

【産業競争力懇談会 2014年度 研究会 最終報告】

【飛躍的な生産性の向上を実現する構工法の構築】

2015年3月5日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エクゼクティブサマリ】

1. 本研究会の基本的な考え方

我が国の建築現場における労働生産性は国内他産業の半分程度であり、熟練工や若年労働者不足も深刻な状況であることから、建設業の近代化、すなわち労働集約型産業からの早期脱却とその結果として魅力的な産業への移行が望まれている。

そのためには、現場における労働生産性の向上が不可欠であり、生産性を飛躍的に向上させる構工法の構築が喫緊の課題である。建物は接合部のかたまりであり、現場では、工場生産された多種多様な部材同士の膨大な数の接合作業に加えて、位置決めやシーリングなど、接合の事前・事後作業も必要であることから、接合作業に要する工数は建築工事全体の約半数を占めると予想した。

本研究会では、接合作業の合理化・省力化を実現する構工法を確立することに着眼、接合作業に係る工数を1/5～1/10に削減することで、建設業における労働生産性を国内他産業並に高めることを目標として、合理的な接手法並びにロボット・自動化技術に関する、各種研究開発の「方向性」と「課題」を示すべく検討を行なった。

2. 検討の視点と範囲

以下の3つの視点から建築・大型施設分野における接合技術の革新について検討する。

- ①構工法技術：現場生産性を重視した接合位置、免震・制震技術による接合部に加わる力と変形の軽減、構造体・仕上げ・設備の一体施工などの構工法技術による合理的な「接合」を実現。
- ②素材・接合技術：工業製品など建築分野以外の接手法、材料分野の成果、特に新材料や接着技術の成果を活用。過去に開発されながら使われなかった技術の再評価も行う。
- ③ロボット・自動化：ロボットによる搬送・取付け、三次元位置情報を用いた自動位置決め、Building Information Modeling（以降全てBIM）との相互連携を図り、ロボットを中心とした自動化施工を目指す。

対象とする接合作業は、1. 構造体、2. 仕上げ材、3. 設備のうち、接合に関する合理化要求が高い部位を選定する。従来の接合作業での工数分析を行い、定量的な評価・検証も行う。また、一般建築以上に接合技術に負うところが大きい、福島第一原子力発電所の廃炉作業や洋上施工に代表される、極限環境下における建築作業も対象とする。

3. 産業競争力強化のための提言および施策

研究会参加メンバーによるオープンコラボレーションにより、建築の接合合理化に関する多角的な検討を行なった。検討は工数分析に始まり、接合法の合理化に関する検討に加えて、部材の搬送や施工手順など、現場全体の生産性にまで及んでいる。

（1）接合作業に係る工数分析

構造体、仕上げ、設備工事に係る各種接合作業について、プレキャスト鉄筋コンクリート造（以降PCa造）の一般的な集合住宅の施工データに基づく工数分析を実施、仮接合や後施工の境界処理を含む「接合作業」の割合は、予想通り建物全体の55%を占めることが明らかになった。

（2）素材・接合作業の点検と評価

建築分野以外も含め、既存の接合技術について点検・評価を実施した。各接合技術と被接合材の関係および要求性能毎の保有性能を整理しつつ、それぞれの接合技術について建築分野への適

用性を評価した。接着剤の構造体への適用や、既存技術と新素材のハイブリッド化についても併せて検討し、特に接着剤については、構造系技術者と化学系技術者の活発な議論を経て、接合部位毎の要求性能を明らかにした。

(3) 各種接合に関する研究開発の方向性および課題

(a) 接合・素材技術

現在溶接が多用されているが、天候の影響を含む現場管理の難しさや熟練工不足などの問題があることから、高強度が要求される構造体を除き、機械式接合（嵌合・ラッチ）や接着剤など、溶接に替わる接合手法を積極的に検討した。構造体では柱と柱の嵌合による接合、仕上げではアルミサッシの接着剤による接合、設備では配管の施工誤差を吸収する接着剤による接合に関する研究開発を提言する。また、新たな構工法を実現するために必要な高強度・高耐久性接着剤や、既存材料と炭素繊維強化プラスチック（CFRP）などの新素材によるハイブリッド材料についても検討しており、いずれも、材料開発とその評価手法確立を提言する。

(b) ロボット・自動化技術

建築現場および部材を供給する工場までを大きなシステムと捉え、新しい構工法とセットでロボット・自動化技術を検討した。接合課題からの要求を踏まえ、梁と梁のレーザ溶接ロボット、アルミサッシ取付ロボット、ダクト配管ユニットの位置決め・取付ロボット、接合作業を支援する搬送・位置決めロボットの開発を提言する。併せて、これらのロボット群が、自らの動作や位置決め・取付作業に必要な設計情報を得るための基盤として、BIM・三次元位置情報を活用することの検討を踏まえ、BIM・三次元位置情報とロボット・自動化設備の双方向連携基盤の開発を提言する。

(c) 実用化に向けた規格・標準化および制度上の支援など

新技術の速やかな普及に向けて、接合に係る各種部材・ロボット・BIM データ構造などの規格・標準化や、BIM・ロボットの活用を促すために必要な新制度の策定など、新たな接合手法を用いるために必要な制度上の支援を提言する。

(4) パイロットプロジェクト構想および実用化に向けてのロードマップ

上記提言によって開発された各要素技術について、その実証並びに社会実装する前の検証を行うため、さらに、各成果を組み合わせるために必要となるシステム化（System of Systems）の実装と、工数削減効果を検証するためのパイロットプロジェクトを提言する。パイロットプロジェクトは2期を想定しており、前期は実物大モックアップで2020年の完成を目標とする。後期は恒久建築を想定し、各種技術の実証に併せて、新技術の取扱いに必要な教育についても検討する。

(5) 官民の役割分担

(a) 産業界の役割

提言した研究開発の方向性およびロードマップに基づいた要素技術開発を推進する。また、開発諸技術のシステム化を推進するためのコンソーシアムを設立・運営し、パイロットプロジェクトを推進するとともに、市場創出に向けた要素技術の積極的な普及・展開を図る。

(b) 関連府省への要請

提言した研究開発に係る研究資金の提供並びにパイロットプロジェクト実現に向けた府省連携プロジェクトの立ち上げを要請する。また、要素技術の規格・標準化および適用に向けた制度上の支援などについても併せて要請する。

4. 今後の課題と展望

本研究会での検討において、接合作業の飛躍的な生産性向上には、BIM や三次元位置情報と相互連携したロボット・自動化技術が不可欠であることが明らかになった。その連携方法や、自動位置決めや自動搬送を含む各種ロボット・自動化技術の活用、施工状況に応じた部材生産方法など、建築生産システム全体に関する検討が課題として残されている。これらの検討に加えて、合理的な接合技術を含む構工法技術に関する検討も行い、相互に深化させていくため、2015 年度も引き続き研究会の継続を検討したい。

【目 次】

【はじめに】	1
【研究会メンバー】	2
【本 文】	3
1. 本研究会の背景	3
2. 本研究会における検討課題	4
2.1 検討の対象と視点	4
2.2 接合作業の占めるウェイト	8
2.2.1 現状の接合作業の工数算定	8
2.2.2 構造体における接合作業の分析	9
2.2.3 仕上げ工事における接合作業の分析	14
2.2.4 設備工事における接合作業の分析	15
2.2.5 工事全体に占める接合作業比率の推定	16
3. 素材・接合技術の点検と評価	18
3.1 接合技術と被接合材料	18
3.2 接合技術の特徴、建築分野への適用性と課題の分析	18
3.3 評価のまとめ	24
4. 接合部位ごとの検討	25
4.1 構造体における接合	25
4.1.1 現状と課題	25
4.1.2 課題解決の方向性	27
4.2 仕上げにおける接合	34
4.2.1 現状と課題	34
4.2.2 課題解決の方向性	35
4.3 設備における接合	38
4.3.1 現状と課題	38
4.3.2 課題解決の方向性	42
4.4 極限作業下における接合	47
4.4.1 福島廃炉	47
4.4.1.1 現状と課題	47
4.4.1.2 課題解決の方向性	50

4.4.2	洋上施工	52
4.4.2.1	現状と課題	52
4.4.2.2	課題解決の方向性	54
5.	接合に関わる共通技術	59
5.1	ロボット・自動化技術	59
5.1.1	既存建築用ロボットおよび今後の発展性	60
5.1.1.1	建築用ロボット開発の歴史にみる課題	60
5.1.1.2	生き残るロボットの条件	62
5.1.1.3	ロボット技術の最近の動向と建築ロボット実現の可能性	62
5.1.2	新しい構工法に対応した共通ロボット・自動化技術	63
5.1.2.1	搬送ロボット	64
5.1.2.2	位置決めロボット	72
5.1.2.3	システム化技術（BIMとの連携）	73
5.2	位置決め技術	77
5.2.1	BIMの機能拡張	77
5.2.2	三次元位置情報の活用	78
6.	本研究会からの提言	82
6.1	各種接合に関する研究開発の方向性および課題	82
6.1.1	接合・素材技術	82
6.1.2	ロボット・自動化技術	84
6.1.3	BIM・三次元位置情報とロボット・自動化設備の双方向連携基盤	86
6.1.4	実用化に向けた規格・標準化および制度上の支援など	87
6.2	パイロットプロジェクト構想	88
6.3	官民の役割分担	90
6.4	実用化に向けてのロードマップ	90
	【参考資料】	92

【はじめに】

現在、我が国の建設市場は2020年の東京オリンピック・パラリンピックに向けて首都圏を中心に活況を呈していますが、一方で労働者不足や建設資材の価格高騰のため、工期の遅れや建設コストの急激な上昇等に見舞われています。また、2020年以降は国内新築市場の縮小や、少子高齢化による国内生産人口の減少に伴い、建設関連労働者の確保が困難になる恐れがあります。このため、建設業の労働生産性向上を図りつつ、女性や若者の参画拡大も期待できるような魅力ある職場環境を実現させることがビジョンとして必要な時代を迎えたと考えます。労働生産性については日本の製造業が機械化投資などによりバブル崩壊後も生産性を向上させ続けてきた反面、建設業の生産性は1990年代から約20年間下落傾向にあり、その後も低水準で推移しております。その背景としては、デフレ経済下での工事単価下落に加え、建設業は製造業に比し、単品受注生産のため現場作業の省力化や機械化を効率的に実現できなかったことがあげられます。

以上のような建設産業の状況を踏まえ、COCNの2014年度研究会活動のひとつとして「接合作業の合理化による生産性の向上」を取り上げました。建物は多種多様な部材や材料を組み立てて造られるため、これらの接合の革新的な合理化が労働生産性向上のみならず、工程の短縮、建設コストの低減、安全性の向上に繋がると予測されるためです。さらに、本研究会では建設関連業界の他に機械、造船、化学を始めとする多様な業界のメンバーが参加し、素材、自動化・機械化など各社が得意とする技術・知見の組み合わせで課題解決を目指しています。そこでは、新たな接合技術に対する新たなマーケットへのビジネスチャンスの拡大が期待されます。

本研究会では、建設工事における接合技術の革新について、①構造体の構築、②仕上げ材の装着、③設備の設置という3つの重要な工程に分けて主にニーズからのアプローチを行うこととし、課題解決に向けて、Ⅰ. 構工法技術、Ⅱ. 接合・素材技術、Ⅲ. ロボット・自動化技術の3つの視点から検討を行いました。これらに加えて、極限環境下での作業合理化についても検討を行い、合計7つの分野で議論を深めたと承知しております。

本報告書では最終目標とする「飛躍的な生産性の向上を実現する構工法」を具現化するために、素材の開発に加えて、BIM・三次元位置情報と総合連携した自動化・ロボット化技術が不可欠であることが明らかにされました。建築分野での飛躍的な生産性の向上に向け、合理的な接合を実現するための研究開発の方向性と課題を提案いたします。

産業競争力懇談会
会長（代表幹事）
西田 厚聰

【研究会メンバー】

リーダー	野城 智也	東京大学 副学長・生産技術研究所 教授
サブリーダー	鈴木 紀雄	鹿島建設(株) 技術研究所 副所長
アドバイザー	粟飯原 周二	東京大学 工学系研究科 教授
	川口 健一	東京大学 生産技術研究所 教授
	浅間 一	東京大学 工学系研究科 教授
COCON実行委員	浦嶋 将年	鹿島建設(株) 専務執行役員 営業本部 副本部長
COCON企画小委員	金枝上 敦史	三菱電機(株) 産業政策渉外室 技術渉外 担当部長
工数分析 世話役		鹿島建設(株) 吉田 知洋
構造体検討会 世話役		鹿島建設(株) 丹羽 直幹
仕上げ検討会 世話役		YKKAP(株) 早川 貴雄
設備検討会 世話役		新菱冷熱工業(株) 岸本 洋喜
極限作業(洋上施工)検討会 世話役		清水建設(株) 石井 大吾
極限作業(福島廃炉)検討会 世話役		鹿島建設(株) 松尾 一平
素材・接合技術検討会 世話役		新日鐵住金(株) 菅野 良一
ロボット・自動化技術検討会 世話役		三菱重工業(株) 上野 大司
メンバー：		
(株) I H I	山西 晃郎、山田 武俊	
鹿島建設(株)	松嶋 潤、西川 博之、塚本 正彰、松尾 一平、櫻井 克己、古川 寿彦 裨圃 成人、水谷 亮、澤本 佳和、和田 環、吉田 知洋、高稲 宜和	
清水建設(株)	柴 慶治、石井 大吾	
新日鐵住金(株)	菅野 良一、半谷 公司、巽 雄二郎	
新菱冷熱工業(株)	岸本 洋喜	
スリーエムジャパン(株)	小嶋 隆之、田中 勝、前田 登士郎、村松 昭人、渡邊 法久、小林 博之	
積水化学工業(株)	和田 弘志、大道 康之、岡部 優志	
高砂熱学工業(株)	近藤 員宗 (～第4回研究会まで)	
東芝エレベータ(株)	高草木 康史	
日立化成(株)	河合 宏政、松宮久雄	
日立化成テクノサービス(株)	松沼 宏佳	
日立機材(株)	伊藤 倫夫、田中 秀宣	
三菱重工業(株)	上野 大司、大西 献、塩谷 成敏、吉岡 篤	
三菱重工マトロシステム(株)	武石 雅之	
三菱レイヨン(株)	景山 義隆、金子 学	
YKKAP(株)	植村 彰、小林 幸男、梅津 満、伊藤 卓、高橋 謙一、内藤 哲也、早川 貴雄	
事務局：鹿島建設(株)	丹羽 直幹、北垣 太郎、中島 賢市、山崎 洋司子	

【本 文】

1. 本研究会の背景

建築マーケットを俯瞰すると、国内建築マーケットは22兆円をボトムに、2013年度は26兆円となる見込みである。また、リニューアル分野の市場規模は拡大の一途をたどっている。さらに、アジアを中心とする新興国でも公共工事だけでなく、日本の製造業をはじめとする民間建築工事が盛んであり、拡大が見込まれる。

その反面、建設業の労働生産性は、製造業における労働生産性が年々増加していることに反して1990年以降低下傾向にあり、近年では製造業の半以下になっている。この要因として、バブル経済崩壊後に始まった過当競争による建築受注金額の低下と、建築現場における作業省力化・機械化の遅れに伴い、建設業が労働集約型産業のまま停滞していることが考えられる。さらに、建設業に従事する就業者は他産業に比して高齢化が進んでおり、また、熟練工不足が建築生産の制約となっていることから、労働集約型産業からの早期脱却が望まれる。

本研究会では、現場における作業省力化に向けて、建物がさまざまな部材を現場で組み立てることで建てられること、即ち「建物は接合部のかたまりである」ことに着目し、接合作業と接合に係るさまざまな現場作業を、新たな構工法、新素材、ロボット・自動化施工などを用いて簡略化することで、建設業の労働集約型産業からの脱却を目指す。接合作業の合理化・省力化を実現する構工法を確立することに着眼し、接合作業に係る工数を1/5～1/10に削減することで、建設業における労働生産性を国内他産業並に高めることを目標とする。

一方、リニューアル工事においては、利用者負担軽減の観点により短工期が望まれることから、合理的な接合技術が求められている。さらには、福島第一原子力発電所の廃炉作業に代表される極限環境下での建設作業においては、現地での作業時間をいかに短縮するかが事業の成否を握っており、ここでも接合作業の合理化は大きな課題である。

また、接合作業にロボット・自動化施工を活用することで、現場における作業の高度化・高付加価値化が起こり、賃金レベル向上が見込まれる。労働環境が改善されることも相まって、若年労働者や女性を含む就業者の安定的な確保への一助となることも期待できる。

本研究会では、以上の観点から、「接合作業」の効率を飛躍的に向上させる構工法の構築を目指した研究開発の「方向性」と「課題」を提言する。

2. 本研究会における検討課題

2. 1 検討の対象と視点

本研究会では、建築物を構成する「1. 構造体」・「2. 仕上げ」・「3. 設備」の中で合理化要求の高い「接合作業」を選定して検討対象とし、「接合作業」を、図2. 1. 1に示すように部材同士を固定する「本接合」のみならず、その前後の工事も含めて扱い、「本接合」と「建方」に分類される「仮接合」（位置合わせや仮ボルトなど）、および「後工事」に分類される「境界処理」（グラウトやシールなど）を合わせたものとして定義した。

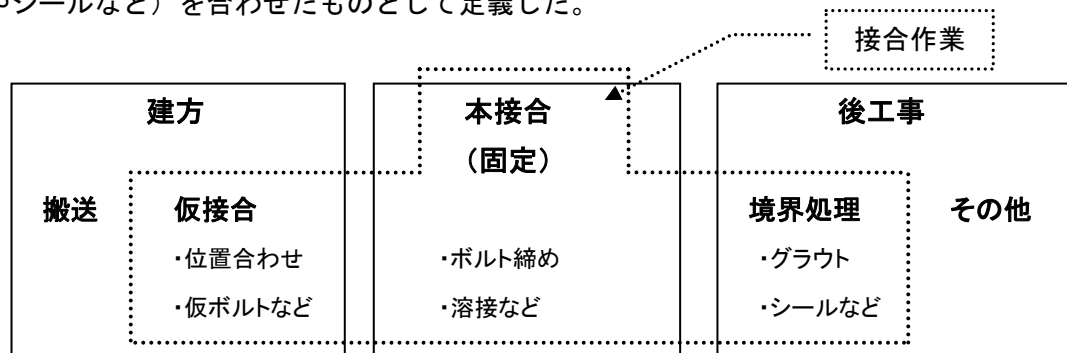


図2. 1. 1 接合作業の定義

本研究会では、現場の「接合作業」の軽減を目的とすることから、

I. 「本接合」の簡易化・省力化

II. 「仮接合と境界処理」の負担軽減

を目指し、それぞれ以下の3つの視点からのアプローチによる検討を行った。

①構工法技術によるアプローチ：現場での生産性を重視した接合位置の変更、免震・制震技術による接合部に加わる力と変形の軽減、構造体・仕上げ・設備の一体施工などの構工法技術により、合理的で簡易な「接合」を実現し、素材・接合技術、ロボット・自動化施工の導入を促進する。

②素材・接合技術によるアプローチ：工業製品など建築分野以外の接合手法、材料分野の成果、特に新材料や接着技術の成果を活用する。ここでは過去に開発されながら使われなかった技術の再評価も行う。構工法技術によるアプローチは、これまでボルトなどによる機械式接合が前提とされた部位における接着技術活用の可能性を広げる。

③ロボット・自動化によるアプローチ：接合の簡略化と新接合手法を前提に、ロボットによる搬送・取付け、準天頂衛星を用いた位置情報による自動位置決め、BIM や AR (Augmented Reality) などとの融合を視野に入れた高度な機械・情報化施工技術を構築する。特にロボットによる自動化施工に力点を置く。

これまでの建築生産分野に関する研究では、これらの検討課題のうち、ある特定分野に着目したものが殆どであったが、本研究会では、飛躍的な建築生産性を生み出すため、これらの融合を目指した。

本研究会では上記を解決するため、以下の4つのステップで検討を行った。

ステップⅠ．経験・知見に基づく接合に関する課題の抽出

過去の経験や知見に照らし、建築設計、施工現場などでの接合の生産性向上に関する問題点、課題を集約する。接合対象として次の代表的な8ケースを想定して検討を開始した。

- 1-① 構造体（鉄筋コンクリート造（以降 RC 造））における部材間の接合
- 1-② 構造体（鉄骨造（以降 S 造））における部材間の接合
- 1-③ 構造体（RC 造部材と S 造部材）の接合
- 2-① 金属系外装（アルミサッシなど）と RC 造躯体の接合
- 3-① 設備キャリア（配水管・ダクト）と RC 造躯体の接合
- 3-② 昇降機と S 造躯体の接合
- 3-③ 設備キャリア（配水管・ダクト）と設備端末（給水器・空調機）の接合
- 3-④ 設備キャリア（配水管・ダクト）同士の接合

ステップⅡ．施工事例の分析による工数の検証

モデルとなる建築物の実際の施工事例から、接合に要する負荷（工数）を分析し、ステップⅠで想定した接合対象が、建築生産性の改善に資する接合部位であることを検証した。

①工程表および施工資料などから対象となる接合関連作業の負荷（所要時間、マンパワーおよび作業環境）を洗い出す。

②接合関連作業のブレイクスルーによって実現する省力化・短工期化・省資源化を推定する。

ステップⅠで抽出した接合対象およびステップⅡの実際の事例から、改善効果が大きいと想定される接合作業を、本研究会の検討対象に設定する。

ステップⅢ．接合技術のシーズ調査および接合手法の検討

建築の領域にとどまらず、①プラントエンジニアリング・造船・機械・自動車などの各産業分野で適用されている技術の活用、②新接合方法の採用、③接着剤などの新素材適用、④ロボット・自動化技術の活用などの観点から、接合に関するシーズ技術を調査・探索し、生産性向上が高いと見込まれるシーズ技術や接合手法について実現可能性・応用展開力を検討した。

実現可能性や応用展開力の検討に当たって、下記の条件を勘案した。

- ①力学上の条件：接合部に加わる力・変形など
- ②その他の条件：接合部の精度・大きさ・重さ、接合に要する時間、耐火性、耐久性など

ステップⅣ. 新たな接合手法のコンセプトと開発課題の提示

合理化効果が高い「新たな接合手法」について、以下の項目で接合対象ごとにコンセプトを整理する。

- ①接合方法
- ②接合境界処理方法
- ③部材搬送方法
- ④取り付け方法

次に、コンセプト実現のための技術開発課題を検討し、提案する。併せて、開発成果の現場適用に必要な制度の見直しや、新たな接合技術を支える人材教育についても提案に含める。

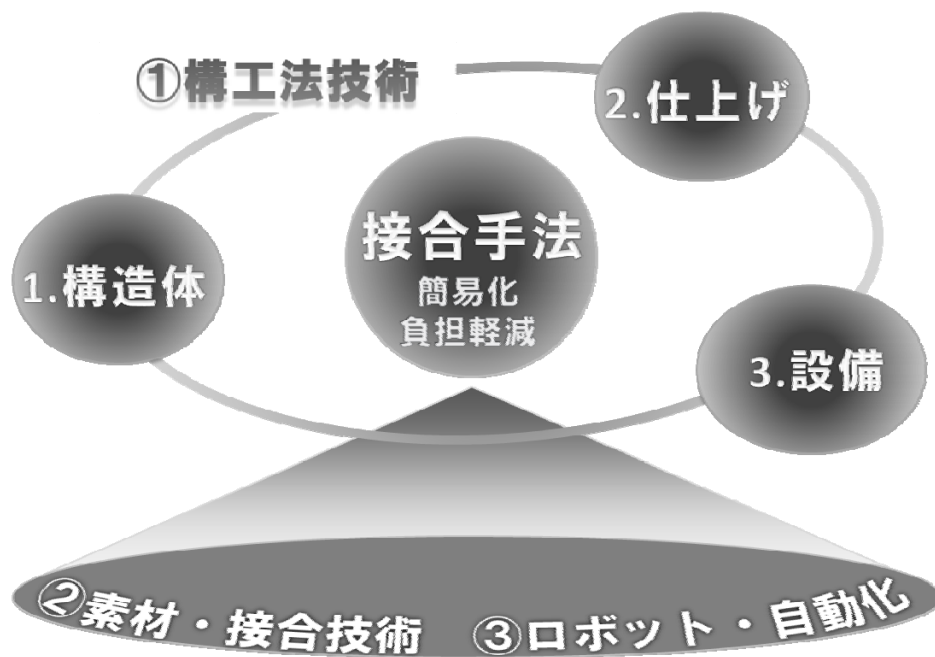


図2. 1. 2 本研究会の検討の視点（要素技術）と検討対象

本研究会では、図2. 1. 2に示す課題と要素技術を設定して検討を進めてきた。

検討対象は、1. 構造体、2. 仕上げ、3. 設備を設定し、要素技術として②素材・接合技術、③ロボット・自動化を設定した。要素技術を活用して、建築現場の「接合作業」を軽減する「接合手法」を検討する。また、構造体・仕上げ・設備を総合的に合理化し、②素材・接合技術、③ロボット・自動化を促進するために①構工法技術を考案する。BIMについて、施工誤差を取り込んだ位置決め・プレ加工の精度向上による接合部の合理化、接合作業の効率化を支援する基盤技術として活用する。

建築現場（適用対象・マーケット）として、新築、リニューアル、および極限作業（福島第一原子力発電所廃炉や洋上風力など）を想定する。

検討対象、要素技術、および極限作業に対応した検討チームを設置して検討を進めた。

最終的には、飛躍的な生産性向上によるイノベーションを実現するためのプロジェクト（成果の実効性を高める社会実装のための実証研究、要素技術の研究開発）を構想する。また、要素技術の開発時期を含むロードマップを作成する。社会実装のための実証研究には下記の効果を想定している。

- ① 実用化の初期段階におけるコスト高やリスクを許容することができる。
- ② 各技術の効果に関するデータ収集とその公表が成果の展開を早める。
- ③ 接合は産業界における共通技術領域であることから、多くの産業が保有する技術の活用機会を創出することができる（図2. 1. 3）。

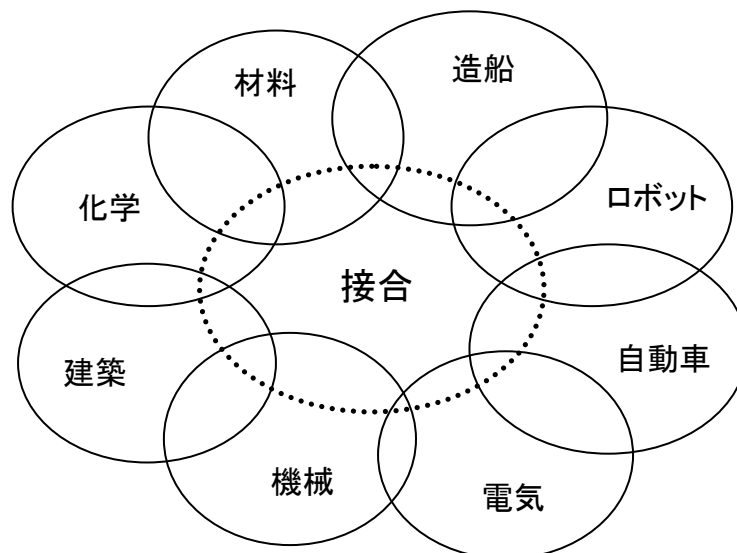


図2. 1. 3 接合に関わる産業分野の例

2. 2 接合作業の占めるウェイト

2. 2. 1 現状の接合作業の工数算定

現状の建築物の施工においては、図 2. 2. 1. 1 に示すように鉄筋コンクリート造（以降 RC 造）、鉄骨造（以降 S 造）とも延べ面積 10 m²あたりの投入人工（面積原単位）が約 20 人日と高く、労働集約型の生産方法となっている。

この投入人工における接合作業が占める比率を求めることで、その工数を算定し接合関連作業の負荷を評価することができる。図 2. 2. 1. 2 に後述するプレキャスト（以降 PCa）工法における接合関連作業の工数算定の例を示す。図中の工数は、2002 年-2011 年の 10 年間に全国で約 700 棟建てられている 21 階以上の高層集合住宅の一例として、延べ床面積約 84,000 m²の建物を対象に算定した結果を示す。

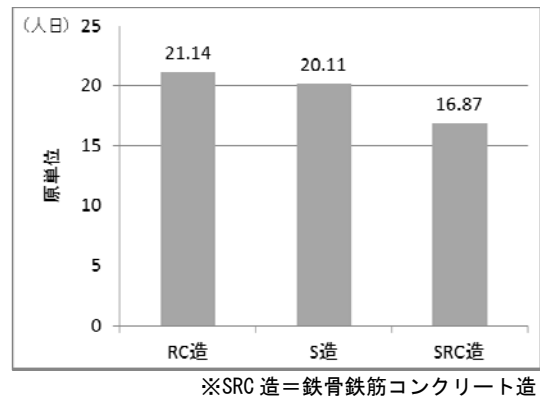


図 2. 2. 1. 1

構造別の就業者の面積原単位

出典：国土交通省 建設資材・労働力需要実態調査【建築部門】（平成 23 年度原単位）

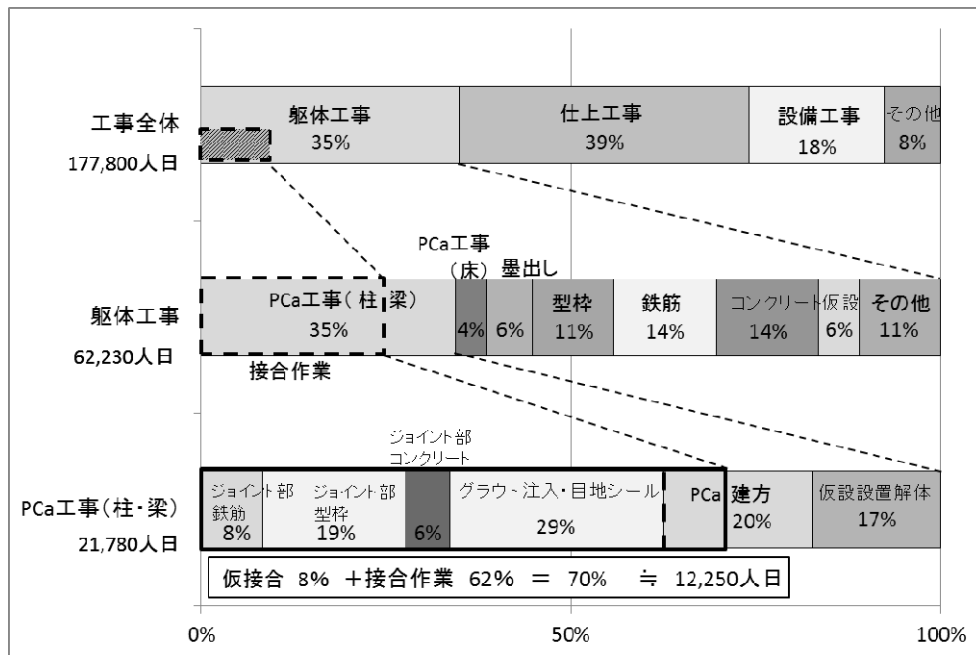


図 2. 2. 1. 2 RC 造構造体の接合作業の工数

接合対象となる PCa 部材は、躯体工事に分類でき、その工数の比率は過去の施工事例では全体の 35%に相当する。この躯体工事中該当部位に関する作業の工数は、同様に躯体工事全体の 35%に当り、接合作業はその約 70%であった。その工数は 12,250 人日と非常に多く、新たな接合方法による工数低減の効果は高いと言える。

一方で、当該接合作業は工事全体の工数から見ると約 7%であり、飛躍的な生産性向上を実現する上では、各工事を構成する工程ごとに接合作業合理化による工数低減を積み上げていくこと

が不可欠である。今回の分析では、図2. 2. 1. 1の範囲に相当する直接の接合作業を評価したが、接合作業の効率はその前後の工事（搬送や後工程）にも影響を与え、たとえば、接合作業の遅延は、手待ちや工程の組み替えなどをまねく。

そのため、接合作業の効率化は工事の進捗を確実なものとするためにも重要である。

以下では、検討対象として抽出された躯体工事、仕上げ工事、設備工事における代表的な接合部位を対象に、現状での接合作業が占める工数の比率を算定した。今後得られた比率を元に対象部位における接合作業の合理化の効果を評価し、検討対象の設定へと繋げていく。

2. 2. 2 構造体における接合作業の分析

(1) 対象と概要

構造体の接合方法の検討対象となっているRC造(PCa工法)、S造の各構造形式における柱梁から構成される構造体フレームの構築において、接合作業が生産性に与える影響を把握するため、実際の施工現場における工数の観点から分析を実施した。対象とした構造体フレーム構築に関わる工程は、PCa工法の施工事例では、躯体工事全体の工数の35%と比較的高い割合を占めて、また工期上もクリティカルとなる工事であるため、躯体工事の生産性向上に与える影響が大きいといえる。S造においても、躯体工事工程上のクリティカルとなる工程であり、躯体工事期間の短縮を図る上で当該工程の生産性向上が大きく寄与するといえる。分析対象外の部位においても、接合作業が含まれており、その合理化については今後の課題である。これら各部位における接合作業の合理化を積み重ねることで、飛躍的な生産性向上の実現が期待できる。

分析は、柱・梁それぞれの部材1ピースの取付（建方）作業と、構造体フレームの構築に関する一連の作業を対象とした（作業の内容は、本章の図2. 2. 2. 2および図2. 2. 2. 6参照）。なお、建方作業の分析においては、建方作業はクレーンを用いた作業のため、そのサイクルタイムの短縮が生産性に与える影響が大きいと考え、所要時間を用いて分析した。

(2) RC造(PCa工法)における接合作業

a. 建方作業の分析

分析の対象とした施工事例を図2. 2. 2. 1に示す。柱を1層ごとに、梁を1スパンごとに分割した部材から構成し、柱と梁の接合部分を現場打ちコンクリートにて一体化する工法である。建方作業は、80tクローラクレーン1台により実施した。本事例における柱・梁部材の建方作業の手順は図2. 2. 2. 2に示す通りである。図中、柱部材では、「位置合せ」「サポートセット」「建入調整」、梁部材は「位置合せ」が建方作業における「仮接合」作業と捉えることができる。

建物概要	階数	地上8階、塔屋1階
	建築面積	651.31m ²
	建物高さ	24.55m
工法概要	<p>床: H-7PCa (FR板) 梁: H-7PCa 柱: PCa</p>	

図2. 2. 2. 1 事例概要

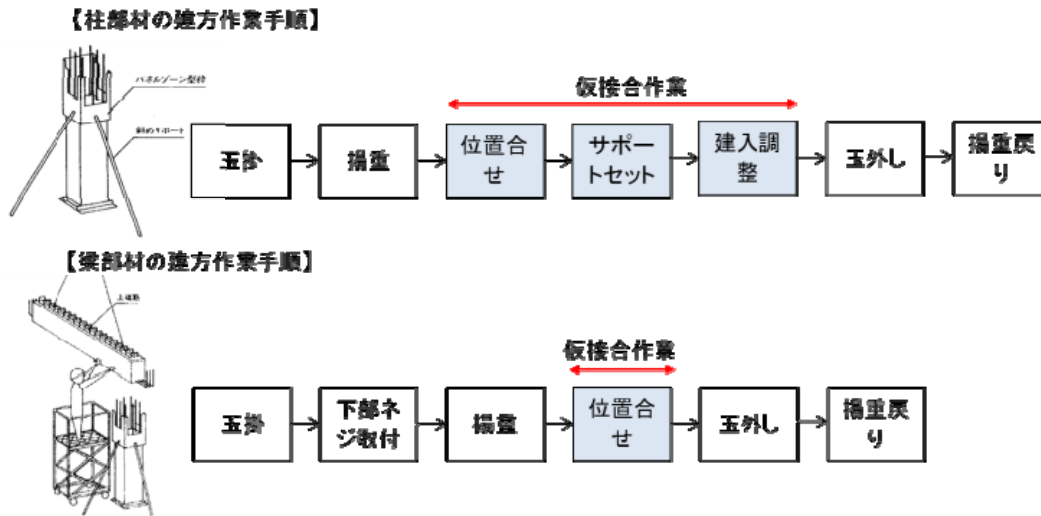


図 2. 2. 2. 2 作業手順

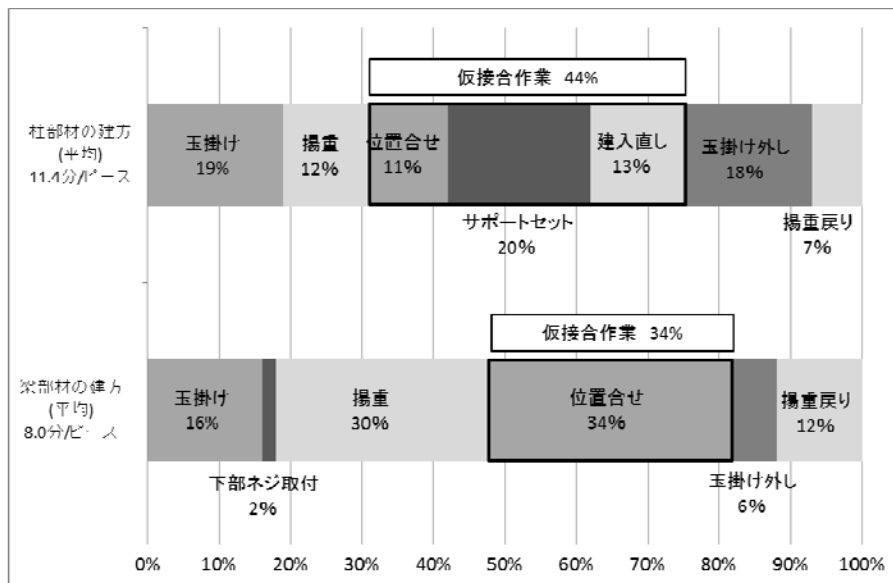


図 2. 2. 2. 3 建方作業の所要時間の構成比 (RC 造 PCa 柱・PCa 梁)

図 2. 2. 2. 3 中の所要時間の構成比は、柱部材 96P、梁部材 142P に対する作業測定（タイムスタディ）の結果をもとに算出している。柱部材の建方作業では「サポートセット」、梁部材の建方では「位置合せ」に最も多くの時間がかかる結果であった。建方作業における「仮接合」作業の割合は、柱部材 44%、梁部材 34% を占める結果であり、サイクルタイムの短縮による生産性向上を図る上では、「仮接合」作業時間の短縮が大きく寄与すると考えられる。また、「仮接合」作業は、「位置合せ」「建入調整」から構成されているため、所定の位置に部材を速やかに合わせる機構を持つことも、生産性向上にとって有効である。この他に、作業測定実施時には、主筋とスリーブ継ぎ手が上手く納まらない場合など、平均に対し大幅な遅延の発生が指摘されている。クレーンを占有する建方作業の遅れは後続する作業に与える影響も大きいいため、接合方法の検討においては、現場での取付精度の誤差を吸収できるようにすることも円滑な施工を実現する上で重要である。

b. 構造体フレーム構築における接合作業の分析

分析対象とした施工事例を図2. 2. 2. 4に示す。

本事例は約 50m×40m 角の平面形状の超高層建物で、1フロアを2工区に分割し、各工区タワークレーン1台(計2台)を用いて建方を実施した。柱部材は2層を1ピース、梁部材は2スパンを1ピースとする部材の大型化が図られている点が特徴的である。PCa部材同士の接合方法は、柱部材同士はスリーブ継手へのグラウト注入、柱部材と梁部材は現場打ちコンクリートにより一体化するものであった。1FあたりのPCaピース数は、柱39P、梁43Pであった。分析は、1フロアの構造体フレーム構築に関わる仮設材の設置解体を含めた一連の工程を対象

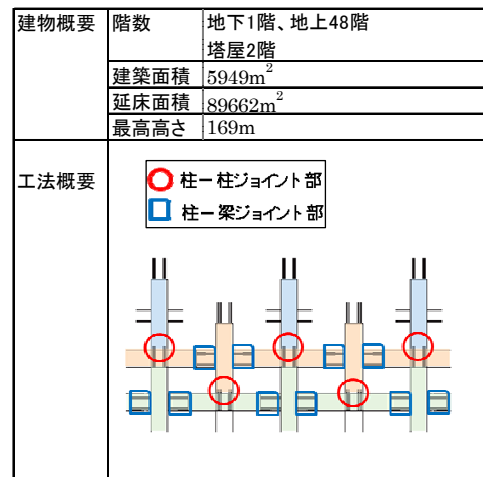


図2. 2. 2. 4 事例概要

とし、現場の作業日報から人工実績を集計し工数を求めることで実施した。工数は日単位で算出しており、休憩時間など余裕時間も含む。図2. 2. 2. 5に対象とした工程と所要工数の構成比率を示す。分析の結果、「グラウト注入・目地シール」が最も多くの工数を占めることが分かった。また、PCa部材同士の接合作業にあたる「ジョイント部鉄筋」「ジョイント部型枠」「ジョイント部 CON (CON=コンクリート)」の合計で全体の62%の工数がかかっている。さらに前項で述べた「PCa建方」の工数の中には、「仮接合」作業の工数も含まれている。本事例における「PCa建方」に対する「仮接合」の割合を、前述の事例と同等と仮定した場合、全工数の約8%がこれにあたる。上記の部材同士の接合と合わせると接合作業が約70%の工数を占める結果となり、この工数の低減が生産性向上に大きく寄与すると考えられる。

また、部材間の接合（ジョイント部）は、3工程（鉄筋-型枠-CON）から構成され、これらの工程の進捗が互い影響しあうと考えられる。こうした接合作業に関わる工程数を低減することで手待ちの低減などが期待でき、生産性向上に寄与すると考えられる。

工程	職種	作業
PCa建方	高工	PC柱取付
		PC梁取付
		柱梁建入調整
	墨出し工	柱、梁受ボルトレベル調整
ジョイント部 CON	高工	PC建方相番
		梁取付相番
ジョイント部 型枠	型枠大工	PC梁ジョイント部ホッパーコン合番
		パネルゾーンコンクリート打設
		パネルゾーンラス取付・段取り
		パネルゾーン解体転用段取り
ジョイント部 鉄筋	鉄筋工	梁パネルゾーン解体転用段取り
		梁パネルゾーン建込
グラウト注入・目地シール	グラウト工	梁ジョイント部配筋
		パネルゾーングラウト
		パネルゾーン目地シール
		ボルトツブスグラウト
		柱脚グラウト
仮設設置・解体	高工	柱脚目地シール
		PC梁支保工組立・解体・盛替

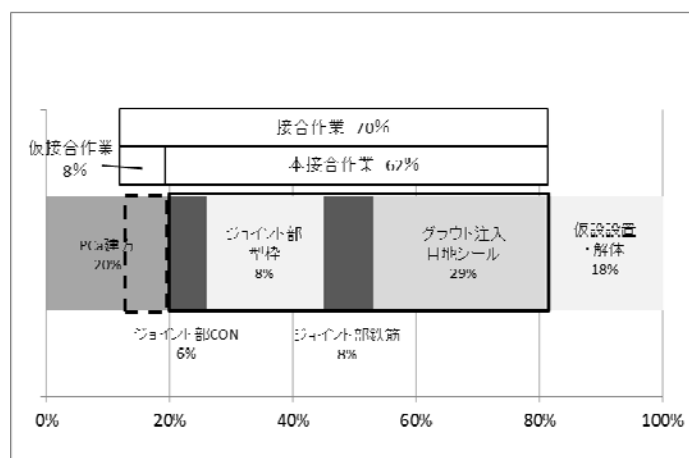


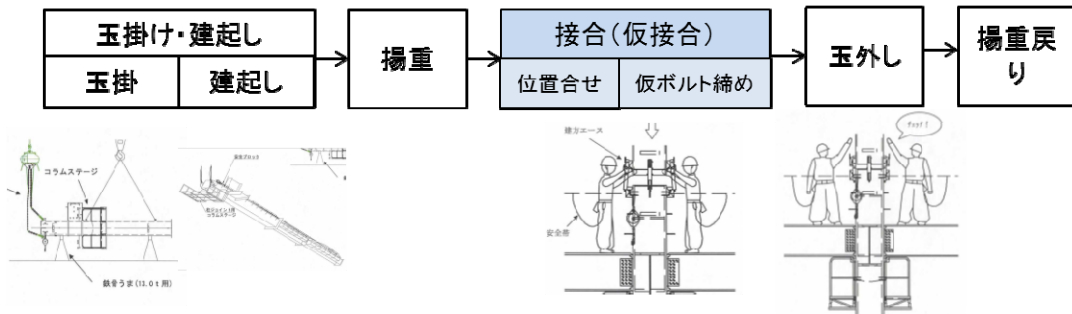
図2. 2. 2. 5 分析対象工程と工数の構成比

(3) S造柱・梁部材の接合作業

a. 建方作業の分析

S造の建物における柱・梁部材の建方作業の手順を図2.2.2.6に示す。小規模なSRC造建物（約33m×約17m）と平面的な広がりを持つ大規模なS造建物（約108m×約71m）の2事例を分析した。各事例の概要と所要時間の構成比をそれぞれ図2.2.2.7、図2.2.2.8に示す。

【柱鉄骨建方】



【梁鉄骨建方】

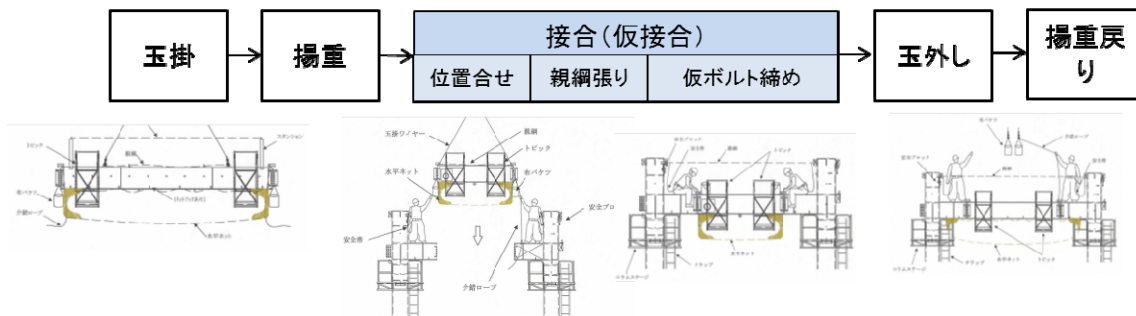


図2.2.2.6 S造柱・梁部材の建方手順

2事例における作業測定（タイムスタディ）の結果から、柱・梁部材の建方作業の所要時間の構成を求めた。図2.2.2.6から、柱建方作業における「仮接合」作業が占める割合は、事例1で60%、事例2で35%、梁建方作業ではそれぞれ55%と48%となった。2事例で「仮接合」の割合が異なる原因は、仮ボルト締め本数の違いが影響していると推測される。事例1


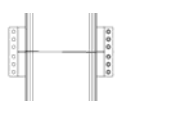
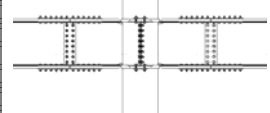
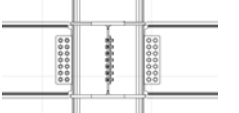
事例1		事例2	
階数	地上9階、塔屋1階	階数	地下3階地上9階
建築面積	762m ²	建築面積	7500m ²
延床面積	6445m ²	延床面積	72601m ²
建物高さ	34.7m	建物高さ	44.6m
構造	SRC造	構造	S造
接合部	柱：H型鋼 ボルト接合	接合部	柱：BOX型 溶接接合
			
	梁：H型鋼 ボルト接合		梁：H型鋼 溶接+ボルト接合
			

図2.2.2.7 事例概要

では仮ボルト締めにかかる時間が大きな割合を占めているのに対し、溶接接合である事例2では、

少ない仮ボルト本数で建方作業を進めることができるため、「仮接合」にかかる時間の割合が小さくなったと考えられる。仮ボルト本数を低減するなど、部材と所定の位置に固定する作業の合理化が、建方作業の効率に大きく影響すると言える。

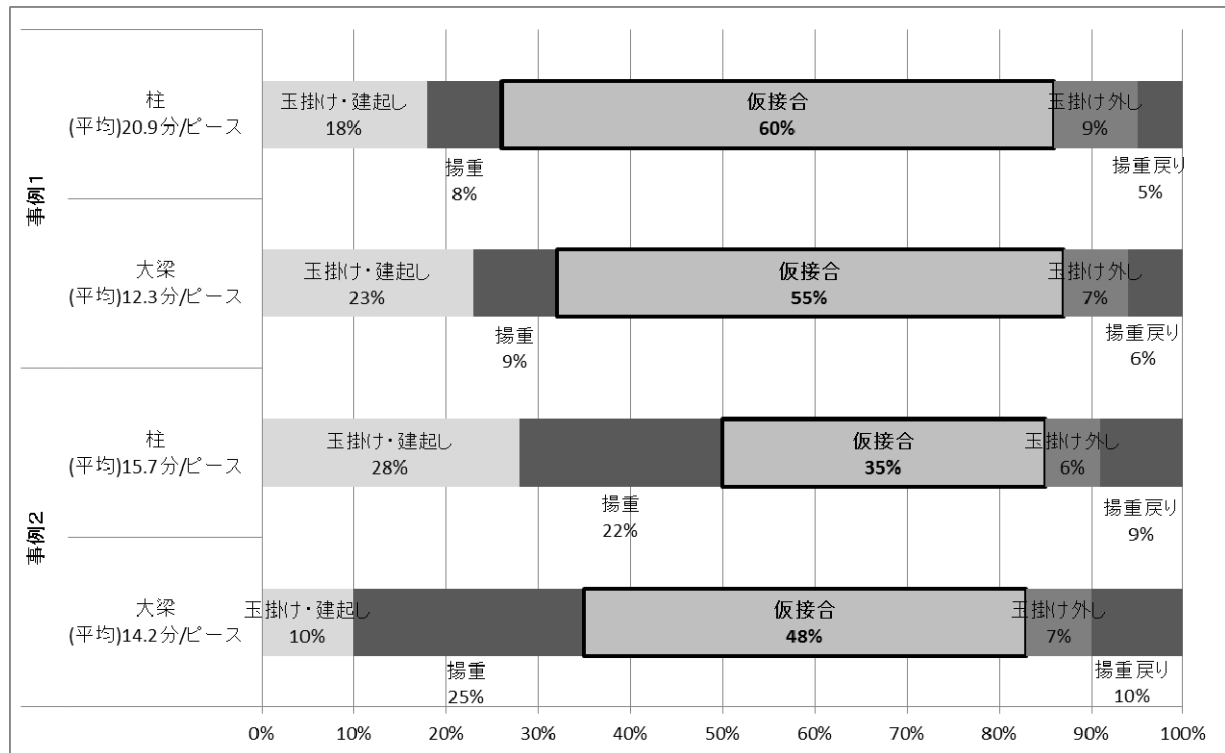


図 2. 2. 2. 8 建方作業の所要時間の構成比 (S造柱・大梁)

b. 構造体フレーム構築における接合作業の分析

対象とした施工事例を図 2. 2. 2. 9 に示す。作業日報から柱梁フレームの構築に関する作業を抽出し、図 2. 2. 2. 10 に示す工程に分類した上で工程別の所要工数の構成比を求めた。工数は、作業日報の人工実績から求めた余裕時間を含む日単位の値である。

図 2. 2. 10 より、柱梁フレームの構築では、建方に最も多くの工数が掛かっている。鉄骨部材同士を接合する作業である溶接・本締めは、それぞれ 23% と 21% であり、建方とほぼ同等の工数が掛かっており、合計で 44% を占めていることが分かる。

さらに建方に含まれる「仮接合」作業を PCa 工法での分析と同様の仮定に基づき推定すると、約 12% がこれに当たることとなり、S 造の柱梁フレームの構築に置いて、接合作業が大きな割合を占めていることが分かる。

階数	地下2階、地上11階 塔屋1階
建築面積	3016m ²
延床面積	25408m ²
建物高さ	54.64m
柱-柱	(CFT柱)溶接、 (H鋼)ボルト
柱-梁	(ウェブ)ボルト (フランジ)溶接
梁-梁	ボルト

図 2. 2. 2. 9 事例概要

工程	職種	作業
準備	高工	鉄骨搬入降し、仮設材搬入・荷降し、建方段取
建方	高工	建方、調整、建方合番
溶接	溶接工	柱溶接(GFT)、梁溶接
本締め	鍛冶工	ボルト本締め、仮ボルト払し、タッチアップ
その他建方	高工	EV鉄骨、外装下地鉄骨
その他本締め	鍛冶工	外装下地・目隠し本締め
その他溶接	溶接工	PCファスナー溶接
仮設材設置・解体	高工	支保工組立、水平ネット張り、手摺組立 支保工解体、トピック・コラムステージ解体、ベント解体
その他	高工	資材揚重(デッキ、鉄筋、スタッド他)、ベント部ジャッキダウン
	鍛冶工	各所鍛冶工事

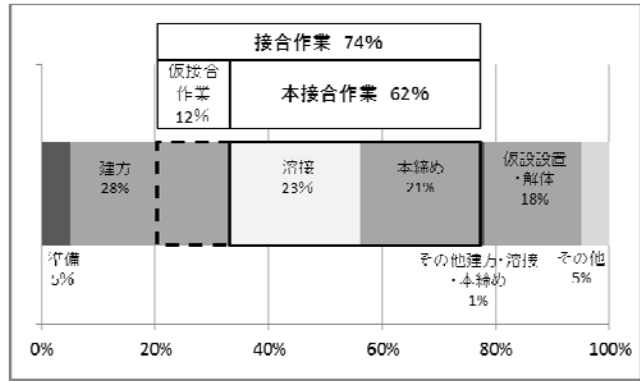


図 2. 2. 2. 10 分析対象工程と工数の構成比

2. 2. 3 仕上げ工事における接合作業の分析

仕上げ工事の分析対象として、多くの建物で利用されている構造体に後付けするアルミサッシを抽出した。分析は、アルミサッシの取付作業とサッシの取付に関連する一連の工程を対象に実施した。サッシ関連の工程として、①サッシ取付、②トロ詰め（構造体と躯体間にモルタルを充填）、③ガラス取付、④シーリングの4工程とした。アルミサッシ取付作業および各工程の所要工数は、作業・工程別の所要人工に関するヒアリングをもとに算出し、工程別の工数の構成を求めた（図 2. 2. 3. 1）。

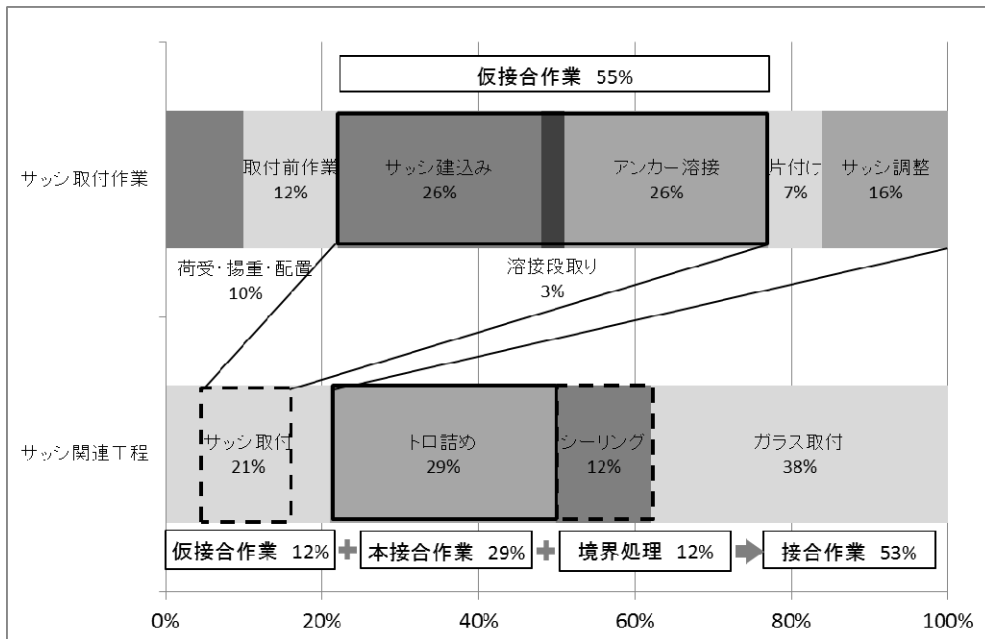


図 2. 2. 3. 1 サッシ取付作業および関連工程の所要工数の構成比

サッシ取付作業における接合作業（仮接合）として、「サッシ建込み」「溶接段取り」「アンカー溶接」があげられる。これらの作業にかかる工数は、作業全体に対し 55%を占める。また、サッシ関連工程においては、「トロ詰め」が接合作業（本接合）にあたり、その割合は関連工程全体の工数に対し 29%を占めている。また、「シーリング」は境界処理作業にあたり、その工数は 12%

を占める。サッシ取付に含まれる仮接合および境界処理の工数を考慮すると、サッシの取付における接合作業は、関連工程全体に対し 53%を占めている。

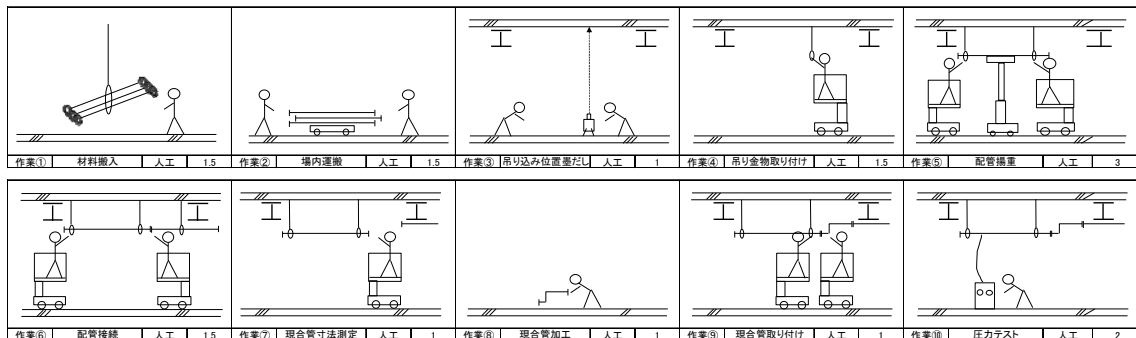
2. 2. 4 設備工事における接合作業の分析

設備工事における接合作業として、以下の3工事を抽出し、その工数分析を実施した。

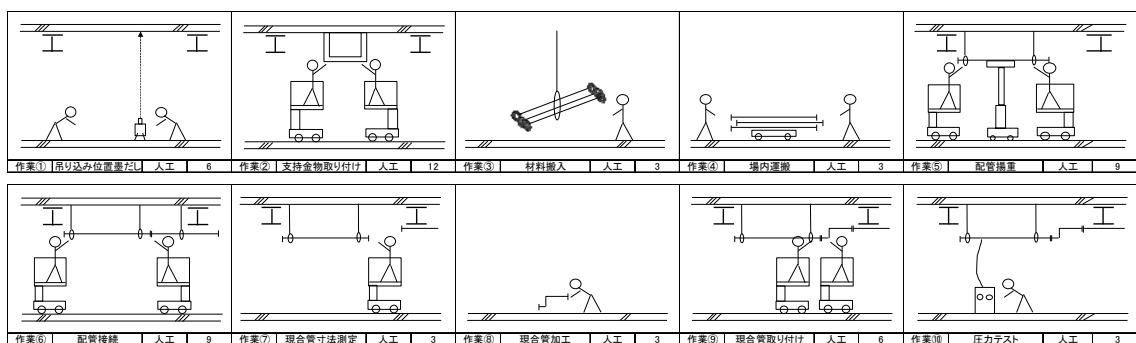
- ①天井配管工事（一般部）
- ②天井配管工事（熱源機械室）
- ③縦シャフト配管工事

各工事の作業手順を図2. 2. 4. 1に示す。各工事の作業ごとの所要工数は、作業にかかる人工に関するヒアリングを通じて推定した値を用いている。推定した工数は、天井配管ではプレファブ配管を前提としたものである。また熱源機械室における熱源機器への接続工事、エア抜き・給水などの小配管工事については含めていない。設備配管工事における接合作業として、所定の位置に配管を設置するための作業である「吊り金物取付」「支持金物取付」「配管揚重」が仮接合作業にあたる。設置された配管同士を接続する「配管接続」「現合管取付」が本接合作業にあたり、この合計を接合作業と捉える事とした。各工事の作業別の所要工数の構成比を図2. 2. 4. 2に示す。

①天井配管取付作業（一般部）



②天井配管取付作業（熱源機械室）



③縦シャフト配管取付作業

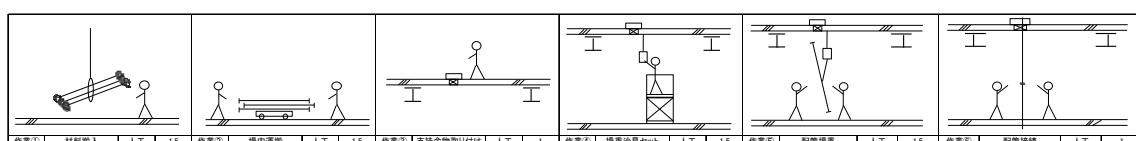


図2. 2. 4. 1 作業手順

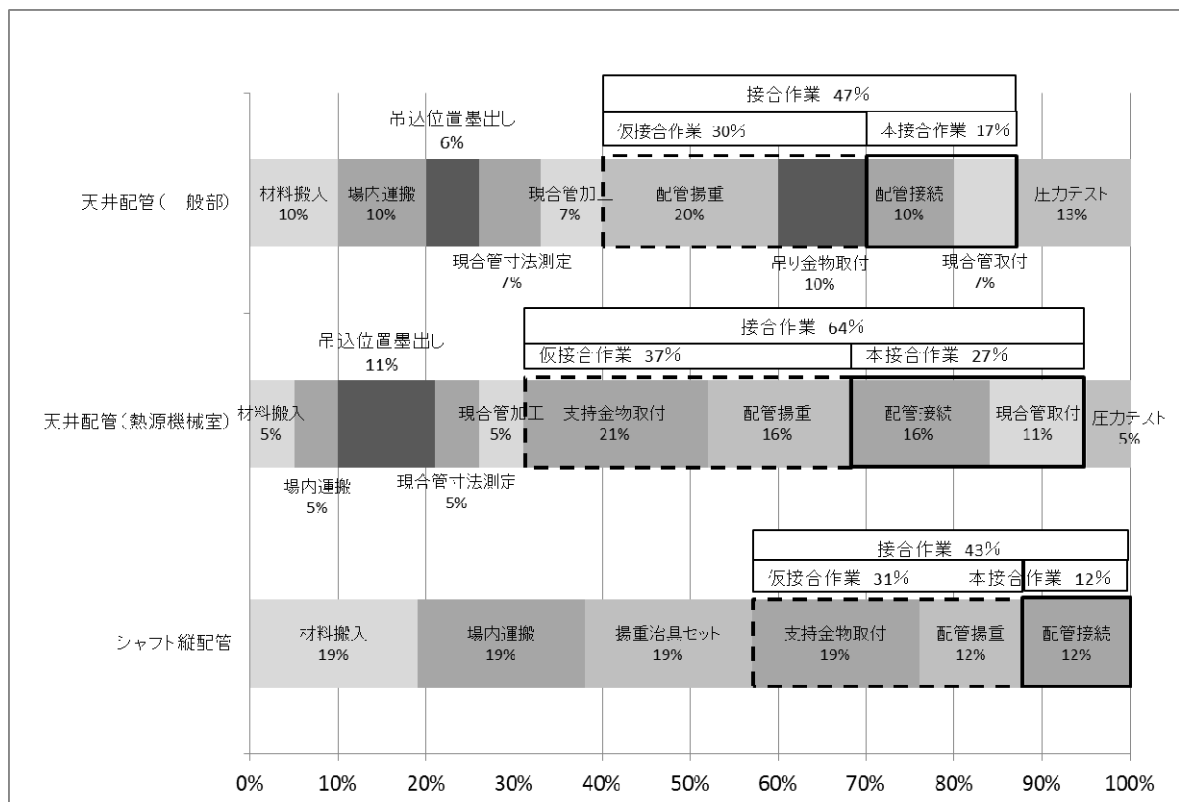


図 2. 2. 4. 2 所要工数の構成比

天井配管工事では、一般部において接合作業が半数近い工数を占め、特に配管の多い熱源機械室では、約 60%の工数がかかっていることがわかる。縦シャフト配管工事においても 43%を占め、配管工事にかかる工数のうち、接合作業が占める割合が高いことが分かった。いずれも配管を所定の位置に設置する「仮接合」作業が「本接合」作業よりも多く、特に躯体などに配管を固定する作業（支持金物取付、吊り金物取付）に多くの工数がかかっている。

2. 2. 5 工事全体に占める接合作業比率の推定

図 2. 2. 1. 2に示すとおり、高層集合住宅の建設にかかる工数において、検討対象として抽出した躯体工事、仕上げ工事、設備工事は、92%を占めている。それぞれの工事において代表的な接合部位を対象に実施した工数分析より得られた接合作業の占める工数比率を各工事の平均的な工数比率と仮定し、各工事が工事全体に占める割合に上記工数比率を掛け合わせ、工事全体に占める接合作業の比率を推定した。設備工事においては、分析した天井配管工事（一般部・熱源機械室）の平均を用いた。

推定の結果、建物全体に占める工数全体のうち、接合作業は 55%を占めている（図 2. 2. 5. 1）。これは前述の延べ床面積約 84,000 m²の高層集合住宅の建築工事においては、97,790 人日にあたる。建物全体の工数の約半数近くが接合作業にかかっており、この工数を大きく低減することは、建物全体の飛躍的な生産性向上に大きく寄与できる。上述の分析を通し、接合作業の工数を低減する方向として以下が考えられる。

- ・新たな接合方法による接合箇所数の低減および作業時間の短縮
- ・部材の取付時に所定の位置に部材を速やかに合わせる機構、および誤差を吸収できる接合方法による取付時間の短縮
- ・部材の取付時における仮接合作業の省略、および位置の不整合などによる遅延の回避
- ・接合作業に関わる工程数（職種数）の低減による手待ち時間の低減

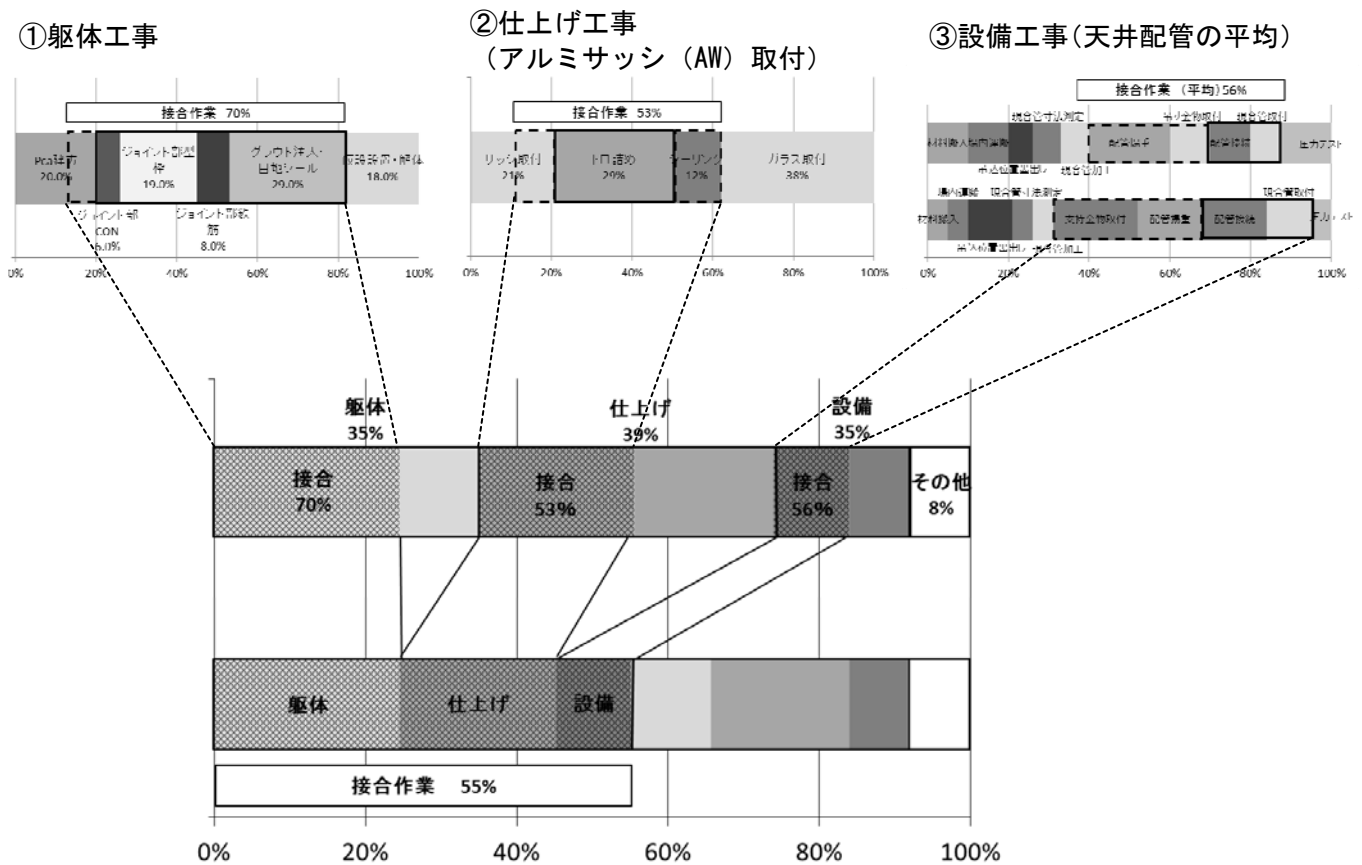


図 2. 2. 5. 1 建物全体における接合作業の工数比率の推定結果

3 素材・接合技術の点検と評価

3. 1 接合技術と被接合材料

建築以外の分野も含めて現状使用されている接合技術と被接合材料との関係を表3. 1. 1に整理して示す。ここで取り上げる接合技術と被接合材料は以下の通りである。

表3. 1. 1 主な接合技術と被接合材料

		接合技術											
		溶接	ボルト	リベット・ねじ	現場固化	かしめ(クリンチ)	嵌合・機械式	ラッチ式	磁力接合	摩擦攪拌接合	溶着	接着	テープ(ロック含)
被接合材料	鋼材	○	○	○		○	○		○	○			
	セメント系材料				○								
	樹脂			○				○			○	○	○
	複合材料			○									

(1) 接合技術

溶接接合（アーク、レーザ、アーク・レーザハイブリッド）、ボルト接合、リベット接合、ねじ接合、現場固化接合、かしめ接合（クリンチ接合）、嵌合接合、機械式接合、ラッチ式接合、磁力接合、摩擦攪拌接合、溶着接合、接着接合、テープ接合（ロックファスナ含む）など。

(2) 被接合材料

鋼材（圧延製品、鍛造製品、鋳造製品）、セメント系材料（鉄筋コンクリート、ALC板など）、樹脂系材料、複合材料（炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、金属強化樹脂）など。表3. 1. 1より、鋼材と樹脂については接合技術の選択自由度が比較的高く、一方、セメント系材料に関しては、同種材料での現場固化が唯一の手段であり、選択の余地が少ない実態が分かる。これは、セメント系材料の接合技術に関する開発ニーズが高いことを示すものである。

3. 2 接合技術の特徴、建築分野への適用性と課題の分析

各接合技術の特徴と、すでに建築分野で利用されている接合技術については、その施工性を向上するための課題を、また未だ建築分野で利用されていない接合技術については、建築分野で利用するための課題を以下でそれぞれ検討する。

(1) 溶接

鋼材の接合に最も広く使用されている技術で、強度や剛性の確保、接合部のコンパクト化などの点で優れた特徴を持つ。作業時間や品質管理に手間を要すること、作業に高度な技能（資格）が要求されること、また悪天候の場合には作業が出来ないことなどが課題である。ロボット技術の活用による溶接作業性の向上や、レーザ溶接やレーザ・アークハイブリッド溶接などの従来建築分野で利用されていない新たな溶接技術の応用などが考えられる。レーザ溶接の利用により、開先角度を小さくして溶着量を減らすことも可能であり、作業時間の縮減に貢献できる。

(2) ボルト

ボルト接合には、ボルトと母材の支圧力を介して力を伝達する支圧接合と、ボルトの締め付け力により接合面に生じる摩擦力を活用する摩擦接合がある。国内では中層以上建物では摩擦接合が、低層建物では支圧接合が使われる。

中層以上建物で使用される摩擦接合において、トルシア型ボルト（図3. 1. 1）により締め付け作業や軸力管理に係る作業手間の縮減検討は進んでいるが、大規模鉄骨造における接合部では多数の本数が必要となるため依然として多くの作業時間を要している。ボルト本数削減策として、ボルト強度を 1400N/mm²級へ高めた超高強度ボルトや、すべり係数（摩擦係数）を高めるために摩擦面にアルミ溶射を施す技術も実用化されている。この他、ボルト孔を大きく（過大孔）することにより、ボルト締結作業を容易化することも考えられるが、骨組精度の低下を招く恐れもある。過大孔の活用と骨組精度の両立を接着剤や現場固化技術により実現を目指すのはひとつの検討方向になるであろう。また仮ボルトによる仮締め作業時間の縮減も生産性向上には有効との現場の声もあり、一次締めから本締め作業の簡略化と合わせて検討を進める必要がある。

（3）リベット・ねじ（ドリリングタッピンねじ）

高温加熱して現場成形するリベットは作業性や騒音問題などから既に高力ボルトに置き換わっているが、常温で塑性変形により締結するワンサイドリベット（図3. 1. 2）は薄鋼板の接合に広く適用されている。ただしリベットには下孔が必要であり、下孔と軸部間のガタの発生が課題となる。

セルフドリリングタイプのタッピンねじ（図3. 1. 3）は、低層建物（スチールハウス）における薄鋼板の接合で広くに活用されているが、厚さ 12 mmの鋼板に自ら穿孔し打設できるものもある。ホップリベットと同様に、ファスナ径がボルトに比べて小さいことから、高力ボルト摩擦接合に比べて接合能力は小さいが、外壁や内壁の接合、二次部材の接合には活用できる。セルフドリリングタッピンねじは、鋼板にねじ孔を成形しながら接合するため、ガタつきは発生しないが、ナットが設置されないため緩みの発生を懸念する声もある。ガタ発生や緩み発生を防止するために接着剤や樹脂とのハイブリッド技術は検討の価値がある。



図3. 1. 1
トルシア型高力ボルト

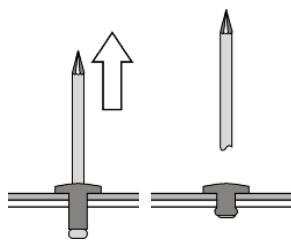


図3. 1. 2
ワンサイドリベット

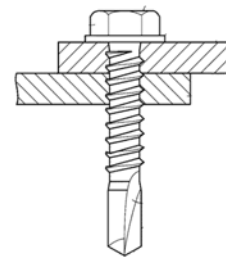


図3. 1. 3
セルフドリリングタッピンねじ

（4）現場固化（コンクリート打設、グラウチング）

現場でコンクリート、モルタルなどのセメント系材料を部材間隙間に流し込んで固着グラウチングする技術であり、プレキャストコンクリート構造における柱-梁接合部や梁同士の接合で利用される。鋼構造においても鋼管杭と鋼管柱との接合部（図3. 1. 4）などで適用実績がある（清水建設（株）のソケット工法など）が、繰り返し作用力に対するひび割れの発生や構造信頼性、作業スピード、品質管理簡易化の視点での改良開発の可能性があり、充填材と接合ディテールが検討対象になる。充填材の改良は、セメント系材料に代わる樹脂材料の検討や、セメント系材料と樹脂のハイブリッド材料（コンクリートへの混和材料）の開発可能性が考えられる。ただし、

いずれも充填材コストが増加することから、その使用量を最小化するような材料開発などが必要である。

(5) かしめ・嵌合・機械式

低層建築分野では、材料の塑性変形を伴う嵌合技術としてかしめ（クリンチ）（図3. 1. 5）があるが、これを板厚の厚い中高層建築に適用するのは装置開発やハンドリング性などの点で難しいのが実情である。嵌合については、リーハイ大学の研究チーム（Robert B. Fleischman 他）が1990年頃に取り組んだ嵌合接合構造[1]（ATLSS Connections、図3. 1. 6）は、生産性向上に資する注目すべき技術である。

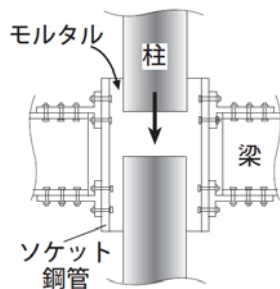


図3. 1. 4
柱梁接合部グラウチング接合の模式図



図3. 1. 5
薄板構造で利用されるかしめ（クリンチ）

機械式接合については、鋼管杭同士の接合技術として一般的に利用されており、一部低層住宅用の角柱接合用途にも実用化されている（図3. 1. 7）。杭における機械式継手の接合機構は、ねじ式、ギア式、荷重伝達キー式（図3. 1. 8）の主に3種類に分類できる。適用実績のある鋼管最大径は $\phi 1600$ mm（板厚 $t=30$ mm）であり、これ以上の大径鋼管へ適用するには精度確保や製造上の課題がある。一方で鋼管杭としての最小径は $\phi 400$ mm（板厚 $t=9$ mm）であるが、更に小径鋼管へ展開することへの課題は相対的には小さく、角形断面柱へ適用するためのディテールや施工方法を開発すれば実用化は可能であろう。なお機械式継手部は圧縮・引張・曲げ・せん断の各力に対して鋼管母材と同等以上の強度（いわゆる全強接合）を保持するように開発されている。

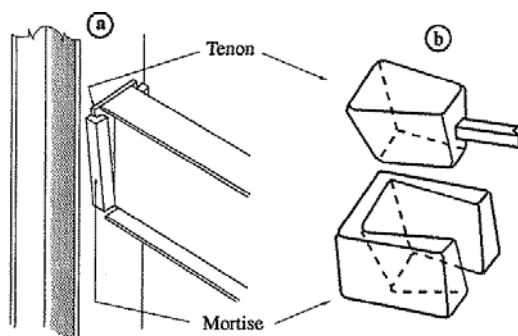


図3. 1. 6
ATLSS Connections（文献3-1から転載）

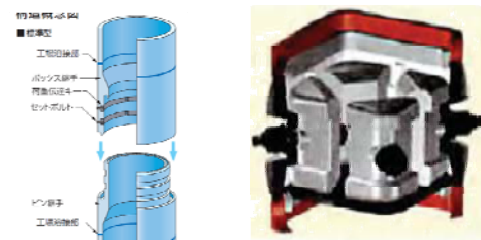
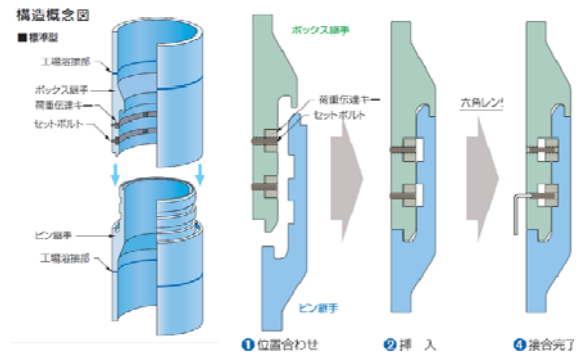


図3. 1. 7
実用化されている機械式接合の例
（左：杭、右：柱）



(a)ギア式



(b)荷重伝達キー式

図3. 1. 8 鋼管杭機械式継手の接合機構

(6) ラッチ式

機械式接合の一種で、工業製品の部材間接合で見られる接合法である。弾性変形、機械的（ばね機構含む）あるいは幾何学的な変形を活用して、凸部を凹部に嵌め合う乾式接合構造である。扉の錠を構成する部分のラッチボルト（図3. 1. 9）もラッチ式接合の一部といえる。

ラッチ式接合については強度・剛性の確保面で課題があるため、具体的な接合ディテールの研究開発が必要である。



図3. 1. 9
ラッチ構造の例

(7) 磁力による接合

永久磁石（フェライト系、ネオジウム系、アルニコ系など）、電磁石による磁力を用いた接合である。鉄骨加工業者での大型の鉄骨部材の吊り上げに活用されており、荷重的にはある程度の能力は期待できる。構造躯体や仕上げ材への適用においては永久磁石の利用が前提になるとと思われる。実用化にあたっては、静的強度、衝撃強度、高温（キュリー点）で磁力を消失する特性などを整理する必要がある。施工時の部材移動や位置決め・仮止め用途としては、永久磁石だけでなく電磁石の活用も十分に考えられる。

(8) 摩擦攪拌接合

線接合するFSW (Friction Stir Welding)、点接合するFSJ (Friction Spot Joining) の2種類あるが、どちらも回転させた専用工具（非消耗接合ツール）を押し付けて塑性流動により一体化する固相接合法である。新幹線や特急電車などアルミ製車両の組み立てなど広く利用されている。さまざまな材料への適用が可能、異材接合が容易、接合速度はアーク溶接と同等以上で、スパッタ、ヒュームがなく有害光線の発生がない、接合前処理が不要などのメリットがある。アルミ同士、アルミとマグネシウム、アルミと鋼材、アルミとステンレスなどの接合では多くの実績がある。これはアルミやマグネシウム合金の融点が比較的低いためであり、鋼材同士の接合を実現するためには、鋼材よりも融点が高く、高温強度と耐摩耗性を有する回転ツールを開発する必要がある。

(9) 溶着

樹脂を融点まで加熱し圧着することで界面同士を分子レベルで結合する技術であり、家電製品の樹脂の接合技術として実績がある。樹脂と金属の接合も可能である。

(10) 接着

エポキシ接着剤（一液型、二液型）、溶剤系、無機溶剤系、ウレタン系湿気硬化型、ホットメルト型などさまざまな種類がある。最近では自動車骨格の接合技術としての実績もある。

樹脂系材料の利用検討をするにあたっては、接合面は、各種接着剤の所定の推奨接合条件（温度、圧力）にする必要があること、初期強度発現時間までに時間を要すること、また既存技術における接着剤（樹脂）の上限温度が 450℃であることをまず認識する必要がある（図3. 1. 10）。強度については、高強度な接着剤の強度（最大せん断接着強さ）でも 40N/mm²程度（図3. 1. 11）であり、引張強度 400N/mm²クラスの鋼材のせん断強度（長期許容せん断応力度=90N/mm²）の 1/2 程度に留まる（図3. 1. 12）。また建築設計では、圧縮、引張、曲げ、せん断の4つの作用力に対する抵抗性能が必要であるが、それらを体系的に整理した情報や、更には FEM 解析で接着層をモデル化する場合の構成則、応力の組合せ（曲げ+せん断、引張/圧縮+せん断）を評価できる関数式なども不足している。耐久性については、60年の建築物耐用年数を満足させる必要があるが、長期耐久性に関する十分なデータは無い（図3. 1. 13）。これらの実状を踏まえると、既存の接着剤をそのまま、既存の建築構造物に適用するのは難しいのが実態である。

この一方で、建築構造と同等以上に高い安全性や耐久性が求められる航空機の機体においてはさまざまな箇所で接着剤が利用されていることから、必要性能条件を明確にして適切な性能評価技術が構築できれば、十分に接着剤の利用可能性はあると言えよう。

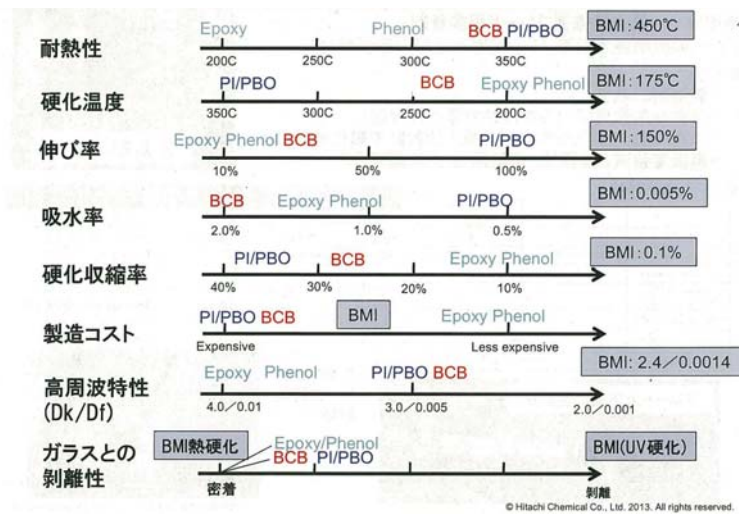


図3. 1. 10 樹脂の性能比較（耐熱配管コート材事例 BMI（ビスマレイミド）樹脂）
（日立化成(株)資料より）

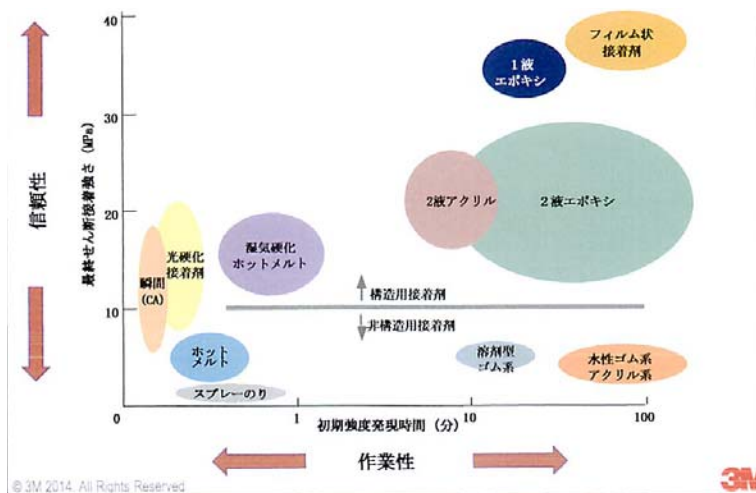


図3. 1. 1 1 各種接着剤の初期強度発現時間と最終せん断接着強さ (スリーエムジャパン(株)資料より)

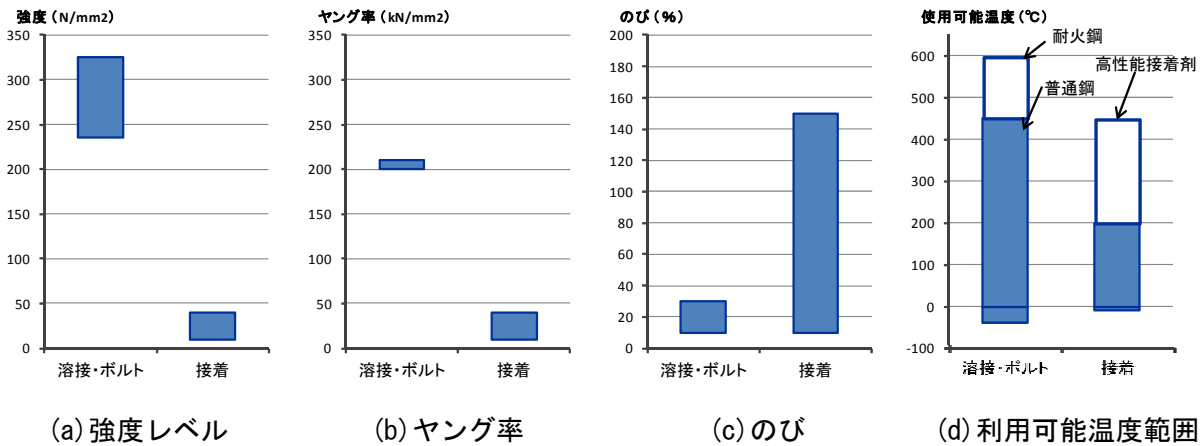


図3. 1. 1 2 溶接 (ボルト) と従来接着剤の接合部性能の比較 (溶接・ボルトの性能は、建築鉄骨で主に利用される 400N/mm²級、490N/mm²級鋼材の引張力に対する材料の降伏強度などとし、また接着剤の性能は、スリーエムジャパン(株)、日立化成(株)の資料に基づく値としている。)

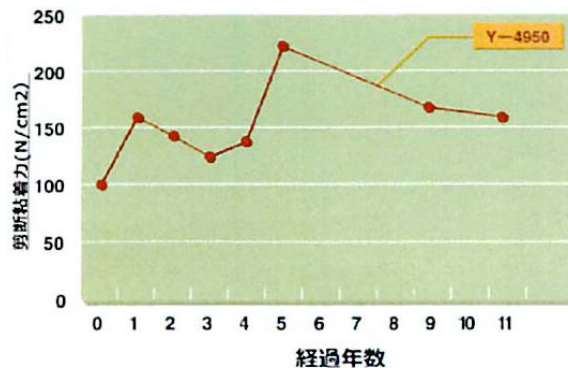


図3. 1. 1 3 屋外暴露された構造用接合テープ (粘着剤) の経年変化の一例 (神奈川県相模原市スリーエムジャパン(株)事業所敷地内での調査結果) (スリーエムジャパン(株)資料より)

(11) テープ (ロック含む)

不織布、PET フィルム、ウレタンフォーム、アクリル系発砲フォーム層などを基材とした両面接着テープがある。近年の技術開発により剥離強度や耐候性の改善が進められている。ロック接合とはファスナ表面に配置されたキノコ状突起を咬み合せて接合する技術 (図3. 1. 14) で、繰り返しの着脱が可能であり、ユニットバスの点検カバーや OA フロアなどでの実績がある。建築接合材料として、サッシや配管の仮止めには有効である。

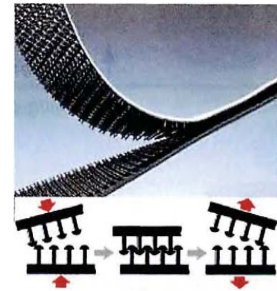


図3. 1. 14
ロック式のテープ接合

3. 3 評価のまとめ

これら各接合技術の評価を通して、各接合技術の力学性能と施工性の両面での保有性能は、定性的には表3. 3. 1のようにまとめることができる。ただし建築分野では構造躯体、仕上げ材、設備などでさまざまなディテールの構造材・非構造材を接合することになり、これらの横並びの評価はあまり意味を持たない。今後施工性向上を具体的に議論するためには、表中に示される要求性能の項目を正確に列挙し、各項目に対する必要物理量をより定量的に数値化していくことが重要である。これについては4章の「接合部位ごとの検討」で報告する。

表3. 3. 1 既存接合技術と保有性能

	適用先		力学性能				施工性				
	構造	非構造	強度	剛性	耐火	耐久性	軽量性	容易性	速度	技能 レス性	工種 レス性
溶接	○	○	◎	◎	△	△	○	×	×	×	△
ボルト	○	○	○	◎	△	△	△	○	△	○	○
リベット・ねじ	○	○	△	△	△	△	○	○	△	○	○
現場固化	○	○	◎	◎	◎	◎	×	×	×	○	○
かしめ(クリンチ)		○	○	○	△	△	△	○	○	○	○
嵌合・機械式	○	○	◎	◎	△	△	△	○	○	○	○
ラッチ式		○	△	×	△	△	○	○	○	○	○
磁力接合		○	×	×	△	△	○	○	○	○	○
摩擦攪拌接合	○	○	◎	◎	△	△	○	×	×	△	△
溶着		○	△	△	×	○	○	○	○	○	○
接着	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○
テープ(ロック含む)		○	×	×	×	○	○	○	○	○	○

参考文献

[1] Robert B. Fleischman: Development, Analysis, Experimentation, and Implementation of ATLSS Connections for Automated Construction, National Steel Construction Conference, AISC, 1993

4. 接合部位ごとの検討

4. 1 構造体における接合

4. 1. 1 現状と課題

適用対象は、主に国内の一般新築建物とする。リニューアル、極限環境下の作業にも活用することを視野に入れて研究課題を設定する。

(1) 対象

鉄骨造（以降 S 造）は、2002-2011 年の 10 年間に全国で約 460 棟の 21 階以上のオフィスビルが建てられ、中低層建物でも商業施設やオフィスを中心に多く用いられている。また、21 階以上のプレキャスト鉄筋コンクリート造（以降 PCa 造）高層集合住宅が 2002-2011 年の 10 年間に全国で約 700 棟建てられ、さらに棟数の多い中層集合住宅でも労務不足から PCa 造が増加中である。これらの構造では、30 階建ての高層建物で一棟当たり柱梁部材だけで約 3,000 力所の膨大な数の接合作業が現場で行われている。この接合作業を合理化することで飛躍的な生産性の向上が期待できる。

S 造では、鋼製の柱、梁を工場で製造し、現場で溶接、またはハイテンションボルトにより接合する。この溶接は天候に左右され、ボルト接合は一接合箇所あたり多数のボルトを締めるため多くの時間を要する（図 4. 1. 1. 1）。また、PCa 造では、鉄筋コンクリート製の柱、梁を工場で製造し、現場で一つの柱あたり 10~20 本の直径 40 mm 程度の鉄筋を接合し、さらに接合後、周辺のコンクリート工事を実施する（図 4. 1. 1. 2）。上記の通り、接合箇所ごとに非常に工数がかかる作業が行われる。以上より、S 造、および PCa 造を検討対象とする。



図 4. 1. 1. 1 S 造の接合状況



図 4. 1. 1. 2 PCa 造の接合状況

(2) 被接合材の仕様

通常、建築で用いる材料の強度は、鋼材で降伏強度 240~685MPa、コンクリートで圧縮強度 24~100MPa 程度であり、接合部強度は母材強度以上が要求される。部材の大きさは、概ね、S 造でボックス柱断面寸法 250×250~600×600 mm、H 型鋼梁断面幅 200×せい 400~幅 300×せい 900 mm、鋼材厚さ 12~40 mm、PCa 造でコンクリート柱断面寸法 600×600~1000×1000 mm、コンクリート梁断面寸法 400×600~550×900 mm、内部の主筋径は 25~41 mm である。また、構造体として

の耐火性能は、S造では、耐火被覆を前提として火災時の1～3時間の加熱環境下で荷重を支持すること（鋼材温度 350～500℃）が要求され、コンクリートは内部鉄筋の温度が 500℃以下であることが要求される。耐久性は 30～60 年である。それ以外にも、接合部には精度（±5mm）、気密・水密性（雨水の侵入防護）、フレキシビリティ（誤差吸収能力）などの性能が要求される。対象となる部材の重量は、最大 20t であるが、一般的には S 造で 0.5～10t、PCa 造で 3～10t である。

（3）課題

これまで、各種の省力化工法が開発されている。例えば、図 4. 1. 1. 3 は、柱がコンクリート充填鋼管（以降 CFT）造、梁が S 造であり、鋼管内部の鉄筋コンクリート（以降 RC）により力を伝達することで柱の鉄骨と梁の鉄骨を溶接しない工法である。図 4. 1. 1. 4 は、柱が RC 造、梁が S 造であり、S 造の梁は柱から出た RC 造の梁に埋め込まれているだけで接合されている。構造体の新たな接合手法を考える上では、このような省力化工法に基づき、3章で示されている素材・接合技術の展開を行う必要がある。

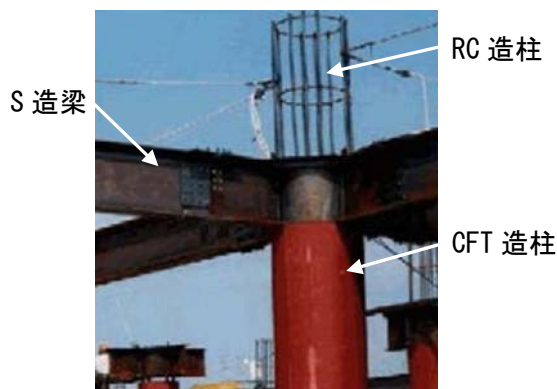


図 4. 1. 1. 3 省力化工法例 1
（清水建設(株)資料より）

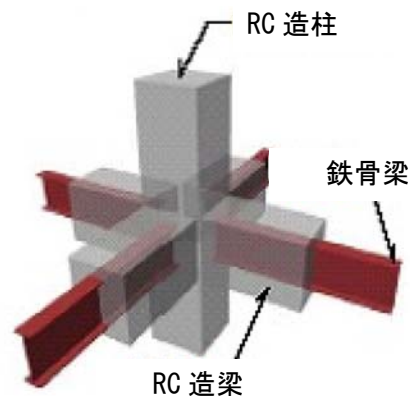


図 4. 1. 1. 4 省力化工法例 2
（清水建設(株)資料より）

また、接合作業の工数分析より、鉄骨工事では、溶接、ボルト締め（仮ボルト締め含む）、位置合わせの工数が大きい。またプレキャスト（以降 PCa）工事では、PCa ジョイント部型枠、鉄筋継手スリーブへのグラウト注入・目地シール、位置合わせの工数が大きい。これらの工数を削減またはなくすことのできる構工法と接合手法を考案する必要がある。工期でみると、クレーンを使用した 1 ピースあたりの取付時間が 1 日の建方量を決める要因になっている（S 造では 6 人対応で 1 ピースの取付時間 10 分が最短）。この時間には、搬送作業と接合作業が含まれており、この両方を合理化することは工期短縮にも貢献する。

4. 1. 2 課題解決の方向性

(1) 構工法の提案

3章での素材・接合技術に関する点検と評価をもとに、構造体において飛躍的な生産性を実現する構工法を以下に提案する。対象とする建物は、6章で示されるパイロットプロジェクトⅡの外周架構のPCa造、およびS造とする。S造では、柱間隔を2倍と設定した。表4. 1. 2. 1に■で示した現状の接合方法に対して、★で示す接合方法を提案する。提案の詳細を以下に示す。

表4. 1. 2. 1 接合方法の提案

対象 接合法	PCa造			S造		
	柱-梁	柱-柱	梁-梁	柱-梁	柱-柱	梁-梁
溶接				■	■	■
ボルト				■	■	■
機械式継手	■	■	■			
スリーブ継手	■	■	■	④	⑤	
リベット・ねじ		②	③	④		
嵌合		★	★		★	⑥
ラッチ			★			
接着	①	★	★	★		
レーザ溶接			★			
特殊ボルト※						★
炭素繊維				★	⑧	
【接合なし】	★					

※：SHTBとアルミ溶射スプライスの組合せを想定する。

□内数字：以下の説明との対応、および仕様表の番号を示す。

a. PCa造

免震構造として地震時の安全性を高め、現場での工数削減のため、柱梁の接合位置を部材中央とすることで曲げ応力の伝達が少なくてすむ構法を提案する。本構法では、図4. 1. 2. 1に示すように、柱梁十字架構を基本とするため、①現場での柱-梁接合が不要となるとともに、品質上重要な接合部を工場で高品質に製造できる。②柱-柱接合部では、地震時の曲げモーメントが小さいため、主筋を継ぐ必要がなく、せん断力と軸力のみを伝達すればよいため、嵌合を容易に適用することができる。③梁-梁接合でも、地震時の曲げモーメントが小さいため、主筋の接合の必要がなく、せん断力のみを伝達すればよいため、柱梁十字架構を落とし込んで接合するラッチを容易に適用することができる。これにより、現場では十字型の柱梁架構を落とし込むだけのワンアクションで接合が完了し、工数の削減とロボット・自動化施工への適用性が向上する。

機械式接合のうち、嵌合、ラッチなどは、構造物が有する大きな力に対応しやすく、しかもワ

ンアクション取付けを可能とする。そのため、短時間作業が要求される極限環境下の作業での有効性も期待できる。また、接着剤は、柱－柱接合部、梁－梁接合部に鉄板を埋め込んでそれらを接着する新たな構法の可能性を生む。有機接着剤では、早期硬化性と柔軟性が確保でき、工数の削減と施工誤差吸収が可能となる。耐火性を確保するために、コンクリートによる防護、および境界部の耐火シールを検討する必要がある。

b. S造

梁付きソケットを柱に挿入して接着剤で接合する構法を提案する。この④柱－梁接合では、図4. 1. 2. 2に示すように、ソケットにより接着面積を拡大（10～20倍）し、鋼材強度（240～330MPa）に対する接着剤の接着力（50MPa）の不足をカバーする。接着剤の柔軟性により、施工誤差を吸収するとともに応力集中を緩和する。制震構造の適用で柱梁接合部の剛性低下を補う。火災時には、耐火被覆により有機接着剤の許容温度 200℃以下となるよう保護する。以上により、有機接着剤をそのまま構造体の接合に適用することができる。⑤柱－柱接合では、階の中央で接合することでせん断力と軸力のみ伝達すれば良く、3章で示されている嵌合の援用が可能である。⑥梁－梁接合では、柱と梁をソケットで接着接合することで、搬送を考慮しても梁の中央で接合できるため、せん断力のみを伝達すればよく、大型化・高強度化した特殊ボルトを採用して工数を極端に削減することができる。柱、梁ともワンアクションで接合が終了する。

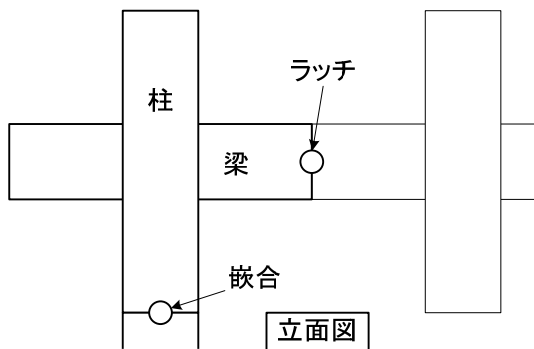


図4. 1. 2. 1 PCa造の構法案

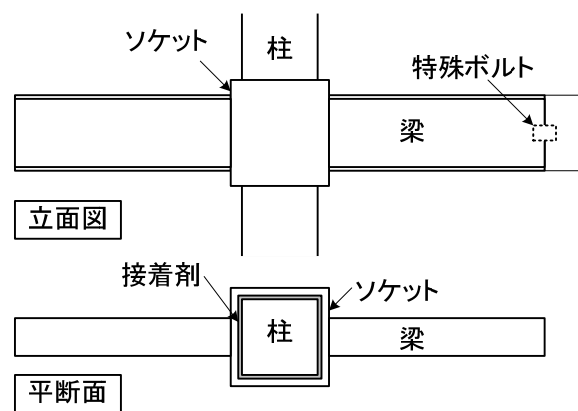


図4. 1. 2. 2 S造の構法案

c. 工場生産で用いられているレーザ溶接の建築現場応用

鉄筋や鉄板などの鋼材を現場でスペースの制約なく高速に全強接合できれば、構造形式や部材位置に関係ない汎用性が高い接手法となる。レーザ溶接は、高速での接合や遠距離接合による狭隘部での接合が可能である。例えば、図4. 1. 2. 3に示すように、⑦PCa造の梁鉄筋の全強接合が必要な箇所で、狭い隙間を通して鉄筋を溶接できれば、溶接後隙間を耐火シールするだけで接合が終了し、通常のスリーブ継手で必要となる後処理の型枠、コンクリート工事が不要となる。被接合材である鉄筋の径とレーザ溶接設備の大きさの関係性から本接手法の適用範囲の選定や、安全性の確保のためのロボット・自動化技術の開発検討を行う。

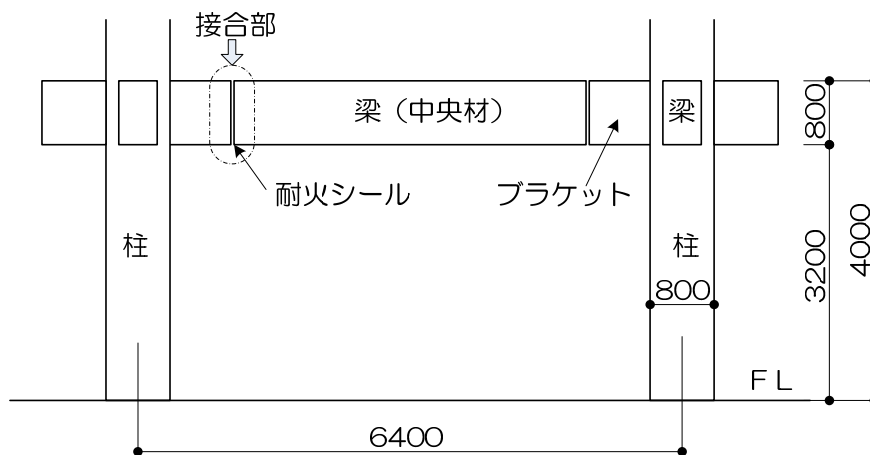


図4. 1. 2. 3 レーザ溶接の適用箇所

d. 炭素繊維

炭素繊維は、重量比で強度、剛性が鋼材より高く、人手による高強度の接合の可能性を秘めている。例えば、図4. 1. 2. 4に示すように、⑧接合プレートを取り付けた梁を、拘束治具により柱に接合する構法[1]では、治具を炭素繊維強化プラスチック（以降 CFRP）で製作することで、下部治具はあらかじめ柱に設置しておけば受け材も兼ねた拘束治具となり、上部治具は人手により挿入して柱と梁を一体化できる。これにより、接合工数を大幅に削減できる。炭素繊維の比強度の大きさを利用して、今後、リニューアルでの活用も視野に入れた検討を行う。

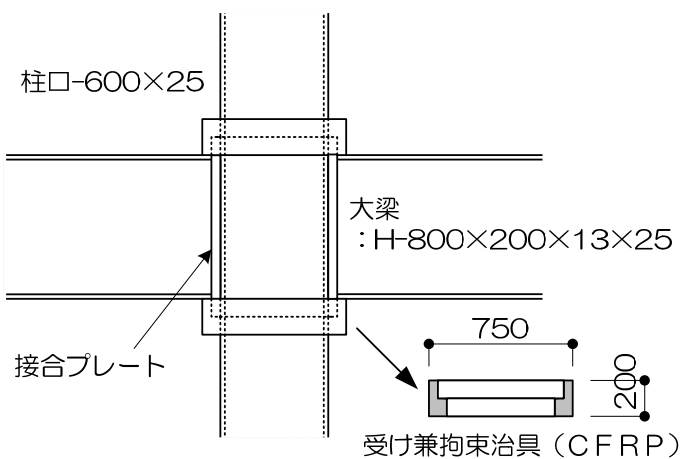


図4. 1. 2. 4 CFRPによる柱梁接合

(2) 接合部仕様と実現難易度評価

代表的な接合部の仕様と実現難易度評価を整理して表4. 1. 2. 2に示す。

表4. 1. 2. 2 接合仕様と実現難易度評価

対象	項目	仕様	備考	現 行 技 術 で 可 能	現 行 技 術 の 延 長 で 実 現 可 能 性 あ り	大 規 模 な 技 術 開 発 が 必 要	シ ーズ 全 く な し
② PCa造 柱—柱 嵌合	強度	75tf (900tf)	せん断 (圧縮)		●		
	剛性 (G・A)	500×10 ³ tf	せん断		●		
	耐火性	450℃・3時間性能保持			●		
	耐久性	60年後に設計強度確保			●		
	繰り返し	0.7×設計強度で2500回			●		
	大きさ	15cm×15cm×長さ100cm			●		
	環境	屋内：5～35℃、日射なし	東京のオフィス内想定		●		
	接合時間	0			●		
	フルシフトリフト	ガタなし			●		
③ PCa造 梁—梁 ラッチ	強度	100tf	せん断			●	
	剛性 (G・A)	288×10 ³ tf	せん断			●	
	耐火性	450℃・3時間性能保持			●		
	耐久性	60年後に設計強度確保			●		
	繰り返し	0.7×設計強度で2500回			●		
	大きさ	15cm×15cm×長さ50cm			●		
	環境	屋内：5～35℃、日射なし	東京のオフィス内想定		●		
	接合時間	0			●		
フルシフトリフト	ガタなし					●	
④ S造 柱—梁 接着	強度	50MPa	接着面：主に引張、 複合応力も考慮			●	
	剛性 (E)	1GPa	ヤング係数	●			
	耐火性	200℃・3時間性能保持	耐火被覆で抑制			●	
	耐久性	60年後に接着強度50MPa				●	
	繰り返し	0.7×設計強度で2500回				●	
	大きさ(厚さ)	1面：100cm×60cm(数mm)			●		
	環境	屋内：5～35℃、日射なし	東京のオフィス内想定		●		
	接合(硬化)時間	5分			●		
フルシフトリフト	特になし			●			

表 4. 1. 2. 2 接合仕様と実現難易度評価（つづき）

対象	項目	仕様	備考	現行技術で可能	現行技術の延長で 実現可能性あり	大規模な技術開発 が必要	シーズ全くなし
⑤ S造 柱-柱 嵌合	強度	100tf (900tf)	せん断 (圧縮)		●		
	剛性 (G・A)	243×10 ³ tf	せん断		●		
	耐火性	450°C・3時間性能保持			●		
	耐久性	60年後に設計強度確保			●		
	繰り返し	0.7×設計強度で2500回			●		
	大きさ	30cm×30cm以下	柱寸法の半分		●		
	環境	屋内：5～35°C、日射なし	東京のオフィス内想定		●		
	接合(硬化)時間	0			●		
	フレキシビリティ	ガタなし			●		
⑥ S造 梁-梁 特殊 ボルト	強度	71t	せん断		●		
	剛性 (G・A)	79×10 ³ tf	せん断		●		
	耐火性	450°C・3時間性能保持			●		
	耐久性	60年後に設計強度確保			●		
	繰り返し	0.7×設計強度で2500回			●		
	大きさ	30cm×30cm以下			●		
	環境	屋内：5～35°C、日射なし	東京のオフィス内想定		●		
	接合(硬化)時間	0			●		
	フレキシビリティ	ガタなし			●		

以上より、嵌合は現行技術の延長での技術開発により短期間に実現できる見込みである。ラッチは、強度、剛性、ガタの削減において課題を有しており、より長期の技術開発を要する見込みである、接着は、60年後の強度の確保と火災時の安全性の確保に課題を有しており、5年程度の大規模な技術開発が必要な見込みである。

(3) ロボット・自動化への基本仕様

a. レーザ溶接

前述の通りレーザ溶接は、図 4. 1. 2. 3 で示す狭隘部の梁主筋の溶接が可能であり、工数の大幅な削減に寄与するが、レーザヘッドを人が持って溶接することは精度上、品質上、安全上不可能である。そのため、ロボット・自動化が必須であり、以下の作業環境・条件でのロボット開発が課題となる。

- ・ 20mm 程度の隙間にある直径 20～30 mmの鉄筋を 500 mm程度の遠距離から溶接
- ・ 下層階のコンクリート床上 3.2～4.0m の位置で接合
- ・ ブラケットを利用した梁（中央材）の仮固定は可能
- ・ クレーンを使わずロボットで安全に自動溶接
- ・ 溶接ロボットの設置移動は人力で行いたい。パワースーツ着用は想定

鉄筋レーザ溶接ロボットを検討したイメージを図4. 1. 2. 5示す。同図ではコンクリートの間が大きく示されているが、この隙間が 20 mm程度でも同様のレーザ溶接が可能な見込みである。光ファイバにより現場内 300m の引き回しができ、多くの現場では、ロボット制御ユニットを一か所に設置した状態で現場全体の溶接が可能である。レーザヘッド、多関節ロボットはエレベータによる他階への移動が可能である。分解すれば人力で移動できる可能性もある。

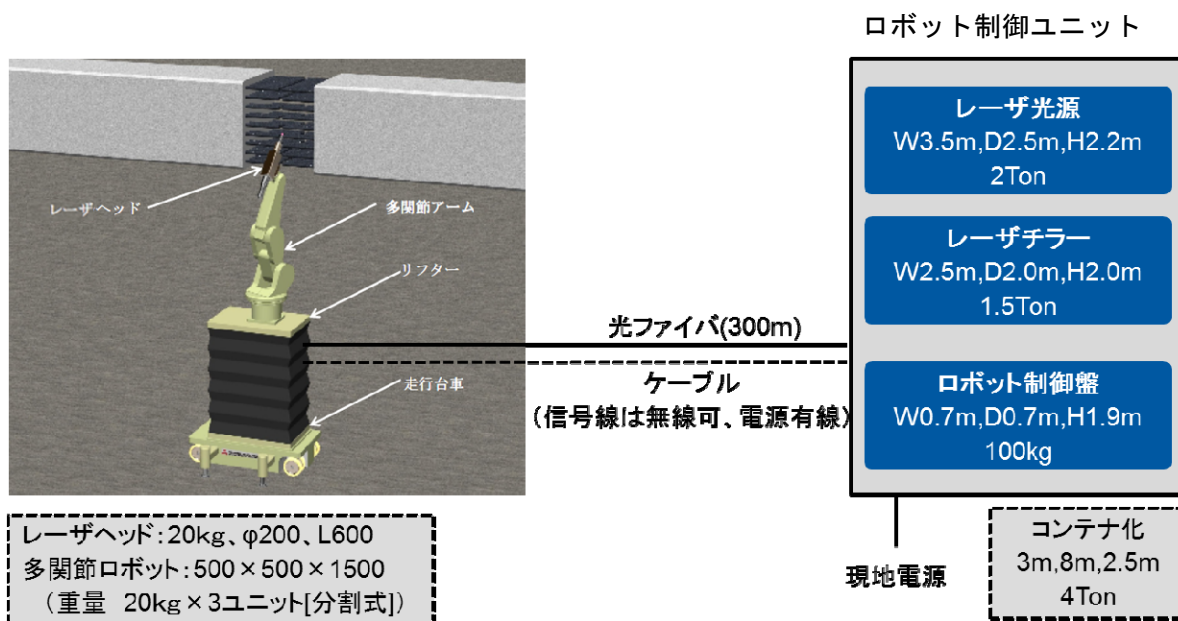


図4. 1. 2. 5 鉄筋レーザ溶接ロボット（レーザ出力 30kW）
（三菱重工業（株）資料より）

b. 柱梁部材の建て方

接合が簡略化されれば作業効率が飛躍的に向上し、精度計測も高速で行う必要がある。特に柱梁部材の建て方では、人手による計測速度をはるかに超える自動計測での三次元座標の提供が可能になれば非常に有効が大きい。計測人員（2 人日）を削減し、クレーンの占有時間の削減により飛躍的な生産性向上が果たせる。そのためには、図4. 1. 2. 6の設置手順における高速・高精度での柱頂部の位置計測が重要なため、以下の作業環境・条件での自動計測装置の開発が課題となる。

- ・ いったん仮置きして施工誤差（基点に対する倒れ、上下は基点+設計柱長さ）を計測
- ・ 誤差を是正するために接合面のシムを設定
- ・ 接合面の水平位置は「ダボ」により設定
- ・ 一般的には1層ごとの設置。最大では2層ごと（高さ 8m）で設置。設置方法は同じ

また、ここで計測した柱梁部材の三次元位置情報を BIM にフィードバックすることで、後工程での位置決めを早く、正確に行うことも可能である。

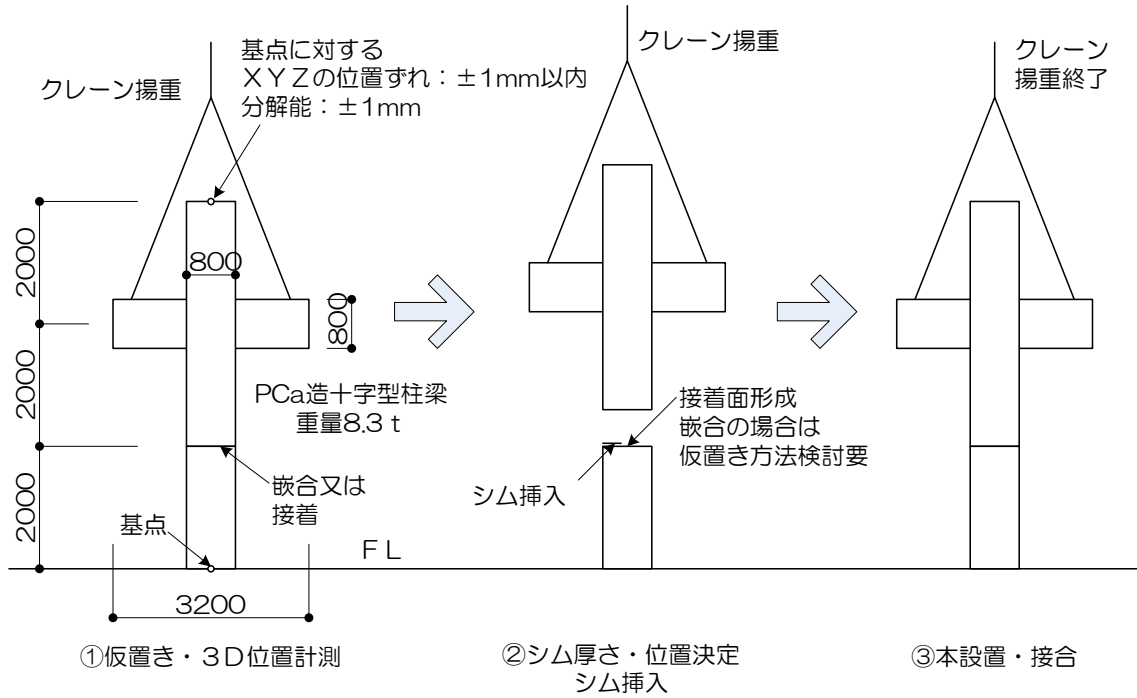


図 4. 1. 2. 6 PCa 造柱梁設置手順

参考文献

[1] (独) 建築研究所「21 世紀鋼構造フォーラム研究報告-6 年半の活動とその成果-」 建築研究資料 No. 113, 2008. 2

4. 2 仕上げにおける接合

4. 2. 1 現状と課題

適用対象は、主に国内の一般新築建物、およびリニューアルの作業に活用することを視野に入れて研究課題を設定する。

現状の建築物の構造は、現場でコンクリートを打設する鉄筋コンクリート造（以降 RC 造）や鉄骨造（以降 S 造）が主流であり、外装材の接合対象は RC 造や ALC 造（Autoclaved Lightweight aerated Concrete：高温高压多湿養生で製造管理された軽量気泡コンクリート）の外壁となっている。

多くの建物で一般的に用いられる外装開口部仕上げ材のアルミサッシは、構造体に後付・接合される工法が主流であり、輸送・搬入、荷降し・揚重、位置決め、溶接固定、モルタル充填のステップを踏む。この構造体と外装であるアルミサッシの施工方法は、30年以上変わらない接合方法を継続している。この工法では、サッシ枠の位置決めは、くさびを使用した調整作業となり、構造体への固定は、構造側埋込みアンカーとサッシ側アンカーとを連結筋を介し溶接にて接合するという経験と技能が要求される熟練工の作業となっている上、非常に工数が掛かっているのが現状である。施工に際しては、天候の影響を受けるとともに、溶接作業の火気に対する養生も必要となる。また、境界部分にはモルタル充填・防水シール施工など、関連作業の手間が多く工数も要している。

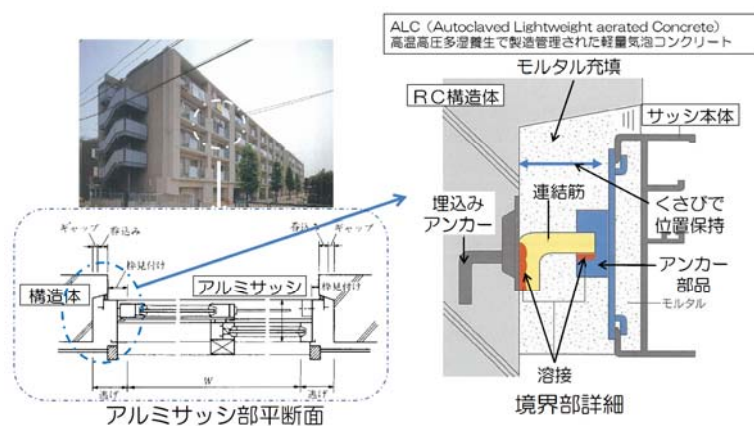


図 4. 2. 1. 1 現状の納まり



くさびでの位置保持



溶接作業

図 4. 2. 1. 2 現状の接合作業

サッシ取付作業の工数分析では、サッシ建込み、溶接段取り、アンカー溶接など接合に係わる所要工数が、全体作業工数に対し過半数を構成する。

また、この他のサッシ関連工程ではサッシの溶接・仮固定後、左官工事によるモルタル充填が接合作業にあたり、その養生を経て、ガラス工事でガラスはめ込みまでが、湿式工法での一連作業となり、これら一連の作業に要する工数は関連工程において全体の 2/3 以上を占める。また、これらの作業手順は、現場での溶接時に飛散する微粒子によるガラスへのダメージを防止するため、ガラスは現場溶接後の取付けを余儀なくされている。

あわせて、建設業に従事する就業者の高齢化、熟練工不足が建築現場での生産性を制約している。そのため、仕上げ工事においても同様に接合作業を合理化することで、省力化、軽減を果たし飛躍的な生産性の向上が期待できる。

4. 2. 2 課題解決の方向性

構造体とアルミサッシの境界部分への「モルタル充填」、溶接接合により制限を受ける「ガラスの現場はめ込み」など、現場作業を可能な限り減らす作業の合理化は、施工の効率化に結び付くと考えられ、飛躍的な生産性の向上を生むために以下の技術を提案する。

- ・完全乾式接合など、溶接に替わる異分野での接合手法の応用
- ・ロボットによる搬送・設置および位置決め自動化

(1) 素材技術（接着剤による接合）

構造体（RC 造、ALC 造）とアルミサッシとの固定部には外力（風圧力、地震力など）により、せん断・引張り・圧縮力が作用する（一般的には風圧力による荷重が大きい）。要求される風圧力、開口サイズにより固定部に作用する荷重は変わるが、モデルケースとして風圧力：2400Pa、開口サイズ：w2400×h2400 とした場合、固定部には最大 1189N の反力値 P を算出することができる。これを基に各接合工法にて固定部に作用する力・方向はそれぞれ図 4. 2. 2. 1 の通りになる。

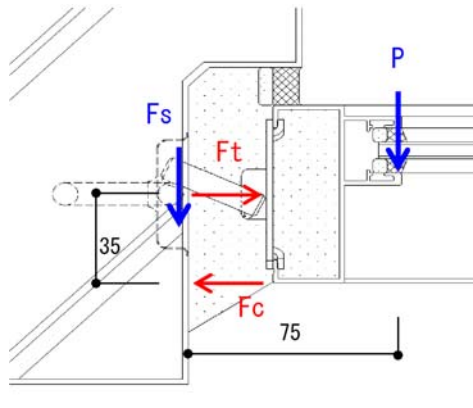
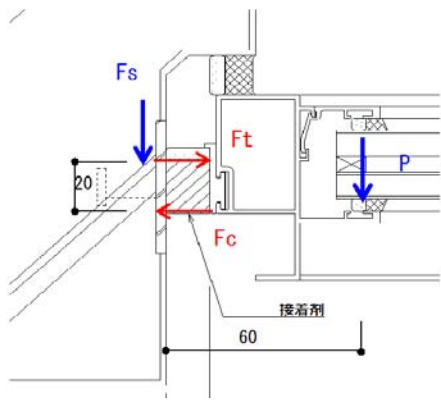
在来接合工法（アンカー溶接、モルタル充填）	接着接合工法（ピッチ接着、モルタル未充填）
	
<p>アンカーにせん断力 F_s 1189N、 引張り力 F_t 2548N</p>	<p>接着剤にせん断力 F_s 1189N、 引張り力 F_t・圧縮力 F_c 3567N</p>

図 4. 2. 2. 1 各接合工法

上記の検討結果より、アルミサッシとの接合部に求められる仕様と実現難易度評価を整理して、表4. 2. 2. 1に示す。

表4. 2. 2. 1 接合仕様と実現難易度評価

対象	項目	仕様	備考	現行技術で可能	現行技術の延長で実現可能性あり	大規模な技術開発が必要	シーズ全くなし
アルミサッシ	強度	1.2 (N/mm ²)	せん断	●			
		-	単純な引張力作用なし				
		9 (N/mm ²)	曲げモーメント				
		1.5 (N/mm ²)	圧縮 (長期)				
		接着剤面積 50 mm × 20 mm/1箇所と仮定					
	剛性	1GPa	せん断 (構造体より)	●			
	耐火性	(660℃~781℃)	要求温度検証による				●
	耐久性	60年後に設計強度確保	湿度90%まで想定		●		
	環境	0℃~70℃	都内想定		●		
	接合時間	5分		●			

現段階では、外装の多くが対象となる「延焼の恐れのない部分」に限定して評価することで、接着剤によるピッチ接合方法が、現行技術の延長で実現できると評価される。ただし、躯体開口精度は、取付け精度を確保する上で重要な管理事項であり、施工誤差±5mm以内が求められる。

これらは、机上での検討であるため、性能などに関わる各要素・作業性を含め実証実験にて確認が必要である。

最終的には、止水性能も兼ねる全面接着固定法により、さらなる生産性向上を目指すとともに、耐火性能も満足する接合方法を目指す。

(2) ロボット・自動化

完全乾式接合の大型外装材の施工に係わる建築用ロボット導入の目的と求める機能を以下に記す。

目的：アルミサッシの大型化およびガラスを含む複合化した重量物の外装材を、所定位置へ据付・接合する作業には、ロボット化が必須であり、ロボット・自動化の導入により省力化を果し、在来の工法より大きく施工工数を削減する。

機能：移動設置を工事用エレベータなどで可能とする建築用ロボットとし、自動搬送、自動位置決め (BIM 連動)、保持・接合を有する機能。



図4. 2. 2. 1 施工用ロボットによる外装材の接合作業

これまでの検討において、完全乾式接合およびロボット・自動化を実現する提案工法と在来工法とを比較すると以下のイメージとなる。

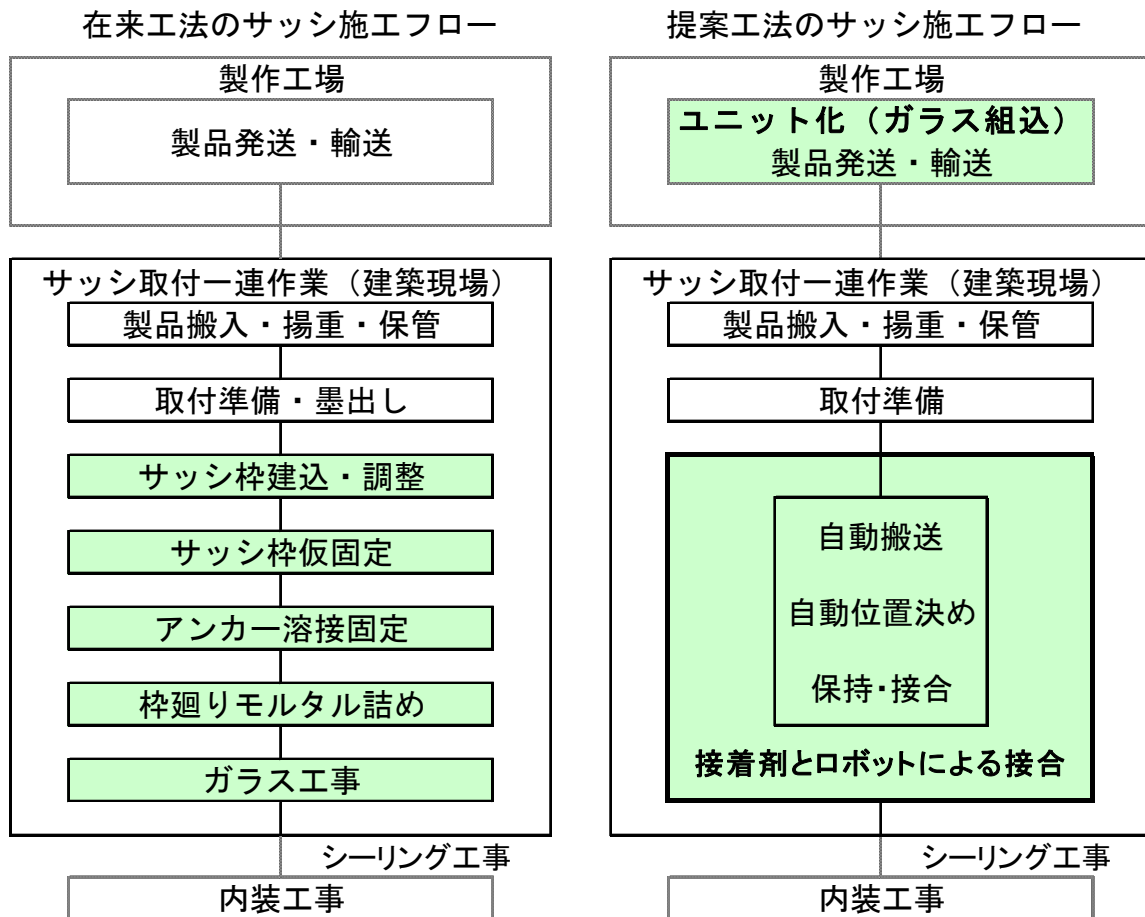


図4. 2. 2. 2 施工フロー比較

無火気・モルタルレスによる完全乾式接合など、溶接に替わる新たな接合手法、搬送作業の自動化、位置決め、接合作業に係わる BIM 連携ロボットの自動化を推進・確立することにより、関連工程の作業工数は 1/5 程度に縮減が見込める。

在来の工法は、人力、技量に頼るところが大きかったが、一連の作業をロボットのオペレーション作業に置き換えることで、今後予想される更なる建設就業者の減少問題解決にも大きく寄与することは確実であり、本研究会のテーマである「接合作業」の効率を飛躍的に向上させる構工法の構築にも寄与できるものと考ええる。

4. 3 設備における接合

4. 3. 1 現状と課題

建設現場における設備の据付工事は、一般的に建築躯体完成後に躯体チェックを行い、材料搬入、トラックからの材料荷降ろし、運搬、揚重、位置決め、接合の各作業を複数の部品について繰り返し行う。そして試運転および検査後に引渡しされる。

現地で組立てる部品は、現場の据付工数を削減するため、なるべく工場でユニット化するが、重量やサイズが大きくなる場合には、各作業をより安全かつ短時間に行うことが検討課題となる。

設備と躯体の接合部は、事前に図面で取り決めた躯体の許容誤差に対応しているが、躯体誤差の縮小、誤差の早期把握、新素材採用の3つの視点からの工期の改善検討が可能と考えられる。

設備の接合作業は一般的にボルトや溶接などで行う。組立時の調整範囲がボルトの長穴による調整では対応できないほど大きく、強度や寿命の確保が必要な部分には、汎用性の高いアーク溶接を用いることが多い。しかし溶接は熟練を要し、品質確認にも手間が掛るので最新の接合技術に置き換える検討が必要である。

重量物の運搬と正確な位置決めには治具化とロボット化の検討が有効と考えられるが、さまざまな建築仕様に対応するためには標準化が必要である。

建設現場では複数の設備業者と仕上げ業者が各階で繰り返し作業を行うが、それぞれの材料の運搬作業や作業工程、取り合い寸法の調整を一括管理することによって待ち時間が削減できる。また昇降機を早期利用可能とし、作業者の縦方向の移動を高速化することで、全体の効率化が実現できる。

以下に、空調・衛生設備と昇降機設備について上記の具体的な事例を示す。

(1) 空調・衛生設備

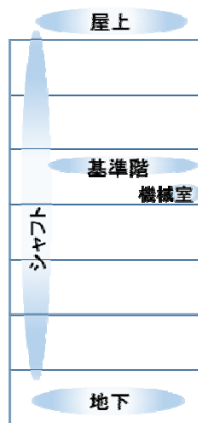
空調・衛生設備は屋上あるいは地下に設置されている空調・衛生機器類からキャリア（配管・ダクト）が建築のシャフトを通して各基準階の末端器具・機械類に接続される。各設備機器の建築躯体への設置および各キャリアの設置および接合が主の工事である。図4. 3. 1. 1に主な空調・衛生配管の仕様例を示す。これらの工事の生産性を向上させるためには、現場の作業をなるべく工場作業にシフトすることが重要であり、近年では設備機器と配管あるいは複数の配管を一体化して工場製作する設備ユニット工法により一定の効果を上げている。ただし、現場において設備機器や設備ユニットの建築躯体への設置あるいは設備ユニット間の配管接合に手間がかかっており、それを解決することで飛躍的な生産性向上が期待される。

図4. 3. 1. 2に屋上や地下に設置される設備機器や設備ユニットの施工事例を示す。設備ユニットは、配管や機器類を型鋼材で支持し、運搬および揚重できる形状に一体化したものである。建築躯体の床上あるいは天井に設置する。重量は10t~20t、配管径は150A~300Aである。配管の材質は鋼管、配管の接合方法は溶接、フランジ、メカニカル接合などである。複数の配管を接合する場合は要求される接合精度（5mm以内）に位置決めされることは困難であり、現合管を考慮するか、接合精度以内となるよう1本毎に移動させるなど、作業の手間がかかる。

図4. 3. 1. 3にシャフトにおける縦配管ユニットの施工事例を示す。重量は1t~5t、配管

径は 150A~300A である。配管の材質は鋼管、配管の接合方法は溶接、フランジ、メカニカル接合などである。課題は前述の屋上・地下の設備ユニットと同様である。

図 4. 3. 1. 4 に基準階の天井に設置する設備の事例を示す。空調・衛生や電気工事などの複数の業者が設置位置出し、支持金物取り付け、材料の揚重、接合などを平行して行うため作業が錯綜し、非効率的である。天井に設置する設備のユニット化はほとんど実施されていない。配管の材質は鋼管、樹脂管、銅管などである。配管径は 10A~65A、接合方法はネジ、フランジ、ろう付け、メカニカル接合などである。



	配管種類	材質	口径(A)	最高圧力(Mpa)	規格
屋上	水配管	鋼管	150~300	1	JIS G 3452-87
	冷媒管	SUS管	150~300	1	JIS G 3448-04
シャフト	水配管	鋼管	10~50	4.15	JIS B 8007-02
	冷媒管	鋼管	150~300	1	JIS G 3452-87
基準階	水配管	SUS管	150~300	1	JIS G 3448-04
	冷媒管	鋼管	10~50	4.15	JIS B 8007-02
地下	水配管	鋼管	65以下	1	JIS G 3452-87
	冷媒管	SUS管	65以下	1	JIS G 3448-04
	水配管	鋼管	10~20	4.15	JIS B 8007-02
	水配管	鋼管	150~300	2	JIS G 3454-88
		SUS管	150~300	2	JIS G 3448-04

図 4. 3. 1. 1 主要設備の仕様例



図 4. 3. 1. 2
屋上・地下の設備ユニット



図 4. 3. 1. 3
縦配管ユニット



図 4. 3. 1. 4
基準階の天井設備

複数の配管が組み込まれた設備ユニットの場合、接合するための位置決め誤差は 5 mm 以内が望ましいが、建築躯体の精度や工場における製作精度、現場設置のための位置決め精度などが合成されるため、要求精度を確保することは困難である。

このような状況下において、飛躍的な生産性向上を生むために以下の技術を提案する。

- ①設備ユニットの接合において簡単に接合できるための位置決め・接合の自動化
- ②設備ユニットの接合において簡単に接合できるため誤差を吸収できる接合方法

(2) 昇降機設備

昇降機は躯体（昇降路および機械室）が完成し、確認申請の認可を受けた後に現場着工するため、早期に着工を開始するためには昇降機の仕様決りを前倒しする必要がある。

そのためには BIM パーツを共有し、建築と昇降機の計画設計を並行して検討することが有効である。(図4.3.1.5) BIM データを用いれば搬入経路の寸法把握も容易になるので、より現場作業を効率化できるユニット化や保管場所の検討も可能になる。

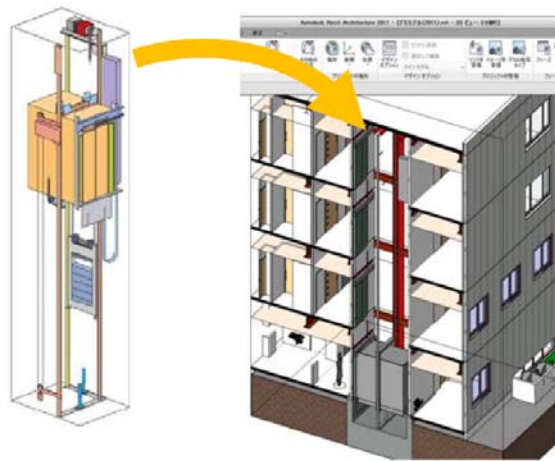


図4.3.1.5 BIM活用による仕様決定と現場着工の早期化

建設現場には工場で半ユニット化された材料を搬入するが、高精度な位置決めが必要なため、建築躯体の誤差を仕上げ作業まで考慮に入れて着工前に正確に確認する必要がある。

躯体との接合は、主に鉄筋コンクリート造の場合あと施工アンカー、鉄骨造の場合アーク溶接で行われている。

作業は昇降路内に吊り下げたゴンドラや仮設足場、昇降路および機械室の開口部周辺で実施することが多いため、異業種も含めた安全対策も重要である。

躯体との接合部は、建築基準法で定められる耐震強度と防火性能の確保が必要である。

図4.3.1.6に代表的な昇降機の概要図、図4.3.1.7に据付手順と接合部の例を示す。

昇降機の構成部品の中で、ガイドレールと出入口は建築の高さに比例して設置数が増え、高精度な位置出しが必要であるため工期の半分以上を占める。

出入口は最終的に意匠仕上げとの取り合いも重要なため、建築墨と躯体誤差を正確に確認してから着工する必要もある。

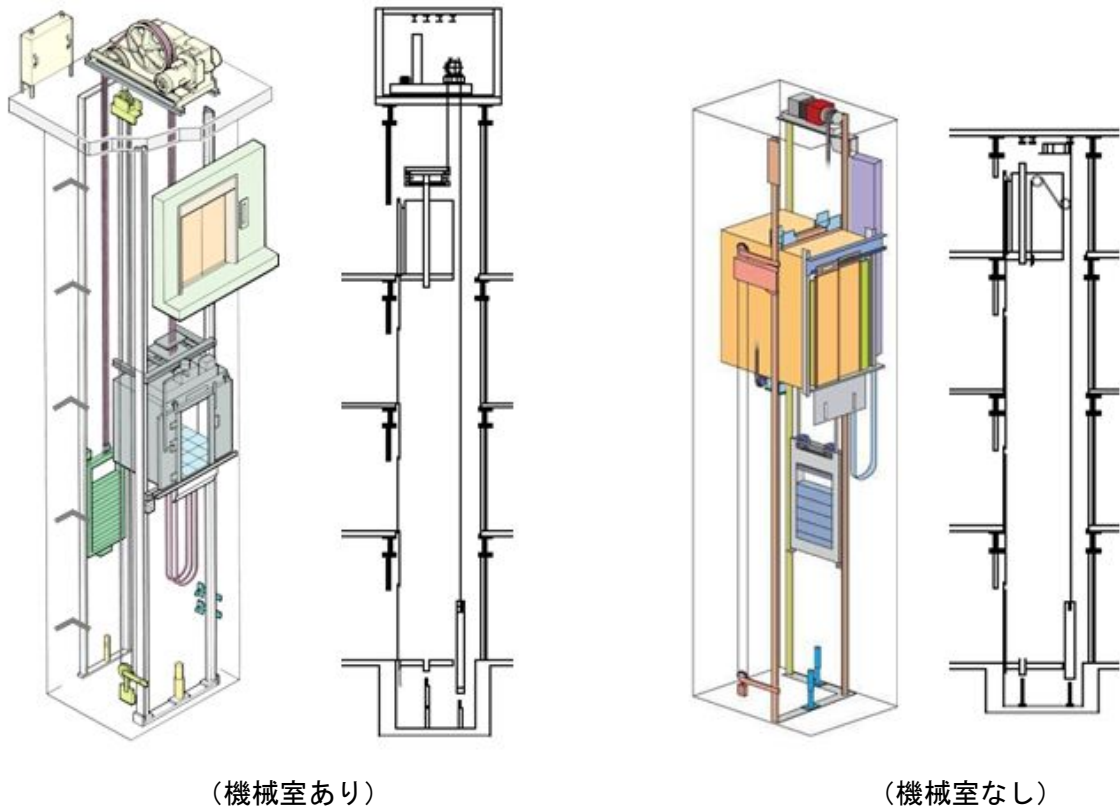


図 4. 3. 1. 6 昇降機の概要図 (4 停止の場合)

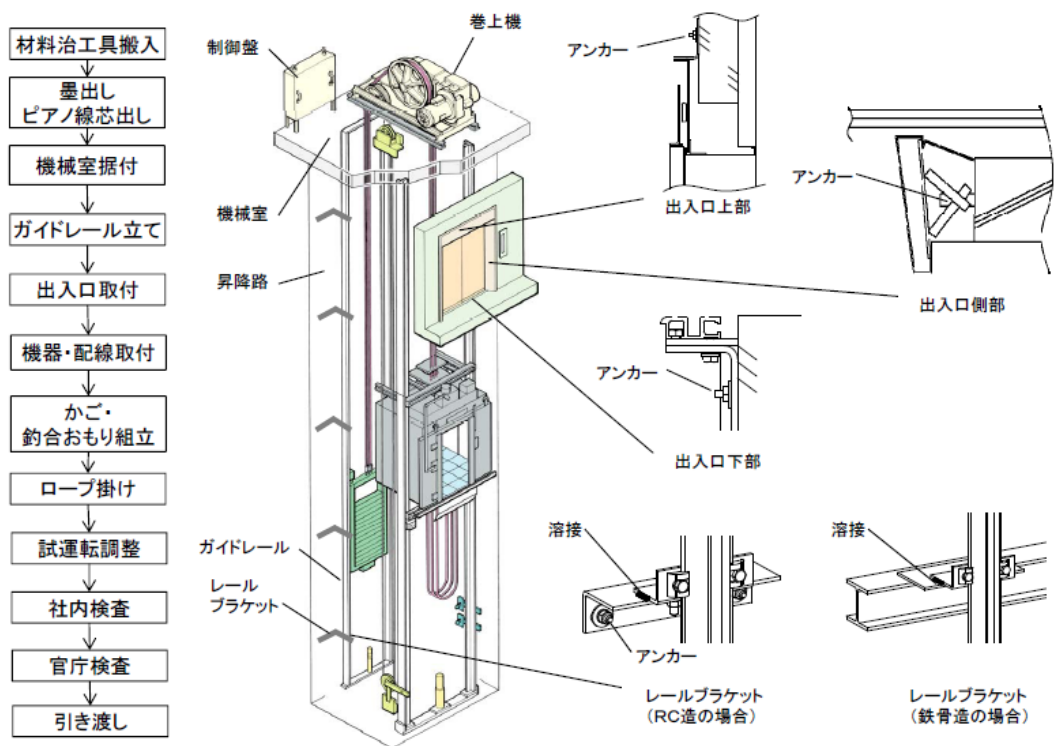


図 4. 3. 1. 7 据付手順と接合部の概要図

各階に設置される出入口と4本の一体化されたガイドレールは、昇降機の安全性と乗心地を確保するためには、昇降路全高で鉛直かつ相対距離を一定に据付する必要があるため、躯体との接合部分に誤差の調整機構を設ける必要がある。

躯体との接合は現状30mm程度の躯体誤差を考慮した鋼製のブラケットを用いている。

位置決めは昇降路全高に鉛直に設置するピアノ線を基準とし、レールブラケットと躯体の接合は、鉄骨構造の場合、主にアーク溶接を用いている。

これら（出入口、ガイドレール）の作業は昇降機の据付工事の中で最も工数が掛り、かつ熟練を要する作業であるため、生産性を向上するために改善が必要な課題である。

4. 3. 2 課題解決の方向性

(1) 空調衛生設備

1) 設備ユニットの接合において簡単に接合できるための位置決め・接合の自動化

設備ユニットは前述のとおり、屋上・地下階、基準階、シャフトに設置される。それらの位置決め・接合の自動化により飛躍的な生産性向上が可能となる。以下にその詳細を述べる。

a. 屋上・地下および基準階の設備ユニット施工方法

屋上・地下および基準階に設置する配管やダクトなどの設備についてはなるべく工場で製作し、運搬可能なサイズにユニット化して現場に搬入する。天井に設置するユニットについては所定のフロアの床上でユニット間の接合を行った後、一括で揚重・位置決め・設置を行う。これらの作業はなるべくロボットにより自動化する。ただしユニット間の接合は製作誤差、位置決め誤差を考慮して、それらの誤差を吸収できる接合方法により手作業で行う。この方法により現場作業が大幅に削減する。さらに高所作業が激減するため安全性の確保にも寄与する。図4. 3. 2. 1に天井に設置するユニットの施工イメージを示す。

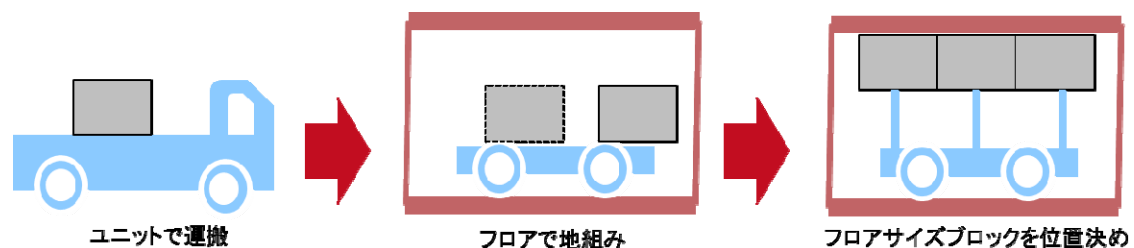


図4. 3. 2. 1 天井に設置するユニット施工イメージ（三菱重工業(株)資料より）

設備ユニットを検討するうえで作業効率のみならず製作工程を含めたトータル的なコストメリットが必要であり、そのためにはなるべく標準化することが極めて重要となる。多数の現場で標準化された設備ユニットを採用することにより、自動化のための専用機械などの開発が実現可能となる。基準階の天井に設置する設備ユニット化においては、多業種の設備の一体化が必要とされ、業種間の垣根を越えた取組みが重要となる。

想定されるユニットのサイズおよび重量は、以下の通りである。

- ・ 地下および屋上のユニットはサイズが2.5mW×3.0mH×6.0mL程度、重量が5t～10t程度
- ・ 基準階のユニットはサイズが2.0mW×1.0mH×4.0mL程度、重量が0.5t～1t程度

図4.3.2.2に屋上・地下に設置されるユニットのイメージを示す。図4.3.2.3に基準階に設置される天井ユニットのイメージを示す。

ロボットはBIMデータに基づき設備ユニットの搬送、位置決めを行う。合わせて施工結果の位置情報をロボットにより取得し、BIMデータの更新を行うことで施工後の正確なBIMデータが構築できる。それにより次工程の工場製作精度が向上するとともに、工事後にBIMを利用した建物の維持・管理が有効に活用できる。

搬送方法としては、種類の異なるユニットの重量や大きさに対応するため、複数の移動ロボットによる協調作業が有効である。その移動機構としては、全方向に駆動可能なアクティブキャスタの利用が考えられる。

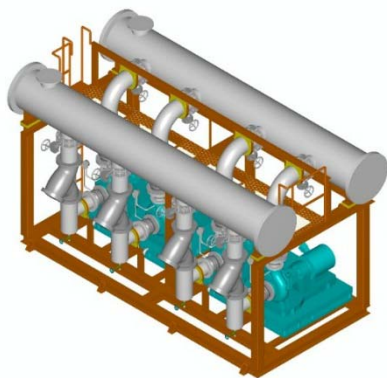


図4.3.2.2
屋上・地下ユニットのイメージ

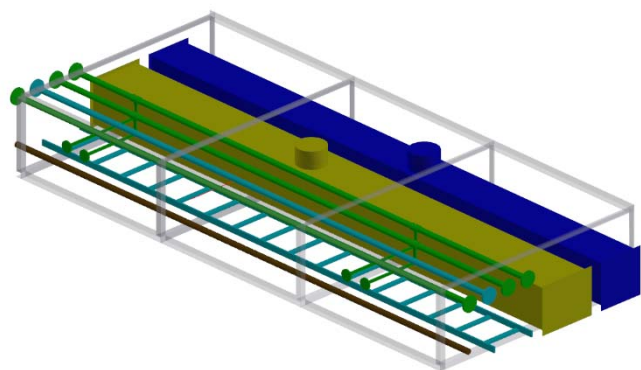


図4.3.2.3
基準階天井ユニットのイメージ

b. 縦配管ユニットの施工方法

シャフトに設置される縦配管のユニット化については前述の通り既に実用化されているが、ユニット間の配管接続はその位置あわせや接合作業に手間がかかっている。ユニットがクレーンにて吊りおろされて、既設ユニットに配管接合される過程において、一括で複数の配管が接合できる手法を考案する。例えば図4.3.2.4に示すとおり、配管固定用金物に取付けられた専用治具により嵌合し、それにより許容誤差以内で位置あわせが可能となる。

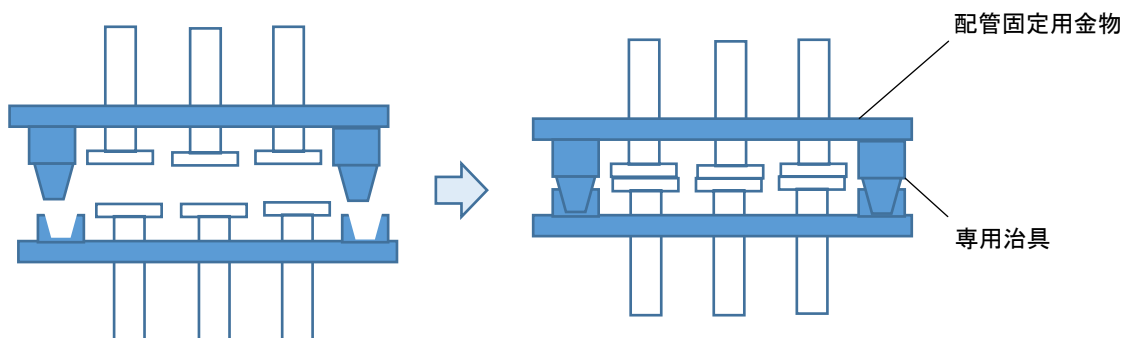


図4.3.2.4 縦配管ユニットの一括接合イメージ

2) 設備ユニットの接合において簡単に接合できるため誤差を吸収できる接合方法

誤差を吸収できる接合方法としては可とう性のある樹脂管の採用や、誤差のある状態のまま接合し、隙間部分を接着剤などで充填するなどにより、接合の手間が大幅な改善が期待できる。その場合の許容誤差としては最大 10 mm～20 mm程度と想定される。さらに 3D プリンタによる誤差吸収部品の現地製作への展開も期待できる。以下にその詳細を述べる。

a. 樹脂管の採用

対象となる樹脂管の種類は、建物用の給水配管としてすでにピット内配管や縦管として用いられている建築設備用ポリエチレン管が活用できる。接合方法は電気融着である。

樹脂管は可とう性があり、許容ひずみ内で配管をたわませることができる。これにより接合時に発生する誤差（芯ずれ）を吸収できると考えられる。一方、最初から芯をある程度ずらした上でオフセット配管を用いて接合する方法も考えられる。

これらを実現するために施工手順方法の確立や専用治具・工具の開発が必要となる。

図 4. 3. 2. 5 にたわみを利用した接合のイメージ、図 4. 3. 2. 6 にオフセット配管による接合のイメージ、図 4. 3. 2. 7 に各配管径において 20 mm たわませた場合の強度検討結果を示す。

長期的な検討課題として空調冷温水への適応範囲（温度、圧力）を拡大するための性能向上が必要となる。

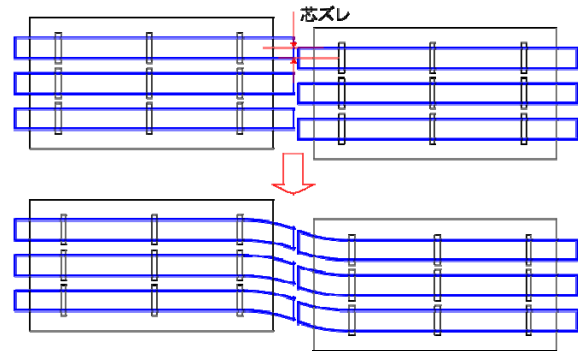


図 4. 3. 2. 5
たわみを利用した接合イメージ
(積水化学工業(株)資料より)

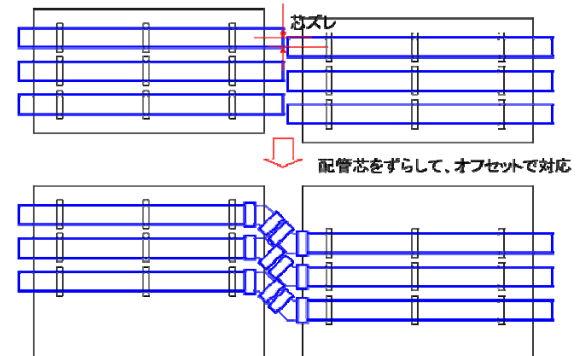
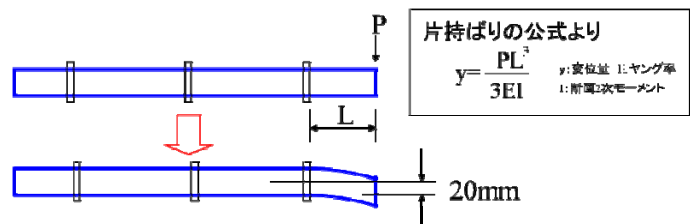


図 4. 3. 2. 6
オフセット配管による接合イメージ
(積水化学工業(株)資料より)

高密度ポリエチレン管（エスロハイパーAW）の場合：
接続に必要な芯ズレ量を 20mm とした場合の管端～
支持部 L と荷重 P を算出する。



呼び径	200				150				100			75		50	
長さL	0.5m	1m	1.5m	2m	2.5m	0.5m	1m	1.5m	2m	0.5m	1m	1.5m	0.5m	1m	0.5m
変位量20mmに 必要な荷重P(kgf) ※1	3250	405	120	51	26	1100	138	41	18	254	32	10	94	12	20
上記のひずみ量(%) ※2	2.6	0.65	0.29	0.16	0.1	1.98	0.5	0.22	0.13	1.37	0.35	0.16	1.07	0.27	0.73
判定	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	○	×	○	○

※1 荷重 P は現場での作業性を考慮して 30kgf 以下とした。 ※2 エスロハイパーAW の許容ひずみは 10% とした。

図 4. 3. 2. 7 たわみを利用した接合の強度検討 (積水化学工業(株)資料より)

b. 3D プリンタの活用

誤差を吸収する方法として前述した樹脂管が使用できない場合、あるいは想定される許容誤差を超えた場合、3D プリンタによる誤差吸収部材の現地作成が考えられる。ただし現段階の技術では素材の強度不足あるいは製作時間が長い、製作可能サイズが小さいなどの課題があり、今後の技術開発の動向に注目する必要がある。

図4. 3. 2. 8に三次元計測により接合箇所的位置を計測し後、3D プリンタによる誤差吸収部材を作成して接合するまでのイメージを示す。

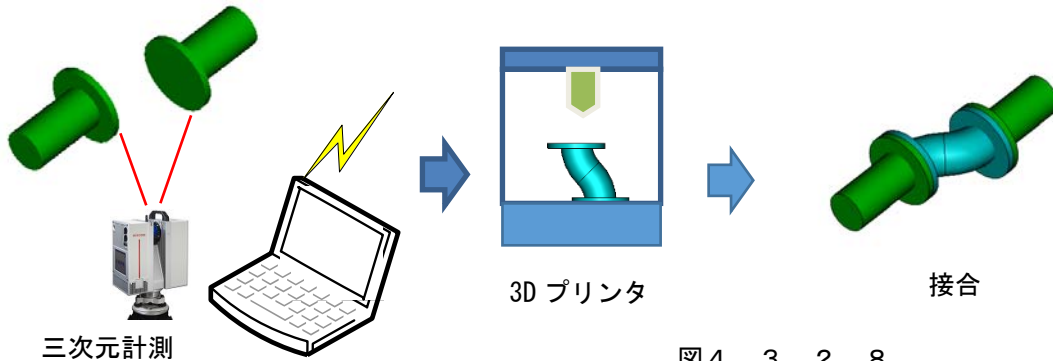


図4. 3. 2. 8
3D プリンタによる誤差吸収部材作成イメージ

(2) 昇降機設備

レールブラケットの溶接接合をボルト接合に変更するためには、躯体精度の向上と躯体誤差の事前把握が必要となる。

建築躯体の進捗段階に応じて BIM データとレーザスキャナ計測のデータを比較し、躯体誤差を事前に把握できれば、接合部の後戻り作業を削減することが可能になる。

躯体精度を向上するためにロボットの活用が提案されており、これらの技術開発によりレールブラケット接合面の許容誤差を現状の±30 mmから±10 mm以下に縮小し、過大孔に対するすべり耐力の確認ができれば、溶接接合を高力ボルト接合に置き換えられる。(図4. 3. 2. 9) また躯体完成後に実施していたガイドレールの搬入、揚重、仮止め接合の作業を、躯体の進捗に合わせて先行実施することも可能になる。

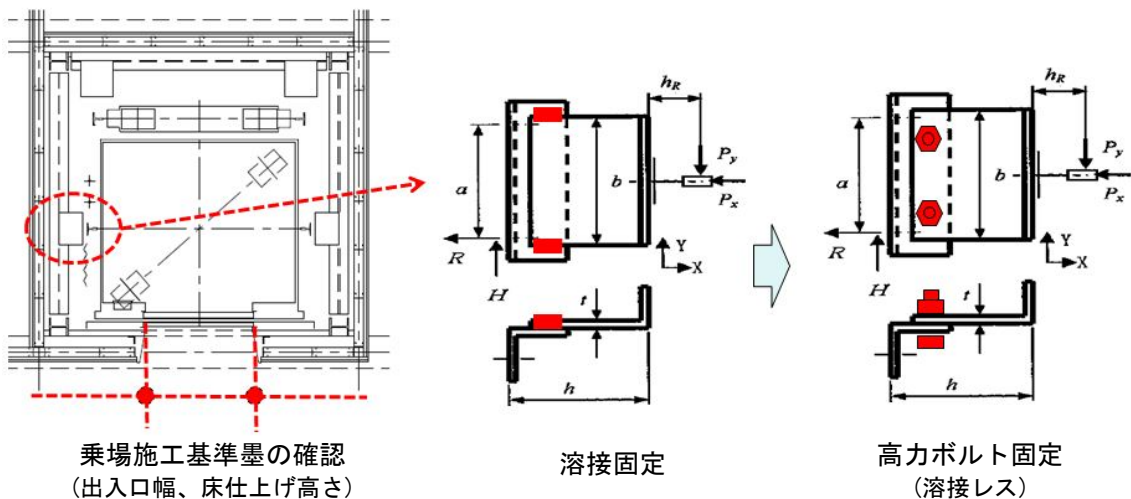


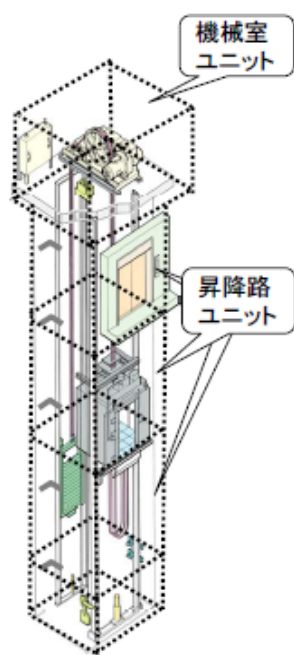
図4. 3. 2. 9 乗場基準墨の早期確認とレールブラケットの溶接レス施工

駅舎などの比較的低い構造物では実績のある、鉄骨躯体と昇降機材料のユニットを一体で搬入して一体接合する工法を、一般の建築に適用拡大できれば工期短縮が可能となる。(図4.3.2.10)

大型の建築物では実績のある、躯体の進捗に合わせて昇降機を一時的に利用可能とし、徐々にサービス階を増やすライズアップ工法(図4.3.2.11)を、一般の建築向けに標準化すれば、建設に関わる全作業者の上下移動を、別途設置する工事専用昇降機を利用するよりも高速化できるし、仕上げ作業を前倒し可能とするメリットもある。

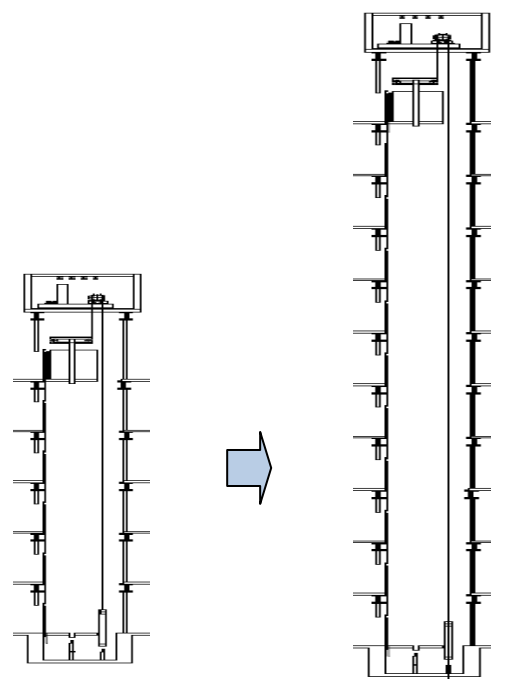
これらのユニット化工法やライズアップ工法は、空調・衛生設備のユニット化工法と同様に、製作工程を含めた標準化を行うとともに、工期短縮のメリットが出る建物の条件や規模を見極める必要がある。

出入口と躯体との接合作業は、サッシと共通化することができれば生産性の向上が期待できる。これらの改善には、職種を越えた多能工化も検討課題になると考えられる。



ユニット単位で据付

図4.3.2.10
ユニット化工法



6階まで工事使用

11階まで工事使用

図4.3.2.11
ライズアップ工法

4. 4 極限作業下における接合

4. 4. 1 福島廃炉

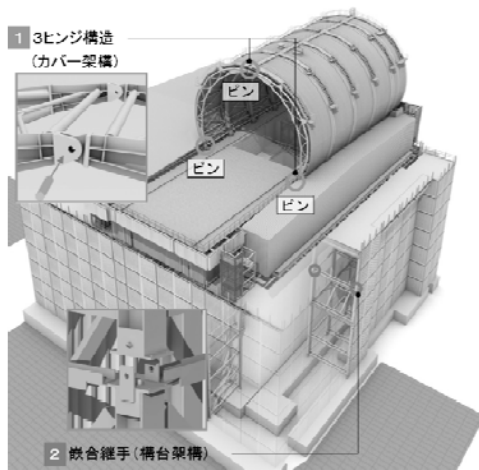
4. 4. 1. 1 現状と課題

(1) 福島第一原子力発電所廃炉作業の課題と要求される接合仕様

a. 福島第一原子力発電所（以降、福島第一）廃炉作業における特異性

高線量下での工事であり、作業時の被ばく低減が強く求められる。現在、1～4号機原子炉建屋ではプール内に残置された使用済燃料を取出すためのカバー架構（図4. 4. 1. 1. 1参照）の建設、損傷調査、汚染ガレキ撤去、除染などの廃炉作業が進められており、さまざまな被ばく低減工法の適用が検討されている。カバー架構は、高線量下での現地作業が比較的少ない鉄骨構造が主となっている。

架構の一例と考慮された適用条件を以下に示す。



【考慮された適用条件】

- ・ 耐候性；屋外海辺
- ・ 耐火性；小規模火災
- ・ 耐薬品性；なし
- ・ 耐放射線性；～数 10 mSv/h オーク

図 4. 4. 1. 1. 1 カバー架構の例

b. 構造物の建設における改善ニーズと現状の対応事例

改善ニーズとして、大型鉄骨架構の据付や接合作業の無人化、省人化、接合部の誤差追従性改善などが挙げられる。現在、無人化施工としては、遠隔クレーン、遠隔解体重機、除せんロボ、無人嵌合接合法が適用されている。（図4. 4. 1. 1. 2参照）省人化施工としては、大ブロック組立てによる現地作業の低減、超高力ボルトやピンを用いた嵌合接合構造の採用による接合作業の省力化などがなされている。誤差追従性対策としては、鉄骨据え付けガイド金物の採用、既存建物と鉄骨との隙間遠隔グラウト、ボルト孔へのジャストリング採用などが挙げられる。

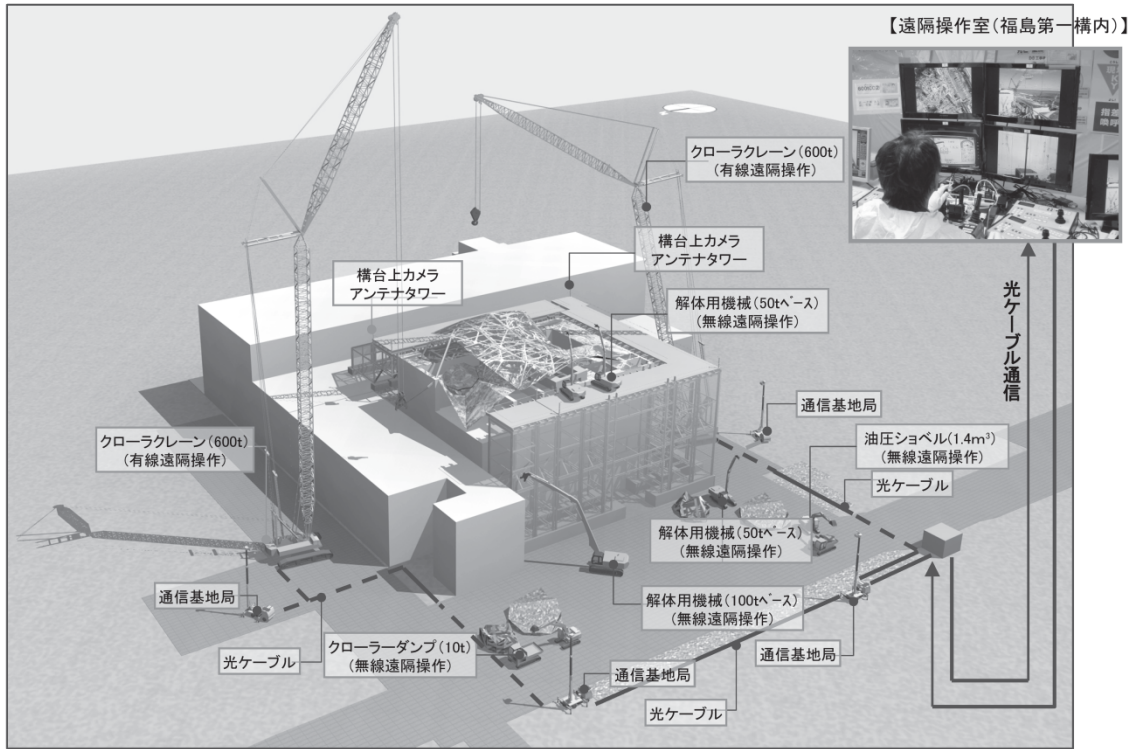


図 4. 4. 1. 1. 2 無人化施工システムの例[1]

(2) 現状技術の調査と適用性分析

a. ロボット分野の要素技術

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以降 NEDO）では、福島第一のような事故で作業員の立ち入りが困難となった屋内などで、状況把握、機材などの運搬、復旧活動を行うためのさまざまな対応ロボットの開発が実施されている。（図 4. 4. 1. 1. 3 参照）

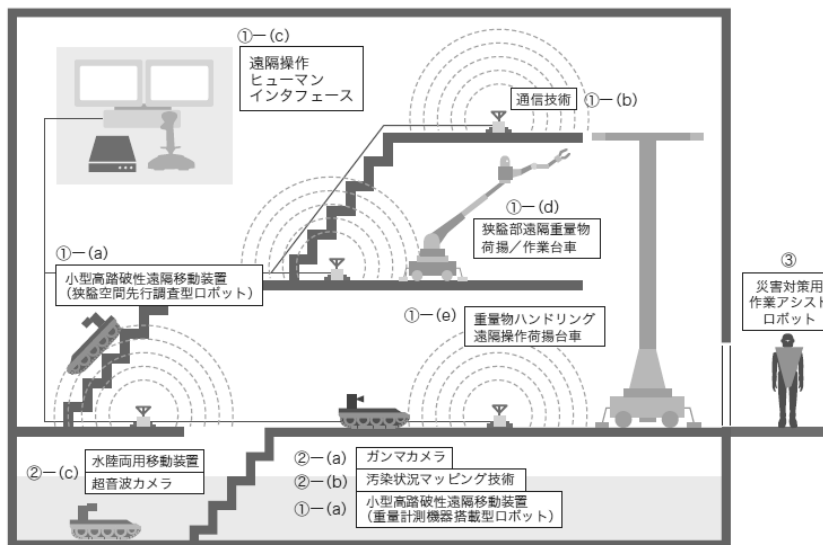


図 4. 4. 1. 1. 3 NEDO 開発事例[2]

また、COCN の場においても、2012 年 3 月「災害対応ロボットと運用システムのあり方」として、福島事故に必要な災害対応ロボットとその運用体制について提言が取りまとめられた。今後、屋外で重量構造物を扱う建設作業分へのこれらの最先端技術の展開が大いに期待できる。

機械メーカーや建設会社においても、位置検出口ボ、溶接などの多機能ロボ、検査ロボ、除染ロボ、遠隔操作重機やクレーンなどが福島第一廃炉作業ほかの現場において、すでに実用化されている。(図 4. 4. 1. 1. 4 参照) 今後、適用範囲のさらなる拡大が期待できる。

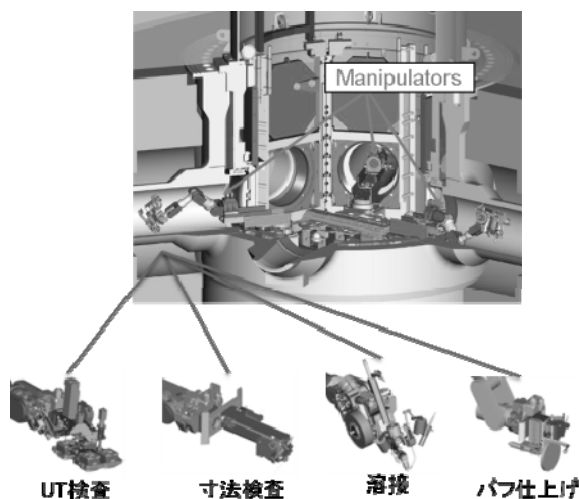


図 4. 4. 1. 1. 4
溶接など多機能ロボットの例[3]

b. 接合工法に関する要素技術

一般構造物を対象とした検討会と同様、ワンアクションで接合が可能な様々な嵌合、ラッチ接合などの機械式接合工法や、簡易な接合工法をして期待されている接着接合、テープ接合、樹脂接合ロックファスナなどの接合技術も実用化が進められている。福島第一では、耐放射線性や耐火性が要求されることより、樹脂を利用した接合工法よりも機械式接合工法の展開が基本となると考えられる。

c. 素材分野の要素技術

近年、車のボディ素材などに炭素繊維強化プラスチック（CFRP）など軽量で高強度の素材が用いられている。福島第一においても、カバー架構の外装材など素材の軽量化ニーズも高く、接合工法と同様に注目される。

4. 4. 1. 2 課題解決の方向性

(1) 高線量下での屋外・重量鉄骨工事を対象とした完全無人接合技術

福島第一廃炉作業における大幅な被ばく低減をめざし、これまでの NEDO 開発、COGN 提言、民間ロボット技術を展開し、今後必要となる屋外作業、重量鉄骨作業を対象とした位置出し・建方・接合などの完全無人接合技術の開発を提案する。

廃炉用鉄骨構造物の建設作業において求められる具体的な開発技術の例を図 4. 4. 1. 2. 1～図 4. 4. 1. 2. 3 に示す。

主に鉄骨柱・柱間のボルト接合あるいは嵌合接合作業を完全無人で行い、かつ搬送や回収が可能なロボットの開発が挙げられる。いずれの技術も、すでに要素技術・類似技術は現存しており、これを廃炉作業用に組み合わせ・改良することで実現の可能性は高いと考えられる。

(2) 完全無人接合に適した接合構造

完全無人接合技術を実現する上で、ロボット化に適した接合構造の具体化が必要となる。耐放射線性や火災に対する安全性確保の観点よりワンアクションで施工可能なボルト接合や嵌合接合などが候補として挙げられる。これらは一般構造物に共通するニーズであり、一般構造物を対象とした検討成果が水平展開できる。

参考文献

- [1] 日本機械工業連合会「第 6 回 ロボット」大賞優秀賞 災害現場で活躍する「次世代無人化施工システム」資料 2012.10.10
- [2] NEDO 「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」研究開発成果 2014.2.20
- [3] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. Advanced INLAY System for Inlet/Outlet Nozzles of RV for Preventive Maintenance Against Alloy 600 PWSCC in Japanese PWR Plants C S - 1 4 ASME Pressure vessels & Piping Conference 2013.7.15

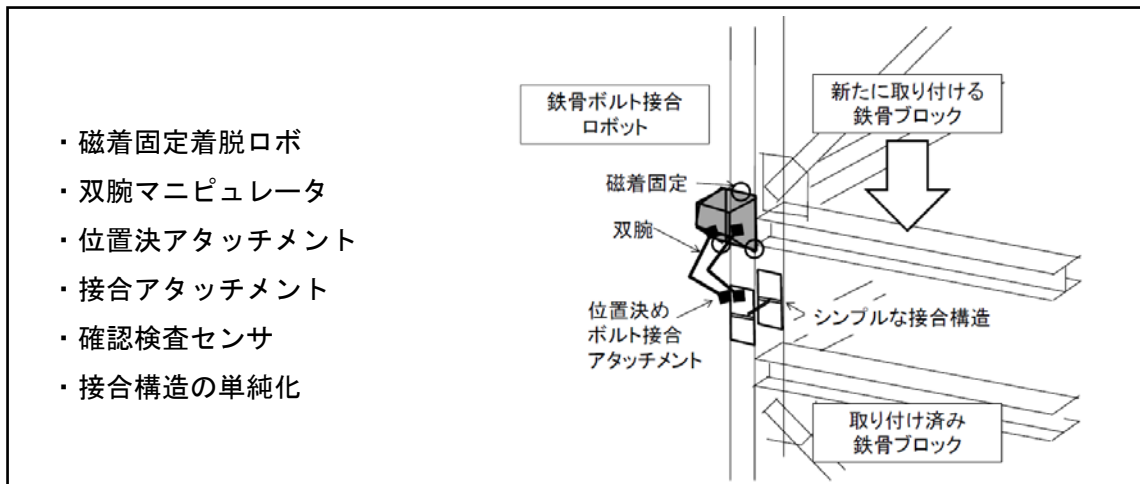


図4. 4. 1. 2. 1 鉄骨ボルト接合ロボットの例

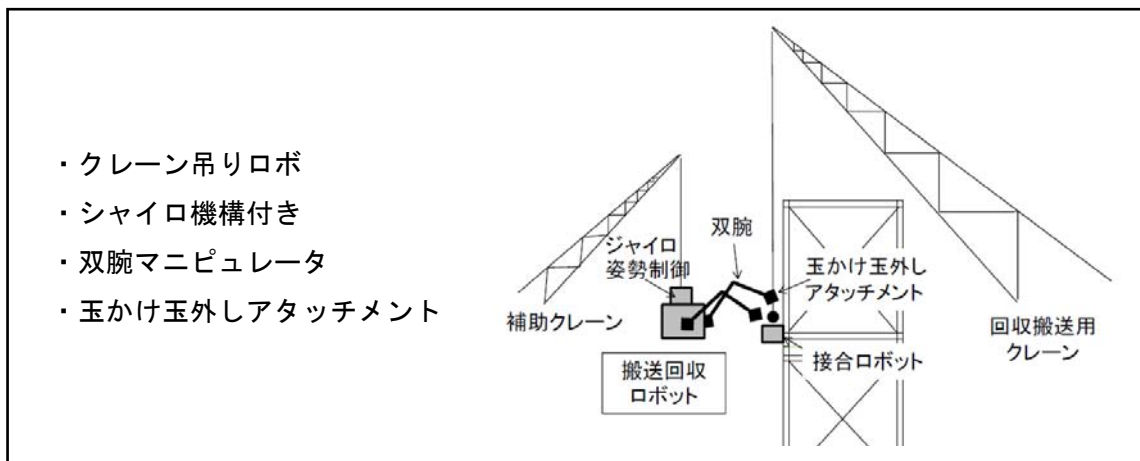


図4. 4. 1. 2. 2 搬送回収ロボットの例

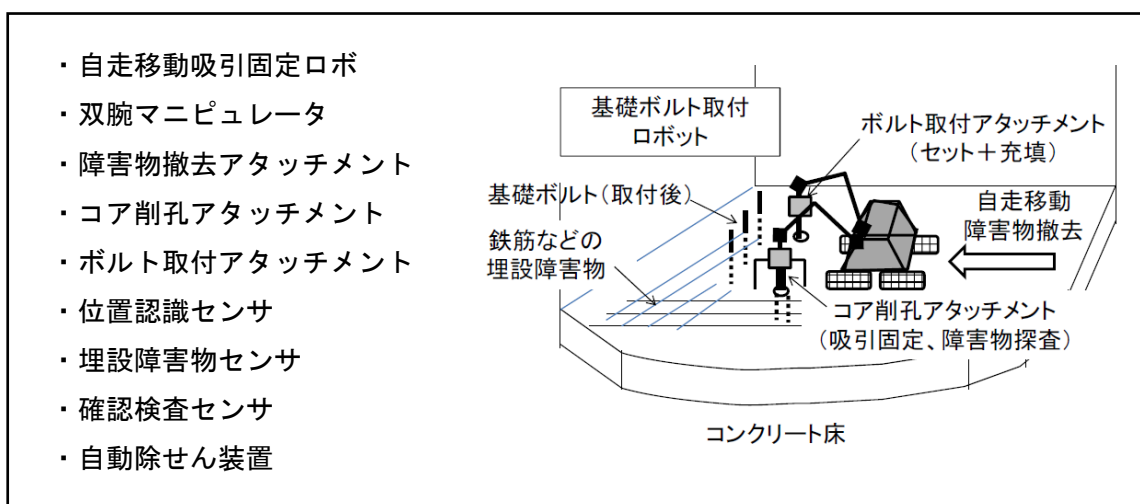


図4. 4. 1. 2. 3 基礎ボルト取付ロボットの例

4. 4. 2 洋上施工

4. 4. 2. 1 現状と課題

(1) 背景

日本は四方を海に囲まれ、国土面積 38 万km²に対し、200 海里面積（排他的経済水域）は 447 万 km²という海洋国家であり、国土交通省の重点政策には海洋開発に関する項目が毎年盛り込まれている。海洋開発を推進する上で、海洋構造物の建設が不可欠であるが、洋上での施工（洋上施工）が必要となるために技術的難易度が高く、さまざまなプロジェクトが試行、実施されている。その例（図 4. 4. 2. 1）としては、関西国際空港建設プロジェクト[1]（1973～1974、1994）、メガフロート技術研究組合の浮体空港実証実験[2]（1995～2001 年）、NEDO の洋上風力発電開発実証実験[3]（2010～）などが挙げられる。海洋開発の更なる推進のため、洋上施工技術の高度化が期待される。



(a) 関西国際空港[1]



(b) メガフロート実証実験試験体[2]



(c) 洋上風力発電開発実証実験[3]

図 4. 4. 2. 1 海洋構造物を建設したプロジェクト事例

(2) 洋上施工の課題

洋上施工を行う上での技術的課題について検討する。洋上施工の特徴としては、通常の陸上での施工と比較して、暴風、波浪、落雷などの影響をより強く受け、施工可能期間が限定されることが挙げられる。作業環境の影響を受けにくく、作業員および作業船の稼働率を上げる構工法を開発することが必要である。

また、建設現場が遠距離であることが課題の一つとして挙げられる。作業員、部材、資機材の移動、搬入出に対して、純粋な移動時間がかかることに加え、移動手段（作業船）も限られているため、一日当たりの物量が制限される。限られた作業員で大型工事を実施するためには、作業重機の高度化、作業の自動化、モニタリングなど省人化技術が重要である。また、部材を製造できる港が限定されており、更なる長距離曳航が必要となる場合がある。今後、海洋開発を推進していくためには、作業船および製造港の整備が必要である。

上記のような条件下で大規模な構造物を建設するためには、なるべく陸上で建設し、洋上施工の比率を下げるのが有効である。ただし、その結果として搬入部材一つ一つが大型となる。部材が大型化した場合、揚重、部材同士の位置決め、仮固定などの作業の難易度が上がる。これらの作業を精度良く、安全に実施できる技術開発が必要である。

洋上施工において生産性を向上させる構工法を開発する上でのポイントを以下にまとめる。

- | | |
|---------|----------------------|
| Point 1 | 作業環境によらない高い稼働率の実現 |
| Point 2 | 作業員数が制限される中での省人化技術 |
| Point 3 | 大型部材の高効率施工（揚重、建方、接合） |



(a) 作業員の移動方法：銚子沖プロジェクト[3]



(b) 長距離の曳航：銚子沖プロジェクト[3]



(d) 大断面部材・スパー型浮体(7.8mφ×80m)
：五島列島沖プロジェクト[3]

図4. 4. 2. 2 洋上施工の現状と課題

4. 4. 2. 2 課題解決の方向性

(1) 検討対象とする接合法

洋上施工において生産性を向上させる構工法を検討する上で、本検討会では洋上風力発電の着床型モノパイル基礎のグラウト接合法に着目した。グラウト接合法の概要を図4. 4. 2. 3に示す。海底に着床したモノパイル（鋼管杭）の上端部に、風車下端の接合用鋼管をかぶせ、モノパイルとの間にグラウト材（モルタル等）を充填し、硬化させて接合を完了する構法である。大断面部材（ $\phi 6000$ 程度まで）の接合が可能で、施工、品質管理も容易である。また、グラウト材を液体で充填するため、施工誤差吸収が容易であり、精度の高い位置決めが不要となる。

グラウト接合法は既に欧州での洋上風力開発[4]において実績が多数ある。日本での実例として、ウィンドパワーかすみ[5]、羽田D滑走路ジャケット栈橋[6]などが挙げられる（図4. 4. 2. 4）が、実用化に向けた検討は今後本格化する段階である。日本において実績の少ないながらも、生産性が高いグラウト接合法を確立することで、日本の洋上風力発電および海洋開発全体の推進に貢献できると考えられる。

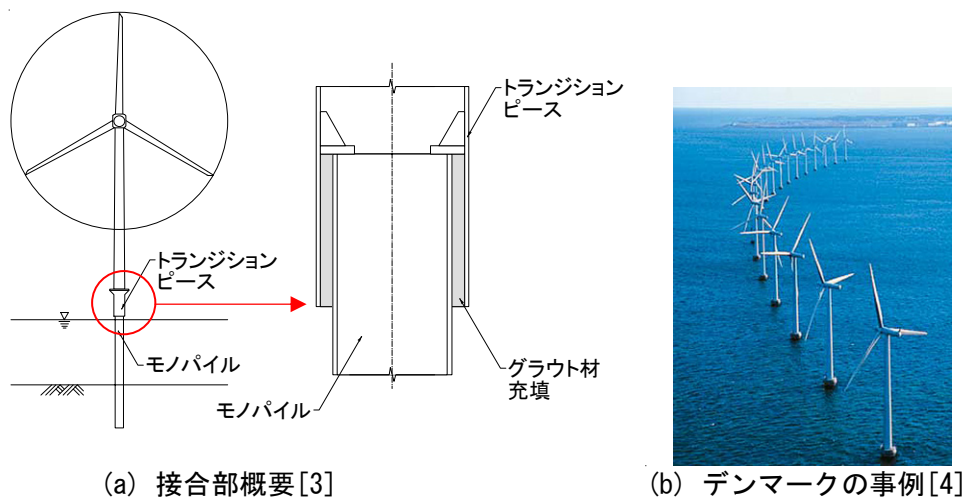


図4. 4. 2. 3 グラウト接合部の概要



図4. 4. 2. 4 国内のグラウト接合法の事例

(2) 素材技術に関する検討

グラウト接合法に使用する素材技術に関して、現状ではグラウト材料の基礎的データと実績の蓄積が課題である。グラウト材料に対する要求性能(案)を表4.4.2.1に示す。表4.4.2.1に示した力学的性質および施工性能については、欧州で採用実績の多い鋼繊維高強度モルタル(鋼繊維混入率 1.9vol%) [7]を参考として設定した。疲労特性に対する設計荷重および繰返し回数は、既往の文献[8]の設計値に基づき設定した。日本では地震と台風が発生するため、欧州と比較して設計荷重が一般的に厳しくなる。設計荷重が厳しい日本でも適用可能な高性能なグラウト材料の開発が実現すれば、海外展開時の国際競争力の向上が期待できる。

接合部内のグラウト材料には、接合部鋼管との支圧接触により圧縮応力度が卓越して発生するため[3]、高い圧縮強度が必要とされる。また、風、波浪、地震などの繰返し荷重に対してひび割れによる損傷の蓄積を防止するため、引張強度と疲労特性の確保が必要である。施工面では、接合部内へグラウト材料を圧入するため、良好な充填性の確保が必要である。

表 4. 4. 2. 1 グラウト材料の要求性能 (案)

力学的 特性	圧縮強度	f_c	130 N/mm ²
	曲げ強度	f_b	18 N/mm ²
	引張強度	f_t	7 N/mm ²
	弾性係数	E	35 kN/mm ²
耐久性	疲労特性	$\sigma = f_c/25$ で 2×10^8 回	
	経年変化	ほぼなし(普通コンクリートと同等)	
	クリープ	ほぼなし(普通コンクリートと同等)	
	収縮性	線収縮率 0.1%程度(普通コンクリートと同等)	
施工性	充填性	F6クラス (BS EN206-1のF0-値 > 630mm)	
	養生	特殊養生不要	
	硬化性	1週で70%強度発現	

グラウト材料として適用の可能性が高い材料の候補と現状性能を表4.4.2.2に示す。各材料の詳細については表中に示した参考文献を参照されたい。表4.4.2.2に示した通り、引張強度を確保するためには、①セメント+繊維補強材混入、②硬化材としてポリマー系材料の使用、が考えられる。混入する繊維補強材としては、炭素繊維、PVA 繊維など日本の技術力が高い素材を適用することで国際競争力の向上につながると考えられる。また、充填量を考えると、骨材を混入させた方がコストメリットが望める。これらの候補を基に、硬化材、骨材、補強材などの配合を検討することで、最適材料の開発が可能であると考えられる。

また、構造性能に関する課題は接合部設計で、施工性に関する課題は施工方法により解決できる可能性もある。接合部設計、施工方法とも併せて総合的に開発を進めることが効果的である。

グラウト材料の開発と併せて、グラウト材料の性能評価方法の確立が必要である。グラウト材料の性能評価方法の確立のためには、一般的な圧縮強度試験、割裂強度試験など JIS の試験方法、土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案) [9]の評価方法などの既往の評価方法の適用性を検証する必要がある。

表 4. 4. 2. 2 グラウト材料の候補と現状性能

新材料	構成		力学的性質					耐久性				施工性			備考
	硬化材	骨材	圧縮強度 [N/mm ²]	曲げ強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]	疲労特性	経年劣化	カーブ	収縮性 (線収縮率)	充填性	養生	硬化性		
目標性能	-	-	130	18	7	35	$\sigma = \sigma_b / 25$ で 2×10^8	ほぼなし	ほぼなし	F6* > 630mm	特殊養生 不要	70%強度発現 1週	文献[7],文献[8]		
高強度コンクリート		なし	○ 150	○ 15	× -	○ 45	要検討	○	○	○ SF**=70cm	△ 簡易断熱	○ 数日	文献[10]		
鋼繊維コンクリート 1.5vol%			○ 170	○ 15	- -	○ 45	要検討	○	-	○ SF**=70cm	△ 要検討	○ 数日	文献[11]		
PVA繊維コンクリート 1.5vol%	セメント	あり	○ 170	○ 15	- -	○ 45	要検討	○	-	○ SF**=70cm	△ 要検討	○ 数日	文献[11]		
アラミド繊維コンクリート 1.5vol%			○ 150	○ 21	- -	○ 45	要検討	△ 要検討	-	△ SF**=45cm	△ 要検討	○ 数日	文献[11]		
炭素繊維(PAN)コンクリート 0.5vol%			○ -	○ 21	○ 7	○ -	△ 要検討	○	◎	○ -	△ 要検討	○ 数日	△鋼材との電界腐蝕あり 文献[12],三菱レイヨン(株)資料より		
レジンコンクリート			○ 100	○ 20	○ 10	○ 30	要検討	○	△	○	△ 要検討	◎ 数時間~	文献[13]		
エポキシ系接着剤	ポリマー	なし	△ 70	◎ 50	◎ 35	× 1.5	△ 要検討	△ 要検討	× 5%	○	△ 要検討	◎ 数時間~	文献[14]		
アクリル系接着剤		なし	○ 100	◎ 50	◎ 25	× 0.8	△ 要検討	△ 要検討	× 5%	○	△ 要検討	◎ 数分~	文献[15]		

* BS EN206-1の70ローが入る, ** SF:スラックフロ-値

(3) ロボット・自動化技術に関する検討

洋上施工において特徴的な要求項目を以下の①～③に示す。

①作業船の高度化

洋上施工を行う上では、作業船は必要不可欠な重機であり、既往のプロジェクトでもさまざまな作業船が開発、適用されている。図4.4.2.5(a)に示した起重機[6]では、航空機離着陸の空域高さ制限を回避するために開発されたジブを低頭式とした。図4.4.2.5(b)に示した作業船はSEP船[3]と称するもので、4本の杭を有し、作業現場ではそれらの杭で海底に自立し、安定した作業台を確保できるものである。このような作業船の性能は、洋上施工の作業効率に大きく影響するため、更なる高度化が望まれる。また、現状では特殊プロジェクトに対応するために、専用に開発される場合が多いが、今後の開発を促進するためには、作業船の標準化、台数の確保、整備が必要である。

②作業効率の向上を図るツール開発

位置決めを容易にするレーザや画像処理技術を利用したセンサ、作業船や吊荷を安定させる制振装置など、作業効率の向上を図るツール開発が有効である。陸上施工と比較して、洋上施工の作業効率は低いため、ツール開発による作業効率の向上効果が得られやすいと考えられる。

③メンテナンスに対するモニタリングシステムの高度化

風車稼働開始後のメンテナンスに対しては、遠隔地からのモニタリングシステムが必要である。異常を発見しても、すぐにはアプローチできないため、ある程度無人で補修が可能なロボット技術が望まれる。また、風雨波浪に対する頑強性も求められる。



(a) 低頭式起重機：羽田D滑走路[6]



(b) SEP船：銚子沖[3]

図4.4.2.5 作業船の例

参考文献

- [1] 関西国際空港全体構想促進協議会：<http://www.fly-kix.jp/about/index.html>, (Accessed 2015.02.06)
- [2] 珠玖正憲, 他：メガフロートとその利用に関する展望, 三菱重工技報, Vol. 37, No. 5, pp. 226-231, 2000.9
- [3] 土木学会：洋上風力発電技術の実証と新展開, 土木学会平成 26 年度全国大会研究討論会研-25 資料, 2014.9
- [4] 日本産業機械工業会：欧州における洋上風力発電の現状（その 2）, 海外駐在員報告書, 平成 22 年 10 月, pp. 35-61, 2010.10
- [5] 吉田健治, 他：洋上風力発電所モノパイル基礎の設計と施工について, 土木学会年次学術講演会梗概集, 第 6 部, 第 65 巻, pp. 949-950, 2010.9
- [6] 関東地方整備局：東京国際空港 D 滑走路建設工事技術報告会（第 1 回）技術報告集, 2006.9
- [7] Densit：<http://www.aeolica.org/uploads/documents/powerexpo2008/06-Anders-Moller-DENSIT.pdf>, (Accessed 2015.02.06)
- [8] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 清水建設, ユーラスエナジーホールディングス, 東京大学：風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 洋上ウィンドファーム・フィージビリティスタディ（FS）千葉県旭市沖 調査報告書, 新エネルギー・産業技術総合開発機構成果報告書, 2011.3
- [9] 土木学会：コンクリートライブラリー113, 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）, 2004.3
- [10] 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状（2009）, 2009.10
- [11] 佐々木亘, 他：アラミド短繊維を用いた高強度繊維補強コンクリートに関する基礎的研究, 日本コンクリート工学会 繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法に関するシンポジウム論文集, 2012.9
- [12] 景山義隆, 他：PAN 系炭素繊維を用いた CFRC の実験的研究 その 2, その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp. 461-464, 1994.7
- [13] 日本レジン製品協会：<http://www.jrpa.gr.jp/resintoha.html>, (Accessed 2015.02.06)
- [14] エポキシ樹脂技術協会：<http://homepage2.nifty.com/epoxygk/>, (Accessed 2015.02.06)
- [15] 吉岡夏樹, 他：アクリル樹脂を用いた接着系あと施工アンカーボルトの性能確認試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会, CS3-022, pp. 43-44, 2013.9

5. 接合に関わる共通技術

5. 1 ロボット・自動化技術

建築におけるロボットの歴史は古く、図5. 1. 1に示すようにロボットや自動化技術を適用するさまざまなアイデアがある。従来は、その時その場の個別ニーズに合わせて開発されてきたため、かならずしも効率的とは言えないものも多かったようである。そこで、1つのビル全体およびこれらに資材を供給する工場までを大きな1つのシステムとしてとらえ、あたらしい建築工法とあたらしいロボット・自動化技術をセットで適用することにより、建築の生産性を飛躍的に向上させることができることを提案したい。本節では、これらロボット・自動化技術の基礎となる共通技術について詳説する。

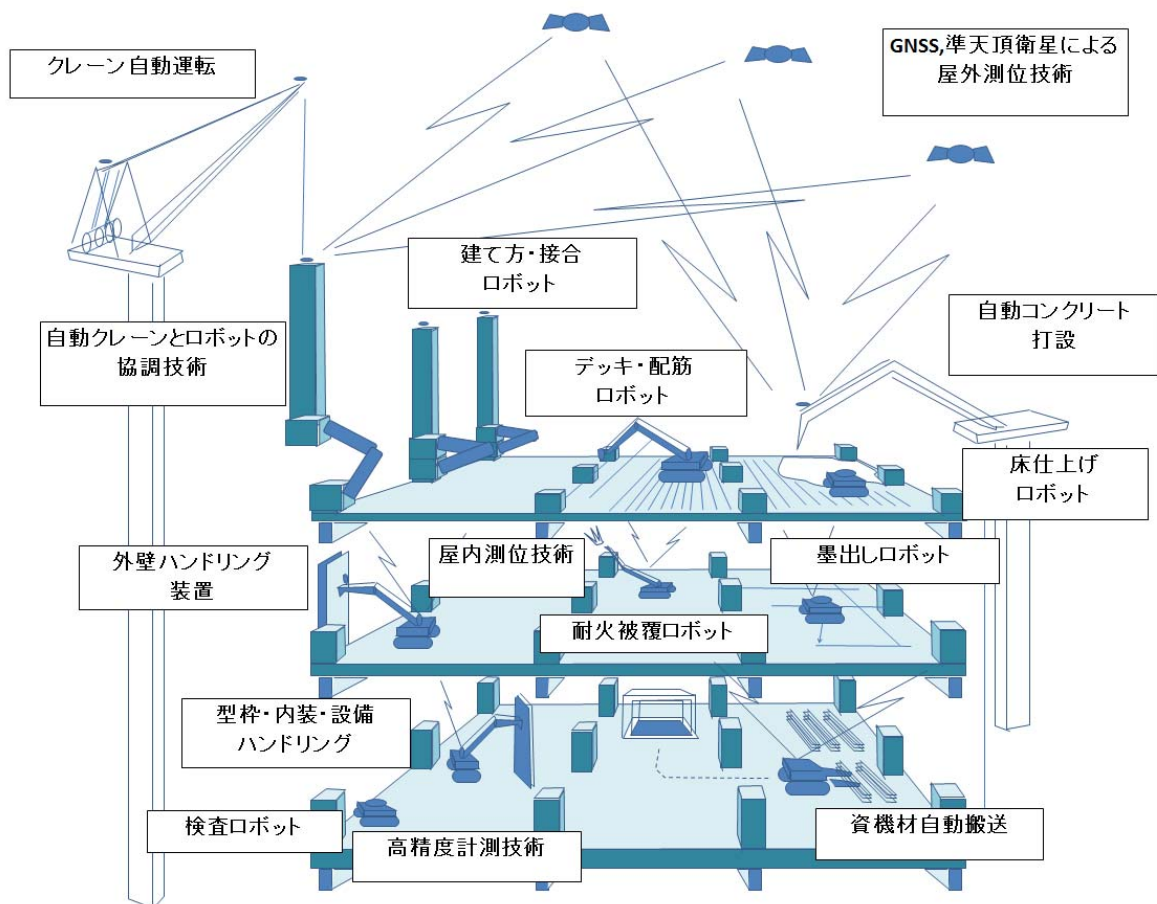


図5. 1. 1 建築ロボット群の例

5. 1. 1 既存建築用ロボットおよび今後の発展性

5. 1. 1. 1 建築用ロボット開発の歴史にみる課題

1970年代から始まった自動車や家電製品の製造ラインのロボット化に続き、1980年代から1990年代にかけて建築作業のロボット化が推進された。バブルに代表される高度成長に伴う人手不足を補い、3K（「きつい・危険・汚い」）の頭文字の略語で1990年頃流行）作業撲滅を掲げて、さまざまなロボットが開発された。図5. 1. 1. 1. 1に建築用ロボット開発の歴史を示す[1]。現在ではほとんどのロボットが使われなくなった一方で、使われ続けているロボットを表中にマーキングし、その特徴を分析した。

		1980	1990
〔建築〕	鉄骨工事	◆耐火被覆吹付ロボット ◆鉄骨玉掛外し装置	◆鉄骨柱溶接ロボット ◆鉄骨柱建方システム
	鉄筋工事	◆重量鉄筋用配筋ロボット	◆鉄筋自動加工システム ◆鉄筋地組装置
	コンクリート工事	◆コンクリート水平ディストリビュータ ◆コンクリート床仕上げロボット	◆コンクリート自動締固めシステム ◆コンクリート床均しロボット
	仕上工事		◆外壁塗装ロボット ◆石材ハンドリングマニピュレータ ◆外壁PC板取付装置 ◆ガラス取付ロボット ◆天井ボード張りロボット ◆内装パネル建込み装置 ◆壁面塗装ロボット ◆タイル張りロボット
	保守・点検・改修工事	◆タイル剥離検知機	◆クリーンルーム検査ロボット ◆外壁塗膜剥離機 ◆配管劣化診断システム
	揚重・搬送		◆資材自動搬送システム
	ビル自動化施工システム		◆高層ビル自動化施工システム

出典「国産ロボット技術発展の系統化に関する調査」日本ロボット工業会, pp65, 2003 (著者マーキング)

図5. 1. 1. 1. 1 建築用ロボット開発の歴史

マーキングされていない（すなわち、現在では使われていない）ロボットを図5. 1. 1. 1. 2に例示する。図5. 1. 1. 1. 2（左）はコンクリート床均しロボット、図5. 1. 1. 1. 2（中）は自動配筋ロボット、図5. 1. 1. 1. 2（右）はタイル剥離検知ロボットである。



図5. 1. 1. 1. 2 使われなくなった建築用ロボットの例

これらのロボットが対象としていた作業は2つに大別される。

- ①配筋・コンクリート床均し(左官)・天井ボード保持など作業そのものが人にとって過酷な作業
- ②壁面塗装・タイル剥離検知など作業現場が高所で人にとって危険な作業

いずれも3K作業であり、これらの撲滅を目的に、人に代わって作業するロボットが開発されたが、逆に言えば人でもできる作業である。“3K作業撲滅”ロボットは、世情の変化とともに目先の“作業効率”を重視した人手作業にとってかわられて使われなくなり、メンテナンスやアップデートされなくなったロボットは、世情が再び変わろうとも使われることはなかった。

人に代わって作業をロボット化しようとする試みは、製造ラインのロボット化が建築ロボット開発より先行し、作業効率を追求し工場内作業で成功を収めた。建築ロボットの対象は屋外の現場作業であり、環境条件の難しさや作業の不定形さから、工場内作業ほどはロボット化により作業効率が上がらなかった。一方、製造ラインのロボット化では、ロボット化を前提として作業環境や物の作り方まで変えていったことが成功の原因と言われており、建築ロボット実現への大きな示唆である。また、建築ロボット特有の問題として、作業から作業へのロボットの搬送や段取り替えが大変だったという報告も、据え置き型の工場内ロボット化とは異なる解決すべき課題を示している。

一方で、図5. 1. 1. 1. 1にマーキングした(すなわち、現在でも使われつづけている)ロボットを図5. 1. 1. 1. 3に例示する。図5. 1. 1. 1. 3(左)は多目的建築ハンド(商品名マイティハンド)と呼ばれ、仕上げ工程において、外壁パネルや窓枠など200~800kgの重量物を位置決めする機能を有する。図5. 1. 1. 1. 3(中)はバランスハンドと呼ばれ、200~300kgのプレキャストコンクリート製の柱を保持して重力を補償し、人間が重さを感じることなく位置決めを可能とする機能を有する。図5. 1. 1. 1. 3(右)は鉄骨組立ロボットであり、Φ40mm以上の太径重量鉄骨をロボット手先の操作部で人がハンドリングする感覚で取り扱うことができる。



図5. 1. 1. 1. 3 使い続けられる建築用ロボットの例

これらのロボットの対象とする作業は、風の影響を受ける高所での正確な位置決め、壊れやすい材料の優しいハンドリング、人では持てない重量物の組立であり、現場の人手だけではできない作業をロボット化している点が、使い続けられるポイントであると考えられる。すなわち、本ロボットがなければ作業ができない、または、これらの作業のために通常は他の重機(例えばタワークレーン)などを専有する必要があり、本ロボットの導入によって「作業効率」があがって

いることを意味する。しかも、作業の無人化を狙うのではなく、人と協調し人を支援するロボットであることも、むやみにロボットが大型・複雑化せず、過剰な高機能化にならない点で重要であろう。もちろん、これらのロボットに対してもなお、使われなくなったロボットと同様、ロボットの搬送や段取り替えが大変だという理由で適用現場が限定されている点も付記しておく。

5. 1. 1. 2 生き残るロボットの条件

前項で分析して得られた建築ロボット開発を実用に導くためのポイントを以下に整理する。

- Point 1 ロボット化を前提としたロボットでなければできない高効率な建築工法と並行して開発
- Point 2 人の代替でなく、人手だけではできない作業をロボット化
- Point 3 作業から作業への搬送や段取り替えが簡単なロボットを開発
- Point 4 無人化でなく人と協調することでロボットの複雑化・大型化を防ぐ

5. 1. 1. 3 ロボット技術の最近の動向と建築ロボット実現の可能性

建築ロボットの開発ブームが下火となった 2000 年ごろ以降もロボット技術は進歩し続けている[2]。建築ロボットの性能向上へ特に大きな影響を与えると思われる新技术を例示する。

- 技術 1 ロボットを智能化するセンサ技術（三次元形状計測手段として、従来カメラ方式に比し外乱光などの環境条件に左右されにくいレーザレンジファインダなど）の進歩と低価格化
- 技術 2 ロボットをシステム化する技術（大量のデータをクラウドで蓄積し処理する技術など）の進歩
- 技術 3 ロボットを小型化・モジュール化する技術（モータやコントローラの小型化や、シリアル通信技術など）の進歩
- 技術 4 ロボットをケーブルレス化する技術（バッテリーや無線 LAN などに代表される通信技術、ナビゲーションなどの制御技術など）の進歩と低価格化
- 技術 5 ロボットと人間が協調して作業しうる環境（ISO13482 の成立や、労働安全衛生法における条文解釈の見直しなど）の整備

これら最新の技術を適用し、“使われなくなった” ロボットが“使える”ようになったり、新たな建築ロボットが誕生したりすることが期待される。特に、技術 2 のシステム化技術を中心に、技術 1、技術 3、技術 4 を組み合わせた新しい建築資材の搬送技術や位置決め技術が、建築の生産性向上に寄与すると期待される。

5. 1. 2 新しい構工法に対応した共通ロボット・自動化技術

これまでの章で、課題領域テーマ（構造体、仕上げ、設備、極限作業）検討で“飛躍的な生産性の向上”を目指し、現状技術の各種課題が明確にされ、これらの課題克服に向け、新たな接合技術を導入した構工法が提案された。

提案された構工法は建築部材の溶接やボルト締め、接着剤の挿入などの工場内で使用される専用設備と同等な人手による固有な作業の自動化技術が求められる。更にクレーン作業に代わる重量物、ユニット化され大型化・重量増加した建築部材の搬送や固定位置での支持や微調整などの汎用性の高い共通のロボット・自動化技術も求められる。

また、生産性に大きく影響する人の介在を回避するには、数値制御を行うために全ての作業に関係する位置情報が必要となり、計画値となる BIM データや作業場所や作業対象に関するリアルタイムの自動計測（位置計測は5. 2. 2に位置決め技術として記載）による位置情報の取得が可能な情報システム（ICT 環境）の構築が必要になる。

以下、共通のロボット・自動化技術として

- (1) 搬送ロボット
- (2) 位置決めロボット
- (3) システム化（BIM との連携、部材の個体認識と属性の取得など）

について課題と解決の方向性について検討した。

5. 1. 2. 1 搬送ロボット

搬送ロボットを次の2つの大別する

タイプ1 タワークレーンに代表される、資材を“吊って”搬送するロボット

タイプ2 フォークリフトに代表される、資材を“支え持って”搬送するロボット

タイプ1の代表は超高層建築物には大型のクライミング式ジブクレーン（以降タワークレーン、図5. 1. 2. 1. 1参照）が建築現場での重量物の運搬の大半を担っている。旋回部にある運転室から巻き上げ・起伏・旋回の電動機付きウインチを操作するとともに油圧昇降装置によって旋回部分の昇降と固定部の昇降（マスト昇降）を連続的に行う。建築現場への資材搬入・搬出、躯体への建築部材の移動などのオープンスペースでの揚重作業全般に適用される。図で示すように躯体のフロアの完成に同期してタワークレーンを上層階に移動し、常に躯体最上部と建築物以外のスペースの間で吊り荷を搬送する。タワークレーンの標準的な仕様を表5. 1. 2. 1. 1に示す。

表5. 1. 2. 1. 1 タワークレーンの仕様例

項目	JCC-V520S
最大定格荷重	21 ton
最大作業半径	40 m
揚程	250 m
巻上速度 早巻	22-110 m/min
起伏速度	20 s
旋回速度	0.48 rpm
クライミング速度	0.56 m/min
自立高さ	36 m

基本的にフックの1点に吊り荷をワイヤにて吊り、揚重を行うがフックの回転方向は地切、着地時の玉掛け作業の便を優先させ、人力でも容易に回転できるが、逆に人力が使えない場所では、吊り荷の方向は制御できない。また、理想的には吊り荷の設置予定姿勢（多くの場合、底面に水平または垂直）で吊り上げ、降下する姿勢の制御を行いたいが、ワイヤのみの玉掛け調整のみで水平吊り、垂直吊りを行うには高いスキルの玉掛け作業者と作業時間が必要になる。



図5. 1. 2. 1. 1 タワークレーン及び各部名称（出典 IHI 運搬機械株式会社 HP）

このような課題の克服に向け、タワークレーンの作業の更なる効率化と工期の短縮、及び安全性の向上を目指して様々な技術開発が行われている。

機械的な性能向上としては、巻上速度、クライミング速度の高速化、風荷重の低減及びたわみと揺れの低減を実現する高強度マスト（市柱）の開発など行われているほか、吊り荷の制振制御、ジャイロトルクによる吊り荷の方向制御などを行うコントロールモーメントジャイロ（図5. 1. 2. 1. 2参照）技術などの高度な制御技術の導入も試みられている。

その他、フックにカメラ、視認性を上げるLEDライトを装着し、運転室からフック周辺の吊り荷の状況の把握を容易にするとともに、玉掛け作業者の音声取得のためのマイク、運転室からの

玉掛け作業への指示を伝えやすくするスピーカを配置し、クレーン運転手と玉掛け作業とのコミュニケーションの効率化を図る多機能フックを開発している（図5. 1. 2. 1. 3参照）。無線 LAN を用い、玉掛け作業従事者が吊り荷の情報を BIM などから取得し、手元のタブレット端末で取り付け位置の特定を可能にするなど ICT の活用により作業情報指示の合理化や各部材の揚重作業時間、フックの挙動データ、場内のカメラ群が撮影した映像情報をサーバに転送し、揚重作業効率の見える化など、多方面に取組みが展開されている。

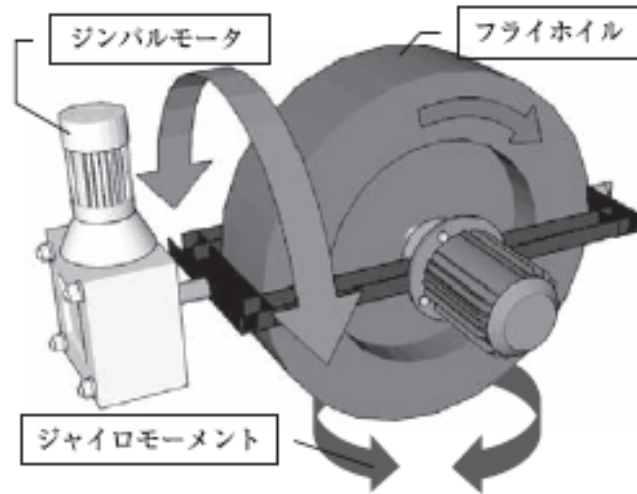


図5. 1. 2. 1. 2 コントロールモーメントジャイロの例
 (出典 “スカイジャスター” 建設の施工企画 ’ 10.8 P78)

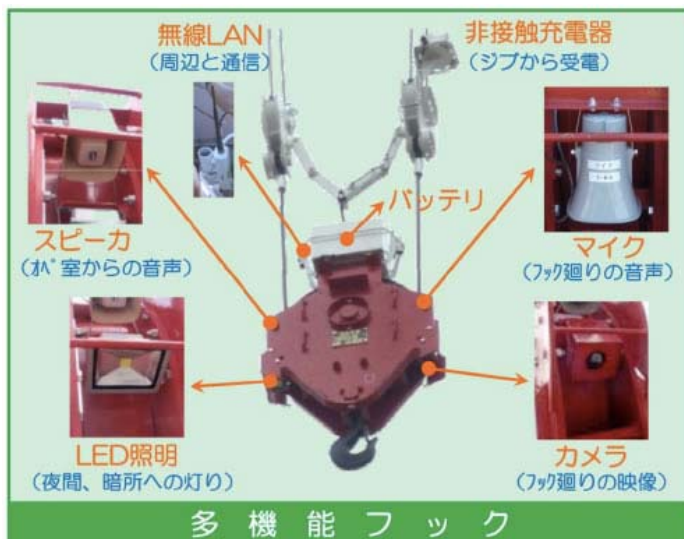


図5. 1. 2. 1. 3 (a)多機能フック (b)運転室内モニター
 (出典 清水建設株式会社 HP)

これらの工夫によっても、熟練オペレータ以上にすばやく資材を搬送し効率を上げることは現実的には難しく、安全面でも無人化を達成することはできないと予想される。そこで、タイプ 1 の技術開発の方向性としては、将来の熟練オペレータ不足にそなえ、ロボット化技術の適用により、経験の少ないオペレータでも簡単かつ安全に運転が可能な技術や、玉掛けや誘導など補助的な人員を削減することのできる技術を開発するのがよい。開発すべき技術を以下に列記する。

- ・ BIM と連動した工程管理システムに基づき、タワークレーンで鉄骨やプレキャストなどの資材を所定の場所に自動搬送する技術を開発する。この時、吊り荷の位置をリアルタイムで計測しフィードバック位置制御する必要があり、GNSS (Global Navigation Satellite System(s)) など衛星を用いた測距、UAV (Unmanned Aerial/Air Vehicle) 制御に用いられる精密気圧高度計とローカルな高さ・圧力をマッピング補正する圧力基準局との連動機能、ビル側になんらかの基準発信源をもつローカルな測位技術の併用が有効である。
- ・ 玉掛け・玉外しを遠隔で行う装置を開発する。これにあわせて、自動で水平を出すインテリジェントなワイヤ装置を併用するとさらに効率的である。
- ・ コントロールモーメントジャイロにかわる小型の方向制御システムを開発する。たとえば、航空機の技術を適用し、エアースラスタと高密度蓄電池の組み合わせなどが考えられる。
- ・ 進行方向の障害物をリアルタイムで検出して衝突を防止する技術を開発する

タイプ 2 の新技術として、例えば建築現場に搬入されたサッシ・カーテンウォールなどの資材を、自動無人で所定階の所定場所まで搬送する運用が考えられる。特に夜間のうちに翌日必要となる分だけを運搬し、所定場所に準備しておくことができれば、建築現場の生産性が向上すると期待できる。自動搬送技術に段差や障害物への対応機能を付加し、屋内測位機能、生産管理システムと連携して複数のロボットを管理する機能を組み合わせたロボット群システムを新規開発することを提案する。

自動搬送技術はさまざま研究されており、移動機構に関しては、複数のロボットが協調して車を運ぶ“iCART” [3] [4] (図 5. 1. 2. 1. 4) や、あらゆる物を移動ロボット化するアイデア“アクティブ・キャスタ” [5] (図 5. 1. 2. 1. 5) などが、エレベータとの協調に関しては“ビル清掃ロボット” [6] (図 5. 1. 2. 1. 6) などが参考になるが、建築中のビルに適用するために、段差や障害物への対応機能（検出するセンサ、乗り越えるメカ、回避する制御アルゴリズム）の開発付加が必須である。

また、屋内でロボットが移動するためには、ロボットの位置を常時標定する屋内測位技術が不可欠である。屋内測位技術に関しては、表 5. 1. 2. 1. 2 に示すようにさまざまな方法が開発中でありその特徴も用途にあわせて一長一短ある。建築中のビル全域を移動するロボットが、資材の搬入移動・エレベータへの乗り込み・所定位置への仮置きなどをするためには、ロボットの位置を数cmの精度でリアルタイム標定する必要があるが、単独でこのニーズを満たす屋内測位技術は現存しない。よって、以下の方法を組み合わせたハイブリッドでロバストな屋内測位システムを新規開発する必要がある。

まず、BIM データを基準（地図情報）とし、レーザレンジファインダでロボット周辺形状を認

識することにより、ロボットが自身の位置を推定する SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を基本とするが、地図情報が正しい前提であり、BIM が施工にあわせて常時アップデートされている必要がある。さらに、フロア内の“墨”を基準とし、ロボットの位置を連続して計測するシステムを併用することにより、よりロバストなシステムが構築できる。この位置計測は、SLAM 技術の補完の位置づけであり、ある程度 (数 10 cm) の精度でよいので、計測方法としては下記 2 案が有力である。

(方法案 1) インパルス UWB (Ultra Wide Band) 技術を適用 (図 5. 1. 2. 1. 7) し、位置の基準となるノードを複数個所設置することで、ノード内の位置を連続計測する。ただし、本技術は、測定レンジが 10m 程度であり、広いフロアでは、ノードの数を増やして非干渉制御するなどシステムが複雑化する。

(方法案 2) 後述する位置決めロボットの位置計測をフロア全体にスケールアップする。精度はよいが、レーザ式なので柱や仮置き資材などの影になると測定できなくなる欠点を有する。

表 5. 1. 2. 1. 2 屋内測位の各種方式比較表

(出典 財団法人ニューメディア開発協会「屋内測位普及発展に関する調査研究 報告書」平成 21 年 3 月)

	技術比較項目				
	測位精度	測位品質	屋内外の連続性	携帯との親和性	開発状況
携帯基地局	数 10m～数 100m 程度	携帯電話の通話 エリア内	標準機能のため 切替え不要	標準機能	商用化済
PHS 基地局	数 10m～数 100m 程度	PHS の通話エリ ア内	標準機能のため 切替え不要	標準機能	商用化済
無線 LAN	0.5m～15m 程度	干渉、マルチパ スの影響等有り	測位デバイスの 切替え必要	ごく一部の携帯 に搭載	商用化済
Bluetooth	数 m～15m 程度	干渉、マルチパ スの影響等有り	測位デバイスの 切替え必要	一部の携帯に搭 載	一部商用化済
RFID (パッシブ)	数 cm 程度	近距離のため影 響無し	測位デバイスの 切替え必要	Felica として搭 載	商用化済
RFID (アクティブ)	数 cm～100m 程度	干渉、マルチパ スの影響等有り	測位デバイスの 切替え必要	搭載予定無し	商用化済
Impulse UWB	数 cm～数 10cm 程度	干渉、マルチパ スの影響等有り	測位デバイスの 切替え必要	搭載予定無し	実証実験レベル
可視光	1m～3m 程度	遮蔽物が無けれ ば安定	測位デバイスの 切替え必要	搭載予定無し	商用化済
赤外線	1m～3m 程度	遮蔽物が無けれ ば安定	測位デバイスの 切替え必要	搭載予定無し	商用済
無線ビーコン	1m～5m 程度	干渉、マルチパ スの影響等有り	測位デバイスの 切替え必要	搭載予定無し	実証実験レベル
高感度 GPS	10m～数 100m 程 度	地下では測位不 可	GPS のため切替 え不要	GPS 携帯に搭載	商用化済
GPS リピータ	数 10m～数 100m 程度	マルチパスの影 響等有り	GPS のため切替 え不要	GPS 携帯搭載の GPS チップ利用	商用化済
Pseudolite	数 10m 程度	マルチパスの影 響等有り	GPS のため切替 え不要	GPS 携帯搭載の GPS チップ利用	実証実験レベル
IMES	5m～15m 程度	マルチパスの影 響等有り	GPS のため切替 え不要	GPS 携帯搭載の GPS チップ利用	商用化可能



図5. 1. 2. 1. 4 iCART 外観
 (出典 日本ロボット学会「日本のロボット研究開発の歩み」)

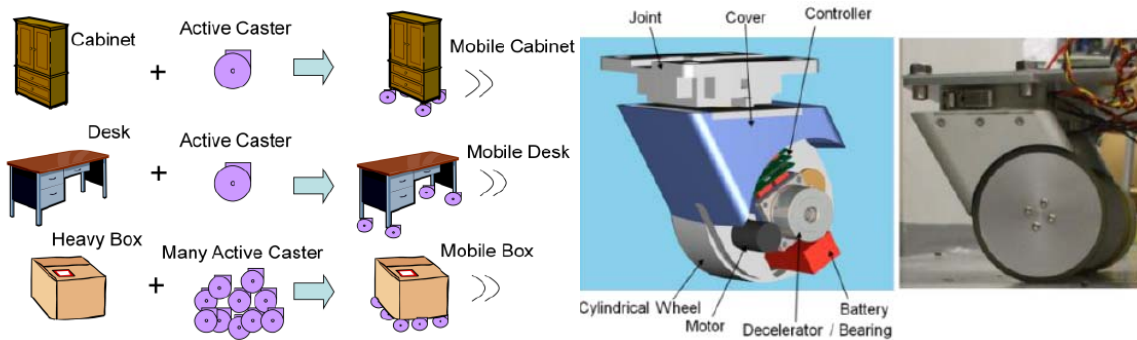


図5. 1. 2. 1. 5 アクティブ・キャスタの概念と試作機構
 (出典 参考文献[5])



図5. 1. 2. 1. 6 エレベータ連動型ビル清掃ロボット
 (出典 ロボット大賞 2006 アーカイブ)

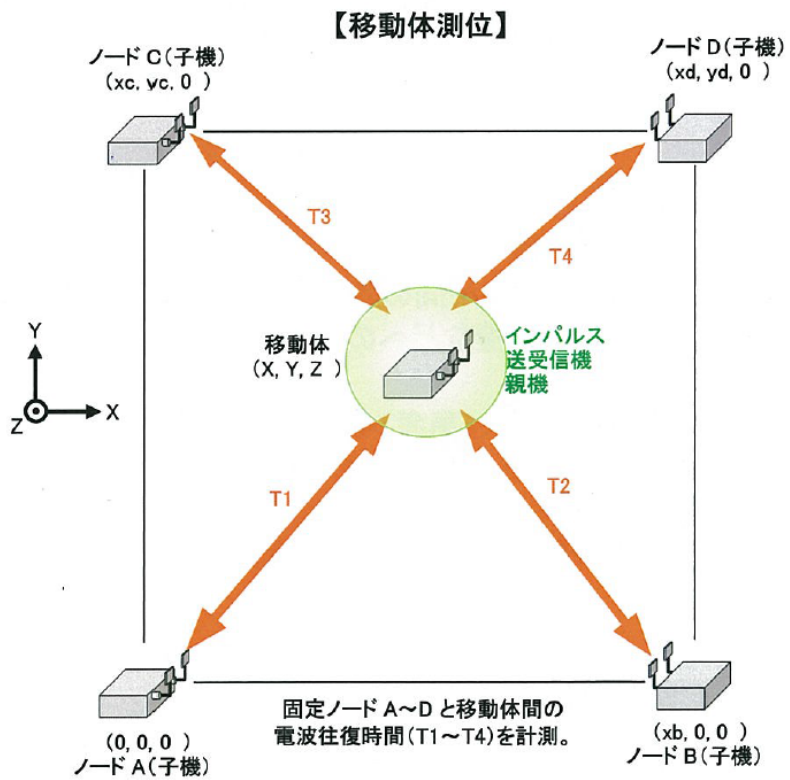


図5. 1. 2. 1. 7 インパルスUWBによる測位技術の原理
(出典 三菱電機エンジニアリング「インパルス無線方式高精度測位システム」カタログ)

5. 1. 2. 2 位置決めロボット

位置決めロボットにおけるハンドリングには、位置決め技術（「5. 2 位置決め技術」を参照）により得られた位置情報に基づき、建築資材を把持しその位および姿勢を制御する機能と、把持したまま移動する機能の両方が必要である。図5. 1. 2. 2. 1は、窓枠ブロックを搬送用ロボットが受け取り、所期の取付け位置まで移動し、姿勢調整を行った後、窓枠の固定作業が終わるまで保持する。

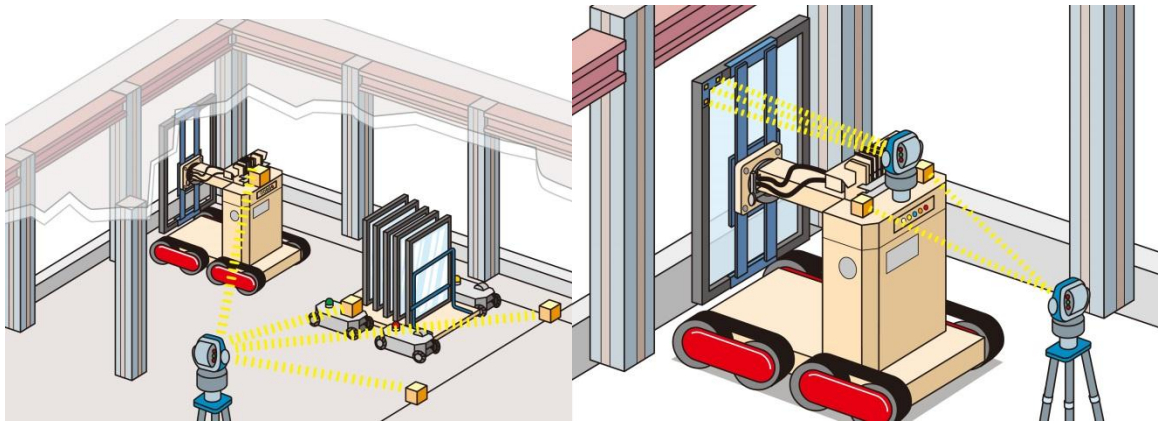


図5. 1. 2. 2. 1 位置決めロボット（移動及び姿勢制御）

資材の位置姿勢は空間内の6自由度を占め、これを制御するためには、ハンドリングロボット側にも6つ以上の自由度が必要である。最も代表的な技術例は、図5. 1. 2. 2. 2に示す産業用ロボットであり、通常6つ以上の関節を有する構造となっている。現場作業を効率化するため、なるべく大きなパーツを工場できみあげ、そのまま搬入・設置した方がよく、たとえば最近の大型のカーテンウォールなどは500 kg以上となる。このクラスをハンドリングする産業用ロボットはあるが、自重がロボット本体だけで2,000 kg以上となり、移動が難しく、エレベータ搭載の妨げとなる。位置繰り返し精度や先端速度は、ビル建築資材ハンドリグ用としてはあきらかにオーバースペックであり、これらの仕様を最適化し、駆動方法に油圧を採用するなど、軽量の専用ロボットを開発する必要がある。



図5. 1. 2. 2. 2 産業用ロボットの例
(出典 ファナック HP)

制御軸	6軸
リーチ	2832 mm
可搬質量	700 kg
位置繰り返し精度	±0.3 mm
ロボット質量	2800 kg
先端速度	約 5m/sec

また、ハンドリングロボットの移動技術に関しては、移動マニピュレータとしてさまざまな研究がなされており、台車にマニピュレータを搭載したシンプルなものから、複数のロボットが協力して大きく重い物をハンドリングする複雑システムまである。本章5. 1. 1. 2で分析したように、ロボット自体が重く大きく取扱いが大変なものは使われなくなってしまうため、小型軽量化、モジュール分割式、動力供給の簡素化、操作の簡単化など開発課題は多いが実現可能である。

5. 1. 2. 3 システム化技術（BIMとの連携）

資材の最適搬送と位置決めを行う高度なロボット群実現のためには、これら全体をコントロールするシステム化技術が必須である。建築工程管理のシステムと BIM とを連携させれば、搬入物の工程指示を各サプライヤに的確に指示することができる。また、ロボットによる施工により、施工と同時にアズビルドデータが蓄積可能であるため、これらを BIM に適切にフィードバックすることにより、後検査の手間を削減するだけでなく、これから搬入する資材にも手直しが必要となった場合、従来は現場合合わせでしていた調整加工作業を、事前に工場ですることができ、物の精度も現場の効率も格段に向上する。図5. 1. 2. 3. 1にイメージを示す。

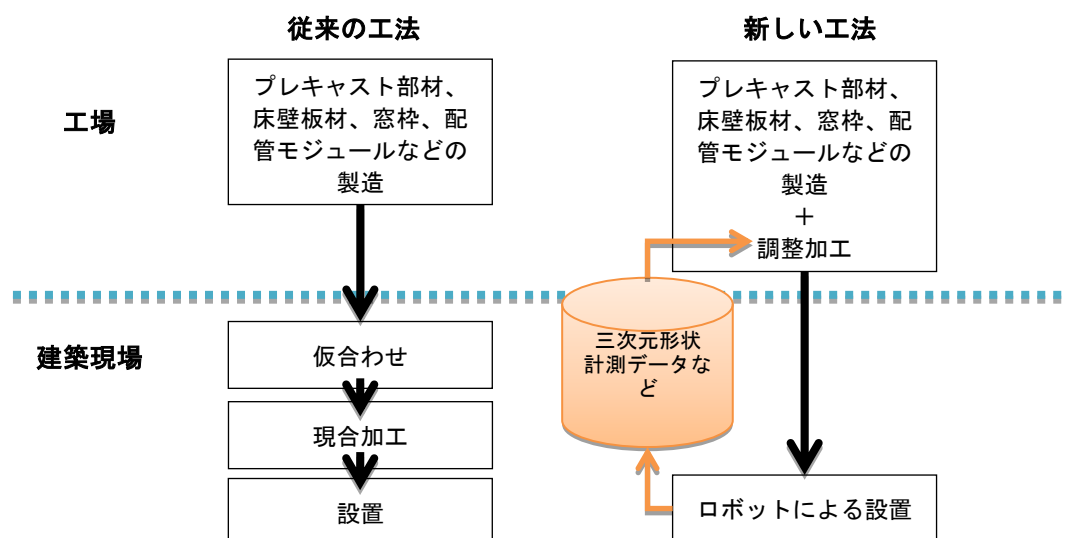


図5. 1. 2. 3. 1 ロボット化を前提とした新しい建築工法のイメージ

ロボット・自動化の設備の作業における各種情報の流れを図5. 1. 2. 3. 2に示す。例では、ワークである窓フレームにRF-ID（表5. 1. 2. 3. 1参照）が取付けられおり、ワークからRF-IDによりシリアルナンバーが送信される。現場フロアでは、三次元位置情報により移動するロボット・自動化装置の位置情報が送信され、ロボット・自動化装置からは軸情報の発信、作業指示（作業座標を含む）の受信などが現場LANルータを通じて行われる。現場LANルータに繋がった現場サーバはBIMからのシリアルナンバーとの照合と関連する属性データ、施工記録の引き当てや取り付けに必要な位置情報、作業プログラムの呼び出しが行われる。BIM上では施工データの部品番号、設計データへの関連付けによる施工記録の生成などが行われる。

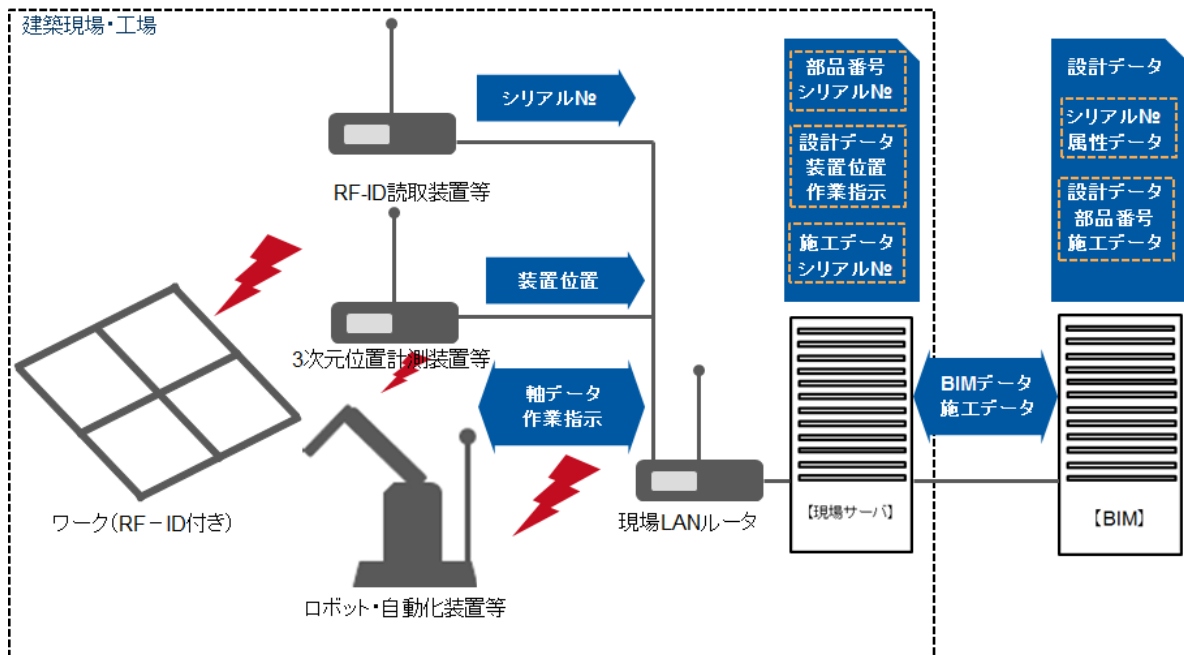


図5. 1. 2. 3. 2 各種情報の流れ

これらのデータの流を実現する想定されるシステムの構成（図5. 1. 2. 3. 3参照）としては、建築設計の中心となる設計及び部材属性を有し、アズビルドデータによるリアルタイムの情報の付加、修正を管理する BIM に設計、工程、部材情報の入出力、修正を行う設計部門、部材製作工場、建築現場などの端末機から繋がる。特に現地作業場所にはロボットや自動化装置への作業指示送信や実測データ、施工記録の受信を行うとともに安全で効率的な作業のため複数のロボットでの協調などを行う各種アプリケーションを搭載した現場サーバが必要になる。

また、これらのシステムで活用されるデータと実体である躯体、建築部材などと BIM データ、工程データとの関連付けを行うための個体認識技術が重要になる。一般的な固体認識技術を表5. 1. 2. 3. 1に示す。個体認識を建築工事に係わる全ての工程で適宜行える環境には、利用する個体認識技術の統一や対応範囲の取り決めやタグなどの取り付け場所の標準化、通信プロトコル、認証方法の標準化などが必要になる。

各要素を繋げる通信は各部門内のイントラネット及び部門間を結ぶ WAN (Wide Area Network) を利用することになるが、BIM はクラウド上に設置し、建築工事に関与する全ての部門からの 24 時間、あらゆる場所からのアクセスを容易にすることが望まれる。特に建築工事を行う工事現場においては仮設の通信システムであるとともに工事進捗に応じてシステムの設置場所や利用機器が変更される場合も予想されるため、これらに対しフレキシブルな対応が可能なクラウドがより優位である。

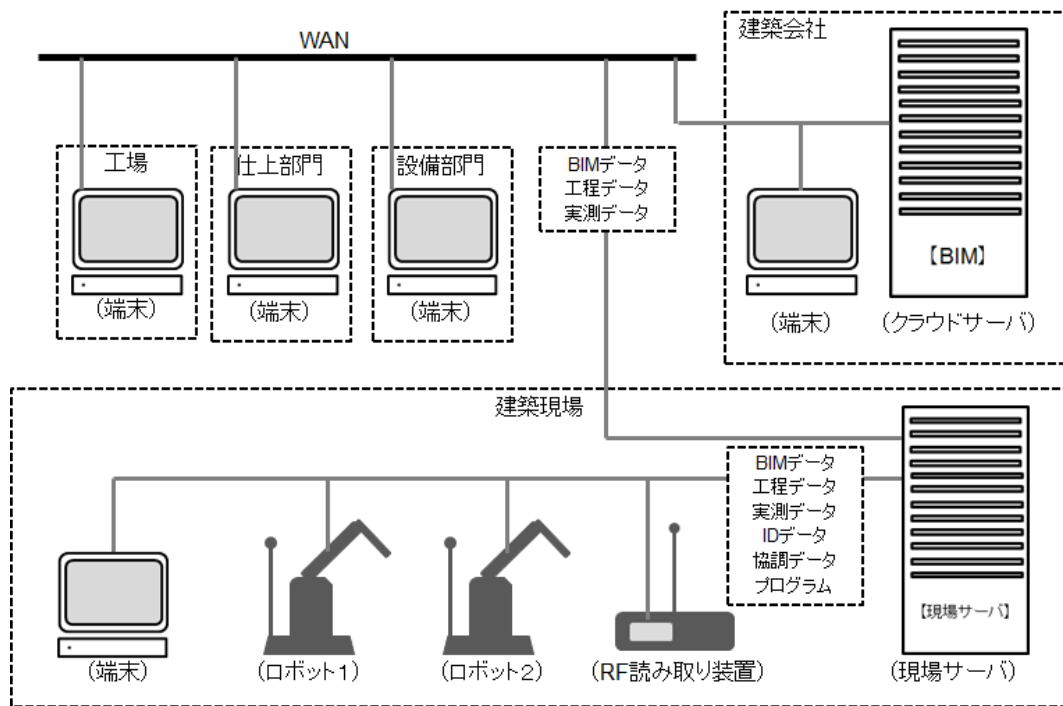


図 5. 1. 2. 3. 3 システムの構成

表 5. 1. 2. 3. 1 個体認識技術

識別タグ技術	仕様	特徴	評価
BLE (アクティブタグ) (Bluetooth Low Energy)	<ul style="list-style-type: none"> 屋内外、広範囲の利用可 利用距離(は約50m以内) コスト:タグ 数千円 リーダー 数万円 	<ul style="list-style-type: none"> 省電力で比較的長寿命 (電池寿命半年~1年) 市販汎用機も多く、機器費が安い。 Bluetooth4.2の制定で、IP6との連携強化 IoT事業他での利用拡大が期待される。 一括読取が可能だが、同時に位置特定できない。 特殊利用ではデータ読書きや機器制御も可能 	<p>比較的タグのコストが高く、電源管理も必要のため、大量物品管理には不適切 ×</p>
RFID (パッシブタグ) Radio Frequency Identifier	<ul style="list-style-type: none"> 屋内外、狭範囲での利用可 利用距離(は約10m以内) コスト:タグ 数円~数千円 リーダー 数十万円 高出力時は免許申請要 	<ul style="list-style-type: none"> RFIDリーダーが高額(固定式は約30万/台) タグは電池不要で安価だが、金属面に張り付けられる場合は、専用品を推奨(数百円/枚) 設定により広域の一括読取が可能だが、位置特定では狭域での通信が必要 制限があるがデータ読書きも可能 	<p>タグが多数、リーダー少数の場合に有効。タグ、リーダーの種類も多い ○</p>
NFC (非接触ICカード)	<ul style="list-style-type: none"> 屋内外、接触距離で利用可 利用距離(は約100mm以内) コスト:タグ 数百円 リーダー 数万円 	<ul style="list-style-type: none"> RFIDと類似した技術だが、書き込み情報量が多く、セキュリティも高い 通信距離は短く100mm程度が限界 	<p>条件次第で利用価値も高まるが、RFID利用が一般的 △</p>
画像処理 (バーコード)	<ul style="list-style-type: none"> 屋内、中範囲で利用可 利用距離(はバーコードの寸法とカメラ解像度次第だが、約5m以内を推奨) コスト:カメラ 数万円 	<ul style="list-style-type: none"> タグ(バーコード)は印刷するのみなので安価 データの追記は不可 2次元バーコードでは誤り訂正機能があり、若干の汚れでも識別は可能 判別に一定の解像度が必要で、遠距離は不利 	<p>タグが多数、リーダー多数の場合に有効だが、タグが見え易い状態である必要がある。△</p>
画像処理 (カラー/カメレオンコード)	<ul style="list-style-type: none"> 屋内、中範囲で利用可 利用距離(はバーコードの寸法とカメラ解像度次第だが、約10m以内を推奨) コスト:カメラ 数万円 処理サーバ 数百万 	<ul style="list-style-type: none"> タグ(カラーバーコード)は印刷するのみだが、色数により利用上限が設定される(基本パターンで約7兆あるが有限枚数) 誤り訂正機能がなく汚損に弱い 2次元バーコードより遠距離の利用ができるが判別に一定の解像度が必要なのは同じ。 	<p>タグが少数、リーダー多数の場合に有効 ×</p>

一方、クラウドタイプのオープンなシステムは利活用の容易さや柔軟なシステム構成である一面、多くの場合、セキュリティ維持管理が重要な要素となりうる。上述の実体とシステムデータ

の連携のための個体認識技術に加えて、データ操作者の認識、利用施設（送信先、受信先のロボットや端末など）認識などの認識技術を用いたセキュリティシステムの構築も必要となる。

参考文献

- [1] 「国産ロボット技術発展の系統化に関する調査」日本ロボット工業会, pp65, 2003
- [2] 「技術戦略マップ 2010」経済産業省
- [3] 神林、鈴木：“複数ロボットを用いた車両搬送システムの開発”、日本機械学会誌、Vol. 113、No. 1103、2010
- [4] 平田、小菅、浅間、嘉悦、川端：“キャスト特性を有した複数の人間協調型移動ロボット（DR Helper）と人間との協調による単一物体の搬送”、日本ロボット学会誌、Vol. 21、No. 7、pp776-784、2003
- [5] 高木、富沢、谷川、大場、水川：“分散アクチュエーションモジュールの開発 —あらゆる物体を移動ロボット化するアクティブ・キャスト”、ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2009
- [6] 田島、青山、関、石川他：“ロボットによる高層ビルの清掃システムの開発”、日本ロボット学会誌、Vol. 22、No. 5、pp595-602、2004
- [7] IHI 運搬機械株式会社：“クレーンの操作性改善で超高層建築物の建設工期短縮”、IHI 技報 Vol. 54、No. 3、pp28-29、2014

5. 2 位置決め技術

5. 2. 1 BIMの機能拡張

BIM (Building Information Modeling) とはコンピューター上で作成した「属性情報付き三次元モデル」を設計から施工、維持管理まであらゆる段階で活用する手段である。(図5. 2. 1. 1)

2014年4月に国土交通省から「BIMガイドライン」が策定され、大手の設計事務所やゼネコンを中心とした取組み企業が増加している。しかし、モデル作成自体が従来行ってこなかった新たな業務であり、現段階では特定の物件のみの対応となっている。

主な取組み内容として、設計段階においてはビジュアルな「見える化」により関係者間の合意形成を図ることや、さまざまな解析・シミュレーションでの事前確認などを実施している。施工段階においては各施工業者のBIMデータの統合モデルによる空間調整や施工シミュレーションなどに活用している。今後は施工後の維持管理にBIMデータが活用されていくと考えられる。

使用されるBIMソフトは、建築系、構造系、設備系に大別される。それぞれの機能に特化させた三次元CADが市販されている。施工段階におけるBIM構築は、関連各社が各々の所有するCADで作成し、それらを統合して空間調整などを行う。したがって各CADの互換性の精度が重要になる。BIMの属性付き情報交換としてはIFC (Industry Foundation Classes) が国際的に使用されており、国内CADメーカーもIFC形式の入出力を実装しているが、その互換性についてはまだ十分ではない。設計から運用までの段階で必要となる属性については、さらなる標準化の取り決めが必要である。

国外ではシンガポールやフィンランド、米連邦調達庁 (GSA) など、建築確認申請にBIMモデルデータの提出を義務付けている、あるいは一定の補助を行っている国・組織も存在する。

国内においても、本格的な普及を目指し、導入支援を視野に入れた義務化が必要である。



図5. 2. 1. 1 BIMの概要

本研究の課題の一つである位置決め技術にBIMを活用することが有効である。

工場製作された部材を躯体などの既存部材に接合する場合、躯体や仕上げ、設備の位置や寸法には必ず製作誤差と施工誤差が含まれている。そのため現状は、現場合わせをしながら調整する作業に手間がかかっている。既存部材を正確に計測してBIMデータにフィードバックし、それに基づいて工場製作することで部材の取り付けを自動化することができれば、大幅な効率化が図られる。ロボットがBIMをリアルタイムに伝達された情報に基づき搬送位置決めを行う。更にその

後に発生する現場合合せなどの変更部分に関しては読み取り装置として機能し、位置データをBIMにフィードバックする手法が考えられる。

BIM と連携させた三次元位置計測技術はさまざまな分野で開発されており、一部については既実用化されている。それらの技術をロボットなどに搭載することで位置決めの自動化が実現できると考えられる。以下にその概要を述べる。

5. 2. 2 三次元位置情報の活用

(1) 建築における墨出し

建築工事において、各種部材を所定の位置に接合する際の位置計測は、各フロアの基礎コンクリートや躯体面に引かれる線を基準として相対的に計測される(図5. 2. 2. 1参照)。この線のことを「墨」と呼び、線を引く作業は「墨出し」と呼ばれている。建物の基準となる墨は、敷地の特定の1点(三次元)を基準点として誤差1mm以内の精度で相対的に設定される。墨出しは、光波測量器やトランジットなどの位置計測装置を利用した専門職の作業を経て、各フロアの水平・垂直方向の墨として展開されていく。

このように、建築工事における位置決めは相対的に設定される墨を基準としており、GPS や準天頂衛星から得られるような三次元絶対座標は用いられない。また、精度も1mmレベルが要求されることから、現状得られる三次元絶対座標を部材取付の際の位置決め用にはできない。

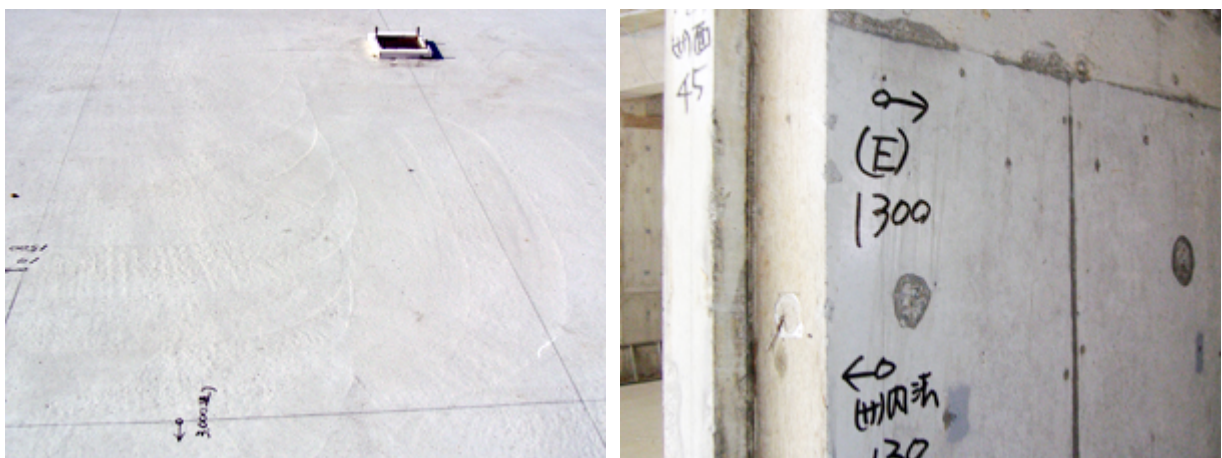


図5. 2. 2. 1 躯体上の「墨」(左:床面、右:壁面)(出典 株式会社スペースQ HP)

墨出しは建築工事において独立した工程となっており、工数、工費、工程に大きく関与する。さらに、部材の取付けに際しては、個々の作業者が当該フロアの「墨」から、位置決めに必要な独自の墨を必要とすることから、墨出しの手順・所掌の区分によっては、作業人員の重複や責任の明確化において、現場の負担となり得る。

また、墨出しの工程はコンクリート打設などの建築躯体工事が完了した後に行うことが多く、その前段階で部材を設置する場合には、基準となる墨そのものがないため、位置決めの精度は不確実とならざるを得ないなどの問題がある。

(2) 三次元計測・位置決め技術

対象部材（サッシや設備ユニットなど）を正確に設置するためには、接合の相手である躯体などの形状と取り付け位置、および取り付け位置に対する部材の相対的な位置を高精度に認識する必要がある。レーザスキャナやトータルステーションによる三次元計測、あるいは写真計測による現場三次元情報の取得技術は既に実用化されており、本研究においても有効な手段として活用できる。

図5. 2. 2. 2に、レーザスキャナ計測による三次元 CAD モデルの作成およびそれを用いた施工情報の構築についてのイメージを示す。計測した点群データを自動的に三次元 CAD モデルに変換する手法が実用化されつつある。図5. 2. 2. 3にモータードライブ型トータルステーションと BIM データを連携させた部材設置位置の墨だし作業の概要を示す。工場製作された部材を効率よく設置するためには正確な墨だし・位置決めが重要であり、本技術による定量的な効果が報告されている。高精度な測定方法としては、レーザマーカやプリズムなどのターゲット（複数点）の位置を連続計測する「レーザートラッカー」が応用できる（図5. 2. 2. 4）。さらに、これらの計測器を移動ロボットに搭載することによって自動計測・墨出しが実現され、さらなる生産性向上が期待できる。そのためには、ロボットの正確な自己位置認識機能に加え、計測器の最適配置や最短ルート探索などのナビゲーション技術が重要となる。

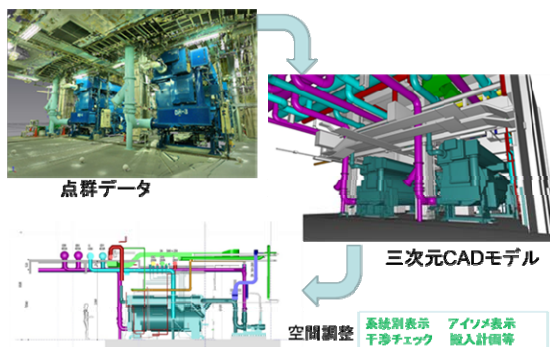


図5. 2. 2. 2 レーザスキャナ計測

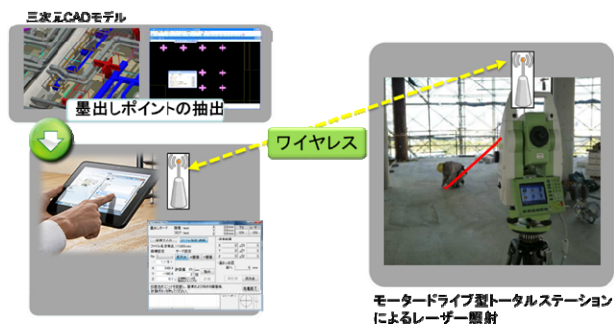


図5. 2. 2. 3 BIM連携による墨だし



レーザートラッカー本体（左）で、対象物に取り付けた専用ジグ（右）の位置 (x/y/z) 姿勢 (yaw/pitch/roll) を連続計測
 測定距離 ~50m
 測定精度 位置 約 1mm

図5. 2. 2. 4 レーザ式トラッキングシステムの例（出典 ライカ社 HP）

(3) 移動計測による三次元モデルの自動構築

センサが移動しながら対象物を計測する技術は、レスキューロボットなどの自律移動ロボットの分野やモバイルマッピングシステム(MMS)などの地形データ作成の分野で数々の研究がなされ、実用化されている技術も多い。レーザレンジファインダなどにより、移動しながら環境地図作成と自己位置推定を同時に行う SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) や、対象をカメラの位置を変えながら撮影した複数の画像から対象の三次元形状とカメラ位置を同時に復元する SFM (Structure From Motion) については多くの報告がある。本研究課題であるロボットによる自動化施工において、移動しながら現場の三次元計測を行う場面や自己位置認識に利用できると考えられる。さらに、改修工事においては、天井内などの狭隘部や高所における既存設備の現状把握のため、上記の技術を搭載した小型の移動ロボット(走行型、飛行型)の活用が有効であり、レスキューロボットに加え、現在研究が盛んに行われているインフラ点検ロボット技術の応用が考えられる。

(4) 計測データと BIM の連携

レーザスキャナによる点群データと三次元 CAD データを自動照合し、差分抽出およびモデル修正を行う技術は、すでに研究開発の報告がある。当技術を利用して出来形を計測し、BIM データにフィードバックする。これにより施工結果に忠実な BIM データが活用でき、工場製作部材の精度や位置決め精度の向上につながる。さらにこの as-built な建物モデルは、竣工後の維持管理においても有効である。

施工後の状況を確認する技術としては、携帯端末やウェアラブル端末を利用し BIM と実物との重畳 (AR (Augmented Reality) 技術) による目視確認が考えられる。図 5. 2. 2. 5 に将来予想される技術として、眼鏡型ディスプレイなどのウェアラブル端末を利用した BIM データとの重畳のイメージを示す。

さらに施工品質を判定できるセンサを合わせて携帯することで、位置情報に関連付けられた品質データを瞬時に取得する技術が考えられる。施工管理側の作業の効率化が図られるとともに、手戻り施工の防止につながることで生産性向上に寄与する。たとえば設備工事においては、施工後に機器等などの能力が設計どおりに機能しているか確認するための性能試験を必ず行う。自己位置認識機能をもった風量測定などの検査ロボットが実現できれば、BIM データと連携することによって検査の手間を大幅に削減することができる。

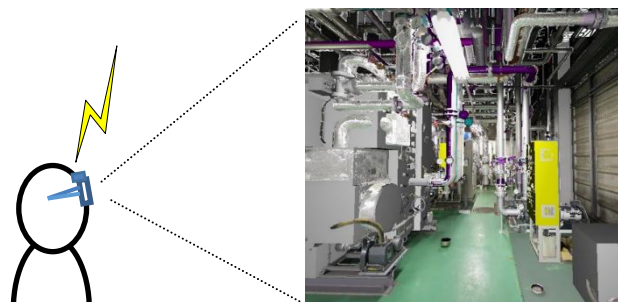


図 5. 2. 2. 5 BIM と実物との重畳

(5) 部材の属性関連付け

IC タグや QR コードなどを利用して、部材やユニットの ID と BIM を連携させて、位置データと属性データを関連付けることで、部材・ユニットの発注・納品管理から品質管理および維持管理まで、建物のライフサイクルにわたって活用することができる。

建築部材は多種多様であり、一つの現場で膨大な数の部材が納品される。各部材がいつ、どこに、誰が設置したかなどの属性情報を ID 番号に関連付けることで現場業務の効率化が図れる。

図 5. 2. 2. 6 に三次元 CAD 部材情報から各部材の取り付け位置情報を求め、位置指示を行うシステムの構成例を示す。図 5. 2. 2. 7 に三次元 CAD から部材のデータベースを作成し、工場製作および現場納品までのフローの例を示す。

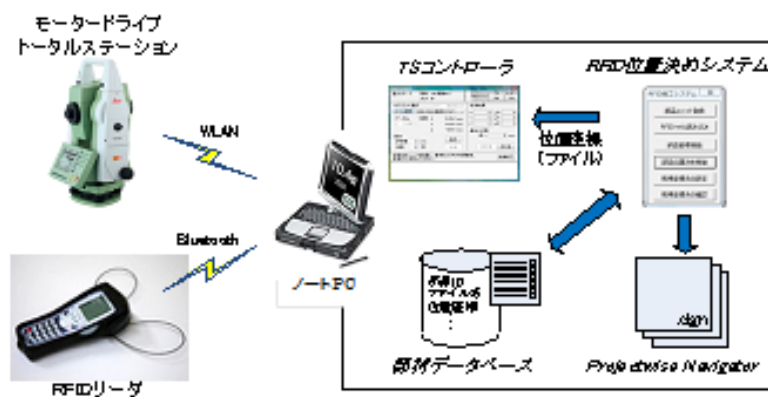


図 5. 2. 2. 6 位置決めシステムの構成例

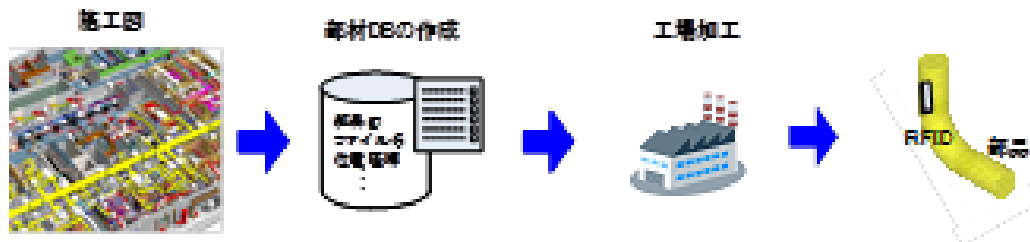


図 5. 2. 2. 7 位置決めシステムのフロー例

参考文献

- [1] 山岡晋也、他：RANSAC による屋内環境レーザ計測点群の BIM 構成要素への効率的なマッチングと差分点抽出
- [2] 富田裕行、他：改修工事におけるエコ生産のための三次元レーザスキャナを用いた計測技術の開発
- [3] 今野一富：設備工事における BIM 取組み事例

6. 本研究会からの提言

前章までに述べたさまざまな検討を踏まえた、本研究会からの提言は以下のとおりである。

【提言 1】各種接合に関する研究開発の方向性および課題

【提言 2】研究開発成果の実証に向けたパイロットプロジェクトの実現

【提言 1】については次節 6. 1 にて、【提言 2】については 6. 2 にてそれぞれ詳細を示す。また、これらの提言を実現するための官民の役割分担（6. 3）と、研究開発成果の実用化に向けてのロードマップ（6. 4）についても併せて示す。

6. 1 各種接合に関する研究開発の方向性および課題

6. 1. 1 接合・素材技術

4 章・5 章で検討した各構造部位に適用する接合技術を整理すると表 6. 1. 1. 1 のように示すことができる。表中の■印は現状の接合技術を示し、★印は本研究会における議論を通して提案され、またその実現が施工性向上に資すると期待される接合技術を示している。

現在多用されている溶接について、天候の影響を含む現場管理の難しさや熟練工不足などの問題があることから、高強度が要求される構造体を除き、機械式接合（嵌合・ラッチ）や接着剤など、溶接に替わる接手法の可能性を積極的に検討した。以下に、接合法毎に研究開発の方向性・課題を示す。

表 6. 1. 1. 1 各接合部位における現行接合法と期待される接合法

対象 接合法	構造体						仕上げ アルミサツ	設備		洋上 施工 ソケット	福島 廃炉
	PCa 造			S 造				配管	エレベータ		
	柱-梁	柱-柱	梁-梁	柱-梁	柱-柱	梁-梁					
溶接				■	■	■	■		■		
ボルト				■	■	■			■		■
機械式継手	■	■	■					■			
スリーブ継手	■	■	■								
リベット・ねじ							■				
現場固化										■	
嵌合		★			★						★
ラッチ			★								
接着		★	★	★			★				
レーザー溶接			★								
特殊ボルト						★			★		
可撓性配管								★			
炭素繊維				★						★	
【接合なし】	★										

※PCa 造＝プレキャスト鉄筋コンクリート造。S 造＝鉄骨造。

(1) 機械式接合技術

3章において点検された各種機械式接合も参考として、4章で提案した構工法にもとづき、飛躍的な生産性向上を実現する具体的なワンアクション接合法を考案してその性能を検証するとともに、構造実験によりその接合法を用いた構工法の性能検証を行う必要がある。

【1】柱・梁機械式接合技術（嵌合・ラッチ型ファスナ）の開発

大幅な工数削減を果たす構造ディテールを考案し、明確化した材料必要性能（強度、伸び、靱性、溶接性、加工性）にもとづき、評価試験方法を立案して、力学特性・施工性・精度の評価を行う。

【2】建築構造物用ワンアクション機械式接合（嵌合・ラッチ）を用いた柱梁架構構築工法の開発

機械式接合（嵌合・ラッチ）を考慮した架構解析による性状評価にもとづき、部分架構の加力実験計画を立案し、加力試験により施工状況を考慮した構造性能評価と生産性評価を行う。成果をもとに設計・施工法の構築を行う。

(2) 接着接合

表6. 1. 1. 1における★の数からも接着接合への期待が非常に大きいことが分かる。接着技術の要素技術開発に係る共通事項として、4章で提示された接着剤への要求性能を再度整理するとともに、接着接合の実現に向けた議論をより本格化させること、また構造系技術者と化学系技術者の議論と連携を更に進展させる必要がある。

従来は接着層をできるだけ薄く塗布することが接着接合の基本とされてきたが、建築構造への適用時には、施工性確保の視点から、接着層に厚みを持たせるケースも考えられる。そのため、接着層の厚さを変数にしたデータ収集が必要であり、また、試験温度や湿度の設定、繰り返し荷重に対する抵抗力や、耐久性の具体的な評価方法についても、構造実験を行い、データを積み上げていく必要がある。

【3】建築構造用高強度・高耐久接着剤の開発

候補材料の選定と解析による詳細仕様設定にもとづく材料の探索から、材料と組成の絞り込みを経てパイロット試験を実施し、改良と実スケール試験により性能を確認する。現場実装のための予備試験と使用条件下での継続暴露試験により必要性能を検証する。

【4】建築構造用接着剤の接着強度・耐火性・耐久性評価技術の開発

組成変化の要因特定と要因ごとの促進実験にもとづき性能評価の妥当性を検証する。合わせて複合応力（長期・短期、引張・割裂など）と組合せ特性（繰り返し、経年、水分など）の評価技術を確立する。

【5】 建築構造用高強度・高耐久接着剤を用いた柱梁架構構築工法の開発

接着性能を考慮した架構解析による性状評価にもとづき、部分架構の加力試験計画を立案し、部分架構の加力実験計画を立案し、加力試験により施工状況を考慮した構造性能評価と生産性評価を行う。成果をもとに設計・施工法の構築を行う。

【6】 ダクト・配管用誤差吸収型接着剤の開発

誤差を吸収する接合方法として、誤差のあるままで接合して、隙間部分を接着剤などで充填し接合する技術を開発する。

【7】 アルミサッシ接合・シール用接着剤の開発

既往接着技術を構造・外装材の接合に用いるための研究開発を行なう。

【8】 完全乾式外装接合技術の開発

既往接着技術の延長で接着固定部において耐火・止水性能を満足する全面接着固定のための研究開発を行なう。

【9】 完全乾式外装接合部の強度・耐火性・耐久性評価技術の開発

必要性能条件を明確にするとともに接合部に作用する力、応力の組み合わせ、耐火性、耐久性などを各要素試験、解析を通して評価技術を構築するための研究開発を行なう。

(3) その他接合技術（溶接技術については、次節【提言 12】と統合）

3章において点検・評価した既存接合技術のうち、既存技術の援用による接合や、既存技術と新素材のハイブリッド化によって性能を高めることについても併せて検討した。

【10】 昇降機レールブラケット非溶接技術の開発

レールブラケット接合面の許容誤差減少により、溶接接合に替わるボルトナット接合方法を開発し、それに伴う施工指針を提言する。

【11】 モノパイルグラウト接合法用充填材料および評価法の開発

洋上施工におけるグラウト接合法用の高性能充填材料の開発および充填材料の性能評価手法に関する研究開発を行なう。

6. 1. 2 ロボット・自動化技術

4章における各接合部位に求められるロボット・自動化技術に関する検討、さらに5. 1における建築におけるロボット・自動化に係る共通技術の検討を踏まえ、以下に研究開発の方向性および課題を示す。

【12】鉄筋レーザ溶接ロボットの開発および実証

狭隘部での鉄筋の遠距離溶接を可能とする鉄筋レーザ溶接ロボットの開発とパイロットプロジェクトでの検証を行なう。

【13】柱建方ロボットの開発および実証

柱、または柱梁架構の建て方時の倒れ（XYZ座標軸のずれ）の高速・自動計測を可能とする計測ロボットの開発とパイロットプロジェクトでの検証を行なう。

【14】ダクト・配管ユニットの位置決め・取付けロボットの開発および実証

工場で製作されたユニットを現場に搬入し、揚重・位置決め・設置までの一連作業をロボットにより自動化する。

【15】アルミサッシ位置決め・仮固定・取付けロボットの開発および実証

構造・外装材接合における大型重量外装材の施工に係わる建築用ロボットに求められる自動化技術の開発と、パイロットプロジェクトでの検証を行なう。

【16】3Dプリンタを活用した誤差を吸収する各種建材のリアルタイム製作技術の開発

誤差を吸収する接合方法として、現場合わせの部分を三次元計測し、そのデータに基づき3Dプリンタで製作する技術を開発する。

【17】現場情報に基づく工場内プレ加工システムの開発

設備ユニットなどの工場製作において、リアルタイムに現場の三次元計測データを反映させた製作方法を開発する。

【18】廃炉用鉄骨ボルト・嵌合接合ロボットの開発

極限環境下で、鉄骨柱・柱間や柱・梁間のボルト接合あるいは嵌合接合作業を完全無人で行い、遠隔操作で搬送や回収が可能なロボットを開発する。

【19】洋上施工用作業船の高度化および整備

洋上施工の作業効率を向上させる作業船の高度化と普及展開に向けた標準化などを整備する。

※以下は、共通ロボット基盤の開発に係る事項

【20】自動搬送ロボットの開発と現場内物流の実証試験

建築現場内においてトラックなどの輸送機器の積み降ろし後から据付・固定場所への搬送をBIMデータ、個体識別情報を利用して、無人で行う搬送ロボットの開発とその運用データ取得と実現性の確認試験を行なう。

【21】搬送ロボットと位置決めロボットとの連携技術開発と実証

自動化された揚重クレーンなどの搬送ロボットと位置決めロボット（一部接合作業までを含む）間の連携作業技術開発の運用データ取得と実現性の確認試験を行なう。

6. 1. 3 BIM・三次元位置情報とロボット・自動化設備との双方向連携基盤

4章における各接合部位に求められる位置決めに関する検討、さらに5. 2における BIM、三次元位置情報の活用に係る検討を踏まえ、以下に研究開発の方向性および課題を示す。

【22】 建築現場のロボット・自動化設備と BIM の双方向連携基盤システムの開発

搬送ロボット、位置決めロボットおよびその他の建築作業の自動化設備の平行作業および協同作業の協調・同期を取るリアルタイムシステムおよびこれらの作業に必要な設計情報や、三次元位置計測情報および施工誤差など双方向のデータ通信を可能にする建築現場に必要な通信システムを開発する。

6. 1. 4 実用化に向けた規格・標準化および制度上の支援など

新技術の速やかな普及展開を図るべく、接合に係る各種部材・ロボット・BIM データ構造などの規格・標準化、BIM・ロボットの活用を促すために必要な新制度の策定、さらに新たな接合手法を用いる工法の設計指針への追加などが必要である。

- ①構造体接合への高強度接着剤適用に向けた、建築基準法 37 条「指定建築材料」への接着剤の項目追加。
- ②昇降機におけるガイドレールのボルトナット接合（非溶接化）の施工指針への追加。
- ③BIM の普及に向けたアプリケーションの標準化および中小企業におけるシステム導入・データ作成費用支援、並びに BIM 活用の入札条件への追加。
- ④多くのサプライヤにまたがる、1) 建築ロボットが扱いやすい部材、2) 製造から自動搬送までの共通データ構造、3) 建築ロボット自体の規格（操作方式・接触回避を含む安全装置・ロボット間通信など）などの標準化。
- ⑤ノーリフトポリシーにより福祉用具が発達したオーストラリアの例（図 6. 1. 4. 1（左））や、解体作業への遠隔操作ロボットの適用を義務づけたことによりロボットが発達したスウェーデンの例（Brokk 社 図 6. 1. 4. 1（右））に習った、建築作業の一部へのロボット使用の義務付け、並びに建築ロボットの調達や維持への補助金制度の確立。



図 6. 1. 4. 1 法整備にあわせて発達したロボットの例

（左）日本ノーリフト協会 HP（2014 年 9 月 21 日アクセス）

（右）Brokk 社 HP（2014 年 9 月 21 日アクセス）

6. 2 パイロットプロジェクト構想

6. 1で述べた各種要素技術開発成果の実証並びに社会実装する前段階の検証を行うために、実規模での実証実験が必要である。また、各成果を組合せて適用するには、開発諸技術のシステム化（System of Systems）も併せて必要となることから、それらを具現化するためのパイロットプロジェクトを以下のとおり提言する。

また、各パイロットプロジェクトにおいては工数削減の検証も併せて実施する。本研究会では、ワンアクション接合などにより、接合作業の工数を1/5~1/10に削減することを目標とした。例えば構造においては、PCa造柱・梁架構で約1/6を見込んでおり、仕上げについては、ロボット化・接着剤の活用によって約1/5の工数削減が見込まれている。

(1) パイロットプロジェクトI [実物大モックアップ]

個々の要素技術の適用と要素技術間の連携検証を目的として、実物大モックアップ1棟を建築する。図6. 2. 1のように、基準階1層分を含む3階建てとし、建物近傍に揚重機や計測設備など配置することから、約1000㎡程度の敷地を必要とする。本プロジェクトの期間は建築期間を含め2年間とし、検証終了後に解体する。解体時には解体の容易性も確認する。

本プロジェクトにおいては、新たな接合手法の効果確認、各要素技術間連携、各種データ取得、それらを踏まえた改良点抽出を実施する。また、たとえば可とう性配管による誤差吸収効果の検証など、既往接合技術を新たな構工法で用いた場合の効果についても本プロジェクトにて検証する。ロボット・自動化技術については、ロボット単体での検証に加えて、ロボット群管理手法の検証やBIM・三次元位置情報との相互連携についても併せて検証する。このような実物大における総合的な検証を通じて、新技術の社会的コンセンサスを獲得するとともに、部材の工場製作～調達～施工までの一貫したシステムの検証を果たす。なお、各種部材・ロボットなどの規格・標準化に向けた課題についても本プロジェクトを通じて抽出する。

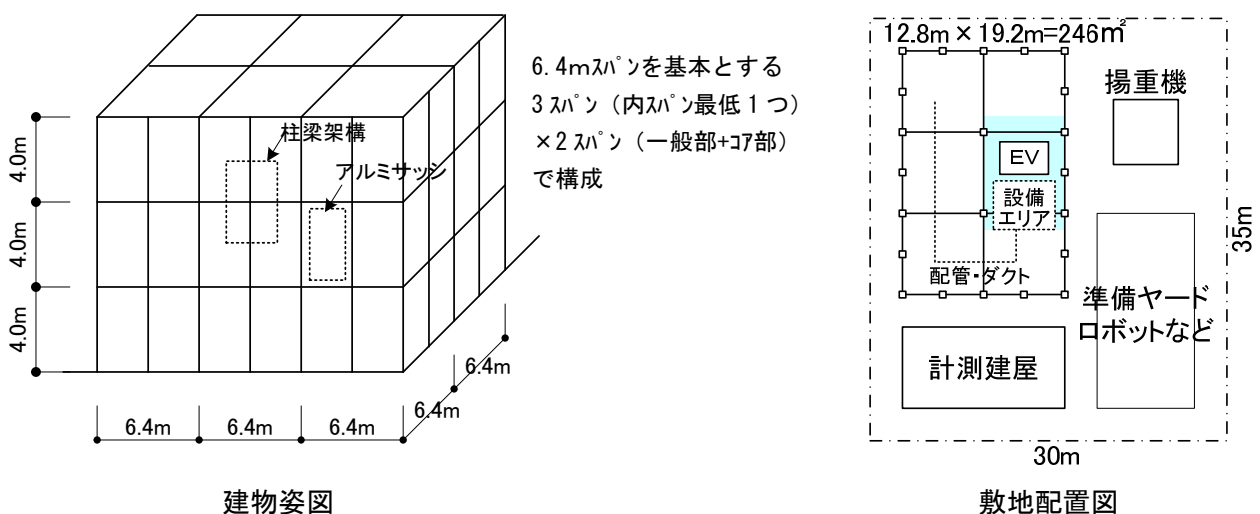


図6. 2. 1 パイロットプロジェクトI構想

(2) パイロットプロジェクトⅡ [恒久建築]

パイロットプロジェクトⅠで得られるさまざまな知見を踏まえ、それらの改良効果と、長期の研究開発期間を伴う要素技術の実証を目的として、図6. 2. 2で示すような実建物を建築する。建物はオフィス利用を目的とした11階建て（高さ44m）の基準階面積約1500㎡の免震建物を想定している。外周はPCa造、内部はS造（またはコンクリート充填鋼管（以降CFT）柱）、床はデッキプレートとし、外装にはアルミサッシを採用、設備は標準的なオフィス仕様を想定している。本研究会では、本プロジェクトを思考実験用モデルとして、新たな接合手法を提案する際の対象建物とした。

なお、本プロジェクトを通じて、新たな接合技術の取扱いに関する教育の必要性についても併せて検討する。

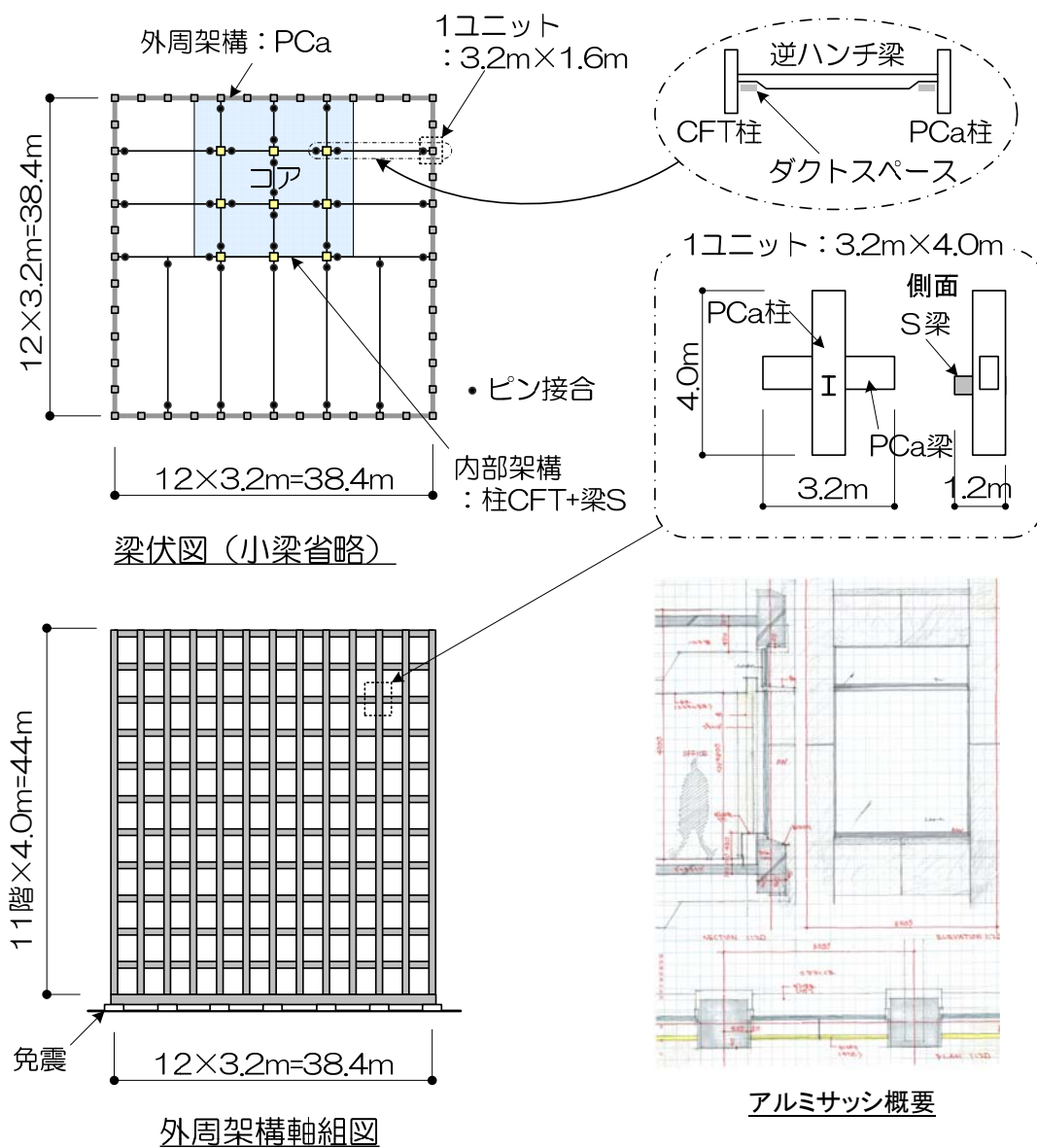


図6. 2. 2 パイロットプロジェクトⅡ構想

6. 3 官民の役割分担

(1) 産業界の役割

6. 1で提言した研究開発の方向性およびロードマップに基づき、要素技術開発を推進する。また、開発諸技術のシステム化を推進するためのコンソーシアムを設立・運営し、パイロットプロジェクトを推進するとともに、市場創出に向けて要素技術の積極的な普及・展開を図る。

(2) 関連府省への要請

6. 1で提言した研究開発に係る研究資金提供並びにパイロットプロジェクト実現に向けた府省連携プロジェクトの立ち上げ、要素技術の規格・標準化および適用に向けた制度上の支援などを要請する。

6. 4 実用化に向けてのロードマップ

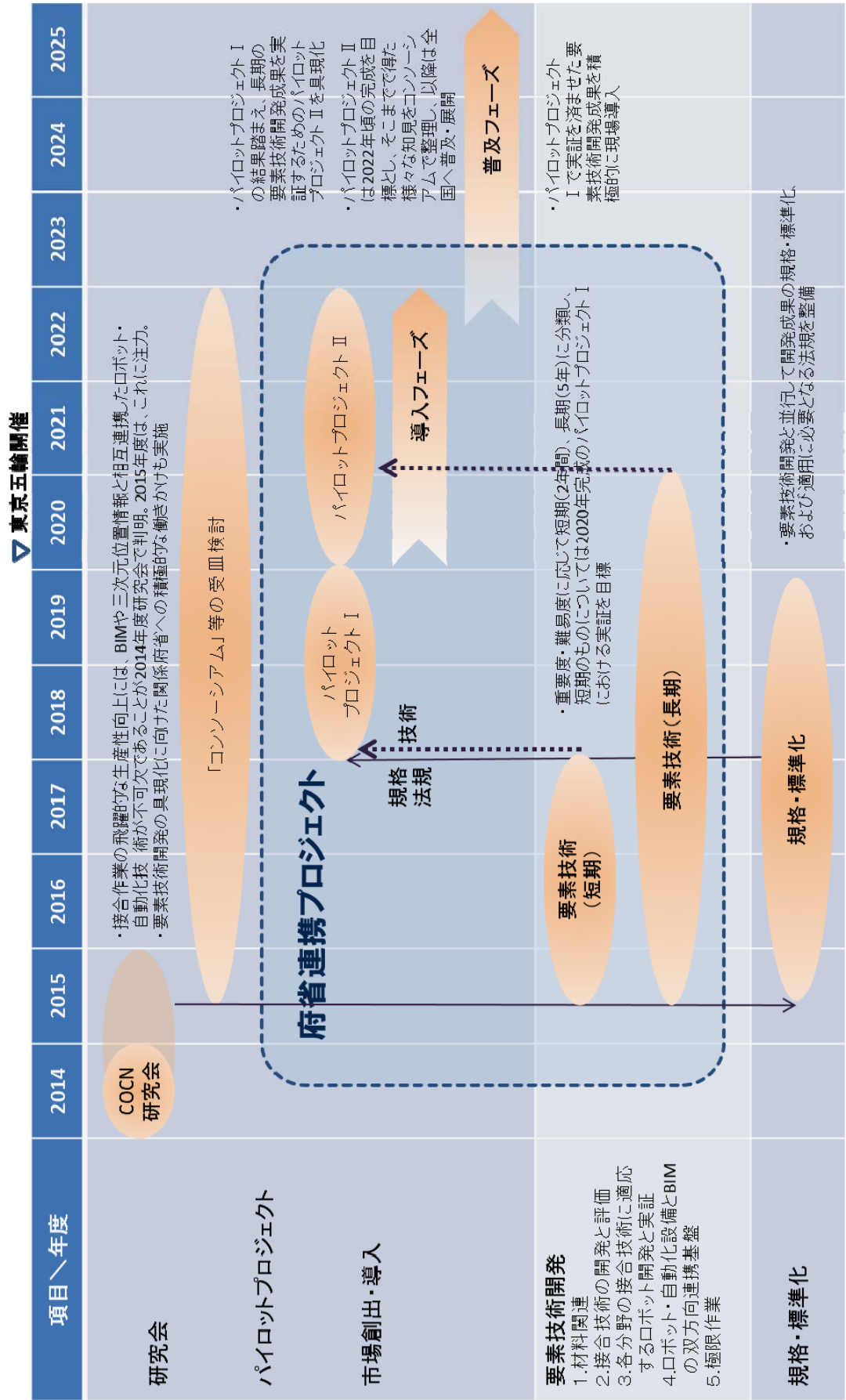
2020年までの実用化を目標としてバックキャストしたロードマップを表6. 4. 1に示す。要素技術開発については、その重要度・難易度に応じて短期（2年間）、長期（5年）に分類し、短期のものについてはパイロットプロジェクトIにおいて実証することとし、2020年までの完成を目標とする。

また、要素技術開発と並行して開発成果の規格・標準化および開発成果の適用に必要な関連法規整備を進める。

パイロットプロジェクトIの結果踏まえ、さらに長期の要素技術開発成果を実証するためのパイロットプロジェクトIIを具現化するとともに、パイロットプロジェクトIで実証を済ませた要素技術開発成果について積極的な普及を図る。パイロットプロジェクトIIは2022年の完成を目標とし、そこまで得たさまざまな知見をコンソーシアムで整理した上で、以降は全国への普及展開を図る。

本研究会での検討において、接合作業の飛躍的な生産性向上には、BIMや三次元位置情報と相互連携したロボット・自動化技術が不可欠であることが明らかになった。その連携方法やロボット群管理手法をはじめとした建築現場の生産システムに関する検討が課題として残されている。2015年度は、6. 1で提言した要素技術開発の具現化に向けて、関係府省への積極的な働きかけを行う。また、残された課題を重点的に検討するとともに、合理的な接合技術を含む構工法技術に関する検討も引き続き行い、相互に深化させていくことで、飛躍的な生産性向上を実現する構工法を構築する。

表 6. 4. 1 実用化に向けてのロードマップ



【参考資料】

会議など開催状況

1. 研究会の開催

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	8/7	15:00 - 17:00	鹿島 KI 多目的ホール	キックオフミーティング
第2回	9/2	9:00 - 11:00	鹿島 KI 大会議室	課題・要素技術紹介
第3回	10/10	9:30 - 11:30	鹿島 技研 大会議室	中間報告に向けた審議
第4回	11/20	13:00 - 15:00	鹿島 KI 多目的ホール	中間報告、検討会報告
第5回	12/24	15:00 - 17:00	鹿島 KI 大会議室	府省別懇談会報告、検討会報告
第6回	1/20	15:00 - 17:00	鹿島 KI 多目的ホール	検討会報告、ロードマップ/パイロットプロジェクト進捗報告
第7回	2/9	15:00 - 17:00	鹿島 KI 大会議室	最終報告に向けた審議

2. 世話役会の開催

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	11/20	15:00 - 16:00	鹿島 KI 多目的ホール	最終報告に向けた分担
第2回	12/24	17:00 - 18:00	鹿島 KI 内会議室	各種調整
第3回	1/20	17:00 - 18:00	鹿島 KI 内会議室	各種調整
第4回	2/4	9:00 - 12:00	鹿島 KI 内会議室	最終報告関連

3. 検討会の開催

「構造体」世話役企業：鹿島建設

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	9/19	13:00 - 14:30	鹿島 KI 多目的ホール	現状整理、要求性能について
第2回	11/6	15:00 - 17:00	鹿島 KI 内会議室	モデル建物、接手法案
第3回	12/16	16:30 - 18:00	鹿島 KI 内会議室	検討依頼と各種議論
第4回	1/7	10:30 - 12:00	鹿島 KI 内会議室	素材・接合技術
第5回	1/16	12:15 - 13:45	鹿島 別館内会議室	ロボット・自動化

「仕上げ」世話役企業：YKKAP

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	9/19	16:30 - 18:00	鹿島 KI 多目的ホール	現状、導入に向けて
第2回	12/16	14:45 - 16:15	鹿島 KI 内会議室	現状と提案比較、接合部仕様
第3回	1/7	14:45 - 16:15	鹿島 KI 内会議室	素材・接合技術
第4回	1/16	15:45 - 16:45	鹿島 別館内会議室	ロボット・自動化

「設備」世話役企業：新菱冷熱

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	9/19	14:45 - 16:15	鹿島 KI 多目的ホール	生産性向上のポイント
第2回	11/11	10:00 - 12:00	新菱冷熱 本社内会議室	モデル建物をベースにした議論
第3回	12/16	13:00 - 14:30	鹿島 KI 内会議室	課題検討
第4回	1/7	16:30 - 18:00	鹿島 KI 内会議室	素材・接合技術
第5回	1/16	14:00 - 15:30	鹿島 別館内会議室	ロボット・自動化

「極限作業（福島廃炉）」世話役企業：鹿島建設

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	10/2	16:30 - 18:00	鹿島 別館内会議室	接合工法のイメージ共有
第2回	1/16	11:00 - 12:00	鹿島 別館内会議室	ロボット・自動化

「極限作業（洋上施工）」世話役企業：清水建設

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	10/2	14:45 - 16:15	鹿島 別館内会議室	モノパイル基礎グラウト接合部
第2回	1/7	13:00 - 14:30	鹿島 KI 中会議室	素材・接合技術

「素材・接合技術」世話役企業：新日鐵住金

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	9/26	13:00 - 15:00	新日鐵住金 本社内会議室	シーズとニーズの整理、提案
第2回	12/24	13:30 - 15:00	鹿島 KI 内会議室	各検討会への情報提供

「ロボット・自動化技術」世話役企業：三菱重工

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	9/19	18:00 - 19:00	鹿島 KI 内会議室	各種議論
第2回	10/2	13:00 - 14:30	鹿島 別館内会議室	各種議論

「生産性（工数分析）」世話役企業：鹿島建設

回	月日	時間	場所	主な内容
第1回	9/22	16:00 - 18:00	清水 技研内会議室	検証状況の共有と議論
第2回	9/30	9:30 - 11:30	清水 技研内会議室	検証状況の確認
第3回	10/28	16:00 - 18:00	清水 技研内会議室	最終確認

4. 関係省庁への説明

提案先	月日	時間	場所	主な内容
国土交通省	12/4	9:30 - 11:30	帝国ホテル	COCN 府省別懇談会
経済産業省	12/5	9:30 - 11:30	帝国ホテル	COCN 府省別懇談会
内閣官房	12/5	12:30 - 13:30	内閣府内	個別懇談会
文部科学省	12/8	9:30 - 11:30	帝国ホテル	COCN 府省別懇談会
内閣府・内閣官房	12/9	9:30 - 11:30	帝国ホテル	COCN 府省別懇談会
国土交通省	12/15	10:30 - 12:00	鹿島 本社内会議室	提案内容の説明
経済産業省	12/19	13:00 - 14:00	経産省内 会議室	提案内容の説明

5. 見学会の開催

行先	月日	場所	主な内容
トヨタ自動車工業	9/4	トヨタ自動車工業	工場見学
JV工事現場	10/7	神田錦町3丁目	建設現場見学
スリーエムジャパン	12/19	スリーエムジャパン相模原事業所	テクニカルセンタ
新日鐵住金	1/8	新日鐵住金 RE センター	高力ボルト、機械式継手、 レーザ溶接
三菱電機	1/22	三菱電機 名古屋工場	サーボモータ製造ライン
セキスイハイム	1/30	東京セキスイハイム工場	ユニット工法
キヤノン	2/26	キヤノンアネルバ	3D プリンタ

産業競争力懇談会（COCN）

東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 〒100-8280

日本生命丸の内ビル（株式会社日立製作所内）

Tel : 03-4564-2382 Fax : 03-4564-2159

E-mail : cocn.office.aj@hitachi.com

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 中塚隆雄