

# 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

中嶋 一憲<sup>1</sup>・森杉 壽芳<sup>2</sup>・森杉 雅史<sup>3</sup>・坂本 直樹<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 兵庫県立大学准教授 環境人間学部 (〒670-0092 兵庫県姫路市新在家本町1-1-12)  
E-mail: nakajima@shse.u-hyogo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 日本大学特任教授 理工学部 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)  
E-mail: h-morisugitrpt.cst.nihon-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 名城大学教授 都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)  
E-mail: morisugi@urban.meijo-u.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 東北文化学園大学准教授 総合政策学部 (〒981-8551 宮城県仙台市青葉区国見6-45-1)  
E-mail: nsakamo@pm.tbgu.ac.jp

本研究は、気候変動に伴う水害被害が時間を通じて経済に及ぼす影響を明らかにするために、動学的多地域応用一般均衡モデルを構築し、数値実験による水害被害額の計測を目的とする。本研究のモデルは、Ramseyモデルの動学構造を基本とし、8地域20産業部門を有する。本研究では水害被害の動学的波及を考慮するために、長期帰着ベース被害(比較静学)と長期帰着ベース被害(移行動学)の2つの指標を提示する。前者は気候変動に伴う水害強度の増加により、定常成長均衡のシフトを通じて長期的に実現する被害である。一方、後者は新たな定常成長均衡までの移行経路上での被害額の差分である。本研究の結果より、2050年の水害被害額は約400億円から約5600億円と算定され、また水害被害による動学的波及の拡大は1.1倍から1.7倍と算定された。

**Key Words :** *climate change, flood damage, dynamic multi-regional CGE model, Ramsey model*

## 1. はじめに

現在、気候変動による水害の頻度や強度は長期的に増大傾向にあると予測されている。日本における水害被害項目のうち、特に大きいものは家屋資産や建物、道路を代表とする社会資本への被害であり、これらの水害による経済的影響は、計量経済学的アプローチ、応用一般均衡アプローチ、工学的アプローチといった様々な手法を用いて評価されている。しかしながら、これらの手法には問題点が存在する。例えば、応用一般均衡(CGE: Computable General Equilibrium)モデルを用いたアプローチは、CGEモデルが短期的かつ静学モデルであり、資本蓄積を考慮していないため、従来のCGEモデルによって、気候変動に伴う長期的な水害被害を評価することは不適當であると考えられる。それゆえ、資本ストックを内生的に扱うことができる動学構造を持ったCGEモデルを構築し、気候変動による水害被害を評価する必要があると考えられる。

そこで、本研究は気候変動に伴う水害被害が時間を通じて経済に及ぼす影響を明らかにするために、動学的多

地域応用一般均衡モデルを構築し、水害シナリオを用いたシミュレーション分析によって、気候変動による水害被害額を計測することを目的とする。

## 2. 経済成長モデルによる水害被害の定義

ここでは、気候変動による水害被害に関して、Ramseyモデルを用いて消費水準および資本ストック水準の観点から長期の定常状態を定式化し、消費水準の変化として水害被害を定義する。

### (1) Ramseyモデル

本研究で用いるRamseyモデルは、集計化された一国一部門のマクロ閉鎖経済を想定し、代表的家計と企業が一主体ずつ存在するものとする。

まず、代表的家計の行動を定式化する。代表的家計はあらゆる生産要素を全て保有すると仮定し、家計はこれら生産要素を企業に提供することによって得られる報酬を所得の源泉とする。そして、家計は企業の生産した財

(numeraire)を消費し、消費目的以外に余剰(不足)となった所得残額はすべて貯蓄の増加(取り崩し)に転嫁されるものとする。

代表的家計の時間を通じた最適化行動は、

$$\begin{aligned} \max_{c(t)} U &= \int_0^{\infty} u(c(t)) \exp\{(n - \rho)t\} dt, \\ \text{where } u(c(t)) &= \frac{c(t)^{1-\theta} - 1}{1 - \theta} \\ \text{s.t. } \dot{a}(t) &= w + ra(t) - c(t) - na(t) \end{aligned} \quad (1)$$

と表すことができる。また、効用関数は CRRA(Constant Arrow&Pratt's Relative Risk Aversion), CIES(Constant Intertemporal Elasticity of Substitution)の形を仮定する。ここで、 $\rho$ は時間選好率、 $\theta$ は異時点間消費の代替弾力性の逆数、 $n$ は労働成長率、 $c$ は1人当たり消費、 $a$ は1人当たり資産、 $w$ は賃金率、 $r$ は利率をそれぞれ表す。なお、時間を示す $t$ は適宜省略する。式(1)の最適化問題の必要条件および横断性条件は、

$$\frac{\dot{c}}{c} = \frac{1}{\theta}(r - \rho) \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[ a(t) \exp \left\{ - \int_0^{\infty} (r(v) - n) dv \right\} \right] = 0 \quad (4)$$

とそれぞれ表すことができる。

次に、企業の行動を定式化する。人口は $t$ 期において $L(t) = L(0)e^{nt}$ と表される。また、ここではHarrod中立的な技術進歩を加味した実質的な労働量を効率的労働量と呼び、 $\hat{L}(t) = L(t)e^{-xt}$ として定義する。一方、資本においても、効率的労働量当たりに換算すれば、

$$k = \frac{K}{L}, \hat{k} = \frac{K}{\hat{L}} = \frac{K}{L \cdot e^{-xt}} = ke^{-xt}, k = \hat{k}e^{xt} \quad (5)$$

と表すことができる。この定義の下、企業は時間を通じて利潤を最大化するため、企業の最適化行動は、

$$\begin{aligned} \max_k \pi &= F(K, \hat{L}) - (r + \delta)K - w\hat{L} \\ &= \hat{L} \left[ f(\hat{k}) - (r + \delta)\hat{k} - we^{-xt} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

と表すことができる。ここで、 $x$ は技術進歩率、 $\delta$ は資本減耗率、 $F(\bullet)$ は規模に関して収穫一定の生産関数とする。式の利潤最大化問題の1階の条件は、

$$f'(\hat{k}) = r + \delta \quad (7)$$

$$\left[ f(\hat{k}) - (r + \delta)\hat{k} \right] e^{xt} = w \quad (8)$$

とそれぞれ表すことができる。

第三に、均衡条件を示す。ここでBarro and Sala-i-Martin (1995)に倣い、すべての変量を効率的労働量単位に変換する。まず、個人の貯蓄が $a = k$ であることから、

$\dot{k} = \hat{k}e^{xt} + x\hat{k}e^{xt}$ 、式(7)および式(8)を式(2)に代入することによって、

$$\begin{aligned} \dot{k}e^{xt} + x\hat{k}e^{xt} \\ = e^{xt} \left\{ f(\hat{k}) - \hat{k}f'(\hat{k}) \right\} + \hat{k}e^{xt} \left\{ f'(\hat{k}) - \delta \right\} - c - n\hat{k}e^{xt} \end{aligned} \quad (9)$$

と表すことができる。ここで $\hat{c} = ce^{-xt}$ とすれば、式(2)より、

$$\dot{\hat{k}} = f(\hat{k}) - \hat{c} - (n + x + \delta)\hat{k} \quad (10)$$

と表すことができる。また、 $c = \hat{c}e^{xt}$ より $\dot{\hat{c}} = \hat{c}e^{xt} + x\hat{c}e^{xt}$ であるため、式(3)より、

$$\frac{\dot{\hat{c}}}{\hat{c}} = \frac{1}{\theta}(r - \rho - \theta x) = \frac{1}{\theta} \left[ f'(\hat{k}) - \delta - \rho - \theta x \right] \quad (11)$$

と表すことができる。このように式(10)および式(11)から成る微分方程式体系によって、本研究の経済システムの均衡経路が決定する。

## (2) 定常状態における比較静学

本研究は気候変動に伴い、水害の発生確率、あるいは水害被害額そのものが長期的に増加することを想定している。以下では、Morisugi and Morisugi (2012)に倣い、Ramseyモデルを基礎とした水害被害(負の便益)、および適応策としての防災関連型社会資本整備事業の帰着便益の算定方法を示す。

本研究では、年間の平均水害被害額による資本の損傷は資本減耗率に織り込み済みと考え、気候変動の影響によって、この資本減耗率が $\delta_0$ から $\delta_1$ へと変化するものとする。ここで、 $\delta_0 < \delta_1$ である。また、 $t = 0$ を事前、 $t = 1$ を事後とする。

初めに、式(10)および式(11)において $\dot{\hat{k}} = 0, \dot{\hat{c}} = 0$ のとき、この経済における定常成長均衡と定義し、それぞれ以下のように表すことができる。

$$f(\hat{k}^*) - (n + x + \delta)\hat{k}^* = \hat{c}^* \quad (12)$$

$$f'(\hat{k}^*) - \delta = r = \rho + \theta x \quad (13)$$

ここで式(13)より、定常成長均衡上において、利率は事前および事後に資本減耗率 $\delta$ が変化しても、定数であるパラメータによって決定付けられるため、同じ値になることが分かる。また、この条件を式(3)に代入すれば、労働人口一人当たりの消費の成長率は常に技術進歩率 $x$ となる。さらに、労働人口一人当たりの所得や資本量の成長率も同様に技術進歩率 $x$ と等しくなる。

次に、気候変動に伴う水害被害の増加によって資本減耗率が変化した場合の比較静学を行う。式(13)を $\delta$ および $\hat{k}^*$ について全微分すれば、稲田条件より、

$$\frac{d\hat{k}^*}{d\delta} = \frac{1}{f''(\hat{k}^*)} < 0 \quad (14)$$

である。また同様に式(12)は、

$$\{f'(\hat{k}^*) - (n + x + \delta)\} d\hat{k}^* - \hat{k}^* d\delta = d\hat{c}^* \quad (15)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d\hat{c}^*}{d\delta} = \frac{\{\rho + (\theta - 1)x - n\}}{f''(\hat{k}^*)} - \hat{k}^* \quad (16)$$

である。

図-1は、式(12)と式(13)の関係、および式(14)と式(16)の比較静学の結果を表している。まず、式(12)の $\dot{\hat{k}} = 0$ における $\hat{k}$ と $\hat{c}$ の関係を描いたものが図中の曲線部分である。一方、 $\dot{\hat{c}} = 0$ においては、式(13)から $\hat{k}$ がパラメータのみで決まるため、図中の垂直線で表される。次に、比較静学の結果を見ると、水害被害の増加によって資本減耗率が $\delta_0$ から $\delta_1$ へ変化したとき、式(12)で表される曲線は下方へシフトする。一方、式(13)で表される垂直線は資本の限界生産性逓減の命題より、左へシフトし、より小さい資本ストックの水準 $\hat{k}^*$ となる。したがって、水害被害の増加により、定常成長均衡点は事前の $E_0$ 点から事後の $E_1$ 点へとシフトし、事後の $\hat{k}^*$ と $\hat{c}^*$ はいずれも事前のそれより小さくなる。

第三に、式(15)を解釈することによって、発生ベースの被害(負の便益)、帰着ベースの被害(負の便益)、および乗数(動学的拡大係数)を考察する。式(15)における左辺第1項の $\{f'(\hat{k}^*) - (n + x + \delta)\}$ は水害被害で失われた資本が産み出すはずであった毎年の収益であり、これに定常成長均衡がシフトすることにより得られる効率的労働単位当たりの資本量の変化分 $d\hat{k}^*$ が乗せられる。家計の通時的な消費・貯蓄計画の変化に伴い、この資本 $\hat{k}^*$ は減少が所得の実質的な目減りをもたらし、定常均衡成長上の効率的労働単位当たりの消費量も結果的に減少する。

一方、式(15)の左辺第2項は水害被害による資本減耗率 $\delta$ が高まることで補てんしなけりななくなった投資の増加分である。短期的に見れば、これは災害復旧あるいは復興投資分にあたり、水害統計資料にあるような「発生ベースの被害(負の便益)」である。この投資支出の増加によって、各時点の可処分所得が目減りし、消費も減少するものの、このとき復興される水準は新たな定常成長均衡上の値になるため、厳密には現状復旧のための投資ではない。以上の2つの効果によって、式(15)の右辺 $d\hat{c}^*$ は負となることから、式(15)の右辺 $d\hat{c}^*$ を「帰着ベースの被害(負の便益)」と呼ぶ。さらに、式(16)を変形すれば、

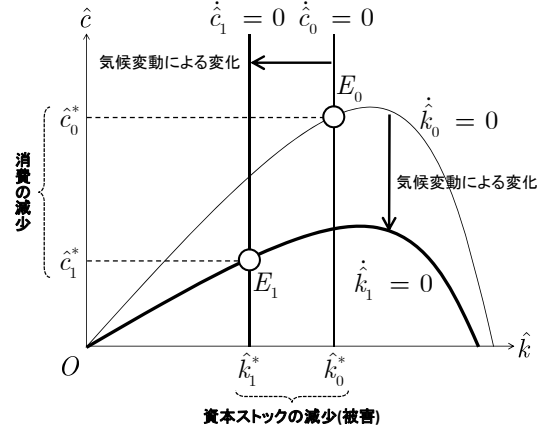


図-1 気候変動による定常状態の変化

$$\frac{d\hat{c}^*}{d\delta} = - \left[ \frac{\{\rho + (\theta - 1)x - n\}}{-f''(\hat{k}^*) \cdot \hat{k}^*} + 1 \right] \hat{k}^* d\delta \quad (17)$$

となる。Morisugi and Morisugi (2012)は式(17)の括弧[ ]内を実数値換算(乗数: 1.357)しており、これを「乗数(動学的拡大係数)」と呼ぶ。式(17)の左辺は帰着ベースの被害であり、これは発生ベースの被害にこの乗数を乗じたものに他ならない。仮定より $f'' < 0$ であり、また横断性条件から、この乗数は1以上であることが保証される。

最後に、静学と動学の違いを再考すると、家計が将来に渡る消費と貯蓄を計画しているか否かの違いに過ぎない。本研究のRamseyモデルの範疇で静学ケースを想定するならば、家計はある任意の一時点の経済のみを考慮することになるため、資本量や貯蓄の変化がないもの、つまり $d\hat{k}^* = 0$ と考えることができる。あるいは、家計が極めて近視眼的な主体であり、当面の単一期間の消費量しか考えず( $\rho = 0$ )、この期間においては人口成長や技術進歩は起こらない( $n = 0, x = 0$ )と仮定することによっても同様の理論的帰結が得られる。どちらの場合であっても、式(15)において式(18)の関係が成立することになる。つまり、静学において左辺の発生ベースの被害と右辺の帰着ベースの被害が一致することが分かる。

$$-\hat{k}^* d\delta = d\hat{c}^* \quad (18)$$

### (3) 消費変化による動学的水害被害

前節では、気候変動に伴う水害被害の増大によって、定常成長均衡点にある経済が新たな定常成長均衡点にシフトすることを示した上で、発生ベースの被害、帰着ベースの被害、および被害拡大係数を定義した。以下では、水害による動学的な被害拡大の効果を考察するために、2つの指標を提示する。1つは「長期帰着ベース被害(比較静学)」であり、もう1つは「長期帰着ベース被害(移行動学)」である。

図-2において、水害のない状況下での経済( $t = 0$ )は

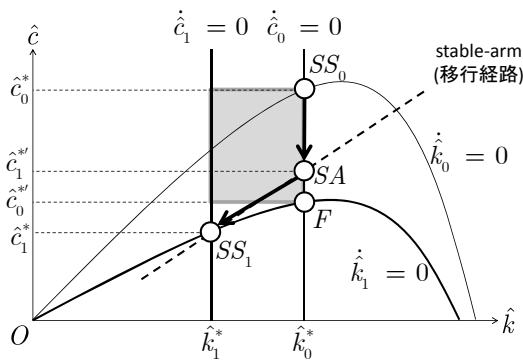


図-2 水害被害の定義

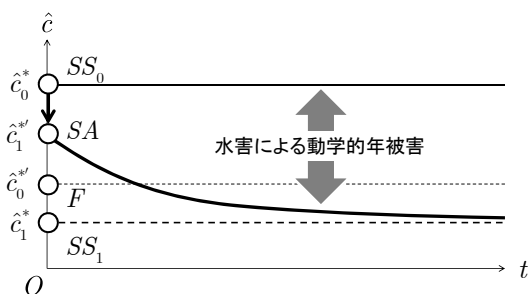


図-3 時間を考慮した水害被害の定義

$SS_0$  点で示される定常成長均衡点にあるとする。また、図-3は横軸を時間軸として消費の移行経路を示している。水害がない、あるいは水害被害が増大しない場合の経済は、時間変化に関係なく  $SS_0$  点にあるものとし、この定常成長均衡点での消費水準は将来に渡って  $\hat{c}_0^*$  で一定である。一方、気候変動に伴い水害被害が増大することにより、資本減耗率は増大し、経済は新たな定常成長均衡点  $SS_1$  にシフトする。

まず、長期帰着ベース被害(比較静学)について示す。この被害指標は水害被害の増大によって、定常成長均衡点が  $SS_0$  から  $SS_1$  にシフトした消費額の差分  $\hat{c}_0^* - \hat{c}_1^*$  である。この長期帰着ベース被害(比較静学)は前節で述べたように理論モデルの解として数的に明確に表現することができ、動学的拡大係数も1を超えることが明らかである。また、この場合、資本ストックは内生変数として扱われる。

次に、長期帰着ベース被害(移行動学)とは、図-2における移行経路上での毎年の消費額の差分  $\hat{c}_0^* - \hat{c}_1^*(t)$  を新たな定常成長均衡点  $SS_1$  に向けて積算し、その年平均を導出したものである。ここで注意しなければならないこ

とは、水害被害の増大(資本減耗率の増大)によって、経済は水害なしの場合の定常成長均衡点  $SS_0$  から、水害ありの初期点  $SA$  へ瞬時にシフトすることである。これは経済が水害被害のある年の投資を調整することによる変化であり、Ramseyモデルにおいては消費の変化として表される。そして、水害ありの初期点  $SA$  は新たな定常成長均衡点へ向かう移行経路上の点であり、経済は時間を通じて定常成長均衡点  $SS_1$  へとシフトして行く。このことは図-3においても見ることができる。図-2および図-3から分かるように、長期帰着ベース被害(比較静学)は長期帰着ベース被害(移行動学)より常に大きな値を示し得るため、前者は後者の可能性としての最大値を示す。また、移行経路の考え方を含む後者の指標は現実描写性が高いと考えられ、水害被害の動学的な波及が時間を通じて十分に生じ得ることを示している。

最後に、「短期帰着ベース被害(比較静学)」について示す。これは図-2および図-3において、点  $SS_0$  と点  $F$  との消費額の差分  $\hat{c}_0^* - \hat{c}_0^{s*}$  として表される。また、これは資本ストックを一定(資本ストックを外生変数)とした場合の消費額の減少分である。このことは、前節における式(18)を意味しており、消費の減少分は直接被害である発生ベースの被害と等しい。

### 3. モデルとシナリオの概要

ここでは、上述した発生ベースの被害(直接被害)および帰着ベース被害の指標に基づいて、気候変動に伴う水害被害の計測を行うために、多地域応用一般均衡モデルおよび水害シナリオの概要を示す

#### (1) 多地域CGEモデルの構造

本研究の多地域応用一般均衡モデルは、2000年47都道府県地域間産業連関表(45産業部門分類)を基準均衡データとして用いる。2000年47都道府県地域間産業連関表の詳細については、宮城ら(2003)、石川・宮城(2004)、および石川(2005a)(2005b)を参照されたい。また、本研究で用いる社会会計表の作成手順については、林山ら(2013)を参照されたい。表-1および表-2が示すように、本研究のモデルは地域区分を47都道府県から8地域に、産業部門分類を45産業部門から20産業部門に統合している。また、経済主体は家計部門、生産部門、政府部門を想定する。家計部門は労働および資本を初期賦存として保有し、家計消費および民間投資を行う。生産部門は労働、資本および中間投入財を生産要素として財を生産する。そして、政府部門は所得税、生産税および間接税を収入として政府消費および政府支出を行う。

表-1 地域区分

地域	Code	都道府県
北海道	HKD	北海道
東北	THK	青森県・岩手県・宮城県・秋田県・山形県・福島県
関東	KNT	茨城県・栃木県・群馬県・埼玉県・千葉県・東京都・神奈川県・新潟県・山梨県・長野県・静岡県
中部	CHB	富山県・石川県・愛知県・岐阜県・三重県
近畿	KIK	福井県・滋賀県・京都府・大阪府・兵庫県・奈良県・和歌山県
中国	CGK	鳥取県・島根県・岡山県・広島県・山口県
四国	SKK	徳島県・香川県・愛媛県・高知県
九州	KYS	福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・大分県・宮崎県・鹿児島県・沖縄県

表-2 部門分類

#	財・部門	Code	47都道府県産業連関表対応
1	農業	AGR	農業
2	林業	FRS	林業
3	漁業	FSH	漁業
4	鉱業	MIN	鉱業
5	食料品	FOD	食料品・たばこ
6	その他製造業	OMF	繊維製品、製材・木製品、家具・装備品、パルプ・紙・紙加工品、印刷・出版、皮革・同製品、窯業・土石製品、その他製造業
7	化学製品	CPR	化学製品、プラスチック製品、ゴム製品
8	石油・石炭製品	P_C	石油・石炭製品
9	鉄鋼	I_S	鉄鋼製品
10	金属製品	MTL	非鉄金属製品、金属製品
11	機械	MCH	一般機械、事務用・サービス用機器、自動車、その他輸送用機械
12	電子機器	ELM	民生用電気機械、電子・通信機械、その他電気機械、精密機械
13	建築・土木	CNS	建築・建設補修、土木
14	電力	ELY	電力
15	ガス・熱供給	GDT	ガス・熱供給
16	水道・廃棄物処理	WTR	水道・廃棄物処理
17	商業	COM	商業、金融・保険、不動産
18	運輸	TRS	運輸
19	医療・保険・社会保障	MED	医療・保険・社会保障
20	その他サービス	ANC	通信・放送、公務、教育・研究、その他公共サービス、対事業所サービス、対個人サービス、その他

a) 国内生産部門

国内生産部門に関して、図-4に示すように多段入れ子型CES関数形を想定している。地域 $s$ における部門 $j$ は、

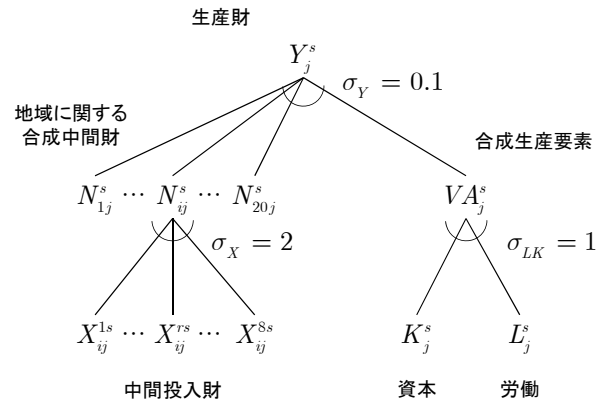


図-4 生産部門の生産構造

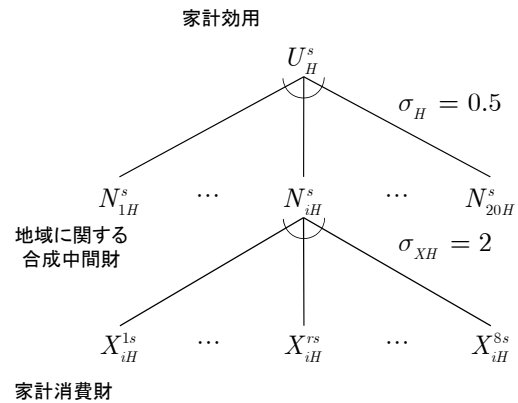


図-5 家計部門の消費構造

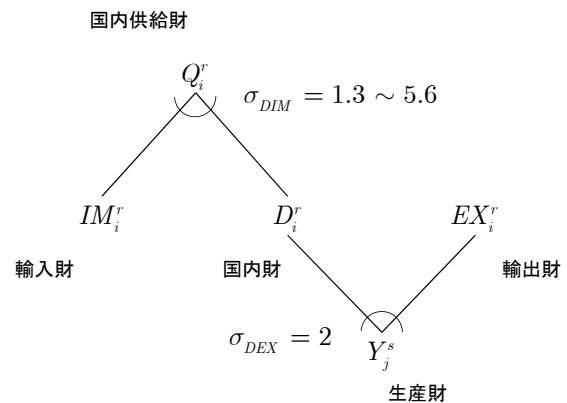


図-6 輸出・国内変形および輸入・国内代替の構造

利潤最大化の下、労働および資本から成る合成生産要素  $VA_j^s$  と地域に関して統合された合成中間投入財  $N_{ij}^s$  を用いて、各部門の生産財  $Y_j^s$  を生産する。各段階における代替弾力性は図に示す通りである。

b) 家計消費部門

家計消費部門の構造は図-5 のように表現される。本研究では各地域に代表的家計が1つ存在し消費を行うと仮定する。地域 $s$ における家計は予算制約下で効用最大

表-3 代替弾力性 $\sigma_{DIM}$ の設定値

部門	値	部門	値
農業	2.5	機械	3.6
林業	2.5	電子機器	4.4
漁業	1.3	建築・土木	1.9
鉱業	5.6	電力	2.8
食料品	2.5	ガス・熱供給	2.8
その他製造業	3.4	水道・廃棄物処理	2.8
化学製品	3.3	商業	1.9
石油・石炭製品	2.1	運輸	1.9
鉄鋼	3.0	医療・保険・社会保障	1.9
金属製品	3.9	その他サービス	1.9

化に基づいて地域に関する家計合成消費財の消費 $N_{IH}^s$ を決定し効用水準 $U_H^s$ を得るとする。各段階における代替弾力性は図に示す通りである。

#### c) 政府消費部門

政府消費部門の構造は家計消費部門における図-5と同様に表される。また、本研究は伴(2007)の仮定に倣い、中央政府は存在せず、各地域に存在する政府部門が仮想的な政府効用 $U_G^s$ を最大化するように政府合成消費 $N_{iG}^s$ を決定すると仮定する。各段階における代替弾力性は家計消費部門と同じである。

#### d) 民間投資部門・政府投資部門

民間投資部門および政府投資部門の構造もまた家計消費部門と同様の構造を持ち、仮想的な投資部門が各地域にそれぞれ1つずつ存在すると仮定する。なお、民間投資は地域を超えて行われるのに対して、政府投資は自地域の産業部門のみに行われる。各段階における代替弾力性は図に示す通りである。

#### e) 輸出・輸入部門

輸出および輸入に関しては、図-6に示す通りである。輸出・国内変形部門は、Armingtonの仮定より、CET(Constant Elasticity of Transformation)型変形関数を用いて国内財 $D_i^r$ と輸出財 $EX_i^r$ とに変形される。一方、輸入・国内代替部門も同様にArmingtonの仮定より、国内財 $D_i^r$ と輸入財 $IM_i^r$ をCES型生産関数によって統合された国内供給財 $Q_i^r$ を生産する。また、輸出・国内変形に関する代替弾力性 $\sigma_{DEX}$ の値は2であり、一方、輸入・国内代替に関する代替弾力性 $\sigma_{DIM}$ の値はGTAP7.1の値を用い、それらの値は表-3に示される。

## (2) 動学的構造

本研究の動学的構造はLau *et al.* (2002), Paltsev (2004), 伴(2007)に基づいており、これらはRamsey型の最適成長モデルについて展開している。以下では、これら3つの研究に倣い、本研究で採用する動学的構造について示す。

まず、本研究の動学的構造は以下を仮定する。

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。

$$\max_{c(t)} \sum_{t=0}^{\infty} \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t U(c(t)) \quad (19)$$

$$s.t. Y(t) = F(K(t), L(t)) \quad (20)$$

$$c(t) = Y(t) - I(t) \quad (21)$$

$$K(t+1) = K(t)(1-\delta) + I(t) \quad (22)$$

ここで、 $c$ は消費、 $Y$ は所得、 $I$ は投資、 $K$ は資本ストック、 $L$ は効率的労働単位当たりの人口(労働)、 $F(\cdot)$ は生産関数、 $\rho$ は時間選好率、 $\delta$ は資本減耗率をそれぞれ表す。この最適化問題の1階の条件より、

$$P(t) = \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \frac{\partial U(c(t))}{\partial c(t)} \quad (23)$$

$$PK(t) = (1-\delta) \cdot PK(t+1) + P(t) \frac{\partial F(\cdot)}{\partial K(t)} \quad (24)$$

$$P(t) = PK(t+1) \quad (25)$$

ここで、 $P(t)$ 、 $PK(t)$ および $PK(t+1)$ はそれぞれLagrange乗数に対応するが、これらの変数はそれぞれ財価格、現在の資本価格、そして将来の資本価格と解釈することができる。Paltsev (2004)および伴(2007)は、ゼロ利潤条件、需給均衡条件、および所得制約条件を混合相補性問題として表現している。また、動学モデルの解を求める際、伴(2007)は定常成長均衡が存在し、初期時点から定常成長均衡へ収束することが保証される必要があることを述べている。本研究の動学的構造は上述した3つの仮定より、動学的最適化問題の解が存在することを保証している。それゆえ、この解が定常成長均衡上にあれば、任意の時点において以下が成立している。

$$P(t) = PK(t+1) \quad (26)$$

$$(1+r) \cdot P(t) = (1-\delta) \cdot P(t) + RK(t) \quad (27)$$

$$I(t) = (\delta+n)K(t) \quad (28)$$

$$VK(t) = K(t) \cdot RK(t) \quad (29)$$

ここで、 $RK$ は実質資本収益率、 $n$ は労働成長率、 $VK$ は資本所得をそれぞれ表す。また、式(26)から式(29)は初期時点においても成立しているため、初期時点の投資は、

$$I(0) = \frac{(\delta+n) \cdot VK(0)}{(\delta+r)} \quad (30)$$

と表すことができる。研究において初期時点における経済は定常状態にあるため(仮定②)、式(30)で求められる

$I(0)$ の値が社会会計表にある投資額  $I^*$  と一致するかどう  
 うかを確認する必要がある。この確認および調整は、伴  
 (2007)に従い、 $I(0) < I^*$  ならば、上回る投資分を家計消  
 費加え、反対に  $I(0) > I^*$  ならば、下回る投資分を家計  
 消費から減じることによって、それぞれの場合における  
 需給を均衡させている。本研究のモデルでは、資本減耗  
 率  $\delta$  を4%、効率的労働単位の人口成長率  $n$  を0.1%、お  
 して利子率を5%としている。

最終時点  $T$  においては、Lau *et al.* (2002), Paltsev (2004)  
 および伴(2007)に従い、生産の変化率と投資の変化率が  
 等しいという以下の条件を課す。

$$\frac{I(T)}{I(T-1)} = \frac{Y(T)}{Y(T-1)} \quad (31)$$

### (3) 複数の意思決定主体と最終時点の金融資産

Lau *et al.* (2002)および伴(2007)は、動学的多地域モデル  
 のように複数の経済的意思決定主体が存在するとき、そ  
 のモデルの均衡解はNegishi (1960)によるNegishi条件を満  
 たさなければならないことを言及している。例えば、地  
 球温暖化問題のための統合評価モデル(Integrated Assess-  
 ment Model)として知られるNordhaus and Boyer (2000)による  
 RICEモデルは、Negishi条件を用いることによって、多地  
 域動学的最適化問題を解いていることが知られている。  
 一方、Lau *et al.* (2002)は無限期間の多地域動学的最適化問  
 題を解くために、最終時点( $t = T$ )の金融資産を通じて  
 均衡解を導出している。ここでは無限期間を初期時点  
 ( $t = 0$ )からある最終時点( $t = T$ )までの期間と、  
 $t = T + 1$ 時点から  $t = \infty$ までの期間の2つに分割し、  
 最終時点( $t = T$ )の金融資産によって、これら2つの期  
 間をリンクさせている。本研究はLau *et al.* (2002)および伴  
 (2007)に従って、複数の意思決定主体の問題を解決する。

まず、初期時点( $t = 0$ )からある最終時点( $t = T$ )ま  
 での期間における地域  $s$  の家計の最適化問題は、

$$\max_{C^s(t)} \sum_{t=0}^T \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t U(C^s(t)), \quad (32)$$

where  $U(C^s(t)) = \log C^s(t)$

$$s.t. \sum_{t=0}^T P^s(t)C^s(t) = \sum_{t=0}^T w^s(t)L^s(t) + A^s(0) - A^s(T+1) \quad (33)$$

である。ここで  $A^s$  は地域  $s$  の金融資産である。

一方、 $t = T + 1$ 時点から  $t = \infty$ までの期間における  
 最適化問題は、

$$\max_{C^s(t)} \sum_{t=T+1}^{\infty} \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \log C^s(t) \quad (34)$$

$$s.t. \sum_{t=T+1}^{\infty} P^s(t)C^s(t) = \sum_{t=T+1}^{\infty} w^s(t)L^s(t) + A^s(T+1) \quad (35)$$

である。式(35)より、最終時点以降の資産は、

$$\begin{aligned} A^s(T+1) &= \sum_{t=T+1}^{\infty} P^s(t)C^s(t) - \sum_{t=T+1}^{\infty} w^s(t)L^s(t) \\ &= \sum_{t=T+1}^{\infty} \left[ P^s(t)C^s(t) - w^s(t)L^s(t) \right] \left( \frac{1+n}{1+r} \right)^{t-T} \\ &= \left[ P^s(T)C^s(T) - w^s(T)L^s(T) \right] \left( \frac{1+n}{r-n} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

である。このとき、最終時点における各地域の金融資産  
 比率  $\phi^s$  を以下のように表す。

$$\phi^s = \frac{A^s(T+1)}{\sum_r A^r(T+1)} = \frac{\left[ P^s(T)C^s(T) - w^s(T)L^s(T) \right]}{\sum_r \left[ P^r(T)C^r(T) - w^r(T)L^r(T) \right]} \quad (37)$$

また、地域に関して資本ストック額の和と金融資産の和  
 は等しくなることから、

$$\sum_s A^s(T+1) = \sum_s PK^s(T+1) \cdot K^s(T+1) \quad (38)$$

である。そして、式(37)および式(38)より、地域  $s$  の最終  
 時点における金融資産の関係は、以下の式で表すことが  
 できる。

$$A^s(T+1) = \phi^s \sum_r PK^r(T+1) \cdot K^r(T+1) \quad (39)$$

式(39)を用いることによって、複数の意思決定主体の問  
 題における均衡解を得る。

### (4) 水害シナリオ

2. で見たように、本研究は水害被害の変化を資本ス  
 トックの資本減耗率の変化として捉えている。そのため、  
 気候変動に伴う水害シナリオにおいても、気候モデルか  
 ら計算される水害被害率の分だけ民間資本ストックの資  
 本減耗率が増大するものと想定する。ここで将来の気候  
 変動による水害被害率を計算するために、CSIRO,  
 GFDL, MIROC, およびMRIの4つの気候モデルの計算結  
 果、およびMorisugi and Morisugi (2012)の計算結果の合計5  
 つの結果を用いる。これらの気候モデルから計算された  
 将来の気候変動による年あたりの水害被害率(%/年)は、  
 1981年と2081年の水害被害額の差が2000年の民間資本ス  
 トック額に占める割合として表される。ここで、民間資  
 本ストック額は内閣府による平成22年度版都道府県別経  
 済財政モデルを参考にした。なお、各水害シナリオの名  
 前はこれらの気候モデルの名前から取り、Morisugi and  
 Morisugi (2012)による水害シナリオをS8シナリオと呼ぶ。

#### 4. 結果と考察

##### (1) 家計消費の変化

5つの水害シナリオから得られた全国の家計消費の変化を図-6に示す。また、各水害シナリオから得られた直接被害額を表-4に示す。

第一に、図-6は長期帰着ベース被害(移行動学)を意味する。2000年の初期時点において、水害被害額は約230億円/年から約4,400億円/年と推定されたのに対して、2050年における水害被害額は最小値でCSIROシナリオの約400億円/年からS8シナリオの約5,600億円/年と推定された。第二に、長期帰着ベース被害(比較静学)から動学的拡大係数を求めると、Morisugi and Morisugi (2012)は1.357であるのに対して、本研究では1.1から1.7の範囲で推定された。このことは、気候変動により長期的に水害被害が大きくなり、投資収益率が低下することが見込まれると、これに応じて投資および貯蓄が減少し、消費の減少に帰着した結果であると考えられ、その額が直接被害額の1.1倍から1.7倍と解釈できる。また、本研究の乗数はMorisugi and Morisugi (2012)らの推定値に近く、乗数が1を超えることが確認できる。第三に、発生ベースの被害である直接被害額は表-4より約250億円/年から約5,000億円/年と推定された。これら直接被害額は資本ストックを一定とした場合の被害であり、短期の比較静学と同値である。また、発生ベースの直接被害と帰着ベースの水害被害を比較すると、すべてのシナリオにおいて、帰着ベース被害は時間が経つにつれて直接被害額よりも大きくなること分かる。これは、水害統計に代表される発生ベースの直接被害は、気候変動の進展に伴う資産被害額の増分を単純に積算したものであり、水害被害による動学的な波及拡大を加味していないため、過小評価であると考えられる。以上のように、本研究におけるシミュレーション分析の結果は、2. および3. で示された理論分析の結果と整合的であることが示された。

##### (2) 部門別生産量の変化

図-7はS8シナリオにおける2030年および2050年時点での部門別生産量の変化額を示している。図から農業、漁業、食料品、電力、ガス・熱供給、水道・廃棄物処理、第3次産業はどちらの時点においても、水害によって生産量が減少する。一方、第2次産業の多くの産業部門や建築・土木は水害による生産量減少の影響を受けず、特に建築・土木の生産量はどちらの時点においても大きく増加することが分かる。

##### (3) 地域別・部門別生産量の変化

図-8はS8シナリオにおける2050年の地域別・部門別の生産量変化率を示している。ここで赤は正の生産量変化、

表-4 水害による直接被害額

シナリオ名	直接被害額(10億円)
CSIROシナリオ	-24.5
GFDLシナリオ	-172.1
MIROCシナリオ	-105.1
MRIシナリオ	-186.5
S8シナリオ	-500.0

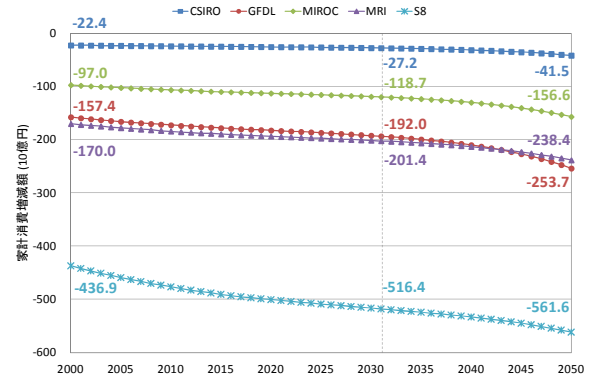


図-6 水害被害による家計消費の変化

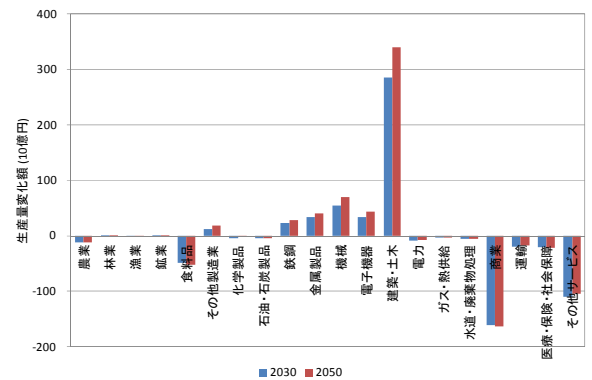


図-7 S8シナリオにおける部門別生産量の変化額

	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州
農業	-0.08	-0.12	-0.11	-0.12	-0.11	-0.12	-0.12	-0.11
林業	0.05	0.10	0.05	0.01	0.10	0.10	0.09	0.07
漁業	-0.10	-0.12	-0.12	-0.13	-0.11	-0.14	-0.11	-0.11
畜産	0.11	0.07	-0.03	-0.03	0.01	0.01	0.08	0.08
食料品	-0.12	-0.14	-0.13	-0.14	-0.13	-0.14	-0.14	-0.13
その他製造業	0.06	0.07	0.02	0.05	0.02	0.05	0.05	0.08
化学製品	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
石油・石炭製品	-0.03	-0.05	-0.05	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02
鉄鋼	0.21	0.22	0.19	0.13	0.18	0.19	0.25	0.21
金属製品	0.22	0.22	0.22	0.18	0.21	0.20	0.21	0.23
機械	0.12	0.15	0.14	0.08	0.18	0.12	0.22	0.13
電子機器	0.10	0.09	0.10	0.07	0.09	0.10	0.14	0.12
建築・土木	0.34	0.41	0.49	0.45	0.43	0.39	0.38	0.40
電力	-0.06	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03
ガス・熱供給	-0.08	-0.08	-0.09	-0.09	-0.08	-0.08	-0.11	-0.08
水道・廃棄物処理	-0.08	-0.06	-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05
運輸	-0.08	-0.09	-0.08	-0.08	-0.07	-0.09	-0.09	-0.08
運輸	-0.05	-0.04	-0.04	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02	-0.02
医療・保険・社会保険	-0.05	-0.05	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05
その他サービス	-0.05	-0.05	-0.04	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06	-0.05

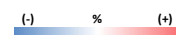


図-8 S8シナリオにおける2050年の地域別・部門別生産量の変化率

一方で青は負の生産量変化を示しており、色が濃くなるほどその変化は大きい。水害被害による影響は、すべての地域において、農業、漁業、食料品といった部門の生



産において大きく、第2次産業の多くの部門は水害被害の影響を受けていないことが分かる。特に、関東、中部、近畿といった大都市圏を含む地域の建築・土木部門の生産量増加が大きいことが分かる。

## 5. おわりに

本研究は、気候変動に伴う水害被害が時間を通じて経済に及ぼす影響を明らかにするために、動学的多地域応用一般均衡モデルを用いて、5つの水害シナリオのシミュレーション分析によって水害被害額の計測を行った。その結果、本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① 長期帰着ベース被害(移行動学)において、2050年の水害被害額は約400億円/年から約5,600億円/年と推定され、また動学的拡大係数は1.1倍から1.7倍と推定された。
- ② 本研究におけるシミュレーション分析の結果は、Morisugi and Morisugi (2012)および本研究で提示された理論分析による水害被害の結果と整合的であることが示された。
- ③ 水害被害は全国的に、農業、漁業、食料品、電力、ガス・熱供給、水道・廃棄物処理、第3次産業の生産量減少に大きく影響を及ぼすことが示された。一方、関東、中部、近畿といった大都市圏を含む地域の建築・土木部門は生産量の増加率が大きいことが示された。

今後の本研究の課題として、47都道府県への地域の細分化、および2100年まで計算期間を延ばすことが挙げられる。47都道府県に地域分割を細分化することによって、水害被害による地域性をより詳細に検討することが可能となる。また、気候変動は長期に渡って、その影響を経済に及ぼすため、より長い計算期間が必要となる。

謝辞：本研究は、環境省地球環境研究総合推進費S-8の助成を得たことに深甚の謝意を表す次第である。また、

大野栄治教授(名城大学都市情報学部)には、貴重なコメントを頂いたことに謝意を表す。なお、本研究における誤りの全ては筆者らに帰すことは言うまでもない。

## 参考文献

- 1) Morisugi, H. and Morisugi, M.: Definition and Measurement of Natural Disaster Damage Cost by Ramsey Growth Model, Proceedings of the 52th European Congress of the Regional Science Association International, Ordinary Session, Vol.52, USB Memory Sticks, 2012.
- 2) 林山泰久・中嶋一憲・坂本直樹・阿部雅浩: 東日本大震災における復興投資の地域間再分配効果の計測, RIETI Discussion Paper Series, 14-J-004, pp.1-42, 2014.
- 3) 宮城俊彦・石川良文・由利昌平・土谷和之: 地域内産業連関表を用いた都道府県間産業連関表の作成, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.1, pp.87-95, 2003.
- 4) 石川良文・宮城俊彦: 全国都道府県間産業連関表による地域間産業連関構造の分析, 地域学研究, Vol.34, No.1, pp.139-152, 2004.
- 5) 石川良文: 地域産業連関分析における地域間交易推計のための Non-Survey 手法の評価, 南山大学研究, Vol.19, No.3, pp.369-382, 2005a.
- 6) 石川良文: 地域環境 SAM の構築と課題, 南山大学研究, Vol.20, No.3, pp.251-262, 2005b.
- 7) 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.
- 8) Lau, M.I., Pahlke, A. and Rutherford, T.F.: Approximating Infinite-Horizon Models in A Complementarity Format: A Primer in Dynamic General Equilibrium Analysis, *Journal of Economic Dynamic & Control* 26, pp.577-609, 2002.
- 9) Paltsev, S.: Moving from Static to Dynamic General Equilibrium Economic Models: Notes for A Beginner in MPSGE, Technical Note 4, Joint Program on the Science and Policy of Global Change MIT, pp.1-47, 2004.
- 10) Negishi, T.: Welfare Economics and Existence of An Equilibrium for A Competitive Economy, *Metroeconomica*, Vol.12, Issue2-3, pp.92-97, 1960.
- 11) Nordhaus, W.D. and Boyer, J.: *Warming the World: Economic Models of Global Warming*, The MIT Press, Cambridge, 2000.

(20XX.MM.DD 受付)

## MEASUREMENT OF FLOOD DAMAGE DUE TO CLIMATE CHANGE BY DYNAMIC MULTI-REGIONAL CGE MODEL

Kazunori NAKAJIMA, Hisa MORISUGI, Masa MORISUGI and Naoki SAKAMOTO

To explain economic impacts of flood damage due to climate change over time in Japan, this study develops a dynamic spatial computable general equilibrium model, and measures flood damage cost through some numerical experiments. This study develops a spatial CGE model based on dynamic structure of the Ramsey model. Our model has 8 regions and 20 production sectors. The flood scenario in this study is described as increase in capital depreciation rate due to flood in simulation periods from 2000 to 2050. To

consider dynamic spillover effects of flood damage, this study proposes two indices as dynamic damage costs that are comparative static and transition dynamics. The findings in this study are shown below. 1) In 2050, the total amount of flood damage cost is estimated to be from about US\$0.4 billion to about US\$5.6 billion. 2) The decrease in the rate of investment return by long-term increase in flood damage causes decreases in savings and consumption, so that the dynamic multiplier is estimated to be from 1.1 to 1.7 times.