

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

① 長江流域からの環境負荷量推定に関する国際共同研究

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 流域環境管理研究チーム 張 継群・徐 開欽  
水圏環境研究領域 領域長 渡辺正孝

平成14～16年度合計予算額 6,682千円  
(うち、平成14年度予算額 2,319千円)

[要旨] 東アジア地域、特に中国においては経済発展が急速に進展しており、水資源開発、エネルギー開発等の増大、土地利用形態の変化、工業化さらには沿岸域への人口集中に伴い、汚濁物質や有害物質の排出負荷量が著しく増大している。長江の流量は最小流量 3,000m<sup>3</sup>/s (3月) から最大流量 90,000m<sup>3</sup>/s (洪水時) まで季節により大きく変動する。汚濁源としては都市域からの生活排水、工業地帯からの工場排水、農村域や森林からの流出等が主要な汚濁負荷源である。東シナ海への汚濁負荷フラックス推定が必要不可欠である。

本国際交流研究においては蓄積されてきた年間を通しての流量データベース及び気象データベースをもとに長江流域における流量予測システムの検証を行うとともに、高分解能衛星データを用いたリアルタイムの流量フラックス推定手法の開発を行う。具体的に長江流域本流の幾つかの水文コントロールステーション、特に宜昌地点、大通地点に対し、既存の河床断面、水位、流量等データの収集を行ううえで、水位-流量曲線を作成する。次に、高分解能衛星データ(QuickBird2、最高リゾリューション61cm)を用いて、該当水文ステーションの衛星データより、河川水面の幅を確定し、既存の水位-流量曲線と河川断面から、川幅と流量の関係を確立する。これによってリアルタイム的な流量フラックスを衛星データから換算することができる。さらに、推定された流量を用いて、過去に得られた流量と汚濁負荷濃度の相関関係式から、汚濁物質の濃度と負荷量を推定する。

その結果、取得した2002年3月29日の長江上流の宜昌地点と2003年1月12日の長江最下流の大通地点における解像度61cmのQuickBird2画像から、得られた流量と実測流量との誤差は5%以内であることが明らかになった。推定された流量から長江経由大通地点から東シナ海に流入するSS, COD, DIN, TP, TNの汚濁負荷量はそれぞれ194,451.1 ton, 3,454 ton, 1,271.4 ton, 1,575.8 ton, 193.2 ton となった。長江流域全体からの汚濁負荷量は大通からの負荷と大通より下流、特に上海市からの汚濁負荷を加算することで求められる。したがって、異なる季節と年間通じて、高分解能の衛星画像の取得が可能であれば、長江からの汚濁負荷の推定が可能であることがわかった。今後、陸域-海域間の相互関係を明らかにするために、汚濁負荷フラックスの年間を通じた流量変動予測と各土地利用別の汚濁負荷原単位データベースの作成が必要である。

[キーワード] 東シナ海、長江流域、流量・水位、高分解能衛星画像、汚濁負荷量

## 1. はじめに

東アジア地域、特に中国においては経済発展が急速に進展しており、水資源開発、エネルギー開発等の増大、土地利用形態の変化、工業化さらには沿岸域への人口集中に伴い、汚濁物質や有害物質の排出負荷量が著しく増大している。長江の流量は最小流量 $3,000\text{m}^3/\text{s}$ （3月）から最大流量 $90,000\text{m}^3/\text{s}$ （洪水時）まで季節により大きく変動する。汚濁源としては都市域からの生活排水、工業地帯からの工場排水、農村域や森林からの流出等が主要な汚濁負荷源である。東シナ海の物質循環応答と生態系への影響特性を把握するためには、東シナ海への汚濁負荷フラックス特に長江流域からの汚濁フラックスの推定が必要不可欠である。汚濁フラックスの推定には、流量データの推定が重要である。従来の流量の推定は現場での直接観測か経験的に得られた水位-流量曲線から換算するかの方法が取られてきた。正確で、よりタイムリー的な河川流量の獲得や辺鄙などところの流量の把握は困難であった。これは、河川流量測定ステーションの確立や経済事情等で発展途上国において特にそうである。一方、技術的革新により、衛星データの高解像度化、取得の容易さが増すにしたがって、リモートセンシングの手法を応用した河川流量の推定が研究されてきた。Smithら<sup>1-3)</sup>は、ERS SAR データを用いて、比較的川幅が大きい河川への応用の可能性について言及してきた。しかし、Schultzら<sup>4)</sup>の指摘したように、解像度が25m程度のERS SAR データでは、実用的応用が難しかった。Schultzらの指摘したように、衛星センサーは直接流量データを測るものではなく、多くのケースでは、衛星データと地上の観測データとの相関関係から求めることが一般的手であった。例えば、もし同じ対象河川断面に渇水期から洪水期まで、多くの衛星画像を取得し、またその同時期の流量データをセットで取得することができれば、衛星画像から得られた川幅と流量の間の相関が得られる。この相関を用いて、河川流量の推定ができる。しかし、この方法では、数多くの衛星画像と同地点の流量の測定が必要で、莫大な費用と時間がかかる。また、数cm程度の河川水位の変動を衛星レーダーアルチメーターデータ<sup>5)</sup> あるいはSAR干渉レーダーデータ<sup>6, 7)</sup>を用いて測定可能な報告があるが、アルチメーターデータは画像ではなく一つのプロファイルであるため、水域が1 km以上の場所に適応できても、それ以下の水域には応用不能であり、干渉レーダーについては、同一サイトに二つ異なる角度のSARイメージが必要となる。しかし、最近1-mレベルの非軍事衛星の打ち上げによって、より高度な地球観察が可能となり、これまでLandsatとSPOT画像のような中小規模スケールのもので対応できないものも対応可能となりつつある。例えば、そのポテンシャルは水文学者にこれまで衛星画像で応用困難の問題に解決できそう糸口を与える可能性が出てきた。例えば、衛星画像から河川の流量を推定することである。

## 2. 研究目的

本研究では、高分解能衛星データを用いたリアルタイムの流量フラックス推定手法の開発を行うとともに、衛星データからリアルタイムな流量フラックスを用いて、過去に得られた流量と汚濁負荷濃度の相関関係式から、汚濁物質の濃度と負荷量の推定を行うことを目的とする。

## 3. 研究方法

### (1) 高解像度の衛星データから河川流量推定のアプローチ

ある河川断面の流量は当断面の流速と断面積の積分から求められることが周知の実である。

$$Q = \int_A V \cdot dA \quad (1)$$

$$A = W \cdot Y \quad (2)$$

ここに、Vは流速、Qは流量、Yは平均水深、Aは断面積である。

流量の推定には、当該河川断面積、平均水深と平均流速を求めなければならない。衛星画像から、直接河川の平均水深、流速と断面積を求めるのは困難である。しかし、一般的に中/大規模の重要な河川においては、水位-流量関係曲線と河川断面の構造について、定期的に図られている。これをベースに、もし衛星画像から河川の幅を正確に特定できれば、河川幅から、河川断面の幾何特性を用いて、川幅と水位流量曲線の相関が求められる。本研究に使用する衛星画像はQuickBird2衛星である（2001年10月に打ち上げ、最高リゾリューション61cm、表-1）。対象河川断面について、長江中流断面の宜昌水文ステーションと最下流の大通水文ステーションである。

表-1 取得したQuickBird2衛星画像の主な特長

Item	Feature	Item	Feature
Acquire Time	2002-03-29 T03:23:27 (GMT)	Satellite Azimuth	342.14
Col Ground Resolution (m)	0.7	Satellite Elevation	76.9507
Row Ground Resolution (m)	0.7	In Track View Angle	11.0393
Sun Azimuth	142.779	Cross Track View Angle	-5.5146
Sun Elevation	57.3328	ImageQuality	Excellent

流量推定のアプローチは以下のステップによって構成される。

- 1) 対象断面の水位-流量曲線を作成する。
- 2) 当該断面の河川断面構造の現場調査或いは、既存の河床断面構造から、河川水位と河川幅との関係を確立する。
- 3) 得られた該当水文ステーションの衛星データより、河川水面の幅を確定する。
- 4) 当該断面既存の水位-流量曲線と河川断面から、川幅と流量の関係を確立する。
- 5) 川幅と流量の関係からリアルタイムに当日の河川流を算定する。

具体的に長江流域本流の幾つかの水文コントロールステーション、特に宜昌地点、大通地点に対し、既存の河床断面、水位、流量等データの収集を行ううえで、水位-流量曲線を作成する。次に、高分解能衛星データ（QuickBird2）を用いて、該当水文ステーションの衛星データより、河川水面の幅を確定し、既存の水位-流量曲線と河川断面から、川幅と流量の関係を確立する。これによってリアルタイム的な流量フラックスを衛星データから換算することができる。重要なことは、いかに正確に川幅を正確に推定することである。

手法的な研究を行うために、ここでは、主に宜昌ステーションを取り上げて、その流量推定を行った。同様な方法についても長江流域最下流の水文ステーション大通地点に応用し、当日東シナ海に流入する流量を求めた。

(2) 長江から東シナ海へ流入する汚濁負荷量の推定

長江流域の最下流の大通水文ステーションから東シナ海へ流入する汚濁負荷量を求めるために、長江流域の主な観測ステーションで観測された1987年と1988年の流量と水質データを収集し、データベース化を行った。これらのデータは長江上流から河口域まで本流の主な断面のSS, COD, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N、流量(Q)、水温等項目を含んだ。大通地点に近い武漢より下流の流量と水質データを用いて、その相関関係を求めた。水質データの中に、栄養塩TPとTNデータが欠けているため、1998年と1999年秋に長江本流重慶から河口域まで2300kmに渡って、50~100km間隔で水質調査を行った結果を用いた<sup>8)</sup>。1987と88年のデータ解析からSS、COD、DINと流量の相関関係がいずれも高い値を示し、1998年と99年の現場調査データからTPとSS、TNとDINの関係に高い相関があることが認められたことから、最終的にSS、COD、TP、TN、DIN負荷量と流量との関係式を求めることができた。これを用いて、東シナ海に流入する汚濁負荷量の推定を可能となった。

したがって、SS、COD、DIN、TP、TNの濃度は以下の式で表すことができた<sup>9)</sup>。

$$SS = 1.7632 * 10^{-4} Q^{1.3705} \tag{3}$$

$$COD = 0.7487 Q^{0.1089} \tag{4}$$

$$DIN = 0.1501 Q^{0.1708} \tag{5}$$

$$TP = 1.5869 * 10^{-7} Q^{1.3705} + 0.0115 \tag{6}$$

$$TN = 0.2259 Q^{0.1708} - 0.2132 \tag{7}$$

これから、大通地点の衛星データより当日の流量が求めれば、その時の汚濁負荷濃度と負荷量が容易に得られた。

4. 結果・考察

(1) 衛星データを用いた河川流量の推定

図-1には、対象流域と水文ステーションを示す。宜昌水文ステーション(111° 17' E, 30° 41' N)は長江の上流域に位置し、河口から約1800km地点に位置し、長江本流1980年代後半に完成した始めの葛洲壩ダムは本水文点のすぐ上流にある。また、世界的に注目している三峡ダムは本地点からおよそ40km上流にある。大通水文ステーション(117.62° E, 30.76° N)は長江流域最下流に位置し、干潮河川のため、河口域から約600km地点にある。従来からこの地点の流出水量をもって東シナ海に流入する水量とされている。

宜昌と大通地点の最近4年間の水位流量データ(1998.1.1~

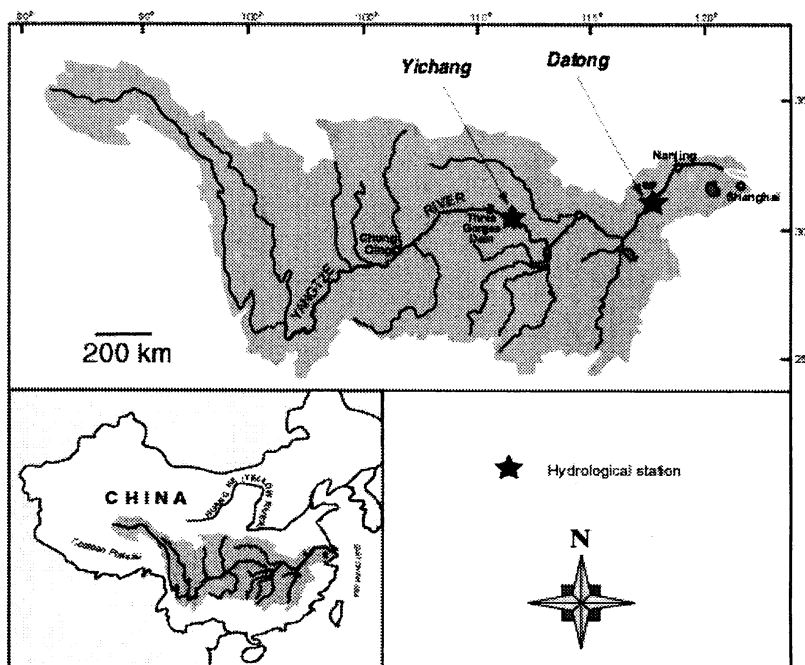


図-1 長江流域の位置と対象水文ステーション

2001.12.31、図一2) を収集し (ここでは、宜昌地点のデータのみ提示する) 水位Hと流量Qの関係式を以下の式で示された。

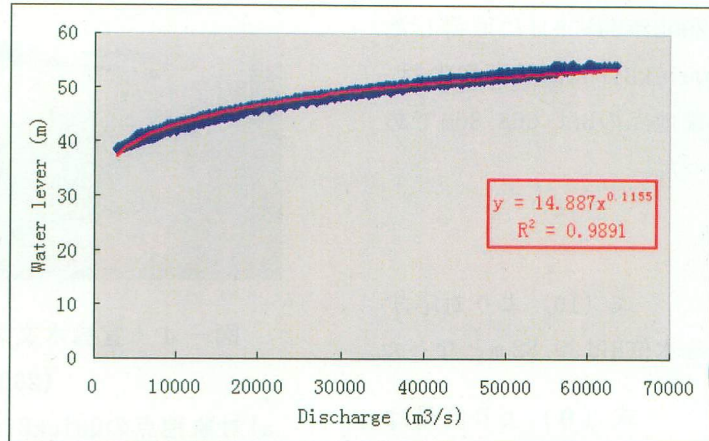
$$H = 14.887Q^{0.1155} \quad (R^2 = 0.9891) \quad (8)$$

したがって、

$$Q = (H/14.887)^{8.658} \quad (R^2 = 0.9891) \quad (9)$$

衛星データから河川流量を推定するためには河川断面の構造つまり、水位と川幅の関係の特定が必要不可欠である。図一3には宜昌断面の水位と幅との関係を示す。

対応する水位 (H) と川幅 (B) から、異なる水深における水位と川幅の関係を導くことができた。



図一2 宜昌水文ステーションの水位-流量関係曲線

$H \leq 43.7$  or  $B \leq 726$  のとき、

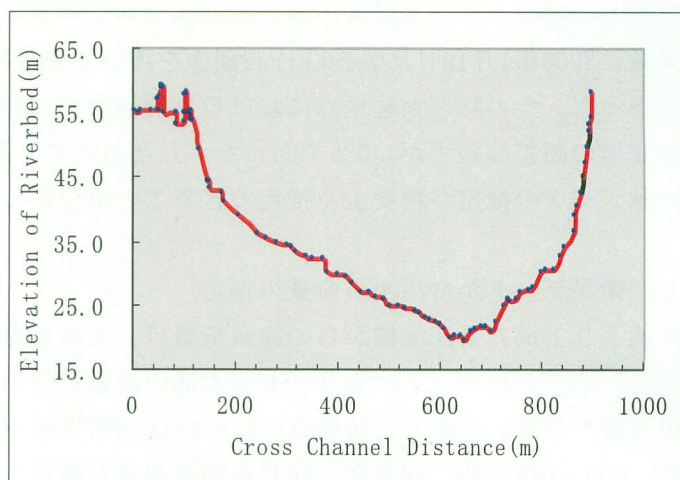
$$H = -1.24683 \times 10^{-6} B^3 + 2.54629 \times 10^{-3} B^2 - 1.6633B + 386.281 \quad (10)$$

$H > 43.7$  or  $B > 726$  の時

$$H = 2.39852 \times 10^{-5} B^3 - 5.31617 \times 10^{-2} B^2 + 39.4489B - 9754.36 \quad (11)$$

対象地点宜昌水文ステーションの Quickbird2 画像 (中心点  $1.281^\circ E$ ,  $30.688N$ ) は2002年3月29日に入手した (図一4)。この衛星画像の主な特徴は表一1に示す。

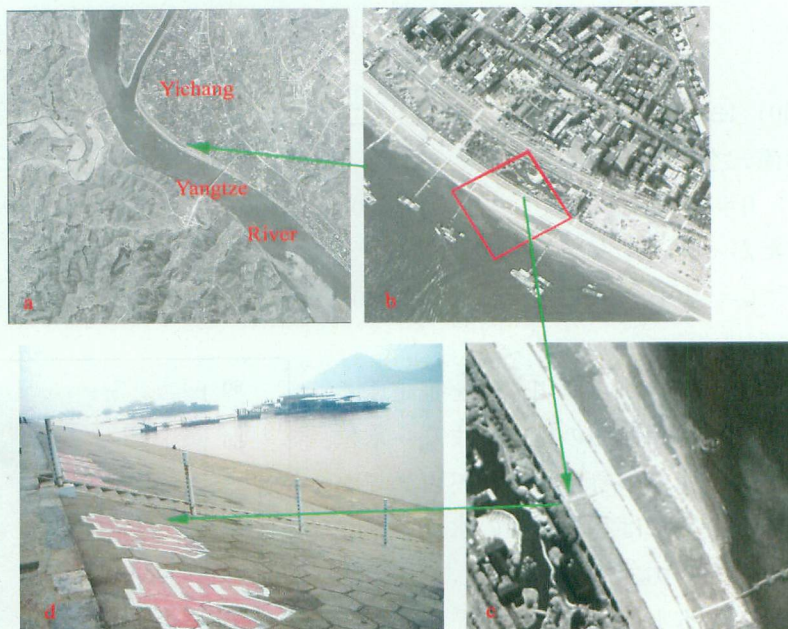
対象としているテストサイトは、平坦かつ狭い領域 ( $8km \times 8km$ ) であるため、オルソ幾何補正の代りに多項式モデルを用いて衛星画像を幾何補正した。今回は画像を正距方位図法に補正するために、10地点のGCP (地上コントロールポイント) が利用された。



図一3 宜昌水文ステーションの水位-川幅との関係

以上の画像処理は、画像処理ソフトウェア (ERDAS Imagine ver.8.4) を使用して行った。

なお、対象とする水文ステーションの左右岸2点のGCPsも行った。衛星画像からこの2点間の距離（川の水面幅B）を求めた。ERDASのツールによって、2002年3月29日に取得したQuickBird2衛星画像の対象地点のBは668.86mであった。



図—4 宜昌水文ステーションのQuickBird 2画像  
(2002年3月29日取得)

式(10)より対応する水位Hは39.82mとなった。

式(9)より流量は5006.2 (m<sup>3</sup>/s)となった。

表—1から、得られた衛

星画像の時間はGMT時間で3:23AMであったため、対象現場宜昌地点の時間帯はGMTより8時間東に位置するため、衛星画像に対応する現場時間帯は当日11:23AMとなる。つまり、宜昌地点2002年3月29日午前11:23の流量は5006.2m<sup>3</sup>/sである。一方、当日宜昌水文ステーションの実測流量Q=5,150(m<sup>3</sup>/s)はであることから、実測地と衛星データからの流量データの誤差やわずか2.8%であった。

同様な手順で、長江流域最下流の大通水文ステーション(中心点座標 117.6193° E, 30.7641N)を対象に2003年1月12日にQuickBird2画像を用いて流量推定を行ったところ、実測流量は18,333m<sup>3</sup>/sであった。その時の大通地点における実測値は17,700m<sup>3</sup>/sであった。実測地と衛星データからの推定値の誤差はわずか3.5%であった。したがって、高解像度の衛星データからリアルタイム的な流量データの推定が精度よく推定できることが分かった。

## (2) 衛星データから汚濁負荷量の推定

大通より上流の長江流域からの総負荷量は、大通地点の汚濁負荷濃度と流量の積で現すことができる。式(3)～(7)より、もし大通の流量が分かればその時の汚濁物質濃度と負荷量の算出が可能である。前節の大通地点のQuickBird2衛星データから算出した流量から、2003年1月12日のSS, COD, DIN, TN, TP濃度と同じ日の負荷量を得ることができた。その結果を表—2に示す。当日長江経由大通地点から東シナ海に流入するSS, COD, DIN, TP, TNの汚濁負荷量はそれぞれ194,451.1 ton, 3,454 ton, 1,271.4 ton, 1,575.8 ton, 193.2 ton であることが推定された。

表一 2 2002年1月12日衛星データから推定した大通地点の SS、 COD、 TP、 TN、 DIN 濃度と負荷量

Items	SS	COD	TP	TN	DIN
Concentration (g/ m <sup>3</sup> )	112.7618	2.1806	0.1220	0.9948	0.8027
Pollutant load (ton)	194451.1	3454	193.2	1575.8	1271.4

衛星データから推定した大通地点の流量は 18, 333 m<sup>3</sup>/s.

本研究結果より、もし、衛星データの取得が可能であれば、長江流域からの淡水量と汚濁物質の濃度と負荷量を予測することが可能であることが明らかになった。

長江流域における最下流流量観測ステーションは河口域から上流約600kmの大通地点に位置することを考えると、これらの式で求めた長江流域經由東シナ海に流入する汚濁負荷量は過小評価になる可能性がある。その理由は大通から河口域までの間に流入する水量が考慮に入れていないためである。長江流域經由東シナ海に流入する汚濁負荷量は最下流の大通水文ステーションから排出する負荷量と大通から河口域間約600km区間に排出する汚濁負荷の和で表すことができる。今後、さらに年間を通じて、東シナ海へ流入する汚濁負荷のより正確な推定方法の検討が必要である。また、洪水期における汚濁物質の挙動が全体の負荷量に占める割合が高いため、その動向の把握が必要不可欠である。

## 5. 本研究により得られた成果

本国際交流研究では、高分解能衛星データを用いたリアルタイムの流量フラックス推定手法の開発を行い、既存の汚濁負荷量と流量の相関関係から、汚濁負荷量の推定を可能とした。具体的に、長江流域本流の幾つかの水文コントロールステーション、特に宜昌地点、大通地点に対し、既存の河床断面、水位、流量等データの収集を行ううえで、水位—流量曲線を作成し、高分解能衛星データ (QuickBird2、最高リゾリューション61cm) を用いて、該当水文ステーションの河川水面の幅を確定し、既存の水位—流量曲線と河川断面から、川幅と流量の関係を確立し、リアルタイム的な流量フラックスを推定できた。さらに、推定された流量を用いて、過去に得られた流量と汚濁負荷濃度の相関関係式から、衛星データ取得当日の汚濁物質の濃度と負荷量の推定ができた。

その結果、取得した2002年3月29日の長江上流の宜昌地点と2003年1月12日の長江最下流の大通地点における解像度61cmのQuickBird2画像から、得られた流量と実測流量との誤差は5%以内であることが明らかになった。推定された流量から長江經由大通地点から東シナ海に流入するSS、COD、DIN、TP、TNの汚濁負荷量はそれぞれ194, 451.1 ton, 3, 454 ton, 1, 271.4 ton, 1, 575.8 ton, 193.2 ton であることが明らかとなった。長江流域全体からの汚濁負荷量は大通からの負荷と大通より下流、特に上海市からの汚濁負荷を加算することで求められる。したがって、異なる季節と年間を通じて、高分解能の衛星画像の取得が可能であれば、長江からの汚濁負荷の推定が可能であることがわかった。今後、陸域—海域間の相互関係を明らかにするために、汚濁負荷フラックスについて年間を通しての流量変動予測と各土地利用別の汚濁負荷原単位データベースの作成が

必要である。

## 6. 引用文献

- 1) Alsdorf D.E., Melack J.M., Dunne T., Mertes A.K., Hess L.L. and Smith L.C., 2000, Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain, *Nature*, 404, 174-177.
- 2) Alsdorf D.E., Laurence C. Smith, and John M. Melack, 2001, Amazon floodplain water level changes measured with interferometric SIR-C Radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2), 423-431.
- 3) Birkett, C.M., 1998, Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands, *Water Resources Research*, 34, 1223-1239.
- 4) Report of Special Research from National Institute for Environment Studies, International Collaborative Research on Integrated Environmental Management in River Catchment, SR-44-2001, 1-55, FY1996-2000, Japan.
- 5) Schultz GA., 1988, Remote sensing in hydrology, *Journal of Hydrology*, 100(1/3), 239-265.
- 6) Smith, L. C., Isacks, B. L., Forster, R. R., Bloom, A. L., and Preuss, I., 1995, Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS-1 SAR: first result, *Water Resources Research*, 31, 1325-1329.
- 7) Smith, L. C., Isacks, B. L., Bloom, A. L., and Murray, A. B., 1996, Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar (SAR) satellite imagery: potential for application to ungauged basins, *Water Resources Research*, 32(7), 2021-2034.
- 8) Smith L. C., 1997, Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review, *Hydrological Processes*, 11, 1427-1439.
- 9) Jiqun, Xu Kaiqin and Watanabe Masataka. 2001, Study on the Prediction of Pollutant Load from the Changjiang River, Eco-Frontier Fellowship in Fiscal Year 2001, Global Environment Bureau, Ministra of the Environment, Japan, pp149-160.

## 7. 国際共同研究等の状況

国立環境研究所と中華人民共和国水利部長江水利委員会との間で「流域環境モニタリング技術と環境管理モデル開発プロジェクトに関する共同研究実施取り決め」が締結され、これに基づき観測調査船を用いて研究推進を行っている。また国立環境研究所と中華人民共和国科学院地理科学与資源研究所との間で共同研究実施取り決めが締結され、これに基づき研究推進を行っている。

## 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 徐開欽、渡辺正孝、須藤隆一：中国における水環境の現状と都市污水处理システムの動向 (1)、月刊浄化槽、No. 309、24-29、2002.



- ② 徐開欽、渡辺正孝、須藤隆一：中国における水環境の現状と都市污水处理システムの動向（2）、月刊浄化槽、No.311、27-31、2002.
- ③ 徐開欽、張繼群、渡辺正孝：中国における水資源の現状とその利用動向分析（1）、資源環境対策、38（9）、934-940、2002.
- ④ 徐開欽、張繼群、渡辺正孝：中国における水資源の現状とその利用動向分析（2）、資源環境対策、39（1）、187-199、2003.
- ⑤ 徐開欽、張繼群、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 J. Zhang, C. Zhou, K. Xu and M. Watanabe: Flood Disaster Monitoring and Evaluation in China, Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions Part B: Environmental Hazards, in press, 2003.

(2) 口頭発表

- ① J. Zhang, K. XU and M. Watanabe: Estimation of River Discharge using Very High-Resolution Satellite Data in Yangtze River, Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing, Seoul Korean, Oct, 728-733, 2002.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、学会誌等への投稿を行い、成果の広報・普及に努める。