「21世紀の地球環境とサステイナブル・ディベロップメント」
(日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金対象研究)

環境資本ストック、サステイナビリティと社会的割引率

——内生的経済成長モデルによる分析——

西　垣　泰　幸

1．はじめに

経済成長、特に、GDPで測った経済の成長率を高める政策は、古くから多くの国々で経済政策の主たる目標とされてきた。GDPの成長により、雇用、所得稼得の機会が増加し、「豊かな経済生活（affluent economic life)」の実現に大きく寄与すると考えられてきたからである。

このような経済発展の初期段階において、世界の多くの国々では環境に対する配慮が十分になされなかったり、あるいは軽視される傾向が見られた。経済開発戦略の中で、発展の初期段階において環境保全のために多くの資源を投入することは、希少な資源の効率的な利用とはいえない、あるいは、環境対策はある程度開発が進んだ後の課題であるとの認識があった。逆に、多くの先進国経済が基本としている市場経済体制では、適切な政策的介入がなければ、経済の内在的メカニズムによっては環境や枯渇性資源の保全が保証されないことも古くから指摘されてきた。

しかしながら、自然資源や環境資本ストックが過度に利用されるならば、環境や、さらに、人間活動全般の破壊が心配される。環境資源ストックがもたらす便益や環境破壊、資源の枯渇がもたらす費用に対する正しい認識は、開発計画策定に欠くべからざるものである。そのために、環境や資源を適切に経済評価し、経済計算と環境への配慮を両立させることは、経済開発を成功させ、その持続性を高めるために重要な課題となる。

この論文においては、環境資本ストックと生産活動に伴う外部効果、および技術的外部性等を明示的に考慮した内生的経済成長モデルを用いて、環境に配慮した経済開発のための新しい経済指標、望ましい経済成長、環境に配慮したコスト＝ベネフィット・ルールなどの問題に検討を加える。そのためのキーポイントとなる「持続可能な所得（sustainable income)」、「持続可能な経済発展（sustainable development)」の概念が、動学的成長経済の枠組みにおいて検討される。これらの概念は、事業評価やコスト＝ベネフィット分析においても、有用な評価尺度を与える。さらに、一般的に「グリー

ン GDP」と呼ばれているいくつかの国民福祉指標と「動学的コスト＝ベネフィット・ルール」との関係が検討される。最後に、本経済モデルの特徴である「技術外部性（Technological externality）」による割引率の変化が、環境保全や資源の利用に及ぼす帰結が検討される。

2．環境ストックを含む内生的経済成長モデル

ここでは、再生産可能な環境資本ストックを明示的に考慮し、生産部門における内生的技術進歩を導入した2部門内生的経済成長モデルを用いて、環境資源／資産の適切な管理や、生産における外部性に対処する適切な環境政策などを検討する。ここで用いるモデルは、供給サイドにおける生産部門と環境改善部門の2部門と、家計、政府とからなり、ストック変数として資本ストックに加えて環境資本ストックを明示的に考慮している。

代表的な個人の無限期間にわたる効用関数は次のように示される。個人は、各期労働を供給し生産に貢献するとともに、消費活動を行う。また、個人は、環境ストックからは正の効用を得るとともに、産業部門が排出する汚染物質により負の影響を受ける。

$$\int_0^{\infty} e^{-rt} U(c, L, R, z)\,dt \qquad (1)$$

ここで、$U(\bullet)$ は瞬時的効用関数であり、通常の関数的性質を満たすと仮定する。r は時間選好率であり、c は各期の消費を示している。L は労働供給であり、R は環境資本のストックである。これは再生産可能な（あるいは不可能な）自然資源のストックを示しており、消費者はこのストックより正の効用を得るとする。また、z は経済活動に伴う汚染物質の排出量であり、消費者に負の効用を与える（$U_z<0$）と仮定する。

ここでは、生産活動に伴って負の外部性（$\bar{z}$）が発生すると想定している。ただしここでは Bertratti (1994) などと同様に、簡単のため、排出量は経済の活動水準にかかわらず一定と仮定する。汚染除去活動部門は、生産された資源（x^p）と労働投入（L^p）とを用いて z^p の汚染物質を除去すると仮定する。したがって、純排出量は（2）式により示される。

$$z = \bar{z} - z^p(x^p, L^p) \qquad (2)$$

ここで、$z^p(x^p, L^p)$ は汚染除去活動により除去される汚染物質を示しており、投入要素 x^p と L^p に関して通常の凸性の特性を満たすと仮定する。

この経済には2つの生産部門を考慮する。その一つは、自然資源ストックを採取（harvesting）する第一次産業部門である。簡単のために自然資源の採取（h）には資源の投入が必要なく、また、資源の再生産には、ストックの存在量（R）が増えるとプラスの効果を発揮し、逆に、汚染物質は負の影響を与えると仮定する。したがって、自然資源ストックの成長に関する動学方程式は（3）式により与えられる。

$$R=g(R,\ z)-h \tag{3}$$

もし自然資源の再生産の速度が、採取あるいは汚染物質に伴う環境破壊を上回るのであれば、自然資源ストックは増加するし、両者が逆転すれば経時的に減少してゆくことになる。ここで、資源の増加関数を無視するならば、この資源は再生産不可能な枯渇性資源を表すことになる。

経済の生産部門では、合成財の生産を考える。Arrow (1962)、Romer (1990) などと同様に、資本ストックに態化された技術水準が生産活動に正の外部性を及ぼすと仮定する。経済には同質的な n の企業が存在し、これらは資本と労働に関して通常の特性を満たすと仮定する。ただしここでは、環境資本を導入したことに伴って、中間投入としての自然資源投入（h）と、汚染物質の排出による負の効果を扱うため純汚染排出量（z）が生産関数にも導入されている。

$$\begin{aligned} x&=F(K,\ L^d,\ h,\ z)\\ &\equiv nf(k,\ K,\ l^d,\ h^d,\ z). \end{aligned} \tag{4}$$

ここで、n は企業数を表し、また、$nk\equiv K$, $nl^d\equiv L^d$, $nh^d\equiv h$ としている。このように、この経済の生産部門では、（生産）資本ストックと労働そして自然資源を投入要素として生産活動が行われる。また、排出された汚染物質は生産活動に負の効果を与えると仮定しているので、$nf_z<0$ となる。

資本ストックの蓄積は、投資を I、一定の資本減耗率を δ として、次のような動学方程式（状態方程式）により示される。

$$\dot{K}=I-\delta K \tag{5}$$

最後に、労働市場と財市場の市場均衡条件は次のように示される。

$$\begin{aligned} x&=c+x^p+I\\ L&=L^d+L^p. \end{aligned} \tag{6}$$

3．経済の最適成長と福祉指標

環境と資源ストックを考慮に入れた経済の最適成長は、無限期間にわたる効用関数（1）式を目的関数とし、汚染排出コントロール方程式（2）、生産資本ストックと環境資本ストックという2つの状態変数（state valuables）の動学的径路を規定する微分方程式（状態方程式）（3, 5）式と生産関数（4）式、財と労働に関する市場均衡条件式（6-a, b）を制約条件とする無限期間にわたる効用最大化問題として解くことができる。この問題は、微分方程式を制約条件に含む動学的な最適化問題であり、最適制御（Optimal Control）の手法を用いて解くことができる。この最適化問題の現在価値ハミルトニアンは次のように示される。

$$
\begin{aligned}
& H(\bullet)=U(c,\ L,\ R,\ z) \\
(\mathrm{A}) \quad & -P[c+x^{p}+I-nf(k,\ K,\ l^{d},\ h^{d},\ z)] \\
(\mathrm{B}) \quad & -w(L^{d}+L^{p}-L) \\
(\mathrm{C}) \quad & +\gamma[z-\bar{z}+z^{p}(x^{p},\ L^{p})] \\
(\mathrm{D}) \quad & +\mu_{1}(I-\delta K) \\
(\mathrm{E}) \quad & +\mu_{2}[f(R,\ z)-h] \qquad (7)
\end{aligned}
$$

（7）式において、（A, B）の行は、それぞれ財市場と労働市場の市場均衡条件を示している。財市場において、財の供給量に代えて生産関数が代入されている。（C）の行は、汚染物質の除去活動と最終的な排出量との関係を示す式となっている。（D, E）の行は、生産資本ストックと環境資源ストックの動学的な動きを規定する状態方程式である。P, w, γ は3つの瞬時的（静学的）制約条件式に付与されるラグランジュ乗数であり、μ_1, μ_2 は2つの状態変数の経時的な動きを規定する共状態変数（co-state valuable）である。

この最適化問題に内点解があると仮定し、最適化のための必要条件群を求めると次のようになる。

$$\partial H/\partial c = U_c - p = 0 \qquad (8)$$

$$\partial H/\partial x^{p} = -p - \gamma z_x^{p} = 0 \qquad (9)$$

$$\partial H/\partial L^{d} = pF_L - w = 0 \qquad (10)$$

$$\partial H/\partial L^{p} = -w - \gamma z_L^{p} = 0 \qquad (11)$$

$$\partial H/\partial L = U_L - w = 0 \qquad (12)$$

$$\partial H/\partial h = pF_h - \mu_2 = 0 \qquad (13)$$

$$\partial H/\partial z = U_z + pF_z + \mu_2 g_R + \gamma = 0 \qquad (14)$$

$$\partial H/\partial I = -p + \mu_1 = 0 \qquad (15)$$

$$-\partial H/\partial K = \dot{\mu}_1 - \gamma\mu_1 = -p(f_k + F_K) + \delta\mu_1 \qquad (16)$$

$$-\partial H/\partial R = \dot{\mu}_2 - \gamma\mu_2 = -U_R - \mu_2 g_R \qquad (17)$$

$$\partial H/\partial \mu_1 = \dot{K} = I - \delta K \qquad (18)$$

$$\partial H \Big/ \partial \mu_2 = \dot{R} = g(R, z) - h \tag{19}$$

ただし、$F^K \equiv nf^K$, $F^L \equiv nf^L$ としている。

以下では、これらの条件式を整理することにより、最適成長や望ましい環境政策のための政策ルール、経済の福祉指標、動学的コスト＝ベネフィット・ルールなどを検討して行こう。

4．環境政策、最適な汚染物質除去活動と環境被害のシャドープライス

まず、望ましい環境政策、汚染物質のコントロールについて検討しよう。総排出量 z のコントロールと、そのための汚染除去活動に対する資源の投入（x^P, L^P）の選択に関しては、次のような3つの必要条件式が各時点において成立することが要請される。

$$\begin{aligned} &U_z + PF_z + \mu_2 g_z = \gamma \\ &-\gamma z_x^P = P \\ &-\gamma z_x^P = w \end{aligned} \tag{20}$$

(20) 式第1行の左辺において、第1項は汚染物質の排出に伴って個人がこうむる環境被害を効用水準により評価したもの（個人の限界環境被害）を示しており、第2項は、汚染物質がもたらす生産活動のダメージを、失われた生産物の限界価値により示したものである。また、同式左辺第3項は、汚染物質が環境資源ストックに及ぼす限界被害（環境のデグラデーション）をあらわしている。このように、この式の左辺は汚染物質の排出がもたらすさまざまな環境の限界被害を示しており、さらにこれらの合計がラグランジュ乗数 γ に一致することを意味している。このように、この問題におけるラグランジュ乗数 γ は汚染物質の排出がもたらす社会的限界費用をあらわしていることがわかる。

他方、(20) 式の第2行、第3行を用いて汚染物質除去活動の費用関数に若干の計算を加えることにより、$-\gamma$ は最適な環境政策（汚染物質のコントロール）が行われている場合の汚染除去活動の限界費用と一致することが示される（図1）。これらの事実から、ラグランジュ乗数 γ は汚染物質の排出による限界環境被害のシャドープライス（shadow price）となることが解る。このような事実は、次のような命題としてまとめることができる。

（命題1）

汚染物質の排出に関して最適な政策的介入がなされているときには、汚染物質除去活動の限界費用が、汚染物質の排出による環境被害の社会的限界費用と一致する。この場合、汚染物質の限界除去費用は、環境被害の社会的限界費用のシャドープライスとして用いることができる。

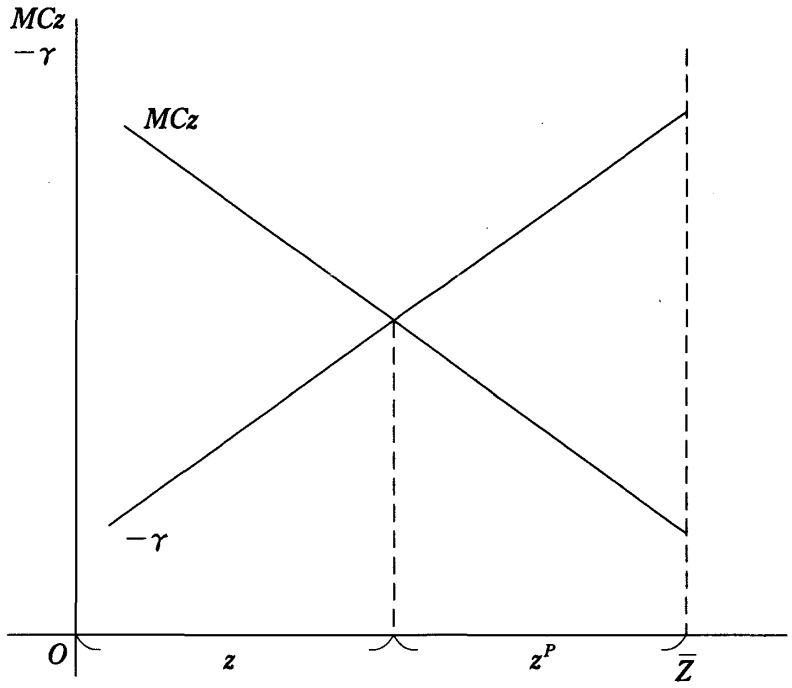


図1　最適な汚染除去活動

（証明）

命題1の前半部分は次のようにして、簡単に確かめることができる。汚染除去部門の費用関数 $C=Px^P+wL^P$ を全微分することにより、汚染除去活動の限界費用を（21）式のように求めることができる。

$$dC\Big/_{dz}=-\gamma z_x^P dx^P\Big/dz-\gamma z_L^P dL^P\Big/_{dz}=-\gamma \tag{21}$$

命題1の後半部分は、（21）式の最右辺の等号関係より直接従う。

5．動学的コスト＝ベネフィット・ルールと国民福祉指標

国民福祉指標との関係では、Hartwick (1990) や Johansson (1993) などと同様に、瞬時的効用関数の線型一次近似を行い、現在価値ハミルトニアンを市場均衡条件式などとともに用いることにより次のような表現を得る。

$$H(\bullet)\approx U_x x^d+U_L L+U_R R+U_z z+\mu_1\dot{K}+\mu_2\dot{R} \tag{23}$$

この式は、Nordhous and Tobin (1972) らが提案した「福祉指標の基本方程式」に対応している。ただし、（23）式には生産活動に伴う負の外部効果と環境資源ストックなどの新たな概念を含んでいる。（23）式よりこの経済の瞬時的厚生水準は各時点でのさまざまな効用水準と生産資本、環境資本ストックの変化により示されることがわかる。以下ではこの式をもとに経済の厚生水準と福祉指標、動学的コストベネフィット・ルールなどの関係を検討してゆこう。

6．国民純福祉と福祉指標

(23) 式に最適化条件と市場均衡条件を適用することにより、(23) 式の純厚生指標 NMW は次のように書きなおすことができる。

$$\begin{aligned} &NMW \\ &=pc+px^P+p\dot{K}\cdots\cdots(A) \\ &-px^P+U_z z-wL^P\cdots\cdots(B) \\ &+U_R R+\mu_2\dot{R}-wL^d\cdots\cdots(C) \end{aligned} \tag{24}$$

(24) 式右辺の第 1 行 (A) は、通常の国民所得概念に一致している。すなわち、財の総生産を私的消費、環境政策のための公的消費と総投資により示したものとなっている。次の 2 行 (B, C) は、福祉指標を導出するために必要となる修正を示している。右辺の第 2 行 (B) は汚染除去活動に要する費用と効用水準で評価した汚染被害を示している。汚染除去のための支出は、通常の国民所得を増大させるが、福祉指標として評価する際にはこれらは控除して考える必要があることを意味している。他方、汚染除去がもたらす便益は、環境ダメージを緩和させることにより示され、これは効用タームにより評価されている。このように、汚染除去費用は NNW より控除される必要があることがわかる。第 2 行の第 2 項は、残存汚染物質がもたらす環境被害の効用評価になっているが、これらは通常の国民所得概念では取り扱われないものである。

(24) 式の第 3 行 (C) は、自然資源ストックの変化や余暇の経済評価からなっている。第 1 項は、自然資源ストックに関する経済評価であり、第 3 項はストック値の経時的な変化を経済評価したものである。第 3 項は通常の評価に加えて、余暇時間の効用の代理変数として労働時間の負効用を代入してある。ここで、環境ストックの経済評価に加えてストック値の変化が評価されている理由は、環境資源ストックの利用 (採取) により増加した持続不可能な GDP の過大計算を修正するためのものである。[注1)]

(24) 式は、産業活動に伴う外部不経済のコントロールや環境資源ストックの最適な制御を考慮した「経済全体のコスト＝ベネフィットルール」と類似のものとなっている。ただし、このようなグリーン GDP の線型厚生基準には、現在の厚生変化に関する評価のみがなされている。動学的な観点からのコスト＝ベネフィットルールのためには、さらに、経済の最適経路に沿った経時的な厚生評価が検討される必要がある。この点に関して、次節において検討を進めよう。

7．持続可能な発展のための NWM 手法

持続可能な経済発展の定義にはいくつかのものがみられるが、それらの中で比較的良く用いられるものとして、Markandya 他 (90) による定義がある。それは、現時点に達成された所得が、将来消費を減少させないのであれば、持続可能 (サステイナブル)

な所得とするものである。この持続可能な所得の定義をさらに詳しく検討するために、（7）式のハミルトニアンを時間に関して全微分し、最適条件と市場均衡条件を用いて整理することにより次のような表現を得る。

$$\frac{dH}{dt}=r[\mu_1\dot{K}+\mu_2\dot{R}]=r[H(\cdot)-U(\cdot)] \tag{25}$$

(25) 式は、持続可能な発展のためには、シャドープライスで評価した生産資本ストックと環境資源ストックの総額が経時的に減少してはならないことを意味している。このような事実は、次のような命題にまとめることが出来る。

命題2：

各時点のハミルトニアンが経時的に減少しないのであれば、経済発展は持続可能と定義される。

すなわち、あるストックが減少している時、同時にそれをおぎなうに足る他の資本ストックの増加がともなわなければならないことを意味している。Pearce 他（90）が指摘しているようにこの方程式の意味していることは持続可能性を満す可能性であって、そのための必要条件ではない。この意味で（25）式はしばしば「弱い持続可能性」の条件と呼ばれている。「強い持続可能性」のためには、それぞれのストックが減少しない、特に、環境ストックの価値が減少しないことという条件が必要となる。[注2)]

(25) 式が非負となる場合には、現在の経済活動が将来世代の効用水準を減少させないことになり、その意味において世代間の厚生配分にも配慮した経済厚生の評価がなされていることがわかる。このように、動学的なコスト＝ベネフィット・ルールのためには、各時点の経済が最適に運営されているという条件に加えて、それが将来世代に与える影響に関しても十分な配慮がなされる必要がある。

8．持続可能な経済発展における環境資本ストックと社会的割引率

社会的割引率の変化が環境資本ストックなどの経済のストック変数に与える影響の分析は、経済成長の枠組みにおける政策分析の重要な課題である。前節までの、経済成長の持続可能性に関する分析から、経済成長の伝統的な概念である「定常均衡（steady state）」は持続可能な経済発展の定義を満たすことから、以下では定常均衡の状態において、技術的外部性が社会的割引率や経済に与える影響に関して分析を進めよう。なお、簡単のために、以下では労働供給を固定とし、また、汚染物質の排出と汚染除去活動を無視する。そのような想定の下で、この経済の定常均衡状態は以下のような方程式により記述される。

$$U_c=\mu_1 \tag{26}$$

$$\mu_1 F_h=\mu_2 \tag{27}$$

$$f_k + F_K = r + \delta \tag{28}$$
$$U_R = (r - g_R)\mu_2 \tag{29}$$
$$nf(k, K, l^d, h^d) = c + \delta K \tag{30}$$
$$g(R) = h \tag{31}$$

ここで、(28) 式は、この経済の社会的割引率を示している。Romer (1990) にも示されているように、生産における技術外部性が存在する場合には、最適政策において適用される社会的割引率 (social discount rate: SDR) は、私的割引率 (private or market rate of discount: PDR) を技術外部性の分だけ上回ることがわかる。

$$\begin{aligned} PDR &= f_k \\ SDR &= f_k + F_K \end{aligned} \tag{32}$$

したがって、この経済における社会的割引率は、通常のモデルにおけるそれを上回る可能性がある。このような社会的割引率の変化が、経済にどのような影響を与えるかを検討するために、ここでは、rが上昇した場合の定常均衡の変化を比較静学分析により検討しよう。(26) 式から (31) 式の条件式を全微分することにより、以下のような関係を得る。

$$\partial \log R \Big/ \partial \log r = [(-\sigma_{KK})\, r/(r - g_R) + rK(\eta_{Rc} - \eta_{cc}) + \sigma_{KK}] \cdot D^{-1} \tag{33}$$
$$\begin{aligned} D \equiv (-\sigma_{kk})[(\eta_{RR} - \eta_{cR}) + \xi] + \varepsilon[(\sigma_{kk}\sigma_{hh} - \sigma_{hK}\sigma_{Kh}) + (\eta_{Rc} - \eta_{cc})(\sigma_{Kh} rK \\ + (-\sigma_{KK}) F_h g)] \end{aligned} \tag{34}$$

ここで、$\sigma_{ij} \equiv jF_{ij}/F_i$, $\eta_{ij} \equiv jU_{ij}/U_i$, $\varepsilon \equiv g_R R/g$, $\xi \equiv dp^r/p^r$, $p^r \equiv P/P_R$ とする。

(33) の分子は常に正の符号を取るので、(33) 式の符号は分母の符号と一致する。分母の第1項は負であり、第2項の中括弧は正であるが、資源の再生産に関する弾力性εはいかなる符号をもとりうる。もし、$\varepsilon < 0 : g_R < 0$ならば、社会的割引率の上昇により、環境資源ストックのデグラデーションが進む。このような事実は、次のような命題にまとめられる。

命題 3

$\varepsilon < 0 : g_R < 0$ という条件の下で、社会的割引率が高い経済では、環境資源ストックのデグラデーション (環境破壊) が進む。(環境資本ストックに関する Hotelling's Lemma)

他方、環境資源ストックの再生産関数はプラスの局面とマイナスの局面の両方を持つので、それにつれて$\varepsilon > 0 : g_R > 0$ともなりうる (図2)。このとき、分母第2項が第1項の絶対値より大きい場合には、(33) 式の符号は正となり、社会的割引率の上昇に伴って環境資源ストックの蓄積が進むことになる。これは、次のような命題にまとめられる。

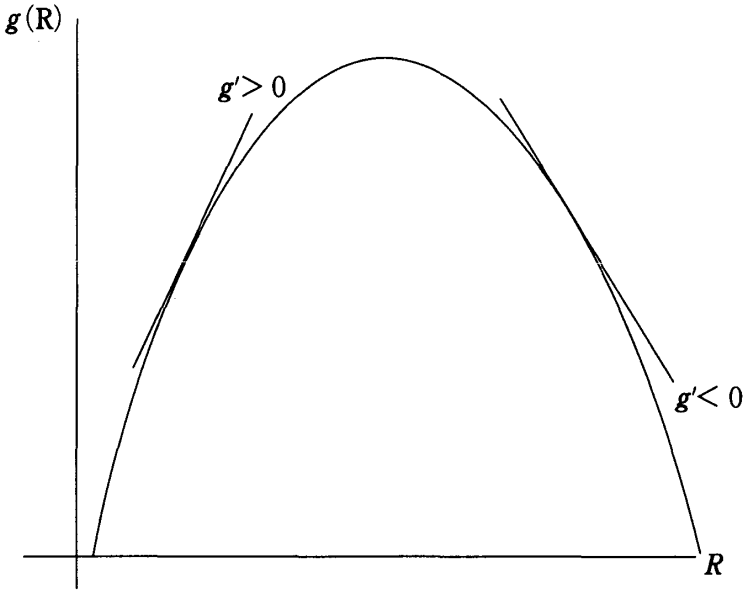


図2　環境資源ストックの位相

命題4

もし、$\varepsilon>0$：$g_R>0$ならば、社会的割引率の高い経済において、環境資本ストックの蓄積が進む。

（脚注）

1）このような公式を用いてNNWを計測したいくつかの例がある。それらの中で、日本の経済企画庁による計測では、1972年の国内純生産（NDP）をもとに、環境保全支出などの「防御的支出」を控除し、環境破壊や余暇、非市場的取引を金銭評価し、考慮することによりNNWを推計している。そこでとられた環境被害の金銭評価に関する基本的な考え方は、環境に関する一定の基準を設け、この基準を満たすために必要となる汚染除去費用を算定し、これを環境被害のコストとみなすというものであり、ここで導出されたシャドープライスの概念に近いものである。このような計算の結果、1955年から1985年にかけて国内純生産は8.3倍となったにもかかわらず、NNWは当該期間に5.8倍にとどまるとの結論を得ている。

2）このような持続可能性の概念を用いて、持続可能な所得を推計する試みがいくつかなされている。それらの中で、1989年に世界資源研究所（World Resource Institute）が行った、インドネシアの森林破壊に関する研究では、森林資源や原油などの自然資源の減少を経済評価し、国内所得（DI）から差し引くことにより、'71年から'74年のGDPの成長率が年率7.4％であったのに対して、持続可能な国内所得（sustainable domestic income）の成長は当該期間に4.1％にとどまったと報告している（Reppeto, 89）。

Reference

Arrow, K. J. (1962), "The Economic Implications of Learning by Doing". *Review of Economic Studies,* vol. 29, pp. 155-173.

Beltratti, A., Chichilinski, G. and G. M. Heal, (1994), "Sustainable Growth and the Green Golden Rule", *Working Paper,* Columbia Business school.

Blackoby, C., Nisson, D., Mononey, D. (1984), "Consumer's Surplus and Welfare Change in a Simple Dynamic Model", *Review of Economic Study,* vol. 51, pp. 171-6.

Hartwick, J. M. (1990), "Natural Resources, National Accounting and Economic Depreciation", *Journal of Public Economics,* vol. 43. pp. 291-304.

Johansson, P. O. (1993), *Cost-Benefit Analysis of Environmental Change,* Cambridge University Press.

Markandya, A., Pearce, D. W. and E. Barbier, (1990), *Sustainable Development: Economics and Environment in the Third World,* Edward Elger.

Nordhaus W. D. and J. Tobin (1972), "Is Growth Obsolete?," *National Bureau of Economic Research, General Series 96,* Columbia University Press.

Pearce, D., Makandya, A. and E. Barbier, (1990), *Blue Print for a Green Economy,* Earthscan Publishing.

Reppeto et. al. (1989), *Wasting Assets: Natural Resources in the National Accounts,* World Resource Institute.

Romer, P. (1990), "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy,* 98 (2), s71-102.