独立住宅モデルの建材選択に伴う LCC, LCCO₂, 最終廃棄物量低減の多目的問題

—住宅建材の選択システムへの GA 適用の研究—

MULTI OBJECTIVE PROBLEM REDUCING LCC, LCCO₂, FINAL WASTE IN SELECTING MATERIALS FOR DETACHED HOUSE

—The study on of an application of genetic algorithms to the estimation system
in selecting materials for detached house—

弥田 俊男*³, 宗本 順三*¹, 吉田 哲*², 高野 俊吾*⁴

Toshio YADA, Junzo MUNEMOTO, Tetsu YOSHIDA
and Shungo TAKANO

In this study, we try to propose the system selecting the combination of building materials to reduce environmental loads (CO₂ exhaust, costs and waste) with using GA (genetic algorithms). The estimation of a wooden house in this system is smaller than one in general. And some houses which have similar value are made from different materials each other. So we can get the better answer and find one that we haven't got empirically yet and we can show the usefulness of this system.

Keywords: genetic algorithm, building materials, detached house, discharge of CO₂ exhaust, final waste, cost
遺伝的アルゴリズム, 建築資材, 独立住宅, CO₂ 排出量, 最終廃棄物量, コスト

1. 研究の背景、目的

環境問題は年々深刻さを増しており、あらゆる分野においてこれまでの成長指向のシステムは持続可能なシステムへと組換えられることが社会的に要請されている。環境負荷低減を目指したシステムには産業マクロ的視点から低減を目指した産業システムモデルや施工方法における環境負荷低減法等様々なスケールと建築の生産段階に対応したモデルが考えられる。

従来の環境問題の研究ではLCC、LCCO₂など単一の指標に基づいた取組が中心におこなわれてきたが、建築の設計や計画段階においては直接的にはコストが非常に重要な位置を占め、コストの裏付けなしにはLCCO₂の削減も十分に進まないという現実的な問題もある。

建築における建材選択は非常に多様な解の候補を持ち、又CO₂排出量やコスト等複数の評価指標はトレードオフの関係にある。個別の設計における建材選択は、これらの指標の値を同時に減らす、あるいはLCCO₂がある一定目標値以下であればコストの最も小さいものを選択するなどして、上記のトレードオフが多目的問題として解決されていることが望まれる。本論では、多目的問題への有用性が裏付けられている遺伝的アルゴリズム (genetic algorithms、以下GA) を用いて「建築資材選択GAシステム」として提案し、建材の選択に伴うLCC、LCCO₂や最終廃棄物量の最小化を目指すところに

特徴がある。このシステムは、現在はモデル化した独立住宅に限定されているが、選択された建材の組合せから、上記の指標を同時に低減させる設計解の発見をおこなうものである。

2. 既往研究の中での位置づけ

本論に関連する分野としてLCC及びLCCO₂やGAを用いた最適化問題がある。LCCに関する研究では、LCCを合理的に削減させるための方策を模索する研究と修繕コストから見た修繕周期や建物の部位別の劣化特性等が把握されている。前者では、石塚はRC造の中規模事務所建築をモデルとしてLCCを計算した結果から、ランニングコストがLCCの過半を占めこれを合理的に減少させることが重要であることを明らかにした文献¹⁾。玄他はAHPを用いて設備システムのLCC分析をおこなう最適案選定システムを開発している文献²⁾。高草木は、賃貸事務所建物の20年間の支出データの実態調査結果に基づき賃貸事務所建物経営の収支計画のためのキャッシュアウトフローのモデルを作成した文献³⁾。後者では、飯塚他は、電話局舎100局の外観からの減耗度調査から修繕費を出した上で適正な修繕周期を求めている文献⁴⁾。石塚は、材料から技術的に判断される修繕期間とその場合のコストのかけ方、取替時期を一覧表に、また経済性を考慮した修繕手法をとりまとめている文献⁵⁾。また、石塚は標準的な

本論は、文献¹⁷⁾、¹⁸⁾で発表したものをもとにしている。

*¹ 京都大学大学院工学研究科 教授・工博

*² 京都大学大学院工学研究科 助手・工修

*³ 限研吾建築都市設計事務所 工修

*⁴ 京都大学大学院工学研究科 大学院生

Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.
Instructor, Graduate School of Engineering, Kyoto University, M. Eng.
Kengo Kuma & Associates, M. Eng.
Graduate School of Engineering, Kyoto University

間取、階数、仕上種類の事務所建築のモデルによって規模による修繕費の相違を検討して、標準建築修繕費を算出している文献(6)。古阪は、基本設計における仕様の決定時に概略に維持保全計画の最適化が論理的に達成できる数理モデルを開発している文献(7)。村上他は、事務所ビルの保全実績費用から部位別の保全行為のタイプと機能劣化曲線のパターンによる解析部位の劣化特性を把握している文献(8)。

LCCO₂に関する研究では、酒井他が標準使用型、リサイクル資材使用型、省エネ型の3タイプでは、LCCO₂の排出量削減において省エネ型が効果的であることを指摘している文献(9)。

岡他は産業連関表に基づいて、特に必要資源量、エネルギー消費量、CO₂等排出量の関係に着目している。事務所ビルにおいて、建設費や運転費が各産業部門に及ぼす波及効果や究極的に消費される原料について省エネルギービルと比較した文献(10)。また、建設に必要な主要資源量、CO₂・NO_x・SO_x・煤塵の排出量、建設に伴う産業廃棄物排出量を406産業部門から計算している。エネルギー消費量は建設費単価に比例し、単位面積あたりの必要資源量、CO₂等排出量、廃棄物排出量はエネルギー消費量に比例することを明らかにした文献(11)。さらに10の建物を対象に建設から運用によって生じるエネルギー消費量、CO₂排出量を産業間で引き起こされる波及効果分を連関分析手法を用いて解析・定量化している文献(12)。住宅においては各構造別にエネルギー消費量とCO₂排出量を算出しており、単位面積あたりのエネルギー消費量は木造住宅に比べて集合住宅・軽量鉄骨住宅の方が高くその原因を構造工事によるものであることを明らかにした文献(13)。

酒井は、1985年産業連関表の取引基本表、建設部門分析用産業連関表を用いて建築構造毎の単位延床面積当たりの資材消費量の解析、建築資材別炭素排出量の算出をおこない建設資材としての木材の有用性を説いている文献(14)。また、有馬は1年間に着工される住宅の総数における生産から解体にいたるエネルギーをライフサイクルエネルギー調査から求めCO₂の発生量をC換算で求めている文献(15)。

廃棄物発生量については、紅谷他は構法別・用途別廃棄物量原単位の整備をおこなっている文献(16)。

以上のようにLCC、LCCO₂、廃棄物量などを単独指標として算出し、その効果的な削減を模索する研究は数多いが、本論はこれらの変数をモデルの中に組込んだGAを用いて個別建築においてLCC、LCCO₂、廃棄物量などの十分小さい解や最小解に近い資材選択の組合せをおこなうという特徴がある。また、これらの問題にGAを用いた多目的最適化を目指した研究は殆どおこなわれていない。

3. 建築資材選択システムの組立

「建築物とは各部位毎に資材選択をおこなった総体である」という考えに基づき本論における建築資材の選択システムの組立を述べる。

建築物は構造部分と非構造的な各仕上部分に分解して考えられる。建築物はこの2つの要素を別にする軸組構造のものと、2つの要素を一体化した壁式構造のものに分類できる。軸組構造の場合、構造的要素は躯体、非構造的要素は壁・屋根・天井・床であり、これらを各々分解して考える。壁式構法では柱・梁等の躯体部分がなく、構造的な部分と非構造的部分の区別がないために建築物を壁・屋根・天井・床等の各部位に分解する。本論では特に、環境負荷問題への有効性が予想されている木材の使用が一般的であり、我々の生活に

身近な独立住宅をモデル化して資材選択の検討対象としたがリサイクルや長寿命化等を考慮していくと一概に木造のみが有利ではなくとも予測されるため、木造、RC造、S造等も同時に評価できるモデルとした。また、建設・ランニング・除却等の、建築物のライフサイクルを通じての環境負荷の評価をおこなうものとした。

独立住宅のモデル化と資材選択は次の様におこなう。

A) 独立住宅のモデル化：設備、内部間仕切等は省略。

7.2m×10.8mの矩形平面で床面積77.6m²の平屋建てで階高3m。

B) 各データベースの整備：下記の項目別のCO₂発生量、廃棄物量とコストのうち現時点で得られる値をデータベースとして整備(注1)。

・資材データベース

・躯体データベース

・部位別の仕上データベース

・資材の再利用方法についてのデータベース

C) 躯体の選択：木造躯体、RC造躯体、S造躯体から選択する。選択に伴い躯体データベースが参照される。但し、壁式構法の建築では実行されない。

D) 部位別の仕上の選択：壁、屋根、床について各々仕上の選択をおこなう。選択に伴い部位別の仕上データベースが参照される。仕上部位は外部仕上、内部仕上、下地に分けられるが、本論では内部仕上は扱わない。

E) 再生処理法の選択：解体した際の解体材に対し、資材別に再生処理方法の選択をおこなう。選択に伴い資材の再利用方法に関するデータベースが参照される。

F) 評価：以上の選択によって、CO₂発生量、廃棄物量とコストが単位床面積・年当りで算出される(図1)。CO₂排出量、コストはその総計を、廃棄物量は再利用されずに最終処分される最終廃棄物量を算出する。3評価値とも値が小さい程よい結果であるとした。

4. 資材選択システムにおける空調負荷計算の手順

空調運転におけるCO₂排出量、コストはライフサイクルに占める割合が一般に高いため、本章で、空調負荷の計算を式4-1～式4-7で算出する過程を詳述する。

4-1. 熱損失係数(文献20, pp.32～から抜粋の上、編集)

式4-1の初項は壁、屋根、床、窓の各部位から出入する熱の総和であり、室内側及び外気側表面熱伝達抵抗値については表1の値を用いた。温度差係数は壁、窓、屋根を1.0、外気に通じる床裏を0.7とした(文献20 pp.33 表2-4)。

表1 熱伝達抵抗値 (文献20 pp.43 表2-9)

	室内側熱伝達抵抗値 [m ² h ² °C/kcal]	外気側熱伝達抵抗値 [m ² h ² °C/kcal]
屋根	0.10	0.05
外壁	0.13	0.05
床	0.17	0.17

第2項は土間床から出入する熱であるが、床裏が外気に通じていない床もその熱性状は類似しているため、この両者を土間床等とし、熱貫流率について同一の式を用いた。本論では評価対象モデルが木造躯体の場合、外気に通じる床裏をもつ一般床であるとし、躯体が

図1 表現型 (pheno-type) の評価フロー

RC造、S造の場合は土間床等とした。

第3項は換気によって出入する熱であり、自然換気回数[回/h]は、木造で1.0、RC造で0.5、S造で0.7とした(文献20 pp.34 表2-5)。

$$Q = \{ \sum A_i K_{fi} + \sum (L_{vi} K_{vi} H_i + A_{vi} K_{vi}) + 0.3n \} / S \cdots \text{(式4-1)}$$

Q: 熱損失係数 [kcal/(m²h°C)]

A_i: 部位の面積 [m²]

K_{fi}: 部位の熱貫流率 [kcal/(m²h°C)]

L_{vi}: 土間床等の外周長さ [m]

K_{vi}: 土間床等の外周に対する熱貫流率 [kcal/(mh°C)]

H_i: 外気等の区分に応じて定まる温度差係数

A_{vi}: 土間床等の中央部の面積[m²]

K_{vi}: 土間床等の中央部に対する熱貫流率[kcal/(m²h°C)]

n: 自然換気回数 [回/h]

B: 気積 [m³]

S: 床面積 [m²]

(iは部位の種類を表す)

4-2. 日射取得係数 (文献20、pp.32～から抜粋の上、編集)

各部位の熱貫流率をKとした時の日射侵入率は屋根、壁で0.04K、窓は単層で0.88、複層で0.78とする(文献20 pp.45 表2-11)。方位係数は東京の値を用いた。

$$\mu = \{ \sum_j (\sum_i A_{ij} \eta_{ij}) \nu_j + \sum_r A_{rr} \eta_{rr} \} / S \cdots \text{(式4-2)}$$

μ: 日射取得係数 [-]

A: 部位の面積 [m²]

η: 部位の日射侵入率[-]

ν: 方位係数 [-]

S: 床面積 [m²]

(iは部位の種類を、jは方位を、rは屋根を表す)

4-3. 空調負荷によるCO₂排出量とコストの算出

(文献19、pp.21-22)

空調の運転条件は、1日につき12時間の全室空調で冷房使用期間は6～9月、室内冷房温度は27°C、暖房使用期間は12～3月、室内暖房温度は20°Cとした。外気温、日射量は東京の月平均値を用いた。

$$q_o = Q \times S \times |t - t_o| \cdots \text{(式4-3)}$$

$$q_s = \mu \times S \times J \cdots \text{(式4-4)}$$

q_o: 外気温による負荷[kcal/h]

Q: 熱損失係数 [kcal/(m²h°C)]

t: 室内冷暖房温度 [°C]

t_o: 外気温 [°C]

q_s: 日射による負荷 [kcal/h]

μ: 日射取得係数 [-]

J: 日射量 [kcal/m²h]

S: 床面積 [m²]

外気温による負荷q_oと日射による負荷q_sを加算して電力消費量に換算したものを冷房機1ヶ月の電力消費量とし、外気温による負荷q_oから日射による負荷q_sを減じたものを電力消費量に換算したものを暖房機1ヶ月の電力消費量とした。なお、成績係数については一般的と考えられる数値を与えた。

$$q = 1.16 \times 10^{-3} \times (q_o \pm q_s) \times 12 \times 30 / \epsilon \cdots \text{(式4-5)}$$

q: 空調負荷による1ヶ月の電力消費量[kWh]

q_o: 外気温による負荷 [kcal/h]

q_s: 日射による負荷 [kcal/h]

ε: 空調機の成績係数 冷房運転時 ε = 2.5

暖房運転時 ε = 3.0

この電力消費量の1年の総計に、式4-6,7のように電力CO₂排出量原単位または電力コスト原単位を乗じたものを、それぞれ空調負荷による1年のCO₂排出量、コストとした。

$$T_g = H_g \times \Sigma q \quad \text{..... (式4-6)}$$

$$T_c = H_c \times \Sigma q \quad \text{..... (式4-7)}$$

T_g : 空調負荷による1年間のCO₂排出量 [kg-c/年]

T_c : 空調負荷による1年間のコスト [円/年]

H_g : 電力CO₂原単位 $H_g = 0.129$ [kg-c/kWh]

H_c : 電力コスト原単位 $H_c = 24.3$ [円/kWh]

(H_g , H_c は文献21 pp.104 表4.1.4より引用)

5. 資材選択システムへのGAの適用

本論のGAシステムでは、躯体部分と仕上部分を区別し、仕上部分は屋根、壁、床に分解した。例えば壁は壁体、外壁、下地と3層に分け、加えて断熱層、窓部分により扱っている(図2)。遺伝子情報数は27、ビット数は85(図3)となる。

各個体の遺伝子情報は大きく別すると、各部位の仕様情報、壁厚等仕様2次情報、再利用情報の3つの遺伝子群から構成されている。壁厚、再生処理の使用割合などの変域は表2のように設定し、これを15分割して遺伝子化している。

各部位の仕様の選択に伴い、各データベースから、資材別使用量、建設コスト、建設時CO₂排出量、建設時廃棄物量、耐用年数が基本データとして参照される(図1)。資材別使用量は建物全体の部位毎に総計され、この値から資材製造時の環境負荷及び解体材量を算出する。耐用年数は建築物の寿命、部材の改修回数に反映させた。

図2 モデルの建材構成図

以上の他にも下記の点に留意した。

- ・基礎部分の重量：上部構造の重量に比例するものと仮定し、設定した基礎重量定数(0.3)を上部構造の重量に乗じて算出した。
- ・再生資材の使用：コンクリート、鉄、アルミニウム
- ・再生処理：コンクリート、鉄、アルミニウム、銅、木材
- ・各資材毎の総使用量：図4外側枠線内の総和とする。これは改修が想定される部位毎に、改修回数分の資材使用量を単位床面積当たり・各資材毎の総重量に加算したものであり、本システムでは改修が想定される部位に建設時と同量の資材投入が再度行われるとした。

6. 住宅建材構成選択システムの試行

5章で提示した建築資材選択GAシステムを試行した。オペレーションにあたっては明確な指針を設けず、試行は汎用プログラムGENESISの初期設定でおこない(選択：ルーレット方式、交叉：2点交叉、交叉率：0.6、突然変異率：0.001)、試行回数を 5×10^3 回、 10×10^3 回、 20×10^3 回とした時に各評価値の小さくなる資材の構成を求めた。

6-1. 1つの評価指標に限定した試行

第1段階として、CO₂排出量、コスト、廃棄物量の3つの評価指標のうち各1つずつをより小さくする資材構成を求める。

1) CO₂排出量のみを最小化した場合

表3は 1×10^3 回、 3×10^3 回、 5×10^3 回までと、 10×10^3 回、 20×10^3 回の上位5個体の仕様とその評価値を示したものである。試行

表2 壁体厚、再生材使用割合、再生処理割合の変域

壁体厚の変域			窓面積の割合の変域		
	最小厚(m)	最大厚(m)		最小値	最大値
木造躯体	0.03	~ 0.1	窓面積割合	0.103*	1
R C造躯体	0.05	~ 0.25	*建築基準法第28条の「居室の面積の1/7」となる面積をこのモデルの住宅の壁面積の総計で除した値		
S造躯体	0.03	~ 0.1	屋根外装材の変域		
外壁材厚の変域				最小厚(m)	最大厚(m)
	最小厚(m)	最大厚(m)	鉄板	0.0002	~ 0.01
外壁材なし	-	-	アルミ板	0.0002	~ 0.01
製材	0.005	~ 0.05	銅板	0.0002	~ 0.01
合板	0.005	~ 0.05	再生材使用割合の変域		
鉄板	0.002	~ 0.02		最小値	最大値
アルミ板	0.002	~ 0.02	再生粗骨材割合	0	~ 0.5
A L C板	0.01	~ 0.05	高炉セメント割合	0	~ 0.5
タイル	0.005	~ 0.005	電炉鋼割合	0	~ 0.5
モルタル	0.01	~ 0.1	アルミ再生地金割合	0	~ 0.5
外壁、屋根下地材厚の変域			再生処理割合の変域		
	最小厚(m)	最大厚(m)		最小値	最大値
製材	0.005	~ 0.05	木材再生処理割合	0	~ 1
合板	0.005	~ 0.05	燃料用チップ割合	0	~ 1
A L C板	0.01	~ 0.05	鉄再生処理割合	0	~ 0.5
断熱材厚の変域			アルミ再生処理割合	0	~ 0.9
	最小厚(m)	最大厚(m)	銅再生処理割合	0	~ 0.5
ロックウール	0.025	~ 0.1	**各変域を15段階に分けて遺伝子の選択段階とした		

遺伝子の項目	仕様情報										仕様2次情報					再生仕様情報					再生処理情報						
	A	B	B1	B2	C	D	G	G1	G2	H	R	b	b1	b2	c	d	g1	g2	k1	k2	l	m	S	S1	T	U	V
	躯体	躯体	外壁材	外壁 下地	断熱材	窓材	小窓廻	窓廻 外装材	窓廻 下地	床 下地	コンクリ 再生処理	躯体 厚	外装材 厚	外壁 下地	断熱材 厚	窓廻 割合	窓廻 厚	窓廻 下地	再生 割合	高炉 セメント	窓伊草 割合	アルミ 再生地金 割合	木材 再生処理 割合	ボード用 チップ 割合	鉄 再生処理 割合	アルミ 再生処理 割合	銅 再生処理 割合
選択の段階	整数値										小数値																
	0: 木 0: 木 0: なし 0: 製材 0: なし 0: 普通 0: 木 0: 鉄板 0: 製材 0: 製材 0: 粗																										
	1: RC 1: RC 1: 製材 1: 合板 1: ロックウール 1: 横断 1: RC 1: アルミ 1: 合板 1: 合板 1: 下										表2を参照																
	2: S 2: S 2: 合板 2: ALC板 3: 鉄板										各遺伝子とも15段階																
	4: アルミ 5: ALC板 6: タイル 7: モルタル																										
ビット数	2	2	3	2	1	1	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	遺伝子情報数 : 27 ビット数 : 85																										

図3 遺伝子へのコーディング

- ・各遺伝子の選択段階の個数に最も近く、かつ、大きい 2^n となる数値のnをビット数と呼ぶ。
- ・遺伝子b~vまでは15段階の選択肢を持つ(表2参照)ため $15 \times 16 = 2^4$ となるのでビット数は4となる。

各資材毎の総使用量 (kg/m²)

図4 資材毎の総使用量の算出式

表3 CO₂排出量のみの最小化による解

試行回数	躯体	壁体	外壁材	壁下地	断熱材	窓	窓割合	小屋組	屋根外装	屋根下地	評価値
1000	S	木	製材	-	なし	普通	0.103	S	銅	ALC	8.7732
	木	木	製材	-	なし	複層	0.103	木	鉄板	製材	9.0603
	S	木	製材	-	なし	普通	0.103	S	銅	ALC	9.1337
	S	S	タイル	-	なし	普通	0.103	木	鉄板	製材	9.0085
3000	S	木	製材	-	なし	複層	0.103	木	鉄板	製材	6.9796
	S	木	製材	-	なし	複層	0.103	木	鉄板	製材	7.1741
	S	木	製材	-	なし	複層	0.103	木	鉄板	製材	7.0116
	S	木	製材	-	なし	複層	0.103	木	鉄板	製材	7.0774
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	6.9816
5000	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.8652
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.8872
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.8685
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.8652
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.9075
10000	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.7028
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.7028
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.7028
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.7028
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	鉄板	製材	5.7028
20000	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	銅	製材	5.6866
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	銅	製材	5.6866
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	銅	製材	5.6866
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	銅	製材	5.6866
	S	木	製材	-	有り	複層	0.103	木	銅	製材	5.6866

図5 各試行回数におけるCO₂排出量最良解のCO₂排出量に影響する因子

回数を増やすにつれて、評価値が徐々に小さくなっていることが分かる。CO₂排出量を減少させるためには躯体はS造が有効であり、他の部材についても試行回数の小さいうちから選択される資材は限られている。図5は各試行回数における最良解のCO₂排出量を空調によるもの、資材選択によるもの、再生資材利用・再生処理によるものに分割し比較したものである。この図からも、CO₂排出量の大部分を空調によるものが占めていることがわかる。

20 × 10³ 回試行で最終的に得られた解は図6に示すような資材構成の建築物であった。CO₂排出量は5.686 kg-c/m²・年となっている。

図6 20 × 10³ 回試行CO₂排出量最良解における資材構成比

図7は20 × 10³ 回試行で得られた解の3評価値を示したものである。コストが大きくなるのはCO₂排出量を減少させるために再生資材の利用や再生処理をおこなったことが影響したためと考えられる。窓面積が小さいのは、ガラスのCO₂排出原単位が大きいことと、年間空調負荷を小さくすることなどが重なったためであると考えられる。

図7 20×10³回試行CO₂排出量最良解における3評価値比較：S造

2) コストのみを最小化した場合

試行回数を6-1. 1)と同様にしたところ、最小化されたコストは1533.3円/m²・年となった。コスト最小化にはRC躯体が有効となる解が得られた(図8)。各試行回数の上位5個体についてもRC造がコスト減少に有効であるという解が得られた。これは空調負荷を低減させるために資材によるコストがそれほど減少せず、RC造の耐用年数が60年と、木造などに比べ2倍以上と長いため、年当たりの評価値を減少させたためであると考えられる。また、コスト最小化は廃棄物量を増大させることが分かる。これはRC造躯体によるコンクリートの使用が多いためと考えられる。

図8 20×10³回試行コスト最良解における3評価値比較：RC造

3) 廃棄物量のみを最小化した場合

試行回数を6-1. 1)と同様にしたところ、試行回数毎の仕様の差はほとんどなく、アルミ屋根の木造建築物で廃棄物量が小さく(0.206 kg/m²・年)なった。これは、総資材使用量の少ない仕様の中で、壁厚や再生処理の割合の相違だけがこれらの評価値に影響を与えているためである。図9に示すように資材構成の大部分を製材が占めていた。CO₂排出量とコストの値が図7と比べ非常に大きな値となり、逆に廃棄物量は非常に小さな値となっているという相違がある(図10)。これは廃棄物量の少ない組合せを選ぶためには建物の断熱性能が小さくなり、その結果、再生処理によるCO₂排出量とコストが増大したこと、特にコストに関しては再生処理の相違が大きく影響していた。

以上、3つの評価指標の各々についての最小化をおこなう場合、CO₂排出量はS造、コストについてはRC造が有効であり、廃棄物量に関しては木造が有効であることがわかった(図7、図8、図9参照)。各部材の資材選択はそれぞれの評価値について有効な資材が

図9 20×10³回試行廃棄物最良解における資材構成比：木造

図10 20×10³回試行廃棄物最良解における3評価値比較：木造

存在し、適切な使用量と再生処理、再生資材の利用によって、より評価値が小さくなることが分かった。特に廃棄物量を減少させるには再生処理のできる木質系資材が有効であるという解が得られた。評価値の変化の傾向として、空調負荷の小さいときにCO₂排出量とコストが小さくなり、同じ様な断熱性能を示すが、より評価値の小さい解では資材の仕様が異なってくる。また、廃棄物量を最小となる解ではCO₂排出量とコストが大きくなることが明らかとなった。これは建物における総資材使用量が小さい上、断熱材も少なく、年間空調負荷が非常に大きくなったためである。

6-2. 複数の評価指標による多目的問題となる試行

試行の第2段階として3つの評価指標から解を得る多目的問題における試行をおこなう。多目的問題では「パレート最適性(北野宏明著:遺伝的アルゴリズム2:産業図書、1995.5)」を満足するパレート最適解を集合として求めることが効率的かつ適切に多目的意志の決定をおこなう上で重要となる。本論では代表的な多目的最適化手法である制約法に基づいた試行によって得られる解の一例を示す。

具体的には、ある一定の規制値が設けられ、その規制値を越えるものが禁止される状況が建築分野における環境負荷問題においても生じることを想定した。1997年に開催された第3回地球温暖化防止会議(COP3)ではCO₂排出量を2008年から2012年の5年間に6%削減することを目標にしている。そこで、本モデルにおける一般的木造住宅を本モデルで計算させたCO₂排出量(表5、図13参照)の上記の6%(CO₂排出量:12.5kg-C/m²・年)を制限値とし、その規制値を満たす中でコストをより小さくする解を求めたところ、その解はRC造躯体となった。これをもとにCO₂排出量と廃棄物量をそれぞれ10%削減、50%削減した値(CO₂排出量:12.0kg-C/m²・年、廃棄物量:2.6kg/m²・年)を規制値とし、試行をおこなった。試行回数は6-1.と同様、20×10³回とした。

規制値：CO₂排出量 ≤ 12.0 (kg-c/m²・年)

廃棄物量 ≤ 2.6 (kg/m²・年)

このときの結果を表4、図11、12で示す。上記の規制値のもとでは、コスト最小化をおこなった場合の上位の解はS造であり、規制値を厳しくしても、これは変わらない。CO₂排出量と廃棄物量を抑制し、コストを抑えるにはS造が有効であると言える。

図11 解における3評価値比較：S造

表4 解の資材構成表：S造

試行回数	20000	CO ₂ 排出量	5.687 kg-c/m ² ・年	総重量	129.13 kg/m ²
成績	1	コスト	2206.5 円/m ² ・年	最終廃棄物量	3.776 kg/m ² ・年

部位	躯体	躯体	厚 (m)	材料	割合
壁	壁体	厚 (m)	木	0.1	
	外壁	厚 (m)	製材	0.005	
	下地	厚 (m)	-	-	
	断熱材	厚 (m)	有り	0.1	
窓	窓	複層			
	窓面積の割合		0.103		
屋根	小屋組	木			
	屋根外装材	厚 (m)	鋼	0.0002	
	下地	厚 (m)	製材	0.05	
床	下地	製材			

資材名	kg/m ²	構成比
コンクリート	27.86	0.216
製材	48.95	0.379
合板	0	0.000
鋼材	39.2	0.304
鉄筋	1.94	0.015
アルミ	0	0.000
銅	1.84	0.014
モルタル	0	0.000
ALC	0	0.000
陶磁器	0	0.000
ロックウール	4.98	0.039
ガラス	4.36	0.034

コンクリート	再生粗骨材の使用割合	0.5
	高炉セメントの使用割合	0.5
	再生処理	なし
木材	木質ボード用チップ化の割合	0.133
	燃料用チップ化の割合	0.467
鉄	電炉鋼の使用割合	0.5
	再生処理の割合	-
アルミニウム	再生地金の使用割合	-
	再生処理の割合	-
銅	再生処理の割合	-

* 「-」はアルミニウム、同等が資材の中に、選択されなかったためGA試行の結果出てきた数値を無効とした。

図12 解における資材構成比：S造

7. 結論および考察

6章の多目的最適化をおこなった場合の3評価値の三角形に比べ、一般的な木造、RC造、S造等の住宅の3評価値の三角形は、大きなものとなっていた(表5、図13は一般的な木造の独立住宅によるもの)。GAの援用によって3評価値の成績の良い資材構成解が得られたと考えられる。

GAモデルの試行により環境負荷の小さい建築物の資材構成を得ることができたが、逆に得られた資材構成をもとに建築物を組立てることにより、環境負荷が小さい建築物を生み出すことができた。その中には資材構成のこれまでにない組合せのものが含まれる可能性も生まれてくる。

本論では以上のような結果が得られたが、遺伝子情報に与えたデータベース上の最終廃棄物量やコスト等の数値が後掲する文献からしか得られず、本論で挙げる環境負荷やコスト等をより正確に算出するためにはデータ精度の向上がシステムの有効性の確保に不可欠である。在来構法以外にもプレハブ構法を用いた場合の環境負荷等の値を算出するという課題にも取り組んでいく必要がある。以上の

表5 一般的な木造の資材構成表

試行回数	-	CO ₂ 排出量	13.294 kg-c/m ² ・年	総重量	130.2 kg/m ²
成績	-	コスト	3311.9 円/m ² ・年	最終廃棄物量	5.279 kg/m ² ・年

部位	躯体	躯体	厚 (m)	材料	割合
壁	壁体	厚 (m)	木	0.1	
	外壁	厚 (m)	モルタル	0.02	
	下地	厚 (m)	製材	0.01	
	断熱材	厚 (m)	有り	0.05	
窓	窓	普通			
	窓面積の割合		0.25		
屋根	小屋組	木			
	屋根外装材	厚 (m)	鉄板	0.0005	
	下地	厚 (m)	製材	0.01	
床	下地	製材			

資材名	kg/m ²	構成比
コンクリート	26.51	0.204
製材	56.86	0.437
合板	0	0.000
鋼材	14.73	0.113
鉄筋	1.84	0.014
アルミ	0	0.000
銅	0	0.000
モルタル	22.91	0.000
ALC	0	0.000
陶磁器	0	0.000
ロックウール	2.08	0.016
ガラス	5.27	0.040

コンクリート	再生粗骨材の使用割合	0
	高炉セメントの使用割合	0.1
	再生処理	粗
木材	木質ボード用チップ化の割合	0
	燃料用チップ化の割合	0.3
鉄	電炉鋼の使用割合	0.1
	再生処理の割合	0.1
アルミニウム	再生地金の使用割合	-
	再生処理の割合	-
銅	再生処理の割合	-

図13 一般的な木造の住宅における3評価値の比較

課題に順次取組み、本論で提案した建築資材選択システムを精緻化していくことによって、とかく抽象議論に陥りやすい環境問題の中で、具体的な設計解を得ることが期待される。

本論 4 章の分析にあたり京都大学大学院工学研究科教授 鉾井修一氏、同修上課程 前田健蔵氏には大変貴重な助言を頂きました。記して謝意を表します。

本研究は平成 9 年度文部省科学研究費補助金（萌芽的研究費）によった。

注

注 1) データベースには、現在各分野で行われている研究の多くがその分析の際採用している、文献 21 の 4 章 (p100-122)、日本建築学会による CO2 原単位分析データ (1985 年値) を基本とした。CO2 排出量原単位の境界条件は、消費支出分の国内排出量分 CO2 原単位 (文献 21、4 章 4.1、p101-105) とした。文献 21、4.1 に記述されていない工事別 CO2 原単位は文献 21 の p.60 表 II.2.11 の事務所の例の平均値によって代用した。更に不足となるもの、再生資材等の CO2 原単位に関しては文献 22～30 より補っている。再生資材のコストのデータのうち、モルタル、転炉鋼、電炉鋼、アルミ新地金、アルミ再生地金については各々、60、85、100、716.5、1000 (円/kg) と任意に設定した。

参考文献

- 1) 石塚義高「第一報 建築物のライフサイクルコスト算定方法の開発 建築物のライフサイクルコスト算定に関する研究」、日本建築学会計画系論文報告集 第 356 号、pp63-67、1985.10
- 2) 玄昌澤他「AHP および LCC 概念を利用した最適案選定システムの開発—設備システムの選定を中心に—」日本建築学会計画系論文集 第 469 号、p149-156、1995.3
- 3) 高草木明「賃貸事務所建物経営の収支計画に対応したライフサイクルコストに関する研究」日本建築学会計画系論文集 第 496 号、p145-152、1997.6
- 4) 飯塚裕他「計画修繕のための適正な修繕周期」日本建築学会論文報告集、第 147 号 p53-59、1968.5
- 5) 石塚義高「第一報 標準建築修繕費算出方法 標準建築修繕費算出に関する研究」、日本建築学会論文報告集、第 335 号 p105-110、1984.1
- 6) 石塚義高「第二報 建築規模による修繕費の変化 標準建築修繕費算出に関する研究」、日本建築学会計画系論文報告集、第 348 号 p53-58、1985.2
- 7) 古阪秀三「維持保全計画の計量的方法に関する研究」、日本建築学会計画系論文報告集、第 368 号 p147-156、1986.10
- 8) 村上公哉他「建物の保全費用からみた物理的要因の機能劣化に関する研究」、日本建築学会計画系論文報告集、第 418 号 p115-124、1990.12
- 9) 酒井寛二他「建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究」日本建築学会計画系論文集 第 484 号、p105-112、1996.6
- 10) 岡建雄「産業連関表による建築物の評価その 1、省エネルギービルと一般事務所ビルの比較」、日本建築学会計画系論文報告集、第 359 号、p17-23、1986.1
- 11) 竹林芳久「産業連関表による建築物の評価 その 2、事務所建築建設による環境への影響」、日本建築学会計画系論文報告集 第 431 号 p31-38、1992.1
- 12) 鈴木道哉他「産業連関表による建築物の評価その 4、事務所ビルの建設・運用に関わるエネルギー消費量、二酸化炭素排出量」日本建築学会計画系論文集、第 476 号 p 37-43、1995.10
- 13) 鈴木道哉「産業連関表による建築物の評価 その 3、住宅建設によるエネルギー消費量、二酸化炭素排出量」、日本建築学会計画系論文報告集 第 463 号 pp75-82、1994.9
- 14) 酒井寛二「建築が地球環境に与える影響—建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定—」1992.6 (社) 日本建築学会、建築と地球環境特別研究委員会
- 15) 有馬孝礼「建築が地球環境に与える影響—住宅への資源、エネルギー投入による CO2 放出と木材による炭素 C ストック—」1992.6 (社) 日本建築学会、建築と地球環境特別研究委員会
- 16) 紅谷裕他「住宅発生副産物の発生量等に関する調査・研究 その 3」日本建築学会論文報告集、第 474 号、1995.8
- 17) 高野俊吾他「環境負荷低減を評価基準とした住宅建材の構成選択システムへの GA 適用の研究」、1998 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)、環境工学 I pp889-890

18) 弥田俊男他「環境負荷低減を評価基準とした住宅建材の構成選択システムへの GA 適用の研究」、日本建築学会 第 21 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、pp391-396、1998 年

空調計算式は以下の文献を参照

19) 前田健蔵「環境負荷とコストを評価尺度とする住宅の多目的最適設計」、1998 年度 京都大学建築学科卒業論文

20) 省エネルギーハンドブック' 93: 監修/建設省住宅局住宅生産課、住宅局建築指導課他、1992.12

データベースに引用した数値は下記の文献を参照

- 21) ライフサイクル CO2 で建物を測る：日本建築学会、地球環境委員会、ライフサイクル小委員会、1996.2
- 22) 建築設計資料集成 1 環境：日本建築学会、丸善、1978.6
- 23) 建築のライフサイクルエネルギー算出プログラムマニュアル、建築研究資料 No.91：建設省建築研究所、小玉祐一郎他、1997.12
- 24) 積算資料 1998-2：(財) 経済調査会、1998.2
- 25) 新建築学大系 49、維持管理：彰国社、1983.1
- 26) 建築が地球環境に与える影響：日本建築学会、建築と地球環境特別研究委員会、1992.6
- 27) 増補版 建築設計資料集成 設備計画編：日本建築学会、丸善、1977.11
- 28) 漆崎昇他：「建設資材製造時の炭素排出量原単位調査（電力、セメント、アルミニウム、鉄鋼）」：日本建築学会大会学術講演梗概集、1993.9
- 29) 野城智也他：「アルミサッシに関わる資源消費・環境負荷に関する考察」：日本建築学会大会学術講演梗概集、1994.9
- 30) 建築・地球環境・地球環境の在り方：日本建築学会、日本建築学会地球環境特別研究委員会、1995.3

(1998 年 11 月 13 日原稿受理、1999 年 5 月 24 日採用決定)