

SICORP e-ASIA共同研究プログラム
イノベーションのための先端融合分野「水資源管理」
事後評価報告書

1 対象

- ・分野名:イノベーションのための先端融合(副題:インテリジェント社会インフラ)
- ・領域名:インテリジェント水インフラ、水資源管理(2021～23 年度)
- ・課題名:ダム貯水池の動的運用による統合水資源管理

2 研究主幹

武田晴夫 株式会社日立製作所 科学技術顧問

3 研究代表者

- ・統括リーダー兼日本チーム研究代表者:
沖 大幹(東京大学 大学院工学系研究科 教授)
- ・タイチーム研究代表者:
ソムチット アムナットサン(王立灌漑局 第2灌漑センター 水管理・保守部長)
- ・ラオスチーム研究代表者:
ケオドンチャイ ケオカムプイ(ラオス国立大学 水資源学部 副学部長)
- ・日本チームの主たる共同研究者
手計 太一(中央大学 教授)ダム運用モデルの実装
乃田 啓吾(東京大学 准教授)水質モニタリング
吉田 貢士(東京大学 教授)灌漑・排水モデルの適用
加藤 亮(東京農工大学 教授)水田域の土地利用シナリオの開発
鼎 信次郎(東京工業大学 教授)ダム流入量の予測情報の開発

4 課題

e-ASIA 共同研究プログラムの本分野は、分野名である「イノベーションのための先端融合」の研究を行うための原動力として、インテリジェント社会インフラの科学技術のモデル構築を一方で目指している。モデルのフレームワークとして技術と社会課題の2次元軸を考える。技術軸は、実世界(自然環境および社会環境)を観測して仮想世界内にモデル化する技術、仮想世界上のシミュレーションでそのモデルを最適化する技術、仮想世界上の最適解を実世界に実装する技術の3技術であると定めた。技術軸と直交すべき社会課題軸について、社会インフラの基本機能とは、生命を維持する機能、共同社会を維持する機能、文明水準を維持する機能の3機能であると定めた。特に e-ASIA 地域の社会インフラとして最重要ともされる水、交通、エネルギーを各機能の代表実例として順次具体研究を行い、その後それらの研究結果を踏まえてシステムオブシステムズのインテリジェント社会インフラの科学技術モデル、特に JST としてインテリジェント社会インフラの科学技術の方法論を構築することを目指している。

本領域は上記3つのサブインフラのうち、インテリジェント水インフラ領域の研究に

取り組んだものである。2020 年 3 月の研究公募に対して合計 26 サブインフラ件の研究提案を応募頂いた。このうち 3 か国の共同研究が 21 件、4 か国の共同研究が 5 件であり、合計 83 件の応募が上記 7 か国 7 Funding Agencies に対してなされた。以上、詳細は研究主幹による本領域の研究主幹総評を参照頂きたい。

提案の主旨を、日本の国内審査委員会としては以下のように捉えた。

- (1) ダムへの水流入量の予測を、従来の数日先程度の短期変動から季節を越えた長期変動にまで対応できるように精緻化する。
- (2) ダム下流の水需要量の予測を、農業用水について従来の静的な農事歴から、動的な水田利用状況、さらに灌漑のみでなく排水状況、産業・生活など都市用水について都市拡大の長期シナリオなどを加味したものに精緻化する。
- (3) 上記(1)と(2)で精緻化された水の需要と供給の予測データからダムを最適に運用する技術を開発し、日本、ラオス、タイにおける様々な規模のダムに適用可能なモデルとして実装する。

この理解によれば、本提案は、e-ASIA 共同研究プログラムが構築を目指すインテリジェント社会インフラの科学技術モデルの本章冒頭で記述した技術軸において、本領域が前提とするインテリジェント社会インフラの3つの基本技術(cf. 研究主幹総評)について、第1の実世界(自然環境および社会環境)を観測して仮想世界内にモデル化する技術に関しては降雨等の自然観測と水需要量の社会観測、第2の計測仮想世界上のシミュレーションでそのモデルを最適化する技術に関しては上記観測結果からの将来の水需給の予測とこれに基づくダムの最適制御、第3の仮想世界上の最適解を実世界に実装する技術に関しては各国の様々な規模のダムに適用を目指すものである。同インテリジェント社会インフラ科学技術モデルの社会課題軸においては、第1の人の生命を維持する機能の代表サブインフラである水を目的とするものであるが、本領域で仮説する水インフラの基本3要素(cf. 研究主幹総評)のうち、特に第2要素の人間界での水需要の分布に合わせて水を分配する分配部に関して、同報告書記述のように人類文明誕生から現在に至るまで最も重要な構成要素であるダムの制御について、近年発展著しい AI 技術を導入して最適化しようとするものである。以上から本公募の主旨にきわめてよく合致する提案と判断され、採択が JST 事務局に対して勧告された。e-ASIA の合同評価委員会において、上記合同提案参画の他2か国も本提案を高く評価していることから、本課題の実施が e-ASIA 理事会で決定された。

なお委員の1人は、個別の運用ではなく、統合的な水管理を行うという提案は、相手国側にとっても、その他アジア諸国にとっても有用な知見になると考えられる、とコメントした。別の委員は、小規模から大規模(タイ、ラオス)なダムまでを対象とし、下流側の需要に焦点を当てているところは興味深い、とコメントした。一方委員の1人は ANN(Artificial Neural Network)を用いた降水予測のモデルについて、AI やディープラーニングを用いることにより、予測の過程にブラックボックスとなるような系が生じ、運用者が限界を理解しないまま運用する可能性の指摘と、予測の限界を運用者に理解させる方法の検討が要望された。これらの期待、要望等は採択結果通知時に研究代表者に伝えられた。

5 課題の解決程度

5.1 当初目標の達成度

研究代表者から 2024 年6月に JST に提出された終了報告書について、日本では JST としての評価のために、採択時の評価委員4人が評価委員に指名された。終了報告書は公開部分と非公開部分から構成される。以下、全評価委員による評価結果に基づいて、JST の当分野の研究主幹が、目標に対する公開部分についての達成度を公開報告するものである。

第4章記載の目標(1)については、終了報告書においては、非公開の技術詳細報告部も含めて、活動および開発された技術の陽な記載が見当たらない。ただし、本プロジェクトの成果文献リストの中に

11) 東儀奈樹, 梶山青春, 鼎信次郎, “タイ国における事前学習済みの Transformer モデルを用いたダム流入量予測”, 土木学会論文集 B1(水工学), 80(16), 23-16148, 2024.

が示されている。学会からすでに公表されている同論文の概要には、タイ国の3つのダムに関して、月流入量データからの Transformer モデルを用いた機械学習で月流入量予測を行い、ナッシュ係数について有意な効果を得たとの記述がある。特にタイにおける雨季と乾季の顕著な降水量の差異から、事前放流と洪水被害の相反リスクが冒頭で謳われている。目標(1)に正に一致する活動とみられ、それが水分野の代表的な学術誌における査読つき Journal Paper に採択されている。合わせてラオスにおいて

5) Hiroki Kawai, Md. Khoiru Zaki, and Keigo Noda, “Geographical and seasonal characteristics of APHRODITE and GSMaP in Lao P.D.R.”, IOP Conference Series, Earth and Environmental Science, 724, 012045, 2021.

のように、降水量の季節変動のデータが解析され、口頭発表されている。このように専門家の会議で本チーム以外の専門家らとの議論が行われ、これが上記 11)に反映されていると思われる。以上から目標(1)は達成されたと考える。

目標(2)については、終了報告書中の「ビエンチャン市内の水田面積の推移の解析」の記述が、目標中の「農業用水について従来の静的な農事歴から、動的な水田利用状況」に相当し、また「都市化の進行に伴う水田面積の変動について、現地の研究機関であるラオス国立大学との国際共同研究」以下の記述が、「目標中の都市拡大の長期シナリオなどを加味したものに精緻化」に相当していると考えられ、目標に対応した研究がしっかり実施されたと判断される。ただし本プロジェクトの成果文献リスト中で直接関連すると思われる文献は

3) 吉田貢士, 本間香貴, 牧雅康, 前田滋哉, 黒田久雄, “コメ単収・収穫面積推定モデルを用いたタイ国雨季米生産量の将来予測”, 応用水文[論文編], 33, 1-10, 2021.

であるが、本論文はプロジェクト開始1か月後の 2021 年5月に一般公開されているものであり、本プロジェクトにより得られた新たな知見が掲載されているとはみなし難い。また

8) Koshi Yoshida, Issaku Azechi, and Toshiaki Iida, “Impact analysis of population growth and fertilizer use on nitrogen runoff in Nam Ngum Basin, Laos”, *International Journal of Environment and Rural Development*, 13(1), 176–183, 2022.

の題名の Impact analysis of population growth 部分は本目標と共通の可能性あるようにもみえるが Fertilizer Use はダム制御と直接の関係薄いようにもみえる。むしろ待たれるのは、本文中に記載ある「ラオス国立大学 Keoduangchai Keokhamphui 教授との共著で行われた論文投稿 (Remote Sensing Applications: Society and Environment 誌) の公開である。研究内容は、ラオス国ビエンチャン市内の土地利用変遷、特に水田面積の減少についてその実態とメカニズムに関する検討」が、本プロジェクトの主要な成果になるはずである。この論文が目標(1)の達成を証明するものであろう。万一同学会の査読にて採択公開に至らなかった場合にも、他の何らかの形で同技術の成果公開の努力を続けて頂くことを望む。

目標(3)については、報告書で「実用的なダム流入量予測へと至るには、より一層の精度の向上および、現地でも操作が容易可能な情報システムの作成が必須であろう。本研究の期間にはそういった真の社会実装にまでは至らなかった」と記載されており、「ダムに実装する」目標は未達成である。ただし、本来社会実装は 3 年間の研究成果をベースにその後継続的に拡大していくべき活動である。特に e-ASIA においては、研究成果もさることながら、人的な国際ネットワークを構築することが大きな目標として掲げられているのはこのためである。本課題においては、その緒に着くまでをプロジェクト期間内に行おうとしたもので、意欲は評価される。さらにパンデミック COVID-19 による渡航制限のやむを得ない事情があったにもかかわらず、後述のように参加各国の間で研究者のみならず実務者にも及ぶ深い人的ネットワークが築かれた。今後の社会実装が大いに期待できる下地はしっかり構築できたと考える。加えて、タイにおいては実装に代えて

10) 中村駿太, 手計太一, “タイ東北部 Chi 川流域における治水・利水の両面を満足する複数貯水池運用方法の提案”, *土木学会論文 B1 (水工学)*, 80(16), 23–16143, 2023.

12) Shunta Nakamura and Taichi Tebakari, “A reservoir operation based on simple inflow prediction for flood control and water resources management in the Chi River Basin, Northeastern Thailand,” *Hydrological Research Letters*, in press.

ラオスにおいては

4) 加藤亮, 乃田啓吾, 木村匡臣, 大倉芙美, 堀切友紀子, 小山知昭, “ラオス国首都近郊の水環境整備におけるグリーンインフラの実装可能性”, *水土の知 (農業農村工学会誌)*, 89(11), 843–846, 2021.

のように、実装提案を主旨とする学術発表がなされており、またその前提となる実際の運用のデータ調査も

9) 中村駿太, 手計太一, “タイにおける 32 基の貯水池運用カタログ”, *水文・水資源学会誌*, 36(2), 139–146, 2023.

のように行われており、コロナ禍を補おうとする実装への努力は評価されてよい。

5.2 当初目標を越えた成果

国内審査委員会が理解した第3. 1節記載の主要目標を越えて得られた科学技術的成果として、以下があげられる。

ラオスのナムグム川流域およびマクヒアオ川流域における水・窒素動態などに関する知見が

8) Koshi Yoshida, Issaku Azechi, and Toshiaki Iida, “Impact analysis of population growth and fertilizer use on Nitrogen runoff in Nam Ngum Basin, Laos”, *International Journal of Environment and Rural Development*, 13(1), 176–183, 2022.

2) Xiaolan Lin, Sadao Eguchi, Shigeya Maeda, Koshi Yoshida, and Hisao Kuroda, “Combined effects of oxygen and temperature on nitrogen removal in a nitrate-rich ex-paddy wetland”, *Science of the Total Environment*, 779, 146254, 2021.

のように得られ、洪水緩和および水質浄化機能を持つため池の評価に関する研究が立ち上がった。タイのランパオダム地域を対象に作物生長モデルが構築された。これを田植え時期をより正確に表現するために、農家の労働力配分・農地配分に関する意思決定をも統合したモデル開発へと進んでいる。気候変動と塩害の関係がタイ Khon Kaen 地域において

1) Koshi Yoshida, Supranee Sritumboon, Mallika Srisutham, Koki Homma, Masayasu Maki, and Kazuo Oki, “Climate change impact on soil salt accumulation in Khon Kaen, Northeast Thailand”, *Hydrological Research Letters*, 15(4), 92–97, 2021.

として示された。ビエンチャンにおいて、人口増加と都市域の拡大により、自然の浄化機能を上回る汚濁物質が排水河川に流出し、水環境が悪化しつつある現状が認識された。ビエンチャン近郊のため池 10 か所を選定し、ため池が有する水緩和および水質浄化機能の定量評価が行われた。ビエンチャン市内の水田面積の推移の解析結果から、水田面積を戦略的に保全することによって、生態系サービスを維持できる可能性があることが指摘された。以上は、今後ビエンチャン市のマスタープランに貢献することが期待される。タイのランパオダム地域を対象にして構築された作物生長モデルは、農家の労働力配分・農地配分に関する意思決定をも統合したモデル開発へと進んでいることである。これが社会実装されれば、田植え時期をより正確に表現できるようになり、同地域の稲作の収量増、不作リスクを低減できる可能性がある。

人的ネットワークに関しては、共同研究機関であるタイ王立灌漑局とは Director 以下、ラオス国立大学とは副学長以下と、既に人的ネットワークを有していたことがうかがわれる。JST は本プロジェクトに関してはキックオフ会議や研究進捗会議、総括会議等一切立ち会っておらず、それら既存のネットワークの程度や、それが本プロジェクト実施でどの程度深まったかを客観的に確認するには至らなかった。一方国費留学生の e-ASIA 枠を活用し、ラオス国立大学から 1 名を東京大学修士課程に受け入れた。同学生は、修士課程修了後、ラオス国立大学の教員となる予定であり、今後の同国での社会実装や、さらに日本とラオスの関係強化への貢献が期待される。本プロジェクトによって形成された新たな人的ネットワークである。

5.3 領域目標達成への成果

(1) 本領域が主唱するインテリジェント社会インフラの科学技術モデルにおいて、社会インフラの3つの機能の1つである生命を維持するための代表的サブインフラである水サブインフラに関して、本分野で仮説する水インフラの基本3要素(cf. 研究主幹領域総評)のうち、特に第2要素の人間界での水需要の分布に合わせて水を分配する分配部について、インテリジェントインテリジェント社会インフラの基本3技術を貫く研究事例が e-ASIA で初めて生まれた。

(2) 第1の基本技術である実世界(自然環境および社会環境)を観測して仮想世界内にモデル化する技術については、ダムへの水の月流入量データや、農業用水の農事歴、動的な水田利用状況、都市化の進行に伴う水田面積の変動、水質悪化の状況とため池などの定量的水質浄化作用などを観測して仮想世界内にモデル化する具体手法例が示された。第2の基本技術である仮想世界上のシミュレーションでそのモデルを最適化する技術については、特にダムへの水の月流入量データから Transformer モデルを用いた機械学習で月流入量予測を行う新技術が開発された。第3の基本技術である仮想世界上の最適解を実世界に実装する技術については、上記技術開発がタイ国の3つの実在ダムを対象に行われたこと、同国の共同研究チームが実世界実装を目的とする王立灌漑局を中心に構成されていたこと、ラオス国についてもビエンチャン市のマスタープランにも資することができる水環境保全のための提案が生まれたこと、両国との水関係公的機関他との人的交流が深化したことから、今後の技術進化と顕著な社会実装技術の進展の可能性が高まった。

(3) 上記(2)は代表的国際学会で多く発表され、そこでの本チーム外の専門家との諸議論も踏まえて、水技術分野の代表的学術誌に論文が採択された。本領域が目指すインテリジェント社会インフラの科学技術モデルの帰納に向けて、多くの reference と高い publicity が構築された。