

■ 研究論文 ■

線形計画モデルによる国際CO₂排出権市場の解析Simulation Study with a Linear Programming Model on Tradable CO₂ Permits
in International Market

山地 憲治*・山本 博巳**・岡田 健司**

Kenji Yamaji Hiromi Yamamoto Kenji Okada

杉山 大志***・長田 紘一****

Taishi Sugiyama Kouichi Osada

(1994年1月7日原稿受理)

Abstract

This paper presents a simulation study on the optimal allocation of tradable CO₂ emission permits to the regions of the world. Social welfare loss under a constraint of total CO₂ emission is minimized using linear programming technique. Effects of transaction costs associated with the trade of emission permits are also analyzed.

Through the simulations the following findings are identified: 1) in case that CO₂ emission permits are initially allocated in proportion to the populations of the regions, significant amount of permits are traded from developing regions to developed regions; 2) utility losses caused by energy savings make a dominant cost when the more stringent constraint of CO₂ emission is imposed; 3) even when a high transaction cost is assumed, the total cost of world CO₂ control is significantly reduced by the introduction of the system of tradable emission permits. The findings clearly show theoretical merits of tradable permits, or international joint action in general, in the global efforts to reduce CO₂ emissions.

1. 背景と目的

地球温暖化防止対策としてCO₂排出抑制が緊急の政策課題となっている。地球温暖化問題に関する科学的知識には未解明な事項が多い。しかし、1992年の地球サミットにおいて表明されたように、世界各国は人類の持続可能な発展を目指して、予防保全の原則に立ち、長期的に地球温暖化対策に取り組む決意を固めた。

地球温暖化対策を難しくしている要因の一つに、地球規模でのCO₂削減における効率と公平の問題がある。効率なCO₂削減を行うためには、削減の限界費用の小さい対策から順次実施すれば良い。世界的視点からCO₂削減の限界費用を比較すれば、低コストの対策の多くは発展途上国に見いだされる。一方、化石燃料からのCO₂発生量は、現在に限っても、OECD諸国で

世界の約半分、旧ソ連・東欧諸国を含めると約7割に達しており、過去の累積発生量をも考慮すれば、いわゆる「先進国の責任」は明瞭である。つまり、排出責任に応じた負担の公平という原則は、費用効率の悪い先進工業国により大きな削減努力を求めることになる¹⁾。

この効率と公平の問題を解決できる制度として、CO₂排出権市場が注目されている。電力中央研究所では、早い時期から排出権市場に着目し²⁾、先駆的研究として、CO₂排出権の国際的取引のシミュレーション解析を行ってきた(国際排出権市場と地域の炭素税の組み合わせ^{3,4)}、更に植林によるCO₂吸収を組み合わせた場合^{5,6,7,8)})。

これら従来のシミュレーション研究では、Edmonds-Reillyモデルを改良した世界エネルギーモデルを用

* 電力中央研究所 経済社会研究所
エネルギーシステムグループリーダー

** " " " 担当研究員

*** " " " 研究員

〒100 東京都千代田区大手町1-6-1

**** 株式会社 エス・アール・シー 代表取締役

〒105 東京都港区虎ノ門3-18-16 朝日虎ノ門マンション

いてきた。また、排出権の需要関数を求めるために、炭素税の収入を排出権の購入資金とする（植林と組み合わせる場合には植林資金を控除）などいくつかのルールを設定した。これら先験的に仮定されたルールは市場の効率的な機能にとっては制約となるものである。

今回の研究では、社会的厚生損失の最小化という最適性に基づいてグローバルなCO₂排出制約の地域配分を行うモデルを開発し、地域的なCO₂排出制約に対するシャドープライスとして排出権の市場均衡価格を導出する。これにより理論的に最適な排出権価格が得られる。また、排出権市場の維持には地域毎の排出量のモニタリングなど市場を維持するためのコストが膨大になるという指摘があることを考慮し、排出権の取引手数料を想定した。これにより、市場維持コストを含めた排出権の経済的成立性を検討できる。なお、最適化手法には線形計画法を用いた。計算条件は従来のEdmonds-Reillyモデルの場合とできるだけ同一にしたが、モデルの大型化を避けるため、地域分割数は5（Edmonds-Reillyモデルでは9）とした外、GNPのエネルギー価格への依存性と二次エネルギー間の代替関係を無視するなどの簡略化を行った。また、2000年のCO₂排出量についてのみ検討した。

2. CO₂排出権市場の線形計画モデルの開発

2.1 最適化の構造

図-1に示すようなエネルギーの需要曲線と供給曲線を考えたとき、両曲線の交点Eが、市場の均衡する点である。この点において、エネルギーの最適価格と最

適需給量の実現され、生産者余剰と消費者余剰の和で示される社会の総余剰が最大となる。

ここで、世界全体の総CO₂排出量制約を課したとき、供給曲線は上方へシフトし、市場の均衡点がE'へと移動する。そして、エネルギー需給の量はQからQ'へと低下する。CO₂制約がない場合と比較して、社会的総余剰は図中に示すエネルギー需要削減に伴う余剰損失(A)と供給コスト増分(B)の和の分だけ失われる。（本モデルでは、二次エネルギー需要曲線は、エネルギー供給曲線の変化にかかわらず、一定と仮定する。CO₂制約下では需要家も生活態度を変えるなどして、自発的に需要を削減すると仮定できる場合には、需要曲線を下方にシフトさせれば良い。）また、排出権取引コストも社会的余剰を減少させる。

従って、最適なCO₂抑制方策は、この社会の総余剰の損失(A+B)と排出権取引コスト(TC)の合計を最小化するものである。

ただし、モデルの定式化においては、目的関数(OBJ)に、CO₂制約なしの場合のエネルギー供給コスト(B' + B'')（この項は一定値であるので最適解には影響しない。）を加える。これにより、目的関数は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \text{OBJ} &= (\text{社会的余剰損失}) \\
 &+ (\text{CO}_2\text{制約なしの場合のエネルギー供給コスト}) \\
 &+ (\text{排出権取引コスト}) \\
 &= (A + B) + (B' + B'') + \text{TC} \\
 &= (B' + B) + (A + B'') + \text{TC}
 \end{aligned}$$

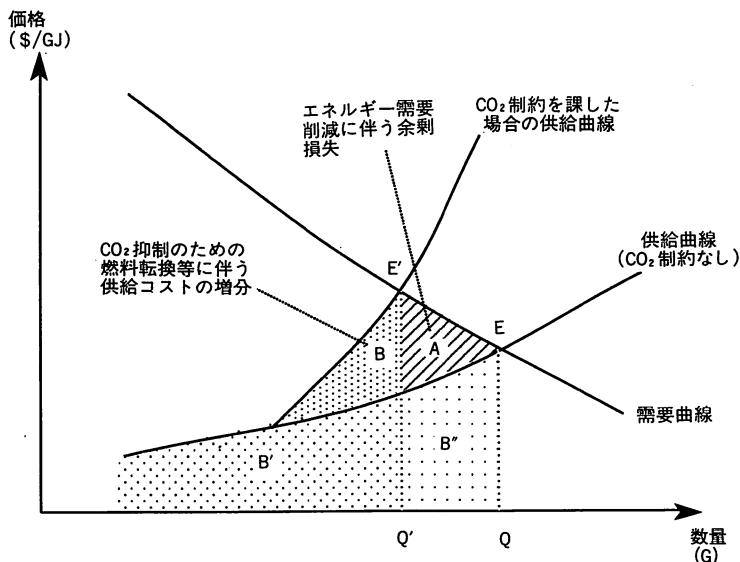


図-1 最適化の構造

ここで、 $(B' + B)$ は、 CO_2 制約時のエネルギー供給コストを意味する。 $(A + B')$ はエネルギー需要削減 $(Q - Q')$ に伴う効用損失であるが、これを CO_2 制約時の省エネルギーコストと定義する。

CO_2 制約下での最適解の算出に先立って、制約がない場合の最適解、すなわち図-1中のE点を求める。

2.2 モデルの対象

本モデルは、2000年の CO_2 排出量制約下での、世界エネルギー需給と CO_2 排出権の取引を対象とする。モデルの入力データは、Edmonds-Reillyモデルの入力データとそのシミュレーション結果を加工して利用した。定式化およびデータ作成の詳細については、山地ほか9)を参照¹⁾。なお、Edmonds-Reillyモデルでは、世界を9地域に分割しているが、本研究では、最適化モデルの制約条件の増大を避けるため、世界を米国、その他OECD、旧ソ連・東欧、中国、その他途上国の5地域に集約した。

対象とするエネルギーは、一次エネルギーとして、石油、天然ガス、石炭、原子力の4種類、二次エネルギーとして、液体燃料、気体燃料、固体燃料、電力の4種類である。本モデルでは、水力発電の発電量は、Edmonds-Reillyモデルと同様に、エネルギー価格と関係なく外生的に決定されるとした。このため、最

適化は、水力の発電量を差し引いた電力の需給量を対象とした。Edmonds-Reillyモデルで扱われている太陽光発電、非在来型の石油・石炭およびバイオマスは、Edmonds-Reillyモデルの2000年時点のシミュレーション結果での導入量が、全エネルギー供給量の0.01%以下と小さいため、本モデルでは取り扱わなかった。

エネルギー需要関数と供給関数は、線形計画法で表現するために、ステップ関数で近似した。需要関数、供給関数ともに、5段階のステップ関数で表現した。

2.3 エネルギーフロー

図-2に本モデルのエネルギーフローを示す。

まず、各地域で一次エネルギー（石油、ガス、石炭、原子力）が生産される。これら一次エネルギーは輸出入を行った後に、製品化されるか発電用燃料として使用される。電力は、石油、ガス、石炭、原子力から生産される。二次エネルギーの輸出入は行われない。

発電および製品燃料化時と、液体、気体、固体の二次エネルギーの使用時に CO_2 が排出される。各地域は CO_2 排出制約量を満たすように、省エネルギーや、 CO_2 排出権の売買を行う。

また、図-2の下部に示すように、エネルギーフローの各段階に対応するコストがある。ここではコストを、<エネルギー生産コスト>、<エネルギー輸送コスト>、<エネルギー転換コスト>、<省エネルギーコスト>、<排出権取引コスト>の5つに分割して示している。

<エネルギー生産コスト>、<エネルギー輸送コスト>

註1) Edmonds-Reillyモデルにはバグがあり、本研究ではバグ修正版のデータを使用した。なお、文献9)では、バグ未修正のデータを使用している。

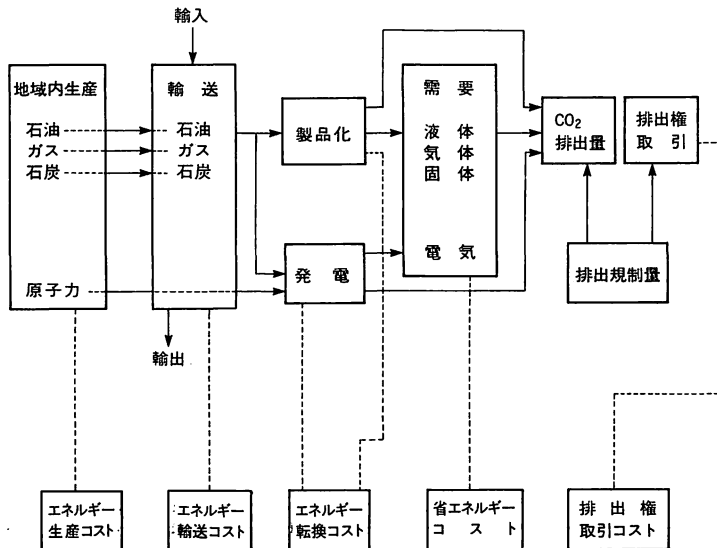


図-2 エネルギーフロー

ト>, <エネルギー転換コスト>の3つのコストの合計が図-1の(B'+B)に相当する。既に述べたように, <省エネルギーコスト>は(A+B'')に対応する。

なお, 本線形計画モデルのマトリックスを付録1に示す。

3. 計算ケースと結果

3.1 ケース設定

比較のためにCO₂排出量を制約しないケースをまず算定した。計算条件はできるだけEdmonds-Reillyモデルと同一にしたが, モデルの簡略化のために(特に需要曲線をステップ関数で近似したため), 制約無しの場合の結果もEdmonds-Reillyモデルとは若干異なるものとなった。制約無しの場合の2000年の世界のCO₂総排出量は約79億トンCとなった(Edmonds-Reillyモデル(バグ修正版)の場合は約70億トンC)。

排出権の初期配分の基準ケースは, 従来と同様に, 2000年時点での各地域の人口(ただしEdmonds-Reillyモデルでの入力値)に比例させた。代替案として検討した初期配分方式は, GNP比例, CO₂排出量比例と国土面積比例であるが, GNPとCO₂排出量については, 排出量を制約しない場合のモデル計算結果の2000年における値を用いた。

CO₂制約については50億, 40億, 30億トンCの3種類設定した。排出権取引については, 初期配分のままで取引を行わない場合も比較のために算定し, 取引を

行う場合については, 取引手数料を, 無料から1トンC当たり1000\$ (1975年\$価値, 以下同様)まで変化させて検討した。

3.2 結果の一例

図-3に, CO₂制約値50億トンC, 人口比例によって排出権を初期配分し, 排出権取引手数料50\$/トンCの場合の最適解の様子を示す。図に示されているように, 中国とその他途上国から大量の排出権が輸出され, 米国, その他OECD, 旧ソ連・東欧に流入している。シャドープライスとして得られる排出権の均衡価格は1トンC当たり約57\$*2で, この理論値が実際の取引に適用されたとすると, 先進工業国から途上国へ約1190億\$の支払が行われることになる。

3.3 CO₂排出総量制約の効果

図-4は, 排出権取引手数料を無料にした場合について, CO₂排出制約を厳しくすることによる排出権価格(シャドープライス)および目的関数の内訳の変化を示したものである。取引手数料が無料の場合には, 最適解は排出権の初期配分に全く依存しない。各地域の限界CO₂削減コストは排出権価格と等しい値に均一化

註2) 厳密に言えば, この値は排出権を輸出する地域のCO₂制約についてのシャドープライスであり, 輸入国についてはこれに取引手数料を加えた値になる。図-3においても, 排出権輸出国の輸出収入はこのシャドープライスを単価として計算しているが, 輸入国の支払額はそれに取引手数料を加算した単価を用いて算定している。

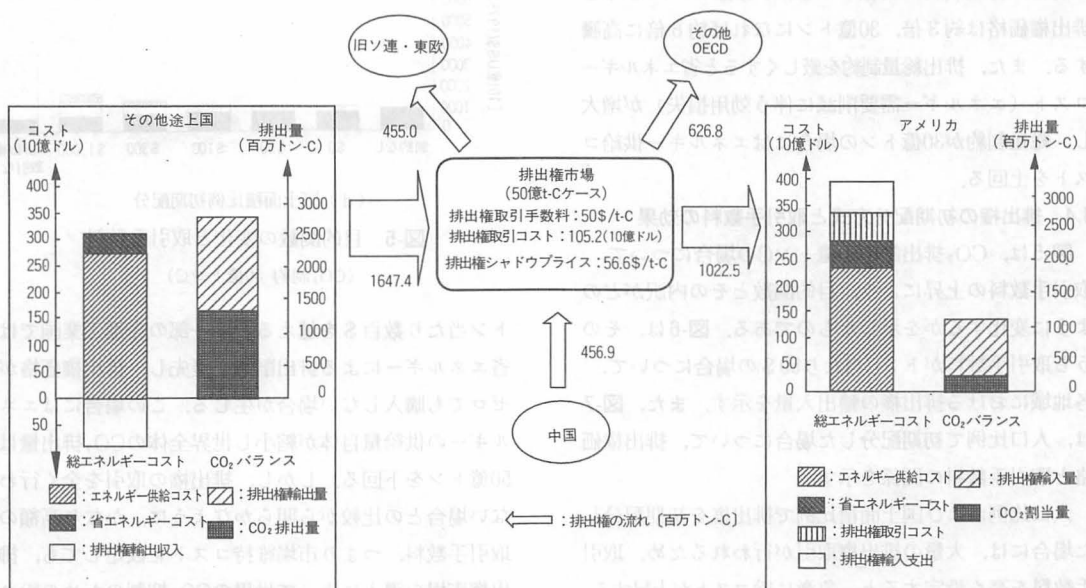
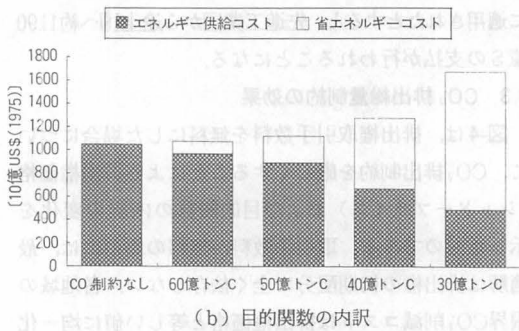
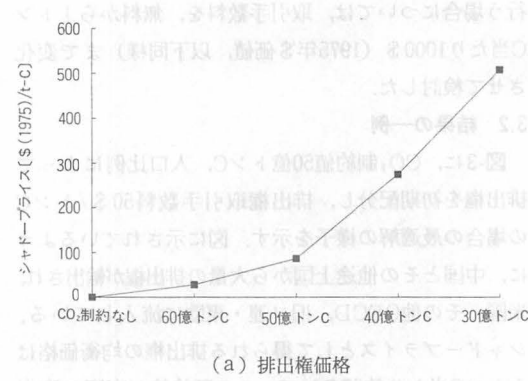


図-3 計算結果の一例 (CO₂制約 50億トンC, 人口比例初期配分, 取引手数料 50\$/t-C)



(人口比例初期配分, 取引手数料ゼロ)

図-4 排出権価格と目的関数の内訳

される。

結果は、CO₂排出総量制約を厳しくすると排出権価格が急上昇することを示している。取引手数料が不要の場合、総量制約が50億トンCから40億トンになると排出権価格は約3倍、30億トンになれば約6倍に高騰する。また、排出総量制約を厳しくすると省エネルギーコスト（エネルギー需要削減に伴う効用損失）が増大し、総量制約が30億トンの場合にはエネルギー供給コストを上回る。

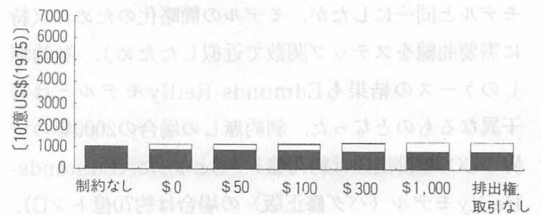
3.4 排出権の初期配分方式と取引手数料の効果

図-5は、CO₂排出制約50億トンCの場合について、取引手数料の上昇により、目的関数とその内訳がどのように変化するかを示したものである。図-6は、そのうち取引手数料がトンC当たり50\$の場合について、各地域における排出権の輸出入量を示す。また、図-7は、人口比例で初期配分した場合について、排出権価格と取引手数料の関係を示す。

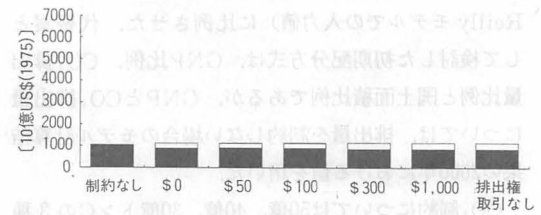
人口比例および国土面積比例で排出権を初期配分した場合には、大量の排出権取引が行われるため、取引手数料を高く設定すると、急激に総コストが上昇する。この場合でも、手数料が上昇すると取引量は減少し、



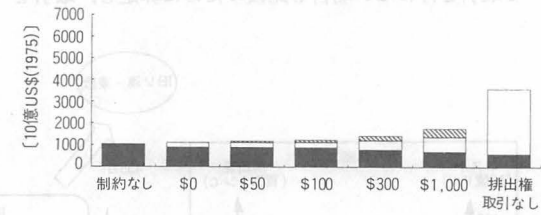
(a) 人口比例初期配分



(b) GNP比例初期配分



(c) CO₂排出実績比例初期配分

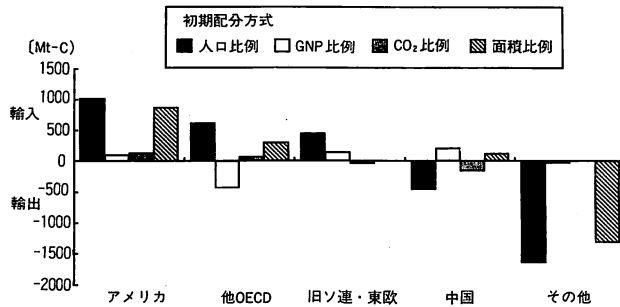


(d) 国土面積比例初期配分

図-5 目的関数の変化と取引手数料

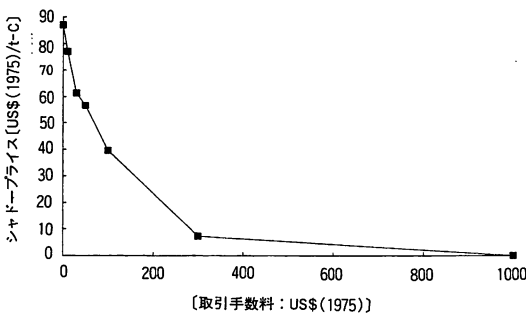
(CO₂制約 50億トンC)

トン当たり数百\$を越えると、一部の先進工業国では省エネルギーによる排出削減を優先し、排出権価格がゼロでも購入しない場合が生じる。この場合にはエネルギーの供給量自体が縮小し世界全体のCO₂排出量は50億トンを下回る。しかし、排出権の取引を全く行わない場合との比較から明らかのように、かなり高額な取引手数料、つまり市場維持コストを仮定しても、排出権市場の導入によって世界のCO₂抑制のための総コストは大幅に低下する。



(CO₂制約 50億トンC, 取引手数料 50\$/t-C)

図-6 排出権の輸出入と初期配分方式



(CO₂制約 50億トンC, 人口比例初期配分)

図-7 排出権価格と取引手数料

これに対し、GNP比例あるいは排出実績比例の場合には、取引量が少なく、総コストはほとんど変化しない。取引手数料が数百ドルを越えると全く取引をしなくなるが、それでも総コストの上昇は僅かである。しかし、このような初期配分をすると、途上国は排出権を輸出する余裕がなくなり（中国の場合は国土面積比例で配分されても同様）、排出権市場を介した先進国から途上国への資金移転という、重要な目的が達成できなくなる。

4. 考察

最適化モデルによるシミュレーション解析によって、国際的なCO₂排出権市場が理論通りに機能すれば、効率的なCO₂排出抑制を実現できることがより明確になった。また、先進国から途上国への大量の資金移転を同時に達成しようとするならば、人口比例のように、現状のCO₂排出量に比して途上国に極端に偏った排出権の初期配分が必要であることも確認された。

この結果は、一般的に、国際連携によるCO₂削減努力の意義を明らかにしたものである。しかし、従来の

検討結果の考察においても指摘しているように、これはモデル計算結果の結論であって、現実には、排出権の初期配分問題をはじめ難問が多く、国際政治力学の下でこのような人為的な市場が理論通り成立すると考えるのは楽観的に過ぎる。実際には、省エネ・環境技術に重点をおいた途上国援助や、途上国の累積債務の返済分を当該国の森林の保護育成など環境対策に当てる債務・環境スワップなど、個別の対応で類似の効果の実現を図るべきだろう。この点で、本研究の結果は、気候変動枠組み条約に記されている「共同実施」制度の現実的展開の重要性を示唆しているといえる。

今後のモデルの改良については、時間軸の延長、二次エネルギー間の代替性の考慮などの拡充が考えられる。結果の応用面については、技術・資金等の移転を伴うより具体的なケースについての詳細な検討が望まれる。

参考文献

- 1) 山地憲治; CO₂問題のジレンマ, エネルギー・資源, 13巻, 3号 (1992), 228~231.
- 2) 電力中央研究所・長期電力方策課題研究会; 長期電力方策の課題研究 (1989), 電力中央研究所.
- 3) 山地憲治, 長野浩司, 山本博巳, 岡田健司, 長田絃一; 市場機構を用いたグローバルCO₂抑制方策の解析, 第7回エネルギーシステム・経済コンファレンス (1991), 1-3.
- 4) 山地憲治, 岡田健司, 長野浩司, 山本博巳; 市場機構を利用したグローバルCO₂抑制方策のシミュレーション解析 (1991), 電力中央研究所報告 Y90301.
- 5) 岡田健司, 山地憲治, 山本博巳, 長田絃一; CO₂吸収オプションを含めたグローバルCO₂抑制方策, 第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス (1992), 3-5.
- 6) 岡田健司, 山本博巳, 長野浩司, 山地憲治, 長田絃一; 植林オプションを含むCO₂排出許可国際市場のシミュレーション, エネルギー・資源, 14巻, 1号 (1993), 48~55.

- 7) Okada, K. and Yamaji, K. ; Simulation Study on Tradeable CO₂ Emission Permits, Proceedings of International Workshop on Costs, Impacts and Possible Benefits of CO₂ Mitigation (1992), IIASA.
- 8) 岡田健司, 山本博巳, 長野浩司, 山地憲治 ; グローバルCO₂ 排出権市場のシミュレーション分析 - 植林による

- CO₂吸収オプションの導入-(1993), 電力中央研究所報告 Y92013.
- 9) 山地憲治, 岡田健司, 山本博巳 ; 線形計画モデルによるCO₂排出権市場の検討 (1993), 電力中央研究所研究報告 Y93003.

付録1 線形計画モデルのマトリックス

No	制約式定義	制約式名	左 辺	変数番号	変数定義										
					一次エネルギー生産量	一次エネルギー供給関数ステップ	エネルギー輸 出 量	エネルギー輸 入 量	エネルギー製品化量	発電燃料投入量	発電電力量	二次エネルギー需要量	二次エネルギー需要関数	排出権輸 出 量	排出権輸 入 量
					XS1 (PE, RG)	XS2 (PE, SX)	XI (PE, RG, RN)	XI (PE, RX, RG)	XR (PF, RG)	XE (PE, RG)	XT (RG)	DM1 (SE, RG)	DM2 (SE, RG, SX)	TH (RG, RN)	TH (RX, RG)
0	システムコスト	OBJ	なし		CSUP 1 (PE)	CSUP 2 (PE, SX)		TRCS (PE)	HIJ (PF) /GIJ(PF)	HUIL(PE) /GUI(PE)			CDEM (SE, RG, SX)		THCS
F-1	一次エネルギー生産1	CS1 (PE, RG)	PSUP (PE, RG, SI)	≥	1.0	-1.0									
F-2	一次エネルギー生産2	CS2 (PE, RG, SX)	PSUP (PE, RG, SX)	≥		1.0									
F-3	一次エネルギー供給バランス1	GBP1 (PF, RG)	0.0	=	-1.0		1.0	-1.0	1.0	1.0					
F-4	一次エネルギー供給バランス2	GBP2 (NU, RG)	0.0	=	-1.0		1.0	-1.0		1.0					
F-5	二次エネルギーバランス1	CBS1 (SF, RG)	0.0	=					-1.0/GIJ (PF)			1.0			
F-6	二次エネルギーバランス2	CBS2 (EL, RG)	0.0	=						-1.0/GUI (PE)		1.0			
F-7	発電電力量	CEP (RG)	0.0	=						-1.0/GUI (PE)	1.0				
F-8	発電燃料シェア	CSH (PE, RG)	0.0	≥						-1.0/GUI (PE)	SHA (PE, RG)				
F-9	二次エネルギー需要1	CD1 (SE, RG)	SDEM1 (SE, RG)	≤								1.0	1.0		
F-10	二次エネルギー需要2	CD2 (SE, RG, SX)	SDEM2 (SE, RG, SX)	≥									1.0		
F-11	CO ₂ 制約	CCO (RG)	TCQL (RG)	≥					COI (PF)	COI (PE)				1.0	-1.0

(a) パラメータ

(エネルギー・パラメータ)	
PE : 一次エネルギー	石油, ガス, 石炭, 原子力
PF : 原子力以外の一次エネルギー	石油, ガス, 石炭
NU : 原子力	原子力
SE : 二次エネルギー	液体燃料, 気体燃料, 固体燃料, 電力
SF : 電力以外の二次エネルギー	液体燃料, 気体燃料, 固体燃料
EL : 電力	電力
ただし, 制約式中で, 一次エネルギー (PF) から二次エネルギー製品 (SF) への変換が行われるときは, 石油-液体, ガス-気体, 石炭-固体燃料がそれぞれ対応する。	
(地域パラメータ)	
RG : 世界5地域	アメリカ, 他OECD, 旧ソ連・東欧, 中国, その他
RX : エネルギー, 排出権の輸出地域	アメリカ, 他OECD, 旧ソ連・東欧, 中国, その他
RN : エネルギー, 排出権の輸入地域	アメリカ, 他OECD, 旧ソ連・東欧, 中国, その他
(ステップパラメータ) エネルギー需要関数, 供給関係のステップを表現するパラメータ	
ST : エネルギー需要関数, 供給関数のステップの状態 (5ステップ)	
S1 : エネルギー需要関数, 供給関数の第1ステップ	
SX : エネルギー需要関数, 供給関数の第2ステップ以降	

(b) 決定変数 (モデルの中で決定される変数)

XS1 (PE, RG)	一次エネルギー生産量
XS2 (PE, RG, SX)	一次エネルギー供給関数の各ステップの一次エネルギー生産量 (第2ステップ以降)
X1 (PE, RG, RN)	一次エネルギー輸出量 (RG地域からRN地域への)
X1 (PE, RX, RG)	一次エネルギー輸入量 (RG地域のRX地域からの)
XR (PF, RG)	エネルギー製品化量 (電力以外の二次エネルギーに製品化する量; 石油-液体, 天然ガス-気体, 石炭-固体燃料への変換量)
XE (PE, RG)	発電燃料投入量 (一次エネルギーの電力への投入量)
XT (RG)	発電電力量
DM1 (SE, RG)	二次エネルギー需要量
DM2 (SE, RG, SX)	省エネルギー量 (ステップ別の二次エネルギー需要の削減量)
TH (RG, RN)	排出権輸出量 (RG地域からRN地域への)
TH (RX, RG)	排出権輸入量 (RG地域のRX地域からの)

(c) 制約定数

PSUP (PE, RG, ST)	エネルギー供給関数の各ステップの資源可採量
SDEM1 (SE, RG)	標準ケース (CO ₂ 制約なし) の二次エネルギー需要量
SDEM2 (SE, RG, SX)	ステップ関数化した需要関数の, 各ステップの省エネルギー可能量
TCQL (RG)	地域別のCO ₂ 排出割当量 (Edmonds-Reillyモデル2000年の人口比例に配分)

(d) 係数

(行列係数) モデル中の決定変数に乗じる係数	
GIJ (PF)	一次エネルギーから二次エネルギーへの変換効率の逆数
GUI (PE)	発電効率の逆数
SHA (PE, RG)	発電シェアの変動の制限
COI (PE)	各一次エネルギーのCO ₂ 排出原単位
(コスト係数) コスト関数の係数	
CSUP1 (PE)	一次エネルギー供給関数の第一ステップのエネルギー生産コスト
CSUP2 (PE, SX)	一次エネルギー供給関数の第二ステップ以降のエネルギー生産コストと 第一ステップのエネルギー生産コストの差額
TRCS (PE)	一次エネルギー輸送コスト
HIJ (PF)	エネルギー製品化コスト (エネルギー精製のコスト)
HUIL (PE)	発電コスト
CDEM (SE, RG, SX)	省エネルギーコスト
THCS	排出権取引手数料