

削減技術の開発を考慮した気候変動 における国際交渉の理論分析

藤 田 峻

I. はじめに

温室効果ガスが大気中に蓄積することを原因として生じる気候変動問題は地球温暖化問題とも呼ばれ、特に20世紀後半から世界的に解決すべき課題として認識されている。こうした課題について、1988年に「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」が国連において設置され、気候変動問題の原因や人間社会に与える影響等について科学的な知見を提供する評価報告書が作成されている。これをはじめとする様々な知見に基づき、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）などの国際会議では、気候変動に対応することが重要である旨の決議案が採択され、ときに具体的な目標を伴う場合もあるものの、未だに決定的な解決につながる国際的な合意が得られているとは言えない。

気候変動問題に関する国際交渉を分析するとき、公共財の費用分担問題として状況をとらえることができる。なぜなら、気候変動に対策するためには一般に二酸化炭素に代表される温室効果ガスを削減することが必要であるが、削減には多くの費用を要する。こうした削減サービスが何らかの経済主体によって購入・供給されるとき、その削減によって温室効果ガス濃度が低減されることで気候変動問題が緩和される便益は、サービスを購入・供給した主体以外も享受することができる。すなわち、温室効果ガスを削減するサービスは非競争的

であると考えられ、同時に温室効果ガス濃度は地球全体の大気に関するパラメータであるため、削減サービスは非排除的な性質をも有する。ゆえに、気候変動に対策する財は公共財的性質を持つと考えられ、複数の国家が公共財である削減サービスの数量を決定する構造が存在するため、気候変動問題の国家間交渉を分析するためには、公共財供給問題によって分析することが考えられる。

さらに、気候変動対策においては、温室効果ガスをより削減する様々な手法が日々開発されている。こうした技術は、そもそもの温室効果ガス排出量を減少させることを通じて削減を実現する技術や、大気中の二酸化炭素をドライアイスに変換して大気中から除去することで温室効果ガスを削減する技術など、多様な手段が開発されている。これらの中には温室効果ガスの限界削減費用を低下させる技術革新も多く見られ、気候変動問題の対策を検討する際には、技術開発を通じた側面も考慮されるべきであろう。

そこで本稿では、各国が協力的に温室効果ガスの削減に取り組む条件を分析する先行研究のモデルに基づき、ある国が技術開発をより積極的に行うことが、協力的な交渉の妥結にどのような影響を与えるのか分析する。

II. 先行研究

地球温暖化に関する国際交渉問題を分析した文献は数多く存在し、環境経済学における主要な関心事のひとつとして研究が行われてきた。

中でも本稿と特に関連する文献は、藤田（2017）およびNishimura（2008）である。藤田（2017）ではNishimura（2008）で設定されたモデルを拡張して、気候変動問題に関する国際交渉において、各国が協力して排出枠取引制度に参加する条件を検討した。藤田（2017）およびNishimura（2008）では、各国を特徴づけるパラメータとして、削減費用と気候変動による被害の程度を表す変数が導入されている。また、排出枠の設定方法として、リンダールメカニズムによる排出割当の設定が仮定されていることも共通している。リンダールメカニズムは耐戦略性を満たさない費用分担メカニズムであるが、Walker（1981）や

Varian (1994) などのメカニズムを用いることで、リンダール配分はナッシュ遂行可能であることが知られている。交渉においてリンダール配分を想定する文献は藤田 (2017) やNishimura (2008) の他にもあり、たとえばUzawa (2003) ではN国のモデルを考えてリンダール配分の安定性について分析が行われている。また、Virta (2014) ではNordhaus and Yang (1996) の分析に基づきながら、リンダール配分を考慮した研究が行われている。

また、以上のようにリンダールメカニズムを用いないアプローチでの研究にも膨大な蓄積がある。たとえばNordhaus and Yang (1996) では、大気温度と海水温度をも区別するほどの詳細で多様なパラメータで構成されるモデルを構築し、推定したパラメータのもとで数値計算を行う手法を採用している。こうした手法によって明快な結論が得られているものの、特定のパラメータのもとでの分析にとどまらざるをえない面が多いため、結論の一般性に課題が残ると言えよう。他方、一般化を追求すると具体的な含意を得ることが難しいというトレードオフがある。こうしたトレードオフに対応した文献としてDutta and Radner (2009) などが挙げられる。Dutta and Radner (2009) では、数理モデルに基づく解析的な分析を行いながらも、解析的な計算が困難な場合にはパラメータを推定したもとでカリブレーションを行うことで、具体的な結論を得ることに成功している。このようなトレードオフの中で藤田 (2017) では、解析的な命題の導出を基本としながら、2国モデルによって交渉が実現するための条件を明らかにした。

そこで、以降では藤田 (2017) のモデルに基づき本稿において用いるモデルを設定し、改変されたモデルの均衡のもとで技術開発が協力的な意思決定を行う誘因に寄与しうるのか検討する。

Ⅲ. モデルの設定

本稿の分析にあたって基本モデルとなる藤田 (2017) では、温室効果ガス削減に関する2国間の交渉問題が分析された。各国 $i = 1, 2$ はそれぞれの利得関

数 U_i の最大化を目指して、ゲームの第1段階で排出枠取引制度の存在に合意するか選択した上で、自国の削減量 A_i を最大化すると仮定された。ここで各国の利得 U_i は、以下の通り設定された。

$$\begin{aligned} U_i &= u_i(c_i) - D_i \left(X - \sum_{k=1}^2 A_k \right) + E_i \\ &= \left(Y_i - \frac{1}{2} b_i A_i^2 \right) - \frac{1}{2} t_i \left(X - \sum_{k=1}^2 A_k \right)^2 + q(A_i - \theta_i \hat{A}) \end{aligned}$$

上式の第1項目は、第 i 国が消費 c_i を通じて得られる効用 $u_i(c_i)$ であり、 $u_i(c_i) = \left(Y_i - \frac{1}{2} b_i A_i^2 \right)$ と特定化される。この特定化は、自国のGDP水準 Y_i から削減に要する費用を引いた値として定義されている。削減費用を表す項は A_i について削減費用が逡増する仮定が置かれており、これは効率的な削減技術から順番に採用されると考えられるため、1単位あたりの削減費用は逡増すると考えるための仮定である。また b_i は削減技術を表す各国を特徴づけるパラメータであり、これが小さいほど安価に削減可能であるため、削減技術が高いことを表現する。

本稿ではこの点に関して拡張を行う。すなわち、本稿では削減技術開発による交渉への影響を分析するため、利得関数の第1項目について、GDPのうちから追加的な技術開発を行う費用を支払うことで、削減効率を表現するパラメータ b_i の数値を操作できる設定を追加する。このようなモデルを設定するため、第1国に限り利得関数を以下のように書き換える¹。

$$\begin{aligned} U_1 &= u_1(c_1) - D_1 \left(X - \sum_{k=1}^2 A_k \right) + E_1 \\ &= \left(Y_1 - \rho_1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{1 + \beta_1 \rho_1} A_1^2 \right) - \frac{1}{2} t_1 \left(X - \sum_{k=1}^2 A_k \right)^2 + q(A_1 - \theta_1 \hat{A}) \end{aligned}$$

1 本稿では追加的な研究開発を第1国のみが行うと仮定したが、両国が追加的な研究開発を行う場合も考えられる。このようなケースの分析は今後の課題である。

すなわち、追加的な技術開発のための支払を $\rho_1 \geq 0$ とすると、削減効率を表すパラメータは $b_1 = \frac{\alpha_1}{1 + \beta_1 \rho_1}$ となるとする。 $\alpha_1 > 0$ は追加的な研究開発が行われなかった場合に適用される削減技術を表すパラメータであり、 $\beta_1 > 0$ は研究開発に対する技術開発効率を表現するパラメータである。このとき $\frac{db_1}{d\rho_1} < 0, \frac{d^2b_1}{d\rho_1^2} > 0$ より、技術開発費用を投入するほど、安価に削減することができるようになるが、その効果は徐々に小さくなると言える。

次に利得関数の第2項目 $D_i(X - \sum_{k=1}^2 A_k)$ は、 i 国が気候変動によって受ける損失を表す。ここで $X > 0$ は、一切の削減が行われない場合に大気中に存在する温室効果ガスの総量である。ここから両国の削減量 $\sum_{k=1}^2 A_k$ を引いた値が大気中に存在する温室効果ガスの最終的な総量となり、この値に依存して被害の程度が決まる。ここで $D_i(X - \sum_{k=1}^2 A_k) = \frac{1}{2} t_i (X - \sum_{k=1}^2 A_k)^2$ として特定化されることについて、温室効果ガスの総量を二乗した値に応じて被害が定まると仮定される。この設定はNishimura (2008) など多くの文献でも採用されている前提であり、温室効果ガスの蓄積によって、気候変動の被害が加速度的に増加することを表現している。また、 $t_i > 0$ は各国が気候変動によって受ける被害の程度を表すパラメータであり、 t_i が大きな国であるほど気候変動により大きな影響を受けることを表す。たとえば極地に近く寒冷な気候の土地が多い国であれば、気候変動による温暖化による被害は小さいと考えられるが、赤道付近の国では気候変動による温暖化によって感染症の蔓延などの損失を被る程度が大きいと考えられる。このような気候変動による被害の程度を表現するパラメータが t_i である。

以上より、本稿のモデルにおいて各国の特徴は、第1国は技術開発投資 ρ_1 を通じて決定され、第2国は所与である削減技術を表すパラメータ b_i と、気候変動による被害を表すパラメータ t_i によって表現される。

最後に第3項目の $E = q(A_i - \theta_i \hat{A})$ は排出枠取引制度によって生じる所得移転である。ゲームの手番については後述するが、排出枠取引制度が成立しない場合は $E_i = 0$ である。本稿で想定する排出枠取引制度は、リンダールメカニズムに基づき削減割当が決定される国家間の合意を考えて、自国の実際の削減量 A_i と削減割当量 $\theta_i \hat{A}$ との差異がある場合にはその差額を支払う（または受け

取る) ことと設定する。

以上の通り利得関数を設定したもとの、以下の手番から構成されるゲームを考える²。

- 1) 第1国が追加的な削減技術開発コスト $\rho_1 \geq 0$ を選択する。
- 2) 各国がリンダールメカニズムに基づく排出枠取引制度の枠組みに参加するか選択する³。
- 3) 第2段階で定まった体制のもとで、各国は削減量 A_i を選択する。

このような手番のもとで、次章では均衡水準を明らかにし、追加的な技術開発投資が協力に向けた姿勢に肯定的な作用をもたらすのか検討する。

IV. 国際交渉に関する意思決定

本章では、以上で設定したモデルに基づき、均衡において選択される水準を検討する。本稿のモデルでは第2段階以降は藤田(2017)で設定されたモデルとほとんど同様である。すなわち、第1段階において第1国が削減に関する技術開発コスト ρ_1 を選択すると、 $b_1 = \frac{\alpha_1}{1+\beta_1\rho_1}$ となる。よって第2段階以降では b_1 の値は一意に定まるため、第2段階以降では藤田(2017)の結論をそのまま適用することが可能である。そこで、まずは藤田(2017)で示された第2段階以降の部分ゲームにおける各国の選択を概観する。

まず、第3段階において実現しうる状況は、「排出枠取引制度を通じた協力が実現する場合」と、「排出枠取引制度が実現せず、各国が私的に削減量を選択する場合」の2通りのみである。

第一に「排出枠取引制度を通じた協力が実現する場合」の状況を考えると、リンダールメカニズムに基づいて定まる総削減量と削減割当を所与として、自

-
- 2 第2段階以降は藤田(2017)の分析と同様であり、本稿では第1段階が追加されたことによる結果への影響に着目した分析を行う。
 - 3 第2段階について、各国は排出枠取引制度という協力の枠組みに参加するかを選択するが、排出枠取引制度が実現するのは両国とも協力することを選択した場合のみであることに注意する。

国の利得を最大化する削減量を選択する。排出枠取引制度が存在する下で各国が選択する削減量の水準は、以下の最大化問題の解によって与えられる⁴。

$$\max_{A_i} \left(Y_i - \rho_i - \frac{1}{2} b_i A_i^2 \right) + q(A_i - \theta_i A^L)$$

ここで A^L とは、リンダールメカニズムを通じて定められた排出枠取引制度における総削減量である。また、この最大化問題に被害の程度を表す項が含まれないのは、被害の大きさは総削減量に依存して決まり、総削減量はリンダールメカニズムを通じて排出枠取引制度が設定される時点で先決されているためである。このとき第 i 国にとって最適な削減量は $A_i^L = \frac{b_j A^L}{b_i + b_j}$ と計算でき、 $A_1^L + A_2^L = A^L$ より $q = \frac{b_i b_j A^L}{b_i + b_j}$ であると言える。この結果から、リンダールメカニズムのもとで各国が申告する公共財需要量（総削減量）の水準は、以下の最大化問題の解が各国について等しくなる水準である。

$$\max_A U_i = Y_i - \rho_i - \frac{1}{2} b_i + q(A_i - \theta_i A) - \frac{1}{2} t_i (X - A)^2$$

上式に $A_i = A_i^L$ および q を代入して各国の選択する A が等しくなる水準を考えると θ_i を計算できる⁵。以上より、リンダールメカニズムに基づく排出枠取引制度が実現するときの総削減量は $A^L = \frac{(b_1 + b_2)(t_1 + t_2)X}{b_1 b_2 + (b_1 + b_2)(t_1 + t_2)}$ となるので、各国の利得は以下の通りであると計算できる⁶。

$$U_i^L = Y_i - \rho_i - \frac{b_i b_j t_i X^2}{2\{b_i b_j + (b_i + b_j)(t_i + t_j)\}}$$

次に、排出枠取引制度が実現せず、各国が私的に削減量を選択する場合を考える。このとき、各国は次の最大化問題の解によって自国の削減量を選択する。

4 ただし $\rho_2 = 0$ である。

5 $\theta_i + \theta_j = 1$ より、両国の θ_i が一意に定まる。

6 リンダール均衡の性質より、ここで実現する各国の利得はパレート効率的である。

両国の反応関数より、私的に削減する場合の総削減量は $A^N = \frac{(b_2 t_1 + b_1 t_2) X}{b_1 b_2 + b_2 t_1 + b_1 t_2}$ となり、このとき各国の利得は以下のように計算できる。

$$U_i^N = Y_i - \rho_i - \frac{b_i b_j^2 t_i (b_i + t_i) X^2}{2(b_i b_j + b_j t_i + b_i t_j)^2}$$

以上の通り計算される U_i^L, U_i^N の大きさを比較し、前者が大きい場合には協力して排出枠取引制度の枠組みに参加することを選択し、後者の場合は協力体制が構築されず、各国が私的に削減するのみとなる。また、私的に削減する場合は社会的に非効率的な状況であると考えられるが、各国にとって協力を選択することが望ましいかは、パラメータ条件によって異なる。

藤田 (2017) では、各国が協力を選択するためのパラメータに関する必要条件と十分条件がともに示されている。各国が協力を選択するためには、自国が協力した場合に得られる利得 U_i^L が協力せず私的に削減する場合の利得 U_i^N を上回らなければならない。このような $U_i^L > U_i^N$ となる必要条件と十分条件は藤田 (2017) の定理 1 および定理 2 で述べられている。ここでは、 $x_1 \equiv \frac{t_1}{t_1 + t_2}, y_1 = \frac{b_1}{b_1 + b_2}$ として第 1 国が協力を選択するための必要条件は、

$$y_1 \leq \frac{2 - 2x_1}{|1 - 2x_1| - 4x_1 + 3}$$

であり、同じく第 1 国が協力を選択する十分条件は、

$$y_1 \leq \frac{2 - 2x_1}{3 - 4x_1 + \sqrt{8x_1 - 11 + \frac{4}{x_1}}}$$

である。以上の条件を図示したものが次頁の図 1、図 2 である。

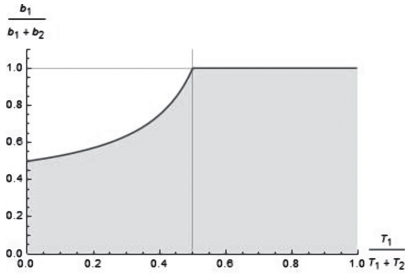


図1 第1国が協力する必要条件

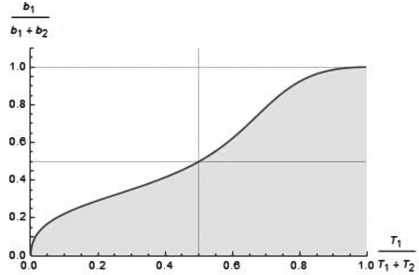


図2 第1国が協力する十分条件

上図について、第2国が協力を選択する x_1, y_1 の組は各図を180度回転させたグラフである。ゆえに、45度線上では協力を選択するための十分条件を両国が満たすことがわかる。なお、必要条件の導出にあたっては $z_1 \equiv \frac{t_1}{b_1}$ について、 $z_1 \rightarrow 0$ の極限がとられており、十分条件の導出には $z_1 \rightarrow \infty$ の極限が計算されている。ゆえに、削減コストに関するパラメータが小さく被害の程度に関するパラメータが大きいほど、十分条件の状況に近づくことが考えられる。以上のような結果について、藤田（2017）では「協力関係の実現には、公共財からの便益と供給コストについて、相手国と比した際の相対的大小関係の一致が重要である。」とまとめられている。

V. 技術開発による効果

以上の結果をもとに、第1段階で技術開発が行われることが、第1国が協力することを選択するインセンティブにどのような影響を与えるか検討する。

第1国が協力を選択する場合の利得 U_1^C と非協力（私的な削減）を選択する場合の利得 U_1^N のそれぞれに $b_1 = \frac{\alpha_1}{1+\beta_1\rho_1}$ を代入して $U_1^C > U_1^N$ となる条件を考える。

しかし、これらの条件を一般形のまま解析的に検討することは困難であるため、技術開発なしであれば私的に削減量を選択する（非協力を選択する）パラ

メータのもとで分析を行う⁷。このとき、 $x_1 = \frac{2}{5}, y_1 = \frac{4}{5}$ である状態を考える⁸。このパラメータのもとでは、前章で述べた必要条件を満たさないため、第1国は協力しないことを選択する。

以上の設定により、 U_1^L, U_1^N に $b_1 = \frac{\alpha_1}{1+\beta_1\rho_1}, x_1 = \frac{t_1}{t_1+t_2} = \frac{2}{5}, y_1 = \frac{b_1}{b_1+b_2} = \frac{4}{5}$ を代入して $U_1^L - U_1^N \equiv F$ として両者の差分を考える。 $F > 0$ ならば第1国は協力を選択し、 $F < 0$ ならば第1国は協力を選択しない。実際に代入した式を整理すると、

$$U_1^L = Y_1 + \frac{2\alpha_1\rho_1 + \{X^2\alpha_1 + 25\rho_1(1 + \beta_1\rho_1)\}t_1}{2\alpha_1 + 25(1 + \beta_1\rho_1)t_1}$$

$$U_1^N = Y_1 - \rho_1 - \frac{X^2\alpha_1 t_1 \{\alpha_1 + (1 + \beta_1\rho_1)t_1\}}{2\{\alpha_1 + 7(1 + \beta_1\rho_1)t_1\}^2}$$

となる。さらに両者の差を計算すると、

$$U_1^L - U_1^N = -\frac{X^2\alpha_1(1 + \beta_1\rho_1)t_1^2\{\alpha_1 + 73(1 + \beta_1\rho_1)t_1\}}{2\{\alpha_1 + 7(1 + \beta_1\rho_1)t_1\}^2\{2\alpha_1 + 25(1 + \beta_1\rho_1)t_1\}} < 0$$

と計算できる。ここでは $x_1 = \frac{2}{5}, y_1 = \frac{4}{5}$ と固定したもとで、任意の $\rho_1 \in \mathbb{R}_+$ を考えていることに注意すると、どれほど技術開発を行うとしても（また、 β_1 が大きく、技術開発効率がどれほど高いとしても）協力の枠組みへ参加する意思決定を変化させることはできないと考えられる。

しかし、この結果は $x_1 = \frac{2}{5}, y_1 = \frac{4}{5}$ としてパラメータを固定したことに依存していると考えられるため、次に $U_1^L - U_1^N \equiv F(\rho_1, \cdot)$ について $\frac{\partial F(\cdot)}{\partial \rho_1} > 0$ となる条件を検討する。ここで、 $\frac{\partial F(\cdot)}{\partial \rho_1} > 0$ は以下の通り計算できる。

7 すなわち $\rho_1 = 0$ のケースを考えると $\alpha_1 = b_1$ となるので、藤田（2017）の状況に一致する。以降の分析では、技術開発の存在によって、各国が協力を選擇する領域に近づく条件の検討を目的とする。

8 このパラメータ設定は、第1国は被害の程度は相手国と比べて若干小さいものの、削減コストが相手国と比べて大きく高いことを表している。

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\rho_1, \cdot)}{\partial \rho_1} > 0 \Leftrightarrow & 12775\beta_1^3 t_1^3 \rho_1^3 + \rho_1^2 (38325\beta_1^2 t_1^3 - 1475\alpha_1 \beta_1^2 t_1^2) \\ & + \rho_1 (38325\beta_1 t_1^3 - 2950\alpha_1 \beta_1 t_1^2 - 278\alpha_1^2 \beta_1 t_1) - 2\alpha_1^3 - 278\alpha_1^2 t_1 \\ & - 1475\alpha_1 t_1^2 + 12775t_1^3 > 0 \end{aligned}$$

上式の成立は一概に言えないものの、たとえば $(\rho_1, t_1, \alpha_1, \beta_1) = (2, \frac{1}{8}, 1, 1)$ のとき上式は満たされ、 $(\rho_1, t_1, \alpha_1, \beta_1) = (\frac{1}{2}, \frac{1}{8}, 1, 1)$ のもとでは満たされない。ここで、

$$\begin{aligned} G \equiv & 12775\beta_1^3 t_1^3 \rho_1^3 + \rho_1^2 (38325\beta_1^2 t_1^3 - 1475\alpha_1 \beta_1^2 t_1^2) \\ & + \rho_1 (38325\beta_1 t_1^3 - 2950\alpha_1 \beta_1 t_1^2 - 278\alpha_1^2 \beta_1 t_1) - 2\alpha_1^3 - 278\alpha_1^2 t_1 \\ & - 1475\alpha_1 t_1^2 + 12775t_1^3 \end{aligned}$$

とする。このとき、次の命題が言える。

命題 1 : $\frac{\partial G}{\partial \alpha_1} < 0$ であり、元々の削減コストが高いほど削減技術開発による協力した場合に実現する利得が高まる。

命題 2 : $38325(1 + \beta_1 \rho_1)^2 t_1^2 > 278\alpha_1^2 + 2950(\alpha_1 + \alpha_1 \beta_1 \rho_1) t_1$ のとき $\frac{\partial G}{\partial \beta_1} > 0, \frac{\partial G}{\partial t_1} > 0$ となる。

まず命題 1 について、元々の削減コストが高まることは協力のインセンティブを高めることに寄与する。これは $y_1 = \frac{4}{5}$ と設定していることが大きく関連しており、 $y_1 = \frac{4}{5}$ の状態から b_1 が減少すると協力を選択する領域に近づく。 α_1 が小さくなるとは b_1 が小さくなることを意味し、このとき研究開発を行うことによる協力することが相対的に望ましいことを表している。他方命題 2 について、 β_1, t_1 については、それぞれの大きさが技術開発による協力の便益を高めるとは一概に言い難い。すなわち、

$$\frac{\partial G}{\partial \beta_1} > 0, \frac{\partial G}{\partial t_1} > 0 \Leftrightarrow 38325(1 + \beta_1 \rho_1)^2 t_1^2 > 278\alpha_1^2 + 2950(\alpha_1 + \alpha_1 \beta_1 \rho_1) t_1$$

となるため、 α_1 が十分に小さいならば b_1, t_1 が大きいほど、削減に関する技術開発を行うことで協力する状況の相対的な利得が増加するものの、 α_1 が大きい場合にはその逆の効果が考えられると言える。

VI. 結論

本稿では藤田（2017）の分析結果に基づいて、気候変動問題に関する国家間交渉について、削減技術の開発が排出枠取引制度を通じた協力の枠組みに参加する利得を相対的に高めることができるか検討した。

中でも削減コストが相対的に高く、被害の程度が相対的にやや小さい国に関する削減技術開発の誘因を考え、元々の削減コストが高い（ α_1 が大きい）とき、技術開発により協力することの相対的な利得を高めることができることが明らかになった。他方、元々の削減コスト α_1 が十分に小さいときには、被害の程度 t_1 や削減技術開発の効率 β_1 が大きいほど、削減技術の開発を通じて、協力することによる相対的な利得が高まることが明らかとなった。

しかし、本稿では特定のパラメータのもとでの分析しか行われておらず、より一般的な分析が今後は必要である。さらに、本稿のモデルでは第1国のみに関係削減コストに関する技術開発を行う手番を与えていたが、2国が技術開発を行うことも考えられるし、このとき技術移転等の存在を考慮することもできる。このような観点でモデルを拡張して分析を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 藤田 峻 [2017]、「地球温暖化に関する国家間交渉の理論分析」、『国際公共経済研究』、第28号、pp. 16-23。
- Dutta, P. K. and R. Radner [2009], "A strategic analysis of global warming: Theory and some numbers," *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol. 71, pp. 187-209.
- Nishimura, Y. [2008], "A Lindahl Solution to International Emissions Trading," *Queen's Economics Department Working Paper*, No. 1177.
- Nordhaus, W. D. and Z. Yang [1996], "A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies," *The American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, pp. 741-765.

- Uzawa, H. [2003], *Economic Theory and Global Warming*, New York and Cambridge: Cambridge University Press.
- Varian, H. R. [1994], "Sequential Contributions to Public Goods," *Journal of Public Economics*, Vol. 53, pp. 165-186.
- Virta, H. [2014], *Climate Change Policy Instruments for Future Use: Personal Carbon Trading and Lindahl Mechanisms*, Helsinki: Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS 123.
- Walker, M. [1981], "A Simple Incentive Compatible Scheme for Attaining Lindahl Allocations," *Econometrica*, Vol. 49, No. 1, pp. 65-71.

