地球温暖化交渉と国際協調の理論：準備的考察

柳　瀬　明　彦

1　はじめに

1997年12月の気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）において採択された、二酸化炭素等の温室効果ガスの削減についての法的拘束力のある約束等を定めた「京都議定書」の運用細目が、2001年11月、マラケシュで開かれた第7回締約国会議（COP7）において合意に達し、各国が批准手続きに入ることとなった。採択から最終合意までの4年近くにわたる交渉、また世界最大のCO_2排出国である米国の不参加という結果は、温暖化防止という共通の目標にもかかわらず、現実問題として存在する各国の利害対立を調整することがいかに困難であるかを物語っている。

地球温暖化やオゾン層破壊は経済学的には、経済活動に伴って排出された汚染物質が国境を越え、また時間を通じて蓄積し、地球環境を悪化させるという「負の国際公共資本ストック」として解釈される。環境保全のために政府が様々な政策的手段を行使できる一国内の環境問題とは異なり、地球環境保全のための政策を実施する世界政府は存在せず、したがって地球温暖化防止という国際公共財の供給は各国が自発的に行うこととなる。また、他の環境問題に比べて、中長期的な時間的視野をもった問題でもある。このような特徴を持った地球環境問題の理論分析は、微分ゲーム理論の応用という形で、1990年代前半から行われてきた。代表的な研究として、van der Ploeg and de Zeeuw (1992), Dockner and Long (1993), Dockner et al. (1996), Hoel (1993), Cesar (1994) といった文献が挙げられる。van der Ploeg and de Zeeuw (1992) や Dockner and Long (1993) は、各国が自国の利益のみを追求する非協力解では国際政策協調をした場合の協力解に比べて定常状態における環境の質が悪化することを示している。また Dockner et al. (1996) は、非協力解の動学経路がカオスを含む複雑な挙動をもたらしうることを示している。一方 Hoel (1993) は、地球温暖化対策として炭素税に焦点を当て、最適な炭素税ルールを導出している。そして Cesar (1994) は、国際的な技術移転が地球環境の質や各国の厚生を高めるための条件について検討している。

地球温暖化を防ぐために国際協調が望ましいという点に関しては、もはや議論の余地はないといえよう。その意味においては、研究の問題意識も、van der Ploeg and de Zeeuw (1992) や Dockner and Long (1993), Dockner et al. (1996) などが議論した非協力解のもたらす様々な問題点よりも、むしろ協力解に関連する問題、具体的には、

- 国際協調に不参加の国を、いかにして参加させるか、
- 国際協調が合意された下で、交渉を通じてどのようにルールを詰めていくか、
- 国際協調のルールに関する大枠設定の下で、具体的にどのような形で政策を実施していくか、

といった問題へとシフトすべき段階にある。本稿では、このうち2番目に挙げた問題について、理論的に検討するための枠組みを提示する。なお、Hoel (1993) や Cesar (1994) の研究は、上に挙げた諸問題のうち、3番目の範疇にあるといえる。

地球温暖化問題における国際協調の合意の下での交渉とは、実は京都議定書の運用ルールに関する交渉に他ならない。既にCOP7において最終合意に達した京都議定書ではあるが、このことは「もはや議定書の内容につい

て検討する必要がない」ということを意味するものではない。京都議定書の特色は、先進諸国に対してそれぞれ温室効果ガス削減目標が設定された点や、目標達成のために排出量取引や共同実施、クリーン開発メカニズムといった柔軟措置（いわゆる「京都メカニズム」）が考案されている点に見出されるが、本稿では、前者、すなわち温室効果ガス削減目標の設定に焦点を当てる。これに関しては、設定された各国の削減目標は科学的な根拠に乏しく、政治的な駆け引きによって数字が積み上げられたとの批判もあり、その妥当性を再検討する余地は大いにあるといえる。Kishino-Kurohata (2002) は、汚染の蓄積がない静学モデルであるが、各国の排出削減目標の設定を協力ゲームの交渉問題として定式化し、各種の交渉ルールの下での交渉解を比較することを通じて京都議定書の再検討を行った興味深い研究である[1)]。動学モデルの枠組みで地球環境の保全に関する国際協調の下での交渉ゲームを分析した研究としては、問題意識は本稿とは異なるが、Escapa and Gutiérrez (1997) が挙げられる[2)]。ただし、彼らのモデルにおいては、各国の厚生水準が地球環境の質と自国の汚染排出量にのみ依存すると仮定されている。このような仮定は、地球環境政策に関する微分ゲーム理論を応用した前述の一連の研究でも、同様になされているものである。しかし、開放経済下の環境政策に関する貿易理論的アプローチの研究によれば[3)]、各国で実施される環境政策による汚染排出量の変化に伴い、汚染集約財の市場において国際価格の変化や各国企業の市場シェアの変化が起こり、外国の厚生水準への波及効果も発生しうる。国際協調が行われる下でも、奥野・小西（1993）が議論しているように、貿易構造とそれに関連する各国の政策の波及効果の存在は、最適な温暖化政策の性質にも影響を及ぼしうる。既存の動学ゲームモデルでは、このような汚染排出量のコントロールがもたらす、いわば「短期」の波及効果は無視されてきたが、以下の分析で示されるように、この短期的効果の存在は交渉解の性質に影響を及ぼすことになる。

2　モデル

N 国から成る世界経済を想定する。各国は経済活動に伴い、環境汚染物質（地球温暖化問題の文脈で考えるならば、二酸化炭素などの温室効果ガス）を排出する[4)]。排出された汚染物質は、国境を越え、一部は自然浄化されるものの、浄化されない部分は時間を通じて蓄積する。$Z(t)$ を t 時点における地球規模の汚染ストックとすると、$Z(t)$ は以下の微分方程式に従って蓄積していく：

$$\dot{Z}(t)=\sum_{i=1}^{N}E_i(t)-\delta Z(t), \qquad Z(0)=Z_0\geq 0. \tag{1}$$

ここで $E_i(t)$ は t 時点における第 i 国の汚染排出量であり、$\delta\in[0,\ 1]$ は汚染の自然浄化率である。

各国は、地球環境の悪化から不効用を被る。第 i 国の汚染被害関数を $D_i(Z)$ で表すことにしよう。関数 $D_i(Z)$ は、以下の性質を満たすと仮定する：

$$D_i(0)=0, \quad D_i'>0, \quad D_i''\geq 0, \quad i=1,...,N.$$

1）浅子ほか（1995）は、京都議定書の採択前に執筆された論文だが、国際協調の達成可能性や各国の合意形成の条件についてゲーム理論の諸概念を適用して包括的に議論した文献として、今なお大いに参考となる。

2）彼らの問題意識は、国際協調が達成された場合の利益の分配について各国が交渉する場合に、異なる交渉ルールの下で利益の分配がどのように影響を受けるかという点にある。

3）例えば、Rauscher (1997) や Ulph (1997) などを参照。

4）本稿では、地球温暖化防止に関する国際協調を念頭に置いてはいるが、モデル自体は必ずしも温暖化問題のみに当てはまるものではないので、「汚染」という一般的な言葉を用いることにする。

各国の厚生水準はまた、フローの汚染排出量にも依存する。汚染排出量は経済活動の水準の代理変数として解釈されうるので、第i国における各時点での厚生水準と各国の汚染排出量との関係を、第i国の経済的純便益関数と呼び、$B^i(E_1,...,E_N)$で表すことにしよう。関数$B^i(E_1,...,E_N)$の性質は、第i国における生産や消費、そして貿易のパターンに依存する[5)]。生産活動において汚染物質の排出を必然的に伴うとすると、第i国における汚染排出量の増加は、その国の生産水準、そして国民所得水準の上昇を意味する。しかし、汚染集約財が国際的に取引されているならば、各国における汚染排出量の増加は、世界全体での汚染集約財の生産の増加を通じて、その国際相対価格の低下をもたらすことになる。もしも第i国が汚染集約財の純輸入国ならば、このような汚染集約財の国際相対価格の低下は交易条件の改善を意味し、反対に純輸出国ならば、汚染集約財の国際相対価格の低下は交易条件の悪化を意味する。前者の場合、第i国は汚染排出量の増加によって、その経済的純便益は大きく高まるが、後者の場合、第i国における汚染排出量の増加に伴う国民所得水準の上昇は、交易条件の悪化によって部分的に相殺されるため、第i国の経済的純便益はそれほど大きく高まることはないだろう。また、第j国（$j\neq i$）の汚染排出量の変化に関しては、それが直接的に第i国の国民所得に影響を及ぼすことはないが、上で述べたとおり、交易条件の変化を通じての間接的な影響は存在する。以上の議論から、関数$B^i(E_1,...,E_N)$の性質については、

$$B^i(0,...,0)=0,\quad \frac{\partial B^i}{\partial E_i}>0,\quad i=1,...,N$$

のみが仮定され、$\partial B^i/\partial E_j$の符号（$j\neq i$）については、正、負、ゼロいずれのケースも想定されうる。

各国の厚生水準は、時点0から無限の将来にわたる純社会的便益$B^i(E_1,...,E_N)-D_i(Z)$の割引現在価値合計として定義される：

$$W_i=\int_0^\infty e^{-rt}[B^i(E_1(t),...,E_N(t))-D_i(Z(t))]\,dt. \tag{2}$$

ここで$r>0$は割引率であり、各国共通であると仮定される。

3　動学的協力ゲーム

3.1　協力解

各国は国際協調体制の下、世界全体の厚生を最大にするように汚染排出量を決定する。世界全体の厚生を表す社会的厚生関数を、Escapa and Gutiérrez (1997) と同様、各国の厚生水準の加重和として定義する。ω_iを世界全体の厚生に占める第i国の厚生水準のウエイトと定義する。各国の厚生水準は（2）式で定義されているので、世界全体の厚生は、以下の式で表される：

$$\sum_{i=1}^N\omega_iW_i=\int_0^\infty e^{-rt}\sum_{i=1}^N\omega_i[B^i(E_1(t),...,E_N(t))-D_i(Z(t))]\,dt. \tag{3}$$

ここで各$i=1,...,N$について$0<\omega_i<1$であり、また$\sum_{i=1}^N\omega_i=1$が成立する。$(\omega_1,...,\omega_N)$の決定については次項において議論を行い、ここでは$(\omega_1,...,\omega_N)$は所与であると仮定する。したがって、協力解は、社会的厚生関数（3）を汚染蓄積方程式（1）の制約の下で最大化するという動学的最適化問題として定式化される。

この動学的最適化問題を解くために、ハミルトニアンを次のように定義する：

$$\mathcal{H}=\sum_{i=1}^N\omega_i[B^i(E_1,...,E_N)-D_i(Z)]+\mu\left[\sum_{i=1}^N E_i-\delta Z\right].$$

5）補論も参照のこと。

最大化の必要条件は、

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial E_i}=\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial B^j}{\partial E_i}+\mu=0,\quad i=1,\ldots,N, \tag{4}$$

$$\dot{\mu}=r\mu-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial Z}=(r+\delta)\mu-\sum_{i=1}^{N}\omega_i D_i{}'(Z), \tag{5}$$

$$\lim_{t\to\infty} e^{-rt}\mu(t)Z(t)=0 \tag{6}$$

で与えられる。(4) 式は、各時点において$E_1,\ldots,E_N$がハミルトニアンを最大にするように選ばれることを表している。オイラー方程式 (5) は、汚染ストックのシャドープライスμが時間を通じてどのように変化していくべきかを表している。そして (6) 式は、汚染ストックの割引現在価値が無限の将来においてはゼロになるべきであるという横断面条件を意味している。

以下の分析では、各国の経済的純便益関数および汚染被害関数を

$$B^i(E_1,\ldots,E_N)=\alpha_i+\beta_i E_i-\frac{E_i^2}{2}+\sum\nolimits_{j\neq i}\gamma_i^j E_j,$$

$$D_i(Z)=\eta_i Z$$

という関数形に特定化する。ここでα_i, β_i, η_iは正のパラメターであり、γ_i^jは非負あるいは非正のパラメターである。これらの特定化の下で (4) 式を変形すると、各国の汚染排出量は

$$E_i=\beta_i+\frac{\sum_{j\neq i}\omega_j\gamma_j^i}{\omega_i}+\frac{\mu}{\omega_i} \tag{7}$$

で表される。(7) 式を (1) 式に代入することにより、汚染ストックの動学方程式が

$$\dot{Z}=\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\omega_i}\mu-\delta Z+\sum_{i=1}^{N}\beta_i+\sum_{i=1}^{N}\frac{\sum_{j\neq i}\omega_j\gamma_j^i}{\omega_i} \tag{8}$$

と求められる。また、(5) 式は

$$\dot{\mu}=(r+\delta)\mu+\sum_{i=1}^{N}\omega_i\eta_i \tag{9}$$

と書き換えられる。したがって、この経済の動学体系は

$$\begin{bmatrix}\dot{\mu}\\ \dot{Z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r+\delta & 0\\ \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\omega_i} & -\delta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu\\ Z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{N}\omega_i\eta_i\\ \sum_{i=1}^{N}\beta_i+\sum_{i=1}^{N}\frac{\sum_{j\neq i}\omega_j\gamma_j^i}{\omega_i}\end{bmatrix} \tag{10}$$

という連立微分方程式で表される。この連立微分方程式を解くと、

$$\mu(t)=\mu^*,\qquad Z(t)=e^{-\delta t}(Z_0-Z^*)+Z^* \tag{11}$$

を得る[6)]。ここで、

$$\mu^*=-\frac{\sum_{i=1}^{N}\omega_i\eta_i}{r+\delta}, \tag{12a}$$

6）動学体系(10)の係数行列の特性根λは$-\delta$と$r+\delta$の２つであるが、$\lambda=r+\delta$の方は横断面条件(６)を満たさないので、$\lambda=-\delta$が選択される。

$$Z^* = \frac{1}{\delta(r+\delta)}\left[(r+\delta)\left(\sum_{i=1}^{N}\beta_i + \sum_{i=1}^{N}\frac{\sum_{j\neq i}\omega_j\gamma_j^i}{\omega_i}\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\omega_i}\right)\left(\sum_{i=1}^{N}\omega_i\eta_i\right)\right] \tag{12b}$$

は、定常解である。(7) 式、(11) 式、そして (12) 式より、各国の汚染排出量が

$$E_i(t) = \beta_i - \frac{\eta_i}{r+\delta} + \frac{1}{\omega_i}\sum_{j\neq i}\omega_j\left(\gamma_j^i - \frac{\eta_j}{r+\delta}\right) \equiv E_i^* \tag{13}$$

と求められる。(13) 式は、最適経路上での各国の汚染排出量は常に一定となることを意味している[7)]。

(2) 式に (12) 式および (13) 式を代入することにより、各国の厚生水準が$(\omega_1, \ldots, \omega_N)$の関数として求められる：

$$\begin{aligned}
W_i &= \int_0^\infty e^{-rt}\left[\alpha_i + \beta_i E_i^* - \frac{(E_i^*)^2}{2} + \sum_{j\neq i}\gamma_i^j E_j^* - \eta_i Z(t)\right]dt \\
&= \frac{1}{r}\left\{\alpha_i + \beta_i\left[\beta_i - \frac{\eta_i}{r+\delta} + \frac{1}{\omega_i}\sum_{j\neq i}\omega_j\left(\gamma_j^i - \frac{\eta_j}{r+\delta}\right)\right] - \frac{1}{2}\left[\beta_i - \frac{\eta_i}{r+\delta} + \frac{1}{\omega_i}\sum_{j\neq i}\omega_j\left(\gamma_j^i - \frac{\eta_j}{r+\delta}\right)\right]^2\right. \\
&\qquad \left. + \sum_{j\neq i}\gamma_i^j\left[\beta_j - \frac{\eta_j}{r+\delta} + \frac{1}{\omega_j}\sum_{k\neq j}\omega_k\left(\gamma_k^j - \frac{\eta_k}{r+\delta}\right)\right]\right\} \\
&\quad - \frac{\eta_i Z_0}{r+\delta} - \frac{\eta_i}{r(r+\delta)^2}\left[(r+\delta)\left(\sum_{i=1}^{N}\beta_i + \sum_{i=1}^{N}\frac{\sum_{j\neq i}\omega_j\gamma_j^i}{\omega_i}\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\omega_i}\right)\left(\sum_{i=1}^{N}\omega_i\eta_i\right)\right] \\
&\equiv W^i(\omega_1, \ldots, \omega_N).
\end{aligned} \tag{14}$$

3.2　ナッシュ交渉ゲーム

社会的厚生関数に占める各国の厚生水準のウエイト$(\omega_1, \ldots, \omega_N)$は、ナッシュ交渉ゲーム（Nash, 1950; 1953）を通じて決定されると仮定する[8)]。ただし、各国が交渉に参加するように国際的な所得移転が適切に行われると想定する。交渉が決裂した場合の各国の厚生水準を$\overline{W}_i$で表すと、ナッシュ交渉解は、$W^i(\omega_1, \ldots, \omega_N) + T_i$と$\overline{W}_i$との差を全ての国について掛け合わせたもの（ナッシュ積）を最大にするような各国のウエイトの組み合わせとなる。ここでT_iは第 i 国への純所得移転額である。したがって、解くべき問題は、

$$\max_{\omega_1, \ldots, \omega_N} \prod_{i=1}^{N}[W^i(\omega_1, \ldots, \omega_N) - \overline{W}_i + T_i] \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N}\omega_i = 1 \quad \text{and} \quad \sum_{i=1}^{N}T_i = 0 \tag{15}$$

である。この問題を解くために、ラグランジュアンを次のように定義する：

$$\mathcal{L} = \prod_{i=1}^{N}[W^i(\omega_1, \ldots, \omega_N) - \overline{W}_i + T_i] + \theta\left(1 - \sum_{i=1}^{N}\omega_i\right) - \phi\sum_{i=1}^{N}T_i.$$

最適条件は、以下のようになる：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\omega_i} &= \frac{\partial W^i}{\partial\omega_i}\prod_{j\neq i}[W^j(\omega_1, \ldots, \omega_N) - \overline{W}_j + T_j] \\
&\qquad + \sum_{j\neq i}\frac{\partial W^j}{\partial\omega_i}\prod_{k\neq j}[W^k(\omega_1, \ldots, \omega_N) - \overline{W}_k + T_k] - \theta = 0, \quad i = 1, \ldots, N,
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial T_i} = \prod_{j\neq i}[W^j(\omega_1, \ldots, \omega_N) - \overline{W}_j + T_j] - \phi = 0, \quad i = 1, \ldots, N. \tag{17}$$

---

7 ）この結果は、汚染被害関数を線形と仮定したために導かれたものである。代わりに、例えば汚染被害関数が 2 次関数とした場合は、各国の汚染排出量は時間に依存することになる。

8 ）Escapa and Gutiérrez (1997) は、ナッシュ交渉解のほかに、Kalai and Smorodinsky (1975) によって提案された交渉ルールに基づく交渉解も導出している。

これらの最適条件を整理すると、

$$\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial W^j}{\partial \omega_i}=\frac{0}{\phi},\quad i=1,\ldots,N \tag{18}$$

を得る。

(18) 式より、ナッシュ交渉解における各国の厚生のウエイトは、連立方程式

$$\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial W^j}{\partial \omega_1}=\ldots=\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial W^j}{\partial \omega_N},\quad \sum_{i=1}^{N}\omega_i=1 \tag{19}$$

の解 $(\omega_1^\beta,\ldots,\omega_N^\beta)$ となる。ところが、(14) 式より

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial W^j}{\partial \omega_i}&=\frac{1}{r}\left[\sum_{j=1}^{N}(\beta_j-E_j^*)\frac{\partial E_j^*}{\partial \omega_i}-\frac{\delta\sum_{j=1}^{N}\eta_j}{r+\delta}\frac{\partial Z^*}{\partial \omega_i}\right]\\&=\frac{1}{r}\sum_{j=1}^{N}\left[-\frac{1}{\omega_j}\sum_{k\neq j}\omega_k\left(\gamma_k^j-\frac{\eta_k}{r+\delta}\right)-\frac{\sum_{k\neq j}\eta_k}{r+\delta}\right]\frac{\partial E_j^*}{\partial \omega_i}\end{aligned} \tag{20}$$

であり、(13) 式より

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_i^*}{\partial \omega_i}&=-\frac{1}{(\omega_i)^2}\sum_{j\neq i}\omega_j\left(\gamma_j^i-\frac{\eta_j}{r+\delta}\right),\\\frac{\partial E_j^*}{\partial \omega_i}&=\frac{1}{\omega_i}\left(\gamma_j^i-\frac{\eta_j}{r+\delta}\right),\quad j\neq i\end{aligned}$$

が成立するので、連立方程式 (19) は極めて複雑な非線形体系となり、一般に明示的な解を求めるのは困難である。そこで、以下では $(\omega_1^\beta,\ldots,\omega_N^\beta)$ が満たす性質について定性的な議論を行う。

いま、$\omega_1=\cdots=\omega_N$ で (20) 式を評価することにしよう。すると、以下の結果を得る：

$$\sum_{j=1}^{N}\left.\frac{\partial W^j}{\partial \omega_i}\right|_{\omega_1=\cdots=\omega_N}\sum_{j\neq i}\left(\gamma_j^i-\frac{\eta_j}{r+\delta}\right)\left(\sum_{k\neq i}\gamma_k^i-\sum_{k\neq j}\gamma_k\right). \tag{21}$$

(21) 式より、各国の短期的な厚生が外国で発生するフローの汚染排出量に依存しない、すなわち $\gamma_i^j=0$ がすべての $i,\ j=1,\ \ldots,\ N$ について成立する場合、

$$\sum_{j=1}^{N}\left.\frac{\partial W^j}{\partial \omega_i}\right|_{\omega_1=\cdots=\omega_N}=0\quad \forall i=1,\ldots,N$$

となることが分かる。したがって、この場合、ナッシュ交渉解において $\omega_1^\beta=\cdots=\omega_N^\beta$ が成立する、すなわち世界全体の厚生に占める厚生のウエイトは全ての国で等しくなる[9]。

これに対して、$\gamma_i^j\neq 0$ の場合は、$\omega_1^\beta,\ldots,\omega_N^\beta$ は一般に異なる値をとることになる。分析の単純化のため、$N=3$ のケースを想定し、

$$\begin{aligned}&\eta_1=\eta_2=\eta_3=\eta,\\&\gamma_1^2=\gamma_1^3=\gamma_1>0,\\&\gamma_2^1=\gamma_2^3=0,\\&\gamma_3^1=\gamma_3^2=\gamma_3<0\end{aligned}$$

を仮定する。このとき、(21) 式は

9）$\gamma_i^j=0$ は、あくまでも $\omega_1^\beta=\ldots=\omega_N^\beta$ が成立するための十分条件であり、これ以外のケースにおいても $\omega_1^\beta=\cdots=\omega_N^\beta$ は成立しうる。

$$\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial W^j}{\partial\omega_1}\bigg|_{\omega_1=\omega_2=\omega_3}=\frac{1}{r\omega_1}\left[(\gamma_3-\gamma_1)\gamma_3-\frac{\eta}{r+\delta}(\gamma_3-2\gamma_1)\right], \tag{22a}$$

$$\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial W^j}{\partial\omega_2}\bigg|_{\omega_1=\omega_2=\omega_3}=\frac{1}{r\omega_2}\left[(\gamma_1)^2+(\gamma_3)^2-\frac{\eta}{r+\delta}(\gamma_1+\gamma_3)\right], \tag{22b}$$

$$\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial W^j}{\partial\omega_3}\bigg|_{\omega_1=\omega_2=\omega_3}=\frac{1}{r\omega_3}\left[(\gamma_1-\gamma_3)\gamma_1-\frac{\eta}{r+\delta}(\gamma_1-2\gamma_3)\right] \tag{22c}$$

と書き換えられる。(22) 式を調べると、$\gamma_1\approx|\gamma_3|$ ならば

$$\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial W^j}{\partial\omega_1}\bigg|_{\omega_1=\omega_2=\omega_3}>\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial W^j}{\partial\omega_2}\bigg|_{\omega_1=\omega_2=\omega_3}>\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial W^j}{\partial\omega_3}\bigg|_{\omega_1=\omega_2=\omega_3}$$

が成立することが分かる。このことは、$\omega_1^g>\omega_2^g>\omega_3^g$ となることを意味している。既に前節で議論したように、汚染集約財の純輸出国は外国の汚染排出量の増加によって交易条件の悪化を被り、逆に純輸入国は交易条件の改善という利益を享受するので、$\gamma_1>0$ および $\gamma_3<0$ という仮定は、第 1 国が汚染集約財の純輸入国、第 3 国が汚染集約財の純輸出国であることをそれぞれ意味していると解釈される。したがって、汚染集約財の純輸出国ほどナッシュ交渉解における自国の厚生のウエイトが低く、逆に純輸入国ほど厚生のウエイトは高くなると考えられる。

４　おわりに

本稿では、地球規模の環境汚染をいかにコントロールしていくべきかという問題について、動学ゲーム理論の立場からのモデルの提示を試みた。地球温暖化交渉に見られるように、各国は国際協調の必要性を感じながらも、自国の利益をできる限り失わないような形での汚染の排出削減を目指すと考えられる。本稿では、このような戦略的側面を考慮に入れて、汚染コントロールの国際協調によって最大化された世界全体の厚生が、ナッシュ交渉によって国際協調に参加する国々の間で分配される、という形での定式化を行った。

本稿は、あくまでも理論的枠組みの提示をしたのみであり、実際にこのモデルを応用して、京都議定書の評価を下すことも可能であろう。また、本稿のモデルは極めて単純化されたものであり、更なる精緻化も必要であろう。これらの点に関しては、また稿を改めて論じたい。

補論：２財貿易モデルによる経済的純便益関数の導出

この補論では、経済的純便益関数の性質について本文で展開された議論を、単純な 2 財貿易モデルによって説明する。

各国では X 財と Y 財という 2 種類の財が生産され、消費されていると仮定する。X 財は「クリーン」な財であり、労働のみを投入することで生産されるものとする。一方、Y 財は「汚染集約財」であり、その生産には労働に加えて汚染物質の排出が必要とされる。第 i 国（$i=1,\ldots,N$）の労働賦存量は $\bar{L}_i$ で与えられているものとする。各国の生産者および消費者は同質的で、競争的に行動すると仮定する。また、議論の単純化のため、それぞれの財は世界市場において自由貿易が行われていると仮定する。X 財をニュメレールとし、Y 財の国際価格を p で表すことにする。

企業の行動

X 財は収穫不変の生産関数によって生産されると仮定し、その投入係数は 1 である（1 単位の労働投入により

１単位のＸ財が生産される）とする。この仮定と、Ｘ財がニュメレールであるとの仮定より、労働賃金率は１に等しくなる。

第 i 国のＹ財部門における労働投入量、汚染排出量、そしてＹ財生産量の関係は、$Y_i = F^i(L_i,\ E_i)$ という「生産関数」で表される。関数 $F^i(L_i,\ E_i)$ は準凹関数で、$F^i(0,\ E_i) = F^i(L_i,\ 0) = 0$，$F^i_L > 0,\ F^i_E > 0$ という性質を満たすと仮定する。Ｙ財生産企業は、汚染を排出する際に排出量１単位当たり τ_i の支払いをしなければならないとする。τ_i は、環境税（汚染排出税）あるいは排出権価格のいずれとしても解釈可能であるが、排出権取引を考えた場合、取引は各国の国内でのみ行われ、国際的な排出権取引は実施されないと想定する。

以上の仮定により、第 i 国の代表的企業の利潤関数は、

$$\pi^i(p,\tau_i) \equiv \max_{Y_i, L_i, E_i}\{pY_i - L_i - \tau_i E_i \quad \text{s.t.} \quad Y_i \leq F^i(L_i, E_i)\}$$

で表される。Hotelling の補題により、

$$Y_i = \pi^i_p(p,\tau_i), \qquad E_i = -\pi^i_\tau(p,\tau_i)$$

が成立し、

$$\pi^i_{pp} = \frac{\partial Y_i}{\partial p} > 0, \qquad \pi^i_{\tau p} = \frac{\partial Y_i}{\partial \tau} = -\frac{\partial E_i}{\partial p} < 0, \qquad \pi^i_{\tau\tau} = -\frac{\partial E_i}{\partial \tau} > 0$$

を得る。

消費者の行動

代表的消費者の財消費からの効用関数を $U^i(x_i,\ y_i)$ で表す[10)]。分析の単純化のため、効用関数は $U^i(x_i,\ y_i) = x_i + u_i(y_i)$ と準線形であると仮定しよう。関数 $u_i(y_i)$ は、$u'_i > 0,\ u''_i < 0$ という性質を満たすと仮定する。

以上の仮定により、第 i 国の代表的消費者の支出関数は、

$$\varepsilon^i(p,B_i) \equiv \min_{x_i, y_i}\{x_i + py_i \quad \text{s.t.} \quad x_i + u_i(y_i) \geq B_i\}$$

で表される。Shephard の補題により、

$$y_i = \varepsilon^i_p(p,B_i)$$

が成立し、

$$\varepsilon^i_{pp}(p,B_i) = \frac{\partial y_i}{\partial p} < 0$$

を得る。また、効用関数が準線形であるとの仮定より、$\varepsilon^i_{pB} = 0$ となる。

自由貿易均衡

世界経済の均衡は、

$$\varepsilon^i(p,B_i) = \bar{L}_i + \pi^i(p,\tau_i) + \tau_i E_i, \qquad i = 1, \cdots, N, \tag{A.1}$$

10）各国における汚染から不効用 $D_i(Z)$ は、国内消費者が被るものであるとも考えられるが、消費者は自分で汚染の水準をコントロールできないので、ここでは消費者が関心を持っているのは自らコントロールできる消費の水準のみであると想定する。

$$M_i = \varepsilon_p^i(p, B_i) - \pi_p^i(p, \tau_i), \qquad i = 1, \cdots, N, \tag{A.2}$$

$$E_i = -\pi_\tau^i(p, \tau_i), \qquad i = 1, \cdots, N, \tag{A.3}$$

$$\sum_{i=1}^{N} M_i = 0 \tag{A.4}$$

という方程式体系で表される[11)]。ここでM_iは各国におけるＹ財の輸入量であり、$M_i > 0$ならば第i国はＹ財の輸入国であり、$M_i < 0$ならば第i国はＹ財の輸出国であることを意味している。企業の利潤と環境税からの収入あるいは排出権収入はすべて消費者に還元されると仮定する。したがって、(A. 1) 式は、各国における総支出と総所得の均等を表している。(A. 2) 式は、各国におけるＹ財の輸入量を、(A. 3) 式は、各国における汚染排出量を、それぞれ表している。そして、(A. 4) 式は、世界全体でのＹ財の需給が均衡することを表している。

均衡体系 (A. 1), (A. 2), (A. 3), (A. 4) は$3N+1$本の方程式から成る。排出権取引あるいはボーモル＝オーツ税を前提とすると、各国の環境政策当局は汚染物質の排出許可量を設定すると考えられる。したがって、均衡体系 (A. 1), (A. 2), (A. 3), (A. 4) においては、$\bar{L}_1, \ldots, \bar{L}_N$に加えて$E_1, \ldots, E_N$が所与とされ、これらの外生変数の値に依存して、$p, B_1, \ldots, B_N, \tau_1, \ldots, \tau_N, M_1, \ldots, M_N$という$3N+1$個の変数が内生的に決定される。このようにして求められるB_iが、本文中の$B^i(E_1, \ldots, E_N)$である。

B_iがどのように$E_1, \ldots, E_N$に依存するかを調べてみよう。(A. 1) 式、(A. 2) 式、(A. 3) 式、(A. 4) 式を全微分し、(A. 2) 式と (A. 3) 式、そして供給関数と要素需要関数についてのオイラーの定理を用いて整理すると[12)]、

$$\varepsilon^i{}_B\, dB_i = \tau_i dE_i - M_i\, dp \tag{A.5}$$

$$= \tau_i dE_i + \frac{M_i}{\sum_{i=1}^{N} \varepsilon_{pp}^i} \sum_{j=1}^{N} \frac{\pi_{p\tau}^j}{\pi_{\tau\tau}^j} dE_j \tag{A.6}$$

を得る。(A. 6) 式は、第i国における経済的純便益の変化が２つの効果から構成されることを表している。第１項は、第i国の汚染排出量の変化がもたらす直接的な影響であり、E_iの増加はB_iを高めるように働く。これに対して第２項は、各国の汚染排出量の変化がＹ財の国際価格の変化を通じて経済的純便益に与える、間接的な影響である。pの低下は$M_i > 0$（第i国がＹ財を輸入している）ならばB_iを高めるように働き、$M_i < 0$（第i国がＹ財を輸出している）ならばB_iを下げるように働くが、p は$(E_1, \ldots, E_N)$の減少関数である。第i国の汚染排出量の増加は、$M_i > 0$ ならばB_iを大きく高めるが、$M_i < 0$ ならば交易条件の悪化をもたらすのでB_i へのプラスの影響は小さい。一方、第j国の汚染排出量の増加（$j \neq i$）の影響は交易条件効果からのみ成り、$M_i > 0$ならばB_iへの影響はプラス、$M_i < 0$ならばマイナスとなる。

参考文献

[１] 浅子和美・國則守生・松村敏弘（1995）「地球温暖化と国際協調―合意形成の条件」宇沢弘文・國則守生編『制度資本の経済学』東京大学出版会，第９章.

11）ワルラス法則により、Ｘ財の市場均衡条件は体系から外れる。

12）供給関数および要素需要関数は(p, τ_i)に関して０次同次なので、オイラーの定理より、

$$p\,\pi_{pp}^i + \tau_i \pi_{p\tau}^i = p\,\pi_{\tau p}^i + \tau_i \pi_{\tau\tau}^i = 0$$

が成立する。

[2] Cesar, H. S. J. (1994), *Control and Game Models of the Greenhouse Effect*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.

[3] Dockner, E. J. and N.V. Long (1993), International Pollution Control: Cooperative versus Noncooperative Strategies, *Journal of Environmental Economics and Management* 24, 13–29.

[4] Dockner, E.J., N.V. Long and G. Sorger(1996), Analysis of Nash Equilibria in a Class of Capital Accumulation Games, *Journal of Economic Dynamic and Control* 20, 1209–1235.

[5] Escapa, M. and M. J. Gutiérrez (1997), Distribution of Potential Gains from International Environmental Agreements : The Case of the Greenhouse Effect, *Journal of Environmental Economics and Management* 33, 1–16.

[6] Hoel, M. (1993), Intertemporal Properties of an International Carbon Tax, *Resource and Energy Economics* 15, 51–70.

[7] Kalai, E. and M. Smorodinsky (1975), Other Solutions to Nash's Bargaining Problem, *Econometrica* 43, 513–518.

[8] Kishino-Kurohata, M. (2002), Kyoto Protocol: Game-theoretically Reconsidered in Setting the GHG Emission Targets and Permit Market, mimeo.

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

[10] Nash, J. F. (1953), Two-Person Cooperative Games, *Econometrica* 21, 128–140.

[11] 奥野正寛・小西秀樹（1993）「温暖化対策の理論的分析」宇沢弘文・國則守生編『地球温暖化の経済分析』東京大学出版会，第５章.

[12] van der Ploeg, F. and A. J. de Zeeuw (1992), International Aspects of Pollution Control, *Environmental and Resource Economics* 2, 117–141.

[13] Rauscher, M. (1997), *International Trade, Factor Movements and the Environment*, Oxford University Press, Oxford, UK.

[14] Ulph, A. (1997), Environmental Policy and International Trade, in C. Carraro and D. Siniscalco (Eds.), *New Directions in the Economic Theory of the Environment*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.