

環境負荷低減を目指した住宅建材選択システムの開発と適用研究 —GAを用いた多目的最適化の研究—

主査 宗本 順三*¹

委員 銚井 修一*¹, 毛谷村英治*², 吉田 哲*³, 大影 佳史*³, 柳澤 孝次*⁴

本研究は遺伝的アルゴリズムを採用して、環境負荷の低減を目指した建築資材と工法選択のシステムを開発し、標準問題の住宅モデルに適用することを目的としている。ライフサイクルを通じてのCO₂排出量、廃棄物量にコストを含めた3つの評価値を最小化する建築資材と工法の組み合わせの探索を行った。試行によって得られた資材と工法の組み合わせの「一般的な住宅」との比較により、システムの有効性を示している。また、3つの評価値すべてを同時に低減させる建築資材と工法の組み合わせを見いだした。

キーワード：1) 遺伝的アルゴリズム, 2) 建築資材, 3) 工法, 独立住宅, 4) CO₂排出量, 5) 最終廃棄物量, 6) コスト

A STUDY ON DEVELOPMENT AND APPLICATION TO SYSTEM SELECTING BUILDING MATERIALS FOR DECREASE IN ENVIRONMENTAL LOADS

—A study on the multi-objective optimization with genetic algorithms—

Ch. Junzo Munemoto

Mem. Shuichi Hokoi, Eiji Keyamura, Tetsu Yoshida, Yoshifumi Okage and Koji Yanagisawa.

In this study, we propose the system which select a combination of building materials and construction methods to reduce environmental loads with using GA (genetic algorithms). We apply the system to the standard building model, and search combinations of building materials and construction methods to minimize each value (CO₂ exhaust, final waste and cost) through life cycle. So combinations found by the system have less value than "typical combination model". This shows the system is effective to reduce each value. And the combination is found that has less three values at the same time.

1. 研究の背景と目的

地球環境への負荷低減を目指した取組は現在、あらゆる分野でなされており、産業マクロ的な視点から低減目標を示す産業システムのモデルや、建築の分野においては施工法における環境負荷低減方法の取組などさまざまなスケールと生産段階に応じた方法やそのモデルが考えられる。本研究では、人間居住の基本的な生活空間である住宅を対象として、独立住宅の個別的最適化が建築に伴う環境負荷低減に資するという視点から、独立住宅における建築資材の選択システムの開発とそれらを用いた環境負荷を軽減する「独立住宅の建材の組み合わせ」を得る方法の研究を行った。従来、環境負荷低減の研究は、建築が完成した後のランニング時における環境負荷や省エネルギーに関する研究が多い。これは事務所建築などのランニング時における空調・照明エネルギーの比率が非常に大きいこと、またエネルギーの消費による化石燃料の消費を減らすことに重点が置かれてきたためである。しかし住宅建築にあっては事務所建築に比べて初

期建設時に占めるエネルギー消費量が相対的に大きいことと現在の環境負荷低減問題はランニング時における化石燃料の消費低減にとどまらない複雑な関係を内包していることから、工法や建材選択問題などの建築の造り方から検討することが重要になってくる。

次に、建築が完成してから、あるいは設計が完了してからでは化石燃料の消費や熱帯雨林の破壊への配慮に処する方法は極めて限定される。そこで建築の企画段階から設計段階における建築のライフサイクルを見通した環境への配慮、つまり、環境負荷低減を目指した建築システムとその建築システムを決定する設計行為は重要な意味を持つと言える。本研究は、建築の生産段階の最も初期段階である企画段階において、建築のライフサイクルを通して環境負荷を最小にする建築資材や躯体工法の選択法の提案を行うことを目的としている。このような初期段階でのさまざまなモデルを用いた予測方法やシステムを構築して具体的な建築の計画条件を決定してゆくことは、後の設計段階、施行段階、完成後の維持管理や解

*¹ 京都大学大学院工学研究科 教授

*² 宮城大学事業構想学部デザイン情報学科 助教授

*³ 京都大学大学院工学研究科 助手

*⁴ 大成建設株式会社技術本部開発第1部 部長

体除去のすべての段階で環境負荷を軽減させる上で最も重要な位置を占めると言える。

本研究は、独立住宅の企画段階から設計段階、施工段階、完成後の維持管理や運用、解体除去のすべての段階、つまり建物のライフサイクルをシステムとしてとらえる。すべての段階を通してCO₂排出量（LCCO₂）と最終廃棄物量を環境への負荷ととらえ、さらに住宅建築を成立させる基盤としてコスト（LCC）を評価尺度とする。これらの最小化に向け、知識技術を用いた建築資材選択の最適解を得る計画法とその適用性についての研究を行う。この場合、建築資材選択は非常に多様な解の候補を持ち、また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築資材選択は、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ることが望まれる。本研究では十分に踏み込むにいたらなかったが、パレート解と対話型満足化手法について多目的解を求める手法への取組として制約法による多目的問題の解を求めた。

2. 研究の方法

モデル化された住宅建築の建築資材のデータベース作成を行い、それらのデータベースを用いてLCCO₂、LCC、最終廃棄物量を算出することにより、一元化された尺度で評価する方法をとる。次にこれらの評価値（LCC、LCCO₂、最終廃棄物量）の最小化に、最適解の探索や多目的問題への有用性が裏づけられている遺伝的アルゴリズム（genetic algorithms, 以下GA）を用いて「建築資材と工法選択GAシステム」として提案する。建築資材と工法の選択の試行によってLCC、LCCO₂や最終廃棄物量の最小化された独立住宅を提示する。これらは「次世代省エネルギー基準」を満たすモデルより優れた解（建材と工法の組み合わせ）を見いだす。

3. 既往研究の中での位置づけ

本研究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がある。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²¹⁾。玄ほかはAHPを用いて設備システムのLCC分析を行う最適案選定システムを開発している²²⁾。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²³⁾。

LCCO₂に関する研究では、酒井ほかが標準使用型、

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²⁴⁾。

岡ほか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等排出量の関係を明らかにしている。事務所ビルの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を省エネルギービルと比較した²⁵⁾。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、単位面積当たりの必要資源量、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²⁶⁾。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含めて連関分析手法を用いて解析・定量化している²⁷⁾。住宅については、各構造別にエネルギー消費量とCO₂排出量を算出し、単位面積当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い原因を構造工事によるものであることを明らかにした²⁸⁾。

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、建築構造ごと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行い、建設資材としての木材の有用性を説いている²⁹⁾。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³⁰⁾。

廃棄物発生量については、紅谷ほかは構法別・用途別廃棄物量原単位の整備を行っている³¹⁾。

以上のようにLCC、LCCO₂、廃棄物量などを個々に算出して、その効果的な削減を模索する研究は数多いが、本研究はこれらの仮定条件を変数としてGAを用いて環境負荷やコストが十分小さい解や最小解に近い資材選択の組み合わせを行うものである。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、筆者らの研究^{21), 13), 14)}を除いて行われていない。

4. 住宅モデルとその環境条件

4.1 モデルの条件

独立住宅は建築全体に占める割合が最も高く、一般的にその立地環境や規模、平面、形状や性能、仕様等多様である。本研究では、建材や工法の選択を行うことで環境負荷低減に対して最適な組み合わせ（最適解）や優秀な組み合わせを見つけることを目的としているために、立地環境や耐久性等の条件は仮定し、簡略化したモデル住宅を使用する。ここでは建設地は東京とし、東京における外気温や日射などの気象条件を使用した。また、資

材・部材の工場からの輸送距離は100km, 建築廃材の廃棄物処理場までの輸送距離を50kmと設定した。

次に, 独立住宅の規模, 形状については宇田川によって提案された標準問題の建物モデル(図4-1, 表4-1)を用いた^{文29)}。このモデルは夫婦+子供2人の4人家族が住むことを想定した120m²程度の独立住宅である。構造形式は, 在来工法の木造, 鉄骨造, 鉄筋コンクリート造のほかに, 枠組壁式工法(2×4木造), 構造用断熱パネル工法(高断熱高気密木造), 壁式プレキャストコンクリート工法(壁式PC造)として在来工法と工業化工法の比較を行えるようにした。在来工法と工業化工法の上記の計6工法によって標準問題の建物モデルの部材構成と同等のものを「一般的な住宅」とする。また, 生活する人のライフスタイルによって空調条件は大きく異なると思われるが, ここでは12時間全室空調とする。

4.2 建物の部位と部材の構成モデル

本研究では, 「建築物は各部材ごとに資材選択が行われた総体である」という考えに基づきモデル化を行っている。建物モデルは主体構造部分である躯体と各部位に分解される。部位は壁, 屋根, 床, 天井であり, さらに壁は開口部を有する。各部位は構造的部材と仕上部材へと分解することができ, 各部位の骨組となる構造的部材が主体構造部分と接続されることで部位が統合され建築個体として成立する(図4-2)。部材における建材の組み合わせは多種多様であり, また環境負荷の観点から適切な組み合わせが存在すると考えられる。そのような観点から各仕上部材を外装材, 内装材のほか, 下地材及び

断熱材に分解する。壁式構造は主体構造部分である躯体と壁の構造的部材である壁体が一体化したものと考える。また, より多様な建材と工法の組み合わせを得るために1階, 2階は別のものとして考えて分解する。さらに, 設備, 階段等ほどのケースにおいても必要であり, 同じであると考えてモデルでは省略した。

5. システムの概要

以下に建材, 工法の組み合わせとそれぞれの評価値を算出するシステムの概要を示す。まず, モデルに対応したデータベースと躯体の選択, 仕上の選択, 再生処理法, 評価, さらにGAによる最適値(最小値)の探索から構成されている。

A) 各データベースの作成

作成するデータベースは下記の4種類で, CO₂発生量, 廃棄物量とコストについて現時点で得られる値を用いて作成する。データベースの作成方法, 作成に用いたデータについては6章で述べる。

- ・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
- ・資材の再利用についてのデータベース

B) 躯体の選択

在来工法の木造(在来木造), 鉄骨造(S造), 鉄筋コンクリート造(RC造)のほかに, 工業化工法として枠組壁式工法(2×4木造), 構造用断熱パネル工法(高断熱高気密木造, 以下断熱木造), 壁式プレキャストコンクリート工法(壁式PC造)6種類から選択される。

表4-1 標準問題の各室床面積

	室名	床面積 (m ²)
1F	DL	20.49
	K	7.23
	和室	13.25
	その他	21.96
	小計	62.93
2F	MB	20.49
	CB1	11.59
	CB2	11.59
	予備室	10.14
	その他	9.12
	小計	62.93
延床面積		125.86

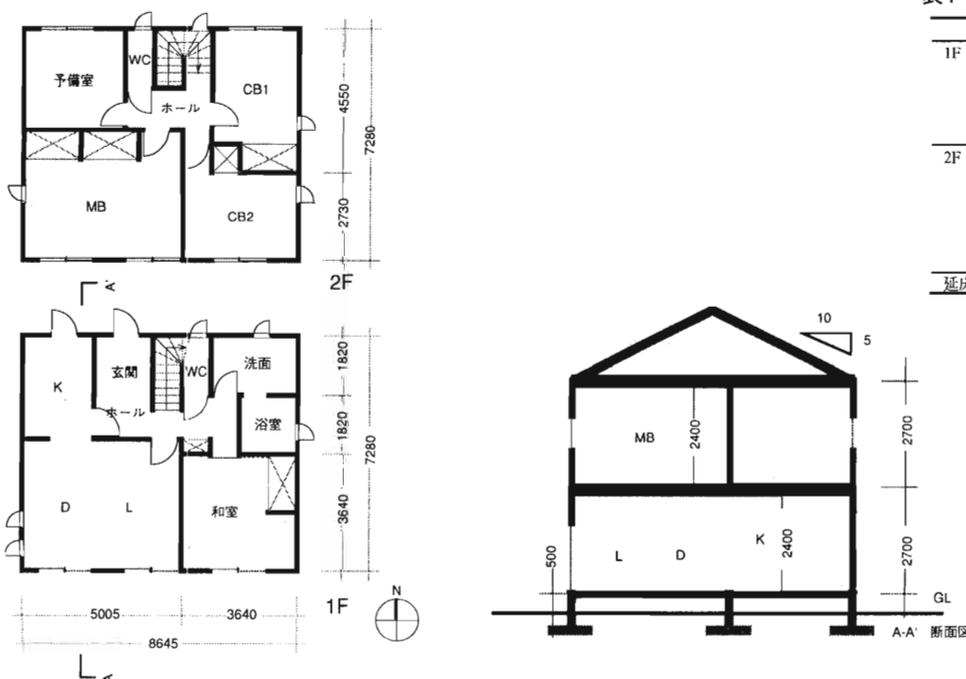


図4-1 標準問題の建物モデル

選択に伴い躯体データベースが参照される。

C) 部位別の仕上の選択

壁、屋根、床、天井について各々仕上の選択が行われる。選択に伴い部位別の仕上データベースが参照される。

D) 再生処理法の選択

解体材に対し、資材別に再生処理方法の選択が行われる。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。

E) 評価

以上の選択によって、CO₂排出量、廃棄物量とコストが単位床面積・年当たりで算出される。GAを用いた建築資材と工法の選択の試行によって、評価値（LCC, LCCO₂, 最終廃棄物量）を個別に最小化する建材と工法の組み合わせや、同時に最小化する建材と工法の組み合わせを得る。

6. データベースの作成

建築物のライフサイクルにおいては、建材や部材の製造、建材輸送、現場における施工、運用、維持保全、解体廃棄の各建築活動において、エネルギーが消費されCO₂が放出されるなど、さまざまな現象が環境負荷の要因となる。ここでは対象モデルについて、建築物のライフサイクルにわたる環境負荷及びコストに関するデータの作成を行う。

LCA研究において信頼できるデータを用いることは非常に重要である。本システムにおけるデータのすべてが信頼性の高いものばかりではないが、現在入手が可能で

信頼性の高いデータによりデータベースの作成を行った。より正確なインベントリデータが作成され次第、入れ替えて予測精度の向上を図ることが重要である。

6.1 資材データベース

資材データベースとして次の3つの項目についてデータの作成を行った（表6-1）。

[資材製造時CO ₂ 排出量]	(kg-c/kg)
[資材コスト]	(円/kg)
[積載効率]	(kg/kg)

[資材製造時CO₂排出量], [資材コスト]には日本建築学会による1990年産業連関表の逆行列を利用して作成されたCO₂排出量原単位及び購入単価を使用し、不足データに関してはそのほかの既往研究で得られた値を使用した。

[積載効率]は建設廃棄物の搬出においてトラックの定格積載重量に対して実質的に積載できる割合であり、資材の密度によって「0.4」「0.6」「0.8」「1.0」の4段階から決定した。

また、一部の資材の使用において再生資材の使用を考慮する。再生資材としては、コンクリート、鉄、アルミニウムの3資材が使用されるものとした。再生資材にはCO₂排出量、コストを同時に低減するものと、どちらか一方を低減するものの他方を増加させるものがある。本システムにおいては、評価する項目に対して適切な再生資材割合が決定されるが、再生資材の使用割合の変域を表6-2のように設定した。

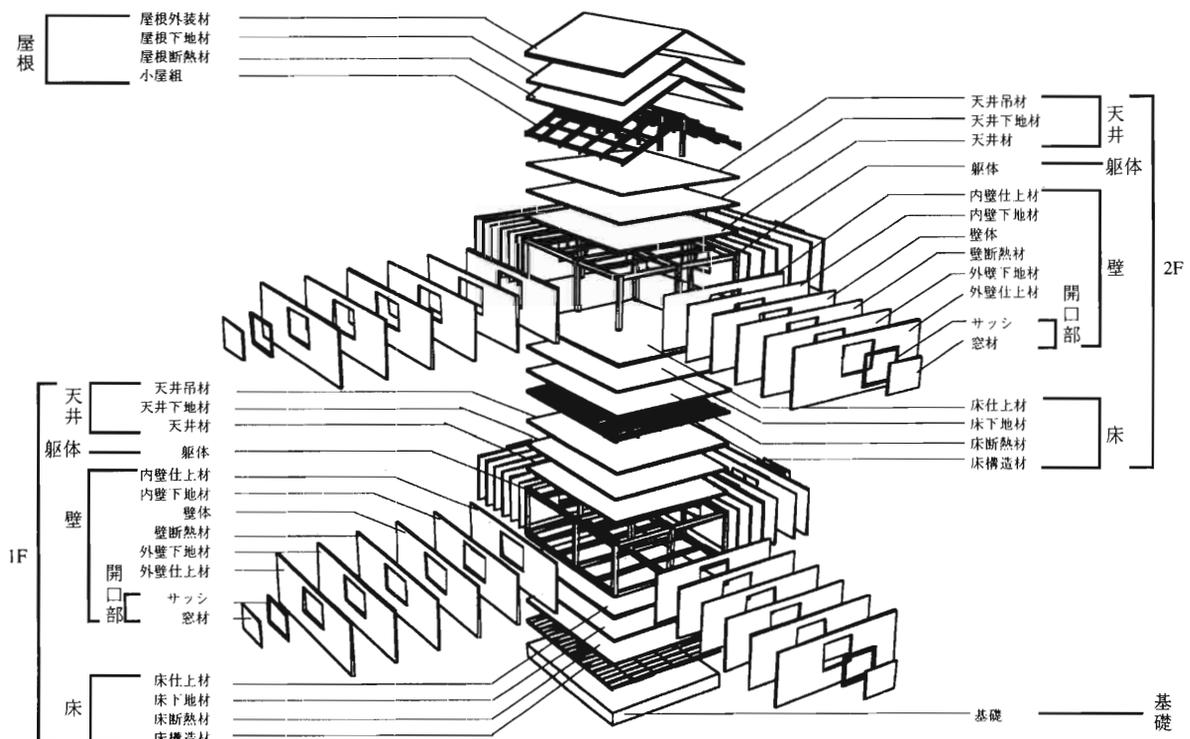


図4-2 部位と部材の構成

表6-1 資材データベース

資材名	CO2排出量 (kg-c/kg)	資材コスト (円/ka)	積載効率 (kg/kg)
コンクリート	0.031 a	6.8 a	1.0
製材	0.056 a	152.3 a	0.8
合板	0.162 a	287.0 a	0.8
鋼材	0.270 a	71.1 a	1.0
鉄筋	0.241 a	61.3 a	1.0
アルミニウム	0.376 a	606.3 a	1.0
銅	0.362 a	413.9 a	1.0
モルタル	0.085 b,c	60.0 -	1.0
ALC板	0.106 b,c	100.0 f	0.8
陶磁器	0.218 a	266.4 a	0.8
プラスチック	0.577 a	613.4 a	0.8
発泡ポリスチレン	0.604 a	657.0 a	0.4
ロックウール	0.049 a	24.4 a	0.4
ガラス	0.200 a	203.9 a	0.8
瓦	0.050 b,c	163.0 f	0.8
毛織物	0.169 g	6.3 f	0.4
紙板	0.409 a	108.8 a	0.4
石膏	0.003 a	2.4 a	0.8
石材	0.0003 b,c	1.5 -	1.0
石綿	2.620 a	1255.4 a	0.8
コンクリート			
砂利・探石	0.002 a	1.7 a	1.0
碎石	0.002 a	1.5 a	1.0
再生粗骨材	0.002 -	2.0 -	1.0
セメント	0.223 a	13.7 a	1.0
高炉セメント	0.138 b,d	9.3 f	1.0
鉄			
転炉鋼	0.277 a	42.1 a	1.0
電炉鋼	0.151 a	58.4 a	1.0
アルミニウム			
アルミ新地金	0.52 e	716.5 -	1.0
アルミ再生地金	0.141 e	1000 -	1.0

a 建物のLCA指針(1990年産業連関表 国内消費支出) (文献27)
 b 建築地球環境・建築地球環境のあり方 (文献26)
 c 建築研究所 (文献19)
 d 漆崎他 (文献24)
 e 野城他 (文献25)
 f 積算ポケット手帳 (文献20)
 g 建築が地球環境に与える影響 (文献22)
 - 任意に設定

表6-2 再生資材の使用割合の変域

	最小値	～	最大値
再生粗骨材割合	0	～	0.5
高炉セメント割合	0	～	0.5
電炉鋼割合	0	～	0.5
アルミ再生地金割合	0	～	0.5

6.2 躯体データベース

本システムでは在来工法と工業化工法の比較を行えるように前述の6種類の躯体について躯体データベースを作成した。

躯体データベースは以下の9項目について作成した。

[資材別使用量]	(kg/m ²)
[部材製造コスト]	(円/kg)
[部材製造時CO ₂ 排出量]	(kg-c/kg)
[建設コスト]	(円/m ²)
[建設時CO ₂ 排出量]	(kg-c/m ²)
[建設時廃棄物量]	(kg/m ²)
[耐用年数]	(年)
[積載効率]	(kg/kg)
[断熱性能]	(m ² hdeg/kcal)

[資材別使用量] は検討対象モデルに対して標準的であると考えられる躯体の仕様を想定し各資材ごとの使用量を単位床面積当たりの重量としてデータとした。

[部材製造コスト], [部材製造時CO₂排出量] は工場

における部材の組立・加工コスト, CO₂排出量であり, 部材の加工, 組立を建設現場ではなく工場で行うものとして単位重量当たりの値を算出した。

[建設コスト], [建設時CO₂排出量] は建設現場における労務, 機械使用によるコスト, CO₂排出量であり単位床面積当たりについて算出した。[建設コスト] は躯体建設時の主として労務によるものであり, 標準歩掛を用いて算出した。建設時を通してのCO₂排出量は主として躯体建設時の機械使用によるものとし, [建設時CO₂排出量] は躯体の選択に伴い決定されるものとした。

[建設時廃棄物量] は建設時における建設副資材の発生を想定したもので, 単位床面積当たりの資材使用量で算出した。

[耐用年数] は木造24年, S造30年, RC造60年とし, 建築物の寿命を決定するものとした。

[積載効率] は資材運搬における積載効率で, 「0.4」「0.6」「0.8」「1.0」の4段階とし, 部材の密度によって設定した。工業化された部材に関しては一律0.6 (kg/kg) とした。

[断熱性能] は壁式構造となる2×4木造, 断熱木造, PC造の3種類の躯体についてのみ作成し, 在来木造, S造, RC造は0 (m² hdeg/kcal) とした。

6.3 仕上データベース

仕上データベースは, 躯体のデータベース項目から[建設時CO₂排出量]を除く8項目とする。

各部位の部材についてそれぞれ仕上データベースを作成する。各項目とも躯体データベースと同様に定義されるが, 壁体など部材厚についても選択する部材に関しては単位体積当たりで算出する。

各部位は構造的部材と仕上部材に分解でき, さらに仕上部材は外装材, 下地材, 内装材, 断熱材に分解する。建材は強度, 防水, 耐火, 遮音といった性能を持っている。本研究では強度等の性能は評価対象としないが, 各部材において必要な性能を満たす建材についてデータを作成する。外装材, 内装材, 下地材の各々について, データを作成する建材を以下に示す。

外装材は, 屋根, 壁で使用される。各々の部位において使用可能な外装材の種類と設定した厚さの変域を表6-3.1に示す。

内装材は, 天井, 壁, 床で使用される。各々使用可能な内装材の種類と設定した厚さの変域を表6-3.2に示す。

下地材は, 屋根, 天井, 壁, 床で使用される。下地材は骨組み下地と面下地に分けられるが建材としては8種類とする。同様にそれぞれ使用可能な下地材の種類と厚さの変域を表6-3.3に示す。

断熱材は断熱材なし, ロックウール, 発泡ポリスチレンの3種類とする。断熱材は外部に面した壁, 屋根, 床

表6-3 使用する建材と適用部位における部材厚の変域

表6-3.1 外装材

	屋根		壁	
	最小厚(m) ~ 最大厚(m)	最小厚(m) ~ 最大厚(m)	最小厚(m) ~ 最大厚(m)	最小厚(m) ~ 最大厚(m)
なし	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0
製材	----	----	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05
合板	----	----	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05
鉄板	平葺	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005
	波形葺	0.0005 ~ 0.005		
アルミ板	平葺	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005
	波形葺	0.0005 ~ 0.005		
銅板	平葺	0.0003 ~ 0.005	----	----
	波形葺	0.0005 ~ 0.005		
ALC板	----	----	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2
セメント板	平葺	0.005 ~ 0.01	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05
	波形葺	0.005 ~ 0.01		
プラスチックボード	----	----	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025
プラスチック板	平葺	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005
	波形葺	0.001 ~ 0.005		
モルタル	----	----	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03
瓦	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03
タイル	----	----	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05
石材	----	----	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05

表6-3.2 内装材

	天井		壁		床	
	最小厚(m) ~ 最大厚(m)					
なし	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0
製材	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05
合板	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05
アルミ板	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005	0.0003 ~ 0.005
プラスチックボード	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025
プラスチック板	----	----	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005
モルタル	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03
プラスチック	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03
タイル	----	----	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05
石材	----	----	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05
ロックウール	0.002 ~ 0.02	0.002 ~ 0.02	0.002 ~ 0.02	0.002 ~ 0.02	0.002 ~ 0.02	0.002 ~ 0.02
クロス	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005	0.001 ~ 0.005
毛織物	----	----	----	----	0.002 ~ 0.02	0.002 ~ 0.02
畳	----	----	----	----	0.02 ~ 0.05	0.02 ~ 0.05

表6-3.4 断熱材

	屋根		壁		床	
	最小厚(m) ~ 最大厚(m)					
なし	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0	0 ~ 0
ロックウール	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15
発泡ポリスチレン	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15	0.025 ~ 0.15

表6-3.3 下地材

	屋根		天井		壁		床	
	最小厚(m) ~ 最大厚(m)							
製材	骨組下地	----	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05
	面下地	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05
合板	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	
鋼材	----	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	
木質板	----	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	0.005 ~ 0.05	
ALC板	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.2	
セメント板	----	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	
プラスチックボード	----	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	0.01 ~ 0.025	
モルタル	----	----	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	0.005 ~ 0.03	

表6-3.5 窓面積割合

窓面積割合	最小値	最大値
窓面積割合	0.105	1

建築基準法第28条の「居住面積の1/7」となる面積をこのモデルの外壁面積の総計で除した値

で使用されるものとした(表6-3.4)。

開口部に関しては窓のみについて扱い、窓仕様とサッシについて建材選択を行う。窓仕様は普通ガラス(6mm)、複層ガラス(18mm)の2種類、サッシは製材、鋼材、アルミニウムの3種類とする。また、外壁面積に占める窓面積の割合を窓面積割合として、変域を最大値1.0~最小値0.105とした(表6-3.5)。

6.4 再生処理データベース

解体材の再生処理方法は各資材ごとに大きく異なるため、再生処理の問題は資材ごとに分別して扱う。再生処理方法は資材ごとにも手法ごとにも異なるが、基本的な再生処理方法のデータベースとして以下の4項目のデータを各資材の各処理方法について整備する。

[再生処理時CO ₂ 排出量]	(kg-c/kg)
[再生処理コスト]	(円/kg)
[再生材の収率]	(kg/kg)
[再生材の売値価格]	(円/kg)

再生処理を行う資材はコンクリート、木材、鉄、銅、アルミニウムの5種類とした。それぞれの再生処理割合の変域を表6-4に示す。

7. ライフサイクルにわたる評価値の算出方法

以上作成したデータベースを用いてモデルのライフサイクルについての評価を行う。評価値はCO₂排出量、最

表6-4 再生処理割合の変域

	最小値	最大値
木材再生処理割合	0	1
燃料用チップ割合	0	1
鉄再生処理割合	0	0.5
アルミ再生処理割合	0	0.9
銅再生処理割合	0	0.9

終廃棄物量、コストの3項目であり、単位床面積・年当たりで算出される。

建築物のライフサイクルは設計に始まり、建設、運用、廃棄処分にいたる各段階に分けられるが、本システムでは建設から廃棄処分までを建築物のライフサイクルとして扱い評価を行う。さらに建築物のライフサイクルを資材製造、部材製造、施工、運用、改修、再生処理、廃棄処分の7過程とし、資材の搬入と廃棄処分場への輸送についても考慮を行った。本システムのライフサイクルにおける評価値算出方法の概略を以下に述べる(図7-1)。

【資材製造過程】 資材製造に伴うCO₂排出量、コストについては、資材別使用量に資材データベースで作成した資材CO₂排出量、資材コストを乗じて算出する。

【部材製造過程】 工場での加工組立によるCO₂排出量、コストを算出する。躯体、壁体について作成された部材製造時CO₂排出量、部材製造時コストに資材重量を乗じて算出する。部材の加工組立を工場で行う工業化工場、在来S造についてのみ算出する。

【施工過程】 施工現場における労務及び機械使用によるCO₂排出量、コスト及び建設時廃棄物量を算出する。

CO₂排出量は主として躯体建設時の機械使用によるもので決まるとして、躯体について作成した建設時CO₂排出量に床面積を乗じることにより求める。コスト、廃棄物量は各部材のデータベースの建設コスト、建設時廃棄物量に床面積または部材面積を乗じて算出する。

【運用過程】 空調運転によるCO₂排出量、コストを算出する。選択された資材の断熱性能によって算出されるモデルの空調運転によるエネルギー使用量に、電力CO₂原単位、電力コストを乗ずることで算出する。エネルギー使用量は(文献16)に準じて算出する。

【改修過程】 耐用年数に達した仕上部材に関して改修を行う。改修される部材は改修以前と同じ仕様で改修されるものとする。また、改修時のCO₂排出量、コスト、廃棄物量は建設時と同様の値を用いて算出する。

【再生処理過程】 再生処理によるCO₂排出量、コストを算出する。また、再生処理による減少廃棄物量も算出する。再生処理によるCO₂排出量、コストは資材や手法により異なるが、基本的には資材別再生処理量に処理時CO₂排出量、処理コストを乗じて算出する。さらに、再生処理した資材は再利用されるものとして、コストから売値分を除く。

【廃棄処分過程】 廃棄処分によるCO₂排出量、コスト、最終廃棄物量を算出する。すべての過程で使用された資材、副資材の総量から再生処理利用される資材量を除いた総量が最終廃棄物量となる。CO₂排出量、コストは最終廃棄物量に廃棄処分CO₂排出量、廃棄処分コストを乗じて算出する。

【輸送過程】 建設現場までの資材搬入と廃棄処分場への輸送によるCO₂排出量、コストを算出する。資材搬入によるCO₂排出量、コストは部材重量に部材ごとに設定した積載効率を乗じ、輸送距離と輸送CO₂排出量、輸送コストを乗ずることで算出する。廃棄処分場へは資材に分解されて輸送されるものとして、資材重量に資材ごとに設定した輸送効率を乗じ、輸送距離と輸送CO₂排出量、輸送コストを乗じて算出する。

8. 住宅モデルのコード化

本研究ではGAを用いて環境負荷に対して有効な建材と工法の組み合わせの発見を目指す。

建築物を各部材に分解し、各部材を遺伝子情報化することで染色体として表現する。各部材は建材の選択とともに仕様2次情報によって部材厚、窓面積割合が決定される。染色体は各部位の仕様情報、部材厚等の仕様2次情報、再利用情報を表す遺伝子の配列からなり、遺伝子情報数は73、ビット数は211(表8-1)となる。部材厚、窓面積割合、再生資材使用割合、再生処理割合の変域は6章で設定した変域を8段階に分けて選択を行った。

建築物はGAの試行によって生成された染色体により

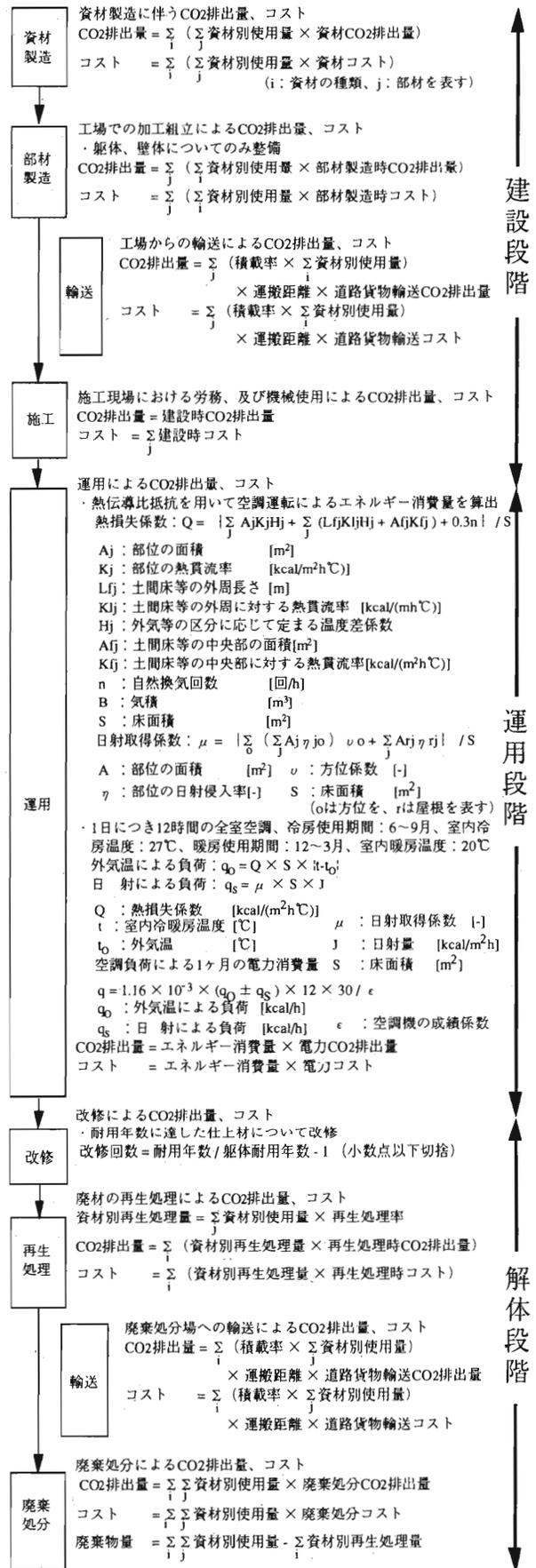


図7-1 ライフサイクルを通じた評価値算出過程

る建材構成を求める。50×10⁵ 試行によって得られた解の3評価値とそのときの資材構成比を図9-2に示す。

1) CO₂ 排出量を最小化した場合 (図9-2.1)

躯体は試行回数の少ないうちから1階PC造, 2階2×4木造となっており, 他の部材についても試行回数の少ないうちから選択される資材は限られている。特に屋根, 床, 開口部の各仕様は3×10⁵回には決定されている。

CO₂ 排出量は2.103kg-c/m²・年となっている。図9-2.1には「一般的な在来木造住宅」と20×10⁵回試行で得られた解の3評価値を同時に示している。CO₂ 排出量を最小化する場合, コストも同様に小さくなるが, 廃棄物量は逆に非常に大きくなった。これは空調によるエネルギー消費量の削減とエネルギー消費の小さい資材が選択されている一方, 再生処理を行わなかったものが選択されてCO₂ 排出量が減少したと考えられる。

2) コストを最小化した場合 (図9-2.2)

最小化されたコストは1,292円/m²・年となった。コスト最小化にはRC躯体に鉄骨下地による壁体が有効となる解が得られた。各試行回数の最良解についてもRC

造がコスト減少に有効であるという解が得られた。これは耐用年数の長い躯体に施工コストの小さいS造部材が組み合わされた結果である。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。これはコンクリートの使用量が多いが, コストを増加させる再生処理を行っていないものが選択されたためと考えられる。

3) 廃棄物量を最小化した場合 (図9-2.3)

試行回数の別による仕様の差はほとんどなく, アルミ屋根の木造建築物が廃棄物量を小さくする結果(廃棄物量は0.309kg/m²・年)となった。これは, 総資材使用量の小さい仕様の中で壁厚の選択や再生処理の割合の選択だけが変化しているためである。図9-2.3からは資材構成の大部分を製材が占めていることが分かる。また, 廃棄物量は「一般的な在来木造住宅」(破線)と比較して非常に小さくなるが, CO₂ 排出量とコストを増加させることになっている。これは建物における総資材使用量が少ないので, 断熱性能が低く年間空調負荷が非常に大きくなったためと再生処理が選択されたことによりCO₂ 排出量, コストが増加したためである。特にコストには

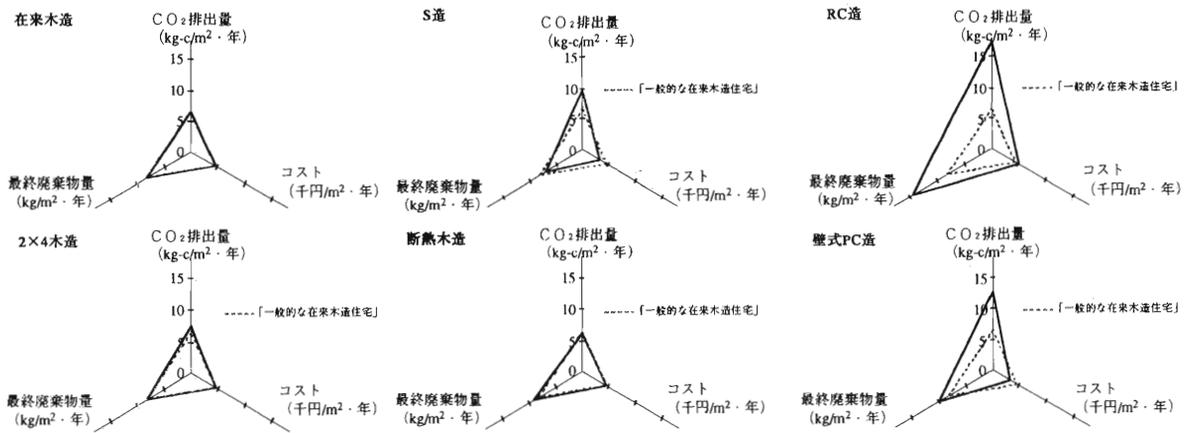


図9-1 「一般的な住宅」の3評価値

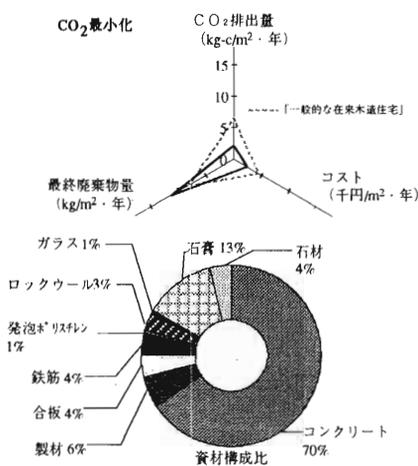


図9-2.1

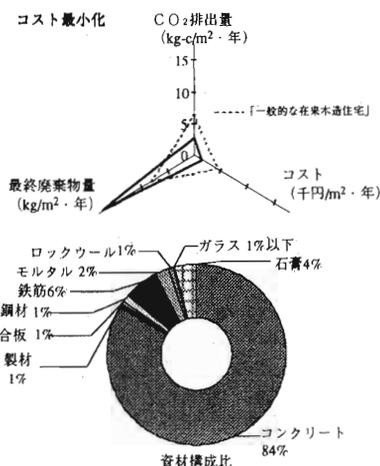


図9-2.2

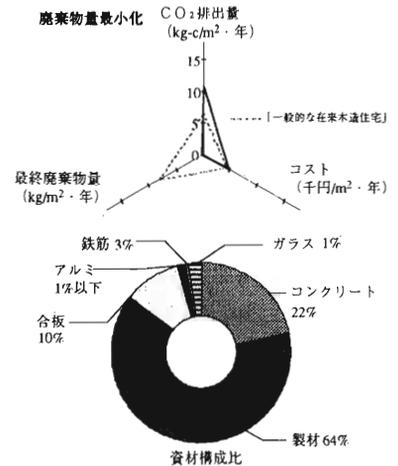


図9-2.3

図9-2 単独の評価値による試行結果

再生処理の相違が大きく影響している。

以上、3つの評価指標の各々についての最小化を行う場合、CO₂排出量には1階PC造、2階2×4木造の複合構造、コストにはRC躯体に鉄骨下地による壁体が有効であり、廃棄物量には木造が有効であることが分かった。各部材の資材選択に関してはそれぞれの評価値について有効な資材が存在し、適切な使用量と再生処理、再生資材の利用により、より評価値は小さくなることが分かった。3つの評価指標の各々についての最小化には、「一般的な住宅」と比較して非常に小さな評価値を与える建材構成解が存在するが、一方でその解は他の評価値を大きくしてしまうという結果が得られた。特に、廃棄物量とCO₂排出量、コストは互いに強いトレードオフの関係にあると言える。

9.2 複数の評価指標の最小化

試行の第2段階として、3つの評価指標を同時に最小化する解を目標とする多目的問題としての試行を行う。本研究では、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例を示す。

表9-1 「次世代省エネルギー基準」の木造住宅の断熱材厚と窓仕様

	屋根・天井	外壁	床	窓
断熱材厚(m)	0.210	0.115	0.115	複層

ここでは、「次世代省エネルギー基準」として断熱材を表9-1のように設定した在来木造住宅モデルを想定し、そのコスト、廃棄物量を制約値（コスト：4,209（円/m²・年）、廃棄物量：8.778（kg/m²・年）として、CO₂排出量をより小さくする解を求めた。試行回数は表9-1と同様、50×10⁵回とした。

表9-2は試行回数1×10⁶回から50×10⁶回までの各試行回数における最良解の仕様とその評価値を示したものである。評価値は、試行回数5×10⁶回で「次世代省エネルギー基準」を満たす「一般的な住宅」の1/2まで減少している。選択された躯体は、1階S造、2階2×4木造となっている。それぞれの評価値について個別に行った試行では得られなかったS造躯体が、上記の制約のもとではCO₂排出量を減少させる躯体の候補の1つとして選択されている。図9-3は各試行回数において保存さ

表9-2 制約法を用いた場合の各試行回数ごとの最良解

1.0	1F S造 2F S造	S造 木造	石材 製材	アラスター板 製材	ロックウール ロックウール	-	アラスター板 複層	0.233	アルミ	在来木造 在来木造	合板 合板	鋼材 鋼材	ロックウール 発泡ポリスチレン	鋼材 なし	ロックウール クロス	製材 木質板	2×4	アラスター板 アラスター板	-	ロックウール	3.653
3.0	1F S造 2F 2×4	木造 -	石材 製材	アラスター板 -	ロックウール -	-	アラスター板 複層	0.105	製材	在来木造 在来木造	合板 合板	鋼材 製材	ロックウール ロックウール	なし なし	クロス アラスター	製材 製材	断熱木造	銅板	-	ロックウール	2.734
5.0	1F S造 2F 2×4	-	石材 製材	アラスター板 -	ロックウール -	-	アラスター板 複層	0.105	製材	在来木造 在来木造	製材 製材	鋼材 製材	ロックウール なし	なし なし	ロックウール アラスター	製材 製材	断熱木造	瓦	-	ロックウール	2.218
10.0	1F 2×4 2F 2×4	-	石材 製材	-	ロックウール -	-	アラスター板 複層	0.105	製材	在来木造 在来木造	製材 製材	鋼材 製材	ロックウール なし	なし なし	ロックウール アラスター	製材 製材	断熱木造	銅板	-	ロックウール	2.209
30.0	1F 2×4 2F 2×4	-	製材 -	-	ロックウール -	-	アラスター板 複層	0.105	製材	在来木造 在来木造	製材 製材	鋼材 製材	ロックウール なし	なし なし	アラスター	製材 製材	断熱木造	銅板	-	ロックウール	2.121
50.0	1F 2×4 2F 2×4	-	アラスター板 製材	-	ロックウール -	-	アラスター板 複層	0.105	製材	在来木造 在来木造	製材 製材	鋼材 製材	ロックウール なし	なし なし	ロックウール	製材 製材	断熱木造	銅板	-	ロックウール	2.114

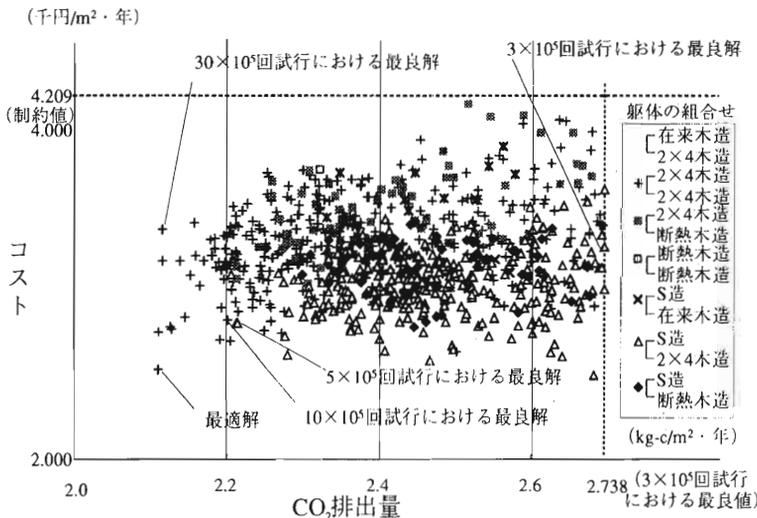


図9-3 制約法を用いたCO₂最小化の各試行回数ごとの解候補と最良解の分布

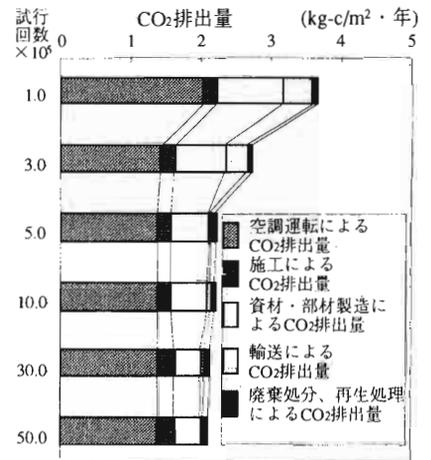


図9-4 各試行回数におけるCO₂排出量の構成

れた解候補のうち、CO₂排出量が3.0×10⁵回試行の最良値より小さい解候補の分布を示したものである。S造躯体を含む解候補は全体的にコストが小さい値となっており、CO₂排出量がより小さくなくてもコストはあまり変化していない。一方、S造躯体を含まない解候補はCO₂排出量が小さくなるとともにコストも小さくなるように分布している。また、各試行回数における最良解から得られた躯体の組み合わせのほか、断熱木造躯体や在来木造躯体を含む解候補が分布している。特に断熱木造躯体を含む解候補は2×4木造躯体やS造躯体と組み合わせられて広く分布している。このように解候補のほとんどは

S造躯体または2×4木造躯体のいずれかを含むことから、上記の制約のもとにCO₂排出量を小さくするのにS造躯体や2×4木造躯体が有効であると考えられる。図9-4は各試行回数の最良値(CO₂排出量)を空調運転によるもの、施工によるもの、資材・部材製造によるもの、輸送によるもの、廃棄処分・再生処理によるものに分解したものである。空調運転によるCO₂排出量は大きいのが3×10⁵回以降大きな変化はなく、資材によるCO₂排出量の減少が評価値を小さくしていくことが分かる。さらに試行回数を増加させると、1階、2階とも2×4木造躯体、在来木造床で断熱木造屋根となった。このときの

表9-3 制約法を用いた場合の最適解の資材構成表

試行回数	50.0×10 ⁵	CO ₂ 排出量	2.1141	kg-c/m ² ・年		総重量	130.845	kg/m ²	
成績		コスト	2531.6	円/m ² ・年		資材別使用量			
評価値	2.11412	最終廃棄物量	5.4519	kg/m ² ・年		資材名	kg/m ²	構成比	
躯体	躯体		2F	2F		コンクリート	28.21	0.216	
	壁	厚 (m)	2×4	2×4		製材	34.75	0.266	
壁	外壁仕上	厚 (m)	グラスボード	0.01	製材	0.005	0.000		
	外壁下地	厚 (m)	-	-	-	-	-		
	壁断熱材	厚 (m)	ロックウール	0.15	ロックウール	0.15	0.000		
	内壁下地	厚 (m)	-	-	-	-	-		
	内壁仕上	厚 (m)	グラスボード	0.01	グラスボード	0.01	0.000		
	窓	窓仕様	窓面積の割合	複層	0.105	複層	0.105	0.000	
床	床構造体		在来木造	在来木造		モルタル	0.00	0.000	
	床仕上	厚 (m)	製材	0.005	製材	0.005	0.000		
	床下地	厚 (m)	製材	0.01	製材	0.01	0.000		
	床断熱	厚 (m)	ロックウール	0.15	なし	0	0.000		
天井	天井つくり材		なし	なし		A L C	0.00	0.000	
	天井仕上	厚 (m)	ロックウール	0.002	ロックウール	0.002	0.000		
	天井下地	厚 (m)	製材	0.01	製材	0.01	0.000		
屋根	小屋組		断熱木造			陶磁器	0.00	0.000	
	屋根外装材	厚 (m)	銅板	0.0003					
	屋根下地	厚 (m)	-	-	-	-	-		
	屋根断熱材	厚 (m)	ロックウール	0.15					
コンクリート	再生粗骨材の使用割合	0.2145							
	高炉セメントの使用割合	0							
	再生処理	なし							
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	0.286							
鉄	電炉鋼の使用割合	0.143							
	再生処理の割合	0							
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	0							

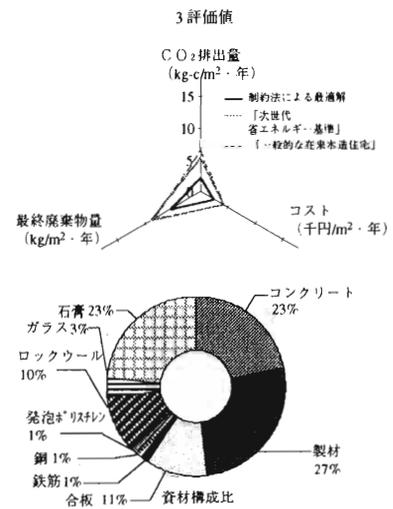


図9-5 制約法を用いた場合の最適解の3評価値と資材構成費

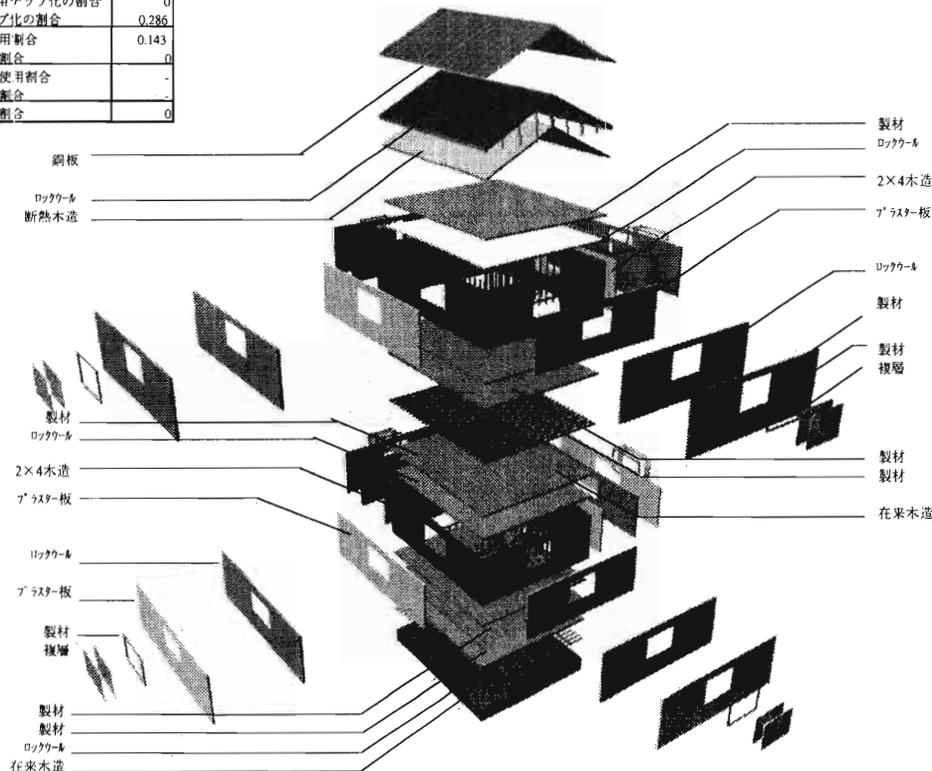


図9-6 制約法を用いた場合の最適解の資材構成図

結果を表9-3、図9-5で示す。

多目的最適化を行った場合の3評価値は、「一般的な木造住宅」や「次世代省エネルギー基準」を満たす木造住宅の3評価値よりも大幅に小さいものとなっていることが分かる。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。このときのモデルの資材構成図を図9-6に示す。

10. 結論及び考察

本研究の結果、GAを用いたシステムの試行により標準問題の住宅モデルで建築資材と工法の選択から環境負荷を同時に低減させる組み合わせを見いだすことができた。また、より現実性の高い住宅でさまざまな条件を織り込むことにより、本システムでさらに現実的な住宅の工法や建築資材の組み合わせを見いだすことができる。

本研究では、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は後述する文献から得ている。これにより相対的比較の意味での評価は可能であるが、環境負荷やコスト等のより正確な算出が可能となり、それはデータ精度の向上を通してシステムの有効性を確保することが不可欠である。以上の課題を順次解決し、建築資材選択システムを精緻化することが望まれる。さらに今後、居住者の生活パターンの違いによる空調条件の違いやライフステージに応じた建物の改修や建替など、居住者の生活に応じたモデル設定の違いにより建材と工法の組み合わせがどのように異なるかについても考察の必要がある。

本研究では資材と工法の選択問題を扱い、環境負荷の小さい住宅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した空間構成や設計問題と一体的に展開することが今後の課題である。

<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，pp.63~67，1985.10
- 2) 玄昌澤ほか：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報告集，第469号，pp.149~156，1995.3
- 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報告集，第496号，pp.145~152，1997.6
- 4) 酒井寛二ほか：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報告集，第484号，pp.105~112，1996.6
- 5) 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，pp.17~23，1986.1
- 6) 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，pp.31~38，1992.1
- 7) 鈴木道哉ほか：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報告集，第476号，pp.37~43，1995.10

- 8) 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，pp.75~82，1994.9
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 紅谷裕ほか：住宅発生副産物の発生量等に関する調査・研究 その3，日本建築学会大会学術講演梗概集，1995.8
- 12) 高野俊吾ほか：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，pp.889~90
- 13) 弥田俊男ほか：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，pp.391~396，1998
- 14) 弥田俊男ほか：独立住宅の建材選択に伴うLCC，LCCO₂，最終廃棄物量低減の多目的問題，日本建築学会計画系論文報告集，第524号，pp.77~84，1999.10

■空調計算式は以下の文献を参照

- 15) 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
- 16) 建設省住宅局住宅生産課，住宅局建築指導課他監修：省エネルギーハンドブック'93，1992.12

■データベースに引用した数値は下記の文献を参照

- 17) 日本建築学会 地球環境委員会 ライフサイクル小委員会：ライフサイクルCO₂で建物を測る，日本建築学会，1996.2
 - 18) 日本建築学会：建築設計資料集成1 環境，丸善，1978.6
 - 19) 小玉祐一郎ほか：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，1997.12
 - 20) 建築資料研究社：積算ポケット手帳'99後期，建築資料研究社，1999.6
 - 21) 日本建築学会：新建築学大系49，維持管理：彰国社，1983.1
 - 22) 日本建築学会 建築と地球環境特別研究委員会：建築が地球環境に与える影響，1992.6
 - 23) 日本建築学会：増補版 建築設計資料集成 設備計画編，丸善，1977.11
 - 24) 漆崎昇ほか：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
 - 25) 野城智也ほか：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
 - 26) 日本建築学会 日本建築学会地球環境特別研究委員会：建築・地球環境・地球環境の在り方，日本建築学会，1995.3
 - 27) 日本建築学会 地球環境委員会 LCA指針策定小委員会：建物のLCA指針，日本建築学会，1998.11
 - 28) 工事歩掛研究会：標準工事歩掛要覧 改訂版，経済調査会出版部，1983.5
- モデルの条件，分解方法は下記の文献を参照
- 29) 宇田川光弘：標準問題の提案 住宅用標準問題，熱分科会第15回熱シンポジウム，日本建築学会環境工学委員会
 - 30) 日本建築学会：構造用教材，日本建築学会，1985.4
 - 31) 日本建築学会：建築材料用教材，日本建築学会，1998.4

<研究協力者>

張本 和芳 大成建設株式会社技術本部
荒川 琢也 大成建設株式会社住宅事業本部
高野 俊吾 京都大学大学院
前田 健蔵 京都大学大学院