

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

山下俊彦*・森田真郷**・杉原幸樹***
斎藤大作****・山崎真一*****

河川から供給される細粒成分は、河川淡水中では負に帯電し互いに反発し合い浮遊しているが、感潮域では海水混合による凝集現象が起きフロックを形成する。本研究では、水中顕微鏡を用いた現地観測や現地試料を用いた凝集実験を通して、自然の状態に近い形での現象の把握を試みた。現地観測と水中画像解析により、塩淡水境界以深では懸濁物質が凝集しフロックを形成していることが確認された。また、室内凝集実験においては凝集過程に石狩川現地試料特有の傾向が見られ、濁質濃度と攪拌強度の両因子の積の値からある程度最終凝集粒径を推定できること、また塩化ナトリウム水溶液よりも実海水のほうが凝集が活発に進むことがわかった。

1. はじめに

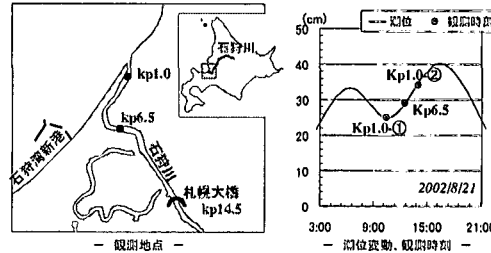
河川から海域へは粗粒土砂に加えて大量の微細土砂が懸濁粒子として流出する。この細粒成分は窒素・リン等の栄養塩類を多く含有し、人工的有害イオンを吸着することもあり、感潮域や沿岸域の水質・底質・生態環境に大きく影響を与えている。この懸濁粒子は河川水中では一般的に負に帯電しているため、互いに反発し合い凝集しないが、河口で海水と混合すると陽イオンにより電荷を失い、フロックを形成して海底に沈降しやすくなる。開放性海域では、河川から流出する物質のうち溶解性成分は沿岸域の流動によって、河口域から容易に移流させられてしまうが、このフロックは比較的河口近くに長期間存在するため、河口沿岸域環境への影響は大きいと考えられる。このような問題を解決するためには、感潮域や沿岸域での懸濁粒子の挙動を把握し、凝集、沈降過程を把握する必要がある。

懸濁粒子の凝集、沈降過程の研究については、懸濁粒子のモデルにベントナイトを用いた小田ら (1999) の実験等が報告されているが、現地の懸濁粒子の凝集過程に関する研究はほとんど実施されていない。そこで本研究では、石狩川を対象として、まず水中顕微鏡を用いた現地観測により、感潮域での懸濁粒子の凝集特性を把握する。次に洪水時の大量採水により実際の懸濁粒子を採取し、その懸濁物を用いた系統実験により凝集特性を明らかにし、現地観測の結果と比較検討する。

2. 観測・実験方法

2.1 観測地点と方法

今回調査対象とした石狩川は、北海道の大雪山系・石狩岳 (標高 1,967 m) に源を発し、大小 70 余りの支川を合わせて日本海に注ぐ大河川である。河道長は 268 km、



図一 観測概要

流域面積は 14,330 km² で北海道全体の 6 分の 1 の面積に相当する。流域には札幌市をはじめ全道人口の半分以上にあたる約 300 万人が生活し、流域に形成された広大な石狩平野は、北海道の稲作農業の中核地帯である。

2001 年 8 月 21 日の大潮時に河口から 1 km (kp1.0) 地点で 2 回、6.5 km (kp6.5) 地点で 1 回の計 3 回の現地観測を実施した (図一)。観測方法は船上から各地点 5 水深で、水中顕微鏡 (SM-201) を用いて水中画像を撮影し、懸濁粒子の凝集画像を取得した。また、同水深にて採水を行い SS 濃度を分析した。同時に、水質計による水深、濁度、水温、塩分の鉛直分布測定と ADCP による流速、反射強度の測定を行った。

なお、現地の粒径は撮影された水中画像を画像解析ソフト (Image Pro Plus) を用いて個々の粒子の面積を求め、その面積と等しい円の直径 (円相当径) を算出し、これに変換係数 0.965 を乗じることにより球相当径を求めた。代表粒径としては 1 ケース 100~200 個の粒径を調べ、粒径加積曲線より中央粒径 d_{50} を求めた。

2.2 実験装置と方法

2001 年 7 月 24 日 12:00~14:30 の洪水ピーク時 (約 2000 m³/s) に kp14.5 の札幌大橋から 2 m³ の河川表面水を採水し、実験試料として用いる懸濁粒子を採取した。実験方法は、小田ら (1999) とほぼ同じで、図二に示すような 2 枚の平板翼を持つ攪拌装置とピーカー (内容量 500 ml) を使用して、以下に示す方法で設定した攪拌強度 g (1/s)、懸濁粒子濃度 SS (mg/l)、塩分濃度 c (psu) と攪

* 正会員 工博 北海道大学助教授 大学院工学研究科
** 北海道大学大学院工学研究科
*** 理修 (株) 福田水文センター
**** 正会員 工修 北海道開発局石狩川開発建設部
***** 正会員 工修 (独法) 北海道開発土木研究所

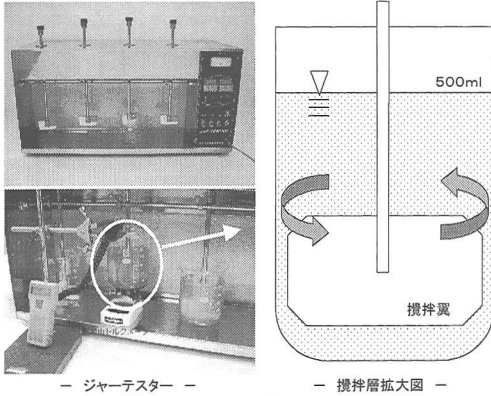


図-2 実験装置

表-1 実験パラメーター

濁質濃度 SS(mg/l)	25 100 200 300
塩分濃度 c (l/s)	NaCl 溶液 : 5 20 32 塩水 : 33.3
攪拌強度 g (l/s)	25 50 100
攪拌時間 t (min)	0 10 30 60 120 180

拌時間 t (min) の4つの実験パラメーター(表-1)による計48ケースの系統的な凝集実験を実施し、ブロック粒径の測定を行った。なお、実験室の温度は20℃の恒温条件である。

ビーカーを微小トルクメーターの上に載せて攪拌時のトルク T_r を計測するとともに、光学式タコメーターを用いて攪拌翼の回転速度を測定し、(1)式、(2)式によって攪拌強度 G を算定した。攪拌強度は(1)式によって定義されるが、式中の ϵ_0 は今回の試験のようにビーカーの中で比較的小さな平板翼を回転させて攪拌する

ジャーテストでは、(2)式のように流体の攪拌するトルクを液体の体積で割って平均化して取り扱う。

$$G = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \quad \text{.....(1)}$$

ここに、 G : 攪拌強度(1/s), ϵ_0 : 流体の単位体積、単位時間当たりのエネルギー消費量($\text{N} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3 \cdot \text{s}$), μ : 流体の粘性係数($\text{N} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$)である。

$$\epsilon_0 = \frac{2\pi f T_r}{V} \quad \text{.....(2)}$$

ここに、 T_r : 攪拌に要するトルク($\text{N} \cdot \text{cm}$), f : 攪拌翼の回転速度(s^{-1}), V : 流体の体積(cm^3)である。

実験試料は、現地採水後、沈殿させ上澄みを捨てて沈殿物溶液として約2℃で保存した。原水懸濁物濃度を予め分析した実験試料を脱イオン水で希釈して所定の濁質濃度に設定した。また、実験に用いた塩水は脱イオン水に塩化ナトリウムを溶解させて調整したものと、石狩湾で直接採取し孔径0.45 μm のGFPで濾過した海水を用いた。

攪拌開始から所定の時間毎にスポイトで採水し、これをプレパラート上に滴下してCCDカメラをつけた顕微鏡にてブロック画像を撮影する。現地調査と同様に個々のブロックの球相当径を求めた。1ケースあたりの解析するブロックの数は500個とし、粒径加積曲線、中央粒径を求めた。

3. 凝集画像

写真-1,2は各々凝集実験前と後の顕微鏡写真、写真-3,4は現地の塩水楔海水水中の水中顕微鏡写真である。写真-1の洪水水中懸濁物質(中央粒径 $d_{50} = 17.5 \mu\text{m}$: 画像解析による)には、種々の粒径や物質が存在するが、大きめの粒子は鉱物質の細粒土砂である。写真-2は

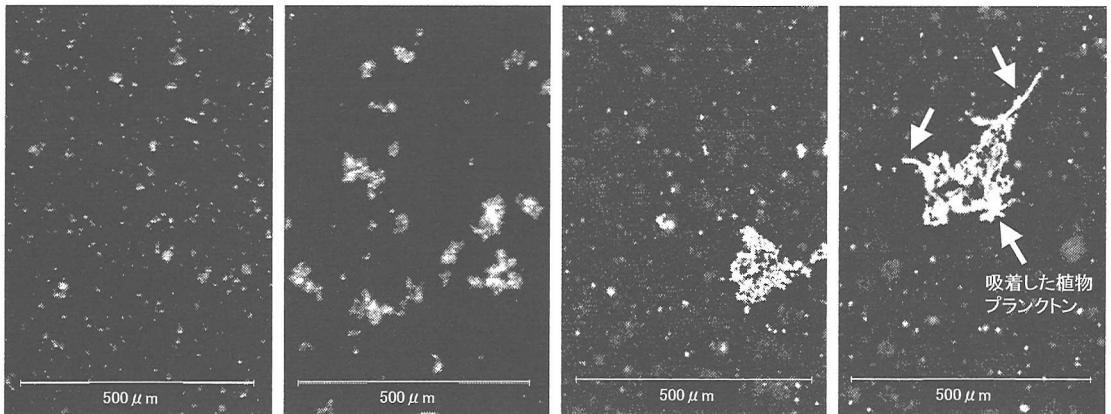


写真-1 実験試料
(凝集前)

写真-2 実験試料
(凝集後)

写真-3 現地水中画像

写真-4 現地水中画像
(デトリタス)

(SS, c , g , t)=(300, 32, 25, 180) の場合であり、微細粒子が減少し $45\mu\text{m}$ 程度のほぼ同じ大きさに凝集していることがわかる。写真-3は日時は異なるが現地 (kp 6.5, 水深 8.5 m) の凝集状態であり、写真-2とは異なり微細粒子もある程度存在する一方、大きな凝集も存在し粒度分布が広がっている。これは、現地の懸濁粒子は凝集・沈降・再浮上を繰り返したものであることが一つの要因と考えられる。

また、実験とは異なり平水時の河川水中には多くの植物プランクトンなどの有機物が存在し、凝集する際にはこれも共に凝集するため、写真-4(kp 6.5, 水深 4.0 m) のようにデトリタスを含んでブロックを形成していることが多く、現地観測でもよく見られた形態のブロックである。今回の現地画像解析処理においては、これらを省いて凝集過程について考察、比較する。しかし、これらのデトリタスを含むブロックはかなり大きな凝集を形成し、比較的よく見られることから、今後検討していく必要がある。

4. 現地観測結果

図-3に kp 1.0, kp 6.5 の現地観測結果を示す。水質計による塩分濃度の鉛直分布を見ると両者とも水深 3 m 付近で淡水層と塩水層のはっきりした境界層が確認でき、シャープな塩水楔が形成されている事がわかる。ADCP による流速は淡水層の流速が約 50 cm/s, 海水層の流速が約 10 cm/s 程度である。

また、濁度 T_b (ppm) について見ると淡水層で高くほぼ一定で、塩淡水界面で急激に減少し、底層付近で急増している。しかし、採水による SS 濃度は淡水層で濁度が高いにもかかわらず大きくなっていない。この様に濁度と SS 濃度の変化に差異が生じる要因は、淡水層では微細粒子として浮遊していた懸濁粒子が、塩水層では凝集してブロックを形成しているためと考えられる。

横山 (2002) によると、赤外光濁度計では $1\mu\text{m}$ 以上の粒子については、ミーの散乱理論式 (3) に従い、濁度 T_b は濃度 SS と粒子比表面積に比例する。

$$T_b = \alpha \left(\frac{1}{d_{50}} \right)^n SS \dots \dots \dots (3)$$

ここで α と n は補正係数である。式 (3) の両対数をとって、実験データより最小自乗法で求めた各々の値は $n=1.0$, $\alpha=0.006$ と報告している。

図-4に、水中顕微鏡を用いた現地観測結果の画像解析処理から求めた d_{50} と T_b/SS の関係を示す。○印が淡水層のデータ、●印が塩水層のデータである。淡水層では懸濁粒子が個々に浮遊しているため、 d_{50} が約 $12\mu\text{m}$ と小さく、塩水層では凝集してブロックを形成しているため d_{50} が $20\sim 34\mu\text{m}$ と大きくなっていることが確認でき

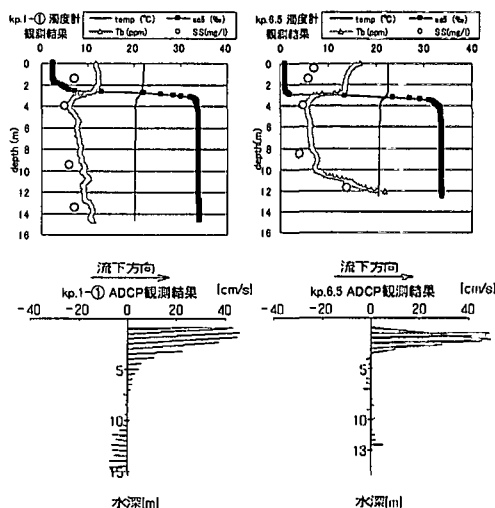


図-3 観測結果

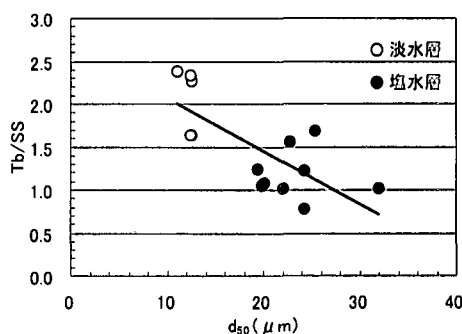


図-4 $T_b/SS-d_{50}$

る。また、ばらつきはかなりあるが、 d_{50} が小さい程、 T_b/SS が大きいという一定の関係があることがわかる。式 (3) の両対数をとって、最小自乗法より n を求めると $n=0.75$ であった。粒子形状が球であれば $n=1$ である。横山 (2002) の結果によると、粒度分布があり、形状が球ではない通常の砂でも $n=1$ がほぼ成立する。今回の結果は 0.75 で 1 より小さい値である。これはブロックが小さい粒子の集合体であり、表面積が単一粒子よりも大きいことが重要な要因と推察される。

ここで、画像解析で求めた d_{50} の精度について述べる。現地のブロック形成状態での粒度分析が室内では難しいため、塩水層ではなく淡水層のサンプルを用いて検討した。淡水層のサンプルの画像解析結果では $d_{50}=11\sim 13\mu\text{m}$ であり、レーザー粒度解析器 (SALD 3000) で求めた $d_{50}=7.5\sim 11.1\mu\text{m}$ より少し大きめであるが両者は近い値であった。本研究では、 d_{50} は画像解析で得られた結果を用いることにした。

5. 実験結果

5.1 フロック形成過程

図-5 に塩分濃度 $c=20$ (psu), 攪拌強度 $g=50$ (1/s) の凝集実験の結果の例を示す。中央粒径 d_{50} は、実験開始後 30 分程度まで増加し、60 分程度でほぼ一定の最終粒径 d_{∞} (実験開始後 180 分) に達することがわかる。この傾向は、後述のような強攪拌強度、高濁質濃度のケース以外では、ほぼ同様であった。この図より、最終粒径 d_{∞} は濁質濃度が小さい程大きいことがわかる。

図-6 に、全試験結果を用いた濁質濃度 SS と最終粒径 d_{∞} の関係を示す。図中には各濁質濃度に対する d_{∞} の最大値、平均値、最小値をプロットしている。この図からも SS が増加すると最終粒径 d_{∞} は小さくなることがわかる。

図-7 に、塩分濃度 $c=5$ (psu), 濁質濃度 $SS=300$ (mg/l) の結果を示す。この図より、最終粒径 d_{∞} は攪拌強度が大きいほど小さくなる傾向があることがわかる。また、このケースのように濁質濃度が 300 (mg/l) と高く、攪拌強度が増加すると、攪拌開始から早い時間で d_{50} は一度ピークをとり、その後 d_{50} が減少している傾向が見られた。単一の粘土鉱物の凝集では、 d_{50} は一様に増加するのが一般的であり、 d_{50} が低下していく減少は考えにくい。これは、試料が実河川から採取されたものであることから、凝集速度の異なる成分が混在していることが 1 つの原因と考えられる。

図-8 に、全試験結果を用いた攪拌強度 g と d_{∞} の関係を示す。図中のプロットは、各攪拌強度に対する d_{∞} の最大値、平均値、最小値である。この図からも攪拌強度が

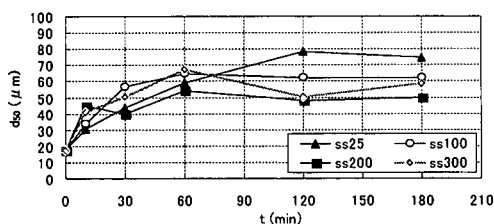


図-5 凝集実験： $c=20$ (psu), $g=50$ (1/s)

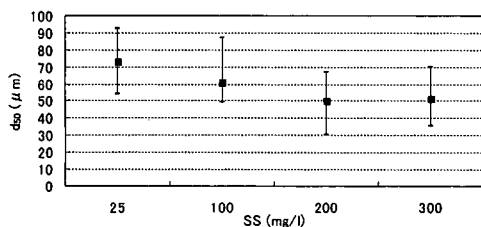


図-6 中央粒径 d_{50} - 濁質濃度 SS

大きくなると d_{∞} が小さくなることがわかる。

図-9 に全試験結果を用いた塩分濃度 c (海水 sw を含む) と d_{∞} の関係を示す。ベントナイトを用いた小田ら (1999) の実験等では、塩分濃度 c の増加により d_{∞} も増加すると報告されているが、 d_{∞} は塩分濃度 c によってあまり変化しない、あるいは塩分濃度の増加に伴い少し減少している。これは、実験試料として用いた粘土鉱物粒子の性質、成分の違いが影響していると考えられる。塩沢 (1969) によれば石狩川から流出する粘土鉱物の構成成分は Chlorite $\gg$ Illite $>$ Montmorillonite であり、Montmorillonite が塩分量の増加に伴って凝集が進むのに対して、主成分である Chlorite は塩分量 2% 以上でほとんど平衡状態に達するという性質があることを報告しており、実験の結果と一致することがわかる。

また、塩化ナトリウム水溶液と実海水を比較すると、実海水のほうが Na^+ イオン以外にも多価の陽イオンがあるためか d_{50} が大きくなっていることがわかる。

5.2 最終凝集粒径

前述の様に、最終粒径 d_{∞} は塩水と海水による違いはあるものの塩分濃度 c による影響はほとんど受けず、濁

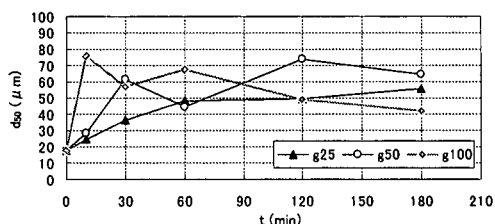


図-7 凝集実験： $c=5$ (psu), $SS=300$ (mg/l)

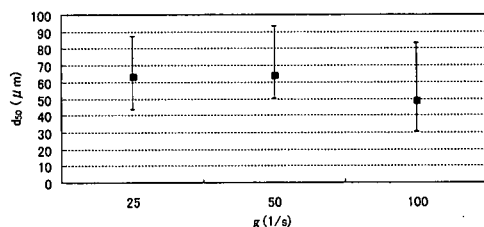


図-8 中央粒径 d_{50} - 攪拌強度 g

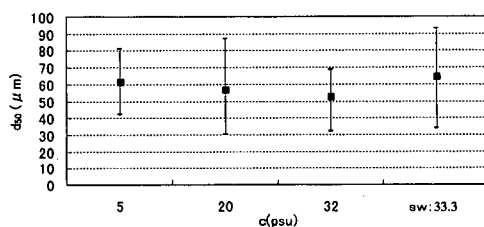


図-9 中央粒径 d_{50} - 塩分濃度 c

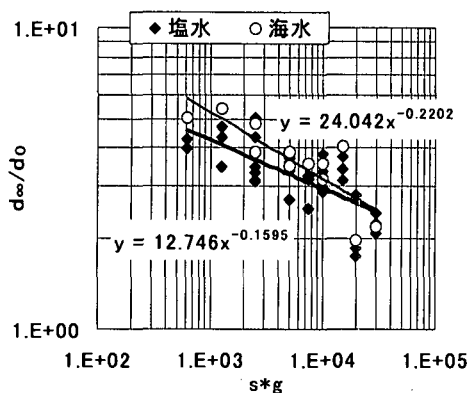


図-10 最終粒径推定

質濃度 SS と攪拌強度 g に反比例することがわかった。そこで、図-10 に最終粒径 d_∞ を濁質濃度と攪拌強度の積で整理したものを示す。これを見ると、 d_∞ と d_0 (凝集前) の比は濁質濃度と攪拌強度の積が大きいくほど小さく、両者の積の値からある程度、最終凝集粒径を推定できることがわかる。また、実海水の場合の方が d_∞/d_0 が大きく凝集が活発であることもわかる。なお、画像解析より求めた d_{50} は、粒径が小さいものの方が実際より少し大きく測定される傾向にあったが、本研究では補正は行わず画像解析より得られた値をそのまま使用した。

実験結果と図-4 の現地結果を比較する。現地の d_∞/d_0 は 1.5~2.5 の範囲であり、現地観測時の上層の淡水の濁質濃度は 10 (mg/l) 程度であった。現地では、懸濁粒子が凝集、沈降、再浮上の過程を繰り返したものであること、また、攪拌強度が不明等の理由で両者を直接比較することは現時点では困難である。しかし、現地の d_∞/d_0 の

値は、今回の実験条件範囲では最低値に近く、濁質濃度 300 (mg/l)、攪拌強度 100 (1/s) の条件とほぼ同じ値であった。

6. まとめ

現地調査において、塩淡水境界以深で濁度が急激に減少している割に、 SS 濃度の変化は見られなかった。この要因として懸濁物質が凝集しブロックを形成していることが考えられた。実際、ブロック径 d_{50} が大きいほど、濁度/ SS が小さいというほぼ一定の関係があることがわかった。

凝集実験では、実験開始後 30 分程度まではブロック径が増加し 60 分程度ではほぼ一定に達した。最終凝集径 d_∞ に関しては、塩分濃度による影響はあまり無く、これは、石狩川の粘土鉱物の主成分が比較的低塩分濃度で凝集平衡状態になる Chlorite の性質によると考えられた。

石狩川河川水中の懸濁物質の最終凝集径 d_∞ は、濁質濃度と攪拌強度の両因子の積の値からある程度、推定できることがわかった。また、塩化ナトリウム水溶液と実海水による凝集径を比較すると、実海水のほうが Na^+ イオン以外にも多価の陽イオンがあるため大きく、凝集が活発に進むことがわかった。

参考文献

- 小田一紀, 宋 元平, 芝村 圭, 農本 充 (1999): 塩水中における微細粒子の凝集・沈降過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻 pp. 981-985
- 塩沢孝之 (1969): 石狩湾堆積物中の粘土鉱物組成, 第 4 期研究, 第 8 巻, 第 3 号 pp. 81-88
- 横山勝英 (2002): 濁度の粒径依存特性と現地使用法に関する考察, 土木学会論文集 No. 698/II-58, 93-98