

43. 建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量

LIFE CYCLE CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE BUILDINGS

○ 酒井 寛二^{*}、 漆崎 昇^{**}、 下山 真人^{**}、 相賀 洋^{***}
Kanji SAKAI^{*}, Noboru URUSHIZAKI^{**}, Masato SHIMOYAMA^{**}, Hiroshi OHGA^{***}

ABSTRACT; Focus on the global warming, life cycle carbon dioxide emissions from the buildings are analysed. We developed the emission quantity estimation method for building life cycle, which starts from building material manufacturing to demolishing the buildings and waste treatment. Using this method, calculations are made for the model building. The result shows that the most effective way of reduction for CO₂ is executing energy conservation for operation process.

KEYWORDS; global warming, carbon dioxide emission, life cycle assessment.

1. はじめに

種々ある地球環境問題の中で、地球温暖化は一番対応が困難とされているが、過半の原因である大気中への二酸化炭素排出量を見ると、日本全体の排出量に対する建設活動の占める比率は35%以上と推定されており^{*1}、この分野での積極的な排出抑制活動に大きな期待が寄せられている。

本研究は、建物を企画・基本計画する段階で、建物の資材生産から施工・運用・廃棄に至るまでのライフサイクルにわたって、大気中に排出される二酸化炭素量を簡便に推定する手法を検討したものである。建設活動は、大きく建築と土木に大別でき、二酸化炭素排出過程はかなり異なるが^{*2}、建物を対象とした二酸化炭素排出量予測手法は、かなりの部分で土木構造物についても適用可能と考え、ここに報告する。

2. 解析の範囲

地球環境問題は長期的視点での対応が求められており、建物も長期的な環境負荷を求めることが要求されている。建物の寿命は、一般に数十年から百年以上にもなるが、この寿命期間を下記の7段階に区分し、それぞれの過程における二酸化炭素排出量を推定して合計した。

- (1) 建設資材生産過程：鉄鋼やセメントが各生産工場内で製造される過程。
- (2) 資材輸送過程：建設資材が各種工場間を加工のために運搬され、最終的に建設現場に至るまでの、さらに新築時の残材や廃棄物搬出の運搬過程の全ての過程。
- (3) 建設現場施工過程：施工現場で消費されるエネルギーに伴う排出の過程。
- (4) 建物運用過程：竣工した建物の冷暖房や照明用エネルギー消費に伴う排出過程。

*大林組技術研究所 Technical Research Institute, Obayashi Corporation

**大林組地球環境部 Global Environment Department, Obayashi Corporation

***大林組設計本部 Architectural and Engineering Division, Obayashi Corporation

- (5) 建物保守過程：日常的な消耗品補充や保守管理、修繕に伴う排出過程。
- (6) 大規模更新過程：劣化した設備や内外装材の、20～30年毎の全面交換過程。
- (7) 解体除却過程：建築物を解体して更地とし、解体廃棄物を処分する過程。

各過程での排出量計算に当たっては、直接的に建築物に組み込まれない資材生産やサービス産業活動による波及効果は除外した。また人間活動による排出量、たとえば呼吸、飲食、通勤、事務所作業、家庭生活関連等は除外している。また海外での発生負荷については、影響が大きいと考えられるアルミニウムの製造過程については加味したが、他の資材については無視可能として除外している。

また建物の運用過程については、通常の業務・居住に伴って消費する標準的エネルギーのみを計算対象としており、建物内の什器備品や事務用品の調達、そしてこれらの廃棄は対象外とした。

3. 二酸化炭素排出量推定法の概要

前述した建築物のライフサイクルの7過程について、各々二酸化炭素排出量を推定したが、その算出過程の全体概要を図－1に示した。

ここで計算遂行上の必要情報であるが、ライフサイクル二酸化炭素排出量計算が必要となる時点は、建築計画のほんの初期段階で簡単な設計図もない時期から、詳細設計が完了した時期までと非常に幅が広い。よって比較的簡単な情報でも大略の推定計算が可能のように、使用頻度の高い多様な値を多量に内蔵しているが、詳細情報があればそれに応じた精度での結果が得られるような工夫をしている。

以下に各過程の計算内容や、使用原単位等を説明する。

4. 建築資材生産過程

(1) 基礎資材生産過程の二酸化炭素排出量原単位

まず建設活動で使用する主要な基礎資材を13項目に大分類し、その各々の製造過程での二酸化炭素排出量を求めた*1。ここで求められた値は、産業連関表をデータベースとして使用するものの、建築物に組み込まれない資材使用やサービス産業への波及効果を極力除外し、積上法の値と同等のものとなるように配慮されたもので、「限定間接需要算入法」と名付けている。

産業連関表だけをデータとして使うと、リサイクル資材等の最近の産業界の技術動向を反映しにくいし、資材の種類を細分して検討することや、海外生産分の排出量を評価することも困難である。そこでこの点については、個々の産業界について調査し、積上法でデータを補完することが望ましい。ここでは、鉄鋼、セメント、アルミニウムの3資材について、リサイクルや海外生産を含めて積上法にて解析した結果*3を用いることとした。このようにして、建築物で多量に使用されている基礎資材の、生産過程での二酸化炭素排出量として、表－1に示す値を用いた。

(2) 資材加工過程からの二酸化炭素排出量

建物の躯体や外装材、内装材は、基礎資材をそれほど加工せずに建物に組み込まれている。よってこれらの部材については、基礎資材生産過程の排出量を使用して支障はない。しかし、加工度の高い設備機器類については、加工過程において単位資材量当たり多量のエネルギーを使っており、加工による二酸化炭素排出

表－1 主要建設資材の二酸化炭素排出量原単位
現時点の推奨値

建設資材			炭素排出量 (kg-C/kg)
砂利・石材			0.00030
木 材	炭素固定 ナシ	製材	0.0078
		合板	0.0487
	(炭素固定) アリ	製材	(-0.492)
		合板	(-0.447)
合成樹脂製品			0.176
ガラス	板	0.414	
	織 維	0.579	
セメント	ポルトランド	0.235	
	45% 高炉 スラグ	0.138	
陶磁器(建設用)			0.114
鉄鋼	棒 鋼	0.173	
	鋼 板	0.436	
銅			0.280
アルミ(サッシュ用)			1.765

も考慮に入れる必要がある。このような見地から、設備工事全般の加工過程の効果を検討した結果^{*4}があるが、大略基礎素材生産の2倍程度の値となっている。今回はこの値を参考として下記の数値で近似した。

(3) 部位ごとの二酸化炭素排出量計算

建物の構造躯体（土に面する地下壁・床を除く）については、S、RC、SRCの3種類について、あらかじめ床面積当たりの標準的基礎資材使用量を与えてある。土に接する地下の壁や床については、単位面積当たりの基礎資材使用量を与えている。また内装および外装部分については、あらかじめ標準的ないくつかの壁や天井、床、ガラス仕様について、単位面積当たりの基礎資材使用量を与えている。

設備については、過去の解析事例からあまり全体に占める比重は大きくなく、床面積に比例すると近似できるので、文献^{*4}の解析結果を参考とし、電気設備は $10.0 \text{ [kg-C/m}^2\text{]}$ 、空調設備は $15.0 \text{ [kg-C/m}^2\text{]}$ 、衛生設備は $5.0 \text{ [kg-C/m}^2\text{]}$ と近似し、昇降機設備については無視することとした。

建物の平面形状、階数、方位、構造形式、外装や内装の仕様が与えられると、床面積や部材面積が算出され、それらに上記の原単位を乗じることで、建築資材生産過程（機器の加工過程も含めて）での二酸化炭素排出量が求められる。

5. 建築資材輸送過程排出量

建設資材の生産過程での産業間運搬や、建築現場までの運搬、さらには新築時の現場からの残材や廃棄物搬出を合わせて、輸送による排出量を前述の「限定間接需要算入法」にて解析した結果、資材使用重量が分かっている場合には、 0.0177 [kg-C/kg] を用いて推定すればよいこととなった。

本報告では、建物の地上部分は延べ床面積当たりの重量を求め、地下部分については地下壁や地下床の部材面積当たりの資材重量を算出して、上記原単位を乗じた。

6. 建設現場施工過程排出量

建設業が、現場で消費しているエネルギー種別毎の数量は、毎年発行されるエネルギー関連統計に表示されている。これより施工現場での年間排出二酸化炭素量が算出可能である。この内土木工事と木造建築分は、別途公表されている工事金額比率に比例するとして除外することが可能であり、結局非木造建築の現場施工からは1990年度で 2.03 [Mt-C] の排出量となる。

また年間の非木造建物の着工床面積も、毎年統計値が公表されており、1990年度のそれは $198 \text{ [Mm}^2\text{]}$ であった。この両者の数値から、現場施工による二酸化炭素排出量原単位として、 $10.2 \text{ [kg-C/m}^2\text{]}$ が求められる。

検討対象建物について、上記の施工過程の二酸化炭素排出量を、躯体、内外装、設備等の各々に標準的使用資材重量比で按分し、床面積を乗じて各々求めた。

7. 建物運用過程排出量

建物の竣工後、建物を使用するためには冷暖房や照明用にエネルギーを使用することとなるが、一般にこの運用過程からの排出量は、ライフサイクル排出量の過半を占る。それだけにこの過程については、精度の高い推定法が求められる。

建物運用のエネルギー構成をみると、通常は空調用にほぼ50%、照明・コンセント用に30%、給排水衛生・昇降機・厨房・駐車場換気等に20%が使われている。このうち空調用は年間を通じて変動が大きく、精度の高い予測のためにはかなりの計算が必要である。これに対してその他の用途については、もっぱら建物の使用時間に比例するものが多く、年間の総量予測は比較的容易である。

以上のような状況をふまえ、空調用については年間を通じて時刻単位で動的熱負荷計算とシステムシミュレーションを実施し、その他用途については時刻別負荷率を与えて年間集計している。ここで熱負荷を動的に求める手法は、すでに空調設備の実施設計で標準的に使用されており、本研究では概略情報から詳細負荷

計算用の入力を自動的に作成する部分に創意をこらした。

このような手法で、建物運用のための各種エネルギー使用量が求められる。それぞれのエネルギー源については、単位消費量当たりの二酸化炭素排出量原単位が与えられており、この原単位を乗じることで運用過程全体の二酸化炭素排出量が求められる。

なお上水の消費と下水の放流に関しては、浄水場や下水処理場のエネルギー消費量を求めて、建物の消費量に按分してみると、空調設備等の運転用エネルギー量に比較して1桁以上小さく、全体を検討するときには無視して支障ないものと考えた。

8. 建物保守過程排出量

建物の機能を竣工時点と同等に維持するために、日常的に消耗品の補充や、故障部品の交換・修繕、劣化部材の交換、塗装の上塗り等が必要である。このような保守活動のために、資材が消費され、また小規模な工事が実施されることとなり、それに伴って二酸化炭素の排出がなされることとなる。

保守活動の詳細な構成は、建物の種類や保守管理者の作業標準によって大幅な差異が予測されるが、系統だった解析事例はない。しかし通常の場合の年間保守費予算は、建物建設費用の1～2%程度である。またこの過程からの排出量が、ライフサイクル全体の排出量に比較してかなり小さいことから、ここでは近似的に、毎年新築時の1%の基礎資材が消費され、1%の運送が発生し、1%の現場施工が生じると仮定して計算した。

また一部冷凍機の冷媒には、温暖化効果のあるフロンが使用されており、長期間の使用では漏出による温暖化寄与を評価する場合もあるが、今回は非温暖化冷媒を使用するものとしてこの項目は無視した。

9. 大規模更新過程排出量

建築物の躯体は、一般に寿命期間を通じて大規模に更新されることは少ないが、外装材は防水の劣化や外壁表面の腐食・ひび割れ、あるいはデザインの流行遅れ等から時々全面的に取り替える必要が発生する。内装材については、表面の汚染や磨耗、あるいは度重なる間仕切り変更による劣化等が原因で、設備機器は可動部分の材料磨耗による性能低下や配管腐食による漏水等から、これも時々大規模に更新することが必要となる。

大規模更新時期は、現実の実施状況を反映させて、内装と設備は20年毎に、外装は30年毎に実施されると仮定した。また大規模更新に伴って、実際の建物では機能向上が計られることが多いが、今回は新築時点の機能に復元するだけとして計算した。

大規模更新に当たっては、当該部位の全資材や機器は交換されるとみなし、新築時と同量の基礎資材消費による排出、このための運輸に伴う排出、現場施工による排出、廃棄物の輸送による排出を各々計算した。ここで現場施工分は、解体工事と新設工事の二重となるために新築時の1.4倍を見込んだ。また廃棄物運輸については、後述の解体除却過程での原単位を適用して求めている。

10. 解体除却過程排出量

解体業者を調査したところ、解体現場での燃料使用量から、解体工事分としては $3.70 \text{ [kg-C/m}^2 \text{]}$ が得られた。また廃棄物運搬は、一般に4トン車に平均 2.11 [t] 積載して往復で 100 [km] 輸送していることから、トラックの燃費をリッター当たり 6 [km] 、軽油の二酸化炭素排出量はリッター当たり 0.74 [kg-C] とすると、結局運搬分として 0.0058 [kg-C/kg] が得られた。

解体に当たっては、使用された資材の全量が廃棄されと考え、建築資材生産過程で推定した全数量を対象に、上記の解体施工分と廃棄物運送分を計算した。なお中間処分場や最終処分場でのエネルギー消費量は比較的少なく、無視して支障が無いと判断した。また最終処分場である埋立地からは、嫌気性分解によるメ

タンガスの発生も予測されるが、廃木材や廃棄紙類は、現在でもリサイクルされる比率が高まっており、将来はさらにこの比率が高まって、最終処分場に混入することが非常に少なくなると見込まれ、この見地から発生メタンガスによる温暖化作用は無視して計算することとした。

11. ライフサイクル二酸化炭素排出量の試算例と低減方策

今まで述べた推定手法を用いて、具体的なモデルビルを対象に計算を行った。モデルとしては、各階面積 2,000m²で地下なし地上 8階建て、SRC 造の標準的事務所ビルを考えて試算した。

図-2には、建物の使用期間を変えた場合の影響を示したが、長期間使用すれば年間平均の炭素排出量は減少するものの、保守や更新にもかなりの資材消費が見込まれ、結局全体としてそれほどの炭素排出量削減効果が見られないこととなった。

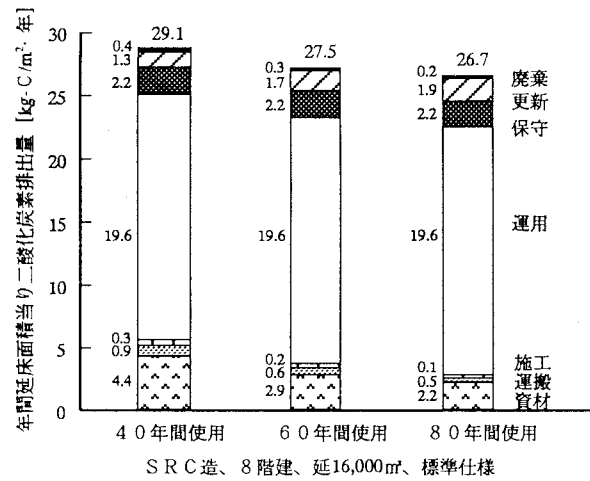


図-2 モデルビルの使用期間変動に伴う
ライフサイクル炭素排出量比較

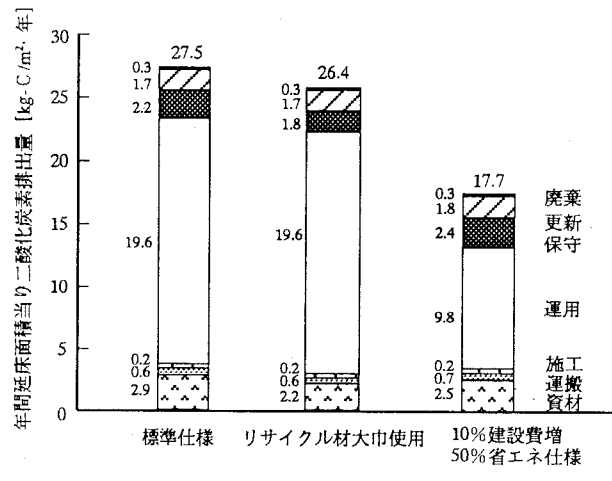


図-3 モデルビルの仕様変更に伴う
ライフサイクル炭素排出量比較

一方図-3では、建物の仕様にリサイクル資材使用型と省エネ型の2ケースを加え、標準仕様との比較を行った。ここに省エネ型仕様としては、建設費が10%割高で建設資材使用量も10%多く、建物運用上の消費エネルギーは一般の建物に比して50%少ない例を考えた。この結果、前者の効果はそれほど大きくなく、後者の効果が非常に大であることが判明した。この理由は、ライフサイクル二酸化炭素排出量にしめる運用段階での比率が圧倒的に大きく、この部分での削減策が最も効果的なことを示している。

また建物の構造形式を変え、S造やRC造とした場合との比較についても試算した結果を図-4に示すが、二酸化炭素総排出量が5%変化する程度の影響しか示さなかった。

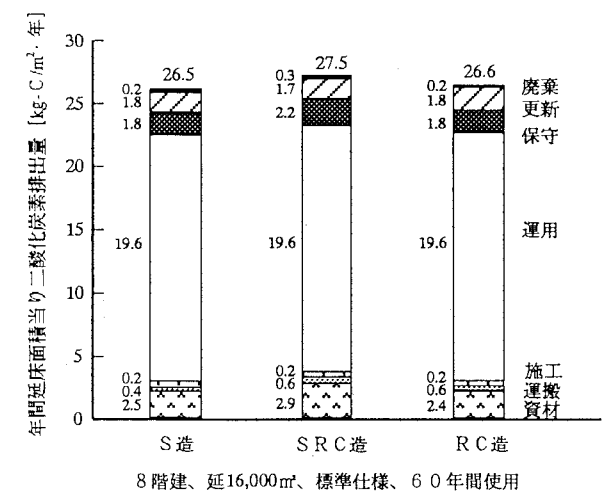


図-4 モデルビルの構造形式変動に伴う
ライフサイクル炭素排出量比較

*1 酒井、漆崎：環境情報科学、Vol. 21, No. 2 (1992) p. 130
*2 岡本、酒井、漆崎：土木学会・第1回地球環境シンポジウム講演集、(1993) p. 93
*3 酒井、漆崎、岡本：日本建築学会大会学術講演梗概集 (1993) No. 4315
*4 酒井、漆崎、金田、下山：空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1994) p. 1345