

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成 14 年度採択研究代表者

丹治 肇

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所  
農村総合研究部 有明海研究チーム チーム長)

「国際河川メコン川の水利用・管理システム」

## 1. 研究実施の概要

メコン川流域は戦乱が終了し、人口増加と経済的開発が拡大している。今後、開発と環境のバランスに配慮した水資源の保全と利用が、重要な流域の課題になると予想される。ここでは、メコン川流域の水循環の特徴に配慮しつつ、持続可能な水利用を可能にする水利用ルール、社会制度、政策提言を検討する。

研究は、①水利用(水循環と水利用の実態解明とモデル化)、②人間活動(農林水産業と水利用の関連の実態解明及びモデル化と水利用の改善方法の探索)、③経済発展(経済モデル)、④システム(政策シナリオ分析)などの各グループによる持続可能な水利用ルール等の提言に分かれる。

17 年度までに、データ収集と現地調査により、メコン川下流 4 カ国において水循環の実態と農林水産業の実態の調査を進め、部門ごとのモデルを作成してきた。18 年度は統合モデルの中心となる経済モデルの開発と部門ごとのモデル構築をすすめた。また、最終的な政策提言を行うための政策シナリオの検討を進め、政策提言の検討に着手した。19 年度は、モデルを活用し、政策提言に向けたシナリオ評価を行う予定である。

18 年度は各課題に次の進展があった。

### ① 水利用グループ(水循環と水利用の実態解明とモデル化)

メコン川下流域全体の 10kmメッシュレベルの水循環モデルを改良した。18 年度は、従来の標高データ(DEM)に基づいた D8 手法と単純な形態学のアルゴリズム(Voronoi Diagram)を結合し、ラスタ形式の数値河川網から河川の骨組を抽出し、河川の一部に湖、ループ、派川としての属性を与えて、流路やサブ流域界などの決定手法を開発した。更に、これらの河川情報を地面特性のデータセット、降水量データセット、蒸発散データセットなどと結合し、TOPMODEL で水文シミュレーションを行った。

メコンデルタの塩水遡上問題では、Dai 川と Ham Luong 川に囲まれた Ben Tre 省内の運河網で流水と水質のシミュレーションを行った。その結果、近年の樋門建設は運河内の塩分濃度を劇的に減少させたが、上流側からの淡水補給が十分でないところでは運河の水位低下を招いたことが

分かった。

水質モデルでは、メコン川本川の Kaoliao 浄水場地点での週に 2 回の定点観測(水温, EC, 濁度, クロロフィル濃度, および TN, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P の各濃度)を継続した。各水質項目について LQ 関係を求め、負荷量の推定を行った。また、ナムグム川支流 XayMuang 川における観測を継続した。

#### ② 人間活動グループ(農林水産業と水利用の関連)

農業分野では、塩水遡上地域である Tien Gian 省 Go Cong 県 Con Sau Xa 島の米の収量データを整理して、モデルによるシミュレーション結果と比較した。モデルの開発と並行して、スケールアップのためのプログラム開発を進め、気象データの空間推定・表示する機能や、栽培可能期間から栽培回数及び定植時期を計算する機能を組み込んだ。

林産業分野では、メコンデルタ地域の Dong Thap 省 Thap Muoi 郡 My Hoa 村、Tien Giang 省 Tan Phuoc 郡 My Phuoc 村、Long An 省 Thanh Hoa 郡 Thuy Tay 村にてメラルーカ植林システムについて調査を行った。その結果、木材工業で利用するには適切な植林密度を含め植林方法の見直しが必要である。また、メラルーカ植林等に掛かる経費(盛土、耕起、水路、植栽、農薬、施肥、早魃、伐採)を、パルプ用のユーカリ・アカシア混合植林と比較したところ、遜色が無かった。

水産業分野では、従来の結果を取りまとめて論文として発表した。

#### ③ 経済発展グループ(経済発展モデル)

ラオスとカンボジアについて社会会計表の推計を行った。それらを用いて産業連関分析と SAM 乗数分析を行い、両国の経済システムの特徴を明らかにした。更に、両国の応用一般均衡モデルを構築した。中国雲南、ラオス、東北タイ、カンボジア、ベトナムメコンデルタにおける水需要とメコン水系の流量を比較できるモデルを構築した。その結果、高い経済成長が予測される中国雲南では年間総流出量に対する水需要の比率が 2050 年にかけて急上昇する可能性の高いことが予測された。

#### ④ シナリオグループ(政策シナリオ分析)

カンボジアの農業開発シナリオ推定のために、バライシステム、バテイシステム、コルマターージュ・システムについて、現地調査結果に基づき、必要な灌漑用水量と生産の関係を明らかにした。このデータに基づき、灌漑面積当たりの必要な貯水池面積が推定可能になった。

水循環モデルに、ダムと灌漑面積の組み込みを行うためのデータセットの作成と、発電ダム操作ルールを解析を行った。

ラオスの灌漑開発に焦点をあてて、人口、農業起因の発生負荷量の変動、および水質環境悪化による成長制約についてシステムダイナミクスモデルを構築した。

農業開発、灌漑開発、水産開発について、ポテンシャル評価を行った。このうちカンボジアの水産開発については、漁獲量の減少傾向が一転して、増加傾向に転じている。この原因として、漁獲努力量の分析を行った。適正な開発評価軸については、世銀、アジア開発銀行、JICA などの評価をレビューし、経済成長と貧困解消の 2 つが大きな評価であることを明らかにした。これに、環境保全を加えれば大きな論点には対処できる。

## 2. 研究実施内容

### (1) 研究目的

メコン川流域は戦乱が終了し、人口増加と経済的開発が拡大している。今後、開発と環境のバランスに配慮した水資源の保全と利用が、流域の重要な課題になると予想される。そこで、メコン川流域の水循環の特徴を明らかにするとともに、その知見に基づいて、持続可能な水利用を可能にする水利用ルール、社会制度、政策提言の検討を目的とする。

### (2) 研究方法

本研究は、メコン川の水循環の特徴をまず、①基本的な水利用実態を明らかにする課題(水利用)、②水利用と人間活動、特に農林水産業との関連を明らかにする課題(人間活動)で明らかにする。この知見を受けて、将来シナリオを③経済発展シナリオのレベルで検討する課題(経済発展)、更には、④経済活動以外の点も配慮した政策シナリオを検討する課題(システム)から構成されている。以下、課題毎の手法を述べる。

#### ① 水利用

水循環の実態を明らかにし、数値シミュレーションによって利用可能な水資源量の推定を行う。ここでは、水理学的モデル、水文学的モデル、水質モデルが構築される。

#### ② 人間活動

農業分野では、塩水遡上地域での実態調査に基づいて、米生産量と栽培可能期間の関係を解明し、モデルを開発する。林産業分野では、メコン地域で通常の作物栽培ができず、生産性の低い酸性土壌地帯で、栽培可能なメラルーカの資源量及び生産性、さらに、メラルーカの木材工業への適用可能性やその他の有効活用技術について検討する。水産業については、従来の結果を取りまとめる。

#### ③ 経済発展

メコン川下流域の将来予測とシナリオ評価のために、応用一般均衡モデルの構築とパラメータ推計を行う。そのモデルとリンクして水需要量の予測を行う水需要モデルの構築も行う。将来予測と並んで社会的最適性の分析も重要なテーマであることから、C. Ringlar による既存水資源配分最適化モデルの拡張も行う。これらのモデルを利用したシナリオ評価の準備として、当該地域の電力供給に関する情報収集も行う。

#### ④ システム

カンボジアの農業開発シナリオの検討のために、パラシシステム、バテイシステム、コルマタージュ・システムにおいて、灌漑用水量の実態を明らかにし、開発面積当たりの必要な貯水池容量の推定式を作成する。

個別シナリオの水循環への影響を予測するために、発電ダム開発と灌漑開発を水循環モデルに組み込む。まず、そのために開発シナリオベースにモデルを組み込み、データを作成する。

システムダイナミクスモデルを用い、経済モデルでは表現しにくい水利用変化と窒素・リンに関する物質収支の変化についてシナリオごとの変動を検討する。モデルの評価指標については、人口、土地利用面積、GDP 等の統計データおよび実測で得た水質指標を取り上げ、予測シナリオに

関して各指標がどのように変動するかを検討する。

政策提言を行うために、既存の ODA で問題にされている評価軸を整理し、論点を明らかにする。個別開発シナリオと各ステークホルダーの利害関係を整理し、検討に値するシナリオを絞り込む。

### (3) 結論

18 年度までの研究で得られた成果は以下である。

#### ① 水利用

##### ● 水循環モデル

メコン川下流域全体の 10kmメッシュレベルの水循環モデルを改良した。メコン下流域には、湖や、流路のループ、派川が含まれ、また、メコンデルタには平坦地域が多い。よって、各河川と湖の間の、流入流出関係のモデルや、サブ流域界の分離は従来の手法では極めて困難である。18 年度は、従来の標高データ (DEM) に基づいた D8 手法と単純な形態学のアプローチ (Voronoi Diagram) を結合し、ラスタ形式の数値河川網から河川の骨組を抽出し、河川の一部に湖、ループ、派川としての属性を与えて、流路やサブ流域界などの決定手法を開発した (図 1 参照)。更にこれらの河川情報を地面特性のデータセット (図 2)、降水量データセット、蒸発散データセットなどと結合し、TOPMODEL で水文シミュレーションを行った (図 3)。

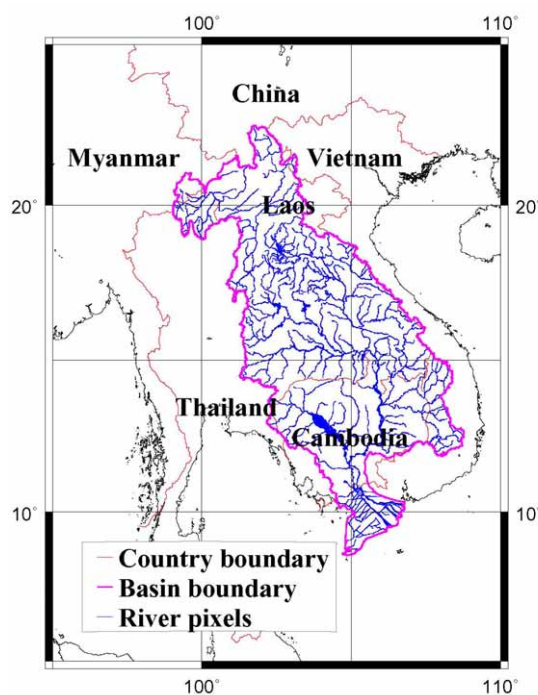


図 1a メコン下流域の数値河道網

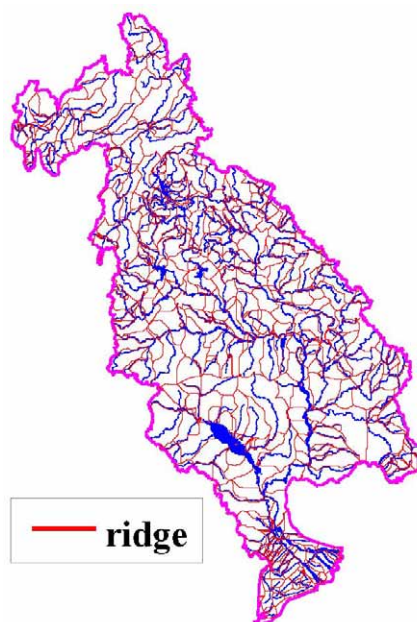


図 1b D8+Voronoi Diagram によって決定された流域界

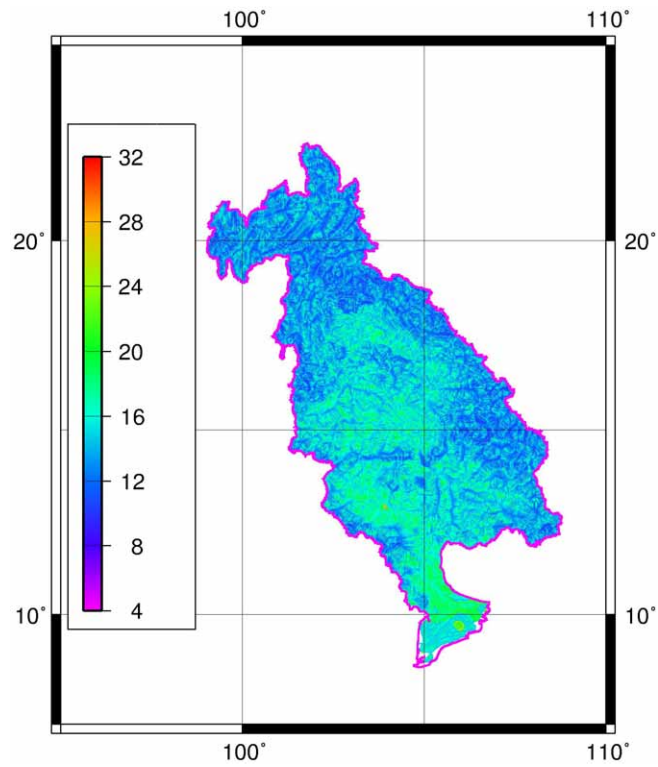


図2 河道網メコン下流域における  $\ln [a/\tan(\beta)]$  の分布 (TOPMODEL 用)

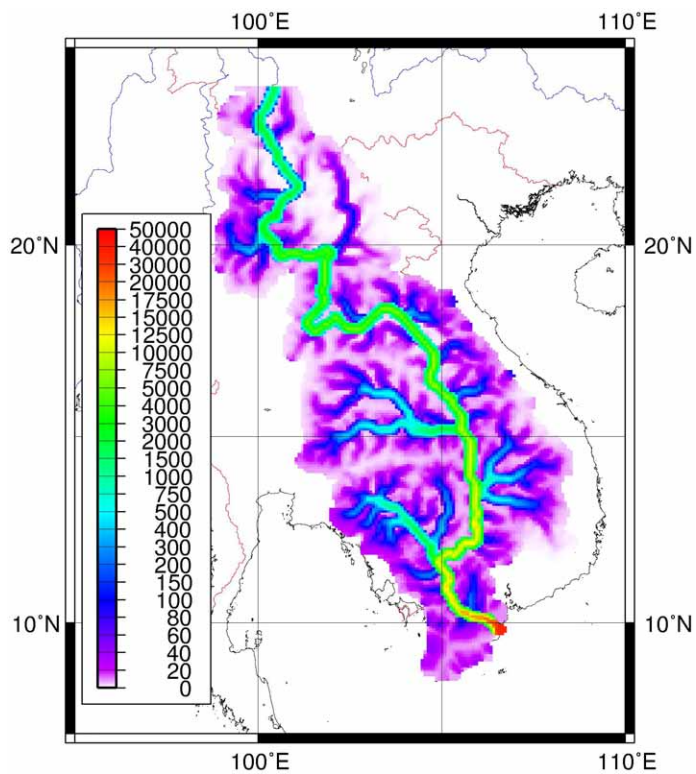


図3 水循環モデルの仮稼動によるメコン下流域における流出の分布 (1993年9月、単位  $\text{m}^3/\text{s}$ )

また、水循環モデルの実稼動に向かって、洪水氾濫と、上下流間に河道流量の相互影響を組

み込むため、開水路の Diffusion モデルと Kinematic モデルを比較検討した。図 4 に示したサンプルの開水路の場合、Diffusion モデルが下流水位の影響をよく反映できることが分かった。

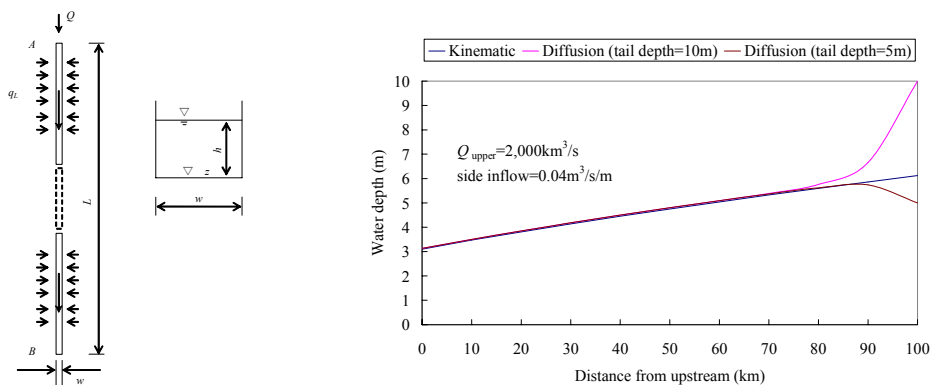


図 4a サンプル開水路の境界条件

図 4b Kinematic モデルと Diffusion モデルの結果比較

#### ● メコンデルタの塩水遡上問題

メコンデルタの塩水遡上モデルでは、モデル適合性検討のために、Hau 川で塩分濃度と流量を観測した。2 大派川の 1 つ Tien 川での塩分濃度 (TPM) と流量 (ADCP) による観測は 17 年度までに終了したので、18 年度は、もう 1 つの派川である Hau 川において同様の観測を行った。

17 年度のデルタ内を分流する 5 派川の計算に続き、18 年度にはデルタ内に毛細血管状に展開する運河内で流水と水質の数値シミュレーションを行った。対象地域は、Dai 川と Ham Luong 川に囲まれた Ben Tre 省内の運河網である。運河網の末端は、以前は Tien 川の派川や南シナ海に接続、開口していた。しかし、近年、運河内の塩分濃度を減少させる目的で運河末端に逆潮樋門が多数建設されている。数値シミュレーションでは、樋門の建設前後での運河内の水質変化や水の滞留時間などを検討した。その結果、樋門建設は運河内の塩分濃度を劇的に減少させたが、上流側からの淡水補給が十分でないところでは運河の水位低下を招いた。一方、樋門建設によって一方向流れになった結果、樋門周辺部の全体に水の滞留時間は増加し、より上流の水の滞留時間は減少した。ただし、今回のシミュレーションではモデルへの組み込みは比較的規模の大きな運河に限られている。そこで、今後モデルを精緻化して結果を検討する必要がある。

#### ● 水質モデル

メコン川本川の Kaoliao 浄水場地点での週に 2 回の定点観測 (水温、EC、濁度、クロロフィル濃度、および TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の各濃度) を継続した。18 年度は、蓄積されたデータの解析を進め、以下のような成果を得た。

##### (a) 各水質項目間の単相関

流量、クロロフィル濃度、濁度の 3 項目は全期間で相関が高かったが、その他の項目間では高水期と低水期とで相関の状況が大きく異なる場合が多かった。TP 濃度と流量との相関は低水期に高かったが高水期には低かった。流域からのリン供給はある程度で頭打ちになり、高水期には流量とリン濃度との相関が低くなるものと考えられた。

(b) 水質項目のクラスター分析

SAS を用いて水質項目のクラスター分析を行った。流量、クロロフィル濃度、濁度は隣接したクラスターに分類された。窒素成分は流量との距離が大きかった。

(c) 流量の増減と各濃度との関係

水質を、流量増加時と流量減少時とに分類し、それぞれの濃度と流量の増減量との相関を求めた。低水期には TN、TP、NH<sub>4</sub>-N 濃度と流量増加量との相関が高かった。TP、NH<sub>4</sub>-N 濃度と流量減少量との間に有意な相関が認められ、急激な流量減少による河岸侵食の影響が示唆された。

(d) LQ 関係の解析と負荷量の推定

各水質項目について LQ 関係を求め、水質項目による LQ 関係の違いを考察した。さらに、得られた LQ 式を用いて負荷量の推定を行った。

ナムグム川支流 XayMuang 川における観測を継続した。観測頻度は週2回で、項目は水位、流速(うきによる)、TN、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、TP、PO<sub>4</sub>-P である。

② 人間活動

• 農業分野

農業分野では、塩水遡上地域である Tien Gian 省 Go Cong 県 Con Sau Xa 島の米の収量データを整理して、モデルによるシミュレーション結果と比較した(図 5)。このモデルは、日射量、光合成速度、窒素供給量、乾物分配、生長期間をそれぞれパラメータとし、その値を外生的に与え得るメカニスティックなものである。ここでは、イネ栽培可能期間が米生産量を規定する大きな要因と仮定して、その他のパラメータは現実的に可能な最大値をとる。その結果、図 5 に示すとおり、モデルは面接調査で得られた米生産量の最大値を与えていると見られた。特に一期作では、栽培可能期間が 90 日より長くても収量は増えない。このように観測値がモデルの推定値を下回る原因が、環境ストレスによって生長が全般的に不良となるためか、環境に適応した品種の特性であるのかは、今後の調査で明らかにして、適宜モデルに取り込む。なお水稻栽培可能期間は、塩水遡上および酸性水に対応した水門操作で規定されていることが、17 年度の調査で明らかになっている。

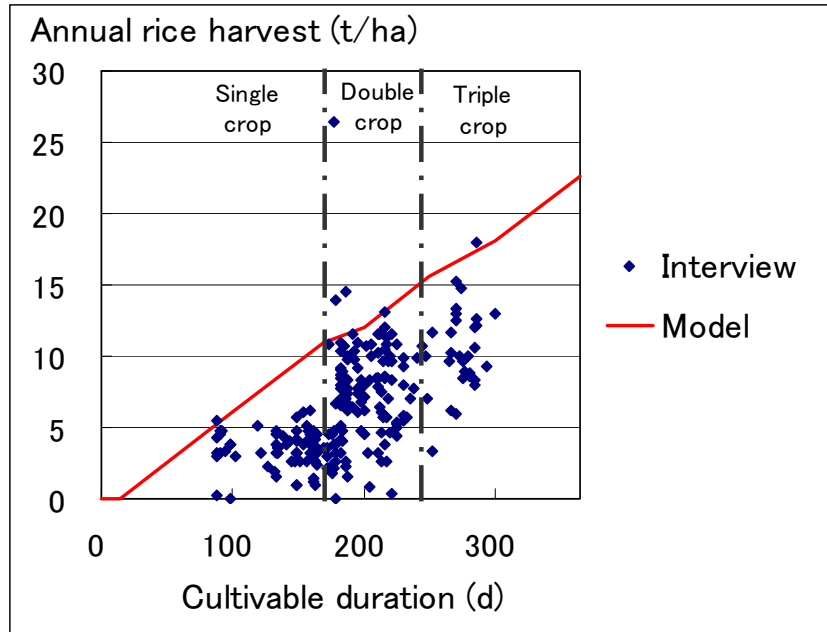


図5 栽培可能期間と年間米生産量の関係。点は農家調査結果、線はモデルの推定値

モデルの開発と並行して、スケールアップのためのプログラム開発を進め、気象データを空間推定する機能や、栽培可能期間から栽培回数及び定植時期を計算する機能をインプリメントした。

- 林産業分野

林産業分野では、メコンデルタ地域の Dong Thap 省 Thap Muoi 郡 My Hoa 村、Tien Giang 省 Tan Phuoc 郡 My Phuoc 村、Long An 省 Thanh Hoa 郡 Thuy Tay 村にてメラルーカ植林システムについて調査を行った。その結果、植林当初における植林密度は 30,000～40,000 本/ha で立木間隔がかなり狭いこと、伐期が7～8年と短く木材の直径は平均 15cm 以下と小さいことが明らかとなった。木材工業での利用を想定した場合現在の典型的な丸太径をアカシアレベルの 20cm 以上にするためには、植林期間を現状より5～15年延長する必要がある。

なお、メラルーカ材の厚い樹皮の利用として、樹皮バイダーレスボードの製造の可能性について検討を行った。樹皮に含有されている撥水性物質の効果により、軽量で耐水性のある樹皮ボードの製造が可能である。

さらに、外樹皮に含まれる薬理活性が期待できるベツリン酸を含むテルペン類の利用可能性を検討するためにメラルーカ材4種について成分分析を実施し、テルペン類の含有量に種間で差異のないことが認められた。

また、メラルーカ植林等に掛かる経費(盛土、耕起、水路、植栽、農薬、施肥、旱魃、伐採)を、パルプ用のユーカリ・アカシア混合植林と比較し、遜色のないことが明らかとなった。さらに、上記の各省において現金収入源として実施されている農作物栽培(稲、パイナップル)との比較では、1年当たりの収入はメラルーカの方が農産物より多いが、メラルーカ植林は、伐採まで収入がないので、その間に別途収入源を確保する必要があり、農業生産システムにメラルーカ植林を取り入れる場



合に、考慮されなければならない要点である。

- 水産業分野

水産業分野では、従来の結果を取りまとめて論文として発表した。

- ③ 経済発展

- メコン流域の経済モデル構築

基本的な経済構造の分析と、応用一般均衡モデルのパラメータ設定に利用するため、ラオスとカンボジアについて社会会計表の推計を行った。基本的な経済構造の分析では、産業連関分析と SAM 乗数分析(産業連関に加えて所得の分配と支出も考慮した分析)を行い、両国の経済システムの特徴を明らかにした。ラオスの所得連関効果(輸出等の最終需要が国内生産を誘発し、それが所得の増加を通して更に生産を誘発する SAM 乗数効果)は後方連関効果(ラオスの主要産業である農業、繊維、木材、電力の輸出が国内生産を誘発する乗数効果)の3倍を越えており、所得連関効果がラオスの経済活性化に大きな役割を果たすことが明らかとなった。したがって、今後は所得連関効果の推定精度を高めるため、社会会計の支出面からみた分析を加える必要がある。またカンボジアでは服飾(アパレル)産業の後方連関効果が食品産業の6割に止まり、国内生産を誘発する効果は期待より小さいことが明らかとなった。これらの特徴に関する基本認識の下に、両国の応用一般均衡モデルを構築した。現在、分析を実施中である。

- メコン流域の水需要モデル

17年度までに計測した工業用水需要関数、生活用水需要関数に基づいて、1人当たり実質GDP増加率と人口増加率を変数として、中国雲南、ラオス、東北タイ、カンボジア、ベトナムメコンデルタにおける水需要とメコン水系の流量を比較できるモデルを構築した。その結果、高い経済成長が予測される中国雲南では、年間総流出量に対する水需要の比率が2050年にかけて急上昇する可能性の高いことが予測された。このモデルでは農業用水需要関数は組み込まれておらず、農業用水需要は一定と仮定されている。今後は農業用水需要サブモデルを組み込む必要がある。

- 水資源配分最適化モデル

C. Ringlar によって開発されたメコン流域モデルは、経済活動と水循環の関わりをモデル化し、流域の便益を最大化する水資源配分を求める。このモデルの拡張のため、産業連関表に対応した産業部門の、水資源単位投入量を推計した。

シナリオ評価のための情報収集:

ラオスのナムテン2ダム発電計画を調査した。その結果、発電量の95%をタイの電力公社が購入する計画である。またこの公社はナムテン2ダムの建設に出資している。今後、ダム建設の波及効果と電力輸出が、ラオス経済に対し大きな影響を及ぼすと考えられる。

- ④ システム

システムグループでは、基本シナリオをメコン川委員会と世界銀行の提示した開発シナリオ(ダム開発、低開発、高開発、農業開発)をベースにし、将来開発に関する国別のシナリオを設定した。

- カンボジアの農業開発シナリオの検討

バライシステム、バテイシステム、コルマタージュ・システムについて、現地調査結果に基づき、必要な灌漑用水量と生産の関係を明らかにした。このデータに基づき、灌漑面積当たりの必要な貯水池面積が推定可能になった。

- 個別シナリオの水循環への影響予測

水循環モデルに組み込むダム開発と灌漑面積のデータセットを作成し、モデルの組み込みに着手した。発電ダムの操作ルールについては、ナムグムダムの水位記録を分析して、操作ルールを抽出した。

- 複数シナリオ間相互影響の評価

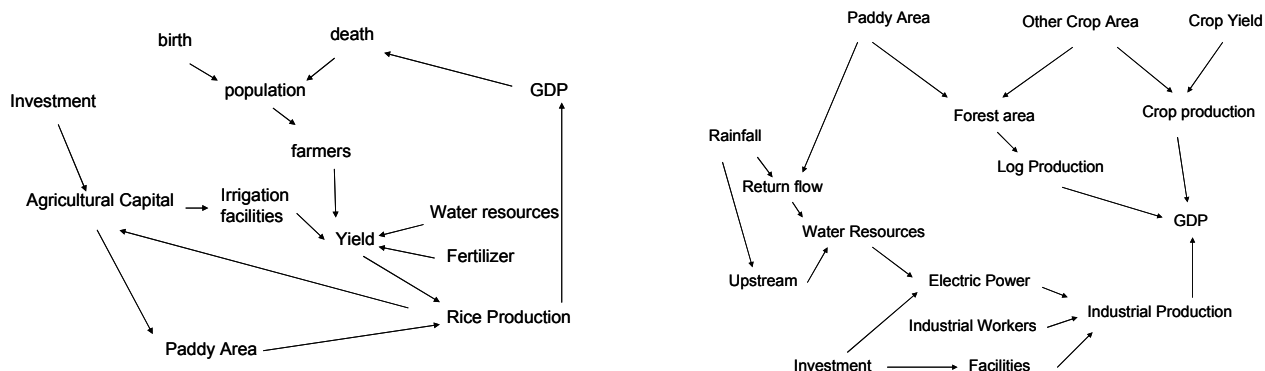


図 6 システムダイナミクスモデルの概略図(左:農地、右:その他)

ラオスの灌漑開発に焦点をあてて、人口、農業起因の発生負荷量の変動、および水質環境悪化による成長制約についてモデルを構築した。

モジュールは、図 6 のように人口、土地利用、水資源、農業セクター、水産セクター、工業セクターからなる。更に別途、川の長さや負荷源から河川までの距離を組み込んだ汚濁負荷流達のサブモデルを構築した上で、上記のシステムダイナミクスモデルに組み込み、開発による水質の悪化を取り上げた。汚濁負荷については窒素・リンについて検討した。

- 政策提言と関連評価

農業開発、灌漑開発、水産開発について、ポテンシャル評価を行った。このうちカンボジアの水産開発については、過去 2 年間は、それ以前の漁獲量の減少傾向が一転して、増加傾向に転じている。考えられる要因には、湖の富栄養化、漁獲努力量の減少がある。ここでは、後者の分析を行った。個別開発シナリオが各ステークホルダーに及ぼす影響は、国を中心に評価マトリックスを作成した。適正な開発評価軸については、世銀、アジア開発銀行、JICA などの評価をレビューし、経済成長と貧困解消の 2 つが大きな評価であることを明らかにした。これに、NPO が問題にしている環境保全を加えれば大きな論点には対処できるが、環境保全については、合意形成されている指標がない問題点がある。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「水利用」グループ

##### ①研究者名

久保 成隆(東京農工大学大学院農学府国際環境農学専攻 教授)

##### ②研究項目

- ・農業・林業開発による水利用変動評価モデルの開発
- ・メコン川下流域・トンレサップ湖の水循環評価モデルの開発

#### (2)「人間活動」グループ

##### ①研究者名

小林 和彦(東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻 教授)

##### ②研究項目

- ・流域の水循環の変動が農林業生産に及ぼす影響の評価

#### (3)「経済発展」グループ

##### ①研究者名

小山 修((独)国際農林水産業研究センター国際情報部研究戦略調査室 室長)

##### ②研究項目

- ・メコン川中下流 4 カ国間応用一般均衡・経済発展モデルの開発とシミュレーション予測

#### (4)「システム」グループ

##### ①研究者名

丹治 肇((独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所農村総合研究部有明海研究チーム チーム長)

##### ②研究項目

- ・災害防除と地域開発のための流域水利用システムの提案と国際協調

### 4. 研究成果の発表等

#### (1)論文発表(原著論文)

(国内)

- Khem Sothea・後藤章・水谷正和:「A Hydrologic Analysis on Inundation in the Mekong Delta, Cambodia」, 農業土木学会論文集 74 巻2号, p.159-167, 2006
- Kwon Sungill・久保成隆・Hoang Ngan Giang:「メコン河北東部派川における塩水遡上特性に関する研究」, 農業土木学会論文集 74 巻 4 号, p.403-411, 2006
- 吉田貢士・塩沢昌・戸田修・宗村広昭・丹治肇:「河畔林葉面積指数の季節変動を考慮した日

射遮断機能のモデル化」, 水工学論文集, 51 卷, p.1225-1230, 2007

(国際)

- Xia Li・Prachya Musikasinthorn・Yoshinori Kumazawa:「Molecular phylogenetic analyses of snakeheads ( Perciformes: Channidae ) using mitochondrial DNA sequences」, Ichthyological Research, vol. 53, number 2, p.148-159, 2006
- Akira P Takagi・Satoshi Ishikawa・Thuok Nao・Sitha Hort・Masanori Nakatani・Mutsumi Nishida・Hisashi Kurokura:「Genetic differentiation of the bronze featherback *Notopterus notopterus* between Mekong River and Tonle Sap Lake populations by mitochondrial DNA analysis」, Fisheries Science, vol. 72, p.750-754, 2006
- Mina Hori・Satoshi Ishikawa・Ponley Heng・Somony Thay・Vuthy Ly・Thuok Nao・Hisashi Kurokura:「Role of small-scale fishing in Kompong Thom Province, Cambodia」, Fisheries Science, vol. 72, p. 846-854, 2006