(財)日本建設情報総合センター研究助成事業

「環境共生建築の設計支援に用いる
多目的評価構造意志決定コンピュータツールの開発」
に関する報告書

平成１５年８月

九州大学大学院・教授　谷本潤

1. はじめに

地球環境問題との関わりの中で、建築物の環境負荷をどのように低減するかが危急の課題となっている。日本建築学会では、COP3を受けて、1997年「我が国の建物の耐用年数を3倍、新築建物のライフサイクルCO_2(LCCO$_2$) 30%削減」の会長声明を発表し、現今、産学官を挙げて建築物の環境負荷軽減への取り組みが進められているのは周知の通りである。

このような地球環境問題の顕在化とその問題意識の高まりとともに、建築計画における設計者の環境意識の程度や設計プロセスの妥当性、将来的な建物の改修や解体・廃棄時における環境的配慮などの定性的な事項を含めて多角的に建築の環境性能を評価することの必要性が認識されてきた。これに対して、建築物の環境負荷を評価するフレームとして、LCCO$_2$や建物環境性能に関する評価手法としてのLEED(米)あるいはBREEAM(英)など様々な既往研究が精力的に行われている[1]。中でも、カナダを中心とする国際共同研究Green Building Challenge(GBC)の枠組みで開発されてきた総合的な環境性能評価ツールであるGBToolは、本邦において特に広く知られており、設計案に対する評価事例も多数報告されている[2]-[5]。GBCでは、各評価項目の得点に重み係数をかけ合わせて合計し、最終的には単一の総合得点として建物の環境性能の評価を行う。これにより従来まで、情緒的に評価される傾向にあった建物の環境性能の客観的評価が行われるようになっている。

しかし、GBCをはじめとした現在の評価フレームには次の2点で限界がある。即ち、第1は多数の評価項目、例えば、エネルギー、CO_2、水質汚染、廃棄物、室内環境などを定量化して、評価計算を行うのは、多量の作業や予算が必要となるため、環境配慮を設計当初から意識した話題性の高い建物以外での適用は期待しにくい点であり、第2はある程度設計が終了していないと総合評価の計算ができないため、評価して設計を修正するというフィードバックが困難な点である。

そのため、建築物の環境負荷低減を、より広範に達成するには、通常の設計階段において環境性能に配慮した合理的な意思決定を行うための枠組みが期待される。

このような背景のもと、筆者らは、設計者が邂逅するコストパフォーマンス、資源性、環境負荷、室内環境の質さらには意匠性など一面で背反するおそれのある各評価スケールを包括して、最終的な意志決定を行う上での合理的方法論MCDM(Multi-Criteria Decision Making)の構築を行った[6]。MCDMは、既往の設計終了後の評価スキームとは異なり、設計段階で、設計者が、対象設計プロジェクトの仕様に応じる幾つかの選択肢(設計案)を比較検討し、その中から最も望ましい案を選定するための方法論である。手法としては、複雑多岐にわたる評価項目を俯瞰し、対象を単一の値に集約して評価するものであり、既往の建物評価フレーム、特にGBCの基本思想と通底するものといえる。建物の話題性、用途、規模に関わらず、設計者・クライアントがこのMCDM方法論を実際に使用するためには、簡便性、汎用性を兼ね備えた、いわば、「電卓のようなツール」が不可欠であるため、MCDMの一連の計算をWindows上で完全にサポートするコンピュータツールMCDM-23の開発を併せて行っている[注1] [7]。MCDMの目的および特徴をGBC2000と比較して表1に示す。

本稿では、MCDM方法論および、それを実現するために一体不離のコンピュータツール

表 1　GBC と MCDM との主な違い

GBC2000／GBTool	MCDM／MCDM-23
①事後評価のためのフレーム	①設計代替案選定のためのフレーム
② 評 価 構 造 (Issues/ Categories)の各項目は固定的である。	②評価構造(Criteria/Sub- criteria)の各項目は自由に変えられる。設計プロジェクト毎に異なってよい。
③同用途のプロジェクトの地域・国際間の比較が目的である。	③最終的評価により、対象設計プロジェクト内の設計代替案の比較を行うことが目的である。
④その地域での標準的な建物(Reference Building)との相対比較を通じて環境性能を評価する。比較結果は普遍的である。	④対象プロジェクト毎に比較の基準が異なってよい。
⑤数多くの項目にわたって評価する作業が多量である。	⑤設計業務の中で行う程度の作業である。

MCDM-23の特徴について述べる。尚、以上のMCDMおよびMCDM-23の開発は、国際共同プロジェクトとして、IEA (International Energy Agency)　SH&C Task23のSubtask Cの枠組の中で行われた注2。

2．方法論 MCDM およびコンピュータツール MCDM-23

2.1 概要

MCDM では、設計時に建物設計案の選択肢が複数存在し、中から、コスト、 資源性、環境性等の多目的評価項目を考慮しながら、最も望ましい設計案を決定する場面を適用対象としている。このような場面では、代替案中の客観的な比較が行い得れば十分であり、一連の思考プロセス、合

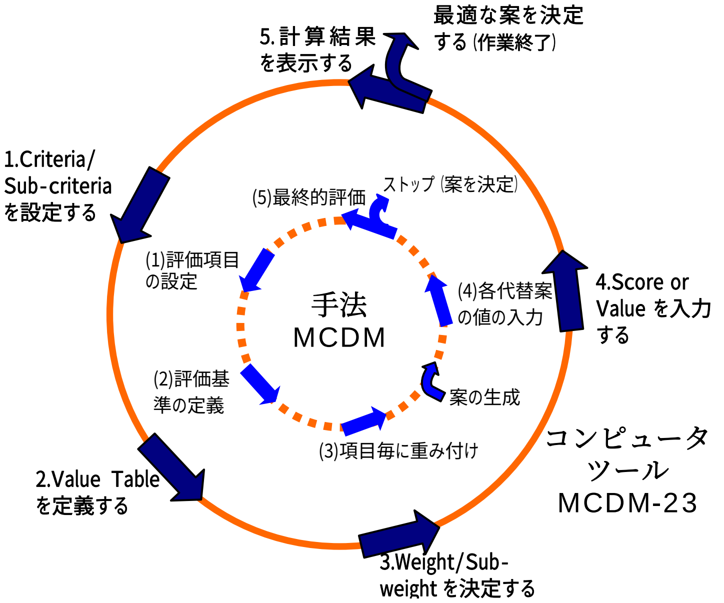


図 1　MCDM および MCDM-23 の流れ

意形成プロセスで on-site に使用できる軽快な比較評価フレームが望まれる。

設計プロセスにおける MCDM、MCDM-23 の位置づけを図 1 に示す。実際の設計時には、①設計ターゲット、 評価項目の設定（or 見直し） ②複数の設計代替案を上げる ③評価の上、最良案を決定、なるルーチンをサークル状に繰り返すことで、最終的設計案に至る場合が多い。図中の内側のサークルが前述の①から③に対応した MCDM におけるプロセス、外側のサークルがその MCDM のプロセスに応じた MCDM-23 における処理内容である。

MCDM-23 開発上の留意点としては、いわゆる、GUI（Graphical User Interface）に配慮した構成をとっている点が挙げられる。ここでいう GUI とは、図的表示によるユーザーフレンドリーな入出力機能という意味にとどまらず、あらゆるダイアログでデフォルト値を用意し、懇切丁寧な Help 機能を付加することを含み、これらにより、初体験ユーザーでも無理なく使えるように配慮している。

2.2 評価項目および評価基準の設定方法

評価項目は、大段階である Criteria とその下部階層の小段階である Sub-criteria の 2 つの階層から成る。表 2 は MCDM-23 におけるデフォルトの Criteria、Sub-criteria であり、IEA SH&C Task23 の各国代表委員の承認のもとに採択された推奨項目である。なお、GBTool とは異なり、実際のプ

表 2 Criteria，Sub-criteria のデフォルト

Life cycle cost	Construction cost
	Annual operation cost
	Annual maintenance cost
Resource use	Annual electricity
	Annual fuels
	Annual water
	Construction materials
	Land
Environmental loading	CO_2-emission from construction
	Annual CO_2-emission from operation
	SO_2-emission from construction
	Annual SO_2-emission from operation
	NO_x-emission from construction
	Annual NO_x-emission from operation
Architectural quality	Identity
	Scale/proportion
	Integrity/coherence
	Integration in urban context
Indoor quality	Air quality
	Lighting quality
	Thermal quality
	Acoustic quality
Functionality	Functionality
	Flexibility
	Maintainability
	Public relations value

ロジェクトの内容や検討する代替案の内容に応じて Criteria、Sub-criteria は柔軟に変更できるもの

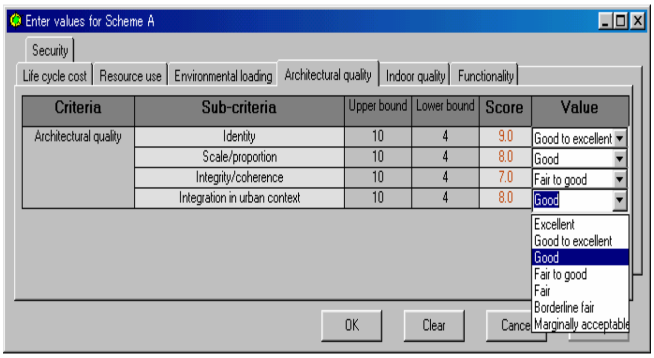


図２　定性的評価項目に関する評点
入力ダイアログ

である。人間の評価プロセスや比較能力からして、 MCDM-23 では、 Criteria、Sub-criteria 各々について 8 項目を上限としている。

意思決定プロセスの参加者である設計者、クライアント、使用者など様々なバックグランドを持った人々が容易に評価できるように、Sub-criteria ごとの評価の結果は、最終的に 4～10 点の定量的相対値である Score で表現される。

デザインの良し悪し、建築的機能の質などの定性的評価項目については、意志決定プロセス参加者はその立場や主観に応じて、直接評点 (Score) を決める。図 2 に MCDM-23 における定性的評価項目に関する評点入力の画面を示す。利用者は、4～10 点の Score、ないしは Score と対応付けられる Verbal scale で表された Judgement を付けばよい。

一方、エネルギー消費やコストなど、通常、定量的にその性能を評価する項目については、それら単位をもつ実値 (以下、Value とする) と Score との

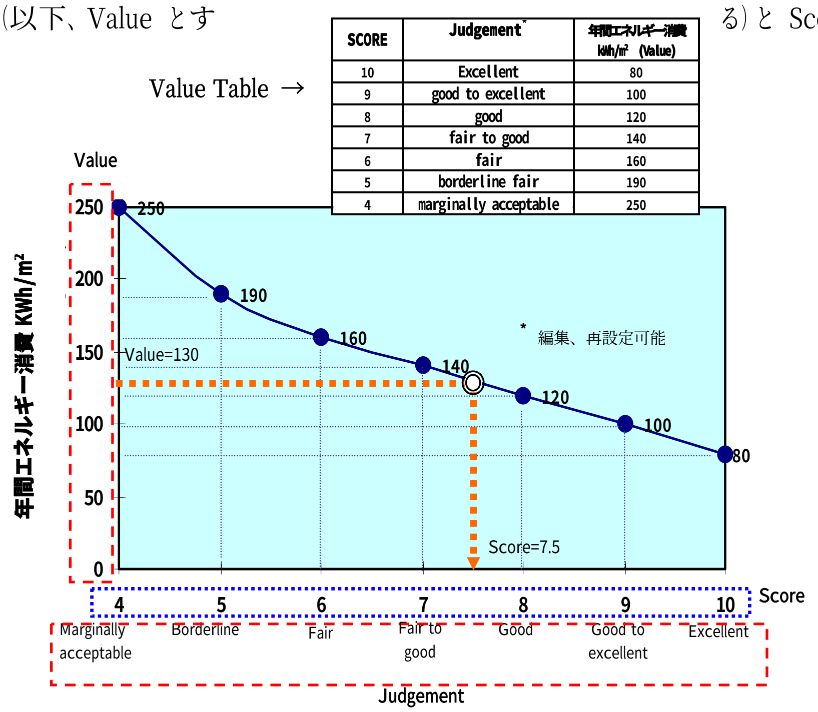


図３　Value と Score との対応関係 - Value Table

対応関係、すなわち評価基準を参照して決定する。この Value と Score の対応関係を MCDM では Value Table と呼び、各プロジェクトごとに事前に設定しておく必要がある。MCDM では当該プロジ

ェクトにおける各代替案の比較が目的であるから、Value Table の定義に普遍的基準は特に設けていない。

Value Table 定義の目安としては、Score=4 は建築コードなどで要求される最低限の基準、Score=10 は、例えば、世界的な高性能基準を想定すればよい。Value Table の定義は最終的な評価値を左右するため、その設定には細心の注意を要する。Value Table では Score と Value の関係に非線形性も許容している。年間エネルギー消費量に関する Value Table を例に、Value=130kW/m^{2}が、Score=7.5 に変換される様子を図 3 に示す。

2.3 重みの決定方法

Criteria間の重みであるWeight、Sub-criteria間の重みであるSub-weightの決定方法としては、AHPプロセスとGradingプロセスの2手法が想定されている。

AHP、すなわち階層分析法(Analytic Hierarchy Process)とは、一連の一対比較申告結果から、その主観申告の矛盾程度に配慮しつつ、巧みなベクトルマトリクス演算通じて、申告の背後にある項目間の重要度を客観的に抽出する手法である[8]。AHPによる重みの算出は次式で表現される。

$$\boldsymbol{A}\cdot w = \lambda\cdot w \qquad \cdots(1)$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc} A_1 & A_2 & \cdots & A_n \end{array} \\ \left|\begin{array}{cccc} a_1/a_1 & a_1/a_2 & \cdots & a_1/a_n \\ a_2/a_1 & a_2/a_2 & \cdots & a_2/a_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_n/a_1 & a_n/a_2 & \cdots & a_n/a_n \end{array}\right| \end{array} \qquad \cdots(2)$$

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \qquad \cdots(3)$$

A_1、A_2、…A_n :項目、a_1、a_2、…a_n :重要度(1〜9の尺度で定義され、1=同じぐらいの重要度、9=極めて重要を意味する)、w は正規化固有ベクトル(w_1、w_2、…w_n :各項目に対する重み、ただし Σw_i=1)、λ :最大固有値

n 項目間の重みを決める際に、$n\cdot(n-1)$/2 回の項目間の重要度の比較を行った結果得られるマトリックス $\boldsymbol{A}$ を(1)式に代入して、求められる w が、各項目に対する重みとなる。MCDM-23では、図4に示すダイアログによって(2)式における重要度の比 a_1/a_7 (もしくは a_7/a_1)を設定している。AHPプロセスは、計算の過程で算出される C.I.(Consistency Index)によって比較申告の内

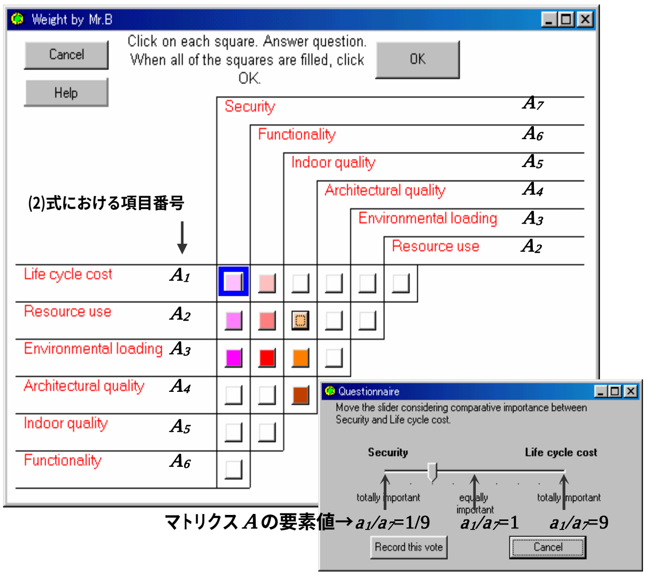


図４　AHP プロセスのダイアログ

表３ Grading プロセスの重みスケール

重要度	Relative Importance,compared with most important criteria
10	Of equal importance
9	
8	Somewhat less important
7	
6	Significantly less important
5	
4	Much less important

包する矛盾を排除することができるという利点を有するが、多数回の一対比較を行う必要があるため利用者のロードがやや過大となる。

対して、Grading プロセスとは、$(n-1)$回の単純一対比較により重みを決定する方法である。実際には、Criteria、Sub-criteria 間で最も重要な項目を 10 とし、表 3 の Verbal scale に基づき、それとの一対相対比較を行うことで各項目の重要度を決める。(4) 式に Grading プロセスによる重みの算出方法を示す。

$$W_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^{m} I_i} \quad \cdots (4)$$

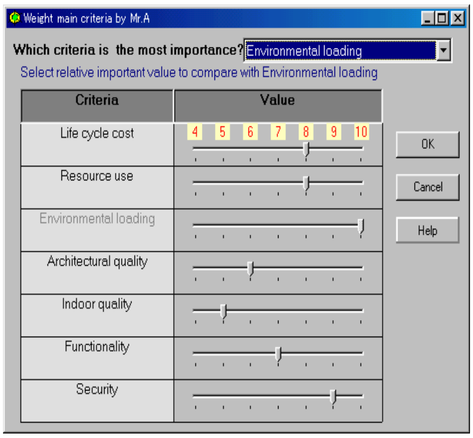


図 5　Grading プロセスのダイア

W_1、W_2、$\ldots W_m$ ：各項目の重み、I_1、I_2、$\ldots I_m$： 重要度、m： 項目数

MCDM-23 では、項目間の一対相対比較を行うために、図 5 に示すダイアログを用意している。

なお、最終的重みの決定に際しては、複数の設計者やクライアントの個別の意向を反映することが可能である。図 6 は、MCDM-23 において Mr.Default、Mr.A、Mr.B の 3 者の重み候補値の算術平均値“Average”が採用されている状態である。

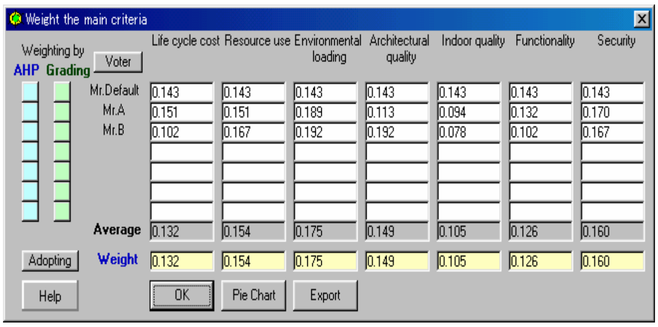


図 6　重み決定のダイアログ

2.4　最終的評価の方法

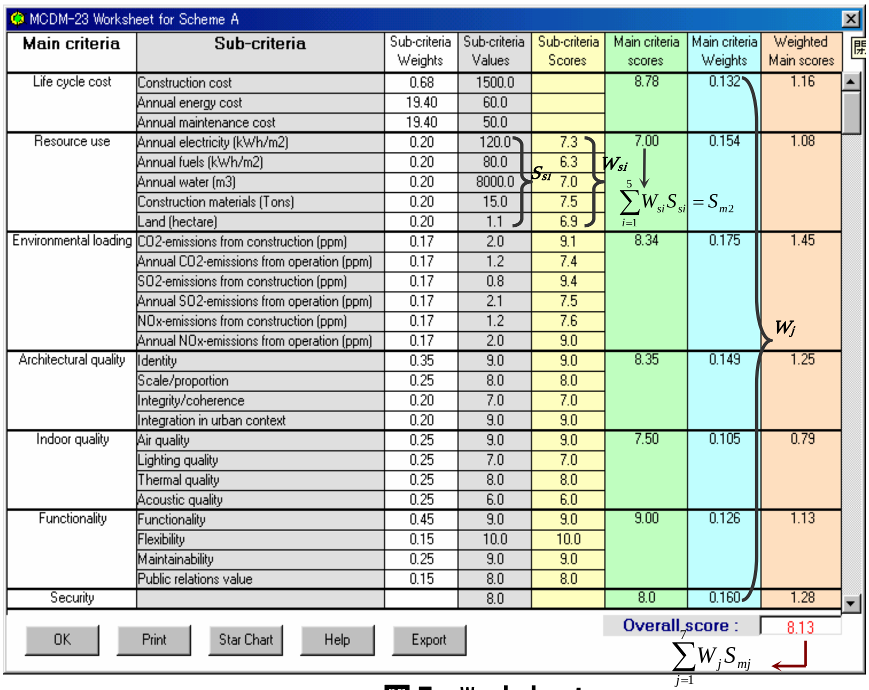
各代替案の最終的評価値(以下、Overall Score とする)から最適な案を決定する。Overall Score は、Criteria ごとに Sub-weight と Score の積和をとって得られる Weighted Score (図 7 における Main criteria scores)を更に Weight と積和計算することで算出する。Score の下限値、上限値をそれぞれ 4、10 としているため、Overall Score の最低値、最高値もそれぞれ 4、10 となる。

なお、MCDM-23 では、計算結果は Worksheet (図 7) 。Star Chart (図 8) 、Stacked Bar Graph (図 9) など理解容易な形で出力される。

Star Chartは各CriteriaごとのMain Criteria Scoresをもとに、各設計代替案の長短所をレーダーチャート状に示したもので、内円は全てのCriteriaで評点最低となる状態を、最外の正多角形は全てのCriteriaで最高評点となる理想的プロジェクトのパフォーマンスを示す。

Stacked Bar Graphは全ての代替案の Weighted Main ScoreとOverall Scoreを一括して図示したものである[9]。図8の例ではScheme Aが最も評点が高い案である。

これらをもとに、設計者は設計案の見直しを図るなり、評価項目の練り直しを行い、それに応じて



MCDM-23 Worksheet for Scheme A

Main criteria	Sub-criteria	Sub-criteria Weights	Sub-criteria Values	Sub-criteria Scores	Main criteria scores	Main criteria Weights	Weighted Main scores
Life cycle cost	Construction cost	0.68	1500.0		8.78	0.132	1.16
	Annual energy cost	19.40	60.0				
	Annual maintenance cost	19.40	50.0				
Resource use	Annual electricity (kWh/m2)	0.20	120.0	7.3	7.00	0.154	1.08
	Annual fuels (kWh/m2)	0.20	80.0	6.3			
	Annual water (m3)	0.20	8000.0	7.0			
	Construction materials (Tons)	0.20	15.0	7.5			
	Land (hectare)	0.20	1.1	6.9			
Environmental loading	CO2-emissions from construction (ppm)	0.17	2.0	9.1	8.34	0.175	1.45
	Annual CO2-emissions from operation (ppm)	0.17	1.2	7.4			
	SO2-emissions from construction (ppm)	0.17	0.8	9.4			
	Annual SO2-emissions from operation (ppm)	0.17	2.1	7.5			
	NOx-emissions from construction (ppm)	0.17	1.2	7.6			
	Annual NOx-emissions from operation (ppm)	0.17	2.0	9.0			
Architectural quality	Identity	0.35	9.0	9.0	8.35	0.149	1.25
	Scale/proportion	0.25	8.0	8.0			
	Integrity/coherence	0.20	7.0	7.0			
	Integration in urban context	0.20	9.0	9.0			
Indoor quality	Air quality	0.25	9.0	9.0	7.50	0.105	0.79
	Lighting quality	0.25	7.0	7.0			
	Thermal quality	0.25	8.0	8.0			
	Acoustic quality	0.25	6.0	6.0			
Functionality	Functionality	0.45	9.0	9.0	9.00	0.126	1.13
	Flexibility	0.15	10.0	10.0			
	Maintainability	0.25	9.0	9.0			
	Public relations value	0.15	8.0	8.0			
Security			8.0		8.0	0.160	1.28

図 7 Worksheet

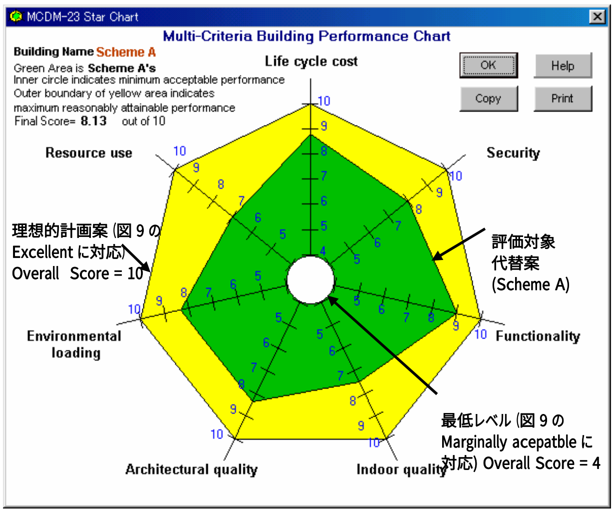


図 8 Star chart

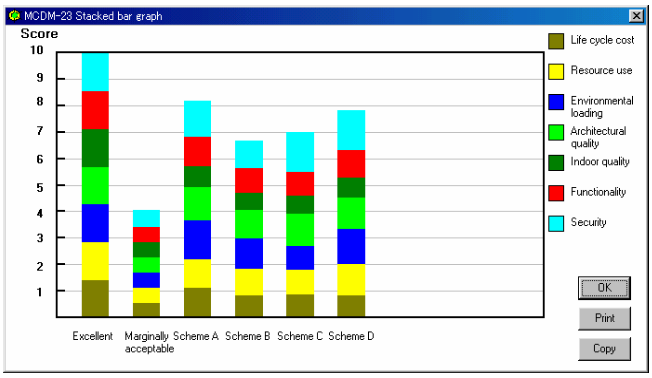


図 9 Stacked bar graph

図1における「(1)評価項目の設定」以降のプロセスを繰り返すことになる。

以上のインタラクションにより、設計チームは、最終的な設計案を意志決定することが出来る。

3．まとめ

設計代替案の合理的意志決定手法Multi-Criteria Decision Making Method、 MCDMおよびその支援ツール MCDM-23 について、既往の評価スキームと比較しつつ、その特徴に論究した。

MCDMは、設計段階で設計者が多数の設計代替案の中から、最適な案を決定するための意思決定手法である。その手法に沿って、実際に使われるコンピュータツール MCDM-23 が開発された。

MCDM、MCDM-23 は、2002 年のタスク終了後、全ての成果は IEA SH&C Executive Commitee での承認を経て、出版公開された。MCDM-23 についてはソースコードを含めたプログラムの全面的公開がおこなわれている。

詳細は幣研究室 web ページ（http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/j/INDEX.htm）を参照されたい。

【謝辞】

IEA SH&C Task23 における本研究に関しては、工学院大学教授・宇田川光弘先生に多くの援助、指導を得た。記して謝意を表する。

【注記】

注1） MCDM-23は、Windows95/98を基本動作環境とする。プログラムについては、本体部分のソースコードはVisual Basic 6.0、固有値計算のソルバーはFortranで、ヘルプはRoboHelpにより作成した。

注 2） 参加 12 カ国の構成は、アルファベット順に Austria, Canada, Denmark, Finland, Germany, Japan, Netherlands, Norway, Spain, Sweden, Switzerland, USA。日本代表委員は、工学院大学・宇田川光弘教授と谷本。また、Balcomb はアメリカ代表委員である。

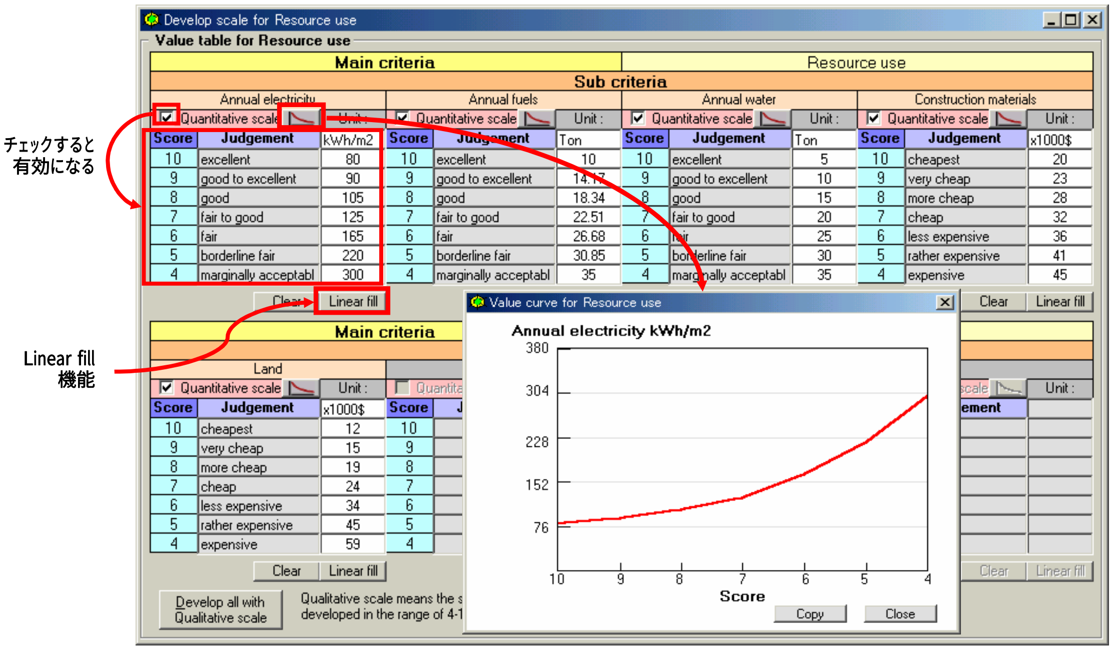
【付録】 MCDM-23におけるValue Tableの設定方法

1．LCC以外のCriteriaの場合

初期画面のValue Tableメニューから設定したいCriteriaを選択すると、Value Tableの設定画面が表示される。Resource UseについてのValue Tableの設定画面の例を付図1に示す。

デフォルトでは、LCCを除く、全てのSub-criteriaは定性的評価項目として設定されている。定量的評価項目については、“Quantitative scale”のチェックボクスをクリックすると、Value Tableの記入欄が有効になる。

各Sub-criteriaごとに設けられたLinear fill機能を用いると、Score=10、Score=4に対応するValueを入力するだけで、途中の値が線形補間される。なお、Scoreに対応したJudgementは各



付図１　Resource Use の各 Sub-criteria の Value Table を設定

Sub-criteriaごとにその文言の表現を変えることができる。

また、ダイアログ中の[ボタン画像]ボタンをクリックすることにより、ValueとScoreの関係をグラフで確認することができる。図からわかるように、Value-Score関係には、所謂、非線形の効用関数が許容されている。

2．CriteriaがLCCの場合

LCCに関しては、Sub-criteriaごとにValue Tableを定義するのではなく、別途用意されたLCC計算機能を用いて、CriteriaであるLCCとScoreとの対応関係を定義する。

初期画面のValue Tableメニューにある LCCを選択すると、まず、LCC計算プロセスを起動するか否かをダイアログで聞いてくる。“Yes”を選択すると、LCC計算ダイアログ（付図2）が表示される（“No”を選択すると付図1と同様のダイアログが示される）。付図2のダイアログで10のパラメータを入力し（デフォルト値あり）、Calculationボタンをクリックすると、LCC計算式（A1）における建設コスト、年間運転コスト、年間管理コストに乗じる係数Coefficient of construction cost (*a*)、energy cost (*b*)、maintenance cost (*c*)が算出される。

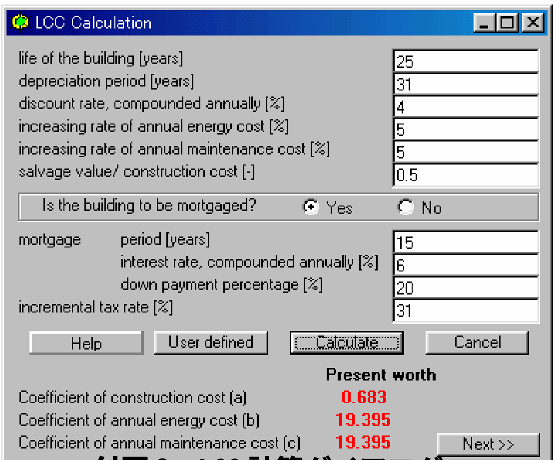
LCC ＝ *a**(Construction cost)

+*b**(Annual operation cost)

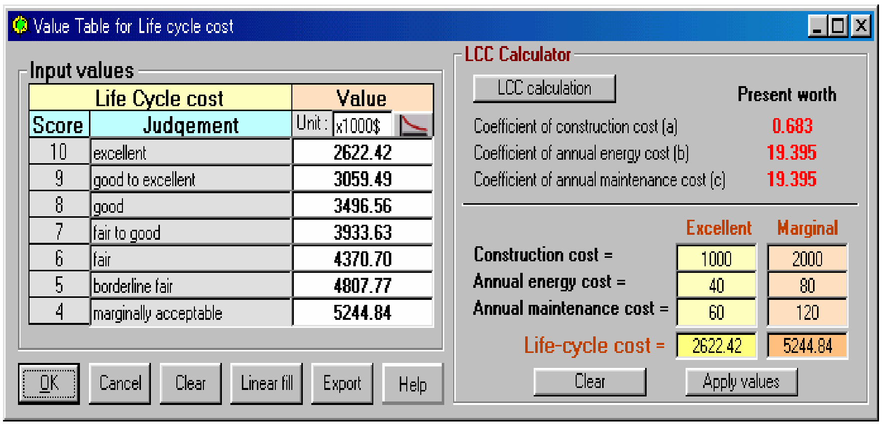
+*c**(Annual maintenance cost)　　　　…(A1)

なお、この3つの係数*a*, *b*, *c* は、LCCを構成する3つのSub-criteriaに対するSub-weightに一致するため、このプロセスを経た場合は、当該Sub-weightを定める必要はなくなる。

“Next”ボタンをクリックすると、付図3に示すLCCのValue Tableが現れる。ここで、ユーザーは、ダイアログ左側のValue欄にあるテキストボックスに値を代入することにより、LCC（Monetary Unit）とScoreとの対応関係を定義する。上述したLinear fill機能、Graph機能のオプションに加えて、LCC



付図 2　LCC 計算ダイアログ



付図 3　Life Cycle Cost の Value

ダイアログでは、LCC計算のための電卓機能が用意されている。これは、ダイアログ右側下にあるテキストボックスにSub-criteriaである3つのコストを代入するとLCCが表示されるというもので、Score=10、 Score=4に対応するLCCの上下限を定めるに当たって有用である。

【参考文献】

[１]全貞ユン、倉科大地、田村明弘：海外の Green Building 評価ツールに関する動向調査、日本建築学会技術報告集　第 11 号、p.161-164、　2000.12
[2]岡建雄、横尾昇剛：Green Building Challenge 2000 その 1　環境共生評価手法に関する国内外の取り組み、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、p.965 ‑ 966、2001.9
[3]横尾昇剛、半澤久、岡建雄：Green Building Challenge 2000 その 2　GBTool 2000 の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、p.967 ‑ 968、2001.9
[4]福永和弘、水野里絵、高草木明：建築基本設計のためのグリーン設計評価手法、日本建築学会技術報告集　第 12 号、p.139-144、2001.1
[5]横尾昇剛、岡建雄：総合的な建築物の環境性能評価手法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、p.923-924、　2000.9
[6] Doug Balcomb、Inger Andresen：Proposal for Multi-Criteria Decision- Making Method 4th version、　IEA SH&C Task23 closed document、　2000.9
[7]谷本潤、片山忠久、萩島理、Douglas Balcomb：Computer program MCDM-23 Multi-Criteria Decision-Making Tool の概要、日本建築学会九州支部研究報告　第 39 号、p.89-92、2000.3
[8]木下栄蔵：意志決定論入門、啓学出版、　1992
[9] Inger Andresen：A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design、Norwegian University of Science and Technology、　p.154、2000.2

助成研究者紹介

谷本（たにもと）　潤（じゅん）

現職：九州大学大学院総合理工学研究院教授（工学博士）

主な著書：ハンディブック建築 改訂第2版（オーム社　平成14年）