フィリピン共和国パンパンガ川流域の農村を対象としたエージェントベースモデルによる水災影響評価モデルの構築

田中　智大[1]・Shi Feng[2]・Maria Angeles Ocampo Catelo[3]・川崎　昭如[4]・横松宗太[5]・大原　美保[6]

[1]正会員　京都大学助教　大学院工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1）
E-mail:tanaka.tomohiro.7c@kyoto-u.ac.jp

[1]Student member of JSCE, Graduate School of Eng., Kyoto University (Kyoto 615-8540, Japan)
E-mail:feng.shi.42w@st.-kyoto-u.ac.jp

[2]Non member of JSCE, the University of Phillipines Los Banos (Laguna, Philippines)
E-mail: mocatelo@up.edu.ph

[3]正会員　東京大学教授　未来ビジョン研究センター（〒113-8654　東京都文京区本郷 7 丁目 3-1）
E-mail: kawasaki@ifi.u-tokyo.ac.jp

[4]正会員　国際応用システム分析研究所（Schlossplatz 1, 2361, Laxenburg, Austria）
E-mail: yoko@iiasa.ac.at

[5]正会員　東京大学教授　情報学環総合防災情報研究センター（〒113－0033 東京都文京区本郷 7-3-1）
E-mail: ohara@iis.u-tokyo.ac.jp

水害の影響が大きい農業コミュニティでの気候変動影響評価に向け，水害リスク下の稲作農家の営農と経済行動を表現するエージェントベースモデルを開発した．開発モデルをフィリピン共和国パンパンガ川流域カンダバ市に適用し，洪水シナリオ下での各農家世帯の営農活動に対して洪水災害が与える影響を分析した．対象地域を 4 つの洪水リスクエリアに分類し，洪水規模の時系列シナリオを入力した結果，水害常襲地のエリアの資産が顕著に減少することを確認した．また，地域全体で収量が減少する大規模洪水が発生する場合にはコメ市場での需要超過によるコメ価格の高騰により農家の収入減が一定程度に抑えられる可能性があり，中小規模の洪水が連続する場合の方が貧困農家世帯の資産形成が長期的に阻害されることがわかった．経済格差の観点では被災世帯の割合が一定程度にとどまる中規模洪水時にジニ係数が高くなることが示唆された．

Key Words: *flood damage, agriculture, agent-based model, Panpanga River*

1. 序論

近年，世界各地で風水害が発生しており，気候変動によってその激甚化，頻発化が予測されている．IPCC 第 6 次報告書によると，世界平均気温は少なくとも今世紀半ばまでは上昇し続けるとされており，東南アジア域をはじめ世界の多くの地域で中程度以上の確信度をもって大雨が増加することが予測されている [1]．自然災害による影響は特に脆弱性の高いコミュニティで大きく，洪水災害の影響も家屋が脆弱であったり浸水しやすい地域に住む貧困層で特に高いことが指摘されている [2]．

気候変動は農業にも大きな影響を与えることが予測されており，特に乾燥地域では干ばつの深刻化に伴って営農が困難となる．そこで，保険によるリスク分散策や作物の変更による適応策，都市への移住といった農家による様々な適応シナリオが検討されている [3]．気候変動は時間的に進行する問題であることから，先行研究では主に動的な経済モデルを用いた分析がなされており，特に，農家世帯ごとの意思決定による適応シナリオの違いを議論するために，いくつかの研究はエージェントベースモデルを用いた農家の意思決定モデルを構築している [4]．

乾燥害だけでなく，水害も農地の浸水によって営農に大きな影響をもたらす．特に，フィリピンやマレーシアといった熱帯地域の農村では気候変動による乾燥害より

も水害の頻発化が大きな問題となることから，水害による営農および農家世帯の生計への影響を評価することが重要となる．

そこで本研究は，東南アジアの農村を対象に水害による農家世帯への気候変動影響と適応限界を議論するための動学的経済モデルを開発することを目的とする．農地の浸水が社会経済状況の異なる農家ごとの営農や生計に与える影響をシミュレーションするためエージェントベースモデルを構築する．

2. 対象地域

本研究では，東南アジアで洪水災害が多発しているフィリピン共和国のパンパンガ川流域の中で，最も浸水リスクの高いパンパンガ州・カンダバ市を対象とする．同地域は他のパンパンガ州の自治体と同様に農業が盛んであり，パンパンガ州を含むルソン地方はフィリピン全体の食糧庫としての役割を果たしている．カンダバ市を含むパンパンガ川流域は年間の総降水量 2,155 mm を誇る多雨地帯である一方，明瞭な雨期（5 月～11 月）と乾期（12 月～4 月）があり，降水の多くは雨期にもたらされる [5]．農業はコメを中心とした稲作地帯であり，その他に野菜や果物も栽培されている．多くの農家が二期作を行っている．

一方，パンパンガ川からの氾濫や内水氾濫によって度々浸水に見舞われており，2013 年の台風 Haiyan や 2020 年に発生した台風 Ulysses 等の大型台風がたびたび襲来し，甚大は風水災をもたらしてきた．特に，台風 Ulysses の際は 24 時間積算降水量が 300 mm を超える豪雨によって甚大な洪水災害が発生した [6]．同地域では水災害・リスクマネジメント国際センターICHARM によって過去の洪水被害やその他の詳細な現地データが得られている．Nagumo et al.[7] は，過去の被災履歴を調査してカンダバ市の洪水危険度（図-1）を分類しており，特にパンパンガ川左岸（エリア D）において浸水リスクが高いことがわかっている．本研究では，この分類を元に 4 つの洪水危険度別エリアに分類して洪水危険度の違いによる農家世帯への影響を分析する．

3. エージェントベースモデルの構造

本研究で構築する農家のエージェントベースモデル（Agent-Based Model for Agricultural Activities under Flood risk, 以下，ABMAAF）は，農家をエージェントとして各エージェントが洪水発生シナリオの中で営農を行うモデルである．ABMAAF は 1）各農家のコメの収量とその集計量としての地域全体の生産量を計算し，需要と供給の

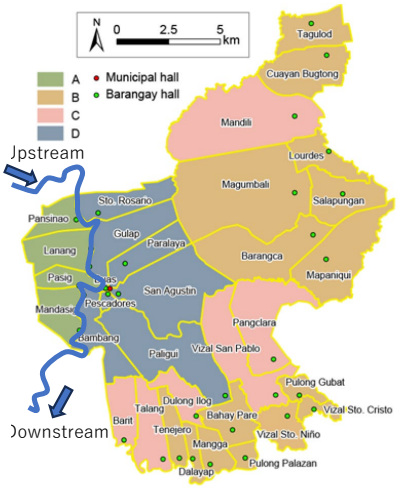


図-1 Nagumo et al.[7] によるカンダバ市の各バランガイの洪水リスク分類図を基に筆者らが加筆した．エリア A で洪水リスクがもっとも小さく，B，C，D の順に洪水リスクが大きくなる．

関係からコメの価格の推移を決定するコメ市場スキームと 2）コメの価格から農家の貯蓄更新を計算する家計収支スキームの 2 つのサブモデルから成る．以下，各モデルの詳細を説明する．

(1) コメ市場スキーム

第 t 期でのコメの価格を $p(t)$，コメの価格に応じて決まる対象地域でのコメの潜在的需要量を $Y_D(p(t))$，対象地域でのコメの総生産量を $Y_S(t)$ とすると，実現する取引量は

$$Y(p(t)) = \min\left[Y_D(p(t)), Y_S(t)\right] \quad (1)$$

となる．ここで，総生産量 $Y_S(t)$ はコメの価格の関数と考えることもできるが，対象地域を含め途上国の多くの集落における営農は家族経営を基本とした小規模農家であり，生産量は，長期に形成された習慣的な要素や，所有する作付け面積，浸水被害等の非市場的要素に大きく左右されることが観察されている．各期の価格の影響は相対的に小さいため，ここでは価格の関数とはしない．コメ価格の変化は粘着的であり，第 $t+1$ 期の価格は次式に従って決まるものとする．

$$p(t+1) = \left[1 + \kappa_Y \left\{\frac{Y_D(p(t))}{Y_S(t)} - 1\right\}\right] p(t) \quad (2)$$

ここで，$\kappa_Y\,(>0)$ は調整速度を表す．第 $t+1$ 期の需要量の実現値 $Y_D(t+1)$ はコメの価格変動を基に以下の式で表される．

$$Y_D(t+1) = \min\left[\left(1-\lambda\pi(t)\right)Y_D(t), Y_{D,\min}\right] \quad (3)$$

ここで

表-1　ABMAAF の計算に用いるパラメータとその設定.

パラメータ	変数名	数値
価格調整速度	κ_Y	0.1
需要の価格弾力性	λ	1.0
収量当たりの税率	τ	0.07
単位面積コメ生産量	y	4.3 ton/ha
栽培に係る経費	ι	30,000 PHP
生存必要消費支出	$c_{\min}$	22,000 PHP
世帯構成人数	n	5
貯蓄率	α_{w}	0.05
初期のコメ価格	$p(0)$	17,000 PHP

$$\pi(t)=\frac{p(t+1)-p(t)}{p(t)} \tag{4}$$

は価格の上昇率，λ は需要の価格弾力性を表し，次期の需要は前期の価格の変化に応じて変化する．以上のサイクルを繰り返すことで長期的な価格調整が行われると仮定する．こうした価格の変化で対応できないほどの被害が生じた農家は営農が困難となる可能性がある．なお，簡単のため雨期と乾期のコメの価格の違いは考慮せず，コメの価格は 1 年に 1 度更新する．すなわち，1 期は 1 年である．

(2) 家計の貯蓄更新スキーム

農家 1 世帯を家計とし，1 家計を 1 エージェントとする．コメ市場で決定した価格 $p(t)$ に応じて，以下の式で家計 i の予算を計算する．

$$B_i(t)=A_i(t)\left\{(1-\tau)\,p(t)y-\iota\right\}-c_{\min}n \tag{5}$$
$$A_i(t)=A_{\mathrm{d},i}(t)+\varphi_i(t)A_{\mathrm{w},i}(t)$$

ここで，$A_i(t)$ は年間の総作付面積，y は単位面積当たりのコメの生産量を表す．稲作は二期作を想定しており，$A_{\mathrm{d},i}(t)$ と $A_{\mathrm{w},i}(t)$ はそれぞれ乾期および雨期の作付面積である．$\varphi_i(t)$ は水害の発生を表す指示関数であり，水害の生じた年は 0，生じていない年は 1 となる．年間の総収量は $y_i(t)=A_i(t)y$ であり，コメの総生産量は収量を全エージェントで集計したものとして計算する（$Y_s(t)=\sum y_i(t)$）．ι は単位面積当たりの肥料や耕作機械等の経費，τ は単位収量当たりの税率を表す．$c_{\min}$ は 1 人当たりの最低消費額，n は世帯人数を表す．ここではこれらの変数は世帯 i によらず一定値とする．$B_i(t)$ は選択的支出に充てられた予算を表し，第 1 項の純利益から第 2 項の生存必要消費支出を除いたものである．予算が正の場合，家計は $w_i(t)=\alpha_{\mathrm{w}}B_i(t)$ を貯蓄して残り $c_i(t)=(1-\alpha_{\mathrm{w}})B_i(t)$ を消費する．$B_i(t)$ が負の場合は負債額だけ貯蓄が減少する．したがって，以下の式で貯蓄を更新する．

$$W_i(t)=\begin{cases}W_i(t-1)+w_i(t) & \left(B_i(t)\ge 0\right)\\ W_i(t-1)+B_i(t) & \left(B_i(t)<0\right)\end{cases} \tag{6}$$

4. 計算条件

(1) ABMAAF のパラメータ設定

ABMAAF のパラメータは，主にフィリピン統計局（Philippines Statistics Authority，PSA）の統計データ OpenSTAT[8]を元に推定した（表-1）．生存必要消費支出は食費を設定し，現地のヒアリングから同額が最低限と呼べるほど少額であることを確認した．価格調整速度はデータが得られなかったため，価格の変化速度が極端とならない値を設定した．フィリピンの貯蓄率は低いことが知られており，文献値も 0%～数%程度を示している[9]ことから 5%と設定した．

需要の初期値 $Y_{\mathrm{D}}(0)$ は，水害が無い状態での市場の均衡状態を仮定し，水害が無い場合の地域内総生産量を設定した．すなわち，水害が発生しなければコメの価格は初期値 $p(0)$ から変化しない．シミュレーションでは，水害の発生によって供給量が減少することによって価格が高騰し，それに対応して次期の需要が減少して価格が再び減少する．

エージェントごとの作付面積は，カンダバ市農業局が 2013 年に実施した対象地域の全数調査の結果を使用し，バランガイごとに各世帯をエージェントとしてその作付面積を割り当てた．ただし，どのエージェントがどの世帯に対応するかが特定されないよう，各エージェントに番号を割り付けた．

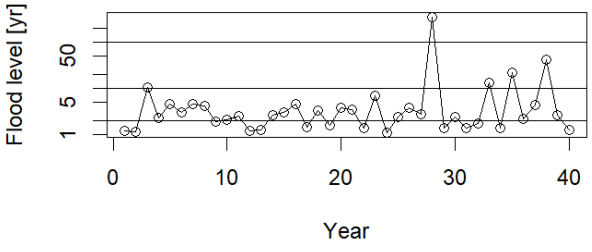
(2) 対象洪水シナリオ

本来であればパンパンガ川の洪水氾濫シミュレーションによって洪水シナリオを作成することが望ましいが，本発表では仮想シナリオを作成する．その代わり，Nagumo et al.[7] による過去の浸水実績に基づく地域分類（図-1）を用いてバランガイごとに異なる洪水頻度を考えることで地域間の氾濫頻度の違いを考慮する．エリア A，B，C，D の治水安全度をそれぞれ 1/1000，1/100，1/10，1/2 と設定する．各年の洪水規模の超過確率を一様分布から発生させ，治水安全度が超過確率を下回ったエリアで浸水被害が発生すると仮定する．浸水被害が発生したエリアでは水害に関する指示関数 $\phi_i(t)=1$ とし，雨期の収量がゼロになると仮定する．

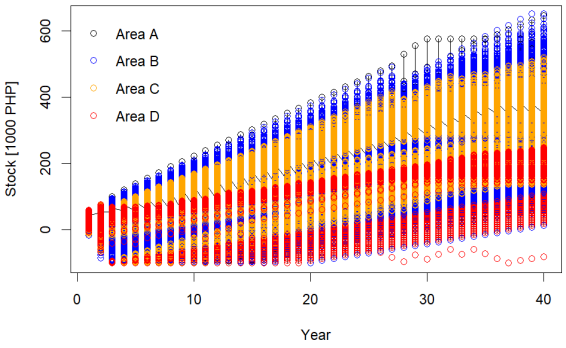
5. 計算結果

(1) 家計の資産形成過程

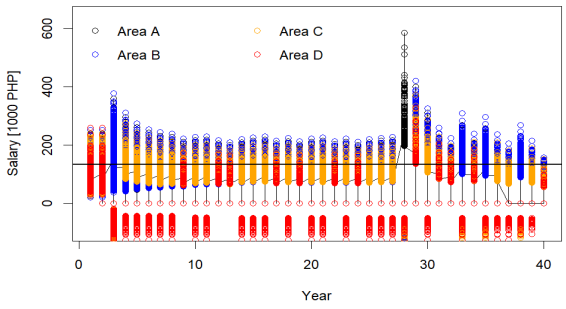
発生させた洪水規模（再現期間），各エージェントの貯蓄，世帯収入，地域内のコメの総生産量の時系列を図-2 に示す．洪水リスクのエリアごとに資産形成の様子が



(a)



(b)



(c)

図-2　ABMAAF によるシミュレーション結果．(a) 発生させた洪水規模（再現期間），(b) 各エリアに居住する各エージェントの貯蓄，(c) 各エージェントの年収．

明瞭に異なることがわかる．一方，洪水規模との対応を見ると，29 年目に再現期間 100 年を超える大洪水が発生しているが，その年の収入はむしろ増加していることがわかる．その他の年も，必ずしも洪水の規模が大きいほど所得が小さくなるとは限らない．これは，洪水の規模が大きいほど地域内の総生産量は減少するが，価格の上昇によって農家の収入は生産量の減少ほどには低下しないことによる．

一方，中小規模の洪水時は総生産量は大きく変わらないためコメ市場による価格の調整効果は小さく，浸水したエリア D の世帯のみ収入が低下している．中小規模の洪水は発生頻度が高いため，このエリアの世帯は継続的に収入が小さくなり，結果として長期的な資産が増加しなかったと考えられる．

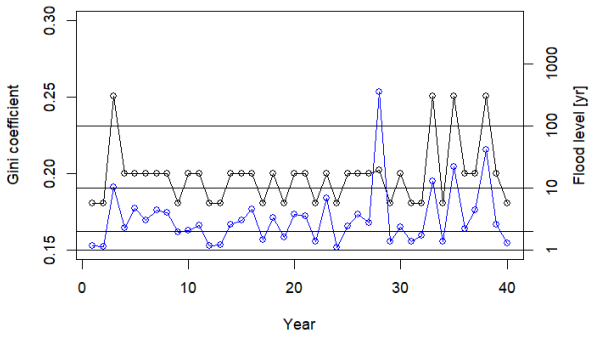


図-2　ジニ係数（青線）の時系列変化．図-2 (a) で示した洪水規模（黒線）を併記している．

(2)　農家間のジニ係数

次に，ジニ係数の時系列を図-3 に示す．収入と同様，洪水規模が大きいほどジニ係数が大きくなるわけではない．特に，中規模（再現期間 10 年～100 年）の洪水時に係数がもっとも高いことがわかる．ただし，ジニ係数は所得の大きさではなく相対的な格差を評価する指標であり，中規模洪水のときに係数が高くなったのは影響世帯数が半数程度（47.0%）となることで所得の格差がもっとも大きくなるためであると考えられる．

6.　考察

計算結果から，洪水の頻発化が生じると雨期の収量の減少を通して農家の資産形成過程に大きな影響を与えることが示された．ただし，その影響の大きさはコメ市場の価格調整にも大きな影響を受け，必ずしも低頻度の大規模洪水によるものとは限らないことが示された．実際，エリア D には貧困世帯が多く，限られた世帯が影響を受ける中小規模洪水の高頻度での発生が現在の貧困を生み出していることが示唆された．

ただし，現地住民は環境にある程度適応しており，エリア D を中心に，水害常襲地のバランガイでは水害時に浸水域で漁業を行ったり，小型ボートによる交通サービスを提供するなどして臨時収入を得ることが知られている [5]．したがって，当該地域での水害が直ちに移住に繋がるわけではない．しかしながら，そうした一時的な対処法を持っているがゆえに現在の生活スタイルを変えることができず，貧困が継続している．さらに，過去の現地調査から，被災時には親戚や高利貸し業者からの借入を増やすこともわかっており，洪水後に借入金やその利子を返済するためさらなる貧困が続く．ただし，仮にその年の洪水による影響を緩和しても，雨期の収入が得られない年では年間の収入の約半分となるため，図-1 に示した長期的な貧困構造が変わらない．この点で水害が大きな影響を与えているといえる．

対象地域では農家が現地で入手可能な材料で住宅を建築するため再建費用が低い．そのため本研究の分析では住宅被害を考慮していない．ただし，今後，フィリピン共和国全体の経済発展に伴って電化製品の普及等の生活の高度化が浸透した場合，物的資産の水害リスクへのエクスポージャーは増大し，浸水被害は増大し，復興のための経済的ないしコミュニティ共助的な差異に起因して，本研究の結果よりもさらに大きな経済格差が生じる可能性がある．より詳細な解析に向けて，将洪水氾濫シミュレーション結果を洪水シナリオに用いることでより詳細な解析を行うことが重要である．さらに，時間的に進行する気候変動による影響を洪水氾濫シミュレーションの中で考慮することによって，洪水頻度が増加する中での農家世帯の営農や生計への影響の変化を分析することが重要である．

7. 結論

本研究は，将来の気候変動による水害リスクの増加に伴って水害常襲地の農村が受ける長期的影響を評価することを目的に，浸水時のコメ農家の家計をシミュレーションするエージェントベースモデルを開発してフィリピン国パンパンガ州カンダバ市の農村地帯に適用した．浸水リスクに応じて異なる頻度で洪水が発生するシナリオを与えた結果，浸水頻度が資産形成に大きな影響を与えることや，コメ市場の価格変動が農家の収入に影響を与えること等の結果が得られた．特に，水害リスクが高いエリアは，大規模洪水よりも頻発する中小規模洪水によって貧困に陥る構造を示すことができた．

今後は，気候変動シナリオに基づく洪水氾濫シミュレーションの結果を入力し，より現実的な経済シミュレーションを行ってコメ農家への長期的影響を調べるとともに，営農戦略や集団移転等による適応策の効果について検討する予定である．

謝辞：本研究は，地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）「気候変動下での持続的な地域経済発展への政策立案のためのハイブリッド型水災害リスク評価の活用」（課題番号：JPMJSA1909）の研究として実施したものである． カンダバ市の農家全数調査のデータをカンダバ市農業局から提供頂いた．記して謝意を表する．

参考文献

1) 文部科学省・気象庁：IPCC 第 6 次評価報告書第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約 暫定訳，p. 10.
2) Moulds, S., Buytaert, W., Templeton, M. R., and Kanu, I.: Modeling the impacts of urban flood risk management on social inequality. *Water Resources Research*, Vol. 57, No. 6, e2020WR029024, 2021.
3) Aryal, J. P., Sapkota, T. B., Khurana, R., Khatri-Chhetri, A., Rahut, D. B. and Jat, M. L.: Climate change and agriculture in South Asia: Adaptation options in smallholder production systems. *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 22, No. 6, pp. 5045-5075, 2020.
4) Choquette-Levy, N., Wildemeersch, M., Oppenheimer, M. and Levin, S. A.: Risk transfer policies and climate-induced immobility among smallholder farmers. *Nature Climate Change*, Vol. 11, No. 12, pp. 1046-1054, 2021.
5) Juarez-Lucas, A. M., Kibler, K. M., Ohara, M. and Sayama, T.: Benefits of flood-prone land use and the role of coping capacity, Candaba floodplains, Philippines. *Natural Hazards*, Vol. 84, pp. 2243-2264, 2016.
6) 会田健太郎, 大原美保, 南雲直子, 久保田啓二朗, 新屋孝文：フィリピン共和国の 2020 年台風 Ulysses 災害を事例にした早期被災者把握における衛星活用の課題検討. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 78, No. 2, I_985-I_990, 2020.
7) Nagumo, N., Aida, K., Ohara, M., and Ballaran, V. G.: Classification of communities based on landforms and flood history in Candaba Swamp, Republic of the Philippines, Processings of 9th International Conference of Flood Management, pp. 1-6.
8) Philippine Statistics Authority: OpenSTAT, https://openstat.psa.gov.ph/（2023 年 10 月 1 日閲覧）
9) Orbeta, A. C.: Children and household saving in the Philippines. Philippine Institute for Development Studies, Discussion Paper, Series No. 47, 2006.

(2023. 10. 13 受付)

AGENT-BASED MODELLING OF FLOOD DISASTER IMPACT FOR AGRICULTURAL COMMUNITY: A CASE STUDY IN PAMPAMGA RIVER BASIN, REPUBLIC OF THE PHILIPPINES

Tomohiro TANAKA, Feng SHI, Maria Angeles Ocampo CATELO, Akiyuki KAWASAKI, Muneta YOKOMATSU, Miho OHARA

We developed an agent-based model of the farming and economic behavior of rice farmers under flood risk for the assessment of climate change impacts in flood-prone farming communities. The developed model was applied to Candaba City in Pampanga Province, Republic of the Philippines to analyze the impact of flood disasters on the farming activities of each farming household under a flood scenario. Simulation of a test flood scenario showed that the assets in the flood-prone areas were significantly re-

duced. In the case of large-scale floods that reduce yields in the entire region, the income loss of farm households was limited to a certain extent due to the high rice prices caused by excess demand in the rice market, while the long-term asset formation of poor farm households were seriously hampered in the case of a series of small- and medium-scale floods. In terms of economic inequality, the Gini coefficient is higher for medium floods when the proportion of affected households is limited to a certain level.