

富山県出し平ダムの排砂ゲートから排出された 黒色濁水の特徴

田崎和江¹・國峯由貴江²・森川俊和²・Chaerun Siti Khodjah²
朝田隆二¹・宮田浩志郎²・脇元理恵²・池田頼正²・佐藤一博²
瀬川宏美²・小路奈々絵²・藤沢亜希子¹・盛一慎吾¹

Characteristics of flushed dam sediments with dark sludge from Dashidaira Dam, Toyama, Japan

Kazue Tazaki¹, Yukie Kunimine², Toshikazu Morikawa², Chaerun Siti Khodjah²,
Ryuji Asada¹, Koshiro Miyata², Rie Wakimoto², Yorimasa Ikeda², Kazuhiro Sato²,
Hiromi Segawa², Nanae Koji², Akiko Fujisawa¹ and Shingo Moriichi¹

Abstract: Dashidaira Dam and Unazuki Dam at Kurobe River, Toyama, Japan are regularly flushed sediments since 1991. The flushing of sediments has been impacted on ecosystem of under stream and Toyama Bay. Parameter of river water, such as pH, Eh, EC and DO at four places, were measured. Clay mineralogical components of dam sediments conducted in the two reservoirs have made it possible to evaluate the characteristics of sedimentation. Biological data are also essential because they allow comparisons to be made with conditions upper and lower of the dam sediments. At 15:30 on July 14 th, 2002, dark sludge with low oxygen was flushed from Dashidaira Dam, which was collected from Ononuma Park. The dark sludge contains expandable clay minerals with strictly anaerobic bacteria, indicating pH 6.8, Eh -210 mV, EC 143 μ S/cm and DO 0.9 mg/l. Physical, mineralogical and biological properties of flushed dam sediments (dark sludge) from Dashidaira Dam differ from the upper clean stream cause strong negative in downstream of Kurobe River. It had better leave river alone.

Key words: dam sediments, dark sludge, flushing, river water, strictly anaerobic bacteria

はじめに

現在、ダム貯水池内の堆砂が進行し、貯水容量の低下により本来の機能が果たせないダムが多数発生している。次世代に渡る水資源の技術的管理あるいは流砂系における総合的な土砂管理を実現させるためには、その要となる貯水池の適切な土砂管理が不

可欠である(角, 2000; 天野, 2001)。堆砂問題の解決策として、欧州諸国では、ダム貯水池に流入する土砂量を軽減するための排砂バイパストンネルの設置やダム貯水池に堆積した土砂を下流へ排出する排砂ゲートの設置を行っている(角, 1996, 1998; Kareiva et al., 2000; Mann and Plummer, 2000; Jackson et al., 2001)。日本においても、黒部川水系の出し平ダムや

¹ 金沢大学理学部地球学科 Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, 920-1192 Japan

² 金沢大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, 920-1192 Japan

宇奈月ダムにおける排砂，天竜川水系美和ダムや新宮川水系旭ダムなどにおける排砂バイパスの事例がある(角，2000)。

出し平ダムにおける排砂は，出し平ダムが建設されてから6年目の1991年12月に初めて行われた。その際，ダムからは砂や礫ばかりではなく多量のヘドロが排出され，下流域には悪臭がたち込め，生態系に大きな影響を与えた(小久保，2000)。しかし，その後も1999年までに計8回の排砂が行なわれた。1991年の排砂以降，黒部川河口沖から北東の泊沖にかけて行われている刺し網漁業や飯野沖のワカメ養殖場では，漁獲量，収穫量が急激に減少している(田崎ほか，2002)。2000年には出し平ダムの約6km下流に同じく排砂ゲートを有する宇奈月ダムが建設され，2001年6月19日には出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂が行われた。なお，連携排砂とは，出し平ダムとその下流に位置する宇奈月ダムの排砂ゲートを同時期に開け，出し平ダムから排砂されたダム堆積物を宇奈月ダム貯水池に再堆積させないために行う操作である。その期間中，ある時間帯では河川水の酸化還元電位および溶存酸素量の著しい減少が認められた(田崎ほか，2001)。

2002年7月14日には，再度出し平ダムおよび宇奈月ダムによる連携排砂が行われた。この時の排砂量は約8万m³であり，2001年に行われた連携排砂時の約59万m³の1/7であった。また，本格的に排砂が行われるようになった1995年以降の年間排砂量と比較しても少ない。すなわち，2002年の連携排砂は，排砂量が極端に少ないことが特徴である。

本研究では，2002年7月14日に行われた連携排砂時に黒部川の出し平ダム上流，出し平ダム直下，宇奈月ダム直下の3地点において河川水の水質測定を行なったほか，出し平ダムより排出された黒色濁水を尾の沼公園前において採取することに成功した。その黒色濁水の特徴は還元的かつ貧酸素状態であり，さらに培養実験により偏性嫌気性細菌の生息を確認したので報告する。

試 料

本研究で用いた分析試料は，2002年7月14日より行なわれた連携排砂時の黒部川の河川水である。出し平ダム上流約2.5kmに位置する黒部川第二発電所付近(①)，出し平ダム下流約0.3km地点(②)(以降，出し平ダム直下とする)，宇奈月ダム下流約0.3kmに位置する山彦橋付近(④)において30～60

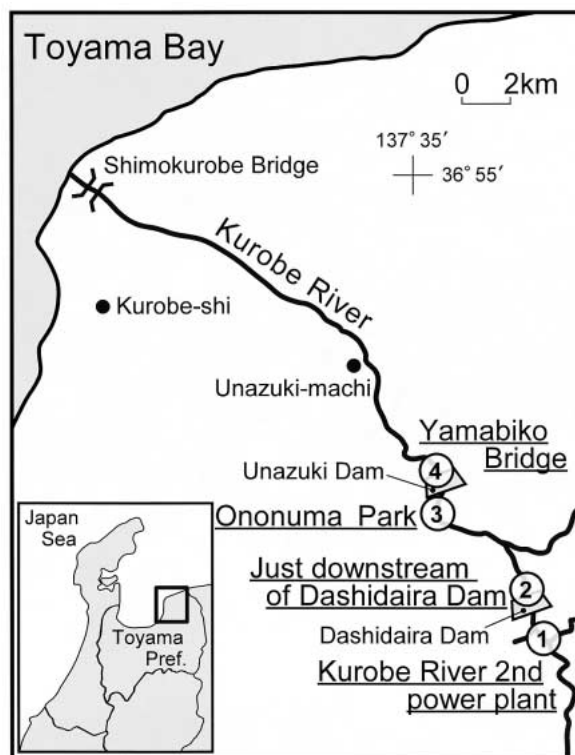


図1 2002年7月14日に行われた出し平ダムおよび宇奈月ダムにおける連携排砂時の水質測定および試料採取地点。

Fig. 1 Locality map of sampling points during flushing dam sediments from Dashidaira and Unazuki Dam in July 14th, 2002.

分毎に水質測定を行なった(Fig. 1)。

また，2002年7月14日11:30，出し平ダム貯水池の水位が低下した際に下流の尾の沼公園前(③)において黄褐色～灰色の濁水を含む堆積物(以降，黄褐色堆積物とする)を採取した。濁水の一部は渦を巻きながら流下していた(Fig. 2 A 左)。また，出し平ダムにおいて自然流下状態となった2002年7月14日15:30には，黒褐色～暗灰褐色の濁水(以降，黒色濁水とする)が，尾の沼公園前(③)を，渦を巻き泡立ちながら蛇行して流下しているのが認められ，硫黄臭も漂うようになった(Fig. 2 B)。この黒色濁水も尾の沼公園前(③)において採取した。なお，自然流下状態とは，ダム貯水池の水位が河床近くまで低下し，上流から流入する河川水によってダム堆積物が押し出される状態のことを指す。出し平ダムと宇奈月ダム周辺の模式断面図を Fig. 3 に示す。2002年7月14日11:30に採取した黄褐色堆積物は，連携排砂中，尾の沼公園前(③)を流下した黄褐色の濁水中の懸濁物質が沈殿・堆積したものである。出し平ダム上流の黒部川第二発電所付近(①)では，連携排砂中河川水に濁りはほとんど認められず，川底の礫が目視でき

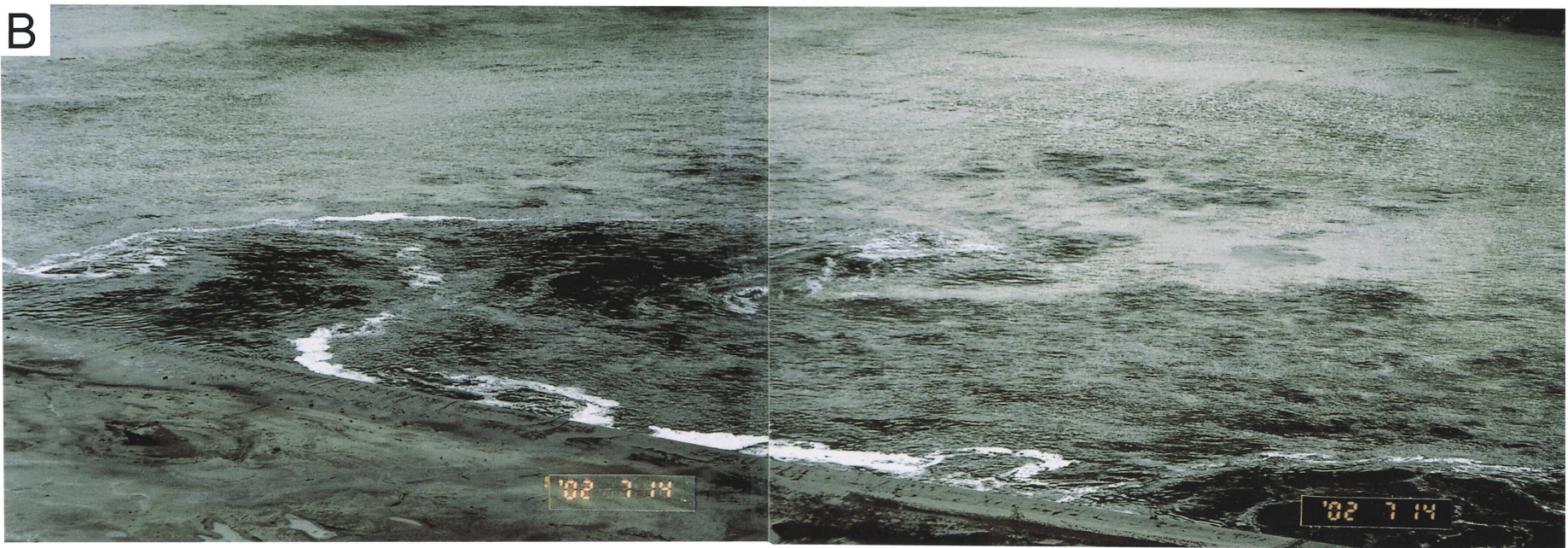


図2 連携排砂中の尾の沼公園からみた河川の様子。A; 2002年7月14日11:30, ダム堆積物の表層部分の懸濁物質を含む黄褐色河川水。B; 2002年7月14日15:30, 自然流下時に出し平ダムから排出された硫黄臭のする黒褐色～暗灰褐色の濁水(黒色濁水)。一部泡立ったり, 渦を巻きながら流下している。
Fig. 2 Field view at Ononuma Park showing yellowish brown muddy water at 11:30 on July 14th, 2002 (A). At 15:30 on July 14th, 2002, dark sludge with sulfurous stench flushed out from Dashidaira Dam (B).

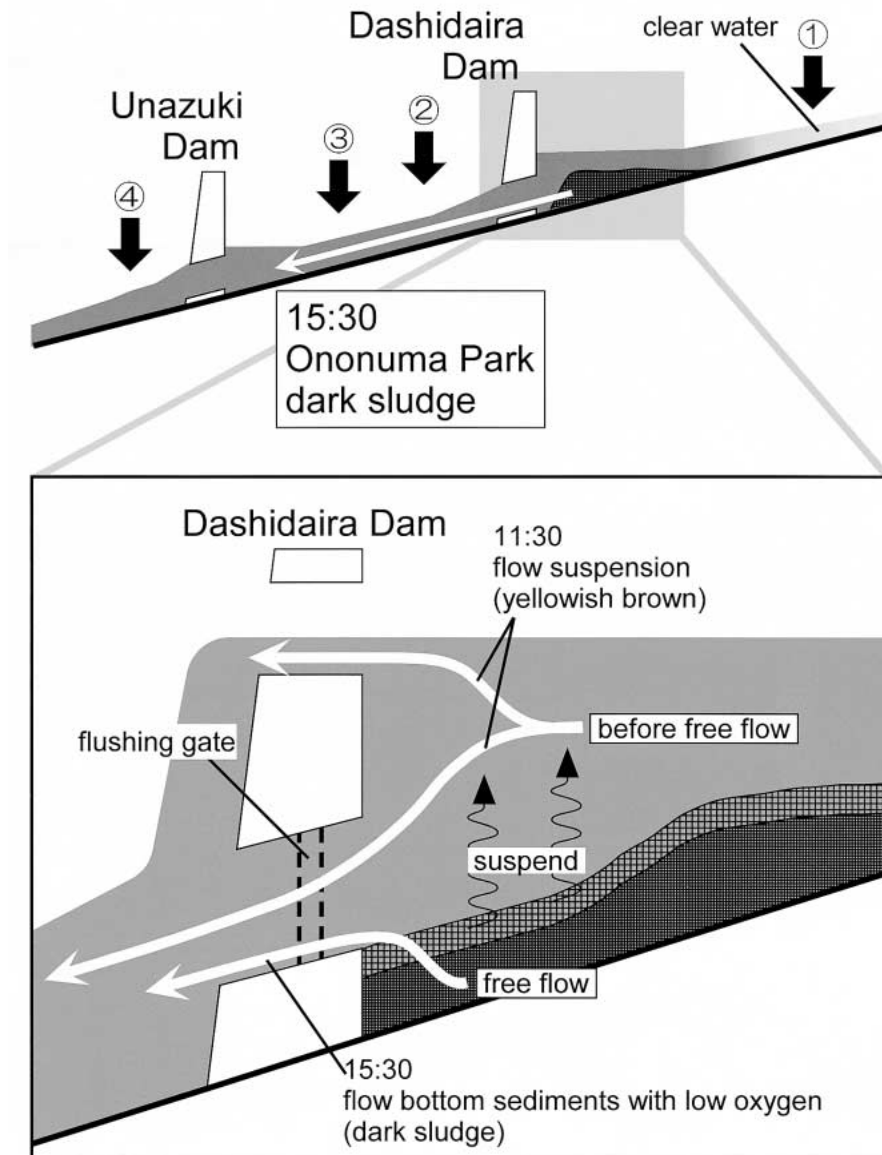


図3 出し平ダムおよび宇奈月ダムの模式断面図(①～④)は図1のサンプリング地点を示す。

Fig. 3 Schematic cross section of Dashidaira Dam and Unazuki Dam (Symbols ①～④ are the same sampling points as those in Fig. 1). The structural cross section of Dashidaira Dam showing flow system of flushing suspension and dark sludge.

たことから、黄褐色の濁水中の懸濁物質は、出し平ダムの堆積物の表層が放水により生じた水流の乱れによってまきあがり、常用洪水吐または排砂ゲートより排出されたものである (Fig. 3, before free flow). 一方, 2002年7月14日15:30に尾の沼公園前(③)において採取した黒色濁水は、出し平ダム上流の黒部川第二発電所付近(①)では濁りがほとんど認められなかったことから、出し平ダムにおいて自然流下状態となった時に排出されたものであり、黄褐色堆積物よりさらに深部の出し平ダム堆積物と考えられる (Fig. 3, free flow).

実験方法

水質測定

出し平ダムおよび宇奈月ダムによる連携排砂が行われた2002年7月14日に現地において河川水のpH, 酸化還元電位 (Eh), 電気伝導度 (EC), 溶存酸素量 (DO)の測定を行った。さらに、懸濁物質の水質への影響を検討するために黒部川第二発電所付近(①), 出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)において採水し, 500 ml ペットボトルに密閉した試料を研究室に持ち帰り, 2002年7月15日19:15より再度

測定を行った。それぞれの測定には HORIBA カスタニー LAB pH メーター F-24, HORIBA カスタニー ACT pH メーター D-13, HORIBA カスタニー ACT 導電率メーター ES-12, HORIBA ハンディ溶存酸素メーター OM-12 および TOA ポータブル溶存酸素計 DO-21 P を用いた。また、2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物の間隙水および黒色濁水についても現地において同様の測定を行った。

窒素、炭素、硫黄の定量分析

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質について、NCS 元素分析装置 (CE Instruments, NA 2500) を使用し、窒素、炭素、硫黄の定量分析を行った。試料は乾燥させ、粉末にしたものをそれぞれ約 2 mg ずつ用い、1 試料につき 2 回分析を行い、平均を求めた。検量線の作成は K-factor 法を採用し、標準試料には Sulfanilamide Standard ($C_6H_8N_2O_2S$, C; 41.84%, H; 4.68%, N; 16.27%, S; 18.62%) を使用した。

X 線粉末回折分析 (XRD 分析)

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質に含まれる粘土鉱物を、XRD 分析により同定した。分析には理学電機製 RINT 1200 型 X 線回折装置を使用し、 $CuK\alpha$ 線を用いて電圧 40 kV, 電流 30 mA で分析を行った。定方位試料の分析には、風乾した試料 0.15 g をコクサン製卓上遠心機 H-26 F を用いて $2\mu m$ 以下 $0.2\mu m$ 以上の粒子を分離・濃縮したものをスライドガラスに塗布し、乾燥させた後に分析を行った。さらに格子面間隔が約 14 Å (001) を示す試料は、エチレングリコール処理を施して分析を行った。エチレングリコール処理試料は、関東化学製 1 級エチレングリコールを使用し噴霧法で作成後、湿潤状態で分析した。

光学顕微鏡観察

2002 年 7 月 14 日 15:30, 尾の沼公園前(③)において採取した黒色濁水中の懸濁物質を、微分干渉・落射蛍光顕微鏡を用いて観察した。また、DAPI (4',6-ジエチルピロニウム-2-フェニルインドール二塩酸塩, $C_{16}H_{15}N_5 \cdot 2 HCl$) で DNA を染色した試料についても観察を行なった。蛍光顕微鏡では、Hg ランプから発生する光線のうち UV-1 フィルターを用いて波長

365 nm の紫外線のみを抽出して試料に照射し、試料の蛍光から波長 400 nm 以上の光のみを観察した。DAPI と錯体を作った微生物中の DNA が青色に蛍光を発することで生息する微生物の確認を行った。なお、観察にはニコン製 OPTIPHOTO-2 型光学顕微鏡に微分干渉装置 NTF 2 A および落射蛍光装置 EFD 3 を設置して使用した。

嫌気培養

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水中に生息する偏性嫌気性細菌を嫌気培養によって分離した。培養は血液寒天培地を用いて希釈平板法により行った。血液寒天培地は Difco 製血液寒天ベース粉末 40 g を 1 l の蒸留水に溶かし、 $121^\circ C$ で 15 分間オートクレーブにかけ、その後 $45^\circ C$ まで静置したものをを用いた。密閉容器内に試料を塗抹した培地および酸素吸収・二酸化炭素発生剤 (嫌気用) (三菱ガス化学株式会社製) を入れ、 $37^\circ C$ で 72 時間、インキュベーター内に静置した。培養期間中、密閉容器内に入れた嫌気指示薬で、容器内が嫌気状態であることを確認した。培養後、コロニーの計数が可能な培地を用いて、コロニーやそのコロニーを構成する微生物の形態を光学顕微鏡により観察した。

結 果

河川水の水質測定結果

2002 年 7 月 14 日より行なわれた連携排砂時の黒部川河川水の水質測定結果を Fig. 4 に示す。黒部川第二発電所付近(①)では測定期間中、pH, Eh, EC および DO について大きな変化は認められず、pH は約 7.5, Eh は約 190 mV, EC は約 $33\mu S/cm$, そして DO は約 11 mg/l (飽和率 108%) であった (Fig. 4 A)。また、この地点において測定期間中河川水に濁りはほとんど認められず、川底の礫が目視できた。

出し平ダム直下(②)においても、pH は約 7.0, EC は約 $42\mu S/cm$, DO は約 11 mg/l (飽和率 110%) と、大きな変化は認められなかった。一方、Eh は測定当初ほぼ 160 mV と一定した値を示したが、出し平ダムにおいて自然流下状態になった 2002 年 7 月 14 日 15:20 の直後には約 100 mV に低下し、特に 17:30 には 48 mV まで低下した (Fig. 4 B)。また、河川水の色は、測定開始時には灰白色であったものが自然流下状態となった 2002 年 7 月 14 日 15:30 には暗灰色に変化し、硫黄臭も漂うようになった。

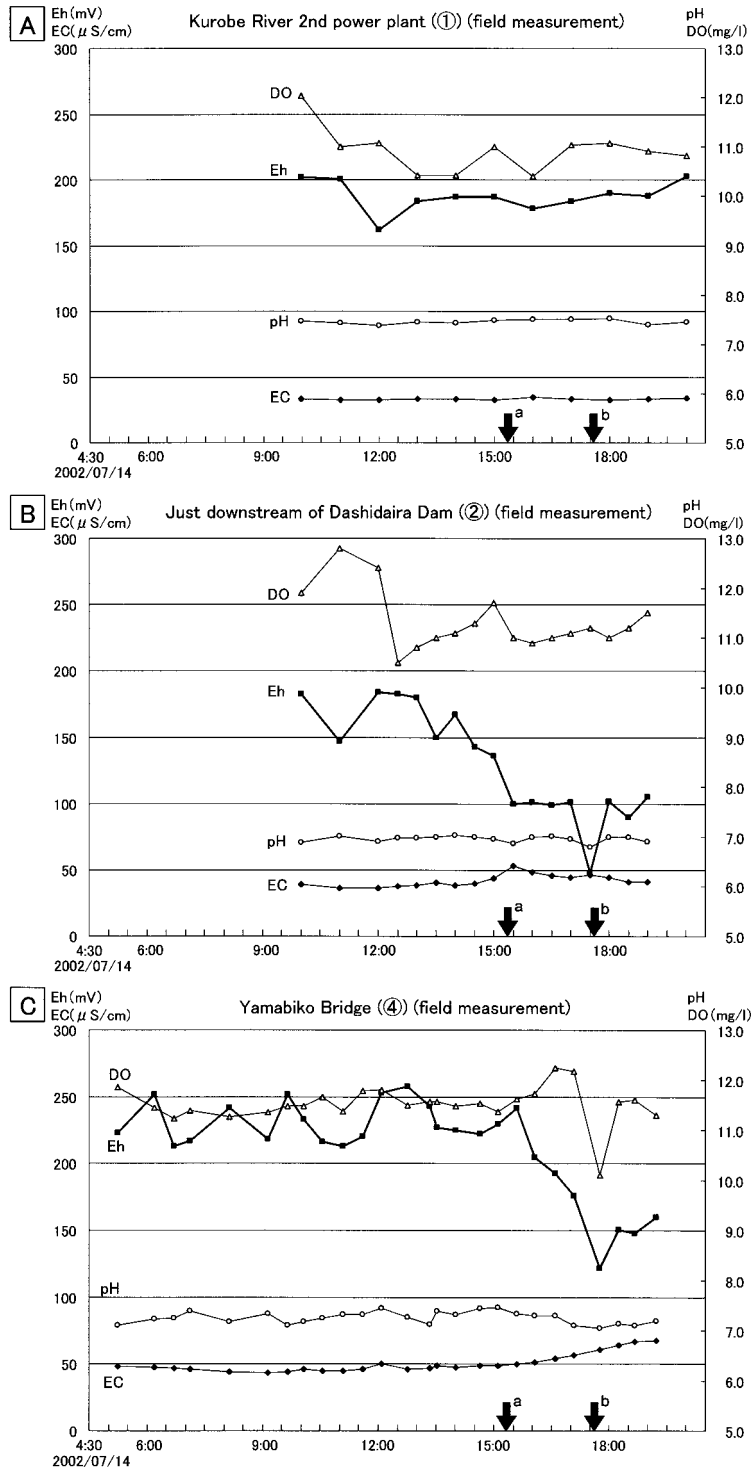


図4 2002年7月14日に行われた出し平ダムおよび宇奈月ダムにおける連携排砂時の黒部川河川水の水質 (pH, Eh, EC および DO) (①, ②および④は図1のサンプリング地点を示す)。A; 黒部川第二発電所(①), 測定期間中に大きな水質の変化は認められなかった。B; 出し平ダム直下(②), 出し平ダムにおける自然流下開始後, Eh が低下し始め, 特に17:30には48 mVまで低下した。C; 山彦橋(④), 宇奈月ダムにおける自然流下開始直前の17:00頃からEhの減少およびECの増加が認められた。

a; 出し平ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日15:20)。

b; 宇奈月ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日17:34)。

Fig. 4 Characteristics of Kurobe River water showing pH, Eh, EC and DO during flushing dam sediments on July 14th, 2002 (Symbols ①, ② and ④ are the same as those in Fig. 1). A; At Kurobe River 2nd power plant (①). B; At just downstream of Dashidaira Dam (②), the Eh decreased to 48 mV at 17:30. C; At Yamabiko Bridge (④), after 17:00, the Eh was decreased whereas the EC was increased.

a; Free flow of river water started at Dashidaira Dam reservoir at 15:20 on July 14th, 2002.

b; Free flow of river water started at Unazuki Dam reservoir at 17:34 on July 14th, 2002.

表 1 尾の沼公園において採取した黄褐色堆積物と黒色濁水の水質および化学組成.

Table 1 Characteristics of yellowish brown sediments and dark sludge collected from Ononuma Park.

	sampling time	characteristics of water					chemical composition		
		pH	Eh (mV)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	DO (mg/l)	WT ($^{\circ}\text{C}$)	N (wt%)	C (wt%)	S (wt%)
yellowish brown sediments	2002/7/14 11:30	7.0	30	197	1.6	23	0.13	4.11	0.05
dark sludge	15:30	6.8	-210	143	0.9	19	0.02	1.64	0.07

宇奈月ダムより下流の山彦橋 (④) において pH は約 7.3, DO は約 12 mg/l (飽和率 114%) とほぼ一定の値を示した. しかし, 出し平ダム直下 (②) と同様に Eh は当初約 240 mV であったが, 出し平ダムにおいて自然流下状態となった 2002 年 7 月 14 日 15:30 以降, 値が低下し続け, 宇奈月ダムにおいて自然流下状態となった 2002 年 7 月 14 日 17:34 の直後には 120 mV まで低下した. それ以降も約 160 mV と, 測定開始当初よりも低い値を示した. また, EC も自然流下状態開始から徐々に上昇し, 19:13 には $68 \mu\text{S}/\text{cm}$ と最も高い値を示した (Fig. 4 C).

現地測定により, 出し平ダム直下 (②) および山彦橋 (④) において, 自然流下状態開始後に Eh の低下が認められたが, これは, 出し平ダムおよび宇奈月ダムの堆積物が河川へ流入したことに関連すると考えられる.

一方, 現地での水質測定値と, 実験室に持ち帰り, 約一日後に再度測定した値と比較することを試み, その結果を Fig. 5 に示した. なお, 現地と水温が異なるため, DO については飽和率 (DO_{SAT}) で示した. 黒部川第二発電所付近 (①) において採取した試料について再度測定を行った結果, pH, Eh, EC および DO_{SAT} のいずれについても現地測定結果と大きな違いは認められなかった (Fig. 5 A). しかし, 出し平ダム直下 (②) の試料について, DO_{SAT} が現地測定では 110% とほぼ一定した値を示したのに対し, 再度測定を行なった結果, 自然流下状態開始前後の試料 (15:00, 16:00 および 17:00) は, 現地測定値に比べ低い値を示した. 特に, 2002 年 7 月 14 日 16:00 に採取した試料は最も低い値を示し, 現地では DO_{SAT} が 106% であったものが 72% に減少した (Fig. 5 B). 一方, 宇奈月ダム直下の山彦橋 (④) において採取した試料について, 再度測定を行なった結果, Eh は約 160 mV とほぼ一定の値を示し, 現地測定値よりも低い値を示した. また, pH, EC および DO_{SAT} は現地測定時と同様にほぼ一定した値を示した (Fig. 5 C).

黄褐色堆積物および黒色濁水 水質測定結果

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に, 尾の沼公園前 (③) において採取した黄褐色堆積物の間隙水および黒色濁水の水質測定結果を Table 1 に示す. 黄褐色堆積物の間隙水の pH は 7.0, Eh が 30 mV, EC が $197 \mu\text{S}/\text{cm}$ および DO が 1.6 mg/l であった. また, 黒色濁水は pH が 6.8, Eh が -210 mV, EC が $143 \mu\text{S}/\text{cm}$ および DO が 0.9 mg/l であった. 両試料において, pH は黒部川第二発電所 (①), 出し平ダム直下 (②) および山彦橋 (④) における現地測定値と比較して大きな違いは認められなかったが, EC が比較的高い値を, Eh および DO が比較的低い値を示した. 両試料共に貧酸素状態であり, 特に黒色濁水はその傾向が著しい.

窒素, 炭素, 硫黄含有量の定量分析結果

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に, 尾の沼公園前 (③) において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質の, 窒素, 炭素, 硫黄含有量の定量分析結果を Table 1 に示す. 黄褐色堆積物の窒素, 炭素, 硫黄含有量は 0.13 wt%, 4.11 wt%, 0.05 wt% であり, 黒色濁水中の懸濁物質の窒素, 炭素, 硫黄含有量は 0.02 wt%, 1.64 wt%, 0.07 wt% であった. いずれの試料も, 2001 年 6 月 19 日から 22 日にかけて行われた連携排砂時の下黒部橋において採取した低 DO 値を示した河川水中の懸濁物質の窒素, 炭素, 硫黄含有量 (田崎ほか, 2001) と比較すると, ほぼ同様の値を示している. 検出された有機物は出し平ダム貯水池に堆積後, 嫌気環境下で変質し, 黄褐色堆積物および黒色濁水の Eh, DO の低下を引き起こしたことが示唆される.

XRD 分析結果

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に, 尾の沼公園前 (③) において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質について, XRD 分析を行った結果を Fig. 6 に示す. XRD 分析により, 黄褐色堆積物 (A)

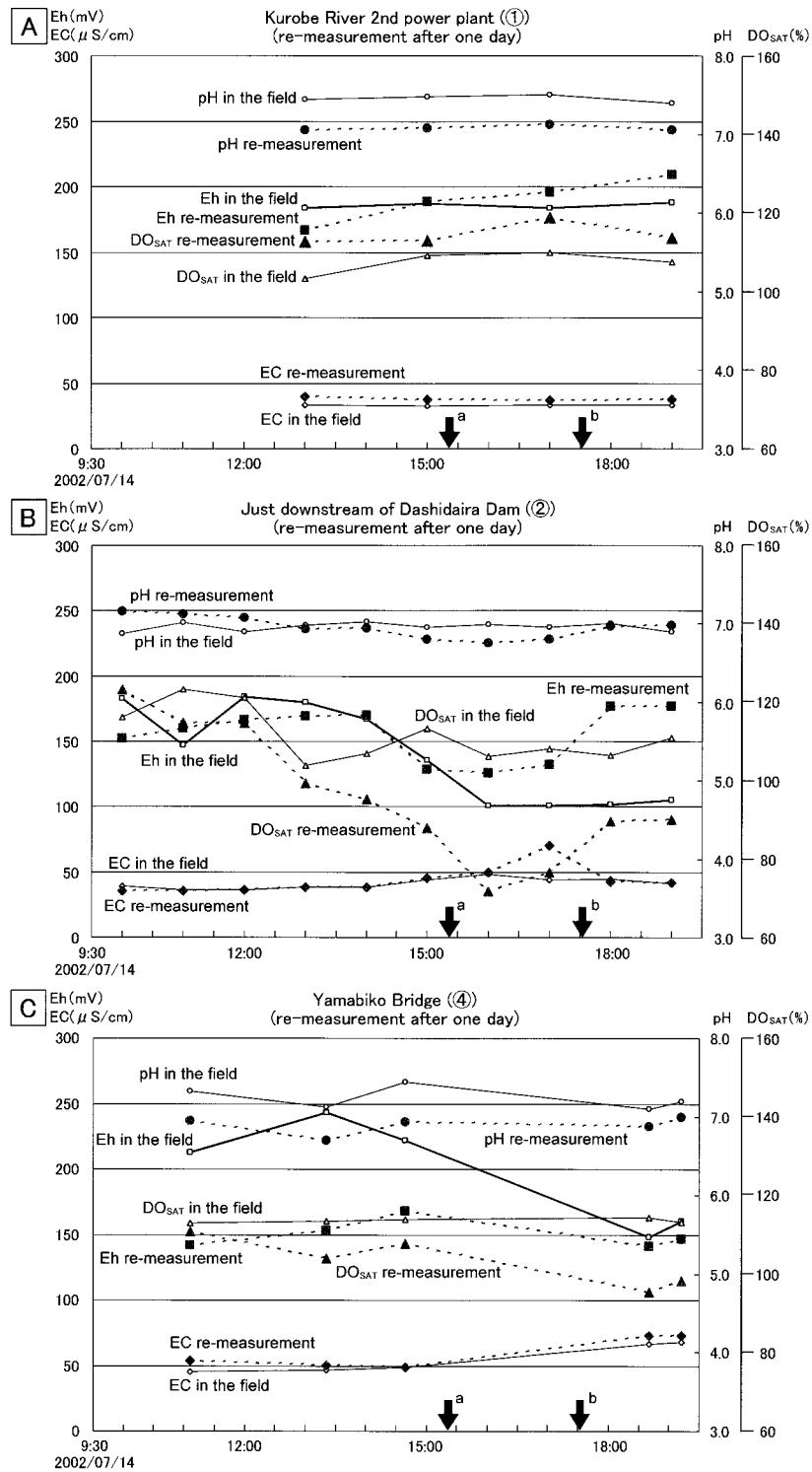


図5 2002年7月14日に行われた出し平ダムおよび宇奈月ダムにおける連携排砂時に採取した黒部川河川水の水質 (pH, Eh, EC, DO) の現地測定から約1日後の再測定結果(①, ②および④は図1のサンプリング地点を示す)。A; 黒部川第二発電所(①)。B; 出し平ダム直下(②), 出し平ダムにおける自然流下開始前後の試料について, DO_{SAT}が現地測定値に比べ低下しており, 特に2002年7月14日16:00に採取した試料において著しい。C; 山彦橋(④), Ehは現地測定値よりも低い値でほぼ一定している。pH, ECおよびDO_{SAT}は現地測定時と同様にほぼ一定した値を示した。

a; 出し平ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日15:20)。

b; 宇奈月ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日17:34)。

Fig. 5 Re-measurement date of Kurobe River water (pH, Eh, EC and DO_{SAT}) after one day in the field. (Symbols ①, ② and ④ are the same as those in Fig. 1). A; At Kurobe River 2nd power plant showing constant values (①). B; At just downstream of Dashidaira Dam (②) showing DO_{SAT} decreased as much as 4%~26% to compare with the field measurement. C; At Yamabiko Bridge (④), Eh in the field was different from re-measured Eh whereas the other factors were constant.

Symbols “a” and “b” are the same as those in Fig. 4.

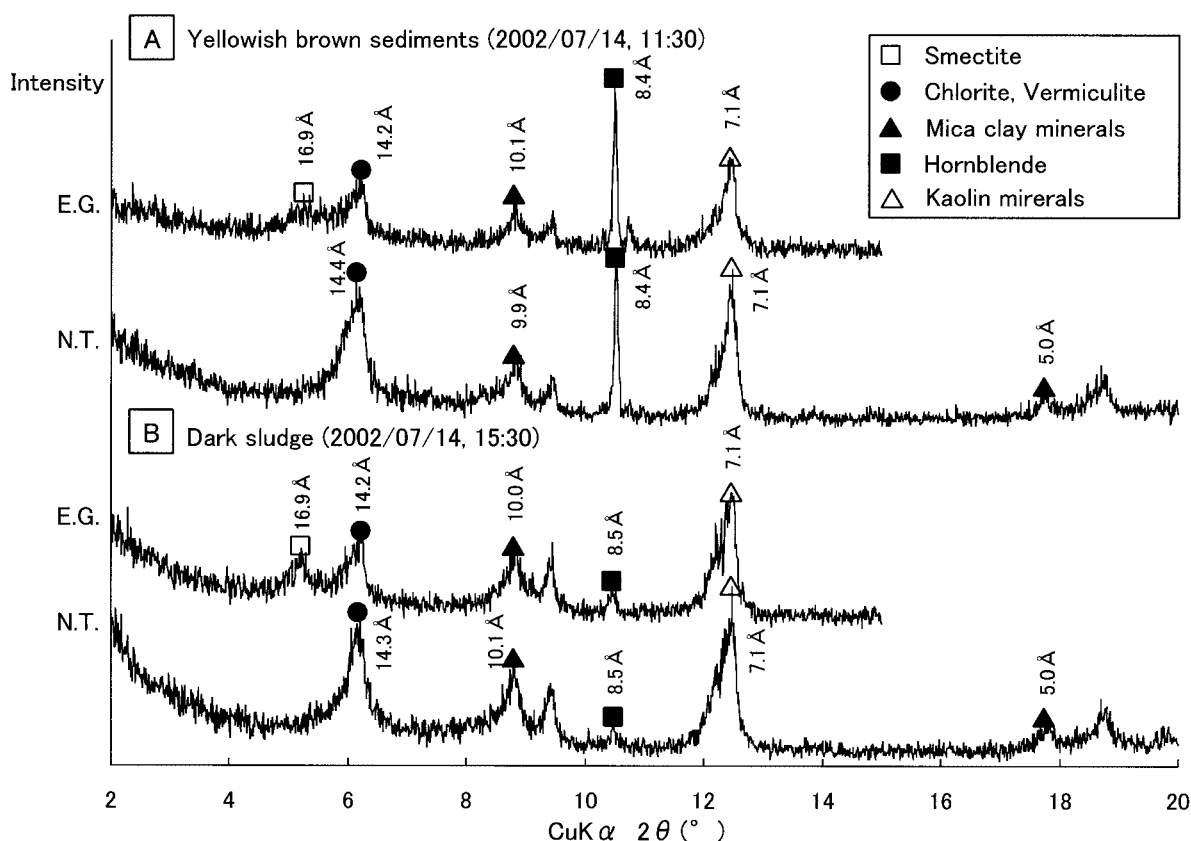


図6 2002年7月14日11:30に尾の沼公園において採取した黄褐色堆積物(A)および同日15:30に採取した黒色濁水(B)の粘土試料($<2\mu\text{m}$)のX線粉末回折(XRD)パターン. N.T.; 無処理, E.G.; エチレングリコール処理.

Fig. 6 X-ray powder diffraction (XRD) patterns of $<2\mu\text{m}$ fraction of yellowish brown sediments (A) and dark sludge (B) collected from Ononuma Park on July 14th, 2002. N.T.: non treatment, E.G.: ethylene glycol treatment.

中の粘土鉱物は、スメクタイト、14Åクロライトおよびバーミキュライト、10Å雲母類粘土鉱物、7Åカオリン鉱物である。また、黒色濁水中の懸濁物質(B)は、粘土鉱物としてスメクタイト、14Åクロライトおよびバーミキュライト、10Å雲母類粘土鉱物、7Åカオリン鉱物を含んでおり、黄褐色堆積物と類似している。しかし、黄褐色堆積物は、黒色濁水中の懸濁物質に比べ8.4Åの角閃石類が強い反射を示している。この粘土鉱物組合せは、田崎ほか(2001)および田崎ほか(2002)で報告している出し平ダムおよび宇奈月ダムの堆積物と同様の結果であった。

光学顕微鏡観察

2002年7月14日15:30、尾の沼公園前(③)において採取した黒色濁水中の懸濁物質について、光学顕微鏡観察を行った結果、懸濁物質は主に、木片、葉や根などの植物破片や生物遺骸からなることが明らかとなった(Fig. 7 A~C)。また、この懸濁物質に

DAPI染色を施し蛍光下で観察を行ったところ、試料中に黄色や緑色の鉱物の自家蛍光が認められたほか、約 $1\mu\text{m}$ の球菌や桿菌の存在が多く確認された(Fig. 7 D)。

嫌気培養結果

尾の沼公園前(③)において採取した低Ehおよび低DO値を示す黄褐色堆積物および黒色濁水中に生息する偏性嫌気性細菌について嫌気培養を行なった結果をFig. 8に示す。偏性嫌気性細菌がいずれの試料からも分離された。37°Cで72時間の培養により、血液寒天培地上にコロニーが形成され、得られた分離株をコロニーの形状、周縁、表面隆起、コロニーの色およびコロニーを形成する細胞の形態によってA~Eの5種に分類した。

Aはいずれの試料からも得られ、優先的な分離株である。これは連鎖した桿菌からなる白色び慢性で周縁が滑な円形コロニーを形成し、その直径は72

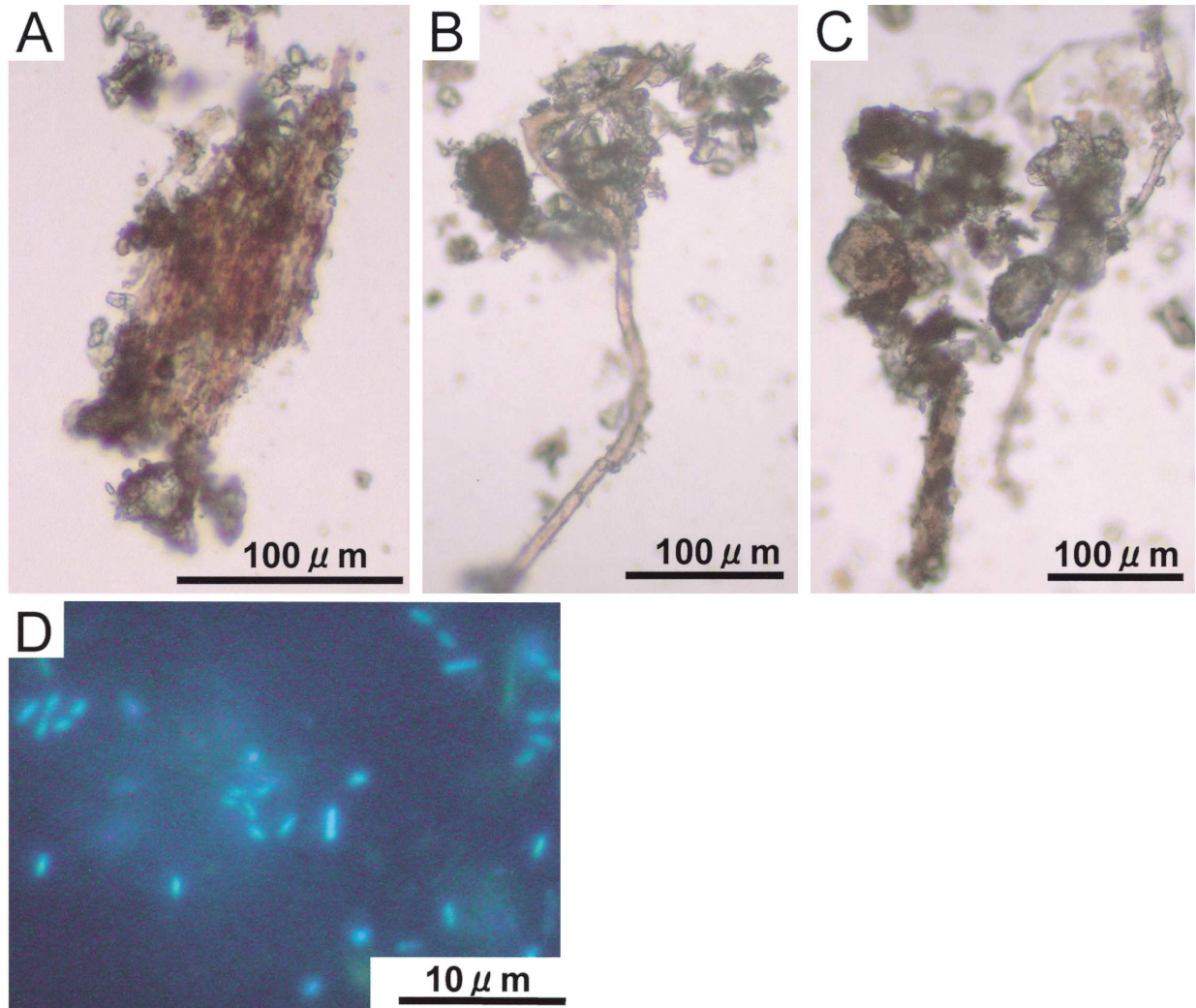


図7 2002年7月14日15:30に尾の沼公園において採取した出し平ダムより排出された黒色濁水中の懸濁物質の光学顕微鏡観察結果。懸濁物質中に認められた木片(A)、葉や根などの植物破片(B)および生物遺骸(C)。DAPI染色後の球菌や桿菌の蛍光顕微鏡写真(D)。

Fig. 7 Optical micrographs of dark sludge collected from Ononuma Park at 15:30 on July 14 th, 2002 showing pieces of plants (A), roots (B) and organics (C). DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole) stained epifluorescence micrograph (D) showing abundance of cocci and bacillus typed bacteria in the dark sludge.

時間で約2 mmまで成長した。このコロニーを形成する連鎖した桿菌は、単一の長さが2~6 μmであり、それらが連鎖し長いもので60 μmの集合体を形成した。細胞数については、黄褐色堆積物中には 10^5 - 10^6 cells/ml、また、黒色濁水中には 10^6 - 10^7 cells/mlと黒色濁水中の方が一桁多い細胞数を示した。

Bは螺旋状の細菌からなる白色び慢性で周縁が葉状の円形コロニーを形成し、他の分離株と比べ細胞数は少ない。黒色濁水中の細胞数は20 cells/mlであったが、黄褐色堆積物中には認められなかった。

Cは球菌からなる白色び慢性の周縁が滑な円形コロニーを形成した。細胞数については、黄褐色堆積物中には400 cells/ml、また、黒色濁水中は10 cells

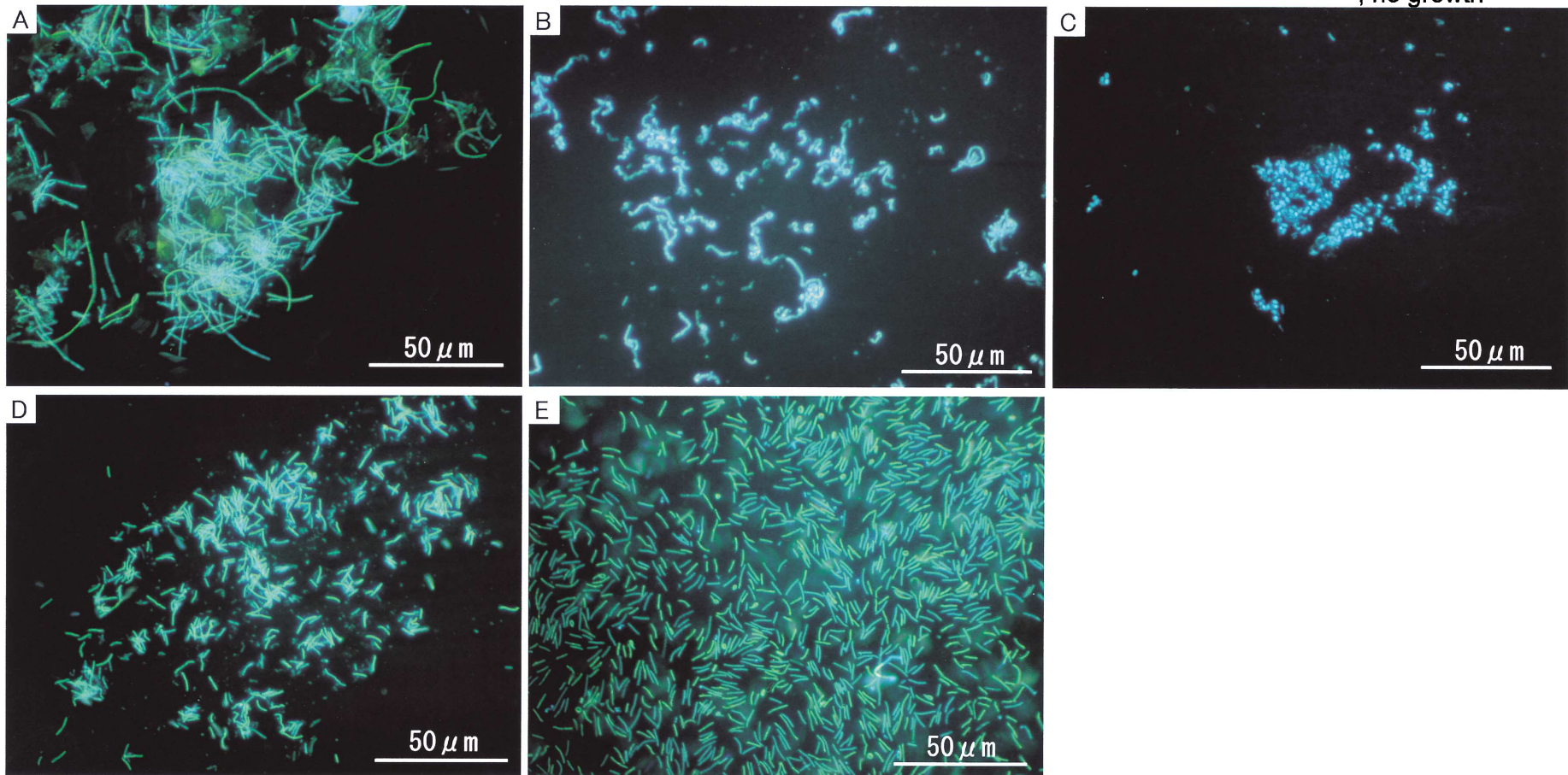
/mlと、黄褐色堆積物中の方が約40倍多いことが明らかになった。

Dは、桿菌からなる白色凸レンズ型の繊維状のコロニーを形成し、いずれの試料についても細胞数は200 cells/mlであった。

Eは灰色び慢性で周縁が滑な円形コロニーを形成し、他の分離株と比べ細胞の大きさが3~11 μmと大きい。黄褐色堆積物中の細胞数は100 cells/mlであったが、黒色濁水中には認められなかった。

すなわち、いずれの試料からも4種の偏性嫌気性細菌が分離され、その大部分が白色び慢性で周縁が滑な円形コロニーを形成する連鎖した桿菌であった。しかし、培養された全偏性嫌気性細菌数は黒色

Isolate code	Characteristics of colonies on blood agar plate				Cell		Yellowish brown sediments	Dark sludge
	form	margin	elevation	color	form	size (μm)	cell number (cells/ml)	cell number (cells/ml)
A	circular	entire	flat	white	bacillus make chain	2 - 6	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷
B	circular	lobate	flat	white	spirilla	2 - 6	-	20
C	circular	entire	flat	white	coccus	1 - 2	400	10
D	rhizoid	filamentous	convex	white	bacillus	2 - 6	200	200
E	circular	entire	flat	grey	bacillus	3 - 11	100	-



富山県出し平ダムの排砂ゲートから排出された黒色濁水の特徴

図8 2002年7月14日11:30に尾の沼公園において採取した黄褐色堆積物および同日15:30に採取した黒色濁水から分離された偏性嫌気性細菌。

Fig. 8 The isolated strictly anaerobic bacteria from yellowish brown sediments (11:30, sampling time) and dark sludge (15:30, sampling time) collected from Ononuma Park on July 14th, 2002, showing five kinds of strictly anaerobic bacteria.

濁水中の方が多く、細胞の形態も3種と黄褐色堆積物に比べ多様であった。また、BおよびEのようにそれぞれの試料からのみ培養されるものや、共通する微生物でもその細胞数が異なるなど、両試料の嫌気状態の差異を示しているといえる。

考 察

河川水の水質

河川水試料について、出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)において自然流下状態開始後に採取した試料は、現地測定時および再測定時において、それぞれ特徴的な変化が認められた。

現地測定では、出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)において、自然流下状態前後でEhの値が変化しており、出し平ダム直下(②)で特にその低下が認められた。このことは、河川水中に懸濁したダム堆積物がEhの低下を引き起こしたことを示唆している。

また再測定時において、黒部川第二発電所付近(①)において採取した試料のpHは、現地測定値とほぼ同様の値を示した。また、Eh、ECおよびDO_{SAT}についても現地測定値との大きな違いは認められなかった。これは、現地から試料を持ち帰り再測定を行っても、水温の変化や試料採取から再測定までの時間による影響が小さいことを示している。また、出し平ダム直下(②)で採取した自然流下状態開始後の河川水試料について、再測定後にDO_{SAT}が現地測定での値よりも低い値を示した。したがって、この再測定値の現地測定値との相違は、水温の変化や試料採取から再測定までの時間による影響ではなく、試料中の懸濁物質が与える影響を反映していると考えられる。つまり、再測定時におけるDO_{SAT}の低下は、試料中に懸濁する出し平ダム堆積物の影響であり、田崎ほか(2001)で報告されているように、その影響は特に出し平ダム堆積物中の有機物によることが示唆される。また、田崎ほか(2001)で報告された2001年6月19日から6月22日に行われた排砂時と比べて、EhおよびDOの減少幅が小さい。これは、排砂量が2001年は59万m³であったのに対し、2002年は8万m³と少なく、DOの低下に影響をおよぼすとされる有機物量も少なかったためと考えられる。また、山彦橋(④)において採取した試料については、再測定時にDO_{SAT}の減少が認められなかったことは、宇奈月ダム堆積物による影響がほとんどなかったことを示唆している。今回の連携排砂では、主に

出し平ダム堆積物が排出され、河川の水質に影響をおよぼしたと考えられる。

黒色濁水の特徴

尾の沼公園前(③)において採取された黒色濁水は、EhおよびDOが河川水や黄褐色堆積物と比べ非常に低い値を示した。またその懸濁物質は、出し平ダム堆積物を主とし、有機物として植物破片や生物遺骸を含んでおり、偏性嫌気性細菌が黄褐色堆積物中よりも多く生息していることが明らかとなった。ダム貯水池は、水理・水文的には河川と湖沼の両者の性格を併せ持つが、ダム湖としばしば呼ばれるように湖沼の性格のほうが強い(宗宮, 1990)。ダム貯水池に流入した物質は、吸着、沈降、分解、生物への変換などの物理的、化学的ならびに生物学的な相互作用を比較的長時間にわたって受け、それらの変化は湖沼における環境や生態系への変化に類似している(宗宮, 1990)。また、高等植物は堆積物中に集積する傾向があり、それらの分解生成物が堆積物の性質に大きく関与している(Timperly and Allan, 1974; Lisiecki and McNabb, 1975; Warren, 1981)。また、堆積物中の微生物数は、堆積物粒子の表面にある溶解した腐食物質や、沈降してきた有機物の破片の堆積によって支配されている。表面付近に生息する微生物が有機物を代謝することにより、表層の遊離酸素が急速に消費され、その結果、堆積物の深部において硫化水素が集積する。したがって、好気微生物数は、表面から下部になるほど急激に減少し、嫌気微生物の比率が増加する(McConnaughey, 1974)。嫌気性微生物のいくつかは酸素に対して耐性を持つものもあるが、多くの嫌気性微生物にとって酸素は毒としてはたらくことが知られている(Eweis et al., 1998)。

出し平ダム堆積物も、図7に示したように上流から流入する土砂および有機物や微生物の遺骸などで構成されている。2001年に行われた連携排砂からはほぼ1年が経過しており、その間に、微生物活動により堆積物の深部(Fig. 3下)が変質し、還元的で貧酸素状態となっていたと考えられる。

黄褐色堆積物が、出し平ダム堆積物のうち貯水池内の水流の乱れによってまきあがった表層部の堆積物が大部分を占めるのに対して、黒色濁水中には、自然流下状態で浸食された、より還元的な堆積物が多く含まれていたと考えられる。出し平ダム堆積物の表層は、比較的酸化的な値を示し、偏性嫌気性細菌がほとんど認められないことが予想される。一方、黒色濁水は、出し平ダム直下(②)で観測された自然

流下状態以後(2002年7月14日15:20以後)の河川水と比較して、EhおよびDOが非常に低く、さらに、偏性嫌気性細菌数の生息も確認された。これは、出し平ダム直下(②)で観測されたように、出し平ダム堆積物が排砂ゲートから排出される時、曝気により一時的にEhおよびDOが上昇するが、流下するにしたがい、堆積物中の有機物や還元物質は、再びEhおよびDOを低下させる。よって、出し平ダム堆積物は還元的な性質を長時間保持したまま流下するため、出し平ダム堆積物中に生息していた偏性嫌気性細菌は、曝気により死滅することなく宇奈月ダム貯水池へと流下してきたと考えられる。また、黒色濁水のDOは0.9 mg/lと非常に低く、岩魚の生息条件から設定された排砂中止のDOの基準値である4 mg/lを遙かに下回っている。さらに、DOが2 mg/lを下回ると魚の生命にとって重大な影響をおよぼすことが報告されており(Merle, 2002)、このような黒色濁水の流下は、河川の生態系に大きな影響を与えることが示唆される。

今回の連携排砂により排出されたダム堆積物は8万m³と、2001年に行われた連携排砂時における排砂量59万m³に比べ極端に少なく、また、本格的に排砂が行われるようになった1995年以降の年間排砂量と比較しても少ない。今回、黒色濁水のような低Ehおよび低DO値を示し、偏性嫌気性細菌の生息場となっているような濁水が、黒部川を流下していることが確認された。また、低Ehおよび低DO値を示す黒色濁水は、宇奈月ダムより下流の山彦橋(④)では観測されなかったものの、自然流下状態開始の前後で河川水のEhが低下するのが出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)の両地点で観測された。これは、1年間で貧酸素かつ嫌気的な状態へと変化したダム堆積物を排出することは、排砂量の多少によらず、河川の水質に影響を与えることを示唆している。

ま と め

2002年7月14日に行われた出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 連携排砂中の黒部川河川水の水質について、出し平ダム直下および宇奈月ダム直下の山彦橋において、自然流下状態開始前後でEhの減少が観測された。
- (2) 出し平ダム直下において自然流下状態開始後に

採取された河川水試料について、DO_{SAT}が再測定時に現地測定値よりも減少しており、ダム堆積物による影響が示唆される。また、2001年に行われた連携排砂時の河川水と比較するとその減少幅は少ない。これは今回の排砂量が2001年に行われた連携排砂よりも少なかったためと考えられる。

(3) 尾の沼公園前において出し平ダム堆積物を主とする黒色濁水の流下が観測された。その水質は還元的で貧酸素状態、かつ偏性嫌気性細菌が4種認められ、連鎖した桿菌数が10⁶-10⁷cell/ml認められた。これは、1年の間にダム貯水池の堆積物が貧酸素で嫌気的な堆積物へと変化したことを示し、排砂量の多少によらず、河川の水質に影響を与えることを示唆している。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、黒部川第二発電所付近および出し平ダム直下での試料採取において関西電力株式会社、関電興業株式会社の許可を得た。また、山彦橋付近および尾の沼公園付近での試料採取において入善町の金谷敏行氏、佐藤宗雄氏、高倉正氏、脇山正美氏の協力を得た。以上の方々に、御礼申し上げます。なお、本研究の一部に文部科学省の研究補助金基盤A(代表田崎和江)を使用した。

文 献

- 天野礼子(2001)ダムと日本。岩波新書, 224 p.
- Ewies, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. Y. and Schroeder, E. D.(1998) Bioremediation principles. McGraw-Hill Inc.Singapore, 66-98.
- Jackson, J. B. C., Kirby, M. X., Berger, W. H., Bjorndal, K. A., Botsford, L. W., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R., Erlandson, J., Estes, J. A., Hughes, T. P., Kidwell, S., Lange, C. B., Lenihan, H. S., Pandolfi, J. M., Peterson, C. H., Steneck, R. S., Tegner, M. J. and Warner, R. R.(2001) Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. Science, 293 : 629-638.
- Kareiva, P., Marvier, M. and McClure, M.(2000) Recovery and management options for spring/summer chinook salmon in the Columbia River Basin. Science, 290 : 977-979.
- 小久保鉄也(2000)出し平ダムの排砂実績と黒部川の土砂流出に与える影響。貯水池土砂管理国際シン

- ポジウムワークショップ論文集, 99-115.
- Lisiecki, J. B. and McNabb, C. D. (1975) The dynamics of hazardous elements in waste water ponds. NTIS, Springfield, VA : PB-248 404.
- Mann, C. C. and Plummer, M. L. (2000) Can science rescue salmon ? Science, 289 : 716-719.
- McConnaughey, B. H. (1974) Introduction to marine biology, second edition. C. V. Mosby Company, St. Louis, 544 p.
- Merle, G. (2002) Some environmental aspects of flushing . International workshop and symposium on reservoir sedimentation management, 89-97.
- 宗宮功 (1990) 自然の浄化機構. 技報堂, 東京, pp.117-133.
- 角哲也 (1996) 流れ下る氷河—スイスにおける貯水池土砂管理. ダム技術, 118: 20-34.
- 角哲也 (1998) 欧州におけるダム排砂の試み. 河川, 628: 43-49.
- 角哲也 (2000) ダム貯水池土砂管理の将来. 貯水池土砂管理国際シンポジウムワークショップ論文集, 117-126.
- 田崎和江・國峯由貴江・森川俊和 (2001) ダム堆積物の連携排砂が黒部川の下流に与える影響, その2—連携排砂時の水質変動と懸濁物質の特性—. 粘土科学, 41: 64-74.
- 田崎和江・縄谷奈緒子・國峯由貴江・森川俊和・名倉利樹・脇元理恵・朝田隆二・渡辺弘明・永井香織・池田頼正・佐藤一博・瀬川宏美・宮田浩志郎 (2002) 黒部川出し平ダムおよび富山湾における堆積物の特性—懸濁粒子が魚類に与える影響の検討—. 地質学雑誌, 108: 435-452.
- Timperley, M. H. and Allan, R. J. (1974) The formation and detection of metal dispersion halos in organic lake sediments. J. geochem. Explor., 3: 90-167.
- Warren, L. J. (1981) Contamination of sediments by lead, zinc and cadmium: a review. Env. Poll. 2: 401-436.

付記一珪藻分析結果一

排砂前の出し平ダム堆積物、排砂中の黒部川河川水中の懸濁物質、排砂前の富山湾堆積物について、その中に含まれる珪藻の分析を行った。試料採取地点および採取日を Fig. 1 に示す。出し平ダム堆積物試料は、2002 年 5 月 22 日、出し平ダム貯水池内のダム堤体より上流 350 m (sample 1) および 80 m (sample 2) の 2 地点で採取した。また、黒部川河川水中の懸濁物質試料は、2002 年 7 月 14 日に行われた連携排砂中に、出し平ダム直下(16:00 採取; sample 3) および尾の沼公園前(黄褐色堆積物; sample 4, 黒色濁水; sample 5) で採取した。富山湾堆積物試料は、2002 年 6 月 9 日、黒部川河口に近いほうから sample 6(北緯 36° 55′ 478″, 東経 137° 25′ 623″, 水深 86 m), sample 7(北緯 36° 55′ 867″, 東経 137° 26′ 241″, 水深 40 m) を採取した。なお、これらの地域には、出し平

ダムからのたび重なる排砂により、ダム堆積物が堆積していることが示唆されている(田崎ほか 2002, Tazaki et al. 2003)。

試料の処理は、柳沢(1999)に記述した方法で行った。珪藻の頻度から C(common)と R(rare)の 2 段階に分類した。また、認められた種は、present(+)として産出表に記録した。さらに、破片として認められた種も同様に present(+)として記録した。珪藻の保存状態は、殻の破損したもの、溶解したものが多いが、中には頑丈な殻をもち、*Diatoma hiemalis* のように完全細胞も多く認められた。珪藻殻の産出量の評価は、+(present), C(common)の 2 段階に分けた。

珪藻分析結果を表 1 に示す。7 試料とも珪藻殻を含んでいるが、その含有量は sample 7 が普通程度(common) 含んでいる以外は稀(rare)である。

Sample 1~5 は、いずれも淡水種(着生(benthic)・浮遊性(planktonic))のみから成り、化石種は含まれ

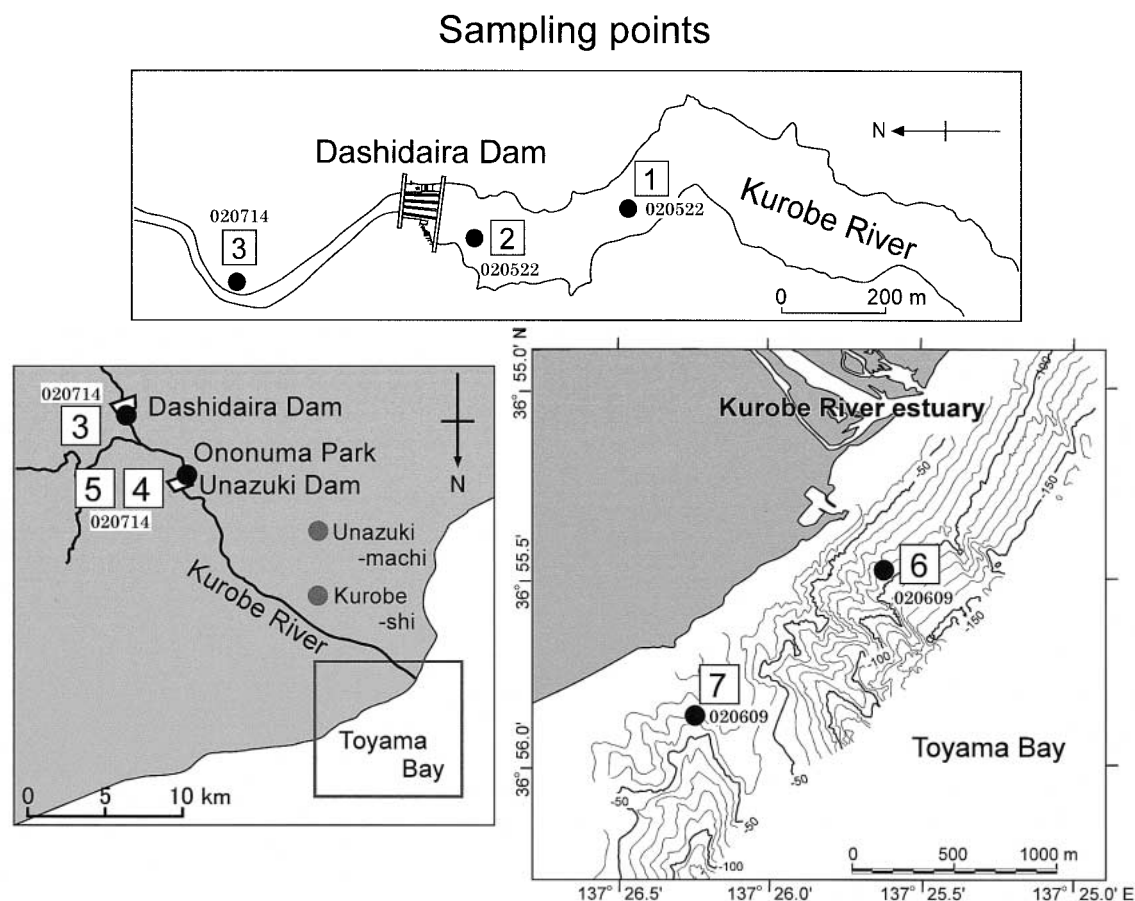


図 1 珪藻分析試料採取地点。

Fig. 1 Locality map of sampling points (1~7) and the date.
 020522; 22nd May 2002 (before flushing)
 020609; 9th June 2002 (before flushing)
 020714; 14th July 2002 (during flushing)

表1 珪藻の産出結果.

Table 1 Occurrence of diatom at Kurobe River and Toyama Bay.

			Sample number	1	2	3	4	5	6	7
			Abundance	R	R	R	R	R	R	C
Nonmarin Diatoms										
benthic	<i>Achnathes</i>	spp.			+	+				
benthic	<i>Cocconeis</i>	placentula var. euglypta	+		+				+	+
benthic	<i>Cymbella</i>	sinuata							+	
benthic	<i>Cymbella</i>	spp.	+			C	+	C	+	C
benthic	<i>Diatoma</i>	hiemalis	C	C	C	C	C	C	+	
benthic	<i>Eunotia</i>	spp.		+						+
planktonic	<i>Fragilaria</i>	spp.							+	
benthic	<i>Frustulia</i>	spp.	+							
benthic	<i>Gomphonema</i>	spp.		+			+			
planktonic	<i>Meloroisra</i>	octagona							+	
benthic	<i>Navicula</i>	spp. (small)					+		+	
benthic	<i>Navicula</i>	sp. (v. small, cf. contenta)	+							
benthic	<i>Navicula</i>	spp.	+					+		
benthic	<i>Navicula</i>	spp. (small)								+
benthic	<i>Nitzschia</i>	spp. (small)	+				+		+	+
benthic	<i>Pinnularia</i>	spp. (large)					+			
planktonic	<i>Synedra</i>	ulna-vaucheri complex	C	C	C	+	+	+	+	C
benthic	<i>Tabellaria</i>	spp.					+	+	+	
Marine Diatoms										
benthic	<i>Amphora</i>	spp.								+
benthic	<i>Biddulphia</i>	decipiens								+
planktonic	<i>Chaetoceros</i>	spp. (spores)							+	
benthic	<i>Cocconeis</i>	scutellum								+
planktonic	<i>Coscinodiscus</i>	spp.							+	+
benthic	<i>Diploneis</i>	spp.								+
benthic	<i>Grammatophora</i>	spp.								+
benthic	<i>Hyalodiscus</i>	spp.								+
planktonic	<i>Laudria</i>	sp.							+	+
benthic	<i>Navicula</i>	sp. (lyrate, small)								+
benthic	<i>Navicula</i>	sp. (lyrate, robust)								+
planktonic	<i>Odontella</i>	cf. sinensis								+
planktonic	<i>Odontella</i>	aurita								+
planktonic	<i>Skeletonema</i>	costatum							+	+
planktonic	<i>Thalassionema</i>	bacillis							+	+
planktonic	<i>Thalassionema</i>	nitzschioides							+	+
planktonic	<i>Thalassiosira</i>	spp.							+	+

Sample 1; upperstream of Kurobe River,
 Sample 2; inside Dashidaira Dam,
 Sample 3; just under Dashidaira Dam,
 Sample 4; yellowish suspension in front of Ononuma Park,
 Sample 5; dark sludge in front of Ononuma Park,
 Sample 6; near estuary of Kurobe River,
 Sample 7; faraway from estuary of Kurobe River.

C; common, R; rare, +; present.

ていない。それらの種構成は互いに類似している。一方、富山湾の堆積物である sample 6, 7 は、海水種のみならず淡水種（着生・浮遊性）と海水種（着生・浮遊性）との混合群集から成る。すなわち、出し平ダム、尾の沼公園の試料と富山湾の試料の群集は、それらの全体的な種構成から明瞭に互いに識別される。淡水種の種構成に関して、7 試料ではほぼ共通して *Cymbella* spp. (着生種), *Diatoma* spp. (着生種), *Synedra ulna-vaucheri* グループ (浮遊性種) の 3 種が比較的顕著に認められる。また、*Cocconeis placentula* var. *euglypta* (着生種), *Eunotia* spp. (着生種), *Nitzschia* spp. (着生種), *Tabellaria* spp. (着生種) も淡水域、海水域の両方で認められた。

排砂前の出し平ダム堆積物や、排砂中の黒部川河

川水中の懸濁物質に含まれる珪藻種、特に着生種が富山湾堆積物中にも含まれることは、排砂によって出し平ダムから排出されたダム堆積物が、富山湾の黒部川河口付近に堆積することを示唆している。また、排砂前の富山湾堆積物中に淡水域の珪藻種（着生・浮遊性）が含まれていたことは、出し平ダム堆積物は排砂により海底に堆積し、海流などの影響をほとんど受けず、1 年以上その場にとどまり続けることを示唆している。なお、排砂されたシルトサイズの堆積物が海底に沈殿するとともに硬くしまり、固結することからも裏付けられる。

なお、富山新港建設時に、富山湾内へ水中投棄された放生津潟のヘドロが海底にどのように拡散していくかの調査によれば、珪藻の組合せを指標とする

ことで、ヘドロの分布域が追跡できることが報告されている(藤井ほか 1991)。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、珪藻の同定を秋葉文雄博士にお願いした。また、富山湾堆積物試料の採取において入善町の佐藤宗雄氏をはじめとする漁師の方々、脇山正美氏をはじめとする泊漁業協同組合の方々の協力を得た。関西電力株式会社より出し平ダム内の堆積物試料を提供していただいた。以上の方々に、御礼申し上げます。なお、本研究の一部に文部科学省の研究補助金基盤 A(代表田崎和江)を使用した。

文 献

- 藤井昭二・邑本順亮・武沢 正(1991)富山湾庄海底に投棄されたヘドロについて。金沢大学日本海域研究所報告, 23: 31-50.
- 田崎和江・縄谷奈緒子・国峯由貴江・森川俊和・名倉利樹・脇元理恵・朝田隆二・渡辺弘明・永井香織・池田頼正・佐藤一博・瀬川宏美・宮田浩志郎(2002)黒部川出し平ダムおよび富山湾における堆積物の特性—懸濁粒子が魚類に与える影響の検討—。地質学雑誌, 108: 435-452.
- Tazaki, K., Sato, M., Van der Gaast, S. V. and Morikawa, T.(2003) Flushing clayey dam sediments influence on downstream benthic life. Clay Minerals (in press).
- 柳沢幸夫(1999)金沢市南部地域に分布する中新統の珪藻化石層序。地調月報, 50: 49-65.