

学位論文

大型木質パネルを用いたユニット型居住空間の 構法計画に関する研究

2020年9月

青島 啓太

目次

第 1 章序章.....	6
1.1. 背景と目的.....	6
1.1.1. 戦後の人口増加と住宅産業の需要拡大.....	8
1.1.2. 大型パネルによる住宅建設の工業化.....	9
1.1.3. 大型木質パネルの目指すべき産業化と多様化.....	10
1.1.4. サステイナブル時代における木質建築への期待.....	11
1.1.5. 住宅を供給する作り手の問題.....	12
1.2. 論文の構成.....	14
1.3. 既往研究.....	16
1.4. 研究の方法.....	21
1.5. 研究対象の範囲.....	25
第 2 章 木質構法を巡る国内外の現状.....	28
2.1. はじめに.....	28
2.2. 日本国内における CLT 建築の黎明期.....	29
2.2.1. 国内における法整備の背景.....	29
2.2.2. 研究の位置付けと分析方法.....	29
2.2.3. 黎明期の CLT 製造と供給拠点の整備状況.....	31
2.2.4. 対象事例の選定と類型化.....	33
2.2.5. 構法から見た CLT 利用の実態.....	37
2.2.6. まとめ.....	45
2.3. 欧米で先行する木質建築.....	46
2.3.1. 中高層建築物の木材利用による公共政策とその効果.....	46
2.3.2. 欧州を中心とした木質建築の大型化の事例.....	50
2.3.3. 建築の木質化に伴う建物の性能上の課題.....	54
2.3.4. まとめ.....	55
2.4. 東南アジアにおける木質建築の多様化.....	56
2.4.1. 木質時代の東南アジア建築展にみるアジアの木質建築.....	58
2.4.2. ヴァナキュラーで伝統的な材料と技術の未来.....	62
2.4.3. 木材の寿命を延ばす技術.....	63
2.4.4. 緊急時における木質材料の役割と技術.....	65
2.4.5. CLT や集成材等の代替素材への取り組み.....	66
2.4.6. まとめ.....	67
2.5. エチオピアの住宅における構法と性能.....	68
2.5.1. 伝統住居における居住性の変化.....	68

2.5.2.	調査の背景.....	68
2.5.3.	ティグライ地方における伝統住居の熱測定.....	71
2.5.4.	熱測定結果.....	71
2.5.5.	考察.....	73
2.5.6.	まとめ.....	73
2.6.	小結.....	74
第3章	大型木質パネルを用いた建築に関する構法計画理論.....	78
3.1.	はじめに.....	78
3.2.	構法計画学の潮流.....	79
3.2.1.	建築構法のはじまりと構法計画の変化.....	79
3.2.2.	構法計画学とは.....	80
3.2.3.	建築物に対する構法計画上の視点.....	81
3.3.	大型木質パネルの登場.....	83
3.3.1.	大型木質パネル建築とは何か.....	83
3.3.2.	大型木質パネルによる住宅建設の産業化.....	83
3.3.3.	CLTをはじめとした木構造材料と木質材料.....	85
3.4.	大型木質パネルを用いたユニット型居住空間に対する構法計画理論の構築.....	89
3.4.1.	大型木質パネルを用いた構法の体系化.....	89
3.4.2.	大型木質パネルを用いた建築における現象と要求.....	90
3.4.3.	要求に対する制御としての構法.....	92
3.5.	小結.....	98
第4章	大型木質パネルを用いた低層集合住宅の施工効率化.....	102
4.1.	はじめに.....	102
4.1.1.	背景と目的.....	102
4.1.2.	既往の研究と研究の位置付け.....	103
4.1.3.	既往研究を踏まえた CLT 躯体工事における課題.....	105
4.1.4.	研究の方法.....	106
4.2.	いわき CLT 復興公営住宅における CLT 導入.....	108
4.2.1.	研究対象の概要と CLT 導入の経緯.....	108
4.2.2.	CLT 導入による施工効率化にむけた仮説の立案.....	108
4.2.3.	設計施工の体制と設計に関する仮説の実装.....	110
4.2.4.	施工計画における仮説の導入と建方の工程計画.....	113
4.3.	工数調査による施工効率化の効果検証.....	114
4.3.1.	工数調査の概要.....	114
4.3.2.	工数の計測条件と作業の分類.....	114
4.3.3.	部位、棟ごとのばらつきにみる建方精度の検証.....	116

4.3.4. 大版パネル化が施工の効率に与える影響	118
4.3.5. 標準作業時間の妥当性と習熟効果	119
4.3.6. 建込み順序の違いによる工区毎の差異	121
4.4. 施工効率化の考察	124
4.5. 小結	125
第5章 大型木質パネルを用いた宿泊施設の環境的效果	128
5.1. はじめに	128
5.1.1. 背景と目的	128
5.1.2. 現状分析と研究方針	129
5.2. 対象建物の計画と計測対象室の概要	130
5.2.1. CLT パネルを導入した対象建物の概要	130
5.2.2. 木質厚板帳壁の導入と各部構成	130
5.2.3. 計測対象室と比較対象室	133
5.3. 現地実測と温熱環境に対する効果	134
5.3.1. 温熱環境計測の方法	134
5.3.2. 実測結果（冬季）による効果の比較	135
5.4. 室の熱容量が室温に与える影響の定量的考察	136
5.4.1. 室の有効熱容量	136
5.4.2. 熱回路近似モデル	136
5.4.3. 室温降下の推定式に代入すべき数値の検討	137
5.4.4. 室温降下の計算結果と考察	139
5.5. 小結	139
第6章 結論	142
あとがき	154
論文要旨	158
Abstract	160

第1章 序章

第1章 序章

1.1. 背景と目的

本論文は、木質系の大型パネルを主たる構成部材とする建築において、その構法計画学上の新たな理論を構築することを目的とする。規格化された居室群が水平・垂直に連続展開するユニット型の居住空間について、大型木質パネルによる施工段階および居住性能上の効果を実証的に明らかにするものである。

21世紀は木材の時代であるとも言える。地球環境への負荷低減が国を超えた社会の主題となったことで、木造建築や木質材料が「再発見」され、都市木造への期待は大きくなった。

1970年代以降次第に叫ばれるようになった、地球温暖化の防止に向けた社会の大きな転換は、2000年代のサステナブル社会の実現を目指す時代につながる。サステナブル時代において、高度経済成長期と比較すると社会変化は低速化し、建築の大きなイノベーションは起こらない。一方、サステナブルな社会を支える建築には、建築材料や建築技術の担い手のあり方を総合的に見直す必要がある。これを背景に期待されるのが木造建築であり、大規模の木造建築を実現する上での重要な構成部材として、注目され始めたのが大型木質パネルである。

本論文は、近年のCO₂排出量削減の観点から急速に開発が進んだ大型木質パネルを用いて構築する建築に関して、構法計画学に資する研究として住居系用途の建築に着目したものである。

建築構法は「建築を構成する方法¹⁾」であり、広い意味を持つ設計方法論である。内田祥哉によると、建築構法は、「*建築物の実態で、その属性として性能があり、機能をもつ*」としており、構法計画では、建築において要求される性能を満足するための方法と、構法自体を成立させるための方法の2つの側面から考える必要がある。

本論文の目的は、これまで建築構法計画の中で構築されてきた、コンクリート製の大型パネル等を用いた構法計画の理論を踏襲して、20世紀の終わりに開発されて展開し始めた、大型木質パネルを用いる建築の構法計画として理論展開することである。

1 参考文献1)『建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究』で、戸田穰らは内田祥哉の言葉を引用し、「構法」という言葉を「建築を構成する方法」の意味として、広い意味付けを行っていると言明している。

もともと、大型パネルを用いた建築は、欧州で1950年代に発展した大型のコンクリートパネルによる構造のものが一般的である。これはプレキャスト鉄筋コンクリート（PCa）造とも呼ばれ、パネル生産を工場で担い、建設現場に運搬されて組み立てられることで建物の構造を構成する構法である。戦後1950年代の世界的な建築投資拡大と都市人口増加を支えるための建築産業への期待から、急速な建築の工業化が進められ、目覚ましい発展の時代を支えてきた。戦中の住宅供給や軍事産業としてのプレファブリケーションは、経済発展とともに大量生産を担うものになったと言える。

一方、木材を主構造とする木質構造の建築は、国内外を問わず古くから存在する。耐久性、耐震性、耐火性など様々な問題で公共性の高い大型建築物には不向きであったが、持続可能な社会環境を構築するために有効な素材として近年再び着目されている。

こうした背景の中で、木質素材を用いた大型パネルが開発され、パネル素材が木質材料であることによる環境への低負荷や、大規模木質建築への展開の可能性に注目が集まることとなった。大型木質パネルは、サステナブルディベロップメントにおいて重要な役割を持つと期待される建築構成部材であると言える。

従来の構法計画学では大枠の体系化は示されているものの、大型木質パネルの位置付けは、不明確であった。改めて、構成部材の特性と建築類型による構法理論の展開が、必要とされる。ともすれば、構法計画の視点で、この大型木質パネルは、どの体系に位置付けるべきなのか。一般に、本材料は木材を用いた部材であることから、木造の文脈で扱われがちである。木質構造であることは間違いないが、筆者は、生産の観点から「大型木質パネルによる構法」の一部として扱うべきであると考えている。

日本国内でも、同様に大型木質パネルを用いた建築の建設は行われてきた。しかし、実現した建物は小規模で数も限られるため、産業としての発展という意味では期待通りの展開には至っていない。この一因は、構法計画における位置付けが不十分であるからである。

本研究では、建築計画（空間用途）と建築構成（空間形式）の中で大型木質パネルを用いた構法を考察する上で最適な領域として、小さな居住ユニットが連続して配置される「ユニット型居住空間」を対象に研究を進める。これにより、構法計画として特徴的な事象を抽出し、2つの対象事例をもとに実証と検証とを双方向から行う。大型木質パネルを用いた建物を構法計画の見直しの起点として位置付け、構法計画学としての体系の充実を図るものである。

1.1.1. 戦後の人口増加と住宅産業の需要拡大

1955 年以降、第 2 次世界大戦を経て戦後復興期の日本において、8,000 万人以下だった日本の人口は、1956 年には 9,000 万人、1967 年には 1 億人と増加していった。大量に大都市圏へ集中する人口増加を支えるために、住宅の大量供給が求められた。建築分野の大きな課題のひとつが大量生産を可能とする構法計画の充実にあった²。

公営住宅や公団住宅等の公共セクターが先導する形で、住宅の大量供給のために住宅地開発や住宅建設技術が進められた。1950 年の住宅金融公庫法、1951 年の公営住宅法、1955 年の日本住宅公団法は、戦後の日本の住宅政策を支えた制度である。

高田³によれば、その制度は、低所得者や都市部の労働者に向けた直接の供給性度であったとされており、そのために行われた集合住宅の標準設計の開発は、規格設計によって住宅施設の生産を一定の水準以上にするためのものであったとしている。建設技術者の不足をカバーすることで、建物の質が確保されることとなり、結果として住生活の合理化・近代化に貢献するものであった。

標準設計は、京都大学の西山卯三の庶民住宅研究が理論的な基礎をつくり、東京大学の吉武泰水や鈴木成文らが「51C 型」として公営住宅の標準設計をまとめたとして、よく知られている。1955 年度に 17,000 戸、次年度に 38,000 戸、次々年度に 30,600 戸の住宅が建設された。団地としての住宅供給は、住宅の不燃化、衛生的な生活、近代都市生活を目的としていたことから、鉄筋コンクリート造による住宅が建設されていった⁴。

雑誌『都市住宅』の編集長を務め、大量供給時代の住宅整備を編集

2 参考文献11) 日本の近代・現代を支えた建築-建築技術100選-のp.27で、経済成長と豊かな暮らしの実現を支えた建築技術として、大量供給を要した戦後期である、1955年から1990年の社会状況の中で、国内の建築技術に求められた時代背景と業界の役割が述べられている。

3 参考文献11) 日本の近代・現代を支えた建築 pp.44-45で、高田光雄は公営住宅・公団住宅の標準設計について次のように述べている。「戦後の住宅難の解消を目指して考案された公営住宅や公団住宅の「標準設計」は、戦中の限界的環境下での効率性を重視した住宅設計技術である規格設計の考え方をふまえた、住宅の大量供給の手段であった。」

4 参考文献11) 日本の近代・現代を支えた建築 pp.46-47の団地の項を参照した。1958年から団地と呼ばれるようになったとされている。

者として把握してきた植田実は、51C型の提案に関わった吉武泰水の言葉を引用し、「設計の標準化は最低レベルを抑えたり、ある目標に達する段階までいいが、固定的な型を再生産していくのは発展の阻害になる」と述べている。標準設計を軸に設計者によってさまざまなアレンジが試みられたことで、住宅整備は多様性を持つことになったと強調している。

民間では、住宅建設を活発化することで住宅供給を産業化していった。高所得者層を対象とした、持ち家としての「分譲マンション⁵⁾」という形で、民間事業者による供給が活性化していった。小林秀樹は、公団・公営住宅の間口が広い住戸の大量生産とは対照的に、分譲マンションは、間口狭小住戸による高層住宅が定着した点に特徴があるとしている。さらに、生活様式の多様化を満足させるため、計画形式のバリエーションは民間で展開したと言ってもよい⁶⁾。

1.1.2. 大型パネルによる住宅建設の工業化

建築工事の工場生産化は、1950年代の近代化に向けた産業革新において主要な話題であった。経済企画庁による昭和38年の年次世界経済報告によれば、「労働力の確保が難しく、賃金の上昇が著しい上に大規模工事が増大していることに対処して、工事消化量増大への努力が続けられている。」として、建設工事の生産性を向上させるための有力な手段である“建築のプレファブリケーション”に期待が集まっていたことが分かる。

1959年には公営住宅での試作建設が行われ、公団住宅、公庫住宅等で開発が進められたとされている。建設省の指導によって進められた施策によって、本格的な建築工事の工業化が始まった。この時、

5 参考文献11) 日本の近代・現代を支えた建築・建築技術100選のp.50で、小林秀樹は、「本格的な分譲は、宮益坂ビルディング（1953年竣工）が第一号とされる」として、区分所有による民間の集合住宅の建設が始まったとしている。

6 参考文献11) 日本の近代・現代を支えた建築・建築技術100選・p.50で、小林秀樹によれば、「1980年代以降は、自由設計やメニュー方式の登場、住棟計画では低層タウンハウスから超高層タワーまで多様な形式が展開し、さらに閉鎖的な住戸周りを見直すリビングアクセス形式、街路景観に配慮した街区型（中庭型）の計画が実現した。しかし、中核は間口を制限した住戸による高層廊下型住宅であり、日本のマンションを特徴づけている。」としている。

近代化のモデルとして参照されたのが、欧米やソ連で進んでいたプレファブ技術であり、ジュラ・セベスチェンの『大型パネル住宅』で詳細に論じられたものである。

内田は、『建築生産のオープンシステム』の中で、「プレファブは、現場の仕事を減らすのが目的であるから、行きつくところは部品の大型化である。」とし、ヨーロッパにおける大型パネルの発展として「煉瓦の大きさを大きくするのが出発点で、やがてブロックが出現し、中型パネル、大型パネルが造られるようになった」と述べている。大型パネルのはじまりは、それ自体が合理的な供給を目指したものであったと言える。

1.1.3. 大型木質パネルの目指すべき産業化と多様化

2015年以降、日本国内で大型木質パネルが注目されるようになったが、1950年代からの住宅需要のような急速な拡大は見込まれない。日本の人口は、2008年の1億2,808万人をピークに減少に転じた。昨今、こうした経済成長を背景とした住宅の大量供給が求められる状況にはないのは明らかである。

大型木質パネルを用いて期待すべきは、選択性の高い産業化である。本論文では、構法計画を立脚点に建築空間の可能性を広げることが狙いであるが、かつての大型パネルの発展と同じ規格化による量産を繰り返すだけのものでは不十分である。内田らが主張するオープンシステム⁷は、プレファブ化の進んだオープン部品が目的であって、空間の画一化を目指すものではなかった。

建築の多様化には、まず、構法計画において大型木質パネルを用いた建物としての標準化を示す必要がある。その上で、大型木質パネルを用いた建築は産業化され、多様な選択を促すことができる。

大型木質パネルとコンクリート製の大型パネルでは、決定的に違う点がある。これは、前者が軽量であることと、加工性に優れることである。特に加工性としては、デジタルファブリケーションとの相性も良く、多様な空間を実現するにはこれほど有効な材料はない。

生活や労働形態の多様化によって、建築に求められる空間はより

⁷ 参考文献3) 建築生産のオープンシステムのp.22で、内田祥哉は、プレファブとマスプロ（マスプロダクション）について、「部品が大型化するにつれて、それを量産しようとする、画一化せざるをえないから、多様化とは両立しにくくなる。逆に、多様化に応じようとするれば、量産はおろか、一品生産に近い作り方をするようになる。」と説明している。

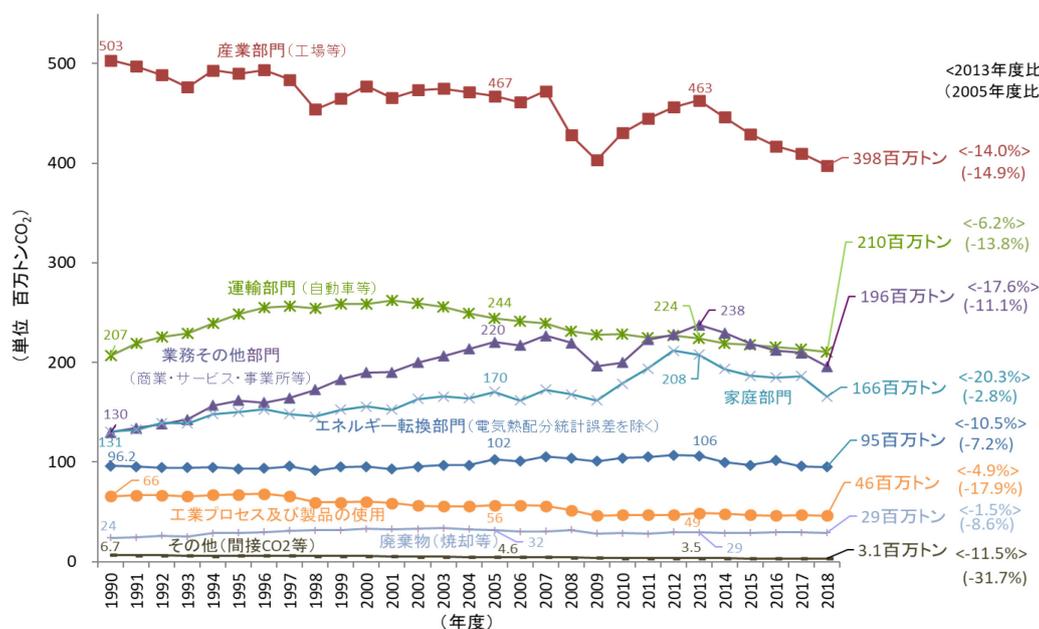


Fig.1-1 CO₂ の部門別排出量（電気・熱配分後）の推移（2018 年度）
 日本国温室効果ガスインベントリ報告書，国立研究開発法人 国立環境研究所
<http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>（最終アクセス日 2020.4.25）

複雑なものとなっている。大型木質パネルによる建築は、構法自身のフレキシビリティと建設後の建物の高いアクセシビリティが特徴である。大型木質パネルは、こうした社会の要求に対応できる、多様な空間に寄与する構成部材でもある。

1.1.4. サステナブル時代における木質建築への期待

人口の減少とともに、社会はサステナブルな構造を実現することに軸足が置かれるようになった。建築分野では、居住環境と省エネルギー化に主眼が置かれ、住宅供給として健全な生活を支える居住空間の室内環境の向上とともに、それにかかるエネルギーの削減が重要な観点となった。住宅部門は、CO₂ 排出量削減の割合でみると、2005 年から 2018 年度の間になんとか-2.8%の削減にとどまり、他部門と比較して削減は進んでいない。このため、住宅における排出削減は早急の課題である。

さらに建設における排出量削減を目的として、建築材料として 21 世紀に入って注目されたのが、循環型資源⁸としての木材である。

8 参考文献9) 新世代 木材・木質材料と木造建築技術のpp.3-6において、地球上の限られた資源は、持続性を考えた自制が必須であるが、地球外から来る太陽エネルギーによって生産される木材などの生物資源は再生可

1.1.5. 住宅を供給する作り手の問題

経済成長の住宅大量生産を支えたのは、建築技術者であることが、その人数をみると理解できる。建築着工数は、経済成長に伴う建築への投資を背景に急拡大した⁹。1960年に6,000万㎡であった着工床面積は、1973年にはおよそ4倍の2億6,700万㎡に達していた。居住専用の建築物は、その半数に及んだ。これにともない、建築技術者の数も1950年から1975年にかけて約2.0倍まで増加した。

住宅供給を担う建築技術者の減少は、人口減少による建築需要の減衰を遥かに上回る勢いで問題となっている。建築技術者の数は、1980年をピークに徐々に減少し始める。蟹澤によれば、2030年にはピーク時の約半分まで減少するとされ、中でも特に深刻な業種として、型枠大工を含む大工を挙げている。大工の人数の減少の加速度は特に著しい¹⁰。(Fig. 1-2, 1-3)

こうした建築技術者、特に大工の減少は、建築現場の環境を抜本的に見直す必要性を示唆している。大型パネル住宅の開発によって、住宅の大量供給を目指した1950年代の取組みと同様の問題提起ができる。

サステイナブルな社会を支えるための建築の実現には、建築材料とともに、建築技術の担い手のあり方を総合的に見直す必要がある。このため、大型木質パネル建築には、低環境負荷の生産と運用とともに、省力化と効率化が期待されている。

能資源としてとらえられていると説明している。

9 参考文献11) 日本の近代・現代を支えた建築 -建築技術100選- のp.29にて、経済成長の位置役を担った建築技術として、高度経済成長期の投資を背景にした建築技術者のようすが述べられている。

10 大工技能の評価はいかになされるべきか (日本建築学会建築討論 <https://medium.com/kenchikutouron> (最終アクセス日2020.04.27) の中で、蟹澤宏剛は2000年から2015年にかけて、減少数は技能者全体で47,770人であり、大工に至っては全体の減少数を上回る50,340人に及んでいると述べている。

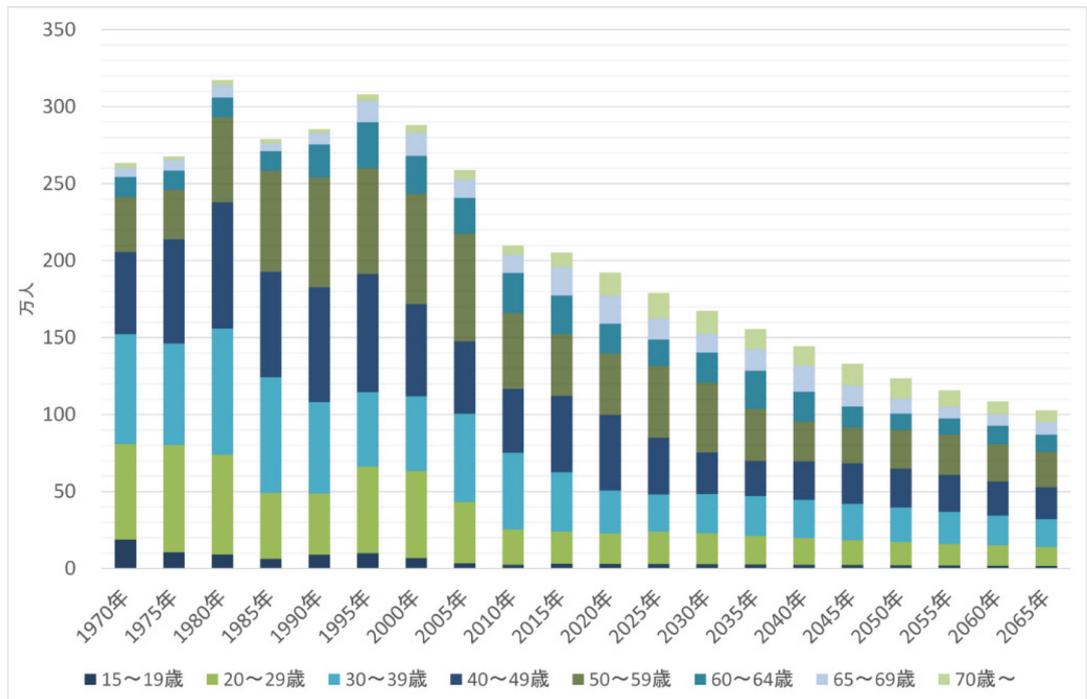


Fig. 1-2 建設技能者数の推移と将来予想

蟹澤宏剛, 大工技能の評価はいかになされるべきか, 日本建築学会建築討論
<https://medium.com/kenchikutouron> (最終アクセス日 2020.04.27)

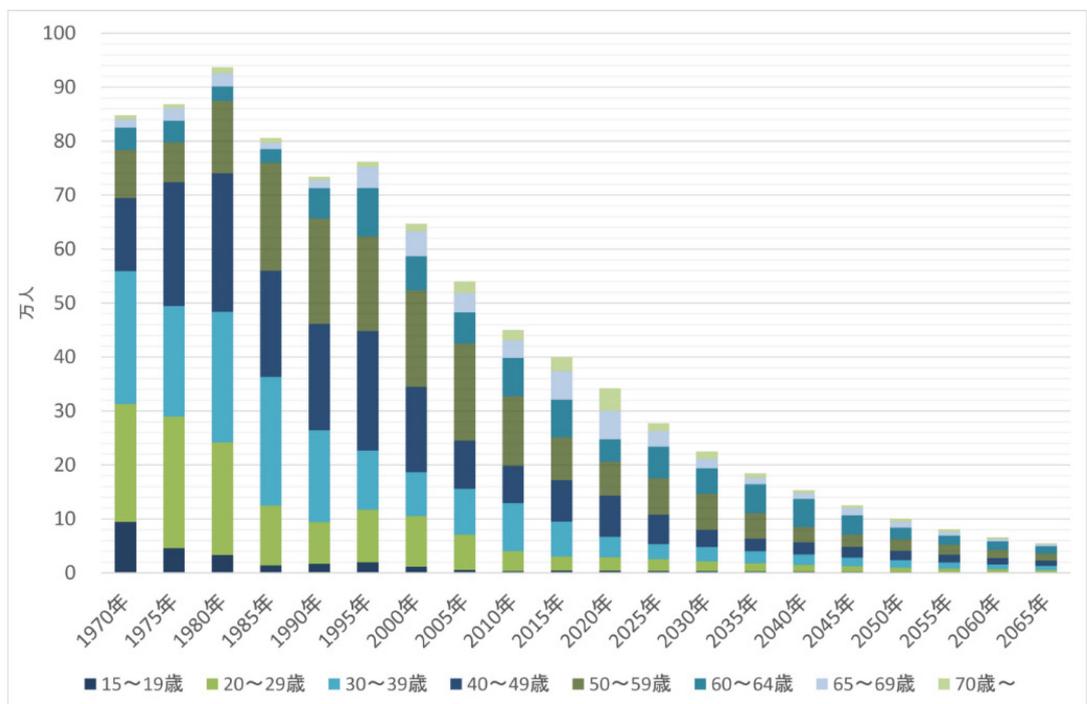


Fig. 1-3 大工数（型枠を含む）の推移と将来予想

蟹澤宏剛, 大工技能の評価はいかになされるべきか, 日本建築学会建築討論
<https://medium.com/kenchikutouron> (最終アクセス日 2020.04.27)

1.2. 論文の構成

第1章「序論」では、研究の背景と目的を述べる。既往研究を受け、本論文の位置付けを明確にし、研究の対象と研究方法の概略をまとめて説明する。

第2章「木質構法を巡る国内外の現状」では、まず、日本において大型木質パネルが用いられ始めた状況をまとめることにより、多様化した社会背景の中で構法計画学を再検証する必要があることを述べている。さらに、木材を用いた現代の建築物の国内外の事例を比較考察することで、木質材料を用いた現代建築の多様性と潮流について検証する。欧州で先行する木質建築物を概観することで、将来的な流れを類推することにより、構法計画を見直す。東南アジアにおける多様性の展開事例や、アフリカにおける急速な社会変化が、住宅の性能を著しく低下させている反証事例を挙げ、構法計画の必要性和展開について考察する。

第3章「大型木質パネルを用いた建築に関する構法計画理論」では、建築を部分の集合あるいは部位の組み合わせとして捉える建築構法から、建築を構成し統合するための方法論に至るまでの構法計画学を概観し、その理論が1990年以降に開発が始まった大型木質パネルにかかわる構法に対してどのような点で有効であり、どのような視点を補うべきかについて論述している。さらに、従来の構法計画を新たに見直すための課題設定として要求される、建物の施工と性能に着目した実証的な分析が必要であることを述べている。

第4章「大型木質パネルを用いた低層集合住宅の施工効率化」では、建築の生産分野に着目し、大型木質パネルを構造に用いた公共の低層集合住宅の計画について述べている。ここでは、約4,800㎡の大規模計画において、施工の効率化を目的に仮説を立て、これをもとに大型木質パネルを用いて建設し、施工中の労務工数の調査によってその効果を実践的に検証している。

第5章「大型木質パネルを用いた宿泊施設の環境的効果」は、構法計画上の性能分野に着目して、大型木質パネルを非構造壁に用いた中規模建築を対象にした室内の温熱環境について述べている。ここでは、4階建ての宿泊施設の外壁及び界壁部分に大型木質パネルを用いた際に、パネルの断熱性能と蓄熱性能が室内環境に影響を与え、冷暖房に関するエネルギー消費量を軽減することを検証している。

第6章「結論」では、前5章を総括し、大型木質パネルを用いた居住系建築の構法計画として、実際の建築設計に資する研究として結論付ける。

章構成を模式図として Fig.1-4 に示す。

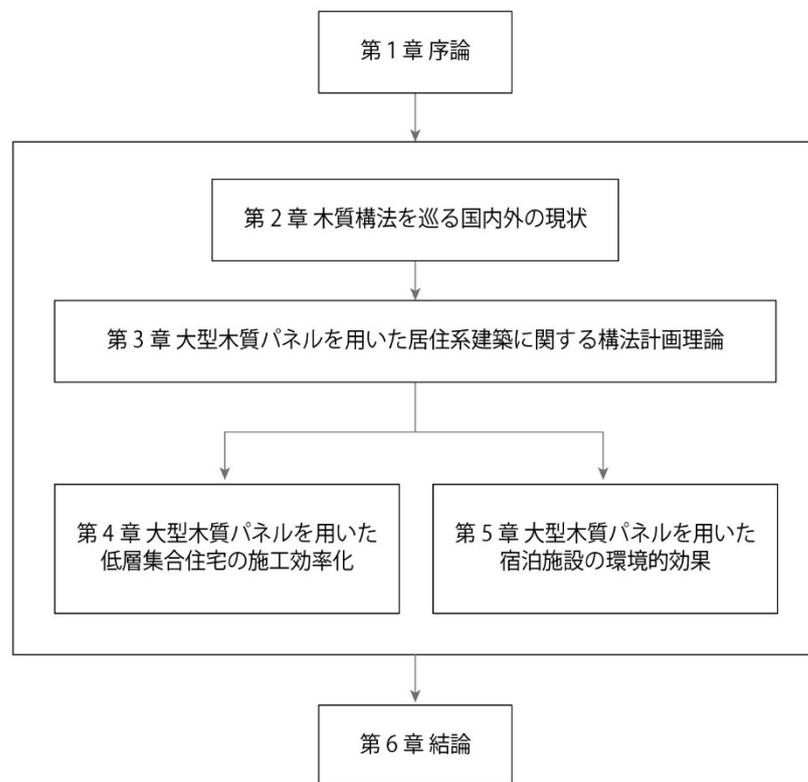


Fig.1-4 論文の章構成 Chapter Structure of Thesis

1.3. 既往研究

戦後に成立した建築構法は、内田祥哉と東京大学の内田研究室によって行われた研究が中心となっている。研究の成立とその展開に関する資料としては、戸田譲が主査としてまとめて報告された、住総研研究論文集の『建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究』に詳しく記述されている。その中で、「1960 年前後に *Building Element* 論 (以下 *BE* 論) によって開始した「建築構法」研究は、1970 年前後を境に「構法計画」へと展開し、日本の建築学における生産分野において重要な位置を占めた。内田自身の建築構法・構法計画研究は 1977 年の『建築生産のオープンシステム』に集大成される。」としている。建築構法の概論として 1981 年に初版が発行された『建築構法』は、この分野の教科書として広く知られるものである。

さらに「構法計画学」として、学問的に追及するために、「手法の体系化」を行った一連の研究がまとめられたのが、真鍋恒博による『図解建築構法計画講義, 「もののしくみ」から建築を考える』である。これは、雑誌『建築技術』に、1994 年 1 月号から 36 回にわたる連載の内容をまとめなおしたものであるが、あらゆる設計上の手法を体系化して、構法の種類を網羅的に扱うことを目的としたものである。

一方で 1968 年に初版が発行された内田祥哉による『プレファブ近代建築の主角』は、戦後 1950 年代の住宅を中心とした建築の大量供給を支えるために注目されていた建築のプレファブリケーションに関するものである。

この次の年である 1969 年に内田は、大野勝彦とともに翻訳した『大型パネル住宅』を出版する。これは、1960 年にハンガリー出身のジュラ・セベスチェン (Gyula Sebestyén) によって書かれた『*NEGYELEMES LAKÓHÁZAK* (Large-Panel Buildings)』を翻訳したものである。内田によれば、旧ソビエトを中心とした東ヨーロッパとフランスを中心とする中部ヨーロッパで大型パネル構造は盛んに用いられたとされる¹¹。(Photo 1-1, Photo 1-2)

『大型パネル住宅』原著の出版当時の社会情勢からみれば、住宅の

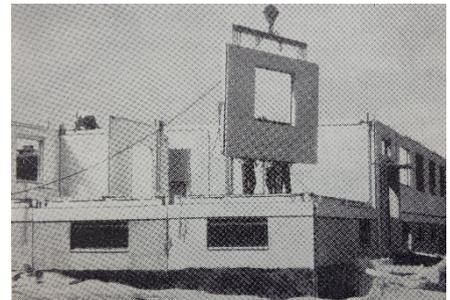


Photo 1-1 プレキャストコンクリートの大型パネルの施工, ジュラ・セベスチェン『大型パネル住宅』から引用

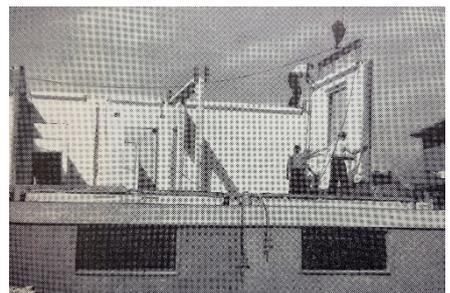


Photo 1-2 プレキャストコンクリートの大型パネルの施工, ジュラ・セベスチェン『大型パネル住宅』から引用

11 参考文献7) まえがきで内田は翻訳者として、大型パネル構造の発展の背景として、次のように言説している。「東ヨーロッパでこの方式が盛んなのは、パネルの生産に規格化が必要なためで、統率力の強さが規格化と関係があるからである。またフランスでは、コンクリートについての伝統があり、それが今日もお先進性を持っているためである。」

需要は、戦後の欧州における急速な経済拡大に伴う、経済の発展が背景にある¹²。内容は、建築産業の大規模化を目的とした大型パネル住宅において、建築材料、構造計画と建築計画、建物性能（構造、断熱、遮音）、建設技術とコスト効率まで、細部にわたる実践的な情報や問題点が網羅されている。しかし、1990年代以降に普及が始まる大型木質パネルについては、もちろん言及されていない。ジュラ自身も本の冒頭で「たとえば木造プレファブ部品を用いた住宅の建設は、ハンガリーにおいて普及するとは思われないので、この種の構法に関しては述べられていない。」と明確に述べている。ここで言うところの木造プレファブ部品とは、枠組壁構法等を中心とした木造パネルであったと考えられる。大型木質パネルが開発されたことで、大型のプレキャスト鉄筋コンクリート部材と同様に、大型木質パネルが建築に用いられる構法について研究する必要がある。

ここでの知見は、この訳書が日本国内で出版されるまでの1960年代に、内田祥哉研究室で行ってきたプレファブリケーションによる集合住宅についての構想¹³につながる。内田が『DAAS（Digital Archives for Architectural Space consortium）』のインタビューでも触れているように、当時は大量生産とプレファブリケーションがテーマとして研究された。ちょうど住宅公団の研究所で、コンクリートの大型パネル構造による集合住宅モデルの実験が開始された頃である¹⁴。

12 経済企画庁による昭和38年12月13日の年次世界経済報告によれば、1955～56年は、“全面的拡大の時期投資ブームの成熟とインフレとの戦いの時期”とされ、“西欧の経済拡大がますます加速化されたばかりでなく、米国経済が急速な回復をみせたために、ブームが全世界的な規模で広がったことである。とくに欧州では貿易自由化の進展に助けられて域内貿易が拡大し、好況がつぎからつぎへと波及した。経済拡大の支柱も住宅建築や耐久消費財から次第に設備投資に移行した。”とされ、この社会状況下での経済拡大を支えるために、住宅生産が求められたことがうかがえる。

13 プレファブリケーションによる集合住宅を目指した、内田祥哉研究室で行われた A Group of University's Prefabricated Building System (GUP) は、1960年代から1970年代にかけて進められた構想であり、実施を想定した試験的な設計と模型製作により、接合部を含むディテールや生産性についても考察された。

14 参考文献7) まえがきに記されている通り、「昭和30年（1955年）に住

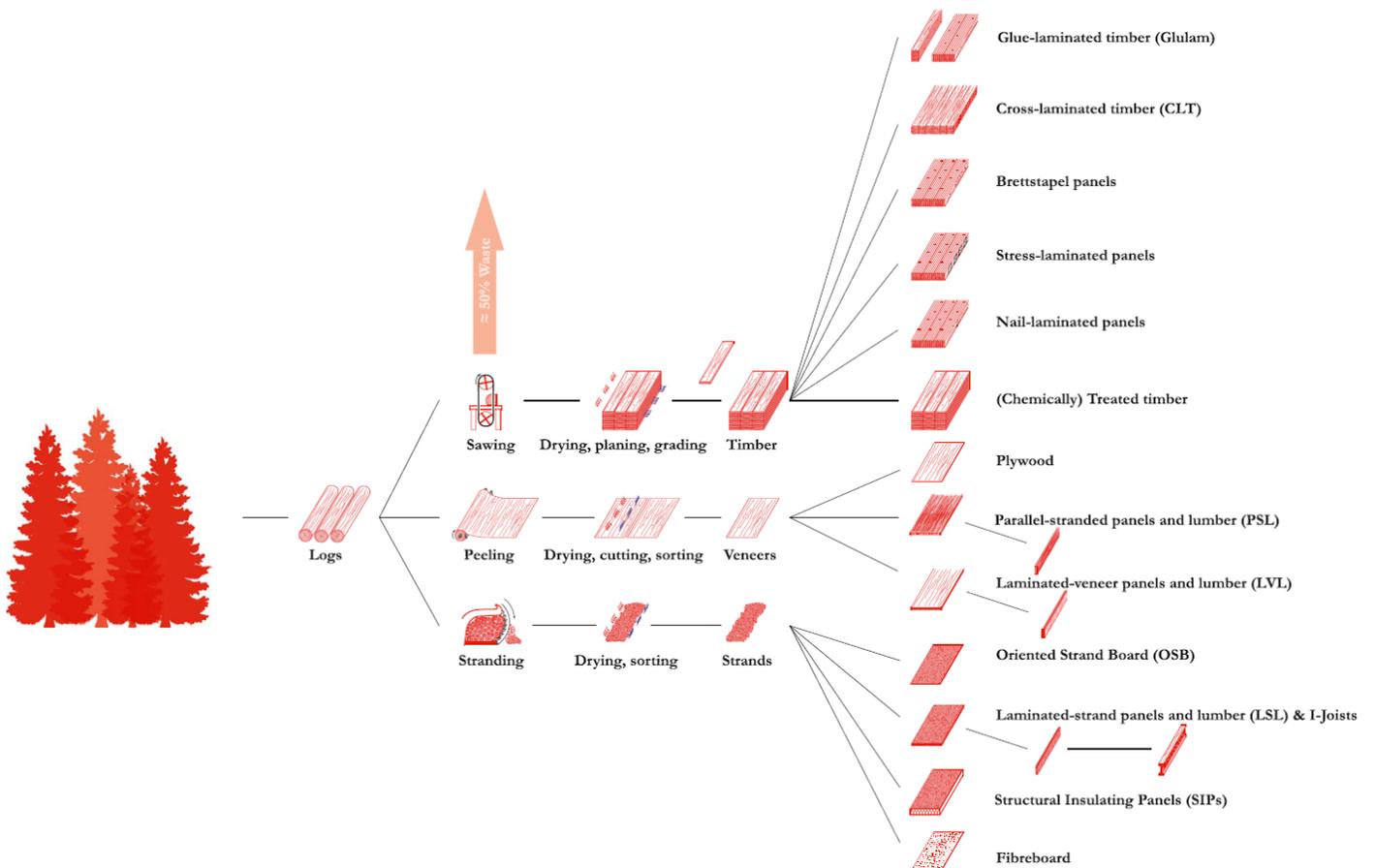


Fig. 1-5 エンジニアリングウッド製品の製造方法分類, Michael Ramage, The wood from the trees: The use of timber in construction から引用 (P.H. Fleming 作成)

木材と木造建築物における技術の総覧としては、農学研究分野の岡野健らが中心となってまとめた『新世代 木材・木質材料と木造建築技術』が詳しく、循環型資源としての木材の特質、木質材料の開発、難燃化、材料劣化、そしてそれらを用いた木造建築の設計・評価技術から居住性評価までを網羅している。

欧州で、高層建築にまで用いられるようになった木材利用に関しては、ケンブリッジ大学のミカエル・ラマーゲ (Michael Ramage) らが発表した『The wood from the trees: The use of timber in

宅公団が研究を開始した」のが、コンクリートの大型パネル構造がはじめて日本に導入された事例である。もともと煉瓦造を主体とするヨーロッパにあって、生産性の向上を目的に発展してきたため、大型パネル構造は、組積造の延長で発展したものである。このため、欧州におけるパネルの接合部は一体化されたものではなく、RC造において構造躯体を一体化して生産してきた日本の耐震構造には合致しなかった。このため、日本独自の接合方式を含む開発を念頭に進められたものであった。



Fig. 1-6 日本国内で用いられる主な
大型木質パネルの種類

construction』に木質材料の性質と利活用方法が言及されている。その中で、エンジニアリングウッド製品の製造と種類について、主要なものがまとめられている (Fig. 1-5)。日本国内で大型木質パネルとして用いられる主要なものには、集成板 (Glue Laminated Timber; Glulam)、直行集成板 (Cross Laminated Timber; 以下 CLT とする)、単板積層材 (Laminated Veneer Lumber; 以下 LVL とする)、枠組パネル (2×4 panel) がある。

本論文では、大型木質パネルの中で、エンジニアリングウッドとしての木質パネル (集成板・CLT・LVL) を研究対象とする。これは、密実な木材であることで生ずる建物性能に対する影響が大きいことと、建築の大型化による産業構造への影響が大きく、構法計画上で特段注目する必要があるからである。また、欧米の先行事例を見ると大規模建築物での活用で期待されているのは、剛性の高い大型木質パネルに限られていることもその理由である。その分析には特に、2000年以降日本国内で急速に利用が拡大した CLT に着目して考察することで、大型木質パネル全体の構法計画を検証することができる。なお、CLT と LVL、集成板は、構造強度やその特性について微妙な違いがあり、本来個々に検証する必要が生じるが、本論文での検証においては、CLT の特性を集中的に取り上げることで、大型木質パネル全体を評価するきっかけとすることを主目的とする。

木造建築物の法規上の位置付けとしては、一般財団法人日本建築センターがまとめた『日本近代建築法制の 100 年 市街地建築物法から建築基準法まで』において明確に示されている。当文献は、1919年に市街地建築物法と都市計画法が制定されてから 100 年を迎えるにあたって、まとめられたものである。ここでは、法制定以前の社会状況で、1881年の東京防火令をはじめとして、災害や戦災等を背景にした都市の不燃化と木造建築物の規制された状況が述べられている。特に、1950年の建築基準法制定以降の木造に関する建築基準が、1987年の改正に至るまで顧みられずにいた状況と、その後徐々に緩和に向かう法改正の流れがまとめられている。

本論文において対象とする空間形式は、ユニット型の居住空間とする。近年の居住スタイルの多様化や、職住混在の空間に注目が集まる中で、用途による分類から形式によって見直すことを行ったのが建築構成学であると言える。こうした建築構成に着目した類型化は、坂本一成がまとめた『建築構成学：建築デザインの方法』や、日本建

築学会『建築設計資料集成』が一般的であり、本論文においてもこれを参照する。建築の構成は、対象の建築物をどのようにつくるのかといった生産論を包括する構法計画と、非常に密接な関係にある。構成によって建物の生産性は大きく影響を受けるため、研究対象は慎重に選択される必要がある。

第4章は、この建築構成学で言うところの単位の反復によって構成される低層の集合住宅について構法計画との関係を詳細に分析したものである。筆者らが2019年に発表した『低層集合住宅におけるCLT導入による施工効率化に関する研究』をもとにしている。大型木質パネルであるCLTを構造に用いた集合住宅を設計するにあたって生産性向上に資する施策（クリアランス、パネルの接合方法、パネルサイズ、工程計画、工区管理）を仮説的に立て、実際の施工において労務工数調査を行なったものである。施策の影響を作業単位時間とそのばらつき、習熟効果を検証し、構法計画を分析した。

第5章では、大型木質パネルを用いた宿泊施設において環境的効果を検証したものである。先行研究としては、イギリスの木質集合住宅に着目した、オックスフォード・ブルックス大学のクリストファー・ケンドリック（Christopher Kendrick）らによる『Thermal mass in new build UK housing: A comparison of structural systems in a future weather scenario』やハートフォード大学のティモシー・アデクンレ（Timothy Adekunle）とマリアレーナ・ニコロプルー（Marialena Nikolopoulou）が行った『Thermal Performance of Low-carbon Prefabricated Timber Housing in the UK』等の研究がある。これらは、近年世界的な気温上昇に伴って定期的に発生している夏場の気温上昇に対する懸念が背景となっている。イギリスで先行している木造プレファブリケーションによる集合住宅の温熱特性について調査を行ったものである。ここで問題視されているのは、軽量の木質材料で集合住宅が建設される際に、躯体等の熱容量が不足することが考えられ、夏季の内部温度上昇リスクにつながるといった懸念から、換気や遮光によって快適性確保を要することを示している。

日本のような高温多湿の地域では、夏季は冷房によって温度だけでなく湿度のコントロールをすることで快適性を確保している。このため、むしろ熱容量の向上によって冷房負荷を低減することにつながる。もちろん、冬季は熱容量が高いほど、蓄熱によって暖房エネルギーを抑えることができる。このため、日本国内での熱容量の影響についての検証が独自に必要であると考えられる。

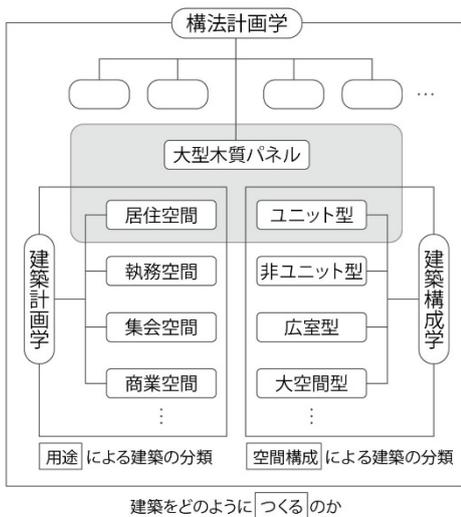


Fig. 1-7 研究の領域

1.4. 研究の方法

本研究の主な領域は、建築の構法計画学である。その中でも、研究領域は、空間の用途で建築を分ける建築計画学の視点と、空間の構成によって類型化を行う建築構成学の視点に立った3つの領域 (Fig. 1-7) からの考察を経て、対象を明確にする。研究の対象は、次節で詳しく述べる。

建築をその目的である用途や構成と、その建築を成立させる要素である素材や部材とで大分するとすれば、これらを統合するのが構法計画である。構法計画の目的は、部位毎の構法や性能を全体に統合して、建築全体を計画していくことである。

また、新しい材料の開発や時代変化に合わせて動的に構法計画を捉える必要がある。大型木質パネルが建築の部材として用いられるようになったことで、構法的な分析を行う必要がある。

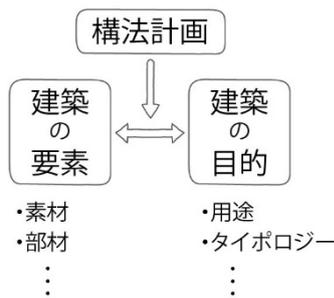


Fig. 1-8 構法計画の役割

本論文では、まず第2章「木質構法を巡る国内外の現状」において、社会背景の違いから大型木質パネルを取り巻く国内外の事象を概観し、構法計画的観点からの位置付けを行う。大型木質パネルの現状においては、木質建築の展開とちょうど並行して進んでいると考えてよい。木質建築を取り巻く状況は、地域ごとに大きく異なっており、地域差は目的や普及度の差異として比較することができる。

はじめに、日本国内の大型木質パネルの普及状況についてまとめる。日本では、2000年以降の大型木質パネルの一つであるCLTにおいてその特徴が端的に表れていることから、CLT建築の黎明期に着目して状況を用途・部位構成を類型化してまとめる。

欧米では、大型木質パネルの導入と開発が日本よりも進んでおり、次々と実例が建設されている。このため、構法計画学の先行事例としては、欧米の現状を参考とすることができる。具体的には、現地調査とヒアリング調査をもって、事例調査とする。性能と生産に関する知見が蓄積され始めたことによって、構法自体が様々に展開しており、大規模化や高層化とともに複合的な大型木質パネルまで実装が始まっている。

東南アジア諸国では、多様な植生に起因して、木質建築の多様化が進んでいる状況がある。これは、木質材料による構法計画は、さらに複雑な状況につながっていると見え、計画学としての知見は、収斂に向かっていない状況があると考えられる。

エチオピアでは、木材の不足を理由に、建築材料を近代化したことにより、土着的な伝統工法によって本来確保できていた建物性能が、著しく損なわれる現状が見られる。構法計画が不十分であるゆえの

性能不備について論ずる。

各地域の社会的背景の差異が、構法計画に対する様々な問題として表れているはずである。構法計画としては、構法自体を柔軟にとらえながら、具体的な現象に対して対応するべきであり、この多様な背景のもとに、構法計画学としての課題設定を示す。

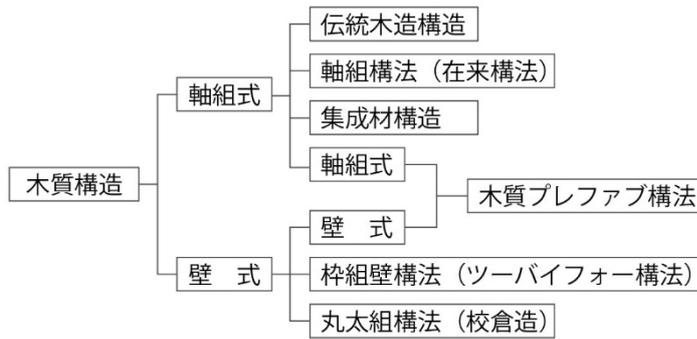


Fig. 1-9 木質構造の分類, 木材・木質材料と木造建築技術 p.37
青木謙治による分類を参考に作成

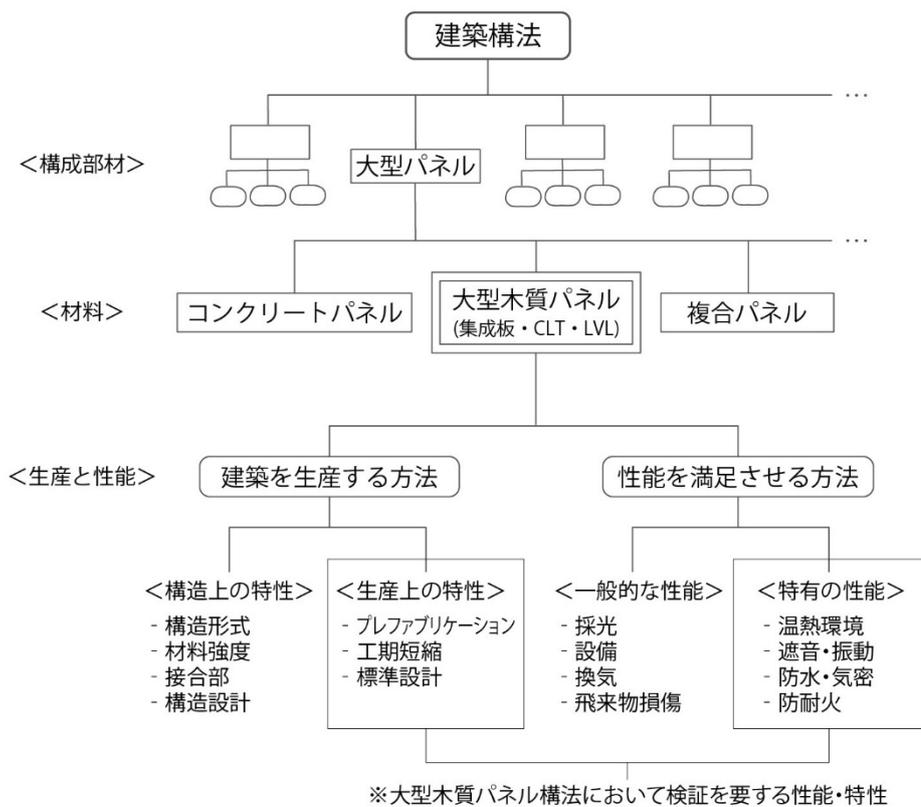


Fig. 1-10 構法計画学における大型木質パネルの位置付け

第3章「大型木質パネルを用いた建築に関する構法計画理論」では、先行研究である構法計画の潮流を整理するとともに、構法計画学の体系を再考することを目的とする。本来、構法計画においては、ほとんどの木質材料が木質構造の一部として位置付けられてきた（Fig. 1-9）。しかし、大型の木質パネルは、1950年代に注目された大型パネルによる構法の一部として位置付けられるべきであると考えられる。これは、建築物の生産の観点から考察していくことが適切であると考えに至ったからである。構法計画の体系における位置付けの概略図を Fig. 1-10 に示す。

まず、大型木質パネルを用いた構法計画においては、内田の『建築構法』でも大きく章分けされている「躯体構法」と「各部構法」（ビルディングエレメント）に分けて説明できる。このうち、構法計画は、「建築の生産をする方法」と、「性能を満足させるための方法」の2つの側面から整理する必要がある。

CLT が構造として建築物で用いることができるようになったのが、2016年のCLTパネル工法に関する告示化が始まりである。告示で示されたことで、CLTの基本的な構造形式や材料強度といった構造上の特性は、設計方法とともに周知のものとなった。一方で、構法計画としてはむしろ、「建築の生産をする方法」に注目すべきであり、コンクリートパネルとの製造上の差異が、構法の特性として抽出可能である。

さらに構法計画としては同時に、建物の性能といった観点から、「各部構法」に注目した性能を見ていく必要がある。これには、真鍋によって展開された建築構法学としての体系化の中で、建物において生ずる可能性がある現象を改めて示し、大型木質パネルによらない一般的な事象と、各現象に対して特筆すべき特有の制御方法を抽出することが可能である。一部は、木質構造の体系に蓄積された知見を参照できるものも多分に含まれるが、密実な大型の木質パネルであるための特有の事象から、構法計画上の性能について見直しを要すると考えられる。

第2章の現状把握と第3章の構法計画としての理論整理を踏まえて、「建築の生産をする方法」と「性能を満足させるための方法」に関わる検証すべき事象が明らかとなる。このため、第4章と第5章では、これらの理論の検証を目的に、実践的な研究を展開する。

生産性の観点では、大型木質パネルによる大規模な建築事例がこれまで存在しなかったことから、生産上の特徴の把握が進んでいなかった。特に、全体の工程に大きく関わる躯体工事の分析について、

標準化された設計による分析が必要である。このため、第4章「大型木質パネルを用いた低層集合住宅の施工効率化」では、建築物の具体的な設計と施工のプロセスに着目する。大規模な計画の設計に大型木質パネルによる構法を採用し、効率化に資する指針を導入して実践した上で、労務工数調査で実際の施工を計測し、構法の合理性に関する考察を行う。

「性能を満足させるための方法」に関する課題としては、欧州で先行する木質化の中で、建物の熱容量の不足による温熱環境の把握の必要性が挙げられる。このことから、第5章「大型木質パネルを用いた宿泊施設の環境的効果」で検証を行う。宿泊施設を対象に、外壁と界壁に大型木質パネルを採用し、温熱環境測定を行うとともに、躯体蓄熱による影響を考察する。

1.5. 研究対象の範囲

『大型パネル住宅』において筆者のジュラ・セバスチェンは、住宅建設の技術的発展は次の3つの事項に関わっていると述べている。「斬新な建築技術の改良」、「建築関連産業の大規模化」、「建設の機械化」である。建設産業へのAI導入や自動化が先端のトピックとして扱われるようになった現代においても、この発展の方法は相変わらずであると言ってよい。ここで著者は、建築関連産業の大規模化こそが、最も適切であると述べているが、これは現在の木質材料を巡る建築関連産業の大規模化の流れと同じである。大型木質パネルと言っても、木造という意味では材料の斬新な改良があったわけでもなく、建設現場が機械化できるわけでもない。

ここで著者が大型パネル住宅で思索した、急速な技術発展に向けた建築資材の調達と部品の規格化の課題は、大型木質パネル建築を産業化する上で求められるものと同様である。また、第1節の背景においても述べたところであるが、技術者の深刻な不足には、建築構法の見直しによる施工の省力化が急務であるとも言える。

構法計画の主軸のひとつである建物の生産性は、こうした産業化および省力化に向かう標準設計の検証が最も効果的であると言える。生産性という観点からは、できる限り標準化された、連続した構築が最も分析しやすい。つまり、研究対象としては、単位空間の反復による建築構成を持つ「ユニット型建築」が理想的であると言える。

日本建築学会の建築設計資料集¹⁵と坂本一成による『建築構成学』によれば、ある一定規模以上の大きな建築では、様々な大きさや形状を持った室が集合して一群を形成することで内部空間が形成されている。これらの室は用途によって多種多様な形状があるが、空間配列は、室の集合を単位とする室群による建築として成立している。このとき、室群は室の配列によって4種類に分類することが可能である。ほぼ同等の大きさの室が規則的に配列されたものを、単位室群 (Fig.1-11)¹⁶と呼んでいる。他に、室がランダムに配列されたもの (非単位室群)、平面的な広がりを持つ室 (広室) や、さらに面積と高さの広がりをもつ室 (大空間) といった違いがあるとしている。

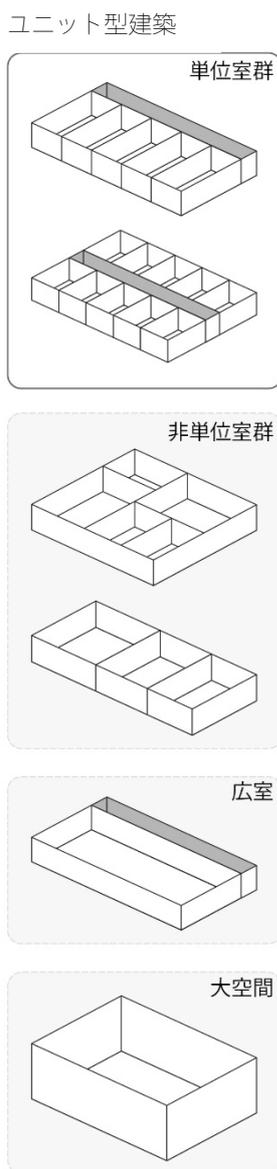


Fig. 1-11 室群の種類

15 参考文献16) 日本建築学会編 (2001.6). 建築設計資料集成 総合編, 丸善出版. p251を参照した。

16 参考文献17) 坂本一成 他 (2012.3). 建築構成学：建築デザインの手法, 実教出版. p65-67にて、提示された室群のモデルを参考とした。

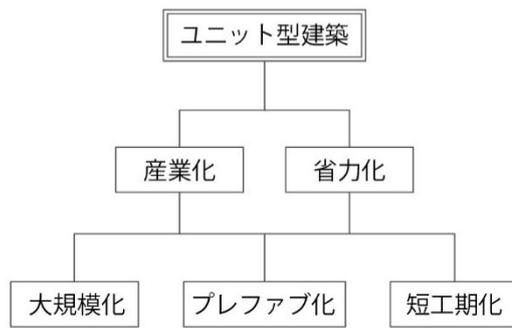


Fig. 1-12 建築物の生産とユニット型建築構成の関係

単位室群を基本構成とした建築を、本論文では「ユニット型建築」と呼ぶ。単位となる室がほぼ同じ大きさや形状であるものとしては、集合住宅、ホテル・宿泊施設、病院、福祉介護施設、学校、研修所の居室が挙げられる。その中でも集合住宅、ホテル・宿泊施設といった寝食等を伴う居住空間を有する建築では、広室や大空間が隣接することなく、比較的小規模の室が連続して配列する計画が可能である。大規模な建築になると、室の繰り返しが多いことから、生産においては室の構法が建物全体の建設に大きく影響することが考えられる。本研究では、大型木質パネルを建築の構法に用いることによって、産業化と省力化を目指す。具体的にその効果は、建築の大規模化、プレファブ化、そして短工期化といった生産上の特性から明らかになるはずである。

生産プロセスの検証としては、規模が大きいほど、または高層であるほど、その影響と効果は大きくなる。前述した建築関連産業の大規模化につながる、十分な規模の研究対象が必要であるが、これまで大規模な大型木質パネルによる建築物は設計されてこなかった。このため筆者らは、第4章において低層集合住宅の計画にCLTを導入して設計し、施工における分析を行うこととした。

研究対象の用途としては、「居住空間」を対象とする。これは、居室が小さいものは、人体が躯体からの熱影響を受けやすく、木質の壁躯体の効果を得やすいからである。滞留時間が長い居住系の空間には、十分な環境性能が不可欠であるから、単位空間として居住空間を持つ「ユニット型居住空間」が対象としては最もふさわしい。ここでは集合住宅だけでなく、不特定多数の人が生活するホテル・宿泊施設も対象に含まれる。

第2章 木質構法を巡る国内外の現状

第2章 木質構法を巡る国内外の現状

2.1. はじめに

本章では、大型木質パネルを含めた木質建築の現状を概観することで、木質構法に関する国内外の状況の整理を行う。地域ごとに構法の充実度には違いがあり、普及の状況や直面する問題には様々である。これらは、筆者が国内外の実施例や製造工場等を訪れる中で、各所で行ったヒアリングやインタビューを基本としている。

まず、第2節では、日本で大型木質パネルが用いられ始めた状況をまとめる。特に、2010年から急速に利用が拡大しているCLTの黎明期に着目することで、他の大型木質パネルを含めた構法的課題を抽出する。さらに、木質建築を巡る国外の状況と見比べ、将来的に我が国で検討を必要とする事項を予測し、研究の対象に据えるための考察とする。

第3節以降は、国外の現状との比較を目的として、代表的な3地域を取り上げる。第3節では、日本よりも先行して進められている欧米の木質建築を概観することで、将来的な流れを類推することにより、構法計画としての展望を考察する。第4節では、植生の多様性が特色である東南アジアで、木質建築の幅広い展開の可能性を述べる。第5節では、アフリカにおける急速な社会変化が、住宅の性能を著しく低下させている反証事例を挙げ、構法計画の必要性と多様性について考察する。

2.2. 日本国内における CLT 建築の黎明期

2.2.1. 国内における法整備の背景



Photo 2-1 Cross-Laminated Timber (CLT) 長さ 12.0m の大型木質パネル

直交集成板、クロス・ラミネイティド・ティンバー (Cross-Laminated Timber: 以下 CLT) (Photo 2-1) を用いた建築の普及にむけて、CLT パネル工法として、「CLT を用いた建築物の一般設計法」が建築基準法告示において 2016 年 4 月 1 日に公布・施行された¹⁷。

CLT 建築普及の黎明期として、国内での CLT 利用が開始された 2010 年から始まり、2013 年 12 月の国内における CLT の日本農林規格 (JAS) 工場での製造開始を通じ、2017 年 12 月までの全 7 年間に、70 の事例が建設された。CLT を用いた建築の法令遵守の問題から、製造・加工・建設技術、サプライチェーンの確立が徐々に整う過程で、実物件における部分的な活用、または告示を反映した CLT パネル工法としての計画等、アプローチは多岐にわたり、以降の普及期における重量木造、木質化建築の展開に向けた足掛かりとなる事例は揃ったと言える。

2.2.2. 研究の位置付けと分析方法

国内における森林資源の利用拡大と木質建築の可能性拡大を目的として、CLT を利用した黎明期の建築事例を分析することで、構法の最適化と以降の普及展開の展望を見据えた考察を行う。国内での CLT 利用が開始された 2010 年から、2016 年の告示交付後 1 年以内に建設された計画 (2017 年 12 月までに竣工したもの) で、CLT を用いて建てられた建物を対象として、CLT の利用部分について類型化するとともに、普及期に向けた利用方法を考察する。

CLT に関する既往研究では、構造・防火・環境の分野における性能に関する報告が行われてきた。しかし、建築計画のアプローチからの分析がなく、また、普及黎明期を網羅して各事例を位置付けた報告がなされていない。このため、本項では、黎明期の CLT 建築と位置付けた 7 年間の事例を俯瞰して、設計・構法計画の観点から CLT の導入目的を明らかにする。

対象は、日本 CLT 協会が公開している利用例、日本住宅・木材技術センターによる事業報告を参考に選定を行った。さらに、これに詳細の掲載のないものは、『新建築』、『新建築住宅特集』、『日経アーキテクチャ』の専門誌より事例を追加し分析した。選定条件は、国

17 建築基準法に基づく告示を公布・施行：CLT を用いた建築物の一般設計法（【新設】平成28年4月1日公布・施行）、CLT 材料の品質及び強度、CLT 部材等の燃えしる設計（【改正】平成28年3月31日公布・施行）

内で初めて CLT を用いた建築物が建てられた 2009 年 3 月から、2016 年 4 月までに大臣認定を受けて告示前に建設されたもの、実験棟として建設されたもの、告示公布以降で 2017 年 12 月までに竣工したものを対象とした。建物としては、仮設の建築物を含め、主要居室、内部空間が存在する建築物とした。これにより、70 事例を調査対象とし、それぞれの概要を一覧にまとめた。

研究方法として、上記に上げた建築事例をさらに類型化するため、主に採用された構法、用途、所在地、規模（階数、延床面積）、CLT 利用量、建物全体の CLT 利用量¹⁸⁾についてまとめて俯瞰するとともに、CLT の利用部分を 6 区分 9 つの部分に分類（水平構面、カンチレバー、耐力壁、非耐力壁、屋根、天井、コア、その他）し、その関係性の分析を行った。

18 対象建物の延床面積（㎡）に対する、CLT 利用量（㎡）を算定した値

2.2.3. 黎明期の CLT 製造と供給拠点の整備状況

日本では 2013 年 12 月に JAS（日本農林規格）に認定され CLT の製造供給が開始された。CLT パネルの製造・加工企業が 2017 年 8 月時点で 14 社あり（Table 2-7）、各社製造機器によって最大寸法の決まるマザーボード¹⁹で製造が行われる。2018 年 6 月現在、日本で製造できる最大の CLT パネル（マザーボード）は銘建工業(株)、(株)サイプレス・スナダヤが製造している 3.0m×12.0m が最大である。

本研究で対象とする CLT 建築の黎明期初頭に当たる 2016 年 3 月までは、2.7m×6.0m がマザーボードの国内最大製造寸法であったため、この限界寸法内で計画されてきた。2016 年銘建工業(株)新工場が稼働した 2016 年 9 月から、3.0m×12.0m の超大型パネルの利用が建築に用いられるようになった。一方で、2016 年 5 月には、KLH Massivholz が欧州の製造者としてはじめて JAS を取得したが、日本での導入実績は限られている。このため、黎明期の CLT 建築の計画は、国内の製造工場の整備に大きく左右されたとも言える。

また、CLT の供給に大きな影響を与えた要因として、国内の加工工場と搬送が挙げられる。国内における CLT 等の厚板木質パネルを加工できるコンピュータ数値制御機械（CNC）を有する工場は、Table 2-1 のとおりである。

製造工場付近で加工までを行っている企業は国内で 3 社ある。それ以外の工場は、JAS 製品としての加工を完了したパネルを受入れて、接合部等を含めた詳細加工を施す加工工場である。CLT は、このようにして工場においてプレカットした後に現場搬入する。加工図による部分詳細設計と、CNC の操作をプログラムする CAM（コンピュータ支援製造）への入力、さらに大型パネルの設置等に時間を要する。このため、現場への供給スピードは、この加工工場の処理能力に左右されることが多い。国内の加工工場の一覧を Table 2-2 に示す。

また、この時の搬送サイズは道路法による車両の幅等の最高限度（幅：2.5m、高さ：3.8m、長さ：12m）によって制限される。供給拠点から建設現場までの道路状況を考慮した上で、設計に用いる CLT の最大サイズが決定される。

以上のことから、エンジニアリングウッド（＝工場製造の木材料）である CLT は、国内の限られた製造拠点を起点として、途中で加工されるため、供給拠点状況の影響を大きく受ける。このため、黎明期の CLT 建築は、普及期以降に見られるような、利用部位の最適化が十分でなく、また、構造部材をすべて CLT とした CLT パネル工法（Fig.2-1）の事例は限られる。

19 製造において、ラミナ（挽き板）で集成形成を完了したパネルの状態
で、利用可能な最大サイズのボード状態（親板）のこと。

Table 2-1 国内の CLT 製造工場一覧 (2018 年 4 月時点),
JAPANESE CLT panel factory (in April 2018)

社名	所在地	製造開始時期	製造最大サイズ(mm)
銘建工業(株)	岡山県真庭市	CLT手貼り：2010年頃	60～270×2,700×6,000
		CLTライン：2012年7月	
		JAS：2014年6月（第1号）	
銘建工業(株) 新工場	岡山県真庭市	CLT：2016年4月	60～270×3,000×12,000
		JAS：2016年9月（第6号）	
山佐木材(株)	鹿児島県肝属郡	CLT：2003年頃	36～450×2,000×4,000
		JAS：2014年6月（第2号）	
(協)レングス	鳥取県西伯郡	CLT：1997年9月（創業）	36×1,000×2,000
		JAS：2016年3月（第3号）	
ウッドエナジー(株)	宮城県日南市	JAS：2016年3月（第4号）	36～270×980×4,000
西北プライウッド(株)	宮城県石巻市	JAS：2016年4月（第5号）	45～450×1,200×4,000
(株)中東	石川県能美市	JAS：2016年9月（第7号）	90～270×1,250×6,200
(協)オホーツクウッドピア	北海道北見市	JAS：2017年2月（第8号）	60～450×2,000×3,650
(株)サイプレス・スナダヤ	愛媛県西条市	CLT：2018年4月	60～270×3,000×12,000

※（一社）日本 CLT 協会の資料をもとに作成

Table 2-2 国内の CLT 加工工場一覧 (2018 年 4 月時点),
JAPANESE CLT panel pre-cut factory (in April. 2018)

社名	所在地	加工機械（メーカー）	最大加工サイズ(mm)
秋田グルーラム(株)	秋田県大館市	Ultra（ユニチーム）	250×3,000×18,000
(株)オノツカ	福島県郡山市	K2i（フンデガー）	300×1,250×10,000
		PBA（フンデガー）	300×3,000×12,000
藤寿産業(株)	福島県郡山市	Ultra（ユニチーム）	270×3,000×15,000
		Extra（ユニチーム）	400×3,000×12,000
(株)ダイテック	福島県いわき市	K2i（フンデガー）	300×1,250×14,000
(株)志田材木店	新潟県長岡市	Ultra（ユニチーム）	300×3,000×16,000
		K2（フンデガー）	300×600×12,500
(株)中東	石川県能美市	K2i（フンデガー）	300×1,250×14,000
齋藤木材工業(株)	長野県小県郡	NGW（平安コーポレーション）	360×4,000×18,000
(株)翠豊	岐阜県加茂郡	NC加工機（平安コーポレーション）	300×2,500×12,000
(株)スカイ	静岡県磐田市	Ultra（ユニチーム）	300×3,000×14,000
		OIKOS(SCM)	300×1,200×9,000
銘建工業(株)	岡山県真庭市	Ultra（ユニチーム）	270×2,700×15,000
		Extra（ユニチーム）	300×3,000×12,000
三王ハウジング(株)	愛媛県新居浜市	OIKOS(SCM)	300×1,200×12,000
		K3i（フンデガー）	300×600×12,000
山佐木材(株)	鹿児島県肝属郡	Extra_mix（ユニチーム）	300×3,500×13,500
		K2（フンデガー）	180×600×11,000
		NC加工機（平安コーポレーション）	210×2,000×4,000

※（一社）日本 CLT 協会の資料をもとに作成

2.2.4. 対象事例の選定と類型化

国内において CLT が用いられた建築物の事例をリスト化し、建物用途、規模（階数、延床面積）、CLT の使用量、建物全体に対する CLT 利用量の基本情報を算定した。さらに、主な構法、CLT 利用部分（水平構面、カンチレバー、耐力壁、非耐力壁、屋根、天井、EV・階段室等のコア、その他）ごとに類型化して、比較検証を行った。

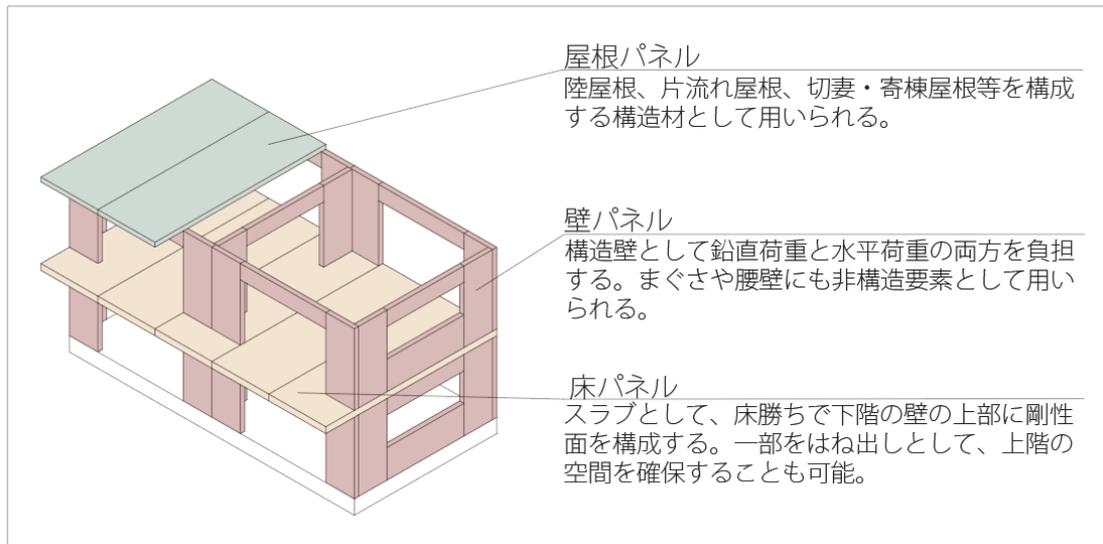


Fig.2-1 CLT パネル工法概念図
CLT panel construction scheme

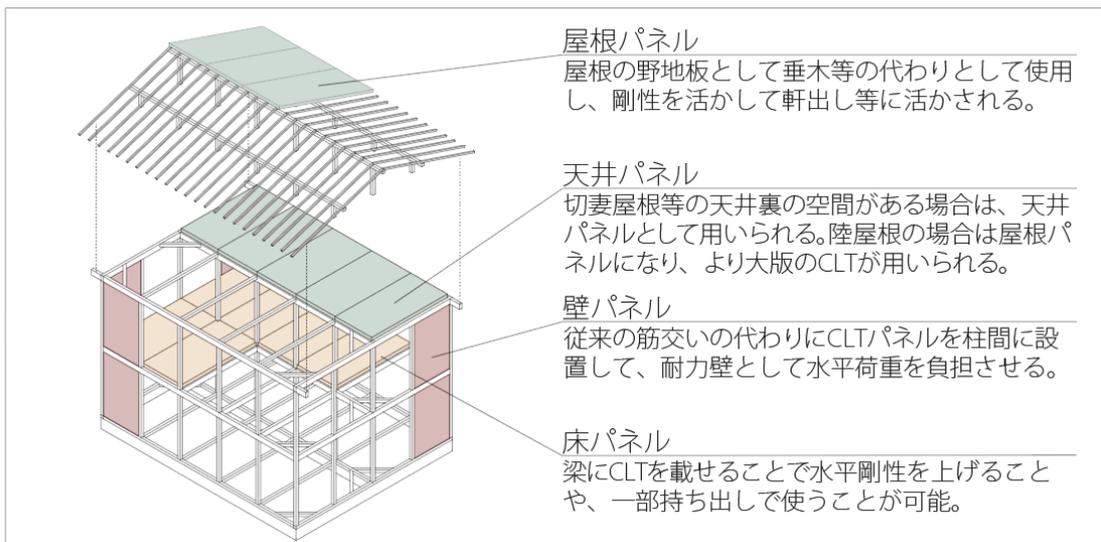


Fig.2-2 在来軸組構法における CLT 利用
CLT usage on timber framed structure

日本国内での CLT 製造ラインが整備されたのは、2012 年 7 月である。2016 年度以前に日本国内で建築された建物で CLT パネルを導入した事例を Table 2-3 に示す。このうち、2014 年 3 月に国土交通大臣の認定²⁰を受けて建設された「02-高知おおとよ製材社員寮」が、国内で生産された CLT を用いて建設された初めての CLT 建築である。それ以前に建設された「01-アドリア北出丸カフェ（Photo 2-2）」は、国内での CLT 生産が始まる以前に建設された。福島県産の杉材を CLT として活用できるかを実証するため、一旦ラミナ材をオーストリアの KLH Massivholz に搬送し、これを CLT としてパネル化して逆輸入し屋根の野地板として使用した事例である（Photo 2-3）。

以降、大臣認定²¹を受けて建設された集合住宅汎用モデル（No.02,10,11,12）や、後に告示化される CLT パネル工法による設計基準を要しない、在来軸組構法の壁面利用等を中心に事例が建設された。4 件で建設された CLT 集合住宅汎用モデルは、「02-高知おおとよ製材社員寮」の構造躯体構成を踏襲して設計され、構造審査の短縮化を図ることで黎明期の CLT 建築を牽引した。

No.30 以降は、告示公布後に竣工した建物である。告示公布の 2016 年 4 月以降で、CLT を用いた建築物はそれ以前と比べると急激に増加している。竣工件数は、年間 15 件（2015 年度）から 25 件（2016 年度）へと急増している。国土交通大臣の認定により建設された特殊事例を除けば、告示が公布された 2016 年 4 月から約 1 年の設計・施工期間を経て、2017 年 2 月によく CLT パネル工法が竣工し始める。

一方で、CLT を建築に用いることで示される短工期化や環境性能向上といった有効性を示唆することで、CLT 建築の可能性を牽引した事例として「03-コエボハウス（Photo 2-4）」と「05-母の家 2030 会津若松実験棟（Photo 2-5）」がある。これは、一般社団法人環境共創イニシアチブの平成 25 年度「ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（以下、ZEH）の標準化に係る調査・実証事業」において、ZEH 技術や ZEH を活用した新たな住まい方を提案したモデルハウスを建築・展示する「エネマネハウス 2014」で展示された。2 週間で建設する ZEH を実証するため、参加した 5 大学のうち 2 大学が CLT による建築を提



Photo 2-2 アドリア北出丸カフェ，会津若松市



Photo 2-3 KLH で加工された CLT パネルを野地板として屋根に施工しているところ



Photo 2-4 慶應型共進化住宅ココエボハウス，慶應義塾大学



Photo 2-5 母の家 2030，芝浦工業大学（東雲に建設された後、会津若松市に実験棟として移築された）

20 建築基準法第20条第一号に基づく国土交通大臣の認定

21 参考文献53) p41、「時刻歴応答解析ルートを採用することになる。このルートでは、構造実験に基づく設計用性能の評価、立体FEMモデル等を用いた構造性能評価、時刻歴応答解析による最大応答の算定、構造設計図書の整備、指定性能評価機関等による審査及び国土交通大臣認定申請を経て建築確認申請を行う。このため、一般的な他構造建築物の構造設計と比べて4ヶ月程度多くの期間を要する。」とされている。

案して、仮設建築物として建設された。CLTを用いた短工期化と、その断熱・蓄熱性能に期待して導入されたもので、住宅の温熱環境向上のために、ちょうど国内の JAS 工場が稼働し始めたばかりの状況の CLT が導入された点で興味深い事例である。2013年5月の省エネルギー基準改正²²を受けて始まった、建物の外皮性能向上を目的とした建物性能向上に、CLT等の木質材料が注目されたことがわかる。

Table.2-3 対象 CLT 建築リスト, Target CLT building list

No.	名称	竣工	用途	所在地	設計
01	アドリア北出丸カフェ	2010年9月	店舗	福島県会津若松市	会津土建
02	高知おおとよ製材社員寮	2014年3月	集合住宅	高知県長岡郡	日本システム設計
03	コエボハウス	2014年7月	実験棟	神奈川県藤沢市	慶應義塾大学池田靖史研究室+宇賀亮介建築設計事務所
04	YUKI HAYAMA STUDIO	2014年8月	工房	佐賀県武雄市	武松幸治+E.P.A 環境変換装置建築研究所
05	母の家2030 会津若松実験棟	2014年9月	実験棟	福島県会津若松市	芝浦工業大学青島啓太+会津土建
06	宮崎大学創立330記念交流会館	2014年9月	学校	宮崎県宮崎市	長大
07	GORIKIISLAND新社屋	2015年1月	事務所	三重県伊勢市	佐々木設計
08	長谷萬館林事業所工場内事務所	2015年2月	事務所	群馬県館林市	ビルディングランドスケープ
09	カヤバホーム倉敷中央店展示場	2015年2月	住宅	岡山県倉敷市	ライフデザイン・カバヤ
10	湯川村CLT共同住宅	2015年2月	集合住宅	福島県河沼郡	日本システム設計
11	市宮CLT春日住宅	2015年3月	集合住宅	岡山県真庭市	日本システム設計
12	真庭木材事業協同組合CLT勝山共同住宅	2015年3月	集合住宅	岡山県真庭市	日本システム設計
13	協同組合オホーツクウッドピア	2015年3月	セミナーハウス	北海道北見市	日本システム設計
14	札幌駅前通まちづくりCLT仮設店舗	2015年3月	店舗	北海道札幌市	アトリエオンド、桜設計集団
15	まちなか案内所	2015年4月	店舗	大分県大分市	伊藤憲吾建築設計事務所
16	くりばやし整骨院	2015年5月	併用住宅	神奈川県藤沢市	鍋野友哉アトリエ
17	HOKUSHU THE HOUSE SHOP MORIOKA	2015年10月	事務所	岩手県盛岡市	北洲
18	ノルン水上スキー場ゲートハウス	2015年12月	事務所	群馬県利根郡	武松幸治+E.P.A 環境変換装置建築研究所
19	U邸	2015年12月	住宅	三重県伊勢市	ビオフォルム環境デザイン室
20	窪津漁業協同組合事務所	2016年1月	事務所	高知県土佐清水市	建築舎KIT
21	ハウステンボス 変なホテル2期棟	2016年2月	宿泊施設	長崎県佐世保市	鹿島建設、住友林業
22	つくばCLT実験棟 CoCoCLT	2016年3月	実験棟	茨城県つくば市	青島啓太+芝浦工業大学 赤堀忍研究室
23	ホテルサンライズCLT棟	2016年3月	宿泊施設	岡山県真庭市	谷岡建築設計事務所
24	ハーバーランドバス駐車場CLT休憩所	2016年3月	休憩所	兵庫県神戸市	黒田建築設計事務所
25	カバヤホーム倉敷CLT店展示場	2016年3月	事務所	岡山県倉敷市	ライフデザイン・カバヤ
26	ウッドエナジー協同組合事務所	2016年3月	事務所	宮崎県串間市	法政大学建築構法研究室、河野泰治アトリエ
27	三井ホームコンポーネント埼玉工場事務所棟	2016年3月	事務所	埼玉県加須市	三井ホームデザイン研究所
28	ソーバイフォー工法6階建て実大実験棟	2016年3月	実験棟	茨城県つくば市	日本システム設計
29	高知県森連会館	2016年3月	事務所	高知県南国市	鈴江章宏建築設計事務所、界設計室、エンケンチクジムショ

22 『エネルギーの使用の合理化等に関する法律』で平成25年5月31第25号に改正された省エネルギー基準改正による。外皮にかかわる基準として、外皮表面積あたりの熱損失量（換気による熱損失量を除く）である外皮平均熱貫流率（UA値）の基準が求められた。熱貫流率の低い木材を外皮に用いることで、UA値を向上させることが可能である。

Table.2-3 つづき
continuation of the table

No.	名称	竣工	用途	所在地	設計
30	高知県立農業担い手育成センター	2016年4月	宿泊施設	高知県高岡郡	田中建築設計事務所
31	大本静岡分苑	2016年4月	集会施設	静岡県富士市	LLPテイクス、福山弘構造デザイン
32	Café CLT	2016年4月	店舗	兵庫県神戸市	KUS、腰原幹雄+kplus
33	阿部建設モデルハウス 手しごとの家	2016年4月	モデルハウス	愛知県名古屋市	泉幸甫建築研究所
34	田井高齢者福祉施設	2016年5月	福祉施設	高知県土佐郡	鈴江章宏建築設計事務所
35	カネシロ新事務所	2016年6月	事務所	愛媛県松山市	鍋野友哉アトリエ
36	熊本県西原村仮設宿泊施設	2016年7月	宿泊施設	熊本県阿蘇郡	銘建工業
37	ぶろぼの福祉ビル	2016年7月	福祉施設	奈良県奈良市	浅田設計室
38	高知県自治会館新庁舎	2016年9月	事務所	高知県高知市	細木建築研究所、桜設計集団、椋建築事務所
39	伊奈の家	2016年10月	モデルハウス	埼玉県北足立郡	桧家ホールディングス、鍋野友哉アトリエ
40	Brillia ランニングスタジアム	2016年12月	スタジアム	東京都江東区	武松幸治+E.P.A 環境変換装置建築研究所、KAP
41	ライフデザイン・カバヤ倉敷支店	2017年2月	事務所	岡山県倉敷市	ライフデザイン・カバヤ
42	三東工業社信楽本店	2017年2月	事務所	滋賀県甲賀市	加藤淳一建築設計事務所、木質環境建築
43	榛名神社奉納額収蔵庫	2017年2月	倉庫	群馬県高崎市	エムロード環境造形研究所、銘建工業
44	井上ビル	2017年2月	事務所	福岡県筑紫郡	ブルク、ウディストプラン
45	入間の家	2017年2月	住宅	埼玉県入間市	AOYAGI DESIGN
46	KFC堺百舌鳥店	2017年3月	店舗	大阪府堺市	Sho建築設計事務所、京都大学生存圏研究所
47	ナイス仙台物流センター事務所棟	2017年3月	事務所	宮城県多賀城市	ナイス
48	加賀町木育の家	2017年3月	住宅	東京都新宿区	鍋野友哉アトリエ、佐藤淳構造設計事務所
49	郡山ヘアメイクカレッジ	2017年3月	学校	福島県郡山市	高橋岳志・AUM設計共同企業体
50	林材木店アッセンブル倉庫	2017年3月	倉庫	栃木県真岡市	梓建築設計事務所、林材木店
51	西ノ原の家	2017年3月	住宅	長崎県東彼杵郡	武松幸治+E.P.A 環境変換装置建築研究所
52	荻窪の住宅	2017年3月	住宅	東京都杉並区	MOUNT FUJI ARCHITECTS STUDIO
53	羽黒高等学校新校舎	2017年3月	学校	山形県鶴岡市	日本設計
54	フレッシュショップトマト観音寺店	2017年3月	店舗	香川県観音寺市	島田治男建築設計事務所、TTR設計
55	加藤工務店新社屋	2017年5月	事務所	静岡県沼津市	東海精機 4D-WORKS、木質環境建築
56	ST柳町I	2017年6月	事務所	高知県高知市	建築設計群 無垢、桜設計集団
57	ウッドワンプラザ金沢	2017年7月	事務所	石川県野々市市	伊東豊雄建築設計事務所、ウッドワン
58	THSセミナーハウス	2017年7月	事務所	岡山県岡山市	片山建築研究所
59	すくも商銀信用組合	2017年7月	店舗	高知県宿毛市	艸建築工房
60	倉敷市平田CLT分譲住宅	2017年8月	住宅	岡山県倉敷市	ライフデザイン・カバヤ
61	高知県林業大学校	2017年9月	学校	高知県香美市	細木建築研究所
62	TIMBERED TERRACE	2017年9月	集合住宅	石川県小松市	SALHAUS
63	アイサワ工業社員寮	2017年11月	集合住宅	岡山県岡山市	ライフデザイン・カバヤ
64	京都府茶業研究所	2017年11月	事務所	京都府宇治市	東畑建築事務所 大阪事務所
65	山佐木材CLT工場棟	2017年11月	工場	鹿児島県鹿屋市	建築支援ファイル
66	高取の家	2017年12月	住宅	広島県広島市	岡本建築設計事務所
67	東北大学建築CLTモデル実証棟	2017年12月	実験棟	宮城県仙台市	佐藤総合計画・鈴木建築設計事務所設計共同体
68	南房総千倉CLT収納庫	2017年12月	倉庫	千葉県南房総市	KeyPoint設計室
69	農業総合研究所中山地農業技術センター	2017年12月	事務所	新潟県長岡市	ワツジ設計
70	馬路村森林組合事務所	2017年12月	事務所	高知県安芸郡	建築舎KIT

2.2.5. 構法から見た CLT 利用の実態

これらの黎明期の CLT 建築事例において、それぞれの部分に CLT が用いられているかを分類したものを Table 2-5 に示す。まず、構法別に分類し、『CLT パネル工法』『複合法』『在来軸組構法』『それ以外の構法』の4つの構法に分類した。そして、それぞれの事例において CLT が用いられた部位について『床』『壁』『屋根』『天井』『コア』『その他（仕上げ等の利用）』に分類した。さらに部位毎に使用された CLT の厚み（層構成）を明記した。（5層5プライ²³の CLT の場合、5-5 というように表記した。）

構法ごとに、延床面積に対する CLT 使用量 [m³/m²] の平均を算定すると、それぞれ『CLT パネル工法』0.42% 『複合法』0.15% 『在来軸組構法』0.17% 『それ以外の構法』0.08% となっている。基本構造要素全てで CLT を用いて構成される CLT パネル工法が、もっとも CLT 使用量が多い結果となった。建物内で構法を複合させて用いたものや、在来軸組構法に CLT を組み込む形で用いたものは、同等の使用量を示した。

しかし一方で、使用されている部位によって生じる CLT 使用量の違いは見られなかった。また、使用されている CLT 厚みと CLT 使用量の相関関係も特に見られなかった。また、建物用途別にみると、Table 2-4 のように『宿泊施設』『集合住宅』の使用量が大きく、連続的な空間構成を持つ建物において CLT の活用は有効であることがうかがえる。一方で、学校建築やスタジアム等の大空間が必要な建物では、使用量は少ない傾向にある。さらに、各構法の事例を見ていくことで、それぞれの展開の傾向がみられる。次項から、代表的な事例をもとに構法別の考察を行っていく。

Table 2-4 建物用途別の CLT 使用量
amount of CLT usage on architecture type

建物用途	CLT使用量の平均	使用量/延床の平均
宿泊施設	230.56 m ³	0.41 m ³ /m ²
集合住宅	145.83 m ³	0.33 m ³ /m ²
店舗	40.73 m ³	0.32 m ³ /m ²
倉庫	65.16 m ³	0.31 m ³ /m ²
事務所	87.25 m ³	0.37 m ³ /m ²
工場・工房	158.25 m ³	0.23 m ³ /m ²
住宅等	26.12 m ³	0.22 m ³ /m ²
休憩所	1.55 m ³	0.13 m ³ /m ²
福祉施設	101.81 m ³	0.13 m ³ /m ²
集会施設	22.70 m ³	0.07 m ³ /m ²
学校	72.98 m ³	0.05 m ³ /m ²
スタジアム	56.00 m ³	0.01 m ³ /m ²

23 ラミナが直交する回数を「層」、全体の段数を「プライ」と呼び、用途に応じて層、プライの数を変えることができる。

Table 2-5 工法別の CLT 利用部分
Architectural elements using CLT by construction method

構法分類	No	竣工	CLT利用部分										建築概要					
			床		壁			屋根	天井	コア	その他	用途	階数	延床面積 [㎡]	CLT 使用量 [㎡]	CLT使用量/延床 [㎡/㎡]		
			水平 構面	柱/梁 壁	耐力壁 水平軸直	耐力壁 水平力	非耐 力壁											
在来 軸組 構法	水平面利用	01	2010.09							3-3				店舗	2	406.6	47.5	0.12
		09	2015.02									3-3		住宅	2	291.0	5.9	0.02
		16	2015.05	5-5	5-5									併用住宅	2	122.3	7.8	0.06
		17	2015.1			5-5								事務所	2	1107.4	30.0	0.03
		32	2016.04						5-5					店舗	1	41.6	22.5	0.54
		64	2017.11						5-5					事務所	2	162.8	31.7	0.19
		66	2017.12	5-5					5-5					住宅	1	982.3	12.0	0.01
		35	2016.06	5-5	5-5						3-3			事務所	3	497.9	43.9	0.09
		39	2016.01	3-3,3-4	3-3,3-4									モデルハウス	2	143.2	27.2	0.19
		57	2017.07	5-5										事務所	2	499.2	69.3	0.14
	水平垂直面 利用	04	2014.08				3-3		5-5					工房	1	445.6	155.0	0.35
		05	2014.09	3-3,5-5			3-3			5-5				実験棟	1	66.9	22.9	0.34
		08	2015.02	7-7			3-3		5-7					事務所	1	51.8	30.9	0.60
		18	2015.12				3-3		5-5					事務所	2	484.1	56.0	0.12
		19	2015.12	5-5			3-3,3-4							住宅	2	162.9	38.7	0.24
		20	2016.01	5-6			3-3							事務所	2	253.9	42.1	0.17
		23	2016.03	3-3			3-3		3-3					宿泊施設	2	238.5	57.2	0.24
		24	2016.03				3-3		3-3					休憩所	1	11.8	1.6	0.13
		25	2016.03	3-3	3-3		3-3			3-4				事務所	2	203.5	65.5	0.32
		29	2016.03	3-3			5-5		5-6					事務所	2	1209.7	315.9	0.26
		33	2016.04	3-3			3-3			3-3				モデルハウス	2	161.9	11.8	0.07
		34	2016.05	5-5			3-3							福祉施設	2	592.9	65.8	0.11
		41	2017.02	3-3			3-3							事務所	3	736.1	139.8	0.19
		59	2017.07	7-7			3-3							店舗	2	804.8	43.0	0.05
		61	2017.09	5-5			3-3		5-5,7-7					学校	2	2647.1	19.7	0.01
		62	2017.09	5-5			3-3							集合住宅	3	779.2	120.0	0.15
		垂直面利用	26	2016.03				3-3							事務所	3	967.7	64.0
	31		2016.04				3-3							集会施設	2	329.8	22.7	0.07
	48		2017.03				5-5							住宅	3	242.8	26.7	0.11
	木造 ラーメン	屋根トラス	06	2014.09					3-3					学校	1	1670.3	36.0	0.02
床剛性		53	2017.03	5-5									学校	3	5480.0	20.0	0.00	
壁剛性		65	2017.11			5-5							工場	2	1460.5	161.5	0.11	
枠組 壁構法		27	2016.03						3-3		3-3		事務所	2	251.9	34.1	0.14	
		28	2016.03	5-7									実験棟	6	206.1	8.0	0.04	
鉄骨造		07	2015.01				5-5						事務所	1	140.0	21.0	0.15	
		54	2017.03					5-5					店舗	1	1399.7	130.0	0.09	

Table 2-5 工法別のCLT利用部分（前ページからのつづき）
 Architectural elements using CLT by construction method (continuation of the table)

構法分類	No	竣工	CLT利用部分										建築概要				
			床		壁			屋根	天井	コア	その他	用途	階数	延床面積 [m ²]	CLT使用量 [m ³]	CLT使用量/延床 [m ³ /m ²]	
			水平構面	柱/巾パネ	耐力壁 水平設置	耐力壁 水平力	非耐力壁										
CLT パネル 工法	大臣認定	02	2014.03	5-6		5-5			5-6				集合住宅	3	267.0	120.0	0.45
		10	2015.02	5-6		5-5			5-6				集合住宅	2	387.0	149.0	0.39
		11	2015.03	5-6		5-5			5-6				集合住宅	3	281.0	120.0	0.43
		12	2015.03	5-6		5-5			5-6				集合住宅	3	543.1	220.0	0.41
		13	2015.03	7-7		5-5			7-7				セミナーハウス	2	143.2	70.0	0.49
		21	2016.02	5-7		5-5							宿泊施設	2	2049.7	570.0	0.28
		30	2016.04	5-6		3-3			5-6				宿泊施設	2	723.6	274.0	0.38
	告示	03	2014.07	5-5		5-5			5-5				実験棟	1	78.8	60.6	0.77
		14	2015.03	3-4		3-4			3-4				店舗	1	4.9	3.2	0.66
		15	2015.04	5-5		3-3			5-5				店舗	1	25.9	15.9	0.61
		22	2016.03	5-7	5-7-7	5-5		5-5	5-5				実験棟	2	166.0	94.1	0.57
		36	2016.07	3-3,5-5		3-3			5-5				宿泊施設	1	29.0	21.0	0.72
		42	2017.02	3-3		5-5			5-5				事務所	1	110.0	95.2	0.87
		43	2017.02			3-3			5-5				倉庫	1	99.4	41.9	0.42
		44	2017.02	5-7	5-7	5-5			5-5		5-5		事務所	2	400.2	180.3	0.45
		46	2017.03			3-3			3-4				店舗	1	161.1	23.0	0.14
		50	2017.03	5-5		3-3,5-5			5-5				倉庫	2	331.2	142.1	0.43
		51	2017.03			5-5			3-3				住宅	1	81.1	33.0	0.41
		52	2017.03	3-3		3-3			3-3,5-5				住宅	2	62.1	12.3	0.20
		58	2017.07	5-7		5-5,7-9			5-7		5-5		事務所	3	561.7	329.9	0.59
60	2017.08	5-7	5-7	3-3			5-5				住宅	2	115.1	27.2	0.24		
63	2017.11	7-7		5-5			3-3				集合住宅	1	951.9	146.0	0.15		
68	2017.12			3-3				3-3			倉庫	1	149.1	11.5	0.08		
69	2017.12	7-7		3-3,5-5			5-5				事務所	2	177.6	54.6	0.31		
70	2017.12	3-3		3-3							事務所	2	121.3	15.5	0.13		
複合工法 (平面)	CLT/パネル工法 +木造アーチ	40	2016.12			3-3			3-3			スタジアム	1	4845.0	56.0	0.01	
	CLT/パネル工法 +RC造(コア)	47	2017.03	5-7		5-5			5-5			事務所	2	356.7	146.0	0.41	
	CLT/パネル工法 +木造ラーメン	49	2017.03			3-4			5-5			学校	2	1447.6	216.3	0.15	
	CLT/パネル工法 +在来軸組工法	55	2017.05	5-7			3-3,5-5					事務所	1	703.7	76.9	0.11	
	CLT/パネル工法 +在来軸組工法	56	2017.06	3-3		5-5			3-3		5-5	事務所	3	243.9	47.4	0.19	
	CLT/パネル工法 +LVL・小屋組み	67	2017.12			5-5						実験棟	2	90.4	14.9	0.16	
複合工法 (積層)	CLT/パネル工法 /RC造	37	2016.07			3-4,5-7						福祉施設	5	971.5	137.8	0.14	
	在来軸組工法 /RC造	38	2016.09				5-5	3-3				事務所	6	3648.6	46.9	0.01	
	CLT/パネル工法 /在来軸組工法	45	2017.02	3-3		3-3			3-3			住宅	2	123.0	14.9	0.12	

CLT パネル工法

2016年4月の告示交付を受けて、例外的に建設されてきた事例(大臣認定事例及び仮設建築物等)以外の事例が2016年中にいくつか計画された。CLTの利用部分を見ていくと、「22-つくば CLT 実験棟 | CoCoCLT (Photo 2-6, Photo 2-7)」を境に、居室面積を広げる目的でカンチレバーとして利用した事例や、コア等の耐震要素、そして平面方向または積層方向で構法を複合させるようなバリエーションが多く見受けられるようになる。それぞれの設計条件において、特殊要件が CLT 建築の多様性を持たせ始めたことがうかがえる。

ここで、「22-つくば CLT 実験棟 | CoCoCLT」で用いられた CLT パネル工法に着目すると、それまで建設されてきた集合住宅汎用モデル等と違い、「カンチレバー」「吹き抜け空間」等の空間構成に CLT を用いられた。構造上のたわみや変形が生じないように、CLT の厚みや層構成、材料強度が選択された。この建物は、日本 CLT 協会が国土交通省の補助を受けて建設された建物で、CLT 建築の施工検証を目的としたものである。

内部空間は1、2階とロフト階の3層に分けて構成されている。これらの各層をつなぐように6.0m×2.7mの大型パネルが用いられている。このパネルサイズは、2015年11月の建て方当時、国内における CLT 製造の限界サイズであった。在来軸組構法等においては、吹き抜け空間は構造的な弱点になる恐れがあるが、大型のパネルを構造部材に用いることで分節されることがないため、5.0mの高天井空間が可能となった。また、2階の床の一部を1.0mのオーバーハングとして、居室空間を大きくするとともに、パネル長さ6.0mの1/2にあたる3.0mをカンチレバーとして躯体から持ち出すことで、大きなテラスを構成している。パネル構成を Fig.2-3 に示す。

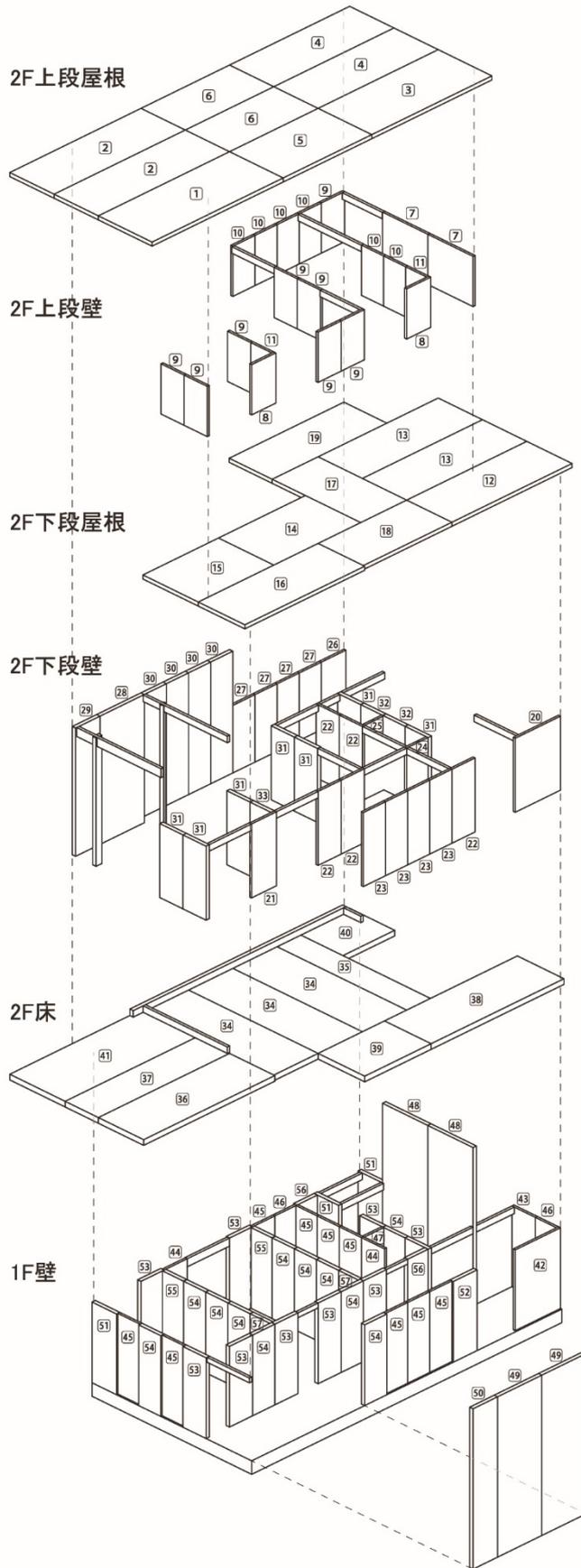
こうした先行事例が牽引する形で国土交通省は CLT パネル工法の普及を目指していった。2016年7月には、『2016年公布・施行 CLT 関連告示等解説書』(日本住宅・木材技術センター発行)がまとめられ、さらに2018年4月には、『実務者のための CLT 建築物設計の手引き』が日本 CLT 協会によって発行されたことで、国内の CLT パネル工法の一般的な設計方法が示された。



Photo 2-6 22-つくば CLT 実験棟
CoCoCLT No.22-CoCoCLT TSUKUBA



Photo 2-7 22-つくば CLT 実験棟
CoCoCLT No.22-CoCoCLT TSUKUBA



使用パネル一覧

使用部分	構成	No.	強軸 [mm]	弱軸 [mm]	枚数
2F上段屋根	5層5プライ (t=150)	1	5925	2425	1
		2	5925	2000	2
		3	5425	2425	1
		4	5425	2000	2
		5	4000	2425	1
		6	4000	2000	2
2F上段壁	3層3プライ (t=90)	7	1860	2045	2
		8	1860	1090	2
		9	1860	1045	8
		10	1860	1000	6
		11	1860	955	2
2F下段屋根	5層5プライ (t=150)	12	5425	2045	1
		13	5425	2000	2
		14	3925	2500	1
		15	3413	2500	1
		16	2105	5413	1
		17	2075	4000	1
		18	2045	4000	1
		19	1940	5180	1
		2F下段壁	3層3プライ (t=90)	20	2740
21	2740			1120	1
22	2740			1045	5
23	2740			1000	4
24	2740			970	1
25	2740			880	1
26	2500			1105	1
5層5プライ (t=150)	27		2500	1000	4
	28		4750	2000	1
	29		4750	1105	1
	30		4750	1000	4
	31		2740	1045	7
	32		2740	1000	2
2F床	5層7プライ (t=210)	33	2740	955	1
		34	6000	2000	3
		35	6000	1075	1
		36	5925	2045	1
		37	5925	1500	1
		38	2105	6000	1
		39	2105	3000	1
		40	2045	2338	1
		41	6000	2500	1
	1F壁	3層3プライ (t=90)	42	2990	2045
43			2990	1060	1
44			2990	1045	2
45			2990	1000	9
46			2990	955	2
47			2990	880	1
48			5940	2045	2
5層5プライ (t=150)		49	5940	2000	2
		50	5940	1105	1
		51	2990	1105	3
		52	2990	1075	1
		53	2990	1045	9
		54	2990	1000	11
		55	2990	955	2
		56	2990	925	2
		57	2990	895	2

Fig.2-3 つくば CLT 実験棟 | CoCoCLT の CLT パネル構成図, CoCoCLT TSUKUBA Panel Diagram

一方で、CLT パネル工法は CLT の使用量が大きいため、CLT パネルのコストに総工事費が左右されやすい。このため、黎明期は比較的規模が小さく、実験的な建築の事例や、CLT そのもののプロモーションを目的とした事例が多い。市場価格に乗りにくいことが黎明期の CLT パネル工法の急激な普及を抑えることになった²⁴。

複合工法：平面構成，積層構成

構法を複合させて部分的に CLT パネル工法を用いて構成した事例である。上記の CLT パネル工法と比べて、CLT の剛性等の特質を活かした利用部分に限定して、効率化を図った事例であると言える。例えば、「55-加藤工務店新社屋」は、集成材の柱・梁によるフレーム構法に、CLT を耐力壁と床スラブとして用いた事例である。「49-郡山ヘアメイクカレッジ (Photo 2-7, Photo 2-8)」は、一平面方向を CLT パネル工法として、もう一方を木造ラーメン構法とした事例であり、比較的大きな教室空間を CLT による界壁を介して構成し、南北方向は採光通風を考慮してラーメン構法で構成したものである。

また、「37-ぷろぼの福祉ビル」や、「38-高知県自治会館新庁舎」に見られる積層構成の複合工法では、低層部を RC 造とし、高層部に CLT を用いることで、建物荷重を軽量化して耐震性向上を図ったものである。「37-ぷろぼの福祉ビル」は、1 階部分を RC 造、2～5 階部分の壁を CLT パネル工法とした 5 階建ての耐火建築物である。(1 階部分：2 時間耐火、2～5 階部分：1 時間耐火) 「38-高知県自治会館新庁舎」は 1～3 階部分を RC 造、4～6 階部分を在来軸組構法で構成し、耐震壁と間仕切壁に CLT を用いていた 6 階建ての耐火建築物である。(1～3 階：2 時間耐火、4～6 階：1 時間耐火) これらの事例により、都市木造の中高層建築の可能性を広げたと言える。CLT パネル工法の事例の床面積の平均が 320.8 m²であることに対して、複合工法によって建てられた事例では平均 1381.2 m²であり、大規模化は複合工法が牽引したことがうかがえる。

在来軸組構法

軸部材で構成された構造において、CLT を筋交い同等の水平力を負担する耐震要素として用いる方法、または、床や天井面での水平剛性を負担させる方法である。鉛直荷重はすべて軸部材が負担するため、



Photo 2-7 郡山ヘアメイクカレッジの外観，福島県郡山市



Photo 2-8 郡山ヘアメイクカレッジの内観，福島県郡山市

24 参考文献53) p8-11参照。高知おおとよ製材社員寮、真庭木材事業協同組合 CLT 勝山共同住宅及びオホーツクウッドプラザ CLT セミナーハウスについて建築工事費を算出したもので、「直接工事費は 280 千円/m²～372 千円/m²、建築主体工事費は 219 千円/m²～299 千円/m²である。建築主体工事費の内訳では、木工事費の割合が多く 49.8%～54.1%であった。」とされている。

壁に用いた CLT パネルは筋交いと同等の水平力負担のみを期待したものである。床や壁等の限定的な部位での採用もできるため、比較的容易に取り入れることができる方法である。

在来軸組構法への CLT 活用は、告示前後で 15 件から 14 件へと事例数は変わらないことがわかる。これは、CLT パネル工法が確立する前から導入が可能であったことに加えて、その汎用性・簡便性から一定の需要があることが推察される。

垂直面のみで利用されているものは 3 件に留まり、垂直面への活用は現段階では未成熟である。一方で、水平面への活用への期待は大きく、大判の厚板パネルである CLT を取り入れることによって、床版の構成がシンプルになる計画が提案可能である。通常は大引きや根太等の 2 次部材で構成される床と違い、CLT の設置直後に床面が完成するため施工の効率化に加えて、施工の安全性が確保できる。



Photo 2-9 湯川村 CLT 共同住宅, 福島県湯川村

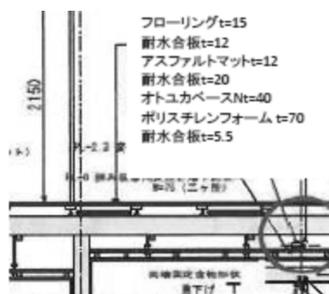


Fig.2-4 CLT 遮音床の構成

ただし、床に CLT を用いた場合、遮音性能には課題がある。特に重量衝撃音に対する遮音性能を確保することが水平面で CLT を活用するための懸念事項となっている。例えば、「10-湯川村 CLT 共同住宅 (Photo 2-9)」で 2015 年 2 月に日本 CLT 協会で計測した床の重量衝撃音遮音等級を見ると、LH-65 (床版構成: CLT5 層 6 プライ, スパン 4,000×4,000mm) に満たない事例が報告されている (Fig.2-4)。

他に、屋根で CLT を取り入れた在来軸組構法の事例も 11 件見られた。2010 年に国内でいち早く CLT を取り入れた「01-アドリア北出丸カフェ」では、在来軸組構法の躯体に、屋根部分に CLT パネルを設置した事例である。ここでも、CLT によって母屋や垂木等の 2 次部材をなくすことで、効率化とシンプルな構成を目指したものであり、本来であれば屋根を構成するべき垂木を省略できるため、見付けの薄い軒先を実現している。

また、天井で用いられた 3 事例「05-母の家 2030 | 会津若松実験棟」「25-カバヤホーム倉敷 CLT 店展示場」「33-阿部建設モデルハウス | 手しごとの家」は、水平面を構成した CLT による構造の上に、在来軸組構法等で勾配屋根を別に構築した事例である。これは、CLT のプレカット時に、パネル頂部の高さを揃えて設計したもので、前述した「02-高知おおとよ製材社員寮」等の集合住宅汎用モデルと違い、最上段の CLT に勾配がない。

CLT パネル工法と同様に、CLT の剛性を利用したキャンチレバーを構成し、在来軸組構法から CLT パネルを持ち出して空間を広げる事例もみられる。対象事例からは、「16-くりばやし整骨院」「25-カバヤホーム倉敷 CLT 店展示場」「35-カネシロ新事務所」「39-伊奈の家」の 4 事例で用いられた。No.16 では 5 層 5 プライのパネルを床のみに利用して 2.15m キャンチレバーとして跳ね出し、居住面積を広げ、

下部空間を駐車場にしている²⁵。No.39では、3層3プライ、3層4プライの2種類のパネルを用いて3方向に跳ね出し、下部空間を駐車場にし、上部は居住面積を拡大するだけでなく、バルコニーにも利用されている。

その他の構法での導入

「06-宮崎大学創立330記念交流会館」「53-羽黒高等学校新校舎」「65-山佐木材CLT工場棟」の3事例では、木造ラーメン構法に取り入れた事例である。「27-三井ホームコンポーネント埼玉工場事務所棟」「28-ツーバイフォー工法6階建て実大実験棟HRT」の2事例は、枠組壁構法で水平構面・天井に用いた事例である。

この5事例は、木造にCLTを取り入れたものだが、「07-GORIKISLAND新社屋」「54-フレッシュショップトマト観音寺店」の2事例は、鉄骨構造に組み込んだものである。特にNo.54では、鉄骨によるトラス梁に水平構面としてのCLTを設置したシンプルな構成²⁶であるが、今後はこうした異種構造との混合によって適切な部位に取り入れられていく可能性を示している。

25 参考文献53) p41、設計者の鍋野によると、「床をシンプルに構成しつつ階高を抑えることが可能となり、かつその材料特性上、大スパンや床持ち出しが可能となる。」として、2つの利点が明確に示されている。

26 参考文献44) p130-146、CLTは最大で3,850mmのスパンの鉄骨による小梁に設置され、Mx60の5層5プライとして、CLTパネルの面内せん断性能確保することで、鉄骨部材への影響を抑えたもの。

2.2.6. まとめ

国内で建築における CLT 利用が開始された、2010 年からの 7 年間で CLT 建築の普及黎明期と位置付け、それ以降の普及期の展開に向けて、構法計画の観点から分析した。以下総括として、第 2 節と第 3 節で得られた検証結果を述べる。

1: CLT 製造と供給拠点の整備状況との強い関連性

黎明期の CLT 建築の計画は、国内の製造工場の整備時期と大型パネルの加工機器 CNC を有した加工工場の整備に大きく左右された。CLT は、エンジニアリングウッドとして国内の限られた製造加工拠点を介して流通する必要があるため、サプライチェーンの影響を受けやすい材料であることが分かった。

2: 段階的な普及展開と構法計画

CLT 建築の計画は、2016 年 4 月の告示公布後に増加したが、設計・施工期間を経て 2017 年 2 月に CLT パネル工法が竣工し始めた。その普及には、先行して研究の進む構造や防耐火のみならず、ゼロ・エネルギー・ハウス等での住環境向上のための導入等によって導入が加速したことに注目するべきであり、それには、建物性能に対して総合的な視点としての構法計画が重要である。

3: 構法の多様化に向けた展開

大臣認定を受けて建設された、集合住宅汎用モデルに牽引され、CLT パネル工法が告示公布後に展開した。しかし、製造加工拠点による制限から、一部に CLT パネル工法を用いた複合工法により、CLT 建築は普及と建築の大規模化へと向かった。在来軸組構法への CLT 導入事例数は、告示前後で変化がなく、一定の需要がある。さらに、鉄骨造等の異構造への導入事例もみられた。

日本国内で大型木質パネルが用いられ始めた状況を見直すと、黎明期にみられる構法的な未成熟の状況が理解できる。普及の推進には、大型木質パネルを用いるための構法としての理論が必要であり、構法計画全体の体系に位置付けて性能制御の方法を示すことで、この構法を一般化する必要がある。その上で、選択性を広げた多様な構法の展開が期待される。

2.3. 欧米で先行する木質建築

欧州における建築部門のエネルギー消費は、全体の40%を占め、さらに温室効果ガス排出についても36%を占めている。これを背景に、地球温暖化対策と循環資源の活用を目的に、中大規模の木造化が急速に進んでいる。

国際会議を通して実証による知見の蓄積と情報共有が進められ、国を越えた木質化への取組みが広がっている。WOODRISEは、こうした活動としてフランス語圏の諸国が中心となって2017年から2年毎の国際会議を行っているものである。フランスやカナダを中心に、米国、イタリア、ノルウェー、フィンランドといった国々から専門家が集まって議論を続けている。

1990年代にCLTが開発されたオーストリアを中心としたドイツ語圏では、CLTを構成部材として用いた建築は、早くから取り組まれてきた。現在では、大型木質パネルだけでなくコンクリートと木材を組み合わせた複合パネルを用いた構法も展開され、大規模建築の生産におけるパラダイムシフトが起こっている。

筆者らは、こうした欧米諸国の動きの中で、政策からの取組みと、民間企業を中心に推進される大型木質パネルに関する事例を調査することとした。これにより、大型木質パネルに期待される性能を考察し、日本国内の将来的な課題を検討する。

2.3.1. 中高層建築物の木材利用による公共政策とその効果

フランス：官民一体の木造政策と公共案件による実績の蓄積

第21回気候変動枠組条約締約国会議COP21²⁷の議長国でもあったフランスでは、当然環境負荷の低減を目的とした政策を強力に進めている。積極的な木材利用を推進する目的は、石油由来の建築材料からの代替によるCO₂削減である。さらに、国家的なバイオマス戦略転換政策も推し進める等、木質産業全体でCO₂を削減のための政策が進められている。また、都市部に人口が集中しているフランスの政策において、地方における地域活性化は重要な課題であり、木造建築の推進はこれを支えるものであると位置付けられている。地方政策で各自治体が独自の制度を制定し、地域活性化が推進しやすいように政府からの支援を行っている。

ボルドーに拠点を置くFCBA（Institut Technologique Forêt

27 第21回気候変動枠組条約締約国会議COP21は、2015年11月30日から12月12日にフランス・パリ近郊、ル・ブルジェで開催された。2020年で失効する京都議定書以降の新たな枠組みについて、全196ヶ国が参加するパリ協定が採択された



Fig.2-5 CANOPIA, 2016年（公共の開発介入のある協議整備区域 ZAC Saint-Jean Bordeaux に計画された）藤本壮介とレネ・ルセル社 (laisné roussel) による、住居、オフィス、バー、店舗が入る複合木造ビル

Cellulose Bois-construction Ameublement) は、木質材料からプロモーションまでを総合的に行う木（建築・家具）に関する研究施設である。こうした機関が中心となって、技術的課題の解決を担い、施工者がかもつ抵抗感に対して、安心して木質材料を使えるような技術の啓蒙を進めている。

公共が主導する建築を活かして、低炭素の環境基準を条件とする等、木材利用を促進している (Fig.2-5)。法整備として、外壁への木材利用の禁止を解除した。また、木造建築はプレファブ化が可能であるとの期待から、政府は2016年から、大型木質パネルによる集合住宅整備を積極的に進め、設計コンクールという形で木造建築の推進している。コンクールは、4省庁+8団体、150人の専門家による委員会が設計条件を検討して進められた。24プロジェクト（住宅18、事務所ビル4、大学1、ホテル1）で合計10万㎡以上、11階建て～16階建ての計画が進む。ADIVbois²⁸が主導し、社会住宅や都市開発でのコンペティション (Fig.2-6) で木造の提案が選定され、実現に向けて動いている。

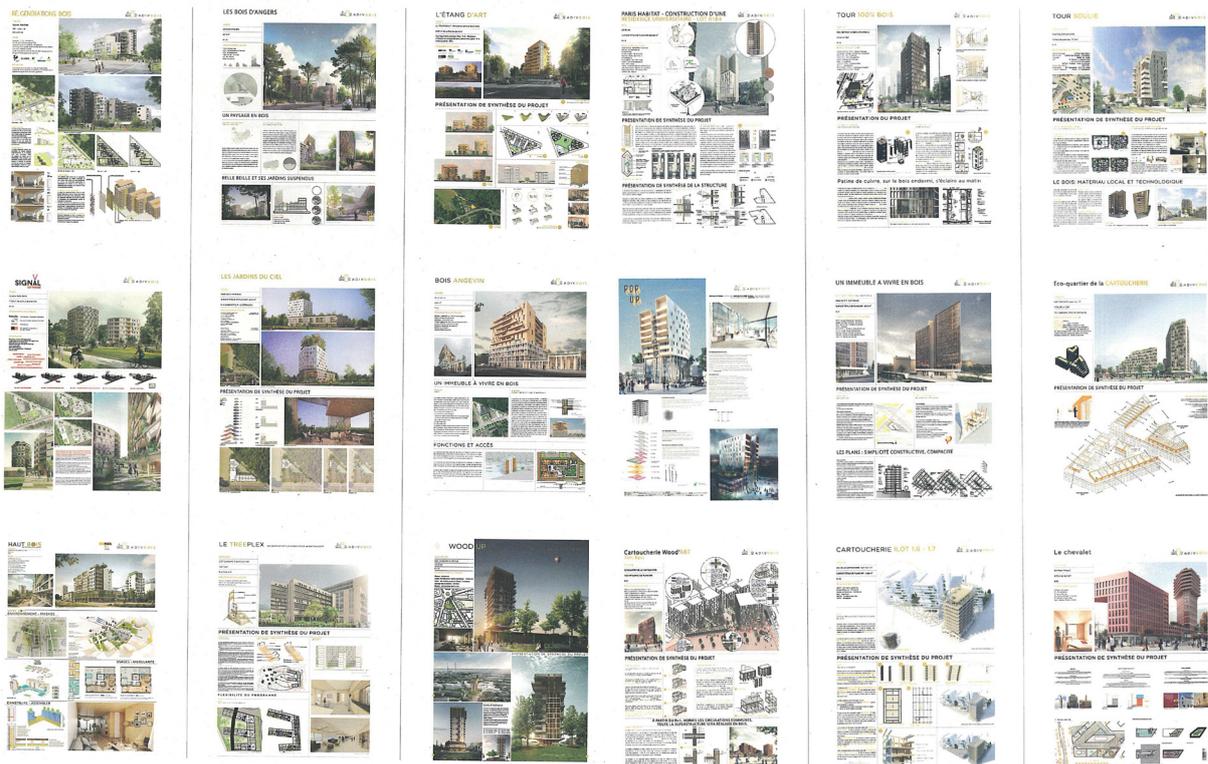


Fig.2-6 ADIVbois が主導して推進された公共設計コンクール（24プロジェクトの内一部）

28 ADIVbois: l'Association pour le Développement des Immeubles à Vivre Bois は、直訳すれば「木に生きる建築開発のための協会」であり、構成員として、事業者、プロモーター、建設会社、建築家、デザイナー、教育研究者、生産者、実業家、技術団体が参画する、木材製品や木造建築を推進する民間団体である。協会は、フランス国内の公共事業等のコンクールを通して、木質プロジェクトを促進している。

カナダ：森林保有国としての木造建築政策

カナダは、木材の生産量は世界4位の1.6億m³を誇る森林保有国である。しかし、木材の利用は、全体の生産量のうち1%にも満たない。このため、木材メーカーらによる木材協議会CWC（Canadian Wood Council）は、「適正価格」「容易な施工」「持続可能」という観点から中高層建築物での木材の利用に注目している。一方で木材以外の業界からのネガティブな活動や抵抗もあるため、協会は地道な啓蒙活動を続けている。

カナダでは1901年建築条例により、木造建築の高さ基準が緩和されたことを受け、1903年にシンシナティで木造とRCの混構造建物が、1905年にはバンクーバーで9階建の木造建物が建設されていた。100年前には中層木造建築が建てられていたが、その後、耐火性能の問題から制限された。

21世紀に入り木造建築が見直されたことで、カナダ国内でも改めて大型木造建築建設のための法整備が開始された。国内の森林資源の活用を目的に、2009年のブリティッシュ・コロンビア州の法律改正から始め、2015年にはカナダ全体の法緩和を実現した。これにより、6階建ての木造建築が建設可能となり、2017年現在木造中高層建築は457棟（建築中含む）を数えるまでに増加した。高層の木造ビルを建設することで、デモンストレーションとして示し、木材利用を牽引することが政府と木材業界の意図であった。

パイロットプロジェクトとして計画された、バンクーバーのブリティッシュ・コロンビア大学学生寮 Brock Common の計画（Photo 2-10）は、CLTパネルを用いて建設された18階建ての計画であり、工期が9.5週間と短期であるのが特徴である。

政策において技術革新のための裏付けは重要であり、高層建築の経済的側面の検証、耐火の考え方の検証、設計・建設のガイドブックの整備を進めている。カナダの研究機関 FPIinnovations²⁹が発行したCLTハンドブック³⁰（Fig.2-7, Fig.2-8）や、高層木造の設計技術ガイ



Photo 2-10 Brock Common, 18階建ての木造学生寮

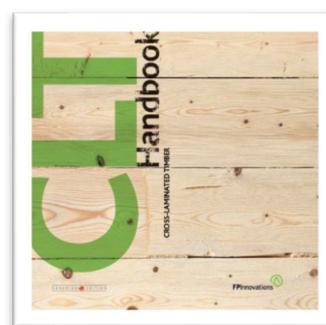


Fig.2-7 FPIinnovationsが発行したCLTハンドブック 2011

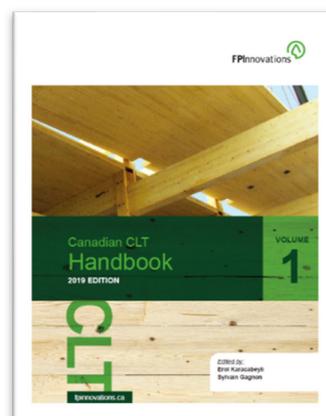


Fig.2-8 FPIinnovationsが発行したCLTハンドブック 2019

29 カナダの森林部門とその関連産業の国際競争力を高めるためのソリューションの創出を専門とする非営利の研究開発民間組織である。カナダのフォリンテック社（1918年設立）、カナダ森林工学研究所（1975年設立）、カナダ紙パルプ研究所（1925年創業）の合併により、2007年4月1日に設立された。

30 参考文献28) CLT Handbook: cross-laminated timber (2011)と参考文献29) Canadian CLT Handbook, 2019 Edition. Volume I and IIが、研究期間FPIinnovationsから発刊され、実務者に向けた詳細データが無償提供されている。

ド³¹の整備はその一環である。他にも、Woodworks³²を通して、技術開発をパッケージ化して技術者にソリューションとして渡すということが行われている。Table 2-6 に、ハンドブックの章構成を示すが、ここには、技術的な要求の内で主要なものが網羅されていると言える。

Table 2-6 FPIinnovations による CLT ハンドブック 2019 の章構成

CANADIAN CLT HANDBOOK, 2019 EDITION. VOLUME I AND II	
CHAPTER 1:	INTRODUCTION TO CROSS-LAMINATED TIMBER: CLT の紹介
CHAPTER 2:	CROSS-LAMINATED TIMBER MANUFACTURING: CLT の製造
CHAPTER 3:	STRUCTURAL DESIGN OF CROSS-LAMINATED TIMBER ELEMENTS: CLT 要素の構造設計
CHAPTER 4:	LATERAL DESIGN OF CROSS-LAMINATED TIMBER BUILDINGS: CLT 建築の耐震性能
CHAPTER 5:	CONNECTION IN CROSS-LAMINATED TIMBER BUILDINGS: CLT 建築の接合部
CHAPTER 6:	DURATION OF LOAD AND CREEP FACTORS FOR CROSS-LAMINATED TIMBER PANELS: CLT パネルの負荷荷重とクリープ係数
CHAPTER 7:	VIBRATIONS PERFORMANCE OF CROSS-LAMINATED TIMBER FLOORS: CLT 床の振動性能
CHAPTER 8:	FIRE PERFORMANCE OF CROSS-LAMINATED TIMBER ASSEMBLIES: CLT 構造の耐火性能
CHAPTER 9:	ACOUSTICS PERFORMANCE OF CROSS-LAMINATED TIMBER ASSEMBLIES: CLT 構造の音響性能
CHAPTER 10:	BUILDING ENCLOSURE DESIGN OF CROSS-LAMINATED TIMBER CONSTRUCTION: CLT 建設の外装設計
CHAPTER 11:	ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF CROSS-LAMINATED TIMBER: CLT の環境性能
CHAPTER 12:	LIFTING AND HANDLING OF CLT ELEMENTS: CLT 部材の揚重と振り回し
CHAPTER 13:	DESIGN EXAMPLE: 設計資料集

31 Technical guide for the design and construction of tall wood buildings in Canadaは、カナダの研究機関FPIinnovationsから発刊され、中高層木造建築において必要となる技術的な資料が示されている。

32 設計者・施工者による2万人の会員に向けた情報提供を行う機関である。設計や施工・製造といった職種によって疑問・課題が異なるため、職業や専門に合わせて回答が得られるようにカウンセラーを配置して対応するものである。

2.3.2. 欧州を中心とした木質建築の大型化の事例

イタリア, チェンニ・ディ・カンビアメント

チェンニ・ディ・カンビアメント (Photo 2-11, 2-12) は、2014年に完成した CLT パネルを構造に用いた公営住宅である。低所得者等の住居を提供する、いわゆる社会保障住宅であり、旧軍事演習場跡地の市営バス車庫の隣に計画された。122 戸を 9 階建ての 4 棟で構成された合計床面積 8,550 m²の建物で、建設当時欧州最大の大規模な大型木質パネル住宅である。

設計者の建築家ロッシ・プロディによれば、建設費は民間投資によって確保されたが、建設費約 1500 万€は、同様に RC 造で設計した場合と比べて 1.2 倍ほどであったとされる。社会住宅のため、投資対象としての信頼性が高かったことに加えて、工期の短縮期間の家賃収入で超過した建設費は回収できたとプロディは主張する。

CLT パネルは、高層棟と基盤部分の低層棟、ならびに共用廊下の回廊すべてに用いられている。E Vホール周りのコア部分も CLT が用いられた、希有な事例である (Fig.2-9)。9 層の建て方は 28 日で完了できたとされ、施工は効率的なものであったと推察される。

計画が始まった 2009 年は、イタリアではラクイラ地震があった都市である。ラクイラの街を壊滅させ、300 人の死者と 6 万人の避難者を出した大災害だったが、当時取り組まれたのが CLT による迅速な復興住宅の建設であった。これにより計画は延期され、2014 年に完成を迎えた。



Photo 2-11 チェンニ・ディ・カンビアメントの高層棟

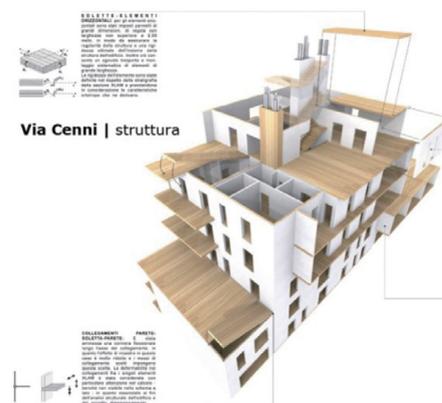


Fig.2-9 構成ダイアグラム

Table 2-7 チェンニ・ディ・カンビアメント建築概要

チェンニ・ディ・カンビアメント, イタリア・ミラノ Cenni di Cambiament, Milano ITALY	
設計	Rossi Prodi Associati
主要用途	主要用途 集合住宅
階数	地上 9 階建て、最高高さ 27m
竣工・工期	施工期間：2009 年 - 2014 年 10 月
構造・構法	木造 (CLT)
延床面積	住宅棟延床面積 8,550 m ²
	122 住戸；A:100m ² (20%) 3~4 部屋、B:75m ² (35%) 2~3 部屋、C:50m ² (45%) 1~2 部屋



Photo 2-12 高層棟の住戸内

オーストリア，ミュールヴェッグ集合住宅

移民増加に伴う、都市部の人口増加の問題は、現在欧州の大都市圏で共有の課題³³である。ウィーンでは、オーストリアがハンガリーを併合していた時点で人口約 200 万人であったが、分離後の一時代において人口が急激に減少した。しかし、その後の人口増加によって、現在は第一次大戦前と同程度まで人口は増加し、首都圏への急速な人口集中が問題となっている。市街地面積の限られるウィーンにおいて、周縁部における住宅供給は、早急の課題である。

ミュールヴェッグ集合住宅 (Photo 2-13, 2-14) は、2006 年に完成した 4 階建ての CLT による公営集合住宅であり、CLT 建築の集合住宅としては、初期の計画である³⁴ (Photo 2-15)。環境に優しく持続可能な住宅を開発し実現させることを目的に、3 住区に分けた設計コンペで採択された。3 住区のうちの一つは、オーストリアの著名な木造建築家であるヘルマン・カウフマンによる設計であり、CLT より大型木質パネル建築を先導する建築である。

都市部の公営住宅における省エネルギー建築として、計 13 棟 252 戸が建設され、主要構造部である外壁、壁、屋根に CLT を使用し、外装材に無塗装木材が用いられている。外壁の外側にはロックウール断熱材を施し、年間暖房エネルギー負荷等を規定したオーストリアのパッシブハウス基準を達成している。



Photo 2-13 ミュールヴェッグ集合住宅ヘルマン・カウフマン設計の北街区



Photo 2-14 ゲオルク・コグラ設計の南街区



Photo 2-15 南街区の施工，大型木質パネルによる建て方

Table 2-8 ミュールヴェッグ集合住宅建築概要

ミュールヴェッグ集合住宅，オーストリア・ウィーン Mühlweg, Wien AUSTRIA	
設計者	北街区：Hermann Kaufmann + Partner ZT GmbH 南街区：Georg Kogler
主要用途	集合住宅
構造規模	木造 (CLT)，地上 4 階建
竣工	2006 年竣工
床面積	8,170 m ² (居住面積 7,617 m ²)

33 東西冷戦終結以降の1990年代の東欧からの人口流入や2000年代のEU圏拡大に伴う流入、その後の移民問題が主な要因として、特に都市圏の人口は増加し続け、飽和状態に向かっているとされる。

34 ウィーン土地供給・都市再生基金は2003年に「木造と木質ハイブリット」をテーマに250戸の集合住宅建設の設計競争を開始して実施された。敷地西側に位置する1960年代の単調な住宅建築群と、東側の緑地帯をつなぐように設計された。都市環境で低炭素の木材造技術の利用が可能であることを示したものである。

オーストリア，モンタフォン水力発電センター

モンタフォン水力発電センター（Photo 2-16）は、約 270 人の従業員のための中央管理棟（エンジニアリング部門オフィス）である。山岳地帯の貯水池に、全長 120 メートルの建屋の 1/4 を湖畔に突き出して計画されている。環境配慮型エネルギー関連事業を積極的に展開している、オーストリアの最大のエネルギー関連企業である Vorarlberger Illwerke AG 社が発注した建物である。2025 年までに毎年二酸化炭素排出量の 12 分の 1 を削減することを目標に掲げる同社³⁵の要求で、建設にも環境的配慮のある構法が採用されている。

大型木質パネル構法につながる複合パネル構法³⁶（Photo 2-17）が採用されている。地上 1 階までは RC 造で計画され、2 階床以上を複合プレファブ床版（集成材+PC）、外装廻りの柱を木造として、平面中央部に鉄骨柱を用いた乾式の混構造である。システム化された構法は、熟練工を必要とせず短工期が可能となっている。これは、CO₂換算で環境負荷の少ない建築を目指した結果である。建設のための一次エネルギー消費量の削減（プレファブ化による効果を含む）、またはライフサイクル CO₂換算では解体時にも大きな利点がある。



Photo 2-16 モンタフォン水力発電センターの外観



Photo 2-17 施工の風景

Table 2-9 モンタフォン水力発電センター建築概要

モンタフォン水力発電センター モンタフォン・オーストリア Illwerke Zentrum Montafon, Montafon AUSTRIA	
発注者	Vorarlberger Illwerke AG
設計者	Hermann Kaufmann+Partner ZT GmbH
施工者	Cree GmbH
構造規模	W+RC（一部S造），地下1階 5階建
建築面積	2,000 m ²
延床面積	11,500 m ²
工事期間	2012-2013年（設計コンペ：2010年）



Photo 2-18 LCTシステムによる LCT ONE（CREE 社本社ビル, 2012年）

35 Vorarlberger Illwerke AG社は、協議会「カーボン・ニュートラル・アライアンス2025」の中心的な役割を担い、参加社は2025年までに毎年二酸化炭素排出量の12分の1を削減することを目標としている。

36 施工会社CREE社が開発した木材ハイブリッド建設システムLCT（Life Cycle Tower）を基本としている。8階建て本社ビルLCT ONE（2012年）にも採用されている。集成材とプレキャストコンクリートによる複合プレファブ床版は、幅3.0m×長さ8.25mと幅3.0m×長さ5.25mの2種類が用いられている。20階程度であれば木造で建設可能な工法とされ、RC造より上部の木質ハイブリッドシステム部分は、わずか6週間で組み立てが完了している。



Photo 2-19 木とコンクリートによる複合パネルの施工

オーストリア, HOHO WIEN



Photo 2-20 ホーホー・ウィーン (HoHo Wien) の外観



Photo 2-21 モデル棟のオフィス内観天井はCLTのフラットな面で構成されている。

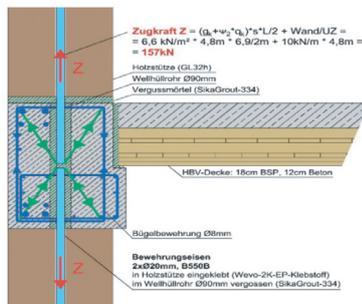


Fig.2-10 接合部詳細

ホーホー・ウィーン (HoHo Wien, Photo 2-20) は、ウィーンの郊外に計画された、約 2 万人の居住人口を許容するスマートシティ開発エリア (The Seestadt Aspern area) の建物である。その一部として計画された、ノルウェーで建設されたミョーストーネット³⁷と並び、世界最高の高さを誇る高層木造による複合ビル³⁸である。コンペを通して、都市開発の cetus Baudevelopment 社と投資会社である Caroline Palfy と Günter Kerbler 社が発注者となって、RLP Rüdiger Lainer 社が設計を行った。持続可能性を追及しており、ホーホー・ウィーンにおいて木質を採用し、CO₂ 排出量を削減し (2,800t 相当)、環境配慮型プロジェクトとして発信されている。

大型木質パネル建築に非常に近く、CLT による木質の大型複合パネルを用いた構法として、注目すべき大規模計画である。全体の構造は、RC 造のコアで水平荷重を負担しながら、居室部分は大型木質パネルを用いたプレファブによる構法で建設された。まさに大型木質パネルによるもので、CLT とコンクリートによってつくられた複合パネルがスラブとなり、集成材による柱で支える³⁹。このため、室内に入ると天井面には短辺方向に梁のない、シームレスな空間となる (Photo 2-21, Fig.2-10, Fig.2-11)。

37 世界で最も高い木造複合ビルとして建設された建物で、オスロから北へ約140kmのブルムンダルに建設された高層木造ビルである。建物の高さは約85.4m、18階建てで、2017年3月に基礎工事が始まり、総工費5000万ユーロ (約61億円) をかけて2019年3月に完成した。本論文では、大型木質パネルを検証するためホーホー・ウィーンを取り上げる。

38 用途構成は、地下に駐車場、1~4階にレストラン、フィットネス、ウェルネスセンター等の商業的用途、5~10階がオフィス、11~18階がホテル、19~23階がサービス付きアパートメントという複合用途で構成されている。

39 柱には幅360mmの集成材を用いて、φ30mmの鉄筋によって上下構造との接続を行っている。柱幅は、下層階と上層階では異なり、負担圧縮力に合わせて設計している。壁には幅4.8m高さ3.5mのCLTパネル、床にはCLT160mmの上にアンカー接続で120mmコンクリートと一体化した全厚260mmの大型複合パネルを用いている。柱上部には鉢巻状のPC梁で、スラブの水平荷重を均等に伝達する。

Table 2-10 ホーホー・ウィーン建築概要

ホーホー・ウィーン ウィーン, オーストリア HoHo Wien, Vienna AUSTRIA	
発注者	cetus Baudevelopment GmbH, Günter Kerbler
設計者	RLP Rüdiger Lainer + Partner
構造協力	RWT+ZT GmbH, Richard Woschitz
防火計画	Kunz
施工者	Handler Bau GmbH
主要用途	アパート、オフィス、ホテル、サービス付きアパートメント、ウェルネス等
構造規模	混構造 (RC コア、木+RC 造) 地上 24 階
最高高さ	84.0m
敷地面積	3,920 m ²
延べ面積	約 25,000 m ²
工事期間	2016.10-2019.12

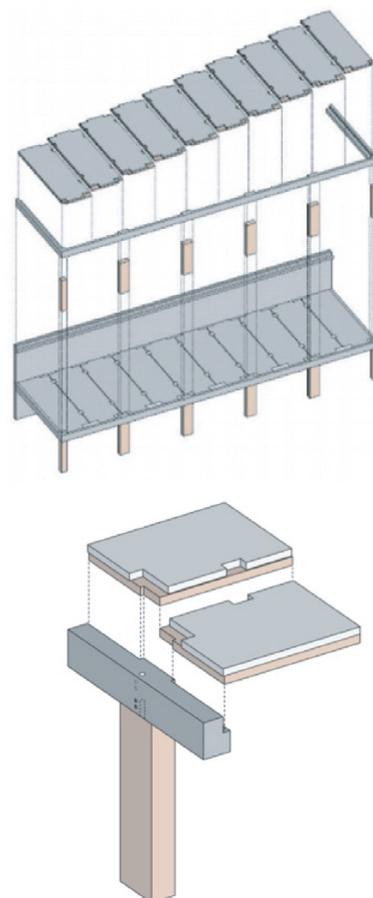


Fig.2-11 HoHo Wien の構造構成
ダイアグラム

2.3.3. 建築の木質化に伴う建物の性能上の課題

前項までの事例調査は、欧米で進む木質建築のごく一部であり、特徴的な事例を取り上げた。大型木質パネルとして CLT を用いた集合住宅等のユニット型居住空間を持つ建築を多く挙げたが、これは、第 1 章で説明した通り、構法計画上の合理性があるからと考えられる。他にも、『100 PROJECTS UK CLT』が公開されている。これは、建築家アンドリュー・ワウ (Andrew Waugh) らが中心となってまとめた、イギリスの CLT 建築 100 事例を扱った資料である。ここにも、居住系建築の事例が 32 事例取り上げられている。Photo 2-22 のダルストーンワークス (Dalston Works) は、その中でも最大の CLT による建物として取り上げられたものである。

こうしたイギリスの木質集合住宅への注目が集まる中、温熱環境に着目した論文が発表されている。オックスフォード・ブルックス大学のクリストファー・ケンドリック (Christopher Kendrick) らによる『Thermal mass in new build UK housing: A comparison of structural systems in a future weather scenario』や、ハートフォード大学のティモシー・アデクンレ (Timothy Adekunle) とマリアレーナ・ニコポルー (Marialena Nikolopoulou) による『Thermal Performance of Low-carbon Prefabricated Timber Housing in the UK』等の研究である。これらは、近年世界的に問題となっている夏季の急激な気温上昇を背景に、建物内、特に住空間においてオーバーヒートを引き起こす懸念を問うものである。これまでは、石材やコンクリート等、蓄熱容量の大きい重量材料によって建物の躯体が造られてきたことから、夜間



Photo 2-22 Dalston Works, London Borough of Hackney, (2017 年, 設計: Waugh Thistleton Architects)
CLT を構造とした集合住宅
100 PROJECTS UK CLT から引用

の冷却によって日中も安定した室内温度を保つことができていたが、躯体が木材に取って代わることで軽量化し、熱容量が不足する可能性があるからである。そこで、換気や遮光によって、室内に籠もる熱を逃がすことの必要性を説明している。しかし、日本では多くの住宅に空調設備が整備されていることや、夏季の快適性は、熱だけでなく湿度の問題が大きいこと等から、室内環境制御を容易にすることが全体的な省エネルギーにつながる。このため、まずエネルギー消費量の多い、冬季の熱容量に着目すべきである。在来軸組構法等の熱容量が低い構法と比べて、密実な大型木質パネルを用いることで、熱容量が向上することを検証する必要がある。

2.3.4. まとめ

欧州で急速に進む中大規模建築の木造化は、石油由来の建築材料からの代替による CO₂ 削減、循環資源の活用と地域産業の発展が主な目的に挙げられる。WOODRISE 等、国際会議を通して活発に議論される中大規模木造の取組みは、政策とも連携しながら強力に進められ、研究機関の裏付けのもとで、公共・民間の計画において確実に実行されつつある。

欧米諸国で実行されてきた木質建築の展開をみると、2005 年頃からオーストリアを中心に、CLT を構造に用いた集合住宅の事例が建設され始める。大規模な木質建築が展開し、純粋な木造だけではなくコンクリートや鉄骨と組み合わせられた混構造の事例が増加する。2010 年以降、大型木質パネルに関しても木材以外の材料と組み合わせた複合パネルによって、性能を確保した事例が見られるようになる。

前節の日本国内の状況を踏まえると大規模化や産業化にあたっては、今後欧州にみられるような複合パネルや、他構法との複合が期待される。大規模化や高層化が進むにつれ、構成要素への要求性能はさらに高度化、複雑化していくため、こうした多様化によって、構法計画の選択肢を増やす必要がある。

また、住空間を中心として進む躯体の木質化によって、建物は軽量化するが、それに伴って熱容量が不足する恐れがある。このため、熱に関する建物の性能といった観点では、断熱性能だけでなく熱容量（蓄熱性能）にも着目する必要があることが示された。

2.4. 東南アジアにおける木質建築の多様化

東南アジアは、多様な生態系が広がる地域である。この地域は、もともと紫檀、黒檀、ウリン、チーク、マホガニーといった高品質の木材の主産地でもあり、竹や籐等の植物材料も豊富なため、多彩な木の文化が育まれたエリアである。伝統的な木質材料に関する技術の蓄積は、さらに技術革新によってさらに多様性を深めている。地域の伝統技術では、土着材料や伝統材料 (Vernacular / Conventional Materials) を用いて、特有のデザインを生み出してきた。さらに、技術革新は木質デザインの多様性を深めている。

一方で、東南アジアは、地震や台風、洪水等の自然災害が多い地域でもある。過去 50 年間に発生した大規模災害の約 2 割がこの地域で発生している。このような災害では、救援や復興の需要に応えるために、緊急時の対応として膨大な量の木材が必要となる。

ヨーロッパや日本では、木材は重要な持続可能な材料として期待され、需要と供給の流れをコントロールするために、適正な木の生育とその消費量のバランスの取れた環状図で示されている。しかし、東南アジア等生態系の多様性が高い地域の現実を見てみると、森林管理政策を実行に移すためには、別のタイプのダイアグラムが必要になってくる。木材の需要と供給がアンバランスで、複雑で、不規則なサイクルを持っている。さらに悪いのは、様々な理由でそのようなサイクルの実施が適切に観察されていないことである。森林伐採による木質材料の枯渇もあって、今でも大量のコンクリートが街づくりに使われている。それでも期待されるのは、環境に関わる専門家たちの努力である。東南アジア諸国でも、都市環境をより環境負荷の少ない木質材料に置き換える議論が始まっている。現地の建築家は、実はこの状況に敏感に反応している。

「Green, Green and Tropical 木質時代の東南アジア建築展」は、この木質時代における新しい建築の潮流として、東南アジア諸国で注目を集める建築家や家具デザイナーによる木質デザインに焦点を当てた展覧会である。筆者は、展覧会のキュレーターとしてアジアの木質建築を調査し、展覧会としてその潮流をまとめた。

展覧会は、2019年2月から5月にかけて京都、浜松、東京で開催された「Green Initiative Week in Japan」の一環として開催されたものである。展覧会に先立ち、静岡県浜松市では、太平洋岸の島国を中心に、日本、インドネシア、シンガポール、フィリピン、マレーシアの専門家を招いた国際会議が開催された。森林・流域管理、木材チェーン、木造建築、グリーン建築、都市生態環境等について議論し、森・都市・人間をつなぐ新しい環境パラダイムへの意識と設計方法論を

生み出すことを目的としている。各国の木質資源の社会的背景は多様化しているが、問題意識は各国とも同様である。

東南アジア諸国の森林面積減少と木質材料の確保

欧州や日本をはじめ、木材はサステナブルな材料としての期待されている。これは樹木の十分な成長とその消費といった、環状のダイアグラムで図式化されることが多い。しかし、東南アジア諸国のような多様性の高い生態系を有する地域を含めると、木材の需要と供給は不均衡かつ複雑化し、いびつな循環を描く必要に迫られる。日本国内で言われているような、1970年代に進められた拡大造成林政策に起因する森林資源の飽和状態とは真逆の森林破壊の問題を抱えている。Fig.2-12に、日本と東南アジアの森林における状況を表したダイアグラムを示す。

森林伐採が進み、木材が希少化しているこの地域では、今なおコンクリートに依拠した都市づくりが展開している。しかし、日本や欧米諸国同様に、鉄とコンクリートによる都市環境を環境負荷の低い木質材料に置き換えていく議論は、東南アジア諸国でも急速に進みはじめ、現地の建築家からも敏感にこれに答えようとしている。

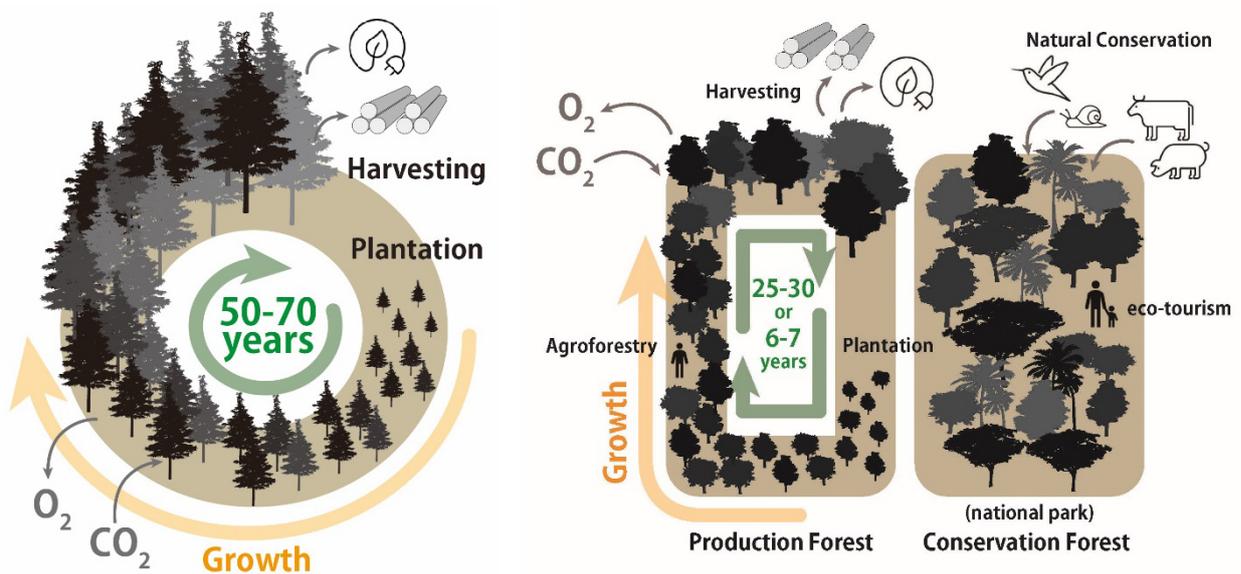


Fig.2-12 森林資源の循環利用イメージ、樹木の生育と消費のバランスの取れた環状図と、東南アジア地域における森林保全政策のダイアグラム

バンドン工科大学のアスウィン・インドラプラスタ（Aswin Indraprastha）によれば、インドネシア国内の森林の現状は、東南アジア諸国の中でも、突出して森林減少面積の大きい国であり、大きな危機感を抱えている。

国土が 17,000 の島嶼からなる、インドネシアの森林面積は、世界でも 8 位と高い。森林面積は、国土の 49.6% に及ぶ 94,432 万 ha (2010 年時点) と広大な面積を覆う。しかし、戦後の国内の森林再生によって、ほぼ 2,500 万 ha で森林面積が横ばいで維持してきた日本の現状と比べると、大きく状況は異なる。1990 年から 2000 年にかけて、森林減少面積は年間平均 200 万 ha にも及び、減少率が緩和された 2005 年から 2010 年でも、減少面積は年間 70 万 ha に及ぶ。驚くべきことに過去 20 年間で、日本が保有する全森林面積とほぼ同じ面積の森林が、インドネシアで消滅したということになる。これらは、森林火災や違法伐採といった要因によるものであるが、さらには、国土が東西 5,200 km 以上に広がり、多民族国家故の土地所有制度や地方分権等による社会変化の混乱も複雑に絡み合っているとも言われる。フィリピンでも同様の状況であり、1934 年に 1,700 万 ha を誇った森林面積も、60 年代からの過剰伐採によって、2010 年には 767 万 ha (国土の 25.6%) まで減少した。

こうなると、当然木材の価格は高騰する。アディ・プルノモ（Adi Purnomo）によれば、インドネシアでは、1 m³ の良質な木材の価格は、車一台分と同等の価格であるとも説明された。こうした背景からしても、日本国内の木材の大量活用を助長する動きとは全く異なった状況が見えてくる。成長率の遅い硬質の南洋材の乱獲を抑えながら新しい木材資源を活かす技術の開拓を進めるために、木質建築デザインを巡る取り組みの多様化は必然的であるとも言える。

2.4.1. 木質時代の東南アジア建築展にみるアジアの木質建築

「Green, Green and Tropical 木質時代の東南アジア建築展」⁴⁰
(2019 年 2 月 5 日～5 月 6 日、建築倉庫ミュージアム、東京・品川



Photo 2-23 Green, Green and Tropical 木質時代の東南アジア建築展の展示会場 photo by JanVranovskys

40 Green, Green and Tropical - 木質時代の東南アジア建築展

会期：2019年2月5日（火）～5月6日（月・祝）（2019年3月4日（月）～3月25日（月）は休館）建築倉庫ミュージアム展示室B（〒140-0002 東京都品川区東品川2-6-10）開館時間：火～日11時～19時（最終入館18時）月曜休館（祝日の場合、翌火曜休館）
主 催：建築倉庫ミュージアム+建築文化保存協会 / 共 催：芝浦工業大学 / 助 成：国際交流基金 アジアセンター アジア・文化創造協働助成 / 協 賛：株式会社パシフィック・ジャパン
キュレーション：青島啓太，若林拓哉 / 会場設計：津賀洋輔

区) (Photo 2-23) は、東南アジア諸国で注目を集める建築家や家具デザイナーによる木質デザインに焦点を当てた展覧会であった。筆者は、この展覧会にキュレーターとして関わり、木質建築・家具、またこれに関わる調査研究資料をまとめ、展示構成を企画した。展覧会は、3つの主要なテーマと、それらの木質デザインを確実なものとして軸をなす技術の変遷と、日本の研究者が取組んできたアジア研究の2テーマの、5構成で編成された。それぞれのカテゴリーを Table 2-11 に示す。

Table 2-11 木質時代の東南アジア建築展のテーマ

(1) <Vernacular / Conventional> 地域性と土着材料
--

伝統的な技法や革新的な技法を用いた建築や家具のデザインを紹介している。特に注目したのは、科学的に再現できない自然素材を活性化させる土着の技術。地域の職人技に裏打ちされた人々の知恵が、地域社会がしっかりと維持されている限り、こうした伝統的な技術を可能にしている。

(2) <Recycled Materials> 再生材料の可能性

針葉樹に比べて熱帯の広葉樹の寿命は理論的に非常に長く、木質材料のリユースやリサイクルが世間の関心を集めている。ここでは、創造性の高い東南アジアの建築家の注目すべき作品を紹介している。

(3) <Emergency Response> 緊急対応の建築

東南アジア地域は世界で最も災害の多い地域であることから、減災や災害後の復興に関する革新的なプロジェクトをまとめた。被災者の喫緊のニーズに応えるために、在来材料を活用した多様な手法や、参加しやすい構法等を駆使している。

(4) <Chronicle Technologies> 技術クロニクル

伝統的な接合システム、道具、材料（木材、竹、カピス貝）から、先進的な技術とデザインの開発を概観できる技術歳時記である。東南アジアの都市は急速に都市化が進んでいるが、他地域から輸入した近代的な材料では独特の気候に対応することは容易ではない。技術革新による新しい木の時代のデザインの幅を測ることができる。

(5) <Asian Survey> アジアンサーベイ

東南アジア諸国の自然の多様性は、多様な生活様式や生息地の文化を育んできた。木造時代の建築やデザインを見るときには、住宅やコミュニティ運営の背景を客観的に調査することが不可欠である。ここでは、1990年代以降、日本の研究者が蓄積してきた膨大な調査データの一部を紹介する。

<Vernacular / Conventional>

科学的に再現できない素材と技術の魅力

我々は、東南アジアの地域で培われてきた伝統的、あるいは慣習的に展開されてきた多くの技術に惹かれる。これらの技術は、スローテクノロジーとも分類され、気候風土と密接にかかわる土着的な魅力がある。しかし、この土着的な技術は常に更新され、新たな驚きを提供してくれる。こうした技術の変遷を一直線上に並べて、東南アジアにみる木質時代の未来の建築像を想像することが、展示の目的でもあった。

自然由来の木質材料をそのまま用いる場合、非常に複雑な自然環境の違いは、素材そのものに微小な違いをもたらす。同じ竹林に育った竹であっても、一本一本は固有のパラメーターを持つ自然材料である。こうした違いをもつ材料を、我々は「科学的に再現できない素材」と呼んだ。伝統的な構法は、こうした素材毎の固有差を包括的に収める寛容なものであることが多い。

注目すべきは、建築家らによって再構成されることで、地域において慣習的に行われてきた構法が、小さな小屋を構成するものから、公共空間を提供するものへと拡大していることである。家具デザインでも、伝統的な加工は新たな視点で改めて研究され、国際的なプロダクトのデザインにつながっている。慣習的な知識は、公共建築の実現や産業化を通して、性能や安全性の確保を含めた科学的な根拠によって裏付けされ、都市空間を形成する構成要素として認められるようになっていった。

<Recycled Materials>

有限の木材を活かし続ける技術

木質時代の建築を考える上で、もう一つ注目したい点は木材という材料の高い加工性による再構築の可能性である。展覧会で示された「科学的に再現できない素材と技術」の中には、木質材料が使用されてきた履歴をそのままデザインに取り込んだような再利用材料の魅力も含まれる。

例えば、かつて、東南アジア地域で海岸の栈橋や外装のルーバー窓等で多用されていたウリンやチークは、耐久性や耐腐食性が高いために再利用が十分に可能であるものが多い。ウリンは、アイアンウッドとも呼ばれ非常に硬質な材料であるが、原産国であるインドネシアにおいても今では希少な材料で、高額で取引されるほどである。このために、建築家たちは、こうした再利用材料にも価値を見出して、再加工して建築材料として新たなデザインに再構築してみせた。これは、ひとつひとつの建築要素を材料に分解して再評価して加工し、新しい空間のための構成要素として計算して組み込む、途方もない

準備を要する作業である。

東南アジアの木質建築にみられる建築の奥行きは、「科学的に再現できない素材と技術」の後ろに隠れたシステムや、惜しまずに注がれた手間の痕跡によるものかもしれない。木質時代の建築に建築家やデザイナーたちが担わなければならないのは、丁寧な材料との対話であり、多様性に対して寛容なものづくりである。

さらには、東南アジア地域をはじめ、世界中の地域の村々で選択されやすい材料は、安価な工業製品や建築材料であることが多い。それらの材料は、亜鉛、セラミック、アスベスト、コンクリートブロック、プラスチック等のリサイクル困難な素材から作られる。再利用の木材を用いたデザインは、こうした安易な選択に警鐘を鳴らすものでもある。

<Emergency Response>

非常時の木質材料と技術の役割

東南アジア諸国の多くが豊富な森林を有する国であると同時に、台風・津波・地震といった自然災害による甚大な被害が定期的に報告されるエリアでもある。緊急対応の建築においては、材料と労力の確保は迅速に行われる必要がある。このため、必然的に地元で産出される材料や伝統的な材料・構法が選定され、非常時対応の建築等に活かされることになる。この時、多くの計画で木質材料が選ばれるのには材料としての加工のしやすさやアクセシビリティ性の高さが理由である。

2.4.2. ヴァナキュラーで伝統的な材料と技術の未来

固有技術としての伝統技術や慣習技術の存在は注目に値する。これらの技術もスローテクノロジーに分類され、風土に密着した土着的な魅力を持っている。この土着技術は常に更新されており、さらなる驚きを与えてくれる。

自然素材は、製品として活用する場合、不規則な凹凸の問題がある。自然環境の中でダイナミックに成長することで、ひとつひとつに微妙な違いが出る。竹は、天然素材としての様々なパラメーターを持っている。このような微妙な違いを持つ素材を「非科学的に再現可能な素材」と呼ぶことができる。従来のすべて手作業による建築システムは、このような自然素材に内在する差異を包括的にカバーすることができていた。しかし現代の一般的なテクノロジーでは、このような自然素材の差異に対応することができないといった課題がある。

今では、建築家の介入によって、伝統的な地域の人々の構法がより大きな公共空間で実践されるようになった。家具のデザインでも同様である。例えば、伝統的な籐の加工は、国際市場をターゲットとした新しい視点から、より洗練された方法で応用されるようになった。工業化により、慣習的な知識は、高性能で安全性の高い都市空間の構成要素として認識されるようになった。

クアラルンプールのペルダナ植物園のパークパビリオンとして、エレーナ・ジャミル(Eleena Jamil)が設計した「The Bamboo Playhouse」(2015年)がある(Photo 2-24)。公共施設の建築材料として、ヴァナキュラーな竹材が受け入れられたことは非常に意義深いことである。竹の成長は早く、循環材料として優秀であり、竹を建築材料として利用することには期待が集まってきた。しかし、繊維の脆性的な破壊構造は、現代建築の構造材料としての活用は難しいとされ、現代的な中大規模の建築、特に公共建築に用いられていなかった。東南アジアの都市は急速に発展しており、建築家は竹等のローカルな素材で公共空間や建物の新しいデザインを生み出している。

東南アジア諸国の研究機関では、伝統的な製造技術の開発を目的とした研究が進められている。バンドン工科大学のアンドリー・ウィディヤウィヤトノコ(Andry Widyowijatnoko)らは、アウトワード・バウンド・インドネシア・エコキャンパスの第1期で竹の構造物「OBI大ホール」(2012年)を完成させた(Photo 2-25)。アウトワードバウンドセンターは、自然環境の中で若者の社会教育を行う施設であり、建築家は8000本の竹の杖を使用して800人収容のホールを構成した。竹のハーフトラスシステムは、巨大なボートのような構造物と一体化するように設計されている。



Photo 2-24 The Bamboo Playhouse
竹の構造体, 設計: エレーナ・ジャミル
(展覧会カタログより引用)



Photo 2-25 OBI Great Hall 竹による
集会ホール, 設計: アンドリー・ウ
ィディヤウィヤトノコ (展覧会カタロ
グより引用)



Fig.2-13 シンガポール工科大学による、3D スキャン・3D プリンターを用いた竹建築に関する研究、SUTD Bamboo Research combines 3D scanning, optimization and 3D Printing (展覧会カタログより引用)

施工に使用した構法は、伝統的な竹の接合方式であった。しかし、大規模なホール空間を構築するためには、従来の構法を技術的に拡張する必要があった。建築家は、すべての竹の直径と節の位置を測定し、トラス構造を精密に設計した。接合には鉄釘、ナット、ボルトを使用し、施工精度を確保している。施工は3次元のデジタルモデルを使用して、職人と情報を共有しながら行われた。

他にも、シンガポール工科大学のエルウィン・ヴィレイ (Erwin Viray) が主導した「竹の構造物のデジタル化」は、自然素材である竹の特性を生かした竹との融合を想定したもので、注目に値する。3D スキャナーで撮影した竹のモデルデータをもとに、わずかな違いで一つ一つの接合部を設計する際に、3D プリントされた人工物を活用して、竹構造物の可能性を広げていく取り組みである (Fig. 2-13)。

地域独自の技術で操作された従来の木質材料は、伝統として継承されてきたが、現在では科学的支援と技術革新によってその役割は飛躍的に拡大している。このようにグレードアップされた素材や構造物の再評価によって生み出される新しいデザインによって、木材時代の東南アジア諸国の街づくりが形作られていくのかもしれない。

2.4.3. 木材の寿命を延ばす技術

加工性の高さを生かした木質材料の繰り返しの利用も、木のデザインで展開されるポイントの一つである。科学的に再現できない素材・技術というテーマで、リサイクルの木質材料によるデザインに注目した。例えば、東南アジアの日常風景のどこにでも広葉樹が使われてきた。港湾施設や道端工事等のインフラ、そしてどんな住宅の仕上げ板や窓枠にも、加工された広葉樹が多用されている。しかし、1990年代以降、森林規制が強化されたことで、ウリン等の一部の樹種を伐採することが非常に困難になった。一方で使われなくなった施設で用いられてきたハードウッドは、これらの木材のライフサイクルが非常に長いことを考えると、施設の目的が変わったからといって廃棄するのは非常に残念で、まだ材料としての価値がある。また、耐久性や耐食性の高さにも注目しておきたい。このような理由から、建築家はこれらの広葉樹材に、リサイクルによる代替価値を見出し、新たな設計手法に組み入れようとしている。このような古材の長寿命化のための設計手法は、建築家が既存の構造物から新しい構造物へと慎重に移行するため、膨大な時間とエネルギーを必要とする場合がある。古い構造物を壊さずに解体し、解体された各要素が新しい構造物にどのように移るかを正確に計算しなければならない。そして、古いものと一体化した新しい要素を用いて製造し、古いものと新しいものの間の接合システムを整えなければならない。

アディ・プルノモ (Adi Purnomo) によって設計された住宅「Tanah Teduh #4 (2013年)」は、この種のライフサイクルに関する可能性を示している (Photo 2-26, 2-27)。建築家は、2つの種類の木材を用いることを決めた。一つ目はカリマンタンのサマリダの栈橋で使用されていたウリンの再生木材で、二つ目は、めったに構造物として使われることのないラバーウッドやココナッツといった材料である。

栈橋に使われていた古いウリンの存在が、柱や梁として全体の軸組要素を構成して構造を支配している。これらの構造部材の寸法は、通常の2倍の太さである。建築家はまた、外壁にリサイクルされたウリンの板材を取付け、建物全体を覆っている。そのため、構造体と外装の仕上げには使い古されたウリンを、内装の仕上げには色白のラバーウッドを使用していることが強調され、印象的な空間となっている。既製のプレハブ住宅では、このような精巧なデザインには太刀打ちできない。柱の削り出しの痕跡や船虫の穴までもが、古さの価値を表現するために美しくに統合されている。

興味深いのは、古材とともに、構造材としては弱いラバーウッドやココナッツの使用にも着目したことである。これらは建築家が将来的に広く共有される必要性を感じている地元の材料である。インドネシアの年間生産量は、ラバーウッドが750万m³、ココナッツが370万m³で、理論的には年間約70万戸と推定されるインドネシアの住宅需要を満たすのに十分な量である。限られた広葉樹の資源に代わる国内の木材資源の探索は、住宅やインフラのための実際の木材ストックからの再生材も含めて非常に重要である。建築家の役割は、木材の連鎖をベースに新しデザインを展開し、木材資源の有効利用による持続可能な社会の展望を与えることである。

耐久性が高く、古くから高級家具や内装、船体等に用いられてきたチーク (Jati) は成長速度が遅く、成樹になるまで100年を要する。インドネシアでは、100年以上前からチーク林の造林が行われてきたため、現在流通する木材は、これらの人工林から産出されたものである。こうした材料の希少性をよく映し出したプロジェクトとして、象徴的なものがバリ島に建つ「Potato Head Beach Club」である (Photo 2-28)。

アンドラ・マティン (Andra Matin) の設計によるもので、まるでコラージュのように木製のルーバー扉がファサードを覆うホテルのクラブラウンジである。作品解説を引用すれば、「ファサードを覆うのは、インドネシア中から集めた6,000点のアンティーク窓やシャッターだ。昔の派手やかな色合いを保っているため、窓のパッチワークともいえる…」とアンドラ・マティン自身が語るように、大きく半円形を描いたオープンテラス空間を囲うように取り付けられているのは、無数の再利用されたルーバー扉である。これらはもともと、70年



Photo 2-26 Tanah Teduh #4
ラバーウッドの利用, 設計:
アディ・プルノモ

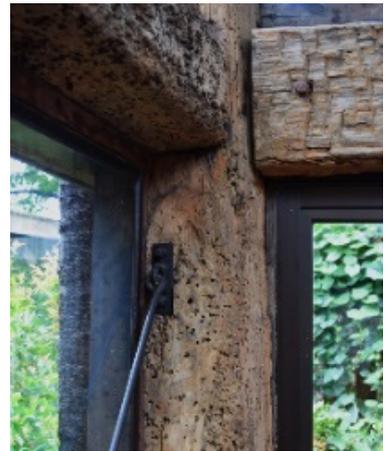


Photo 2-27 Tanah Teduh #4 再利
用材料のウリン, 設計: アディ・
プルノモ



Photo 2-28 Potato Head Beach
Club の再利用建具 (チーク材)
による曲面ファサード, 設計: アン
ドラ・マティン (展覧会カタログ
より引用)

代にインドネシアで多用されたチークのルーバー窓である。近代化とともにルーバー扉の代わりにガラスが取り付けられるようになり、その必要性は失われ、近年、大量に売りに出される事態に陥ったという。しかし、耐久性能が高いチークは腐食せず、そのままの性能を保っている。むしろ、職人によってひとつひとつ丁寧に加工された彫刻のようで、人の労力が無限に広がるような感覚である。現在の材料で新しく造作しようとすれば途方もない費用がかかる。ルーバー扉は、リサイクルの木質材料でありながら、同時に非常に高価な建材として、バリの高級リゾートを象徴するファサードに用いられている。

2.4.4. 緊急時における木質材料の役割と技術

東南アジアは、日本と同様に森林が多く、残念ながら台風、津波、地震、噴火等の自然災害の被害にさらされている。そのため、緊急時に対応できる建築物の整備は各国共通の喫緊の課題である。材料や労働者の迅速な動員は絶対的に必要である。現地での材料の入手可能性や復興方法によって、状況に応じた対策を選択しなければならない。木材は、入手が容易で、加工がしやすいことから、主役となる可能性がある。



Photo 2-29 Streetlight Tagpuro, ストリートライト・タグプロ (展覧会カタログより引用)

このような緊急時対応型のアプローチを議論するには、ノルウェーを拠点にヨーロッパやアジアで活躍する建築家アレクサンダー・エリクソン・フルヌ (Alexander Eriksson Furunes) とフィリピンのレアンドロ・V・ロクシン・パートナーズ (Leandro V. Locsin Partners) が共同で行ったプロジェクトが参考になるだろう。「Streetlight Tagpuro」と題されたプロジェクトは、2013年11月の台風ハイヤンによって破壊された建物の再建プログラムとして、レイテ島のタクロバンに孤児院と学習センターの建設を目指したものである (Photo 2-29)。プロジェクトは、3つの通気性のよい建物で設計されている。各建物は、台風や他の災害時に避難するコンクリートでコア構造とした居室を有する。



Photo 2-30 I-SIGURO DA-AN, イシグロダーンシェルター (展覧会カタログより引用)

評価されるべきは、建物だけでなく、コミュニティの参加に基づいて施設を実現する方法についてのプロセス自体である。ワークショップは、実現のイメージを明確にするための重要なプロセスであった。100回以上のワークショップを経て、建築家は地域住民との対話を重ねることで、子どもたちにとって最適な空間にたどり着いた。建築家は、地元で手に入る素材や技術を探し出し、選ばれたのはシンプルな木造の架構であった。扉や窓は、園児の保護者も含めて地元の人たちが地元の木材で製作した。建築家は、技術のない地域住民でも実現可能なように、現地の技術から厳選した構法を採用した。住民が製造・施工するための建材として、加工性に優れた木材が選ばれたのは

必然だったと言える。その結果、建設過程では、住民の能力開発や生活訓練にもつながった。

同じく 2013 年のスーパー台風ハイヤンの被災者のために、サンカルロス大学のダニーロ・ラビナ (Danilo Ravina) らのチームによって設計された災害用シェルターは、地元の木材で製作することができるプロトタイプである。「I-siguro da-an」と名付けられたこの避難所は、災害直後の避難段階から居住環境確保までの過渡期を支える住宅ユニットとして、簡易的な要素で構成されている (Photo 2-30)。公的機関の脆弱性を考慮すると、完成したシェルターを一度に大量に供給することはできないため、セルフビルドで建築できなければならない、自力で簡単に組み立てることができる必要がある。これを目的に開発されたシェルターは、小さな小屋の形をしている。その主な構造は、木とココヤシ材で軽く、かつ、丈夫な連結フレームである。嵐や洪水に抵抗するために、床を高くし、壁を傾斜させ、家具を内蔵した剛性のあるユニットとして設計されているが、それは非常に迅速に組み立てることが可能だ。材料調達と施工を計画的に行うことで、2 週間という短期間での施工が可能になる。このような緊急時の対応力は、災害後の復興には欠かせない。

2.4.5. CLT や集成材等の代替素材への取り組み

前項までの個々の建築家らによる革新的な取り組みに加えて、材料供給の側からみる木質材料の展開にも注目するべきである。東南アジア諸国でも中大規模の木造建築の実現に向けた取り組みが進む。この中大規模の木造建築を実現するために注目されているのが、CLT (Cross Laminated Timber) である。

ジャカルタの WOODLAM INDONESIA 社 (Photo 2-31) は、2016 年に設立された東南アジアで唯一 CLT を製造する企業である。欧州向けに大型の建具を製作・販売してきた Permata Door 社 (1974 年) を親会社に持つ。同社は、元々硬質の南洋材を用いた建具を製造してきた実績から、工場は大判のパネルを加工するための CNC 加工機やプレス機等を保有する。このため、重量のあるパネル状の木材加工に長けていたとも言える。

WOODLAM INDONESIA 社が協力して、計画されたのが第 16 回建築ヴェネチアビエンナーレ国際展示会に出展され、特別賞を受賞したアンドラ・マティン設計による CLT を構造に用いたパビリオン「ELEVATION」 (Photo 2-32, 2-33) であった。インドネシアにおける標高毎のバラエティーに富んだヴァナキュラー建築をらせん状の階段空間を上りながら体験するものである。インドネシア産のジャボ



Photo 2-31 WOODLAM INDONESIA 社の工場、4 台の CNC 加工機が並ぶ

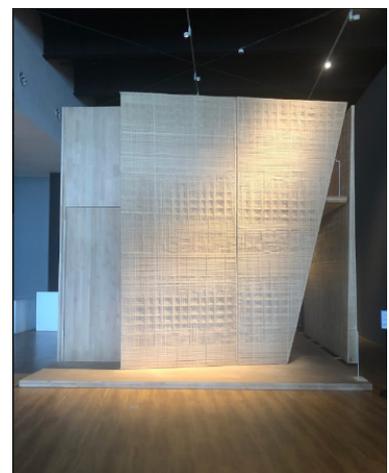


Photo 2-32 インドネシア近現代美術館 MACAN に展示されているアンドラ・マティン設計のパビリオン

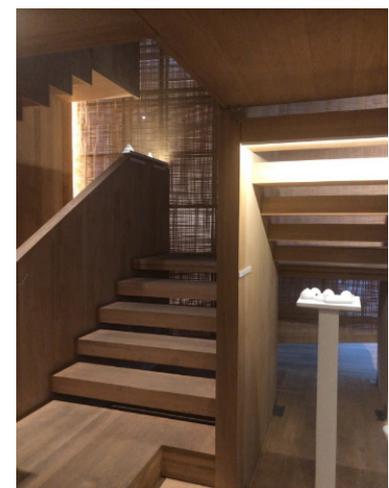


Photo 2-33 アンドラ・マティン設計のパビリオン「ELEVATION」に使われた CLT の構造



Photo 2-34 フィリピン、セブ島のマクタン・セブ国際空港ターミナル

ン材 (Jabon) を用いて製造された CLT を工場加工して、展示会場まで搬送して組み立てられた。

またフィリピンでは、曲面集成材を使用したマクタン-セブ国際空港ターミナル (2018 年) が、香港の設計事務所 Integrated Design Associates によって設計された (Photo 2-34)。ここでは、オーストリアの RUBNER 社製の集成材が使用されている。セブ島の顔であるこの空港は、美しい木架構でデザインされており、東南アジア諸国の木の時代を象徴しているとも言える。

2.4.6. まとめ

東南アジア諸国における木質建築の需要拡大は、欧米と同様に急速に進んでいる。一方で、この地域の木材は、伐採までの成長に時間のかかる樹種や多様な樹種を含むために、原材料の流通状況は様々である。このため、日本で見られるような、豊富な森林資源量を背景とした一定量かつ大量の供給の可能性とは状況が異なる。加えて、森林破壊からの保全という課題も孕むため、木質化推進について特有の取り組みがみられた。その中で、多様な原材料を用いた CLT が製造され、今後、大型木質パネルの多様化にも活かされていく可能性がある。

東南アジアの木質建築の多様化の流れは、木質材料の幅広い選択性を示唆していると言ってよい。代表的な木質材料の活用として、下記のもので挙げられる。これらは、多様な要求に対する選択肢として位置付けられるものである。

1. ヴァナキュラーで伝統的な材料と技術の軸線上に位置する、木質技術の展開による高度化
2. 木材自身の寿命を正確に評価した、再生材料の活用
3. 災害等の緊急時における地域性や加工性を有効性とした木質材料と構法の活用
4. CLT や集成材等のエンジニアリングウッド技術の展開

ただし、これらの活用事例は、多様な展開が進んでいるという意味で、評価するべきである。産業化という視点から考えると、ひとつひとつの構法計画が確立しているとは言えない。

2.5. エチオピアの住宅における構法と性能

ここでは、建築の工業化が十分に進んでいない地域における、建物の変容について検証する。期待するのは、構法的な観点から見て、その変容が建物の性能にどのような影響を及ぼしているかを明らかにすることである。

乾燥気候でありながら年間を通して気候が安定しているエチオピアを事例に、伝統的な住居が近代化によって構成要素が変更され、急激に室内環境が変わっていることを対象とする。近代化は、明らかに国外から輸入された安価な材料や構法によって急速に進んでいる。ここで問題視すべきは、構法として計画された上で変更されているかであるが、残念ながらそうではない。不十分な構法計画の検討が居住環境を変容させている可能性がある。

2.5.1. 伝統住居における居住性の変化

エチオピアの北部、ティグライ地方の伝統的住居 (Photo 2-35) には、地元素材と自然の気候に基づいた独特な建築要素が多くみられる。しかし、それらのヴァナキュラーな技術は年々衰退し、近代的な様式と材料の導入によって大きく変化している。それらの新素材やライフスタイルの変化によって、住宅の室内温熱環境が変化してきた。本研究は、建物の十分な快適性を持ち、持続可能な住宅として伝統的な技術の環境的な再評価を行い、伝統住居の近代化による、設計を開発する基礎データを提示する。

居住性としては、温度と湿度が最も重要な要素であるが、建築環境技術は、これらの要素を制御するために、特に日本のような困難な状況にある地域では慎重に開発されてきた。現状のエチオピアにおける住居において、不快な住環境を示すためには、壁と天井表面温度に焦点を当てる必要がある。そして、これらの住居における変化の要因は、いくつかの生活条件の近代化にあることが推察される。特に、遮熱はエチオピアのような太陽高度の高い地域では特に重要な建物性能であり、屋根の構成要素の変更は、室内環境に大きな影響を与えているはずである。



Photo 2-35 エチオピア、ティグライ州の伝統住居

2.5.2. 調査の背景

建築の近代化によって、エチオピアの伝統的住居の建築材料や構法を大きく変化させた。特に、木材の不足は深刻で、気候変動や植生の破壊によってエチオピアで産出する木材が極端に減少したことから、屋根の構成は大きく変わっている。建築材料として用いられる大径木は、今では伐採に制限がかけられたこともあり、代わりに用いられるようになったのが細いユーカリの木と、効率的に雨を防ぐこと

ができる軽量の波板鉄板（corrugated iron sheets）である。

元々、伝統的な構法は、居住性を確保して気候条件に適応するために、経験的に開発された多くの持続可能な建築技術を含む。しかし、近代化による材料の変化は、室内環境の予期せぬ変化につながる。構法的な視点に立った考慮の不在が住環境の崩壊の要因となる可能性がある。

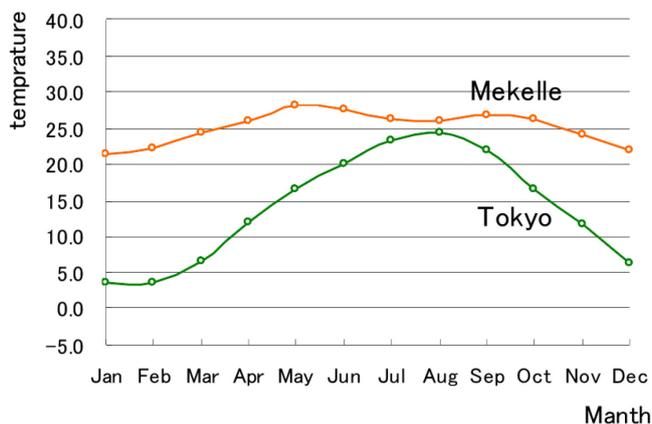
ゼロ・エネルギー・ハウスに関する先行研究

著者は以前、3つのプロジェクトにおいて、いくつかの持続可能な設計と建築技術を報告した。3つのエネマネハウス（2013, 2014, 2016）は、ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）⁴¹の実証事業として建設された。日本では、近年の地球温暖化対策や電力消費の増大の影響から、建築分野においては、家庭部門での省エネルギーが求められている。これらのプロジェクトは、住宅の環境性能を改善することによりエネルギー負荷を低減することを試みた計画である。

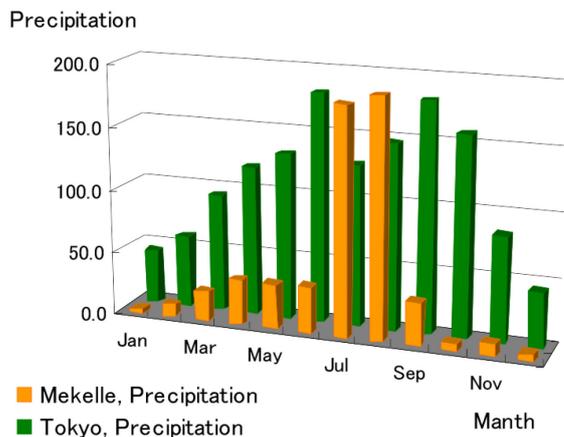
快適な住まいを維持するためには、「空気温度」、「放射温度」、「気流速度」、「湿度」、「着衣量」および「代謝量」の6つの要素をコントロールすることが重要である。エチオピアの気候は日本と違って、一年を通じて湿度が低くて安定している。したがって、建物内の快適な居住環境を有するためには、「空気温度」、「放射温度」、「気流速度」の3つの要素を重点的に考慮するべきである。本研究で計測したエチオピア・ティグライ州の州都メケレでは、北緯13度29分と赤道に近いものの標高が2,254 mと高い。このため、年間を通じて平均気温が25度近くであり、室温調節にはそれほどエネルギーを必要としないと言える。一方、調査に入ったいくつかの住宅は高い室内温度と悪い空気循環を示した。本論文では、特に「放射温度」に焦点を当て、住宅環境の悪化について論じた。東京とメケレの気候条件の違いを Fig.2-1 に示す。

41 経済産業省によれば、ゼロ・エネルギー・ハウス、通称ZEH（ゼッチ）とは、「外皮の断熱性能等を大幅に向上させるとともに、高効率な設備システムの導入により、室内環境の質を維持しつつ大幅な省エネルギーを実現した上で、再生可能エネルギーを導入することにより、年間の一次エネルギー消費量の収支がゼロとすることを目指した住宅」のことである。経済産業省では、「2020年までにハウスメーカー等の建築する注文戸建住宅の過半数でZEHを実現する」という政府目標の達成に向け、課題と対応策を整理した「ZEHロードマップ」を関係省庁等と共に策定（2015年12月）し、当該ロードマップに基づき普及に向けた取り組みを行った。

Ethiopia, Japan Temperature



Ethiopia, Japan Precipitation



Created by author by using data from the NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center; New et al. 2002

Fig.2-14 エチオピアメケレ市と東京の気温差および降水量の比較

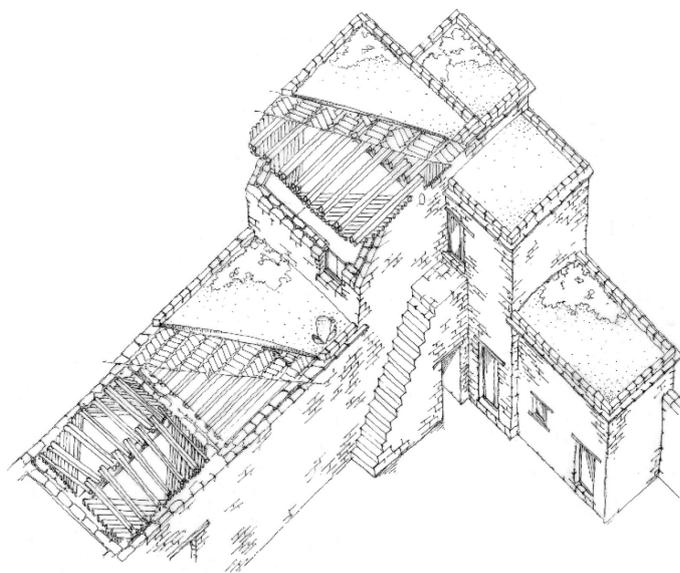


Fig.2-15 伝統住居の構法アクソメ図（屋根が木材と土で覆われた伝統工法）

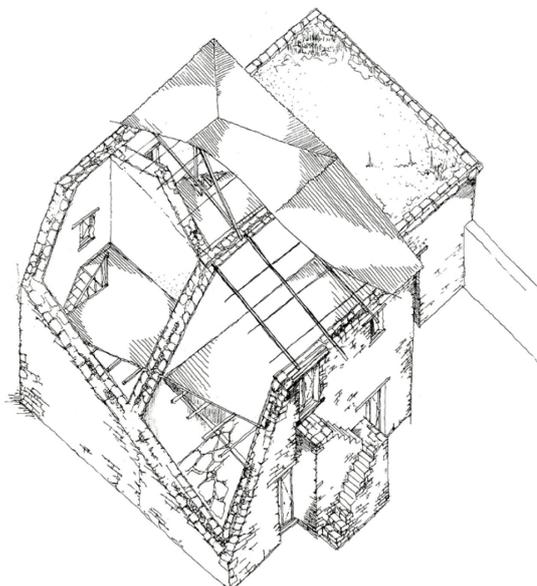


Fig.2-16 伝統住居の構法アクソメ図（屋根が波板鉄板に葺き替えられたもの）

2.5.3. ティグライ地方における伝統住居の熱測定



Photo 2-36 伝統住居の土で覆われた陸屋根

メケレ市内、および市街地から東の郊外アイナレム地域において、住居内部の熱測定を行った。いくつかの伝統的および現代的住宅において表面温度をサーモカメラにより測定し、内部状況を比較した。エチオピアのティグライ地方にある伝統的な住居は「HIDUMO (Fig.2-2, Fig.2-3)」と呼ばれ、その壁は地元近隣で採掘される石で築造される組積造の建物である。伝統的な構法では、組積で積み上げられた壁躯体を垂直に立上げ、大径木の梁と小梁を掛けることで支えられ、この上に木板を並べ、さらにスレートと土で覆われて構成されていた (Photo 2-36)。

近年、寸法精度が高く、施工が容易なコンクリートブロックが地元の石に代わって使用されているが、これは伝統的に用いられてきた石材よりも蓄熱性能は劣るものの大きな環境変化を生むものではないと考えられる。しかし、屋根においては近代的な材料である波形鋼板の簡易屋根が普及したが、これは戦後の国外からエチオピアに輸入された材料である。環境の変化や植生の破壊で木材が不足したこともあり、伝統的な木材と土に取って代わった可能性がある。

2017年3月25日にメケレ市郊外のアイナレム地域に位置する2棟の建物を対象に熱計測を行った。躯体からの放射温度はサーモグラフィカメラ「FLIR ONE⁴²」で撮影された。

2.5.4. 熱測定結果

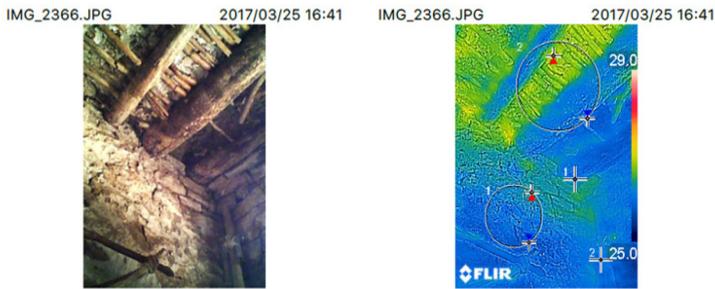
2棟の住宅の各部屋において、いくつかの熱画像を撮影した。特に顕著な結果を示した、伝統的な天井（木材と土による陸屋根）と近代的な天井（波形の鉄板による片流れ屋根）の表面温度の違い Fig.2-20 に示す。これら2つの部屋は、同じ敷地内にある。伝統的な屋根が掛けられた部屋は、天井面の表面温度が約 26.0℃と低く、放射温度が快適性を保つために良好な熱環境であることを示した。

一方、近代的な天井が掛けられた部屋の内部は、非常に過酷な環境であった。日中の外気温が 25.0℃でありながら、壁面の表面温度は 22.5℃とやや低温を示したが、天井面の表面温度は、45.6℃と非常に高温であった。この部屋の天井は、波形の鉄板で覆われており、天井面には何も設けられておらず、鉄板の表面は直接天井面に露出している。これは、天井からの危険なほどの高い放射温度を示しており、明らかに直射日光によって加熱されて発熱しているものである。

また、別の要因が室内温度の上昇に起因することも分かった。Fig.2-

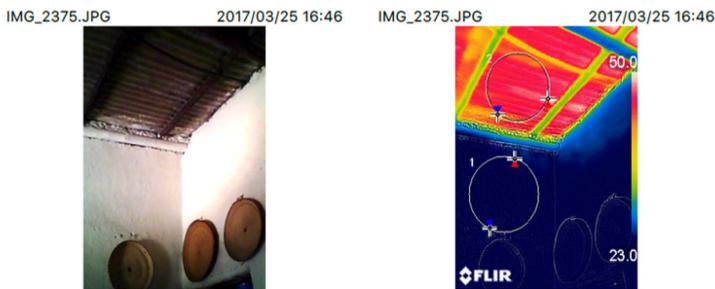
42 FLIR ONE Gen 2 (Sensitivity: Ability to detect temperature differences as small as 0.18° F (0.1° C), Certifications and Standards: FCC, CE, RoHS, CAN ICES-3 (B)/NMB-3(B), UL)

4は、屋内に置かれた家電製品による影響を示している。元々この地方では、料理等における加熱作業は野外で行われることが多いが、生活の近代化によって、調理機や冷蔵庫等の電気機器が導入され、屋内に設置されるようになった。これらの機器によって発生した熱は、周囲の壁を暖め続け、その結果、室温が上昇していることもわかった。



Traditional Roof by Soil

Traditional Construction:
Temperature (degree)
< Wall Surface >
Circle-1: 25.8 - 26.5 (Ave. 26.2)
< Ceiling Surface >
Circle-2: 26.0 - 27.1 (Ave. 26.5)



Modern Roof by Steel

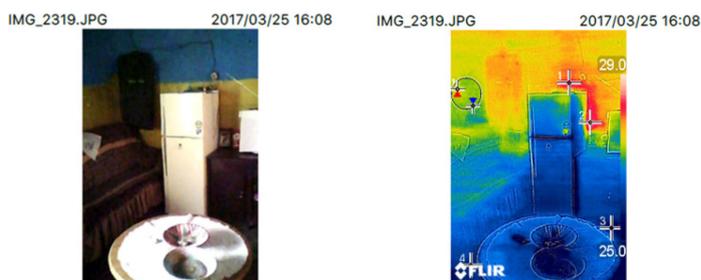
Modern Construction:
Surface Temperature (degree)
< Wall Surface >
Circle-1 : 20.9 - 24.6 (Ave. 22.5)
< Ceiling Surface >
Circle-2 : 41.5 - 48.3 (Ave. 45.6)

Fig.2-20 サーモカメラによる天井面の放射温度計測



INJERA Cooking Machine (2h after cooking)

Traditional Facility:
Temperature (degree)
<Wall Surface>
Spot 1 26.1
Spot 2 25.7
Spot 3 26.0



Temperature Around Refrigerator

Modern Facility:
Surface Temperature (degree)
<Wall Surface>
Spot 1 28.3
Spot 2 28.6
Spot 3 25.5
Spot 4 25.8

Fig.2-17 サーモカメラによる屋内の壁面放射温度計測

2.5.5. 考察

前項の結果に基づいて、住宅の快適性を考察する。特に、天井面の温度上昇は、室内環境を極端に悪化させる大きな要因である。一般的に、快適性を確保するためには、頭と足の温度差を3℃以下に保つことが望ましいとされているが、天井からの熱放射のため、日中の室内環境は非常に厳しいと言える。実際に、ヒアリングによる結果から日中の生活はほとんど鉄板屋根による建物の室内では行われず、別棟で過ごしているか、または外出していることが分かった。さらに、夜間は熱放射によって急激に冷やされることも懸念される。

この結果を考察すると、もともとティグライ地域に広がっていた伝統的な木材と土による陸屋根は、日射の影響と室内天井温度の調整にとって非常に重要な環境的要素であった。木材は、熱伝導抵抗が高く断熱性に優れ、その上を覆う土によって遮熱性能が確保されていたと考えられる。これにより陸屋根表面への直射日光から室内の熱環境は巧みに遮断され、快適性を保護していた。また、伝統構法の躯体に用いられる石材や土等の蓄熱性能も、放射温度の安定化と室内快適性の向上に大きな影響を与える環境要素であると言える。

2.5.6. まとめ

外皮性能の影響は、居住性を大きく左右する要素であり、構法計画によって建物の性能を検討した上で各部位の構成要素は選択されなければならない。エチオピア等のヴァナキュラーな伝統住居が残る地域において、こうした環境性能は、経験的に気候合わせた構法が取り入れられてきた。伝統的住宅の構法は、建築の環境要素として再評価されるべきである。

伝統住居の近代化による変化に伴って、筆者は、居住性の変化を明らかにするために、エチオピア北部のティグライ地方の伝統住居の住環境を調査した。壁と天井の表面温度をサーモカメラで測定することにより、天井面の表面温度は48℃を超え、異常な放射熱により室内環境が害されていることが確認された。極端に不均質な熱環境から居住性は著しく損なわれている。

国外からの影響を大きく受け、伝統的な構法の構成要素である材料や設備は近代化され、無計画に住空間を変化させた。エチオピア・ティグライ州の伝統的な木造屋根は、構法計画が十分にされずに構成要素が変更されることによって、住空間の性能は著しく悪化することが確認された。

2.6. 小結

本章では、国内外の各地域において、木質建築を巡る現状を調査することで、大型木質パネルを用いた構法がどのように展開しているのかを明らかにした。さらに、普及が進んでいない地域で建物の性能に生じている現象の実態を明らかにすることで、構法計画による建物の性能との影響関係を端的に示した。

まず、第2節「日本国内における CLT 建築の黎明期」では、国内での大型木質パネル建築の現状を把握した。特に、2000 年以降急速に利用が始まった CLT を事例に、状況の把握のための調査と類型化を行った。2016 年の CLT パネル工法の基準化によって、事例は増加したが、建物の性能を満たす上での構法計画的な視点による整理はされていなかった。

第3節から第5節に亘って、それぞれ欧米、東南アジア、アフリカの木質建築に関連する事例を取り扱った。これは、構法計画としての成熟の状況を比較してみるためである。上記の3地域を見ることによって、木質建築を巡って産業化が進み、目的に応じた多様な選択肢となっているか、その全体像を把握できた。Fig.2-18 に、各地域において木質建築がどのように展開しているかを現した図を示す。

エチオピアの伝統住居は、多様性とともに近代化による画一化を受けて多様化には幅があるが、地域の産業化といった観点では進んでいない。東南アジアでの木質建築は、植生の多様性を背景に、極端に多様化が進み、独自に展開していることから産業に結び付いているものは限られている。欧州やカナダで展開する木質建築は、複合化

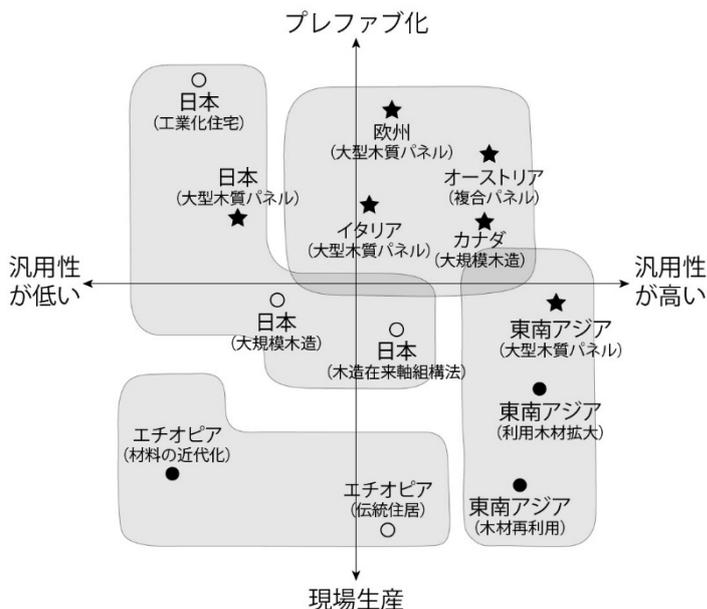


Fig.2-18 木質の構法を巡る各国の状況

による多様化が進み、選択肢の幅が広がり始めていると言える。

日本の木質建築については、もともと非常に住宅供給において産業化が進んだ木造在来軸組構法等も見られるが、大型木質パネルについては、産業化と多様化の双方が進んでいないことから、将来的な展開としては、欧米でのモデルを追って今後展開することが望まれる。

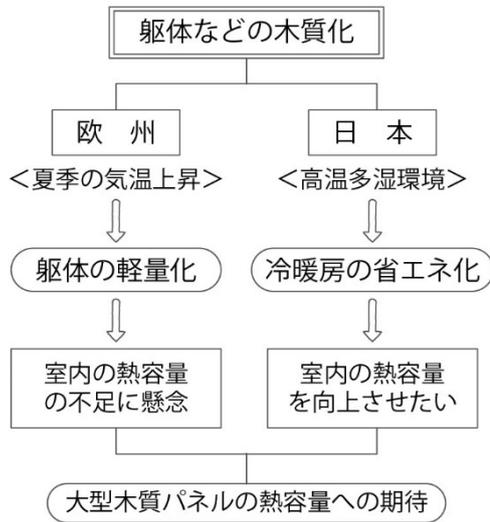


Fig.2-19 欧州と日本における室内温熱環境の課題

一方で、建物の性能に着目すると、構法計画の充足が大きく影響していることが各地域の状況から明らかになった。

エチオピアをはじめとする近代化が遅れた地域では、構法が十分に計画されないことによって、居住環境の重大な欠陥につながることを示唆された。内部環境の性能を上げ、生活上の要求を満足することが建築の目的であるとするならば、建築を構成する上で材料や構成方法の不備が、建築の性能低下につながる可能性がある。日本において大型木質パネルが用いられ始めた状況を見直すと、黎明期の特徴として、構法的に未成熟な状況が起因して普及できていないことが懸念される。

先行して木質建築が展開されている欧米の状況を見ると、建物の性能の観点から要求される性能を注視することで、日本における将来的な課題が示唆できる。欧州では、夏季の気温上昇を背景にした、温熱環境に注目が集まっている。住空間を中心として進む躯体の木質化によって、建物は軽量化するが、それに伴って熱容量が不足する恐れがある。このため、熱に関する建物の性能といった観点では、断熱性能だけでなく熱容量（蓄熱性能）にも着目する必要があることが示された。

これらの状況を総じてみると、産業化とともに多様化を進めることが必要であるとも言え、このため、大型木質パネルを用いるための構法としての整理が必要であり、構法計画全体の体系に位置付けて性能を制御する方法を示すことで、大型木質パネルを用いた構法を一般化する必要がある。

第3章

大型木質パネルを用いた建築に関する

構法計画理論

第3章 大型木質パネルを用いた建築に関する構法計画理論

3.1. はじめに

本章では、大型の木質パネルを用いた構法の位置付けを目的に、国内における構法計画学の展開を背景として、大型木質パネルによる構法をどのように扱うべきかを述べる。体系化された構法計画理論に沿って検討を行うことで、大型木質パネルを巡る体系の見直しを図る。

建築における大枠の体系化は建築構法学に示されているが、大型木質パネルを用いた構法の位置付けは不明確であり、改めて整理する必要があった。第1章で述べた通り、大型木質パネルは、木質の材料でありながら、製造過程や建方の過程では、木質構造の一つとして考えるよりも、コンクリートパネルに代表される大型パネルを用いた構法と類似することに注目するとよい。搬送や揚重に影響するパネルのサイズや、建方工程の流れ、パネルの接合部設計等、建物の生産という観点から、大型木質パネルは、大型パネルの一部として位置付けるのが有効である。

建築を構成し統合するための方法論に至るまでの構法計画学を概観し、その理論が1990年以降に開発が始まった大型木質パネルを起点としてどのように見直す必要があるのかを示すことを目的としている。内田祥哉もインタビュー⁴³で明らかにしている通り、これらの要素に関しては細分化すればするほど甚大な数になることから、開発等によって必要となった時に、その都度、蓄積を行うことが重要である。

まず、木質の大型パネルがどのようにして製造され、施工が行われていくかの概略を述べる。これらは、筆者が実際の設計⁴⁴の中で蓄積してきた知見を体系毎にまとめ直したものである。

43 参考文献62) 建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究

44 大型木質パネルを用いた建築として、筆者自身が設計して実現した、エネマネハウス 母の家2030（東京都東雲，2013，その後、会津若松実験棟として福島県会津若松市に移築），エネマネハウス 継ぎの住処（神奈川県横浜市，2014，その後、WOOD.ALC実験棟として福島県郡山市に移築），湯川村CLT共同住宅（福島県湯川村，2015），つくばCLT実験棟（茨城県つくば市，2015），エネマネハウス わたしの家（大阪府大阪市，2016），いわきCLT復興公営住宅（福島県いわき市，2018）がある。

3.2. 構法計画学の潮流

3.2.1. 建築構法のはじまりと構法計画の変化

内田によれば、建築構法とは、建築物の実態であり、その属性として性能と機能を含んだものである⁴⁵。部材と部品で構成される建築物と、生産されるとき条件、完成後の維持管理される条件を包括するとしている。建築を構成する方法として、広い意味をもつとしている。

「建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究⁴⁶」によれば、建築構法は1960年代に内田によって創立された、新しい学問分野であるとしている。建築構法研究は内田の東京大学での研究室活動を通して、1960年前後のビルディングエレメント論によって開始されたとしている。1970年前後を境に構法計画へと展開し、建築の生産分野で重要な役割を果たした。

構法計画学が成立していった流れからみると、内田による初期の研究であるビルディングエレメント論から構法計画論へと移行していく中で、行き詰まりがあったとしている。「ビルディングエレメント論においては、建築をBEに分解し、BE毎の構法リスト化・性能把握を目指した」としているが、すべての構法に関する総覧を整備することが目的であり、設計はここからの選択により行われるとしていた。しかし、選択した後の総合のプロセスを、建築家の経験と創造というブラックボックスに委ねていたために、設計の学としては行き詰まりをみせたとされている。

建築学のあらゆる分野を統合して計画するのが構法計画の役割である。新しい材料、構法によって、空間の性能は大きく変わる。そのために、それらの開発の都度、構法を見直す必要があり、建築としての統合の方法を示しておく必要がある。

45 参考文献54) 建築構法のp.2で、内田祥哉は、建築構法の位置付けを述べている。それによれば、構法という語は、『不燃家屋の多量生産方式』（1945年／岸田日出刀著）にある「鉄骨乾式工法の研究と実施」が初出であるとして、「構法という視点が、建築物が造られ、使われ、維持されながら、社会の中で、生き続ける姿を見つめることである。」としている。

46 参考文献62) 建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究では、「内田は、BE論の導入に当たって、建築の分類に関してA) 目的別分類、B) 骨組の材料による分類、C) 職手別分類、D) 原材料の分類を挙げ、各々に対応する学問分野としてA) 建築計画学、B) 建築構造学、C) 建築施工学、D) 建築材料学を示している。そこに新たにE) Building Element による分類を挙げ、これに対応する学問分野の不在を指摘して、BEに対応する学問体系の整序を課題とした。」としている。

内田は、「建築構法」で構法の価値について次のように述べている。「構法の価値は、目的に対する評価できる。(中略) 同じ構法でも、時代により価値が異なり、ある時代に高い価値を発揮していた構法も、時代が変わり社会情勢が変わると価値が衰える。」として、構法計画の要素すべてを事前に掴めるものではない⁴⁷としていることから、構法計画は材料や時代変化に合わせて動的にとらえる必要があると言える⁴⁸。

3.2.2. 構法計画学とは

構法計画学は、部位毎の構法や性能を建築全体に統合し、あらかじめ計画することを目的とした学問である。内田が活動をはじめの背景には、議論当時、建築学では構造や環境等に細分化されていたため、全体を統合してまとめる領域がないとの問題意識があったとされている。

真鍋による構法計画に関する一連の手法体系化は、『図解建築構法計画講義「もののしくみ」から建築を考える』に網羅されている。真鍋は、「構法計画の目的は、それぞれの専門分野での研究や経験の結果として得られた知識や情報を総合して、実際の建物の具体化に役立つ形（手法）に結び付けていくことである。」として、そのために必要となるのが理論としての「構法計画」であると説明している。

このために、構法計画は「総合的・総論的とならざるをえない。」として、他の学問分野である材料、構造、防火、環境工学等で基本となる分析的な学問手法で対応できないとの葛藤を述べている。一方で、設計活動との連携が重要であるとしながらも、学問体系の構築は設計活動だけでは不十分であり、理論体系を整える必要があるとして、「構法計画学」を位置付けている。

構法計画における手法の体系化は必要なものであり、真鍋らが実際に体系化を行ったことで、時代や社会情勢の変化に構法を動的にとらえる枠組みができたと言える。

47 参考資料54) 建築構法（第5版）のp.271を参照した。

48 参考資料55) 建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究の中で、内田祥哉氏聞き取り第5回の記録がある。「例えばね。プレハブ会社なんか見てるとね。我々がやっているようなばかばかしい量の仕事をこなして、1つ1つ新しい製品をつくるというようなことではないわけですよ。行き当たりばったりのところもあるけれど、多少は飛び飛びに探りを入れながらやっていく。それで、失敗するのもあるけど、早いのもあるんです。そういうのを見てると、やっぱりそう簡単にトータルが掴めるものではないというふうに思うようになったんですね。だから、その場に応じてその場のことを考えるほうが、効率がいいというふうに思いますね」（2009年10月13日）

3.2.3. 建築物に対する構法計画上の視点

内田は、『建築構法』の概説において、建築物の関連要素を章ごとに説明している。それぞれを概略すると次のようになる。

建築物の性能

外部からの作用因子を制御するのが建築物の基本的機能であるとして、屋根・床・壁等は、目的に合った内部空間を実現させるために機能する。内田も、「建築の性能を、雨仕舞、遮音、気密、断熱・・・と並べ、水に対する性能を吸水と防水、音に対する性能を遮音と吸音等と分けていくと、性能の数はまたたく間に増大する」として、膨大な要素に展開するため、「あらかじめ調べ尽くしておけるものではなく、必要な時に必要な性能に重点を置いて調べる」としている。

真鍋の取組みは、この無限の分野を網羅的に扱い、体系化することで理論化しようと試みたものであると言える。

建築物の構成

建築物が、内部空間と外部空間を仕切ることで必要とされる空間を実現するものであるとすれば、建築物の構成はこれらの空間を仕切る部位のことである。屋根・床・壁・天井といった用語で用いられるが、表面を指している場合と、断面と厚さがあるもので分ける必要がある。

垂直部位として、空間を遮断するために厚みのある外周壁・間仕切壁という用語と、外面壁と内面壁とする、表面をとらえた用語がある。

水平部位としては、通常用いられる屋根・床・天井という用語は、いずれも表面の様子をとらえた用語である。このため、断面を持つものの呼称としては、屋根天井と床天井が用いられるとされている。

建築物の構造形式

建築物を支えている部分を躯体と呼ぶ。その支え方を構造方式として呼び、以下のように分類される。

- ① 柱梁構造（軸組構造）：柱・梁をもつ構造方式
- ② 壁式構造：柱のない構造方式

建築物の設備・家具・造作

建築物には、生活空間を快適にするための証明・電気・給排水・温湿度調整等の諸設備が必要である。大きく分けて機器と配管・配線とに分かれるが、特に躯体への埋設や貫通を要する配管との関連は、構造や性能にも大きく関係するため注意を要するとしている。また、配

線・配管類について、躯体に比べると寿命が短いこともあるため、躯体を傷めない更新を考慮すべきとしている。

家具・造作としては、造付け家具は建築の一部として扱われてきた。また、間仕切りと家具を兼ねたシステムや、取替え部材等、部品として商品化されるようになったことで構法上の構成部材として扱われる。

建築物の生産

建築物は土地に定着するものであるが、現地で実際に行う作業全体を、建築施工という。建築においては、最終製品が一品生産であることがほとんどであることが特徴である。日本では工業化住宅も、大部分を工場で生産して現場で組み立てる一品生産である。戦後の大量生産をきっかけの一つとして、1950年以降はプレハブ化と大型化が進んでいるとされている⁴⁹。

さらに、「構法と建築生産は、時代の変化に敏感に反応し、コストに応じ相互に反映される。生産方式の選択は構法を決定する上での、重要なポイントである。」と述べている。

構法計画学が流動的なものであるとすれば、新しい構成部材が開発されたとしても構法計画の理論展開は応用可能である。構法として新しい状況や問題が提示された際に、この手法体系を整理し直す必要がある。これによって、構法計画を更新することで構法計画は新しい選択肢を獲得することができる。

例えば構法計画が1977年に内田によって『建築生産のオープンシステム』で集大成されてから、40年を経て大きく変わった社会状況がある。

低炭素社会に向けた低環境負荷の建築の生産と、それを実現しうる建築材料と構成部材の需要である。内田は、『建築生産のオープンシステム』においてすでに構成部材の寿命として、サステイナブル性については触れていたが、建築の生産そのものを考慮する必要があるとされるようになったことで、真鍋は環境保全と構法計画を結び付けて述べている。このことから、大型の木質建築生産に影響の大きい大型木質パネルによる構法の整理を要する。

49 参考資料64) 内田は、1968年には『プレファブ』の中で、プレファブ (Prefabrication) について詳しく述べている。「現場組み立てと、現それ以前に組み立てられる部分との相対関係で、プレファブ化された部分の比重が大きいものが、とくにプレファブと呼ばれている。」としている。そして、あえてプレファブという言葉を使うようになった理由を、「正確には在来工法よりもプレファブ化された建築物」と在来工法と区別する目的があったとしている。

3.3. 大型木質パネルの登場

3.3.1. 大型木質パネル建築とは何か

大型木質パネル建築とは、プレキャスト部材等の大型パネルを用いた構法を源流として、密実な木質のパネルを大判で製造できるようになったことから始まった。代表的なものとしては、CLTが挙げられる。CLTは、1990年ごろに木材による大型のパネル部材として開発されたことで、主に構造等の構成部材に使われるようになった。他に、第1章で挙げた集成板、LVL等の、大型の木質パネルを構成部材として用いた建築のことである。本質的には、耐力壁をパネル部材によって耐力壁を構成した建物のみが純粋なパネル構造であるが、大型木質パネル建築には、帳壁や間仕切り等の非構造部材に使ったものも含むものとする。

3.3.2. 大型木質パネルによる住宅建設の産業化

ジュラ・セバスチエンの『大型パネル住宅』では、1950年代の経済成長を背景にした、住宅の大量供給を目的に工場生産による大型のコンクリートプレキャストパネルを住宅建設の産業として定着させるべくまとめられたものであった。

日本では人口増加のピークを越えて、2008年以降人口減少の時代へと移行し、かつての住宅大量供給の需要は考えられない。しかし、住宅の需要がなくなることはなく、むしろ住宅供給を担う作り手の問題から改めて住宅建設の産業化を見直す必要があるのは自明の事実である。サステナブル時代とも言える現代にあって、建築物の省エネ性能や生産・運用・廃棄の際の二酸化炭素排出による環境負荷低減から木質材料への期待が高まっている。

こうした背景から、大型木質パネルを起点として産業化を進める必要がある。大型パネルでジュラ・セバスチエンが目指した産業化のプロセスを参考とすることができると考えている。これには、木材の加工性を活かしたプレファブリケーションによる、省力化が重要であると言える。

産業化にあたっては、「建築関連産業の大規模化」がふさわしいとジュラ・セバスチエンも述べている。第2章の第4節で概観した、CLTが建築物に用いられるようになった黎明期についてしてみると、初期の事例は実験的な要素が大きいこともあって、いずれも建築物の規模が小さく、産業化に向かって検証を行うためには不十分である。集成板やLVL等の大型木質パネルについては、CLT以上に事例が限られ、産業化に向けての議論するのは、あまり現実的ではない。

奇しくも、次章で取り上げる「いわき CLT 復興公営住宅 (Photo 3-1)」の状況は、1950年代の大型パネル住宅が置かれた発展の歴史と酷似しており、試作建設として国交省の指導のもとで進められた。大規模木造建築物の工場生産化による、本格的な工業化の先駆けであると言える。その課題も同様にして、労働力確保の難しさ、東日本大震災を経験した後の福島県における大量の住宅需要への対応という、大型木質パネル住宅が求められるに十分な要素が整っていたと言える。ただし、60年を経てその目的が大きく変わった事項がいくつかある。低炭素社会に向けた低環境負荷の建築とその材料の需要と、経済成長に伴う住宅の大量供給のためではない、省力化や効率化を目的とした工場生産への移行である。この違いに合致しつつも、大規模化を推し進めることができるとして期待できるのが、大型木質パネルを用いた建築である。



Photo 3-1 大型木質パネルを用いた建築
「いわき CLT 復興公営住宅」

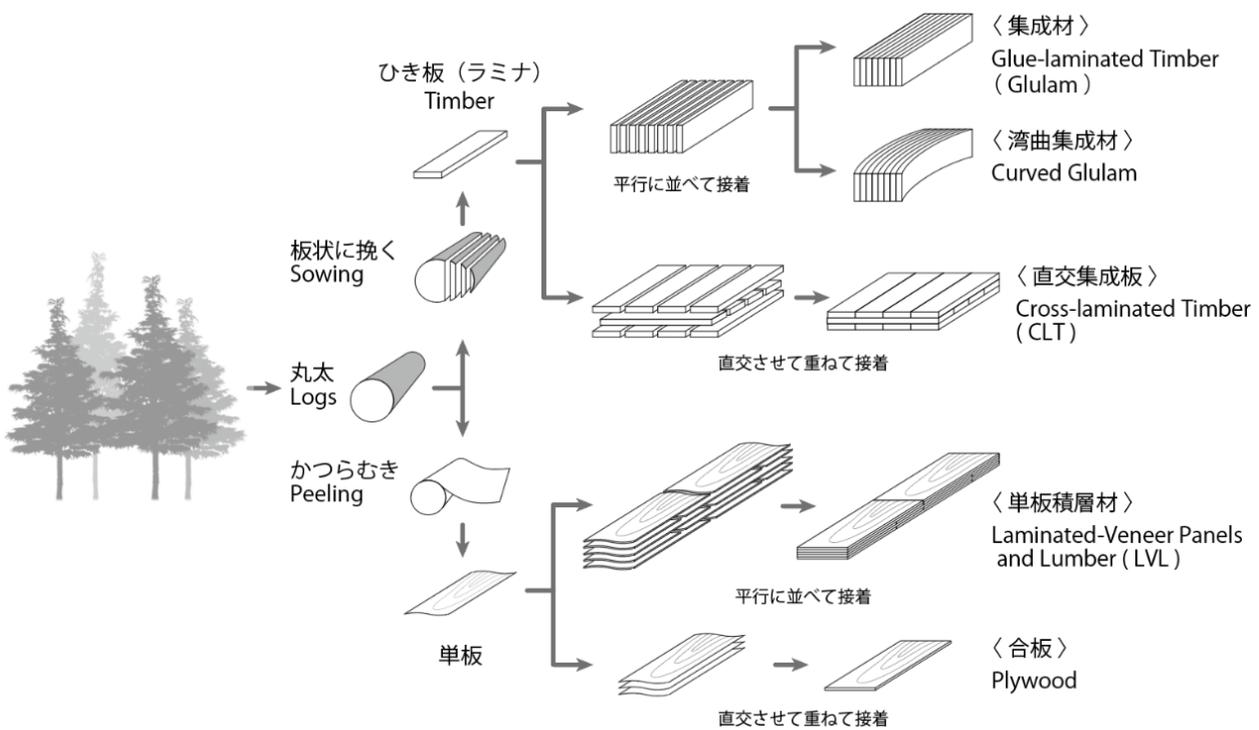


Fig. 3-1 大型木質パネル等の主な木材製品の製造工程

3.3.3. CLTをはじめとした木構造材料と木質材料

大型木質パネルで用いられる材料は、伝統的に用いられてきた木材と何ら違いはない。ただし、大型の木材料は大径木の樹木から切り出されるわけではなく、丸太から切り出された木材を工場でアッセンブリを行うエンジニアリングウッドである。その種類は多様であり、代表的な大型木質パネルだけでも Fig. 3-1 のような種類がある。

木造建築物の構造部材としてよく知られたものとしては、1893年にドイツ人のオットー・ヘッツェルが考案したとされる集成材がある。ひき板を接着剤で張り合わせたもので、国内では1950年代に入って利用が開始された。大型の木造において用いられる、張り合わせラミナ数が多く、大きな梁せいの構造部材に用いられる300mmのものを大断面集成材と呼び、戸建て住宅等の梁でも用いられる150mmのものを中断面集成材と呼ぶ（Table 3-1）。また、しばしば曲線の構造架構として用いられるのが、湾曲集成材である。圧着の際のジグ形状を変えることで、ひき板そのものを曲げて接着したものである。

Table 3-1 構造用集成材の断面区分

大断面	短辺が150mm以上、断面積が300mm以上のもの
中断面	短辺が75mm以上、長辺が150mm以上のものであって大断面集成材以外のもの
小断面	短辺が75mm未満または長辺が150mm未満のもの

※日本農林規格（JAS）より

内田祥哉の『建築構法』では、プレキャストコンクリート造について、大型パネルと中型パネルを明確に分けている。中型パネルを高さ階高分とし、幅1.0m程度のもので、それを超えるものを大型パネルと呼んでいる。本論文では、これを踏まえて大型木質パネルの大きさを Table 3-2 のように定義する。この時幅については2.0mに満たないものを中型パネルとし、2.0m以上のものを大型パネルとした。これは、幅2.0mを境に製造が可能な工場が分かれているからである。また、CLT パネル工法における許容応力度計算のパネル幅の範囲が0.9m以上2.0m以下とされていることも理由である。

Table 3-2 大型木質パネルの大きさ区分

大型パネル	高さは階高以上とし、幅2.0m以上のもの
中型パネル	高さは階高分とし、幅2.0m以下のもの

大型木質パネルは、一般的に理解される構造体としてこれを用いた、いわゆる木造建築と、非木造を含めた建築要素としてこれを用いた木質構造とを分ける必要がある。WOOD.ALC (Fig. 3-2)⁵⁰は、450mm等の大断面集成材を用いて非構造耐力壁として鉄骨造等の構造躯体に取り付ける帳壁による構法である。

CLTは、直行集成板と呼ばれ、この集成材の接着方向を変えただけのものであり、製造方法が違っただけで用いられる材料は集成材と変わらない。日本国内ではスギが最も多く用いられ、他にも、ヒノキ、カラマツ、トドマツといった樹種が使われる。欧州では、ホワイトウッド現状については述べるが、CLTは2010年以降注目を集めた木材料で、木質材料の普及を牽引する大型木質パネルである。特に壁、スラブに用いられ、国内での最大製造サイズも、幅3.0m長さ12.0m厚さ300mmと非常に大型のパネルまでを製作できる。

他に、丸太から板状に挽いた材料を用いるのではなく、かつらむき状にして単板をつくり、張り合わせたものが合板である。同じように厚さ2～4mmの単板を幾層にも接着剤で張り合わせることで大きな板を構成するのが単板積層材(LVL)である。これも大型木質パネルと呼べるもので、CLTと同様に構造要素として用いることが可能な木構造材料である。材料寸法の安定性に加え、製造工程の自動化が可能で、生産性が高い。国内では最大で、幅1.2m長さ12.0m、厚み600mmまで製造が可能である。一方で、特殊な製造設備を要するために、製造コストが高いという難点もある。

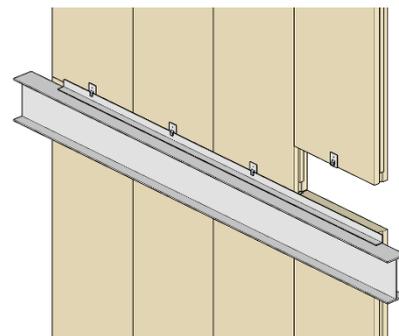


Fig. 3-2 WOOD.ALC工法のパネル取り付け方法（ロッキング）

50 日本WOOD.ALC協会の公式サイト（最終閲覧日：2020年7月4日）によれば、WOOD.ALCとは、Attain Low Carbon Societyの頭文字を合わせたものであり、外壁用の木製集成材であるとしている。

大型木質パネル（CLT）の生産と工場加工

構造用の修正パネルに用いる材料は、厚さ 20~40mmの充分乾燥（JAS 規 15%以下）されたひき板を用いる。これらをプレス機等で圧着し、接着剤によって一体化させる。現在は、ひき板の強度を測定して等級分けすることで安定した強度を持つ製品とすることができる。このひき板はラミナと呼ばれ、国内では集成材や間柱等と同じ材料を用いることができることも汎用性が高いとされる一つの理由である。

現場での接合の手間を考えれば、パネルは当然ながら大きいほうがよい。大型のパネルを製造するには、その材料の大きさにも関わってくる。伐採されて流通する丸太は、長さ 4.0m あたりのものが多く、最大長さである 12.0m の大型パネルを製造するにはラミナ自体を長さ方向に継ぐ必要がある。このため、Fig. 3-3 のようなフィンガージョイントによって接着接合される。こうしてできたラミナを縦・横・縦と 3 層以上重ねて接着剤で一体化したものがマザーボードと呼ばれる大判のパネルである。理論上は、フィンガージョイントで無限につないだらミナを用いれば、どこまでも大きな板を作ることが可能ではあるが、現在の CLT パネルの限界サイズを決定づけているのは、圧着する際のプレス機（Photo 3-2）の大きさである。国内で初めて稼働した CLT の製造工場は、幅 2.0m 長さ 6.0m までしか生産できなかったが、これも当時のプレス機構によるものであった。幅 3.0m まで製造できるようになったことで、3.0m 程度の階高までは幅方向で対応できるようになったことは施工効率の観点から考えれば大きい変化とみなせる。

こうして製造されたマザーボードは、まず JAS に適合させるために 4 つの辺を切り落とされる（Photo 3-3）。ここで、問題となるのが、材料の重量と加工しなければならない大きさである。製造されたパネルは、最大のものになると、スギの気乾比重は約 0.38 であるから、少なくとも 4.1t を超える⁵¹。このため、工場内には床上運転式クレーン設備が必須となる。さらにカットには、幅 3.0m の板のまま通すことができる加工機器が必要である。

さらに複雑なのは、このあとのプレカットの加工工程である。CLT は大型のために振り回しが効かず、建設現場において加工を施すことは非常に非効率である。このため、製造工場または中継工場でのプレカットが必要となる。これには、Photo 3-4 や Photo 3-5 のような多軸制御のコンピュータ数値制御機械（CNC）で一息に加工する必要

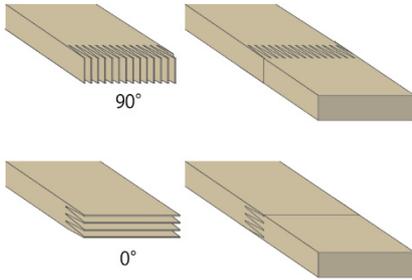


Fig. 3-3 フィンガージョイント接合
櫛状に加工された接続面に接着剤を
塗布して材料をつなぎ合わせる方法



Photo 3-2 プレス加工機（奥側），岡
山県真庭市の CLT 工場



Photo 3-3 岡山県真庭市の CLT 工場



Photo 3-4 大型木質パネル（CLT）を
加工しているところ，静岡県磐田市プ
レカット工場

51 CLTの最大製造サイズ3.0m×12.0m×0.3mとして、108m³であり、比重 0.38g/cm³で算定すると、41,040,000gとなる。さらに圧着の影響と接着剤の重量も考慮すれば、重量はそれ以上になる。

がある。このために加工データ作成と制御プログラムに時間を要する。設計段階でパネル形状だけでなく接合箇所や金物形状、開口との取り合いや配管経路による孔位置等、パネル設計段階で詰めておく必要がある。ここまでを工場内で加工し、建設の建方工程に合わせた出荷時期を待つことになる（Photo 3-6）。

パネルの組立てと施工方法

ここでは、工場からの出荷以降の流れを説明する。前述のように、あらかじめ工場にて建物の構成部位として正確に加工されているために、パネル設計が複雑であればあるほど、搬送のためのトレーラーへの積み込みには苦勞することになる。さらには、現場に到着してからの積み込みに順繰りに送り出す必要があるため、建て込み順に積み込まれるのが理想である。欧州のメーカーでは、海上輸送のため、コンテナに隙間なく積み込むことで、搬送コストを抑えている。

パネルの製造限界サイズは長さ 12.0m幅 3.0mであるが、これは搬送がしやすい大きさが要因である。Fig.2-4 は、搬送における制限を示したものである。低床トレーラーの荷台の幅からはみ出さないように荷を収める必要があるから、一般車両では平積みの場合、幅 2.5m のパネルまでが搬送できる。これ以上のパネルを搬送する場合は、特殊車両の通行許可を取得するか、もしくは縦積みとする必要がある。さらには、搬送ルートが使えるトレーラーのサイズを限定することもあり、特に幹線道路から建設地に至るまでの道路幅や曲がり角、交差点等を十分に確認することが必要で、場合によっては設計段階でこれらを把握した上でパネル設計を行う必要がある。

建設現場においては、敷地も限られることが多い。建設する建物の周囲に十分な荷積みスペースを確保できることは稀である。このため、搬送のトレーラーからの荷降ろしから建て込みまでをスムーズに行うことが必要である。積み込み順序は、建方の順と相違ないように順序良く積み下ろしが可能であるように意識しなければならないのはこのためである。

大型木質パネルは、人力での搬送は不可能であるから、ラフタークレーンによってパネルは揚重する必要がある（Fig.3-5）。このため、建込みの工程管理にあつては、クレーンの作業時間がクリティカルパスとなる。効率的にパネルの建込みを行うには、できれば荷降ろしと建込み用があることが望ましい。



Photo 3-5 大型木質パネルの加工機
(加工機自体が材料上部を移動するもの)、福島県郡山市のプレカット工場

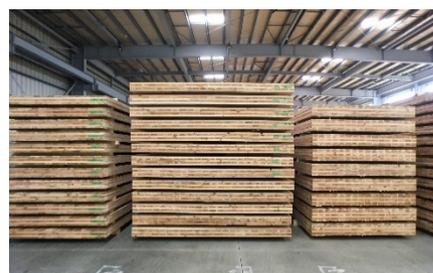


Photo 3-6 CLT 工場で出荷まで保管されているところ

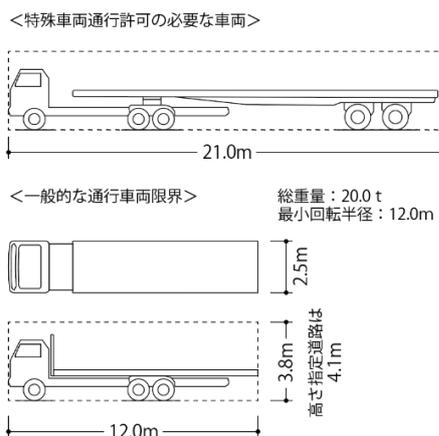


Fig. 3-4 搬送車両の制限

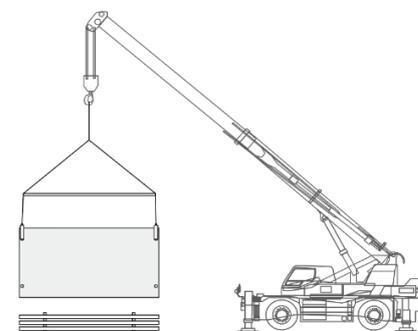


Fig. 3-5 ラフタークレーンによる CLT パネルの揚重

3.4. 大型木質パネルを用いたユニット型居住空間に対する構法計画理論の構築

3.4.1. 大型木質パネルを用いた構法の体系化

前節で、1990年代に始まる新しい材料としての大型木質パネルの開発によって、建築物の構成部材として用いられることとなった背景に触れた。これまで日本国内で蓄積されてきた構法計画学の体系の中では、大型パネルは扱われているものの、大型木質パネルを用いた構法について十分な議論がされていない。

内田祥哉が1960年代から展開した建築構法研究は、Building Element論から開始され、1970年前後から「構法計画」へと展開し、1977年の『建築生産のオープンシステム』に集大成されたとされている。構法計画学は、建築学の様々な分野を統合して構法を計画する分野であるとして、設計方法論から発展し、建築の生産論へと展開したものである。構法計画が一通りのまとまりを示した1980年代以降に急速に導入が進んだ大型木質パネルの構法に着目して、構法計画学を見直す必要がある。

内田が編著した『建築構法』では、建築は部材と部品で構成されているとして、「建築構法は、建築物の実態で、その属性として性能があり、機能をもつ。」としている。建築を構造的に成立させる「躯体構法」とビルディングエレメントやシステムに注目する「各部構法」をまとめている。大型木質パネルを用いた構法においても、同様に構法を大分することができる。

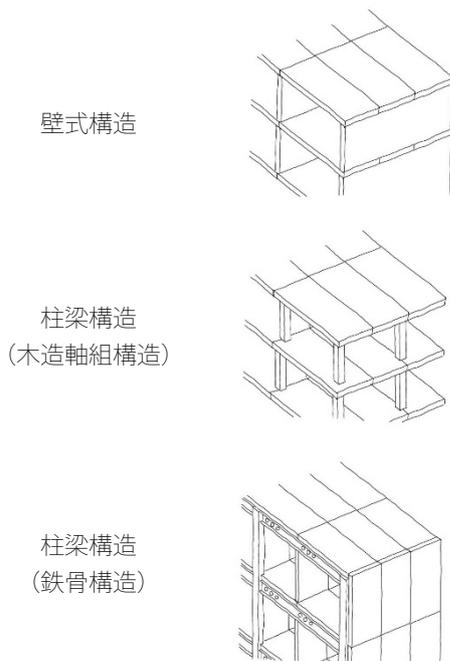


Fig. 3-6 大型木質パネルによる躯体構法の例

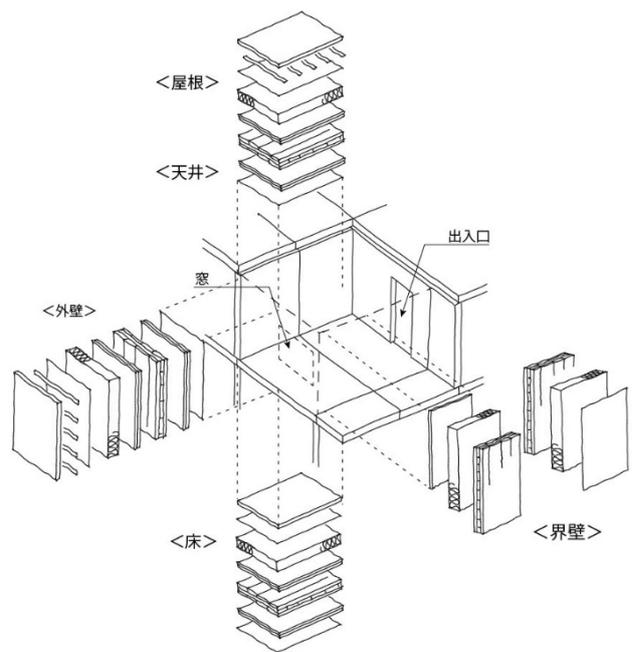


Fig. 3-7 大型木質パネル構法における各部構法

真鍋は、構法計画学として、一連の研究の中で「手法の体系化」を徹底的に行った。もののしくみとして、建築設計上に必要となるあらゆる現象に関する制御手法をまとめたものである。その中で、構法を体系的に分類・把握する方法として、そのアプローチを次の2通りに大分している。

- ① 要求を満足するための手法として構法を見る
- ② 構法自体の成立している原理から構法を見る

実際の構法にはバリエーションが無数に存在しているが、分類にはある程度単純化したモデルでとらえられることになるとしている。2つのアプローチから、原理的にありうる構法のパターンを網羅することで、「置き場所」を与えることができるという主張である。

ともすれば、大型木質パネルが新しい建築構成部材として用いられる際に、考えられる使用方法のパターンを網羅することで、構法としての「置き場所」が与えられると考えられる。この位置付けによって、設計における構法としての選択肢の一つとなりうる。

3.4.2. 大型木質パネルを用いた建築における現象と要求

真鍋は、前項の2通りのアプローチによって、構法の体系化は行われる必要があるとしているが、目的に応じた空間を実現するためには、建築で生じうる現象に対して建築設計上で対応する方法を整理する必要があるとしている。そのために、真鍋は現象を下記の2つに大別している。

- ① でき上がった建物において生ずる現象（例として、熱・音・水・人等が出入りする現象や、汚れ・腐朽等の劣化現象がある。）
- ② 建物の建設過程において生ずる現象（例として、部品の運搬・保管、加工、取付け・接合等がある。）

建築空間とは、建築によって仕切られた囲まれた空間であるとして、外部からの作用因子を制御するのが建築物の基本的機能である。この機能に影響する、光・音等のエネルギーや、空気・水・人間等の物のことを「作用因子」と呼んでいる。作用因子は、建築や人間に対してさまざまな挙動現象を生じるとして、真鍋は挙動現象を一般的・代表的な現象を挙げている。Table3-2は、真鍋によって示されたものである。

Table 3-2 真鍋による作用因子による主な挙動現象

作用因子		主な作用因子の挙動現象	
輻射線	光	明るさとしての光	日光（直射光・天空光）の反射・透過・屈折・拡散等による到達（または遮蔽） 照明器具からの光の発生・到達 室内（または室外）からの光の漏れ（暗さ確保不可能）
		情報光・視線	画像情報の発生・到達（ものが見えること） 窓等からの眺望，覗き（覗かれ） 光の設備搬送（光ファイバー等）
	赤外線・熱線	（→輻射熱）	
	紫外線	太陽からの紫外線の建物・人体への到達 紫外線灯などの発生源からの発生・到達	
	電波（各種の波長）	電波の発生（放送・漏洩），到達（受信・盗聴，遮蔽，受信障害） 電波の設備搬送（導波管等）	
放射線	放射線の発生，透過・散乱による到達		
熱	移動する熱	輻射熱	暖房機器・人体・室内空間等からの輻射熱の発生 日射や屋外の物体・外気等からの，建物・室内空間・人体等への輻射熱到達
		伝導熱	建築部位の熱貫流（表面熱伝達・熱伝導）による建物の熱損失・熱取得 固体内の熱伝導 物体表面と人体との熱伝達（熱い・冷たい）
		対流熱	物体表面の放熱・受熱 熱媒体流体（隙間風等）の移動
	熱量としての熱	熱の存在（温度の高い状態・低い状態，熱源としての熱）	
火	物の燃焼，火災の発生・伝達，延焼		
音	空気伝播音	騒音・情報音	交通騒音，人・楽器・設備機器等からの音（騒音・楽・音人声等）の発生 音の透過・反射・回折等による伝達・到達または聴音不全 エコー，フラッタエコー
	固体伝播音	設備機器・配管・人の歩行等による固体伝播音の発生と固体内の伝達	
力	重力による荷重	自重・積載荷重・積雪荷重等の荷重の発生 地下等における水圧・土圧の発生	
	他の荷重・圧力等	風圧・衝撃力・摩擦力・水圧・空気圧等の発生	
	加速度による力	地震力の発生 乗物内の慣性力・振動の発生 機械装置・交通・歩行等による振動の発生（cf. 固体伝播音）	
	局所釣合力 その他の力	接合部の接合力（面支持圧・摩擦力・剪断力・接着力等）の發揮 日射（屋上等），設備の発熱（燃焼機器）・冷却（冷凍庫）による熱膨張力の発生	
電気	電流	漏電 配送電（電流の設備搬送）	
	静電気	歩行・摩擦等による静電気の発生・放電 落雷	
気体	空気	窓等からの換気，隙間風 換気装置による換気 空調機器からのドラフト	
	空気以外の気体	臭気各種成分（塵埃・微生物・エアロゾル等），各種気体の発生・拡散 各種気体の設備搬送	
液体	水	降水・雨漏り，流水（川河・親水施設等），溜水（池・貯水池等） 設備等からの漏水・飛散 給排水・給湯（水の設備搬送）	
	水以外の液体	各種成分（泥・微生物・化学物質等）による水質の変化（汚濁） 各種液体の設備搬送（送油管等）	
物体	物品一般	家具・荷物・乗り物等の存在（→空間占有） 荷物・乗り物等の運搬・移動 物品の付加・収納	
	飛来物等	ボール・弾丸・落下物・自動車等の飛来・衝突	
	その他の物体	降雪・積雪（→水），降灰・火山灰堆積等（粒状・粉状物体の発生・移動・蓄積） 雪崩・山崩れ・土石流（→水の移動）等（塊状物体の発生・移動・蓄積）	
生物	植物	植物の成育	
	微生物	物体表面における黴の発生（→建物の性状変化現象） 微生物による空気汚染（空気中の微生物の発生・移動…cf. 空気の成分） 微生物による水汚染（水中の微生物の発生・移動…cf. 水の成分）	
	人間以外の動物	虫・鳥・けだもの等の生育・生存，移動・侵入	
	人間	住人・家人・知人・他人・悪人等，弱者・健常者等	生存・生活，諸般の生活行為，快感・不快感等の感覚・感情 移動（歩行・飛越え・飛降り・滑り・ぶら下がり・よじ登り・車椅子等） 事故（墜落・転落・滑落・転倒・衝突・火傷・中毒等）による危険・怪我・死亡 泥棒等の侵入
作用因子全般		空間の占有，それによる物品・人間・その他の作用因子の通過障害等	

3.4.3. 要求に対する制御としての構法

真鍋が構法計画学で行った「手法の体系化」とは、前述した作用因子に起因する各現象に対して、要求を満足するような建築設計上の手法を、体系的に網羅・分類・整理することであるとしている。

さらに、体系化されたものが実用的な構法選択を目的とするときには、必要とされる性能を定量化し、それに対して構法側の性能も定量化することによって、はじめて選択可能となるとしている。

真鍋によれば、要求に対して制御するために構法を位置付け、この制御を次のように分類する。

- ① 作用因子の挙動の制御
- ② 作用因子の設備的搬送の制御
- ③ 建物自体の性状変化の制御
- ④ 建物の生産段階に対する要求

この中で、大型木質パネルを構法的に取り入れようとした際に、体系に属する構法や手法をやみくもに羅列することは意味をなさない。内田も『建築構法』の中で述べているように、性能の制御をあらかじめ調べ尽くしておけるものではないものとして、必要なときの重点的な調査が必要である。このことから、筆者は性能の制御に関して調査すべき事象を設計経験から導き出した。

大型木質パネルを用いた構法について、既存の構法と大きく異なる点、また、構法計画の有無が施工に強い影響を及ぼす点を演繹的な視点から列挙する。「エネマネハウス 2013」,「エネマネハウス 2014」,「エネマネハウス 2016」,「つくば CLT 実験棟」,「湯川村 CLT 共同住宅」の 5 つの小規模の建物を設計する中で、構法計画と大きく関わる事象が示唆できる。

この構法が設計手法の一つとして選択しうる条件としては、構築する方法が明示化され、目的とする性能が得られることが明確に示されることが必要である。それぞれの制御と要求に対する考察を事項以降で述べる。特に、真鍋が挙げた作用因子毎に現象の制御を見ていき、熱・火・音・力・気体・液体に関して取り上げるべき特有の制御手法について述べる。また、生産過程において生ずる現象として、施工プロセスを踏まえて、生産における基本作業の種類毎に要求に着目する。Fig. 3-9 に、特有の制御方法を抽出した図を示す。

① 作用因子毎の挙動に対する制御手法

建築におけるさまざまな作用因子の挙動現象の種類としては、先に真鍋が挙げた代表的な現象について触れた。このうち、現象が大型木質パネルを構法として用いることに起因する特有なものと、計画自体のものに分類できる。このため、一般的な構法制御とは別に、特有な制御の手法について特記する必要がある。

光、電気、物体、生物に関する現象の制御

放射線（光）、電気、物体、生物等に関する作用因子については、特段大型木質パネルを用いた構法であるが故の特別な制御は見当たらない。むしろ、計画上の配置等が大きく影響するため、他構法と同様と考えることが可能である。ただし、開口部の大きさや位置の設計による制御方法については、構法の影響を受けるため注意が必要である。構造に欠陥を及ぼさない適切な開口設計が必要である。

火、力に関する現象の制御

2016年にCLTパネル工法に関する告示交付に際して、定量的な性能値として明記されている。これには、日本建築学会論文集や木材学会誌、木材工業において発表されてきた研究や、建築研究所や森林総合研究所等の研究機関による研究を基準として、法規基準としての定量的な性能値が規定された^{52 53}。特に、告示化に伴って整理された構造、材料強度（JAS規格）準耐火仕様（燃えしろ）は、最低限の基準として示されている。

このために、国内関連学会における既発表の論文数としては、分野に偏りがある。上記のように構造関係論文は63本を数える等最も充実している。防耐火に関する論文も、構法における細部までの検証は至っていないものの、基本的な研究は整っているとよい。

また、『新世代 木材・木質材料と木造建築技術⁵⁴』では、木造建築技術として、木質材料で特に構造材料として用いた際の定量的な基準が示されている。

課題として、接合部等の細部の施工によって性能を大きく阻害する恐れがあるため、注意しなければならない。例えば、防火性能を期待する区画壁に木質パネルを用いた場合の区画貫通部や、耐火性

52 CLT材料の品質及び強度、CLT部材等の燃えしろ設計（官報）（【改正】2016年3月31日公布・施行）

53 CLTを用いた建築物の一般設計法（官報）（【新設】2016年4月1日公布・施行）CLTパネル工法を用いた建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件

54 岡野健（監修），et al. (2017). 新世代 木材・木質材料と木造建築技術，エヌ・ティー・エス.

能を期待した部位に使用された木質パネルの接合部等は、施工要領の中で十分な防火性能を持つように、被覆等の適切な処置をしなければならない。

熱に関する現象の特有な制御

室内熱環境に対する断熱性能は、木材による熱抵抗が省エネ基準のうち外皮性能を左右する。伝導熱による熱損失に関する定量評価は、評定機関によって熱伝導率が示されたことによって、外皮性能評価の定量的な性能値が統一された⁵⁵。エネルギー使用の合理化等に関する法律に伴い、特に外皮性能に関する設計値は、実務設計の際には必須の情報であるため、定量的な性能値は出そろっているとよい。日本建築学会の既掲載論文としては、CLTの厚さに関する温熱環境性能に関する研究⁵⁶が発表されている。

一方で、伝導熱・対流熱による影響は、室内熱環境への影響は大きいにも関わらず、これまで検証されてこなかった。実際に大型木質パネルを用いた居室にて温熱環境を測定したところ、躯体の蓄熱性能が影響して温度変化が緩慢となり、放射温度の影響が室内環境に影響することが分かっていた。大型木質パネルによって大きな木質の面が構成されるため影響が大きいと考えられる。構成部材の蓄熱性能を考慮した検証によって定量評価が可能である。

音に関する現象の特有な制御

音の制御に関しては、伝達媒体の違いから空気伝搬音と個体伝搬音がある。居住性能に関わるこれらの音の制御手法としては、遮音制御が必要である。また、要求される遮音制御は、大きく分けて屋外か

55 設計上の外皮性能算定のために、CLTの熱伝導率は明示されて来なかった。しかし、2020年にはじめて一般財団法人建築環境・省エネルギー機構がウェブサイト<http://ibec.or.jp/>（最終アクセス日2020.5.7）において見解を公開した。『CLTパネル（直交集成板）の熱伝導率の検討』への回答（平成31（2020年）年1月30日）によれば、「JIS A 1476（建築材料の含水率測定方法）ならびに JIS A 1412-2（熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第2部：熱流計法（HFM法））に基づき試験を実施した結果より、CLTパネル(直交集成板)の熱伝導率については、0.12W/mKとする。CLTパネルを用いた住宅のUA値、ηA値の算出においては、構造熱橋部における熱損失を勘案することとし、熱橋の線熱貫流率は、断熱補強の有無、熱橋の形状、室の配置等によらず0.36W/mKとする。なお、接合金物の熱橋による熱損失は勘案しないこととする。」として、熱損失に関する方針を示した。

56 山口温 and 武田仁 (2019). "直交集成板 (CLT) を用いた木造公共建築の温熱環境と地域別適用可能性 学校施設におけるRC造とCLT最適厚さの検討." 日本建築学会環境系論文集 84(762): 739-748.

らの空気伝搬音に対する遮音と隣室や上部階からの遮音がある。特に集合住宅等の共同住宅では、界壁の遮音性能と床の遮音性能に関して、住宅性能表示制度⁵⁷にて性能規定されている。

空気伝搬音と個体伝搬音のうち大型木質パネルを用いた構法においては、個体伝搬音において既存構法とは大きく異なる現象が確認された。特に CLT 等は、木材が密実に積層されたパネルである。もともと木材は、個体伝搬音が発生する衝撃が加わった際に振動しやすく、音が伝搬しやすいという特色を持つ。このために、パネル内部を個体伝搬音が伝わり、構造として大型木質パネルを用いた場合は、パネル同士が密着して組み上げられるために、周辺室への衝撃音や振動が伝わりやすい。このために、特に重量衝撃音等の波長帯での床遮音の課題は大きく、構法的な制御の方法には至っていない。

気体に関する現象の特有な制御

木材の腐朽を抑えて期待した強度を保つには、十分に乾燥させた状態にしておくことが重要である。これには、外壁や屋根の内部の通気を十分に確保する必要がある。

また、大型木質パネルを用いる際の接合部やパネル同士のわずかな隙間は、建物の気密性能を著しく阻害する恐れがあるため、十分な気密処置が必要となる。

液体に関する現象の特有な制御

木材を使用する際は、雨水や湿気等水を制御することが腐朽・変形・変色等の経年変化とも大きく関わるために重要である。

特に、大型木質パネルによる建築物の普及にともなって、木質材料による大断面の屋根、壁が構成されるようになる。これによって、RC造やS造の主要な防水工法で発達してきた大面積の防水技術を木質材料について転用する必要がある。木質材料による構成部材では、連続被膜の防水機能に加えて下地水分の調整や被膜直下の脱気、防水材料の軽量化に対応する必要がある。

また、防水上の弱点となる開口部廻りのしつらえについては、木造住宅等で培われた防水ディテールの展開が必要とされ、今後は、こうした施工上の仕様の標準化が必要である。例えば、田島ルーフィングの中・大規模／都市木造建築防水設計 ARCHITECTS' HANDBOOK⁵⁸が発行されている。ここでは、先に挙げた通気の重要性和防水ラインの構成に配慮することが重要であることがまとめられている。

57 住宅性能表示制度とは2000年4月1日に施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」に基づく制度である。

58 中・大規模／都市木造建築防水設計 ARCHITECTS' HANDBOOK, 田島ルーフィング株式会社, 2019.11.8

② 作用因子の設備的搬送の制御

作用因子の設備的な手段に伴って、その搬送に対して制御するものである。安全性・確実性・高効率性等の要求があると真鍋は示している。大型木質パネルを用いた構法では、配線・配管といった点について注意が必要である。例えば、躯体貫通を伴う配管・配線では、構成部材の性能を損なうものであってはならない。構造に対する欠陥等が考えられる。

③ 建物自体の性状変化の制御

建物に生ずる変化を抑制・防止するという要求に対して制御するものであるが、耐火・耐熱・耐震・耐力・耐衝撃・耐摩耗・耐食・防錆・耐久等の総合的な指標を例として挙げられるが、木材による大型パネルを用いる場合、木材の耐久性・耐食性が大きく影響する。特に被覆がない用いられ方による経年変化は重要な課題である。

『新世代 木材・木質材料と木造建築技術』において、中島は「木造建築物の耐久設計」として、耐久設計上考慮すべき劣化現象を挙げている。木質系構造材料は、木部と接着層の2つに分けることが可能であり、建物の全体としては構造を構成する木部、接着層、接合具・金物類の3つの耐久性を確保することに帰着するとしている。さらに、木部の構造性能を低下させる作用因子として、腐朽と蟻害を挙げ、接着層の劣化に関しては、木部との剥離、接着層の強度低下を挙げる。

そして、制御手法として、劣化しにくい環境設計、材料の適材利用、薬剤処理を挙げているが、こうした木造建築物での構法計画から参照できるものであると言える。

④ 建物の生産段階に対する要求

部材の製造・プレカット・搬送については、第3章2節「大型木質パネルの登場」において製造機械と空間、搬送設備による制限が大きいことについて述べた。現場での組み立て・工期と労務時間は、表のように整理され、大型パネル構法の要求に近い形で体系化が可能である。しかし、木質材料である大型木質パネルの建方については、国内で定量的な測定例が少なく、特に大規模な標準化された構法で評価することが必要である。

コストについては、「CLTの製造コストを1/2にし、施工コストを他工法並みにする技術開発」として森林総合研究所と東京農工大学による研究開発が行われている。しかし、市場価格としてコストを把握するには、さらなる事例と統計が必要とされている。

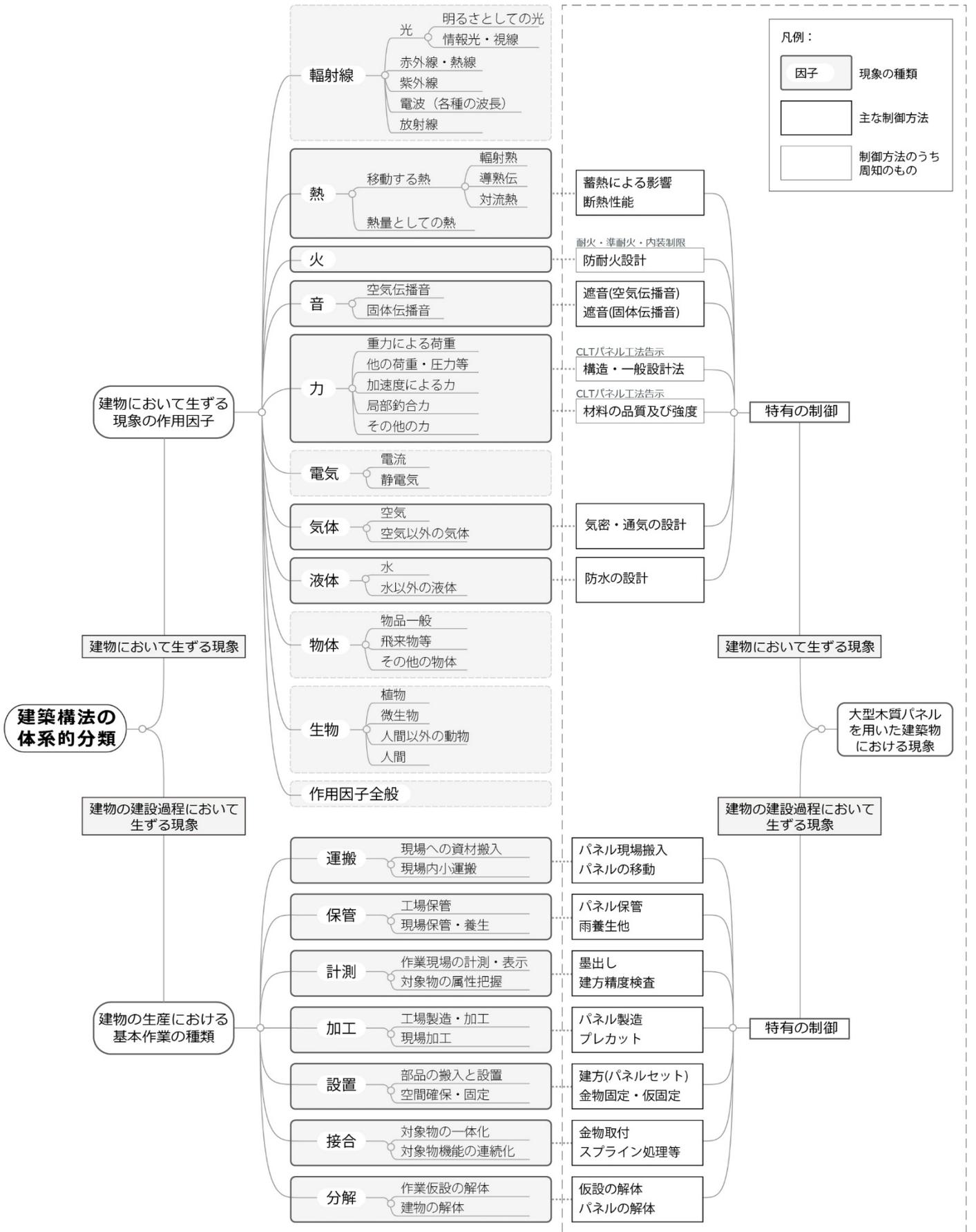


Fig. 3-8 大型木質パネルを用いた建物における現象と特有の制御方法

3.5. 小結

大型木質パネルの建築構法に関する位置付けを行う上で、作用因子毎の現象と対応する制御という形で体系化されてきた構法計画学の潮流を俯瞰しながら、実施計画上で得られた特有な事象を演繹的に分類して照らし合わせることを行った。その中で、大型木質パネルを用いることによる特有の制御方法が抽出され、「建築物の生産」と「建築物の性能」に関する事項で、それぞれ検討すべき構法計画に資する検証対象項目が提示された。

Fig. 3-9に、大型木質パネルによる構法で考察を加えた現象に関する体系を示す。特に点線内は、筆者が加筆した事象である。

建物の生産

大型パネルにはプレファブ化や短工期化といった期待が集まっているが、構法の標準化を行うことで、産業化や省力化に向けて大きく寄与できると考えられる。大型木質パネルとなると、材料が木材であることから、プレファブリケーションや加工の自由度が加わることで、よりフレキシブルな生産が可能となる。

建物の生産プロセスを構法計画の体系として分類していくと、大型木質パネルによる構法の特有性は、ある限定的な事象の転換というよりは、作業工程の全体に万遍なく広がっていることが示された。このことから言えるのは、局部的な検証ではなく、生産工程を通じて構成部材としての影響を総合的に見る必要性である。一連の作業工程を通じて、構法計画の本懐でもある生産性を確認すべきである。

建物の性能

建物において生ずる現象毎に検討していくと、大型パネルが木質化することに起因する特有な制御と、そうでない一般的な制御によって解決可能なものに分けられる。このうちで前者として、熱・火・音・力・気体・液体の制御に関する懸念事項が示された。

さらにこの中で、火や力に関する制御は、法整備を前提として研究が進められてきたために、性能として検証対象とするべきは温熱、遮音・吸音、防水、気密といった詳細の性能に関する研究を深めていく必要が明示された。

特に、前章で抽出された問題である、木質構造による建築躯体の軽量化が、熱容量の不足への懸念が検証の対象として挙げられる。欧州とは、気候と設備環境が異なることから生ずる日本独自の検証を要する。

本章で示された検証項目は、第4章と第5章で扱う。

建物の一連の生産性を確認するには、大規模な計画において採用

して全体計画としての構法の影響を考察する必要がある。第1章で対象として説明した「ユニット型建築」を構成に持つ計画において、大型木質パネルによる生産効率が実証されることが理想的である。大型木質パネルの使用によって得られる構法上の合理性が、その建築規模に比例する形で期待できる。できる限り大規模で標準的な平面構成を持つ建物で実証するのが最も効果検証結果が得やすい。

建物の性能としての建物の熱容量の検証では、エネルギー負荷の低減を目的とした効果を確認する必要がある。これには「居住空間」外周壁・間仕切壁で大型木質パネルを構成部材として用いたことで生ずる性能特性に着目すればよい。

第4章
大型木質パネルを用いた低層集合住宅
の施工効率化

第4章 大型木質パネルを用いた低層集合住宅の施工効率化

4.1. はじめに

本章では、第3章で提示された対象項目として、建物の生産性に関する検証を行う。大型木質パネルを用いて「ユニット型建築」を構成に持つ建築で、可能な限り大規模で標準的な計画において、実践的に効率化を示すことを目的とする。対象は、大型木質パネルのうちでCLTを主要な構造に用いた計画である。

既往の研究として位置付けた2事例は、「つくば CLT 実験棟」と「湯川村 CLT 共同住宅」である。前者は、CLTパネル工法の告示化に向けて直前に建設された施工までの実証を目的とした実験棟である。このため、大型のパネルを躯体構法に活かせるキャンチレバーや吹き抜け空間が計画に取り入れられた建物である。後者は、日本国内でCLTパネル工法に先駆けて建設された3件の集合住宅汎用モデルのひとつである。以降の計画のモデルとなった2事例での労務工数調査における分析を根拠に、仮説を立てて検証している。

4.1.1. 背景と目的

2011年度以降、国内の建設投資額は増加傾向にある。それに対して、建設技能労働者・技術者の担い手不足は、深刻である。そのため、国内の建設生産を維持していくためには、短工期化や省人化、労働生産性の改善に有効な構法の開発が必要である。

直交集成板「クロス・ラミネイティド・ティンバー (Cross Laminated Timber: 以下 CLT)」を用いた建物の建設事例が国内で増加している。2016年には、CLTを床、壁、屋根等に使用するCLTパネル工法⁵⁹について、一般的な設計手法等に関する一連の告示が公布・施行された。CLTパネル工法の特徴は、パネルを組み立てて構造体を形成するため、鉄筋コンクリート造等と比較して短工期で躯体工事を完了できることにある。

筆者らは、CLTパネルのプレカットの精度や建方順序等を改善することで、パネル建て方作業時間が短縮され、施工効率が向上することに着目し、構法の標準化を目的に研究を遂行している。本稿では、施工性を高めかつパネル取付け時間の平準化できる工事仕様の立案、および実プロジェクトでの検証を行い、その仕様に対する施工歩掛りについて考察する。

59 建築基準法に基づく告示を公布・施行：CLTを用いた建築物の一般設計法（平成28年4月1日公布・施行），CLT材料の品質及び強度（平成28年3月31日公布・施行），CLT部材等の燃えしろ設計（平成28年3月31日公布・施行）

4.1.2. 既往の研究と研究の位置付け



Photo 4-2 つくば CLT 実験棟
TSUKUBA CLT test house



Photo 4-2 湯川村 CLT 共同住宅
YUKAWA CLT apartment

CLT パネル工法を対象とした施工性に関する既往研究としては、林志手による研究⁴⁾が挙げられる。これは、CLT パネル工法によって建設された「湯川村共同住宅 (Photo 4-1)」について、労務工数調査を通して躯体工事工程を考察したものである。また、(公財) 日本住宅・木材技術センター、(一社) 日本 CLT 協会の開発・普及事業²⁾では、「つくば CLT 実験棟 (Photo 4-2)」の建設における労務工数調査が実施された。Table 4-1 に、既往研究の対象事例の概要をまとめる。これら 2 つの調査における、主な CLT パネルの建方工程に関する考察は、以下のように整理できる。

- ① 1 枚につき 8 分の建込み標準作業時間 (CLT パネル揚重から後続のパネルの揚重開始までの時間) で、施工速度を設定できることが、建方工程から明らかとなった。(湯川村共同住宅)⁶⁰
- ② CLT パネルの部材の大きさや重さ (材積) は、取り付け時間の増減に影響がないことが、各部材の作業時間とパネル材積の相関関係の検証により明らかにされた。(つくば CLT 実験棟)⁶¹
- ③ CLT パネル工法の建方は、クレーンによる揚重を伴う作業であり、クレーン作業時間がクリティカルパスとなる。よって、「パネルセット」と「ボルト締め」に関する作業人数の増員は、短工期化には繋がらない。(湯川村共同住宅)⁶²

60 参考資料86) 林による湯川村共同住宅の建方工程で明らかとなったのは、CLT パネル1枚につき8分の取付け時間で、施工速度を設定することが可能であることである。揚重から設置まで240秒 (壁パネル268.4秒と床・屋根パネル213.8秒の平均を取ったもの)、ナット2本固定完了まで140秒を根拠に算出したもの。

61 参考資料84) pp.68-69では、パネルのサイズや材積ではなく、枚数当たりの標準時間で全作業時間を検討することが妥当であるかを明らかにするために、「各部材の作業時間」と「パネル材積」の相関関係を検証している。得られた作業時間を壁・床・梁 (まぐさ) 毎に分け、部材の体積と取付け時間の相関係数を分析すると、係数のR二乗値は、壁：0.1502、床：0.026、梁：0.0481といずれも低く、部材の体積と取付け時間に相関関係があるとは言えないとしている。(通常R二乗値の係数が0.6以上を示した場合、両数値に相関関係があると考える。) 同様に、部材の面積と取付け時間の関係においても、壁：0.114、床：0.1069、梁：0.0299といずれも低く、面積と取付け時間に相関関係があるとは言えない。

62 参考資料86) における林の考察によれば、作業人数の影響について湯川村共同住宅での調査より「パネルセットと、ボルト締め、共に、クレー

換言すれば、CLTパネル工法の施工計画では、総パネル数を根拠にした建方の工程計画が可能であると言える。本研究では、既往研究によって得られた小規模のCLTパネル工法での研究成果を大規模な計画に活かし、工程計画の指針の精度向上を目指す。

また、CLT導入による工期の短縮には、施工者による施工の合理化のみならず、施工を見越した設計の見直しが重要である。本研究では、既往研究の結果を元に、施工効率化に向けた施策を実設計に反映して検証を行う。

Table 4-1 先行研究におけるプロジェクトの概要, The reference project description

プロジェクト Project	湯川村 CLT 共同住宅 YUGAWA CLT apart.	つくば CLT 実験棟 TSUKUBA CLT test house
構造形 Structure	CLT パネル工法 CLT panel structure ※大臣認定による構造計算	CLT パネル工法 CLT panel structure
建築用途 Facility	共同住宅 Apartment	実験棟 Test house
規模 Size	2階建て 4住戸 2 stories, 4 units	2階建て+ロフト 2 stories + loft
施工期間 Construction	2014年10月—2015年2月 Oct. 2014 - Feb. 2015	2015年11月—2016年3月 Nov. 2015 - Mar. 2016
建築面積 Build. area	256.26 m ²	130.00 m ²
延床面積 Floor area	387.15 m ²	166.00 m ²
パネル接合形 P. joint	引きボルト接合 Bolt joint	U字金物接合 U-shaped plate joint

ンによる揚重を伴う作業であり、クレーン作業がクリティカルパスとなる。」ことが報告されている。また、「作業人数を増加することで作業時間の短縮が見込めるが、1つのボルト穴に対して1人でしか作業を行うことができないため、各パネルのボルト穴数以上の人数を確保しても無駄になる。」としている。

4.1.3. 既往研究を踏まえた CLT 躯体工事における課題

前述の既往研究における 2 事例から、効率化を阻害するいくつかの課題が明らかとなっている。下記に、代表的なものをまとめる。

「湯川村 CLT 共同住宅」 (Photo 4-1)

(福島県湯川村, 2015 年竣工)

- ① CLT パネルの接合方式は、引きボルト接合が採用され、あらかじめ加工された壁パネルの孔に引きボルトを差込み固定された。基礎との緊結においてボルト位置の精度によっては、調整を要するため、パネルの建込み時間が遅延する場合がある⁶³。
- ② パネルの建込み後、仮設の支持材で補助して後続の設置を進めたことで、補助材の設置・解体の時間を要する結果となった。パネルの建込み順序を変更し、設置と同時にパネルが自立するようにすることで、補助材に関わる作業は省略できる。
- ③ 建込み手順は、あらかじめ壁パネルとまぐさ・腰壁を地組みし、まとめて吊り込む工程とされた。しかし、建込み時の調整が増え、効率化にはつながらなかった。

「つくば CLT 実験棟」 (Photo 4-2)

(茨城県つくば市, 2015 年竣工)

- ④ CLT パネルの接合方式は、U 字金物接合が採用され、設置個所にあらかじめ取り付けけた金物にパネルを建込み、ビス止めされた。パネル設置位置の自由度が高く、パネルセット時間は短い、建方精度が低く、結果的に余分な調整を要した。
- ⑤ パネル同士のクリアランスとして、パネル毎の幅をそれぞれ 2mm 短く加工した。余裕を見込みすぎたことで建方精度の低下につながり、結果的に現場加工による調整を余儀なくされた⁶⁴。
- ⑥ CLT パネル工法 (構造設計ルート 1) を基準とした、幅 2.0m 以下の小幅パネルで構成されたためパネル数が多く、全体の建方工期

63 参考資料86) で調査された湯川村共同住宅で、基礎へのホールダウンボルトの打ち込みが最大の課題であるとされた。一方で、続く参考資料 2) p75にある通り、U字金物接合を基礎との接合に用いたつくばCLT実験棟においても、ボルト位置の精度を高く施工しなければならない問題は変わっておらず、引きボルトの設置と手間がさほど変わらないことが明らかになっている。

64 参考資料84) pp.71-72のつくばCLT実験棟で行われた先行調査において、職長へのヒアリング、現場調査員の報告により、つくばCLT実験棟の

が長くなった。

CLTの躯体工事においては、上記の課題点が認められるが、CLTパネル設計の改善にこれらの知見を用いている事例はない。本研究では、実際に大規模建築の計画において、研究成果をフィードバックして計画に実装し、効果を検証することを目的とする。これにより、効率化のための有効な施策・指針を示すことが可能である。

4.1.4. 研究の方法

本研究の主たる調査対象は、CLTパネル工法による買取型復興公営住宅整備事業で建設された「いわき CLT 復興公営住宅」(Photo 4-3, Photo 4-4) であり、主構造を CLT パネル工法とした低層集合住宅である。本事例は、福島県復興住宅の整備事業⁶⁵の中で実施された RC 造をはじめとする他構造の事例⁶⁶と比べ、5.5 ヶ月と短工期を実現している。類似の間取りが連続するため、躯体工事は繰り返しの建方であり、効率化を分析しやすく、標準作業時間のデータを多く収集可能であると考えられる。

事業者として選定された、「ふくしま CLT 木造建築研究会 | 木あみ」が、設計施工を担った。筆者ら(青島、志手)は、基本設計段階から全日の研究会に参加し、総合監修として設計の改善案と施工計画の立案を行なった。これをもとに、事業者によって実施設計・施工計画が行われ、当研究会の承認を受けて実行された。施工中には、筆者らは実際の建方工程についての労務工数調査を行い、設計段階の施策の妥当性を検証した。Fig. 4-1 に、実際に行った研究の流れを示す。



Photo 4-3 いわき CLT 復興公営住宅外観, Exterior of the IWAKI CLT public housing for revitalization

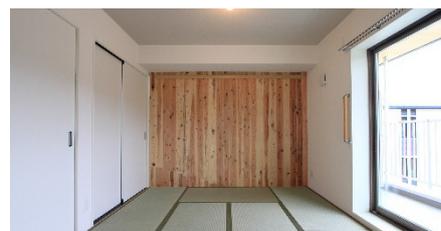


Photo 4-4 いわき CLT 復興公営住宅住戸内観, Interior of the IWAKI CLT public housing for revitalization

パネル加工は、パネル幅をそれぞれ2mmのクリアランスで加工され、

「『クリアランス範囲内の誤差』の蓄積は、床パネルのクリアランスで吸収できないほど大きくなる。このことが、床パネルの設置に多くの時間を要した原因と推測される。」と報告されている。

65 福島県は、2011年に発生した東日本大震災に伴う原子力災害により避難を余儀なくされている被災者の居住の安定を確保するために整備する災害公営住宅を「復興公営住宅」と称して整備を進めてきた。『福島県買取型復興公営住宅整備事業』とは、復興公営住宅の整備を迅速かつ円滑に推進するため、県内の民間事業者が、復興公営住宅として整備する住宅及びその附帯施設を県が買い取る事業を実施するものである。(福島県買取型復興公営住宅整備事業実施要綱より)

66 福島県は、4,707戸(戸建てを含む)を整備した。その中で、2018年度末までには復興公営住宅の団地として全125棟、全3,512戸の中・低層集合住宅を整備した。工期はそれぞれ構造形式ごとに、RC造94棟(PCa含む)平均13.1ヵ月、鉄骨造19棟平均8.6ヵ月、軽量鉄骨造8棟平均5.5ヵ月、木造(CT以外)2棟平均7.0ヵ月となっている。

本稿の構造を以下に示す。まず、対象事例における CLT 導入の経緯をまとめ、既往研究で得られた知見をもとに、CLT パネル工法の施工効率化に向けて立案した「パネル設計上の施策」と「施工計画・管理における指針」に対する仮説と実装の状況を示す（第 2 節）。次に、建方工程において実施した労務工数調査の内容をまとめ、第 2 節で示した仮説の実装によって、どのような効果がみられたかを調査データをもとに分析する（第 3 節）。

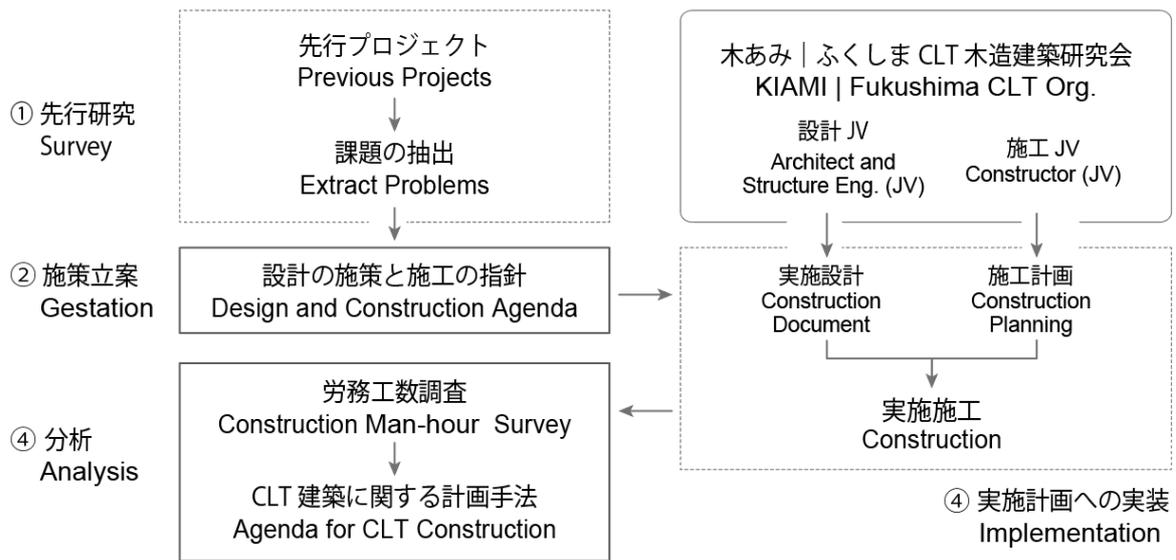


Fig. 4-1 研究の構成 Chapter Structure of Research

4.2. いわき CLT 復興公営住宅における CLT 導入

4.2.1. 研究対象の概要と CLT 導入の経緯

福島県は 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の被災者及び原子力災害による避難者に対する生活の再建を目的として、全 4,890 戸の復興公営住宅を整備する計画を決定した。その中で、2018 年度末までには復興公営住宅の団地として全 125 棟、全 3,512 戸の中・低層集合住宅が整備された。

一方で、2016 年 3 月及び 4 月に構造設計や防耐火設計に関する技術基準告示が公布され、CLT パネル工法が確立した。これを受けて、福島県は、CLT を用いた建築技術の確立と普及促進を目的に、復興公営住宅整備事業に CLT パネルの導入を決定した⁶⁷。

CLT 導入が公示された 3 団地のうちで唯一、買取型復興公営住宅整備事業として設計・施工 JV の事業者を選定するものであった「いわき市下湯長谷地区・北工区」の建設が先行された。福島県の事業者選定委員会⁶⁸により「ふくしま CLT 木造建築研究会 | 木あみ」が選定された。同工区は、2017 年 2 月 14 日基本協定締結後、約 5.5 カ月の工期を経て、2018 年 2 月に「いわき CLT 復興公営住宅」として竣工した。同計画は、国内における CLT パネル工法による大規模な低層集合住宅の先行事例と言える。

4.2.2. CLT 導入による施工効率化にむけた仮説の立案

第 1 節でまとめた考察と課題をもとに、施工効率化に向けた仮説を立案した。設計に関する仮説と、施工計画に関する仮説として、合計 5 つの対策を立案し、「いわき CLT 復興公営住宅」の実施設計への導入を目指した。

67 福島県は、2016年10月24日に、記者発表を通じて「CLT（直交集成板）工法の県内建築技術の確立と普及促進を目的に、復興公営住宅整備事業にCLT工法を導入する」ことを発表した。

68 平成29年1月25日に事業者選定委員会を開催して、全4者からの提案内容を審査された。ふくしまCLT木造建築研究会 | 木あみの提案は、木材の使用量が高く、定性的評価の「住宅の供給体制に関すること」で、日本CLT協会や工業系大学との連携、CLTパネル生産体制の構築とそのオープン化、さらにはCLT工法の現場経験者と地元業者による連携した施工体制の提案が評価された。（福島県買取型復興公営住宅（いわき市下湯長谷地区・北工区）事業者選定委員会審査講評より）

- ① 仮説1（設計）：クリアランスの設定
パネル毎のクリアランスを1mmと設定しても、パネルセットの施工性に影響しない⁶⁹。むしろ、建方精度が確保され、連続的な建込みによるずれを抑えて後続の円滑な建方につながる。
- ② 仮説2（設計）：パネル接合方法の選択
CLTパネルの接合方法⁷⁰を選択する上で、考慮すべき点は建方の精度確保であり、先行事例のうち、「湯川村共同住宅」で採用された引きボルト接合によって壁パネルを固定する。パネル設置の際の自由度はなくなるものの、±1mmの精度で設置されたボルト位置に壁パネルが設置されることから正確性が確保される。
- ③ 仮説3（設計）：大版パネル化
建方工程の総時間は、パネル数に比例するため、可能な限り大版パネルを用いて、パネル数ならびにパネル接合点数や基礎との緊結箇所、パネル突き付け箇所を抑える。大版パネルとしても、パネル毎のパネルセット時間は増加しない。
- ④ 仮説4（施工計画）：標準作業時間8分による工程計画
第1節2項で示した通り、パネルの使用部位に関わらず、一枚あたりのCLTパネルに対して作業時間8分を基準とした積算によって、建方の工程計画を立てる。
- ⑤ 仮説5（施工計画）：工区毎の管理
住戸毎に工区分割可能なパネル構成として、工区内の建込み順序については、できるだけ住戸毎に建込みをまとめて行う方法と、作業日毎に壁パネルを先行して取付けた後、まとめてまぐさ・腰壁を設置していく方法の2通りで設定した。

69 参考資料84) p72で実施された職長へのヒアリングにおいて、次のように考察されている。「CLT パネルの工場加工は、手作業でなく、プレカットマシンで行う。そのため、加工精度は高い。気象状況などが影響した材料の伸縮を無視すれば、1ミリ以下のクリアランスでも、特段の問題は生じないと思われる。」

70 参考資料84) p73に、「壁パネルの作業時間は、先述したごとく、U字金物接合が約230秒、引きボルト接合が約360秒と、U字金物接合の方が2分程度早い。しかし、引きボルト接合は、ボルトの位置さえ間違っていなければ、壁の施工精度が保証されるのに対し、U字金物接合は、壁パネルの面内方向に施工誤差が生じる可能性がある。」と記載されている。この誤差が、床パネルの設置時に大きな影響を及ぼすとされている。

4.2.3. 設計施工の体制と設計に関する仮説の実装

事業体制は、設計・工事監理事業者（福島県内の設計事務所2社、CLTパネル工法の設計実績のある構造設計事務所）と、施工事業者（CLT施工実績を有する建設会社を含む4社）に加えて、既往の研究成果を活かすために総合監修として大学機関を含めた実施体制が組まれた。建物の概要をTable 4-2に示す。実施設計に向け、意匠設計と構造設計によるパネル設計の段階で、前節の設計に関する3つの仮説が検討され、実施設計図へと反映された。CLTパネルの数量を、棟毎および使用部位毎にまとめたものをFig. 4-2とTable 4-3に示す。

パネルの接合方法としては、引きボルト接合が採用された（仮説2）。構造のCLTパネル構成を、Fig. 4-2に示す。CLTパネル工法の告示に準じて、大版パネルを用いるための方法として、構造設計ルート3による設計を立案し採用された⁷¹（仮説3）。大版パネルは、住戸間の界壁に用いられ、最大で幅6.83m高さ2.75mの無開口パネルが用いられた⁷²（Fig. 4-4）。大版パネルの引きボルト接合箇所は、上下2か所ずつ計4点である（Fig. 4-5）。また、パネルの加工寸法は、それぞれ設計寸法から-1mmで工場に発注された（仮説1）。建込みの工区を明確にするため、パネル構成は、住戸間の界壁となる大型パネルで住戸毎に完結する計画とされた（仮説5）。

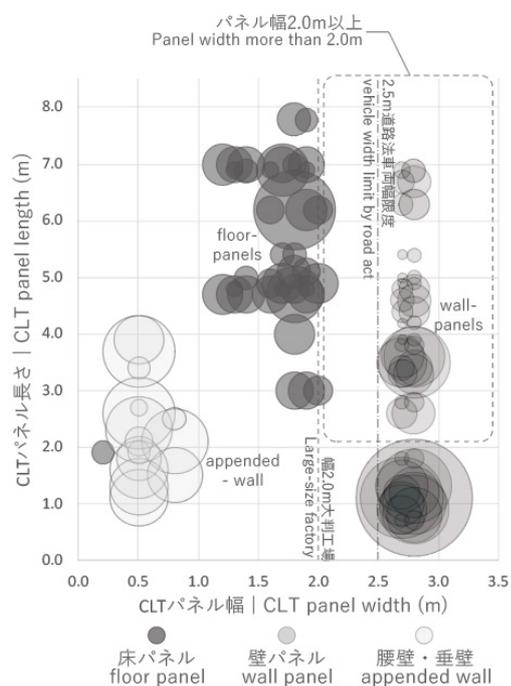


Fig. 4-2 パネルの数量分布 Panel quantity distribution

71 CLTパネル工法で許容応力度計算（ルート1）を用いる場合、耐力壁の幅は90cm以上2m以下に限定されるが、これと比較すると3倍以上の幅を持つ大型パネルを採用した。構造設計ルート1では、構造計算が簡易である一方、壁の配置やサイズ、架構形式などが限定されており制約がある。構造設計ルート3では、構造計算ソフトを用いた高度な計算が要求されるが、大型パネルを用いた自由度の高い設計ができる。

72 使用されたCLTパネルのうち、最大の壁パネルは、高さ2.75mで長さ6.83m、床パネルにあつては、最大長さ7.77m、最大幅1.95mであった。これは、大量のパネル供給に対応するために制作にあつたCLTパネル製造工場の2工場で製造限界が異なり、一方は12.0m×3.0mもう片方は4.0m×2.0mであったことによる。さらに、建設地までのパネル搬送ルート状況を考慮した上で、原則の道路法車両幅限度である幅2.5mに収まるものと、特殊車両通行許可を受けて搬送するそれ以上のパネルが分けられた。

Table 4-2 対象建物の概要, The target project description

事業名 Project name	いわき CLT 復興公営住宅 IWAKI CLT public housing for revitalization
施工期間 Construction	2017年9月15日-2018年2月28日 (5.5ヵ月) 15th Sep. 2017 - 28th Feb. 2018 (5.5 months)
業務体制 Project team	ふくしま CLT 木造建築研究会 木あみ KIAMI Fukushima CLT organization
設計: Architect:	(株)白井設計, (株)邑建築事務所 (設計共同体) Shirai sekkei Inc., Yu architect & associate Inc. (JV)
構造設計: Structure eng.:	(株)日本システム設計 Nihon system sekkei Inc.
施工: Constructor:	会津土建(株) (株)渡辺組 菅野建設(株) 山木工業(株) (特定建設工事共同企業体) Aizu doken Inc., Watanabe gumi Inc. Kanno kensetsu Inc., Yamaki kougyou Inc. (JV)
総合監修: Supervisor:	芝浦工業大学 Shibaura institute of technology
建物用途 Building type	共同住宅 (復興公営住宅, 57戸) Residential building (Public housing for revitalization, 57 units)
構造形式 Structure	CLT パネル工法 (共用廊下部: 鉄骨造), 3階建て CLT panel structure (corridor: steel structure), 3 Stories
建築面積 Building area	I棟 (AW, AE) 1,087.61 m ² , II棟 (BW, BE) 1,000.26 m ² Building-I (AW, AE) 1,087.61 sqm, Building-II (BW, BE) 1,000.26 sqm
床面積 Floor area	I棟 (AW, AE) 2,486.81 m ² , II棟 (BW, BE) 2,194.14 m ² Building-I (AW, AE) 2,486.81 sqm, Building-II (BW, BE) 2,194.14 sqm
CLT 使用量 CLT usage	1,955 m ³ 1,955 cubic meters

Table 4-3 使用した CLT パネル数量と種類, CLT panel quantity

建物 Building	使用部位 Usage	数量 Qty	使用材料 Category		
B-I (18 unit)	AW	壁 Wall panel	S60-5-5, t150		
	(18 unit)	まぐさ・腰壁 Appended wall	S60-5-5, t150		
		床 Floor panel	Mx60-5-7, t210 Mx60-5-5, t150 (RF)		
	AE (12 unit)	壁 Wall panel	288	S60-5-5, t150	
		(12 unit)	まぐさ・腰壁 Appended wall	141	S60-5-5, t150
			床 Floor panel	171	Mx60-5-7, t210 Mx60-5-5, t150 (RF)
B-II (9 unit)	BW	壁 Wall panel	S60-5-5, t150		
	(9 unit)	まぐさ・腰壁 Appended wall	141	S60-5-5, t150	
		床 Floor panel	171	Mx60-5-7, t210 Mx60-5-5, t150 (RF)	
	BE (18 unit)	壁 Wall panel	135	S60-5-5, t150	
		(18 unit)	まぐさ・腰壁 Appended wall	54	S60-5-5, t150
			床 Floor panel	78	Mx60-5-7, t210 Mx60-5-5, t150 (RF)

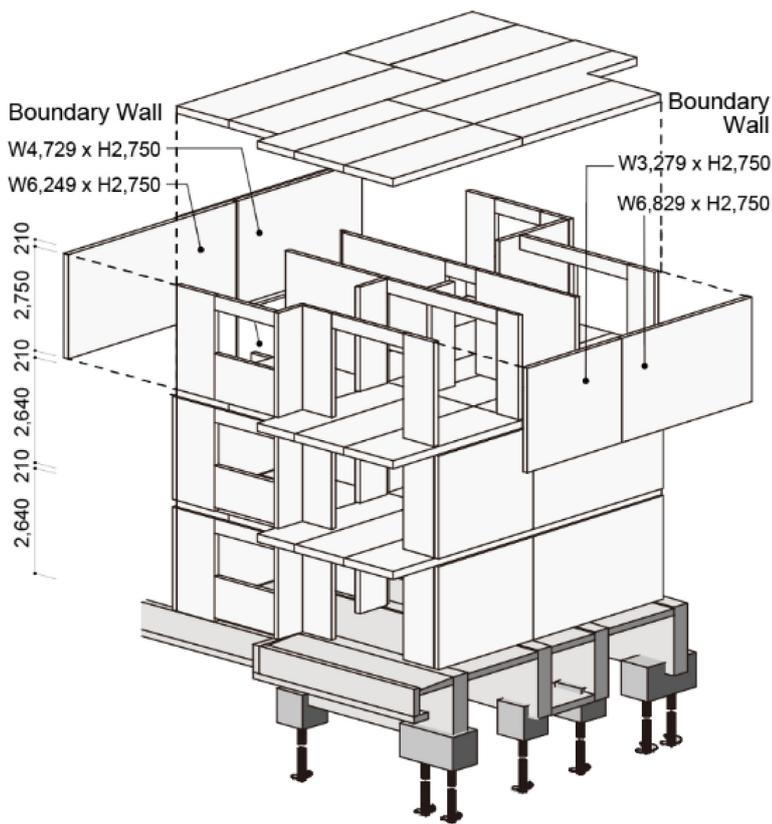


Fig. 4-4 CLT パネルの構造モデル Diagram of CLT panel system

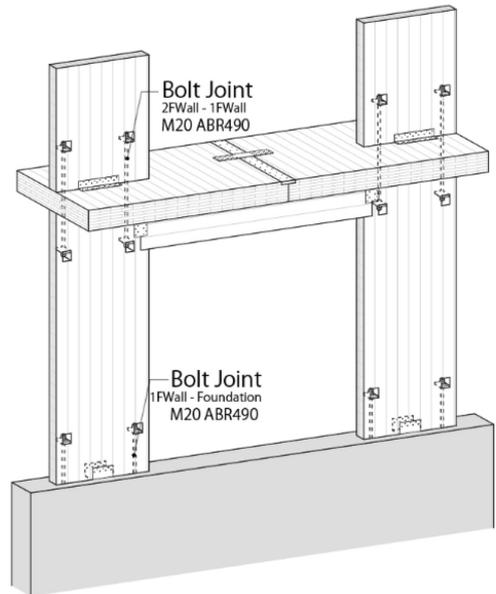


Fig. 4-5 パネル接合部 Diagram of CLT panel joint system

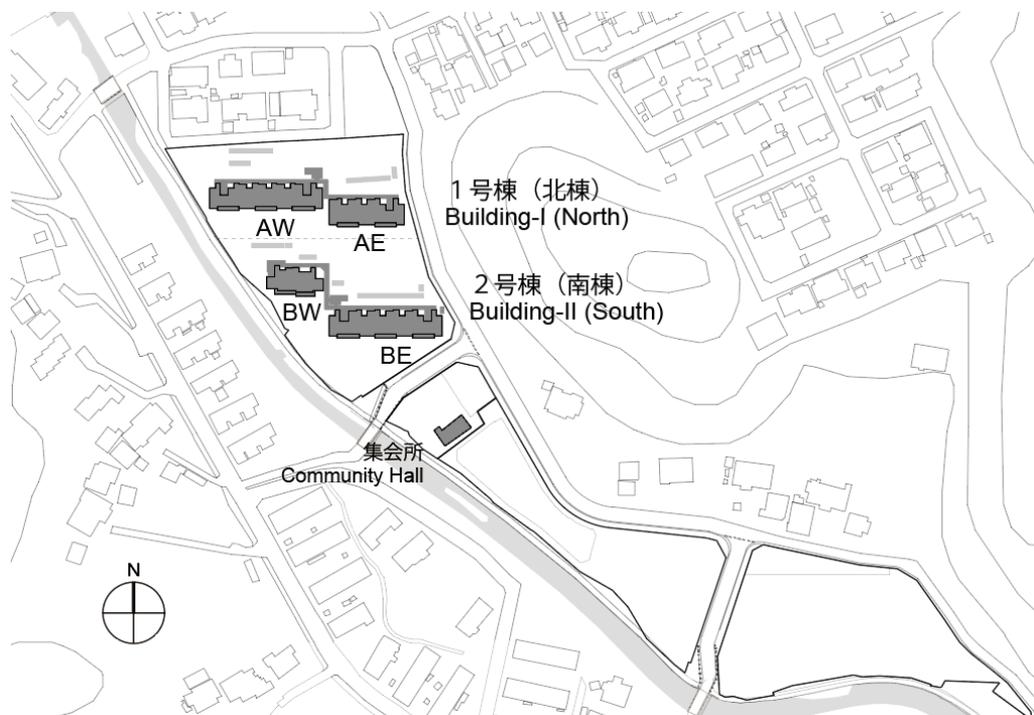


Fig. 4-6 いわき CLT 復興公営住宅の配置図 IWAKI CLT public housing for revitalization site plan

4.2.4. 施工計画における仮説の導入と建方の工程計画

対象の建物は、鉄骨造の共用廊下で繋がる1号棟（北側30戸）と2号棟（南側27戸）に分かれる（Fig.4-6）。建方工程は、さらに構造的に東西に分節されたAW、AE棟とBW、BE棟に分けて計画された。パネル部材数（壁パネル933枚、床パネル499枚、まぐさ・腰壁パネル443枚、合計1875枚のCLTパネル）に基づき施工計画を策定した。前章で挙げた既往研究における建込みの標準作業時間8分をもとに、AW棟19日、AE棟12日、BW棟13日、BE棟19日の建方の作業工程が立てられた（仮説4）。工程計画と、実施スケジュール、及び各作業員の人数をFig.4-7にまとめた。工区分割と工区毎の注意事項として、施工計画段階の研究会では、1日で作業完結できる工区分割と日毎のパネル建込み枚数を示した。パネル毎の作業時間にはばらつきが出ないように、建込み順序を示した。建方工程は、CLTパネルの現場納入スケジュールを考慮して、3日で4戸の建方を完結させる計画とされた（仮説5）。

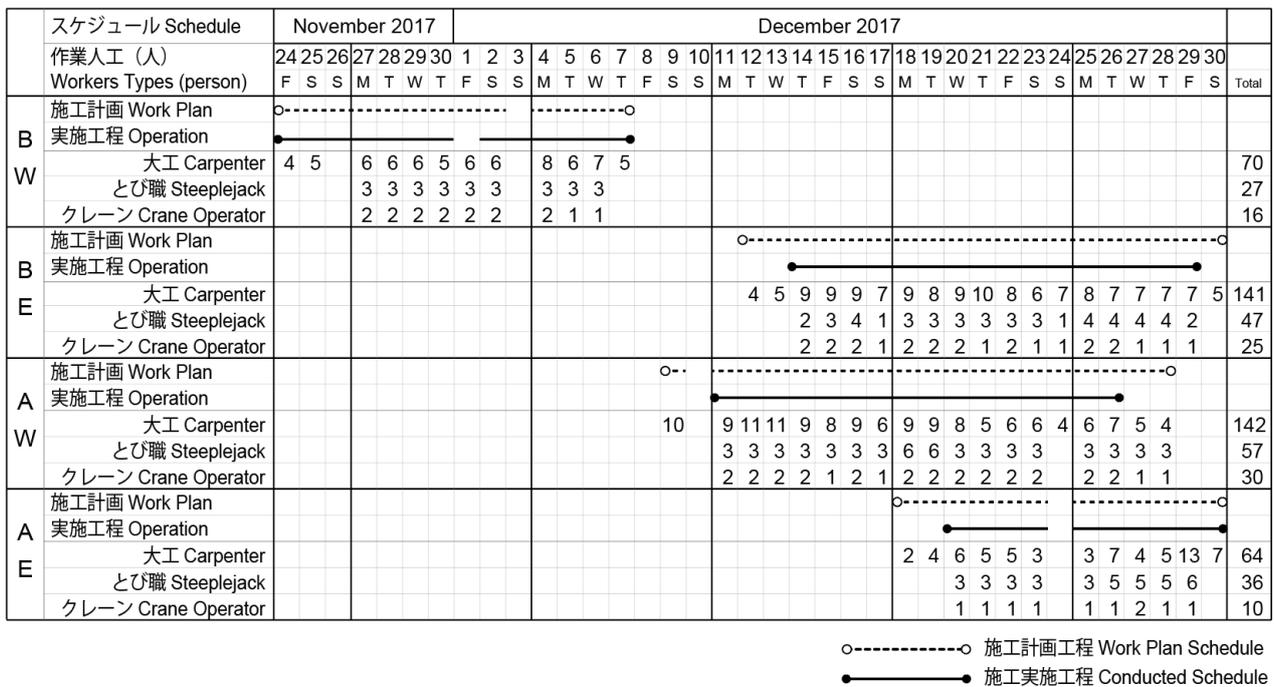


Fig. 4-7 施工計画と実施工程および施工人工 Work plan for panel construction and number of workers

4.3. 工数調査による施工効率化の効果検証

4.3.1. 工数調査の概要

労務工数調査は、「いわき市下湯長谷地区・北工区復興公営住宅整備事業」の建設現場で行われた。調査期間は、施工計画から 2017 年 11 月 24 日から 12 月 29 日までの約 1 ヶ月間とし、調査を行う工程は 4 棟の建方工程とした。調査員 2 名が現場に常駐し、開始時刻と終了時刻の記述と、撮影したビデオによる作業時間の確認を行った。結果を、Fig. 4-7 の調査シートを使用して記録した。CLT 建方工程でクリティカルパス作業となるクレーンの作業に注目し、各作業の開始時間と終了時間、作業人数を計測した。また調整作業等、懸念された点は、適宜備考欄や空欄に記入した。

4.3.2. 工数の計測条件と作業の分類

CLT パネルの建方工程の流れと、作業分類を Fig. 4-8 と Fig. 4-9 に示す。主作業は、パネルのクレーン揚重開始から、位置合わせ、ボルトの固定を経て吊り金物が外し始まるまでとし、「A 主作業：パネルセット」（目的に直接かかわる作業）と定義する。次に、揚重するための吊り金物を外し、仮置き場までクレーンが戻って後続のパネル揚重準備をするまでを「B 付随作業：玉掛け」（主作業と共に随時発生する作業）とする。玉掛けは、主作業のパネルセット 1 枚ごとに必ず発生する作業である。そして、主作業に用いるクレーンを用いなくとも並行作業が可能な段取りや準備、後始末を「C 付帯作業」（主作業の準備・後始末の作業）と定義する。

パネルNo.	作業項目	各人数	開始時間	終了時間	備考
12	パネルセット	5	09:05:31	09:10:13	シートを仮置き場下 セットからの 揚重
	ボルト締め	2	09:10:13	09:13:20	
	サポート材設置	2	09:13:20	09:14:08	
	玉掛け	4	09:14:08	09:15:57	

Fig. 4-8 調査シート Survey sheet for actual operating time



Fig. 4-9 作業工程の分類 Work classification

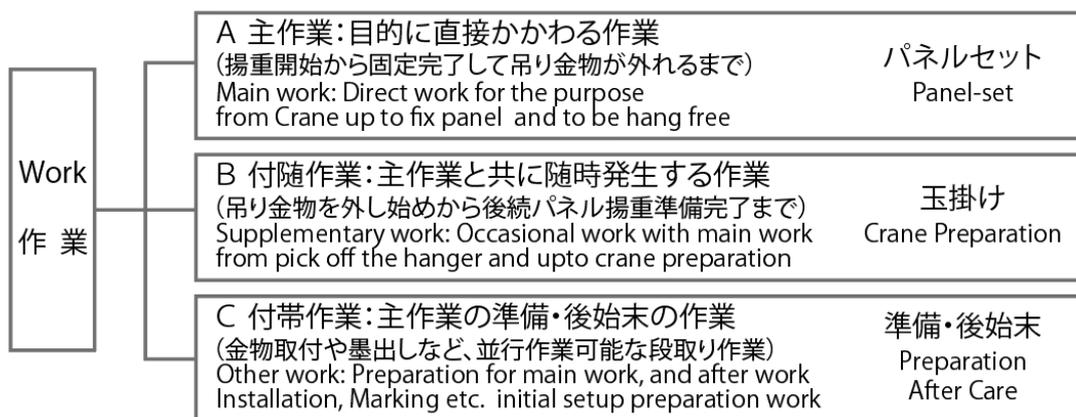


Fig. 4-10 作業分類の関係図 Work relation on survey

建方工程の総作業時間 T_c は、各作業時間と繰り返し回数 x の関係によって、(1) 式で表される。各工区において、作業開始の荷降ろしや墨出しに要する付帯時間を C_1 、及び最終パネル設置後の処理に要する付帯時間 C_2 として加える必要がある。

$$T_c = (A + B) \times x + C_1 + C_2 \dots (1) \quad \text{Total Work Time: 総作業時間}$$

また、(2) 式が成り立つことが作業を遅延させない条件である。

$$C < (A + B) \dots (2) \quad \text{Critical Pass Provision: 成立条件}$$

Fig. 4-10 に示すように、クレーンの稼働する建方工程をパネル設置時間の積算とするには、タクトタイムである A と B の合計を、 C が上回らず、金物取付や墨出し等の並行可能な作業によって工程を遅延させないことが工区作業時間の円滑な完了の必要条件である。

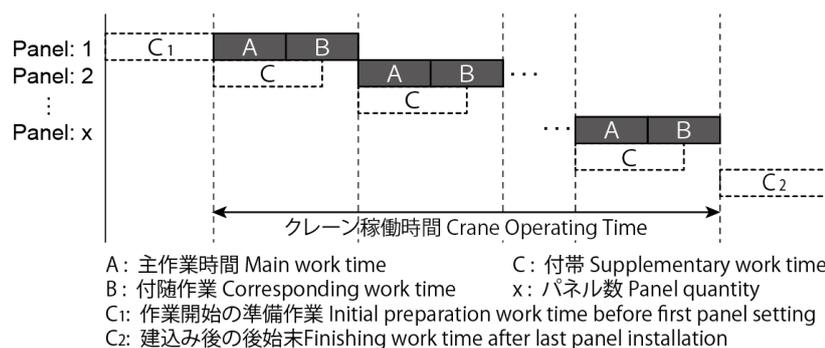


Fig. 4-11 CLT パネル施工に関わる総作業時間 Actual Operating Time of CLT Panel Construction

4.3.3. 部位、棟ごとのばらつきにみる建方精度の検証

パネル建込み時間のばらつきをみることにより、建方工程のスピードと単位作業時間の安定性が分析可能である。建方精度が低いことで発生する建込み作業中の調整作業等、余分な時間の発生を確認できる。これにより、前章の「仮説 1、2」を検証する。

CLT パネルの使用部位毎に、各棟の階毎に分けた主作業時間（パネルセット）による分布を Fig. 4-11 に示す。先行事例の内で建方時間のばらつきが大きかった「つくば CLT 実験棟」と比較した⁷³。パーセンタイルを示すことで、データのばらつきを確認する。ばらつきが少ないほど合理化が進み、理想的な時間に収斂したと言える。

73 参考資料84) p65の、各パネルの取付け時間ヒストグラムデータを用いて、つくばCLT実験棟における分布図を作成した。

棟毎に見ると、BW棟の作業時間が長く、ばらつきも大きいことが分かるが、これは、BW棟を試験的に先行して作業員全員の情報共有の時間を設けたためである。また、BE棟も比較的ばらつきがあり、突出して75~95%の数値の分布が大きい。これはAE,AW棟と比べて、現場でのパネル調整が行われ、部分的に時間がかかったためである。特にBE棟1階で壁パネルとまぐさ・腰壁の調整があったことが、2,3階の壁と床パネルまで影響した。各部位毎に見ると、壁パネルの内各棟1階の作業時間は長く、ばらつきが比較的大きい。これは、基礎との緊結を慎重に進めたためである。一方で、まぐさ・腰壁のパネルサイズは、他と比べて比較的小さいにもかかわらず、作業時間とばらつきは、壁や床パネルと同様の傾向を示した。

「つくば CLT 実験棟」の労務工数と比較すると、総じて作業時間のばらつきが抑えられていることが確認できる。特に、床パネルのパネルセット作業時間では如実であり、「つくば CLT 実験棟」で加工時間を含めたため多くの時間を要した床パネルの作業時間は、「いわき CLT 復興公営住宅」では半分以下に抑えられ、さらにばらつきがないことからクリアランスの設定が適切であり、接合方法（引きボルト接合）による建方精度の低下が抑えられたと言え、「仮説 1、2」が適当であることが実証された。

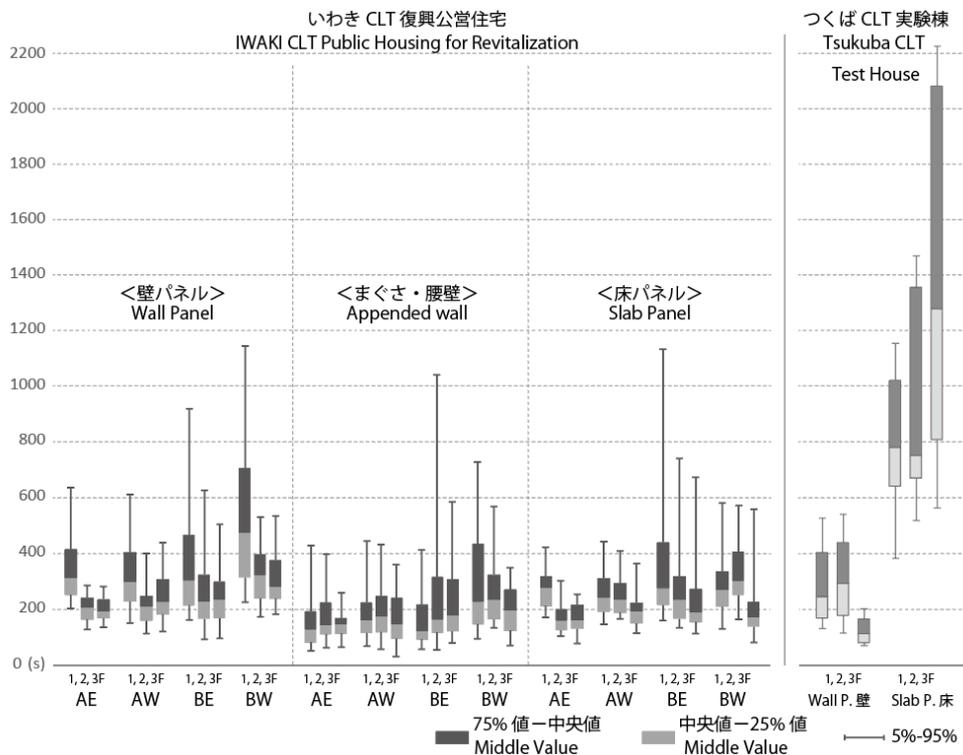


Fig. 4-12 パネル毎の建て方工程における作業時間分布 Time range of panel-setting process

4.3.4. 大版パネル化が施工の効率に与える影響

「仮説3」をもとに実装された、住戸間の界壁による大版パネルへの変更によって、小幅パネルで設計された場合と比較することで仮説の影響を確認する。まず、既往研究の2事例で用いられてこなかった2.0mを超える壁パネルの作業時間への影響を確認するために、壁パネルの幅2.0m毎に分け、パネルセットの平均作業時間を集計し、Fig.3-12にまとめた。壁パネル毎の作業時間は、パネルの大きさに相関して増大することが確認された。しかし、平均ではいずれも工程計画で設定した8分を大きく上回ることはなく、灰色のバーチャートで示した大型パネルを2枚以上に分割した場合の作業時間を下回り、結果的に効率化につながると言える。

また、前述の既往研究の事例のうち、小幅パネルのみで設計され、同じく引きボルト接合が採用された「湯川村 CLT 共同住宅」との比較を行う。Fig. 4-12に先行事例の壁パネルの平均し作業時間を示し、Table 4-4に、各棟の住戸数および総作業時間を示す。住戸毎の作業時間を見ると、前節ではらつきがなく効率的に工程が進んだAE、AW棟は、遅延なく作業が進み、大型パネル化による時間短縮が確認された。また、対象事例の場合、大型パネルは壁パネル全体の38% (399枚)あり、これをすべて構造設計ルート1で設計した際に最大となる幅2.0m以下のパネルで構成したと仮定すると、882枚の壁パネル数増加に相当し、約8日間分の建方工程が増加する可能性があったと想定される。

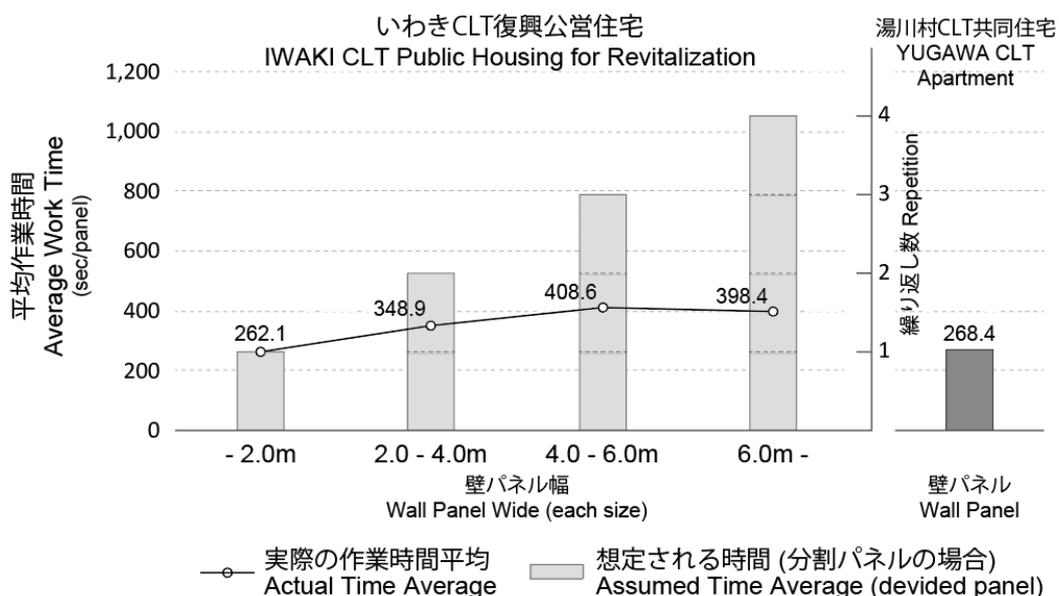


Fig. 4-13 パネルサイズ毎のパネルセット作業時間の平均 Time average of panel-setting process by panel size

Table 4-4 住戸毎の作業時間比較 Comparison of unit panel construction

プロジェクト Project	棟 Bdg.	数量 Unit Qty	作業時間 (h) 建物総合 Work time Bdg-total (h)	作業時間 (h) ユニット毎 Work time per unit (h)
IWAKI CLT*	AW	18	61:21:34	3:24:32
いわき CLT*	AE	12	41:06:49	3:25:34
	BW	9	38:06:07	4:14:01
	BE	18	80:52:39	4:29:35
YUGAWA CLT**	A	2	7:42:01	3:52:00
湯川 CLT**	B	2	7:21:52	3:40:56

* いわき CLT 復興公営住宅 IWAKI CLT Public housing for revitalization
Unit size: 3LDK-A 76.0m², 3LDK-B 76.0m², 2LDK 60.0m²,
3LDK (Wheelchair-Accessible) 75.8m²

** 湯川村 CLT 共同住宅 YUGAWA CLT apartment
Unit size: 3LDK 88.0m²

4.3.5. 標準作業時間の妥当性と習熟効果

「仮説4」として示した、標準作業時間を根拠とする工程計画の妥当性を確認する。第2節4項で示した、Fig.5の工程計画と実施工程を見ると、4棟すべてにおいて、躯体工事が工程計画内で完了していることからわかるように、既往研究を根拠に設定したパネルあたり8分の標準作業時間には余裕があった。さらに、試験的に先行して施工されたBW棟以外の実施工程は短縮されている。これは、建設規模が大きく繰り返しの工程が連続したことと、建築計画の構成がシンプルで標準的な設計とされたことにより、作業員の習熟効果が現れたと考えられる。

習熟効果は作業を繰り返し行うことで作業能率が次第に向上する現象を示し、対数線形モデルで示される⁶⁴⁾。一般的に、パネル毎の累計平均作業時間Acと、繰り返し回数xの関係を(3)式で表すことができる。

$$Ac = t1 \times n \dots\dots\dots (3) \text{ Learning impact: 作業習熟効果}$$

- Ac: Work time par panel パネル毎の作業時間 (分/枚)
- t1: Operating time of first panel 繰り返し1回目の作業時間 (分)
- x: Repeat count 繰り返し回数
- n: Learning coefficient 習熟係数
- * Approximate gradient of op. time 作業時間の線形近似勾配

最もばらつきがなく工程が進められたAW棟の実績値に基づき、工区毎の平均作業時間をFig. 4-13に示す。ここで得られた、近似直

線の傾きの値が部位ごとの習熟を表す。各傾きは、壁パネル-0.49、まぐさ・腰壁パネル-0.08、スラブパネル-0.32であったため、この値を習熟係数 n とする。工程の進行に従って、「慣れ」の作用による作業員の習熟効果を見込むことができる。これにより、壁パネル、床パネル、まぐさ・腰壁の3つの習熟曲線は、Fig.4-14 に示すように、おおむね3分付近に収斂することが明らかとなった。

以上により、施工計画において基準とした作業時間 8 分は短縮が可能であり、習熟後の主作業時間 3 分に、湯川村 CLT 共同住宅での既往研究⁵⁸⁾から得られた付随時間の平均である 2 分 20 秒を加えた、5 分 20 秒を目標作業時間とすることができる。

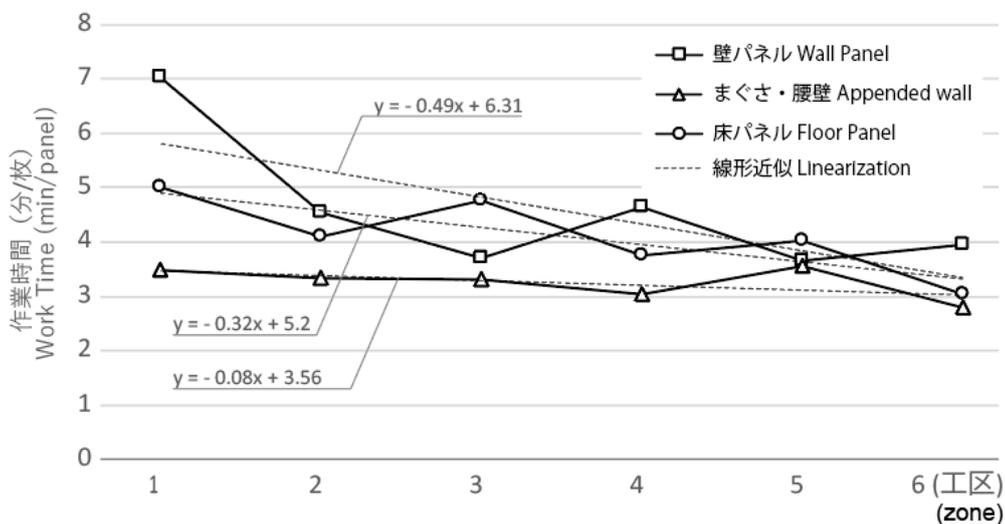


Fig. 4-14 AW 棟パネルセット作業時間の平均 Average time of panel-set time (AW)

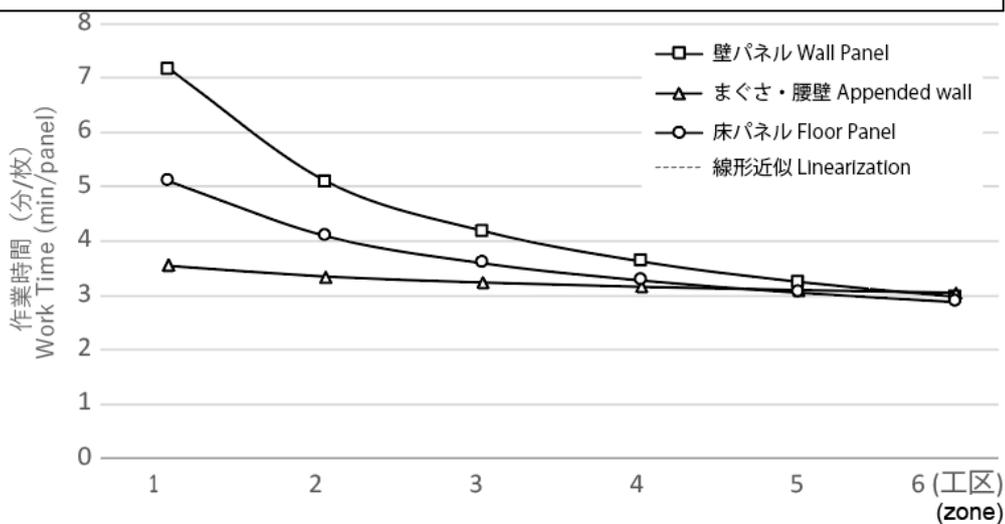


Fig. 4-15 作業習熟効果の計算結果 Learning curve of panel-set time (AW)

4.3.6. 建込み順序の違いによる工区毎の差異

「仮説5」の検証として、工区毎の建込み順序を考察する。建込み順序は、施工班毎の判断で進められた。BE棟はAW棟と同規模の棟であるが、AW棟に比べて作業時間のばらつきと総作業時間が大きいという事象が生じた。これは、建込み順序への配慮の有無が、作業時間のばらつきに影響したと考えられる。

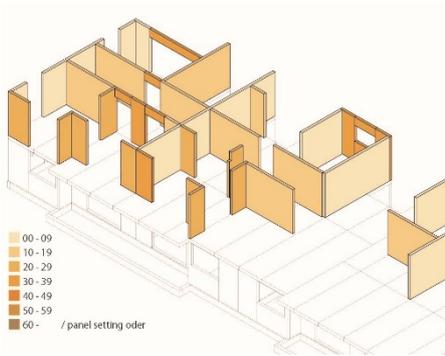


Fig. 4-16 AW棟2階部分の壁パネルセット作業順序 AW 2nd floor wall panel setting order

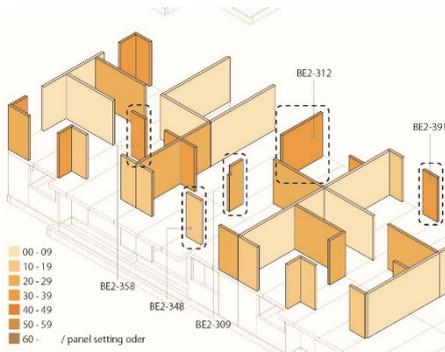


Fig. 4-17 BE棟2階部分の壁パネルセット作業順序 BE 2nd floor wall panel setting order

Fig. 4-15にAW棟、Fig. 4-16にBE棟それぞれの2階部分の半分3戸の工区におけるパネル毎の建込み順序について、開始から40枚のパネルを順に示す。「仮説5」で示した、2つの建込み順序の中で、AW棟は、できるだけ住戸毎に建込みをまとめて行う方法を採用し、BE棟では、作業日の最後に、まとめてまぐさ・腰壁を設置していく方法がとられた。結果的に、各3住戸の建方工程は、BE棟では、合計15時間16分（12/17：7時間10分および12/18：8時間06分）かかったのに対し、AW棟では、合計12時間21分（12/16：7時間09分及び12/17：5時間11分）で工程を完了し3時間の作業時間の差がみられた。これは、BE棟の壁パネルにおいて計7回のボルト穴加工による調整が行われたからである。1日工区内の建込み順序に注目すると、AW棟（Fig. 4-15）では、建込みが西側住戸から順に進み、後続のパネルが先行するパネルを支えるようにT字を構成する形で、施工が進んでいる。このため、建方が安定したことで、終盤まで調整時間が発生せず、おおむね各6分でパネル毎の建込みが完了している。

一方で、BE棟（Fig. 4-16）では、建込み順序がばらばらであり、施工エリアが広い。このため、後続のパネル設置がパネル同士に挟まれた融通の利かない設置となり、調整に時間を要している。また、先行するパネルと接しない、不安定な自立したパネルが多く散見される。Fig. 4-16に点線で、この時点での独立パネルを示す。

さらにFig. 4-17, Fig. 4-18では、この2棟の建て方の進行をおよそ10枚程度のパネル毎に分けて、プロセスを追った。BE棟の中盤においてパネル毎の作業時間が長いことが確認できる。

以上の2工区の比較により、工区内のパネル取付け順序が、建込みの効率を左右することが分かり、住戸毎の完結した工区毎に建込みを進め、建方中に余分な支持材を要しないように、順次パネルが自立するように取付けを進める必要があることが実証された。



Fig. 4-18 AW 棟 2 階部分の壁パネルセット作業順序と作業時間の関係
AW 2nd floor wall panel setting order and time

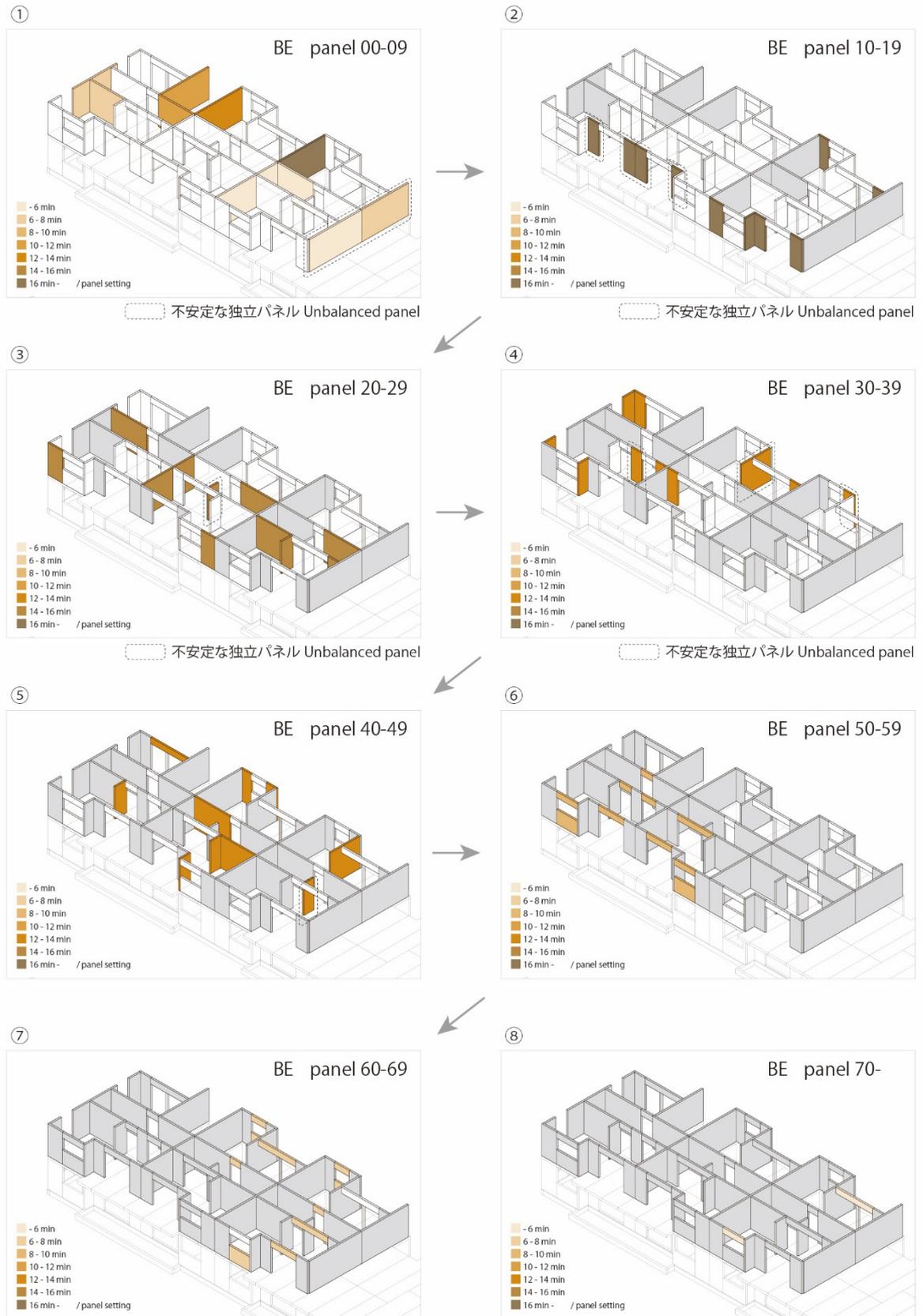


Fig.4-19 BE棟2階部分の壁パネルセット作業順序と作業時間の関係
BE 2nd floor wall panel setting order and time

4.4. 施工効率化の考察

CLT パネル工法は、パネルを組み立てて構造体を形成するため、躯体工事の短縮が可能である。工場プレカットによる精度確保によって、現場での建方は、高い施工効率で標準化できる。本研究の対象は、繰り返し型の躯体工事が連続する大規模な低層集合住宅であったことから、既往研究で比較的小規模な事例において考察された躯体工事に関する指針の精度が上がったと言える。国内における CLT パネル工法による初期の事例である既往研究の 2 事例と比べ、「いわき CLT 復興公営住宅」の施工は効率化した。

しかしながら、3 節で示した通り、建方の精度と建込みの順序が、建方工期を左右する。大規模な計画では特に、繰り返しの建方工程が連続することから、躯体の精度は後続工程への影響が大きく、注意を要する。建方の精度確保には、設計時に決定するパネルクリアランスと接合方法が大きな要因となる。さらに、施工を効率化するには、工程計画と施工上の合理化だけでは不十分であり、パネル設計の段階で施工を見越して計画することが必須である。

先行研究 2) では幅 2.0m 以下の壁パネルのみで設計され、それらの建込み時間には差がなかったが、2.0m を超える大版パネルが採用された「いわき CLT 復興公営住宅」では、建込み時間とパネルの大きさが相関する関係となった。しかし、小幅に分割した場合の所要時間と比べると所要時間は十分に短く、設計時の大版パネルの導入は、躯体工事の工期短縮に対して有効であると言える。

4.5. 小結

先行事例2件をもとに、CLT導入における課題を整理した上で、CLTパネル工法の施工効率化を目的とした、設計と施工計画に関する仮説を立案した。これをもとに、福島県で計画された「いわきCLT復興公営住宅」の設計と施工計画に実装し、躯体工事における労務工数調査を実施することで当該仮説の妥当性を確認した。本研究により、設計と施工の両面から、施工の効率化に資するCLT導入における以下の施策が示された。

<設計段階の施策>

- ① 建込みの余裕を目的とした過剰なパネル同士のクリアランスは、施工精度を阻害する可能性が高く、パネル幅を各1mmとすることで、連続的な建込みによるずれを抑えられる。
- ② 構造躯体全体の精度に大きな影響を及ぼすため、接合方法は設置位置の精度確保を優先した方法を選択するべきである。
- ③ パネル数を抑えることが、建方工程の短工期化には有効であり、そのために大版パネルを用いることが効果的である。

<施工計画・管理における指針>

- ④ CLTパネル工法において、玉掛けとパネルセットを合わせた建込み作業時間は、作業の習熟により3分程度に収斂することを示した。これに付随時間の平均の2分20秒を加えた5分20秒をパネル毎の建込み目標作業時間として考えることが可能である。
- ⑤ 完結する工区毎に建込みをまとめ、パネル毎の建込み順序の管理が重要であり、できるだけ支持材を要しない計画を立てる。

第5章
大型木質パネルを用いた宿泊施設の
環境的効果

第5章 大型木質パネルを用いた宿泊施設の環境的効果

5.1. はじめに

本章では、第3章で提示された対象項目として、建物の性能に関する検証を行う。大型木質パネルを用いて「ユニット型の居住空間」で、実践的に温熱環境効果を示すことを目的とする。対象は、4階建ての宿泊施設で、木質パネルとしてのCLTを外周壁・間仕切壁として構成要素に取り入れた計画である。

建物の熱容量の検証が必要であることは、第2章の欧州の先行研究で示したが、宿泊施設は室の利用が間欠的であることから、建物の熱容量は全体の冷暖房におけるエネルギー負荷を左右する大きな要因である。実際の検証としては、温熱環境の計測とモデルによる解析を行うことで、性能特性を考察する。

5.1.1. 背景と目的

2010年以降、直交集成板「クロス・ラミネイティド・ティンバー（Cross-Laminated-Timber：以下CLT）」の国内での利用が開始された^{注1)}。木材資源の活用という点や、製造に莫大なエネルギーを要する建築構造材料の代替材料として活用されることで、炭素排出の低減を目的に注目を集めている。パネル化による工期短縮が可能であることから、今後採用が増加することが考えられる。一方で、CLTの活用と普及に向けて、パネル自体を構造体とするCLTパネル工法のみならず、他構造との混構造や非構造利用による建物の木質化等の多角的な利用が求められると考えられる。

筆者らは、CLT等の木質厚板パネルによる外壁と界壁を採用することによって、木材の持つ断熱・蓄熱性能によって室内の温熱環境を向上させることに着目した。本章では、CLTを帳壁として用いた宿泊施設の計画に木質厚板パネルを採用した結果、建物外皮の熱抵抗と室内の温熱快適性が改善されることが明らかとなったため、その影響について検証する。

5.1.2. 現状分析と研究方針

CLTをはじめとする木質厚板集成板は、工場生産される密実な木質厚板であり、木材自身を持つ熱性能によって建物の外壁に用いた場合、外皮性能の改善に寄与することが期待される。CLT パネル工法による建築物については、CLT 建築物の建築物省エネ法適合を目的に、平成 27 年からの CLT 建築物等普及促進委託事業において、CLT 建築物における温熱性能が報告されている³⁾。また、CLT 住性能向上研究開発事業報告書では、「建築物のエネルギー消費性能の向上における法律」の地域区分における住宅及び非住宅において基準適合となる CLT パネル工法の断熱仕様の目安が示されている。しかし、現在非木造の建物において、CLT を外壁利用した場合の温熱環境についての報告事例はない。

そこで本章では、鉄骨造の帳壁に CLT を用いて宿泊施設を計画し、温熱環境実測を行った。その結果、外壁の断熱性能と室内側の体感温度の向上がみられ、住性能の向上につながる事が確認された。

本章では、まず筆者である青島が設計者として計画した宿泊施設を対象建物として、CLT によって木質化する計画を立て、これによる温熱環境への影響を完成後の現場実測によって得られた結果を示し、室の温熱環境に関する考察として解析モデルを用いて算定した結果と照らし合わせるにより、実測結果の検証を行う。

5.2. 対象建物の計画と計測対象室の概要

5.2.1. CLT パネルを導入した対象建物の概要

本報告の主たる実測対象は、鉄骨造 4 階建てで計画された耐火建築物^{注2)}の宿泊棟である (Table 5-1)。もともと宿泊施設が運営されてきた施設の、宿泊機能拡張を目的として増築された。1 階をツインルームまたはペット対応室 (4 室)、2 階と 3 階をシングルルーム (各 6 室)、4 階を特別室 (3 室) として、全 19 室からなる。宿泊室はすべて北側に面して配置され、南面から宿泊室への日射影響は、比較的少ないと考えられる。(Photo 5-1, Photo 5-2)

まず著者らは、先行研究をもとに鉄骨造 4 階建ての宿泊棟の外壁に木質厚板パネルである CLT を帳壁として用いる構法を採用した。また、界壁においても非構造の CLT を用いて構成し室間を隔てる計画とした。その際、設計における方針を下記のように定めた。

- (1) 木質集成板による外壁の温熱性能の改善
- (2) 外壁の室内側表面からの輻射熱による体感温度の向上
- (3) 外皮性能向上による景観に大きく開いた開口設計



Photo 5-1 対象の建物外観

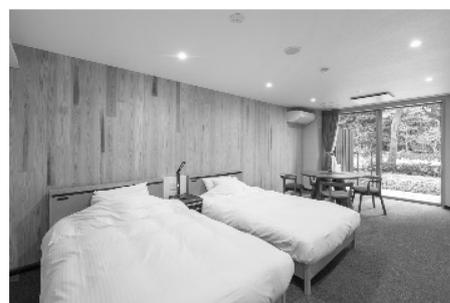


Photo 5-2 対象の建物客室の内観

Table 5-1 対象建築物の概要

計画名称	スパホテルあぶくま, 宿泊棟
所在地	福島県西白河郡西郷村 (地域区分Ⅳ)
竣工	2018 年 11 月竣工
設計	株式会社バスクデザイン
施工	藤田建設工業株式会社
用途規模	鉄骨造 4 階建て ホテル (耐火建築物) 建築面積: 290.69m ² 延床面積: 1,047.39m ²

5.2.2. 木質厚板帳壁の導入と各部構成

CLT を外壁または界壁の非耐力壁に用いて、それぞれ Fig.5-1 の構成とした。それぞれの壁構成の熱貫流率を表 2 に示す。外壁に用いる CLT 帳壁は、耐火建築物の性能要求により、21mm の強化石膏ボードを 2 枚貼りし、耐火性能を確保している。また、CLT による界壁^{注3)}は、要求される界壁遮音性能を確保するために片面を CLT 現しとして、裏面を 10mm の空隙、グラスウール、軽量鉄骨下地を組み石膏ボード (t12.5,t9.5) で仕上げる構成とした。CLT パネルの帳壁による外壁は、躯体層間変形にパネル毎に微小回転して追従するロッキング構法として、鉄骨の横架材に取り付けたアングルとパネル重量を

自重受け金物によって支持するものとした。界壁の CLT パネルは、上端を受け金物で支持し、パネル上部がスライドして追従するものとした。床の構成については、すべて ALC による遮音床として、CLT パネルは用いていない。

Table 5-2 部位構成毎の熱貫流率

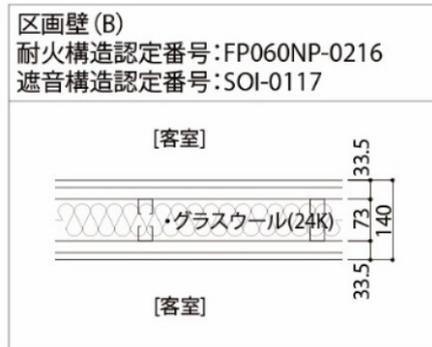
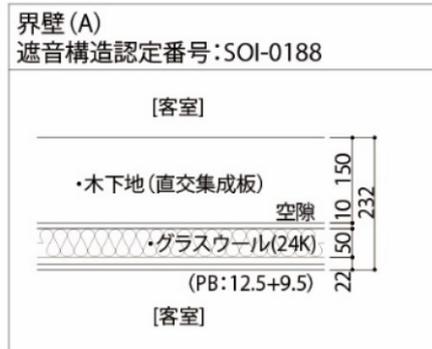
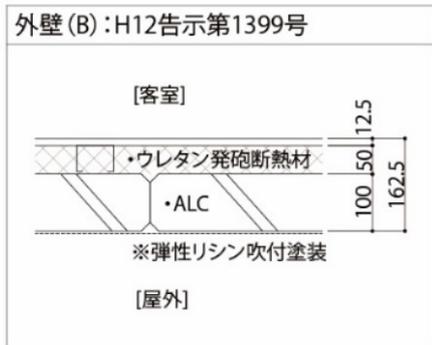
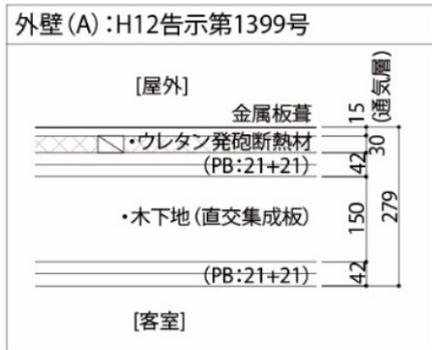


Fig.5-1 部位構成の概要図

外壁 (A) : CLT 帳壁

材料名	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/mK]	熱抵抗値 [m ² K/W]	熱貫流率 [W/ (m ² ·K)]
(外気側)			0.09	
金属板葺				
通気層	15			
フェノールフォーム	30	0.02	1.50	
石膏ボード	42	0.22	0.19	0.302
CLT	150	0.12	1.25	
ビニールクロス				
(室内側)			0.09	

外壁 (B) : ALC 帳壁

材料名	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/mK]	熱抵抗値 [m ² K/W]	熱貫流率 [W/ (m ² ·K)]
(外気側)			0.09	
金属板葺				
通気層				
ネオマフォーム	50	0.02	2.50	
ALC	100	0.19	0.53	0.298
中空層 (下地)	85		0.09	
石こうボード	12.5	0.22	0.06	
ビニールクロス				
(室内側)			0.09	

区画壁 (A) : CLT 界壁

材料名	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/mK]	熱抵抗値 [m ² K/W]	熱貫流率 [W/ (m ² ·K)]
(客室側)			0.09	
ビニールクロス				
石こうボード	12.5	0.22	0.06	
グラスウール 24K	30	0.038	0.79	
石こうボード	42	0.22	0.19	0.376
CLT	150	0.12	1.25	
石こうボード	42	0.22	0.19	
ビニールクロス				
(隣室側)			0.09	

区画壁 (B) : 区画界壁

材料名	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/mK]	熱抵抗値 [m ² K/W]	熱貫流率 [W/ (m ² ·K)]
(客室側)			0.09	
ビニールクロス				
石こうボード	33.5	0.22	0.15	
グラスウール 24K	73	0.038	1.92	0.416
石こうボード	33.5	0.22	0.15	
ビニールクロス				
(廊下側)			0.09	

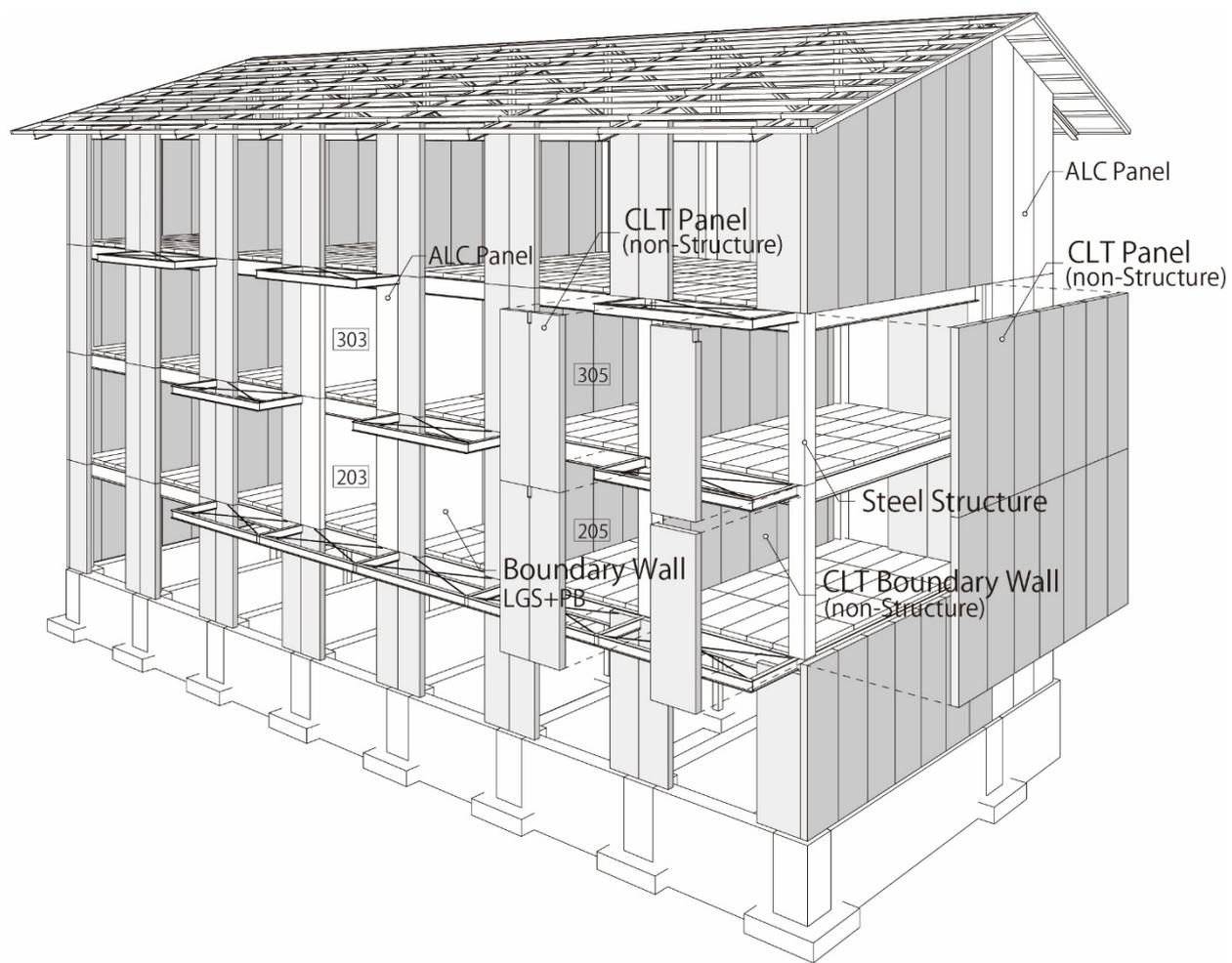


Fig.5-2 CLT 帳壁を用いた鉄骨造の宿泊施設の構成

5.2.3. 計測対象室と比較対象室

対象建物は、環境省の平成29年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を受けて建設されたものであり、CLTを壁体に用いた室（対象室）とCLTを用いなかった室（比較対象室）の2種類の仕様の室で計画された。本報告において主に対象とする室は、居室面積が同一のシングルルームからなる2,3階の居室の中で、外壁・界壁にCLTが用いられた205・305室（対象室）と、外壁にALCと界壁を軽量鉄骨と石膏ボードによる遮音壁とした203・303室（比較対象室）の4室である。Fig.5-3とFig.5-4に、それぞれ対象室の部分を示す。また、宿泊室内に設けた水回りの仕切り壁には、CLTは用いていない。

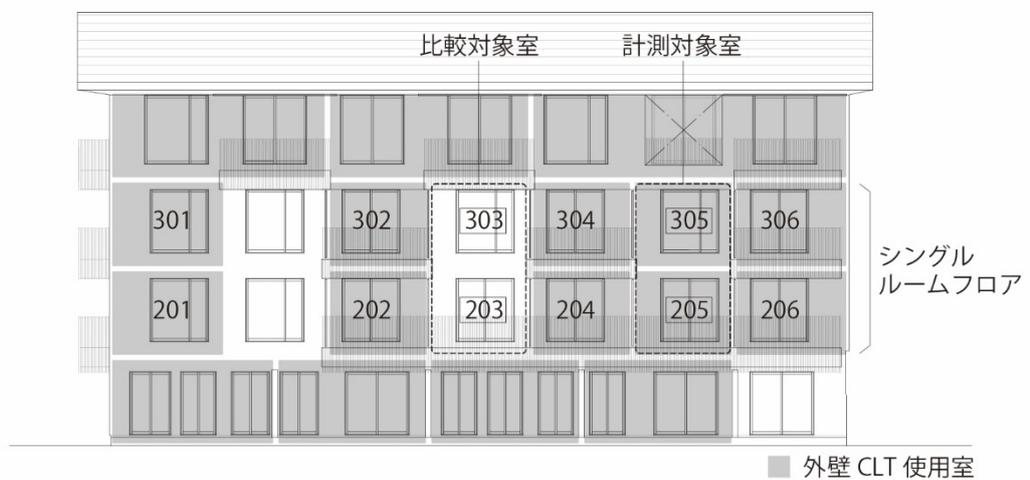


Fig.5-3 北側立面の外壁におけるCLT帳壁を用いた室の構成

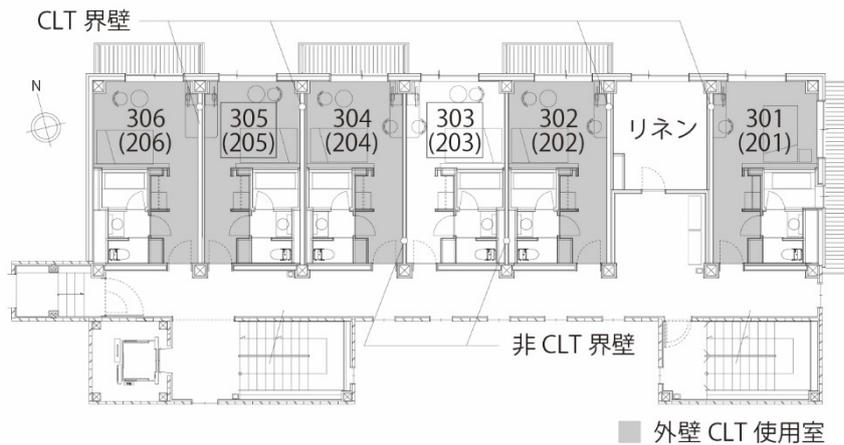


Fig.5-4 2階及び3階の比較対象室の構成

5.3. 現地実測と温熱環境に対する効果

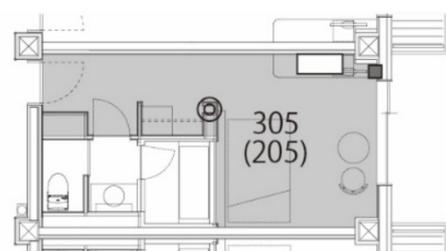
5.3.1. 温熱環境計測の方法

現地実測では、2階3階の各宿泊室にそれぞれ室内の中心となる解放された収納内に温度計を設置し、同様にそれぞれの室の外壁側に表面温度計を設置した。計測機器と設置点数を Fig.5-5 と Table 3-3 に示す。

計測には温度・湿度測定器と表面温度測定器を用いて、宿泊室毎の温度変化と外壁の表面温度を5分間隔で測定してデータを解析することとした。

Table 5-3 宿泊室内の温度・壁表面温度測定点

	計測項目	測定点内訳	センサー種別	測定間隔	特記
温度	外気	屋外：1点	サーミスタ	5分	通風筒、ラジエーションシールド付※1
	補助対象室	2階：5点 3階：5点			壁付け温湿度計※2
	比較対象室	2階：1点 3階：1点			
壁表面温度	補助対象室	2階：5点 3階：5点	サーミスタまたは熱電対※3	5分	センサーは、クロスと石膏ボードの間に隠蔽
	比較対象室	2階：1点 3階：1点			



凡例：

- ルームエアコン
- ⊙ 温度・湿度測定器
- 表面温度測定器

Fig.5-5 各宿泊室における計測器の設置個所

- ※1 建物北側の日射が当たらない地上 1.5m 高さに強制通風式通風筒を設置し、内部に温湿度計を設置
- ※2 無線通信方式の温湿度センサーを、エアコンの気流や日射が当たらない場所に設置
- ※3 熱電対のT型クラス2（許容差±1.0℃）以上の精度を採用

5.3.2. 実測結果（冬季）による効果の比較

Fig.5-6 に測定期間中の比較対象室（203 室）と、CLT を用いた対象室（205 室）との温熱環境の比較を示す。冬季の実測データを見ると、エアコンの運転を停止した 0 時以降は両室共に温度が下がるが、朝方の温度は CLT の 205 の方が ALC の 203 よりも 2 度程度高い。測定期間の始め、1/16 18:00 以前、実験準備中の 15:00 頃までは全館で床暖房が運転されていたので、特に現しの CLT パネルによる蓄熱効果の高さが顕著に表れた結果と考えられる。断熱性能に関しては、表 2 に示すように計算熱貫流率は CLT 壁 0.302W/m²K、ALC 壁 0.298W/m²K と、両者に大きな差は無く、また、両室共に外皮は殆どが窓であり、窓の熱貫流率は同一であることから、上記の結果の相違は CLT の蓄熱性能によるものと推測される。

両室とも、空気温度とグローブ温度は殆ど一致しているため、空気温度と壁面からの放射温度環境に大きな違いはなかったと言える。しかし、室内温度低下の推移をみると、CLT を用いた対象室は、温度低下が明らかに緩慢であることから、エアコンや床暖房によって温められた壁体の熱放射が続いたと考えられる。CLT に蓄熱した熱が室内に放射されたとすれば、全体が CLT で構成された見付面積 16.64 m² の界壁と、大きな開口部を持つため 5.10 m² の限られた見付面積の外壁とでは、表面積の大きな界壁の方が、室内環境に大きな影響を及ぼすと考えられる。

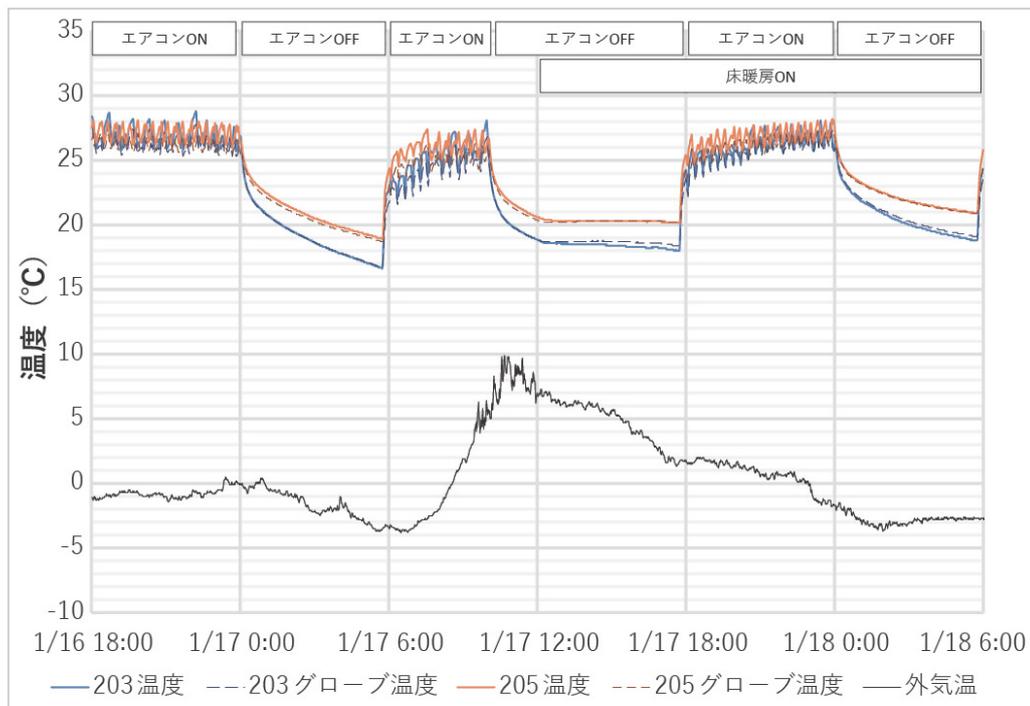


Fig.5-6 203 室と 205 室の温度実測結果

5.4. 室の熱容量が室温に与える影響の定量的考察

5.4.1. 室の有効熱容量

上述のように、エアコン暖房の停止後の室温降下（室温はグローブ温度が代表するとみなす）は、CLT が使われている 205 室の方が明らかに 203 室より降下が緩慢であり、その原因は 205 室に使用されている CLT が有する熱容量に帰せられると推察される。こうした建築部材の熱容量が室温に与える影響については、動的熱負荷計算の分野において以前から多くの研究蓄積があり、商用シミュレーションプログラムも多く販売されているので、それらを用いれば容易に熱容量の大小が室温に与える影響を把握することができると考えられる。しかし、ここでは端的に CLT の熱容量の影響を調べるために、室の有効熱容量を用いて簡易な定量的考察を行ってみる。

室の有効熱容量とは、室温の変動に影響を与える、建築部材や室内に置かれた物品の熱容量の総量という意味である。例えば、外皮であれば、その熱容量の全部が室温に影響を及ぼすわけではなく、熱抵抗の中心（熱抵抗が外皮の全熱抵抗の 1/2 になる面）より室内側に存在する材料の熱容量が有効であると考え、抽出した熱容量のことである。文献⁹⁶⁾に従い、(1) 式で室の有効熱容量を定義する。

$$C_R = \sum_i D_i A_i + \sum_i C_i V_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、(1) 式の右辺第 1 項は外皮の有効熱容量を、第 2 項は家具や間仕切壁等の有効熱容量（この場合は全熱容量に同じ）を表している。なお、

C_R = 室の有効熱容量[J/K]

$D_i = \sum_j c_{ij} d_{ij}$ = 外皮 i の面積当たりの有効熱容量[J / (m²·K)]
 （ただし、 \sum は室内側表面から熱抵抗の中心まで）

c_{ij} = 外皮 i の j 番目の構成材料の容積比熱[J / (m³·K)]

d_{ij} = 外皮 i の j 番目の構成材料の厚さ[m]

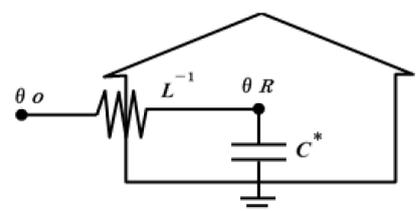
A_i = 外皮 i の面積[m²]

C_i = 室内の家具や間仕切り、空気等の容積比熱[J / (m³·K)]

V_i = 上記の体積[m³]

5.4.2. 熱回路近似モデル

暖房停止後に低下する室温に対する計算モデルとして、以下の微分方程式を使用する。この計算モデルは、室温に関する最も単純な非常計算モデルであり、熱回路近似モデルと称される (Fig.5-7 参照)。



$$L = (\sum U_i A_i + 0.35 V) / S = \text{熱損失係数}$$

$$C^* = C_R / S = \text{床面積あたりの室の熱容量}$$

Fig.5-7 室の熱回路近似モデル

$$C^* \frac{d\theta_R}{dt} = L(\theta_o - \theta_R) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 θ_R =室温（グローブ温度）[°C]、 θ_o =外気温[°C]、 t =時間[s] である。また、 L =熱損失係数[W/ (m²・K)]（一般にはQ値と称される）、 $C^*=C_R/S$ =床面積あたりの室の熱容量[J/ (m²・K)]、 S =室の床面積[m²]である。今回の 203 室と 205 室の室温の問題において、 L と C^* をどのように設定するかについては、次節で説明する。

θ_o が一定であるとすれば、(2) 式の微分方程式は容易に解けて、

$$\theta_R = (\theta_i - \theta_o)e^{-at} + \theta_o \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。これが熱回路近似モデルを用いた場合の室温降下の推定式である。ただし、 $a=L/C^*$ =室温変動率[1/s]、 θ_i =初期室温[°C] である。

5.4.3. 室温降下の推定式に代入すべき数値の検討

ここでは、(3) 式を用いて、203 室と 205 室の室温降下の様子を推定し、その推定結果を測定結果と比較して、両室の室温降下の違いが CLT の熱容量に起因しているのかどうか、考察する。(3) 式における定数に対しては、以下のように設定する。

- ① θ_i : 初期室温であるので、暖房を停止した 1 月 17 日 0 時 0 分における 203 室のグローブ温度である 26.2°C を設定した。同時刻の 205 室のグローブ温度は 25.5°C であり 203 室のそれとは異なっていたが、この検討では 205 室も含め両室に対して 26.2°C を設定する。
- ② θ_o : 外気温であり、計算対象となる 1 月 17 日 0 時 0 分～同日 6 時 0 分の時間帯では、 θ_o は一定でない (Fig.5-6 参照)。しかし、(3) 式はそもそも θ_o が一定のもとで得られる推定式なので、 θ_o は一定とし、この時間帯の平均値である -1.6°C を設定する。
- ③ L : 熱損失係数であり、これは戸建住宅のような小規模な建物に対して一つだけ定まる係数として与えられる。本論文での対象のような大きな建物の一室に対しては、周囲の室や廊下等の温度に関する知見が乏しいので、計算で L を求めることは無理である。しかし、幸いにして今回の対象室の一つ上階の 3 階の 303 室と 305 室において、文献⁹⁷⁾ の手法による L の実測が行われ、303 室が 1.62 W/ (m²・K) 、305 室が 1.43 W/ (m²・K)、という結果が得られていた。本論文では、この実測値をヒントにして、 L はパラメーターと考え、3 ケースの数値 (1.5、1.75、2.0 W/ (m²・K)) を設

定することにする。203 室と 205 室で L が異なるという根拠は見当たらないので、両室の L は同一値を設定した。なお、実測値よりやや大き目の数値が設定された理由は、熱損失係数の実測では換気口が塞がれていたのに対して、室温降下の計測では換気口は開いていたからである。

- ④ C^* と a : 文献⁹⁶⁾ に従い (1) 式を用いて計算した。計算結果は Table 5-4 の通りで、203 室では $C^* = 169.4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、205 室では $C^* = 267.9 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と計算された。両者の差は界壁 (CLT 使用) による差が大きい。3 ケースの L に対する a の値も Table 5-4 に示した。

Table 5-4 対象室・比較対象室の有効熱容量の詳細

205,305 室 (CLT 外壁・界壁) 対象室				
部位種類	部位面積 [m ²]	面積等の算定式	単位熱容量 ※[kJ/(K・m ²)]	有効熱容量 [kJ/K]
外壁 A	5.10	3.5x2.6m-窓面積	123.24	628.5
区画壁	9.10	3.5x2.6m	58.43	531.7
界壁 A	33.28	(6.4x2) x2.6m	78.03	2596.8
床・天井	22.40	6.4x3.5m	89.49	2004.6
窓	4.00	2x2m	17.10	68.4
室内仕切り	46.64	(2.36mx2+1.92mx2+1.46mx3+1mx5) x2.6m	2.16	100.7
空気	58.24 m ³ (体積)	体積:床面積 22.4 m ² x 天井高 2.6m	1.2*	69.9
C_R =合計 (室の有効熱容量)				6000.7
C^* =床面積あたりの有効熱容量[kJ/(K・m ²)]				267.9
			L (W/m ²)	a (h ⁻¹)
※単位熱容量とは、板状の部位であれば面積当たりの有効熱容量 D 、空気であればその容積比熱[kJ/(K・m ³)]である。			K)	$=L/C^*$
			1.50	0.020158
			1.75	0.023517
			2.00	0.026877
203,303 室 (ALC 外壁) 比較対象室				
部位種類	部位面積 [m ²]	面積等の算定式	単位熱容量 ※[kJ/(K・m ²)]	有効熱容量 [kJ/K]
外壁 B	5.10	3.5x2.6m-窓面積	66.79	340.6
区画壁 B	42.38	(6.4x2+3.5) x2.6m	28.54	1209.5
床・天井	22.40	6.4x3.5m	89.49	2004.6
窓	4.00	2x2m	17.10	68.4
室内仕切り	46.64	(2.36mx2+1.92mx2+1.46mx3+1mx5) x2.6m	2.16	100.7
空気	58.24 m ³ (体積)	体積:床面積 22.4 m ² x 天井高 2.6m	1.2*	69.9
C_R =合計 (室の有効熱容量)				3793.8
C^* =床面積あたりの有効熱容量[kJ/(K・m ²)]				169.4
			L (W/m ²)	a (h ⁻¹)
※単位熱容量とは、板状の部位であれば面積当たりの有効熱容量 D 、空気であればその容積比熱[kJ/(K・m ³)]である。			K)	$=L/C^*$
			1.50	0.031884
			1.75	0.037198
			2.00	0.042512

5.4.4. 室温降下の計算結果と考察

Fig.5-8 に L が異なる 3 ケースの計算結果を示す。推定式 (3) 式による計算結果は、いずれも暖房停止直後の室温降下がかなり緩慢であり実測結果とは一致しているとは言えない。これは、この推定式が、熱容量がたった 1 個の単純すぎる数学モデルに基づくものであるからである。これを修正するには、既述のように高精度の商用シミュレーションプログラム等を用いればよいだが、本稿ではこれは次の課題と考へ、これ以上は言及しないことにする。

さて、Fig.5-8 の計算結果は 203 室と 205 室の室温差については、この 3 ケースは同じ傾向、同じ程度である。つまり、CLT を使用している 205 室の方が、それを使用していない 203 室より、降下の仕方が緩やかであり、暖房停止の 5.5 時間後の両室温の差はどのケースでも 2K 前後になる。実測結果においても、暖房停止数時間後の両室温の差は 2K 程度であるので、2 室の室温差に対しては、推定式はほぼ正しい結果を与えると判断できる。推定式を用いた計算においては、203 室と 205 室の L は同一の値なので、 C の値の違い（つまり CLT を用いているかいないかということ）が a の違いとなり、両室温の差の要因になっている。したがって、実測結果においても、2 室の室温差は CLT の使用の有無に起因していると結論づけてよい。

5.5. 小結

鉄骨造の宿泊施設の計画において、CLT パネルを帳壁及び界壁として用いて設計を行った。同計画においては、宿泊室の内一部を従来の ALC の外壁と軽量鉄骨下地とグラスウール、石膏ボードによる遮音界壁で構成されている比較対象室を設け、CLT パネルで構成された宿泊室との温熱環境の変化を比較した。現地実測により、CLT が使われている室は、明らかに室温降下が緩慢であることが分かった。これは、CLT が有する熱容量に帰せられると考えられ、熱回路近似モデルを用いて、室温降下の様子を推定した結果、CLT の使用が室温降下に影響していることが確認された。

宿泊施設の計画において、シングルサイズの面積の小さな宿泊室が連続する場合、外気と面する外壁よりも隣室と面する界壁の方が面積は大きくなる。CLT を用いて外壁・界壁を構成した場合、接する表面積が大きな界壁の影響が大きく、CLT を用いることで熱容量が大きくなり、安定した室内環境を保つことに効果があると考えられる。この効果は、特に間欠暖房に対して有効な効果であろう。

欧州では、建物の木質化により躯体が軽量化し、建物の熱容量の不足が懸念されている。特に、夏季の室内発熱過多によるオーバーヒー

トが問題視されている。高温多湿の環境にある日本国内においても、空調設備への影響は大きいと考えられる。本研究では、冬季の実測値と理論値の検証に留まっており、今後、夏季の検証が必要である。

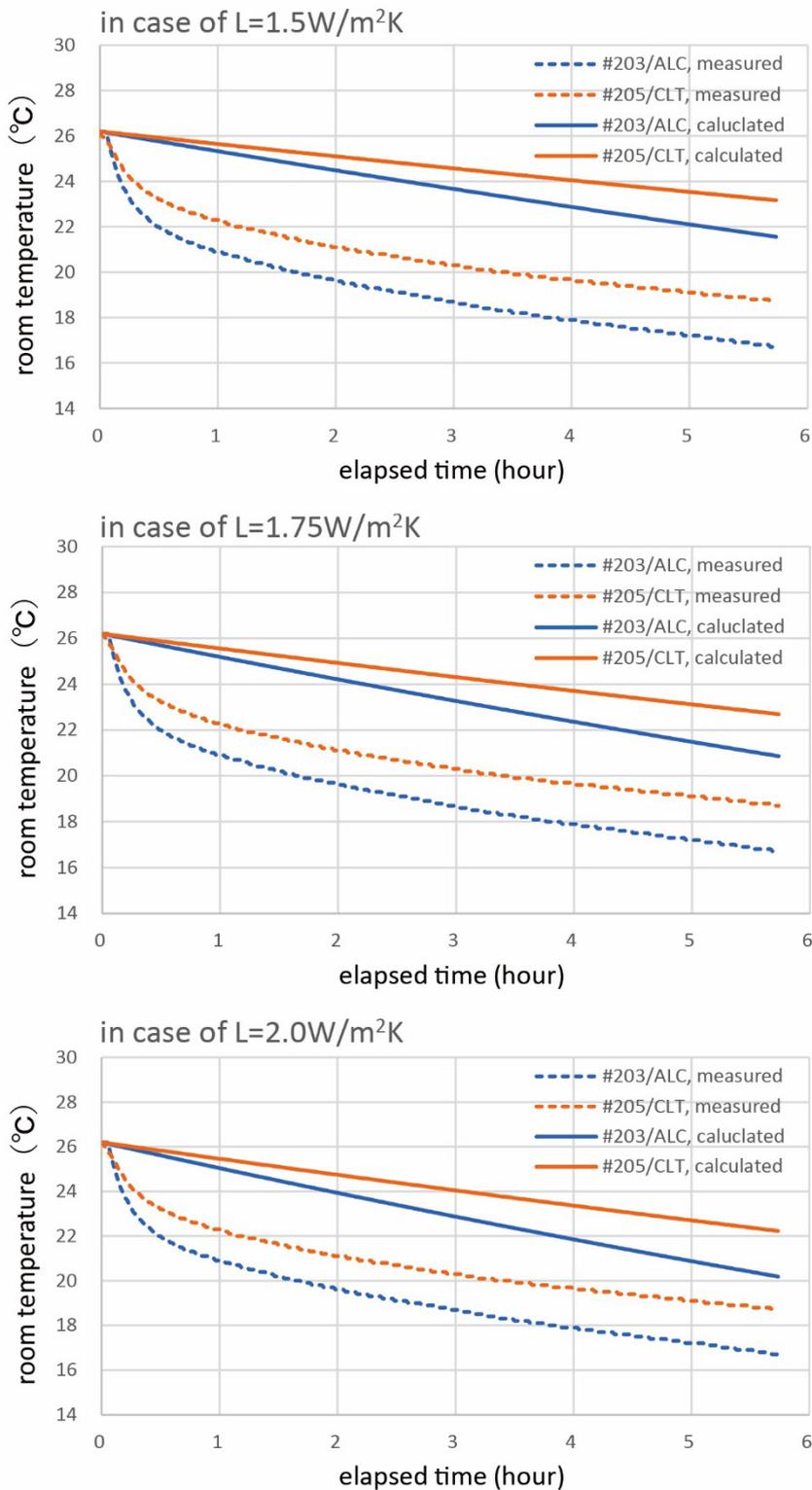


Fig.5-8 推定式による室温降下の計算結果

第6章 結 論

第6章 結論

本研究では、世界的な木質建築物の急速な展開に伴い、木質系の大型パネルを構成部材として用いた建築を対象に構法計画の観点から、建物の生産と性能を調査してまとめたものである。研究の主な目的は、大型木質パネルを用いた構法の計画に際して起こる問題点を整理することで、建築構法計画学の体系における位置付けを行うことである。

第1章「序章」では、まず大型木質パネルを用いた建築について、構法計画学の体系においてどのように位置付けられるのかをまとめた。在来軸組構法をはじめとする木質構造に分類するのではなく、コンクリートパネルと同様に大型パネルの体系に位置付けることで、構法計画の観点から詳細に考察していくものとした。用途と空間構成の観点から、研究対象として「ユニット型居住空間」を有する建築に注目して、構法計画を検証するのが適切であることを示した。

第2章「木質構法を巡る国内外の現状」では、まず国内での大型木質パネル建築の現状を把握するために、2000年以降急速に利用が始まったCLTを事例に、状況の把握のための調査を行った。2017年までは日本国内のCLT利用は黎明期であったとも言え、試験的な試みが多く、規模も比較的小さいものであったことから、構法計画に資する知見の蓄積は十分とは言えないことが明らかとなった。

一方で欧州を中心とする木質建築の展開は、大規模な建築まで含む、多岐にわたる実践事例のなかで蓄積されている。この中で、構法計画に向けたマニュアル整備が進んでいることから、日本の状況からは先行していると言ってよい。複合パネル等の開発等、選択性の高い産業化が進んでいることから、構法計画としての多様化に繋がっていることが明らかとなった。対照的に、エチオピアをはじめとする近代化が遅れた地域では、構法計画が十分なされないことによって居住環境の重大な欠陥につながることを示唆された。

各地域の状況を比較することで、日本国内での大型木質パネル利用拡大に伴う構法計画への要求が示唆され、特に、先行する欧州では集合住宅を中心に木質建築の計画が広がっていることから、構造躯体の熱容量の懸念につながっていることが明らかとなった。

第3章「大型木質パネルを用いた建築に関する構法計画理論」では、構法計画の体系において要求される性能のうちで、大型木質パネルを用いることによる特有の制御方法を抽出した。

建物の生産上の特性としては、大型木質パネルは、特にCLTに注

目すると、その製造からパネルの組立てに至る生産のプロセスから、コンクリートパネルとの違いが明示された。大型木質パネルによる特有な制御が、作業工程の全体に分散していることから、生産工程を通じて影響することが明らかとなった。

大型木質パネルを用いることで生ずる特有の性能においては、おおむね明らかになっており、熱・音・気体・液体の制御に関する懸念事項が示された。

第1章から第3章に亘って、大型木質パネルを構法計画学への位置付けにあたって、大型パネルの体系を軸に、躯体構法と各部構法に関わる検証対象が導かれた。「ユニット型居住空間」の実践的な検証によって、第4章と第5章で具体的な調査、及び検証を行った。

第4章「大型木質パネルを用いた低層集合住宅の施工効率化」では、建築の生産分野に着目し、大型木質パネルを構造に用いた公共の低層集合住宅の計画について述べている。

ここでは、約4,800㎡の大規模計画において、施工の効率化を目的に仮説を立て、これをもとに大型木質パネルによって設計して建設し、施工中の労務工数の調査によってその効果を実践的に検証した。建設時の労務工数調査を通じて導かれた施策を標準化することで、大型木質パネルによる建築において生産工程を省力化・効率化できることを示した。

第5章「大型木質パネルを用いた宿泊施設の環境的効果」では、構法計画上の性能分野に着目して、大型木質パネルを非構造壁に用いた中規模建築を対象にした建物の熱容量の影響について述べた。

ここでは、4階建ての宿泊施設の外壁及び界壁部分に大型木質パネルを用いた際に、パネルの断熱性能と蓄熱性能が室内環境に影響を与え、冷暖房のエネルギー消費量を軽減することが明らかとなった。

大型木質パネルが開発されて運用され始めたが、建築の生産方式としての選択しうる構法計画上の位置付けが不十分であるため、大型木質パネルによる構法が確立されていなかった。そこで、本論文では、大型木質パネルを用いた構法によって、建設された建築の設計・施工プロセスにおいて実践的な検証を行った。

「ユニット型建築」の設計では、標準化が生産性向上に大きく影響することが明らかとなった。これは、大型パネルによる建物の生産プロセスと類似した現象であると言える。「居住空間」では、建物の熱容量が高まることから省エネにつながる事が明らかとなった。他

の木質構造と比べて特筆すべきは、中実の木質パネルであること
によって、日本において一般的な在来軸組構法等の建物のとは異な
った性能を示す点である。以上の検証結果から、大型木質パネルを用
いた構法は、「ユニット型居住空間」をもつ建築の生産において有効
であるということが示された。

建築構法の分類で見ると、1950年代の住宅の大量供給を目的とし
た、「大型パネル」による建築工場の工場生産化は、構法計画として
は特筆すべきものであった。2000年代は人口減少に対応するために、
「大型木質パネル」に注目すべきであり、住宅生産の省力化と産業
化を目的とした開発が求められる。本論文では、構法計画学における
「大型パネル」の位置付けを発展させることで、「大型木質パネル」
に関するあらゆる現象に対する制御方法を示すことができた。ゆえ
に、大型木質パネルを主たる構成部材とした建築は、建築の構法の
視点から「大型パネル」のひとつとして構法計画を行うことが有効で
ある。

結果的に「大型パネル」の種類としては、コンクリートパネルと大
型木質パネル、そして、材料を組み合わせた複合パネルが並ぶことと
なる。コンクリートパネルと大型木質パネルでの相違点としては、上
記の材料特性に由来する性能上の問題と、製造工程からくる性能が
ある。コンクリートパネルが型枠による繰り返し製造であるのに対
し、大型木質パネルはマザーボードからの切り出しで多様な形状加
工が可能な点は、結果として空間のフレキシビリティにつながるも
のである。また、複合パネルに関しても、大型木質パネルと同様に大
型パネルとして扱うべきで、構法計画の選択肢を広げることにつな
がると考えられる。

参考文献一覧：

<第1章>

- 1) 戸田穰, et al. (2013). "建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究 オーラルヒストリーと文献史学による戦後住宅史." 住総研研究論文集 39: 201-212.
- 2) 内田祥哉, et al. (1981). 建築構法, 市ヶ谷出版社.
- 3) 内田祥哉, 建築生産のオープンシステム, 彰国社, 1977/8/10
- 4) 真鍋恒博 (1999). 図解 建築構法計画講義 「ものしくみ」から建築を考える, 彰国社.
- 5) 内田祥哉, プレファブー近代建築の主役, 講談社, 1968
- 6) Gyula Sebestyén, NAGYEMES LAKOHAZAK (Large-Panel Buildings), 1960
- 7) ジュラ・セバスチャン著, 内田祥哉, 大野勝彦監訳『大型パネル住宅』, 鹿島研究所出版会, 1969
- 8) DAAS interview vol.006 内田祥哉 インタビュー YOSHITIKA UTIDA, architect 2009, <https://www.daas.jp/video/ushida.html> (最終アクセス日 2020.6.11)
- 9) 岡野健 (監修), et al. (2017). 新世代 木材・木質材料と木造建築技術, エヌ・ティー・エス.
- 10) 日本建築センター (2019). 日本近代建築法制の100年 市街地建築物法から建築基準法まで, 日本建築センター
- 11) 日本建築センター/建築技術教育普及センター, (2019). 日本の近代・現代を支えた建築 -建築技術 100選-
- 12) Ramage, M. H., et al. (2017). "The wood from the trees: The use of timber in construction." Renewable and Sustainable Energy Reviews 68: 333-359.
- 13) Keita AOSHIMA, Kazuya SHIDE and Tatsuo IWAOKA: Efficient Construction of Low-Rise Residential Buildings by CLT Panels, AIJ Journal of Technology and Design, 2019-84-765, pp.2271-2279, 2019.11
青島 啓太, 志手 一哉, 岩岡 竜夫: 低層集合住宅における CLT 導入による施工効率化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 2019, 84 巻, 765 号, pp.2271-2279, 2019.11
- 14) Adekunle, T. O. (2014). Thermal Performance of Low-carbon Prefabricated Timber Housing in the UK. Department of Architecture, University of Kent. Doctor of Philosophy (PhD).
- 15) Kendrick, C., et al. (2012). "Thermal mass in new build UK housing: A comparison of structural systems in a future weather scenario." Energy and Buildings 48: 40-49.
- 16) 日本建築学会 (2001). 建築設計資料集成, 丸善.
- 17) 坂本 一成, et al. (2012). 建築構成学: 建築デザインの方法, 実教出版.

<第2章>

- 18) Comfortability of Tigray Traditional House, 20th International Conference of Ethiopia Studies, Aug. 2018
青島啓太, 清水信弘: エチオピア・ティグライ地方の伝統住居における居住性, ICES20, Aug. 2018
- 19) Keita AOSHIMA, Takashi AKIMOTO: Mother's House 2030, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Architectural Design, pp.100-101, 2014. 9 (in Japanese)
青島啓太, 秋元孝之: 母の家 2030 (エネマネハウス 2014), 建築デザイン, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 建築デザイン発表会, pp.100-101, 2014.9
- 20) Keita AOSHIMA, Takashi AKIMOTO etc.: Dwelling to succeed - ENEMANE2015, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Architectural Design, pp.200-201, 2016. 9 (in Japanese)
青島啓太, 秋元孝之, 他: エネマネハウス 2015 継ぎの住処, 建築デザイン, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 建築デザイン発表会, pp.200-201, 2016. 9
- 21) Jun NAKAGAWA, Shinichi TANABE, Takashi AKIMOTO etc.: Mother's House 2030, AIJ Journal of Technology and Design 2019-25-59, pp.239-242 (in Japanese)
中川 純, 田辺 新一, 秋元 孝之, 他: 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案, 日本建築学会技術報告集, 2019, 25 巻, 59 号, p. 239-242, 2019.2
- 22) Nobuhiro SHIMIZU, Ephrem Telele etc.: URBAN FORMATION OF MEKELLE, ETHIOPIA, AS APPLICATION OF TRADITIONAL SETTLEMENT TECHNIQUES, AIJ Journal of Technology and Design 2018-08-750, pp.1579-1589
清水 信宏, エフレム テレレ, 岡崎 瑠美, 三宅 理一: 伝統的な集落形成作法の応用としてのエチオピア・メケレにおける「都市」の形成, 日本建築学会計画系論文集, 2018, 83 巻, 750 号, pp.1579-1589, 2018.8
- 23) Nobuhiro SHIMIZU, Ephrem Telele etc.: "TRADITIONAL" TECHNIQUE AND LOCAL KNOWLEDGE ON HIDMO HOUSE CONSTRUCTION IN TIGRAY ETHIOPIA ("TRADITIONAL" TECHNIQUE AND LOCAL KNOWLEDGE ON HIDMO HOUSE CONSTRUCTION IN TIGRAY, ETHIOPIA), AIJ Journal of Technology and Design 2019-84-758, pp.1017-1027, 2019.4
清水 信宏, エフレム テレレ, アルーラ テスファイ, 三宅 理一, エチオピア・ティグライ州のヒドモ住宅の建設をめぐる「伝統」技術と地場の知識, 日本建築学会計画系論文集, 2019, 84 巻, 758 号, pp.1017-1027, 2019.4
- 24) Okazaki, R.: Deterioration of Heritage by Informal Urbanization in Mekelle, Ethiopia, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 10, Issue 2, pp. 343-350, 2011.
- 25) Okazaki, R.: A Study on the Formation of an Imperial City in Tigray, Ethiopia, at the Turn of the 20th Century: Construction of Mekelle During and After the Reign of Yohannes IV, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Vol. 79, No. 702, pp. 1753-1759, 2014.8.
- 26) 一般財団法人日本建築センター, 第1回 WOODRISE 国際会議 ボルドー大会, 木造による中・高層建築物実現をテーマとした国際会議視察報告書, 共同執筆及び編集協力, 一般財団法人日本建築センター発行, 2017.12.15
- 27) 一般財団法人日本建築センター, 欧州木造・マッシュホルツ視察 2019 視察報告書, 共同執筆及び編集協力, 一般財団法人日本建築センター, 2019.11.29
- 28) Sylvain Gagnon and Clpian Pirvu, FPIInnovations (Institution): CLT Handbook: cross-laminated timber (2011), FPIInnovations, 2011
- 29) Erol Karacabeyli, Sylvain Gagnon, FPIInnovations (Institution): Canadian CLT Handbook, 2019 Edition. Volume I and II,

- FPIInnovations, 2019.2
- 30) Erol Karacabeyli, Conroy Lum, FPIInnovations (Institution) .: Technical guide for the design and construction of tall wood buildings in Canada, Pointe-Claire, QC: FPIInnovations, 2014
 - 31) 新建築社, 小見山陽介企画・構成, CLTの12断面(新建築連載2017年1月号~2018年2月号)
 - 32) Waugh, A. and A. Thistleton (2018) . 100 Projects UK CLT, Waugh Thistleton Architects on behalf of the Softwood Lumber Board & Forestry Innovation Investment Printed in Canada.
 - 33) Joseph Mayo.: Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design, Routledge, 2015.10
 - 34) Michael Green.: Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance, Birkhauser, 2017.1
 - 35) Ontario.: Ontario's Tall Wood Building Reference, Ministry of Natural Resources and Forestry, 2017.10
 - 36) 後藤豊, 環の解像度を上げることで見えてくる課題 | ヨーロッパにおける循環型経済と建築の関係(特集: 木造建築のサークル・オブセッションズを超えて), 2019.6, <https://medium.com/kenchikutouron/>
 - 37) G. Kogler.: Wohnbau, Holz-Passivhaus Mehrgeschossiger geförderter Wohnbau für 70 Wohneinheiten Holzmassivbauweise, Passivhausstandard Mühlweg, 1210 Wien, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 2008.6
 - 38) 三宅理一監修, 青島啓太共著, 境界から考える都市と建築, 2017.8.15, 鹿島出版会 出版
 - 39) Riichi Miyake, Daiki Amanai, Keita Aoshima, Kazuo Tsuchiya.: Grow the Forest, Nurture the Wood Culture - Green Strategy, Timber Chain and Woodified Architecture in Southeast Asia and Japan <Conference Papers for Green Initiative Week in Japan-Hamamatsu>, 2020.3.29, ARCHI-DEPOT Corporation
 - 40) 青島啓太, 東南アジアのいびつな木材マテリアル・フローと建築家たちの試行(特集: 木造建築のサークル・オブセッションズを超えて), 2019.6, <https://medium.com/kenchikutouron/>
 - 41) 青島啓太+芝浦工業大学赤堀忍研究室, つくば CLT 実験棟, 新建築住宅特集 2017年4月号
 - 42) 秋田県農林水産部林業木材産業課, CLT 利用のイメージ 2016
 - 43) (公財) 日本住宅・木材技術センター, CLT 関連告示等解説書
 - 44) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成29年度 CLT を活用した建築物等実証事業の成果—これまでの実績と今後の展望—, 2017.3
 - 45) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成29年度 CLT (直交集成板) を活用した先駆的な建築物の建設等支援事業報告書, 2017.3
 - 46) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成28年度補正 CLT 建築物等普及促進事業のうち協議会が取り組む実証的建築支援事業報告書, 2016.3
 - 47) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成29年度 CLT 建築事例集—CLT 活用建築物等実証事業から, 2017.3
 - 48) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成28年度 CLT (直交集成板) を活用した先駆的な建築物の建設等支援事業報告書, 2016.3
 - 49) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成28年度都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及委託事業のうち CLT 普及促進, 2016.3
 - 50) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成27年度補正 CLT を活用した建築物の実証事業報告書, 2015.3
 - 51) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成27年度 CLT 建築等新たな製品・技術を活用した建築物の実証事業報告書, 2015.3
 - 52) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成26年度 CLT 等新たな製品・技術活用建築物実証事業報告書, 2014.3
 - 53) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成26年度 CLT 等新たな製品・技術の開発促進事業のうち中高層建築物等に係る技術開発等の促進, 2014.3
 - 54) (公財) 日本住宅・木材技術センター, 2016年公布・施行 CLT 関連告示等解説書, 2016.7
 - 55) (公財) 日本住宅・木材技術センター, CLT 建築物等普及促進事業のうち 協議会が取り組む実証的建築支援事業報告書, 2019.3
 - 56) (一社) 日本 CLT 協会, 実務者のための CLT 建築物設計の手引き, 2018.4
 - 57) 池田靖史, 小林光, 伊香賀俊治, 西宏章 他, 慶應型共進化住宅, 学術講演梗概集 2014 (建築デザイン), 106-107 (一社) 日本建築学会, 2014.9.12
 - 58) 青島啓太, 秋元孝之, 母の家 2030, 学術講演梗概集 2014 (建築デザイン), 100-101 (一社) 日本建築学会, 2014.9.12
 - 59) 新建築社, 新建築 2014年3月号~2017年12月号
 - 60) 新建築社, 住宅特集 2014年3月号~2017年12月号

<第3章>

- 61) 内田祥哉, et al. (1981) . 建築構法, 市ヶ谷出版社.
- 62) 戸田穰, et al. (2013) . "建築構法学・構法計画学の成立・発展史の研究 オーラルヒストリーと文献史学による戦後住宅史" 住総研研究論文集 39: 201-212.
- 63) 真鍋恒博 (1999) . 図解 建築構法計画講義 「ものしくみ」から建築を考える, 彰国社.
- 64) 内田祥哉, プレファブ—近代建築の主役, 講談社, 1968
- 65) Gyula Sebestyén, NAGYEMES LAKOHAZAK (Large-Panel Buildings) , 1960
- 66) ジュラ・セベスチャン著, 内田祥哉, 大野勝彦監訳『大型パネル住宅』, 鹿島研究所出版会, 1969
- 67) ふくしま CLT 木造建築研究会 | 木あみ+青島啓太, いわき CLT 復興公営住宅, 新建築 2018年8月号 pp.088
- 68) 日本建築学会編 (2001.6) . 建築設計資料集成 総合編, 丸善出版. p251
- 69) 坂本一成 他 (2012.3) . 建築構成学: 建築デザインの方法, 実教出版. p65-67
- 70) 日本建築センター/建築技術教育普及センター, (2019) . 日本の近代・現代を支えた建築—建築技術 100 選—.
- 71) 岡野健 (監修) , et al. (2017) . 新世代 木材・木質材料と木造建築技術, エヌ・ティー・エス.
- 72) Haru YAMAGUCHI, Hitoshi TAKEDA .: Study on the Thermal Environment of Wooden Public Buildings Using Cross Laminated Timber (CLT) in Various Climatic Regions: Comparison of RC buildings and CLT thickness of school facilities, AIJ

- Journal of Technology and Design 2019-84-762, pp.739-748, 2019.8
山口 温, 武田 仁, 直交集成板 (CLT) を用いた木造公共建築の温熱環境と地域別適用可能性, 日本建築学会環境系論文
集, 2019, 84 巻, 762 号, pp.739-748, 2019.8
- 73) 田島ルーフィング and 木造防水ガイド編集委員会 (2019). 中・大規模/都市木造建築防水設計 ARCHITECTS'
HANDBOOK.田島ルーフィング.
- 74) 内田祥哉, 建築生産のオープンシステム, 彰国社, 1977/8/10
- 75) 門脇耕三 and 深尾精一 (2005). "集合住宅における住戸各部の計画内容の影響関係." 日本建築学会計画系論文集 70
(588) :63-69.
- 76) 門脇, 耕. (2015). "建物の部分の設計の自由度を高める構法計画の原則についての考察." 日本建築学会計画系論文集 80
(717) :2481-2489.
- 77) 権藤智之 and 松村秀一 (2010). "木造軸組構法住宅の基礎・床組部材の材質・断面寸法の変遷 工務店が用いる木造軸組
構法の変遷に関する研究 その1." 日本建築学会計画系論文集 75 (653) :1673-1678.
- 78) 松村秀一, et al. (2013). "プレハブ住宅メーカーの住宅事業開始初期の技術開発に関する研究." 日本建築学会計画系論文
集 78 (693) :2307-2313.
- 79) 角田誠 and 深尾精一 (1993). "一戸建住宅における乾式外壁の施工性と外壁面の割付設計との関係について : 住宅の外
壁構法計画に関する研究 その1." 日本建築学会計画系論文報告集 446: 81-87.
- 80) 角田, 誠. (1993). "乾式外壁を用いた一戸建住宅における外壁面の割付設計方法の記述内容と実態との関係 : 住宅の外壁
構法計画に関する研究 その2." 日本建築学会計画系論文報告集 454: 87-92.
- 81) 角田誠 and 深尾精一 (1994). "乾式外壁を用いた一戸建住宅における外壁面の割付寸法と外壁材寸法の検討 : 住宅の外
壁構法計画に関する研究 その3." 日本建築学会計画系論文集 59 (463) :93-98.

<第4章>

- 82) Keita AOSHIMA, Kazuya SHIDE and Tatsuo IWAOKA: Efficient Construction of Low-Rise Residential Buildings by CLT Panels, AIJ
Journal of Technology and Design, 2019-84-765, pp.2271-2279, 2019.11
青島 啓太, 志手 一哉, 岩岡 竜夫: 低層集合住宅における CLT 導入による施工効率化に関する研究, 日本建築学会計画系論
文集, 2019, 84 巻, 765 号, pp.2271-2279, 2019.11
- 83) Fukushima Prefecture Civil Eng., Dep. Building Housing Division: FUKKOKUOUJEIJUTAKU SEIBIKIROKU (Document of Public
Housing for Revitalization) 2018.3 (in Japanese)
福島県土木部建築住宅課: 復興公営住宅整備記録-原子力災害による避難者の生活再建に向けて, 2018.3
- 84) Japan Housing and Wood Technology Center, Japan CLT Association: Report of Action for Development and Dissemination
of New CLT Products and Technologies, 2016.3 (in Japanese)
(公財) 日本住宅・木材技術センター, (一社) 日本 CLT 協会: 平成 27 年度 CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業報
告書, 2016.3
- 85) Japan Housing and Wood Technology Center, Japan CLT Association: Report of Action for Development and Dissemination
of New CLT Products and Technologies, 2017.3 (in Japanese)
(公財) 日本住宅・木材技術センター, (一社) 日本 CLT 協会: 平成 28 年度 CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業報
告書, 2017.3
- 86) Kouji, H. and Kazuya, S.: Study of Planning of Constructional Program in Assembly Buildings, Summaries of Technical Papers of
Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Architecture System and Management, pp.151-152, 2015.7 (in Japanese)
林晃士, 志手一哉: 組み立て建築の施工における計画指標の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 建築社会システム,
pp.151-152, 2015.7
- 87) Yingjian, W. and Seich, F.: A Study on the Constructability of Partitions with Wooden Back-up Structure in Apartments, Journal
of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.457, pp.111-116, 1994.3 (in Japanese)
王英健, 深尾精一: 集合住宅の木製軸組間仕切の施工性に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 457 号, pp.111-
116, 1994.3
- 88) Satoshi, K.: Man-hour Survey and Analysis of the Labor Productivity of on-site Work Using the Reinforced Precast Concrete
Frame Method, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.555, pp.287-293,
2002.5 (in Japanese)
小早川敏: 架構式プレキャスト鉄筋コンクリート工法の現場作業に関する工数調査および労働生産性の分析, 日本建築学
会計画系論文集, 第 555 号, pp.287-293, 2002.5
- 89) Japan CLT Association: JITSUMUSYA NO TAMENO CLT KENNTIKUBUTU SEKKEI NO TEBIKI (Manual for CLT Building Design) ,
2018.2 (in Japanese)
(一社) 日本 CLT 協会: 実務者のための CLT 建築物設計の手引き, 2018.2
- 90) Shinji, M. and Naoto, M.: Optimization for Work Planning of Building Construction, The Operations Research Society of Japan,
OR, pp.218-224, 1983.5 (in Japanese)
松本信二, 三根直人: 建築施工の作業計画における最適化, オペレーションズ・リサーチ, pp.218-224, 日本オペレーシ
ョンズ・リサーチ学会, 1983.5
- 91) Naoto, M., Shinji, M. and Yoshiji, U.: Work scheduling method for building construction (No.05) , Summaries of Technical
Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, pp.379-380, 1982.7 (in Japanese)
三根直人, 松本信二, 内山義次: 建設工事における作業計画方法に関する研究-その 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集,
pp.379-380, 1982.7
- 92) Shinji, M. and Naoto, M.: Work scheduling method for building construction (No.02) , Summaries of Technical Papers of
Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, pp.151-152, 1979.7 (in Japanese)
松本信二, 三根直人: 建設工事における作業計画方法に関する研究-その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.363-364,

- 1979.7
- 93) Hajime, M. and Takashi, S.: Standard time setting for building production (No.03), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, pp.135-136, 1974.7 (in Japanese)
森一, 汐川孝: 建築生産における標準時間設定に関する研究-その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-136, 1974.7
- 94) Architectural Institute of Japan: SAGYOUNOURITSU SOKUTEI SHISHIN (Work Efficiency Measurement Guidelines), Maruzen, 1990.2 (in Japanese)
日本建築学会 編著: 作業能率測定指針, 丸善, 1990.2
- 95) 蟹澤宏剛, 大工技能の評価はいかになされるべきか (特集: 大工職人のテクノロジー, 大工の熟練技能は現代にいかになされるべきか), 042, 2020.4, <https://medium.com/kenchikutouron/>

<第5章>

- 96) 坂本雄三「建築熱環境」p133、東京大学出版会、2011.
- 97) Tetsuyuki HATTORI, Yuzo SAKAMOTO, Hideaki FUKUDA. : Developments and Examples Related to Practical Field Measurements of the Heat Loss Coefficients of Detached Houses, AIJ Journal of Technology and Design 2008-14-28, pp491-496, Oct.,2008 (in Japanese)
服部 哲幸, 坂本 雄三, 福田 秀朗, 戸建住宅の熱損失係数に関する実用的現場実測法の開発と実測例, 日本建築学会技術報告集 14 巻, 28 号, p. 491-496, 2008.10
- 98) NPO 法人建築技術支援協会, 平成 27 年度林野庁委託事業 C L T 住性能向上研究開発事業報告書, 2016.3
- 99) Haru YAMAGUCHI, Hitoshi TAKEDA. :Study on the Thermal Environment of Wooden Public Buildings Using Cross Laminated Timber (CLT) in Various Climatic Regions: Comparison of RC buildings and CLT thickness of school facilities, AIJ Journal of Technology and Design 2019-84-762, pp.739-748, 2019.8
山口 温, 武田 仁, 直交集成板 (CLT) を用いた木造公共建築の温熱環境と地域別適用可能性, 日本建築学会環境系論文集, 2019, 84 巻, 762 号, pp.739-748, 2019.8
- 100) Adekunle, T. O. (2014) . Thermal Performance of Low-carbon Prefabricated Timber Housing in the UK. Department of Architecture, University of Kent. Doctor of Philosophy (PhD) .
- 101) Kendrick, C., et al. (2012) . "Thermal mass in new build UK housing: A comparison of structural systems in a future weather scenario." Energy and Buildings 48: 40-49.
- 102) Adekunle, T. O. and M. Nikolopoulou (2018) . "Post-occupancy evaluation on people's perception of comfort, adaptation and seasonal performance of sustainable housing: a case study of three prefabricated structural timber housing developments." Intelligent Buildings International 12 (2) :71-99.
- 103) Adekunle, T. O. and M. Nikolopoulou (2016) . "Thermal comfort, summertime temperatures and overheating in prefabricated timber housing." Building and Environment 103: 21-35.
- 104) Adekunle, T. O. and M. Nikolopoulou (2019) . "Winter performance, occupants' comfort and cold stress in prefabricated timber buildings." Building and Environment 149: 220-240.
- 105) Arvesen, A., et al. (2015) . "Life cycle assessment of transport of electricity via different voltage levels: A case study for Nord-Trøndelag county in Norway." Applied Energy 157: 144-151.
- 106) Cherubini, F., et al. (2016) . "Bridging the gap between impact assessment methods and climate science." Environmental Science & Policy 64: 129-140.
- 107) Lolli, N., et al. (2019) . "An assessment of greenhouse gas emissions from CLT and glulam in two residential nearly zero energy buildings." Wood Material Science & Engineering 14 (5) : 342-354.
- 108) Sakka, A., et al. (2012) . "On the thermal performance of low income housing during heat waves." Energy and Buildings 49: 69-77.

図版の引用元一覧：

<第1章>

Fig.1-1: 国立研究開発法人 国立環境研究所サイトより引用 <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html> (最終アクセス日 2020.4.25)
Fig. 1-2, Fig. 1-3: 日本建築学会建築討論より引用 <https://medium.com/kenchikutouron> (最終アクセス日 2020.04.27)
Photo 1-1, Photo 1-2: ジュラ・セベスチエン『大型パネル住宅』p.145 より引用
Fig. 1-5: Michael Ramage, The wood from the trees: The use of timber in construction から引用 (P.H. Fleming 作成)
Fig. 1-9: 『木材・木質材料と木造建築技術』 p.37 青木謙治による分類を参考に作成
Fig. 1-11: 坂本 一成, et al. (2012) . 『建築構成学: 建築デザインの方法』の資料を元に作成
Fig.1-4, Fig. 1-6, Fig. 1-7, Fig. 1-8, Fig. 1-10, Fig. 1-12: 筆者作成

<第2章>

Table 2-1, Table 2-2: 一般社団法人日本 CLT 協会提供の資料をもとに作成
Fig.2-1: 東京理科大学理工学部高橋遼平と細野拓哉により作成
Photo 2-2, Photo 2-3: 会津土建株式会社提供
Photo 2-4: 慶應義塾大学提供
Photo 2-5: 芝浦工業大学提供
Photo 2-1, Photo 2-6, Photo 2-7, Photo 2-7, Photo 2-8, Photo 2-9: 筆者撮影
Fig.2-2: 筆者作成
Table.2-3, Table 2-4, Table 2-5: 筆者作成
Fig.2-3: 東京理科大学理工学部高橋遼平と細野拓哉により作成
Fig.2-4: 会津土建株式会社提供
Fig.2-5: Council on Tall Buildings and Urban Habitat, <http://www.skyscrapercenter.com/building/id/24051> (最終アクセス日 2020.7.29)
Fig.2-6: ADIVbois, IMMEUBLES À VIVRE BOIS 2017, CONCOURS NATIONAL ADIVBOIS より引用
Photo 2-10: Archello サイトより引用 <https://archello.com/es/project/brock-commons-tallwood-house> (最終アクセス日 2020.7.29)
Photo 2-11, Photo 2-12, Photo 2-13, Photo 2-14: 筆者撮影
Fig.2-7, Fig.2-8: FPIinnovations CLT Handbook サイトより引用 <https://web.fpinnovations.ca/clt/> (最終アクセス日 2020.7.29)
Table 2-6: FPIinnovations, CLT Handbook 2019 をもとに作成
Table 2-7: CR Firenze Foundation の資料を参考に作成 https://www.fondazionecrifirenze.it/wp-content/uploads/2017/04/Fabrizio_Rossi_Prodi.pdf (最終アクセス日 2020.7.29)
Fig.2-9: Fabrizio Rossi Prodi より提供
Table 2-8: Hermann Kaufmann + Partner ZT GmbH の資料を参考に作成
Photo 2-15: Hermann Kaufmann + Partner ZT GmbH のサイトより引用 https://www.hkarchitekten.at/v6/wp-content/uploads/pdf-cache/hk-04_17-muehlweg_en.pdf (最終アクセス日 2020.7.29)
Photo 2-16, Photo 2-17: Hermann Kaufmann + Partner ZT GmbH のサイトより引用 https://www.hkarchitekten.at/v6/wp-content/uploads/pdf-cache/hk-10_35-izm-illwerke-zentrum-montafon_en.pdf (最終アクセス日 2020.7.29)
Photo 2-18, Photo 2-19: CREE 社サイトより引用 <https://www.creebyrhomburg.com/project/life-cycle-tower-one/> (最終アクセス日 2020.7.29)
Table 2-9: Hermann Kaufmann + Partner ZT GmbH の資料を参考に作成
Fig.2-10: WOSCHITZ Group サイト参照 https://www.woschitzgroup.com/wp-content/uploads/2018/04/O_Woschitz_Zotter1.pdf (最終アクセス日 2020.7.29)
Table 2-10: Rüdiger Lainer + Partner Architekten ZT GmbH サイトを参考に作成 <https://www.lainer.at/projekte/hoho/> (最終アクセス日 2020.7.29)
Fig.2-11: WOSCHITZ Group サイト参照 https://www.woschitzgroup.com/wp-content/uploads/2018/04/O_Woschitz_Zotter1.pdf (最終アクセス日 2020.7.29)
Photo 2-22: 100 PROJECTS UK CLT から引用
Photo 2-20, Photo 2-21: 筆者撮影
Fig.2-12: 筆者作成
Photo 2-23, Photo 2-24, Photo 2-25, Photo 2-28, Photo 2-29, Photo 2-30: 展覧会カタログより引用
Fig.2-13: 展覧会カタログより引用
Table 2-11: 展覧会カタログを参考に作成
Fig.2-14: NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center; New et al. 2002 を参考に作成
Photo 2-26, Photo 2-27, Photo 2-31, Photo 2-32, Photo 2-33, Photo 2-34, Photo 2-35, Photo 2-36: 筆者撮影
Fig.2-15, Fig.2-16, Fig.2-20, Fig.2-17, Fig.2-18, Fig.2-19: 筆者作成

<第3章>

Photo 3-1: Nacasa & Partners により撮影
Table 3-1: 日本農林規格 (JAS) を参考に作成
Table 3-2: 真鍋恒博 (1999) . 『図解 建築構法計画講義 「もののしくみ」から建築を考える』 p.30 より引用
Photo 3-2, Photo 3-3, Photo 3-4, Photo 3-5, Photo 3-6: 筆者撮影
Table 3-2: 筆者作成
Fig. 3-1, Fig. 3-2, Fig. 3-3, Fig. 3-4: 筆者作成
Fig. 3-5, Fig. 3-6, Fig. 3-7, Fig. 3-8: 筆者作成

<第4章>

Photo 4-1, Photo 4-2, Photo 4-3, Photo 4-4: 青島 啓太, 志手 一哉, 岩岡 竜夫: 低層集合住宅における CLT 導入による施工効率化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 2019, 84 巻, 765 号, pp.2271-2279, 2019.11 より引用

Table 4-1, Table 4-2, Table 4-3, Table 4-4: 青島 啓太, 志手 一哉, 岩岡 竜夫: 低層集合住宅における CLT 導入による施工効率化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 2019, 84 巻, 765 号, pp.2271-2279, 2019.11 より引用

Fig. 4-1, Fig. 4-2, Fig. 4-4, Fig. 4-5, Fig. 4-6, Fig. 4-7, Fig. 4-8, Fig. 4-9, Fig. 4-10, Fig. 4-11, Fig. 4-12, Fig. 4-13, Fig. 4-14, Fig. 4-15: 青島 啓太, 志手 一哉, 岩岡 竜夫: 低層集合住宅における CLT 導入による施工効率化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 2019, 84 巻, 765 号, pp.2271-2279, 2019.11 より引用

Fig. 4-16, Fig. 4-17, Fig. 4-18, Fig. 4-19: 筆者作成

<第5章>

Fig.5-6: アーキテックコンサルティングのデータをもとに作成

Fig.5-7: 坂本雄三『建築熱環境』p133、東京大学出版会、2011.p.133 より引用

Fig.5-8: 坂本雄三により作成

Photo 5-1, Photo 5-2: 筆者撮影

Table 5-1, Table 5-2, Table 5-3, Table 5-4: 筆者作成

Fig.5-1, Fig.5-2, Fig.5-3, Fig.5-4, Fig.5-5: 筆者作成

用語集：

アクセシビリティ accessibility 近づきやすさやアクセスのしやすさのことであり、利用しやすさ、交通の便などの意味を含む。建築においては、建築材料の扱いやすさや加工のしやすさを指す。

エンジニアリングウッド engineered wood products 木を原材料に工場で二次加工された木質材料のうち特に、強度特性が設計段階で所定の要求水準を満たすように計算され、完成した製品が所定の試験によって所定の要求水準を満たしているものと評価されることにより、強度特性が所定の要求水準を満たしていることが保証された木材製品。

大型パネル large panel 建物を構成するパネルのうち特に大型のもの一般には両辺がルームサイズまたはそれ以上のパネルをいう。建築構法の観点からは、中型パネルを高さ階高分で幅 1.0m程度のものであり、それを超えるものを大型パネルと呼んでいる。

大型パネル組立て工法 large panel construction 大型のコンクリート板(パネル)を組み立てて建築物を構築する工法。ルームサイズ程度の大きさを持つプレキャスト鉄筋コンクリート板を床、屋根、壁として組み立てる。「大型プレキャスト板組立て工法」、「壁式PC工法」、「SPH工法」ともいう。

大型木質パネル large timber panel 建物を構成するための大型のパネルで、木材を用いて製造されたもの。高さ階高分以上として、幅を 2.0mに満たないものを中型パネルとし、2.0m以上のものを大型パネルと呼ぶ。

オープンシステム open system プレファブ化の手法の一建物の各部分をそれぞれ独立した商品として生産し、それを適宜組み合わせることにより建物を造っていく方式。⇐クローズドシステム

規格化 standardization 工業生産品の材料、生産工程、形、寸法、品質などについて標準を設けること。とりわけ互換性を要求する部品において意義を持つもの。規格化と造形との関連については、ルコルビュジェの理論や、ドイツ工作連盟の綱領のうちに積極的なとらえ方の例がある。

躯体 building frame, skeleton 建築物の、建具・造作・仕上げ・設備などを除いた部分。建物の構造体で主として強度を受け持つ。

クリティカルパス critical path プロジェクトの各工程を、プロジェクト開始から終了まで「前の工程が終わらないと次の工程が始まらない」という依存関係に従って結んでいったときに、所要時間が最長となるような経路。

建築計画 architectural planning ①都市計画に対し、単体または群の建物を計画すること。②建物の計画のなかで、設備計画、構造計画に対して空間の計画を扱う分野。③人間の生活、行動、意識と、空間との対応関係を基にして建築を計画するアプローチ。

建築構法 building construction 建築の実体の構成方法。

公庫住宅 finance corporation dwellings 持ち家を希望する個人、自社の社宅を建設する会社、地方住宅供給公社、住宅供給業者などが、住宅の建設に当たり住宅金融公庫の融資を受けて建設した住宅、および住宅金融公庫の融資を受けて購入する新築住宅、中古住宅。

公団住宅 h.u.d.c. dwellings 住宅事情の改善を特に必要とする大都市地域等において、住宅都市整備公団によって供給される住宅。主として大都市の既成市街地の周辺部において集団的に共同住宅を建設して、新しい良好な住宅地を形成することを目的とする団地住宅と、既成市街地内に共同住宅および健全な市街地の形成に必要な施設を建設して、土地の高度利用と市街地の再開発とに寄与することを目的とする市街地住宅とがある。住宅の種別には賃貸住宅、分譲住宅および賃貸用特定分譲住宅がある。最近ではペア住宅や戸建て住宅、フリープラン賃貸住宅、2戸1改造住宅など、近年の居住空間に対する人々の考え方や価値観の変化に対応した多様な試みが行われている。

工法 construction method 建物の組立て方、造り方、施工の方法。広義には構法を含む。

構法計画 construction planning ①建築の構成方法を計画すること。部位などの設計において要求条件を設定し、それに適した構法を選択、開発すること。②建物の計画のなかで、各部構造構法システムの計画を扱う分野。

サプライチェーン supply chain 商品が消費者に届くまでの原料調達から製造、物流、販売といった一連の流れを、大きな供給(supply サプライ)の鎖(chain チェーン)として捉えたもの。供給連鎖とも呼ばれる。

産業化 Industrialization 18世紀半ばのイギリスの産業革命に端を発して進行した、経済の領域における変動を指す概念。農耕社会から産業社会へと変化するプロセス。

軸組 framework 土台、柱、梁、桁、筋かいなどから構成されている壁体の骨組。架構の骨組をいうこともある。略して「軸」ともいう。

集成板 Glue Laminated Timber; Glulam ひき板(ラミナ)を接着剤で再構成して製造される木質材料。圧着の際のジグ形状を変えることで、ひき板そのものを曲げて接着したものを湾曲集成材と呼ぶ。

住宅性能表示制度 housing performance indication standards 住宅の性能を適切に評価するための制度。「住宅の品質確保の促進等に関する法律(品確法)」に基づいて2000年に制定された。新築住宅では、構造の安定、火災時の安全、劣化の軽減、維持管理への配慮、省エネ対策、シックハウス対策、窓の面積、遮音対策、高齢者への配慮、防犯対策の10分野について、等級や数値で評価される。

単板積層材 Laminated Veneer Lumber ローターリーレース、スライサーその他の切削機械により切削した単板を繊維方向を揃えて積層、接着した軸材料の木質材料。主に柱や梁など長い棒状のものとして利用されることを前提に、長さ方向の強度を優先して製造される。

直行集成板 Cross Laminated Timber ひき板(ラミナ)を並べた後、繊維方向が直交するように積層接着した木質系材料。日本では2013年12月に製造規格となるJAS(日本農林規格)が制定され、2016年4月にCLT関連の建築基準法告示が公布・施行された。

デジタルファブリケーション digital fabrication デジタルデータをもとに創造物を制作する技術のこと。デジタルデータを3Dプリンターやレーザーカッターなどのデジタル工作機械で読み込んで造形する方法。

ビルディングエレメント building element 建物を構成する要素。機能区分による要素、生産単位により区分する要素などがある。略して「BE」ともいう。

複合パネル(木質複合パネル) hybrid timber panel 建物を構成するための大型のパネルで、木材とコンクリートまたは鋼材などの異材料と組み合わせて製造されたもの。

プレカットシステム precut system 主として木造住宅の継手や仕口の手加工を工場における機械加工に置き換える方法。継手や仕口の形状寸法などは機械加工に適するように変えている。一部を手加工で補うものから、コンピュータを駆使して墨付

け作業を省略するものまで、利用者の条件や規模などによって異なる。

フレキシビリティ flexibility 一般には変化に対し柔軟に対応、調整できる性質を意味する。建築では機能の変化、間仕切りの変更、将来の増築等に対して使われる。時間にかかわりあう柔軟性(flexibility in time)と、ある時点における平面形式に関する柔軟性(planning flexibility)とがある。建築そのもののフレキシビリティと同様に、間仕切りシステムや家具可動性のフレキシビリティも重要な要素となる。

プレキャスト コンクリート パネル precast concrete panel あらかじめ工場などで製作した鉄筋コンクリート部材の総称。普通コンクリート、軽量骨材コンクリートあるいは気泡コンクリートなどで作られる。種類としては柱、梁、壁板、床板、屋根板、道路用側溝などがあり、これらを現場で組み立てて構造体を作る。「PC」と略称する。⇔現場打ちコンクリート

プレキャスト鉄筋コンクリート構造 precast reinforced concrete construction プレキャストされた鉄筋コンクリート部材を用いて組み立てた構造。

プレファブリケーション (プレファブ) prefabrication 現場での施工の前に、あらかじめ組み立てておくこと、すなわち現場での作業を別の場所に移して行うこと略して「プレファブ」または「プレハブ」という。具体的には、工場での部材の加工、組立てを行い、現場で所定の場所に取り付けること。生産性の向上、質の均一性、精度の向上などをねらった建築生産における技術革新の手段の一。量産とよく混同されるが一品生産のものでもプレハブされることがあり、必ずしも量産されるとは限らない。

マザーボード motherboard JAS 規格による CLT の製造過程において、最終的に製品として加工された大きな板状のパネルのこと。製造工場によって寸法は異なり、一般的には幅 1m×長さ 4m～幅 3m×長さ 12mで製造される。

丸太組構法 (校倉造) log house 木材を横に重ねて井楼(せいろ)組みとして外壁を造る構法。横木は校木(あぜき)と称され、その断面は円、四角、三角など。我が国では弥生時代の倉として始められる。現存のものとしては、正倉院(756 ころ)の校倉が著名。校(あぜ)は物を交差させて積み重ねる意。古代では「甲倉」、「又倉」、「あぜり」、「校屋」ともい、近世の俗称では「釘無し堂」とも称した。

燃えしろ burning margin 想定される火事で消失する木材の部分を燃え代と呼ぶ。燃え代を想定して部材の断面寸法を考えることを燃え代設計という。

木材 wood, timber, lumber 建築用材料の一で、樹木を伐木、造材、製材したもの。木材は樹皮、樹幹および髓より成り立っており、樹幹は形成層から内側に向かって形成された植物細胞の集合体であって、一般には、この樹幹を材として取り扱う。植物細胞の種類により針葉樹と広葉樹材に大別され、針葉樹材は主に構造用、広葉樹材は主に各種仕上げ用、造作用として使われる。

木材腐朽菌 wood-rotting fungi 木材質の構成成分を分解吸収し、それを破壊腐朽させる菌類の総称。大部分は担子菌類で帽菌亜目に属する。

木質構造 wooden structure 木材またはその加工品を主要な素材として構成される構造、伝統的な木構造のほか積層集成材や合板パネルなどを主構造材として構成される構造。

ユニット化 unification 建物または家具の量産効果を上げるためにプレファブ化し、数種の部分を一体化するシステム。空間または構造機構について基準単位が考慮される。住宅でいえば、浴室、台所、便所などの各室が、配管、配線を含めて単位空間とされる場合と、トレーラーハウスのように、一住宅全体が単位空間とされる場合とがある。

ユニット型空間 modular dwellings 建物の平面構成の単位、例えば、集合住宅の1戸の平面、学校建築の1教室の平面などが連続した空間構成。

ラミナ (挽き板) lamina 集成材を構成する板材。厚さは最大 5cm 程度で一般には 1cm から 3cm 厚のものが多く。

枠組壁工法 (ツーバイフォー構法) wood frame construction 2×4inch の断面を有する木材、または 2inch はそのまま 4inch の整数倍の断面長さを有する木材を、主として釘打ち工法によって建て、壁全体で支える構法。アメリカ、カナダで開発され、主として住宅用の建築物に用いられる。「木造枠組壁構法」、「ツーバイフォー構法(2×4 工法)」などとも呼ばれる。

枠組パネル (2×4 panel) 2×4 panel construction 主として合板を用いたパネルを主な構造耐力部材として利用する木造建築構法。パネルに用いる構造用合板は厚さ 5mm 以上、パネル厚さは 75mm 以上のものをいう。

CAM (コンピュータ支援製造) computer aided manufacturing コンピュータ支援製造の略語。製品の製造を行うために、CAD で作成された形状データを入力データとして、加工用の NC プログラム作成などの生産準備全般をコンピュータ上で行うためのシステムであり、出力されたデータは、CNC 化された工作機械に送られて実際の加工が行われる。

CLT パネル工法 CLT panel construction CLT パネル工法を用いた建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件(平成 28 年国土交通省告示、第 611 号)の制定に基づき定められた工法。

CNC (コンピュータ数値制御機械) computer numerical control コンピュータによる数値制御。制御系の中心的な要素としてコンピュータを用い、CPU(中央処理装置)でプログラム処理を行コンピュータ値制御装置。

JAS Japanese Agricultural Standard 日本農林規格等に関する法律(JAS 法)に基づく JAS 制度は、食品・農林水産品やこれらの取扱い等の方法などについての規格(JAS)を国が制定するとともに、JAS を満たすことを証するマーク(JAS マーク)を、当該食品・農林水産品や事業者の広告などに表示できる制度。

参考：青木繁, et al. (1993). 建築大辞典 第 2 版, 彰国社. 他

あとがき

本論文は、自身の設計活動を通して実証してきた内容を元に、構法計画学の領域における大型木質パネルの扱いに関して、まとめたものである。

研究は、2008年にエチオピア国立メケレ大学在任中に始めた伝統住居に関する調査からと、フランスのパリ・ベルヴィル建築大学留学中の修士研究で扱った住居のつくりかたと構成要素の分析から始まった。2013年に帰国してから、芝浦工業大学に着任し、ゼロ・エネルギー・ハウスの設計を行う中で、大型木質パネルであるCLTに触れることになった。以降、各章で扱った諸々のプロジェクトにおける実践的な取り組みをもとに、検証したものである。

社会的に木質建築の需要が高まっている中で、大型木質パネルを用いた建物の設計実績が蓄積していったが、これを汎用性のある研究論文としてまとめることを目指したものである。正直なところ、これまで、ただがむしゃらに建築の設計を行ってきたといってもよい。アフリカでの調査から環境型建築の設計、木質建築の設計まで、自身の活動が散漫であることは認識していた。

建物の性能や機能と、その生産方法で建築を分析することで、自身のアフリカでの活動から日本での設計までが、ようやく一本の軸上に並んだように感じた。構法計画の領域から見ると、みるみるうちに扱ってきた要素が統合されていく感覚は感動的でさえあった。

設計の実務では、場合によっては論理の飛躍によって次々と課題を解決していく必要があるため、筆者自身は、研究論文として客観性を持たせる論理の展開には苦心した。本来、建築構法の理論は、演繹法として観察を一般論に照らして、結論を必然的に導き出すことができればよい。しかし、筆者が取組んできた設計の実績をもとにした理論展開は、むしろ、いくつかの事象の共通点に注目して論理を導き出した、帰納法によるものだった。このために、いくつかの設計実績をもとにして各事象に対して仮説を立て、続くプロジェクトへの設計に反映し、施工中、または建設後の調査と分析を経て、この仮説の客観性を確認する作業が必要であり、膨大な時間を要している。

本論文の背景には、大型木質パネルを国内で一つの産業として成立させることで、木材資源の活用や雇用創出による地方創生に対する社会的な期待がある。さらには、プレファブ리케이션による効率化で、建設現場の働き方改革を進めたいという建設業界の思惑も介在している。筆者としては、本論文において、できる限り汎用性がある知見を、実例の中で示すことを心掛けたつもりである。これらの知

見が、建築設計や事業において、構法を計画する上での一助となれば幸いである。

そして、筆者の本懐としては、建築自身の多様な展開に期待しているのも事実である。本論文で主に対象とした建物は、建築計画と生産方法における知見の蓄積を目指してきたために、ある程度、標準化を意識して汎用的な計画を扱ってきた。しかし、建築の設計者として大型木質パネルに期待する役割は、規格化された建築による建築生産の効率化だけでなく、より自由な構成要素としての役割にある。

大型木質パネルの高い加工性は、ユニット型空間の連続構成において、単純な繰り返しに変化を持たせることや、より自由度の高い空間を構成する要素にもつながるものである。また、材料としてのアクセシビリティの高さは、建築の中で起こる多様な人々のふるまいに対して、寛容なものでもあるはずである。規格化や工業生産が生む選択性の高い多様な建築の在り方に期待したい。

陳謝

本論文を執筆するにあたり、数多くの方々のご指導とご協力を頂きました。ご助言・ご協力をいただいた関係諸氏に、この場を借り感謝いたします。

まず、東京理科大学理工学研究科建築学専攻教授 岩岡竜夫先生には、博士課程の指導教員としてご指導いただきました。研究者と建築家の両視点からのご指導のおかげで、ようやく論文としてまとめることができたと思っております。心より厚く御礼申し上げます。

理工学研究科建築学専攻 教授 吉澤望先生、同教授 山名善之先生、同准教授 垣野義典先生、理工学研究科国際火災科学専攻 教授 萩原一郎先生、工学研究科建築学専攻 教授 坂牛卓先生、同教授 今本啓一先生、同准教授 熊谷亮平先生には、論文の審査を通じて、論旨から隅々に至るまで、ご指導を賜りました。構法計画、建築計画、環境工学、建築材料と様々な領域からのご指導を頂いたことで、まとめることができました。厚くお礼申し上げます。

第4章では、芝浦工業大学建築学部建築学科 教授 志手一哉先生には、共同で研究をさせて頂くとともに、日本建築学会での論文発表に際して共著いただきました。心から感謝申し上げたいと思います。

この調査は、復興公営住宅整備事業として、ふくしま CLT 木造建築研究会 | 木あみ（代表：会津土建株式会社 菅家洋一氏）の関係者各位、並びに福島県土木部建築住宅課の協力のもと実行されたものです。また、労務工数調査では、伊藤啓吾君（芝浦工業大学）らの協力を得て、貴重なデータが収集できました。心から感謝申し上げます。

第5章では、東京大学 名誉教授 坂本雄三先生、株式会社アーキテックコンサルティング 社長 瓦口泰一さん、同取締役 田澤慎也さんには、調査で共同いただくとともに、日本建築学会での技術報告に際して共著いただきました。心から感謝申し上げたいと思います。

この調査は、環境省の平成29年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（木材利用による業務用施設の断熱性能効果検証事業）を得て実施された計画において、温熱環境の詳細分析のために実測を行ったものです。計画・実測にあたっては、藤田建設工業株式会社の協力により、貴重なデータが収集できました。ご助言・ご協力をいただいた関係各位に、心から謝意を表します。

最後に、研究と執筆にあたり見守ってくれた家族にも、感謝します。

2020年9月 青島 啓太

論文要旨

本論文は、木質系の大型パネルを主たる構成部材とする建築を対象としたものである。この構法の計画学上の新たな理論を構築するために、規格化された居室群が水平・垂直に連続展開するユニット型居住空間に着目した。これによって、大型木質パネルによる施工段階および性能上の効果を実証的に明らかにするものである。

大型パネルを用いた建築は、欧州で1950年代に発展した大型のコンクリートパネルによる構造のものが一般的だった。これはプレキャスト鉄筋コンクリート工法とも呼ばれている。パネル生産を工場で行い、建設現場に運搬されて組み立てられることで建物の組立の効率化を図る構法である。

一方、1990年代以降、CLT（＝直交集成材）等の大型木質パネルが開発・製造され、それらを主な構成部材とする建築物が欧米を中心に急速に普及し始めた。木材を主たる構成部材とする木質建築は、国内外を問わず古くから存在するが、耐久性、耐震性、耐火性など様々な問題で公共性の高い大型建築物には不向きであった。近年、木材は質の高い居住性能を求める建築に対して、あるいは持続可能な社会環境を構築するために有効な素材として近年再び着目されている。特に、比較的小さな居住スペースが、界壁や床版を介して均質的に連続配置・重層される形式の、集合住宅や宿泊施設で展開している。これらの、いわゆるユニット型の居住空間をもつ建築においては、大型木質パネルを使うことで構法上の合理性がある。さらには、その規模に比例する形で、効率化の効果が期待できる。しかしながら、この新しい構成部材を用いた建築に対する構法計画理論は、従来の構法計画学において明確に位置づけられていない。構成部材の特性と、建築類型の関係から生ずる新たな構法理論の展開が必要である。

そこで本研究では、従来の構法計画学の新たな展開として、大型木質パネルによって構成される建築の中で、特にユニット型の居住空間に着目する。その施工上や環境性能上の有効性と問題点を検証することを通じて、建築構法計画の新たな理論の構築と計画の指針について明らかにしている。

本論文は以下の6章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、本論文の構成等を述べている。

第2章「木質構法を巡る国内外の現状」では、日本において大型木質パネルが用いられ始めた状況をまとめることにより、構法計画学を再検証する必要があることを述べている。さらに、木材を用いた現代の建築物の国内外の事例を比較考察し、木質材料を用いた現代建

築の多様性と潮流について検証する。欧州で先行する木質建築物を概観することで、見直すべき構法計画上の性能を述べる。東南アジアにおける多様な展開事例や、アフリカで住宅の性能を著しく低下させている反証事例を挙げ、構法計画の必要性を考察する。

第3章「大型木質パネルを用いた建築に関する構法計画理論」ではまず、建築を構成し統合するための方法論に至るまでの構法計画学の成り立ちを概観する。建築を部分の集合、あるいは部位の組み合わせとして捉えるのが建築構法である。その理論が1990年以降に開発が始まった大型木質パネルにかかわる構法に対してどのような点で有効であり、どのような視点を補うべきかについて論述している。さらに、従来の構法計画を新たに見直すための課題設定として要求される、建物の施工と性能に着目した実証的な分析が必要であることを述べている。

第4章「大型木質パネルを用いた低層集合住宅の施工効率化」では、建築の生産分野に着目し、大型木質パネルを構造に用いた公共の低層集合住宅の計画について述べている。ここでは、約4,800㎡の大規模計画において、施工の効率化を目的に仮説を立て、これをもとに木質大型パネルによって設計して建設し、施工中の労務工数の調査によってその効果を実践的に検証している。

第5章「大型木質パネルを用いた宿泊施設の環境的效果」は、構法計画上の性能分野に着目して、大型木質パネルを非構造壁に用いた中規模建築を対象にした室内の温熱環境について述べている。ここでは、4階建ての宿泊施設の外壁及び界壁部分に大型木質パネルを用いた際に、パネルの断熱性能と蓄熱性能が室内環境に影響を与え、冷暖房に関するエネルギー消費量を軽減することを検証している。

第6章「結論」では、前5章を総括し、大型木質パネルを用いたユニット型居住空間の構法計画上の理論および指針についてまとめ、本論文が実際の建築設計に資する研究であることを結論づけている。

Construction Planning for Modular Dwellings Using Large Timber Panels

Abstract:

This dissertation focuses on architecture with large timber panels as the main components. In order to develop a theory for the construction planning of this method, the focus was given on module buildings in which a standardized group of rooms develops continuously in a horizontal and vertical direction. As a result, this will empirically clarify the effect of large-size Timber panels on the efficiency construction efficiency and building quality.

Large panel construction was generally used in Europe in the 1950s, where large concrete panel construction was developed. This is also called PCa (Precast Concrete) construction method. The panels are produced in a factory and transported to the construction site to be assembled, thereby improving the efficiency of building assembly.

On the other hand, large timber panels such as CLT (Cross Laminated Timber), have been developed and manufactured since the 1990s. The use of CLT as the main component of buildings has spread rapidly, especially in Europe and Canada. Notably, The Wood-based construction has existed for a long time both in Japan and abroad, but they were not suitable for large buildings with high public importance due to various problems such as durability, earthquake and fire resistance. In recent years, wood has been attracting attention again as an active material for buildings that require high-quality living performance and for a sustainable environment. It is developed in residential buildings and hotels, which are composed of rather small spaces that are connected vertically and horizontally by walls and floors. In these modular buildings, the use of large timber panels is structurally rational. Moreover, we can expect efficiency in construction proportional to building scale.

However, the construction planning theory for using this new component does not have a clear position in the existing academic knowledge. It is necessary to develop a new theory arising from the relationship between the characteristics of the components and the building type.

In this study, the focus is given on the modular buildings composed of large timber panels as a new development of construction planning studies. By examining its effectiveness and problems in terms of construction system and environmental performance, new theory and planning-guideline were developed.

Chapter 1, "Introduction," describes the background, objectives, and the overall structure of the research.

Chapter 2, "Current State of Wooden Construction Method: Within and Outside Japan," describes the necessity of reviewing construction planning theory by summarizing the situation where large timber panels started to be used in Japan. In addition, by comparing various modern wooden buildings, both domestic and foreign, its diversity and trend were verified. By giving an overview of the latest wooden building examples in Europe, areas in need of review to improve the performance of construction methods were extracted. The necessity of a new construction method has been discussed through the wide examples in Southeast Asia and disproving cases that significantly deteriorate the performance of housing in Africa.

Chapter 3, "Construction Planning Theory for Architecture Using Large Timber Panels," gives an overview of the origins of construction planning theory and development as the methodology for constructing and integrating architecture. The construction planning is the view of architecture as coordination of elements or a combination of parts. The author describes how the theory is practical for the construction method related to the large timber panels developed after 1990, and what kind of viewpoint should be supplemented. It also discusses the necessity of empirical analysis focusing on the construction and performance of the building, which is required to set the agenda to review the conventional construction planning.

Chapter 4, "Efficient Construction of Low-Rise Apartments Using Large Timber Panels," focuses on the construction of buildings and gives an example about a project of public low-rise residence using large timber panels. In this research, the author formulates several hypotheses to improve the efficiency of construction in a large-scale project of approximately 4,800 square meters. The efficiency was verified by investigating the working hours of the laborers at the construction site.

Chapter 5, "Environmental Effects of Accommodations Using Large Timber Panels," focuses on the performance of the indoor thermal environment of a medium-sized building using large timber panels as non-structural walls as the field in construction planning. Large timber panels were used for exterior walls as well as fences of a four-story accommodation facility. It was verified that the thermal insulation and thermal storage performance of the panels affect the indoor environment and reduce energy consumption.

Chapter 6 "Conclusion" summarizes the previous five chapters and concludes by summarizing the theory and guidelines for the construction planning of a dwelling unit buildings with large timber panels. This dissertation is a study that contributes to actual architectural design.