遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザイン に関する研究

－耐用年数推定法の導入－

LIFE CYCLE DESIGN FOR BUILDING STRUCTURES

－ Introduction of estimation method of durable years －

中田 聡*, 大森 博司**

Satoshi NAKATA and Hiroshi OHMORI

Recently, the environmental impact has been required to be explicitly taken into account in the life cycle design of building structures besides the initial economical efficiency which has been ordinarily required up to the present days. Consequently, it is important not only to design the building structures so as to be safe as well as economical at the initial stage of completion of the building but also to pay attention and take into account the total behaviors of the designed and constructed building structures during all stages of their life cycles. The former paper by the authors has proposed the way to deal with the life cycle design of building structures with consideration of a hierarchy according to the ranks of building construction systems by using genetic algorithms as the optimization scheme with respect to both ecology and economy for evaluations. Authors have been developing computational software for the life-cycle design of structures through utilization of Genetic Algorithm. In this paper, the presumption method for the lifetime of structures is introduced, by which easy usage as well as practicality of the tool are expected. For evaluation of the lifetime of structures, the lifetime of each portion is individually evaluated where surrounding situations of them, such as near from water, exposed to outside of building and so on, are taken into consideration. This newly introduced treatment is expected to exclude the arbitrariness on the evaluation time of the life-cycle design and make the tool much more suitable for practical use.

Keywords: *Life Cycle Design, Optimization, Genetic Algorithm, Durable Years, Wooden Construction*

ライフサイクルデザイン, 最適化, 遺伝的アルゴリズム, 耐用年数, 木造

1. 序

近年の地球環境問題の深刻化に伴い、建築分野においても持続可能な発展に貢献すべきであるという認識が高まっている。日本建築学会は建築構造物の耐用年数を延長させることが建築分野における二酸化炭素排出量の削減に効果的であるとした上で、わが国における建築構造物の寿命を3倍ないし100年に延長することを提唱している¹⁾。建築構造物の長寿命化には、建設時の初期投資の多寡を偏重した設計ではなく、建設後の維持管理計画を含めた建築構造物のライフサイクル (Life Cycle, LC) を考慮した設計が必要である。建築構造物のLCを考慮した設計により長寿命化が可能になり、従来の営繕的、対症療法的な維持管理ではなく、計画的な維持管理へとシフトすることで環境負荷やライフサイクルコストの低減が可能になると考えられる。

近年、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) 等の最適化手法を用いて建築構造物の設計を支援する設計支援の手法が提案されている。こうした手法は、従来熟練した専門家の経験や勘を必要としていた建築構造物の設計に、計算機の力を生かすものであり、これにより、施主や設計者等の意思決定者は、科学的な裏づけを伴う一定の合理性を伴った設計案を得ることができる。

持続可能な建築構造物の設計手法として、最適化手法を援用したライフサイクルデザイン (Life Cycle Design, LCD) 手法の研究がいくつか報告されている^{2)~4)}。そこでは、建築物の構成要素や、維持保全周期を設計変数として最適化を行うことにより、従来の建築構造物の設計案よりもサステナブルな建築構造物を提案できるとしている。ところで、建築構造物のLCの多くのステージは設計時よりなお将来における事象であり、本来確定的な評価はなし得ない。こうした観点に立って、建築構造物のLCに内在する不確定性の影響の内、修繕周期の不確定性⁵⁾および地震ハザード⁶⁾、単価の不確定性⁷⁾がLC評価に与える影響を検証した研究が報告されている。

本稿では、遺伝的アルゴリズムを用いたLCD手法による設計支援ツールに耐用年数推定法を導入することにより、実用性の向上を図ることを目的としている。具体的には、建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」⁸⁾で提案された耐久設計法に用いられる耐用年数推定法により、時間的設計変数の定量的な算出を試みる。建築構造物の修繕周期となる躯体の耐用年数を算出し、これに基づいて建築構造物のライフサイクルにおける環境負荷諸量を推定することで、設計支援ツールの実用性の向上を図る。

本稿では、まず既報⁴⁾で提案したLC評価手法、文献⁸⁾で提案さ

* 東邦ガス(株) 工修

** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Toho Gas Corporation, M. Eng.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

れている耐用年数推定法について概説する。次に耐用年数推定法を適用するための解析条件を設定し、耐用年数推定法を用いた LCD 手法を提案する。続いて耐用年数推定法を用いた LCD による解析例を示し、提案する手法の有効性を検討する。

具体的な提案内容を 2 点記述する。1 点目は、耐用年数推定法を用いることで、躯体を含めた木造構造体の耐用年数を定量的に算出できることである。LCD 手法では各部材の耐用年数を設定する必要がある。耐用年数推定法は実測による経験的根拠を持った理論であり、時間的な変数の領域を設定するための手法として、有効であると考えられる。

2 点目は、耐用年数推定法を用いることで、部材の構成要素に加えて、構法、施工方法、環境条件、維持管理方法を LC 評価値に反映できることである。これは設計支援ツールとして、ユーザーの意思決定の参考になる情報であり、実用性の向上につながると考える。

ここで、評価対象期間を推定耐用年数とすることで、ライフサイクルコスト年等価額 (Annual Value of Life Cycle Cost, AVLCC) を新たに目的関数として加える。ライフサイクルコストとは異なる費用統合の方式について、目的関数をライフサイクルコストとライフサイクルコスト年等価額とした二目的最適化問題を定式化し、これにより耐用年数推定法の導入の意義を示す。

2. ライフサイクル評価手法

建築構造物を企画・設計・施工し、その建築構造物を維持管理して、最後に解体・廃棄するまでの、建築構造物の全生涯に要する費用の総額を、建築構造物のライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, LCC) といい、全生涯において発生する CO₂ 排出量の総量を建築構造物のライフサイクル CO₂ (Life Cycle CO₂, LCCO₂) という。以下本論文では、建築構造物の評価尺度として LCC を用いるが、LCCO₂ についても同様の手法で評価可能である。

2.1. イニシャルコスト

イニシャルにおける部材 i のコスト評価 $C_{0,i}$ は、素材 j を使用する部材 i の重量 W_{ij} を用いて次式で算定される^{4),5),9)}。

$$C_{0,i} = \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) \quad (1)$$

ここに

c_j : 素材 j の製造および流通に関する重量当たりの単価

よって、建築構造物全体のイニシャルコスト C_0 は、次式で算定される。

$$C_0 = \sum_i C_{0,i} = \sum_i \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) \quad (2)$$

本稿では建築物にかかるコストを部材コストで評価しているが、本来はさらに人件費などの検討が必要である。コストの算出方法として、人件費 (施工費) を考慮すれば、イニシャルコスト及びランニングコストが増え、推定よりもライフサイクルコストは大きい値となると言える。よって、ライフサイクルコスト年等価額の値は大きくなると考える。ただし、人件費 (施工費) は環境等の条件によって異なる不確定な値である。人件費 (施工費) を定量的に算出するためには、施工業者などの見積もりデータと統計が必要であると考えられる。人件費などの不明確なコストの算出をいかにして行なうかは今後の課題である。

2.2. ランニングコスト

ランニングコストの評価は、部材別のイニシャルコスト評価に、劣化関数により算定される部材別の修繕率 r_{ik}^* を乗ずることによって算出する¹⁰⁾。時刻 t における部材 i の k 回目の修繕に関するコスト C_{ik} は、次式で算定される。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^t} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (3)$$

ここに

ν : 割引率

γ^q : 修繕率とコストとの関係を示すパラメータ

部材 i の修繕を期間 $t_{p,i}$ ごとに周期的に行うとすると、式 (3) は次式のようにになる。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^{k \cdot t_{p,i}}} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (4)$$

ここでは、 $\nu = 0$ 、 $\gamma^q = 1$ として評価を行う。

よって、部材 i の時間軸において累積したコスト C_i は、次式で算定される。

$$C_i = \sum_{k=1}^{n_i} C_{ik} \quad (5)$$

ここで、修繕回数 n_i は建築構造物の寿命 t_l と部材 i の修繕周期 $t_{p,i}$ を用いて次式で表現できる。

$$n_i = \left\lceil \frac{t_l}{t_{p,i}} \right\rceil - 1 \quad (6)$$

ただし、 $\lceil \cdot \rceil$ は Ceiling 関数を表現しており、 $\lceil x \rceil$ の場合 x 以上 $x+1$ 未満の整数を表す。1 を減じているのは、イニシャルとの重複を避けるためである。

2.3. 構法的序列による階層化の考慮

構法的序列による階層化⁴⁾とは、建築構造物を構成する部位の順序関係を示す概念である。これは LC 評価の観点から言えば、建築構造物を造る順序であり、修繕のし難さの順序でもある。式 (5) に示したランニングコストは、構法的序列による階層化の観点から見て支持側の部材の修繕の影響を考慮していない。被支持側の部材は支持側の部材の修繕によって修繕シナリオに制約を受ける。修繕シナリオとは、建築構造物の設計時に計画される、建築構造物を構成する各部材の平均耐用年数に基づく修繕計画である。一般に支持側の部材の修繕をするためには被支持側の部材は交換せざるを得ない。例えば、構造躯体とその仕上材がある時、構造躯体の修繕を行うためには仕上材を破棄する必要がある。

LC 評価を適切に行なうためには、支持側の部材の修繕を行う際に被支持側の部材は除去される現象を把握することが望まれる。以降、支持側の部材、例では構造躯体を構法的に上位、被支持側の部材、同例では仕上材を構法的に下位と呼ぶこととする。図 1 に構法的序列による階層化によるシナリオの制約の様子を示す。 t_p^u は構法的序列第 u 位部材の修繕周期を、 $t_{stopover}^{u,u-1}$ は構法的序列第 $u-1$ 位部材の修繕周期中の第 u 位部材の $\left\lceil \frac{t_p^u}{t_p^{u-1}} \right\rceil$ 回目の修繕後から時刻 t_p^{u-1} までの時間を示す。

構法的第 u 位の部材 i を支持する第 $u-1$ 位の部材の修繕周期 $t_{p,i}^{u-1}$ 中に発生するコスト $C_i^{u,u-1}$ は式 (4) を用いて次式で表現できる。

$$C_i^{u,u-1} = \sum_{k=0}^{n_i^{u,u-1}} C_{ik} \quad (7)$$

図1 構法的序列による階層化を考慮したシナリオ

ここで、第 u 位部材 i の修繕回数 $n_i^{u:u-1}$ は Ceiling 関数 $\lceil \cdot \rceil$ を用いた次式で表現できる。

$$n_i^{u:u-1} = \left\lceil \frac{t_{p,i}^{u-1}}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \quad (8)$$

建築構造物の躯体を構法的序列第1位とすると、躯体の修繕周期 t_p^1 すなわち建築構造物の寿命 t_l 中に発生する第 u 位の部材 i のランニングコスト C_i は次式で算定できる。右辺最終項はイニシャルとの重複を避けるため減じている。

$$C_i = \prod_{x=1}^{u-2} n_i^{x+1:x} \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} n_i^{z+1:z} \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:1}} C_{ik} - C_{0,i} \quad (9)$$

ここで、修繕回数 $n_i^{a:b}$, $n_{stopover,i}^{a:b}$ ($a > b$) は Ceiling 関数 $\lceil \cdot \rceil$ を用いた次式で表現できる。

$$n_i^{a:b} = \left\lceil \frac{t_{p,i}^b}{t_{p,i}^a} \right\rceil - 1 \quad (10)$$

$$n_{stopover,i}^{a:b} = \left\lceil \frac{1}{t_{p,i}^a} \left\{ t_{p,i}^b - \left(\left\lceil \frac{t_{p,i}^b}{t_{p,i}^a} \right\rceil - 1 \right) \cdot t_{p,i}^a \right\} \right\rceil - 1 \quad (11)$$

よって、建築構造物全体の時間軸において累積したランニングコスト C_r は、上式を用いて次式で算定される。

$$C_r = \sum_i C_i \quad (12)$$

2.4. ライフサイクル評価

建築構造物は全供用期間に亘って多種多様なコストが発生するが、本研究では建築構造物全体のイニシャルコスト C_0 に、時間軸において累積した修繕によるランニングコスト C_r を加算したものを、建築構造物の LCC とし、 C_{lc} で表す。

$$C_{lc} = C_0 + C_r \quad (13)$$

2.5. 評価対象期間の考慮

本研究では時間的なパラメータである躯体の耐用年数を操作するため、躯体の耐用年数すなわち建築構造物の寿命が異なる設計案を比較する必要がある。

寿命が異なる複数の設計案を比較するためには、LCC だけでなく、確定値として評価対象期間 t_{eval} を設定し、評価対象期間中に建築構造物が繰り返し利用されるとして、拡張した LCC を用いて評

価することが望まれる。評価対象期間を構法的序列による階層の第0位とすれば、 $t_{eval} = t_p^0$ として式 (13) は式 (9) を用いて次式のように拡張される。ただし次式では、LC評価期間全体を対象とするため式 (9) におけるイニシャル評価の重複は考慮する必要はない。

$$C_{eval} = \sum_i \left\{ \prod_{x=0}^{u-2} n_i^{x+1:x} \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} n_i^{z+1:z} \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:0}} C_{ik} \right\} \quad (14)$$

3. 耐用年数推定法

本稿では建築構造物の構法を木造と想定し、文献⁸⁾より木造躯体の耐用年数推定法について詳述する。文献⁸⁾では、当該の文献の発行時点までの調査研究の範囲では、精緻な推定を行うための資料等は未整備であるとしている。耐用年数の推定手法を提案する主な目的は、木造建築物の設計時点で材料、構法、施工および維持保全等の耐用年数に関わる項目に「耐久性に対する配慮を盛り込む」ことにより、耐用年数を増大できることを示すこととしている。

また本手法は、「構造安全性からみて危険域に到達するまでの年数」を耐用年数として設定せず、長い歴史をもつ木造建築物の過去の事例から、「劣化し、構造部材の取替えに到達するまでの年数」を耐用年数として求める。しかし、本手法そのものは耐用年数を推定するための一つの考え方として提案されたものであり、提案された内容も適宜改訂されるべき性格のものである。

耐用年数の推定は、文献⁸⁾では、維持保全による加算値を含まない場合と含む場合の2段階に分けている。建物を長持ちさせるためには、良い設計・施工により耐久性能の高い建物を建設する場合と、多少、耐久性の劣る建物でも手入れにより長持ちさせる場合の2通りが考えられるが、耐用年数推定の本旨からいえば、前者の考え方となる。したがって、維持保全の良否を考慮に入れない場合の耐用年数の推定値が必要になる。これが1次推定耐久性能値および1次推定耐用年数である。次いで維持保全の良否を配慮した場合が2次の値であり、本稿ではこの値を建築構造物の耐用年数として採用する。

図2に木造躯体各ユニットの耐用年数推定における計算手順フローチャートを示す。

木造の部位別の推定耐用年数を求める場合は、次式に示される1次推定耐久性能値 P_{sp-1} 、または2次推定耐久性能値 P_{sp-2} を用いて換算する。

$$P_{sp-1} = P \times B \times C_w \times D$$

$$P_{sp-2} = P \times B \times C_w \times D + M_w \quad (15)$$

ここに

P_{sp-1}	: 1次推定耐久性能値
P_{sp-2}	: 2次推定耐久性能値
P	: 耐久性能値
B	: 構造級別係数
C_w	: 施工検査級別係数
D	: 劣化外力係数
M_w	: 維持保全加算値

図 2 木造躯体各ユニットの耐用年数推定における計算手順フローチャート⁸⁾

建物全体の構造部材の推定耐用年数を求める場合は、式 (16) によって 1 次平均推定耐久性能値 P_{sp-1A} 、あるいは 2 次平均推定耐久性能値 P_{sp-2A} を求め、式 (17) を用いて換算する。式 (17) は本稿において、表 1 より耐久性能値と耐用年数に比例関係があることを利用し、耐久性能値と耐用年数の 1 次関数と考えて比例定数を算出したものである。耐久性能値が 0.3 ～ 0.7 の時、耐用年数が 10 ～ 20 年であるため、比例定数は $10 / 0.3 = 33.33$ 、 $20 / 0.7 = 28.57$ と計算できる。これらの平均値を用いて、推定耐用年数換算式を以下のように定義する。

$$P_{sp-1A} = \frac{\sum (P_{sp-1} \times \text{ユニット数})}{\text{ユニット数の総計}} \quad (16)$$

$$P_{sp-2A} = \frac{\sum (P_{sp-2} \times \text{ユニット数})}{\text{ユニット数の総計}}$$

$$P_{sl} = P_{sp} \times 30.24 \quad (17)$$

ここに

- P_{sp-1A} : 1 次平均推定耐久性能値
 P_{sp-2A} : 2 次平均推定耐久性能値
 P_{sp} : 推定耐久性能値
 P_{sl} : 木造構造物の推定耐用年数 (年)

表 1 推定耐久性能値の推定耐用年数への換算⁸⁾

グレード	部位別・平均推定耐久性能値 P_{sp-1} , P_{sp-1A} P_{sp-2} , P_{sp-2A}	推定耐用年数の換算値 P_{sl-1} , P_{sl-1A} P_{sl-2} , P_{sl-2A}
1	0.3 ～ 0.7	10 年 ～ 20 年
2	0.8 ～ 1.2	25 年 ～ 35 年
3	1.3 ～ 1.7	40 年 ～ 50 年
4	1.8 ～ 2.2	55 年 ～ 65 年
5	2.3 ～ 2.7	70 年 ～ 80 年
6	2.8 ～ 3.2	85 年 ～ 95 年
7	3.3 ～	約 100 年

文献⁸⁾では、構造部材の耐用年数を直接算定することはせず、第 1 段階として推定耐久性能値を求め、換算して耐用年数を推定する方法を用いている。この理由は、現状の研究成果等では明確に耐用年数を推定する基礎資料が乏しいと考えられるためである。

また、文献⁸⁾の指針は先に述べたとおり、部位区分別に耐用年数を

推定するものである。したがって、建物各部の耐用年数は結果としてさまざまな値になり、この値では、各種構法による建物ごとの比較ができないことになる。そこで、構造体全体の平均推定耐用年数を求める方法を用いている。平均値の求め方は、部位区分ごとに算定した推定耐用年数を単純平均してもよいが、その方法では構造体全体の木材量との関連や推定耐用年数の短い部分の比率などが把握できない。そこで平均値の算出においては、ユニット数を乗じて重み付けをし、建物全体の平均値とする方法を採用した。

本稿では LCD 手法として、構法的序列による部材の階層化を考慮し、階層化した部材をユニット分割して、加重平均により部材の推定耐用年数を算出する。

3.1. 耐久性能値 (P)

耐久性能を示す耐久性能値 P の算定は、設計時に使用した仕様構造部材の樹種、断面の小径、保存薬剤処理の種別に基づき、 P_1 、 P_2 、 P_3 の各係数を以下の表を用いて設定し、次式を用いて求める。

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (18)$$

ここに

- P_1 : 製材品等の耐久性能値 (表 2)
 P_2 : 断面寸法別の加算値 (表 3)
 P_3 : 保存薬剤処理による加算値 (表 4)

表 2 製材品等の耐久性能値 (P_1)

耐久性能値 P_1	製材品および木質製品の名称
1.4	ヒバ ベイヒバ コウヤマキ クリ ケヤキ
1.3	ヒノキ心材 台湾ヒノキ心材
1.2	ヒノキ辺材 スギ心材 ベイヒノキ ベイマツ アカマツ クロマツ カラマツ ソ連カラマツ
1.0	スギ辺材
0.8	硬質木片セメント板
0.7	ベイツガ スプルース ラワン 構造用合板 JAS 特類
0.5	構造用合板 JAS 1 類 ハードボード インシュレーションボード パーティクルボード

表 3 断面寸法別の加算値 (P_2)

増倍係数 P_2	部材の断面級別 (mm)
0	小径が 3 寸 5 分 (105mm) まで
0.15	小径が 4 寸 (120mm) まで
0.30	小径が 4 寸 5 分 (135mm) まで
0.45	小径が 5 寸 (150mm) まで
0.60	小径が 5 寸 (151mm) 以上

表 4 保存薬剤処理による加算値 (P_3)

増倍係数 P_3	保存薬剤処理の種別
0.3	現場処理 (標準: クレオソート 2 回塗布) 加圧処理 JAS 第 3 種
0.7	加圧処理 JAS 第 2 種
1.5	加圧処理 JAS 第 1 種

3.2. 構造級別係数 (B)

構造級別係数 B の算定は、主要構造部位について、主として水分による腐朽の難易を基準に構法上の観点から B_{11} , B_{12} , B_{13} の3つの係数をそれぞれ設定し、次式によって求める。

$$B = \frac{B_{11} + B_{12} + B_{13}}{3} \quad (19)$$

または

$$B = \frac{B_{11} + B_{12}}{2} \quad (20)$$

ここに

B_{11} : 水分、湿分を木材に作用しにくくする構法の種別による加算値 (表 5 参照)

B_{12} : 建物内に浸入した水分、湿分を屋外に排出するような構法の種別による加算値 (表 6 参照)

B_{13} : 建物内に浸入した水分、湿分が侵入したとしても、木材が直接それらと接触しないような構法の種別による加算値 (表 7 参照)

表 5 構法級別係数 (B_{11})

係数値	1.3	1.2	1.1	1.0	0.6
軸組 (A)	610 以上	600	400	300	300 未満
床組 (B)	660 以上	650	550	450	450 未満
小屋組 (C)	6 以上	5	4	3	3 未満

[注] A : 構造材の地上からの距離 (mm)
B : ふとりの深さ (mm)
C : 勾配 (寸)

表 6 構法級別係数 (B_{12})

グレード	1	2	3	4	5
係数値	2.0	1.8	1.5	1.0	0.6
外壁	露出	通気 1	通気 2	通気 3	なし
内壁	真壁	真大壁	しっくい	クロス張り	モルタル塗り
床組	600	500	400	300	200 以下
小屋組	棟換気	妻換気 1	妻換気 2	軒裏換気	なし

[注] 外壁 : 通気 1- 板張り、通気 2- 材表面通気、通気 3- 下地面通気、軒の出 900mm で 0.5、600mm で 0.2 を係数に加算する。
内壁 : 水まわり室の周囲内壁に適用、その他の内壁の係数は 2.0 とする。
床組 : 外周 3.0×10^3 mm 当りの換気口面積 (mm^2) 床下に防湿層を施し、捨てコン 100mm 打ちは 1 グレード上げる。
小屋組 : 棟換気 - 越屋根等、妻換気 1- 入母屋等、妻換気 2- 妻面換気。

表 7 構法級別係数 (B_{13})

係数値	1.2	1.1	1.0	0.8
軸組 *1	ASR 24kg~	ASR 22kg~	ASF 20kg~	ASF 20kg~ 以下
床組 *2	ASR 24kg~	ASR 22kg~	ASF 20kg~	ASF 20kg~ 以下
小屋組	ASR 24kg~	ASR 22kg~	ASF 20kg~	ASF 20kg~ 以下

[注] ASF はアスファルトフェルト、ASR はアスファルトルーフィング
*1 表 6 において、係数が 1.5、1.0、0.6 に適用
*2 水まわりに適用

3.3. 施工検査級別係数 (C_w)

施工検査級別係数 C_w の算定は、施工管理における検査項目類別数と検査対象類別数とにより施工管理の程度を級別化し、表 8 により求める。

表 8 施工検査級別係数 (C_w)

係数値	1.2	1.1	1.0	0.8	0.6
検査項目類別数	20	15 ~ 19	10 ~ 14	5 ~ 9	0 ~ 4
検査対象類別数	16	8 ~ 15	4 ~ 7	2 ~ 3	0 ~ 1

[注] 係数は、検査項目数と検査対象数のいずれかを選択し、設定する。

3.4. 劣化外力係数 (D)

劣化外力を考慮する劣化外力係数 D は、地域劣化外力係数 D_{11} , D_{12} と部位劣化外力係数 D_2 とを用いて次式より求める。

$$D = \frac{D_{11} + D_{12}}{2} \times D_2 \quad (21)$$

ここに

D_{11} : シロアリの分布・地域区分係数 (表 9)

D_{12} : 腐朽菌の生育係数 (表 10)

D_2 : 部位劣化外力係数 (表 11)

表 9 シロアリの分布・地域区分係数 (D_{11})

係数値	1.0	0.8
地域区分 1	ヤマトシロアリのみの分布地域	イエシロアリの分布地域
地域区分 2	内陸地域	沿岸地域

表 10 腐朽菌の生育係数 (D_{12})

係数値	1.2	1.1	1.0	0.90	0.80
15 °C 以上の時間数の積	3520 時間以下	4700 時間以下	5900 時間以下	7050 時間以下	7050 時間をこえる

表 11 部位劣化外力係数 (D_2)

係数値	2.0	1.0	0.6	0.5	0.4
部位記号	... I ...	... N S ...	... I-W	... N-W ... S-W E-S ... W-I-W	E-N-W E-S-W E-N ...
壁					
軸組					
係数値	1.8	0.8	0.6	—	—
部位記号	... F-S ... F ...	... F-W W-F ...	W-F-S	—	—
床組					
小屋組	R-F ...	R-F-W			

[注] 部位記号の説明は、表 12 を参照。

推定耐用年数の計算に先立ち、構造体を軸組 (壁体)、床組、小屋組の部位に区分する。また、各部位は水分の作用とその影響の程度に応じて表 12 のように区分する。

表 12 部位記号とその対象部位

記号	対象部位
... I ...	両側面に水まわり室がない内壁
... I-W	片側面に水まわり室がある内壁
W-I-W	両側面に水まわり室がある内壁
... N ...	内側面に水まわり室がない外壁—北側
... S ...	内側面に水まわり室がない外壁—北側以外
E-N ...	内側面に水まわり室がなく、雨どいが 90cm 以内にある外壁—北側
E-N-W	内側面に水まわり室があり、雨どいが 90cm 以内にある外壁—北側
E-S ...	E-S ...、E-S-W は北側以外の外壁
... F ...	上下面に水まわり室がなく、下面が地盤に面していない床組
... F-S	上面に水まわり室がなく、下面が地盤に面している床組
W-F ...	上面に水まわり室があり、下面が地盤に面していない床組
W-F-S	上面に水まわり室があり、下面が地盤に面している床組
... F-W	上面に水まわり室がなく、下面に水まわり室のある床組
R-F ...	最上階で、下面に水まわり室のない小屋組
R-F-W	最上階で、下面に水まわり室のある小屋組

[注] 水まわり室とは浴室・台所・洗面所・便所・玄関をいう。

3.5. 維持保全加算値 (M_w)

維持保全係数 M_w は、点検による加算値 M_1 と保存薬剤処理による再処理加算値 M_2 を設定し、次式によって求める。なお、 M_{11} , M_{21} , M_{22} の係数は表 13 ~ 15 より定める。

$$M_w = M_1 + M_2$$
$$M_1 = (P_{sp-1} - 0.3) \times M_{11} \quad (22)$$
$$M_2 = P_3 \times M_{21} \times M_{22}$$

ここに

- M_{11} : 保守点検係数 (表 13)
 M_{21} : 薬剤の再処理係数 (表 14)
 M_{22} : 維持難易係数 (表 15)

表 13 保守点検係数 (M_{11})

係数値	+0.3	+0.2	0.0	-0.2	-0.5
点検箇所数	20	15	10	5	0
点検周期	毎年	2 年おき	5 年おき	10 年おき	なし

- [注] 1. : 部位別の P_{sp-1} から 0.3 を減じた係数に上記数値を乗じる
 2. : 表 5 で係数が 1.1 以上、表 6 で係数が 1.5 以上の場合は 0.2 を加算する。

表 14 薬剤の再処理係数 (M_{21})

係数値	1.0	0.7	0.0
再処理間隔	8 年以内	15 年以内	再処理なし

表 15 維持難易係数 (材の露出面数, M_{22})

係数値	1.0	0.9	0.8	0.7
軸組	—	真・真壁	大・真壁	大・大壁
床組	4 面	3 面	2 面	1 面
小屋組	4 面	3 面	2 面	1 面

4. 耐用年数推定法を用いた LCD 手法

4.1. 問題領域

解析モデルは図 3 に示す標準的な規模の独立住宅とし、木造構法の構造物を想定し、木造躯体の耐用年数を推定するために解析条件を設定する。文献⁸⁾を参考として、解析モデルの構造は在来軸組構法で、基礎は布基礎とし、使用する材料・構法の概要を表 16 のように設定する。木造構造物の耐用年数推定における評価部位のグルーピングを図 4 に示す。

図 3 解析モデル

図 3 に示した平面図を 910mm モジュールによりユニット分割し、各ユニットを表 12 の部位区分に基づき分類する。本稿では解析モデルの 1 階の壁体、床組みの部位区分について、壁体は図 5、床組は図 6 に示す。部位区分ごとに、表 16 の右欄に示したように、使用材料、構法、施工検査、維持保全に関する係数名と、係数値を設定する。図 2 の計算フローにより、各ユニットごとに P_{sp} を算出し、 P_{sp} の

表 16 材料・構法の概要の設定

項目	材料・構法等の内容	係数名	係数値
基礎の立上り高さ	300mm	B_{11}	1.0
床高さ	450mm	B_{11}	1.0
屋根勾配 *1	5 寸 (5/10)	B_{11}	1.2
外壁	モルタル塗り *2	B_{12}	1.0
内壁	水まわり部分クロス張り	B_{12}	1.0
床組	換気口面積 300 mm ²	B_{12}	1.0
小屋組 *1	軒裏換気	B_{12}	1.0
防水下地の種類	アスファルトフェルト 20 kg 品	B_{13}	1.0
施工検査	10 項目, 4 回	C_w	1.0
建設地域 (劣化外力)	東海地方で 15 °C 以上の時間数の積が 5900 時間以下 内陸地域 部位区分	D_{11} D_{12} D_2	1.0 —
保守点検	毎年 10 箇所	M_{11}	0.0
再処理	再処理なし	M_{21}	0.0
維持難易	各部位による	M_{22}	—

- [注] *1 : 本稿では使用しない。
 *2 : 公庫仕様では係数 1.0 とする。

図 4 木造構造物の耐用年数推定における評価部位のグルーピング

値にユニット数を乗じ、平均値 P_{sp-A} は全体のユニット数で除して算出する。さらに式 (17) により推定耐用年数 P_{sl-A} を算出する。

4.2. 設計変数及び制約条件

■仮定条件 本稿では、木造躯体の耐用年数を推定する際に製材品等の耐久性能値 P_1 (表 2) について、また断面寸法別の加算値 P_2 (表 3) の建築部材の面積や厚さに影響を与える係数について、これらの原材料がライフサイクルアセスメントデータベース⁹⁾に掲載されていないため、係数値によるデータベースの変更は行わないものとする。さらに、通常は時間軸において、部材に用いる構成要素は異なる場合があるが、本稿では、評価対象期間中において、常に同じ構成要素の部材を使い続けるとして、時間軸における構成要素の変動は評価しないものと仮定する。

一方、部材の修繕周期に関して、文献¹⁰⁾より劣化の開始時刻、劣化速度変化時刻および減耗限界時刻を参考にし、部材毎にその値を設定する。部材の修繕の効果により部材の性能が初期性能に回復するものとモデル化し、劣化部位の箇所は予測できるものと仮定している。

本稿では、多目的最適化の設計変数として、構成要素及び修繕周期を用いる。しかし、木造躯体の設計変数としては、耐久性能値 P のみ用いる。耐久性能値 P を設計変数とし、算出される推定値の最小値から最大値までの各年を時間軸の変数として最適化を行う。例えば、推定値の最小値が 37 年、最大値が 165 年と計算された場合、ステップ数 129 が耐久性能値 P に従属する時間軸の変数となる。

制約条件としては、宗本³⁾の研究を参考として建材選択におい

図 5 部位区分の記号を付した図（壁体）

図 6 部位区分の記号を付した図（床組み）

て生じる可能性のある、例えば木造躯体における RC 造屋根小屋組のような非現実的な組合せなどは排除する。

■木造躯体における構成要素およびシナリオ 木造躯体の耐用年数は、第 3 章で示した耐用年数推定法により算定し、修繕周期を推定耐用年数 (Estimated Durable Years) Y_E とする。耐久性性能値 P を設計変数とし、木造躯体の耐用年数を推定する。木造躯体の設計変数として表 17 に示す数値を設定し、 P_1 , P_2 , P_3 の係数値をこの中から選択する。他の係数は表 16 の材料・構法の概要で設定した値を適用する。

表 17 木造躯体の設計変数 P_1 , P_2 , P_3

記号	項目	変数値
P_1	製材品等の耐久性性能値	0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.3, 1.4
P_2	断面寸法別の加算値	0.00, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60
P_3	保存薬剤処理による加算値	0.3, 0.7, 1.5

このときスラブおよび壁体の各ユニットを含めて躯体の耐用年数を推定するため、木造躯体が選択される場合、木造スラブおよび木造壁体が選択される条件を設ける。また、全ユニットの重み付け平均値が耐用年数の推定値であるため、木造躯体、木造スラブ、木造壁体に対して同値の推定値を用いることとする。これより、表 16 及び表 17 の値から推定耐用年数の最小値・最大値を算出し、表 18 に示す数値を修繕周期として選択する。本解析条件は文献⁸⁾を参考に、躯体の耐用年数を推定する際に躯体・スラブ・壁体までの部位を含めて評価を行うこととした。(図 4 参照)

表 18 木造躯体の構法に従うスラブ及び壁体の構法

	構法	変域 (年)
躯体	木造	$Y_{E,min} \sim Y_{E,max}$
スラブ	木造	$Y_{E,min} \sim Y_{E,max}$
壁体	木造	$Y_{E,min} \sim Y_{E,max}$

■外壁下地材における構成要素およびシナリオ 設計変数の選択可能領域について、非構造部材の例として表 19 に外壁下地材として選択される部材および部材毎のシナリオ変域を示す。

表 19 外壁下地材として選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
スレート板	10 ~ 30	20 ~ 100
ケイ酸カルシウム板	10 ~ 30	10 ~ 100
プラスタ (石膏)	10 ~ 30	20 ~ 100
モルタル	5 ~ 36	10 ~ 100
合成木材	7 ~ 30	10 ~ 100
パルプセメント板	10 ~ 30	20 ~ 100
アルミボード	20 ~ 40	15 ~ 100

5. 解析例

本章では、図 3 で示した標準的な規模の独立住宅に対して、木造構法の構造物を想定し、多目的最適化法(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, SPEA2)¹¹⁾を用いて多目的ライフサイクル最適化を行う。評価対象期間を推定耐用年数とし、ライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, LCC) 及びライフサイクルコスト年等価額 (Annual Value of Life Cycle Cost, AVLCC) の二目的最小化問題について解析結果を示し、考察を述べる。ここで、ライフサイクルコスト年等価額とは LCC を評価対象期間 (推定耐用年数) で除した値とする。

既報⁴⁾では評価対象期間を 100 年と設定し、100 年の間に建替えを行うことを想定した LCD を行っている。しかしながら、あらかじめ建替えを考慮した設計、つまり同じ設計内容の建築物を再び建て直すことは現実的ではない。そこで、本稿では建築物の耐用年数を評価対象期間として、ライフサイクル最適化を行うこととする。これより、建築物ごとに評価対象期間が異なるため、LCC を年単位に換算した値 AVLCC を目的関数として適用する。また、評価対象期間が小さい場合 LCC は小さいと考えられるが、評価対象期間が大きい場合に AVLCC は小さいと考える。これより、評価対象期間を変数として費用統合の異なる方式がトレード・オフの関係にあることが推測される。

5.1. 概要

耐用年数推定法を用いた木造構造物の二目的ライフサイクル最適化を行う。ここで、目的関数は LCC と AVLCC とし、次式の適合度関数 $f(c, t_p)$ を用いて、最適化計算を行う。ライフサイクルに関する設計を構成要素の取捨選択および各構成要素の維持保全シナリオの組合せ問題として、費用統合の異なる方式を同時に考慮した多目的最小化問題を次式で与える。また、評価対象期間は構造物の減耗限界である推定耐用年数と設定する。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad f(c, t_p) = \begin{cases} f_1(c, t_p) = C_{eval}(c, t_p) \\ f_2(c, t_p) = \frac{C_{eval}(c, t_p)}{t_{eval}} \end{cases} \quad (23) \\ &\text{subject to} \quad g_j \leq 0 \end{aligned}$$

ここに

- C_{eval} : 評価対象期間中のライフサイクルコスト
- t_{eval} : 評価対象期間
- $\mathbf{c}$: 空間的設計変数 (部材の種類および組合せ)
- $\mathbf{t}_p$: 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- g_j : j 番目の制約条件
- γ_1 : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

なお、制約条件を満たさない場合、 $\mathbf{f}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p)$ にペナルティ項を掛け合わせたものを新たな目的関数 $\mathbf{h}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p)$ として、以下のように多目的最適化問題を定式化する。

$$\text{minimize } \mathbf{h}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) = \mathbf{f}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) \gamma_1 \quad (24)$$

表 20 に計算に用いた SPEA2 のパラメータを示す。なお、本論では、二目的最適化においてアーカイブ個体群のサイズを 25 に設定する。

表 20 SPEA2 パラメータ

Population	100
Archive	25
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

5.2. 木造建造物の多目的ライフサイクル最適化

本節では、耐用年数推定法を用いた木造建造物の二目的ライフサイクル最適化を行い、解析結果と考察を述べる。図 7 に LCC - AVLCC の二目的最適化における最終世代のアーカイブ個体群の目的空間内における存在位置を示す。目的関数空間における個体群は、横軸に LCC [yen]、縦軸に AVLCC [yen/years] として表現する。また、図 8 では最終世代のアーカイブ個体群を横軸に推定耐用年数 [years]、縦軸に LCC [yen] として表現し、同様に図 9 では横軸に推定耐用年数 [years]、縦軸に AVLCC [yen/years] として表現する。図 7 より、完全最適解が得られていないことより、本解析では LCC と AVLCC についてはトレード・オフの関係にあることがわかる。

図 8 ではアーカイブ個体群の各個体の推定耐用年数が増加するとともに LCC が線形的に増加していることがわかる。図 9 ではアーカイブ個体群の各個体の推定耐用年数が増加するとともに AVLCC が減少していることがわかる。このことから本解析では、評価対象期間を変数として LCC と AVLCC の間にトレード・オフの関係があることがわかる。

また、本稿で提案した手法の有効性について、2 点記述する。1 点目は耐用年数推定法を用いることで、躯体を含めた木造構造体の耐用年数を定量的に算出できたことで、実用性の向上に対する有効性が確認できた。2 点目は耐用年数推定法を用いることで、部材の構成要素に加えて、構法、施工方法、環境条件、維持管理方法を LC 評価値に反映できることである。本稿では、表 16 の材料・構法の概要として、耐久性能値以外の各変数を一定値に設定した。表 16 の各変数を変化させることで、LC 評価値が受ける影響を定量的に示すことができる。耐用年数推定法を用いることで、各変数の変化を評価できるようになり、実用性の向上に対する有効性が確認できた。

仮定条件について、本稿では解析上の入力データとなる部材の原材料や面積、厚みに対して、係数値の変化の影響を考慮していない。

これより、図 8 で示した推定耐用年数の増加による LCC の線形的な増加は一般性に乏しい結果であり、係数値の影響を考慮した場合にアーカイブ個体群の分布形状が変化することが十分に考えられる。データの蓄積及び材料種別のより詳細なデータ整備が望まれる。

図 7 LCC—AVLCC 二目的最小化 Archive

図 8 LCC—AVLCC 二目的最小化 Archive, Y_E — LCC

図 9 LCC—AVLCC 二目的最小化 Archive, Y_E — AVLCC

6. 結

本稿では、文献⁸⁾で提案された耐久設計法に用いられる耐用年数推定法により、建築構造物の修繕周期となる木造躯体の耐用年数を算出した。耐用年数を定量的に推定することで、建築構造物の実供用期間内のライフサイクルデザインができる。これより、遺伝的アルゴリズムを用いた LCD 手法による設計支援ツールに耐用年数推定法を導入することにより、実用性の向上を図り、提案する手法の有効性を検討した。また、評価対象期間を推定耐用年数とすることで、ライフサイクルコスト年等価額を新たに目的関数として加え、費用統合の方式の異なるトレード・オフ問題を構成し、これを解いた。

耐用年数推定によるライフサイクルデザイン手法は、躯体に限らず地、仕上げの材料を含む全ての構成要素に対して適用することが理想的であるといえる。しかし、計算負荷が増すことや、詳細に設定し過ぎることで入力データの作成が膨大になる等の問題が生じる。これより、耐用年数を推定する際の評価部位のグルーピングにおいて、詳細な設定を行うことと計算時間とのトレード・オフ関係が考えられ、本設計支援ツールを用いる際に、設計者に評価部位の適用範囲の設定が委ねられることになる。

今後、構法及び材料別の単価、体積等のデータを蓄積することにより、より現実に近い結果が得られると考えられる。より詳細で精度の高いデータベースの構築が待たれる。

■記号・変数一覧 本稿で提案する LCD 手法で用いる変数について、一覧を表 21 に示す。 t_{eval} は評価対象期間、 Y_E 推定耐用年数、 P_{sl} は木造構造物の推定耐用年数であり、本稿では同数値ではあるが同義の変数ではない。

表 21 記号・変数一覧

記号	項目
t_{eval}	評価対象期間
C_{eval}	評価対象期間中のライフサイクルコスト
Y_E	推定耐用年数
P_{sp-1}	1 次推定耐久性能値
P_{sp-2}	2 次推定耐久性能値
P_{sp-1A}	1 次平均推定耐久性能値
P_{sp-2A}	2 次平均推定耐久性能値
P_{sp}	推定耐久性能値
P_{sl}	木造構造物の推定耐用年数
P	耐久性能値
B	構造級別係数
C_w	施工検査級別係数
D	劣化外力係数
M_w	維持保全加算値
P_1	製材品等の耐久性能値
P_2	断面寸法別の加算値
P_3	保存薬剤処理による加算値
B_{11}	水分、湿分を木材に作用しにくくする構法の種別による加算値
B_{12}	建物内に浸入した水分、湿分を屋外に排出するような構法の種別による加算値
B_{13}	建物内に浸入した水分、湿分が侵入したとしても、木材が直接それらと接触しないような構法の種別による加算値
D_{11}	シロアリの分布・地域区分係数
D_{12}	腐朽菌の生育係数
D_2	部位劣化外力係数
M_1	点検による加算値
M_2	保存薬剤処理による再処理加算値
M_{11}	保守点検係数
M_{21}	薬剤の再処理係数
M_{22}	維持難易係数

参考文献

1) 日本建築学会：気候温暖化への建築分野での対応（1997 年 12 月 2 日，会長声明全文），建築雑誌，Vol. 113，No. 1417，pp. 90–91，1998.

2) 弥田俊男，宗本順三，吉田哲，高野俊吾：独立住宅モデルの建材選択システムに伴う 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－，日本建築学会計画系論文集，No. 524，pp. 77–84，1999.10.

3) 宗本順三，鈴木修一，張本和芳，吉田哲，高野俊吾：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－その 2. GA を用いた「標準問題の建物モデル」への住宅建材・工法選択システム－，日本建築学会計画系論文集，No. 551，pp. 85–92，2002.1.

4) 大森博司，野田賢：遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.601，pp.181–188，2006.3.

5) 大森博司，小林春之，内藤雅子：建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究－不確定性のライフサイクル評価へ及ぼす影響－，日本建築学会構造系論文集，No.627，pp.765–771，2008.5.

6) 内藤雅子，蜂須賀聖力，大森博司：遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究－地震ハザードの考慮によるライフサイクル評価値の相連－，日本建築学会構造系論文集，No.640，pp1083–1090，2009.6.

7) 蜂須賀聖力，中田聡，大森博司：不確定性を考慮した建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究－その 4:単価の不確定性の検討－，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1（構造 1），pp309–310，2009.7.

8) （財）国土開発技術研究センター 建築物耐久性向上技術普及委員会：木造建築物の耐久性向上技術 建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編，技報堂出版，1986.

9) 日本建築学会：建物の LCA 指針－温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール－，2006.

10) 建築・設備維持保全推進協会：「建築躯体・部材・設備等の耐用年数調査」報告書，1998.

11) E. Zitzler, M. Laumanns and L. Thiele：SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks, 2001.

（2011 年 3 月 24 日原稿受理，2011 年 9 月 8 日採用決定）