

河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集・沈降特性

山崎 真一*・森田 真郷**・山下 俊彦***

河川から海域へは粗粒土砂に加え微細土砂が懸濁物質として流出し、塩分と混合することによりフロックを形成し沿岸域に沈降する。この懸濁粒子は、窒素、リン等の栄養塩を含有し沿岸域の生態環境に大きな影響を与えている。本研究では、北海道の三河川を対象とし、水中顕微鏡を用い感潮域の懸濁粒子の凝集過程を把握すると共に、洪水時に河川の懸濁粒子を採取し系統実験及び物質特性を調査し凝集・沈降特性を考察した。その結果、河川が同一でも採取した洪水毎に懸濁物質の凝集特性に違いがあること、塩分濃度に対しては、粘土鉱物、有機物の含有量が影響していること、フロックの沈降速度は粒径の 0.6~0.82 乗に比例することなどがわかった。

1. はじめに

河川水中の懸濁粒子は、一般的に負に帯電しており互いに反発し凝集しないが、海域においては陽イオンによって電荷を失い凝集し単一粒子に比べ早く沈降する。このため、洪水後においては、河口周辺の沿岸域には懸濁物質が凝集した細粒成分が多く堆積する。この微細土砂は、窒素、リン等の栄養塩を多く含有し感潮域、沿岸域の生態環境に大きな影響を与えている。これらの微細土砂の海域における移動特性を把握するためには、その基礎的な資料となる凝集・沈降特性を明らかにすることが必要である。しかし、現地の懸濁粒子を用いた凝集・沈降過程の研究は多くなされていない現状にあり、また河川毎に特性が異なると考えられることから、本研究では北海道の代表的な河川である石狩川、尻別川、鵠川を対象として調査を実施した。まず、石狩川、尻別川において水中顕微鏡を用いた現地観測を実施し感潮域における懸濁粒子の凝集過程を把握し、次に三河川で洪水時に実際の懸濁粒子を採取し系統実験、さらに採取した懸濁粒子の物質特性を調べ凝集・沈降特性を考察した。

2. 観測・実験方法

(1) 調査対象河川の概要

調査は北海道の 1 級河川である石狩川、尻別川、鵠川で実施した。石狩川は日本海に注ぐ幹川流路延長 268 km, 流域面積 14,330 km²の日本を代表する河川で、流域には札幌市をはじめ全道人口の半分以上に当たる約 300 万人が生活し、流域に広がる石狩平野は北海道の稲作の中心地帯である。尻別川は、日本海に注ぐ幹川流路延長 126 km, 流域面積 1,640 km²の河川で、流域は羊蹄山等からの火山噴出物で占められ台地を形成し、主要な産業は農業で馬鈴薯、アスパラなどの畑作が盛んである。鵠川は、太平洋苦小牧沿岸に注ぐ幹川流路延長 135 km, 流域面積

1,270 km²の河川で流域形状は細長く流域面積の 91%が森林で占められ沖積平野はほとんどない。このように、それぞれの河川は流域規模、土地利用などが異なり洪水時に流出する懸濁物質の性質にも違いが生じると考えられる。

(2) 凝集過程の現地調査

現地調査は 2001 年 7 月及び 8 月の大潮時に、石狩川及び尻別川で実施した。観測は、水中顕微鏡 (SM-201: 生物流体力学研究所製) を用いて水中で懸濁物質の凝集画像を取得し、画像解析ソフトを用いて現地における凝集径を算出した。同時に採水による SS 濃度の分析、水質計による濁度、水温、塩分濃度の観測を行った。

(3) 懸濁物質の採取及び実験・分析

2001 年夏季に三河川で洪水時の懸濁物質を採取し、懸濁物質の栄養塩含有量、粘土鉱物の分析、凝集・沈降実験などを実施した。各河川で試料を採取した地点、日時、河川流量を表-1 に示す。それぞれの河川で、洪水のピーク流量付近で河川水を流心の水面付近で深井戸用のポンプを用いて約 1 m³採取した。試験・分析に用いる試料は、採取した河川水を約 1 週間冷所に静置し懸濁物質を沈降させ上水を除去した沈降物を用いた。沈降物を粒径毎に分画し、リン、窒素の形態別含有量、強熱減量等を分析した。細粒分画試料については塩沢ら (1969) の方法を参照し X 線回折により粘土鉱物を分析した。

凝集実験は 2 枚の平板翼を持つ攪拌装置とビーカー (内容量 500 ml) を使用し、表-2 に示す攪拌強度 G (1/s)、懸濁物質濃度 SS (mg/l)、塩分濃度 c (psu) と攪拌時間 t (min) の 4 つの実験条件により実施した。凝集実

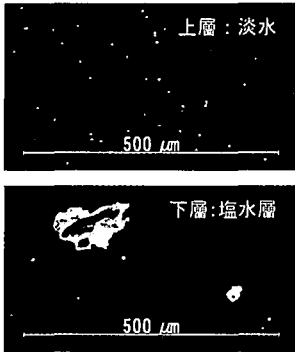
表-1 採取試料

河川名	試料名	試料採取地点	採取日	採取時の最大流量 (m ³ /s)	流量観測地点
石狩川	7/24 石狩川 SS	札幌大橋	7月24日	1,970	石狩大橋
	9/12 石狩川 SS		9月12日	6,600	
尻別川	8/23 尻別川 SS	宝橋	8月23日	200	名駒
	9/11 尻別川 SS		9月11日	570	
鵠川	8/23 鵠川 SS	鵠川橋	8月23日	540	鵠川橋

* 正会員 工修 (独法)北海道開発土木研究所河川研究室 副室長
** 工修 (株)石川島播磨重工業
*** 正会員 工博 北海道大学助教授大学院工学研究科環境資源工学専攻

表一 凝集実験パラメータ

濁質濃度	SS (mg/l)	25, 100, 200, 300
塩分濃度	c (psu)	NaCl 溶液 : 5, 20, 32 海水 : 33.3
攪拌強度	G (1/s)	20, 50, 100
攪拌時間	t (min)	0, 10, 30, 60, 120, 180



写真一 尻別川で撮影したフロック

験の詳細については前報（山下ら，2002）に示したものと同様である。

沈降実験は凝集させた試料を凝集時の塩分濃度の溶液中に滴下し，沈降物を1秒毎に撮影し画像解析ソフトにより沈降物の粒径と沈降速度を測定した。

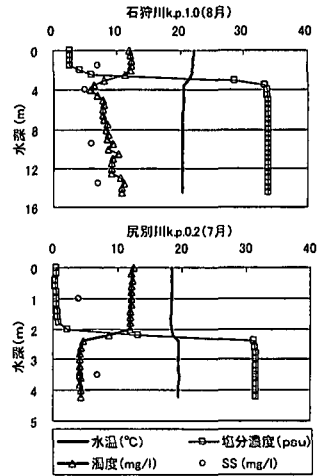
3. 現地凝集調査

写真一に一例として尻別川の感潮域における懸濁物質の写真を示すが，塩分の含まれる下層において，懸濁粒子が凝集していることが分る。石狩川及び尻別川の調査結果を図一に示す。粒子の性質，粒径が同様であれば濁度とSS濃度には良い相関が得られるが，調査結果からは，SS濃度と濁度には変動傾向に違いが見られた。この原因は，濁質が凝集することによって粒子が大きくなったことが考えられる。ミーの散乱理論式によれば，濁度 T_b はSS濃度と粒子比表面積に比例し中央粒径 d_{50} ，係数 n ， α により式（1）のように表現され，粒子形状が球であれば係数 $n=1$ となる。

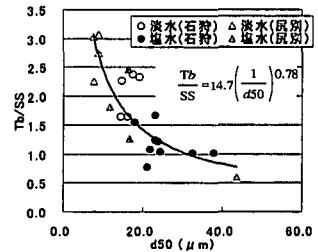
$$T_b = \alpha \left(\frac{1}{d_{50}} \right)^n SS \dots \dots \dots (1)$$

図二に T_b/SS と d_{50} の関係を示すが，式（1）に当てはめると $n=0.78$ ， $\alpha=14.7$ となった。 n が1以下の値を示したのは，フ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要因と考えられる。

図に示すとおり石狩川・尻別川においては，河川のフロック径は濁度とSS濃度を把握することにより概ね推定できることが示された。



図一 現地観測結果



図二 T_b/SS と d_{50} の関係

4. 河川の懸濁粒子の性質

X線回折により分析した粘土成分の比率を図三に示す。鶴川ではChlorite, Illite, Montmorilloniteの3種類の粘土鉱物が同程度，石狩川と尻別川はChloriteが多いことがわかった。Chloriteは塩分濃度が2%以上ではほとんどが凝集し平衡状態に達するといわれており，各河川の懸濁粒子の凝集特性にもこの特徴が現れている。石狩川では2回の出水でIllite及びMontmorilloniteの含有率が異なる。この原因としては，石狩川は流域面積が大きく，また土壌・土地利用も多様であることから，空間的に降雨域が異なれば流出する懸濁物質にも変化が生じたことが考えられる。石狩川の2回の出水の特徴は，7月洪水は上流域中心の降雨で，9月洪水は流域に平均的な降雨であった。

田中（1994）の論文を参考に懸濁粒子中のリンの形態別含有量の分析を実施した（山崎ら，2003）。分析結果を図四に示すが，懸濁物質のリン含有量は尻別川が他の河川に比べ大きく有機態リンの比率も高い。有機態リンが多いということは懸濁物質中の有機物量が多いことを示している。図示はしていないが，強熱減量は尻別川>

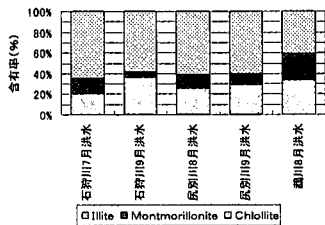


図-3 懸濁物質の粘土成分

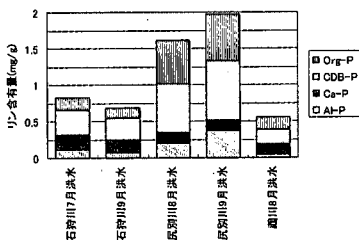


図-4 懸濁物質中の形態別リン含有量

石狩川>鶴川の順で、有機物の含有量もこの関係に従うものと考えられる。尻別川流域の台地部を覆う黒色火山性土（クロボク土）は一般にリン酸吸収係数が高くリンを保持しやすい特性があり、流域が畑作地帯であること

から施肥によってリン含有量が高くなっているものと考えられる。鶴川の懸濁物質のリン含有量は尻別川、石狩川に比べ低く、また有機物の含有量も多くない。鶴川流域は森林面積が多く褐色森林土に覆われている。森林土壌に関する調査では褐色森林土のリン含有量が他の森林土壌に比べ低く（河田，1989）、鶴川流域についても同様の性質を表したと考えられる。一方、鶴川は、洪水時の懸濁物質濃度は高く、洪水時のSS濃度は4,000 mg/lに達する。

5. 凝集・沈降実験

(1) 凝集実験

図-5に凝集実験の結果を示す。石狩川では7月洪水の試料が9月洪水の試料に比べ凝集比（最終中位径/初期中位径）が高い結果となった。また、凝集比は2試料共に濁質濃度が高いほど凝集比は低下する傾向を示した。攪拌強度に対しては攪拌強度 $G=25$ (1/s) 及び $G=50$ (1/s) で凝集比はほぼ同じで、 $G=100$ (1/s) で少し小さめである。今回の実験では、攪拌時間 $t=180$ (分) としたが、 $G=25$ (1/s) の場合には180分で粒径が最大値をとっているケースが多く、最終粒径に達するまでの凝集時間が不足している可能性があったことを示している。一方、塩分濃度に対しては、2試料共にほぼ同じ値

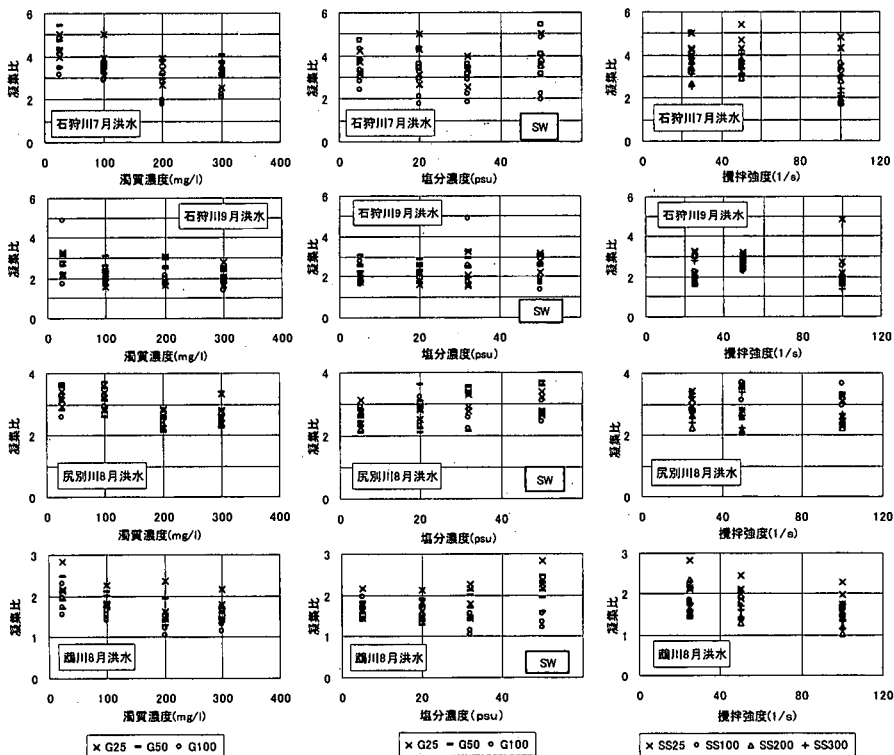


図-5 凝集実験結果

を示しており、Chlomiteの性質が反映しているものと考えられる。尻別川の試料については、8月洪水の結果のみを示しているが、濁質濃度、攪拌強度の条件に対しては石狩川と同様の特徴を示した。塩分濃度に関しては、8月の試料で濃度が上昇すると凝集比が上昇する傾向がみられたが、9月の試料では殆ど傾向はみられなかった。鶴川の試料は、凝集比は他の河川に比べ低いが、濁質濃度が上昇すると凝集比が低下するのは他の河川と同様であった。攪拌強度と最終粒径の関係については、鶴川では実験条件内では直線的に低下する結果となった。

各河川共に懸濁物質濃度・攪拌強度が大きいほど凝集比が高い傾向が見られたが、その程度は小田ら(1999)がベントナイトで実施した比率に比べて小さなものであった。塩分濃度に対しては、石狩川の試料及び尻別川9月洪水の試料では殆ど凝集比に傾向がみられないが、尻別川8月洪水試料では、塩分濃度が上昇するに従いやや、凝集比が上昇した。また鶴川では逆に塩分濃度が上昇するに従い凝集比が低下する傾向がみられた。小田ら(2002)がベントナイト等で行った実験では、同一の懸濁物質でも有機物の吸着の有無により塩分濃度に対する凝集径の傾向が異なることが指摘されている。有機物含有量は尻別川が特に大きく、逆に鶴川が小さく小田らの傾向と類似した結果となった。

各河川の凝集比を、傾向がみられない塩分濃度を除き $1/(SS \cdot G)$ で整理した結果を図-6に示す。同じ河川の試料であっても凝集比にばらつきがある。石狩川の試料では凝集比自体が異なり $1/(SS \cdot G)$ に対する勾配にも違いが見られた。尻別川は、凝集比の違いがあるもののパラメータに対する勾配は石狩川、鶴川に比べ小さい傾向があり、これらのパラメータに対する依存性がやや低いと考えられる。

平均の凝集比は石狩川7月試料>尻別川8月試料>石狩川9月試料・尻別川9月試料>鶴川8月洪水試料の順

であった。

(2) 沈降実験

三河川の沈降速度と凝集径の関係を図-7に示す。単一粒子の沈降速度は式(2)、(3)によって表される。

$$w_0 = \left(\frac{4g}{3} \frac{1}{C_D} \frac{\rho_e d}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_e = \rho' - \rho \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 w_0 : 粒子の終末沈降速度、 g : 重力加速度、 C_D : 粒子の抵抗係数、 ρ_e : 有効密度、 ρ' : 粒子の密度、 ρ : 媒体の密度、 d : 粒子の直径を表す。

図中には $C_D = Re/24$ で $\rho_e = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 、及び $\rho_e = 1.65, 0.5, 0.1 \text{ g/cm}^3$ で $C_D = Re/45$ の場合の粒子径と沈降速度の関係を図中に示している。 $C_D = Re/24$ は球体を、 $C_D = Re/45$ は丹保ら(1967)がフロックの粒子形状

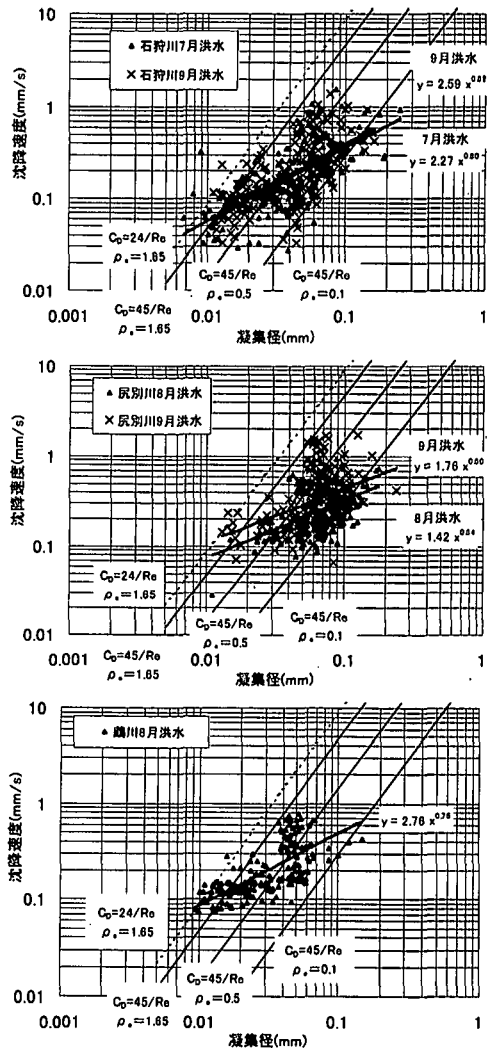


図-7 凝集径と沈降速度の関係

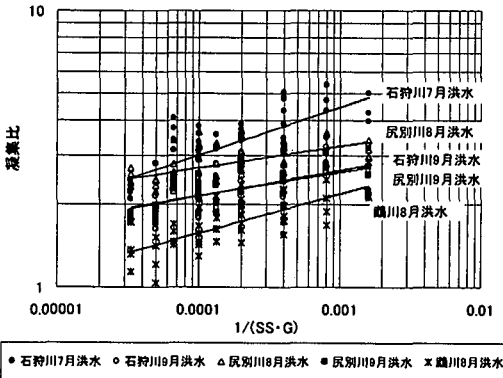


図-6 凝集比と攪拌強度、濁質濃度の関係

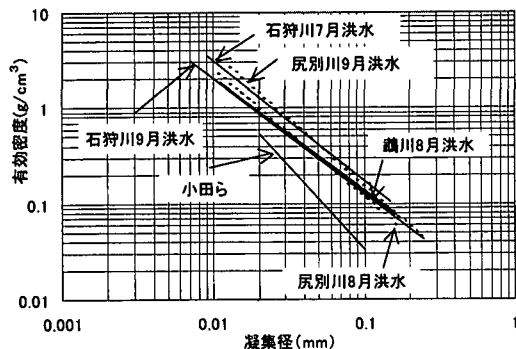


図-8 フロックの有効密度

を正八面体を仮定して用いた値である。各試料共に、凝集径が大きくなるに従い沈降速度にばらつきが大きくなり、比較的有效密度もしくは抵抗係数に幅があることがわかった。このことは、これらの懸濁物質の凝集特性がある程度の幅を持っていることを示している。なお、 $C_D = Re/24$ 、 $\rho_e = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 上にある粒子はフロックを形成していない可能性がある。図から各河川共に有効密度 ρ_e は 0.1 g/cm^3 程度より大きな値を示すことがわかる。鶴川のフロックは石狩川、尻別川に比べ有効密度が小さな粒子は少ないが、これは鶴川の懸濁物質の凝集比が小さいことが原因と考えられる。それぞれの沈降速度と凝集径の関係を最小二乗法により求めると、それぞれ凝集径の $0.6 \sim 0.82$ 乗に比例して増加する結果となった。この乗数は小田ら (1999) がベントナイトで実施し得た値 0.26 乗に比較すると大きな値となった。

図-8 に各試料の有効密度と凝集径の関係を示す。有効密度は $C_D = Re/45$ の場合の値を用い算出した。それぞれ粒径の $-1.18 \sim -1.4$ 乗に比例している。小田ら (1999) の得た有効密度 ($\rho_e = 99.7d^{-1.74}$, $\rho_e: \text{g/cm}^3$, $d: \mu\text{m}$) を図中に示した。その結果、今回の実験で求めた有効密度は、小田らの実験に比べ値が大きく、また凝集径との乗数も小さく、いわゆるしまり工合の良いフロックであることがわかった。

6. まとめ

今回行った、河川の懸濁物質に関する調査結果から、各粒子の特性、凝集沈降特性について次のようなことが明らかになった。

(1) 採取した河川、洪水により凝集特性には違いが見られる。鶴川の試料は石狩川、尻別川に比べ凝集比が小さく、尻別川の試料は濁質濃度、攪拌強度による凝集比の変化は少なかった。石狩川では2回の洪水で凝集特性に特に大きな違いがあった。

(2) 今回調査を行った三河川に含まれる粘土成分には、Chlomiteが多く含まれており、その結果懸濁物質は塩分濃度に対して凝集特性にあまり変化が見られない傾向がみられた。しかし有機物の含有量の大小により、塩分濃度と凝集比の関係に影響がみられた。

(3) 沈降速度は、凝集径の $0.6 \sim 0.82$ 乗に比例する。また、フロックの有効密度は、概ね 0.1 以上で、粒径の $-1.18 \sim -1.4$ 乗に比例することがわかった。

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土粒子の凝集・沈降過程に関する研究, 海工論文集, 第46巻, pp. 981-985.
- 小田一紀・大石大輔・影地良昭・汪思明 (2002): 塩水中における長江河口微細浮遊砂の凝集過程と凝集機構に関する研究, 海工論文集, 第47巻, pp. 1273-278.
- 河田弘 (1989): 森林土壌学概論, 博友社, pp. 243-251.
- 塩沢孝之 (1969): 石狩湾堆積物中の粘土鉱物組成, 第四紀研究, 第8巻, 第3号, pp. 981-985.
- 田中勝久 (1994): 沿岸・河口域のリン循環過程に及ぼす土壌物質の影響, 西南水研技報, No. 28, pp. 73-119.
- 丹保憲仁・山田浩一・穂積準 (1967): アルミニウム・フロックの密度に関する研究, 水道協会雑誌, 427号, pp. 4-5.
- 山崎真一・山下俊彦・渡邊康玄 (2003): 海域に供給される河川のSSに含まれるリンの形態別含有量に関する調査, 水工学論文集, 第49巻, pp. 1476-1480.
- 山下俊彦・森田真郷・杉原幸樹・斎藤大作・山崎真一 (2002): 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, 海工論文集, 第49巻, pp. 1016-1020.