

論文

社会が持続可能な発展から離れていくとき

赤尾 健一*

1. はじめに

持続可能な発展は、社会にとって望ましいことだろうか？ 多くの人にとって、それは答えるまでもない問いかもしれない。事実、この概念を広めたブルントラント委員会は、地球環境問題への協力を得るため、とりわけ当時環境問題への関心が低かった発展途上国および社会主義国の協力を得るために、地球上の誰もが望むこととして、持続可能な発展を提唱した（World Commission on Environment and Development, 1987）。

しかし、少なくとも経済理論上は、社会的に最適な経路が持続可能な発展と一致しないことが起こりうる。そのような状況では、人々は自らの進んでいる道が非持続的であることを知りながら、しかし理性に基づいてさらにその道を進もうとする。

歴史を繙けば、ダイヤモンド（Diamond, 2011）が示すように、これまで数多くの社会が減ってきた。社会崩壊の原因は、外部からの侵略や病原菌、気候変動のような外部要因だけでなく、その社会に住む人々自らが招いたものも含まれている。ダイヤモンドは、森林破壊によって社会崩壊が生じたとされるイースター島に関して、その最後

の1本の木を伐った人は何を思っただろうかという問いを残している。その答えは、恐らくその1本を伐ることが合理的選択であったということだろう。その選択自身は賢明だが、その選択をせざるを得ない状況は悲惨である。明らかに、我々はそのような状況に陥らないために最大限の注意と努力を払う必要がある。

では、合理的選択が持続可能な発展となるための要件とは何であろうか。Akao and Managi（2007）は、内生的成長理論の枠組みで、環境と経済との関係に関する包括的なモデルを作成分析し、社会的最適経路が持続可能な発展と一致するための必要条件を導出している。本論文では、それらの条件を示すとともに、特にその条件の1つである自然の自浄能力に注目する。

社会的最適経路が持続可能な発展となるためには、経済成長とともに増加する汚染物質の排出増加に耐えるだけの十分な自然の自浄能力が必要である。汚染物質の寿命は、自然の自浄能力と密接な関係がある。すなわち、我々の経済がより長寿命の廃棄物をより多く環境に排出するならば、それは我々が自浄能力のより低い自然を持つことを意味する。

本論文では、長寿命汚染物質として、オゾン

*早稲田大学社会科学部 教授

破壊物質、温室効果ガス、そして放射性廃棄物のいくつかを取り上げ、それらの寿命と自然の自浄能力の関係を見る。それによって、たとえば温室効果ガスを排出し続ける社会において、社会的最適経路が持続可能性を具えているかを論じる。

以下、本論文は次のように構成されている。次節では、地球温暖化問題を例にとり、持続可能な発展と社会的最適経路の乖離の可能性を見る。第3節では、Akao and Managi (2007) に依拠して、両者が一致するための必要条件を示す。そこで示されるように、環境中に長年月にわたって滞留する汚染物質を大量に排出する社会では、社会的最適経路と持続可能な発展は一致しなくなる。第4節では、上に述べたオゾン破壊物質、温室効果ガス、そして放射性廃棄物の寿命や半減期を示し、それらを排出する社会の持続可能性について論じる。最後の節では、持続可能性を脅かす未知の環境問題に言及する。

2. 気候変動枠組み条約の2°Cターゲットと最適政策

2015年の第21回気候変動枠組み条約締約国会議(COP21)で採択されたパリ協定は、「地球平均気温の上昇を産業化前から2°C高い水準よりも十分に低くとどめること、1.5°Cを上限とする努力を続けること」を目標に掲げている(第2条(a))。この2°C目標は、気候変動枠組み条約の「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準」(第2条)として、COP16のカンクン合意(2010)以来、国際社会で受け入れられてきたものである。それは地球社会の持続可能性を保証するための目標といえる。

一方で、COP21に先立ち、2020年以降の温暖化対策の国別目標案INDC(Intended Nationally Determined Contribution)が各国から提出されたが、このINDCは2°C目標の実現には全く不十分であることが広く認識されている。たとえばIEA(2015)は、INDCが完全に実行されたとしても2100年末の気温上昇は2.7°Cとなると予測している。またUNFCCC(2015)は2015年から直ちに最小費用で2°Cを実現するための取り組みを行った場合とINDCの計画に従った場合の年間排出量の差が、2025年に8.7 GtCO₂eqとなり、2030年には15.1 GtCO₂eqに拡大するとしている。これらの超過排出量は、2015年から直ちに最小費用で2°Cを実現するための取り組みを行った場合の同年の排出量のそれぞれ1/3と1/4に相当する。

次ページの図1は、経済学者による代表的な温暖化分析モデルであるDICE(Dynamic Integrated model of Climate and Economy)による、シナリオ毎の温室効果ガス排出経路を示している。最適経路(optimal)は、各時点の世界消費量を $c(t)$ 、世界人口を $L(t)$ として

$$\sum_{t=1}^T (1+\rho)^{-t} \frac{c(t)^{1-\sigma}}{1-\sigma} L(t),$$

$$\rho = 0.015, \sigma = 2, T = 600.$$

を最大にするものである。ここで割引率 ρ と消費の限界効用弾力性 σ は過去のデータと整合的な水準が選ばれている。なお、図のSternはStern Review(Stern, 2007)が用いた $\rho = 0.001$ 、 $\sigma = 1$ による最適経路だが、このパラメータの組み合わせでは過去のデータを再現できない。

さて、図1の「 $\leq 2^\circ\text{C}$ 」経路と最適経路を比較すれば、これらの経路の違いは明らかである。2°C以下を最小費用で実現する経路が、温室効

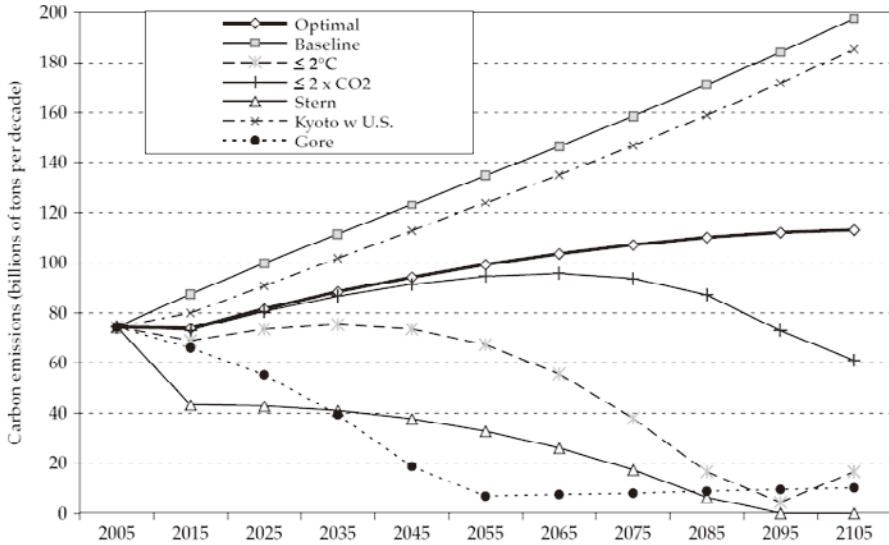


図1 DICEモデルによるシナリオ別年排出量の推移

出典：Nordhaus, William (2008)

果ガス排出量を直ちに低下に転じることを指示しているのに対して、最適経路は来世紀まで排出量の増加を許す。Nordhaus (2008) によれば、最適経路では2100年の温度上昇は2.61℃、2200年には3.45℃に上昇すると予想されている。それは気候変動枠組み条約の「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととされない水準」(第2条)を恐らく超えたものであろう。

一方で、その気温上昇はIEAがINDCから予測する水準と類似している。このことは、各国が持続可能性よりも経済学的最適経路を選んでいるかのように見える⁽¹⁾。

3. 経済成長と環境のモデル

この節ではAkao and Managi (2007) の環境一経済モデルと、そのモデルから得られる最適経路が持続可能な発展と一致するための必要条

件を示す。具体的なモデルを示すに先立って、経済成長と環境の関係を整理しておこう。それは次の図2に示すように3つのパターンに分類できる。

ここで横軸は資本の蓄積量がとられている。したがって経済成長は右方向への移動によって表現される。縦軸は汚染蓄積量である。 D_{max} はそれを超えると社会経済に致命的な影響が及ぶ臨界的な汚染水準を示している。図を地球温暖

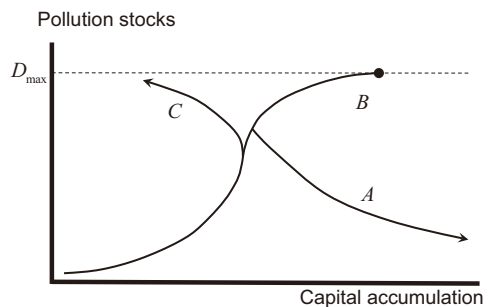


図2 経済成長と環境の関係

化問題の文脈で解釈するならば、縦軸は産業化前と比較した気温上昇であり、 D_{\max} は2℃目標の少し上に位置することになる。

さて、経済が成長するとともに汚染ストックも増加するが、やがて3つの経路に枝分かれする。 A は経済成長と汚染の関係が反転し、経済成長とともに汚染が減少するパターンである。これが持続可能な発展に対応する。 B はそうした反転が生じないケースである。この場合、経済成長によって社会はやがて臨界的汚染水準に到達する。それ以上の汚染は社会経済に致命的な影響を与えるから、この汚染水準を超えることはできない。したがってそれ以上の経済成長は諦めなければならない。このパターンは、環境汚染が経済成長の障壁となる成長の限界の経路である。

最後に C は、経済の衰退と環境劣化が同時に生じるパターンである。それは貧困と環境劣化の悪循環として知られるものであり、発展途上国での砂漠化問題で典型的に見られる。ただし理論上、 C が最適経路として現れることはない。これは、経済的にも環境的にもより悪くなるのであれば、現状に留まることが賢明であるためである⁽²⁾。したがって、ここで問題となるのは、最適経路が A となるか B となるかである。

その検討を、ここではAkao and Managi (2007) のモデル（以下、AMモデル）に基づいて行う。AMモデルの結果は基本的にAghion and Howitt (1998) と同じだが、そのモデルは次の点で包括的である。第1に、生産だけでなく消費がもたらす環境への負荷を考慮している。第2に汚染の削減だけでなくリサイクルの過程を考慮している。そして第3に、マテリアルズ・バランス・アプローチを採用す

ることで経済と環境とを統一的に扱っている。

図3は、AMモデルにおける経済と環境の関係を表している。環境から経済へ、環境サービスあるいは天然資源 R が提供される。 R は労働や資本と組み合わせられて、産出 Y に変換される。 Y は消費と資本蓄積に分配される。消費からは $vC(R/Y)$ の廃棄物が環境に返される。残りリサイクルされて資本部門に蓄積される。リサイクル率は $1-v$ で与えられる。このモデルは、マテリアルズ・バランス・アプローチを採用しており、環境と経済のやり取りは重量単位で表現されている。消費から発生する廃棄物の単位重量は R/Y で与えられる。資本からの廃棄物は、資本減耗率を δ として $v\delta W$ で与えられる。ここで W は重量単位で表現した資本の量である。消費の場合と同様に、資本減耗分の一部はリサイクルされて再び資本蓄積過程に投入される。

消費および資本蓄積過程から発生した廃棄物は、汚染された環境ストック（以下、汚染ストック） D として環境に蓄積される。 D は、自然浄化率 θ で経済にとって利用可能な環境サー

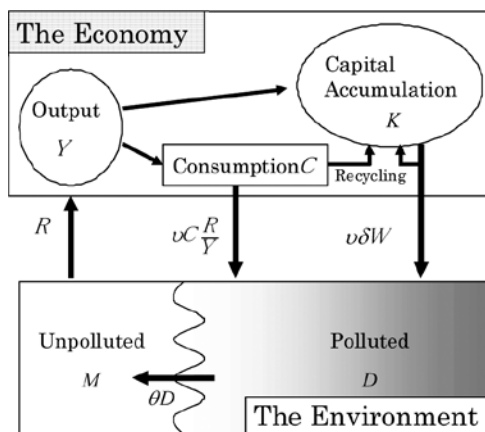


図3 環境と経済の関係

ビス・資源に変化する。次節でみるように、長寿命の汚染物質を環境に捨てる経済では θ は小さくなる。

以上の諸過程を技術的制約条件とする、次の通時的社会厚生最大化モデルがAMモデルである。AMモデルは、典型的な経済動学モデルを、環境を含むモデルに拡張するものである⁽³⁾。

[AMモデル]

$$\begin{aligned} & \max \int_0^{\infty} \left[\frac{C(t)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \gamma \frac{D(t)^{1+\omega}}{1+\omega} \right] e^{-\rho t} dt, \\ & \quad \sigma, \gamma, \omega, \rho > 0 \text{ (constant)} \\ & \text{subject to } \dot{K}(t) = Y(t) - \nu(t)(C(t) + \delta K(t)), \\ & \quad \delta > 0, \nu(t) \in (0, 1], \\ & \quad \dot{W}(t) = -\nu(t)[(R(t)/Y(t))C(t) \\ & \quad \quad \quad + \delta W(t)] + R(t), \\ & \quad \dot{D}(t) = \nu(t)[(R(t)/Y(t))C(t) \\ & \quad \quad \quad + \delta W(t)] - \theta D(t), \\ & \quad D(t) \in (0, D_{\max}), \\ & \quad Y(t) = AK(t)^\alpha (B(t)L_f(t))^\beta R(t)^{1-\alpha-\beta}, \\ & \quad A, \alpha, \beta > 0 \text{ (constant)}, \alpha + \beta < 1, \\ & \quad \dot{B}(t) = \eta_B L_B(t) B(t), \quad \eta_B > 0 \text{ (constant)}, \\ & \quad \dot{Q}(t) = \eta_Q Q(t)[1 - L_f(t) - L_B(t) \\ & \quad \quad \quad - q(\nu(t))(C(t) + \delta K(t))/Q(t)], \\ & \quad L_f(t) + L_B(t) + q(\nu(t)) \frac{C(t) + \delta K(t)}{Q(t)} \leq 1, \\ & \quad L_f(t), L_B(t) \geq 0, \\ & \quad K_0, B_0, Q_0 > 0 \text{ and } D_0 \in (0, D_{\max}) \text{ given.} \end{aligned} \tag{1}$$

ここで $t \geq 0$ は連続時間を表わす。制御変数は、 $C(t), L_f(t), L_B(t), \nu(t)$ である。 D_{\max} は、図2に現れたものであり、それ以上に環境が汚染されると社会経済が致命的な影響を受ける汚染ストックの上限である。この経済において、各時点で供給可能な労働量は一定で、それは1に標

準化されている。労働は最終財部門 L_f 、人的資本部門 L_B 、リサイクリング部門、あるいはリサイクリング技術部門に投入される。 B は人的資本を表わし、 Q はリサイクル技術を表わす。

各時点での社会厚生はその時点の代表的個人の効用

$$U(C, D) = \frac{C^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \gamma \frac{D^{1+\omega}}{1+\omega}$$

で与えられる。第1項は消費から得られる効用であり、第2項は汚染された環境から得られる不効用である。各時点の社会厚生は割引因子 $e^{-\rho t}$ で割引かれて現在価値に換算され積分される。したがって、社会最適性とは、現在から無限の将来にわたる世代の効用の現在価値の総和を最大にするような経済運営を意味する。

割引率 ρ は正の値をとるので、より遠い世代の効用は現在価値に換算される際により小さく評価される。このため将来世代の効用を犠牲にして現在世代がより多くの効用を得るような経路が最適な経路となることもありうる。

一方で、経済が十分に生産的ならば、現在世代はその消費を抑えて資本蓄積に励むことで将来世代に十分に大きな効用を与えることが可能となり、割引にも関わらず、より高い効用水準をより遠い将来世代に与える経路が社会的に最適となる。多くの経済学者が関心をもち、また現実にも沿うと考えるのは、この後者の経路である。本論文でも後者の資本が増加する経路を想定して論を進める⁽⁴⁾。

このような資本蓄積経路は消費の増加をもたらし、その点で持続可能な発展の概念に沿うが、他方、環境面では複雑な問題が生じる。すなわち、そうした資本蓄積は将来の経済活動をより活発にするため、環境対策が強化されなければ

ば環境問題の激化を招く。理論的には、Stokey (1998) が示すように、最適経路上で、資本蓄積とともに環境対策は常に強化される。これは1つに、所得の上昇が良好な環境への人々の需要を高め、環境改善への限界支払意志額が増加することによる。しかし、同時に経済活動もより活発になるため、増加する汚染と環境対策の強化の相対的な関係によって、環境は悪化することもあれば改善することもありうる。

知られている理論的結果は以下のようなものである。経済発展の初期の段階では、環境保全よりも資本蓄積のスピードが優先されて環境は悪化する。さらに資本蓄積が進むと、2つの可能性が生じる。

1つは図2のAのパターンであり、資本蓄積が進むと、ある段階で資本蓄積と環境改善が同時に生じるようになる。このような経路では経済成長は持続する。したがって、その最適経路は持続可能な発展経路、あるいは持続的最適経路と呼ぶことができる。資本蓄積とともに汚染ストックが一度上昇しやがて減少することは、経験的に環境クズネツ曲線として知られている (Grossman and Krueger, 1993)。Stokey (1998) はそれが最適経路として生じる理論的可能性を明らかにしている。

もう1つは図2のBのパターン、すなわち依然として環境が悪化し続ける場合である。しかし汚染を際限なく増加させることはできない。たとえば、オゾン層が破壊され続ければ、われわれを含めて陸上生物は生存不可能となる。このような臨界的な汚染ストックの水準 D_{\max} に至った段階で、経済成長は終わる。つまり、このような経路では汚染の限界が成長の限界を画する。この意味で、汚染が増加し続けてやがて

成長が終わる経路は“成長の限界”経路、あるいは非持続的最適経路と呼ぶことができる⁽⁵⁾。

Akao and Managi (2007) による次の結果は、AMモデルの最適定常状態が持続的なAになるか、あるいは非持続的なBになるかを条件づけている。ここで定常状態とは、経済変数の成長率が時間を通じて不変な成長経路を指す。AMモデルでは消費 $C(t)$ 、資本 $K(t)$ 、そして産出 $Y(t)$ が共通の成長率を持つことから、その定常状態は balanced growth path (BGP) と呼ばれている。

[持続可能な発展が最適経路となる必要条件]

AMモデルにおいて、持続可能な発展が最適経路となるための必要条件は

$$\begin{aligned} & \text{(i) } \sigma \geq 1, \\ & \text{(ii) } \eta_B > \rho, \\ & \text{(iii) } \theta > -\frac{1-\sigma}{1+\omega} g_c. \end{aligned} \quad (2)$$

である。ここで g_c は最適BGP上での消費の成長率を表す。

以上の条件のうち、(ii) はBGPが消費（そして資本、産出）について正の成長率をもつために必要となる。それは環境問題を考慮しない通常のマクロ成長モデルでも現れる一般的な条件である。

成長の限界と持続可能な発展を分ける条件は、(i) と (iii) である。このうち (i) はわれわれの選好に関するパラメータであり、消費の増加に対してその限界効用が急速に低下することを要求する⁽⁶⁾。一方、(iii) は環境の自然浄化率 θ がBGP成長率に対して十分に高いことを要求している。本論文が注目するのは、この条

件 (iii) である。

4. 汚染物質の寿命・半減期と自然の自浄能力

AMモデルに示された汚染ストックに関する状態方程式は

$$\dot{D}(t) = v(t)[(R(t)/Y(t))C(t) + \delta W(t)] - \theta D(t) \quad (3)$$

である。右辺第1項は人為的な汚染の増加であり、自然状態ではそれはゼロとなる。つまり自然状態では汚染ストックは次式に従って指数的に減少する。

$$D(t) = D_0 e^{-\theta t} \quad (4)$$

汚染ストックが t 年後に消滅する確率を $P(t)$ と表わすと、このモデル (decay model) における汚染ストックの平均寿命 \bar{t} が、

$$\bar{t} = \int_0^\infty tP(t)dt = \int_0^\infty t \frac{\theta D_0 e^{-\theta t}}{D_0} dt = \frac{1}{\theta} \quad (5)$$

で与えられる。また半減期 $t_{1/2}$ は

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\theta} \approx \frac{0.693}{\theta} \quad (6)$$

である。これらから明らかのように、平均寿命の長い、あるいは半減期の長い汚染物質ほど、持続可能な発展が最適経路となるための必要条件 (iii) を満たさない可能性が高くなる。

表1は、オゾン層破壊、地球温暖化、および放射性廃棄物問題に関わる汚染物質等について、 θ の値を調べたものである。なお、二酸化炭素の θ の算出は補論2に示されている。

表1の各汚染物質が、モデルの θ を代表するとき、持続可能性の必要条件 (iii) が満たされるかを考えよう。

その条件は次のように書くことができる。

$$\omega > \frac{\sigma - 1}{\theta} g_c - 1 \quad (7)$$

持続的成長率を1% ($g_c = 0.01$) と仮定し、消費の限界効用弾力性として、DICE-07 (Nordhaus, 2008) の $\sigma = 2$ を採用すると、(7)の右辺の値は、各汚染物質について、表1の最後の列のようになる。

ここで負の値をとっているものは明らかに (iii) の条件を満たす。また、主要なオゾン破壊物質であるCFC-12はほぼゼロである。このこ

表1 汚染物質と自然浄化率

		平均寿命	半減期	θ	$\omega >$
オゾン破壊物質*	CFC-12	100		0.010000	0.00
	HCFC-22	12		0.083333	-0.88
長寿命温室効果ガス*	二酸化炭素	さまざま		0.008629	0.16
	メタン	12		0.083333	-0.88
	一酸化二窒素	114		0.008772	0.14
高レベル放射性廃棄物**	Pu-239		24110	0.000029	346.83
	長寿命核種	Am-241	432.6	0.001602	5.24
		I-129	15700000	0.000000	226502.12
短寿命核種	Sr-90		28.90	0.023984	-0.58
	Cs-137		30.08	0.023043	-0.57

注：* IPCC (2007), ** IAEA (2009)

とは、ここでの理論によれば、オゾン破壊物質によって、社会が非持続的経路を辿る心配はないことを意味している。実際のところ、オゾン層保護に関する国際協調は成功をおさめ、10年以上前の2002年の国連報告書（WMO/UNEP, 2002）で示された予測の通りにオゾン層は現在回復に向かっている。

一方で、高レベル放射性廃棄物をみると、その長寿命核種（long-live actinides and fission products）のPu-239とI-129に対応して必要とされる汚染の不効用の弾力性 ω は、非常に高い値となっている⁽⁷⁾。 ω の妥当な値の範囲を論じた論文は存在しないようだが、そこに示された数値は、限界効用の弾力性として通常考えられる値よりも桁違いに高い。このことは、これら放射性廃棄物が主要な汚染物質となるような社会では、持続可能な発展は諦められる可能性が高いことを示唆している。すなわち、社会が望む経路は、図2のBではなくAになる可能性が高い。

最後に主要な温室効果ガスである二酸化炭素と亜酸化窒素をみると、それらが要求する ω の値はそれほど大きくはない。ただし、地球温暖化問題は、温室効果ガスの排出とそれによる気候への影響の間に50年以上に及ぶタイムラグがある。このようなタイムラグは Akao and Managi (2007) ではモデル化されていないものの、汚染ストックの限界不効用の弾力性が小さい状況に対応すると解釈できる。たとえば大気中の温室効果ガス濃度が600ppmから1%増加することは、将来世代にとっては深刻な変化だが、一方でその時点の人々にとってはその影響は小さい。つまり、汚染の不効用弾力性 ω の値は小さい。したがって、これら温室効果ガスが主要な汚染物質となる社会が選ぶ最適経路が持続可能

なものかどうかは微妙である。

5. 持続可能な発展の実現のために

放射性廃棄物は別として、オゾン破壊物質にせよ温室効果ガスにせよ、自然過程で長い寿命をもつものは、化学的に安定な、人体への害の少ない物質である。このため、50年前までは、それらが我々にとって脅威となるとは思いもよらなかった。また、それゆえ環境に大量に排出されてきた。

歴史的事実として、科学の進歩はそうした潜在的脅威を明らかにし、政治経済システムは、そうした脅威の除去に取り組んできた。しかし、この論文が示唆するのは、あまりに寿命の長い汚染物質が環境問題を引き起こすならば、我々は脅威の除去を諦めてしまうかもしれないということである。

地球温暖化問題はそのような可能性のある問題である。環境問題が思いもかけない形で発現することを考慮に入れるならば、持続可能な発展の実現のために、我々は、技術の選択や開発の方向において、難分解性廃棄物を避けることを考える必要があるだろう⁽⁸⁾。

より一般的な言い方をすれば、経済システムのダイナミクスのスピードと比してあまりに遅いダイナミクスを我々にはうまく扱えない。持続可能な発展の実現のためには、そうした遅いダイナミクスに影響を与えることは極力避けるべきであると考えられる。

補論1 AMモデルの解説

この補論ではAMモデルの各式を解説する。

$$\max \int_0^{\infty} \left[\frac{C(t)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \gamma \frac{D(t)^{1+\omega}}{1+\omega} \right] e^{-\rho t} dt \quad (8)$$

(8)は、経済成長と環境の問題で典型的に用いられる目的関数である。被積分関数の大カッコ内第1項は各時点で消費から得られる効用を表す。この関数型は消費代替弾力性一定の効用関数と呼ばれ、標準的にマクロ経済モデルで用いられている。第2項は汚染ストックのもたらす効用を表現する。やはり弾力性（ここでは汚染のそれ）が一定となる関数型が用いられているが、これは最適BGPが存在するための技術的仮定である。ここでは、消費の効用と汚染の不効用は加法分離的だが、消費と汚染の凹関数となる限り、積の形で両者を結ぶ関数形を用いても同じ結果が得られる（Akao, 2014）。

効用に乘じられている $e^{-\rho t}$ は割引因子と呼ばれ、 r は割引率と呼ばれる。将来の資産を割り引いて現在価値に換算するように、将来世代の効用を割引現在価値に変換したうえで合計（積分）したものの最大化が、ここでの目的であり、社会の最適性を意味している。

このような目的関数の定式化は割引功利主義と呼ばれる。割引率は、わずかでも大きな値を選ぶことで遠い将来世代の効用をほとんど無視することになる。このため適切な割引率の水準を巡って、そして、そもそも将来世代の効用を割り引くこと自体の是非を巡って、Ramsey (1928) 以来1世紀近くに及ぶ経済理論上の諸議論がある。赤尾 (2012) は世代間衡平の文脈でその最近の諸理論を紹介している。

制約条件のはじめの3式 $\dot{K}(t)$, $\dot{W}(t)$, $\dot{D}(t)$ のドットは時間微分を表す（たとえば $\dot{z} = dz / dt$ ）。

これらの各式は、それぞれ物的資本、物的資本に消費財と経済内の廃棄物量を加えた経済の物的量、そして環境に捨てられた廃棄物や汚染の物的量の動態を示す微分方程式である。資本蓄積の式はマクロ経済モデルにおける標準的な定式であり、国民経済計算に準じる。すなわち、純投資＝国民所得－（消費＋資本減耗）。ただしリサイクルが考慮されている点はAMモデルに特有である。 $\dot{W}(t)$, $\dot{D}(t)$ の式は、重量表現された経済と汚染ストックのマテリアルズ・バランスを表している。

最終財生産（国民所得）に関する

$$Y(t) = AK(t)^{\alpha} (B(t)L_f(t))^{\beta} R(t)^{1-\alpha-\beta} \quad (9)$$

は、Cobb-Douglas型とよばれるマクロ経済モデルの標準的な生産関数である。生産要素として環境からの投入 R が含まれている点はAMモデルを含む経済成長と環境のモデルの特徴である。また、人的資本 B が生産関数に含まれているが、このようなモデルは新古典派成長モデルと区別されて内生的成長モデルと呼ばれる。人的資本の蓄積は資本の限界生産性の低下を防ぎ、最適経路上で常に正の純投資が選択されることで経済が持続的に成長することが可能となる。「内生的」という言葉の意味は、人的資本の蓄積が経済メカニズムによって内生的に決定されることによる。新古典派モデルは、このようなメカニズムを欠き、このため、外生的技術進歩を仮定することで長期の経済成長を表現する。

$\dot{B}(t)$, $\dot{Q}(t)$ の各式は、それぞれ人的資本の蓄積とリサイクル技術の時間発展を表す。どちらもその量に比例的に変化すること（線形性）が仮定されている。人的資本について、この仮定が満たされず限界生産性が逡減する場合、持続的成長は最適経路ではなくなる。したがって、線形性がなぜ仮定できるかは、内生的成長理論

の妥当性の核心に関わり、それゆえさまざまな巧妙な説明がある。例えば、Barro and Sala-i-Martin (2004) や Aghion and Howitt (1998) を参照。

リサイクル技術に関する線形性は、リサイクル問題を考慮するAMモデルに特有の仮定である。経済成長が続く限り、不要な情報（非物質的なゴミ）を含めて廃棄物も増加する。労働力の制約の中でそのゴミを処理するためには、リサイクル技術進歩における労働の限界生産性を維持すること、すなわち線形性が必要となる。ただしAkao and Managi (2007) が明らかにしたことは、仮にリサイクル技術が線形性の条件を満たさないとしても、最適経路の持続可能性は影響されないことである。その場合、最終的にリサイクルは行われなくなるが、リサイクルは持続可能性にとって本質的ではない。

労働に関する制約式

$$L_f(t) + L_B(t) + q(v(t))(C(t) + \delta K(t)) / Q(t) \leq 1 \quad (10)$$

については本文で述べた。AMモデルの制約条件の最後の行の $K_0 > 0$ や $D_0 \in (0, D_{\max})$ は初期値を示す。

補論2 二酸化炭素の θ

表1において、二酸化炭素については大気中での平均寿命も半減期も示されていない。これは二酸化炭素がさまざまな分解過程を持つことによる。IPCC第4次アセスメントWG1のTechnical Summaryでは、「瞬間的に大気に注入された二酸化炭素の約半分は30年ほどの間に除去され、さらに30%が数世紀以内に除去され、残りの20%は何千年も大気中に留まらう」としている⁽⁹⁾。同じTechnical Summaryの

中で、IPCCは、大気中の二酸化炭素の減少が次の式で表わされるとしている (IPCC, 2007, 表TS. 2の注)。

$$a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i e^{-t/\tau_i},$$

$$a_0 = 0.217, a_1 = 0.259, a_2 = 0.338,$$

$$a_3 = 0.186, \tau_1 = 172.9, \tau_2 = 18.51, \tau_3 = 1.186$$

表1の θ の値はこの式を近似するものである。この θ の値に対応する平均寿命は116年である。注意として、次の図4に示すように、一定の θ で近似するモデル (decay model) は、近い将来の二酸化炭素の大気残留を過大に評価する一方で、遠い将来のそれを過小に評価する。したがって、長期的影響を考える場合には θ はより小さな値となる。

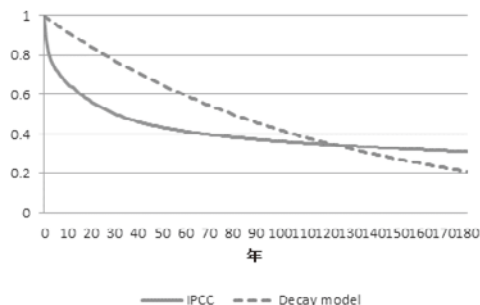


図4 二酸化炭素の大気残留率

[投稿受理日2017.1.5/掲載決定日2017.2.20]

注

- (1) INDCは各国の自発的約束であり、フリーライダー効果によって、最適経路よりもさらに少ない排出削減が表明されていることが理論的には予想される。
- (2) Cが現れる典型的な理論モデルは非協力ゲームである。そこでは各主体は合理的行動をとりながら社会全体では非効率な経路が選択される。
- (3) 補論1で個々の式を簡単に解説している。
- (4) 初期時点において物的そして人的資本が十二分

- に存在する経済では、最適経路に沿ってそれら資本は減少する。しかしそうではない経済を想定することが現実的であろう。また、本文の“経済が十分に生産的”の形式的な表現は、各資本の限界生産性が割引率より大きいことである。本論文のモデルの場合そして多くのマクロ経済モデルの場合、このことは最終財については生産関数の性質として満たされている。また人的資本生産に関しては、以下に示す命題の条件(ii)によって与えられる。
- (5) ここでの最適経路が“成長の限界”にとどまり続けるのに対して、有名なローマクラブ・レポート「成長の限界」(Meadows et al., 1974)では、“成長の限界”に至った後、経済は(環境改善を伴いながら)衰退に向かうと予測している。このような経路は最適経路としては得られていない。ローマクラブ・レポートの予測は、過去の傾向を将来にあてはめるものであり、最適化問題等で表現される社会経済の対応を考慮するものではないことに注意すべきである。
- (6) この条件に関する詳細な議論と理論的結果は Akao (2012) を参照。
- (7) 汚染の不効用の弾力性とは汚染ストックが1%増加したときの不効用の増加率(%)である。
- (8) Acemoglu et al. (2012) は、技術進歩の方向性、より具体的には環境保全的な技術進歩を社会が選択するか否かが、社会経済の持続可能性にとって決定的であることを理論的に示している。
- (9) 同レポートのTS2.2.1。和訳は気象庁他 (http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_ts_jpn.pdf アクセス2017/1/5) による。

引用文献

- Acemoglu, Daron, Phillippe Aghion, Leonardo Burzтын, and David Hemous (2012) “The environment and directed technical change,” *American Economic Review* 102: 131–166.
- Aghion, Philippe and Peter Howitt (1998) *Endogenous Growth Theory*. MIT Press.
- Akao, Ken-Ichi (2014) “Preference constraint for sustainable development,” *Environmental Economics and Policy Studies* 16: 343–357.
- Akao, Ken-Ichi and Shunsuke Managi (2007) “Feasibility and optimality of sustainable growth under materials balance,” *Journal of Economic Dynamics and Control* 31: 3778–3790.

- Barro, Robert J. and Xavier Sala-i-Martin (2005) *Economic Growth: 2nd Edition*. MIT Press.
- Diamod, Jared (2011) *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed: Revised Edition*. Penguin.
- Grossman, Gene M. and Alan B. Krueger (1995) “Economic growth and the environment,” *Quarterly Journal of Economics* 110: 353–377.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *Fourth Assessment Report, Working Group I: Technical Summary* (https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/4ts.html Access 2017/1/5)
- International Atomic Energy Association (2009) *Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants*. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1363_web.pdf Access 2016/8/5/)
- Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, and William W. Behrens III (1974) *The Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. Universe Books.
- Nordhaus, William (2008) *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*. Yale University Press.
- Ramsey, Frank P. (1928) “A mathematical theory of saving,” *Economic Journal* 38: 543–559.
- Stern, N. (2007) *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.
- Stokey, Nancy L. (1998) “Are there limits to growth?” *International Economic Review* 39: 1–31.
- UNFCCC (2015) Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions. (FCCC/CP/2015/7) (<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/07.pdf> Access 2016/8/5/)
- World Commission on Environment and Development (1987) *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. (<http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> Access 2016/8/5/)
- WMO/UNEP (2002) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer (<http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2002/> Access 2016/8/5/)
- 赤尾健一 (2012) 「持続可能な開発と世代間の衡平」 細田衛士編著『環境経済学』第12章, ミネルヴァ書房

謝辞：

本研究は2016年度韓国環境経済学会大会，中国東北師範大学環境科学院セミナー，2016年度環境経済政策学会大会で報告された。貴重なコメントをいただいた方々，特にTaek-Wan Han, Deli Wang, 張継権に感謝申し上げます。

English Summary:

When society moves away from sustainable development

Ken-Ichi Akao
School of Social Sciences, Waseda University

Sustainable development, having both economic growth and environmental conservation, is not necessarily economically optimal. This indicates that the present generation may willingly take an unsustainable path, recognizing that it will be hardly acceptable for future generations. In the framework of endogenous growth theory, we can identify the necessary conditions for an economically optimal path to be sustainable development. One key factor in the conditions is the assimilation capacity of nature. The capacity relates to the lifetime of pollutants. I discuss how sustainable development can be undermined by long lifetime pollutants such as some of ozone depleting substances, greenhouse gasses and radioactive wastes. The discussion may shed new light on environmental issues and contribute to obviating a potential threat to sustainable development.