

芝 浦 工 業 大 学

博 士 学 位 論 文

建築工事におけるデジタル活用に関する研究
要素技術の実務適用を妨げる要因に対するケーススタディと課題整理

令和6年 3月

染谷 俊介

建築工事におけるデジタル活用に関する研究
要素技術の実務適用を妨げる要因に対するケーススタディと課題整理

目次

序章	5
1. 研究の背景と目的	6
2. 用語の定義	11
3. 本論文の構成	13
参考文献	16
第1章 建築工事における問題とデジタル活用の可能性	18
1.1. 本章の目的と構成	19
1.2. 建築工事における問題と現状	21
1.3. デジタル活用の概念と仮説の検証方法	34
1.4. 本章のまとめ	37
参考文献	38
第2章 要素技術の現状と課題	41
2.1. 本章の目的と構成	42
2.2. 過去の技術開発および市販製品の変遷	44
2.3. 要素技術の概要	52
2.4. 本章のまとめ	58
参考文献	59
第3章 施工管理目的のデジタル活用	62
3.1. 本章の目的と構成	63
3.2. 建築工事における点群データの活用方法	67
3.2.1. 建設分野における点群データの活用用途の調査	67
3.2.2. ワークフローの合理化	70
3.2.3. データ処理の効率化・自動化に関する手法提案とシステム開発	71
3.2.4. 提案手法の有効性の検証	74
3.3. RC造における既存と新築の整合調整	79
3.3.1. 背景と目的	79
3.3.2. 題材プロジェクトの概要	79
3.3.3. 提案ワークフローに従った3次元スキャンとデータ処理の手順	80
3.3.4. 3次元スキャンとデータ処理の実施結果	81

3.3.5. 本取組みのまとめ	84
3.4. 鉄骨部材の工場製品検査	86
3.4.1. 背景と目的	86
3.4.2. 提案ワークフローに従った鉄骨部材のデジタル検査	87
3.4.3. 本取組みのまとめ	91
3.5. 伝統木造における建築材料の品質検査	94
3.5.1. 背景と目的	94
3.5.2. 題材としたプロジェクトのワークフロー	94
3.5.3. 検査支援およびデータ変換手法の構築	95
3.5.4. プロジェクトにおける試適用検証	98
3.5.5. 本取組みのまとめ	104
3.6. 本章のまとめ	107
参考文献	110
第4章 施工記録目的のデジタル活用	113
4.1. 本章の目的と構成	114
4.2. 建築生産プロセスを通じた建材トレーサビリティの記録と可視化	119
4.2.1. 背景と目的	119
4.2.2. 建材トレーサビリティの記録および可視化手法の提案	119
4.2.3. プロジェクトへの試適用	121
4.2.4. 本取組みのまとめ	125
4.3. 工事進捗の記録と可視化	127
4.3.1. 背景と目的	127
4.3.2. 工事進捗の記録及び可視化手法の提案	127
4.3.3. プロジェクトへの試適用	127
4.3.4. 本取組みのまとめ	130
4.4. 解体・リユースを想定した建築材料の使用履歴の記録	132
4.4.1. 背景と目的	132
4.4.2. 題材プロジェクトの概要	132
4.4.3. 解体材トレーサビリティの記録方法	133
4.4.4. プロジェクトにおける試適用検証	134
4.4.5. 本取組みのまとめ	136
4.5. 本章のまとめ	138
参考文献	141
第5章 分析目的のデジタル活用	143
5.1. 本章の目的と構成	144

5.2.	屋内位置測位技術を用いた労務および建設資機材の稼働率記録	146
5.2.1.	背景と目的	146
5.2.2.	建築工事において実用的な屋内位置把握手法の提案	146
5.2.3.	プロジェクトにおける試適用検証	151
5.2.4.	本取組みのまとめ	156
5.3.	労働条件の改善を目的とした生理センシング	159
5.3.1.	背景と目的	159
5.3.2.	疲労軽減に資する対策・製品類の効果検証	160
5.3.3.	熱中症予防に資する対策・製品類の効果検証 1：建設作業中の飲水効果....	164
5.3.4.	熱中症予防に資する対策・製品類の効果検証 2：飲料物による効果の差異..	167
5.3.5.	本取組みのまとめ	172
5.4.	本章のまとめ	175
	参考文献	178
第 6 章	教育目的のデジタル活用	181
6.1.	本章の目的と構成	182
6.2.	安全教育を目的とした VR 教材使用時の生体反応	184
6.2.1.	背景と目的	184
6.2.2.	仮説の検証方法	184
6.2.3.	検証実験の概要	186
6.2.4.	実験結果	188
6.2.5.	考察	192
6.2.6.	本取組みのまとめ	198
6.3.	技能労働者の動作分析	201
6.3.1.	背景と目的	201
6.3.2.	宮大工の作業調査	201
6.3.3.	調査結果と考察	203
6.3.4.	本取組みのまとめ	207
6.4.	本章のまとめ	210
	参考文献	213
第 7 章	要素技術の実務適用における課題整理	215
7.1.	本章の目的と構成	216
7.2.	デジタル活用を妨げる障壁	216
7.3.	デジタル活用を妨げる障壁に対する課題と解決アプローチ	220
7.4.	本章のまとめ	223
結章	225

研究業績	230
あとがき	232

序章

1. 研究の背景と目的
 2. 用語の定義
 3. 本論文の構成
- 参考文献

1. 研究の背景と目的

社会におけるデジタル技術の活用に関する現状

近年、欧米の製造業が起点となって、世界中で Industry4.0^[1]と呼ばれる技術革新が進んでおり、工場同士、加工ロボット同士が情報連携して自律的にものづくりを進める『考える工場』の実用化が目指されている。このようにデジタル技術やロボット技術を活用して産業構造を変革する取り組みをデジタルトランスフォーメーション（以下、DX という）という。特にこの数年で AI に関する技術が大きく進歩したこともあり、産業界だけでなく、一般社会でも広く DX が浸透しつつある。

日本においても、内閣府^[2]が 2016 年に発表した「第 5 期科学技術基本計画」において『Society5.0』を目指す政策を記載した。Society5.0 とは、狩猟社会(1.0)・農耕社会(2.0)・工業社会(3.0)・情報社会(4.0)に続く新たな社会を意味しており、上記政策において「サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会」と定義されている。また、経済産業省^[3]は 2018 年に「デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン（DX 推進ガイドライン）Ver. 1.0」を発表するなど、国が主導して DX の推進を図っている。

建設業界においても、国土交通省^[4]が 2016 年に i-Construction と呼ばれる 3 次元データを活用した生産性向上の取り組みの推進を発表した。i-Construction は土木分野を中心とした取り組みであり、建築分野では 2019 年 6 月には国土交通省の主導で「建築 BIM 推進会議」^[5]が発足し、産学官が一体となって BIM (Building Information Modeling) の推進が図られている。BIM とは、一般的に建物の 3 次元形状データや属性情報などを構築および活用する取り組みを指す。民間でも、例えば日本建設業連合会が 2016 年に「生産性向上推進要綱」^[6]を発表し、取り組み項目として、施工段階の BIM の啓発・普及促進や、建築工事現場における携帯情報端末等の ICT 活用を挙げている。2021 年にはゼネコン 16 社によって「建設 RX コンソーシアム¹⁾」が発足し、ロボット技術や IoT 技術に関する研究開発を共同で実施するなど、業界全体で DX を推進する機運が高まっている。

建設業界におけるデジタル技術の活用実態としては、例えば野原ホールディングスが 2023 年に全国の建設業界従事者 1,000 人へ実施したアンケート調査^[7]では、期待するデジタル技術の上位 3 項目が 1 位：建設ロボット（37.7%）2 位：測量ドローン（21.1%）3 位 VR/AR/MR（18.5%）に対し、導入が進んでいると思うデジタル技術の上位 3 項目が 1 位：建設ロボット（20.1%）2 位：工事管理システム（18.7%）3 位 VR/AR/MR（14.5%）であり、期待に対して導入が進んでいない状況が報告されている。業務プロセス別の結果では、設計関連業務や見積・積算といった内勤業務でデジタル化による生産性向上が進んでいる一方、施工管理・施工・専門工事といった建築工事関連の業務で遅れている実態が明らかになっている。デジタル

¹⁾建設 RX コンソーシアムとは、ゼネコン・協力会社・ロボットメーカー・ソフトウェアベンダーなどが共同出資し、ロボットおよび IoT アプリ等の共同研究開発を実施する団体であり、2021 年 9 月に設立された。墨出しロボット分科会、タワークレーン遠隔操作分科会など、目的別の分科会で活動している。<https://rxconso-com.dw365-ssl.jp/index.html> (accessed:2023.9.22)

技術の活用が進まない理由については、1 位：デジタル化できない作業が多い（52.8%）2 位：現場での変更が多くデータ更新が面倒、など建築工事に関係するものが上位に挙げられている。

このように、国や産業界全体で DX による技術革新が提唱されている一方、建設業界、特に建築工事では業務におけるデジタル技術の活用（以下、デジタル活用という）自体が進んでいない状況がある。そこで、本研究では建築工事に着目し、デジタル活用を推進するための方策を検討する。

研究の対象とする業務

建物の建設に関わる一連の業務は、一般的に建築生産プロセスと言われる。田村^[8]によると、建築生産という言葉が日本で用いられるようになったのが 1932 年にデサムグループが機関紙 DESAM7 号に発表した『建築と建築生産』にはじまり、今では現場施工という建築そのものをつくる活動以外に、設計から竣工後の維持保全までの広範な領域における一連の活動を含めて用いられている、と 1994 年に述べている。その中で、工事そのものを行う施工主体は建設業者であり、その活動としては、建築家が提示する設計図書類に従って、施工の計画および諸準備を進め、建築材料および設備機器の製造業者より、材料や設備機器の供給を受け、また各職種の建築労働者を雇い、現場における作業の指揮及び統制に当たる、と述べている。さらに建設業者の役割として、建築家が求める設計意図を具現化すること、と定義し、工事計画および管理の良否が、完成する建築物の品質や出来映えを大きく左右する、としている。この活動と役割は、ゼネコンが請け負っている施工管理業務の概念と言える。

『施工管理』とは、公共建築工事標準仕様書（建築工事編）^[9]に「（1）設計図書に適合する工事目的物を完成させるために、施工管理体制を確立し、品質、工程、安全等の施工管理を行う。（2）工事の施工に携わる下請負人に、工事関係図書及び監督職員の指示の内容を周知徹底する。」と定義されている。この定義から解釈すると、「計画に適合するよう工事を実施、かつ確認・記録する」ことが施工管理業務の主目的である。施工フェーズにおける関係者ごとの役割と具体的な活動を図 0-1 に整理する。本研究では、デジタル活用を推進する主たる対象として、施工管理のために実施される一連の活動に着目する。一般的にはデジタル技術は、企業単位で活用を推進する物ではなく、個人が自身の生活や仕事を効率化するために、便利だと思ったツールを各自の判断で利用するものである。例えばスマートフォンや SNS は国や企業が推進しない段階で自然と広まった。しかし、図 0-1 に示した通り、施工管理業務はゼネコンという大きな組織において秩序立って進められるプロセスであり、このプロセスを対象とするからこそ、デジタル活用の普及を問題として取り扱う意義があると考ええる。

本研究に取組む動機と背景

筆者は、所属するゼネコンにおいて、施工管理の実務と BIM 推進部門の立ち上げを経験している。工事現場で生の声を聞き、日本建設業連合会や日本建築学会等の学協会活動を通じて協力会社や工場の関係者と意見交換を行ってきた中で把握した、工事現場におけるデジタル活用に関する彼らの共通認識は、「国・企業のビジョンと現場の温度差」であった。彼らは、工事

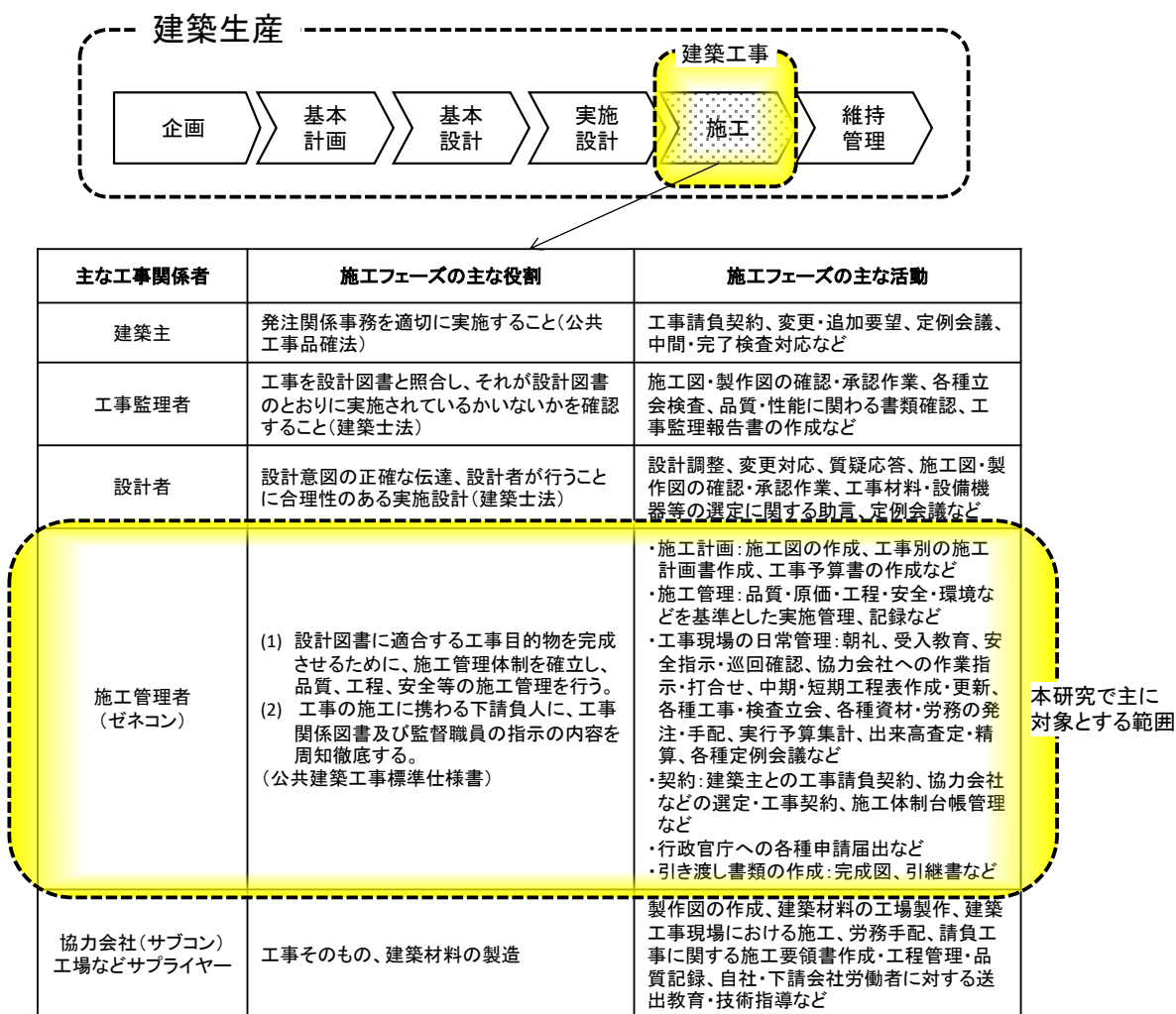


図 0-1 本研究で主に対象とする業務

現場の最前線にいても、国や業界が DX や IoT のビジョンを示していることを熟知しており、企業の本社・内勤部門が工事現場で様々なデジタル活用を推進している状況を耳にしている。しかし施工管理業務の実態は依然としてアナログが主体であり、デジタル活用が進んでいる実感がない、という意見が多勢である。

しかし、数十年前から何も変わっていないわけではなく、一般に広まったデジタルツールは工事現場でも定着している。日本建設業連合会は、2013 年から 2017 年にかけてスマートデバイスの導入状況に関するアンケート調査^[10]を加盟企業 60 社を対象に実施しており、導入済企業の割合が 2013 年 41.7%から 2017 年には 96.0%に達している。2018 年からは活用方法の調査を開始しており、SNS や WEB 会議などによるコミュニケーション利用、写真管理など日常の細かい業務利用目的で、工事現場にもデジタル活用が広がっていることを明らかにしている。これらは一般社会で既に定着したデバイスとツールであり、現場の人間にとっても大きな障壁なく使用できるため、トップダウンで推進を図らずとも自然と利用が広がっていると推察する。

一方で、図 0-1 に示した計画-実施の照合確認や記録といった施工管理の本質に関わる業務目的ではデジタル活用の事例が少ない。HMD などの XR ソリューションを使った施工支援や AI・IoT 機器を使った品質検査・記録など、先端技術の試行検証事例^[11]はあるものの、工事現場で利用するための様々な障壁が指摘され、定着に至っているものが少ない。先端技術は一般社会でも普及していない高額・高度なツールが多く、工事現場の実務で技術者が利用するには導入障壁を整理してそれらを克服するためのサポートが必要だと考えている。

このように、『デジタル技術』といっても、一般社会で定着した便利ツールと、普及途上の先端技術がある。これらが同列で工事現場に持ち込まれていることが施工管理でデジタル技術が活用されていないという実務者の感覚につながっているのではないかと考える。国や業界が示す生産性向上や働き方改革への対応というビジョンを実現するためには、施工管理の本質に関わる業務目的に対するデジタル活用が必要であると考え。先述のアンケートや事例から読み取れることは、工事現場の最前線にトップダウンで技術適用が行われるが、導入障壁や克服方法の整理がないまま、次々と新しい技術の試行検証が繰り返される状況である。これまでに、工事現場の実態として『使っているだけ』である状況も目にしてきた。例として、配筋検査ツールを挙げる。工事現場の現地で、タブレット端末上に検査結果を記録する製品が多く販売されている。構造図などをベースに工区ごとの伏図・部材断面図・符号などが記載されたデジタル野帳を作成し、検査結果を記入するものである。比較的扱いやすいツールであるため、会社単位で導入し、トップダウンで多くの工事現場に使用させているケースがある。しかし品質管理の実務では、例えば段差部や端部の定着長など、図面に表れない細かい配筋納まりも確認する必要があり、これらは野帳への反映が難しい。鉄筋工の職長や施工管理者は、配筋仕様や質疑応答書なども参照しながら、部位や状況に応じた自主的なチェックによって建物の品質を確保しており、このような本質的な活動は依然として属人的かつアナログである。この場合、デジタル野帳では『検査完了』を記録することのみが目的となった建前作業になってしまい、実務担当者としてはツールと手間が増えただけに感じられるであろう。しかし、『導入率〇%』といった目標値が先行する本社や内勤部門の中では、デジタル活用が進んでいるような誤解が広がる。このようなギャップが、『デジタル化が進んでいない』というアンケート結果や、『国・産業・企業内勤と現場の温度差』という実感に繋がっていると推察する。

このままでは、現場ではデジタル活用に対する失敗体験ばかりが積み上がり、他業界から取り残されてしまうのではないかと、筆者は危惧している。デジタル技術は本来、使いこなせば業務を効率的かつ高度にできる有用なツールである。企業の建前だけでなく、工事現場の最前線で頑張る実務担当者こそ、この恩恵を享受してほしい。そのために、建築工事特有の導入障壁を整理し、先端的なデジタル技術の実務利用を推進しようという動機が、本研究の背景である。

本研究の目的

建築工事における課題は数十年前と同様のものも多く、国や産業界も様々なビジョンを示している。例えば建設労働の担い手不足に対しては法改正や指針などの形で対策が進められている。しかし、他産業と比較した労働生産性の低さ、死亡災害の多さなど、解決に至っていない

い問題も多い。こうした問題が解決に至らない理由として、これまで多くの研究者が、他産業と比較した建設生産の特殊性を挙げている。例えば、一品受注生産、毎回変わる作業場所、重層下請構造などである。建築工事を取り巻く環境の詳細については、第1章で述べる。

一方で、このような組織や場所に起因する問題は、デジタル活用によって解決できるものも多いという指摘もある。山崎^[12]は、情報化の進展を進める場合には建設業の抱えてきた不利な条件は大きな障害とならないこと、情報化によって組織や階層を超えて生産に必要な知識や情報を流通させることで意思決定プロセスを透明にしていけることができ、これまで別々に管理され、プロジェクトごとに生産条件が異なるため困難とされてきた品質・性能とコストの関係を把握できる可能性が高まっている、と言及している。

しかし、建築工事が他産業と比較してデジタル活用が進まないのは、先述のアンケート結果にある理由（デジタル化できない作業が多い、データ更新が面倒、など）だけではなく、表面化していない建築工事特有の障壁が存在するのではないかという問題意識を持っている。そこで、本論文は、建築工事におけるデジタル活用を妨げる要因の整理を目標に、複数の要素技術を題材として取り上げ、実務適用のケーススタディを通じて、デジタル活用を妨げる要因を明らかにすることを目的とした。

2. 用語の定義

本論文で用いる主な用語の定義を以下に記す。

表 0-1 用語の定義

番号	用語	定義
01	建築生産 建築生産プロセス	建物を建設し、維持管理する一連の活動を建築生産と呼ぶ。一般的には企画→基本計画→基本設計→実施設計→請負契約→施工→運用、維持管理、という業務フェーズで区分される。建築主・設計者・施工者・協力会社・サプライヤーなど多くの関係者が建物建設のために実施するタスク群を建築生産プロセスと呼ぶ。
02	建築工事	建築生産における施工フェーズに当たり、特に工事現場における建物建設に関わる活動を本論文では建築工事と呼ぶ。
03	プロジェクト	建築主から発注される一つの建設事業を、本論文ではプロジェクトと呼ぶ。
04	施工管理	(1) 設計図書に適合する工事目的物を完成させるために、施工管理体制を確立し、品質、工程、安全等の施工管理を行う。(2) 工事の施工に携わる下請負人に、工事関係図書及び監督職員の指示の内容を周知徹底する。 (公共建築工事標準仕様書による定義)
05	デジタル情報	コンピュータで扱うことのできる、ONN/OFF もしくは 0/1 のようなビット情報で電磁的に記述されている情報。対義語として『アナログ情報』があり、本論文ではデジタル情報以外のものを指す。例えば、図面などの印刷物だけでなく、長さ・重さも厳密には 150.12345…mm などと際限なく表現が可能なため、アナログ情報と定義する。このアナログ情報を「150 mm」などとコンピュータの中で記録したものがデジタル情報であり、この行為を本論文では『デジタル化』と呼ぶ。
06	デジタルデータ	デジタル情報として記録された数値や記号の集まり。
07	ファイル	データを何らかのソフトウェアで扱うために、決められたフォーマットに従って記述されたもの。
08	デジタルツール	特定の業務のためにパッケージされた単一のソフトウェアやハードウェア。例えば CAD ソフトウェアや携帯情報端末など。

09	業務システム	複数の業務で構成される一連のプロセスにおいて、誰もが同程度以上の成果を創出できるよう、仕事の進め方や各種ツールの運用方法などが標準的に定められた仕組み。
10	デジタル活用	業務などを通じてデジタル技術やデジタルツールを活用し、従来よりも効率化や高度化を図る取組みを指す。デジタル技術とは、例えば画像処理技術や位置測位技術といった、主として情報を扱う要素技術を指す。
11	建材トレーサビリティ	建築生産プロセスを通じ、建物を構成する建築材料が運搬・加工・組立されていく履歴を指す。例えば鉄筋材料の場合、高炉メーカーで鉄筋の生材が製造され、鉄筋加工場で曲げ・切断、工事現場で組み立てられる。これら一連の物流情報に加え、商流に関わる商社・鉄筋協力会社、建設会社などの契約情報や、加工・組立に携わった人材の労務情報、各プロセスにおける品質記録など、履歴として必要となる情報は多岐に渡る。
12	建設資機材	工事現場内に搬入された建築材料や仮設資機材を指す。建築材料とは、建物を構成する各種材料であり、例えば鉄筋、内装ボード、ガラスなど、施工スケジュールに合わせて事前に搬入される。仮設資機材とは、工事を実施するための補助設備であり、例えば仮設足場や手摺などの安全設備に加え、高所作業車やクレーンなどの建設機械類も含める。
13	安全教材	主に建築工事に携わる建設労働者を対象に、工具や安全設備の使用方法、工事現場内のルール、法規などを学ぶための教材を指す。紙のテキスト、動画、VRを使った仮想体験ソリューションなど、様々な媒体がある。一般的には、工事現場ごとに施工管理者が実施する新規入場者教育や、協力会社内で実施される送り出し教育で使用されることが多い。
14	建設技術者	工事現場における工事の施工の技術上の管理をつかさどる者として配置が義務付けられている監理技術者や主任技術者（建設業法による定義）。主に工事現場におけるゼネコン所属の現場監督など。
15	技能者 熟練技能者	技能者とは、建築工事で直接的な作業を行う技能を有する労働者（国土交通省による定義）。主に工事現場における協力会社所属の建設作業員など。その中でスキル・経験に長けた人材を熟練技能者と呼ぶ。公的な定義では国土交通省による『基幹技能者』や厚生労働省による『高度熟練技能者』などがあるが、本論文ではこれらへの登録がない高スキル・経験人材も包含して『熟練技能者』と総称する。

3. 本論文の構成

本論文は、序章・第1章から第7章・結章によって構成される。各章の関係を図0-2に示す。

序章では、日本において他産業と同様に建設業界においてもデジタル活用の推進が図られている状況を国・産業の両面の取り組みから整理するとともに、特に建築工事においてデジタル活用が進んでいないと言われる状況について言及した。そこで、デジタル活用に関して建築工事特有かつ共通の導入障壁があるのではないかと、との問題意識を述べ、本研究の目的を建築工事におけるデジタル活用の普及を妨げる障壁に関する課題整理とした。また、本論文で使用する専門用語の定義を行った。

第1章「建築工事における問題とデジタル活用の可能性」では、約30年前から現在までの既往研究を調査することで、建築生産および建築工事を取り巻く環境と問題の変化を整理する。建築生産・建築工事に影響を及ぼす環境として、社会・経済・自然・技術・法律の5つに着目して整理し、これらに起因する問題の多くが現在においても解決されていない状況を示す。これら問題に対する解決アプローチを考察し、デジタル活用によって解決可能な項目を絞り込む。複数の既往研究において、これら多く問題が解決されない要因として『建築生産の特殊性』が挙げられているので集約・整理する。これら建築工事の問題と解決アプローチに関わる調査分析の結果、本研究の仮説として以下2つを挙げる。①建築工事で解決されていない問題をデジタル活用によって解決しようとする場合、従来と比較して障害となる『建築工事の特殊性』が少ない、②デジタル活用が進まない原因として『建築工事の特殊性』とは別に阻害要因が複数存在するか。さらに、この仮説の検証方法として、要素技術の実務適用を妨げる要因に対するケーススタディを4項目挙げる。プロジェクト単位での活用ケースとして①施工管理目的②施工記録目的、複数プロジェクトを俯瞰した活用ケースとして③分析目的④教育目的。

第2章「要素技術の現状と課題」では、建築工事におけるデジタル活用に関して、過去に実施されてきた技術開発や市販製品を整理するとともに、それらを構成する要素技術をまとめる。さらに、実施された技術開発を目的によって分類し、その変遷を整理することで、実用化の状況と課題を考察する。そして、過去の取り組みで用いられている要素技術の概要をまとめ、民生用途で既に定着しているもの、特定の産業における業務用途で定着しているもの、いずれの業界でも定着していないものへ峻別することで、完成度や難易度が異なる要素技術が区別なく建築工事へ適用されている状況を明らかにするとともに、次章以降のケーススタディに適した要素技術を選定する。

以下、第3章から第6章では、第1章で定義した4つの活用目的において、要素技術の実務適用を妨げる要因に対するケーススタディを実施する。

第3章「施工管理目的のデジタル活用」では、施工出来形および工場製作物の検査効率化を目的としたデジタル活用を題材として、3次元スキャン技術を要素技術に選定し、実務適用のケーススタディを通じて技術普及を阻害する要因を抽出する。まず、施工分野における点群データの活用用途と課題に関するアンケート調査を実施することで、実務で点群データを活用するためのソフトウェア操作を抽出するとともに、合理的な実施手順を提案する。次に、ケーススタディとしてRC造における既存と新築部位の調整、鉄骨造における工場製品検査、伝統木

造における木材受入検査を取り上げ、提案ワークフローに従って点群データの活用を試みることで有効性を検証するとともに、実務適用を阻害する要因を整理する。

第4章「施工記録目的のデジタル活用」では、建築工事において様々な外的要因によって発生する工程の混乱や遅延などに対応するため、実績データに基づいて科学的な管理を行うことを目的として、建築資材のトレーサビリティと工事現場の進捗状況をデジタルデータで蓄積するケーススタディを実施する。要素技術として個体認証技術と3次元スキャン技術を使った記録システムを構築し、新築工事における外装金属パネルの建材トレーサビリティ記録、新築工事における工事現場全体の進捗記録、解体工事におけるリユース資材の記録、の3つの題材において、各種情報を汎用的なデジタルデータとして記録・活用を試みることで、その有効性を検証するとともに、実務適用を阻害する要因を整理する。

第5章「分析目的のデジタル活用」では、複数プロジェクトを俯瞰したデータ蓄積による分析目的として、稼働率分析、および建設労働の改善対策における効果分析、という2つの具体的なケーススタディを通じ、技術の普及を阻害する要因を抽出する。稼働率分析においては要素技術として位置測位技術を用い、工事現場内に存在する建設労働者と建設機械の位置情報のリアルタイム記録を試みる。建設労働の改善対策に対する効果分析では、疲労軽減施策として運動時の筋肉をサポートするアンダーウェアを題材として取り上げ、人間工学的な分析によって建設労働に特化したサポート箇所を明らかにするとともに、生理センシング技術を用いた効果測定を試みる。さらに、暑熱対策として建設労働中の飲水量と飲料物の差異に着目し、生理センシング技術を用いて効果の可視化を試みる。これら要素技術は他産業における特定の用途を想定されたものであり、建築工事においては適用の難易度が高いため、ケーススタディを通じて実用的な適用方法を検討するとともに、普及の阻害要因を整理する。

第6章「教育目的のデジタル活用」では、複数プロジェクトを俯瞰したデータ活用のケーススタディとして、建設労働者に対する教育や技能伝承を目的としたデジタル活用に着目し、安全教育目的で使用するVR安全教材の効果測定と、技能労働者のスキル・ノウハウの可視化を目的とした動作分析を題材として、デジタル活用の普及を妨げる要因を抽出する。教育目的では、近年製品化が進んでいるVR（Virtual Reality）技術を使った安全教材の効果分析を題材とし、要素技術として生理センシング技術を用いて、実務経験者と未経験者の2群の被験者に対してVR安全教材を使用中の生体反応をデジタルデータとして蓄積することで統計的な評価を試みる。技能伝承目的では、熟練の技能労働者として宮大工を選定し、木材加工の実務を題材に、要素技術として作業動画を使った動作分析手法を用い、作業を細分化するとともに、スキルやノウハウを要する作業の特定を試みる。これら要素技術も第5章と同様に建築工事においては適用の難易度が高いため、ケーススタディを通じて実用的な適用方法と課題を検討するとともに、普及の阻害要因を整理する。

第7章「要素技術の実務適用における課題整理」は、第3章から第6章で実施したケーススタディを総括し、建築工事において共通して技術普及を阻害する要因を明らかにするとともに、それらを克服するための解決アプローチを技術開発・組織構築・環境変化の3つの視点で示す。

結章では、それまで述べる8章を統括し、本論文の結論として、建築工事において要素技術の実務適用を阻害する要因と課題の分析結果を述べるとともに、技術開発以外の視点も含めた複数の解決アプローチを示す。加えて、本研究で対象としたデジタル活用以外の問題解決手段の可能性についても言及することで、今後の建築工事における問題解決の在り方を提言する。

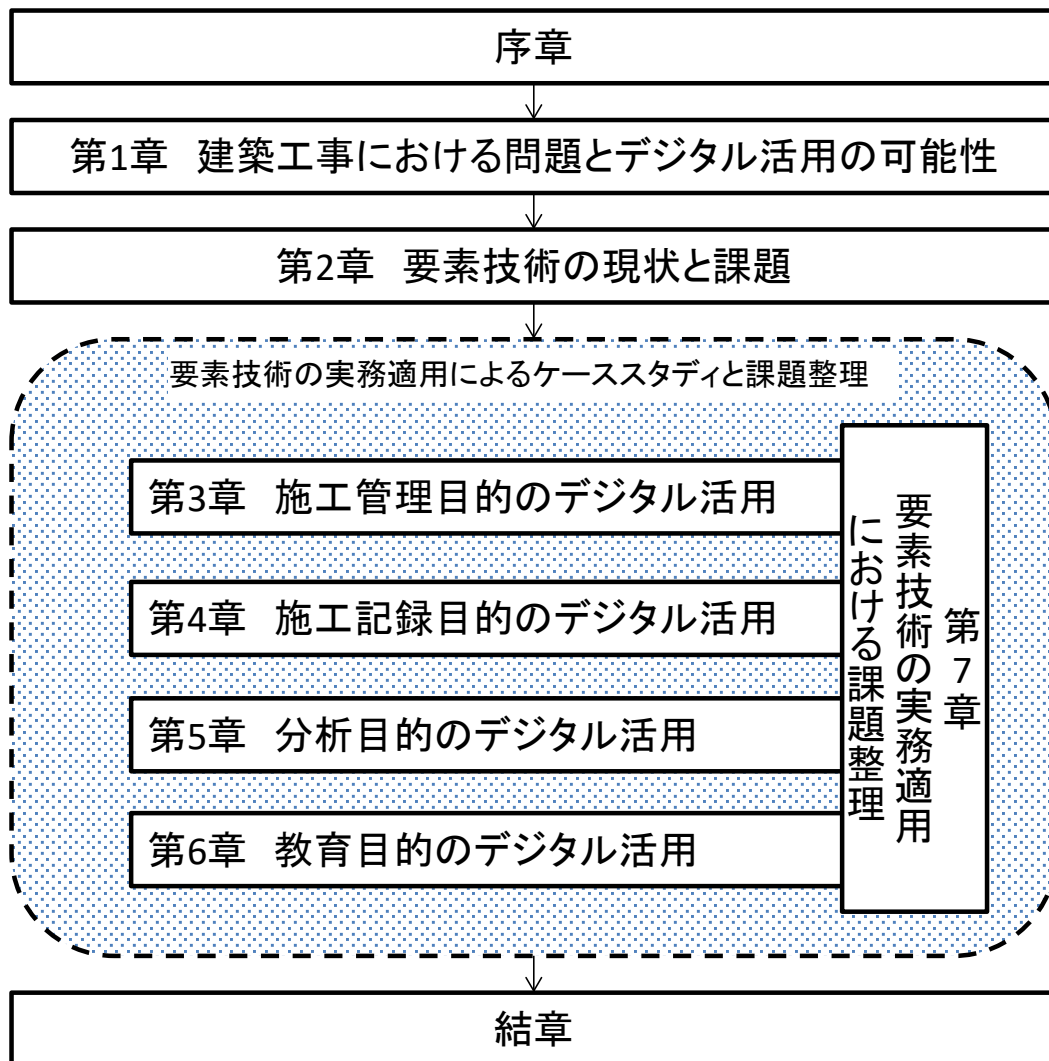


図 0-2 本論文の構成

参考文献

- [1] 総務省：インダストリー4.0 とは
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd135210.htm>
(accessed 2023.9.28)
- [2] 内閣府：第5期科学技術基本計画
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html> (accessed 2023.9.28)
- [3] 経済産業省：デジタルガバナンス・コード2.0
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/dx/dx_guideline.pdf (accessed 2023.9.28)
- [4] 国土交通省：i-Construction
<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (accessed 2023.9.28)
- [5] 国土交通省：建築BIM推進会議
<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/kenchikuBIMsuishinkaigi.html>
(accessed 2023.9.28)
- [6] 一般社団法人日本建設業連合会：生産性向上推進要綱，2016.4
https://www.nikkenren.com/sougou/seisansei/pdf/seisansei_outline.pdf
(accessed 2023.8.17)
- [7] 野原ホールディングス株式会社：建設業界従事者 1,000 人の「建設 DX に対する意識調査」結果詳細，2023.3
https://nohara-inc.co.jp/wp/wp-content/uploads/2023/04/attached_questionnaire_construction20230406.pdf (accessed 2023.12.13)
- [8] 田村恭：建築生産管理工学第1講序論①建築生産を取り巻く環境とその変化，建築の技術施工，彰国社，No.339，pp.33-40，1994.1
- [9] 国土交通省：公共標準仕様書（建築工事編）令和4年版，pp.5，2023.3
<https://www.mlit.go.jp/common/001473539.pdf> (accessed 2023.9.14)
- [10] 一般社団法人日本建設業連合会：建築のICTセミナー 報告資料
<https://www.nikkenren.com/kenchiku/ict/advance/> (accessed 2023.12.23)
- [11] 建設通信新聞：“【小柳建設】直感的な操作に対応 MR ソリューション「Holostruction」新バージョンを開発”，建設通信新聞，2021.11 (accessed 2024.1.11)
- [12] 山崎雄介：情報化の進展がもたらす建築生産の変革，建築の技術 施工，彰国社，No.359，pp.69-78，1995.12

图版出典

图 0-1 筆者作成

图 0-2 筆者作成

表 0-1 筆者作成

第1章 建築工事における問題と デジタル活用の可能性

- 1. 1. 本章の目的と構成
- 1. 2. 建築工事における問題と現状
- 1. 3. デジタル活用の概念と仮説の検証方法
- 1. 4. 本章のまとめ

参考文献

1.1.本章の目的と構成

はじめに

建築工事を取り巻く環境は、業界内部だけでなく、社会環境や経済環境など、外部から受ける影響が多い。建築工事で解決が必要とされている問題についても、これら環境に起因するものが多く、数十年来、同様の問題が残っていると言われる。本章ではこれら建築工事を取り巻く環境と問題を整理し、依然として解決に至らない原因を考察することで、デジタル活用の果たす役割を検討することを目的とする。

既往の研究

建築工事を取り巻く環境については、田村^[1]が1993年に、社会的・経済的・自然的および技術的環境の4つの視点で整理し、第二次世界大戦後から1993年までの変化について述べている。三根^[2]は戦後に多くの作業調査が行われた背景として、復興期に大量の工事を消化するためであったと指摘している。蟹澤^[3]は日本建築学会建築社会システム委員会建築生産小委員会において、2013年に1980年からの環境変化についてまとめており、バブル経済とその崩壊といった経済環境の変化や、ゼネコン・専門工事会社・発注者の関係変化などに言及している。馬場^[4]は産業革命・情報化という社会変化、国際化・国内産業構造の変化などの経済環境、規制緩和などの法制度の変化に言及している。眞片山^[5]は施工技術の開発は建築を取り巻く社会状況や環境の変化および将来予測の下で進められていると指摘し、近年30年間の建設需要の変化や、労働力不足、環境配慮、維持修繕の増加などを例として挙げた。安藤^[6]は建築基準法の改正という制度の変化に際し、建築行為を『割付け型』と『積上げ型』の2つの手続きから捉え、改正基準法に盛り込まれた制度を両面から考察している。嘉納^[7]、古阪^[8]はこれらに加え発注者・消費者視点にも言及しており、顧客満足度重視の指向や発注者のプロジェクト関与・要求度合いの強化などの変化を挙げている。ゼネコンに所属する企業研究者の多くは社会環境について言及しており、例えば室^[9]、山崎^[10]、椎野^[11]は工事現場での担い手不足やゼネコン内の技術者の育成不足など業界内部の環境変化に加え、社会全体の情報化によってメーカーや物流を中心とした外部の環境変化が建築工事に与える影響についても考察している。野中^[12]は景気低迷や市場の国際化をはじめとした経済的環境の変化や、公共工事の入札方式など制度面の変化に加え、建物の品質問題その他不祥事による国民の批判が業界および法制度に与える影響についても指摘している。このように、建築工事は、時代ごとに国内外の様々な環境変化から影響を受け、戦後に残っていた業界の様々な歪みが外圧によって正されていった経緯を読み取ることができる。建築工事の実務から見ると、より適正な企業が生き残り、受注などにおいても公正に評価されるように変わる一方で、様々な制約が増えていった歴史とも言える。これら外的要因によって生じる問題の多くは、技術によって直接の解決を図ることが難しいものも含まれているので、技術適用の対象範囲を整理する必要がある。

また、これら環境に関連し、多くの研究者が『他産業と比較した建築工事の特殊性』について述べている。嘉納^[13]は特殊性を建築物固有の特性と産業構造の2つに分けて要因を整理し、1994年当時の機械化施工の限界について言及している。金岩^[14]はゼネコンが直接的な生産手

段を持たない特性を指摘している。馬場^[15]や安藤^[16]は一品生産・受注生産を特殊性として挙げている。このように、多様な特殊性が既往研究によって指摘されており、建築工事の様々な問題解決を阻害している要因としても挙げられている。これらは建設産業全体の特殊性や課題であり、デジタル活用の視点で実務適用の阻害要因となる特殊性について、新たに整理する必要がある。

建築工事においてデジタル活用が果たす役割について、金岩^[17]は、多くの異種複数生産組織を束ねるために早く正確な情報を把握することが強力な武器になると指摘している。安藤^[18]は CALS/EC アクションプログラムや ISO/STEP といった国際標準化の動きに着目し、設計・生産のための制度の再編・確立の必要性和、それによる合理化を超えた社会的・文化的影響力について述べている。馬場^[19]は多品種少量生産である建築物の合理化のために情報化が寄与すると述べる一方で、情報化を進める難点として「どう使ってよいか分からない」「思うような成果が得られない」「扱える人間がいない」「機器やシステムの更新に追われて経営の圧迫要因になっている」など多くの問題点が表面化していない状況を挙げ、導入の成功例と失敗例の分岐点を見極める重要性を指摘している。このように、複数の既往研究において、先述した『建築工事の特殊性』とも関連付けてデジタル活用の意義が述べられるとともに、普及促進の難しさについても言及されていることが分かる。

以上、既往研究の調査を通じて、産業としての環境変化や他産業と比較した特殊性、建築工事における情報化の役割や課題について、多くの研究者によって検討されているが、各々を結び付けてデジタル活用の方向性について考察した事例はない。そこで本章では、建築工事を取り巻く環境変化、特殊性、それらに起因する問題について既往研究で挙げられた要素を整理し、それらに対してデジタル活用によって解決を図る方策を考察する。

本章の構成

まず 1.2. では、一般社会にパソコンなどが普及し始め、建設業界においても情報化に関する取組みが始まった約 30 年前から現在までを対象に、建築工事を取り巻く環境の変化を 5 つの視点（社会・経済・自然・技術・法制度）で整理する。さらに、様々な既往研究で指摘されている建築工事の特殊性についても整理する。そして建築工事で約 30 年前から解決していない問題を明らかにする。次に 1.3. では、これら長年解決できていない問題に対し、デジタル活用が果たす役割を 2 つの視点（プロジェクト活用・複数プロジェクトを俯瞰した活用）に分け、本研究でケーススタディを実施する項目を設定する。

1.2.建築工事における問題と現状

建築工事を取り巻く環境の変化と問題点

まず、建築工事が外的な環境変化によって受ける影響と、それに起因する問題点について整理する。

A) 社会的環境

1990年代はバブル崩壊によって建築需要が減少し、さらに以前から問題視されていた建設労働者不足も解決せず、業界全体で厳しい状況となっていた。2000年以降は建築需要が徐々に戻る一方で、国際化への対応、高齢化に備えた住みよい社会の実現、高度情報化社会への進展、地球環境との共生、働き方改革など、様々な社会環境の変化があり、建築工事においては調達先の変化や業務・書類の増加、実質的な作業時間の削減などが、実務の変化に直結する外的要因となった。また、2000年以降は建築物の品質に関わる不祥事が続き、社会からの目が厳しさを増した。2005年の耐震偽装問題は、建築基準法の改正に繋がった。他にもこの時期に建物の品質問題が頻出したことから、これまで抜き取り検査であった配筋検査の全数化が義務付けられた。その後も、建築工事 2012 年の笹子トンネル天井崩落事故、2014 年のマンション工事におけるスリーブ不具合による建て直し、2023 年にも高層ビル工事の品質検査記録の虚偽報告と精度不良による建て直しや、マンション工事における 15 か月の工期遅延など、現在まで大きな品質問題が続いており、検査機関や工事監理者から要求される検査や記録は、量・質ともに増加している。

嘉納^[20]は、建築需要の変動と下請け企業の弱体化に着目しており、「日本では大企業において終身雇用が前提となっているため、大企業の社員を固定化し、弱小の企業の社員・作業者を需要変動のバッファードとする仕組みをつくり出してきた。これが日本における建設産業の構造を弱体化させる結果となっている」「下請け企業が元請企業に比べて非常に弱体化している」と指摘している。近 30 年の建設投資額の推移を図 1-1 に示す。1992 年に 84.0 兆円であった建設投資額は、2009 年に 41.9 兆円まで減少し、2023 年には 70.3 兆円まで再び増加している。一方で図 1-2 に示す通り、建設業就業者数の統計では 1997 年の 685 万人から 479 万人まで減少を続けている。その内、技能労働者の数は 1997 年の 464 万人から 2022 年の 305 万人まで減少している。建設労働者不足については、技術者と技能労働者を分けて考える必要がある。技術者とは、建設業法第 26 条の 3 で定義されており、工事現場における工事の施工の技術上の管理をつかさどる者として配置が義務付けられている監理技術者や主任技術者を指し、ゼネコンの施工管理者である。技能労働者は法令上の定義はないが、国土交通省が「建築工事で直接的な作業を行う技能を有する労働者²⁾」と解説している。技能労働者不足のリスクは受注可能量の減少、技術者不足のリスクは QCDSE など施工品質の低下などの影響が考えられる。

このように、建築需要が増減する中で建設労働者数は減少し続け、国際化・高齢化・情報化・環境配慮といった様々な社会的環境の変化、不祥事や事故を発端として厳しさを増す社会の目とそれに伴う業務量の増大に対応してきた状況が読み取れる。

²⁾ 国土交通省：技能労働者より引用

<https://www.mlit.go.jp/common/001173626.pdf> (accessed 2023.9.28)

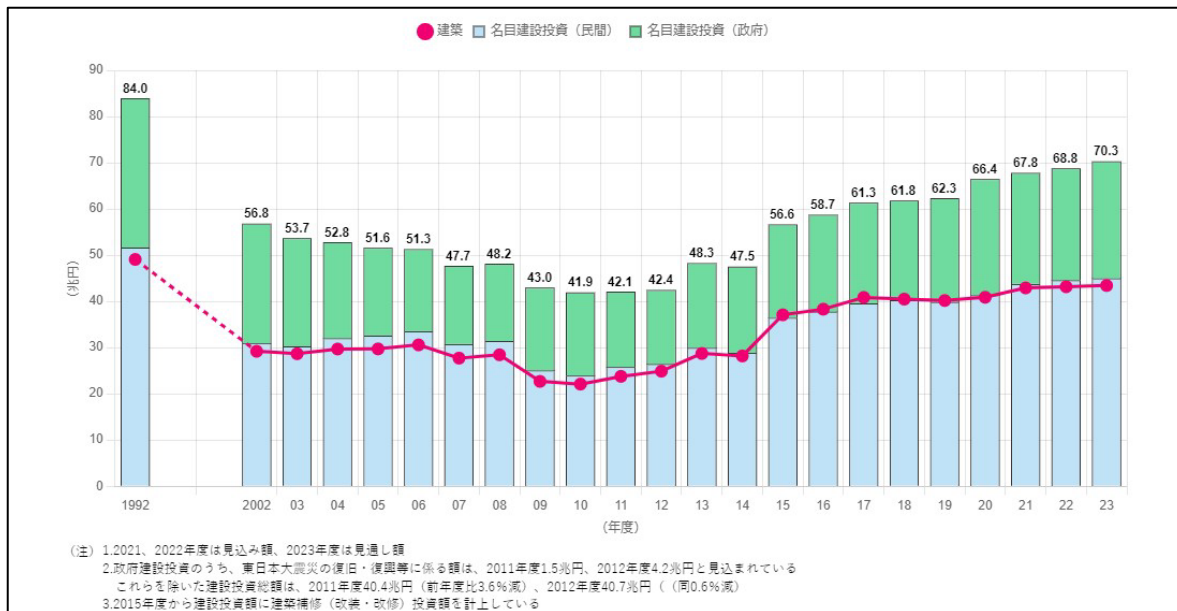


図 1-1 日本における建設投資の推移（建設業デジタルハンドブックより引用）

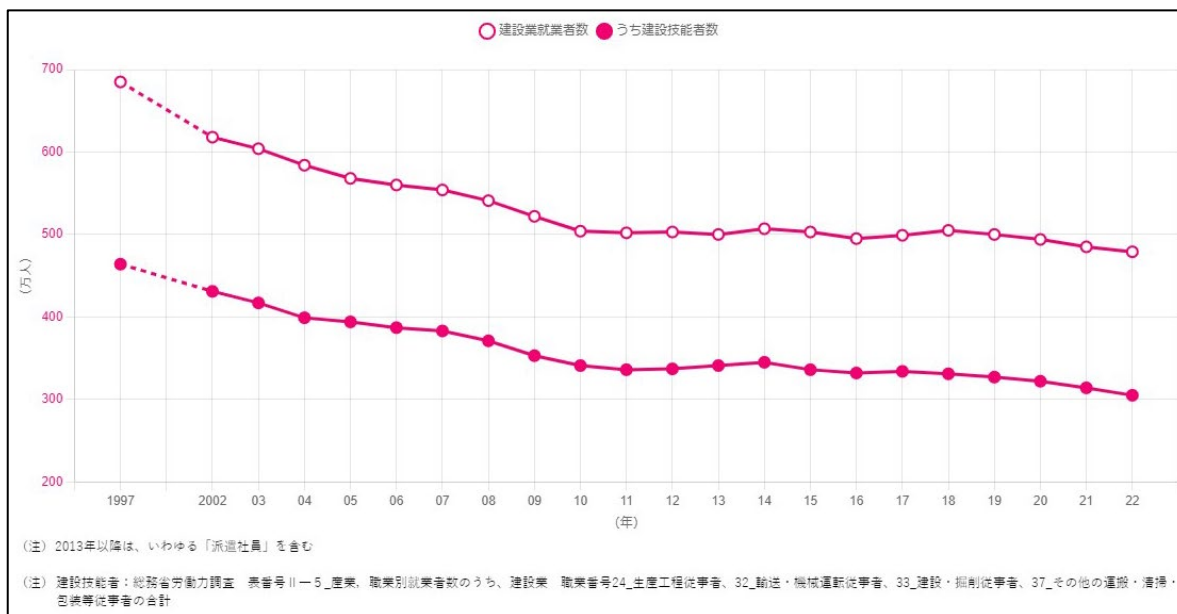


図 1-2 日本における建設業就業者数の推移（建設業デジタルハンドブックより引用）

B) 経済的環境

経済的環境については、田村^[21]によってマクロ経済的視点およびミクロ経済的視点の2点から変化が記述されている。マクロ経済的視点では、まず、約30年前にまだ日本が先進国で唯一の貿易黒字国であった状況から、諸外国からの外圧として建設市場の開放や建築材料の輸入を求められていた環境があった。次に、建設事業のもつ社会性・公共性について、建築工事は国民の社会生活や活動に密接なかかわりがあり、かつ製造業などの他種産業の新規需要を生

み出す生産誘発効果が高く、建築需要の経済波及効果が大きいことが挙げられている。これらに起因する問題点として、建築投資の大半が民需であり、景気の変動を受けやすいこと、そのため労働者の賃金・雇用条件や建材市場に直接景気変動の影響が波及することを挙げている。ミクロ経済的視点としては、建築生産が一品受注生産である特徴があり、工事内容や建物品質が従事した労働者の技能水準ならびに施工の入念さに左右されること、工事費や工期が携わる建設業者の調達能力・管理体制に影響されることが指摘されている。これら経済的環境と問題点は現在も同様であると考えられる。

C) 自然環境

自然環境については、1992 年リオデジャネイロにおける「環境と開発に関する国連会議」における世界的な合意から、1997 年の京都議定書、2015 年のパリ協定など、国際社会で気候変動問題に関する取組みが継続されている。日本においても建築工事に関わる環境対策として、様々な法律や規制類が整備された。法律や規制の変化は後述するが、このような環境対策の動きが、工事現場レベルにおいて管理上の大きな制約となっていると考えられる。

D) 技術的環境

技術的環境としては、1993 年当時の施工技術について田村^[22]が、2014 年当時までの 30 年における変化について山崎^[23]が整理している。その変化の根源として、以下 5 点が挙げられている。

- ① 建築需要そのものに起因する高度の品質と出来映えの要求
- ② 労務についての技術水準の向上と自主的管理能力の育成、資材の品質改善・開発
- ③ 前二問の解決手段として追及された工業化
- ④ ハード技術に対するソフト技術の急速な発展
- ⑤ 以上四問の技術変化を合理的かつ効果的に展開させるための管理技術・システム化技術の積極的活用

これらに対応するため、広範囲にわたる先端技術の追求が大手建設業においてなされており、それは欧米諸国にも例を見ない、国際的にも傑出した存在という評価が 1993 年当時に述べられている。具体的には、例えば若年層の入職を阻害する労働環境の改善を目的とした作業計画手法や、週休二日制の導入に絡んだ全天候型施工技術・全自動建設システムなどが例として挙げられている。開発された技術の変遷を見ると、例えば、工事シミュレーションのために各社で独自の 3 次元 CAD や業務ツールを開発していたものが、現在では BIM という概念として一般化することで多様な市販製品が普及するに至るなど、解決したい課題に対して要素技術が入れ替わりながら変化を続けるものがある。一方で、嘉納^[24]が指摘している通り、工事現場で用いるロボット研究などのように、定着まで至らずに試行検証が繰り返されているものもある。これら技術動向については第 2 章で整理する。

現在でも、ゼネコン各社が独自に研究部門を有するのは日本や韓国の特徴であるが、欧米諸国では Arup をはじめとした技術コンサルティング企業やフラウンホーファーをはじめとした

大規模な研究機関による技術開発とプロジェクト適用が進み、日本企業における技術面の優位性は述べられることが少なくなった。

E) 法制度環境

建築工事では、制約となる数多くの法令があり、行政・監督官庁から認可や承認を得るため、申請や届出に伴う書類作成に関する業務がとて多い。

社会環境の変化で述べた通り、品質関連の事故や不祥事が起きますと、法改正や規制強化が実施された。蟹澤^[25]は、2005 年の耐震偽装問題によって建設産業の社会的信用が根底から揺らいだと指摘しており、その後の 2014 年の公共工事の品質確保の促進に関する法律の改正（以下、品確法）などを通じて発注者も品質に関する責任を免れることができないようになり、「プロ化」した発注者の下で抜き取り検査が全数検査になるとともに、全ての記録を残すことが求められ、現場の技術者が疲弊していった、と述べている。品質に関しては検査行為やその記録に関して要求は増す一方であり、建築工事の実務を圧迫していると言える。

社会における働き方改革の動きに関連し、建築工事に関わる法改正もあった。2019 年に新・担い手三法と言われる品確法、建設業法、公共工事の入札及び契約の適正化の促進に関する法律（以下、入契法）が改正され、働き方改革の推進に関わる内容が盛り込まれた。具体的には、発注者に対して休日や天候などを考慮した適正な工期設定を責務としたことや、受注者に対して適正な請負代金・工期での下請契約の締結を求めたことであり、建築工事に関する良い環境変化と言える。一方で、2023 年には労働基準法が改正され、時間外労働の上限規制が設定された。建設業界においても猶予期間の後 2024 年 4 月には適用される。人手不足が進む中、この法改正により一人当たりの労働時間も制限されるため、近い将来、建築工事において従来通りの品質・費用・工期・安全・環境配慮などを確保できなくなる恐れがある。

環境面では、建設廃棄物が産業全体の 2 割を占め、最終処分量の 3 割を占めていること、2001 年の環境省調査^[26]では全産業の不法投棄量 24 万トンの約 7 割を占めることが指摘されており、この 30 年間変わらず問題となっていた。古くは当時の建設省が再生資源利用促進法に基づいて 1992 年にまとめたリサイクル要綱があり、施工業者に対して多大の努力を促している。2001 年には全産業を通じて循環型社会を目指した法整備が行われ、廃棄物処理法と資源有効利用促進法が施行されることで廃棄物処理と建材リサイクルの両面で規制が強化された。2002 年にはこれらを上位概念とした建設リサイクル法が施行され、木材・コンクリート・アスファルトなど具体的な材料を対象に実施状況の記録・保存が義務付けられ、具体的には電子マニフェストの実務適用などが始まっている。環境関連の取組みについては国際社会全体の動きとして今後さらに加速すると考えられるため、建築工事における業務負担のさらなる増加を想定する必要がある。

以上のように、建築工事は外的な環境変化の影響を受け、様々な制約や問題点が生じていることが分かる。各項目から読み取れる具体的な問題点を表 1-1 に整理する。

表 1-1 外的環境変化によって建築工事が影響を受ける問題

問題の種類	30年以上解決されていない問題
外的な環境変化に起因する問題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建設労働者（技術者、技能者）不足 ・ 建築資材の価格変動 ・ 需要の動向に左右される資材計画 ・ 不祥事のたびに増加し続ける安全・品質関連書類および業務による実務担当者の疲弊 ・ 環境保全のために増える規制や書類の増加による実務担当者の疲弊 ・ 残業規制による実質作業時間の削減：
	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>（参考）現在は対策が進んでいる、もしくは認識されなくなった問題</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 住宅不足 ・ 品質向上 ・ 省資源・省エネルギー問題 ・ 労働福祉の確立 ・ 高齢化に備えた住みよい社会の実現 ・ 国際化への対応 ・ 海外と比較して高い建設コスト </div>

建設業に内在する要因から建築工事に生じている問題点

次に、建設業そのものに内在する要因から工事現場レベルで生じている問題について、QCDSE およびその他の視点で整理する。

A) 品質関連

当時の建設省が1995年に取りまとめた建設産業政策大綱^[27]では、品質に関する目標達成の視点の中で、現場レベルの問題点を複数指摘している。これらの基本方針は国土交通省となっても継承され、建設産業政策2007^[28]、建設産業の再生と発展のための方策2011^[29]、同2012^[30]が発表された。具体的な課題として挙げられている品質確保のための体制づくり、品質向上による競争体制などについては、先述した品確法の改正などの形で改善が図られている。しかし近年では、社会的環境の変化で述べた通り、要求された品質を確保できていない、さらには検査結果の改ざんが行われるなど、品質に関してこれまでは考えられなかったような不祥事が続いている。今後の問題意識として、建設技術者や技能労働者が不足し、かつ労働生産性が向上しない環境下で、従来と同様の工期を求められる結果、品質確保が難しくなる問題についても指摘されているが、現在も解決には至っていない。

B) コスト関連

建築工事はプロジェクトごとの工事原価に基づいて現場単位の独立採算で活動するため、工事担当者一人ひとりが経営者の視点で出来高を常に記録・分析し、実行予算との乖離が生じないように調整している。しかし、野中^[31]は、出来高の単位が工事種別によって異なる問題について言及している。例えば、コンクリート工事ではm³単位、鉄筋や鉄骨工事ではt単位、型枠工事ではm²単位など、出来高の表現が異なることに加え、これらは労務費と材料費の複合値になっており、現場レベルでの原価管理を複雑にしている。さらに、契約形態も大きく2種類があり、工事の成果物に対して対価を支払う請負契約と、働いた分の労務費を支払う常用契約が混在している。例えば請負契約は躯体工事や仕上工事など建物の一部を施工する工事が多く、工事に要する労働者数は請負業者の裁量となる。常用契約は警備員や土工などの労務職が多く、

毎日の労務手配は施工管理者が実行予算の範囲内で差配する。このような状況であるため、工事現場においてコストコントロールをしようとしても、拠り所となる過去の実績データが、比較可能な形で蓄積されていないことが問題である。鉄筋工事を例に挙げると、施工歩掛りを集計しようとしても人・日/t という単位になるため、形状が単純で作業も容易な基礎部分では歩掛りが上がり、細かい仕口部分になると歩掛りが落ちる。さらには携わる建設労働者のスキルによっても大きく歩掛りが変動してしまう。これでは工事の良し悪しを判断する材料として数値を扱えず、他の工事との比較も難しい。

また、近年では資材の原価変動も問題となっている。昨今は世界的なインフレと物価上昇が社会問題となっており、建設資材も例外ではない。2015 年 1 月を 100 とした建設資材物価指数では 2023 年 11 月には 134.8 となっており、前年比で+3.2%上昇、前月比でも+0.4%の上昇である³。建築工事は製造業などと比較して一つの製品＝建物に要する工期が長いため、工事請負契約の時点の見積原価に対して、実際に資材を調達する際の物価上昇が問題となっている。

C) 工期・工程関連

田村^[32]は工期管理の要点として、資材・労務の手配や調達を的確に行い、工程の各段階における作業の進捗状態の管理を適切に実施して工事を進めること、と述べている。しかし、工事の過程で起きるさまざまな問題が工程を乱し、これが遅延を招く原因となっていることも指摘しており、工期・工程をめぐるさまざまな問題をいかに克服するかが、大きな課題と指摘した。その解決手段の一つとして、現場作業の相当部分を統一された工場工程に移行させ、工場加工度を高めた建築構成部品を導入して、省力化と工程削減の相乗効果を狙う合理化された生産方式が注目されるようになったことを挙げている。しかし、これほど大きな問題でありながらも、過去に建設された建物の実績工期に関する資料がきわめて少なく、また十分な研究も行われておらず、そのため多くは過去の実施例などの曖昧なデータを参考として計画・管理が行われていることを問題としている。嘉納^[33]も工事活動の基盤となる工事計画の不備や欠陥、工事管理の不徹底さが生産効率の改善を妨げている状況を指摘し、その原因の一つとして工程関連の科学研究がなおざりにされてきたことに言及している。以上から、工事の過程で起きる様々な問題による工程の混乱と遅延、および、それらを管理するための根拠として科学的なデータが活用されていないことが問題であると考えられる。

D) 安全衛生関連

建設工事における死亡災害は全産業の中で 36.3%を占めている。1993 年は 42.1%であり、業界としての死亡災害の多さは変わっていない⁴。災害原因としてかかわる建築工事特有の事項が先述した既往研究^[34]で複数挙げられている。整理すると以下の通りである。

³ 数値出所 一般財団法人建設物価調査会「建設物価 建設資材物価指数®」
https://www.kensetu-bukka.or.jp/business/so-ken/shisu/shisu_shizai/ (accessed:2024.1.4)

⁴ 数値出所 建設業労働災害防止協会「建設業における労働災害発生状況」
https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/statistics/occupational_accidents.html
(accessed:2024.1.4)

- 作業環境の厳しさ（野天・地下・高所など）
- 作業床が不安定な状況での作業（足場・梯子・仕掛り中の構造物など）
- 多種類の労働者が交錯した作業実施
- 工程に従って変化する作業状況
- 事業主・労働者ともに欠如した安全意識
- 材料・機械設備ともに危険な要因が多い
- 繰り返し型災害
- 中小規模の建設業で多発
- 労働者の高齢化、技能レベルの低下

特に、繰り返し型災害が起こる原因として、過去の事故事例による教訓が生かされていない点が指摘されている。

また、近年の傾向として衛生面に着目すると、熱中症を中心とした疾病の割合が多いことも問題となっている。厚生労働省からは、建設業労働災害防止協会への2023年度通達・告示^[35]で、熱中症の死傷者数は全産業の中で建設業が最多であること、予防の徹底を図ること、を指摘している。現在の工事現場における一般的な対策^[36]としては、(a)作業環境管理（WBGT値周知、休憩所整備）(b)作業管理（作業時間短縮、暑熱順化、水分・塩分補給、服装、巡視）(c)健康管理（自己申告）(d)労働衛生教育(e)救急処置がまとめられており、企業・工事現場・建設労働者個人それぞれが独自の判断で対策を実施している。これら現状の対策の多くは医療やスポーツ分野など他産業の事例を引用している場合が多いが、工事現場という特殊条件における効果は検証されておらず、曖昧な根拠に基づいた対策となっている問題がある。

これら安全衛生分野の技術開発に対するアプローチ方法としては、労働科学、生理学、衛生学、理工学、社会科学、統計学などによる的確な判断が求められる。

E) 環境関連

建築工事における環境対策では、まず建設副産物への対応があり、先述した廃棄物およびリサイクルに関わる法律に基づき、届出、記録・保存業務を実施している。建設副産物以外にも、例えば2003年に施行された土壌汚染対策法に基づき敷地土壌の調査を実施しており、汚染部分については処理の過程や最終処分状況を写真や図面表記を交えて細かく記録する必要があるなど、工事現場における環境対策の増加は実務担当者の業務を圧迫している。

法規制への対応以外にも、近隣に配慮した騒音・振動対策はほぼ必須となっており、国土交通省からは「建設工事に伴う騒音振動対策技術指針」^[37]として施工者の努力が求められている。

その他、自然環境の変化として述べた国際社会全体での温暖化対策に関連し、建築工事に伴う搬出入車両のCO₂排出量を考慮したサプライチェーンデザインと実施管理のニーズも高まっている。これまでは品質や費用の観点で工場選定していたところ、これからは工場-工事現場間の距離や運搬方法も考慮する必要が生じることで、工事現場の実務の制約となり得る。

F) その他

ゼネコン各社では管理費の低減や生産性向上を目指して現場係員の少人数化が厳しく問われており、多くの業務を粗漏なく行うことが施工管理者の負荷を極めて厳しいものとしている。また、田村^[38]や山崎^[39]は、これらの対策として各企業で実施されている現場と内勤支援部門の連携体制構築や工務事務のOA化などが、これから現場を担う中堅社員の育成を妨げているとの危惧も示している。

以上、A) ～F) 各項目から読み取れる問題点を表 1-2 に整理する。

表 1-2 建設業そのものに内在する要因によって建築工事に生じている問題

問題の種類	30年以上解決されていない問題
建築工事の内的な要因による問題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 他産業と比較して低い労働生産性 ・ 他産業と比較して多い死亡災害 ・ 曖昧な根拠に基づいた工程管理と原価管理による巧拙の差異 ・ 曖昧な市場予測に基づいた資材計画による原価変動 ・ 工事の過程で起きる様々な問題による工程の混乱と遅延 ・ 施工管理業務の内勤移管や外注化による技術者育成の阻害

他産業と比較した建築工事の特殊性

先述の通り、長年問題点として挙げられていながら解決されていない理由として多くの研究者が『他産業と比較した建築工事の特殊性』として説明している。複数の既往研究で挙げられた項目を集約すると以下の 15 項目が挙げられていた。嘉納は、特殊性を『建築物固有の特性』と『産業構造の特性』の 2 つに分類できる、と指摘していたため、15 項目をこの 2 分類に峻別すると、以下の通りである。

[建築物固有の特性]

- (1) 現場の場所が常に変わる
- (2) 文化的・芸術的側面が強い
- (3) 建築物の規模・複雑度が大きい
- (4) 建築物の耐用年数が長い
- (5) 特殊な性能を持つ材料を使用する（遮音・耐火その他規格品）

[産業構造の特性]

- (6) 建築需要の変動
- (7) 設計と施工が別人格
- (8) 一品受注生産
- (9) 重層下請構造
- (10) 労働集約的作業
- (11) 工事関係者が臨時に組織される
- (12) 関係する人的・物的資源の量と種類が多い
- (13) 人手と建設設備（仮設材・建設機械など）の分化
- (14) 建築材料・施工方法ともに標準化が少ない
- (15) 安全・品質よりコスト・納期が優先（現場所長の評価は利益が主）

各種問題に対する解決アプローチの考察

次に、これまで抽出した問題点に対し、建築工事の特殊性と関連付けるとともに、考えられる解決アプローチを表 1-3 に整理する。

例えば建設労働者不足に対する解決アプローチとしては、労働者人口を増加させる目的で、入職者数を増やすもしくは離職者を減らす方策が考えられる。そのためには、待遇の向上や、女性・高齢者の就労を可能とする労働福祉の向上・働き方改革など、国や業界単位で取組む施策が考えられる。熟練技能者の不足に対しては、母数となる建設労働者全体の人口増加施策の他に、技能伝承の高度化によって高スキル人材の割合を高めるアプローチもある。他には、少人数を許容して施工することも選択肢である。そのために、建設作業の省人化を目的として機械化施工や装置化施工、モジュール化施工などを推進する方策や、現状行われている自主検査や各種記録など管理業務の効率化などが考えられる。他にも、工期の延長が許容されれば、少人数となっても物理的に施工は可能である。このように方策は、技術開発が寄与するものと、技術開発以外の取組みによるもの、2 種類がある。さらに技術開発は、構工法やロボット、モジュール化など主としてハード開発に関わるものと、各種情報集約や科学的なデータ分析など

デジタル活用に関するものに分けられる。技術開発以外では、企業単位で取組む対策と、国や業界単位で取組むものがある。

また、この中には、現実的にはコントロールが難しい問題もある。建築資材の価格変動と、曖昧な根拠に基づいた原価管理による巧拙の差異に対する解決アプローチとして『資材価格の安定化』を挙げたが、資材価格は、例えば建設需要の変動や為替など、国際市場の中で多様な要因によって変動するものであるため、対策は難しい。施工管理業務の内勤移管や外注化による技術者育成の阻害に対しては、『実務経験量の増加』という解決アプローチを挙げたが、先述の通り今後は法規制によって残業時間が制限され、個人の实労働時間は減少する方向であるため、実行することは現実的でない。そのため本研究では、これらのようにコントロールが難しい問題に対しては、問題自体の解決を図るのではなく、これらに対応するための施策を検討する。例えば資材価格の変動に対しては過去のデータ蓄積による将来予測、建設労働者の育成阻害に対しては教育の高度化などを挙げた。

これらを表 1-4 に整理する。本研究ではこの中で、情報活用に関する技術開発をケーススタディの対象とする。

なお、国や業界単位で取組むものについては、具体的に示されている産業ビジョンや施策が存在するので、次にまとめる。

表 1-3 30 年以上解決されていない問題に対する解決アプローチ

問題の種類	30 年以上解決されていない問題 (数字: 解決を阻害する建築工事の特殊性)	問題の解決アプローチ (太字下線: デジタル活用によって解決可能である問題)
外的な環境 変化に起因 する問題	・ 建設労働者(技術者、技能者)不足: ⑨⑪⑫	→ 建設労働者人口の増加 → 入職者数の増加 → 離職者の減少 → 熟練技能者の増加 → 建設労働者人口の増加 → 技能伝承の高度化 → 少人数施工 → 建設作業の省人化 → 機械化・装置化施工 → 管理業務の効率化 → 施工管理業務の効率化 → 工期の延長
	・ 建築資材の価格変動: ③⑤⑥⑧⑫	→ 資材価格の安定化 → 原価変動の許容・工事価格の適正化
	・ 需要の動向に左右される資材計画: ③⑥⑧⑫	→ 資材供給の安定化 → 集中購買 → 資材製造の内製化
	・ 不祥事のたびに増加し続ける安全・品質関連書類および業務による実務担当者の疲弊: ⑦⑧⑭⑮	→ 書類・関連業務の削減 → 実務担当者の増員 → 施工管理業務の効率化
	・ 環境保全のために増える規制や書類の増加による実務担当者の疲弊: ①⑧⑫⑭	→ 書類・関連業務の削減 → 実務担当者の増員 → 施工管理業務の効率化
	・ 残業規制による実質作業時間の削減: ⑩	→ 建設労働者の増員 → 専門工事会社の原価増 → ゼネコンの原価増 → 工期の延長・適正化 → 業務効率化 → 建設作業の省人化 → 機械化・装置化施工 → 管理業務の効率化 → 施工管理業務の効率化
建築工事の 内的な要因 による問題	・ 他産業と比較して低い労働生産性: ⑧⑩⑭	→ 付加価値の上昇 → 原価低減 → 工事価格の上昇 → 少人化施工 → 建設作業の省人化 → 機械化・装置化施工 → 管理業務の効率化 → 施工管理業務の効率化
	・ 他産業と比較して多い死亡災害: ⑨⑪⑮	→ 危険作業の減少 → 現場作業の減少 → 安全設備・装備の充実 → 建設労働者の安全知識・意識の向上
	・ 曖昧な根拠に基づいた工程管理と原価管理による巧拙の差異: ①⑧⑭	→ データに基づいた工程/原価管理 → 資材価格の安定化
	・ 曖昧な市場予測に基づいた資材計画による原価変動: ③⑥⑧⑭	→ 原価変動の許容・工事価格の適正化 → データに基づいた市場予測 → 工期の延長・適正化
	・ 工事の過程で起きる様々な問題による工程の混乱と遅延: ①③⑧⑩⑪⑫⑬⑭	→ 情報集約と分析に基づいた緻密な工程調整 → 施工管理業務の簡易化 → 材料・施工方法の標準化
	・ 施工管理業務の内勤移管や外注化による技術者育成の阻害: ⑨⑪	→ 教育の高度化 → 実務経験量の増加

(凡例) 建築工事の特殊性

- ① 現場の場所が常に変わる
- ② 文化的・芸術的側面が強い
- ③ 建築物の規模・複雑度が大きい
- ④ 建築物の耐用年数が長い
- ⑤ 特殊な性能を持つ材料を使用する
- ⑥ 建設需要の変動
- ⑦ 設計と施工が別人格
- ⑧ 一品受注生産
- ⑨ 重層下請構造
- ⑩ 労働集約的作業
- ⑪ 工事関係者が臨時に組織される
- ⑫ 関係する人的・物的資源の量と種類が多い
- ⑬ 人手と建設設備の分化
- ⑭ 建築材料・施工方法ともに標準化が少ない
- ⑮ 安全・品質よりコスト・納期が優先

表 1-4 建築工事の問題に対する解決アプローチの分類

分類		解決アプローチ
技術開発	情報活用	<ul style="list-style-type: none"> ・ 施工管理業務の効率化 ・ 情報集約と分析に基づいた緻密な工程調整 ・ データに基づいた工程/原価計画・管理 ・ データに基づいた市場予測 ・ 安全設備・装備の充実 ・ 建設労働者の安全知識・意識の向上 ・ 教育・技能伝承の高度化
	ハード開発 その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機械化・装置化施工 ・ 現場作業の減少 ・ 材料・施工方法の標準化、モジュール化施工
技術開発 以外	主として 企業単位	<ul style="list-style-type: none"> ・ 資材の集中購買 ・ 資材製造の内製化 ・ 書類・関連業務の削減 ・ 実務担当者の増員 ・ 建設労働者の増員 ・ 原価低減 ・ 工事価格の上昇 ・ 実務経験量の増加
	主として 国・業界 単位	<ul style="list-style-type: none"> ・ 入職者数の増加 ・ 離職者の減少 ・ 工期の延長・適正化 ・ 原価変動の許容・工事価格の適正化

国および業界単位で示されている産業ビジョンと施策

次に、表 1-4 に記載した解決アプローチの中で、技術開発以外の要素で、主として国・業界単位で取組むものについて、国や業界から既に示されている産業ビジョンと施策を整理する。

● 入職者の増加と離職者の減少に関する施策

国による産業ビジョンとして、「建設産業の再生と発展のための方策 2011」「同 2012」が発表されており、その中で課題として「技能労働者の雇用環境の改善」「技術者の育成と適正配置」について言及されている。このビジョンについて蟹澤^[40]は「単なる目標を示すだけでなく、一歩も二歩も踏み込んだ具体策を提示した」と評価しており、その具体例として保険未加入企業の排除や技術者データベースの整備と業種区分の点検などを挙げている。労働環境の改善に関しては、1994 年に当時の建設省が「建設産業における総合的な安全確保に関する報告書」^[41]において元請企業と協力会社における関係者の役割を明確にするとともに、自律的安全行動による実効を求めていた。国土交通省となった後も継続的に本ビジョンは更新され、2023 年の「建設工事従事者の安全及び健康の確保に関する基本的な計画」^[42]では高齢者・女性労働者に関する記述や、主にインフラ面での DX 活用に対する期待にも言及されている。

法改正による対策として、2014 年の新・担い手 3 法（品確法・建設業法・入契法改正）によって建設労働者の働き方改革の推進が図られ、社会保険の加入を許可要件化、下請け代金のうち労務費相当については現金払いとするなど、現場の処遇改善策が盛り込まれている。

官民の取組みとしては、技能労働者の就労履歴や保有スキルなどのデータベースを標準化した建設キャリアアップシステム⁵が挙げられる。

入職者の増加に関わる制度としては、外国人技能実習制度がある。1993 年に制度化されたものだが、2009 年の出入国管理及び難民認定法改正によって外国人の在留資格に『技能実習』が追加され、2017 年に技能実習法が施行されることで、工事現場における労働者の間でも技能実習生の割合が増えた。第一の目的は、技能実習生がスキルを身に付けて母国で生かすことであるが、慢性的な担い手不足の中、工事現場において貴重な戦力となっている。

● 工期/工事価格の延長・適正化に関する施策

工期や工事価格の適正化に関する国の取組みとしては、2014 年の新・担い手 3 法によって、発注者と受注者双方の責務が明記されている。発注者側では、休日や天候などを考慮した適正な工期設定、施工時期の平準化のための措置を講ずる努力義務が課せられた。受注者側では、著しく短い工期による請負契約が禁止された。

民間では、日本建設業連合会によって完全週休 2 日制を考慮した適正工期算定プログラム⁶が作成されるとともに、労働基準法改正の猶予期間が 2023 年度末に終了することによる残業

⁵ 建設キャリアアップシステムは 2019 年 1 月から運用開始された。一般社団法人建設業振興基金が運営しており、技能者ひとり一人の就業実績や資格を登録し、技能の公正な評価、工事の品質向上、現場作業の効率化などにつなげるシステムである。
<https://www.ccus.jp/> (accessed 2023. 9. 21)

⁶ 日本建設業連合会「建築工事適正工期算定プログラム」, 2016. 5 初版, 2021. 10 第 6 版
<https://www.nikkenren.com/kenchiku/proper.html> (accessed 2024. 1. 4)

規制を考慮して、建設業界全体の宣言として 2023 年 7 月に「適正工期確保宣言」が発表され、工事現場の 4 週 8 閉所と週 40 時間稼働を原則とした適切な工期に基づく見積りを行うとともに発注者の理解を得るための説明を徹底することが明記されている。日本建設業連合会が 2016 年に発表した「生産性向上推進要綱」^[43]においても、適正工期算定プログラムの活用が主要課題の一つとして位置づけられ、現在も会員企業を中心に推進が図られている。

● 海外における国家施策

日本では見られない動きとして、海外では、表 1-4 に示した問題解決アプローチの中で、国が技術開発側の施策を支援する動きがある。例えば、イギリスでは工期短縮・省人化施工・品質向上などを目的に MMC (MODERN METHODS OF CONSTRUCTION⁷) と呼ばれる工業化工法を推進するため、公共工事における技術適用に関して費用補助を行っている。シンガポールでは、外国人労働者への依存からの脱却を目的に、国が Code of Practice on Buildability⁸を作成することで、建設規制関連の法規則としてプロジェクトにおける省力化技術・手法の導入を義務化している。この評価は定量的にスコア化され、必要最低限のスコアを獲得できない場合は工事の着工申請が許可されないほど、強制力を持つ。

これらイギリスとシンガポールの技術開発に対する支援や強制力の特徴は、解決したい問題と解決アプローチが直結していることである。イギリスでは慢性的な住宅不足と建設労働者不足が問題となっており、国家戦略として、MMC や新技術の採用を促進するほか調達の簡素化にも取り組んでいる。シンガポールでは、全産業において外国人労働者の割合が高く、建設業では 7 割が外国人労働者であり、その依存からの脱却が課題となっているため、Buildability 評価による着工制限のほか、外国人雇用税の引き上げや雇用上限率の引き下げなど、問題に対する明確な解決アプローチが複数実施されている。

このように、技術開発以外に、国や業界による取り組みが必要な問題に関しては、幅広くビジョンが公開され、法改正などを通じて具体的な施策が講じられていることが分かる。海外においては、国家が抱える問題に対する技術開発支援も含めた幅広い解決アプローチが国のトップダウンで戦略的に実施されている事例も確認した。

1.3. デジタル活用 の 概念 と 仮説 の 検証 方法

建築工事においてデジタル活用を阻害する問題点

建築工事におけるデジタル活用を妨げる阻害要因に言及した既往研究は以下がある。

⁷ MODERN METHODS OF CONSTRUCTION 参考 HP

<https://www.goconstruct.org/educational-resources/learn-about-construction/modern-methods-of-construction/> (accessed 2024.1.4)

⁸ CODE OF Buildability 2019 Edition

https://www1.bca.gov.sg/docs/default-source/docs-corp-news-and-publications/publications/for-industry/buildability-series/cop-on-buildability-2019.pdf?sfvrsn=d8526675_0 (accessed 2024.1.4)

眞片山^[44]は、デジタル技術を工事現場に定着させるためには、「生産性や合理化の程度を評価し、さらに、それらを工事費用等へ反映させる方法を考えていかなければならない」と述べている。その上で、これまで定着しなかった技術に対する阻害要因の例として、建設需要の低下時期に建設技能労働者の賃金が低下したことによる技術開発への投資減少、技術適用のための仮設資機材その他物資の投資・保管管理手間を挙げている。金岩^[45]は、情報技術の実務適用の前提として、情報の標準化、情報インフラの拡充と運用体制の整備を挙げ、過去技術の定着を阻害した課題の例として、専用オペレーターによる集中運用体制が必要となったこと、専門知識獲得に手間がかかったこと、システムの信頼性検証が難しかったこと、不測の事態に対応できなかったことなどを挙げている。馬場^[46]は情報化技術の難点として、どう使ってもいかに分からない、思うような成果が得られない、扱える人間がいない、機器やシステムの更新に追われて経営の圧迫要因になっている、などを挙げている。その上で、重要な課題として「情報の統合化」を挙げ、異なるツールや手法を共通の利用環境に乗せる必要性に言及している。日本建築学会は建築生産における情報の流れに関するアンケート調査^[47]の結果、デジタル活用の問題点として、データの完成度・保証の不足とそれに伴うチェック費用、変更の多発と対応、セキュリティ上の理由で共有できないデータの存在、システムの不安定性、部門など組織の壁を挙げている。山崎^[48]はデジタル活用によって建築工事の特殊性の一部を克服できる可能性がある一方、全てが克服できるわけではないこと、他産業で成功した生産システムをそのまま建築工事で導入してもうまくいかない、と述べているが、それらの阻害要因を具体的に整理した研究はない。

本研究におけるデジタル活用の概念と仮説の検証方法

1. 2. で挙げた建築工事レベルの諸問題について、解決が難しい理由として、多くの研究者が『建築工事の特殊性』を理由としてきた。一方で山崎^[49]は、「情報化の進展を進める場合には建設業の抱えてきた不利な条件は大きな障害とならない」と述べている。そこで、筆者は①建築工事で解決されていない問題をデジタル活用によって解決しようとする場合、従来と比較して障害となる『建築工事の特殊性』が少ない、②デジタル活用が進まない原因として『建築工事の特殊性』とは別に阻害要因が複数存在する、との仮説を立てた。

デジタル活用の概念については、2つの視点があると考ええる。ひとつは、金岩^[50]が情報化施工の定義として「施工の計画と管理における膨大な情報を一元的に管理し、企業内外の生産体制の中で、生産実施との密接な関連の下に必要な情報を適切かつ迅速に処理できる生産方式を言う」と述べているように、プロジェクト内でデジタルデータを一元管理することで業務効率化を図る活用方法である。もうひとつは、池田^[51]が「今後日本の建設業界に求められるのは、業界や業種の垣根を越え、既存の分業制を飛び越えたデータのやり取りや活用」であると述べているように、既存の業務の効率化にとどまらず、プロジェクト・組織を超えてデジタルデータを扱うことにより、過去には不可能であった高度な建築手法の実現や技能継承など、より俯瞰した活用方法が考えられる。

表 1-4 で整理した建築工事の問題点に対する解決アプローチの中で技術開発かつ情報活用の分野に着目すると、A：プロジェクトにおける問題解決として、施工管理業務の効率化、情報

表 1-5 解決のためのアプローチ方法による問題点の整理

分類		解決アプローチ	デジタル活用の分類	
技術開発	情報活用	<ul style="list-style-type: none"> ・ 施工管理業務の効率化 ・ 情報集約と分析に基づいた緻密な工程調整 ・ データに基づいた工程/原価計画・管理 ・ データに基づいた市場予測 ・ 安全設備・装備の充実 ・ 建設労働者の安全知識・意識の向上 ・ 教育・技能伝承の高度化 	A-1施工管理目的 A-2施工記録目的	A:プロジェクト活用
	ハード開発 その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機械化・装置化施工 ・ 現場作業の減少 ・ 材料・施工方法の標準化、モジュール化施工 	B-1分析目的 B-2教育目的	B:複数プロジェクトを俯瞰した活用

集約と分析に基づいた緻密な工程調整、が当てはまる。B：複数プロジェクトを俯瞰した問題解決としては、データに基づいた工程/原価計画・管理、市場予測、安全設備・装備の充実、建設労働者の安全知識・意識の向上、教育の高度化、が当てはまる。これらをさらに細分類すると、表 1-5 に示す通り A-1：施工管理目的、A-2：施工記録目的、B-1：分析目的、B-2：教育目的、と 4 パターンの異なるデジタル活用に分けることができる。そこで第 3 章以降では、これら 4 パターンのケーススタディを題材として取り上げ、デジタル活用の実務適用を妨げる要因を整理することで、仮説を検証する。

A-1：施工管理目的については、計画通りに工事が進められていることを確認することが業務の主目的であり、これまでの問題整理を通じて、工事現場内の出来形や工場製作物などの検査行為に対する要求品質・量の増大が実務担当者の業務を圧迫している状況が読み取れたので、出来形確認や検査のデジタル化をケーススタディとして取り上げる。

A-2：施工記録目的については、多様な要因で工程の遅延や変更が起こる環境の中で、データに基づいて科学的な予測や調整が行われていないことを問題として着目した。そこで、建築資材と工事現場全体、2 つの視点で、プロジェクトにおける各種進捗を汎用的なデジタルデータとして記録・活用するケーススタディを実施する。

B-1：分析目的については、複数プロジェクトを俯瞰して工程・原価に関わる現状分析や評価、将来予測が行われていない状況に着目し、根拠となるデータが同一基準で収集されていないことが問題であることに言及した。そこで、工程や原価に直結するデータとして建設労働者および建設機械の稼働率、安全設備・装備の評価・改善に直結するデータとして建設労働者の生理情報の収集・活用をケーススタディとして取り上げる。

B-2：教育目的については、技術者・技能者双方の減少およびスキル低下が背景にあり、安全面について同じような事故の繰り返し災害が多いことから安全教育の高度化が必要であること、熟練技能者の減少に対して技能伝承の高度化が対策の一つになることを述べた。そこで、安全面については先端的な安全教材を題材とした定量的な効果測定方法の検討、技能伝承については技能労働者を対象とした科学的な動作分析によるスキルの形式知化、をケーススタディとして取り上げる。

1.4.本章のまとめ

本章では、建築工事における問題を整理するため、まず外的な要因として業界を取り巻く環境の変化と、それに起因する問題を調査した。次に内的な要因として、建築工事そのものに内在する問題を整理した。その結果、30年以上解決されていない問題を12項目抽出した。さらに、これら問題解決ができていない理由として挙げられている建築工事の特殊性を既往研究から15項目抽出し、30年以上解決されていない問題の全てについて、特殊性のいずれかが関わっていることを確認した。次に、これら問題を解決する方策を検討し、技術開発の方策と技術開発以外の方策、2パターンに整理した。技術開発の中でも、情報活用とハード開発に分け、本研究で対象とする範囲として情報活用による解決アプローチに着目した。

また、デジタル技術がこのような業界の特殊性を克服するために有効な手段であることに言及し、本研究の仮説として以下2点を設定した。

[本研究の仮説]

- ① 建築工事で解決されていない問題をデジタル活用によって解決しようとする場合、従来と比較して障害となる『建築工事の特殊性』が少ない。
- ② デジタル活用が進まない原因として『建築工事の特殊性』とは別に阻害要因が複数存在する。

既往研究では、個別の要素技術や環境に対して技術の定着を阻んだ要因について複数の記載があったが、建築工事全体の問題として具体的な実務適用を通じて整理された事例がなかった。そこで本研究では、先述の通り整理した情報活用に関する技術開発による解決アプローチに対して、上記の仮説の検証方法として4パターンのケーススタディを設定し、具体的に要素技術の実務適用を図ることで、デジタル活用を阻む要因の抽出と整理を図る。

[検証の題材とするケーススタディ]

A：プロジェクト内の問題解決

A-1：施工出来形および工場製作物の検査効率化

A-2：建築資材および工事現場全体の進捗記録・活用

B：複数プロジェクトを俯瞰した問題解決

B-1：稼働率分析に資する位置情報収集、安全装備の評価・改善に資する生理情報収集

B-2：安全教材の定量評価に資する生理情報収集、技能伝承に資する動作分析

参考文献

- [1] 田村恭：建築生産管理工学第 1 講序論①建築生産を取り巻く環境とその変化，建築の技術 施工，彰国社，No. 339，pp. 33-40，1994. 1
- [2] 三根直人：生産性向上のためのマネジメント技術，コンクリート工学，日本コンクリート工学会，Vol. 55，No. 9，pp. 852-858
- [3] 蟹澤宏剛：建設産業の 30 年，第 30 回建築生産シンポジウム記念企画「建築生産の 30 年そしてこれからのために」，第 30 回建築生産シンポジウム論文集，日本建築学会，pp. 267-270，2014. 7
- [4] 馬場明生，ほか 2 名：情報化社会に対応した建築生産の現状と課題-鉄筋コンクリート建築物を例として-，コンクリート工学，日本コンクリート工学会，Vol. 34，No. 10，pp. 14-20，1996. 10
- [5] 眞片山美穂：建築生産における自動化・ロボット化技術の変遷と現状，計測と制御，コロナ社，第 55 巻，第 6 号，pp. 501-506，2016. 6
- [6] 安藤正雄：建築生産、三つの課題と法改正，建築雑誌，新建築社，Vol. 113，No. 1430，pp. 32-33，1998. 11
- [7] 嘉納成男：建築生産における生産性と装置化施工，建築の技術 施工，彰国社，No. 341，pp. 98-104，1994. 3
- [8] 古阪秀三：日本の建築プロジェクトにおける発注・契約方式の 30 年間の変遷，第 30 回建築生産シンポジウム記念企画「建築生産の 30 年そしてこれからのために」，第 30 回建築生産シンポジウム論文集，日本建築学会，pp. 271-277，2014. 7
- [9] 室英治：建築施工新時代への備え，建築年報 1993，日本建築学会，pp. 26-27，1993
- [10] 山崎雄介：情報化の進展がもたらす建築生産の変革，建築の技術 施工，彰国社，No. 359，pp. 69-78，1995. 12
- [11] 椎野潤：はじめに，建築の技術 施工，彰国社，No. 351，pp. 30-32，1995. 1
- [12] 野中稔：日本建設業における技術開発の歩み，建築の技術 施工，彰国社，No. 366，pp. 118-121，1996. 4
- [13] 参考文献[7]前掲書，pp. 100-101
- [14] 金岩哲夫：技術ノート設計施工の動向③情報化施工，建築雑誌，新建築社，Vol. 108，No. 1346，pp. 52-53，1993. 8
- [15] 参考文献[4]前掲書，p. 14
- [16] 参考文献[6]前掲書，p. 32
- [17] 参考文献[14]前掲書，p. 52
- [18] 参考文献[6]前掲書，p. 32
- [19] 参考文献[4]前掲書，p. 14
- [20] 参考文献[7]前掲書，p. 101
- [21] 参考文献[1]前掲書，pp. 36-38
- [22] 参考文献[1]前掲書，p. 40
- [23] 山崎雄介：建築生産における管理技術の 30 年，第 30 回建築生産シンポジウム記念企画

- 「建築生産の 30 年 そしてこれからのために」, 第 30 回建築生産シンポジウム論文集, 日本建築学会, pp.287-292, 2014. 7
- [24]参考文献[7]前掲書, p.103
- [25]参考文献[3]前掲書, p.269
- [26]松村秀一, ほか 8 名: 建築生産, 市ヶ谷出版社, pp.259-261, 2004. 5
- [27]建設産業政策委員会: 建設産業政策大綱, 建設省, 1995. 4
- [28]建設産業政策委員会: 建設産業政策 2007 ～ 大転換期の構造改革 ～, 国土交通省, 2007. 6
- [29]国土交通省建設産業戦略会議: 建設産業の再生と発展のための方策 2011, 国土交通省, 2011. 6
- [30]国土交通省建設産業戦略会議: 建設産業の再生と発展のための方策 2012～「方策 2011」を実現し、東日本大震災を乗り越えて未来を拓く～, 国土交通省, 2012. 7
- [31]参考文献[12]前掲書, p.118
- [32]田村恭: 建築生産管理工学第 10 講工事管理論②工期・工程の管理, 建築の技術 施工, 彰国社, No. 360, pp.23-26, 1995. 10
- [33]嘉納成男: 建築工事における工程計画手法に関する一連の研究, 日本建築学会賞 (論文), 1994. 9
- [34]田村恭: 建築生産管理工学第 11 講工事管理論③安全の管理, 建築の技術 施工, 彰国社, No. 361, pp.25-28, 1995. 11
- [35]厚生労働省労働基準局: 令和 4 年職場における熱中症の発生状況 (確定値) 等について, 2023. 5
https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ministries_agencies/files/20230605_1.pdf
 (accessed 2023. 9. 28)
- [36]国土交通省: 建設工事従事者の安全及び健康の確保に関する基本的な計画, 2017. 06 初版, 2023. 6 改訂
https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/const/totikensangyo_const_tk2_000108.html
 (accessed 2023. 12. 2)
- [37]国土交通省: 建設工事に伴う騒音振動対策技術指針, 1987. 3
https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/sosei_constplan_fr_000005.html
 (accessed:2024. 1. 4)
- [38]田村恭: 建築生産管理工学第 2 講序論②建築生産をめぐる諸問題, 建築の技術 施工, 彰国社, No. 341, pp.33-36, 1994. 3
- [39]参考文献[10]前掲書, p.69
- [40]参考文献[3]前掲書, p.269
- [41]建設省: 建設産業における総合的な安全確保に関する報告書, 建設業振興基金, 1994
- [42]参考文献[36]前掲書
- [43]一般社団法人日本建設業連合会: 生産性向上推進要綱, 2016. 4
https://www.nikkenren.com/sougou/seisansei/pdf/seisansei_outline.pdf (accessed

2023. 8. 17)

[44]参考文献[5]前掲書, p. 506

[45]参考文献[14]前掲書, p. 53

[46]参考文献[4]前掲書, p. 14

[47]日本建築学会情報システム技術委員会・情報交流小委員会・建築生産情報の流れ WG: 調査報告, 建築の技術 施工, 彰国社, No. 351, pp55-68, 1995. 12

[48]参考文献[10]前掲書, p. 72

[49]参考文献[10]前掲書, p. 71

[50]参考文献[14]前掲書, p. 52

[51]池田靖史: 四角い空間が建築の常識? その概念から フリーになる未来の建築技術を研究, ANDPAD ONE, 株式会社アンドパッド, 2019. 3

<https://one.andpad.jp/magazine/206/> (accessed:2023. 12. 28)

図版出典

図 1-1 一般社団法人日本建設業連合会: 建設投資の推移, 建設業デジタルハンドブック, 2023. 11 より引用

<https://www.nikkenren.com/publication/handbook/chart5-1/index.html>

(accessed:2024. 1. 3)

図 1-2 一般社団法人日本建設業連合会: 建設業就業者数の推移, 建設業デジタルハンドブック, 2023. 11 より引用

<https://www.nikkenren.com/publication/handbook/chart6-4/index.html>

(accessed:2024. 1. 3)

表 1-1 筆者作成

表 1-2 筆者作成

表 1-3 筆者作成

表 1-4 筆者作成

表 1-5 筆者作成

第2章 要素技術の現状と課題

- 2.1. 本章の目的と構成
- 2.2. 過去の技術開発および市販製品の変遷
- 2.3. 要素技術の概要
- 2.4. 本章のまとめ

参考文献

2.1.本章の目的と構成

はじめに

建設分野単独でデジタル活用に関する要素技術を開発することは少なく、工事現場においても、一般社会に出現した先端技術を用いたシステム開発が主流であった。本章では、仮説検証のためのケーススタディで題材とする要素技術を選定するため、過去の技術開発動向を調査するとともに、今後のデジタル活用で求められる要素技術を整理する。

既往の研究

技術開発の変遷については、既往研究において様々な視点からまとめられている。例えば松田^[1]は 1960 年代から 1990 年代にかけての建築生産の IT 化に関する動向を整理している。報告では社会的背景と IT 化の 2 つの視点で技術開発の変遷を年表化しており、建築生産の IT 化では社会的背景からニーズが発生し、技術が開発される時には基となるシーズが業界内外に存在することを指摘している。山崎^[2]は 2014 年に、建築生産における 30 年間の管理技術の変遷をまとめている。そこでは管理技術を 3 種（管理システム・組織、活動、管理手法・技術、情報技術の活用）に分類し、建設産業・市場の動向、国の政策・法規等の動向、代表的な建築・工事・イベント、主要な活動、開発された技術・手法等の視点で年表化している。その中で、1990 年代当時は工事現場においては情報システムを活用するためのインフラ整備（タブレット端末の配布や無線ネットワークの整備など）で苦労していた状況が述べられている。眞片山^[3]は 2016 年に、1995 年以降における建築生産の情報化技術の変遷をまとめている。ここでは現場支援システムや品質管理等に適用された技術を中心に年表化されており、技術開発の課題として生産性や合理化の程度を評価した上で工事費用等へ反映させる方法を検討すること、と述べている。三根^[4]は、生産性向上のためのマネジメント技術について、工程計画・管理手法やシミュレーション手法を中心に技術開発の変遷をまとめている。これら開発された技術の課題として、プロジェクトごとに変わる条件への対応としてパラメータを様々な変化させながら最適解を探索する必要があったことを挙げ、近年の人工知能の発展や BIM などとの連携による解決への期待を述べている。曾根^[5]は 2021 年に、建築生産情報のマネジメント技術に関する変遷を整理することで、BIM/ICT を活用したシステム開発の在り方を考察した結果、デジタル化された生産情報の作成や次工程と連携させるための推進・普及、専門工事会社との連携に課題があると述べており、鉄筋工事を題材に解決を図っている。これら技術開発の変遷に関する既往研究から読み取れることは、建設業界においてはまず社会的背景からデジタル活用のニーズが生じ、シーズの技術の多くも一般社会で出現した要素技術を基にして、研究機関やゼネコンを中心として独自開発が実施されてきた状況である。さらに、開発された技術の実務適用に際して多様な課題が報告されており、デジタル活用の普及のためにはこれら課題の整理が重要であると考えられる。

要素技術の活用や普及に関する既往研究では、戸倉^[6]が施工管理業務において活用が期待される既存の ICT ツールを題材に、プロジェクトにおける選定条件を個別にシミュレーションする手法を提案した事例がある。しかし検証では仮想プロジェクトを想定しており、現実の環境でデジタル活用の普及を妨げる要因に関してケーススタディした既往研究はない。毎回条件が

変わる建築プロジェクトに対して事前の机上検討を行うためには、現実のプロジェクトにおけるケーススタディを通じて、まだ明らかになっていない課題を抽出する必要があると考える。

そこで本章では、施工管理業務におけるデジタル活用の普及を想定して、活用目的別に過去の開発技術と社会動向の変遷を改めてまとめるとともに、開発された技術の定着状況、定着に至らなかった原因、要素技術の完成度について整理する。

本章の構成

まず2.2.では、既往の研究と文献を調査し、施工管理業務におけるデジタル活用に関する過去の技術開発と、関連する社会動向を年表としてまとめる。そして、開発された技術の現状について文献から抽出し、特に定着に至らなかった原因について考察する。次に2.3.では、技術開発に用いられる要素技術に着目し、建築工事における普及を想定して、各技術の現時点での完成度や課題について整理する。その上で、本研究でケーススタディとして扱う要素技術を選定する。

2.2.過去の技術開発および市販製品の変遷

デジタル活用に関わる技術開発と市販製品の変遷

まず、表 2-1 に、一般社会および建設分野それぞれにおける ICT 関連製品と市場動向、建築工事に関わる技術開発を整理する。期間は、BASIC などの OS や Word などのソフトウェアが発売された 1980 年代以降とし、10 年ごとに主要な動向をまとめている。

一般社会の動向については、民生用途の製品・ソリューションと業務用途の先端技術・製品に分けて整理した。民生用途の動向としては、1980 年代に一般家庭にパソコンが普及し始め、Windows を始めとした OS やワープロ・表計算などのソフトウェアが整備され、それまで手書きが主流であった書類作成の電子化が進んだ。1990 年代にはインターネットの民生利用が始まり、2000 年代に掛けて通信網が整備され、WEB ブラウザの普及に伴って検索・通信販売サイトや SNS の原型など、現在も続くソリューションが次々と出現した。ハード面では携帯電話やノート PC といったモバイル・タブレット端末が多様化した。これら端末・WEB 環境をプラットフォームとして、バーコードや QR コード、GPS、IC カードといった現在も使われるデジタルソリューションが整備されていった。業務用途の動向としては、1980 年代から現在の AI の原型であるニューラルネットワークなどが存在しており、PC の処理能力の進歩によって現在の生成 AI ソリューションの民生利用に繋がっている。RFID など、1990 年代に業務用途のプロトタイプが増え始め、PDA など業務用途のモバイル端末と連携した活用が進み、2000 年代以降の民生用途の利用に繋がっている。このように、一般的に先端技術はまず業務用途でプロトタイプが市場に出現し、要素技術の完成度が高まるとともに、インフラ環境などが整ったタイミングで民生用途の製品が普及している状況が読み取れる。

建設分野の動向については、主に建築工事における活用用途を想定し、業界全体の動向として情報インフラ整備と技術活用、専用製品・ソリューション、技術開発の状況を整理した。

情報インフラ整備に関しては、建設業界では 1990 年代にゼネコンの職員一人一台パソコンが配備されることで、例えば作図作業が手書きのドラフターから CAD へ移行している。建設現場事務所でも PC 配備が進むと、インターネット/イントラネットなどの通信環境も併せて構築された。2000 年代には工事現場でもゼネコン社員全員に携帯電話が配布され、2010 年代にはタブレット端末も配布された。当初はいわゆる Wi-Fi モデル（端末単独では通信不可能）が主流であり、工事現場の場内に仮設の通信インフラを整備する動きがあったが、現在では多くがセルラーモデル（端末単独で通信可能）である。この状況は、工事現場の場内へも簡易に端末と通信インフラを持ち込める環境が整備されたことを意味しており、2000 年代以降の建築工事関連の技術開発や製品・ソリューションの増加に繋がっていると読み取れる。

技術開発の状況については、以下の通りである。建築工事に関するデジタル活用の技術開発は 1980 年代までは少なく、ローカルの PC 上で動作するニューラルネットワーク^[7]やエキスパートシステム^[8]を用いた施工計画・管理システムの研究などが報告されている。1990 年代以降はこれらデスクトップ端末とネットワーク環境を利用して、電子商取引に関するシステム開発^[9]や、IC カード等を利用した入退場システム^[10]の試行検証など、建築工事の業務に直結する技術開発が見られるようになった。2000 年代以降は、端末と通信環境の整備を背景に、

様々な施工管理業務を効率化するための多様な研究開発事例が報告されている。例えば3次元CADをベースとしたバーチャル工事現場システム^[11]、入退場管理システム^[12]、画像を用いた工事進捗管理システム^[13]、検査野帳の電子化^[14]、無線LANを使った建設機械の接触防止システム^[15]、生体センシングを使った作業モニタリング^[16]、モーションキャプチャを使った作業姿勢・負荷の推定^[17]などがある。2000年代までは、一般社会で出現した先端技術をベースに、建設業界では研究機関やゼネコンの研究所が独自システムを開発してきた状況が読み取れる。また、独自システムで試行検証が繰り返された後、要素技術が成熟すると市販製品や業界共通のソリューションに繋がっていることも分かる。例えば1990年代から検証が繰り返されてきた3次元オブジェクトCADに関する概念は、現在ではBIM関連ソリューションとして実務に定着している。

2010年以降は状況に変化が見られる。建築工事に関わる技術開発において、ゼネコン独自のクローズなシステム開発の報告が減少し、一般社会や建設分野用途に存在する製品や先端技術・ソリューションを組合せた用途検証などが増加している。独自開発の事例としては、画像AIを用いた配筋の自動検査システム^[18]などがある。用途検証に関する事例としては、3次元レーザースキャナーを用いた品質管理^[19]、仕上げ材のプレカット^[20]、BIMを使ったゼネコンと専門工事会社のデータ連携^[21]などがある。さらに、建設RXコンソーシアムのように、複数のゼネコンやソリューションベンダーがコンソーシアムを組み、各社の過去の開発成果物を共有するとともに、市場の先端技術を共同で用途検証し、データ構造や仕様の標準化を行う動きが始まった。要素技術については、建設分野に特化したスタートアップ企業が出現し、これまで研究機関やゼネコン研究所が担っていたような専用システムの開発などを請け負う仕組みができた。その結果、市場に存在する技術を建築工事に適用するサイクルが速まっていることが分かる。一方で、要素技術については民生用途・業務用途ともに、製品レベルまで成熟して市場に定着したものと、そうでないものが混在しており、それらが峻別されずに建築工事の実務で試適用が繰り返されている状況が読み取れる。

表 2-1 ICT 関連製品および建築工事に関わる技術開発の変遷

		1980年代	1990年代	2000年代	2010年代 ～現在
一般社会 の動向	民生用の デジタル技術・製品	◇携帯電話 ◇BASIC、MS-DOS、 Macintosh ◇一次元バーコード ◇Word, Excel, Powerpoint ◇フロッピーディスク ◇PLCネットワーク	◇カメラ付き携帯電話 ◇PHS ◇電子手帳 ◇ガウルス ◇タフブック ◇デジタルカメラ ◇インターネット ◇ISDN、ADSL ◇iモード ◇コンパクトフラッシュ ◇Windows、Linux ◇Yahoo!、Amazon ◇GPS ◇QRコード	◇FOMA ◇iPhone ◇Android ◇USB ◇SDカード ◇SSD ◇Google、Twitter、 Facebook、mixi ◇Suica ◇Wi-Fi ◇WEBカメラ ◇光ファイバー網 ◇高速PLCネットワーク	◇iPad ◇LINE ◇ChatGPT、生成AI ◇メタバース ◇AirTag ◇360度カメラ ◇民生用3Dプリンタ ◇民生用XRデバイス ◇民生用ドローン ◇WEB会議ツール
	業務用の デジタル技術・製品	◇業務用3Dプリンタ ◇トータルステーション ◇ニューラルネットワーク	◇PDA ◇RFID	◇AWS ◇NAS ◇GIS/GNSS ◇スパコン（地球シミュ レータ）	◇XRデバイス ◇iBeacon ◇IoTセンサー ◇3Dレーザースキャナ ◇写真測量 ◇業務用ドローン ◇自律歩行ロボット ◇VDI ◇iPhone、iPad搭載LiDAR ◇音声認識技術 ◇スパコン（京、富岳）
建築工事分野 の動向	情報インフラ整備		◇ゼネコン職員へのPC配布 ◇ドロッパーからCADへの 移行	◇ゼネコン職員への携帯電 話配布 ◇建設現場事務所のネット ワーク構築	◇工事現場のWi-Fi環境構築 ◇ゼネコン職員へのiPad配 布
	先端技術の活用 に関する業界動向		◇CI-NET ◇CALS/EC	◇電子マニフェスト ◇グリーンファイル	◇建設スタートアップ企業 ◇3Dプリンタ建築の実現 ◇スマートビルディング ◇建設キャリアアップシス テム ◇BIM元年 ◇RXコンソーシアムなど業 界単位の技術開発が加速 ◇オープン・標準化活動の 加速
	建築分野向けの デジタル技術・製品	◇AutoCAD ◇MicroStation ◇Archicad3.1	◇JW-CAD ◇IFC Release 1.0 ◇BE-Bridge	◇IFC2x3 ◇Revit1.0 ◇GLOOBE ◇Rhinceros、 Grasshopper	◇建築BIMの普及（利用化） （レンタル・リースサービ スの登場） ◇建築サイズ3Dプリンタ ◇ICT建機 ◇Plateau ◇IFC4 ◇ST-Bridge
	建築工事に 関する 技術開発	◆エキスパートシステムを 使った工程計画 ●パソコンを使った各種施 工管理システム ◆CGを使った施工計画の可 視化 ●東京ドーム施工における 3次元CADと測量技術の活用	●バーコードやICカードを 使った各種施工管理システ ム ◆ニューラルネットワーク を使った施工シミュレー ション ◇CALS/EC現場実証 ●オブジェクト指向3次元 CADシステム	●3次元CADを使ったパー チャル工事現場システム ◇PDA、ICタグを使った入 退場管理システム ●RFIDを使った施工管理シ ステム ◇VR・画像処理技術を使っ た工事進捗管理システム ■生体センシングを使った 作業モニタリングシステム □モーションキャプチャを 使った作業姿勢・負荷の推 定技術 ◆無線LANを使った工事車 両の接触防止システム ◇3DオブジェクトCAD自社 開発 ●モバイルPC、携帯端末を 使った各種施工管理システ ム ◇配筋検査の野帳電子化	●3Dレーザースキャナ を使った施工管理活用 ●XR技術を使った施工支援 ドローイングレス施工 ●BIMと3次元スキャンによ る部材ブレイク ●画像処理・ステレオカメ ラ・AI等を使った自動検査 ■工事現場内センシング データの3次元可視化シス テム □防衛災害のCG再現、VR体 験 ●BIMによる施工計画、管 理

(凡例) ●管理目的 ○記録目的 ■分析目的 □教育目的 ◆その他目的 ◇共通基盤、電子化

開発された技術の定着状況および定着を阻む要因

次に、過去の技術開発の変遷からデジタル活用の実務適用を阻む要因を読み取るため、2.1.で整理した技術開発を対象に、実務への定着状況を整理する。

過去から現在までの技術開発の変遷を見ると、既に実務に定着したものと、そうでないものが存在している。さらに、定着していないものについては、ただ研究が中止されているわけではなく、共通の目的に対して要素技術や解決アプローチを替えて技術開発が繰り返されていると考えることができる。一覧を表 2-2 にまとめる。

まず、実務に定着した技術は、以下が挙げられる。

- オブジェクト指向 3 次元 CAD に関する技術開発

1980 年代に CG を使った施工計画の可視化に関する研究^[22]があり、PC 性能の進化に伴って 1990 年代にオブジェクト指向の 3 次元 CAD システムの開発^[23]、2000 年代にバーチャル工事現場システム^[24]といった独自システムの研究開発が盛んに実施された。2010 年代には BIM という用語や概念に対する認知が急速に広まると、複数の BIM 関連ソフトウェアやソリューションとしてオブジェクト指向 3 次元 CAD の概念が実用化された。現在の BIM ソリューションの原型となる 3 次元 CAD システムは 1980 年代から存在したが、2000 年代までは性能や機能が実務ニーズに追いついておらず、企業がそれぞれ独自システムを開発していた状況が分かる。企業単位では試行検証レベルに留まっていたが、2010 年代に市販ソフトウェアの性能や機能がニーズに追いつき、市場シェアの増加に伴って製品の完成度が高まることで、業界内の実務で広く定着したことが推測される。

- 電子商取引に関する技術開発

1990 年代に CALS/EC という電子商取引に関する概念が登場し、官民が一体となって CALS/EC コンソーシアムが発足され、実用化に向けて実証^[25]が繰り返された。その後、経済産業省の管轄で CI-NET という電子商取引に関する標準化が実現し、この規格に準拠したソフトウェアが複数製品化され、建設業界の中で広く定着した。電子商取引に関しては、建設業界だけでなく産業界全体の課題であったこともあり、技術開発の初期から国や産業界の主導で規格標準化やオープン化が進んでいた状況が分かる。

- 書類・帳票の電子化に関する技術開発

工事現場に PC や通信環境が普及した 2000 年代から、各種工事書類や帳票類の電子化に関する技術開発が実施された。

例えば労務・入退場管理に関しては PDA と IC タグを用いた入退場管理システム^[26]などの独自システムの開発事例がある。業界単位の取組みとしては施工体制台帳の電子化としてグリーンファイルシステムが作られた。建設労働者視点の取組みとしては就労履歴の管理やキャリア評価を目的として、官民一体となって建設共通パスに関する実証^[27]が繰り返され、2010 年代には建設キャリアアップシステムとして業界全体に定着している。このような労務管理・労働福祉に関しては社会的背景からニーズの高まりがあり、他の技術開発と比較して早い段階でオープン化や標準化の動きが進んだと考えられる。

配筋検査をはじめとした各種検査野帳の電子化については、2000 年代にゼネコン各社が独自システムを開発^[28]しており、そのニーズの高さが読み取れる。2010 年代には建設分

野に特化したスタートアップ企業⁹が複数出現し、書類の電子化にとどまらず、ドキュメント管理やそれに伴う職場コミュニケーションの円滑化機能を備えたソフトウェアやサービスを販売し始めた。製品化によって、それまで自社で独自システムを開発できなかった小規模な建設会社にも技術が広く浸透し、定着に至ったと考えられる。

- 建設機械の情報化に関する技術開発

2000年代には工事現場の場内にも無線通信環境が整備されたため、ゼネコンが安全管理に関する用途検証に取り組んでおり、例えば無線 LAN を使った工事車両の接触防止システム^[29]などが報告されている。その後、2010年代には機械メーカーが主導して建設機械の情報化に関する取り組みが多く報告され、遠隔操作可能な無人機や、BIM データを元に自律的に掘削作業を行う ICT 建機などが製品として社会実装されている。この背景の一つには国土交通省が i-Construction という形で、主に土木工事を対象に情報化施工の推進を図り、補助金などによって費用面の後押しもあったなど、社会的背景と国レベルの施策によって製品化が進みやすかったと言える。また、工事車両やクレーンなどの建設機械は元々電子制御の機構を有していたため、他のデジタル技術との連携が比較的容易であったことも要因の一つであろう。

- 測量技術

測量技術は、当初から市販製品レベルで定着したものである。1980年代にトータルステーションなどの光学 3 次元測量機器が販売され、測量会社が導入し、一般的な工事現場でも活用されるようになった。2000年代にはノンプリズム式トータルステーション、自動追尾式トータルステーションなど、継続的な機能拡張があり、2010年代には杭工事など特定の業務を想定して遠隔から一人で操作・測量可能なソリューションも製品化された。企業の技術開発では、例えば BIM モデルから測量座標を入力することでトータルステーションの追尾や帳票作成を自動化した事例^[30]がある。このように機器メーカーが主導した先端技術は、当初から性能や機能が製品レベルまで完成されたものであり、実務適用が想定されたものであると言える。ゼネコンなどの民間企業は独自システムの開発などは行わず、他の先端技術との組合せによる効率化などが技術開発のターゲットとなっていることが分かる。

次に、実務に定着していない技術は、以下が挙げられる。

- 施工計画・管理の支援に関する技術開発

1980年代に PC が普及してから、先端的な要素技術と組合せることで、施工計画や管理を支援する各種システムの研究開発が行われてきた。例えば計画目的では、エキスパートシステムを使った工程計画の自動化、ニューラルネットワークを使った施工シミュレーションがある。進捗管理目的ではバーコードや IC カード、RFID を使った施工管理システム^{1]}、

⁹ 建設系スタートアップ企業の沿革 2016年に CONCORE'S 社（現：フォトラクション）が工事写真管理ソリューション、2017年に東京ロケット社（現：助太刀）が建設労働者の手配ソリューションを発表。その後建設系スタートアップ企業が増加し、2022年4月には一般社団法人建設テック協会が設立され、多くの企業が一体となってデジタル技術の社会実装を目指している。

VR や画像処理技術を用いた工事進捗管理システムの研究がある。1990 年代まではデスクトップ PC を想定した技術開発が主流であったが、PDA やタブレット端末、携帯電話などモバイル端末の進歩によって、2000 年代からは工事現場の場内でデジタルデータを収集することによる施工管理システムに関する研究も行われるようになった。2010 年代には 3 次元レーザースキャナーや XR デバイス、画像 AI など、工事現場の場内でも使用可能な先端技術が次々と出現し、それらを使って施工管理業務のどの部分を効率化できるのか、個別の用途検証が多く行われるようになったことが読み取れる。このように、この分野では『施工計画・管理』という幅広い業務に対し、デジタル技術を用いて効率化しようとする試みが 1980 年代から繰り返されており、手段としての要素技術や解決アプローチが時代によって変化している状況が、現在まで続いている。既往研究の中で、実用化のための課題として挙げられていた項目は、例えばニューラルネットワークや AI を用いたシステムではプロジェクトごとに変化する条件への対応、個体認証タグを用いたシステムではシステムの準備・運用手間、2010 年以降の各種先端技術に関してはまだニーズに対するシーズ側の課題整理が始まった段階であることに加え、技術自体が未成熟であるために実務で上手く運用できないなど、多様な問題が報告されており、解決に至っていない。

- 分析目的の技術開発

2000 年代に工事現場の場内でも使用可能なセンサーが増え、建設労働の状況を定量的に観測する目的で生体センシング技術を活用した事例や、工事現場内の各所に配置したセンサーから得た情報を 3 次元モデルの中で可視化しようとする試みがあった。これらは近年ビッグデータとして他産業で活用が進む用途であり、単一プロジェクトの業務効率化に限らず、複数プロジェクトを俯瞰してデータを一元的に分析し、各プロジェクトへのフィードバックや次プロジェクトの計画の根拠として活用する狙いがある。しかし、既往研究では実務適用の課題として、要素技術自体が未成熟であることから、建築工事の実務で安定して運用することが難しい点や、工事現場の場所や環境が常に変わる特性から導入手間・コストの問題があることが指摘されている。

- 安全教育や技能継承に関する技術開発

安全教育や技能継承に関しては、第 1 章で述べた通り、建設労働者不足など社会的背景からのニーズが高く、不当不適格業者の排除や建設労働者の就労履歴管理システムの作成、技能評価の基準作成など、国や産業レベルでの仕組みづくりが先行している。一方で、2000 年代からはデジタル技術の活用事例も報告されるようになった。例えば安全教育に関しては、3 次元 CAD の普及に伴い、労働災害の状況を 3 次元 CG で仮想的に再現しようとする試みがあった。2010 年代になると民生用に普及した VR デバイスを用いて事故を仮想体験する製品が発売されたが、具体的に建築工事の実務での運用方策について検証した事例がなく、まだ定着には至っていない。これらの基盤となったのは、1990 年代に実施されたモーションキャプチャシステムを用いた動作解析に関する研究であり、単なる動作の再現に留まらず、技能労働者と経験の浅い労働者の違いを動作から考察した事例など、技能伝承を目的とした研究もあった。このように、熟練技能や経験・ノウハウといった暗黙知の

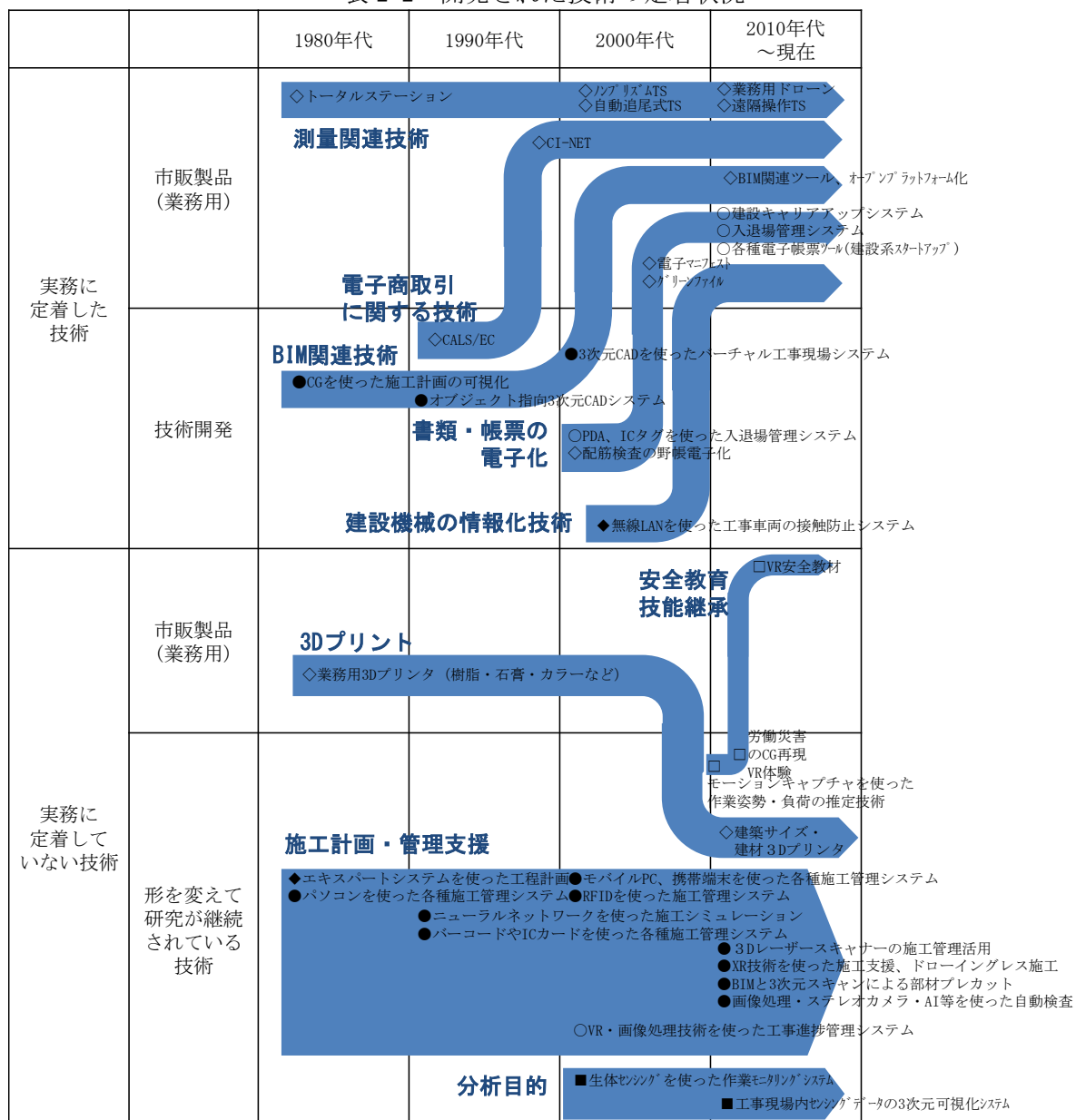
形式知化を目指す試みは、現在も大学を中心に研究が進んでいる段階であり、実務適用に向けた課題は整理されていない。

上記の中から、開発された技術が定着しなかった要因を整理すると以下の項目があった。

- 技術適用までの準備手間
- 技術適用中の管理・変更手間
- システムの完成度不足
- 費用対効果の不足/不明確

このように、過去の技術開発や用途検証を題材に、既往研究に記載のあった課題を整理したが、これらは技術開発を通じて明らかになった個別の問題や課題であり、実務適用の阻害要因にする検証は実施されていない。そのため、既往研究ではまだ明らかになっていない課題があると考えられることから、本研究における仮説の検証方法として、実務適用のケーススタディを実施することには意義があると考ええる。次項では、要素技術の状況を整理し、ケーススタディの題材を選定する。

表 2-2 開発された技術の定着状況



(凡例) ●管理目的 ○記録目的 ■分析目的 □教育目的 ◆その他目的 ◇共通基盤、電子化

2.3.要素技術の概要

第1章で整理したデジタル活用によって解決を図る問題の分類ごとに、手段として用いられた主な要素技術を整理する。

A:プロジェクト内の活用において、A-1:施工出来形および工場製作物の検査効率化を図る目的では、施工出来形や工場製作物の形状を自動で取得する手段として、画像処理技術と3次元測量技術の活用事例があった。A-2:建築資材および工事現場全体の進捗記録・活用目的では、入退場管理におけるICカード、施工記録のためのRFIDやQRコード活用など、個体認証技術が活用されていた。また、工事現場内でモバイル端末等を使って各種記録を行う際、写真や入力情報と位置情報を紐づけるため、位置測位技術の活用や、入力支援のために音声認識技術の活用があった。その他業務活用では、建築材料を使った3Dプリント技術や、ICT建機などのハード技術との連携があった。

B:複数プロジェクトを俯瞰した活用では、B-1:稼働率分析に資する位置情報収集、安全装備の評価・改善に資する生理情報の収集目的で、各種センシング技術を用いて工事現場の状況をデジタルデータとして取得する試みが見られた。B-2:安全教材の定量評価に資する生理情報収集、技能伝承に資する動作分析目的では、XR技術を用いた新しい教育コンテンツがあった。その他では、AIを使ったビッグデータ分析などによって計画などのノウハウを学習させようとする試みがあった。

これら要素技術の詳細を以下に記す。さらに、民生用途で既に定着したもの、業務用途の中で建築工事において定着しているもの、他産業でのみ定着しているもの、どの分野でも定着していないもの、の4パターンに分けて整理する。市場への定着有無の判断基準としては、製品やソリューションの形で既に活用されているものを本研究では『定着済み』と判断し、その他を『未定着』とする。

A:プロジェクト内の問題解決

A-1:施工出来形および工場製作物の検査効率化

① 画像処理技術

民生用途で定着した技術としては、顔認証、カラー処理、フィルター処理、キャリブレーション、画像コード認識、文字認識（一般用語）などが用いられている。

業務用途で定着した技術としては、外観検査・不良品検品については、例えばコンクリート躯体のひび割れ検査など、明確な検出対象に対しては強みを発揮し、製品化されている。

他産業であれば、特徴点マッチング、立体復元、寸法計測、位置合せ、文字認識（専門用語）などは例えば製造業の検品システムやセキュリティ分野で製品化されている。

② 3次元測量技術

民生用途では定着した技術がない。

業務用途で定着した技術としては、建築工事ではトータルステーションなどの光波測量が 1980 年代から普及している。3 次元スキャン技術については、TLS

(Terrestrial Laser Scanner) と呼ばれる三脚固定式のレーザースキャナーについては、機器の性能がある程度成熟し、データを扱うソフトウェアも基本機能を有して完成度が高まっているため、主に敷地や建物外観を対象とした一般的な測量用途で実務適用されている。

他産業であれば、携帯端末搭載の LiDAR は民間の有志開発者によって多くのフリーアプリケーションが公開されており、ゲーム業界やエンターテインメント用途で活用が広がっている。ステレオカメラ方式は各種検査用途で、フォトグラメトリーについては航空測量分野で SfM¹⁰ (Structure from Motion) 技術が発達している。

定着していない技術としては、移動式レーザースキャナーに分類される機器が増えてきており、主にロボット制御の分野から発達した SLAM¹¹ (Simultaneous Localization and Mapping) 技術が応用されている。

A-2：建築資材および工事現場全体の進捗記録・活用

③ 個体認証技術

民生用途で定着した技術としては、1 次元バーコードや 2 次元バーコード (QR コードや AR マーカーなど)、交通系 IC カードやマイナンバーカードなどで使われる NFC 規格の RFID が既に一般社会で活用されている。

業務用途では、他産業であればその他規格の RFID が用いられている。例えば倉庫の在庫管理目的で長距離から非接触で読取ることができる UHF 帯や、電池を内蔵して自ら電波を発することができるアクティブタグなどが活用されているが、建築工事ではまだ普及していない。

定着していない技術としては、近年ではカメレオンコード¹²と言われる画像コードも用いられるが、他産業を含めても検証レベルで留まっている。

④ 位置測位技術

民生用途で定着した技術としては、GPS・みちびき・北斗といった衛星電波を使った測位技術が民生用途の携帯端末でも標準で準拠されており、業務でも地図や図面への位置記録用途で日常的に活用されている。

業務用途では、他産業であれば、各種電磁波や音波などを使った三角測量方式の位置測位技術が検証されている。例えば RFID、無線 LAN、赤外線、BLE¹³、UWB¹⁴、音波、

¹⁰ SfM (Structure from Motion) : 対象物を多くの視点から撮影した大量の画像を用いて、特徴点マッチングを用いることで自己撮影位置と姿勢を推定し、画像特徴点から 3 次元形状を復元する技術。古くは、海上で星の位置から自己位置を推定する航海技術が基礎になっていると言われている。

¹¹ SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) : 空間の中で連続的に取得された画像や点群データなどを用いて、フレームごとの特徴点マッチングを行うことで自己位置を推定し、環境地図を作成する技術。

¹² カメレオンコード : 複数の色が連なった画像コードであり、色の組合せや順番によってユニークな ID を割り当てるもの。

屋内 GPS¹⁵など、様々な周波数帯の電磁波・音波が用いられており、空間内に多数配置した基地局と受信機の距離から自己位置を割り出す方式は共通である。これらは事務所における従業員管理や工場やプラントにおける労働者や搬送ロボットの位置測位用途などで実用化されている。個人を特定せずに空間内の移動体検知などの目的では、不審者検知などの用途でレーダーや LiDAR といった測距センサーが実用化されている。車業界では、PDR¹⁶ (Pedestrian Dead Reckoning) と言われる空間側の基地局を用いない自己位置推定技術などが実用化されている。例えば GPS 電波を受信できないトンネル内などにおけるカーナビ利用のため、タイヤの向きや回転数によって自己位置を推定している。

⑤ 音声認識技術

民生用途では、一般用語の文字化については検索や機器制御の目的で一般的なスマートフォン用 OS・スマート家電などに標準で搭載されている。

業務用途では、他産業であれば専門用語を辞書化することで実用化されている。例えば卸売市場の競りや、公的な会議における発言記録などである。

A-3 : その他

⑥ 3次元プリント技術

民生用途で定着した技術としては、樹脂素材や石膏素材を使った 3D プリンターが市販されている。石膏素材であればカラー出力も可能である。

業務用途では、他産業であれば金属素材やセメント素材など、建築材料としての活用も期待される素材のプリンターも出現しており、海外を中心に住宅や橋梁の 3D プリント事例が報告されている。日本においては JIS などの規格や構造耐力上の課題などに対応すべく研究^[31]が進められている。

¹³ BLE (Bluetooth Low Energy) : 近距離無線通信規格 Bluetooth の拡張仕様の一つ。使用電波は 2.4GHz 帯。Bluetooth は規格によっては 100m 程度まで通信可能だが、BLE は通信距離を 15m 程度とし、通信するデータを 20 バイト程度に制限しているため、端末が低電力で動作することが特徴である。iOS などのモバイル端末で用いられる OS がこの規格に標準対応している。

¹⁴ UWB (Ultra-Wide Band) : 7.25-9.0GHz の周波数帯を用いる超広帯域無線通信。近接無線通信と比較して短く鋭い矩形波を用いることで、高精度な位置検出を可能とする。近年、BLE と同様に一般的なモバイル端末の OS が規格に標準対応した。

¹⁵ 屋内 GPS : JAXA が考案した IMES (Indoor Messaging System) と言われる屋内向けの位置測位技術。GPS と類似した信号を用いることで、民生用途の一般的な携帯端末を使った位置測位を実現。

¹⁶ PDR (Pedestrian Dead Reckoning) : 加速度、ジャイロ、地磁気、気圧センサーなどの組合せで、自身の移動方向と距離を推定し続ける歩行者自律航法技術。GPS を用いることができないトンネル内や地下などでの活用を想定されている。原理上、初期位置の指定が必須であり、移動中は累積誤差が蓄積する。

B：複数プロジェクトを俯瞰した問題解決

B-1：稼働率分析に資する位置情報収集、安全装備の評価・改善に資する生理情報の収集

⑦ センシング技術

民生用途で定着した技術としては、各種の環境センシングがある。温湿度センサー、光センサー、空気質センサー、振動センサーなどは一般家庭向けの家電などでも搭載されている。建築工事においても、例えば山留壁の変位をモニタリングするための歪みセンサーや、暑熱環境を把握するための温湿度センサー、近隣に対する環境配慮のための騒音・振動センサーなど、民生用途の製品の活用が広がっている。

業務用途では、他産業であれば、人体を対象とした生理センシング技術は医療や人間工学分野で実用化されている。映画産業やエンターテインメント産業ではモーションキャプチャ技術が定着している。

B-2：安全教材の定量評価に資する生理情報収集、技能伝承に資する動作分析

⑧ XR¹⁷技術

VR 技術や AR 技術を用いたヘッドマウントディスプレイは民生用途で広く普及しており、ゲームや映画鑑賞などの用途で使われている。建築工事においても、2.2. で述べた通り、安全教育目的では新しい教材コンテンツとして VR 技術や AR 技術を使った事故・災害の仮想体験製品が市販されており、厚生労働省など国からも一般に公開されている。

業務用途では定着した技術では、他産業であれば MR 技術が挙げられる。機器メンテナンスにおける遠隔支援や、工場技術者のトレーニング用途などで活用が進んでいる。建築工事においても、BIM などと連携した施工支援や測量技術と連携した墨出しレス施工などの用途検証が行われているが、実用化には至っていない。

⑨ 動作解析技術

民生用途、建築工事において定着した技術はない。

他産業における業務用途では、映画・ゲームなどのエンターテインメント業界において、CG に対して現実の人体の動きを重合せる用途で、モーションキャプチャが実用化されている。製造業では、作業者の動作を細分化し、所要時間を細かく計測する科学的管理手法^[32]が古くから実践されている。建築工事の技能労働者を対象とした研究では、建設作業を撮影した動画などを用いた作業分析手法が日本建築学会の指針^[33]となっているが、実務に定着していない。先端技術を用いた手法としては、視線解析、圧力・触覚解析などを組合せた研究が実施されているが、試行錯誤の段階である。

¹⁷ XR 技術：VR (Virtual Reality) 仮想現実、AR (Augmented Realit) 拡張現実、MR (Mixed Reality) の総称。それぞれの定義の違いについては諸説あるが、一般的には、VR は現実空間が見えない仮想世界のみ体験、AR は個人の視点で現実と仮想世界が重畳される体験、MR は複数の視点で現実と仮想世界がリアルタイムに共有される体験、として認識されていることが多い。

B-3：その他

⑩ AI 関連技術

民生用途では、生成 AI と言われるソリューションが急速に普及し、一般的な OS の検索エンジンやブラウザに標準で実装されている。業務利用も進んでおり、LLM(Large Language Models) とされる言語系の汎用モデルを企業クローズの環境で利用する動きが始まり、書類作成や社内情報の検索などで既に実用化されている。

他産業の業務用途に限って定着している技術としては、エキスパートシステムやニューラルネットワークもこの分野の研究と言え、業務用に特化したチャットボットや飛行機のオートパイロットなどが実用例として挙げられる。

以上のように抽出した要素技術の一覧を表 2-3 に示す。施工管理に係るデジタル技術は多様であるが、民生用途で普及したものと業務用途で定着したもの、他産業を含めても定着していないものが混在していることが分かる。民生用途で定着したものであれば、建築工事への適用を想定しても技術的な障壁はないと考えられる。業務用途については、他産業に限って定着している技術が多く、建築工事への適用には課題があることが考えられる。本研究では、第 1 章で整理したデジタル活用の各用途に対し、現時点で適していると考ええる要素技術を選定して、ケーススタディを実施する。

A：プロジェクト内の問題解決

A-1：施工出来形および工場製作物の検査効率化：3 次元スキャン技術（TLS¹⁸など）

A-2：建築資材および工事現場全体の進捗記録・活用

- ・新築工事における建材トレーサビリティの記録用途：個体認証技術（QR コードなど）
- ・工事進捗の記録用途：3 次元スキャン技術（TLS など）
- ・建物解体に伴う建材使用履歴の記録用途：3 次元スキャン技術（携帯端末用 LiDAR など）

B：複数プロジェクトを俯瞰した問題解決

B-1：稼働率分析に資する位置情報収集、安全装備の評価・改善に資する生理情報の収集

- ・労務・建設機械の稼働率の把握用途：位置測位技術（BLE など）
- ・安全装備の着用効果の可視化・評価用途：生体センシング技術（環境・生理センシングなど）

B-2：安全教材の定量評価に資する生理情報収集、技能伝承に資する動作分析

- ・安全教育用途：VR 技術、生体センシング技術（生理センシングなど）
- ・技能伝承用途：動作解析技術（動画ベースの作業分析など）

¹⁸ TLS (Terrestrial Laser Scanner)：地上型レーザースキャナーのこと。三脚据付型の 3 次元レーザースキャナーであり、スキャン位置を盛替えながら計測する方式の製品。

表 2-3 建築工事のデジタル活用に関わる主要素技術

要素技術の分類	定着した技術 (民生用途)	定着した技術 (業務用途 建築工事含む)	定着した技術 (業務用途 他産業のみ)	定着していない技術
①画像処理技術	<ul style="list-style-type: none"> 顔認証 カラー処理、フィルター処理 キャリブレーション 画像コード認識 文字認識 (一般) 	<ul style="list-style-type: none"> 外観検査、不良品検品 	<ul style="list-style-type: none"> 文字認識 (専門用語) 立体復元、寸法計測 特徴点マッチング 位置合せ 	
②3次元測量技術		<ul style="list-style-type: none"> 光波測量(トータルステーションなど) <u>3次元スキャニング(TLS)</u> 	<ul style="list-style-type: none"> <u>携帯端末搭載LiDAR</u> ステレオカメラ フォトグラメトリー(SfMなど) 	<ul style="list-style-type: none"> 3次元スキャニング(移動式レーザースキャナー)
③個体認証技術	<ul style="list-style-type: none"> 1次元バーコード 2次元バーコード (<u>QRコード</u>、ARマーカー等) RFID (NFCなど) 		<ul style="list-style-type: none"> RFID (アクティブタグ、UHF帯など) 	<ul style="list-style-type: none"> カメレオンコード
④位置測位技術	<ul style="list-style-type: none"> 衛星電波 (GPS、みちびき、北斗など) 		<ul style="list-style-type: none"> 測距センサー(レーダー、LiDAR) <u>三角測量方式</u>(RFID, 無線LAN, 赤外線, <u>BLE</u>, UWB, 音波, 屋内GPSなど) 自律航行方式 (PDRなど) 	
⑤音声認識技術	<ul style="list-style-type: none"> 一般用語の文字化 		<ul style="list-style-type: none"> 専門用語の文字化 要約、翻訳、議事録作成など 	
⑥3次元プリント技術	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂素材 石膏素材(カラープリント) 		<ul style="list-style-type: none"> 金属素材 セメント素材 	
⑦センシング技術	<ul style="list-style-type: none"> 環境センサー(温熱、光、空気質、振動、歪みなど) 		<ul style="list-style-type: none"> <u>生理センサー(心拍/心電、体表面温度、深部体温、発汗、活動量など)</u> 	
⑧XR技術	<ul style="list-style-type: none"> VR (Virtual Reality) : 仮想現実 AR (Augmented Reality) : 拡張現実 		<ul style="list-style-type: none"> MR (Mixed Reality) : 複合現実 	
⑨動作解析技術			<ul style="list-style-type: none"> モーションキャプチャ <u>動画ベースの作業分析</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 視線解析 圧力、触感解析
⑩AI関連技術	<ul style="list-style-type: none"> 生成AI (LLM(Large Language Models)、画像、音声、音楽、動画など) 		<ul style="list-style-type: none"> エキスパートシステム ニューラルネットワーク ディープラーニング 	

(凡例) 太字下線：本研究でケーススタディとして取り上げる要素技術

2.4.本章のまとめ

本章では、まず建築工事のデジタル活用に関わる過去の技術開発と、それに影響する社会的背景および一般の ICT 技術の変遷について、既往研究の調査を通じて整理した。建設分野では、2000 年代までは、一般社会で出現した先端技術をベースに、研究機関やゼネコンの研究所が独自システムを開発してきた状況が分かった。独自システムでの試行検証が繰り返された後、要素技術の成熟に伴い、業界ニーズが市販製品や業界共通のソリューションに反映されることで実務に定着してきた状況も読み取れた。2010 年代以降は状況に変化が見られ、それまで民間研究所が実施していた独自システムの開発を建設系のスタートアップ企業が担う動きが始まるとともに、先端技術の用途検証などは複数企業によるコンソーシアムを中心として業界が一体となって実施することで、建築工事への技術適用や検証サイクルが速まっている状況を報告した。一方で、適用された要素技術を見ると、製品レベルまで成熟して定着したものと、そうでないものが混在しており、それらが峻別されずに建築工事の実務で試適用が繰り返されている状況が読み取れた。

次に、異なる要素技術やシステム開発の変遷を、活用目的別に分類して変遷を整理した。その結果、開発された技術が実務に定着したケースと、定着せずに手段を替えて技術開発が繰り返されているケースが確認できた。定着したものは、社会的ニーズを背景に技術開発の当初から官民一体となって標準化・オープン化を見据えた活動が行われていたケース、当初から完成度の高い機器・ソフトウェアをベースとして開発されたケース、従来業務の電子帳票作成など建設系スタートアップ企業によって製品化されたケース、を確認できた。定着していないものは、施工管理業務の仕組みを変革しようとする取組みや、複数プロジェクトを俯瞰したデータ活用目的など、従来業務の単純な電子化に留まらない目的であり、要素技術や開発システムの形を変えて繰り返し研究が続けられていた。デジタル活用の普及を阻害する要因を文献から読み取ると、技術適用までの準備手間・技術適用中の管理変更手間・システムの完成度不足・費用対効果の不足/不明確などが挙げられていたが、阻害要因を整理する目的でのケーススタディが行われた事例がないため、本研究において課題整理する意義があることを述べた。

そして、用いられた要素技術を活用目的別に峻別し、その中から、本研究のケーススタディにおいて題材として取り扱う要素技術を選定した。

次章からは、要素技術の実務適用を阻害する要因に対するケーススタディを実施することで、課題整理を行う。

参考文献

- [1] 松田章宏，嘉納成男：建築生産における IT 化の動向に関する研究：1960 年から 1999 年までの IT 化の変遷と技術開発の要因，日本建築学会関東支部研究報告集，日本建築学会，第 83 巻，pp.521-524，2013.3
- [2] 山崎雄介：管理技術の 30 年，第 30 回建築生産シンポジウム記念企画「建築生産の 30 年そしてこれからのために」，第 30 回建築生産シンポジウム論文集，日本建築学会建築社会システム委員会，pp.287-292，2014.7
- [3] 眞片山美穂：建築生産における自動化・ロボット化技術の変遷と現状，計測と制御，コロナ社，第 55 巻，第 6 号，pp.501-506，2016.6
- [4] 三根直人：生産性向上のためのマネジメント技術，コンクリート工学，日本コンクリート工学会，Vol.55，No.9，pp.852-858
- [5] 曾根巨充：建築生産情報のマネジメント技術に関する研究 鉄筋工事における設計・加工・施工の生産情報の連携に着目した技術的解決方策について，芝浦工業大学学位論文，2021.3
- [6] 戸倉健太郎，春山信一郎：建築施工管理業務シミュレーションに基づく ICT ツール選択手法，日本建築学会計画系論文集，日本建築学会，第 88 巻，第 811 号，pp.2567-2576，2023.9
- [7] 李 永鎬，ほか 4 名：ニューラルネットワークを用いた成長型躯体数量概算モデル，日本建築学会計画系論文集，日本建築学会，63 巻，第 509 号，pp.173-180
- [8] 呉 愚如，ほか 3 名：メッシュデータによる新用途地域指定における支援エキスパートシステムの開発に関する研究，日本建築学会計画系論文集，日本建築学会，63 巻，第 512 号，pp.191-198
- [9] 上之藺隆志：第 2 フェーズを迎えたアクションプログラム，建築の技術 施工，彰国社，No.413，pp.24-27，2000.3
- [10] 板谷俊郎，ほか 5 名：IC カードを用いた現場管理システムの現場試行実験，1995 年度日本建築学会大会（北海道）学術講演梗概集，日本建築学会，pp.415-416，1995.8
- [11] 嘉納成男：バーチャル建設現場システムの開発・建築工事の可視化シミュレーション，建築生産シンポジウム，pp.95-102，2003.07
- [12] 香月泰樹，半田雅俊：IC タグを利用した現場管理システムの開発と適用，2010 年度日本建築学会大会（北陸）学術講演梗概集，日本建築学会，pp.103-104，2010.7
- [13] 平林裕治，高野雅夫：配筋検査システムの開発と現場適用：（その 1）システムの概要と効果，2003 年度日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集，日本建築学会，pp.1107-1108，2003.7
- [14] 金炯垠，蔡成浩，嘉納成男：建築生産における VR 技術の活用化に関する研究ーリアル画像のシステムへの応用ー，第 26 回情報・システム・利用・技術シンポジウム 2003，日本建築学会情報システム技術委員会，pp.161-164，2003.12
- [15] 蔡成浩，中村隆寛：建設機械の接触災害の防止における無線 LAN 装置の適用，2010 年度日本建築学会大会（北陸）学術講演梗概集，日本建築学会，pp.121-122，2010.7

- [16] 蔡成浩, 嘉納成男: 建築工事における作業内容の推定に関する研究-作業モニタリングシステムの設計-, 2004 年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演梗概集, 日本建築学会大会, pp. 1305-1306, 2004. 8
- [17] 中村隆寛, 蔡成浩: 建築作業における生産性に関する研究-作業姿勢の分類と作業負荷の評価-, 2004 年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演梗概集, 日本建築学会, pp. 1307-1308, 2004. 8
- [18] 池田雄一, ほか 3 名: 配筋自動判定システムの開発と現場検証実験, 大林組技術研究所報, 大林組, No. 78, pp. 1-6, 2014. 12
- [19] 妹尾悠貴, ほか 4 名: 3 次元レーザースキャナを用いた建築物の計測手法に関する研究その 4: 屋上スラブを対象とした点群データ測定作業手順と活用事例, 2020 年度日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集, 日本建築学会, pp903-904, 2020. 7
- [20] 石田航星, ほか 6 名: 内装部材のプレカット化のための 3 次元レーザースキャナを用いた計測と生産設計の手法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 日本建築学会, 第 78 巻, 第 688 号, pp1355-1363, 2013. 6
- [21] 室井一夫, ほか 7 名: BIM 連携による鉄骨梁貫通孔補強の自動計算その 1 鉄骨梁貫通孔補強につなげるために必要な情報, 2017 年度日本建築学会大会 (中国) 学術講演梗概集, 日本建築学会, pp1307-1308, 2017. 7
- [22] 嘉納成男, 三根直人: コンピュータによる工事計画方法に関する研究, 1986 年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演梗概集, 日本建築学会, pp593-594, 1986. 8
- [23] 高本孝頼, 足達嘉信: オブジェクト指向 3 次元建物モデルによる IFC モデルサーバの必要性と構築技術, 第 27 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 2004, 日本建築学会情報システム技術委員会, pp. 13-18, 2004. 12
- [24] 参考文献[11]前掲書, pp. 95-102
- [25] 参考文献[9]前掲書, pp. 24-27
- [26] 参考文献[12]前掲書, pp. 103-104
- [27] 参考文献[10]前掲書, pp. 415-416
- [28] 参考文献[18]前掲書, pp. 1-6
- [29] 参考文献[15]前掲書, pp. 121-122
- [30] 大林組: “東京スカイツリー® のつくり方 「複雑な形状の鉄骨を精度よく建てる」”, 2011. 7
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/skytreedetail17_20110715.html (accessed 2024. 1. 11)
- [31] 大林組: “3D プリンター実証棟「3dpod™」が完成”, 2023. 4
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230425_1.html (accessed 2024. 1. 11)
- [32] フレデリック・テーラー: 新訳科学的管理法, ダイヤモンド社, 2009. 11
- [33] 日本建築学会: 作業能率測定指針, 丸善, 1990. 1

图版出典

表 2-1 筆者作成

表 2-2 筆者作成

表 2-3 筆者作成

第3章 施工管理目的のデジタル活用

- 3.1. 本章の目的と構成
- 3.2. 建築工事における点群データの活用方法
- 3.3. RC造における既存と新築の整合調整
- 3.4. 鉄骨部材の工場製品検査
- 3.5. 伝統木造における建築材料の品質検査
- 3.6. 本章のまとめ

参考文献

3.1.本章の目的と構成

はじめに

本章では、要素技術の実務適用を阻害する要因に対するケーススタディとして、主としてプロジェクトにおける業務活用を想定し、施工出来形および工場製作物の検査効率化を題材として取り上げる。

施工管理業務は、序章で述べた通り、建築物が設計された通りに施工されるよう工事計画・管理を行うことであり、施工管理者の日々の活動として設計仕様と施工出来形の照合が重要である。

この業務に関わる問題として、第1章では外的環境変化に起因する項目として建設労働者の不足、不祥事や社会変化によって増える関連書類と規制による実務担当者の疲弊、今後の残業規制による実質作業時間の削減を挙げた。さらに、建築工事の問題として、他産業と比較して低い労働生産性を挙げた。本章では、これら問題の解決アプローチとして、デジタル技術による業務の省人化に着目する。施工出来形および工場製作物の検査を省人化するための方策としては、要素技術として3次元スキャン技術を用い、現状は人間が目視や手計測で実施している形状や寸法検査の自動化を考えた。

配筋検査を例に挙げると、設計仕様としては、鉄筋の径・長さ・角度・本数・位置・あき間隔といった寸法に関わる仕様と、鋼種など物性に関わる仕様が指示されている。施工出来形の確認方法としては、物性に関しては施工中の現地で測定することができないので、鉄筋へ一定間隔で刻印されている鋼種マークを目視確認するとともに、ミルメーカーから納品されるメタルタグなどを実績情報として、設計図書や施工計画書と照合している。寸法については、工事現場の現地で鉄筋を直接測定する。この際、工事現場内の目の前にある鉄筋がどのように組み立てられていれば正しいのか、一つ一つの位置や形状を明確に記載された指示書などは存在しない。部位ごとの主筋本数やあき間隔などは構造図に明確に記載があるが、その他補助筋などは「D10@100」などの間隔表記であり、定着長さは特記仕様として「 $La=20d$ 」「軽量コンクリートの場合は表の値に5dを加えたものとする」「1節半以上かつ150mm」「これらの中で最も大きい数値を採用する」などの記載があり、ケースごとに各担当者が計算した上で照合して

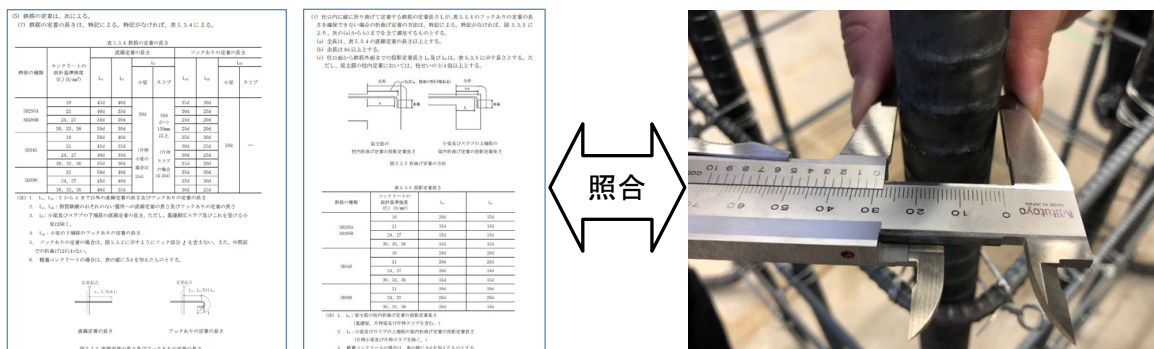


図 3-1 配筋検査における予実照合のイメージ

いる。また、かぶり厚などのように、鉄筋だけでなく、コンクリート打設後の形状や後工程で取り合う部材まで考慮した寸法計測も必要となる。配筋検査における計画と実績の照合イメージを図 3-1 に示す。

このように、検査業務においては、計測作業そのものだけでなく、比較対象となる形状や・位置・寸法に関する明確な指示書がないことも、業務効率化の妨げとなっている。各部材を現地でどのように組み立てるのか、正解情報はゼネコンの現場監督や協力会社の職長が各々、図面や特記仕様書、標準仕様書、質疑応答書などを読み解いて計算し、公の検査記録に表れない細部を自主検査しているため、多大な手間を要している。

本章では、これら検査の省人化を目的としたデジタル活用のケーススタディとして、3次元スキャン技術によって取得する点群データの実務活用を題材とする。

既往の研究

松田^[1]は鉄筋専用の BIM ツールを独自開発し、検査支援機能も含めて実装している。このツールでは構造解析ツールを通じて作成された各部材の断面情報を用いて鉄筋の BIM オブジェクトを自動生成し、標準仕様に従って部材一般部の納まりを自動整列する。パネルゾーンを中心として人間による納まり検討を支援する機能や、配筋検査の記録機能も実装した。曾根^[2]は、既存の BIM ツールと鉄筋専用 CAD をカスタマイズし、鉄筋の BIM オブジェクトを自動生成・配置調整するシステムを構築した。さらに、計画段階にシステム内で配筋状況を仮想的に自動検査する機能を実装し、実施段階ではその通り配筋する運用とすることで、配筋検査の負担軽減を図っている。これらは主として計画の高度化を目的とした技術開発事例であり、出来形の確認は従来と同様に人間による目視を前提としている。

蔡^[3]、池田^[4]は、検査作業の効率化を対象とした技術開発の事例を報告している。具体的には、画像処理技術を用いて配筋状況の写真画像から鉄筋径とあき寸法を自動計測、判定しようとする試みである。しかし、画像処理の対象は、配筋全体の内、現状では技術的な制約で表層部の測定に限定されることが課題として挙げられており、二段筋など部材の深部、定着部分、かぶり厚など、対象外となっている検査項目も多い。妹尾^[5]は、屋上スラブの施工後に 3次元レーザースキャナーを使用し、勾配や不陸の品質確認に活用した事例を報告している。しかし、機器の取扱いや取得データのソフトウェア操作の難易度が高く、実務担当者が自ら取り扱うことは難しいことを指摘しており、この事例においても技術研究所の研究員が技術を適用した。このように、検査行為の省力化に直結する技術開発では、実務適用のためには様々な課題が存在し、技術の普及には至っていない。

要素技術の概要

本章で主として活用する要素技術は 3次元スキャン技術である。古くは、製造業などのリバーシエンジニアリング目的で使われていたプローブ方式のアーム式 3次元測定器（図 3-2）が起源であると言われている。近年はレーザ測距（ToF（Time of Flight）・位相差など）、近距離電磁波（赤外線など）、パターン光投影、画像処理（SfM（Structure from Motion）、ステレオカメラなど）、その他、多くの測距原理を用いた 3次元スキャンが可能となっている。

測定方法も、以前は TLS (Terrestrial Laser Scanner) と呼ばれる三脚固定方式が主流であったが、近年は航空測量や MMS (Mobile Mapping System) といった移動体と一体型の技術も普及している。原理ごとに整理した 3 次元スキャン技術の一覧を表 3-1 に、測定解像度と対象範囲の関係を図 3-3 に示す。このように、測定原理によって性能が多様であるため、ユーザーは活用目的に応じて技術を選択している。本章の検査目的では、建物のサイズと、品質検査に求められる寸法精度が考慮され、10m 以上の範囲を数mm精度で 3 次元的に測定が可能である TLS (以下、3 次元レーザースキャナー) の活用が適している。3 次元レーザースキャナーの測距原理と、取得する点群データのイメージを図 3-4 に示す。

以上のように、点群データを扱うためにはハードおよびソフトの専門知識を要求される点が技術普及の障壁の一つとなっていると考えられるため、本章では、実務担当者がデジタルデータを扱う際のスキルに関する障壁に着目する。

本章の構成

まず 3.2. では、建設分野における施工段階における点群データの活用状況をアンケート調査によって整理し、主にソフトウェア操作に関わる合理的なワークフローを考察することで、技術普及の阻害要因となっているタスクを抽出する。3.3.、3.4. および 3.5. では、提案したワークフローに従って点群データを施工管理の実務で活用するケーススタディを実施することで、普及の阻害要因を整理する。まず、考えられる阻害要因の一つとして、技術適用するために実務とは別に必要となる作業を把握するため、3.3. では RC 造における既存建物と新築建物の整合調整を題材とする。次に、建築特有の検査項目へ対応するために必要となる高度なソフトウェア操作を把握するため、3.4. では鉄骨部材の工場検査を題材とする。最後に、実務担当者自身によるデジタル活用を阻害する要因を把握するため、3.5. では伝統木造建築で使用する木材調達時の受入検査を題材とする。3.6. ではこれらケーススタディを通じて明らかになった阻害要因を整理する。

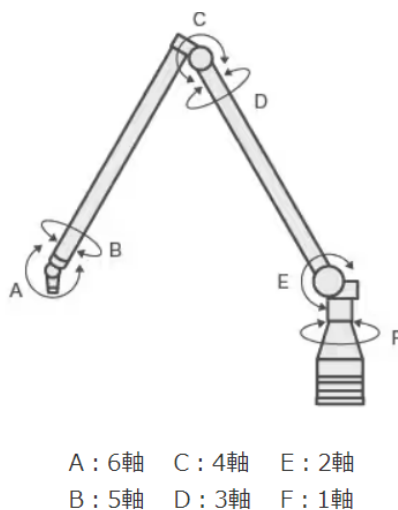


図 3-2 プローブ方式アーム式 3 次元測定器のイメージ

表 3-1 測距原理ごとの 3 次元スキャン技術

		測距原理		
		レーザー測距方式 (ToF、位相差など)	近距離電磁波 (赤外線など) ・パターン光投影方式	画像処理方式 (SfM、ステレオカメラなど)
測定方法	三脚固定式	<ul style="list-style-type: none"> ・トータルステーション ・2次元/3次元LiDAR ・3Dレーザースキャナー ・アーム式スキャナー 	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易スキャナー 	—
	移動式 (車載、ハンドヘルドなど)	<ul style="list-style-type: none"> ・航空測量 (レーザー) ・MMS ・ハンドヘルドスキャナー ・バックパック型スキャナー 	<ul style="list-style-type: none"> ・携帯端末搭載LiDAR ・ハンデイスキャナー 	<ul style="list-style-type: none"> ・航空測量 (カメラ) ・ステレオカメラ ・フォトグラメトリー

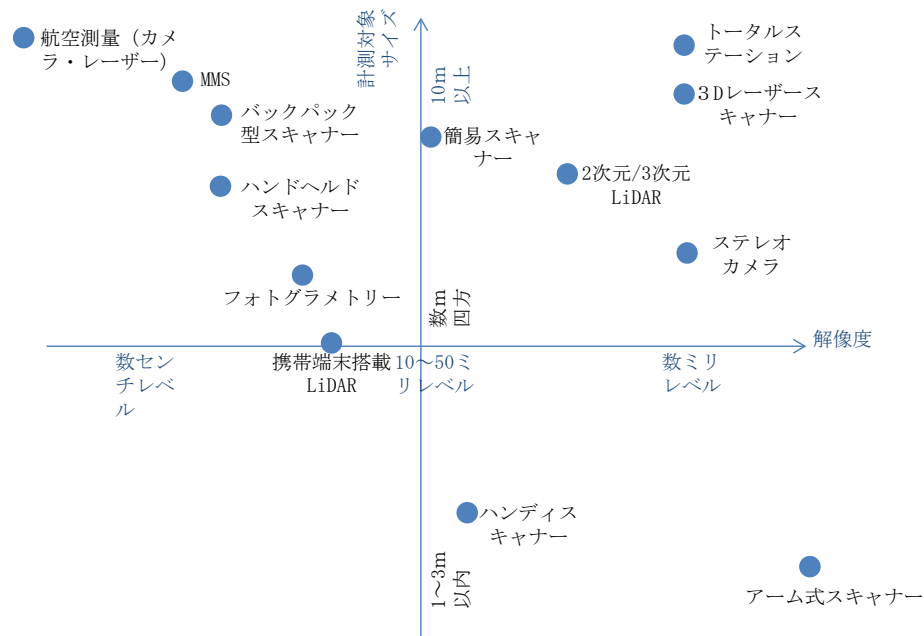


図 3-3 測定解像度と対象範囲の関係

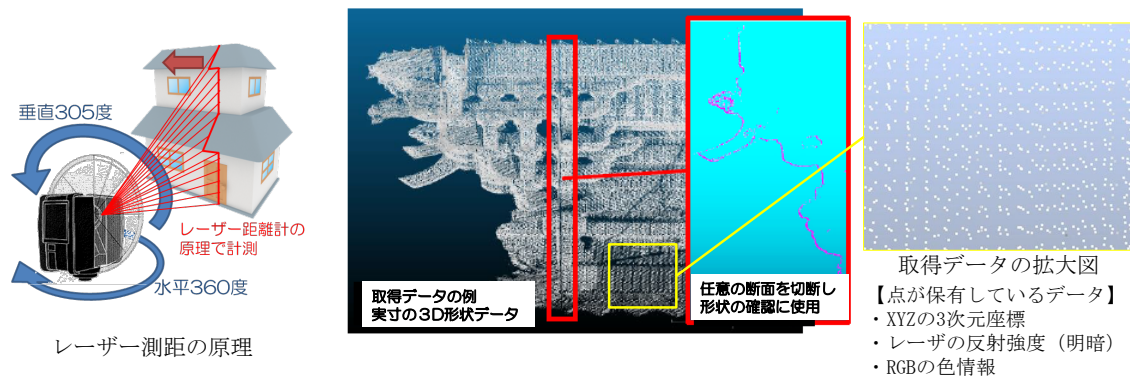


図 3-4 3次元レーザースキャナーの原理と点群データのイメージ

3.2.建築工事における点群データの活用方法

3.2.1.建設分野における点群データの活用用途の調査

実務で点群を活用した事例の報告はまだ少ない。その原因の一つとして、筆者らは、点群データの処理方法の煩雑さに着目した。実際のプロジェクトで点群を活用する場合、建設現場で扱う点群データは、複数の計測点で撮影した点群を合成してひとつの空間データとする。そのデータを利用する目的によって、精度や時間、費用等の制約条件が異なるため、さまざまな処理を加えていく。しかし、ソフトウェアの機能が多様であり、データ処理手順が明確になっていないため、所定の要求を満たさない場合も少なくない。

そこで本節では、建築分野で点群活用が期待されているニーズと、それらに対する制約条件や必要リソースを整理するため、アンケート調査を実施した。そして、多様な活用目的に共通して必要なデータ処理方法に着目し、その処理手順を検討する。

まず、調査の対象は、建設会社に所属し、実務で3次元スキャン技術を活用している有識者とした。調査数は20名であり、所属は総合建設会社10社および設備専門工事会社1社、職種は設計・内勤技術支援部門・工事現場とした。調査方法は、記入式のアンケートとし、項目は用途、使用者、要求条件、点群データの加工編集方法などに関する以下12種とした。

- ①活用用途 ②活用者の職能 ③建築/設備 ④新築/改修 ⑤精度 ⑥時間
- ⑦計測頻度 ⑧費用 ⑨使用機器⑩使用ソフトウェア ⑪作成する成果物
- ⑫その他工夫点、問題点等の自由記述

調査の結果、20名から22種の活用用途が回答された（表3-2）。活用用途ごとの回答内容を表3-3に整理した。活用用途の分野を見ると、まず新築/改修工事の区別では、新築工事が8項目、改修工事が12項目、新築・改修工事の区別がないものが2項目であった。建築/設備では、建築が15項目、設備が6項目、建築/設備の区別がないものが1項目であった。このように、幅広い分野で3次元スキャン技術が活用されていることが分かった。

一方、要求条件を見ると、要求される精度が $\pm 5\text{ mm}$ 未満のものが9種、 $\pm 5\sim 10\text{ mm}$ のものが10項目、 $\pm 10\text{ mm}$ を超えて許容されるものが3種であった。なお、これらの閾値は、使用される計測原理の違いによる限界精度を参考に設定した。例えば、三脚固定式の3次元レーザースキャナー（以下、固定式レーザースキャナーと呼ぶ）では $\pm 5\text{ mm}$ 程度、赤外線等を使ったデブスカメラでは $\pm 10\text{ mm}$ 程度が一般的な限界精度である。スキャンから成果物をアウトプットするまでの許容時間を見ると、当日中が10種、1週間以内が6種、1週間以上で許容されるものが6種であった。

次に、アンケート結果から点群データの加工編集を通じて用いられているデータ処理方法を推測し、活用用途ごとに使用されているものを表3-4に整理した。列記したデータ処理方法は

32種類である。レジストレーションを除き共通して使用されるものはなく、組み合わせも多用であることが分かる。一般的に使用されている主な点群関連ツールの対応状況を調べると全てのデータ処理に対応した製品はない。回答には11種のソフトウェア名があり、ユーザー

表 3-2 アンケート結果（活用用途の一覧）

No.	用途
1	CFD解析のモデル作成
2	歴史的建造物の造作を石膏型取りの代わりに 3Dプリント
3	新築施工時、山留残置する既存地下外壁の位置を確認申請図に反映
4	BCP対策として、敷地周辺への防水壁構築における既存工作物との調整
5	敷地、建物外観の点群モデルと新築BIMモデルを重ね合わせて工事計画に活用
6	耐震工事における実測に基づいた鉄骨計画・発注
7	バーチャル現地調査(搬出入経路+改修エリアの点群データ)
8	設備改修工事における既存建物・設備の実測に基づいた製作物発注
9	設備改修工事における既存建物・設備と新築BIMモデルの干渉チェック
10	躯体残置で仕上・設備のみ改修する場合の既存構造図作成
11	スラブコンクリート打設時に表面平滑度をヒートマップ表示、押え作業の指示
12	受入検査における寸法・形状に関わる検査
13	断熱ウレタン材の吹付厚み管理
14	既存構造物と新築構造物の干渉チェック、解体範囲の検証
15	設備熱源更新工事における既存機械・配管類の実測に基づいた施工方法・手順検討
16	既存建物に接続する新築建物の施工計画に利用
17	工場における製品検査寸法・形状に関わる検査
18	新築建物の骨組みの完成検査、現状保存
19	新築建物の初期設計時における敷地レベル調査、既存構造物等の調査
20	将来の設備改修工事受注を想定した既存機械室等の空間情報記録
21	施工中作業所場内の日々の出来形把握、記録
22	設備改修工事における既存天井伏図の作成

表 3-3 アンケート結果（活用用途ごとの回答内容一覧）

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
要求精度	±10mm	±1mm	±10mm	±3mm	±5～10	±1～10	±3mm	±3mm	±3mm	±30mm
許容時間	1週間程度	1か月程度	1週間程度	2週間程度	1か月程度	1か月程度	1週間程度	2週間程度	1週間程度	1か月程度
許容費用	20万円	30万円	20万円	30万円	20万円	20万円	20万円	50万円	20万円	50万円
ニーズ保有者	設計	施工 (作業所)	施工 (内勤)	施工 (作業所)	施工 (作業所)	施工 (作業所)	施工 (内勤)	設計	設計	設計
建築/設備	設備	建築	建築	建築	建築	建築	両方	設備	設備	建築
新築/改修	両方	改修	新築	改修	改修	改修	改修	改修	改修	改修
頻度	1回	1回	数回	1回	1回	1回	1回	1回	1回	1回
成果物	サ-フェス	ソリッド	ポリライン	差異寸法、色分け図等	差異寸法、色分け図等	差異寸法、色分け図等	点群データ	BIMモデル	差異寸法、色分け図等	差異寸法、色分け図等
使用機器	固定式レーザースキャナ・フォトグラマトリ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
±1mm	±1～数mm	±3mm	±10mm	±10mm	±10mm	±1mm	±10mm	±30mm	±10mm	±50mm	±10mm
30分以内	1日程度	1日	1週間程度	1日	1日	1日	1日	1日	1日	3時間	1週間程度
5万円/日	20万円/日	5万円/日	50万円	10万円	10万円	5万円/日	10万円	10万円	10万円	数千円/日	20万円
施工 (作業所)	施工 (作業所)	施工 (作業所)	施工 (作業所)	設計	施工 (作業所)	施工 (作業所)	施工 (作業所)	設計	設計	施工 (作業所)	施工
建築	建築	建築	建築	設備	建築	建築	建築	建築	設備	建築	設備
新築	新築	新築	改修	改修	新築	新築	新築	両方	改修	新築	改修
打設毎	検査毎	フロア毎	複数回	1回	1回	検査事	1回	1回	1回	毎日	1回
平滑度色分け図等	検査帳票	検査帳票	外形寸法	点群データ	BIMモデル	外形寸法	点群データ	外形寸法	BIMデータ	差分の色分け図等	天井伏図
固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	固定式レーザースキャナ	ドローン携帯端末のLiDAR	移動式スキャナ	ドローン	固定式レーザースキャナ

が用途によって複数のツールを使い分けていると推測される。自由記述にもソフトウェアの使い分けやスキル習得に苦労している記述があった。

具体例を挙げると、表 3-2No. 3 の「新築施工時、山留残置する既存地下外壁の位置を確認申請図に反映」用途では、点群データのレジストレーションやローカリゼーションといった処理を行うためには点群処理専門の市販ソフトウェアが必要で、そのデータを使って図面を作成するためには建築系の BIM ツールや 2 次元 CAD を使用しなければならず、関係者間でこれら成果物を共有するためには無償ビューアー等を活用してデータを配布する必要がある。

以上より、建設分野の多様な用途に対して一般的な実務担当者が点群を扱うためには、以下二つの運用的な障壁があると推測される。一つ目は、必要なデータ処理の種類が多様であり、

表 3-4 アンケート結果（主なソフトウェア機能と活用用途の関係）

データ処理	ニーズNo.																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
レジストレーション	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
外れ値処理	○	○				○		○		○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○
スムージング	○	○				○		○		○	○	○	○		○		○		○			○
間引き処理	○	○					○	○		○	○	○			○		○		○			
不要点の削除	○	○				○	○	○		○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	○
法線計算	○	○				○		○		○		○			○		○		○			○
メッシュモデリング	○	○				○		○		○		○			○		○		○			○
サーフェスマデリング	○	○																				
ソリッドモデリング	○	○																				
ポリライン描画			○							○		○					○		○			○
断面切断			○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○		○
ローカリゼーション			○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○		○	○	○	○	○
カタログ品近似								○	○						○							○
中心線付与								○	○						○							○
包絡処理	○																					
ポリゴン数削減	○	○				○		○		○		○					○		○			○
形状反転		○																				
面再構築		○				○		○				○			○		○		○			○
最外部分抽出			○																			
図面重畳			○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○			○
3Dモデル重畳			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○
寸法生成			○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○			○
図面作成			○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○			○
差異比較・可視化			○	○	○		○		○		○	○		○	○	○	○	○	○		○	
展開面認識										○					○			○				○
展開ビュー生成										○					○			○				○
属性付与								○	○						○							○
数量算出								○				○	○	○	○		○				○	
数量等リスト作成								○														
検査等記録帳票作成							○					○	○				○					
中間ファイル形式出力	○	○				○		○				○					○	○		○		
データショート化												○					○				○	

単独のソフトウェアで完結する場合も少ないため、用途に応じたデータ処理の手順の計画が難しい点である。二つ目は、点群データに特有のデータ処理が多いため、スキルの習得に時間が掛かる点である。そこで、多様な用途に適応できる手順を分析し、得られた結果を組み込んだデータ処理プログラムを用いて、分析結果の有効性を検証する。

3.2.2.ワークフローの合理化

洗い出した 32 種のデータ処理タスクを対象に、理想的な手順を分析する手法として、Design Structure Matrix（以下、DSM）を採用した。DSM とは業務の流れをマトリクス形式に整理し、手戻りなどの問題を可視化・分析する手法^[6]である。具体的には、業務をタスク単位で細かく分解し、マトリクスの行・列に同じ項目を記載した上で、タスク同士で工程や入出力の依存関係があるものをチェック入力する。対角線の左下のマークは上流から下流へ進行している業務の流れを意味し、対角線の右上のマークは手順の逆転を表す。

今回は、32 種のデータ処理タスクをマトリクス化し、タスク同士で入出力に依存関係があるものに『1』を入力した。例えば、工程 B の前工程として必ず A が必要な場合、B 行 A 列に『1』を入力する。このマトリクスを使い、タスクを手戻りのない順番に整理する。具体的には、①並べ替え：反復作業を減らす（『1』を左下に集める）②パーティショニング：関係性の深いタスク同士を固める（『1』を対角線付近に固める）、の 2 つを実施する。以上の方法で整理された結果を表 3-5 に示す。

パーティショニングの結果、下記に述べる 3 つの関連性の深いタスク群がグループ化された。

- レジストレーション・外れ値処理・ローカリゼーション・スムージング
- 不要点の削除、断面切断
- 断面切断、メッシュモデリング、法線計算、サーフェスモデリング、ソリッドモデリング

その他のタスクは、タスク間の順序をループすることがなく、順序立って処理できるものである。また、対角線に接したセルに「1」の無いタスク同士は、並行作業が可能なものである。例えば、表 4 中の 14 と 16 はどちらも点群データから線分を生成する操作であるため、どちらを先に実施しても互いの結果に影響がない。

この結果から、点群データの加工タスクを 4 つに分類した。

- ①前処理工程：レジストレーション～スムージング
- ②チェック工程：間引き処理～差異比較、可視化
- ③モデリング工程：不要点の削除～ソリッドモデリング
- ④アウトプット工程：ポリライン描画～ダッシュボード化

組織・体制面から考察すると、①と③については、それぞれのタスク群の関係性が深く、手戻りも発生しやすい工程であるため、同一の人物やチーム内で対応する方が良いと考えられる。②と④については、直列で進捗しやすい工程であるため、タスクを切り分け、複数の人物やチームで手分けをすることができると考えられる。また、①～④は最も合理的と考えられる手順に整理されたものなので、この順番を入れ替えた場合、工程や成果物品質に何らかの悪影響が生じる可能性が考えられる。

ソフトウェアの機能として考察すると、①と③それぞれのタスク群が一つのソフトウェア内で対応されていると、ユーザーにとって扱いやすいと考えられる。②と④についても、手順が近いタスクが一つのソフトウェアに固まっているほど良いと言える。

3.2.3.データ処理の効率化・自動化に関する手法提案とシステム開発

次に、データ処理を効率化もしくは一部を自動化する手法を提案する。前章で示した加工タスクグループの内、グループ①前処理工程および②チェック工程については、分野を問わず用いられる汎用的な加工タスクが多く、既に市販ソフトウェアに効率化・自動化機能が備わっているものが多い。一方、グループ③モデリング工程および④アウトプット作成については、建築分野特有の加工タスクも多く、それらは市販ソフトウェアでは対応されにくい。そこで今回は、グループ③④から1つずつ建築分野特有の加工タスクを選定し、CAD操作を効率化・自動化する手法を提案する。

表 3-5 アンケート結果

PARTITIONED DSM [Needs Updating!]		レジストレーション	外れ値処理	ローカリゼーション	スムージング	間引き処理	カテゴリ品近似	中心線付与	最外部分抽出	図面重量	3Dモデル重量	差異比較、可視化	不要点の削除	断面切断	メッシュモデリング	法線計算	サーフェスマデリング	ソリッドモデリング	ポリライン描画	包絡処理	展開面認識	展開ビュー生成	属性付与	数量算出	寸法生成	ポリゴン数削減	面再構築	形状反転	図面作成	数量等リスト作成	検査等記録帳票作成	中間ファイル形式出力	ダッシュボード化
		1	3	2	4	5	13	14	16	17	18	19	6	7	9	8	10	11	12	15	20	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	28	32
レジストレーション	1	1	1	1	1																												
外れ値処理 ①	3	1	3	1	1																												
ローカリゼーション	2	1		2	1																												
スムージング	4	1		1	4																												
間引き処理	5	1		1		5																											
カテゴリ品近似	13	1	1	1	1	1	13																										
中心線付与	14	1	1	1	1	1	1	14																									
最外部分抽出 ②	16	1	1	1	1	1			16																								
図面重量	17	1		1						17																							
3Dモデル重量	18	1		1							18																						
差異比較、可視化	19									1	1	19																					
不要点の削除	6	1		1									6	1																			
断面切断	7	1		1										7	1	1	1	1	1														
メッシュモデリング ③	9	1	1	1	1	1	1							1	1	9	1	1	1														
法線計算	8	1	1	1	1	1								1			8																
サーフェスマデリング	10	1	1	1	1	1	1							1	1		1	10															
ソリッドモデリング	11	1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1	11														
ポリライン描画	12	1		1										1	1	1		1		12													
包絡処理	15																			1	15												
展開面認識	20	1	1	1	1	1								1								20											
展開ビュー生成	21																						21										
属性付与	22	1	1	1	1	1	1							1		1	1	1	1					22									
数量算出	23	1	1	1	1	1		1	1					1	1	1	1	1	1	1					23								
寸法生成	24	1	1	1	1	1		1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1						24							
ポリゴン数削減 ④	25																1	1	1								25						
面再構築	26																1	1	1									26					
形状反転	27	1		1										1		1	1	1											27				
図面作成	29	1		1					1	1	1											1	1	1						29			
数量等リスト作成	30											1											1	1	1	1				1	30		
検査等記録帳票作成	31	1		1					1	1	1													1	1	1	1			1	1	31	
中間ファイル形式出力	28	1		1										1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	28	
ダッシュボード化	32	1		1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	32

相互の関連性が深いタスク群

グループ③モデリング工程：断面切断の効率化・自動化

建設分野では、多くの業務で設計図や施工図といった図面を介して関係者間がやり取りをする習慣がある。これら建築図面は、平面図・天井図・立面・展開図・断面といった決まった方向で切断されている。そのため、点群データを活用する場合も、まずは同様の方向で切断したうえで、様々なアウトプットを作成することが多い。

一般的な CAD ツールで点群データを断面切断する場合、以下のような操作が必要となる。点群データは取得時に座標系が定まっておらず、任意の方向に傾いているため、まずは水平垂直方向に回転・整列する。その上で、切断面ごとに正対した表示画面を作成する。点群データは一見して平面に見えても、レーザー測距の原理上、必ず±数mm幅でばらつきのあるデータであるため、水平・垂直・正対といった方向を人間が決めるのは手間を要している。

そこで今回は、まず、点群データを水平・垂直方向に整列する自動化手法を考案した。建築分野で扱う点群データは、業務で要求される精度を考慮すると、固定式レーザースキャナーで取得するが多い。多くの固定式レーザースキャナーでは傾きセンサーが搭載されており、鉛直方向の傾きはデータ取得時に正確に補正される。そのため、平面座標系の水平・垂直方向のみを自動で整列することとした。具体的には、上記 2 次元平面上に投影した点群データを用い、バウンディングボックスを生成する。バウンディングボックスとは、2 次元図形の最外形を囲む矩形の境界線である。バウンディングボックスの周長が最短になる方向が、最も点群データが水平・垂直に整列した方向であると定義し、自動で回転させる。次に、建築図面と同様の断面を自動生成する。建築図面として用いられる立面・断面は、整列後のバウンディングボックス各辺を軸に垂直方向へ正対したビューと一致していることが多い。そこで、レーザー測距の誤差を考慮し、バウンディングボックス各辺±5 mm厚の表示ビューを自動生成する。（図 3-5）

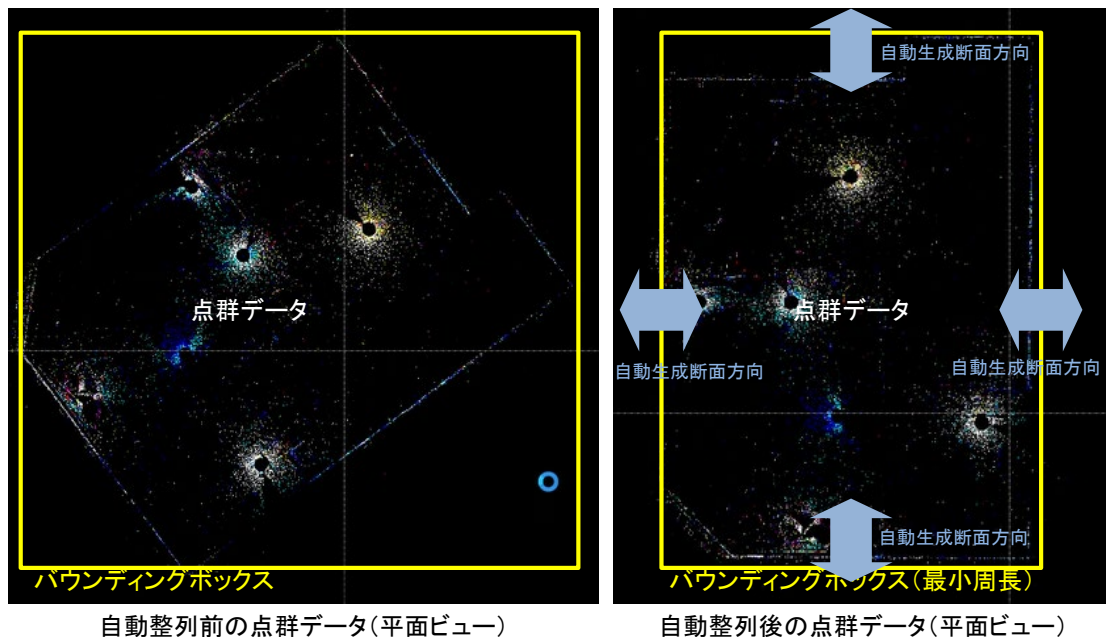


図 3-5 水平・垂直整列および断面切断の自動化イメージ

グループ④アウトプット工程：寸法記入の効率化・自動化

建築分野の業務ではほぼ全ての用途で対象物の寸法を扱うため、点群データからアウトプットを作成する場合、寸法線を記入する作業が多い。しかし、対象物や用途によって押えるべき寸法位置が多様であるため、一般的な市販ソフトウェアでは効率化・自動化が難しい機能であり、とても手間を要するタスクである。点群データに寸法線を記入する際の問題点は、点群データが同一平面上に存在しないことである。先述の通り、点群データは平面に見えても±数mm厚の幅内ではばらついている特性があるため、同一平面上に点が存在しない。そのため、切断面上に複数の寸法線を配置しようとしても、必ず奥行き方向に傾いてしまうことから、寸法線を配置するための作業平面を断面ごとに設定する必要があり、通常のCAD操作と比べて手間を要する。

そこで、図3-5の通り生成した各断面において寸法線を配置する場合、実際には奥行き方向にばらついている点群データを、仮想的に同一平面へ全て投影配置することで、寸法押えの効率化を図る。さらに、用途や対象物を限定すれば、寸法を押える位置がルール化されているため、数式として自動計算させることが可能である。例えば、柱材や梁材といった長手物の建築材料の寸法検査では、材長や小口断面のW×Hのように、3.2の整列処理で扱ったバウンディングボックスを使って自動生成可能な寸法線も多い。今回は、特に寸法計測が難しい例として、非定型木材の加工前原木を対象に、設計形状を考慮した木取り寸法も含めて検査するケースの自動寸法記入を試みた（図3-6）。まず、事前情報として、木取りする設計長と、片方の木口からの所定の切断寸法を与える。次に3.2手法で水平垂直に整列した平面ビューを想定し、バウンディングボックス長辺を材料長とする。そして材料長の端点を起点に所定の切断寸法・設計長を生成し、余剰の切断寸法を算出する。むくり寸法は、切断位置両端を直線で結び、材料がもっともむくんでいる箇所までの鉛直距離を算出する。さらに、提案した効率化・自動化手法の有効性を検証するため、独自プログラムに実装した。

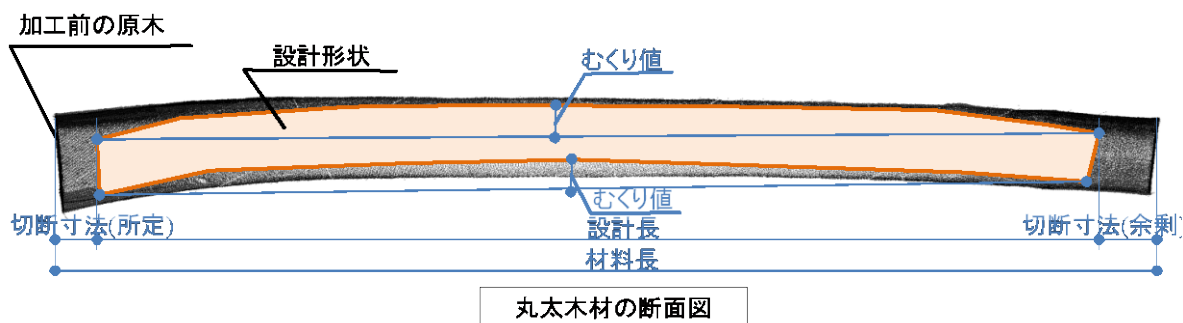


図 3-6 建材の受入検査で計測する寸法押えの例（非定型の木材）

3.2.4.提案手法の有効性の検証

ワークフローの有効性の検証

まず、3.2.2 で整理したワークフローの有効性を検証するため、実務で使用された点群データを題材に、ワークフローに従った手順と異なる手順の2通りでデータ処理を実施し、成果物の品質を比較した。題材として、建築材料を調達する段階で実施する品質記録を想定した。受入時の寸法検査や後工程での加工・組立シミュレーションに活用する目的で、建築材料を3次元スキャンした点群データを使って、汎用的かつ軽量のポリゴンメッシュデータを生成する

(図3-7)。今回、建築材料の中でも形状が複雑であり3次元スキャン技術の活用ニーズが大きい、非定形の丸太材4本の点群データを選定した。断面がφ約900mm、材長が7,000mm程度であり、処理前の点群密度は平均約2mm間隔程度、ポイント数は約300万点である。処理後の成果物は1辺5mm程度の三角形で構成されたポリゴンメッシュとする。ソフトウェアは一般に無償で公開されている点群処理ソフトウェア『Cloud Compare』を選定し、ポアソン方程式に基づいて滑らかなポリゴンメッシュを生成する既存機能を使用した。提案したワークフローに従うと以下の手順でデータ処理のタスクが発生する。

【パターンA：提案手順】

[グループ①レジストレーション→外れ値処理→スムージング]→

[グループ②間引き処理]→[グループ③メッシュモデリング]

次に、あえて手順を入れ替えてデータ処理を行い、成果物のポリゴンメッシュの品質を比較する。手順の入れ替えは、現実でも起こ

り得るケースを選定した。点群データは一般的なデータファイルと比べて大容量であることが多いことから、今回のように最終的に軽量化する必要がある場合、ワークフローの初期段階で間引き処理を実施するケースがよくあるので、取り上げる。その場合の手順は以下の通り、2.3で分類したタスクグループ①と②が入れ替わる。

【パターンB：入れ替え手順】

[グループ②間引き処理]→[グループ①レジストレーション→外れ値処理→スムージング]→[グループ③メッシュモデリング]

以上2パターンで4本の丸太材点群データを処理した。なお、実験を通じて恣意的な操作が

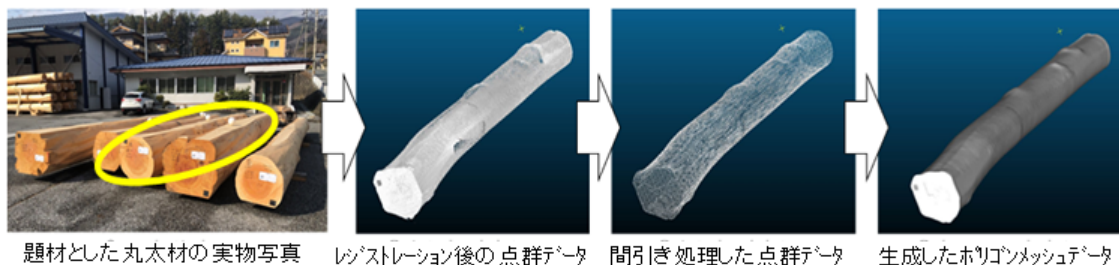


図3-7 材とした丸太材のデータ変遷の例

介入しないよう考慮し、ソフトウェア操作は著者ではなく、点群の扱いに習熟した第三者が実施した。

その結果、パターンAでは4本全てで良好なポリゴンメッシュが生成された（図3-8）。パターンBでは3本で形状の一部に目視で確認できる歪み等の不具合が見られた。品質の差異を定量的に確認するため、それぞれのパターンで元となった点群データのポイントごとに、生成されたポリゴンメッシュデータとの寸法差異を算出した（図3-9）。実務的に許容される寸法誤差を大工および施工管理者にヒアリングし、5mmを閾値として、寸法差異5mmを超える点の比率を算出したので、表3-6に示す。丸太材1・2・4については差異5mm超の比率に大きな違いはなく、パターンBでは図3-9に示したように部分的に突出して膨れたことが分かる。一方、丸太材3は目視では明確な不具合を確認できなかったが、表5に示す通り、差異5mm超の比率で約10倍の違いがあったことから、全体的に変形していると考えられる。このように、手順の入れ替えによって、全てにおいて品質に何らかの影響が生じていたことが確認された。

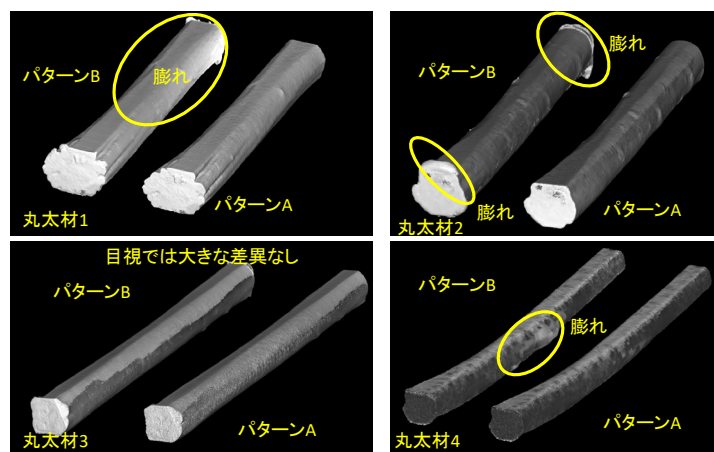


図3-8 模擬作業を実施した4つのポリゴンメッシュデータ



図3-9 点と面の寸法差異の可視化例

表3-7 点と面の寸法差異の一覧

点群データの 種類	パターンA:提案手順			パターンB:入れ替え手順		
	ポイント数(点)		差異5mm超 の比率	ポイント数(点)		差異5mm超 の比率
	差異5mm以内	差異5mm超		差異5mm以内	差異5mm超	
丸太材1	759,200	40,060	5.0%	745,910	53,350	6.7%
丸太材2	609,223	15,786	2.5%	598,951	26,058	4.2%
丸太材3	1,228,393	7,330	0.6%	1,098,170	137,553	11.1%
丸太材4	188,292	133,559	41.5%	186,291	135,560	42.1%

その理由を技術面から考察する。同じ手法で点群からポリゴンメッシュを生成する場合、各ポイント間を滑らかな面で繋ぐようソフトウェアが自動処理するため、点群データが密かつ均等に分布しているほど、正確なポリゴンメッシュが生成される傾向にある。パターン A ではノイズのような明らかな不要点を削除してから間引き処理をしているのに対し、パターン B のように先に間引き処理をすると、必要点と不要点の区別なく全体的にポイント数が削減されてしまうため、ポリゴンメッシュ生成の際に低密度もしくは不均等な部位が生じやすいことが原因だと推測される。

以上より、今回実験した模擬作業において、提案したワークフローが合理的な手順となっている可能性が示唆された。

効率化・自動化手法の有効性検証 1 鉄骨材料への寸法記入作業

次に、提案したデータ処理の効率化・自動化手法の有効性を検証するため、実務でよく行われるデータ処理を題材に複数の被験者によるソフトウェア操作の模擬作業実験を実施し、提案手法を使用した場合としなかった場合の工数比較によって効果を検証した。

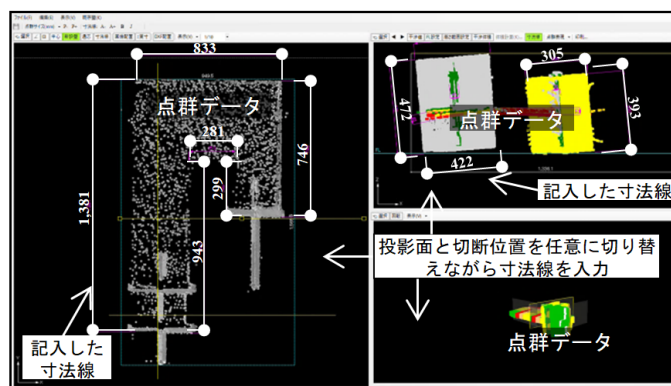
題材は、実務でのニーズが大きい製品検査における寸法入力作業とした。点群データは、直線的な形状で構成されている鉄骨材料と、非定型かつ複雑形状である丸太材の、2 種類を取り上げる。これらの点群データに対し、予め指定した箇所へ寸法線を記入するまでの工数を計測する。このとき、提案・作成した独自プログラムの使用有無で同じ作業を実施し、工数を比較する。独自プログラムを使用しない場合は、汎用性を考慮して AutoCAD の 3 次元機能を使って寸法記入した。模擬作業を実施する被験者は、個人の CAD スキルや実務知識の有無の影響を考慮するため、施工管理業務の実務経験者 2 名と未経験者 2 名を選定した。なお、ソフトウェア操作の習熟効果を排除するため、各実験ともに、被験者は事前に使用するソフトウェアの操作練習を別データを使用して実施している。

一つ目の題材である鉄骨材料は、図 3-10・3-11 に示す通り複数のプレート材が立体的に組み合わさった形状のものであり、平面・立面方向の投影面を作成したうえで、各プレート材の外形寸法および板厚の寸法線を記入する模擬作業を実施した。被験者ごとの所要時間を表 3-7 に示す。

実験の結果、実務経験の有無に依存せず、独自プログラムの効果は確認できなかった。主なソフトウェア操作は、点群データの水平・垂直方向への整列、投影面の作成、寸法記入等であり、独自プログラムではこれらの効率化・自動化機能を有していたが、汎用ソフト上で手動操作する場合も迷いなく対応できていた。

効率化・自動化手法の有効性検証 2 丸太材への寸法記入作業における検証結果

二つ目の題材である丸太材は図 3-12・3-13 に示す通り捻じれやむくりを有する原木である。被験者へは事前情報として、原木から切り出す設計長さおよび木口からの切断位置を与え、点群データの平面・立面方向投影面に対して材長・両木口の外形寸法・むくり値・設計長・切断寸法を記入する模擬作業を実施した。被験者ごとの所要時間を表 3-7 に示す。



★青字①～⑦の寸法線を記入してください

⑥元口の幅×高さ
(太い方の木口)

④むくり値 1

⑦末口の幅×高さ
(細い方の木口)

⑤むくり値 2

②所定の切断位置250

設計長さ4,400

③切断後の残り長さ

①木材全長

4150

木材立面図

被験者	①鉄骨材料		②丸太材	
	汎用ソフト	独自プロダクト	汎用ソフト	独自プロダクト
実務経験者1	987秒	1,153秒	920秒	254秒
実務経験者2	586秒	660秒	1,070秒	372秒
未経験者1	585秒	708秒	1,059秒	210秒
未経験者2	754秒	490秒	676秒	147秒

実験の結果、実務経験の有無に依存せず、汎用ソフト上での作業と比べ独自プログラムを使用した場合は所要時間が 20%～35%と大幅に短縮された。汎用ソフト上での操作を観察すると、点群データの外形が複雑な形状であることから、寸法線を入力すべき起点・終点の選択に迷い、時に補助線等も描画するなど、試行錯誤のために時間を要していた。一方で独自プログラムではこれら操作はルールに従って自動化されているため、被験者が迷うことはなかった。

以上の結果から、点群データに関わるソフトウェア操作を効率化・自動化する場合、人間がソフトウェア操作に迷うような複雑形状のデータに対し、ルールに従って機械的に処理することで、より大きな効果が得られると考えられる。一方で、直線や平面で構成されたシンプルなデータでは、点群の専門ツールを使用しない場合でも、汎用 CAD の既存機能で対応できる可能性が示唆された。

次に、これら提案したワークフローや開発プログラムを用いて、ケーススタディを実施する。

3.3.RC 造における既存と新築の整合調整

3.3.1.背景と目的

技術適用するために実務とは別に必要となる作業を確認するため、3.2.1.の表3-1で取り上げた活用用途のNo.3「新築施工時、山留残置する既存地下外壁の位置を確認申請図に反映」を題材とし、実務において点群データを活用する。この活用用途では、既存建物の解体工事から新築工事着工までの期間に、工事スケジュールを妨げることなく3次元スキャンと点群データの編集・活用を適切なタイミングで実施する必要があるため、実務と技術適用の間の調整が多いことが想定されるため、上記検証に適していると判断した。

本用途の背景として、大都市圏では更地がほぼ存在しないため、新築工事であっても、敷地内に存在する既存建物の解体が伴うプロジェクトが多い。その場合、敷地周辺に別建物が隣接しているため、地下構造体を全て撤去すると山留が困難である。そこで、既存建物の地下外壁のみを山留目的で残置し、その内側に新築建物を施工する工法が多い。

新築建物の設計図書を作成する段階では既存建物を解体していないため、既存建物の完成図などの過去図面に記載された既存躯体の位置を参考に、新築躯体の位置を計画する必要がある。工事費用や工程に大きく影響するため、解体数量、および既存・新築躯体の隙間への埋め戻しコンクリート数量は極力少なく計画したい。しかし、実際に解体すると、過去図面に記載された形状や位置が異なっている場合があり、解体および埋め戻しが計画通りに進まないことが多く、問題となっている。そのため、新築設計段階で、既存建物の地下仕上げの一部を先行解体して抜き取りで既存躯体位置を測量することがある。しかし、数十年前に施工された地下躯体は施工精度が粗い場合も多く、同スパンの壁面であっても場所によって数100mm単位の不陸や出入りがあるため、抜き取りの測量では推測精度に限界がある。

そこで、既存地下外壁の位置を面的に測量し、解体・埋め戻し数量が最少となる位置に新築躯体を計画することを目的とし、提案ワークフローに沿って3次元スキャン技術を実務適用することで、技術の実務適用を阻害する要因となる実務側の必要作業を抽出する。

3.3.2.題材プロジェクトの概要

プロジェクトは東京都内の事務所ビル新築工事を題材とした。規模は地下1階、地上12階、塔屋1階であり、延床面積が約9,000㎡の建物である。地上躯体は鉄骨造、地下はRC造、基礎は耐圧盤となっている。山留残置する既存地下躯体と新築躯体の間は、耐圧版の下は流動化コンクリート、壁面側は一般的なコンクリートで埋め戻す。プロジェクトの断面イメージ、および地下部分の平面図の抜粋を図3-14に示す。なお、記載している既存地下躯体の位置は、竣工当時の過去図面を参考に推測している。今回は、3次元スキャンによってより高精度に計画することで、過去図面を基にした推測時と比較した解体・埋め戻し数量の差異を指標に、デジタル活用の効果を検証する。

3.3.3.提案ワークフローに従った3次元スキャンとデータ処理の手順

題材プロジェクトでは、確認申請と建築主契約のスケジュールを考慮し、新築着工の3ヶ月前に新築躯体の位置を決定する必要があった。既存建物の地下解体は新築着工の1か月前であるため、着工5か月前のタイミングで既存建物の地下仕上げの一部を先行解体し、露出した既存地下外壁の位置を3次元スキャンする。これら工程を図3-15に示す。

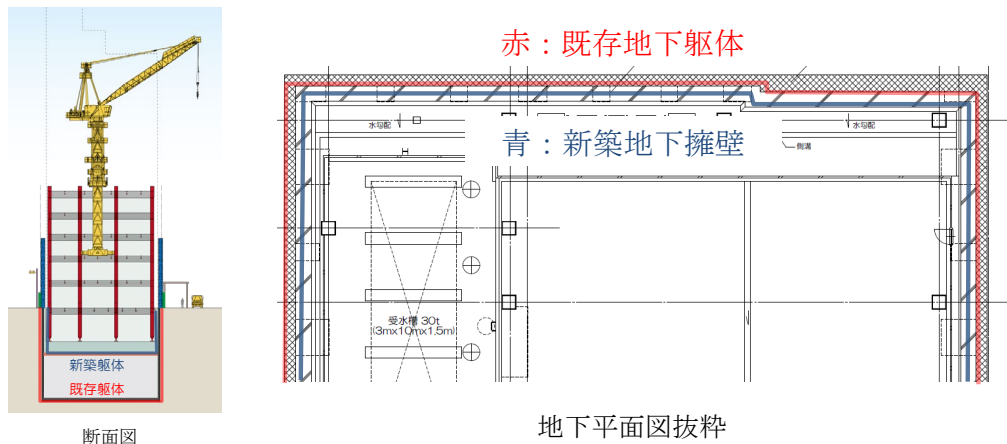


図 3-14 題材としたプロジェクトの概要

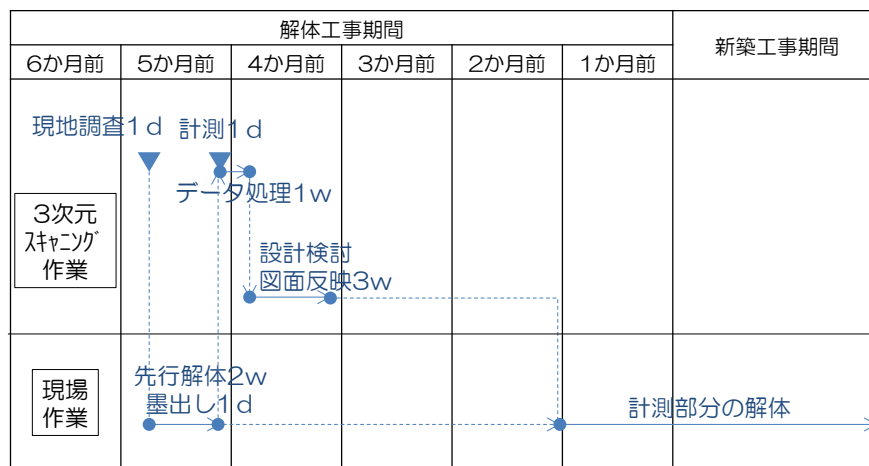


図 3-15 3次元スキャンに関わる工程



写真 3-1 既存建物の解体前（左）と部分解体後（右）

3次元スキャンによって得られた点群データのデータ処理は、3.2.で提案したワークフローに従い、以下の手順とした。なお、使用機材はFARO社製 FOCUS3D S120、点群処理ソフトウェア SCENE、作図ソフトウェア Revit とした。

- ①前処理工程：点群のレジストレーション、図面座標系とのローカリゼーション
- ②チェック工程：既存地下外壁の最外部分抽出、図面重畳、過去図面との差異比較
- ③モデリング工程：新築躯体のソリッドモデリング
- ④アウトプット工程：既存地下外壁と新築躯体の位置を修正した図面作成

3.3.4.3 次元スキャンとデータ処理の実施結果

先行解体の様子を写真 3-1 に示す。このように、既存建物の地下の内側から、地下躯体を露出するために、外壁側の仕上壁のみ先行解体した。また、外壁側を効率的に3次元スキャンするため、外壁側の間仕切壁や什器も部分的に撤去した。このとき、3次元スキャンで得られる点群データと計画図面の座標系をローカリゼーションする際のベンチマークとして、露出した外壁躯体の複数個所に、図面上の通り芯からの水平逃げ墨とレベル墨を墨付けした。なお、これら先行解体・墨出し作業は、協力会社との工事請負契約の範疇で手順を入れ替えたものであり、3次元スキャンのために新たな費用は発生していない。

次に、3次元スキャンを実施した。使用機材は、数mm精度と操作性を考慮し、三脚固定型の3次元レーザースキャナーFOCUS3D（FARO社製）を選定した。計測対象エリアは1フロア約1,000 m²であり、24箇所のスキャニングを実施して1日工数であった。計測作業の様子を写真 3-2 に、取得した点群データを図 3-16 に示す。データ処理は以下の通り実施した。

①前処理工程

24箇所で計測した点群データは、専用のリファレンスボール20個をベンチマークとして用い、機器付属の処理ソフトウェアで自動レジストレーションした。その後、レジストレーション目的で、各スキャンデータの中で外壁躯体部分にポリゴンメッシュデータを生成し、そのポリゴンメッシュデータ自体も特徴点ベンチマークとして利用することで、確実にレジストレーションを実施した。点群データと計画図面の座標系を一致させるローカリゼーションでは、点群データの中に映り込んだ水平逃げ墨とレベル墨を利用し、手動で位置合わせを行った。ポリゴンメッシュの生成と、ローカリゼーションで使用した墨の例を図 3-17 に示す。

②チェック工程

次に、実測した既存地下外壁の位置と過去図面の差異を比較した。既存地下外壁の位置を可視化するために、前処理工程のレジストレーション目的で生成したポリゴンメッシュデータを活用した。図 3-18 に示す通り、一つの外壁面の垂直方向断面を見ると、上階スラブから床スラブに向かって100 mm程度室内側にはらんでいることが分かった。新築躯体は、既存躯体との干渉を避けるため、各壁面の中で最も室内側のポイントを基準に配置計画する。そこで、各ポリゴンメッシュデータの中で、最も室内側に飛び出している箇所を繋ぎ合わせることで、現実の既存外壁ラインを描画した（図 3-18）。過去図面の位置と比較すると、最も差異が大きい箇所で231 mm、平均で約200 mm室内側に位置していることが分かった（図 3-19）。



写真 3-2 3次元スキャンの様子

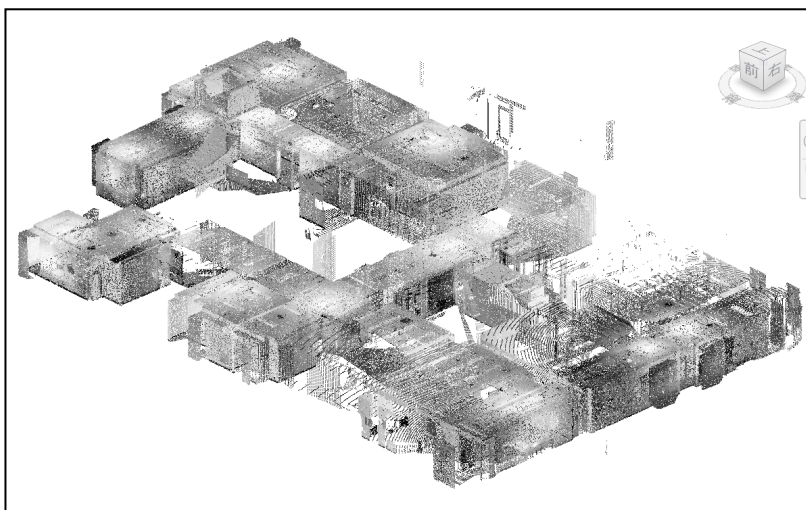


図 3-16 取得した点群データ

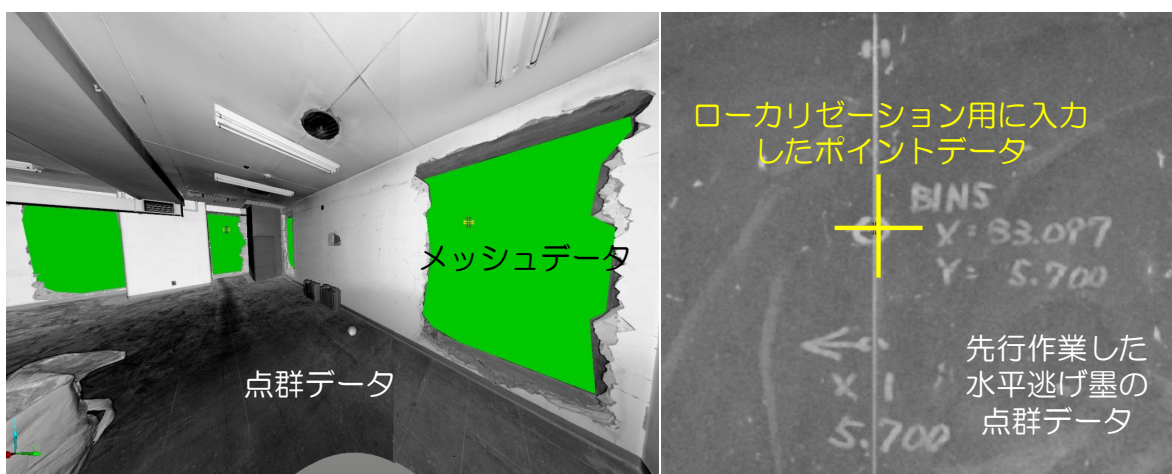


図 3-17 前処理工程（レジストレーション・ローカリゼーション）

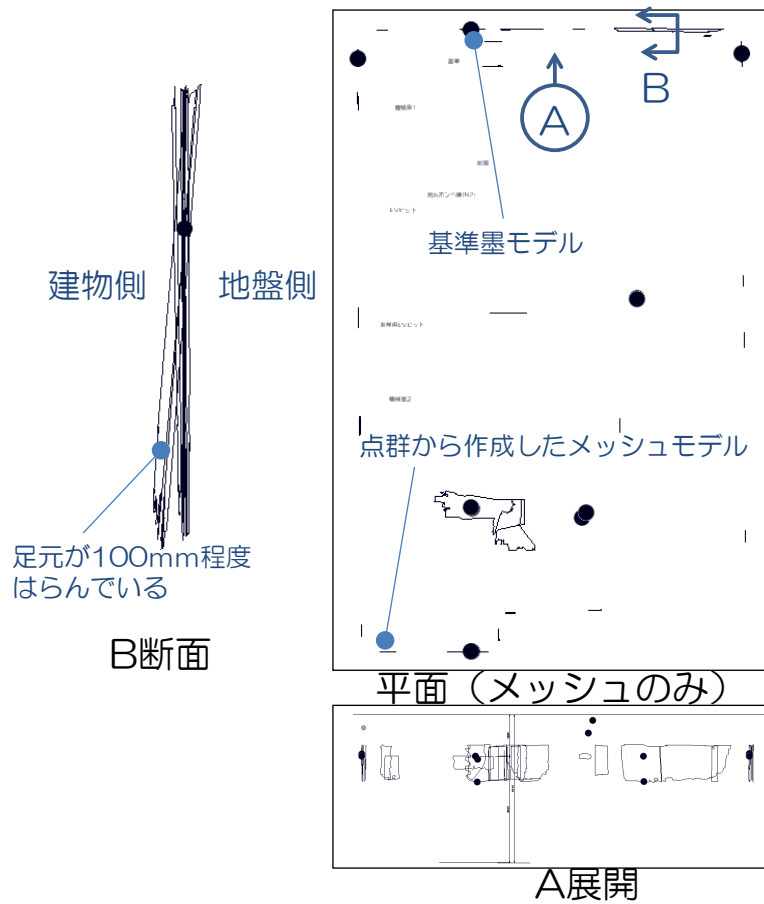


図 3-18 チェック工程（最外部分抽出）

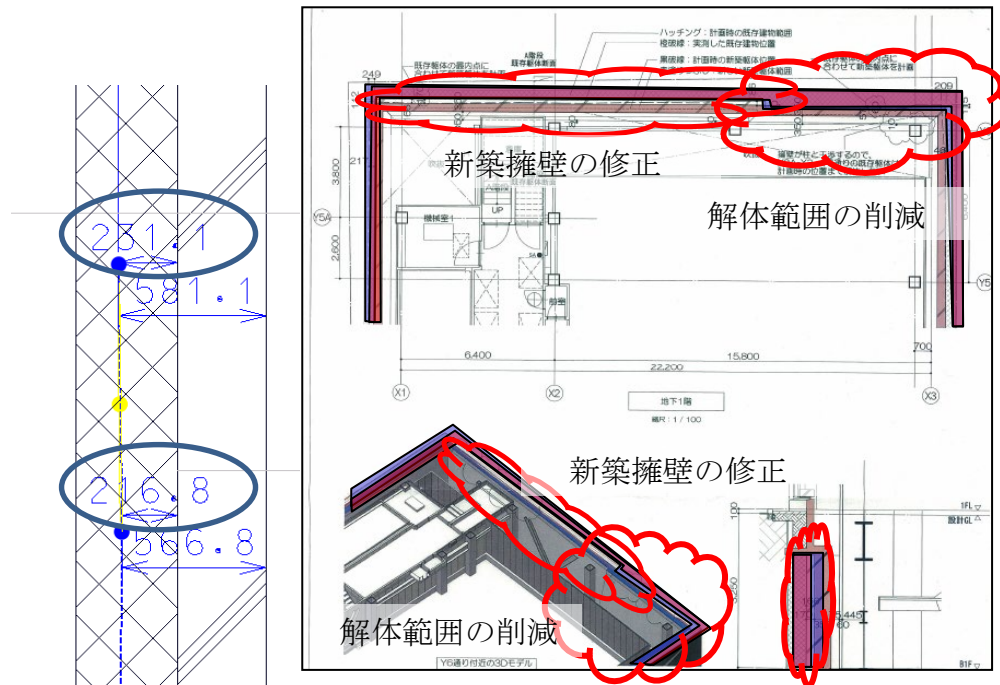


図 3-19 チェック工程（差異比較）

図 3-20 モデリング・アウトプット工程（図面作成）

③モデリング工程、④アウトプット工程

最後に、現実の既存地下外壁の位置に合わせ、極力、解体および埋め戻しコンクリートが少なくなるよう、新築躯体の外壁ラインを修正した。そのために、チェック工程で作成した既存地下外壁の最外ラインを基準に、新築躯体のソリッドモデルを作成し、構造設計者および施工管理者と相談の上、合理的な擁壁形状を決定した（図 3-20）。この結果、解体数量を 5 m³、埋め戻しコンクリート数量を 5 m³削減した。削減割合は全体の 1%にも満たないが、特に解体数量の削減は 5 m³であっても、解体工程のその場で過去図面との差異が判明すると、確認や再解体のために数日程度の工程遅延が生じるため、そのリスク回避が最も大きなメリットだと言える。

3.3.5.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

RC 造における既存と新築の整合調整では、既存地下外壁を山留残置するプロジェクトを題材とし、既存地下外壁を 3 次元スキャンによって面的に測量することで、従来の抜き取り測量と比較して、高精度の位置把握を試みた。その際、得られた点群データの処理を、3.2. で提案したワークフローに従って実施することで、手戻りなくアウトプットまで作成することができた。また、3 次元スキャンを適用した結果、過去図面から推測した既存地下外壁の位置との差異が平均約 200 mmであることを確認し、解体数量と埋め戻しコンクリート数量を各 5 m³ずつ削減するとともに、解体工程の遅延リスクを回避した。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第 1 章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および本項で適用した 3 次元スキャン技術の普及を阻む要因となっているものを表 3-8 に整理する。従来業務では、No. 3「建築物の規模・複雑度が大きい」No. 8「一品受注生産」No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No. 14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」の 4 項目が要因となり、既存構造物の形状把握をスケジュール内に全数実施することが難しいが、3 次元スキャン技術を活用する場合は、これらは阻害要因とならないことが分かった。また、No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」は従来業務でも 3 次元スキャン技術の活用においても共通して阻害要因であり、費用対効果が問題となった。例えば製造業の工場生産のように、作業場所が固定されていれば、現場に測量機器を常設することによって、技術適用のコスト低減を図ることができるが、建築工事の場合は工事現場が常に変わるため、機器を使用するために毎回コストを要する。さらに、工事現場ではプロジェクト単位で利益が求められ、実務担当者に対する企業内評価として利益率が重要視されることから、高コストな技術は適用を見送られる場合が多い。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、本取組みでは技術を実務運用するために特別に必要となる作業を抽出した。まず、通常の工事スケジュールでは 3 次元スキャンの対象となる既存構造物の露出が新築着工の直前となり、施工検討のために点群データを加工・編

表 3-8 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用 の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造		
	10	労働集約的作業		
	11	工事関係者が臨時に組織される		
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

集する時間を十分に確保できないため、該当部位を先行解体する必要があった。また、点群データと BIM モデル・計画図面を重畳するために、工事現場の現地にベンチマークとなる墨出しを先行させる必要があった。今回のケーススタディでは、建築知識と点群データ活用の技術ノウハウを有した技術者が携わったため事前の想定と調整が可能であったが、そのような専門家が配置されていない一般的なプロジェクトを想定すると、技術適用のために実務側に必要となる特別な作業は、阻害要因となる。

- 技術適用までの準備手間：計測対象である既存構造物を事前に露出させる、計画情報との位置合せのために現地への墨出しを先行させるなど、技術適用のための準備手間。
- 専任人員の必要性・専門知識・技術の習得難易度：専門的な機器・ソフトウェアの選定、これらを適切に活用するための作業調整など、一般的な実務担当者にとって扱いが困難なスキルが多く、専門家の配置、もしくは実務担当者への事前教育が必要。

その他、ケーススタディを通じて、以下の阻害要因を把握した。

- データの非標準化：点群データそのものでは出来形確認の用途で直接使用することができないため、ポリゴンメッシュ変換など特殊なデータ変換が必要。
- 大容量データ：点群データは他のデジタルデータと比較して大容量であり、一般的な工事関係者が使用する PC やソフトウェアでは扱うことが困難であった。加えて、データを保管するストレージや関係者間でやり取りするデータ授受手段など、情報インフラも新たに整備が必要であった。
- 費用対効果の不足/不明確：取り扱う機器・ソフトウェアいずれも高価であり、一般的に普及させるためには設備投資の必要性や効果の明確化が課題。

3.4.鉄骨部材の工場製品検査

3.4.1.背景と目的

次に、3.2.で示した通り、点群データの活用を想定すると高度なソフトウェア操作が技術普及の阻害要因となっていると考えた。建築工事の品質検査では、製作物によって寸法の計測方法が多様に指定されており、これら建築特有の検査項目へ対応するために要求される特殊なソフトウェア操作を具体的に把握するため、建築工事において一般的な製作物である鉄骨部材を題材に、工場の製品検査へ技術適用する。3.2.1.の表3-1で取り上げた活用用途のNo.17「工場における製品検査寸法・形状に関わる検査」に該当する。

鉄骨工事では、鉄骨工場が製作した鉄骨部材に対し、工場内での自主検査や、施工管理者・設計監理者の立会検査などが実施される。工事現場の中での組み立て作業が主である在来の鉄筋コンクリート工事などと異なり、工場製作物はそのものの形状・寸法が建物品質に直結するため、工場では『単品図』『加工指示図』のような形で部材ひとつひとつの形状や細部の寸法、鋼種などの物性を図面化する。そのため、検査の際にも、これら製造用の仕様情報を使用できる。工場自主検査用の野帳の例を図3-21に示す。このように、検査すべき形状や寸法は部材ごとに明示されているが、照合のための現況確認の手段はスケールなどを使った手計測が主であることから、ヒューマンエラーを防ぐために、検査者や立会者を変えて何度も同じ箇所を繰り返し測定している。

そこで本論文では、3次元スキャン技術を用いて形状・寸法の現況を原寸のデジタル情報として取得することで、鉄骨製品検査の効率化・高度化を図る。題材とする検査としては、従来

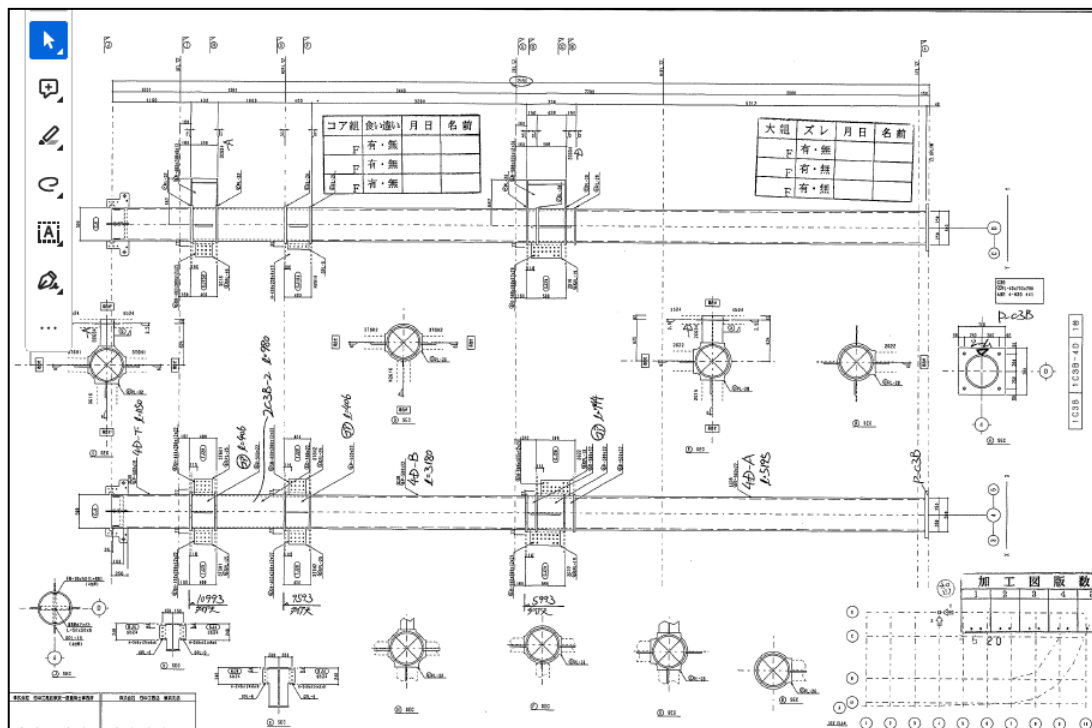


図 3-21 鉄骨工場における検査野帳の例

の手作業による寸法計測においても精度管理の難易度が高い2種を取り上げる。一つ目は、板材を溶接によって格子上に組む構造の部材であり、フレーム全体で形状が目標精度内に収まっているか確認するケースである。二つ目は、柱と梁の接合部として使用するため立体的かつ複雑に屈曲した鉄骨部材であり、複数ボルト孔の相対な位置関係を確認するケースである。

3.4.2.提案ワークフローに従った鉄骨部材のデジタル検査

デジタル検査の概要

本取組みにおいて寸法計測に求められる条件は、表 3-3 の No. 17 で記載した通り、精度±1mm、所要時間は検査毎に1日程度、費用は5万円/日である。そこで、計測手段は特に計測精度を重視し、三脚固定式の3次元レーザースキャナー（Z+F 社 Imager5016、FARO 社 FOCUS3D S120）を選定した。現況と比較する計画情報は、工場が従来から加工目的で作成している3次元CADモデル（鉄骨モデル）を用いた。データ重畳のためのデータ編集では、汎用性と費用を考慮して無償ソフトウェア（CloudCompare）で実施する方法を考案した。データ処理の手順は以下の通りである。

- ①前処理工程：点群のレジストレーション、外れ値処理
- ②チェック工程：鉄骨モデルとの重畳、差異比較・可視化
- ③モデリング工程：不要点削除
- ④アウトプット工程：検査等記録帳票作成

プロジェクトで使用する鉄骨部材の製品検査への試適用（題材1：鉄骨フレーム）

一つ目の題材は板材を格子状に組立・溶接する鉄骨フレームである。1.7m×4.0mの鉄骨フレームに対し、想定されていた製作誤差は±3.0mmであった。鉄骨フレームは、板材に対して溶接作業が多く、精度管理が難しい部材であるため、フレーム同士を工事現場で組立てるためのボルト接合部には比較的大きいルーズが想定されていた。そのため、重点的に精度管理を要する特定の部位はなく、『全体として±3.0mm以内』という条件であった。

現況と比較する計画情報は、製造のために作成された鉄骨BIMモデルを用いた。

現況のデジタル化では、三脚固定側の3次元レーザースキャナーを用いて、鉄骨フレームひ

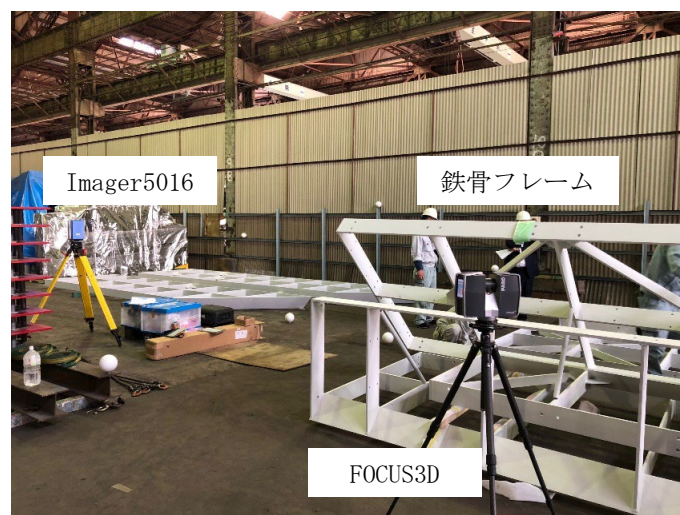


写真 3-3 鉄骨工場における3次元スキャン状況

とつに対して周囲3か所から3次元スキャンを実施した。その際、レジストレーション用のベンチマークとして、機器付属の専用リファレンスボールを5個、周囲に配置した。3次元スキャンは1か所約5分であり、鉄骨フレームひとつ当たりスキャン3か所および盛替え等で、計20分程度の作業工数であった。計測状況を写真3-3に示す。

データ処理は、先述のワークフローに従って実施した。①前処理工程では、3次元レーザースキャナー付属の処理ソフトを用いて、リファレンスボールをベンチマークとして指定することで自動でレジストレーションした。その後のデータ処理は全て無償の点群処理ソフトウェア「CloudCompare¹⁹」を使用した。レーザ測距を通じて生じるノイズデータが、予実照合の際に影響するため、外れ値処理で自動削除した。②チェック工程では、鉄骨BIMモデルと点群データを重畳した。その際、今回検査の精度管理方針を鑑み、無償ソフトウェアで扱うことができる機能の中で、2つのデータの差が最小となるよう自動合成するアルゴリズム²⁰を使用した。2つのデータ間の差異は、ポイントごとに差異寸法値を算出し、その値の大小に応じて表示色を着色することで、可視化した(図3-22)。その結果、点群データの90%以上が±3.0mm以内の差異であることが分かった。残りの約10%を個別に確認すると、自動処理できない微小なノイズ類であることが分かった。③モデリング工程では、計測対象である鉄骨フレーム以外の点群データを不要点として削除した。3次元スキャンでは周囲の環境(工場建屋、鉄骨部材を保持する架台等)も点群データ化されるため、先述の差異比較の結果を検査帳票としてアップロードするケースを想定し、この段階でデータの母体から不要点を取り除いている。最後に、④アウトプット工程の検査帳票作成目的で、点群データのポイントごとの差異寸法値をテキスト出力した。

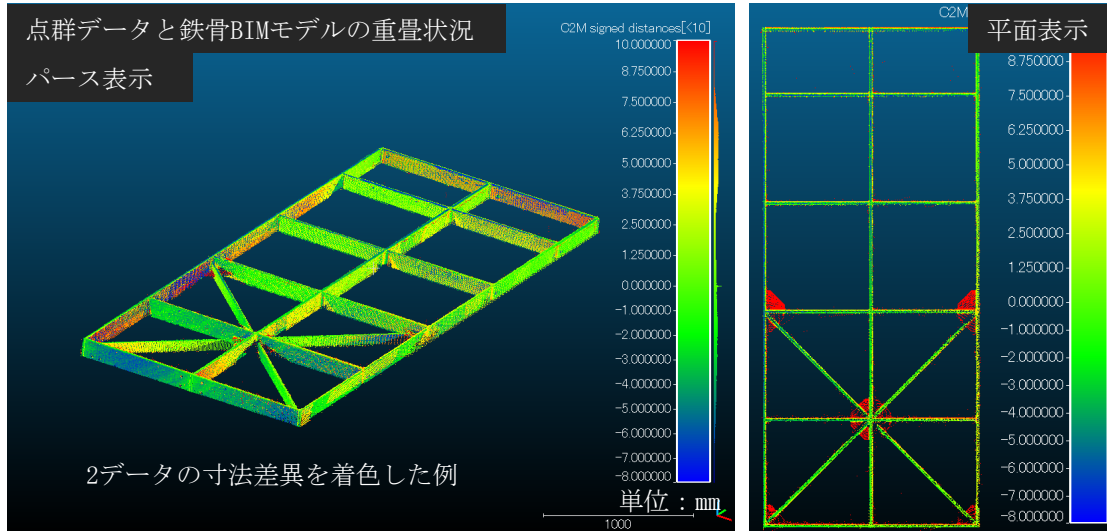


図 3-22 設計 BIM モデルと点群データの重ね合せ状況

¹⁹ CloudCompare は Telecom ParisTech と Électricité de France S.A. が共同で開発した点群処理専用のフリープログラムである。 <https://www.danielgm.net/cc/> (accessed 2023.9.27)

²⁰ CloudCompare の『Fine registration(ICP)』機能。ICP とは Interactive Closest Point の略であり、2つの点群間の差を最小化するために用いられる一般的なアルゴリズムである。

<https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf> (accessed 2023.9.27)

プロジェクトで使用する鉄骨部材の製品検査への試適用（題材 2：鉄骨仕口）

二つ目の題材は、複数の鉄骨が取り合う仕口部分の部材である。今回題材とした部材は、3次元的に様々な方向に鉄骨が取り合うものであり、仕口部材自体も微細な折れや傾きを伴う。精度管理の方針としては、ボルト孔同士の相対位置が重要であり、ひとつのボルト孔を基準とした時、残りの全てのボルト孔の3次元座標値が $\pm 1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 以内の誤差である必要があった。対象部材の例を写真 3-4 に示す。このように難易度の高い製作物では、従来のスケールなどを用いた手計測では検査が難しく、例えば検査用のテンプレート型紙を作成するなど、毎回手間を要している。

現況と比較する計画情報は、製造のために作成された鉄骨 BIM モデルを用いた。

現況のデジタル化では、三脚固定側の3次元レーザースキャナーを用いて、鉄骨仕口部材ひとつに対して周囲4か所から3次元スキャンを実施した。その際、レジストレーション用のベンチマークとして、機器付属の専用リファレンスボールを5個、周囲に配置した。3次元スキャンは1か所約5分であり、鉄骨仕口部材ひとつ当たりスキャン4か所および盛替え等で、計30分程度の作業工数であった。

データ処理は、先述のワークフローに従って実施した。①前処理工程は、題材1と同様の手順であり、3次元レーザースキャナー付属の処理ソフトと無償ソフトウェア「CloudCompare」を使用してレジストレーションと外れ値処理を実施した。②チェック工程では、まず鉄骨 BIM モデルと重畳した。その際、今回の精度管理方針を鑑み、題材1で使用した自動合成機能は選定せず、2データの共通ポイントを手動で複数指定することによる半自動合成²¹を用いた。具体的には、部材端部のボルト孔の中から最も離れて位置する3か所を合成のベンチマークとして選定し、その3点における2データの寸法差異が最小になるよう重畳した。2データの差異は題材1と同様に着色することで可視化した。そのうえで、ベンチマークとして利用した3点以外のボルト孔周辺の製作精度を確認した。使用した鉄骨 BIM モデルと点群データの例を図 3-23 に、重畳・差異可視化の状況を図 3-24 に示す。実際に検査を実施すると、一部のボルト孔が4～5 mm程度の誤差であり、要求精度の1～2 mmを超えていたため、その場で修正指示を行うことができた。④アウトプット工程では、検査帳票作成目的で、点群データのポイントごとの差異寸法値をテキスト出力した。

²¹ CloudCompare の『Align(point pairs picking)』機能。



写真 3-4 題材とした鉄骨仕口部材

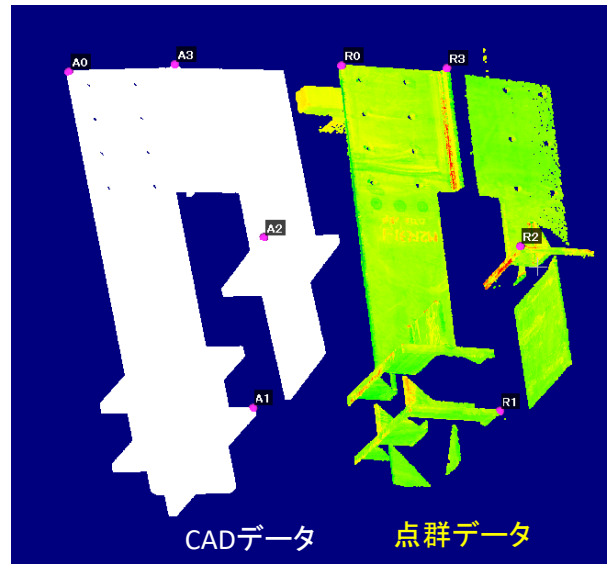


図 3-23 設計 BIM モデルと点群データ

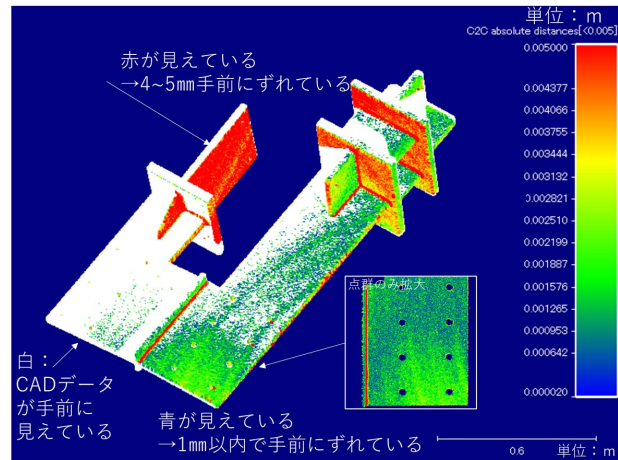


図 3-24 端部ボルト孔を基準に遠箇所寸法検査を行った例

3.4.3.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

このケーススタディでは、部材全体での精度管理を行う鉄骨フレーム部材と、ボルト孔同士の位置関係を重点管理する鉄骨仕口部材の2パターンを題材に、点群処理の提案ワークフローに従ってデジタル検査を実施した。鉄骨フレームの検査においては、従来は水系やスケールを使った抜き取りの寸法確認を行っていたが、点群データとBIMモデルを重畳することで、面的かつ網羅的な形状確認を実現した。鉄骨仕口部材の検査においては、従来はボルト孔の位置を確認するための型紙やテンプレート板などを個別に作成するなどの手間を要していたが、点群データとBIMモデルを重畳することで、ボルト孔同士の相対的な位置関係を定量的に把握することができた。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第1章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および本項で適用した3次元スキャン技術の普及を阻む要因となっているものを表3-9に整理する。従来業務では、No.3「建築物の規模・複雑度が大きい」No.8「一品受注生産」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No.14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」の4項目が要因となり、プロジェクトごとに多種多量が製造される鉄骨部材の工場検査が実務の負担となっている。建物の柱-柱間のスパンが通常7m以上であり、階高は多くが4m以上であることから、鉄骨部材も多くが4~7m以上の大型の製作物であり、中高層ビルでは数百から数千種類が製造・検査される。従来の手作業による寸法計測の効率化を図るためには、これら規模と数が障壁となっていた。また、No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」の2項目が要因となり、プロジェクトごとに組織される工場や組織が変わることで、同様の検査においても携わる人材によって品質差異やヒューマンエラーの排除が難しかった。しかし、3次元スキャン技術を活用する場合は、市販の測量機器を用いて広範囲を短時間でデジタルデータ化するため、建築サイズや多種多量の処理が問題とならず、測距品質も確保可能であった。一方で、No.1「現場の場所が常に変わる」No.15「安全・品質よりコスト・納期が優先」は3.3.と同様に、従来業務でも3次元スキャン技術の活用においても共通して阻害要因であり、高額な測量機器を毎回異なる場所を使用するためのコストが技術普及を阻んでいる。

次に、このケーススタディで阻害要因として特に着目した、建築特有の検査項目へ対応するためのソフトウェア操作は以下である。鉄骨フレームの検査においては、計画と実施の形状を比較して、全体としての寸法差異を確認するため、全ての点群データとBIMモデルの距離を算出し、それらの和が最小となる位置を自動で判別して重畳させた。鉄骨仕口部の検査においては、複数ボルト孔の相対的な位置関係を確認するため、点群データとBIMモデルを、起点とするボルト孔→基準面→基準軸の順で重畳するようソフトウェアを制御した。このように、用途によって異なる検査方法に対し、ソフトウェア操作へ反映するための数学的な解釈やノウハウが必要であることが分かった。ケーススタディでは建築知識と点群データの活用ノウハウを有した技術者が携わったため、無償のソフトウェアであっても既存機能の組合せで実現できるこ

表 3-9 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用 の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	
	10	労働集約的作業		
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

とを確認したが、このような専門家が配置されていない一般的な工事現場を想定すると技術的な難易度が高く、技術普及の阻害要因となる。

- データの非標準化：寸法計測の方法がプロジェクトや製作物によって多様であり、統一されていない。
- 専任人員の必要性・専門知識・技術の習得難易度：多様な寸法計測ルールをソフトウェア操作に反映するためには、建築知識に基づいた数式化・数学的解釈が必要であり、専門家の配置、もしくは実務担当者への教育が必要。

その他に、3次元スキャン技術の活用を阻害する要因として以下を確認した。

- 準備データの不足：設計段階では工場製作物の形状は加工レベルまで検討されているケースが少なく、設計情報をそのまま検査の比較対象として用いることが難しい場合が多い。工場が作成していれば加工レベルの3次元形状データを入手する、もしくは事前にデータを作成する必要がある。
- 大容量データ：点群データは他のデジタルデータと比較して大容量であり、一般的な工事関係者が使用するPCやソフトウェアでは扱うことが困難であった。加えて、データを保管するストレージや関係者間でやり取りするデータ授受手段など、情報インフラも新たに整備が必要であった。

- 技術適用までの準備手間：デジタル検査のために、対象となる鉄骨部材の3次元スキャンを事前に実施し、一本単位で点群データと判定モデルのセットを準備するため、これらを実施するための体制を構築する必要があった。
- 成果創出までのリードタイム不足：工場製作物の製造から出荷まではスケジュールの余裕がない場合が多く、不具合箇所の手直し時間を考慮すると、検査結果は遅くとも当日中に判定する必要があった。点群処理は通常数日以上の手間を要する技術であり、リードタイム不足が普及の阻害要因となっている。
- 費用対効果の不足/不明確：取り扱う機器・ソフトウェアいずれも高価であり、一般的に普及させるためには設備投資の必要性や効果の明確化が課題であった。

3.5.伝統木造における建築材料の品質検査

3.5.1.背景と目的

次に、実務担当者が自ら技術を扱うために克服が必要な障壁を把握するため、伝統木造建築で使用する大型木材調達時の受入検査をケーススタディとして取り上げる。3.2.1.の表3-1で取り上げた活用用途のNo.17「工場における製品検査寸法・形状に関わる検査」に該当する。この題材に着目した理由は、扱う建材が工業製品のように機械加工されたものではなく、樹木ごとにユニークな形状を許容して加工および組立を行うことから、通常の製作物の製品検査と比較して寸法の計測方法や判断基準が複雑であり、施工管理者・宮大工・設計者など、多くの職能および関係者が検査に関わるため、実務担当者が自ら技術を扱うための課題抽出に適していると考えたからである。

日本では、寺社仏閣や城郭建築など、はるか昔に建築され、現在でもとても価値の高い伝統建築が数多く存在する。近年の一般的な木造建築では、集成材やCLTのような機械加工された材木がメインで使用されるが、日本の伝統的な木造建築では1本の原木から柱や梁のような建材を切出して使用されている。調達から加工・組立まで、あらゆる生産プロセスにおいて高度なスキルが要求される。

今回は、生産プロセスの起点である調達段階をモデルケースとし、その段階の材木形状を3次元スキャン技術によってデジタル化することで、検査作業を支援する手法を提案する。さらに、その形状データを後工程である原木の加工検討で使用することを想定し、データを軽量かつ汎用的に扱える形式に変換する手法を提案する。

3.5.2.題材としたプロジェクトのワークフロー

最初に、日本の伝統的な木造建築の保全および改修プロジェクトにおける調達と加工プロセスの特徴を説明する。

まず、調達プロセスでは、材木のサプライチェーンがとても特殊である。伝統的な木造建築で使用する建材は、1本の樹木から1つの部材を切出すことで作られるため、元となる材木が大型である。例えば、長さが5m以上、重さが1t以上のものが多い。このような大型の材木は、ゼネコンは短時間に大量に集めるルートやノウハウを持たないため、ゼネコンが材木所有者から直接購入することは困難である。そのため、ゼネコンは材木専門の木材会社から材木を購入する。その際、ゼネコンは木材会社へ設計仕様を伝達し、木材会社は設計仕様に合致する材木を集める。これらの方法で木材会社が収集した材木は、樹皮を撤去し角型、丸型に加工した程度の粗い状態である。これら材木は断面寸法や曲がり度合いがユニークであるため、それらを設計通りの部位に使用できるか、ゼネコンが倉庫で検品し、合格したもののみが購入される。検査項目は、長さや断面寸法といった形状に関わるもの、色や傷といった美観に関わるもの、ヤング係数などの物性に関わるものなどがある。形状に関わる検査は、実寸サイズで印刷した図面を材木の下に敷いて確認するとともに、細部は巻き尺等を使って計測する。美観に関わる検査は、設計監理者等が目視で実施する。物性に関わる検査は、専用の測定機器を使用する場合が多い。これらに加えて、検査者は表面から見える個性的な形状や節・傷入皮・腐れ等

の情報を使って材木内部の状況を推測し、建材として使用できるか判断する必要がある。このためには、木材加工に関するとても高いスキルと経験が必要であるため、ゼネコンは検査者として大工を雇用する場合がある。

ゼネコンは購入後に、大工に依頼して、まず材木を設計寸法と同じ長さにカットし、断面形状が一定になるよう表面をカットする。その後、他部材と接続する部分を精密に加工する。材木の形状が変化するプロセスを図 3-24 に示す。

3.5.3.検査支援およびデータ変換手法の構築

検査支援手法の提案

今回は、検査作業の支援と、後工程でデータを軽量かつ汎用的に扱える形式に変換すること、の 2 点を目的に、デジタル活用を図った。

まず、前者の検査作業の支援目的では、建材の形状に関わる寸法測定効率化・高度化を図るため、3 次元レーザースキャンによるデジタル検査手法を提案した。具体的には、人間による検査作業の事前に材木の形状をレーザースキャンによって正確にデジタル化し、プログラム処理で自動判定することで、検査を省人化および精度向上を図る。この手法を実現するための要素技術を以下に記す。

まず、材木形状を正確にデジタル化するために、写真 3-5 に示す 3 次元レーザースキャナーを使用する。この機器を採用した理由は、それが、対象物の形状を 3 次元座標を有した点の集合体として高精度に計測できる機械であるためである。多くの市販製品が、10m 先の対象物に対し 2～3 mm 以下の誤差で計測可能であり、材木の検査や加工検討のために十分な精度である



図 3-24 材木形状が変化するプロセス



写真 3-5 使用機材（3 次元レーザースキャナー）

と考えた。取得されるデータは、3次元座標(x, y, z)、レーザーの反射率(intensity)、色情報(R, G, B)の7つのテキストによって記述された点データの集合体であり、一般的には点群データと呼ばれる。次に、取得した点群データを一般的なプログラムで編集できる形式に変換するため、データ汎用化、レジストレーション、の2つのデータ処理を、市販ソフトウェアを用いて実施する。

次に、材木の形状に関わる検査を自動化する機能は既存のツールに存在しないため、デジタル検査プログラムを独自に開発した。従来の検査作業をプログラム処理に置き換えるためには、主に要求される機能は①必要な寸法の自動生成②設計図面の重ね合せ、の2つであると考えた。材木の点群データを活用してこれらを実現するため、以下の要件でプログラムを開発した。

a) 点群データの読み込み機能

b) 点群データの表示機能

可否の判定基準の多くは寸法等の数値で表される。計測すべき寸法の位置は、材木に対して水平や垂直な投影面の中で決められている。そこで、点群データは3次元ビューで表示せず、あえて平面・立面・断面の3種類の2次元ビューで表示する仕様とした。

c) 点群データの自動整列

材木には配置する向きに重要な意味がある。まず、必ず2か所ある切断面のことを“木口（こぐち）”と言い、根元側を“元口（もとぐち）”、反対側を“末口（すえぐち）”という。マツ材は材の特徴として1方向に向かって湾曲している割合が高い。建材として木を使用する場合、できる限り元口に近い部分を使用し、曲りが上方向になるよう配置する。そのため、寸法の計測においても元口・末口・曲りを判別する必要がある。そこで、開発プログラムでは、点群データを読み込む際に、実際に建物に使用する向きに自動で整列させる仕様とした。処理としては、まず点群データの3Dバウンディングボックスを生成し、平面ビューにおいて直方体の長辺が水平になるよう配置する。次に、短辺方向の2面に最も近い点群断面2つを比較し、面積が大きい方を元口、小さい方を末口と判断して、平面ビューにおいて元口が右側になるよう配置する。最後に、バウンディングボックス内全ての点群と両木口の点群を比較し、平面ビューにおいてバウンディングボックス内の点群がより上方に位置する方向に配置する。

d) 寸法線と寸法値の自動表示

可否の判定のために必要な寸法について、実際に検査で使用されている検査シートと、検査者である設計者・施工者・大工にヒアリングした。その結果、開発プログラムでは検査時の材木の外形に関わる寸法値と、加工を想定した寸法値を自動で生成する仕様とした。加工を想定した寸法とは、検査時の材木から建材を切出す位置を表す寸法である。なお、この切出し作業のことを“木取り（きどり）”という。また、曲がり組立時に重要な寸法であるため、木取り後の形状をベースに算出する。材木の外形ラインを平面ビューで見たとき、長辺方向の2つのラインが上弦の弧になっている。それぞれの弧について、両端を結んだ直線に対する垂直距離の中で最も大きい値をむくり値と定義した。材木の各部位の名称と寸法位置を図3-25に示す。

・材木の外形寸法：両木口断面の wide と height、材木の長さ

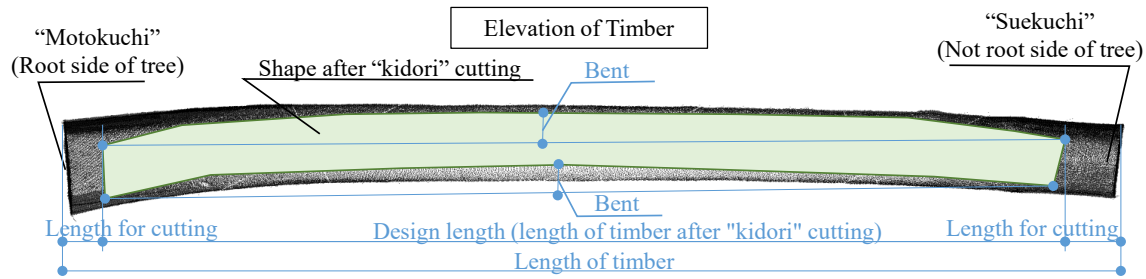


図 3-25 材木の各部位の名称と寸法位置

- ・ 木取り寸法：元口・末口側から木取り位置までの長さ、木取り後の材木長さ＝設計長さ、木取り後のむくり値、木取り後の両木口断面の wide と height

e) 図面データの重ね合せ表示

寸法値で判断が難しい項目については、平面ビューの中で、点群データに対して設計図の断面ラインを重ね合わせる仕様とした。設計図の断面ラインには、対象に部材に対して接続する別部材の断面も記載されている。材木は完全な直線や一律な曲率で構成されていないため、組立時に問題なく他部材と接続が可能か、確認が必要である。

3 次元スキャンデータの軽量かつ汎用化手法の提案

デジタル検査のために取得した材木の形状データを後工程でも活用できるように、点群データを軽量かつ汎用的な形式に変換する手法を提案する。今回は、調達の後工程における加工検討での活用を想定ケースとした。具体的には、CAD 上のプログラム処理によって材木の加工形状をシミュレーションする作業を想定し、検査時に取得した点群データを軽量のポリゴンメッシュデータに変換する。このデータ変換を行うために、以下 2 つのアルゴリズムを採用した。

ひとつ目は、オクツリーを使った点群の間引き処理方法である。点群データからポリゴンメッシュデータを生成する場合、まずは点群を頂点として機械的に三角形を生成する。そのため、軽量のポリゴンメッシュデータを生成するためには、点の数を少なく均等に間引く必要がある。しかし点群データは、3 次元レーザースキャナーを中心に放射状にレーザ計測した点の集合体であるため、同じ材木であっても場所によって点の密度が大きく異なる問題がある。このように、不均一な点群データを軽量化するために、オクツリーを使った均等間引き手法を採用する。図 3-26 に示すように、オクツリーとは、対象の空間を格子状に均等分割する考え方であり、分割された空間ごとに 1 点ずつの点データを残すことで、点群データを均等間隔で間引くことが可能であると考えた。

ふたつ目は、ポアソン方程式を使った平滑化方法である。点群データを使ってポリゴンメッシュを生成する際の問題は、点群にノイズ点が含まれる場合、ノイズ点も頂点の一つとして計算されてしまうため、実際の形状とは異なる凹凸が出現することである。レーザースキャンは、レーザの反射による時間差や位相差から距離を推定する原理であるため、空気中の塵や機器上の汚れ等によるノイズが必ず一定量含まれる。そこで今回は、ノイズを含んだポリゴンメッシュが生成されることを許容し、そのポリゴンメッシュを平滑化処理することによってノイズ

の影響の最小化を図った。具体的には、面形状の平滑化のために、Kazhdan らが提案しているポアソン方程式を使った平滑化アルゴリズムを採用した。これは、近傍面の平均平面を計算することにより、急激な凹凸を防ぎ、面全体を滑らかにする処理である。この処理によって、図 3-27 に示すように、機械的なノイズの影響が少ないポリゴンメッシュを生成可能だと考えた。以上の手順で作成したポリゴンメッシュを、STL 形式でアーカイブする。STL を採用した理由は、建築系の 3DCAD ソフトや、他分野のシミュレーション・解析ソフトでも一般的に用いられている汎用的な中間ファイルフォーマットであるためである。

本研究では、これら提案手法を用いて、実プロジェクトに試適用して有効性を検証したので、次に報告する。

3.5.4. プロジェクトにおける試適用検証

プロジェクト概要

本研究では、伝統的な木造建築の復元プロジェクトを題材とした。使用される材木は、主架構木材が約 2,000 本であり、体積で表すと約 2,000 である。木の種類は、主にヒノキとマツであり、部位によって角材と丸太材が存在する。これらは、1 本の原木から 1 つ柱・梁を削り出すことで建材として加工される。

次に、検証のモデルケースとする検査作業について説明する。まず初めに、検査対象の材木は反りが水平になる方向で床に寝かされる。その状態で露出している部分、具体的には、材木側面の 3/4 程度と両端切断面を対象に検査を実施する。その後、材木を反転させて残りの側面を検査する。このとき、必要に応じて原寸サイズの設計断面図面を材木と床の間に敷き、形状を比較する。この作業を全ての材木に対して実施していく。材木の移動や反転をスムーズに行うため、検査対象の材木は検査前日までに床一面に敷き並べられ、検査が完了したものから順にストックヤードへ移動して山積みされる。このワークフローの中で、新手法を適用する。

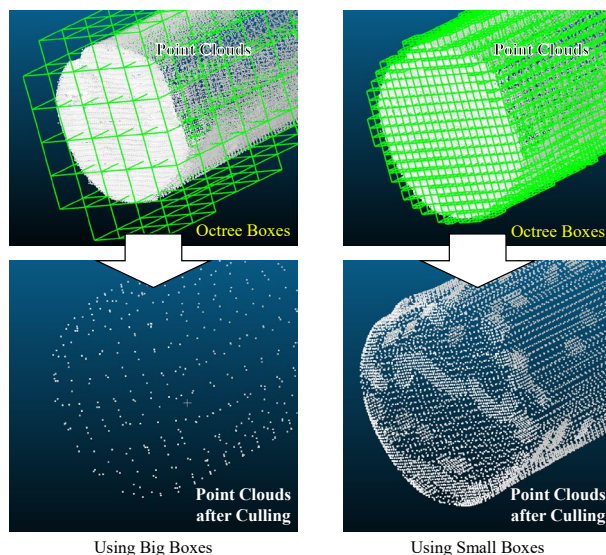


図 3-26 オクツリー手法を使った均等間引き

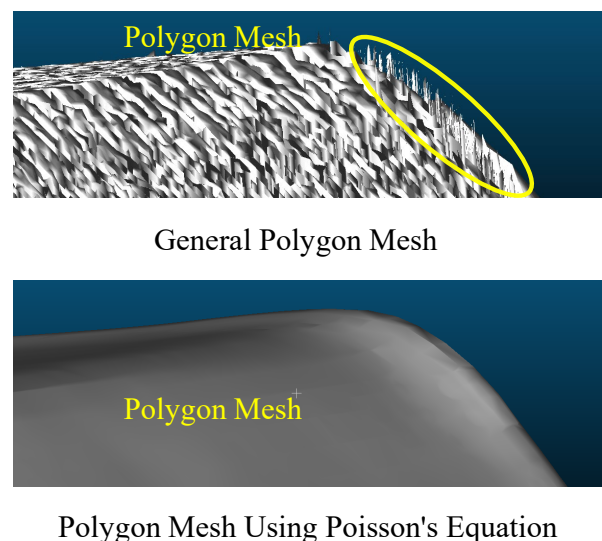


図 3-27 ポアソン方程式を使った平滑化

提案手法の適用方法

● 適用の対象物

主架構木材の内、約 500 本使用するマツの丸太材とした。理由は、使用される建材の中でそれらが最も複雑でユニークな形状であり、提案手法の適用効果が大きいと考えたためである。

● 適用時期と場所

2019 年 1 月～2020 年 3 月、日本の岩手県

● 使用機材

- ・ 3 次元レーザースキャナー（FARO 社『FOCUS3D S120』）
- ・ 機器付属の点群編集ソフトウェア（FARO 社『SCENE』）
- ・ 独自開発した検査支援プログラム
- ・ 点群処理専用フリーソフトウェア（『CloudCompare』）

[適用手順 1 3 次元スキャンによる検査支援手法]

材木の形状を 3 次元スキャンするタイミングは、1 つの材木に対して 2 回に分ける。1 回目は、検査対象の前日、材木が敷並べられている状態である。2 回目は、検査完了後、材木が反転された姿勢でストックヤードへ移動されたときである。それぞれ、計測漏れを防ぐため、1 つの材木に対して 2～4 か所の位置からスキャンする。検査前日の材木の状態を図 3-28 に示す。スキャンを 2 回に分けた理由は 2 つある。一つ目は、人間による検査の事前に、自動検査のために最低限必要な面をスキャンするためである（註：英文と対比するためにあえて回りくどい日本語になっています）。事前であっても、山積みでストックされている状態では露出面が不足する。床上に敷き並べられた状態であれば、形状に関わる検査が可能であると考えた。二つ目は、従来作業に手間を追加しないためである。スキャンデータを後工程でも活用するためには、材木全面のデータが必要である。しかし検査の事前には、フォークリフトを使用して材木を移動および回転しなければならないため、とても手間が掛かる。そこで、通常のワークフロー中に残りの面が露出する時に、2 回目のスキャンを実施する。複数方向からスキャンした点群データは、専用の付属ソフトウェアを用いてレジストレーションし、材木ごとのファイルに分割したうえで、汎用的な中間ファイルフォーマットである PTS 形式の点群データに変換する。

そして、材木ごとの点群データに対して検査支援プログラムを使用し、以下寸法を自動生成するとともに、設計断面データを重ね合わせる。



図 3-28 ストックされた材木とスキャン作業および受入検査の様子

- ・材木の外形寸法：両端断面の wide と height、材木の長さ
- ・加工後の寸法：材木から削り出す建材の設計長さ、両端からの距離、建材の反り、建材両端の断面の wide と height

なお、材木から建材を削り出す際の両端からの長さについては、設計長さより 500mm 長く発注しているため、プロジェクトの基準ルールとして設定されている、材木の根元側から 250mm を初期値とする。

[適用手順 2 取得データの軽量かつ汎用化手法]

前項で取得したデータを使用する後工程として、施工部署が材木の加工形状をシミュレーションする作業を題材とした。ツールには一般的なコンピュテーショナルデザインソフトである Rhinoceros と Grasshopper というソフトウェアが使用される。処理フローは、加工前の材木の 3D データに対し、プログラム言語で記述した加工ルールを適用して、加工後の材木形状を自動で生成する。この処理フローを実施するためには、インプットする 3D データは汎用的な面データで、かつ、10MB 以下程度のファイルサイズである必要がある。前項で取得した点群データのままだはこの要件に合致しないため、前章で提案した手法を使ってデータ変換を試みる。

目標とするポリゴンメッシュデータの仕様としては、データを構成する三角形メッシュの頂点が約 10mm 間隔程度に設定した。理由としては、加工を検討する設計者と宮大工にヒアリングした結果、材木表面の特徴的な歪みや傷を考慮して加工検討する場合、10mm 以上の凹凸が表現されていればデータとして十分である、との結論が得られたからである。

具体的には、伝統的な木造建築で使用される材木の長さが 7,000mm 前後である場合が多いため、 $93=729$ 個の格子で分割すると、9.6mm 間隔の点群データが得られる。

そしてその点群を頂点としたポリゴンメッシュを生成し、ポアソン方程式を使って面を平滑化する。これらの処理はフリーウェアである CloudCompare が持つ複数の機能を組合せることで実施する。

以上の手順で適用した結果を次に説明する。

3 次元スキャンの結果

材木を 3 次元スキャンした結果を報告する。適用対象である丸太材に対して、2019 年 1 月から 2020 年 3 月の間に 32 日間実施された検査作業に筆者らが同伴し、再検査も含めて全部で材木 581 本に対して 3 次元スキャンを実施した。材木の長さごとの本数を図 3-29 に示す。最短で 2,350mm、最長で 16,968mm であり、中央値は 6,800mm であった。

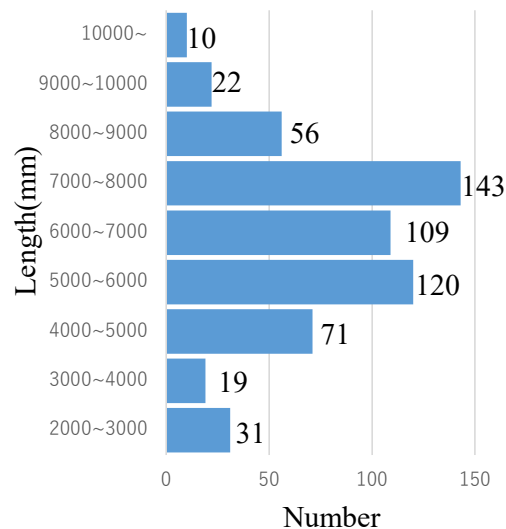


図 3-29 スキャン対象とした材木の長さごとの本数

提案手法の適用結果と効果検証

[提案手法 1 3次元スキャンによる検査支援手法]

まず、代表的な一つの木材を題材として、提案手法の適用結果を報告する。題材としては、長さが全体の中央値に近い 7,130mm で、類似の形状も多い材木 1 つを選定した。以下、この材木をサンプル材木と言う。1 回目の 3 次元スキャンは検査の前日であり、サンプル材木は他の材木 4 本と隣接して床に整列されていた。遮蔽ができる限り少なく計測できるよう考慮し、5 本の材木の周囲 7 地点から 3 次元スキャンを実施した。このとき、レジストレーション処理の際にベンチマークとして使用するため、直径 145mm のプラスチックボールを 4 つ設置した。レーザー照射の解像度は 5,120pt/360° で実施した。これは 10m 先で 4mm 間隔ほどになる密度である。次に、点群編集ソフトを使って、取得した点群データからサンプル材木の部分のみを切出し、PTS 形式で保存した。そして、開発した検査支援プログラムを使用し、検査で必要な寸法値を自動生成した。具体的な検査項目と、プログラムで自動生成した寸法値を以下に示す。
検査項目：長さ 6,800mm 以上、根本側の断面の W×H が 550mm×550mm 以上、反りが 150mm±30mm 以内。自動算定した数値は、長さ 7,044mm、断面が 728mm×663mm、反りが 139mm であり、合格基準を満たしていた。さらに、点群データに設計断面図を重ね合せて表示することで、数値で表せない形状に対しても、検査者 1 人が事前判定を行った。その結果、従来であれば検査時に材木の下に原寸の紙図面を敷いて比較する作業を、このサンプル材木については省略することができた。プログラムを使った事前検査の様子を図 3-30 に示す。

この検査支援手法によって得られた効果を、工数比較によって考察する。従来の検査時間は 1 本当たり 20 分であり、省略できた時間は 10 分である。検査時には平均して 8 名程度の検査

者が立ち会うため、トータルで 80 分が削減された。一方で、スキャンからデータ処理までの作業は 1 名の技術者が実施しており、1 本当たり 30 分が増加した。以上より、材木 1 本当たり 160 分の内 50 分、約 31 % の労働時間が削減された。

また、本手法の適用によって、数値では表れない付加価値も生まれた。高度な加工スキルを有する職人からの要望で、実物では確認できない寸法や形状を事前に確認できた。具体的には 2 つである。一つ目は、反り形状である。検査項目では、材木の外側から計測できる部分を確認している。今回は点群データを使って、材木の施工にとってより重要である、材木内部から上側の反り寸法を計測することができた。二つ目は、材木を加工した場合の断面形状である。今回は、点群データを使って仮想的な切断面を確認できた。このように、高度な技能を有する職人がデジタル技術を使うことで、より付加価値の高い仕事が可能となることが分かった。

[提案手法 2 データの軽量かつ汎用化手法]

サンプル材木を題材に、手法の適用結果を報告する。5.1 で取得した点群データは (x, y, z, intensity, R, G, B) のテキスト配列で記述している。サンプル材木の点群データは、密度が不均質な 1,097,31 個の点で構成されており、ファイルサイズは 67MB であった。1 つ目のステップとして、これに対して 93 に分割した 3 次元オクツリー(octree)を生成し、各エリアの中で 1 点のデータのみを残すことで、データを 10 mm 間隔程度の密度で均等に間引いた。次に、この各点を頂点とした三角形で構成されるポリゴンメッシュを機械的に生成するとともに、ポアソン方程式を使って面を平滑化することで、目標とする品質のポリゴンメッシュデータを作成することができた。このデータを STL 形式で保存したところ、ファイルサイズは 7.6MB であり、88.4% の軽量化を実現した。データ変換の手順を図 3-31 に示す。

以上の手順で作成したデータを使って加工シミュレーションを実施することができたので、その手順を図 3-32 に示す。具体的には、断面形状を直径 550mm の円に内接する正 16 角形とし、長軸方向の中心線に沿って、材木を切っている。従来は設計用のシンプルな BIM モデルを使ってシミュレーションを実施していたが、今回は現実の材木形状を使って、より精密な加工計画や問題抽出ができた。このように、(1) で取得したデータを軽量かつ汎用化することで、後工程でも、より高度な仕事を実現できる可能性があることが分かった。

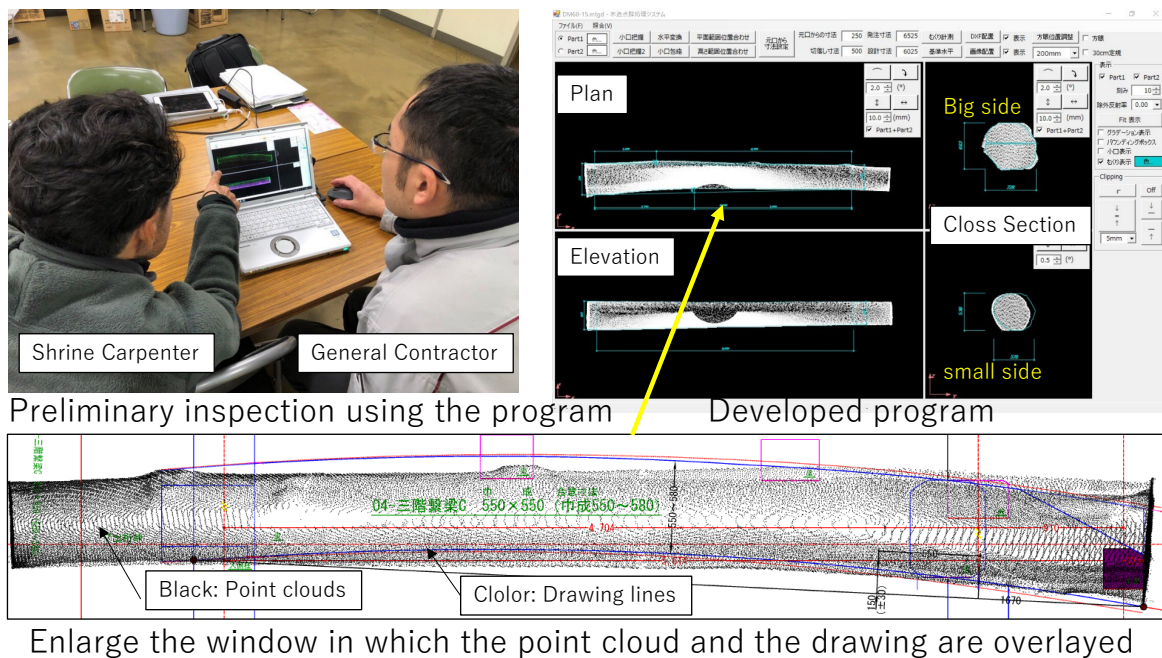


図 3-30 開発プログラムを使った事前検査の様子

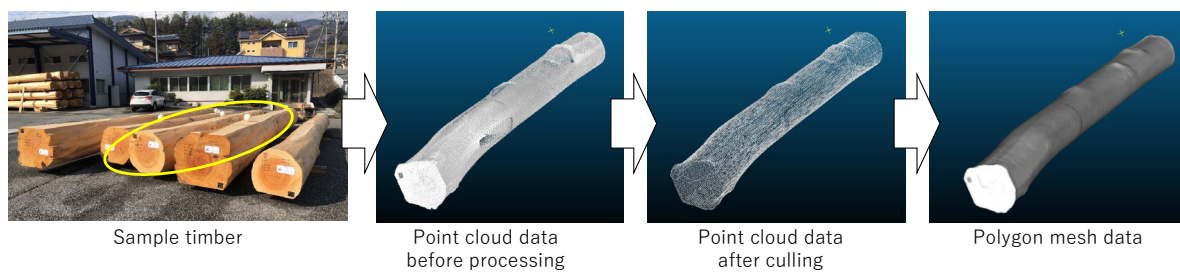


図 3-31 検査対象材のデータ変換の手順

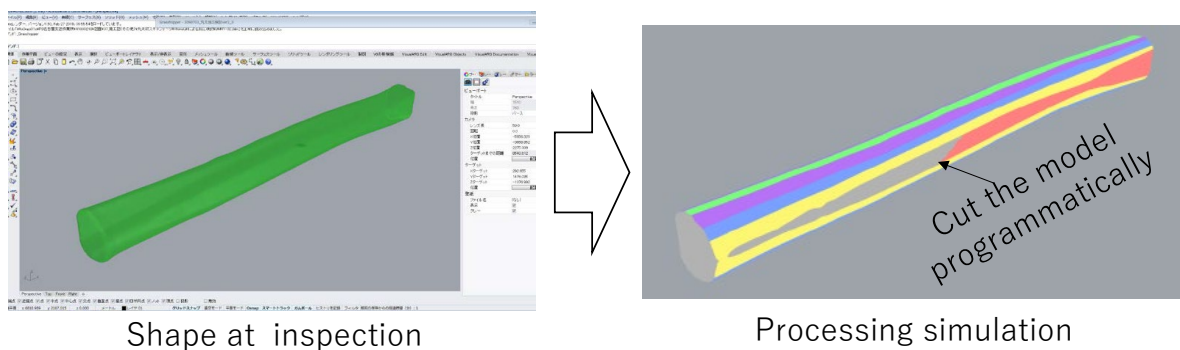


図 3-32 ポリゴンメッシュデータを使った加工シミュレーションの様子

3.5.5.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

このケーススタディでは、3次元スキャンした建材の形状を使って検査を支援する手法と、そのデータを後工程でもハンドリングよく使用するため、軽量かつ汎用化する手法を提案した。さらに、伝統的な木造城郭の復元プロジェクトでこれらの手法を適用することで、有効性を検証した。その結果、建材の検査作業において1本の材木当たり31%の労働時間の削減に貢献するとともに、取得データを約90%軽量化したポリゴンメッシュデータに変換することで、後工程の加工シミュレーションでの活用を実現できた。さらに、高度な技能を有する職人がこれらデジタル技術を活用することで、従来よりも高度な仕事の実現できる可能性を示唆した。

なお、本研究は株式会社竹中工務店と慶応義塾大学 SFC 池田研究室の共同研究として実施した。本取組みにおいては、筆者が3次元スキャンの実施と点群データの処理に関わる自社開発を担当し、池田研究室が前後工程を考慮したデータ構造の検討を担当した。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第1章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および本項で適用した3次元スキャン技術の普及を阻む要因となっているものを表3-10に整理する。工場検査を題材とした3.4.鉄骨部材と同様の要因に加えて、従来業務ではNo.5「特殊な性能を持つ材料を使用する」が問題解決の阻害要因として加わる。原木からの削り出しによって材料を製造するため、工業製品と異なり、一品一品の形状が全て異なる。設計の段階では、想定形状で計画されており、受入検査では明確な検査寸法がなく、意匠・構造などの視点で要求性能を確保するための許容値などに基づいて判定されるなど、より複雑な作業が要求される。そのため、省人化のための問題解決をより困難とする要因となっている。しかし、3次元スキャン技術の活用では、数式化されたルールに基づいてデータ処理することから、工業製品と同様に扱うことができるため、この特殊性は問題とならないことを確認した。

次に、実務担当者が自ら技術を扱うために克服が必要な障壁を以下の通り確認した。まず、検査用途で頻出するソフトウェア操作が存在し、実務担当者にとっては3次元の点群データを手動で扱う難易度が高いため、それら操作を自動化することが重要であった。具体的には、部材を3次元座標軸に対して水平・垂直方向に回転整列する、平面・立面・断面の正射投影で表示する、数式で決められたルールに従って必要箇所へ寸法線を記入する、などであった。これらはいずれも、一般的にはCAD操作として基本的な機能であるが、複雑な3次元データに対して、技術に不慣れな人材が手動で水平・垂直や正面などを定めるためには補助線描画など手間やストレスを要する操作を伴うものであることが分かった。その他にも、表示・閲覧機能や印刷機能など、CAD操作には直接関わらないユーザーインターフェースの完成度も重要であることが分かった。例えば、点群データは一般的なCADやドキュメントファイルと比較してデータサイズが大きく、起動・閲覧にも分単位の時間を要することがある。検査の実務では数百個単位のデータを同時に扱うため、分単位の起動時間であっても業務を圧迫することから、部分的な試行検証では問題にならなくとも、実務適用する場合に担当者が途中で使用を止める要因と

表 3-10 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する	×	
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	
	10	労働集約的作業		
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

なる。そのため、点群の平面形状をサムネイル表示する、自動生成した寸法値のみリスト集計・表示する、複数部材の平面・立面画像を集約表示、指定の縮尺で印刷するなど、点群データの操作性を補うソフトウェア機能が必要であった。

- 専門知識・技術の習得難易度：複雑形状の点群データはソフトウェア上で取り扱いが難しく、基本的な CAD 操作であっても手間を要するため、業務を圧迫する。一方で、類似操作を繰り返し使用するため、自動化の効果が大きい。
- 大容量データ：点群データは他のデジタルデータと比較して大容量であり、起動・閲覧にも時間を要するため、多量の部材データを扱う際に業務を圧迫する。表示・印刷など、CAD 機能以外の基本的なユーザーインターフェースの完成度も重要。

その他に、3次元スキャン技術の活用を阻害する要因として以下を確認した。

- 準備データの不足：検査のために必要な準備データは、設計で用いられている想定形状ではなく、検査用に整理した許容値や判定方法の数式化が必要となった。
- データの非標準化：本用途で活用するための点群データの計測品質や解像度、ファイル形式など、一般的な仕様がないため、現状では全て事前に想定し、使用する機器とソフトウェアに応じて仕様設計する必要があった。

- 専任人員の必要性：点群データを採取する作業に限っては、取り扱う機器・ソフトウェアが特殊であり、実務担当者に求めるスキルではないため、専門家を別途配置するか、外部委託などが必要。
- 技術適用までの準備手間：デジタル検査のために、対象となる木材の3次元スキャンを事前に実施し、一本単位で点群データと判定モデルのセットを準備する必要がある。
- 成果創出までのリードタイム不足：原木から削り出す木材は特殊であり、設計仕様に適合する原木の探索自体が困難であるため、検査対象の決定から検査実施までのリードタイムが短い。加えて、生産プロセスの工程上、受入検査後の後工程までのリードタイムも短い。そのため、3次元スキャンを実施するタイミングが検査前日などに限定されることも多く、技術に要求されるスピード感が阻害要因となった。
- 費用対効果の不足/不明確：取り扱う機器・ソフトウェアいずれも高価であり、一般的に普及させるためには設備投資の必要性や効果の明確化が課題であった。

3.6.本章のまとめ

本章では、施工出来形および工場製作物の検査効率化を目的としたデジタル活用を題材として、TLS を使った 3 次元スキャン技術を要素技術に選定し、実務適用のケーススタディを通じ、主に実務担当者が点群データを扱う場合のスキルに関する障壁を考察した。具体的には、以下 3 つの検証項目に対し、ケーススタディを実施した。

（検証項目 1）技術適用のために特別に必要となる作業の把握のため、RC 造の出来形把握を題材に、点群データを活用した。その結果、技術適用のために既存構造物を一部を先行して露出させる、現地に先行して墨出しする、などの作業調整が必要であり、これらを実施するためには建築知識と点群データ活用ノウハウの両方を有する専門家の配置が求められることを述べた。

（検証項目 2）建築特有の検査項目への対応するためのソフトウェア操作を把握するため、鉄骨部材の工場検査を題材に、点群データと BIM モデルの重畳を実施した。その結果、形状の精度確認やボルト孔の相対位置確認など、要求される品質管理方法に応じて複数のソフトウェア操作を組合せる必要があることを明らかにした。さらに、そのためには品質管理方法を数学的に解釈するために建築知識および ICT スキルが求められることを述べた。

（検証項目 3）実務担当者が自ら技術を扱うための障壁を把握するため、伝統木造建築で用いられる大型木材の受入検査を題材に、実務で扱う 581 本全数に対してデジタル検査を実施した。その結果、点群データをソフトウェアで扱う場合には、回転・整列や寸法記入などの基本的な CAD 操作が煩雑であることに加え、起動・表示など CAD 操作以外の基本機能にも手間や時間を要するため、実務担当者が自ら技術を扱うためには、これら基本機能の自動化やユーザーインターフェースの充実が必要であることを述べた。

また、これらケーススタディにおいて点群データを合理的に活用するため、専門家に対して点群データ活用に関するアンケート調査を実施し、施工管理用途で点群データを活用するための主たるソフトウェア操作を 32 項目抽出するとともに、DSM 手法を用いて合理的な手順を提案した。

これら検証を通じて明らかにした、第 1 章で整理した建築工事の特殊性 15 項目に対する、従来業務の問題解決と、デジタル活用を阻害する要因を表 3-11 に整理する。実施したケーススタディで一つでも阻害要因として挙げた場合は、本表においても阻害要因として表記し、題材によって結果が異なっている場合は以下の考察内で詳細を言及する。

全てのケーススタディに共通して No. 3「建築物の規模・複雑度が大きい」No. 8「一品受注生産」No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No. 14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」の 4 項目が要因となり、プロジェクトごとに多種多量が施工・製造される建築部材の出来形確認・工場検査が実務の負担となっていることが分かった。また、工場検査のように専門工事会社や工場が関わる場合は、No. 9「重層下請構造」No. 11「工事関係者が臨時に組織される」の 2 項目が要因となり、プロジェクトごとに変わる施工体制が問題解決を阻害していることが分かった。木材のように部材ごとに形状や物性が異なるなど、No. 5「特殊な性能を持つ材料を使用する」場合はより省人化を困難にすることを指摘した。しかし、これら 7

表 3-11 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題解決 ×：阻害要因	デジタル活用 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する	×	
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	
	10	労働集約的作業		
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

項目は、3次元スキャン技術の活用を想定すると、多種多量のデジタルデータを数式に従って自動で検査する特性に対しては不利に働かないため、技術を普及させる阻害要因とはならなかった。

一方で、No. 1「現場の場所が常に変わる」によって特定の場所への設備投資が難しく、No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」されることから、従来業務でも3次元スキャン技術の普及においても、『費用対効果』が普及の阻害要因となった。

その他に、施工出来形および工場製作物の検査効率化を目的とした3次元スキャン技術の活用を阻害する共通の要因として以下を確認した。

- 準備データの不足：出来形や工場製作物などの実施情報との比較対象となる計画情報もしくは判定のための基準のデジタル化・数式化が必要であった。鉄骨部材などの工業製品のように、工場やメーカーが製造工程を通じて作成する加工データが存在する場合は、準備データを比較的容易に整備できることが分かった。
- データの非標準化：点群データを出来形確認や検査目的で使用するための計測品質や解像度、ファイル形式など、一般的な仕様がなないため、現状では全て事前に想定し、使用する機器とソフトウェアに応じて仕様設計する必要がある。
- 大容量データ：点群データは他のデジタルデータと比較して大容量であり、一般的な工事関係者が使用するPCやソフトウェアでは扱うことが困難であった。加えて、データを保管するストレージや関係者間でやり取りするデータ授受手段など、情報インフラも新たに整備が必要であった。

- 技術適用までの準備手間：デジタル検査のために、対象となる部位・部材の3次元スキャンを事前に実施する必要がある、これらを実施するための現地環境の整備（出来形確認の場合は現地の墨出しや対象部位の露出、工場検査の場合は3次元スキャンを実施するための部材敷き並べなど）と体制構築が必要であった。
- 成果創出までのリードタイム不足：出来形確認や工場検査の用途では、生産プロセスの工程上、検査から判定までのリードタイムが短い場合が多く、点群データ処理に要する時間は一般的に数日以上が相場であるため、技術普及のためにはデータ処理のスピードが阻害要因となることが分かった。
- 専用人員の必要性・専門知識・技術の習得難易度：3次元スキャン技術に関する機器・ソフトウェア・データはいずれも施工管理業務の中では特殊であるため、工事現場・工場の実務担当者が扱うことは困難であり、専門家を別途配置するか、実務担当者への事前教育が必要となった。
- 費用対効果の不足/不明確：取り扱う機器・ソフトウェアいずれも高価であり、一般的に普及させるためには設備投資の必要性や効果の明確化が課題であった。

参考文献

- [1] 松田耕, 多葉井宏: RC 一貫生産システムに関する研究-鉄筋工事用 BIM ツールの開発と適用-, 第 33 回建築生産シンポジウム論文集, pp. 37-44, 2017. 7
- [2] 曾根巨充: 建築生産情報のマネジメント技術に関する研究 鉄筋工事における設計・加工・施工の生産情報の連携に着目した技術的解決方策について, 芝浦工業大学学位論文, 2021. 3
- [3] 蔡成浩, ほか 4 名: 配筋測定へのステレオカメラの適用, 2008 年度日本建築学会 (中国) 学術講演梗概集, pp. 901-902
- [4] 池田雄一, ほか 3 名: 配筋自動判定システムの開発と現場検証実験, 大林組技術研究所報, 大林組, No. 78, pp. 1-6, 2014. 12
- [5] 妹尾, ほか 4 名: 3 次元レーザースキャナを用いた建築物の計測手法に関する研究 その 4 屋上スラブを対象とした点群データ測定作業手順と活用事例: 2020 年度日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集, pp. 857-858, 2020. 9
- [6] 脇坂英佑, ほか 2 名: 難計測部をもつ空調設備 as-built 3 次元モデル構築のための最適スキャナ配置計画 (第 1 報) 不完全な SfM モデルに基づいた計測対象空間の空間占有状態分類手法, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 479-480, 2016. 9
- [7] スティーブン・D・エッピンジャー, タイソン・R・ブラウニング: デザイン・ストラクチャー・マトリクス DSM-複雑なシステムの可視化とマネジメント-, 慶應義塾大学出版会株式会社, 2014. 10

図版出典

図 3-1 筆者作成

図 3-2 株式会社キーエンス: CHAPTER 3 測定機の種類と特徴アーム型三次元測定機より引用
<https://www.keyence.co.jp/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/arm-cmm.jsp> (accessed 2023. 9. 20)

図 3-3 筆者作成

図 3-4 筆者作成

図 3-5 筆者作成

図 3-6 筆者作成

図 3-7 筆者作成

図 3-8 筆者作成

図 3-9 筆者作成

図 3-10 筆者作成

図 3-11 筆者作成

图 3-12 筆者作成
图 3-13 筆者作成
图 3-14 筆者作成
图 3-15 筆者作成
图 3-16 筆者作成
图 3-17 筆者作成
图 3-18 筆者作成
图 3-19 筆者作成
图 3-20 筆者作成
图 3-21 筆者作成
图 3-22 筆者作成
图 3-23 筆者作成
图 3-24 筆者作成
图 3-25 筆者作成
图 3-26 筆者作成
图 3-27 筆者作成
图 3-28 筆者作成
图 3-29 筆者作成
图 3-30 筆者作成
图 3-31 筆者作成
图 3-32 筆者作成

表 3-1 筆者作成
表 3-2 筆者作成
表 3-3 筆者作成
表 3-4 筆者作成
表 3-5 筆者作成
表 3-6 筆者作成
表 3-7 筆者作成
表 3-8 筆者作成
表 3-9 筆者作成
表 3-10 筆者作成

表 3-11 筆者作成

写真 3-1 筆者撮影

写真 3-2 筆者撮影

写真 3-3 筆者撮影

写真 3-4 筆者撮影

写真 3-5 筆者撮影

第4章 施工記録目的のデジタル活用

- 4.1. 本章の目的と構成
- 4.2. 建築生産プロセスを通じた建材トレーサビリティの記録と可視化
- 4.3. 工事進捗の記録と可視化
- 4.4. 解体・リユースを想定した建築材料の使用履歴の記録
- 4.5. 本章のまとめ

参考文献

4.1.本章の目的と構成

はじめに

本章では、要素技術の実務適用を阻害する要因に対するケーススタディとして、主としてプロジェクトにおける業務活用を想定し、建築資材および工事現場全体の進捗記録・活用を題材として取り上げる。

第1章で述べた建築工事に関わる問題の中で、本章に関わるものとして、建築資材の価格変動、それら変動に対する曖昧な市場予測に基づいた資材計画による原価変動、環境保全のために増える規制や書類の増加による実務担当者の疲弊、曖昧な根拠に基づいた工程管理と原価管理による巧拙の差異、工事の過程で起きる様々な問題による工程の混乱と遅延、が挙げられる。この中で、市場の価格変動や法規制といった外的環境、工事の過程で起きる様々な問題は一品受注生産かつ毎回場所が変わる建築工事の特性であり、コントロールすることができないので、これらの影響を小さくするために、建築工事における多様な進捗・実績データに基づいた将来予測・工事調整が必要である。

建設分野における各種記録に関する現状としては、例えばゼネコンでは部署や職能の縦割りで業務ツールが作り込まれてきたため、収集した情報がアナログのままであったり、デジタル化されていても他に転用が難しく、多くの業務ツール間でデータが共有されていない問題がある。ゼネコンが扱う業務ツールの例を図4-1に示す。営業、設計、見積、工務、調達、生産技術、施工、安全、環境、労務、改修工事・維持管理など、職能ごとにデータベースや管理ツール

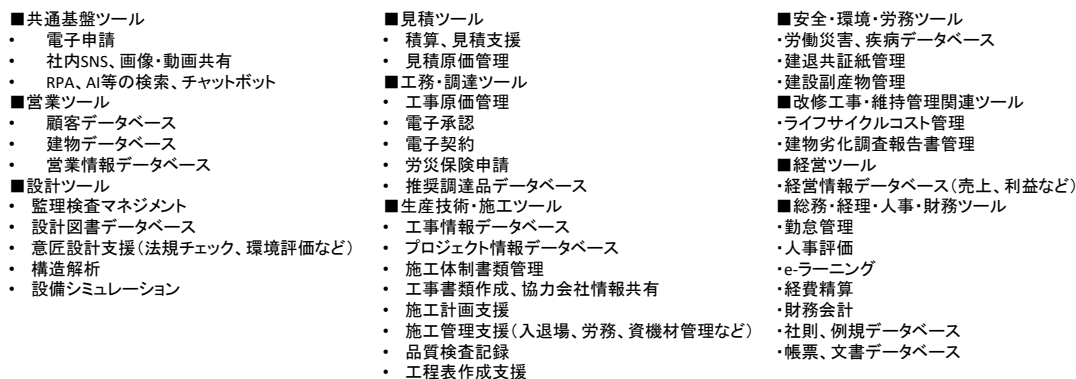


図 4-1 ゼネコンが扱う業務ツールの例

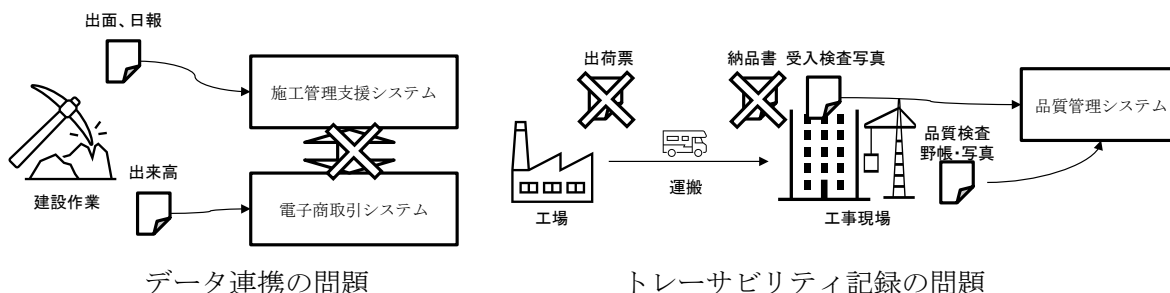


図 4-2 建築工事に関わる記録の問題点

ルが整備されていることが分かる。例えば労務関連では、工事現場において協力会社が労務申告のために、施工管理ツールの中で日々の出面や日報を登録しても、精算目的の電子商取引ツールにデータが連携されないため、同じような情報を何度もデータの形を変えて再度登録している。建築資材を対象とした例では、受入時や施工時の品質検査を通じて、実物や検査内容の黒板を写した写真などを記録しているが、工場における製造履歴や出荷・受入時の納品書などのトレーサビリティ情報は体系的に記録されておらず、デジタル化すらされていないことが多い。このため、同じような情報を何度も入力する手間や、転用できないアナログ情報、滅失する情報など、記録に関する問題が多い（図 4-2）。

建築工事においてプロジェクト単位で進捗を管理する対象は建設資機材（本設・仮設）・労務・建設機械・工事現場の空間・搬出入車両など幅広い。このような経営資源の有効活用を目的として、例えば製造業では ERP (Enterprise Resource Planning) と呼ばれる基幹統合システムなどによってデータが一元管理されており、進捗・実績データは例えば工場や製造ラインの各工程でトレーサビリティが記録され、データベース化されている。これら他産業の事例は、ものづくりに関わる一連のサプライチェーンがグループ企業内、もしくはある程度固定化された調達先であるため、パッケージ化されたツール・システム類の導入が可能であったと考えられる。一方で建築工事では、第 1 章で述べた通り重層下請構造かつプロジェクトごとに工事関係者が臨時に組織される特殊性があるため、各企業間で使用するツール・システムやデータ類の統一・標準化が難しく、他産業で実績のあるシステムを直接導入することができなかった。

そこで本章では、データの基づいた科学的な将来予測と工事調整の実現を想定し、建築資材および工事現場全体の進捗記録・活用に関するケーススタディを実施することで、デジタル活用の実務適用を阻害する要因を抽出する。

既往研究

労務に関する既往の取組みでは、香月^[1]が IC カードを利用した入退場管理システムの開発を報告するなど、過去にゼネコン各社が入退場管理システムを自社開発していた。自社クローズの入退場管理システムの課題として、プロジェクトごとに建設労働者が変わる点、プロジェクト途中であっても入れ替わりやスポット入場が多い点が挙げられた。建設労働者の視点では就労する工事現場やゼネコンによってシステムが異なるため、普及の阻害要因として挙げられていた。第 2 章で述べた通り、現在は複数の建設資機材リース・レンタル会社が製品化しており、工事現場ごとにこれら製品の中から採用される状況になったことで、入退場管理システムとしては技術の普及が進んでいる。

建築材料や工事進捗の記録に関する既往研究では、嘉納^[2]が PCa 工事を題材に、工事現場内のタワークレーンに設置したカメラによって撮影した画像を用いて 3 次元スキャン（フォトグラメトリー）を実施し、定期的に工事現場全体の点群データを取得することで、差分の自動抽出による工事進捗の把握を試みている。RFID などの電子タグを用いた研究では、中村^[3]、村井^[4]が木材のトレーサビリティ記録、中島^[5]が鉄骨施工に関する品質記録、大久保^[6]、杉山^[7]が鉄筋コンクリートへ打ち込んだタグを使った施工記録など、工種や材料ごとの記録手法が報告されている。このように部材や空間を対象とした記録目的の研究では、建設分野でも既に多

様な用途で実績のある要素技術を用いてシステム開発が試みられているが、各種電子タグを用いる場合の課題として多種多量の部材へタグを取り付けるための費用と手間が課題として挙げられており、画像を用いる場合は技術的な制約から屋内や細かい資機材の記録は困難である旨が指摘されているなど、実務適用のためには課題が残っていることが読み取れる。

そこで本章のケーススタディを通じ、これら既往研究で指摘されていた要素技術の運用面の課題に着目し、数年という長い期間かつ多くの関係者が要素技術を扱う場合の障壁を把握する。

要素技術の概要

建材トレーサビリティの記録では、多種多量の資材を個別に識別するユニーク ID をベースにして工程進捗などの情報を記録する必要があるため、要素技術として個体認証技術の選定が重要となる。個体認証技術では第 2 章で述べた通り各種電子タグ、画像コード（1 次元/2 次元バーコード、カメレオンコード）などが存在する。電子タグは費用面で実務適用の阻害要因となることが既往研究で指摘されており、画像コードの中ではカメレオンコードもユニーク ID の取得や読取りシステムの整備に費用を要するため同様である。1 次元/2 次元バーコードは ISO で規格が統一されており、一般的な書類作成/表計算ソフトウェアや携帯端末 OS が標準機能として対応しているため作成や読取りに費用が掛からない。建築工事では扱う情報量が多くなることが想定されるため、本研究ではより多量の情報を記録できる 2 次元バーコード（QR コード）を採用する。公開されている仕様書から図 4-3 に QR コードの構成を、図 4-4 に仕様一覧を引用する。ユーザー側の選択肢として、図 4-4 に記載の『誤り訂正レベル』がある。これは QR コードの一部に汚れや欠損があった場合にも読取りを可能とするための復元仕様である。作成時に 4 段階のレベルから選択することができ、レベルによって QR コードの密度が異なる。建築工事では汚れや欠損が想定されるため、最も高レベルである『H』を採用する。

工事現場全体の空間および解体資材の記録では、形状や寸法に関わる情報をベースとしてその他の属性情報を記録するため、要素技術として 3 次元スキャン技術を採用する。工事現場全体の空間を定期的に 3 次元スキャンすることで進捗を把握するためには、日々取得した点群デ

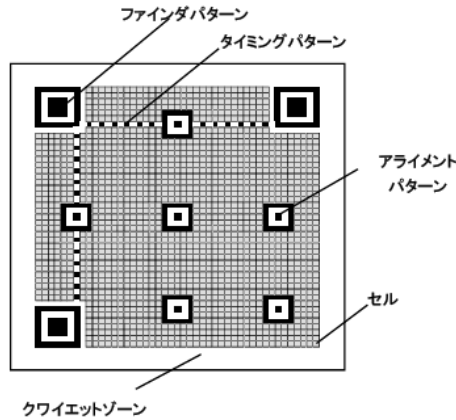


図 4-3 QR コードの構成

シンボルの大きさ	最小 21×21 セル～最大 177 セル×177 セル(4 セル間隔)	
情報の種類と情報量	数字	最大 7089 文字
	英字、記号	最大 4296 文字
	バイナリ(8bit)	最大 2953 文字
	漢字	最大 1817 文字
変換効率	数字モード	3.3 セル／文字
	英数記号モード	5.5 セル／文字
	バイナリ(8bit)モード	8 セル／文字
	漢字モード(13bit)	13 セル／文字
誤り訂正機能	レベル L	シンボル面積の最大約 7%を復元
	レベル M	シンボル面積の最大約 15%を復元
	レベル Q	シンボル面積の最大約 25%を復元
	レベル H	シンボル面積の最大約 30%を復元
連結機能	最大 16 シンボルまで分割可能	

図 4-4 QR コードの仕様一覧

一タ間の差分を部材単位で当日中に判定する必要があるため、数ミリレベルの測距精度と成果物創出までのリードタイム 1 日以内、10m 以上の広範囲のスキャン、という条件が求められる。そこで本研究では 3 次元スキャン技術の中でデータ品質と広範囲・高密度の測距を両立する TLS を採用する。

解体資材の記録では、検査用途ではなく、リユース時の資材検索などの用途で活用するための形状記録が目的となるため、数m範囲を数センチレベルの精度で測距できれば良い。一方で、解体作業を妨げないようスキャンと属性入力のスPEEDが求められ、成果創出まで数分以内のリードタイムが求められる。そこで本研究では 3 次元スキャン技術の中で、操作性に優れた携帯端末搭載の廉価版 LiDAR を採用する。

他の 3 次元スキャン技術との特徴の違いを図 4-5 に示す。

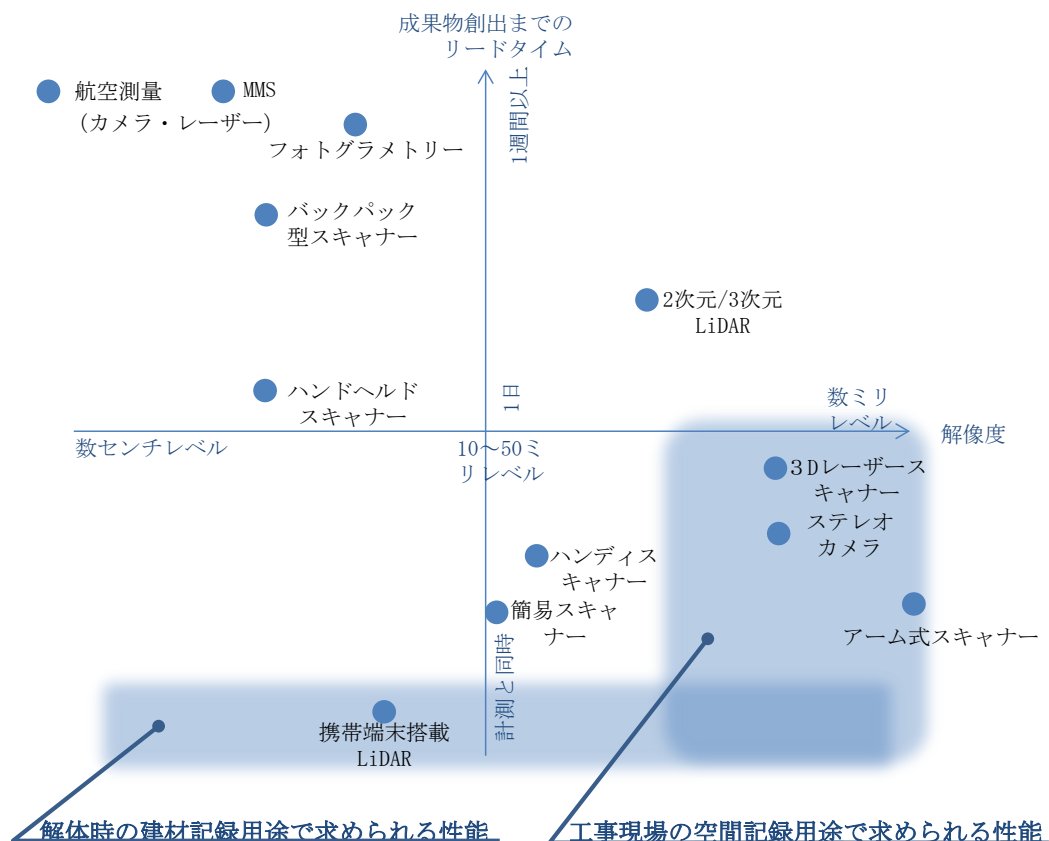


図 4-5 3 次元スキャン技術の特徴 (データ解像度・成果創出までのリードタイム)

本章の構成

本章では、長い期間かつ多くの関係者が要素技術を扱う運用面の障壁を把握するため、以下3種の検証項目に対してケーススタディを実施する。まず4.2.では、新築工事における建築資材の製造から取付履歴まで一連の流れを記録する場合の課題を抽出するため、資材の個体認証技術としてQRコードを用いることで、工場における製造状況から出荷、工事現場への搬入、取付、検査までの一連のプロセスをデジタルデータとして記録し、進捗管理その他業務で活用するケーススタディを実施する。4.3.では、空間を対象とした進捗履歴を記録する場合の課題を抽出するため、工事現場全体に対して3次元レーザースキャナー（TLS）を使って屋内外全ての空間を定期的に3次元スキャンすることで、工事進捗の自動把握を試みる。4.4.では、建材のリユースを想定して既に使用されている建築資材の情報を記録する場合の課題を抽出するため、建物の解体・リユースプロジェクトを題材に、解体資材を対象として、携帯端末搭載の廉価版LiDARを用いて資材形状・寸法および関連情報のリアルタイム記録を試みる。4.5.では、4.2.から4.4.で実施したケーススタディによって抽出された技術適用の阻害要因を整理する。

4.2.建築生産プロセスを通じた建材トレーサビリティの記録と可視化

4.2.1.背景と目的

建築工事の品質記録として、工場における建材の製造・加工記録や、工事現場における施工記録は一元的にデジタル管理されている必要があると考える。しかし現状は、先述した通り、建築生産プロセスの各フェーズにおいてアナログ情報としてのみ保存されているか、デジタル情報であっても、多様な業務システムの中で、他に転用が難しい特殊なデータ構造で保存されているケースが多い。そのため、例えば施工管理者が建材の施工進捗や搬入・取付予定を管理する際には、工事現場の現地で取付状況やストック資材を目視確認するとともに、最新の工程を考慮して協力会社職長や工場と出荷・搬入予定を調整し、手持ちの図面にこれら情報を記入している。管理野帳の例を図 4-6 に示す。そこで本論文では、一つの建材をユースケースとして、工場の製造段階から工事現場における取付・検査段階までの作業記録を一元的に記録・管理するためのシステムを開発し、プロジェクト適用することで、建材トレーサビリティ記録のためにデジタル技術を活用する場合の課題を抽出する。

4.2.2.建材トレーサビリティの記録および可視化手法の提案

建築生産プロセスを通じて、一元的に建材トレーサビリティを記録することが難しい原因の一つとして、建材を扱うフェーズや目的によって、管理する ID が多様に変化することに着目した。例えば、設計段階では、設計図書を作成するための BIM ツールや CAD ツールなどが採番した GUID などが固有 ID である。工場では、営業・設計目的で管理する段階では工場特有の部材 ID を採番し、製造・加工段階ではロット情報なども付加したより詳しい ID (合番) が採番

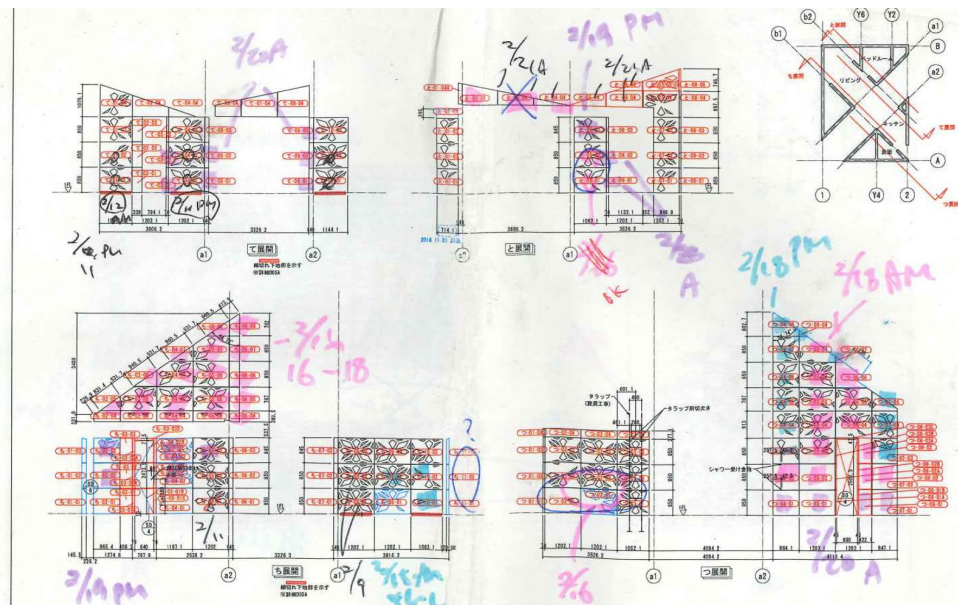


写真 4-6 従来用いられている建材取付予定の調整野帳の例

されることが多い。工事現場で建設労働者が取付けのために扱う図面は合番図と呼ばれ、工場
で付与された合番が記載されている。このように、扱う企業・関係者やツールによって ID が
変わるため、トレーサビリティを一元的に紐づけて管理する共通 ID が必要であると考える。

そこで、プロセスの起点となる設計 BIM モデルをベースに、プロセスを通じて共通で扱うユニーク ID を最初に採番し、フェーズを通じて増える多様な ID を全てユニーク ID に紐づけて管理する方法を考案した。また、建材トレーサビリティを汎用的なデジタル情報として記録するために、自由記述ではなく、WEB ページ上に記載したプロセス・作業内容を選択する形式とした。具体的なシステム構成としては、記録用の作業選択ボタンを配置した WEB ページを建材ごと個別に作成し、ユニーク ID と紐づけた URL リンクでアクセスする仕組みとした。データはクラウドストレージに集約し、ユニーク ID・選択した作業内容・記録日時をテキスト形式で保存する。この記録作業をプロジェクトで運用するため、作業記録 URL リンクを QR コード化し、工場での製造時に建材へシール貼付する運用を考えた。一連のシステム構成を図 4-7 に示す。

記録したトレーサビリティ情報の可視化のためには、汎用性と視認性を考慮して、市販の BIM ビューアーをベースにカスタマイズした。BIM ビューアーが自動かつ定期的にクラウドサーバーのデータベースを読み取る仕組みを構築し、建材 BIM モデルの属性として進捗情報を反映する仕組みとした。表示機能では、完了記録された作業項目に応じて BIM モデルの表示色を変更する仕様とした。また、出来高確認や精算活用を想定し、過去の日時を指定することで、その時点での進捗状況を表示する機能も設けた。

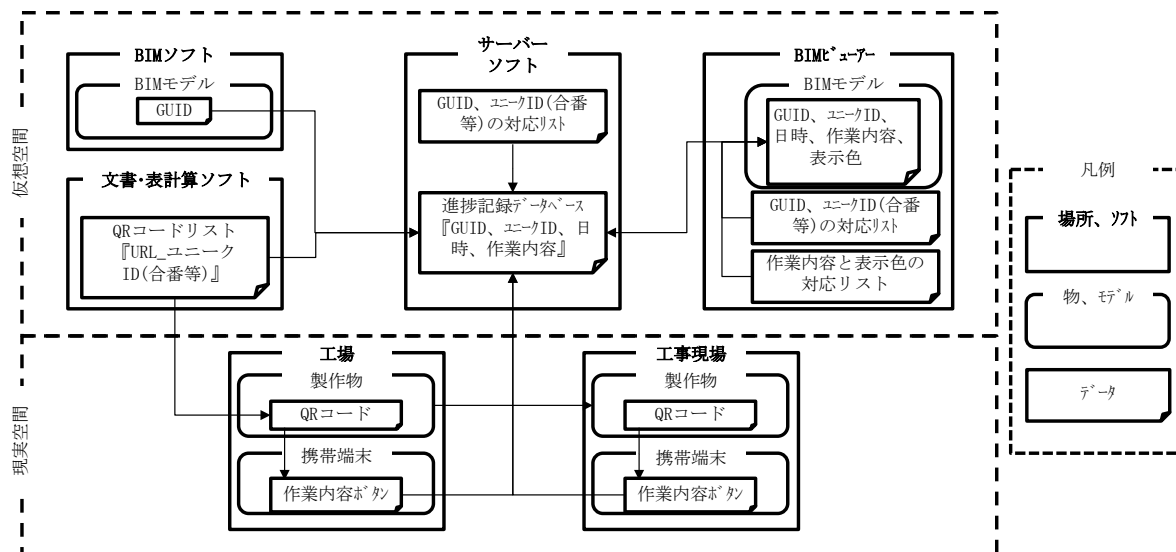


図 4-7 建材トレーサビリティ記録のためのシステム構成図

4.2.3.プロジェクトへの試適用

プロジェクト概要

適用プロジェクトは、地上1階建て、建築面積が約120 m²の展示場、構造がS造、外装がアルミパネルであった。今回は、提案手法の試適用対象をアルミパネルとした。アルミパネルは850 mm×850 mm材を中心に約1200枚使用され、そのほぼ全てが異なる模様であることが特徴である。小規模ではあるが、多品種の製造および取付作業が発生するため、新技術の有効性検証に適していると考え、選定した。プロジェクト概要および外観を表4-1 および写真4-1に示す。

提案手法の適用結果

提案手法に従って作成したQRコードの仕様を図4-8に示す。進捗入力用のWEBページへ自動リンクさせるURLの文字列をそのままQRコード化している。URL末尾の文字をパネルの固有IDとすることで、パネル別に独立した進捗記録を可能とした。パネルIDは、設計時に作成したアルミパネルモデルから各パネル固有のGUIDを抽出し、人間が見ても分かりやすいよう4桁の連番数字で定義した。進捗記録のWEBページでは、設計者・工場担当者・施工管理者それぞれにヒアリングし、生産プロセスの中で重要なマイルストーンとして①図面承認完了②製作完了③現場搬入完了④地組開始⑤地組完了⑥取付開始⑦取付完了⑧検査完了の8種類を入力で

表 4-1 プロジェクト概要

建築地	東京都港区
建物用途	主/展示場、従/旅館・ホテル
建築面積	120.69 m ²
延床面積	88.09 m ²
階数	地上1階
構造	S造
工期	2018.09.01～2019.03.01



写真 4-1 竣工後外観

きる仕様とした。なお、今回は工事現場での鉄骨・パネル地組作業が予定されていたため、「地組開始・完了」項目を用意した。作業記録用 WEB ページを図 4-9 に示す。

貼付対象は計 1230 枚の内 272 枚とし、QR コードは竹中工務店が作成してパネル工場へ支給、工場担当者がシールを貼付した。工事現場では、工事現場員および職長が携帯端末を使用して進捗記録を実施した。作業状況を写真 4-2 および 4-3 に示す。

携帯端末を使ったアルミパネル 272 枚の進捗記録は、①図面承認完了②製作完了③現場搬入完了④地組開始⑤地組完了⑥取付開始⑦取付完了⑧検査完了の 8 種類の内、③現場搬入完了⑥取付開始⑦取付完了の 3 種類に絞って記録した。この理由としては出荷と搬入のタイミングや地組みの有無といった、本プロジェクト特有のものであり、一般的なプロジェクトにおいては上記 8 種類が必要である。携帯端末を使った作業記録の状況を写真 4-4 に示す。

また、今回 QR コード貼付の対象としていないアルミパネル 958 枚および鉄骨フレームについて、工事現場員が日々目視で進捗を確認し、BIM ビューアーへ手入力で記録を実施することで、一連の生産プロセスを記録した。鉄骨フレームについては、工事現場員が把握できる項目として①図面承認完了③現場搬入完了④地組開始⑤地組完了⑥取付開始⑦取付完了の 6 種を記録している。アルミパネル工場の担当者からは、このように可視化された進捗情報を元請と専門工事会社が共有することで、現状は各々が手作業で行っていた出来高情報の作成、確認が効率化される可能性がある、とのヒアリング結果を得た。進捗記録を可視化した BIM ビューアーと、進捗が記録された属性ダイアログの画面を図 4-10 および図 4-11 に示す。

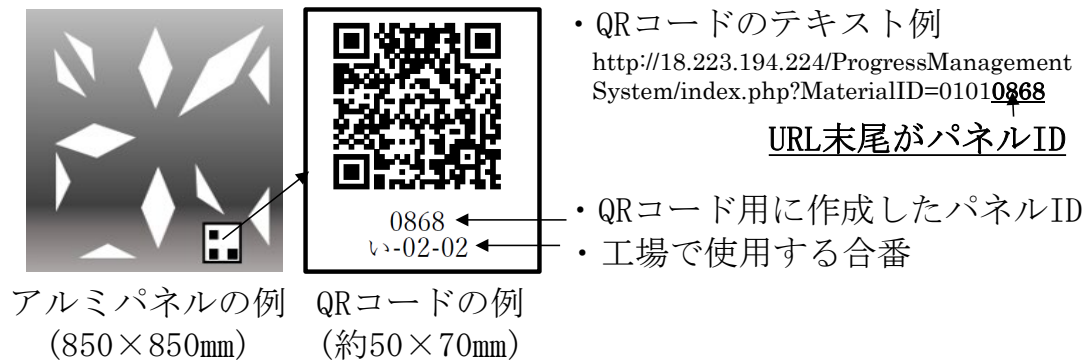


図 4-8 作成した QR コードの仕様



写真 4-2 工場のQRコード添付状況



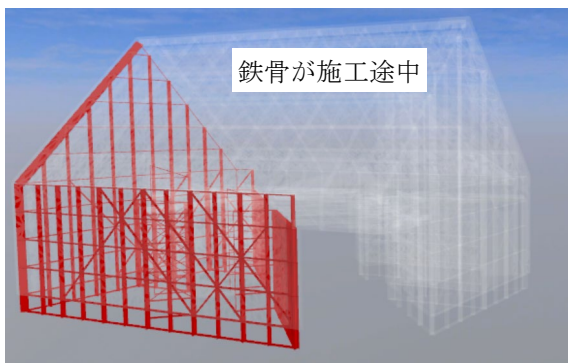
写真 4-3 建材の工事現場搬入状況



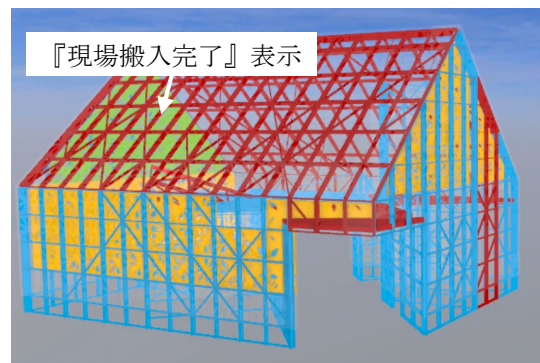
図 4-9 携帯端末上の記録画面



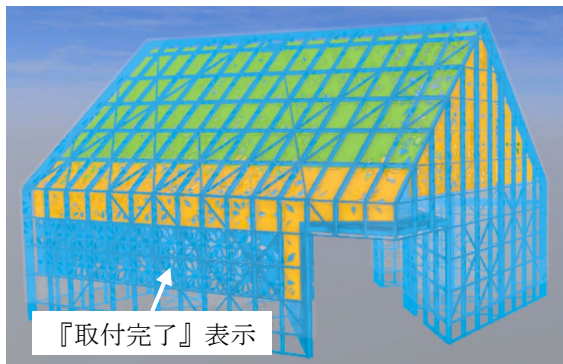
写真 4-4 携帯端末を使った作業記録状況



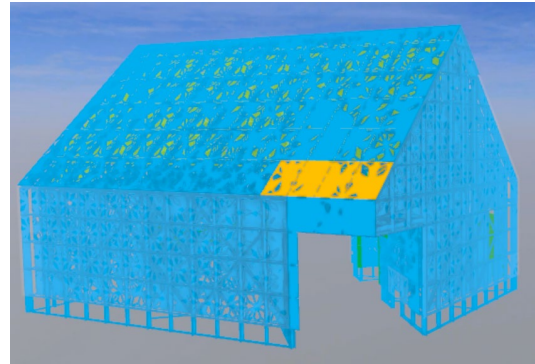
10月26日 アルミパネル搬入前



12月16日 アルミパネル搬入後、施工前



1月9日 アルミパネル施工中



2月27日 竣工直前

図 4-10 記録の可視化状況

一覧表示

プロパティ名	値
基本情報	
カテゴリ名	Brep
ファミリー名	閉じたホリサーフェス
レベル名	GL
グループ名	グループ08
ワークセット/レイヤー名	アルミ
Guid	aa888521-32cc-4b78-8a19-979ad44b0683
インスタンスプロパティ	
部材ID	01010762
図面承認完了	[空白]
製作完了	[空白]
現場搬入完了	2018/11/21 08:25
地組開始	[空白]
地組完了	[空白]
取付開始	2018/12/18 14:46
取付完了	2018/12/18 14:48
検査完了	[空白]

閉じる

アルミパネルの記録例

一覧表示

プロパティ名	値
基本情報	
カテゴリ名	Brep
ファミリー名	閉じたホリサーフェス
レベル名	GL
グループ名	[空白]
ワークセット/レイヤー名	S-BEAM
Guid	537d960b-1157-4a84-a99b-65a13152e3d8
インスタンスプロパティ	
部材ID	[空白]
図面承認完了	2018/12/10 17:00
製作完了	[空白]
現場搬入完了	2018/12/25 10:15
地組開始	2018/12/25 10:30
地組完了	2018/12/25 10:45
取付開始	2018/12/26 10:46
取付完了	2018/12/26 11:30
検査完了	[空白]

閉じる

鉄骨フレームの記録例

図 4-11 建材に記録されたトレーサビリティの例

4.2.4.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

本取組みでは、建築生産プロセスを通じて扱う建材ユニークの共通 ID の必要性を提言し、BIM モデルの GUID、工場の部材 ID、合番のような多様な ID を紐づけて一元管理するデータ構造を検討した。各フェーズの作業記録をデジタル情報として集約するため、建材ごとに固有の作業記録用 WEB ページを作成し、共通 ID と作業記録ページへの URL リンクから成る QR コードを建材に添付することで、携帯端末を通じて記録するシステムを開発した。プロジェクトのアルミパネル工事を題材に開発システムを試適用し、建材の作業進捗をデジタル記録するとともに、BIM ビューアーを用いてリアルタイムに進捗を可視化することができた。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第 1 章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および要素技術として適用した個体認証技術の普及を阻む要因となっているものを表 4-2 に整理する。従来業務では、No. 8 「一品受注生産」 No. 12 「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」 No. 14 「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」の 3 項目が要因となり、多種多量の建築資材のトレーサビリティを記録する作業は現実的でなかった。個体認証技術を活用する場合も、工程ごとに全ての資材の QR コードを読み取り、タスク記録する手間が課題であり、従来と同様に阻害要因となった。また、No. 1 「現場の場所が常に変わる」 No. 15 「安全・品質よりコスト・納期が優先」についても従来業務・個体認証技術に共通した阻害要因であり、費用対効果が問題となった。さらに、各工程で携わる実務担当者と企業が多種多様かつプロジェクトごとに再編されるため特性から、No. 9 「重層下請構造」 No. 10 「労働集約的作業」 No. 11 「工事関係者が臨時に組織される」 No. 14 「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」が従来業務の問題解決の阻害要因となっていた。一方で、デジタル活用の場合には多種多様な資材を個別に ID 化し、携帯端末という共通ツールを用いてデータ収集、共通フォーマットでデータベース化・可視化するなど、No. 10 「労働集約的作業」 No. 14 「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」は普及の阻害要因とならないことが分かった。No. 9 「重層下請構造」 No. 11 「工事関係者が臨時に組織される」については、技術の利用者に対する操作レクチャーや体制構築が問題となるため、従来と同様に阻害要因となった。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、建築資材の製造から取付に掛けて、多くの組織と関係者を跨いで要素技術を活用する場合の障壁を確認した。まず、同一の資材に対して組織や関係者によって異なる ID が用いられていることから、技術適用の準備段階で共通 ID の発行と管理作業が必要であった。個体認証タグとして発行した QR コードは資材に貼付する必要があり、従来なかった作業の負担が技術適用の障壁となった。また、出荷や搬入作業では建材は工区単位や作業日単位でまとめて扱われる場合が多いため、一度に多量の QR コード読み取りとタスク記録が必要となるケースが多く発生し、技術運用の妨げとなった。共通 ID は建材単位だけでなく、パレット単位などのまとまりでも扱えるよう、階層的なデータ構造を構築すると、より実用的であると考えられる。

表 4-2 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用 の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい		
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	×
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

- 準備データの不足：生産プロセスの各工程で扱う職能や企業ごとに資材を表す ID やまとまり単位が異なるため、個体ユニークの共通 ID を新たに作成する必要がある。
- 技術適用までの準備手間：全ての資材へ QR コードを添付するための準備手間が課題。
- 技術適用中の管理/変更手間：工場と工事現場内の各工程で携わる実務担当者が技術を活用する必要があるため、組織や企業の枠を超えて運用する仕組みづくりが必要である。

その他に、個体認証技術の活用を阻害する要因として以下を確認した。

- データの非標準化：建材トレーサビリティとして記録すべき項目やデータフォーマットが標準化されていないため、現状では毎回仕様設計が必要である。
- 専用人員の必要性：資材への個体ユニーク ID の採番や、QR コードの作成・管理運用など、通常の施工管理業務にはない特殊なノウハウが求められるため、技術適用を支援する人員もしくは実務担当者への教育が必要である。
- 費用対効果の不足/不明確：QR コードや読取り用の携帯端末など物資への初期投資は問題にならなかったが、技術適用のために新たな記録手間・準備手間発生したため、役割分担や労務費の取扱いが普及の阻害要因となった。

4.3.工事進捗の記録と可視化

4.3.1.背景と目的

次に、空間を対象とした進捗履歴の記録のためにデジタル技術を活用する場合の障壁を明らかにするため、3次元スキャン技術を用いた工事現場全体の進捗を記録するケーススタディを実施する。

トレーサビリティ記録の対象が建材であれば、個体認証タグなどを利用して個別の記録作業が可能であるが、工事現場全体を対象とする場合、出来形や現場状況の変化を把握するニーズが多いため、広域の空間情報を定期的に記録する必要がある。そこで本論文では、工事現場全体の空間情報を3次元デジタル情報として定期的に記録するとともに、差分や属性を効率的に判別する方法を提案し、実務適用する。

4.3.2.工事進捗の記録及び可視化手法の提案

広域の空間情報をデジタル記録する要素技術としては、3次元測量や画像処理が考えられる。特に、差分や属性判別の自動化を想定すると、深層学習などを用いたAI技術の進歩が著しく、カメラ画像との相性が良い。しかし、今回は対象が施工中の工事現場であるため、定点画像として広い空間を連続して記録することが難しく、現時点ではベースとなる空間情報の記録が困難である。そこで、今回は空間情報の記録手段として3次元スキャン技術を採用する。

4.1. で取り上げた既往研究の中では、嘉納が3次元スキャン技術を用いた工事進捗の自動判別手法を検討している。3次元スキャンの手段としては、工事現場内に設置した定点カメラ画像をSfM手法で解析することで点群データを取得していた。カメラ画像を基にした3次元スキャンであるため、施工中常に露出しているPCa躯体を対象としており、計画時の3次元CAD点群データと比較することで、進捗を自動判別した。今回の目的を想定すると、フォトグラメトリーの場合は、屋内などの遮蔽部分の記録が課題である。また、計画時の3次元CADモデルと比較する場合は、仮設資機材やストック材料などの判別が課題となる。そこで今回は、3次元スキャンの手段として3次元レーザースキャナーを採用することで、屋内外全ての空間記録を図る。また、仮設資機材やストック材料なども把握対象とするため、定期取得する点群データ同士の差分判別を試みる。

4.3.3.プロジェクトへの試適用

題材としたプロジェクトの概要と試適用方法

題材とするプロジェクトは、4.2. で取り上げたプロジェクトと同様である。工期は2018年11月～2019年2月の4か月である。今回試みる空間把握の対象は、施工中の建物室内も含めた工事現場全体とした。進捗を把握する物体としては、主として鉄骨・パネルといった本設の主部材と足場・建設機械等の仮設材、その他ストックヤードや外構などである。

3次元スキャンで使用した機器は、差分判別のために計測誤差やノイズが10mm以内に収まるよう考慮し、三脚固定型の3次元レーザースキャナー（Z+F社Imager5016）を使用した。品質検査等の用途と異なり、ミリ単位の精度は必要ないため、レジストレーションのためのベ

ンチマークは使用せず、得られた点群データ同士の同一特徴点のみを使って合成した。また、データ処理段階で異なる計測日の点群データを重ね合わせる（ローカリゼーション）ためには、同一の水平墨およびレベル墨を近接距離から計測することで、ベンチマークとした。計測頻度は工期中の1か月ごと、2018年11月22日・2018年12月16日・2019年1月22日・2019年2月28日の計4回実施した。計測時間は、工事作業を妨げないように考慮し、12時～13時の1時間とした。計測状況を写真4-5に示す。

試適用の結果と考察

計測日の点群における近傍の2点間距離を算出することで、進捗を自動で判別するため、期中に計4回、約1か月置きに計測した点群データを重ね合せ、近傍の2点間距離を算出することによって、不動点・消失点・出現点の3種類を分類した。具体的には、計測日が古い点群データに対し、差異が50mm未満のものを不動点、-50mm以下のものを消失点、+50mm以上のものを出現点として定義した。なお、±50mmの閾値は、鉄骨やパネルといった主部材のクリアランスと、点群同士の重ね合せ精度を考慮して設定した。この内、消失点と出現点が工事進捗として抽出されたものであり、消失点は仮設資機材・建設機械やストック材料などの仮設類、出現点は本設の主部材の施工が進んだ出来形であることが多い。計4回の計測データを図4-9に、差異の抽出状況を図4-10に示す。

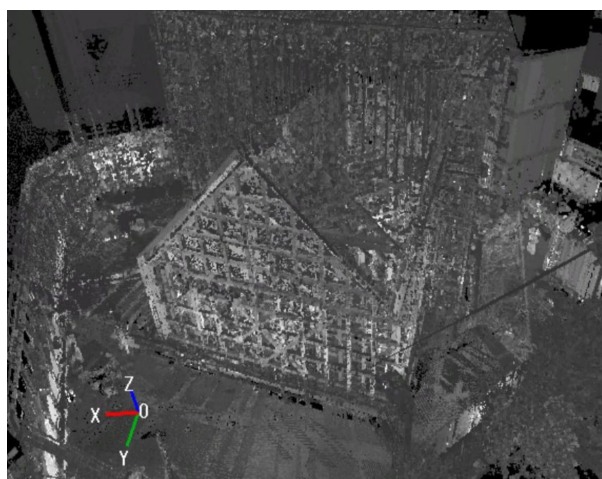
このように、点群データとBIMモデル、および異なる計測日の点群データ間の差異を算出することで、工場においては製作精度および取付け漏れ・間違いの抽出、工事現場においては仮設材の撤去および出来形の抽出を実施できる可能性があることが分かった。一方で、進捗把握のためには、自動で判別した仮設材・本設材の中でより詳細の部材判別が必要であり、今後の課題として残った。また、計測作業から結果抽出までのリードタイムの短縮も課題である。今回は、データ間の重ね合せおよび差分抽出については、筆者が複数の専門ソフトウェアを使って作業しており、今回の部分的な試行であっても半日から一日のリードタイムが必要であった。



写真 4-5 工事現場内の3次元スキャン



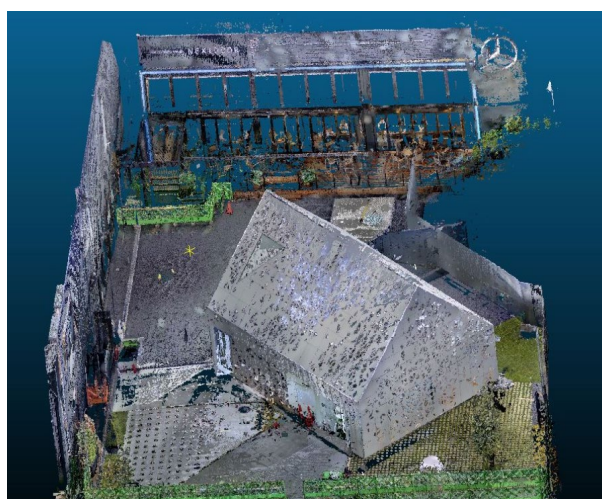
点群データ例1 2018.12.16



点群データ例2 2019.1.19

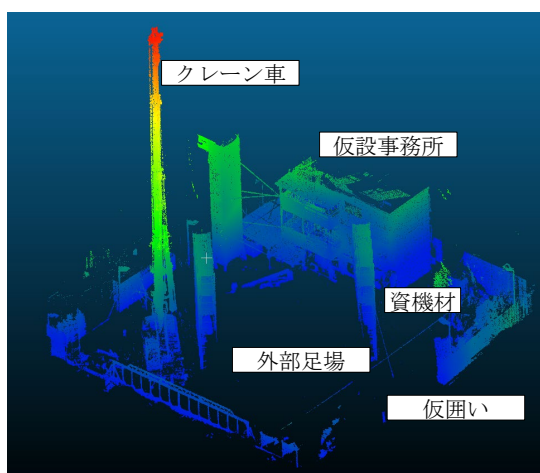


点群データ例3 2019.2.1

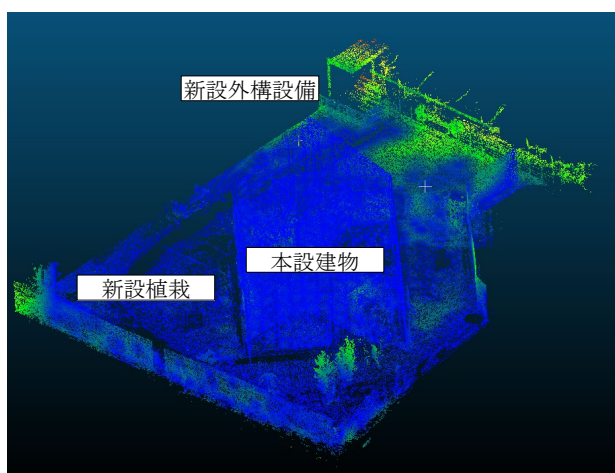


点群データ例4 2019.2.28

図 4-9 工事期中に取得した点群データ



差異の抽出(50mm以上減少分)



差異の抽出(50mm以上増加分)

図 4-10 工事初期と竣工前の点群データの差分抽出状況

実務での運用を想定すると、さらに取扱うデータ数が増加するため、これら一連のデータ処理はさらなる効率化が必要であると考える。

4.3.4.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

本取組みでは、工事現場全体の進捗を記録するため、屋内外の空間情報を3次元かつデジタル化する手段として3次元レーザースキャナー(TLS)による3次元測量に着目し、プロジェクトに対して1か月置きに定期的な計測を実施した。得られた点群データを重ね合わせ、50mmを閾値として差分を自動抽出することで、進捗の有無を判別するとともに、変化があった点群データの中で差異の正負を考慮することで、仮設資機材と本設部材のデータを自動分割した。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第1章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および要素技術として適用した3次元スキャン技術の普及を阻む要因となっているものを表4-3に整理する。従来業務では、No.3「建築物の規模・複雑度が大きい」No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」の3項目が要因となり、工事現場の中で多様な作業を常に把握することが難しい。しかし、3次元スキャン技術を活用する場合には、広範囲を短時間で点群データ化する特性から、上記3項目は普及を阻害する要因にはならなかった。No.8「一品受注生産」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」の2項目について、具体的には、工事現場の中で進捗を把握すべき対象が多種多量であることが問題となり、従来業務における問題解決を阻害している。3次元スキャン技術を活用する場合も、点群データを取得する段階では属性などが付与されておらず、座標値の集合であるため、進捗を把握するためには部位や工種など意味のある属性付けや分割が必要となることから、普及の阻害要因となっている。さらに、No.1「現場の場所が常に変わる」No.15「安全・品質よりコスト・納期が優先」についても、問題解決のための設備投資を難しくする要因となっており、従来業務の問題解決と3次元スキャン技術の普及について費用対効果が共通した阻害要因となっている。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、空間を対象に進捗を記録するためにデジタル技術を活用する際の障壁を確認した。3次元スキャン技術を用いることで工事現場全体の空間情報を点群データとして記録することができたが、空間全体がひと塊のデータであるため、進捗把握や出来高査定などの実務で使用するためには、今回試みた本設/仮設の分割だけでなく、工事別・企業別などより細分化が必要であることが分かった。また、第3章と同様に、扱う機器・ソフトウェア・データが特殊であるため実務担当者が自ら扱うことが難しく、専門家の配置もしくは人材教育が必要であった。

- 専任人員の必要性：使用する機器・ソフトウェアともに建築工事の施工管理では特殊な機材であり、3次元スキャンを実施する委託先など新たな体制構築が必要である。また、委託先への作業指示や、取得後の点群データの取扱いのためには、技術適用を支援する人員もしくは実務担当者への教育が必要であり、普及を阻害している。

表 4-3 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用 の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	×
	9	重層下請構造	×	
	10	労働集約的作業		
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない		
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

- 技術適用中の管理/変更手間：実務で点群データを活用するためには、本設/仮設の分割だけでなく、工事別/企業別など意味のあるまとまり単位への細分化が必要である。

その他に、3次元スキャン技術の活用を阻害する要因として以下を確認した。

- データの非標準化：工程遅延や調整のために進捗データを科学的に活用する方法が確立されていないため、取得する点群データの整理方法やファイルフォーマットなどを毎回仕様設計する必要がある、普及を阻害している。
- 技術適用までの準備手間：点群データを取得するための機器・ソフトウェア・ストレージ、さらに進捗状況を関係者間で共有するためのインフラ環境などを事前に準備する必要がある、普及を阻害している。
- 費用対効果の不足/不明確：使用する機材・ソフトウェアともに効果であり、3次元スキャンの委託や支援人材の労務コストも新たに必要になることから、費用対効果が普及の阻害要因となっている。

4.4.解体・リユースを想定した建築材料の使用履歴の記録

4.4.1.背景と目的

近年、建設分野においても環境配慮の取組みが求められ、建物の新築施工だけでなく、中古建材の販売市場が広がるとともに、建物自体を解体・移築・リユースする取組みも始まっている。解体リユース建物の履歴管理に関する既往研究では、中島ら^[5]が鉄骨造の実大実証建物において、RFID タグを使って建方・検査等の施工履歴を記録した事例がある。一方で、施工以外に記録すべき情報の種類については、公的に整理されていない。そこで今回は、新築工事と異なり、既存建物において既に使用されている建築資材の解体・リユースを想定して履歴情報を記録する場合にデジタル技術を活用する障壁を明らかにするため、解体工事の現地で運用するためのシステムを開発し、ケーススタディとして実プロジェクトへ試適用した。

4.4.2.題材プロジェクトの概要

プロジェクト概要を表 4-4 に、建物外観を写真 4-6 に示す。

この建物は解体・再利用を想定して設計され、2014 年に施工された実験住宅である。構造体は CLT 材のみで構成され、解体のために大部分が乾式で接合されており、建具や防水材など最低限の仕上がりが用いられている。2014 年に展示・解体・移設された建物が 2022 年まで使用されていた。2022 年 12 月に解体され、CLT 材料の一部を再利用し、展示用オブジェ（図 4-11）を作成するプロジェクトである。解体の際は、壁や床などを構成する CLT 材一枚単位で取り外

表 4-4 プロジェクト概要

建物名称	コエボハウス
竣工	2014 年 7 月
解体	2022 年 12 月
延床面積	78.79 m ²
構造	木造(軸組工法 CLT 利用)
建物用途	実験棟(1 階建ての住宅仕様)
所在地	神奈川県藤沢市



写真 4-6 コエボハウス解体前の外観 図 4-11 リユースイメージ（慶応大 SFC 池田研究室(当時)提供）

され、その中から健全と思われる部位を選択的に切除する。また、品質検査のため、再利用材とは別に試験体も採取する。

4.4.3.解体材トレーサビリティの記録方法

記録情報の検討

今回の用途で必要と考えられる情報を挙げる。まず、切除した再利用材の品質である。現地で目視確認可能な劣化状況、建物内での使用履歴、試験体の構造試験記録等が考えられる。次に、建築時の資材製造情報である。経年変化を確認する際の比較対象として必要となる。CLT材の場合、工場には製造工程で使用したラミナ材の物性や層ごとの組合せ、加工工程、検査記録、担当者情報などが残っている。最後に、解体時に不要となる廃棄物の処理記録である。将来的には環境負荷に関する情報も付加価値として求められると考えた。そして、これら情報を一元的に管理するために、設計・施工・解体時の設計符号や合番等を使った個体識別 ID が必要である。

これら情報を①解体・切除の直後にのみ記録可能な情報と②別のタイミングで記録可能な情報、の2種類に分類したとき、①の採取が喫緊の課題であると考え、今回はその作業効率化に資する技術開発を図った。洗い出した情報項目を表 4-5 に示す。

記録方法の提案

解体・切除直後にのみ記録できる情報は、再利用材の切出し箇所、屋内/外、表裏、水上/下方向など、形状や位置などの3次元情報と併せた記録が必要となるものが多い。そこで今回は、3Dの形状モデルを基軸とした記録方法を提案する。具体的には、解体・切除直後に資材を3次元スキャンし、得られる点群データに対して他の情報を属性として紐づけて記録する手法を考案した。技術に対する要求条件としては、解体・切除作業の中で負担なく実施可能なスピードを最優先とし、3m四方×150mm厚程度の対象物に対し1～2分以内にスキャンを完了させる。一方で、誤差は±10mm程度まで許容する。運用面では、一般的な作業員が自ら実施可能な操作性に配慮する。そこで今回は、ハードはLiDAR搭載の市販携帯端末を選定し、1つの点群データの中で任意の箇所に複数の属性情報を入力可能なアプリケーションを独自開発した。

表 4-5 解体・再利用目的に必要な情報の例

①解体・切除の直後にのみ記録可能な情報
部材 ID、使用履歴(再利用材の切出し箇所、屋内/外、表裏、水上/下方向等)、作業中の特記(部材選別の判断理由、天候等)、その他
②別のタイミングで記録可能な情報
図面/BIMモデル、部材の取扱い(再利用材/切除後の端材/その他)、劣化状況(蟻害、傷、腐食、塗装等)、経年変化(目視、寸法、色、平面平滑度等)、破壊/非破壊検査記録(電気抵抗、含水率、比重、ヤング係数・強度等)、廃棄物処理の記録、その他

4.4.4.プロジェクトにおける試適用検証

コエボハウスの解体作業において、開発アプリケーションを使用し、再利用に関わる 22 枚の CLT 材料を対象に情報記録を試行した。データ採取時の作業状況を写真 4-7 に、アプリケーション画面を図 4-12 に示す。

作業手順は、まず CLT 材の解体直後、敷地内に仮置きされた状態でスキャンした。次に、切除作業後、再利用材と廃棄される端材をそれぞれスキャンした。作業時間は 1～2 分程度であり、目標速度を達成できた。切除後の再利用材の寸法は 900×1,800×150mm 程度であり、データサイズは平均 5MB 程度、取得ポイント数は平均 20 万ポイント程度であった。

属性情報は、建物設置時の上下や表裏、水上/下方向など、後には判別できなくなるものを優先して手入力した。同時に部材 ID を記録しておくことで、計画時の図面/BIM モデルや、後日実施される試験記録等との照合を可能とした。その他現地で追加入力した項目としては、例えば、再利用材に隣接していた廃材の状態から推測できる劣化状況や経年変化など、事前想定にない有益情報も散見され、現地現物現時で記録する有効性を確認できた。

課題としては、まず測距精度があった。今回優先した情報を扱う用途では十分な精度であったが、寸法品質に関わる情報、例えば微細な傷や屈曲などは読み取れないため、必要に応じてレーザースキャナー等との併用が求められる。また、経年変化を判断するために、建築時に取得が必要な情報も明らかになった。例えばクリープ変形の確認では、設置当初の精密な形状記録が望まれる。



写真 4-7 再利用材の 3 次元スキャン実施状況

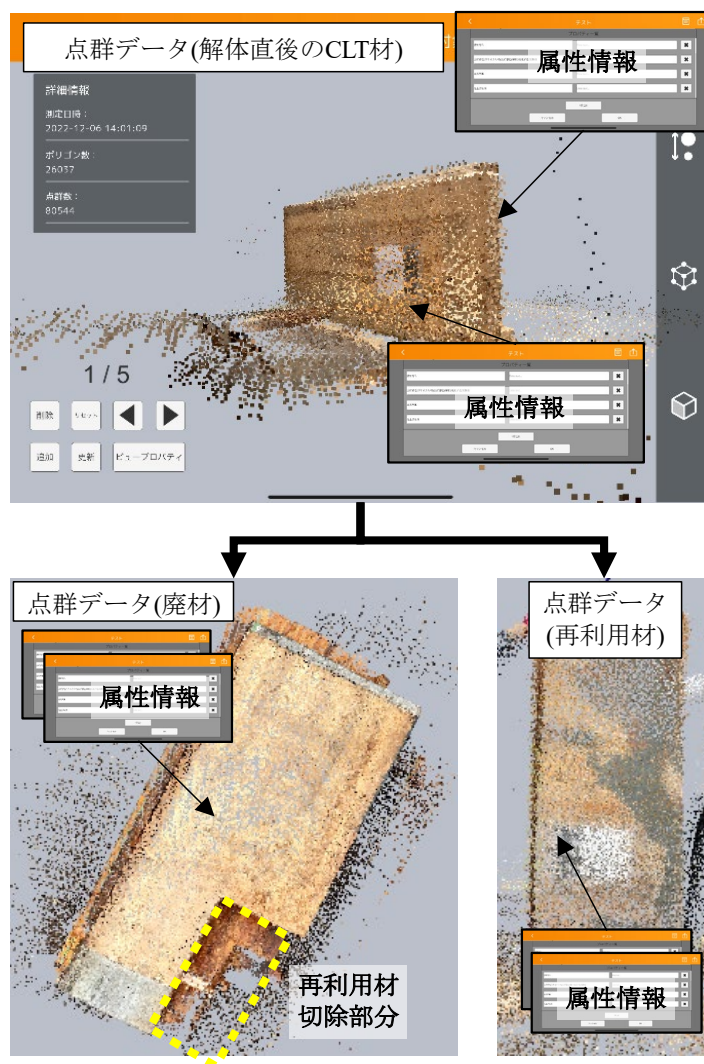


図 4-12 採取したデータの例

4.4.5.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

本取組みでは、木造建物の解体・再利用プロジェクトを題材に、必要な建材トレーサビリティ情報を整理し、記録を効率化する技術を開発・試適用した。作業中の記録速度は要求を満足したが、より寸法精度が求められる用途や、建築当初に記録が必要な情報も明らかになった。

なお、本研究は株式会社竹中工務店と慶応義塾大学 SFC 池田研究室の共同研究として実施した。本取組みにおいては、筆者は 3 次元スキャンと同時に属性を記録するためのプログラム開発と 3 次元スキャンの実施、属性の入力を担当した。池田研究室は対象建物の管理、解体計画、部材 ID など建物側のデータ構造の設計を担当した。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第 1 章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および要素技術として適用した 3 次元スキャン技術の普及を阻む要因となっているものを表 4-6 に整理する。No. 4「建築物の耐用年数が長い」No. 9「重層下請構造」No. 11「工事関係者が臨時に組織される」の 3 項目が要因となり、従来は建物の建設当初の記録や情報が関わった企業や関係者ごとに分散され、集約や統一が難しい問題がある。また、No. 3「建築物の規模・複雑度が大きい」No. 10「労働集約的作業」No. 14「建築材料・施工方法共に標準化が少ない」の 3 項目が要因となり、建物の解体段階では解体手順や保管・搬出方法などが統一されておらず、かつ情報の記録を想定されていないことから、資材の使用履歴や作業状況などの情報を十分に記録することが困難である。一方で、これら情報をデジタルデータとして集約・活用する場合には、組織、時間、サイズなどは問題とならないため、3 次元スキャン技術を中心としたデジタル活用の普及を阻害する要因とはならないことが分かった。。No. 8「一品受注生産」No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」の 2 項目は情報記録の対象となる資材が多種多量となる要因となり、No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」の 2 項目については問題解決のための設備投資を難しくする費用面の問題があるため、これら 4 項目は従来業務の問題解決と 3 次元スキャン技術の普及に対して共通した阻害要因となっている。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、既存建物において既に使用されている建築資材の解体・リユースを想定して履歴情報を記録する場合にデジタル技術を活用する障壁を確認した。まず、リユースのために記録すべき情報自体が法律や指針等でルール化されておらず、必要な準備作業や情報が不明確であることが問題であった。また、記録作業は容易であるため実務担当者が自ら 3 次元スキャンと属性入力を実施することができたが、取得した点群データと、それに紐づく属性データが特殊な情報形式であり、データ管理のために専門家の配置もしくは人材教育が必要であった。

- 準備データの不足：建物の解体やリユースを想定して記録すべき情報が明確になっておらず、デジタル活用の普及を阻害している。

表 4-6 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い	×	
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	×
	9	重層下請構造	×	
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

- データの非標準化：建物の解体やリユースを通じて取得した情報の保存・活用方法が明確になっておらず、ファイルフォーマットやデータ構造を毎回仕様設計する必要がある。
- 専任人員の必要性：取得するデータが建築工事の施工管理では特殊な情報形式であり、取扱いのためには、技術適用を支援する人員もしくは実務担当者への教育が必要。

その他に、3次元スキャン技術の活用を阻害する要因として以下を確認した。

- 技術適用までの準備手間：点群データを取得するための機材は市販製品の組合せで構成できることが分かったが、点群データに必要な情報を属性として紐づけて記録する手段がなく、これらデータを保管・閲覧するシステムもないことが、技術普及の阻害要因となっている。
- 技術適用中の管理/変更手間：上記の通り、3次元スキャンの実施には現状では機材・体制ともに特殊な準備が必要であり、工事進捗を高頻度に把握するための阻害要因となっている。
- 費用対効果の不足/不明確：使用する機材・ソフトウェアは比較的安価な市販製品の組合せで実現可能であることを確認したが、3次元スキャンの委託や支援人材の労務コストが新たに必要になること、取得したデジタルデータの保管管理・運用コストなどの費用負担が普及の阻害要因となっている。

4.5.本章のまとめ

本章では、建築工事において様々な外的要因によって発生する工程の混乱や遅延などに対応するため、実績データに基づいて科学的な管理を可能とすることを目的として、建築資材のトレーサビリティと工事現場の進捗状況をデジタルデータで蓄積するケースを想定し、建築工事における長期間および多くの関係者が要素技術を扱う際の運用面の障壁を明らかにするため、以下3種の検証項目に対してケーススタディを実施した。

（検証項目1）新築工事の建築資材を対象とした製造から取付までのトレーサビリティ記録のためにデジタル技術を活用する際の課題抽出では、外装金属パネルを用いたプロジェクトを題材に取り上げ、工場における製造から工事現場における取付・検査までのトレーサビリティを記録するためのデータ構造を提案するとともに、QRコードを個体認証タグとして用いて作業履歴を記録、BIMビューアーを用いてリアルタイムにデータを集約・可視化するシステムを開発し、実務適用した。その結果、個々の資材に対して、多くの関係者が共通して利用するIDの準備や、発行したQRコードを貼付する作業負担などの準備手間と、多量の資材がパレット単位などのまとまりで同時に出荷・運搬される運用に対応するための技術の管理・運用手間が主な障壁となっていることを確認するとともに、階層的なデータ構造の必要性を述べた。

（検証項目2）空間を対象とした進捗を記録するためにデジタル技術を活用する際の課題抽出では、工事現場全体の進捗把握を題材に取り上げ、施工中の工事現場内を1か月ごとに3次元スキャンする手法を提案し、汎用的なテキスト形式の点群データとして色及び座標情報を記録した。これらの点群データを、工事現場内に墨出しされた通り芯の水平墨とレベル墨を基準にローカリゼーションし、その差分を正負に分けて抽出することで、仮設材と本設部材を区別して記録した。その結果、記録した点群データを進捗把握や出来高査定などの実務で使用するためには、本設/仮設部材の分割だけでなく、工事別/企業別などのより細分化したデータ分割が必要であり、実務担当者が手動でデータ編集することは困難であるため、技術普及のためにはこれらデータ処理の自動化が必要であることを述べた。

（検証項目3）新築工事と異なり、既存建物で既に使用されている建築資材の履歴情報を記録するための課題抽出では、CLT材を主構造とした実験住宅の解体および一部建材のリユースプロジェクトを題材に、記録が必要と考えられる情報を、様々な用途を想定して洗い出した。そして、解体作業中の現地で記録が必要な情報を整理した。これらの記録手段として民生用途の携帯端末に搭載されているLiDARを用いた3次元スキャン技術を選定し、解体作業中の現地で即時に解体材の3次元形状と色情報を記録するとともに、3次元形状の任意の箇所に複数のテキスト情報を記録可能なシステムを開発、実務適用した。その結果、リユースを想定して記録すべき情報自体が公に定められておらず、必要な準備情報や作業などが不明確であることが主な技術普及の阻害要因であった。

これら3種のケーススタディを通じ、第1章で整理した建築工事の特殊性15項目に対し、建築資材および工事現場全体の進捗記録・活用に関する従来業務の問題解決と、デジタル活用を阻害する要因を整理したので、表4-7に示す。なお、実施したケーススタディで一つでも阻害要因として挙げた場合は本表においても阻害要因として表記し、題材によって結果が異なっている場合は以下の考察内で詳細を言及する。

従来業務では、全てのケーススタディに共通してNo.1「現場の場所が常に変わる」No.8「一品受注生産」No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No.15「安全・品質よりコスト・納期が優先」が阻害要因となり、問題解決を阻む阻害要因となっていた。生産プロセスを通じて、各工程における記録作業を実施するためには、プロジェクトに関わる組織や企業の壁が問題となっており、建物形状や工事場所が毎回変わる特性によって解決が困難になっている。工事進捗や解体資材の記録についてはNo.3「建築物の規模・複雑度が大きい」No.10「労働集約的作業」という特性によってサイズや時間の制約があるため、形状や寸法などの物理的な記録を難しくしている。建築資材を対象とした記録では新築と解体ともに、No.14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」ことによって、対象資材の種類・量が多いことが阻害要因となっていた。解体資材については、No.4「建築物の耐用年数が長い」ことによって記録情報の保存管理が困難となっていた。

デジタル活用の普及のためには、No.1「現場の場所が常に変わる」No.8「一品受注生産」No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No.15「安全・品質よりコスト・納期が優先」の6項目が従来業務の問

表4-7 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×:阻害要因	デジタル活用の阻害有無 ×:阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い	×	
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	×
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

題解決と共通した阻害要因となっていた。各種進捗やトレーサビリティをデジタルデータとして記録するためには、データ取得の作業をゼネコン1社だけでなく工場や建設労働者など多様な企業・関係者と協働で実施する必要があり、新たに発生する記録作業や設備手配に関する費用負担と合わせて、技術普及の阻害要因となった。一方で、No.3「建築物の規模・複雑度が大きい」No.4「建築物の耐用年数が長い」No.10「労務集約的作業」No.14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」など、サイズや物量といった物理的な制約や時間的な制約については、デジタルデータの蓄積や活用の普及に対しては不利な要因とはならず、デジタル活用が得意とする条件であることが分かった。

その他に、建築資材のトレーサビリティと工事進捗の記録を目的としたデジタル活用を阻害する要因として以下を確認した。

- 準備データの不足：個体認証技術を活用するためには、資材単位で関係者が共通して取り扱うIDが必要だが、現状ではプロセスや企業によって多様なIDを用いており、統一されていないことが普及の阻害要因となっていた。また、記録が必要となる情報が明確でないため、これらの整備が必要となっている状況も問題であった。
- データの非標準化：各種記録のための個体認証タグの仕様や、記録する情報の種類・フォーマットなどが標準化されておらず、現状では技術適用のために仕様設計する必要があるため、技術普及の阻害要因となっていた。
- 技術適用中の管理/変更手間：工程進捗に応じた個体認証タグの貼付手間や、取得データの保存・管理に関する運用手間が必要となり、工場など企業を超えた連携も必要となることから、普及の阻害要因となっていた。
- 技術適用までの準備手間：個体認証技術を活用するためにはタグの貼付、3次元スキャン技術を活用するためには形状・寸法以外に必要な情報の整理と記録・保存・閲覧手段を準備する必要があり、普及の阻害要因となっていた。
- 専任人員の必要性：本章のケーススタディではデータ取得後の保存・管理運用が重要であるが、通常の施工管理とは異なる特殊なスキル・ノウハウが必要であるため、工事現場・工場の実務担当者が扱うことは現状では困難であり、専門家を別途配置するか、実務担当者への事前教育が必要となった。
- 費用対効果の不足/不明確：技術適用までの準備と適用中の管理/変更手間など、通常業務にはない新たな手間が発生しており、工場など企業を超えた連携も必要となるため、役割分担および費用負担が問題となった。

参考文献

- [1] 香月泰樹, 半田雅俊: IC タグを利用した現場管理システムの開発と適用 : (その 5) 汎用利用されている IC タグを用いた入退場管理システム, 2010 年度日本建築学会大会 (北陸) 学術講演梗概集, pp. 103-104, 2010. 7
- [2] 嘉納成男, ほか 2 名: 点群データに基づく工事進捗の自動識別に関する研究 PCa 工事における出来形の判定, 日本建築学会計画系論文集, 第 80 号, 第 715 号, pp. 2081-2090, 2015. 10
- [3] 中村裕幸, ほか 3 名: 電子タグを用いた木材トレーサビリティ実証実験 (その 1) 持続可能な森林経営のためのデマンド・プル型木材流通システム, 2006 年度日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集, pp. 1149-1150, 2006. 7
- [4] 村井一, ほか 3 名: 電子タグを用いた木材トレーサビリティ実証実験 (その 2) 実験内容および実験結果, 2006 年度日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集, pp. 1151-1152, 2006. 7
- [5] 中島史郎, ほか 7 名: 鋼構造躯体の施工における IC タグを利用した品質管理支援技術の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻, 第 35 号, pp. 21-26, 2011. 2
- [6] 大久保孝昭, ほか 5 名: コンクリートのトレーサビリティ確保のための IC タグの活用技術 - 製造時に投入する IC タグの評価 -, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 38 号, pp. 31-36, 2012. 2
- [7] 杉山央, ほか 2 名: IC タグを活用したコンクリートのトレーサビリティ確保技術 - 鉄筋コンクリート床部材中に投入した IC タグの通信可能確率 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 731 号, pp. 11-21, 2017. 1

図版出典

図 4-1 筆者作成

図 4-2 筆者作成

図 4-3 株式会社デンソーエスアイ: QR コードの概要より引用

https://www.denso-si.jp/dictionary/dic_qr/GeneralDescriptionoftheQRCode.pdf
(accessed 2024. 1. 7)

図 4-4 株式会社デンソーエスアイ: QR コードの概要より引用

https://www.denso-si.jp/dictionary/dic_qr/GeneralDescriptionoftheQRCode.pdf
(accessed 2024. 1. 7)

図 4-5 筆者作成

図 4-6 筆者作成

図 4-7 筆者作成

図 4-8 筆者作成

図 4-9 筆者作成

図 4-10 筆者作成

図 4-11 慶應大学 SFC 池田研究室（当時）提供画像を引用

図 4-12 筆者作成

表 4-1 筆者作成

表 4-2 筆者作成

表 4-3 筆者作成

表 4-4 筆者作成

表 4-5 筆者作成

表 4-6 筆者作成

写真 4-1 筆者撮影

写真 4-2 筆者撮影

写真 4-3 筆者撮影

写真 4-4 筆者撮影

写真 4-5 筆者撮影

写真 4-6 筆者撮影

写真 4-7 筆者撮影

第5章 分析目的のデジタル活用

- 5.1. 本章の目的と構成
 - 5.2. 屋内位置測位技術を用いた労務および建設資機材の稼働率記録
 - 5.3. 労働条件の改善を目的とした生理センシング
 - 5.4. 本章のまとめ
- 参考文献

5.1.本章の目的と構成

はじめに

本章では、建築工事において曖昧な根拠に基づいて工程・原価・安全衛生などが計画・管理されている問題の解決策として、工事現場の各種履歴を汎用的なデジタルデータとして収集し、それらを根拠として複数のプロジェクトを俯瞰して科学的に状況を分析するデータ活用を想定する。この場合、幅広くデジタルデータを蓄積するために多種多様かつ多量の計測機器を用いる必要があるため、それら技術を普及させるための準備や技術完成度に関わる障壁を検討するため、ケーススタディを実施する。

第1章で述べた建築工事に関わる問題の中で、本章に関わるものとして、建築資材の価格変動、それら変動に対する曖昧な市場予測に基づいた資材計画による原価変動、他産業と比較して多い死亡災害、曖昧な根拠に基づいた工程管理と原価管理による巧拙の差異、が挙げられる。この中で、市場の価格変動や法規制といった外的環境、工事の過程で起きる様々な問題は一品受注生産かつ毎回場所が変わる建築工事の特性であり、コントロールすることができないので、これらの影響を小さくするために、過去のプロジェクトにおける実績データを使った科学的な分析に基づいた工程・原価などに対する計画・管理が必要である。

また、死亡災害に関しては、建設労働者本人の資質などコントロールが難しい要因や、危険作業の減少を目指して高所作業を不要とする構工法や機械化・装置化施工などハード技術開発が寄与するものなども考えられるが、本章では疲労や疾病対策の製品や対策が勘や経験などの曖昧な根拠に基づいて利用推進されている問題に着目し、定量的に測定したデータに基づいて科学的な評価を試みる。

建設労働者・建設機械の位置データを使った稼働率分析と、建設労働者の生理データを使った安全装備の効果分析を題材として取り上げる。

既往研究

工程や原価に関するデータ蓄積と分析を目的とした既往研究では、金^[1]が出来高把握を目的として、工事写真とVR画像を重ね合わせるため、ノンプリズム測量機による光波測量と画像解析技術を活用し、カメラ位置を推定した例がある。蔡^[2]は安全管理を目的として建設機械と建設労働者の位置を把握するため、RFIDタグを活用し、1台の建設機械を中心とした10m単位での接近状態の推定手法を提案している。建物運用時のマーケティング目的では、広範囲かつ不特定多数を対象とした位置把握が必要となるため、宮崎^[3]がスーパーマーケット内でショッピングカートにRFIDタグを設置することによる動線把握手法を報告している。このように、様々な分析目的で位置情報がベースとして用いられるため、第2章で整理した通り、位置測位に関する要素技術開発は盛んに実施されている。例えば、GPSやWIFI、IMES、PDR、音波、といった様々な技術を活用し、1～数m精度の位置把握システムが報告されている。しかし、これらの技術適用のためには電波受信器などの設備構築が前提となっており、建物屋内の事務所やプラントなど、固定された場所や環境を想定したものが多い。使用場所や環境が常に変わる

状況では設備の盛替え手間が課題として挙げられており、建築工事で実務適用した事例は少ない。このように、要素技術は多様な選択肢があり、他分野では実績のあるものが多いため、建築工事で実務適用するための阻害要因の整理が重要な分野であると考えられる。

安全衛生対策を目的としたデータ分析の既往研究としては、医療、人間工学、スポーツ医学などの分野が先行している。建設労働者と類似した事例としては、暑熱環境においてアスリートが摂取する飲料水の効果を生理センシングによって定量的に評価した研究^[4]がある。建設分野では、暑熱対策の製品が多数市販されており、例えばファン付き作業服の場合はメーカーが実験室ベースで生理センシングによって効果測定した分析結果が根拠として公開されている。建設労働者を対象に、作業中の疾病発症を予測して警告を発するシステム開発^[5]や製品の事例も報告されているが、特定の建設労働者を対象とした試行に留まっており、実務に定着していない。このように、主に医療用途で用いられる要素技術は本来屋内の制御された環境において使用されるものであり、使用条件が大きく異なる建築工事においては試行錯誤の段階であることが読み取れる。

本章の構成

既往研究で挙げられた課題を踏まえ、本章における検証項目を以下2種設定する。

まず工程や原価に関する分析目的では、大量のデジタルデータを蓄積するための仕組みや運用面の課題抽出を試みる。そのために5.2.では、屋内位置測位技術を用いて建設労働者と建設機械の位置履歴をリアルタイムに取得するケーススタディを実施する。

次に安全衛生対策のための分析目的では、他産業用途に特化した要素技術や分析手法を建築用途で適用する場合の障壁を明らかにする。そのために5.3.では、疲労軽減と暑熱対策のための製品や施策に着目し、主に医療や人間工学分野で用いられる生理センシング技術による定量的な効果測定のケーススタディを実施する。

5.4.ではこれらケーススタディを通じて明らかになった阻害要因を整理する。

5.2.屋内位置測位技術を用いた労務および建設資機材の稼働率記録

5.2.1.背景と目的

建築工事では、建設労働者や建設機械の稼働状況を把握するため、位置把握技術に対するニーズが大きい。建設労働者は大規模現場では1日に1,000人を超えることもあり、工程に対する遅延リスクを管理する目的など、労務稼働率の把握に対するニーズがある。建設現場で利用される建設機械の多くはゼネコンがリース手配して協力会社へ日々貸与している。大規模現場では、例えば高所作業車は同時に数百台が稼働する。現場監督はこれらの位置把握を目視で行っており、日々多くの手間を要している。

位置把握技術については、5.1.にて整理した既往研究など、様々な種類の要素技術が報告されている。しかし建築工事は、日々変化する屋内環境という厳しい条件が制約となり、実用化が難しかった。そこで今回は、建築工事において実用的に稼働率を把握するための位置把握システムの開発を図り、実務適用することで、大量のデジタルデータを蓄積するための仕組みや運用面の課題抽出を試みる。

5.2.2.建築工事において実用的な屋内位置把握手法の提案

実務利用のための必要条件

今回は、稼働率・位置把握の対象として、労務ではゼネコン職員、建設機械では高所作業車・フォークリフトを選定した。建設工事における技術適用を阻害する特徴を以下3点考えた。

- 日々状況が変化する屋内環境であること
- 取り扱う資機材が安価であること（高所作業車・フォークリフトは月額数千円程度）
- 現場監督は日常業務で多忙であり、システムの準備や管理に手間を費やせないこと

以上を考慮し、要素技術に求められる必要条件を以下6点設定した。

- 屋内対応
- 無線電源での稼働（電池・バッテリー駆動）
- 安価な導入・メンテナンスコスト
- 専用受信機が不要
- システム起動やデータ回収の自動化
- 測位精度は5m前後で良い（一般的な柱スパン程度）
- 通信環境は問わない（ゼネコン職員が保有する携帯端末経由でネットワーク利用可能）

例えば既往研究で使用されている要素技術では、GPSは屋内対応、その他無線発信機を使った技術ではコストや受信設備が課題となる場合が多く、建築工事における実務利用が難しい。その理由の一つとして、建築工事と一般用途のニーズ差異が考えられる。一般的な位置測位の用途では、例えば事務所内の人員把握や工場内の機械把握など、数センチから1メートル内程度の比較的高精度の測位が求められる一方、一度設置した機器類を継続的に使用できるため導入時に手間とコストを費やせるため、既往技術の実務運用が可能であったと考えられる。

そこで、今回は近年広まった新しい無線発信機である BLE 端末²²に着目し、必要条件を満たす位置把握システムの開発を試みた。位置把握システムに使用する要素技術と必要条件の対比を表 5-1 に示す。

位置情報の取得方法の提案

使用機器は、①発信機：BLE 端末②受信機：携帯端末③サーバー、の 3 種類である。機器はほぼ市販製品を使用し、ソフトウェアを独自に開発することで、今回の用途に適したシステムを構築した。

無線発信機に BLE 端末を採用した理由としては、表 5-1 に示す通り、今回の用途に必要な条件を全て満たしているためである。例えば、BLE 端末を発信機として工事現場内に設置することで、屋内対応が可能である。また、BLE は通信距離が 10～15m と近距離で、発信可能な情報も限られている代わりに、省電力であり乾電池で 1～2 年稼働するため、有線での電力供給が必要なく、工事期間中の電池交換も不要である。コストは、量産型の市販製品を採用することで低減できる。今回は、専用の受信機を不要とするため、BLE の中でも iBeacon²³という規格に準拠した端末を採用した。この規格は建設会社で多く使われている携帯端末の OS が標準で

表 5-1 位置把握用途で用いられる要素技術と必要条件の対比表

要素技術	必要条件					低優先項目	
	屋内対応	無線電源	低コスト	専用受信機	自動稼働	精度	通信環境
光波測量	○	○	×	×	×	◎ 数 mm	○ 不要
GPS	×	○	○	○ 不要	○	△ 数 m	△※
RFID	○	○	○	×	○	○ 1～数 m	△※
WIFI	○	×	△ 量産無	×	○	○ 1～数 m	△※
IMES	○	×	△ 量産無	×	○	○ 1～数 m	△※
音波	○	○	△ 量産無	○ 不要	○	○ 1～数 m	△※
PDR	○	○	◎ 発信機無	○ 不要	×	○ 1～数 m	○ 補正要
BLE	○	○	○	○ 不要	○	△ 数 m	△※

²² BLE とは、Bluetooth Low Energy の略で、近距離無線通信規格 Bluetooth の拡張仕様の一つであり、使用電波は 2.4GHz 帯。Bluetooth は規格によっては 100m 程度まで通信可能だが、BLE は通信距離を 15m 程度とし、通信するデータを 20 バイト程度に制限しているため、端末が低電力で動作することが特徴である。

²³ iBeacon とは、Apple Inc. の登録商標である。

対応している。

さらに、特殊な無線発信機も開発した。通常、携帯端末上で同時に稼働させることができるソフトウェアは1つであり、未起動であったり、起動中でもバックグラウンドに存在すると、処理を実行することができない。そのため、通常はユーザー全員が常にソフトウェアをフォアグラウンドに起動させておく必要があり、現実的に運用が難しかった。そこで、ソフトウェアが未起動であっても自動で処理が実行されるよう、独自のコマンドを発信する無線発信機（以下、起動用ビーコン）を開発し、場内に設置した。電波の発信間隔は、制御を受ける携帯端末のバッテリー消費を考慮し、3分間隔とした。電波の発信強度は、3分間隔の発信を乾電池で1～2年連続させることが可能な範囲で設定し、通信距離60m程度とした。

開発したシステムの構成を図5-2に示す。事前準備として、BLE端末を無線標識として利用するため、工事現場場内に事前に固定しておく（以下、固定ビーコン）。携帯端末を持った現場監督が固定ビーコンの通信距離である10～15m以内に近づくと、位置座標がサーバーに送信され、ソフトウェア上の図面に現場監督のアイコンが描画される。建設機械へも、BLE端末を設置しておく（以下、移動ビーコン）。携帯端末を持った現場監督が建設機械に近づいた際に、その位置情報がサーバーに送信・共有される仕組みとした。なお、本来であれば建設機械にも現場監督と同様に携帯端末を設置すれば情報の更新頻度がより密になるが、コスト・故障の危険・セキュリティを考慮すると実用的でないため、今回の方法とした。

ソフトウェア側で位置を判定するためのフローを図5-3に示す。まず事前準備として、ソフトウェア上で表示する図面の画像データをサーバーに登録する。図面はフロア別に用意する。携帯端末のソフトウェア側では、BLE端末のUUIDに対応した個体番号、BLE端末が配置されているフロア番号、および2次元位置座標のリストを用意する。また、携帯端末のUDIDに対応した現場監督の属性情報（ユーザーID、氏名、連絡先等）を別途用意する。なお、UUIDとは、BLE端末に付与されている個体ユニークな32桁の英数字であり、UDIDとは、携帯端末に付与されている個体ユニークな40桁の英数字である。携帯端末がBLE端末から発信されるUUIDを受信すると、ソフトウェア内で、複数のUUIDの中から受信強度を基に最も近接した固定ビーコンを判定し、先述のリストを使って位置座標・フロアを算出する。位置情報・フロアは携帯端末のユーザー情報と紐づけられ、サーバーに送信される。移動ビーコンを受信した場合、そのときに最も近接した固定ビーコンの位置座標・フロアが紐づけられる。サーバーでは複数の携帯端末から受信した情報を集約し、各携帯端末へ配信することで、位置情報を共有する。

位置情報の活用方法

取得した位置情報は、最終的に業務で活用する形式に変換する必要がある。本報で対象とする用途は建設機械の配置管理であり、具体的な業務としては、位置の探索および移動履歴の把握である。

建設機械の探索では、従来方法の効率化が望まれている。建設機械の大部分は施工者がリース会社から借り、専門工事会社へ貸与している。工事現場に導入した建設機械には固有の号車番号を付与し、本体とエンジンキーがその番号で管理される。リース期間中、本体は工事現場

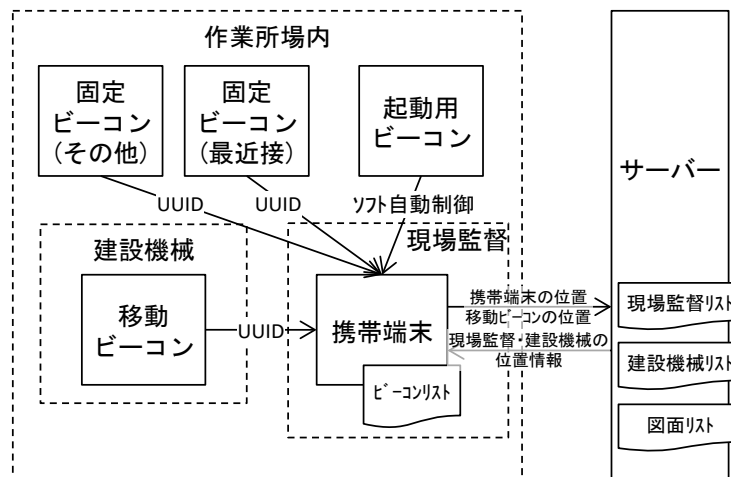


図 5-2 システムの構成図

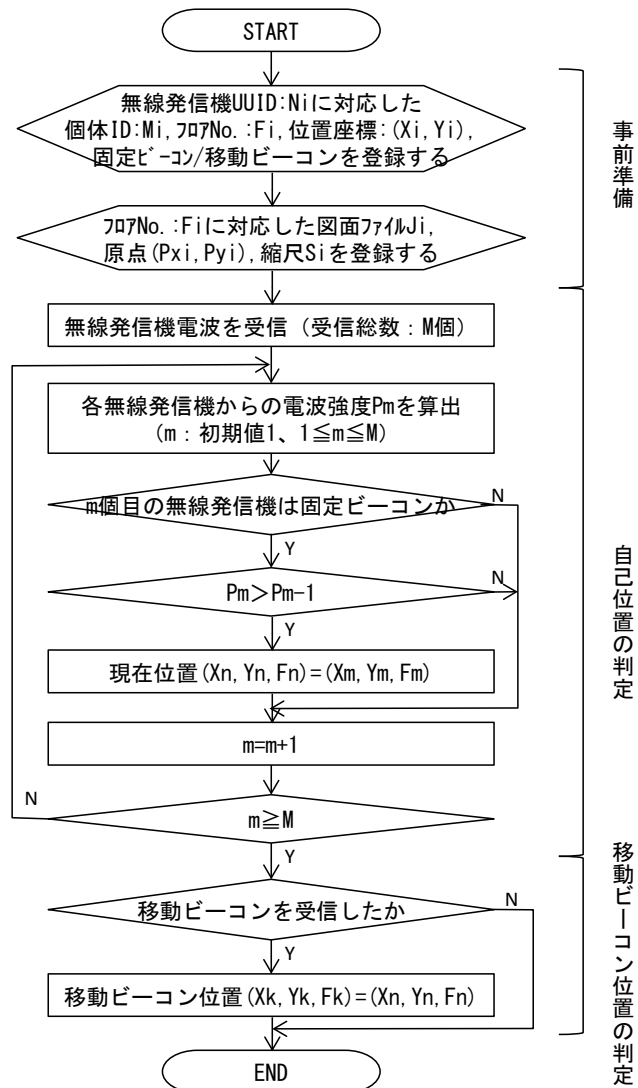


図 5-3 位置座標の判定フロー図

場内に残置されており、現場監督は使用者に対し、エンジンキーを貸出・返却することで、日々の配置管理を行っている。具体的には、現場監督は使用者に対し、作業場所のなるべく近傍に残置されている建設機械を割り当てるとともに、フロアや工区単位のおおよその所在を伝える必要がある。そのため、現場監督は前日の作業終了後もしくは当日の朝に建設機械の所在の棚卸しを行っている。従来は、各建設機械に近づいて掲示された号車番号を確認する必要があるため、場内をくまなく巡回しており手間が掛かっていた。

また、仮設費低減のために、現場監督は工程に応じて建設機械の追加・返却を行うが、その判断根拠として移動履歴が必要となる。従来は、使用者の自己申告等、把握する手段が限られており、適正な台数管理が難しかった。特に、貸与したものの移動が少ない建設機械の把握が求められている。

これらの課題解決のために、取得した位置情報を以下の通り活用した。また、システムでの表示画面の例を図 5-4 に示す。

(1) 建設機械の探索

取得した位置情報を探索業務に活用するため、携帯端末の図面上に建設機械・現場監督のアイコンおよび属性をリアルタイムに表示させた。属性とは、建設機械であれば号車番号、現場監督であれば所属と氏名である。さらに、特定の建設機械・現場監督を探索するため、属性から所在地の検索も可能とした。

(2) 建設機械の稼働状況の把握

移動の少ない建設機械を把握するため、取得した位置情報を基に、一定時間以上移動のない

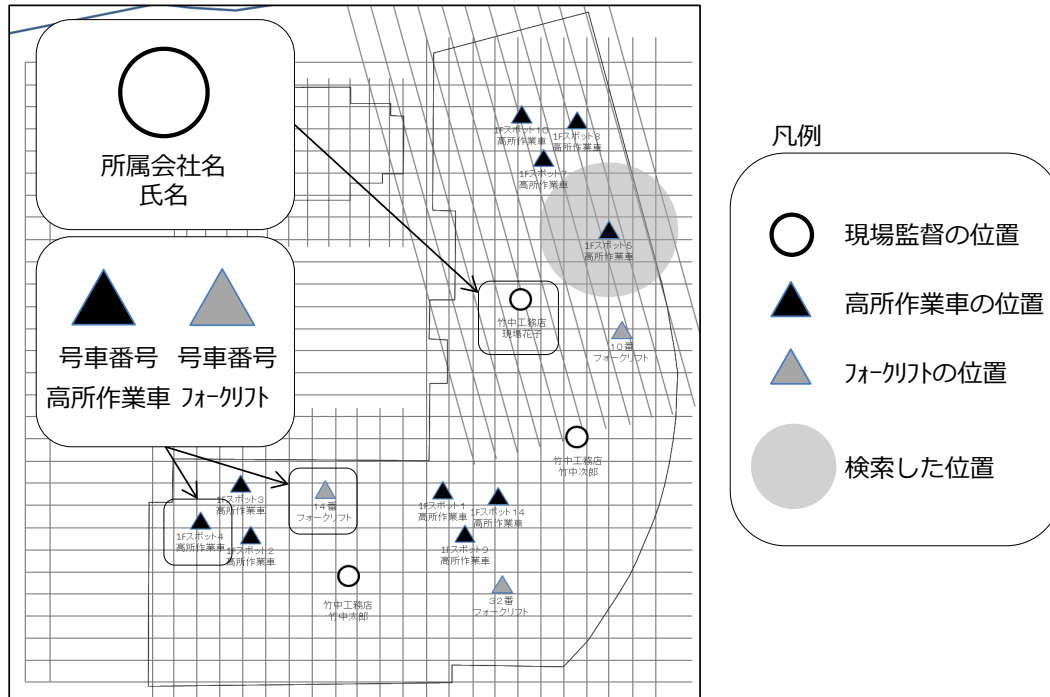


図 5-4 開発システムの表示画面例

建設機械のアイコンをリアルタイムで赤く表示させた。また、サーバー側では位置情報のログを集計しており、移動履歴の把握を可能とした。次章では開発したシステムを工事現場で実運用することで、有効性を検証したので、その概要を報告する。

5.2.3.プロジェクトにおける試適用検証

プロジェクト概要

建設機械・現場監督の配置管理の効率化効果が大きい工事として、ショッピングモールのように、建築面積が広大かつ間仕切り等で見通しの良くない建物種別に着目した。そこで、本システムの有効性を検証するため、大阪府堺市にある大型ショッピングモールの新築工事に適用した。

本工事は建築面積が 39,656.1 m²、延床面積が 136,819.3 m²、構造はS造、地上4階建て、工期は2014年10月～2016年3月の17か月であった。施工中の外観を写真5-1に示す。技術系の現場監督は最大配員数32名であった。建設機械は、最大で同時に約800台の高所作業車・フォークリフトが使用された。これらの内訳は、専門工事が独自に持ち込む400台と、ゼネコンから専門工事会社へ貸与する400台があった。さらに後者では、使用者が固定されている300台と、日々使用者が変わるスポット機100台に分かれていた。高所作業車の使用



写真 5-1 適用プロジェクトの施工状況

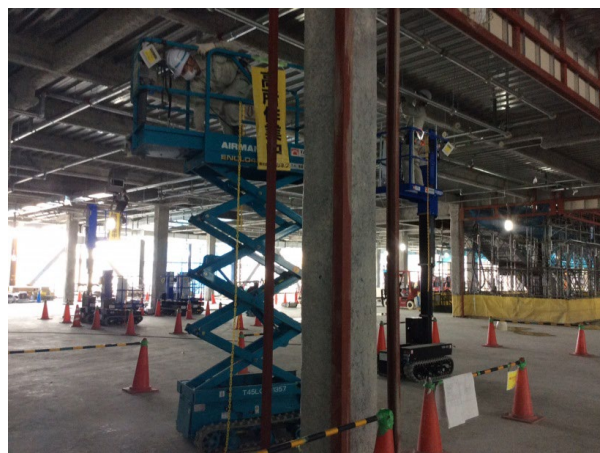


写真 5-2 高所作業車の利用状況

例を写真 5-2 に示す。

本システムの適用期間は、鉄骨建方開始時期である 2015 年 2 月から竣工検査前の 2016 年 2 月までである。システムの適用対象は、現場監督の管理業務への影響が大きい貸与スポット機 100 台と、現場監督 32 名全員とした。計測範囲は、多くの間仕切によって見通しが良くない店舗エリアが含まれる 1～3 階の 3 フロアとした。多くの現場監督が、作業開始・終了時および休憩時間である 8・10・13・15・17 時頃に場内を巡回しており、定期的な情報更新が可能であった。

施工中の通信環境については、場内に WIFI 等の通信設備はなかったが、現場監督全員にセルラーモデルの携帯端末が支給されていた。携帯端末は図面閲覧やメール確認等の日常業務用途で使用されているため、場内でも常に全員が携行しており、常に通信は可能な環境であった。その他仮設電気設備については、一般的な鉄骨造の工事と同様、デッキスラブが打設された工区から順次、デッキ吊り下げ型の仮設照明・分電盤が設置されていった。仮設照明は、天井ボードが張られても多くが残置されており、本設照明機器が設置される工期終盤に全て撤去された。

適用方法

使用した機器は、①固定ビーコン：1 フロア 100 個×3 フロア＝300 個②移動ビーコン：100 個③起動用ビーコン：1 フロア 3 個×3 フロア＝9 個④携帯端末 32 台⑤レンタルサーバー1 台、の 4 種類である。①②のビーコンは市販品を使用した。これらは出荷時に割り当てられている UUID に加えて、majorID・minorID をユーザー側で設定することができる。本検証では、majorID にフロア番号、minorID に端末固有の番号を割り当てた。これら情報は、毎秒一回、自動で発信される。また、ケース外側に端末固有の番号を印字し、目視で確認可能とした。③起動用ビーコンについては独自に製作した。④携帯端末は、本検証と関係なく、技術系社員全員に予め配備されているものを使用し、事前に開発アプリケーションをインストールした。⑤レンタルサーバーは市販品を使用し、事前に開発アプリケーションをインストールした。

固定ビーコンは、仮設照明に設置した。その理由は、①仮設電気工によって仮設照明と同時に設置可能であり、設置手間が少ない②天井本設照明の施工直前まで残置予定であり、盛り替えが少ない③竣工後は撤去される仮設材であり、回収漏れの恐れがない、の 3 点である。端末は防水・防塵のためにビニール袋で養生し、袋は印字された番号を目視できるよう透明なものを使用した。設置方法は、まず仮設電気工にフロア別に仕分けした固定ビーコンと配置計画図（既存の仮設照明配置図に、固定ビーコンの位置を重ねたもの）を支給し、仮設照明施工と同時に照明上部へ設置してもらった。設置状況を写真 5-3 に示す。本システムでは先述の通り、最も近接した固定ビーコン位置を現在地として判定する仕組みとしたため、設置密度が位置精度に直結する。今回の用途では、1 スパン（9m）四方程式のエリア区分けで位置を把握できれば十分であった。そこで、図 5-3 に示す通り、1 スパンごとに設置されている仮設照明に対し、固定ビーコンは 2 スパン（18m）に 1 つの割合で、千鳥形状に配置した。配置後、現場監督が現地で固定ビーコンに印字された番号を目視し、アプリケーション上で配置位置を登録し

た。なお、現場監督の配置管理では、仮設事務所での在籍有無も重要であるため、仮設事務所内にも固定ビーコンを設置した。

移動ビーコンは、写真 5-4 に示す通り、運転席のコンソール回りにテープ等で固定した。起動用ビーコンは、設置場所が位置判定に関わらないため、各端末の通信距離 60m で敷地内を漏れなく包含できていればよく、厳密に固定する必要がない。そこで、メンテナンス性を考慮して、資機材倉庫等等、地上から手が届き、かつ移動の少ない場所を選んで、各フロア 3 個を設置した。設置状況の例を写真 5-5 に示す。

アプリケーションではフロア別に図面を登録しており、①事務所 1F②事務所 2F③工事現場 1F④工事現場 2F⑤工事現場 3F、の 5 種類を選択可能とした。アプリケーションの表示は、起動している間は常時サーバーに接続し、最新の情報に更新した。各携帯端末とサーバー間の位置情報の送受信は、アプリケーションが起動している場合は 1 秒間隔とした。未起動時は起動用ビーコンの制御コマンドを受信する都度（最大で 3 分間隔）送信し、その後アプリケーションが起動された際にサーバーから最新の位置情報を受信する設定とした。

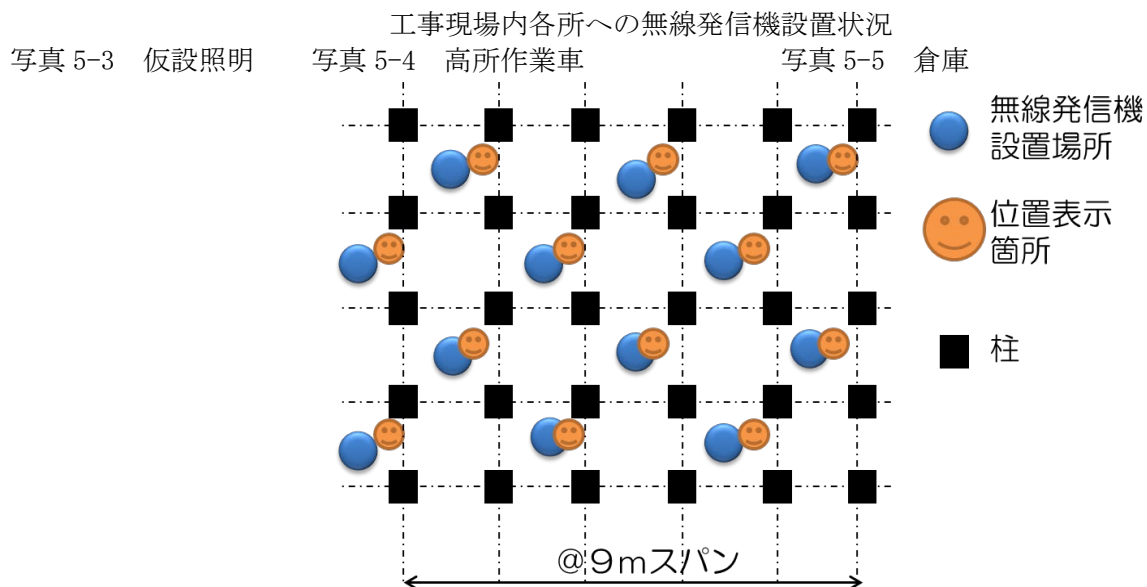


図 5-3 工事現場内における無線発信機の配置方法

サーバーには、各携帯端末から①日時②無線発信機 ID③ユーザーID（号車番号）④XY 座標⑤フロア番号が送信される。これらをデータベースとして整理し、各ユーザー・建設機械の最新のフロア・位置座標・3 時間以上滞留の有無を算出した。データの履歴は、ファイルサイズの軽量化を考慮して SQL 形式で保存し、管理者がいつでも抽出することができる仕組みとした。

検証結果および考察

取得したデータの例として、建設機械 1 週間分のログの一部を図 5-4 に示す。1 週間のデータを抽出した理由は、スポット用の建設機械を貸与する場合、同一ユーザーが連続して使用する期間が 1 週間である場合が多かったからである。抽出期間は鉄骨建方と設備工事が混在する 7 月 28 日～8 月 4 日とし、対象となる建設機械は 99 台であった。これらのログデータを分析することにより、建設機械の移動履歴を把握することができた。図 5-5 に、1 台の高所作業車を題材に、3 日間の移動履歴を示す。このように、期間中の移動状況や、よく使用されている場所を視覚的に把握することができる。

一方で、対象期間では、1 週間で 42870 個の位置データが記録されており、その内 2495 個が 3 時間以上移動のないデータ（以下、滞留データという。）であった。滞留データが 1 以上であったものが 37 台、0 であったものが 62 台であった。ただし、業務時間外となる 0 時～8 時、17 時～24 時のデータは除外している。滞留データを活用することにより、建設機械の導入・返却計画に役立てることが可能となる。

また、取得したデータの位置精度を、3 つの固定ビーコンで囲まれた 9m×18m のエリアで実測した。方法としては、図 5-6 に示す通り、水平 1,500mm×1,500mm グリッドで計 55 箇所の計測箇所を設定し、①最近接ビーコンを正しく判定できているか②最大誤差、の 2 点を確認した。①最近接ビーコンの判定精度は、計測箇所 55 箇所の内、正しい判定が 46 か所、誤った判定が 9 か所であり、正判定率は 83.6%であった。誤った判定となった箇所は 2 つの固定ビーコンの中間距離付近に集中しており、各固定ビーコンが発する電波の個体差や、BLE 電波自体の出力の不安定性が影響しているものと考察できる。②最大誤差については、最近接ビーコンを全て正しく判定できていれば理論的には 9m となる配置であるが、実測では最近接ビーコンの判定の違いにより最大 10.1m であった。その他、位置精度に影響があったケースとしては、外壁のない建物外周部のみ、上下フロアの固定ビーコンの電波を誤受信する場合があった。

従来、現場監督による建設機械の目視探索は、担当の 1 人が 1 日 30 分～1 時間程度を要している。一方、本プロジェクトでは、全ての現場監督が作業の進捗確認のために行う巡回行為を通じて、建設機械の位置情報を自動で更新しており、担当の現場監督による探索作業を削減することができた。削減効果は、システムが順調に稼働した期間が 6 か月であり、1 日の削減時間を 30 分とすると、計 72 時間と試算することができる。

また、定性的効果としては、専門工事が誤って異なる高所作業車を使用した場合にも、本システムを使用して位置を特定し、迅速な作業是正が可能となった。

移動 ビーコン	uuid	固定 ビーコン	X座標	Y座標	滞留 有無	電波受信 時刻	サーバ側 の時刻
8041	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:02	2015/7/27 15:03
8073	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:01	2015/7/27 15:03
8041	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:05	2015/7/27 15:06
8073	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:04	2015/7/27 15:06
8041	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:08	2015/7/27 15:09
8073	00000000-65CC-	9901	1.3	10.1	N	2015/7/28 0:08	2015/7/27 15:09
8041	00000000-65CC-	9901	1.3	10.1	N	2015/7/28 0:12	2015/7/27 15:12
8073	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:11	2015/7/27 15:12
8041	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:14	2015/7/27 15:15
8073	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:14	2015/7/27 15:15
8041	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:17	2015/7/27 15:18
8073	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:16	2015/7/27 15:18
8041	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:21	2015/7/27 15:21
8073	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:20	2015/7/27 15:21

図 5-4 取得したログの例

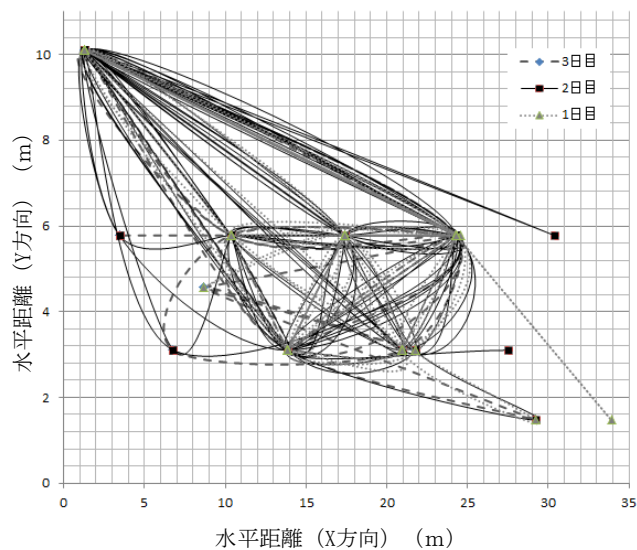


図 5-5 高所作業車の移動履歴例

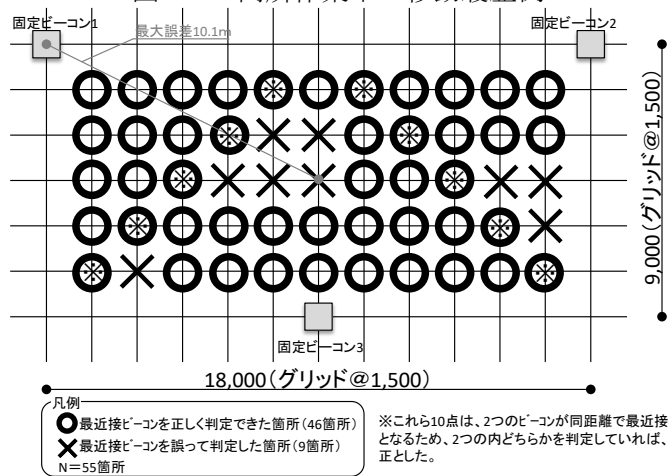


図 5-6 最近接ビーコンの判定制度と最大誤差

5.2.4.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

本取組みでは、BLE 端末を使った位置把握システムを開発し、工事現場に適用した。工事現場では高所作業車・フォークリフトの位置を屋内で最大誤差 10.1m 以内の精度で算出することで、日々の配置管理に必要なスパン単位での位置把握を可能とした。運用面では、現場監督に配備されている携帯端末を受信機として活用するとともに、場内の巡回時に位置情報を自動で共有する仕組みを構築することで、導入や運用を容易にした。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第 1 章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および要素技術として適用した位置測位技術の普及を阻む要因となっているものを表 5-2 に整理する。

従来業務では、No. 9「重層下請構造」No. 10「労働集約的作業」No. 11「工事関係者が臨時に組織される」No. 13「人手と建設設備の分化」の 4 項目が要因となり、建設労働者と建設機械の稼働率把握・分析が困難であった。プロジェクトごとに多様な企業・建設労働者が組織され、施工中も入れ替わりやスポット入場が多いため、建設労働者の把握が難しく、建設機械はゼネコン手配の共有機と協力会社手配の専用機が混在するため管理が難しい。また、No. 3「建築物の規模・複雑度が大きい」No. 8「一品受注生産」No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No. 14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」の 4 項目が要因となり、管理対

表 5-2 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用 の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化	×	
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

象となる建設作業がプロジェクトによって多様であるため、複数プロジェクトで使われている日報などの情報を集約して同一基準で分析することが難しい。

位置測位技術を使った稼働率分析では、No. 9「重層下請構造」No. 11「工事関係者が臨時に組織される」No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」は従来業務と共通であり、普及の阻害要因となった。位置測位技術の活用のためには建設労働者が無線発信機か通信端末を携帯する必要があるため、プロジェクトに携わる幅広い協力会社との連携体制が必要であり、インターフェースの一部として図面などの機密情報を扱う場合はセキュリティ面の対策も必要となる。従来業務で問題となっている No. 3「建築物の規模・複雑度が大きい」No. 8「一品受注生産」No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No. 14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」といった建物規模や作業種類の多様性に関わる特殊性については、位置情報という汎用的なデジタルデータの蓄積によって克服可能であることが分かった。

No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」の2項目は費用対効果に関わる項目であり、従来業務の問題解決と位置測位技術の普及に共通した阻害要因である。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、大量のデジタルデータを蓄積する仕組み・運用面の障壁を確認した。まず、このケーススタディでは一つの工事現場の中で409個の無線発信機と32台の携帯端末を使用しており、無線発信機については個別のID入力など、携帯端末についてはデータ蓄積・サーバー転送用途のアプリケーション導入など、初期設定が必要であるため、実務担当者がこれら多量の準備作業を実施することが難しかった。また、技術適用中は、日々変化する工事現場の状況に応じて機器の移動やメンテナンスが必要であり、管理手間も技術普及の障壁となった。準備・管理作業を実施するためには特別な知識やノウハウは不要であるため、第3章・第4章などで求められた専門家である必要はなく、これら作業に対応するために実務担当者を増員することによって解決が可能であると考えられる。

- 技術適用までの準備手間：位置測位のために工事現場の空間側と建設労働者・建設機械などの移動体の双方へ多量の発信・受信端末を配布する手間、各機器の初期設定手間が煩雑である。
- 技術適用中の管理/変更手間：工事現場の状況は常に変化するため、空間側に設置した機器の管理/変更手間が煩雑である。また、建設労働者・建設機械ともに入れ替わりやスポット入場が多いため、移動体側の機器の管理/変更手間も煩雑である。
- 専任人員の必要性：使用する機器が建築工事の施工管理では特殊な機材であり、収集したデータの取扱いや分析ノウハウも特殊なスキルであるため、専門家による技術支援が必要である。

その他に、位置測位技術を使った稼働率分析の普及を阻害する要因として以下を確認した。

- データの品質不足：現状の技術では全ての建設労働者と建設機械の位置情報・稼働率を常にモニタリングすることは運用・費用面で現実的でなく、本章のケーススタディのように位置情報の測位精度と更新頻度を用途に応じて粗く設定することで普及を可能としたが、より幅広く分析に活用するためには情報が不足する可能性がある。

- データの信頼性不足：位置測位のために工事現場の空間側と建設労働者・建設機械などの移動体の双方へ多量の発信・受信端末を配布する必要があるため、取得データのバグや欠損などの不具合の取扱いが問題となる。
- データの非標準化：稼働率分析のために必要となる位置情報のファイルフォーマットや単位系、データの記述順序など、データ構造が標準化されていないため、複数のプロジェクトで異なる取組みを並行するとデータを一元的に扱えない可能性がある。
- 成果創出までのリードタイム不足：位置データが毎日蓄積されていくので、多種多量のデータ整理と稼働率分析も1日単位で処理するスピード感が求められる。本章のケーススタディでは専任人員による手動で対応していたが、普及のためには自動化などの対策が必要である。
- 専門知識・技術の習得難易度：複数のプロジェクトを俯瞰して稼働率分析する仕組み自体が従来にない新しい職能であるため、施工計画・管理へのフィードバックも含めて、蓄積されたデータの分析・活用方法に関する教育が必要である。
- 費用対効果の不足/不明確：位置測位のためにプロジェクトごとに多量の機器を使用するため、分析のために新たな設備投資が必要になることから、費用負担や費用対効果が普及の阻害要因となる。
- セキュリティによるアクセス制約：請負体制に関する特殊性でも述べた通り、インターフェースの一部として図面などの機密情報を扱う場合はセキュリティ面の対策が必要となる。さらに、プロジェクトや企業を超えてデータを集約・閲覧しようとした場合、ネットワークやストレージには関係者の立場によって多様なアクセス制限が掛けられているため、これらインフラの整備も必要である。
- システムの完成度不足：上記のように、技術適用のためには準備・運用それぞれにおいて、実務担当者に対して従来にない手間を要求することになるため、普及を推進する場合には、実務レベルにおいてもメリットを享受できるようなシステムの完成度、ユーザーインターフェースの操作性が求められる。本章のケーススタディにおいては、例えば関係者間で位置情報を簡易に共有・閲覧できる仕組みや、それらをベースに電話やメッセージ授受といったコミュニケーションを円滑にする機能など、分析用途では重要ではないインターフェースまで意識的に作りこんでいる。

5.3.労働条件の改善を目的とした生理センシング

5.3.1.背景と目的

建設労働の問題意識の例として、国土交通省は 2017 年の第 3 回建設産業政策会議において、「若手の技能労働者が定着しない主な原因」をアンケート調査^[6]しており、休暇・賃金といった雇用形態、キャリアアップ・職業意識といった労働意識、作業のきつさ・危険といった労働環境、などの回答に着目していた。また、厚生労働省は 2021 年の建設雇用改善計画（第十次）^[7]において、若年労働者の確保に加えて、女性および高年齢労働者の活躍・定着の促進についても提言をまとめている。その具体策としては、雇用形態・労働災害防止・技能継承などが挙げられている。両者に共通し、かつデジタル活用によって貢献し得る分野として、本論文では『作業のきつさ・危険』に着目した。

まず、『きつさ』の調査例としては、厚生労働省が民間企業を対象に実施した「労働者健康状況調査」^[8]がある。企業が重要課題と回答した労働者の健康管理対策として「腰痛予防」が挙げられており、労働者の疲労箇所としては腰が一般的であると言える。具体的な対策としては、厚生労働省が「職場における腰痛対策指針」^[9]を発行しており、職場内教育やチェックリストの活用といった管理方法が示されている。特定の産業内における調査・対策事例としては、農業において農林水産省が主管している「スマート農業の実現に向けた研究会」^[10]があり、その目標のひとつとして「きつい作業、危険な作業」からの開放を目指し、ICT や RT を活用した軽労化および自動化を検討している。例えば田中^[11]は、農業で補助すべき疲労箇所として腰や肩、腕等に着目し、アクチュエータを使って筋力を補助するアシストスーツの開発を行うことで、労働者の疲労を軽減する対策を提案している。一方、建設業では、小林^[12]による調査事例があり、特定のプロジェクトにおける高所作業を題材に、鉄筋工や大工等、計 7 職種における疲労箇所を日々のアンケート形式で調査した結果、該当作業においては足裏・腰・後肩の訴えが多いことを明らかにした。このように、建設労働の疲労軽減に資する対策は、ニーズの調査や対策の試行錯誤が始まった段階であり、効果を定量的に示した事例は少ない。

次に、『危険』の対策として、労働災害の防止を目的に挙げる。建設業における死傷災害の発生割合を見ると、2020 年度の集計^[13]では上位から順に墜落・転落、転倒、はさまれ・巻き込まれ、となっている。しかし、これらはデジタル技術による対策が難しい分野と言える。その他では、近年の気象変化等の影響もあり、熱中症対策も喫緊の課題とされている。例えば厚生労働省からは、建設業労働災害防止協会への 2023 年度通達・告示^[14]で、熱中症の死傷者数は全産業の中で建設業が最多であること、予防の徹底を図ること、を指摘している。

熱中症を発症するメカニズムとして、医学的な知見からは①脱水と、②高体温という 2 つが着目されている。現在の工事現場における一般的な対策としては、(a)作業環境管理（WBGT 値周知、休憩所整備）(b)作業管理（作業時間短縮、暑熱順化、水分・塩分補給、服装、巡視）(c)健康管理（自己申告）(d)労働衛生教育(e)救急処置がまとめられているが、これらの対策の定量的な効果については明らかになっていない。

熱中症対策の効果を定量的に示した事例としては、運動分野の既往研究において中井^[15]が①脱水への対策に着目し、飲水が脱水の予防に寄与していることを示した。

建設分野では赤川^[16]が、建設作業中に比較的計測が容易な心拍数等を指標として熱中症の予知、診断を試みた事例があるが、計測データの個人差や、運用面で実務適用が難しいことを課題としている。

このように、疲労と熱中症どちらも、建設工事における対策を定量的に分析した事例が少ないことが分かる。そこで本論文では、それぞれの主要な対策を題材に、生理センシング技術によって効果を定量的に分析するケーススタディを実施することで、他産業用途に特化した要素技術・分析手法を建築用途で適用する場合の障壁を明らかにする。

5.3.2.疲労軽減に資する対策・製品類の効果検証

建設労働者へのヒアリング調査による疲労箇所の特定

5.3.1. で挙げた既往研究の通り、建設業の高所作業を題材に、建設労働者の疲労箇所をアンケート調査した例がある。そこで本論文では、疲労軽減対策を目的として、特定の条件に限定せず、一般的な疲労箇所を明らかにするため、改めて複数職種へアンケート調査を実施した。

ヒアリング項目は、①建設作業員が日常的に疲労や痛みを感じる箇所、②それを伴う動作、および③現在個人で実施している対策、の3項目である。

調査対象職種は、建築工事において一般的である6職種（鳶工、土工、鉄筋工、型枠大工、左官工、軽鉄・ボード工）を選定した。回答者は年代による偏りが生じないように配慮し、20歳代から60歳代まで幅広く選定した。調査の概要を表5-3に示す。

調査で得られた主要な回答を以下に記す。

- 鳶工：仮設足場組の際の資材運搬で腰が疲れる。また、仮設足場内の昇降が多いので、脹脛が疲れる。
- 土工：コンクリート打設時の配管盛替や水中ポンプの盛替など、重量物の運搬で腰が疲れる。腰痛で病院に通っている職人も多い。
- 鉄筋工：鉄筋の運搬で腕、床鉄筋の結束で腰が疲れる。
- 型枠大工：支保工のような重量物の運搬で肩、腰、上向き作業で首が疲れる。慢性的な腰痛を患っている職人も多く、コルセットを使用して仕事に就いている。
- 左官工：土間工の床コンクリート押え作業で腰全体が疲れる。慢性的な腰痛を患っている職人も多く、コルセットやサポーターを使用して仕事に就いているが、腰痛で仕事を休まざるを得ないケースも多い。
- 軽鉄・ボード工：ボード張は腕を肩より上げた状態および重量物運搬の繰り返し作業であり、肩、腕、腰が疲れる。天井ボード張では上向き作業により首が疲れる。対策と

表 5-3 ヒアリング概要

対象職種	鳶工、土工、鉄筋工、型枠大工、左官工、軽鉄・ボード工
人数	14 名
年齢	21 歳～64 歳（平均 42 歳）
調査場所	建築現場の作業員休憩所、協力会社工事事務所、他
ヒアリング項目	疲れや痛みを感じる箇所、それを伴う動作、使用している補助具・医療器具

してはコルセットの他、自身で身体にゴムを巻きつけてサポートしている例もある。

以上より、疲労箇所は腕・肩・首・腰（背骨周りの狭範囲）・腰（広範囲）・脛脛の6種類であり、職種によって疲労箇所の組合せが異なることが分かった。また、既往文献で示されていた通り、腰は全職種共通の疲労箇所であった。職種ごとの疲労箇所と動作、補助具を表5-4に示し、加えて疲労箇所については身体図を用いて図5-7に示す。

調査結果を基に、将来、共通した疲労対策を可能とするため、疲労箇所による職種の類型化を試みた。本稿では、疲労箇所が類似する職種同士をグループとし、疲労箇所が①上半身を中

表 5-4 職種ごとの疲労箇所・起因動作・対策補助具

職種	疲労箇所	動作	補助具
鳶工	腰、脛脛	仮設足場組階段昇降	なし
土工	腰	CON 打ち ポンプ 盛替	なし
鉄筋工	腕、腰	鉄筋運搬床鉄筋結束	なし
型枠大工	肩、腰	支保工運搬上部型枠	コルセット
左官工	腰、脛脛	床 CON 押え	コルセット、サポーター
軽鉄・ボート工	首、肩、腕、腰	天井ボート張壁ボート張	コルセット、ゴム

表 5-5 疲労軽減対策箇所の類型化

グループ	職種	疲労箇所	動作
①上半身中心	土工, 鉄筋工, 型枠大工, 軽鉄・ボート工	首, 肩, 腕, 腰	重量物運搬 長時間継続作業（腕上げ）
②下半身中心	鳶工, 左官工	腰, 脛脛	階段昇降 長時間継続作業（中腰）

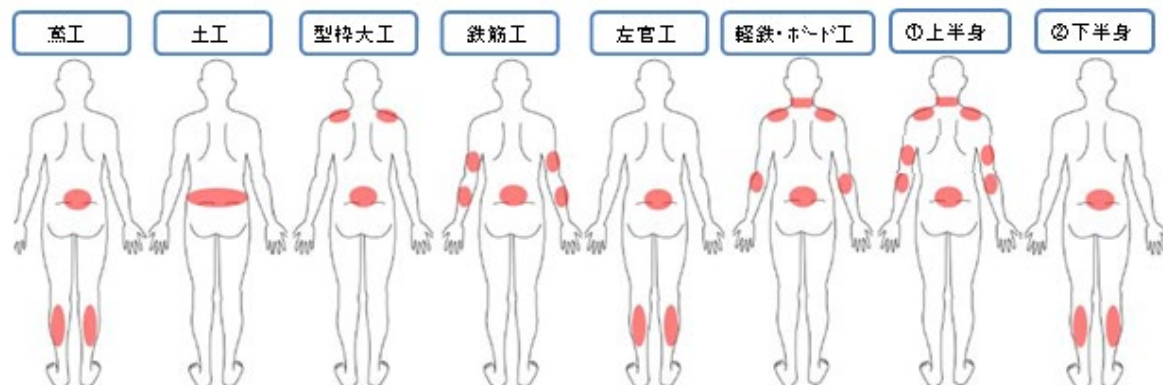


図 5-7 職種ごとの疲労箇所を表す身体図

心としたグループ、②下半身を中心としたグループの2パターンに類型化した。グループごとの疲労箇所と動作の関係を表5-5に、身体図を図5-7に示す。①上半身を中心としたグループは土工、鉄筋工、型枠大工、軽鉄・ボード工であり、疲労箇所は首・肩・腕・腰、動作は重量物の運搬や、腕が肩より高い位置での長時間継続作業といった腕、背中周りを使うものが多い。②下半身を中心としたグループは鳶工、左官工であり、疲労箇所は腰・脹脛、動作は階段昇降や中腰の長時間継続作業といった、足腰を使うものが多い。

次に、この2種類の疲労箇所グループに対し、具体的な対策を検討する。

建設労働に特化した疲労軽減アンダーウェアの開発と効果測定

表5-3で示した通り、現状、建設労働者が一般的に使用している対策補助具としては、コルセット・サポーター・ゴムであった。研究段階では、建設業においても機械タイプのパワーアシストスーツが開発されているが、実用的には、費用面や作業性を考慮すると、ヒアリング結果にあるように布やゴムを使った補助具が適していると考えた。

そこで、他分野向けに販売されている疲労軽減目的のアンダーウェア『DARWING』に着目した。この製品を販売している企業は、医療用のサポーターやコルセットを販売するメーカーである。そのノウハウを生かして、疲労軽減対象の筋肉部分にゴム製の人工筋肉やコルセット機能を付与したアンダーウェアを開発していた。その対象が他分野であったため、先述の建築工事に特化した疲労箇所グループを用い、建設労働に特化した疲労軽減アンダーウェア『職人DARWING』を共同で開発した(図5-8)。

デジタル技術を用いた効果測定の手段として、今回は筋電位センシングを選定した。被験者は健康成人男性11名であり、年齢は 34 ± 9.5 歳、身長は 173.5 ± 6.5 cm、体重は 74.5 ± 12.0 kgであった。対象動作は、最も腰部に負担が大きいと推測される床コンクリート押え作業を取り上げ、腰部の筋肉疲労を測る部位として左右の大殿筋を選定した。被験者ごとに、1分間の模擬作業を5回繰り返し、身体表面に添付した筋電位計を用いて測定を実施した。その結果、各個人の最大筋電位を100%としたとき、アンダーウェア未着用時で右大殿筋：平均27.09%、左大殿筋：平均23.15%が、アンダーウェア着用時で右大殿筋：平均24.18%、左大殿筋：平均20.21%となり、定量的に着用効果を確認することができた。



①上半身タイプ

①下半身タイプ

図 5-8 建設労働向け疲労軽減アンダーウェアの 2 種類

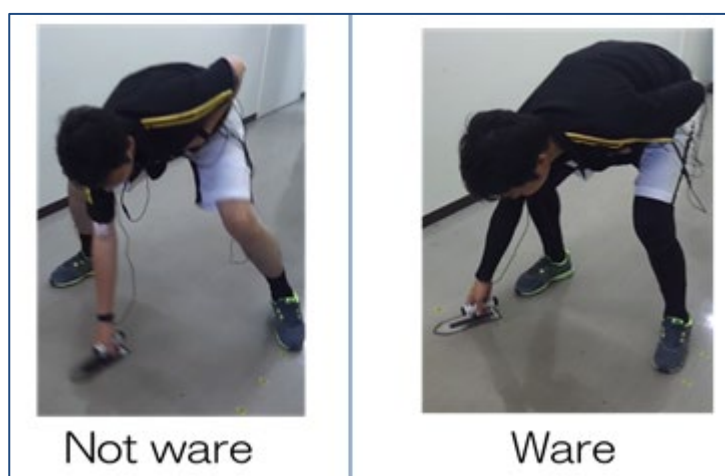


図 5-9 筋電位センシングによる効果測定の様子

5.3.3.熱中症予防に資する対策・製品類の効果検証 1：建設作業中の飲水効果

建設労働者を対象とした現場実測実験の目的と方法

5.1. で取り上げた文献の通り、工事現場における一般的な対策としては、(a)作業環境管理（WBGT 値周知、休憩所整備）(b)作業管理（作業時間短縮、暑熱順化、水分・塩分補給、服装、巡視）(c)健康管理（自己申告）(d)労働衛生教育(e)救急処置が挙げられている。この中で、予防策として一般的に広く推奨されている水分・塩分補給に着目した。熱中症対策として、多くの工事現場では水分と塩分を同時接種できる飲料水としてスポーツドリンクが推奨され、ゼネコンによる安全対策として、休憩所にスポーツドリンクの無償サーバーが設置されていることもある。しかし、建設労働の中で、スポーツドリンクを摂取するタイミングや量について、定量的に効果を検証した事例はない。そこで本論文では、熱中症予防の指標となる脱水に関わる生体情報に着目し、プロジェクトにおいて作業中の建設労働者を被験者とした効果測定実験を実施する。

既往の研究^[17]では、工事現場において自由な飲水では給水量が不足している可能性が推測された。そこで、一定量の飲水を義務付ける（以下、強制飲水という）ことで、熱中症予防に効果があるか、検証する。今回の実験では、建設労働者を自由飲水グループと強制飲水グループの2群に分け、被験者が通常よりも多量の飲水を行うことによる脱水の低減効果の計測を試みた。脱水症状の評価指標としては、文献で熱中症時の休憩指示の閾値に設定されている脱水率（ $(\text{朝の作業前体重} - \text{作業後の体重}) / \text{朝の作業前体重} \times 100$ ）を採用した。また、飲水状況を把握するため、飲水量（作業中の作業状況・飲水状況・体重・飲水量測定状況）を記録した。

実験は夏季の工事現場において、実作業中の作業員を対象に2019年8月初旬の5日間実施し、各日ともWBGTは最高約33、最低約27であり厳しい暑熱環境であった。被験者は、工種や年齢による偏りが生じないように、表5-6の通り複数工種・年齢で構成された8名とし、表5-7の通り4名ずつグループを入れ替えた。

A) 自由飲水グループ: 各被験者が自由に水分摂取する。

B) 強制飲水グループ: 最低飲水量と時間を指示する。

表 5-6 被験者の情報

被験者	年齢	身長 [m]	体重 [kg]	職歴 [年]	職種
a	39	1.67	57	19	土工
b	40	1.70	79	19	鷹職
c	25	1.70	80	4	給排水工
d	36	1.73	94	15	鉄筋工
e	58	1.67	63	35	鷹職
f	39	1.77	70	18	雑溶接工
g	50	1.75	74	9	土工
h	29	1.68	74	5	給排水工

表 5-7 実験日ごとのグループ分け

被験者	a, b, c, d	e, f, g, h
8月2日	A	B
8月3日	B	A
8月5日	A	B
8月6日	B	A
8月7日	A	B

なお、B)強制飲水グループでは各作業時間帯に最低 500g 以上の水分摂取を指示した。最低飲水量の 500g は、既往研究での平均飲水量を参考に設定した。

建設作業は、一般的に昼休み(12～13 時)を挟んだ 8～17 時に行われ、各 30 分の休憩を挟んで午前 2 回、午後 2 回の計 4 回の作業時間帯(AM1, AM2, PM1, PM2 と称す)に分けられている。作業中の飲水にはスポーツドリンクを用意し、体重、飲料容器の測定を AM1, AM2, PM1, PM2 の前後に計 8 回行い、その減少量から着衣時脱水量、飲水量を求めた。なお本実験は、岩手大学の人を対象とする医学系研究実施規則第 7 条第 1 項の規定に基づき、承認(第 201901 号、平成 31 年 4 月 21 日)を得て実施した。

実験結果と考察

まず、飲水量の実態を把握するため、グループごとの飲水量と飲水時間を二要因として分散分析した結果を図 5-10 に示す。各作業時間帯の平均飲水量は、自由飲水グループが 545g、強制飲水グループが 636g であり、有意な差が認められた($p<0.05$)。飲水時間と飲水量の関係をみると、PM1 (807g) の平均飲水量が、AM1 (586g)、AM2 (458g)、PM2 (512g) より有意に高値を示した($p<0.001$)。また、作業時間帯ごとの飲水量には、飲水方法の違いによる統計的な有意差は認められなかったが、PM1 以外において強制飲水グループの飲水量が自由飲水グループを上回っており、AM1 の差が最も大きかった。この結果から作業員の飲水状況を考察すると、PM1 の時間帯は飲水量の指示に依存せず、作業員は一日の中で最も多く飲水しており、その他の時間帯は指示によって飲水量が増加傾向になることが分かった。

次に飲水による脱水の低減効果を考察するため、飲水方法・飲水時間と脱水率を要因として分散分析した結果を図 5-11 に示す。グループ別の平均脱水率は、強制飲水グループが 0.1%、自由飲水グループは 0.8%であり、グループ間で脱水率に有意差が認められた($p<0.001$)。さらに、熱中症予防に対する効果を考察する。文献では、熱中症予防のためには脱水率を 1.5%未満に維持することが望ましいとされている。今回の実験結果では、自由飲水グループでは AM2 から脱水率が 1.0%前後で推移しているのに対し、強制飲水グループでは 0%前後を推移していた。個別データで自由飲水グループは脱水率 1.5%を超えた回数が 15 回に対し強制飲水グループは 7 回であった。この結果から、最低飲水量を指示したことによって脱水率の低減に寄与し、熱中症予防に効果があった可能性がある。また、強制飲水グループと自由飲水グループとの間では、PM1 時間帯における飲水量の差は小さく、他時間帯の飲水量の差が大きいことから、特に午前中と夕方の時間帯において、自由飲水グループの飲水量が十分でなく、この各時間帯で一定量の飲水を指示することが熱中症予防に効果があることが推測される。残された課題として、今回、強制飲水グループへ義務付けた飲水量は 500 g であったが、その量の妥当性は確認できなかったため、今後は複数の飲水量による効果の差異も検証する必要がある。

凡例 * : $p<0.05$ ** : $p<0.01$ *** : $p<0.001$

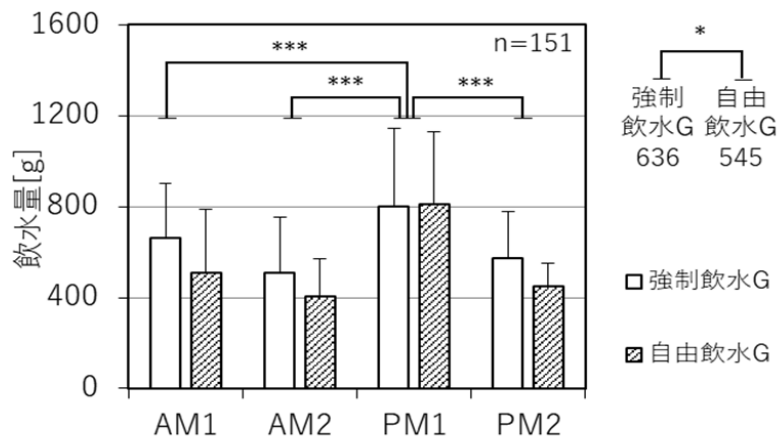


図 5-10 飲水量と飲水時間の関係

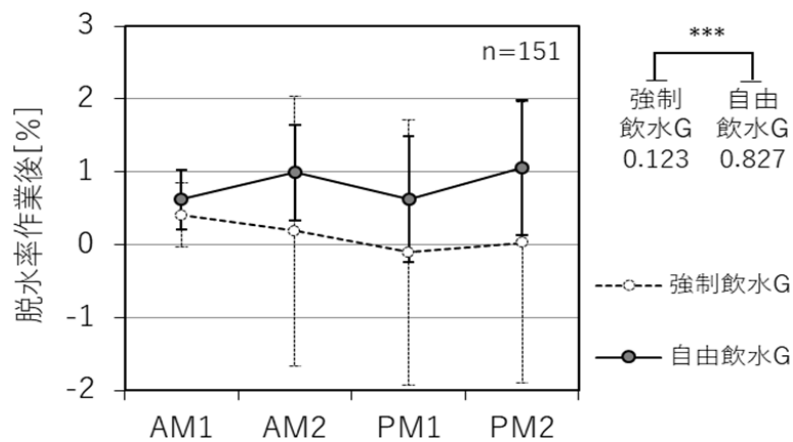


図 5-11 飲水方法・飲水時間と脱水率の関係

5.3.4.熱中症予防に資する対策・製品類の効果検証 2：飲料物による効果の差異

建設労働者を対象とした人工気候室実験の目的と方法

次に、飲料物の種類による効果の差異を検証する。5.3.3. では一般的な対策製品として市販のスポーツドリンクを用いたので、今回は比較対象として、近年新しく普及が始まったアイススラリーを選定した。アイススラリーとは、スポーツドリンクと類似の成分だが、予め冷凍しておくことで、シャーベット状態で接種することができる製品である。他分野では、例えば柳田が消防隊員がアイススラリーを摂取することにより、直腸温と心拍数を指標として身体内部の冷却効果を確かめた事例がある。

そこで今回は、既往研究と同様に複数の生体センシングを実施し、一般的なスポーツドリンクとアイススラリーの接種効果の差異を検証する。被験者は建設労働者を選定した。被験者の労働条件を極力統一するため、実験場所は人工気候室の中とし、型枠大工の模擬作業を実施した。

実験は、2021 年 10～11 月に北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟内の人工気候室にて実施した。健康な 20 歳～50 歳代の型枠大工（男性）9 名を被験者とした。人工気候室の室温は 34℃、相対湿度は 50%とし、1 名ずつ、予め設定した型枠組立・解体の模擬作業（代謝量 2Mets 程度）を行わせた。服装はファン付き作業服、長袖 T シャツ、作業ズボン、トランクス、靴下、安全靴、手袋、ヘルメット、不織布マスクとし、作業環境、活動量、それぞれの条件を統制した。

スケジュールと主な測定項目を表 5-8 に示す。作業時間は AM1 前半 40 分(AM1-1 と称す)、AM1 後半 40 分(AM1-2)、AM2 前半 40 分(AM2-1)、AM2 後半 40 分(AM2-2)とし、AM1-2 と AM2-1 の間に休憩を 30 分設けた。

表 5-8 実験のサイクルスケジュール

	AM1						休憩	AM2					
	前半		測定	後半		前半		測定	後半				
	AM1-1			AM1-2		AM2-1			AM2-2				
時間(分)	40		10	40		30	40		10	40			
実験時間(分)	0	20	40	0	20	40	0	20	40	0	20	40	
着衣体重	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
裸体体重	●		●	●		●			●	●		●	
舌下温	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
皮膚温	●												
心拍	●												
主観申告	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

表 5-9 実験条件の一覧

	条件 1	条件 2	条件 3
休憩場所の温熱環境 (気温,相対湿度)	26℃,35%	26℃,35%	34℃,50%
休憩中に摂取する飲料	通常飲水 (スポーツドリンク)	アイススラリー	通常飲水 (スポーツドリンク)

それぞれ 40 分作業の 0、20、40 分目に着衣体重測定、舌下温測定、主観申告を実施した。AM1-1、AM1-2、AM2-2 では、それぞれ実験前(0 分)、実験後(40 分)に、休憩時間後の AM2-1 では体表面温度計測の休憩時間からの皮膚温の継続性を考慮して実験後(40 分)のみに、裸体体重と全ての衣類の重量を測定した。着衣及び裸体体重いずれも、電子天びん GP-100K (T&DCorp.)を用いて測定した。同様の頻度で、深部体温を額にセンサー(ベアハガー, 3M)を貼り付けて計測した。脱水率は、AM1-1 開始時の体重を基準として、各作業時間帯終了時の体重から、裸体体重、着衣体重それぞれで求めた。各作業の開始時、終了時の体重と各被験者の体表面積から、各作業時間帯の裸体体重減少率、着衣体重減少率を求めた。皮膚温はサーミスター(LT-8A, Gram)を用いて 8 か所(前額、腹部、背部、前腕、手背、大腿、下腿、足背)を作業中常時計測し、平均皮膚温は Hardy&DuBois の 7 点法の式を用いて求めた。心拍数は胸部に取り付けたベルト電極の心電計(心拍(My・beat)と称す)と、右手首にとりつけたウェアラブル端末(心拍(POLAR)と称す)で測定し、活動量は左手首にライフレコーダ(A&Dcorp.)を取り付け測定した。

被験者の主観申告は、温冷感・快適感・発汗感・着衣の濡れ具合・口渇感及び疲れ具合についてアンケート調査を行った。

被験者には、表 5-9 に示すように、休憩場所の温熱環境 2 パターンと休憩中に摂取する飲料の 3 条件を設定し、各計測データ、各主観申告結果を条件毎に比較する。飲水量は、通常飲水(スポーツドリンク)、アイスラリーとも体重 1kg 当たり 5g に設定し、休憩時間 30 分で休憩直後に 2.5g/kg, 15 分後に 2.5g/kg と 2 回に分けて摂取させた。作業中は自由飲水としたが、被験者は全員飲水しなかった。

なお、本研究は室蘭工業大学ヒトを対象とした研究に関する規則第 9 条第 1 項の規定に基づき、承認(R3-03-S03, 令和 3 年 10 月 15 日)を得て実施し、事前に被験者の了承を得た。

実験結果と考察

脱水率については、裸体、着衣(図省略)ともに、条件 1, 2, 3 の間で有意な差異はみられず、休憩の飲水で一旦低くなった後、時間帯を経るに従い増大した。

心拍数については、図 5-12 に各条件での平均値の変動を示す。休憩時間に、条件 3 が 85bpm までしか下がらなかったのに対し、条件 1, 2 は、安静時の心拍数に近い 75bpm まで低下していた。条件 2 は、条件 1 に比べてアイスラリー摂取後、急激に心拍数が低下した。休憩時間後の AM2-1 では、3 条件とも作業開始後に 100bpm に達し、3 条件に差異はみられなかった。

皮膚温について、図 5-13 に背部、足背、平均皮膚温の各条件での平均値の変動を示す。(a) 背部は、休憩時間に条件 1 が条件 2 より約 2℃低くなり、AM2-1 の作業時間になっても急激に上昇しなかったのに対し、条件 3 は、AM1-2 終了時の概ね 33℃を維持したままだった。(b) 足背は、休憩時間に条件 1 が概ね 34.5℃を維持していたのに対し、条件 2 は、緩やかに下降し続け 34℃以下に下がった。一方、条件 3 は、AM1-2 から休憩時間に約 1℃低くなったが、その後 AM2-1 まで緩やかに上昇した。条件 1, 2 とも AM2-1 の作業時間中、休憩時間の効果が継続し、終了時に条件 1 と同じ温度に達した。以上のように、身体のコア部分に近く発汗の多い部位である(a)背部と、コア部分から遠く、安全靴の通気性がなく放熱しにくい(b)足背では、異なる

傾向がみられた。その結果、(a)及び(b)の影響を受け、(c)平均皮膚温は、休憩時間に入った直後から条件1,2は概ね同じ32℃まで低下したが、条件3は緩やかに上昇し続けたため、作業開始からしばらく他の条件より高い状態が続いた。

主観申告について、休憩の温冷感、快適感では、条件1,2の間で顕著な差異はみられなかった。条件3は条件1に比べて有意に暑く不快だったが、AM2-1の作業開始後は、3条件に差異はみられず、概ね皮膚温と同様の傾向が見られた。

背部と足背の皮膚温及び平均皮膚温は、休憩時間では、34℃の環境では概ね作業時間帯から変動がみられなかったのに対し、26℃の環境では大きく低下した。また心拍数も大きく低下し、温冷感は低く、快適感は高くなったことから、休憩場所を26℃に空調することが休憩中の生理心理反応に影響した。休憩後のAM2-1作業開始から背部と足背の皮膚温及び平均皮膚温は徐々に上昇したが、足背の皮膚温は、作業開始後も低値で推移する持続時間が長かった。しかし、心拍数、背部の皮膚温、平均皮膚温は、低値で推移する持続時間が短かった。

通常飲水とアイススラリー飲水では、休憩時間での心拍数と背部・足背の皮膚温では若干の差異がみられたが、直後の作業時間帯では差異はみられなかった。

これらの結果から、休憩場所を26℃に空調することは、心拍数、背部と足背の皮膚温及び平均皮膚温を低下させる効果があることが示唆されたが、いずれも効果は休憩時間のみで、継続時間は限定的な傾向がみられた。また、アイススラリーは、足背の皮膚温を低値で推移させる持続時間を、通常飲水の場合と比較して、長くさせる効果があることが示唆された。

次に、得られた各種数値を用いて、統計分析を試みた。特に、熱中症予防の視点で重要な指標である深部体温と、比較対象として各所皮膚温の平均値に対し、反復測定分散分析(ANOVA)を使用して、作業開始時からの模擬作業による変化を一元配置分散分析し、表5-8に示した3条件で比較した。

深部体温では、休憩時間を含め3条件で、作業開始時からの有意な変化は認めらなかった(図5-14)。一方、平均皮膚温は、条件1と条件2では休憩時間後のAM2-1とAM2-2、条件3ではAM2-2と休憩時間で、それぞれ34℃以上まで上昇し、作業開始時の概ね33℃より有意に高くなった(図5-15)。この二つの統計分析結果から推測すると、今回の模擬作業の環境下では、深部体温が一定に保たれており、常に熱中症の危険がない状態であったと言える。今回の条件下では、一般的なスポーツドリンクとアイススラリーの間で、熱中症予防に資する効果の差異は確認できなかった。また、身体各所で計測した皮膚温の平均値を指標とすると、条件や時間帯によって統計的に有意差が確認できていることから、熱中症へのリスクとは関係しない範囲で、身体表面では外部環境の影響を受けていることが分かった。また、主観的にはアイススラリーを摂取するとスポーツドリンクよりも身体が冷えるように感じるが、統計的にはその主観は錯覚であり、体温に対する影響の差異は確認されなかった。

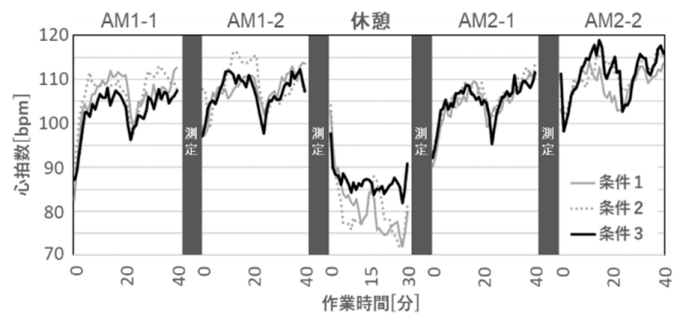


図 5-12 心拍数の平均値の変動

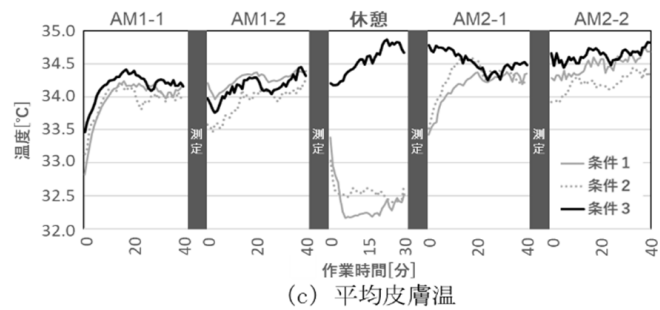
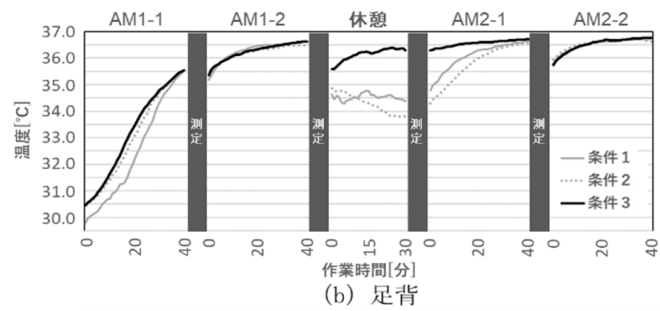
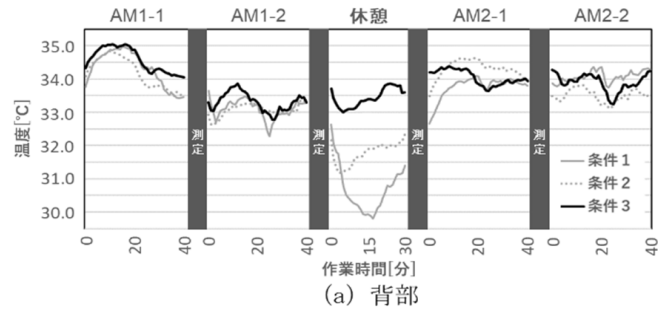


図 5-13 身体各箇所における皮膚温の平均値の変動

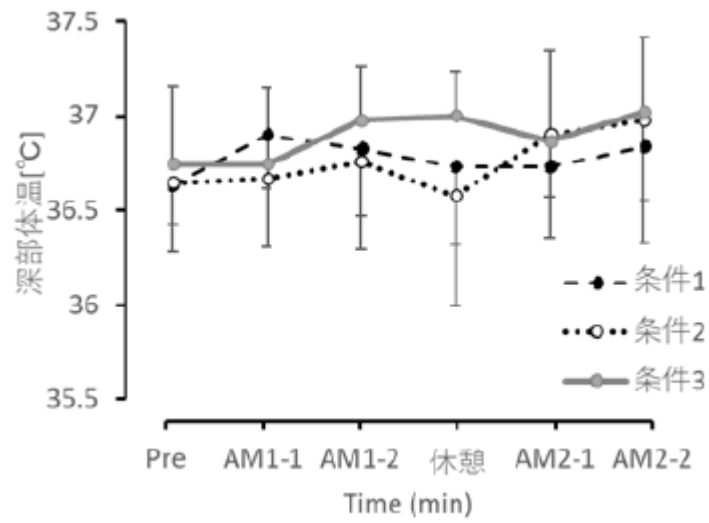


図 5-14 深部体温・3 条件・時間帯の関係

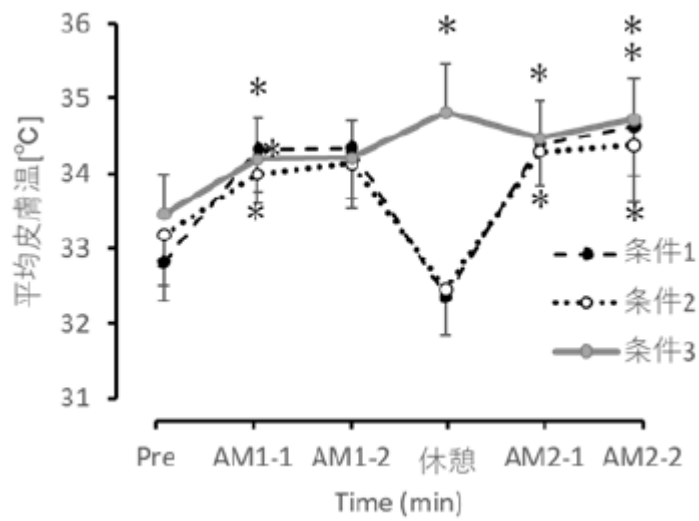


図 5-15 身体各所の平均皮膚温・3 条件・時間帯の関係

5.3.5.本取り組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

疲労軽減を目的とした分析では、複数職種の建設労働者へのヒアリングによって疲労箇所を洗い出し、上半身中心と下半身中心の2パターンに分類した。この疲労箇所に対し、ゴムによる人工筋肉とコルセット機能を付与したアンダーウェアを開発した。これによる疲労軽減効果を、筋電位を指標として生体センシングによって計測を試みた。その結果、床コンクリート押えの模擬作業実験によって、左右大腿筋の疲労軽減効果を定量的に確認した。

熱中症予防を目的とした分析では、一般的に推奨されている対策として飲水に着目し、工事現場および人工気候室で被験者実験を実施して、定量的な効果把握を試みた。脱水率を指標とした検証の結果、午前中と夕方の時間帯で、スポーツドリンクを任意で接種する飲水量が不足している傾向を把握し、各時間帯で500gの飲水を義務付けることで、熱中症予防により効果的であることを確認した。一方、深部体温と指標としてスポーツドリンクとアイススラリーの摂取効果の差異を検証したが、統計的な有意差はなかった。

このように、他分野でも実績のある人間工学的な検証手法を用いると、建設労働における各種取組みに対しても定量的な評価が可能であることを確認した。課題として、現実の建設労働は職種やプロジェクトによって作業条件が多様であり、統計的に有意な結果を得ることは難易度が高いことも分かった。

なお、本取組みにおいては業績論文に記載の通り、筆者が共同執筆者となった論文の成果も含めて分析を行っている。筆頭著者である山崎氏、高橋氏、平野氏は主に蓄積データの整理と統計分析、グラフ作成を担当し、筆者は実験計画と運営、取組みの考察を担当した。

実務適用を阻害する要因のまとめ

このケーススタディに関し、第1章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および要素技術として適用した生理センシング技術の普及を阻む要因となっているものを表5-10に整理する。

従来業務では、No.9「重層下請構造」No.10「労働集約的作業」No.11「工事関係者が臨時に組織される」の3項目が要因となり、建設労働者の個人に対する施策や分析が困難であった。建設労働者の多くはゼネコンと直接の雇用関係にないため、装備品などを工事現場から支給することができず、例えばファン付き作業服などについても一次協力会社各社の判断や取組みに依存している。安全設備に関しては元請の役割であるため、スポットクーラーや製氷機、熱中症指標に対応した温湿度計の設置などが実施されているが、それ以上踏み込んだ対策が難しい。また、No.3「建築物の規模・複雑度が大きい」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No.14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」の3項目が要因となり、管理対象となる建設作業がプロジェクトによって多様であるため、対象を絞ることも難しい。例えば屋外/屋内作業、上向き/下向き作業、装備品の差異など、工種や作業によって条件が多様である。

生理センシング技術を使った疲労軽減・暑熱対策の効果分析では、No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」は従来業務と共通であり、普及の阻害要因となった。生理センシング技術の活用のためには建

表 5-10 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産		
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化		
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

設労働者に対して測定機器を貸与する必要がある、プロジェクトに携わる幅広い協力会社との連携体制が必須である。従来業務で問題となっている No. 3「建築物の規模・複雑度が大きい」No. 10「労働集約的作業」No. 14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」といった物理的な多様性に関わる特殊性については、筋電位や心拍数、体温という汎用的なデジタルデータの蓄積によって克服可能であることが分かった。

No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」の2項目は費用対効果に関わる項目であり、従来業務の問題解決と位置測位技術の普及に共通した阻害要因である。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、他産業用途に特化した技術を建築用途で適用する場合の障壁を確認した。まず、今回のケーススタディでは医療や人間工学用途で用いられる生理センシング技術を要素技術として採用しており、使用する計測機器はいずれも、装着中に建設作業のような大きな動作が伴うことが想定されておらず、身体に対する機器の固定や機器自体の安定稼働が困難であり、採取するデータにノイズや異常値、欠損などが多く含まれるなど、十分なデータ蓄積が困難であった。そのため、工事現場における実作業中のデータを採取するためには計測箇所や機器を最小限に限定する、豊富なデータ採取のためには人工気候室など安定した環境下で模擬作業を行うなど、実験環境の構築に専門的なノウハウが必要であった。また、これら技術適用のためには第三者組織による倫理審査や、専門的な医療判断などが必要であるため、他産業の専門家との協業体制が必要であることも技術普及の障壁であった。

- データの品質不足・信頼性不足：多くの生理センシング技術は、医療や人間工学など建築工事における活用が想定されていない要素技術であるため、建設作業という比較的激しい動きを伴う状況では安定してデータを採取できないケースが多く、異常値や欠損などの不具合も多い。
- 専任人員の必要性：使用する機器が建築工事の施工管理では特殊な機材であり、収集したデータの取扱いや分析ノウハウも特殊なスキルであるため、専門家による技術支援が必要である。

その他に、生理センシング技術を使った疲労軽減・暑熱対策の効果分析の普及を阻害する要因として以下を確認した。

- データの非標準化：生理センシングのための各種センサーから取得されるデータは、メーカーや型番などによってファイルフォーマットや単位系、データの記述順序など、データ構造が標準化されていないため、複数のプロジェクトで異なる取組みを並行するとデータを一元的に扱えない可能性がある。例えば、記録される時間の単位と間隔が異なる（例：起動からの経過時間・秒間隔、内臓時計の絶対時間・ミリ秒間隔など）だけであっても、複数のデータを同時に扱うために苦労する。
- 技術適用までの準備手間：建設作業の開始前に各種センサーを着用する必要があるため、毎回の準備が煩雑である。また、データを公表するためには倫理審査によって承認を得る必要があり、建設業で審査委員会を保有する企業は少ないため、専門のメーカーや大学などとの協業体制が必要となる。
- 技術適用中の管理/変更手間：身体各所に複数のセンサーを装着するため、装着状況やデータ取得状況を適宜確認するなど技術的な運用管理が必要であることに加え、毎日の消毒や洗濯といった衛生面の管理も煩雑である。
- 専門知識・技術の習得難易度：複数のプロジェクトを俯瞰して安全衛生対策の効果を分析する仕組み自体が従来にない新しい職能であるため、施工計画・管理へのフィードバックも含めて、蓄積されたデータの分析・活用方法に関する教育が必要である。
- 費用対効果の不足/不明確：生理センシングのために多量の機器を使用するため、分析のために新たな設備投資が必要になることから、費用負担や費用対効果が普及の阻害要因となる。

5.4.本章のまとめ

本章では、複数プロジェクトを俯瞰したデータ蓄積による分析目的のデジタル活用を想定し、データ蓄積のために多種多様な機器を用いる場合の準備や技術完成度に関わる障壁を把握するため、以下2種の検証項目に対してケーススタディを実施した。

(検証項目1) 大量のデジタルデータを蓄積するための仕組・運用面の課題抽出のために、稼働率分析を目的としたデジタル活用を題材として取り上げ、建設労働者と建設機械を対象に、工事現場内に配置するBLE端末とゼネコン職員が保有する携帯端末の無線通信を利用した屋内位置把握システムを開発し、実務適用した。その結果、大量の無線発信機や携帯端末などの機器を初期設定、および技術適用中に移動やメンテナンスする管理手間が生じ、解決策として実務担当者の増員などが必要であることが分かった。一方で、これら作業のためには特別な知識やノウハウは不要であることから、専門家のような特別な人材は必要ないことを述べた。

(検証項目2) 他産業向けに特化した要素技術・分析手法を建築用途で適用する場合の課題抽出のために、建設労働の改善のために従来から実施されている施策に対する効果測定を題材として取り上げ、筋肉疲労および暑熱負荷の軽減施策に対して生理センシング技術を用いて定量的な効果分析を実施した。その結果、他産業向けの機器は建設作業に伴う大きな動作を想定していないことから、安定してデータを採取することが困難であり、技術適用のためには安定した実験環境の構築などの専門的なノウハウが求められることが分かった。また、そのためには他産業の専門家との協業体制が必要であり、技術普及の阻害要因となった。

これらケーススタディを通じ、第1章で整理した建築工事の特殊性15項目に対し、本章のケーススタディに関する従来業務の問題解決と、デジタル活用を阻害する要因を整理したので、表5-11に示す。実施したケーススタディで一つでも阻害要因として挙げた場合は、本表においても阻害要因として表記し、題材によって結果が異なっている場合は以下の考察内で詳細を言及する。

従来業務では、主にNo.9「重層下請構造」No.10「労働集約的作業」No.11「工事関係者が臨時に組織される」No.13「人手と建設設備の分化」の請負体制に関する特殊性が要因となり、建設労働者や建設機械に対する管理や分析を阻害していた。プロジェクトごとに多様な企業・建設労働者が組織され、施工中も入れ替わりやスポット入場が多く、かつ建設労働者の多くがゼネコンと直接の雇用関係にないことから、踏み込んだ対策を困難にしている。また、No.3「建築物の規模・複雑度が大きい」No.8「一品受注生産」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No.14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」という物理的な規模や多様性の問題があり、管理対象となる建設作業がプロジェクトによって多様であるため、幅広い問題解決が困難であった。

本章におけるデジタル活用のユースケースでは、No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」は従来業務と共通であり、普及の阻害要因となった。位置測位と生理センシングともに、建設労働者や建設機械へ個別に機器類を装備・設置する必要があり、協力会社等との連携や準備・運用手間といった阻害要因に繋がっている。従来業務で問題となっているNo.3「建築物の規模・複雑度が大き

表 5-11 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用 の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい	×	
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動	×	×
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化	×	
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

い」No.8「一品受注生産」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No.14「建築材料・施工方法ともに標準化が少ない」といった物理的な特殊性については、デジタルデータの蓄積によって克服可能であることが分かった。

また、No.1「現場の場所が常に変わる」No.15「安全・品質よりコスト・納期が優先」の2項目は費用対効果に関わる項目であり、従来業務の問題解決とデジタル活用の普及に共通した阻害要因である。

デジタル活用普及の阻害要因となっている建築工事の特殊性については、本章の2つのケーススタディともに共通であった。

その他に、本章のケーススタディにおけるデジタル活用の普及を阻害する要因として以下を確認した。

- データの品質不足・信頼性不足：位置情報、生理センシングともに、他分野で実績のある要素技術を活用したが、建設作業という比較的激しい動きを伴う移動体を対象物として想定されていないため、実務での運用を優先して取得するデータ品質を必要最小限とした。稼働率であれば位置測位の精度・更新頻度の向上、生理データであれば深部体温の測定などが可能であれば、より緻密な分析が可能になると考えられる。また、現状の要素技術では安定してデータを収集することが難しく、かつ収集したデータの中にも異常値や欠損などの不具合が混在するため、信頼性の問題も考慮した普及展開が必要である。

- データの非標準化：取得するデータのファイルフォーマットや単位系、データの記述順序など、データ構造が標準化されていないため、複数のプロジェクトで異なる取組みを並行するとデータを一元的に扱えない問題があった。
- 技術適用までの準備手間：本章のケーススタディでは工事現場の空間側や建設労働者・建設機械といった移動体側などへ多量の機器設置が必要となることが普及の阻害要因となった。
- 技術適用中の管理/変更手間：工事現場の状況は常に変化するため、空間側に設置した機器の管理/変更手間が煩雑である。また、建設労働者・建設機械ともに入れ替わりやスポット入場が多いため、移動体側の機器の管理/変更手間も煩雑である。
- 成果創出までのリードタイム不足：計測データが毎日蓄積されていくので、多種多量のデータ整理と分析をタイムリーに実施する必要がある。特に稼働率分析の場合は、工事現場では日々の状況を把握して施工管理に役立てる必要があるため、リードタイムの短縮が普及のための課題となる。本章のケーススタディでは専任人員による手動で対応していたが、普及のためにはデータ処理・分析の自動化などが必要である。
- 専任人員の必要性：使用する機器が建築工事の施工管理では特殊な機材であり、収集したデータの取扱いや分析ノウハウも特殊なスキルであるため、専門家による技術支援が必要である。
- 専門知識・技術の習得難易度：複数のプロジェクトを俯瞰してデータ分析する仕組み自体が従来にない新しい職能であるため、施工計画・管理へのフィードバックも含めて、蓄積されたデータの分析・活用方法に関する教育が必要である。
- 費用対効果の不足/不明確：本章のケーススタディではプロジェクトごとに多量の機器を使用するため、本用途のために新たな設備投資が必要になることから、費用負担や費用対効果が普及の阻害要因となる。
- セキュリティによるアクセス制約：請負体制に関する特殊性でも述べた通り、インターフェースの一部として図面などの機密情報を扱う場合はセキュリティ面の対策が必要となる。さらに、プロジェクトや企業を超えてデータを集約・閲覧しようとした場合、ネットワークやストレージには関係者の立場によって多様なアクセス制限が掛けられているため、これらインフラの整備も必要である。
- システムの完成度不足：上記のように、技術適用のためには準備・運用それぞれにおいて、実務担当者に対して従来にない手間を要求することになるため、普及を推進する場合には、実務レベルにおいてもメリットを享受できるようなシステムの完成度、ユーザーインターフェースの操作性が求められる。

参考文献

- [1] 金 炯垠, 嘉納成男, 蔡 成浩: 建築工事における写真画像と VR 画像を用いた進捗管理に関する研究—工事写真の撮影方法及び視点位置・方向の取得—, 日本建築学会計画系論文集 第 599 号, pp. 119-126, 2006. 1
- [2] 蔡 成浩, 土橋稔美, 吉田知洋, 中村隆寛: 建築工事における建設機械の接触災害の防止に関する研究 無線 IC タグデータに基づく作業者と建設機械の接近状態の推定方法の検討, 日本建築学会計画系論文集 第 75 巻 第 656 号, pp. 2451-2458, 2010. 10
- [3] 宮崎慎也: RFID 技術を用いて取得したスーパーマーケット内の顧客動線の可視化, 日本建築学会技術報告集 第 18 巻 第 40 号, pp. 1033-1037, 2012. 1
- [4] 柳田信也: 消防隊員の暑熱環境下におけるアイススラリー摂取による身体冷却効果, 総合危機管理, No. 4, pp. 79-84, 2020. 3
- [5] 赤川宏幸, 他 6 名: 建設現場における生体情報を用いた暑熱対策に関する研究, 日本生気象学会, Vol. 55, No. 3, p. 20, 2018
- [6] 国土交通省: 建設業の働き方として目指していく方向性 (参考資料), 第 3 回建設産業政策会議資料, 資料 2-3, 2017. 9
<https://www.mlit.go.jp/common/001171558.pdf> (accessed 2023. 9. 27)
- [7] 厚生労働省: 建設雇用改善計画 (第十次), 2021. 4
<https://www.mhlw.go.jp/content/11600000/000782574.pdf> (accessed 2023. 9. 27)
- [8] 厚生労働省: 平成 24 年労働者健康状況調査, 2013. 9
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/h24-46-50.html> (accessed 2023. 9. 27)
- [9] 厚生労働省: 職場における腰痛対策指針の改定及びその普及に関する検討会報告書, 2013. 6
<https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r98520000034qql.html> (accessed 2023. 9. 27)
- [10] 農林水産省: 「スマート農業の実現に向けた研究会」検討結果の中間とりまとめ, 2014. 3
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/g_smart_nougyo/pdf/cmatome.pdf (accessed 2023. 9. 27)
- [11] 田中孝之, ほか 3 名: 農作業用スマートスーツのためのセミアクティブ S-FRP アクチュエータの開発, 平成 22 年度イノベーション創出研究支援事業, 公益財団法人北海道科学技術総合振興センター, 2011. 3
- [12] 小林謙二, 田村恭: 高所における建設作業に従事する作業者の疲労に関する調査, 日本建築学会計画系論文集, 第 476 号, pp. 145-153, 1995. 10
- [13] 一般社団法人全国建設業労災互助会: 労働災害の現状
https://rousaigojyokai.or.jp/?page_id=165 (accessed 2023. 9. 27)
- [14] 厚生労働省労働基準局: 令和 4 年職場における熱中症の発生状況 (確定値) 等について, 2023. 5
https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ministries_agencies/files/20230605_1.pdf
- [15] 中井誠一, ほか 4 名: 運動時の発汗量と水分摂取量に及ぼす環境温度 (WBGT) の影響,

体力科学, Vol. 43, pp. 283-289, 1994

[16]参考文献[5]前掲書, p. 20

[17]山崎慶太, 他 5 名: ファン付き作業服を用いた熱ストレス低減化に関する研究(第 8 報)建設作業時の発汗量、脱水量、飲水量、および WBGT の関係, 空気調和・衛生工学会, 令和元年度空気調和・衛生工学会大会(札幌), pp. 165-168, 2019. 9

図版出典

図 5-1 筆者作成

図 5-2 筆者作成

図 5-3 筆者作成

図 5-4 筆者作成

図 5-5 筆者作成

図 5-6 筆者作成

図 5-7 筆者作成

図 5-8 ダイヤ工業株式会社: 職人 DARWING 掲載図版を引用

<https://www.daiyak.co.jp/product/detail/?id=896> (accessed 2023. 9. 27)

図 5-9 筆者作成

図 5-10 高橋氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

図 5-11 高橋氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

図 5-12 平野氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

図 5-13 平野氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

図 5-14 山崎氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

図 5-15 山崎氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

表 5-1 筆者作成

表 5-2 筆者作成

表 5-3 筆者作成

表 5-4 筆者作成

表 5-5 筆者作成

表 5-6 高橋氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

表 5-7 高橋氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

表 5-8 平野氏(業績論文筆頭著者)と筆者が共同で作成

表 5-9 平野氏（業績論文筆頭著者）と筆者が共同で作成

表 5-10 筆者作成

表 5-11 筆者作成

写真 5-1 筆者撮影

写真 5-2 筆者撮影

写真 5-3 筆者撮影

写真 5-4 筆者撮影

写真 5-5 筆者撮影

第6章 教育目的のデジタル活用

- 6.1. 本章の目的と構成
- 6.2. 安全教育を目的とした VR 教材使用時の生体反応
- 6.3. 技能労働者の動作分析
- 6.4. 本章のまとめ

参考文献

6.1.本章の目的と構成

はじめに

本章では、複数のプロジェクトを俯瞰したデータの活用目的として教育用途を想定する。第3章から第5章の用途では蓄積するデータを直接計測することが可能であったが、教育用途では知識や思考といった指標を対象とする場合が考えられ、それらは直接計測することが難しい。そこで本章では、知識や思考など形に表れない情報を扱う場合の障壁を把握するため、ケーススタディを実施する。

第1章で述べた建築工事に関わる問題の中で、本章に関わるものとして、他産業と比較して多い死亡災害、施工管理業務の内勤移管や外注化による技術者育成の阻害、技能労働者の育成阻害が挙げられる。

死亡災害を減少させるためには、構工法や機械化・装置化施工のようなハード技術の開発による解決策が考えられるとともに、建設労働者本人の資質などコントロールが難しい要因も想定される。デジタル活用に関する施策として、本章では安全教育の高度化による建設労働者の安全知識・意識向上に着目する。

建設技術者・技能労働者の育成のためには、建設作業自体の簡素化や標準化・モジュール化施工といった構工法に関する技術開発のほか、一人一人の実務経験量を増加させる企業戦略なども考えられるが、残業規制が強化される現在の社会環境下では現実的ではない。本章では、安全対策と同様に教育の高度化に着目し、技能伝承のためのデジタル活用に着目する。

既往研究

建設業界の安全教育教材に関する既往研究では、高木^[1]が建設会社で用いられている安全教材と効果について考察しており、災害防止に対する効果の確認が課題であると言及している。建築分野において近年ではVR（Virtual Reality）技術を教材として用いる事例が報告されており、例えば小野^[2]や侯^[3]によって、設計教育用途でスケール感などに関わるテストでVR技術を用いた場合の汎用的な効果が確認されているが、経験や知識といった個人差の影響を検証した事例はない。他分野では、伊藤^[4]によって、VRゲーム体験中の心拍間隔（R-R間隔）の標準偏差における個人差や男女間での傾向の差が報告されているが、業務目的のような専門的な用途における利用者の能力差や個人差を検証した事例はない。このように、安全教育の選択肢としてデジタル活用が増える中で、利用者の反応や教材としての有効な活用方法は整理されていない。

建設技術者や技能労働者の技能伝承に関する動向としては、建設労働者の就労履歴や保有資格・スキルのデータベース化と業界標準化を目指した取組みとして、序章・第1章でも取り上げた『建設キャリアアップシステム』があり、官民が一体となって技術開発の経緯が報告されている。このシステムでは、協力会社における作業員の労務関連情報を業界共通でデータベース化し、各社の施工体制管理、入退場、スキル評価などの各種システムとの連携を実現している。これらは建設労働者不足という社会問題からニーズが生じており、取組みの当初から標準

化・オープン化を想定した動きとなっていたこともあり、現在では建設業界で広く普及している。

技能労働者のスキルを評価する動きも始まっており、例えば国土交通省が多くの職種に対して能力評価基準を認定²⁴している。また、これらのように認定されたスキルに加え、労働者が過去に携わったプロジェクトなどの履歴なども「建設キャリアアップシステム」の中でデータベース化されるなど、技能評価に関するデジタル活用も進みつつある。

本章の構成

既往研究から読み取れる課題を考慮し、本章における検証項目を2種設定する。まず、多様化する安全教材に対し、業務知識・経験の多寡が使用者に与える影響を検証するため、6.2.では安全教材の要素技術としてVR技術に着目し、利用者の反応を生理センシング技術によって定量的に確認するとともに、実務経験による差異を考察するケーススタディを実施する。次に、建設労働の技能に関わる知識や思考などの暗黙知をデータとして蓄積するための障壁を確認するため、6.3.では日本における代表的な技能労働者である宮大工による木材加工を題材として取り上げ、動作と思考を細かく分解・分析することで、熟練を要するスキル・ノウハウを明らかにするケーススタディを実施する。6.4.では、これらケーススタディを通じて明らかになったデジタル活用の普及を阻害する要因を整理する。

²⁴ 国土交通省：認定能力評価基準について

https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/const/totikensangyo_const_fr2_000044.html (accessed 2023.9.22)

6.2.安全教育を目的とした VR 教材使用時の生体反応

6.2.1.背景と目的

安全教育に関するデジタル活用の題材として、VR 技術を用いた体験型の教材に着目し、生理センシング技術を用いて生体反応を定量的に確認するとともに、実務経験の有無による差異を考察するケーススタディを実施することで、業務知識・経験の多寡が要素技術の利用者に与える影響を確認することを目的とする。

VR を使った安全教材は日本の厚生労働省^[5]や民間企業^[6]から公開されている。HP には、VR コンテンツの特徴として、臨場感あふれる現実に近い体験を得ることができる点が挙げられている。一方で、既往研究^{[7] [8]}の通り、VR はゲームコンテンツであっても利用者の反応に個人差があることから、安全教材においても得られる体験に差があるはずである。筆者らは、その差が実務経験の有無によって生じると考え、その体験における感度の違いが心拍数に表れると仮説を立てた。このケーススタディではこの仮説を検証し、VR を用いた安全教育の特徴を明らかにする。そのために、複数の実験対象者が VR コンテンツを使用する実験を実施し、彼らへのヒアリング心拍数計測で得られたデータを分析して傾向の差異を考察する。

6.2.2.仮説の検証方法

題材とする VR 安全教材

本研究では、高所かつ屋外に設置された仮設足場の VR 空間における歩行体験を実験の対象とした。実験では、安全設備の点検作業を模して足場の上を歩きまわり、不備のある箇所における危険の感じ方などについて、実務経験の有無で差が生じるかを検証する。使用するコンテンツは表 6-1 に示す市販製品を用いる。このコンテンツには、5 つの安全設備（1. 階段・2. 足場板・3. 巾木・4. 壁繋ぎ・5. ブレース）に不備が設けられている（図 6-1）。

コンテンツ内の移動可能範囲を図 6-1 に示す。仮設足場高層部の 1 層であり、足場内の昇降階段や本設建物への渡り部がある。実験では、それらを含む 4 スパン（W1, 200mm×L7, 200mm）程度を歩行可能領域とした。設備の不備については実験開始時には言及せず、各自が自由に歩行および目視確認で見つけ出す。

実験対象者の反応を定量化するための指標

本研究では、VR 体験中に生じる生体反応を定量的に把握するため心拍数を計測する。心臓の拍動は、体温その他の生理反応と比べて即時に変化するため、危険と感じた瞬間を定量的に把握するような体験実験の評価に適していると判断した。先述した既往研究^[9]をはじめ、心臓の拍動を定量分析する研究では快適度や不快感などをあつかうことが多い。その場合、胸部に電極を装着して計測した心電データを使う。それに対して本研究は、瞬間的な生体反応の有

表 6-1 実験で使用した機材の一覧

HMD	OculusQuest2 (FacebookTechnologies,LLC)
VR contents	Safety VR Experience Training(Tsumiki Seisaku Co., Ltd.)
HR sensor	A370 (Polar Electro)

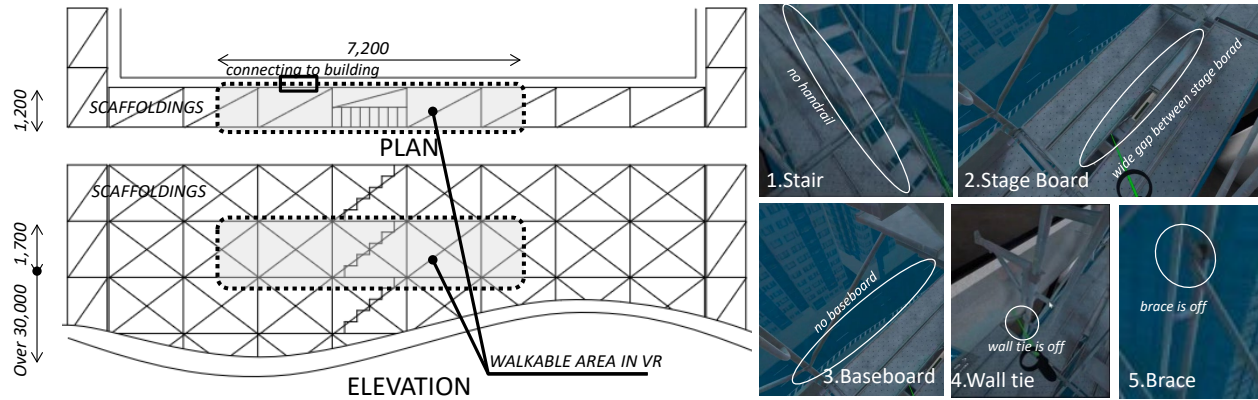


図 6-1 実験で使用したVR安全教材における体験エリアおよび設備不備

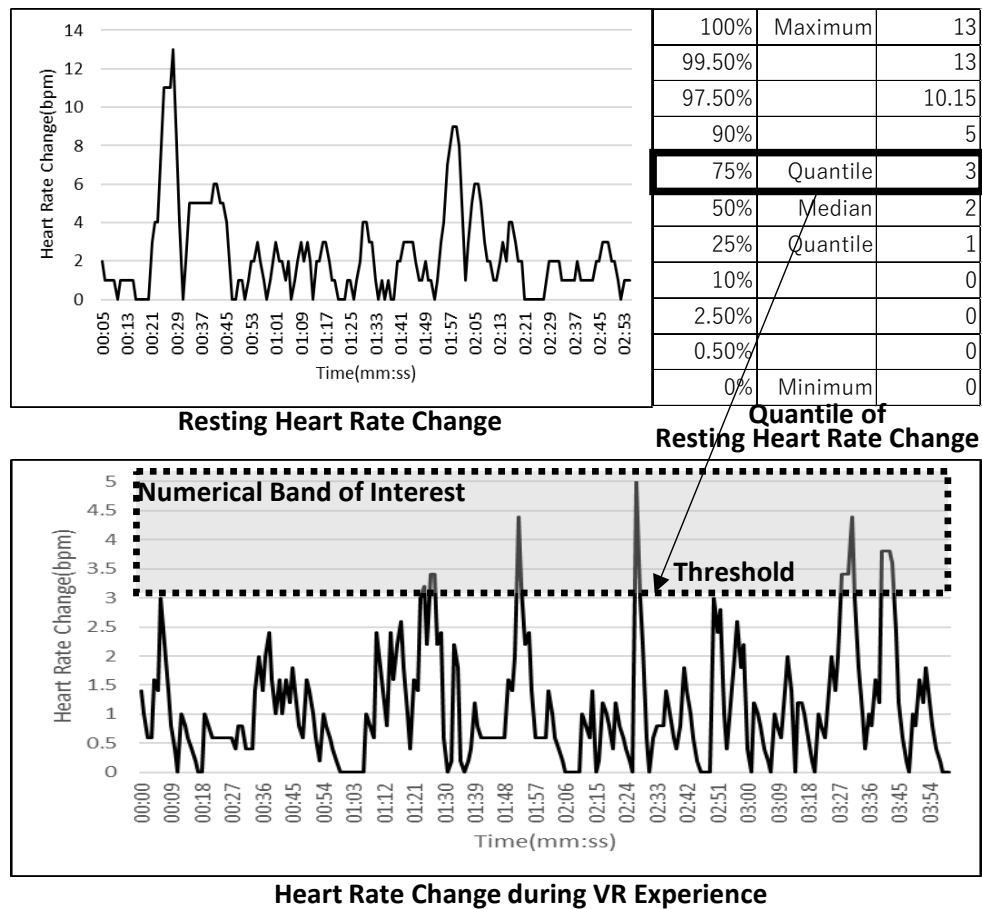


図 6-2 体験中に心拍数が大きく変化したと判断する閾値の決定方法

無を検知することが目的のため、心拍数の増減をリアルタイムに記録することが求められる。そのため、手首の脈波等から推定した心拍数のデータを機器内に記録できる腕時計型の計測器を採用した。

体験中の反応の有無を判別する方法は以下の通りである。体験中は心拍数の経時変化を記録し、実験後に変化量の絶対値を指標として、閾値を境に反応の有無を判別する。心拍数の変化量は、廣田ら^[10]の報告を参考に5秒移動平均の絶対値とした。廣田らは虚偽返答の検知を目的として、質疑応答時の心拍変動を計測し、回答後5秒～20秒の間で何らかの変化が認められることを明らかにした。本研究ではその最小値である5秒を危険の認知から心拍数に変動が生じるまでの所要時間と仮定した。閾値は、心拍変動の個人差を考慮し、各実験対象者の安静時心拍数を基準とした。安静時における心拍変動絶対値の中で第三四分位数を閾値として、体験中にその閾値を超えた変化量を確認した場面について「変化があった」と判断した。(図6-2)

実験対象者の選定

経験の有無による差異を確認するため、A:建設工事に関わる実務経験を有する実験対象者、B:実務経験のない実験対象者、の2グループをつくり、各々に対して同様の実験を実施する。人数は各グループ10名ずつ、計20人とし、一部の特異データで全体の分析結果に偏りが出ないよう配慮する。Aグループは建設会社の施工管理職、Bは大学院生とした。性別は、VRコンテンツを体験した際の心拍数の反応に男女で傾向の差があることを指摘した既往研究3)を参考に、男性に限定した。

結果の分析方法

①心拍変動とVRコンテンツの関係

心拍数が大きく変動したタイミングで見ていたVRコンテンツ、もしくは行動を把握し、グループ間の差異を考察する。

②心拍変動と主観の関係性

実験対象者に対し、VR体験直後にヒアリングを実施し、本人が体験中に主観で意識した気づきや心情の変化を把握する。ヒアリングの方法は、助川ら8)によるプロトコル分析をベースに熟練大工の暗黙知を明らかにした研究を参考とし、実験対象者に自身のVR体験動画を見せ、それぞれの場面で感じていたことを言葉にしてもらい、キーワードを記録する。これら主観のフィードバックと心拍変動の関係を考察する。

6.2.3.検証実験の概要

使用機材

使用したヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）、VRコンテンツ、心拍計を表6-1に示す。心拍計のデータ記録間隔は製品仕様上の最短である1秒間隔とした。

実験概要

実験対象者の属性、実験日時と場所、実験の手順を以下に記す。

グループ A（実務経験を有するグループ）

実験対象者：建設会社で施工管理を 2～22 年経験の男性 10 名

日時：2021 年 12 月 17 日・24 日

場所：新築工事現場事務所内の会議室

グループ B（実務経験を有さないグループ）

実験対象者：大学院修士課程で建築学を専攻する男子 10 名

日時：2021 年 9 月 22 日

場所：芝浦工業大学豊洲キャンパス内の設計演習室

実験は実験対象者一人ずつ、以下の手順で実施した。なお、STEP2 は、緊張や驚き等を鎮めるための慣らし時間として設けた。STEP4 で実験対象者に自身の体験動画を見せるため、STEP3 では HMD に映る VR 画像を動画キャプチャーした。STEP4 ではモニター画面に彼らの VR 体験動画と心拍数グラフを表示しながら、彼らが各場面で感じていたことを言葉にしてもらい、それを筆記で記録した。また、参加者の知識や行動に関わるバックグラウンドを把握するため、実務未経験者に対しては仮設足場での歩行経験、実務経験者に対しては経験年数、そして全員にゲームなど VR の利用経験を聞いた。実験の様子を写真 6-1 および 6-2 に示す。

STEP1：心拍計を着用、着座で安静時心拍数を測定（5 分）

STEP2：HMD を着用、立位で VR コンテンツ内を見回し（1 分）

STEP3：体験エリア内を自由に歩行・目視点検（3 分）

STEP4：VR 体験終了後、実験会場にて対面ヒアリング



写真 6-1 HMD と心拍センサーの装着状況

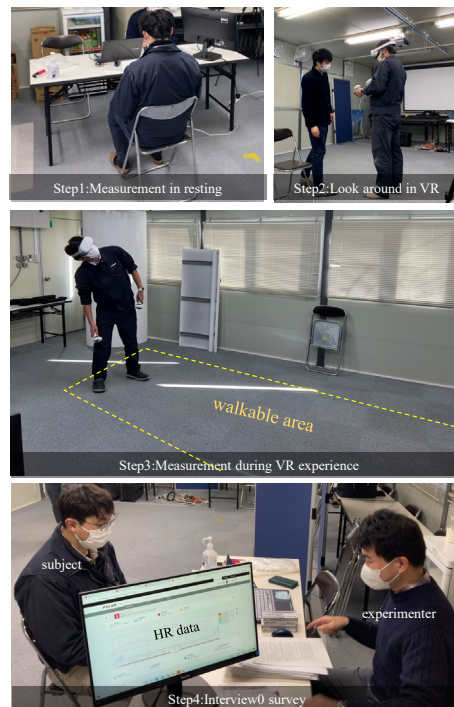


写真 6-2 実験状況

6.2.4.実験結果

実験時の状況

実験対象者は VR コンテンツの体験中、コンテンツ内で歩行可能なエリアを満遍なく歩き回り、VR 空間内を見回していた。実験対象者によっては、歩き回るだけでなく、背伸びして頭上を確認したり、屈んだ姿勢で足元を覗き込んだりする動作があった。

心拍数の計測結果

実験対象者の安静時の平均心拍数、体験中の平均心拍数、心拍数が閾値を超えて変化した回数を表 6-2 に示す。実験結果の心拍数データを示す。安静時の心拍数の平均値は 62.4～103.4bpm、安静時の心拍変動値は 0～13bpm であった。実験対象者ごとの心拍変動値の第三四分位数は 2 または 3 のいずれかであり、これらを体験中の心拍変動の有無を判別する閾値とした。図 6-3 および図 6-4 のグラフは、実験対象者ごとに計測した体験中の心拍変動値の 5 秒移動平均値である。点線は実験対象者ごとの閾値、○印は閾値を超えた個所を示している。なお、閾値を超えた心拍変動は、全て上昇側の変化であった。

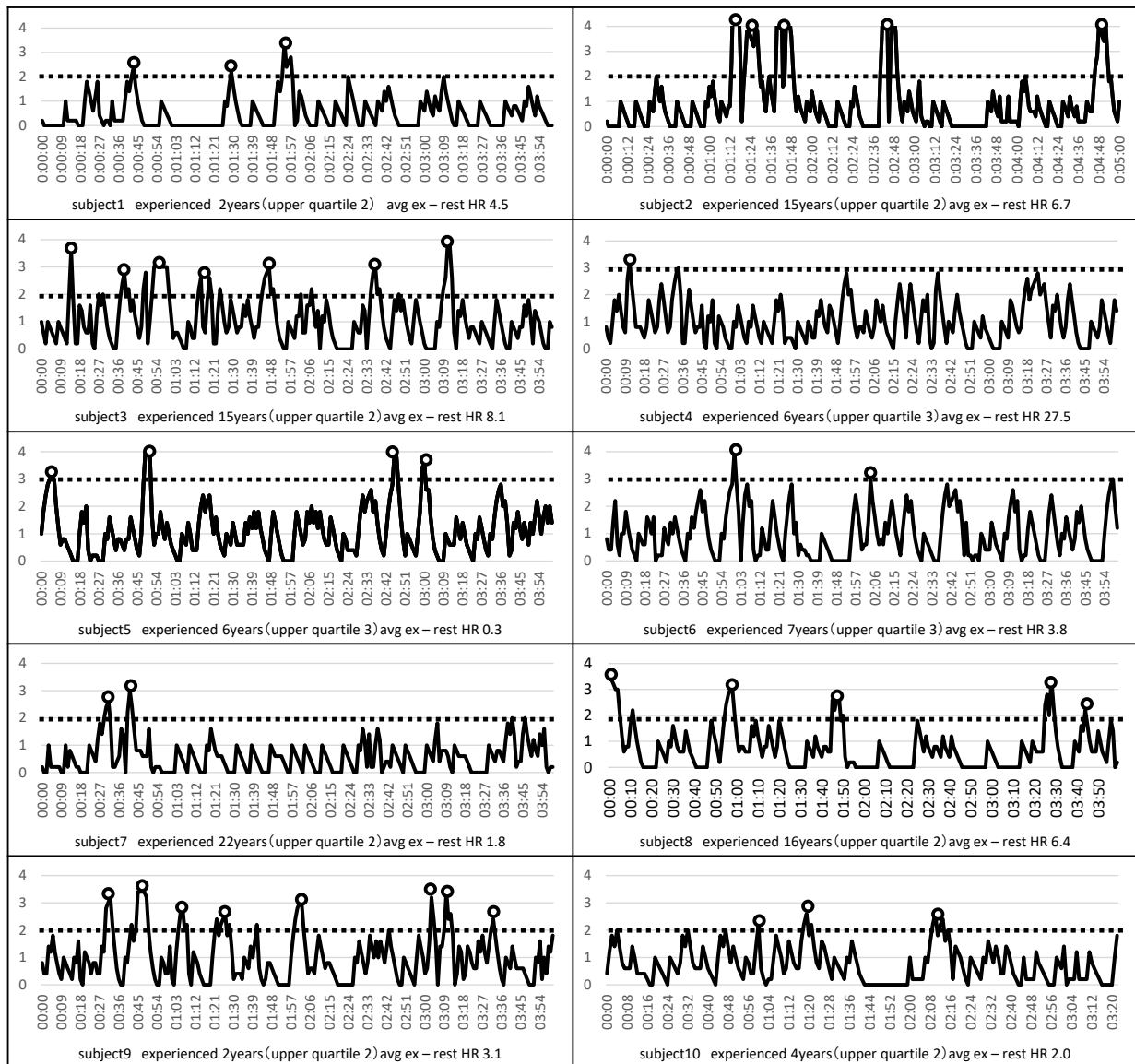
心拍数の変化を判定した箇所数の中央値は、グループ A が 3.5、グループ B が 0.5 であった。

ヒアリング結果

ヒアリングでは、体験中に HMD に映し出されていた画像の動画を実験対象者と閲覧しながら、①VR コンテンツの現実感に関する感想、②VR コンテンツ内で気づいた安全設備の不備、③そ

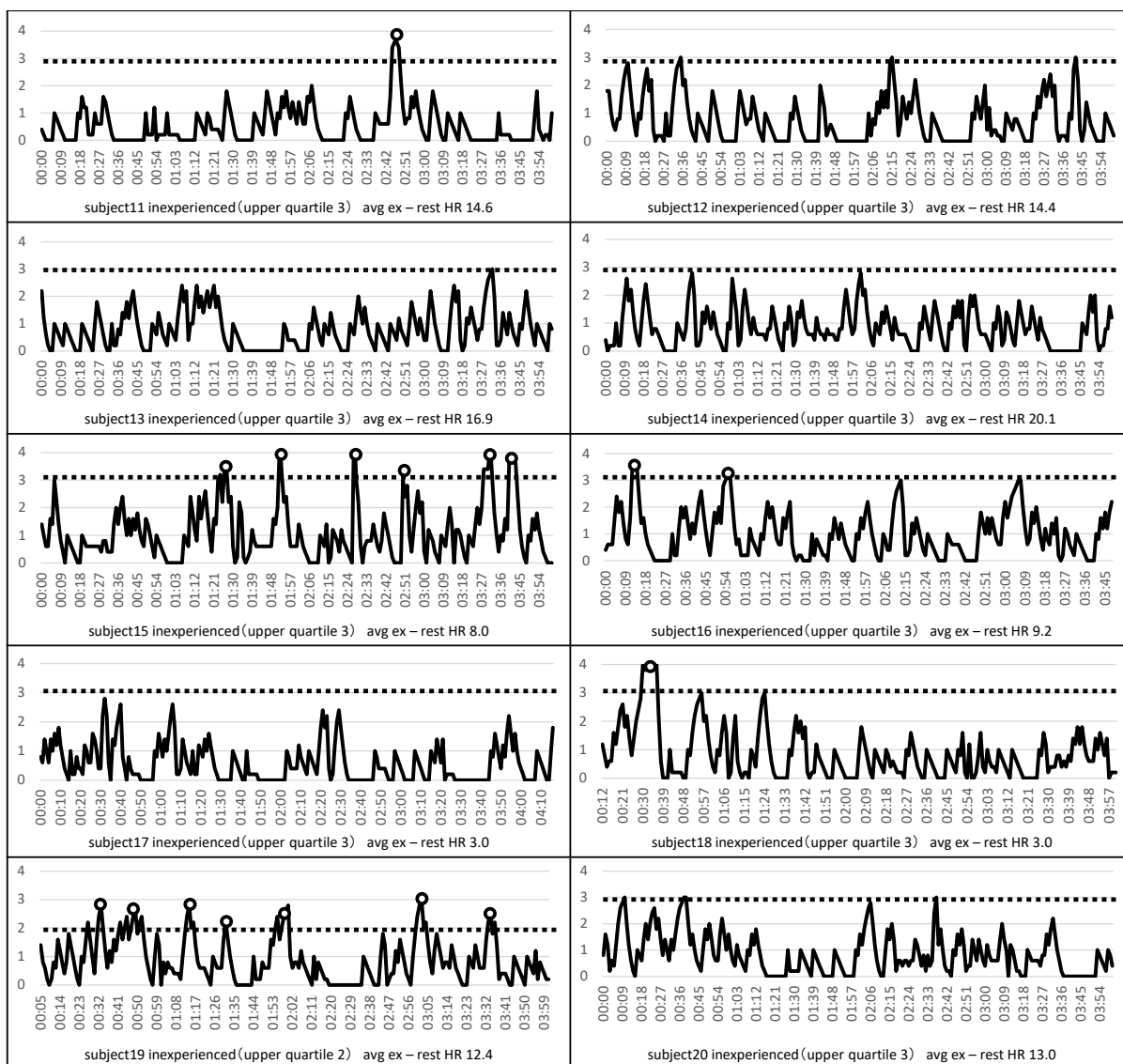
表 6-2 実験対象者の心拍数に関するデータ

subjects		HR average (bpm)		number of HR changed times
		in rest	in ex	
group A experienced	subject1	86.3	90.5	3
	subject2	93.6	99.7	4
	subject3	75.3	84.1	7
	subject4	96.9	103.5	1
	subject5	70.8	70.3	4
	subject6	84.1	87.8	2
	subject7	95.5	96.8	2
	subject8	88.9	95.4	4
	subject9	76.0	79.2	6
	subject10	82.3	80.0	3
group B inexperienced	subject11	96.5	97.6	1
	subject12	72.8	86.4	0
	subject13	82.6	83.9	0
	subject14	88.3	107.1	0
	subject15	92.9	101.0	6
	subject16	86.5	95.2	2
	subject17	91.7	94.0	0
	subject18	103.4	107.0	1
	subject19	62.4	74.4	6
	subject20	68.3	80.0	0



(凡例)縦軸：心拍数変化値[bps]，横軸：時間 (mm:ss) …線:大きく変化したと判断する閾値（安静時の心拍数変化値の第三四分位値），○印:閾値を超えた変化点

図 6-3 実験対象者の体験中における心拍数変化値の 5 秒移動平均グラフ（グループ A）



(凡例)縦軸：心拍数変化値[bps]，横軸：時間 (mm:ss) …線:大きく変化したと判断する閾値（安静時の心拍数変化値の第三四分位値），○印:閾値を超えた変化点

図 6-4 実験対象者の体験中における心拍数変化値の 5 秒移動平均グラフ（グループ B）

の他感想、に大別して確認をした。②に対するコメントは動画中の再生時間と共に手書きで記録し、どのシーンで何を感じていたかを把握できるようにした。

①VR コンテンツの現実感に関しては、全員が現実と大差ない没入感を感じており、安全設備の質感や高所の恐怖感を述べていた。

②VR コンテンツ内の安全設備に関する気づきについては、コンテンツ内であえて不備を設けた設備 5 つに加え、層間ネットや飛散防止ネットの設置状況についても改善提案をする実験対象者が複数いた。合わせて最大 7 か所の不備に対し、グループ A の指摘数の中央値は 5.5、グループ B の指摘数の中央値は 2.0 であった。表 6-3 は、各実験対象者が気づいた安全設備の不備に○印をつけている。

③その他では、「体験中はヘルメットを着用していないため VR の中でも頭を打たないように注意して歩いた」、「現実ではどこかを触りながら歩くので VR でも感触がほしかった」、など VR コンテンツ内で現実に近い感覚を持っていたと思われる意見がグループ A の実験対象者からあった。

表 6-3 実験対象者が認識した設備不備

subjects	Defective equipments					Other equipments		total
	Stairs	Stage board	Baseboard	Wall tie	Brace	Interlayer net	Anti-scattering net	
group A experienced	subject 1	○	○	○	○	×	○	6
	subject 2	○	○	○	○	○	×	6
	subject 3	○	○	○	○	×	○	5
	subject 4	○	×	○	○	×	○	4
	subject 5	○	○	○	○	×	○	6
	subject 6	○	○	×	○	×	○	4
	subject 7	○	○	×	○	×	○	5
	subject 8	○	○	○	○	×	○	6
	subject 9	○	○	○	○	○	○	6
	subject 10	○	○	○	○	×	×	5
group B inexperienced	subject 11	○	○	○	×	×	×	3
	subject 12	○	○	×	×	×	×	2
	subject 13	○	○	×	×	×	×	2
	subject 14	○	○	○	○	×	○	6
	subject 15	○	×	×	×	×	×	2
	subject 16	○	×	×	×	×	×	1
	subject 17	○	×	×	×	×	×	1
	subject 18	○	○	×	×	×	×	2
	subject 19	○	○	×	×	○	×	3
	subject 20	○	×	×	×	×	○	2

心拍変動と VR コンテンツ・主観の比較結果

次に、心拍変動を確認できた時間帯に実験対象者が目視していた VR コンテンツを表 6-4 に示す。

心拍変動と VR コンテンツの関係では、心拍変動が最も多い不備のある安全設備は階段周辺で、グループ A が 10 人中 9 人、グループ B が 10 人中 5 人であった。足場板はグループ A が 5 人、グループ B が 2 人、壁つなぎはグループ A が 2 人、その他での変化はなかった。意図的に不備を設けた安全設備以外での心拍数の変化は、グループ A で層間ネット 5 人、垂直ネット 1 人であった。また、ヒアリングの際に、実験対象者の気づきと心拍変動のタイミングを擦り合わせると、それらが必ずしも一致していないことが分かった。

6.2.5.考察

実務経験の有無による差異

実務経験の有無で VR 体験中の生体反応にグループ間で違いがあるかを確認するため、表 6-4 で示した心拍数の変化回数を指標に、グループ A・B の 2 群で平均値の差を統計的に検定した。本実験における標本数が 10 名×2 群と比較的少数であること、および対応のない標本群

表 6-4 実験対象者の心拍数が大きく変化した箇所

subjects		Defective equipments					Other equipments		total
		Stairs	Stage board	Baseboard	Wall tie	Brace	Interlayer net	Anti-scattering net	
group A experienced	subject1	×	×	×	×	×	○	×	1
	subject2	○	○	×	×	×	○	×	3
	subject3	○	×	×	○	×	○	×	3
	subject4	×	×	×	×	×	×	×	0
	subject5	○	×	×	×	×	×	×	1
	subject6	○	×	×	×	×	×	×	1
	subject7	○	○	×	×	×	×	×	2
	subject8	○	○	×	×	×	○	×	3
	subject9	○	○	×	○	×	○	×	4
	subject10	○	○	×	×	×	×	○	3
group B inexperienced	subject11	○	×	×	×	×	×	×	1
	subject12	×	×	×	×	×	×	×	0
	subject13	×	×	×	×	×	×	×	0
	subject14	×	×	×	×	×	×	×	0
	subject15	○	○	×	×	×	×	×	2
	subject16	○	○	×	×	×	×	×	2
	subject17	×	×	×	×	×	×	×	0
	subject18	○	×	×	×	×	×	×	1
	subject19	○	×	×	×	×	×	×	1
	subject20	×	×	×	×	×	×	×	0

の比較であることから、ノンパラメトリック手法である Wilcoxon/Kruskal-Wallis の順位和検定を採用した。グループごとのドットプロット図を図 6-5 に示す。なお、図中のひし形はグループごとの 95%信頼区間と平均値を表している。検定結果の p 値は 0.0237 であり、グループ間の平均に有意な差があることを確認した。

次に、表 6-3 で示した安全設備に対する気づき数を指標として、同様の検定を実施した。ドットプロット図を図 6-6 に示す。検定結果の p 値は 0.0011 であり、グループ間の平均値に有意な差があることを確認した。

なお、表 6-4 で示した安静時および体験中の平均心拍数を指標に同様の検定を実施すると、安静時と体験中ともに、グループ間の平均値に有意な差を確認できなかった。これらの結果から、既往文献 2) 3) で述べられているように、心拍数の絶対値をそのまま扱うと個人差が影響してグループ間の差を検知しづらくなる考えられる。安静時の心拍数を考慮することで、個人差を取り除いた生体反応データを取得できたと推測される。

さらに、心拍変動の回数と気づき数を、VR コンテンツ内で実験対象者が目視していた安全設備ごとに集計した情報をデータ化し、実験対象者のクラスター分析を試みた。図 6-7 に示す

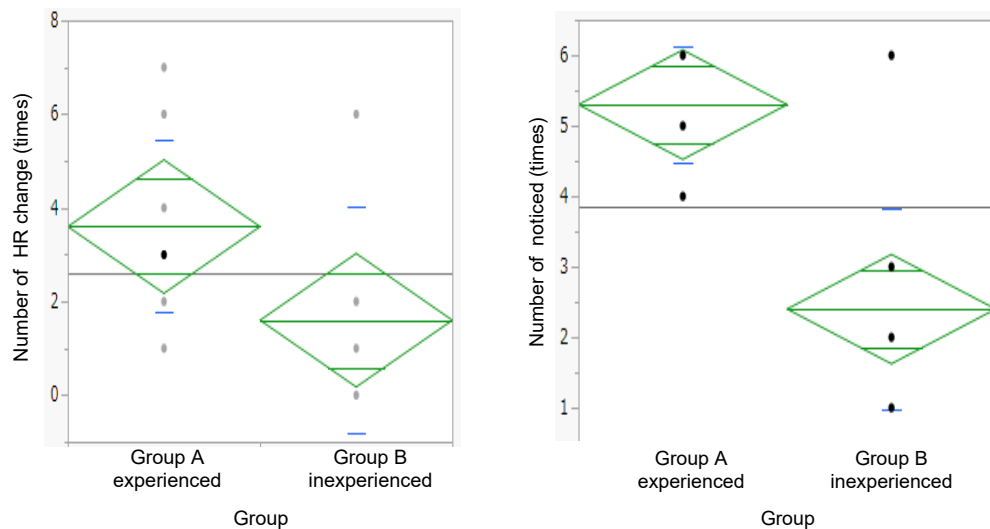


図 6-5 グループ別ドットプロット図(心拍変動) 図 6-6 グループ別ドットプロット図(不備指摘数)

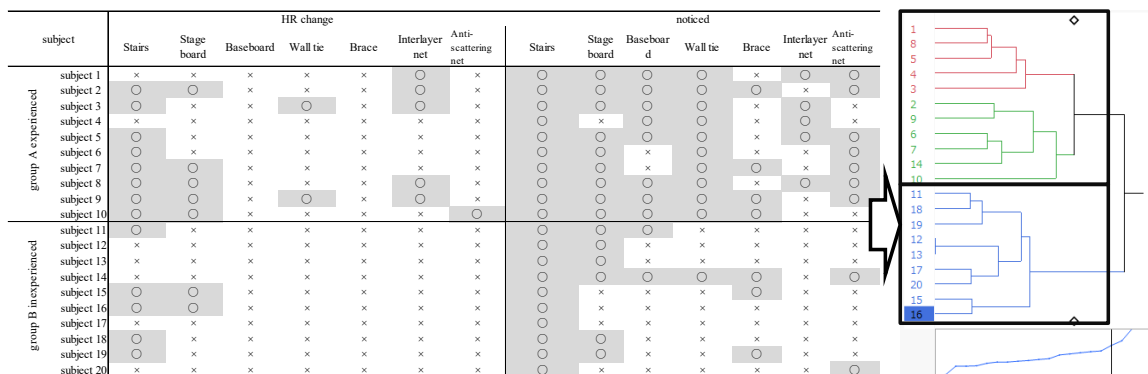


図 6-7 心拍変動回数と不備指摘数を指標としたクラスター分析結果の樹形図

樹形図で2群に分けられたクラスターを採用すると、ひとつのグループは実験対象者1～10および14であり、14以外は全員が実務経験者であった。ふたつ目のグループは実験対象者11～13および15～20であり、全員が実務未経験者であった。実験対象者14の心拍数および気づき数を見ると、実務経験がないにもかかわらず、意図的に配置した設備不備の全てに気づいており、建築知識が豊富な大学院生であったと推測する。

また、表6-4で示した実験対象者ごとの心拍変動数と、表6-3で示した気づき数を用いて相関分析すると、p値は0.05を超えており、有意な相関を確認できなかった。

以上より、VR安全教材を体験する場合、実務経験の有無によって、心拍数の変化および気づきに差異がある可能性が示唆された。また、心拍数と気づきの間の相関を確認できなかったことから、同じ人間であっても、無意識下と意識下で異なる反応が生じている可能性がある。

安全設備の種類による差異

目視する安全設備の種類によって、体験者の反応に違いがないか考察する。

まず、図6-7で整理した表を用い、実験対象者が目視した安全設備における心拍変動および気づきの有無を指標として、これら指標間の多変量相関分析を実施した。出力されたペアごとの相関係数一覧を図6-8に示す。この中で、相関係数の絶対値が0.5以上、かつp値が0.05未満のペアを有意に相関があると判断し、以下の10ペアを抽出した。

- 足場板の心拍変動と階段の心拍変動が正の相関
- 層間ネットの心拍変動と壁繋ぎの心拍変動が正の相関
- 巾木の気づきと層間ネットの心拍変動が正の相関
- 壁繋ぎの気づきと層間ネットの心拍変動が正の相関
- 壁繋ぎの気づきと巾木の気づきが正の相関
- ブレースの気づきと足場板の心拍変動が正の相関
- 層間ネットの気づきと心拍変動が正の相関
- 層間ネットの気づきと巾木の気づきが正の相関
- 層間ネットの気づきと壁繋ぎの気づきが正の相関
- 飛散防止ネットの気づきと巾木の気づきが正の相関

この結果から推測すると、実務経験の有無に依存せず、自身の足元に存在する開口部において、共通して心拍数が変化していると考えられる。また、層間ネット・巾木・壁繋ぎ・飛散防止ネットに関する気づきや心拍変動がペアで生じることが多く、これらは実務経験者にのみ見られた結果である。

一つ特殊なペアとして、「ブレースの気づきと足場板の心拍変動が正の相関」という結果があった。この理由を類推すると、配置された位置関係が影響していると考えられる。今回使用したVRコンテンツの中で、不備のある足場板とブレースが近傍に配置されていた。各実験対象者の体験動画を確認すると、まず足元の足場板の設置幅大きいことに気づき、そこで一旦立ち止まって、注意深く周囲を見渡す過程で、近傍のブレース不備にも気づくパターンが多かった。

variable	vs. variable	correlation	frequency	95% lower limit	p-value	
Stage board_HR	Stairs_HR	0.5385	20	0.1260	0.7922 0.0143*	
Baseboard_HR	Stairs_HR	.	20	.	.	
Baseboard_HR	Stage board_HR	.	20	.	.	
Wall tie_HR	Stairs_HR	0.2446	20	-0.2219	0.6200 0.2986	
Wall tie_HR	Stage board_HR	0.1048	20	-0.3541	0.5231 0.6601	
Wall tie_HR	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Brace_HR	Stairs_HR	.	20	.	.	
Brace_HR	Stage board_HR	.	20	.	.	
Brace_HR	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Brace_HR	Wall tie_HR	.	20	.	.	
Interlayer net_HR	Stairs_HR	0.1816	20	-0.2838	0.5777 0.4436	
Interlayer net_HR	Stage board_HR	0.3026	20	-0.1615	0.6571 0.1947	
Interlayer net_HR	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Interlayer net_HR	Wall tie_HR	0.5774	20	0.1811	0.8123 0.0077*	
Interlayer net_HR	Brace_HR	.	20	.	.	
Anti-scattering net_HR	Stairs_HR	0.1683	20	-0.2962	0.5685 0.4780	
Anti-scattering net_HR	Stage board_HR	0.3126	20	-0.1507	0.6634 0.1796	
Anti-scattering net_HR	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Anti-scattering net_HR	Wall tie_HR	-0.0765	20	-0.5020	0.3789 0.7486	
Anti-scattering net_HR	Brace_HR	.	20	.	.	
Anti-scattering net_HR	Interlayer net_HR	-0.1325	20	-0.5431	0.3294 0.5778	
Stairs_noticed	Stairs_HR	.	20	.	.	
Stairs_noticed	Stage board_HR	.	20	.	.	
Stairs_noticed	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Stairs_noticed	Wall tie_HR	.	20	.	.	
Stairs_noticed	Brace_HR	.	20	.	.	
Stairs_noticed	Interlayer net_HR	.	20	.	.	
Stairs_noticed	Anti-scattering net_HR	.	20	.	.	
Stage board_noticed	Stairs_HR	0.3026	20	-0.1615	0.6571 0.1947	
Stage board_noticed	Stage board_HR	-0.0605	20	-0.4899	0.3925 0.7999	
Stage board_noticed	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Stage board_noticed	Wall tie_HR	0.1925	20	-0.2734	0.5851 0.4163	
Stage board_noticed	Brace_HR	.	20	.	.	
Stage board_noticed	Interlayer net_HR	0.3333	20	-0.1281	0.6761 0.1510	
Stage board_noticed	Anti-scattering net_HR	0.1325	20	-0.3294	0.5431 0.5778	
Stage board_noticed	Stairs_noticed	.	20	.	.	
Baseboard_noticed	Stairs_HR	0.1048	20	-0.3541	0.5231 0.6601	
Baseboard_noticed	Stage board_HR	0.1048	20	-0.3541	0.5231 0.6601	
Baseboard_noticed	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Baseboard_noticed	Wall tie_HR	0.3333	20	-0.1281	0.6761 0.1510	
Baseboard_noticed	Brace_HR	.	20	.	.	
Baseboard_noticed	Interlayer net_HR	0.5774	20	0.1811	0.8123 0.0077*	
Baseboard_noticed	Anti-scattering net_HR	0.2294	20	-0.2372	0.6100 0.3306	
Brace_noticed	Stairs_noticed	.	20	.	.	
Brace_noticed	Stage board_noticed	0.1816	20	-0.2838	0.5777 0.4436	
Brace_noticed	Baseboard_noticed	0.1048	20	-0.3541	0.5231 0.6601	
Brace_noticed	Wall tie_noticed	0.2423	20	-0.2242	0.6185 0.3033	
Interlayer net_noticed	Stairs_HR	-0.0605	20	-0.4899	0.3925 0.7999	
Interlayer net_noticed	Stage board_HR	-0.1816	20	-0.5777	0.2838 0.4436	
Interlayer net_noticed	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Interlayer net_noticed	Wall tie_HR	0.1925	20	-0.2734	0.5851 0.4163	
Interlayer net_noticed	Brace_HR	.	20	.	.	
Interlayer net_noticed	Interlayer net_HR	0.4667	20	0.0304	0.7536 0.0381*	
Interlayer net_noticed	Anti-scattering net_HR	-0.1325	20	-0.5431	0.3294 0.5778	
Interlayer net_noticed	Stairs_noticed	.	20	.	.	
Interlayer net_noticed	Stage board_noticed	0.0667	20	-0.3873	0.4946 0.7800	
Interlayer net_noticed	Baseboard_noticed	0.5774	20	0.1811	0.8123 0.0077*	
Interlayer net_noticed	Wall tie_noticed	0.5222	20	0.1037	0.7837 0.0182*	
Interlayer net_noticed	Brace_noticed	-0.4237	20	-0.7294	0.0232 0.0627	
Anti-scattering net_noticed	Stairs_HR	0.0316	20	-0.4167	0.4676 0.8948	
Anti-scattering net_noticed	Stage board_HR	0.1791	20	-0.2861	0.5760 0.4499	
Anti-scattering net_noticed	Baseboard_HR	.	20	.	.	
Anti-scattering net_noticed	Wall tie_HR	0.0335	20	-0.4152	0.4691 0.8885	
Anti-scattering net_noticed	Brace_HR	.	20	.	.	
Anti-scattering net_noticed	Interlayer net_HR	0.4062	20	-0.0443	0.7194 0.0756	
Anti-scattering net_noticed	Anti-scattering net_HR	-0.2075	20	-0.5954	0.2588 0.3800	
Anti-scattering net_noticed	Stairs_noticed	.	20	.	.	
Anti-scattering net_noticed	Stage board_noticed	0.2901	20	-0.1748	0.6493 0.2147	
Anti-scattering net_noticed	Baseboard_noticed	0.3015	20	-0.1627	0.6564 0.1964	
Anti-scattering net_noticed	Wall tie_noticed	0.6162	20	0.2387	0.8319 0.0038*	
Anti-scattering net_noticed	Brace_noticed	0.1791	20	-0.2861	0.5760 0.4499	
Anti-scattering net_noticed	Interlayer net_noticed	0.1741	20	-0.2908	0.5725 0.4629	

図 6-8 心拍変動回数と不備指摘数を指標とした多変量相関分析の結果

次に、安全設備ごとに心拍数変動の有無と気づきがあった人数をクロス集計し、偏差と χ^2 値を算出することで、統計的な特徴の有無を確認した。作成したモザイク図を図6-9に、クロス集計表の度数および算出された偏差・ χ^2 値の一覧を表6-5に示す。一般的に、 χ^2 値が大きいところは統計的に有意な特徴があり、偏差の符号が正のものは割合が多く、負のものは割合が少ないことを意味している7)。なお、分析結果が有意であるか確認する場合、一般的にN数が20未満もしくは最小期待値が5未満の場合はFisherの正確検定が推奨されている。今回は検定の結果、p値が0.0238であったため、統計的に有意な分析結果と考えられる。表6-5の中で、 χ^2 値が2を超える上位3項目に着目すると、実務経験の有無に依存せず、階段と層間ネットでは心拍変動のある人数が多い特徴があり、巾木では心拍変動のある人数が少ない特徴があると言える。一方、気づきでは統計的に特徴は認められなかった。巾木のように、気づきがあっても心拍変動がないケースに関して、実務経験者グループのヒアリングによると、「日々の安全点検業務で常に確認しているので気づくことはできるが、足元の開口など違い、すぐに事故などに直結するような緊急性があるものではないため、特に驚きや恐怖といった感情は沸かない」、という意見があった。以上の分析から、安全設備の中でも、VRで体験する場合の反応に、複数のパターンがあることが推測される。

そこで、安全設備ごとの各実験対象者における心拍変動と気づきの有無のデータを標本とし

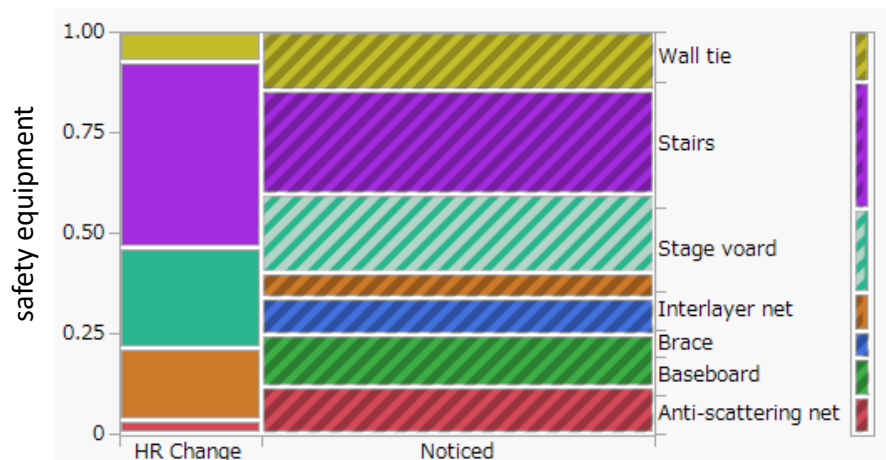


図6-9 心拍変動回数と不備指摘数を指標としたクロス集計の結果（モザイク図）

表6-5 心拍変動回数と不備指摘数を指標としたクロス集計の結果（度数・偏差・ χ^2 値）

frequency	Anti-scattering net	Baseboard	Brace	Interlayer net	Stage board	Stairs	Wall tie
deviation							
χ^2							
HR Change	1	0	0	5	7	13	2
	-1.6667	-2.6667	-1.8667	2.33333	1.13333	4.2	-1.4667
	1.0417	2.6667	1.8667	2.0417	0.2189	2.0045	0.6205
Noticed	9	10	7	5	15	20	11
	1.66667	2.66667	1.86667	-2.3333	-1.1333	-4.2	1.46667
	0.3788	0.9697	0.6788	0.7424	0.0796	0.7289	0.2256

てクラスター分析することで、統計的に峻別を試みる。分析に使用したデータを表 6-6 に、出力された樹形図は図 6-10 に示す。2 群にクラスタリングされた結果に着目すると、クラスター1 は階段、足場板、クラスター2 は巾木、壁繋ぎ、ブレース、層間ネット、飛散防止ネット、という分類であった。

クラスター1 は、実験対象者全体に共通して、心拍変動・気づきともに多いものである。先述した多変量相関分析の結果でもこの二つの安全設備における心拍変動は正の相関があった。

クラスター2 は、それ以外の安全設備であり、先述の分析結果の中では、実務経験者のみが共通して気づくものや、巾木のように気づいていても心拍変動は少ない特徴のものなど、様々なパターンが混在している。

以上より、VR 安全教材を体験する場合、階段開口、足場板隙間といった、高所からの落下を想起させるようなケースでは、実務経験の有無に依存せず、万人に同様の反応が生じる可能性がある。一方で、層間ネット、巾木、壁繋ぎ、飛散防止ネット、ブレースといった、直接自身が恐怖を感じにくいものについて実務経験がない実験対象者は、気づくことも難しく、心拍

表 6-6 安全設備を行データとして整理した心拍変動回数と不備指摘回数

		HR change																			
		group A experinced subjects										group B inexperienced subjects									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
safty equipment	1 Stairs	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×
	2 Stage board	×	○	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×
	3 Baseboard	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	4 Wall tie	×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	5 Brace	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	6 Interlayer net	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	7 iti-scattering	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		noticed																			
		group A experinced subjects										group B inexperienced subjects									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	×
		○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		×	○	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	○	○	×	×	×	○	×
		○	×	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		○	○	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○

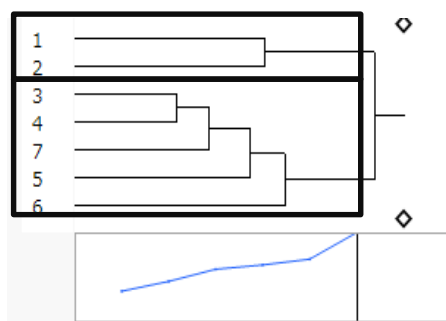


図 6-10 クラスタ分析結果の樹形図

数が変化する傾向も認められなかった。この理由は、ヒアリング内容から考察すると、VRを用いた安全教育は、各人の過去の記憶を追体験することで安全知識の確認を期待できる一方で、コンテンツのシチュエーションが全く新しい体験だった場合は自身におよぶ危険のシミュレーションにとどまると解釈できる。

6.2.6.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

建設現場の安全教育に関する VR コンテンツを使用した場合に、実務経験の有無によって生じる身体反応の差異を確認するため、心拍数を指標とした定量的な検証方法を提案し、実務経験者・未経験者を対象とした検証実験を実施した。同時に、実験対象者へのヒアリングを実施し、自主報告による気づきや心情変化を記録した。得られた結果を統計分析した結果、心拍変動と気づきの両指標において、実務経験の有無による差異があることを確認した。

体験内容に着目すると、自身の落下を想起させるような体験については、実務経験の有無に依存せず、同様の反応を確認した。一方、その他については、認知するために実務知識を要するものなど、実務経験者のみが反応できる可能性があるケースを複数確認した。

今後の課題として、安全教材を使用した効果の差異を確認するためには、上記の生体反応と知識・行動などの関係性を調査する必要がある。

なお本研究は、芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会の承認（豊学事発第 21069 号、2021 年 8 月 19 日）を得て実施した。実験対象者には、実験前に予め実験内容を説明し、承諾を得ている。

実務適用を阻害する要因のまとめ

第 1 章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および要素技術として適用した安全教育の効果測定に対する生理センシング技術の普及を阻む要因となっているものを表 6-7 に整理する。

従来業務においては、No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 8「一品受注生産」No. 10「労働集約的作業」No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No. 13「人手と建設設備の分化」No. 14「建築材料・施工方法共に標準化が少ない」の特殊性が関連し、建設作業が工種によって多様であるとともにプロジェクトごとに場所や設備、作業手順といった条件も変化するため、安全知識・経験の向上を図る対策が困難であった。また、No. 9「重層下請構造」No. 11「工事関係者が臨時に組織される」という請負体制に関する問題で、基礎的な安全知識・経験に関わる送り出し教育は一次協力会社の責務となっており、工事現場ではゼネコンの新規入場者教育によって共通の注意喚起が実施されている程度であるため、建設労働者に対する施策や効果測定などの取組みが困難である。

デジタル活用の普及については、No. 9「重層下請構造」No. 11「工事関係者が臨時に組織される」という請負体制の問題は従来と同様に阻害要因となっており、建設労働者に対する要素技術適用のためには工事現場を管理するゼネコンと労務を提供する協力会社など企業を超えた連携体制が必要である。また、No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」について

表 6-7 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい		
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化	×	
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

も共通の阻害要因となっており、本章のケーススタディにおいて安全設備の種類や設置場所によって安全教材利用者の反応が異なるなど、多様な作業条件に幅広く対応する必要がある。従来問題となっていた特殊性の中で、No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 10「労働集約的作業」No. 13「人手と建設設備の分化」No. 14「建築材料・施工方法共に標準化が少ない」など物理的な特性に関する4項目については、汎用的なデジタルデータを同一基準で分析する場合には、阻害要因とはならなかった。

No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」の特性は共通の問題であり、安全に関する新たな費用負担や設備投資が困難な状況である。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、業務知識・経験の多寡が要素技術の利用者に与える影響を確認した。心拍数を指標として用いることで、業務知識や経験の有無によってVR技術の利用者の生体反応に違いが生じることが統計的に明らかになったが、その生体反応の差異と教育効果の関係性は確認が難しく、直接計測することができない情報を推測するための方法論が確立されていないことが問題であることが分かった。

- 専門知識・技術の習得難易度：教育効果など直接計測することができない情報を推測する方法論が未確立である。また、デジタルデータを用いて教育効果を分析する仕組み自体が従来にない新しい職能であるため、施工計画・管理へのフィードバックも含めて、蓄積されたデータの分析・活用方法に関する人材教育が必要である。

その他に、安全教材に関する効果分析の普及を阻害する要因として以下を確認した。

- データの非標準化：生理センシングのための各種センサーから取得されるデータは、メーカーや型番などによってファイルフォーマットや単位系、データの記述順序など、データ構造が標準化されていないため、複数のプロジェクトで異なる取組みを並行するとデータを一元的に扱えない可能性がある。
- 技術適用までの準備手間：効果測定のために教材使用者が各種センサーを着用するため、毎回の準備が煩雑である。また、データを公表するためには倫理審査によって承認を得る必要があり、建設業で審査委員会を保有する企業は少ないため、専門のメーカーや大学などとの協業体制が必要となる。
- 技術適用中の管理/変更手間：VR 安全教材を使用しながら生理センシングと動画撮影同時に実施する必要があるため、各種機器類が正常に動作しているか常に確認し、必要に応じてシステムの再起動や同期作業などの調整が必要がある。
- 専任人員の必要性：使用する機器・ソフトウェアともに建築工事の施工管理では特殊な機材であり、実務担当者とは別に専門家による技術支援体制が必要である。
- システムの完成度不足：教材の使用が建設労働者に与える影響や効果を測定するためには、使用する教材の完成度が重要である。本章のケーススタディでは VR 安全教材を題材として取り上げたが、製品自体の操作性や没入感、VR の再現性などが不完全であると、使用者はそれらが気になることで生理センシングのデータにも影響が生じるため、分析が困難となる。

6.3.技能労働者の動作分析

6.3.1.背景と目的

建設労働の技能に関わる知識や思考などの暗黙知をデータとして蓄積するための障壁を確認するため、日本における代表的な技能労働者である宮大工による木材加工を題材として取り上げ、動作と思考を細かく分解・分析することで、熟練を要するスキル・ノウハウを明らかにするケーススタディを実施する。6.2.で述べた通り、知識や思考のように直接計測することができない情報を扱う場合には、生体反応など別の計測値から推定することが難しいため、心理学分野などで用いられる調査アプローチ手法なども用いて検証する。

6.3.2.宮大工の作業調査

調査対象とした作業は、1.5m四方程度の木造の地蔵倉に使用する柱4本・土台4本・方立4本の加工作業である。宮大工が作成した立面イメージを写真6-3に示す。作業場は10m四方程度の屋内作業スペースであり、加工用の架台の上に複数の部材と工具類を並べて立位で作業を行う。作業場の様子を写真6-4に示す。部材は事前に原木から直方体形状に粗製材された木材であり、約150mm×150mm×700mm程度の形状で統一されていた。この状態の木材から、宮大工が設計寸法に木取りし、仕口部などの詳細部位を加工する。部材と工具の敷並べ状況を写真6-5に示す。

作業する宮大工は1名であり、各部材を連続で4本ずつ観察・墨付けしていく。例えば、柱材の4本を最初に全て横並びで観察し、木材の使用箇所や向きを決定する。事前に宮大工へヒアリングすると、加工作業の中で、品質および所要時間どちらを考慮しても、この観察～墨付けが最も重要であった。方針が決まれば、図面からの転写である墨付け動作や、切断や切削といった加工動作は大工の繰り返し動作であるため、そこまで熟練は要さない、とのことであった。実際、今回の作業場にも多くの加工機械が導入されており、題材とした木材の粗製材も機械で行っていた。

そこで、今回の作業調査対象は各材料の観察～墨付けとし、作業を分解して宮大工自身から作業意図をヒアリングすることで、熟練を要する作業の抽出を測る。

調査方法は、目視と動画による作業記録と、作業後のヒアリング調査の併用とした。動画記録のためには、作業場全体を俯瞰する定点カメラと、作業者の視野を記録するためのヘッドマウンドカメラを設置した。ヒアリング方法は、人間の思考を明らかにするための学術的な手法として、EricssonとSimonによるプロコトル分析^[11]を選定した。この手法は、宮大工自身が作業する動画を再生すると同時に、各場面で宮大工が何を考えていたのか、自身で解説する方法である。

調査は3日間実施した。柱・土台・方立、それぞれの部材4本を観察～墨付けを実施するために各1日を要していた。

6.3.3.調査結果と考察

今回対象とした柱・土台・方立用の木材は、基本形状や組立方法が類似しており、ワークフローは同一であった。そのため、一種類の部材 4 本を対象に観察から墨付けするまでのサイクルフローを図 6-11 に示す。

部材の使用場所・面決めでは、4 本の木材を横並びにし、各木材を使用する箇所や方向、向きなどの方針を検討する。

墨付けでは、まず一本の木材の一面へ全ての墨付けを実施する。墨付けの手順は、木材の中で建物へ使用する部分を決め、端部の切断位置（木取り位置）を墨付けする。その後、木取り位置を基準に、設計図面に従って通り芯墨、返り墨、蟻・ホゾ墨などを順番に墨付けする。一面の墨付けが終わると、木取り位置の墨や通り芯墨など、他面に転写できる墨を全面に回し、残りの蟻・ホゾなどの墨付けを行う。一本の木材への墨付けが完了すると、その木材をテンプレートとして残り三本の木材へ墨を転写していく。その際、木取り位置のみは木材ごとに改めて検討しており、その場で使用方向や使用面を変更する場合もあった。所要時間は、観察から 1 本目の木材への墨付けまでが約 3 時間であり、残り 3 本への墨付けが合計で約 1.5 時間程度であった。

ヒアリングでは、作業場全体を俯瞰撮影した定点カメラ動画を用い、3 倍速で再生しながら、各場面では何を思考していたか、宮大工自身に解説を依頼した。重要な場面や、言葉に詰まる場面などでは一時停止し、筆者らからも質問や意図の再確認を行った。ヒアリングの様子を写真 6-7 に示す。その結果、ヒアリングで発せられた言葉を考察すると、道具の名称・木材の観察・宮大工自身の行動・宮大工自身の思考・加工方法・建物や部材名称・長さや本数などの数値・その他解説、といった項目の単語に分解できた。部材 4 本のサイクルワークフローに対するヒアリングにおいて発せられた単語の回数と時間の関係を図 6-12 に示す。その中で、木材の観察に関わる単語を図 6-13 に抜き出す。ほぼ全ての発言が一本目で発せられており、二本目以降は『先ほどと同様』との回答で、新しい発言はなかった。作業者の行動に関わる単語を図 6-14 に、道具に関する単語を図 6-15 抜き出すと、二本目以降の繰り返し作業においても均等に解説があった。この理由は、動画が俯瞰した位置からのものであったため、手元の動作や道具を丁寧に解説したからだと推測する。

これらの結果から考察すると、一本目の検討作業で宮大工として熟練を要する判断の多くを下しており、観察工程の後には思考と動作の両者とも繰り返し作業が多いと考えられる。

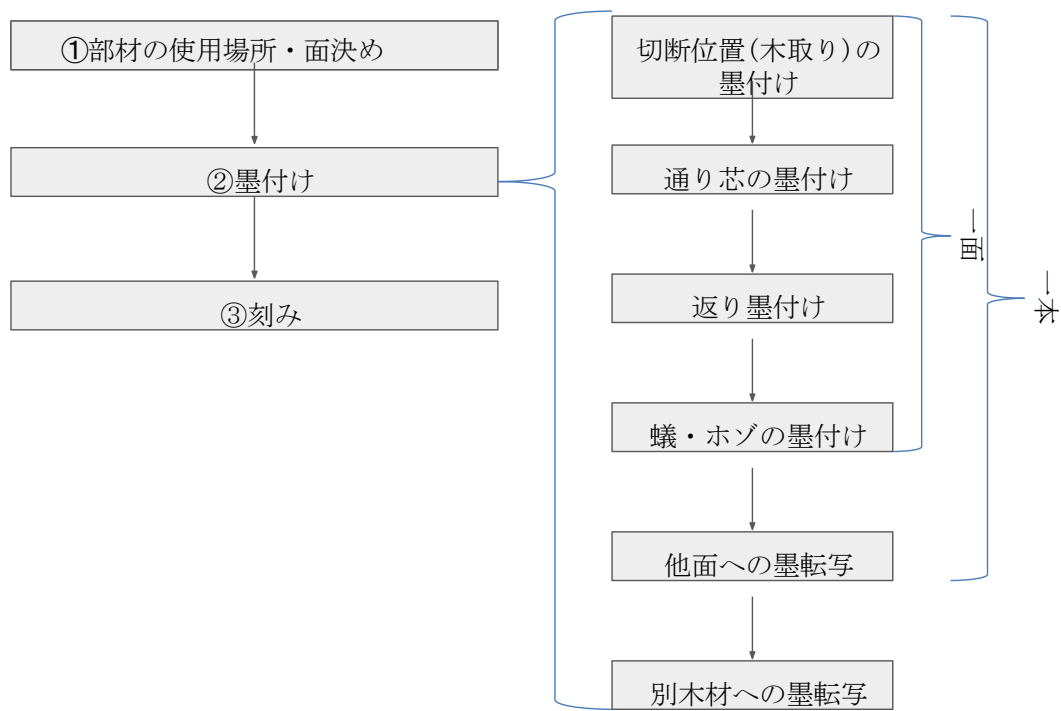


図 6-11 調査対象のワークフロー

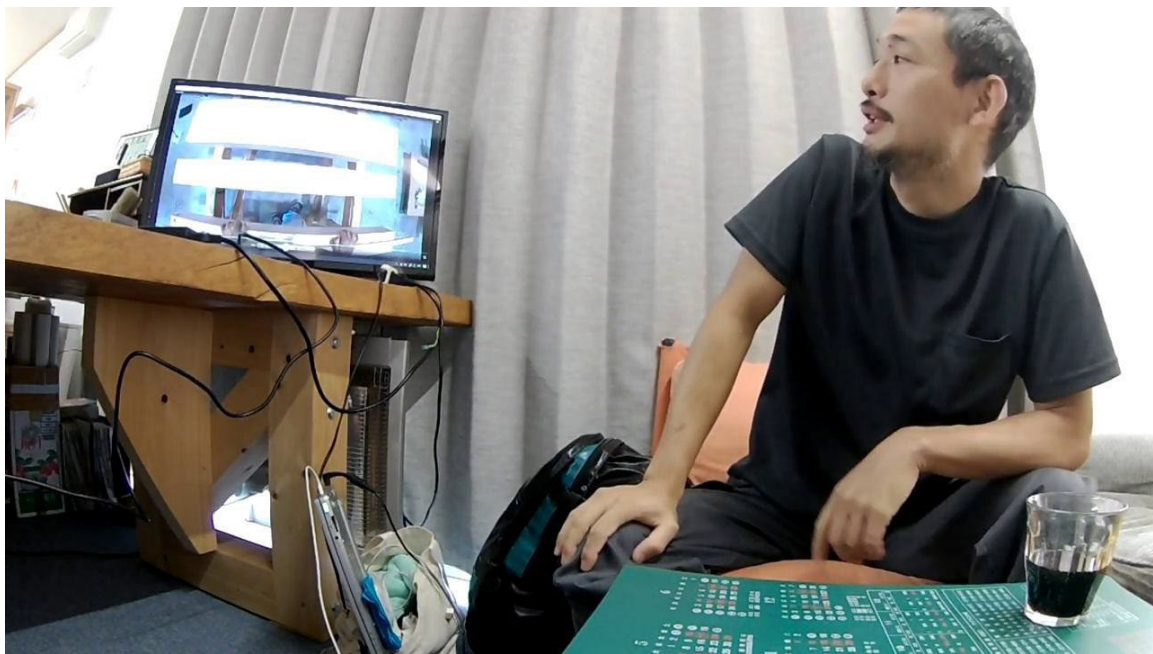


写真 6-7 ヒアリングの様子

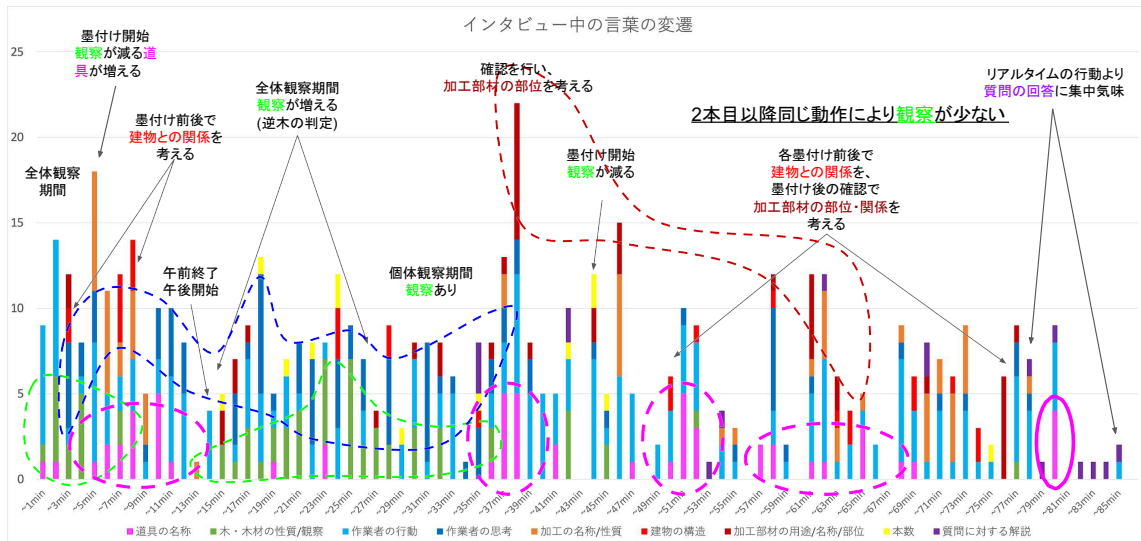


図 6-12 ヒアリング中に発せられた単語の分類と回数

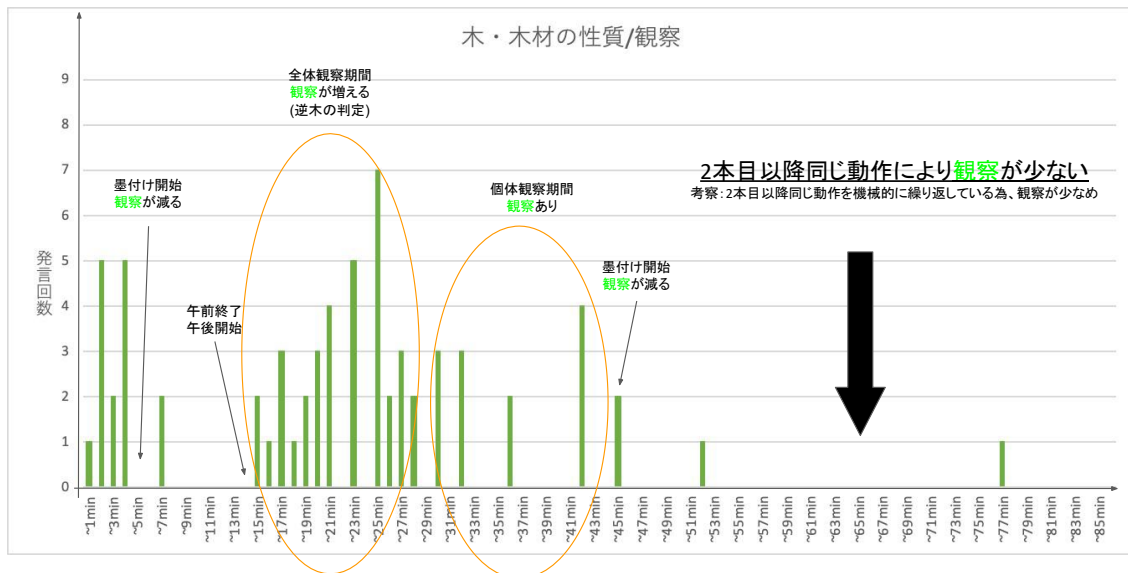


図 6-13 木材の観察に関わる単語

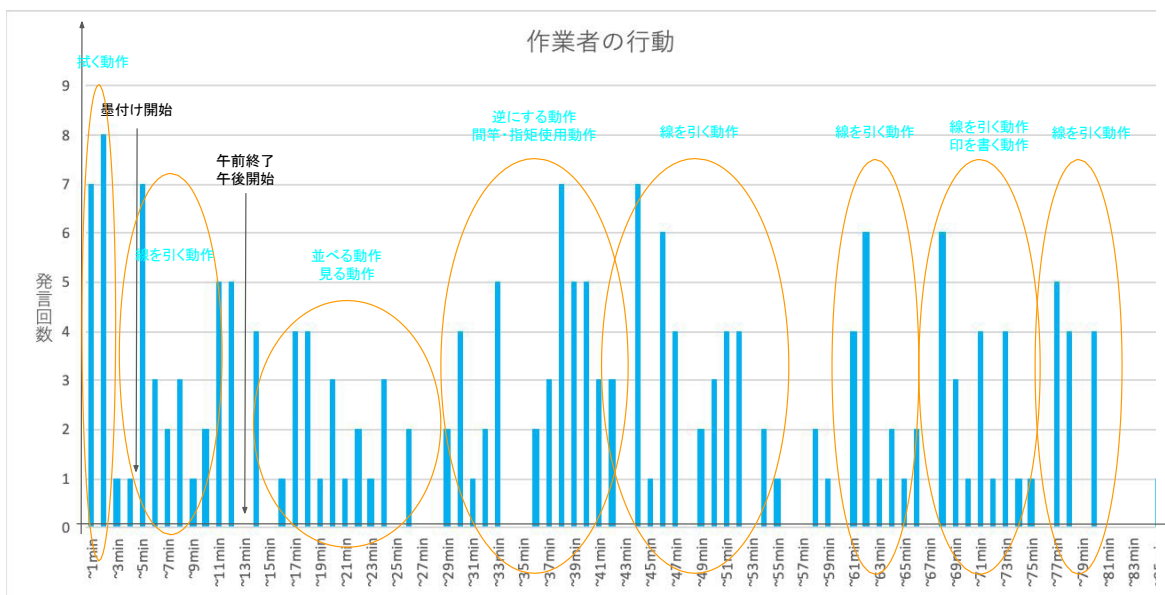


図 6-14 行動に関わる単語

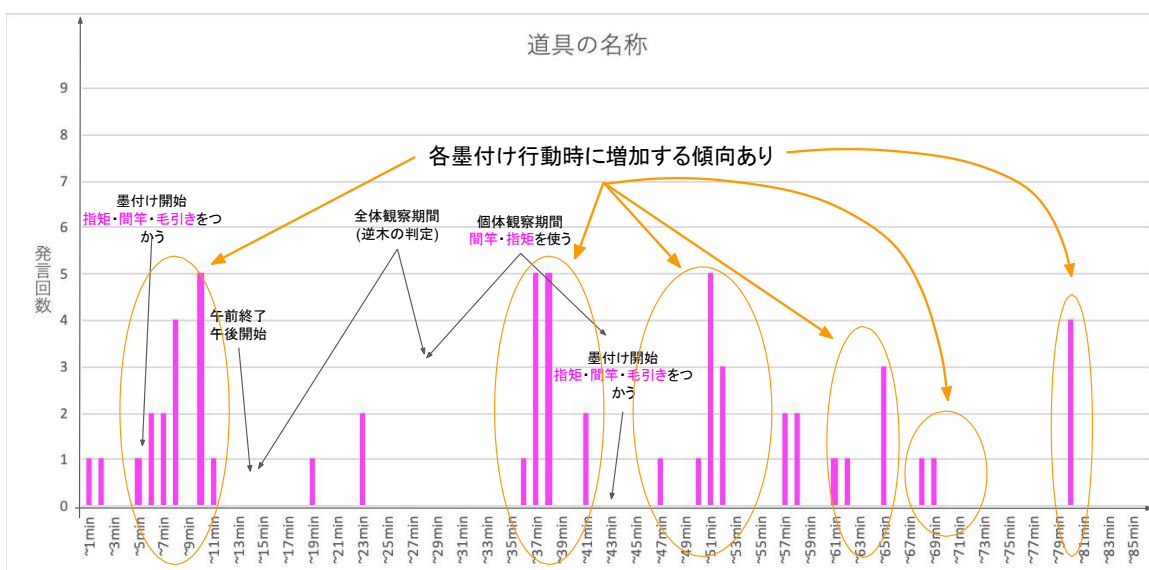


図 6-15 道具に関わる単語

6.3.4.本取組みのまとめ

ケーススタディのまとめ

建設技術者・技能労働者の技能伝承を目的とし、今回は技能労働者を題材としてスキル・ノウハウを動作分析によって明らかにするケーススタディを実施した。動作分析では、建設業界で用いられている要素作業分析を参考に、動作を細分類して所要時間を記録した。さらに、宮大工の思考に関わるノウハウを明らかにするため、思考分析の分野で用いられているプロトコル分析を用いて、細分類した動作の意図や思考内容を記録した。調査対象とした作業は、1.5 m四方程度の木造の地蔵倉に使用する柱4本・土台4本・方立4本の加工作業であり、技能労働者は職歴20年以上の宮大工である。要素作業分析とプロトコル分析で用いるための動画撮影のために、作業場の周囲に定点カメラ、宮大工の頭部にウェアラブルカメラを設置することで、3日間の作業状況を全景・手元の2視点で記録した。

動作分析の結果、作業を大きく準備作業（検討、墨付けなど）と加工作業（孔あけ・切削など）に分けた場合、準備作業に多くの時間を要していることが分かった。特に、木材1本目の検討から墨付けまでに多くの時間を割いており、全体の約67%の時間を要していた。このことから準備作業が最も重要であることが示唆された。

次にプロトコル分析の結果、宮大工が自身の作業動画に対して発言・説明した単語を、道具の名称・木材の観察・宮大工自身の行動・宮大工自身の思考・加工方法・建物や部材名称・長さや本数などの数値・その他に分類できた。その中で、動作分析において多くの時間を要していた木材の観察に関する単語に着目すると、90%以上が1本目の木材に対する発言であったことから、作業初期に加工方針を決定するまでの検討に最もノウハウやスキルを要していることが示唆された。

宮大工本人に、大工作業の中で重要視しているスキルやノウハウをヒアリングすると、加工方針の検討に最も技術力を要しており、一人前になるまで10年以上の経験を要する、との回答であった。方針が決まった後の加工作業は数年で習得できることが多く、単純な切削や孔あけであれば現状でも機械加工を併用していた。このように、宮大工の主観と動作分析・プロトコル分析の傾向が一致していることを確認した。

なお、本研究は株式会社竹中工務店と慶応義塾大学 SFC 池田研究室の共同研究として実施した。また、業績論文に記載の通り、筆者が共同執筆者である論文の成果も含めて分析を行っている。本取組みにおいては、筆者は分析対象となる宮大工と建設作業の選定、動画撮影、ヒアリング、動作分析を担当した。池田研究室は撮影機材の調達、動画撮影、ヒアリング、ヒアリング結果の言語分析、グラフ作成を担当した。

実務適用を阻害する要因のまとめ

第1章で整理した建築工事の特殊性に対し、従来業務の問題解決を阻む要因となっているもの、および要素技術として適用した技能労働者のスキル・ノウハウの可視化を目的とした動作分析技術の普及を阻む要因となっているものを表6-8に整理する。

従来業務においては、No.8「一品受注生産」No.10「労働集約的作業」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」No.13「人手と建設設備の分化」No.14「建築材料・施工方法

表 6-8 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用 の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる		
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい		
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化	×	
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

共に標準化が少ない」の特殊性が関連し、建設作業が工種によって多様であるとともにプロジェクトごとに場所や設備、作業手順といった条件も変化するため、伝承すべき技能の特定が困難であった。

デジタル活用の普及については、従来問題となっていた特殊性の中で、No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 10「労働集約的作業」No. 13「人手と建設設備の分化」No. 14「建築材料・施工方法共に標準化が少ない」など物理的な特性に関する4項目については、汎用的なデジタルデータを同一基準で分析する場合には、阻害要因とはならなかった。

デジタル活用の普及と従来業務の問題解決に共通して阻害要因となっていた項目として、No. 9「重層下請構造」No. 11「工事関係者が臨時に組織される」という請負体制の問題があり、建設労働者に対する要素技術適用のためには工事現場を管理するゼネコンと労務を提供する協力会社など企業を超えた連携体制が必要であった。No. 12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」についても共通の阻害要因となっており、分析対象となる建設作業が多様であることは不利に働く。No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」も共通の問題であり、建設労働者の技能伝承に関する新たな費用負担や設備投資が困難な状況である。

次に、『建築工事の特殊性』以外の阻害要因として、建設労働の技能に関わる暗黙知をデータとして蓄積する場合の障壁を確認した。6.2.と同様に、直接計測ができない情報を推測するための方法論が未確立であることが障壁であったが、心理学分野の調査手法などを併用することで熟練を要する作業や思考内容を抽出するなど、一定の知見を得られることが分かったので、

方法論などを業界で標準化・ルール化することによる解決の可能性が示唆された。一方で、今回のケーススタディのように被験者の動作やインタビュー回答などのデータを用いて分析する場合、実験以外の要素に被験者の意識が向くことによってデータにノイズが混入するため、安定した実験環境の構築や使用機材の品質・完成度などに留意する必要がある。取得データの分析、活用ノウハウについても建設業に從來存在しないスキルであるため、建築知識とデータサイエンススキルなどを有した新しい人材・職能が求められる。

- データの非標準化：動作分析やプロトコル分析などの分析手法が一般化されていないため、記録すべきデータの構造が標準化されておらず、複数のプロジェクトで異なる取組みを並行するとデータを一元的に扱えない可能性がある。
- 専門知識・技術の習得難易度：複数のプロジェクトを俯瞰して動作分析や技能伝承を図る取組み自体が從來にない新しい職能であるため、施工計画・管理へのフィードバックも含めて、蓄積されたデータの分析・活用方法に関する教育が必要である。
- システムの完成度不足：プロトコル分析では技能労働者が自身の作業動画に対して解説を実施するため、解説に集中するための動画品質が重要である。例えば、撮影漏れなどを防ぐ目的で広角カメラや魚眼レンズの使用も想定されるが、ヒアリング用途では視認性が問題となり、発言数や時間の計測に影響が生じる可能性がある。また、再生速度も1倍速であると長時間の拘束になり、技術の普及を妨げる要因となるため、ヒアリングに影響が生じない範囲で加速再生する仕組みが必要がある。

その他に、技能伝承を目的とした動作分析の普及を阻害する要因として以下を確認した。

- 技術適用までの準備手間：分析のためには作業ごとに動画撮影とヒアリング調査が必要であり、機材の準備や実験の実施に手間を要する。
- 技術適用中の管理/変更手間：実際の建設労働と複数の動画撮影を同時に実施する必要があるため、各種機器類が正常に動作しているか常に確認し、必要に応じてシステムの再起動や同期作業などの調整が必要がある。
- 専任人員の必要性：動作分析は建築工事の施工管理にはない特殊な活動であるため、実務担当者とは別に専門家による技術支援体制が必要である。

6.4.本章のまとめ

本章では、複数プロジェクトを俯瞰したデータ活用の目的として教育用途に着目し、知識や思考など形に表れない情報を扱うためにデジタル技術を活用する場合の障壁を明らかにするため、2種の検証項目に対してケーススタディを実施した。

(検証項目1) 業務知識・経験の多寡が要素技術の利用者に与える影響を確認するため、VR安全教材を使用することによる教育効果の測定を題材に取り上げ、利用者の反応を心拍数を指標として測定する手法を提案し、施工管理の実務経験に依存した反応差異について統計的に分析するケーススタディを実施した。その結果、VR技術や生理センシング技術などで用いられる機器は他産業での使用が想定されており、建設作業のような大きな動作が伴うと安定したデータ採取が難しくなることから、適切な実験環境を準備する必要があるなど、特殊なノウハウが要求されることによって技術普及が阻害されることを確認した。また、教育効果のように直接計測することができない情報を推測する方法論が未確立であることも技術普及の阻害要因であり、このケーススタディにおいても実務経験の有無が生体反応の差異と統計的に関係することは明らかになったが、生体反応の差異と教育効果の関係を推測することができなかった。

(検証項目2) 建設労働の技能に関わる暗黙知をデータとして蓄積する場合の障壁を確認するため、宮大工による木材加工作業を題材に、動作分析および心理学分野で用いられるインタビュー手法を用いて、熟練を要する作業や思考を抽出するケーススタディを実施した。具体的には、まず宮大工の従来作業を動画記録し、その動画を見ながら宮大工本人が動作意図を解説することで、細分化した作業に対して言及された単語の回数や説明時間を指標に、宮大工が無意識に重要視している作業や思考内容を抽出した。この結果、検証項目1と同様に、直接計測することができない情報を推測する方法論が未確立であるものの、心理学分野の調査手法など他産業の技術を活用することで、一定の知見を得られることが分かった。一方で、被験者の動作やインタビュー回答などを指標として扱う場合、実験以外の要素に意識が向かないよう、安定した実験環境の構築や機器制御など、特殊なノウハウが必要であることも分かった。

これらケーススタディの結果から、第1章で整理した建築工事の特殊性15項目に対し、教育と技能伝承目的の分析に関する従来業務の問題解決と、デジタル活用を阻害する要因をそれぞれ表6-9に整理する。実施したケーススタディで一つでも阻害要因として挙げた場合は、本表においても阻害要因として表記し、題材によって結果が異なっている場合は以下の考察内で詳細を言及する。

従来業務においては、本章で共通して、No.6～15の産業構造に関わる特殊性10項目の内、No.8～15の8項目が問題解決の阻害要因となっていた。本章は教育や技能など、人間の知識やスキル・ノウハウに関する取組みを主として題材としており、重層下請構造をはじめとした組織・役割の分化がこれら問題解決の阻害要因となっている。

デジタル活用の普及については、No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」という請負体制の問題は従来と同様に阻害要因となっており、建設労働者に対する要素技術適用のためには工事現場を管理するゼネコンと労務を提供する協力会社など企業を超えた連携体制が必要である。また、No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」について

表 6-9 建築工事において従来業務の問題解決・デジタル活用を阻む要因となる特殊性

分類	No.	建築工事の特殊性	従来業務の問題への関連 ×：阻害要因	デジタル活用の阻害有無 ×：阻害要因
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	
	2	文化的・芸術的側面が強い		
	3	建築物の規模・複雑度が大きい		
	4	建築物の耐用年数が長い		
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する		
産業構造の特性	6	建設需要の変動		
	7	設計と施工が別人格		
	8	一品受注生産	×	
	9	重層下請構造	×	×
	10	労働集約的作業	×	
	11	工事関係者が臨時に組織される	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い	×	×
	13	人手と建設設備の分化	×	
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない	×	
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×

も共通の阻害要因となっており、本章のケーススタディにおいて安全設備の種類や設置場所によって安全教材利用者の反応が異なる、動作分析の対象となる建設作業が多種であることなど、多様な作業条件に幅広く対応する必要がある。一方で、従来問題となっていた特殊性の中で、No. 1「現場の場所が常に変わる」No. 10「労働集約的作業」No. 13「人手と建設設備の分化」No. 14「建築材料・施工方法共に標準化が少ない」という物理的な特性に関する4項目については、汎用的なデジタルデータを同一基準で分析する場合には、阻害要因とはならなかった。

No. 15「安全・品質よりコスト・納期が優先」の特性は共通の問題であり、教育や技能伝承に関する新たな費用負担や設備投資が困難な状況である。

その他に、教育と技能伝承を目的とした動作分析の普及を阻害する要因として以下を確認した。2つのケーススタディを通じて全て共通の項目であり、他産業で用いられる要素技術や分析手法をそのまま建築工事の用途で使うことが困難であること、および技術を適用するための仕組みや組織構築に関わる課題が主であることが分かった。

- データの非標準化：生理センシングで用いるセンサー類と、動作分析で実施する動画撮影ともに、記録すべきデータの構造やフォーマットなどが明確になっていないことが普及を阻害する要因となる。複数のプロジェクトで取得したデータを一元的に扱えない可能性がある。

- 技術適用までの準備手間：本章のケーススタディでは、建築工事の現場とは別の場所でデータ採取をする必要があり、機材や実験環境の準備が新たに必要となった。また、生理センシングのデータを公表するためには倫理審査によって承認を得る必要があり、建設業で審査委員会を保有する企業は少ないため、専門のメーカーや大学などとの協業体制が必要となることも普及を妨げる要因である。
- 技術適用中の管理/変更手間：各種測定では複数のセンサーや機器類を同時に使用しており、それぞれが正常に動作しているか常に確認し、必要に応じてシステムの再起動や同期作業などの調整が必要がある。
- 専用人員の必要性：使用する機器・ソフトウェアともに建築工事の施工管理では特殊な機材であり、実務担当者とは別に専門家による技術支援体制が必要である。
- 専門知識・技術の習得難易度：複数のプロジェクトを俯瞰して教育や技能伝承のためのデータを蓄積・活用する仕組み自体が従来にない新しい職能であるため、専門の人材教育が必要である。
- システムの完成度不足：測定や分析のために、安全教材に対する生体反応や自身の動作の解説など、目的のデータのみを採取する必要があり、教材自体の完成度不足やヒアリングで使用する動画の視認性不足など、主にシステムの完成度不足に起因する影響を排除することは、技術普及の障壁となる。

参考文献

- [1] 高木元也：中小建設業における安全教育の実態と課題—管工事業対象のアンケート調査と分析—，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），72（4）， I_11-I_22， 2016
- [2] 小野浩史，平手小太郎：被験者属性・提示装置の違いに着目した空間認識に関する基礎的研究—バーチャルリアリティを用いた住環境提示システムにおける実空間再現性の検討（その3），日本建築学会環境系論文集，70 巻， 593 号， pp.103-109， 2005.7
- [3] 侯寧，ほか 6 名：設計教育における VR 空間の活用可能性に関する研究 その1：スケール感の学習実験による VR 空間の有効性検証，日本建築学会環境系論文集，86 巻，785 号， pp.670-679， 2021.7
- [4] 伊藤弘大，原田 圭裕，木代 優，富山 剛，中辻 晴彦，舘 陽介，瀬戸 洋紀，大倉 典子：整理指標を用いた社債機器の情報提示による「わくわく感」の評価—社外風景に関する事前情報付与の影響の HRV 解析—，日本感性工学会論文誌，16 巻，3 号， pp.321-331， 2017
- [5] 厚生労働省：” 各種教材・ツール”， 職場のあんぜんサイト
<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/information/kyozaishiryo/eng.html>
(accessed 2023.4.3)
- [6] 積木製作：安全体験 VR トレーニング
<https://tsumikiseisaku.com/safetyvr/> (accessed 2023.4.3)
- [7] 参考文献[4]前掲書， pp.321-331
- [8] 伊藤弘大，大倉典子：心電を用いた VR システムの感性評価の研究～「サマーレッスン」プレイ時の「ドキドキ感」の男女間での比較～，エンターテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集， pp.301-305， 2017
- [9] 伊藤弘大，大倉典子：心電を用いた VR システムの感性評価の研究～「サマーレッスン」プレイ時の「ドキドキ感」の男女間での比較～，エンターテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集， pp.301-305， 2017
- [10] 廣田昭久，横田 賀英子，和田 純一郎，渡辺 昭一，高澤 則美：虚偽返答時の心拍数および心拍変動，日本鑑識科学技術学会誌， 5(1)， pp.33-53， 2000(DOI:
<https://doi.org/10.3408/jasti.5.33>)
- [11]Ericsson, K. A., Simon, H. A. : Protocol analysis:Verbal reports as data, The MIT Press, 1993.5

図版出典

- 図 6-1 筆者作成
- 図 6-2 筆者作成
- 図 6-3 筆者作成
- 図 6-4 筆者作成

図 6-5 筆者作成

図 6-6 筆者作成

図 6-7 筆者作成

図 6-8 筆者作成

図 6-9 筆者作成

図 6-10 筆者作成

図 6-11 筆者作成

図 6-12 助川氏（業績論文筆頭著者）と筆者が共同で作成

図 6-13 助川氏（業績論文筆頭著者）と筆者が共同で作成

図 6-14 助川氏（業績論文筆頭著者）と筆者が共同で作成

図 6-15 助川氏（業績論文筆頭著者）と筆者が共同で作成

表 6-1 筆者作成

表 6-2 筆者作成

表 6-3 筆者作成

表 6-4 筆者作成

表 6-5 筆者作成

表 6-6 筆者作成

表 6-7 筆者作成

表 6-8 筆者作成

表 6-9 筆者作成

写真 6-1 筆者撮影

写真 6-2 筆者撮影

写真 6-3 筆者撮影

写真 6-4 筆者撮影

写真 6-5 筆者撮影

写真 6-6 筆者撮影

写真 6-7 筆者撮影

第7章 要素技術の実務適用における課題整理

- 7.1. 本章の目的と構成
- 7.2. デジタル活用を妨げる障壁
- 7.3. デジタル活用を妨げる障壁に対する課題と解決アプローチ
- 7.4. 本章のまとめ

7.1.本章の目的と構成

第3章から第6章まで、個別の要素技術を用いた実務適用を通じ、4パターンのデジタル活用のケーススタディを実施した。その結果、ケーススタディごとにデジタル活用の実務適用を阻害する要因を抽出した。7.2.ではそれらの中で共通項目と要素技術/用途固有の項目を峻別することで、建築工事においてデジタル活用を阻害する共通の課題を考察する。7.3.では、それら課題を解決するための方策を検討し、デジタル技術の実務適用が定着する将来像を示す。

7.2.デジタル活用を妨げる障壁

他産業と比較した建築工事の特殊性に対する考察

第1章で挙げた仮説の一つ目として、「他産業と比較した建築工事の特殊性に対しては従来と比較してデジタル活用によって克服できるものが多いのではないか」と設定した。この検証のために第3章から第6章においてケーススタディを実施した結果、全ての章において、障害となる『建築工事の特殊性』が従来よりも少なかった。

各ケーススタディに対して障害となった『建築工事の特殊性』を表7-1に整理する。

第1章で挙げた特殊性15項目の内、9項目については全てのケーススタディにおいてデジタル活用による問題解決の阻害要因とは考えられなかった。物理的な実態を持たないデジタル活用の強みとして、情報伝達のために時間や空間の制約を受けないため、建築物固有の特性は大きな障壁にならないことが分かった。また、産業構造の特性についても、一般的には労働集約的作業や建築材料・施工法の非標準化は問題解決の阻害として挙げられることが多いが、デジタルデータとして扱う場合には大きな問題にならないことが分かった。

一部もしくは全てのケーススタディで阻害要因に項目については以下の通りである。

No.1「現場の場所が常に変わる」については、全てのケーススタディで阻害要因となった。デジタル活用によって問題解決を図るためには、どのような目的であっても必ず工事現場においてデジタルデータを採取する必要がある、常に場所が変化する環境では技術適用の準備や管理、変更対応などの面で不利に働く。

No.9「重層下請構造」No.11「工事関係者が臨時に組織される」No.12「関係する人的・物的資源の量と種類が多い」については、3パターンのケーススタディ（記録・分析・教育）に対する阻害要因となった。該当する3パターンのケーススタディはいずれも建設労働と直接関わる活用方法であるため、デジタル活用のためにはゼネコンだけでなく多様な協力会社や工場との協業が必要であり、企業組織を超えて活用する仕組みが必要である。

No.15「安全・品質よりコスト・納期が優先」については、2パターンのケーススタディ（管理・記録）で阻害要因になった。プロジェクトの成否を判断する評価指標が現在でも工事利益（率）が主であるため、プロジェクト単体での成果が求められる技術適用では常に『費用対効果』が課題となった。

No.8「一品受注生産」については、1パターンのケーススタディ（記録）でのみ阻害要因になった。特に、建築材料のトレーサビリティ記録のように、サプライチェーンの上流まで幅広く技術適用する必要がある場合、技術適用の準備や管理、変更対応などの面で不利に働くこと

が分かった。しかし、他の多くの用途では、デジタルデータとして扱う場合には大きな障壁にはならなかった。

ケーススタディを通じて抽出した阻害要因の整理

次に、仮説の二つ目に設定した「デジタル活用が進まない原因として『建築工事の特殊性』とは別に阻害要因が複数存在する」に対しては、第3章から第6章まで実施したケーススタディを通じて、それぞれ複数の阻害要因を明らかにした。各ケーススタディにおける主な検証項目と、明らかになった主な阻害要因の一覧を表7-1に示す。さらに、各ケーススタディの間で共通して抽出された阻害要因を図7-1に整理する。

全てのケーススタディに共通した阻害要因は、データの非標準化、技術適用までの準備手間、専任人員の必要性、専門知識・技術の習得難易度、であった。検証を通じて筆者が特に問題として着目したのが、準備手間、専任人員、専門知識・技術の習得難易度である。第2章の表2-3で整理した、まだ一般社会でも定着していない先端技術を活用する場合には、これらが常に阻害要因となる。技術の試行検証段階では、筆者のような研究職能の人材や本社・内勤の技術支援部門などがサポートするケースが多いために問題として挙がらないが、その後実務への定着まで至らない大きな原因である。これらを克服するためには、要素技術をそのまま持ち込むだけではなく、第3章や第4章で試作したように、要素技術と実務ツールの間を繋ぐ支援機能が必要になると考える。支援機能とは、2つの手段が考えられる。ひとつは、このようなデータ変換や業務用途の専用機能を有したツールの整備である。専用機能の対象となる業務の種類は序章で述べた通り多様かつ多量であるため、これまでの自社開発ツールのように時間を掛

表7-1 検証したデジタル活用における建築工事の特殊性による影響

分類	No.	建築工事の特殊性	ケーススタディ (×：阻害要因)			
			CS1 管理	CS2 記録	CS3 分析	CS4 教育
建築物固有の特性	1	現場の場所が常に変わる	×	×	×	
	2	文化的・芸術的側面が強い				
	3	建築物の規模・複雑度が大きい				
	4	建築物の耐用年数が長い				
	5	特殊な性能を持つ材料を使用する				
産業構造の特性	6	建設需要の変動			×	
	7	設計と施工が別人格				
	8	一品受注生産		×		
	9	重層下請構造		×	×	×
	10	労働集約的作業				
	11	工事関係者が臨時に組織される		×	×	×
	12	関係する人的・物的資源の量と種類が多い		×	×	×
	13	人手と建設設備の分化				
	14	建築材料・施工方法ともに標準化が少ない				
	15	安全・品質よりコスト・納期が優先	×	×	×	×

けたクローズなものではなく、現場レベルで簡易に作成、カスタマイズし、ユーザー同士で共有できるものが適する。そのためには、扱うデータの標準化が前提となる。もうひとつは、新たな職能として、要素技術と実務ツールの間を繋ぐ技術コンサルティングを担う組織を構築・活用することである。第1章で例示したARUPのように、BIM活用やシミュレーションなど主として計画段階の技術コンサルティングについては海外で既にビジネスモデルが確立し、建築工事の請負体制の中に組み込まれている。同様に、建築工事の実施段階におけるデジタル活用をコンサルティングする外部企業/内部組織がビジネスモデルとして一般化することで、上記の問題は解決する。

次に、プロジェクト活用（管理・記録）/複数プロジェクトを俯瞰した活用（分析・教育）、の2パターンに対し、それぞれ共通の項目を抽出した。

プロジェクト活用（管理・記録）における阻害要因は、先述した全ての共通項目以外に絞ると、準備データの不足、費用対効果の不足/不明確、の2項目であった。『準備データの不足』の解決のためには、工事現場の実施情報と比較もしくは入力先としての計画情報のデジタル化が必要だと考える。『費用対効果の不足/不明確』については、特に品質関連のデジタル活用で用いる計測機器やソフトウェア自体が高価であることが、活用の障壁となっている。『高価』という判断は、現状アナログで対応している建設労働者の労務費と比較した評価である。そのため、第1章の社会背景で述べたように建設労働者の減少が今後も進んだ結果、労務費が高騰した場合には、これら機器類のコストが相対的に下がることで、費用対効果の問題は解決する可能性がある。また、第1章で海外における国レベルの施策として例示したイギリスにおけるMMC適用に対する費用支援やシンガポールの建築申請におけるBuildability評価のように、国や企業によるトップダウンでこれら先端技術の活用が義務付けられることで、費用対効果の議論が問題視されなくなることも考えられる。

俯瞰したデジタル活用における阻害要因としては、先述した全ての共通項目以外に絞ると、技術適用中の管理/変更手間、システムの完成度不足、の2項目であった。複数のプロジェクトを俯瞰して分析や教育のために扱うデジタルデータを取得するためには、例えばケーススタディで扱ったヒト・モノの稼働率や建設労働者の生理情報のように、工事現場の中で広範囲かつ継続的にデータ採取する必要があるため、『技術適用中の管理/変更手間』が問題となるが多かった。また、これらの目的で扱う要素技術は、プロジェクト活用のケーススタディで扱ったものと比較してもさらに扱いが難しいケースが多く、技術適用を通じて安定してシステムを稼働させることに苦労した。これら問題は、要素技術自体が未成熟な段階であることが主たる原因と考えられる。この問題を克服するためには、3つの要因が考えられる。一つ目として、要素技術が成熟することで建築工事においても運用が容易なるケースである。二つ目は、先述したデジタル活用の支援組織が整備されるケースである。専門家集団であれば要素技術の完成度は問題にならない。例えば、竹中工務店がBLEを用いた位置測位ソリューションを多くの工事現場へ展開する施策として、グループ会社である商社に新規ビジネスモデルとして専任の運用・サポートチームを設けた事例がある。三つ目は、二つ目の支援組織の構築とも関係するが、外的要因やトップダウンによる強制力である。担い手不足やスキル低下などの社会背景

表 7-2 ケーススタディにおける主な検証項目と得られた知見

章	主な検証項目	ケーススタディを通じて抽出した 要素技術の実務適用を阻害する主な要因
第3章 施工 管理	実務担当者が点群データを扱うスキルに関する障壁	<ul style="list-style-type: none"> ・要素技術を取り扱う専門人員もしくは人材教育が必要。 ・技術適用のために新たに必要な現場作業を必要とする。 ・計画情報がデジタル化されていない。 ・点群特有の障壁（大容量データ、高額機器）
第4章 施工 記録	長い期間、かつ多くの関係者が要素技術を扱う運用面の障壁	<ul style="list-style-type: none"> ・資材を対象とすると機材の準備手間が障壁となる。 ・企業を超えた技術適用となるため組織の障壁がある。 ・技術適用を補助する専用人員が必要。
第5章 分析	データ蓄積のために多種多様な機器を用いる場合の準備と技術完成度に関わる障壁	<ul style="list-style-type: none"> ・大量の機器を扱うため技術適用の準備・管理・変更手間が煩雑。 ・技術適用を補助する専用人員が必要。 ・他産業の中でも、医療や人間工学など建築と共通点が少ない分野の要素技術は、建築利用の障壁が多い。
第6章 教育	知識や思考など形に表れない情報を扱う場合の障壁	<ul style="list-style-type: none"> ・直接計測が不可能な情報を推測する手法が他産業においても未確立であり、取扱いが困難。 ・実験で使用する機材の完成度が求められる。

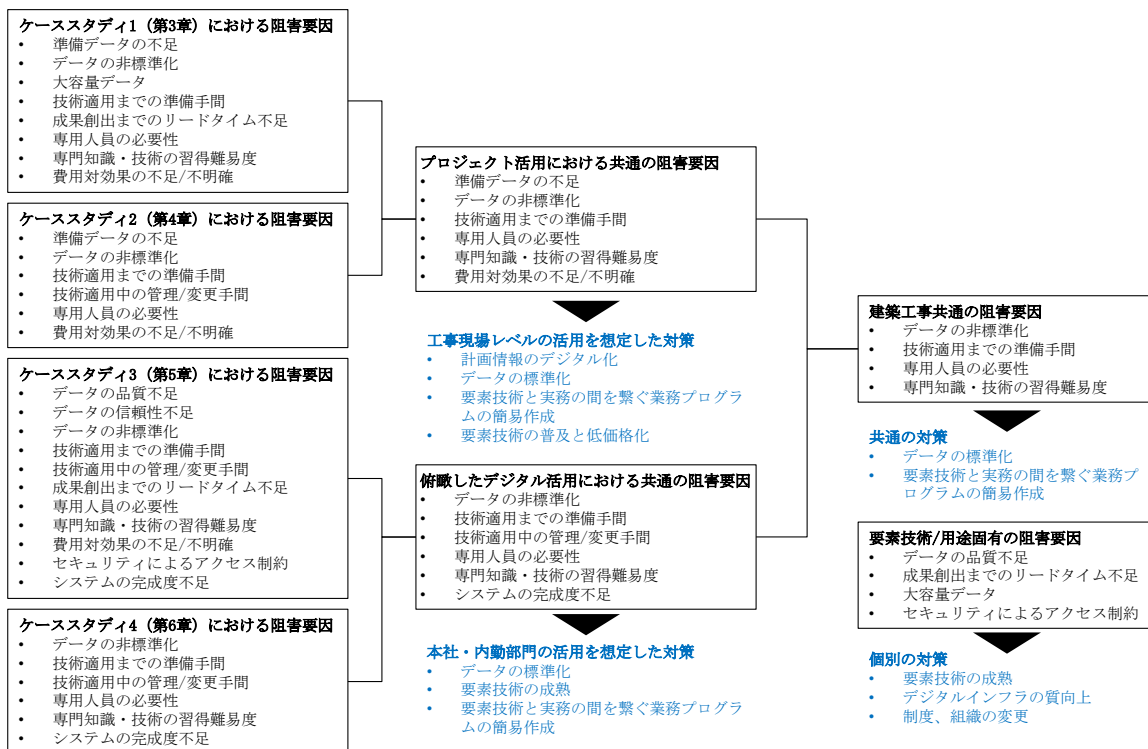


図 7-1 ケーススタディを通じたデジタル活用を妨げる要因の整理

にも関係して、過去と同様に工事を進めていても、将来的に建物の品質不良や労働災害が増加する可能性がある。第1章において、社会的な事件や事故をきっかけとして国による指針や法改正による強制力が働いた事例を挙げたように、将来的な環境変化によってトップダウンでこのようなデータ蓄積や分析が義務付けられることで問題が解決する可能性がある。

また、要素技術や用途固有の阻害要因では、データの品質不足、成果創出までのリードタイム不足、大容量データ、セキュリティによるアクセス制約、の4項目があった。データの品質不足やリードタイム不足に関して、一部の品質管理で求められるミリ単位の高精度計測とリアルタイム性に対しては、既存機器の性能に限界があることがケーススタディを通じて明らかになった。データ容量については点群データ特有の問題であり、3次元スキャンを用いる場合にはストレージや通信インフラの整備を特に考慮する必要がある。

7.3. デジタル活用を妨げる障壁に対する課題と解決アプローチ

7.2. で考察した障壁を踏まえ、建築工事においてデジタル活用を妨げる障壁と課題について整理する。

まず、現在のデジタル活用の状況と問題点の関係性を図7-2に示す。先端技術をそのまま工事現場に持ち込んだとしても、取得したデジタルデータは実務ツールの中で扱えず、苦労して収集したデジタルデータを使って施工管理や記録目的に活用しようとしても比較や入力対象となる計画情報のデジタル化も進んでいない、という状況を示している。複数プロジェクトを俯瞰して分析や教育目的で活用する場合には要素技術自体の取扱いが困難であり、実務適用のためにはさらに障壁が多いことが分かる。

次に、障壁に対する解決手段を追記したものを図7-3に示す。建築工事におけるデジタル活用を妨げる障壁に対する課題としては、大きく3つに分類できる。

● 技術開発による解決アプローチ

要素技術と実務の間でデジタルデータが断絶していることが共通の障壁であり、技術的な解決方策としては、これらを繋ぐ支援ツールの整備となる。このツールは、現場やユーザーレベルで簡易にカスタマイズ・共有を可能とするオープンな仕様が求められる。次に、特にプロジェクト活用の際に比較・入力対象となる計画情報のデジタル化が必要となる。この場合は、扱うデータの標準化も前提となる。

● 組織構築による解決アプローチ

要素技術と実務間のデータ断絶の障壁と、要素技術自体が未成熟である障壁については、これらを技術的に支援する新たな専門家組織の整備によっても解決可能である。専門家組織は、ゼネコンなどが社内組織として整備するケースと、海外事例のように外部企業が新規ビジネスモデルとして建築工事に参入する可能性がある。

全てのケーススタディを通じて、工事現場の実務担当者に要素技術を使用させることが普及の障壁となっていることから、この『専門家組織』は技術的な助言やサポートを実施するのみではなく、専門家が企業やプロジェクトの中で主体的に要素技術を活用する組織である必要がある。さらに、各章の考察で言及した通り、この専門家に求められる専門性としては、デジタ

ル技術の扱いに精通していることのみでは不足であり、建築生産プロセス全般の実務知識も併せて有している必要がある。ケーススタディで繰り返し述べた通り、多様なデジタル機器や分析方法が存在する中で、実務で求められる成果物や制約条件を考慮して技術適用を進める必要があるためである。このような専門性を有する人材は現状稀有であるため、業界全体でその必要性を共有し、人材教育を働きかける必要があると考える。筆者がゼネコン所属の研究者として勤めている経験から、情報技術の習得に比較して、建築の実務知識の習得ははるかに困難かつ時間を要すると考えており、上記のような専門性を習得するためには、前提としてまず建築の実務担当者として知識と経験を積んだ人材に対し、情報技術の習得を働きかける方法が合理的である可能性がある。

● 環境変化による解決アプローチ

技術適用の費用対効果に関する障壁と、要素技術自体が未成熟である障壁については、建築工事を取り巻く環境の変化に伴う外的要因・強制力によって解決が可能である。将来的にさらなる担い手不足やそれに伴う労務費の高騰、品質・安全に関する不祥事の増加などが生じた場合、費用対効果に関する問題意識は自然と解消する。また、これらに起因して社会的ニーズが先行し、国や企業のトップダウンなどによる強制力が働くことで、要素技術自体の完成度に依存せず、データの蓄積や分析が義務付けられる状況になる。

国や企業のトップダウン方策については、第1章で例示したイギリスによる MMC 推進やシンガポールによる Buildability 評価などが参考になる。これらは先述した通り、イギリスでは住宅不足の解消と建設労働者不足への対応が目的となっており、MMC＝工業化の推進という技術的な施策に加えて、これらに関連する調達の簡素化など制度面の施策も併せて実施している。シンガポールにおいても外国人労働者への依存からの脱却という明確な目標があり、Buildability 評価を通じた省人化工法の推進に加えて、外国人雇用税の引き上げや雇用上限率の引き下げなど税制の変革も同時に進めている。

今後の日本においても、トップダウンで問題の解決を図る場合には、手段の一つとしてデジタル活用を推進するとともに、例えば第1章表 1-4 で示したようなハード開発のアプローチや技術開発以外のアプローチを並行して推進することが必要である。

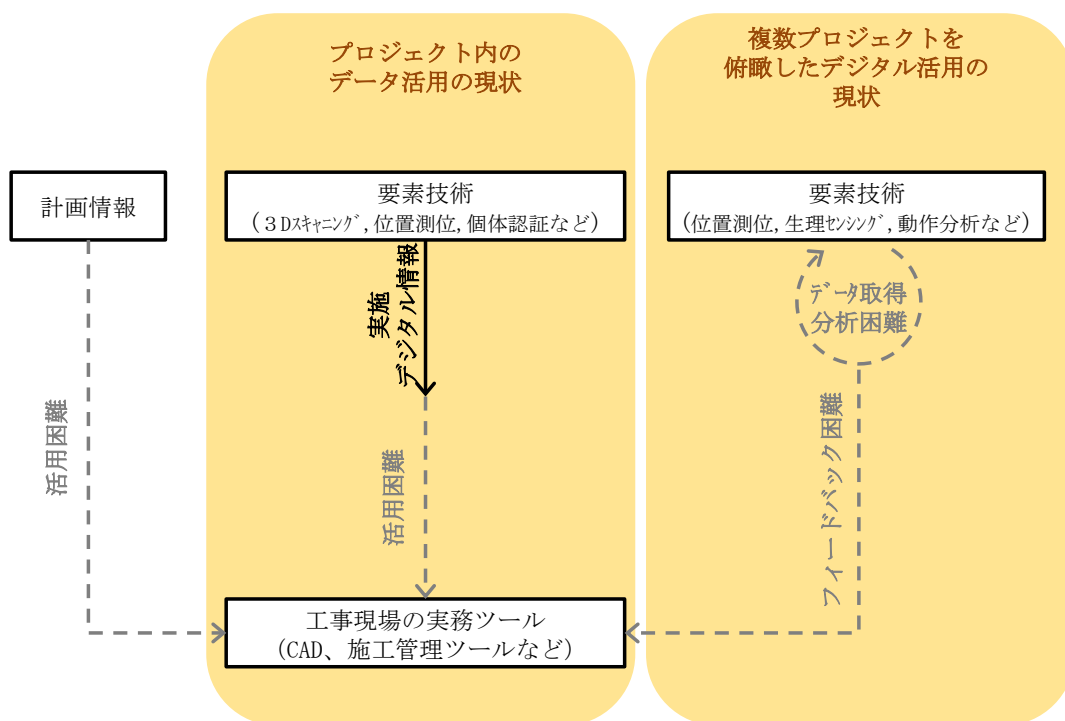
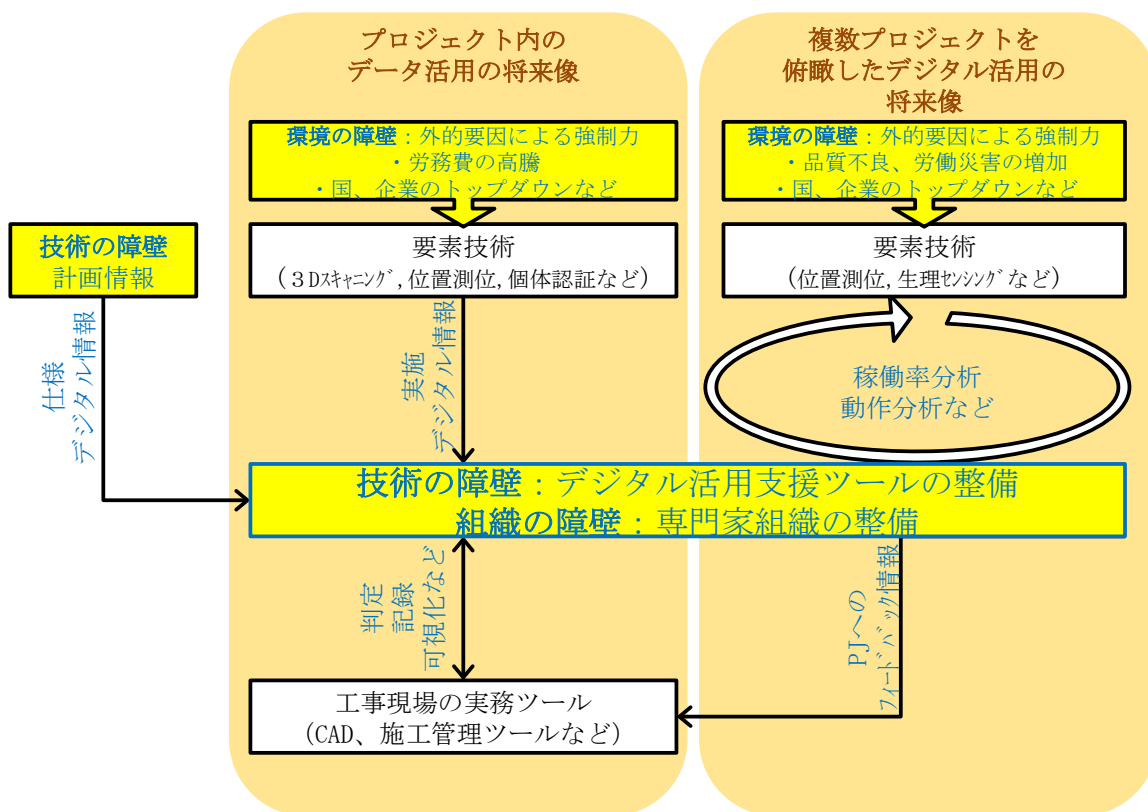


図 7-2 デジタル活用の現状と問題点



(凡例) 黄色ハッチング：デジタル活用を妨げる障壁と克服手段

図 7-3 デジタル活用の実務適用を妨げる障壁の整理

7.4.本章のまとめ

本章では、まず仮説の一つ目として設定した「他産業と比較した建築工事の特殊性に対しては従来よりデジタル活用によって克服できるものが多い」の検証結果として、全てのケーススタディにおいて、障害となる『建築工事の特殊性』が従来よりもデジタル活用の方が少なかったことを述べるとともに、一般的に阻害要因とされている『建築工事の特殊性』15項目に対し、9項目では今回のケーススタディのいずれも障壁にならないなど、デジタル活用を妨げる主たる要因ではないことを明らかにした。

特に、建物の規模や形状に関わる物理的な要因と、産業特性の中では多品種少量生産に関わる要因については、デジタル活用によって克服が可能である特性であることを述べた。一方で、デジタル活用によっても克服が難しい要因も確認し、工事現場の場所が常に変わる特性や重層下請構造など請負体制に関わる特性については同様に阻害要因となるため、デジタル活用の普及を推進する場合には考慮が必要であることを述べた。

次に、仮説の二つ目として設定した「デジタル活用が進まない原因として『建築工事の特殊性』とは別に阻害要因が複数存在する」の検証結果として、第3章から第6章までのケーススタディを通じて明らかになったその他の阻害要因を整理した。その結果、各ケーススタディにおける共通の課題として、扱うデータの標準化と、実務担当者とは別の専任人員・組織の必要性を挙げた。その他に、プロジェクト活用を想定したデジタル活用の普及を阻害する要因として、収集する実施データと比較するための計画データの不足と、費用対効果の不足/不明確が挙げられた。複数プロジェクトを俯瞰したデータ活用の普及を阻害する要因としては、要素技術を取り扱う難易度の高さや完成度不足が挙げられた。

これら阻害要因を克服するための課題を、技術・組織・環境の3つの視点で整理した。デジタル活用の普及のためには、技術開発だけではなく、企業やプロジェクトの中で要素技術を扱う専門家人材や仕組みなど組織構築に関する解決アプローチと、社会環境に起因したニーズの変化や国・企業のトップダウンによる解決アプローチも考えられる。

图版出典

图 7-1 筆者作成

图 7-2 筆者作成

图 7-3 筆者作成

表 7-1 筆者作成

結章

はじめに

本研究は、建築工事においてデジタル活用の普及を妨げる共通の要因を整理するとともに、克服するための課題と解決方策について論じた。議論の対象とする業務は、施工管理業務とした。施工管理業務では他産業/職種と比較してデジタル活用が進んでいない状況が既往調査で報告されているためである。本研究ではまず建築工事において過去 30 年以上解決されていない問題を整理し、デジタル活用以外の手段も含めた解決方策を考察することで、建築工事においてデジタル活用を推進する意義を示した。次に、要素技術を実務適用するケーススタディを通じて技術普及の阻害要因と課題の整理を行った。

研究の統括

序章では、本研究の背景と目的、用語の定義、本論文の構成について述べた。

第 1 章「建築工事における問題とデジタル活用の可能性」では、建築工事を取り巻く環境と問題の変化を調査することで、現在も解決に至っていない問題を 12 項目抽出した。さらに、これら問題解決を阻む理由として度々言及される『建築工事の特殊性』を 15 項目に整理した。調査結果を踏まえ、本論文における仮説を 2 つ設定した。

【本研究における仮説】

- ① 建築工事で解決されていない問題をデジタル活用によって解決しようとする場合、従来と比較して障害となる『建築工事の特殊性』が少ない
- ② デジタル活用の普及を妨げる要因が『建築工事の特殊性』以外に複数存在する

次に、整理した問題に対する解決アプローチとして、技術開発（情報活用・ハード開発）と技術開発以外の方策（企業単位・国/業界単位）の 4 パターンに分類した。本論文ではこの中で情報活用に関わる技術開発に着目し、仮説検証のためのケーススタディの題材として 4 項目を設定した。

【仮説検証のために実施するケーススタディの分類】

- | | | |
|-------------------|------------|------------|
| A：プロジェクトにおける内部活用 | A-1：施工管理目的 | A-2：施工記録目的 |
| B：複数プロジェクトを俯瞰した活用 | B-1：分析目的 | B-2：教育目的 |

第 2 章「要素技術の現状と課題」では、デジタル活用に関わる過去の技術開発と一般社会における ICT 技術の変遷を整理した。そして、用いられている要素技術を民生/業務用途で定着した技術と未成熟な技術に峻別し、ケーススタディで使用する要素技術を選定した。

第 3 章から第 6 章は、要素技術の実務適用を通じて技術普及の阻害要因を抽出するケーススタディである。

第 3 章「施工管理目的のデジタル活用」では、3 次元スキャン技術を用いて施工出来形および工場製作物の検査効率化を題材とし、実務担当者が点群データを扱うスキルに関する障壁を確認した。その結果、多種多量の部材を扱う特性は技術普及の阻害要因とはならないことが分

かった。一方で、実施データを照合する比較対象となる計画・仕様のデジタルデータが存在せず、その準備手間などが阻害要因であった。さらに、点群データを活用するためには施工管理の実務とは異なる特殊な専門性が必要であり、技術普及のためには要素技術を実務の中で取り扱う専門家の配置が必要であること、およびその人材には建築知識と情報技術が求められることを述べた。

第4章「施工記録目的のデジタル活用」では、個体認証技術と3次元スキャン技術を用いた建材トレーサビリティと工事現場の進捗状況のデータ蓄積・活用を題材とし、長い期間かつ多くの関係者が要素技術を扱うための運用面の障壁を確認した。その結果、資材のサイズや物量といった物理的な特性はデジタル活用を阻害しないことが分かった。一方で、蓄積するデータの種類や構造が不明確であること、企業や組織を超えて技術適用のために新たに発生する作業の負担を分担する必要があることなどが阻害要因となっていた。

第5章「分析目的のデジタル活用」では、位置測位技術を用いた建設労働者・建設機械の稼働率分析と、生理センシング技術を用いた建設労働の疲労軽減・暑熱対策に対する効果測定を題材に、データ蓄積のために多種多様な機器を用いる場合の準備と技術完成に関わる障壁を確認した。その結果、多様な人的・物的資源という建築工事の特性は、デジタルデータを一元的に扱う場合には阻害要因とならないことが分かった。一方で、技術適用のために多くのデジタル機器を取り扱うため、それらの準備・管理運用手間が普及の阻害要因であり、他産業の業務用途で用いられる機器や分析手法を建築工事に適用する場合には他産業の専門家との協業体制が必要となる課題も確認した。

第6章「教育目的のデジタル活用」では、生理センシング技術を用いてVR安全教材の効果把握、および動作分析による熟練技能の可視化を題材に、知識や思考など形に表れない情報を扱う場合の障壁を確認した。従来は建設作業が多様に分化している特性が問題となったが、数字として蓄積したデータを用いた分析では阻害要因とならないことが分かった。一方で、重層下請構造によって建設労働者が属する組織が分化している状況が技術適用や普及の阻害要因となっていた。

第7章「要素技術の実務適用における課題整理」では、第3章から第6章で抽出した阻害要因をまとめた。建築工事の特殊性に対しては、15項目の内9項目は障壁にはならなかったが、重層下請構造や費用対効果は従来と同様に阻害要因となることが分かった。さらに特殊性以外の視点で明らかにした課題を技術開発・組織構築・環境変化の3種類に分類し、デジタル活用の普及に資する多様な解決アプローチを示した。

建築工事における今後の問題解決の在り方

本研究では建築工事においてデジタル技術が解決に寄与する問題を明らかにするとともに、技術普及の阻害要因と課題を整理した。

加えて、第1章では建築工事における多様な問題に対し、技術開発による解決アプローチとして情報活用とハード開発その他、技術開発以外の解決アプローチとして企業単位の取組みと国・業界単位の取組み、の4パターンを挙げることで、一つの問題に対してデジタル活用以外の解決アプローチがあることにも言及し、中にはデジタル活用では解決が困難な問題があるこ

とも述べた。さらには第7章では、解決アプローチとしてデジタル活用が適している場合であっても、技術普及を阻害する要因が複数存在することを明らかにし、それを克服するための方策は技術開発以外に組織構築や建築工事を取り巻く環境の変化、それに起因するトップダウンなどを挙げた。

これらの知見が、今後の建設業における問題解決のために果たす役割について考察する。

本研究では、建築工事において解決されていない問題に対して、複数考えられる解決アプローチの中でデジタル活用に着目し、その要素技術の実務適用を阻害する要因と課題解決の方策を述べた。一方で、これら解決方策の中には、デジタル活用の普及を推進するのみならず、建築工事の問題そのものの解決手段にもなり得るものがあると考えた。例えば図8-1に示す通り、デジタル活用を推進するための施策の一つとして、第7章で言及した通り、建築知識と情報技術を併せ持った専門家組織の構築を挙げた。この施策は、第1章で整理した建築工事において解決されていない問題の中で、建設労働者不足や、規制・書類増による実務担当者の疲弊といった項目に対する解決策としても有効である可能性がある。このように、今後の建設業界においては、建築工事において解決したい根本的な問題と、個々の問題解決アプローチを推進するための具体的な施策が、相互に関係する可能性があることを認識し、例えば『DXの推進』や『機械化施工の推進』のように個々の問題解決アプローチのみに着目するのではなく、業界として多角的かつ複合的な視点で問題解決を図っていることが重要であると考えます。

このように業界として解決しようとする根本の問題と具体的施策の関係性を常に把握しようとする試みは、序論において筆者が本研究に取組む動機として述べた、実務担当者が感じている「国・企業のビジョンと現場の温度差」という問題意識に対する回答としても有効であると考え、本論文の総括として、かつ未来の建設業界に必要な理念の一つとして提言したい。

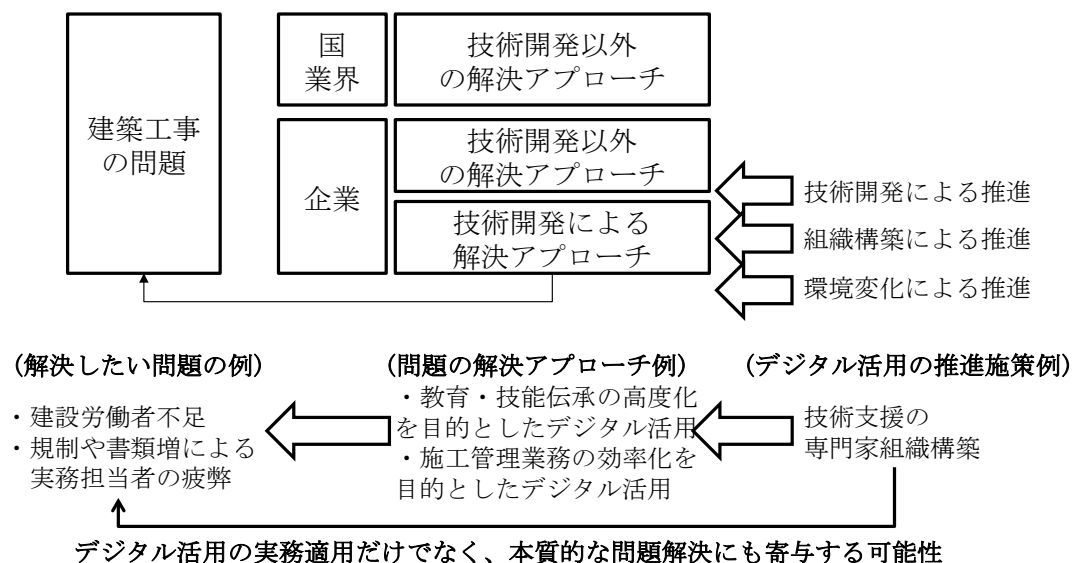


図8-1 本研究が建設業界の問題解決のために果たす役割のイメージ

图版出典

图 8-1 笔者作成

研究業績

第 3 章		
題目	発表媒体 巻 頁	発表者名
部材スキャニングとデータ活用	月刊建築技術 2019 年 12 月号/pp.112-113	染谷俊介
3 次元レーザースキャナを用いた建築物の計測手法に関する研究 その 2：建築工事における点群データの活用用途とデータ処理方法に関する研究	日本建築学会/2020 年度日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集 pp.857-858	染谷俊介,脇坂英佑,石田航星,中村隆寛,妹尾悠貴
Research on a Method to Consider Inspection and Processing for Atypical Wood Members Using 3D Laser Scanning	IAARC/Proceedings of 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction pp.1203-1210	Shunsuke Someya,Yasushi Ikeda,Kensuke Hotta,Seigo Tanaka ,Mizuki Hayashi,Mitsuhiro Jokaku,Taito Takahashi
点群データを活用するための所作	月刊建築技術 2022 年 10 月号/pp.98-99	染谷俊介
建設分野における点群データの業務活用に関する研究 -活用用途に応じたデータ処理方法-	日本建築学会/技術報告集 29巻 / 73 号 / pp.1594-1599	染谷俊介,志手一哉

第 4 章		
題目	発表媒体 巻 頁	発表者名
建築工事における実績収集技術の適用報告	日本建築学会/第 35 回建築生産シンポジウム pp.145-150	染谷俊介,多葉井宏
EQ ハウスの外装パネル工事における設計施工一貫での BIM データ活用	月刊建設 21-06/pp.2-4	染谷俊介
3 次元スキャン技術を活用した建築資材のトレーサビリティ記録に関する研究	日本建築学会/2023 年度日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集 pp.119-120	染谷俊介,池田靖史,王索奥,平野雄士

第5章		
題目	発表媒体 巻 頁	発表者名
無線発信機を活用した工事現場内の高所作業車の位置把握システムに関する研究	日本建築学会/技術報告集 23 巻/54 号/pp.701-705	染谷俊介, 多葉井宏
建設作業に伴う疲労箇所に関する研究	日本建築学会/2014 年度日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集 pp.115-116	染谷俊介, 永田幸平, 福田克幸
夏季建設現場における飲水とファン付き作業服による脱水の低減に関する研究 建設作業での発汗量、脱水量、飲水量、および WBGT・活動量の関係 (共著)	日本建築学会/日本建築学会環境系論文集 第 85 巻/第 771 号/pp.351-360	山崎慶太, 栗原浩平, 染谷俊介, 濱田靖弘, 小林 宏一郎
人工気候室での模擬作業による夏季建設現場の休憩場所の環境に関する研究 その 1:休憩中の温熱環境・飲料が作業員の生理・心理反応におよぼす影響 (共著)	日本建築学会/2022 年度日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集 pp.1109-1110	平野雄士, 山崎慶太, 藤崎幸市郎, 染谷俊介, 栗原浩平, 濱田靖弘, 傳法谷郁乃
人工気候室での模擬作業による夏季建設現場の休憩場所の環境に関する研究 その 2:模擬作業による生理・心理反応への影響についての統計解析 (共著)	日本建築学会/2022 年度日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集 pp.1111-1112	山崎慶太, 平野雄士, 藤崎幸市郎, 染谷俊介, 栗原浩平, 濱田靖弘, 傳法谷郁乃
工事現場における熱中症対策の研究 ー強制飲水の効果測定ー (共著)	日本建築学会/2020 年度日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集 pp.905-906	高橋泰斗, 染谷俊介, 山崎慶太, 栗原浩平, 傳法谷郁乃, 濱田靖弘, 小林宏一郎

第6章		
題目	発表媒体 巻 頁	発表者名
SMART HAND FOR DIGITAL TWIN TIMBER WORK THE INTERACTIVE PROCEDURAL SCANNING BY INDUSTRIAL ARM ROBOT (共著)	CAADRIA/Proceedings of the 27th CAADRIA Conference pp.131-140	Chika Sukegawa, Arastoo Khajehee, Takuma Kawakami, Shunsuke Someya, Yuji Hirano, Masako Shibuya, Koki Ito, Yoshiaki Watanabe, Qiang Wang, Tooru Inaba, Alric Lee, Kensuke Hotta, Mikita Miyaguchi, Yasushi Ikeda
VR 技術を活用した安全教育に関する研究 その 1 心拍数を用いた効果検証手法 (共著)	日本建築学会/2022 年度日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集 pp.214-215	大津一輝, 染谷俊介, 志手一哉, 蟹澤宏剛
VR 技術を活用した安全教育に関する研究 その 2 心拍数を用いた効果検証実験の結果と考察	日本建築学会/2022 年度日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集 pp.215-216	染谷俊介, 大津一輝, 志手一哉, 蟹澤宏剛
Research on the Relationship between Awareness and Heart Rate Changes in the Experience of Safety Education Materials Using VR Technology	IAARC/Proceedings of 40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction pp.333-340	Shunsuke Someya, Kazuya Shide, Hiroaki Kanisawa, Zi Yi Tan, Kazuki Otsu

あとがき

本論文は、私が2019年10月に芝浦工業大学大学院地球環境システム専攻博士課程（後期）に社会人として入学して以来の研究をまとめたものです。また、私が2007年に株式会社竹中工務店に入社し、技術研究所において研究開発職として携わってきたデジタルコンストラクションに関する一連の研究についても、ケーススタディの題材として一部を盛り込んでいます。

建築生産という研究分野には長い歴史があり、偉大な諸先輩方が積み上げてきた実績があります。その中で情報化やデジタル活用などは比較的新しい取り組みと言えますが、時代によって手段やアプローチが異なるだけであり、コンピュータなどがなかった時代から、業界として解決したい課題や目的は変わらないものが多いことが分かりました。例えば、生産性向上や省人化などです。本論文の執筆を通じて既往文献を調査していくと、現在の建設業界で提言されている思想の多くが数十年前の論文で既に提唱されていることに気づかされました。例えばフロントローディングやオブジェクト指向、モジュール指向など、言葉や手段を変えて何度も取組まれていることが分かります。調べるほどに、先人たちの偉大さと自身の未熟さを痛感する日々でした。しかし見方を変えると、これらの課題は数十年来、解決されていないとも言えます。情報技術をはじめとして、仕事のやり方を根本から変えるような便利なツールが次々に出現する一方で、建設工事の運営に関わる法規制や物価上昇、人手不足など、業界を取り巻く状況は厳しさを増すばかりです。今後も、その時代ごとの社会環境と先端技術に応じて、建築生産の研究は脈々と続いていくのでしょう。本論文は、現時点で考えられる最新の技術を題材に取り上げ、それらが実務へ広く普及しない要因と解決方策を学術的に整理することで、過去から続く建築生産研究のバトンを未来へ繋ぐ役割の一端を担えれば、との思いで執筆いたしました。また、研究の背景として述べた通り、この研究が机上の検討に留まらず、建築工事の最前線で働く実務担当者にとってのメリットに繋がることを願い、今後も在野の精神でこの分野の研究活動を続けていく所存です。

このように広く深い分野の研究を進めるには、多くの方々のご協力なしには果たし得ませんでした。本論文を執筆するにあたって、芝浦工業大学の志手一哉教授には博士課程（後期）入学以来、建築生産研究の全般に関する技術的なご助言や、論文執筆を通じたテクニカルライティング、研究に対する心構えなど、研究者としてのスキルを基礎からご指導いただきました。博士学位論文審査委員会では主担当指導教員（主査）を引き受けてくださり、審査委員の選定から委員会運営に至るまで、多大なお力添えをいただきました。心から感謝申し上げます。

芝浦工業大学の蟹澤宏剛教授には審査委員（副主査）を引き受けていただき、ゼネコンや協力会社を取り巻く社会状況や生産体制などに関わる技術的なご助言をいただきました。VR安全教材を使った研究では、題材とした教材のご手配や、実験対象とした建築工事現場や協力会社との折衝など、多大なお力添えをいただきました。同大の岡崎瑠美准教授には審査委員として、建築史や文化遺産のデジタルアーカイブに関するご知見から、主に3次元スキャン技術に関するご助言をいただきました。同大の市川学准教授には審査委員として、社会システム科学のご知見から、デジタル技術の研究手法や専門的な人材教育に関するご助言をいただきました。

東京大学の池田靖史教授には学外審査委員として、建築情報学のご知見から、建設業界においてデジタルデータを取扱うことに対する意義や問題意識についてご助言をいただきました。また、私が所属する竹中工務店技術研究所と慶応義塾大学 SFC 池田研究室（当時）との共同研究を通じて、建築生産プロセスを通じた建材トレーサビリティ記録やロボットアーム制御に関する技術的なご指導をいただくとともに、本論文の業績論文の一部でも共同執筆者としてお力添えをいただきました。広島工業大学の杉田洋教授には、学外審査委員として、建築生産分野のご知見から、本論文の方向性や問題設定、結論のまとめ方など、骨子に関わる重要なご助言をいただきました。このように、建築生産に留まらない幅広い分野の有識者である皆様からご指導をいただけたことは、貴重な機会であったと考えます。心より御礼申し上げます。

また、社会人の立場で本論文を執筆することができたのは、所属する竹中工務店の諸先輩と同僚の皆様のご理解とご協力によるものです。中でも、入学時に推薦状を執筆していただいた菅田昌宏/技術本部長、技術研究所においてライン長・上長として業務と研究の両立にご配慮いただいた高橋幹雄/技術研究所長、櫛部淳道/未来・先端研究部長、後藤礼彦/未来・先端研究部長席、多葉井宏/建設革新グループ長、に感謝申し上げます。

点群データ活用の研究における学内実験においては、竹中工務店の平野君、芝浦工業大学の朱君、藤井君、一宮君に被験者としてご協力いただきました。VR 安全教材の実験においては、株式会社積木製作から教材をご貸与いただきました。鹿島建設株式会社の施工管理者の皆様、大崎建設株式会社のご関係者皆様、芝浦工業大学建築学部志手研究室および蟹澤研究室の学生皆様には被験者としてご協力いただきました。特に、志手研究室（当時）の天津君、蟹澤研究室（当時）の古賀君には、実験運営にも主体的に携わっていただきました。暑熱対策研究では室蘭工業大学栗原准教授、岩手大学小林教授、神奈川大学傳法谷助教（当時）、北海道大学濱田教授（当時）、竹中工務店山崎氏（当時）、藤崎氏、高橋氏、その他各大学の学生皆様に、生理センシング技術や統計分析手法に関するご指導と実験運営のご協力をいただきました。宮大工調査では、慶応義塾大学 SFC 池田研究室（当時）の堀田助教、伊藤君、助川さん、渋谷さん、アラストゥー君にお力添えをいただきました。御礼申し上げます。

私が早稲田大学および大学院在学中に指導教官であった早稲田大学理工学術院の嘉納成男名誉教授には、博士課程（後期）入学前から、博士学位取得に向けて事あるごとに温かい叱咤激励をいただきました。特に、過去にいただいたお言葉の中で「研究で扱う技術は先端的なものが多く、研究成否がその技術自体の評価や普及に与える影響は大きく、研究者は責任を持って扱わなければならない」というものがあり、本論文の執筆にあたっても私の研究姿勢として強く意識しました。心から御礼申し上げます。

最後に、論文執筆活動を温かく支えてくれた家族に感謝します。在学中に第一子である息子・泰成が誕生しました。また、同じく在学中に、実父、義父、および結婚以来 14 年間連れ添った愛犬が他界するなど、家庭状況が大きく変化するタイミングでした。妻・光恵とは共働きで、お互いに育児と仕事の両立で苦労する中、学業までも重複した私に対して多大な配慮と支援をいただきました。このサポートなしに学業を継続することはできませんでした。

2024 年 3 月 染谷 俊介

2023 年度 芝浦工業大学 博士学位論文

建築工事におけるデジタル活用に関する研究
要素技術の実務適用を妨げる要因に対するケーススタディと課題整理

令和 6 年（2024 年）3 月 8 日

染谷 俊介
