

植林を組み合わせた国際的排出権市場によるCO₂抑制

CO₂ Emission Control by the International Tradeable Permits
with Afforestation

キーワード：地球温暖化，CO₂ 排出権市場，課徴金，植林

岡田 健 司

1. CO₂ 抑制方策としての経済的手段

地球温暖化防止方策としてCO₂ 排出抑制が国際的な緊急課題となっている。しかし、温暖化現象のメカニズムや影響の度合いについては、不確実な部分が多く、国際的な共同政策を取るまでには至っていない。しかし、温暖化の影響が明確に現れてからでは手遅れになりかねない。環境影響への可能性が高い限り、温室効果ガスの排出を抑制する努力がなされるべきである。

このような観点から、ノルウェーやオランダなどでは炭素税が導入され、日本でも地球温暖化防止計画が策定されるなど、具体的な対策が取られている。炭素税の削減効果とコスト評価など、CO₂ 抑制方策の研究も最近数多く報告されている。しかし、これらの研究の多くは、ある特定の地域もしくは国を対象としたもので、将来経済の発展が予想される発展途上地域との連携・協力による世界全体でのCO₂ 抑制方策の研究は未だ少ない。

電力中央研究所では、グローバルなCO₂ 排出抑制方策の可能性を追求する観点からCO₂ 排出権市場に関する研究に取り組んでいる。この排出権市場は、CO₂ 削減効率と責任分担の

公平さの双方を追求できる制度として提案されている。当所では、世界のCO₂ 政策解析によく用いられているエドモンド・ライリーモデル^[1]を改良し、排出権市場についてモデルシミュレーションを行っている^{[3][4]}。

本稿では、植林を組み合わせた国際的CO₂ 排出権市場のシミュレーション解析の概要を紹介する^[5]。

2. CO₂ 排出権市場のモデル

2.1 排出権の初期割当

グローバルなCO₂ 排出権市場では、科学的知見に基づき求められた世界全体のCO₂ 排出総量を、如何に各地域または各国へ排出権として割り当てるかが、極めて重要な問題となる。本研究では、一人当たり等しい権利を持つと仮定して、人口比例で各地域に割り当てる。

2.2 課徴金と排出権取引との組み合わせ

CO₂ 排出実績に対して初期割当 CQ_m [Mt-C: 炭素換算百万トン] が少ない地域 m は、その超過分を自らの努力により排出量を削減するか、市場より排出権を購入する必要がある。ここで、自らの努力で排出量を削減する手段として各地域ではCO₂ 課徴金を採用するものと仮定する。この場合、課徴金 t_m [\$/t-C] に対す

る当該地域 m の CO₂ 排出量 $CE_m(t_m)$ [Mt-C], 市場からの排出権購入量 CP_m [Mt-C] との間には, 次式のような関係が成り立たなければならない。

$$CE_m(t_m) = CQ_m + CP_m \quad (1)$$

このように, 市場から排出権を購入する地域を排出権輸入地域, 一方, 初期排出権割当量が CO₂ 排出量を上回り余剰となる排出権を市場に放出できる地域を排出権輸出地域と呼ぶものとする。

排出権輸入地域 m は, 課徴金収入を財源として市場から排出権を購入するものと仮定すると, 課徴金, CO₂ 排出量さらに排出権購入量の間には, 以下のような関係式が成り立つ。

$$CE_m(t_m) \cdot t_m = CP_m \cdot P \quad (2)$$

ここで P は排出権価格 [\$/t-C] である。この価格は, 排出権の総放出量と, 総購入量が一致した需給均衡価格である。

また, 排出権輸出地域 n は, 排出権を市場に放出することで次式の売却収入 RE_n を得ることができる。

$$RE_n = (CQ_n - CE_n) \cdot P \quad (3)$$

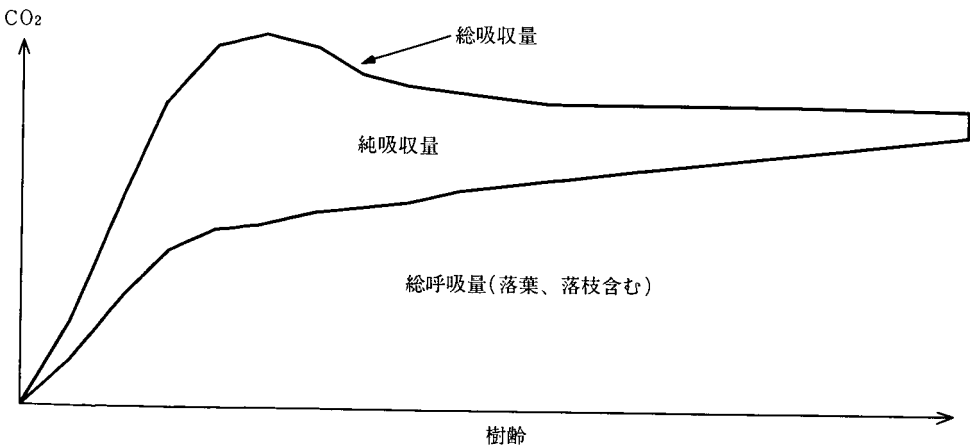


図 1 植林による CO₂ 吸収量の概念

3. CO₂ 吸収オプションの導入

このような課徴金や排出権市場などの経済メカニズムを利用した抑制方策に加えて, CO₂ 回収・固定の技術開発への期待も大きい。しかし, 関連設備のコスト制約と回収した CO₂ の管理・処分など, 解決すべき問題が数多く残されている。現時点で最も有効な CO₂ 吸収・固定手段は, 植物の光合成によるものであろう。本研究では, 経済的手段に, 植林という CO₂ 吸収オプションを組み合わせた。

3.1 CO₂ 吸収オプションのモデル化

世界全体での究極的な植林可能面積は, 約 8 億 ha あると推定されている^[2]。この面積を, エドモンド・ライリーモデルで定義されている地域分割 (世界 9 分割) に対応させると表 1 のようになり, その値を各地域の植林面積制約 (究極的植林面積) とする。さらに, 労働力, 諸関連設備等の制約を参考にして, 年間植林面積にも制約を設定した。

一般に, 樹木が固定する純 CO₂ 吸収量 (総吸収量 - 総呼吸量。ただし, 落ち葉, 落ち枝の分解により発生する CO₂ も含む) は, その植

表 1 各地域の植林可能面積と炭素吸収率

地 域	現実的可能面積 [Mha]	究極的可能面積 [Mha]	年間平均 CO ₂ 吸収率 [t-C/ha/年]
アメリカ	11.3	45.0	5.9
OECD ヨーロッパ	26.0	104.0	3.6
OECD パシフィック	13.3	53.0	5.9
計画経済圏ヨーロッパ	30.5	122.0	3.6
計画経済圏アジア	21.5	86.0	5.9
中 東	0.8	3.0	5.4
アフリカ	19.0	76.0	9.9
ラテンアメリカ	30.2	121.0	9.9
東南アジア	49.2	197.0	9.9
世界計	201.8	807.0	

生によって異なるものの、図 1 に示すように植林直後は少なく、その後急速に増加した後、一定のピークに達した後は、次第に減少する。この吸収作用は、数年から数十年に渡り続く。本研究では、この吸収作用年数を全地域一律に、シミュレーションの 1 期間の年数 25 年とし、1 期間中の植林による CO₂ 吸収量の総量が、同期間に均等に配分されるものと仮定した。ここでは、表 1 に示すように地域毎に単位面積当たりの年間 CO₂ 吸収率を設定している。

また、本研究では、事例調査から吸収炭素量当たりに換算した地域別植林コストを設定した。ただし、ここでの植林は、常にコスト条件の良い場所から実施されるものと仮定し、未利用面積にほぼ相当する究極的な植林可能面積の 25%（現実的可能面積）までは、比較的緩やかに増加し、その後コスト増加率が倍増するものとした。

3.2 排出権市場への吸収オプションの導入

植林による CO₂ 吸収量を考慮すると、排出量、初期割当量、購入量、吸収量との関係は、(1) 式より、次式ようになる。

$$CE_m(t_m) = CQ_m + CP_m + CW_m \quad (4)$$

ここで、CW_m は地域 m の植林による CO₂ 吸収量 [Mt-C] である。

また、排出権輸入地域 m は、課徴金収入を財源として、排出権の購入と、植林の導入を行うものとする、(2) 式は次式のように拡張される。

$$CE_m(t_m) \cdot t_m = CP_m \cdot P + CW_m \cdot PW_m \quad (5)$$

ここで、PW_m は、地域 m の吸収炭素量当たりに換算した植林単価 [\$/t-C] である。

一方、排出権輸出地域 n でも、排出権の売却収入を財源として植林を行うとすると、次式のような関係が成り立つ。

$$(CQ_n - (CE_n - CW_n)) \cdot P \geq CW_n \cdot PW_n \quad (6)$$

また、もともと CO₂ 排出量が初期割当を上回っていた排出権輸入地域でも、植林による CO₂ の吸収により、割当量の余剰分が生じて、かつ (6) 式を満たせば、輸出地域として排出権を市場に供給する。

3.3 植林導入規模の決定

各地域の植林導入規模の決定は、植林コストと排出権価格の比較により行われる。まず、年間面積上限で 1 期 25 年間植林を行う時の、当該期中の平均植林コスト（吸収炭素量当たりに換算）を算出する。この平均植林コストとその時の排出権価格を比較し、平均コストが排出権

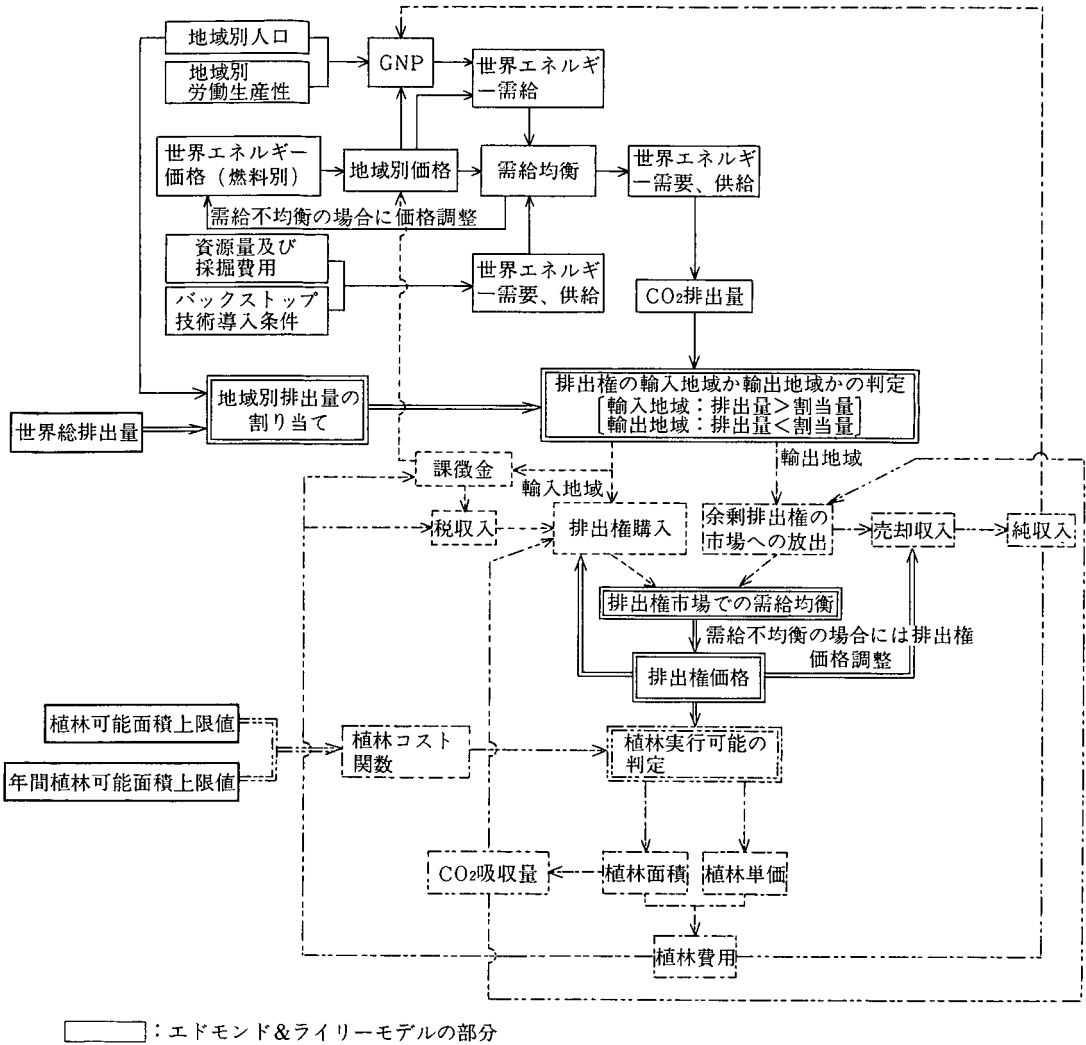


図 2 モデルフロー

価格よりも高い場合は、排出権価格をその期の植林コストとする。植林コスト関数から、この変更されたコストに対応する植林面積と CO₂ 吸収量を算出し直す。

一方、平均植林コストが排出権価格よりも安ければ、そのまま、CO₂ 吸収量を求める。ただし、排出権価格が、最小植林コスト以下の場合、植林を行わないものとする。

また、図 2 は、エドモンド・ライリーモデルを含めた、本シミュレーションモデルフロー図

である。

3.4 排出権市場の需給均衡

各地域間で市場を通して排出権取引が行われるが、市場内では排出権の需給均衡が保たなければならない。

例えば、図 3 は、2000 年で世界全体の CO₂ 総排出規制を 60 億 t-C としたときの、排出権需給曲線と植林による吸収量を示したものである。

図中の曲線 A は、排出権の総需要量（購入

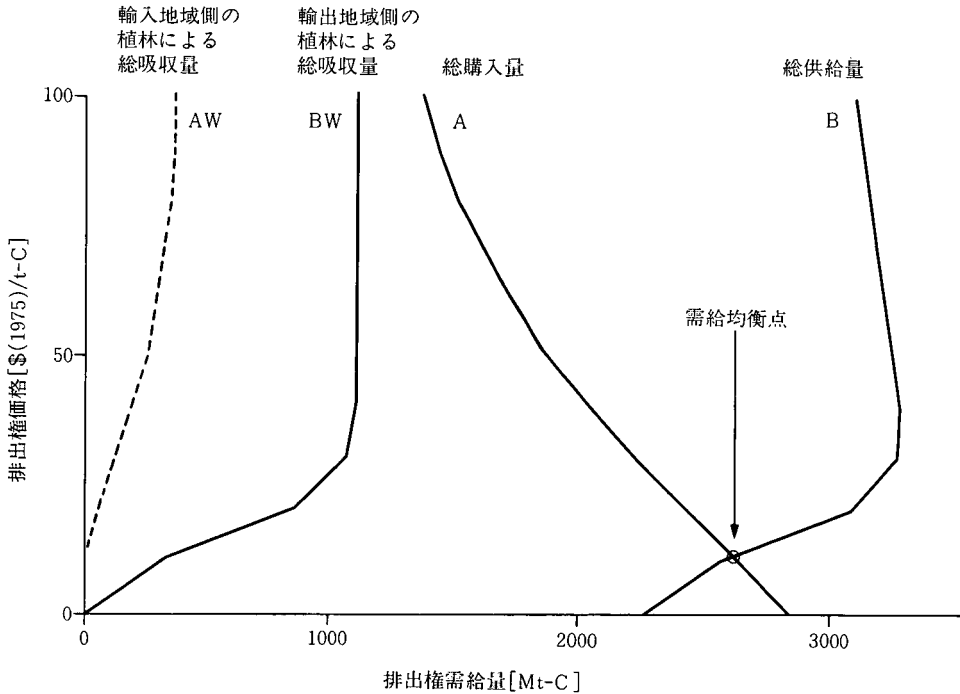


図 3 排出権需給曲線
(2000年, 総排出規制 60 億 t-C)

量)で曲線 B は総供給量(放出量)である。曲線 AW は、排出権輸入地域での植林による総 CO₂ 吸収量、BW は輸出地域での総吸収量である。また、図中の曲線 A と曲線 B との交点が、市場での需給均衡点を示している。

図 3 のケースでは、東南アジアなどの植林コストの安い途上地域が、排出権輸出地域となる。これらの地域では、排出権の価格水準が低い段階から、植林導入が行われる。しかし、排出権の価格がある水準以上になると、年間植林上限制約により、吸収量は一定量となる。

植林により、排出権価格水準と市場での排出権の総需給量の間には非線形的な関係があるものの、市場内で排出権価格水準が低いと排出権が不足し、逆に価格水準が高すぎると排出権が余るといふ、通常の需給調整機能が働いていることが確認された。

4. シミュレーション結果と考察

2000 年で、世界の CO₂ 総排出量を 50 億 t-C に規制すると仮定した時の、排出権市場の需給均衡点での、排出権の取引量と価格、さらに各地域の課徴金レベルと植林による吸収量を示したのが図 4 である。この時の排出権の初期割当は、2000 年人口で比例配分している。この図から、東南アジア、アフリカ、ラテンアメリカ、計画経済圏アジアの 4 地域が、排出権輸出地域、その外の地域が輸入地域となり、市場で 2,539 Mt-C の排出権が取り引きされている。輸出側では、東南アジアが、総輸出量の約 65% に近い 1,638 Mt-C を市場に供給し、総輸入量の約 43% 強がアメリカに流れている。また、排出権輸入地域の中で、各地域の課徴金レベル(図中()内の値)を比較してみると、

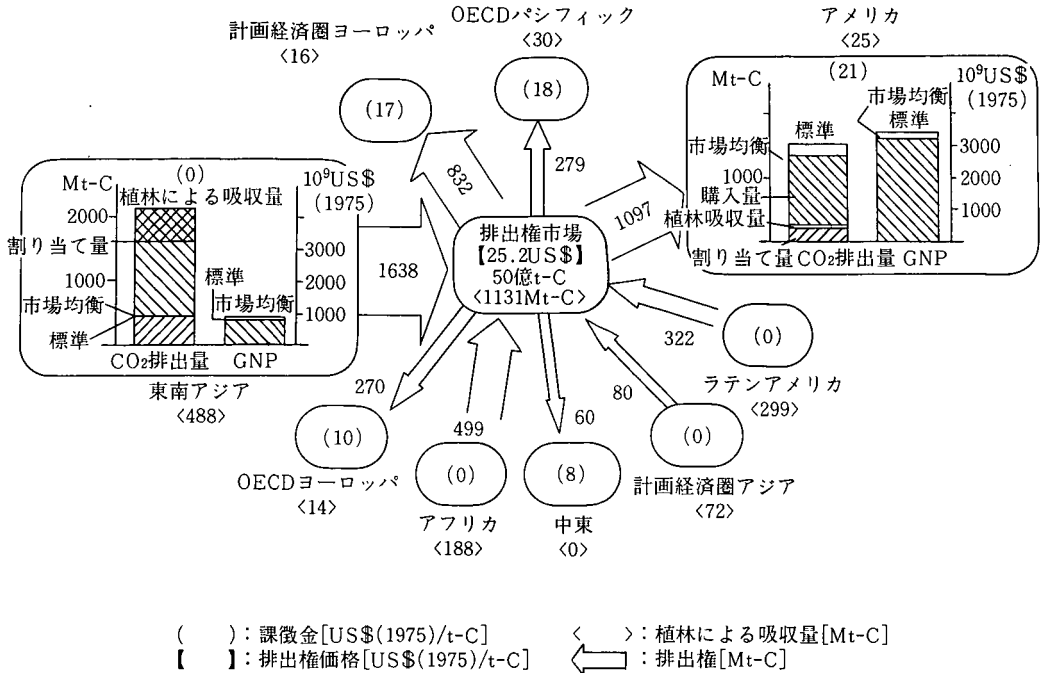


図 4 2000 年で総排出規制を 50 億 t-C とした時の排出権市場

一人あたりの CO₂ 排出量の最も多いアメリカの課徴金レベルが最も高い。また、需給均衡時の排出権価格 25 \$ は、各地域の課徴金よりもやや高い水準になっていることも分かる。この時の植林による CO₂ 吸収量は、世界全体で 1,132 Mt-C で、総量の約 43% (488 Mt-C) が東南アジア地域の植林により吸収されている。

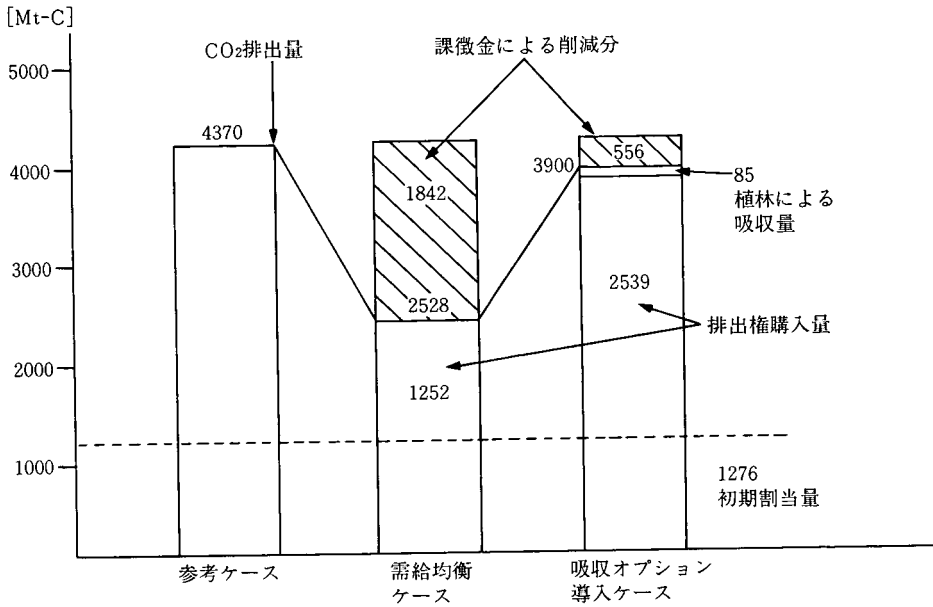
図 5 は、排出権輸入および輸出地域における、CO₂ 排出量、課徴金による削減量、排出権の購入量・売却量、植林による吸収量を示したものである。市場での排出権の取引量は、輸出地域での大規模な植林による吸収と売却収入の減少により、植林を導入しない場合（排出権需給均衡ケース）の 1,252 Mt-C から 2,539 Mt-C に増加する。市場での排出権取引量の増加は、排出権価格を引き下げ、排出権輸入地域での課徴金による CO₂ 削減量を、植林を導入しない場合の 1,842 Mt-C から 556 Mt-C へと

減少させている様子が分かる。

また、図 6 に各総排出規制レベルにおける、植林を導入する場合（吸収オプション導入ケース）としない場合（排出権需給均衡ケース）での、均衡価格と、米国と計画経済圏ヨーロッパ（旧ソ連）の課徴金とを比較した。この図から、世界全体の排出規制レベルを厳しくするほど、植林の導入により、課徴金と排出権の市場均衡価格の大幅な軽減がなされている様子が分かる。これは、排出権市場への総輸出量に占める植林の吸収量の割合が増加するからである。しかし、輸出地域によっては、植林により排出権輸出可能量は増加するものの、排出権価格の下落により売却収入が減少し、国際的な排出権市場への参加のインセンティブは低下するケースもある。

表 2 は、2025 年までの、植林を導入しない場合（排出権需給ケース）と導入する場合（吸収

<排出権輸入地域>



<排出権輸出地域>

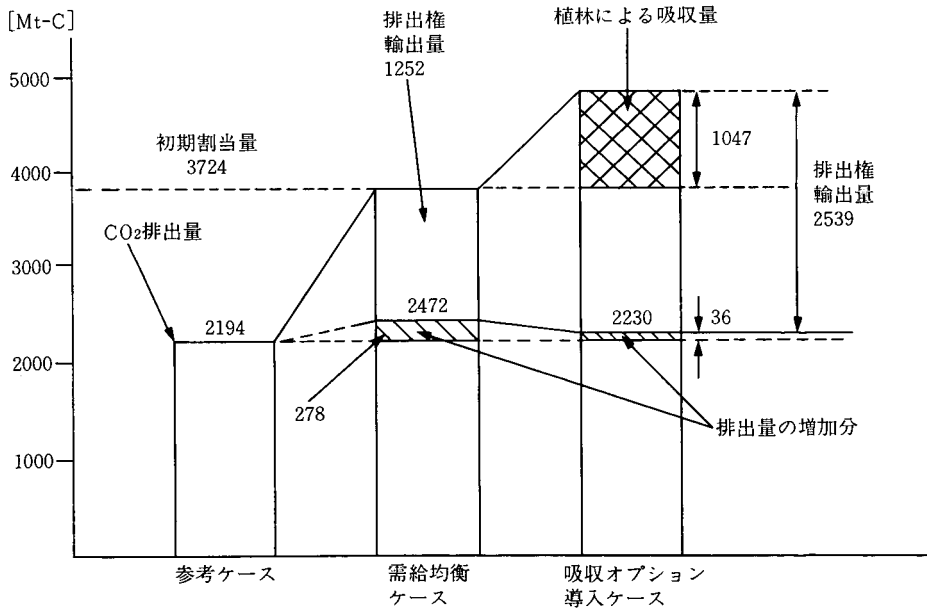


図 5 2000年で総排出規制を50億t-Cとした時の各ケースのCO₂排出量, 排出権購入・売却量, 植林による吸収量

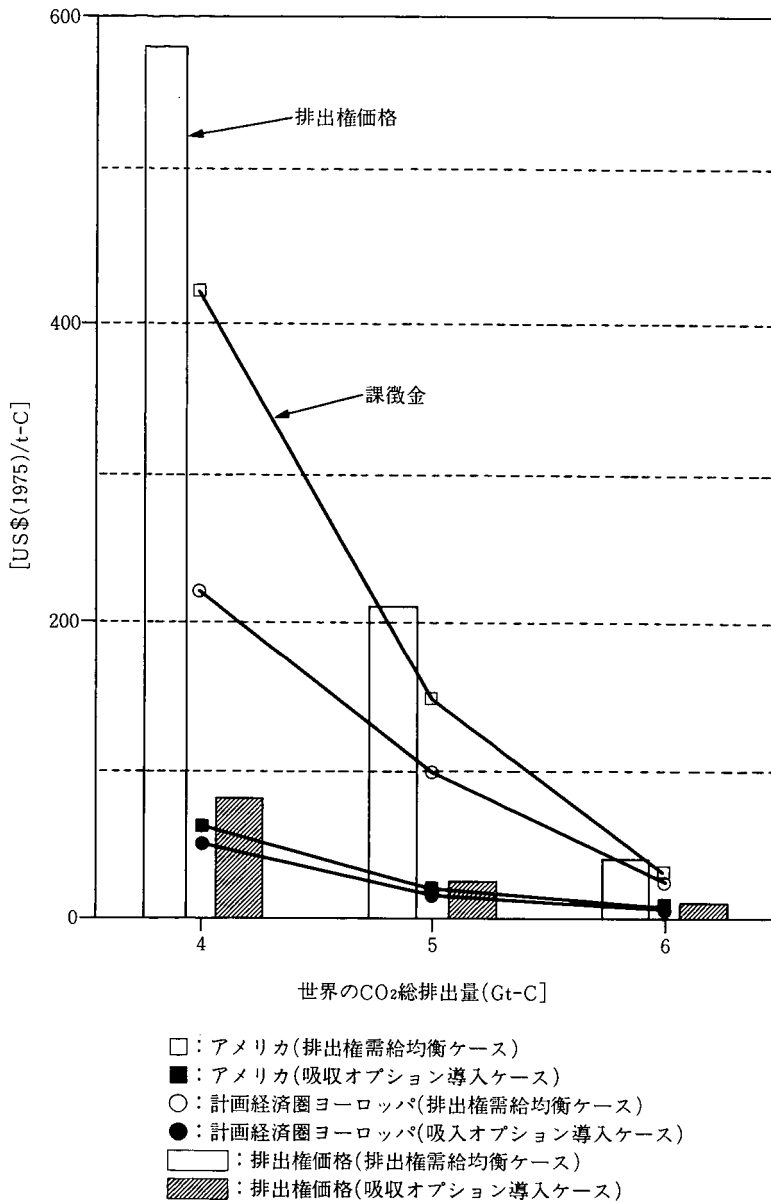


図 6 2000 年で各規制レベルに対する米国と計画経済圏ヨーロッパ（旧ソ連）の課徴金と排出権価格の比較

表 2 2025 年までの排出権価格

(単位: US\$(1975)/t-C)

総排出規制量 (炭素換算億 t-C)	2000年		2025年	
	排出権需給 均衡ケース	吸収オプション 導入ケース	排出権需給 均衡ケース	吸収オプション 導入ケース
40	586.7	80.8	—(a)	1, 190.5
50	212.8	25.2	—(a)	418.7
60	42.3	11.2	989.9	213.7

(a) 排出権を輸出する地域がなくなり、国際的な排出権市場を設けることができないので、CO₂ 排出量が初期割当を越えている地域のみが各々独自に課徴金により CO₂ 排出量を初期割当まで削減する。

オプション導入ケース)での排出権の市場均衡価格を比較したものである。特に、植林を導入せず、総排出規制量を 40 及び 50 億 t-C とする場合には、2025 年の時点で、排出権を市場に供給する地域がなくなり、排出権市場を設けることが出来なくなる。このときは、課徴金により各自の割当量まで CO₂ を削減しなくてはならない。60 億 t-C のケースでは、2025 年でも排出権市場は成立するものの、均衡価格は、989.9 \$/t-C となり、植林を導入する場合 (213.7 \$/t-C) の約 4.6 倍といった高い水準となる。

これまでのシミュレーション解析から、国際的な CO₂ 排出権市場を介して、発展途上地域と先進工業地域との間で排出権と資金の交換が行われ、先進地域での排出抑制に伴う国民経済的損失が緩和されると同時に、途上地域では排出権の売却収入により国民総生産が増加すること等が示された。しかし、より厳しい総排出量規制を課すと、市場への排出権供給量が減少し、市場での供給調整機能により排出権価格の高騰が生じることも示された^{[3][4]}。今回報告したシミュレーション解析から、植林を導入することで、世界的に大幅な CO₂ の吸収・固定が可能となる。さらに、世界規模の植林導入は、市場の排出権取り引き量を増加させ、需給均衡価格を低減させる。これらの効果は、長期

的に排出権市場を持続させ、CO₂ 削減に伴う世界的な経済損失を緩和させることが可能であることが示された。

しかし、このような解析結果の応用については、国際政治の現実的な条件下で市場の理論的機能を実現するための制度の検討が必要であろう。例えば、総排出量の決定、排出量の初期割当、排出量のモニタリングなど問題点が多く、モデルシミュレーションで示された様な市場メカニズムが理想的に機能するのは困難であろう。現実的には、途上国での省エネや環境技術に重点をおいた援助や、途上国の累積債務の返却分を当該国の森林の保護育成などの環境対策に充てる環境・債務スワップなど、個別の対応で同様な効果を実現すべきであろう。今回報告したシミュレーション解析以外に、社会的厚生損失の最小化という最適性に基づいて、各地域ごとの最適行動を明示的に取り扱った排出権モデル分析を実施しており、世界全体の最適化によって CO₂ 削減を行う場合との比較を検討中である。

5. おわりに

世界の経済活動を損なうことなく、CO₂ の排出量を削減し、世界全体が地球環境を保全していく共通のルールを持ち得るか否か、人類は今や重大な岐路に立っている。世界規模での

CO₂ 削減を実現するためには、発展途上国を含む国際的な協力が不可欠である。今後、各地域間に生じる利害対立を解消し、継続的に世界全体が参加できる国際的な CO₂ 規制プログラムのあり方について考察を深めて行きたい。

[参考文献]

- [1] J. Edmonds and J. Reilly, "A long-term global energy-economic model of carbon dioxide release from fossil fuel use," ENERGY ECONOMICS, April (1983).
- [2] 品田他, "植物による炭素固定に関する文献調査", 電力中央研究所報告, U91054 (1991

植林を組み合わせた国際的排出権市場による CO₂ 抑制年).

- [3] 山地他, "市場機構を用いたグローバル CO₂ 抑制方策の解析", 第7回エネルギーシステム・経済コンファレンス, No. 1-13, pp. 87-92, (1991年1月).
- [4] 山地他, "市場機構を利用したグローバル CO₂ 抑制方策のシミュレーション解析", 電力中央研究所報告, Y90301 (1990年).
- [5] 岡田他, "植林オプションを含む CO₂ 排出許可市場のシミュレーション", エネルギー資源学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 49-55, (1993年1月).

(おかだ けんじ
経済部 エネルギー研究室)