

GPS ロガー, Google Earth, Landsat 衛星画像を用いた 中国・東苕溪川流域の河川環境の現状把握

ASSESSMENT OF RIVER ENVIRONMENT IN THE EAST TIAOXI BASIN, CHINA
USING GPS-LOGGER, GOOGLE EARTH AND LANDSAT IMAGES

佐藤辰郎¹・鹿野雄一²・黄亮亮³・李建華⁴・島谷幸宏⁵

Tatsuro SATO, Yuichi KANO, Liangliang HUANG, Jianhua LI, Yukihiko SHIMATANI

¹学生会員 工修 九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

²非会員 学術博 九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

³非会員 理修 中国・同济大学環境科学与工程学院 (〒200092 中国上海市四平路 1239 号)

⁴非会員 理博 中国・同济大学環境科学与工程学院 (〒200092 中国上海市四平路 1239 号)

⁵フェロー会員 工博 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

In Taihu Lake Basin in China, due to the rapid development of economy and society, degradation of aquatic environment has been one of the most urgent issues. On the other hand, the region still holds a lot of rivers and lakes with good environmental condition, which Japan and other advanced countries have already lost. For the first step to conserve such remaining environments, the past and present environmental status of the East Tiaoxi River (one of the most significant rivers in Taihu Lake Basin) was surveyed using GPS-logger, Google Earth and Landsat images. At first, NDBI, NDVI, BA was calculated from the multi-temporal Landsat images. The past Landsat images showed that, since 2000, urban areas and open-cast mining have been drastically expanded in the region. Classification of bank type was conducted using high resolution satellite images of Google Earth and digital photographs taken at main stream of East Tiaoxi; As a result, it was suggested that the carrying vessels for mineral substance considerably disturb the river environment.

Key Words: GPS-logger, Google Earth, Landsat, NDBI, NDVI, BA, river environment, China

1. 背景および目的

中国では、1979年以降の改革開放政策により飛躍的な経済成長を遂げた反面、大気汚染、水質汚濁などによる河川・土壌の汚染、農地の拡大による国土の砂漠化、ダム建設に伴う河川・海洋の環境変化、廃棄物問題など、環境悪化が深刻である。特に、長江デルタ地帯に位置し、中国で最も経済発展の著しい地域の一つである太湖水系では水環境の悪化が著しい。

経済・社会発展に伴い疲弊した河川・湖沼流域の水環境を保全・再生するためには、水質汚濁物質の発生源対策だけではなく、水源地域や水辺の自然生態系の修復が必要となる¹⁾。太湖及びその周辺の水域は現在においても自然の湖岸帯や河岸帯が崩壊して残され、現時点で保全措置を講ずれば、将来、健全な生態系と生物多様性

が維持できる可能性が高い。日本や欧米では現在、過去の自然環境に無配慮な河川・湖沼整備に対する反省のもと自然再生事業に注力されているが、良好な水環境が未だ残されている中国においてはその貴重な自然環境を失うことなく、社会資本整備と河川・湖沼環境の保全を両立するような技術や対策が切望される。そのためには流域の現状把握や課題の抽出が急務であり、良好な自然環境がどこに残っているのか、また、開発が進み環境が劣化しているのはどこであるのか、といったベースラインの情報をまず把握する必要がある。しかしながら、対象水系のスケールが広大である等の理由で調査研究が困難であり、十分な成果が得られていないのが現状である。

そこで本報では太湖水系の主要な河川である東苕溪川流域において、(1) ネット上で公開されている地理情報

の解析と、(2) 安価かつ最新の技術を用いた広域的な現地調査を実施し、保全上重要な地域の抽出と環境に負荷を与える要因の分析をしたので、ここに詳述する。

2. 対象流域の概要

研究対象とした東苕溪流域は太湖水系の一部で浙江省・杭嘉湖平原の西部に位置する(図-1)。天目山山脈の馬尖崗(標高 1271m)南麓を源とし、南苕溪川として東天目山から流れる溪流と合流しながら臨安市を経て青山ダムに注ぐ。その後、杭州市余杭区の瓶窰鎮付近で中苕溪川、北苕溪川と合流し、東苕溪川となる。余杭、徳清等を流下し、下流の湖州市・白雀塘橋で西苕溪川と合流し長兜港を経て、机坊港から太湖に流入する。主要な河道の全長は 151.4km で、流域面積は 2265km² に及び、太湖に流入する主要な河川である。流域は亜熱帯性気候帯に属し、年平均降水量は 1460mm であるが、降雨の季節的な偏りが大きい²⁾。東苕溪川上流(北・中・南苕溪川)は流れが急峻で、ひとたび暴雨に見舞われると河道の狭窄した中流部(余杭・瓶窰付近)において洪水被害が発生する。中流部には希少な動植物の多数生息する湿地帯の下渚湖等があるが、中下流域では露天掘り採鉱が盛んで、住宅地の開発も著しい。

3. 流域の開発状況の把握

流域の開発は流域内河川の流量や水質といった基本的物理量を変化させ、河川環境に大きな影響を与える。そのため、流域における緑地や市街地等の土地被覆の分布特性や経年的変化特性を把握することは河川環境の保全を考えるに当たって重要である。しかしながら中国では、土地利用に関するデータは軍事機密に当たるため経年変化を抽出するための土地利用データを揃えることが非常に困難である。ここでは地球観測衛星 Landsat の多時期画像から都市化指標の変遷を調べることで、東苕溪川流域の開発状況を把握する。

(1) 解析データと方法

本論では、米国・Maryland 大学の GLCF: The Global Land Cover Facility (<http://glcf.umd.edu/index.shtml>) から取得した、1991年7月23日、2005年10月17日の Landsat TM、2000年10月11日の Landsat ETM+の衛星画像(オルソ幾何補正済み)を用いた。一般的に経年比較をする場合、センサの感受徳性のばらつきやその時々の大気の影響を考慮しなければならない。そのため解析の前処理として、Song ら³⁾の推奨する DOS (Dark Object Subtraction) 法を用いて大気補正とセンサ出力値から反射率への変換を行った。変換には Song らと Chavez⁴⁾の研究を参考に以下の式(1)、(2)を用いた。

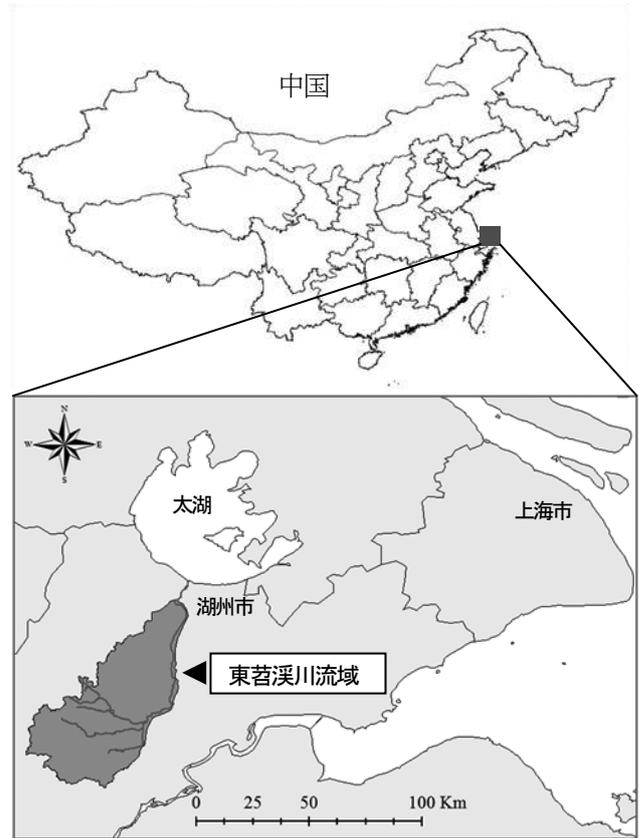


図-1 対象とした中国の東苕溪川流域

$$\rho = \frac{\pi(L_{sat} - L_p)d^2}{T_v E_0 \cos(\theta_z) T_z} \quad (1)$$

$$L_p = G \cdot DN_{min} + B - 0.01 \cdot T_v E_0 \cos(\theta_z) T_z / (\pi d^2) \quad (2)$$

ここで、 ρ : 反射率、 L_{sat} : 放射輝度、 L_p : パスラディアンズ、 d : 太陽-地球間の天文単位距離、 T_v : 地表物からセンサまでの大気透過率、 E_0 : バンド別の太陽放射量、 θ_z : 衛星通過時の太陽天頂角、 T_z : 太陽から地表までの大気透過率、 G : ゲイン、 DN_{min} : 各バンドのセンサ出力値 DN (Digital Number) の最小値、 B : バイアスである。大気透過率についてはレイリー散乱のみを仮定し、以下の式(3)、(4)より求めた⁴⁾。

$$T_v = e^{-\tau / \cos(\theta_v)} \quad (3)$$

$$T_z = e^{-\tau / \cos(\theta_z)} \quad (4)$$

ここで、 θ_v : センサ角度(真上から観測しているとし、 $\theta_v = 0$ とした)で、 τ_r : レイリー散乱での光学的厚さに関しては Kaufman⁵⁾の式(5)より推定した。

$$\tau_r = 0.008569\lambda^{-4} (1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \quad (5)$$

ここで、 λ : 各バンドの平均波長である。

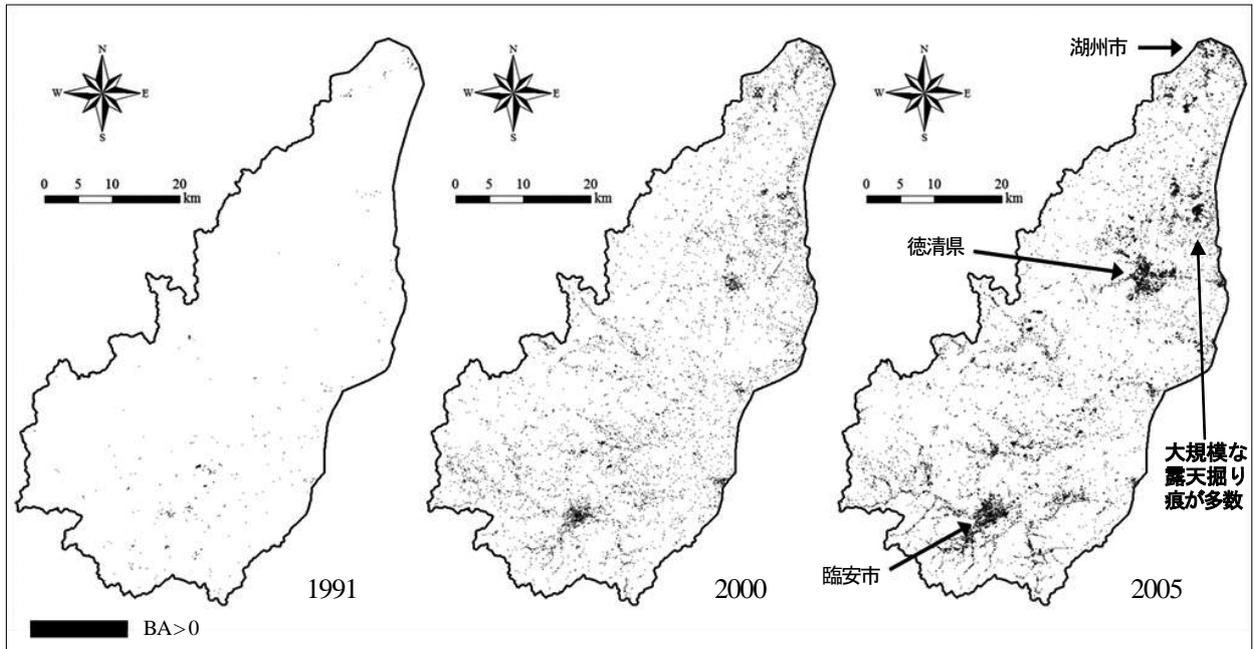


図-2 1991年(左), 2000年(中央), 2005年(右)におけるBA値(開発指標値)マップ

次に補正を施した画像から水域を除外した後, 都市化の指標であるNDBI (Normalized Differences Built-up Index) と正規化植生指数: NDVI (Normalized Differences Vegetation Index) を求めた. NDBIはZhaら⁶⁾によって提案された指標で, 都市化や地域の開発状況の評価, 植生の変化を抽出するのに用いられている⁷⁾. 森脇ら⁸⁾はZhaらの研究を参考に, 開発された土地 (Built-up Area) を表す指標BAを算出し千葉市の都市化の評価を行っており, 本研究でもこのBA値を用いた. NDBI, NDVI, BAは式(6), (7), (8)から求められる.

$$NDBI = \frac{Band5 - Band4}{Band5 + Band4} \quad (6)$$

$$NDVI = \frac{Band4 - Band3}{Band4 + Band3} \quad (7)$$

$$BA = NDBI - NDVI \quad (8)$$

ここで *Band i*: バンド*i*の反射率である. BA値が正の場合, そのピクセルは開発地を表す. NDBI, NDVI共に比演算処理であるため, 太陽照明光量や大気効果等の変動を相殺したり減少したりすることが期待できる⁹⁾. 解析にはEARDAS IMAGIN 9.3を使用した.

(2) 結果と考察

図-2にBA値の解析結果マップを示し, 図-3に各年のBA値が正の値だった土地(開発地とする)の面積変化を示す. 図-3に示すように1991年から2005年にかけて流域内の開発地は拡大していた. 図-2より開発の分布状況

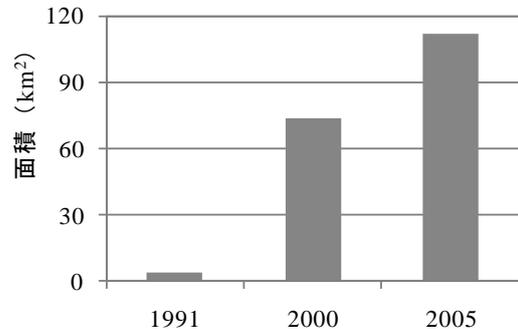


図-3 開発地 (BA > 0) の面積変化

を見ると, 特に湖州市, 德清県, 臨安市といった都市域の拡大が顕著であった. また, 2000年から2005年にかけて德清県北部の丘陵地帯においてBA値が正の値の場所が確認されるようになった. 現地踏査の結果, この場所は新興の都市が建設されたわけではなく, 建築用の石材や鉱物採掘用の露天掘りの痕であった. 東苕溪川流域では鉱物資源が豊富であり, 経済発展に伴う需要増加により, 2000年以降, この地域の採掘が活発化していると考えられる.

4. 東苕溪川本川河岸の類型化

河岸の状態は河川に生息する生物の生息状況に大きな影響を与え^{10) 11)}, 流域にどのような種類の河岸がどの程度あるのかといった情報は河川環境の保全を考える上で重要である. そこで本報では東苕溪本川の河岸の実態把握を目的として, 河岸の類型化を行った.

(1) 現地踏査

2009年11月19~23日にかけて実施した. 東苕溪川本

川の河口から上流域（ここでは、中苕溪川に分岐する辺りを上流域とする）にかけて、流程約 100km の距離を船で移動しながら河岸をデジタルカメラで撮影した。このとき後述する河岸のタイプ分けが変化するところを逃さないように気をつけて撮影した。同時に GPS ロガー（Transystem 社）により経路を記録した。

（２）解析方法

現地踏査で撮影した写真ファイル（約 3700 枚）に GPS ロガーによる位置情報を付加した。これには GPS Photo Tagger（Transystem 社）を用いた。画像の撮影時間と GPS ログから撮影場所を特定する機能を用いることで、画像と位置情報のリンクを瞬時に行うことができ、大幅に労力を削減できた。次に Google Earth 用 kmz ファイルを作成し、Google Earth 上に撮影した写真をマッピングした（図-4）。今回用いた Google Earth は Google が無料で公開している GIS ソフトウェアで、多くの科学的データの解析情報が WEB 上に公開されており、単なるエンターテイメントの域を超えた可能性を秘めたアプリケーションと言える¹²⁾。これまで、Google Earth の情報可視化能力の高さを利用した研究¹³⁾があるが、広範囲かつ高解像度で整備されている衛星データを直接利用した研究はない。本研究では Google Earth の高解像度衛星写真と Google Earth 上に配置された現地写真を見比べながら、河口から上流

へおよそ 100km 地点まで、河岸の整備状況（コンクリート護岸、土羽河岸）と植生の有無から A~D の 4 タイプに河岸状況を類型化した。河岸のタイプが変化点は押さえてあるので、類型化は連続的に調査した範囲を網羅するように行った。図-5 に河岸の類型タイプの例を示す。ここで、植生としては河岸の水際から流心方向に水生植物が繁茂しているものとした。船が入れず、現地で写真が撮影できなかった区間については解析から除外した。

（３）結果と考察

図-6 にそれぞれの河岸タイプの流域内の分布状況を示す。なおタイプ分けにおいて、植生がほんのわずかし



図-4 Google Earth 上の河岸の画像

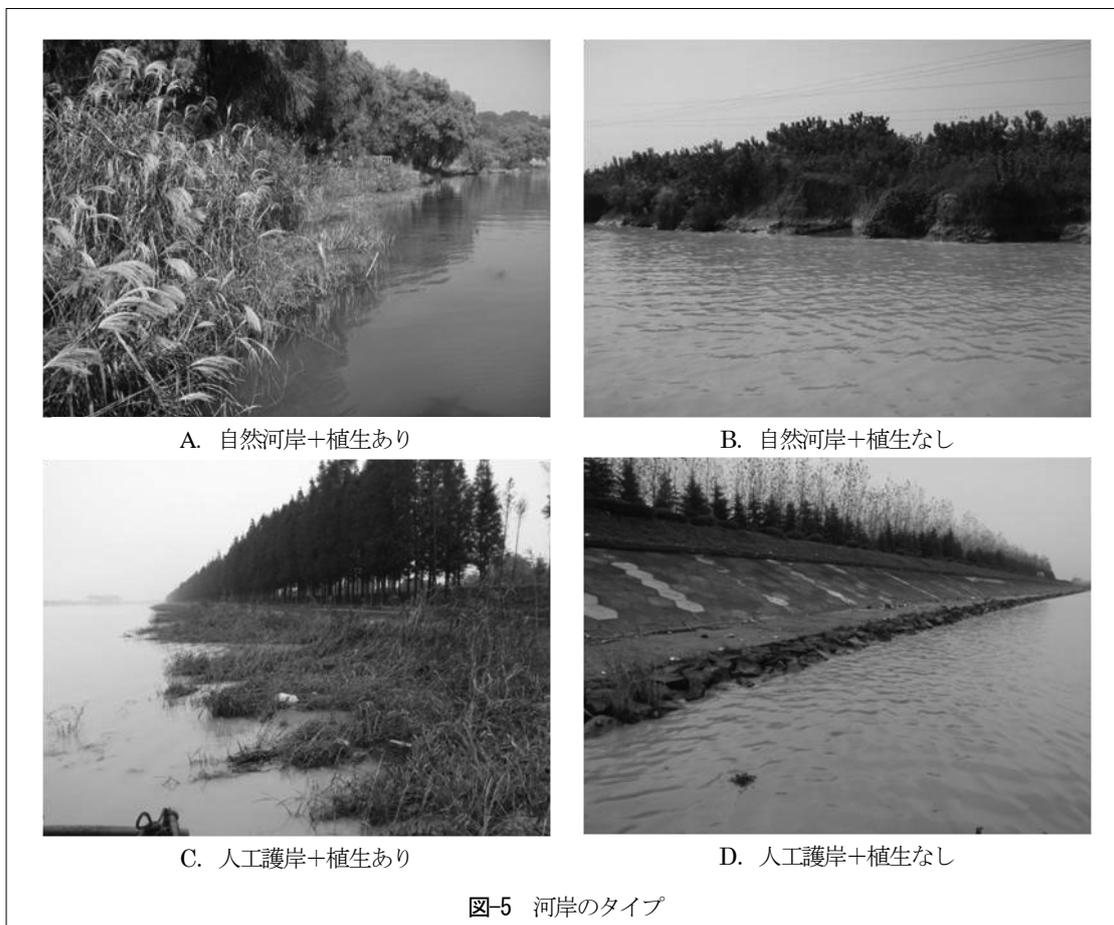


図-5 河岸のタイプ

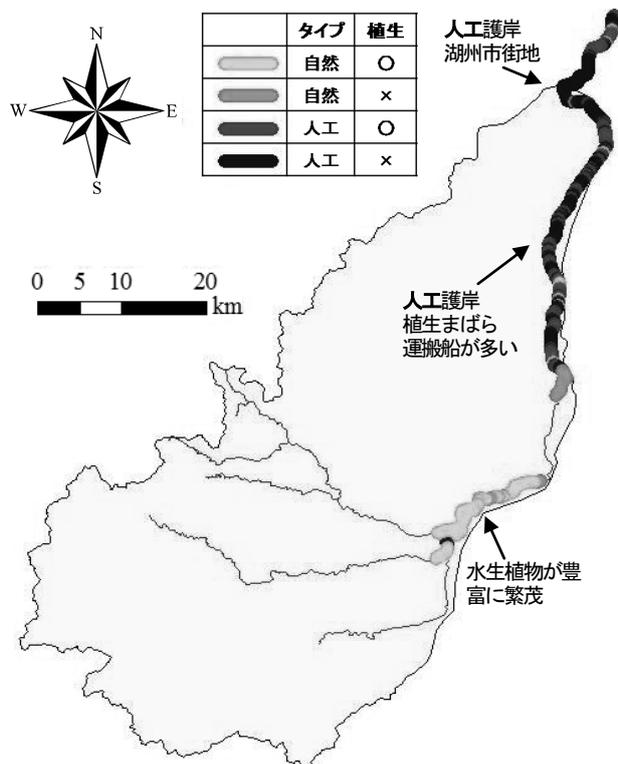


図-6 各河岸タイプの分布状況

なかったり、コンクリート護岸が崩れて土羽状になっていたりして区別がやや困難なケースが数地点あったが、ほとんどの場合は明確に区別することができた。図-7の円グラフは、各タイプの河岸の長さを右岸・左岸で合計し、それを全区間の河岸距離（右岸・左岸合計）で割ることで各タイプの河岸の割合を算出したものである。

図-6より上流部においては水生植物が豊富に繁茂する良好な環境の自然河岸が多く残されていることが分かる。全体の30%が、タイプA：自然河岸+植生ありだったが、これはほとんど上流の区間に集中していた。しかしながら、大規模な護岸工事が急ピッチで進められておりGoogle Earthの衛星画像では自然河岸であった所（対象地域の衛星画像は2007年1月28日撮影のもの）が垂直勾配のコンクリートの護岸に変わっているところもあった。早急に治水と河川環境の両立に向けての対応策を考えなければ、日本や欧米の二の舞となるだろう。一方、下流部の湖州市内では、都市域ということもあってタイプD：人工護岸+植生なしがほとんどであった。

中流区間・左岸側は自然の土羽河岸が多かったが、河岸浸食が進み、河岸前面に植生がない所が多かった（河岸タイプD）。この付近は勾配がほとんどなく（河床勾配が約1/20,000）、流速もほぼゼロに近いので、流れによる河岸浸食の可能性は低い。河岸の浸食の原因としては、現地踏査の際に頻繁に往来が確認された大型の運搬船（図-8）の影響が考えられる。こういった大型の運搬船は石材もしくは鉱物を運んでいた。全長40～50mの大型運搬船が引き起こす波の波高は、船近傍では1m近く、河

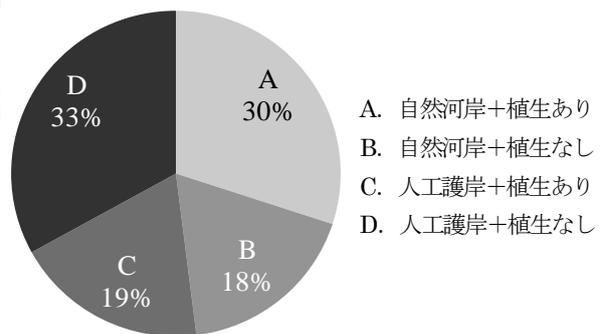


図-7 各河岸タイプの割合



図-8 頻繁に往来する運搬船

岸付近でも約20cmあった。このように、運搬船の頻繁な往来が中流区間の土羽河岸の浸食を招いているものと考えられた。

中流部の右岸については、人工のコンクリート護岸がほとんどであったが、場所によって植生の繁茂に違いが見られた。コンクリート護岸が直線的に整備されているところは植生の繁茂が見られなかった（タイプD）。この現象も船が引き起こす波により、護岸前面の土砂が安定して堆積しないため水生植物の繁茂が制限されていることや、巻き上げられた微細土砂による光合成阻害が考えられる。ただし、対岸に支川の合流があるなどしてコンクリート護岸が湾曲し、川幅が急拡大しているところ及びワンドのような形状の所には植生の繁茂が見られた（タイプC）。ワンド形状の所は水生植物の中でも沈水植物の繁茂が目立った。このように川幅の広い場所では、運搬船の波が川岸付近に至るまでに軽減され、その結果、水生植物に与える影響も比較的少なくなるものと考えられる。コンクリート護岸であっても面的に余裕があれば、植生は維持されるのであろう。

5. まとめ

本研究により、東苕溪川流域の開発状況及び本川河岸の状態が初めて明らかとなった。東苕溪川上流区間（瓶窟付近）においては自然の土羽護岸の前に水生植物が繁茂する良好な環境が残されており、引き続き維持・保全が望まれる。しかしながら、この区間は洪水も頻発するため、治水的要求を満たしながらどのように良好な河岸

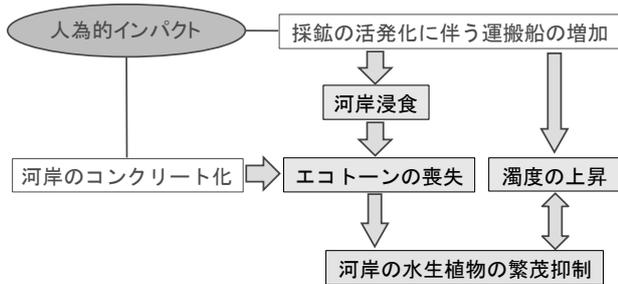


図-9 東苕溪川中流域の人為的インパクトと水生植物の関係

環境を保全していくかが課題である。東苕溪川中流区間（徳清県北部）では、採掘した石材を運搬するための船が頻繁に往来することで引き起こされる波により、河岸浸食の発生や護岸前面の植生繁茂に影響を与えていると考えられた。また Landsat 衛星画像の解析結果より、2000年以降にこの地域において採鉱が活発に行われていることから、運搬船の往来も近年活発になっていると考えられ、河岸環境に与えるインパクトも近年増加していると推測される。一方、運搬船が航行の際に排出される油汚染の問題も指摘されておる¹⁴⁾。このように東苕溪川では、中下流域の船のインパクト軽減に向けた対策が特に重要と考えられる。図-9 に中流域の人為的インパクトの河岸の水生植物への影響についての模式図を示す。今後は生物調査の結果を組み合わせ、今回明らかにした東苕溪川流域の開発の状況と流域の生物の生息状況との関係性を明らかにする必要がある。

以上、本研究では最新の技術を用いることで、東苕溪川流域の現状および近年の変化を詳細に把握することができた。一般に広域の物理環境調査には多大な労力とコストがかかるが、本報では現地で撮影したデジタル写真と Google Earth を GPS ロガーにより効果的に組み合わせることによって、広域的な河岸の状況を低労力、かつ低コストで把握することができた。GPS ロガーを携帯しデジタルカメラで写真を撮るだけで、数千枚程度であれば瞬時に位置情報をリンクさせ、Google Earth 上の撮影した場所上にアップロードすることができる。このような方法は、流域のモニタリングなど広域的に情報を取得したいがあまりコストをかけたくない場合には非常に有効な方法であると考えられ、今後の国内外の河川現場調査においても一般的な手法になりうると期待している。

謝辞：本研究は九州大学・東アジア環境研究機構の研究活動の一環である「中国・太湖流域における水環境保全に関する研究」の一部で、主に「三菱商事株式会社」の助成を得て行われた。ここに記して御礼申し上げる。また本研究の一部は、文部科学省グローバルCOEプログラム（自然共生社会を拓くアジア保全生態学）の支援を受けた。

参考文献

- 1) 大塚健司, 藤田香: 流域の環境再生に向けたガバナンス - 中国太湖流域へのアプローチ -, 環境経済・政策学会 2009 年大会要旨集, 2009.
- 2) 陈革强, 胡昌伟, 程晓陶, 王春来: 提高东苕溪防洪能力及河道治理分析研究, 水利水电技术, 第 40 卷, pp.53-56, 2009.
- 3) Song, C., C. E. Woodcock, K. C. Seto, M. P. Lenney, and S. A. Macomber.: Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effect?, *Remote Sensing of Environment*, Vol.75, pp.230-244, 2001.
- 4) Chavez, P.S., Jr.: Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.55, pp.1285-1294, 1989.
- 5) Kaufman, Y. J.: The atmospheric effect on remote sensing and its corrections, In *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, Ed.), New York, pp.336-428, 1989.
- 6) Zha, Y., Gao, J. and Ni, S.: Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.24(3), pp.583-594, 2003.
- 7) 例えば, Yang, Z., He, X. and Hu, Z.: Evaluating Urban Expansion of Nanjing City Based on Remote Sensing and GIS, In *Proceedings of 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, Vol.3, pp.432-435, 2009.
- 8) 森脇 隆一, 小林 麻里子, 工藤 勝輝, 岩下 圭之: 衛星データを用いた都市化の定量評価に関する研究, 日本大学生産工学部学術講演会土木部会講演概要, 第 40 卷, pp.63-66, 2007.
- 9) 秋山侃, 石塚直樹, 小川茂男, 岡本勝男, 斎藤元也, 内田論編著: 農業リモートセンシング・ハンドブック, システム農学会, 2006.
- 10) 萱場祐一, 吉田桂治, 田村秀夫, 剣持浩高, 高木茂知, 林尚: 水際における生息場所タイプと魚類の生息分布 - 砂鉄川における現地調査結果から -, 河川技術論文集, 第 11 卷, pp.31-34, 2005.
- 11) 萱場祐一: 多自然川づくりにおける水際域の保全と修復: 水際域の魚類生息場所としての機能を中心として, 水環境学会誌, 第 31 卷, pp.341-345, 2008
- 12) 牧山文彦: フリーソフトによるデータ解析・マイニング (53) Google Earth と R の連携 (1) -3D 地図の作成-, エストレーラ, No.165, pp.74-79, 2007.
- 13) 山田将二, 小川鶴蔵, 佐藤宏明, 竹本典道: わかりやすい河川情報の提供に向けた GIS データの整備について, 河川情報シンポジウム講演集, Vol.9, pp.1-6, 2008.
- 14) 金根奎: 东苕溪 (余杭段) 水体航运污染调查及评价, 环境污染与防治, Vol.15, pp.35-38, 1993.

(2010. 4. 8 受付)