AHP による重要度評価を用いた部材選定方法及び修繕計画策定手法 に関する研究

A STUDY ON MATERIAL SELECTION METHOD AND REPAIR PLAN METHOD WITH NECESSITY EVALUATION BY AHP

守谷 謙一*, 近江 隆**, 石坂 公一***

Kenichi MORIYA, Takashi OMI and Koichi ISHIZAKA

We analyzed judgement of building utility performance with physical, social, functional element of buildings.
The following point became obvious.

1. At present repair plan is rational, for close to an optimal repair-plan.
2. It needs to maintain it more briskly than a standard repair plan, to raise the rationality of a repair-plan in an architecture main body.
3. It is ideal to make a little maintenance-cycle long than it's standard, to raise the rationality of a repair-plan in equipment.
4. It is necessary to measure long-life-ization of a building from an administrative face, to improve a long-term effect in equipment.

Keywords: Life Cycle Cost, Analitic Hierarchy Process, Generic Algorithm, Building Repair Plan, Business Building

ライフサイクルコスト, AHP, 遺伝的アルゴリズム, ビル修繕計画, オフィスビル

1 はじめに

1.1. 背景

近年、我が国経済の成熟化にともない、高度経済成長期に建設された膨大な建物に対する維持管理・機能更新需要が増大してきている。また、良好な社会資本の蓄積、地球環境の保全等に関する社会的要請の高まりを背景として、建築のロングライフ化の実現が強く求められている。スクラップ&ビルドの時代は終わりストック対策が中心となる時代に入りつつあると言えよう。このような社会的要請に対処するためには、建築の企画・設計から建設、維持保全、廃棄、再利用に至る建物の全ライフサイクルにわたる総合的な検討を行う LCC (Life Cycle Cost) 分析の考え方を積極的に導入することが重要になってきている。

建築物を対象とした LCC 分析は、従来のように竣工時点のみの性能を重視するのではなく、建物の全生涯にわたって建物がその機能・性能を十分に発揮できるように企画・設計から施工・維持管理の各段階で適切な方策を講じるとともに、社会情勢の変化に対する可能な限りの対応策をも建設企画段階において総合的に織り込もうとする概念であると考えられる。

建物の LCC 分析に関する既往の研究を見ると、石塚¹⁾で LCC 算定モデルの定式化が提案されて以来、LCC 分析に関する研究は多数

見られる²⁾³⁾⁴⁾が、それらのほとんどは実際の資料をもとに維持管理方式が建物の寿命・コストにどれだけ影響を与えるかを実証的に明らかにしたものであると言える。LCC 分析を実際の建設・維持管理計画の立案に適用していく場合には、何らかの意味で「最適」という概念を導入したうえで計画を立案することが必要である。しかし、既往の研究の中にはこのような「戦略的視点」に立って維持管理方式の選択や建物部材及び設備の耐用年数の選択等を初期コスト・維持管理コストとの関係から分析した研究はあまり見られない。

1.2. 研究の目的

本稿では LCC 分析を実際の建設・維持管理計画に適用するための手法の開発を目指し、建物の劣化・修繕過程に関する基本的なモデルを設定した上で、これに遺伝的アルゴリズムを適用することで、適切な計画を立案する手法を提案することを目的としている。

遺伝的アルゴリズムは、建築分野においてもいくつかの研究⁵⁾⁶⁾において用いられているが、LCC に関して用いられた例はあまり見られない。遺伝的アルゴリズムは多数の選択肢の中から最適な組み合わせを選択する際に有効な手段であり、多数の修繕計画の組み合わせからなる LCC 計画の立案にも有効であると考えられる。

そこで、本稿では建物の様々な部材に対応可能な劣化・修繕の数学的モデルを作成し、それに対する最適修繕計画を導く方法について

* 自治省消防庁予防課 工博

** 東北大学大学院工学研究科都市建築学専攻 教授・工博

*** 東北大学大学院工学研究科都市建築学専攻 助教授・工博

Fire and Disaster Management Agency, Ph. D. (Eng.)

Prof., Dept. of Architecture, Tohoku Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Tohoku Univ., Dr. Eng.

て検討する。

本稿は文献⁷⁾を基としてその発展を図ったものである。文献⁷⁾では、建物全体を一つの部材と見なし、それに対するLCC評価の最適化を図る手法を提案したが、本稿では多部材で構成された建物を対象とした場合にもLCC評価が可能となるようにモデルを拡張している。そのために、各部材ごとの重要度の差異をアンケート調査のデータをベースとして、AHP (Analytic Hierarchy Process: 階層化意志決定法) によって求めた。また建物の建設時の各部位における材料についても複数の候補から選択することを想定し、より一般的な部材選定計画の立案のための方法を検討した。

2 AHPによる重み付け

2.1. AHP

AHP⁷⁾は、アメリカのSaaty教授が提唱し、現在広く応用されている不確定な状況や多様な評価基準における意志決定手法の一つであり、その手順は次のようである。

- 複雑な問題を評価目的、評価構造と代替案によって階層構造に分解し、階層図を書く。
- 階層の各レベルの要素をすぐ上のレベルの要素 (評価基準) を視点として、一対比較し、人間の定性的判断を定量化する尺度によって、一対比較行列を作る。
- 各一対比較行列の固有ベクトルの計算とその整合性評価指数の検定及びウェートの合成を通じて、評価結果としての総合ウェートを得る。

2.2. 本稿におけるAHPモデル

(1) 上位項目

本稿におけるAHPのモデルは、建築、設備それぞれについて文献¹⁰⁾で定式化されている劣化の3要因、すなわち破損や汚損などの「物理的な性能の劣化」、居住性やユーザーニーズへの対応性、デザインの陳腐化といった「機能的な劣化」、用途の変更や周辺環境の変化に対する経営方針の変更や収支の悪化などの「社会的な要因」を修繕の意志決定要因における上位項目として設定した。

(2) 中位項目

中位項目としては、上位項目の場合と同様に文献¹⁰⁾で各劣化の内容として定式化されているものを設定した。すなわち、物理的要因としては、部材が壊れて使えない状況である「物理劣化」、使用には困らないが外観を損ねる「汚れ」の二項目を、機能的要因としては、レイアウト変更や新規設備納入場所のなどに対する「利便性の悪化」、騒音や狭隘感といった「快適性」、デザインの流行遅れなどの「陳腐化」、社会的要因としては、維持管理費用の増大、収支の悪化などの「費用」、用途変更や環境変化への対応といった「経営方針の変更」である。

(3) 代替案

代替案としては、文献⁷⁾で述べられている建物の各部材のうち、建物管理者へのアンケート調査結果をデータとして用いることを考慮し、使用者にとって日常的な劣化認識の対象となる部分として、各中位項目ごとに建築では外壁、内壁、天井、床、建具、設備では照明、通信、給排水、空調、搬送機を設定した。

2.3. 建物種類と重要度分布

(1) 分析対象

分析は1997年に仙台市内のオフィスビル・商業ビルのうちから住宅地図をベースに無作為に抽出した300棟のビルについて、管理者に対して行ったアンケート結果をもとにした。

アンケートは、郵送と戸別訪問によって行い、有効回収数107通を得た。その概要は表1に示すとおりである。なお商業系・事務系の区分は延べ床面積の過半を占める用途にしたがって分類している。

調査では設問として、建物の用途、床面積、規模、構造の他、建物を修繕する際に重視する部位及び留意する点を尋ねた。特に建物の重要度を分析するための設問は、物理的・機能的・社会的要因についての判断を一対比較によって行い、中位項目における部材間の比較は各項目ごとに部材の重要度を3点から0点までの点数をつけてもらうことによって行った。

表1 重要度分析に用いたアンケート対象概要

用途	床面積	建設年代					総計
		1950	1960	1970	1980	1990	
事務系	～2999㎡		3	12	5	3	23
	3000～5999㎡		8	9	8	6	31
	6000㎡～	3	3	8	6	5	25
	未記入	1			1	1	3
事務系計		4	14	29	20	15	82
商業系	～2999㎡			3	3		6
	3000～5999㎡			5	4	1	10
	6000㎡～		1	3	3	1	8
	未記入				1		1
商業系計			1	11	11	2	25
総計		4	15	40	31	17	107

(2) 重要度分布

アンケート調査の結果から、建築、設備それぞれについて、AHPにより上位項目、中位項目、代替案の各段階における重要度を解析した。107件の回答について、全体を一括したもの、用途別2区分(業務用・事務用)、延べ床面積による規模別3区分(3000㎡未満、3000～6000㎡未満、6000㎡以上)、規模別2区分(6000㎡未満、6000㎡以上)の場合についてそれぞれ重要度を求め、AIC (Akaike Information Criterion) を用いて有効な区分方法を検討した結果(表2)、規模を2区分して分析することが最も適切であり、ついで全体を一括して取り扱うことが適切であることが判明したので、以降の分析では規模別に中小規模(延べ床面積6000㎡未満)と大規模(延べ床面積6000㎡以上)に分けて検討を行うこととした。

表2 重要度に関するAIC情報量比較

AIC情報量		建築	設備
全体	—	341.95	340.56
用途別	2区分	349.82	348.39
規模別	3区分	344.97	343.56
	2区分	337.00	335.60

図1に示すのは、規模別(2区分)で見た場合の建築、設備の重要度分布である。

建築本体の物理的要因で重視されたのは外壁で、使用者の目に触れやすいことから重視されたと考えられる。また、機能的要因から重視されたのは、床、天井であり、利便性を高めるために天井や床の機能的配置が考慮された結果であると思われる。社会的要因からは、外壁・建具が重視される傾向があり、デザインの陳腐化などが目立つ部分であることによると考えられる。また規模に関わらず内壁、昇降機に対する重要度は低い。これは、これらの項目が社会的要因として作用する面が少なく、また物理的・機能的要因においてもあまり重視されない傾向があることによるものと思われる。

(上段: 中小規模)
(下段: 大規模)

(上段: 中小規模)
(下段: 大規模)

図 1 各部位の重要度分布(上段・建築本体、下段・設備部分)

規模による差異をみると、大規模のビルでは床、内外壁の重要度が高く、中小規模のビルでは天井、建具の重要度が高くなっている。上位項目における差異をみると、大規模の場合は機能的要因を重視する傾向が強いが、中小規模の場合は物理的要因を重視する傾向が強い。代替案での重要度は上位・中位項目の重要度をも考慮した加重平均値として得られているので、この結果は、大規模の場合には使い勝手を重視し、中小規模の場合には物理的な劣化を重視するという傾向を反映したものであるといえる。

設備の物理的要因で重視されるのは通信、空調の各部位で、これらの部位は使用者が日常的な使用頻度が高いために劣化が感じられやすいことに起因していると考えられる。機能的要因から重視され

たのは、通信、空調、照明である。設備の各部位はやはり日常的な使用頻度が高いために更新・修繕作業が行われることが重要視される原因であると考えられる。また、社会的要因からは各部位間に重要度の差があまりみられなかった。

規模別に差異が見られる点については、大規模では照明を重視し、中小規模では空調を重視する傾向が見られる。照明の重視は、維持管理費、利便性の各項目が重視されることによることから、大規模な建物では照明の規模が大きくなることによる電気負荷の軽減や照明レベルの部分調整などが必要とされていることがうかがえる。空調には維持管理費の項目が大きな比重を占めているが、中小規模の場合にセントラル空調からユニット空調に切り替えることによる管理費用の軽減に関心が集まっていることに対応していると思われる。

3 最適部材選定の方法

3.1 劣化のモデル

(1) 対象

基本的なモデルの対象を本論文では「部材」と称することにし、部材は「躯体」「外装仕上げ」といった『部位』と、「タイルによる仕上げ」「アクリル系塗料による仕上げ」といった『材料』によって構成されるものとする。なお、対象となる建物はオフィス・商業系を想定している。

また、LCC では建物の生涯の運用に対する評価をおこなうが、ここでは建物の生涯にかかった総費用に対する得られる総収入の比に相当するものを評価指標として用いることとする。

(2) モデルの概念

ここで、部材モデル作成に際して最も基本的な部分である評価関数、部材性能関数を概念的に説明する。

① 評価関数

評価関数の値は、部材の物理的性能(P: Performance)、部材にかかる費用(C: Cost)によって構成されると考えられるが、その具体的な形は経営的な判断によって決定されることができると考えることができる。経営的判断の結果としての物理的性能の評価は、社会的要因や経済的要因によって規定され、物理的性能そのものではないことが一般的であろう。ここでは、社会・経済的要因をも考慮した経営的判断の結果としての物理的性能の評価値を「効用」(U: Utility)と呼ぶこととし、建物から得られる賃料に相当すると考える。ここではその評価関数として、「効用」を「費用」で割ったもの U/C を考え、これを費用対効用 (Value Index: VI) と呼ぶこととする。

② 物理的性能

物理的性能(P(t))は、修繕を行わない場合には時間の経過にともなって低下、すなわち劣化するものとする。この自然な劣化に対して、経営期間中に満足な性能を保持するために修繕を行うが、修繕量を時間軸に沿って並べた関数が修繕計画となる。

3.2 モデルにおける各関数の展開

(1) 物理的性能

劣化は、部材の設置からの時間(t)に関する性能値 $P(t)$ によって『劣化曲線』としてあらわす。劣化曲線は $P(0) = P_0$ 、 $P(T_1) = P_1$

($P_0 > P_1$)、 $0 \leq t \leq T_1$ の全域にわたって $\frac{dP(t)}{dt} < 0$ である。劣化

曲線としては種々の単調減少関数が考えられるが、劣化パターンを

パラメトリックに表現できることから、本稿では $P(t)$ の具体的な形として、 $P(t) = \frac{P_1 - P_0}{T_1^m} t^m + P_0$ を想定する。ここで、劣化のパター

ンは劣化指数(m)によって表現される。すなわち、時間の計画により直線的に劣化する場合は $m=1$ 、初期に大きく劣化する場合は $m<1$ 、初期にはあまり劣化しないが後期に劣化が進む場合は $m>1$ である。 m の値は部材によって異なるが、具体的値は修繕履歴から類推するものとする。また部材の初期性能を P_0 、部材の耐用年数を T_1 で表現し、 T_1 時点の性能を耐用性能 P_1 で表現している。

すなわち、ここでは、部材の耐用性能は何ら修繕を行わないで自然的な劣化にまかされた場合に、性能が P_0 から P_1 に達するまでの時間として定義している。

物理的性能の劣化に対する管理者側の行為を $R(t)$ であらわす。 $R(t)$ には「取替」と「修繕」が含まれる。「取替」は部材の性能を設置時点に戻す行為をさし、このとき費用として新部材の購入費用(初期費用と同額) + 廃棄費用がかかるものとする。また「修繕」は部材の性能を回復させる行為をさすが、部材の性能を根本的に回復するのではなく、性能の部分的な修復を行うものとして、劣化傾向(劣化曲線の傾き)は変化せず、全体に修繕量だけ性能が向上するものとする。この仮定はその妥当性を実証的研究の積み重ねによって検証する必要があるが、本稿では得られるデータの制約もあり、手法の開発という本研究の目的とも照らして、一応このような仮定をおくこととした。

図 2 に物理的性能劣化及び修繕・取替による回復を模式的に示す。

図 2 修繕および取替の模式的図

(2) 物理的性能に関する経済的判断

各時点の物理的性能は P_0 と P_1 の範囲になるが、本稿では物理的性能を社会・経済的要因から評価した「効用」を用いるため、性能を効用に変換する必要がある。

物理的性能と効用の変換は、管理者または対象部位によって単調増加関数の範囲で様々な形をとると考えられるが、ここでは平均的な変換の形態として、図 3 に示すように性能と価値の変換が線形に行われるものと仮定した。

式であらわすと、時点 t における効用は次式となる。

$$U(t) = U_0 \frac{P(t) - P_0}{P_0 - P_1}$$

ここで U_0 は物理的性能が P_0 の場合の効用であり、 $U(0)=U_0$ である。 U_0 を初期効用と呼ぶこととする。また、性能が一定値 (P_0) 以下になった時に効用が 0 になるものと考え、この値 (P_0) を効用基準値と呼び、経営主体の部材の物理的な性能に対する評価を反映する

ものとした。ここで当然 $P_1 \leq P_0 < P_0$ であると考ええる。

図 3 価値と性能の変換

(3) 費用

新規に部材を設置する際には部材の初期費用(C_0)がかかるものとし、部材の撤去に際しては、廃材の廃棄費用・解体費用等で撤去費用(C_d)がかかるものとする。また修繕量が多くなることによって一般に費用は大きくなる。本稿では修繕量が 0 を超えているとき、修繕量に比例した費用を要するものと仮定する。これらの費用については各部材ごとに文献¹⁰⁾などに示される実際の修繕の傾向から判断して設定を行う。

(4) 複数部材を扱う場合の評価関数の拡張

本稿では、複数部材を扱うことから、上述の評価関数を拡張する。まず費用については、各部材費用を合計する。 t 時点の費用は次式であらわされる。

$$C(t) = \sum_{i=1}^I C_i(t) \quad i: \text{部材} \quad (i=1 \sim I)$$

効用は、各部材の最大効用を 1 に規準化し、各部材ごとの重要度を用いて、その線形和として求める。以上から、次の式を複数部材の場合の評価式として用い、以下ではこの値を VI (Value Index) であらわす。

$$VI(t) = \frac{\sum_{i=1}^I \left[\left\{ \sum_{\tau=0}^t (w_i U_i(\tau)) (1+r)^{-\tau} \right\} \right]}{\sum_{i=1}^I \left[C_i(t) (1+s)^{-t} \right]} \quad i: \text{部材} \quad (i=1 \sim I)$$

ここで τ : 時点、 s : 利子率、 r : 効用の割引率である。

(5) 変換

以上より、パラメータとして各部材の耐用年数(T_{1i})、設置価格(C_{0i})、廃棄費用 (C_{di})、劣化指数(m_i)、初期性能(P_{0i})、効用基準値(P_{1i})、初期効用値(U_{0i})及び部材ごとの管理者の重要性の判断(w_i)、利子率(s)、効用割引率(r)が設定され、修繕量もしくは修繕費用であらわされる修繕計画が与えられれば VI は評価できることとなる。

3.3. 最適修繕計画選定方法(遺伝的アルゴリズム)

(1) 概念

本稿では以上に述べたモデルのもとで最適な部材選定および修繕計画を算出することを目的としている。

本稿の修繕計画の評価モデルは、経年及び修繕量とその費用との関係によって表現することができる。こうした評価モデルの最大化には、一般に最適制御の方法が用いられる。

しかしながら、本稿のモデルでは①性能の上限・下限が制限されることによる不等式制約がかかるために数理解を求めることが困難であり、②取り替えが生じる際に費用と修繕量の関係が不定になることから、現在一般的に行われる数理的方法の適用が困難である⁹⁾。一般に用いられる変分法では、複雑な不等式制約のかかる問題はダミー変数を用いて等式制約に置き換えて解析解を求める。しかしながら、その計算には複雑な定式化が必要であり、本稿では実際の計画に適用する場合における簡便性と計算時間の短縮を図る目的から、シミュレーションによる探索を検討することとする。

本稿では、離散化した $R(t)$ に対するシミュレーションを行うことで修繕計画を求める。 $R(t)$ を n 段階の離散的な値をとるものとし、部材数(I)、経営期間(A)における全部の修繕レベルについてのシミュレーションを行うと $n(A)$ 回の計算が必要となり、一般的な場合には実用的な時間範囲内において結果を得ることが非常に困難である。

そこで、より少ない試行によって最適な修繕計画を行うためのアルゴリズムとして、遺伝的アルゴリズムによる解法を提案する。

(2) 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム(GA: Generic Algorithm)とは、生物の形態・形質が遺伝子により進化する過程を模倣したアルゴリズムである¹⁰⁾。本稿では各パラメータを次のように設定した。

1. 本稿では各年における建設時の部材選択及び取替・交換を含む修繕計画($R(t)$)を遺伝子とし、それを部材数×経営期間分、並列したものを染色体とする。
2. 染色体の環境への適合度は VI によって評価する。
3. 交叉は一点交叉とし、突然変異を遺伝子ごとに 10% の確率で生じるものとする。

(3) 遺伝子の構成

本稿の遺伝子は、以下の 0~12 の値をとるものとする。

0: 修繕しない

1~10: 修繕量が 0.1~1.0 の修繕を行う。

11: 標準部材に取り替える。

12: 部材を標準部材と同じ初期性能・耐用性能を持ち、劣化指数 m 、耐用年数 T_1 が異なる他の部材 (代替部材) に交換する。

ただし、 $R(0)$ は建設時における部材の選択をあらわす遺伝子であり、値としては 11 または 12 のいずれかをとるものとしている。

(4) 親染色体の選定

子を作るための親の選定方法には、評価値を重視する方法やランダムに選択する方法などがあるが、今回は染色体の多様性の保持を重視し、評価値によって親を 10 分割し、評価値の平均値が上位のグループから優先的に採用するように選定を行い、一時的に優秀な一つの染色体のみが継承されて局所的最適値に陥る危険を回避した。また収束性の向上のため、その世代までで最大の VI をもつ修繕計画に関しては、常に親として含まれるものとした。

(5) 遺伝的アルゴリズムの有効性

遺伝的アルゴリズムの計算量はほぼ(染色体数)×(世代数)×(染色体長)に比例する。本稿では計算機資源の制約も考慮して、染色体数を 200、世代数を 10000 とした。

図 4 に、計算期間 8 年の場合について、全ての修繕計画の組み合わせを計算した場合の VI の最大値を 100% としたときに GA を用いた場合の VI の最大値を示す。この場合は概ね 2000 世代で最適値の

99% の値が得られ、以降の変化はほとんどないことから、本稿で採用したアルゴリズムは一応の有効性を持っているものと考えられる。

図 4 全数探索時の VI と GA の VI の比較

3.4. 局所的最適化

遺伝的アルゴリズムは、最適値付近までの収束は比較的早い、それ以降の最適値の探索効率は低下する性質があることが知られている。そのため、最適値の探索にあたっては遺伝的アルゴリズムと他の局所的探索手法を組み合わせる用いることが一般に行われている。本稿では、遺伝的アルゴリズムによって算出された修繕計画について、その近傍においてよりよい評価となる修繕計画を探索するため、次の手順に従って順次サーチを行った。

1. 各年次について、計画の変更を加えた場合の評価値を調べ、それが変更前に比較して向上する場合、計画をその年次に限って変更する。
2. 変更がなされた場合にはその計画をもとに繰り返し計画の変更を行う。
3. 各年次の計画を変更しても評価値が向上しなくなるまで 1~2 を繰り返す。

局所最適化を行うことにより、遺伝的アルゴリズムの結果に比べて 5% 程度の改善効果が得られた。

4 各部材のパラメータ

4.1. 部位構成

表 3 モデル構成部材

部位	材料	部位	材料
建築 躯体	杭	建築 内外装	外壁
	躯体		天井
	コンクリート		床
設備 基幹系	屋根		内装
	電気		天井
	配電盤	設備 端末系	照明
	変圧器		空調
	キュービクル		給排水
	ボイラー		給水口
	冷凍機		給湯口
	冷却塔		衛生機器
	給排水		ガス
	受水槽		エレベータ
	高圧水槽		
	排水通気		

建物を構成する部材について、文献¹¹⁾を参照して表 3 に示すように部材の構成を行った。各種配管類についてはそれぞれの端末に含まれるものとする。

これらの部材について、文献^{12)・13)}等を用いて数量の予測を行うこととした。各種面積等の計算に当たっては、建物を直方体状の形態であると想定して行った。

1. 延べ床面積と階数を適宜想定する。
2. 階数から構造方式 (RC、SRC) を想定する。構造方式と延べ床面積から鉄骨量、コンクリート量を定める。
3. 延べ床面積と階数から建築面積を求める。建築面積は屋根面積と対応する。
4. 建築面積に従ってコア方式を求め、各種コア方式(中央コア、片側コア、両端コア)の標準的な幅から幅と奥行きを求める。
5. 標準的な階高 (賃貸ビルで 3.556m) と幅・奥行きから建物全面の壁面積、正面方向の壁面積を求める。これらの面積は外壁、建具面積に対応する。
6. 建築面積から柱数を想定する。ここでは柱スパンとして 8×12m を標準として与えている。
7. オフィスの平均的居住人数を元にエレベータ数を想定する。
8. 一般的な各設備の必要量を算定する。

4.2. 価格

価格については、文献¹⁴⁾を参照して各材料ごとに材工ともの費用を求め、各部位において必要とする量と価格を乗じ、合算した金額を直接工事費とした。

計算に用いた数量の約 2000 m²の某ビルについての例を表 4 に示す。また文献^{14),15)}に掲載されているいくつかのビルについて延床面積と階数から建築、設備費用を求め、実際の工事費と比較した。相関係数は建築で 0.94、設備で 0.87 となり、概ね整合しているといえる。

表 4 工事費概算例

延床面積	2,086 m ²	冷凍機	60 USRT
階数	9 階	ボイラー	217 *10 ⁷ kcal
建築面積	232 m ²	空調風口	438 m3/min
柱数	6 本	設備容量	188 kw
人数	230 人	照明負荷	33 kw
コアシステム	片寄せコア	照明本数	334 本
全周長	63 m	動力負荷	154 kw
(X)	20 m	受水容量	9 kl
(Y)	23 m	高架水容量	2 kl
壁面積	2026 m ²	給排水面積	173.2196 m ²
内(正面)	642 m ²	(空調)	143.6372 m ²
エレベータ数	2 台	(電気)	29.58246 m ²

部位	材料	単価	数量	価格(材工とも)
基礎	PC箱中掘20m	236,000	6	1,416,000 円
	縦切り ガーファン	1,010	232	234,320 円
	鉄骨 100kg/m ²	287,000	209	59,983,000 円
	コンクリート	22,500	5,215	117,337,500 円
	アスファルト葺出	6,070	232	1,408,240 円
外壁	二丁タイル掛け	15,834	1,385	21,930,090 円
	カーテンウォール	150,000	642	96,300,000 円
床	タイルカーペット	10,840	2,086	22,612,240 円
	アクリルシン	5,630	2,026	11,406,380 円
	化粧石膏ボード	3,170	2,086	6,612,620 円
天井				

設備				
176,291,000				
			略	

直接工事費	515,531,390 円		247,139 円/m ²
間接費	103,106,278 円		
工事費計	618,637,668 円		296,566 円/m ²
設備工事費	662,554,000 円	内設備費	180,000,000 円
直接工事費	515,531,390 円		247,139 円/m ²
間接費	103,106,278 円		
工事費計	618,637,668 円		296,566 円/m ²
設備工事費	662,554,000 円	内設備費	180,000,000 円

4.3. 材令と劣化曲線

部材に設定される耐用年数(T*)は、減価償却に用いられる法定耐用年数、実際に使用している場所での交換経験に基づいた計画更新年数がある¹³⁾。本稿では、実際の使用状況に近い状態をモデル化するため、計画更新年数を部材に設定される耐用年数(T*)とみなした。

前述したように本稿で計算に用いる耐用年数(T₁)は、修繕を行わなかった場合に部材の性能が耐用性能(P₁)に達する時点を示す。計画更新年数は標準的な修繕計画¹³⁾にしたがって修繕を行った場合に部材が耐用できる期間であるため、本稿の計算で用いる耐用年数とは異なっている。そこで、部材に定められた標準的な修繕計画(b(t))と計画更新年数(T*)から計算で用いる耐用年数(T₁)および劣化指数(m)を以下により算出した。

部材の劣化関数(P(t))は、初期性能 P₀ を P₀=1、耐用性能 P₁ を P₁=0 となるように基準化しても劣化指数 m、耐用年数 T₁ は変化せず、一般性は失われぬので、以下では P₀=1、P₁=0 と想定する。この想定のもとではなにも修繕を行わない場合の、時点 t における部材の性能は P(t)=1-(t/T₁)^m とあらわされる。時点 τ に修繕(修繕量 b(τ): 修繕が行われなかった場合は b(τ)=0 と考える)が行われた場合には次式となる。

$$P(t) = 1 - (t/T_1)^m + \sum_{\tau=0}^t b(\tau)$$

したがって計画更新年数の定義から次式が成り立つ。

$$P(T^*) = 1 - (T^*/T_1)^m + \sum_{\tau=0}^{T^*} b(\tau) = 0$$

また性能値が 1~0 の範囲となることから、0<t<T* の範囲で次式が満足される必要がある。

$$0 < P(t) = 1 - (t/T_1)^m + \sum_{\tau=0}^t b(\tau) < 1$$

これらの式から T* と b(τ) が与えられた場合の T₁ と m について上限値と下限値を算出し、T₁ が最も長くなるように T₁、m を定めた。

5 建物種類による修繕計画の違い

本稿では、中小規模のオフィスビルを 6000 m²未満、大規模のものを 6000 m²以上としているが、規模別の修繕計画について検討するため、中小規模として 2500 m²9 階建て、大規模のものとして 9000 m²9 階建てのものを比較した。なお、利子率、効用割引率についてはそれぞれ 2% とし、効用基準値は標準的な管理者に対する値として 0 を想定した。

以上の前提のもとで得られた最適な修繕計画について、標準的な修繕計画と比較したものを表 5 及び図 5、6 に示す。

表 5 最適修繕計画の比較

中小規模(2500m ²)		費用単位:万円			
		初期費用	内外装	設備全体	設備全体
初期費用	8,274	7,715	16,899	8,500	16,968
比	55%	45%	100%	31%	69%
設備全体	10,238	26,683	36,920	64,832	70,287
比	110%	346%	217%	760%	371%
計画	初期費用に対するLCC費用	110%	346%	217%	760%
65年時点でのVI	48.5	18.2	25.2	7.2	15.3
初期費用	8,295	7,715	17,011	8,500	16,968
比	55%	45%	100%	31%	69%
設備全体	8,838	28,029	35,868	66,588	69,370
比	107%	337%	211%	783%	366%
計画	初期費用に対するLCC費用	107%	337%	211%	783%
65年時点でのVI	48.7	14.8	23.6	6.2	14.3
大規模(9000m ²)		費用単位:万円			
		初期費用	内外装	設備全体	設備全体
初期費用	77,425	46,236	123,661	18,346	46,236
比	63%	37%	100%	28%	72%
設備全体	81,326	146,958	228,283	128,578	146,958
比	105%	316%	185%	701%	316%
計画	初期費用に対するLCC費用	105%	316%	185%	701%
65年時点でのVI	51.4	17.5	26.7	7.7	17.8
初期費用	77,483	46,236	123,729	18,346	46,236
比	63%	37%	100%	28%	72%
設備全体	79,540	146,989	228,529	133,281	146,989
比	103%	322%	185%	727%	322%
計画	初期費用に対するLCC費用	103%	322%	185%	727%
65年時点でのVI	48.8	16.3	27.7	6.8	16.2

図 5 計画期間 65 年における中小規模建物・建築本体の修繕計画

図 6 計画期間 65 年における中小規模建物・設備部分の修繕計画

最適な修繕計画として計算された結果は、標準的な修繕計画にかなり近いものであり、現在行われている修繕が費用対効用(VI)の観点からも妥当であることがわかる。

費用についてみると、初期費用については標準修繕計画と最適修繕計画での差がほとんど見られないが、LCC 総額としては建築では最適修繕計画を行った場合の方が高くなり、設備では安くなる傾向がある。これは建築では標準修繕計画に比較してよりこまめに修繕を行っているためであり、それによって効用の向上が図られている。その結果、建築においては効用値の時系列に沿った変化は、標準修繕計画に比較して全体的に狭い範囲に収まり、過度の劣化を防ぐような計画となっている。逆に設備では、標準的な修繕計画よりも若干修繕周期を長めにとることが合理的であるという結果が得られており、標準修繕計画は十分な余裕をもったものとなっていることが

うかがえる。このため、修繕計画を若干粗くすることにより費用対効用の向上が図られる可能性があるが、実際の運用にあたっては劣化度に対する十分な検討が必要であると考えられる。

5.1. 規模別

規模別に比較すると、小規模のものの LCC 費用が高くなっている。大規模建物では延べ床面積に対して必要とされる部材の数が少ないため初期建設費が面積に対して低くなる傾向があるが、LCC 費用としてみるとこの傾向がさらに拡大することがわかる。

5.2. 経営期間別

経営期間を 20 年から 80 年まで変えながら VI 指数の計算を行った結果を図 7 に示す。建築では 50 年から 65 年間の経営が最も合理的であるが、設備では 20 年以下の経営が合理的である。

このことから、建物全体を合理的に長期間経営することを考える場合、設備における長期的な効用を高めることが必要だといえる。

図 7 経営期間別 VI 指数

6 結

本研究では、建物の効用の判断に物理的要因のみではなく、社会的要因、機能的要因を導入して分析を行った。その結果、オフィスの修繕計画について以下の点が明らかになった。

- 1) 現在行われている標準的な修繕計画に従って行われる修繕は、最適な修繕計画に近く、費用対効用(VI)の観点からの合理性が認められる。
- 2) 建築本体において修繕計画の合理性を改善するためには、標準の修繕計画よりもこまめにメンテナンスすることが必要である。
- 3) 設備において修繕計画の合理性を改善するためには、標準的な修繕計画よりもメンテナンス周期を長くできる可能性があるが、運用にあたっては性能の低下に対する慎重な判断が必要になると思われる。
- 4) VI から判断される合理的な経営期間は建築本体においては 50 年から 65 年であるが、設備では 20 年程度である。これから、経営的な面から建物の長寿命化をはかるためには、設備における長期的な効用を高めることが必要であると考えられる。

以上より、建物の長寿命化を考慮した経営を行うためには、少なくとも標準的な修繕計画として示されるものに見合った修繕・取替費用をかけることで効用を維持することが必要であり、費用に対する効用はメンテナンスをこまめに行うことでさらに向上することができるという。

本稿では建物全体についての LCC に基づく修繕計画の分析に重点を置いたため、計画・設計・施工の各段階で検討される材料の選

定や修繕を実際に行う場合の問題点などについての分析は今後の課題として残されている。建物の長寿命化を経営的な面をふまえて検討していくために、これらの点については、いずれ稿を改めて報告することとしたい。

参考文献

- 1) 石塚義高：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、No.356、1985.10
- 2) 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、No.496、1997.6
- 3) 小松幸夫：建物寿命の年齢別データによる推計に関する基礎的考察、日本建築学会計画系論文報告集、No.439、1992.9
- 4) 高草木明：賃貸事務所建築の集中的改修の計画における社会的劣化の回復への投資評価に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、No.505、

1998.5

- 5) 長岡弘明、古坂秀三ほか4名：建築工事における労務平準化への遺伝的アルゴリズムの適用、日本建築学会計画系論文報告集、No.491、1997.1
- 6) 山下剛、友消貞和：遺伝的アルゴリズムを用いた高齢者在宅福祉サービス供給の最適化手法試案、日本建築学会計画系論文報告集、No.509、1998.7
- 7) 守谷勘一、石坂公一、近江隆：オフィス・商業系建物を想定した最適維持管理計画の探索手法、第22回情報・システム・利用シンポジウム、1999.12
- 8) 木下栄蔵：AHPの発展経緯と諸問題、オペレーションズリサーチ、vol.44, No.1、1999.1
- 9) 加藤寛一郎：工学的最適制御、東京大学出版会、1988
- 10) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993
- 11) 日本建築学会編：設計資料集成8、丸善、1981
- 12) 高橋輝男：コストプランニングの知識、鹿島出版会、1999
- 13) 建設大臣官房官庁営繕部監修：建築物のライフサイクルコスト、経済調査会、1991
- 14) 建築思潮研究所編：建築設計資料4、建築資料研究社、1984
- 15) 建築思潮研究所編：建築設計資料21、建築資料研究社、1988
- 16) 石塚義高：建築経済学のすすめ、経済調査会、1994

(1999年10月10日原稿受理、2000年5月8日採用決定)