

地球温暖化の被害／対策コストの定量化と内部化について

On the Valuation and Internalization of Damage and Control Costs of Global Warming

キーワード：地球温暖化，被害コスト，対策コスト，外部性，統合解析

長野 浩司 杉山 大志

1. はじめに

ある財の生産，消費に起因して生じた影響（被害もしくは便益）の一部が，その財の取引に適切に反映されていないがゆえに，財の生産者ないし消費者が負担することなく，第三者もしくは社会に転嫁されている状況，及びその状況をもたらしている要因を，外部性と呼ぶ。エネルギーや電力の消費に係わる外部性としては，SO_xやNO_x排出に起因する酸性雨等の環境外部性，事故リスクやエネルギー供給セキュリティ等の非環境外部性などが指摘され，欧米などで包括的な定量評価研究（たとえば Lee et al. (1992) を参照されたい）が試みられている。

中でも，CO₂等の排出・蓄積に起因する地球温暖化の影響は，エネルギーシステムの環境影響のうちでも，大規模かつ超長期にわたって発生し，かつ極めて大きな不確実性を持つ。温暖化が顕在化した場合にそれがどのような影響を及ぼし，もたらされる被害額がどの程度に上るのかは，今後のエネルギー戦略あるいは政策立案において最重要の要因となる。しかし，温暖化の被害額の評価推定は，温室効果ガス排出

量の長期見通し，気象の物理化学過程，気温上昇と被害額の関係など，評価ステップの各々になお抜本的な改善を必要としている。このため，現在までに見られる評価例は，これらの連環のある部分を大幅に簡略化した概数評価が多い。

本稿では，地球温暖化の被害コスト評価の現状を，これまでに報告された代表的な文献をサーベイし，今後のエネルギー戦略評価への示唆について考察する。

2. 地球温暖化の被害コストの定量化

地球温暖化による被害には，以下のようなものが予想されている：海面上昇による海岸の侵食および塩害，農業生産の減少，疾病率の増加，種の絶滅，水資源の減少，冷房費の上昇など。一方，被害を相殺する要因としては，CO₂の大気中濃度および大気温度の上昇が光合成を促進し農業生産を増やすこと，暖房費が減少することなどがある。温暖化による被害を算出する場合には，これらを差し引いた正味の値を求める必要がある。

2-1. 積み上げ計算による大気中 CO₂ 濃度倍増時の被害評価

被害コストの定量化研究については、Nordhaus (1991), Cline (1992), Fankhauser (1993) の3つの事例が報告されており、頻繁に引用されている。CO₂ 濃度が産業革命前の2倍の水準に達した場合のアメリカ合衆国における被害を、多数の被害要因の積み上げ評価によりそれぞれ求めており、その結果が表-1である。3つの事例の個々の項目の値はかなりばらつきが大きいですが、被害の総額がGNPの1～1.3%程度であるという点では概ね一致を見ている。

さらに Fankhauser (1993) は、全世界を対象に、5地域に分けた積み上げ評価を行った(表-2)。GNP比で算出された被害は中国で6.1%と高く、旧ソ連で0.7%と低い。中国で

大きな値になる主な理由は、GNPに占める農業の割合が約1/3と他の地域(例えばアメリカでは2%)より高いためである。一方、寒冷的な旧ソ連地域では温暖化によって受ける利益が大きく、被害をかなり相殺する。

上記の3者がともに強調している点は、これらの値は概数評価(Order Estimate)であって、その絶対値にさほどの意味は無いということである。Fankhauser (1993) では、結果には少なくとも50%の誤差が見込まれるとしている。

2-2. 一般的な状況での温暖化被害評価

前項に紹介した積み上げ計算は、「CO₂ 濃度倍増時」の一点のみを対象として行われている。これ以外の状況についての試算は殆ど存在しないが、重要な論点が2つある。

まず第1に、気候変動の進行速度である。上

表-1 大気中 CO₂ 濃度倍増時の米国の温暖化被害コストの評価例 (Fankhauser (1993) による, 単位 10 億ドル: 1988 年価格)

	Fankhauser (1993)	Cline (1992) ^a	Nordhaus(1991) ^a
Coastal defense	0.2	1.0	7.5
Dryland loss	2.1	1.5	3.2 ^b
Wetland loss	5.6	3.6	e
Species loss	6.4	3.5	e
Agriculture	7.4	15.2	1.0
Forestry	-1.8	2.9	small
Fishery	—	—	small
Energy ^c	—	9.0	1.0
Water	13.7	6.1	e
Other sectors	—	1.5 ^d	e
Amenity ^c	6.8	—	e
Life/morbidity	16.6	>5.0	e
Air pollution	6.4	>3.0	e
Migration	0.5	0.4	e
Natural hazards	0.2	0.7	e
Total (% GNP, 1988)	64.1 (1.3)	53.5 (1.1)	48.6 (1.0)

a 1988 年価格に換算。

b 土地損失の総額 (dryland と wetland の合計)。

c Fankhauser (1993) では Amenity, Cline (1992) 及び Nordhaus (1991) では Energy と分類しているが、ともに冷暖房費を評価しており対応関係にある。

d 旅行。

e 評価せず。全体で GNP の 0.75% と想定。

表-2 世界地域別の温暖化被害コスト評価 (Fankhauser (1993) による, 単位 10 億ドル)

	EC	USA	Former USSR	CHINA	OECD	World
Coastal defense	0.1	0.2	0.0	0.0	0.5	1.1
Dryland loss	0.3	2.1	1.2	0.0	8.1	14.0
Wetland loss	4.9	5.6	1.2	0.6	15.9	31.6
Special loss	7.1	6.4	2.6	1.5	17.3	28.2
Agriculture	9.7	7.4	6.2	7.8	23.1	39.1
Forestry	-4.1	-1.8	-2.9	1.1	-10.0	-10.8
Fishery ^a	—	—	—	—	—	—
Energy	—	—	—	—	—	—
Water	14.1	13.7	3.0	1.6	34.8	46.7
Other sectors	?	?	?	?	?	?
Amenity	7.0	6.8	-0.7	0.7	20.1	23.1
Life/morbidity ^b	22.0	16.6	3.9	7.3	57.3	89.3
Air pollution	3.5	6.4	2.1	0.2	11.9	15.4
Migration	1.0	0.5	0.2	0.6	2.0	4.3
Natural hazards ^c	0.0	0.2	0.0	0.2	1.1	3.2
Toral (% GNP, 1988)	65.6 (1.5)	64.1 (1.3)	16.8 (0.7)	21.6 (6.1)	182.1 (1.4)	285.2 (1.5)

注：負の値は便益（負のコスト）を表す。

a 漁業損失は湿地損失に含まれる。

b 致死損害のみ評価。

c 台風被害のみ評価。

記の CO₂ 濃度倍増時の試算は、平衡状態についての計算であって過渡応答を考慮していない。将来、温暖化がどのように顕在化するのかわについては諸説あるが、環境庁(1990)によれば、温室効果ガスの排出量の増加が続いた場合、2030年代までに CO₂ の大気中濃度は産業革命以前のその2倍程度にまで上昇し、地球の平均で 1.5~3.5°C の気温上昇が起こる。また、19世紀末から現在までの温度上昇は 0.3~0.7°C 程度であり、人類は今後数百年の間に、有史以来経験したことのない速さで進行する気温上昇に直面する。このとき、温暖化の進行につれて、植生分布が赤道側から両極方向へと移動して行くが、温暖化の進行に植生の移動が追いつかないために、温暖化による農林業生産の向上は望めないという意見がある。

第2の論点は、非線形性である。Cline (1992) が主張しているように、3°C 程度の温

度上昇は農林業生産を増加させるかもしれないが、10°C ないし 20°C といったより大きな温度上昇に直面した場合の被害はカストロフィックなものとなり、単純に 3°C 上昇の場合の被害を線形に外挿して得られるものでは無いと考えるべきである。

これらの点について、Nordhaus は被害額が温度上昇の2次関数で増加するとの想定を、また Fankhauser は温度上昇の時間変化率を考慮した被害コスト関数形を、各々実験的に採用している。

2-3. 地球温暖化被害を取り入れた費用便益分析

Nordhaus (1991) は、最適化モデルを用いて CO₂ 排出抑制の費用便益分析を行っている。その結果として、今後起こるであろう温度上昇は基本的には放置するべきであると主張した。すなわち、最適解においては、評価期間で

ある2100年までに大気中CO₂濃度は現在の約2倍に達するが、このとき、評価期間を通してのCO₂排出量のShadow Price（排出量を1単位削減したときの総費用の変化）は1t-C（炭素換算トン）当たり\$5-20程度と低く、これより高価な排出抑制対策の実施は正当性がないとした。

Nordhausの結果は、IPCCの「CO₂濃度安定化」という目標と全く相反している。Cline（1992）はこれに反論して、Nordhausが3%としている効用割引率（純粋時間選好率）を0%に変更して試算を行った結果、濃度安定化というIPCCの目標は正当化されるとした。ただしClineは、被害の非線形性などの仮定条件に不確実性が大きいので、現時点で最適化計算から政策的示唆を読みとることは危険であり、「最大限の温暖化抑制努力を払わねばならない」との結論に止めるべきだとしている。

2-4. 被害コスト評価の前提条件に関する問題点

ドイツのフラウンホーファー・システム技術革新研究所のHohmeyerらは、EC委員会への報告（Hohmeyer and Gärtner（1992））において、温暖化の被害コストの概略評価を行っている。手法としては、上に挙げた検討例と同様に積み上げアプローチによっている。

この報告書の最大の特徴は、温暖化による人命の損失（飢饉、嵐、伝染病等による死亡を想定）について、以下の仮定の下に算定していることである。

- a. 人命の価値は、世代・地域を問わず一律1M\$/人。
- b. 人命への影響については、割引率は0。

これらの想定は、「一人の人間の価値」は世代・地域を問わず同様とされねばならない、と

地球温暖化の被害/対策コストの定量化と内部化についていう人道的原則から設定されている。また、割引率については、将来世代の生活レベルが現世代よりも向上している（better-off）はずであるから、少なくともその向上に対応する「限界効用通減に伴う割引率」を一種の下限值と考えることができる。しかしHohmeyerはこの批判に答えて、たとえ生活レベルの向上があったとしても、将来世代は現世代が残した廃棄物等の環境影響に対して「環境の修繕コスト」を支払わねばならず、これらの費用が生活レベル向上を相殺するとしている。

Hohmeyerの被害コスト算定は、他の検討事例が想定しているような適応策、たとえば海面上昇に対して防護壁を設置するなどの対応策を基本的に考慮していない。このため、温暖化が発生した際の被害の最大値を評価していると言える。算定結果によれば、大気中CO₂濃度倍増時（2030年と想定）までの累積被害額は、飢饉による人命損失が支配的で、総額で約900兆ドルとされており、他の事例（年あたりの被害額として算定）よりも数桁大きい。

Hohmeyerの用いた設定の可否を軽々に断定することはできないが、少なくともこの検討事例は、人命の価値や割引率といった根本的な要因の設定が、超長期にわたる温暖化被害の費用算定の前提条件において未解決の問題点であることを鮮明に示している。

3. CO₂ 排出抑制対策コスト

地球温暖化が顕在化した際の被害額に対比して、地球温暖化の主因となるCO₂等の排出量を抑制し、あるいは排出されたCO₂を除去吸収して処理処分する場合の対策コストを考えてみる。一般に、最適な戦略の下においては、CO₂排出の1単位削減に伴う限界被害減少額

と、限界対策コスト値とが等しい。ゆえに、最適戦略の立案においては、被害と対策の双方の詳細を知る必要がある。

排出削減対策としては、省エネルギー等のようにコストがかからないかもしくは利益（負のコスト）をもたらすものから、火力発電所の排ガスからの CO₂ 回収等、多額の費用を要するものまで多岐にわたる。本藤ら（1992）の評価によれば、火力発電所の排ガスからの 90% 脱炭及び海洋貯留に伴う費用は、炭素 1 トン回収あたり 36,000~69,000 円程度に上る。

また、排ガス脱炭等のように直接に排出削減を行う対策の他に、炭素税や課徴金等の価格シグナルにより排出低減を誘導する施策がある。永田ら（1991）の評価では、わが国経済において炭素排出課徴金のみにより 2005 年までの炭素排出量を現状（1988年）レベルに安定化するために、2005 年時点での課徴金率としては 64,000 円/t-C が必要とされ、これは上記の発電所排ガス脱炭のコストと同程度である。その際の 2005 年時点での GNP の低下は、約 6% に上るといふ。これは、2. に紹介した被害コスト想定と比べても格段に大きく、課徴金のみによりわが国の排出量安定化を図る政策は正当化され得ない。

以上のように、大規模な排出抑制対策として現時点までに明らかになっているものはいずれも高コストに上るため、被害コストと対策コストのトレードオフにより最適な戦略を定めることの重要性が改めて認識される。

4. 地球温暖化影響の内部化

4-1. 追加コストアプローチと市場メカニズムの活用

環境外部性の内部化においては、追加コスト

(Adder) アプローチが代表的な手法として検討されている。これは、個々の外部性要因に対してある合理的な追加コスト単価（たとえば ¥/toe あるいは ¥/kWh）を設定し、これをエネルギー単価に加算するというものであり、価格付けがなされていないがために補償されていない環境影響について、これを明示的に価格に上乗せすることで補償しよう、という考え方に立脚している。容易に推察されるように、ひとたび適切な追加コスト単価が定められればその後の取扱いは単純であることは長所であるが、実際に適切なコスト値が求められるかどうかについては、とくに地球温暖化に対応する追加コスト等の定量化は至難の問題である。

これに対して、Joskow（1992）は、米国の一部の州の電気事業規制当局が導入している追加コストアプローチ^{*1}について、以下の誤りがあると批判を加えている。

（1）「外部性」と「環境影響」を混同している：前者は、最も効率的な資源配分を妨げている要因を指している。そうした外部性要因が存在しない最適資源配分の状態においても「残存する (residual)」環境影響は存在する。最適状態においては、限界環境影響と限界対策コストは等しく、この意味でこれらの残存する影響はすでに「内部化」されている。追加コストアプローチは、「最適な残存影響」にすら賦課金を課すものであり、かえって最適状態の実現を阻害する。

（2）既存の規制体系との整合性が保証されていない：仮に合理的な追加コスト値を算出したとしても、規制対象者（汚染者）が追加コスト導入に対して示す反応は、既存の規制体系

*1 これは主として酸性雨対策を対象としており、温暖化には直接関わるものではないが、外部性の内部化方策としての追加コストアプローチの実例として参考になる。

そのものに依存する。現在検討されている案によれば、追加コスト値は州毎に異なるものとなり、また新規電源の選択に対してのみ考慮される。このような場合、規制のないあるいは緩やかな州に汚染源が移動したり、規制対象外のより汚染度の高い古い設備の稼働を優先するなど、事業者が当初の目的と相反する対応を採る場合が予想される。このように、追加コストアプローチが所定の効果を発揮するためには、適切なコスト値を求めることに加えて汚染者の反応を正確に把握する必要があるが、後者は時として前者以上に評価が困難である。

(3) 対策コストで被害コストを代替している：被害コスト算定が困難である場合に、次善の策として最も高価な対策コストで置き換えることが検討されている。この置き換えが意味を持つためには、現状が最適状態に近く（限界対策コストと限界被害がほぼ一致している）、かつ当該の対策コストが限界対策コスト曲線上に存在することが必要である。しかし、現実には現状の規制体系が前者を保証していることはまずあり得ず、また想定される対策コストが限界曲線上に存在する保証も全くない。従って、両者は無関係であり、対策コストで被害コストを近似することには何の正当性もない。

(4) 「何もしないよりは何かしたほうがよい」との誤解に立っている：合理的でない追加コスト値でも賦課すべきであるとの考え方に立って検討されている。何等の規制も施されていないならば、この主張が正当である可能性はある。現実には、現行の複雑な規制体系に加えて導入する以上、追加コストが電力価格を上昇させるだけで環境改善効果を全く示さず、あるいは環境影響を悪化させる場合すらあり得る。

さらに、外部性コストの効率的な内部化の

「教科書的原則」として、以下を示している。

No. 1：ある汚染物質の目標排出（削減）レベルが、最小の対策コストの下で実現されなければならない。

No. 2：最適な排出（削減）レベルは、排出削減に伴う便益の増分（被害の減少分）が排出削減の（最小）コストの増分と等しくなるよう定められなければならない。

No. 3：最終財（鉄、電力など）の価格は、原則 No. 2 の排出レベルを原則 No. 1 の最小対策コストで実現した際の費用に加えて、残存する最適排出量の社会的限界価値（当該財の生産 1 単位あたりの排出量増分あたり）を考慮して定められなければならない。

これらの実現のための政策手段として、1) 排出課徴金、2) 譲渡可能排出許可、3) オフセット、及び 4) 排出源毎の基準の設定、の 4 種を挙げ、完全情報下かつ汚染／排出のモニタリング費用がゼロの場合は、これらはほぼ同様の効果を挙げ得るとしている。（この点については、杉山ら（1994）に詳しい考察がある。）

Joskow の理論的指摘は、いずれも本質的に正しい。ただし、こと地球温暖化に限っては、その影響の発生と規模が予測できない点にこそ問題があり、それゆえに実際のエネルギー戦略立案においては、そうした不確実性への対処が問題となる。ここでは、不確実性を考慮したエネルギー解析への視点の提示を試みる。

4-2. エネルギー計画への視点

MIT の Connors (1992) は、外部性のエネルギー計画問題への取り込みに関して、図-1 に示す分析手法の概念を提示している。X、Y の 2 軸（理論的には n 軸）で表される空間上に、エネルギー源の組み合わせによって表される全ての戦略を、点でプロットしていく。各軸の指

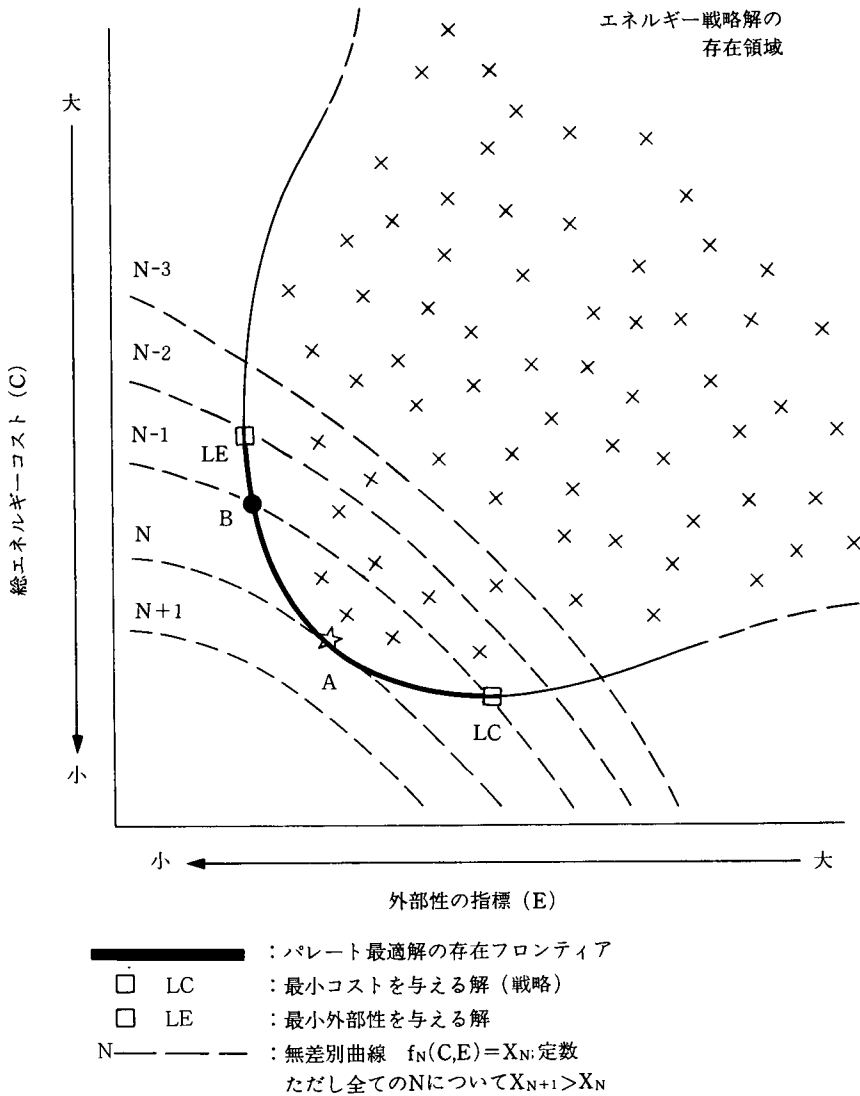


図-1 エネルギー計画問題における外部性の内部化の概念 (Connors (1992) に加筆)

標のうち、1つはコストであり、1つは外部性の指標である。すると、複数の指標に対してパレート最適な戦略の集合は、図で最小コストを与える点LCと最小外部性を与える点LEを結ぶフロンティア曲線 (n次元の場合は曲面) を形成する。真に最適な戦略は、これらパレート最適な戦略の中で、外部性とコストの限界トレードオフにより定まる無差別曲線の最大値を与

える点 (図の点A) で表される。

Nanahara et al. (1991) では、同様の手法を電源計画問題に適用し、コストの軸に加えて不確実性への適応度の指標とも言える Regret 値 (想定される種々の条件変化に対するコスト増分の最大値) を用いた解析を示している。

この手法の特徴を追加コストアプローチと比較すると、現実的に採り得る戦略を明示してお

いてから選択するので、具体的な実施の筋道が同時に示されることがある。さらに、実際には追加コスト値を算定評価することは容易ではないが、この手法では外部性とコストのトレードオフ関係を考慮することで最適戦略が定まり、その際に「最適な外部性」は最小コストの戦略 LC との総コスト差として自動的に社会的費用に内部化されることである。このように、外部性の内部化は恣意的かつ硬直的な「追加コストアプローチ」によるのではなく、市場機構あるいは戦略選択の過程に反映させることにより、経済社会が内蔵している調整機能を活用することが望ましいと思われる。

ただし、この手法が必要としているコストと外部性の無差別曲線が与えられれば、これを目的関数に直接持ち込んで最適化する、いわゆる統合解析が可能となる。次にこれについて述べる。

4-3. 統合解析

2-3. 項に紹介した費用便益分析に見られるように、最適化の指標（目的関数、たとえば社会的総効用）に温暖化被害額を明示的に盛り込んだエネルギー戦略評価が、各国各機関で試みられている。

Cline の警告しているように、こうした統合解析により「人類の進むべき」最適パスを導出するには、まだまだ科学的知見が不足し、不確実性が大きい。ここでは現時点までに提案されている試みのうち、特徴的なものを2つ紹介する。

米国 Carnegie-Mellon 大学の Dowlatabadi ら（1993）は、地球環境被害の確率分布を明示的に取り入れたモデル開発を進めている。現在までに得られている初期評価では、GDP 損失によって表される抑制対策の効果（対策の実施

地球温暖化の被害／対策コストの定量化と内部化について費用と被害の軽減の両方を反映）は、考慮する地域及び割引率によって大きな影響を受けること、より厳しい排出抑制戦略は GDP 損失の平均値を上昇させるが、最大値を低下させることが示されている。また、最も望ましい戦略が地域毎に異なる場合がある。とくに低緯度地域では、21 世紀前半に対策費用が急激に上昇するため、高緯度地域に比べてより厳格な排出抑制戦略が選択される。

さらに、“Geoengineering”による対策として、大気中の SO_x エアロゾル形成を促進するケース及び植林を行うケースを検討しており、とくに前者の効果は大きく温暖化を緩和するので、排出抑制関連の最適戦略としては「何もしない」ことが選択されるという予備的な結果を得ている。

米国電力研究所 (EPRI) の Peck ら（1993）は、統合モデル CETA を、各パラメータの不確実性の低減のメリット、すなわち「情報の価値」(Value of Information) の評価に応用した。これは、統合モデルを最適戦略評価に用いるのではなく、感度解析的に使うことで、各条件に対する研究開発による知見の蓄積の優先度を評価している点で特徴的である。

この他、多数の機関で独自の試みを展開中である。多用な特徴を持つ分析ツールや分析結果が多数提示されることで、統合評価研究がさらに加速されることが期待される。

5. おわりに

地球温暖化の被害コストの正確な評価のためには、地球気象のモデル化等に求められる科学的知見がまだまだ不足している。現在までに提示されている被害コスト評価は、大きな不確実性を内包した概数評価に留まっている。そうし

た状況下において、適切なエネルギー戦略を立案していくために、被害コストとその不確実性を明示的に取り扱う統合解析等の手法も検討されてきている。

被害コスト評価については、今後とも手法およびデータの精緻化が求められる。とくに、「環境の価値」といった主観的概念をいかに貨幣価値化するか、そのための定量化手法についての考察を深めて行きたい。また、統合解析については、今後とも内外の事例収集と評価を加えていくとともに、独自の評価モデル開発に取り組んでいく予定である。

【参考文献】

[1] Lee, R. et al. (1992), "U.S. - EC Fuel Cycle Study: Background Document to the Approach and Issues," Report Number 1 on the External Costs and Benefits of Fuel Cycles, ORNL/M-2500.

[2] Nordhaus, W. D. (1991), "To Slow or Not To Slow: The Economics of Greenhouse Effect," *Economic Journal*, Vol. 101, No. 407, pp. 920-937.

[3] Cline, W. R. (1992), "The Economics of Global Warming," Institute for International Economics, Washington, D. C.

[4] Fankhauser, S. (1993), "The Economic Costs of Global Warming: Some Monetary Estimates" in Y. Kaya et al. (ed.), "Costs, Impacts and Benefits of CO₂ Mitigation," IIASA Collaborative Paper No. CP-93-2, IIASA, Austria.

[5] 環境庁長官官房総務課(編) (1990), 『地球環境キーワード事典』, 中央法規。

[6] Hohmeyer, O. and M. Gärtner (1992), "The Costs of Climate Change: A Rough Estimate of Orders of Magnitude," Report to the Commission of the Euro-

pean Communities Directorate General XII.

[7] 本藤, 内山 (1993), 「火力発電所の環境対策コスト分析」, 研究報告 No. Y92009, (財)電力中央研究所。

[8] 永田, 山地, 桜井 (1991), 「課徴金によるCO₂抑制効果と経済的影響の分析」, 研究報告 No. Y91002, (財)電力中央研究所。

[9] Joskow, P. L. (1992), "Dealing with Environmental Externalities: Let's Do It Right!," Issues and Trends Briefing Paper No. 61, Edison Electric Institute.

[10] 杉山, 山地, 岡田, 山本 (1994), 「グローバルCO₂抑制方策の検討—公平性と効率性の実現に向けて—」, 研究報告 No. Y93015, (財)電力中央研究所。

[11] Connors, S. R. (1992), "Side-stepping the Adder: Planning for Least-Social-Cost Electric Service," *Proceedings of the NARUC-DOE 4th National Integrated Resource Planning Conference*, Burlington, VT.

[12] Nanahara, T. et al. (1991), "Approach to Evaluation of Flexibility of Generation Mix," *Proceedings of IFAC/IFORS/IAEE International Symposium on Energy Systems, Management and Economics (ESME 89)*, International Federation of Automatic Control.

[13] Dowlatabadi, H. and M. G. Morgan (1993), "A Model Framework for Integrated Studies of the Climate Problem," *Energy Policy*, March 1993, pp. 209-221.

[14] Peck, S.C. and T. J. Teisberg (1993), "Global Warming Uncertainties and the Value of Information: An Analysis Using CETA," *Resources and Energy Economics*, Vol. 15, No. 1, pp. 71-97.

(ながの こうじ
すぎやま たいし
エネルギーシステムグループ)