

地球環境問題のモデル解析

山地 憲治

1. はじめに

地球環境問題は典型的な学際問題である。たとえば地球温暖化問題は、現象としては気象学の問題であるが、原因物質であるCO₂の挙動の解明には、大気化学、海洋学、生物学等の分野の協力が必要だし、CO₂の排出の実態解析や抑制策の検討には、エネルギーや土地利用に関する工学および経済学の広範な知識が必要になる。メタンや亜酸化窒素などCO₂以外の温室効果ガスも対象とすれば、農学分野での検討も重要になる。さらに、対策の実施にあたっては、さまざまな利害の調整のために、法学や政治学、国際関係論の助けが必要だし、ライフスタイルの変更のような長期的な対応には、文化人類学や社会心理学、倫理的な考察が重要になる。

このような学際問題である地球環境問題の解決のためには、さまざまな分野の専門家の知識を総合化できるツールが必要である。ここに地球環境問題とOR研究の接点がある。本連載では、地球温暖化問題を題材として地球環境問題に関するモデル解析研究の現状と今後の展開について解説したい。今回はまず、地球温暖化問題とは何か、何が難しいのか、どのようなアプローチが求められているのかについて紹介する。

2. 地球温暖化問題の難しさ

2.1 科学的知見における不確実性

地球温暖化問題への取り組みを難しくしている最大の要因は科学上の不確実性である。1988年11月から大勢の研究者を動員してこの問題を検討しているIPCC(気候変動に関する政府間パネル)の作業によってもこの不確実性は解消していない。

地球の温度変化は温室効果だけでは説明できないし、CO₂など温室効果ガスの大気中の濃度変化から地球の温度変化を予測する気候モデルでも雲や海洋の効果には不明な点が多い。たとえば、1940年から1970年にかけて地球の平均気温はむしろ若干低下したという事実があるが、これを完全に説明する理論はまだ確立していない。太陽活動の微妙な変動も地球平均気温に大きな影響力を持つし、大気や地表面での太陽光の反射率(アルベド)も一定ではない。

それでは温室効果による地球温暖化は問題にならないのかというと、そうではない。地球が現在のように15℃というマイルドな平均温度になっているのは温室効果のおかげである。もし大気中に水蒸気(あまり知られていないが、現在の地球の温室効果の90%以上は水蒸気によって引き起こされている。水蒸気が問題にされないのは、人為的排出量より自然生成量の方がはるかに大きいからである)やCO₂などの温室効果を起こす気体がなければ、地球は平均温度マイナス18℃という極寒の世界になってしまう。温室効果で地球が温まるという現象は科学的事実である。しかし、現在までに観測された程度のCO₂の濃度上昇からでは、地球の平均気温の上昇が温室効果によるものとは断定できないのである。現在の調子で大気中のCO₂の濃度が上昇を続ければ、今後数十年程度のうちに温度効果による地球温暖化が事実として確認されることはまちがいない。ただし、その温度上昇の定量的予測には、現在のところ、極めて大きな不確実性が伴っている。

IPCCでは、このまま進むと来世紀の地球平均気温は10年当たり0.3℃の割合で上昇すると予測しているが、その予測の不確実性の幅は0.2-0.5℃と大きく、これによる海面上昇も、来世紀末で、30センチから1メートルという大きい幅で予測されている。

地球規模でのCO₂の発生と吸収についても、森林破壊からの放出量には諸説があるし、吸収側にはミッシ

やまじ けんじ 東京大学 工学系研究科 電気工学専攻
〒113 文京区本郷 7-3-1

ングシンクという大きな謎がある。化石燃料の燃焼から発生するCO₂量はほぼ正確に推定される(炭素重量で年間約60億トン)し、大気中のCO₂濃度の増加の様子についても正確な観測データがある(1980年代平均では、年間約1.5ppm)。しかし、推定される人為的なCO₂排出量から観測されたCO₂濃度の増加量を説明しようとすると、放出されたCO₂のほぼ半分は1年以内にどこかに吸収されたことになるのだが、それがどのように行なわれているのかが分からない。これがCO₂のミッシングシンクと呼ばれる問題である。最近の観測では、CO₂の吸収量は年によってかなり変化することが知られている。特に1990年代に入って濃度の増加速度が落ちているが、この原因はよく分かっていない。このように地球規模でのCO₂の挙動がよく分かっていないので、地球温暖化防止のために大気中のCO₂濃度をコントロールするにしても、そのためにどの程度化石燃料からのCO₂放出量を抑制すればよいのか正確には分からない。

そのほか、CO₂以外の温室効果ガスであるメタンや亜酸化窒素、フロンなどについてもその挙動や効果には未解明事項が多々ある。フロンについては、1992年2月のIPCCの追加報告では、その温室効果はフロンが破壊する成層圏下部のオゾンの減少によって相殺される(話が多少ややこしいが、オゾンも温室効果ガスである)という指摘がなされている。

また、そもそも地球が温暖化すればどの程度の損害が発生するのかもよく分かっていない。温度上昇によって生態系が破壊され農業生産に大打撃を与え、海面上昇により多くの人口密集地帯が水没するという恐怖のシナリオが一般には流布しているが、これに異論を唱える専門家も多い。最近、米国の経済学者を中心として、地球温暖化の被害コストの推計が始められている。これらによれば、大気中のCO₂濃度が倍増した場合に予測される温度上昇(3℃前後)による被害は、世界のGNPの1-4パーセントに達するという評価が得られており、被害は発展途上国において特に深刻とされている。また温度上昇の幅が大きくなると被害は加速度的に拡大すること、同じ温度上昇幅でも上昇テンポが速いと被害が大きくなることなども指摘されている。しかし、この分野の研究の進展は遅く、コンセンサスが得られるにはほど遠い状況である。

つまり、いま分かっている科学的知識では、「CO₂排出量(われわれがコントロールできる政策変数)」・「大気中のCO₂濃度」・「地球平均気温の上昇」・「地球温

暖化による被害(これを小さくすることが政策目標)」という連鎖のすべての関係において、それぞれ大きな不確実性がある。これは、どのような対策をとればどの程度損害が避けられるのかを科学的に正確には評価できないことを意味する。ただし、不確実性の範囲を考慮しても、このまま放置すれば今後100年程度うちに、地球は過去100万年で最も急速な温度変化を経験するという事は確かである。

2.2 対策評価の困難さ

この科学上の不確実性が、環境ラジカリストと保守主義者との対立をまねき、地球温暖化対策の着手に混乱を与えている。地球温暖化による被害コストが正確には分からない一方で、現在実施可能な温暖化対策のコストの方はかなり正確に評価できる。いま直ちにコストの高いCO₂排出抑制に着手するよりも、現象の観測や理論の高度化など科学上の不確実性を減少させることに、より努力を傾注すべきだというのが保守派の意見である。責任逃れのための言い訳だとすれば論外であるが、論理的にはこの見解にも合理性はある。これに対して環境ラジカリストは、予防保全原則に立って、少なくとも先進国は、明瞭なCO₂抑制目標を掲げて直ちに本格的な対策に着手すべきだと主張する。

政策評価研究の立場からは2つのテーマが重要である。1つは種々のCO₂排出抑制対策についてその社会的コストを評価し、優先順位をつけ、不確実性下でも着手すべき低コストの対策を見いだすことである。省エネルギーなど種々の技術的対策の経済性評価、エネルギー経済モデルを用いた環境税などさまざまな制度的方策の効果とコストの評価などは、これに寄与する。

もう1つは、科学的な不確実性を減少させることの意義を定量的に評価することである。ここでもモデル解析研究が重要になる。この側面の研究は比較的少ないが、地球温暖化の被害コストに関する情報の価値(たとえば温度上昇幅や上昇速度と被害コストの関係における非線形性の程度が最適な対策選択に与える影響など)について評価を試みた研究例がある。種々の前提において被害コストを仮定し、対策コストと合算したトータルコストを最小化する政策を求めるといった研究もいくつか行なわれているが、被害コストの推定が困難な現状では、このようなアプローチからえられる結論の価値は低い。トータルコストを評価する場合には、不確実性の取扱いに注意すべきであり、現時点では、最適解そのものよりも、不確実性に伴うコストの解明

に焦点を合わせるのが生産的であろう。

地球温暖化対策の政策評価を困難にしているもう1つの要因は、この問題が扱わねばならない長い時間範囲である。通常の政策評価では、対策の実施によって得られる便益を対策のコストと比較する。便益がコストを上回ればその対策は正当化される。一般に、便益もコストもある時間範囲に分布する。同じ金額のコスト・便益でも、その発生する時点が異なれば、その価値は異なる。つまり、今日の1万円は来年の1万円より価値が高い(物価上昇によるインフレがないとしてもである)。この時点間の価値の差を調整するパラメータを割引率と呼んでいる。割引率の選択は、対象とする問題の性格によって異なる。企業の投資の場合には期待する利益率が用いられるし、一般的には平均的な金利を用いることが多い。また、公共的な政策判断では低い割引率を適用する。しかし、地球温暖化問題のように、幾世代間にもまたがるような超長期の公共的な問題に対しては、割引を行なうべきではないとする見解もあり、いかなる割引率を適用すべきかについて定説はない。地球温暖化対策の費用便益分析は100年程度の時間範囲で行なわれることが多いが、このような長期間では割引率のわずかな差が結果に大きな影響を与えてしまう。地球温暖化対策の便益(つまり対策によって回避される被害コスト)は、その評価自体が極めて不確実であるうえに、割引率の選択に伴う不確定さが加わるのである。

2.3 国際的な合意形成の必要性

地球温暖化対策に限らず、問題解決の手段は、目標を効率的に達成し、関係者の負担が公平で、しかも現実に実行可能でなければならない。地球温暖化対策ではこれを複雑な国際政治力学のなかで実現しなければならない。

効率的なCO₂削減を行なうためには、削減の限界コストの小さい対策から順次実施すればよい。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途上国に見いだされる。たとえば、インドの石炭利用では選炭による灰分除去を行なうことで1トン(炭素)当たりわずか3ドル以下の費用でCO₂削減ができると評価されている(わが国で実施できるCO₂削減技術について同様の計算を行なうと多くの場合1トン当たり1万円以上になる)。植林も、途上国では極めて費用効率のよいCO₂削減方策である。

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対策努力を求めることになる。現実的にも、地球環境対策において、途上国に先進国と同じような役割を今期待するのは難しい。発展途上国はむしろ「開発の権利」を主張している。このような効率と公平という2つの基準からの矛盾する要求を解決する手段として、途上国への環境保全技術の移転促進や資金援助が重要視される。

しかし、将来の人口増と経済発展に伴うエネルギー消費の増大を見通せば、来世紀半ばには途上国からの環境インパクトが先進国を上回ると予想される。発展途上国にも当然地球環境保全に対する責任がある。1992年6月のリオ宣言にも述べられているように、「差異はあるが共通の責任」という原則は堅持しなければならない。

このような国際的な視点から効率的かつ公平な対策を見いだすこともモデル解析研究の重要な役割である。

3. 地球温暖化対策のプロフィール

3.1 広範囲な対策メニュー：リサイクルからジオエンジニアリングまで

環境対策の基本は予防保全である。産業公害問題で経験したように、環境問題は現象とその原因が明らかになってから事後的に対応しようとすると遙かに高い社会的コストを負担しなければならないことが多い。しかも、地球環境問題に必要な国際的対応では合意形成までどうしても余計な時間がかかってしまうので、十分に先行して対策に着手する必要がある。

また、地球温暖化現象には大きなタイムラグと不可逆性がある。たとえば、温度上昇がある水準を越えるとツンドラから大量のメタンが放出され破滅的な温暖化が起きるとする主張もある。これは小さな穴から漏れだした水がきっかけとなって堤防が決壊する時のようなもので、穴がある程度大きくなってしまえば手の施しようがなくなる。

したがって、地球温暖化対策は、予防保全を基本とし、合意可能なものから直ちに実行に移すべきである。そして、科学的知見の充実に伴って、段階的かつ多面的に実施できる柔軟性を持つ必要がある。

このような認識の下でまず行なうべきことは、対策のメニューをできるだけ広範囲に設定することである。

エネルギーの使用に伴うCO₂排出を抑制する技術について、少し詳しく検討してみよう。数多くのモデル解析がCO₂排出抑制技術の評価について行なわれている。

われわれがエネルギーを使うのは、電気やガソリンそのものが欲しいからではない。電気を使ってテレビを見たり、車に乗って遊びに行きたいからエネルギーを使う(最終需要としてのエネルギー使用)。また、車やテレビを作るため、さらにはその材料である鉄を作るために大量のエネルギーを使う(生産要素としてのエネルギー使用)。つまり、われわれの欲望がまず存在し、それを満たすために、直接間接にエネルギーが使われている。地球環境問題の根本的な原因はこの人間の欲望にある。

モノやサービスに対する人間の欲望から地球温暖化の損害までを、いくつかのフェーズに分解し、それぞ

の解消などには、技術だけでなくわれわれの生活態度、ライフスタイルも大きな役割を果たす。このフェーズの対策では、技術によって拓かれた可能性を現実の效果に実らせるために、社会的対応と組み合わせることが重要である。

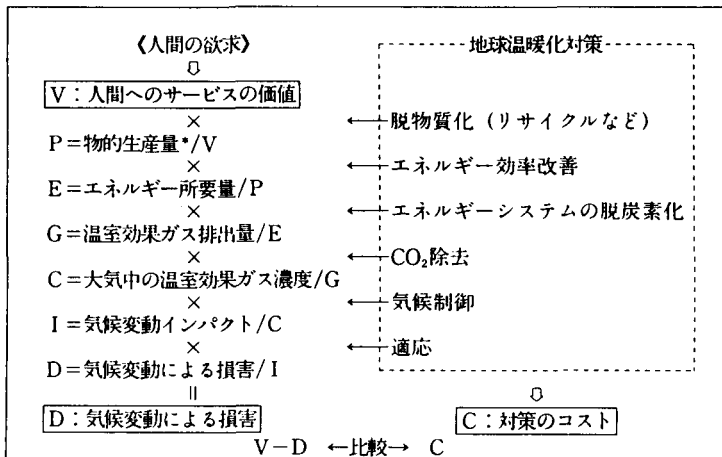
次のフェーズは、同じ生産あるいはサービスをより少ないエネルギー使用量で行なう技術である。つまり、エネルギー使用の効率化である。ここでは多種多様な技術的可能性がある。照明やモーターなどエネルギーの末端利用機器の効率向上から、生産プロセスの省エネ、発電などエネルギー変換部門の効率向上、さらには温度の高い順番に熱エネルギーを利用するヒートカスケディングやコージェネなどエネルギー利用の複合化と、さまざまな分野で多くの可能性が検討されている。

エネルギー使用の効率化と並んで重要な技術的対策

は、エネルギー供給源の脱炭素化である。天然ガスへの燃料転換は既に世界的規模で急速に進展しているし、原子力や再生可能エネルギーなど非化石エネルギー利用の推進は、地球環境時代のエネルギーの長期的基本戦略である。なお、現在の技術の延長上では原子力や再生可能エネルギーの利用分野は発電に限られる。原子力や再生可能エネルギーの応用分野を拡大するために、水素エネルギー利用技術(輸送・貯蔵を含む)の開発が、長期的には重要課題となろう。また、CO₂以外の温室効果ガスであるメタンや亜酸化窒素の排出低減技術も検討する必要がある。

次に位置づけられる対策技術は、大気

中の温室効果ガスの濃度上昇を抑制する技術である。これには、大きく分けて2つの対応がある。1つは、化石燃料を使用しても大気中にCO₂を放出しないようにする技術であり、燃料から直接炭素分を取る技術や燃焼後の排ガスからCO₂を除去する技術が提案され開発中である。この方式の場合は、除去した炭素分の処理が問題であり、深海に貯留するアイデアや太陽エネルギーを利用して有用物質に変えてリサイクルする方法などが検討されている。もう1つの方法は、大気中からCO₂を吸収・固定する技術である。最も有望なのは植林であるが、それ以外にも海洋中の植物性プランクトンの増殖や牧草の根に固定するなどの提案がある。いずれも、基本的には光合成を利用して、バイ



*: 最終需要用途のエネルギー利用を含む

図1 地球温暖化対策の構造

れのフェーズにおける対策のタイプを整理して示したのが図1である。

まず、欲望そのものをコントロールすることが考えられる。物質的欲望から脱却すれば、われわれのエネルギー消費は激減するに違いない。しかし、個人の欲望は聖域である。ここへ介入するのは技術の役割を越える。しかし、同じ欲望をより少ない生産量で満足させることなら、技術にもある程度のはできる。リサイクルしやすい設計をすれば、同じ欲望をより少ない物質生産で満足できる。製品の寿命を長くすることも同様である。また、都市設計や交通システムを工夫すれば、無駄な移動を減らせるし、渋滞を解消できる。もちろん、リサイクルの促進や製品の長寿命化、渋滞

オマスのストックを増やして炭素を固定するというアイデアである。この場合、大気中からCO₂が除去されるのは、バイオマスのストックが成長している期間だけであることに注意すべきである。また、形成したバイオマスのストックの維持について、さらにはメタンや亜酸化窒素などその他の温室効果ガスの排出についても慎重な配慮が必要だ。

さらに、大気中のCO₂濃度の上昇によって温室効果が起きても、人工的な地球冷却によって、温暖化を相殺するという対策技術が考えられる。たとえば、ジェット機の排気ガスを利用して大気の上層部にエアロゾルを散布して太陽光の反射率（アルベド）を増し地球を冷却するというアイデアや、海水を大規模に循環させ、深海部の冷水を表面に汲み上げて海表面を冷却することで温度上昇を相殺するという提案などが出されている。このように、大規模技術によって人工的に地球の環境条件を改造しようとする対策はジオエンジニアリングと呼ばれている。その影響の大きさからして、実際の実行に当たっては十分に慎重を期すべきだが、長期的な地球環境技術の対策メニューの中では、ジオエンジニアリングの可能性を考えておくべきである。

最後に位置づけられるのは、地球温暖化が生じて、その損害が少なくなるようにするいわゆる適応技術である。これには、温暖化に対応した農林産物の品種改良、植物工場などによる農業の気候依存性の低減、さらには、オランダで現実に行なわれたような大規模堤防工事による海面上昇への対応などが含まれる。地球温暖化現象の非可逆性を考慮すれば、このような適応技術の可能性を検討しておくことも重要課題である。

3.2 対策技術のスコアボード

地球温暖化の対策技術は、いま説明したようにリサイクルからジオエンジニアリングまで多種多様なものがある。それぞれの対策はどのような技術的可能性を持っており、地球温暖化対策としてどのように評価されるだろうか。

技術的可能性の上限は、自然科学の法則によって規定される理論的可能性である。核融合や太陽エネルギーの大規模利用、あるいはジオエンジニアリングなど、現実の利用から未だ遠い技術の可能性については、この理論的可能性で夢が語られていることが多い。これに対し、実験室レベルで実現されている技術的可能性は、理論的可能性よりは実現性が高い。しかし、太陽電池の効率や高速増殖炉の燃料サイクル性能など、技

術的には高度なレベルでも成立するものの、経済的に成り立つ範囲は極限られているという技術は多い。また、経済的成立性にも、いくつかのレベルがある。経済的成立性は、税制や技術基盤など技術が実用に用いられる場のローカルな条件によってさまざまに変化する。現実には、同じ機能を持つ技術についても、さまざまなレベルの技術が混在している。商用化された最高性能の技術が地球上のすべての地域で用いられているわけではない。情報の不完全性もあれば、税金制度や気候、土地代の違いなど、さらには人々の好みのような文化的要因もある。特に、生活関連のエネルギーの末端利用技術の選択において、このような技術選択の不均一性が顕著である。炭素税などによって環境コストを内部化する制度があれば、地球温暖化対策技術の経済的成立条件は相対的にやさしくなると期待されるが、その効果は地域と分野によって大きく異なることになるだろう。つまり、対策技術のポテンシャルは、理論的可能性、技術的実証性、商業的利用可能性、現場での普及という階層構造を持っている。

以上のような技術的可能性の階層構造を考慮して、評価の基準を設定する必要がある。モデル解析においては、定量化という要請があるために評価基準の選択範囲は限られるのが通例である。ここでは、とりあえず定量化という制約は考慮せず、地球温暖化対策技術の基本的評価基準として、次の5つを提示したい。

第1は期待される効果である。ここではCO₂削減や温暖化被害の低減など当該技術に期待される機能について、その技術が市場に普及した場合に期待される効果が評価される。これはモデル解析にもなじむ評価基準であろう。第2の基準は、リグレットの大きさである。地球温暖化問題が抱える不確実性の大きさを考慮すると、当該技術にとって都合の悪い不確実性が発生した場合の最大のコスト（つまりリグレット）を評価する必要がある。不確実性の取扱いはモデル解析研究の重要な課題である。第3は現在の開発水準である。評価指標は、実用化までに要する時間と開発コストである。第4の基準は、実用化後の市場普及の速度である。実用化しても普及に多大の困難を伴う場合がある。これら第3、第4の基準は簡単そうだが定量化はあんがい難しい。そして第5の最終的な評価基準は、当該技術の費用効果特性、つまり、その技術のコスト（実用化時点での）とその技術によって回避できる地球温暖化の損害との比率である。定量化は極めて困難だが、この値を得ることがモデル解析研究の最終的な目標で

表1 地球温暖化対策技術のスコアボード

	効果	リグレット	開発水準	実用化後の普及速度	費用/効果
リサイクル	△	○	○	×	○
最終需要端のエネルギー効率向上	△	○	○	△	○
生産技術のエネルギー効率向上	△	○	△	○	△
エネルギー変換効率向上	△	○	△	○	△
天然ガス	×	○	○	○	○
原子力	○	×	△	○	△
再生可能エネルギー	○	○	×	×	×
CO ₂ 回収処分	○	×	×	○	△
植林	△	○	○	?	○
海洋への鉄分散布	?	×	×	?	?
アルベド制御	○	×	×	?	?
温暖化適応技術	?	?	?	?	?

○：良 △：問題有り ×：悪 ?：不明

ある。

先に概観した各フェーズでの代表的な地球温暖化対策技術について、今述べた5つの評価基準による定性的な採点表(スコアボード)を表1に示す。表中に示した結果は筆者の相当割り切った主観的な判断である。読者はそれぞれに異論をお持ちと思うが、多少説明を加えておきたい。なお、評価はグローバルな視点から行なっている。

エネルギー効率向上と植林は、ほとんど問題のない対策技術である。ただし、いずれも単独で地球温暖化問題を最終的に解決できるほどの効果は期待できない。ましてや天然ガス転換は一時的な手段と考えた方がよい。リサイクルは理想的な対策だが、大規模な実現には人々の生活態度の大きな変化が必要で、そのことを考慮して普及速度の項目にバツをつけた。原子力は、大規模利用のためには増殖炉を実用化する必要があるので開発コストに若干問題があり、放射性廃棄物処分や安全性、核不拡散問題についての社会的不安を考慮してリグレットの項目にバツをつけた。また、再生可能エネルギーはコストに最大の問題がある。CO₂の除去・処分は、CO₂問題がなければ全く無意味な技術であり、コスト問題とともに、リグレット基準による評価

がマイナスになる。鉄分散布による海洋へのCO₂吸収やアルベドコントロール、適応技術については分からない点が多いが、少なくとも前2者はリグレットの点で大きな問題をかかえている。

このような簡単な定性的評価によっても、地球温暖化対策には、単独ですべてを解決できるような切り札は存在しないことがよく分かる。地球温暖化に対しては、長期的かつグローバルな視座に立ち、複数の対策を組み合わせる必要がある。それを通して21世紀のエネルギーシステムは大きく変貌するであろう。モデル解析は、このような評価を定量的に行なうことにより、地球環境と調和する持続可能な発展の姿を描き出すことができる。

4. 今後の予定

本連載は今回を含めて3回を予定している。次回は、CO₂対策技術の評価を目的とするモデル解析について最近の成果と今後の課題を紹介する。第3回については、環境税など地球環境保全のための経済的手段の評価を目的とするモデル解析を中心に解説する予定である。