

2.6 (有)ジョイボンド九州／(株)大匠建設

事業名		ジョイボンド九州社屋新築工事の建築実証		
実施者(担当者)		有限会社ジョイボンド(株式会社大匠建設)		
建築物の概要	用途	パン屋(製造・販売)		
	建設地	福岡県那珂川市後野2-14-7		
	構造・工法	CLTパネル工法		
	階数	2		
	高さ(m)	8.25		
	軒高(m)	7.05		
	敷地面積(m ²)	705.16		
	建築面積(m ²)	150.7		
	延べ面積(m ²)	299.0		
	階別面積	1階	150.7	
	2階	148.3		
		-		
CLTの仕様	CLT採用部位		壁、床、屋根	
	CLT使用量(m ³)		加工前製品量112.0m ³ 、建築物使用量96.4m ³	
	壁パネル	寸法	120mm厚	
		ラミナ構成	3層4プライ	
		強度区分	Mx60A相当	
		樹種	スギ	
	床パネル	寸法	150mm厚	
		ラミナ構成	5層5プライ	
		強度区分	Mx60A相当	
		樹種	スギ	
屋根パネル	寸法	120mm厚		
	ラミナ構成	3層4プライ		
	強度区分	Mx60A相当		
	樹種	スギ		
木材	主な使用部位(CLT以外の構造材)		梁・小屋束・母屋・屋根下地	
	木材使用量(m ³)※構造材、羽柄材、下地材、仕上材等とし、CLT以外とする		15.2m ³	
仕上	主な外部仕上	屋根	ガルバリウム鋼板 t=0.6 H=88	
		外壁	窯業系サイディング t=16	
		開口部	アルミサッシ+複層ガラス(透明・型板・網入)	
	主な内部仕上	界壁	CLT+PB12.5+準不燃クロス貼	
		間仕切り壁	LGS+PB12.5+準不燃クロス貼	
		床	1F:FAフロア(H=250)+ラワン合板(t=12)×2枚+塩ビシート 2F:OAフロア(H=100)+タイルカーペット	
	天井	LGS+PB9.5+岩綿吸音板t=9.0		
構造	構造計算ルート		許容応力度計算(ルート1)	
	接合方法		ビス接合+xマーク金物+引きボルト	
	最大スパン		6.59m	
	問題点・課題とその解決策		内部CLTを現しとする為、燃え代設計(片面45mm)を行う必要があったが、CDの観点から壁CLTパネルを150mm→120mmに変更したことにより、75mmで構造体が成り立つか再計算を行う必要があった。	
防火	防火上の地域区分		法第22条区域	
	耐火建築物等の要件		無	
	本建築物の防火仕様		45分準耐火	
	問題点・課題とその解決策		内部CLT現しとする為、片面45mmの燃え代設計を行った。	
温熱	建築物省エネ法の該当有無		該当なし	
	温熱環境確保に関する課題と解決策		西面・南面に遮熱シートを施工、2F天井裏・小屋組に断熱材敷込	
	主な断熱仕様(断熱材の種類・厚さ)	屋根(又は天井)	グラスウール t=50	
		外壁	-	
床		-		
施工	遮音性確保に関する課題と解決策		外部からの騒音防止対策として複層ガラスを採用	
	建て方における課題と解決策		施工傷防止対策として、壁建て起こし時に回転治具を採用	
	給排水・電気配線設置上の工夫		コンセントBOXをCLTパネル内部へ埋込	
	劣化対策		バトン塗布(工場1回、現場1回 計2回)	
工程	設計期間		2021年6月～11月(6ヵ月)	
	施工期間		2021年12月～2022年5月(6ヵ月)	
	CLT躯体施工期間		2022年1月下旬～2月中旬(2週間)	
	竣工(予定)年月日		2022年5月31日	
体制	発注者		有限会社 ジョイボンド九州	
	設計者(複数の場合はそれぞれ役割を記載)		DAISHO一級建築士事務所	
	構造設計者		DAISHO一級建築士事務所 協力:株式会社 ウッディストプラン	
	施工者		株式会社 大匠建設	
	CLT供給者		山佐木材 株式会社	
	ラミナ供給者		鹿児島県森林組合連合会、曾於地区森林組合	

実証事業名：ジョイボンド九州社屋新築工事の建築実証

建築主等／協議会運営者：(有)ジョイボンド九州／(株)大匠建設

1. 実証した建築物の概要

用途	パン屋（製造・販売）		
建設地	福岡県那珂川市		
構造・工法	CLT 工法		
階数	2		
高さ（m）	8.25	軒高（m）	7.05
敷地面積（㎡）	705.16	建築面積（㎡）	150.7
階別面積	1階	150.7	延べ面積（㎡） 299.0
	2階	148.3	
	3階	-	
CLT 採用部位	壁、床、屋根		
CLT 使用量（m ³ ）	加工前製品量 112.0 m ³ 、加工後建築物使用量 96.4 m ³		
CLT を除く木材使用量（m ³ ）	15.2 m ³		
CLT の仕様	（部位）	（寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種）	
	壁	120mm 厚/3 層 4 プライ/Mx60A 相当/スギ	
	床	150mm 厚/5 層 5 プライ/Mx60A/相当/スギ	
	屋根	120mm 厚/3 層 4 プライ/Mx60A 相当/スギ	
設計期間	2021 年 6 月～11 月（6 ヶ月）		
施工期間	2021 年 12 月～2022 年 5 月（6 ヶ月）		
CLT 躯体施工期間	2022 年 1 月下旬～2 月中旬（2 週間）		
竣工（予定）年月日	2022 年 5 月 31 日		

2. 実証事業の目的と設定した課題

本実証建築物は、2 階建て店舗兼事務所を許容応力度計算(ルート 1)にて、自社による設計施工を行った。構造体全てを CLT パネルで設計施工を行ったのは九州初となる。当社 CLT 施工 3 件目となる本事業において、これまでの実証事業で蓄積してきたノウハウを活かし、如何に品質の高い建築物を顧客へ提供できるかが課題となる。今回の実証事業で設定した課題は以下である。

- (1) 跳ね出しバルコニースラブにおける漏水対策の検証
- (2) 電気配線及びコンセント BOX 埋込による内装意匠の簡素化
- (3) CLT パネル素地仕上げ箇所の品質向上
- (4) CLT パネルコストの検証

3. 協議会構成員

- (設計) DAISHO 一級建築士事務所 : 梅野 光太郎
- (構造設計) DAISHO 一級建築士事務所 : 梅野 光太郎
- (施工) 株式会社 大匠建設 : 寺田 洋樹、倉成 孝典 (協議会運営者)
- (原木供給) 鹿児島県森林組合連合会、曾於地区森林組合
- (材料) 山佐木材 株式会社
- (金物) 山菱工業 株式会社

4. 課題解決の方法と実施工程

協議会を通じて設計、施工、資材調達の担当者それぞれが協力し合い、適切な実証方法を検討していく。当社過去施工物件に関係者全員で赴き、着工前段階から CLT 工法に対する認識を共有させる。現場施工法に関して、BIM を使用し、当該課題箇所とその他の取合いについて干渉がないかをチェックする。

<協議会の開催>

- 2021 年 12 月 : 第 1 回開催、問題点洗い出し、原木及び金物調達の確認、工事着工
- 2022 年 1 月 : 第 2 回開催、CLT パネル加工図確認、基礎と壁パネルの接合部精度確認
- 2 月 : 第 3 回開催、木工事進捗確認、改善点等確認、実証事業の取りまとめ検討

<設計>

- 2021 年 9 月 : 設計業務委託契約締結・実施設計
- 10 月 : 構造設計
- 11 月 : 建築確認申請提出

<施工>

- 2021 年 11 月 : 工事請負契約締結
- 12 月 : 工事着工、基礎工事
- 2022 年 1 月 : 基礎工事～CLT 建方
- 2 月 : CLT 建方～屋根工事
- 3～5 月 : 外装、内装、建具、外構工事

5. 得られた実証データ等の詳細

設定した課題において次の結果が得られた。

(1) 跳ね出しバルコニースラブにおける漏水対策の検証

CLT 床パネルジョイント部に、一次防水としてブチルテープを施工し、二次防水としてバルコニースラブ全体に FRP 防水を施工する。木口面については、三次防水を兼ねた仕上げとして、溶融亜鉛めっき鋼板による幕板を施工する。

ジョイント部における当て木留め N 釘についても、釘頭にシーリングを打設するなど、水の浸入口となり得る箇所を徹底して除去した。

(2) 電気配線及びコンセント BOX 埋込による内装意匠の簡素化

耐力壁以外の箇所について、CLT パネル製作完了後に BOX の欠取り及び配線部の穿孔を行うことで、本来フカシ壁を設けなければならなかった箇所を、CLT パネル素地仕上げとすることができ、内装仕様の簡略化と工事コスト削減に繋げることができた。現場での計算ミスも起こったことから、一発勝負である為 CLT 製作者や電気設備工事業者とより綿密な打ち合わせと図面チェックが必要になるという反省と課題が残った。

(3) CLT パネル素地仕上げ箇所の品質向上

前回の CLT 工法施工の際に生まれた課題の一つとして、施工中におけるキズや汚れが挙げられた。特に CLT パネル単体の角欠けが目立った為、本実証においてはコーナー部の養生を重点的に検証した。協議会の中で、コーナーガードや木製治具を用いることとした。結果として、建方完了時に目視による自主検査を行った際、素地化粧部や開口部等に目立った損傷は確認されなかった。よって、余計な補修等も発生しなかったことから工事コスト削減にもつながったと言える。

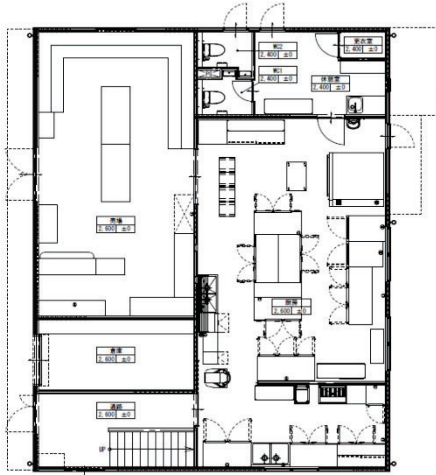
(4) CLT パネルコストの検証

コロナ禍における原木市場価格と特定地域材価格との比較を行った。言わずと知れたウッドショックによる木材価格の高騰は否めず、両者に原価自体の差は生まれなかった。特定地域材となると、費用が嵩むのは運搬費の部分であり、指定の地域から製作工場までの道のりに準じて変動する。本実証を例に挙げて、福岡県産材及び那珂川市産材を調達し、鹿児島県の製作工場へ運搬したと仮定すると、約 60 万円の追加費用が発生した。現在高止まりしている原木価格については、オミクロン株の出現により世界の輸出入体制が好転するとは考えにくい為、その他の面でコストダウンを図る必要があると考えられる。

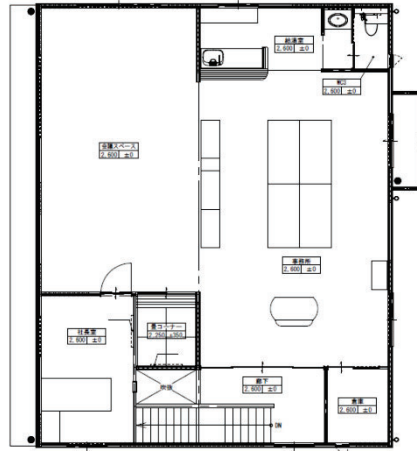
6. 本実証により得られた成果

初の自社設計施工を通して、早い段階での問題解決に取り組むことができた。建方工事については、これまでの施工実績資料があったことから、CLT を初めてさわる当社社員大工が携わり、会社全体で CLT 工法の普及に努めた。その中で、内装意匠の簡素化や CLT パネルの品質向上などに取り組み、現在抑えることのできない原木価格以外の面でコスト削減を実現することができた。

7. 建築物の平面図・立面図・写真等



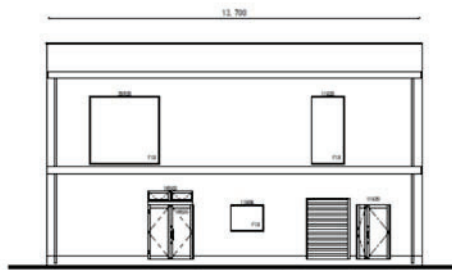
1階平面図



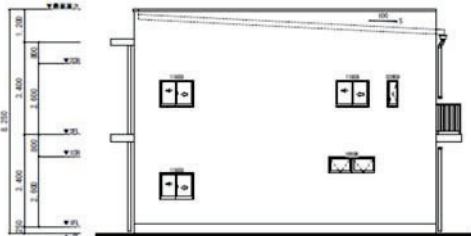
2階平面図



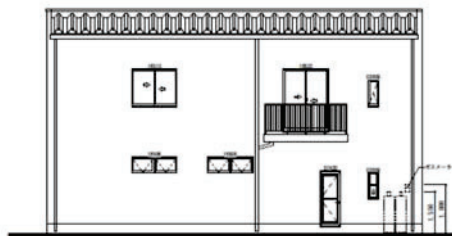
北側立面図



西側立面図



南側立面図



東側立面図



完成パース

2021年度 大匠建設・山佐木材・福岡大学 共同研究

CLT建築物におけるCO₂排出量の評価手法に関する研究

研究成果報告書

2022年2月

福岡大学工学部建築学科

倉富 洋

【目次】

1. はじめに	・・・ 3
2. 対象建物（CLTパネル工法）	・・・ 4
3. 鉄骨造のケーススタディ	・・・ 5
3.1 基本条件	・・・ 5
3.2 仮定断面	・・・ 7
4. 構造種別ごとの建設時CO ₂ 排出量	・・・ 12
5. 炭素貯蔵量の計算	・・・ 14
6. 運用段階のCO ₂ 排出量	・・・ 15
7. まとめ	・・・ 17
謝辞・参考文献	・・・ 17

1. はじめに

近年、中大規模建築物を木質化する取り組みが随所で見られ、林野庁は2021年10月に「建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン」¹⁾を公表した。本ガイドラインには炭素貯蔵量の計算式は記されているものの、目標とする数値は明記されていない。CO₂排出量や炭素貯蔵量などの環境的側面からも、木材利用の利点を明示することが重要である。本研究では木材利用が環境的側面に与える影響を数値化することを目標に、中大規模建築物の木質化推進に繋げることを企図する。

産業全体において、建設分野が高いCO₂排出率を有していることは周知の事実であり、同時に今後CO₂排出削減の可能性が大きいことも特徴である。建設時および運用段階におけるCO₂排出削減を行なうための具体的な道筋を示すことが肝要であり、文献2)では低炭素社会を実現するための具体的なシナリオが提示されている。また、近年エコマテリアルとして注目を集めている木材をいかに効果的に活用し、CO₂排出削減の評価手法を明確化することも重要視されている。

本報告では、CLTを使用した建設予定の実建物を対象に、各種構造（CLTパネル工法、RC造、鉄骨造）において建設時に排出されるCO₂量を算出し、その評価手法の妥当性を検証する。ここでは、主に以下の三点について述べる。

1. 建設段階におけるCO₂排出量
2. 当該CLTパネル建物の有する炭素貯蔵量
3. 運用段階におけるCO₂排出量

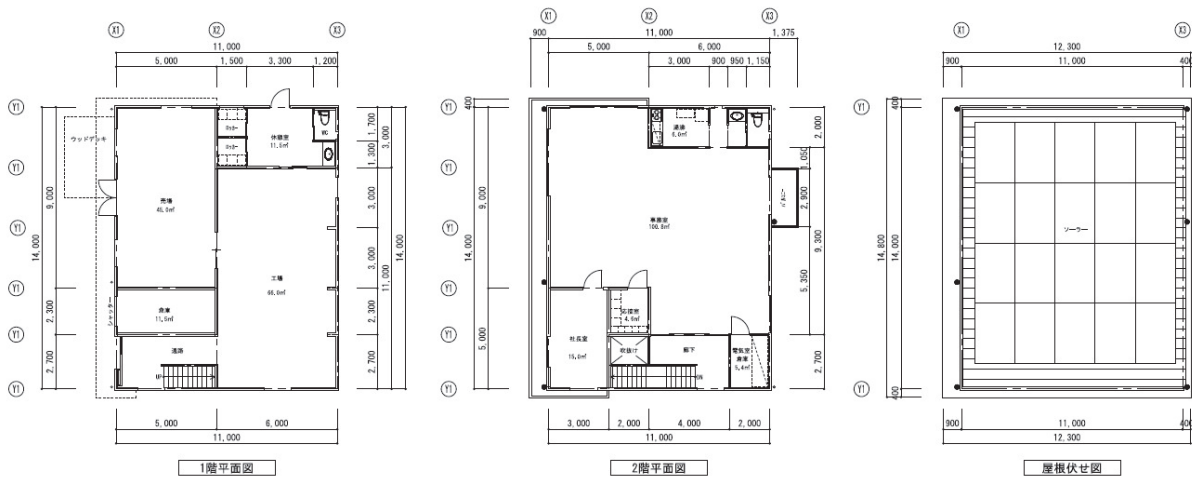
これらのうち、1.の建設段階におけるCO₂排出量は、日本建築学会が刊行するLCAデータベースにある建築資材の重量当たりのCO₂排出原単位を参考に、実際の建物プランに応じて算定する。鉄骨造は当該建物の諸条件に基づいて仮定断面を作成し、建物重量から使用された鉄骨量を算出する。2.の炭素貯蔵量は、2021年10月に林野庁が公開した「建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン」に基づいて計算し、当該建物の規模における炭素貯蔵量を示す。3.の運用段階におけるCO₂排出量は、2050年達成目標となっているカーボンニュートラル化を想定して考察を行い、木材の有する時間の経過とともに植林した木々がCO₂を吸収するといった、他の材料にはない特性を加味し、木材利用の有用性を示すものとする。

2. 対象建物（CLTパネル工法）

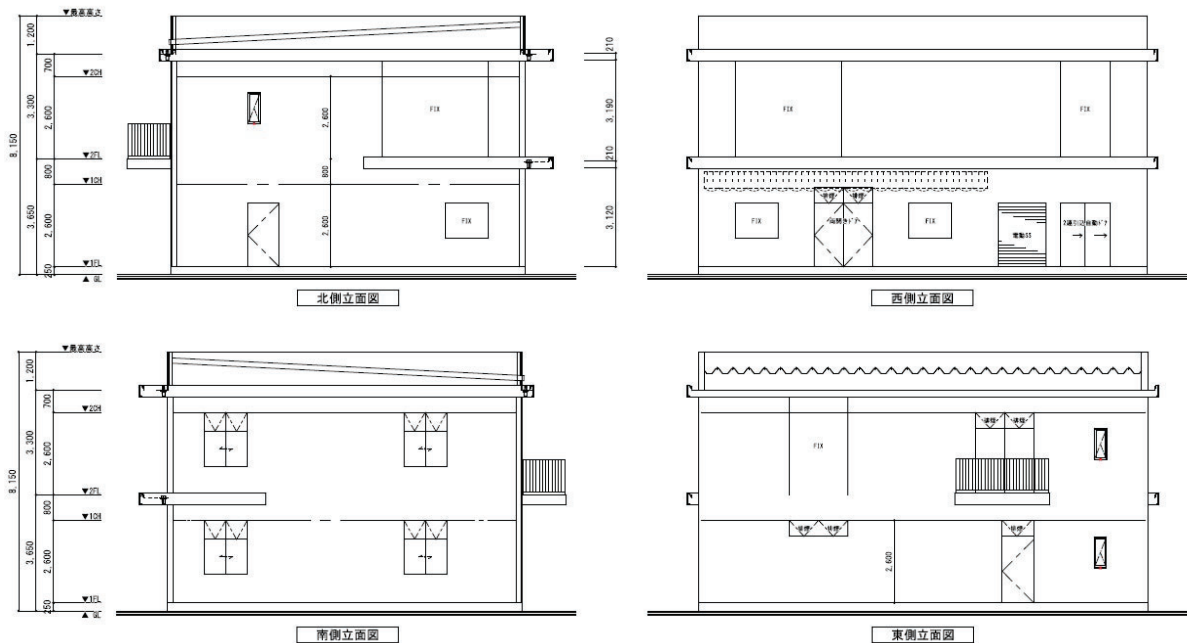
本報告にて試算対象とする建物は、CLTパネル工法を用いた木造事務所であり、地上2階建て、最高高さ8.15m、延べ床面積308m²である。建物の平面形状は11.0m × 13.7mの長方形となっている。平面図および立面図を図2.1に示す。平面・立面ともに均整の取れた整形な形状である。

本建物は、CLTパネル工法であり、許容応力度計算（構造計算ルート1）で耐震性が確保されている。使用したCLTの概要は、壁および床ともにスギMx60-5-5（板厚150mm）を用い、使用材積は126m³となる。屋根仕上げは木組下地によるガルバニウム鋼板、外壁仕上げは通気胴縁下地によるサイディング貼りである。内部仕上げにおいて、床は表装を長尺塩ビシートで仕上げ、壁はCLT素地またはクロス貼りとしている。天井高さは2.3m～2.6mである。

壁パネル・床パネルおよび、基礎・土台・壁の接合金物は、所定のクロスマーク金物を使用している。基礎はRC布基礎とし、基礎コンクリート総量は57.4m³、鉄筋量は10tである。



(a) 各階平面図および屋根伏せ図



(b) 各立面図

図2.1 CLTパネル工法の建物詳細

3. 鉄骨造のケーススタディ

3.1 基本条件

2章で述べたCLTパネル工法で設計された建物を、鉄骨造に置換した際の検討を行う。ここでは、建設地、建物形状、建物規模を同一条件のもと、構造体を鉄骨造として計画した。なお、本検討では文献3)を参考として仮定断面を作成した。

構造図として、平面図を図3.1に、立面図を図3.2に、それぞれ示す。構造形式は、XY両方向ともに純ラーメン構造を採用した。本建物は平面、立面ともに整形な形状であり、偏心率、剛性率ともに問題となることはないと考えられる。使用材料は、2階建てであることを考慮し、主要架構となる鋼管柱にBCP295、鉄骨梁にSN400Bを用い、床スラブおよび基礎に使用するコンクリートはFc21、鉄筋はSD295Aを、それぞれ使用した。

事務所階となる2階床スラブは平均厚さ125mmの合成床板デッキとし、屋上階はフラットタイプの型枠デッキを用いた厚さ150mmのRCスラブを採用する。1階床は厚さ160mm（150mm+増打ち10mm）のコンクリートスラブとした。小梁は、配置間隔が2.7m以下となるように計画し、いずれもSN400A材を用いた。

設計用の床荷重を表3.1に示す。固定荷重として、屋上階は4900N/m²、事務室は3800N/m²、1階は4300N/m²、階段は2100N/m²と設定した。壁荷重において、外壁は仕上げを押し出成形セメント板を用いることを想定して壁荷重を1000N/m²とした。積載荷重は、建築基準法施行令第85条に基づき、表3.2のように設定した。柱および梁の仕上げは、耐火被覆の取り付けも考慮して500N/m²と仮定した。また、地震力の算定では、地域係数Z=1.0、振動特性係数R_f=1.0、標準せん断力係数C₀=0.3として計算している。

表3.1 床荷重表

(1) 屋根		(2) 事務室	
露出防水	300	仕上げ	400
コンクリート t=150	4200	コンクリート t125	3000
デッキプレート	200	デッキプレート	200
天井	200	天井	200
	4900 N/m ²		3800 N/m ²
(3) 1階		(4) 階段	
仕上げ	400	仕上げ	800
コンクリート t=150+10 (増打ち)	3840	踏板	461
	4300 N/m ²	ささら板	277
		手すり	200
		階段幅考慮	2100 N/m ²

表3.2 積載荷重

床荷重 [N/m²]

用途	種別	スラブ用	ラーメン用	地震用
非歩行屋根	L. L.	900	650	300
事務室、研究室	L. L.	2900	1800	800

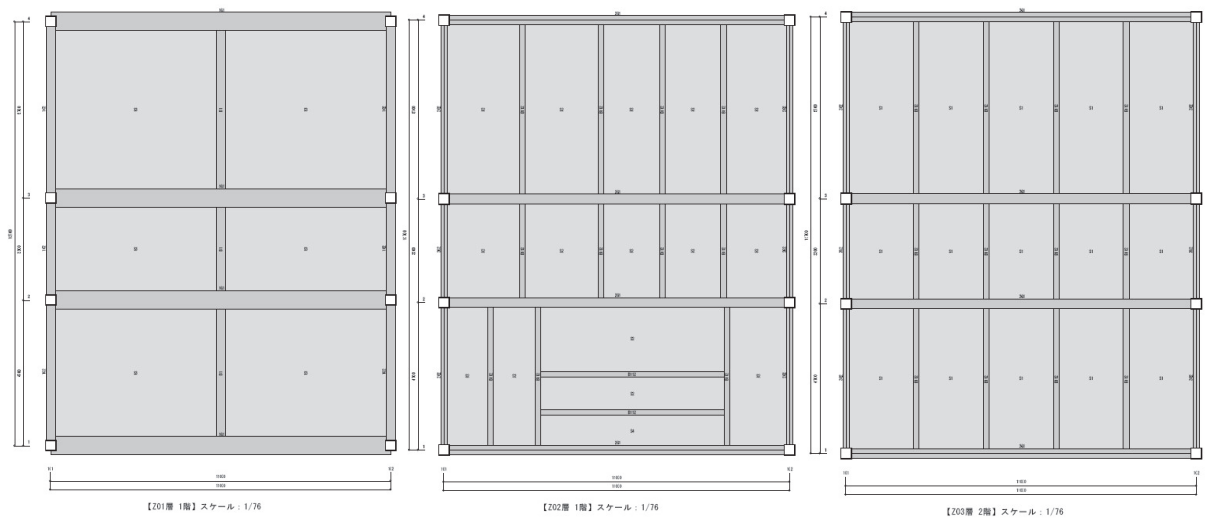


図3.1 平面図

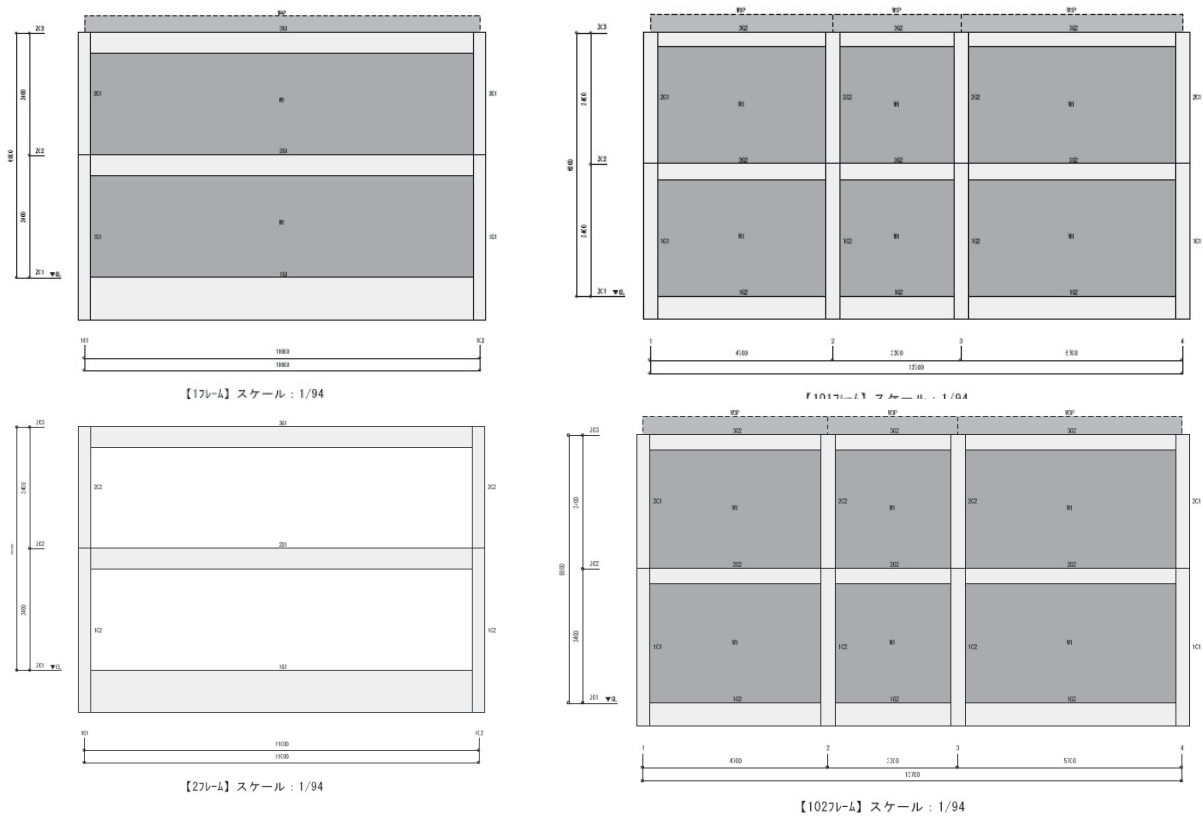


図3.2 立面図

3.2 仮定断面

前述した構造計画のもと、一貫構造計算プログラムにて断面算定を行なう。本研究で使用した計算ソフトは、Super Build SS3 ver.1.29（ユニオンシステム株式会社）である。構造計算書の詳細は付録資料を参照することとし、ここでは主要な情報について記述する。

使用部材一覧を表3.3に示す。鋼管柱断面は、 \square -350×350×16（BCP295）で各階とも統一した。大梁はX方向にH-700×300×13×24（SN400B）を、Y方向にH-400×200×8×13（SN400B）を、それぞれ用いた。小梁はいずれもH-350×175×7×11（SN400A）である。基礎梁はRC造とし、X方向は $B \times D = 600 \times 1200\text{mm}$ 、Y方向は $B \times D = 300 \times 600\text{mm}$ とした。小梁は $B \times D = 300 \times 600\text{mm}$ である。配筋は同表を参照されたい。

建物重量を表3.4に示す。2階は1153.6kN、1階は1075.6kNとなり、単位床面積当たりの建物重量は、2階で7.65kN/m²、1階で7.14kN/m²となり、鉄骨造事務所ビルの平均値が6～10kN/m²であることを考慮すると、妥当であるといえる。地震層せん断力を表3.5に示す。本建物の構造計算ルートは1-2となるため、1階部分の C_0 は0.3として計算している。

柱および梁の断面算定を表3.6、表3.7に、偏心率を表3.8に、それぞれ示す。いずれも作用応力度は許容応力度以内に収まっていることを確認している。

表3.3 断面リスト

1.4 断面リスト
1.4.1 梁

RC造

B×D：梁の幅とせい[cm] dt：一段目の鉄筋重心位置[cm]
左端・右端：略軸組図で見て左側を左端，右側を右端とします。

符号(層)	項目	左端	中央	右端
1G1 (Z01) dt上6.0 dt下6.0	B×D	60×120		
	上端	5D25	4D25/2D25	5D25
	下端	5D25	4D25/2D25	5D25
	ST	2D13 @200	コンクリート ※ 普通	Fc21.0
1G2 (Z01) dt上6.0 dt下6.0	B×D	30×60		
	上端	3D25	3D25	3D25
	下端	3D25	3D25	3D25
	ST	2D13 @200	コンクリート ※ 普通	Fc21.0

S造

左端・右端：略軸組図で見て左側を左端，右側を右端とします。

符号(層)	項目	左端	中央	右端
3G1 (Z03)	鉄骨	H-700x300x13x24x18		
	種別	SN400B		
3G2 (Z03)	鉄骨	H-400x200x8x13x13		
	種別	SN400B		
2G1 (Z02)	鉄骨	H-700x300x13x24x18		
	種別	SN400B		
2G2 (Z02)	鉄骨	H-400x200x8x13x13		
	種別	SN400B		

1.4.2 柱

S造

符号(階)	項目	柱頭	柱脚
2C1 (2)	鉄骨	□-350x350x16x32	
	種別	BCR295	
2C2 (2)	鉄骨	□-350x350x16x32	
	種別	BCR295	
1C1 (1)	鉄骨	□-350x350x16x32	
	種別	BCR295	
1C2 (1)	鉄骨	□-350x350x16x32	
	種別	BCR295	

1.4.3 壁・ブレース

壁

※出力していない鉄筋径と鉄筋種別は[2.設計方針と使用材料]を参照

符号	壁厚 [cm]	重量 [N/m ²]	縦筋	横筋	dt [cm]	内蔵Ab [cm ²]
W1	—	1000	—	—	—	—

1.4.4 小梁

RC造

符号	B×D[cm]	単位重量[N/m]
B1	30×60	—

S造

符号	鉄 骨
B112	H-350x175x7x11x13

表3.4 建物重量

4.7.2 建築物重量と地震力

地震用重量

階	床自重(L.L)[kN]	梁自重[kN]	特殊荷重 [kN]	Wi [kN]
	床自重(D.L)[kN] 積雪 [kN]	柱自重[kN] 壁自重[kN]	補正 [kN] フレーム外[kN]	
2	45.3	141.1	80.1	1153.6
	789.1 0.0	31.2 66.8	0.0 0.0	
1	120.7	141.1	0.0	1075.6
	617.8 0.0	62.4 133.6	0.0 0.0	
基礎	120.7	851.0	0.0	1794.7
	703.0 0.0	53.3 66.8	0.0 0.0	

表3.5 地震力

地震力：X方向 Ci, kを直接入力したときは、数値の後に“*”を付記します。

階	全体Wi [kN]	全体ΣWi [kN]	αi	Ai	Ci	全体Qi1 [kN]	Wi/A [kN/m ²]	全体Qi2 [kN]
2	1153.6	1153.6	0.517	1.220	0.366	422.5	7.65	1408.4
1	1075.6	2229.2	1.000	1.000	0.300	668.8	7.14	2229.2

地震力：Y方向

階	全体Wi [kN]	全体ΣWi [kN]	αi	Ai	Ci	全体Qi1 [kN]	Wi/A [kN/m ²]	全体Qi2 [kN]
2	1153.6	1153.6	0.517	1.220	0.366	422.5	7.65	1408.4
1	1075.6	2229.2	1.000	1.000	0.300	668.8	7.14	2229.2

表3.6 柱の断面算定

鉄骨		柱種	F値	柱種	F値
		[BCR295]	295.0	[BCR295]	295.0
[201]	[2 4 102]				
p= 350*	350*18.0*	32.0[FA]			
部材長	340.0				
Lk/h	1.29 2.00				
Lk	438.6 880.0				
iy	13.52 13.52				
λ	32.4 50.2				
fo	183				
		位置	NL	NL'	DL [部材]
<X>柱頭	0.0	137	-132	69	L+K1
柱脚	0.0		103	69	L+K1
<Y>柱頭	0.0	137	-22	10	L+K1
柱脚	0.0		13	10	L
		Z	A	Aw	fb
<X>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.04 0.42 0.04
柱脚	2164	207.1	103.5	295	0.04 0.33 0.02
<Y>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.04 0.21 0.18
柱脚	2164	207.1	103.5	197	0.05 0.25 0.04
					TOTAL
					τ/fs
					組合せ
					0.49
					0.08
					0.39
					0.03
					0.42
					0.01
					0.31
[202]	[2 3 102]				
p= 350*	350*18.0*	32.0[FA]			
部材長	340.0				
Lk/h	1.29 1.44				
Lk	438.6 489.6				
iy	13.52 13.52				
λ	32.4 38.2				
fo	179				
		位置	NL	NL'	DL [部材]
<X>柱頭	0.0	183	-173	91	L+K1
柱脚	0.0		137	91	L+K1
<Y>柱頭	0.0	183	13	6	L+K2
柱脚	0.0		-8	6	L+K2
		Z	A	Aw	fb
<X>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.04 0.48 0.03
柱脚	2164	207.1	103.5	295	0.04 0.38 0.02
<Y>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.03 0.28 0.31
柱脚	2164	207.1	103.5	295	0.03 0.22 0.22
					TOTAL
					τ/fs
					組合せ
					0.54
					0.10
					0.44
					0.10
					0.44
					0.06
					0.80
					0.47
					0.06
					0.47
[101]	[1 4 102]				
p= 350*	350*18.0*	32.0[FA]			
部材長	340.0				
Lk/h	1.20 1.66				
Lk	408.0 564.4				
iy	13.52 13.52				
λ	30.1 41.7				
fo	173				
		位置	NL	NL'	DL [部材]
<X>柱頭	0.0	278	-76	45	L+K1
柱脚	0.0		77	45	L+K1
<Y>柱頭	0.0	278	-13	11	L+K1
柱脚	0.0		23	11	L+K1
		Z	A	Aw	fb
<X>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.07 0.38 0.02
柱脚	2164	207.1	103.5	295	0.07 0.46 0.04
<Y>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.07 0.12 0.17
柱脚	2164	207.1	103.5	295	0.07 0.13 0.32
					TOTAL
					τ/fs
					組合せ
					0.47
					0.09
					0.56
					0.09
					0.58
					0.36
					0.06
					0.35
					0.51
					0.06
					0.50
[102]	[1 3 102]				
p= 350*	350*18.0*	32.0[FA]			
部材長	340.0				
Lk/h	1.20 1.32				
Lk	408.0 448.8				
iy	13.52 13.52				
λ	30.1 33.1				
fo	181				
		位置	NL	NL'	DL [部材]
<X>柱頭	0.0	370	-97	55	L+K1
柱脚	0.0		90	55	L+K1
<Y>柱頭	0.0	370	9	7	L+K1
柱脚	0.0		-14	7	L+K2
		Z	A	Aw	fb
<X>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.08 0.41 0.02
柱脚	2164	207.1	103.5	295	0.08 0.48 0.04
<Y>柱頭	2164	207.1	103.5	295	0.09 0.16 0.27
柱脚	2164	207.1	103.5	295	0.05 0.15 0.44
					TOTAL
					τ/fs
					組合せ
					0.51
					0.10
					0.59
					0.10
					0.59
					0.08
					0.51
					0.08
					0.64

表3.7 断面算定

(a) 基礎梁の断面算定

コンクリート		長期	短期	鉄筋	異形	-D16 [SD295A]				丸鋼 -R16 [SR235]				記号 (U) は、高強度せん断補強筋ウルボンを表す。				
Fc 21.0 (普通)	fc	7.00	14.00			D19-D29	[SD345]	D32-	[SD390]	R16-	[SR295]							
[161]																		
[Z01 3	101 -102]	位置	左端	1/4	中央	3/4	右端	設計	at上	左端	1/4	中央	3/4	右端	左端	右端		
		ML'	89	-461	-629	-460	90	下	25.35	25.35	30.42	25.35	25.35	25.35	25.35	25.35	216	216
		ME1'	-163	-79	0	79	163	MA長	544	544	640	544	544	544	544	544	216	216
		ME2'	163	79	0	-79	-163	短上	872	872	1027	872	872	872	872	872	276	276
		MS上	252				253	下	872	872	1027	872	872	872	872	872	L+E	L+E
		下	-74	-540	-629	-539	-73	Mu	上	1019 (987)	(987)	1019	1019	Pw	0.21%	0.21%		
		L+E2	L+E2	L+E1	L+E1	L+E2	L+E2	下	1019 (987)	(987)	1019	1019	QAL	472	472			
		L+E1	L+E1	L+E1	L+E1	L+E2	L+E2	dt	上	6.0	6.0	8.1	6.0	6.0	6.0	775	775	
		下	6.0	6.0	8.1	6.0	6.0	下	6.0	6.0	8.1	6.0	6.0	αL	1.11	αS	1.21	
		部材長	1100.0	内法	1065.0													

(b) 大梁の断面算定

鉄骨：左端 [SN400B] F値 235.0 中央 [SN400B] F値 235.0 右端 [SN400B] F値 235.0

[361]	[Z03 3	101 -102]	位置	左端	JOINT	中央	JOINT	右端	左端	中央	右端							
			ML'	203	-225		204	Lb	220.0	220.0	220.0							
			QL	137	----		137	C										
			[部材]					fb	235	157	235							
			M	306	-225		307	Z	3293	3293	3293							
			Q	155	0		155	Aw	57.3	65.7	57.3							
			[仕口]					σ	93	68	93							
			M					τ	27	----	27							
			Q					σ/fb	0.40	0.44	0.40							
			均等：必要補剛数 (等) 0本				λ	158.5	0.20	----	0.20							
			たわみ δ	0.990	δ/L	1/1110												
[362]	[Z03 102 3	-4]	位置	左端	JOINT	中央	JOINT	右端	左端	中央	右端							
			ML'	25	-17		22	Lb	570.0	570.0	570.0							
			QL	26	----		25	C	2.300	1.061	2.181							
			[部材]					fb	202	109	200							
			M	84	-17		90	Z	973	973	973							
			Q	49	0		48	Aw	24.3	29.9	24.3							
			[仕口]					σ	87	17	93							
			M					τ	20	----	20							
			Q					σ/fb	0.43	0.17	0.47							
			均等：必要補剛数 (等) 0本				λ	124.9	0.15	----	0.15							
			たわみ δ	0.086	δ/L	1/6620												
[261]	[Z02 3	101 -102]	位置	左端	JOINT	中央	JOINT	右端	左端	中央	右端							
			ML'	250	-184		254	Lb	249.7	195.2	210.2							
			QL	135	----		139	C										
			[部材]					fb	235	157	235							
			M	435	-184		438	Z	3293	3293	3293							
			Q	169	0		173	Aw	57.3	65.7	57.3							
			[仕口]					σ	132	56	133							
			M					τ	29	----	30							
			Q					σ/fb	0.57	0.36	0.57							
			均等：必要補剛数 (等) 0本				λ	158.5	0.22	----	0.23							
			たわみ δ	0.716	δ/L	1/1536												
[262]	[Z02 101 3	-4]	位置	左端	JOINT	中央	JOINT	右端	左端	中央	右端							
			ML'	28	-16		28	Lb	570.0	570.0	570.0							
			QL	27	----		27	C	2.300	1.008	2.300							
			[部材]					fb	202	106	202							
			M	125	-16		133	Z	973	973	973							
			Q	62	0		62	Aw	24.3	29.9	24.3							
			[仕口]					σ	128	16	136							
			M					τ	26	----	26							
			Q					σ/fb	0.64	0.16	0.68							
			均等：必要補剛数 (等) 0本				λ	124.9	0.19	----	0.19							
			たわみ δ	0.070	δ/L	1/8062												

表3.8 偏心率

10. 偏心率
10.1 偏心率

gx, gy : 重心位置 (軸力の中心) [m] ex, ey : 偏心率距離 [m] re : 弾力半径 [m]
 px, py : 剛心位置 [m] Re : 偏心率 Fe : 形状特性係数
 ※ gx, gy, px, pyは絶対座標, ex, eyは地震力の方向に対し直交, re, Re, Feは地震力の方向を示します。
 ※ Reが0.15を超えたとき末尾に「*」を付記します。

<雑壁を考慮しない場合>(加力方向 : X正 Y正)

X方向	階	gx	gy	px	py	ey	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.224	6.837	0.033	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.229	6.871	0.033	1.000

Y方向	階	gx	gy	px	py	ex	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.000	8.045	0.000	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.000	7.985	0.000	1.000

<雑壁を考慮しない場合>(加力方向 : X正 Y負)

X方向	階	gx	gy	px	py	ey	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.224	6.837	0.033	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.229	6.871	0.033	1.000

Y方向	階	gx	gy	px	py	ex	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.000	8.045	0.000	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.000	7.985	0.000	1.000

<雑壁を考慮しない場合>(加力方向 : X負 Y正)

X方向	階	gx	gy	px	py	ey	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.224	6.837	0.033	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.229	6.871	0.033	1.000

Y方向	階	gx	gy	px	py	ex	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.000	8.045	0.000	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.000	7.985	0.000	1.000

<雑壁を考慮しない場合>(加力方向 : X負 Y負)

X方向	階	gx	gy	px	py	ey	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.224	6.837	0.033	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.229	6.871	0.033	1.000

Y方向	階	gx	gy	px	py	ex	re	Re	Fe
	2	5.500	6.825	5.500	6.601	0.000	8.045	0.000	1.000
	1	5.500	6.827	5.500	6.598	0.000	7.985	0.000	1.000

4. 構造種別ごとの建設時CO₂排出量

建物建設時に排出されるCO₂排出量の計算を行なう。ここでは、2章で述べた建物を対象とし、木造（CLTパネル工法）、RC造、鉄骨造の三つの構造種別ごとにCO₂排出量を計算した。評価は単位床面積当たりのCO₂排出量で行なうが、まず資材別のCO₂排出量を式(4.1)にて計算する。

$$C_{em} = W \cdot {}_oE_m \cdot D \quad (4.1)$$

ここで、 C_{em} ：資材別排出量（kg-CO₂）、 W ：使用体積（m³）、 ${}_oE_m$ ：CO₂排出原単位（kg-CO₂/kg）、 D ：密度（kg/m³）である。

構造種別によって使用される資材は、木材、コンクリート、鉄筋、鋼材があり、これらの資材別CO₂排出量を合計した値を、構造部材に係る建設時CO₂の総排出量とする。これを単位床面積当たりのCO₂排出量 ${}_u C_{em}$ に換算すると、式(4.2)で表される。

$${}_u C_{em} = C_{em} / A / 1000 \quad (4.2)$$

ここで、 ${}_u C_{em}$ ：単位床面積当たりのCO₂排出量（t-CO₂/m²）、 A ：延床面積（m²）である。

構造種別ごとに単位床面積当たりのCO₂排出量を計算した結果を表4.1に示す。RC造の算出は、検討元の建物がCLTパネル工法であることから、RC壁式構造に同断面で置換できるものとし、コンクリートの使用体積をCLTと同量の使用材積とした。ただし、RCにおけるコンクリートと鉄筋の単位立米当たりの重量比は、一般的なRC壁式構造の断面を想定し、ここでは23:1とした。鉄骨造における鋼材の使用体積は、一貫計算プログラムから計算された重量を体積に換算している。鉄骨造の床スラブに用いたRCの使用体積は、床厚に床面積を乗じて立米を求め、その数値を上述した比率に準じてコンクリートと鉄筋に分配した。

基礎はRC布基礎であり、CLTパネル工法の建物に用いられた実数値であるコンクリート総量57.4m³、鉄筋量10tで計算した。単位床面積当たりのCO₂排出量は表4.1(b)を参照されたい。なお、本検討では上部構造におけるCO₂排出量の比較を主目的としているため、基礎部はRC造、鉄骨造ともに同数値とした。ただし、厳密には、CLTパネル工法は従来のRC造および鉄骨造と比較して建物重量を軽減できることから、重量の減少による基礎コンクリート量の削減は可能であるものと考えられる。即ち、RC造およびS造の基礎部におけるCO₂排出量は、本試算よりも大きな数値となるものと予想される。CO₂排出原単位は、日本建築学会LCAデータベース⁴⁾に基づいて数値を決定した。なお、各材料の密度は同表に示す通りである。

上部構造における延床面積当たりのCO₂排出量で比較すると、表4.1(a)より、CLTパネル工法は鉄骨造のおよそ1/4、RC造のおよそ1/5に抑えられていることがわかる。基礎部を含めた合計量によれば、表4.1(c)より鉄骨造のおよそ1/2.1、RC造のおよそ1/2.3となる。また、木材を利用することで、次章以降で述べる炭素固定化やカーボンニュートラル化への長期使用に対する利点もあるものと考えられる。

表4.1 単位面積当たりのCO₂排出量

(a) 上部構造

構造種別	延床面積 (m ²)	使用体積 (m ³)				資材別CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)				総排出量 (kg-CO ₂)	総排出量 (t-CO ₂)	単位面積 当たり (t-CO ₂ /m ²)
		木	コンクリート	鉄筋	鋼材	木	コンクリート	鉄筋	鋼材			
CLT	308	126	0	0	0	20097	0	0	0	20097	20.1	0.0653
RC	308	0	120.8	5.3	0	0	56934	38781	0	95715	95.7	0.311
S	308	0	44.3	1.9	5.3	0	20876	14220	47147	82242	82.2	0.267

(b) 基礎部

構造種別	延床面積 (m ²)	使用体積 (m ³)				資材別CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)				総排出量 (kg-CO ₂)	総排出量 (t-CO ₂)	単位面積 当たり (t-CO ₂ /m ²)
		木	コンクリート	鉄筋	鋼材	木	コンクリート	鉄筋	鋼材			
CLT	308	0	57.4	1.27	0	0	27064	9410	0	36474	36.5	0.118
RC	308	0	57.4	1.27	0	0	27064	9410	0	36474	36.5	0.118
S	308	0	57.4	1.27	0	0	27064	9410	0	36474	36.5	0.118

(c) 上部構造と基礎部の合計

構造種別	延床面積 (m ²)	使用体積 (m ³)				資材別CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)				総排出量 (kg-CO ₂)	総排出量 (t-CO ₂)	単位面積 当たり (t-CO ₂ /m ²)
		木	コンクリート	鉄筋	鋼材	木	コンクリート	鉄筋	鋼材			
CLT	308	126	57.4	1.27	0	20097	27064	9410	0	56571	56.6	0.184
RC	308	0	178.2	6.52	0	0	83998	48191	0	132189	132.2	0.429
S	308	0	101.7	3.20	5.29	0	47940	23630	47147	118716	118.7	0.385

表4.2 CO₂排出原単位

CO₂排出原単位（日本建築学会LCA指針より）および密度

名称	木	コンクリート	鉄筋	鋼材
CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /kg)	0.319	0.205	0.941	1.136
密度 (t/m ³)	0.5	2.3	7.85	7.85

5. 炭素貯蔵量の計算

2021年10月に林野庁より、「建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン」¹⁾が公表された。本ガイドラインの主旨は、木材利用の促進を図るうえで、木材利用が地球温暖化防止に寄与していることを数値化して示し、わかりやすい表示の仕組みを設けることにある。本章では、前章で述べたCLTパネル工法で建てられた当該建物に対して、炭素貯蔵量を数値化して示すことを目的とする。

本ガイドラインによれば、炭素貯蔵量（CO₂換算量）は式（5.1）で計算される。

$$C_s = W \cdot D \cdot C_f \cdot 44/12 \quad (5.1)$$

ここで、 C_s ：建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量（t-CO₂）， W ：建築物に利用した木材の量（m³）， D ：木材の密度（t/m³）， C_f ：木材の炭素含有量である。

本ガイドラインに従って、当該建物から各項目に代入する数値を読み解くと、以下のようなになる。まず、 W （木材量）は、「完成した建築物本体に利用されている木材の量」となり、上屋に使用されている床・壁・屋根等のCLTはすべて該当する。次いで、 D （木材の密度）は、「気乾状態の在籍に対する全乾状態の質量の比」とある。本ガイドラインでは、樹種別の気乾密度の数値例の記載があり、当該建物に使用された樹種が国産スギであることを反映させると、気乾密度 d は0.38t/m³となる。ここで、樹種別の気乾密度を用いて木材の密度 D を求める際には、気乾状態の材積に対する全乾状態の質量の比に関する必要があることから、その係数として0.87を乗ずる。当該建物はCLTであるが、製材品であるラミナを積層接着した木質材料であることから、スギの密度を準用する。 C_f （木材の炭素含有量）は、本ガイドラインに従って、製材の0.50をとる。

上記数値を4.1式に代入すると、76.4t-CO₂が得られる。1haにある36-40年生のスギ人工林の炭素貯蔵量が302t-CO₂であることを踏まえると、当該建物の炭素貯蔵量は、0.25ha（50m×50m）分のスギ人工林の炭素貯蔵量に匹敵すると考えられる。

表5.1 炭素貯蔵量の算定

W (m ³)	d (t/m ³)	D (t/m ³)	C_f (t-CO ₂)	C_s (t-CO ₂)
126	0.38	0.331	0.5	76.5

6. 運用段階のCO₂排出量

木材活用がLCCO₂に及ぼす影響を調べるため、建物建設段階および、建物運用段階に排出されるCO₂量を考慮して試算を行なう。

2020年10月、日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出量と吸収量の差分をゼロとする、カーボンニュートラル化を目指すことを示した。建築分野では、建物の運用段階に排出されるCO₂もカーボンニュートラル化の対象になる。本試算では、2021年度を100%として、再生可能エネルギーへの転換によるCO₂排出量削減率を2050年までに20%に削減、省エネによるCO₂排出量削減率を2050年までに50%に削減すると仮定した。これらは、2050年までに線形的に減少する。また、2050年にカーボンニュートラル化が達成されたのちは、建物運用段階に排出されるCO₂は0とできるものとした。ここでは、年間建物運用段階に排出される平米当たりのCO₂排出量を100kg-CO₂/m²/年（日本ビルディング協会連合会、2005年実績）とした。なお、この数字は比較的大規模建築物を対象としたものであるため、比較用として50kg-CO₂/m²/年とした際の検討も実施した。2022年以降は、上述した削減率をこの数値に乗ずることで低減させる。図6.1に削減率の有無を比較した建物運用段階におけるCO₂排出総量を示す。2050年時において、削減した場合としていない場合で2倍ほどの差が見られており、CO₂排出量削減への取り組みの重要性が示されている。

カーボンニュートラル化を目指すにあたっての木材利用の利点は、木材を利用した跡地に新たに植林できることである。周知のとおり、木々の成長過程によりCO₂は吸収され、若木であるほど吸収量は多い。また、4章で述べたように、木材には炭素貯蔵（炭素固定化）の役割もあり、木材利用を促進することで、現状ある木材は炭素を放出せず、また新たに植林する木々によってCO₂を吸収できる効果が見込まれる。ただし、木材を利用するにしても、建設資材の加工段階や輸送等でCO₂は発生する。木材のCO₂排出原単位 V (t-CO₂/t) は式 (6.1) で求められる。

$$V = V_a + V_b + V_c \quad (6.1)$$

ここで、 V_a ：木材の組成に起因するCO₂排出量、 V_b ：建設資材の加工段階で発生するCO₂量、 V_c ：建設資材の輸送等で発生するCO₂量である。

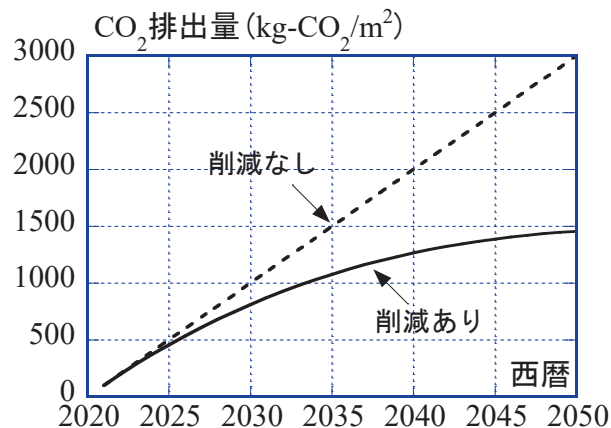


図6.1 CO₂排出量削減取組みの有無による比較

木材を燃焼させたとしても、時間の経過とともに植林した木々がCO₂を吸収することから、CO₂排出量は相殺されることになり、 V_a (kg-CO₂/kg/年) は式 (6.2) で求められる。

$$\begin{aligned}
 V_a &= 0.5 \times 44/12 - 0.5 \times 44/12 \times N/50 \\
 &= 1.833 \times (1-N/50)
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

上式は、木材1kgあたりに含まれる炭素重量を木材全体重量の50%とし、木材が資源として再生するまでの期間を50年と仮定する。

先に述べたCO₂削減率を考慮したLCCO₂の推移を図6.2に示す。同図(a)は年間建物運用段階に排出される平米当たりのCO₂の排出量を100kg-CO₂/m²/年とし、同図(b)は50kg-CO₂/m²/年とした際の試算である。また、黒線は鉄骨造、赤線はCLTパネル工法を示している。仮に2100年まで建物が解体されずに運用されるとすれば、鉄骨造、CLTパネル工法ともに破線のようなになる。2100年の段階でCLTパネル工法が鉄骨造より低い数値となっている理由は、建設段階においてCO₂排出量が低く抑えられていることと、上述した V_a の効果が反映されているためである。この時点で、同図(a)のケースでは、CLTパネル工法が1503kg-CO₂/m²に対し、鉄骨造は1828kg-CO₂/m²となり、およそ82%ほどに削減できることが示されている。同図(b)では、同様に775kg-CO₂/m²に対し、1099kg-CO₂/m²となっていることから、鉄骨造のおよそ70%ほどの排出量となる。

ここで、我が国の建物の計画寿命を鑑みると、50年ほどで建替えられている建物が見られ、その影響を考慮する必要がある。ここでは2070年に建物を解体し、同規模の建物を建設するものと仮定する。この推移を同図に示すと、2070年から2071年にかけて建替え時による一時的なCO₂増加が生じる。しかしながら、カーボンニュートラル化が達成できていれば、鉄骨造とは異なり、CLTパネル工法では木材を利用することで運用段階におけるCO₂排出量は右肩下がりとなる。このことから、木材利用の促進に加え、建物の計画寿命を延ばすことで、将来的に建設段階で排出されるCO₂のカーボンニュートラル化も可能となるものと考えられる。なお、建替えを行なった場合、同図(a)での2100年時におけるCO₂排出量は、CLTパネル工法で1607kg-CO₂/m²、鉄骨造で2189kg-CO₂/m²となり、およそ73%に減少できる。同様に、同図(b)の条件で比較すると、CLTパネル工法で879kg-

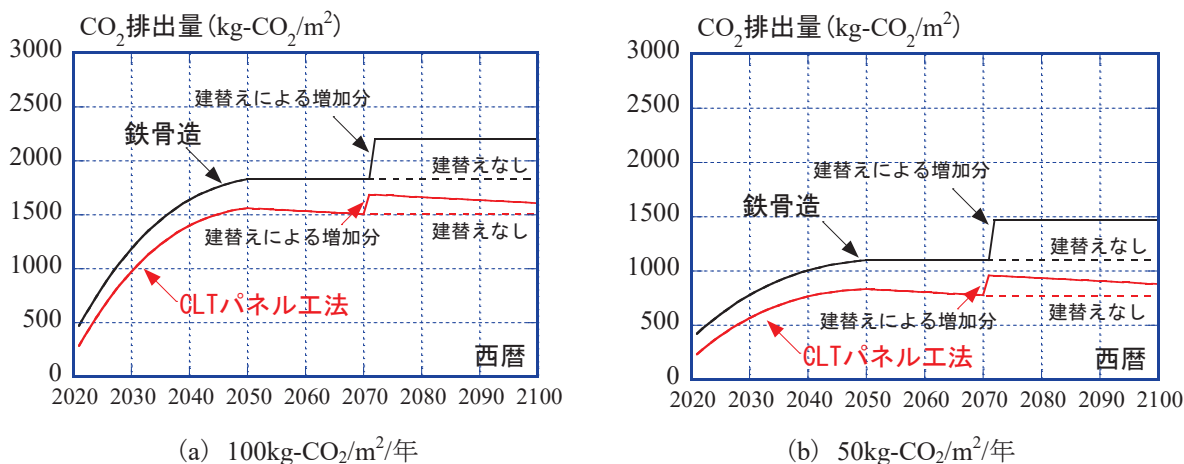


図6.2 運用段階におけるCO₂排出量の比較

CO₂/m²，鉄骨造で1470kg-CO₂/m²となり，およそ60%に減少できる。運用段階においての年間CO₂排出量が小さくなるほど，木材を活用することによる削減率の影響は大きくなることがわかる。

7.まとめ

木材を建築物に採用するにあたり，木材の有するCO₂吸収量について，木造，RC造，鉄骨造と比較して建設段階および運用段階におけるCO₂排出量について検討したところ，以下の知見を得た。

建設段階におけるCO₂排出量を調べるため，CLTパネル工法と同程度の建物をRC造およびS造として検討を行った。CLTパネル工法に対し，RC造では2.3倍，S造では2.1倍，排出量が増えることを示した。本検討では，基礎部分を構造種別に拘らず同仕様としているため，RC造およびS造の基礎工事が増加することを考慮すると，この差は大きくなるものと考えられる。

木材の炭素貯蔵量に着目し，林野庁が示したガイドラインに基づいて算定した。本検討で用いたCLTパネル工法では，76.5t-CO₂程度の炭素貯蔵量を有しているものと考えられる。

運用段階におけるCO₂排出量では，時間の経過とともに植林した木々がCO₂を吸収する特性を加味した考察を行った。2050年にカーボンニュートラル化が達成されるものと仮定すると，総量としてのCO₂排出量は減少に転じることになる。ただし，50年周期での建替えを考慮すると，建設段階におけるCO₂排出量が加算されるため，カーボンニュートラル化に加え，建物の長寿命化における検討も必要であるものと考えられる。

謝辞

本報告書のデータ分析にあたり，稲田達夫氏（現山佐木材株式会社顧問，元福岡大学教授）より多くの貴重なご助言を頂戴した。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 林野庁：建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン，2021.10，3林政産第85号，<https://www.rinya.maff.go.jp/j/mokusan/attach/pdf/mieruka-1.pdf>（2022年1月10日閲覧）
- 2) 稲田達夫：低炭素時代における建築構造のあり方に関する研究，建物構造躯体の長寿命化促進の重要性について，日本建築学会構造系論文集，No.74，Vol.644，pp.1887-1894，2009.10
- 3) 日本建築構造技術者協会編：JSCA版 S建築構造の設計，第2版，2018.3
- 4) 日本建築学会：LCAデータベース 1995年産業連関分析データ版，Ver.3.1，2006.3