

3. アジア地域を対象とした温暖化適応評価のためのモデル開発 ー中国の洪水被害についてのケーススタディー

Adaptation to climate change impact on economy -A case study on flood damage in China-

高橋 潔*

游 松財**

松岡 譲***

Kiyoshi TAKAHASHI, Songcai YOU, Yuzuru MATSUOKA

ABSTRACT; The objective of this research is to evaluate investment as a robust adaptation strategy in response to projected climate change in China. Four scenarios combining climate change and investment have been simulated in the model which is established adopting the standard approach of modern optimal economic growth theory and includes two discount factors from the climate sector, i.e., flood damage from climate variability and climate change. Relationships between flood sectors are established from historical data and applied to estimate the benefit of investment to mitigate flood damage from climate variability. By assuming that the marginal adaptation costs to flood damage from projected climate change is the same as those from current climate variability, these relationships are also applied to estimate the benefit of investment in mitigating flood damage from climate change. The conclusion is that optimized investment, taking into climate change consideration will effectively reduce the damage from climate change and promote the capacity to mitigate flood damage from climate variability and that consumption and production increase no matter whether climate change occurs or not.

KEYWORDS; Climate change impact · Adaptation · Flood · Economy · Investment

1. はじめに

地球温暖化による水文・水資源の変化は、経済活動、社会、環境に大きな影響を及ぼす。これまでに多くの研究が行われてきたが、その大半は水収支の変化、特に流量変化に注目したものである。水質や水資源システムへの影響を取り扱った研究は少なく、気候変化への適応を明示的に勘案した研究はさらに少ない。また温暖化とともに激しい降雨の頻度が増加するという報告があり(McGuffie ら, 1999)、洪水リスクの変化は気候変化影響の代表的なものの一つであるが、比較的少数の研究しか行われてきていない。地域的な流域を対象として洪水の頻度の変化について定量的に評価する試みがこれまで行われてきた。一般的な結論としては、その将来見通しには不確実な点が多いものの、推計に利用する気候モデルや地域によっては気候変化により洪水の頻度・強度が増加する場合もあるというものである。

気候変化への適応とは、気候に対するシステムの脆弱性を減少させるための努力である。気候変化影響に対する適応は重要かつ効率的な政策となりうるが、適応政策の効率については詳細な行動計画を提示できる程度までには分析されてきておらず、分野別に潜在的に選択可能な適応策がリストアップされるにとどまっている。これは主として気候変化影響と適応研究の次のような性質によるものである。(a) 気候変化の生起・程度はいまだ不確かであり、もしそれが起きたとしても当面はさほど深刻な影響が現れないと考えられているため、(b) 適応のメカニズムは複雑で評価が困難であるため。これらの難点に

* 国立環境研究所社会環境システム研究領域 National Institute for Environmental Studies

** 東京工業大学社会理工学研究科社会工学専攻 Tokyo Institute of Technology

*** 京都大学大学院工学研究科 Kyoto University

もかわらず、各国は気候変化の悪影響を軽減するために 21 世紀前半に何ができ、何をすべきかを積極的に模索しなければならない。なぜなら、資本蓄積や新技術導入には時間がかかるためである。また、社会資本への投資は将来の気候変化影響に対する適応容量を増すだけでなく、現状社会においても時折甚大な被害を及ぼす災害を軽減する効果を持つ。

中国において洪水は主たる自然災害の一つであり、湿潤なモンスーン気候である華南においてのみならず、華中・華北の乾燥した地域においても発生している。治水社会資本の不足がその主たる原因であり、多くの河川において安全基準が満たされていない。さらに将来の気候変化により洪水の頻度・強度ともに増した場合、現状における気候の変動性に適応するために建設された治水社会資本では十分な防護効果を得られないようになって考えられる。ここ数十年の間に多くの治水社会資本が建造されたにもかかわらず、1991 年から 1998 年の洪水は深刻なダメージを与えた。過去 10 年の平均では直接的な洪水被害は GDP の 2.5% に相当し、最も深刻であったのは 1994 年における 3.9% である。

本研究では、近代経済学の成長理論を基本的なアプローチとして採用し、気候変化を考慮した最適な治水投資（適応策）により軽減される洪水被害を評価するためのモデルを開発し、中国を対象に 2100 年までを評価期間としてシミュレーション分析を行った。気候変化の影響は水供給システムが気候変化のみならず、需要変化、技術、経済・社会状況などに対応する能力に依存する。本研究では、人口変化、複数生産セクタにおける労働者雇用、技術変化、消費性向、政策オプション、気候変化の生起確率などをモデルで統合的に取り扱っている。

2. 治水適応投資最適化モデル

目的関数

最も基本的な仮定として、現状から将来にかけての消費水準の関数として示される消費者効用（社会的厚生）を最大化することを目的として政策が選択されるとした。効用は消費量に応じて単調増加するが、その増加率は漸減していく (Ramsey, 1928)。技術的には、一人あたり消費の関数である効用を社会的時間選好性を考慮した上で積分して得られる社会的厚生の最大化を行う。

$$\max U = \sum_t \left[\left(\prod_i C_i(t)^{\nu_i} \right) \times (1 + \rho)^{-t} \right],$$

ここで、 U は社会的厚生、 $C_i(t)$ は t 年における生産部門 i の財の最終消費量、 ρ は世代間の重み付けを示す時間選好性、 ν_i は各財の消費シェア（ ν_i の和は 1）を示す。本研究では生産部門を農業と非農業の 2 部門に分けている。対象期間は 1995 年から 2100 年の 105 年間、計算ステップは各年である。

生産関数

製品生産は Leontief 生産関数に従い、中間財 1（農業財）、中間財 2（非農業財）と複合生産要素（資本、労働、土地等の生産要素を CES 生産関数に従い組み合わせたもの）を固定比率で組み合わせて行われると仮定した。農業部門には資本・労働・土地の 3 種、非農業部門には資本・労働の 2 種の生産要素を考慮した。土地は農業部門のみで利用され、総面積はシミュレーション期間を通じて変化しないと仮定している。これは中国政府の食糧安全保障政策を反映した仮定である。現実には、都市近郊の肥沃な農地が商工業用地や住宅地に転換され、かわりに農業に向かない限界的な土地を利用せざるおえなくなりつつあり、肥沃度の平均は低下傾向にある。その傾向は人口増加・都市化が治まるまで継続すると考えられ、本研究ではこうした理由による土地生産性の低下を考慮している。

各部門の財は最終消費、投資、中間投入、気候変化影響への適応投資の用途に分配される。各計算ステップにおいて、農業財・非農業財の生産量はそれぞれ需要総和と一致する。非農業財は、非農業部門の資本形成のみならず、農業部門の資本形成にも用いられると仮定した。輸出入はこの研究では取り扱っていない。

資本形成

非農業財の農業セクタの資本蓄積への利用を可能と仮定し、以下のように定式化した。

$$Ka(t) = (1 - \delta)Ka(t-1) + Ia(t-1) + Iex(t-1) - DAMa(t-1)$$

$$Kn(t) = (1 - \delta)Kn(t-1) + In(t-1) - DAMn(t-1)$$

$$INR(t) = INR(t-1) + LAa(t-t') + LAN(t-t')$$

$$INRA(t) = INRA(t-1) + IADa(t-t') + IADn(t-t')$$

ここで、 δ は減耗率、 $Ka(t)$ と $Kn(t)$ はそれぞれ t 年における農業・非農業部門の資本ストック、 $INR(t)$ 、 $INRA(t)$ はそれぞれ気候変動性と気候変化による洪水被害の軽減を目的とした治水社会資本ストックである（本研究では、現在の気候条件で何年かに一度起きている洪水を「気候変動性による洪水」、将来に気候変化が起きた場合に追加的に起きる洪水を「気候変化による洪水」として分けて取り扱っている）。 $Ia(t-1)$ 、 $Iex(t-1)$ はそれぞれ前年における農業財ならびに非農業財による農業部門への生産投資、 $In(t-1)$ は非農業財による非農業部門への生産投資、 $LAa(t-t')$ 、 $LAN(t-t')$ 、 $IADa(t-t')$ 、 $IADn(t-t')$ は t 年前に行われた農業・非農業財による変動性・気候変化への適応投資を示している。 $DAMa(t-1)$ と $DAMn(t-1)$ はそれぞれ前年の農業および非農業部門のストックへの被害、 t' は治水投資が有効な治水社会資本として機能するまでのタイムラグを示す。

損害関数

洪水が生産活動に直接被害を及ぼす道筋は大きく2通り考えられる。一つは、農業部門における土地への影響、もう一つは両生産部門における資本ストックの損壊である。前者には、氾濫による収量低下や収穫不可能、農業に不適な土壌の堆積などが含まれる。本研究では、土地への洪水被害はその一期のみ生産活動を阻害するが次年度には自動的に回復することを仮定している。一方、資本ストックの損壊は次年度以降の生産にも継続的に影響を与える。

前述のように本研究では洪水を変動性による洪水（現在も発生）と気候変化による洪水（将来に追加的に発生）に分けて、経済活動への被害・適応防護のための社会資本の蓄積を取り扱っている。変動性による洪水については過去の統計に基づき土壌ならびに農業・非農業部門の資本ストックへの洪水被害と一人あたり治水社会資本ストック量の過去統計に基づき回帰を行い、将来の治水社会資本量に応じてどの程度洪水が生産活動に及ぼす被害を軽減できるかを定式化した。気候変化による洪水については、世界平均気温が2100年に2.5℃上昇した場合に気候変化がない場合と比べてGDPを最大3.9%引き下げる影響が起きる（最近10年で最も深刻であった1994年の被害量）と仮定し、1990～2100年については気温上昇（線形的に変化）の二乗に比例した気候変化による洪水の被害を推計した（Nordhaus, 1994）。この被害は気候変化による洪水を抑えるための治水社会資本ストック量に応じて軽減される。農業・非農業部門の気候変動性・気候変化による洪水被害を考慮した生産関数は以下のように示される。各部門資本ストック（ $Ka(t)$ と $Kn(t)$ ）への洪水被害は前述の資本形成の式で考慮されている。

$$YGDPa(t) = Aa(t) \times La(t)^{\gamma} \times Ka(t)^{\beta} \times \{F0 \times [1 - Q(t)] \times [1 - DAMal(t) - DAMalc(t)]\}^{\lambda}$$

$$YGDPn(t) = An(t) \times Ln(t)^{\alpha} \times Kn(t)^{1-\alpha}$$

ここで、 $YGDPa(t)$ 、 $YGDPn(t)$ はそれぞれ農業・非農業部門の粗生産、 $Aa(t)$ と $An(t)$ は技術変数、 $La(t)$ 、 $Ln(t)$ は各部門の労働力、 $F0$ は土地資源の初期値、 $Q(t)$ は土壌劣化、 $DAMal(t)$ と $DAMalc(t)$ はそれぞれ変動性と気候変化による土地への被害率を示している。

3. モデルパラメーター

1978年の改革以降、広範な耕地が建築用途に転換されてきた。政府は食料供給の安定化を計り、農

地減少を食い止める政策をとってきた。1995年には耕地面積の減少傾向は逆転し、年64200haの純増となったが、実際には人口密集地を囲む質の高い土壌は建設用途にとってかわられ、代わりに限界的な土地が農地に転換されているため、全体的な土壌の質の平均は低下している。本研究では、将来に人口が安定した場合に建設用途への転換による土壌劣化が止むと仮定し、2030年まで年率0.25%の土壌劣化（生産性低下）、2050年まで0.15%、2050年以降は0とした。

生産要素間の代替性は1972～1995年のデータに基づき推計し、将来にも適用した。社会的時間選好性は、財政関連政策等の社会的な意思決定を総括的に示す変数であり、本研究では将来に渡り年0.03（Nordhaus, 1994）を採用した。技術進歩による経済発展については、1991～1995年の推計データを基礎に、農業部門について2.5%、経済全体について3.1%と設定した。ただし現在の技術レベルがいまだ高いレベルにはないことを反映して、1996～2030年、2031～2050年、2051～2100年の各期間において、技術変化速度はそれぞれ年1%、0%、-1%で増減すると仮定した。農業部門および非農業部門の資本ストックは、1995年時点でそれぞれ1.3兆中国元（1995年換算）と17.3兆元、1956年以降の治水投資を積算した1995年における治水社会資本ストックは260億元とした。各部門資本ストックと治水社会資本の減耗率はともに年10%としたとした。

労働力は人口に比例すると仮定し、将来の人口変化シナリオに基づき各セクタの労働人口を産出した。人口変化シナリオとしては、現行の一人っ子政策が維持される低位ケース、一人っ子で育った夫婦は2子を持つことを許される中位ケース、全ての夫婦が2子を持てる高位ケースが考えられるが、本論文の試算では2030年近辺に最大人口16億人に達し、それ以降は2035年まで平行、その後次第に減少していく中位ケースを用いた（Liら, 2000）。1995年時点で52.2%の労働力が農業部門に従事し、47.8%が非農業部門に従事している（SSB, 1996）。工業化に従い労働力は都市に集中し非農業に従事する割合が増えていく。が中国における複雑な労働力移動のプロセスを示してきた。本研究では、2050年、2100年時点において、それぞれ労働力の70%、80%が非農業に従事する。つまり1995～2050年には年率0.4%、2050～2100年には年率0.2%の割合で農業から非農業への労働力の転換が起こるとした（Kong, 1999）。

4. シナリオ分析と結果

4. 1 4つの政策選択・気候シナリオ

気候変化の有無、治水社会資本への追加的な投資の有無について、4つのシナリオを設定しシミュレーションを行った。

- （1）シナリオ CnAn（基準ケース、楽観成功）：気候変化は実際には起きず、また気候変化を見越した適応投資は行わないケース。
- （2）シナリオ CyAn（楽観失敗）：気候変化は実際には起きるのだが政策決定者がそれを予想せず、洪水被害が増加するにもかかわらず適応投資を行わないケース。
- （3）シナリオ CyAy（適応成功）：気候変化を予想した最適な治水投資を行うケース。
- （4）シナリオ CnAy（杞憂）：気候変化を想定した治水投資を行うにもかかわらず、実際には気候変化が起きないケース。

これら4シナリオについて、最適治水適応投資を計算し、GDP、一人あたり消費、回避されたダメージ等を計算した。

4. 2 便益分析

CnAnを基準ケースとして、気候変動性と気候変化による耕地の洪水被害は2100年にCyAyで1.13%増加する。最も被害が大きくなるのは2050年付近で1.58%である。CyAnでは、被害は次第に増加し21世紀末には3.11%に達する。CnAyの洪水被害は基準ケースに比べて低い。これは適応投資が追加的な適応量を達成し、それゆえ気候の変動性からのダメージを削減するためである。農業資本ストック並

びに非農業資本ストックに対するダメージは、農地へのダメージに類似したパターンを示す(図1～3)。

政策決定者が気候変化を無視した政策決定を行い、実際にはそれが起きてしまったとき、農業・非農業GDPに対する洪水被害はそれぞれ2100年において基準ケースに比べて0.71%と0.25%となる。CyAyではGDPへのダメージは若干増加するものの、農業部門において0.03%、非農業部門において0.01%という低いレベルに抑えられる。気候変化が起きず、しかしながら気候変化が起きると見込んだ治水投資を行った場合、農業並びに非農業GDPはそれぞれ0.03%、0.003%増加する。CnAnを基準とした一人あたり消費(図4)はGDPと同じパターンを示すが、CnAnとCnAyを比較した場合、特に21世紀前半において気候変動によるダメージを見据えてCnAnよりも大きな各部門生産投資や治水投資が行われるため、CnAyの一人あたり消費は若干低く抑えられる。

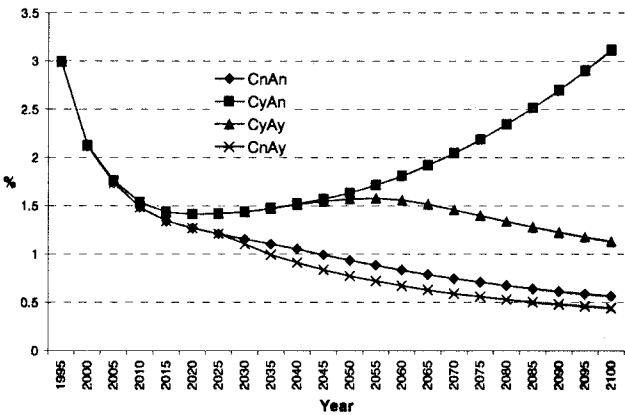


図1 洪水による耕地被害

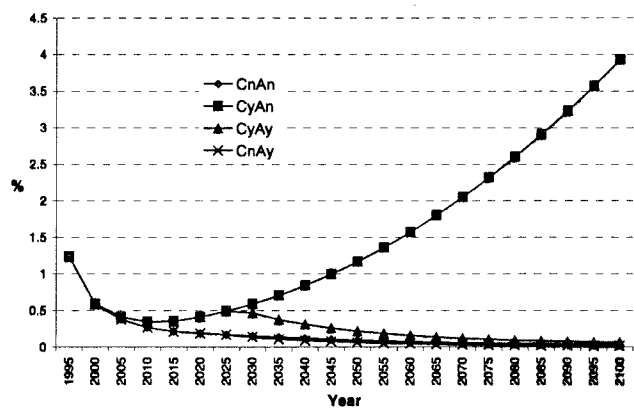


図2 洪水による農業部門資本ストック被害

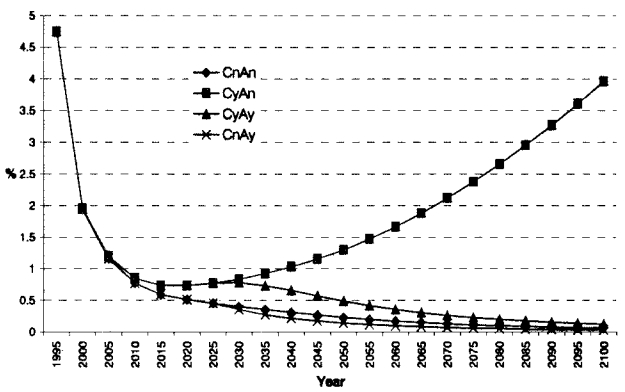


図3 洪水による非農業部門資本ストック被害

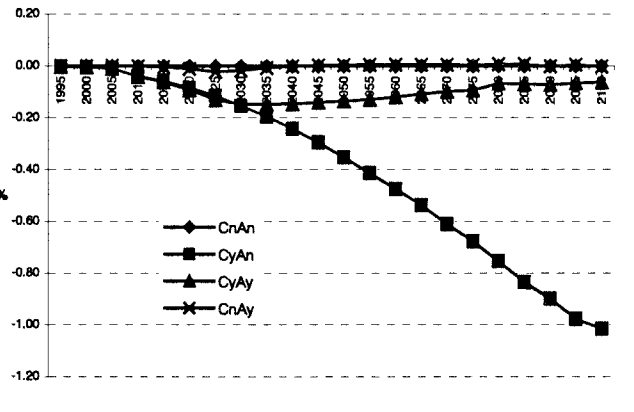


図4 一人あたり消費(基準ケースとの比較)

4. 3 意思決定分析

一人あたり消費を社会的時間選好性を考慮して各タイムスパンについて積算(社会的厚生)し、意思決定分析(宮川, 1992)を行った。気候変化の生起が不確実な状況下において適した意思決定を選択するために、便益(ベースラインケースと比較した社会的厚生の増分)に基づいて maximin、maximax の原則に従った意思決定分析を用いた。maximin 原則の意思決定プロセスは、生起不確実な事象のそれぞれについて複数の政策選択肢の中から最も便益が小さくなるものを選び、さらにその中で最も便益が大きいものを採用する。この意思決定では、最悪の致命的な結果を回避することを重視する。maximax 原則でも同様の意思決定プロセスが行われるが、生起不確実な事象のそれぞれについて複数の政策選択肢の中から最も便益が大きくなるものを選び、さらにその中で最も便益が大きいものを採用する。この意思決定では、潜在的に起こりうる最大の便益を得る可能性を重視する。表1は予期される気候変化に

対して適応投資を行うことが、気候変化が実際に起きるか起きないかに関わらず最適な選択肢であることを示している（ただし 2050 年までの短期を見た場合のみ、maximax 原則で判断すると適応投資しない方が良策となる）。

表 1 maximin および maximax の原則に従った社会的厚生変化による意思決定分析（単位は中国元／人）

評価期間	適応の有無	(A)気候変化があった場合の厚生増加	(B)気候変化がなかった場合の厚生増加	(C)最小厚生増加Min(A,B)	(C)の最大値	Maximin 最適選択	(D)最大厚生増加Max(A,B)	(D)の最大値	Maximax 最適選択
1995-2100	有	-13700.7	422.2	-13700.7	-13700.7	v	422.2	422.2	v
	無	-129402.0	0.0	-129402.0	-129402.0		0.0		
1995-2080	有	-6855.3	178.7	-6855.3	-6855.3	v	178.7	178.7	v
	無	-34668.6	0.0	-34668.6	-34668.6		0.0		
1995-2050	有	-1534.5	-51.7	-1534.5	-1534.5	v	-51.7	0.0	
	無	-2620.8	0.0	-2620.8	-2620.8		0.0		v

5. 結論

本研究では、気候の変動性と将来気候変化を勘案した投資の最適化を取り扱う経済モデルを開発し、中国を対象として 1995 年から 2100 年までの 105 年間についてシミュレーションを行った。次に示すような結果がモデルシミュレーションにより得られた。

- (1) 気候変化を無視して投資を最適化した場合、2020 年近辺から深刻な被害が顕れ始め、2100 年にピークに達する。気候変化による洪水被害は気候変動性と将来気候変化の両方を考慮した投資によって効率的に削減することが可能である。
- (2) 気候変化の生起に関わらず、懸念される気候変化に適応するための投資をしておくことが最適な選択肢であることを、意思決定分析により示した。気候変化が持つ不確実性は気候変化に対する適応政策を妨げないことが、本研究で取り扱った中国の洪水影響に関しては示された。

引用文献

- Deng Y M (1999) Achievements in water management in the last 50 years and prospect in century 21(in Chinese). *Disaster Reduction in China* 9(3):25-30
- IPCC (1996) *Climate Change 1995: Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 831.
- Kong Sh H (1999) Effects of Transfer of Surplus Rural Labor on Advance of Industrial Structure (in Chinese). China Economics Publishing House, Beijing.
- Li Y, Shen Zh H, Guo N (2000) One birth or two births? (in Chinese) *Life Weekly* 2000(10):31-44
- McGuffie K, Henderson-Sellers A, Holbrook N (1999) Assessing simulations of daily temperature and precipitation variability with global climate models for present and enhanced greenhouse climates. *International Journal of Climatology* 19:1-26
- Nordhaus W D (1994) Managing the global commons - the economics of climate change. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Ramsey F P (1928) A mathematical theory of saving. *The Economic Journal* December:543-549.
- SSB (1996) China Statistical Yearbook-1995 (in Chinese). China Statistical Publishing House, Beijing.
- 宮川公男 (1992) 経営学入門シリーズ OR 入門 (第 12 版), 日本経済新聞社