Title	環境政策とリアルオプション : 複数主体における汚染削減費用の交渉問題
Sub Title	Environmental policies and real options : some problems of negotiations on pollution abatement costs among agents
Author	坂上, 紳(Sakaue, Shin)
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	2007
Jtitle	三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.100, No.3 (2007. 10) ,p.711(129)- 732(150)
JaLC DOI	10.14991/001.20071001-0129
Abstract	本研究では, 世界規模の汚染に対する多国間の汚染削減政策行動を分析するため, 交渉と限界汚染被害の不確実性を考慮したリアルオプションモデルを構築した。次に, 世界各国が政策に合意する条件を解析的に求め, 交渉で各国を厚生改善させる政策実行が早期化されることを導いた。そして, 不確実性の低下や汚染ストック量の増加, さらに適切な排出権の分配による政策実行の早期化の促進を示した。最後に, シミュレーションで交渉の存在が政策を早める事を確認した。 To analyze multilateral pollution abatement policy actions against global pollution, this study constructs a real options model considering the uncertainty of negotiations and limits to pollution damage. Next, the study analytically determines the conditions under which countries worldwide would agree on policies, leading to an expedition of policy execution that would improve the welfare of countries through negotiations. In addition, this study shows a promotion in decrease of uncertainty, increase in pollution stock amount, and expedition of policy execution due to an appropriate distribution of emission rights. Finally, this study confirms through simulation that the presence of negotiations hastens policies.
Notes	小特集 : 環境経済学の新展開(上)
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-20071001-0129

環境政策とリアルオプション—複数主体における汚染削減費用の交渉問題—

Environmental Policies and Real Options —Some Problems of Negotiations on Pollution Abatement Costs among Agents—

坂上 紳(Shin Sakaue)

本研究では，世界規模の汚染に対する多国間の汚染削減政策行動を分析するため，交渉と限界汚染被害の不確実性を考慮したリアルオプションモデルを構築した。次に，世界各国が政策に合意する条件を解析的に求め，交渉で各国を厚生改善させる政策実行が早期化されることを導いた。そして，不確実性の低下や汚染ストック量の増加，さらに適切な排出権の分配による政策実行の早期化の促進を示した。最後に，シミュレーションで交渉の存在が政策を早める事を確認した。

Abstract

To analyze multilateral pollution abatement policy actions against global pollution, this study constructs a real options model considering the uncertainty of negotiations and limits to pollution damage. Next, the study analytically determines the conditions under which countries worldwide would agree on policies, leading to an expedition of policy execution that would improve the welfare of countries through negotiations. In addition, this study shows a promotion in decrease of uncertainty, increase in pollution stock amount, and expedition of policy execution due to an appropriate distribution of emission rights. Finally, this study confirms through simulation that the presence of negotiations hastens policies.

「三田学会雑誌」100 巻 3 号（2007 年 10 月）

環境政策とリアルオプション

――複数主体における汚染削減費用の交渉問題――*

坂　上　　　紳†

要　　旨

本研究では，世界規模の汚染に対する多国間の汚染削減政策行動を分析するため，交渉と限界汚染被害の不確実性を考慮したリアルオプションモデルを構築した。次に，世界各国が政策に合意する条件を解析的に求め，交渉で各国を厚生改善させる政策実行が早期化されることを導いた。そして，不確実性の低下や汚染ストック量の増加，さらに適切な排出権の分配による政策実行の早期化の促進を示した。最後に，シミュレーションで交渉の存在が政策を早める事を確認した。

キーワード

リアルオプション，国際交渉，環境政策，気候変動問題，越境汚染

1. 序　文

環境汚染は過去から現在まで様々な形態で地球上の各地で発生してきたが，当時，それらの影響は必ずしも人々によって認知されず，広範な環境汚染に対する認識は河川の越境汚染や渡り鳥の保護など一部の範囲に限られていた。だが，1960 年代には海洋汚染の問題を中心とした国際条約の成立，1970 年前後における国連人間環境会議やローマクラブ「成長の限界」によって，環境問題に対する危機感や重要性の認識は急速に広まっていった。そして，1980 年代になると地球規模の汚染が注目された。その代表的な例が，フロンによるオゾン層破壊問題と CO_2（二酸化炭素）等による地球温暖化問題である。フロンガスは，“安全”で不燃性をもつために 1930 年代より導入されてから様々な用途で用いられたが，1970 年代にオゾン層破壊など広範囲な有害性が指摘されると，それは人々に知られるようになり，1980 年代以降は条約でフロンの生産・使用が段階的に抑えられた。

＊　本論文は 2007 年 3 月のコンファレンス「環境経済学の新展開」（慶應義塾経済学会主催）で発表したものです。そのとき西村一彦氏（日本福祉大学）をはじめ参加された各氏から有益なコメントをいただいたことに感謝致します。

†　*E-mail address*: shins@gs.econ.keio.ac.jp

CO_2 は太古から地球に存在した物質であるが，その温暖化効果については 19 世紀から予想されていたにも関わらず 1950 年代までは注目されなかった。1980 年代になると CO_2 による地球温暖化問題が現実的な環境問題として議論されるようになり，1997 年の京都議定書の締結で，ようやく先進国の将来の CO_2 排出量削減目標が具体的に設定された。ただ，アメリカ等による京都議定書の離脱や削減量の見直しなどもあり，必ずしも順調とはいえず，現在でも多くの問題点が指摘されている。

これら世界規模の越境汚染には 3 つの大きな特徴が挙げられる。第一に，汚染の影響に対する不確実性である。上記の事例は，以前は環境への悪影響が弱いとされたため，規制無しに排出されてきた潜在的な汚染物質の存在を示している。これらの汚染被害の影響は不確実性をもつため，すぐには削減されず，価値観の変化，観測技術の発展や汚染物質に対する科学的研究の蓄積により汚染への期待被害が高まってはじめて条約で使用規制がなされた。第二に，汚染削減政策の不可逆性によるタイムラグがある。一般には汚染の発生時点と削減の開始時点は一致しないが，その原因の 1 つが国際的環境政策における不可逆性である。現実の政策では汚染の削減を各時点で意志決定することは難しいので，汚染削減量は数年単位で決定される。また，特に国際条約の削減目標は非弾力的であり，少なくとも短期において修正されることは少ない。それゆえ，政策決定は慎重になる。第三に，交渉における多数の国家の存在がある。上記の事例をみると，政策決定には国単位のみの意志決定だけではなく国家間での交渉も重要な役割をもつ。実際，京都議定書の発効条件として，第二十五条では議定書を結んだ国家のうち 55 カ国以上の批准と先進国のうち 1990 年ベースで 55 パーセント以上の CO_2 排出量を占める国家の批准があった。また，近年は排出権取引も活発であり，これらは単一主体の意志決定とは大きく異なる。

これらの特徴を踏まえると，環境削減政策を分析する場合には，各国の異なる状況を含み，複数主体の交渉を前提とした環境政策の意志決定問題を取り扱う必要がある。そこで，不可逆性や不確実性のもとで政策決定を考える際に有用な方法としてリアルオプションモデル(1)が挙げられる。ただ，これらの研究の多くは単一主体を前提とした議論である(2)。一方，交渉に関する研究は多数存在するが(3)，不確実性や不可逆性を明示的に扱った研究は少ない。そこで，本論文では多数の国家主体を前

(1)　リアルオプション理論一般に関しては Dixit (1989), Dixit and Pindyck (1994), Pindyck (1988), 地球温暖化問題を分析した先駆的研究としては Conrad（1997），単一主体を前提とした包括的な環境政策のリアルオプション分析は Pindyck（2000，2002）を参照。

(2)　交渉によるリアルオプションの行使については二企業間の M&A を取り扱った Morellec and Zhdanov（2005）を参照。

(3)　交渉に関する研究は，ゲーム理論や法と経済学の分野を中心に様々なアプローチで行われてきた。代表的な研究としては，ナッシュ交渉解を提示した Nash (1950)，自発的交渉を議論した Coase (1960)，非協力ゲームで交渉解を定義づけた Rubinstein（1982），非協力ゲームで協力ゲームの提携形成を特徴付けた Selten（1981）などがみられる。環境問題に関しては，CO_2 排出権取引問題を協力ゲームで分析した Okada（2003），世界的公共財について条約締結と汚染削減技術に関する R&D の関係を段階ゲームを用いて分析した Heal and Tarui（2006）の分析などがある。交渉理論に関するサーベ

提としたリアルオプションモデルを提示し，汚染物質に対する評価の不確実性を考慮しながら環境政策の施行時点における同意条件とその含意，政策的意義を分析した。その結果，削減政策が同意される条件が解析的に求められ，交渉の存在が各国の厚生改善をもたらす汚染削減政策の実行タイミングを早める事が示された。また，政策が早められる要因として，汚染被害に関する不確実性の低下や汚染ストック量の増加があることが導かれた。さらに，多くの場合は汚染の限界削減費用が低い国に重点的に排出権の初期配分を行う事で早期の政策が可能になりうる事が示された。最後にシミュレーションによって交渉で政策が早められる事が確認された。

本論文の構成としては，まず次節で各国のオプション価値を求め，それから環境政策の交渉を排出権取引として定義し，その交渉を考えた上で削減政策の合意条件を求める。第三節では被害逓増という異なる仮定のもとで交渉の合意条件を導出し，第四節で結果の確認のために数値シミュレーションを行う。そして，第五節で結論と今後の課題について触れる。

2.　排出権取引による複数主体交渉モデル

本節では，まずモデルを設定し，費用所与のもとで国ごとのオプション価値を求める。それから排出権取引を考え，各国が合意する条件を導出する。

2.1　モデル

以下でモデルを構築していく。世界全体は有限の n 国で構成され，各国は添え字 $i=1,\ldots,n$ で表される。世界全体の国家の集合を $N=\{1,\ldots,n\}$ と定義する。$r>0$ を無リスク金融市場の利子率と定義し，以下では割引率として用いる。次に，毎期，各国が排出する汚染物質フロー量を定義する。$E_i^0>0$ を国 i が毎期に排出する汚染物質の量とし，所与の値とする。したがって，世界全体の毎期の汚染物質排出量は $E^0\equiv\sum_{j=1}^n E_j^0$ と各国の排出量の和で表される。次に，政策後の世界全体汚染物質排出量の削減目標として $E^A\in(0,E^0)$ を所与の値として定義する。このとき，その削減目標に合わせて各国には初期の排出権が配分されるとする。国 i が毎期に排出する汚染物質の権利は $\bar{E}_i^A\geq 0$ で表され，その値は排出目標 $E^A=\sum_{j=1}^n \bar{E}_j^A$ を満たすように各国で配分される。したがって $\bar{\xi}_i\in[0,1]$ を $\sum_{j=1}^n \bar{\xi}_i=1$ を満たす各国の排出権の初期配分割合とすれば，$\bar{E}_i^A=\bar{\xi}_i E^A$ と表すことができる。

次に，初期配分のもとでの各国の排出権取引を考慮する。このとき，全体の排出量は不変でなければならないので，$E_i^A\geq 0$ を排出権取引後に国 i が保有する排出権の総量とすると，$E^A=\sum_{j=1}^n E_j^A$

イとしては，ナッシュ交渉解と交互交渉問題との関連性を論じた Osborne and Rubinstein（1990），提携形成に関して論じた岡田（2002），法と経済学とゲーム理論との関連について議論した Benoit and Kornhauser（2002）を参照。

が必ず満たされる必要がある。この性質を考慮すると，$\sum_{j=1}^{n}\xi_i = 1$ を満たす各国の取引後の排出権配分割合 $\xi_i \in [0,1]$ を用いて，$E_i^A = \xi_i E^A$ と表すことができる。したがって，このとき ξ_i は所与の値ではなく，排出権取引の結果として得られる値となる点に注意する。

国 i の毎期の汚染物質による便益関数は $B_i(M(t);\theta_i(t)) \equiv -\theta_i(t)M(t)$ と線形かつ負の値で定義される。ただし $M(t)$ は t 期の汚染ストック量を表し，$\theta_i(t)$ は汚染ストック 1 単位あたりの限界不効用を示す時点 t で観察可能なパラメータである。したがって，汚染ストック量が増えるほどその期以降の便益が減少し，ストック量が変化しないとしてもパラメータが上昇すると便益が減少する(4)。これより，国 i の t 期の便益の期待現在価値総和は t 期における条件付期待値 $\mathbb{E}_t[\int_t^{\infty} B_i(M(s);\theta_i(s))ds]$ で得られる。

今度は，汚染物質のストック量 $M(t)$ が変化する過程を考える。汚染ストック量は，初期値 $M(0) = M_0 > 0$，微分方程式 $dM/dt = \beta E - \delta M(t)$ に従って変化していくと仮定する。つまり，汚染物質ストック量は，毎期の総排出量 E と汚染ストックへの効果の度合 $\beta > 0$ の積だけ毎期増加していくが，一定割合 $\delta \geq 0$ で自然に削減されていく。したがって，仮にある時点 t' で政策が行われ，それ以降 E の値が減少すると，政策を行わない場合と比べ，t' 期から先までの $M(t)$ が全て減少していくことになる(5)。

次に，便益に関するパラメータ $\theta_i(t)$ を考える。$\theta_i(t)$ は各国ごとに異なるとし，それに加えて $\theta_i(t)$ を確率変数として定義する。ここで，$\theta_i(t)$ の不確実性の要因としては，汚染物質の変化から気候変化など被害が発生するまでのプロセス，汚染物質の被害や影響に関するデータや研究活動の成果，政府や国民の価値観の変化，太陽の黒点活動など様々なものが考えられる。確率変数としては様々な定式化があるが，ここでは $\theta_i(t)$ の確率過程として一般的な幾何ブラウン運動 $d\theta_i(t) = \alpha_i\theta_i dt + \sigma_i\theta_i dz_i(t)$ を考える。ただし，初期値 $\theta_i(0) > 0$ は所与，dz_i は標準ウィーナー過程，トレンド変化を表すパラメータは α_i で $\alpha_i < r$ を満たす，$\sigma_i \geq 0$ は不確実性の強さを表す標準偏差のパラメータとする。したがって，伊藤の公式より $\theta_i(s) = \theta_i(t)e^{(\alpha_i - \frac{1}{2}\sigma_i^2)(s-t)+\sigma_i(z_i(s)-z_i(t))}$ が任意の $s \geq t$ で成立することになり，$\theta_i(t) \geq 0$ となる(6)。

最後に，汚染削減政策によって各国が支払う費用を定義する。政策の実行に伴い，その時点で各国が支払う総費用 C_i は，(i) 排出権と現在の排出量の乖離を埋めるために行われる削減の直接費用，(ii) 排出権の売買にもとづく費用または収入，の 2 つによって構成される。したがって，費用関数は $C_i(E_i^A;E_i^0,\bar{E}_i^A) \equiv k_i^a(E_i^0 - E_i^A) + p(E_i^A - \bar{E}_i^A)$ と定義される。ただし $k^a > 0$ で汚染削減の単

(4)　以下では負の便益を「被害」と呼ぶ。

(5)　Pindyck（2000,2002）では M に不確実性があるモデルも考えられてきたが，それを導入すると他に強い仮定が必要となるので，以下では考えない。

(6)　特に全ての国の $\theta_i(0)$ が同一であり，各国間の相関係数が 1 となる場合，各国は全く同じ $\theta_i(t)$ を持つことになるので完全に同じ価値を共有することになる。しかし一般的には先進国と途上国の対立のように，環境に対する評価付けが各国において完全に一致する事は稀である。

位費用を表し，$p \geq 0$ を各国共通の所与の排出権取引価格とする。特に $p = 0$ ならば各国は無料で互いに排出権を分配するということになる。特に断らない限り，以下では $p \neq k_i^a$ を仮定する。このとき，汚染削減に関する限界費用は，$dC_i(E_i^A; E_i^0, \bar{E}_i^A)/d(E_i^0 - E_i^A) = k_i^a$ となるので，k_i^a が汚染削減限界費用を示すパラメータであることがわかる。ここで C_i は削減政策が行われる時点 t でのみ発生する費用である[(7)]。なお，特に $E_i^0 < E^A$ のとき $E_i^0 < E_i^A$ となる場合もありうるが，このときには負の削減費用が発生する。ここでは，単純化のためにその負の削減費用は実質的な排出量の増加を許容することによる便益とみなす[(8)]。

これらの環境のもと，t 期における各国のオプション価値を定義していく。ここでのオプション価値とは，現在の状況を保持したままでその国が現在から将来にわたって得られる純便益の期待現在価値総和を費用削減というオプション行使も考慮した上で計算したものである。以下では $W_i^N(\theta_i(t), M(t))$ を汚染削減政策前のオプション価値，$W_i^A(\theta_i(t), M(t))$ を汚染削減後のオプション価値と定義する。汚染削減政策が合意に至る条件としては多数決や全会一致など様々な形態が考えられるが，特に以下で考える問題は（i）全ての国が同意しない限り汚染削減政策は実行されない，（ii）汚染削減政策は1回限りであり不可逆である[(9)]，（iii）交渉にもとづく排出権取引以外の費用や交渉時間は考えない，という状況で分析していく。これより，各時点において各国がトリガー戦略を用いることがナッシュ均衡となる[(10)]。つまり，t 期における各国の最適戦略では，θ_i^* が国 i のトリガーだとすると $\theta_i(t) \geq \theta_i^*$ ならば費用削減に同意し，$\theta_i(t) < \theta_i^*$ ならば費用削減に同意しない。そして，均衡では全ての国の同意が必要なので，（a）全ての $i \in N$ で $\theta_i(t) \geq \theta_i^*$ ならば t 期に全ての国が費用削減に同意して各国が削減を行う，（b）ある $i \in N$ で $\theta_i(t) < \theta_i^*$ ならば合意はなされないのでどの国も t 期に汚染削減は行わない，となる。これより，特にある国 $i' \in N$ について $\theta_{i'} \geq \theta_{i'}^*$ が満たされているにも関わらず（b）によって環境政策が行われない場合，その国 i' にとっては損失が発生するので，取引が可能ならば自らの便益を少し犠牲にしてでも他国と排出権を売買して政策を行わせるような誘因をもつことになる。

（7）　C_i は別の解釈もできる。割引率 $r > 0$，毎期 s におけるフローの削減費用を $\bar{C}(s) = \bar{k}_i^a(E_i^0 - E_i^A)$ とすると，政策実行時点 t 期から無限先までかかる毎期の費用の合計は $\int_s^\infty e^{-r(s-t)}\bar{C}(s)ds = \bar{k}_i^a(E_i^0 - E_i^A)/r$ となる。したがって，$k_i^a \equiv \bar{k}_i^a/r$ と定義することで $C_i = \int_s^\infty e^{-r(s-t)}\bar{C}(s)ds$ となるので，費用関数 C_i は長期に渡って発生する毎期の費用の現在価値総和となる。

（8）　$E_i^0 - E_i^A \geq 0$ と交渉に制約をおいて分析することも可能である。

（9）　Pindyck（2000）では連続的な削減に対するオプション価値も考えられているが，本論文では非弾力的で大規模な環境政策が想定されているので，ここでは用いない。

（10）国 i の意志決定は，他国が全て同意する場合ならば，Pindyck（2000）と同じ議論が成り立つので，$\theta_i(t) \geq \theta_i^*$ ならば費用削減に同意し，$\theta_i(t) < \theta_i^*$ ならば費用削減に同意しない。また，政策に同意しない他国が存在する場合は，$\theta_i(t) \geq \theta_i^*$ の場合に同意しても利得が得られないが，このときは仮定よりオプション行使権を失わないので，同意しない場合と無差別となる。これより，各国 i は θ_i に対してトリガー戦略が依然として最適となる。ゆえに，各時点において各国がトリガー戦略を用いるのがナッシュ均衡となる。

以下では，まず費用を所与としたうえで各状況における各国のオプション価値を求め，そこから θ_i^* を計算し，そして排出権取引にもとづく費用交渉を考えていきたい。

2.2　リアルオプションの計算

まず，政策前の環境と政策後の環境を比較するために，それぞれの状況における各国のオプション価値を求めたい。オプション価値は各期の便益を用いて定義された価値関数を用いて表現でき，それは動学的最大化を表すベルマン方程式 $rW^i = B_i(M(t);\theta_i(t)) + E_t[W^i]/dt$ で表される。これから Pindyck（2000）に従ってオプション価値を計算すると，削減政策前（$E = E^0 > 0$）におけるオプション価値 $W_i^N(\theta)$ は，微分方程式

$$rW_i^N \;=\; -\theta_i M + (\beta E^0 - \delta M)W_{iM} + \alpha_i\theta_i W_{i\theta} + \frac{1}{2}\sigma_i^2\theta_i^2 W_{i\theta\theta} \tag{1}$$

を満たすことがわかる。ただし，$W_{iM} \equiv \partial W_i/\partial M$，$W_{i\theta} \equiv \partial W_i/\partial\theta$，$W_{i\theta\theta} \equiv \partial^2 W_i/\partial\theta^2$ と定義される。同様に，政策後（$E = E^A$）のオプション価値 $W_i^N(\theta_i, M)$ は，期待現在価値総和

$$W_i^A = \mathbb{E}_t[\int_t^\infty e^{-r(s-t)}B_i(M(s);\theta_i(s))ds|E = E^A] \tag{2}$$

で表される。注意すべき点は，$W_i^N(\theta)$ の値は，オプションを考慮する必要があるので，被害関数を積分するだけでは得らないという点である。あとは，微分方程式（1）を解けばよいが，そのためには利潤最大化の十分条件と知られる境界条件が必要となる。それらは Brekke and Oksendal（1991）や Dixit and Pindyck（1994）などで説明されている以下の三条件

$$W_i^N(0, M) \;=\; 0 \tag{3}$$

$$W_i^N(\theta_i^*, M) \;=\; W_i^A(\theta_i^*, M) - C_i \tag{4}$$

$$W_{i\theta}^N(\theta_i^*, M) \;=\; W_{i\theta}^A(\theta_i^*, M) \tag{5}$$

である。(3) の条件（non-negative condition）は，オプション価値が非負となる事を要求する。(4) の条件（value-matching condition）は，左辺の政策前オプション価値が右辺の政策後オプション価値と費用の差で定義される純オプション価値と等しくなることを示す。この条件は，左辺が右辺より大きい場合には政策を行わない場合の価値の方が政策後の期待価値より大きいので合理的であるが，逆に右辺が左辺を上回ったときは政策前のオプション価値を機会費用とみなしても汚染削減に同意することで正の純価値が得られるので汚染政策が行われる，という関係を示している。(5) の条件（smooth-pasting condition）は必ずしも自明ではないが，過去には Samuelson（1965）や Merton（1973）などにも見られる金融資産理論では有名な条件である。これは微分方程式の解として得られるオプション価値式のパラメータを計算する為に一般に使われる便利な十分条件であり，幾何的には 2 つのオプション価値が点 θ_i^* で接することを要求する。

微分方程式（1）と条件式（3）を用いて政策前オプション価値 W_i^N を求めると，国 i の削減政策前オプション価値 W_i^N は，未知のパラメータ A_i を用いて

$$W_i^N = A_i\theta_i^{\gamma_i} - \frac{\theta_i M}{r+\delta-\alpha_i} - \frac{\beta E^0\theta_i}{(r-\alpha_i)(r+\delta-\alpha_i)} \tag{6}$$

と表すことができる。ただし

$$\gamma_i = \frac{1}{2} - \frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} + \sqrt{(\frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} - \frac{1}{2})^2 + \frac{2r}{\sigma_i^2}} \tag{7}$$

であり，$\gamma_i > 1$ となる。右辺第一項は汚染削減政策のオプション価値を示し，右辺第二項と第三項は汚染削減前の排出水準における通時的便益の期待現在価値総和を示す。なお γ_i は特性方程式 $\frac{1}{2}\sigma_i^2\gamma_i(\gamma_i - 1) + \alpha_i\gamma_i - r = 0$ の大きい方の根であり，したがって γ_i は E，C_i に依存しないが，α_i, σ_i, r に依存するパラメータとなることが解る。同様にして，（2）の積分計算より，政策後オプション価値 W_i^A は

$$W_i^A = -\frac{\theta_i M}{r+\delta-\alpha_i} - \frac{\beta E^A\theta_i}{(r-\alpha_i)(r+\delta-\alpha_i)} \tag{8}$$

と求められる。右辺は，削減政策の実行にともなう E の変化による t 期以降の $M(t)$ の変化が考慮された，汚染削減後の排出水準における通時的便益の期待現在価値総和を示す。

次に，これらの結果を利用して，W_i^N のオプション価値を決める未知のパラメータ A_i と，政策を決める重要パラメータである θ_i^* を求めたい。オプション式と第二と第三の境界条件を用いると，条件（3），（4），（5）の解であるトリガーと，オプション式（6）の未知パラメータが得られる。削減政策の実行条件を示すトリガーは

$$\theta_i^* = \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}\frac{C_i}{E^0 - E^A} \tag{9}$$

となり，W_N^i の値は

$$A_i = (\frac{\gamma_i - 1}{C_i})^{\gamma_i - 1}[\frac{\beta(E^0 - E^A)}{\rho_i\gamma_i}]^{\gamma_i} > 0 \tag{10}$$

と定まる。ただし $\rho_i \equiv (r-\alpha_i)(r+\delta-\alpha_i) > 0$ と定義される。ここで ρ_i は 2 つの項 $(r-\alpha_i)$ と $(r+\delta-\alpha_i)$ によって構成されるが，（6），（8）を見てもわかるとおり，前者は毎期の汚染排出 E に対応する調整後割引率であり，後者はストック量 M に対応する調整後割引率である。また，簡単な比較静学より，γ_i，β が増加すると θ_i^* が減少し，ρ_i，C_i が増加すると θ_i^* が増加する事がわかる。γ_i の増加は削減政策に対するオプション行使価値の増加を表すので，その結果として待つインセンティブが高まり削減政策が行われにくくなる。ρ_i の増加は割引率を増加させ将来の汚染削減に対する現在価値を下げる為に削減政策が行われやすくなる。そして，C_i の増加は削減費用の増加による政策の遅れを意味する。

なお，仮に不確実性がないとすれば $\gamma_i \to \infty$ となり $\frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1} \to 1$ となるので，$\theta_i^* = \frac{\rho_i}{\beta}\frac{C_i}{E^0 - E^A}$ とトリガーは変化する。また，逆に不確実性が著しく大きい場合は $\gamma_i \to 1$ となり，$\theta_i^* \to \infty$ となるので，その国は削減政策には決して合意しない。つまり不確実性が低下するほど政策が早まる傾向にある。

2.3　排出権取引

2.3.1　排出権取引の導入

前節では，費用 C_i を所与としたうえでトリガー θ_i^* を求めていた。しかし，特にある国 i が $W_i^A(\theta_i, M) - C_i \geq W_i^N(\theta_i, M)$ を満たしており，削減政策を行った方が得であるにもかかわらず他国が参加しない為に実現されない場合，各国はその期での削減政策実行を何もせずに諦めるのではなく，$W_i^A(\theta_i, M) - C_i \geq W_i^N(\theta_i, M)$ を満たす範囲で自分の排出権を売買して他国の費用負担を減らすことを試みる。それは，もし自国が純便益を多少犠牲にしたとしても，それによって政策が実現すれば正の純便益が得られることには変わりないからである。ただ，もちろん全ての場合で交渉によって合意が結ばれるとは限らない。どんなに交渉しても全ての国が合意せずに削減政策が実行されない場合も存在するし，交渉なしに政策が実現される場合もある。それを以下では 3 つのケースに分類する。

(i)　全ての i で $\theta_i \geq \theta_i^*(\bar{\xi}_i)$ となる

(ii)　ある j で $\theta_j < \theta_j^*(\bar{\xi}_i)$，全ての i で $\theta_i \geq \theta_i^*(\xi_i^*)$ かつ $\sum_{j=1}^n \xi_j^* = 1$ となる $(\xi_1^*, \dots, \xi_n^*) \geq 0$ が存在

(iii)　$\sum_{j=1}^n \xi_j = 1$ を満たす任意の $(\xi_1, \dots, \xi_n) \geq 0$ について $\theta_i < \theta_i^*(\xi_i)$ となる i が存在

(i) の場合は排出権取引の有無に関わらず全ての国が汚染削減に必ず合意するので，汚染削減政策が直ちに実現する。(ii) の場合は，排出権取引が許されるならば各国が削減政策に合意するように国家間で費用が分担されて削減政策が実現されるが，排出権取引が不可能な場合には削減政策は実現しない。(iii) の場合は排出権取引が許されるとしても，必ず費用削減政策に反対する国家が出てきてしまうので，排出権取引の有無に関わらず削減政策が実現することはない。従って，各主体はその時点で削減政策を行わず将来に先送りする。

以下での問題は，所与の状況のもとで，これらのケースを区別できるかである。(i) の有無はオプション価値さえ既知ならば直ちに計算によって判断することが可能である。しかし (ii) と (iii) を区別することは自明ではない。何故ならば，排出権の制約に注意しながら交渉によって可能となる θ_i の領域を計算しなければならないからである。したがって，以下では特に (ii) を満たす条件を模索していくことにする。

まず，交渉時に必ず満たすべき性質は以下で得られる。

補題 1. 交渉が可能な場合，以下の条件が成立する。
(a) 全ての国 i について $\theta_i \geq \max\{\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i\}$ となる場合，必ず削減政策が実現される。
(b) ある国 i について $\theta_i < \min\{\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i\}$ となる場合，削減政策は実現されない。
ただし，

$$\underline{\theta}_i \equiv \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} - p\bar{\xi}_i \frac{E^A}{E^0 - E^A}) \tag{11}$$

$$\bar{\theta}_i \equiv \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (p(1-\bar{\xi}_i) - k_i^a)\frac{E^A}{E^0 - E^A}) \tag{12}$$

と定義され，$p \gtrless k_i^a \Leftrightarrow \bar{\theta}_i \gtrless \underline{\theta}_i$ となる。

なお $\underline{\theta}_i$ は $\xi_i = 0$ における θ_i^* であり，$\bar{\theta}_i$ は $\xi_i = 1$ における θ_i^* である。ここでは費用に線形性を仮定しているため，各国の費用は $0 \leq \xi_i \leq 1$ の変化に対して連続的に変化し，特に $\xi_i = 0$ か $\xi_i = 1$ で最小化または最大化される。したがって，それを考慮するとパラメータ $\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i$ で定義される領域は，その国が取引によって得られるトリガーの最大領域を示すことになる。以下では一般的に ξ_i が端点とならない場合も分析するが，そのときの交渉後の均衡配分も必ずこの条件を満たす点に注意する。

次に合意条件 $\theta_i \geq \theta_i^*$ を ξ_i について解くと，以下の不等号が政策合意の条件として得られる。

補題 2. $0 \leq \xi_i \leq 1$ となる任意の交渉配分について国 i が削減政策に合意する必要十分条件は，
(a) 全ての国 $i \in N$ で $p \geq k_i^a$ ならば $\xi_i \leq \xi_i^*(\theta_i)$，(b) 全ての国 $i \in N$ で $p < k_i^a$ ならば $\xi_i \geq \xi_i^*(\theta_i)$ となる。ただし

$$\xi_i^*(\theta_i) \equiv \frac{E^0 - E^A}{E^A}\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta\theta_i}{(p - k_i^a)\rho_i} - \frac{k_i^a}{p - k_i^a}\frac{E_i^0}{E^0 - E^A}\frac{E^0 - E^A}{E^A} + \frac{p\bar{\xi}_i}{p - k_i^a} \tag{13}$$

つまり，各国の費用構造によってトリガーが大きく異なる事になる。その理由としては，排出権取引価格 p より限界削減費用 k_i^a の方が低い国は自分の保有する排出権を売却して自分で排出を削減した方が費用を節約できるが，排出権取引価格より限界削減費用の方が高い国は排出権購入によってより多くの排出権を得る事で削減費用を節約できるからである。ただ，$p \gtrless k_i^a \Leftrightarrow \xi_i^{*\prime}(\theta_i) \gtrless 0$ を考慮すると，どの国 i についても，θ_i が増加した場合，削減政策に合意をもたらす領域が広がり削減政策が実行されやすくなるという点は変わらないことが確認できる。

2.3.2 多国間交渉

今までは各国が独立して行動する場合のみを考えてきた。次は，この議論を踏まえて多数主体が存在し，交渉する場合を実際に考えていきたい。以下では $p = k_i^a$ となる国 $i \in N$ の存在を許容する。ま

ず，p に応じて削減費用ごとに各国を 3 タイプに分け，$I_0 \equiv \{i \in N | p = k_i^a\}$，$I_1 \equiv \{i \in N | p > k_i^a\}$，$I_2 \equiv \{i \in N | p < k_i^a\}$ と定義する。このとき $I_0 \cup I_1 \cup I_2 = N$ かつ $I_0 \cap I_1 = I_0 \cap I_2 = I_1 \cap I_2 = \emptyset$ となる。次に，交渉後の排出権均衡配分を ξ_i^e と定義する。これは排出権均衡配分と削減政策が実行されるときの配分であり，必ず $0 \le \xi_i^e \le 1$ と $\sum_{j=1}^{n} \xi_j^e = 1$ を満たす。

まず，$I_0 = \emptyset$ の場合を考える。以下では限界削減費用と排出権取引価格について 2 つのケースを考える。第一に $N = I_1$ または $N = I_2$ の場合を考える。$N = I_1$ のときは全ての $i \in N$ で $p > k_i^a$ となるので，全ての国にとって ξ_i を減らすことで費用を節約できる。また $N = I_2$ のときは同様に全ての $i \in N$ で $p < k_i^a$ となり，この場合は全ての国からみて ξ_i を増やした方が費用節約となる。したがって，この場合には国家間にトレードオフが発生するので均衡配分は直ちに決まらない。このとき各国が互いに行う排出権売買を考慮すると，補論より以下の結果を得る。

補題 3. (a) 全ての国 i で $p > k_i^a$ ならば，削減政策が合意される必要十分条件は

$$\sum_{j=1}^{n} \frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j} \frac{1}{p - k_j^a} \frac{\theta_j}{\rho_j} \ge \Theta_n(\bar{\xi}) \tag{14}$$

かつ全ての i について $\theta_i \ge \underline{\theta}_i$ となる。

(b) 全ての国 i で $p < k_i^a$ ならば，削減政策が合意される必要十分条件は

$$\sum_{j=1}^{n} \frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j} \frac{1}{p - k_j^a} \frac{\theta_j}{\rho_j} \le \Theta_n(\bar{\xi}) \tag{15}$$

かつ全ての i について $\theta_i \ge \bar{\theta}_i$ となる。ただし

$$\Theta_n(\bar{\xi}) \equiv \frac{1}{\beta}(\sum_{j=1}^{n} \frac{k_j^a}{p - k_j^a} \frac{E_j^0}{E^0} \frac{E^0}{E^A} + 1 - \sum_{j=1}^{n} \frac{p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a}) \frac{E^A}{E^0 - E^A} \tag{16}$$

つまり，補題 1 の必要条件に加え，(14) または (15) で表される不等式条件が満たされる場合，汚染削減政策が実行されることになる。第二に，$I_1 \neq \emptyset$ かつ $I_2 \neq \emptyset$ となる場合を考える。このとき I_1 に属する国は，自国の所有する排出権を I_2 に属する国に全て売却し自分で汚染を削減することが最適となるので，$i \in I_1$ ならば必ず $\xi_i^e = 0$ となる。したがって，このとき $\sum_{j \in N} \xi_j^e = \sum_{j \in I_2} \xi_j^e = 1$ となるので，あとは I_2 について $I_1 = \emptyset$ の場合と同様にして計算すれば条件を導出できる。

次は $I_0 \neq \emptyset$ の場合を考える。以下では 3 つのケースを考える。第一に，$I_2 = \emptyset$ のときを考える。このとき I_0 に属さない全ての国は I_1 に属するので，費用削減のために自分の保有する排出権を売ろうとする。一方，I_0 に属する国にとっては自国の保有する排出権をどう売買しても無差別であるので，なるべく自国以外の相手が有利となるように排出権を売買するのが望ましい。この場合，I_0 に属する国が I_1 に属する国の排出権を全て購入するので，$i \in I_1$ ならば必ず $\xi_i^e = 0$ となり，$\sum_{j \in N} \xi_j^e = \sum_{j \in I_0} \xi_j^e = 1$ となる。第二に，$I_1 = \emptyset$ のときを考える。I_0 に属さない全ての国は I_2 に

属するので，費用を節約するため出来るだけ排出権を買おうとする。一方，I_0 に属する国にとっては自国の保有する排出権をどう売買しても無差別であるので，I_0 に属する国が I_2 に属する国に排出権を全て売却する。したがって，$i \in I_0$ ならば必ず $\xi_i^e = 0$ となり，$\sum_{j \in N} \xi_j^e = \sum_{j \in I_2} \xi_j^e = 1$ となる。第三に，$I_1 \neq \emptyset$ かつ $I_2 \neq \emptyset$ のときを考える。このとき I_2 に属する全ての国は，汚染削減量を減らして費用を節約するために排出権を買おうとする。一方，I_1 に属する国は，自分の保有する排出権を売ろうとする。また，I_0 に属する国にとっては自国の保有する排出権をどう売買しても無差別である。これより，この場合は I_0 または I_1 に属する国が I_2 に属する国に排出権を全て売却する。したがって，$i \in I_0 \cup I_1$ ならば必ず $\xi_i^e = 0$ となり，$\sum_{j \in N} \xi_j^e = \sum_{j \in I_2} \xi_j^e = 1$ となる。

以上の結果をまとめると，以下の命題を得る。

命題 1. 汚染削減政策が実現される条件は，以下の（a），（b）で表される。

（a） $I_0 \neq \emptyset$ または $I_2 \neq \emptyset$ ならば，以下の（i），（ii），（iii）を満たす

（i） 全ての $i_0 \in I_0$ について $\theta_{i_0} \geq \underline{\theta}_{i_0} (= \bar{\theta}_{i_0})$

（ii） 全ての $i_1 \in I_1$ について $\theta_{i_1} \geq \underline{\theta}_{i_1}$

（iii） 以下の不等号

$$\sum_{i \in I_2} \frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j} \frac{1}{p - k_j^a} \frac{\theta_j}{\rho_j} \leq \Theta_{I_2}(\bar{\xi}) \tag{17}$$

を満たし，かつ全ての $i_2 \in I_2$ について $\theta_{i_2} \geq \bar{\theta}_{i_2}$ となる。

（b） $I_0 = I_2 = \emptyset$ ならば

$$\sum_{i \in I_1} \frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j} \frac{1}{p - k_j^a} \frac{\theta_j}{\rho_j} \geq \Theta_{I_1}(\bar{\xi}) \tag{18}$$

かつ全ての i について $\theta_i \geq \underline{\theta}_i$ が満たされる。ただし $\Theta_{I_s}(s = 1, 2)$ は

$$\Theta_{I_s}(\bar{\xi}) \equiv \frac{1}{\beta}(\sum_{j \in I_s} \frac{k_j^a}{p - k_j^a} \frac{E_j^0}{E^0} \frac{E^0}{E^A} + 1 - \sum_{j \in I_s} \frac{p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a}) \frac{E^A}{E^0 - E^A} \tag{19}$$

と定義され，全体制約を表す。

特に，$I_2 = \emptyset$，または $I_0 \neq \emptyset$ かつ $|I_2| = 1$ の場合，先ほどの議論より排出権売却を望む全ての国 $i \in N$ について $\xi_i^e = 0$ となり，排出権購入を望む全ての国 $j \in N$ について $\xi_j^e = 1$ となるので，全ての国が最適排出権配分となる。これより $\theta^i \geq \underline{\theta}^i$ かつ $\theta^j \geq \bar{\theta}^j$ が十分条件となるので，$p \gtrless k_i^a \Leftrightarrow \bar{\theta}_i \gtrless \underline{\theta}_i$ に注意すると，命題 1 の特殊例として以下の結果を得る。

系 1. $|I_2| \leq 1$ とする。このとき，$I_0 \neq \emptyset$ または $|I_2| = 1$ ならば，全ての国が削減政策に合意する必要十分条件は，全ての $i \in N$ について $\theta_i \geq \min\{\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i\}$ となる。

注目すべき点は，補題 1（b）の不等式の対偶として得られる必要条件と系 1 の条件が一致する点である。つまり，系 1 は削減政策への合意の必要条件が十分性をもつことを主張している。このようになる理由は，異なる費用構造をもつ国が存在し，かつ互いの排出権に対する売買行動も逆になるために均衡配分は最も極端な形となり，結果として互いにとって最良な点が均衡配分となるからである。ただ，この結果は系 1 の前提条件が満たされる場合のみの性質である点に注意する。なぜなら，条件が満たされず全ての国が最適とはならない一般の場合には，補題 1（b）の対偶で表される必要条件に加え，さらに二国間のトレードオフを表す不等号（17）か（18）が満たされる必要があるからである。

なお，各国の費用構造が p に対して異なるとき，（17）と（18）の不等号の方向も異なる。特に $N = I_2$ の場合は θ_1 と θ_2 の線形結合が右辺より下回ることを要求する点で，従来の条件とは逆に見える。ただ，この場合は全ての $i \in N$ で両辺の分母 $p - k_i^a$ が負となるので，結局は左辺の絶対値が右辺にマイナスをかけた値より大きければ削減政策が実現されると解釈できるので，その点に関しては従来と同じである。

$\Theta_{I_s}(\bar{\xi})$ は交渉における全体制約を規定する関数であり，排出権の初期配分 $\bar{\xi}_i$ によって変化しうる。ただ，必ずしも変化するわけではなく，(i) $p > 0$, (ii) ある $i, j \in I_s$ で $k_i^a \neq k_j^a$ という 2 つの条件を満たす時のみ初期配分の変化が全体制約に影響を与える。例えば，二国 $i, j \in I_2$ をとると，$p < k_i^a$ かつ $p < k_j^a$ となるが，このとき $k_i^a < k_j^a$ ならば $0 < k_i^a - p < k_j^a - p$ より $-p/(p - k_i^a) > -p/(p - k_j^a) > 0$ なので $\bar{\xi}_i$ を $\Delta\xi$ だけ増やし，$\Delta\xi$ だけ $\bar{\xi}_j$ を減らすことで初期保有の制約を維持したまま $\Theta_{I_2}(\bar{\xi})$ を増加させることが出来る。特に $N = I_2$ の場合ならば，限界費用が最小の国 i について $\bar{\xi}_i = 1$ とすることで，削減政策実行の可能性は最大化される。また，$N = I_1$ のときには，$k_i^a < k_j^a$ ならば同様に $\bar{\xi}_i$ を $\Delta\xi$ だけ減らし，$\Delta\xi$ だけ $\bar{\xi}_j$ を増やすことで $\Theta_1(\bar{\xi})$ が減少する。そして，これを繰り返して限界費用が最大の国 j について $\bar{\xi}_j = 1$ とすると $\Theta_1(\bar{\xi})$ が最小化され，削減政策実行の可能性は最大化される。このような考え方は三国以上が存在する場合にも適用出来るので，その結果をまとめると以下が得られる。

系 2. $p > 0$ となるとき，全体制約における削減政策実行可能性は，初期配分 $\bar{\xi}$ を以下の（a），（b），（c）のように再配分することによって最大化される。

（a） $N = I_2 \cup I_0$ かつ $I_2 \neq \emptyset$ のとき，$\bar{\xi}_{i_*} = 1$ とおく。これより $j \neq i_*$ ならば $\bar{\xi}_j = 0$ となる。

（b） $N = I_1 \cup I_0$ かつ $I_1 \neq \emptyset$ のとき，$\bar{\xi}_{i^*} = 1$ とおく。これより $j \neq i^*$ ならば $\bar{\xi}_j = 0$ となる。

（c） $I_1 \neq \emptyset$ かつ $I_2 \neq \emptyset$ ならば，$\bar{\xi}_{i_*} = 1$ とおく。これより $j \neq i_*$ ならば $\bar{\xi}_j = 0$ となる。

ただし $i_* \in \arg\min_{j \in I_2} k_j^a$ は I_2 に属する限界費用最小の国を表し，$i^* \in \arg\max_{j \in I_1} k_j^a$ は I_1 に属する限界費用最大の国を表す。

つまり，各国の排出権取引価格水準が低い場合ならば限界費用が最も低い国に重点的に排出権の初期配分を与え，逆に取引価格が非常に高い場合ならば限界費用が最も高い国に初期配分を与えるべきである。また，取引価格が中間的な場合ならば削減費用が低い国のもつ初期配分を減らし，削減費用が高い国に配分することによって個別国の改善だけでなく，交渉全体の効果も上がることになる。特に，排出権を需要し最小の限界費用をもつ国に排出権を重点的に配分すれば全体の合意条件は改善される。[(11)] なお，$N = I_0$ となる特殊な場合，排出権の初期配分は意志決定に全く影響を及ぼさない。

3. 被害逓増の場合

従来の議論は線形の被害関数を仮定したうえで議論してきた。しかし，実際には非線形の場合を考える事も重要となる。そこで，本節では汚染被害関数が線形ではない場合について考えてみたい。以下では，前節のモデルで定義された線形の被害関数を二次関数 $B_i(M(t);\theta_i) \equiv -\theta_i[M(t)]^2$ と置き換えた上で分析していく。このとき，オプション価値と新しいトリガー θ_i^{**} は以下のように求まる。まず，$E^A < E^0$ における削減政策後のオプション価値 W_i^A は

$$W_i^A = -\frac{\theta_i M^2}{r+2\delta-\alpha_i} - \frac{2\beta^2(E^A)^2\theta_i}{(r-\alpha_i)(r+2\delta-\alpha_i)(r+\delta-\alpha_i)} - \frac{2\beta E^A\theta_i M}{(r+2\delta-\alpha_i)(r+\delta-\alpha_i)} \quad (20)$$

となる。次に削減政策前のオプション価値 W_i^N は

$$\begin{aligned} W_i^N = A_i\theta^\gamma &- \frac{\theta_i M^2}{r+2\delta-\alpha_i} - \frac{2\beta^2(E^0)^2\theta_i}{(r-\alpha_i)(r+2\delta-\alpha_i)(r+\delta-\alpha_i)} \\ &- \frac{2\beta E^0\theta_i M}{(r+2\delta-\alpha_i)(r+\delta-\alpha_i)} \end{aligned} \quad (21)$$

(11) これらは Coase（1960）らの議論である，所有権が明確であり資本制約も無く取引費用が無い場合には初期配分に関わらず交渉によって均衡配分が成立するという「コースの定理」に矛盾するように見える。ただ，系 2 の前提条件として，$p \neq 0$ という条件があることに注意すると，$p = 0$ ならば初期配分は結果に影響を全く与えないのでコースの議論と同じ結果が得られる。また，コースの定理に関する議論（例えば Kolstad（1999）Ch.6）ではしばしば配分を交渉で取引する場合，連続的に交渉価格を変えながら取引できると暗黙に仮定されていたが，ここでは外生的に排出権価格を与えた上で分析されているので，その点に差異がある可能性がある。加えて，コースを始めとした交渉の議論では正のレントが主体間で存在することを前提とされているが，ここでは必ずしも全ての時点において交渉によって正のレントが得られるとは限らず，むしろ正のレントが発生する状況で初めて交渉が発生するので，結果として初期時点で政策が合意される場合を除き，レントがゼロとなるときに交渉が発生することになる。そういった意味で扱う状況が異なっている。いずれにせよ，本論文で扱う交渉を考える上で過去の議論との対比は重要である。

となり，係数とトリガーの値は

$$A_i = [(\gamma_i - 1)\frac{E^0 - E^A}{C_i}]^{\gamma_i - 1}[\frac{1}{\gamma_i}\frac{\beta}{\lambda_i(M)\rho_i}]^{\gamma_i}(E^0 - E^A) \tag{22}$$

$$\theta_i^{**} = \lambda_i(M)\frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}\frac{C_i}{E^0 - E^A} \tag{23}$$

となる。ただし，$\gamma_i > 1$ は前節のモデルと同じ値で

$$\gamma_i = \frac{1}{2} - \frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} + \sqrt{(\frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} - \frac{1}{2})^2 + \frac{2r}{\sigma_i^2}} \tag{24}$$

となり，

$$\lambda_i(M) \equiv \frac{(r + 2\delta - \alpha_i)}{2[\beta(E^0 + E^A) + (r - \alpha_i)M]} \tag{25}$$

である。なお，θ_i^{**} を線形被害関数のトリガー θ_i^* と比較すると，$\theta_i^{**}/\theta_i^* = \lambda_i(M)$ より λ_i のみが異なる。特に，従来のモデルと大きく異なる点は，(25) で表される $\lambda_i(M)$ の式の分母に汚染ストック量 M が含まれている点である。線形におけるトリガー θ^* を見ると汚染ストック量 M が式には全く含まれなかったが，二次被害関数のトリガー θ_i^{**} では，M が増加するほど $\lambda_i(M)$ の減少を通じてトリガーも減少するので，汚染ストック量が増えるほど環境政策が早まる。その理由としては，M に対する限界被害が $-2\theta_i M$ となり M について逓増するため，M が増加するほど削減政策の必要性が増していくことが考えられる。

費用 C_i の影響に関しては θ_i^{**} に対して線形のまま変わらない。これより，ρ_i を $\lambda_i\rho_i$ に置き換えれば，従来と同じ交渉を用いて分析することが可能となる。その結果は以下でまとめられる。

命題 2. 被害関数が二次で削減費用が線形のとき，削減政策の実現条件は以下で示される。

(a) 全ての国 $i \in N$ で $i \in I_1$ となる場合，つまり $N = I_1$ ならば，

$$\sum_{i\in N}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{1}{p - k_j^a}\frac{\theta_j}{\lambda_j\rho_j} \geq \Theta_{I_1}(\bar{\xi}) \tag{26}$$

を満たし，かつ全ての $i \in N$ について $\theta_i \geq \underline{\theta}_i^{**}$ となる。

(b) ある $i \in N$ で $i \notin I_1$ となる場合，以下の (i)，(ii)，(iii) を全て満たす。

(i) 全ての $i \in N$ について $\theta_i \geq \underline{\theta}_i^{**}(= \bar{\theta}_i^{**})$

(ii) 全ての $i \in I_1$ について $\theta_i \geq \underline{\theta}_i^{**}$

(iii) 全ての $i \in I_2$ について，不等号

$$\sum_{i\in I_2}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{1}{p - k_j^a}\frac{\theta_j}{\lambda_j\rho_j} \leq \Theta_{I_2}(\bar{\xi}) \tag{27}$$

を満たし，かつ $\theta_i \geq \bar{\theta}_i^{**}$ となる。ただし，

$$\underline{\theta}_i^{**} \equiv \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\lambda_i \rho_i}{\beta}(k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} - p\bar{\xi}_i \frac{E^A}{E^0 - E^A}) \tag{28}$$

$$\bar{\theta}_i^{**} \equiv \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\lambda_i \rho_i}{\beta}(k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (p(1 - \bar{\xi}_i) - k_i^a)\frac{E^A}{E^0 - E^A}) \tag{29}$$

と定義され，$p \gtrless k_i^a \Leftrightarrow \bar{\theta}_i^{**} \gtrless \underline{\theta}_i^{**}$ となる。

ここで，もし M が増加したとすれば全ての λ_i が減少するので，I_1 に対応する不等号の左辺は増加し，I_2 に対応する不等号の左辺は減少する。また $\underline{\theta}_i^{**}, \bar{\theta}_i^{**}$ が共に減少するので，結果として汚染ストック量の増加は必ず削減政策への合意を早める効果があることがわかる。これが従来の線形モデルでは得られなかった点で，汚染が進むほど政策が実行されやすくなるという点でより現実的な結果である。また，仮に不確実性が無いとすれば $\gamma_i \to \infty$ となり $\frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1} \to 1$ となるので，$\theta_i^{**} = \frac{\lambda_i \rho_i}{\beta}\frac{C_i}{E^0 - E^A}$ となり，不確実性が非常に強いならば $\theta_i^{**} \to \infty$ となるが，これは線形モデルと同じ結果である。

4. シミュレーション

前節までで，様々な環境において汚染削減政策が実行される条件を探し，各要因が政策の実行時点に与える影響を調べてきた。今節では，今までの分析で得られたトリガーを利用し，乱数を用いて θ_i を発生させることによってシミュレーションを行い，状況の変化に対応する政策の実行時点の変化を数値的に見ていきたい。

実験試行期間を $T = 200$ として k 国が存在する線形便益，線形費用，対称モデルで行った。$r = 0.05$，$\beta = 1$，$\delta = 0.02$，θ_i の相関係数は 0.5，$E^0 = 300000$，$E^A = 120000$，$p = 100$，$k_i^a = 500$，$\mu_i = 0.01$，$\alpha_i = 0.01$，$\sigma_i = 0.1$，$\theta_i(0) = 0.1$，$E_i^0 = E^0/k$，$\bar{\xi}_i = 1/k$，とした。これは全ての国で $p < k_i^a$ となるケースにあてはまる。そして，以下では $k = 2, 3, 4, 5, 10$ についてTSP4.5 を用いてモンテカルロシミュレーションを実行する。なお，試行回数は 100 回とする。

シミュレーションによる削減政策実行時点の分析結果は表 1 でまとめられている。表 1-a では各国で対称的に排出権が配分されたときの初期配分の場合，交渉が存在する場合のそれぞれについて，削減政策実行時点の標本平均と中位数が計算されている。特に注目する点としては，第一に，初期配分のままで交渉がないとすれば国の数が少し増えたとしても環境政策の実行時点が早まることはないこと，第二に，交渉が存在する場合には国数が少し増加しただけで環境政策への合意と実行が著しく早まる点にある。第一の結果の理由は，国の数が増加すると，排出権初期配分の変更によりトリガー θ_i^* が低下するという現象と矛盾するように見えるがそうではない。なぜなら，ここでは全ての国について合意条件が満たされなければならないので，個々の国については条件が緩くなった

表 1　削減政策実行時点（線形）

表 1-a：$k_i^a > p$ の場合

	標本平均		中位数	
国	交渉前	交渉後	交渉前	交渉後
2	194.75	185.54	200	200
3	193.57	110.85	200	93
4	192.34	71.91	200	54.5
5	188.22	49.31	200	37.5
10	108.51	0.00	95	0

表 1-b：$p > k_i^a$ の場合

	標本平均		中位数	
国	交渉前	交渉後	交渉前	交渉後
2	194.97	128.53	200	125
3	193.88	93.89	200	79.5
4	195.52	48.96	200	34.5
5	186.57	30.08	200	12
10	71.14	0.00	51.5	0

としても条件の数が k 倍となるために最終的な削減政策の実現は遅れてしまうからである。ただ，非常に国数が増加して各国の輩出水準や負担が著しく小さい場合は削減政策のタイミングが早まり，特に国数が著しく多くなる場合には初期時点で政策が行使される。第二の結果の理由としては，一般に θ_i は必ずしも完全には相関しないため，時が経つにつれて環境政策を需要する国とそうでない国が生まれ，交渉がない限りそのギャップが埋まらずに放置されてしまうが，交渉が可能ならば国数が増えるほど各国が柔軟に排出権取引を行うので結果として環境政策がより早く実行されることになる。ただ，もちろん全てのパラメータにおいてこのように明確な結果が出るとは限らない点に注意する。表 1-b は，同じ設定のもと価格と限界費用についてのみ $p = 1000$，$k_i^a = 400$ と変更した分析結果である。この場合は，先ほどとは逆に全ての国で $p > k_i^a$ となるケースであるが，結果は表 1-a と比較しても大きく変わらない。これよりどちらの場合でも不等号条件が機能することが確認できた。

表 2 では，排出権初期配分に関する分析が行われている。最初の設定のもとで，三国で構成される世界において各国の削減限界費用のみ異なるというケースを考え，排出権初期配分の影響を調べた。なお，最も削減限界費用に優れているのが国 1，次に国 2，最も費用面で劣っているのが国 3 である。結果を見ると，まず交渉がない場合，国 3 に重点的に配分をすることで交渉を早める事が出来る。これは，国 3 は費用が劣っている為にトリガーが高く，他国より削減政策に合意する条件が厳しい為に初期に配分される排出権が少ないと各国間でバラつきが生じてしまうからである。一方で，もし交渉が可能ならば，逆に費用優位な国 1 に配分することが最適となる。これは，系 2 の結果そのものを示している。削減限界費用が高い国としては，削減技術が発達していない国としてみなすならば途上国にあてはまりそうだが，実際にはむしろすでに汚染削減が十分進んでいて排出規制などによりこれ以上の汚染ストック量の削減のためには途上国と比べて多大な技術や努力が必要となる先進国とみなすことも可能かもしれない。いずれにせよ，初期配分は削減政策の実行に対して多大な影響を及ぼしうるということが確認された。

次に，被害関数が逓増となる場合を分析した。このときのパラメータ設定は $T = 200$，$r = 0.05$，$\beta = 1$，$\delta = 0.02$，θ_i の相関係数は 0.5，$E^0 = 300$，$E^A = 120$，$M(0) = 100$，$p = 100$，$k_i^a = 500$，

表 2　削減政策実行時点（線形），$k_i^a > p$，初期配分別（$k = 3$）

限界費用			排出権配分			標本平均		中位数	
k_1^a	k_2^a	k_3^a	$\bar{\xi}_1$	$\bar{\xi}_2$	$\bar{\xi}_3$	交渉前	交渉後	交渉前	交渉後
300	500	700	1/3	1/3	1/3	194.48	98.37	200	76
300	500	700	1	0	0	198.38	87.12	200	68.5
300	500	700	0	1	0	197.44	106.33	200	84
300	500	700	0	0	1	197.39	108.34	200	91
300	500	700	1/2	1/4	1/4	194.72	94.72	200	73
300	500	700	1/4	1/2	1/4	197.29	99.26	200	78
300	500	700	1/4	1/4	1/2	189.46	94.20	200	75

表 3　削減政策実行時点（被害逓増）

	標本平均		中位数	
国	交渉前	交渉後	交渉前	交渉後
2	177.41	138.65	200	146
3	172.67	42.23	200	32.5
4	175.11	27.14	200	19
5	158.43	14.91	200	11
10	130.76	0.00	148	0

表 4　削減政策実行時点（被害逓増，初期汚染変化）

	標本平均		中位数	
初期汚染	交渉前	交渉後	交渉前	交渉後
500	185.44	133.09	200	134
2500	179.20	136.59	200	160
10000	175.99	134.65	200	153
50000	157.15	0.00	200	0
75000	111.77	0.00	120.5	0
100000	0.00	0.00	0	0

$\mu_i = 0.01$，$\alpha_i = 0.01$，$\sigma_i = 0.1$，$\theta_i(0) = 0.1$，$E_i^0 = E^0/k$，$\bar{\xi}_i = 1/k$，となる。特に，ここでは M の初期値も結果に影響を与える点に注意する。そして，$k = 2, 3, 4, 5, 10$ についてシミュレーションを行った。

表 3 の結果を見ると，被害関数が線形となる場合に比べて結果が不安定となるものの，やはり国数が増えるほど削減政策の実行が早まる。特に交渉が存在する場合ならば，少数の国のもとでより早く政策が実行されるが，これは線形の場合と変わらない。表 4 では，被害逓増モデルの特徴である汚染ストック量の変化による削減政策実行への影響を見るために，従来の線形モデルでは結果に影響を与えなかった初期ストック量 $M(0)$ を変化させて分析を行った結果がまとめられている。やはり結果は少し不安定であるが，全体の傾向しては初期汚染が増加するにつれて削減政策の実現は早まり，特に $M(0)$ が 100000 を越えて大きくなると政策が初期時点で実行されるようになることがわかる。なお，この $M(0) = 100000$ という汚染ストック量数字は毎期の排出が $E^0 = 300$ だという点を考慮すると非常に大きな値であることがわかる。ただ，数千年単位で蓄積されてきた物質ならば，このような大きな値もありえるかもしれない。現在では特に CO2 削減問題について汚染削減の必要が前提とされて分析される事が多いが，それは，単に限界被害額が大きいというだけではなく，むしろ CO2 の蓄積量が増大した結果であるとされる事が多いので，このように汚染ストック量が多いと削減政策が行われやすくなるという状況に対応するかもしれない。そういった意味では，線形モデルより被害逓増モデルの方が直感的には現実に対応する。

5. 結論

本論文では，世界規模の越境汚染に対する削減政策を考えるため，汚染削減政策に関する不可逆性，汚染被害に関する不確実性，多数の国家の存在を前提としたリアルオプションモデルが構築された。そして，各国が削減政策に合意する条件が求められ，それを利用する事で，政策が早められる要因として不確実性の低下や汚染ストック量の増加があること，交渉の存在が政策を早める事が示された。特に，政策として汚染の限界削減費用が低い国に重点的に排出権の初期配分を行う事で，多くの場合は早期の汚染削減が可能になることが示された。最後に，合意条件を利用したシミュレーションによって，その結果が確かめられた。

本研究の今後の課題としては，汚染ストック量の変化など他の不確実性による影響，現実に得られる情報とモデルのパラメータとの関連性，削減後の汚染水準が内生的に決定される可能性，明示的な交渉費用や交渉時間の導入，排出権取引の価格や取引方法に関する仮定の緩和，可逆的または追加的な汚染削減政策の可能性の導入，などが考えられる。そういった拡張は今後考えていきたい。ただ，従来では，このような交渉によって政策実行のタイミングが早まるか否か分析されていた研究はあまり見られなかったので，この理想的な状況におけるモデルが今後の研究の出発点となる事を期待したい。

補　　論

補題 1 の証明

以下では交渉時に満たすべき条件を模索していく。$\theta_i^*(\xi_i;\bar{\xi}_i)$ に $C_i = k_i^a(E_i^0 - E_i^A) + p(E_i^A - \bar{E}_i^A)$ を代入して整理すると，国 $i \in N$ のトリガーは

$$\theta_i^*(\xi_i;\bar{\xi}_i) = \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a\frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (\xi_i(p - k_i^a) - p\bar{\xi}_i)\frac{E^A}{E^0 - E^A})$$

となる。ここで国 i は ξ_i を $0 \leq \xi_i \leq 1$ の範囲で自由に動かせるので，排出権取引後の均衡配分 ξ_i^e について，全ての i で $\theta_i \geq \theta_i^*(\xi_i^e;\bar{\xi}_i)$ が満たされる。このとき，削減政策に対する国 i の合意条件は

$$\theta_i \geq \theta_i^*(\xi_i;\bar{\xi}_i) = \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a\frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (\xi_i(p - k_i^a) - p\bar{\xi}_i)\frac{E^A}{E^0 - E^A})$$

となり右辺のトリガーは ξ_i に依存して単調に変化するが，このとき $0 \leq \xi_i \leq 1$ よりトリガーは上限と下限を持つ。具体的には，$\xi_i = 0$ となるときのトリガーを

$$\underline{\theta}_i \equiv \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a\frac{E_i^0}{E^0 - E^A} - p\bar{\xi}_i\frac{E^A}{E^0 - E^A})$$

$\xi_i = 1$ となるときのトリガーを

$$\bar{\theta}_i \equiv \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (p(1-\bar{\xi}_i) - k_i^a)\frac{E^A}{E^0 - E^A})$$

と定義すると，

（i） $p > k_i^a$ ならば，ξ_i を増やすほどトリガーが上昇するので，$\underline{\theta}_i < \bar{\theta}_i$ で，$\theta_i^* \in [\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i]$

（ii） $p < k_i^a$ ならば，ξ_i を増やすほどトリガーが低下するので，$\underline{\theta}_i > \bar{\theta}_i$ で，$\theta_i^* \in [\bar{\theta}_i, \underline{\theta}_i]$

（iii） $p = k_i^a$ ならば，ξ_i を変化させてもトリガーが一定なので，$\underline{\theta}_i = \bar{\theta}_i$ で，$\theta_i^* = \underline{\theta}_i = \bar{\theta}_i$

となる。いずれにしても，均衡配分でのトリガーは $\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i$ で定義される領域に必ず含まれる。これより，全ての i について $\theta_i \geq \max\{\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i\}$ となる場合には各国が必ず削減政策に合意すること，ある i について $\theta_i < \min\{\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i\}$ となる場合では国 i が削減政策に合意しないために政策が実現しないことがいえる。

補題 2 の証明

国 $i \in N$ が政策に合意する条件は

$$\theta_i \geq \theta_i^*(\xi_i;\bar{\xi}_i) = \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (\xi_i(p - k_i^a) - p\bar{\xi}_i)\frac{E^A}{E^0 - E^A})$$

である。以下ではこの不等号を ξ_i について整理する。

不等号の両辺に $\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta}{\rho_i} > 0$ をかけると

$$\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta\theta_i}{\rho_i} \geq k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (\xi_i(p - k_i^a) - p\bar{\xi}_i)\frac{E^A}{E^0 - E^A}$$

となる。両辺に $p\bar{\xi}_i \frac{E^A}{E^0 - E^A} - k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A}$ を加えると

$$\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta\theta_i}{\rho_i} - k_i^a \frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + p\bar{\xi}_i \frac{E^A}{E^0 - E^A} \geq \xi_i(p - k_i^a)\frac{E^A}{E^0 - E^A}$$

となる。右辺と左辺を入れ替えて両辺に $\frac{E^0 - E^A}{E^A} > 0$ を掛けると

$$(p - k_i^a)\xi_i \leq \frac{E^0 - E^A}{E^A}\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta\theta_i}{\rho_i} - \frac{k_i^a}{p - k_i^a}\frac{E_i^0}{E^0 - E^A}\frac{E^0 - E^A}{E^A} + \frac{p\bar{\xi}_i}{p - k_i^a}$$

となる。あとは両辺を $(p - k_i^a)$ で割ればよいが，このとき $(p - k_i^a)$ の符号が重要となる。

$p \geq k_i^a$ ならば $(p - k_i^a) > 0$ より

$$\xi_i \leq \frac{E^0 - E^A}{E^A}\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta\theta_i}{(p - k_i^a)\rho_i} - \frac{k_i^a}{p - k_i^a}\frac{E_i^0}{E^0 - E^A}\frac{E^0 - E^A}{E^A} + \frac{p\bar{\xi}_i}{p - k_i^a}$$

となる。$p < k_i^a$ ならば $(p - k_i^a) < 0$ より

$$\xi_i \geq \frac{E^0 - E^A}{E^A}\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta\theta_i}{(p - k_i^a)\rho_i} - \frac{k_i^a}{p - k_i^a}\frac{E_i^0}{E^0 - E^A}\frac{E^0 - E^A}{E^A} + \frac{p\bar{\xi}_i}{p - k_i^a}$$

となる。上の 2 つの不等号の右辺は共通なので，

$$\xi_i^*(\theta_i) \equiv \frac{E^0 - E^A}{E^A}\frac{\gamma_i - 1}{\gamma_i}\frac{\beta\theta_i}{(p - k_i^a)\rho_i} - \frac{k_i^a}{p - k_i^a}\frac{E_i^0}{E^0 - E^A}\frac{E^0 - E^A}{E^A} + \frac{p\bar{\xi}_i}{p - k_i^a}$$

と定義すれば簡略化できる。

補題 3 の証明

$\xi_i^e = 1 - \sum_{j\neq i}\xi_j^e$ より，全ての国 $i \in N$ で $p > k_i^a$ ならば $\xi_i^e = 1 - \sum_{j\neq i}\xi_j^e \geq 1 - \sum_{j\neq i}\xi_j^*(\theta_j)$，全ての国 $i \in N$ で $p < k_i^a$ ならば $\xi_i^e = 1 - \sum_{j\neq i}\xi_j^e \leq 1 - \sum_{j\neq i}\xi_j^*(\theta_j)$ となる。また，補題 2 より

$$1 - \sum_{j\neq i}\xi_j^*(\theta_j) = 1 - \frac{E^0 - E^A}{E^A}\sum_{j\neq i}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{\beta\theta_j}{(p - k_j^a)\rho_j} + \sum_{j\neq i}\frac{k_j^a}{p - k_j^a}\frac{E_j^0}{E^0 - E^A}\frac{E^0 - E^A}{E^A} - \sum_{j\neq i}\frac{p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a}$$

も得られる。これより

$$\begin{aligned}
\theta_i \ \geq\ & \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a\frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + (\xi_i^e(p - k_i^a) - p\bar{\xi}_i)\frac{E^A}{E^0 - E^A}) \\
\geq\ & \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(k_i^a\frac{E_i^0}{E^0 - E^A} + ((1 - \frac{E^0 - E^A}{E^A}\sum_{j\neq i}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{\beta\theta_j}{(p - k_j^a)\rho_j} \\
& + \sum_{j\neq i}\frac{k_j^a}{p - k_j^a}\frac{E_j^0}{E^A} - \sum_{j\neq i}\frac{p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a})(p - k_i^a) - p\bar{\xi}_i)\frac{E^A}{E^0 - E^A}) \\
=\ & \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1}\frac{\rho_i}{\beta}(\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j^a(p - k_i^a)}{p - k_j^a}\frac{E_j^0}{E^0 - E^A} - \sum_{j\neq i}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{(p - k_i^a)\beta\theta_j}{(p - k_j^a)\rho_j} \\
& + ((p - k_i^a) - \sum_{j=1}^{n}\frac{(p - k_i^a)p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a})\frac{E^A}{E^0 - E^A})
\end{aligned}$$

なので，整理して

$$\sum_{j=1}^{n}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{p - k_i^a}{p - k_j^a}\frac{\theta_j}{\rho_j} \ \geq\ \frac{1}{\beta}(\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j^a(p - k_i^a)}{p - k_j^a}\frac{E_j^0}{E^0}\frac{E^0}{E^A} - \sum_{j=1}^{n}\frac{(p - k_i^a)p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a} + (p - k_i^a))\frac{E^A}{E^0 - E^A}$$

となる。あとは両辺を $(p - k_i^a)$ で割ると，全ての国 $i \in N$ で $p > k_i^a$ ならば

$$\sum_{j=1}^{n}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{1}{p - k_j^a}\frac{\theta_j}{\rho_j} \ \geq\ \frac{1}{\beta}(\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j^a}{p - k_j^a}\frac{E_j^0}{E^0}\frac{E^0}{E^A} + 1 - \sum_{j=1}^{n}\frac{p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a})\frac{E^A}{E^0 - E^A}$$

となり，全ての国 $i \in N$ で $p < k_i^a$ ならば

$$\sum_{j=1}^{n}\frac{\gamma_j - 1}{\gamma_j}\frac{1}{p - k_j^a}\frac{\theta_j}{\rho_j} \ \leq\ \frac{1}{\beta}(\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j^a}{p - k_j^a}\frac{E_j^0}{E^0}\frac{E^0}{E^A} + 1 - \sum_{j=1}^{n}\frac{p\bar{\xi}_j}{p - k_j^a})\frac{E^A}{E^0 - E^A}$$

が得られる。

最後に，$\xi_i^e \geq 0$ という端点制約を考慮すると，全ての i について $\theta_i \geq \min\{\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i\}$ も必要である。

（経済学部助教）

参 考 文 献

[1] Benoit, J.-P. and L. A. Kornhauser (2002) "Game-theoretic Analysis of Legal Rules and Institutions," in Aumann, R. J. and S. Hart (eds.), *Handbook of Game Theory Vol. 3*, North-Holland: Netherlands.

[2] Brekke, K. A. and B. Oksendal (1991) "The High Contact Principle as a Sufficiency Condition for Optimal Stopping," in *Stochastic Models and Option Values*, ed. by D. Lund, and B. Oksendal. North Holland: Amsterdam.

[3] Coase, R. H. (1960) "The Problem of Social Cost," *Journal of Law and Economics*, 3, 1–44.

[4] Conrad, J. M. (1997) "Global Warming: When to Bite the Bullet," *Land Economics*, 73, 164–173.

[5] Dixit, A. K. (1989) "Entry and Exit Decisions under Uncertainty," *Journal of Political Economy*, 97(3), 620–638.

[6] Dixit, A. K. and R. S. Pindyck (1994) *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton: New Jersey.

[7] Grubb, M., Vrolijk, C. and D. Brack (1999) *The Kyoto Protocol: A Guide and Assessment*, The Royal Institute of International Affairs: London.

[8] Heal, G. and N. Tarui (2006) "Technology Diffusion and International Environmental Agreements," Working Paper.

[9] Kolstad, C. D. (1999) *Environmental Economics*, Oxford University Press: New York.

[10] Merton, R. C. (1973) "The Theory of Rational Option Pricing," *Bell Journal of Economics*, 4(1), 141–183.

[11] Morellec, E. and A. Zhdanov (2005) "The Dynamics of Mergers and Acquisition," *Journal of Financial Economics*, 77(3), 649–672.

[12] Nash, J. F. (1950) "The Bargaining Problem," *Econometrica*, 18, 155–162.

[13] Okada, A. (2003) "A Market Game Analysis of International CO2 Emissions Trading: Evaluating Initial Allocation Rules," in Sawa, T. (ed.), *International Frameworks and Technological Strategies to Prevent Climate Change*, Springer-Verlag: Tokyo.

[14] Osborne, M. J. and A. Rubinstein (1990) *Bargaining and Markets*, Academic Press: New York.

[15] Pindyck, R. S. (1988) "Irreversible Investment, Capacity Choice, and the Value of the Firm," *American Economic Review*, 78(5), 969–985.

[16] Pindyck, R. S.(2000) "Irreversibilities and the Timing of Environmental Policy," *Resource and Energy Economics*, 22, 233–259.

[17] Pindyck, R. S. (2002) "Optimal Timing Problems in Environmental Economics," *Journal of Economic Dynamics and Control*, 26, 1677–1697.

[18] Rubinstein, A. (1982) "Perfect Equilibrium in a Bargaining Model," *Econometrica*, 50, 97–110.

[19] Samuelson, P. A. (1965) "Rational Theory of Warrant Pricing," *Industrial Management Review*, 6, 13–31.

[20] Selten, R. (1981) "A Non-cooperative Model of Characteristic Function Bargaining,"in Boehm, V. and H. Nachtkamp (eds.), *Essays in Game Theory and Mathematical Economics in Honor of Oskar Morgenstern*, Bibliographisches Institut: Mannheim.

[21] 岡田章（2002）「グループ形成と非協力 n 人交渉ゲーム」，今井晴雄，岡田章編『ゲーム理論の新展開』所収，勁草書房。

[22] 蟹江憲史（2001）『地球環境外交と国内政策―京都議定書をめぐるオランダの外交と政策』慶應義塾大学出版会。

[23] 高村ゆかり，亀山康子編（2002）『京都議定書の国際制度―地球温暖化交渉の到達点』信山社出版。

[24] 富永健，他（1989）『フロン―世界の対応技術の対応』日刊工業新聞社。

[25] 浜中裕徳，編（2006）『京都議定書をめぐる国際交渉―COP3 以降の交渉経緯』慶應義塾大学出版会。