

鉄骨造倉庫建築物の資材製造・現場施工段階に着目した環境影響評価および環境負荷低減対策の検証

DB20132 小林拓登

1. はじめに

現在、我々の生きる地球では局地的な豪雨や記録的な猛暑といった様々な異常気象が発生している。これを引き起こしている原因のひとつとして地球温暖化問題が挙げられ、大気および海洋の温度上昇と異常気象の関係が指摘されている。この問題は大気中に温室効果ガスが放出されることによるものであり、その温室効果をもたらす物質のなかで最も大きな割合を占めるものが二酸化炭素（以下、CO₂）である。この物質の大気中への大量放出が経済をはじめとする人間の諸活動に起因しているということは言うまでもないが、近年日本国内でそれを改善させる取り組みが活発化しているなかで、建築業界としてもこの排出量削減に取り組むことは必須である。建築物のライフサイクル（以下、LC）において、時間的な観点から運用段階が排出量の大きな割合を占めるが、その前の段階である建設フェーズでの CO₂の排出抑制が非常に重要である。本研究では、近年建設需要が高まり重要な物流拠点である鉄骨造倉庫建築物の建設にかかわる CO₂の排出について、現状をサプライチェーン（以下、SC）分析に基づいて把握し、それをもとに排出抑制効果が得られる可能性を検討する。

2. 鉄骨造建築物の建設段階における CO₂排出の現状

2.1 資材製造と輸送時の排出 CO₂量の算定方法

対象建築物の基本情報や詳細について表 1 に示す。建物 LC のなかで、特に SC におけるスコープ 3（上流）の資材製造段階の環境負荷とスコープ 1,2 の施工段階の原燃料消費に伴う CO₂排出量に着目し、建築物の建設段階の総 CO₂排出量を算出する。そして、資材単位の排出量を可視化し SC のなかで大きな割合を占めるものを明確（カーボンフットプリント：CFP）にしたうえで排出抑制効果の検討を行う。

2.2 算定に用いる CO₂排出原単位値の収集および選定

本研究では、対象建築物の資材投入量や施工における消費エネルギー等の情報から環境負荷量を算定するため、それらの情報と合わせて CO₂に関する排出原単位のデータも必要となる。鉄骨材や鉄鋼製品に関する原単位については一般社団法人日本鉄鋼連盟が収集、計算し公開している LCI データコレクションを活用すべく、同連盟にデータ請求を行い、2023 年 2 月の請求時点で最新であった各鋼材の原単位の値を取得した。その他の資材、製品についても同様に CO₂排出原単位の収集を行い、表 2 に示すデータが得られた。本研究においてはこの値を用いることとした。

表 1 対象建築物の概要

	
所在地	神奈川県平塚市
主要用途	倉庫業を営む倉庫
フロア数	地上 4 階
延べ面積 [m ²]	29,606.53
建築面積 [m ²]	9,666.57
容積率 [%]	194.81
建蔽率 [%]	64.34
基本構造	鉄骨造（基礎：鉄筋コンクリート）

表 2 資材の製造・輸送段階に関する CO₂排出原単位

項目	値
公益社団法人 日本コンクリート工学会	
普通ポルトランドセメント	0.769 [kg-CO ₂ /kg]
高炉セメント B 種	0.445 [kg-CO ₂ /kg]
砕石	0.004 [kg-CO ₂ /kg]
砕砂	0.004 [kg-CO ₂ /kg]
上水	0.348 [kg-CO ₂ /m ³]
リグニン	0.150 [kg-CO ₂ /kg]
高炉スラグ微粉末	0.036 [kg-CO ₂ /kg]
10t アジテータ車	0.253 [kg-CO ₂ /m ³ km]
10t トラック	0.178 [kg-CO ₂ /tkm]
一般社団法人 日本鉄鋼連盟	
鉄筋（電炉材）	752.747 [g-CO ₂ /kg]
厚板（高炉材）	2,109.935 [g-CO ₂ /kg]
厚板（電炉材）	856.693 [g-CO ₂ /kg]
形鋼（高炉材）	1,617.812 [g-CO ₂ /kg]
形鋼（電炉材）	874.197 [g-CO ₂ /kg]
酸洗鋼板（高炉材）	1,963.893 [g-CO ₂ /kg]
酸洗鋼板（電炉材）	708.204 [g-CO ₂ /kg]
溶融亜鉛鋼板（高炉材）	2,318.261 [g-CO ₂ /kg]
溶融亜鉛鋼板（電炉材）	1,063.991 [g-CO ₂ /kg]
産業連関表	
鋼管	2.400 [t-CO ₂ /t]
グラスウール	2.690 [kg-CO ₂ /kg]
ロックウール工業会	
ロックウール	0.379 [kg-CO ₂ /kg]
AIJ-LCA&LCW ver.5.01	
ビニールクロス	2.900 [kg-CO ₂ /m ²]
タイルカーペット	16.100 [kg-CO ₂ /m ²]
アスファルト	13.900 [kg-CO ₂ /m ²]
ケイカル板 t5	1.600 [kg-CO ₂ /m ²]
せっこうボード t12.5	4.100 [kg-CO ₂ /m ²]
LGS	14.300 [kg-CO ₂ /m ²]
合板 t12	7.000 [kg-CO ₂ /m ²]
ガラス	23.300 [kg-CO ₂ /m ²]
土木学会コンクリート委員会	
購入電力	0.410 [kg-CO ₂ /kWh]
ガソリン	2.310 [kg-CO ₂ /L]

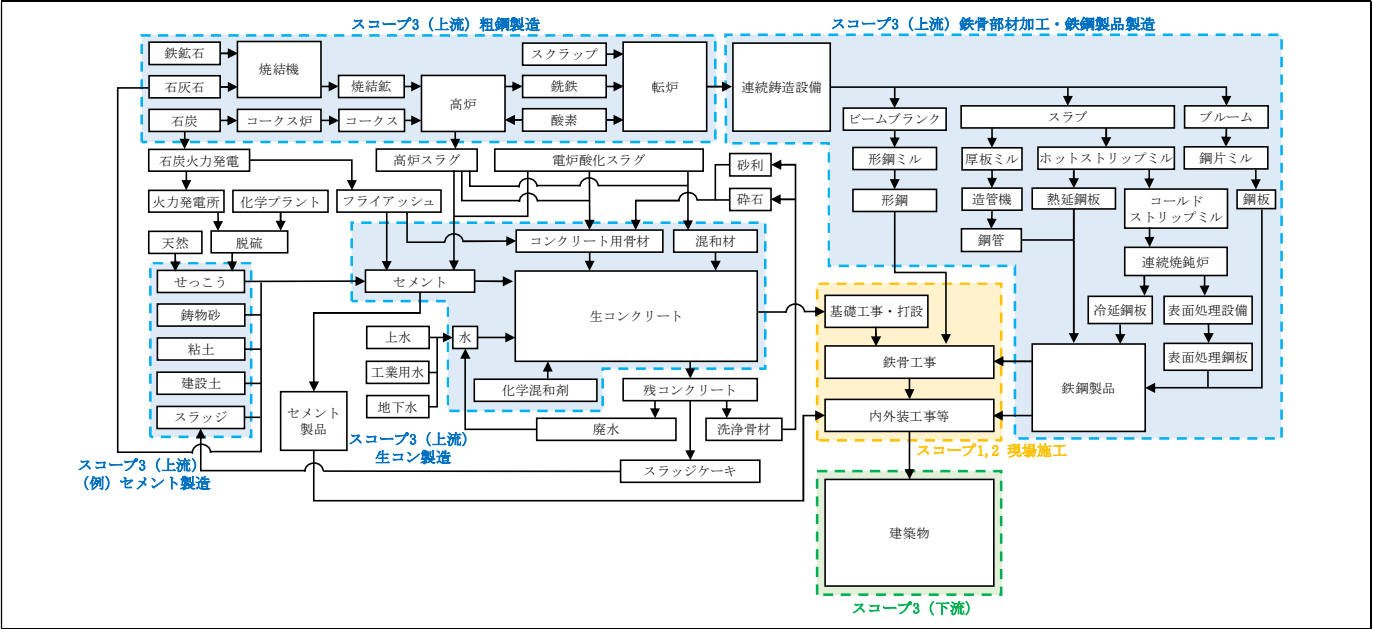


図 1 評価対象である鉄骨造倉庫建築物のシステム境界の設定

2.3 システム境界の設定

まず、建物 LC のなかで環境負荷量の算定を行う範囲を設定した。建築物に投入される材料の製造から現場での施工までの代表的な資材の工程や作業を取り上げ、図 1 にまとめた。

2.4 資材の製造および輸送段階で排出される CO₂ 量

1) 資材製造における排出量

対象建築物への投入資材には生コンクリートや鉄骨材などがある。積算表よりそれぞれの資材の数量を拾い上げ、そこに各 CO₂ 排出原単位を乗ずることで排出量を算出した。

2) 資材輸送における排出量

生コンクリートや鉄骨材といった主要な躯体材料の輸送における排出量を求めた。輸送距離は一般的な値を使用した。

各種資材参照記号

RC	: 鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete)
SF	: 鉄骨材(Steel Frame)
PCP	: 既製コンクリート杭(Precast Concrete Piles)
SD	: デッキプレート(Steel Deck)
IE	: 内外装材(Interior and Exterior)
P	: 舗装(Pavement)
FS	: 床スラブ(Floor Slab)

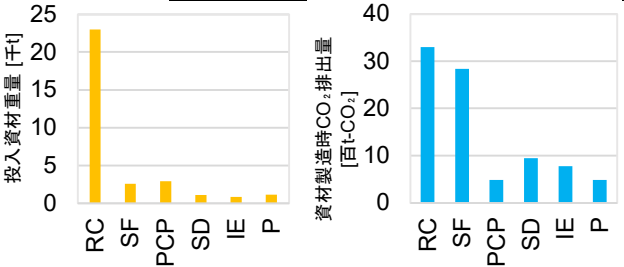


図 2 投入資材重量 図 3 資材製造時 CO₂ 排出量

表 3 投入資材重量および製造時 CO₂ 排出量

項目	投入重量 [t]	排出量 [t-CO ₂]
鉄筋コンクリート	生コン	21,976
	鉄筋	995
鉄骨材	2,596	2,839
既製杭	2,901	485
デッキプレート	1,102	944
非躯体	屋根	162
	外壁	138
	内装	495
	耐火被覆	45
	ガラス	12
舗装	1,145	484
計	31,569	8,828

表 4 資材輸送時 CO₂ 排出量

項目	数量	距離 [km]	排出量 [t-CO ₂]
生コンクリート	9,555 [m ³]	5	12
鉄筋	995 [t]	400	49
鉄骨材	2,596 [t]	500	158
既製杭	2,901 [t]	200	71
ファブデッキ	1,102 [t]	70	9
計			370

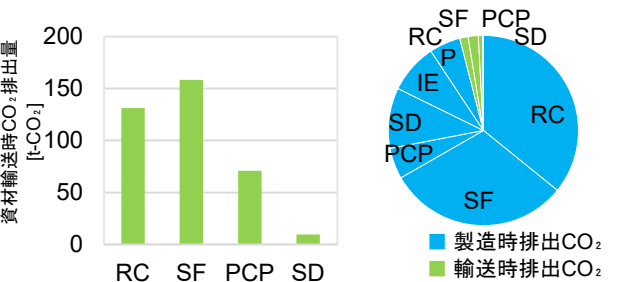


図 4 資材輸送 CO₂ 排出量 図 5 製造輸送排出量比

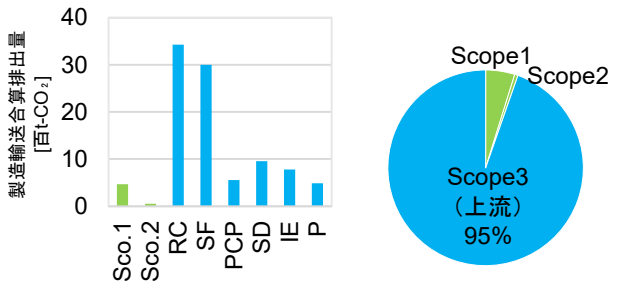


図 6 スコープ 1,2,3(上流)の CO₂ 排出量および排出割合

2.4 鉄骨造建築物の建設における CO₂排出の現状と考察

本物件の用途は倉庫で 4 階程度の床面積が大きい形状のため、上部構造の鉄骨材と比べて基礎に使用される生コンクリートの重量の方が大きくなる。重量は、図 2 や図 7a) からわかるように、内外装材料に比べ躯体材料が重量の上位に位置している。製造時の CO₂排出量については図 3 で示すように、鉄筋コンクリート、鉄骨材が排出量全体の大きな割合を占めており、この 2 資材に関連する CO₂排出量を低減させることで、建築物全体の排出量削減が可能になると考える。

3. 使用材料再選択による資材製造時 CO₂排出量変化

表 5 は材料置き換えを行う資材の対象数量と内容について示している。ケース A では生コンクリートの構成材料であるセメント、ケース B は鉄骨材、ケース C はデッキプレートの鋼板、ケース D は舗装材についての置き換えである。

3.1 生コンクリートの使用セメント置き換え（ケース A）

現状排出量では普通ポルトランドセメントを使用した場合を仮定して算出したが、この検討では特定の部位を高炉セメント B 種または高炉セメント C 種に相当するセメント（高炉スラグ微粉末：70%，普通ポルトランドセメント：30%）に置き替えた。ケース A1 では、耐圧版や基礎大梁といった要求される強度が大きい基礎コンクリートの部位は置き換えを行わず普通ポルトランドセメント、土間コンクリートや各階床を構成するコンクリート部位は高炉セメント B 種、要求される強度が小さい捨コンクリートには高炉セメント C 種相当のものを使用したと仮定してそれぞれ求めた。ケース A2 では、基礎コンクリート部位は引き続き普通ポルトランドセメント、土間コンクリートや立ち上がりコンクリートを高炉セメント B 種、そして捨コンクリートと各階床コンクリートを高炉セメント C 種相当のものを使用したと仮定した。各階床コンクリートのセメントを高炉セメント C 種相当に置き替えたのは、それらの打設に際しては捨て型枠等が用いられるため、早期に強度を発現させる必要がないためである。置き換え可能な部位の割合は図 8 に示すとおりである。ケース A1 では、高炉セメント B 種が全体の 58%，高炉セメント C 種相当は 4% 程度で、ケース A2 は、高炉セメント B 種が 18%，高炉セメント C 種相当は 44%それぞれ普通ポルトランドセメントからの置き換えが可能である。特に、使用量の大きい床スラブなどの部位をより環境負荷の小さいセメントに置き替えることによる排出量削減効果の期待は大きい。

算定結果は図 9 のようになった。普通ポルトランドセメントのみを用いた生コンクリートの製造時排出量（図 9 において【-】と示す）を基準として、ケース A1 は 76.3%，ケース A2 では 67.8%まで排出量が減少した。

3.2 鉄骨部材の材料置き換え（ケース B）

この建築物は鉄骨造であり、重量、CO₂排出量ともに鉄骨材は大きい。ケース B は鉄骨材に関する材料置き換えである。

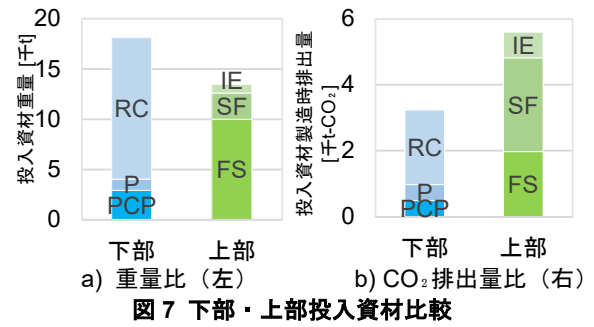


表 5 材料再選択によるケーススタディ

	置き換え数量	元	置き換え後
生コンクリート 9,555 [m³] (ケース A)			
A1	3,644 [m³]	普通ポルトランドセメント	置き換えなし
	5,501 [m³]		高炉セメント B 種
	411 [m³]		高炉セメント C 種相当
A2	3,644 [m³]	普通ポルトランドセメント	置き換えなし
	1,685 [m³]		高炉セメント B 種
	4,227 [m³]		高炉セメント C 種相当
鉄骨材 2,596 [t] (ケース B)			
B1	2,596 [t]	高炉材	電炉材
B2	273 [t]	高炉材	木材
	2,323 [t]		置き換えなし
B3	273 [t]	高炉材	木材
	2,323 [t]		電炉材
デッキプレート 1,102 [t] (ケース C)			
C	76 [t]	高炉材	電炉材
	1,026 [t]	電炉材	置き換えなし
外構 1,145 [t] (ケース D)			
D	463 [t]	アスファルト	置き換えなし
	116 [t]	普通ポルトランドセメント	高炉セメント B 種
	542 [t]		高炉セメント C 種相当
	25 [t]		置き換えなし

N : 普通ポルトランドセメント
BB : 高炉セメント B 種
eBC : 高炉セメント C 種相当

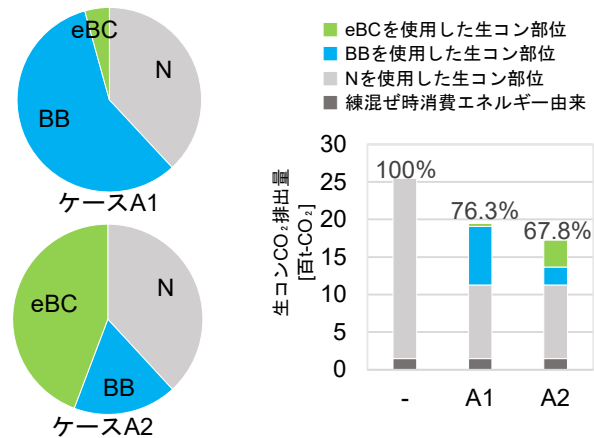


図 8 生コンの置き換え部位割合 (A)

図 9 セメント置き換えによる生コン CO₂排出量 (A)



図 10 加工前の生材 (左) と鉄骨部材 (中・右) (B)

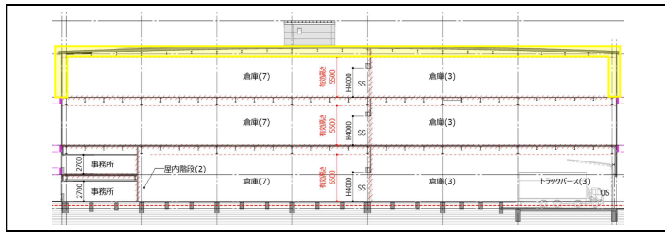


図 11 鉄骨部材木質化（ケース B2）の該当部位

1) 高炉材から電炉材に置き替え（ケース B1）

現状排出量では一部の電炉材を除き高炉材として算出した。これをすべて電炉材に置き替えること（ケース B1）で図 12 の B1 のような結果となった。現状排出量 2,839 t-CO₂を基準（図 12 において【-】と示す）とすると、電炉材に置き替えることでおよそ 8 割の 2,270 t-CO₂に減少することがわかった。

2) 最上階の鉄骨材を木材に置き替え（ケース B2）

本建築物の最上階の鉄骨部材を木質化すること（ケース B2）による CO₂排出量の変化を検討した。最上階の鉄骨材 272.5 t は木材 259.6 t に置き替わった。鉄骨材（高炉材）のとき 441 t-CO₂であった最上階躯体部分の排出量は、木材に置き替えたことで 138 t-CO₂に減少した。鉄骨材の木質化によって、4 階躯体部分の排出量をおよそ 3 割に低減させることができる結果になった。ただし、1 階から 3 階の排出量（鉄骨材（高炉材）のまま）を合算した建築物躯体全体の排出量では、図 12 の B2 のように、現状排出量から 1 割減の 2,537 t-CO₂にとどまった。

3) 鉄骨部材の電炉鋼化および最上階木質化（ケース B3）

ケース B1（鉄骨を高炉材から電炉材に置き替えた場合）とケース B2（最上階の鉄骨を木質化した場合）を合わせると、図 12 の B3 のようになった。現状排出量（すべての階の鉄骨が一部を除き高炉材である場合の排出量）と比較すると、ケース B3 は 75%まで CO₂排出量が減少する結果となった。最上階以外の鉄骨を木質化する場合、力学の観点などから木材の断面積、数量等は大きくなり木質化による排出量低減効果は最上階のみと比べて小さくなると考えるが、鉄骨材を木材に置き替えることによる CO₂排出量削減の可能性は大きい。

3.3 デッキプレートの鋼板部分の材料置き替え（ケース C）

鋼板部分を高炉材から電炉材に置き替えることで排出量がどれほど削減されるのかを算定した。なお、鉄筋トラス付き捨て型枠の鉄筋部分および補強筋については現状排出量の算出で電炉材を使用したものとしているため置き替えない。

結果は、図 13 に示すとおりである。現状排出量 944 t-CO₂と比較して、鋼板部分の電炉材置き替えによるデッキプレート全体からの排出量は 10%減少した 850 t-CO₂になった。

3.4 外構の舗装材料置き替え（ケース D）

コンクリート舗装のセメントは高炉セメント B 種に、地盤改良材のセメントは高炉セメント C 種相当に置き替えた。

算定結果は図 14 に示す。セメント使用量が多かつより環境負荷の小さい高炉セメント C 種相当に置き替えられた地盤改良材の置き替えて大幅に CO₂排出量が削減された。

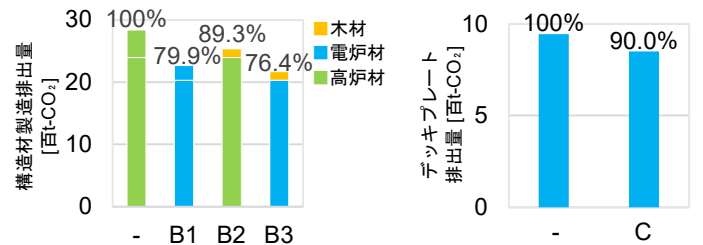


図 12 鉄骨材の排出量（B）

図 13 デッキプレートの排出量（C）

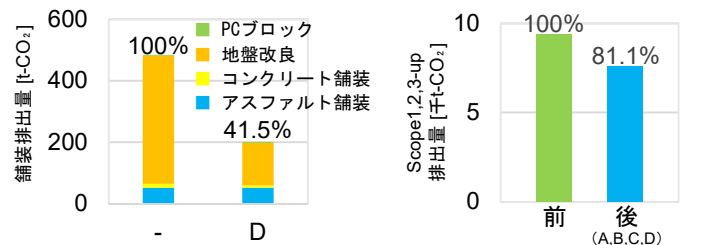


図 14 舗装材料の排出量（D）

図 15 Scope1,2,3-up 総排出量

4. まとめ

- 1) 生コンクリートや鉄骨といった投入量の多い資材の原材料を置き替えることで、対象建築物の投入資材製造における排出量は 1,948 t-CO₂減少した。
- 2) 資材製造から現場施工までのスコープ 1,2,3（上流）すべてを合わせた排出量は、鉄筋コンクリートと鉄骨からのそれが合計 65%を占めており、その原材料を置き替えることで総排出量を 2 割削減させることができる結果となった。
- 3) 建築物の投入材料の置き換えは、技術的な問題や流通、コストといったさまざまな観点から考慮する必要があり、特に躯体材料や主要資材は建築物に使用される量が多いことで流通、コストのなどの問題を大きく受ける。しかし、それらをより環境負荷の低いものに置き替えることは、スコープ 1,2,3（上流）全体からの CO₂排出量の削減に効果があることが本研究からわかった。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本コンクリート工学会
コンクリートの環境テキスト（案）[改訂版] p.127-130
- 2) KOBAYASHI, TAMURA, LCCO₂ Evaluation and Proposal of the Measures for Environmental Impact Reduction focusing on the Material Manufacturing, Fabrication, and Construction on site Phases of Steel-framed Buildings in Japan, 2023 International Symposium on Advanced Technology (ISAT-22), Oct. 2023
- 2) 小林、田村ら、鉄骨造倉庫建築物のライフサイクル環境影響に着目した SC 分析に基づく CFP 評価、日本建築学会関東支部研究発表会、2024 年 3 月

謝辞

本研究は JFE シビル株式会社との 2023 年度工学院大学共同研究である。鉄骨資材加工工場視察にご協力いただいた株式会社カジケイ鉄工の関係各位に感謝の意を表します。