# 地球温暖化予測シミュレーション

森田　恒幸・松岡　譲

## 1. はじめに

昨年11月10日，マラケシュで開催された気候変動枠組条約第7回締約国会議（COP 7）において，京都議定書の実施に係るルールが決定し，我が国をはじめとして大多数の国が今年中に京都議定書を批准する方向で，国内法等の対策のための準備を開始した．残念ながら，米国の参加は実現しそうにもないが，世界の大勢は温暖化対策に向かって着実な一歩を踏み出そうとしている．

今後1世紀にわたる本格的な温暖化対策は，環境保全と経済発展の両立に向けた人類の100年の挑戦でもある．個々人の意識改革への挑戦，技術革新への挑戦，消費改革への挑戦，新しい環境産業創出への挑戦，新国際協力体制への挑戦等々，これらの挑戦が今まさに開始されようとしている．そして，世界規模で新しいマーケットが出現し，環境分野でビジネスチャンスが拡大しつつある．

本稿では，まず，地球温暖化問題の科学的根拠である温暖化予測シミュレーションについて，研究現場の情報を提供することから始める．このため，最新の予測値修正とその根拠を，気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の検討結果をもとに解説するとともに，この予測シミュレーションに用いられたモデルの全容を，我々の研究を中心に紹介する．次いで，最近のモデル研究によって明らかにされた我が国の温暖化対策の可能性と経済影響について解説し，最後に，温暖化対策と企業経営との関係について研究成果が示唆するいくつかの含意を述べる．

もりた　つねゆき
国立環境研究所 社会環境システム研究領域
〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2
まつおか　ゆずる
京都大学 大学院工学研究科 環境工学専攻
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

## 2. IPCCの温暖化予測

IPCCは，気候変動枠組条約の政策決定過程に科学的知見を提供することを目的に，約500人にのぼる世界の一線の科学者が参加している国連機関である．約5年ごとに地球温暖化研究の最前線の科学的知見をレビューし，その評価結果をレポートとして公表している．昨年の夏には第3回目の報告書が出された．

この最新のIPCCの報告書で良く知られたメッセージは，今から21世紀末までに地表の気温は1.4～5.8℃の範囲で上昇するという推計結果である．これは，1996年に公表された第二次評価報告書の推計値（1～3.5℃）に比べて，全体的に高めであり，またその推計幅が大きくなった．予測が大幅に修正された主な原因は，気候変動の自然のメカニズムについて新たな発見があったということではなくて，人間社会の将来の発展の可能性の研究が進み，新しい将来発展シナリオを持ち込んだためである．即ち，将来の社会の発展方向の描き方により，エネルギー利用や土地利用変化の予想が大きく変わり，温室効果ガスや硫黄酸化物などの排出シナリオが大きく違ってくる．その結果，温暖化の予測に大きな差が出てしまったのである．この意味から，今回の修正は自然科学的発見ではなくて，社会科学的研究の進展によるものといえる．

以前は，気候変化予測のほとんどが，IPCCによって1992年に作成された排出シナリオを前提にしてきた．このシナリオはIS 92 a（「IPCCで作成した参照シナリオ1992年版のaケース」の意味）と呼ばれ，六つ作られたうちの一つであり，あくまでも一つの社会の発展方向を描いたものに過ぎない．しかも，このシナリオは1985年のデータを基礎にして描かれ，1990年以降に生じたいろいろな社会変化を当然のことながら考慮していなかった．ソ連崩壊，アジア発展途上国の経済の急激な成長，自由貿易体制の導入などは，1990年代に入って世界の温室効果ガスや硫黄酸化物の排出量を大きく変える要因となった．このため


© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

IPCCでは，1996年から特別のプロジェクトチームを組織し，新しい排出シナリオの作成に着手した．我々のチームを含めて世界の六つの研究チームが経済モデルを含めた大規模なコンピュータ・モデルを駆使し，3年半の期間を費やして新しい排出シナリオを作成した．一連の成果はIPCC特別報告書「Special Report on Emission Scenarios」として一昨年出版され，この報告書の頭文字を取って，「SRESシナリオ」と呼ばれるようになった．

新しい排出シナリオが前提とした社会経済の発展シナリオは六つある．まず，高成長シナリオ群．マーケットの利点を活用して，世界中がさらに経済成長を遂げ，教育，技術，そして社会制度に大きな革新が生じるシナリオである．過去100年間の平均経済成長率，年約3%が，今後100年間も続くとし，2050年の一人当たり所得は世界平均で2万米ドルを超える．このような高い経済成長のシナリオでは，技術革新が大きく進み，どの方向に技術革新が進むかによって，温室効果ガス等の排出が大きく異なる．このため，石炭のクリーン利用技術の大幅な革新や，石油と天然ガス関連の技術革新が顕著な「**化石燃料依存型高成長社会シナリオ**」，原子力を含む新エネルギーの大幅な技術革新を見込んだ「**高度技術指向型高成長社会シナリオ**」，そしてこれらの技術革新がバランスして生じる「**バランスのとれた高成長シナリオ**」の三つが用意された．

他の三つは，世界の各地域が固有の文化を重んじ，多様な社会構造や政治構造を構築していくことによって，世界の経済や政治がブロック化していく「**多元化社会シナリオ**」，環境や社会への高い関心に基づいて，地球公共財としての環境の保全と経済の発展を地球規模で両立し，バランスのとれた経済発展を図る「**循環型社会シナリオ**」，そして，環境や社会への高い関心に基づくが，地球規模の問題への関心や国際的な問題解決という方向に向かわず，地域の問題と公平性を重視して，ボトムアップの方向で発展を図る「**地域共存型社会シナリオ**」である．それぞれ，社会発展や技術革新の方向が異なるために，経済成長や人口増加，それにエネルギー利用が大きく異なってくる．

以上の六つの発展シナリオをコンピュータ・モデルを用いて定量化し，二酸化炭素の排出量を予測した結果が図1に示してある．二酸化炭素の他に，メタンガスや亜酸化窒素，それに大気の冷却効果に影響を与える硫黄酸化物の排出量などを定量化して，気候モデルの入力条件とした．そして，三つの発展シナリオについて気候モデルの計算結果をまとめたのが，図2である．1.4～5.8℃の予測推計幅が，発展シナリオの違いによってもたらされていることが理解できよう．

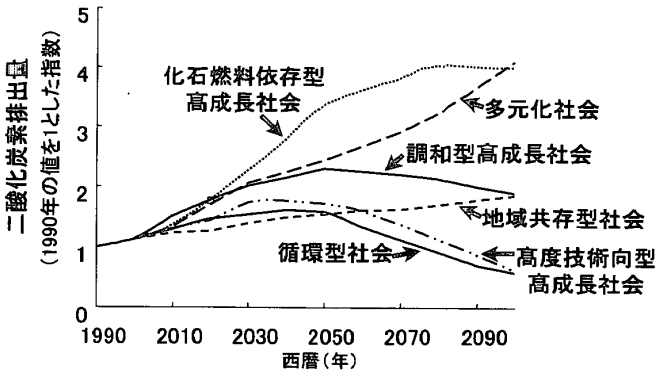


図1　社会経済の発展シナリオと二酸化炭素の排出

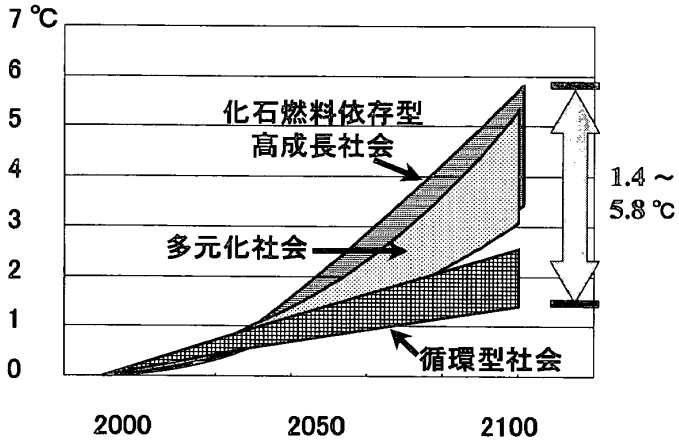


図2　各発展シナリオを前提にした場合の気温上昇予測

今回の新しい予測は，政策決定の場に非常に重要なメッセージを与えた．それは，人類の将来の発展方向は多様であり，これらの発展の方向の選ばれ方によって温暖化の程度や温暖化対策の意味は大きく違ってくるということである．リサイクルやエネルギーの効率的利用を徹底する循環型社会や，廃棄物そのものを減らして自然と共生する地域共存型社会の方向に発展する道を選べば，温暖化対策がいかにやりやすくなるか，また，温暖化対策を社会全体の発展政策の中で考えていくのがいかに重要かを訴えたものであった．

## 3．温暖化予測を支えるシミュレーション・モデル

さて，このような一連の予測は，二つのタイプの大規模なシミュレーション・モデルによって実施されている．一つは，気候変動を海洋循環や植生のダイナミックスと統合してシミュレートする「大循環モデル」，他の一つは，社会経済の発展や温室効果ガスの増加，


© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

それに気候変動が社会や環境に及ぼす影響をシミュレートする「統合評価モデル」である．今回のIPCCで大きく変更された排出シナリオは，もっぱら後者の統合評価モデルによって計算された．

我々は，後者の統合評価モデルの開発に過去10年以上にわたって携わってきた．このモデルは，アジア太平洋地域統合評価モデル（Asia-Pacific Integrated Model，略称「AIM」）と呼ばれ，自然科学から社会科学にわたる広範囲な分野を統合的にモデル化し，アジア太平洋地域を特に詳しく分析できるように開発された世界モデルである．AIMの主要モジュールは中国，インドなど，アジア太平洋地域の主要国の研究機関に移転し，各国独自の適用と開発を促している．これは，各国が温暖化対策を論ずる際の共通な政策策定支援ツールを準備することによって，相互理解や環境・エネルギー技術の移転などを円滑にすることをねらったものであり，世界の類似のモデルに比べ，このモデルを特徴付けている点である．

AIMの主要なモジュールは，図3に示すとおり大きく分けて三つの部分で構成される．二酸化炭素，メタン，$N_2O$などの温室効果ガスの排出量を予測する温室効果ガス排出部分，全地球的な炭素循環や気候変動を簡略的に予測する気候計算部分，それに，気候変動の社会や環境に対する影響を評価する影響計算部分であり，これらをつないで統合的にシミュレートすることが可能である．また，個々のプロセスモデルを単独に使用したり，集約度や内部機構が異なるモデルと差し替え作動させることによって，個々の政策課題に応じた解析が可能となっている．さらに，モデルのリアリティーを充実させるために，プロセスの表現や空間的な表現を詳細に行うモジュールも用意してある．

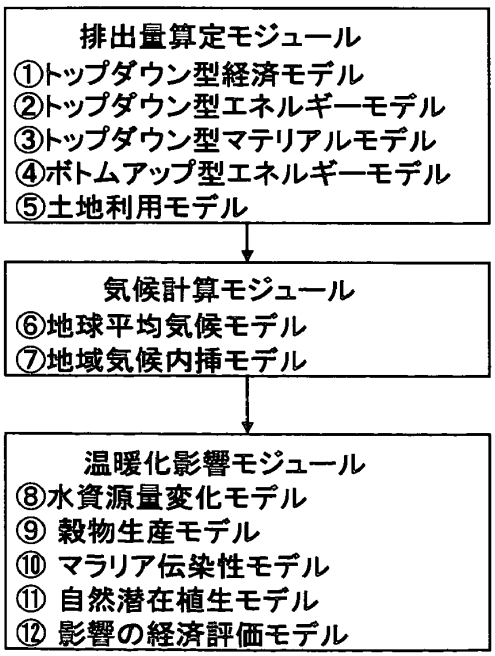


図3　AIMの主要モジュール

上で紹介した，IPCCの社会経済発展シナリオを前提とした排出シナリオでは，もっぱら温室効果ガス排出モジュールによってシミュレートした．このモジュールでは，三つのタイプのサブモジュールが稼動している．第一は，人口，技術進歩及びエネルギー賦存量を外生シナリオとして，経済的市場均衡をベースにして世界各地域の長期的な排出量を推計するサブモジュール（トップダウン型モデル），第二に，エネルギー技術とエネルギーサービスに関する個別の情報を網羅的に積み上げ，短中期的な排出量を各国レベルで推計するサブモジュール（ボトムアップ型モデル），第三に，土地利用変化及びそこからの排出量を推計するサブモジュールである．

第一のトップダウン型モデルとしては，これまでに，①11財及び21地域分けを持つ逐時一般均衡型モデル，②Edmonds・Reillyモデルを改良したエネルギー供給サイドに比較的詳細な記述を持つ世界市場でのエネルギー財需給を部分均衡で記述するモデル，③環境産業のマクロ経済効果と環境効果を分析するため，廃棄物とリサイクルのフローを一般均衡モデルの中に組み込んだ国内モデル，の三つを開発した．

また，第二のボトムアップ型モデルとしては，④技術水準，サービス及びコーホート別のエネルギー関連機器の市場参入・退役を，先験的あるいはいくつかの経済的基準に基づいて選択するエンドユース型モデルを開発した．このタイプのモデルは，それをサポートするデータベース整備に労力と工夫を要するが，これに関しては精粗2種類のデータを整備した．その第一は，世界全域のカバーを第一目的とするもので，世界を9地域に分け，発電用・工業用ボイラー，各種炉，給湯・暖房機器あるいは輸送機器など70程度の技術分類に基づいて，技術ごとのサービス分担率，技術効率及び温室効果ガス排出原単位を整備したものである．これらのデータの将来変化はシナリオに基づいて外生的に与える．第二は，一国単位に前記の技術分けに加え，各種省エネ，リサイクル技術，詳細なコーホート参入・退役事象，産業内のエネルギー循環プロセスなどのシステム記述と技術分類を行ったものであり，技術進歩シナリオは外生的に与えるが，各種の社会・経済フレーム及び排出抑制施策下での技術選択は，経済


© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

的基準に基づいて内生的に求め，その結果としての排出量を推計するものである．

土地利用モジュール⑤では，農地，牧草地，森林などが持つ農業生産性や環境資源量を，生産，消費関数の要素とする一般均衡型経済モデルを用い，各種の生産性向上や消費選好性シナリオ下での土地利用間の遷移を，整合性を保ちながら推計する．世界17地域，5種の土地利用，10種の財・サービス区分を持ち，土地利用起源の排出量算定の他，エネルギーモデルに対するバイオマス燃料供給関数の役割も持っている．

以上の①～⑤までのモデルを統合的に用いて，IPCCの新しい排出シナリオは作られた．気候モデルの入力条件である排出シナリオをシミュレートするだけで，このような多様な種類のモデルを投入して3年半にわたる膨大な作業が必要となったのである．

## 4. AIMを用いた京都議定書の分析

我々のチームを含め，世界の統合評価モデルの研究者が大きな課題を与えられたのはIPCCだけではない．1997年に京都で開催された第3回気候変動枠組条約締約国会議（COP 3），そしてそこで合意された京都議定書をめぐるその後の政策論争においても，多くの政策的問いが我々に投げかけられた．こうした問いに対しては，モデル全体を稼動し最終結果のみを提示するといった使い方よりも，全体の整合性を見計らいながら，例えば，我が国の6%削減は技術的に可能なのかとか，京都議定書の世界経済に対する影響はどれだけかとか，先進国5%削減を気候安定化に結び付けるには今後どのような削減スケジュールを立てなければならないか，などといった分断的ではあるがトピック的な課題設定がなされるのが普通である．つまり，統合評価モデルといえども，社会的役割を果たすためには，こうした個別課題に対して回答する機能を持たなければならず，それらを整合的かつ有機的に行うツールとして統合モデルの存在価値がある．以下に京都会議に関連し発生したいくつか政策的課題を中心にモデル分析結果を紹介する．

まず，二酸化炭素排出量の削減目標をどうするかは，京都会議のもっとも大きな議題であった．先進各国は会議に先立って自国の削減可能量を推計し，それに基づいた交渉を展開しようと図った．我が国においても政府部内，NGOなどを中心に激しい論争があったが，そうした中でAIMは，図3④のモデルを使用し，適切な施策下での2010年時点の削減可能量を1990年比で7.6%減と算定した．これは普及が確実視されている省エネ技術の展開を中心に炭素トン当たり3万円の炭素税を賦課するなどの対策を行ったときの結果であり，1997年夏時点での計算値であった．しかし，京都会議以降の我が国の取り組みは，温暖化対策推進法や改定省エネ法などの策定はあったものの，本格的な取り組みを始めたとは言い難い情勢にある．京都会議の後，技術開発の進展やトップランナー方式で固定化された参入技術の効果などを考慮し，対策開始年を2年遅らせて算定し直した二酸化炭素排出量を，図4に示す．技術固定ケースは，削減政策を導入しないでこのまま行く場合であり，2010年には全体で21%増加する．これは，現在市場に導入されている技術が，機器更新はあるものの，そのまま使用されると考えた場合である．一方，市場選択ケースとは，開発が確実視されている技術の導入を考慮する場合，また，対策ケースとは，さらにそれらの技術を炭素トン当たり3万円の炭素税で普及促進を図った場合である．対策ケースの場合には，90年比で5%削減が可能となっている．京都会議の前に行った7.6%に比べ小さくなっているが，2年の対策の遅れが削減率を小さくする一方，昨今の経済成長の下方修正が伸びを押さえたため，依然としてこれだけの削減幅が残っているのである．つまりしっかりした政策を導入していけば，国内対策のみで京都会議目標値に近づけることは可能であることを示している．

ところで，我が国が国内対策のみで京都議定書の数値目標を達成した場合，技術的には可能であっても，

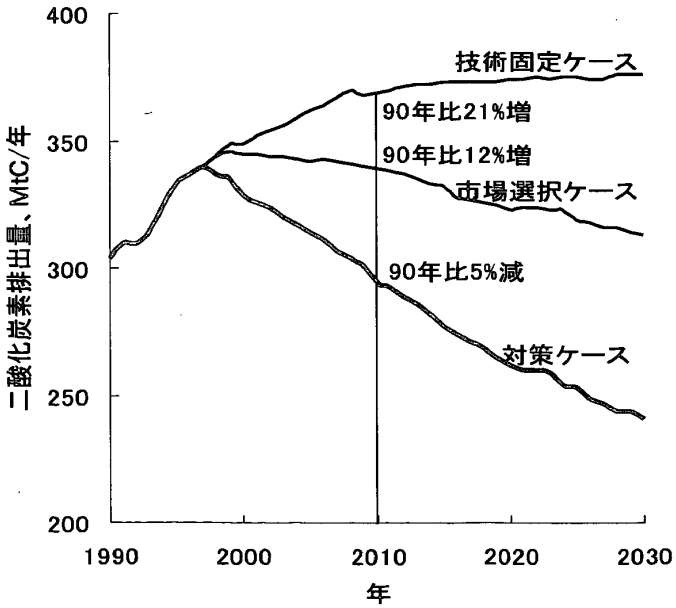


図4　我が国の二酸化炭素排出量の見通し


© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

二酸化炭素排出量1トン（炭素換算）の削減当たり最大で3万円の直接費用がかかるため，適切な経済政策を導入しない場合には経済的なダメージは避けられない．したがって，我が国は最悪どの程度の経済的ダメージを受けるか，またそれを回復するにはどのような方策が必要か，という政策的問いも頻繁に寄せられている．図3③のモデルを使ったシミュレーション結果を紹介する．図5に示すとおり，京都議定書の数値目標を国内対策のみで達成しようとした場合，最悪のケースで，我が国は2010年時点で約2兆5千億円程度のマクロ経済的損失を被る可能性がある．この10年間の経済成長率に直せば年率0.05パーセント程度の減少であり，経済政策を失敗した場合や為替変動による影響に比べれば非常に小さい損失ともいえる．しかし，環境政策との因果関係が予め予測できる経済損失については，可能な限りそのダメージを回復する政策を検討することが環境政策に求められている．

では，経済的損失を回復するにはどのような有効な手だてがあるか．引き続き図5のシミュレーション結果を紹介する．まず，第一の有効な手だては，環境産業の発展を支援することである．省エネ産業やリサイクル産業などの財やサービスの生産が増加すれば，二酸化炭素などの温室効果ガスの排出が抑制される方向に向かううえに，経済も活性化させる．この効果が2010年時点で約1兆円のGDP回復となって現れると推計した．第二の有効な手だては，環境産業以外の産業セクターにおける技術開発投資の増加を誘導することである．日本国内で長期的に温室効果ガスを削減していくためには，さまざまな分野で技術革新が進まなければならない．燃料電池，太陽電池，バイオマス技術，それらの技術を効率化させるためのナノ技術，バイオ技術など，広範囲の技術開発に対して投資が必要となる．環境関連の金融マーケットを整備するなどしてこれらの技術開発投資を活性化させれば，付加価値ベースで5000億円以上の回復が見込まれる．さらに第三の手だてとして，環境にやさしい消費へのシフトが日本の経済にプラスに働くことを忘れてはならない．エコハウスやハイブリッド・カーのように，高価であっても環境にやさしい商品は，消費者の環境プレミアムの増加によって購入されるようになった．これが温室効果ガスを減少させるだけでなく新しい付加価値をも創造し，日本の経済を活性化させるのである．このような手だてを尽くせば，京都議定書で生じる経済的ダメージはほとんど解消される．予測シミュレーションはそんなシナリオの実現可能性を明らかにしてくれる．

もう一つ，最近の分析結果を紹介しよう．京都議定書批准をめぐる産業界の大きな懸念の一つは，米国が京都議定書から離脱した場合，日本は国際競争力で非常に不利な状況に追い込まれるのではないかという点である．図3①のモデルを使ったシミュレーション結果によって，この懸念への回答を試みる．図6には，国際マーケットを通じた経済影響の推計結果をまとめている．

まず，米国も参加して京都議定書を達成する場合，2010年時点のGDPは，日本が0.28%，米国，

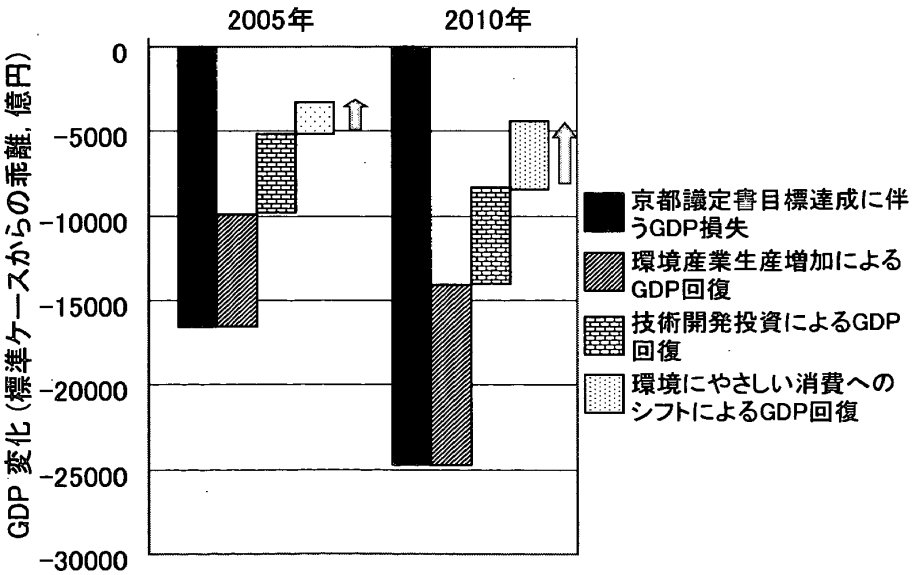


図5　京都議定書目標達成のためのマクロ経済的損失とその回復（国際排出量取引のない場合）


© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

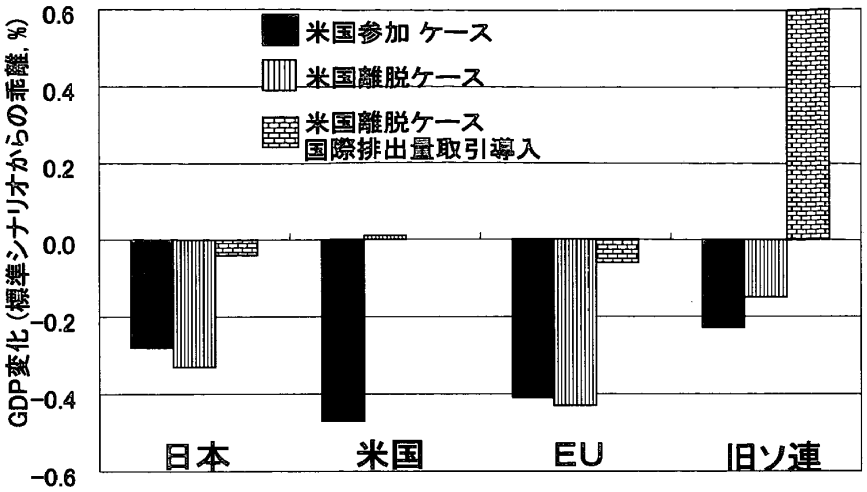


図6　米国離脱の経済的影響とその緩和策

0.47%，EUが0.41%，ロシアが0.23%下がると推定される．これに対して，米国が不参加の場合，日本，EUのGDP損失が大きくなり，0.33%，0.43%となる．米国に比べて鉄鋼や石油化学などのエネルギー集約産業の国際競争力が落ちることが主な原因である．逆に米国のGDPは0.01%ほど増加する．このような事態を避けるためには，京都議定書で認められている国際排出量取引（排出枠を国際間で融通しあう制度）を活用するのがもっとも効果的である．米国が参加しない場合は，排出枠の需要が減って取引価格が下がり，日欧は安い排出枠を購入することができる．これにより，日本および欧州のGDP損失は0.04〜0.06%にまで軽減される．国際的視点から種々のリスクを回避していく戦略も必要となる．

## 5.　おわりに

以上の最近のシミュレーション研究は，今後の企業経営と温暖化対策の関係に関して，多くの重要なメッセージを提供している．最後にそのメッセージのいくつかについて述べてみたい．

まず，IPCCの温暖化予測シミュレーションで詳しく説明したとおり，地球温暖化対策は，1世紀にわたる世界規模の事業になるとともに，社会経済の発展の方向を根本的に変える可能性があるということである．このことはもちろん，経済活動の基本であるマーケットが大きな影響を受け，企業経営にも長期的に大きな変化をもたらすはずである．この変化のシナリオを的確に理解し，どのシナリオに向かいつつあるかを見通す努力がまず必要となる．

第二に，我々のモデルで計算したとおり，地球温暖化対策は短期的に我が国及び世界の経済に悪影響を及ぼす可能性があるが，それを克服するシナリオは描けるし，我々の社会はその克服の方向に実際に努力をしていくはずである．重要なことは，この克服への努力は，実は新しい経済発展のパラダイムに向けた努力であり，その過程で民間企業は勝者と敗者に鮮明に分かれるという点である．京都議定書対応のために既に始まっている環境産業の活性化，環境関連技術開発への投資，消費行動の変化などは，新しい企業間競争に向けた序章にすぎない．

第三に，多種多様な温暖化対策シミュレーションから得られる共通したメッセージは，短期的にも長期的にも「技術」に対する大きな期待であり，技術の進展なくしてはとても温暖化問題を解決できないという叫びである．しかも，オールマイティの単一技術はあり得ず，広範囲な技術開発の総力戦を長期間にわたって展開しなければならない．さらにこれらの技術を社会が受け入れるために社会システム側の適応にも大きな投資が必要になってくる．このことは，多様な分野での新しい巨大マーケットの成立を予測しているのであり，長期にわたって技術開発でのビジネスチャンスは間違いなく拡大する．

第四に，米国離脱のシミュレーションで示したとおり，温暖化対策の世界的な枠組みは未だフェアなものになっておらず，単純な戦略で臨むと大きなリスクに遭遇する可能性があることである．このようなリスクを避けるために，排出量取引やクリーン開発メカニズム（先進国が途上国の温暖化対策プログラムに投資をして，その見返りとして温室効果ガス削減に見合った排出枠を得る制度）などの国際的なメカニズムを活用することは，企業においても常に検討しておかなければならない．


© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

## 参考文献

IPCCの最新の報告書（IPCC Third Assessment Report-Climate Change 2001）及び関連する特別報告書のほとんどは，次のサイトからダウンロードできる．

http://www.ipcc.ch/

このうち，新しい排出シナリオや対策シナリオについての報告書は，次のサイトにある．

http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm

http://www.ipcc.ch/pub/tar/wg3/068.htm

また，新しい排出シナリオに基づく気候シミュレーションについては，次のサイトが分かりやすい．

http://www.ipcc.ch/pub/tar/wg1/029.htm

一方，AIMに関する情報は，次のサイトから入手できる．

http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/2/02-03.html

http://www-cger.nies.go.jp/ipcc/aim/


© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．