魚類養殖漁場における海底堆積物の 化学的特性とリンの存在形態

上 出 貴 士^{a*}

(2006年2月1日受付, 2006年9月8日受理)

和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場増養殖研究所

Chemical characteristics and forms of phosphorus compounds in sediment of fish farming areas

TAKASHI UEDE^{a*}

*Fisheries Farming Laboratory, Fisheries Experimental Station, Wakayama Research Center of Agriculture,
Forestry and Fisheries, Tanabe, Wakayama 646-0058, Japan*

This study is compared the sediment quality of fish farming areas with those of non fish farming ones, to clarify the environmental characteristics of the sediment in fish farming areas. For chemical oxygen demand, total organic carbon, total nitrogen and C/N, no difference was observed between fish farming areas and non fish farming areas. In contrast, total phosphorus concentrations in fish farming areas were higher than those of non fish farming areas. C/P and N/P were lower than those of non fish farming areas. These results caused by the accumulation of Ca-bound phosphorus to the sediment. Concentrations of Ca-bound phosphorus, which originates from fish feed and feces, reached more than 1 mg g^{-1} in the sediment of fish farming areas. These findings reveal that determination of phosphorus compounds in the sediment enables us to show the area affected by the organic loads of fish farming.

キーワード：海底堆積物, カルシウム結合型リン, 魚類養殖漁場, 全リン量

魚類養殖は、波の静かな内湾の限られた海域を生産基盤として発展してきた。しかし、過密養殖や過剰な給餌は生簀周辺への有機物負荷を増大させ、¹⁾ その影響は生簀周辺に限られるものの海底の動物相に影響を与えることが明らかにされている。²⁾ また、過密養殖と過剰給餌に伴う有機物負荷の増大は、漁場環境の悪化を引き起こし、赤潮の発生や魚病の蔓延、ひいては魚類養殖そのものの生産性を損なうことにつながる。

このような富栄養化に対処し漁場の適正利用と魚病の予防・蔓延防止を目指して1999年に「持続的養殖生産確保法」が施行され、養殖漁場の環境指標が定められた。しかし、基準とされている酸素消費速度に基づいた硫化物量は現場適応が困難であると指摘され、³⁾ 底生生物に関しては存在の有無のみが定められているに止まり、漁場の環境状態を明示できるような具体的な数値は

示されていない。横山らは、これらの魚類養殖漁場の環境評価手法を一層推し進め、熊野灘において底質及びマクロベントスの詳細な調査・分析を行い、内湾度などを導入することで養殖漁場環境の具体的な評価事例を示している。^{4,5)} また、漁場環境に適した魚類養殖生産量の推定⁶⁾や生簀周辺への有機物負荷の影響範囲⁷⁾などの魚類養殖漁場環境やその評価に関する知見が集積されつつある。

筆者も和歌山県における養殖漁場の持続的かつ効率的な利用手法の確立を目的に魚類養殖漁場の環境評価に関する調査研究に取り組んでいる。その中で、化学的酸素要求量(COD)や全有機態炭素量(TOC)などの有機物指標のみでは魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場の違いが明確で無い場合がみられることや魚類養殖漁場の海底堆積物には全リン量(TP)が高濃度で含まれる傾向のあ

* Tel.: 0735-62-0940. Fax: 0735-62-3515. Email: uede_t0001@pref.wakayama.lg.jp

^a 現所属：和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場 (Fisheries Experimental Station, Wakayama Research Center of Agriculture, Forestry and Fisheries, Kushimoto-cho, Wakayama 649-3503, Japan)

ることなどを見出した。しかしながら、海底堆積物中における窒素やリンの分布については、東京湾,^{8,9)} 大阪湾,¹⁰⁾ 瀬戸内海沿岸及び有明海¹¹⁾などの主に大都市に面した内湾域での知見がほとんどで、魚類養殖漁場やその周辺海域での知見については、現在のところほとんどないのが現状である。特にリンに関する知見が少ないが、大阪湾ではアルミニウム結合型リンや鉄結合型リンは有機物負荷との関連性が示唆されており,¹²⁾ 魚類養殖とリンの関連性を理解することは漁場の適正な利用手法の確立に必要なことであると考ええる。

そこで、魚類養殖漁場における海底堆積物の化学的特性、TPの高濃度の蓄積及びその存在形態を明らかにすることを目的として、紀伊半島南西部沿岸の3海域において魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場で海底堆積物を採取し、還元性物質である酸揮発性硫化物態硫黄量

(AVS)や有機汚濁並びに富栄養化関連物質（化学的酸素要求量：COD，全有機態炭素量：TOC，全窒素量：TN）濃度の測定を行った。これらのデータを用いて魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場の海底堆積物中の有機物指標の比較を行った。また、TPの高濃度の蓄積とその組成について検討し、魚類養殖との関係を検討した。これらの結果、魚類養殖漁業の底質環境に対する影響を評価する上での有効な知見を得たのでここに報告する。

方 法

調査は Fig. 1 に示した3海域で行った。和歌浦湾では2003年8月29日に13定点、田辺湾では2003年8月6日に10定点、串本漁場では2003年8月12日に10定点で海底堆積物の採取を行った。なお、調査定点のT1~3, T8~10, K1~8では養殖筏直下で採取を行っ

Fig. 1 Study areas and sampling stations. Letters T and K with enclosures indicate fish farming areas and without enclosures indicate non fish farming areas. in Fig. 1-II indicate fish farming areas and in Fig. 1-III indicate fish cages.

たので魚類養殖漁場として、その他を非魚類養殖漁場として扱った。田辺湾及び串本漁場における魚類養殖生産量は1996年から2001年までの平均値で2,076 t及び3,068 tである。

海底堆積物の分析項目は酸揮発性硫化物態硫黄量 (AVS), 化学的酸素要求量 (COD), 全有機態炭素量 (TOC), 全窒素量 (TN), 全リン量 (TP), 鉄結合型リン量 (Fe-P), アルミニウム結合型リン量 (Al-P), カルシウム結合型リン量 (Ca-P) である。

海底堆積物はエクマンバージ型採泥器 (採泥面積 0.0225 m^2) を用いて、表面 (0~1 cm 層) のものを採取した。採取した海底堆積物は直ちに氷を入れたクーラーボックスに収容し実験室へ持ち帰った。分析には粒径 1 mm 以下のものを用い、採取日と同日中に AVS の測定を行った後、試料は他の分析項目の測定まで -20°C で保存した。保存後、COD の測定及び試料の乾燥保存処理は 7 日以内に行った。

AVS 及び COD はそれぞれ検知管法^{13,14)} 及び過マンガン酸カリウムによる方法^{13,15)} で行った。TOC 及び TN は、試料を恒量に達するまで乾燥したものに 1N HCl を加えて無機炭素化合物を分解し、蒸留水で洗浄・乾燥した後、元素分析装置 (EA1110, ThermoQuest Italia) を用いて定量を行った。TP や各種のリン化合物は、TOC や TN の分析に用いたものと同じサンプルを用いて Ishio *et al.*^{16,17)} による方法に準じて定量した。各種リン化合物の抽出は以下のとおりである。

TP は試料 50~100 mg を試験管に採り、 H_2SO_4 (1 : 1) を 5 mL と 30% H_2O_2 を数滴加えオートクレーブ内で 121°C , 2 時間分解した。Al-P は Fe-P と共に抽出・定量された (以下、(Fe+Al)-P と表記)。試料は 300~

500 mg を三角フラスコに採り、1% $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液を 20 mL 添加し、沸騰したウォーターバスに 1 時間置いた。Ca-P は、(Fe+Al)-P の分析に用いた試料に 1 mol L^{-1} HCl を加え、24 時間室温で振盪・抽出した。Fe-P は 800~1000 mg の試料を三角フラスコに採り、NaOH 溶液で pH 5.07 に調整した 0.164 mol L^{-1} マレイン酸緩衝溶液を 20 mL 加え、続いて 1% $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液を 20 mL 添加した。三角フラスコにはアルミ箔で蓋をして針金でピンホールを一つ開け、沸騰したウォーターバスに 10 分間置いた。

こうして得られた各分解液は、蒸留水で試料をよく洗浄しながら孔径 $0.45 \mu\text{m}$ のミリポアフィルターを用いて吸引濾過した。得られた濾過液はフェノールフタレインを加え 5.5 mol L^{-1} NaOH で pH 調整した後、 H_2SO_4 (1 : 1) を $200 \mu\text{L}$ 加えた。なお、(Fe+Al)-P の分解液は 120°C で約 1 時間加熱した後、析出した硫黄を前述のフィルターを用いて取り除いた。

以上のようにして得られた濾過液をメスフラスコで 100 mL にメスアップした後、モリブデン青 (アスコルビン酸還元) 吸光光度法¹⁸⁾ で定量した。なお、(Fe+Al)-P の測定値から Fe-P の測定値を差し引いたものを Al-P の濃度とした。また、TP から Fe-P, Al-P, Ca-P を減じたものを Residual-P (Re-P) とした。

結 果

魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場における海底堆積物の特性 Fig. 2 に海域別の海底堆積物中の AVS, COD, TOC, TN, TP 及び原子比 C/N, C/P, N/P の平均値を示した。AVS, COD, TOC 及び TN はそれぞれ $0.00 \sim 0.80$, $1.6 \sim 25.1$, $1.3 \sim 14.6$, $0.27 \sim 1.87 \text{ mg g}^{-1}$ の範囲に

Fig. 2 Average concentrations of AVS, COD, TOC, TN, TP, C/N, C/P and N/P in the sediment. Vertical lines indicate SD. Upper-left graphs are enlargements of average concentrations of AVS, TN and TP in the lower graphs. Arrows in the graphs show the relationship between the lower original graphs and the upper-left enlarged graphs. Wakaura Bay Fish farming area in Tanabe Bay Non fish farming area in Tanabe Bay Fish farming area in Kushimoto Non fish farming area in Kushimoto

Fig. 3 Concentrations of four types of phosphorus (Fe-P, Al-P, Ca-P and Re-P) in the sediment. Fe-P Al-P Ca-P Re-P The highlighted station numbers indicate sampling stations in fish farming areas.

あり、海域間で大きな差はないものの、総じて田辺湾の魚類養殖漁場で高くなった。また、C/N は 5.8~10.7 の範囲にあり、COD などの有機物指標と同様に海域間で大きな差はみられなかった。一方、TP, C/P 及び N/P はそれぞれ 0.20~2.85 mg g⁻¹, 6.1~80.5, 0.8~8.0 の範囲にあった。TP は田辺湾及び串本漁場の魚類養殖漁場で、和歌浦湾や田辺湾の非魚類養殖漁場に比べ有意に高くなった (Tukey-Kramer 検定, $p < 0.05$)。また、田辺湾及び串本漁場の魚類養殖漁場では高濃度の TP によって C/P 及び N/P が低下し、和歌浦湾や田辺湾の非魚類養殖漁場に比べると有意に低い数値となった (Tukey-Kramer 検定, $p < 0.05$)。これらの傾向は串本漁場の魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場との間にもみられた。

魚類養殖漁場に蓄積されたリンの存在形態 Fig. 3 に定点別の各リン化合物の濃度を示した。和歌浦湾では、Fe-P 及び Ca-P は和歌川河口付近 (W3, 5) や湾北部 (W6, 7) で低く、湾口、湾中南部 (W8~13) で高い傾向がみられた。Al-P は沿岸部 (W1~6) で高く、湾口の W7~13 で 10 μg g⁻¹ 以下と低く、TP, Fe-P, Ca-P と異なる分布を示した。田辺湾では、Ca-P は TP と類似した分布を示し、魚類養殖漁場 (T1~3, 8~10) で顕著に高く、TP の 75.9% 以上を占めた。Fe-P は、Ca-P と比較的好く似た分布を示した。Al-P は南部 (T9, 10) 及び東部 (T4), 会津川河口付近 (T6) で 27 μg g⁻¹ 以上と高かった。一方、湾口南部 (T7) は 1 μg g⁻¹ と低い値であった。串本漁場では、TP, Ca-P は、田辺湾同様に魚類養殖漁場 (K1~8) で顕著に高い値を示した。特に Ca-P は東部 (K2, 4) で 2000 μg g⁻¹ を超え、TP に占める割合が 78.6% 以上となった。また、K9, K10 では Ca-P が他の非魚類養殖漁場より高い数値を示した。Fe-P は、K5, 6 でそれぞれ 59, 63 μg g⁻¹ と低く、南部の K1 で 97 μg g⁻¹ と最も高かった。Al-P

Fig. 4 Average concentrations of four types of phosphorus (Fe-P, Al-P, Ca-P and Re-P) in the sediment. Vertical lines indicate SD. Upper-left graphs are enlargements of average concentrations of Fe-P and Al-P in the lower graphs. Arrows in the graphs show the relationship between the lower original graphs and the upper-left enlarged graphs. Wakaura Bay Fish farming area in Tanabe Bay Non fish farming area in Tanabe Bay Fish farming area in Kushimoto Non fish farming area in Kushimoto.

は漁場の東部 K4 や南部 K3 で 2 μg g⁻¹ と低くなり、TP や Ca-P, Fe-P とは異なる分布を示した。

Fig. 4 に海域別の海底堆積物中の Fe-P, Al-P, Ca-P 及び Re-P の平均値を示した。Fe-P, Al-P 及び Re-P は COD などの有機物指標と同様に海域間における差は明瞭ではなかった。一方、田辺湾で魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場とを比較した場合、Ca-P は魚類養殖漁場で 1570 μg g⁻¹ を超え、有意に高くなった (Tukey-Kramer 検定, $p < 0.05$)。更に、田辺湾、串本漁場の魚類養殖漁場と和歌浦湾、田辺湾の非魚類養殖漁場を比較してみると魚類養殖漁場で有意に高くなった。 (Tukey-Kramer 検定, $p < 0.05$)。同様の結果は、串本漁場の魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場との間にもみられた。以上の結果が

Table 1 Matrix of correlation coefficient between organic matter and the four types of phosphorus in the sediment
Non Fish Farming Areas

	AVS	COD	TOC	TN	TP	Fe-P	Al-P	(Fe + Al)-P
Fe-P	0.398	0.682*	0.780*	0.849*	0.712*			
Al-P	0.182	-0.299	-0.184	-0.135	-0.129	-0.125		
(Fe + Al)-P	0.462*	0.486*	0.634*	0.723*	0.599*	0.869*	0.382	
Ca-P	0.156	0.551*	0.640*	0.583*	0.872*	0.497*	-0.001	0.462*
Fish Farming Areas								
	AVS	COD	TOC	TN	TP	Fe-P	Al-P	(Fe + Al)-P
Fe-P	0.394	0.313	0.109	0.301	0.148			
Al-P	0.356	0.420	0.520	0.370	-0.462	-0.456		
(Fe + Al)-P	0.717*	0.693*	0.576*	0.635*	-0.264	0.604*	0.434	
Ca-P	-0.092	-0.353	-0.103	0.011	0.983*	-0.505	-0.505	-0.363

Asterisks indicate that the correlation coefficients are significant (*t*-test, $p < 0.05$).

ら海底堆積物中の TP 及び Ca-P は魚類養殖漁場直下で顕著に高く、非魚類養殖漁場とは大きく異なることが明らかになった。

次に、魚類養殖漁場及び非魚類養殖漁場における有機物汚濁指標と各リン化合物との関係を検討するため Table 1 に Fe-P, Al-P, Ca-P と AVS, COD などの有機汚濁指標との相関行列を示した。また、内湾に堆積した Al-P は外海水の進入で Fe-P に容易に転化することが知られている¹⁶⁾ので、これらの和 ((Fe + Al)-P) と各項目との相関についても検討した。非魚類養殖漁場では、Al-P は有機汚濁指標や他のリン化合物と有意な相関を示さなかった。一方、Fe-P, Ca-P 及び (Fe + Al)-P は有機汚濁指標と有意な正の相関を示した。魚類養殖漁場では COD, TOC, TN といった有機物指標と Fe-P や Al-P とは関連性が認められなかった。しかし、(Fe + Al)-P とこれらの有機物指標の間には有意な正の相関がみられた。また、Ca-P については TP との間に極めて高い正の相関が認められた。

考 察

TOC 及び TN は魚類養殖の存在の有無に関わらず、どの海域においても変動がみられ、 $1.3 \sim 14.6 \text{ mg g}^{-1}$ 及び $0.27 \sim 1.87 \text{ mg g}^{-1}$ の範囲にあった。一方、TP は非魚類養殖漁場に比べ魚類養殖漁場で著しく高い傾向がみられた。東京湾⁹⁾や大阪湾¹⁰⁾において、リンは炭素、窒素と類似の分布を示すことが報告されており、鎌谷ら⁹⁾は有機態炭素と TP の関係から $\text{TP (mg g}^{-1}) = 0.0287 \times \text{TOC (mg g}^{-1}) + 0.161$ という直線回帰式を得ている。そこで調査海域における TOC と TP との関係を図 5 に示した。今回得られた非魚類養殖漁場でも TP と TOC の間には有意な正の相関 ($p < 0.01$) がみられ、

$$\text{TP (mg g}^{-1}) = 0.0304 \times \text{TOC (mg g}^{-1}) + 0.171$$

Fig. 5 Relationship between TOC and TP in the sediment. ○, □, △: Nonfish farming stations in Wakaura bay, Tanabe bay, the fish farming area of Kushimoto, respectively. ■, ▲: Fish farming stations in Tanabe bay and the fish farming area of Kushimoto, respectively. Solid line in the graph indicates the regression line that represents the relationship between TOC and TP in the sediment of non fish farming stations. Broken lines show confidence interval (95%) of regression line.

という東京湾と極めて類似した回帰式が得られた。従って、回帰式とその95%信頼区間内に位置する TOC 及び TP 濃度を非魚類養殖型の海底堆積物として考えることができる。しかし、K10 では TOC 8.0 mg g^{-1} に対し TP は 0.61 mg g^{-1} となった。TOC 8.0 mg g^{-1} の場合、非魚類養殖漁場における TP の95%信頼区間の上限値は 0.57 mg g^{-1} であり、実測値は上限値より高い数値となった。K10 は、養殖筏から 1 km 以上離れた和歌浦湾や田辺湾の非魚類養殖海域に比べて養殖筏から 200 m 程度の距離しか離れていない。魚類養殖による有機物負荷の影響は 50~300 m の範囲に及ぶことが知ら

れ,^{1,7,19)} K10 の TP が高いのは、後述する魚類養殖の影響によるものと考えられる。一方、魚類養殖漁場では TOC と TP の間に明瞭な対応がみられず、TOC に対して TP が著しく高く、リンの高濃度の堆積が認められた。これらの海域ではいずれも TP が 1 mg g^{-1} を超えた。熊野灘沿岸の魚類養殖漁場でも 1 mg g^{-1} を大きく超える TP 濃度が報告されており、⁴⁾ 有明海や博多湾での $0.09 \sim 1.06 \text{ mg g}^{-1}$ の範囲²⁰⁾ に比べると魚類養殖漁場では TP 濃度が高くなる傾向がみられた。また、魚類養殖漁場の C/P や N/P が非魚類養殖漁場に比べ有意に低いことからリンの高濃度の堆積が明らかになった。

TP の組成については Fe-P, Al-P, Ca-P が海底堆積物における主な無機態リンであることが知られており、^{21,22)} 今回の調査海域では TP の大部分がこれらの無機態リンによって構成されていた。とりわけ Ca-P の占める割合が 75.9% 以上を占め、TP と極めて強い正の相関を示したことから魚類養殖漁場における TP の蓄積は Ca-P に大きく依存していることが明らかになった。また、有明海や博多湾では Ca-P は $85 \sim 632 \mu\text{g g}^{-1}$ の範囲にあり、¹⁶⁾ 和歌浦湾や田辺湾の非魚類養殖漁場では $272 \mu\text{g g}^{-1}$ 以下であることから、魚類養殖漁場での $1000 \mu\text{g g}^{-1}$ を超える Ca-P 濃度は極めて高い値といえる。このことは Ca-P が難分解性のため有機物の循環にほとんど関与せず¹⁰⁾ 海底堆積物中に堆積した結果と考えられる。更に、養魚飼料の主原料である魚粉に含まれている骨由来のリン酸カルシウムは魚類の利用率低いことが知られており、²³⁾ Ca-P の蓄積は養魚飼料由来の残餌及び糞の沈積成分に由来すると考えられる。従って、Ca-P 若しくは TP と TOC などの有機物指標の比較を行うことで魚類養殖による有機物負荷の影響範囲の評価を行えると考えられる。

一方、AVS や COD, TOC, TN といった有機汚濁指標は、田辺湾の魚類養殖漁場で高くなった。しかし、魚類養殖生産量で田辺湾を上回る串本漁場の魚類養殖漁場は非魚類養殖漁場と比べて明確な違いはみられなかった。串本漁場では周年を通して強い海水の流れの存在することが漁業関係者の間では経験的に知られている。海底上 1 m の平均流速が 8 cm sec^{-1} 以上であれば直上からの有機物負荷をほとんど受けないとされており、¹⁹⁾ 串本漁場では速い海水の流れが負荷有機物の拡散や酸素の供給による AVS 濃度の抑制に関係していると思われる。

また、C/P, N/P は魚類養殖漁場で低くなる傾向がみられたが、C/N は魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場との間に違いはみられなかった。カナダ東岸の Bliss Harbour でも同様の結果が得られている。²⁴⁾ Holmer *et al.* も養殖筏直下と 30 m 離れた地点での海底堆積物を分析し、有機物や硫酸還元速度は直下で高い傾向がみられるものの、C/N では違いがないことを報告している。²⁵⁾ 彼

らは海底堆積物の C/N が養魚飼料より高く、なおかつ海底堆積物中の間隙水の C/N が養魚飼料よりも低いことから、C よりも N の分解と溶出が早く進んでいることを指摘している。従って、本研究で得られた結果もこのような海底堆積物における N の分解過程や海域環境の特性によって生じたと考えられ、海底堆積物中の TOC や TN の含有量のみによって魚類養殖による有機物負荷の影響を評価することは困難であると考えられた。

また、他のリン化合物についてみると、Ca-P ほどではないものの魚類養殖漁場では非魚類養殖漁場に比べ Fe-P が高い傾向がみられた。Fe-P からのリン酸イオンの溶出は、酸素濃度への強い依存性を持つことが知られており、^{26,27,28)} Fe-P の高い含有量がみられた田辺湾や串本漁場では溶存態の無機リン酸の潜在的な供給源が存在している^{20,22)} と考えることができる。Al-P は和歌川の河口付近をはじめとした和歌浦湾の W1~6、田辺湾奥の T4, T9, T10、会津川河口の T6 などで高くなった。Al-P は弱アルカリ下でリン酸を遊離し Fe-P となり、¹⁶⁾ 主に陸水の影響の強い海域で高くなることが報告されている¹²⁾ ことから、外海水の影響が弱い内湾域などで高くなったものと考えられる。一方、外海水の影響の強い海域では Fe-P に転換していることが推察され、有機汚濁物質とともに負荷されたリンが、海底堆積物中で Al-P と Fe-P の形態をとることが考えられた。このことは、(Fe + Al)-P が魚類養殖漁場と非魚類養殖漁場の双方で有機物指標と有意な正の相関を示したことから妥当といえるであろう。また、調査を行った魚類養殖漁場周辺には大きな河川や大規模な都市排水の流入がないことから、魚類養殖によって負荷されたリンが、海底堆積物において Fe-P や Al-P の形態をとることも示唆された。しかし、Al-P 単独での濃度分布は、前述したように定点の位置や地形に大きく依存し、魚類養殖との関連性が低くなるものと考えられた。

以上のように、魚類養殖漁場では TP の高濃度の蓄積がみられ、それは魚類養殖によって負荷された Ca-P に由来していることが示唆された。従って、リン化合物の組成を知ることで、魚類養殖での飼料投与による海底堆積物への TP の蓄積が明らかになった。従って、TP は魚類養殖による有機物負荷の影響範囲を知る有力な指標になると考えられた。しかし、Ca-P は安定な化合物のため海底堆積物中に投与されると蓄積されたままになり、かつて魚類養殖漁場として使用されていた海域でも高い数値をとることがある。(上出未発表) 従って、TOC や TN などの有機汚濁指標や周辺海域の魚類養殖の現況などのデータを考慮することで、魚類養殖による有機物負荷の影響範囲を的確に推定できると考える。

謝 辞

本報をとりまとめるにあたり有益な御助言と御校閲を頂いた大阪市立大学工学部教授矢持進博士及び和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場増養殖研究所所長竹内照文博士に深く深謝致します。独立行政法人水産総合研究センター養殖研究所生産システム部横山寿博士並びに同石樋由香氏には、TOC 及び TN の分析にあたり貴重な御指導と御助言を頂き、厚く御礼申し上げます。

また、調査並びに試料分析にご協力いただいた和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場増養殖研究所佐々木明生氏、巨海敏之氏、田中真珠美氏並びに働わかやま産業振興財団田中俊充氏に、この場を借りて深謝致します。

本研究は水産庁による平成 15 年度養殖漁場環境保全推進委託事業（環境保全型養殖普及推進事業）により行ったものであり、ここに改めて水産庁に謝意を表します。

文 献

- 窪田敏文. 魚類養殖場. 「水産学シリーズ 21 浅海魚類養殖と自家汚染」(日本水産学会編) 恒星社厚生閣, 東京. 1977; 9-18.
- Brown JR, Gowen RJ, McLusky DS. The effect of salmon farming on the benthos of a Scottish loch. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1987; **109**: 39-51.
- 横山 寿, 坂見知子. 五ヶ所湾魚類養殖漁場における環境指標としての酸素消費速度の検討. 日水誌 2002; **68**: 15-23.
- 横山 寿, 西村昭史, 井上美佐. 熊野灘沿岸の魚類養殖におけるマクロベントス群集と堆積物に及ぼす養殖活動と地形の影響. 水産海洋研究 2002; **66**: 133-141.
- 横山 寿, 西村昭史, 井上美佐. マクロベントス群集を用いた魚類養殖漁場環境の評価. 水産海洋研究 2002; **66**: 142-147.
- Yokoyama H. Environmental quality criteria for the fish farms in Japan. *Aquaculture* 2003; **226**: 45-56.
- Pawar V, Matsuda O, Yamamoto T, Hashimoto T, Rajendran N. Spatial and temporal variations of sediment quality in and around fish cage farm: A case study of aquaculture in the Seto Inland Sea, Japan. *Fish. Sci.* 2001; **67**: 629-627.
- 鎌谷明善. 東京湾における懸濁物及び堆積中の磷, 珪素, 炭素と窒素について. 日水誌 1979; **45**: 1109-1114.
- 鎌谷明善, 捧 一夫, 森田良美. 東京湾堆積物中の磷の形態と鉛直分布. 日水誌 1984; **50**: 1883-1888.
- 城 久. 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁場生産に及ぼす影響について. 大阪水試研報 1986; 1-174.
- 田中勝久. 沿岸・河口域のリン循環過程におよぼす土壌物質の影響. 南西水研研報 1994; **28**: 73-119.
- 城 久. 大阪湾におけるリンの循環. 沿岸海洋研究ノート 1987; **24**(2): 158-168.
- 水産庁研究部漁場保全課. 「漁場保全対策推進事業調査指針」水産庁, 東京. 1997; 1-113.
- 門谷 茂. 硫黄化合物. 「地球環境調査計測辞典第 3 巻沿岸域編」フジ・テクノシステムズ, 東京. 2003; 233-236.
- 橋 治國. 化学的酸素要求量 (COD). 「水の分析第 5 版」(日本分析化学会北海道支部編) 化学同人, 京都. 2005; 290-206.
- Ishio S, Kuwahara M, Nakagawa H. Conversion of AlPO_4 -P to Fe-bound P in sea sediments. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1986; **52**: 901-911.
- Ishio S, Kuwahara M, Nakagawa H. H_2S -Extraction method for Fe-bound P in sea sediments. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1986; **52**: 103-108.
- 日本工業標準調査会. 「工場排水試験方法 JIS K 0102: 1998」日本規格協会, 東京. 1998; 175-177.
- Yokoyama H, Abo K, Ishihi Y. Quantifying aquaculture-driven organic matter in the sediment in and around a coastal fish farm using stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Aquaculture* 2006; **254**: 411-425.
- Ishio S, Kondo K. Study on the scarcity of red tide in the eutrophicated waters of Ariake Bay-I. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1986; **46**: 977-989.
- 駒井幸雄. 底質のリン化合物とその動態. 「最新の底質分析と化学動態」(寒川喜三郎・日色和夫編) 技報堂出版, 東京. 1996; 51-76.
- 城 久. 大阪湾底泥中に含まれるリンの存在形態と溶出分画. 日水誌 1983; **49**: 447-454.
- 荻野珍吉. 無機質. 「魚類の栄養と飼料」(荻野珍吉編) 恒星社厚生閣, 東京. 1987; 232-246.
- Hargrave BT, Duplisea DE, Pfeiffer E, Wildish DJ. Seasonal changes in benthic fluxes of dissolved oxygen and ammonium associated with marine cultured Atlantic salmon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1993; **96**: 249-257.
- Holmer M, Kristensen E. Impact of marine fish cage farming on metabolism and sulfate reduction of underlying sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1992; **80**: 191-201.
- 城 久, 矢持 進, 安部恒之, 河合 章. 大阪湾の貧酸素底層水における無機栄養塩濃度について. 日水誌 1984; **50**: 1693-1700.
- Mortimer CH. Chemical changes between sediments and water in the Great Lakes—speculations on probable regulatory mechanisms. *Limnol. Oceanogr.* 1971; **16**: 387-404.
- Serruya C. Lake KINNERET: the nutrient chemistry of the sediments. *Limnol. Oceanogr.* 1971; **16**: 510-521.