

特集

地球温暖化問題と京都メカニズム

世界エネルギーモデルによる温暖化対策の定量的評価

—世界エネルギーモデルによる評価へのアプローチ—

Assessment of Measures to Mitigate Global Warming through the Use of a World Energy Model
—Approach to the Assessment with a World Energy Model—

藤井康正*

Yasumasa Fujii

1. はじめに

1997年に京都において開催された気候変動枠組み条約第3回締約国会議(COP3)では、温室効果ガスの排出抑制を目的として京都議定書が採択された。京都議定書では、Annex I国(付属書I国、いわゆる先進国と旧ソ連・東欧諸国)から排出される温室効果ガスの排出量を数値目標として定めた。この排出量の数値目標は、第一約束期間(2008年~2012年)の5年間の平均排出量に上限枠を与えるものである。例えば日本の数値目標は、1990年の排出量から6%削減された量となる。また日本を含めたAnnex I国に属するアメリカ合衆国やヨーロッパ連合、オセアニア地域および旧ソ連・東欧地域等の諸地域の数値目標は平均で、1990年の排出量から5.2%削減された量となる。

この数値目標の効率的な達成を補助する目的で採用された制度が京都メカニズムである。京都メカニズムは柔軟性措置とも呼ばれるが、一般に(1)排出取引(Emissions Trading, ET)、(2)共同実施(Joint Implementation, JI)、(3)クリーン開発メカニズム(Clean Development Mechanism, CDM)の3つの制度を指す。一昨年(1998年11月)にアルゼンチンのブエノスアイレスにおいて開催された第4回締約国会議(COP4)においては、これら一連の京都メカニズムに関する制度を2000年のCOP6をデッドラインとして最終決定することが「ブエノスアイレス行動計画」として合意された。

ところで上記の京都メカニズムは、「排出枠」の取引前提とする(ET)と、「排出削減単位」の取引を前提とする(JIとCDM)とに大きく区分される。前者の「排出枠」はAnnex I国を対象に京都議定書において具体的な量が定められたものである。一方、

後者の「排出削減単位」取引は、国際的な排出削減プロジェクトの実施により、追加的に削減されたと認定できる排出量の分が取引の対象となる。Annex I国間のプロジェクトのことをJIと呼び、Annex I国(先進国)と非Annex I国(途上国)との間のプロジェクトをCDMと呼んで区別している。この「排出削減単位」取引制度に関しては、プロジェクトの透明性の確保、承認、監査等といった諸問題について、まだ議論の余地が多く残されている。

本稿ではこの一連の京都メカニズムに関して、このような実施上の諸問題を取り敢えず取捨して、理想的な状況を想定し、世界エネルギーモデルに基づいて、CO₂排出量およびエネルギーシステムコストに関する定量的な可能性評価を試みる。そして、上記したような各種制度の導入がもたらす結果の概観を把握し、今後の制度設計に向けた指針の提示を目指す。

まず2章では、本稿のシミュレーションで用いた世界エネルギーモデル(Dynamic New Earth 21)を概説し、今回想定した主な基準データを示す。次に3章では数理計画問題としての京都メカニズムの定式化について簡単に述べる。そして4章では各種ケースの計算結果を示すとともに検討を加える。最後に5章で本稿のまとめを述べる。

2. 世界エネルギーモデル

Dynamic New Earth 21 (DNE21) モデル¹⁾は、対象期間中のシステム総コストが最小となるようなエネルギーシステムの最適将来像を計算するコンピュータプログラムのことであり、それは我国を代表するエネルギーモデルの一つとなっている。このモデルを用いることで、全世界を対象にしつつ、特にエネルギーの供給サイドにおけるCO₂問題対策技術をボトムアップ的に評価することができる。DNE21モデルの概要をまとめると以下ようになる。

* 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻助教
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

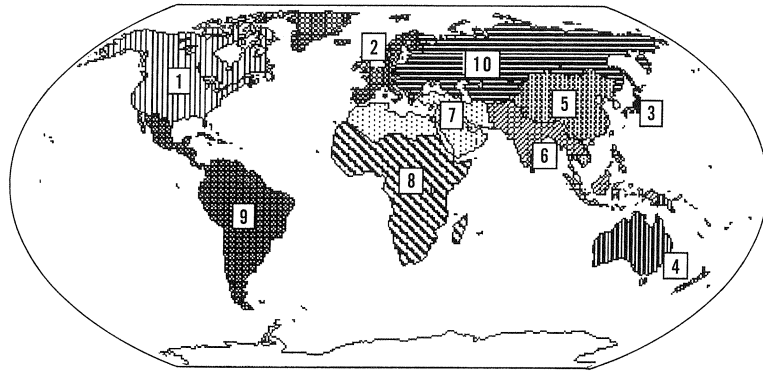


図1 DNE21モデルにおける地域分割

2.1 世界の地域分割と対象時点

DNE21モデルでは世界各地域の特性を考慮に入れるため、世界を図1に示す10地域に分割して評価を進めている。地域名称は[1]北米、[2]西ヨーロッパ、[3]日本、[4]オセアニア、[5]中国、[6]その他アジア、[7]中東・北アフリカ、[8]その他アフリカ、[9]中南米、[10]旧ソ連・東欧、である。地域番号[1][2][3][4][10]が京都議定書におけるAnnex I国となる。

本稿におけるDNE21モデルの計算対象時点は、1990年を初期時点として、2000年と2010年の2時点である。これらの時点間の諸量は線形補間し、この期間中の現在価値換算（本稿での割引率は5%/年）されたシステム総コストの最小化を行う。今回は時点数が少ないため実質的には静学的なモデルとなっている。なおシステム総コストには、1次エネルギー供給コスト、エネルギー輸送コスト、CO₂回収・処分コスト、各種エネルギープラントの設備費・運転保守費、省エネルギーコストなどが含まれる。

2.2 CO₂排出削減対策のモデル化

エネルギーシステムから放出されるCO₂を抑制する主な方策としては、「省エネルギー」、「燃料転換」、「CO₂の分離・回収・処理」などがある。次にそれぞれの方策のモデル化について概説する。なおDNE21モデルはC言語で記述されたプログラムで構成されている。本稿で用いたDNE21モデルの変数の個数は約3,500個、制約条件式の本数は約2,500本であり、最適化計算の所要時間は3分程度である。その他データの詳細は、文献2)を参考にして頂きたい。

(1) 省エネルギー

DNE21モデルでは、最終エネルギー需要部門を図2に示すように4部門（気体燃料需要、液体燃料需要、

固体燃料需要、電力需要）に分割している。最終エネルギー需要部門における省エネルギーに関するコスト関数の記述の仕方としては、個別技術の投資コストを積み上げるボトムアップ方式と、価格弾性値の概念を用いたトップダウン方式とがある。DNE21モデルでは、入手可能なデータに制約があることから、価格弾性値によるトップダウン方式を採用している。なおトップダウン方式において導出される省エネルギーに要するコストは、厚生経済学の分野において消費者効用の損失として解釈されるものである。世界地域別の省エネルギーコストの差は、最終エネルギーの小売り価格の地域差として考慮することになる。

(2) 燃料転換

石炭から石油、石油から天然ガスに燃料代替することにより、エネルギー消費量を削減することなくCO₂排出量を抑制できる。DNE21モデルでは、これら化石燃料の地域別種類別の生産コストを、それぞれの累積生産量の関数として定義している。

一方、非化石エネルギーに関しては、DNE21モデルでは実用的に利用可能な資源量の大きさを基準に、原子力、水力・地熱発電、森林バイオマス、太陽光発電、風力発電の6種類のエネルギーを考慮している。太陽光発電を除く非化石エネルギーの単位供給コストは、開発サイトによるばらつきを考慮しつつ、年間供給量の増大に伴って逓増するものとした。原子力発電に関しては、極端なペースでの廃止あるいは増設が行われないように、地域別時点別に上限値と下限値を設定している。

(3) CO₂の分離・回収・処理

火力発電所の排気ガス、ガス化プラントの生成ガスからCO₂を分離回収し、そして処分することでCO₂の大気中への放出を抑制できる。DNE21モデルでは、

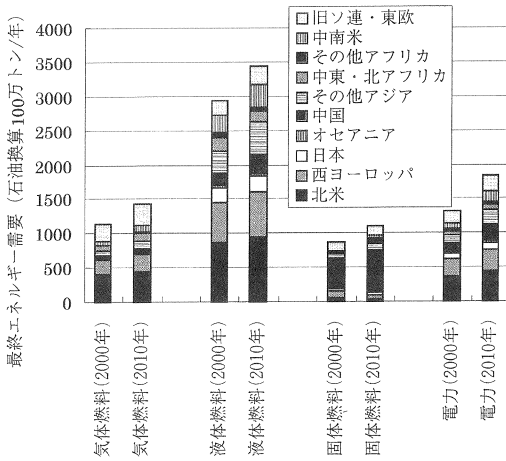


図2 本稿で想定した基準最終エネルギー需要

発電所排ガスからの化学吸収法と、ガス化プラント合成ガスおよび石炭ガス化複合発電プラントからの物理吸収法とを考慮している。

回収CO₂の処分方法は、地中処理と海洋処理とに大きく分けられる。地中処理の主だった方法として、石油増進回収時に油田に圧入する方法、枯渇天然ガス田に圧入する方法、そして地下帯水層に圧入する方法など炭素換算で数千億トンのオーダーの貯蔵容量が見込まれている。一方海洋処理は、処理現場周辺において局地的に海水のpHを大きく変化させるなど海洋生態系への影響が心配されるが、CO₂の処理可能量は実質的には無限大と見なせる。なおDNE21では両者を考慮に入れているが、2010年以前にこの種の技術が大規模に利用される可能性は低いと考えられる。

2.3 世界地域別の基準エネルギー需要シナリオ

本稿の計算で想定した世界地域別の基準最終エネルギー需要を図2に示す。これは国内外の関連機関で行われた需要予測^{3,4)}などを参考に、DNE21モデルの地域区分や部門分割に合わせて筆者が作成したものである。基準シナリオとして従来頻繁に採用されているIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) のIS92aシナリオ⁵⁾と比較すると、アジア地域の最終エネルギー需要を大きく見積もる一方で、旧ソ連・東欧地域のそれは昨今の経済危機を反映させて小さく想定している。

3. 京都メカニズムの定式化

次に一連の京都メカニズムを数理計画問題として定式化してみる。ここでの定式化の方法は、CO₂排出量

に関する制約条件式の定義の違いで、各種制度の差異を表現するものであり、現実の問題を大幅に簡略化して考えている。なおCDMに関しては排出削減単位のバンキングという異時点間に亘る機構もあるが、ここでのシミュレーションでは無視している。また、京都議定書ではCO₂以外の温室効果ガスも含まれているが、ここではCO₂のみを考慮している。

3.1 無政策ケース

まず始めにすべてのケースの基準となる無政策ケースを定義する。この無政策ケースでは、いかなるCO₂排出削減は行われないものとする。すなわち、京都議定書は存在しないものとする。またこの無政策ケースにおいては、DNE21モデルによる最終エネルギー需要量の計算結果が図2の想定値と丁度一致するように、需要関数のパラメータを校正する。そして後で述べる排出量目標設定ケースでは、ここで校正された需要関数に基づいて最終エネルギー需要量を計算する。

3.2 排出量目標設定ケース

このケースでは京都議定書に従い、それぞれのAnnex I 地域 (北米、西ヨーロッパ、日本、オセアニア、旧ソ連・東欧の5地域) の2010年におけるCO₂排出量に対して、それぞれの1990年の排出量実績値の93%、92%、94%、108%、100%の上限制約を設ける。この段階ではまだ京都メカニズム (柔軟性措置) は導入されていないものとする。このケースのシミュレーションの結果として得られる2010年時点における旧ソ連・東欧ならびに非Annex I 地域の排出量は、後で述べる共同実施およびクリーン開発メカニズムの「ベースライン」の具体的な数値として利用する。

3.3 京都メカニズム導入ケース

次に排出量目標設定に加えて、各種の京都メカニズムを導入した場合の問題を考える。

(1) 排出取引 (ET) 導入ケース

ここではAnnex I の5地域におけるCO₂の限界削減費用が同地域間で互いに等しくなるまで、排出取引が実施されるものとする。このケースは、3.2で述べた地域別に複数の排出量上限制約を設定する代わりに、Annex I の5地域全体に係る1つのCO₂排出量上限制約を設けることで表現される。このAnnex I 全体に係る排出量制約の具体的上限値は、これらAnnex I の5地域の「排出目標値」の総和となる。

(2) 共同実施 (JI) 導入ケース

ここでもAnnex I の5地域におけるCO₂の限界削減費用が同地域間で互いに等しくなるまで、共同実施

が行われるものとする。このケースでも、(1) 排出取引の場合と同様に、複数の排出量上限制約の代わりに、Annex I の5地域全体に係る1つのCO₂排出量制約を設けることで表現される。ただし、排出量制約の具体的上限値は同5地域の「排出目標値」の総和ではなく、「共同実施を仮に行わなかった場合に予想される排出量」の総和となる。旧ソ連・東欧のように、特に対策を講じなくてもCO₂排出量が目標を下回る可能性がある地域が存在する場合、この両者の間には差異が発生する。そして京都議定書が遵守される限り、後者は前者よりも大きくはならない。

ところでこの「共同実施を仮に行わなかった場合に予想される排出量」、あるいは別の言葉で「ベースライン」は、仮想的な排出量であるため、それを特定することは、恣意性が入りやすく、実際問題としては非常に難しい。(モデルを用いた計算では、それ自体が仮想世界を対象としているため、前述の3.2のシミュレーションで得られた2010年時点の排出量をそのままベースラインとして利用することができる。)

なお、共同実施のベースラインとして、このように特定することが困難な仮想的排出量ではなく、議定書で明示された排出目標値を利用することも考えられている。この場合、排出取引と共同実施との境界は曖昧なものとなる。

(3) クリーン開発メカニズム (CDM) 導入ケース

クリーン開発メカニズムを活用すると、Annex I 国 (先進国) と非Annex I 国 (途上国) との間のプロジェクトを通して、排出削減を全世界的に効率的に行うことができる。ここでは簡単のため、CO₂の限界削減費用が世界全地域で互いに等しくなるまで、クリーン開発メカニズムによるプロジェクトが進展するものと想定する。

このケースは、地域別に複数の排出量上限制約の代わりに、世界10地域全てに係るCO₂排出量上限制約をたった一つだけ設けることにより表現される。そしてこの世界全体に課せられる排出量制約の具体的上限値は、非Annex I 地域の「クリーン開発メカニズムを仮に行わなかった場合に予想される排出量」の総和と、Annex I 地域の「排出目標値」(あるいは「共同実施を仮に行わなかった場合に予想される排出量」) の総和との合計値となる。

非Annex I 地域の「クリーン開発メカニズムを仮に行わなかった場合に予想される排出量」の具体的な数値としては、やはり前述の3.2のシミュレーション

で得られる2010年時点の排出量を利用する。

4. 各種ケースの計算結果

本章では、各ケースにおける世界地域別の「2010年のCO₂排出量」、ならびに「2010年のシステム総コスト」等の変化を、世界エネルギーモデルDNE21モデルを用いて評価する。なお表記の簡略化のため、各ケースを以下のように番号を付けて表現する。

Case 0 : 無政策ケース

Case 1 : Annex I 排出目標 (京都メカニズム無し)

Case 2 : Annex I 排出目標+ET導入

Case 4 : Annex I 排出目標+JI導入

Case 4 : Annex I 排出目標+ET, CDM導入

Case 5 : Annex I 排出目標+JI, CDM導入

4.1 CO₂排出量

まず各ケース別の2010年におけるCO₂排出量を見てみる。図3にはAnnex I と非Annex I とに区分した結果を示す。排出目標を設定しないCase0では、CO₂の総排出量は炭素換算90億トンを超えるのに対し、目標設定ケースではいずれも炭素換算80億トン付近となり、約10億トン程度の抑制が行われているのが見て取れる。

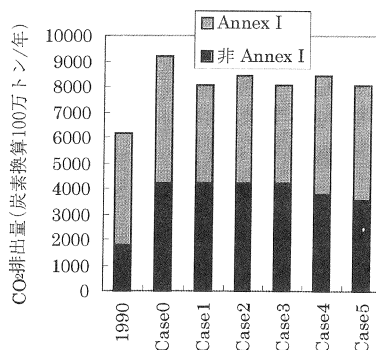


図3 2010年におけるCO₂排出量

また、非Annex I 地域の排出量の増加が顕著であることもわかる。Case 2およびCase 4の排出量が、Case 1, Case 3, Case 5 に比べて多いのは、旧ソ連・東欧の所謂ホットエアーが市場に供給されるためである。表1には、Case 3~Case 5のJIならびにCDMのベースラインの策定に利用したCase 1での地域別のCO₂排出量を示す。本稿の想定では2010年の旧ソ連・東欧の排出量は目標値を下回ることになる。

4.2 2010年のシステム総コスト

次に各ケース別の2010年におけるシステム総コスト

表1 CaselにおけるCO₂排出量
(単位: 1990年排出量に対する比率(%))

地 域	排出目標	計算結果
北 米	93	93
西 ヨーロッパ	92	92
日 本	94	94
オセアニア	108	108
中 国	—	238
その他アジア	—	288
中東・北アフリカ	—	162
その他アフリカ	—	175
中 南 米	—	261
旧ソ連・東欧	100	73

を見てみる。図4にはCase1～Case5のそれらからCase0のシステム総コストを差し引いた値を示す。

図4に見るように一連の京都メカニズムの導入は、経済的には大きな効用をもたらす可能性があるのがわかる。例えば、排出取引(ET)の場合では、Case1とCase2との比較より、2010年時点でおおよそ800億ドル/年の対策コスト低減効果が期待できる。

一方、共同実施(JI)の場合では同じようにして、Case1とCase3との比較より、約400億ドル/年のシステム総コストの低減が可能であると見込まれる。ETとJIのこの差は、旧ソ連・東欧のホットエアに起因している。本稿のJI導入ケースのシミュレーションでは、旧ソ連・東欧のホットエアは「排出削減単位」としては認めていない。

そして、クリーン開発メカニズム(CDM)を導入した場合は、Case2とCase4の比較、またCase3とCase5の比較より、150億ドル/年から400億ドル/年の経済的効果が期待される。ETが既に導入され

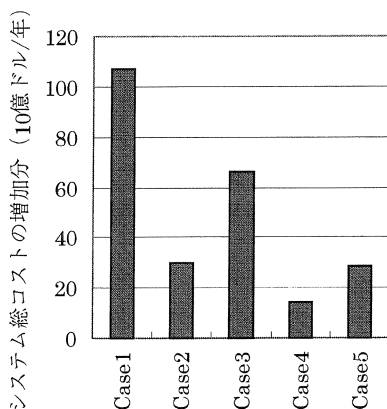


図4 2010年でのシステム総コストの増加分

ている状況では、CDMの経済的効果は大幅に減じられる結果となっている。「排出枠」あるいは「排出削減単位」の供給者として、旧ソ連・東欧と非Annex I地域との間では一種の競合関係が見られる。

以上より第一約束期間だけを考えるならば、比較的实施が容易であると目されるETのみであっても、柔軟性措置としての十分な効果が予想される。

4.3 限界削減費用

本章の最後に各ケース別の2010年におけるCO₂排出量削減のための限界費用を図5に示す。限界費用の値は、理論的には同程度の削減を実現するために必要な炭素税率と等しく、排出目標を達成するための困難さの度合を示している。Case1では西ヨーロッパと日本の限界費用が炭素換算1トン当たり約300ドルと顕著に大きくなっている。京都メカニズムが実施されると、ETそしてJIの導入により、Annex I地域内の限界費用は平滑化されて、限界費用はそれぞれ70ドルそして130ドル程度になる。さらにCDMが導入されると限界費用は全世界的に均一化されて30ドルから45ドル程度になる。京都メカニズムにより、例えば日本でのCO₂削減限界費用は、大幅に低減されるであろうことがわかる。

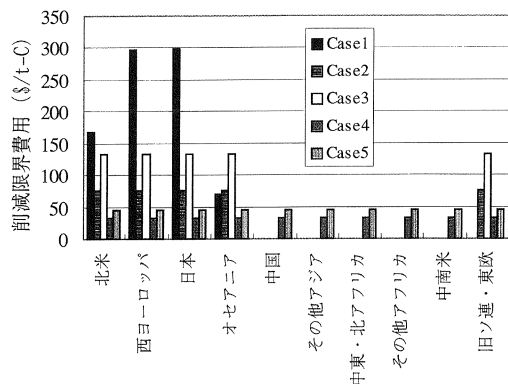


図5 2010年における限界削減コスト

5. まとめ

本稿では、ET、JI、CDMという一連の京都メカニズムに関して、その実施上の問題(ベースラインの設定に関する諸問題など)を取り敢えず取捨した理想的な状況を想定し、世界エネルギーモデルに基づいて、CO₂排出量およびエネルギーシステムコストに関する定量的な評価を試みた。

その結果、CO₂排出量としては1年当たり炭素換算

10億トンの排出削減を実現しつつ、対策費用を数100億ドル/年のオーダーで低減できる可能性があることを示した。また京都メカニズムにより、西ヨーロッパや日本でのCO₂削減限界費用は、炭素換算1トン当たり約300ドルという高額なものから、30ドル程度へと大幅に低減できる可能性があることを示した。

しかしながら、本稿で示した数値には多くの不確定性が付随していることは言うまでもない。他研究の結果との比較も含め、入力データの更新を中心に信頼性を向上させる努力は続けたい。

ところで、JIならびにCDMの実現は、個別の削減プロジェクトの実施と、それによるCO₂排出削減の確認を通じて行われる。そのため、より現実的な制度評価を行うには、個々の排出削減対策を明示的に考慮できる詳細なモデルによる、ボトムアップ的な検討が必要である。

また本稿では触れなかったが、図4に示されるような京都メカニズム導入によって発生する経済的な余剰

を、世界地域間でどのように配分するかは政治的にも大きな問題であると言える。この問題に関しては、協力ゲーム理論などの手法を用いて解析することも考えられる。

参考文献

- 1) Y. Fujii and K. Yamaji ; Assessment of technological options in the global energy system for limiting the atmospheric CO₂ concentration, Official Journal of the Society for Environmental Economics and Policy Studies, Vol. 1, (1998), 113-139, Springer-Verlag
- 2) 山地憲治, 藤井康正 ; グローバルエネルギー戦略, (1995) 電力新報社
- 3) IEA, World Energy Outlook, (1998), 412-463, IEA Publications
- 4) 日本エネルギー経済研究所 エネルギー計量分析センター, エネルギー・経済統計要覧, (1999), 266-300, 財団法人省エネルギーセンター
- 5) W. Pepper et al. ; Emission Scenarios for the IPCC an Upgrade, Assumptions, Methodology, and Results, prepared for the IPCC Working Group 1 (1992)

協賛行事ごあんない

「第4回 エコバランス国際会議」について

〔主催〕 (社)末踏科学技術協会, (社)環境情報科学センター, (社)農林水産技術情報協会, (社)産業環境管理協会

〔主管〕 エコマテリアル研究会, LCA日本フォーラム, 日本LCA研究会

〔後援(予定)〕 科学技術庁, 環境庁, 農林水産省, 通商産業省, 建設省

〔日時〕 平成12年10月31日(火)~11月2日(木)

〔場所〕 つくば国際会議場(エポカルつくば)
(つくば市竹園2-20-3)

〔言語〕 英語及び日本語

〔登録料〕 8/31以前 30,000円(会員)
40,000円(非会員)
10,000円(学生)

9/1以降 40,000円(会員)

50,000円(一般)

20,000円(学生)

〔事務局〕 (社)末踏科学技術協会:担当 末次
東京都港区虎ノ門1-2-8 琴平会館ビル
TEL03-3503-4681, FAX03-3957-0535
e-mail : mitoh@snet.sntt.or.jp
http : //www.sntt.or.jp/ecobalance/