

河岸堆積微細砂と浮遊物質の洪水時における挙動

Transportation of fine sand on river bank and suspended solid in river water during floods

開発土木研究所 ○正会員 佐藤耕治(Koji Sato)
正会員 渡邊康玄(Yasuharu Watanabe)

1. はじめに

砂防ダムの建設や河川改修などの影響で流域からの安定した土砂供給が行われなくなっている。これに起因して、河道内での河床低下、海岸浸食などが発生していると指摘されている。また、ダムにおける堆砂問題の解決策として堆砂放流が試験的に実施されているが、下流域では放流後の微細砂の堆積によって生態系に重大な影響を与えていることが大きな社会問題となっている。

一方、河川周辺における動植物の生息生育環境は、河川生態系の基盤を形成する上で重要な土砂やそれに含まれる栄養塩類等の制約を受けている。河道内に存在する栄養塩類は、その大半が洪水時に浮遊物質に吸着された形で輸送蓄積されていることが指摘されておりⁱ⁾、浮遊物質の挙動が河川環境の創出に大きな影響を与えていると考えられる。このようなことから河川環境保全の立場からも土砂や栄養塩類等の現状や河道の変化に伴う挙動について流域一貫した移動現象の解明が試みられている。

しかし、微細砂等で構成されるウォッシュロードと呼ばれる浮遊物質の洪水時の挙動については十分解明されておらず、上記の諸問題の解決に向けた早期解明が求められている。

本研究は、洪水時に水位のピークに先行して浮遊物質のピークが生起する現象に焦点を当て、図-1に示す鵜川流域における洪水時の流水中の浮遊物質濃度観測および洪水前後に実施された河岸堆積物調査を基に、河岸堆積物と浮遊物質との交換現象を取り込んだ1次元不定流河床変動モデルを開発し、洪水時の浮遊物質の下流への輸送および浮遊物質と河岸堆積物との関係について検討を行うとともに、浮遊物質に含まれる栄養塩の挙動について考察を行ったものである。

2. 水位ピークと浮遊物質濃度ピークの生起時間

上流域(山地)では、生産源である斜面(流域)と河道とが隣接しており、浮遊物質の流送される距離が短いため、浮遊物質濃度のピークと流量のピークが同位相で推移することが知られている。図-2は、鵜川上流域に位置するパンケシュル川の更生橋において観測を行った結果であるⁱⁱ⁾。浮遊物質濃度と水位変化が、ほぼ同位相で推移していることを示している。

上流から運搬された浮遊物質が下流に輸送される速度は、概ね流速に等しい。一方、水位変化である洪水波は、広長方形水路での kinematic wave と仮定した場合、流速の5/3倍の速度で下流に伝播する。これらを整理すると、図-3に模式的に表したように、上流域で河道に供給された浮遊物質は河川の下流域において洪水波に対して遅れた位相を持って伝播することになる。

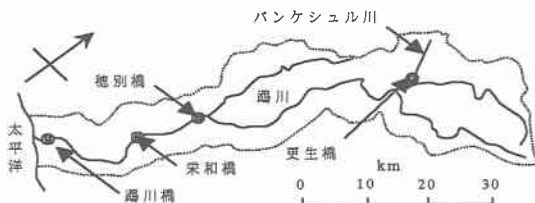


図-1 鵜川流域模式図

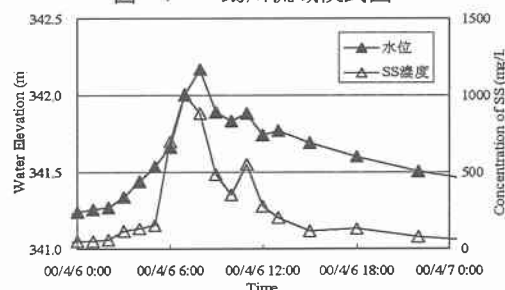


図-2 鵜川上流域(更生橋)における水位と浮遊物質濃度の時間変化

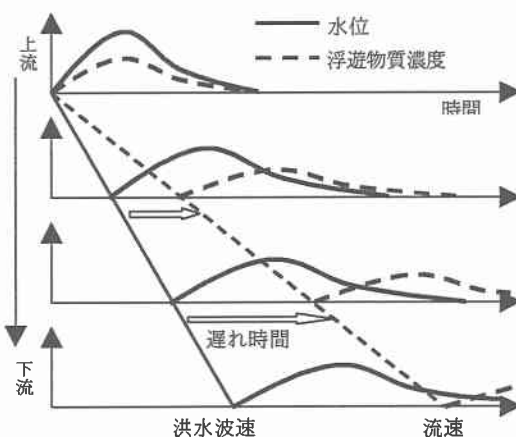


図-3 洪水波と浮遊物質の伝播模式図

しかし、浮遊物質の下流への伝播について洪水波に対して遅れた位相を持つ現象が観測されることは少なく、多くは水位のピークに先行して浮遊物質濃度のピークが生じているⁱⁱⁱ⁾。図-4は、2地点間で大きな支川が合流していない鵜川の鵜川橋および穂別橋において観測された浮遊物質濃度と水位の時間変化の関係を表したものであるⁱⁱ⁾。鵜川橋は河口から2.6km上流に、穂別橋は河口から40.7km上流に位置している。この場合も水位のピークに先行して浮遊物質の濃度のピークが観測されている。また、2地点間で水位および浮遊物質濃度がどの程度の時間で伝播したのかを表したものが、それぞれ図-5および図-6である。ピーク付近の時間変化を基に判断すると、水位、浮遊物質濃度ともに概ね5~6時間である。このことから鵜川の穂別橋鵜川橋間では、水位と浮遊物質濃度は、同じ速度約2m/s程度で下流に伝播し、水位ピークに先立って浮遊物質濃度のピーク

クが生じたこととなる。

この理由の一つとして、洪水時における掃流力の増加に伴い、河床から浮遊物質となる粒径の細かい砂粒が供給されることが考えられる。しかし、浮遊物質を主に構成する微細砂は、粒径0.1mm以下であり、通常河床に存在しない。ウォッシュロードの生産場が裸地斜面や溪岸堆積物など通常時は流水の洗礼を受けていない場所であるとともに生産されたウォッシュロードが流水中に取り込まれ、ほとんどそのまま流下するとした場合、下流域で観測された浮遊物質の濃度ピークが水位ピークに先行するという現象を説明できない。

3. 河岸堆積物との交換を考慮したモデルの開発

穂別橋から鷺川橋までの間において、浮遊物質がどのような挙動をしているかを把握するため、1次元不定流計算にCIP法¹⁾を用いて河床変動計算¹⁾を行った。本研究では浮遊物質の挙動に着目しているが、河床材料との交換や他の粒径による遮へい効果等も取り込むため、混合粒径による河床変動計算を行った。なお、CIP法は差分を行う際の補完方法にスプライン補完を行う手法である。CIP法は、波形の伝播等で数値拡散が極めて小さく、洪水波を計算する場合に威力を発揮する。

(1)モデルの概要

鷺川流域における洪水時の流水中の浮遊物質濃度観測結果から、洪水時の浮遊物質の横断方向拡散現象として、洪水立ち上がり初期に0.01~0.1mmの浮遊物質が河岸近傍から供給され流心に向かって移動し、その後流心から河岸に向かって移動していることが想定された¹⁾。また、河岸堆積物の洪水時の洗掘・堆積現象を定量的に把握した結果、観測された浮遊物質の粒径と一致する0.1mm以下の河岸堆積物は、洗掘・堆積量の10%程度であったことから、浮遊物質と河岸堆積物との交換が洪水中に行なわれていることが判明した¹⁾。このことから、浮遊物質の輸送過程に関するモデルとして、1次元不定流モデル¹⁾に微細砂の河岸堆積物との交換を組み込んだモデルを検討した。なお、1次元の計算であり実際の河川を対象とした検討であることから、流水中の浮遊砂と河岸堆積物との微細砂の出し入れについては、単純なモデルとし、直接的には河道内の浮遊砂濃度のみに影響を与えるものとした。また、河岸における微細砂の浮上沈降は、平常時に浮遊物質濃度が極めて低い値であることを考慮し、計算開始時の水位以上になった場合に影響が生じるよう仮定した。モデルの考え方は以下の通りである。

計算開始水位を高水敷高 η_c とする仮想の高水敷を設け、この高水敷に流水が乗った際に、その場所でのせん断力により微細砂の巻き上げが生じるとともに、設定した河道断面での浮遊砂濃度と同一の濃度が仮想高水敷にも存在して砂粒子の浮上・沈降量が決定されることとした。仮想高水敷幅は、初期水位時の川幅と水位ピーク時の川幅の差を基に設定した。なお、この仮想高水敷は河岸近傍であり、洪水時において断面全体における分担流量が少ないことを考慮し、不定流計算においては流水の通過断面には含まれないこととした。図-7に仮想高水敷を含む断面設定における考え方の模式図を示した。以上の考え方にに基づき計算を行うため、一般に(1)式で表される粒径別の浮遊砂濃度の連続式を(2)式に変更した。

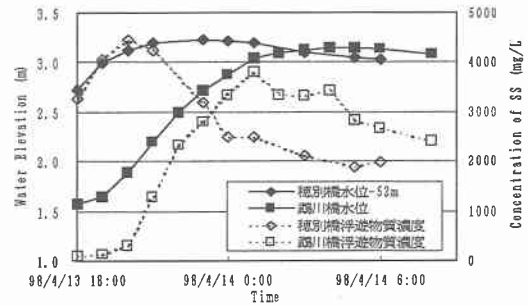


図-4 鷺川下流域（穂別橋・鷺川橋）における水位と浮遊物質濃度の時間変化

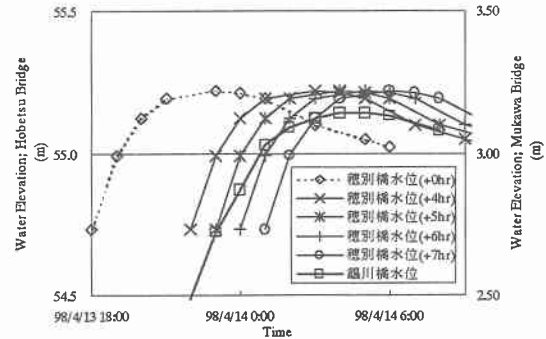


図-5 穂別橋と鷺川橋間の水位伝播時間

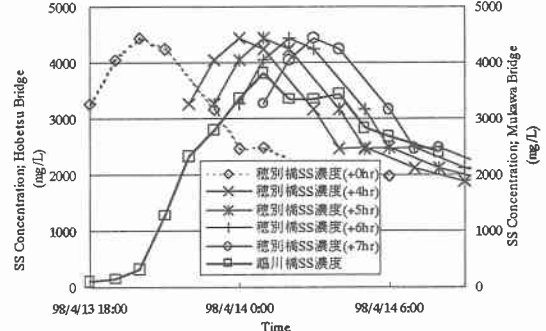


図-6 穂別橋と鷺川橋間の浮遊物質濃度伝播時間

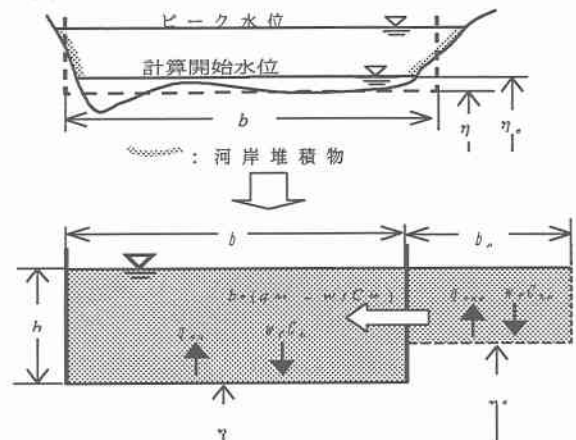


図-7 断面設定および河岸堆積物からの浮遊物質の供給モデル

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\langle C_i \rangle hb \right) + \frac{\partial (u h b \langle C_i \rangle)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \langle C_i \rangle h b}{\partial x} \right) + q_{sui} b - w_f C_{bi} b \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\langle C_i \rangle hb \right) + \frac{\partial (u h b \langle C_i \rangle)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \langle C_i \rangle h b}{\partial x} \right) + b (q_{sui} - w_f C_{bi}) + b_s (q_{suei} - w_f C_{bei}) \quad (2)$$

ここで、 t : 時間、 x : 縦断距離、 h : 水深、 u : 流速、 b : 川幅、 ε : 拡散係数、 q_{su} : 単位時間単位面積当りの河床からの浮遊砂浮上量、 w_f : 浮遊砂の沈降速度、 C_b : 河床付近の浮遊砂濃度、 $\langle c \rangle$: 浮遊砂濃度の水深平均値であり、添え字 i は粒径 d_i の値であることを示している。また、 b_e : 仮想高水敷幅、 q_{suc} : 単位時間単位面積当りの仮想高水敷からの浮遊砂浮上量、 C_{be} : 仮想高水敷底面付近の浮遊砂濃度である。(2)式の右辺代3項が仮想高水敷との浮遊砂の出入りを表現している。

(2)モデルの再現性

計算に使用した洪水は1998年4月13日に鶴川で発生した融雪出水である。ピーク流量は低水路満杯の600m³/sec程度であり、高水敷への乗り上げは観測されていない¹⁾。対象区間は観測値の存在する穂別橋から河口までとした。なお、計算に用いた河道断面は、200m毎に実施されている横断測量データを基に、対象洪水のピーク水位以下の河道として河床高と川幅を決定した。

不定流計算の境界条件として、上流端では穂別橋で観測された水位と流量を与え、下流端では水位が不明であり計算の安定性を考慮して水面勾配の縦断変化が直上流と同じになるよう設定した。また、穂別橋の水位が上昇し始めた時点の流量145m³/sを用いて不等流計算を実施し、初期条件とした。計算に用いた穂別橋の水位と流量を図-8に示した。

河床変動計算に用いた初期河床材料の粒径分布は、浮遊物質の挙動を把握することを主目的としていることから、計算区間の河床材料調査結果を基に平均的な分布を与え、計算区間において一定とした。なお、計算に用いた代表粒径は $d=0.05, 0.48, 1.43, 5.75, 42.3\text{mm}$ の5粒径である。また、鶴川橋、穂別橋の洪水観測において採水された浮遊物質の粒径は0.1mm以下であった。これは流水中の河床材料には存在しないが、河岸堆積物調査結果から河岸に存在することが確認されている¹⁾。このことから、代表粒径0.05mmの粒子の挙動を浮遊物質の挙動として扱った。河床変動の境界条件は、上流端で動的平衡となるよう設定するとともに、代表粒径0.05mmについては図-9に示した穂別橋で観測された浮遊物質濃度を与えた。なお、穂別橋での浮遊物質観測は13日17時から実施されているため、それ以前の値は穂別橋における過去の観測結果^{1),9)}を整理した流量-浮遊物質濃度の関係から求めた。

仮想高水敷を用いて河岸堆積物と浮遊物質との微細砂の交換を考慮した計算結果について、鶴川橋での観測値とあわせて図-10に示した。なお、仮想高水敷に存在する河床材料の粒径分布は、対象区間で約10km毎に各断面3箇所で行った河岸堆積物調査結果⁹⁾の各地点での値を内挿する形で縦断的に分布が異なるように与えた。図-11に調査された各地点での河岸堆積物の粒径分布を示した。計算結果は、濃度のピーク値が観測値に比べ若干大きな値となっているが、従来再現することができなかった浮遊物質濃度の立ち上がり時刻を概ね再現することに成功している。

なお、濃度のピーク値に若干の差が認められるが、これは、水位上昇期には仮想高水敷の濃度が河道部に比べて高くなり砂粒子の浮上を抑制する現象を、簡単のため仮想高

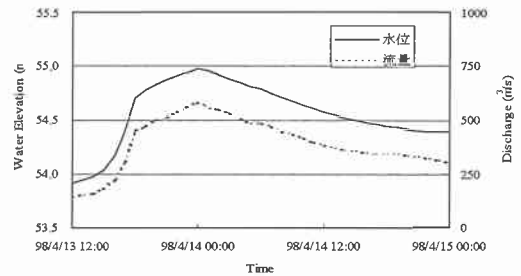


図-8 計算上流端である穂別橋の水位と流量

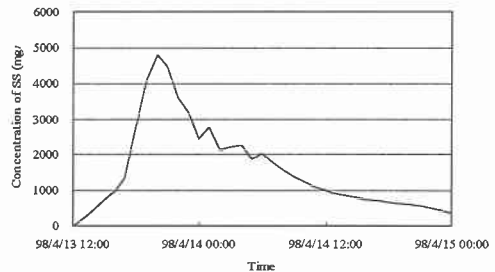


図-9 計算上流端である穂別橋の浮遊物質濃度

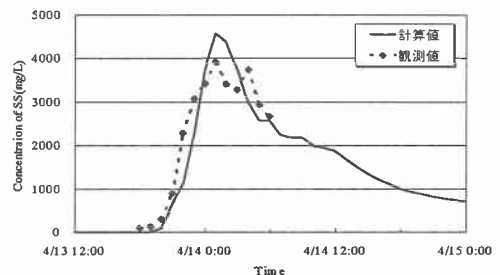


図-10 鶴川橋における再現結果

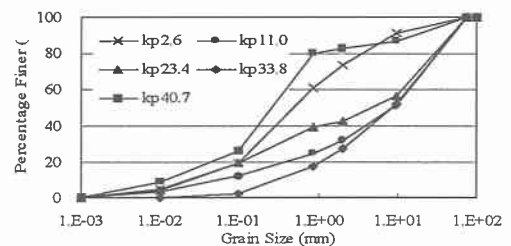


図-11 河岸堆積物の粒径分布

水敷と河道との浮遊砂濃度を等しいと仮定したことに起因しているものと考えられる。この点については、今後の課題である。

4. 洪水中の微細砂と栄養塩類の挙動

一洪水における微細砂と栄養塩類の挙動を把握するため、高水敷における粒径0.05mmの浮遊砂の巻き上がり、沈降の様子を調べる事とする。図-12は鶴川橋、穂別橋および両地点の中間に位置する栄和橋地点における高水敷の単位縦断距離あたりの浮上沈降量を計算した結果である。各地点とも、水位上昇期に浮上量が増大し、減水期後半の水位が仮想高水敷より低くなる付近で沈降していることがわかる。また、下流に行くほど洪水初期の浮上量が減少し、逆に洪水後期に沈降量が増加している傾向を示している。この結果を利用し、洪水期間中における各地点の高水敷単位面積あたりに粒径0.05mmの粒子が浮上および沈降する厚さをまとめたものが、表-1である。なお、間隙率は考慮していない。

一方、渡邊ら¹⁾は堆積物質に吸着されている栄養塩類の

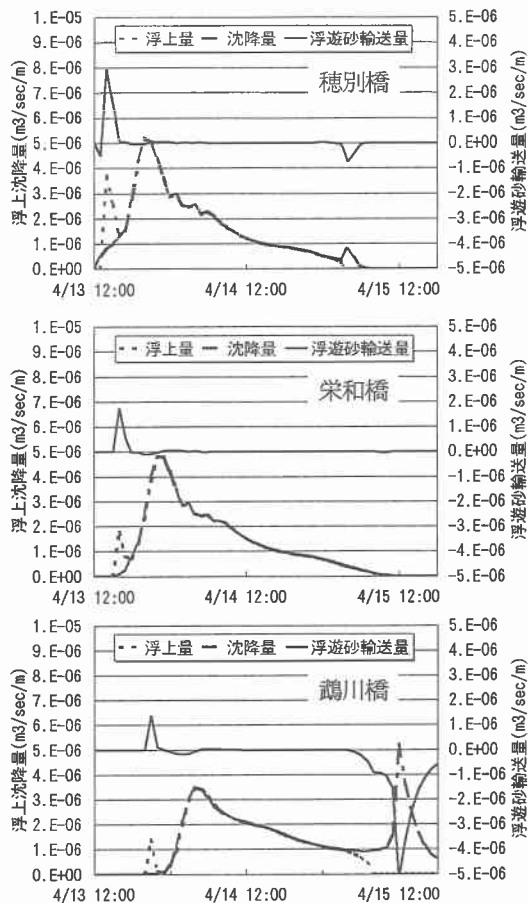


図-12 高水敷の単位縦断距離あたりの浮上沈降量

表-1 高水敷単位面積あたり浮上・沈降厚さ(左)

表-2 1m²あたりの栄養塩類の交換量(右)

地点	浮上 厚さ	沈降 厚さ
穂別橋	0.52	0.50
栄和橋	0.49	0.47
鷗川橋	0.40	0.55

単位: m³/m²

栄養塩	地点	浮上 重量	沈降 重量
PT-N	穂別橋	1.12	1.07
	栄和橋	1.04	1.00
	鷗川橋	0.86	1.17
PT-P	穂別橋	0.54	0.52
	栄和橋	0.51	0.49
	鷗川橋	0.42	0.57
VSS	穂別橋	71.49	68.89
	栄和橋	66.55	64.40
	鷗川橋	55.22	74.84

単位: kg

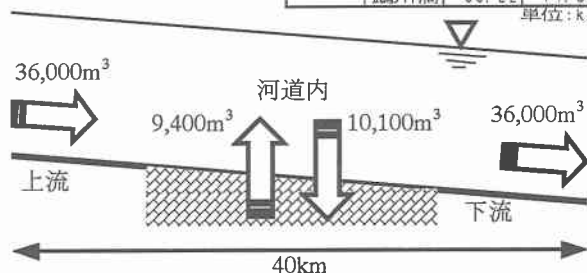


図-13 河道への浮遊物質輸送量

質量百分率を(3)式のように求めている。

$$\left. \begin{aligned} C_{PT-N} &= 0.000224d^{-0.428} \\ C_{PT-P} &= 0.000281d^{-0.112} \\ C_{VSS} &= 0.0263d^{-0.226} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 C_{PT-N} 、 C_{PT-P} 、 C_{VSS} ；それぞれ、粒子性総リン、粒子性総窒素、浮遊物質の強熱減量の河岸堆積物に占める重量割合であり、 d ；土粒子の粒径(mm)である。

この結果を用い、各地点の高水敷に堆積している栄養塩類が一洪水中に粒径 0.05mm の浮遊物質に吸着されている

栄養塩類と交換される量は表-2のように算定される。また、一洪水中における浮遊物質の上流からの流入量、下流への流出量について図-13に模式的に示す。図-13から、浮遊物質が上流から供給され、河川環境の基盤を形成する河岸近傍の栄養塩類を含む微細砂と洪水中にかなりの量の交換が行われ、流出していることがわかる。植生等が河岸に生育している場合、河岸堆積物の浮上する場所と浮遊物質が沈降する場所とが異なると考えられることから、栄養塩類の場所的移動が生ずることとなる。栄養塩類の場所的移動が河川生態系に与える影響は不明であり、今後の課題となる。

5. おわりに

従来、浮遊物質の洪水時の濃度変化を、不定流計算により再現しようとした場合、濃度の立ち上がりが観測値に比べ遅くなる結果となり、実現象をうまく表現できなかった。このことは、土砂の流域一貫した管理を考える場合のみならず、河川環境の基盤を形成する栄養塩類が浮遊物質に吸着されて洪水時に大量に輸送されていることから、河川環境を考える上でも重要な課題の一つであった。本研究では、鷗川における洪水観測の結果に基づいた浮遊物質の縦断的な輸送過程を検証することを目的として、1次元不定流河床変動計算を行った。その結果、浮遊物質が河岸堆積物と交換しながら流下することを表現する簡単なモデルを組み込むことにより、流量、浮遊物質濃度ともに、観測値と計算値が一致する、すなわち浮遊物質濃度のピークが流量のピークの前に生起するという現象を再現することが可能となった。

仮想高水敷高および仮想高水敷幅の設定には、ピーク濃度を概ね一致させるという不確定な部分も存在するが、この結果は既往の調査結果を裏付けるものであり、洪水時の浮遊物質濃度の変化が河岸堆積物の影響を受けていることを示唆するものであると考えられる。

この計算手法を用いて、鷗川の融雪出水における浮遊物質と河岸堆積物との洪水中に交換される量を算定した結果、多量の栄養塩類が洪水中に浮遊物質として移動していると算定された。今後河川生態系を考えていく上で、河岸堆積物と浮遊物質の関係をさらに詳しく調べていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 渡邊康玄、新目竜一、斎藤大作、玉川尊：鷗川 1998 年融雪出水時の物質輸送に関する調査、土木学会水工学論文集第 43 巻、pp.587-592, 1999.
- 2) 三宅洋、渡邊康玄：洪水流への浮遊物質の供給過程、土木学会北海道支部論文報告集第 56 号(B)、pp.132-138, 2000.
- 3) 倉茂好匡：河川の浮流土砂研究における最近の動向、北海道大学地球物理学研究報告 No.59、pp.1-13, 1996.
- 4) 矢部孝、観山正見、梶島成治：パソコンによるシミュレーション物理、朝倉書店、pp.41-47, 1992.
- 5) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法、開発土木研究所報告第 93 号、1991.
- 6) 渡邊康玄、長谷川和義、橋本識秀：洪水時における浮遊物質の横断面内輸送と河岸堆積微細砂の堆積状況、土木学会水工学論文集第 44 巻、pp.413-418, 2000.
- 7) 佐藤耕治、渡邊康玄：栄養塩類を吸着した微細砂の高水敷等への堆積過程、第 43 回北海道開発局技術研究発表会発表概要集 (3)、pp.83-90, 2000.