

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—

Sediment characteristics of Dashidaira Dam Reservoir at Kurobe River and Toyama Bay, and flushed suspension impacts on fishes

Abstract

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*

Kazue Tazaki, Naoko Nawatani**,
Yukie Kunimine*, Toshikazu Morikawa*,
Toshiki Nagura**, Rie Wakimoto**
Ryuji Asada**, Hiroaki Watanabe**
Kaori Nagai**, Yorimasa Ikeda**
Kazuhiro Sato*, Hiromi Segawa*
and Koshiro Miyata**

2001年9月4日受付.
2002年4月26日受理.

* 金沢大学理学部
Faculty of Science, Kanazawa University,
Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan
** 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, Ishikawa 920-1192, Japan

In 1985, a dam with a discharge gate was built at Dashidaira at Kurobe River, Toyama Prefecture for the first time in Japan.

The dam sediments were first flushed out in December, 1991. The sediments with bad smell, such as sludge, spread all over the downstream of Kurobe River. After the first discharge of the dam sediments, benthic fishes decreased year by year in Toyama Bay. In this study, the sediments in Dashidaira Dam Reservoir and Toyama Bay were collected in 1997, 2000 and 2001.

The Toyama Bay sediments which were considered to have been affected by discharged dam sediments were collected on July 20, 2000, November 19, 2000, and March 3, 2001. The sediments in the dam reservoir and the bay were studied chemically, physically and mineralogically for comparative study.

The quantity of clay minerals, mainly smectite, increase toward the discharge gate at Dashidaira Dam. The distribution of clay minerals approximately corresponded to distribution of the N, C, and S concentration in Toyama Bay. XRD data show similar clay mineral components and patterns between dam sediments and suspended particles from the seabed at the offing of Kurobe River mouth. The sediments in Dashidaira Dam Reservoir and Toyama Bay contain relatively high content of kaolin minerals associated with chlorite, vermiculite, smectite, and mica clay minerals compared with sediments of the other bays. Rainbow trouts in water with smectite suspension result clearly indicated the damage to the fish. In the highest concentration of smectite (10 g/l), all 7 rainbow trouts died in five hours. The fish's gills were deformed and dehydrated, suggesting influence of smectite particles adhered to the surface of the gills. Furthermore, SEM observation and EDX analysis of the flat fish's gill in Toyama Bay clearly showed the presence of particle-like thin films with organic materials sticking on the surface. The volume of discharged sediments from Dashidaira Dam Reservoir is clearly related to the decrease of annual haul of benthic fishes in Toyama Bay within the past nine years (1991-1999).

Key words : dam sediments, Toyama Bay, marine sediments, clay minerals, smectite, interstitial water, benthic fishes, flatfish, gills

はじめに

日本において、治水、利水の目的で大型ダム建設が本格的に取り入れられたのは、1965年に完成した高さ165mの佐久間ダムが最初である(天野, 2001)。それ以降、水力発電や洪水防止などの機能を持つダムの数は年々増加し続けてきた。しかし、近年、ダム建設のみが原因とはいえないものの、

日本における海魚の漁獲量は、世界一を誇る1984年の1150万tから、1998年には531万tと半分以上まで落ち込み、世界一の海産物輸入国となった(天野, 2001)。また、ダムは、下流域や海域の魚だけでなく、上・下流域の堆積物の増減や海岸の浸食、さらには、生態系にも大きな影響を与えており、長野県の脱ダム宣言や東北地方における魚のための植林運動などにみられる様に、社会問題ともなっている。ダム建設に

よる水質汚濁、塩害、下流域への「流れのない川」の出現など、人間を含めたあらゆる生命体の生存そのものを脅かすという理由から、アメリカにおける連邦ダム建設は1980年以降、事実上、一つもつくられてきていない（公共事業チェック機構を実現する議員の会、2001）。さらに、カリフォルニア州では、すでに完成しているエルワー川のグラインズ・キャニオンダム、エルワーダムを取り壊すことになった。「生態系と漁業回復に関する法律」で、サケの遡上する川にするためには、ダムを取り壊す以外に方法はない、との結論に達したからだとされた。

一方、ダムの寿命はダム堆積物の堆積量に大きく依存しており、欧州諸国では、ダムに流入・堆積する土砂量を根本的に減らすため、ダム堤体に設置した排砂ゲートや排砂パイパストンネルにより堆積土砂を排出したり、サケの遡上を可能にするため魚道を設置している（角、1996、1998；Kareiva et al., 2000；Mann and Plummer, 2000；Jackson et al., 2001）。日本でも、1985年に富山県黒部川の上流約26 kmに、排砂ゲートを設置した出し平ダムが建設された（角、2000）。建設6年目の1991年12月、わが国で初めてダムの排砂ゲートからの直接排砂が行われた。その際、ダムからは砂・礫ばかりではなく多量のヘドロが排出され、下流域には悪臭が満ち、生態系にも大きな影響を与えた（小久保、2000）。出し平ダムは、その後も1999年までに計8回の排砂を実施している。2000年には、出し平ダムの下流6 kmに宇奈月ダムが新設され、同年9月3、4日に土砂変質抑制策として、出し平ダムの排砂ゲートを開けている。また、2001年6月20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、土砂変質抑制策とは、出し平ダム湖堆積物が変質して環境に悪影響を与えないよう、堆積物に酸素を供給することを目的とし、下流に位置する宇奈月ダムの排砂ゲートは閉鎖したまま、出し平ダムの排砂ゲートの開操作を行ったものである。これは、2000年にダム湖への水の流入量が規定を満たさず、排砂を行えなかったためになされた対策である。

これまで、水中の懸濁物質が魚貝類の孵化およびその後の成長に重大な影響を与えることが多く報告されている（Loosanoff and Frances, 1948；Harry, 1960；O'Connor et al., 1976；Auld and Schubel, 1978；Morgan et al., 1983；Isono et al., 1998；Staub, 2000）。しかし、有機物と粘土鉱物を多く含むダム堆積物が直接排砂され、河川から海まで到達した後の懸濁微粒子の挙動や、その挙動が魚介類へ与える影響についての詳細な研究はされていない。

本研究では、出し平ダムの排砂が下流域に与えた影響を明らかにするため、出し平ダム湖堆積物の特性、および黒部川の河口付近から富山湾東部の堆積物および間隙水の特性について調査、分析を行った。さらに、懸濁微粒子が魚に与える影響について実験を行い、ニジマスのエラに損傷を与える結果を得たので報告する。

なお、2001年6月に行われた連携排砂時における排水の特性については、別報で述べた（田崎ほか、2001）。

富山湾と黒部川流域の地形および地質環境

富山湾の地形、地質および海流については、日本海洋学会・沿岸海洋研究部会（1985）に詳しい。富山湾は、北緯37°、東経137°付近に位置する。富山湾の東側には、扇状地を隔てて高度3,000 mの日本アルプスが、南側には同様に扇状地を隔てて飛騨高原が、西側には第三系の丘陵性の能登半島があり、日本海に向かって北東方向に開けている。富山湾には、東から順に黒部川、片貝川、早月川、常願寺川、神通川、庄川、小矢部川の7大河川が流入し、多量の土砂を運搬する。富山湾は急激に深くなっており、大陸棚は湾西部や南部でいくらか発達するが、神通川以東では発達が悪い。大陸棚斜面には海底谷がよく発達しており、この海底谷は直接富山湾底に達している。黒部川河口沖では、海底の傾斜が一定で、陸から約600 m沖合いで水深が150 mになる。その北東の芦野沖の地形は入り組んでおり、水深は黒部川河口沖に比べやや浅い。さらにその東端には、水深の変化が緩やかな大きな尾根があり、その尾根の東側は緩やかな谷となっている。

富山湾東海域の地質は、扇状地礫層から構成されている（藤井、1974、1983；富山総合利用対策研究会、1983）。また、黒部、泊の丘陵は、海底で形成された扇状地性堆積物からなると考えられている（茂木、1977）。海底堆積物表層の微細泥（44 μm以下）の分布について、湾全体では、沖合部は大部分が70%以下であるが、全般的には湾西部で高く、黒部川河口付近を含む沿岸陸棚および湾東部沖合部では30%以下と極めて少なくなっている。表層堆積物中の腐植酸の分布は、微細泥含有率に比例すると考えられるが、河川流入部と水深100~900 mに多くっており、神通川より西側に多い。900 m以浅では全体的に陸源腐植で占められ、河川より流出する陸起源の有機物が湾内広範囲に影響を及ぼしている。富山湾における海流については、対馬暖流と日本海固有冷水の消長および河川水の動向などにより、各年各季節における状況が複雑である。黒部川河口付近においては、平均的に湾西岸沿いから湾口東部に向かって流去している（日本海洋学会・沿岸海洋研究部会、1985）。

富山湾に注ぐ黒部川上・中流域の地質は、主に新期花崗岩質岩石体からなるが、その中には閃緑岩、流紋岩・石英斑岩火山砕屑岩、そして片麻岩が点在する。下流域には扇状地堆積物である砂・粘土・礫が分布し、そして、扇状地内には未固結堆積物の礫（真砂）からなる河床堆積物が堆積している（富山県、1992）。

試料

富山湾堆積物の試料採取は、富山県黒部川の河口周辺から海岸沿い北東方向に約2 km沖合500 mの範囲の28ヶ所で行った（Fig. 1）。なお、ここに示した海底地形図は、朝日航洋と伴にスキャンソナーおよびGPSを用い、2000年に独自に作成したものである。試料採取は、土砂変質抑制策実施前の2000年7月20日、土砂変質抑制策実施後の同年11月19日、2001年3月3日の3回にわたって行われた（Fig. 1）。それらの試料の位置は、分析データとともにTable 1に示す。

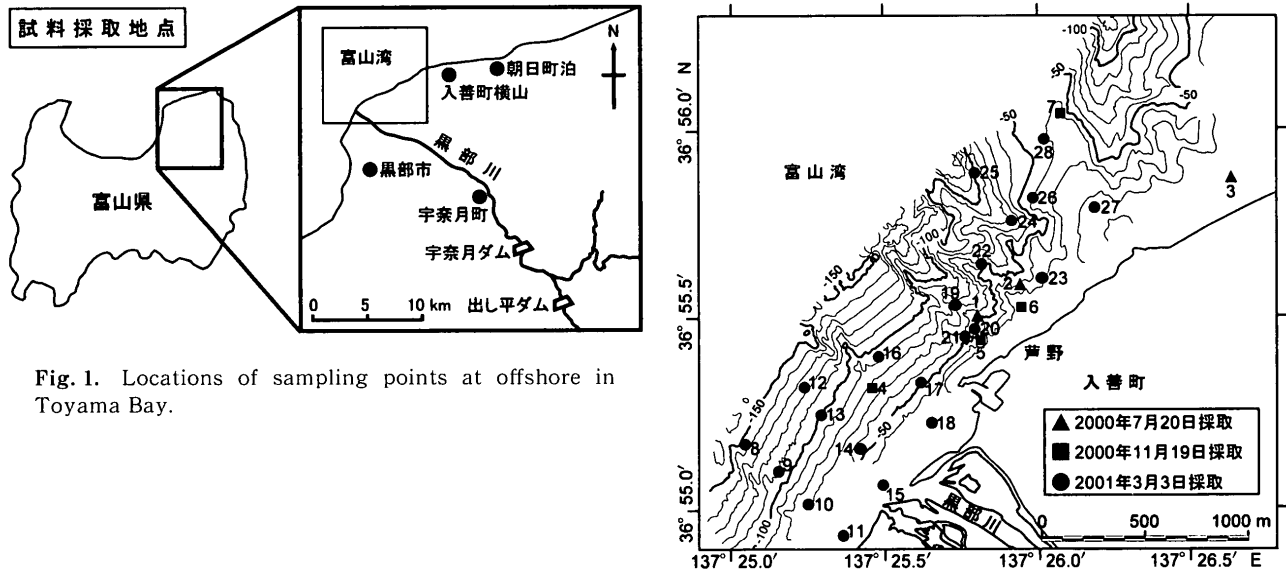


Fig. 1. Locations of sampling points at offshore in Toyama Bay.

Table 1. Characteristics of pore water and sediments from Toyama Bay, Japan.

試料 No.	採取日	緯度 (北緯)	経度 (東経)	水深 [m]	粒度	色	硫黄臭	含泥率 [wt%]	pH	Eh [mV]	EC [mS/cm]	DO [mg/l]	WT [°C]	窒素 [wt%]	炭素 [wt%]	硫黄 [wt%]
1	2000年7月20日 抑制策 実施前	36° 55.50'	137° 25.80'	50	—	—	—	—	7.5	-180	3.9	1.1	20	0.040	0.507	0.213
2		36° 55.59'	137° 25.94'	36	—	—	—	—	7.7	-130	30.6	1.1	21	0.037	0.145	0.199
3		36° 55.87'	137° 26.64'	8	—	—	—	—	7.7	50	46.4	2.5	24	0.038	0.170	0.121
4	2000年11月19日 抑制策 実施後	36° 55.31'	137° 25.44'	77	シルト	7.5Y 6/2	+	55.6	8.3	-200	45.8	5.4	17	0.044	0.934	0.155
5		36° 55.48'	137° 25.81'	40	細粒砂	7.5Y 5/2	+	24.2	8.2	-260	47.2	1.3	18	0.011	0.488	0.149
6		36° 55.52'	137° 25.95'	18	シルト	7.5Y 3/1	+	32.0	8.1	-330	46.4	3.9	17	0.013	0.442	0.093
7		36° 56.05'	137° 26.07'	39	シルト	7.5Y 4/1	+	46.6	7.7	-300	41.7	2.8	17	0.024	0.658	0.178
8	2001年 3月 3日	36° 55.17'	137° 25.04'	145	中粒砂	ごま塩状	-	4.1	7.4	-120	—	—	—	n.d.	0.050	0.031
9		36° 55.10'	137° 25.15'	110	中レキ 混じり砂	ごま塩状	-	5.1	8.0	210	47.5	12.3	8	n.d.	0.078	0.043
10		36° 55.02'	137° 25.24'	73	シルト～ 粘土	5G 2/1	+++	21.2	7.6	-190	48.2	10.4	8	n.d.	0.411	0.095
11		36° 54.94'	137° 25.35'	18	中粒砂	ごま塩状	-	4.5	8.0	0	47.7	11.0	9	n.d.	0.072	0.059
12		36° 55.32'	137° 25.24'	124	極細粒砂	5Y 5/3	+	30.4	7.8	-180	—	—	—	n.d.	0.191	0.057
13		36° 55.25'	137° 25.29'	100	細レキ 混じり砂	ごま塩状	-	12.1	7.8	-60	45.2	11.2	8	n.d.	0.118	0.047
14		36° 55.16'	137° 25.42'	55	細粒砂～ シルト	7.5GY 3/1	+	21.2	8.0	-240	48.5	9.8	8	n.d.	0.287	0.085
15		36° 55.07'	137° 25.48'	20	中粒砂	ごま塩状	-	8.9	7.6	-110	48.3	9.0	9	n.d.	0.102	0.051
16		36° 55.40'	137° 25.48'	93	極細粒砂	10Y 5/2	+	33.5	7.7	160	—	—	—	0.002	0.476	0.095
17		36° 55.33'	137° 25.62'	53	極細粒砂	2.5GY 4/1	+	26.8	7.4	-150	—	—	—	0.002	0.516	0.077
18		36° 55.22'	137° 25.65'	25	中粒砂	ごま塩状	-	7.2	7.6	70	47.7	9.5	8	n.d.	0.062	0.054
19		36° 55.54'	137° 25.73'	72	細粒砂～ シルト	5GY 3/1	+	44.3	7.7	-230	46.9	12.0	8	n.d.	0.487	0.107
20		36° 55.48'	137° 25.79'	52	細粒砂	7.5GY 3/1	+	16.6	7.7	-170	48.2	10.7	8	n.d.	0.223	0.113
21		36° 55.45'	137° 25.76'	56	極細粒砂	7.5GY 5/1	+	15.1	7.4	-10	—	—	—	0.033	1.682	0.120
22		36° 55.65'	137° 25.81'	60	シルト	10GY 3/1	++	73.8	8.0	-220	48.7	12.1	7	n.d.	0.446	0.113
23		36° 55.61'	137° 26.01'	33	シルト	7.5GY 3/1	+	39.4	7.6	-160	—	—	—	0.014	0.865	0.208
24		36° 55.75'	137° 25.91'	77	細粒砂～ シルト	10Y 3/1	+	59.6	8.1	-220	50.5	13.5	7	0.005	0.579	0.092
25		36° 55.89'	137° 25.80'	100	細粒砂～ シルト	7.5GY 4/1	++	80.9	8.0	-220	50.0	13.0	8	n.d.	0.465	0.101
26		36° 55.82'	137° 25.98'	40	細粒砂～ シルト	7.5GY 3/1	+	30.2	8.0	-140	50.7	11.2	7	n.d.	0.280	0.081
27		36° 55.79'	137° 26.18'	17	細レキ 混じり砂	ごま塩状	-	0.0	8.1	140	49.1	15.2	6	n.d.	0.038	0.025
28	36° 55.98'	137° 26.02'	41	シルト	2.5G	+++	68.1	7.5	-300	46.1	7.8	4	0.012	0.731	0.189	

硫黄臭(-:無し +:弱 ++:中程度 +++:強い)
 n.d.; not detected
 —: 欠測

出し平ダム湖堆積物については、上流からダム堤体にかけての5ヶ所から試料を採取した。採取地点は、粘土鉱物等の分析結果とともに、Fig. 2に示した。採取は、排砂ゲート付近については1997年12月3日、その他の地点については2000年7月3日に行っている。なお、試料採取には海底・湖底いずれの場合にもスミスマッキンタイヤー式採泥装置を用いた。

分析および実験方法

1. 堆積物中の含泥率

富山湾堆積物(堆積物の表層～深さ約15cm)を採取について、風乾し、メッシュ64 μm のふるいを用いて水ふるいを行い、含泥率を求めた。なお、含泥率を求めるにあたっては重量を測定し、その試料を超音波にかけて粒子を分散させたものを用いた。

2. 間隙水の水質測定

富山湾堆積物試料について、採取直後の堆積物中に表層から電極を挿入し、間隙水のpH、酸化還元電位(Eh)、電気伝導度(EC)、溶存酸素量(DO)、水温(WT)の測定を行った。それぞれの測定にはHORIBAカスターニーLABpHメーターF-24、HORIBAカスターニーACTpHメーターD-13、HORIBAカスターニー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を用いた。この測定値は、表層から10cm付近の間隙水の性質を代表する。

3. 堆積物のエネルギー分散型蛍光X線分析(ED-XRF分析)

富山湾堆積物試料について、ED-XRF分析により含有元素の半定量分析を行った。分析には日本電子製エネルギー分散型蛍光X線分析装置JSM-3201、Rh-K α 線源を用い、加速電圧30kVでFP(ファンダメンタルパラメーター)ーバルク法により半定量分析を行った。試料は、風乾させ乳鉢で粉末にし、ペレットを作成し分析を行った。

4. 堆積物の窒素、炭素、硫黄含有量の定量分析

富山湾堆積物試料について、NCS元素分析装置(サーモクエスト社製、NA2500)を使用し、堆積物中の窒素、炭素、硫黄の定量分析を行った。分析には風乾した粉末試料をそれぞれ約2mgずつ用い、1試料につき2回分析を行い、平均値を求めた。検量線の作成にはK-factor法を採用し、標準試料にはSulfanilamide Standard (C₆H₈N₂O₂S, C; 41.84%, H; 4.68%, N; 16.27%, S; 18.62%)を使用した。なお、本分析で求められる炭素量は、全炭素量である。

5. 堆積物のX線粉末回折分析(XRD分析)

堆積物試料に含まれる鉱物を、XRD分析により同定した。分析には理学電機製RINT2200型X線回折装置を使用し、CuK α 線を用いて電圧40kV、電流30mAで分析を行った。定方位試料の分析には、風乾した試料0.3gを乳鉢で粉末にし、コクサン製卓上遠心機H-26Fを用いて2 μm 以下0.2 μm 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。

格子面間隔が約14Å(001)の粘土鉱物として、スメクタイト、クロライトおよびバーミキュライトが考えられる。この

うちスメクタイトの同定のために、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、噴霧法で作成し、湿潤状態で分析した。また、同定した各々の粘土鉱物について、反射強度のフルスケールを同一にした(001)面の反射の高さに半価幅を加えて求めた数値(単位なし)を相対的な含有量とした。反射強度(ピークの高さ)、半価幅の求め方は、Moore and Reynolds (1997)の方法に従った。なお、クロライトとバーミキュライトは、エチレングリコール処理では同定できないため、これらを区別していない。

また、湾およびダム湖堆積物の一部の試料について、湿度調整によるXRD分析を行った。試料は、Ca飽和処理を行った定方位試料(<2 μm)について、湿度を調整して分析を行った。湿潤状態で乾燥させていないもの(100%RH)、相対湿度50%にて乾燥させたもの(50%RH)、そして相対湿度0%で乾燥させたもの(0%RH)について分析を行った。なお、乾燥は室温にて行い、同定方法はVan der Gaast and Kuhnel (2001)に従った。

6. スメクタイト懸濁液中でのニジマス飼育実験

黒部川河川水が富山湾に流入した場合、その中に懸濁している粘土鉱物が魚貝類に与える影響を知るために、ニジマスの飼育実験および富山湾の調査域より採取されたヒラメのエラの観察を行った。なお、ニジマスおよびヒラメは、富山県の大きな水産資源になっていることから、排砂が及ぼす影響を評価する必要がある。

実験に先立ち、粘土鉱物懸濁液の挙動の予備実験を行った。懸濁液は、黒部川河川水(pH7)および富山湾の海水(pH8)各々1lに、粉末標準スメクタイトとカオリン鉱物を各々0.5g懸濁させた。黒部川河川水中では両粘土鉱物とも長時間懸濁する。しかし、海水中では、スメクタイトが直ちに凝集・沈殿するのに対し、カオリナイトは長時間懸濁を保った。このスメクタイトの淡水と海水における挙動の違いから、淡水においては河川に泳いでいる魚類に、また、一方、海洋においては底生魚や貝類などの生態に影響を与えと考え、特に、スメクタイトに注目し、ニジマス飼育実験を行った。なお、スメクタイトは、日本粘土学会参考試料JCSS-3101として使用されているクニミネ工業製クニピアF(粒径2 μm)を用いた。また、カオリン鉱物は、ニュージーランド産天然標準カオリン鉱物を用いた。

ニジマス飼育実験は、エアレーションを設置した各水槽に、異なるスメクタイト濃度の懸濁液(0, 0.5, 5, 10g/l)を設した。なお、この濃度は、Glechner et al. (1999)およびStaub (2000)の実験に従った。ニジマスは、濃度が0.5g/lの水槽には9匹、それ以外には7匹入れて実験を行い、水質および生存率の経時変化を24時間測定した。なお、ニジマスの年齢は1年、体長6~7cmで、金沢市内の養殖業者から購入したものを用いた。実験終了後も濃度0, 0.5および5mg/lで生存していたニジマスのエラについて、微分干渉光学顕微鏡(Nikon-OPHTHOPHOT2)を用いて観察し、ED-XRF分析によりエラの表面の元素分析を行った。

また、富山湾の入善沖(試料No. 22付近)で捕獲したヒラ

メのエラを、日本電子製 JSM-5200LV 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察し、その付着物質については、SEM に取り付けられたフィリップス製 EDAX PV-9800TD 型エネルギー分散 X 線分析装置を用いて、エネルギー分散 X 線分析 (EDX 分析) を行った。

結 果

富山湾および出し平ダム湖堆積物の分析結果と、ニジマス飼育実験、ヒラメのエラの観察結果を以下に示す。

1. 出し平ダム湖堆積物

出し平ダム湖堆積物試料は、ダム堤体に近い No. 4 および No. 5 の堆積物の粒度は、シルト～粘土で、色は 5G2/1～7.5GY4/1 である。ダム堤体より上流の No. 2 および No. 3 において、粒度は細粒砂～シルトに変化し、色も 7.5GY になる。最も上流の No. 1 では、中粒砂～細礫混じりの砂となり、ごま塩状を呈する。

出し平ダムにおける、湖表層および湖底の水質測定、堆積物の ED-XRF 分析、および XRD 分析結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 中の水質を示すレーダーグラフは、各データの偏差値を求め、基準値の六角形に対してのずれと、その傾向を表し

た。ダム付近では、EC がダム湖上流と比較して高くなっている。また、ED-XRF 分析結果より、ダム堆積物は、主に Si, Fe, Al, K, Ca から構成され、上流 (No. 1) からダム直下 (No. 5) にかけて Si の割合が減少し、逆に Fe の割合が増加する傾向が見られ、K の含有量は均一に分布していることが認められた。

出し平ダム湖堆積物 (<2 μ m) の定方位試料の XRD 分析結果より、それぞれの試料中には、いずれも 14Å, 10Å, 7Å の反射が認められ、エチレングリコール処理を施した結果、格子面間隔が 15～17Å (スメクタイト), 14Å (クロライトおよびパーミキュライト), 10Å (雲母類粘土鉱物), 7Å (カオリン鉱物) の反射が得られた。これらについて、相対的な含有量を求めた。ダム湖において、上流側からダム堤体に近づくにつれ堆積物中の粘土鉱物の含有量が増えており、かつ、スメクタイト、クロライト・パーミキュライト、カオリン鉱物の増加が顕著である。特に試料 No. 5 では、スメクタイトの含有量が他の粘土鉱物より多くなっている。

2. 富山湾堆積物

2-1. 含泥率：富山湾の 28ヶ所から採取した堆積物は、中粒砂、極細粒砂、シルトと様々で、灰～黄灰色を呈する。

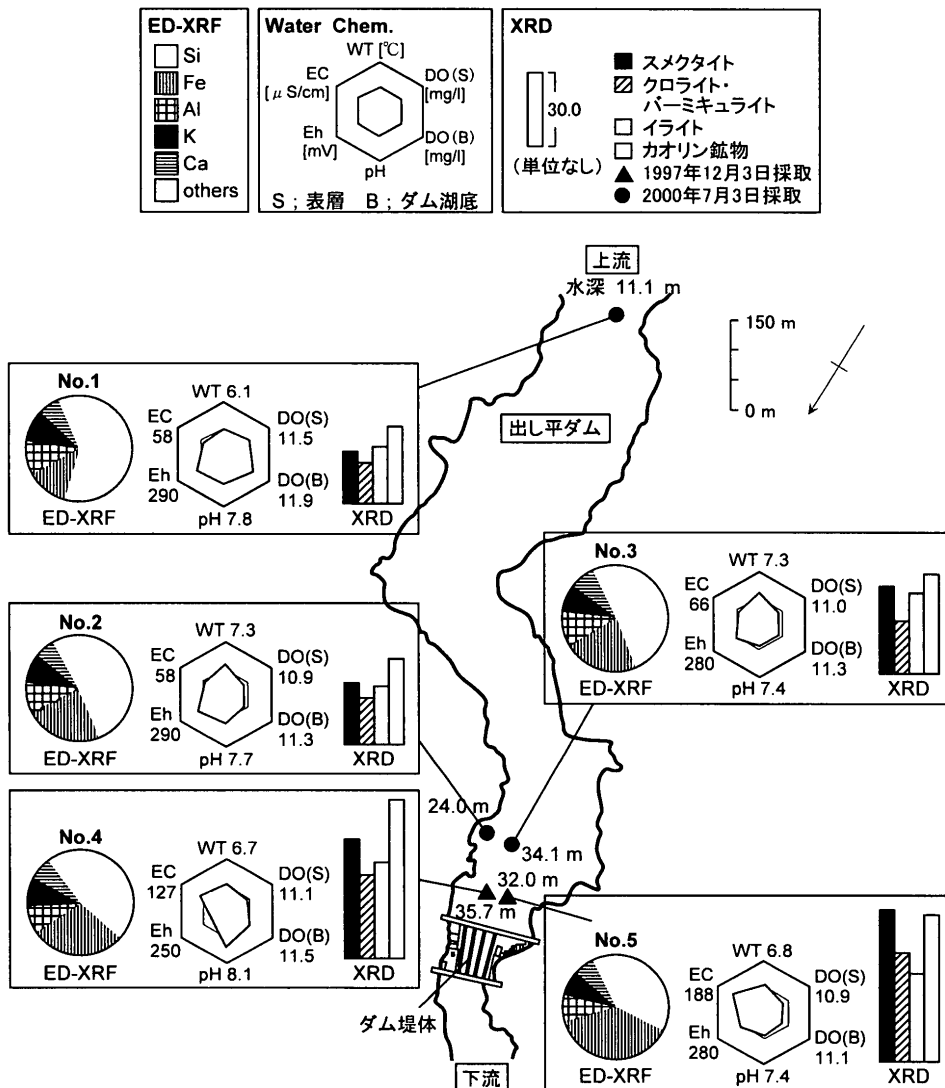


Fig. 2. Distribution map of water quality, chemical composition of sediments and clay mineral concentration at Dashedaira Dam Reservoir, showing intensity of clay minerals of (001) d-spacing.

The calculation method was used after Moore and Reynolds (1997).

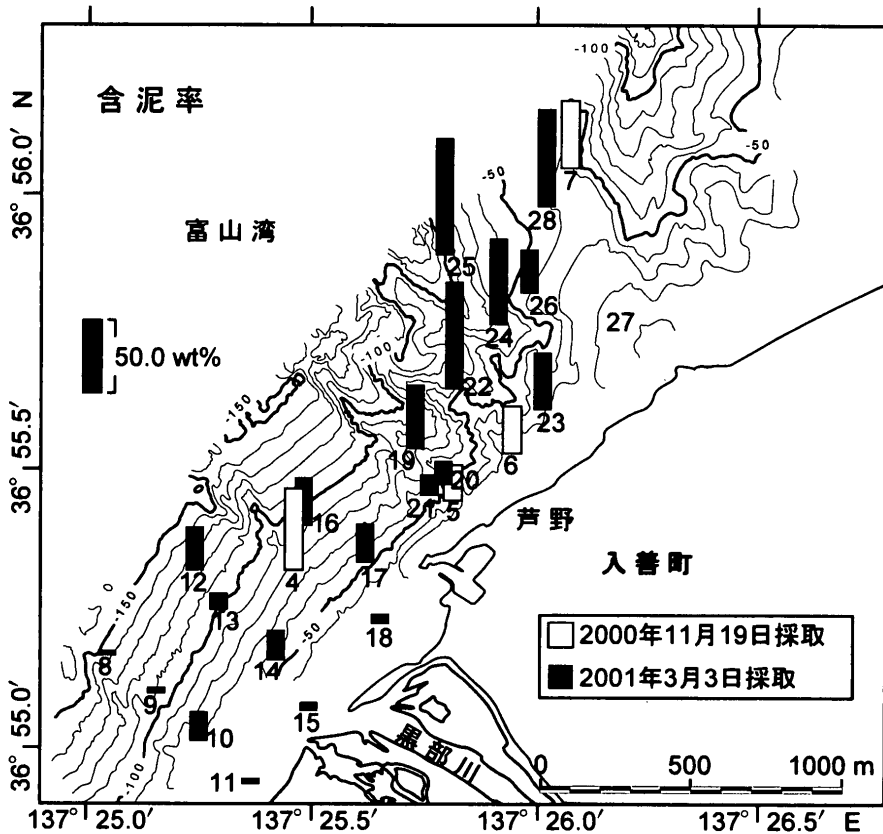


Fig. 3. Distribution map of mud content of the sediments in Toyama Bay.

中粒砂は花崗岩の風化した真砂由来で、長石類と黒雲母、角閃石からなり、ごま塩状を呈す (No. 8, 9, 11, 13, 15, 18, 27) (Table 1).

富山湾堆積物試料の含泥率を求めた結果を Fig. 3 に示す。試料採取地点 No. 22, 24, 25, 28 においてそれぞれ 73.8, 59.6, 80.9, 68.1 wt% と非常に高い値を示した。これに対し、黒部川河口付近と海岸沿いはいずれも 8.9 wt% 以下と低い値 (No. 27 では 0 wt%) を示した。なお、含泥率の高い地点は地形が入り組んでおり、底生魚のよい漁場となっていた場所である。

2-2. 間隙水の測定結果：富山湾堆積物試料の間隙水の水質測定結果を Table 1 に示す。pH はいずれも 7.4~8.3 で弱アルカリ性を示し、採取日、採取地点による変化は認められない。一方、Eh はほとんどの地点でマイナスを示し、還元性であった。特に、土砂変質抑制策実施後の 2000 年 11 月 19 日に測定を行ったすべての地点では、-200 から -330 mV と非常に低い値を示し、かつ硫黄臭がした。

EC は、No. 1, 2 で低い値を示した以外はすべて 40 mS/cm 以上と、比較的高い値を示した。DO については、2000 年 7 月 20 日と、抑制策実施後の 2000 年 11 月 19 日は 1.1~5.4 mg/l と貧酸素状態であるのに対し、その後の 2001 年 3 月 3 日に採取した試料はいずれの地点でも 7.8 mg/l 以上の値を示した。また、Eh が低い場合、ほとんどの試料で硫黄臭がした。水温は、2000 年 7 月 20 日には 20~24°C、11 月 19 日には 17~18°C、2001 年 3 月 3 日には 7~8°C であり、季節変化を示したが、Eh および DO については、抑制策が実施された前後の期間と翌年の 3 月とでは有意な差が認められた。

2-3. エネルギー分散型蛍光 X 線分析 (ED-XRF 分析) 結果：富山湾堆積物試料 No. 4~28 における ED-XRF 分析結果を Fig. 4 に示す。検出された元素は Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe そして Sr の 11 元素であり、それぞれ異なる [c.p.s.] のスケールであらわしている。このうち S については、Table 1 に NCS 元素分析による定量分析結果を示しているので図では省略する。

いずれの試料採取地点においても、Si は最も多く含まれ、特に真砂土の No. 9 と No. 18 において高い。一方、シルト質で硫黄臭の強い No. 28 において最も低い Si 値を示したが、Mg, S, Ti, Mn, Fe は、他の地点と比較して [c.p.s.] の値が相対的に高い。特に No. 28 は硫黄臭が強く、Eh も -300 mV と還元性であり、炭素含有量も 0.731 wt% と高い。Fe は 8934~17684 [c.p.s.] の値をとり、細粒砂の No. 25 において最も高く、真砂土の No. 27 において最も低い値を示した。なお、Si と Fe については逆の相関が認められる。含泥率の高い No. 22, 25 の試料において Mg, Al, Ti, Mn, Fe の含有量が特に高く、No. 25 においては Ca も高い値を示した。

2-4. 窒素、炭素、硫黄含有量の定量分析結果：この分析に使用した富山湾堆積物試料の採取地と窒素、炭素、硫黄含有量の定量分析結果を Table 1 および Fig. 5~7 に示す。2000 年 9 月 3, 4 日には、土砂変質抑制策として出し平ダムの排砂ゲートの開操作が行われたが、その抑制策実施 1 ヶ月半前の 2000 年 7 月 20 日と抑制策実施 6 ヶ月後の 2001 年 3 月 3 日においては、芦野沖で窒素、炭素、硫黄が多く認められた。一方、抑制策実施 2 ヶ月半後の 2000 年 11 月 19 日においては、芦野沖の谷部よりもむしろ平坦部 (例えば No. 4) で

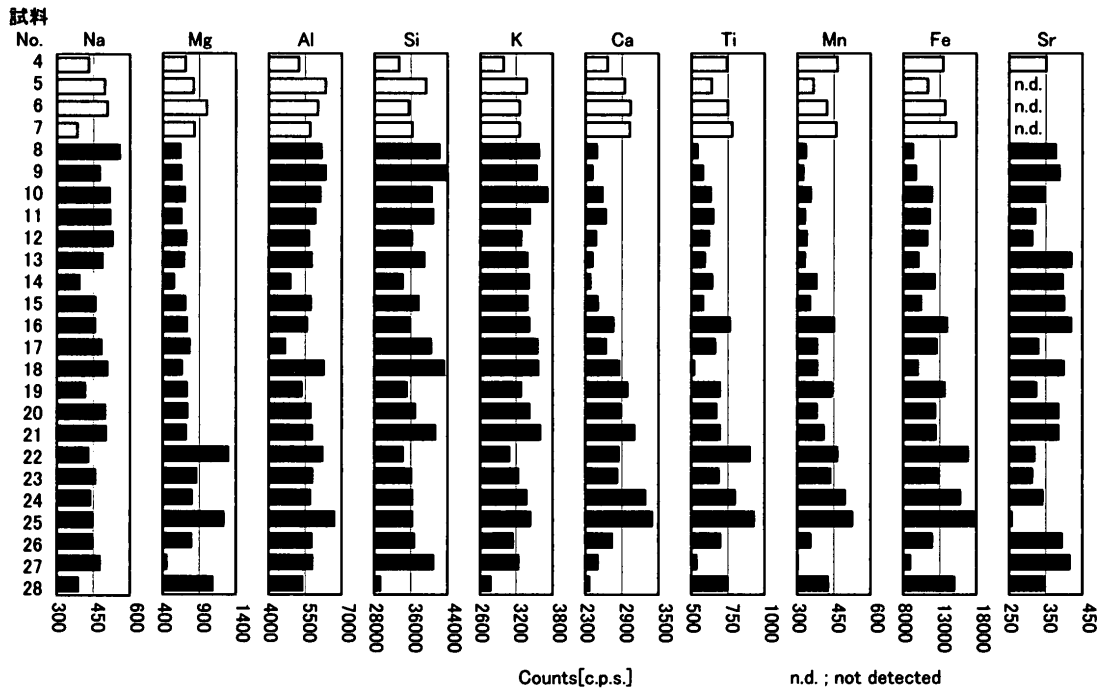


Fig. 4. Energy dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) chemical analysis of the sediments in Toyama Bay.

窒素, 炭素, 硫黄が多く認められた。窒素含有量については, No. 1~4, 21 が比較的高く, 0.033~0.044 wt% を示したが, 黒部川河口以西の No. 8~15 をはじめとした 15 ヶ所では検出限界以下であった。炭素含有量については, No. 21 における値が 1.682 wt% と特に高く, 次に No. 4 と No. 23 がそれぞれ 0.934, 0.865 wt% という値を示した。また, 中粒砂~礫まじり砂の No. 8 と No. 27 における炭素含有量が最も少なく, それぞれ 0.050, 0.038 wt% であった。硫黄含有量は No. 1, 2, 23, 28 の 4 ヶ所において比較的多く, いずれも 0.200 wt% 前後を示した。特に, No. 28 は強い硫黄臭がした。炭素含有量と同様, No. 8, 27 で最も少なく, それぞれ 0.031, 0.025 wt% であった。

以上の結果から, 窒素, 炭素, 硫黄のいずれの元素も黒部川河口以西や海岸沿いにおいて低く, 地形の入り組んだ芦野沖で高い傾向が認められた (Figs. 5~7)。すなわち, 芦野沖の堆積物中には粘土鉱物とともに, 有機物の存在を示唆する窒素, 炭素, 硫黄が多く含まれていることが明らかとなった。また, 窒素, 炭素, 硫黄のいずれについても, 抑制策実施 1 ヶ月前および抑制策実施 6 ヶ月後においては, 芦野沖で多いのに対し, 抑制策実施 2 ヶ月半後では, 黒部川河口付近の平坦部に多い傾向が認められた。この分布の違いは, 出し平ダムにおける土砂変質抑制策によるものと考えられるが, 今後検討が必要である。

2-5. X 線粉末回折分析 (XRD 分析): 含泥率が高く, Eh が -220 mV と還元的な富山湾堆積物試料の XRD 回折パターン (試料 No. 22) を Fig. 8 に示す。この結果から, 富山湾堆積物中には, 格子面間隔が 14, 10, 7 Å の粘土鉱物のほか, 濁沸石 (9.39 Å), 角閃石 (8.41 Å), 石英 (3.34 Å), 長石類 (3.19 Å), ハライト (2.84 Å) が含まれていることが明らか

となった。これらの試料にエチレングリコール処理を施した結果, 14.3 Å の反射が 16.8 Å へシフトした部分と 14.2 Å に残った部分とに分かれた。この格子面間隔が 14.3 Å から 16.8 Å にシフトしたものをスメクタイト, 14.2 Å のまま変化のなかったものをクロライトおよびパーミキュライト, 10.0 Å を雲母類粘土鉱物, 7.1 Å のものをカオリン鉱物と同定した。反射強度のフルスケールを 1200 [c.p.s.] に統一した後, 各々の粘土鉱物の半価幅と反射強度の和の相対的な含有量 (単位なし) を Fig. 9~12 に図示した。試料 No. 22 においては全ての粘土鉱物の含有量が多く, また, 海底谷にあたる No. 24, 25 も高い。2000 年 11 月 19 日に採取した No. 4~7 でも, 全体的に粘土鉱物含有量が高い値を示し, 特に No. 7 がその中で最も高い値を示した。

スメクタイトの含有量は, 黒部川河口付近の No. 8~18 の海底地形がなだらかに傾斜している地域で, 0.0~25.0 (単位なし) と低い, 河口から北西側で, 水深が深くなる方向に沿って高くなる (Fig. 9)。黒部川河口より北東の谷地形に位置し含泥率の最も高い No. 22 でスメクタイト含有量が 55.2 と最も高い値を示した。また, No. 7 で 37.4, 谷地形の No. 24 と No. 25 でもそれぞれ 29.4, 32.3 と比較的高い値を示した。また, 2000 年 11 月 19 日に採取した No. 4~7 では, 24.8~37.4 と, 他の採取日に比べ高い値を示している。真砂土を主とする No. 3, 11, 18 そして No. 27 ではスメクタイトの反射は認められなかった。

また, クロライト・パーミキュライトの含有量はスメクタイト同様, 谷地形の No. 22 で最も高い 46.7 を示し, 河口の No. 14 で最も低い 11.9 を示した (Fig. 10)。2000 年 11 月 19 日に採取した No. 4~7 において, 31.1~41.7 と比較的高い値を示し, 2000 年 7 月 20 日に採取した No. 1~3 と 2001 年 3

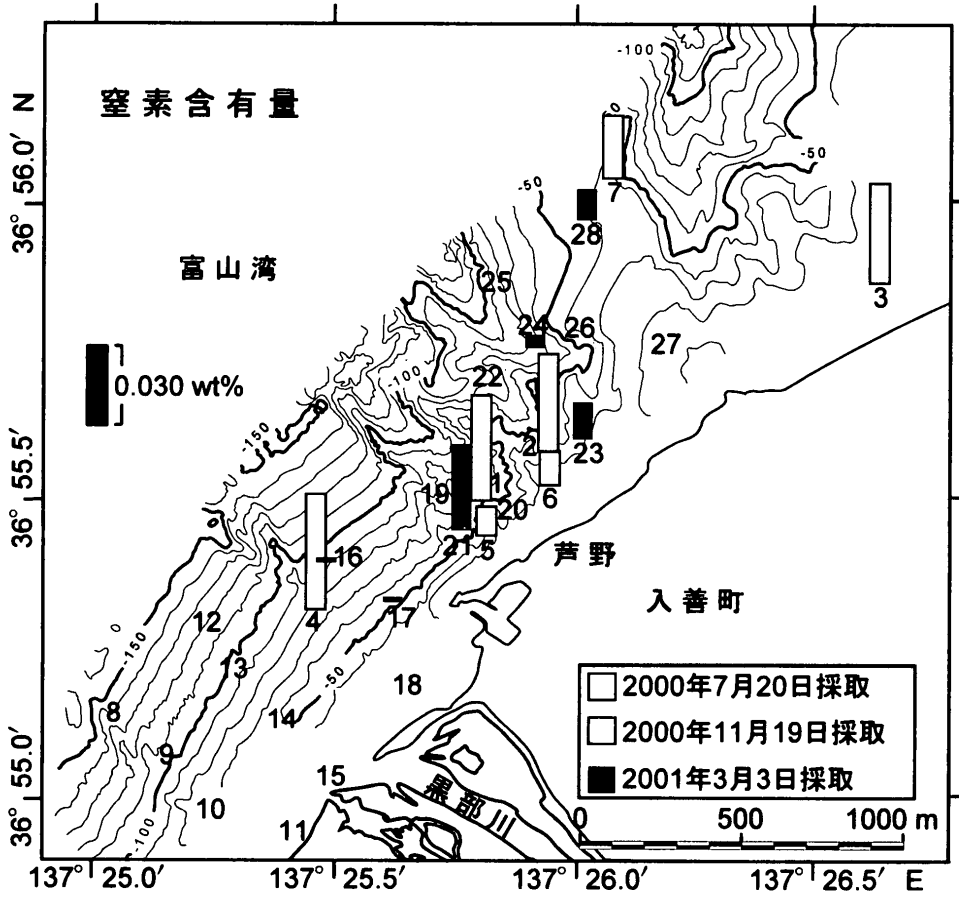


Fig. 5. Distribution map of nitrogen concentration of the sediments in Toyama Bay.

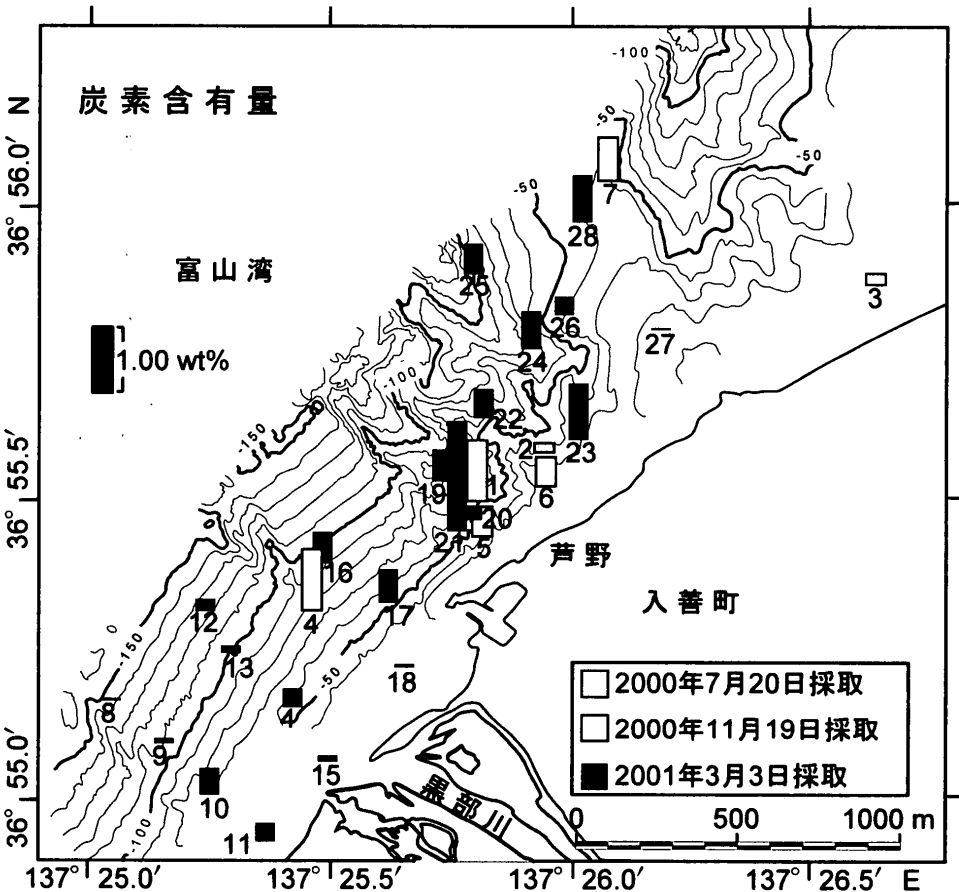


Fig. 6. Distribution map of carbon concentration of the sediments in Toyama Bay.

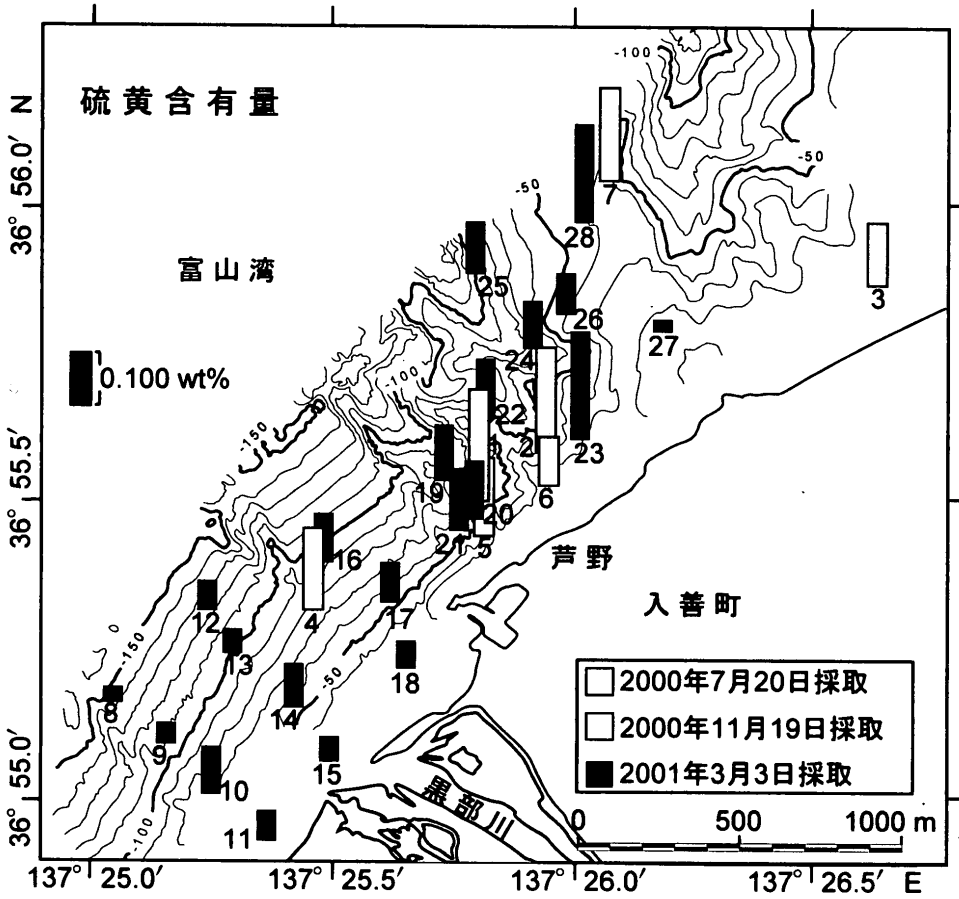


Fig. 7. Distribution map of sulfur concentration of the sediments in Toyama Bay.

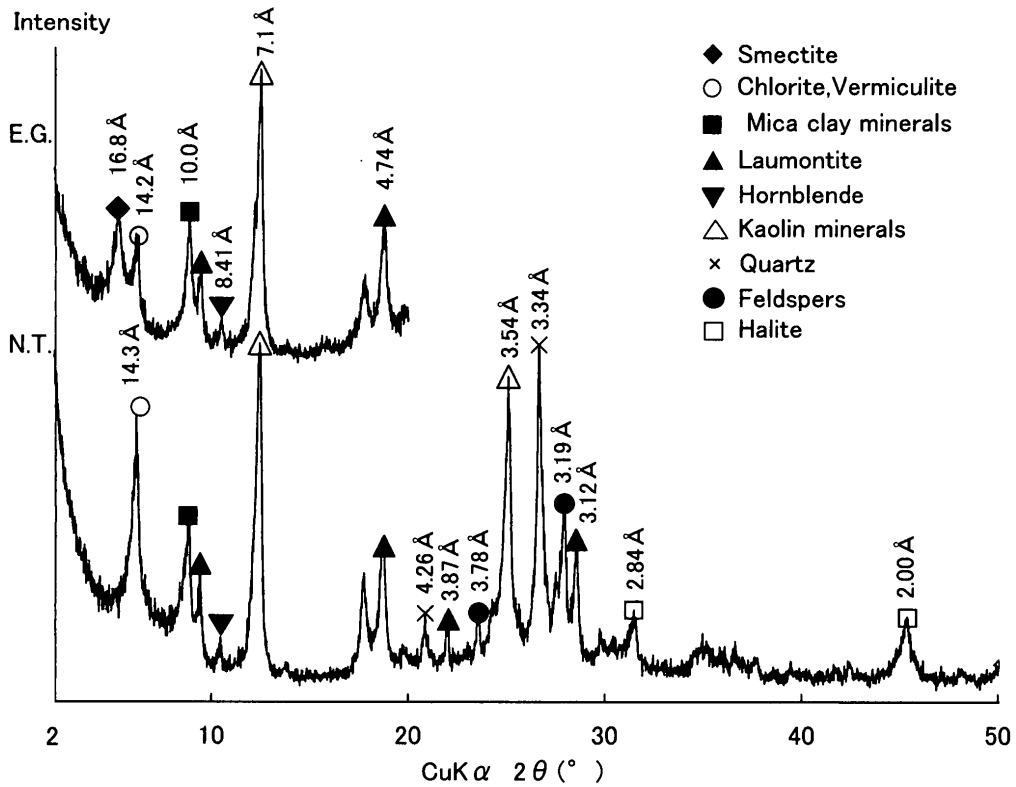


Fig. 8. X-ray powder diffraction (XRD) patterns of the sediments (<2 μ m fraction) of the sample No. 22.

N.T. : non treatment, E.G. : ethylene glycol treatment.

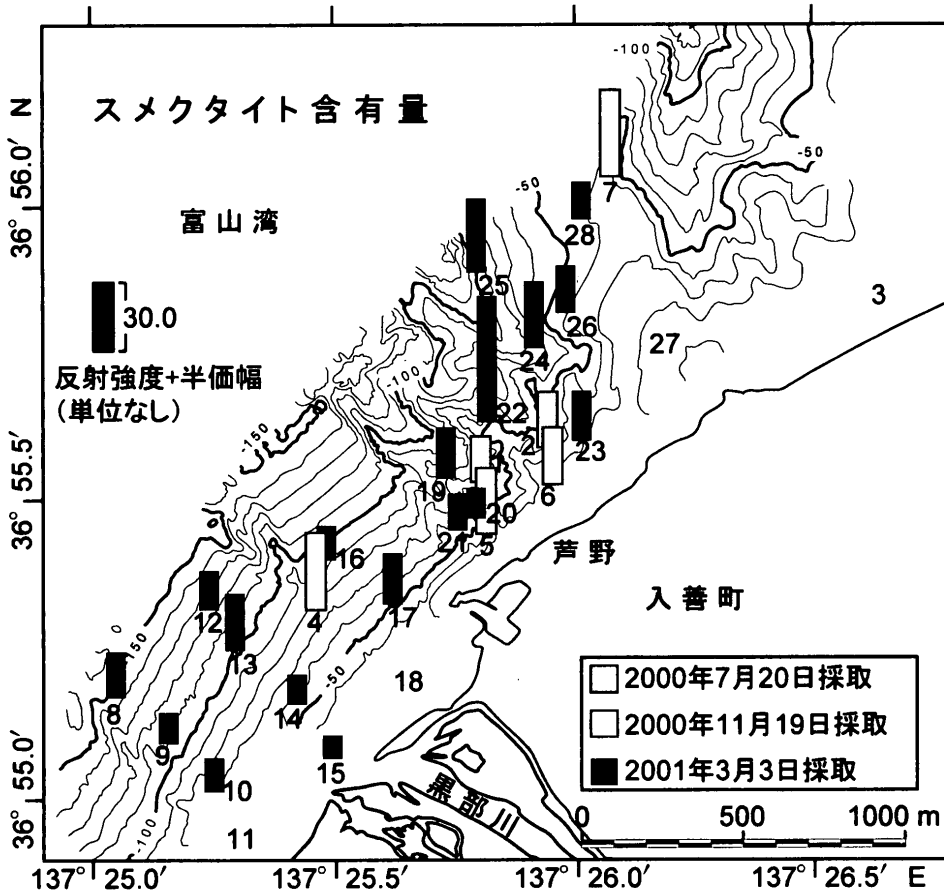


Fig. 9. Distribution map of smectite intensity in the sediments in Toyama Bay, by using XRD method.

Intensity of smectite (001) d-spacing was followed method of Moore and Reynolds (1997).

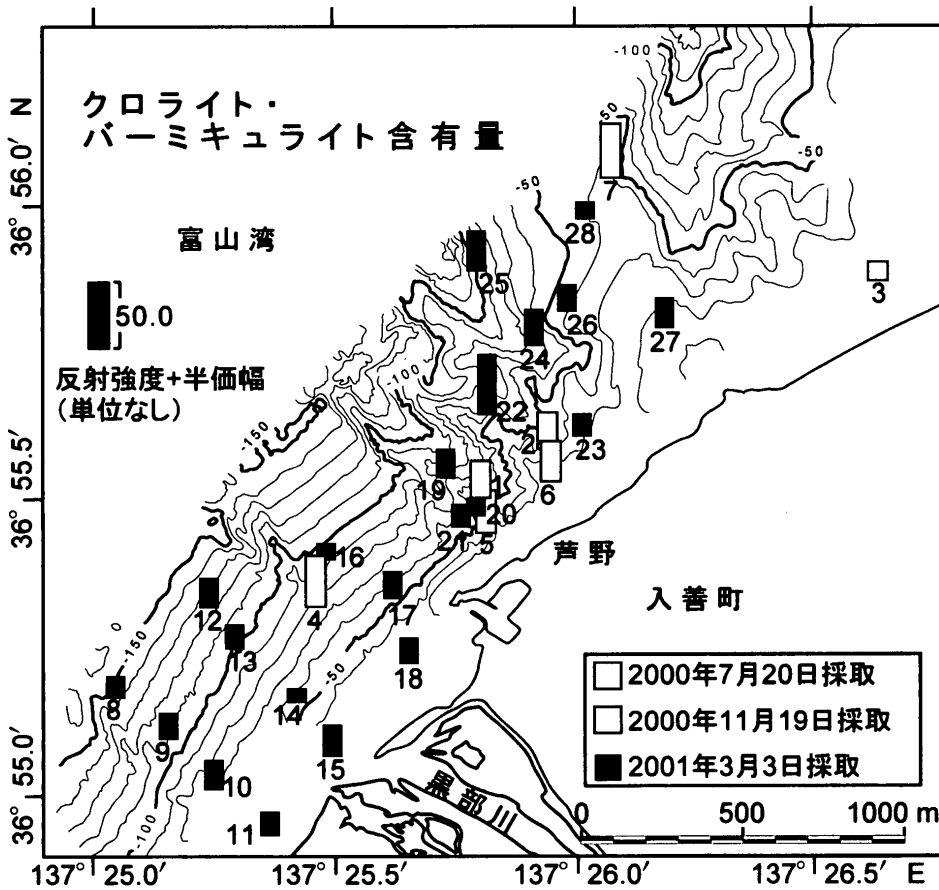


Fig. 10. Distribution map of chlorite and vermiculite intensities in the sediments in Toyama Bay, by using XRD method.

Intensity of chlorite and vermiculite was calculated by the same method as Fig. 9.

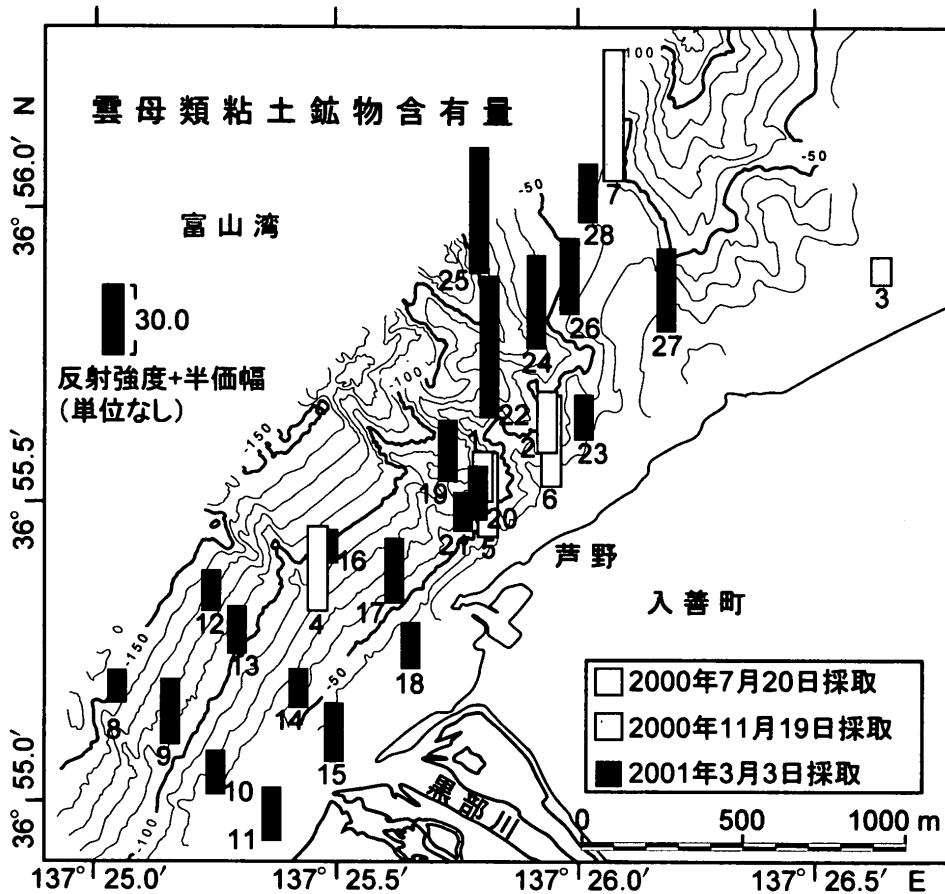


Fig. 11. Distribution map of mica group clay minerals intensity in the sediments in Toyama Bay, by using XRD method. Intensity of 10 Å (001) was calculated by the same method as Fig. 9.

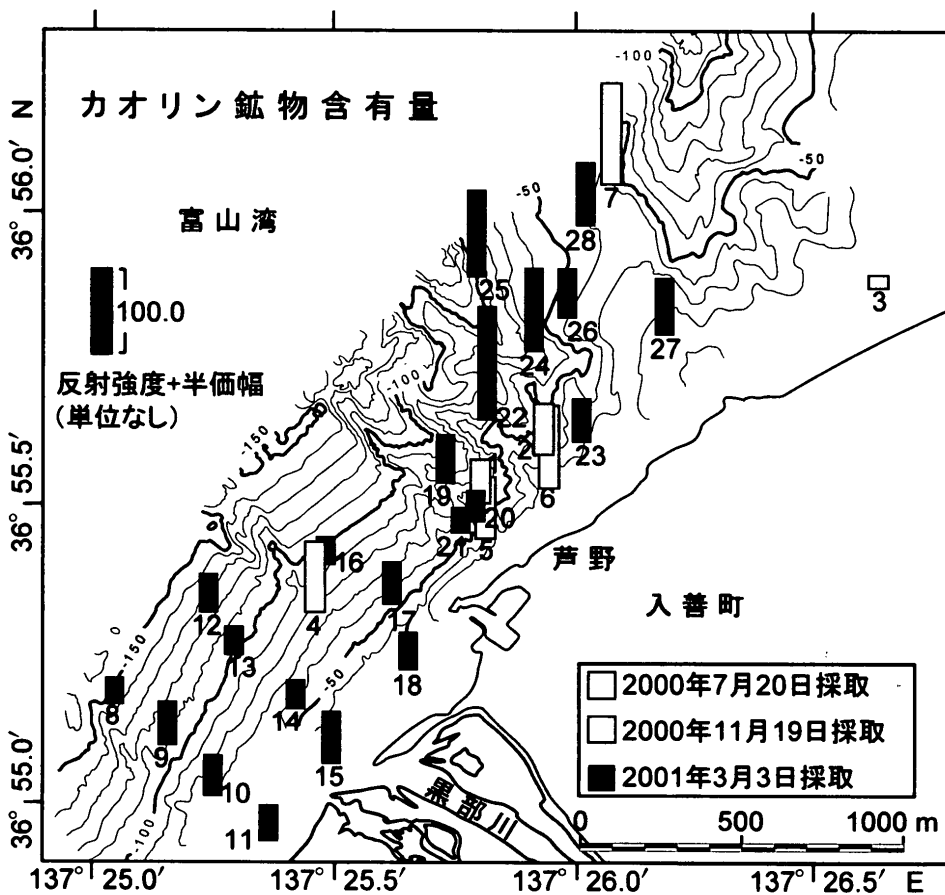


Fig. 12. Distribution map of kaolin group minerals intensity in the sediments in Toyama Bay, by using XRD method. Intensity of kaolin group minerals (001) was calculated by the same method as Fig. 9.

月3日に採取したNo. 8~28において、最高値をとるNo. 22を除いて21.0前後の値を示した。

さらに、雲母類粘土鉱物の含有量も同様に、谷地形のNo. 22で62.1と最も高く、真砂土のNo. 3で12.0と最も低い値を示した (Fig. 11)。2000年11月19日に採取したNo. 4~7では比較的高い値を示し、No. 7が57.0と特に高い値を示した。入り組んだ地形となっている北東部では、No. 22, 24, 25を中心に高い値を示し、それより南西の黒部川河口付近では低い値を示した。

カオリン鉱物については他の粘土鉱物と同様に、No. 22で135.0と最も高く、真砂土のNo. 3で15.8と最も低い値を示した (Fig. 12)。2000年11月19日に採取したNo. 4~No. 7において72.1~118.6と比較的高い値を示した。他の地点では雲母類粘土鉱物と同様に、入り組んだ地形となっている北東部では、No. 22, 24, 25においてそれぞれ62.1, 28.6, 31.5と高い値を示し、それより南西の黒部川河口付近では低い値を示した。

3. 湿度調整による出し平ダムおよび富山湾堆積物の粘土鉱物の分析

Ca飽和处理と湿度調整を行った、富山湾および出し平ダム湖堆積物試料 (<2 μ m) の定方位試料について、XRD分析結果をFig. 13に示す。いずれの試料についても、100%RHにおいて18.8Å (スメクタイト), 15.0, 15.1Å (パーミキュライト) 14.2, 14.3Å (クロライト), 10.0Å (雲母類粘土鉱物)

および7.1Å (カオリン鉱物) の反射が認められた。富山湾、出し平ダム湖堆積物試料の両者とも、湿度の低下に伴って18.8Å (スメクタイト) の反射が14Å付近へ、15.0, 15.1Å (パーミキュライト) の反射が11Å付近のブロードな反射へとシフトした。

また、XRDの反射パターンは、各試料の特徴を示すが、その反射の強さや幅にもそれぞれの特徴が現れる。本分析に用いた富山湾と出し平ダムの反射パターンを比較すると、いずれの湿度においても酷似している。特に、スメクタイトとパーミキュライトの存在を示唆する反射は、100%RHから湿度の低下に伴って変化するが、その途中の50%RHにおける反射の強さや幅、角度もよく一致している。これらの結果は、富山湾堆積物と出し平ダム湖堆積物はともに、非常に類似した性質の粘土鉱物組成からなることを示している。

4. スメクタイト懸濁液中でのニジマス飼育実験結果

異なるスメクタイト濃度の懸濁液 (0, 0.5, 5, 10 g/l) を用いたニジマス飼育実験について、水質および生存数の測定結果をTable 2に示す。また、実験終了後、生存していた濃度0, 0.5および5 mg/lでのニジマスのエラの光学顕微鏡観察およびED-XRF分析によるエラの表面の元素分析結果をFig. 14に示す。

スメクタイトを入れないコントロールでは、7匹全てが24時間後も生存していたのに対し、スメクタイト濃度が最も高い10 g/lでは、実験開始6時間後に7匹が死滅という結果が

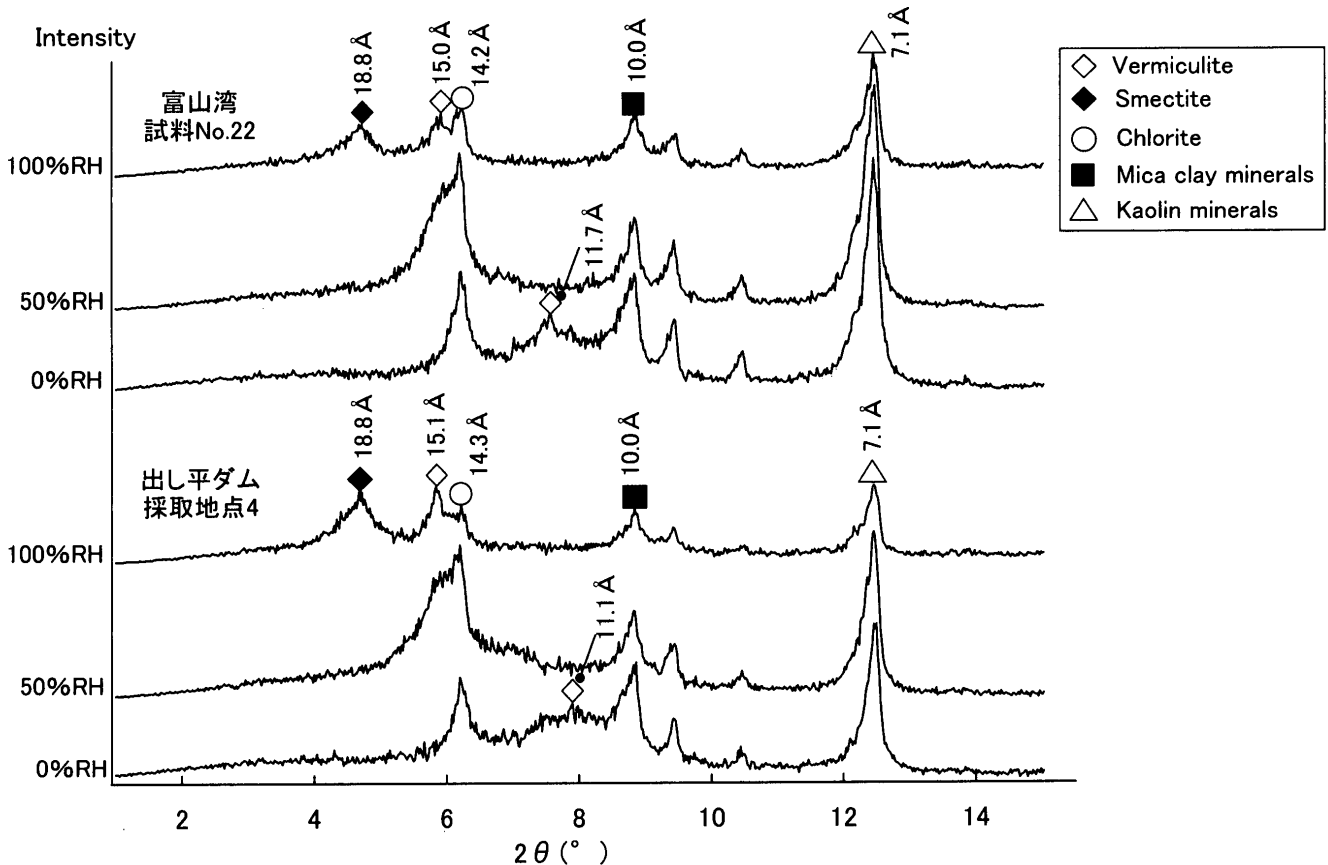


Fig. 13. X-ray powder diffractions (XRD) patterns of the sediments collected from Toyama Bay (Sample No. 22).

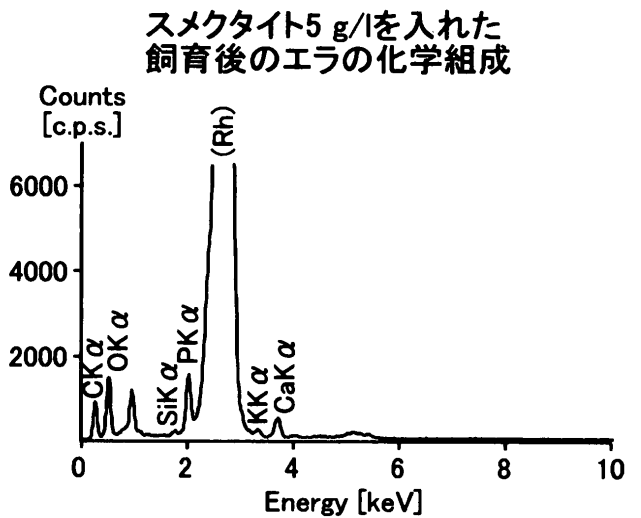
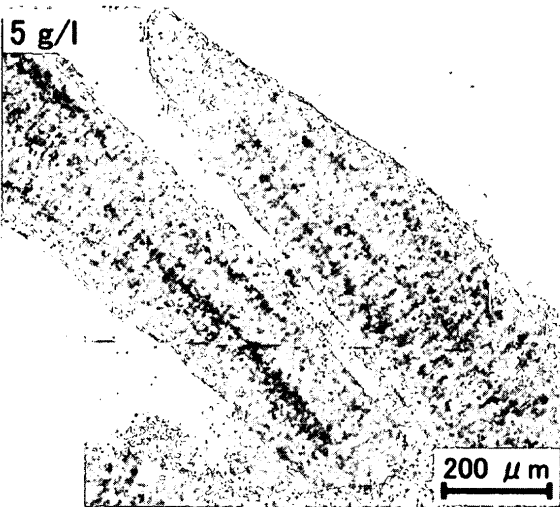
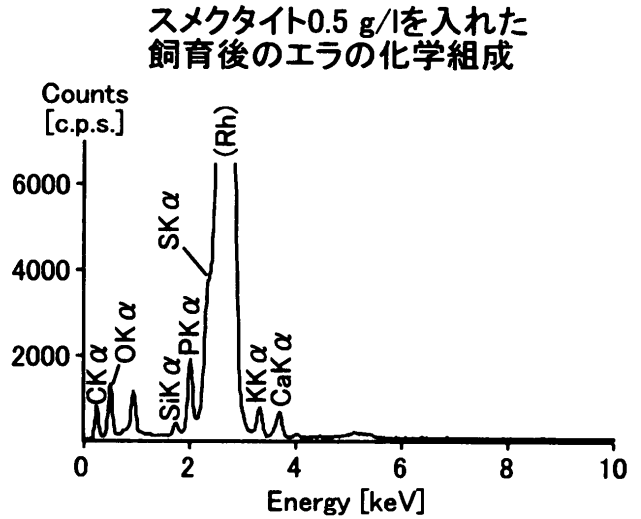
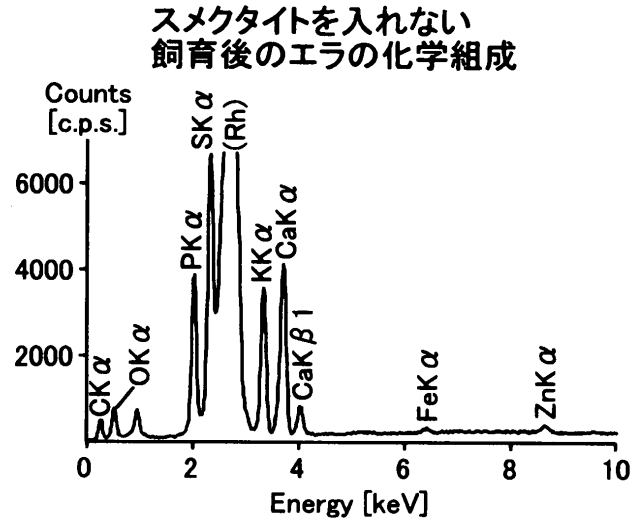


Fig. 14. Optical micrographs and the ED-XRF chemical analysis of the gills of rainbow trouts after smectite suspension experiments.

Note that smectite attached to the surface of gills which are dehydrated and deformed under high concentration. The exposure experiments show that is responsible for biological effect, not just the suspension concentration. The micrographs of experiments at 0.5 g/l (middle) and 5 g/l (bottom) concentration indicated damage of gill tissue of mucus production. The damaged gill tissue have shrunk, sharpen and separated tissue by dehydration. (Rh) ; due to mechanical element.

Table 2. The Rainbow trout breeding experiments in water with smectite suspension.

生存個体数[匹]

時間(分)	スメクタイト濃度			
	コントロール	0.5 g/l	5.0 g/l	10.0 g/l
0	7	9	7	7
30	7	9	7	7
60	7	9	7	7
90	7	9	7	7
120	7	9	7	5
360	7	9	7	0
840	7	9	4	0
1080	7	7	4	0
1440	7	7	1	0

DO[mg/l]の経時変化

時間(分)	スメクタイト濃度			
	コントロール	0.5 g/l	5.0 g/l	10.0 g/l
0	8.9	9.5	8.8	7.9
30	10.1	9.6	9.6	8.5
60	8.4	9.2	9.4	8.2
90	6.8	8.2	8.4	7.3
120	6.2	8.0	8.0	6.5
360	8.4	8.1	8.5	7.1
840	8.6	8.4	8.3	8.0
1080	8.8	8.5	8.8	7.5
1440	8.6	8.0	7.6	6.1

実験開始時の水質

スメクタイト濃度	pH	Eh [mV]	DO [mg/l]	EC [μ S/cm]	WT [°C]
コントロール	7.2	280	8.9	91	13
0.5 g/l	8.2	230	9.5	117	12
5.0 g/l	9.4	110	8.8	311	13
10.0 g/l	9.9	110	7.9	674	13

実験終了時(1440分後)の水質

スメクタイト濃度	pH	Eh [mV]	DO [mg/l]	EC [μ S/cm]	WT [°C]
コントロール	7.7	230	8.6	125	16
0.5 g/l	7.6	170	8.0	216	16
5.0 g/l	8.4	160	7.8	528	16
10.0 g/l	8.9	160	6.1	743	16

得られた。DOについては、飼育実験中、いずれの濃度においても6~10 mg/lを示し、酸素の供給は十分に行われていた。また、ECがいずれの濃度の水槽でも、実験開始時に比べ、終了時には1.5~2倍程度に上昇しており、スメクタイト濃度と相関が認められる。

また、それぞれの濃度におけるニジマスのエラの光学顕微鏡観察から、コントロールのものに対し、濃度5 g/lでは、エラの幅が約半分収縮し、間隙も大きくなることが認められた (Fig. 14)。ED-XRFによるエラ表面の元素分析から、濃度0.5および5 g/lの懸濁液で飼育したニジマスのエラ表面において、P, S, K, Ca, FeおよびZnが減少し、逆にSiが増加していることが明らかになった (Fig. 14)。

一方、富山湾の入善沖で捕獲されたヒラメのエラについて、SEMによる観察結果を Fig. 15 に示す。一般に、健全なヒラメのエラの表面は平滑で付着粒子は認められないが、入善沖で捕獲された5匹のヒラメのエラには、一面に微細粒子が覆っているものや、エラの隙間が微細粒子で充填されているものが観察された。また、エラの表面が部分的に厚い皮膜で覆われていたり (Fig. 15.A)、1~2 μ mの均一な粒子がエ

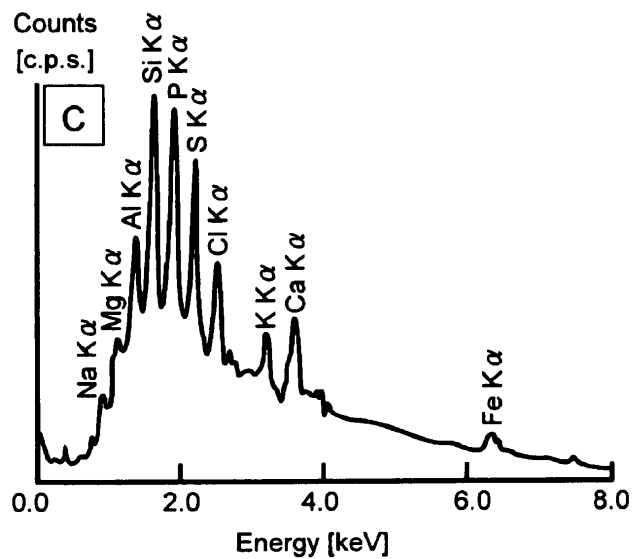
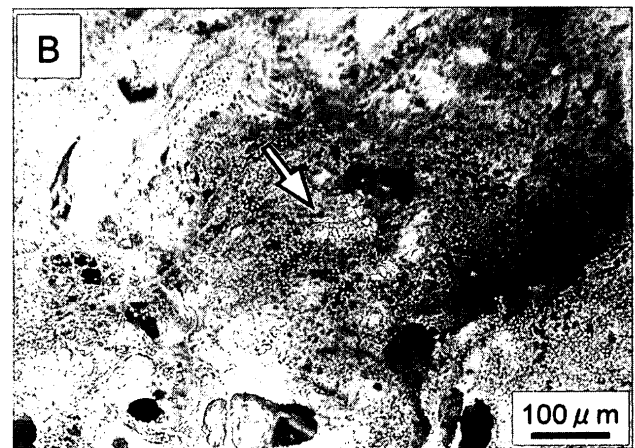
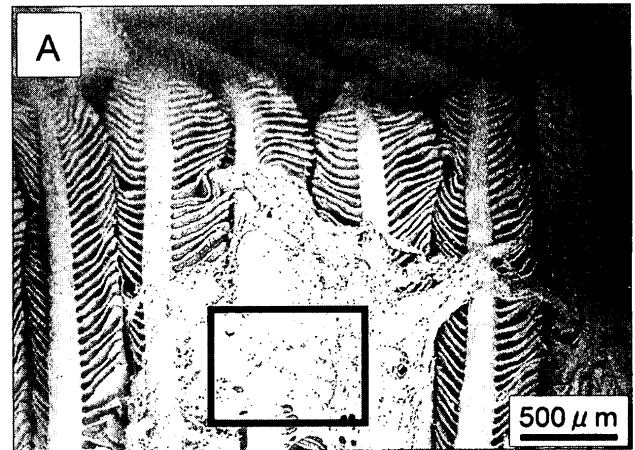


Fig. 15. SEM micrographs (A, B) and the EDX spectrum (C) of gills of flatfish collected from Toyama Bay, showing smectitic adhesion films attached to the surface of gills, the same as Fig. 14.

The covering films hinder oxygen transfer into the gills.

ラ表面に付着していることが確認された (Fig. 15.B). 図中の矢印の部分について, EDX 分析を行った結果, スメクタイトの組成である Na, Mg, Al および Si のピークが認められた (Fig. 15.C). なお, 高いバックグラウンドはエラの有機物の組成を示し, P, S および Cl は生体に一般に認められる元素である.

考 察

出し平ダム湖及び富山湾堆積物中の粘土鉱物の含有量やその特性, 水中の懸濁物質が魚や海藻に与える影響に注目して考察を行う.

1. 堆積物の特性

1-1. 出し平ダム湖堆積物の特性: 花崗岩類の風化および粘土化については, 窯業や土壌学などの応用面や, 崩壊などの災害面から, 比較的多くの研究がある (例えば関, 1998; 秦, 1999; 北川, 1999). 一般に, 岩石の風化は, 気候や水理条件などの環境に大きく依存することから, 生成粘土鉱物に地域性が強く現われる. 特に, 花崗岩類の風化帯中での粘土鉱物組成の変化は, 深部から地表に向かって複雑になる. 例えば, 斜長石や黒雲母が風化すると, それに伴ってイライト, 加水黒雲母, パーミキュライト, カオリン鉱物, ギブサイトなどの二次鉱物や粘土鉱物が生成する. 風化の進行と共に陽イオンが溶脱し, 最終的にはカオリン鉱物やギブサイトが形成される (関, 1998). 通常, 風化が進行してカオリン鉱物が生成されても, 石英や正長石は風化速度が比較的に遅いため (木宮, 1975 a, b), 河川におけるスメクタイトの生成は少ない. しかし, ダム湖においては, 水が長時間, 堆積物と接するため, 水との反応で粘土が形成されやすいと考えられる. なお, 水中において, 微生物により容易に鉱物が風化され粘土鉱物が形成されることが報告されている (Tazaki and Ishida, 1996; Tazaki, 1997). また, 黒部川の河川水に花崗岩中の長石類を入れ常温, 常圧下で密封し, その変化を観察したところ, 約2ヶ月で鉱物表面に多量の微生物と Al-Si の被膜が形成された. この実験結果は, 滞留させ静止した水中において, 微生物によって鉱物の風化が促進され, 粘土鉱物の前駆体を容易に形成する可能性を示唆している. なお, この実験結果については別報で報告する.

1-2. 富山湾堆積物の特性: 本研究により, 谷地形の発達した芦野沖において含泥率が高く, 黒部川河口付近と海岸沿いにおいて低い傾向が認められた. しかし, 排砂が行われる以前において, 黒部, 泊の丘陵は, 海底で形成された扇状地性堆積物からなると考えられており (茂木, 1977), ダム建設に伴って, 海底堆積物の粒度が変化することが考えられる. さらに, 0.2mm より粒径が小さい粒子は, 一度浮遊状態になると, その状態が維持され, 十分遠くまで運搬されるが, 堆積した後は, 底面が滑らかなため乱れが少なく, また, 粒子間の結合力が加わって始動が困難になる性質がある (勘米良ほか, 1979). よって, 排砂によって出し平ダムおよび宇奈月ダムから放出された堆積物は, 黒部川河口に堆積した後, 芦野沖に運搬・堆積したのではなく, 芦野沖に直接堆積したことを示唆する. また, この芦野沖は粘土鉱物のみならず, 窒

素, 炭素, 硫黄含有量も本調査域において相対的に高く, かつ, 間隙水が還元性であり, ヘドロ化した堆積物の存在が認められる地域でもある. そして, この地域は定置網や刺し網漁の場所とも一致する.

スメクタイトは, 2:1 型の層状ケイ酸塩粘土鉱物であり, 層間に交換性陽イオンと水分子を有する. そのため膨潤性を持つスメクタイトは, カオリン鉱物などの粘土鉱物とは異なった挙動を示す. すなわち, 出し平ダムから排砂時に放流されたスメクタイトは, pH 7 付近の河川を通る間は懸濁しているが, pH 8 付近の海域に出ると, 海水の溶存イオン濃度が高いため, 凝集・沈殿する (須藤談話会, 2000). 黒部川の河口付近は, 急勾配でかつ淡水と海水が混合する水域であり, スメクタイトの沈殿量は少なく, 海水域である芦野沖では, スメクタイトの沈殿が生じると考えられる. その他の粘土鉱物についても, 谷地形の芦野沖に多く堆積しており, 沈殿後も有機物とともにヘドロ化が進み, 底質環境およびヒラメなどの底生魚や沿岸のワカメの生育などに影響を及ぼしたと考えられ, 今後さらなる検討が必要である.

1-3. 富山湾堆積物の起源: 青木・生沼 (1995) は, 日本列島周辺の下底堆積物および湾内堆積物に含まれる粘土鉱物組成の分析データを報告しており, 東京湾, 相模湾, 駿河湾, 大阪湾の堆積物中に含まれる4種の粘土鉱物 (スメクタイト, クロライト, イライト, カオリナイト) について, それらの平均の含有率を100分率で示している. 本研究で行った, 富山湾と出し平ダム湖堆積物の粘土鉱物組成についても同様に, それぞれの平均の含有率を100分率で表し, 合わせて Fig. 16 に示した. 富山湾以外の湾にはクロライトや雲母類粘土鉱物が多く, 逆にスメクタイトやカオリン鉱物は少ない. 一般に粘土鉱物は海的环境下ではスメクタイトやカオリン鉱物は不安定であり, イライトやクロライトのような安定な形に変化する (生沼・小林, 1959; 青木ほか, 1990). しかしながら, 富山湾についてはカオリン鉱物が最も多く, スメクタイトの量もクロライトや雲母類粘土鉱物と大差ない. 前

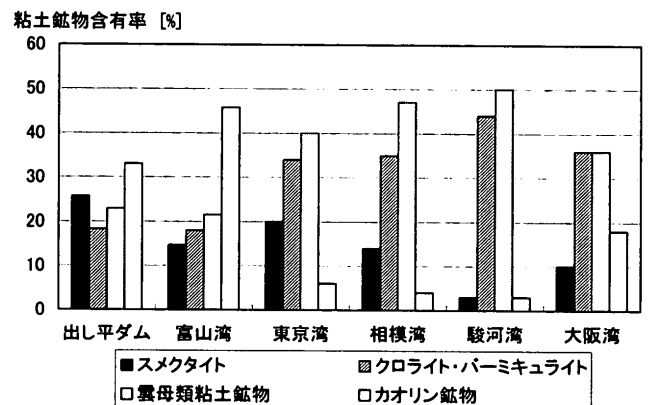


Fig. 16. Ratio of clay minerals in the sediments from Dashidaira Dam Reservoir and Toyama Bay to compare with 4 bays (Tokyo, Sagami, Suruga and Osaka).

Note that the sediments in Dashidaira Dam Reservoir and Toyama Bay contain a large quantity of kaolin minerals.

述したように、黒部川上流は主に花崗岩を主としており、その風化産物が多い。また、東京湾、相模湾周辺は堆積岩が主体であり（経済企画庁総合開発局, 1972, 1973 a; 国土庁土地局, 1975, 1976）、駿河湾周辺には堆積岩、安山岩、花崗岩が（経済企画庁総合開発局, 1971, 1973 b）、大阪湾周辺には花崗岩と流紋岩が認められる（経済企画庁総合開発局, 1967）。すなわち、母岩が異なっても、風化産物がひとたび湾内に流入し、安定に存在した場合は、クロライト、雲母類粘土鉱物が多くなる。富山湾と他の湾との比較から、粘土鉱物含有率が大きく異なっていることが明らかであり、この違いは出し平ダムの排砂ゲートから1991年以來8回にわたって排砂された影響によることが示唆される。

以上の結果から、花崗岩地帯に位置する出し平ダムでは、花崗岩体の風化産物の真砂土や粘土鉱物がダム湖底に堆積し、その堆積物は、たび重なる排砂ゲートの開放により、黒部川を懸濁物として流下し、富山湾に流れ込み、谷地形を示す海底の漁場に堆積することが示唆された。

2. 魚類への影響

2-1. 実験観察：濃度の異なるスメクタイト懸濁液中でのニジマス飼育実験の結果から、スメクタイトの微細粒子がエラの細胞膜に付着することで、細胞質の成分であるKやCa、血液の成分であるFe、生体の必須元素であるP、SおよびKが細胞から溶脱し、エラ全体が収縮し、障害を引き起こすことが明らかとなった。このうちP、SおよびKは生体必須元素、そして、KやCaは細胞質、Feは血液の成分であり、Siはスメクタイトの構成元素である。よって、本実験においてニジマスが死亡したのは、スメクタイトがエラ表面に付着することで細胞から成分が溶脱し、かつ、エラが収縮し、ニジマスの呼吸障害を引き起こしたためと考えられる。また、実験終了時におけるECの上昇は、スメクタイトからの陽イオンの溶脱のほか、ニジマスのエラからの元素の流出によるものだと考えられる。なお、本実験に示したように、スメクタイトがエラの成分を溶脱させることを直接観察した例は、今までに報告されていない。ニジマスで観察されたことがヒラメでも起きている可能性があり、実際に富山湾で採取したヒラメのエラを観察したところ、エラの表面にも粘土粒子が付着していた。

排砂に伴う魚類の酸素欠乏を誘発する要因について、Staub (2000) はスイスアルプス河川での排砂を例に、(1)エラの物理的な損傷によるエラ呼吸の障害、(2)排出された堆積土砂から、酸素を消費する化学物質が放出されるために起こる水中の溶存酸素濃度の低下、(3)流速の増加に伴って運動量が増すことによる、魚の酸素要求量の増大、の3つを挙げ、その中の(1)について、浮遊土砂の粒径と形状はエラの損傷の発生に深い関連があることを指摘している。75 μm より小さい粒子は、エラの膜を通過してエラの組織間の空間に入り込むため、粘液の分泌が誘発され、周囲の水から魚の血液への酸素輸送速度が低下する。また、75~250 μm の粗い粒子は、エラに機械的な損傷を与えると報告している。Glechner et al. (1999) によるニジマスの実験においても、浮遊土砂への曝露によるエラの微粒子の詰まりや収縮、変形がSEMに

よって観察されている。よって、いずれの粒径であっても、過剰な粒子の流下は魚のエラに影響を与え、正常な呼吸を阻害することが明らかである。また、排砂後、ダム下流の河床に堆積した微細な土砂を除去しないと、ブラウントラウト (*Salmo trutta Linnacus*) の繁殖成功率が低下することも知られている (Waters, 1995)。本研究により、入善沖で採取されたヒラメについて、数 μm サイズの微粒子がエラの膜を通過して、エラの組織間の空間を充填しているのが観察され、海域においてもニジマスと同様に、体内への酸素取り込みに影響が出ていることが示唆される。

さらに、魚類ばかりでなく、海藻についても微粒子の流入による成長阻害が鈴木ほか (1997 a)、鈴木ほか (1997 b)、鈴木ほか (1998) によって報告されている。懸濁物質の存否は、海藻の孢子および遊走子が基質に着生できるか否かを左右する重要な因子の一つであり、海藻群落の形成阻害原因となる。懸濁物質として、モンモリロナイト型である酸性白土、モルデナイト、ベントナイト、そしてカオリナイト、ハロイサイトの5種類の粘土鉱物について、いずれも1~5 mg/lの濃度で、着生に著しい阻害作用を示す (鈴木ほか, 1998) こ

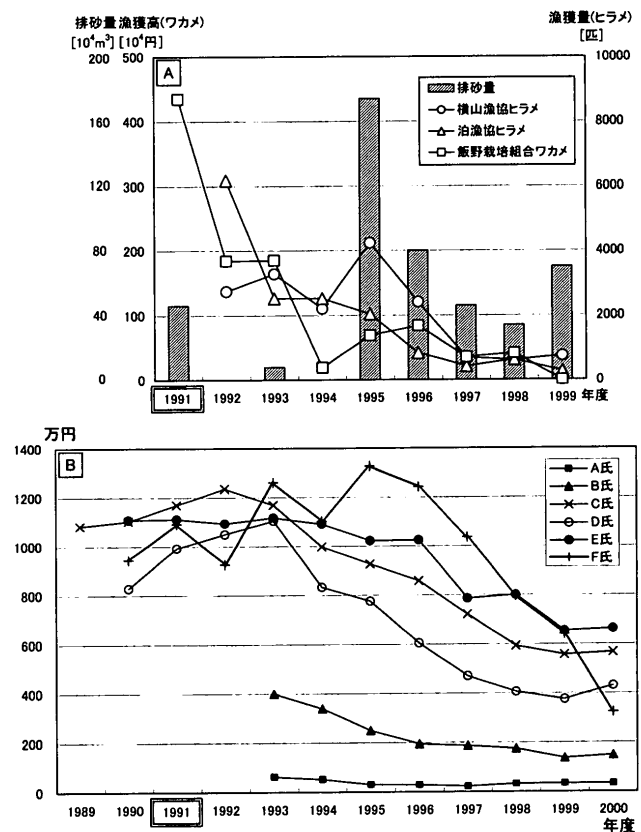


Fig. 17. Variation of the annual haul of flatfish at Yokoyama and Tomari Fishermen's Cooperative Associations within the past nine years.

A; The decrease of annual haul is related with volume of discharged sediments from Dashidaira Dam Reservoir since 1991.

B; Annual incomes from fishing have been decreased since the first discharge in 1991, according to 6 fishermen's reports.

とが報告されており、本研究域においても同様の影響が現われている可能性がある。

2-2. 漁獲量の変化: 1991年, 出し平ダムにおいて初の排砂が行われたが, それ以降の年別排砂量と; 入善町横山および朝日町泊漁協のヒラメの漁獲量および飯野栽培組合のワカメの漁獲高を合わせて Fig. 17.A に示す。なお, 泊漁場や横山漁場は, 富山湾堆積物試料採取地点の北東に位置する。これより, 排砂量とヒラメやワカメの漁獲量(高)とが相関していることが明らかである。また, Fig. 17.B に, 排砂が行われる前の1989年からの, 横山および赤川漁協の6名の漁獲高を示す。この6名の漁師はハマチ, ハチメ, アンコウ, カマス, エビ, バイカゴ, アマダイ, キスおよびコチ漁を行ってきたが, いずれも漁獲高は1991年以降減少の一途をたどっており, 特に1995年の大量の排砂以降, 急激な減少を示している。これらの漁獲量(高)の減少は, 出し平ダムにおける排砂と密接な関係を示している。今後, ダム湖や漁場等において, 堆積物のボーリングコアを採取し, 出し平ダム建設前とそれ以降の堆積物の種類や経時変化を観察する必要がある。

ま と め

富山湾の堆積物の含泥率は, 芦野沖で多く60~80 wt%, 黒部川河口付近や海岸沿いで0~9 wt% 未満という低い値を示した。間隙水のpHはいずれも7.4~8.3の弱アルカリ性, Ehはほとんどの地点でマイナスを示し, 還元であった。

堆積物中の窒素, 炭素, 硫黄の定量分析結果から, これらの元素は黒部川河口以西や海岸沿いにおいて低く, 谷地形の芦野沖で高い傾向が認められた。XRD分析により同定された粘土鉱物も, 同様の分布をしており, これは, 海底の地形と沿岸流に依存していると考えられる。また, 河川水中で懸濁していたスメクタイトは, 海水と混合することにより, 沖合では凝集・沈殿するため, 特に谷部に生息するヒラメなどの底生魚に影響を及ぼしている可能性が考えられる。その影響の一つとして, スメクタイトの微粒子が魚のエラに付着して, 細胞を収縮・変形させることがニジマスを使った実験により示された。また, 漁獲量の統計的変化の結果も, 1991~1999年の出し平ダム排砂量と底生魚であるヒラメの漁獲量には密接な関係を示している。今後, ダム湖や漁場等において, 堆積物のボーリングコアを採取し, 経時変化を観察していくことが重要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり, 佐藤宗雄氏を始めとする入善刺し網組合の皆様, 高倉 正氏を始めとする入善町の住民の皆様, そして朝日航洋(株)の川井田敏久氏の協力を得た。オランダのNIOZ研究所のVan der Gaast, S. J. 博士には, 粘土鉱物の同定に関して協力を得た。本論文の査読者である倉茂好匡博士, 楡井 久博士, 編集委員の山本正伸博士および匿名の査読者に有益なご助言をいただいた。また, 本研究の一部は文部省科学研究補助金基盤Aを使用させていただいた。以上の方々に, 心より御礼申し上げます。

文 献

- 天野礼子, 2001, ダムと日本. 岩波新書, 224 p.
- 青木三郎・生沼 郁, 1995, 海底堆積物に含まれる粘土鉱物組成の分析データ(その2). 東洋大学紀要教養課程篇(自然科学), 39, 55-70.
- 青木三郎・生沼 郁・星野 透, 1990, 大阪湾堆積物中の粘土鉱物の分布. 東洋大学紀要教養課程篇(自然科学), 34, 1-18.
- Auld, A. H. and Schubel, J. R., 1978, Effects of suspended sediment on fish eggs and larvae: A laboratory assessment. *Estuarine Coastal Marine Sci.*, 6, 153-164.
- 藤井昭二, 1974, 富山湾, 富山文庫, 273 p.
- 藤井昭二, 1983, 富山湾黒部川扇状地埋没林の研究. 昭和57年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1-64.
- Glechner, R., Patzner, R. A. and Jagsch, A. 1999, Wassertrube und Fische - Auswirkungen resuspendierter Sedimente aus Speichern auf die Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*). *Schriftenreihe der Forschung in Verbund*, 57, 1-119.
- 秦 明徳, 1999, 長期間の化学的風化実験による花こう閃緑岩の変質. 粘土科学, 38, 233-245.
- Harry, C. D., 1960, Effects of turbidity - producing materials in sea water on eggs and larvae of the clam. *Biol. Bull.*, 118, 48-54.
- Isono, R. S., Kita, J. and Setoguma, T., 1998, Sediment effects on eggs and larvae of striped bass and white perch. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C*, 120, 449-455.
- 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.
- 勘米良龜齡・水谷伸治郎・鎮西清高, 1979, 岩波講座地球科学5 地球表層の物質と環境, 岩波書店, 23-27.
- 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.
- 経済企画庁総合開発局, 1967, 土地分類図(表層地質図Ⅳ)中部・近畿地方.
- 経済企画庁総合開発局, 1971, 土地分類図(静岡県)20万分の1.
- 経済企画庁総合開発局, 1972, 土地分類図(千葉県)20万分の1.
- 経済企画庁総合開発局, 1973 a, 土地分類図(埼玉県)20万分の1.
- 経済企画庁総合開発局, 1973 b, 土地分類図(山梨県)20万分の1.
- 木宮一邦, 1975 a, 花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度—花こう岩の風化・第1報—. 地質学雑誌, 81, 349-364.
- 木宮一邦, 1975 b, 三河・富草地域の花こう岩の風化速度—花こう岩の風化・第2報—. 地質学雑誌, 81, 683-696.
- 北川隆司, 1999, 花崗岩のマサ化のメカニズムと斜面崩壊. 粘土科学, 39, 37-44.
- 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.
- 国土庁土地局, 1975, 土地分類図(神奈川県)10万分の1.
- 国土庁土地局, 1976, 土地分類図(東京都)10万分の1.
- 公共事業チェック機構を実現する議員の会, 2001, アメリカはなぜダム開発をやめたのか, 築地書館, 204 p.
- Loosanoff, V. L. and Frances, D. T., 1948, Effect of suspended silt and other substances on rate of feeding of oysters. *Science*, 107, 69-70.
- Mann, C. C. and Plummer, M. L., 2000, Can science rescue salmon? *Science*, 289, 716-719.
- 茂木昭夫, 1977, 日本近海海底地形誌・海底俯瞰図集, 東大出版会, 90 p.
- Moore, D. M. and Reynolds, R. C., 1997, X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, 78 p.
- Morgan, R. P., Rasin, V. J. and Noe, L. A., 1983, Acute effects of kaolinite suspension on eggs and larvae of some marine

- teleosts. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **112**, 220-224.
- 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会, 1985, 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, 981-1008.
- O'Connor, J.M., Neumann, D.A. and Sherk, J.A., 1976, Lethal effects of suspended sediments on estuarine fish. *US Coast. Engin. Res. Tech. Pap.* No. 76-20.
- 生沼 郁・小林和夫, 1959, 東京湾口堆積物の粘土鉱物組成—東京湾口の研究(昭和34年)その6—, 日本海洋学会創立20周年記念論文集, 136-145.
- 関 陽児, 1998, 土壌・風化帯の形成と水質変化. 地質調査所月報, **49**, 639-667.
- Staub, E., 2000, スイスアルプスの河川における排砂の魚類と無脊椎動物に対する影響. 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, 83-88.
- 須藤談話会, 2000, 粘土科学への招待 粘土の素顔と魅力, 三共出版, 283 p.
- 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.
- 鈴木祥広・丸山俊郎・三浦昭雄・申 宗岩, 1997 a, 懸濁および堆積カオリン粒子がスサビノリ殻胞子の着生と発芽に及ぼす影響. 土木学会論文集, **559**, 73-79.
- 鈴木祥広・丸山俊郎・三浦昭雄, 1997 b, 懸濁物質がノリ殻胞子の着生に及ぼす影響. 土木学会論文集, **580**, 19-26.
- 鈴木祥広・丸山俊郎・高見 徹・三浦昭雄, 1998, 海水中懸濁粒子の沈降・堆積がワカメ遊走子の着生とその成長に及ぼす阻害作用. 水環境学会誌, **21**, 670-675.
- Tazaki, K., 1997, Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: An electron microscopical study. *Clays and Clay Minerals*, **45**, 203-212.
- Tazaki, K. and Ishida, H., 1996, Bacteria as nucleation sites for authigenic minerals. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **102**, 866-878.
- 田崎和江・国峯由貴江・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.
- 富山県, 1992, 10万分の1富山県地質図, 201 p.
- 富山総合利用対策研究会, 1983, 富山湾沿岸海域調査報告書, 1-64.
- Van der Gaast, S. J. and Kuhnle, R. A., 2001, Proceeding of International Clay Congress. (in press).
- Waters, T. F., 1995, Sediment in Streams. *American Fisheries Society, Monograph*, **7**, 251 p.

(要 旨)

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—. 地質雑, **108**, 435-452. (Tazaki, K., Nawatani, N., Kunimine, Y., Morikawa, T., Nagura, T., Wakimoto, R., Asada, R., Watanabe, H., Nagai, K., Ikeda, Y., Sato, K., Segawa, H. and Miyata, K., 2002, Sediment characteristics of Dashidaira Dam Reservoir at Kurobe River and Toyama Bay, and flushed suspension impacts on fishes. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **108**, 435-452.)

1991年12月, 排砂ゲートを設けた出し平ダム(富山県黒部川水系1985年設立)から, 初の直接排砂が行われ, その際, 多量のヘドロが排出された. その後も1999年までに計8回の排砂が行われた. 本研究において, 出し平ダム湖および富山湾堆積物の特性について分析を行った. その結果, 特に芦野沖にヘドロが堆積していること, そして, 富山湾堆積物は他の湾堆積物と比べカオリン鉱物, スメクタイトが多く, 出し平ダム湖堆積物と類似した粘土鉱物組成を持つことが明らかとなった. 実験より, ニジマスのエラにスメクタイトが吸着することで, エラの変形や脱水を引き起こすことが明らかとなり, また, 富山湾で採取されたヒラメのエラ表面が, 微細粒子で覆われているのが観察された. 以上の結果と1991年から1999年の出し平ダム排砂量とヒラメの漁獲量の変遷には密接な関係が認められ, ダム湖や富山湾底質の経時変化を観察することの重要性が示された.