

表1 大気中CO₂濃度倍増時の米国の温暖化損害コストの評価例
(Fankhauser⁵⁾による, 単位10億ドル: 1988年価格)

	Fankhauser(1993)	Cline(1992) ^a	Nordhaus(1991) ^a
Coastal defense	0.2	1.0	7.5
Dryland loss	2.1	1.5	3.2 ^b
Wetland loss	5.6	3.6	e
Species loss	6.4	3.5	e
Agriculture	7.4	15.2	1.0
Forestry	-1.8	2.9	small
Fishery	-	-	small
Energy ^c	-	9.0	1.0
Water	13.7	6.1	e
Other sectors	-	1.5 ^d	e
Amenity ^c	6.8	-	e
Life/morbidity	16.6	>5.0	e
Air pollution	6.4	>3.0	e
Migration	0.5	0.4	e
Natural hazards	0.2	0.7	e
Total	64.1	53.5	48.6
(% GNP, 1988)	(1.3)	(1.1)	(1.0)

注:

- a 1988年価格に換算。 b 土地損失の総額 (dryland と wetland の合計)。
c Fankhauser⁵⁾ではAmenity, Cline⁴⁾及びNordhaus³⁾ではEnergyと分類しているが、ともに冷暖房費を評価しており対応関係にある。
d 旅行。 e 評価せず。全体でGNPの0.75%と想定。

表2 世界地域別の温暖化損害コスト評価 (Fankhauser⁵⁾による, 単位10億ドル)

	EC	USA	Former USSR	CHINA	OECD	World
Coastal defense	0.1	0.2	0.0	0.0	0.5	1.1
Dryland loss	0.3	2.1	1.2	0.0	8.1	14.0
Wetland loss	4.9	5.6	1.2	0.6	15.9	31.6
Species loss	7.1	6.4	2.6	1.5	17.3	28.2
Agriculture	9.7	7.4	6.2	7.8	23.1	39.1
Forestry	-4.1	-1.8	-2.9	1.1	-10.0	-10.8
Fishery ^a	-	-	-	-	-	-
Energy	-	-	-	-	-	-
Water	14.1	13.7	3.0	1.6	34.8	46.7
Other sectors	?	?	?	?	?	?
Amenity	7.0	6.8	-0.7	0.7	20.1	23.1
Life/morbidity ^b	22.0	16.6	3.9	7.3	57.3	89.3
Air pollution	3.5	6.4	2.1	0.2	11.9	15.4
Migration	1.0	0.5	0.2	0.6	2.0	4.3
Natural hazards ^c	0.0	0.2	0.0	0.2	1.1	3.2
Toral	65.6	64.1	16.8	21.6	182.1	285.2
(% GNP, 1988)	(1.5)	(1.3)	(0.7)	(6.1)	(1.4)	(1.5)

注: 負の値は便益(負のコスト)を表す。

- a 漁業損失は湿地損失に含まれる。 b 致死損害のみ評価。 c 台風損害のみ評価。

3者はともに、CO₂濃度が産業革命前の2倍(560 ppm)の水準に達した場合のアメリカ合衆国における損害を、多数の損害要因の積み上げ評価によりそれぞれ求めている(表-1)。3つの事例の個々の項目の値はかなりばらつきが大きい、損害の総額がGNPの1~1.3%程度であるという点では概ね一致を見ている

点は興味深い。

これら3つの事例がともに強調している点は、これらの値は概数評価(Order Estimate)であって、その絶対値にさほどの意味は無いということである。誤差が生じる要因としては、1) 損害コストの経済的波及効果について考慮しないこと、2) 定常状態に於け

る計算であり、過渡的応答は考慮していないこと、および3)情報の不足により、任意性の高い仮定を用いる場合があること、などが挙げられ、Fankhauserは結果には少なくとも50%の誤差が見込まれるとしている。

さらにFankhauserは、全世界を対象に、5地域に分けた積み上げ評価も行っており(表2)、温暖化損害の地域依存性を定量的に記述した。この地域依存性が生じる原因としては、1)支払意志額の所得依存性、2)産業構造の違い、3)気候変動影響の地域ごとの特性、の3つが挙げられる。特に途上国はその損害コストが高く、GNP比にして先進国の数倍に達し得ると考えられている。

たとえば中国ではGDP損失が6.1%と大きくなっているが、このような損害が想定される理由の一つは、気候変動の影響を受け易い農業部門がGDPの約1/3という大きな割合を占めることであって、これは例えばアメリカ合衆国の農業部門比率が2%であることと対照的である。一方で寒冷な旧ソ連地域では温暖化によって受ける利益が大きく、損害をかなり相殺していることが林業部門などから窺える。また死亡や疾病が起きた場合、それに支払い意志額(WTP)をかけることでコスト換算を行うが、一般にWTPは所得レベルに比例するため先進国で疾病死亡コストが高く評価されることになる。

地域格差に関連するこの評価についての留意点として、表2の評価は1988年時点の所得水準および産業構造に基づいたものであり、温暖化損害が顕在化すると見られる2050年ないし2100年頃には、特に途上地域に対する評価結果が大きく変わる可能性があることである。全般的な傾向としては、途上地域の今後の経済発展に伴って、農業部門の相対比率減少およびWTPの上昇が起こるために、先進地域と途上地域の損害のGNP比で見た格差は縮小に向かうと考えられる。

このような積み上げ計算は、方法論が進歩し多大な労力が投入されれば、その不確実性は縮小されるであろうか?残念ながら、如何に進歩が見られても、科学的知見の限界もさることながら、環境、人命や疾病の価値といった半ば主観的要素が入り込む以上、万人が納得する形でのコスト評価は得られそうにない。また仮にこれら主観的要素についての方法論を一つに固定させて試算ができたとしても、それは依然として概数評価に留まり、大きな誤差範囲は半永久的につきまとうであろう。しかしながら損害コスト評価を行う努力

をつづけ、その概算値を知っておくことは、経済合理的な政策策定を行なうために重要であり、またその不確実性の大きさについてもコストの次元で定量化できれば、それも貴重な指標となるだろう。

3. 単位排出量あたりの温暖化損害評価²⁾

前節の積み上げ評価を受けての次の興味は、仮に損害コストがGNPの1%程度になるとすれば、現在の単位排出量あたりの温暖化損害はどの程度の金額になるかということである。この場合、以下のような問題点が新たに生じてくる:

(a)温暖化損害コストの外挿

先の損害評価はCO₂濃度倍増という一点のみを扱ったが、他のCO₂濃度の点においてはどのような値が見込まれるであろうか。

まず損害コストには、全球平均気温に対して非線形性があると考えられている。つまり3°C程度の温度上昇では、農林業生産などはむしろ増加する可能性もあるために、損害は比較的小さいかもしれないが、CO₂濃度がさらに上昇を続け、10°Cないし15°Cといったより大きな温度上昇に直面した場合の損害はカタストロフィックなものとなり、単純に3°C上昇の場合の損害を線形に外挿して得られるものよりもはるかに大きいであろう。

以上の事情を反映するために最もよく行われる方法は、次式のように損害コストが全球平均温度上昇に関してべき関数で表されるとするものである。べき指数は通常2次程度に任意にとられる:

$$d = d_0 (T/3)^2$$

d:損害コスト,

d₀:3°C上昇時の損害コスト,

T:全球平均温度上昇で,

産業革命前との差で測る。

またこの場合全球平均気温の値だけでなく、その上昇速度(もっと正確には気候変動の進行速度)が重要であることが知られている。上記のCO₂濃度倍増時の試算は、平衡状態についての計算であって過渡応答を考慮していない。

森田³⁾によれば温室効果ガスの排出量の増加が続いた場合、人類は今後数百年の間に、過去数百万年の間経験したことのない速さで進行する気温上昇に直面することになる。この場合の損害コストの値は平衡状態計算によって得られるものとは全く様相が異なる可能性がある。たとえば農林業について平衡状態計算を行

えば、温暖化の進行につれて植生分布が赤道側から両極方向へと移動し、両極周辺では便益をうけることになるが、過渡応答を正しく考慮すれば、植生の移動速度は遅いために温暖化の進行に追従できず、実際には便益的にはなり得ないとする指摘がある。

(b) 温室効果ガス排出シナリオの設定

損害コストについては、それがどのような将来排出シナリオを用いて算出されたものであるか、という点で注意が必要である。なぜなら現在の温室効果ガス排出による損害コストは、将来の温室効果ガス排出シナリオに決定的に依存するためである。例えば、仮に来年から一切の温室効果ガスの排出を停止したとすると、大気中の温室効果ガス濃度はただちに減少を始め、産業革命前の水準にもどるだろう。このとき温暖化損害は発生しないから、今年の温室効果ガス排出による損害コストもゼロである。一方で、今後も化石燃料を大量燃焼し続けると、将来時点で温暖化損害が発生し、今年の温室効果ガス排出に起因する損害コストもかなりの値を持つであろう。

(c) 割引率の設定

CO₂排出損害コスト評価は割引率の設定に大きく影響される。50年後の100円の損失の現在価値は、割引率1%なら61円であるが、割引率10%のもとでは0.85円になってしまう。従って割引率の設定は損害コストの現在価値に対して1桁ないし数桁の影響を及ぼし得る。これについてはのち第7に改めて詳しく述べることにする。

以上のような問題点を踏まえつつ、杉山ら⁷⁾は温室効果ガス損害評価のための世界1地域モデルを開発し、現時点に於けるCO₂排出損害コストを算出した。

モデルの詳細については文献にゆずり、ここでは簡単に要点のみを述べる。このモデルでは、IPCCによる1992年発表の経済/排出シナリオのうち、高排出シナリオ(IS92eシナリオ)から低排出シナリオ(IS92c)に渡って、対数型効用関数およびゼロの純粋時間選好率を仮定して損害コストを計算した。この場合、割引率は経済成長率に等しくなる。また損害関数としては式(1)に類似のものを用い、損害コストのべき指数は1から3とした。CO₂排出から濃度および温度上昇については、簡略化されたモデルを用い、放射強制力の濃度依存性はIPCCレポートに従った。

この試算の結果によると、現時点における1単位のCO₂排出による将来にわたる損害コストの総和の現在

価値は、40\$/t-Cないし160\$/t-Cとなった。この幅は排出シナリオの仮定および温暖化損害の温度依存性に対する仮定によるものであり、他の要素による幅は含んでいない。ただしこの値は上述のような一連の条件設定に基づくものであり、なお大きな不確実性が伴うことを認識する必要がある。例えばNordhausが行っているように純粋時間選好率(効用割引率)を3%に設定すると、同じモデルから7\$/tという低い値も得られる。しかし超長期にわたる規範的モデルについて純粋時間選好率を3%という高い値に設定することには、世代間公平の観点からの批判があり、この試算においてもこの立場を採用して、中央値の評価時には純粋時間選好率を0%とおいている。

4. CO₂排出抑制対策コスト

この節では、地球温暖化が顕在化した際の損害額に対比して、地球温暖化の主因となるCO₂等の排出量を抑制し、あるいは排出されたCO₂を回収処分する場合の対策コストを考えてみる。

排出削減対策としては、省エネルギー等のようにコストがかからないかもしくは利益をもたらす(負のコスト)のものから、火力発電所の排ガスからのCO₂回収等、多額の費用を要するものまで多岐にわたる。本藤ら⁸⁾の評価によれば、火力発電所の排ガスからの90%脱炭及び海洋貯留に伴う費用は、炭素1トン回収あたり36,000~69,000円程度に上る。

また、排ガス脱炭等のように直接に排出削減を行う対策の他に、炭素税や課徴金等の価格シグナルにより排出低減を誘導する施策がある。永田ら⁹⁾の評価では、わが国経済において炭素排出課徴金のみにより2005年までの炭素排出量を1988年レベルに安定化するために、2005年時点での課徴金率としては64,000円/t-Cが必要とされ、これは上記の発電所排ガス脱炭のコストと同程度である。その際の2005年時点でのGNPの低下は、約6%に上るといふ。これは3節に紹介した損害コスト評価を上回る額であり、ここでの一連の仮想的条件設定を認めるならば、これら高額な排出抑制政策を採択することは合理的でない。仮に採択するのであれば、それは暗に温暖化損害をさらに高めに想定したことを意味する。

いずれにしろ、以上のように大規模な排出抑制対策として現時点までに明らかになっているものが高コストであることから、損害コストを評価しバランスの良い政策を選択することの重要性が改めて認識される。

5. 地球温暖化損害を取り入れた費用便益分析

損害コストと対策コストについての評価が得られれば、次のステップは、双方の和を最小化する最も経済効果的な温室効果ガス排出抑制レベルを求めることである。これはNordhaus¹⁰⁾によって、最適化モデルDICEを用いてCO₂排出抑制の費用便益分析という形ではじめて実施された。

驚くべきことに、その結果は温室効果ガス排出抑制の実施に否定的であり、今後起こるであろう温度上昇は基本的には放置するべきであると主張した。すなわち彼の最適解においては、評価期間である2100年までに大気中CO₂濃度が現在の約2倍に達し、またこのときのCO₂排出量のShadow Price（排出量を1単位削減したときの総費用の変化で、おおむね炭素税率に相当する。）は\$5/tないし\$20/t程度と低く、これより高価な排出抑制対策の実施は正当性がないとした。この結果は、IPCCの「CO₂濃度安定化」という目標と全く相反している。

この結果はNordhausが同モデルを非常に分かりやすい形で公開したこともあって反響をよんだが、Cline¹¹⁾はこれに反論して、Nordhausが3%としている効用割引率（純粋時間選好率）を0%に変更して試算を行えば、濃度安定化というIPCCの目標は正当化されることを、同じモデルを使って示し、割引率の選択の問題が温暖化問題における最も重要な論点の一つであることを改めて提示した。しかしClineはこうしたモデル分析について、損害の非線形性などの仮定条件に不確実性が大きいので、現時点で最適化計算から政策的数量目標を読みとることは危険であって、「最大限の温暖化抑制努力を払わねばならない」との結論に止めるべきだとしている。

6. 政策への反映

(a) 損害コスト評価から排出抑制政策への道筋

CO₂濃度倍増時にGNPの1%程度の損害コストが見込まれる、と仮定して行った費用分析では、現時点におけるCO₂排出による損害コストは\$40/tないし\$160/tであり、割引率の選択によってはこの1/10程度になることを見てきた。もしも本当にこの程度の損害コストしか発生しないならば、温暖化問題対処のために現行の電源構成を大きく変更したり、発電所からのCO₂回収処分などを行ったりする必要性はあまり考えられない。

しかしClineも指摘しているように、以上の損害コスト評価は概算である上に、破局的な事象の発生リスクも適切に考慮されているとは言えないなどの数々の不備があるため、これらの完全とは言い難い費用便益分析から得られる「解」が、そのまま政策に用いられることは望ましくない。このことは損害コスト評価の意義を減じるものでは決して無いが、政策決定にあたってはこれらの評価結果の中心値を用いるだけでなく、その不確実性が高いことを考慮して、リスク回避の観点から総合的な評価を行うことが重要である。

(b) 異なる温室効果ガスによる温暖化影響力の比較¹²⁾

損害コスト評価の応用として、ここでは異なる温室効果ガスに対する対策コスト配分の問題を考察する。損害コスト評価には大きな不確実性が内包されているが、ここで一つ重要なことは、不確実性の存在を考慮してもなお成立する結論を抽出することである。

温室効果ガスにはCO₂、メタン、N₂O、フロンなどさまざまなものがあり、IPCCではそれらのガスの温室効果の相対的強さを地球温暖化ポテンシャル(Global Warming Potential, 以下GWP)として発表している。

1994年のIPCC報告によると、メタンガスのGWPは、放射強制力の積分期間nを20年としたとき62、n=100年のとき24.5、n=500年のとき7.5となっている。GWPが1より大きいことは、単位質量当たりの温室効果がメタンの方がCO₂より大きいことをしめしており、またメタンのGWPが時間とともに減少していくことは、大気中でのメタンの寿命(14.5年)がCO₂(約120年)より短いため、長い時間範囲で比較するほどメタンの温室効果はCO₂のそれに近づいてゆくことを示している。

GWPは、見方を変えれば、異なる温室効果ガスの交換レートであって、例えばCO₂排出に対して課税をするならば、他のガスにはその税率にGWPをかけた税率を適用することがコスト効果的である。しかしながらここで問題となるのは、提示されている3つ(n=20, 100, 500年)のGWPのうちどれを用いるべきであるか（あるいは他の指標を用いるか）、ということであり、これについてはIPCCは回答を与えていない。例えば上述のようにメタンガスのGWPはnの値に大きく依存するから、これは深刻な問題である。

ここで経済学的な観点から正しい手続きと考えられるのは、個別のガスによる損害コストを各々算出して、その比を交換レートとして用いることである。これに

よって n の選択の任意性の問題も同時に取り除かれる。杉山ら⁷⁾はこの考えに沿って「経済的温暖化ポテンシャル(Economic GWP, EGWP)」を異なるガス間の損害コストの比として定義してモデル計算を行った。

結果として、損害コストを比較すると、さまざまな不確実性を考慮しても、CO₂と比較したメタンの温室効果はさほど大きくなく、さきの3つのGWPのうちの何れかを用いるとすれば、 $n=100$ の場合のないしは500の場合の値を用いるべきであって、 $n=20$ におけるGWPを使用するとメタンの温室効果の過大評価にあたるのが分かった。

より正確には次のように説明できる：まず、メタンは寿命が14.5年と短く今後30-40年で現在の排出分は殆ど分解されてしまうが、このときCO₂(寿命約120年)の現在排出分はその後も相当程度残留していることに注意する。このとき、温度は上昇を続け21世紀末には3℃程度上昇するが、温暖化損害は温度について非線形であるため、単位ガス量当たりの損害は後の時刻になるほど大きくなる。すると、短命なメタンは単位濃度当たりの損害が少ない早い時期しか存在しないため、その損害の積分値は小さくなり、従ってEGWPも低くなる。

地球温暖化問題の本質的な点の1つは、その時定数が100年、200年といったように大きく、それ故実質的に気候変動は不可逆で、ひとたび問題が顕在化してから対策を打ったのでは手遅れになる可能性が大きいということである。すると最も憂慮すべきはCO₂などの長期に渡って影響を及ぼすガスであり、比較的短時間に自然に分解されるCH₄については緊急の排出抑制は要さず、問題が顕在化し始めてから対策を講じればよい。従ってその金銭的評価はCO₂やN₂Oと比較して低めになる。

もちろんこの解析も現在の科学的知見の制約を受けているし、またモデリングによって複雑な現象を単純化しているため、今後この結論が覆る可能性も無いとは言えない。しかし科学的知見から政策策定への橋渡しとして、このような考察が一定の役割を果たすことができるだろう。

7. 割引率の選択について

温室効果ガス排出による損害コストは、それが超長期に渡って発生するものであるために、割引率の設定に大きく影響されることは、3節でも触れた。割引率の選択は損害コストの現在価値に対して1桁ないし数

桁の影響を及ぼし得るため、温暖化損害コスト評価においては政策策定において決定的な重要性を持つ。しかし残念なことに、割引率の設定については古くから論争がありながら決着はついておらず、温暖化問題をきっかけに議論が再燃しているが、未だ解決したとは言えない。

地球温暖化における割引率の選択についての詳細は文献に譲り、ここでは簡単に要点を述べるに止める。超長期の費用便益分析においてその一人あたり消費を割り引く根拠としてよく挙げられるものには2つあり、純粹時間選好(または効用割引率)と限界効用通減である。このうち前者は単に将来であるという理由で割り引くものであり、現実の個人の行動を記述するときには確かに存在するが、これを規範的に環境外部性を内部化するときに持ち込むことは、世代間公平の観点から大いに疑問の余地がある。また後者は将来世代が現在世代よりも経済成長によって豊かになっているとすれば、現在世代よりも多くの費用負担能力を持つというものであるが、どの程度豊かになるのかの予測が困難であることもさりながら、豊かになったらどの程度支払いを増やすべきか(累進税率の設定のようなものと考えて頂きたい)、という価値判断を必要とする。またこの場合現在と将来の間の所得格差だけでなく、現在世界における所得格差との整合性を考慮する必要もあるだろう。

8. おわりに

地球気象のモデル化等の科学的知見の整備は現在積極的に進められており、今後かなりの進歩が見込まれるだろう。しかし問題が極めて複雑であることから、その損害について詳しい描像を得ることは今後数十年ではまず不可能であると思われる。このことから損害コスト評価についても今後本質的な改善というものはあまり望めず、大きな誤差範囲というものは半永久的につきまとうと予想される。

しかし、例え情報が不足していても、我々は完全な情報を得るまで待つことは許されず、有限の時間で何かしらの政策決定を下さなければならない。本稿でのべた温暖化に関わる一連の対策/損害コスト評価は、このような政策決定のための重要な道具として活用できるだろう。

文 献

- 1) 長野, 杉山 地球温暖化の被害/対策コストの定量化と

- 内部化について, 電力経済研究 No.33 (1994), p.10.
- 2) 杉山, 長野, 谷口 地球温暖化によるグローバル損害コスト評価の現状, 電力中央研究所調査報告 Y94012(1995).
 - 3) Nordhaus, W.D., "To Slow or Not To Slow : The Economics of Greenhouse Effect," Economic Journal, Vol. 101, No.407(1991), pp.920-937.
 - 4) Cline, W.R., The Economics of Global Warming(1992), Institute for International Economics, Washington, D.C.
 - 5) Fankhauser, S., "The Economic Costs of Global Warming : Some Monetary Estimates" in Y. Kaya et al. (ed.), "Costs, Impacts and Benefits of CO₂ Mitigation," IIA SA Collaborative Paper No.CP-93-2 (1993), IIASA, Austria.
 - 6) 森田恒幸, 地球環境保全のための政策研究の新展開 - 環境経済学を中心にして -, 計画行政 16(2)(1993).
 - 7) 杉山, 山地, Liu 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(1995), エネルギー資源学会.
 - 8) 本藤, 内山, 「火力発電所の環境対策コスト分析」, 電力中央研究所研究報告No.Y92009(1993).
 - 9) 永田, 山地, 桜井, 「課徴金によるCO₂抑制効果と経済的影響の分析」, 電力中央研究所研究報告No.Y91002(1991).
 - 10) Nordhaus, W.D., Managing the Global Commons : The Economics of Climate Change (1994), The MIT Press.
 - 11) Cline, W.R., Optimal Carbon Emissions over Time : Experiments with the Nordhaus DICE Model(1992), Institute for International Economics.

協賛行事ごあんない

「第3回『環境と化学』講演会

—自然エネルギーと地球環境—について

〔主 催〕 日本学術会議化学研究連絡委員会
 〔共 催〕 安全工学協会, 化学工学会 (幹事学会) 他
 〔協 賛〕 環境科学会, 日本水環境学会 他
 〔日 時〕 平成7年11月27日(日)・28日(火)
 〔会 場〕 日本学術会議講堂
 (東京都港区六本木7-22-34,
 TEL 03-3403-6291)

〔プログラム〕

- 第1日 (11月27日(月)13:20~17:25)
- * 特別講演「自然エネルギーと地球環境」
(慶應義塾大学教授 茅 陽一)
 - * 講演(1)「生物的炭酸固定と資源エネルギー問題」
(東京大学助教授 五十嵐泰夫)
 - * 講演(2)「森林・砂漠とエネルギー」
(成蹊大学教授 小島 紀徳)
 - * 講演(3)「海洋化学と地球環境」
(北海道大学教授 角皆 静男)
 - * 講演(4)「自然エネルギー利用のための材料と技術」
(東京工業大学教授 中野 義夫)

- 第2日 (11月28日(火)10:00~17:00)
- * 講演(5)「地熱エネルギー開発利用とその環境負荷」
(地質調査所課長 玉生 志郎)
 - * 講演(6)「紫外線の健康影響」
(国立衛生試験所室長 木嶋 敬二)
 - * 講演(7)「光触媒と環境」
(大阪府立大学教授 安保 正一)
 - * 講演(8)「太陽電池材料の進歩」
(三洋電機㈱室長 田中 誠)
 - * 講演(9)「エネルギー貯蔵のための材料」
(横浜国立大学教授 田川 博章)
 - * 講演(10)「自然エネルギー利用システム」
(東京大学教授 山田 興一)
- * パネルディスカッション
 「地球環境に役立つ自然エネルギー」
- 〔参加費〕 無料 (ただし, 資料代5,000円)
 〔申込締切〕 11月22日(水)
 〔申込先〕 〒112 東京都文京区小日向4-6-19
 ㈱化学工学会事務局「環境と化学」講演会係
 TEL 03-3943-3527 FAX 03-3943-3530