

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成13年度採択研究代表者

楠田 哲也

(九州大学大学院工学研究院 教授)

「黄河流域の水利用・管理の高持続性化」

1. 研究実施の概要

研究のフェーズを「基礎の確立」（データ準備、観測準備、モデル構築、中国側との関係の確立等）、「研究の深化」（観測によるデータ蓄積、節水技術開発、モデル改善、水マネジメントシステム構築等）、「研究の統合化」（要素研究成果を基にしたシステム化、指標による判定、水循環システムの新デザインの決定など）とすると、平成16年度は「研究の深化」から「研究の統合化」への移行フェーズに当たる。

具体的な研究成果は以下の通りである。第1に、内蒙古托克托実験圃場における灌漑トウモロコシ畑で水収支を詳細に解明し、灌漑用水が数10%過剰に供給されていることを明らかにした。第2に、内蒙古河套灌区の耕地にて水分・熱・塩分動態を正確に把握し、塩害地と地下水流動の関係を明確にし得た。合わせて、灌漑管理実行評価モデルIMPAMを開発し、この大型灌区の水収支構造を詳細に示し得た。第3に、渭河流域において引き続き現地観測を実施し、河川水の生下水に近い汚染の実態に変わりの無いことを確認した。また、水量水質統合モデルを用いて、渭河流域での水資源供給制約下における効果的水資源配分手法を検討した結果、特に農業分野で適切な節水化方策を実施した場合に限り、2050年までに経済成長率年平均1.64%を確保できることが明らかになった。第4に、土砂流出量の推定方法をほぼ確立し、土砂流出量のこの式による計算値と観測値とが比較的一致したことから、流量ハイドログラフが与えられれば土砂流出量の評価が可能となった。また、水理・水文観測点における洪水流量と流砂量を境界条件として提案の河床変動解析手法により、下流の任意の地点における洪水流量と流砂量を良好に推測できることを示した。第5に、GBHM2分布型流出モデルと分布型水循環モデルを改良し、0.1度グリッドでの流域全域での水循環計算を精度良く行えるようになった。第6に、縣市レベルの水資源の空間分布をモデル化することによって、黄河流域の地域別及び用途別（上・中・下流域、農業・工業・生活用水）の年単位の水需給構造を把握し、経済成長シナリオに基づく水需給ギャップを評価し、それにより政策を評価した。このような結果、高持続性の水循環システムの新デザイン手法の提案にさらに一步近づくことができた。

2. 研究実施内容

黄河の水収支を理解し、水の利用方法を工夫して単位水量当たりのサービスをより高める水循環システムの新しいデザインを検討するために研究を続け第4年目に入った。研究課題は、農地・乾燥地、都市、土砂輸送、流出・水資源、流域水マネジメントに大別される。流域を農地・乾燥地、都市に分けて空間的に水利用を検討し、降水から流出・水資源化に至るプロセスと組み合わせて流域の水循環を検討し、これらをまとめて流域の水マネジメントを検討する手順を採っている。同時に黄河特有の土砂輸送を河川水量に合わせて検討した。今年度得られた結果は以下の通りである。

農地・乾燥地：

1) 内蒙古托克托実験圃場における水・塩分の動態の検討

托克托実験圃場のトウモロコシ畑において春季から秋季にわたる灌漑に係る灌漑水量と土壌水分量を測定した。この結果をもとに、灌漑水量の妥当性を検討した。その結果、動的圃場容水量を数十%越える水量が灌漑されている事実が明らかになった。

さらに、塩分動態を明らかにするために3ヵ所の井戸を利用して揚水試験を実施した。帯水層の有効間隙率が小さく、透水係数も小さい場所が、塩類化スポットを構成しやすいことが明らかになった。つまり、塩類化スポットは地下水毛管上昇が起りやすく、雨水や灌漑水の浸入が起りにくいところに形成される可能性が高いことが推察された。

2) 半乾燥農地における水分・熱・塩分動態の解明

河套灌区の灌漑畑地と耕作放棄地（非灌漑裸地）の蒸発散量を測定し、空気力学式に基づいて構築した蒸発散モデルをSPACモデルに組み込み、衛星データを利用して河套灌区における蒸発散量の空間分布を推定する方法を樹立し、それに基づき推定値を得た。

また、河套灌区の耕地にて、灌漑後の水の挙動を観測した。その結果、灌漑直後の隣接塩害地での地下水位の応答は速やかで、時間の経過とともに地下水位ピークが塩害地に向かって伝播すること、および、耕地の下層浸透水分フラックスは灌漑時に発生し、その量は灌漑水量と降水量の約20%に相当こと、塩害地では下層からの上昇フラックスが発生し、灌漑期間中約130mmが土壌面蒸発として消費されたことを明らかにした。

さらに、耕地及び塩害地における凍結融解期間の土壌水分・塩分フラックスを追跡した結果、凍結期間の12～2月には不凍水分が下層から上昇し、融解期の3月には表層水分の一部は蒸発で上昇するとともに融解した水分の大部分は重力で下向きに移動し、4月には強い蒸発で水分が再上昇することを明らかにしえた。可溶塩分は土壌水分の移流に従うと考えることにより、春先の返塩現象の発生機構を明らかにし得た。

加えて、河套灌区の灌漑から排水に至る経路においてCaイオンの変化を追跡した。その結果、土壌中におけるCaイオンは非水溶性塩としての沈積し、地域の塩分輸送に影響していることを明らかにした。

3) 農地の作付け体系や水管理と黄河などの流域レベルの水循環・水収支との関係の明確化

様々な観測結果や既存の資料をもとに、大型灌区（河套灌区）の水収支構造を詳細に示し得た。また、その結果を説明できるモデル（灌漑管理実行評価モデルIMPAM）を開発した。

都市：

1) 渭河流域における水質・流量観測現地調査の継続

渭河流域及び皂河流域において2002年10月から現地水質観測を継続している。水質測定結果は例年の傾向とあまり差がない。渭河において、水質が激変する地点が150km付近（宝鶏市下流）にあり、理由確認のために精査したが、依然として解決し得ていない。

2) 渭河流域の水量水質統合モデルの構築と検証

水量水質統合モデルを構築し、現地水質観測結果との比較により、モデルの妥当性を検証した結果、BOD₅推定値は観測結果とほぼ同様の傾向を示し、再現性が高く妥当であることが確認された。他の水質項目、及び、河川流量、地下水位等の解析値と観測値の関係も概ね良好であった。

3) 西安市都市部における河川への汚濁物質負荷過程の解明

解析対象区域は、大峪水庫灌区、小型及井灌区、沔惠渠灌区である。解析対象河川区間は22.3km長であり、5つの雨污水集水区からの排水流入が見られる。解析手順は以下のようである。まず、土壌水分量及び根の長さによる蒸発散量の調整機能を有するtank modelを用い、水及び汚濁物質の流出量を算定する。次にKinematic wave法により河川流量を算定し、一次元移流分散方程式から河川水質の挙動をもとめる。さらに、2004年1、4、8、11月の現地観測データを用いて汚濁負荷算定に係る各パラメータを同定した。その結果、解析値と実測値の相関は定量的に良好であった。

4) 渭河流域における将来の水利用可能量の算定と効果的水資源配分方策の検討

渭河流域で、降雨量推定モデルと流出モデルから豊水期、平水期、渇水期の流域内水資源利用可能量を算定した。その際、ここでは流域内各gridに年間の地下水位低下限界を設定し、水量水質統合モデルから得られる河川流量、及びダム容量等から設定される表流水資源利用可能量と地下水取水限界量を足し合わせたものを水資源利用可能量とした。その結果では、2050年における水資源利用可能量は、平水期で43億m³、渇水期で39億m³程度であり、現在の水利用量70億m³をかなり下回る。渭河流域で農業分野の節水灌漑導入率を80%、生活分野での乾式トイレ、中水道の導入率を30%程度、工業用水の回収率を80%程度にそれぞれ引き上げ、農業及び生活分野での余剰水を工業に転用した場合における効果的水資源配分量を検討した結果、2050年までに経済成長率年平均1.64%を確保できることがわかった。

土砂輸送：

1) 高濃度洪水の流出解析と土砂流出評価

窟野河、禿尾河、佳芦河流域の水理・水文観測点における雨量、流量の観測値を用いて流出係数を算定した。その結果、雨量の精度が悪くバラツキが大きいのが、流出係数は $f = 0.05 \sim 0.62$ 、ピーク流出係数は $f_p = 0.05 \sim 1.57$ を得た。また f は f_p より小さく、 f_p は 1 より大きくなった。これはピーク時に土砂を高濃度に含有するためである。

また、貯留関数法により流出解析を行い洪水1波形毎にパラメータ k_1 、 k_2 を同定した。その結果、 $k_1 = 0.01 \sim 6$ 、 $k_2 = 0.4 \sim 65$ となり、平均的には $k_1 = 1.4$ 、 $k_2 = 17.8$ となった。これらの結果から、水理・水文観測点において流量ハイドログラフを求めることができるようになった。

さらに、河川断面を長方形とし、流れを等流と仮定して、土砂流出量の推定について検討した。ここに、摩擦損失係数は泥流型土石流について提案されている式を、流砂量式としては従来提案されている広範な流砂形態に適用可能な平衡流砂量式をそれぞれ用いた。土砂流出量の計算値と観測値とを比較すると、両者は比較的一致していた。これにより、流量ハイドログラフが与えられれば土砂流出量の評価が可能となった。

2) 高濃度洪水による河床変動解析

窟野河の神木～温家川の区間を対象として河床の変動を解析した。計算対象期間は1979年8月7日～8月14日である。基礎式は、運動方程式、全相連続式、固相連続式である。境界条件として、神木における観測点の観測流量、流砂量を与える。温家川における流量、流砂量の計算値と観測値を比較した結果、両者はよく一致した。その結果、水理・水文観測点における洪水流量と流砂量を境界条件として河床変動解析を行うと、下流の任意の地点における洪水流量と流砂量を良好に推測できることを示した。

流出・水資源モデル：

1) 分布型流出モデルと分布型水循環モデルの改良

GBHM2分布型流出モデルにおける流出発生に関する課題を解決するため、Shuttleworth-Wallaceモデルを用いて土地被覆(地表面粗度、アルベドなどの違い)及び気象条件(気温、風速、放射など)の時間・空間的な分布を考慮した可能蒸発散量の推定を行った。また、積雪モデルを用いた融雪量の時空間分布の推定を行った。さらに、凍土による浸透量の抑制、の3つの過程を新たにモデルに組み込んだ結果、大幅にモデルを改善しえた。

一方、分布型水循環モデルにおいて、人工系水循環を考慮し、再現精度を一層高めることができた。

2) 分布型流出モデルと水利用モデルとの結合

農地グループが開発する水利用モデルと分布型流出モデルとを結合させ、農業取水の影響を考慮した流出解析を行うために、水利用モデルの出力(取水量推定値)が流出解析の入力情報として利用できるようにモデルを改良した。また、農業取水モデルの入力情報となる各0.1度グリッドごとの流出量データを整備した。

3) 流出モデルへの土砂輸送過程の導入

分布型流出モデルに土砂輸送プロセスモデルを導入するための基礎的検討を行った。黄河本川の中流河道区間(Longmen～Sanmenxia)に中国水利水電科学研究院泥沙研究所の一次元土砂輸送モデルを適用し、モデルによる土砂輸送量、堆積量などの再現性をチェックし、かなりの精度であることを確認した。

4) 分布型水循環モデルによる過去50年間の水循環の検討

過去50年間の水循環を再現し、水資源賦存量の実態を分析した。現実の賦存量をほぼ再現し得たが、水循環の不確定性について明らかにしなければならないことが判明した。

流域水マネジメント：

1) 灌漑用水需要量予測

水資源需給予測モデルでは、水資源需給バランスを分析する最小単位を県市レベルとした。また、先行研究の例にならって2000年から50年間の経済活動等に伴う水資源需給構造の年単位での変化を議論することを前提に、特に灌漑用水需要量予測を試みた。

265の観測点において得られた1971～2000年の気象データを利用して、流域全体の作物別耕地の分布と作物の季節別生長パターンを考慮した可能蒸発散量の空間分布を求めるとともに、作物別の水需要量(CWR)と灌漑用水需要量(CIWR)を推計する農作物灌漑用水モデルを作成し、過去におけるそれらの空間分布の変化を再現評価した。さらに、2001年から2030年までの地球全体の気候変動シナリオ(GCM HADCM3)を利用して、将来の気候変化の空間パターンをより小さな空間スケールにダウンスケールすることによって、将来の気候変化が播種作物パターン及び可能蒸発散に及ぼす影響を分析し、将来の灌漑用水需要量の変化を予測した。

2) 水資源需給将来予測モデルの構築

構築したモデルを用いて実績値に基づく1997年と2000年における水需給構造を分析した。水資源の需給バランスの逼迫度を、モデル内で設定している必要生態水基準に対して検討した。ただし、流砂水量も考慮した必要生態水量は、全体として210億 m^3 程度必要であるという情報しかなく、現時点では上流からの累積水資源量に対して最下流で210億 m^3 となるよう均等に割り付けた。1997年は、深刻な断流が発生した年であるが、水資源量自体が中・下流域で少なく、また取水制限政策が実施される前で農業用水量が多かったことから、汾河、渭河の支流と本流の下流域で必要生態水基準ラインを下回る結果となった。このことは地下水を汲み上げすぎること示している。

3) 経済成長の地域格差が水需要ギャップに与える影響

経済成長の地域格差が水需要ギャップに与える影響について分析した。構築したモデルでは、黄河流域内の省レベルの経済成長シナリオは外挿値として一定としたものである。省レベルの経済成長が、県市レベルのどのような成長パターンで達成されるかによる水需給ギャップの差異を、均等成長(均等成長シナリオ)と、省都を中心とした成長パターン(大都市成長シナリオ)、都市を中心とした成長パターン(中都市成長シナリオ)それぞれに

ついて分析した。その結果、経済成長が大都市に偏るほど、それらの成長都市における水資源の需給ギャップが拡大することが判明した。また、その需給ギャップは、成長都市が周辺地域に対してより高い経済レベルであることを背景に、原単位の圧縮や排水処理システムの整備による耗水量の減少等を集中的に行うことによって低減できる可能性があることを示した。さらに、排水システムが普及すればするほど水資源ギャップは緩和され、特に経済活動が集中している大都市において、より効果的であることを示した。

3. 研究実施体制

農地・乾燥地グループI

- ①研究分担グループ長：渡辺 紹裕（総合地球環境研究所、教授）
- ②研究項目：1) 半乾燥農地における水分・熱・塩分動態の解明
2) 農地の作付け体系や水管理と黄河などの流域レベルの水循環・水収支との関係の明確化

農地・乾燥地グループII

- ①研究分担グループ長：小林 哲夫（九州大学大学院農学研究院、助教授）
- ②研究項目：1) トウモロコシ畑における灌漑水量の妥当性の検討
2) 塩類化スポットの生成機構の検討

都市グループ

- ①研究分担グループ長：楠田 哲也（九州大学大学院工学研究院、教授）
- ②研究項目：1) 渭河流域における水質・流量観測現地調査の継続
2) 渭河流域の水量水質統合モデルの構築と校正
3) 西安市都市部における河川への汚濁物質負荷過程の解明
4) 渭河流域における将来の水利用可能量の算定と効果的水資源配分方策の検討

土砂輸送グループ

- ①研究分担グループ長：橋本 晴行（九州大学大学院工学研究院、助教授）
- ②研究項目：1) 高濃度洪水の流出解析と土砂流出評価
2) 高濃度洪水による河床変動解析

流出・水資源モデルグループI

- ①研究分担グループ長：竹内 邦良（山梨大学大学院医学工学総合研究部・教授）
- ②研究項目：1) GBHM2分布型流出モデルの改良
2) 分布型流出モデルと水利用モデルとの結合
3) 流出モデルへの土砂輸送過程の導入

流出・水資源モデルグループII

- ①研究分担グループ長：楊 大文（東京大学大学院工学系研究科・助教授 H16.8.1付で中国清華大学水利水電工程系 教授で転出（研究項目は継続している））
- ②研究項目：1) 分布型水循環モデルの改善

2) 分布型水循環モデルによる過去50年間の水循環の検討

流域水マネジメントグループ

①研究分担グループ長：井村 秀文（名古屋大学大学院環境学研究科・教授）

②研究項目：1) 灌漑用水需要量予測

2) 水資源需給将来予測モデルの構築

3) 経済成長の地域格差が水需要ギャップに与える影響

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

Fujino, Y. , Guo, X. , Liu, J. , Matthews, I P. , Shirane, K. , Wu, K. , Kasai, H. , Miyatake, M. , Tanabe, K. , Kusuda, T. , and T. Yoshimura	Chronic arsenic exposure and urine 8-Hydroxy-2'-deoxyguanosine in an arsenic-affected area in Inner Mongolia, China	Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, advance online publication, doi: 10. 1038/sj. jea. 7500381, 2004
Yang, D. , C. Li, H. Hu, Z. Lei, S. Yang, T. Kusuda, T. Koike, and K. Musiake	Analysis of water resources variability in the Yellow River basin during the last half century using the historical data	Water Resources Research, vol. 40, W06502(1-12) ,2004
Kaneko, S. , K. . Tanaka, Toyota, T. , and S. Managi	Water Efficiency of Agricultural Production in China: Regional Comparison from 1999 to 2002	Int, J. Agricultural Resources, Governance and Ecology, vol. 3, no. 3/4, pp. 231-251, 2004
Fujino, Y., Guo, X., Liu, J., You, L., You, L., Miyatake, M., Yoshimura, T., and Japan Inner Mongolia Arsenic Pollution (JIAMP) Study Group	Mental health burden amongst inhabitants of an arsenic - affected area in Inner Mongolia, China	Social Science & Medicine, Vol.59, pp.1969-1973
楊大文, 倪広恒, 雷志 棟, 楊詩秀	大流域の分布型水文モデル及び黄河 流域への適用	中国水文科学与技術研究進展- 全国水文学術討論會論文集, 河海大学出版社（中国語）, pp. 215-223, 2004

劉霞, 天谷孝夫, 赤江剛夫, 西村直正	凍土中における温度勾配下の水分の上昇移動	農業土木学会論文集, no. 230, pp. 21-28, 2004
Wang, W. , Kobayashi, T. , Chou, H. , Mori, M. , Watanabe, E. and Iwanaga, R	An experiment on the spatial variability of water balance terms in a small grass-covered area	Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources, vol. 17, no. 3, pp. 264-273, 2004
大本照憲, 崔志英, 柿原ゆり	高濃度土砂流の抵抗特性について On rheologicay of hyperconcentrated sediment-laden flow	土木学会応用力学論文集, vol. 7, pp. 979-986, 2004
安武大輔, 岩永理佐, 小林哲夫	黄河流域のトウモロコシ灌漑農地における生体調査	気象利用研究, no. 17, pp. 32-35, 2004
幡野貴之, 奥田隆明	省市レベルの地域間産業連関表を用いた中国国内の仮想水分析 - 黄河流域を中心にして -	環境システム研究論文集, vol. 32, 2004
久米崇, 長野宇規, 渡邊紹裕, 三野徹	除塩灌漑に伴う排水不良農地の土壌塩分分布変動	農業土木学会論文集, no. 233, pp. 21-28, 2004
Wang, L. , and T. Akae	Analysis of ground freezing process by unfrozen water content obtained from TDR data in Hetao Irrigation District of China (中国河套灌区におけるTDRで測定した不凍水量による土壌の凍結過程の解析)	土壌の物理性, no. 98, pp. 11-19, 2004
東修, 楠田哲也, 王曉昌, 楊大文, 井上和久, 尾崎心平, 柴田勝史	水文・水質統合モデルを用いた渭河流域内都市域水質汚濁状況の解明	環境工学研究論文集, vol. 41, pp. 693-700, 2004
馬場啓輔, 楠田哲也, 王曉昌, 楊大文, 東修, 尾崎心平, 柴田勝史	EPICによる渭河流域の穀物生産評価と食糧安全保障の検討	環境工学研究論文集, vol. 41, pp. 659-664, 2004
Iwanaga, R. , Yasutake, D. , Kobayashi, T. , Wang, W. and W. He	Growth of Corn and Hydrological Environments in the Togtoh Experimental Field in the Yellow River Basin, China	Kyushu Journal of Agricultural Meteorology, ser. 2, no. 13, pp. 7-12, 2004
赤江剛夫, 宇野徹, 史海濱, 李延林	内蒙古河套灌区における灌漑水から農地土壌、地下水、排水路水にいたる経路での陽イオン組成の変化	農業土木学会論文集, no. 234, pp. 79-87, 2004

王維真, 渡辺江梨子, 小林哲夫, 長裕幸, 賀文君、毛利周子	A Method for Measuring Soil Solution Electrical Conductivity in the Field Using TDR	水文水資源学会誌, vol. 18, no. 1, pp. 55-63, 2005
平林由希子, 鼎信次郎, 沖大幹	20世紀の世界陸域水文量の長期変動	水工学論文集、第49巻、pp. 409-414, 2005
平野順子, 馬籠純, 石平博, 竹内邦良	グローバルダム貯水池データベースの構築	水工学論文集、第49巻、pp. 385-390, 2005
北原健司, 菅原琢磨, 馬籠純, 竹内邦良, 石平博	GISおよび分布型流出モデルを用いた流域内の汚濁物質輸送過程の検討	水工学論文集、第49巻、pp. 1585-1590, 2005
Hiroki Oue, Toshiyuki Tamoto, Hiroki Ikawa and Keiji Takase	Micrometeorological Model for Estimating Evapotranspiration from an Irrigated Maize Field in the Hetao Irrigation District in the Yellow River Basin	Journal of Agricultural Meteorology, vol. 60, no. 5, pp. 537-540, 2005
Toshiyuki Tamoto, Hiroki Oue and Keiji Takase	Micrometeorological Model for Estimating Evaporation from a Bare Field in the Hetao Irrigation District in the Yellow River Basin	Journal of Agricultural Meteorology, vol. 60, no. 5, pp. 541-544, 2005