

D-1 陸域由来の環境負荷変動に対する東シナ海の物質循環応答に関する研究

(3) 東シナ海の海洋環境予測統合モデルの開発に関する研究

- ② 土地利用変化の影響を考慮した長江流域からの汚濁負荷流出量の推定手法開発に関する国際共同研究

独立行政法人国立環境研究所研究所

水圏環境研究領域 EFフェロー	Xiang Bao
水圏環境研究領域 土壌環境研究室	林 誠二
水圏環境研究領域長	渡辺正孝

<研究協力者>

独立行政法人国立環境研究所

流域圏環境管理研究プロジェクト 村上正吾、徐 開欽、岡寺智大

平成14～16年度合計予算額（予定）	6, 682千円
（うち、平成15年度予算額	2, 359千円）

[要旨] 渤海・東シナ海は世界でも代表的な大陸棚であり、生物生産・生物多様性が高い海域である。一方、長江を中心とした流域の開発により、陸域からの環境負荷の量・質的变化が海洋生態系機能および生物種多様性に大きな影響を与えることが危惧されており、その影響を早急に明らかにする必要がある。

本研究の目的は、人為的な環境変化に伴う長江流域由来の環境負荷の質的・量的変化を予測するため、主要な支流の一つである嘉陵江流域（流域面積160,000km²）を対象に汚濁負荷流出量の推定手法を開発することである。具体的には、複数の衛星データを用いた多時期の詳細な土地利用データの整備とそれを基にした土地利用の時系列的な変化量の抽出と、汚濁負荷発生インベントリの作成を行った。さらに、これら土地利用データ、負荷インベントリを入力データとする流域汚濁負荷流出モデルの開発と適用を行った。

1990年と2000年を対象にそれぞれ作成した縮尺1:1,000,000の土地利用データを用いた空間解析の結果、流域全体で耕作地と森林域が10年間で、それぞれ4,170km²、1,475 km²減少しており、特に耕作地の市街地化（減少面積の63.6%）が顕著であった。これにより、市街地は4,686km²増加し、中国における目覚ましい経済発展を裏付けるように、都市近郊農地（農村地域）の市街地化の促進が定量的に確認できた。また、重慶市を対象とした汚濁物質発生インベントリモデルの構築によって、都市の急激な発展に伴い、産業系を由来とする汚濁物質の長江、ひいては東シナ海への流入量が增大することが、定量的に確認できた。さらに、嘉陵江流域を対象とした、1987年の水・土砂流出動態に関する日単位のシミュレーション実施結果は、年間を通じて水および土砂流出の日変動を的確に再現していた。これにより本モデルが、水・土砂流出特性に対して、流域内の土地利用形態の変化のもたらす影響を定量的に予測し得るツールとなることが確認された。

[キーワード] 汚濁負荷、土地利用変化、流出モデル、土砂生産、産業連関分析

1. はじめに

土地利用形態の変化や化学肥料使用量の増加に代表されるように、人為的な環境改変によって、この20年間に於いて海域へ流入する河川由来の窒素やリンといった栄養塩や他の汚濁負荷量は、世界規模で見て5倍程度増加した¹⁾。これにより、沿岸域における富栄養化の拡大や有害な藻類の大量増殖をたびたび引き起こされており、結果的に、大中規模の河川に隣接する沿岸環境生態系の構造に著しい変化をもたらしている²⁾。

中国の長江はその河川延長において世界第3位の長さを有し、その海への年間総流出量（9,794億m³）は世界第4位に相当する。長江流域内の人口は4億人を超え、これは世界人口の5～10%に相当する。また、作物生産量は中国国内の総生産量の40%を占める³⁾。長江流域を由来とする汚濁・汚染物質は、このような生活排水や農業生産に伴って発生しており、さらには、近年の急激な経済成長と都市域の人口増加によって、長江沿岸域への流入負荷量は著しく増加していることが推測される。長江沿岸域に位置する渤海・東シナ海は世界でも代表的な大陸棚であり、生物生産・生物多様性が高い海域である。一方、長江を中心とした流域の開発により、河川を通じて流入する流砂、栄養塩および有害化学物質等の陸域からの環境負荷の量・質的变化が海洋生態系機能および生物種多様性に大きな影響を与えることが危惧されており、その影響を早急に明らかにする必要がある。

2. 研究目的

本研究の目的は、人為的な環境改変に伴う長江流域由来の環境負荷の質的・量的変化を予測するため、主要な支流域の一つである嘉陵江流域を対象に汚濁負荷流出量の推定手法を開発することである。具体的には、まず、長江流域全体を対象に、衛星データを用いた最新かつ詳細な土地利用分布データの作成を行い、1990年を対象に作成された同土地利用分布データとの比較から、10年間における流域での土地利用変化量を抽出する。次いで、嘉陵江流域重慶市を対象に土地利用分布データに基づいた発生汚濁負荷インベントリの作成を行う。さらに、これら土地利用データ、負荷インベントリを入力データとする流域汚濁負荷流出モデルの開発と適用を行う。

3. 研究方法

(1) 長江流域ならびに嘉陵江流域の概要

長江は、全長6,300kmで中国最大の河川であると同時に、ナイル川、アマゾン川に次ぐ世界第3位の長さをもつアジア最大の河川である（図1）。その本流は、青海、チベット、雲南、四川、重慶、湖北、湖南、江西、安徽、江蘇、上海の11の省・自治区・直轄市を通り、流域面積は約180万km²で国土の19%全長6,380km、流域面積181万km²を有している。東シナ海に流れる年間総流量は1兆億m³弱で、中国河川総流量の38%を占め、第2位の黄河の20倍以上である⁴⁾。また、流域には約4億人の人口と、約2,640万haの耕地があり、特に、上海市や重慶市に代表される大都市における人口密度は極めて高い⁵⁾。長江流域は源流域の青蔵高原を除いて、大部分が亜熱帯気候区に属しており、年平均気温は16～18℃である。源流域では年平均気温は-4℃程度で、最低気温は-40℃にもなるが、中下流域では最高気温が40℃以上になることもある。流域内の降水量は豊富で、年平均降水量は1,100mm程度である。降水量は東から西に向かって遞減傾向にあり、東南沿岸域では1,200～1,400mm/year、西部上流地区では1,000mm/year程度である。降雨は、夏と秋に集中して発生し、4～10月の降水量は、年間の70%以上を占めている。

嘉陵江は、長江第3位の長さの支流で、夾西省秦嶺の南斜面を源流とし、四川盆地の北部斜面

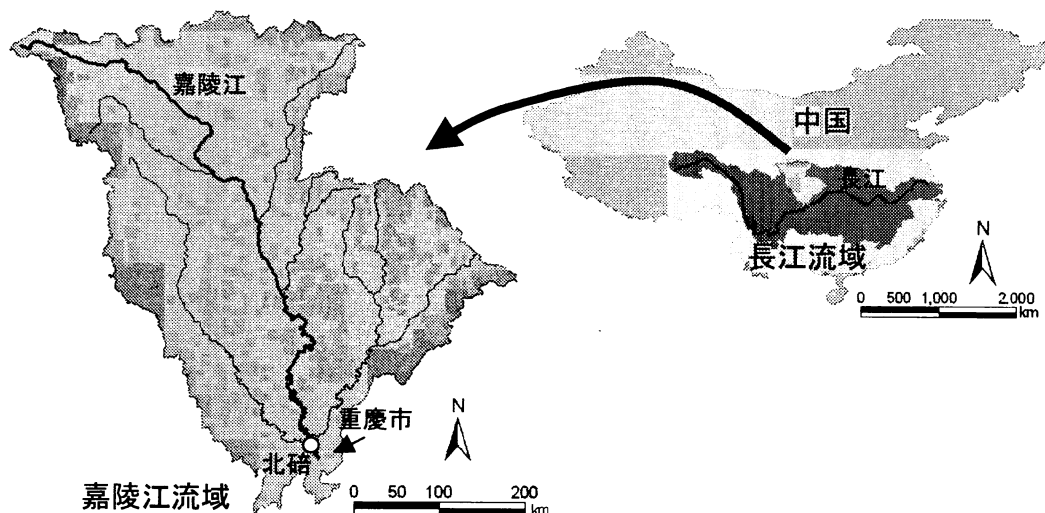


図 1 長江流域ならびに嘉陵江流域

に沿って北から南に流れ、重慶で長江に注いでいる（図 1）。全長 1,120km、流域面積 16 万 km² である。上流部は山地域であり、峡谷型河川である。中下流部では川中盆地が形成され、重慶市を中心に流域内人口（約 3,800 万人）が多く、農業が発達している（耕地面積は流域全体の 50% 程度）。本流最下流部にある北碚水文観測点での年平均流量は 2,120m³/s、年総流量は 670 億 m³ である。洪水期である 5～10 月の総流出量は、年間の 80% 以上を占めている。洪水量が大きいため、河岸に沿った地域への洪水の脅威が大きく、長江全体の主な原因の一つである。また、流域内の表土流失が激しく、長江由来の土砂の主要な生産源の一つとなっている⁶⁾。

(2) 土地利用データ作成ならびに土地利用変化量抽出手法

これまでに、中国国内においては、統計資料やリモートセンシングデータを基に、土地利用分布データの作成と土地利用変化に関する研究が、土地利用変化過程⁷⁾、時間的、空間的土地利用変化パターンの定量化^{8),9)}、土地利用の歴史的な変化¹⁰⁾、地域的な土地利用変化^{11),12)}、等について数多く行われてきた。リモートセンシングデータを利用した土地利用変化量を抽出する手法は大きく 2 つに分けられ、1 つは入力データの直接的な分類に基づく方法であり、もう 1 つは、地表面の放射特性の季節変化に基づく方法である。前者については、適切な分類基準とともに、正確なグラウンドトゥルースデータ収集のための労力を有する。また、後者については、リモートセンシングデータの選択に厳密性が要求されるとともに、正確なデータ処理が必要とされる。

本研究では、それぞれ長江流域全体をカバーしている、異なる 2 時期の TM ランドサット衛星画像データに対して、6 つカテゴリとさらにその細分類として 25 のサブカテゴリから成る分類基準を適用し、分類のための対話形式のソフトウェア (MGE, Arc/Info) を用いて、縮尺 1:1,000,000 スケールの土地利用データの作成と、土地利用変化量の抽出を行った。本データ処理作業の概要は、まず、1990 年と 2000 年それぞれについて、同時期に撮影された TM ランドサットデータを用いて、上記の分類手法により、長江流域の土地利用分布データを作成する。次いで、地理情報システム上で 1990 年と 2000 年の土地利用データを比較し、土地利用変化部分を抽出する。最後に、土地利用データおよび土地利用空間変化量データを 1km グリッドデータへ変換し、統計処理を実施することで変化量定量化する。図 2 は、以上の手法に関するフローを示している。

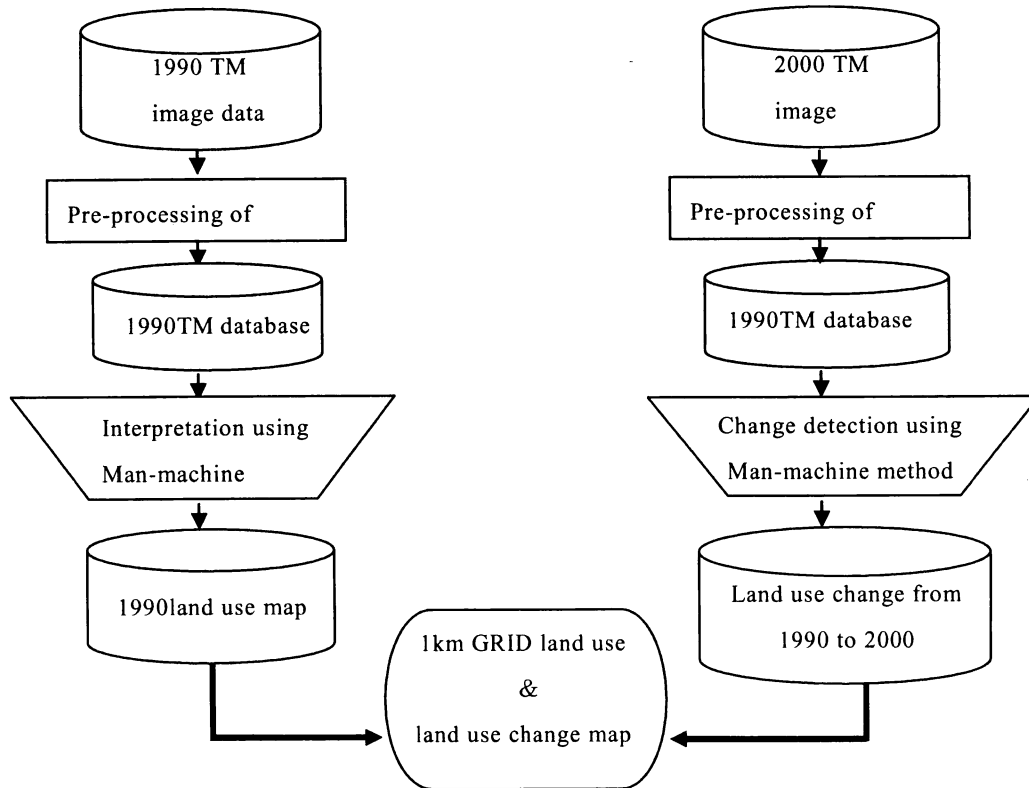


図2 土地利用変化量の抽出手法フローダイアグラム

(3) 重慶市を対象とした汚濁負荷発生インベントリ作成手法

① 水資源-負荷発生インベントリモデルの枠組み

重慶の水資源 - 汚濁物質発生インベントリの算定モデルは産業部門と家計部門の2つのサブモデルにより構成される。産業のインベントリモデルは水資源パラメータや汚濁負荷の発生パラメータを設定するプロセスを経て、産業連関分析モデルによって、各産業の水資源フロー(用水量, 排水量, 水消費量)と汚濁負荷発生量(排水中の炭素, 窒素, リン)の算定を行う。また中国の地域産業連関表は、法的制約により入手が困難なため、推計モデルを用いて推計を行う。他方、家計部門のインベントリモデルは都市と農村の人口に原単位を乗ずることで、家計の水資源フロー(用水量, 排水量, 水消費量)と汚濁負荷発生量(炭素, 窒素, リン)の算定を行う。また、産業と家計のサブモデル間の整合性を図るために、基本算定パラメータは同時に設定する。これらの算定モデルを経て、産業および家計からの水需要及び汚濁負荷の発生量に加え、家計により誘発される負荷量、重慶市内外の消費活動起因別の負荷の発生構造の評価を行う。

② 産業連関表を用いた水資源 - 汚濁負荷発生インベントリモデル

本算定で用いる競争移輸入型産業連関表のモデル式は、

$$X = [I - (I - \hat{M} - \hat{N})A]^{-1} F \quad (1)$$

ただし、 X : 総産出額列ベクトル, A : 投入係数行列, \hat{M} : 輸入係数の対角化行列, \hat{N} : 移入係数の対角化行列, F : 最終需要列ベクトル

ここで、総産出額あたりの用水量や、それに伴い発生する排水量や汚濁負荷発生強度を要素とする対角ベクトルを \hat{D} とすると、水資源及び汚濁負荷発生列ベクトル CE は、式(1)より、

$$CE \equiv \hat{D}X = \hat{D}[I - (I - \hat{M} - \hat{N})A]^{-1}F \quad (2)$$

または移輸入内生型レオンチェフ逆行列 $[I - (I - \hat{M} - \hat{N})A]^{-1} \equiv B$ とし、また最終需要の対角化行列を \hat{F} とすると、水資源及び汚濁負荷インベントリ行列 EL は

$$EL \equiv \hat{D} \cdot B \cdot \hat{F} = \begin{pmatrix} d_1 b_{11} f_1 & \cdots & d_1 b_{1j} f_j & \cdots & d_1 b_{1n} f_n \\ \vdots & \ddots & \bullet & \ddots & \vdots \\ d_i b_{i1} f_1 & \bullet & d_i b_{ij} f_j & \bullet & d_i b_{in} f_n \\ \vdots & & \bullet & \ddots & \vdots \\ d_n b_{n1} f_1 & \cdots & d_n b_{nj} f_j & \cdots & d_n b_{nn} f_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

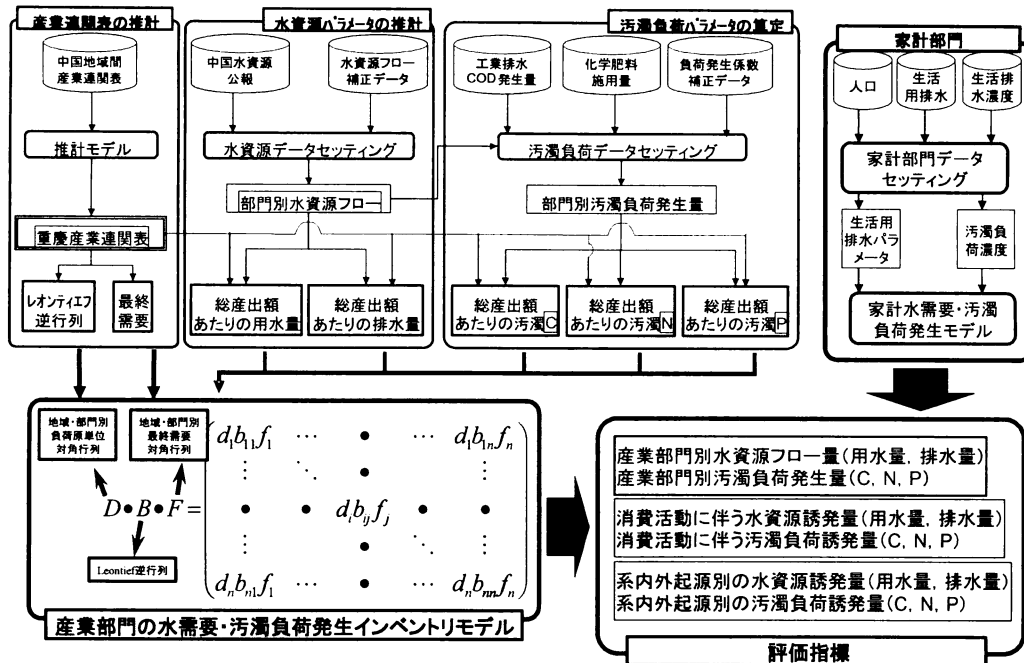


図3 水資源・汚濁負荷発生インベントリシステムの概略

(4) 分布型流域汚濁負荷流出モデルの概要

① 雨水流出過程

本研究では、流域水文モデルとしてHydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF)¹³⁾を選択し、要素モデルの組込みによる統合化で、その改良を行った。HSPFの特徴として、降雨時の流域斜面流出過程を再現する要素モデルとしてStanford Watershed Model (SWM)¹⁴⁾を利用していることや、流域斜面と河川流路ならびに河川流路間のネットワーク化が簡便に行える等の利点を有していることが挙げられる。一方で、モデル適用対象とした嘉陵江流域下流部は四川盆地を形成する低平地で、水稻栽培が盛んな地域である。このように地表面に人為的に湛水操作を行う水田

域に対して、SWMを適用することは不適切であるため、図3に示すような1層のタンクから成る水収支モデルを開発し¹⁵⁾、水田域での雨水流出過程のシミュレーションに適用した。タンクにおける水収支は以下の式によって表現される。

$$WD_e = WD_s + PR - ET - DR - OF - IF + IR, (4)$$

ここに、 WD_e :各計算ステップ終了時の湛水深(mm)、 WD_s :同じく開始時の湛水深(mm)、 PR :降雨量(mm)、 ET :実蒸発散量(mm)、 DR :水田域からの面積当たりの排水量(mm)、 OR :同じく畦畔からの越流量(mm)、 IF :面積当たりの浸透量(mm)、 IR :面積当たりの灌漑水量である。水収支式のそれぞれの項に関して、 DR はタンクに設けた排水孔をオリフィスに見立てて、ベルヌーイの定理に基づいて以下の式から計算される。

$$DR = \alpha * \sqrt{WD - WD_m} \quad ; \quad WD > WD_m \quad (5)$$

$$DR = 0 \quad ; \quad WD < WD_m \quad (6)$$

ここに、 α :流出係数、 WD :ある時間における湛水深(m)、である。畦畔越流量 OF は以下の自由越流に関する堰公式によって求められる。

$$OF = C * B_w * (WD - H_r)^{3/2} / A \quad ; \quad WD > H_r, \quad (7)$$

$$OF = 0 \quad ; \quad WD < H_r, \quad (8)$$

ここに、 C :流量係数(SI単位系で1.5495)、 B_w :堰幅(m)、 A :水田の表面積(m²)、である。実蒸発散量 ET は、SWMでの推定手法を部分的に修正して蒸発散のソースとして地表面貯留水分も対象とした。具体的な手順として、湛水状態であればまず地表面貯留水量を蒸発散要求量に応じて減少させる。次に、残りの蒸発散要求量に応じて土壌上層貯留量を減少させる。さらに要求量が残存する場合は、最後にその量に応じて土壌下層貯留量を減少させる。結果として、各貯留量からの減少量の総和が ET となる。また、浸透量 IF の算定については、SWMにおける浸透過程をそのまま用いた。本モデルでは、灌漑用水源として各水田域からの流出先である河川流路貯留水量を想定している。このため、灌漑水量 IR の算定は、まず、各シミュレーションインターバル終了時の減水深($WD_m - WD_e$)を灌漑要求水量として求める。次に、インターバル終了時の各河川流路における貯留水量と灌漑要求水量との比較から、前者が後者より多ければ灌漑要求水量がそのまま実灌漑水量となり、逆であれば河川流路における貯留水量が実灌漑水量となる。求めた実灌漑水量 IR に相当する水量が、次のシミュレーションインターバル開始時に、HSPFにおいて各河川流路から引き抜かれる。

②汚濁負荷流出過程

汚濁物質の1つである土砂については、モデルの最大適用空間スケールが8,000km²と大きいことから、その適用が容易な表面侵食形式のモデルを採用した^{16),17)}。これは、流域斜面を生産場として雨滴衝撃と降雨に伴う地表流により発生する過程と、河岸へ堆積した土砂の河川流による侵食過程の組合せから成る。前者の流域斜面においては、式(8)に示すunit stream power形式の流砂量式を構築し、実際の適用に際しては、流域内の土地利用状況等を勘案して拡張された式(9)を

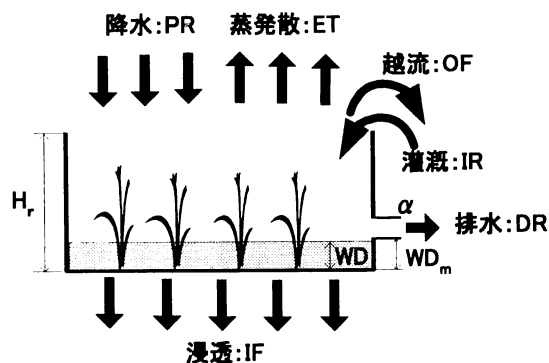


図4 水田モデルの地表面水文過程での水収支

用いた。

$$q_{B^*} = A_0 \cdot \{q_* I_* - (q_* I_*)_c\}^{2n/3} \quad (8)$$

ここで、 $A_0 = K_0 / \phi^{2n/3}$ 、 $q_* = q / \{(\sigma/\rho - 1)gd^3\}^{0.5}$ 、 $I_* = I / (\sigma/\rho - 1)$ 、 d =代表粒径、 I =斜面勾配、 q =単位幅流量、 $(q_* I_*)_c$ =無次元移動限界unit stream powerである。また、 $K_0/\phi^{2/3n}=1\sim 10$ 、 $m=2/3n=5/3$ となる。一方、無次元移動限界値 $(q_* I_*)_c$ は、平坦河床での値 $(q_* I_*)_c=0.224$ から $(q_* I_*)_c=0.034\{\Psi(\theta)\}^{3/2}$ 程度に変化する。ただし、降雨流では雨滴衝撃により移動限界が非常に減少することを考慮し、急斜面上の降雨流の場合には $\Psi(\theta)$ の効果を陽に式(4)中に入れず、本報告では、 $A_0 = K_0 / \phi^{5/3}$ =一定として土砂輸送量を推定した。

$$Q_{B^*} = \sum_i q_{B^*i} \cdot L_i = \sum_i \varepsilon_i \cdot \pi_i \cdot \gamma_i \cdot A_0 \cdot \{(q_* I_*)_i - (q_* I_*)_c\}^{5/3} \cdot L_i \quad (9)$$

ここで、 Q_{B^*} =流域面末端での侵食量、あるいは河道流入する土砂、 L =流出斜面幅、下付き添え字 i =個々の土地利用・土地被覆、 ε =植生被覆による減少率、 γ =対策工による補足率、 π =耕作形態による減少率である。

流入水域において富栄養化を引き起こす要因となる窒素、リンの流出過程については、上記の発生汚濁負荷インベントリから、各土地利用形態への窒素、リン投与量（入力データ）与えるとともに、土壌表層、上層、下層、地下滞水層の各層における現存量を、図5の窒素動態フローダイアグラムに示されるように、多様な物理化学的、生物化学的反応過程を、一次反応式を主とする反応式を用いて算定するとともに、雨水流出過程の計算結果から求められる土壌水分フラックスを基に、各層間での移動量、河川流路への流出量を計算する。

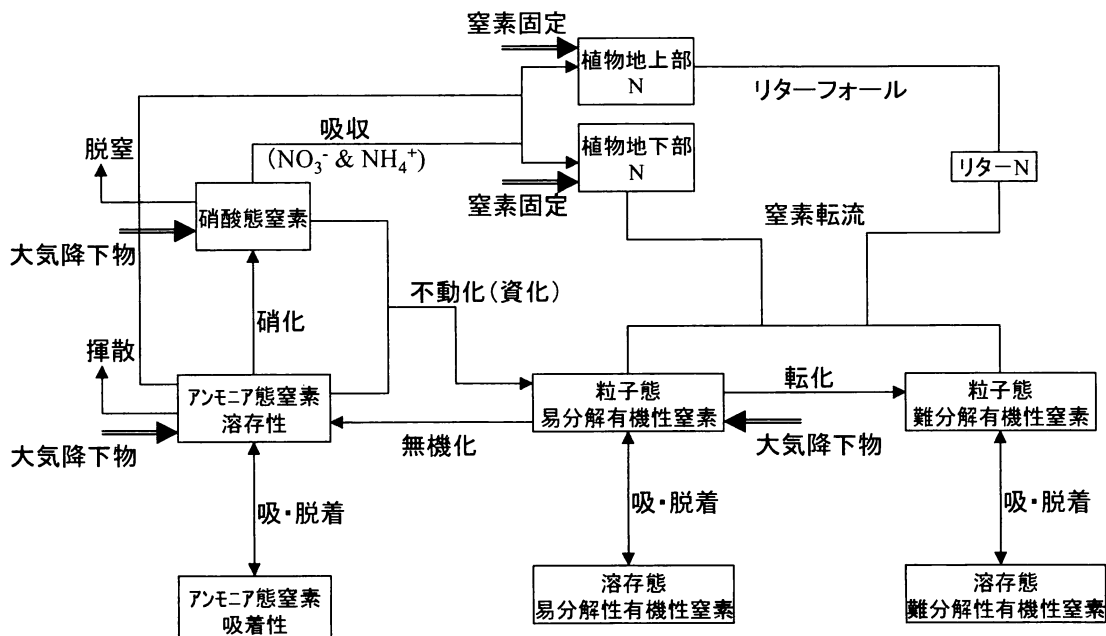


図 5 モデルにおける流域斜面土壌での窒素動態フローダイアグラム

③嘉陵江流域へのモデル適用過程

ア. グループ応答単位 (GRU) の算定

モデルを嘉陵江流域へ適用するにあたり、流域内の降水流出事象の応答単位として、計算の効率を図りつつ、流域内の地形や土地被覆等の空間分布をできるだけ反映したグループ応答単位 (GRU) の抽出をGIS (Arc/Info) 上で行った。その手順は図6にその概要を示すように、まず、縮尺5万分の1から10万分の1の地形図を基に作成した河川網データと低平地では50mメッシュ、山地域では1kmメッシュの数値標高モデル (DEM) を用いて、流域を29のサブ集水域に分割した。次いで、このサブ集水域データに上述の1990年の土地利用を重ね合わせ、統計処理を行うことにより、

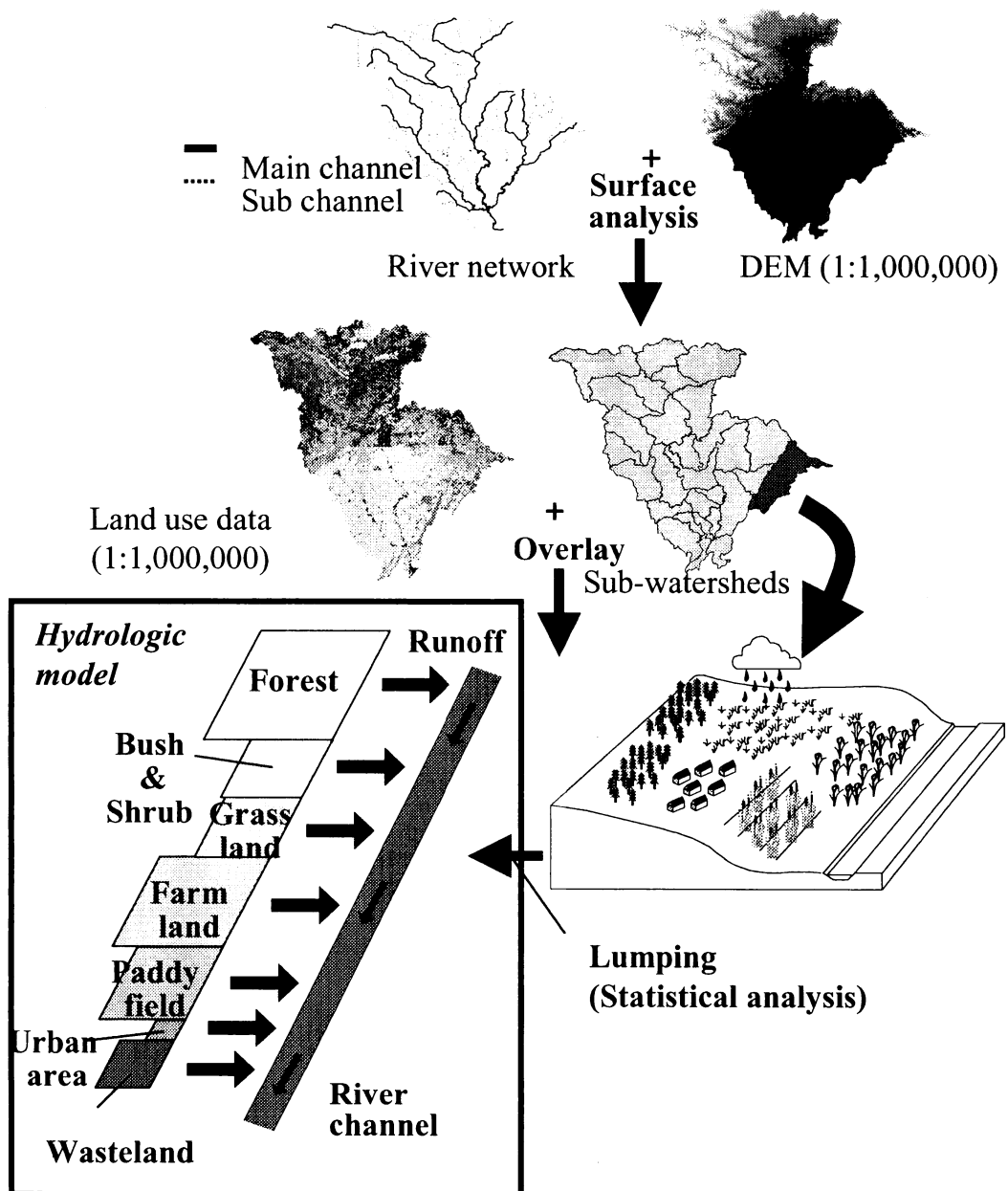


図6 嘉陵江流域への汚濁負荷流出モデル適用手法に関する概要図

各サブ集水域内の土地形態別面積とその平均標高ならびに平均勾配を算定した。本研究では、この土地利用形態別に集約した領域をGRUとした。また、斜面長についてはGRUを正方形と仮定して領域面積からその1辺の長さを算出し、その1/2の値を与えた。なお、水田モデルは、GRUとしてサブ集水域毎に集約された稲作地にそれぞれ適用された。

イ. 入力気象データ及び計算条件

検証用の河川流量データ等の取得状況から、汚濁負荷流出計算の対象を1987年とした。入力用の気象データとして、降水量データについては、長江水理委員会によって嘉陵江流域内の429の観測点で得られた日降水量データを空間内挿法であるuniversal kriging法¹⁸⁾を用いて0.5° × 0.5°の日雨量グリッドデータとした。また、その他の気温、風速、露天温度、短波放射量については、1987年に大気大循環モデル (GCMs) 計算結果や衛星画像解析結果、更には補完的に用いた気象観測データの合成データから成る全球スケールの水文気象データセット、ISLSCP Initiative I CD-ROM Set¹⁹⁾の1° × 1° の6時間グリッドデータを用いた。これらグリッドデータは、サブ集水域が各グリッドに占める面積割合からサブ集水域単位の分布値へ変換し、降水量については24等分割、その他の項目については線形補間により、それぞれ1時間データとした。また、ペンマン法を用いてこれらのデータからサブ集水域単位での可能蒸発量を算定し、同じく入力データとした。

計算時間ステップは各サブモデルと統合モデルともに1時間とした。また、モデルパラメータの初期設定値の影響を除くため、1987年の気象データを2回繰り返し与えた後、本計算を行った。

4. 結果・考察

(1) 長江流域における土地利用変化量の抽出

この10年間ににおける6つ分類カテゴリー（耕作地、森林域、草地、水域、市街地、未利用地）それぞれの変化量と表1に、36種類の土地利用変化パターンマトリックスを表2に、それぞれ示した。これら抽出結果を基に、主な土地利用変化傾向については以下の様にまとめることが出来る。

表1 1990年から2000年における長江流域での各土地利用形態の面積変化量 (km²)

1		2		3		4	5	6
耕作地		森林域		草地		水域	市街地	未利用地
-4, 171		-1, 475		41		691	4, 686	228
水田域	畑作地	森林域	低木・ 灌木林他	高密度 草地	中・低密度 草地	水域	市街地	未利用地
-3, 824	-347	-497	-978	-180	221	691	4, 686	228

表2 1990年から2000年における長江流域での土地利用形態変化マトリックス (km²)

	耕作地	森林域	草地	水域	市街地	未利用地	1990
耕作地	272	846	181	1173	4319	345	6794
森林域	1217	1974	1992	197	285	7.45	5672
草地	675	1350	477	100	55.0	181	2838
水域	442	15.5	144	1,070	44.8	192	19.1
市街地	13.5	1.45	1.21	1.94	39.5	0.0	57.6
未利用地	3.94	10.3	84.5	57.8	0.45	32.9	190
2000	2, 623	4, 196	2, 880	2, 599	4, 744	418	17, 460

- ・ 耕作地と森林域は、それぞれ4,171km²、1,475km²減少し（図7、図8）、一方で、草地、水域、市街地ならびに未利用地は、それぞれ、41.4km²、691km²、4,686km²、228km²増加した。
- ・ 耕作地面積の減少は顕著であり、減少分の63.6%にあたる部分は市街地に変化し、同じく17.3%が水域に、12.4%が森林域へ変化した。
- ・ 市街地の開発は、下流域を中心に大規模に行われ（図9）、その91%が耕作地の転用であり、森林域の開発は6%であった。
- ・ 10年間（1990年－2000年）での長江流域での多様な土地利用変化形態における、特に主要な変化形態としては、耕作地から市街地、森林域から草地、草地から森林域、森林域から耕作地、耕作地から水域、耕作地から森林域、草地から耕作地、が挙げられる。

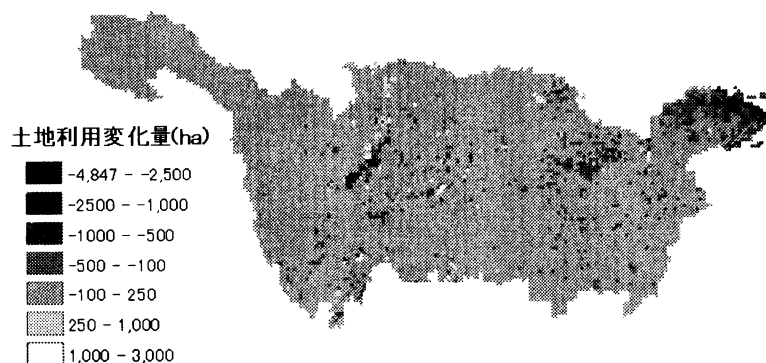


図7 長江流域における1990年－2000年の間での耕作地面積の変化量

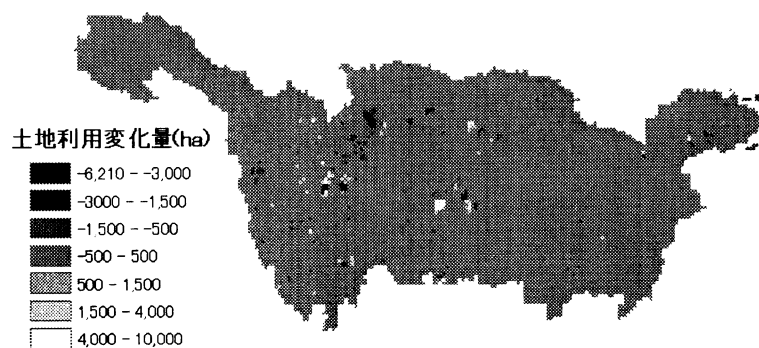


図8 長江流域における1990年－2000年の間での森林域面積の変化量



図9 長江流域における1990年－2000年の間での市街地面積の変化量

(2) 重慶市を対象とした発生活濁負荷インベントリ

算定の結果、図10に示すように、重慶市の用水量(2000)は55億 m^3 であり、これは中国水利局の報告値(56億 m^3)²⁰⁾とほぼ等しい値である。また用水量の内訳は産業系51%、農系35%、生活系14%となった。次に排水量は31億 m^3 となり、内訳は産業系66%、農系21%、生活系13%となった。2000年度重慶市の工業排水及び生活排水はそれぞれ8億 m^3 、4.4億 m^3 であり²¹⁾、生活排水の算定値(4.1億 m^3)はほぼ等しい。工業排水の算定値(21億 m^3)と統計値との開きがあるが、統計値は重慶市全企業の約3分の1の値であることを加味すれば、算定値はほぼ妥当な値と考えられる。

汚濁負荷発生量については炭素19万t、窒素5万t、リン1万tとなり、その起源は産業由来という結論が得られた。これは農系の窒素、リンについては、気化率、土壌への固定率、作物への吸収率、地下水浸透率を内包し、純粹に流出する汚濁負荷量を算定したためである。

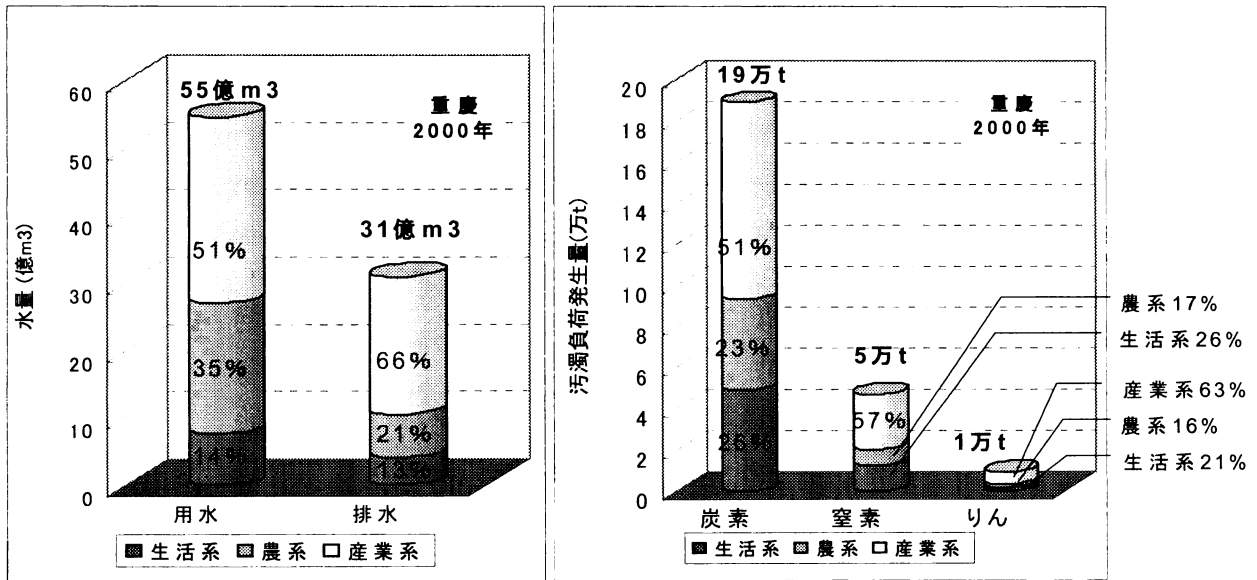


図10 2000年度の重慶市の水需要・排水量・汚濁負荷発生量の算定

(3) 嘉陵江流域へのモデル適用結果

モデルの嘉陵江流域への適用結果として、現時点で、観測データにより十分にその適用性が検証し得た土砂流出量についてのみ以下に記した。

図11は、嘉陵江北碕水文観測点での日河川流量観測値に対する日平均流量計算値の比較結果を示したものである。これらの値は嘉陵江流域全体からの総流出量にほぼ相当し、洪水期に観測される急激な流量変動についても、モデルは流量ピーク値も含めて的確に再現しており、雨水流出過程の再現性についてモデル計算結果の妥当性が確認された。

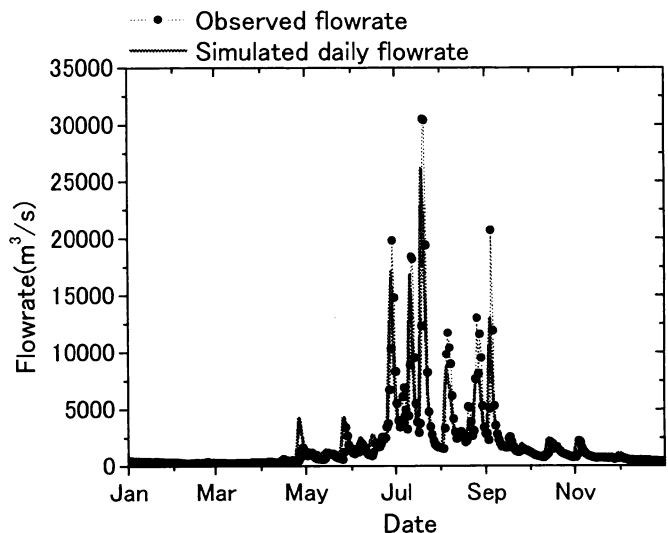


図 11 1987年嘉陵江北碕水文観測地点での日河川流量計算値と観測結果との比較

図12および図13は、流域からの土砂流出量について、それぞれ月単位と日単位での観測値と計算値の比較結果を示している。これらによると、月単位での土砂総流出量について、モデルは観測結果に対して非常に高い再現性を示し、洪水期（6月～9月）に集中する土砂生産・流出特性を的確に表している。また、日単位での土砂流出特性についても、モデルは土砂フラックスのピーク値について総じて過小評価する傾向があるものの、洪水期の変動特性を的確に再現し得ることが確認された。

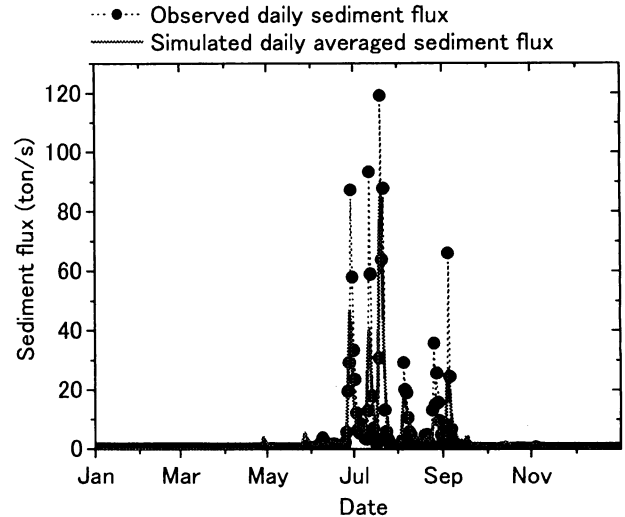
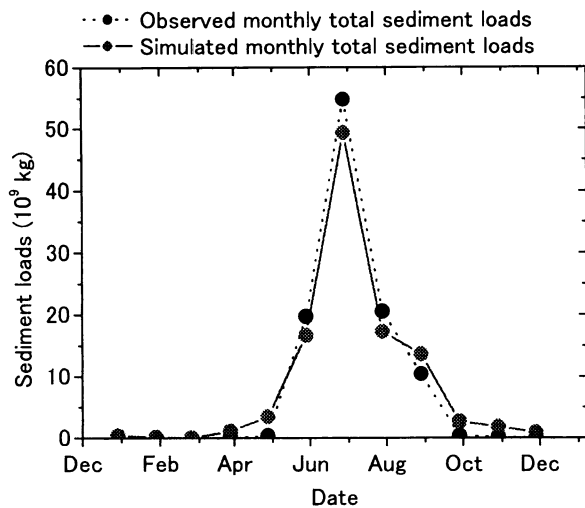


図 12 1987年嘉陵江流域からの月単位土砂総流出量計算値と観測結果との比較

図 13 1987年嘉陵江流域からの日平均土砂流出フラックス計算値と観測結果との比較

5. 本研究により得られた成果

衛星画像データを基に、長江流域全体を対象に作成された1990年と2000年の土地利用データの比較から、（特に都市近郊に位置する）耕作地の市街地化が顕著であることが明確にされた。これは、中国国内において顕在化している農地放棄とそれに伴う食糧生産量の低下への懸念について、より定量的な裏付けを与えるものである。また、重慶市を対象とした汚濁負荷発生インベントリ作成によって、このような都市の急激な発展に伴い、産業系を由来とする窒素やリンといった汚濁物質の長江、ひいては東シナ海への流入量の増大が懸念されることが、定量的に確認できた。さらに、本研究において開発している流域汚濁負荷流出モデルは、現時点で、水・土砂流出過程に関して、土地利用形態の変化のもたらす影響を定量的に予測し得るツールとなることが確認された。

6. 引用文献

- 1) J. Zhang et al., Human impacts on the large world rivers: would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? *Global Biogeochemical Cycles*, 13(4):1099-1105,1999.
- 2) Tuner, R.E., and N.N. Rabalais, Costal eutrophication near the Mississippi River delta, *Nature*, 368,619-621,1994.
- 3) J. Zhang et al., (2003): Dissolved aluminum and silica in the Changjiang (Yangtze River): Impact of weathering in subcontinental scale, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(3): 1-11.
- 4) G.X. XING, Z.L. ZHU (2002): Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds,

Biogeochemistry, 57/58: 405-427.

- 5) Weijin Yan, Shen Zhang (2003): How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate: A temporal analysis for 1968-1977, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4):2-9, 2003.
- 6) 徐開欽・林誠二・村上正吾・牧秀明・渡辺正孝 (2000) :中国長江流域の水環境問題(1)－長江流域の自然概況と主な水系－, 用水と廃水, Vol. 42, No.6, pp.44-55.
- 7) Liu Jiyuan, Buheaozier (2000): Study on spatial-temporal feature of modern land-use change in China: using remote sensing techniques. *Quaternary Sciences*, 20(3):229-239(In Chinese).
- 8) Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang et al. (2003): A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s. *Geographical Research*, 22(1):1-12 (In Chinese).
- 9) Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang et al. (2002): Study on spatial patterns analysis of recent land-use change in China. *Science in China (Series D)*, 32(12):1031-1040 (In Chinese).
- 10) Ge Quansheng, Zhao Mingcha, Zheng Jingyun et al. (2000): Land use change of China during the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 55(6):698-706 (In Chinese).
- 11) Yang Guishan (2001): The process and driving forces of change in arable-land area in the Yangtze River Delta during the past 50 years. *Journal of Natural Resources*,16(2):121-127 (In Chinese).
- 12) Long Hualou, Li Xiubin (2001): Land use pattern in transect of the Yangtse River and its influential factors. *Acta Geographica Sinica*,56(4):417-425 (In Chinese).
- 13) Bicknell, B.R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Donigian, A. S. and Johanson, R. C. (1997): Hydrological Simulation Program--Fortran, User's Manual for Version 11. Rep. No. EPA/600/R-97/080, U.S. EPA, Athens, Ga.
- 14) Crowford, N.H. and R.L. Linsley(1966): Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV, Stanford Univ. Dept. Civ. Eng. Tech. Rep.39.
- 15) Hayashi, S., Murakami, S., Watanabe, M., and Xu, B-H. (2004): Daily runoff simulation by an integrated catchment model in the middle and lower regions of the Changjiang basin, China, *J. Hydrology*. (in revision).
- 16) 村上正吾・林 誠二・渡辺正孝・徐 開欽・陳 中原 (2004) :表面侵食モデルによる嘉陵江流域の土砂生産量推定－長江(揚子江)上流域を対象として－, 水工学論文集 第48巻,
- 17) Murakami, S., Hayashi, S., Watanabe, M., Xu, K-Q., and Chen Z. (2003) Use of surface erosion model to estimate sediment in Jialingjiang catchment upstream of Changjiang River, China, *Hydrological Processes*. (submitted)
- 18) Matheron, G. (1971):The theory of regionalized variables and its applications. *Les Cahiers du centre de morphologie mathmatique de Fontainebleu*. Ecole Nationale Supperieure des Mines deParis.
- 19) Sellers, P.J., et al. (1995): Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models - algorithms - experiments. *Remote Sens. Environ.* 51,1,3-26.
- 20) 中華人民共和国水利部 (2000) :中国水資源公報.
- 21) 中国環境年鑑社(2001) :中国環境年鑑 2001, pp. 532-533

7. 国際共同研究等の状況

環境省が主催するアジア太平洋環境イノベーション戦略プロジェクト (APEIS、平成13年度開始) において、統合環境モニタリングサブプロジェクトを中国科学院地理科学与資源研究所 (担当者: 劉紀遠所長) を共同で推進している。また、本研究は、その成果を発信する場として、環境省の主催するアジア太平洋環境会議 (エコアジア) や、中国ミレニアムエコシステムアセスメントやチャイナカウンシルとの連携を有している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり)>

- ① Hayashi, S., Murakami, S., Watanabe, M., and Xu, B-H. *Acta Geographica Sinica*, Vol. 59, No.1, 125-135(2004)
“Simulation of water runoff using estimated global precipitation data: Taking the upper reaches of the Changjiang River as an example”
- ② Murakami S., Hayashi S., Watanabe M.: *Acta Geographica Sinica*, 59 (1): 136-142 (2004).
“Application of Surface Erosion of Sediment Yield Model to Jialingjiang Watershed.”
- ③ 村上正吾・林 誠二・渡辺正孝・徐 開欽・陳 中原: 水工学論文集 第48巻, (2004) “表面侵食モデルによる嘉陵江流域の土砂生産量推定 -長江(揚子江)上流域を対象として- “
- ④ Hayashi, S., Murakami, S., Watanabe, M., and Xu, B-H., *J. Environ. Eng., ASCE*, (2004) (in press).
“HSPF simulation of runoff and sediment loads in the upper Changjiang River basin, China”
- ⑤ 徐開欽、張継群、村上正吾、陳中原、渡辺 正孝: 長江流域における土砂堆積の動向分析-2000年長江土砂公報より、用水と廃水、45 (3) 247-253, 2003
- ⑥ 徐開欽: 三峡ダム湖が貯水開始- 世界最大級の水力発電所が発電開始へ---用水と廃水、45 (10) 908-911, 2003
- ⑦ 徐開欽・張継群・陳中原・渡辺正孝: 三峡ダム区域における水質汚濁の現状とその防止対策、資源環境対策、Vol.40, No.2, 89-98, 2004.
- ⑧ Kaiqin XU, Jiqun Zhang, Seiji Hyashi, Shogo Murakami, Hediaki Maki, Baohua XU and Masataka Watanabe: Characteristic of Water Quality in the Changjiang River Basin: Observations between NIES and CWRC conducted in 1998 and 1999, *Acta Geographica Sinica*, 59(1), 118-124, 2004
- ⑨ J. Zhang, K. Xu, M. Watanabe, Y. Yang and X. Chen: “Estimation of river discharge from non-trapezoidal open channel using QuickBird-2 satellite imagery”, *Hydrological Sciences Journal*, 49:247-260, 2004.
- ⑩ Kaiqin Xu, Jiqun Zhang, Masataka Watanabe, and Chunpeng Sun: Estimating River Discharge from Very-High-Resolution Satellite Data: A Case Study in the Yangtze River, China, *Hydrological Processes*, in press 2004.

<学術誌 (査読なし)> なし

<書籍> なし

<報告書類等> なし

(2) 口頭発表

- ① Murakami, S., Hayashi, S., Watanabe, M., and Xu, K-Q.: Second IAG Yangtze Fluvial Conference,

Shanghai.China,2004

“Sediment routing model of Jialingjiang watershed,upstream of Changjiang (Yangze) River, China”

- ② K. Xu, J. Zhang, M. Watanabe, S. Hayashi and Z. Chen: Second IAG Yangtze Fluvial Conference(2004) “Estimation of sediment and nutrient fluxes from the Changjiang river into the East China Sea”

(3) 出願特許

特になし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

特になし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

ミレニアムエコシステムアセスメント (MA) のサブグローバルアセスメント部門や中国MAにおいて、本研究成果である流域汚濁負荷流出モデルを用いた土地利用変化に伴う土砂流出量変化予測結果を提示し、それぞれのレポート作成に貢献した。