懸濁物質が魚類の生理・生態に及ぼす影響-
粘土鉱物の種類および添加方法とヒラメの生存への影響

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者名	岩田,仲弘 横山,信吾 田中,克彦 川那,公士 難波,憲二
発行元	日本水産學會
巻/号	77巻2号
掲載ページ	p. 215-222
発行年月	2011年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

AgriKnowledge

Nippon Suisan Gakkaishi 77(2), 215–222 (2011)

懸濁物質が魚類の生理・生態に及ぼす影響—粘土鉱物の種類および添加方法とヒラメの生存への影響

岩田仲弘,[1*] 横山信吾,[1] 田中克彦,[1a] 川那公士,[2] 難波憲二[1]

(2010年10月1日受付, 2010年12月24日受理)

[1]㈶電力中央研究所, [2]広島大学大学院生物圏科学研究科

Eco-physiological effects of suspended solids on fish—Lethal effects of clay mineral suspension on Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* in relation to the mineral composition and suspending method of clay mineral products

NAKAHIRO IWATA,[1*] SHINGO YOKOYAMA,[1] KATSUHIKO TANAKA,[1a] KOJI KAWANA[2] AND KENJI NAMBA[1]

[1]*Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko, Chiba 270-1194,* [2]*Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8528, Japan*

The effects of clay mineral suspension in seawater on the survivability of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* were examined with four kinds of clay mineral products, A, B, C and D. The main clay mineral contents analyzed by X-ray diffraction were pyrophyllite in product A, kaolinite and pyrophyllite in B, sericite in C, and smectite in D. Fish (6 cm in total length) were kept for 96 hours in the suspension with products A, B and C added directly to seawater as powder. The 96 hours lethal concentration (96 h LC_{50}) of products A, B and C were 44, 5 and 80 g/L, respectively. Similarly, 96 h LC_{50} values were also examined with products A, C and D added to seawater as fivefold concentrated suspension in freshwater. The 96 h LC_{50} values were 78, 179 and 4 g/L for products A, C and D, respectively. The 96 h LC_{50} value of product D was 37 g/L when it was added as powder in the former study, and was lower when added as fresh water suspension. However, the opposite results were obtained with A and C. This study indicates that the lethal effects of suspended clay mineral on marine fish depend on its composition and on the way it is added to seawater.

キーワード：海水魚，カオリン，懸濁物質，添加方法，粘土鉱物，半数致死濃度，ヒラメ

水域の懸濁物質濃度の上昇は，出水や風，潮汐などの自然現象に加えて，浚渫や土砂投棄，産業排水の流入,[1)] ダムからのフラッシング排砂[2)]などの人間活動によって発生し，魚類の行動や成長，生存などに影響を及ぼす。[3)] このうち，出水や排砂などに伴う一時的かつ高濃度の懸濁物質については生存への影響が重要になると考えられる。魚類の生存に及ぼす懸濁物質の影響濃度についてはこれまでに多くの知見が集積されてきたが，研究例によって大幅な差がみられ，魚類に及ぼす影響の評価が困難なものとなっている。たとえば，水産用水基準[4)]に引用されている懸濁物質の48時間半数致死濃度は，火山灰を曝露した12～17 cmのサケでは1.1～1.2 mg/Lであるのに対して，粘土を曝露した6.5～9.0 cmのアユでは269 g/Lと，5桁もの違いがみられる。また，U. S. EPAのまとめた総説においても，生存への影響濃度は広い範囲にわたっている（The Biological Effects of Suspended and Bedded Sediment (SABS) in Aquatic Systems: A Review. *EPA Internal Report.* 2003. http://pubweb.epa.gov/waterscience/criteria/sediment/pdf/appendix1.pdf, 2010年12月1日)。

魚類に対する懸濁物質の影響は，魚種や成長段階によ

* Tel : 81-4-7182-1181. Fax : 81-4-7182-7922. Email : n-iwata@criepi.denken.or.jp
[a] 現所属：海洋研究開発機構国際海洋環境情報センター (Global Oceanographic Data Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Okinawa 905-2172, Japan)

って変化することが知られている。[1,5,6] 一方，懸濁物質の種類や粒径なども魚類への影響に関係すると考えられているが，知見は少ない。懸濁物質の種類については，フラー土と天然の泥の致死濃度を比較した例において，数種の魚類でフラー土の影響が大きいことが報告されている。[1] 一方，Redding and Schreck[7] は表土，火山灰土，カオリンの懸濁がギンザケに及ぼす影響を比較した結果，生存や血液性状の変化に対する影響は懸濁物質の種類によらず同様であったと報告している。懸濁物質の形状については，珪酸塩鉱物を用いて鋭利なものと円滑なものでギンザケの生存への影響を比較した例では，両者に差は認められていない。[8] また，粒子サイズについては，粒径が細かいものほど魚類への影響が大きいことを示唆する例があるのに対して，[9] 粒径が大きいほど影響が大きいとする例も報告されている。[10,11] 形状や粒径などを含む懸濁物質の鉱物科学的な組成や特徴は水生生物への影響を決める重要な要因であるにもかかわらず，十分な知見が得られていないのが現状である。[12]

粘土鉱物は，出水などによって水域に流入する土壌の主要な構成成分である。一般的には層状の珪酸塩鉱物と定義され，立体構造や元素組成からカオリン鉱物，雲母粘土鉱物，スメクタイトなどに分類される。[13,14] 前報では粘土鉱物の一種スメクタイトを主成分とする製品を粉体のまま海水に直接添加した場合に，ヒラメ *Paralichthys olivaceus* の生存や呼吸に与える影響を明らかにした。[15,16] そこで本研究では，主成分が異なると考えられる複数の粘土製品についてヒラメの生存に及ぼす影響を調べ，粘土鉱物の種類と懸濁物質としての影響との関係を検討した。また，従来，懸濁物質が海水魚に及ぼす影響研究では，対象物質は粉体のまま直接，海水に添加されていた。しかし，出水などを想定した場合には，懸濁物質は河川水に懸濁した後，海域に流入し，海水魚に影響を及ぼす。そこで，粉体の粘土鉱物製品をそのまま海水に添加した場合と，淡水懸濁液とした後に海水に添加した場合について，ヒラメの生存への影響を比較した。

材料および方法

粘土鉱物 実験には，粘土鉱物製品A（日本薬局方カオリンJP-100，竹原化学工業㈱），B（日本薬局方カオリン，㈱勝光山鉱業所），C（CS-Rセリサイト，㈱勝光山鉱業所），D（クニピア-F，クニミネ工業㈱）を用いた。各製品に含まれる粘土鉱物種はX線回折装置（RINT 2500，㈱リガク）によって分析した。あわせて4社の化学用カオリン（117-00025，和光純薬工業㈱；23000-02，関東化学㈱；020-42505，キシダ化学㈱；K7375, Sigma-Aldrich, Inc.）についても同様に鉱物種分析を行なった。また，各粘土鉱物製品の海水懸濁液中における粒度分布をレーザー式測定装置（LMS-30，セイシン企業㈱）によって測定した。粘土鉱物製品の水分は，110℃で24時間の加熱を繰り返し，恒量を求めて算出した。

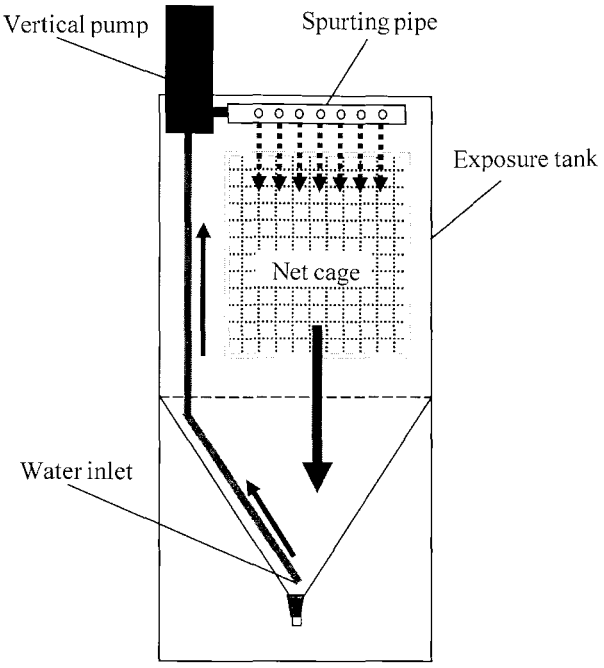

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for maintaining the concentration of suspended solids. Arrows show the directions of circulated rearing water.

実験装置 実験には前報[15]と同様，曝露槽とポンプ，配管から成る容量50 Lの懸濁維持装置を用いた（Fig. 1）。粘土鉱物製品Dでは前報[15]と同様に曝露槽下部に設置した水中マグネットポンプ（RSD-40，㈱レイシー）を用いて試験水を循環した。一方，粘土鉱物製品A, B, Cでは，水中マグネットポンプを用いた場合，混入している石英などが原因と考えられるマグネットの摩耗によりポンプが停止したため，摩耗が生じにくいタテ型ポンプ（P-112S，㈱レイシー）を用い，これを曝露槽上部に設置して装置をウォーターバスに浸漬可能とした（Fig. 1）。供試魚は試験水が十分に散布される位置に設置したプラスチック製の網イケスに収容した。懸濁維持装置は，前報[15]と同様に水温20℃に設定したウォーターバス内に設置して，水温の維持を図った。

実験方法 粘土鉱物製品A, Cについては，粉体のまま海水に直接添加する条件（以下，海水直接添加条件）と，設定濃度の5倍濃度の淡水懸濁液とした後，海水に添加する条件（以下，淡水添加後海水添加条件）の2通りで懸濁液を作成した。粘土鉱物製品Bについては，実験途中で入手が困難になったため，海水直接添加条件のみ検討した。また，粘土鉱物製品Dの海水直接

添加条件については既報[15]であるため，淡水添加後海水添加条件でのみ実験を行なった。淡水添加後海水添加条件では淡水に粘土鉱物製品を添加し，24時間以上，曝気により撹拌した後，懸濁維持装置に添加した。淡水添加後海水添加条件の塩分は用いた海水の80％となる。海水は千葉県御宿町の㈶海洋生物環境研究所の地先で採水して砂濾過したものを，淡水は水道水を無処理のまま用いた。

実験1では粘土鉱物製品AおよびCについて，添加濃度を海水直接添加条件，淡水添加後海水添加条件のいずれも18.8, 37.5, 75.0, 150, 300 g/L（公比2）として各3回の曝露試験を行なった（Table 1）。1回の試験には各濃度1基の懸濁維持装置を用い，異なる入手時期のヒラメを用いた。いずれの試験でも対照として，海水に粘土鉱物製品を加えない実験区（全海水区）を設けた。また2回の試験では淡水添加後海水添加条件と同様の塩分となるように海水を水道水で希釈して粘土鉱物製品を加えない区（80％海水区）も設定した。

実験2では粘土鉱物製品Bについて，海水直接添加条件で添加濃度1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 g/L（公比2）として検討を行なった。対照区は全海水のみとし，各濃度3基の懸濁維持装置を用いた。

実験3では粘土鉱物製品Dについて，淡水添加後海水添加条件で添加濃度1.2, 1.8, 2.7, 4.0, 6.0 g/L（公比1.5）として，異なる生産時期のヒラメで2回の曝露試験を行なった。対照は全海水区のみとし，それぞれの試験において各濃度3基の懸濁維持装置を用いた。

いずれの実験においても，開始時に懸濁維持装置の網イケスにヒラメ10尾ずつを収容し，試験水の交換を行なうことなく96時間飼育した。なお，実験1の2回目における粘土鉱物製品Cの淡水添加後海水添加条件150 g/L区では計数を誤ったため供試魚は9尾であった。曝露は10：00に開始し，曝露期間中，9：00～18：00の1時間毎に網イケスを試験水から持ち上げて運動性の有無を確認し，手で刺激しても反応しない場合は死亡魚と判断して取り上げた。全長，体長，体重は，死亡魚については取り上げた際に，生残魚については実験終了時に測定した。

実験期間中は毎日，水温，溶存酸素飽和度，濁度，pH（実験2では実験初日と終了日のみ）を測定した。また粘土鉱物製品A, B, Cについては，実験1の3回目の試験と実験2の試験開始日に懸濁維持装置の中央付近から採水して懸濁物を測定し，それぞれ添加した粘土鉱物製品の乾燥重量で除して懸濁率を算定した。淡水添加後海水添加した粘土鉱物製品Dを用いた実験3では濾紙の目詰まりが著しく，濾過が困難であったため懸濁率を測定しなかった。水温，溶存酸素飽和度はポータブル溶存酸素計（DO-25A，東亜電波工業（株），水温は標準温度計で補正），pHはpHメーター（pHメーターF-53, pH電極9611-10D，㈱堀場製作所），濁度は濁度計（2100P型，Hach Company，同社ホルマジン標準液で校正）でそれぞれ測定した。懸濁物は試験水を濾紙（AP40，日本ミリポア㈱）で吸引濾過し，イオン交換水で洗浄後，110℃，1時間乾燥を恒量となるまで繰り返して算定した。

供試魚　実験に用いたヒラメは愛知県内で生産された人工種苗で，実験室に搬入後，実験開始まで10～11日間（実験3の2回目のみ61日間），水温20℃に設定した循環濾過水槽において市販のヒラメ用配合飼料を投与して飼育した。実験開始前48時間（実験1の3回目のみ72時間）および実験期間中は給餌を行わなかった。

実験1の3回の試験に用いた供試魚はそれぞれ，全長65±4, 56±5, 58±3 mm（平均±標準偏差，以下同様），体長55±4, 47±2, 49±4 mm，体重2.0±0.4, 1.2±0.2, 1.3±0.2 g，実験2では全長71±4 mm，体長60±4 mm，体重2.8±1.4 g，実験3の2回の試験ではそれぞれ全長85±4, 62±5 mm，体長71±4, 53±4 mm，体重4.9±0.8, 1.9±0.4 gであった。

統計　各濃度区における24, 48, 72, 96時間後の生残率を逆正弦変換した後，Dunnettの多重比較によって対照区との差を検定した。また，24, 48, 72, 96時間後の生残率と粘土鉱物懸濁液の設定濃度から作図法[17]により半数致死濃度を算出した。粘土鉱物製品AとCでは濃度と添加方法が生残率に及ぼす影響を2元配置分散分析で検討した。

結　果

粘土鉱物製品の主成分と粒度分布，水分　X線回折分析の結果（Fig. 2），日本薬局方カオリンである粘土鉱物製品Aではカオリナイトのピークは認められず，パイロフィライトのピークが認められた。一方，同じ日本薬局方カオリンである粘土鉱物製品Bでは，パイロフィライトに加えて，カオリナイトのピークも認められた。粘土鉱物製品Cではセリサイト（熱水性イライト）の，Dではスメクタイトのピークが認められた。また，粘土鉱物ではないことから図示しなかったが，A, B, Cでは石英のピークも確認された。

鉱物種分析を行なった4社の化学用カオリンのうち，Sigma-Aldrich, Inc.の製品ではカオリナイトに明確なピークがみられ，パイロフィライトにはピークが認められなかった（Fig. 3）。これに対して他の3社の製品ではパイロフィライトに明確なピークが認められたが，カオリナイトはほとんど検出されなかった。また，Sigma-Aldrich, Inc.以外の製品では石英の含入も確認された。

海水中での粒度分布は，粘土鉱物製品Aでは，海水

直接添加条件，淡水添加後海水添加条件のいずれも類似しており，粒径中央値はそれぞれ 4.2 μm と 4.5 μm であった（Fig. 4）。同じ日本薬局方カオリンである B の海水直接添加条件での粒度分布は A とほぼ同様であり，粒径中央値は 5.3 μm であった。C も海水直接添加条件と淡水添加後海水添加条件での粒度分布の違いは小さかったが，他の粘土鉱物製品に比べて分布範囲が広かった。粒径中央値はそれぞれ 8.0 μm と 9.2 μm であった。D では海水直接添加条件に比べて淡水添加後海水添加条件の粒度分布は小粒径側にあり，粒径中央値はそれぞれ 16.1 μm と 2.3 μm であった。

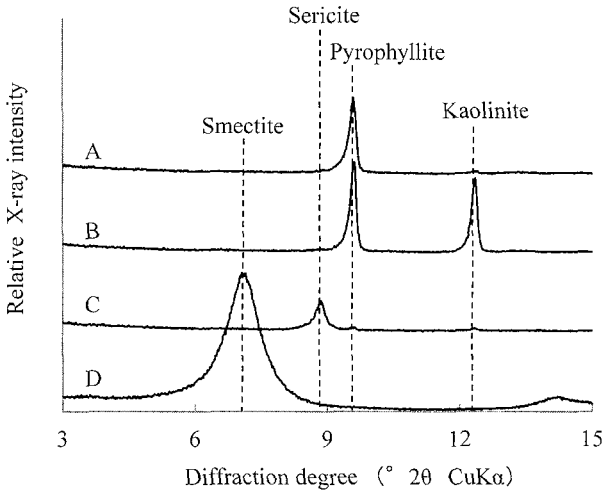

Fig. 2 X-ray diffraction pattern for the clay mineral products. A, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Takehara Industrial Chemical Corp.); B, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Shokozan Mining Co., Ltd.); C, CS-R Sericite (Shokozan Mining Co., Ltd.); D, Kunipia-F (Kunimine Industries Co., Ltd.).

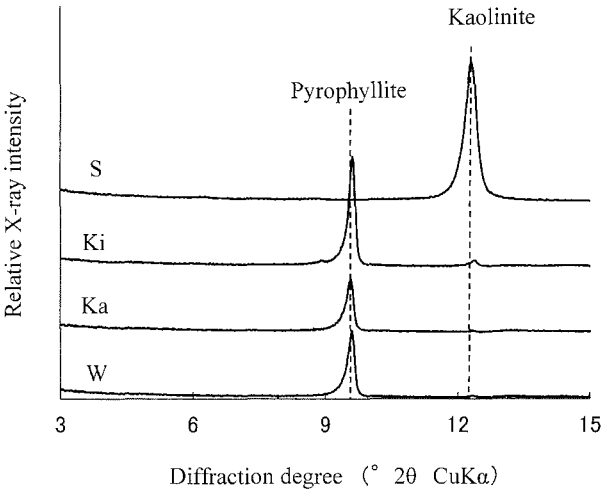

Fig. 3 X-ray diffraction pattern for the chemical reagents of Kaolin. W, 117-00025 (Wako Pure Chemical Industries, Ltd.); Ka, 23000-02 (Kanto Chemical Co., Inc.); Ki, 020-42505 (Kishida Chemical Co., Ltd.); S, K7375 (Sigma-Aldrich, Inc.).

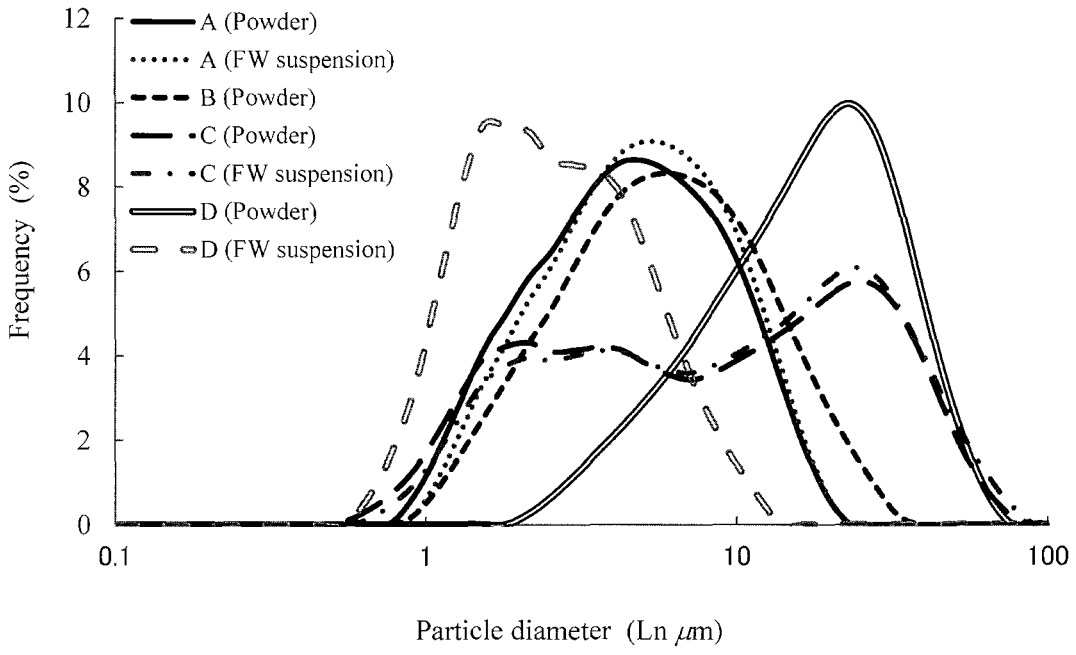

Fig. 4 Particle size distribution of the clay mineral products in seawater added as powder or as concentrated suspension of fresh water. A, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Takehara Industrial Chemical Corp.); B, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Shokozan Mining Co., Ltd.); C, CS-R Sericite (Shokozan Mining Co., Ltd.); D, Kunipia-F (Kunimine Industries Co., Ltd.).

粘土鉱物製品の水分は，Aが0.4%，Bが0.3%，Cが0.8%，Dが8.8%であった。

実験期間中の水質　いずれの実験においても水温は20±1℃の範囲であった。溶存酸素飽和度は90%以上に維持されていた。pHは，対照区ではいずれの実験においても7.9～8.0であった。粘土鉱物製品Aでは添加方法にかかわらず濃度とともに低下し，18.8, 37.5, 75.0, 150, 300 g/LでのpHはそれぞれ海水直接添加条件では7.8, 7.5, 6.7, 4.8, 4.0，淡水添加後海水添加条件では7.7, 7.5, 6.3, 4.4, 3.9であった。粘土鉱物製品CでもpHは添加濃度とともにわずかに低下する傾向がみられ，300 g/Lではいずれの添加条件でもpHは7.1であった。粘土鉱物製品B, Dでは添加濃度が低いこともあり，懸濁液のpHはいずれも7.9～8.1であった。また，実験期間中の各試験水のpHの変化は最高でも0.3であった。濁度については，実験1，実験3ではいずれの試験においても経時的な低下傾向はみられなかった。一方，実験2では実験4日目までは濁度の低下傾向は認められず，初日の濁度に対する比は平均で約100%であったが，実験5日目に一部の懸濁維持装置で濁度が低下し，全体では初日の約80%となった。懸濁率については，粘土鉱物製品A, Cでは，それぞれ海水直接添加条件での平均が91%と103%，淡水添加後海水添加条件が93%と102%で，最も懸濁率の低い濃度区で85%であった。粘土鉱物製品Bでは各濃度区の平均は86%以上で，全体の平均では91%であった。

ヒラメの生存への影響濃度　すべての実験において，全海水，80%海水のいずれの対照区でも実験期間中に死亡魚は認められなかった。また，いずれの粘土鉱物製品も添加条件を問わず，添加濃度の上昇につれて生残率は低下する傾向がみられた（Table 1）。

粘土鉱物製品Aでは，粉体のまま海水に直接添加した場合も淡水添加後海水添加した場合も，150および300 g/L区では24時間以内にすべての供試魚が死亡した。一方，75.0 g/L区では，淡水添加後海水添加条件に比べて海水直接添加条件の方が生残率の低下は顕著であった。二元配置分散分析の結果，曝露96時間後の生残率への影響は，濃度（$p=3.1\times10^{-8}$）と添加方法（$p=0.031$）のいずれについても有意であった。算定された半数致死濃度も，24～48時間のいずれにおいても淡水添加後海水添加条件の方が高い値であり，粘土鉱物製品Aでは淡水添加後海水に添加することによって，粉体のまま直接海水に添加した場合よりもヒラメの生存に及ぼす影響は軽減された（Table 2）。

粘土鉱物製品Bでは海水直接添加条件についてのみ検討を行なった。1.0 g/L区では死亡魚は認められなかったが，これ以上では濃度とともに生残率は低下し，96時間後には16 g/L区で平均17%となった。96時間半数致死濃度は5.0 g/Lと算定され，同じ日本薬局方カオリンの粘土鉱物製品Aの海水直接添加条件に比べて1桁小さい値となった。

粘土鉱物製品Cでは，海水直接添加条件における300 g/L区の供試魚は48時間目までにすべて死亡したのに対して，淡水添加後海水添加条件ではわずかではあるが96時間目まで生存する魚がみられた。75.0 g/L区については，淡水添加後海水添加条件では死亡魚が認められなかったのに対して，海水直接添加条件では平均でおよそ半数の供試魚が死亡した。二元配置分散分析の結果，曝露96時間後の生残率への影響は，濃度（$p=7.4\times10^{-12}$）と添加方法（$p=1.2\times10^{-3}$）のいずれについても有意であった。粘土鉱物製品Aと同様に，半数致死濃度は24～96時間のいずれにおいても海水直接添加条件の方が淡水添加後海水添加条件よりも低い値となった（Table 2）。

粘土鉱物製品Dを淡水添加後海水に添加した場合（Table 1），1.8 g/Lまでは96時間の実験期間中，死亡魚はみられなかったが，2.7 g/Lではわずかに生残率が低下した。4.0 g/Lでは実験回次による生残率の変動が大きかったが，平均ではほぼ半数が96時間目までに死亡し，6.0 g/Lでは24時間以内に全ての供試魚が死亡した。算定された半数致死濃度は24時間目から96時間目までほとんど変化がなく，約4 g/Lであった（Table 2）。

考　察

いずれの実験においても水温はほぼ設定値に維持されており，溶存酸素飽和度もヒラメの生存に影響しない範囲にあったと推定される。粘土鉱物A, B, Cの実験期間中の懸濁濃度については，懸濁率と実験期間中の濁度から，設定値からの大幅な低下はなかったものと考えられる。なお，粘土鉱物製品A, B, Cについては添加条件によらず，またDについても海水に直接添加した場合には，いずれも速やかに沈降したのに対して，粘土鉱物製品Dを淡水添加後海水添加した場合には，24時間以上静置してもほとんど沈降しなかった。したがって，粘土鉱物製品Dの淡水添加後海水添加条件では懸濁率を測定できなかったが，より沈降しやすい他の粘土鉱物製品で懸濁物質濃度の設定値からの大幅な低下がみられなかったことから，Dについても実験期間中の懸濁濃度は設定値付近に維持できていたと考えられる。

本研究では4種類の粘土鉱物製品を海水に懸濁させた場合のヒラメの生存への影響を検討した結果，製品によって影響濃度に差がみられた。海水に直接添加した場合の96時間半数致死濃度では，粘土鉱物製品Bで最も低く，同じ日本薬局方カオリンである製品Aとも大幅な差が認められた。海水中での粒度分布は製品AとB

Table 1 Survival rates of Japanese flounder after 24, 48, 72, 96 h exposure to clay mineral products suspension

Clay mineral product*1	Added to seawater as*2	Concentration (g/L)	n*3	Survival rates (%)*4			
				24 h	48 h	72 h	96 h
Control for A and C*5							
seawater		0	3	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
80% seawater		0	2	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
A	Powder	18.8	3	93±12	87±23	87±23	87±23
		37.5	3	73±38	70±44	67±40	63±38*
		75.0	3	30±44**	7±12**	3± 6**	3± 6**
		150	3	0± 0**	0± 0**	0± 0**	0± 0**
		300	3	0± 0**	0± 0**	0± 0**	0± 0**
	FW suspension	18.8	3	100± 0	100± 0	93±12	93±12
		37.5	3	100± 0	93±12	93±12	93±12
		75.0	3	70±52	53±45*	53±45*	53±45*
		150	3	0± 0**	0± 0**	0± 0**	0± 0**
		300	3	0± 0**	0± 0**	0± 0**	0± 0**
B	Powder	0	3	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		1.0	3	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		2.0	3	80±35	70±30	70±30	70±30
		4.0	3	77± 6	53±12*	50±17**	50±17**
		8.0	3	50±26**	47±25**	43±21**	43±21**
		16	3	40±10**	17±15**	17±15**	17±15**
C	Powder	18.8	3	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		37.5	3	100± 0	97± 6	93± 6	93± 6
		75.0	3	93± 6	80±10	73±12*	53± 6**
		150	3	53±42*	27±31**	20±26**	17±29**
		300	3	3± 6**	0± 0**	0± 0**	0± 0**
	FW suspension	18.8	3	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		37.5	3	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		75.0	3	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		150	3	77±40	73±46	73±46	66±40*
		300	3	53±29*	27±15**	10± 0**	3± 6**
D	FW suspension	0	6	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		1.2	6	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		1.8	6	100± 0	100± 0	100± 0	100± 0
		2.7	6	97± 5	97± 5	95± 5	95± 5
		4.0	6	58±26**	52±25**	52±25**	52±25**
		6.0	6	0± 0**	0± 0**	0± 0**	0± 0**

*1 A, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Takehara Industrial Chemical Corp.); B, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Shokozan Mining Co., Ltd.); C, CS-R Sericite (Shokozan Mining Co., Ltd.); D, Kunipia-F (Kunimine Industries Co., Ltd.).

*2 Test water was made in two ways: the clay mineral products was added to seawater directly as powder, or as five fold concentrated suspension in fresh water.

*3 Number of replications.

4 Mean±SD. Ten juvenile Japanese flounder were reared in each concentrated suspension of clay mineral products. Asterisks denote significant difference from control values at $p<0.05$ or $p<0.01$** (Dunnett's test).

*5 Clay mineral products A and C were tested at the same time. In control group full-strength and 80% concentration seawater were examined.

では顕著な差が認められなかった。また，海水に添加した際のpHへの影響も，半数致死濃度付近では製品Aの方がBよりも著しく，pHの変化がヒラメの生存への影響の差を生じたとは考え難い。一方，X線回折分析の結果，Aではパイロフィライトのピークのみでカオリナイトは検出されなかったのに対して，Bではパイロフィライトに加えてカオリナイトの含有が確認された。この結果から，製品AとBでヒラメの生存に差を生じた原因は含有する鉱物種の違いにあり，カオリナイトがパイロフィライトに比べてヒラメの生存に対してより強い影響を生じることが推察される。

本研究で用いた粘土鉱物製品に含まれていた粘土鉱物

Table 2　LC_{50} values of clay mineral suspension for Japanese flounder

Clay mineral product*1	Clay minerals mainly contained in the products	Clay mineral product was added to seawater as*2	LC_{50} (g/L)			
			24 h	48 h	72 h	96 h
A	Pyrophyllite	Powder	54.3	46.7	45.0	43.7
		Fresh water suspension	91.4	78.3	78.3	78.3
B	Pyrophillite, Kaolinite	Powder	9.9	5.7	5.0	5.0
C	Sericite	Powder	157.1	110.8	101.6	79.9
		Fresh water suspension	300<	212.1	193.7	179.4
D	Smectite	Powder*3	(38.4)	(38.0)	(37.7)	(36.9)
		Fresh water suspension	4.2	4.1	4.1	4.1

*1 A, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Takehara Industrial Chemical Corp.); B, Japanese Pharmacopoeia grade Kaolin (Shokozan Mining Co., Ltd.); C, CS-R Sericite (Shokozan Mining Co., Ltd.); D, Kunipia-F (Kunimine Industries Co., Ltd.).

*2 Test water was made in two ways: the clay mineral product was added to seawater directly as powder, or as fivefold concentrated suspension in fresh water.

*3 Baba *et al.*[15]

のうち，パイロフィライトとカオリナイトはいずれも含水ケイ酸アルミニウムで構成元素は同様である。一方，基本構造はカオリナイトがケイ酸四面体と水酸化アルミニウム八面体の1：1層であるのに対して，パイロフィライト，セリサイト，スメクタイトは2：1層である。1：1層型粘土鉱物では八面体層表面に水酸基が露出しているといった特徴があることから，粘土鉱物の立体構造の差異がヒラメの生存への影響の差を生じた原因として推定される。また，粘土鉱物Bではカオリンに加えてパイロフィライトのピークも確認されたことから，カオリナイト含量のより高い粘土鉱物製品では，ヒラメの生存への影響もより強い可能性がある。

粘土鉱物製品AとBはいずれも日本薬局方カオリンであるが，粘土鉱物組成は異なっていた。日本薬局方（http://jpdb.nihs.go.jp/jp15/YAKKYOKUHOU15.pdf, 2010年12月1日）では，カオリンは定められた試験方法による基準を満たす，天然に産する含水ケイ酸アルミニウムであって，鉱物種は規定していない。化学用カオリンについても，国内3社のものではパイロフィライトの明確なピークが認められたのに対してカオリナイトのピークはほとんどみられなかった。一方，外国社製の化学用カオリンではパイロフィライトのピークは認められず，カオリナイトのピークが認められた。工業用水試験方法（JISK0101, http://www.jisc.go.jp/app/pager?id=56862，2010年12月1日）では濁度の標準物質としてカオリンが用いられており，また，魚類の懸濁物影響試験にも広く用いられてきた。[4] 本研究の結果から，同じ名称の粘土鉱物製品でも鉱物組成が異なっている場合があり，また，組成によって魚類への影響が異なることが示唆された。

一方，同じ粘土鉱物製品でも，海水への添加方法によってヒラメの生存への影響には差が認められた。粘土鉱物製品Dでは，全長81 mmと本研究とほぼ同様のサイズのヒラメを用いた既報[15]の海水直接添加条件における96時間半数致死濃度が約37 g/Lであったのに対して，淡水添加後海水添加条件では約4 g/Lに低下した。前述のように，製品Dでは淡水添加後海水添加条件では海水直接添加条件にくらべて懸濁物がほとんど沈降せず，粒度分布においても淡水添加後海水添加条件では粒径が大幅に小さくなった。このことから，添加方法の違いによる粒径の差によってヒラメの生存への影響濃度が異なった可能性がある。木下ら[9]は9～488 μmの平均粒径の異なるシルトや砂をイワナに曝露した結果，粒径が細かいほど鰓に付着しやすく，また，鰓での付着面積が増加して鰓での酸素摂取量が減少すると窒息死すると述べている。一方，アユに粒径の異なる粘土を曝露した例や，[10] 河川堆積物を＜74～740 μmの4段階に篩分けしてベニザケに曝露した例では，[11] 懸濁物質の粒径が大きいほど生存への影響も大きいことが報告されている。これらの知見から，懸濁物質の種類や魚種などによって粒径と影響との関係も変化する可能性も考えられる。

粘土鉱物製品Dとは反対に，AとCでは海水直接添加条件に比べて淡水添加後海水添加条件で影響が小さかった。製品A, Cでは添加方法の違いによる粒径や水質の差は認められなかった。また，粘土鉱物製品について，添加方法によって物性が変化するとの知見も得られていないことから，本研究の範囲では添加方法によって生存への影響が変化した原因については明らかではない。

高濃度の懸濁物質が魚類に及ぼす影響では，懸濁物粒子による鰓の閉塞や物理的損傷がしばしば重要視される。[12] 一方，本研究では粘土鉱物製品Aを高濃度に添加した場合には懸濁液のpHが大幅に低下したことから，懸濁物質の種類によっては物理的影響のみならず，水質の変化を介して魚類に影響を及ぼす可能性もある。また，天然水域の堆積物は重金属などの汚染物質を吸着している場合があり，懸濁物質の影響を強調する可能性

も指摘されている。[18] 本研究では，ヒラメの生存に対する粘土鉱物製品間の差や添加方法の違いを検討した結果，最大で2桁の差がみられた。土砂に含まれる粘土鉱物の組成は地域によって異なっており，[14] また水域への流入経路も一様ではないことから，懸濁物質が魚類に及ぼす影響を検討する上では，対象とする地域の地質的・地理的特性にも配慮して用いる物質や添加方法を選定する必要があると考える。さらに，懸濁物質の粒径や水質変化を介した魚類への影響などについても知見を集積することによって，より適切な影響評価が可能になるものと推察される。

謝　辞

本研究を行なうに当たり，大山隆弘博士（電中研），馬場義彦博士（元　電中研）ほか関係各位に御指導，御協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げる。

文　献

1) Sherk JA, O'Connor JM, Neumann DA. Effects of suspended and deposited sediments on estuarine environments. In: Cronin LE (ed). *Estuarine research. Volume 2: Geology and Engineering*, Academic Press, New York. 1975; 541–558.
2) Crosa G, Castelli E, Gentili G, Espa P. Effects of suspended sediments from reservoir flushing on fish and macroinvertebrates in an alpine stream. *Aquat. Sci.* 2010; **72**: 85–95.
3) Newcombe CP, Jensen JO. Channel suspended sediment and fisheries: a synthesis for quantitative assessment of risk and impact. *North Am. J. fish. Manage.* 1996; **16**: 693–727.
4) ㈳日本水産資源保護協会．3. 懸濁物質（SS）．「水産用水基準」．東京．2005; 19–24.
5) Auld AH, Schubel JR. Effects of suspended sediment on fish eggs and larvae: A laboratory assessment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 1978; **6**: 153–164.
6) McFarland VA, Peddicord RK. Lethality of a suspended clay to a diverse selection of marine and estuarine macrofauna. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1980; **9**: 733–741.
7) Redding JM, Schreck CB. Physiological effects on coho salmon and steelhead of exposure to suspended solids. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1987; **116**: 737–744.
8) Lake RG, Hinch SG. Acute effects of suspended sediment angularity on juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1999; **56**: 862–867.
9) 木下篤彦，天野邦彦，藤田正治，田川正朋，水山高久．排砂に伴う濁りが魚類に与える生理的影響とその評価．砂防学会誌 2005; **58**: 34–43.
10) 天野邦彦，萱場祐一，皆川朋子，村岡敬子，中村圭吾，傳田正利，大石哲也．Ⅰ-16 河川環境におけるインパクト・レスポンスに関する調査．平成17年度土木研究所成果報告書．2005; 167–184.
11) Servizi JA, Martens DW. Some effects of suspended Fraser river sediments on sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 1987; **96**: 254–264.
12) Bilotta GS, Brazier RE. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Res.* 2008; **42**: 2849–2861.
13) 白水晴雄．「粘土鉱物学―粘土科学の基礎―」．朝倉書店，東京．1988.
14) 日本粘土学会．「粘土ハンドブック」．技報堂出版，東京．2009.
15) 馬場義彦，川那公士，半田岳志，岩田仲弘，難波憲二．懸濁物質が魚類の生理・生態に及ぼす影響―スメクタイトに対するヒラメの生存実験．日水誌 2006; **72**: 408–413.
16) 川那公士，半田岳志，馬場義彦，岩田仲弘，植松一眞，難波憲二．懸濁物質が魚類の生理・生態に及ぼす影響―ヒラメの呼吸に及ぼすスメクタイトの影響．日水誌 2008; **74**: 375–379.
17) Doudoroff P, Anderson BG, Burdick GE, Galtsoff PS, Hart WB, Patrick P, Strong ER, Surber EW, Horn WM. (町田喜弘訳)．魚類に対する産業排水の急性毒を評価するための生物学的定量法．水産増殖 1955; **3**: 1–23.
18) Au DWT, Pollino CA, Wu RSS, Shin PKS, Lau STF, Tang JYM. Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper *Epinephelus coioides*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2004; **266**: 255–264.