九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

動態的システムにおける環境汚染と最適規制政策

伊ヶ崎，大理

https://doi.org/10.15017/3000241

出版情報：経済論究. 107, pp.1-14, 2000-07-31. 九州大学大学院経済学会
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

動態的システムにおける環境汚染と最適規制政策

伊ヶ崎　大　理*

1　序論

伝統的な新古典派の成長モデルでは，経済成長の１つの重要な要因として資本蓄積を指摘しているが，生産要素に対し収穫逓減性が存在するために，物的資本の蓄積だけではやがて成長率はゼロとなる。この帰結は長期的に経済が成長するためには，資本蓄積だけでなく生産性を上昇させることが必要であることを示唆している。新古典派ではその後，科学技術の発展等がもたらす技術進歩によって生産性が上昇し，その結果長期的な成長率がプラスに維持されうるということを指摘したが，技術進歩は外生的なものとして取り扱われていた。

これに対して内生的経済成長理論においては，技術進歩や生産性の上昇が生じる過程を内生化している。そこでは，企業家の私的なインセンティブによってなされるＲ＆Ｄとともに高等教育によってもたらされる人的資本の蓄積の重要な役割を指摘している。すなわち，Ｒ＆Ｄ活動によってイノベーションが生じることや高等教育によって労働の質が向上することによって生産性が上昇し，持続的成長が可能となるのである。Ｒ＆Ｄをモデルの中に内生化した先行研究としては，Romer（1990），Segerstorm（1991），Grossman and Helpman（1991），Barro and Sala-i-Martin（1995），Aghion and Howitt （1998），Young（1998），Dinopoulos and Thompson（1998）等がある。一方人的資本はUzawa（1965）やLucas（1988）等によって展開されてきた。

地球環境問題が深刻となっている現在において経済成長が持続可能かどうかを検討する際に，上記した生産性の議論とともに考慮しなければならないものとして環境問題がある。実際，将来の我々の経済活動を考慮した場合，環境破壊がもたらすの負の外部性は無視することができない要因である。本稿では経済成長と環境との関連性を分析するために，人的資本を伴うモデル二部門成長モデルに対して環境汚染の外部性を組み込み，それが経済成長に対して与える影響について検討する。

第１に，人々の効用に対して直接的に負の影響を与えるような汚染を導入する。このような汚染には例えば，工業排水，大気汚染等のようなものがある。本稿ではこのようなタイプの汚染を「公害型汚染」と定義する。このような汚染は多くの先行研究においても取り扱われている。

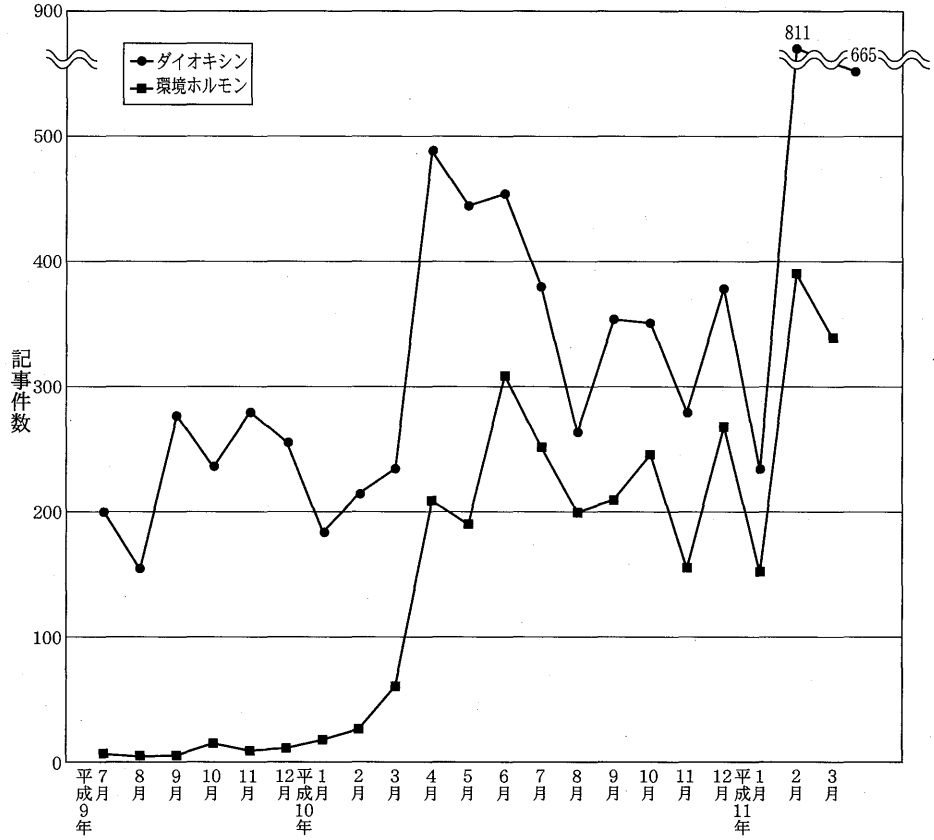
その後，人々の効用に対して直接的に負の影響を与えることはないが，人的資本の蓄積に影響を与えることによって間接的に経済活動に影響を与えるような汚染を導入する。これについては現在話題になっている内分泌撹乱化学物質（環境ホルモン）のようなものがあるであろう。このような汚染や

* e-mail : ikazaki@en.kyushu-u.ac.jp

化学物質は大気汚染や水質汚濁等と比較すると人類が通常の生活を営む上で直接的に影響を感じることはあまりないかもしれない。しかしながらそれは，場合によっては目に見えない形で人々の健康や生殖機能等に影響を与え，それを通して間接的に経済活動に影響を与えうる。本稿ではこのような汚染を「環境ホルモン型汚染」と定義する。第1図では，ダイオキシンおよび環境ホルモン関連の新聞記事件数が表されている。特に環境ホルモン関連の記事は1998年（平成10年）以降飛躍的に増加していることがわかる。第2表では，日本政府の環境ホルモン対策関連の予算額が示されている。環境ホルモンが話題になり，その影響が懸念されるようになったせいもあり，1998年度（平成10年度）では第三補正予算まで含めると環境ホルモン対策関連費用は，当初の予算額と比べて総額で約25倍増加している。

本稿の構成は次のようになっている。まず第2節でUzawa (1965) やLucas (1988) 等によって導入されてきた人的資本を伴う成長モデルを紹介する。次に第3節で人々の効用に対して負の影響を与えるような汚染を導入する。このような汚染には例えば，工業排水，大気汚染等のものがある。第4節では，人々の効用に対して直接的に負の影響を与えることはないが人的資本の蓄積に影響を与えるような汚染を導入する。最後に第5節では結論，および今後の課題を述べる。

第1図　ダイオキシン及び環境ホルモン関連新聞記事件数（全国紙4紙，日経テレコンで検索）



（出所）　環境庁（編）『環境白書 平成11年度版』，大蔵省印刷局，1999年220ページ

第2表　政府の内分泌かく乱化学物質対策関連予算額

省庁名	平成10年度予算(補正予算)(三次補正まで含む)	平成11年度予算（当初）
環境庁	0.53億円（　50億円）	16.09億円
厚生省	1.27億円（　15億円）	10.94億円
通商産業省	0.12億円（20.5億円）*	10.84億円
農林水産省	0.39億円（　23億円）	10.91億円
建設省	0億円（　6.3億円）	4.29億円
運輸省	0億円（　0億円）	0.03億円
労働省	0億円（　0億円）	1.70億円
文部省	0億円（　3.4億円）	0.23億円
科学技術庁	3億円（　13億円）	18.94億円
合計	5.31億円（131.2億円）	73.97億円

＊：この額の一部が内分泌かく乱化学物質問題関連経費

（出所）　環境庁（編）　『環境白書　平成11年度版』，大蔵省印刷局，1999年，232ページ

2　人的資本を伴う経済成長モデル（Uzawa-Lucasモデル）

本節では，Uzawa (1965) やLucas (1988) によって導入されてきた物的資本と人的資本を伴うような二部門の経済成長モデルを紹介する。このモデル自体は環境上の要因を含むわけではないが，次節以降のもととなるモデルである。

まずは最終財部門から検討することにしよう。本稿を通じて最終財は単一かつ同質である。それは物的資本と人的資本を本源的生産要素として生産され，消費もしくは物的資本の蓄積に用いられる。t 期における最終財の生産関数を次のように設定する。

$$Y(t)=AK(t)^{\alpha}(u(t)h(t)L)^{1-\alpha}. \tag{2.1}$$

ただし，$Y(t)$，$K(t)$，$h(t)$ はそれぞれ t 期における最終財の生産量，資本ストック量，一人当たりの人的資本量であり，L は通時的に一定な総人口である[1]。また，$u(t)$ は各個人が生産活動に割り振る労働力，$A(>0)$，$\alpha(0<\alpha<1)$ はそれぞれ生産性，弾力性を表わすパラメータである。各期において個人は1単位の労働力を所有しており，それを生産活動か教育（人的資本の蓄積）活動に振り分けるものとする。すなわち，$u(t)$ の上限は1であり，人的資本の蓄積に費やされる労働力は，$1-u(t)$ となる。人的資本の蓄積を表す関数（人的資本の生産関数，あるいは教育部門の生産関数）をLucas (1988) に従い次のように定式化する。

$$\dot{h}(t)=\varepsilon(1-u(t))h(t). \tag{2.2}$$

ただし，ε は教育部門における生産性のパラメータ，ドットは時間についての微分を表すものとする（すなわち，$\dot{h}(t)\equiv\frac{dh(t)}{dt}$ 等である）。(2.2)の左辺は $h(t)$ の瞬時的な増加量である。したがって，こ

1）本稿を通じて (t) は t 期における水準を表すことにする。

れは教育部門における産出量とみなすこともできるであろう。より一般的には人的資本の蓄積にも物的資本が必要であるような状況を考えることができるであろう。例えばRebelo (1991) では人的資本の蓄積関数を(2.2)ではなく物的資本と人的資本とのコブ＝ダグラス型の関数として定式化している。多くの先行研究では教育部門の方が生産部門よりもより人的資本集約的であると仮定している。最終財および人的資本の生産関数 (2.1) と (2.2) はこの仮定と整合的であるが人的資本の生産には物的資本は用いられないという極端なケースである。

次に消費者部門について規定しよう。経済には各時点において無限に生存する同質的な個人がL人存在する。代表的個人の目的関数（効用流列の現在価値の総和）は以下のように設定される。

$$U=\int_0^{\infty} e^{-\rho t}\left[\frac{c(t)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}\right] dt. \tag{2.3}$$

ただし，$\rho(>0)$ は主観的割引率，$c(t)$ は一人当たりの消費量である。瞬時的な効用は$\frac{c(t)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}$であり，$\sigma(>0)$ は異時点間の代替の弾力性の逆数である。社会的計画者の問題は (2.2)，資本の蓄積方程式

$$\dot{K}(t)=AK(t)^{\alpha}(u(t)h(t)L)^{1-\alpha}-C(t), \tag{2.4}$$

および$K(t)$，$h(t)$ の初期値，K_0，h_0 を制約として (2.3) を最大にするものとなる。ただし，$C(t)\equiv c(t)L$ は総消費量である。カレント・ヴァリュー・ハミルトニアンは次のように設定される。

$$\mathcal{H}=\frac{c^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}+\mu_1(AK^{\alpha}(uhL)^{1-\alpha}-cL)+\mu_2(\varepsilon(1-u)h). \tag{2.5}$$

ただし，μ_1，μ_2 はそれぞれ資本ストック，および人的資本のシャドー・プライスである。最大化のための条件として以下の関係が成立する。

$$c(t)^{-\sigma}=\mu_1(t)L, \tag{2.6}$$

$$u(t)=\frac{(1-\alpha)Y(t)\mu_1(t)}{\varepsilon\mu_2(t)h(t)}, \tag{2.7}$$

$$-\frac{\dot{\mu}_1(t)}{\mu_1(t)}=\alpha\frac{Y(t)}{K(t)}-\rho, \tag{2.8}$$

$$\frac{\dot{\mu}_2(t)}{\mu_2(t)}=\rho-(1-\alpha)\frac{Y(t)\mu_1(t)}{h(t)\mu_2(t)}-\varepsilon(1-u(t)). \tag{2.9}$$

横断性条件は次のようになる。

$$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\mu_1(t)K(t)=0, \tag{2.10}$$

$$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\mu_2(t)h(t)=0. \tag{2.11}$$

ここでは定常状態のみに議論を集中することにする[2)]。定常状態は各経済変数が一定の（しかし必ずしも同一の率とは限らない）率で成長するものとして定義される。もちろん本節で興味があるのは (2.2)，(2.4)，(2.5)-(2.11) の関係をすべて満たすような定常状態である。定常状態では，結果として $Y(t)$，$K(t)$，$C(t)$，$h(t)$ がそれぞれ等しい率で成長することになる。最終財の生産に振り向ける労働量 $\bar{u}$，および定常状態における成長率 $\bar{g}_Y$ はそれぞれ

2）Barro and Sala-i-Martin (1995, ch5)ではこの種のモデルの移行動学を分析している。

$$\bar{u}=\frac{(\sigma-1)\varepsilon+\rho}{\sigma\varepsilon}, \tag{2.12}$$

$$\bar{g}_Y=\frac{1}{\sigma}(\varepsilon-\rho) \tag{2.13}$$

となる。ただし，g_j は下添え字 j に関する成長率を表すものとする。成長率の導出については補論を参照せよ。本稿では長期的な成長が正になることを保証するために $\varepsilon-\rho>0$ を仮定する。長期的な成長率は，人的資本の生産性が高いときほど（εが高いほど），異時点間の代替の弾力性が高いときほど（σが小さいほど），家計が我慢強いときほど（ρが低いほど）高くなることに注意しよう。また，このモデルにおいては，規模の効果が存在しないという点も指摘しておく[3]。横断性条件は

$$(1-\sigma)\varepsilon-\rho<0 \tag{2.14}$$

であるときにみたされる。したがって例えば$\sigma\geq 1$のときには，この条件は常にみたされることになる。

以上が本稿の基礎となるモデルの概略である。以下では本節のモデルに対して環境問題（具体的には汚染の問題）を組み込むことによって，環境と経済成長との関連性について分析を行うことにしよう。

3　公害型汚染を伴う経済成長モデル

本節では前節のモデルに対して環境汚染の外部性を導入し，それが長期的な成長率に与える影響について検討する。ここで生じてくる１つの大きな問題は環境汚染をどのようにして経済学の理論的なフレームワークの中に組み込むかということである。ここでは，各個人の効用に対して負の影響を与えるような汚染を導入することにしよう。このような汚染には例えば水質汚濁をもたらす工場から排出される排水，大気汚染をもたらす自動車の排気ガス，あるいは産業廃棄物等が挙げられる。さらにこれをより広く解釈して，(いわゆる汚染ではないが)騒音や地盤沈下なども含むものとして考えてもよいであろう。本稿ではこのようなタイプの汚染を「公害型汚染」と定義する。

まずは，最終財部門から検討することにしよう。本節では，最終財の生産関数を (2.1) ではなく次のように設定する。

$$Y(t)=AK(t)^{\alpha}(u(t)h(t)L)^{1-\alpha}z(t). \tag{3.1}$$

ただし，$z(t)(z(t)\in[0,1])$ は環境技術の指標である[4]。その他の変数はすべて前節と同じものを表すことにする。

本節でも人的資本の蓄積方程式は再び

$$\dot{h}(t)=\varepsilon(1-u(t))h(t) \tag{3.2}$$

で与えられるものとする。ここで，代表的個人の目的関数を以下のように設定することにしよう。

3）例えばGrossman and Helpman (1991 ch3, ch4), Barro Sala-i-Martin (1995 ch6, ch7) はR＆Dを導入した内生経済成長モデルを展開しているが，そこでは規模の大きな経済ほど成長率が高くなるという帰結がもたらされている。

4）類似の生産関数は，Stokey (1998)でも用いられており，そこでは $z(t)$ を技術の指標 (index of the technology) と定義している。これに対するより明確な意味づけは後に詳細に議論することにしよう。

$$U=\int_0^{\infty} e^{-\rho t}\left[\frac{c(t)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-BD(t)\right]dt. \tag{3.3}$$

ただし，$B(>0)$ は各個人が汚染によってどの程度被害を被るのかを示すパラメータである。また，$D(t)$ は汚染水準であり，次のように特定化する。

$$D(t)=AK(t)^{\alpha}(u(t)h(t)L)^{1-\alpha}z(t)^{\beta}. \tag{3.4}$$

ただし，$\beta>1$ とする。本節の状況では，瞬時的効用が$\frac{c(t)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}$ではなく$\frac{c(t)^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-BD(t)$ で与えられていることに注意しよう。すなわち各期における効用水準は消費水準だけでなく汚染水準にも依存しているのである。(3.1)，(3.4)より，最終財の生産量が正の量で行われるときには必ず汚染が排出されることが分かる。さらに所与の $AK(t)^{\alpha}(u(t)h(t)L)^{1-\alpha}$ に対して，$z(t)$ を上昇させることによって生産量を増やせば汚染は加速度的に増加することも分かるであろう(すなわち，$\frac{dD(t)}{dY(t)}>0, \frac{d^2D(t)}{dY(t)^2}>0$ である)。$z(t)=1$ の場合に産出量，汚染量はともに最大となり，$z(t)$ の値を1から減少させると両者はともに減少する。類似の生産関数および汚染の排出過程を表す関数はStokey (1998) においても用いられている。Stokey (1998) はこの産出可能な最大の値を潜在的な産出量 (potential output) と定義している。ただし，そこでは「潜在的な産出量」をAKモデルや外生的な技術進歩を伴うものとして定式化しており，人的資本は検討されていない。$z(t)$ を1から下げるとき，$z(t)$ が比較的大きい場合には，産出量の減少に比べて汚染量の方がより急速に減少する。そして，最終的に $z(t)=0$ のときには産出量，汚染量ともゼロとなる。これらのことから $z(t)$ は汚染に対する規制水準，あるいは省エネ活動をどの程度行っているのかを表す尺度などと解釈することもできるであろう。以下では，$z(t)$ を汚染に対する規制水準，または単に規制水準と呼ぶことにする。この解釈では，$z(t)=1$ を規制がまったく行われていない状態とみなすことができる。$z(t)$ の値を1から減少させると両者はともに減少するため，$z(t)$ が低いときほど規制が強いものと解釈できる。最も規制が強いのが $z(t)=0$ のときであり，この場合には産出量，汚染量ともゼロとなる。たとえ前節のモデルにおいても生産関数が (2.1) ではなく (3.1) で与えられていたと解釈しても良い。前節のモデルにおいては汚染水準が効用水準に全く影響を与えなかったので(すなわち，$B=0$ という特殊ケースとみなせる)最適化の過程において常に $z(t)=1$ となることが後の議論から明らかになるであろう。このとき，(3.1) は常に (2.1) と等しくなる。

社会的計画者の問題は(3.2)，(3.4)，資本の蓄積方程式

$$\dot{K}(t)=AK(t)^{\alpha}(u(t)h(t)L)^{1-\alpha}z(t)-C(t), \tag{3.5}$$

および $K(t)$，$h(t)$ の初期値，K_0，h_0 を制約として (3.3) を最大にするものとなる。カレント・ヴァリュー・ハミルトニアンは次のようになる。

$$\mathcal{H}=\frac{c^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}-BAK^{\alpha}(uhL)^{1-\alpha}z^{\beta}+\mu_1(AK^{\alpha}(uhL)^{1-\alpha}z-cL)+\mu_2(\varepsilon(1-u)h). \tag{3.6}$$

ただし，μ_1，μ_2 はそれぞれ資本ストック，および人的資本のシャドー・プライスである。最大化のための条件として以下の関係が成立する。

$$c(t)^{-\sigma}=\mu_1(t)L, \tag{3.7}$$

$$z(t)=\begin{cases}1 & (\mu_1(t)\geq\beta B \text{ のとき}),\\ \left(\dfrac{\mu_1(t)}{\beta B}\right)^{\frac{1}{\beta-1}} & (\mu_1(t)<\beta B \text{ のとき}),\end{cases} \tag{3.8}$$

$$u(t)=\begin{cases}(1-\alpha)\left(1-\dfrac{B}{\mu_1(t)}\right)\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{\varepsilon\mu_2(t)h(t)} & (z(t)=1 \text{ のとき}),\\ (1-\alpha)\left(\dfrac{\beta-1}{\beta}\right)\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{\varepsilon\mu_2(t)h(t)} & (z(t)<1 \text{ のとき}),\end{cases} \tag{3.9}$$

$$-\frac{\dot{\mu}_1(t)}{\mu_1(t)}=\begin{cases}\alpha\left(1-\dfrac{B}{\mu_1(t)}\right)\dfrac{Y(t)}{K(t)}-\rho & (z(t)=1 \text{ のとき}),\\ \alpha\left(\dfrac{\beta-1}{\beta}\right)\dfrac{Y(t)}{K(t)}-\rho & (z(t)<1 \text{ のとき}),\end{cases} \tag{3.10}$$

$$\frac{\dot{\mu}_2(t)}{\mu_2(t)}=\begin{cases}\rho-(1-\alpha)\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{h(t)\mu_2(t)}\left(1-\dfrac{B}{\mu_1(t)}\right)-\varepsilon(1-u(t)) & (z(t)=1 \text{ のとき}),\\ \rho-(1-\alpha)\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{h(t)\mu_2(t)}\left(\dfrac{\beta-1}{\beta}\right)-\varepsilon(1-u(t)) & (z(t)<1 \text{ のとき}).\end{cases} \tag{3.11}$$

横断性条件は次のようになる。

$$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\mu_1(t)K(t)=0, \tag{3.12}$$

$$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\mu_2(t)h(t)=0. \tag{3.13}$$

再び，定常状態における成長率に焦点を当てることにしよう。定常状態では結果として，Y，K，Cがそれぞれ等しい率で成長することになる。2節のモデルとの相違点は環境汚染を伴うモデルにおいてはhの成長率はこれらとは異なってくるという点である。最終財の生産に振り向ける時間u^*，および定常状態における成長率g_Y^*はそれぞれ

$$u^*=\frac{(\sigma-1)\varepsilon+\rho(1+\sigma\Gamma)}{\sigma\varepsilon(1+\Gamma)}, \tag{3.14}$$

$$g_Y^*=\frac{1}{\sigma}(1+\Gamma)^{-1}(\varepsilon-\rho) \tag{3.15}$$

となる。ただし，$\Gamma\equiv\dfrac{1}{(1-\alpha)(\beta-1)}$である。$\Gamma>0$であるので，$(1+\Gamma)^{-1}<1$である。したがって，公害型汚染の外部性がある場合の長期的な成長率はそれが存在しない場合と比較すると低くなる（すなわち，$g_Y^*<\bar{g}_Y$）。(3.15) より長期的な成長率がプラスとなるための必要十分条件は$\varepsilon-\rho>0$で与えられるが，この条件は前節でもたらされた条件とまったく同じである。したがって，公害型汚染の外部性によって長期的な成長率は低くはなるが，止まってしまうわけではないということに注意しよう。これらの議論により以下の命題を得る。

命題1　公害型汚染が存在するケースではそれが存在しないケースと比較して長期的な成長率は低くなる。しかしながら，両者において成長率がプラスになるための必要十分条件は同じであり，その条件とは教育部門における生産性が主観的割引率と比較して十分に高いことである。

最終財生産に振り向ける労働量を比較すると

$$\Gamma(\sigma-1)(\varepsilon-\rho)>0 \tag{3.16}$$

である場合には$u^*<\bar{u}$となる。本稿を通じて$\varepsilon-\rho>0$という仮定がなされていたので，$\sigma-1>0$であ

ることがこの不等式が成立するための必要十分条件である。

次に，汚染の動学的挙動に焦点を当てることにしよう。経済は初期の段階で比較的貧しい，すなわち，$K(0)$，$Y(0)$，$h(0)$，$c(0)$ が比較的小さな値を取るものとしよう。その場合には $z(0)=1$ となる。すなわち，環境汚染に対する規制政策はなされない。このとき，経済発展の初期の段階においては，$K(t)$，$Y(t)$，$h(t)$，$c(t)$，そして，$D(t)$ もまた通時的に上昇することになる。しかしながら，ある期を過ぎると，$z(t)$ が 1 より小となり，汚染に対する規制政策が施行されることになる。その後，$z(t)$ は通時的に減少する。すなわち，汚染に対する規制水準が通時的に厳しくなるのである。この効果によって，汚染量もまた減少する傾向がある。定常状態における汚染量の変化率は次のようになる。

$$g_D^*=(1-\sigma)g_Y^*. \tag{3.17}$$

これより以下の命題を得る。

命題 2　$\varepsilon-\rho>0$ かつ $\sigma>1$ であるものとしよう。このとき長期的な成長率はプラスになり，汚染量は通時的に減少する。このとき，最終財の生産に向けられる労働量は公害型汚染が存在しないケースと比較してより少なくなる。

この帰結はStokey (1998)，Aghion and Howitt (1998)，Ikazaki (1999) 等とも整合的である。Stokey (1998) では潜在的な産出量をAKモデルや外生的な技術進歩を伴うモデルとして定式化している。Aghion and Howitt (1998) ではそれを中間財の品質上昇を伴うようなモデル，Ikazaki (1999) ではバラエティーの拡大という形でイノベーションが生じるケースとして検討している。

汚染量が経済発展の初期の段階では上昇し，ある一定の段階を経ると減少するという一人当たりの所得と汚染との逆U字の関係は環境クズネッツ曲線と呼ばれ，様々な実証分析においても指摘されている。実証的には，一人当たりの所得が約8，700米ドル当たりで汚染水準が増加から減少に転じることが指摘されている[5]。(3.17) はちょうどこの曲線の右下がりの部分に相当するものとみなすことができるであろう。

最後に横断性条件について検討しよう。横断性条件は

$$(1-\sigma)\varepsilon-\rho<0 \tag{3.18}$$

であるときにみたされることになる。前節同様 $\sigma\geq 1$ であるとき，すなわち，長期的な成長率と汚染量が負の相関をもつかあるいは少なくても定常状態において汚染が一定となるときには，常にみたされることになる。

4　環境ホルモン型汚染を伴う経済成長モデル

前節では，各個人の効用に対して直接的に影響を与えるような汚染が検討された。しかしながら，汚染の中には直接的に人々の効用に与えるというよりはむしろ，間接的に経済の生産性に影響を与えるようなものも存在する。例えば，近年話題になっている環境ホルモンなどはまさしくその典型であ

5）例えば，Selden and Song (1994)，Grossman and Krueger (1995)，松岡・松本 (1998) 等を参照せよ。

ろう。それは，大気汚染や水質汚濁などのように直接人間がそれを感じるのは困難であるが，生物の繁殖能力や健康等に影響を与えることによって間接的に人々の生活に影響を与える。そこで本節では，直接的に効用関数には影響を与えないが，教育部門における生産性を低下させるような汚染を導入することにする。本稿ではこれを「環境ホルモン型汚染」と定義する。そして，人的資本の蓄積を表す関数（3.2），代表的個人の目的関数（3.3）の代わりに以下の式を導入する。

$$\dot{h}(t)=[\varepsilon(1-u(t))-\xi D(t)]h(t), \tag{4.1}$$

$$U=\int_0^\infty e^{-\rho t}\log c(t)dt. \tag{4.2}$$

(4.1) は汚染によって人的資本の蓄積が鈍るということを示している[6]。(4.2) は本節で考えるタイプの汚染が，人々の瞬時的な効用には影響を与えないという仮定を反映している。瞬時的効用は2節におけるものの $\sigma=1$ の（より正確には $\sigma\to 1$ とした極限の）特殊ケースである。

最終財の生産関数，汚染の排出過程を表す関数，資本の蓄積方程式はそれぞれ(3.1)，(3.4)，(3.5)で与えられる。より一般的には，本節で導入されたようなタイプの汚染も個人の瞬時的効用に影響を与えると考えた方が妥当かもしれない。また，3節で導入されたタイプの汚染もまた人的資本の蓄積に対して影響を与えると仮定した方がよいかもしれない。このようなケースでは目的関数としては (3.3)，人的資本の蓄積方程式としては (4.1) が採用されることになる。しかしながら本稿では，2種類の汚染の経済に与える影響の違いをより明確にするためにこのような極端なケースで分析を行う。3節のケースは $\xi=0$，本節の場合は $B=0$ という特殊ケースとみなすこともできる。社会的計画者の問題は(3.4)，(3.5)，(4.1)，および $K(t)$，$h(t)$ の初期値，K_0，h_0 という制約のもとで(4.2)を最大にするものとなる。カレント・ヴァリュー・ハミルトニアンは次のように設定される。

$$\mathcal{H}=\frac{c^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}+\mu_1(AK^\alpha(uhL)^{1-\alpha}z-cL)+\mu_2(\varepsilon[(1-u)-\xi AK^\alpha(uhL)^{1-\alpha}z^\beta]h). \tag{4.3}$$

ただし，μ_1，μ_2 はそれぞれ資本ストック，および人的資本のシャドー・プライスである。最大化のための条件として以下の関係が成立する。

$$c(t)^{-1}=\mu_1(t)L, \tag{4.4}$$

$$z(t)=\begin{cases}1 & (\mu_1(t)\geq\mu_2(t)h(t)\beta\xi \text{ のとき}),\\ \left(\dfrac{\mu_1(t)}{\mu_2(t)h(t)\beta\xi}\right)^{\frac{1}{\beta-1}} & (\mu_1(t)<\mu_2(t)h(t)\beta\xi \text{ のとき}),\end{cases} \tag{4.5}$$

$$u(t)=\begin{cases}(1-\alpha)\left(1-\dfrac{\xi\mu_2(t)h(t)}{\mu_1(t)}\right)\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{\varepsilon\mu_2(t)h(t)} & (z(t)=1 \text{ のとき}),\\ (1-\alpha)\left(\dfrac{\beta-1}{\beta}\right)\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{\varepsilon\mu_2(t)h(t)} & (z(t)<1 \text{ のとき}),\end{cases} \tag{4.6}$$

$$-\frac{\dot{\mu}_1(t)}{\mu_1(t)}=\begin{cases}\alpha\left(1-\dfrac{\xi\mu_2(t)h(t)}{\mu_1(t)}\right)\dfrac{Y(t)}{K(t)}-\rho & (z(t)=1 \text{ のとき}),\\ \alpha\left(\dfrac{\beta-1}{\beta}\right)\dfrac{Y(t)}{K(t)}-\rho & (z(t)<1 \text{ のとき}),\end{cases} \tag{4.7}$$

6）この定式化はGradus and Smulders (1993)に従っている。

$$\frac{\dot{\mu}_2(t)}{\mu_2(t)}=\begin{cases}\rho-\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{h(t)\mu_2(t)}\left[(1-\alpha)-\dfrac{(2-\alpha)\xi\mu_2(t)h(t)}{\mu_1(t)}\right]-\varepsilon(1-u(t)) & (z(t)=1\text{ のとき}),\\ \rho-\dfrac{Y(t)\mu_1(t)}{h(t)\mu_2(t)}\left[(1-\alpha)-(2-\alpha)\dfrac{1}{\beta}\right]-\varepsilon(1-u(t)) & (z(t)<1\text{ のとき}).\end{cases} \tag{4.8}$$

横断性条件は次のようになる。

$$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\mu_1(t)K(t)=0, \tag{4.9}$$

$$\lim_{t\to\infty}e^{-\rho t}\mu_2(t)h(t)=0. \tag{4.10}$$

本稿でも定常状態に焦点を当てることにする。最終財の生産に割り当てる時間，および定常状態における（Y，C，K共通の）成長率は次のようになる。

$$u^{**}=\frac{\rho}{\varepsilon}, \tag{4.11}$$

$$g_Y^{**}=(1+\Gamma)^{-1}(\varepsilon-\rho)-(1+\Gamma^{-1})^{-1}\rho. \tag{4.12}$$

同じことであるが（4.12）は以下の様に書くこともできる。

$$g_Y^{**}=(1+\Gamma)^{-1}[\varepsilon-(1+\Gamma)\rho]. \tag{4.13}$$

このケースにおいては長期的な成長率がプラスとなるのは $\varepsilon-(1+\Gamma)\rho>0$ というパラメータ制約が成立するときである。本節のモデルにおいて経済が長期的に成長するための条件が前節のモデルにおけるそれとは著しく異なっていることに注意しよう。命題1に注意すると以下の命題を得る。

命題3　環境汚染が存在しないケースで長期的な成長率がプラスになる場合には公害型汚染を伴うようなケースにおいても長期的な成長率はプラスになる。しかしながら環境ホルモン型汚染を伴うようなケースにおいてそれがプラスになることはこの条件だけでは必ずしも保証されない。

定常状態においては汚染の変化率はゼロとなり汚染量は一定となる。また，横断性条件がみたされることは容易に分かる。

最後に，公害型汚染と環境ホルモン型汚染が経済に与える様々な影響についての比較・検討を行うことにしよう。まずは成長率に与える影響について検討する。ここでは両者における比較を明示的にするために $\sigma=1$ というケースにおいて分析を行ってみよう。このとき，$g_Y^{*}>g_Y^{**}$ となる。すなわち，次の命題を得る。

命題4　人々の効用に対して直接的に影響を与えるような汚染（公害型汚染）よりも人的資本の蓄積に関して負の影響を与えるような汚染（環境ホルモン型汚染）の方が成長率に与える負の外部性が大きい。

この命題に対する直感的な含意は次のようになる。環境ホルモン型汚染を伴うような状況では，汚染が人的資本の蓄積に対して負の影響を与えるため，教育部門における単位当たりの人的資本投入量に対する成長率は，公害型汚染を伴うような状況と比較して，相対的に低くなる。$\sigma=1$ である場合には，最終財の生産と教育部門への投資へ割り振る時間，およびYとhの関係はともに等しくなる。したがって，環境ホルモン型汚染を伴うようなケースにおいては，人的資本の成長率と同様，経済成長率もまた，低くなるのである。

最後に規制水準との関係を考察する。汚染にまったく規制をすることができない場合を検討することにしよう。すなわち，すべての $t(t>0)$ に対して $z(t)=1$ ということを仮定するのである。公害型汚染の場合には，Y，Dはともに $\bar{g}_Y$ の率で成長する。一方，環境ホルモン型汚染の場合には，汚染がある一定を超えると $\dot{h}<0$ となるであろう。したがって産出量そのものも減少する可能性がある。

5 結論

持続可能な成長を達成するために環境政策の果たす役割は大きい。一般に環境問題は異時点間の要素というものが大きな割合を占めるため，多くの経済学者は環境問題をマクロ動学の枠組みに組み込んで分析を行っている。自然資源の有効利用という観点からこの問題を分析したものもあるし，汚染の外部性という観点から分析したものもある。

本稿では，環境問題を汚染の外部性という形でモデルの中に組み入れている。環境汚染をマクロ動学モデル枠組みで分析を行った先行研究にはStokey (1998)，Gradus and Smulders (1993)等がある。これらのモデルにおいて，効用水準は消費と汚染水準に依存する。また，消費の限界効用は通常のモデルと同様正で逓減的であるが，汚染の限界不効用は逓減的ではないと仮定されている。したがって，経済がある一定以上に発展すると消費の限界効用は十分に小さくなるため，汚染を規制し，不効用の増加を押さえることによって厚生水準を増加させることができることになる。この帰結は，一般的に発展途上国よりも先進国の方が環境汚染に対する規制が厳しいという現実とも相容れるものである。

本稿の第3節はこの流れを汲むものである。そこでは，消費の異時点間代替の弾力性が十分に小さい場合には長期的な経済成長率と汚染の変化率には負の相関があるという帰結が得られている。これはちょうど一人当たりの所得と汚染との間の逆U字の関係である環境クズネッツ曲線の右下がりの部分に相当するものと見なすことができ，Stokey (1998)，Aghion and Howitt (1998, ch5)，Ikazaki (1999) 等などの先行研究とも整合的である。

これらの結果は極めて興味深いものである。しかしながら，現在の経済活動において排出される汚染は必ずしもこのようなものばかりではなく，環境ホルモンのような新たなタイプの汚染も深刻になってきている。そこで第4節では，効用に対して直接的に影響を与えることはないが，人的資本の蓄積に対して負の影響を与えるような「環境ホルモン型汚染」を導入した。そして「公害型汚染」と「環境ホルモン型汚染」の経済成長率に与える影響の大きさを比較・検討した。汚染が存在しないような場合に長期的に正の率で成長する条件は公害型汚染が存在する場合に正の率で成長する条件と等しいという結論が得られた。その一方で環境ホルモン型汚染については必ずしもそのことは言えない。また，環境ホルモン型汚染の方が負の外部性が大きく長期的な経済成長率に与える影響も大きいということが明らかになった。この命題は公害型汚染よりも環境ホルモン型汚染の方がより経済に深刻な影響を与えるということや「環境ホルモン型汚染」に対しても「公害型汚染」同様規制をしなければならないということを示唆している。

今後の課題としては，汚染が国境を越えて影響を与えるという事実や先進国と発展途上国との相互関連性を反映するために貿易等を導入し国際間のモデルを構築することや，本モデルを複数世代が存

在するモデルに拡張し，世代間の公正という問題を検討することなどが望まれるであろう。

6　補論

ここでは，本稿で分析した3種類のモデルの成長率の導出を行う。まずは2節のモデルにおける成長率について検討しよう。このモデルでは，Y，C，K，h はすべて同じ率で成長する。さらに，(2.7)，(2.9) より以下の関係が成立する。

$$g_{\mu_2}=\varepsilon-\rho. \tag{6.1}$$

定常状態において，g_h は一定であるので，u も一定となる。(2.7) に注目すると，

$$g_Y+g_{\mu_1}-g_h-g_{\mu_2}=0 \tag{6.2}$$

となる。ここで，(6.1) と $g_Y=g_h=-\frac{1}{\sigma}g_{\mu_1}$ に注意すると $g_{\mu_2}=g_{\mu_1}=-\sigma g_Y$ となるので，成長率は次のようになる。

$$\bar{g}_Y=\frac{1}{\sigma}[\varepsilon-\rho]. \tag{6.3}$$

次に公害型汚染のケースについて検討してみよう。(3.7)，(3.8)，(3.9) より次の関係が成立する。

$$g_Y=-\frac{1}{\sigma}g_{\mu_1}, \tag{6.4}$$

$$g_z=\frac{1}{\beta-1}g_{\mu_1}=-\frac{\sigma}{\beta-1}g_Y, \tag{6.5}$$

$$g_Y+g_{\mu_1}-g_h-g_{\mu_2}=0. \tag{6.6}$$

生産関数および，(6.5) より

$$g_h=(1+\sigma\Gamma)g_Y \tag{6.7}$$

となる。(6.4)，(6.7) を用いて，(6.6) を変形すると次のようになる。

$$g_{\mu_2}=-\sigma[1+\Gamma]g_Y. \tag{6.8}$$

一方，(3.9)，(3.11) より

$$g_{\mu_2}=\rho-\varepsilon \tag{6.9}$$

とも書くことができる。(6.8)，(6.9)より公害型汚染を伴うモデルの定常状態における成長率，g_Y^* は次のようになる。

$$g_Y^*=\frac{1}{\sigma}(1+\Gamma)^{-1}(\varepsilon-\rho). \tag{6.10}$$

最後に環境ホルモン型汚染を伴うモデルを検討しよう。公害型汚染を伴うモデルと同様の手法で，g_Y と g_{μ_1}，g_z の関係を求めるとそれぞれ，$g_Y=-g_{\mu_1}$，$g_z=-\frac{1}{\beta-1}g_Y$ となる。ただし，g_z を求める際に，$g_Y+g_{\mu_1}=g_h+g_{\mu_2}=0$ という関係を用いている。g_z と g_Y の関係に注意し，生産関数を変形すると

$$g_h=(1+\Gamma)g_Y(=-g_{\mu_2}) \tag{6.11}$$

となる。(4.6)，(4.8) より次の関係が成立する。

$$g_{\mu_2}=\rho-\varepsilon+\varepsilon u[1-\Gamma(\beta(1-\alpha)-2+\alpha)]. \tag{6.12}$$

人的資本の蓄積を表す関数より $g_h=\varepsilon(1-u)-\xi D$ である。ここで，定常状態における汚染水準を求めると，

$$D=Yz^{\beta-1}=\varepsilon u\Gamma\frac{1}{\xi} \tag{6.13}$$

となる。定常状態において u は一定となるので D もまた一定となる。これに注意すると，h の成長率は以下のように表される。

$$g_h=\varepsilon-\varepsilon u(1+\Gamma). \tag{6.14}$$

(6.12)，(6.14) および $g_h+g_{u_2}=0$ に注意すると $\rho=\varepsilon u$ となる。したがって，

$$g_h=\varepsilon-\rho(1+\Gamma) \tag{6.15}$$

である。$(1+\Gamma)g_Y=g_h$ より定常状態における成長率は次のようになる。

$$g_Y^{**}=\frac{1}{1+\Gamma}(\varepsilon-\rho)-\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\rho. \tag{6.16}$$

参 考 文 献

[1] Aghion, P. and P. Howitt, *Endogenous Growth Theory*, MIT Press, 1998.

[2] Barro, R. J. and X. Sala-i-Martin, *Economic Growth*, McGraw-Hill, 1995. (大住圭介訳『内生的経済成長論 I．II』九州大学出版会，1997，1998.)

[3] Copeland, B. R. and M. S. Taylor, "North-South Trade and the Environment," *Quarterly Journal of Economics*, vol.109, 755-787, 1994.

[4] Dinopoulos, E. and P. Thompson, "Schumpeterian Growth without Scale Effects," *Journal of Economic Growth*, vol.3, 313-335, 1998.

[5] Gradus, R. and S. Smulders, "The Trade-off between Environmental Care and Long-Term Growth-Pollution in Three Prototype Growth Models," *Journal of Economics*, vol.58, 25-51, 1993.

[6] Grossman, G. M. and E. Helpman, *Innovation and Growth in the Global Economy*, MIT Press, 1991. (大住圭介監訳『イノベーションと内生的経済成長—グローバル経済における理論分析—』創文社，1998.)

[7] Grossman, G. M. and A. B. Krueger, "Economic Growth and the Environment," *Quarterly Journal of Economics*, vol.110, 353-377, 1995.

[8] Ikazaki, D., "Innovation, Environment, and Economic Growth," *Keizai=Ronkyu*, vol.105, 1-12, 1999.

[9] Lucas, R. E. Jr., "On the Mechanics of Economic Development," *Journal of Monetary Economics*, vol.22, 3-42, 1988.

[10] Osumi, K., *Economic Planning and Agreeability*, Kyushu University Press, 1986.

[11] Osumi, K., "Global Asymptotic Convergence of Optimal Time-Path in Renewable Resource Problem," *Keizaigaku=Kenkyu*, vol.64 (Nos.5-6), 203-214, 1998.

[12] Rebelo, S., "Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth," *Journal of Political Economy*, vol.99, 500-521, 1991.

[13] Romer, P. M., "Increasing Returns and Long Run Growth," *Journal of Political Economy*, vol.94, 1002-1037, 1986.

[14] Romer, P. M., "Endogenous Technological Change," *Journal of Political Economy*, vol.98, S71-S102, 1990.

[15] Segerstorm, P. S., "Innovation, Imitation and Economic Growth," *Journal of Political Economy*, vol.99, 807-827, 1991.

[16] Selden, T. M. and D. Song, "Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions?" *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.27, 147-162, 1994.

[17] Stokey, N. L., "Are There Limits to Growth?" International *Economic Review*, vol.39, 1-32, 1998.

[18] Uzawa, H., "Optimal Technical Change in an Aggregative Model of economic Growth," *International Economic Review*, vol.6, 18-31, 1965.

[19] Young, A., "Growth without Scale Effects," *Journal of Political Economy*, vol.106, 41-63, 1998.

[20] 伊ヶ崎大理・大住圭介「環境問題と内生的経済成長」,『九州経済学会年報』第37集, 6-10, 1999.

[21] 環境庁（編）『環境白書 平成11年版』大蔵省印刷局, 1999.

[22] 松岡俊二・松本礼史「アジアの経済成長とエネルギー・環境問題」, 環境経済・政策学会編『アジアの環境問題』東洋経済新報社, 111-122, 1998.