

拡張 AHP による「リニューアル有効度」の考察

金尾 毅, 宮坂 房千加, 木下 栄蔵

1. はじめに

既報[1]にて、ビル内の空調用自動制御設備のリニューアルという問題（「リニューアル有効度」）に関して、複数のビルを代替案として、AHP（Analytic Hierarchy Process：階層分析法）を拡張したAM法（Absolute Measurement法：絶対評価法）を用いてコストベネフィット分析を適用した事例を報告した。

本報ではより現実的な事例研究として、コスト分析にLCC（Life Cycle Cost）の概念を適用しさらに、AHPを拡張した、Inner Dependence法（内部従属法）およびInner-Outer Dependence法（内部-外部従属法）により「リニューアル有効度」を算出した結果を報告する。

2. リニューアル有効度

ビル設備の内、空調用自動制御設備のリニューアルの有効性を評価するために「リニューアル有効度」という新たな指標を定義した。これはリニューアルを行った場合に得られるメリット面（リニューアルの必要性）から定まる「リニューアル要求度」とリニューアルによるデメリット面（費用とユーザの態度）から定まる「リニューアルコスト」により定義される。

2.1 対象ビル（代替案の選定）

分析対象のビルを選定する上でまず、メンテナンス契約を結んでいるビルの中から竣工後10~20年程度経過していることを条件に128のビルを代替案として選定した。次に、節2.3に示す「リニューアル要求度」の調査段階で128のビルの設備管理責任者に対してリニューアルに関する意見を求めたが、十分な回答

が得られたビルの数は71であった。結果として、この71のビルを代替案とした。

なお、本研究における分析結果は既報[1]における調査結果に基づくものである。調査結果は現時点のものではないが、AHPの拡張による分析結果の差異を主旨とする本研究においては問題ない。

2.2 リニューアルコストの定義

リニューアルによるデメリット面の指標として図1に示す階層図のとおり「リニューアルコスト」を定義した。

「リニューアルコスト」はレベル2で示されるとおり、実際にリニューアルに掛かる費用を表す「改修費用」（定量的基準）とユーザのリニューアルに対する消極性を示す「ユーザの態度」（定性的基準）から構成される。

「改修費用」は定量的基準であり、既報では、空調用自動制御設備のローカル機器と中央監視制御装置の更新費と工事費から算出した。ところが、これはいわゆる現在価格であり、実際問題としてユーザの支出を考える場合、長期的な経済性を評価するためには設備の耐用年数とランニング（メンテナンス）コストを考慮したLCC（Life Cycle Cost）計算を行うことが必要となる。本報では更新費と工事費に加え、保全費用を考慮したLCCを用いた。

「ユーザの態度」は次節で示す「リニューアル要求度」と同様にアンケート調査による定性値である。

2.3 リニューアル要求度の定義

リニューアルを行うメリットの指標として図2に示

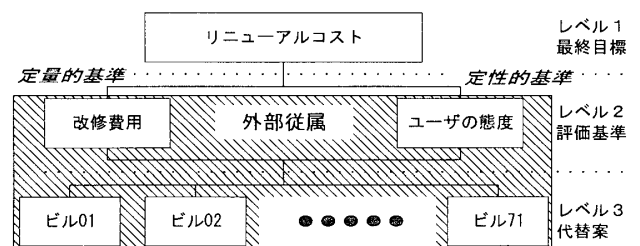


図1 リニューアルコストの階層図

かなお たけし, みやさか ふさちか
山武ビルシステム(株) データウェアセンター
〒108-0023 港区芝浦 4-3-4
きのした えいぞう
名城大学 都市情報学部
〒509-0200 可児市虹ヶ丘 4-3-3
受付 03.1.14 採択 03.5.12

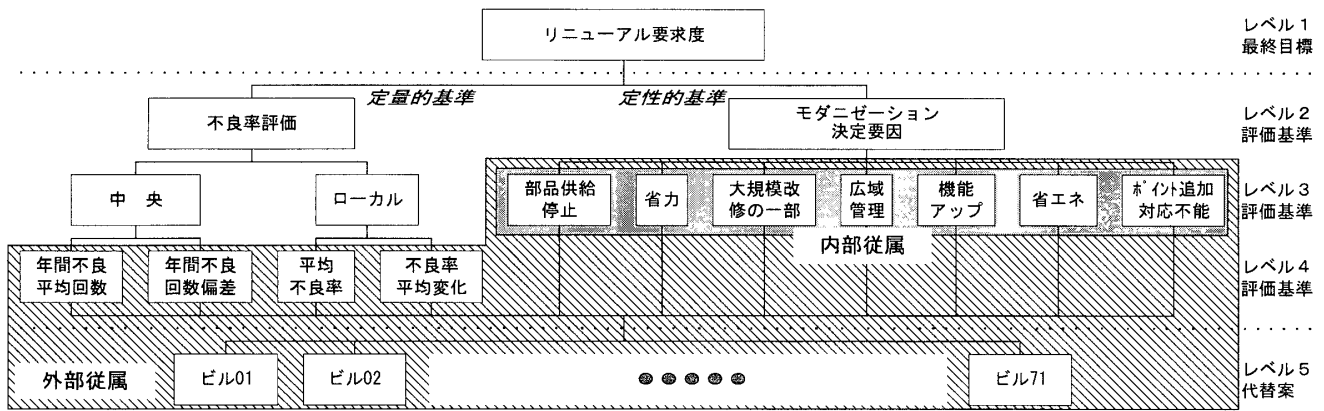


図2 リニューアル要求度の階層図

す階層図のとおり [リニューアル要求度] を定義した。

[リニューアル要求度] はレベル2で示されるとおり [不良率評価] (定量的基準) と [モダニゼーション決定要因] (定性的基準) から構成される。

[不良率評価] は機器の不良状況を表す定量的基準であり、レベル3で中央監視制御装置に関する[中央]とローカル機器に関する[ローカル]に分かれている。レベル4に示されている各項目はメンテナンス結果による機器の不良に関する定量値である。

[モダニゼーション決定要因] は実際にリニューアルに至る場合の動機についてユーザに対してアンケート調査した結果から抽出した定性的基準である。それらはレベル3で示すとおり7項目から構成されている。各項目はリニューアルにより改善されることが期待されるものである。

2.4 リニューアル有効度の定義

上で定義した [リニューアル要求度] B_j と [リニューアルコスト] C_j から [リニューアル有効度] E_j を式(1)に示すとおり定義した。この概念は便益を [リニューアル要求度]、費用を [リニューアルコスト] と考えた費用便益分析といえる。

$$E_j = \frac{B_j}{C_j} \quad (j=1, 2, \dots, 71) \quad (1)$$

j : ビル番号

3. リニューアル要求度とリニューアルコストの絶対評価

71のビルを評価するに当たって、サティアーの提唱したAHPの拡張であるAM法を用いた[2]。この手法の特徴は代替案の評価を一対比較で行うのではなく絶対評価で行うところにある。

表1 リニューアルコストの評価項目間の重み付け (レベル2: リニューアルコスト)

	1 改修費用	ユーザの態度	ウェイト
改修費用	1.0	1.0	0.500
ユーザの態度	-1.0	1.0	0.500
λ max			2.000
C. I.			0.000

表2 リニューアル要求度の評価項目間の重み付け (レベル2: リニューアル要求度)

	1 不良率評価	モダニ決定要因	ウェイト
不良率評価	1.0	1.0	0.500
モダニ決定要因	-1.0	1.0	0.500
λ max			2.000
C. I.			0.000

(レベル3-1: 不良率評価)

不良率評価			
0.5	中央	ローカル	ウェイト
中央	1.0	5.0	0.833
ローカル	-5.0	1.0	0.167
λ max			2.000
C. I.			0.000

(レベル4-1: 中央)

中央			
0.416666657	年間不良平均回数	年間不良回数偏差	ウェイト
年間不良平均回数	1.0	1.0	0.500
年間不良回数偏差	-1.0	1.0	0.500
λ max			2.000
C. I.			0.000

3.1 評価項目の重み付け

[リニューアルコスト], [リニューアル要求度] を算出するために、まず図1, 2に示す各階層図の評価項目間の一対比較により、重み付けを行う必要がある。一対比較の結果の一部をレベルごとにそれぞれ表1,

2に示す。

なお、表中の数値が示す意味は[1]で解説済み。また表中のマイナス値は表示上便宜的に表したものである。

表3 絶対評価水準の重み付け
[リニューアルコスト]の[ユーザの態度]
に関する絶対基準の一対比較
(ユーザの態度)

ユーザの態度				
0.899999976	積極的	どちらでもない	消極的	ウェイト
積極的	1.0	-3.0	-5.0	0.105
どちらでもない	3.0	1.0	-3.0	0.258
消極的	5.0	3.0	1.0	0.637
λ max				3.039
C. I.				0.019

[リニューアル要求度]のレベル3
に関する絶対基準の一対比較
(部品供給停止)

部品供給停止				
0.2045455	困っている	不明	問題ない	ウェイト
困っている	1	5	9	0.735
不明	-5	1	5	0.207
問題ない	-9	-5	1	0.058
λ max				3.117
C. I.				0.059

(省力)

省力				
0.0227	必要	不明	不必要	ウェイト
必要	1	2	3	0.540
不明	-2	1	2	0.297
不必要	-3	-2	1	0.163
λ max				3.009
C. I.				0.005

(大規模改修の一部)

大規模改修				
0.1136	必要	不明	不必要	ウェイト
必要	1	4	8	0.707
不明	-4	1	4	0.223
不必要	-8	-4	1	0.070
λ max				3.054
C. I.				0.027

(広域管理)

広域管理				
0.0682	必要	不明	不必要	ウェイト
必要	1	3	5	0.637
不明	-3	1	3	0.258
不必要	-5	-3	1	0.105
λ max				3.039
C. I.				0.019

り、計算時には分数として処理している(例:-5→1/5)。

3.2 絶対評価水準の重み付け

代替案の評価を行う前に、AM法の定性的基準による評価の場合は各評価項目に関して絶対評価水準を定め、それらの間の一対比較を行う必要がある。リニューアルに関するアンケート結果から絶対評価水準を選定し、一対比較によりそれらの重み付けを行った。その結果の一部を表3に示す。

例えば表3中の[部品供給停止]を見ると、{[困っている],[不明],[問題ない]}の三つの絶対評価水準が設定されており、それらの間の一対比較により重みの比が0.735:0.207:0.058となっていることが分かる。

3.3 代替案の絶対評価

定量的基準の場合は定量値で、定性的基準の場合は表3で定めた絶対評価水準で各代替案の絶対評価を行う。

既報[1]では[リニューアルコスト]の[改修費用]は工事費を含めた初期費用のみを算出し、ユーザの態度との一対比較で重み付けすることで[リニューアルコスト]を算出した。しかしながら実際にはユーザがリニューアルを考える場合、初期費用だけでなく、その後の保全費用も考えるのは当然のことである。そこで本報では、より現実的な分析を行うためにランニングコストである保全費用を新たに算出した。さらに、初期費用と保全費用にLCCの概念を適用した。

ところで、初期費用と保全費用ではLCC計算に必要な現価係数が異なる。これはそれらの発生の仕方や税法上の取り扱いが異なるためである。そこで現価係数として初期費用には定率評価係数を、保全費用には周期現価係数[3~5]を適用した。

3.3.1 初期費用のLCC

初期費用のLCCを式(2)のとおり定義した。

$$LCC_F = \sum_{k=1}^n RN_k \cdot \frac{1}{(1+i/100)^k} + RT_n \cdot \frac{1}{(1+i/100)^n}$$

$$\begin{cases} RN_k = RT_{k-1} \cdot r \\ RT_k = RT_{k-1} - RN_k \end{cases} \quad (2)$$

ただし、

LCC_F : 初期費用のLCC

i : 金利

n : 計画耐用年数

RN_k : k 年次の償却額

RT_k : k 年次の残存価格

r : 償却率

初期費用の LCC (LCC_F) は n 年までの償却額の現在価値の累計と n 年の残存価格の現在価値との和で表される。

上式を用いて金利 3%, 計画耐用年数 10 年, 法定耐用年数 15 年の条件で既報の改修コストから LCC_F を算出した。

3.3.2 保全費用の LCC

保全費用のように周期ごとに発生する費用については現在価格をもとに価格変動率と金利を用いてその LCC を式(3)に示すとおり定義した。

$$LCC_M = \sum_{k=j}^{k \leq n} Q \cdot \frac{(1+e/100)^{k-1}}{(1+i/100)^k} \quad (j=1, 2, \dots) \quad (3)$$

ただし,

LCC_M : 保全コストの LCC

e : 価格変動率

Q : 保全の現在価格

m : 保全周期

式(3)を用いて節 3.3.1 と同じ条件と価格変動率 3%, 保全周期 1 年として LCC_M を算出した。

3.3.3 リニューアルコストの算出

以上より求めた [改修費用]: LCC (= $LCC_F + LCC_M$) と [ユーザの態度] を評価基準として, AM 法で各ビルの [リニューアルコスト] を算出した。既報で LCC を適用せずに算出したリニューアルコストをリニューアルコスト①, LCC を適用して算出したリニューアルコストをリニューアルコスト②としてその比較を図 3 に示す。

金額的には大きなビルで億単位の変化があったが, これを他のビルと相対的に比較した場合, 顕著な変化

は見られない。しかし, 保全費用を含めたことによりほとんどのビルで多少の変化が見られる。

また, この改修費用を用いた絶対評価の様子の一部を表 4 に示す。

4. 評価項目 (代替案) 間, 評価基準レベル間の従属性

階層構造中の評価項目 (代替案) 間に従属関係が起こる場合として, 以下の二つの場合が考えられる。

(1) 同一評価基準レベルの評価項目 (代替案) 間に従属性がある

(2) 評価基準レベル間に従属性がある

木下は AHP の拡張として, (1) のみの場合には Inner Dependence (内部従属) 法, (2) のみの場合には Outer Dependence (外部従属) 法, (1), (2) が同時に起こる場合には Inner-Outer Dependence 法による解析事例を紹介している [2]。

(1) の従属関係に関しては, [リニューアル要求度] の定性的基準のレベル 3 である { [部品供給停止], [省力], [大規模改修の一部], [広域管理], [機能アップ], [省エネ], [ポイント追加対応不能] } の七つの評価項目間に従属性がある (図 2 中の □ 部分)。これらは, 空調用自動制御設備のリニューアルに至る動機についてヒアリングし, その結果に基づいた評価項目であるが, 広域管理を行うことで省力化が図れることは当然のことである。つまり, [広域管理] は [省力化] に影響を与えるという従属関係が存在する。

(2) の従属関係に関しては, [リニューアル要求度] と [リニューアルコスト] の各末端の評価基準レベルと代替案レベルの間に従属性がある (図 1, 2 中の ▨ 部分)。つまり, 実際には各ビルのユーザによ

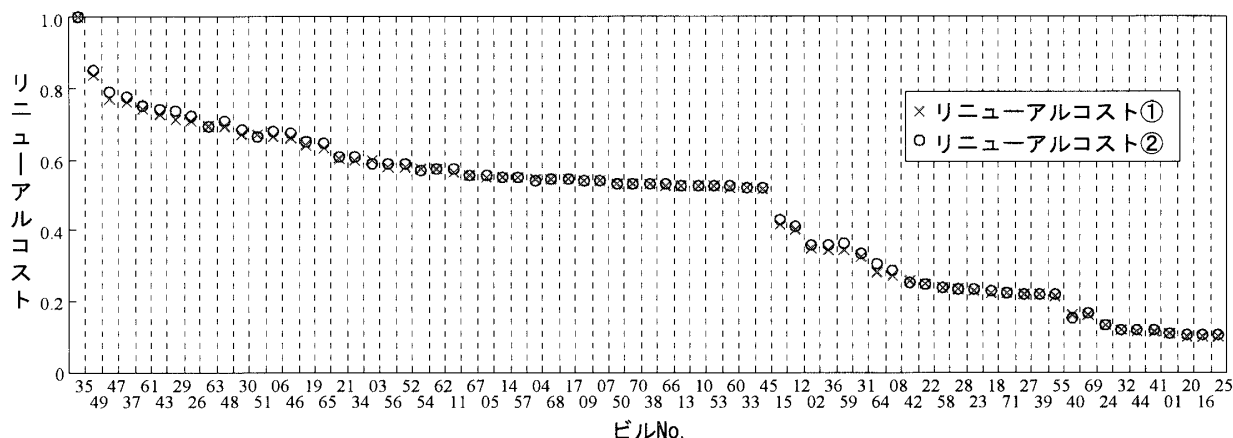


図 3 リニューアルコストの変化

表4 代替案（ビル）の絶対評価

リニューアル要求度の絶対評価											リニューアルコストの絶対評価			
絶対評価											絶対評価			
ビル	部品供給停止	省力	大規模改修	広域管理	機能アップ	省エネ	ポイント追加	年間不良平均回数	年間不良回数偏差	平均不良率	不良率平均変化	改修費用	ユーザの態度	
ビル01	困っている	▼不明	▼必要	▼必要	▼必要	▼大いに	▼問題ない	0	0.33	4.85	3.22	ビル01	83.2	積極的
ビル02	困っている	▼不明	▼必要	▼必要	▼必要	▼大いに	▼問題ない	0	0.33	15.94	6.93	ビル02	445.5	どちらでもな
ビル03	困っている	▼必要	▼不必要	▼必要	▼必要	▼あまり	▼不明	0.75	0.66	0.25	4.73	ビル03	251.8	消極的
ビル04	問題ない	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼あまり	▼問題ない	0	0.33	1.22	3.29	ビル04	119.5	消極的
ビル05	不明	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	0.5	0.33	1.71	3.66	ビル05	155.2	消極的
ビル06	困っている	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼大いに	▼問題ない	0	0.33	0.45	3.92	ビル06	508.3	消極的
ビル07	不明	▼必要	▼不必要	▼不必要	▼不明	▼まあ必	▼問題ない	0.25	0.66	0.91	5.13	ビル07	111.9	消極的
ビル08	困っている	▼必要	▼必要	▼不必要	▼必要	▼あまり	▼困っている	0	0.33	0.8	4.49	ビル08	570.1	積極的
ビル09	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	4.33	2.08	ビル09	120.0	消極的
ビル10	問題ない	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	2.67	4.54	ビル10	75.1	消極的
ビル11	問題ない	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼あまり	▼問題ない	0	0.33	3.92	2.26	ビル11	209.9	消極的
ビル12	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼大いに	▼問題ない	0	0.33	7.03	7.2	ビル12	593.9	どちらでもな
ビル13	不明	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不明	▼まあ必	▼問題ない	0.5	0.33	0.71	5.29	ビル13	75.8	消極的
ビル14	困っている	▼不明	▼不必要	▼必要	▼必要	▼まあ必	▼困っている	0.5	0.33	0.35	4.22	ビル14	135.5	消極的
ビル15	困っている	▼不明	▼必要	▼必要	▼必要	▼まあ必	▼困っている	0.75	0.33	1.35	4.42	ビル15	638.6	どちらでもな
ビル16	困っている	▼必要	▼不必要	▼不明	▼不必要	▼まあ必	▼問題ない	0.75	0.33	5.83	3.39	ビル16	60.0	積極的
ビル17	不明	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼大いに	▼問題ない	0	0.33	12.12	6.24	ビル17	132.1	消極的
ビル18	困っている	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼まあ必	▼困っている	0	0.33	1.7	5.16	ビル18	412.3	消極的
ビル19	困っている	▼不明	▼不必要	▼必要	▼必要	▼大いに	▼問題ない	2.75	1.33	3.57	4.44	ビル19	63.2	積極的
ビル20	不明	▼不必要	▼必要	▼不必要	▼不必要	▼まあ必	▼問題ない	1.5	1	0.91	2.40	ビル20	309.5	消極的
ビル53	不明	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	0.75	1	6.7	5.94	ビル52	245.2	消極的
ビル54	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	1.14	4.36	ビル53	74.1	消極的
ビル55	不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼まあ必	▼問題ない	1.25	1	2.87	5.95	ビル54	198.7	消極的
ビル56	困っている	▼不明	▼不必要	▼必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	1.5	1	0.5	4.06	ビル55	46.8	どちらでもな
ビル57	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不明	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	1.19	4.22	ビル56	247.7	消極的
ビル58	困っている	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	1.76	4.01	ビル57	141.7	消極的
ビル59	不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼既に実	▼問題ない	3.5	3	2.55	3.94	ビル58	106.7	どちらでもな
ビル60	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	0	4.22	ビル59	447.1	どちらでもな
ビル61	困っている	▼不明	▼不必要	▼必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	3.58	2.4	ビル60	70.1	消極的
ビル62	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼あまり	▼問題ない	0.75	0.33	0.9	4.46	ビル61	711.9	消極的
ビル63	困っている	▼不必要	▼必要	▼必要	▼既に実	▼問題ない	▼問題ない	1.5	0	0.73	4.34	ビル62	213.3	消極的
ビル64	困っている	▼不明	▼必要	▼必要	▼必要	▼大いに	▼困っている	6	3.66	0.38	4.4	ビル63	540.9	消極的
ビル65	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼あまり	▼問題ない	0.75	0.33	17.86	2.79	ビル64	633.7	積極的
ビル66	不明	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼大いに	▼問題ない	0	0.33	1.69	5.63	ビル65	416.6	消極的
ビル67	不明	▼必要	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼大いに	▼不明	0.25	0.66	0.3	4.22	ビル66	85.2	消極的
ビル68	困っている	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	0	4.22	ビル67	160.2	消極的
ビル69	困っている	▼不明	▼必要	▼必要	▼必要	▼大いに	▼問題ない	0.25	0.66	0.66	4.03	ビル68	123.3	消極的
ビル70	不明	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼必要	▼大いに	▼問題ない	0	0.33	4.94	4.22	ビル69	233.7	積極的
ビル71	困っている	▼不明	▼不必要	▼不必要	▼不必要	▼まあ必	▼問題ない	0	0.33	0	4.22	ビル70	91.3	消極的
												ビル71	63.5	どちらでもな

って評価項目の重み付けは異なってくると考えられる。

そこで、Inner Dependence 法により評価項目間の内部従属による影響度を解析し、その結果を利用して Inner-Outer Dependence 法を用いて「リニューアル有効度」を算出した。

4.1 Inner Dependence 法

Inner Dependence 法は、同一評価基準レベルの評価項目（代替案）間に従属性がある場合にその影響度を取り込んだ分析を行う手法である。[リニューアル要求度]の定性的基準のレベル3である{[部品供給停止],[省力],[大規模改修の一部],[広域管理],[機能アップ],[省エネ],[ポイント追加対応不能]}の七つの評価項目間に本手法を適用する(図2中の□部分)。

Inner Dependence 法ではまず、従属関係にある評価項目（代替案）間でその影響の向き（影響を与えているのか、与えられているのか、または両方）を考察し、次に全ての評価項目に関して、影響を与えられている評価項目間の影響度（影響の強さ）の一対比較を行い、全体としての影響度を算出する。そして、従属

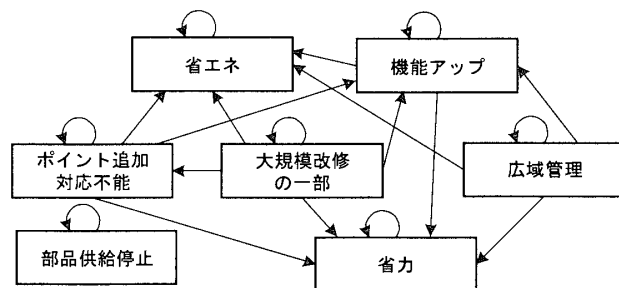


図4 評価項目間の影響力の方向

性を無視した重みを修正する。つまり、従来の AHP は評価項目（代替案）間の重要度についてのみ考慮して各要因のウェイトを決定したが、従属関係がある場合はその影響度も考慮する必要がある。

ところで、要因間の影響の向きと強さを明らかにする手法に DEMATEL 法 (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) がある[2, 5]。本事例研究では、DEMATEL 法によって算出される全影響行列を用いて、[リニューアル要求度]の定性的基準である七つの評価項目間の影響度を表す内部従属の影響行列を算出し、[リニューアル要求度]に関して新

たな重みを算出した。図4に内部従属による影響の向きを示す。

4.1.1 DEMATEL 法による影響行列の算出手順

DEMATEL 法はアンケートなどによる専門的知識により問題の構造を明らかにするものである。この手法により後述する内部従属の影響行列 **M** を算出した。その手順を以下に示す。

Step 1：影響度の評価

要因間のペア比較を行い、要因 *i* が要因 *j* にどれくらい直接影響しているかを a_{ij} で表し、行列 **A** (クロスサポート行列と呼ぶ) を作成する。表5に影響度の内容と評価値の関係を示す。また表6に作成したクロスサポート行列 **A** を示す。

全ての評価項目は当然自分自身に影響を与える。また例えば、[機能アップ] は [省力], [省エネ] に影響を与え、[大規模改修の一部], [広域管理], [ポイント追加対応不能] から影響を与えられている。また、[部品供給停止] は影響を与えることも、与えられることもないことが分かる。

Step 2：直接影響度の評価

クロスサポート行列 **A** より次式で定義される直接影響行列 **D** を作成する。

$$D = s \cdot A \quad (4)$$

ただし、*s* は尺度因子と呼ばれる推移性の程度や間接的影響 (直接影響行列の積で表される) の程度を制御する値である。その範囲は式(5)で定義されるが通常、上限かその 1/2, 3/4 を用いる (*n* は要因数)。

$$0 < s \leq \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n, j=1} \sum_{i=1}^n a_{ij}} \text{ or } \frac{1}{\max_{1 \leq j \leq n, i=1} \sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (5)$$

ここで、クロスサポート行列 **A** に関して、

表5 影響度の評価内容とその値

内容	評価値
非常に大きい直接影響	8
かなりの直接影響	4
ある程度の直接影響	2
無視しうる直接影響	0

表6 クロスサポート行列 **A**

	1. 部品	2. 省力	3. 改修	4. 広域	5. 機能	6. 省エネ	7. 追加
1. 部品	8	0	0	0	0	0	0
2. 省力	0	8	0	0	0	0	0
3. 改修	0	2	8	0	2	2	4
4. 広域	0	4	0	8	2	2	0
5. 機能	0	2	0	0	8	2	0
6. 省エネ	0	0	0	0	0	8	0
7. 追加	0	2	0	0	2	2	8

$$\max_{1 \leq i \leq 7, j=1} \sum_{i=1}^7 a_{ij} = \max_{1 \leq j \leq 7, i=1} \sum_{i=1}^7 a_{ij} = 18$$

であり、式(5)より $0 < s \leq 0.056$ となるが、上限の 0.056 を式(4)に適用し、直接影響行列 **D** を求める。

Step 3：全影響度の評価

直接影響行列 **D** より式(6)で定義される全影響行列 **F** を作成する。

$$F = \sum_{i=1}^{\infty} D^i = D(I - D)^{-1} \quad (6)$$

ただし、**I** は単位行列である。

Step 4：内部従属による影響度の評価

全影響行列 **F** の各列の和が1になるように正規化して内部従属の影響行列 **M** を作成する。表7に結果を示す。

DEMATEL 法による全影響行列 **F** を利用して算出した内部従属の影響行列 **M** に従来の AHP による重み **W**

$$(W^T = (0.409, 0.045, 0.227, 0.136, 0.045, 0.091, 0.045))$$

を掛けることで各要因間の従属性を考慮した重み **W_f** を求めることができる。その結果、

$$W_f^T = (0.409, 0.012, 0.290, 0.171, 0.036, 0.028, 0.054)$$

となる。

表7 内部従属の影響行列 **M**

	1. 部品	2. 省力	3. 改修	4. 広域	5. 機能	6. 省エネ	7. 追加
1. 部品	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2. 省力	0.000	0.268	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3. 改修	0.000	0.202	1.000	0.000	0.249	0.230	0.474
4. 広域	0.000	0.265	0.000	1.000	0.178	0.164	0.000
5. 機能	0.000	0.120	0.000	0.000	0.395	0.137	0.000
6. 省エネ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.304	0.000
7. 追加	0.000	0.145	0.000	0.000	0.178	0.164	0.526

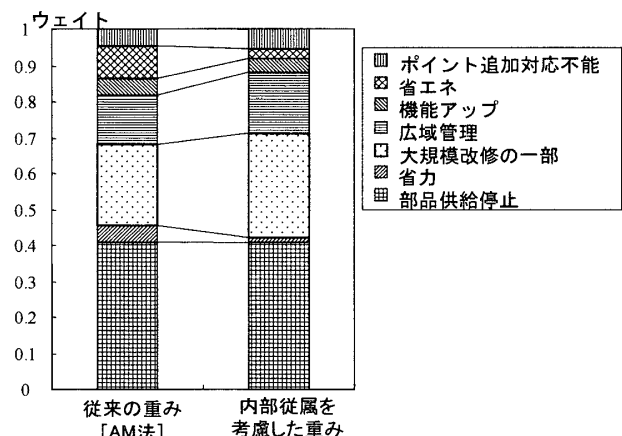



図5 内部従属を考慮した場合の重みの変化

また、内部の従属性を考慮していない従来の重みと、内部従属による従属性を考慮した場合との各評価項目間の重みの比較を図5に示す。

4.2 Inner-Outer Dependence 法

Outer Dependence 法は、評価基準レベル間に従属性がある場合にその影響度を考慮した分析を行う手法である。[リニューアル要求度]と[リニューアルコスト]の末端レベルと代替案レベルの間には従属性がある(図1, 2中の  部分)。つまり、「各代替案に関する評価項目間の重みの差異(異なるレベル間の従属性)」も考える必要がある。この重みを取り入れるということは、例えば代替案をビル、目的をリニューアルとするなら、そのビルのユーザのリニューアルに対する個人的な考えの差異を反映することになる。

代替案ごとに評価項目に対する重みを変える場合、各ビルのユーザに評価項目の重み付けを行ってもらう必要がある。しかし実際は、時間と労力を考えると不可能である。ところで、事業体(代替案)間の相対的な効率値を最適ウェイト(効率が最も良くなるような重み付け)を用いることにより算出する手法としてDEA(Data Envelope Analysis: 包絡分析法)がある[6]。


また、節4.1で示したとおり図2中の[リニューアル要求度]の定性的基準のレベル3の7項目間には内部従属の関係があり、この内部従属の影響度も取り込む必要がある。内部従属と外部従属の両方の影響度を取り込んだ分析を行う手法をInner-Outer Dependence 法と呼ぶ。

末端レベルの評価項目に対する各代替案の最適ウェイトをDEAにより算出し[7, 8]、内部従属の影響行列と合わせてInner-Outer Dependence 法に適用して「リニューアル有効度」を算出した。

4.2.1 Inner-Outer Dependence 法による計算手順

DEAによる最適ウェイトを利用したInner-Outer Dependence 法による「リニューアル有効度」の解析手順を以下に示す。

Step 1: 代替案に関する評価値の算出

各階層図の末端の評価項目(図1, 2中の  部分)について、代替案ごとに絶対評価値を算出する。

Step 2: 不正データの修正

DEAによる解析対象データは原則として、投入項目、産出項目とも正の数値データでなければならない。しかしながら、データの中で中央監視装置がないビルについては、中央監視装置についての項目である[年

間故障回数平均]と[年間故障回数偏差]が欠測している。さらに、中央監視装置、ローカル機器についての項目である[年間故障回数偏差]と[不良率変化平均]については、負の値も算出されている。そこでこれらのデータについては最小値が0となるように、そしてその上で欠測データを0に修正する。

Step 3: DEAによる最適ウェイトの算出

修正データを式(7)に適用して、入力、出力項目に対する最適ウェイト($u_{js}, v_{jm}; j=1, \dots, 71, s=1, \dots, 11, m=1, 2$)を算出する。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_s y_{so} \\ & \text{Subject to} \\ & v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_m x_{mo} = 1 \\ & u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots + u_s y_{sj} \\ & \leq v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_m x_{mj} \\ & (j=1, \dots, n) \\ & v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0 \\ & u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

入力、出力項目に対する最適ウェイトの一部を表8に示す。

Step 4: 正規化データDと正規化ウェイトWの作成

Step2で修正した評価値(データ)を評価項目ごとにその合計が1となるように正規化し、最適ウェイトを代替案ごとにその合計が1となるように正規化することにより、[リニューアルコスト](入力)に関して D_{in}, W_{in} 、[リニューアル要求度](出力)に関して D_{out}, W_{out} を求める。

つまり従来の考え方では、異なる代替案間でもその評価項目の重みは同一であった。しかしながら、外部従属による重みを各代替案の効率が最も良くなるように(DEAによる最適ウェイト)、代替案ごとにその重みを決定することを試みた。これにより、そのビルのユーザのリニューアルに対する個人的な考えの差異を反映することができたと考えられる。

Step 5: 内部従属の影響度の取込み

ところで、 W_{out} は[リニューアル要求度]の定量的基準に関する最適ウェイトの正規化行列 W_{out1} と定性的基準に関する最適ウェイトの正規化行列 W_{out2} から構成されているが、 W_{out2} に関しては内部従属の影響度を取り込む必要がある。そこで、節4.1で求めた内部従属の影響行列 M に W_{out2} を掛けられた行列を定性的基準に関する最適ウェイトの正規化行列とし、 W_{out1} と合わせて W_{out} とする。

表8 DEAによる最適ウェイト

ビル No	リニューアル要求度											リニューアルコスト	
	定量的基準				定性的基準							定量的 基準	定性的 基準
	年間故障 回数平均	年間故障 回数偏差	平均 不良率	不良率 変化平均	部品供給 停止	省力	大規模 改修 の一部	広域 管理	機能 アップ	省エネ	ポイント 追加対 応不能	改修 費用	ユーザ の態度
01	0.026	0.042	0.009	0.012	0.210	0.287	0.219	0.243	0.287	0.259	0.287	0.001	9.000
02	0.002	0.076	0.056	0.001	0.019	0.026	0.020	0.022	0.026	0.023	0.026	0.000	3.850
03	0.105	0.000	0.000	0.000	0.089	0.000	0.000	0.138	0.265	0.000	0.002	0.003	0.314
04	0.000	0.000	0.000	0.050	0.000	0.453	0.000	0.000	0.000	0.000	0.129	0.008	0.000
05	0.169	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.653	0.000	0.000	0.005	0.254
06	0.000	0.000	0.000	0.016	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.177	0.000	0.001	0.399
07	0.000	0.046	0.000	0.044	0.000	0.692	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.009	0.000
08	0.005	0.008	0.098	0.002	0.039	0.245	0.041	0.045	0.054	0.048	1.260	0.000	9.440
09	0.000	0.093	0.018	0.000	0.304	0.000	0.000	0.051	0.252	0.305	0.000	0.008	0.000
10	0.000	0.060	0.000	0.063	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.099	0.000	0.013	0.000
11	0.000	0.185	0.021	0.000	0.000	0.000	0.019	0.156	0.000	0.000	0.129	0.003	0.524
12	0.000	0.000	0.027	0.063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.117	0.000	0.000	3.870
13	0.027	0.000	0.000	0.066	0.000	0.947	0.000	0.000	0.000	0.136	0.000	0.013	0.000
14	0.026	0.000	0.000	0.000	0.420	0.000	0.000	0.325	0.178	0.000	0.011	0.007	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.397	0.000	0.000	0.539	0.000	2.960
16	0.251	0.040	0.008	0.011	0.197	0.337	0.205	0.227	0.268	0.812	0.268	0.013	2.220
17	0.000	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.628	0.000	0.008	0.000
18	0.006	0.010	0.111	0.003	0.048	0.066	0.050	0.056	0.066	0.059	1.270	0.000	9.390
51	0.000	0.000	0.000	0.029	0.000	0.000	0.000	0.126	0.000	0.000	0.000	0.001	0.710
52	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.267	0.000	0.064	0.200	0.118	0.000	0.003	0.367
53	0.003	0.347	0.060	0.002	0.028	0.038	0.029	0.032	0.369	0.034	0.038	0.013	0.032
54	0.019	0.000	0.000	0.000	0.286	0.000	0.000	0.216	0.130	0.000	0.000	0.005	0.000
55	0.354	0.029	0.097	0.008	0.143	0.194	0.148	0.165	0.194	0.176	0.194	0.021	0.165
56	0.106	0.000	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	0.143	0.266	0.000	0.000	0.003	0.319
57	0.000	0.000	0.000	0.002	0.568	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000
58	0.000	0.245	0.021	0.000	0.284	0.000	0.000	0.000	0.464	0.000	0.000	0.009	0.000
59	0.000	0.241	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	1.890
60	0.000	0.000	0.000	0.003	0.816	0.000	0.000	0.000	0.000	0.878	0.000	0.014	0.000
61	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.233	0.000	0.149	0.000	0.000	0.000	0.000	1.570
62	0.033	0.000	0.000	0.021	0.251	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000
63	0.064	0.000	0.000	0.000	0.084	0.000	0.000	0.000	0.129	0.000	0.000	0.001	0.587
64	0.019	0.031	0.006	0.009	0.153	0.208	0.159	0.176	0.208	0.188	0.208	0.000	9.070
65	0.000	0.000	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.470
66	0.000	0.000	0.035	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.657	0.000	0.012	0.000
67	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.574	0.000	0.000	0.000	0.232	0.000	0.006	0.000
68	0.000	0.000	0.000	0.005	0.484	0.000	0.000	0.360	0.138	0.000	0.000	0.008	0.000
69	0.012	0.020	0.004	0.109	0.097	0.132	0.101	0.307	0.132	0.119	0.132	0.001	8.350
70	0.000	0.000	0.049	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.180	0.820	0.000	0.011	0.000
71	0.000	0.004	0.000	0.004	0.902	0.000	0.000	0.000	0.000	0.965	0.000	0.016	0.000

内部従属，外部従属を考慮した場合の各評価項目における重み付けの変化を図6に示す。

内部従属による影響度のみを取り込んだ場合は全体として大きな変化は見られない。従属関係がある項目中でも [部品供給停止]，[機能アップ]，[ポイント追加対応不能] のウェイトには大きな変化は見られないが，被影響度の大きい [省力]，「省エネ」のウェイトが下がり，他への影響度が大きい [大規模改修の一部]，[広域管理] のウェイトが上がっていることが分かる。内部従属と外部従属の両影響度を取り込んだ場

合では [リニューアル要求度]，[リニューアルコスト] ともそのウェイト比が大きく変化している。

Step 6：[リニューアルコスト]，[リニューアル要求度] の算出

Outer Dependence 法においては，式(8)で定義されるマルコフ性のある推移行列 SM (Super-Matrix：スーパーマトリクスと呼ぶ) の極限確率 SM* を式(9)のとおり求めることにより代替案間の評価値 D* を算出することができる。

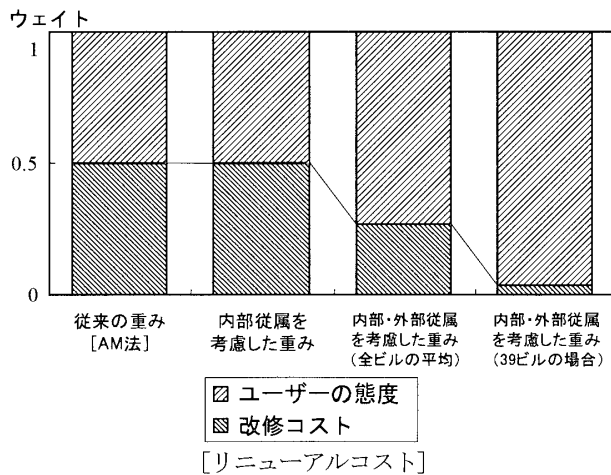
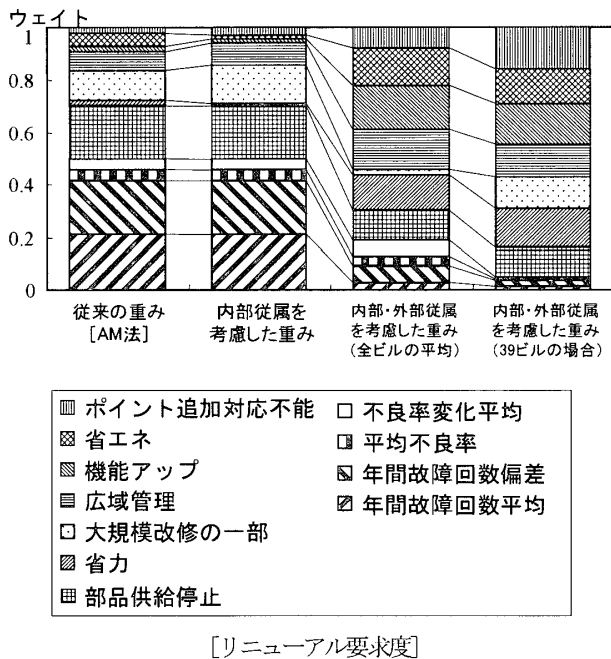


図6 評価項目の重み付けの比較

$$SM = \begin{bmatrix} 0 & W^T \\ D & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$SM^* = \lim_{k \rightarrow \infty} SM^{2k+1} = \begin{bmatrix} 0 & W^{T*} \\ D^* & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 n を代替案数、 m をデータ項目数とすると、 D は要素 d_{ij} 、 W^T は要素 w_{ij} から構成される($i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$)行列である。また、極限確率 SM^* では $d_{i1}^* = d_{i2}^* = \dots = d_{im}^*$ 、 $w_{j1}^* = w_{j2}^* = \dots = w_{jn}^*$ である。

実際には [リニューアルコスト] (入力) と [リニューアル要求度] (出力) について、式(8)に示す SM_{in} 、 SM_{out} をそれぞれ作成し、それらの極限確率 SM_{in}^* 、 SM_{out}^* を算出する。その中の要素である行列 D_{in}^* 、 D_{out}^* がそれぞれ [リニューアルコスト]、[リニューアル要求度] である。

Step 7: リニューアル有効度の算出

Step 6で算出した [リニューアル要求度]、[リニューアルコスト] を式(1)に適用して「リニューアル有効度」を算出する。

4.3 「リニューアル有効度」の算出

AM法、Inner Dependence法および Inner-Outer Dependence法による「リニューアル有効度」の算出結果をそれぞれ「リニューアル有効度」①~③として図7に示す(「リニューアル有効度」①の降順)。ただし、各手法で最大値を1に正規化した値である。

随所で「リニューアル有効度」①、②に比べて「リニューアル有効度」③が変化していることが分かる。

例えばビル25では、内部従属による影響度のみを考慮した「リニューアル有効度」②は「リニューアル

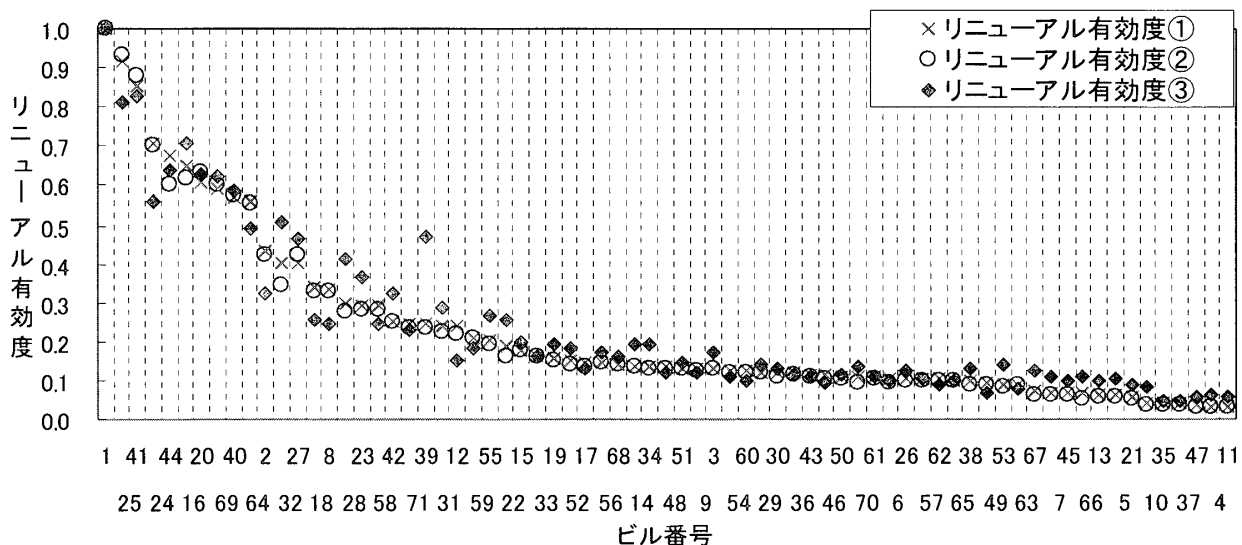


図7 「リニューアル有効度」の変化

有効度」①に比べて若干上がっているが、内部従属、外部従属の両影響度を考慮した「リニューアル有効度」③では大きく下がっている。逆に39ビルの場合「リニューアル有効度」③が大きく上がっている。これは代替案側つまり、ユーザ側からの重み付けを行い評価したことによる、より現実的な結果だといえる。

5. まとめ

ビルの空調用自動制御設備に関するリニューアルの有効性を示す「リニューアル有効度」を定義し、従来のAHPを拡張したAM法によりその値を算出した。その際、定量的データと定性的データからなる「リニューアル要求度」と「リニューアルコスト」を定義し、メリットとデメリットの両面からの分析を試みた。

さらに、階層構造の従属性に着目し、同一評価基準レベルの評価項目間の従属性（内部従属性）をInner Dependence法を用いて、その影響度を取り込んだ分析を行い、評価基準レベル間の従属性（外部従属性）と合わせて、Inner-Outer Dependence法で各代替案から見た重み付けも取り込んだ「リニューアル有効度」を算出した。

また、内部従属の影響行列には、アンケートにより要因間の影響の向きと強さを明らかにするDEMATEL法を応用し、外部従属における各代替案からの重み付けをする際には、分析者の主観的な判断による重みではなく、効率を最大にするように重み付けを行うというDEAの性質を利用し客観的な重みを使用することを試みた。

本研究におけるAHPの拡張によって、ユーザの意思を反映したより現実的な解析が行えたが、「リニューアル有効度」の変化とビルの形態（大きさや用途など）に関する考察をさらに行う必要がある。また、本研究の調査開始時から既に7年余りが経過しており、その間に実際にリニューアルが行われたビルもある。実際と本研究の結果の比較による有効性の検証も必要である。

参考文献

- [1] 木下, 宮坂, 石川, 東, 「拡張AHP手法を利用したリニューアルのコストベネフィット分析」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 40, No. 8, 1995.
- [2] 木下栄蔵, 『AHP手法と応用技術』, 総合技術センター, 1993.
- [3] 野原文男, 「建築設備のやさしいLCC(2)」, 空気調和・衛生工学, 66-12, 89~94, 1992-12.
- [4] (社)建築・設備維持保全推進協会, 『ビルディングLCビジネス百科』, オーム社, 1992.
- [5] 三好, 渡辺, 東, 金尾, 宮坂, 木下, 「LCCによるリニューアルのコストベネフィット分析手法の拡張」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1996.
- [6] 刀根薫, 『経営効率性の測定と改善』, 日科技連, 1993.
- [7] 笹匡, 木下, 「費用便益分析に関する一手法の提案」, 土木計画学研究・講演集 19(1), 1996.
- [8] 金尾・渡辺・東・三好・宮坂・木下: Outer Dependence法によるリニューアル有効度の算出, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, III, 1301~1304, 1997-8.