

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

Observation for seawater mixing layer at the Abukuma River
and study about flocculation

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, seawater mixing creates unique water environment. Observations on distribution of seawater mixing layer and on water quality were conducted in this study in order to understand the mechanism of seawater mixing and the vertical distribution of water quality. At the point which has deep water depth, the mixing layer changes easily. Suspended material as well as chlorophyll-a have maximum concentration at the upper edge of the mixing layer. In ebb tide phase, phosphorus has its maximum value at the bottom layer.

Laboratory experiment was also carried out in this study to investigate the flocculation process using river bottom mud. The experiment result shows that flocs diameter, which is used for flocculation, are differed by suspended matter concentration.

Key Words : Seawater mixing layer, boundary area, flocculation, suspended matter concentration, diameter distribution

1. はじめに

河川の河口域は、上流から流下する淡水の河川水と、海域から遡上する塩分を含んだ海水が混合する地域であり汽水域となっている。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。このような汽水域には特殊な生態系が存在しているだけでなく漁場などの生産場としても重要な場所であり、その特性を知ることは有益なことと言えるが、各河川ごとに特有かつ複雑な特徴、変化を示すため解明は難しい。

阿武隈川は東北地方の中で長大な河川に分類され、周辺の環境、生息する生物に大きな影響を与える。しかし近年では、東北地方において最も水質の汚染が進んだ河川として有名である。阿武隈川ほどの大河川における水質の汚染は、河口だけでなく放水される海洋の環境にも影響を与えることが予想される。

金野ら¹⁾は出水時などの高濁度の河川水中に含まれる栄養塩は、粒子などの浮遊物に付着して輸送されることを示した。よって栄養塩の移動について調べるには浮遊

物の移動の特性を調べるのが重要であると言える。しかし汽水域のような場所では浮遊物がフロックを形成することが知られており、浮遊物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、沈降に関する実験が行われている^{2), 3)}が、付着する物質濃度に関連すると考えられる浮遊物の粒径の分布についてはほとんど言及されていない。

そこで本研究では阿武隈川を対象にした現地観測を行い、塩水混合層および水質項目、栄養塩の分布特性を明らかにすることを目的とした。また、底泥を用いた実験を行いフロック化の特性を調べた。

2. 対象河川の概要

図-1に阿武隈川の流域図を示す。阿武隈川は福島県、宮城県、山形県の3県にまたがる一級河川である。福島県と栃木県の県境にある旭岳(標高1835m)を水源として、福島県中央部にある安積、福島盆地を北に抜け宮城県の角田盆地に流入し、蔵王山系より発する最大の支川、白石川と合流する。その後仙台平野の南部を通過して岩沼

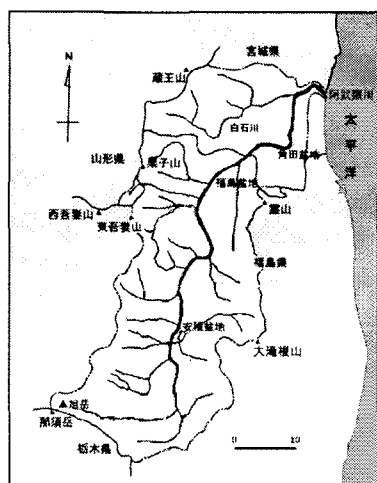


図-1 阿武隈川流域図

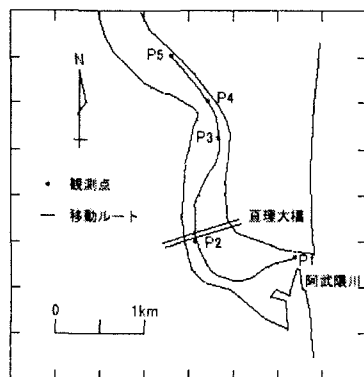


図-2 観測地点と観測ルート

市と亘理町の境にある荒浜から太平洋に流入している。

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。

3. 観測方法

(1) 観測地点

大潮である2002年11月22日を選び、舟をチャーターして阿武隈川の河口域における現地観測を行った。観測地点と観測ルートを図-2に示す。観測地点は、河口から上流へ2.0km、3.5km、4.5km、5.5kmの地点と河口であり、下流側からP1、P2…と名づけた。観測ルートは滞筋に沿って設定した。舟の現在位置の把握にはGPSを用いた。

(2) 観測内容

観測内容の一つ目は淡水と塩水の混合層の空間分布の観測である。これには、音響測深器を舟の側面に設置したまま稼働させ、P1からP5まで約5ノットで移動する

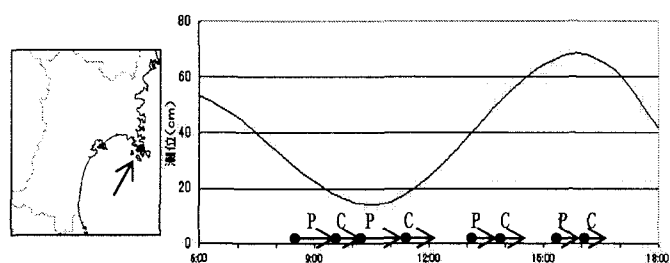


図-3 鮎川港の位置と2002年11月22日における潮位、観測時間
(Pは音響測深器、Cは多項目水質計を用いた時間)

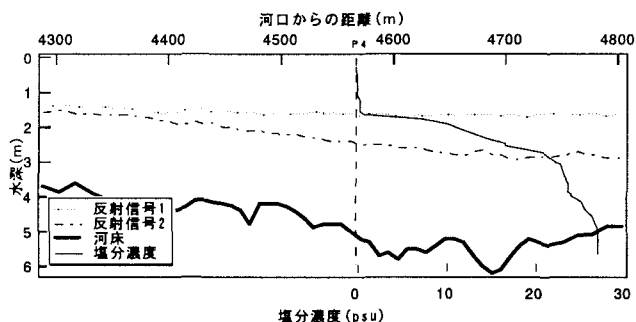


図-4 P4における反射信号と塩分濃度の分布

ことにより、観測ルートに沿って連続となる空間分布を得るものである。今回用いた音響測深器は、送波器から水中に音波を送信し海底に反射されて戻ってくる音波を受波器により受信し、その所有時間を伝播速度にて計算し水深を求めるものである。受波器の感度を調節することで、塩水の混合によって密度が変化している深さも同時に計測した。

観測内容の二つ目は水質の鉛直分布の観測である。これは各測定点において多項目水質計を約10cm/sで水中に沈め、塩分濃度 (psu: practical salinity unit)、水温 (℃)、濁度 (mg/l)、クロロフィルa (μg/l) の各項目の鉛直方向の分布を測定するものである。また、多項目水質計を用いた観測と同時に、音響測深器によって得られた反射信号付近の水深と水面、河床付近の3ヶ所の採水を行い後日実験室で分析することで栄養塩 (窒素、リン) の量を測定した。

以上のような内容の観測を潮汐の各位相 (下潮、干潮、上潮、満潮) においておこなった。また、最初の下潮時の観測で底泥の採取も行った。図-3に鮎川港の位置と、観測日の潮位、観測した時間を示す。Pは音響測深器を用いた時間、Cは多項目水質計を用いた観測時間を示している。

4. 観測結果

(1) 音響測深器の反射信号

音響測深器の送受波器は上下に密度差がある面において反射した超音波を感知するが塩分濃度の観点ではどのような特徴に当てはまるのか考察する。図-4は満潮時に

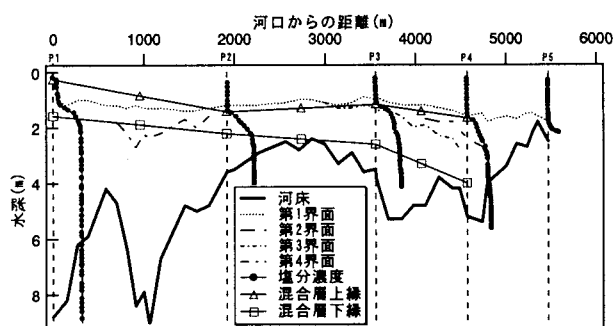


図-5 満潮時における塩水混合層の空間分布

におけるP4付近の音響測深器の反射信号と、多項目水質計によって得られた塩分濃度の鉛直分布を重ねたものである。浅い深さにある反射信号から反射信号1, 2…と名づけた。

音響測深器の反射信号の深さと、塩分濃度の分布の勾配が急変する面の深さはほぼ一致している。よってこの急変面を境に密度が変化しているものと言える。しかし反射信号が見られない深さにも界面が発生していることから、界面ごとにその上下の密度差が異なっており、超音波が反射されない界面があると考えられる。

(2) 塩水混合層の変化

海水と淡水の混合している層を塩水混合層としたとき、塩分濃度を基準としてその厚さの変化を考察する。図-5は満潮における塩水混合層の空間分布を示したものである。鉛直方向の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。また、音響測深器によって界面の位置が複数観測されたので、上流側から第1界面、第2界面…と名づけた。

混合層下縁が位置する深さには反射信号が見られないところが多い。特にP3、P4付近では塩分濃度の分布の変化も少ない。このことより海水と混合層の境界面では淡水による希釈がゆるやかに行われ、急激な密度の変化が無いと考えられる。

P1において音響測深機によって得られた第1界面の深さと、塩水混合層の上縁の深さにずれが生じていることがわかる。水深1m付近では分布勾配が急変しており、図-4と同様に反射信号がその面で反応していることがわかる。混合層上端付近において塩分濃度が増加しているが、その量は第1界面付近と比較すると少ない。そのため密度の変化も小さく、混合層上端では超音波の反射が起こらなかったと考えられる。

河口から上流1000m付近とP3付近において河床が深くなっており新たな界面が発生している。新たに界面が発生した深さに注目すると、界面は地形に沿って変化しており淡水より密度が大きい海水が河床を這うように進んでいる様子がわかる。塩水混合層に注目すると、上流に向かうにつれて厚くなりまた、P3付近の河床が深くなる

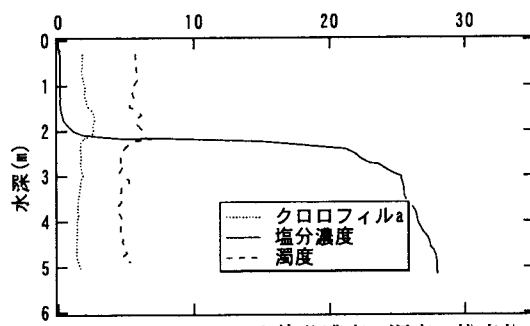


図-6 クロロフィルaと塩分濃度、濁度の鉛直分布

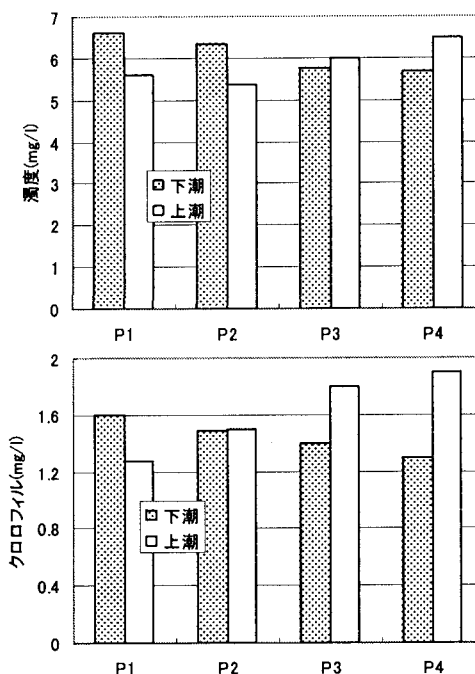


図-7 塩水混合層内の濁度とクロロフィルaの流下方向の変化

部分では海水層が薄くなっている。これは海水が浅瀬から深い所を通過するときが発生する流れの乱れによる流速の変化によって海水の希釈が進んだものと考えられる。

(3) 濁度、クロロフィルa

a) 塩水混合層内における特徴

図-6はP4の干潮時におけるクロロフィルaと塩分濃度、濁度の鉛直分布を示したものである。塩分濃度が急増する水深2m付近で濁度とクロロフィルaの値が増加していることがわかる。これは塩分濃度とともに密度も急激に増加するため浮力が大きくなり、浮遊物が沈降しにくくなるからと考えられる。これにより塩水混合層の上部を通過する浮遊物が少なくなり、混合層の下部において濁度の値が減少していると考えられる。

図-7は塩水混合層内における濁度とクロロフィルaの流下方向の変化を示した図である。示した値は図-5で定義した塩水混合層内における最大値である。

下潮時では下流に近づくに従って濁度、クロロフィルaの値が増加している。

これは浮力の増加によって塩水混合層上部に集積した

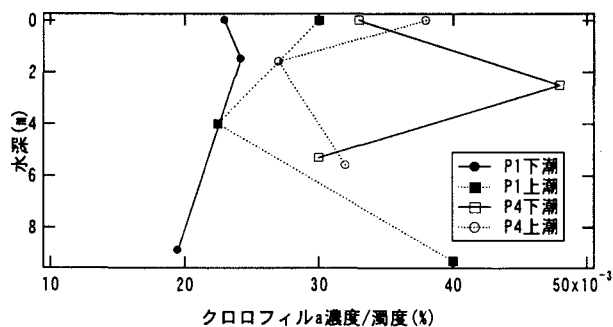


図-8 クロロフィルa濃度の濁度に占める割合の鉛直分布

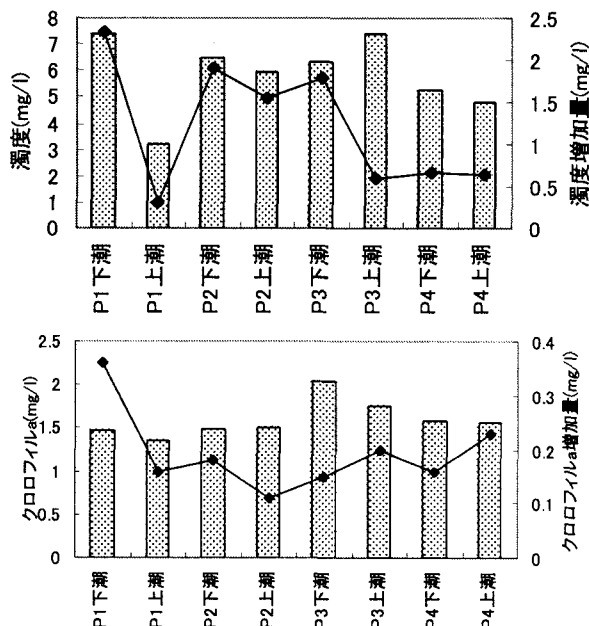


図-9 河床付近における濁度、クロロフィルa濃度 (棒グラフ) とその増加量 (折れ線グラフ)

上流の浮遊物が流下することで下流に累積し、濃度が高くなると考えられる。上潮時では流速が遅いため流下する浮遊物が少なくなる。これにより流下に伴って増加する浮遊物量よりも、塩水混合層の下部へ沈降する浮遊物量のほうが多くなり、下流に向かって濃度が低下すると考えられる。

図-8はクロロフィルa濃度の濁度に占める割合の鉛直分布を示している。浅い方から水面付近の値、塩水混合層内の最大値、河床付近の値を示している。下潮時において濁度に占めるクロロフィルaの濃度が増加している。これはクロロフィルaが河川起源であり、流下方向の流速が速い下潮時に集積しやすいものと考えられる。

b) 河床付近における特性

図-9は河床から20cm浅い深さにおける濁度、クロロフィルa濃度の値と、濁度、クロロフィルaの増加量を示したものである。濁度とクロロフィルaの増加量は河床から20cm浅い深さの値から塩水混合層下端の値を減じたものであり、巻き上げによって増加した値であると考えられる。塩水混合層下端は塩分濃度変化の90%にあたる深さの値を用いた。

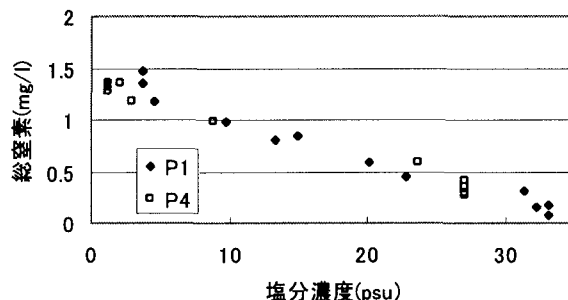


図-10 塩分濃度と総窒素の関係

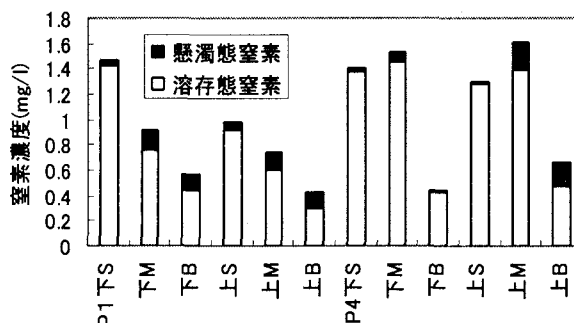


図-11 各水深における窒素の状態

上潮時よりも下潮時のほうが、濁度とクロロフィルaの増加量が多い観測点が見られる。これは下潮時の流速のほうが速いことから、巻き上げによって浮遊する堆積物量が増加するものと考えられる。

5. 分析結果

観測時に採水した試料を実験室で分析した結果を考察する。本研究で分析した項目は、栄養塩のうち総窒素、総リン、溶存態窒素(DTN), 溶存態リン(DTP)について分析した。溶存態窒素、溶存態リンの分析には、採水した試料を0.45 μ mのフィルターでろ過したものを用いた。機器によって計測することのできない懸濁態栄養塩は、総窒素から溶存態窒素、総リンから溶存態リンを減じたものとしそれぞれ懸濁態窒素(P_{TN}), 懸濁態リン(P_{TP})とした。

(1) 窒素

図-10はP1とP4における塩分濃度と総窒素の関係を表し、図-11はP1, P4の各水深における窒素の状態を表したものである。図-11中の下, 上の漢字は下潮, 上潮時のものであることを示し, S, M, Bのアルファベットはそれぞれ水面, 塩水混合層内, 河床付近のものであることを示している。

塩分濃度と総窒素の間には負の相関が見られ上流側にあるP4における窒素濃度が高いことから、窒素は河川からの供給に依存するところが大きいことがわかる。

塩水混合層内では濁度と同様に懸濁態窒素の濃度が増加しているが、総窒素に占める溶存態窒素の割合のほう

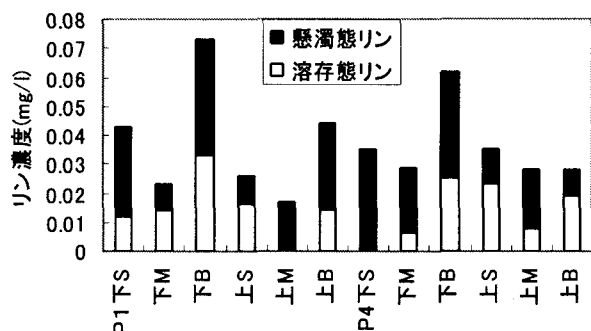


図-12 各水深におけるリンの状態

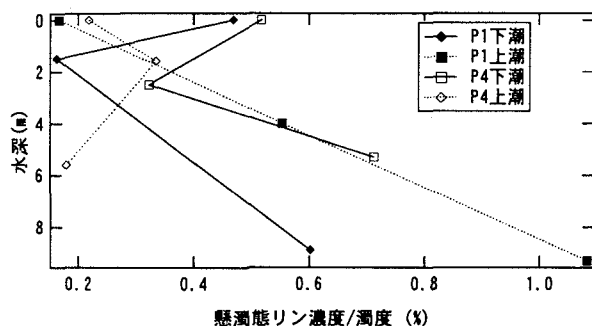


図-13 懸濁態リン濃度の濁度に占める割合の鉛直分布

が高く、平均で約80%であった。そのため河床付近において窒素濃度が低下するのは海水の混合によって溶存態窒素が希釈されるからであると考えられる。

(2) リン

図-12はP1とP4における下潮時と上潮時の各水深におけるリンの状態を示したものである。図中の記号は図-11のものと同じ意味である。

懸濁態リンが総リンに占める割合は平均60%となっており溶存態よりも多くを占めている。P1の河床付近で懸濁態リンの濃度が上昇している。これは巻き上げによって河床から再び浮遊したためと考えられる。P4の上潮時では懸濁態リン濃度が減少している。P4は塩水楔の先端に近いので、流速が遅く巻き上げが少ないためと考えられる。

図-13は懸濁態リン濃度の濁度に占める割合の鉛直分布を示している。浅いほうから水面付近、塩水混合層内、河床付近の値を示している。

塩水混合層内における懸濁態リンの濁度に占める割合は、下潮時には低くなっている。塩水混合層内でクロロフィル濃度が濁度に占める割合が増加することから、懸濁態リンが付着している粘土粒子の割合が減少するためと考えられる。

6. フロック形成実験

巻き上げによる浮遊物の増加が河床付近の懸濁態リンの濃度増加に影響を与えていると考えられることを受け

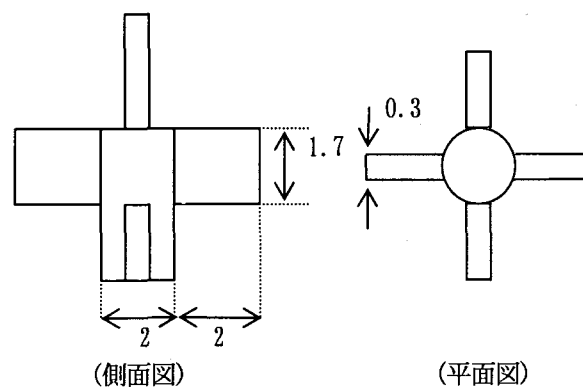


図-14 ジャーテスター(単位; cm)

て、観測時に採取した底泥を用いた実験を行い、浮遊物の濃度がフロックの形成に与える影響を調べた。今回の実験では浮遊物の成長、特に粒径の変化に注目して調べた。

(1) 実験方法

実験に先立って、底泥を24時間蒸留水に浸すことで塩分を取り除く処理を行った。今回実験で用いた底泥は最も高い塩分濃度を示したP1で採取したものである。その底泥を設定した濁質濃度になるように調整した懸濁液と塩水を混合し500mlとして所定の強度で攪拌してフロックを形成させた。攪拌に用いたジャーテスターは2cm×1.7cm×0.3cmの平板攪拌翼4枚を回転させるもので、その寸法を図-14に示す。実験条件は塩分濃度を30mg/l、試料中に含まれる浮遊物の濃度(以下濁質濃度と呼ぶ)を40mg/l、200mg/lとした。塩分濃度は底泥を採取した場所の値、濁質濃度は平水時、出水時の値を参考としている。実験試料は攪拌開始後、所定時間ごとにスポイトで採取してシャーレに取り完全に沈降させた後、カメラを取り付けた顕微鏡にてフロックの画像を撮影する。この画像から個々のフロックの球相当径を求めた。

(2) 実験結果と考察

濁質濃度40mg/l、200mg/lの粒径加積曲線を図-15に示す。縦軸は粒径がこれより小さいフロックの体積の全体積に対する割合である。図-16はそれぞれの条件におけるフロックの中央粒径の時間変化を表したものである。粒度分布の変化を見ると、濁質濃度40mg/lでは、攪拌開始120分以降では150μm以上の粒径が全体に占める割合の変化が無いことがわかる。中央粒径の変化を見ると、攪拌開始180分後の粒径にはあまり違いが見られない。山下ら⁴⁾が行った河川表層から採取した試料を用いた実験では、中央粒径は濁質濃度が小さい程大きくなる結果となっている。山下らの実験試料は洪水時に採取され、平水時よりも鉱物質が含まれる割合が大きいことが指摘されている。この違いによってフロックの成長に差が生まれたものと考えられる。

図-17は経過時間t=40、180分のときの粒径分布である。

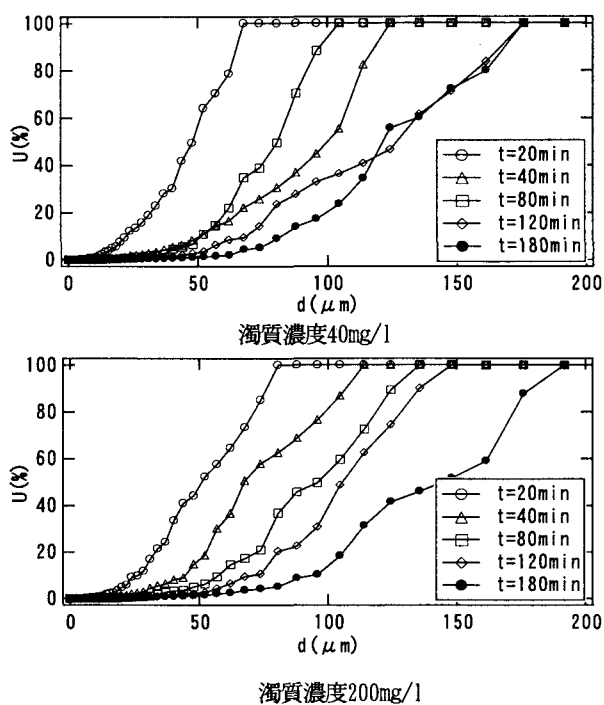


図-15 粒径加積曲線の時間変化

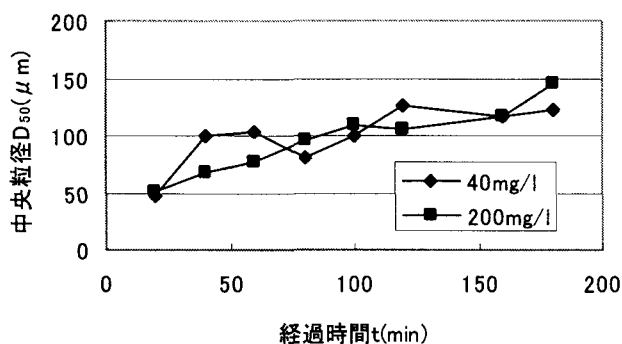


図-16 中央粒径の時間変化

どちらの条件においても40分経過時に見られなかった $200\mu\text{m}$ 付近の粒径のフロックが増加している。濁質濃度 200mg/l の粒径分布に注目すると $50\sim 70\mu\text{m}$ の粒径が減少し、 $150\mu\text{m}$ 以上の粒径のフロックが増加している様子ははっきりとわかる。濁質濃度 40mg/l では $120\mu\text{m}$ 付近の頻度が減少している。

7. 結論

阿武隈川河口域における観測の結果、河床の地形が変化しているところでは塩水混合層の厚みや塩分濃度分布が変化しやすいことがわかった。濁度とクロロフィルaは河床付近では巻き上げによって濃度が増加し、塩水混合層内ではその上端付近に集積し、下流に向かって濃度が増加することがわかった。栄養塩では、窒素は溶存態

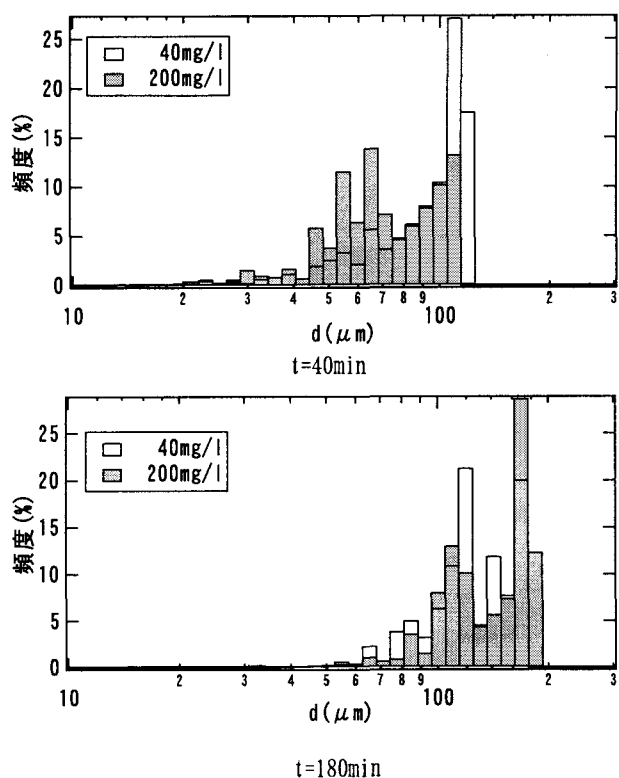


図-17 フロックの粒径分布の時間変化

として多く存在し海水の混合によって希釈され、リンは懸濁態として多く存在し、河床付近では巻き上げによって増加し、塩水混合層内ではクロロフィルaの増加によって濁度に占める割合が減少することがわかった。

採取した底泥を用いたフロックの形成実験によって、濁質濃度によってフロックの成長速度に違いが見られるが成長後の中央粒径においては濁質濃度による違いが見られないことがわかり、粒径分布の変化では濁質濃度が変化するとフロック化により減少する粒径も変化することがわかった。

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：塩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) 山下俊彦，森田真郷，杉原幸樹，斉藤大作，山崎真一：石狩川河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集過程に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.1016-1020，2002。

(2003.9.30受付)