

江戸川における土砂濃度の横断・鉛直分布特性と 土砂輸送量算定法の検討

STUDY ON LATERAL AND VERTICAL DISTRIBUTIONS OF SUSPENDED
SEDIMENT CONCENTRATION AND EVALUATION OF SEDIMENT
TRANSPORT IN THE EDO RIVER

二瓶泰雄¹・植田雅康²・木水 啓³

Yasuo NIHEI, Masayasu UEDA and Akira KIMIZU

¹正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 学(工) 西武建設(株)(〒359-0037 埼玉県所沢市くすのき台1-11-2)

³学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

To evaluate accurately sediment transport in a river, we conducted the field measurements for lateral and vertical distributions of suspended sediment concentration (SSC) in the Edo River with a CTD sensor. The measured results indicate that the SSC variation in the lateral direction was more dominant than that in the vertical direction. The SSC fluxes are evaluated by using several methods with or without taking account of lateral and vertical variations of the SSC, showing that there appear significant errors for the evaluation of sediment transport when the lateral variation of the SSC is not appropriately incorporated. These facts demonstrate the importance of the measurements for the lateral distribution of SSC for accurate evaluation of sediment transport in rivers.

Key Words : *sediment transport, CTD sensor, lateral distribution of suspended sediment, flood flow*

1. はじめに

河川の源流から河口, 沿岸域に及ぶ水系全体にわたる総合土砂管理¹⁾を実現するために, 近年, 多くの河川において土砂動態調査が実施されている^{2), 3)}. この調査では主として採水観測が行われ, そこでの計測地点としては横断面内の1地点(断面内もしくは低水路の中央部), 鉛直方向に1~3箇所とすることが多い. このように計測地点を設定すると, SSの鉛直方向変化は何とか捉えられるものの, SSの横断方向変化を計測することは不可能であり, これらの結果に基づいて土砂輸送量を算出する際にはSSの横断方向変化を無視することとなる. しかしながら, 横断面内の土砂濃度は鉛直方向のみならず横断方向にも大きく変化する, ということが室内実験⁴⁾により指摘されている. このようなことから, 精度良く土砂輸送量を算定するには, 土砂濃度の横断・鉛直方向変化を考慮した調査を行うことが必須であるものの, 現地河川において横断面全体の土砂濃度計測例は極めて少なく⁵⁾, 既存の調査により得られた土砂輸送量にはある程度の計測誤差が含まれるものと予想される. また, 現地河川における断面内の土砂濃度変化に関する知見は少なく, 特

に土砂濃度の横断分布特性に関しては不明な点が多い.

本研究では, 現地河川の洪水時における土砂濃度の横断・鉛直分布特性を把握するために, 江戸川における洪水時の土砂濃度の鉛直・横断分布調査を行うことを試みた. また, この調査結果に基づいて, 土砂濃度の横断・鉛直方向変化を適切に考慮していない既存の土砂輸送量算定法の推定誤差を検証する. なお, この調査を行う際には, 非常に多くの労力を必要とする採水観測の代わりとして, 土砂濃度の鉛直分布計測を行うことが容易な濁度計付きCTDセンサーを使用する.

2. 現地観測の概要

(1) CTDセンサーについて

CTDセンサーは, 通常, 沿岸海域や湖沼における水質環境の鉛直分布調査に用いられるものであり, 濁度計を搭載しているセンサーも市販されている. この濁度計付きCTDセンサーを用いることにより, 洪水流中における濁度鉛直分布を計測することが可能である. 本研究で使用するCTDセンサーはアレック電子株製のCompact-STDであり, 後方散乱光型濁度計を有している. 計測項目は水

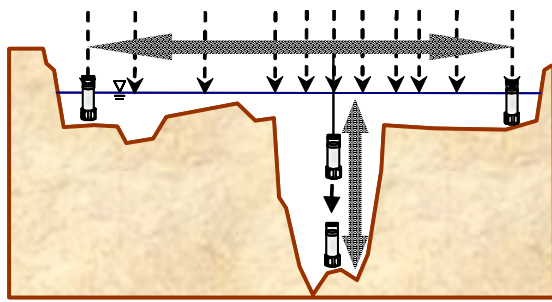


図 - 1 濁度計付き CTD センサ - の使用方法

深や水温，塩分濃度（電気伝導度），濁度，クロロフィルa濃度である．このCTDセンサーを用いて横断面内の土砂濃度分布を計測する際には，図 - 1 に示しているように，橋上よりCTDセンサーを吊るし，水面から底面付近まで降ろす，という作業を横断面内における複数の地点で行う．なお，ここで用いるCTDセンサーの質量は水中1.0kgと軽いことから，CTDセンサーが洪水流に流れることを抑えるためCTDセンサーに20kgの重りを付けている．

(2) 観測内容

観測場所は，首都圏を縦貫する江戸川における上流部・新関宿橋（河口より57.5km）と中流部・玉葉橋（同35.5km）である．これらの観測地点では，低水路幅は約100m，堤間幅は約400mとなっている．観測期間は2004年10月5日～8日（秋雨前線観測）と10月21日～22日（台風23号観測）という2つの洪水イベント時である．このときの洪水概況としては，秋雨前線観測時では水位は高水敷高さをわずかに超える程度であり高水敷上の流れはほとんど見られなかったのに対して，台風23号観測時では高水敷でも水深が2mに達し，0.5m/s以上の流速が観測されている．そこで，横断面内の計測範囲・地点数は，秋雨前線観測では低水路のみ（玉葉橋9地点，新関宿橋8地点），台風23号観測では横断面全体（玉葉橋11地点，新関宿橋15地点）とした．

本調査ではCTDセンサーにより濁度の横断・鉛直分布を計測するとともに，超音波ドップラー流速分布計ADCP（WorkHorse ADCP Sentinel 1200kHz，RD社製）を用いて，横断面内の流速分布を計測する．ADCP計測については，佐藤ら⁶⁾と同様に，橋上よりADCPを下向きに吊り下げて，水面付近にセンサーを設置して流速計測を行う．この作業を横断面内における複数の地点で繰り返し行っており，断面内の観測地点はCTDセンサーと同じである．このADCPとCTDセンサーを用いた調査を一面計測するのに，60～70分程度の時間を要するが，この時間は洪水の継続時間（約4日）と比べると十分短い．なお，ADCPの計測結果の一部については，二瓶ら⁷⁾を参照されたい．

また，CTDセンサーにより記録された濁度をSSに変換するために，上記の調査と同時に表層バケツ採水を行い，得られたサンプル水を実験室に持ち帰り，SSをガラス織

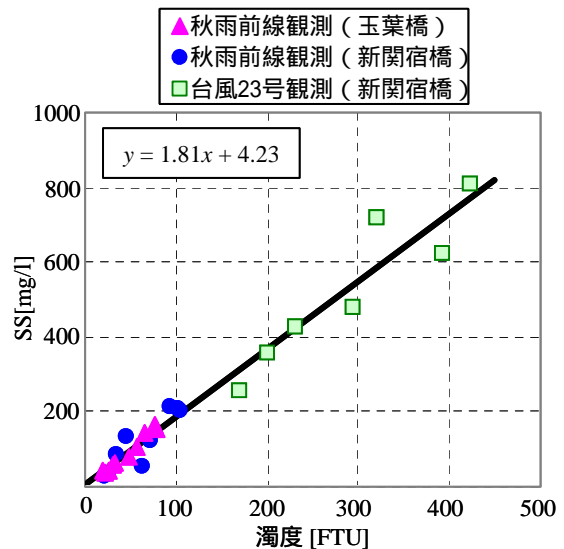


図 - 2 濁度とSSのキャリブレーション結果

維ろ紙法⁸⁾により求める．得られたサンプル水の一部に対しては浮遊土砂の粒径分布を計測しており，その際にはレーザ回折式粒径分布測定装置（SALD-3000S，(株)島津製作所製）を用いる．

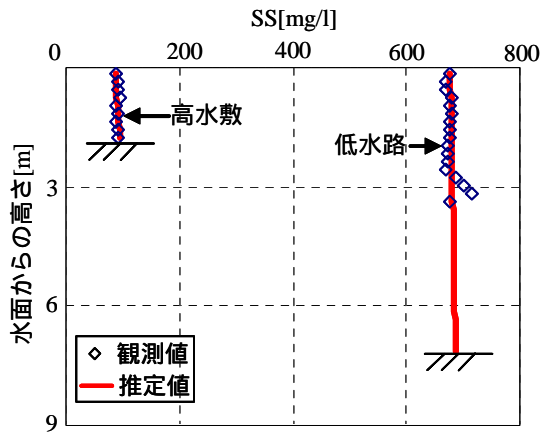
(3) SSと濁度のキャリブレーション結果

CTDセンサーにおける濁度の計測値からSSに変換する際に必要となるSSと濁度のキャリブレーション結果を図 - 2 に示す．ここでは，表層バケツ採水により得られたSSと同じ地点で測定された濁度を比較している．これを見ると，SSと濁度の相関関係は高濃度部分に関してはややばらつきしているものの，全体的な相関性は概ね良く，また，場所や洪水イベントが異なっても両者の関係はほとんど変化していないことがうかがえる．図中に示されている全データに対して回帰直線を当てはめると，その式に対する相関係数は0.981と高い値となり，2つの観測期間でかつ2つの測定点の観測データを対象としても，SSと濁度の相関性は高いことが分かる．後述するように，浮遊土砂の粒径分析の結果から，粒径分布がほとんど変化していないことが確認されたので，濁度とSSの相関関係が洪水イベント毎，観測場所毎に差が生じなかったものと考えられる⁹⁾．

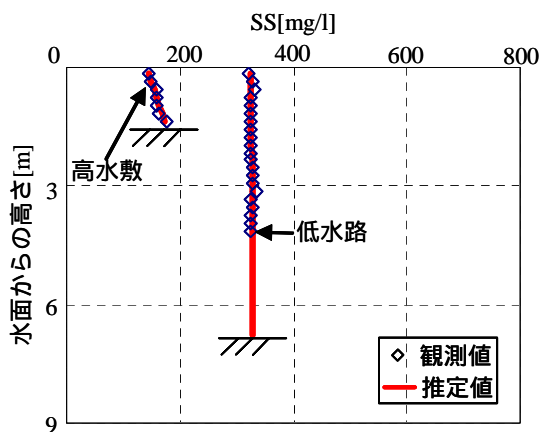
3. 洪水時における土砂濃度の横断・鉛直分布特性

(1) SSの鉛直分布

濁度から推定されたSSの鉛直分布特性を調べるために，台風23号観測時の新関宿橋における低水路と高水敷上のSS鉛直分布を図 - 3の印で示す．ここでは，洪水時の水位ピーク期（10月21日13:31～14:54）と減水期（10月22日0:58～2:08）における結果が図示されている．観測値



(a) 水位ピーク期 (10月21日 13:31 ~ 14:54)



(b) 減水期 (10月22日 0:58 ~ 2:08)

図 - 3 SS鉛直分布に関する観測値 SS_{obs} と推定値 SS_{cal} (台風23号観測, 新関宿橋)

の取得状況としては、高水敷に関しては全水深にわたるSS鉛直分布を計測できているのに対して、低水路では河床付近におけるSSを観測できない時が見られた。これは、CTDセンサーに重り20kgを付けて調査したものの、2m/sに達する洪水流によりCTDセンサーが流下方向に流れ、CTDセンサーが河床面まで到達できなかったためである。図-3を見ると、低水路と高水敷ともに、SSは鉛直方向にほとんど一様に分布していることが分かる。この様子は、ここで示していない時間帯、場所においても確認されている。

低水路、高水敷ともにSSの鉛直分布が一様化している要因を調べるために、同じ台風23号観測の新関宿橋における浮遊土砂粒径分布を図-4に示す。これを見ると、低水路、高水敷とともに、0.1mm以下の微細土砂成分が大部分を占めており、中央粒径 D_{50} に関しては、低水路では約10 μ m、高水敷では約8 μ mと非常に小さい。ウォッシュロード成分を便宜的に100 μ m以下¹⁰⁾とすると、浮遊土砂のうちウォッシュロード成分が98%以上を占めることが全ての観測データにおいて確認されている。以上

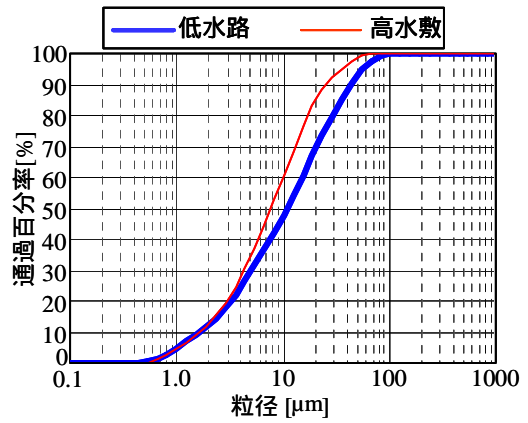


図 - 4 浮遊土砂の粒径分布 (台風23号観測, 新関宿橋)

のように、浮遊土砂としてウォッシュロード成分が大部分を占めるため、低水路・高水敷ともにSSが鉛直方向に一様になるものと考えられる。

また、前述したように、低水路ではCTDセンサーが流下方向に流されるため、底層部分のSSが一部欠測している。そこで、SSの鉛直分布に対して何らかの近似式を当てはめて、欠測部分のSSの推定値を求める。まず、河床面からの高さ z におけるSSの推定値 SS_{cal} を求める際には、近似式として以下の指数関数を採用する。

$$SS_{cal} = SS_0 \exp\left(-\frac{w_0}{\varepsilon_s} z\right) \quad (1)$$

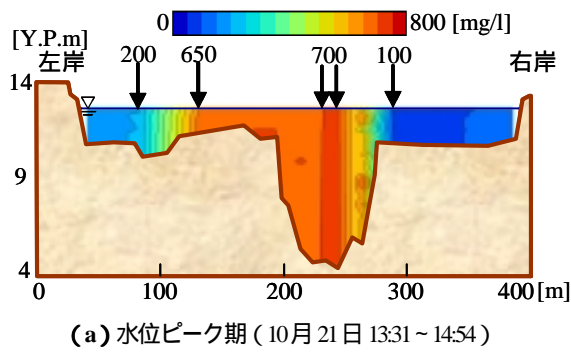
ここで SS_0 は河床面上におけるSS、 ε_s は渦動粘性係数、 w_0 は浮遊土砂の沈降速度である。このうち、渦動粘性係数 ε_s に関しては、以下のように与える。

$$\varepsilon_s = \frac{\kappa}{6} U_* h \quad (2)$$

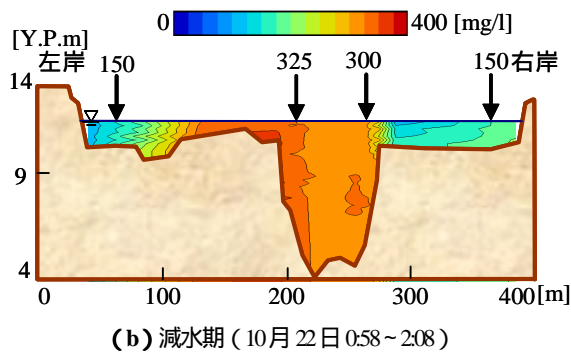
ここで、 κ はカルマン定数(=0.40)、 h は水深、 U_* は摩擦速度であり、ADCPにより観測された流速値より与えられる。また、沈降速度 w_0 は、粒径分布より得られる中央粒径 D_{50} からストークスの抵抗則に基づいて求められる。さらに、河床面上における SS_0 は、SSの観測値 SS_{obs} と式(1)から得られる次式を用いて算出される。

$$SS_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{SS_{obs}}{\exp\left(-\frac{w_0}{\varepsilon_s} z\right)} \quad (3)$$

ここで N は各横断位置における観測データの数であり、 SS_0 は式(1)に基づいて全データから算出される河床面上のSS値を平均したものとなっている。ここで得られた推定値 SS_{cal} を図-3中の実線で示す。これより、低水路や高水敷ともに、SSの推定値 SS_{cal} は観測値 SS_{obs} と概ね一致しており、本観測で得られたSSの鉛直分布は良く知られている指数関数で近似できることが明らかとなっ



(a) 水位ピーク期 (10月21日 13:31~14:54)



(b) 減水期 (10月22日 0:58~2:08)

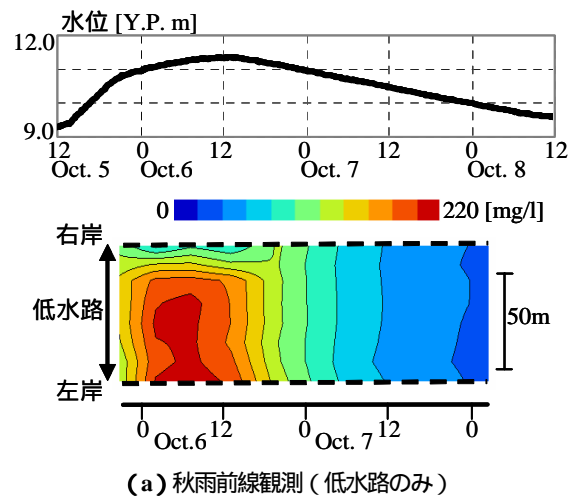
図 - 5 横断面内におけるSSコンター (台風23号観測, 新関宿橋)

た. また, 式(1)~(3)を用いることにより, データ欠測した部分に対して良好なSS推定値が得られることが確認された.

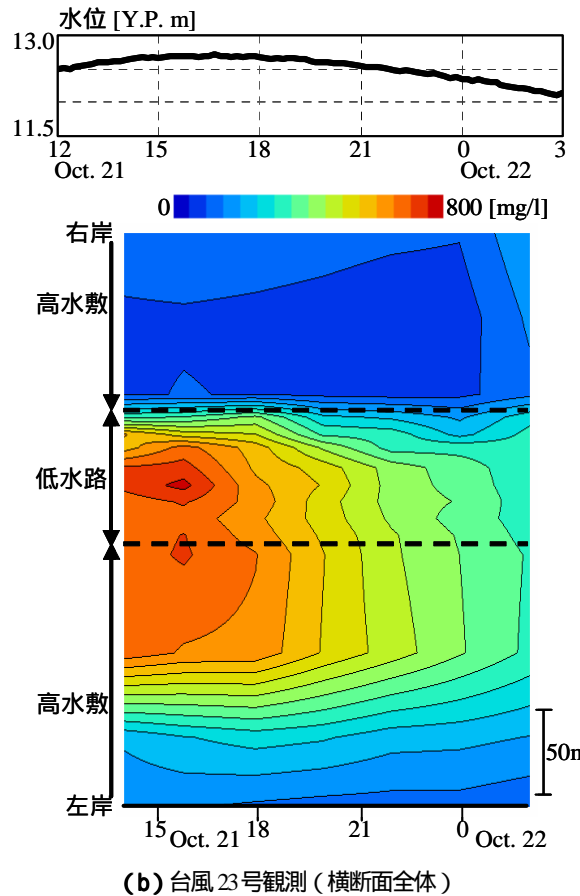
(2) SSの横断分布

次にSSの横断分布特性を把握するために, 横断面内のSSコンターを図-5に示す. ここでも図-3と同様に, 台風23号観測時における新関宿橋での水位ピーク期と減水期の結果を図示している. このコンター図を作成する時に採用されているSSとしては, 観測値 SS_{obs} があるところではそのまま観測値を使用し, データ欠測の部分では上述した推定値 SS_{cal} を与える. この図を見ると, 水位ピーク期では, 低水路で最大700mg/lまで達しているのに対して, 高水敷の大部分では100~200mg/l程度であり, 横断面内においてSSが大きく変化している. 高水敷上では, 左岸側の方が右岸側よりも高濃度域が広がるとともに, 低水路内においても左岸側のSS値の方が右岸側よりも大きい. 一方, 減水期においては, 低水路ではSSはおおよそ300mg/lと水位ピーク期と比べて大幅に濃度低下しているのに対して, 高水敷では100~200mg/lと水位ピーク期と同程度であり, 低水路と高水敷のSSの差は水位ピーク期と比べて減少している. また, 前述したように, SSの鉛直分布は概ね一様となっており, ウォッシュロード成分が卓越する江戸川ではSSの鉛直方向変化よりも横断方向変化が顕著となっていることが分かる.

より詳細にSSの横断分布特性を調べるために, 水深平



(a) 秋雨前線観測 (低水路のみ)



(b) 台風23号観測 (横断面全体)

図 - 6 水深平均SSの横断分布に関する時間変化 (新関宿橋)

均SSの横断分布に関する時間変化を図-6に示す. ここでは, 新関宿橋を対象として, 秋雨前線観測(同図(a))及び台風23号観測(同図(b))の結果を図示している. また, 秋雨前線観測の場合には低水路のみの結果を, 台風23号観測の場合には全断面にわたる結果をそれぞれ表示している. まず, 秋雨前線観測時に関しては, 横断面内における水深平均SSのピークは, 増水期には低水路中央部に, 水位ピーク付近では低水路左岸側に, それぞれ現れる. また, このとき, 低水路右岸側におけるSSは, 低水路中央部や左岸側のSSよりも全般的に小さい.

その後、減水期において水位が低下すると、このようなSSの横断方向変化は無くなり、SSは横断方向に一様となっている。これは、水位が低下すると、顕著なSSの差が存在する高水敷と低水路が分断され、高水敷上の低濁度水と低水路内の高濁度水が水平混合しないためであると考えられる。一方、台風23号観測時では、SSピークは、秋雨前線観測と同様に、増水期から水位ピーク期の間では低水路中央部に現れるのに対して、減水期においては低水路左岸側に出現している。また、左岸側高水敷上の低水路に近い領域においても、低水路と同レベルの高いSSが見られる。それ以外の高水敷においては、低水路と比べて低濃度のSSとなっており、全体的には左岸側高水敷上のSSの方が右岸側高水敷上よりも大きい。SSの時間変動特性としては、低水路全体及び左岸側高水敷上における低水路近傍の領域では、水位ピーク直前にSSが最大となり、その後減少している。それに対して、その他の高水敷上の大部分では、SSはほぼ一定となっている。

このように、低水路と高水敷の間には顕著なSSの違いがあり、また低水路内においてもSSが横断方向に有意に変化している。さらに、高水敷においても左岸側と右岸側ではSSが大きく異なる。このようにSSの横断方向変化が生じる要因としては、高水敷上における植生分布状況が挙げられる。新関宿橋付近では、右岸側の高水敷上では植生が一面に繁茂しているのに対して、左岸側の高水敷上では疎らに植生が分布している。そのため、左岸側高水敷上では、低水路からの高濁度水が侵入しやすく、結果としてSSレベルが高くなる。一方、右岸側では、高水敷上の低濁度水の影響を受けて、低水路右岸側のSSが低水路中央部や左岸側よりも低くなるものと考えられる。

以上のように、SSの横断分布としては、水位が高水敷の地盤高さよりも十分大きい場合には高水敷と低水路のSSの違いは大きくなり、また、低水路内においてもSS変化は顕著となる。しかしながら、水位が低く高水敷と低水路が分断されると、低水路内におけるSSの横断分布は概ね一様となる。さらに、高水敷上における植生分布の粗密により、高水敷上の低濁度水と低水路内の高濁度水の水平混合過程が変化し、結果として低水路内におけるSS変化が決定されるものと推察される。

4. 土砂輸送量算定法の精度評価

(1) 算定法の概要

SSの鉛直・横断方向変化を正確に考慮していない既存の土砂輸送量算定法の精度を検証するために、CTDセンサーとADCPにより計測されたSS・流速の鉛直・横断分布から土砂輸送量算定法の推定精度を検討する。ここで用いられるデータセットとしては、まずSSに関しては、図-5と同様に、観測値 SS_{obs} と推定値 SS_{cal} を組み合わせ

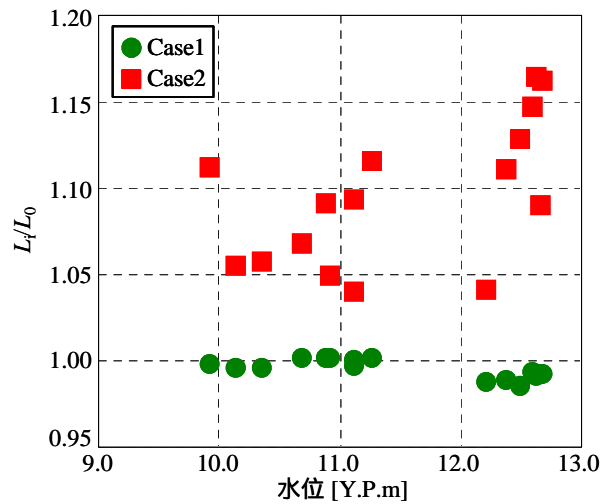


図-7 土砂輸送量算定法の推定精度 (新関宿橋)

せたデータセット $SS(y, z)$ (y : 横断方向, z : 鉛直方向)を用いることとする。また、ADCPにより得られる流速データに関しても、データ欠測している水面・底面付近に対しては近似式を適用して推定値を求めて、その推定値と観測値を組み合わせたデータセット $u(y, z)$ を作成する。

SSや流速の鉛直・横断変化の取り扱いに着目して、上述した流速 $u(y, z)$ と土砂濃度 $SS(y, z)$ のデータセットを用いて次式に示す3つの土砂輸送量算定法 L_0, L_1, L_2 を適用する。

$$L_0 = \int \int u(y, z) \times SS(y, z) dy dz \quad (4a)$$

$$L_1 = \int \int u(y, z) \times SS_w(y) dy dz \quad (4b)$$

$$L_2 = \int \int u(y, z) dy dz \times \overline{SS_m} \quad (4c)$$

ここで、 $SS_w(y)$ は表層SS、 $\overline{SS_m}$ は低水路中央部の水深平均SSを表している。上式のうち、断面内の全データを用いて、流速とSSの積を断面積分する L_0 はSSや流速の鉛直・横断変化を全て考慮しているため、ここでは正解と見なされる。 L_1 (Case1)は表層SSのみを用いており、SSの横断方向変化は考慮されているものの鉛直方向変化が考慮されていない。低水路中央部の $\overline{SS_m}$ を採用する L_2 (Case2)は、SSの横断方向変化は考慮されていない。このCase2は、これまでの土砂動態調査で主として使用されており、低水路のみのデータを用いて土砂輸送量を算定する方法に相当している。

(2) 算定結果

SSの鉛直方向変化もしくは横断方向変化を考慮していない2つのケースと正解となる L_0 を比較するために、新関宿橋の結果を例にして、 L_0 で無次元化された L_1, L_2

と水位の相関図を図-7に示す。ここでは、秋雨前線観測と台風23号観測の結果が表示されている。これを見ると、SSの鉛直変化を無視し、横断変化を考慮しているCase1の L_1/L_0 は0.988~1.001であり、Case1における土砂輸送量の推定誤差はおよそ1%以下となっている。これは、3.で述べたように、江戸川ではウォッシュロード成分が卓越し、SSが鉛直方向にほぼ一様に分布するため、SSの鉛直方向変化を無視しても土砂輸送量の推定精度は低下しないものと考えられる。それに対して、低水路中央部のみのSSを用いるCase2では、全般的に、水位とともに推定誤差が大きくなる傾向が見られる。具体的には、新関宿橋における高水敷上の地盤高さの平均値(=約11m)を境にして、水位がその高さよりも低いときには L_2/L_0 は1.05~1.09となるのに対して、逆の場合には L_2/L_0 は1.10~1.16となっている。このように、横断方向変化を考慮しないCase2では土砂輸送量を過大評価しており、その誤差は水位とともに大きくなる。これらの結果は、3.2で記述している土砂濃度の横断分布特性を反映しており、低水路中央部のSSが断面平均値よりも大きいためにCase2では土砂輸送量を過大評価しているものと考えられる。

以上のことより、土砂輸送量を精度良く評価するためには、SSの鉛直・横断分布調査を行うことは不可欠であることが実証された。本研究で対象とした江戸川のように、ウォッシュロード成分が顕著となる場合には、SSの鉛直方向変化よりも横断方向変化を計測することが重要であり、表層におけるSSだけでも横断分布を把握することにより、土砂輸送量の算定精度は著しく向上することが明らかとなった。また、上述したSSの鉛直・横断方向変化を簡便に調査する上では、採水観測の代わりとして、濁度計付きCTDセンサーを用いる調査法が一つの有用な手段となり得ることが示された。

5. まとめ

本論文で得られた成果は、下記のとおりである。

(1) CTDセンサーを用いて、江戸川における洪水時のSSの横断・鉛直分布調査を実施した。その結果、江戸川では、ウォッシュロード成分が顕著となるため、SSは鉛直方向にはほぼ一様となることが示された。また、SSの横断方向変化が顕著であることやその様子が水位により大きく変化することが明らかとなった。

(2) 2つの方法(Case1, 2)により土砂輸送量を算定したところ、SSの鉛直方向変化を無視しても横断方向変化を考慮しているCase1では、土砂輸送量の推定誤差は1%以下となった。一方、SSの横断変化を無視するCase2で

は4~16%の土砂輸送量推定誤差が生じることが明らかとなった。

(3) 以上のことから、江戸川のようなウォッシュロード成分が顕著となる河川において精度の良い土砂動態調査を行うために、SSの横断方向変化を計測することが必須である。また、このような土砂動態調査を実施する上では、濁度計付きCTDセンサーは一つの有効な測定器となり得るものと考えられる。

謝辞: 現地調査に際して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大な御協力を頂いた。水質分析には同学科出口浩教授に様々な便宜を図って頂いた。粒径分析では、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻鯉淵幸生講師に御協力頂いた。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)(2)、(財)河川環境管理財団・河川整備基金助成事業(いずれも研究代表者:二瓶泰雄)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤田光一: “広域総合土砂(物質)管理”の理念と実践との隔たりをどう埋めるか 月刊海洋, Vol.32, No.3, pp.179-184, 2000.
- 2) 平林桂, 平館治, 望月達也, 藤田光一, 松尾和己, 坂野章, 服部敦, 塚原隆夫, 梅野浩一, 渡辺敏, 近藤和仁, 山形宙, 李参熙, 赤木泰雄: 洪水時広域採水による濁沼川水系の土砂動態, 水工学論文集, Vol.42, pp.1045-1050, 1998.
- 3) 二村貴幸, 諏訪義雄, 谷口丞, 末次忠司, 平館治: 細粒土砂動態観測により明らかにされた濁沼川流域の細粒土砂供給特性, 河川技術論文集, Vol.8, pp.213-218, 2002.
- 4) 池田駿介, 泉典洋: 浮遊砂の横断方向拡散係数について, 土木学会論文集, No.434/ -16, pp.47-55, 1991.
- 5) 木下良作: 石狩川下流部における洪水時の濁度鉛直分布と流れの構造について 水工学論文集, Vol.34, pp.463-468, 1990.
- 6) 佐藤慶太, 二瓶泰雄, 木水啓, 飯田裕介: 高解像度 ADCP の洪水流観測への適用 江戸川を例にして, 水工学論文集, Vol.48, pp.763-768, 2004.
- 7) 二瓶泰雄, 木水啓, 植田雅康, 中岡亮, 望月健: 陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析方法に関する検討~江戸川を例にして~ 海岸工学論文集, Vol.52, No.2, pp.1106-1110, 2005.
- 8) (社)日本下水道協会: 下水試験方法上巻 - 1997年度版 -, pp.116-118, 1997.
- 9) 横山勝英: 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, No.698/ -58, pp.93-98, 2002.
- 10) 江頭進治, 芦田和男, 金屋敷忠儀: 微細土砂の流出解析法とその適用に関する研究, 水理講演会論文集, Vol.25, pp.481-487, 1981.

(2005.9.30 受付)