

動学SCGEモデルによる 地球温暖化対策の経済評価

松澤 晴季¹・武藤 慎一²・森杉 壽芳³

¹学生員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 土木環境工学専攻
(〒400-0008 山梨県甲府市武田4-3-11)
E-mail:g14mc009@yamanashi.ac.jp

²正会員 博(工) 山梨大学大学院准教授 医学工学総合研究部 (〒400-0008 山梨県甲府市武田4-3-11)
E-mail:smutoh@yamanashi.ac.jp

³正会員 工博 日本大学客員教授 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail:morisugi.hisayoshi@nihon-u.ac.jp

現代社会の大きな問題のひとつとして、地球温暖化がある。その原因として、自動車の普及によるCO₂排出量の増加が挙げられる。わが国は2030年度までに2013年度比マイナス26.0%の温室効果ガスを削減するとの目標を掲げている。そのため、今後も継続的に地球温暖化対策を実行し、確実な温室効果ガスの排出削減を行うことが必要な状況にある。本研究では、動学SCGEモデルを構築し、長期的な視点での費用便益分析を通して、交通整備が温暖化に与える影響を明らかにする。とくに、温暖化による洪水などの水害増大に対する防災、砂浜の消失や生態系の変化に関する環境・景観施策の経済評価を行う。

Key Words : *transport development, beach erosion, flood damage, dynamic SCGE model*

1. はじめに

近年、世界中で異常気象が観測されている。ハリケーンや干ばつ、熱波などの災害が各地で発生し、わが国でも強大な台風や局地的な豪雨による被害が数多く報告されている。これらの異常気象は地球温暖化によるものだと考えられており、このまま温暖化が進行していけば海面上昇による海岸の消失、生態系の変化による感染症リスクの拡大なども考えられる¹⁾。

わが国の2012年度の温室効果ガス総排出量は1,343(百万t-CO₂)であり、1990年度比で6.5%上回っている。京都議定書の第一約束期間(2008~2012年)において、わが国に1990年度比マイナス6%の目標が課されていたが、森林等吸収源および京都メカニズムクレジットを加味した結果、マイナス8.4%となり、目標は達成できた²⁾。しかし、2013年度の温室効果ガス排出は、原子力発電所の稼働停止による火力発電所の稼働増加や冷媒分野のハイドロフルオロカーボン類の排出量が増加したことで、2007年度に続く過去2番目に多い値(1,408百万t-CO₂)となった。前年度比では1.2%増であり、4年連続の増加となった³⁾。環境省は2015年12月に開催される

気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)に向けて「日本の約束草案」⁴⁾を国連に提出し、その中でわが国は2030年度までに2013年度比マイナス26.0%の温室効果ガスを削減するとの目標を掲げている。そのため、今後も継続的に地球温暖化対策を実行し、確実な温室効果ガスの排出削減を行うことが必要な状況にある。しかしながら、地球温暖化対策への取り組みは多いものの、温室効果ガス排出をどこまで削減すればよいのか(緩和策)、あるいはこのままのCO₂排出量が続いた場合に、将来の温暖化による影響、被害に対し対応可能であるのか(適応策)といった点は明確にはなっておらず、定量的な評価や具体的な方策の提示が必要とされている。わが国では「脱温暖化 2050 プロジェクト」で低炭素社会の実現に向けたシナリオ作成及び具体的な方策の検討がなされた。一方、「温暖化影響総合予測プロジェクト」では日本への気候変動の影響と温暖化の危険な水準に関する定量評価が行われた。このように近年、温暖化対策に関する科学的知見が徐々に明らかにされている。その中で、自動車に起因するCO₂排出も問題とされている。特に、自動車は道路整備が進めば走行量が増大し、CO₂排出量を増やす恐れが高

い。しかし、自動車利用から得られる便益も大きいいため、道路整備あるいは自動車利用の抑制を通じて、自動車に起因する CO₂ 排出を削減するという緩和策の導入には強い抵抗がある。

そこで本研究は、モデルに道路整備によるCO₂排出量の変化を盛り込み、地球温暖化対策の経済的影響を明らかにし、温暖化への適切な緩和策と適応策を示すことを目的とする。特に本研究では、気候変動に伴う長期的な温暖化の影響を評価するため、資本ストックを内生的に扱うことができる動学SCGEモデルを構築する。また、海岸消失に焦点を当て、観光・レクリエーションの行動モデルを導入し分析を行う。本研究は、武藤ら⁹⁾で適用した空間的応用一般均衡（SCGE：Spatial Computable General Equilibrium）モデルを用いて分析を進めるが、それらとの違いは観光・レクリエーション便益を明示的に導入した点とモデルを動学化（投資を内生化）した点であり、それによりCO₂由来の地球温暖化による観光・レクリエーションを含む経済的影響を正確に計測することが可能となっている。

2. 既存研究の整理と SCGE モデルの概要

(1) 既存研究の整理

動学モデルによる便益評価手法に関する研究は、費用便益分析の分野では今のところ皆無である。関連分野として、地球環境を内生的に組み込んだ経済成長モデルがある。RICEなど統合評価モデルとよばれている。RICEは地球全体を8地域に分割したモデルで、各地域の温暖化による影響の違いや、各地域の温暖化対策の効果を評価することができる。すなわち、GHG最適排出経路、温暖化対策や気候変動による損害の費用を地域ごとに定量的に評価することができる。しかしその一方で、経済構造や地域を高度に集約化したことで、気温上昇によって生産効率が減少するという科学的根拠が不明確なメカニズムを採用すること、家計のGHG排出が考慮されていないこと、エネルギーを除いて価格変数は考慮されないこと、その最適化構造から主体的な投資行動は考慮されないこと、といった欠点がある。

一方で経済政策評価においても、伴⁹⁾が日本のデータベースにもとづいて作成した最適動学SCGEモデル（伴モデル）がある。伴モデルは8地域22部門からなっており、財政負担の是正や労働力人口の減少、企業減税といった経済環境の変化が時間的視野で地域経済に影響する様子を数値計算により明らかにしている。また、東山ら⁷⁾は、伴モデルに余暇時間の導入と運輸部門の細分化を行い、過去から現在までに建設された高速道路整備によって生じた便益を計測する方法論を示した。そして、青木ら⁸⁾ではその計測がなされている。

温暖化による洪水被害への影響に関しては、中畠ら⁹⁾

の研究がある。中畠ら⁹⁾はラムゼイモデルの動学構造を基本とした8地域20産業部門のSCGEモデルを用い、長期的な気候変動に伴う水害被害を動学的に評価している。しかしながら、この研究では洪水シナリオを気候モデルから設定しており、交通を含むCO₂排出部門が取り扱われておらず、CO₂排出量の増加が温暖化に与える影響は評価できていない。

(2) SCGEモデルの概要

SCGEモデルは家計の支出最小化行動と企業の費用最小化行動のもと、需要と供給が一致するような財と生産要素の価格と数量を求めるモデルであり、これまで大規模交通整備の経済評価などに適用されてきた。しかし、これらの多くは静学モデルであり、現状の費用便益分析マニュアルを含め、資本ストックが外生的に与えられ、変化しないとの想定で便益評価がなされていた。

これに対し、動学モデルは資本蓄積過程を考慮しており、資本ストックが内生的に変化する。そして、これは外部性や政策変数が変更されても変化する。例えば、道路整備を行うと資本蓄積もより多くなるように変化する。それは、経済の活性化につながるため、静学モデルで計測する便益よりも大きな便益が得られると考えられる。すなわち、静学モデルで計測される便益は、動学モデルでの便益に対して過小評価となっているのである。

動学モデルには、貯蓄率を外生的に与えるソロー動学モデルと貯蓄率を内生的に求めるラムゼイ動学モデルがある。ソロー動学モデルは単期の計算を対象期間分行うモデルで、貯蓄の扱いは期の計算で求めた貯蓄から資本減耗を差し引いた分を、 $t+1$ 期の資本に追加して計算している。貯蓄率を外生とすることにより、経済成長の条件を明確化することができているものの、家計の効用最大化行動は当期のみしか考慮しておらず、将来の経済環境は考慮されていない。これは、過去のデータに基づいて推計された行動を不変なものとして仮定して政策評価を行うことはできないとするルーカス批判の対象となる。これに対し、ラムゼイ動学モデルは複数期を同時計算して将来に渡る家計の総効用を最大化するような計算を行っている。そこでは毎年、貯蓄が決定されることから将来の経済環境を考慮しているといえ、より現実的な家計の行動を表現している特徴がある。したがって、地球温暖化などの長期的な影響を評価する際は、ラムゼイ型の動学構造を持ったSCGEモデルを構築する必要があると考えられる。

東山、森杉らは、ラムゼイ型の動学SCGEモデルを交通整備の評価に適用している。これは、森杉らにて開発してきた交通生産を考慮したSCGEモデルを最適動学

化したものである。本研究も、この東山のモデルをベースとする。しかし、そこには地球温暖化の被害として、洪水や砂浜の減少による観光被害などを評価する枠組みは含まれていなかった。そこで、次章では交通生産を考慮した SCGE モデルに、水害と観光被害が評価できる枠組みを組み入れた最適動学 SCGE モデルの構築を行う。

3. 動学 SCGE モデルの構築

(1) SCGEモデルの動学化

家計の経済活動は、所有する労働と資本を企業へ提供することで対価として収入を得て、その収入を財の消費と貯蓄にまわしている。貯蓄は企業への投資分となり次期以降の資本を増大させて企業の生産性を高め、次期以降の家計の消費を増やす要因となる。家計は効用を財の消費から得ることができ、当期の直接的な消費と、次期以降の間接的な消費増加分を考慮して最適な消費と貯蓄を決定している（ラムゼイ型動学モデル）。

本研究では中寫ら⁹⁾に倣い、以下を仮定する。

- ① 全期間に渡って、経済は動学的均衡経路上にある。
 - ② 初期時点において、経済は定常状態にある。
 - ③ 最終時点において、生産の変化率と投資の変化率が等しいという制約の下、経済は定常状態にある。
- これらの仮定の下、次の最適化問題を考える。

$$\max_u \int (\ln u) \exp(-\rho t) dt \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } \dot{K} + \delta K = wL + rK - e - S_F \quad (1b)$$

ただし、 u ：効用関数、 K ：資本ストック、 L ：労働供給量、 e ：支出水準、 w, r ：それぞれ賃金率、利子率、 ρ 、 δ ：それぞれ割引率、資本減耗率、 S_F ：域外貯蓄
 $(= \sum_j (p_j^E x_j^E - p_j^M x_j^M))$

支出水準 e は、従来の SCGE モデルにおいて、ツリー構造として定式化される家計行動モデルから求められる。家計行動ツリー最上位の行動モデルは以下のようになる。

$$e (= p_U u) = \min_{z_H, z_S} [q_H z_H + w_H z_S] \quad (2)$$

$$\text{s.t. } u = \gamma_{ZH} \left[\alpha_H \{ \beta_H z_H \}^{\frac{\sigma_{ZH}-1}{\sigma_{ZH}}} + (1-\alpha_H) \{ (1-\beta_H) z_S \}^{\frac{\sigma_{ZH}-1}{\sigma_{ZH}}} \right]^{\frac{\sigma_{ZH}}{\sigma_{ZH}-1}} \quad (3)$$

これらを解いて得られる需要関数を、式(2)の目的関数に代入すると支出関数が得られる。

$$e = \frac{1}{\gamma_{ZH}} \psi_{ZH}^{\frac{1}{1-\sigma_{ZH}}} \cdot u \quad (4)$$

ただし、

$$\psi_{ZH} = (\alpha_H)^{\sigma_{ZH}} \left(\frac{q_H}{\beta_H} \right)^{1-\sigma_{ZH}} + (1-\alpha_H)^{\sigma_{ZH}} \left(\frac{w_H}{1-\beta_H} \right)^{\sigma_{ZH}-1}$$

ここで、便宜的に $p_U \equiv \frac{1}{\gamma_{ZH}} \psi_{ZH}^{\frac{1}{1-\sigma_{ZH}}}$ とおくと、支出

関数は $e = p_U u$ と表される。なお、実際に数値計算を行う際は、家計所得から資本投資額を差し引いた所得から効用水準が決定され、各財消費を求めることになる。

$$u = \frac{1}{p_U} [wL + rK - (\dot{K} + \delta K)] \quad (5)$$

得られた支出関数を式(1a)に代入し、現在価値ハミルトニアンを定義する。

$$H = \ln u + \lambda \{ wL + (r - \delta)K - p_U u \} \quad (6)$$

すると、最大化の一階条件は以下のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 \Rightarrow \frac{1}{u} - \lambda p_U = 0 \quad \therefore \lambda = \frac{1}{p_U u} = \frac{1}{e} \quad (7)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial K} = \dot{\lambda} - \rho \lambda \Rightarrow -\lambda(r - \delta) = \dot{\lambda} - \rho \lambda \quad (8)$$

式(7)の両辺を微分すると、

$$\dot{\lambda} = -\frac{1}{e} \frac{\dot{e}}{e} = -\lambda \frac{\dot{e}}{e} \quad \therefore \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = -\frac{\dot{e}}{e} \quad (9)$$

また、式(8)より以下が求められる。

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = -r + \delta + \rho \quad (10)$$

式(9)、(10)により、以下のオイラー方程式が導出できる。

$$\frac{\dot{e}}{e} = r - \delta - \rho \quad (11)$$

一方、資本蓄積式は式(1b)により与えられている。

以上から、本モデルの動学構造は、以下のオイラー方程式及び資本蓄積式により規定される。

$$\text{【オイラー方程式】 } \frac{\dot{e}}{e} = r - \delta - \rho \quad (12)$$

$$\text{【資本蓄積式】 } \dot{K} + \delta K = wL + rK - e - S_F \quad (13)$$

以上がモデルの動学構造部分である。既に述べたが、この中の家計の支出水準は静学 SCGE モデルとまったく同じ家計行動モデルの支出水準から得られる。

また、本 SCGE モデルでは企業は瞬時的費用最小化行動をとるものとする。すなわち、企業も静学 SCGE モデ

ルとまったく同じモデル化となる。

(2) レクリエーションを考慮した家計の行動モデル

本研究の SCGE モデルは余暇においてレクリエーション需要を R 合成財として明示化し、砂浜消失を R 合成財の生産効率の低下で表す。それによって R 滞在時間や R 運輸に及ぼす影響を考慮できるものとする。

扱う家計の行動モデルは武藤・桐越⁹⁾をもとに、交通消費において自家輸送を明示化し、それを含む交通機関選択を考慮した。

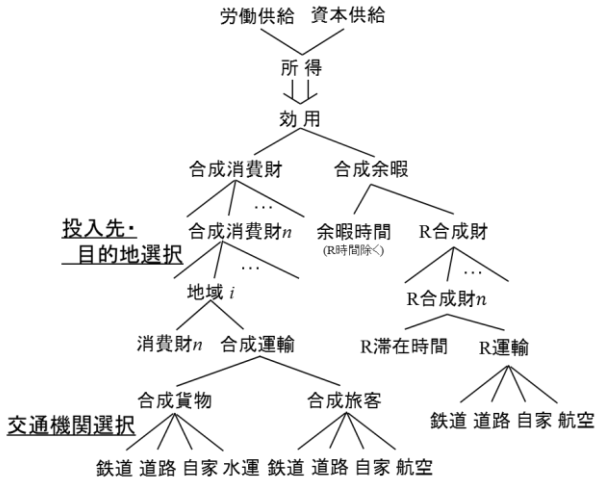


図-1 家計の行動モデルツリー

(3) 交通生産を考慮したSCGEモデルの構造

本研究で用いる SCGE モデルは、武藤、桐越⁹⁾で開発したものを森杉他¹⁰⁾で改良したものである。具体的には国内には企業（ここでは 23 産業部門を想定）、運輸企業（ここでは 11 運輸部門を想定し、その中には自家輸送部門も含まれる）、家計、政府、公的投資部門、民間投資部門が存在する。

各主体の基本的な行動モデルは、標準的SCGEモデルと同様に階層型行動モデルを想定し、企業は生産技術制約下での費用最小化行動、家計は効用一定制約下での支出最小化行動をとるものとする。家計の具体的な支出最小化行動モデルは式(2)、(3)に示したものであり、それより各期の支出水準が求められる。

(4) 運輸企業の行動モデル

本モデルの特徴は交通生産を行う運輸企業を独立させ扱っているところにある。運輸企業の行動モデルは、基本的には武藤・桐越⁹⁾あるいは森杉他¹⁰⁾と同様である。

具体的な企業の行動モデルを説明する。ここでは、特に交通投入を詳細化している点に特長がある。すなわち、図-2に示すように、企業が投入する業務交通と、中間財投入において必要とされる貨物運輸を明示的にモデル化し、それらは交通機関選択まで考慮した。さ

らに、交通機関には自家輸送も考慮した。

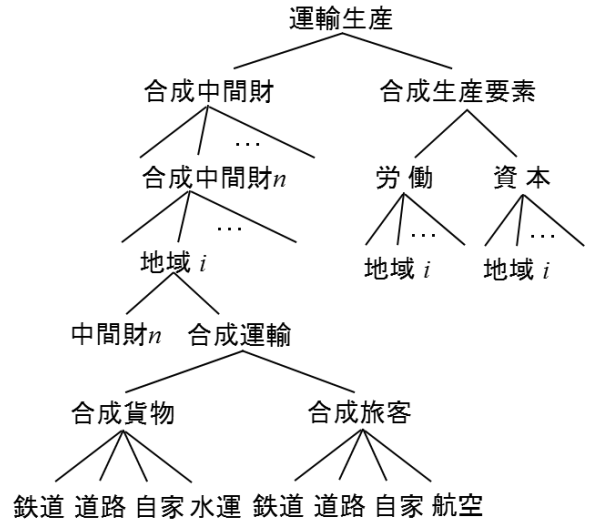


図-2 運輸企業の行動モデルツリー

自家輸送とは、本来は各企業が自身の労働、資本の一部と輸送に必要な中間財を投入して、自ら輸送を行うものである。それをここでは仮想的な自家輸送運輸部門を設け、その部門が自家輸送サービスを生産しそれを企業が投入するものとした。これにより、自家輸送をモデル上は他の運輸部門と同様に扱うことができる。企業は、まず合成中間財と合成生産要素の投入量を決定し、その合成中間財に対し中間財 i の合成投入量を決定する。なお、中間財 i の投入には貨物運輸が必要であり、貨物運輸の投入ではさらに自家貨物輸送を含む交通機関選択を行う。一方、業務交通も考慮し、それに対しても自家旅客輸送を含む交通機関選択を行うとした。なお、交通時間消費に関しては、業務交通（旅客運輸）の鉄道、道路交通（バス、タクシー等）、航空において考慮している。これは、出張等において鉄道や道路交通、航空を利用する際、利用者は移動に時間を費やすためである。自家輸送のような自家用車で移動する際も時間を消費するが、それは自家旅客輸送サービスを生産するために投入される労働資源と考えられる。そのため、ここではそれらを自家輸送部門のモデル化において考慮することとした。

(5) 被害の考慮

洪水被害は洪水や冠水により企業の資本ストックが損壊する（資本減耗率が增大する）と想定する。

(6) 投資需要決定モデル

本モデルでは、家計貯蓄（ここでは $\dot{K} + \delta K$ ）がそのまま投資に回されると仮定する。その際、以下の瞬時的費用最小化行動に基づき各投資需要が決定されるものとする。

$$p_I y_I = \min_{x_{ji}} \left[\sum_j p_j x_{ji} \right] \quad (14)$$

$$\text{s.t. } y_I = \gamma_I \sum_j \left\{ \beta_{Ij} x_{ji} \right\}^{\alpha_{Ij}} \quad (15)$$

ただし, y_I : 合成投資財, p_I : 合成投資財価格

なお, 式(15)の右辺は家計貯蓄額と一致するため,
 y_I は以下により求められる.

$$y_I = \frac{\dot{K} + \delta K}{p_I} \quad (16)$$

(7) 定常状態における分析

本モデルの市場均衡条件は以下のとおりである.

$$\text{財市場: } y_j = \sum_i x_{ji} + x_{jH} + x_{jI} \quad (17)$$

$$\text{ただし, } p_{Yj} Y_j = p_j y_j - (p_j^E x_j^E - p_j^M x_j^M)$$

$$\text{労働市場: } L = \sum_i l_j \quad (18)$$

$$\text{資本市場: } K = \sum_j k_j \quad (19)$$

$$\text{域外収支: } S_F = \sum_j (p_j^E x_j^E - p_j^M x_j^M) \quad (20)$$

j 財市場に関しては, 以下の均衡価格が得られている.

$$p_j = \frac{1}{\gamma_{Zj}} \psi_{Zj} \frac{1}{1 - \sigma_{Zj}} \quad (21)$$

定常状態を仮定すると, 式(1a), (1b)より,

$$r = \delta + \rho \quad (22)$$

$$\delta K = wL + rK - e - S_F \quad (23)$$

定常状態では, 式(22)のように利子率 r が決定される. これを, 式(23)の右辺に代入することにより, 定常状態での資本ストック量 K が求められる. 賃金率 w は, 式(23)より求められる. なお, ここでは域外貯蓄をニューメラルールとしている.

以上から, 利子率と賃金率が求められ, 式(21)から財 j の価格が得られる.

次に, 定常状態の家計所得については以下となる.

$$wL + rK - e - S_F \quad (24)$$

w, r, K は上記にて導出済みである. L, δ は固定であるため, 家計所得が求められる. また, これと財価格から

家計需要が得られる. さらに, 定常状態では資本減耗分に対してのみ投資がなされるため, 投資額は δK となり, これと財価格から投資需要も導出できる.

以上より, 定常状態において, 各均衡解を計算することが可能となる.

4. まとめ

本研究は地球環境対策による環境の変化が及ぼす経済的影響を計測するために, 既存の短期静学 SCGE モデルを最適動学化する枠組みを示した. また, レクリエーション需要についても同一モデル内で明示化した.

今後は, 実際に数値計算を行い, 地球温暖化対策による水害被害, 砂浜喪失への影響評価を実施する. 計算結果については講演時に報告予定である.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 多くの方々からご指導, ご協力をいただきました. とくに, 指導教員である武藤慎一准教授におかれましては, ご多忙にもかかわらず, 多くのご指導, ご鞭撻をいただき, ここに深く感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 環境省: パンフレット「STOP THE 温暖化 2015」, 2015.
- 2) 地球環境センター: わが国の 2012 年度 (平成 24 年度) の温室効果ガス排出量について, 2014.
- 3) 地球環境センター: わが国の 2013 年度 (平成 25 年度) の温室効果ガス排出量について, 2015.
- 4) 環境省地球温暖化対策推進本部: 日本の約束草案, 2015.
- 5) 武藤慎一, 桐越信: Barro 型 CES 関数に基づく空間的応用一般均衡(SCGE)モデルの一般性向上 -交通モデルを中心に-, 交通学研究/2010 年研究年報, pp.255-264, 2011.
- 6) 伴金美: 日本経済の多地域動学的応用一般均衡モデルの開発: Forward Looking の視点に基づく地域経済分析, RIETI Discussion Paper Series, 07-J-043, 2007.
- 7) 東山洋平, 森杉壽芳, 武藤慎一, 福田敦: 動学 SCGE モデルによる高速道路整備便益の推計, 土木計画学研究・講演集 Vol.47, 2014.
- 8) 青木優, 森杉壽芳, 武藤慎一, 上泉俊雄, 河野達仁, 福田敦, 東山洋平: 高速道路ネットワーク 9,142km の経済効果 -空間的応用一般均衡(SCGE)アプローチ-, 高速道路と自動車, Vo.58, No.3, pp.16-25, 2015.
- 9) 中嶋一憲, 森杉壽芳, 森杉雅史, 坂本直樹: 動学的多地域応用一般均衡モデルによる気候変動に伴う水害被害の計測, 土木計画学研究・講演集 Vol.47, 2014.
- 10) 森杉壽芳他: 交通ネットワーク均衡を明示的に組み込んだ SCGE モデルによる道路整備経済効果と便益の計測, 日交研シリーズ A-617, 日本交通政策研究会, 2014.