

温暖化対策のタイミングと費用

一温室効果ガス濃度安定化目標下での最適戦略における 限界費用の時間経路一

Timing and Costs of Mitigating Global Warming:
The Optimal Marginal Cost Trajectory with Policy Targets of Greenhouse Gas Concentration

キーワード:地球温暖化、二酸化炭素、限界費用、最適戦略、濃度安定化

杉山大志 長野浩司

温室効果ガスの濃度安定化を目標とした、排出削減対策費用の最小化問題において、限界対策費用が従う時間経路の解析解を導き、以下のことを示した。1) 費用面からみた合理的な温室効果ガス排出削減戦略においては、割引率および大気中のガス寿命（時定数）が重要な因子である。2) 短期的な温室効果ガス排出量目標を置く場合に比較して、長期的な濃度目標を採用することにより、排出削減費用を全期間を通してより効率的に配分することができ、ひいては総対策費用を相当程度削減できる可能性がある。3) 大気中のガス寿命が比較的短いメタンについては、少なくとも当面はその排出削減の優先度は低い。

- はじめに
 - 最適限界費用の時間経路
 - 限界費用の解析解
 - CO₂、メタン排出抑制の最適限界費用経路
 - CO₂排出抑制の最適経路についての考察
 - メタン排出抑制の最適経路についての考察
 - 濃度と温度の超過（オーバーシュート）
 - 結語
- 参考文献
- 付録 限界費用の解析解の導出
- A.1 複数の濃度目標がある場合
 - A.2 Hotelling の定理との形式的類似性について

1. はじめに

地球温暖化問題への対応の方向について定めた気候変動枠組み条約においては、「自然生態系に深刻な人為的被害をもたらさない水準への温室効果ガス濃度の安定化」を最終目標とし、その達成のための第1段階として、「2000年における温室効果ガス排出を1990年以前のレベルに回帰させること」を先進諸国に義務づけている。また、2000年以降の排出目標については、1997年に日本で開催される予定の第3回締約国会議(COP3)で議論される見通しである。

究極的な目標としては、温室効果ガス濃度安定化以外に選択されうる候補として、温暖化損害と対策費用の総和（実質的な総費用）の最小化、全世界の地表面気温の年間平均値（全球平

均気温）の安定化、の2つの可能性があった。しかし、今日得られている科学的知見の確度では、具体的な対策手段との関係を定量化できるのは温室効果ガス濃度までであり、総費用最小化、全球平均気温の安定化については、概念としては濃度安定化よりも優れているが、実際に政治的な目標としては適用不可能である。

わが国でも、温暖化対策のあるべき方向性について議論が活発に進められて来てはいるが、概してそうした議論はまず排出量の目標値を前提として定めた上で、具体的な対策について検討するという形でなされている。しかし、温暖化問題において、環境影響を及ぼすより直接的な因子は大気中の温室効果ガス濃度であって、排出量ではない。目標年に実現される濃度が同じであれば、そこに至るまでの排出量がどのよ

うな時間経路をとっても、その環境影響は殆ど変わらないと考えられている。

ここで、環境影響をある一定限度以内に留めるという制約の下で、排出削減の努力及び費用を全期間に亘って最も適切に配分することによって、排出抑制のためのコストを削減できる可能性がある。例えば、2000年から2030年までの間にある一定の排出量レベルに保つ場合に2030年に到達する濃度と同じ濃度に至るためには、初期時点でより大きな排出抑制を図って後で排出量を増すものや、初期に排出量を増加し後に排出抑制を加速するものなど、多種多様な排出経路が存在する。本稿ではまず、そのような無数の排出経路のうち、目標時点に至るまでの総費用が最小になる経路について、限界対策費用^(注1)が従う関係式を導出する。次に、得られた最適な限界費用の式から得られる示唆について、世界、国、あるいは国内の産業部門・企業レベルの排出抑制の在り方に関して、効率的な時点間費用配分、設備ストックの更新、および技術進歩等の観点から考察を加える。

2. 最適限界費用の時間経路

2.1 限界費用の解析解

気候変動枠組み条約の最終目標は、「自然生態系に深刻な人為的被害をもたらさない水準への温室効果ガス濃度の安定化」となっている。これに従えば、解くべき問題は「ある年（例えば2050年）以降の温室効果ガス濃度を安定化するためのコストを最小化する」となる。ここでは、ある年以降とするかわりに、その年度のみ目標を設定すれば^(注2)、原問題は以下のよう

に定式化される：

$$\min TC[E(t)] = \int_{t_0}^{t_1} C(t') [E(t')] e^{-rt'} dt' \quad (1)$$

$$\text{s.t. } M(t_1) = M_1 \quad (2)$$

但し目的関数は、全計画期間（ t_0 から t_1 ）におけるエネルギーシステムコスト（エネルギーの生産から転換、輸送、消費までの全てに関する資本、運転および修繕コストの総和）の現在価値の総和 TC であり、時刻 t_1 における濃度 $M(t_1)$ を目標 M_1 に抑えるという制約下で、排出量経路 $E(t)$ を変化させることによって TC を最小化する。時刻 t のエネルギーシステムコスト $C(t)$ は排出経路 $E(t)$ の汎関数である。この問題は厳密に解けて^(注3)、コスト効率的な排出削減戦略における限界費用 MC は、時間経過につれて次の式に従って上昇する：

$$MC = |\lambda| f(t_1 - t) e^{rt} \quad (3)$$

但し t_1 は濃度目標を達成する目標年（例えば2050年）であり、 $f(t)$ は時間 t が経過したときの温室効果ガスの大気中残存率（従って定義により $f(0)=1$ であり、 $f(t)$ は t とともに減少する。よって式(3)の項 $f(t_1-t)$ は t とともに増大する）、また r は割引率である。この式の導出の詳細については、Hotelling の定理との類似性の検討も含めて、付録に譲る。

式(3)の意味するところは、最適戦略における限界費用は時間とともに上昇し、その上昇する速さは、(1)排出からの時間経過(t_1-t)の増大につれて、大気中濃度が早く自然減少するガスほど、また(2)割引率 r が高いほど、大きいということである。

(注1) 本稿での限界対策費用（あるいは以下単に限界費用とも書く）とは、炭素排出を 1t-C 削減するのに必要な追加費用のことであり、直接規制や補助金などが無く炭素税のみによって排出削減を行う場合には、その炭素税率と等しくなる。

(注2) 濃度目標を特定の単年度（例えば2050年）にのみ設定するか、それ以降（例えば2050年以降）その濃度以下に保ち続けるようにするかは、当面の排出抑制戦略には

あまり影響しないと考えられる。また、一般に単年度でなく、複数年度の目標を設定する場合には、簡単な形で表現される解析解は存在しない。これについては付録を参照されたい。

(注3) 厳密に解けるのは、各々の温室効果ガスがそれぞれ線形の応答関数に従うと仮定しているからである。この仮定は以下の議論を本質的に妨げない妥当な仮定であると考えられる。

式(3)の注目すべき特徴は、限界費用 MC の時間依存性が、どのような排出削減技術やエネルギーシステムを想定するかには全く依存しないことである。これらの技術的想定は、定数 λ を介して、限界費用の絶対値にのみ影響する。

また一方、目標とする大気中濃度の絶対レベルも、定数 λ にのみ反映されている。すなわち、限界費用の指数関数的上昇に伴って、その限界費用以下で利用できる排出抑制対策・技術が順次導入されて行き、全期間を通じた排出削減を行う結果、目標とされる大気中濃度に到達する。

2.2 CO₂、メタン排出抑制の最適限界費用経路

次に、最も重要な温室効果ガスである CO₂ とメタンについて具体的に限界費用を求めるために、応答関数 $f(t)$ を以下のように導入する。

・ CO₂ については5つの異なる時定数 τ を持つ指数関数の和：

$$f(t) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (4)$$

但し、 τ 、及び基準化のための係数 α の各々の値は表1で与えられる。式(4)は、大気物理の専門家によって提案され、広く受け入れられている近似式である。

・メタンについては時定数 $\tau=14.5$ 年の指数関数：

$$f(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5)$$

CO₂ の応答関数 $f(t)$ は時定数が長い成分を多く含み、CO₂ がメタンよりも長期に渡って大気中に残存することを示している^(注4)。それぞれについて、式(3)を用いて限界費用の時間依存性を計算した結果を、表2および図1に示す^(注5)。基準時点(0時点とした)の限界費用を1とし

表1 CO₂濃度蓄積モデルにおける

パラメータ設定値

i	1	2	3	4	5
α	0.131	0.201	0.321	0.249	0.098
τ	∞	362.9yr	73.6yr	17.3yr	1.9yr

た相対値で示している。

メタンについては、大気中に放出されても時定数14.5年程度という比較的短い時間で分解されてしまうために、例えば今日100g排出しても50年後には僅か3gしか大気中に残存せず、従って50年後の蓄積量にはあまり影響が無い。よって、最適な排出削減経路は、初期時点ではほとんど排出削減を実施しないでおき、目標年の直前から急激に削減を図る、というものになるだろう。このことを反映して、最適な限界費用の経路は少なくとも時定数14.5年の指数関数で急激に上昇するものとなっている。割引率が高い場合には、さらにその上昇は急速である。

一方、大気中で分解されず、海や陸地に時定数120年程度で吸収されるCO₂については、例えば今日の100gの排出のうち76gが50年後まで大気中に残存するために、現在の排出量を抑制するか否かが将来の濃度目標にかなり影響を及ぼす。この結果、 $f(t-t)$ の項に由来する限界費用の上昇は比較的ゆるやかになっており、限界費用の経路形状は主に割引率の選択に依存している。

3. CO₂排出抑制の最適経路についての考察

本格的なCO₂排出抑制対策を開始する合理的なタイミングは、割引率によって決定的に異なることが表2および図1から分かる。まず、割引率(年率、以下同様)が0%ならば、2050年

(注4) CO₂ についての $f(t)$ を単独の指数関数で近似すると時定数はおおむね120年となる。

(注5) 目標年度 t_1 は図表中の終端年($t=100$)以降に設定した。

表2 限界費用の時間依存性（基準時点（0時点）を1とする相対値）

t	CH4:r=0%	CH4:r=3%	CH4:r=10%	CO2:r=0%	CO2:r=3%	CO2:r=10%
0	1	1	1	1	1	1
10	2	3	5	1.0	1.4	2.8
20	4	7	29	1.1	2.0	8.1
30	8	19	159	1.2	2.9	23.3
40	16	52	861	1.2	4.1	67.1
50	31	141	4667	1.3	5.9	195.3
60	63	379	25284	1.4	8.6	574.2
70	125	1020	136979	1.6	12.8	1714.5
80	249	2744	742102	1.8	19.4	5234.7
90	496	7383	4020418	2.0	30.3	16498.7
100	989	19862	21781068	2.7	54.8	60041.6

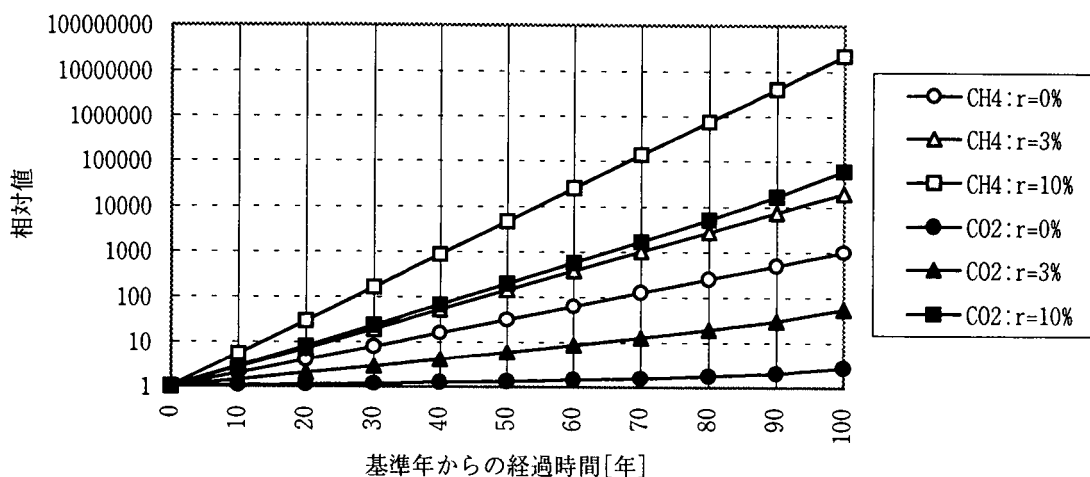


図1 限界費用の時間依存性（基準時点（0時点）を1とする相対値）

の限界費用は現在の約1.3倍になるに過ぎない。従って、技術進歩によるコスト減や現存する設備の寿命などの要因を除けば、採られるべき対策は初期の時点から実施される反面、50年間の時間経過につれて順次正当化され導入されて行く新規の対策は、多くは存在し得ないことになる。従って割引率0%の下では、例えば世界全体で仮に最終的な濃度レベルを産業革命前の2倍(550ppm)といった野心的な値^(注6)に設定するならば、高額な限界費用を持つ抑制対策が、直ち

に実施されることになるだろう。

一方、割引率を10%に設定すれば、最適戦略における限界費用は時間経過につれて急激に上昇する。これに対応した排出抑制戦略は、全く排出抑制をしない状態から多くの排出抑制対策を行う状態に短時間に推移するものになるだろう。

一般に民間部門においては、世界全体、国、あるいは公共部門での排出抑制の場合と比較して、相対的に高い割引率が参照されると考えられる。このことの排出削減戦略への影響を、仮に割引率を10%として、民間部門の中でも最もCO₂排出量の多い電力部門を例に考察してみる。

(注6) これを例えば一定の排出量で実現するためには、2100年までの世界の各年の排出量を現在のレベルでは固定する必要がある。

割引率を10%と仮定した場合、例えば初期時点の限界費用が炭素1トンあたり10ドル(10\$/t-C)であったとすると、それが100\$/t-Cへと10倍になるのに21年を要するのみであり、さらに10倍の1000\$/t-Cになるのにも42年しか要さない。ところで、100\$/t-Cという限界費用は、石油火力発電の排出原単位と対比すればおおむね2.0¥/kWhに相当し^(注7)、これら費用面から見る限りにおいては、石油ないし石炭火力発電の価格競争力を左右するような影響を持つ。また、限界費用が1000\$/t-Cになった時点では、排煙脱炭等を含めた殆どの炭素排出抑制技術が正当化されることになるだろう^(注8)。反対に、限界費用が10\$/t-C程度であれば、そのような限界費用を持つ対策が実施されたとしても、発電原価を0.2¥/kWh程度押し上げる効果しか無く、電源の選択に大きな影響を及ぼし得るものではない。従って、燃料転換による排出抑制のような本格的対策は、いずれにせよ実施されることはないだろう。

結局、42年程度という(電源設備を1ないし2回更新するであろう)時間範囲で、殆ど排出抑制をしないという状態から今日想定されている排出抑制対策のうちの大半を行うという状態に移行することが、10%という高い割引率の下での最も合理的な行動となる。どのようなタイミングでこの移行をすることが経済的であるかは、目標とする年度とその目標濃度、想定する技術進歩シナリオ、および化石燃料価格の推移などの諸要因によって決定される。

気候変動枠組み条約では、先に述べたように濃度安定化を究極の目標としているが、そのための道筋については、先進国はおおむね2000

年までに1990年の排出レベルで安定化するとしている以外に、特に定めていない。2000年以降の排出削減については来年3月に日本で開催される予定の第3回締約国会議(COP3)で議論される見通しであるが、濃度の安定化を図るという立場からは、2005年や2010年といった短期的な年次において厳しい排出量の数値目標を定めるという方法は、コスト効率的では無い可能性がある。

排出削減を初期時点では行わず、後の時点から開始した方がコスト効率的になり得るとする理由としては4つあり、

1. 割引率(r)があること
2. (応答関数 $f(t)$ に表される)濃度の自然減少があること
3. 既存設備の寿命があること
4. 新・省エネルギー技術の進歩が期待できるとされている(Richels[2])。3.は既存設備を途中で廃棄するのではなく、その寿命の満了を待ってから炭素排出の少ない設備を建設することが効率的であるという意味であり、4.は技術進歩によって将来時点ではより安価に脱炭素化を進めることができるという意味である。式(3)に即して言うならば、限界費用の時間依存性の関数形については3.、4.といったエネルギーシステムの具体的な条件とは独立に、割引率及び温室効果ガスの残存率(1.及び2.)だけで決まる。限界費用の絶対値には、 λ を介して3.及び4.が反映される^(注9)。

世界全体での排出削減経路を考える場合については、全体としての目標濃度と年度の設定もさることながら、その場合に適用する割引率の値が重大な問題となる。この場合にどのような割引率を設定するべきかは、専門家の間でも議論が分かれたままであり、「最適」とされる長

(注7) 発電効率を38%、CO₂発生原単位を0.903t-C/TOE、\$1=¥100と仮定した。

(注8) 本藤・内山[1]によれば、火力発電において排煙脱炭(CO₂の分離・液化および海洋貯留を含む)を実施した場合に、必要な処理費用は36000-69000¥/t-Cあるいは7.41-13.72¥/kWhとなっている。

(注9) 仮に技術進歩が年率 σ の排出抑制コスト削減を実現するならば、実効的に(見かけ上の)割引率が $r+\sigma$ に補正される、という解釈も可能である。

期的な排出抑制政策も、当面の排出抑制は殆ど必要ないとするものから、直ちに大規模な対策が必要、とするほぼ正反対のものまで、幅広い見解が存在しているのが現状である。

しかし何れにせよ、世界全体での問題を議論するときには、このような総費用面の分析を過度に重視することは危険である。なぜなら、仮に割引率を 10% に設定することが妥当であって、2020 年頃までは排出削減を実施せずにその後の 40 年間で全く排出しない状態に到達するという経路が費用最小であるとの解を計算上得たとしても、そのような劇的な変化が、国際社会において誰がその費用を負担するかという分配の問題を乗り越えて実現されるとは考え難いからである。

他方、世界全体での判断により目標時点での濃度目標^(注10)が与えられ、かつその目標の実現に向けての分担が決定されたとして、個々の国の産業部門あるいは企業レベルがどのような排出削減努力をすべきかという問題設定の下では、各主体はそれぞれ固有の割引率を有していることから、その割引率を用いて各主体が要求されている濃度削減への寄与の下での費用最小化を行うことが適切であると考えられる。この場合の割引率は比較的高いために、短期的な排出量目標ではなく、長期的（少なくとも 30 年程度）な濃度目標を用いることで、同じ環境影響の制約条件の下で総費用を相当程度削減できる可能性があり、注目に値する。特に寿命の長い設備ストックを多く保有している実施主体（例えば電気事業）であれば、このような長期濃度目標の優位性はさらに高まると考えられる。

言うまでもなく、温暖化対策は個々の実施主

体レベルではなく、社会全体の観点から要請されるものであり、従って実施主体の費用最小化という上記の文脈は、それ単独で正当化されるものではない。しかし、社会の意志として産業部門あるいは企業に何らかの温暖化対策の実施を求める場合においても、ある年度の排出量を直接規定するという硬直的な規制よりも、「濃度上昇への加担」の削減目標を規定し、その対策実施の時期については各主体の自主判断に委ねる柔軟な規制策のほうが、実施主体における費用効率性については勿論、結局は経済社会全体の観点からも好ましいであろう。

4. メタン排出抑制の最適経路についての考察

メタンは、その大気中の寿命が 14.5 年と短いために、割引率が 0% の場合であっても CO₂ について割引率を高く設定した場合と見かけ上同じように、急激に限界対策費用が上昇する。割引率を 3% と低めに設定しても限界費用が 10 倍になるのに 23 年しかかからないため、長期的な濃度目標の下では、初期時点（たとえば今後 10-20 年）においてはメタンの排出抑制のための限界費用は低く抑えられることになる。従って、最適な排出抑制戦略は、殆ど排出抑制をしない状態から、多数の排出抑制対策が実施される状態に短時間のうちに移行する、というものになるだろう。CO₂ へ課されるべき限界費用と調和したメタン排出削減のための限界費用を具体的に計算するためには、温室効果ガス排出による損害コストを比較するアプローチのみが知られている。これについて、筆者等は、IPCC が与えている地球温暖化ポテンシャル（Global Warming Potential, GWP：温暖化への各々の温室効果ガス 1 分子あたりの寄与の相対値）の、特に（GWP 評価において温暖化効果を考慮する時間範囲である）積分期間が 20 年のもの（メタン 1g=CO₂ 62g と換算する）を用いることは、メタンによ

(注10) 式(4)、(5)が線形であることから、ある特定の国あるいは企業ごとの「濃度への寄与（あるいは加担）」の削減目標を定めることが可能である。非線形であれば勿論このような寄与の分離は不可能であるが、この線形式は良い近似であると考えられているため、本稿の議論に支障は無い。

る環境影響の過大評価につながり、正当性は薄いとの結果を得ている（杉山他[3]）。

5. 濃度と温度の超過（オーバーシュート）

急激な限界費用の上昇に対応して、多数の排出抑制対策が一斉に導入される場合、その時点以降には排出量が急速に低下する。その場合、温室効果ガス濃度は、一次的に目標値を超過（オーバーシュート）したのちに、低下して最終目標に到達するという経路をとることが起こりうる。極端な場合には、温度についても、一次的に上昇したのちに最終状態に低下して到達することもあり得るだろう。このような超過を生じなくても、一般的に抑制開始以前および直後には、温度上昇速度が大きくなる。

この温度上昇速度の一時的加速が生態系にとって追従が困難であり、重大な影響を及ぼし得るような問題ならば、このような経路は回避すべきである。現状では、生態系への損害の正確な評価が不可能であるため、温度上昇速度の影響を知ることは非常に困難である。ただし、最も重要な温室効果ガスである CO₂ については、そのガス寿命が 120 年程度と長いために濃度の超過はそれほど大規模には起きず、また全球平均気温についても、海洋の熱容量が大きいことから 30 から 50 年の時間応答遅れがあると考えられているために、温度のオーバーシュートの程度も小さくなる。従って、これらのオーバーシュートによる環境影響は、あまり重大な問題とはならないと思われる。

6. 結語

本報告では、温室効果ガスの濃度安定化を目標とした排出削減対策費用の最小化問題において、限界対策費用が従う時間経路の解析解を導き、そこから得られる温室効果ガス排出削減戦略への示唆を考察した。主要な結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 費用面から見た合理的な温室効果ガス排出抑制戦略においては、割引率および大気中のガス寿命（時定数）が重要な因子であることを示した。
- (2) 世界全体あるいは国レベルでの排出抑制戦略においては、割引率の設定は難問である上に、本稿のような費用分析で得られる結果に沿うような最適戦略が実現可能であるかについても疑問が残る。世界全体についての目標濃度制約下での費用最小化の観点からは、当面の排出削減は効率的で無く必要ないとの見方もあるものの、国際的公平（先進国の過去の汚染責任）、国際協調、世代間公平などの観点から、仮に長期的な濃度目標を定めるとしても、先進国の側からの長期的な排出削減へ向けての率先した取り組みが求められる。
- (3) 産業部門あるいは企業レベルでは、それぞれ固有の比較的高い割引率を有しているために、短期的（2005 年ないし 2010 年）な排出量制限を規定するよりも、より長期的（2030 ないし 2050 年）な「濃度上昇への加担」の低減目標を設定し、その枠内で具体的な排出抑制戦略を、実施主体の自主判断に基づいて立案し実施することで、同じ環境影響の制約条件の下での所要費用を相当規模削減できる可能性がある。特に設備産業である電気事業の場合には、寿命の長い設備ストックを多く保有しているという特徴があることから、このような長期濃度目標の優位性はさらに高まる。しかし以上のことは、費用以外の観点からの温暖化抑制への努力を否定するものではない。また、将来起こり得る大規模な排出抑制に備えて、その費用を下げるための対策技術の研究開発などの努力は、現時点から推進し継続していく必要があるだろう。
- (4) メタンについては、その寿命が短いために、

例えば 2050 年といった、適切な長期的視野で濃度目標を設定する場合には、少なくとも今後 10 ないし 20 年はその排出抑制を実施することの意義は薄い。

短期的な排出量規制策に比較した場合の、長期的な濃度規制策の優位性は、世界、国、あるいは産業部門・企業の何れを対象とするかといった状況に応じてその程度には差があるものの、本報告で明示した限界費用の時間経路などによって、定性的には明らかである。今後の展開としては、国あるいは個別産業部門（具体的には電気事業）を対象として、技術選択を明示的に考慮した定量的な検討を行う予定である。

謝辞

本研究にあたっては、横浜国立大学講師の藤井康正氏および東京大学教授の山地憲治氏に有益な助言を戴いた。また、とりまとめの段階では、編集委員および匿名の外部査読者からのコメントを戴いた。ここに深く感謝の意を表したい。

【参考文献】

- [1] 本藤 祐樹、内山洋司、火力発電プラントの環境対策コスト分析、電力中央研究所研究報告 No.Y92009、(財)電力中央研究所、1993年3月。
- [2] Richels, R., presentation at Energy Modeling Forum 14 meeting, Mar 25, 1996, IIASA, Austria.
- [3] 杉山大志、Leslie Liu、山地憲治、損害コストの比較による温室効果ガスのウェイトづけ—経済的温暖化ポテンシャル(Economic GWP)—、第11回エネルギーシステム・経済コンファレンス、エネルギー資源学会、1995年1月。

付録 限界費用の解析解の導出

ここでは、本文中で省略した式展開の詳細について示す。変数の定義については表3を参照されたい。

目的関数は、全計画期間における総エネルギー

システムコスト TC であり、それを時刻 t_1 のにおける濃度^(注1) 目標 M_1 のもとに、排出量経路 $E(t)$ を変化させて最小化することを考える。

$$\min. TC[E(t)] = \int_{t_0}^{t_1} C(t)[E(t)] e^{-\rho t} dt \quad (6)$$

$$\text{s.t. } M(t_1) = M_1 \quad (7)$$

ここで時刻 t のエネルギーシステムコスト $C(t)$ は排出経路 $E(t)$ の汎関数である。これを解くためには、Lagrange 乗数 λ を導入して、次の L を最小化すればよい。

$$L = TC[E(t)] - \lambda \cdot \{M(t_1) - M_1\} \quad (8)$$

ここで、便利のために大気中濃度を計画期間前 (M_a) と後 (M_b) の排出の寄与に分けておく。

$$M(t) = M_a(t) + M_b(t) \quad (9)$$

すると、

$$M_b(t_0) = 0 \quad (10)$$

$$M_b(t) = \int_{t_0}^{t_1} E(t') f(t_1 - t') dt' \quad (11)$$

となる。これを用いると、目標時刻における濃度の目標からのずれは以下のように表される。

$$\begin{aligned} M(t_1) - M_1 \\ = M_a(t_1) + \int_{t_0}^{t_1} E(t') f(t_1 - t') dt' - M_1 \end{aligned} \quad (12)$$

他方、限界排出削減費用 MC および割引率 r の定義式は

$$MC = -\frac{\delta TC}{\delta E(t)} \div \frac{\delta TC}{\delta C(t)} \quad (13)$$

$$\frac{\delta TC}{\delta C(t)} = e^{-\rho t} \quad (14)$$

である。以上の下に最小化問題を解くと、

(注1) 大気中の CO_2 蓄積量 (Gt-C) は、換算係数 0.471 (pmv/Gt-C) を用いて濃度に換算することができる。モデルでは蓄積量で記述しているが、文中では慣用に従って濃度という用語を用いることにした。

表3 変数の定義

変数名	単位	意味
MC	\$/t-C	限界排出削減費用
TC	\$	総エネルギーシステムコスト
$C(t)$	\$	時刻 t におけるエネルギーシステムコスト
$E(t)$	t-c	時刻 t における CO ₂ 排出量
$M(t)$	t-C	時刻 t における大気中 CO ₂ 蓄積量
$M_1(t)$	t-C	時刻 t の CO ₂ 蓄積量のうち、時刻 t_0 以前の排出の寄与分
$M_2(t)$	t-C	時刻 t の CO ₂ 蓄積量のうち、時刻 t_0 以降の排出の寄与分
r	1/yr	割引率
t_0		計画期間の初期時点
M_0	t-C	時刻 t_0 における CO ₂ 蓄積量
t_1	yr	CO ₂ 蓄積量目標の第1設定時点
M_1	t-C	時刻 t_1 における CO ₂ 蓄積量目標
t_2	yr	CO ₂ 蓄積量目標の第2設定時点
M_2	t-c	時刻 t_2 における CO ₂ 蓄積量目標
$f(t)$		時刻 $t=0$ に排出された CO ₂ が大気中に残存している割合
λ	\$/t-C	Lagrange 乗数

$$\frac{\delta L}{\delta E(t)} = \frac{\delta TC}{\delta E(t)} - \lambda f(t_1 - t) = 0 \quad (15)$$

が成立するから、限界費用 MC について解くと、

$$MC = -\frac{\delta TC}{\delta E(t)} e^{rt} \quad (16)$$

$$= -\lambda \cdot f(t_1 - t) e^{rt} \quad (17)$$

が成立する。

A.1 複数の濃度目標がある場合

異なる2時点で濃度目標を与える場合は、 MC は上記のような簡単な形では解けない。例えば目標時刻が2つある場合には、

$$MC = \{\lambda_1 \cdot f(t_1 - t) + \lambda_2 \cdot f(t_2 - t)\} e^{rt} \quad (18)$$

となる。 λ_1 と λ_2 は簡単な関係を持たないので、この和がどのような形になるかはそれぞれの目

標値の設定によって変わってくる。同様に、複数の時点で濃度目標を与える場合には、簡単な関数形で書くことはできない。これは目標が無制限個になった場合と考えられる濃度安定化目標、例えば2050年以降の濃度安定化、という場合についても同様で、簡単な関数形からは外れる。しかし、濃度安定化という目標を立てる場合には、少なくとも当面の排出抑制策を立案するためには最も早い時点における目標が最も重要であって、それ以降の目標は最適な限界費用経路にはさほどの影響を及ぼさないだろう。

A.2 Hotelling の定理との形式的類似性について

前節で扱った、濃度目標下での限界費用の時間経路の定式化については、Hotelling の定理との形式的類似性がある。まず、Hotelling の定理について記述する。

Hotelling の定理 資源量 R という制約、

$$\int_{t_0}^{t_1} x(t) dt = R \tag{19}$$

のもとで、収益 Π を最大化するように、各時点の採掘量 $x(t)$ を計画期間 t_0 から t_1 の間で最適化するような問題を考える。

$$\begin{aligned} \max. \Pi[x(t)] \\ = \int_{t_0}^{t_1} x(t)p(t) \exp(-rt) dt \end{aligned} \tag{20}$$

但し $p(t)$ は資源価格、 r は割引率である。

この問題は、ラグランジアン L を、未定乗数 λ を用いて構成し、解くことができる。

$$L = \Pi - \lambda \left(\int_{t_0}^{t_1} x dt - R \right) \tag{21}$$

$$\frac{\delta L}{\delta x(t)} = pe^{-rt} - \lambda = 0 \tag{22}$$

$$\Rightarrow p = \lambda e^{rt} \tag{23}$$

従って、資源価格は計画期間を通じて割引率で上昇することになる。

類似性 Hotelling 定理に表される枯渇性資源の最適利用経路問題と、本稿で取り上げた濃度制約下の最適排出経路問題の間には、表4に示す

表4 Hotelling の定理との対比

Hotelling の定理		濃度制約下での限界費用	
最大化	Max.	最小化	Min.
収益	Π	総コスト	TC
資源産出量	x	排出量	E
資源価格	p	限界費用	MC
資源量	R	蓄積量	MI

ような変数の対応関係が成立する。両者間の差異としては、次の2点が指摘される。

- (1) 制約式における応答関数 $f(t)$ の有無。濃度制約問題ではこの項が存在するために、解も単純な指数関数上昇から外れる。
- (2) 目的関数における、 $x(t)p(t)$ と $C(t)[E(t)]$ という関数形の違い。仮に、時点 t におけるコスト $C(t)$ が排出経路 $E(t)$ の汎関数でなく、単純に時点 t のみの排出量 $E(t)$ の関数ならば、類似性はより強まる。

(すぎやま たいし
エネルギーシステムグループ
ながの こうじ
エネルギーシステムグループ)