

「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

(農業工学研究所水工部河海工水理研究室 室長)

「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）などによる持続可能な水利用ルール等の提言に分かれる。

16 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、農林水産業の実態の調査を進めるとともに、データの解析を行ってきた。17 年度は、16 年度までの内容を継続するとともに、新たにモデル化に着手した。18、19 年度はモデルを活用し、政策提言を行う予定である。

17 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）：

全メコン川流域を 10 km グリッドに分割し、1994 年と 1995 年のデータで各グリッドからの流出量及び主要河川の流量を計算するモデルを構築した。これにより各グリッドでの利用可能水量の把握が可能になった。ただし、湛水計算は行っていないので、その影響のあるコンポンチャム下流の推定値は改善が必要である。また、計算期間を拡大するために、10 km グリッドの降雨データ、土地利用データを作成した。

ベトナムのメコンデルタでは Tien 川の河口から 110 km 地点より下流の 5 派川において、ADCP による流量と河床断面の観測を行った。このデータを使って河水の数値シミュレーションモデルを作成した。また、塩水遡上の計算に必要な地点毎の縦分散係数を表す推定式を求めた。この推定式を用いて塩水遡上のシミュレーションを行い、現象の再現性を確認した。

## 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、塩水遡上の影響を受けるベトナムのメコンデルタの中州の島について、水稲作付け回数とその要因についての調査を行った。その結果、雨期の水稲作付けの開始条件は、塩分濃度が、2psu 以下であった。下流では、更に、7 以上の pH が必要であった。乾季の作付けが不可能になる条件は、塩分濃度が 4psu 以上であった。

林産業分野では、メコンデルタの酸性土壌でも唯一生育可能なメラルーカの利用拡大のための、家具用材、木質ボード用原料、合板の利用を検討したが、有望な加工品が得られなかった。今まで未利用のメラルーカの樹皮から有効な薬用成分であるベチュリン酸が確認された。メラルーカの炭化実験では、炭窯に精錬管を組み込んで炭質の改善に成功した。また、得られた木酢液は、市販されている木酢液と同等の品質であった。酸性土壌に得られた炭を改良材として加えたところ、pH1~2 の改善効果があった。

水産業分野では、カンボジアのトンレサップ湖における 1990 年代からの魚種漁獲法別の漁獲量データを分析し、資源変動量のトレンド分析を行った。その結果、チャナ (*Channa micropeltes* : ナマズの一種) は経年的な資源量の変動傾向が見られたが、ヘニコリンクス (*Henicorhynchus* spp. : コイの一種) には減少傾向は見られなかった。

## ③ 経済発展グループ（経済発展モデル）：

経済発展グループは、メコン川下流域での水資源利用の総合的分析・評価に適用することを目的とし、応用一般均衡 (CGE) モデルの構築に取り組んだ。また並行して、計量経済分析によって対象地域の水需要関数を推定した。

ベトナムとタイでは、国際 CGE モデルの基礎的パーツとなる国内 CGE モデルのプロトタイプを構築した。ラオスでは、CGE モデルの基礎となる社会会計表の推計作業に必要な産業別付加価値、粗資本形成額のデータ、及び税収データの整理を行った。カンボジアでは社会経済関係のサーベイデータを入手したが、詳細な分析を行うには至らなかった。

また、メコン川の水利用から発生する各国の利害関係を直接把握するために、CGE モデル以外に、経済モデルに河川流量を組み込んだ Ringler モデルの改定モデルを構築し、特に渇水期におけるメコン川の利用から発生する各国の利害関係を検討した。

## ④ システムグループ（政策シナリオ分析）：

17 年度には、それまでに得られた知見を基に、基本モデルと基本シナリオの設計を完了する予定であった。このうち検討の開始地点である、基本シナリオは、メコン川委員会と世界銀行のレポートのシナリオ（ダム開発、低開発、高開発、農業開発）を採択することにした。シナリオ検討のためのシステム・ダイナミックスモデル作成は、モデルの基本設計とデータの作成を行い、データの組込作業の途中である。

18 年度は、以上の経済モデルと政策分析モデルの作成の遅れを早急に挽回する予定であり、そのために、17 年度後半は研究チーム内の研究資源配分をモデル化に重点化する再編を行った。

17 年度には、ベトナム南部水資源研究所の協力のもとで、ベトナムのメコンデルタに隣

接するホーチミン市で、ワークショップを行った。その結果は、プロジェクトチームのホームページでも公開している。18年度は、メコン川委員会の協力のもとで、第2回ワークショップをプノンペンのカンボジア工科大学にて行い、研究成果の実務への引き渡しを強化する予定である。

## 2. 研究実施内容

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。

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、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

農林業と水産業の経済活動と水利用の相互作用を解明する。農業分野では、メコン下流の塩水遡上地域で乾季と雨季に水稻作付けの実態調査を行って、塩水の遡上状況、灌漑用水の水質と用水利用可能期間を調査する。そのデータをもとに、水稻の作付け状況・収量と塩水遡上の関連を解明する。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需要予測、メラルーカを用いたバイダーレスボード、セメントボードなどを製造する木材工業の適用可能性、木材工業以外のメラルーカの有効活用技術について検討する。更にメラルーカの炭化法の開発と製炭された木炭の品質・特性を明らかにし、国内外での市場性を検討する。水産業分野では、カンボジアにおいて、漁法、魚種、資源量、漁獲量などの調査を行い、現在の水産の水利用実態を明らかにするとともに、将来予測を行う。

### ③ 経済発展

応用一般均衡モデル、産業連関モデルなどの経済モデルを用いて、経済発展と水利用の関連を明らかにする。

### ④ システム

政策提言をシナリオに基づいて検討する。検討シナリオは、現在の開発計画、資源の需要

と供給バランスを基に作成する。検討モデルには、システム・ダイナミックスなど、経済モデルでは表現できない問題点を組み込む。モデル作成と同時に評価指標の検討を進める。

結論：

17年度までの研究結果で得られた成果は以下である。

① 水利用

メコン川流域を 10 km グリッドに分割し、各グリッドからの流出量及び主要河川の流量を計算するモデルを 1994 年と 1995 年のデータを用いて構築した (図 1)。これにより各グリッドでの利用可能水資源量の把握が可能となった。ただし、洪水の湛水計算は今後の課題である。

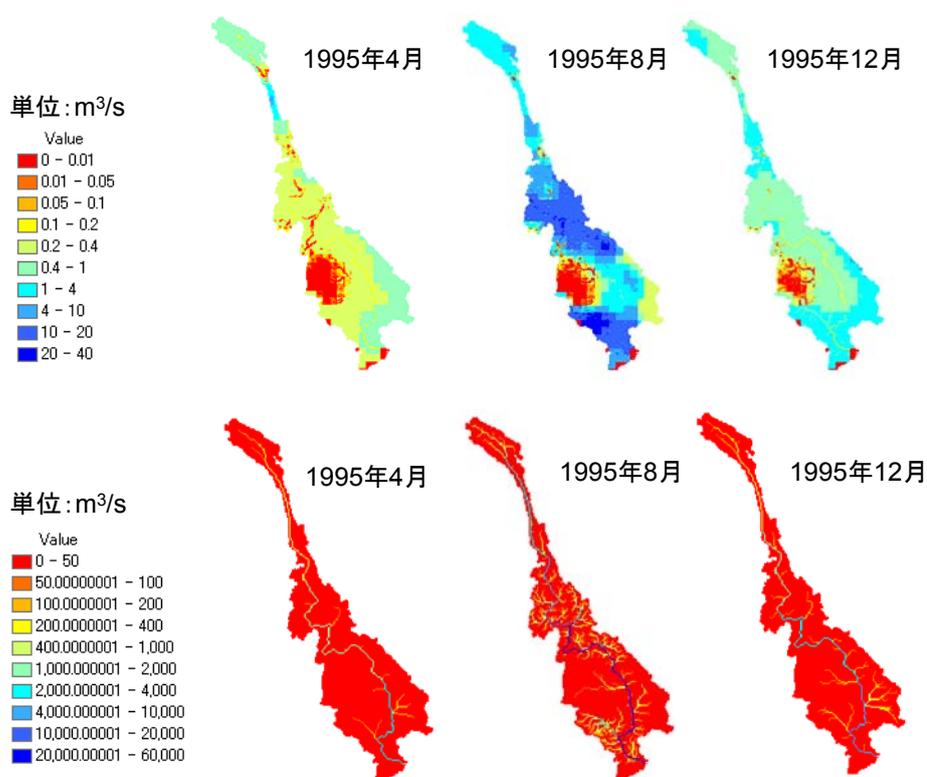


図 1 各グリッドにおける流出量(上図)及び主要河川流量(下図)

作物生産モデルは、土砂浸食モデルである EPIC や WEPP などに組み込まれている作物生長モデルを参考に、水ストレス・温度ストレス・日射ストレスが考慮できるモデルを構築した。既往の研究では、春小麦のパラメータが用いられてきたが、国内の試験水田におけるバイオマスデータとの検証により、稲作に適したパラメータを同定した。

ベトナムのメコンデルタでは、2大派川の1つの Tien 川が My Thuan 橋(河口から約 110 km 地点)下流で更に分かれる5派川において、ADCPを用いて流量と河床断面形状を観測した。このデータを用い、My Thuan 地点の水位と5河口部地点の水位を境界条件とした河水流動

の数値シミュレーションモデルを作成した。また、塩分の拡散の程度を表す縦分散係数を、5 派川の河川断面形状と流速分布から求めた。河川断面形状と流速分布から縦分散係数を推定する式を作成した。推定式による縦分散係数を実測値と比べると、平均値はよく一致した。しかし、実測値から計算した縦分散係数の分散は大きいので、測定データの追加などの精度改善の余地がある。この縦分散係数の推定式を用いて、My Thuan 橋下流域での塩水遡上シミュレーションを行った。その結果、現象の一応の再現に成功した。今後、塩水遡上シミュレーションと、人間活動グループが明らかにした栽培可能条件から、塩水遡上地域における河川取水の可能性の検討をすすめる。これとは別に、My Thuan 地点と河口地点での水位差に注目し、月単位の長期変動を抽出するために、水位差時系列の回帰曲線と、河川流量時系列の回帰曲線を作成・平滑化した。その結果、両者は比例関係にあった。この関係を使い、月別流量の推定が可能になると同時に、その理論的根拠を明らかにすることができた。

モデル計算に必要なデータは、表 1 のとおり複数のデータセットを新規に整備した。また、データセットが異なったため、その違いを比較した (図 2 参照)。

水質モデル作成のためにビエンチャン市において水文観測と、河川の水質観測を引き続き行った。

表 1 平成 17 年度新規整理したデータセット一覧

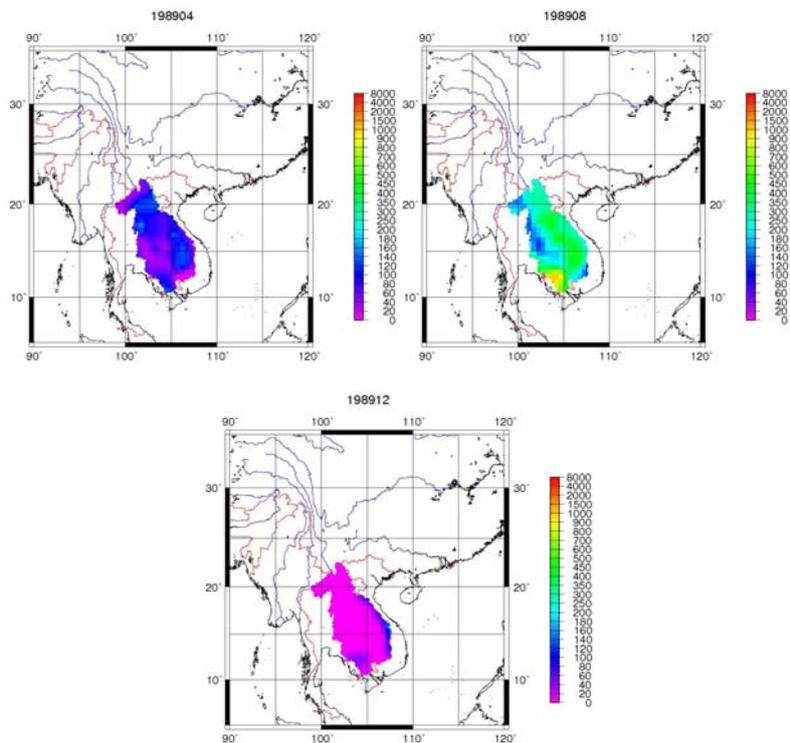
No.	データ名	内容	分解能	期間	入手先
1	CRU05-Precip	降雨量	0.5Deg, monthly	1986-1995	Climatic Research Unit the University of East Ang, UK
2	CRU05-tmp	気温	0.5Deg, monthly	1986-1998	As above
3	GPCC	降雨量	0.5Deg, monthly	1986-1995	The Global Precipitation Climatology Centre at Deutscher Wetterdienst, Germany
4	TRMM-3b42	降雨量	0.25Deg, 3h	1998-2005	Nasa, USA
5	TRMM-G2B31	降雨量	0.1Deg, 1.5h	1998-2005	Nasa, USA
6	EDC_landcover	土地利用	0.25Deg	1992-1993	USGS
7	MODIS_landcover	土地利用	0.25Deg	2000-2001	Boston University, USA
8	UMD_landcover	土地利用	0.25Deg	1992-1993	University of Maryland, USA

図 2 には、GPCC (Global Precipitation Climatology Centre, Germany) と CRU (Climatic Research Unit, UK) の 2 つのデータセットによる月降雨量分布を示す。両セットは乾季も雨季も月単位の降雨量分布がそれぞれ違うので、水収支解析に大きな影響があると考えられる。

a. GPCC-1989 年 4 月

b. GPCC-1989 年 8 月

c. GPCC-1989 年 12 月



d. CRU05-1989 年 4 月

e. CRU05-1989 年 8 月

f. CRU05-1989 年 12 月

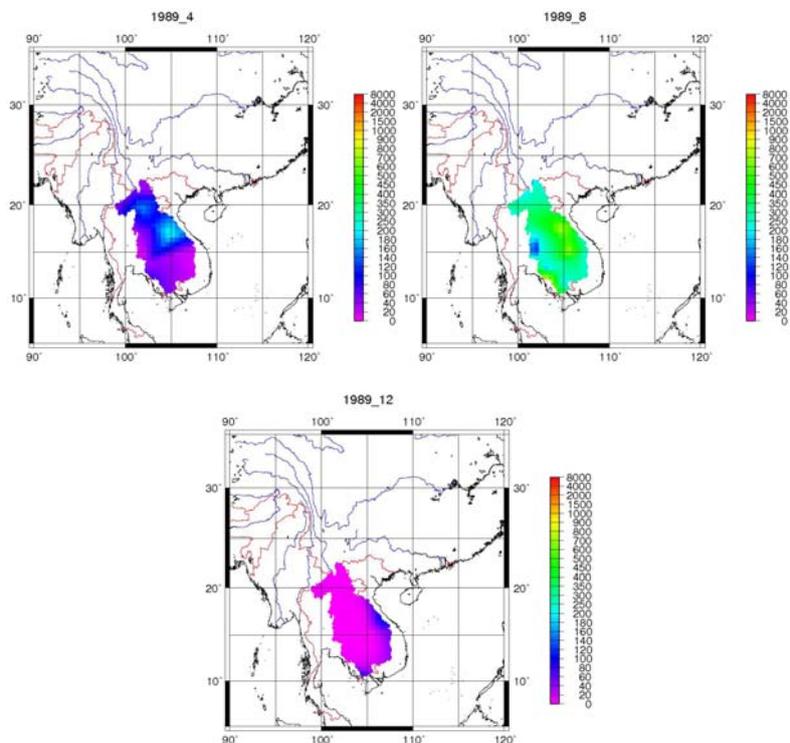


図 2 異なったデータセットの降雨量分布の比較 (単位 : mm/month)

## ② 人間活動

農業分野では、塩水遡上地帯の水稲作付け可能期間と農家の水稲作付け回数の決定要因を明らかにした。すなわち、塩水遡上地域の上流部のうち、水門の非設置地域は、雨季の初めに河川の塩分が 2psu 以下になってから、乾季に 4psu 以上になるまでの期間に稲作が可能であった。一方、下流部の水門設置地域では、河川から取水開始後、水路の塩分が 2psu 以下かつ pH が 7 以上の期間で水稲の作付けが可能であった。また、水門閉鎖後に水路の貯留水を使って灌漑する期間と、収穫前の灌漑不要期間から水稲作付け期間を推定した。水稲作付け期間は、場所により 4.7 ヶ月から 7.8 ヶ月と推定された。この結果を用いて、6 ヶ月以上の地域を年 2 作、それ以下を 1 作とすれば、2 期作の可否判断ができる。なお、年 1 作の地帯は、天水に依存した栽培地区にほぼ一致した。塩水遡上範囲内での水稲 1 作あたりの収量差は小さい。詳細に見ると、水門に近い農家が遠い農家より、高収量であった。

林産業分野では、メコンデルタのメラルーカ林の、資源量及び需要予測を行った。その結果、主用途の杭材の需要は減少傾向であった。ゆえに早急に新たな需要開発が必要である。昨年度より実施しているバイダーレスボード、セメントボードの他に、家具用材、木質ボード用原料、さらに合板としての利用を検討した。その結果、現有の試験材料では、木材が細く、十分な加工品が得られなかった。一方、メラルーカのうち、現状では捨てられている厚い樹皮の有効利用の検討を行った。まず、ボード原料としての利用は試作の結果可能であった。次に樹皮中には、多量のベチュリン酸の含有が確認された。このベチュリン酸は、国内ではシラカバの樹皮に多く含まれることが知られ、発ガンプロモータ抑制作用が見出されている。

炭化関係では、前年に作成したホーチミン市近郊のタインホアの炭窯で製炭実験を行った。炭質の改善のため、炭窯に精錬管を組み込み、窯内温度の上昇に成功した。また、炭化時に得られる粗木酢液の成分は、実用上は既存の木酢液と同質であった。メラルーカ 2 種の成長期の苗を用いて、木酢液が植物の成長に与える影響を試験し、成長促進効果を確認した。アンモニア、りん酸等を含む生活排水や河川水等の木炭によるろ過浄化試験を行った。その結果 pH、鉄含量等の指標が改善された。また木材投入が土壌の pH に与える影響を試験したところ、酸性土壌の pH を約 1 から 2 上昇させた。

水産業分野では、カンボジア・トンレサップ湖周辺地域の、1990 年代後半以降の魚種別漁法別の漁獲量記録を用いて漁獲努力量あたりの漁獲量 (CPUE) を計算した。その結果、チャナ (*Channa micropeltes*: ナマズの種類) は経年的に資源量が減少していた。一方、ヘニコリンクス (*Henicorhynchus* spp.: コイの種類) には長期的な資源量減少の兆候は見られなかった。この資源量変動は前年あるいは前々年のトンレサップ湖の水位変動によって説明できた。

## ③ 経済発展

経済発展グループは平成 17 年度に、メコン川下流地域での水資源利用の総合的分析・評価への適用を目的とした、応用一般均衡 (CGE) モデルの構築に取り組んだ。また並行し

て、対象地域における水資源利用の課題を明らかにし、今後の分析・評価の視点を明確化するとともに、CGE モデルのパラメータ設定に利用するために計量経済分析によって対象地域の水需要関数を推定した。

計量経済分析による水需要関数の推定作業では、人口当たりの生活用水需要関数、工業用水需要関数が特定化された。この結果より、経済発展に伴って生活・工業用水の需要拡大が予想されるが、水資源が工業化の制約にはならないとも予想される。この点の詳細な検討は平成 18 年度に実施し、CGE モデルでの分析に情報の提供を行う予定である。

CGE モデル構築に関しては、下流域 4 カ国の社会経済データの充実度の違いから、国毎に異なる作業を行った。ベトナムとタイでは、国際 CGE モデルの基礎的パーツとなる国内 CGE モデルのプロトタイプを構築した。但し、農業部門の生産技術の特定化など吟味を要する部分が、現段階では未解決である。ラオスでは、CGE モデルの基礎となる社会会計表の推計作業に必要な産業別付加価値、粗資本形成額のデータ、及び税込データの整理を行った。カンボジアでは社会経済関係のサーベイデータを入手したが、詳細な分析には至らなかった。その他に、国際モデルへの統合の準備として、4 カ国間の財別貿易データを推計する基本的データセットを整備した。

ところで、メコン川流域の国際 CGE モデルでは、財やサービスの貿易を媒介とする経済の相互依存関係は把握できても、メコン川の水利用から発生する各国の利害関係を直接把握することは困難である。そこで、経済モデルに河川流量を組み込んだ Ringler モデルを改良したモデルを構築し、特に渇水期におけるメコン川の利用から発生する各国の利害関係を明らかにすることを目的として、Ringler のメコン河流量データと吉田推計（水利用グループ）の流量データセットの検討を行った。8 月から 9 月に流量のピークがあることは両流量データで共通しているが、吉田推計では下流にいくほど流量が増大しているのに対し、Ringler 氏のデータは下流にいくほど流量データの増減の傾向はない。流量データの値を比較してみると、吉田推計が約 3～5 倍大きいなど、検討すべき課題も多いことが明らかとなった。

#### ④ システム

システムグループでは、基本シナリオの検討と、シナリオ検討のためのモデル構築を行った。基本シナリオの検討では、文献レビューを行った結果、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）をベースに検討を進めた。このシナリオは主に、ダムの開発量と灌漑面積の組み合わせで構成されている。ただし、このレポートで触れていない国毎の灌漑タイプの違い等の個別開発シナリオは補完する。世界銀行の灌漑開発シナリオとモデルによるシミュレーションの乖離はカンボジアの乾季灌漑で大きい。カンボジアについてはこの点を踏まえた現地調査の結果、①トンレサップ湖周辺の洪水氾濫地域、②メコン川沿いの洪水氾濫地域、③バサック川沿いのコルコタージュ（泥水灌漑）地域、がそれぞれ異なったタイプによる灌漑開発の可能性が高い。17 年度は、前二者の必要灌漑水量のデータを収集した。

シナリオ検討のモデルは、システム・ダイナミクスによるモデル構築を行った。モデルは国毎に適用する。現在、以下のモジュールから構成されるモデルを作成中である。必要なデータは80%のデジタル化が完了した。

人口モジュール：年齢別人口変化を予測する。

土地利用モジュール：土地利用変化を予測する。天水田、灌漑水田、森林、プランテーション、畑の土地利用を扱う。

水資源モジュール：灌漑面積と人口から水需要量を求める。水供給は、降雨と開発による。発電需要も考慮する。

農業セクターモジュール：コメ価格、コメの生産、水田面積、農民の関係をモデル化する。

水産セクターモジュール：魚価、漁民、漁獲量、漁業投資などの関係をモデル化する。

工業セクターモジュール：資本、電力、投資、工業人口などの関係をモデル化する。

現在、これらのモジュールの詳細な内容の再検討と、経済モデルとの関数の共有化可能性を調整中である。

開発と保全活動をしている主体間のパワーバランスを分析すると、近年の傾向として、各国内の勢力間の対立は、カンボジアの政党間、ラオスの共産党と反政府間のように弱まりつつある。代わって、各国政府と世界銀行、アジア開発銀行、メコン川委員会など、国と国際機関が、主たるパワーバランスの場になりつつある。2002年頃からアジア開発銀行はGMS（拡大メコン流域）の経済開発に本格的に着手したが、2005年以降も開発を拡大している。世界銀行は、2005年にはラオスのナムテン2ダム開発に本格的に着手した。メコン川委員会も従来の環境保全中心から開発に方向を転じ、2004年末に世界銀行と共に初の本格的な開発シナリオの検討結果を公表した。最近、中国の温家宝首相はカンボジアに対して、無償とローンを合わせて6億ドルの援助を決めた。一方、日本を含む12カ国と国連機関からなるカンボジア支援国連合は2006年分の拠出金として6.1億ドルを約束している。このように、各国と国際機関はプレゼンスを高めるために、具体的な開発案件を競って提示してきている。

### 3. 研究実施体制

「水利用」グループ

①研究分担グループ長：久保 成隆（東京農工大学大学院農学教育部 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

「人間活動」グループ

①研究分担グループ長：黒倉 寿（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  
流域の水循環の変動が漁業生産に及ぼす影響の評価

「経済発展」グループ

- ①研究分担グループ長：小山 修（国際農林水産業研究センター国際情報部、部長）  
②研究項目：メコン川中下流 4 カ国間の応用一般均衡・経済発展モデルの開発とシミュレーション予測

「システム」グループ

- ①研究分担グループ長：丹治 肇（農業工学研究所水工部河海工水理研究室、室長）  
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. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- 吉田貢士・宗村広昭・樋口克宏・丹治肇:「河畔林保全による流域の河川水温管理」, 農業土木学会誌, 73(4), pp.11-14, 2005
- Kwon Sungill・久保成隆:「感潮河川における密度流シミュレーションのための多層流モデル開発に関する研究」, 農業土木学会論文集, 第 238 号, pp.397-405, 2005
- 宗村広昭・吉田貢士・樋口克宏・戸田修・丹治肇:「東北タイにおける乾季の非灌漑水田への供給可能水量の推定に関する考察」, システム農学, 21 巻 3 号, pp.167-176, 2005
- 大平智江・石川智士・黒倉寿:「メコンデルタの複合農業(VAC システム)の実態」, 熱帯農業, 49 巻 4 号, pp.294-301, 2005
- 逆瀬川三有生・谷田貝光克・関則明:「Novel combination system of charcoal kiln and essential oil collector」, Wood Carbonization Research, 2 巻, pp.17-26, 2006
- 逆瀬川三有生・谷田貝光克・関則明・Tran Manh Hung:「Novel combination system of charcoal kiln and essential oil collector (2) Comparison of charcoal quality」, Wood Carbonization Research, 2 巻, pp.27-36, 2006
- 逆瀬川三有生・谷田貝光克:「Composition of Pyrolyzate from Japanese Green Tea」, Journal of wood science, 51 (1), pp.73-76, 2005
- 宗村広昭・丹治肇・吉田貢士・戸田修・樋口克宏:「Estimation of Supplementary Water to Paddy Fields in the Lower Mekong River Basin during the Dry Season」, Paddy and Water Environment, 12, pp.177-186, 2005
- 加西智英実・Thongchai Nitiratsuwan・馬場治・黒倉寿:「Incentive for shifts in water management systems by shrimp culturists in southern Thailand」, Fisheries Science, 71, pp.791-798, 2005