複数の将来気候シナリオと社会経済シナリオを入力した統合評価モデルFUNDの水分野影響関数による経済被害推計値の特性分析

井芹慶彦^{1*}, 宮崎千尋², Lu Gao¹, 吉川沙耶花¹, 鼎信次郎¹

¹東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山1-12-1-M1-6)

²東京工業大学 大学院理工学研究科 (〒160-0004 東京都目黒区大岡山1-12-1-M1-6)

* E-mail:iseri.y.aa@m.titech.ac.jp

本研究では、最新の気候シナリオと社会経済シナリオの組み合わせが統合評価モデル影響関数による推計に与える影響を定量的に分析するため、統合評価モデルFUNDに着目し、最新のシナリオフレームワークを用いてFUNDの水分野影響関数による経済影響推計を行った。その結果、本研究で着目した三分野のうちどれも、高排出シナリオ(RCP8.5)では21世紀末にかけて被害が増加し続いていた。21世紀末における三つの社会経済シナリオ(SSPs)間での被害の大きさを全球GDP比で比較すると、水資源及び熱帯低気圧影響は、適応への困難度が大きいSSP3で被害が最も大きく、SSP1とSSP2の被害は同程度であった。一方、海面上昇については、SSP3 > SSP1 > SSP2となっており、排出シナリオ・社会経済シナリオの違いが被害の大きさに与える影響を定量的に示す事ができた。

Key Words : *Representative concentration pathways, Shared socioeconomic pathways, Impact function, Water resource, Tropical storm, Sea level rise*

1. はじめに

気候変動がもたらしうる影響が懸念されており、これまで様々な分野に対して気候変動の影響評価が行われている。気候変動の影響を評価する方法の一つとして、気候変動の経済影響を推計する方法がある。経済影響を推計する利点としては、影響を金銭換算することで多分野間で影響を比較・総計でき、気候変動が各分野にもたらす影響を相対的・総合的に評価することが可能になる、という事等が挙げられる。

地球温暖化の経済影響(金銭換算された影響)を推計できる様々な統合評価モデルがこれまで提案されている。それら統合評価モデルの中でも特に、FUND^{1) 2)}, DICE/RICE³⁾, PAGE⁴⁾の3つのモデルは、気候変動の経済影響評価にしばしば用いられている⁵⁾。しかし、IPCC第5次評価報告書WGIII(Chapter3)で述べられているように、統合評価モデルにおける気候変動の影響関数は信頼性が低い⁶⁾事が指摘されている。影響関数の信頼性を向上させるための取り組みの一つとして、影響関数の入力値と出力値の関係等の特性を十分に把握する事は重要で

ある。複数の統合評価モデルの影響関数を比較した研究としてWarren et al. (2006)⁷⁾がある。Warren et al. (2006)では、IPCC第四次評価報告書で用いられた将来シナリオであるSRESシナリオを、4つの統合評価モデル(RICE, MERGE, PAGE, FUND)の影響関数にそれぞれ入力し、各モデルの影響関数の特性を調べている。一方、SRESシナリオは排出シナリオ(気温シナリオ)と社会経済シナリオが一体となっている。そのため、Warren et al. (2006)では各SRESシナリオが一定の気温に達した時の被害を調べる事で、社会経済シナリオが影響関数の出力に与える影響を見積もっているが、一つの将来気温経路に対して複数の社会経済シナリオを対応させた分析は行われていない。しかし実際には、将来の任意の気温経路に対して複数の異なる社会経済像(社会経済シナリオ)が対応しうる。従って、気候変動の経済影響を評価する際には、任意の気温経路に対して異なった社会経済シナリオを対応させた分析を行う事も重要である。このような分析を行う事で、同様の気温上昇であっても将来の社会像によって被害がどのように異なりうるかを詳細に分析する事ができる。

そこで本研究は、複数の気温経路（排出シナリオ）と社会経済シナリオをそれぞれ独立に組み合わせて影響関数に入力し、それらシナリオの組み合わせが対象分野の推計値に与える影響を定量的に分析する事を目的とする。また、本研究での分析により、最新の排出シナリオ及び社会経済シナリオのフレームワークの下でのFUND影響関数の入力・出力の応答特性を把握できると共に、最新のシナリオを用いた場合の各分野の推計値の不確実性幅を見積もる事もできる。

排出シナリオと社会経済シナリオとしては、Climate Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) で用いられている最新の排出シナリオであるRepresentative Concentration Pathways (RCPs) ⁸⁾ と、社会経済シナリオであるShared Socio-economic Pathways (SSPs) ⁹⁾ を用いる。RCPsとSSPsは、それぞれ独立した排出シナリオ及び社会経済シナリオであるため、これらのシナリオを影響関数への入力に用いた場合、様々な気温経路（排出シナリオ）と社会経済シナリオの組み合わせが影響関数の出力に与える影響を分析できる。また、統合評価モデルの中でも分野別の影響関数が最も充実しているThe Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND)の影響関数を本研究では用いる。更に、気候変動影響の水分野への影響は強く懸念されているため、FUND影響関数の内、水資源、熱帯低気圧、海面上昇の三分野を対象として分析を行う。

本論文の構成は以下である。2章では、本研究で解析対象とした三分野の影響関数を示すと共に、本研究で用いた全球平均気温データ及び社会経済データについて述べた。3章では、最新の気候シナリオ及び社会経済シナリオをFUND影響関数に入力し、その推計値の不確実性幅や入力値と出力値の関係性について考察した。第4章はまとめとした。

2. FUND影響関数と入力シナリオ

(1) FUND

気候変動影響評価のための統合評価モデルの一つである FUND は、ToI によってモデルが提案されて以降、改良が重ねられており、FUND 3.8n には、農業、森林、水資源、エネルギー需要、海面上昇、生態系、健康、極端気象（熱帯低気圧及び温帯低気圧）の各分野の影響関数が組み込まれている。本研究では、これら影響分野の内、水に関わる三分野（水資源、熱帯低気圧、海面上昇）に着目する。

FUND にはモデル解説サイト（<http://www.fund-model.org/versions>）があり、このサイトから FUND の各バージョンの説明資料と、モデルのパラメータ値の表の PDF 資料をダウンロードできる。また、同サイトから

FUND のソースコードもダウンロードできる。FUND3.8n では世界が 16 地域に分けられており、その地域毎に被害が計算される。16 の各地域に属する国名は、FUND3.8n のモデル解説書 Table R (p.2) を参照した。

(2) FUNDの三分野の影響関数

ここでは、FUNDの水資源、熱帯低気圧、海面上昇の3つの影響関数について説明する。

a) 水資源影響関数

FUND3.8nの水資源影響は下記の式で推計される。

$$W_{t,r} = \min \left\{ \alpha_r Y_{1990,r} (1-\tau)^{t-2000} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\beta \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right)^\eta \left(\frac{T_t}{1.0} \right)^\gamma, \frac{Y_{t,r}}{10} \right\} \quad (1)$$

$W_{t,r}$ = 水資源影響 [1995US\$], t : 年, r : 地域, $Y_{t,r}$: t 年における地域 r の収入[1995US\$], $P_{t,r}$: t 年における地域 r の人口[人], $y_{t,r}$: t 年における地域 r の一人当たり収入[1995US\$/capita], T_t : t 年における産業革命前からの全球平均気温上昇量[°C], α_r : 地域 r の基準ダメージ[°C], β : 0.85, η : 0.85, γ : 1, τ : 0.005 (水技術進歩のパラメータ)。min { , } は括弧内の二式の内、値が小さい方を用いる事を指す。

(1)式の各項を、第1項: $(1-\tau)^{t-2000}$, 第2項: $(y_{t,r}/y_{1990,r})^\beta$, 第3項: $(P_{t,r}/P_{1990,r})^\eta$, 第4項: $(T_t/1.0)^\gamma$ に分けると、各項は順に、水技術の発展による水資源被害の減少、一人当たり収入の変化の水資源被害への影響、人口増加による水資源被害の増加、気温上昇に伴う水資源被害の増加とそれぞれ関係している。また、係数 α_r 、収入および一人当たり収入、人口はFUNDの16地域別に与えられている。

b) 熱帯低気圧影響関数

FUND3.8nの熱帯低気圧影響は、Narita et al. (2009) ¹⁰⁾ で提案された式に基づく下記の式を用いて推計される。

$$TD_{t,r} = \alpha_r Y_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varepsilon \left[(1 + \delta T_{t,r})^\gamma - 1 \right] \quad (2)$$

$TD_{t,r}$: 熱帯低気圧影響[1995US\$], t : 年, r : 地域, $Y_{t,r}$: t 年における地域 r の収入, $y_{t,r}$: t 年における地域 r の一人当たり収入[1995US\$/capita], $\delta T_{t,r}$: t 年における産業革命前からの地域 r の気温上昇量, ε : -0.514, δ : 0.04, γ : 3, α_r : 地域 r の基準ダメージ[°C]。

(3)式において、係数 α_r 、収入、一人当たり収入、平均気温上昇量、はそれぞれ16地域別に与えられている。また、(3)式を第1項: $Y_{t,r}$, 第2項: $(y_{t,r}/y_{1990,r})^\varepsilon$, 第3項: $[(1+\delta T_{t,r})^\gamma - 1]$ に分けると、第1項は収入の増加による資産価値の増大を表している。第2項は、一人当たりGDPが高くなると、資産が損害を受けた場合の被害額が上がる一方で、災害対策への投資や災害に強い基盤設備によって、

表－1 60通りの入力シナリオの作成に用いた
GCM, RCP, SSP

GCM	GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M,
RCP	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.0
SSP	SSP1, SSP2, SSP3

災害の被害が減少する効果を表している。また、第3項は、全球昇温量地域係数を掛けて1を加えた値の3乗に応じて、熱帯低気圧の強度（風速）が増大するという形をしており、気温（海水温）上昇によって被害が大きくなる効果を表している。

c) 海面上昇影響関数

海面上昇影響を推計する際には、防護コスト、湿地損失コスト、乾燥地損失コストからなる以下の費用便益式から、その年 t の海面上昇量に応じた対象地域 r の護岸の割合 $P_{t,r}$ が求められる。

$$P_{t,r} = \max \left\{ 0, 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{NPVVP_{t,r} + NPVW_{t,r}}{NPVVD_{t,r}} \right) \right\} \quad (3)$$

$NPVVP_{t,r}$: その年の海面上昇分を全て防護した場合の防護コストの割引現在価値, $NPVW_{t,r}$: その年の海面上昇分を全て防護した場合に失われる湿地コストの割引現在価値, $NPVVD_{t,r}$: 海面上昇に対して全く防護しない場合に失われる乾燥地コストの割引現在価値。

また、年 t における地域 r の乾燥地価値 $VD_{t,r}$ および湿地価値 $VW_{t,r}$ は、それぞれ以下の式で定められる。

$$VD_{t,r} = \varphi \left(\frac{Y_{t,r} / A_{t,r}}{YA_0} \right)^\varepsilon \quad (4)$$

φ : パラメータ (=4) [million US\$/km²], $Y_{t,r}$: 年 t における地域 r の収入, $A_{t,r}$: 年 t における地域 r の面積[km²], YA_0 : 基準化定数(=0635) [million US\$/km²], $\varepsilon=1$

$$VW_{t,r} = \alpha \left(\frac{y_{t,r}}{y_0} \right)^\beta \left(\frac{d_{t,r}}{d_0} \right)^\gamma \left(\frac{W_{1990,r} - W_{t,r}^c}{W_{1990,r}} \right)^\delta \quad (5)$$

α : 湿地サービスの純現在価値 (5,880,000\$/km²), $y_{t,r}$: 一人当たり収入 [US\$/capita], y_0 : 基準化定数(25,000\$/cap-yr), $d_{t,r}$: 年 t における地域 r の人口密度, d_0 : 基準化定数(27.59), $W_{1990,r}$: 1990年における湿地面積, $W_{t,r}^c$: 年 t における地域 r の湿地の累積損失面積, β : 1.16, γ : 0.47, δ : -0.11.

式(3)で定まる護岸割合を基に、その年の防護コスト、湿地損失コスト、乾燥地損失コスト、移住コスト、(移住)受入コストが求められる。本稿では、上記5つのコストの合計を対象年における海面上昇影響とする。

図－1 SSP1, SSP2, SSP3における 2010 年～2099 年の
全球人口[人]と全球 GDP [2005US\$PPP]
(上図), 全球一人当たり GDP
[2005US\$PPP/capita] (下図)

(3) 影響関数の入力シナリオ

ここでは、三分野の影響関数への入力シナリオについて述べる。2(2)に示した各影響関数の入力変数は、全球（または地域的）平均気温上昇量、人口、収入から作成される。全球（または地域的）気温上昇量には 4 つの RCP と 5 つの GCM から成る 20 通りシナリオを用い、人口および収入のシナリオとしては 3 つの SSP を用いた（表－1）。即ち本研究では、5GCM×4RCPs×3SSPs=60 通りのシナリオ（以降、単に 60 シナリオと呼ぶ）を、3 つの各分野の影響関数にそれぞれ入力する。

20 通りの全球平均気温上昇量は、国立環境研究所から提供された、表－1 に示した 5 つの GCM における 4 つの RCP 毎の全球平均気温から求めた。これら 5 つの GCM は、影響評価モデルの国際的な比較プロジェクトである The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP) で用いられた GCM と同じものである。なお、FUND の各 16 地域別の平均気温上昇量は、FUND に与えられている各 16 地域毎の平均気温上昇量を計算するための変換係数 (FUND3.8n のモデルマニュアルの Table RT を参照) を、全球平均気温上昇量にかけて求めた。平均気温上昇量は産業革命前からの昇温量である。なお、

図－2 2010年～2099年における（左列）水資源，（中列）海面上昇，（右列）熱帯低気圧の被害．上段はRCP2.6，下段はRCP8.5での推計結果を表す．各図中には5GCM x 3SSP=15本の折れ線を示している．被害額は，その年における全球GDPに対する割合（％）で表示している．

FUNDの地域別平均気温上昇量を求めるための地域係数は，近年のGCMを用いて定められているわけではなく，この地域係数の妥当性の検討は今後の課題である．

将来の社会経済シナリオとしては，SSP1, SSP2, SSP3の人口およびGDPを用いる．SSPsでは，社会経済シナリオが国毎のデータとして与えられているため，国別データをFUNDの16地域毎に集計し，それを三分野のFUND影響関数の各入力データとして用いた．また，SSPsの社会経済データは5年毎の値で与えられているため，それら5年毎の値を線形内挿する事で，2010年から2099年までの年毎の社会経済データをまず作成した．

図－1には，2010年から2099年における全球人口及び全球GDPを，3つのSSPシナリオ毎に示す．図－1の上図より2099年時には，全球人口はSSP3>SSP2>SSP1であり，全球GDPはSSP1とSSP2が同程度，SSP3が他2つのシナリオと比べて低い値となっている．即ち，一人当たりGDPで見ると，SSP1>SSP2>SSP3となっている．

また，1990年～2009年における16地域の社会経済データ（人口・GDP）は，世界銀行が提供する国毎の社会経済データを基に作成した．なお，2010年における全球の人口・GDPを，SSPsと世界銀行のデータとで比較すると一致しなかった．そのため，まず1990年から2010年における世界銀行データから，FUNDの16地域毎の人口およびGDPの年成長率を計算した．そして，2010年におけるSSPsの人口およびGDPデータに対してそれら成長率を遡って適用する事で，世界銀行データとSSPsを接続し，1990年から2099年までの連続した年毎の社会経済データ

を作成した．即ち本研究の計算では，1990年～2009年が過去期間に相当し，2010年～2099年がSSPsによる将来期間に相当する．

なお，2(2)に示したFUNDの影響関数式は1995年基準US\$で与えられているが，作成したシナリオの金銭単位はSSPsと同様に2005年US\$PPPである．そこで本研究では，Tol (2006)¹¹⁾で与えられている以下の関係式を用いて，社会経済シナリオの金銭単位をPPPから1995年基準US\$へと変換した．

$$\ln y = -0.28 \ln x + 2.8154 \quad (6)$$

x, y は，1995年MER (Market Exchange Rate)での一人当たり収入，PPP (Purchasing Power Parity)での一人当たり収入とMERでの一人当たり収入との比をそれぞれ表す．

3. 60シナリオでの三分野の影響推計

(1) 2010年～2099年における全球被害推計値の比較

60シナリオ（5GCM×4RCPs×3SSPs）を，水資源，熱帯低気圧，海面上昇の計三つの影響関数にそれぞれ入力し，2010年～2099年における各分野の全球被害の推計値を求めた．RCP2.6, RCP8.5での計算結果を図－2に示す．なお，FUNDの16地域別に推計された値を合計して全球被害を求める際には，地域的な重み付け（公平性の重み付け等）は行っていない．また，図－2中で被害の大きさは，その年の全球GDPに対する被害の割合（％）で表示している．図－2よりRCP2.6では，三分野とも2099年まで被

害はほぼ横ばいとなっている。一方RCP8.5では、どの三分野においても2099年にかけて被害が増加している。RCP8.5での2099年時における三分野の被害を比較すると、水資源が最も被害が大きく、全球GDPの0.2~0.6%となっている。また、2099年時における熱帯低気圧影響は約0.01~0.02%、海面上昇影響は全球GDPの約0.02~0.04%となっている。なお三分野とも、RCP4.5、RCP6.0における被害は、RCP2.6とRCP8.5の間であった。

本研究においてRCPとSSPの組み合わせで得られた推計値と、既往研究でFUND影響関数を用いた推計値との関係を調べるため、FUND影響関数で該当分野の影響推計を行っている既往文献と本研究の結果を比較する。FUND影響関数を用いた既往文献では、水資源影響は全球GDPの0.6%程度（Tol（2002）による2100年頃の値）、0.3%程度（Warren et al.（2006）による2℃前後上昇時の値）、0.2%程度（Tol（2013）^{12）による2100年頃の値）となっており、本研究の推計値の範囲内にほぼ収まっている。}

一方、熱帯低気圧影響は、Narita et al.（2009）によるEMF14標準化シナリオを用いた2100年の推計値は全球GDPの約0.006%であり、本研究ではRCP4.5またはRCP6.0を用いた場合の推計値に大よそ相当する値となっている。

また、海面上昇影響については、Warren et al.（2006）でSRESシナリオを用いた場合の2℃上昇時の推計値は全球GDPの0.01%程度であり、本研究でRCP2.6を用いた場合の2099年頃の値に近い値となっている。以上のように、過去の研究で様々なシナリオを用いて推計された被害額は、本研究でRCPとSSPのフレームワークで推計された被害額の範囲でほぼ網羅されうる事が分かった。

次に、FUND影響関数による将来予測値の信頼性を検討するため、本研究による推計値を、FUND影響関数を使わずに各分野の影響推計を行った研究と比較する。Mendelsohn et al.（2012）^{13）}では、気候変動下での2100年における熱帯低気圧被害はGWP（Gross World Product）の約0.02%と予測されており、本研究におけるRCP8.5とSSP3での推計値は、Mendelsohn et al.（2012）^{13）}よりやや値が小さいもののオーダーは同程度の推計結果となっている。一方、Hinkel et al.（2014）^{14）}では、海面上昇を考慮した沿岸洪水被害の推計を行い、適応を考慮しない場合の沿岸洪水被害は、RCP8.5で全球GDPの1.2~9.3%に達し、適応を考慮した場合はそれより二、三桁小さい値になると述べている。これより、適応を考慮した場合のHinkel et al.（2014）における沿岸洪水被害推計値は、FUND影響関数による海面上昇被害とオーダーとしては大よそ同程度であると考えられる。従って、ここで比較を行った熱帯低気圧および沿岸部影響に関しては、数値モデル等を用いて被害推計を行った場合と比べて、FUND影響関数は全く桁数が異なるような推計を行っている訳ではない事が確認された。

図一3 2099年における5GCM x 4RCP x 3SSPでの三分野の全球被害推計値の箱ひげ図。上下の髭は5GCMと4RCPの最大および最小値を表す。箱の上下は第3四分位数および第1四分位数、箱内の横線は中央値を表す。

次に、2099年における4つのRCPと3つのSSPでの全球被害推計値の相違を、全球GDPに対する各被害値の比率で調べた（図一3）。RCP2.6とRCP8.5での被害を比べると、RCP8.5はRCP2.6の大よそ3~5倍程度の被害となっている。RCP2.6とRCP8.5でGCMの違いによる不確実性幅に着目すると、RCP8.5は箱ヒゲ図の幅がRCP2.6より大きく、より高排出のシナリオである程、GCMによる不確実性幅が大きい事が分かる。

また、RCPを固定（例えばRCP8.5）してSSP1、SSP2、SSP3の被害を比べると、水資源と熱帯低気圧被害はSSP3が最も被害が大きくSSP1とSSP2は同程度の被害となっており、海面上昇被害はSSP3>SSP1>SSP2となっている。

ここで、上記各分野におけるSSP間の被害の大小関係を定める要因を、各影響関数の式形と共に定性的に推察する。まず、2(3)で議論したように21世紀末における全球GDPの値はSSP1≈SSP2>SSP3、全球人口はSSP3>SSP2>SSP1、全球一人当たりGDPは、

図-4 RCP8.5での2099年における5GCM x 3SSPでの三分野の地域別影響推計値の箱ひげ図。縦軸は、全球被害に対する各地域の被害の比(%)を表す。上下の髭は5GCMと3SSPの最大および最小値を表す。箱の上下、箱内の横線の意味は図-3に同じ。

SSP1>SSP2>SSP3である。

水資源分野にまず着目すると、式(1)より被害は、GDP、一人当たりGDP、人口に関する項に比例する式形をしているが、式変形すると(気温上昇の項を除くと)GDPに関する項のみに比例する形になりうる。GDPはSSP1、SSP2は同程度でSSP3の値が小さいが、水資源被害はGDPの変化に対して弾力性係数0.85で応答するため、GDPの増加率が大きいほど、対GDP比で見た場合の被害は小さくなる。そのため、GDPの増加率が最も小さいSSP3が最も大きな被害を示す結果となったと考えられる。

次に、熱帯低気圧影響についてSSP間の被害の差異の原因を考察する。式(2)より、熱帯低気圧被害の大きさはGDPに比例し、一人当たりGDPに応じて減少する式形である。SSP1とSSP2を比較すると、両シナリオのGDPは同程度な一方で、一人当たりGDPはSSP1>SSP2であるため、SSP1はSSP2と比べて被害の減少率が高い。その結果、被害はSSP2がSSP1より僅かに大きくなったと考えられる。また、SSP1、SSP2と比べてSSP3は、一人当たりGDPが小さいため、被害の減少率はSSP1、SSP2より小

図-5 2099年における、RCP8.5 & SSP3におけるGDP被害。GDP被害は全球GDPに対する割合[%]で表示。図は順に(上)水資源被害、(中)海面上昇被害(下)熱帯低気圧被害

さい。そのため、SSP3のGDPはSSP1、SSP2より小さいにも関わらず、全球GDP比で見ると、他シナリオと比べてSSP3が最も大きな被害を示したと考えられる。

海面上昇影響についてSSP間の被害の差異の原因を考察する。海面上昇被害の推定に使われる乾燥地損失コストを計算する際には、乾燥地の価値が計算に利用されるが、乾燥地の価値は、式(4)よりGDPに比例する。また、湿地損失コスト算定の際に使われる湿地の価値は、式(5)より一人当たりGDPと人口密度に比例する。また、一人当たり収入の湿地価値への弾力性は1.16と設定されており、一人当たりGDPが大きくなる程、湿地が損失した場合の経済損失は増加する。これらのことから、GDPと一人当たりGDPの値が大きい事が原因で、SSP1は大きな経済被害を示す事が推察される。一方、GDPと一人当たりGDPが3つのシナリオの中で最も小さいSSP3は、海面上昇被害の絶対値は小さくなるが、全球GDPも小さい為に全球GDP比で見ると最も大きな被害を示したと考えられる。

次節では、全球被害を16地域別に分解する事で、上記

図-6 RCP8.5 と SSP1, SSP3 での 1990 年～2099 年における FSU の水資源影響関数の各項の経年変化。右の縦軸は、その年の全球 GDP に対する FSU の水資源被害の比 (%) を表す。

の定性的な議論を可能な限り定量的に調べると共に、各 SSP のストーリーラインと被害の大小関係についても考察する。

(2) 社会経済シナリオ間の被害の相違と地域別被害

3(1)で示されたSSP間の被害の相違の原因を定量的に調べるため、全球被害を構成する16の各地域の被害が、全球被害に占める割合をまず調べた。最も被害の大きいRCP8.5における2099年を対象として、各地域別に5GCM×3SSPからなる箱ヒゲ図を三分野別に作成した結果を、図-4に示す。また、図-5には、2099年における、RCP8.5 & SSP3でのGDP被害を示す。図-4より、FSU（旧ソビエト地域）の被害の大きさは、全球水資源被害の50～70%に達する事が分かる。熱帯低気圧被害については、USAが全球被害の55%～70%強、次いでCHI（中国・香港・北朝鮮・マカオ・モンゴル）が10～15%前後を占めている。海面上昇被害については、SEA（東南アジア地域）が全球被害の20%前後、USAが15～20%弱位を占めている。一方、図-4と図-5を見ると、どの三分野についても、NAF（北アフリカ）やSIS（小島嶼国）といったGDPが低い国からなる地域は、該当する地域の被害が全球GDPに占める割合が非常に小さい事が分かる。従って、経済的な指標を用いて全球規模でリスクを分析する際には、大きな絶対値の被害が推計された地域・国に着目することは重要な一方で、GDPが低い国や人口が少ない国におけるリスクを過小評価しないように、その国のGDPに対する被害額の比で分析したり、公平性の重みづけを行って全球合計の被害値を推計したりする事も重要である。

次に、図-3に示した各SSP間の被害の大小関係を定める要因を、影響関数の式形と入力シナリオとの関係も考慮して詳しく分析するため、水資源、熱帯低気圧、海面上昇被害について、被害に占める割合が最も大きい国

図-7 RCP8.5 と SSP1, SSP3 での 1990 年～2099 年における熱帯低気圧影響関数の各項の経年変化。上図は USA、下図は CHI を表す。軸の意味は図-6 に同じ。

に着目し、関数内の各項の変化と被害の将来変化の関係をそれぞれ調べた。

まず、2099年における水資源分野の被害に占める割合が最も大きい（約60%）FSUに着目する。水資源影響関数のFSUにおける地域係数 α は-0.02754であり、地域係数がその次に大きいNAF（ $\alpha=-0.00902$ ）の約3倍となっている。次に、異なる社会経済発展の道筋が水資源関数の推計値に与える影響を調べるため、(1)式を値が経年変化する以下の4つの項に分け、それら各項の長期変化をFSUについて調べた（図-6）。4つの各項は、第1項（黒直線）： $(1-\tau)^{t/2000}$ 、第2項（直線に丸印）： $(y_{rt}/y_{r,1990})^\beta$ 、第3項（直線に×印）： $(P_{rt}/P_{r,1990})^\eta$ 、第4項（黒破線）： $(T_t/1.0)^\gamma$ である。図-6より、SSP1とSSP3を比べると、一人当たりGDPの増加率はSSP1>SSP3である。収入の水資源被害への弾力性は0.85 (<1)であるため、被害をGDPに対する比率で見た場合は、収入の増加は被害を減少させる。一方、人口の増加率は、SSP3は1より大きく、SSP1は1以下である。これらの傾向は以下を意味する。経済発展が盛んなSSP1では、収入の増加率が高いために水資源分野の被害が減少する方向に進むと共に、人口増加が抑えられているので、人口増加に伴う水資源被害の増加率も小さい。一方、SSP3は収入の増加率が小さい為に水資源被害の減少率が小さい事に加えて、

人口増加に伴う水資源被害の増加率が大きい。その結果、適応の困難度が大きく脆弱性も高いシナリオであるSSP3が最も大きな被害を示している。

次に、2099年における全球熱帯低気圧被害に占める割合が1位（55%～70%強）であるUSAと、2位（10～15%前後）であるCHIについて、影響関数の各項の変化を1990年～2099年について示す（図-7の上図（USA）と下図（CHI））。図-7には、式(2)に示される熱帯低気圧影響関数を、第1項（直線に丸）： Y_{it} 、第2項（直線に×）： $(y_{it}/y_{1990t})^{\epsilon}$ 、第3項（黒破線）： $[(1+\delta T_{it})^{-1}I]$ に分解した各項の変化をプロットしている。各項は順に、GDP、一人当たりGDP、気温上昇量に関係している。まずUSAに着目すると、SSP1は収入が高いため資産価値も大きくなっているが、一人当たり収入の増加により脆弱性が減少している。SSP3は、一人当たり収入がSSP1よりやや小さいため脆弱性の減少率もSSP1よりやや小さいが、収入も低いため資産価値が低くなり、結果としてUSAではSSP1とSSP3とで被害はほぼ同じとなっている。次に、CHIに着目すると、CHIはSSP1、SSP3共にGDPの将来増加率が高く、双方とも資産価値の将来増加率が高い。一方、一人当たりGDPで表される脆弱性に着目すると、SSP1はSSP3と比べて一人当たりGDPの増加率が高いため、脆弱性の減少率が大きい（SSP3より適応が進む）。その結果、SSP3はSSP1と比べて熱帯低気圧被害が大きい推計結果となっている。即ち、SSP3は熱帯低気圧に曝される資産価値は他シナリオと比べて低いものの、適応があまり進まないために、熱帯低気圧被害がSSP1と比べて一般的に大きくなる、という結果となっている。

また、海面上昇影響について、地域別の被害が1位と2位である東南アジア、USAにおける1990年～2099年の5つの各コストの変化を調べた所、2099年時には湿地損失コストが海面上昇影響の大部分を占めていた。

FUNDの海面上昇影響関数は、一人当たり収入の高いシナリオで湿地の価値が高くなる式形となっている。そのため、一人当たりGDPの増加率が高いSSP1では、湿地の価値が高まる事で湿地損失コストの絶対値が特に上昇していたが、SSP3は全球GDPが小さい為に、全球GDP比で見るとSSP3が最も海面上昇影響が大きくなっていた。また、防護コストの絶対値を調べるとSSP1、SSP2、SSP3でほぼ同程度であった事から、どのSSPシナリオでも海岸防護の割合は同程度であると考えられる。その一方で、適応の困難度が最も高いSSP3は、他のシナリオと同程度の規模で海岸防護を行うものの、全球GDPが小さい為に海岸防護コストに対する社会的な負担が最も大きなシナリオとなっていた。

5. まとめ

本研究では、最新の気候シナリオと社会経済シナリオの組み合わせの下で統合評価モデルの影響関数を用いた気候変動影響推計を行った場合の不確実性幅を見積もるため、FUNDの水分野影響関数による経済影響推計を行い、その結果を分析した。その結果、本研究の対象としたどの分野においても、社会経済シナリオによらずRCP2.6では被害がほぼ横ばいである一方、RCP8.5では21世紀末にかけて被害が増加し続けていた。

また、21世紀末における被害の大きさを三つの社会経済シナリオ間で比較すると、SSP1、SSP2はGDPの上昇量が同程度である事から、将来の水資源分野被害はSSP1、SSP2で同程度となっていた。一方SSP3は、一人当たりGDPの増大量が小さいため他のシナリオと比べて水資源分野の脆弱性の減少量が小さく、更に人口増加に伴う水資源被害の増加が最も大きくなっていた。その結果として、SSP3が最も大きな水資源分野影響を示していた。

熱帯低気圧影響については、SSP1とSSP2とで、熱帯低気圧被害に曝される将来の資産価値は同程度である一方、一人当たりGDPが大きいSSP1ではより適応が進み、SSP2より僅かに被害が小さくなっていた。SSP3はGDPの増加量が小さいため資産価値も最も小さいシナリオではあるが、一人当たりGDPも小さいため適応もあまり進まない。その結果、SSP3で熱帯低気圧影響が最も大きいという推計結果となっていた。

海面上昇被害については、湿地損失コストの絶対値はSSP1が高い値を示していたが、全球GDP比で評価した被害の大きさはSSP3>SSP1>SSP2となっており、海岸防護コストの社会的負担はSSP3が最も大きかった。SSP3は適応や緩和があまり進まない社会像が想定されているため、水資源、熱帯低気圧、海面上昇の各被害がSSP3の場合に最も大きいという上記の結果は、SSP3のストーリーラインとも整合していると言える。

謝辞：国立環境研究所の高橋潔博士からは本研究で用いた全球平均気温をご提供頂き、藤森真一郎博士には有益なご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。本研究は環境省の環境研究総合推進費（S-10）の援助を受けました。

参考文献

- 1). Tol, R. S. J. : Estimates of the damage costs of climate change Part I: Benchmark Estimates, , *Environmental and Resource Economics*, Vol.21, pp. 47-73, 2002a.
- 2). Tol, R. S. J. : Estimates of the damage costs of climate change Part II: Dynamic Estimates, , *Environmental and Resource Economics*, Vol. 21, pp. 135-160, 2002b.

- 3). Nordhaus, W.D. and Boyer, M. : Warming the World: Economic models of global warming, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2000.
- 4). Hope, C. : The marginal impact of CO₂ from PAGE2002: An integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern, *The integrated Assessment Journal*, Vol. 6 (1), pp. 19-56, 2006.
- 5). Watkiss P. : Aggregate economic measures of climate change damages: explaining the differences and implications, *WIREs Climate Change*, Vol. 2, pp. 356-372, 2011.
- 6). IPCC : Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, Chapter 3, p.212, NY, USA, 2014.
- 7). Warren, R. et al. : Spotting impacts functions in integrated assessment, *Tyndall Centre for Climate Change Research*, Working Paper 91, 2006.
- 8). Van vuuren D.P. et al. : The representative concentration pathways: an overview, *Climate Change*, Vol 109 (1), pp. 5-31, 2011
- 9). Van vuuren, D.P. et al. : A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture, *Climatic Change*, Vol. 122, pp. 373-386, 2014.
- 10). Narita, D., Tol, R. S. J. and Anthoff, D. : Damage costs of climate change through intensification of tropical cyclone activities: an application of FUND, *Climate Research*, Vol. 39, pp. 87-97, 2009.
- 11). Tol, R.S.J. : Exchange rates and climate change: An application of Fund, *Climate Change*, Vol. 75 (1), pp. 59-80, 2006.
- 12). Tol, R.S. J. : The economic impact of climate change in 20th and 21st centuries, *Climate Change*, Vol. 117, pp. 795-808, 2013.
- 13). Mendelsohn R., Emanuel, K., Chonabayashi, S. and Bakkensen, L. : The impact of climate change on global tropical cyclone damage. *Nature climate change*, Vol. 2, pp. 205-209, 2012.
- 14). Hinkel J. et al. : Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise, *PNAS*, Vol. 111, No. 9, pp.3292-3297, 2014.

(2016. 4. 7受付)

Analysis of economic impacts projected by FUND's impact functions for water sectors using multiple climate scenarios and socio-economic scenarios

Yoshihiko ISERI¹, Chihiro MIYAZAKI¹, Lu GAO¹, Sayaka YOSHIKAWA¹, Shinjiro KANAE¹

¹ School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

² Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

This study employs the updated climate scenarios and socio-economic scenarios in order to evaluate uncertainties and characteristics of projected economic impacts using impact functions of FUND model, which is an integrated assessment model having detailed sector-specific impact functions. We, in particular, focused on impact functions for water sectors: water resources, tropical storm, and sea level rise. The result suggested damages in three sectors would keep increasing under Representative Concentration Pathway 8.5 scenario, regardless of socio-economic scenarios. In addition, comparisons of damages among three socio-economic scenarios (i.e. Shared Socio-economic Pathways (SSPs) 1-3) revealed damages in water sector and tropical storm follow SSP3 > SSP1 ≈ SSP2, while damages in sea level rise follows SSP3 > SSP1 > SSP2.