

河口塩水混合層における浮遊物質の分布特性

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SOLID IN SALT WATER MIXING LAYER OF RIVER MOUTH

酒井 新吾¹・真野 明²
Shingo SAKAI and Akira MANO

¹学生会員 工修 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科付属災害制御研究センター(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

In estuaries, mixture of seawater creates unique water environment. After a flood, observations of water quality in the river mouth were conducted in order to understand the vertical distribution of suspended solid in the seawater mixing layer. At the upper part of mixing layer, suspended solid concentration is higher than at the lower part of mixing layer. There is a correlation suspended solid diameter and salinity. Suspended solid concentration increases from upstream to lower stream during low tide.

The concentration distribution model including diameter distribution model could reproduce the concentration distribution of suspended solid in salt water mixing layer.

Key Words : Salt water mixing layer, suspended solid concentration, median volume diameter, flocculation, turbidity

1. はじめに

河口域は、河川水と海水が混合する汽水域である。また潮汐による流れの変化、豪雨時の出水などによって塩水の混合状態や周辺の環境が大きく変化する。特に、上流から流れてきた浮遊物質は、河口で塩水と混合することで凝集しやすくなり、沈降現象が影響を受ける。そのため河口域における浮遊物質の分布を解明することは難しいものとなっている。

金野ら¹⁾は阿武隈川を対象とした観測により、出水時などの高濁度の河川水中に含まれる栄養塩は、窒素では総量の70%が、リンでは総量の99%が懸濁態として輸送されることを示した。このことから、高濁度時における栄養塩の影響を調べるには、浮遊物質の移動特性を調べるのが重要であると言える。しかし河口のような汽水域の場所では、浮遊物質がフロックを形成することが知られており、浮遊物質の移動機構を明らかにするのを困難なものにしている。また、フロックの成長や沈降に関する実験が行われている^{2), 3)}が、付着する物質量に関係すると考えられる浮遊物質の粒度分布についてはほとんど言及されていない。

2002年11月に平水時の阿武隈川河口において現地観測

を実施し、塩水混合層や浮遊物質の分布特性を調べた⁴⁾。その結果、塩水混合層の上部において浮遊物質濃度が増加することがわかった。

そこで本研究では、出水後の阿武隈川を対象とした観測を行い、高濁度水中における水質項目や流速、浮遊物質の分布特性などを調べた。さらに浮遊物質の粒径の変化を濃度分布モデルに組み込むことで、塩水混合層内の浮遊物質の分布を再現し、その特性を明らかにすることを目的とした。

2. 対象河川の概要

今回観測を行った阿武隈川は、流域面積は約5400km²、幹線流路延長は約239kmであり流域面積は全国第11位、東北地方第3位である。河口上流8km地点に岩沼観測所があり、その地点での100年確率基本高水流量10700m³/sであり平常時の流量は100~180m³/sである。塩水は最大で河口上流11kmまで遡上するが、通常は河口上流10km地点に1982年に完成した阿武隈大堰によりせき止められる。

阿武隈川のような大河川においては、水質の汚染だけでなく浮遊物質の輸送量の変化が、河口域だけでなく放

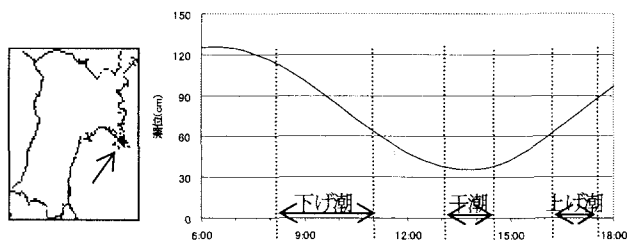


図-1 鮎川港の位置と2004年6月24日における潮位と観測時間

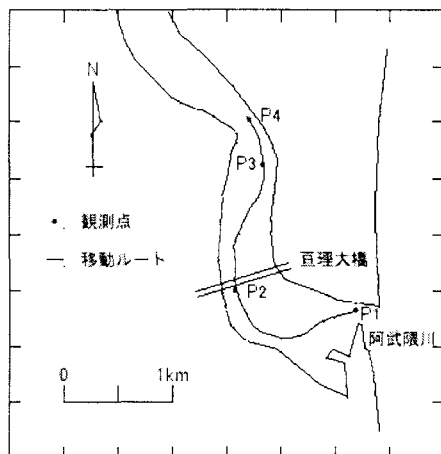


図-2 観測地点と観測ルート

水される海洋の環境にも影響を与えるものと考えられる。

3. 観測方法

2004年6月24日に、阿武隈川の河口域における現地観測を行った。この日は小潮の2日前にあたり、台風6号が通過した日から3日後であった。出水直後は舟を出すのが危険であるため、高濁度状態で流量が通常時まで落ち着く日を待った。この日の最大流量は $117.4\text{m}^3/\text{s}$ であり通常時の流量と同程度であった。図-1に、鮎川港の位置と観測日の潮位、観測した期間を示す。図中における矢印は観測期間を表す。

当日の観測地点と観測ルートを図-2に示す。観測地点は河口およびその上流2.0km、3.5km、4.5kmの地点で、それぞれP1、P2…P4で示す。P2とP3は、河床が浅くなっている場所の上流側、下流側に位置する。P4は2002年の観測時に塩水楔の先端が到達していた場所である。

観測ルートは滞筋に沿って設定した。現在位置の把握にはGPSを用いた。

観測内容の一つ目は水質、流速の鉛直分布の観測である。水質の観測は、各観測地点において10cm間隔の深さのデータを観測できるように多項目水質計を水中に沈め、水深(m)、塩分濃度(psu: practical salinity unit)、水温($^{\circ}\text{C}$)、濁度(mg/l)、クロロフィルa($\mu\text{g/l}$)の各項目の鉛直方向の分布を観測するものである。また、電磁流向流

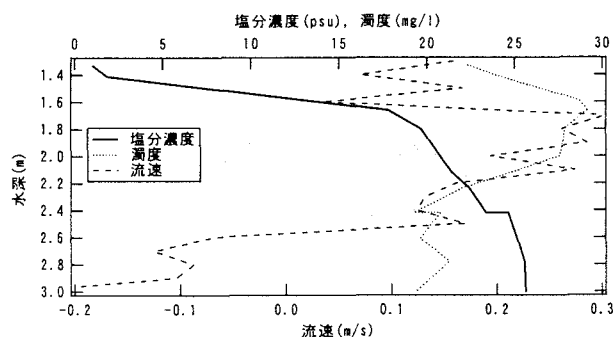


図-3 塩水混合層内の塩分濃度と濁度、流速の分布

速計を10cm間隔で水中に沈めて各深さの流向、流速を観測した。

観測内容の二つ目は、各観測点における異なる深さからの採水である。本研究では、水面から河床までの塩分濃度変化の10%を混合層上縁、90%を混合層下縁とし、その間の層を塩水混合層と定義する。そこで多項目水質計によって得られたデータをその場で確認し、水面の塩分濃度から約2psu増加している深さ、最深部の塩分濃度から約2psu減少している深さを特定し、それぞれ塩水混合層の上縁、下縁における試料とした。以上の2箇所に加えて、水面から約20cmの深さ、河床から約20cmの深さの計4箇所から採水を行うものである。また、最初の下げ潮時の観測において底泥の採取も行った。後日実験室にて分析を行うことで、浮遊物質の粒度分布を調べた。

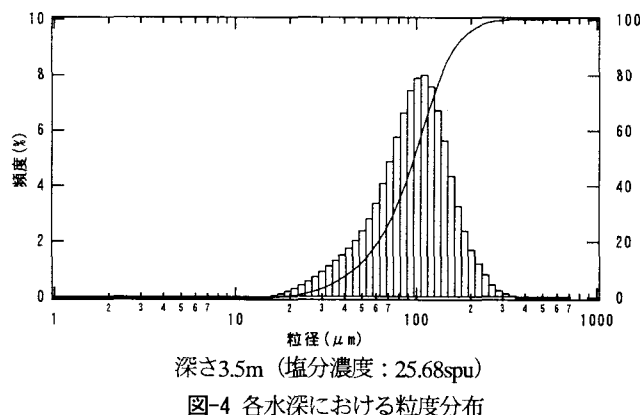
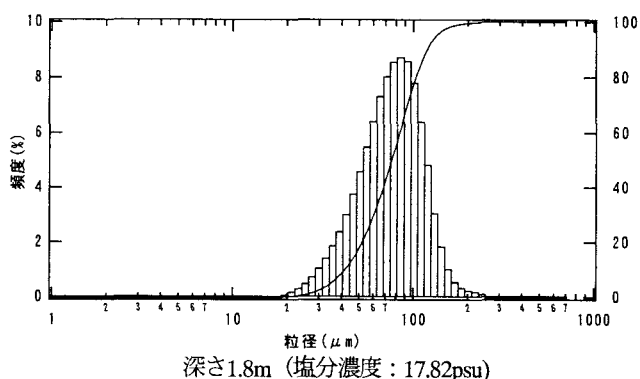
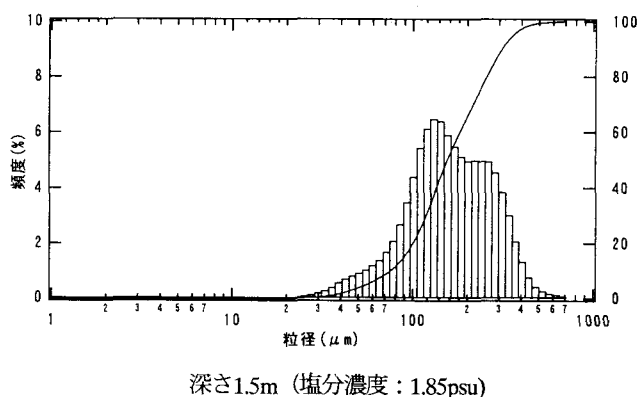
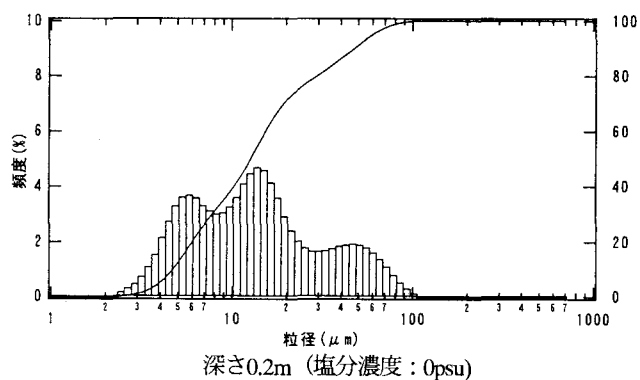
4. 分析結果

(1) 塩分濃度と濁度、流速の分布

図-3は下げ潮時のP4における、塩水混合層内の塩分濃度と濁度、流速の分布である。流速は流下方向が正である。図-4は下げ潮時のP4における各深さの浮遊物質の粒度分布を示したものである。横軸に粒径をとり、縦軸には、粒径の頻度と、ある粒径より細かい浮遊物質の含有割合 V (全体積に対する百分率で表す)をとっている。また採水した深さにおける塩分濃度も示す。粒度分布はレーザー散乱粒度分析計(マイクロトラック)を用いて得たものである。

図-3において、塩水混合層の上部(水深1.4~1.8m)において塩分濃度が急激に増加していることがわかる。同じ深さにおいて流速も早くなっていることから、流速の変化が激しかったために河川水と海水の混合が進んだものと考えられる。

濁度は、塩水混合層上部の塩分濃度が急激に増加し始める深さにおいて、顕著に増加していることがわかる。図-4において0.2mの深さと1.5mの深さの粒度分布を比較すると、 $100\mu\text{m}$ 以上の粒径の割合が0.2mの深さよりも1.5mの深さの方が顕著に増加している。このことから、塩水混合層の上部では、ブロック化によって密度が小さ



く粒径の大きな浮遊物が形成され、沈降しにくくなっているものと考えられる。

深さ1.8mから採取した試料において200~400 μ mの粒径の浮遊物質の割合が減少しているのは、上部よりも流速が遅いために攪拌の効果が小さく、大きなフロックが

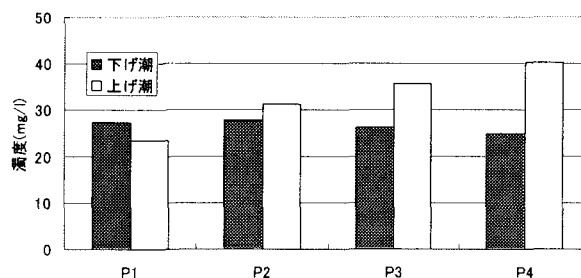


図-5 塩水混合層内の濁度の流下方向の変化

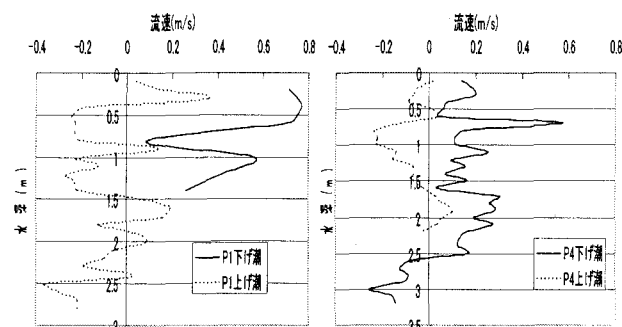


図-6 流速の鉛直分布

形成されなかったものと考えられる。1.8mと3.5mの深さでは、大きな粒径の頻度にあまり差がない。大きなフロックは河床に沈降してしまうと、巻き上げられにくくなるため、物質の割合が減少しているのは、上部よりも流速が遅い河床付近では大きな粒径の浮遊物質が少なくなるためであると考えられる。

(2) 濁度の流下方向の変化

図-5は各観測地点における塩水混合層内部の濁度の流下方向の変化を示したものである。塩水混合層内における最大値を用いた。図-6はP1, P4における流速の鉛直分布を示したものである。

濁度は、下げ潮時では下流の観測地点の方が高く、上げ潮時には上流の観測地点の方が高い。これは下げ潮時の方が上げ潮時より河川水層内の流速が大きいことから、流下する浮遊物質量も多くなり、下流に集積するためであると考えられる。上げ潮時では流速が遅いため流下する浮遊物質が少なくなる。これにより、流下に伴って増加する浮遊物質よりも、塩水混合層の下部へ沈降する浮遊物質のほうが多くなり、下流に向かって浮遊物質濃度が低下するものと考えられる。以上のように、下げ潮時より上げ潮時の方が、流下する浮遊物質が少なく、沈降する浮遊物質が多いために、濁度の河川縦断方向の空間勾配が大きくなっているものと考えられる。

5. 浮遊物質濃度の分布の再現モデル

現地観測によって得られた、観測点における塩水混合

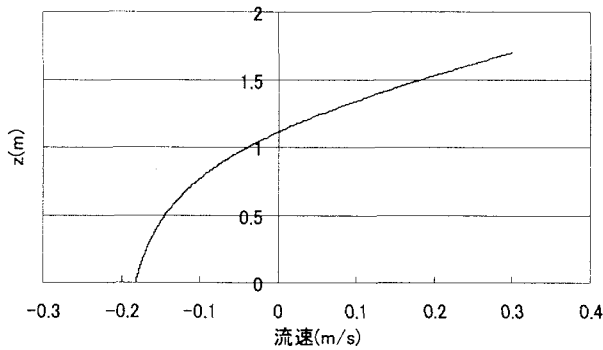


図-7 塩水混合層内の流速分布

層内の浮遊物質濃度の鉛直分布を再現することのできるモデルの構築を試みた。

(1) 数値計算手法

浮遊物質濃度分布を求める数式の導出に必要なものを順次定義する。

a) 座標と流速

座標は流下方向と水深方向の2次元で考え、流下方向にx座標の正、鉛直の浅い方向にz座標の正をとる。流速は、濃度分布の再現性を確認するために、細田ら⁹⁾による研究を参考に、tanh型の式を仮定した。

$$u = u_1 - (u_1 - u_2) \tanh \left\{ \frac{2}{h_0} (h_0 - z) \right\} \quad (1)$$

ここで、 u_1, u_2 ：塩水混合層上縁、下縁における流速、 h_0 ：塩水混合層の厚みを表している。 u_1, u_2 の方向の設定によって、潮汐の変化による塩水混合層の流向の再現も可能になるものと考えられる。図-7に、 $u_1=0.3\text{m/s}$ 、 $u_2=-0.2\text{m/s}$ 、 $h_0=1.7\text{m}$ としたときの塩水混合層内部の流速分布を示す。本研究では、塩水混合層の下縁が図-7中の $z=0$ に相当するものと仮定する。

b) 浮遊物質の濃度分布

浮遊物質濃度の分布式の誘導には式(2)のような2次元拡散方程式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{sx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{sz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial w_0 C}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 C ：浮遊物質の濃度、 u, w ：x, z 方向の流速、 $\varepsilon_{sx}, \varepsilon_{sz}$ ：浮遊物のx, z 方向の拡散係数、 w_0 浮遊物の沈降速度、をそれぞれ表している。浮遊物質濃度の、流下方向の変化率よりも、鉛直方向の変化率の方が大きいため、本研究では浮遊物質濃度の流下方向の変化を無視する。そのため流れを等流と仮定し、浮遊物が流下方向に平衡状態であるとする式(2)は式(3)のように変形することができる。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{sz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial w_0 C}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

両辺をzで積分し、積分定数を K_1 とすると、

$$\varepsilon_{sz} \frac{\partial C}{\partial z} + w_0 C = K_1 \quad (4)$$

が得られる。浮遊物質は河川由来であるので塩水混合層上縁において浮遊物質濃度の輸送があるものと考え、境界条件を式(5)のように設定する。

$$\left(\varepsilon_{sz} \frac{\partial C}{\partial z} + w_0 C \right)_{z=h_0} = K_1 (\neq 0) \quad (5)$$

$z=h_0$ における拡散係数と沈降速度は、後述する式を用いて算出し、濃度勾配と濃度は現地観測の結果から設定するものとする。

c) 浮遊物質の沈降速度

浮遊物質の沈降速度にはRubeyの沈降速度式を適用し、式(6)を用いる。

$$\begin{aligned} w_0 &= \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d} \times F(d) \\ F(d) &= \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \\ s &= \frac{\sigma}{\rho} - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

式中における記号はそれぞれ、 ν ：動粘性係数、 σ ：浮遊物質の密度、 ρ ：周囲の流体の密度、 d ：浮遊物質の粒径、 g ：重力加速度、を表している。

また浮遊物質の密度は、山崎ら⁹⁾が行った凝集実験から求められる次式を用いて有効密度 ρ_e として算出する。

$$\rho_e = \sigma - \rho = 0.0081(d \times 10)^{-1.193} \quad (7)$$

式(7)中の密度の単位は g/cm^3 、粒径の単位は cm である。流体の密度の算出には次式⁷⁾を用いる。

$$\rho = \rho_0 \left\{ 1 - (7(T - T_0)^2 - 750s) 10^{-6} \right\} \quad (8)$$

ここで、 T ：水温($^{\circ}\text{C}$)、 s ：塩分濃度(psu)、 ρ_0 ： 999.972kg/m^3 、 T_0 ： 4°C である。また、塩分濃度と水温の変化に伴って、流体の密度も変化するため、塩水混合層内の塩分濃度と水温の分布を次式のように仮定して式(8)に代入する。

$$s = s_1 - (s_1 - s_2) \tanh \left\{ \frac{6}{h_0} (h_0 - z) \right\} \quad (9)$$

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} + \frac{T_1 - T_2}{2} \tanh \left\{ \frac{8}{h_0} \left(z - \frac{h_0}{2} \right) \right\} \quad (10)$$

ここで、 s_1, s_2 ：塩水混合層上縁、下縁の塩分濃度、 T_1, T_2 ：塩水混合層上縁、下縁の水温、を表している。図-8に塩水混合層内の塩分濃度と水温の、実測値と計算値の分布を示す。どちらの場合も、実測値の分布をよく再現できているものと言える。

また、今回の現地実測の結果から、塩水混合層内における浮遊物の粒度分布が塩分濃度に伴って変化していることがわかったので、式(6),(7)中の d に体積平均粒径を扱うものとして、その分布を次式のような塩分濃度との関係式で仮定する。

$$d = 206.34 \times s^{-0.264} \quad (11)$$

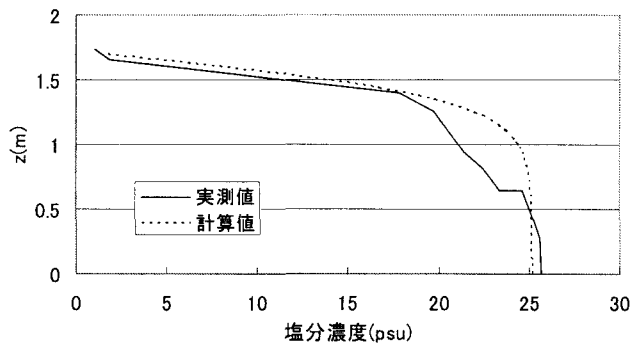


図-8 塩水混合層内における塩分濃度と水温の分布

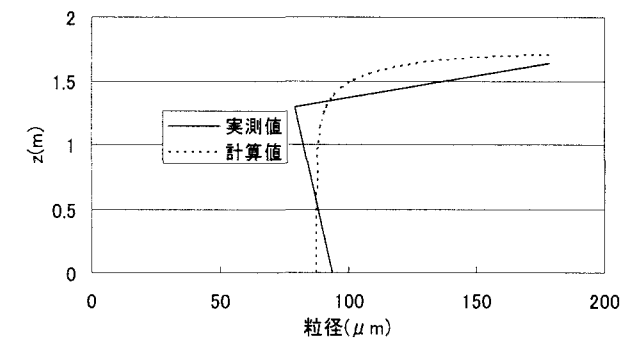


図-9 体積平均粒径の分布

ここで、粒径の単位は μm 、塩分濃度の単位はpsuである。式(11)は、下げ潮時に採取した試料における塩分濃度と体積平均粒径の関係から求めた。

図-9に、採水した試料の体積平均粒径の分布と、式(11)の計算結果を示す。採水した箇所が少ないが、今回の現地観測によって得られた浮遊物質の体積平均粒径の鉛直分布の傾向はおおむね再現できているものと思われる。

d) 拡散係数

浮遊物質の拡散係数(ε_{sz})と水の渦動粘性係数(ε_z)の比を表す β は式(12)の形で表される。

$$\beta = 1 + \alpha_1 \left(\frac{w_0}{u_*} \right)^{\alpha_2} \quad (12)$$

Kerssenら⁸⁾によって求められた結果によると、 $\alpha_1=1.54$ 、 $\alpha_2=2.12$ となっている。式(12)中の u_* は摩擦速度であり、本研究では幅広断面を仮定し、次式のように表す。

$$u_* = \sqrt{ghi} \quad (13)$$

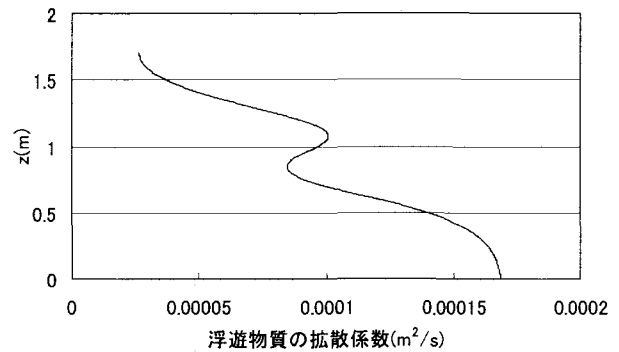


図-10 浮遊物質の拡散係数の分布

表-1 パラメータ

パラメータ	symbol	数値	単位
上縁の流速	u_1	0.3	m/s
下縁の流速	u_2	-0.2	m/s
上縁の塩分濃度	s_1	1.70	psu
下縁の塩分濃度	s_2	25.2	psu
上縁の水温	T_1	25.9	°C
下縁の水温	T_2	18.7	°C
塩水混合層の厚さ	h_0	1.7	m
水深	h	4.0	m
動粘性係数	ν	0.0114	cm^2/s
浮遊物質の沈降速度($z=h_0$)	w_0	9.55×10^{-4}	m/s
浮遊物質の濃度($z=h_0$)	C	24.1	mg/l
浮遊物質の濃度勾配($z=h_0$)	$\partial C / \partial z$	-0.935	mg/l/cm
中立状態における鉛直渦動粘性係数	ε_{z0}	1.70×10^{-4}	m^2/s
重力加速度	g	9.8	m/s^2
河床勾配	i	1/4000	-

ここに、 h : 水深、 i : 河床勾配、である。

感潮河口部における鉛直渦動粘性係数は、リチャードソン数 $Ri \equiv g(\partial \rho / \partial z) / \rho (\partial u / \partial z)^2$ を用いて次式のように表すことができる⁹⁾。

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0} (1 + 5.2 Ri)^{-1} \quad (14)$$

ε_{z0} は中立状態における鉛直渦動粘性係数を表している。以上の式を用いて得られた浮遊物質の鉛直拡散係数の分布を図-10に示す。 $z=0.8 \sim 1.2\text{m}$ の範囲において拡散係数の増減が逆転している。この範囲では、塩分濃度の変化勾配が大きくなり始め、水温の変化勾配も大きくなっている。それにより流体の密度変化が影響を受け、リチャードソン数、浮遊物質の拡散係数が変化したと考えられる。

e) パラメータ

計算に用いたパラメータを表-1に示す。混合層上縁($z=h_0$)における沈降速度は式(6)を用いて算出し、浮遊物質の濃度や濃度勾配は、下げ潮時のP4における観測結果を参考に設定した。また、塩水混合層の上縁、下縁における各項目も同様に観測結果を参考に設定した。

(2) 計算結果

塩水混合層内の浮遊物質濃度の実測値と計算値の分布

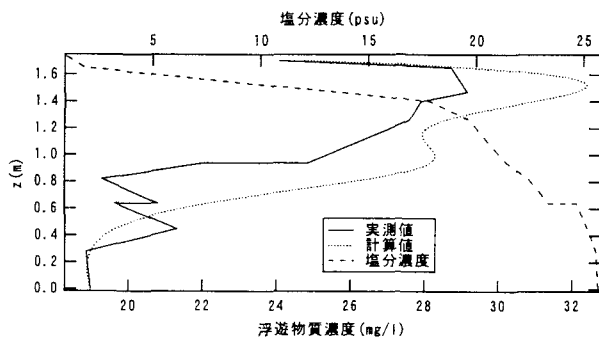


図-11 実測値と計算値の比較

と塩分濃度の実測値の分布を図-11に示す。塩水混合層の上部で濃度分布が増加するという実際の分布に近い概形を得られた。しかし、浮遊物質濃度の最大値や、塩水混合層の下部における濃度の減少状態など、まだ再現しきれていない部分がある。より密な間隔の採水データを得ることで正確な粒径の分布を仮定することができれば、さらに実際の分布に近づけることができるものと考えられる。

6. 結論

阿武隈川河口域における観測の結果、塩水混合層の上部で浮遊物質濃度が増加し、下部に向かうにつれて減少していることがわかった。また、濁度は、流速の影響を受けて、下げ潮時には流下方向に向かって増加し、上げ潮時には流下方向に向かって減少していることがわかった。塩水混合層内の浮遊物質の粒度分布は水面付近よりも大きな粒径の割合が増加しており、フロック化によって粒径の大きな浮遊物質が形成されているものと考えられる。また、塩水混合層の内部では塩分濃度の増加に伴って浮遊物質の粒径が変化していることがわかった。

現地観測の結果得られた浮遊物質粒径の分布が、塩分

濃度と相関を持つと仮定することで、塩水混合層内部における浮遊物質濃度の分布の概形を再現することができた。

参考文献

- 1) 金野 修：河口域における栄養塩の輸送特性，東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文，2002。
- 2) 安立重昭：塩水中におけるベントナイトのフロック形成について港湾技研資料，No.421，Vol6，pp.3-17，1982。
- 3) 小田一紀，宋 元平，柴村 圭，農本 充：緑水中における微細土粒子の凝集，沈降過程に関する研究-ベントナイトをモデルとして-，海岸工学論文集，第46巻，pp.981-985，1999。
- 4) 酒井新吾，真野 明：阿武隈川河口における塩水混合の調査とフロック形成に関する研究，水工学論文集，第48巻，pp.1501-1506，2004。
- 5) 細田 尚，西澤賢太郎，福住 晃，大久保賢治，村本嘉雄：交換密度流に生じる内部波に関する数値解析的研究，水工学論文集，第40巻，pp.523-530，1996。
- 6) 山崎真一，森田真郷，山下俊彦：河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集・沈降特性，海岸工学論文集，第50巻，pp.961-965，2003。
- 7) Rajendra G.Kurup, David P.Hamilton, Robert L.Phillips : Comparison of two 2-dimensional, laterally averaged hydrodynamic model applications to the Swan River Estuary Mathematics and Computers in Simulation, 51, pp.627-638, 2000.
- 8) Kerssens, P.J.M., A.Prins and L.C. van Rijn: Model for suspended sediment transport., Proc, ASCE, Vol.105, HY5, pp.461-476, 1979.
- 9) 中辻啓二，許 再寧，室田 晃：三次元表層密度流の数値実験，土木学会論文集，No434，II-16，pp.19-28，1991。

(2004. 9. 30 受付)