

社会変動と水循環の 相互作用評価モデルの構築

研究代表者
寶 馨

社会変動と水循環の相互作用評価モデルの構築

京都大学防災研究所 寶 馨

1. 全体構想

本研究では、社会の様々な変動要素と水循環の相互作用関係を考究してきた。人間社会と水循環の係わりを定量的に評価できるようなモデルを、明治期以後急速な社会的発展を遂げいまや安定成長期に達した我が国、さらには、今後も急激な人口増と社会の変動が予測されるアジア域の複数の河川流域を対象に構築した。これにより、

- (1) 社会の変動が河川流域の水循環、国際的な水資源循環・収支に及ぼす影響を予測する
- (2) アジアの淡水資源の利用可能性とリスクを科学的定量的に評価・予測する
- (3) 我が国の水（食料、産業）政策、国際貢献戦略の持続可能な将来像を明らかにすることを目指した。

2. 研究体制

当研究チームでは、次の3つのグループを構成して研究を推進してきた。

- (A) アジアモンスーン地域を対象とした水循環モデルの構築（水循環モデルグループ）
参加機関：京都大学、山梨大学、国連大学、（独）土木研究所
- (B) 自然の水文循環と社会変動の相互作用を考慮した水循環モデルの構築（相互作用グループ）
参加機関：京都大学、国土交通省国土技術政策総合研究所（国総研）
- (C) 国際的水循環・水収支の自然・社会・経済シナリオ分析と貢献戦略（国際水連関グループ）
参加機関：国総研、東京大学、法政大学、埼玉大学、横浜市立大学、京都大学ほか

3. 研究成果

3.1 アジアモンスーン地域を対象とした水循環モデルの構築

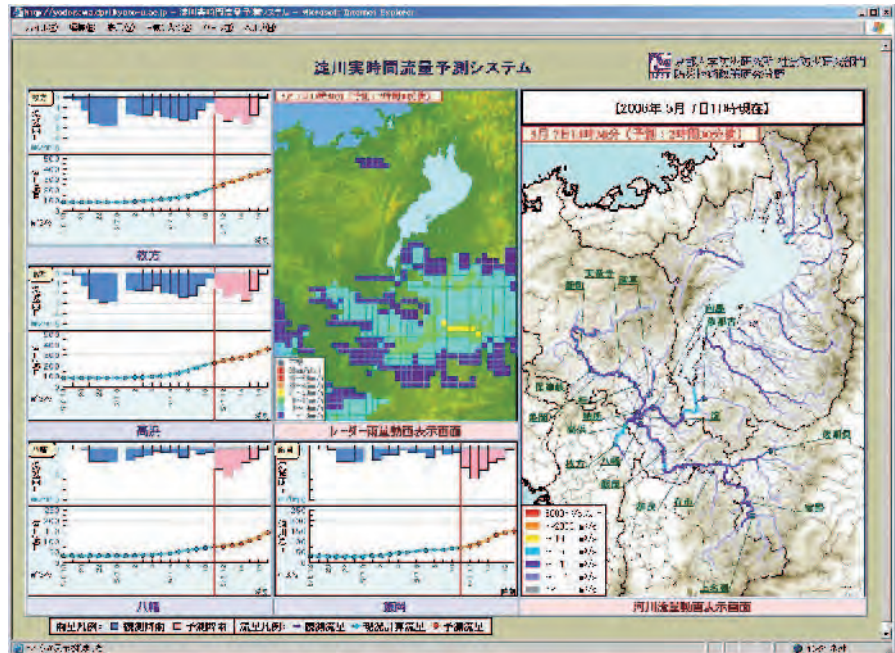
(1) 淀川流域を対象としてダム群流況制御を考慮した広域分布型流出予測システムの実現

水循環に対する人間活動をモデル化し、水循環システムの中のコンポーネントとしてその要素を陽に組み込んだ。人口、資産が集積し、治水事業と流水管理が高度に実施されている淀川流域（枚方地点上流、7,281 km²）を対象として流況制御の効果を考慮した広域分布型流出予測システムを構築した。従来、こうした流出予測システムは、評価地点の限られた集中型システムとして構成されることが多かったが、ここでは、250 mの空間分解能を有する物理分布システムにダム制御の効果を陽に導入した流出予測システムを新たに開発し、研究計画立案時に構想した予測システムを実現することができた。

国内外でもこうした詳細な流出予測システムは類がなく、これにより、わが国の社会基盤である治水システムの機能を時空間的に評価することが可能となった。また、社会変動や環境変化に対する治水システムの動作とそれに対応した河川流量を詳細な分解能で予測することが可能となった。

淀川流域においても、流量観測や流量予測が実施されているのは、国土交通省や府県が管理している一部の河川区間に過ぎず、大部分の中小河川流域では流量の予測情報は存在しない。そこでここで開発した250m空間分解能の分布型流出予測システムを実時間で運用できるようにシステムを拡張し、短時間降雨予測システムと組み合わせる実時間流量予測を実施するシステムを試験運用して、一部の情報を参考情報としてウェブ（<http://yodogawa.dpri.kyoto-u.ac.jp>）上で、実時間で閲覧できるようにしている（図1）。河川流量に関してはこのような高分解能の予測情報はこれまでに存在しない。減災のための高度予測システムとして貢献すべく、現在も改良を重ねている。

図1 淀川流出予測システムの実時間流出予測システムへの展開



○流出システム構築のためのプログラム群の公開

他流域でも同様の流出予測システムを構築することができるよう、Fortranで記述された分布型流出予測システム（セル分布型流出モデル）を開発した。標高データを用いた分布型流出予測モデルの構築と流出シミュレーションを実現するための基本プログラムのソースコードをホームページ上で公開している（<http://flood.dpri.kyoto-u.ac.jp/product/cellModel/cellModel.html> 参照）。

上記のシステムとこの公開モデル、さらには、構築された淀川流域一帯の降雨・水位、レーダー雨量のデータベースも併せて本CRESTプロジェクトの大きなプロダクトであると言える。

(2) インドネシアのブランタス川支川レスティ川流域での降雨・土砂流出特性

レスティ（Lesti）川はスメル火山の南西斜面に源を持つ多数の二次支川からなるブランタス川の右支川である。ブランタス川の流域面積は約11,800km²、流路延長は約320kmであり、インドネシア国内でソロ川につぐ大きな河川である。レスティ川の流域面積は約625km²であり、ブランタス川との合流点に発電と利水を目的としたセングルー（Sengguruh）ダム（1988年完成、総貯水容量21.5百万m³、有効貯水容量2.5百万m³）がある。さらに、その直下流には治水、発電、利水（農水・上水）のための多目的ダムであるスタミ（Sutami）ダム（1972年完成、総貯水容量343百万m³、有効貯水容量253百万m³）がある。

セングルーダムは、10年に1回は噴火するといわれている土砂生産が活発なスメル火山に源をもつレスティ川と、森林伐採により農地の拡大が年々進行しているブランタス川本川の両方の流域から出てくる土砂を受けるために急激な貯水池堆砂が進行し、極めて深刻な問題となっている。とくに、スタミダムの堆砂を軽減することが目的の一つとなって建設されたため、グロスの堆砂率（堆砂量／総貯水容量）は、ダム建設後5年で約80%、15年で89%以上となっており、利水上、由々しき状況となっている。スタミダムでもグロスの堆砂率は50%近くになっており、両貯水池では浚渫による貯水容量の回復を図っているが、高価な対策費用を強いられざるを得ない状況となっている。このような流域において土砂流出を軽減するための砂防や降雨・土砂流出量の予測に基づいた

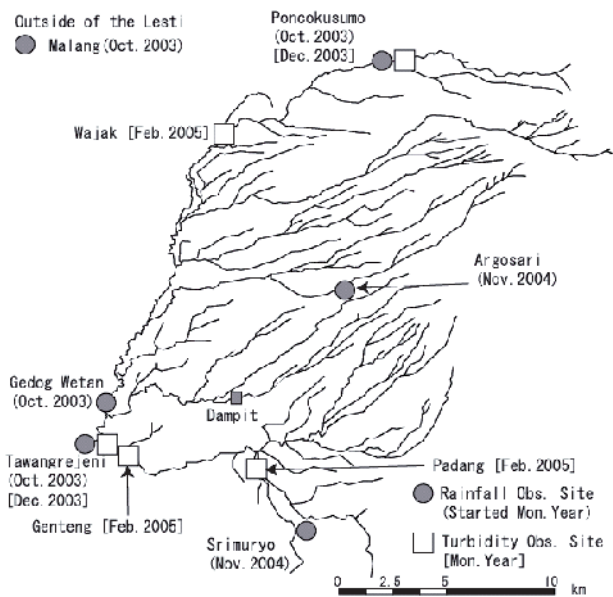


図2 レスティ川流域の雨量観測点等

土砂管理が早急に進められる必要がある。

堆積土砂の大部分は粒径が20～30 μm以下のウォッシュロードであり、火山灰からなる山腹斜面からの侵食土砂の流出によるものと考えられる。したがって、降雨による斜面での侵食特性をきちんと評価し、それが河道内に流出した後の河道内濁度観測と流量観測は、流域の洪水・土砂管理を実施するうえで極めて重要であり、観測データに基づいた降雨・土砂流出特性の把握とその予測モデルの構築が本研究の主たる目的である。その際、降雨・土砂流出に与える人為的インパクトを考慮することが求められている。

○観測とその結果

観測基準点はブランタス川の合流点からレスティ川の約20km上流にあるタワングレジェニ(Tawangrejeni)であり、ここでは水位と濁度が自動観測されている。濁度は採水方式であり、10分毎に川を管理している水管理公団(JASA TIRTA)に水位データとともにテレメータで伝送される。観測開始当初、レスティ川流域での雨量観測点はタワングレジェニから上流約7kmにあるダンピット(Dampit)のみであったため、流域の降雨・土砂流出特性を明らかにするために研究期間中に雨量計を新規に5ヶ所配置した(図2)。

図3は衛星データ(TERRA/MODIS)による季節ごとの植生指数の変化を見たものである。また、図4は土地利用毎に植生指数の季節変化を見たものである。これより、雨季前には植生指数は最小値をとるが、雨季が始まると急激に増加することがわかる。図5はタワングレジェニ地点で観測された流量と濁度から求めた流砂量である。同図より、雨季直後および雨季末期に流砂量が多いことが分かる。また、2005年3月の現地観測で偶々洪水に遭遇し、此処から約14km上流のワジャック(Wajak)で流量の計測と濁水の採取を実施した。

その結果、流量は6.5 m³/s、濁度は室内での分析により強熱減量で12,600 mg/literであり、流砂量に換算すると295 ton/hとなり、自動採水による濁度から求めた流砂量と同様のオーダーとなっていることが分かる。水位-流量曲線の妥当性はADCPによる詳細な流速分布計測により精度が確認されている。また、JASA TIRTAが実施している連続的な濁度計測結果については、タワングレジェニ地点で鉛直および横断方向に詳細な濁度計測をした結果、妥当であることを確認している。

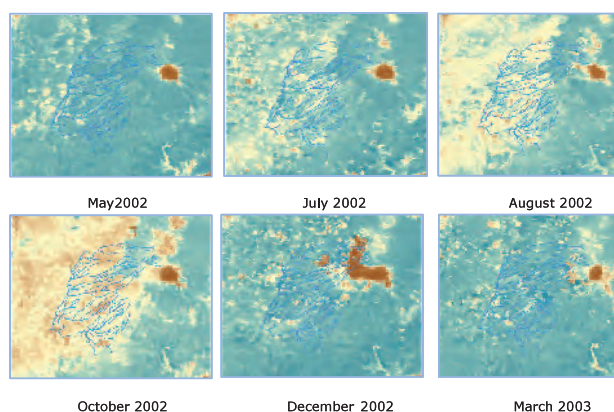


図3 空間的に見た植生指数の変化

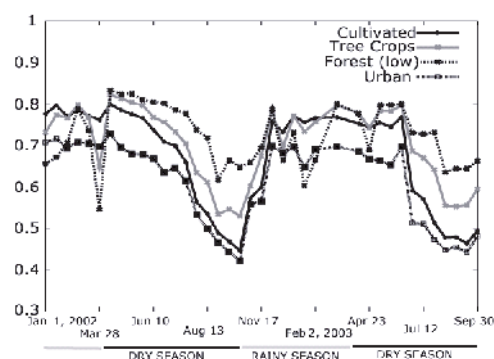


図4 土地利用別に見た植生指数の季節変化

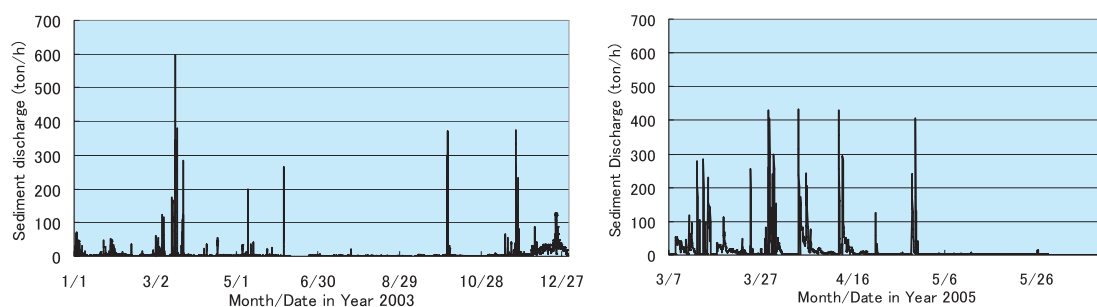


図5 タワングレジェニ地点での流量と濁度から求めた流砂量

○降雨・土砂流出モデルとその適用性の検討

分布型の降雨・土砂流出モデルを構築した。流域を斜面と河道に分けたDEMに基づく kinematic wave モデルが基本であり、斜面では雨滴及び表面流による侵食を考慮した土砂の連続式、Manning 式および水の連続式、Richards の式により降雨の土層内への浸透など、土層内の流れおよび土層内から河道への横流入も考慮している。また河道においてはバルクの連続式、粒径ごとの土砂の連続式、土石流、層流状集合流動、乱流といった流れの形態ごとの抵抗則、河床位式等である。なお、対象とする土砂の粒径は小さく、ウォッシュロードに分類されることから、土砂の連続式において微細砂（流体として流動する）として取り扱った。図6はタワングレジェニ地点での流量と濁度の計算値と観測値とを比較したものである。

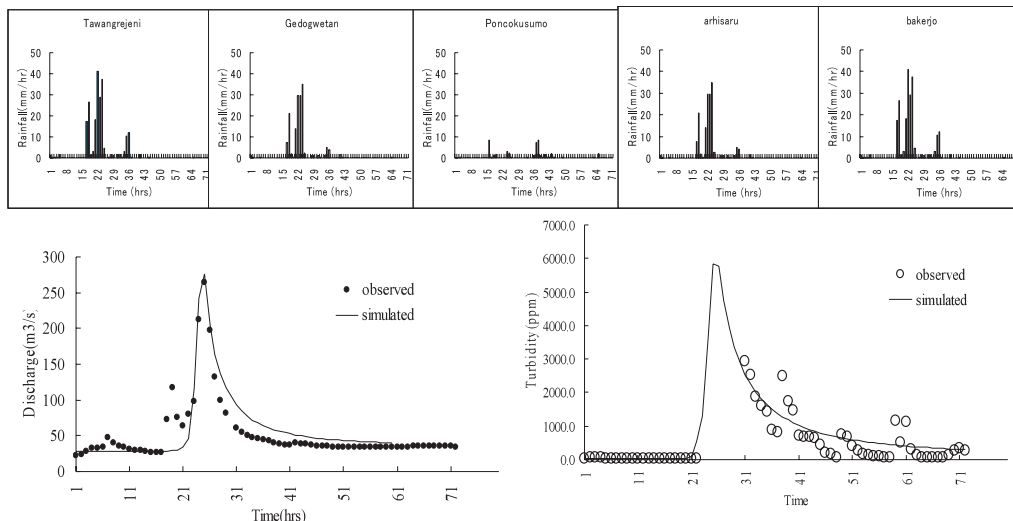


図6 ワングレジェニ地点での流量と濁度の計算値と観測値との比較

水循環と人間活動との相互作用の観点から、以下のようなことが言える。

- 1) 雨季（11月から4月）開始直後の豪雨時には、耕作地の表面は植生が少なく、雨滴侵食によって容易に土砂流亡する状態となり、斜面上の表面流によっても容易に侵食される。また、耕作地のみならず道路や側溝にも多量の微細土砂が乾季の間に堆積しており、雨季の初期にはこれらの微細土砂が耕作地の土砂とともに流出するために、高い濁度が観測された。
- 2) 雨季后半には雨季前期と同様の降雨があっても高濁度な土砂流出はあまり発生しない。これは、雨季前期に道路や側溝にたまった土砂が出尽くすことと、耕作地において急激に植生が回復し、地表面を覆いつくすために、土砂流亡が抑制されることによる。
- 3) 東ジャワでは年2回、農作物の収穫が見込まれる。山地部の斜面ではキャッサバやとうもろこしの栽培が多く、また、高原野菜としてキャベツの栽培が極めて活発に行われている。雨季末期の3月頃は第1回目の農作物の収穫時期であり、畑が収穫や次の植え付けのために攪乱されるとともに、田圃は代かきで攪乱され、降雨による多量の土砂流出が観測された。
- 4) 高地でりんご等の果樹園が増えてきている。熱帯でのりんごの栽培は珍しく、大変良い現金収入が期待できるので、農家は雨季に繁茂する下草刈りに精を出す。これによって表土が露出し、雨季の豪雨で土砂が流亡して高濁度な水が畑から河川に流入する。高付加価値の農産物の無秩序な栽培が土砂生産・流出を助長しており、適切な農業指導が喫緊の課題である。
- 5) 非洪水時には砂利採取がレスティ川流域のいたるところで行われており、土砂生産、土砂流出に多大な影響を与えている。今後、砂利採取による河床の擾乱が微細土砂の生産・流出に与える影響（マイナス面）、および採取された粒径成分の土砂が下流に到達しなかったことによる河床低下（マイナス面）、河床上昇の防止（プラス面）、貯水池堆砂の軽減（プラス面）など、砂利採取の影響を多面的に検討する必要がある。

(3) Chao Phraya 川流域を対象とした水循環モデルの構築

タイ国の労働人口の50%以上が農業に従事し、Chao Phraya 川流域を中心として米の生産が行われ、高原ではトウモロコシ、サトウキビ、マレー半島ではゴム、タピオカなどが栽培されている。米の輸出量は世界第1位(2002年統計)である。他に水産、養鶏、野菜栽培も盛んである。ただし、1960年からの40年間で農林水産業が約1/5にまで縮小した。その一方で、食品加工、繊維などの軽工業から、70年代以降は日本やアメリカの企業が進出して、電機、電子産業など輸出産業が急成長し高度経済成長の段階に入った。しかし1996年に輸出が不振となると、不良債権問題が表面化し、海外からの投資がいつせいに引き上げられ、米ドルとの固定相場制も崩れた。この結果「国際通貨基金(IMF)」の支援を受けるにいたったが、現在では金融引き締めなどの対策によりプラス成長に回復している。また、周辺国と同様に第二次世界大戦後、死亡率の低下が極めて早いペースで達成され、さらに出生率が高止まったため急激に人口が増加した。現在では、人口の増加圧力は低下しつつあるものの、低年齢層が多いことによる雇用創出の問題や、バンコクへの一極集中の問題などを抱えている。Chao Phraya 川を含む北部と中央部には約50%以上の人口が集中している。

人、物の多くが集中しているため、本流域内における社会変動と水循環の相互作用を検討することは極めて重要な問題である。大規模な人間活動の一つとして、まず大規模ダム貯水池の建設・運用が下流の流況に及ぼす影響について評価を行った。その結果、ダム建設を境に最低流出量が増加し、最高流出量が減少した。これは、貯水池操作によって安定的に水資源を供給するとともに、洪水の発生を減少させている。極めて顕著な流況の変化が捉えられた。FFTによる、Nakhon Sawanにおける日流量、BhumibolダムとSirikitダムの日放流量についてスペクトル解析を行うと、いずれも7日という同じ短い周期特性が得られた。すなわち、BhumibolダムやSirikitダムによって下流の流況に多大な影響を及ぼしていることが明らかであって、ダムのような大規模な人間活動は絶対に無視することはできないことを明らかにした。

○社会変化が水循環に与える影響の数値実験

Chao Phraya 川を対象とした流域水循環モデルを構築し、その構造上の特性を仔細に述べるとともに、構築した数値モデルの妥当性について検証を行った。その結果、流量と水位ともに極めて高い精度で再現をすることができた。ここで構築した数値モデルによって、土地利用や大ダム貯水池開発などの人間活動による河川流況への影響を評価することが可能となった。このモデルを利用して、「ダムが無い」という仮定を下にした自然流況の再現実験を行い、ダム貯水池の持つ治水・利水効果について検討を行った。その結果、利水については、大ダム貯水池建設・運用によって低水流量が顕著に増加しかつ安定化したことが明らかになった。また、治水については、C.2観測所においてピーク流量を最大で3793 m³/s、平均でも1748 m³/sの流量低下に寄与していることを明らかにした。さらに、大ダム貯水池建設・運用によって小・中規模の洪水を約60%減少させ、大規模洪水についても約50%を減少させる能力を持つことを明らかにした。

長期に亘るChao Phraya 川流域における自然流況の再現計算を行った結果、各支川の特徴を明らかにした。特に、対象流域の東側の流域、Nan川流域は、Yom川と併せて河川流量の時空間変動に大きな偏りがあることがわかった。下流への水資源供給にはNan川流域の開発が欠かせないことを明らかにした。さらに、二大支川のPing川とNan川がChao Phraya 本川に流入する際、ピークが一致しないようにして洪水波の増幅を回避する必要性があることがわかった。

仮想土地利用数値実験によって、この流域においては、小規模な森林の増加は下流の河川流量に与える影響は小さいが、大規模に森林等植生が増加することは河川流量の増加に繋がることが分かった。今後予想される大規模な市街化の進行を想定して、それが河川流量に与える影響について検討した結果、大規模な洪水災害が発生する可能性が示された。市街化を進めるに際しては、土地被覆の状況を鑑みながら開発を行わなければ、市街化による洪水氾濫が発生する可能性は非常に高い。

ここで議論した二つのダム貯水池の治水は、利水のための貯水の結果としてであって、積極的な治水運用は行っていない。下流域における社会資本や人口の集中によって齎される洪水氾濫被害を未然に防ぐには、二つのダム貯水池を用いた治水対策は欠かせない。昨今の環境保護圧力によって、新規ダム貯水池の

建設が困難となっている今、上述の二つのダム貯水池はもとより、既存の中・小規模の灌漑用ダム貯水池を利用した、利水と治水が一体となった運用をしなければならない。

○タイ国・Chao Phraya 川流域の社会変動と水循環の相互作用

さらに、社会変化と水循環の相互作用の評価を試みた。Chao Phraya 川流域は同国最大の流域面積を持ち、GDP の約 60%を生産し、人口の約 40%が集中地域であるため、同国の社会・経済に多大な影響を持っている。同流域内では 1950 年代から土地利用が大きく変遷し、水需要の拡大から大ダム貯水池が二つ建設、運用されている。このような大規模な人間活動が水循環へ及ぼす影響を定量的・定性的に評価し、さらに水循環が人間活動へ及ぼす影響も相互に評価した。このような「人間活動と水循環の相互作用」を実際の観測データや統計データから明らかにするとともに、数値実験を用いて検証を加えた。まず「低水流量の安定化」によって、灌漑面積が増加し、船舶航行による物資や人の移動が可能になり、さらに、「洪水規模が減少」することによって、都市化や市街化など人口や社会資本の集中が起こったことを明らかにした。また、水文量の時空間分析によって、河川流量の減少傾向を捉え、その要因は自然的要因（降雨量）なのか人為的要因（土地利用・被覆改変）なのかについて検討した。その結果、土地利用・被覆改変による影響もあるものの、降雨量に因る影響の方が強いことを明らかにした。

				水循環																											
				大気水象				高水				低水				流出率		地下水		水質											
				降水量		蒸発散量		洪水頻度		洪水規模		低水流量		安定化		増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少				
				増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少	安定化	増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少	増加	減少			
社会変動	水需要	人口	都市化	生活用水	増加	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
				減少	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
			都市活動用水	増加	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
				減少	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
		工業用水の増加	増加	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			減少	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
		水循環に対して意図しない影響	農業用水	農業形態の変遷	浮稲から高取穫米	増加	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
					稲作から果樹耕作	増加	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
					天水田から灌漑田	増加	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
				水田面積	増加	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	減少				0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
	灌漑面積			増加	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
			減少	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
	森林面積		増加	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			減少	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	市街地面積		増加	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
		減少	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	適応策	堤防	増加	1	0	0	0	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			減少	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		ダム貯水池	増加	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
減少			1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
地下水ポンプ		増加	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		減少	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
灌漑用水路		増加	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
		減少	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			

図7 Chao Phraya 川流域における社会変動と水循環の相互作用評価シート
 (シート中の数字 0 ~ 2 は社会変化と水循環の相互作用の強弱の度合いを示す。
 「0」は相互作用が「無い」という意味ではなく、「弱い」という意味である)。

図7のような Chao Phraya 川流域における社会変化と水循環の相互作用が表現されたマトリックスを作成することができた。このように、Chao Phraya 川流域における社会変化と水循環の相互作用についての定性的な評価が可能になった。

3.2 自然の水文循環と社会変動の相互作用を考慮した水循環モデルの構築（相互作用 G）

（1）洪水リスクマネジメント

2000年の東海豪雨災害を契機として、河川計画超過の水害発生を考慮した総合的な水害リスク管理の重要性が指摘されている。また、河川法の改正によりこれまで水害リスク管理の主要な部分を担ってきた河川事業において、住民の意向を反映した河川整備方針の策定や河川整備計画の立案が求められるようになってきた。このような社会変動を背景として、今後コミュニティレベルの水害リスク管理、とりわけ住民自らが被害軽減のための代替案を検討し、コミュニティでの協調的な減災行為としてのリスクコミュニケーションが必要となってくる。本研究では、水害リスクコミュニケーション支援を目的として、時空間GISを基盤とした水害リスクコミュニケーション支援システムの開発を行った。さらにシステムの有効性の検証と住民と意思決定者（あるいは河川・流域管理者）とが参加型で開発・改善するコラボラティブモデリングのためのワークショップを名古屋市都市圏において実施した。紙数の都合により、詳細は、川島健一・多々納裕一・畑山満則：自律的避難のための水害リスクコミュニケーション支援システムの開発、土木計画学研究・論文集、No. 23、2006（印刷中）を参照されたい。

（2）水資源ダイナミクス

水資源を考えるにあたっては、水の循環状況を物理的に把握することが重要であると同時に、資源としての水の増減が人間の社会・経済活動とどのような相互関係を持つかといった構造を定量的に把握することも重要である。水資源ダイナミクスグループでは、以上の観点から、大別して、

- (a) 水資源の有限性を考慮した大陸間相互作用モデルの開発
- (b) 地球温暖化と水災害の経済評価のためのリカーシブモデルの開発
- (c) 国スケールを対象とした水資源－経済相互作用モデル
- (d) 異なる分解能を持つ領域のネスティングに基づく大陸規模水循環モデルの開発

の4つの検討を行った。

紙数の都合で詳細は省略するが、気候－水資源－経済活動の相互作用を考えるためのモデル開発を行い、気候と経済・社会活動との関係を動的にモデル化すること、気候変動の結果生じる洪水・渇水など水災害のインパクトを考慮することに重点をおいた検討を行ってきた。これらは、具体的なモデルパラメータの調整等今後詳細をつめていかなければならないことも多いが、今後の水問題を通じた気候変動の社会に与える影響予測や、政策分析の基本的なツールとして活用できるものである。本研究グループではすでに現在まで開発して来たモデルの実用化への一歩として、GTAP、WDIに基づく地域間産業連関表のデータ作成に着手しており、実データを用いた分析を行っている。また、水災害の影響をフローおよびストックへの影響として地域メッシュ別にとらえる補助モデルについても検討している。

本研究で開発した要素モデルにより、例えば、現在は固定的なシナリオに基づいて計算されているGCMシミュレーションに、経済モデルのアウトプットを逐次入力するなど、より現実的なシミュレーションが可能な環境が整った。これにより、気候－水資源－経済社会活動の相互作用分析は、それぞれの過程を表現する要素モデルの結合を行う段階に入ったと言える。今後、実データに基づくモデルキャリブレーションと結合計算を進め、本研究の過程で、部分的に得られた知見、すなわち、いくつかの仮定の下では、2100年段階で、アジア及び北米で増大する人口による深刻な水不足が発生する可能性のあること、アフリカと南米では水不足よりもむしろ再生不可能資源の枯渇の影響を受け、食料の不足、産業への支障が生じる可能性が高いことの詳細な確認、および、種々の政策オプションがこの状態をどの程度改善できるかについて定量的な分析を進めていく予定である。

3.3 国際的水循環・水収支の自然・社会・経済シナリオ分析と貢献戦略（国際水連関グループ）

（1）アジアモンスーン地域の水問題解決の方向性

アジアモンスーン地域における、今後の水問題の解決の方向性として、

- ・各国の自然条件、歴史的背景に適応した経済的に持続可能な管理制度の構築

- ・ ガバナンスの確立
- ・ 法制度の実効性を担保するための信頼できるデータの収集

が必要となるが、これらの実現に向けて、これまで日本が実施してきた治水・利水対策が、アジアモンスーン地域の国々（9ヶ国）に適用可能か検討した。

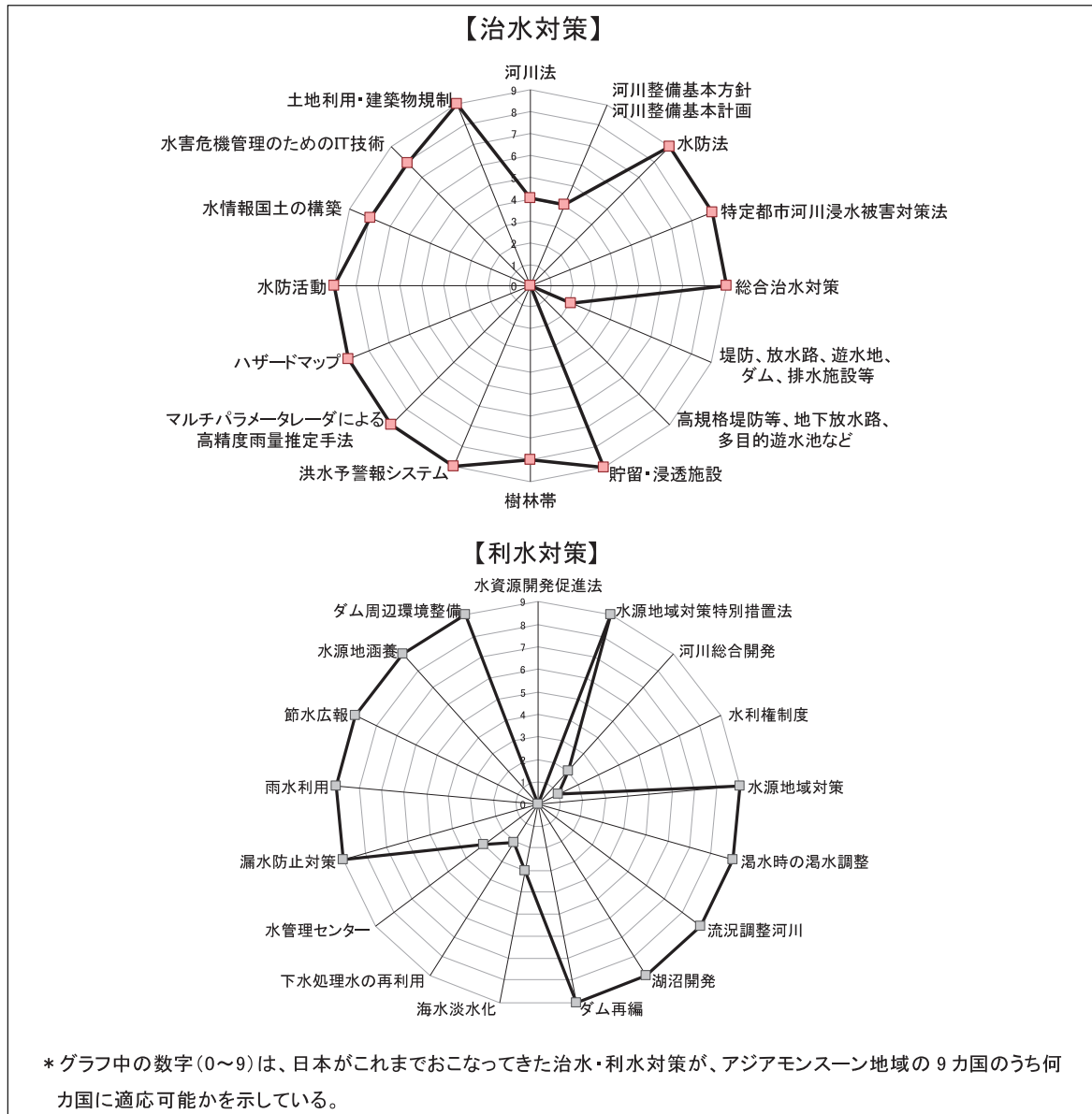


図8 我が国の治水・利水対策のアジアモンスーン地域9か国への適用可能性

さらに、治水対策については、今後アジアモンスーン地域でより効果的かつ効率的にプロジェクトを実施する際に必要とされる洪水リスクマネジメント手法の方向性として、1) 地域・状況に即した支援の実施、2) 治水プロジェクト支援に関する情報の共有、3) 洪水脆弱性指標による地域、社会の脆弱性の把握、4) 洪水被害に起因する貧困からの脱却支援、5) 人材育成、6) 構造物対策と非構造物対策のベストミックス、7) リスクマネジメントの視点からの支援を提案した。

(2) 国際的水循環・水収支

自然環境・社会経済と水循環・水資源の連関を分析し国際的な水資源事業における諸問題とその解決の方策を調査研究するという観点から、コスタリカ、インド、バングラデシュ、インドネシア、スリランカ、

トルコなどを対象として、国際河川における堰の設置や取水・洪水予報に関わる国際紛争、ダム事業・広域灌漑事業の地域への影響評価などについて文献調査、関係者からの聞き取り、および現地調査を行い、以下のような成果を得た。

中米のサン・ファン川流域およびシクス・アオーラ川流域に関して、現地調査および関連機関での聞き取り調査に基づき、持続可能な流域開発が同流域で実現するための要件について考察し、環境に留意した流域開発に向けての要件を、特に市民参加と国際機関による主導の観点から提言した。

国際河川に於けるプロジェクトが他国に与える影響に関しては、Tnansboundary Impact Assessment (TIA) の改善を志向した研究プロジェクトを米国・ワシントン DC に本部を置く「環境法研究所」と共に 2004 年から 2006 年に掛けて実施し、アジアとアフリカでの事例研究から得られた「改善への指針」を発表する国際シンポジウムを 2006 年 10 月にワシントン DC で開催した。

世界ダム委員会報告書による勧告への各国と援助機関の反応に関して、関係者からの聞き取り調査と文献調査より、世界的な行動規範として実効性を有するための条件を探求した。特に日本の国際援助機関に焦点をあてて関係者からの聞き取り調査と文献調査を行い、世界的な行動規範として備えるべき要件を提言した。

水資源の間接貿易 (Virtual Water) の影響に関して、この概念が食料安全保障や一般論としての安全保障に与える影響を考察した。また、アラル海流域とメコン川流域を事例とした研究を実施し、国際流域管理に関して斯様な概念が与え得る影響について考察した。2003 年 8 月のストックホルム水シンポジウムで CREST 後援のワークショップを主催し、この研究成果を発表するとともに、関連研究者とともに研究討議、資料収集を行った。更に、アラル海流域に於ける水資源の間接貿易 (Virtual Water) の影響に関しては、流域国であるアフガニスタンが灌漑農業を拡大する場合の食料安全保障や一般論としての安全保障へのインパクトについて考察を深めた。

国際流域での社会経済活動が水循環と環境管理に与える影響について、本研究からの知見を政策提言として提示するため、個別の国際会議での発表に加えて、国際シンポジウム「国際河川管理における交渉・対話・認識の役割」を東京において 2006 年 2 月に開催した。

開発途上国でダムが建設される場合の移転住民による生活再建について、サグリン・ダム (インドネシア)、チラタ・ダム (インドネシア)、コタパンジャン・ダム (インドネシア)、ビリビリ・ダム (インドネシア)、コトマレ・ダム (スリランカ)、ヴィクトリア・ダム (スリランカ) に関して比較分析を行うことで、実証的な提言を構築した。ヴィクトリア・ダム流域 (スリランカ)、ビリビリ・ダム流域およびコタパンジャン・ダム流域 (インドネシア) では、「自然環境および社会経済」と「水循環・水収支を含む水資源」との相互の連関を分析した。また、ダム建設が流域の水循環と社会経済に与える影響に関して、本研究で得られた知見を政策提言として提示するために、個別の国際会議での発表に加えて、AOGS2005 (6 月・シンガポール) では “Dams and Development” セッションを開催した。また、国際ワークショップ “Resettlement Issues by Dam Development” をジャカルタ (インドネシア) において 2005 年 9 月に開催した。

本研究で実施した事例研究は、その殆どが Post-Project Review の観点から「過去の事例から有用な教訓を引き出し、将来において同種のプロジェクトが実施される場合の方法論的な改善に資する」為の政策提言を志向している点が、既存の研究とは異なるユニークな点である。

例えば、ダム建設時の水没補償に関しても、過去の事例に於ける問題を指摘することを主眼とするのではなく、発見された問題点の中から、方法論的な改善が必要かつ可能な事象を追求し、それを政策提言として提示するという方向性を維持している。世界ダム委員会報告書に関する研究でも、世界的な行動規範として備えるべき要件を提言することを志向している点で、他の研究とは一線を画している。

国際流域に関する研究では、市民参加と国際機関による主導の観点からの政策提言は、他の同様な研究では類を見ないユニークな視点からの研究である。また、水資源の間接貿易 (Virtual Water) が及ぼす影響について、その政策論的な意味合いを追求した研究は、Virtual Water に関する研究の多くがその数量的な把握を扱っているのとは明確な対比を示している。更に、Tnansboundary Impact Assessment

(TIA) の方法論的改善に特化した国際共同事例研究は、類似の既存研究例がないユニークな研究である。

(3) 水循環におけるコンフリクトの問題

昔から水は紛争や対立（コンフリクト）の種であった。洪水の時は対岸あるいは上流の堤防が決壊することを望んだし、渇水の時は上流へ水を奪いに行った。こうした自然の流況によるもののみならず、現代では社会的な行為（社会変動）が水循環に変化をもたらすことによって様々なコンフリクト（対立構造）が生じる。しかもそのコンフリクト問題（利害関係者の意見の衝突）は、計画の立案から意思決定までの間に発生する可能性があり、地域開発環境計画に対して社会が抱えるリスクのひとつとしてコンフリクトを認識することができる。特に、公共計画のうち、国際的な水資源開発計画はコンフリクトマネジメントの整備が喫緊の課題であると考えられる。様々な社会変動要因により、世界的に水不足に陥り、水争い（水資源コンフリクト）が将来各地で起こるだろうと社会的に認識されてから久しい。

日本においては水資源開発をめぐる行政や住民の間でのコンフリクトが昨今頻繁に見受けられる。今後は災害対策として地域に密着したハザードマップの作成がますます活発に行われるようになると考えられるが、ハザードマップを地域住民に公開し、地域ごとのリスクが明確になれば、流域全体で河川管理を行う際のリスクの再配分方法に関して、流域各地域でさらなるコンフリクトの発生も考え得る。この点で、水害対策は物理的な側面はもちろん、社会的受容性という側面にも配慮してなされるべき時代になりつつあるといえる。水資源をとりまくコンフリクトを社会の抱えるリスクのひとつとして捉え、水災害対策の一環としてマネジメントを行うことの重要性がある。しかしながら、従来の取り組みのほとんどが現在くり広げられている水資源コンフリクトの現況や背景を記述的に報告するに留まっている。

本研究では、社会公正という価値基準を常に念頭に置き、マネジメントのプロセスは明示的、かつそのアプローチはシステムとして確立されていなければならないという観点に立つ。水資源開発に関するコンフリクトを、事後的にではなく事前にマネジメントしていくために、コンフリクトの構造を明らかにすることを目的として、数学理論にもとづいたコンフリクト分析のためのモデルをいくつか構築した。さらに、これらのモデルを Third Party の介入によるコンフリクトのマネジメントという視点から体系化した。すなわち、水資源を取りまく利害主体の対立を数学理論によりモデル化し、その均衡状態によってコンフリクトがマネジメントされ得る可能性を分析するために、数学理論が拠り所とする数学的安定性の関連を整理し、社会的安定性との関連について考察を行った。すなわち、社会的安定性を数学的安定性を通して眺め、最悪のコンフリクト状態を避けるための、水資源コンフリクト問題における分析視座を示した。そして、インド・バングラデシュのガンジス河水利用コンフリクトを事例に、数学的安定性の社会システムにおける現実的意味と、将来的な合意形成の可能性について研究を行った。

研究期間中に行った以下の現地調査が研究課題の遂行のために特に有効であった。

- 1) 中国黄河流域： 黄河流域は洪水・渇水の被害にさらされており、特に下流域では頻繁に断流が生じている。流域の各省間ではこのような洪水・渇水リスクの配分に関してコンフリクトが生じている。中央政府が各省間のコンフリクトをマネジメントする Third Party 的な役割を演じており、本研究におけるコンフリクトマネジメントの視点からは非常に有意義な研究対象であると認識した。
- 2) ガンジス川流域・バングラデシュならびにインド西ベンガル： ガンジス川は水資源コンフリクトの発生地域として世界的に認識されており、将来激化が予想される危機的な事例として重要であると考え、調査を行った。ここにおけるインドとバングラデシュのコンフリクトの構図は、本研究課題における特に重要な Third Party の介入について有益な示唆を与えてくれた。
- 3) 吉野川流域： 吉野川可動堰建設問題は 2000 年に建設の可否を問う住民投票が行われ、建設反対派が多数を占めたため、可動堰建設が中断されたという経緯がある。ある程度の期間が経過し、議論の成熟が進んでいると考えられる吉野川可動堰建設問題のコンフリクトのプロセスを分析することは、将来的なコンフリクトマネジメントのシステムを構築する上では非常に有効であると考え、調査を行った。
- 4) 川辺川・球磨川流域ダム： 川辺川ダム建設問題は司法が介入し、農林水産省が敗訴したため利水計

画を見直さなければならなくなった。日本における水資源コンフリクト問題としては新たな局面を迎えているという点で重要な事例であると考え、調査を行った。

以上のような本研究課題における成果を書籍にとりまとめ出版した（萩原良巳・坂本麻衣子：コンフリクトマネジメント—水資源の社会リスク—、勁草書房、2006年3月）。

4. 研究成果

◎原著論文発表（国内誌 45 件、国際誌 54 件）

平成 16 年度から平成 18 年度に発表したものについて以下に挙げる。

【平成 16 年】

Mori, K., Fujikura, R. and Nakayama, M.: Japan's ODA and the WCD Recommendations: Applicability of Comprehensive Options Assessment in JICA Development Studies, *Water International*, Vol. 29, No. 3, International Water Resources Association, pp. 352-361, 2004.

寶 馨：世界の水問題の動向と研究展望，土木学会論文集，No. 761/II-67，pp. 1-18，2004.

Tani, M. and Kosugi, K.: On a Method for Evaluating Effects of Soil-Physical and Slope-Topographic Properties on Storm Runoff Responses in Mountainous Catchments. *Forests and Water in Warm, Humid Asia*, (Sidle et al., eds.), 267-270, 2004.

大石哲・佐山敬洋・中川一・里深好文・武藤裕則・Dian Sisinggih・砂田憲吾：雨滴粒径分布を考慮した雨滴衝撃エネルギー算出方法の開発と局所的土砂生産量との関係に関する研究，土木学会水工学論文集，第 49 巻，pp. 1087-1092，2005.

手計太一，深見和彦，Chanchai Suvanpimol，宮本守，山田正，大ダム建設の持つ利水・治水効果に関する基礎的検討—タイ王国・Chao Phraya 川上流域を対象として—，土木学会水工学論文集，第 49 巻，pp. 457-462，2005.

和田一範・上野山智也：黄河断流問題とその対策としての水法の改正，水利科学，No. 279，pp. 60-82，2004.

手計太一，吉谷純一，Chanchai Suvanpimol：タイ王国・Chao Phraya 川流域とその周辺におけるパン蒸発量の時空間分布に関する研究，水文・水資源学会誌，Vol. 17, No. 5, pp. 468-481, 2004.

手計太一，吉谷純一，Chanchai Suvanpimo：2002 年のタイ王国・Chao Phraya 川流域における洪水，自然災害科学，Vol. 23, No. 2, pp. 215-228, 2004.

Pathirana, A., S. Herath, and T. Yamada: Simulating orographic rainfall with a limited-area, nonhydrostatic atmospheric model under idealized forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, 215-226. EuropeanGeosciences Union, 2005.

Sakamoto, M., Hagihara, Y. and Sugiman, T., 'A Dynamic System Model of Social Conflict that Combines Attitude Change Model and Game Theory', *Asian Journal of Social Psychology*, Vol. 7, pp. 263-284, 2004.

坂本麻衣子・萩原良巳：水資源計画における社会的コンフリクトのマネジメントに関する研究—インド・バングラデシュのガンジス河利用に関するコンフリクトを対象として—，水文・水資源学会誌 Vol. 18, No. 1, pp. 11-21, 2005.

坂本麻衣子・萩原良巳：長良川河口堰問題を対象とした開発と環境のコンフリクトに関する分析，水文・水資源学会誌，Vol. 18, No. 1, pp. 44-54, 2005.

Salewicz, K. A. and Nakayama, M.: Development of a Web-based Decision Support System (DSS) for Managing Large International Rivers, *Global Environmental Change*, 14(1), 25-38, 2004.

Yamaguchi, H., Futamura, H. and Nakayama, M.: Issues concerning a diagnostic study of an action plan for the San Juan river basin, *Hydrological Processes*, 18(16), 2977-2989, 2004.

Pathirana A. and T. Yamada (2004) Idealized simulation of orographic rainfall with a mesoscale atmo-

spheric model," *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 48, pp. 295-300, Japan Society of Civil Engineers.

【平成 17 年】

- 佐山敬洋・立川康人・寶 馨：流出モデルの不確実性評価手法とそのモデル選択への適用，土木学会論文集 No.789/II-71, pp. 1-13, 2005.
- Nawahda, A., Kojiri, T. and Kaihotu, I.: Distributed Runoff Model Linking Surface with Groundwater Processes, *水文・水資源学会誌*, Vol. 18, No. 3, pp. 293-305, 2005.
- 佐山敬洋・立川康人・寶 馨・市川温：広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価，土木学会論文集，No. 803/II-73, pp. 13-27, 2005. 11.
- 和田一範・日下部隆昭：メコン川における航路開削問題について，*水利科学*，No. 285（第 49 巻 第 4 号）水利科学研究所，pp. 86-105, 2005.
- 佐山敬洋・菅野浩樹・立川康人・寶 馨：ダム群操作過程を考慮する広域分布型流出予測システムを用いた淀川流域の治水安全度評価，土木学会水工学論文集，Vol. 50, pp. 601-606, 2006.
- Shen CHIANG, Yasuto TACHIKAWA, Kaoru TAKARA: A pseudo validation algorithm for hydrological model reliability assessment, 土木学会水工学論文集，Vol. 50, pp. 103-108, 2006.
- Nawa Raj PRADHAN, Yasuto TACHIKAWA and Kaoru TAKARA: Downscaling methods of flow variables for scale invariant routing model, 土木学会水工学論文集，Vol. 50, pp. 109-114, 2006.
- NMNS Bandara Nawarathna, Kazuo Ishino Yasuto Tachikawa and Nobuyuki Tamai: Application of distributed hydrological model to analyze bridge-collapse scenarios in the Asuwa River 2004 flood, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 50, pp. 67-72, 2006.
- 牧野育代・寶 馨・立川康人：流入河川の水質特性と冷水対策が貯水池水質に及ぼす影響，土木学会水工学論文集，vol. 50, pp. 1369-1374, 2006.
- Sunmin KIM, Yasuto TACHIKAWA and Kaoru TAKARA: Ensemble rainfall-runoff prediction with radar image extrapolation and its error structure, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 50, pp. 43-48, 2006.
- 小林健一郎・立川康人・佐山敬洋・寶 馨：分布型降雨流出モデルによる 2004 年 10 月台風 23 号由良川洪水の解析，土木学会水工学論文集，vol. 50, pp. 313-318, 2006.
- 竹下伸一・三野 徹：京都盆地における日降雨特性の経年変化，*水文・水資源学会誌*，第 18 巻 2 号，pp. 106-115, 2005.
- 萬和明，田中賢治，池淵周一：全球灌漑要求水量と降水量の相関分析，土木学会水工学論文集，第 50 巻，2006, 6pp. (CD-ROM).
- 坂本麻衣子・萩原良巳・畑山満則：水資源開発コンフリクトにおけるプレイヤーの設定に関する研究，*環境システム研究論文集*，Vol. 33, pp. 415-422, 2005.
- 坂本麻衣子・萩原良巳：水資源コンフリクトにおける Third Party の調整効果に関する研究，*地域学研究*，Vol. 35, No. 2, pp. 295-308, 2005.
- Taichi Tebakari, Junichi Yoshitani and Chanchai Suvanpimol: Time-Space Trend Analysis in Pan Evaporation over Kingdom of Thailand, *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, Volume 10, Issue 3, pp. 205-215, 2005.
- Syafuruddin Karimi, Mikiyasu Nakayama, Ryo Fujikura, Taro katurai, Masako Iwata, Takeshi Mori & Koichi Mizutani: Post-project Review on a Resettlement Programme of the Kotapanjang Dam Project in Indonesia, *International Journal of Water Resources Development*, Vol. 21, No. 2, pp. 371-384, June 2005.
- Roshan Shrestha, Yasuto Tachikawa and Kaoru Takara: Input data resolution analysis for distributed hydrological modeling, *Journal of Hydrology*, Vol. 319(1-4), pp. 36-50, 2006.

【平成 18 年】

- Sakamoto, M. and Hagihara, Y., 'A Study on Social Conflict Management in a Water Resources Development - A Case of the Conflict between India and Bangladesh over Regulation of the Ganges River-', Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, Vol. 18, No. 1, pp. 11-21, 2005.
- Sakamoto, M., Hagihara, Y., and Hipel, K.W.; Coordination Process by a Third Party in the Conflict Between Bangladesh and India over Regulation of the Ganges River, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 1119-1125, 2005.
- Sakamoto, M. and Hagihara, Y.; Social Stability and Mathematical Stability in Conflict Management, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2006. (掲載確定)
- 和田一範・野仲典理、佐野貴之：ジャカルタの水道事業民営化問題，水利科学，No.290, pp. 52-76, 2006.
- 川瀧健一・多々納裕一・畑山満則：自律的避難のための水害リスクコミュニケーション支援システムの開発，土木計画学研究・論文集，Vol. 23, 2006 (掲載予定).

◎ その他の主な著作物

1. K. Takara and T. Kojima (Eds.): Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region (APHW2003), organized by the Asia Pacific Association on Hydrology and Water Resources (APHW), Pa-lu-lu Plaza, Kyoto, Japan, 13-15 January 2003, Vol. 1, pp. 1-542 (2003)
2. K. Takara and T. Kojima (Eds.): Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region (APHW2003), organized by the Asia Pacific Association on Hydrology and Water Resources (APHW), Pa-lu-lu Plaza, Kyoto, Japan, 13-15 January 2003, Vol. 2, pp. 543-1139 (2003)
3. Y. Tachikawa, B.E. Vieux, K.P. Georgakakos and E. Nakakita (Eds.): Weather Radar Information and Distributed Hydrological Modelling, IAHS Publication no. 282, Proceedings of an international symposium (Symposium HS03) held during IUGG2003, the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, at Sapporo, Japan, 30 June-11 July 2003, pp. 1-323 (2003)
4. K. Takara and T. Kojima (Eds.): Managing Water Resources under Climatic Extremes and Natural Disasters (FIJI-2003), Proceedings of the FIJI-2003 international conference organized by South Pacific Applied Geoscience Commission (SOPAC) and IHP Regional Steering Committee for Southeast Asia and the Pacific (IHP RSC-SEAP), and UNESCO Office, Jakarta, at Sigatoka, Fiji, 27-28 October 2003, IHP-VI Technical Documents in Hydrology, Regional Steering Committee for Southeast Asia and the Pacific, UNESCO Jakarta Office, No. 2, pp. 1-292 (2003)
5. Y. Chen, K. Takara, I. Cluckie and F. Hilaire De Smedt (Eds.): GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment (ICGRSHWE), Proceedings of the ICGRSHWE international conference, held at the ThreeGorge Dam construction site, China, 16-19 September 2003, IAHS Publication no. 289, pp. 1-422 (2004)
6. K. Takara, Y. Tachikawa and K. Kojima (Eds.): Monitoring, Prediction and Mitigation of Disasters by Satellite Remote Sensing (MPMD-2004), Proceedings of the MPMD-2004 international symposium organized by Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University in cooperation with Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 19-21 January 2004, Awaji Yumebutai International Conference Center, Hyogo, Japan, pp. 1-199 (2004)
7. Y. Chen and K. Takara (Eds.): Flood Forecasting and Management with GIS and Remote Sensing (FM2S-2004), Proceedings of the FM2S conference organized by Sun Yat-Sen University and

- Kyoto University, 6-12 November 2004, Guangzhou and Three Gorges, China, pp. 1-256 (2004)
8. K. Takara, Y. Tachikawa and NMNS B. Nawarathna (Eds.): Monitoring, Prediction and Mitigation of Water-Related Disasters (MPMD-2005), Proceedings of the MPMD-2005 international conference organized by Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 12-15 January 2005, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, Kyoto, Japan, pp. 1-790 (2005)
 9. Srikantha Herath, Dushmanta Dutta, Uruya Weesakul and Ashim Das Gupta (Eds.): Proceedings of the International Symposium on Role of Water Sciences in Transboundary River Basin Management (ISBN 974-8202-94-1), 10-12 March 2005, Ubon Ratchathani, Thailand. (2005年6月出版)
 10. 萩原良巳・坂本麻衣子；コンフリクトマネジメント—水資源の社会リスク—，勁草書房，2006. 3. 20.
 11. 三野 徹：農山村における環境ストックの蓄積とその利活用，自然と共生した流域圏・都市の再生（「自然と共生した流域圏・都市の再生」ワークショップ実行委員会編著，307 pp.），187-200，2005.
 12. 三野 徹：21世紀の国土・農業政策と自然共生，自然共生プロジェクト成果集農における自然との共生，「自然共生」プロジェクト推進事務局編，農林水産省農林水産技術会議事務局，130 pp.，2005.
 13. 亀田弘行監修・萩原良巳・岡田憲夫・多々納裕一編著：総合防災学への道，京都大学学術出版会，pp. 445-476，2006.
 14. 立川康人・佐山敬洋・宝 馨：大洪水のシミュレーション—洪水予測の高度化、治水安全度評価および温暖化時の流出予測実験，第5回水文・水資源セミナー「気候変動と水災害・生態系」，水文・水資源学会，東京大学農学部弥生講堂，2006年5月25日，pp. 11-28.

◎受賞

本研究推進中に以下のような若手研究者の顕彰を得た。

坂本麻衣子	日本地域学会奨励賞	平成14年10月4日
Nawa Raj Pradhan	土木学会 水工学論文奨励賞	平成17年3月7日
Roshan K. Shrestha	水文・水資源学会論文奨励賞	平成17年8月4日
佐山敬洋	土木学会論文奨励賞	平成18年5月26日