

# 国際河川メコン川の水利用・管理システム

研究代表者  
丹治 肇

# 国際河川メコン川の水利用・管理システム

(独)農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 丹治 肇

## 1. はじめに

ここでは、今まで進めてきた、メコン川の水利用の研究をまとめる意味で、メコン川の水利用の実態がどうなっていて、何が問題なのかを論じたい。メコン川の水利用が複雑で、とらえどころがないというのが今までの多くの研究であった。メコン川の水資源の開発については、メコン川委員会（MRC；Mekong River Commission）という国際機関が調整を行うことになっていて、非常に多くの分野で調査や検討がなされている。しかし、ここでは、細かいところは後で検討するとして、最も骨組みだけを考えたらどうなるのかという視点で検討を進める。

## 2. メコン川の水利用の実態

メコン川の水利用の90%以上は灌漑用水であろうといわれている。これは、FAOのデータにも書いてある。アジアモンスーンの灌漑は、水田中心で雨期と乾期で異なる。雨期には、まず、雨を利用して、不足分を灌漑する。このため、降雨と取水量が年により変動する。雨期は取水量は小さく、河川流量は大きいので、灌漑水田が渇水になる可能性は小さい。乾期には降雨は期待できないので、必要な水は原則全て灌漑で補われる。乾期は、河川流量も小さく、灌漑水量の不足が起きやすい。図1のメコン川の代表的な水位観測点について、図2に4月と9月の月別平均流量と4月を含む乾期の月別取水量を示す。4月は乾期で最も河川流量の少ない時期、9月は雨期で最も河川流量が大きい時期として選んだ。乾期と雨期の河川流量は大きく異なるので、9月の流量を1/10スケールで書いてある。図2から、4月と9月の流量はほぼ10倍異なる。図2の取水は、各水位観測点とその下流の水位観測点の間の取水を意味する。メコン川の取水の大半はベトナムでなされている。4月の河川流量と取水の割合をみると⑤ Vietnam Borderで取水割合が高くなる。つまり、折れ線グラフの青と棒グラフの差が、取水した後の流量（取水残）であるから、⑤では、河川流量のほとんどが取水され、取水残は小さい。

取水量の数値推定には、原単位法を使っている。これは、灌漑面積を調査しておいて、原単位として面積当たりの灌漑水量の値をかけて、取水量を推定する。この計算方法では、実際に河川から取水しているか、否かは問題にされない。もう一つの問題は原単位の係数の妥当性である。ここでは、MRCが使っている原単位による推定値（Intake1）と筆者らの推定値（Intake2）を示してある。原単位の取り方で、数字は少し変化するが、乾期の下流4カ国の灌漑水量の6割をベトナムが使用している。

図2の4月流量の折れ線グラフと取水量の棒グラフの間は取水残であるといったが、メコン川の下流では、河川が潮汐の影響を受け、水位・流速が変動する上に、海からの塩水遡上の影響を受けるので、図2の取水残が未利用の水資源とはいえない。図3にメコンデルタの乾期作米の作付面積（収穫年表記）とトンレサップ湖の最高水位（前年値表記）を示す。明らかに洪水の後では、作付面積が大きくなる。つまり、取水残は、実際には水資源として利用できない部分であり、メコン川平均流量で見ると、新規のダム建設などで渇水流量を増強しない限り、灌漑面積を拡大できない段階まで、灌漑開発が進んでいる。この開発段階は日本の本州の河川では、江戸時代中期には達したといわれ、灌漑面積の拡大は戦後に技術的にダム建設が可能になる時期まで停滞した。メコン川も、ダムなしで、灌漑面積の拡大は難しい。黄河では灌漑面積の拡大にダム建設が追従できなかったため、断流が起こったが、これは、黄河が天井川であるため、同じような水需給逼迫は、メコン川では、メコンデルタでの塩水遡上の拡大または塩水を嫌って取水の減少に結びつくと思われる。



図1 メコン川の水位観測点

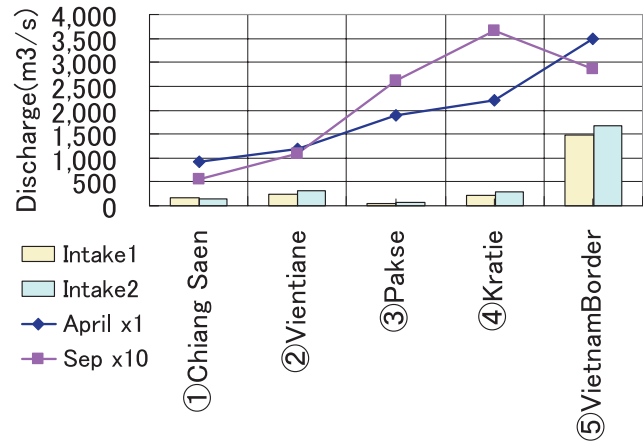


図2 メコン川の河川流量と取水量

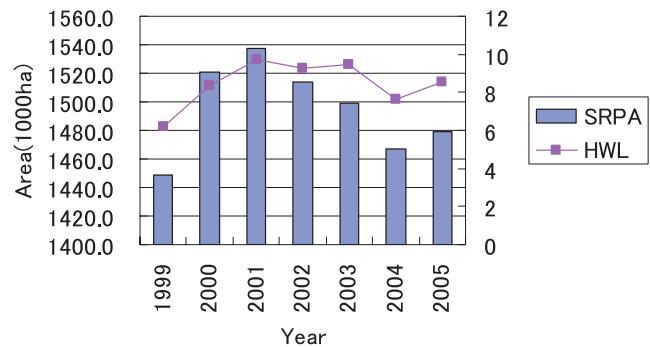


図3 ベトナムのメコンデルタの乾期作米の作付面積

### 3. ベトナムのメコンデルタの河川流量の問題点

以上の検討で図2の河川流量はMRC(2005)からとった1960～2004年の平均値である。⑤ Vietnam Borderは世界銀行の推定値である。MRCの水文年表では、メコン本川の計算流量は④ Kratieの上流だけで、それより下流では、水位が公開され、流量になっていない。

図2では、⑤ Vietnam Borderの河川流量を $3,500\text{m}^3/\text{s}$ としていたが、この値は他の地点に比べると問題がある。カンボジアのプノンペン下流では、メコン川の流量は潮汐の影響を受ける。ベトナムの河口付近では、潮汐の影響は水位だけでなく、一日のうちで流れの向きが上流～下流、下流～上流に変化する。つまり、平均流量推定は技術的に非常に困難であり、議論の対象である。筆者らは、CRESTプロジェクトの支援を受けて、最新の流速観測機器であるADCPをメコン河口部に投入できた。この機器により得た精密な流速データと河川断面を用いて、メコンデルタのメコン派川のうち、図4に示すTien川システムの解析を行った。もう一つの大派川であるHau川が残されたが水量で約半分の実態解明ができた。図5と6は、モデルにより再現したTieu川河口と地点の水位と流量を示す。黒い帯は時間毎の水位と流量の変動を示す。中央の白線が回帰曲線で求めた平均値である。表1は2003年の平均流量最低時MyThuan地点と各派川での流量を示したものである。表中のBTとCCSはCoChien川の2つの派川の河口観測点である。メコンデルタのメコン川の渇水流量は $2,000\text{m}^3/\text{s}$ という推定値もあるが、表1の値と、今回のモデル化できなかったHau川の規模を考えると、図2の $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 弱が妥当な推定渇水流量と思われる。

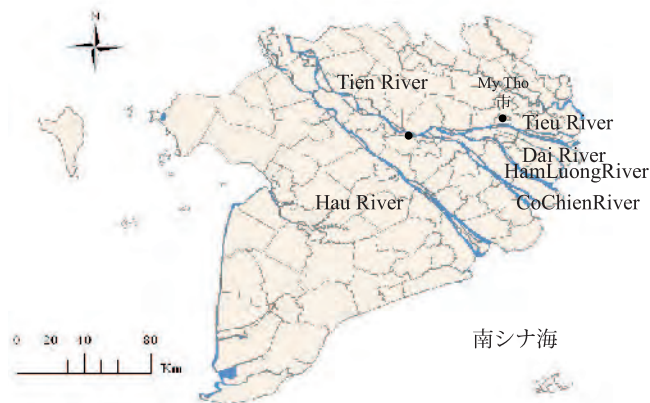


図4 メコンデルタのメコン派川

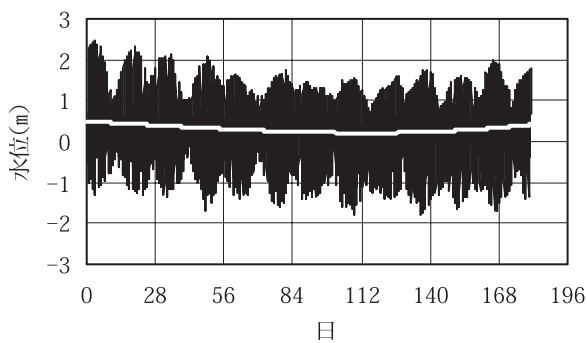


図5 水位差

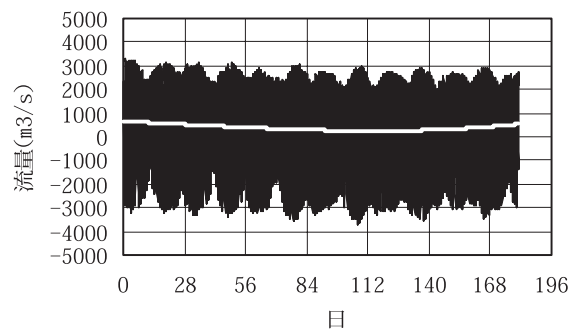


図6 河川流量

表1 派川間の河川流量推定

川と地点の名前	MTWL	流量比率
Tien R. MyThuan	1,697	100%
Tieu R.	404	24
Dai R.	-168	-10
HamLuang R.	296	17
CoChien R.-BT	708	42
CoChien R. -CCS	341	20

#### 4. MRCの開発シナリオ

メコン川下流4カ国のうち内戦が続いていたカンボジアとラオスは、今後の人口増加を見込めば、灌漑開発は避けられない。そこで、妥当な開発シナリオの提案と調整が重要になる。MRCの水利調整権は表2のように本川か支川か、雨期か乾期か、流域内か流域外かで分かれ、メコン本川以外に対する権限は限定されている。

ここでは、メコン川の望ましい開発方向を考えるが、現時点で、メコン川全体の開発計画を水資源ベースで検討したものは、MRCが世界銀行と共同で行ったレポート（World Bank, 2004, 以下DSFレポートと呼ぶ）だけである。現在、MRCは、このレポートで使った水循環モデルをDSF（Decision Support Framework）と呼び、これに、経済モデルを組み込んで、水資源の最適配分問題として流域管理を進めていく考えである。そこで、DSFレポート中心に開発シナリオを整理する。

DSF レポートで開発案件として重視されているのは、発電ダム開発と灌漑開発である。シナリオを BL (Baseline)、LD (Low Development)、HD (High Development) の3段階に分け、LD と HD にそれぞれ、発電ダムと灌漑開発の拡大規模をしている。この発電 (ダム開発) と灌漑を開発の指標とすること、開発のレベルを2つに整理することは、シナリオ検討を行う上で、本質をはずしておらず、個々のダム建設の可能性などの細かな検討を後回しにできるなど利便性が高いので以下では踏襲する。

DSF の開発シナリオには上工水など細かな指定もあるが、水量の上で一番重要な、発電ダム開発と乾期の灌漑開発を表3に整理した。ここで、VietnamCH はベトナムの中央高原、VietnamMD はベトナムのメコンデルタの意味である。DSF レポートの結論は、LD、HD の2つのシナリオとも灌漑開発を進めても、発電ダム開発が進めば、発電ダムによる渇水流量の増加は灌漑取水の増加を上回るため、渇水被害が生ずることはないというものである。

表2 MRC の水利調整権限

	Inter-Basin		Intra-Basin	
	DrySeason	WetSeason	DrySeason	WetSeason
Mainsream	XXX	XX	XX	X
Tributaries	X	X	X	X

X : Notification

XX : Agreement

XXX : Specific Agreement

表3 DSF のシナリオと条件

	Effective dam capacity			Dry season irrigated area		
	Baseline mcm	LowDev mcm	HighDev mcm	Baseline x1000ha	LowDev x1000ha	HighDev x1000ha
China	0	10,298	22,698	-	-	-
Cambodia	0	0	3,590	250	375	751
LaoPDR	5,406	11,664	27,114	127	191	382
Thailand	0	0	0	156	187	412
VietnamCH	779	1,889	2,359	45	52	67
VietnamMD	0	0	0	1,514	1,514	1,514

## 5. 開発シナリオの検討

DSF シナリオを元に、次の2点を検討する。

### 1) 開発シナリオ設定の妥当性

ダム開発シナリオについては、個別のダム案件について、現在、計画、設計、施工のどのレベルに達しているのかというデータがある。発電ダムシナリオにもダムの建設時期のずれなどが生じやすいが、開発のポテンシャルと優先順位は明らかになっている。一方、灌漑計画は、検討が進んでいる開発案件は少なく、シナリオの具体性に乏しい。特に、DSF シナリオでは、LD、HD 共に灌漑開発はメコンデルタでは行わない条件設定になっている。

### 2) 渇水時の流況予測の妥当性

渇水時の取水量増加が発電ダムによる渇水流量増加を上回るという結果は、仮に、計算結果から、計算条件を逆設定できれば、発電ダムによる渇水流量増強に見合う範囲に LD、HD の開発段階の灌漑面積を調整した可能性を示唆する。もし、シミュレーションにおけるシナリオ条件設定にそのような作為が行われていれば、シミュレーション結果の信憑性は低い。この問題を水資源の配分問題として考えれば、DSF

レポートは、発電ダムにより、新たな渇水流量増という水資源が生じた場合に、灌漑用水の増加という資源配分が行われるが、そこでは常に資源の余剰が生ずることを意味する。しかし、メコン川の水資源開発はダムが必要なレベルに達していることを考えれば、あらたな水資源が生ずればそれに応じて灌漑開発が進み、水資源の供給と需要が釣り合うと考える方が自然である。したがって、DSFの想定する、「水資源供給量の増分が水資源需要量の増分を上回るので、水利調整は不要である」という前提は容認しがたい。渇水を防ぐには、MRCの調整権限を強化し、メコン川水系全体で水利権の配分権限をMRCが持たなければならぬと考える。

### 5.1 開発シナリオ設定の妥当性

開発シナリオは、発電ダムによる渇水流量増分を灌漑用水の増分で分け合う問題である。発電ダムは全て④ Kratie 上流にある。灌漑取水は、④の下流のカンボジアとベトナムメコンデルタが圧倒的に大きい。そこで、水利権配分モデルを作り DSF-BL と DSF-LD の計算結果と比較した。水資源供給増は、LD シナリオレベルとするが、DSF-LD との比較を容易にするために、供給は DSF-LD の取水に一致させる。取水量の幅は、BL シナリオより小さいことから HD シナリオまでをとる。ベトナムのメコンデルタはシナリオによる差がないため、適宜幅を与えた。条件を図7に示す。

DSF-BL と DSF-LD を基準に、比較検討は、灌漑便益を最大化する線形計画解 (LP)、BL シナリオを参考にしたパレート最適な配分 (Pareto)、上流優先ルール (Upstream) を比べた。図8に取水配分を、図9に農家の乾期作米の販売総額を示す。

これから、流域の便益の合計を最大化するという評価関数では問題解決にはならないことが判る。なぜならば、大まかにいえば、開発が遅れているところは、灌漑施設が不備のため面積当たり灌漑水量が大きく、単収は低く、Farm Gate Price は低いからである。つまり、便益最大化を現在のデータをもとにパラメータを作成して計算すると、開発の進んでいるところに一層の投資をする結果になってしまう。「メコン川の開発は、特に開発が遅れている国や地域に焦点を当てる」ということは、共通認識のように思われる。その場合には、平等性指標を導入することになるが、これが、経済的合理性とは逆の重みになることも上の考察が正しければ自明である。少なくとも、短期的には、水利用効率の向上、より大きな経済的効果を追及しないことになろう。

### 5.2 渇水時の流況予測の妥当性

3～4月の渇水と開発の関係について、DSF レポートは、灌漑開発により、取水量（需要）が増加するが、発電開発による低水流量増強（供給）がこれを上回るとしている。つまり、渇水が起こるか否かは、発電開発の灌漑開発の速度のバランスにある。DSF レポートの主張するように、灌漑開発と水力発電のバランスの有意性は水力発電ダムの操作と、面積あたりの必要灌漑水量に依存している。この点を確認するために、一例として、灌漑必要水量を変えた場合の需要供給バランスを図10に示す。横軸は現在の灌漑必要水量に対する比である。需給バランスはBLシナリオでゼロになるように調整した。図10から、需給バランスは面積あたりの灌漑必要水量の影響を受けること、その割合が、HDシナリオで特に大きいことがわかる。

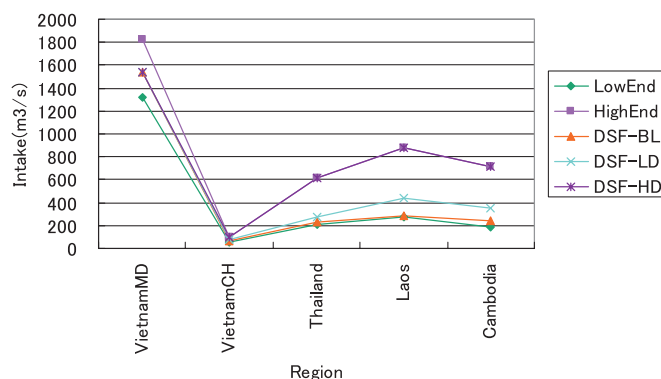


図7 シナリオ毎の取水と取水の制約条件

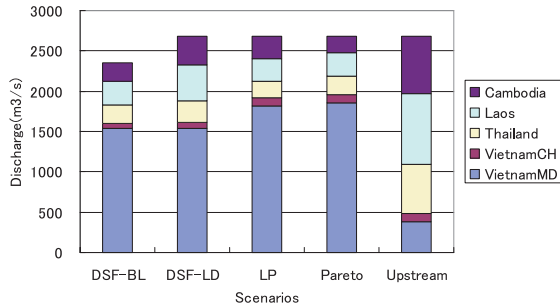


図8 取水量の配分

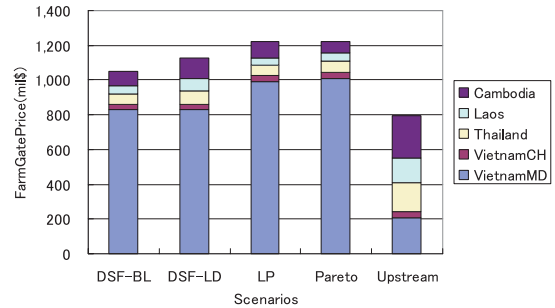


図9 農家の乾期作米販売額

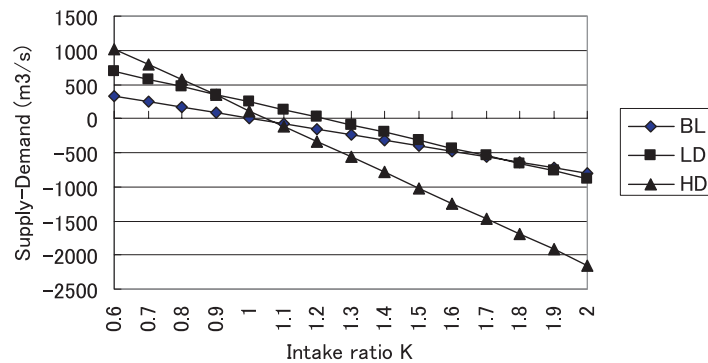


図10 需要供給バランスに対する灌漑水量変動の感度応答

## 6. 開発と水循環

以上の開発シナリオの検討は概算なので、ここでは、具体的に水循環モデルを使ってシナリオを検討する。

### 6.1 ダム開発効果の検討

水力発電ダムはLD・HDシナリオとも全て、Kratieより上流にある。水循環モデルを作る上では、Kratie上流は流れが下流水位の影響を受けないため、モデル検討は、下流部より単純になる。ここでは、Kratie地点の流量で、ダム開発効果を検討した。計算は1991～2002年までを行い、12年間の平均値を月平均流量で示した。モデルの精度は、DSF-BLを基準に比較した。ただし、ここでは、乾期の流量に着目するため、灌漑取水は乾期の1～4月に限定したので、雨期の流量は取水条件が異なる。比較したDSFと今回の計算ケースの条件を表4に示す。面積当たり灌漑水量 (Unit Irrigation Require.) は、DSFの値と、現地調査の値 (New) の2種類について計算を行った。

図11の計算結果を平均流量で見ると、全体の傾向としてはDSFのシミュレーションに近い値が得られている。開発シナリオ間の比較では、HDシナリオ (Case 2) とBLシナリオ (Case 1) を比べると、1～3月のKratie流量は増加するというDSFと同じ結果が得られた。

Case 1, 2はDSFに準じたパラメータ設定をしているが、水力発電ダムの操作ルールは独自に推定した。LDシナリオとBLシナリオの比較でも、開発により、乾期のKratie流量が増加する結果となった。面積当たり灌漑用水量についてDSFの値と筆者らの推定値 (表3のNew) を用いたケースを比較すると、Kratieの流量は1～2月は差が無く、3月は後者が $40\text{m}^3/\text{s}$ 大きくなった。このように推定値はパラメータの影響を強く受ける。

### 6.2 トンレサップ湖の灌漑開発の検討

メコン流域の乾期の灌漑開発は、i) メコン本川から取水する、ii) メコンの支川から取水する、iii) メコンの支川にダムを造り、雨期の貯水を利用する、iv) メコン本川にダムを建設し、取水する、のいずれが多い。しかし、トンレサップ湖周辺では、ii)、iii)も乾期と、雨期ともに支川の流量が小さいた

め困難である。トンレサップ湖で一般に行われている灌漑は、ア) 雨期の洪水を池に貯めて灌漑する方法である。現在行われていないが、考えられるもう一つの方法は、イ) 湖の中央から周辺に放射状に導水路を掘削して、乾期にポンプで湖の水を揚水する方法である。

環境面での影響はア) がイ) より小さい。そこで、トンレサップ湖の周辺開発の影響を考える。カンボジアの乾期の水田の灌漑面積は BL シナリオで 251kha、HD シナリオで 751kha である。一方、トンレサップ湖の面積は、最大で約 1,200kha である。ここでは、シナリオベースでなく、開発リスクの上限を検討する目的で 400kha が貯水池に転換された場合のシミュレーションを行った。比較のためトンレサップ湖がない場合を計算した。

1991～2002年の計算結果を図12に示す。現状と比べ流量減少は3月が230m<sup>3</sup>/s、4月が100m<sup>3</sup>/sである。トンレサップ湖がない場合の流量減少は3月が840m<sup>3</sup>/s、4月が780m<sup>3</sup>/sであるから、開発の影響は面積比(1/3)に比べ小さい。一方、現状と比べ流量減少は11月が1,930m<sup>3</sup>/sで最大、ついで12月が1,560m<sup>3</sup>/s、1月が840m<sup>3</sup>/sとなり、11、12月の影響が大きい。以上の検討は考えられる最大の開発面積をとっているため、より小さな開発面積であれば、1月は影響が出るが、3月の影響は小さくなる。

トンレサップ湖の洪水を利用した開発は、以上の下流への流量の影響以外に湖の環境に対する影響が強い。Baran (2005)によれば、湛水域の過去の森林開発が漁獲量減少につながった可能性がある。こうした危険を避けるには、ウ) 湛水域より高い標高の水田に乾期灌漑をする方法がある。このための水源には、支川上流にダムを建設し、メコン川の洪水を導入することが必要である。この方法は HD シナリオメコン本川のサンボールダムよりは環境への影響が小さい。

表4 水循環モデルの計算条件

	Scenarios			UnitIrrigationRequire.	
	Baseline	LowDev.	HighDev.	DSF	New
DSF	×			×	
Case 1	×			×	
Case 2			×	×	
Case 3			×		×
Case 4		×		×	

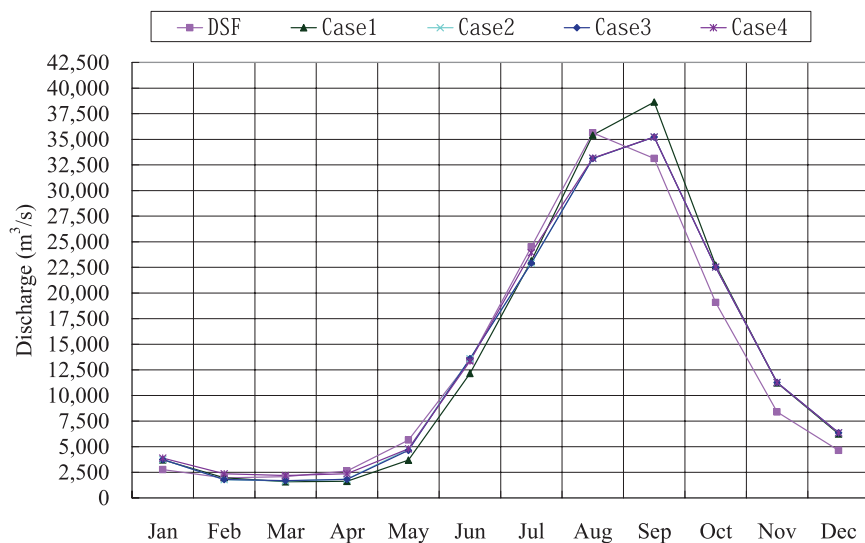


図11 Kratie の月別流量比較



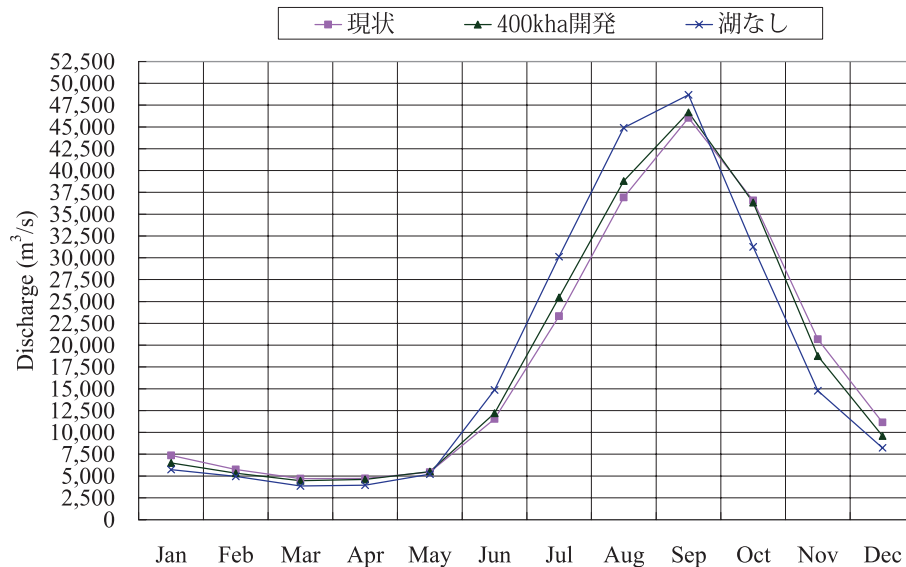


図12 トンレサップ湖の開発とベトナム国境の流量

## 7. 水力発電ダム開発の経済効果

水力発電ダムが、ラオスの経済発展に与える影響を一般均衡モデルで分析した。2003年の経済状況を基準にして、ラオスとタイ間の送電容量増加がない場合、石油価格が上昇した場合などについて、実質GDPの変化を比較した。表5に計算条件と結果を示す。送電容量増加と石油価格上昇がないケース1では、ラオスのGDPは2003年に比べて3.79%低下した。2003年のラオスのGDP成長率が6%であることを考えると、電力輸出は重要な牽引役といえる。次に送電容量増加がないことに加え、石油価格が50%上昇したケース2では、ラオスとタイのGDPはそれぞれ4.48%、2.90%低下した。しかし、石油価格上昇時に送電容量増加があるケース3では、GDPの低下が0.25%、2.20%まで軽減された。これらの結果により、電力の輸出はラオスの成長に有効であるのみならず、石油価格上昇に直面する周辺国にも経済面での利益をもたらすといえる。ただし、分析の基礎とする経済データは現在も更新作業が続いていることから、データの精度向上に合わせて計算結果が変化する可能性がある。

次に、ラオスにおける水力発電の経済効果を、2003年の主要な輸出産業である、木材加工品、繊維製品と比較する。それぞれの輸出額が100万ドル増加した場合のGDP増加率は、木材加工品が0.05%、繊維製品が0.02%であるのに対し、水力発電は0.14%となった。水力発電の効果が大きいのは、設備さえあれば中間投入（原材料の投入）がそれほど必要なく、借入金返済を除く売電収入の多くが国内で分配可能なためであろう。

次に、水力発電投資のための借入金が、政府財政に負担なしで返済が可能か検討した。返済は一般会計を使わず電力輸出税収のみで行うと仮定し、図13のその時の水力発電投資額とそれに見合う最低輸出電力価格を図13に求めた。実際の取引価格は4centでタイの火力発電のカンボジアへの販売価格が6.4centであるから、水力発電の採算性は高く、輸出により、タイに多額の利益がある。2003年以降に原油価格が125%上昇し、火力発電のコストが大きく上昇していることを考えると、ラオスの輸出電力価格に値上げの余地はあり、投資の可能性が広がっていると考えられる。

表5 ラオスの水力発電と実質 GDP

	2国間送電容量の増加	石油価格上昇	実質 GDP (基準年比)	
			ラオス	タイ
ケース1	なし	0	- 3.79%	- 1.36%
ケース2	なし	50%	- 4.48%	- 2.90%
ケース3	あり	50%	- 0.25%	- 2.20%

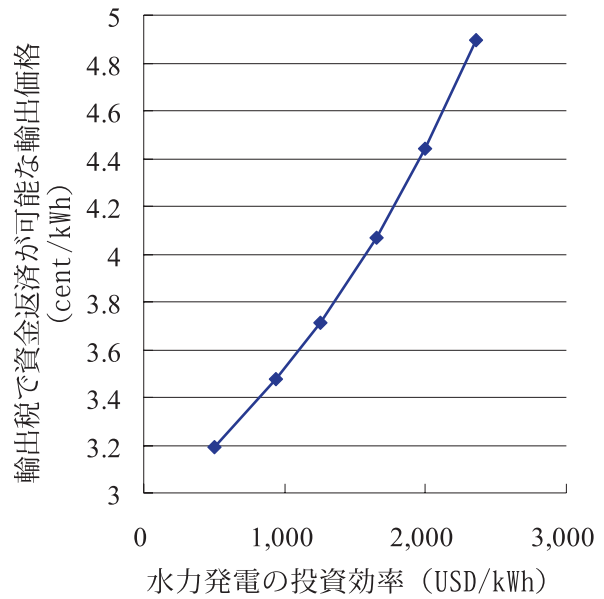


図13 ラオスの水力発電投資と最低返済可能価格

## 8. おわりに

メコン川の開発と保全を考えるために、水循環モデルと経済モデルを使ったシナリオ検討を行った。下流4カ国では、2つのモデルとも、現時点では、データの精度が十分でないところがあり、シミュレーションをするには、ある種の思い切りが必要である。このことは、今後のデータ向上により結果が代わる可能性を示唆する。しかし、より重要であるのは、特に感度の高いパラメータが結果を左右し、そのパラメータの精度が確保できない場合、精密なモデルより、簡便なモデルで感度分析を行う方法の実用性が高くなる点であろう。

## 9. 今後の展開

持続的な開発シナリオの検討のため、水循環モデルと経済モデルの統合を進める。更に、検討シナリオの幅を広げ、MRCなどメコン川流域への働きかけを行いたい。

## 10. 引用文献

World Bank (2004): Mekong Regional Water Resources Assistance Strategy, Mekong Observations on Development Scenarios in the Lower Mekong Basin

Mekong River Commission (2005): Overview of the Hydrology of the Mekong Basin

Eric Baran (2005): Cambodian inland fisheries, facts, figures and context, World Fish Center

## 11. 主要な成果報告等

1. 戸田修, 樋口克宏, 宗村広昭, 丹治肇, カンボジアのコルマタージュシステムの歴史と展望, 農業土木学会誌, 73(1), pp.31-34, 2005/1
2. Miyusse Sakasegawa, Mitsuyoshi Yatagai, Composition of Pyrolyzate from Japanese Green Tea, Journal of wood science, 51(1), pp.73-76, 2005/4
3. Khem Sothea, Goto Akira, Mizutani Masakazu, A Hydrologic Analysis on Inundation in the Mekong Delta, Cambodia, 農業土木学会論文集 242号, 2006/4
4. 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 v 農業土木学会論文集 244号, 2006/8
5. Akira P. Takagi, Satoshi Ishikawa, Thuok Nao, Sitha Hort, 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, pp.750-754, 2006/8
6. 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, pp.846-854, 2006/8
  7. 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 巻, pp.1225-1230, 2007/2
  8. Paradis Someth, Naritaka Kubo, Hajime Tanji, A combined technique of floodplain storage and reservoir irrigation for paddy rice cultivation, *Paddy and Water Environment*, vol.5 Num.2, 2007/4
  9. Toshiaki Iida, Somphone Inkhamseng, Koshi Yoshida, Shinnosuke Ito, Seasonal variation in nitrogen and phosphorus concentration in the Mekong River at Vientiane, *水文・水資源学会誌*, 20 巻 3 号, pp.226-234, 2007/5
  10. Shintaro KOBAYASHI, Katsuhiko SAITO, Hajime TANJI, Wenfeng HUANG, and Minoru TADA, "Cambodia's Economic Structure and the Strategy for its Pro-poor Growth: Results from a CGE Analysis", *Studies in Regional Science (地域学研究)*, Vol. 37. (in press)