

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82111

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20606

研究課題名（和文）データ寡少流域の水リスクを回避するための多目的貯水池群の統合管理プロトコルの提言

研究課題名（英文）Development of Integrated Management Protocol for Multi-purpose Reservoirs to Avoid Water Risks in Data-scarce Watersheds of Southeast Asian Developing Countries

研究代表者

高田 亜沙里（Takada, Asari）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・研究員

研究者番号：40912069

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：東南アジア新興諸国では洪水や渇水が頻発しており、治水と利水の両視点における高度な流域水管理が急務である。水問題の効果的な解決に向け、多目的貯水池群の統合管理によるルールカーブ最適化手法の開発、および気候変動下における水リスク回避のための貯水池群の統合管理プロトコルの提言を目的とした。複数の貯水池を組み込んだ分布型降雨流出モデルを構築し、乾季・雨季の流出変化や貯水池の貯留・放流操作を考慮した流出計算を可能にした。また、気候変動下における水資源量や水利用時期の変化が水需給バランスに及ぼす影響の評価手法を提案し、特に利水リスク回避を目指した貯水池群の統合管理プロトコルの構築に向けた基盤を固めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

治水と利水はトレードオフな関係にあることから、両面に対する問題をバランス良く効率的に解決する流域水管理手法の構築が求められていた。また、東南アジア流域では、流域水管理モデルの構築に必須となる各種データが低精度あるいは入手不可能なことが多く、データ寡少な中でもいかに定量的にモデリングするか、適用可能な手法を構築するかも重要な課題であった。本研究は、近年の気候変動が水資源や水利用に及ぼす影響も考慮しつつ、これらの課題解決を目指して実施されたものである。

研究成果の概要（英文）：Developing countries in Southeast Asia experience frequent floods and droughts, and advanced watershed managements from both flood control and water utilization perspectives are urgently required. This study aimed to develop an optimization method for reservoir operation rules through integrated management of multi-purpose reservoirs to effectively solve water problems, and to propose a protocol for integrated management of reservoirs to avoid water risks under climate change. We developed a distributed rainfall-runoff model incorporating multiple reservoirs to enable runoff calculations that expresses changes in runoff during dry and rainy seasons and reservoir operations. We also proposed a method for evaluating the impact of changes in water resources and water use period on the water supply-demand balance under climate change, and established a foundation for developing an integrated management protocol for multiple reservoirs, especially for avoiding drought risks.

研究分野：水文学

キーワード：流域水管理 降雨流出モデル 貯水池操作 気候変動 水需給バランス

1. 研究開始当初の背景

東南アジア新興諸国では洪水や渇水が頻発しており、治水と利水の両視点における高度な流域水管理が急務である。流域水管理を効率的に行うため、治水面と利水面双方の機能を組み合わせた多目的貯水池が広く用いられている。貯水池は事前に定義された操作計画曲線(ルールカーブ)と貯水位の関係に基づき貯水・放流操作が行われている。実流域では、一つの流域圏内に配置された複数の多目的貯水池が複雑に影響し合うことで、流域水循環が形成されているため、東南アジア流域で顕在化している水問題解決には、貯水池群を統合した流域水管理のアプローチが必須である。その際、トレードオフ関係にある治水面・利水面の問題をいかにバランス良く効率的に解決するかが大きな課題である。多目的貯水池群の統合管理に関する研究は存在するが、長期の水文気象データや流域データが必須なため、データ寡少性が問題となる流域では実施されておらず、そのような流域にも適用できるような汎用性が求められている。また、東南アジア新興諸国では、気候変動による過去に経験が無い極端な気象イベントの増加、経済成長に伴う需要水量の増加や、土地利用変化などの影響による水リスク拡大が懸念されている。さらに、低平地域においては、海面上昇に伴う浸水被害も危惧されている。多目的貯水池群の統合管理に関しても、予測情報に基づいた極端な気象イベント、経済成長、海面上昇による水リスクを回避するためのプロトコルの確立が求められている。

2. 研究の目的

データ寡少な東南アジア流域の治水面・利水面の効果的な問題解決に向け、多目的貯水池群の統合管理によるルールカーブ最適化手法の開発、および極端な気象イベント、経済成長、海面上昇による水リスク回避のための貯水池群の統合管理プロトコルの提言を目的とする。

3. 研究の方法

ベトナム南部のサイゴン - ドンナイ川流域(流域面積:約 36,500 km²)を対象とする。同流域には、個々の機能とルールカーブの形状が異なる6つの多目的貯水池が配置されており、それらの貯水池は、下流に位置するホーチミン市の治水面・利水面に大きく寄与している。

(1)情報収集・データベース作成: Thuy Loi University, Vietnam より観測水文気象データ、流域データ、需要水量データ、貯水池操作マニュアルを収集する。入手不可だった過去の水文気象データは衛星全球データセットを、水文気象予測データは全球気候モデルを用いてそれぞれ入手する。入手不可の流域データは、衛星リモートセンシング技術で補完する。

(2)分布型降雨流出モデルの構築: 6つの多目的貯水池を含むホーチミン市の上流域を対象に、入力データの編集のみで、土地利用変化や気候変動による流出変化を予測可能な分布型降雨流出モデルを構築する。

(3)低平地タンクモデルの構築: ホーチミン市の洪水時における湛水域を推定する低平地タンクモデルを構築する。海面上昇に伴う湛水被害を考慮するため、(2)で求めた上流域からの流入量、および河口の潮位変動を境界条件とする。ルールカーブの大域的最適化計算に用いるため、流域を簡略化したタンクで表現し、計算時間を短縮する。

(4)貯水池群の統合管理によるルールカーブ最適化: (3)で求めた湛水域と水需給差の最小化を目的関数として、SCE-UA法で最適化計算を行う。治水面・利水面のパレート最適解を求めて、両面のバランスが取れたルールカーブを作成する。

(5)水リスクを回避する貯水池群の統合管理プロトコルの提言: 全球気候モデルから得た複数の予測シナリオに基づいた極端な気象イベント、海面上昇や需要水量の増加などを想定した各貯水池のルールカーブを作成する。政策担当者が任意で最適な流域水管理方を決定できるように、パレート最適解の感度解析で求めた治水面・利水面のリスク情報を提言する。

4. 研究成果

(1)情報収集・データベース作成: 現地の研究協力者を通じて、分布型降雨流出モデルや低平地タンクモデルの構築に必要な地形データ、水文気象データ、および貯水池操作規則(ルールカーブ)の最適化に必要な貯水池操作マニュアル、水需給データを入

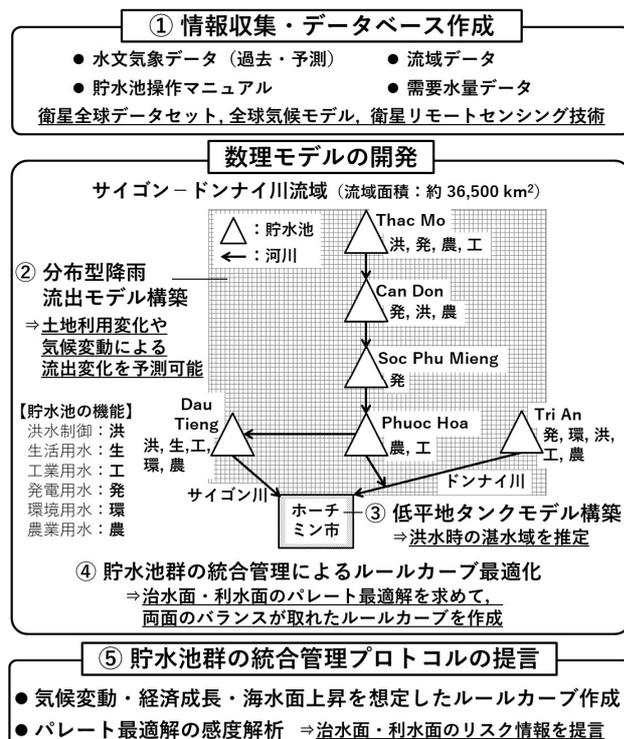


図1 研究手法の概要

手した。また、気候変動による水リスクの評価に向けて全球気候モデルによる気象予測データの入手、および観測データと比較したバイアス補正を行った。

(2)分布型降雨流出モデルの構築：6つの多目的貯水池を連携した操作を表現するため、流域全体を対象とした分布型降雨流出モデルの構築に取り組んだ。まずは、Tri An 貯水池流域(図2)を対象にモデルのプロトタイプを構築した。Tri An 流域内には Tri An 貯水池以外に9個の中小規模の貯水池が配置されている。6つの多目的貯水池と比べて、Tri An 流域内の貯水池は規模が小さく、シンプルな操作規則が設定されていることから、プロトタイプ構築の対象とした。

熱帯多雨地域特有の降雨の空間的不均一性や、将来的な土地利用の変化も反映可能なモデルとするため、流域全体を正方形メッシュで表現し、各メッシュに入力した雨水を流下方向に追跡する分布型降雨流出モデルを採用した。モデルの概要を図3に示す。計算時間短縮のため、流域を4500mの陸域メッシュで表現し、10個の貯水池を配置した。その際、流域境界、標高、土地利用については、オリジナルの90mメッシュデータから4500mメッシュデータへ粗視化を行った。各陸域メッシュは、水田、畑地、市街地、森林、以上4種類の土地利用と河川を含む。メッシュスケールの粗視化後も土地利用実態をモデルに反映し、各土地利用からの流出をより正確に表現し再現性を高めるため、土地利用別タンクモデルを導入した。各土地利用別タンクモデルの側孔からの流出量は、各メッシュにおけるそれぞれの土地利用面積を乗じて河川に流入させた。また、土地利用別タンクモデルの最下段タンクからの浸透量は、流域全体に1つ設定した流域地下水タンクへ流入させた。そして、流域地下水タンクへの流入水は、地下水として、タンク貯留高に比例して再び個々のメッシュ内の河川へ流出させた。流出係数と浸透係数は、中桐ら(2000)の値を参考に試行錯誤的に決定した。図4に示すように、メッシュ間の流出計算は陸域から陸域、陸域から貯水池、貯水池から陸域へ流出する場合の3種類に分類される。陸域から陸域へ、陸域から貯水池へ流出する場合の河川流量は Manning 則に基づく Kinematic Wave 法を用いた。貯水池から陸域への流出量は、ベトナム総理大臣名で公布されている貯水池運用方針に基づいて決定した。流域内の貯水池は、雨季と乾季で異なる操作が定められており、乾季は決められた最低放流量を下回らないように流出させ、雨季は貯水池毎に作成した操作のフローチャートをもとに放流量を決定した。必要なデータが揃っている17年間について1年間ごとに計算を行い、貯水池操作を組み込んでいないモデル(旧モデル)と、今回構築した貯水池操作を組み込んだモデル(新モデル)の Nash-Sutcliffe 係数(以下、NS)を比較した。その結果、全ての年でNSが向上し、うち7年では再現精度が高いとされる $NS > 0.75$ となった。計算流量と観測流量の比較の一例として、最も再現精度の高かった1991年の結果を図5に示す。本研究で構築したモデルでは、旧モデルに比べてより観測値に近い波形を得ることができた。また、乾季の一定量の流出や雨季の貯水によるピークカット効

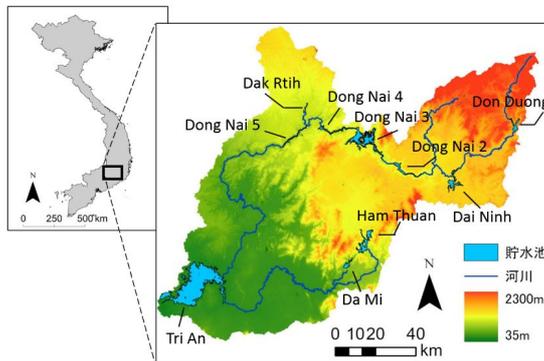


図2 Tri An 貯水池流域の概要

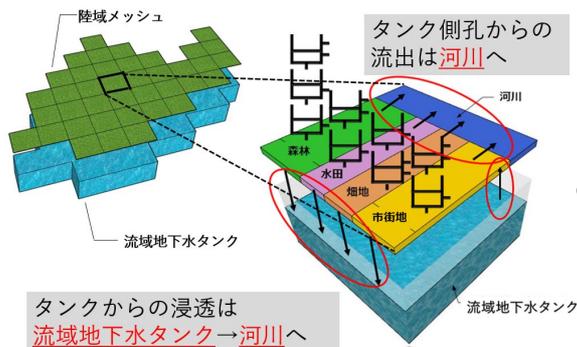


図3 分布型降雨流出モデルの概要

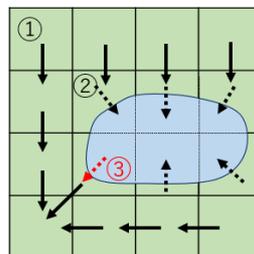


図4 メッシュ間流下過程の模式図
(緑が陸域メッシュ、青が貯水池)

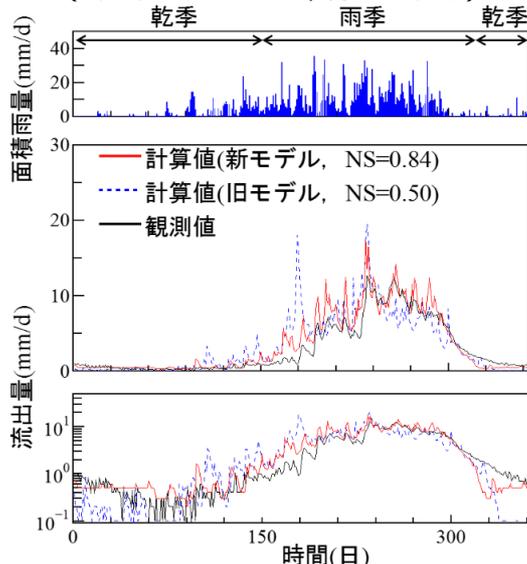


図5 計算結果の一例

率は、乾季は決められた最低放流量を下回らないように流出させ、雨季は貯水池毎に作成した操作のフローチャートをもとに放流量を決定した。必要なデータが揃っている17年間について1年間ごとに計算を行い、貯水池操作を組み込んでいないモデル(旧モデル)と、今回構築した貯水池操作を組み込んだモデル(新モデル)の Nash-Sutcliffe 係数(以下、NS)を比較した。その結果、全ての年でNSが向上し、うち7年では再現精度が高いとされる $NS > 0.75$ となった。計算流量と観測流量の比較の一例として、最も再現精度の高かった1991年の結果を図5に示す。本研究で構築したモデルでは、旧モデルに比べてより観測値に近い波形を得ることができた。また、乾季の一定量の流出や雨季の貯水によるピークカット効

果も再現できていたことから、東南アジア流域における乾季・雨季の流出変化や貯水池操作を精度良く表現できるモデルだと考えられる。

当モデルは、多くの研究事例があるタンクモデルを各土地利用からの流出の表現に用いているため、既往の研究を参考にパラメータが推定し易く、東南アジア新興諸国のデータ寡少性および低精度が問題となる流域において適用性が高いと考える。また、各メッシュサイズを 4500 m に粗視化した結果、計算時間を大幅に短縮できつつも十分な再現性も確保できたことから、多目的貯水池のルールカーブの大域的最適化のような計算時間の短縮が必須となる事例に対しても有効なモデルである。

(3)低平地タンクモデルの構築：新型コロナウイルスの影響で渡航および現地調査ができず、低平地タンクモデルの構築に必要な排水施設や水門等に関する情報やデータを収集できなかったため、モデルを構築することが困難だった。それに伴い、(4)貯水池群の統合管理によるルールカーブ最適化についても、治水面に関する入力値として重要なホーチミン市の湛水域をシミュレーションできず、多目的貯水池群の統合管理によるルールカーブ最適化手法の構築に至らなかった。そこで、(5)水リスクを回避する貯水池群の統合管理プロトコルの提言に関して、気候変動下で起こり得る水リスクの評価手法の構築を優先して取り組むことにした。

(5)水リスクを回避する貯水池群の統合管理プロトコルの提言：対象流域での水需要量が最大の農業用水に着目し、気候変動により水資源量が変化した場合、および適応策として作付け時期（農業用水の利用期間）が変化した場合に、水需給バランスに対して及ぼす影響の評価手法を構築した。気候変動下における水資源量の変化、および農業用水の利用時期の変化による渇水リスクを回避するための貯水池群の操作規則を提示することを目指して取り組んだものである。対象流域では農業水利用に関する情報が十分に入手できなかったことから、まずはデータが豊富な日本の流域（信濃川流域）を対象に手法の構築を目指した。水稲生育収量予測モデル（Ishigooka et al., 2017）と分布型降雨流出モデル（Yoshida et al., 2016）に対して、1週間毎に最大±5週間まで変更した田植え日を入力し、収量・品質と水需給バランスを計算した。各田植え日における収量・品質と水需給バランスを図6のプロットで示した。プロットが右肩下がりで、田植え日の変化が両者に利益をもたらす場合を「調和型」、プロットが右肩上がりで、一方に利益をもたらす田植え日が他方に損害を及ぼす場合を「競合型」とした。水需給バランスの評価指標として、利水基準点における灌漑期間の正常流量を下回った量の累積値（以下、渇水量）を田植え日毎に算出した。また、水稲生育の評価指標として、総収量と米の等級決定の基準に大きく影響する外観品質（白未熟粒の発生）に着目した。白未熟粒の発生率は出穂後20日間の日平均気温が26°Cを超えた値の積算値（ヒートドース値）と明瞭な関係があることから、算出された収量をヒートドース値に基づいて3クラスに分類し、このうち、高温による外観品質の低下リスクが低い米の収量（以下、外観品質良好米の収量）を外観品質に関する指標とした。3種類の全球気候モデル（MIROC5、MRI-CGCM3、HadGEM2-ES）による気象予測値を入手し、シナリオはHistorical（1981–2000年）RCP2.6およびRCP8.5（2011–2030、2031–2050）を用いた。また、信濃川流域への適用に際しては、信濃川中下流の利水基準点である小千谷観測所とその下流に広がる灌漑区域を対象に渇水量と収量・品質を計算し、田植え日変更による影響のみに焦点を当てて評価するために、対象の灌漑区域を一つの地区として扱い、同一の田植え日と作付け品種（コシヒカリ）を割り当ててモデル計算を行った。対象地区における2019年の最盛期にあたる5月9日を現在の田植え日とした。

Historicalシナリオ（1981–2000年）において、田植え日を変更した場合の総収量—渇水量および外観品質良好米の収量—渇水量の関係性を図7に示す。総収量—渇水量は右肩下がりのプロットを描いており、総収量が増加する移植日を選択すると渇水量も減少する調和型が示された。一方、外観品質良好米の収量—渇水量は右肩上がりのプロットを描いており、外観品質が向上する移植日を選択すると渇水量が増加する競合型が示された。現在の田植え日に着目すると、総収量—渇水量の関係では、渇水量が最小、総収量が最大となる右下に近い位置に現在の田植え日があるが、外観品質良好米の収量—渇水量の関係では渇水量は最小に近いものの、外観品質が最大となる位置に現在の田植え日がない。つまり、現在は外観品質ではなく、高い総収量を確保できるような田植え日に落ち着いているものと考えられる。図8にRCP2.6シナリオの2011–2030年と2031–2050年における総収量—渇水量、外観品質良好米の収量—渇水量の関係を描いた。RCP2.6シナリオでも総収量—渇水量が調和型で、総収量が増大するように田植え日を選択すれば、渇水量も低下できることが示された。一方、外観品質良好米の収量—渇水量は競合型で、2011–2030年には+5週間で現在と同程度の外観品質を担保できるものの渇水量が28.9倍まで増加すること、さらに、2031–2050年には+5週間でも現在より外観品質が低下することが示された。RCP8.5シナリオでも同様の結果が得られたが、RCP2.6シナリオより渇水傾向が弱まり、外観品質の低下傾向が強まることが確認された。外観品質良好米の収量—渇水量の関係をIPCC第6次評価報告書第2作業部会報告書（以下、IPCC第6次評価報

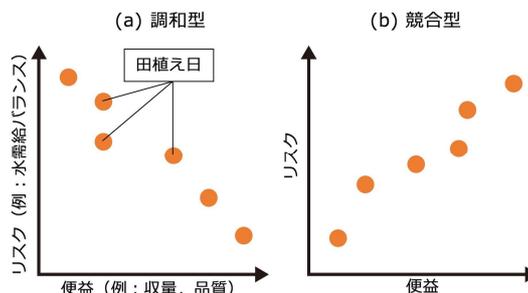


図6 田植え日の影響評価プロット

告書)で述べられた、適応策の実現可能性や適応限界の観点でみていく。信濃川中下流域が含まれる新潟県中越地域においては、1953-1998年には渇水リスクが低下しつつ総収量が增大する方向(早期化)に田植え日が推移してきたものの、2000年代以降に外観品質が増大する方向への推移(晩期化)がみられた。これは、2000年代以降の外観品質に対する重要性の高まりを示していると考えられる。田植え日の変更は、2011-2030年において+5週間により外観品質が現状値まで回復するという点で対象地区での有効性は認められるが、同時に渇水リスクを高める。つまり、田植え日の変更という適応策を実行するときに、他の要因(水需給バランスの悪化)によってその実現が阻害される可能性を示している。この状況をIPCC第6次評価報告書では「ソフトな適応限界」と呼んでおり、本研究は日本の水資源と水稲生産の間で生じ得る「ソフトな適応限界」の一例を示している。また、2031年以降には田植え日を変更しても現状と同程度の外観品質を担保できないことから、田植え日の変更という漸進的な適応策ではなく、ダムや水利施設の建設、品種改良等の革新的な適応策が必要になると考えられた。

本研究で提示した枠組みは、水資源と水稲生産に関する2つのプロセスモデルに、複数パターンの田植え日を与えて実行するという非常にシンプルな手法であることから、データ寡少で水資源と水稲生産を統合したような高度なプロセスモデルの構築が難しい流域においても適用性が高い手法であると考える。東南アジア流域を対象とした水稲生育収量予測モデルは様々なものが提案されていることから(例えば、Hasegawa et al., 2008)、今後は本研究で構築した分布型流出モデルと組み合わせて、作付け時期の変化が水需給バランスに及ぼす影響を評価するとともに、渇水リスク回避のための貯水池群の操作規則の提示を目指していく。

本研究期間全体を通じて、貯水池群の貯水・放流操作を表現可能な分布型降雨流出モデルを構築でき、気候変動下における水資源量・水利用の変化に関する検討および評価手法の構築を行なったことから、研究計画で想定した水リスクのうち「渇水」の回避に向けた貯水池群の統合管理の提案の準備は概ねできている。一方で、「洪水」に関しては、本研究期間で十分な検討ができなかったことから、今後は貯水池群の下流域の洪水リスクの評価モデルの構築を行い、渇水と洪水の両リスクに対して有効な貯水池群の統合管理手法の提案を目指す。

参考文献:

中桐ら(2000), 農業土木学会論文集, 205, pp.35-42; Yoshida et al. (2016), Irrigation and Drain-age, 65, pp.31-39; Ishigooka et al. (2017), Journal of Agricultural Meteorology, 73(4), pp.156-173; Hasegawa et al. (2008), Paddy and Water Environment, 6, pp.73-82.

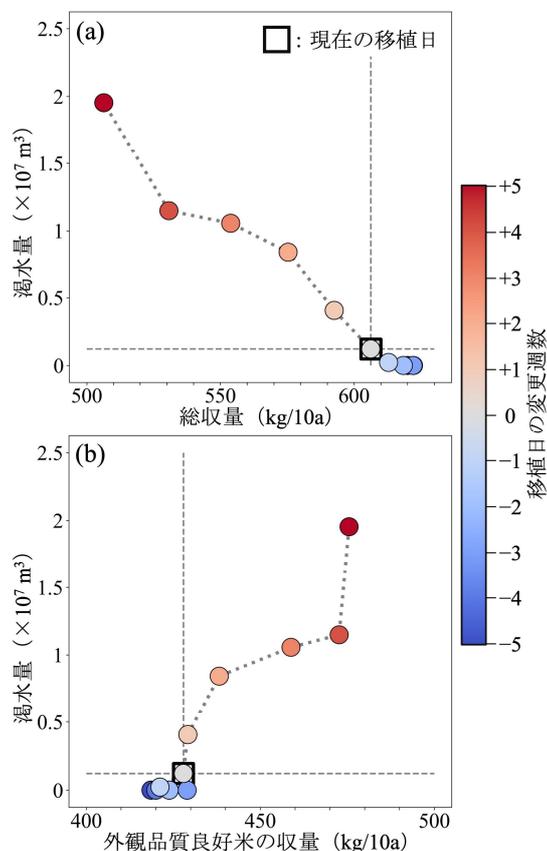


図7 Historical シナリオにおける農業便益と渇水リスクの関係:(a) 総収量—渇水量 (b) 外観品質良好米の収量—渇水量

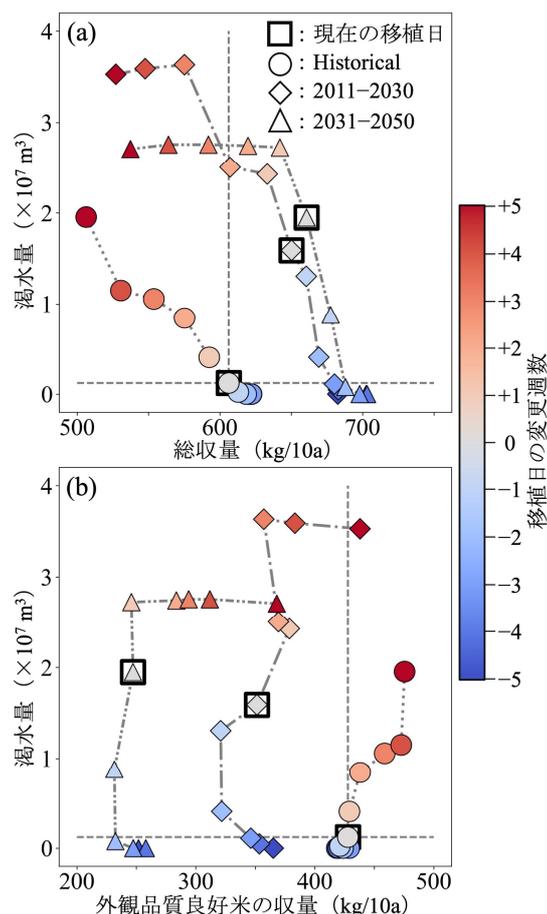


図8 RCP 2.6 シナリオにおける農業便益と渇水リスクの関係:(a) 総収量—渇水量 (b) 外観品質良好米の収量—渇水量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高田 亜沙里, 吉田武郎, 石郷岡康史, 丸山篤志, 工藤亮治	4. 巻 91(5)
2. 論文標題 水稻生産者の気候変動への適応戦略と水資源の相互影響評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業農村工学会誌	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 高田 亜沙里, 平松 和昭, Trieu Anh Ngoc, 原田 昌佳, 田畑 俊範
2. 発表標題 東南アジア流域における湯水軽減と洪水防除を効果的に両立可能な多目的貯水池ルールカーブの最適化手法の開発
3. 学会等名 2021年度 (第70回) 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田 亜沙里, 吉田武郎, 石郷岡康史, 丸山篤志, 工藤亮治
2. 発表標題 農業水利用時期の変化を考慮した水資源影響評価: 信濃川流域を事例として
3. 学会等名 2022年度 (第71回) 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Asari Takada, Takeo Yoshida, Yasushi Ishigooka, Atsushi Maruyama, Ryoji Kudo
2. 発表標題 Conflict between rice cultivation and water use under changing climate
3. 学会等名 24th International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Asari Takada, Takeo Yoshida, Yasushi Ishigooka, Atsushi Maruyama, Ryoji Kudo
2. 発表標題 Assessing the impact of changes in water use period on interactions between agricultural production and water resources
3. 学会等名 PAWEES2022 International Conference 2022 in Fukuoka (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Asari Takada, Takeo Yoshida, Yasushi Ishigooka, Atsushi Maruyama, Ryoji Kudo
2. 発表標題 Relationship between rice production and water resources: The feasibility of shifting the transplanting date as an adaptation measure under climate change
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------