

地球温暖化問題における カタストロフ・リスクによる長期的影響 — 動学モデルの数値解析による均衡解の性質 —

中 篤¹・林山 泰久²・森杉 壽芳³

¹ 修(工学) 東北大学博士課程後期 大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)
E-mail: nakajima@fecsun.kankyo.tohoku.ac.jp

² 正会員 博(工学) 東北大学教授 大学院経済学研究科 (〒980-8576 仙台市青葉区川内 27-1)
E-mail: yhaya@econ.tohoku.ac.jp

³ 正会員 博(工学) 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)
E-mail: morisugi@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は、地球温暖化による将来のリスクを定量的に評価するための基礎的研究として、カタストロフ・リスクを明示的に組み込んだ動学モデルを構築し、数値解析によってモデルの挙動特性の把握と均衡解の性質に関して分析したものである。

Key Words : global warming, catastrophic damage, long-term equilibria

1. はじめに

これまで温室効果ガス(GHG)削減を初めとした温暖化対策の経済的影響を評価する研究分野には数多くの蓄積が見られる。これらの研究では、Nordhaus(1994)¹⁾、Nordhaus and Boyer(2000)²⁾によるDICE/RICEや、わが国ではMatsuoka *et al.*(1995)³⁾、Kainuma *et al.*(2003)⁴⁾によるAIMといった統合評価モデルが開発され、数多くの分析が試みられてきた。しかしながら、温暖化がある危険な水準に達するに伴い、不可逆的なカタストロフ事象(Catastrophic Events)による損害の経済的影響を定量的に評価する研究は未だ多くはない。ここでカタストロフ事象とは、気候システムを不安定にする熱塩大循環の停止や海面上昇を引き起こすグリーンランド氷床の融解等によって引き起こされるとされており、その社会経済への影響は甚大であると考えられる事象を指し示す。このカタストロフ事象による損害の経済評価が未だ多くない理由の1つとして、温暖化研究分野で用いられる多くの統合評価モデルが、地球温暖化が莫大な不確実性を抱える問題であるにもかかわらず、感度分析による不確実性の検討しか行われていないことが挙げられる。特に、AIMのように比較

的大規模なモデル構造を持つモデルにおいては、計算時間の点から感度分析による不確実性の検討も困難になる。

これに対して、Aronsson *et al.*(1998)⁵⁾やBosello and Moretto(1999)⁶⁾では不可逆的な現象を内生的、あるいは外生的な不確実性としてモデルに組み込み、最適な温暖化政策の効果について分析している。しかしながら、これらのモデルは、GHGの最適排出経路や温暖化対策の効果を評価することを目的としており、温暖化による負の影響は考慮されているものの、経済成長率は外生的に与えられているという問題を有している。本来、温暖化問題は社会経済より排出されるGHGの大気中での蓄積を通じて、気候が変動し、その負の影響によって経済活動、例えば経済成長率が減少するという構図を有するはずであるものの、経済成長率を外生的に与えることは、モデル構造の矛盾として批判されている点でもある。

以上のように、温暖化による将来のリスクの1つとして不可逆的なカタストロフ事象により損害を被るリスクを定量的に評価し、かつ経済活動による気候変動が経済活動に及ぼす影響を内生的に評価できる枠組みが今後の温暖化影響研究において不可欠であると考えられる。そこで本研究では、温暖化によ

る将来のリスクを定量的に評価するための基礎的研究として、内生的経済成長モデルにカタストロフ・リスク(Catastrophe Risks)を明示的に組み込んだ動学的モデルを構築し、数値解析によってモデルの挙動特性の把握と均衡解の性質に関して分析することを目的とする。また本研究は、温暖化対策による最適経路を求めるものとは異なり、カタストロフ・リスクの存在の下、長期均衡解の性質を分析する研究として位置付けられる。

2. 既存研究の整理

カタストロフ・リスクを扱った既存研究に、横松(2003)⁷⁾、Johansson and Lofgren(1995)⁸⁾、Tsur and Zemel(1996)⁹⁾が挙げられる。横松(2003)⁷⁾では、カタストロフ・リスクを家計の死亡リスク(家計的リスク)と災害リスクとに分割し、防災投資によってリスクが制御される最適生命保険モデルを用いた防災投資の費用便益分析を行っている。横松(2003)⁷⁾は、数値シミュレーションを行っているものの、カタストロフ・リスクを地震のような自然災害によるリスクとして扱っており、温暖化によるカタストロフ・リスクを扱ったものではない。Johansson and Lofgren(1995)⁸⁾では、カタストロフ・リスクを時間(年齢)と汚染による健康被害の死亡リスクとして扱っており、健康資本の蓄積によって死亡リスクが制御されることを論じている。Tsur and Zemel(1996)⁹⁾は、カタストロフ事象が生起すると社会全体が甚大な損害を被るリスクとしてカタストロフ・リスクを扱っている。しかしながら、これらの研究は理論分析のみに留まっており、シミュレーションによるカタストロフ事象の経済評価や政策的インプリケーションまで言及していない。

次に数値シミュレーションを用いた既存研究に、Aronsson *et al.*(1998)⁵⁾、Bosello and Moretto(1999)⁶⁾が挙げられる。Aronsson *et al.*(1998)⁵⁾では、原子力利用に伴い外部に放射能が漏れる不確実性を確率的事象として捉え、動学的ピグー税を導いている。また、Bosello and Moretto(1999)⁶⁾では、Nordhaus(1994)¹⁾によるDICE、Manne *et al.*(1995)¹⁰⁾によるMERGE及びPeck and Teisberg(1992)¹¹⁾によるCETAの3つの統合評価モデルにカタストロフ・リスクを組み込み、最適排出経路を導出している。しかしながら、これらの研究は経済成長率を外生的に与えているため、気候変動による経済活動への負のフィードバックを正當に評価しているとは言い難い側面を有している。これらに対して、Greiner and Semmler(2005)¹²⁾はカタ

ストロフ・リスクを扱っていないものの、資本のスピルオーバーから生じる正の外部性と収穫一定をもつ生産関数から、資本に関する社会的な収穫一定性の存在によって、内生的成長がもたらされるモデルに温暖化が経済成長に影響を及ぼすことを考慮して、長期的均衡解の性質を分析している。

前述した既存研究では、カタストロフ・リスクがどのような要因に起因するものか異なるものの、カタストロフ事象が生起した後に想定される社会経済の状態に関しては、3つの状態に大別することができる。第1に、カタストロフ事象が一度生起すると、社会全体が崩壊するというdoomsdayの状態である。Johansson and Lofgren(1995)⁸⁾やAronsson *et al.*(1998)⁵⁾ではこの仮定を用いている。第2に、カタストロフ事象が一度生起したとしても、それが社会全体の崩壊を意味せず、社会的便益がカタストロフ事象なしの場合の最適値からあるペナルティ分だけ差し引かれる状態である。Tsur and Zemel(1996)⁹⁾はこの仮定を用いている。そして第3に、カタストロフ事象が生起した後、効用水準がカタストロフ事象生起前の基準年の効用水準まで下落する状態である。この仮定は、Bosello and Moretto(1999)⁶⁾で用いられている。このようにカタストロフ事象が生起した後の社会経済の状態は、どの程度のカタストロフ事象が生起するかにより異なる。

3. モデル

(1) 経済モデル

本研究では、Greiner and Semmler(2005)¹²⁾(以下、適宜GSとする)の内生的経済成長モデルを拡張し、温暖化の進展による不可逆的なカタストロフ・リスクを組み込んだ経済モデルを構築するが、その多くはGSに依拠するため、本章の第1節、第2節において、GSで用いられる経済モデルおよび気候モデルの概要を説明する。なお、本研究における経済モデルは、GSと同様に世界全体を1地域とした世界経済を仮定するため、空間的要素は考慮しておらず、地域分割した経済モデルは今後の課題としたい。

まず、代表的な家計と企業から構成される経済を考え、代表的個人としての家計は合成財の消費 c から効用を得るものとする。各時点 t での瞬時的効用関数は $u(c(t)) = \ln c(t)$ と定義され、時点 s における家計の効用 $U(s)$ は、瞬時的効用関数の割引現在価値の和として、式(1)で定義される。

$$U(s) = \int_0^s \ln c(t) L(0) \exp\{-(\rho - n)t\} dt \quad (1)$$

ここで、 $L(0)$ は初期時点における人口、 ρ は主観的時間選好率、 n は人口成長率を表す。ただし、人口は初期時点において 1 に基準化すると仮定されるため、時点 s での人口は $L(s) = e^{ns}$ と表される。時点 t における家計の予算制約は、消費 c 、資本投資 $\dot{k}$ 、GHG 削減費用 a 、GHG 排出税支払い $\tau_E > 0$ から構成され、式(2)で定義される。

$$y(t) = \dot{k}(t) + c(t) + a(t) + \tau_E \frac{E(t)}{L(t)} + (\delta + n)k(t), k(0) = k_0 \quad (2)$$

ここで y は生産量、 k は資本、 E は集計された GHG 排出量、 δ は資本減耗率を表す。また GHG 排出税は政策変数として外生的に扱われる。なお本研究を通じて、特に断りがない限り、小文字で示された各変数は 1 人あたりの量的変数として定義される。

次に代表的企業は資本 k と社会全体の資本ストック総量 $\bar{k}$ から生産活動を行うものとし、生産関数は Cobb-Douglas 型生産関数として定義される。ここで、企業の資本ストックの増加は社会全体の資本ストック総量の増加を通じて、経済全体の企業の生産性に寄与するため、 $\bar{k}$ は資本のスピルオーバーから生じる正の外部性を意味する。また、企業の生産活動が気温変化に伴う損害によって減少すると仮定することにより、時点 t における生産量は式(3)で表される。

$$y(t) = D_2(T(t) - T_0) B k(t)^\alpha \bar{k}(t)^{1-\alpha} \quad (3)$$

ここで $D_2(\cdot)$ は気温変化による生産活動への損害、 B は Hicks 中立的な生産パラメータ、 α は資本のシェアパラメータ ($0 \leq \alpha \leq 1$) を表している。企業の GHG 排出量 E は生産活動における資本投入の副産物として扱われ、所与の技術の下、GHG 削減費用あたり資本投入量によって、式(4)で定義される。

$$E(t) = \left(A \frac{L(t)k(t)}{L(t)a(t)} \right)^\gamma \quad (4)$$

ここで、 A と γ は非負のパラメータであるが、GHG 削減費用あたり資本投入量を所与としたとき、 A が大きくなれば、GHG 排出量は増加するため、 A は GHG の排出係数、もしくは GHG 排出技術を表すパラメータとして解釈することができる。また式(4)は $a(t) = 0$ のとき定義されないことに注意されたい。

GHG 排出量は企業の生産活動に直接影響を及ぼさないものの、大気中の GHG 濃度の増加を通じて気温上昇を引き起こし、気温に依存した損害関数を通じて間接的に生産活動に影響を及ぼすことになる。

以上のことから、GS における家計の最適化問題は式(2)–(4)を制約条件として、式(1)を最大化することで表される。

(2) 気候モデル

GS における気候モデルは、Energy Balance Model (以下、EBM とする)を適用しており、これは GHG 排出・蓄積—気候変動の地球物理学的な関係を地球大気の熱収支 (Energy Balance) の観点から高度に集約化したモデルである。これに対して、DICE/RICE における気候モデルは、GHG 排出・蓄積—気候変動の関係を、大気圏、海洋上層および海洋下層から成る多層システムによって集約化したモデルである。EBM の特徴は、アルベド (Albedo) の変化が気温に影響を及ぼす中心的要素として扱われていることである。ここで小倉 (1984)¹⁴⁾によれば、アルベドとは地球に入射する太陽放射量と反射された放射量との割合を示すものである。なお EBM の詳細に関しては、Greiner and Semmler (2005)¹²⁾を参照されたい。

EBM によると、地球の平均地表気温の変化は式(5)で表される。

$$\dot{T}(t)c_h = S_E - R(t) - F_N(t) + (1 - \xi)F \quad (5)$$

ここで、 $T(t)$ は絶対温度 (K: Kelvin) で測った平均地表気温、 c_h は地球の熱容量 ($\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$)、 S_E は地球に入射する太陽放射量 (Wm^{-2})、 $R(t)$ は反射される放射量 (Wm^{-2})、 $F_N(t)$ は放射フラックスの流入出の差 (Wm^{-2})、 F は放射強制力 (Wm^{-2})、 ξ は海洋上層から海洋下層への熱移転に関するパラメータを表す。式(5)における $S_E - R(t)$ は、地球に入射する平均的な正味の太陽放射量を示し、式(6)で表される。

$$S_E - R(t) = b_1 [1 - \alpha_1(T(t))] \quad (6)$$

ここで、 b_1 は太陽定数の割合を示すパラメータ、 $\alpha_1(T(t))$ は地球のアルベドを示す。式(5)の第 3 項 F_N は、放射フラックスの入射 (F_{in}) と反射 (F_{out}) の差で式(7)のように表され、 F_{out} は Stefan-Boltzmann の法則に従うとすると、式(8)として表される。

$$F_N = F_{out} - F_{in} \quad (7)$$

$$F_{out} = \varepsilon \sigma_r T^4 \quad (8)$$

ここで ε は放射率である．また σ_T は Stefan-Boltzmann 係数であり，放射フラックスの入射と放射の割合から式(8)は式(9)として改められる．

$$F_N = b_2 T^4 \quad (9)$$

式(5)の第4項は，大気圏－地表システムの放射平衡を変化させる放射強制力を表す．これは GHG 排出が大気中の GHG 濃度を上昇させ，地球の温室効果を増大させることを意味する．ここでは CO2 による放射強制力のみとし，式(10)で表される．

$$F = b_3 \ln \frac{M(t)}{M_0} \quad (10)$$

ここで $M(t)$ は当該期の CO2 濃度， M_0 は産業革命前の CO2 濃度を表す．また，式(5)の第4項の係数 b_3 は，温室効果による気温上昇のうち海洋に吸収される割合を表す．さらに，式(5)の左辺の係数 c_h は地球の熱容量を表しており，地表の大部分が海洋であるため，海洋の熱容量を地表の熱容量の近似とする．

以上より，平均地表気温の変化を表す式(5)は，式(11)として改められる．ここで $b_3 = (1-\xi)b'_3$ である．また，GHG 濃度の変化は式(12)として表される．

$$\dot{T}(t) = c_h^{-1} \left\{ b_1 (1 - \alpha_1(T(t))) - b_2 T^4 + b_3 \ln \frac{M(t)}{M_0} \right\} \quad (11)$$

$$T(0) = T_0$$

$$\dot{M}(t) = \beta_1 E(t) - \beta_2 M(t), \quad M(0) = M_0 \quad (12)$$

ここで， β_1 は GHG 排出のうち海洋に吸収される割合であり， β_2 は CO2 の大気中での寿命の逆数を表す．なお，ここで用いられる EBM のパラメータの数値は，GS に依拠し，各パラメータの値は後述する数値解析において，まとめて表記する．

(3) カタストロフ・リスク

本節ではカタストロフ事象が生起する確率について示す．本研究ではカタストロフ・リスクを横松(2003)⁷⁾による，生起確率は希少だが，一度生起すれば多くの経済主体が同時(集合性)に甚大(巨大性)な損害を被るリスクとして定義する．温暖化によるカタストロフ・リスクは，前述したように熱塩大循環の停止やグリーンランド氷床の融解といった現象が生起する確率は希少であるが，それらの現象が生じた際にそれらの影響は地球規模で及ぶため，多くの

経済主体が同時に未曾有の損害を被るという集合性と巨大性をもつリスクである．また，これらのカタストロフ事象は人類を含めた地球上の全ての生態系を崩壊させる場合も考えられるため，カタストロフ事象生起後の社会経済を doomsday として仮定する．

いま，カタストロフ事象が生起するまでの確率は時間を通じて一定であるものの，気温変化によりその生起確率は変化するものと仮定する．また，その生起確率は当該期の気温水準 $T(t)$ のみに依存し，気温水準の増加関数とする．初期時点 $t=0$ から時点 t までカタストロフ事象が生起せず，期間 $[t, t+\Delta t]$ にカタストロフ事象が生起する確率をハザード関数 (Hazard function) を用いて式(13)で定義する．

$$\frac{\psi(T(t))}{1 - \Psi(T(t))} dt = \mu(T(t)) dt \quad (13)$$

ここで， $\Psi(T(t))$ は初期時点から時点 t までの間にカタストロフ事象が生起する確率を表す分布関数， $\psi(T(t))$ は期間 $[t, t+\Delta t]$ にカタストロフ事象が生起する確率を表す確率密度関数である．式(13)からその両辺を積分することにより式(14)が導かれ，さらに式(14)を解くことにより，式(15)が得られる．

$$-\ln[1 - \Psi(T(t))] = \int_0^t \mu(T(s)) ds \quad (14)$$

$$1 - \Psi(T(t)) = \exp \left\{ - \int_0^t \mu(T(s)) ds \right\} \quad (15)$$

式(15)は気温水準 $T(t)$ において，カタストロフ事象が t 期まで生起しない確率を表している．式(15)を用いて，カタストロフ事象が t 期まで生起しない確率を $\Pi(T(t)) = 1 - \Psi(T(t))$ とすれば，カタストロフ事象が 0 期から t 期まで生起せず，かつ $[t, t+\Delta t]$ 期に生起する確率 $\pi(T(t))$ は式(16)で表すことができる．

$$\pi(T(t)) dt = \mu(T(t)) \Pi(T(t)) dt = \psi(T(t)) dt \quad (16)$$

(4) 家計の行動計画と定常状態

本節では，カタストロフ事象が生起する可能性を考慮した場合の家計の行動計画と定常状態に関して定義する．まず，3.(1)で示した家計の効用関数を再定義する．本研究では，温暖化による効用への影響を考慮するものの，効用を最大化する財の組み合わせが温暖化影響に依存しないものとするため，効用は Uzawa(2003)¹³⁾における強分離可能性の仮定を用いて，基準年の地表平均気温 T_0 からの偏差による損害 $D_1(T(t) - T_0)$ との積で表されるものとする．

このとき、式(1)の時点 s における家計の効用 $U(s)$ を式(17)で再定義する。

$$U(s) = \int_s^{\infty} u(c(t)D_1(T(t)-T_0)) \exp\{-(\rho-n)t\} dt \quad (17)$$

ここで $D_1(\cdot)$ は温暖化による効用への影響を表す変数であり、温暖化に伴う健康被害のような非市場的損害に相当する。一方、式(3)のように生産活動に影響を及ぼす効果は市場的損害に相当する。DICE/RICE では温暖化による経済活動への影響が生産関数に関してのみであるのに対して、Uzawa(2003)¹³⁾では温暖化による効用への影響も考慮している。なお、人口は初期時点において1に基準化していることに注意されたい。式(17)において、各時点 t での瞬時的効用関数と損害関数の積を CRRA(Constant Relative Risk Aversion: 相対的危険回避度一定)型効用関数で表し、式(18)で定義する。

$$u(c(t)D_1(\cdot)) \begin{cases} = \frac{[c(t)D_1(T(t)-T_0)]^{1-\sigma}}{1-\sigma}, & (\sigma \neq 1) \\ = \ln c(t) + \ln D_1(T(t)-T_0), & (\sigma = 1) \end{cases} \quad (18)$$

ここで σ は相対的危険回避度を表すパラメータで $\sigma \in (0, \infty)$ であるが、本研究では分析を簡単化するために、また GS の瞬時的効用関数に倣い、以下では $\sigma=1$ として議論を進める。したがって、式(17)で定義された時点 s における家計の効用 $U(s)$ は式(19)に改められる。

$$U(s) = \int_s^{\infty} [\ln c(t) + \ln D_1(T(t)-T_0)] \exp\{-(\rho-n)t\} dt \quad (19)$$

次に、2. で前述したように、既存研究においてカストロフ事象生起後の社会は、大きく3つに分類することができるが、本研究では簡単化のために、カストロフ事象生起後の全ての期間を doomsday となるような状況として定義する。いま、 τ をカストロフ事象が生起する時点とし、初期時点の気温水準 T_0 でカストロフ事象が生起しないとすれば、家計の行動計画は、式(15)、(16)、(17)を用いて、式(20)の期待効用 EU として定義される。

$$EU = E \left[\Pi(T(\tau)) \int_0^{\tau} u(c(t)D_1(\cdot)) \exp\{-(\rho-n)t\} dt \right] \quad (20)$$

ここで $E[\cdot]$ は期待値演算子を表す。次に、式(20)で表された家計の期待効用を単純化するために若干の計算を行う。式(20)を整理し、 $(0 \leq \tau \leq \infty, 0 \leq t \leq \tau) \Leftrightarrow (t \leq \tau \leq \infty, 0 \leq t \leq \infty)$ が異なる積分領域で成立することを用いれば、 τ を積分から外すことにより家計の期待効用は式(21)として改められる。

$$\begin{aligned} EU &= \int_0^{\infty} \left[(1 - \Psi(T(\tau))) \int_0^{\tau} u(c(t)D_1(\cdot)) \exp\{-(\rho-n)t\} dt \right] d\tau \\ &= \int_0^{\infty} u(c(t)D_1(\cdot)) \exp\{-(\rho-n)t - \Lambda(t)\} dt \end{aligned} \quad (21)$$

ここで $\Lambda(t)$ を式(22)で定義し、さらに時間 t に関して微分すれば、式(23)を得る。

$$\Lambda(t) = \int_0^t \mu(T(s)) ds, \quad \Lambda(0) = 0 \quad (22)$$

$$\dot{\Lambda}(t) = \mu(T(t)) \quad (23)$$

式(21)は、ある時点 t の気温水準 $T(t)$ でのカストロフ事象の生起確率が変化することを通じて、効用に対する割引率に影響を与えることを意味する。また、この家計の期待効用を用いることにより、無限期間の効用最大化問題として扱うことができる。

次に温暖化によるカストロフ・リスクの存在の下、長期均衡における均衡解の性質について分析を行うため、定常状態(Steady State)を式(24)で定義する。

$$\dot{T}(t) = \dot{M}(t) = 0, \quad \frac{\dot{c}(t)}{c(t)} = \frac{\dot{k}(t)}{k(t)} \quad \text{with } M(t) \geq M_0 \quad (24)$$

式(24)は、地表平均気温の変化と GHG 濃度の変化が一定であること、および1人あたりの消費の成長率が1人あたりの資本の成長率と等しく、かつ一定であることを意味する。さらに、本研究では $M(t) \geq M_0$ の場合のみを考慮する。GS では GHG 濃度が過去10年間で単調増加傾向にあることを理由に、GHG 濃度が産業革命前の水準より減少するような状態($M(t) < M_0$)を除いているため、本研究においても GS 同様に $M(t) \geq M_0$ の場合のみを考慮する。

4. 最適化条件と動学体系

(1) 競争経済

競争経済における家計の最適化問題は、式(25)–(26)として定義される。

$$\max_{c(t), a(t)} \int_0^{\infty} [\ln c(t) + \ln D_1(\bullet)] \exp\{-(\rho-n)t - \Lambda(t)\} dt \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \dot{k}(t) &= D_2(\bullet) Bk(t)^\alpha \bar{k}(t)^{1-\alpha} - c(t) - a(t) \\ &\quad - \tau_E L(t)^{-1} A' k(t)^\gamma a(t)^{-\gamma} - (\delta+n)k(t), \quad (26) \\ k(0) &= k_0 \end{aligned}$$

式(25)–(26)の最適化問題を解くために、ハミルトニアン(Hamiltonian)を式(27)として定義する。

$$H(t) = [\ln c(t) + \ln D_1(\bullet)] \exp\{-(\rho-n)t - \Lambda(t)\} + \lambda_1 \dot{k}(t) \quad (27)$$

ここで λ_1 は資本のシャドープライスを表す。式(27)の1階の条件及び横断性条件は式(28)–(31)として得られる。ただし、以下では時間 t を省略する。

$$\frac{\partial H}{\partial c} = \frac{1}{c} - \lambda_1 = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial H}{\partial a} = -\lambda_1 + \lambda_1 \tau_E L^{-1} A' k^\gamma a^{-\gamma-1} = 0 \quad (29)$$

$$\begin{aligned} -\lambda_1 \left\{ \alpha B k^{\alpha-1} \bar{k}^{1-\alpha} D_2(\bullet) - \gamma \frac{\tau_E}{Lk} A' k^\gamma a^{-\gamma} - (\delta+n) \right\} \\ = \dot{\lambda}_1 - \lambda_1 \{(\rho-n) - \dot{\Lambda}(t)\} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} k \lambda_1 \exp\{-(\rho-n)t - \Lambda(t)\} = 0 \quad (31)$$

競争経済において、各経済主体は外部効果を考慮せずに行動するため、均衡では $k = \bar{k}$ が成り立つことに留意すれば、式(28)より $\lambda_1 = c^{-1}$ 、 $\dot{\lambda}_1 = -c^{-2} \cdot \dot{c}$ を式(30)に代入することにより式(32)を得る。

$$\frac{\dot{c}}{c} = - \left\{ (\rho + \delta + \dot{\Lambda}(t)) - \alpha B D_2(\bullet) + \frac{\tau_E}{Lk} \gamma A' k^\gamma a^{-\gamma} \right\} \quad (32)$$

また、式(29)より最適削減費用 a は $a = (\tau_E N^{-1} \gamma A' k^\gamma)^{1/(1+\gamma)}$ であり、これを式(4)に代入すれば、式(33)として最適 GHG 排出量を得る。

$$E = \left(\frac{\tau_E}{Lk} \right)^{-\frac{\gamma}{1+\gamma}} \gamma^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} A^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} k^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad (33)$$

さらに、式(29)から得られる最適削減費用 a を式(32)に代入し、また式(33)の最適 GHG 排出量 E を制約式(26)に代入し、それぞれ整理する。このとき、定常状態において、ある一定の1人あたり資本・消費比率 $\bar{c} = c/k$ を考慮すれば、式(24)の定常状態の定

義より式(34)を得る。したがって、本研究における競争経済の動学体系は、資本・消費割合の変化を表す式(34)、気温変化を表す式(35)、及び大気中の GHG 濃度の変化を表す式(36)の3本の微分方程式体系によって表される。

$$\frac{\dot{\bar{c}}}{\bar{c}} = (n - \rho - \dot{\Lambda}(t)) - (1 - \alpha) B D_2(\bullet) + \left(\frac{\tau_E}{Lk} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \gamma^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} A^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} k^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} + \bar{c} \quad (34)$$

$$\dot{T} = c_h^{-1} \left\{ b_1 (1 - \alpha_1(T)) - b_2 T^4 + b_3 \ln \frac{M}{M_0} \right\}, T(0) = T_0 \quad (35)$$

$$\dot{M} = \beta_1 \left(\frac{\tau_E}{Lk} \right)^{-\frac{\gamma}{1+\gamma}} \gamma^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} A^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} k^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} - \beta_2 M, M(0) = M_0 \quad (36)$$

(2) 社会的最適

社会的最適においては、社会計画者は正と負の両方の外部効果を考慮するため、競争経済における制約式(26)は式(37)として改められる。

$$\begin{aligned} \dot{k}(t) &= D_2(\bullet) Bk(t) - c(t) - a(t) - (\delta+n)k(t), \\ k(0) &= k_0 \end{aligned} \quad (37)$$

したがって、社会的最適化問題は式(38)–(42)として定義される。

$$\max_{c(t), a(t)} \int_0^{\infty} [\ln c(t) + \ln D_1(\bullet)] \exp\{-(\rho-n)t - \Lambda(t)\} dt \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \dot{k}(t) &= D_2(\bullet) Bk(t) - c(t) - a(t) - (\delta+n)k(t), \\ k(0) &= k_0 \end{aligned} \quad (39)$$

$$\dot{M}(t) = \beta_1 A' k(t)^\gamma a^{-\gamma} - \beta_2 M(t), M(0) = M_0 \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}(t) &= c_h^{-1} \left\{ b_1 [1 - \alpha_1(T(t))] - b_2 T(t)^4 + b_3 \ln \frac{M}{M_0}(t) \right\}, \\ T(0) &= T_0 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\dot{\Lambda}(t) = \mu(T(t)), \Lambda(0) = 0 \quad (42)$$

この社会的最適化問題を解くために、ハミルトニアンを式(43)として定義する。

$$\begin{aligned} H(t) &= [\ln c(t) + \ln D_1(\bullet)] \exp\{-(\rho-n)t - \Lambda(t)\} \\ &\quad + \lambda_2 \dot{k}(t) + \lambda_3 \dot{M}(t) + \lambda_4 \dot{T}(t) + \lambda_5 \dot{\Lambda}(t) \end{aligned} \quad (43)$$

ここで、 λ_2 , λ_3 , λ_4 , λ_5 はそれぞれ資本、大気中の GHG 濃度、気温変化、カタストロフ・リスクに関するシャドーバリューを表し、 λ_2 は非負、 λ_3 , λ_4 はともに非正であるとする。式(43)の1階の条件及び横断性条件は、式(44)～式(52)として得られる。

$$\frac{\partial H}{\partial c} = \frac{1}{c} - \lambda_2 = 0 \quad (44)$$

$$\frac{\partial H}{\partial a} = -\lambda_2 - \lambda_3 \gamma \beta_1 A^\gamma k^\gamma a^{-\gamma-1} = 0 \quad (45)$$

$$\begin{aligned} & -\lambda_2 \{BD_2(\bullet) - (\delta + n)\} - \lambda_3 \{\gamma \beta_1 A^\gamma k^\gamma a^{-\gamma}\} \\ & = \dot{\lambda}_2 - \lambda_2 \{(\rho - n) + \dot{\Lambda}(t)\} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\lambda_3 \beta_2 - \lambda_4 c_h^{-1} b_3 M^{-1} = \dot{\lambda}_3 - \lambda_3 \{(\rho - n) + \dot{\Lambda}(t)\} \quad (47)$$

$$-\frac{D'_1(\bullet)}{D_1(\bullet)} + \lambda_2 D'_2(\bullet) Bk - \lambda_4 c_h^{-1} \{-b_1 \alpha'_1(T) - 4b_2 T^3\} \quad (48)$$

$$-\lambda_5 \mu'(T) = \dot{\lambda}_4 - \lambda_4 \{(\rho - n) + \dot{\Lambda}(t)\}$$

$$\begin{aligned} & [\ln c + \ln D_1(\bullet)] \exp\{-(\rho - n) - \Lambda(t)\} \\ & = \dot{\lambda}_5 - \lambda_5 \{(\rho - n) + \dot{\Lambda}(t)\} \end{aligned} \quad (49)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} k \lambda_2 \exp\{-(\rho - n) - \Lambda(t)\} = 0 \quad (50)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} M \lambda_3 \exp\{-(\rho - n) - \Lambda(t)\} = 0 \quad (51)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T \lambda_4 \exp\{-(\rho - n) - \Lambda(t)\} = 0 \quad (52)$$

ここで、式(44)と式(45)を整理すれば、式(53)が得られる。

$$\frac{a}{k} = \left(\frac{c}{k} (-\lambda_3) \beta_1 \gamma A^\gamma \right)^{1/(1+\gamma)} \quad (53)$$

式(44)より $\lambda_2 = c^{-1}$, $\dot{\lambda}_2 = -c^{-2} \cdot \dot{c}$ なので、式(53)を式(46)に代入すれば、式(54)が得られる。

$$\frac{\dot{c}}{c} = - \left\{ (\rho + \delta + \dot{\Lambda}(t)) - D_2(\bullet) Bk + \left(\frac{c}{k} (-\lambda_3) \beta_1 \gamma A^\gamma \right)^{1/(1+\gamma)} \right\} \quad (54)$$

また、式(53)を制約式(39)と大気中の GHG 濃度に関する制約式(40)に代入すれば、式(55)および(56)が得られる。

$$\frac{\dot{k}}{k} = D_2(\bullet) B - \frac{c}{k} - \left(\frac{c}{k} (-\lambda_3) \beta_1 \gamma A^\gamma \right)^{1/(1+\gamma)} - (\delta + n) \quad (55)$$

$$\dot{M} = \left(\frac{c}{k} \right)^{\gamma/(1+\gamma)} (-\lambda_3)^{\gamma/(1+\gamma)} \beta_1^{\gamma/(1+\gamma)} \gamma^{\gamma/(1+\gamma)} A^{\gamma/(1+\gamma)} - \beta_2 M \quad (56)$$

したがって、社会的最適の動学体系は式(54)～(56)に、前述した式(41)、及び式(47)～(49)を加えることにより、7本の微分方程式体系によって表すことができる。

4. 数値シミュレーション

(1) 数値シミュレーションのための諸設定

ここでは3. おいて構築した動学モデルを数値シミュレーションを用いて分析するための準備として、各パラメータに数値を設定し、地球のアルベド、損害関数およびカタストロフ事象の生起確率を個々に特定化する。

経済モデル及び気候モデルにおける各パラメータの値を、各々、表-1および表-2に示す。これらパラメータの値はGSに依拠している。地球のアルベドは式(57)で定義される。ここで z_1 , z_2 はパラメータであり、その設定値を表-1に示す。GSでは、地球の気温が上昇すれば、アルベド($\alpha_1(T(t))$)が減少する関係をS字型の曲線で近似している。これは気温が高いほど、アルベドは減少するため、地球に入射する太陽放射量のうち地球によって反射されない部分($1 - \alpha_1(T(t))$)は増加することを意味する。しかしながら、 $T(t) \rightarrow \infty$ としても、 $1 - \alpha_1(T(t)) = 0.2191$ に収束するものとしている。なお、アルベドの詳細については、Greiner and Semmler (2005)を参照されたい。

$$1 - \alpha_1(T(t)) = z_1 \left(\frac{2}{\pi} \right) \text{ArcTan} \left(\frac{\pi \times (T(t) - 293)}{2} \right) + z_2 \quad (57)$$

家計の効用と企業の生産に影響を及ぼす損害関数は、家計の損害を式(58)、企業の損害を式(59)として定義する。

$$D_1(T(t) - T_0) = \left[d_1 (T(t) - T_0)^2 + 1 \right]^{-\theta_1} \quad (58)$$

$$D_2(T(t) - T_0) = \left[d_2 (T(t) - T_0)^2 + 1 \right]^{-\theta_2} \quad (59)$$

表-1 気候モデルにおけるパラメータ設定値

b_1	1367.5/4
b_2	$(21/109) \times 0.95 \times (5.67 \times 10^{-8})$
b_3	$(1-0.23) \times 6.3$
c_h	0.497
β_1	0.49
β_2	0.1
z_1, z_2	$5.6 \times 10^{-3}, 0.2135$

表-2 経済モデルにおけるパラメータ設定値

$\rho = 0.03$	$\gamma = 1$	$T_0 = 287.8$
$n = 0.02$	$d_1 = 0.04$	$L_0 = 1$
$\delta = 0.075$	$d_2 = 0.04$	$M_0 = 1$
$B = 0.35$	$\phi_1 = 0.04$	$m = 2.5$
$\alpha = 0.45$	$\phi_2 = 0.05$	$\theta = 9.3962$
$\tau_E / LK = 0.001$	$z_1 = 5.6 \times 10^{-3}$	
$A = 1.65 \times 10^{-4}$	$z_2 = 0.2135$	

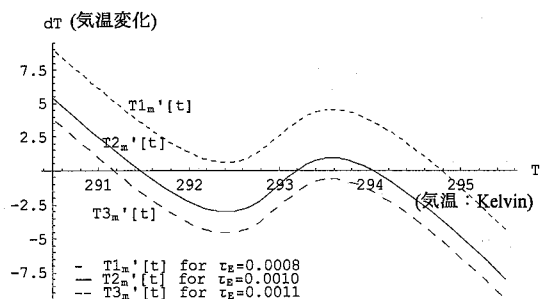


図-1 競争経済におけるモデルの挙動特性

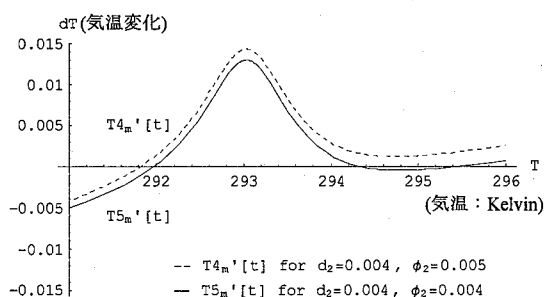


図-2 社会的最適におけるモデルの挙動特性

ここで、 d_1 、 d_2 、 ϕ_1 、 ϕ_2 は、各々、表-2で示されるパラメータである。GSによれば、式(59)および表-2で設定される損害関数は、(3℃、2℃、1℃)の気温上昇により、それぞれ(1.54%、0.74%、0.19%)の損害が生じることを意味しており、この値は1.5℃から4.5℃の気温上昇が世界のGDPの1.5%から2%の減少をもたらすというIPCCの報告によって正当化されている。これに対して、効用に関する損害関数は、(3℃、2℃、1℃)の気温上昇により、それぞれ(1.23%、0.59%、0.16%)減少するように設定しているものの、この設定を正当化する具体的な根拠はないことに注意されたい。

カタストロフ事象の生起確率に関するハザード関数は、産業革命前の気温水準からの偏差を変数としたべき乗の関数として式(60)で定義する。

$$\mu(T(t)) = \frac{m(T(t) - T_0)^{m-1}}{\theta^m} \quad (60)$$

ここで、 m は関数の形状パラメータ、 θ は尺度パラメータであり、各々、表-2に示される。Bosello and Moretto(1999)⁶⁾ではカタストロフ事象が生起する確率を気温変化のトレンドに関連付け、その生起確率をワイブル関数によって表現しており、3℃の気温上昇でカタストロフ事象の生起確率が4.8%と設定している。本研究での尺度パラメータ(θ)も同様に、形状パラメータ(m)が2.5のとき、3℃の気温上

昇で生起確率が4.8%となるように設定している。

(2) 基本ケースとモデルの挙動確認

ここでは競争経済および社会的最適の動学体系に関して、モデルの挙動を確認し、カタストロフ・リスクがない場合の均衡解の特徴を分析する。また以下では、ここで得られた結果を、それぞれ競争経済と社会的最適の基本ケースとする。本研究ではGreiner and Semmler (2005)¹²⁾のモデルを拡張しているため、カタストロフ・リスクがない場合および代表的家計に対する気温上昇からの損害がない場合のシミュレーション結果が同じである必要がある。ここでは、前者を $\mu(T(t)) = 0$ 、後者を $\ln D_1(T(t) - T_0) = 0$ としてモデルの挙動確認を行った。本研究で構築したモデルの挙動特性とその確認の結果は図-1および図-2に示す通りであり、本研究でのモデルの結果がGSの結果とほぼ一致することが確認された。なお、図-1および図-2において、横軸(T)は気温(Kelvin)を、縦軸(dT)は気温変化を表す。

図-1は競争経済において、排出税(τ_E / Lk)を変化させたとき、定常状態における均衡解が単一あるいは複数になることを示している。ここで、排出税 $\tau_E = 0.0010$ を基準値とすれば、このとき複数均衡解が生じるのに対して、基準値より低い排出税 $\tau_E = 0.0008$ は相対的に高い単一均衡解を、基準値より高い排出税 $\tau_E = 0.0011$ は相対的に低い単一均衡解がそれぞれ導かれることが分かる。このように排

表-3 $\tau_E = 0.001$, 低リスクケースにおける均衡解

	T^*	$T^* - T_0$	$\tilde{c}^*$	g	Risk *
E_1	291.45	3.65	0.234	-0.039	0.0643
E_2	293.19	5.39	0.283	-0.092	0.1159
E_3	294.04	6.24	0.310	-0.122	0.1439

出税の変化は図-1における曲線を上下にシフトさせるため、排出税の設定は長期の均衡点に重要な影響を与えることが分かる。一方、図-2は社会的最適において、損害関数の形状パラメータ(ϕ_2)によって、定常状態での均衡解が単一あるいは複数存在する状態を示している。損害関数のパラメータ($d_2 = 0.004, \phi_2 = 0.005$)を基準値とすれば、このとき単一均衡解であるのに対して、損害関数のパラメータ($d_2 = 0.004, \phi_2 = 0.004$)は複数均衡解となる。これは相対的に高い損害の場合は長期的な単一均衡解しか存在しないが、相対的に小さい損害の場合、複数均衡解が存在し、損害関数と均衡解の数に閾値が存在することを意味している。

(3) 競争経済における均衡解の性質

ここでは、気温変化によるカタストロフ・リスクを伴った競争経済での長期均衡解の性質について分析を行う。初めに、2つの異なるカタストロフ・リスクが均衡解の数および経済成長に与える影響を考察する。次に2つの異なるカタストロフ・リスクの下で、排出税の変化が厚生および経済成長に与える影響を考察する。以下ではカタストロフ事象の生起確率が高いケースと低いケースを想定し、基本ケースとの比較を行う。ここで低カタストロフ・リスクは、式(60)におけるパラメータがそれぞれ $m = 2.5$, $\theta = 9.3962$ であり、3℃の気温上昇によってカタストロフ事象の生起確率が4.8%となる場合である。一方、高カタストロフ・リスクは $m = 3$, $\theta = 6.5519$ であり、カタストロフ事象の生起確率が9.6%となることを意味している。

定常状態において、均衡気温(T^*)を求めることにより、資本と消費の割合($\tilde{c}^* = c^*/k^*$)と定常状態における成長率($g = \dot{c}^*/c^*$ for $\dot{T} = 0$)を導くことができる。図-1と表-3より、排出税 $\tau_E = 0.001$ 、かつ低リスクケースのとき、この競争経済の均衡解は3点存在し、図-1における $T2'_m[t]$ の曲線で表される。 $dT = 0$ となる曲線上の点を左より E_1, E_2, E_3 とすれば、このうち点 E_1 と点 E_3 が安定的な均衡点となる(均衡解の安定性については、Greiner and Semmler (2005)¹²⁾に詳しい)。点 E_1 での均衡気温は $T_1^* = 291.45$ (Kelvin)であり、これは3.65℃の気温上

表-4 $\tau_E = 0.001$, 高リスクケースにおける均衡解

	T^*	$\tilde{c}^*$	g	Risk *
E_1	291.45	0.312	-0.116	0.1421
E_2	293.19	0.477	-0.286	0.3099
E_3	294.04	0.581	-0.393	0.4153

昇を意味する。このとき $\tilde{c}^* = 0.234$ であるものの、この均衡での成長率は3.9%の減少、またカタストロフ事象の生起確率は0.0643となる。これに対し、点 E_3 では $T_3^* = 294.04$ (Kelvin)であり、 $\tilde{c}^* = 0.310$, $g = -0.122$ 、カタストロフ事象の生起確率は0.1439である。これは点 E_1 でのリスクの2倍以上の値となる。一方、図-1と表-4より高リスクケースの場合も同様の傾向が見られることが分かる。ここでは $T2'_m[t]$ の曲線から $dT = 0$ となる均衡解が3つ存在するものの、点 E_3 におけるカタストロフ事象の生起確率と成長率を見ると、低カタストロフ・リスクの場合と比べて、前者、後者ともに約3倍の値となる。

以上のことから、カタストロフ事象の生起確率の存在は、その存在がない場合と比べて、資本・消費割合や成長率に影響を与えるものの、均衡解が単一もしくは複数存在するかについては、影響を与えないことが分かる。想定したカタストロフ・リスクの存在は経済に影響を与えるが、気温変化に対してその存在が影響を及ぼさないため、均衡解の数については、カタストロフ・リスクが存在しない場合同様に、排出税の大きさが影響しているものと考えられる。このことは図-1と同様にGSにおいて、気温変化を通じたアルベドの変化よりも、排出税の大きさが均衡解の数に影響を与えと言及していることから分かる。さらに、GSでは高い成長率をもつ経済は低い均衡気温をもつ均衡解へ収束し、低い成長率をもつ経済は高い均衡気温をもつ均衡解へ収束するという結果から、どのような均衡解に収束するかは経済の初期状態に依存するという結論を得ており、本研究においても、カタストロフ・リスクの存在によって成長率は負の値をとるものの、GSと同様の結果となることが分かる。また、気温変化の大きい均衡点ほどカタストロフ・リスクは大きくなるが、この結果に関してもその経済の初期状態に依存する。

次に、排出税(τ_E)の変化とカタストロフ・リスクの存在が均衡解の性質にどのような影響を及ぼすかを見る。ここでは、排出税の変化による均衡解への影響を見るため、最適基準として定常状態での厚生をGSに従い式(61)のように定義する。

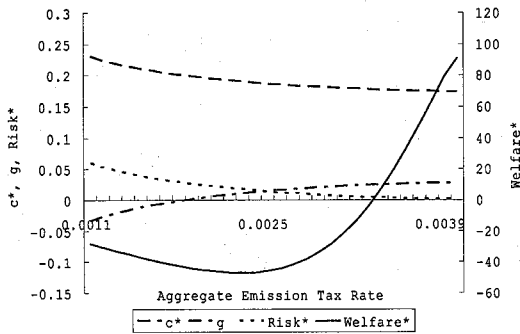


図-3 低リスクケースにおける排出税の変化

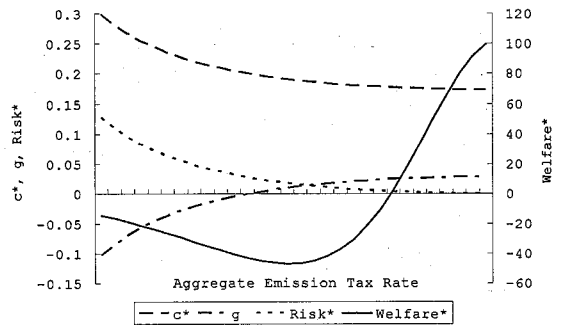


図-4 高リスクケースにおける排出税の変化

$$Welfare^* = \int_0^{\infty} \left\{ \ln(c^* k^* e^{gt}) + \ln D_1(T^* - T_0) \right\} \times \exp[-(\rho - n)t - \Lambda(t)] dt \quad (61)$$

また、均衡解が単一であるケースを仮定するため、排出税(τ_E)を0.0011から0.004まで0.0001ずつ変化させた場合の低リスクケースと高リスクケースについて見る。低リスクケースの場合、図-3より排出税が低くなるほど、カタストロフ事象の生起確率は上昇するのに対して、成長率は減少する。また、厚生は $\tau_E = 0.0034$ を境として、より低い排出税の下では負の値を取り、 $\tau_E = 0.0023$ のとき最小となる。

一方、高リスクケースにおいても、図-4より同様の結果が得られる。しかしながら、高リスクケースでは排出税が低くなるほど、カタストロフ事象の生起確率が増加するとともに、成長率の減少も大きくなる。厚生に関しては、負の値に転じる排出税は $\tau_E = 0.0033$ と低リスクケースの場合とほぼ変わらないが、厚生が最小となる排出税は $\tau_E = 0.0025$ と若干高い。また、 $\tau_E = 0.0011$ を見ると、低リスクケースで厚生が-24.240を取るのに対して、高リスクケースでは-14.178と低リスクケースの約半分となる。このように高リスクケースでは、低い排出税において、負の領域ではあるが、相対的に厚生は小さい。

GSでは、排出税の設定は生産に対する損害関数の形状に依存していることを指摘し、損害が大きい場合、定常状態の気温が産業革命前の水準($T_0 = T^*$)となるような排出税の水準が最適であるのに対して、小さい損害では、定常状態の気温が産業革命前の水準より大きく($T_0 < T^*$)なるような排出税の設定が最適であると結論付けている。これに対して、カタストロフ・リスクが存在する場合、同様の結論は成り立たない。これはGSの最適基準である厚生が排出税の変化に対して、均衡における資本・消費割合($\hat{c}^*$)と成長率(g)と同じ変化を示し、排出税と $\hat{c}^*$ 及び g との間に逆U字型の関係が成り立っていることに起

因する。しかしながら、図-3および図-4から分かるように、本研究では、これらの間に逆U字型の関係は成立していない。低い排出税ほど、均衡における気温(T^*)は高く、損害関数を通じた気温変化の間接的効果だけでなく、気温変化によるカタストロフ・リスクの上昇により、家計は均衡気温でのリスク分だけさらに将来を割り引くため、成長率が大きく減少することが原因であるものと考えられる。これはリスクが大きいほど、低い排出税での成長率の減少が顕著に見られ、カタストロフ・リスクが存在する場合、競争経済においては、損害関数の形状に関係なく、均衡気温が産業革命前の水準と等しくなるような排出税が最適な水準となり、排出税の変化は必ずしも厚生を改善をもたらさないことが分かる。

(4) 社会的最適における均衡解の性質

ここでは、2つの異なるカタストロフ・リスクの下、経済への損害の大小が均衡解の数に与える影響を考察するために、低リスクケース、高リスクケースのそれぞれに、損害が大きい場合と損害が小さい場合の4通りのケースについて分析を行う。なお、図-5から図-8において、横軸(T)は気温(Kelvin)を、縦軸(dT)は気温変化を表す。

低リスク・高損害ケース、及び高リスク・高損害ケースの結果を図-5および図-6に示す。効用と生産に対して気候変化による損害が大きい場合、低リスクケース、高リスクケースともに唯一の均衡解を与える。また、どちらのケースにおいても均衡気温は287.94となり、これは約1℃の上昇を意味する。

次に、図-7および図-8より低リスク・低損害ケースおよび高リスク・低損害ケースに関して見ると、損害関数の形状の変化により3つの均衡解が生じることが分かる。図-7で示される低リスク・低損害ケースの均衡気温は、 $T^* = (292.19, 293.80, 298.62)$ であり、これらの均衡気

温においてカストロフ事象の生起する確率はそれぞれ 0.0879, 0.1392, 0.3333 となる。一方、図-8 で示される高リスク・低損害ケースでは $T^* = (292.28, 293.69, 300.42)$ であり、これらの気温変化に対するカストロフ事象の生起確率は、0.2237, 0.3827, 1.000 となる。ここで注意すべきことは、均衡気温が 300.42 のとき、カストロフ事象の生起確率が 1.0 となってしまうことであり、この気温変化は 12.12℃の気温上昇を意味し、やや非現実的であることである。すなわち、3 番目の均衡解は、たとえそれが長期的な均衡であるとしても、現実的な観点からは許容し難い結果である。このように、若干非現実的な結果を含むものの、損害が低い場合には低リスクケース、高リスクケースともに 3 つの均衡解が生じる。

以上のように、社会的最適においては、図-5 から図-8 で示される曲線の変化の大部分が、効用と生産に関する損害関数の形状に依存するものの、カストロフ・リスクの大きさを含めたこれらの相対的な関係によって、均衡解が 1 つであるか、もしくは複数存在するか決まる。このことは、損害関数の形状だけでなく、カストロフ・リスクを含めた相対的な関係に均衡解を決定付ける閾値が存在することを意味する。最後に、たとえ長期の均衡解が安定的であったとしても、均衡気温が 300(Kelvin)を超える均衡解は非現実的であると考えられる。しかしながら、本研究での数値シミュレーションは現実を反映したものというより仮想的なものであり、また本研究ではカストロフ事象生起後の社会を非現実的な doomsday と仮定していることや、現時点で未知であるカストロフ事象そのものに科学的根拠がないということを考慮すれば、本研究における非現実的と考えられる結果も本モデルの妥当性の範囲と考えられる。

5. おわりに

本研究では、気温変化によるカストロフ・リスクの存在が競争経済と社会的最適における長期均衡解の性質にどのような影響を及ぼすかということについて数値シミュレーションを用いて分析を行った。以下に、本研究での数値シミュレーションによって得られた結論をまとめる。

- ① 競争経済において、カストロフ・リスクの存在は、資本・消費割合と経済の成長率に影響を及ぼすものの、均衡解が単一もしくは複数存在するかについては影響を及ぼさない。

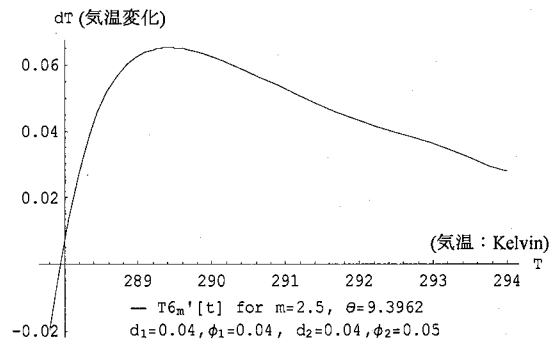


図-5 社会的最適における低リスク・高損害ケース

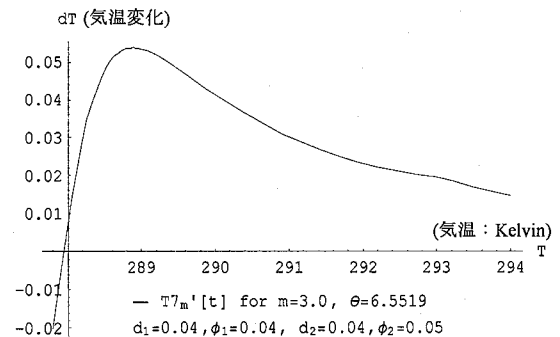


図-6 社会的最適における高リスク・高損害ケース

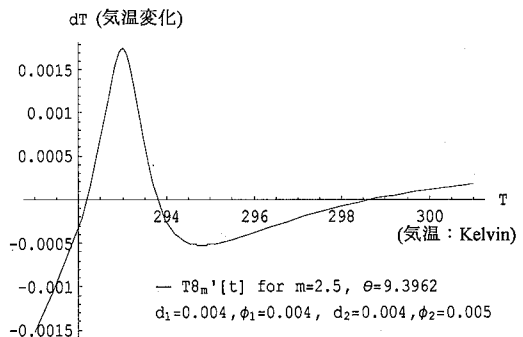


図-7 社会的最適における低リスク・低損害ケース

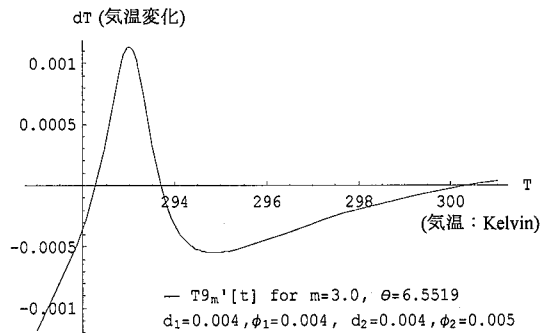


図-8 社会的最適における高リスク・低損害ケース

②競争経済において、カタストロフ・リスクの存在は、効用と生産に対する損害関数の形状に関係なく、均衡での地表平均気温が産業革命前の水準と等しくなるような排出税が最適な水準となり、排出税の変化は必ずしも厚生改善をもたらさない。

③社会的最適において、その均衡解が単一もしくは複数存在するかについては、効用と生産に対する損害関数の形状だけでなく、カタストロフ・リスクの大きさを含めたこれらの相対的關係により決まり、これらの関係には単一均衡解と複数均衡解との閾値が存在する。

本研究を通じて、今後の課題としては以下のことが挙げられる。まず、本研究ではカタストロフ事象生起後の社会を *doomsday* として想定したが、社会全体が崩壊しないような状況を考慮する必要がある。また、カタストロフ事象の生起確率としてハザード関数を用いたが、今後はより最新の科学的知見に基づいたカタストロフ事象の生起確率を想定する必要がある。最後に、本研究ではリスクを減じる手段が一切考慮されていないため、リスクを回避するための手段や施策について考慮する必要がある。

謝辞：本研究は、森杉壽芳を研究代表者(研究課題：地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデル開発に関する研究)とする地球環境研究総合推進費戦略研究 S-4(戦略研究課題：温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究)の助成を得たことを付記し、深甚の謝意を表する次第である。なお、本稿における誤りの全ては筆者らに帰することは言うまでもない。

参考文献

1) Nordhaus, W.D.: *Managing the Global Commons:*

- Economics of Climate Change*, The MIT Press, Cambridge, 1994.
- 2) Nordhaus, W.D. and Boyer, J.: *Warming the World: Economic Models of Global Warming*, The MIT Press, Cambridge, 2000.
- 3) Matsuoka, Y., Kainuma, M. and Morita, T.: Scenario Analysis of Global Warming Using the Asian Pacific Integrated Model (AIM), *Energy Policy*, Vol.23, No.4/5, 357-371, 1995.
- 4) Kainuma, M., Matsuoka, Y. and Morita, T.: *Climate Policy Assessment*, Springer-Verlag, Tokyo, 2003.
- 5) Aronsson, T., Backlund, K. and Lofgren, K.-G.: Nuclear Power, Externalities and Non-Standard Pigouvian Taxes: A Dynamic Analysis under Uncertainty, *Environmental and Resource Economics* 11, 177-195, 1998.
- 6) Bosello, F. and Moretto, M.: *Dynamic Uncertainty and Global Warming Risk*, FEEM Working Paper, 80.99, Milan, 1999.
- 7) 横松宗太: カタストロフ性を考慮した災害リスクマネジメントの便益評価に関する方法論的研究, 京都大学大学院工学研究科学学位請求論文, 2003.
- 8) Johansson, P.-O. and Lofgren, K.-G.: Wealth from Optimal Health, *Journal of Health Economics* 14, 65-79, 1995.
- 9) Tsur, Y. and Zemel, A.: Accounting for Global Warming Risks: Resource Management under Event Uncertainty, *Journal of Economic Dynamics and Control* 20, 1289-1305, 1996.
- 10) Manne, A., Mendelsohn, R. and Richels, R.: MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies, *Energy Policy*, Vol.23, No.1, 17-34, 1995.
- 11) Peck, S.C. and Teisberg, T.J.: CETA: A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment, *Energy Policy*, Vol.13, No.1, 55-77, 1992.
- 12) Greiner, A. and Semmler, W.: Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibrium and Thresholds, *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol.57, Issue.4, 430-447, 2005.
- 13) Uzawa, H.: *Economic Theory and Global Warming*, Cambridge University Press, 2003.
- 14) 小倉義光: 一般気象学 (第2版), 東京大学出版会, 1984.

LONG-TERM EFFECTS OF THE CATASTROPHE RISK OF GLOBAL WARMING BY DYNAMIC MODEL

Kazunori NAKAJIMA, Yasuhisa HAYASHIYAMA and Hisayoshi MORISUGI

The purpose of this paper is to build the dynamic model in consideration of the catastrophe risk of global warming, and analyzed the character of the equilibrium solution by numerical analysis. As a result, existence of the catastrophe risk by greenhouse gas emissions has grasped the effects which it has on the long-run equilibrium solution in competitive economy and social optimum.