開放経済における環境資源の保全問題

蔡　　大　鵬

This paper reviews the basic models that examine the optimal management of environmental resources that have amenity values and are to be shared among the current as well as the future generations. The focus is placed on Okumura and Cai (2007, 2010), which analyze the implications of the exhaustibility of resources on intergenerational equity in an open economy setting.

Ⅰ．イントロダクション

本論文は，環境資源の最適な管理，すなわち，持続的な経済発展と世代間衡平性を達成するために，どのような政策が望ましいかについて考察することが目的である。ここでいう環境資源とは，きれいな空気のようなアメニティ価値を持ちながら，地球上のすべての人々がともに利用・保全し，将来世代の人々とも分かち合っていかなければならない環境資源のことを指している。地球環境問題の代表である地球温暖化問題を考える際，温室効果ガスの吸収能力をある程度再生可能な枯渇性資源と見れば，地球温暖化問題を枯渇性資源の最適管理問題と見ることができる。その際の基本的視点は，異時点間の最適性と公正性である。すなわち，持続的な地球環境保全が保証されながら，厚生水準を最大化するように消費と環境の質的水準を選択しなければならない。

このように，地球温暖化問題は，環境資源としての大気の温室効果ガスの吸収能力の通時的配分問題であり，その対策の時間的経路の最適性と費用負担の公正性を研究しなければならない。その際には，経済学において蓄積されてきた外部性の理論，ピグー税などの税制面での対策，直接規制や排出権取引などの手法をもちろん，視野に取り入れなければならない。当然のことながら，この問題を正しく分析するために，次の３項目を同時に考慮しなければならない。

1）環境資源の多くは枯渇的であり，また限定した再生能力しか持っていない。現実では，そうした自然再生能力を超える相対的に過剰な資源の利用は，環境資源の利用が競合的になる状況を作り出している。

2）多くの地球環境問題は，世代を超えた影響が現れる。全体の厚生水準を最大化するように消費と環境の質的水準が選択されるが，対象となる計画期間は，超長期でなければならない。また，遠い将来世代の厚生を十分に配慮し，「世代間の衡平性」が実現しなければならない。つまり，「持続可能な発展」を目指さなければならない。

3）経済のグローバリゼーションの進展により，国々の間の経済関係はますます密接になっている。多くの国で財・サービスの貿易や資本の国際取引は国

内生産を上まわるスピードで伸び，対外依存度が高まっている。経済問題はすでに国際貿易・資本移動を抜きにしては語られない段階に入っている。こうした現実を考慮すると，開放経済下の分析は不可欠である。

本論文では，従来の研究を概観した上で，上記の3項目を同時に考慮した理論モデルを紹介する。その上で，地球環境問題の解決に対する政策インプリケーションについても短く触れる。次節では，枯渇性資源を生産へのインプットとして用いる閉鎖経済を考え，そこにおける最適成長経路の性質（ホテリング・ルール）を検討する。続いて，Ⅲ節では，コンスタントな消費経路を達成できる条件としてのハートウィック・ルールおよび一般化したハートウィック・ルールを導出し，それらの経済含意を吟味する。Ⅳ節では，上記の分析を小国開放経済に拡張し，開放経済におけるホテリング・ルールと一般化したハートウィック・ルールを見出し，それらの性質を分析する。引き続き，Ⅴ節では，上記の分析をさらに再生可能な資源に拡張し，最適経路の性質を分析するとともに，環境意識レベル改善の効果，省資源技術改善の効果，また資源再生技術改善の効果などについて分析を行う。最後に，Ⅵ節において，今後の課題について触れる。

Ⅱ．枯渇性資源の最適成長経路：ホテリング・ルール

まず，石油や石炭のような生産へのインプットとしての枯渇性資源の最適成長経路を考える（枯渇性資源に関する経済分析の概説書として，Dasgupta and Heal（1979），Heal（1989）と時政（1992）が優れている）。ここで，S_tを枯渇性資源ストックの大きさとする。産出Q_tは，枯渇性資源の生産への投入量R_t（議論を簡単化するために，その採掘量と等しいと仮定される），再生可能な資本ストックK_tより作り出されると仮定する。生産関数を

(1) $$Q_t = F(K_t, R_t),\quad F_K(K_t,R_t)>0,$$
$$F_R(K_t,R_t)>0,\quad F_{KK}(K_t,R_t)<0,$$
$$F_{RR}(K_t,R_t)<0,\ F_{KR}(K_t,R_t)>0,$$
$$\lim_{K\to 0} F_K(K_t,R_t)=\infty,$$
$$\lim_{R\to 0} F_R(K_t,R_t)=\infty,$$
$$\lim_{K\to \infty} F_K(K_t,R_t)=0,$$
$$\lim_{K\to \infty} F_K(K_t,R_t)=0$$

とする。また，採掘費用はゼロ，人口は常に1と仮定する。Q_tは消費C_tにも資本蓄積にも利用されるとする。効用関数$U(C_t)$はC_tに依存し，$U'>0$, $U''<0$, $\lim_{C\to 0} U'(C_t)=\infty$, $\lim_{C\to\infty} U'(C_t)=0$を満たすとする。また，時間選好率を$\delta$とする。所与の$(K_0, S_0)$の下で，以下の最大化問題を考えよう。

(2) $$\int_0^\infty U(C_t)e^{-\delta t}dt$$

subject to

(3) $$\dot{K}_t = F(K_t,R_t) - C_t,$$

(4) $$\dot{S}_t = -R_t,$$

(5) $$\int_0^\infty R_t dt = S_0.$$

この問題の経常価値ハミルトニアンは，

(6) $$H = U(C_t) + \lambda_t[F(K_t,R_t) - C_t] - \nu_t R_t,$$

である。ここでのλ_tとν_tは，それぞれ貯蓄と資源蓄積のシャドウ・プライスである。一階条件は，

(7) $$U'(C_t) = \lambda_t,$$

(8) $$\dot{\lambda}_t - \delta\lambda_t = -\lambda_t F_K(K_t,R_t),$$

(9) $$\lambda_t F_R(K_t,R_t) - \nu_t = 0,$$

⑽ $\dot{\nu}_t - \delta\nu_t = 0$, i.e. $\lambda_t = \lambda_0 e^{\delta t}$

である。ここでの⑽式は，ホテリング・ルールとして知られ，通時的最適な計画においては，枯渇性資源を保有することによる収益率が利子率（資本の収益率）に等しくなることを意味している（Hotelling，1931）。ホテリング・ルールは，以下のような経済的含意を持つ。採掘費用がゼロなら，地下にある１単位の資源も，採掘され市場に出された資源の１単位も同じ価値を持つが，ホテリング・ルールは，その資源の価格が資本の利子率 r に等しい率で成長しなければならないことを意味する。[1]つまり，枯渇性資源を保有し続けるためには，資源によるキャピタルゲインが，資源を採掘販売して得た資金による利子所得に等しくならなければならない。

Ⅲ．持続可能性の達成: ハートウィック・ルールとその一般化

次に，最適経路上の消費水準の変化について考察する。⑺式および⑻式より，

⑾ $$\dot{C}_t = -\frac{U'(C_t)}{U''(C_t)}(F_K(K_t, R_t) - \delta)$$

が成立することが簡単に確かめられる（ラムゼイ・ルール）。明きからに，最適経路上での消費水準は，資本の限界生産物 $F_K(K_t, R_t)$ と時間選好率 δ の大きさに依存している。$F_K(K_t, R_t) = \delta$ の場合，$\dot{C}_t = 0$ となり，消費水準は一定となるが，Dasgupta and Heal（1974）が考えているような $F_K(K_t, R_t)$ ゼロに向かって減少するケースでは，消費レベルもゼロに向かって減少していく。このような最適経路は，将来世代の厚生を著しく損なうために，真の世代間衡平性を達成しない恐れがある。これに対して，Hartwick（1977）が，コンスタントな消費経路を達成できる経路を示した。ホテリング・ルールを満たしている最適経路に，次の条件

⑿ $\dot{K}_t = F_R(K_t, R_t)R_t$，$\forall t \geq 0$.

を取り入れる。一方，⑶式を時間について微分すると，

⒀ $\dot{C}_t = F_K(K_t, R_t)\dot{K}_t + F_R(K_t, R_t)\dot{R}_t - \ddot{K}_t$.

が得られる。他方，⑿式を全微分すると，$\ddot{K}_t = \dot{F}_R(K_t, R_t)R_t + F_R(K_t, R_t)\dot{R}_t$ が得られる。それを⒀式に代入し，またホテリング・ルールの変形式 $\dot{F}_R(K_t, R_t)/F_R(K_t, R_t) = F_K(K_t, R_t)$ を用いると，コンスタントな消費経路が実現されること，つまり，$\dot{C}_t = 0$ が容易に確認できる。⑿式は，「ハートウィック・ルール」として知られ，「コンスタントな消費経路を達成するためには，枯渇性資源により得られるレントのすべてを再生可能な資本への投資に向けるべきである」ことを意味している。

ハートウィック・ルールは，資本ストックと枯渇性資源の間に，代替可能性が存在しているのであれば，世代間衡平性を実現できる可能性を示唆している。その後，Dixit et al（1980）が「ネット・インベストメント」の概念を導入し，ハートウィック・ルールの一般化作業を行った。彼らは，次式のようなより一般化した条件を満たしているのであれば，$\dot{C}_t = 0$ が達成できることを示した。

⒁ $$(\dot{K}_t - F_R(K_t, R_t)R_t)e^{-rt} = \text{constant}, \quad \forall t \geq 0.$$

つまり，各時点において，ネット・インベストメントの総和値の割引現在価値が一定であれば，コンスタントな消費経路を達成できる。Dixit et al（1980）は，ハートウィック・ルールをネット・インベストメントが一定になるように修正することにより，対象と

なる資源を再生可能なものに拡張したと考えることができる。[2)]

しかしながら，ハートウィック・ルールおよび一般化したハートウィック・ルールのいずれも，最適化問題の解として得られるものではないので，恣意的なアレンジメントになっていると言わざるをえない一面がある。次節では，上記のモデルを小国開放モデルに拡張し，そのフレームワークにおいて，コンスタントな消費経路を内生的に得るOkumura and Cai（2007）の試みを紹介する。

Ⅳ．小国開放経済への拡張（Okumura and Cai, 2007）

前述のように，急速なグローバリゼーションの進展より，経済はすでに国際貿易・資本移動を抜きにしては語られない段階に入っている。ここでは，前節のモデルを開放経済に拡張し，世界の財市場および資本市場に自由にアクセスできる小国経済を考える。なお，資源賦存量の有限性を強調するために，資源のフローは国際的に取引されないと仮定する。

ここで，Ⅱ節のモデルに海外資産 B_t を導入し，予算制約式を以下のように変形する。

⒂ $$\dot{B} = rB_t + F(K_t, R_t) - C_t - I_t.$$

ここでの I_t は純投資であり，$I_t = \dot{K}_t$ となる。また，r は利子率である。なお，Ponziゲームを排除するために，通時的予算制約を設ける：

⒃ $$\int_0^{\infty} (C_t + I_t) e^{-rt} dt = \int_0^{\infty} F(K_t, R_t) e^{-rt} dt + B_0.$$

B_0，K_0 および S_0 が所与の下，経常価値ハミルトニアンは，以下のようになる。

⒄ $$H = U(C_t) + \lambda_t [F(K_t, R_t) + rB_t - C_t - I_t] + \mu_t I_t - \nu_t R_t,$$

ここでの λ_t，μ_t および ν_t は，それぞれ貯蓄，純投資および資源蓄積のシャドウ・プライスである。一階条件は，⒅式から㉓式になる。

⒅ $$U'(C_t) - \lambda_t = 0,$$

⒆ $$-\lambda_t + \mu_t = 0,$$

⒇ $$\lambda_t F_R - \nu_t = 0,$$

㉑ $$\dot{\lambda}_t = (\delta - r)\lambda_t,$$

㉒ $$\dot{\mu}_t = \delta\mu_t - \lambda_t F_K,$$

㉓ $$\dot{\nu}_t = \delta\nu_t - \frac{\partial H}{\partial S} = \delta\nu_t, \text{ i.e. } \nu_t = \nu_0 e^{\delta t}.$$

㉓式より，ホテリング・ルールが満たされていることが容易に確認できる。時間選好率と世界利子率が等しい（$\delta = r$）との仮定をおくと，⒅，⒆および㉑式より，λ_t，C_t および μ_t が定数であることが容易に確認できる。また，㉓式より，

㉔ $$F_K(K_t, R_t) = r$$

が得られる。さらに，⒇および㉓式より，

㉕ $$\dot{F}_R / F_R = r, \text{ ここでは } F_R = \nu_t / \bar{\lambda}.$$

がわかる。つまり，資源の利用が効率的であることが確認できる。

続いて，最適解より一般化したハートウィック・ルールを導出する。⒂式を全微分すると，

㉖ $$\ddot{B} = r\dot{B} + F_K\dot{K} + F_R\dot{R} - \dot{C} - \dot{I}$$

が得られる。また，㉔と㉕式を用いると，次式が得られる。

㉗ $$d(F_R R)/dt = \dot{F}_R R + F_R \dot{R}.$$

㉗を用いて，㉖式を以下のように書き換える。

㉘ $$\ddot{B}_t + \dot{C} + \dot{I}_t - \frac{d}{dt}(F_R R_t) = r(\dot{B}_t + I_t - F_R R_t).$$

上式の両辺に e^{-rt} を掛けて，整理すると，次式が得られる。

㉙ $$\dot{C}_t e^{-rt} + \frac{d}{dt}\left[(\dot{B}_t + I_t - F_R R_t)e^{-rt}\right] = 0.$$

㉙式から分かるように，$\dot{C}_t = 0$ が満たされて

いるためには，次の条件が成立する必要がある。

(30) $\dot{B}_t + I_t = F_R R_t$, all t.

これは小国開放経済下のハートウィック・ルールであり，各時点において，ネット・インベストメントの総和値は枯渇性資源から得られるレントに等しくなることを示している。また，$\dot{C}=0$ は次の条件よりも実現できる。

(31) $(\dot{B}+I-F_R R)e^{-rt} = \text{constant}$, all t.

これは一般化したハートウィック・ルールとなっている。つまり，ネット・インベストメントの総和値の割引現在価値が各時点において一定である必要がある。ここでは，ハートウィック・ルール，あるいは一般化したハートウィック・ルールとは異なり，$\dot{C}_t=0$ は最適化の結果として，内生的に得られている。

次に，経常収支の経路の特徴を調べ，内生的に得られたコンスタントな消費経路が持つ経済的含意について考察する。まず，(16)式より，コンスタントな消費経路は以下のように表される。

(32) $$\overline{C} = r\left\{\int_0^{\infty}[F(K_t, R_t) - I_t]e^{-rt}dt + B_0\right\}.$$

ベルマンの最適性原理から，最適解を任意の時点 $t>0$ において再評価しても最適であることがわかる。よって，(32)式を次のように変形できる。

(33) $$\overline{C} = r\left\{\int_t^{\infty}[F(K_s, R_s) - I_s]e^{-r(s-t)}ds + B_t\right\}$$
$$= r\left\{\int_{t+\Delta t}^{\infty}[F(K_s, R_s) - I_s]e^{-r(s-t-\Delta t)}ds + B_{t+\Delta t}\right\}.$$

上式より，国際資本市場へのアクセスを通じて，産出と消費とのギャップが通時的に調整され，消費のフローが平準化されていることがわかる。上式をさらに以下のように変形できる。

(34) $$B_{t+\Delta t} - B_t = \int_t^{\infty}[F(K_s, R_s) - F(K_{s+\Delta t}, R_{s+\Delta t}) - I_s + I_{s+\Delta t}]e^{-r(s-t)}ds.$$

(34)式の両辺を Δt で割り，また極限を取ると次式が得られる。

(35) $$\dot{B}_t = -\int_t^{\infty}(F_K\dot{K}_t + F_R\dot{R}_t - \dot{I}_t)e^{-r(s-t)}ds.$$

(35)式は経常収支の通時的変化を示していて，経常収支の経路は純投資の変化率 $\dot{I}_t$ および産出の変化率 $F_K\dot{K}_t + F_R\dot{R}_t$ の両者に依存していることがわかる。すなわち，t 期における外国資産の上昇は，将来の経常収支の赤字の割引価値に等しいことを意味している。したがって，経常収支の調整により,産出の変化率と投資の変化率とのギャップが調整され,結果として，コンスタントな消費経路が内生的に得られていることがわかる。[3)]

V．再生可能な資源への拡張（Okumura and Cai, 2010）

熱帯雨林や大気のような環境資源は，限定された再生能力しか持っていない。過剰利用が続くとこの再生能力は作用しなくなる。たとえば，汚染物質が大気の中に排出されても，自然の浄化作用を受け空気の質が回復する。しかし，排出される汚染物質の量があまりにも大きい場合，自然の浄化作用が機能しなくなり，汚染物質は環境の中に堆積するようになる。また，多くの環境資源は，生産における有用なインプットであると同時に，科学的，娯楽的，また美的なアメニティ価値を持っていて（Krutilla, 1967; Krutilla and Fisher,

1975)，個人はそのストックから直接に効用を得ることができる。この節では，再生可能な環境資源のこうした特徴を取り入れ，その異時点間での配分について考えるOkumura and Cai（2010）を紹介する。

ここでは，代表的個人は財の消費および資源ストックから効用を得ていて，それを最大化するように消費量および資源ストックを調整する最適化問題を考える。問題は，下記のように定式できる。

(36) $$\mathrm{Max}\int_0^\infty [U(C_t)+W(S_t)]e^{-\delta t}dt,$$

subject to

(37) $$\dot{B}_t = rB_t+F(K_t, R_t)-C_t-I_t,$$

(38) $$\dot{K}_t = I_t,$$

(39) $$\dot{S}_t = \Phi(S_t)-R_t,$$

(40) $$\int_0^\infty (C_t+I_t)e^{-rt}dt=\int_0^\infty F(K_t,R_1)e^{-rt}dt+B_0.$$

ここでの $\Phi(S_t)$ は資源再生関数であり，Dasgupta and Heal（1979）に倣い，$\Phi(S_t)$ は連続微分可能な強い意味の凹関数であると仮定する。つまり，$S_t \geq 0$ に対して，$\Phi''(S_t)<0$, $\forall t$。$\Phi(0)=0$ と仮定し，また，この資源に対する最大な環境収容能力が存在すると仮定する。つまり，$\exists\bar{S}>0{:}\,\Phi(\bar{S})=0$ とする。すなわち，$\Phi'(\hat{S})=0$ を最大にする唯一の最大値 $\hat{S}$ が存在する，という性質をもつ。生産関数 $F(K_t, R_t)$ および効用関数 $U(C_t)$ に関する諸仮定は前節のものをそのまま使うが，$W(S)$ について，以下のように仮定する:

(41) $$W'(S_t)>0,\ \ W''(S_t)<0,$$
$$\lim_{S\to 0}W'(S_t)=\infty,\ \ \lim_{S\to\infty}W'(S_t)=0.$$

この問題の経常価値ハミルトニアンは，

(42) $$H=[U(C_1)+W(S_1)]+\lambda_t[F(K_t, R_t)+rB_t-C_t-I_t]+\mu_t I_t+\nu_t[\Phi(S_t)-R_t].$$

となる。その一階条件は，以下のようになる。

(43) $$U'(C_t)-\lambda_t=0,$$

(44) $$-\lambda_t+\mu_t=0,$$

(45) $$\lambda_t F_R(K_t, R_t)-\nu_t=0,$$

(46) $$\dot{\lambda}_t=(\delta-r)\lambda_t,$$

(47) $$\dot{\mu}_t=\delta\mu_t-\lambda_t F_K(K_t, R_t),$$

(48) $$\dot{\nu}_t=\rho\nu_t-W'(S_t)-\nu_t\Phi'(S_t).$$

もし，ここで考える資源は枯渇的であり，またアメニティ価値も伴っていない場合，つまり，$\Phi(S_t)=0$ また $W'(S_t)=0$, $\forall t$ であれば，(48)式はホテリング・ルールとなる。このシステムの定常状態は以下のようになる。

(49) $$U'(C)=\lambda,$$

(50) $$F_R(K^*, R^*)=\nu^*/\bar{\lambda},$$

(51) $$F_K(K^*, R^*)=r,$$

(52) $$\nu^*[r-\Phi'(S^*)]=W'(S^*),$$

(53) $$C^*=rB^*+F(K^*, R^*),$$

(54) $$\Phi(S^*)=R^*,$$

(55) $$\frac{C^*}{r}=\int_0^\infty [F(K_t, R_t)-I_t]e^{-rt}dt+B_0.$$

また，$\rho=r$ の仮定の下では，上記システムの定常状態は，下記のように簡単化できる。[4)]

(56) $$\Phi(S^*)=\Psi(\nu^*),$$

(57) $$[r-\Phi'(S^*)]\nu^*=W'(S^*),$$

ただし，ここでは，$\Psi'(\nu_t)<0$ である。また $W'(S^*)>0$ のため，$r>\Phi'(S^*)$ となる。

次に，外生的な需要と生産性のショックを考える。ここで，α を環境意識レベルとし，代表的個人にとって，資源ストックより得られる効用は環境意識レベルの増加関数とする。すなわち，(36)式の $W(S_t)$ を $\alpha W(S_t)$ で置き換える。また，β は省資源技術のレベルとし，生産関数は β に依存するとする。すなわち，(37)式の $F(K, R)$ を $F(K, \beta R)$ で置き換える。さらに，γ は資源再生技術のレベルとし，資源再生関数は $\gamma\Phi(S_t)$ の形とする。すると，

簡単化された定常状態はさらに以下のように書き換えられる。

⑸8) $\gamma\Phi(S^*)=\Psi(\nu^*)$，

⑸9) $[r-\gamma\Phi'(S^*)]\nu^*=\alpha W'(S^*)$。

ここで，α，β および γ の初期値を1とし，全微分すると，

⑹0)

$$\begin{bmatrix}\Phi'(S^*) & -\Psi'(\nu^*)\\ -[W''(S^*)+\Phi''(S^*)\nu^*] & [r-\Phi'(S^*)]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}ds\\ d\nu\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\Phi(S^*)\\ W'(S^*)d\alpha+\nu^*\Phi'(S^*)d\gamma\end{bmatrix}.$$

(1) 環境意識レベル改善の効果

地球温暖化問題の進行を背景に，住民の環境意識が高まりつつある。ここでは，その効果について分析を行う。⑹0)式より，

⑹1)
$$\left.\frac{dS^*}{d\alpha}\right|_{d\beta=0,d\gamma=0}=\frac{1}{\varDelta}\begin{vmatrix}W'(S^*) & -\Psi'(S^*)\\ 0 & [r-\Phi'(S^*)]\end{vmatrix}=\frac{W'(S^*)[r-\Phi'(S^*)]}{\varDelta}>0.$$

ここで，$\varDelta=\det(A)\equiv\Phi'(S^*)[r-\Phi'(S^*)]-\Psi'(\nu^*)[W''(S^*)+\Phi''(S^*)\nu^*]>0$ となる。⑹1)から，環境意識レベルの改善が，資源のシャドウ•プライスを増加させ，それにより資源採掘を抑制させることがわかる。

(2) 省資源技術改善の効果

近年，世界的な資源リスクの増大に伴い，省資源化や廃棄物の有効利用による省資源生産技術の開発が重要課題となっている。古紙を回収して再生紙を生産する技術はその一例である。本来廃棄物である古紙を焼却，廃棄せずに再度紙に作り直すことにより，資源の節約につながる。こうした省資源技術は，資源の回収・再生を容易にするような技術，希少資源の代替・削減が可能となるように生産物を構成する設計技術，少ない労働力で効率的に多品種の製品をオンデマンドで生産するための生産技術,回収された解体物を安全・適切に処理し，再生原料とするための解体技術，解体された再生原料から再利用可能な素材を効率的に再生する材料処理技術など，広範囲にわたっている。[5] ここでは，こうした技術改善の効果について分析を行う。

⑸8)および⑸9)式に β が入っていないため，省資源技術の改善は定常状態の資源ストックおよびそのシャドウ•プライスに影響を及ぼさないことが分かる。しかしながら，F_K は省資源技術の改善により高くなっているため，$F_K(K^*,\beta R^*)=r$ を保つためには，K^* が増加する必要がある。また，$\beta F_R(K^*,\beta R^*)=\nu^*/\bar{\lambda}$ より，β の増加は資源の限界生産性の増加をもたらし，$\bar{\lambda}$ の減少，また消費水準の向上をもたらすことがわかる。

(3) 資源再生技術改善の効果

バイオ燃料技術に代表される資源再生技術の進歩は，めざましいものである。たとえば，経済的かつ多量にセルロース系原料からバイオ燃料等を効率的に生産する画期的な技術革新の実現を目指して，企業による研究開発の競争を広げている。ここでは，資源再生技術の進歩が持つインプリケーションについて分析する。

⑹2)

$$\left.\frac{dS^*}{d\gamma}\right|_{d\alpha=0,d\beta=0}=\frac{1}{\varDelta}\begin{vmatrix}-\Phi'(S^*) & -\Psi'(S^*)\\ \Phi'(S^*)\nu^* & [r-\Phi'(S^*)]\end{vmatrix}=\frac{-\Phi'(S^*)[r-\Phi'(S^*)]+\Psi'(S^*)\Phi'(S^*)\nu^*}{\varDelta}.$$

明らかに，$\Phi'(S^*)<0$ の場合，$\left.\frac{dS^*}{d\gamma}\right|_{d\alpha=0,d\beta=0}$ の符号は確定できない，一方，$\Phi'(S^*)>0$ の場合，$\left.\frac{dS^*}{d\gamma}\right|_{d\alpha=0,d\beta=0}>0$ となる。資源再生

技術の改善は 2 つの効果を同時にもたらしている。すなわち，再生された資源の量を増加させる一方，資源を保有する機会費用 $[r-\Phi'(S^{*})]$ を変化させる。$S_t>\hat{S}$ の場合，$\Phi'(S^{*})<0$ であるため，機会費用が増加するので，結果として，ネットの効果がこの二つの効果のトレードオフに依存することになる。一方，$S_t<\hat{S}$ の場合，$\Phi'(S^{*})>0$ なので，機会費用が減少するため，定常状態の資源ストックが増える。つまり，資源再生技術の保存効果は，資源ストックが $S<\hat{S}$ の場合のみはっきり現れる。なお，いずれの場合でも定常状態の消費量が増加していることが簡単に確認できる。

Ⅵ. 終わりに

本論文は，地球環境資源の保全問題を議論する際に基礎となるモデルについて概観した。しかしながら，より現実的な結論を得るためには，以下のような拡張が必要と考えられる。第一に考えられる拡張は，地球環境資源がオープン・アクセス性を持っていることに着目し，この性質が資源の持続的利用においていかなる問題点をもたらしているか，またそうした問題の解決に望ましい国際的環境資源の管理のあり方はどのようなものか，ということに関する考察である。[6] 地球環境資源の多くは，オープン・アクセス資源となっており，特定の国に帰属しない非排除的な財・サービスであり，各国の利用者は将来の処理費用等を含む対価を十分に支払わないまま自由に利用している。つまり，所有権はすべての人々に配分されているが，その利用をめぐる配分ルールを欠いた財であると見なしえる。

第二に考えられる拡張の方向は，割り引かない無限期間動学的計画問題の最適解の構築・分析である。地球温暖化や生物多様性の減退といった地球環境問題は費用や効果の発生が世代を超えて，遠い未来まで多大な影響を与えているため，従来から，Ramsey＝Cass＝Koopmans の最適成長理論の分析枠組みにおいて無限期間動学的計画問題として定式化し，分析されてきた。しかしながら，実数空間において無限大（∞）は定義されていないため，こうした問題は技術的困難を伴っている。一般的に用いられる割引功利主義的厚生関数では，将来に対する割引の導入によって目的関数を収束させ，上記の問題点を回避してきたが，将来世代に低いウェイトを付与することは持続可能性と矛盾しており，倫理的に擁護の余地がないと考えられている。Ramsey（1928）は割引の導入を「単に想像力の貧弱さからのみ生じるに過ぎない」と指摘している。現実問題として，核廃棄物の管理や地球温暖化等に単純に割引率を適用すると，将来世代の厚生を著しく損なうような政策が選択される恐れがある。地球環境問題の「真の」解決には世代間衡平性，すなわち遠い将来の世代の厚生を我々と同様に扱うことが要求されている（Stern，2007）。Cai and Nitta（2009，2011）が提示した最適解が存在する条件を明確にすることにより，割り引かない無限期間動学的計画問題の最適解を構築する手法を確立させる必要もあると考えられる。

注

1）ホテリング・ルールの解説については，時政（1992）を参照されたい。

2）ハートウィック・ルールと一般化したハートウィック・ルールの解説については，大沼（2002）を参照されたい。

3） 最適経路上の各変数の動きについては，Okumura and Cai（2007）を参照されたい。

4） 短期均衡や動学分析などの関連分析はOkumura and Cai（2010）を参照されたい。

5） 産業競争力懇談会（http://www.cocn.jp/）のウェブサイトを参照されたい。

6） Brander and Taylor（1997, 1998)では，オープン・アクセス資源について分析した。

参考文献

時政勗（1992）『枯渇性資源の経済分析』牧野書店。

大沼あゆみ（2002）「環境の新古典派的接近」佐和隆光／植田和弘編『環境の経済理論』岩波書店，123－150頁。

Brander, J. A., and Taylor, M. S. (1997), "International Trade and Open Access Renewable Resources: The Small Open Economy Case," *Canadian Journal of Economics*, Vol. 30, pp. 526-552.

Brander, J. A., and Taylor, M. S. (1998), "Open Access Renewable Resources: Trade and Trade Policy in a Two-country Model," *Journal of International Economics*, Vol. 44, pp. 181-209.

Cai, D., and Nitta, T. (2009), "Optimal Solutions to the Infinite Horizon Problems: Constructing the Optimum as the Limit of the Solutions for the Finite Horizon Problems," *Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications*, Vol. 71, pp. e2103-2105.

Cai, D., and Nitta, T. (2011), "Limit of the Solutions for the Finite Horizon Problems as the Optimal Solution to the Infinite Horizon Optimization Problems," *Journal of Difference Equations and Applications*, Vol. 17, pp. 359-373.

Dasgupta, P., and G.M. Heal, (1974), "The Optimal Depletion of Exhaustible Resources," Review of Economic Studies, Vol. 42 (Symposium), pp. 3-28.

Dasgupta, P., and Heal, G. M. (1979), *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge University Press.

Dixit, A., Hammond, P., and Hoel, M. (1980), "On Hartwick's Rule for Regular Maximin Paths of Capital Accumulation and Resource Depletion," *Review of Economic Studies*, Vol. 47, pp. 551-556.

Hartwick, J. M. (1977), "Intergenerational Equity and Investing of Rents from Exhaustible Resources," *American Economic Review*, Vol. 66, pp. 972-974.

Heal, G.M. (1989), *Valuing the Future: Economic Theory and Sustainability,* Columbia University Press, New York.

Hotelling, H. (1931), "The Economics of Exhaustible Resources," *Journal of Political Economy*, Vol. 39, pp. 137-175.

Krutilla, J. V. (1967), "Conservation Reconsidered," *American Economic Review*, Vol. 54, pp. 777-786.

Krutilla, J. V., and Fisher, A. C. (1975), *The Economics of Natural Environments: Studies in the Valuation of Commodity and Amenity Resources*, Johns Hopkins University Press.

Okumura, R., and Cai, D. (2007), "Sustainable Constant Consumption in a Semi-open Economy with Exhaustible Resources," *Japanese Economic Review*, Vol. 58, pp. 226-237.

Okumura, R., and Cai, D. (2010), "Environmental Amenities and the Long-run Effects of Conservation Technologies of Renewable Natural Resources," *Economic Science*, Vol. 58, pp. 1-14.

Ramsey, F. P. (1928), "A Mathematical Theory of Saving," *Economic Journal*, Vol. 38, pp. 543-559.

Stern, N. H. (2007), The Economics of Climate Change: The Stern Review, Cambridge University Press.

（名古屋大学高等研究院）