

研究論文

社会的選好に適合する電源構成と支払い意志額の解析手法の開発

Development of Analytical Evaluation of Best-mixed Power Generation Systems and Willingness-to-pay Reflecting Public Preferences

四ヶ所 成 美* ・ 赤 坂 亮** ・ 松 元 達 也***
Narumi Shikasho Ryo Akasaka Tatsuya Matsumoto

守 田 幸 路**** ・ 福 田 研 二*****
Koji Morita Kenji Fukuda

(原稿受付日2004年3月29日, 受理日2004年8月4日)

Abstract

There are many controversial issues related with energy and/or environmental problems. Unfortunately, the participants: suppliers and consumers hardly evaluate the immeasurable values of energy resources, or the energy externalities because of their complexity and variety. Under this situation, arguments among them on future energy systems are often confused. This paper suggests an evaluation method of constructing best-mixed power generation systems reflecting public preferences, and willingness-to-pay for various values. The linear programming method was applied, which duality theorem allowed us to evaluate the marginal cost of consumers' preferences or the willingness-to-pay. Investigations into consumers' preference for power generation systems showed that most consumers preferred values for 'social acceptability' and for 'environmental effect' in constructing power generation systems. The best combinations of power generation systems for the preferences were comprised mainly of the natural gas-fired power and hydraulic power generation systems, followed by the photovoltaic and wind power generation systems. The willingness-to-pay for the value of 'environmental effect' resulted in the highest one.

1. はじめに

日本のエネルギー消費量の増加に伴い、エネルギー源の安定供給、また化石燃料の過大な消費に伴う環境問題が注目されている。これらの問題解決策としてさらなる原子力発電の導入も考えられているが、一方では、廃棄物対策や事故による安全性への懸念等により大幅な原子力の導入は困難な状況にある。これらはそれぞれ「エネルギーセキュリティ」、「環境」、「社会的リスク受容性」という、市場経済の元で日常的には取り引きされず、従って価格が容易にはつけられない、いわゆる複数の「外部性（価値の場合「外部価値」）」のトレードオフ問題と考えることができる。

ところで、電力を供給する側は社会的合意を重視せざるをえないが、社会の意志を的確に把握することは必ずしも容易ではない。一方、需要側である消費者においても、

様々な情報によりエネルギーや環境に対する関心は高まってきたものの、複雑な問題であるが故に、複数の問題を同時に考慮に入れ、電源に対し求めるものとそれに見合う電源構成についての確かなイメージを持つことは難しい状況にある。このような事情が両者の合意を得ることを困難にする一原因であると考えられる。

エネルギーの枯渇問題が喧伝され始めた70年代以降、将来におけるエネルギーの最適消費形態や電源構成最適化に関する研究がさかんに行われるようになった。これらの多くは将来の経済動向、エネルギー消費動向、技術の進展予測などを仮定し、コスト最小という目的達成のため考えられるエネルギー源構成や環境負荷予測あるいは社会的費用を算出するといったものである。

しかし、コスト最小の元での解析では外部性は排除される宿命にある。換言すれば、長期ビジョン策定においてさえ「外部価値」に関わる配慮が往々にしてなされていないということであるが、外部価値は「価値」である故に、長期的には実現することが望ましいか、あるいは実現する可能性も高い。ここにコスト最小という価値を予め設定した解析に横たわる問題がある。

更に、自然エネルギーによる電力への支払い意志額の仮

*九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻

E-mail: shikasho@nucl.kyushu-u.ac.jp

** 環境システム科学研究センター 研究員

*** 〃 〃 〃 助手

**** 〃 〃 〃 助教授

***** 〃 〃 〃 教授

〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1 エネルギー量子工学専攻

想評価法を用いた調査も行われている^{1), 2)}が、比較的単純な外部価値のトレードオフ問題といえる。

著者らは、社会的選好に適合する最適電源構成（電源ベストミックス）を求める解析手法を開発してきた³⁻⁸⁾。これは人々の様々な外部価値への配分に注目し、これを適切に満足する、いわば各人にとって理想的な電源構成を求めるものである。本論文では、本手法から算出されるシャドウプライスとして、各種電源に対する評価価格あるいは外部価値への支払い意志額等を求めることができることを示す。さらに、本手法を用い得られた結果の一例を示す。

2. 解析方法

2.1 価値観の数値化

本研究では電源に関わる価値を経済性、利便性、エネルギー安全保障、環境、社会的受容性（評価項目）の5つに分類し、アンケートを用い、それぞれを一对比較することによって被験者が電源に対し抱く価値観を数値化することにした。図1に調査に使用したアンケートの設問項目を示す。このアンケートでは、被験者に5評価項目に対し5段階評価の一对比較を要請するので、被験者は合計10組の一对比較を行うことになる。アンケート結果を用い、被験者の電源に対する価値観を評価項目の割合（重視度）として数値化した。

2.2 電源の特性値の算出方法

本研究では石油火力（OIL）、石炭火力（COA）、天然ガス火力（LNG）、水力（HYD）、太陽光（SOL）、軽水炉（LWR）、高温ガス炉（HTGR）、高速増殖炉（FBR）および風力（WIN）の9種類の電源を考慮することとし、各評価項目に対する

それぞれの電源の性能（特性値）を数値化した。特性値が大きいほど、対応する評価項目に対する性能が優れていることを示す。

図2に電源特性値の算出のための階層図を示す。各電源を各評価項目について評価するためのいくつかの細目を選択し、電源*i*に対する評価項目*j*の細目の性能ポイントを統計値やAHP法⁹⁾により求められた数値の偏差値によって与えた。更にこれらの性能ポイントをAHP法により決定し

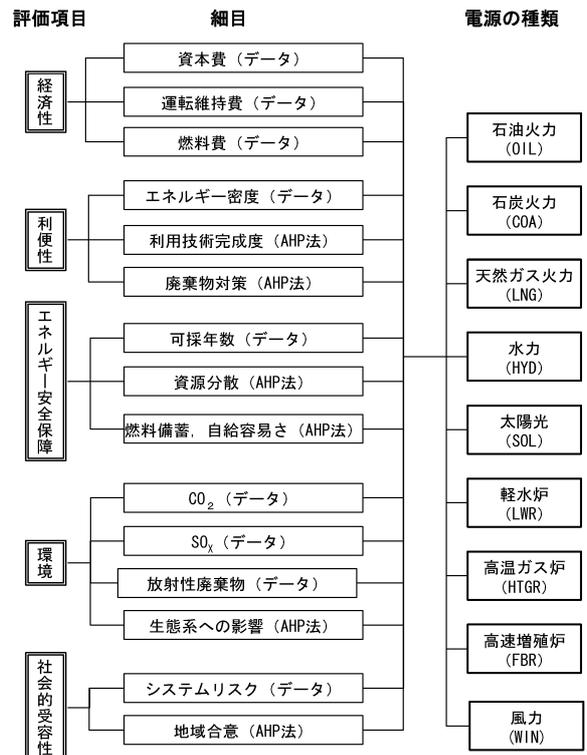


図2 本研究での電源の特性値の階層図

では、アンケートにお答えください。下の例のように適当だと思うところに○印をつけてください。

(例) 利便性と環境を比較して、環境の方が重要だと思った場合

利便性	と	環境		利便性の方が重要	利便性の方が若干重要	同じくらい重要	環境の方が若干重要	環境の方が重要
アンケート			↑	とを比較して				
アンケート項目				選択肢				
経済性	と	利便性	とを比較して	経済性の方が重要	経済性の方が若干重要	同じくらい重要	利便性の方が若干重要	利便性の方が重要
		エネルギー安全保障		経済性の方が重要	経済性の方が若干重要	同じくらい重要	エネルギー安全保障の方が若干重要	エネルギー安全保障の方が重要
		環境		経済性の方が重要	経済性の方が若干重要	同じくらい重要	環境の方が若干重要	環境の方が重要
利便性	社会的受容性	経済性の方が重要		経済性の方が若干重要	同じくらい重要	社会的受容性の方が若干重要	社会的受容性の方が重要	
	エネルギー安全保障	利便性の方が重要		利便性の方が若干重要	同じくらい重要	エネルギー安全保障の方が若干重要	エネルギー安全保障の方が重要	
	環境	利便性の方が重要		利便性の方が若干重要	同じくらい重要	環境の方が若干重要	環境の方が重要	
エネルギー安全保障	社会的受容性	利便性の方が重要		利便性の方が若干重要	同じくらい重要	社会的受容性の方が若干重要	社会的受容性の方が重要	
	環境	エネルギー安全保障の方が重要		エネルギー安全保障の方が若干重要	同じくらい重要	環境の方が若干重要	環境の方が重要	
環境	社会的受容性	エネルギー安全保障の方が重要		エネルギー安全保障の方が若干重要	同じくらい重要	社会的受容性の方が若干重要	社会的受容性の方が重要	
	社会的受容性	環境の方が重要		環境の方が若干重要	同じくらい重要	社会的受容性の方が若干重要	社会的受容性の方が重要	

図1 被験者の電源に対する価値観を調査するためのアンケート項目

た各細目の重みで加重平均した数値を電源*i*の評価項目*j*に対する特性値とした⁸⁾。以降本研究では電源および評価項目に対し添え字*i*および*j*を用いる。

表1に本研究で用いる電源の特性値を示す。

表1 本研究の電源の特性値

	経済性 (<i>j</i> =1)	利便性 (<i>j</i> =2)	エネルギー — 安全保障 (<i>j</i> =3)	環境 (<i>j</i> =4)	社会的 受容性 (<i>j</i> =5)
OIL(<i>i</i> =1)	0.540	0.236	-0.937	-0.505	-0.292
COA(<i>i</i> =2)	0.540	-0.319	-0.829	-1.141	-1.392
LNG(<i>i</i> =3)	0.642	0.260	-0.927	0.355	0.211
HYD(<i>i</i> =4)	0.259	0.669	1.084	0.117	-0.025
SOL(<i>i</i> =5)	-2.131	-0.447	1.084	0.369	1.007
LWR(<i>i</i> =6)	0.651	-0.232	-0.518	0.177	-0.149
HTGR(<i>i</i> =7)	0.394	0.064	-0.518	0.177	-0.149
FBR(<i>i</i> =8)	0.394	-0.001	0.446	0.177	-0.218
WIN(<i>i</i> =9)	-1.289	-0.230	1.116	0.274	1.007

2.3 最適電源構成問題とその双対問題

(1) 最適電源構成問題

本研究では、まず、被験者の各価値に対する重視度の配分に適合する電源構成（最適電源構成）を決定した。

ここでは、まず、重視度の配分と電源構成全体から得られる特性値との誤差を最小とする線形計画問題①を解き、さらに①で得られた誤差を含む重視度を使い発電コストが最小となる線形計画問題②を解くことにより最適電源構成（電源ベストミックス）を求めた。

以上を線形計画法問題¹⁰⁾として定式化した目的関数および制約式を次に示す。

線形計画問題①

式(1)は重視度と電源構成の特性値の誤差を表し、これを目的関数として最小化する。式(2)は評価項目*j*に対する電源構成の特性値が誤差を含む重視度と一致するための制約式、式(3)は各電源の導入率の総和を1とする制約式、式(4)は各電源導入率の非負条件である。

目的関数

$$z = \Delta b \text{ (最小化)} \dots\dots\dots (1)$$

制約式

$$\sum_{i=1}^9 S_{ij}x_i \geq b_j^0 - \Delta b \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum_{i=1}^9 x_i = 1 \dots\dots\dots (3)$$

$$x_i \geq 0 \quad (i=1, \dots, 9) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 b_j^0 、 Δb 、 S_{ij} および x_i はそれぞれのアンケート結果から得られる評価項目*j*の重視度、重視度と電源構成の特性値との誤差、評価項目*j*に対する電源*i*の特性値および電源*i*の導入率である。

線形計画問題②

式(5)は電源構成での全発電コストを表し、これを目的関数として最小化する。この時の制約式(6)、(7)および(8)は線形計画問題①の制約式と同じであるが、線形計画問題①の最適解である Δb より、式(6)において最適化された誤差を含む重視度は $b_j = b_j^0 - \Delta b$ とする。

目的関数

$$z = \sum_{i=1}^9 c_i x_i \text{ (最小化)} \dots\dots\dots (5)$$

制約式

$$\sum_{i=1}^9 S_{ij}x_i \geq b_j \dots\dots\dots (6)$$

$$\sum_{i=1}^9 x_i = 1 \dots\dots\dots (7)$$

$$x_i \geq 0 \quad (i=1, \dots, 9) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 b_j および c_i は評価項目*j*の誤差を含む重視度および電源*i*の発電コストである。

(2) 双対問題の解析式

次に、人々の価値観に適合するベストミックス解析問題に対する双対問題¹¹⁾を解いた。本研究により後に述べる潜在価格等を得ることができる。

2.3(1)節に示した主問題に対する双対問題は以下のように機械的に与えられる。

目的関数

$$w = \sum_{j=1}^5 b_j y_j + y_6 \text{ (最大化)} \dots\dots\dots (9)$$

制約式

$$\sum_{j=1}^5 S_{ij} y_j + y_6 \leq c_i \dots\dots\dots (10)$$

$$y_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, 5) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 y_j ($j=1, \dots, 6$)は変数であり、その最適解 y_j^* ($j=1, \dots, 6$)は主問題の各制約式に対する潜在価格を表す。すなわち本研究では、 y_j^* ($j=1, \dots, 5$)は回答者の価値選択における評価項目*i*の重視度1単位当たりの価格である。また、潜在価格 y_6^* は導入量1が必要であるという電力機能に対する価格であり、これが正の場合は重視度を満たすだけでは満たされなかった導入量を増やすための価格(追加的1単位の費用)、負の場合は、重視度を満たすために余分に導入した導入量を合計が1になるように減らすことに対する価格(費用)である。

2.4 支払い意志額

2.3節に示した主問題と双対問題の最適解、それぞれ x_i^* , y_j^* に対する目的関数はその値が等しいという双対定理によって次式が成立する。

$$\sum_{i=1}^9 c_i x_i^* = \sum_{j=1}^5 b_j y_j^* + y_6^* \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 y_j^* は評価項目 j に対する重視度1単位当たりの価格であり、 b_j はその回答者の評価項目 j に対する重視度であるので、最適解における式(12)の $b_j y_j^*$ 項は被験者の評価項目 j に対する「支払い意志額」を表していると考えられる。

ここで、図3に電源ベストミックス問題とその双対問題の目的関数の関係を示す。本図のように、式(12)左辺は発電計画を立てる電力生産者の立場の問題であり、電源構成に対しかかる費用の配分を最適化する問題である。一方、右辺は電力を購入する消費者の立場の問題であり、発電によって得られる価値に対していくら支払うかという支払い意志額の配分を最適化する問題である。実際、電力生産者にとってはどのような電源をどの程度の配分で用いるかが問題であるが、消費者は電源を購入する際、どの電源が用いられるかというより、その電源を用いて発電するとどのような価値を得ることができるかということを考えるだろう。さらに、経済性のみを重視し選択した場合よりも被験者の選好に基づいて選択した場合追加的に、より多く支払うことになる「付加的支払い意志額」を求めた(付録参照)。

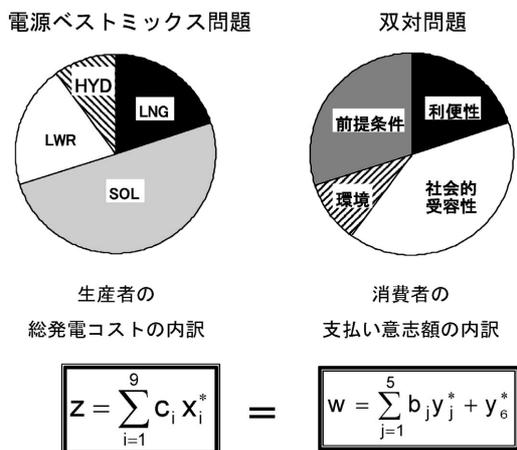


図3 電源ベストミックス問題とその双対問題の目的関数の関係

2.5 評価価格

2.3節に示した双対問題の制約式と主問題の最適解の間には次の関係(相補スラック条件)が成り立つ。

$$\sum_{j=1}^5 S_{ij} y_j^* + y_6^* < c_i \text{ ならば, } x_i^* = 0 \dots\dots\dots (13)$$

$$\sum_{j=1}^5 S_{ij} y_j^* + y_6^* = c_i \text{ ならば, } x_i^* \geq 0 \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 S_{ij} は電源 i が持つ評価項目 j の特性値であり、 y_j^* は価値観を満たすように付けられた評価項目に対する価格である。よって、 $S_{ij} y_j^*$ は価値観による電源 i の評価項目 j に対する評価価格となる。

以上から、式(13)は、電源 i に対する評価価格が発電コストに見合わないならば、被験者の電源ベストミックスにその電源は導入されないという状況を表していることになる。

一方、式(14)は、電源 i に対する評価価格が発電コストに見合うようであれば、被験者のベストミックスにその電源が導入される可能性がでてくるという状況を表している。

3. 結果および考察

平成11年10月から12月に郵送もしくは街頭で行った調査により得られたアンケート回答を使い、重視度、電源ベストミックス、支払い意志額、付加的支払い意志額および評価価格の解析を行った。今回は全回答の中で、ある程度回答に整合性があった290件について集計結果の考察を行う。なお、本アンケートは正規の方法で行われたものではないが、解析手法の確立を目的として利用するものである。

図4に回答者全体の重視度の平均を示す。この重視度と表1に示す電源の特性値を用いて、電源導入率、評価項目に対する支払い意志額、付加的支払い意志額および電源に対する評価価格を求めた。電源導入率、評価項目に対する支払い意志額、付加的支払い意志額および電源の評価項目に対する評価価格の平均をそれぞれ図5、図6、図7およ

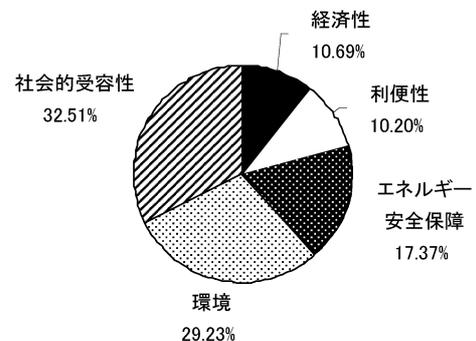


図4 回答者全体での重視度の平均

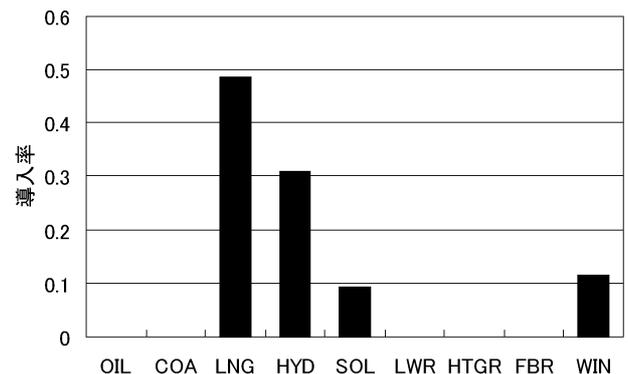


図5 導入率の平均

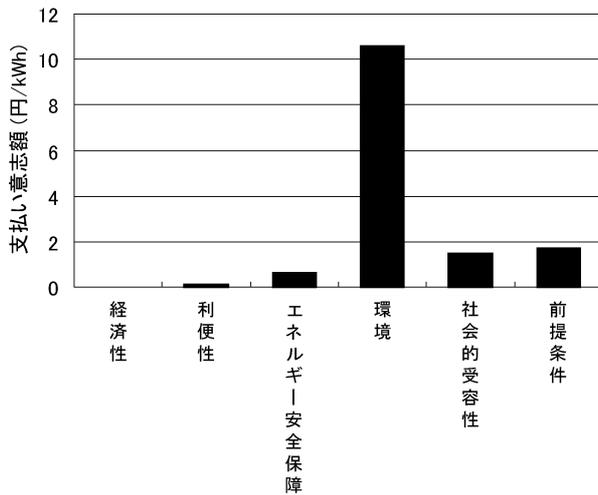


図6 支払い意志額の平均

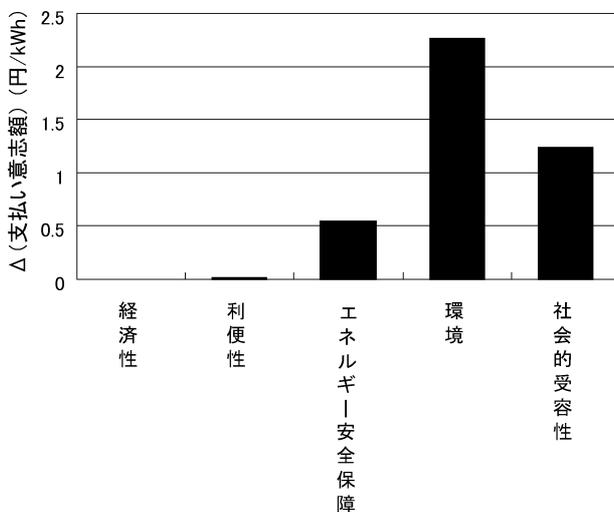


図7 付加的支払い意志額の平均

び図8に示す。

図4から、社会的受容性および環境を他の項目よりも重視し、経済性および利便性を重視しない傾向にあることがわかる。

図5から、LNG、HYDは電源ベストミックスに大きい割合で導入されている。続いて、WIN、SOLの順で導入されることがわかる。

図6から、平均すると環境に対する支払い意志額が非常に大きいことがわかる。また図7から、付加的支払い意志額は総支払い意志額の平均14.5円/kWhに対して、環境2.3円/kWh、社会的受容性1.2円/kWh、エネルギー安全保障0.5円/kWhとなった。また、これらの総支払い意志額に対する割合は、それぞれ15%、9%、4%であった。なお、本研究による付加的支払い意志額の妥当性を調べるために、求められた環境に対する付加的支払い意志額の結果を、再生可能エネルギー導入を目的として調査された消費者が付加的に支払うグリーン料金の結果と比較してみた。一般家庭の一ヶ月の電気料金が約1万円としてそれに対しグリ

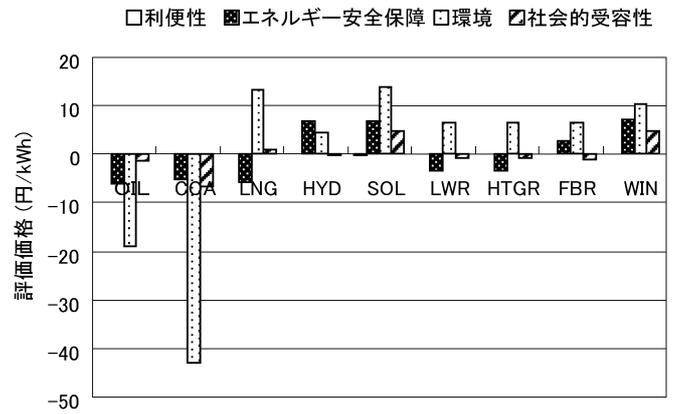


図8 評価価格の平均

ーン料金一口500円を支払った場合、全電気料金に対するグリーン料金の割合は約5%である。これに対し本研究による環境に対する付加的支払い意志額は15%と大きい結果となった。本研究では被験者に対し間接的に支払い意志額を設問しているため、大きめの値になったことも原因と考えられる。

図8から、以下のような結果が得られた。OILおよびCOAはすべての項目で負の評価であった。LNGはエネルギー安全保障について悪い評価だったが、環境についてはSOLについて良い評価を得ている。HYDはエネルギー安全保障および環境の評価が良い。SOLは利便性の評価が良くはないが、環境に対する評価が非常に高く、エネルギー安全保障および社会的受容性についても良い評価を得ている。LWR、HTGRは環境に対する評価は良いのだが、エネルギー安全保障および社会的受容性に対する評価が悪い。FBRは環境およびエネルギー安全保障に対する評価は比較的良いが、社会的受容性に対する評価が悪い。WINはすべての評価項目の評価が高い。

4. おわりに

本論文では、著者らが提案している人々の電源に対する価値観に適合する電源構成を求める解析手法をもとに支払い意志額および評価価格を算出する方法について述べた。5評価項目および9電源の場合の最適電源構成問題（主問題）に対する双対問題の理論的解釈を行うことにより、被験者の支払い意志額および電源に対する評価価格を算出できることがわかった。

本方法を用いてサンプル的アンケート結果について解析例を示した。

参考文献

- 1) 野村昇, 赤井誠; 自然エネルギー電力への支払い意志額についてのCVM調査, エネルギー・資源, 23-4 (2002), 282-287.
- 2) 高橋雅仁, 浅野浩志; 事業用需要家のグリーン電力への支払い意志額のCV調査と数量分析, エネルギー・資源, 23-4 (2002), 288-294.

- 3) 原田康弘 他 4 名；電源構成の構築における公衆の意見の評価手法に関する研究，九州大学総会理工学報告，18-4 (1997)，289-295.
- 4) 福田研二 他 3 名；社会的選好を考慮した最適電源構成の算出法の開発，九州大学総会理工学報告，20-1 (1998)，19-24.
- 5) 片山善順 他 8 名；社会的選好に適合する電源のベストミックス解析システムの開発，九州大学工学研究院附属環境システム科学研究センターIES レポート，22 (2000).
- 6) Shikasho N, et al. ; An Analytical Method of Constructing Best-mixed Power Generation Systems Reflecting Public Preference, MEMOIRS OF THE FACTORY OF ENGINEERING, 62-4 (2002), 149-164.
- 7) Akasaka R. et al. ; AN ANALYTICAL METHOD OF CONSTRUCTING BEST-MIXED POWER GENERATION SYSTEMS REFLECTING PUBLIC PREFERENCE, Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, (2003), 1019-1024.
- 8) 四ヶ所成美 他 4 名；社会的選好に適合する電源構成と支払い意志額の解析方法，九州大学工学研究院附属環境システム科学研究センターIES レポート，38 (2003).
- 9) 刀根薫；ゲーム感覚意思決定法，(1986)，1-46，日科技連出版社.
- 10) 今野浩；線形計画法，(1987)，1-12，日科技連出版社.
- 11) 今野浩；線形計画法，(1987)，73-87，日科技連出版社.

(付録) 付加的支払い意志額の算出方法

付加的支払い意志額の総和は被験者の選好に基づいた場合と経済性のみを重視した場合との支払い意志額の差額であるので，式(9)より次式で表される。

$$\sum_{j=1}^5 \Delta(b'_j y'_j) = w' - w_0 = \sum_{j=1}^5 (b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0) + y'_6 - y_6^0 \dots (付1)$$

ここで， $\Delta(b'_j y'_j)$ は評価項目 j に対する付加的支払い意志額， w' ， y'_j および y'_6 はそれぞれ被験者の重視度 b'_j から求めた支払い意志額の総和，評価項目 j に対する潜在価格および電力機能に対する潜在価格， w_0 ， y_j^0 および y_6^0 は経済性のみを重視した場合の重視度 b_j^0 を用い求めたそれぞれの解である。ここで，それぞれ評価項目に対する支払い意志額には被験者の選好を満たすため付加的に支払う額の外に，経済性のみを重視した場合でもその評価項目に対し支払わざるをえない額 $b_j^0 y_j^0$ ，および次に述べる電力機能も満たすための額

Y_j^0 が含まれていると考えられる。すなわち，評価項目に対する支払い意志額は次式で表される。

$$b'_j y'_j = b_j^0 y_j^0 + Y_j^0 + \Delta(b'_j y'_j) \dots (付2)$$

ここで， Y_j^0 は，経済性のみを重視した場合と，被験者の選好による重視度を用いた場合の，それぞれ電力機能に対する潜在価格の差額 $y_6^0 - y'_6$ を，

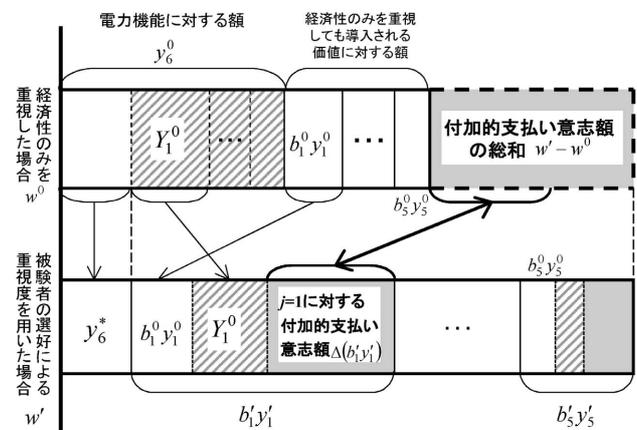
$$y_6^0 - y'_6 : Y_j^0 = \sum_{j=1}^5 (b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0) : b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0 \dots (付3)$$

の比で割り振ったものと定義した(付図1参照)。結局， Y_j^0 は次式により求めた。

$$Y_j^0 = \frac{y_6^0 - y'_6}{\sum_{j=1}^5 (b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0)} (b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0) - \frac{y'_6 - y_6^0}{w' - w_0} (b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0) = \frac{1}{1 - \frac{y'_6 - y_6^0}{w' - w_0}} (b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0) \dots (付4)$$

よって，式(付2)，(付4)より評価項目 j に対する付加的支払い意志額 $\Delta(b'_j y'_j)$ は次式で表される。

$$\Delta(b'_j y'_j) = \frac{1}{1 - \frac{y'_6 - y_6^0}{w' - w_0}} (b'_j y'_j - b_j^0 y_j^0) \dots (付5)$$



付図1 付加的支払い意志額の算出方法概要