事例研究 CASE STUDY

陸域観測技術衛星 (ALOS) を活用した相模川低地部の河道形状変化の推定

松前 大樹¹⁾・梁 政寛¹⁾・吉村 千洋^{2)*}

1) 東京工業大学理工学研究科土木工学専攻 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-4

2) 東京工業大学環境・社会理工学院 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-4

Hiroki MATSUMAE¹⁾, Masahiro RYO¹⁾, Chihiro YOSHIMURA^{2)*}: Estimation of river-channel morphological changes in the lowland section of Sagami River using the Advanced Land Observing Satellite (ALOS). *Ecol. Civil Eng.* 20(1), 25-32, 2017

1) Department of Civil Engineering, School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1-M1-4, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

2) School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Yoshimura-Fujii lab., 2-12-1-M1-4, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

はじめに

河川において地形の時空間的な動態は、河川生態系の構造および機能の特徴づける重要な要因の一つである (Ward & Stanford 1995; Tockner et al. 1998). 河川では土砂の侵食・輸送・堆積などが継続的に生じているため、流路の形状および土地被覆は常に変化しており、特に氾濫原におけるそのような変化は大きい。つまり、平水時における砂礫の頻繁な移動 (Miyake & Nakano 2002), 出水時の突発的な攪乱や土砂の輸送などによって、物理的環境 (生息場など) は創出・維持・消失を繰り返している (Gordon et al. 2004). しかし、堤防やダム・堰の整備によって洪水防御や水資源管理・開発がなされている河川では、出水制御や河道分断化による縦断方向の土砂輸送量の制限、減少などによって、河道形状変化が制限されている (Ward & Stanford 1995; 中村 1999). このような人為的な流路や河岸の安定化に伴う、水生生物や河畔植生の群集構成の変化が懸念されていることから (Ward & Stanford 1995; 辻本ほか 2001), 河川生態系の保全において地形動態の把握は重要である。

現在、流路形状および河道内氾濫原 (永山ほか 2015) の土地被覆変化は、主に現地調査による縦横断測量と空

中写真測量 (平面測量) で定期的に観測されている。例えば、縦横断測量では 100 m ~ 1 km 区画毎に標高・堤防高・水深・流路幅などを測定し、空中写真測量 (平面測量) では管理区間の中で国土交通省や都道府県が指定する箇所毎 (河川により異なるが約 10 km 未満) に滞筋・平面形状・河道内の植生率などを把握している (析木 1998; 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 2012; 国土交通省 2015). このような縦横断測量と空中写真測量は原則的に 5 年に一度行われ、平均年最大流量規模以上の出水が起きたときや、ダム・堰等の横断工作物を新たに設置したときにはより高い頻度で実施されている (国土交通省 2015). ただし、コストの制約上、高頻度かつ広域の観測は困難であり、縦横断測量の規格 (実際の実施頻度や時期、測量箇所の間隔など) が管轄区域によって異なる、といった問題点が挙げられている (桑原ほか 2005). また、河川以外の他分野での活用 (地すべり斜面・海岸汀線の把握) を念頭に、デジタル画像からの測量を含む映像解析・可視化技術は日々進化しており、これらの新しい計測技術を河川分野へ応用することが期待されている (国土交通省水管理・国土保全局 2014).

その中で、長期間の定期的かつ広域における地形変化のモニタリングには、衛星観測を用いた解析手法が有効であり、陸域・海洋・海岸においてその利用が進んでい

2016 年 1 月 31 日受付, 2017 年 3 月 15 日受理

*e-mail: yoshimura.c.aa@m.titech.ac.jp

る (Stoms et al. 1998; de Mûelenaere et al. 2014; Coulter et al. 2016 など). 主に現地観測が困難な広域における、地震などのパルス型変動の前後の変化や、季節や年間の変遷への適用事例が多い (たとえば、地表面被覆分類の変化 (高木ほか 2006)). しかし、河道内氾濫原は陸域や海洋などに比べて狭い領域であるため、衛星画像を利用した研究は未だ例が少ない (Legleiter et al. 2004). 衛星画像を用いた地形解析は現地測量と空中写真測量に比べて精度は劣り、水中の地形 (河床断面など) は測定が困難、開空度が高い箇所限定されるといった制約はあるが、統一された規格の下で広域を定期的 (年複数回) に観測できるといった利点がある. したがって、衛星画像を用いて河川の地形動態をどの程度記述できるかを評価する試みはモニタリングの更なる効率化のために有益である.

以上より、本研究では衛星画像解析を用いて流路形状と土地被覆の変化の定量的な推定を行い、その手法の有効性を評価することを目的とした. 対象地域は相模川平野部として、陸域観測技術衛星「だいち」(英語名: the Advanced Land Observing Satellite (ALOS)) に搭載された、高性能可視近赤外放射計 2 型 (英語名: the Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2)) を活用した.

方 法

対象河川

相模川は山梨県の山中湖を水源とし、山梨県・神奈川県を流れ相模湾に注ぐ、全長 113 km、流域面積 1,680 km² の一級河川である. 本河川は関東地方における重要な水資源であり、リクリエーションの場を提供する一方で、生態系に配慮した環境放流や土砂管理を行っている (国土交通省河川局 2007). 本研究では、相模川水系の相模川の城山ダム下流から湾口までを観測対象とした (Fig. 1, 流路長約 35 km).

横断方向の幅に関して、低水時における河口部での堤外地幅・流路幅は 250~300 m、三川合流点 (Fig. 1, 小鮎川, 中津川そして相模川の合流地点) での堤外地幅はおよそ 360 m、流路幅は 70~90 m、磯部堰上流部での堤外地幅はおよそ 450 m、流路幅は 20~70 m である. 城山ダムから厚木 (河口から約 15 km) までにあたる中流部は丘陵地や河岸段丘で形成され、厚木より下流にあたる下流部では市街地が拡がり、縦断勾配は中流部で約 1/200~約 1/500、下流部で約 1/500~約 1/3,000 である

Fig. 1. Target section (the black part on the Sagami River).
図 1 対象領域 (相模川上の黒塗り区間).

(国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 2012). 中下流部では堰や堤防が整備され、河道は固定されており (2010 年 3 月において堤防整備事業の進捗率は約 70%), 近くに市街地が拡がる三川合流点では、治水のために河道拡張・川底掘削が計画・実施されている (神奈川県県土整備部河川課 2010).

対象衛星画像

陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) の観測機器「高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)」で得られた画像を利用した. だいち (英語名: Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)) が運用する地球観測衛星の一つである. AVNIR-2 では可視 (青: 0.42~0.50 μm , 緑: 0.52~0.60 μm , 赤: 0.61~0.69 μm) と近赤外 (0.76~0.89 μm) の 4 つの波長を観測に用いているため、地表面の土地被覆観測に適している (村上ほか 2007). 空間分解能 (ピクセル解像度) は 10 m であり観測幅は 70 km である.

2007 年 11 月 12 日, 2008 年 10 月 28 日および 2010 年 9 月 6 日の約 1 年毎, 9~11 月に撮影された計 3 枚の

Fig. 2. Water Level in the target period (at Sagami Ohashi gauging station near Atsugi).

図2 対象期間の水位（厚木の近くの相模大橋水位観測地点）。

AVNIR-2 画像を使用した。画像解析および幾何補正処理は GRASS GIS (version 6.4.3) (Neteler & Mitasova 2002) を使用した。植生や水位の周期的な季節変化の影響を可能な限り除くため、季節を 9～11 月の秋に限定した。今回対象とした全画像の撮影日およびその前三日間には、対象領域（雨量観測地点は平塚）で降水はほぼ無く（2007 年 11 月 10 日に一日合計 11 mm のみ）、雲量は 5% 以下であることを確認している（国土交通省水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>)). これらの日時における水位は平水状態を保ち、対象領域内にある水位観測地点（相模大橋）で 2007 年から順に 1.42 m, 1.33 m, 0.61 m であった (Fig. 2)。なお、2010 年 9 月 6 日における水位が低い、これは観測基準点の変更に起因すると判断した（2009 年 1 月 1 日に水位が低下し、以後平常時水位は 2008 年 12 月 31 日までよりも常に 0.8 m 低く、水位にこのような唐突な変化が起きることは考えにくい）。以上から、いずれの撮影時期も平水位を保ち、対象画像間の比較において水位差による流路形状の差異は無視できるとした。

幾何補正

衛星画像の地理情報誤差の幾何補正を各画像に対して行った（建石ほか 2011）。任意の基準点 Ground Control Point (GCP) の座標に基づき、以下の 2 次式を用いて幾何補正後の座標 (X , Y) を推定した（GRASS GIS の幾何補正処理コマンド [g.gui.gcp] を用いて算出）（Neteler & Mitasova 2002）。

$$\begin{aligned} X &= a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \\ Y &= b_1x^2 + b_2y^2 + b_3xy + b_4x + b_5y + b_6 \end{aligned} \quad (式 1)$$

ここで、(x , y) はそれぞれ幾何変換前の座標であり、 a_{1-6} と b_{1-6} は連立方程式を満たす係数である。最小二乗法により平均二乗誤差を最小にするように係数を決定した後、各ピクセルの (x , y) 座標を代入することで幾

何変換を行った。具体的には、2 枚の画像を比較し、対象領域内で明らかに同一地点である道路や建物の角のような特徴的な固定点を GCP として各年で 30 点を対象範囲内で均一に分布するよう選択し係数を求めた（松江・影本 2008）。また、補正後の誤差量を定量評価するために、補正に用いた GCP とは別の GCP を 20 点選択し、この各点で誤差ベクトルを求め、長さの方角の平均を求めた。なお、2010 年の画像は対象領域が 2 枚の画像にわたって撮影されていたため、幾何補正を行い、パッチ合成した画像を用いた。また、2009 年の同時期を含まない理由は、AVNIR-2 画像（12 月 20 日撮影）は幾何補正による誤差が他年度（ ≤ 10 m）よりも大きいためであり（ > 40 m）、今回の解析には含めていない。

土地被覆分類とその精度検証

最尤法による教師つき画像分類法（Lillesand et al. 2008; Biro et al. 2013）により、画像上の各ピクセルを水域、植生および砂礫（橋や道路、建物を含む）に分類した。まず各分類項目に対して教師データを設定し、その後分類対象画像の各ピクセルの尤度を計算し、土地被覆分類を行った（GRASS GIS の最尤法による分類コマンド [i.maxlik] を用いて算出）。教師データは、水域は近赤外線バンド画像から、植生は正規化植生指数から、砂礫は正規化植生指数による植生および近赤外線バンドによる水域と判別できないところから、それぞれ画像上の目視判断で 700 ピクセルずつ得た。このとき、判断が難しい分類の境界域は選ばないようにし、対象領域内において上流から河口まで一様に教師データを取った。また、現地観測による教師データ選定の代替として、高解像度で判別の行いやすい Google Earth (<http://earth.google.com>) において対象時期に近いもの（2006 年 12 月 30 日および 2012 年 3 月 27 日）と比較することで教師学習の有効性を確認した。

更に、対象区間において各年各分類で教師データと異なる地点において約 500 ピクセルずつ選定し、分類結果の整合率（分類の結果と精度評価に用いたピクセルが一致している数（真陽性数）を精度評価に用いたピクセル数（総評価数）で除したものと、偶然の一致を排除するように考慮した分類結果と精度評価に用いたピクセルの一致度を示す κ 係数（Viera & Garrett 2005）により分類精度を検証した。

河道内の土地被覆分類と流路形状の変化の推定およびマッピング

幾何補正および土地被覆分類後の対象衛星画像に基づき、毎年の流路の変化をピクセルの土地被覆分類の変化から推定を行った。同位置での分類が、例えば 2007 年では水域、2008 年に砂礫であれば、この時間経過においてその場所は砂礫が堆積したか、流路が移動したなど河道形状変化が起きた場所であるとした。この中で水域から植生、水域から砂礫、植生から水域、砂礫から水域という変化を示したピクセルのみを抽出し、対象区間全域での流路形状変化が生じたと推定される地点が判別可能なよう、GIS にてマッピングした。

更に、2007 年から 2008 年、また 2008 年から 2010 年において河川縦断方向における流路形状の変化量の空間分布を定量的に評価するために、上記のマップから流路形状が生じたピクセル数を縦断方向に対して 250 m 平方区間毎に集積した上で、GIS にて流路上にその値をマッピングした。ただし、幾何補正によって排除しきれな

かった画像間の位置の誤差（東西方向に約 1 ピクセル、結果を参照）が引き起こす変化量の過大推定を極力排除するために、河道兩岸に沿って流路形状の変化量から幾何補正誤差分（最大補正誤差：5,000 m²）を差し引いた。

結果と考察

河道内の土地被覆分類と流路形状の変化

対象衛星画像に対してそれぞれ土地被覆分類を行った結果、3 枚分の合計で水域は 99.7%、植生は 100%、砂礫は 91.9% の整合率であり、 κ 係数は 2007 年、2008 年および 2010 年でそれぞれ 0.98、0.97、0.92 であった。2007 年の厚木三川合流地点を例にとると（Fig. 3）、Google Earth の画像（Fig. 3 (a)）と比較して、相模川本流の河川幅が大きな箇所（40 m 以上）は水域と推定された（Fig. 3 (b)）。橋は砂礫に分類され、砂州の存在なども分類結果に示されており、更に、河道内氾濫原の草地や、堤防沿いにある木々の存在も示されていた。一方、支流のような川幅が狭い箇所（<20 m）では水域の判定が難しく、不連続になっていた。砂州が発達している部分においても水域が途切れていると推定されたり、河川から外れたところで水域と判断されている箇所が点在した。

土地被覆分類の整合率は高い精度を示したが（>90 %）、本研究では土地被覆分類および精度評価の際に、現地調査を基にした分類をしておらず、また、分類の境

Fig. 3. (a) Google Earth image and (b) the satellite image after land-cover classification around Atsugi: the confluence of three rivers in 2007 (water in blue, vegetation in green, and gravel in gray).

図 3 厚木（三川合流地点）周辺における 2007 年の (a) Google Earth と (b) 土地被覆分類後の衛星画像（青色は水域、緑色は植生、灰色は砂礫を示す）。

Fig. 4. Near Infrared satellite images around Sagami Ozeki in (a) 2007 and (b) 2008, and (c) the estimation of river-channel morphological changes between them (light green for “water to vegetation”, light blue for “vegetation to water”, orange for “water to gravel”, deep blue for “gravel to water”). The circled parts are representatives of water-course (A), riverbank and sandbar (B), and typical erroneous trend (C).

図 4 相模大堰周辺における (a) 2007 年と (b) 2008 年の近赤外線画像、および (c) それらを比較した際の流路形状変化推定 (黄緑色は水域から植生、水色は植生から水域、オレンジ色は水域から砂礫、紺色は砂礫から水域)。地点 A は滞筋、地点 B は川岸と砂州、地点 C は典型的な誤差の例。

Fig. 5. The estimation of morphologically changed area of river-channel within each unit ($250\text{ m} \times 250\text{ m}$) in the lowland section of Sagami River (2007–2008 and 2008–2010).

図 5 相模川低地部における 250 m 区画毎の流路の変化面積の推定 (2007 年から 2008 年および 2008 から 2010 年)。

界部分における精度評価を行っていない点に留意が必要である。流路形状変化をより適切に評価するためには境界における分類（浅瀬、陸と水域の境界など）の精度向上が求められる。例えば、流路幅が狭い区間においては、より高解像度の衛星画像や航空写真、また、衛星画像の一つ一つのピクセルの土地被覆分類率を計算するミクセル分解（沖ほか 2002）を使用することで精度を向上させることが可能である。また、精度評価の手段として、正規化水指数（Gao 1996）といった指標などの利用も考えられる。正規化水指数はマルチバンド衛星画像の中から水域を推定するものであり、本稿の手法で得られる結果に正規化水指数を適用することで、分類結果の追加的な評価が可能となる。

次に、河道内の土地被覆分類の変化を地図上で示すことで、堰下流部の砂礫の移動や砂州の更新、また、植生の動態などを推定した。例として、2007 年から 2008 年における相模大堰付近の変化を評価した結果（Fig. 4）、河川流路内の川岸から離れた箇所（滞筋など）で砂礫が現れた結果は少なく（例：Fig. 4（c）の地点 A）、川岸や既存の砂州の周りに沿って砂礫の堆積・流送が推定された（例：Fig. 4（c）の地点 B）。また、河道内の土地被覆分類のなかから流路形状変化のピクセルを集積して広域な流路形状変化図を作成すると（Fig. 5）、流路形状変化が起きたと判断された 250 m 区間が対象区間全体に対して占める割合は、2007 年～2008 年および 2008 年～2010 年でそれぞれ 30% および 36% であった。一般に、堰によって流路形状変化は制限されるが（中村 1999；Ward & Stanford 1995）、本研究においては堰周辺の箇所においても流路形状変化量が大きいことが推定された（Fig. 5 の磯辺堰や相模大堰付近）。この傾向は河川の合流点においても同様であった（Fig. 5 の厚木付近）。堰上流部では堆砂が進み（杉尾 1956；Williams 1995）、合流点では合流角度によっては流速の分布が変わることで河岸や砂州の堆積および浸食のプロセスが異なるため（Rhoads 1987；Rooney 2014 など）、流路形状変化量が大きくなっている可能性がある。

幾何補正が土地被覆分類に及ぼす影響

衛星画像の地理情報誤差を補正するために、画像間の 2007 年と 2008 年の衛星画像間および 2008 年と 2010 年の衛星画像間に対して幾何補正を行った結果、それぞれ直線距離で平均 173 m、156 m の地理情報誤差が平均 10.5 m、10.3 m に減少した。ズレ方向角度は東を基準にそれぞれ反時計回り方向に平均 17.7 度、11.7 度であった。つまり、幾何補正を行ったことで、それぞれ北方

向平均 3.2 m、2.1 m で、東方向に平均 9.98 m、10.1 m のズレまでに誤差を減らすことができた。

前述のように、水位変化による影響は無視しうが（Fig. 2）、幾何補正しきれなかった誤差が多くの箇所で見られ、流路に沿って 10 m（1 ピクセル）右岸で砂礫の堆積、左岸で砂礫の掘削として示された（例：Fig. 4（c）の地点 C）。

流路形状変化図（Fig. 5）の信頼性は、教師つき分類の精度および幾何補正結果に起因する。幾何補正誤差を考慮すると、流路形状変化の推定は流路幅が 20 m より大きい区間において、横断方向に 20 m 以上の変化が生じる場合に推定の有効性が増すといえる。幾何誤差（東西方向で 9.98 m）と対象画像の解像度（10 m）がほぼ同等であったことから、幾何誤差は東西方向に約 1 ピクセルであり、南北方向に流れる相模川の流路形状変化推定において大きく影響を受けた。つまり、河岸や砂州の境界部分から 1 ピクセル以内においては実際に流路形状変化が起きているかどうか推定できない。これは砂州の周辺でも同様であった。このような適用上の限界は、衛星画像解像度に対する流路幅および変化量の相対的な距離に依存しているものと考えられ、既存の知見と一致した（Zhao et al. 2011, 2014）。

おわりに

本研究では、衛星だいちの AVNIR-2 から得られた画像（解像度約 10 m）から、相模川（流路長約 35 km）における 3 年間の流路および土地被覆変化を推定およびマッピングし、河川測量における衛星画像解析の適用可能性を評価した。植生、砂礫、水域の空間分布および 1～2 年間隔でのその変化や、流路における川岸や砂州、堰の周辺における砂礫の移動は定量的に推定可能であることが示唆された。つまり、対象河川の空間スケール次第では、現地測量に加えて衛星測量を補完的に用いることで、低コストで簡易・効率的に広域・高頻度で河道動態を評価できる可能性がある。また、後述のように、適用に際していくつか検討すべき課題を明らかにした。

本研究で適用したマッピング手法は現地測量や航空写真測量では困難な、流路長 10 km 以上かつ流路幅が 20 m 以上の河川区間を対象とした流路形状変化（河岸や砂州の変遷など）の時系列評価に有効であることが示唆された（Fig. 4, Fig. 5）。また、区画を一定の間隔で区分（本研究では 250 m 間隔）することで、流路においてどの地点が顕著に変化するかの簡易的な判別に利用できるこ

とを示唆した。既存の研究では解像度 30 m の低解像度衛星画像を用いており、川幅 60 m 以下における適用限界が多数報告されている (Frazier & Page 2000; Kloiber et al. 2002; Zhao et al. 2011 など)。それよりも狭い川幅を対象に衛星画像を利用した取り組みは少ないことから (Zhao et al. 2014)、本研究で得られた知見は有益といえる。

本研究で用いた ALOS/AVNIR-2 (空間解像度 10 m) よりも空間分解能が高い衛星画像 (IKONOS (空間分解能: 3.3 m) など) を用いることでより細部にわたり、詳細かつ教師つき分類精度の高い推定が可能になる (桑原ほか 2005)。ただし、画像あたりの観測幅が小さくなり (IKONOS では 11.3 km)、対象区間を解析する際に多くの画像をつなぎ合わせる必要性があり、幾何補正の誤差が大きくなる可能性がある。JAXA によって 2014 年 5 月に打ち上げられた陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号 (ALOS-2)」は観測幅 25 km で分解能 1 ~ 3 m (ただし本研究のように流路形状変化を推定するためには他のマルチバンド画像と組み合わせる必要がある)、また、2019 年以降に打ち上げ予定の ALOS の後継にあたる先進光学衛星では、より広範囲・高分解能の陸域観測衛星となることが予定されており、高精度の流路形状モニタリングに活用できることが期待される。

ところで、ALOS の場合、回帰日数が ALOS は 46 日である (島田 2010) ことから年間で最大 8 回の変化を解析することができるが、実際の衛星画像には雲の影響が大きく、流長 35 km の河川に対して解析に使用できる AVNIR-2 の画像は年間で 1 枚程度であった。しかし、ALOS や ALOS2 には雲や雨、夜においても地表を観測が可能なフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (英語名: the Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR)) が搭載されている。よって、PALSAR と AVNIR-2 と組み合わせることで、森林に覆われた箇所の地形推定や (Shimada et al. 2014)、より高頻度での流路形状変化のモニタリングが行われることが期待される。

謝 辞

本研究は JAXA (ALOS-2, RA-4, PI-1165) および神奈川県企業局のご支援、そして JSPS 科研費 (15K00592, 25241024) の助成を受けました。ここに記して深謝いたします。

摘 要

河川環境評価において河道の時空間的な動態の把握は必須であり、現地調査による計測が行われている。近年、衛星画像解析の高度化に伴い、現地調査に対し補完的に広域の簡易的な環境評価が出来る可能性が示唆されている。そこで本研究では、空間分解能 10 m の陸域観測技術衛星「だいち」で得られる画像を用いて、相模川の低地部河道を対象に、河道の時空間的变化 (土地被覆および流路形状変化) の推定およびマッピングを行い、その手法の有効性を評価した。結果として、植生、砂礫、水域の空間分布および 1 ~ 2 年間隔でのその変化や、流路における川岸や砂州、堰の周辺にて砂礫の移動をモニタリングできることを示した。なお、今回使用した衛星画像とその幾何補正では、横断方向に約 10 m の不整合が生じたことから、それより大きなスケールの横断方向の地形変化を解析する上での本手法の有効性が明らかになった。以上から、日本の主要河川を対象とする場合、本手法は流路長 10 km を超える広域区画を対象とした河道形状変化の時系列評価に有効である可能性が示唆された。

引用文献

- Biro K., Pradhan B., Buchroithner M. & Makeschin F. (2013) Land use/land cover change analysis and its impact on soil properties in the northern part of Gadarif region, Sudan. *Land Degradation & Development* **24**: 90-102.
- Coulter L.L., Stow D.A., Tsai Y.H., Ibanez N., Shih H., Kerr A., Benza M., Weeks J.R. & Mensah F. (2016) Classification and assessment of land cover and land use change in southern Ghana using dense stacks of Landsat 7 ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment* **184**: 396-409.
- Frazier P.S. & Page K.J. (2000) Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **66**(12): 1461-1467.
- Gao B.C. (1996) NDWI-A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment* **58**(3): 257-266.
- Google Earth. Website: <http://earth.google.com>
- Gordon N.D., McMahon T.A., Finlayson B.L., Gippel C.J. & Nathan R.J. (2004) *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. Second edition. Wiley, Chichester.
- 析木敏仁 (1998) 今後の砂防基本計画に関する課題. *砂防学会誌* **51**(1): 68-71.
- 神奈川県県土整備部河川課 (2010) かながわの川づくり計画.
- Kloiber S.M., Brezonik P.L., Olmanson L.G. & Bauer M.E. (2002) A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment* **82**: 38-47.
- 国土交通省水文水質データベース Website: <http://www1.river.go.jp/>

- 国土交通省 (2015) 国土交通省河川砂防技術基準維持管理編 (河川編).
- 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 (2012) 相模川河川維持管理計画 [国土交通大臣管理区間編].
- 国土交通省河川局 (2007) 相模川水系河川整備基本方針 土砂管理等に関する資料 (案).
- 国土交通省水管理・国土保全局 (2014) 国土交通省河川砂防技術基準調査編.
- 桑原祐史・町田聡・黒台昌弘・大林成行 (2005) 高空間分解能衛星データを用いた河川の水面抽出および瀬と淵の可視化に関する研究—国土防災リモートセンシング研究会河川防災ワーキンググループ活動報告—. 日本リモートセンシング学会誌 **25**(5): 482-489.
- Legleiter C.J., Roberts D.A., Marcus W.A. & Fonstad M.A. (2004) Passive optical remote sensing of river channel morphology and in-stream habitat: Physical basis and feasibility. *Remote Sensing of Environment* **93**(4): 493-510.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. & Chipman J.W.* (2008) *Remote sensing and image interpretation*. 6th Edition. Wiley, New York.
- 松江正彦・影本信明 (2008) 中分解能衛星による緑地の変遷解析手法に関する研究. 国土技術政策総合研究所資料第 436 号.
- Miyake Y. & Nakano S. (2002) Effects of substratum stability on diversity of stream invertebrates during baseflow at two spatial scales. *Freshwater Biology* **47**: 219-230.
- de Mûelenaere S., Frankl A., M. Haile, Poesen J., Deckers J., Munro N., Veraverbeke S. & Nyssen J. (2014) Historical landscape photographs for calibration of Landsat land use/cover in the northern Ethiopian highlands. *Land Degradation & Development* **25**: 319-335.
- 村上浩・田殿武雄・島田政信 (2007) 大気上端反射率の方向性関数を用いた AVNIR-2 と MODIS の相互輝度校正. 日本リモートセンシング学会誌 **27**(4): 354-362.
- 永山滋也・原田守啓・萱場祐一 (2015) 高水敷掘削による氾濫原の再生は可能か? ~自然堤防帯を例として~. *応用生態工学* **17**(2): 67-77.
- 中村太士 (1999) ダム構造物が水辺林の更新動態に与える影響. *応用生態工学* **2**(2): 125-139.
- Neteler M. & Mitasova H. 著 (2002): 植村哲士 訳 (2009) オープンソース GIS グラス アプローチ. 第 3 版. 日本語版. 開発社.
- 沖一雄・大政謙次・稲村實 (2002) ミクセル分解による植生リモートセンシングのための植生被覆率と活性度の分離—室内実験におけるミクセル分解手法の評価—. *農業気象* **58**(1): 33-39.
- Rhoads B.L. (1987) Changes in Stream Channel Characteristics At tributary Junctions. *Physical Geography* **8**(4): 346-361.
- Rooniyan F. (2014) The effect of confluence angle on the flow pattern at a rectangular open-channel. *Engineering, Technology & Applied Science Research* **4**(1): 576-580.
- 島田正信 (2010) ALOS/PALSAR の運用と干渉について. *測地学会誌* **56**(1): 13-39.
- Shimada M., Itoh T., Motooka T., Watanabe M., Shiraishi T., Thapa R. & Lucas R. (2014) New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007-2010). *Remote Sensing of Environment* **155**: 13-31.
- Stoms D M., Bueno M.J., Davis F.W., Cassidy K.M., Driese K.L. & Kagan J.S. (1998) Map-guided classification of regional land cover with multi-temporal AVHRR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **64**(8): 831-838.
- 杉尾捨三郎 (1956) 堰上流の堆砂に関する解析的研究. *土木学会論文集* **32**: 18-25.
- 高木哲也・小口高・サーカー M.H.・マーチン M.A. (2006) GIS とリモートセンシングを用いたバングラデシュ・ブラマプトラ川の動態解析. *地形* **27**(2): 187-203.
- 建石隆太郎・政春尋志・飯倉善和・田殿武雄・沖一雄 (2011) 幾何補正. 「基礎からわかるリモートセンシング」(日本リモートセンシング学会編), pp. 177-197. 理工図書株式会社, 東京.
- Tockner K., Schiemer F. & Ward J.V. (1998) Conservation by restoration: the management concept for a river-floodplain system on the Danube river in Austria. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems* **8**: 71-86.
- 辻本哲郎・村上陽子・安井辰弥 (2001) 出水による破壊機会の減少による河道内樹林化. *水工学論文集* **45**: 1105-1110.
- Viera A.J. & Garrett J.M. (2005) Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic. *Family Medicine* **37**(5): 360-363.
- Ward J.V. & Stanford J.A. (1995) Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Research & Management* **11**: 105-119.
- Williams H.F.L. (1995) Assessing the impact of weir construction on recent sedimentation using cesium-137. *Environmental Geology* **26**: 166-171.
- Zhao D., Cai Y., Jiang H., Xu D., Zhang W. & An S. (2011) Estimation of water clarity in Taihu Lake and surrounding rivers using Landsat imagery. *Advances in Water Resources* **34**: 165-173.
- Zhao D., Lv M., Zou X., Wang P., Yang T. & An S. (2014) What is the minimum river width for the estimation of water clarity using medium-resolution remote sensing images? *Water Resources Research* **50**(5): 3764-3775.

(*印を付した文献は直接参照していない)