

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2012

課題番号：20255012

研究課題名（和文） 西アフリカのサバンナ気候下における農村水資源開発オプション

研究課題名（英文） Development Options for Rural Water in West African Savannas

研究代表者

宇波 耕一 (UNAMI KOICHI)

京都大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号：10283649

研究成果の概要（和文）：西アフリカのサバンナ気候下にある農村地域にコアサイトを設定し、水利構造物の建設を含むフィールド調査を行った。これに対して学術的意味づけを行うため、確率微分方程式を軸とした数理モデル化手法を体系化した。また、実際的な最適水資源開発オプションを導出するために必要な数値解析モデルを構築した。その結果、稲作と漁撈の共存関係を重視した貯留系の確率論的最適設計・管理手法を提示することができた。

研究成果の概要（英文）：A core site was established in a rural area under a savanna agro-ecological zone of West Africa, to implement field studies including installation of several water controlling structures. Focusing on stochastic differential equations, mathematical modelling methods were integrated to clarify scientific implication of the field studies. Numerical analysis models were constructed as well, so that practical optimal water resources development options became feasible. These achievements demonstrated stochastic optimization methods for design and management of storage systems, emphasizing on coexistence of rice cultivation and fishery.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2010年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2011年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
年度			
総計	24,800,000	7,440,000	32,240,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学，農業土木学・農村計画学

キーワード：サバンナ気候・水資源開発・浅水方程式・確率過程・確率制御・意思決定支援

1. 研究開始当初の背景

西アフリカのサバンナは、サバンナ農耕文化の発祥の地であると同時に、世界の他の地域との交流、気候変動への順応といった過程を経て、極めて特徴的な発展をとげてきた地域である。年間降雨量は世界平均に近く、豊富な日射量があるため、農耕を営むに当たっては、一見、有利な条件に恵まれているように思われる。しかし、自給的農業に依存した住

民の生活レベルは世界でも最も低い地域であり、国際的な支援が不可欠な状況にある。水問題は、西アフリカが抱える諸問題の中でもとりわけ重要である。

農村における地域、住民レベルで実行可能な水資源開発オプションのうち、最も有効なものの一つが小規模ダム（溜池）の築造である。しかしながら、西アフリカにおいては、感染症および膨大な蒸発量の問題が溜池開

発の制約因子となっている。水源を地下水に求めることは、この二点に関しては小規模ダムに比べて格段に有利であるが、浅層地下水については乾季に枯渇する、深層地下水については塩分を含んでいる、掘削、運用コストが高い、といった問題が不可避である。このような事情から、西アフリカにおいては、単一の水資源開発オプションによって現状の貧困状態を改善することは望めず、横断的視点に立った開発戦略を進める必要がある。そこで、対象とするコアサイトを設定し、他地域との比較も行いながら、数理的根拠に基づいた最適な水資源開発オプションを提示すべく、研究を開始した。

2. 研究の目的

西アフリカのサバンナにおいては、治水、利水、環境の三側面を統合的に関連づけた最適戦略のもとで水資源開発を行っていくことが必要である。洪水制御、十分な量と質の水資源確保、健全な生物生態系の保全等々の要求に応えうる最適戦略を工学的に見出し、モデルケースについて実際に開発事業を行って実証することが研究の目的である。コアサイト(中核的試験地区)として、ギニアサバンナ気候区に位置するガーナ国北部州トロンクンブング郡のボンタンガ川流域を設定する。また、比較対照調査を、沿岸サバンナ気候区に位置するガーナ大学農業研究所の研究センターのほか、西アフリカサバンナ以外の地域においても実施する。降雨と蒸発散、地表水と地下水の流動、流れ場における物質輸送、ならびに、魚類を中心とした生物個体群の行動に関し、コアサイトへの適用を念頭に置いたモデルを開発する。とくに、確率微分方程式を用いた時間発展現象のモデル化ならびに確率過程の最適制御問題に焦点を当てる。これらのモデルに基づき、伝統的洪水利用、小規模ダム、風力揚水、地下ダムをオプションとする水資源開発の最適戦略を検討し、現地において実証する。オプション最適化に際しては、生物多様性の維持、伝統的文化の保存、住民レベルでの管理による開発水源の持続可能性を制約条件に課す。また、コアサイトにおける自給的農業を中心とした人間活動が、世界経済においてどのような意義を持つのかについても工学的に考究する。

3. 研究の方法

コアサイトにおいては、5つのダムにおける水位観測システム、気象および土壌水分プロファイル観測システム、雨量計3台、土壌水分計3台、日射計1台によって時系列データを自動的に記録する。また、井戸水や小規模ダム貯留水に関して22の観測点を設定し、週に一回、各地点で水理・水質調査を行う。水資源開発の最適戦略を実証するため、感湿

帯稲作圃場に地下畦畔として機能する地下ダムを建設し、また、決壊した小規模ダムの修復を行うことを通じてその多面的機能について検討する。ガーナ国政府が建設した風力揚水灌漑施設についても、故障した揚水機の修理と防獣柵の設置を行い、営農活動について経過調査を行う。

これらの工事や調査に対して学術的な意味づけを行うため、確率微分方程式を軸とした数理モデル化手法の体系化を推進する。そのための鍵となるのが、放物型線型偏微分方程式ならびに双曲型非線型偏微分方程式の数値解析手法の汎用化と効率化である。すなわち、コアサイトを中心としたフィールド研究、数理モデルの構築、数値解析手法の開発が、研究の方法の3つの柱をなす。

4. 研究成果

研究成果の内容は、大きく3つに分類できる。すなわち、(1)地表近傍流れ場ならびに水質輸送に関する数値解析モデルの開発、(2)確率過程の定常性にもとづく持続可能性の定義、(3)確率制御理論にもとづく水資源管理における意思決定問題、について、以下のような成果が得られた。

(1) 西アフリカのサバンナにおいては、コアサイトにおいて典型的に見られるように、感湿帯が発達し、稲作圃場あるいは小規模ダムサイトとして利用されている。よって、地下水が地表に滲出し、直接降雨とともに浅水流を形成することになるので、その定量的理解が水資源開発を論じるためには不可欠である。本研究では、浅水流ならびに水質輸送に関する強力な数値解析モデルを開発し、現象の深い理解を可能にした。とりわけ、射流上を遡上する段波の再現に関しては、国内外において絶対的に優位なモデルを得ることができた(図1)。

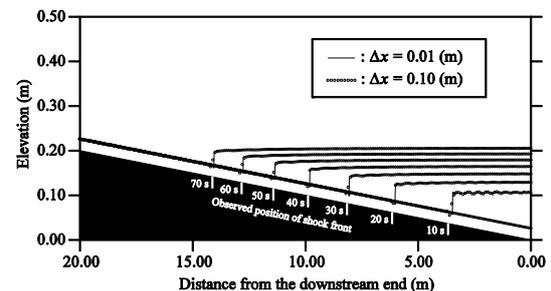


図1：射流上を遡上する段波に関する水理実験結果と開発したモデルによる数値解析結果の比較

(2) 主に稲作圃場として利用されている感湿帯において小規模ダムを開発する際には、水生生物生態系ならびに漁撈活動の脆弱性に注意すべきであることが、フィールド調査

の結果明らかとなった。その持続可能性を論じるため、小規模ダムによって分断された複数の生息域における魚類個体のダイナミクスに関し、確率微分方程式を用いてモデル化した。確率密度関数を支配するコルモゴロフ前進方程式の自明でない定常解の存在性に帰着する。これにもとづき、決壊した小規模ダムの修復工事を実施した。写真1に修復された堤体部分を示す。これ以後、この小規模ダムにおいて新たに漁撈活動が行われるようになったことが確認されている。



写真1：修復された小規模ダム堤体

(3) 小規模ダムを灌漑に用いることは、コアサイトにおいては現状では例外的であるが、確率制御理論にもとづいた最適管理を行えば自律分散型かつ持続可能な乾季灌漑が可能であることを示した。灌漑水の取水には、バッテリーを介さないソーラーポンプによって直接行うものとした。小規模ダム貯留量と受益地土壌水分量の挙動を確率微分方程式によってモデル化し、灌漑水流量を制御変数としたシステムに対して確率制御問題を設定した。評価関数の最大値と最適制御を支配するハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式系を数値的に解き、最適制御、すなわち最適灌漑政策を導出した。この手法は、貯留系と受益地からなる一般の灌漑スキームに対して適用が可能であり、西アフリカサバンナ以外の地域における展開を検討中である。たとえば、浅層地下水を貯留系として乾季水田灌漑を行っているバングラデシュ国の平坦地、塩性乾燥地における洪水取水を計画しているヨルダン国の死海沿岸地域への応用をすすめている。後者に関しては、図2に示すように、時間とともに変化する貯水池の取水制限容量を現すルールカーブが得られている。

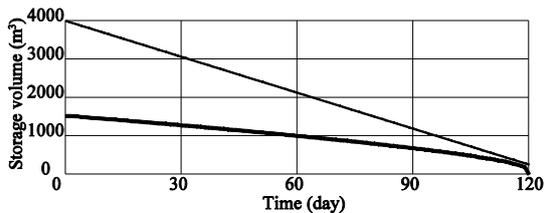


図2：貯水池ルールカーブ(太線)と満水初期条件下での最適貯水容量(細線)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Yoshioka H, Unami K (2013) A cell-vertex finite volume scheme for solute transport equations in open channel networks, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 31, 30-38. (査読有)
- ② Unami K, Yangyuoru M, Alam AHMB, Kranjac-Berisavljevic G (2013) Stochastic control of a micro-dam irrigation scheme for dry season farming, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(1), 77-89. (査読有)
- ③ Unami K, Alam AHMB (2012) Concurrent use of finite element and finite volume methods for shallow water flows in locally one-dimensional channel networks, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 69(2), 255-272. (査読有)
- ④ Yoshioka H, Unami K, Kawachi T (2012) Stochastic process model for solute transport and the associated transport equation, *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1796-1805.
- ⑤ Unami K, Yangyuoru M, Alam AHMB (2012) Rationalization of building micro-dams equipped with fish passages in West African savannas, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26(1), 115-126. (査読有)
- ⑥ Ishida K, Unami K, Kawachi T (2012): Application of one-dimensional shallow water model to flows in open channels with bends, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, Vol.17, No.2, pp.15-24.
- ⑦ Ishida K, Yangyuoru M, Unami K, Kawachi K (2011) Application of shallow water equations to analyze runoff processes in hilly farmlands, *Paddy and Water Environment*, 9(4), 393-401. (査読有)
- ⑧ Unami K, Izumi T, Imagawa C, Kawachi T, Maeda S, Takeuchi J (2010) Infiltration process in rainfed rice field soil of Ghanaian inland valley, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 15(2), 17-20. (査読有)
- ⑨ Unami K, Ishida K, Kawachi T, Maeda S, Takeuchi J (2010) A stochastic model for behaviour of fish ascending an agricultural drainage system, *Paddy and Water Environment*, 8(2), 105-111. (査読有)
- ⑩ Unami K, Abagale FK, Yangyuoru M, Alam AHMB, Kranjac-Berisavljevic G (2010) A stochastic differential equation model for

assessing drought and flood risks, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 24(5), 725-733. (査読有)

- ⑪ Unami K, Kawachi T, Kranjac-Berisavljevic G, Abagale FK, Maeda S, Takeuchi J (2009) Case study: Hydraulic modeling of runoff processes in Ghanaian inland valleys, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 135 (7), 539-553. (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 宇波耕一・梁美里 (2012) 確率制御に基づく塩性土壌の灌漑, 農業農村工学会京都支部第 69 回研究発表会講演要旨集, 2012 年 11 月 21 日, 新潟市.
- ② 宇波耕一・河地利彦 (2011) 閉鎖性水域における水質の確率過程モデルと最適制御, 農業農村工学会京都支部第 68 回研究発表会講演要旨集, 2011 年 11 月 17 日, 奈良市.
- ③ 宇波耕一・河地利彦 (2011) 確率過程制御に基づいた溜池群における貯留水の最適配分, 日本雨水資源化システム学会第 19 回研究発表会講演要旨集, 2011 年 11 月 6 日, 松山市.
- ④ 宇波耕一・河地利彦 (2011) 1 次元開水路網の流れに対する保存型数値手法, H23 年度農業農村工学会大会講演会企画セッション, 2011 年 9 月 8 日, 福岡市.
- ⑤ 宇波耕一・河地利彦・横塚貴之 (2010) 確率過程モデルに基づく灌漑用貯留タンク的设计, 農業農村工学会京都支部第 67 回研究発表会講演要旨集, 2010 年 11 月 18 日, 津市.
- ⑥ 宇波耕一・河地利彦 (2010) 移動を考慮した生物個体群の定常確率過程モデル, 日本雨水資源化システム学会第 18 回研究発表会講演要旨集, 2010 年 11 月 6 日, 岐阜市.
- ⑦ Abagale FK, Unami K, Kawachi T (2009) Key issues in management of existing micro-dams in Ghana, Proceedings of the 17th Annual Congress of Japan Rainwater Catchment Systems, 1 November 2009, Kanazawa, Japan.
- ⑧ Unami K, Kawachi T, Miyuchi A (2009) Application of shallow water equations models for water hazards problems, Proceedings of the International Conference on Water, Environment, Energy and Society (WEES)-2009, 12 January 2009, New Delhi, India, Volume I, 217-222.

[図書] (計 1 件)

- ① Unami K, Kawachi T, Maeda S, Takeuchi J (2008) Computational methods supporting rainwater harvesting technology, Chapter 4

in New Topics in Water Resources Research and Management, Edited by Andreassen HM, Nova Science Publishers, 167-193.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇波 耕一 (UNAMI KOICHI)

京都大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号: 10283649

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし