

樹木状植生を持つ河床上における 浮遊砂濃度の形成機構

HYDRODYNAMIC MECHANISM OF SUSPENDED LOAD ON RIVERBEDS VEGETATED BY WOODY PLANTS

湯城豊勝¹・岡部健士²

Toyokatsu YUUKI and Takeshi OKABE

¹正会員 工修 阿南高専助教授 建設システム工学科 (〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木 265)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

Hydrodynamic mechanism of suspended load in open channel flows over woody plants was investigated based on the results of laboratory experiments. In the experiments, three-dimensional distributions of equilibrium sediment concentration were minutely measured in uniform flows over tree models uniformly arranged in a staggered manner. It was clarified that so-called dispersive flux plays an important role in the mass-conservation relationship of suspended load, and also that the diffusion coefficient of suspended sediment is almost proportional to the kinematic viscosity of flow. The experimental results of vertical profiles of horizontally averaged sediment concentration were accurately reproduced by a numerical model that includes an empirical model for the dispersive flux and a $k-\varepsilon$ turbulent flow model for the diffusion coefficient.

*Key Words : woody plant, suspended load, mass-conservation relationship,
dispersive flux, numerical modeling*

1. はじめに

近年、河道内の植生繁茂領域の拡大とともに、樹木の成長も顕著になり、樹木の管理・保全が重要な課題になっている。このため、植生水理に関する研究成果が数多く報告され、植生を伴う河床上の流れと流砂現象の解明が試みられてきた。まず流れに関する研究としては、混合距離理論に基づくもの¹⁾、渦動粘性係数を用いて流速分布の摂動解を求めるもの²⁾、高次の乱流クロージャーモデルを適用するもの³⁾などがある。

一方、流砂については、掃流砂を対象として有効掃流力の低減を、経験的に求めたもの⁴⁾、抵抗分離法を適用したもの⁵⁾、 $k-\varepsilon$ モデルによるもの⁶⁾などがある。浮遊砂については、清水ら⁷⁾はLESに基づく平面2次元数値計算から流れ場の非定常構造を抽出し、それか樹林帯の浮遊砂輸送に及ぼす影響を把握している。池田ら⁸⁾は高水敷と低水路の境界部に樹林帯を有する水路での実験と、

SDS-2DH モデルに浮遊砂の輸送方程式を組み込んだ数値計算を行い、浮遊砂の輸送機構について考察している。

このような研究の流れの中で、筆者ら^{6), 9)}は、より現実に近い灌木状および樹木状の木本類を模擬した植生モデルを用いた水理実験を行い、同時に数値計算による検討を行ってきた。とくに、前報⁹⁾ではレーザードップラー流速計による乱流計測を実施し、流れの乱流構造の把握を試みた。流れの数値解法については従来無視されてきた dispersive flux を考慮することの効果を検討した。

本研究では、今までに明らかにされていなかった浮遊砂濃度の形成機構を、詳細な実験データに基づいて考察した。水理実験においてはサイフォン式と濁度計による浮遊砂濃度の計測を行い、その結果と前報の乱流構造に関する成果を合わせながら濃度の dispersive flux に注目し、植生を持つ河床上的における浮遊砂濃度の形成機構を分析した。

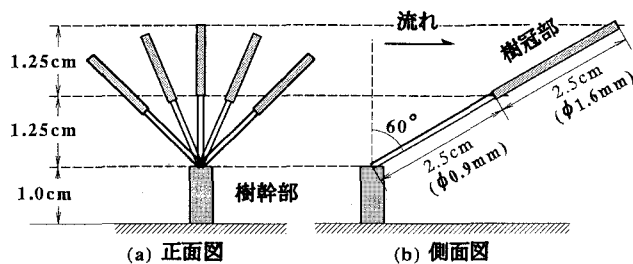


図-1 実験で用いた植生モデルの単体

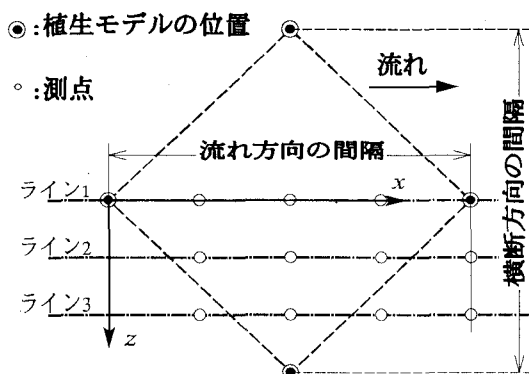


図-2 配列メッシュ内の測線と測点位置

2. 水理実験

実験には、長さ 12m、幅 0.4m の水路を使用した。図-1 に実験で使った樹木状植生モデルの概要を示す。この植生モデルは、直立した樹幹部と流れによって撓んだ枝の樹冠部を持つ樹木を想定し、アルミ管に 5 本の銅線を差し込み、その先端にゴムチューブをかぶせたものである。実験では、このような植生モデルを水路床の 7.2m の区間に様な密度で配列した。配列パターンは、図-2 に示すような縦・横断方向間隔が 12cm×12cm の千鳥状とした。

実験を行う浮遊砂流で、定常濃度をつくる方法は以下の通りである。まず清水流を循環させて、水路下流端付近において適当な量の実験砂を供給し、それらが水と同時に循環する状況で、河床上にわずかの土砂堆積が認められるまで投入した。濃度は、配列メッシュ内の単位領域で空間平均された鉛直分布と、いろいろな高さにおける平面分布が求められた。前者の計測は採水方式、すなわち自作の 3 連式サイフォン（内径 2mm）を使用した。図-2 に示す 3 本のライン上を、5 分間に流れ方向の間隔長さを均等な速度で水平移動して、約 4.6 リットル採水した。ここでは詳しい説明を省略するが、この方法は単位領域から採水することと同等であると考えた。一方、単位領域内における濃度の平面分布の計測は、図-2 の○点において濁度計(KENEK製)を利用して行った。濁度から濃度への較正は先に述べた採水によるデータから行った。

実験条件を表-1 に示す。ここでは水深 h を 6.00cm に固定し、流量 Q と水路床勾配 i を変化させている。

表-1 水理条件

ケース	流量 Q (l/s)	勾配 i	水深 h (cm)	平均流速 V_m (cm/s)	摩擦速度 u_* (cm/s)
1	5.45	1/1000	6.0	22.7	2.13
2	6.75	1/667	6.0	28.1	2.60
3	7.65	1/500	6.0	31.9	3.01

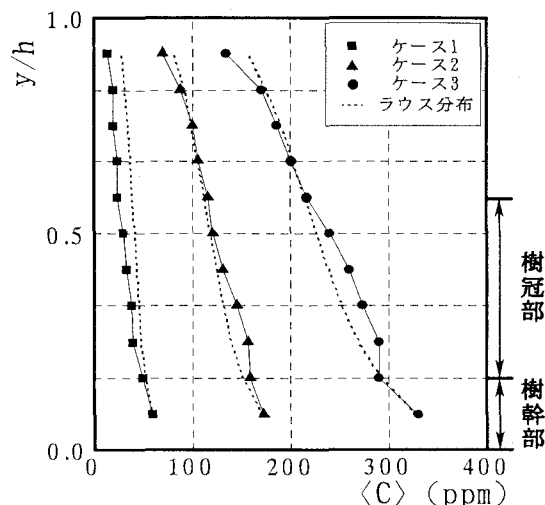


図-3 平面的に平均された濃度分布

平均流速 V_m は連続の式より求められ、みかけの摩擦速度 u_* は $\sqrt{ghi}$ より求められた。実験に用いた粒子は比重 1.42、粒径 0.1mm のほぼ様な塩化ビニル製のものである。沈降速度 w_f は、ルベイの式で求めると 0.225cm/s になった。

3. 実験結果ならびに考察

(1)空間平均された濃度の鉛直分布

平面的に積分平均された濃度 $\langle C \rangle$ の鉛直分布の計測結果を図-3 に示す。ここに、 y は水路底からの高さである。参考のためにラウス分布曲線を破線で併記している。計測値はラウス分布特有の逆 S 字状の様相を呈するものの、樹冠部においてはふくらむようになり、高い濃度になっている。これは、底面付近の高濃度の浮遊砂が通常の乱流より多く上方へ輸送されたと考えられ、この原因は、樹冠部付近に発生する組織的渦構造によるものと思われる。ケース 3 とほぼ同条件で行われた前報の横断流況結果を図-4 に再掲すると、樹冠部に丁度組織的渦構造が存在しており、この渦が浮遊砂の駆動力になっていると思われるが、以下詳細に濃度分布の形成機構を検討する。

(2)濃度の dispersive flux

ある高さにおける浮遊砂輸送の収支式を、メッシュの

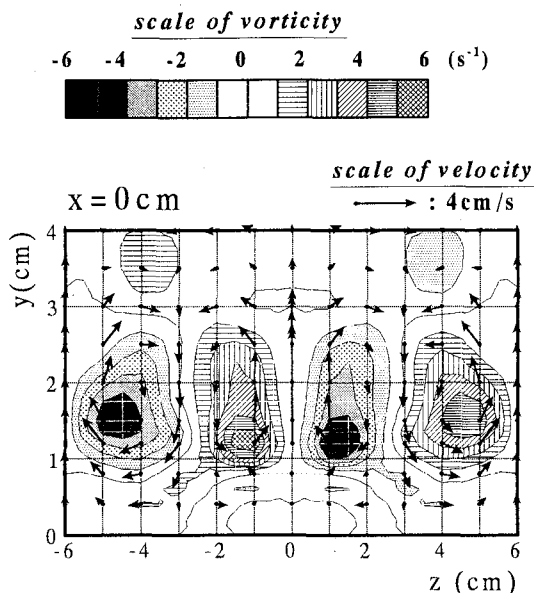


図-4 組織的渦構造

単位領域について積分平均すると次式を得る。

$$-\varepsilon_t \frac{d\langle C \rangle}{dy} + \langle C''V'' \rangle = w_f \langle C \rangle \quad (1)$$

ここに、 ε_t :拡散係数(cm^2/s)、 C'' :空間的平均濃度からの偏差、 V'' :鉛直方向流速の空間的平均値からの偏差、 $\langle C''V'' \rangle$:濃度の dispersive flux である。流れにおける運動量の空間平均値は、運動量の dispersive flux とよばれたので、本論文ではこれに倣って濃度の dispersive flux とよぶ。

式(1)の第1項は、浮遊砂の乱れによる「拡散項」、第2項は組織的渦構造が持つ鉛直方向への浮遊砂の輸送量を表す「dispersive flux 項」、右辺は下方への輸送量を表す「重力項」である。拡散項については、本来は左辺第1項全体が空間的平均値を表す $\langle \rangle$ に含まれるべきであるが、そのように扱うと問題が難しくなるため、実用上の観点から式(1)のようにしている。左辺第2項は、通常の開水路流においては0であるが、植生中においては V'' が大きいので残留すると考えられている。

ところで、前報においては今回のケース3とほぼ同条件の実験による実測値 V'' が求められている。ここに、式(1)における上記3項の重要度を調べるために、ケース3を例にとって大きさの項別比較をして図-5に示す。なお、拡散項は重力項から dispersive flux 項を引いた残差である。

底面付近では dispersive flux 項と拡散項がほぼ等しくなり、樹幹頂部において dispersive flux 項が極端に大きくなって拡散項はほとんど0である。さらに樹冠部中央で再び両者は等しくなって交差しているが、植生頂部よりやや下方で dispersive flux 項はほとんど0となり、重力項と拡散項が釣り合っている。このように各項の大小関係は複雑に入れ替わっている。

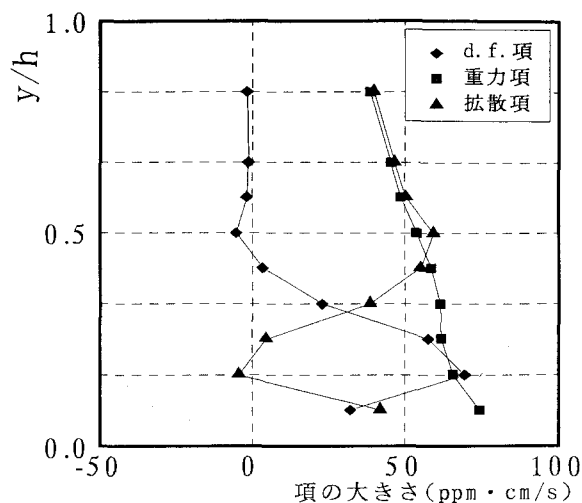


図-5 式(1)における各項の大きさ

濃度分布の予測においては、式(1)から分かるように dispersive flux と拡散係数 ε_t を知る必要があるが、現段階ではこれらを求めることができない。そのため、今後これらの評価法やモデル化が問題になってくる。

さて、dispersive flux のモデル化には何らかの見識が必要とされるが、そのためには dispersive flux の形成機構を知らねばならない。ここでは、dispersive flux を構成する C'' と V'' を調べることによって $\langle C''V'' \rangle$ の概要が理解できると考え、 C'' と V'' の個々の分布特性、ならびに dispersive flux の基になる $C''V''$ の分布特性をコンター図で示した。その結果を図-6に示す。水の流れは紙面の上方から下方に流れている。

まず C'' に注目する。濃度の平面内変化は水路底で大きく、水面では小さくなっている。水深の半分以下において、濃度は縦断的に変化しないものの、横断的には変化している。水深の上半分においては、濃度の縦断的变化がわずかに見られる。濃度の横断的变化は水深の下方と上方では異なり、水深の下半分では植生モデルを結ぶ線上で大きく、植生モデルの中間部では低くなっている。水深の上方においては、 C'' は植生モデルの線上で低くなり、しかも中間部で高くなって、水深下方のものとは正負が逆転する領域も現れる。

つぎに V'' に注目する。濃度と同様に水深の下方では V'' の縦断的变化がなく、横断的变化が大きくなっている。ただし、 C'' は底面近くで大きい値を示すものの、 V'' は $y=1.0\text{cm}$ と 1.5cm の樹幹部上方で大きくて底面近くでは小さい。とくに、樹幹直上部の値は大きい。この原因は、底面近くでは水路床により流れが抑制され、樹幹に沿っては強い上昇流が存在するためと考えられる。このように樹幹部上方では V'' の強い領域が顕著に現れて、前報でも述べた組織的渦構造が存在する証左になるとともに、組織的渦構造が水路床に支配されていることが確認された。水深の上方においては、下方と比較して V'' の値は小さくなるものの符号の逆転は見られない。

つぎに、両者の相関をみると明らかに正の相関がみら

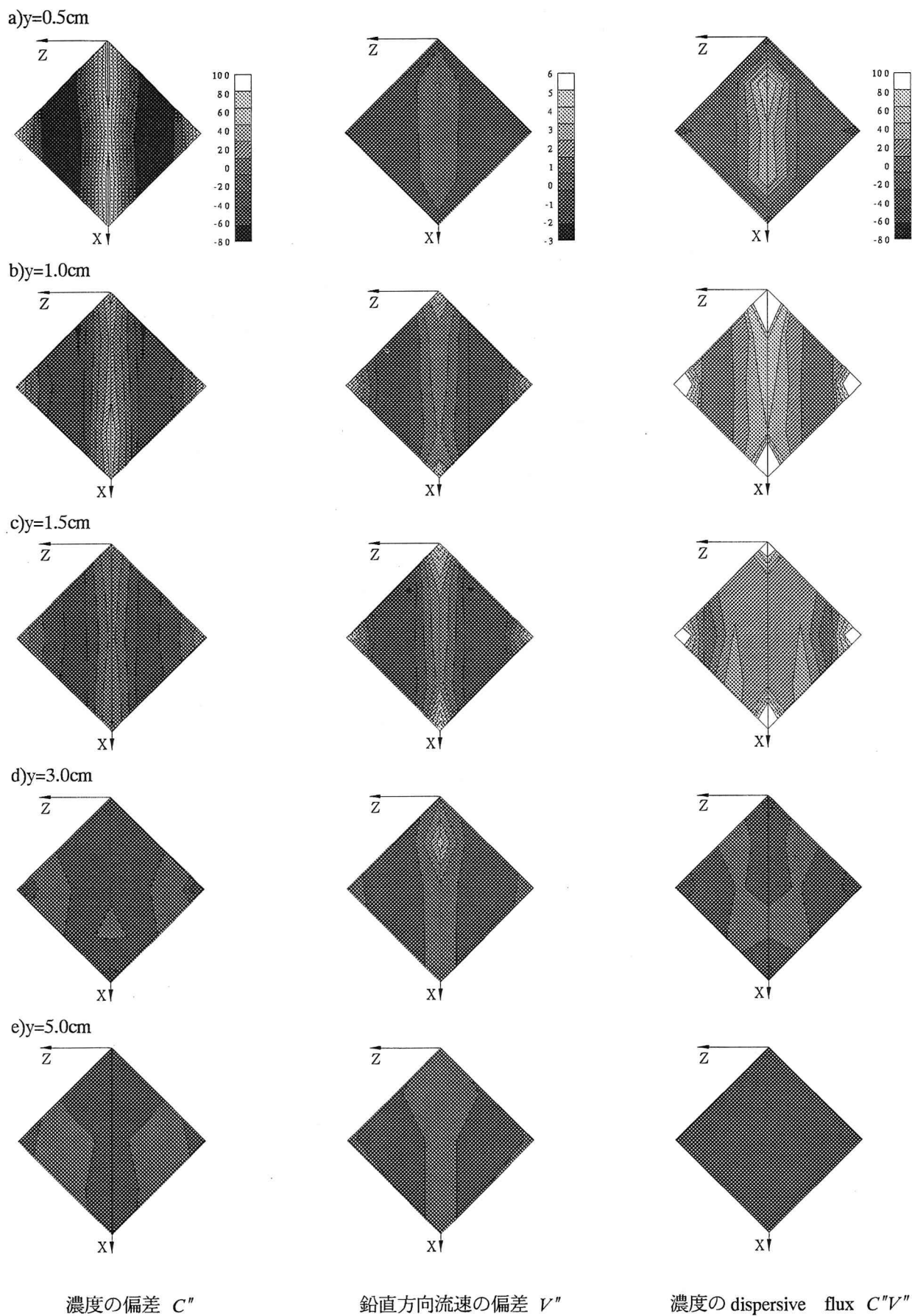


図-6 C'' , V'' , $C''V''$ の平面分布

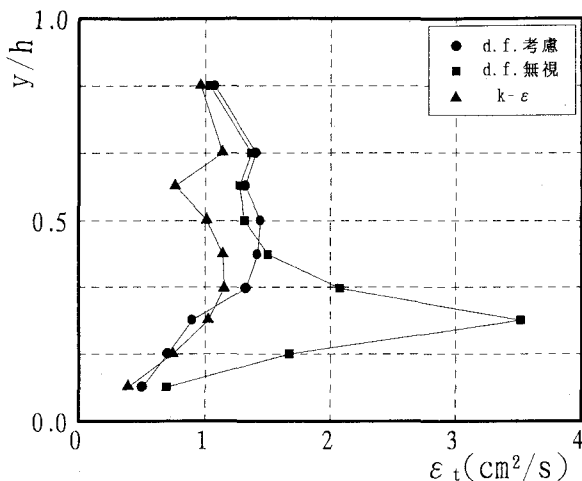


図-7 拡散係数

れる。とくに水深の下半分においては強い相関が示され、水面に向かう浮遊砂輸送量の多いことが確認される。水深の上方においては弱い負の相関が示され輸送量も少ないことを示している。

結合のフラックスとなる $C''v''$ は、相関関係から予想されたように、水深の下方で大きい正值、上方で小さい負値を持っていることが確認される。とくに、樹幹部上方の $y=1.0\text{cm}$ と 1.5cm における全体の $C''v''$ 値は大きく、図-3の濃度分布曲線におけるふくらみに影響を及ぼしていることが確認された。さらに、同水深における平面分布の局所的現象として、樹幹直上部の値がとくに大きくなっていることも表されている。このように、 $C''v''$ の大きさらびに平面分布形状の決定には v'' が大きく寄与していることがよみとれる。

以上、dispersive flux を規定しているものが組織的渦構造であり、換言すれば組織的渦構造が dispersive flux の支配因子であることが確認された。

(3) 拡散係数

式(1)から分かるように、浮遊砂の濃度分布を調べるためには拡散係数 ε_t が必要となる。ここでは、まず dispersive flux を分離する場合としない場合について、式(1)を逆算した結果について考察した。つぎに、前報の $k-\varepsilon$ モデルの計算過程に現れる運動量拡散係数、すなわち渦動粘性係数 ε_m と比較検討した。

その結果を図-7に示す。Dispersive flux を分離した場合 (d.f.考慮) の ε_t の分布形状は、底面付近から上方に向かって徐々に大きくなり、樹冠部上方で最大値、植生頂部で極小値をとり、その後若干大きくなったのち水面に向かって減少する。

Dispersive flux を分離しないで (dispersive flux=0) 求めたみかけの拡散係数 $\tilde{\varepsilon}_t$ の分布形状は、底付近から急激にその値を増し、樹幹部上方で最大値を示した後、植生頂部に向かって減少する。さらに植生頂部より上方

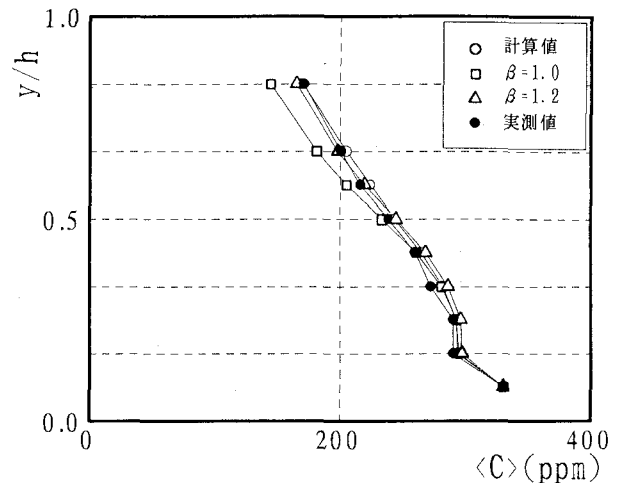


図-8 実測値を用いて再現した濃度分布

では dispersive flux を分離した場合と同じになる。 $k-\varepsilon$ 計算に現れる ε_m は、 ε_t と比較して、樹幹部上方まではほぼ同じ値になり、その上方ではよく似た分布形状を示すものの若干小さい値になっている。すなわち、拡散係数は、従来より渦動粘性係数の 1.0~1.3 倍になるといわれ、 $\varepsilon_t = \beta \varepsilon_m$ の関係になっている。この図の上方では $\beta=1.2$ 、下方では 1.0 を示しているが全体には 1.2 位になりそうである。

このように、精度良い拡散係数を得るためには、計測値があれば dispersive flux をうまく分離することと、計算値であれば渦動粘性係数を比例させればよいことが明らかにされた。ここで、濃度分布を知りたいならば、式(1)において dispersive flux を適当にモデル化すればよいことが分かる。

以上、dispersive flux と拡散係数についてそれぞれの形成機構の解明を試みた。Dispersive flux については組織的渦構造が大きく関与していること、拡散係数については $k-\varepsilon$ 計算からの渦動粘性係数と比例関係にあることが明らかにされた。

4. 濃度分布の再現

実験で得られた濃度分布の再現計算を試みた。まず、dispersive flux の計測値が得られているケース3を計算した。拡散係数については前項で説明されたように、実験で得られた値と $k-\varepsilon$ 計算に現れる値に数種の β 値を与えた。計算は式(1)の中央差分法で行われ、その結果が図-8に示されている。実測値を用いた計算値はかなり良好な再現結果を得ている。 $k-\varepsilon$ モデルによる拡散係数については、 $\beta=1.0$ と 1.2 の結果を紹介しているが、 $\beta=1.0$ では計算値が実測値よりやや小さい傾向を示し、 $\beta=1.2$ においてはかなり良好な再現結果を得ている。

ケース1および2については、dispersive flux を計測していないので何らかのモデル化が必要になる。現段階ではどのようなモデルが適切であるか不明であるが、と

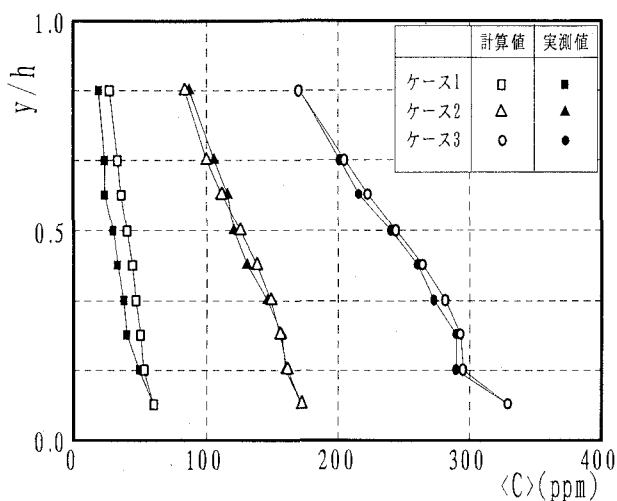


図-9 dispersive flux のモデル化による濃度の再現

りあえず次元を合わせ、dispersive flux の分布はいずれのケースにおいても相似形と考えて次式のように仮定した。

$$\langle C^*V^* \rangle = K C_m V_m \quad (2)$$

ここに、

K : 植生モデルの幾何条件によるパラメーターで

$$K = K_D f_D \left(\frac{y}{k} \right) \quad \text{とおく。}$$

k : 植生高さ

K_D : dispersive flux の大きさを規定する係数

f_D : dispersive flux の分布形状

C_m : 平均濃度

V_m : 平均流速

まず、実測値が得られているケース3においてパラメーターを決めることにした。 f_D は図-5に示されている dispersive flux 項の分布形状であるが、直線近似が最も適しており、下記の分布形状とした。

$$f_D = \frac{7}{2} \frac{y}{k} \quad 0 \leq y/k < 2/7 \quad (3)$$

$$f_D = -\frac{7}{3} \frac{y}{k} + \frac{5}{3} \quad 2/7 \leq y/k < 5/7 \quad (4)$$

$$f_D = 0 \quad 5/7 \leq y/k \quad (5)$$

なお、 K_D の値は0.0093という結果が得られた。

これらの結果をケース1と2にも適用して、濃度分布の再現を試みた結果を図-9に示す。ケース3においては若干計算値が大きいものの全体に良好な結果を得ている。またケース2においても、多少のばらつきがあるものの良好な結果を示している。ケース1においては、全体にやや大きめの値を示しているが、若干左に平行移動すれば計測値に近づくため、初期値となる $y=0.5\text{cm}$ 地点における濃度測定精度の悪さが原因と考えられる。全体的にはほぼ妥当な値が示され、本モデルにおいても濃度

分布の再現がある程度行えることが分かった。詳しくは今後の検討課題であり、とくに式(2)の妥当性とパラメーター K についてはさらに議論を進める必要がある。

5. あとがき

本研究では、樹木状の植生帯を通過する流れの中に浮遊砂が存在する場合を考え、水理実験を通してその濃度構造を把握し、とくに濃度に関する dispersive flux や拡散係数について検討し、最後に濃度の再現計算を試みた。

実験においては、3連式サイフォンにより空間的に積分平均された濃度の鉛直分布を測定し、濁度計により得られたデータを用いて濃度に関する dispersive flux を求めた。その結果、濃度の鉛直分布や dispersive flux の平面分布とともに流れの中の濃度構造が明らかにされた。さらに、樹冠部下方においては組織的渦構造が存在し、dispersive flux には組織的渦構造が関与していることも明らかにされた。拡散係数についても、実測値や $k-\varepsilon$ モデルの結果と比較検討されて分布の特性が明らかにされた。さらに、実測値による濃度分布の再現が差分法によって試みられて精度よい結果が得られた。Dispersive flux のモデル化については今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 室田明・福原輝幸：直立性の植物を有する開水路流れの構造について、第28回水理講演会論文集，pp. 225-231, 1984.
- 2) 渡邊康玄・北條紘次・清水康行：樹木の存在する河道の流況特性，水工学論文集，第35巻，pp. 471-476, 1991.
- 3) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：直立植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，No. 447, II-19, pp. 35-44, 1992.
- 4) 平野洋一・水原邦夫・大手桂二：植生水路の流水抵抗と掃流砂量に関する研究，新砂防，Vol. 40, No. 3(152) pp. 4-10, 1987.
- 5) 石川芳治・藤田英信・水原邦夫・成富靖：河畔林をもつ河道における掃流砂量に関する研究，砂防学会誌，Vol. 51, No. 3, pp. 35-43, 1998.
- 6) 井上貴之・岡部健士・濱井宣明・湯城豊勝：樹木状の植生を伴う河床上の流れと掃流砂量に関する研究，水工学論文集，第43巻，pp. 677-682, 1999.
- 7) 清水義彦・辻本哲郎・小葉竹重機：平衡植生流れと浮遊砂輸送に関する数値計算，水工学論文集，第41巻，pp. 845-850, 1997.
- 8) 池田駿介・河村一弘・福元正武・佐野貴之：低水路側岸部に植生を有する複断面開水路に生じる組織渦と横断方向浮遊砂輸送，水工学論文集，第44巻，pp. 795-800, 2000.
- 9) 湯城豊勝・岡部健士・濱井宣明：樹木状植生を持つ河床上的流れの乱流構造とその数値解法，水工学論文集，第45巻，pp. 847-852, 2001.

(2001. 10. 1受付)