

出荷対象のマダイに対する低魚粉飼料の実用性

青木秀夫^{1,2,*}・松倉一樹³・山下浩史⁴・宮本敦史¹・清水砂帆子^{1,2}・金田典久⁵
輿石友彦⁶・佐藤秀一⁷・石田典子⁸

Growth performance of adult red sea bream *Pagrus major* fed low-fish meal diet in commercial aquaculture

Hideo AOKI^{1,2,*}, Kazuki MATSUKURA³, Hirofumi YAMASHITA⁴, Atsushi MIYAMOTO¹,
Sahoko SHIMIZU^{1,2}, Hisanori KINDA⁵, Tomohiko KOSHIISHI⁶,
Shuichi SATOH⁷ and Noriko ISHIDA⁸

Abstract: Red sea bream culture generates a revenue of around 50 billion yen each year, and has been an important aquaculture business in Japan. This study evaluated the performance of adult red sea bream *Pagrus major* fed the combination of soybean meal (SBM) and corn gluten meal (CGM) as replacement protein sources for fish meal. Control diet containing 40% fish meal and the combination of SBM and CGM at 45% replacements, were used as treatments and those treatments were replicated thrice. Feeding experiments were conducted using practical large-scale net cages at the farming site in Mie, Ehime, and Nagasaki prefectures. Fish with weight ranging from 500–1,000 grams were fed the experimental diets for 4–6 months. There was no significant difference in terms of growth performance and feed performance among the treatments. The result of condition factor, hepatosomatic index, and hemochemical assessment indicated that the fish were in good physical condition for both treatments. Moreover, there were no significant differences in rheologic and freshness parameters of flesh between the control and test diet group. Thus, the combination of SBM and CGM at 45% replacement is thereby recommended to be used as an effective alternative protein source for adult red seabream commercial aquaculture.

Key words: Red sea bream; low-fish meal diet; extruded diet; practical scale culture

わが国の海産魚類養殖業は、海面養殖全体の生産量の24%、生産額では53%を占めており、重要な漁業種類である（農林水産省 2014）。養殖魚のうちマダイの生産量はブリ類に次ぐ規模で推移しており、マダイは

2016年12月15日受付；2017年6月15日受理。

¹三重県水産研究所尾鷲水産研究室（Owase Branch, Mie Prefecture Fisheries Research Institute, 215-2 Tenmaura, Owase, Mie 519-3602, Japan）.

²現所属：三重県庁農林水産部（Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Mie Prefectural Government, 13 Komei, Tsu, Mie 514-8570, Japan）.

³長崎県総合水産試験場（Nagasaki Prefectural Institute of Fisheries, 1551-4 Taira, Nagasaki 851-2213, Japan）.

⁴愛媛県農林水産研究所水産研究センター（Fisheries Research Center, Ehime Research Institute of Agriculture, Forestry and Fisheries, 5516 Shitaba, Uwajima, Ehime 798-0104, Japan）.

⁵五島漁業協同組合（Goto Fishery Cooperative, 1190-9 Fukue, Goto, Nagasaki 853-0007, Japan）.

⁶日清丸紅飼料株式会社（Marubeni Nisshin Feed Co., Ltd., 3-1 Ehima, Tahara, Aichi 441-3605, Japan）.

⁷国立大学法人東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科（Faculty of Marine Science, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato, Tokyo 108-8477, Japan）.

⁸国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所（National Research Institute of Fisheries Science, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-1-14 Fukuura, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan）.

*連絡先（Corresponding author）: Tel, (+81) 59-224-2584; Fax, (+81) 59-224-2608; E-mail, aokih02@pref.mie.jp（H. Aoki）.

主要な養殖魚種に位置付けられる。マダイ養殖業では個人経営体および会社経営体とも利益幅が小さく、販売単価の低下によりコスト割れにつながりやすい構造であると指摘されている（水産庁 2013）。そのため、養殖経営の安定化には、生産コストの削減をはかることが重要である。マダイ養殖業にかかる生産コストの内訳をみると、支出費目のうち飼料費の割合が70～80%と最も多くを占めている。海産魚用の配合飼料（粉末、固形）の原料組成では、一般的に単価の最も高い魚粉が主タンパク質源として50%前後配合されており、魚粉は最も高価な飼料原料となっている。現在、国内で製造される配合飼料に使用する魚粉は、その殆ど全てを国外からの輸入に依存している。そのため、配合飼料の販売価格は輸入魚粉の価格に大きな影響を受ける。近年では魚粉の国際的な市場価格の高騰に伴い飼料の価格が上昇しており、これが養殖経営を圧迫する大きな要因となっている。さらに、輸出国における魚粉の生産量はその原料となる多獲性魚類の漁獲量に左右され、不安定となっている。

こうした状況のなか、配合飼料の安定供給をはかり価格の高騰に対処するため、これまでに魚粉に代わる安価なタンパク質原料の利用に関する研究が多くの魚種で実施され、各種の動・植物性原料を有効に利用できることが明らかにされている（青木 2009）。マダイ用飼料では大豆油粕、コーングルテンミール、ミートミール等の利用性が検討され、稚魚ではこれらを単独あるいは併用して飼料中に30～40%程度配合でき、魚粉割合の半分程度を置き換えられることが報告されている（Aoki et al. 1997, 1998）。またマダイ1歳魚では、それらの原料を用いることで魚粉の全量を置き換えられるという知見が得られている（Aoki et al. 2000; 高木ら 2000a）。

しかしながら、マダイ用飼料における魚粉代替タンパク質の有効利用に関するこれらの知見は、市販飼料の配合設計に十分活用されているとは言い難い。その理由としては、代替原料の利用に関する多くの研究は、研究機関における小規模の飼育施設で行われたものであり、また飼育期間の制限もあることから、研究結果をそのまま養殖業者の実用規模で使用する飼料の配合設計に活用するのが困難であることが大きな要因であると考えられる。これまでに海産魚用配合飼料における魚粉削減の可能性を実用規模で調査した事例はあるが、十分であるとは言えない。そこで本研究では、マダイに対する低魚粉飼料の利用性を実証するため、国内の主要な養殖漁場において養殖業者の大型生簀を用い、出荷可能な成魚に対する有効性を評価した。

材料および方法

試験飼料

試験飼料の配合組成および一般成分を Table 1 に示した。本研究では、三重県、愛媛県および長崎県の各マダイ養殖漁場で飼育試験を実施し、それぞれ試験 1、試験 2、試験 3 とした。各試験とも低魚粉飼料と市販飼料の 2 種類の飼料を用い、それぞれの給餌区を低魚粉区と市販飼料区とした。低魚粉飼料の配合組成では、カタクチイワシを原料とした魚粉の割合を25%とし、その他のタンパク質原料として大豆油粕（以下、SBM）を20%、コーングルテンミール（以下、CGM）を25%配合した。脂質原料として魚油を8%とパーム油を4%配合した。その他の原料として、ビタミン類、ミネラル類、デンプン、またマダイのアミノ酸要求量を参考として、不足が懸念されるリジン+メチオニン+スレオニン+トリプトファンからなる結晶アミノ酸混合物を添加した（山本 2009; 渡邊 2009）。さらに魚粉の低減に伴う不足が懸念されるタウリン、摂餌促進のためカツオ煮汁濃縮物（カツオペプチド、日清丸紅飼料）、飼料原料の消化性向上のため麹菌発酵物（酵

Table 1. Feed ingredient and nutrient compositions (%) of the control and low-fish meal diets for red sea bream

Diet ^{*1}	Test		Control	
	Expts.1-3	Expt.1	Expt.2	Expt.3
Diet type ^{*2}	EP	DP	EP	EP
Anchovy fish meal	25.0			
Defatted soy bean meal	20.0			
Corn gluten meal	25.0			
Wheat flour	5.0			
Starch				
Vitamin mixture	9.3			
Mineral mixture				
Fish oil	8.0			
Palm oil	4.0			
Calcium phosphate	1.5			
Amino acid mixture ^{*3}	1.0			
Taurine	0.5			
Skipjack peptide ^{*1}	0.5			
Enzyme mixture ^{*4}	0.2			
Astaxanthin	40 ppm			
<i>Analytical results</i>				
Crude protein	46.3	43.3	42.2	41.9
Crude lipid	14.6	15.1	13.9	16.5
Crude ash	7.9	10.5	11.5	10.8
Moisture	7.6	7.4	9.1	7.6

^{*1} Marubeni Nissin Feed Co.

^{*2} EP; extruded pellet, DP; steam dry pellet.

^{*3} Lys 1.0, Met 0.5, Thr 0.5, Trp 0.2.

^{*4} Alltech Co.

Commercial diet for red sea bream
(40% fish meal)

Table 2. Labeling data values on the feed ingredient compositions (%) of the commercial diets for red sea bream in expts.1-3

Ingredient	Commercial diet*		
	Expt.1	Expt.2	Expt.3
Animal origin feeds	40	40	40
Oil seed meal	31	33	32
Grains	17	16	13
Brans and food processing by-products	1	1	4
Others	11	10	11

*Marubeni Nissin Feed Co.

素混合物、オルテック) (Hanini et al. 2013), 色調の改善にアスタキサンチン等を添加した。一方, 市販飼料の魚粉 (動物性原料) の割合は40%であり, その他に植物性油粕類 (31~33%), 穀類 (13~17%), 糟糠類 (1~4%), 油脂類, ビタミン類, ミネラル類等を原料とした。試験1~3で使用した市販飼料の原材料の配合割合 (表示値) を Table 2 に示した。試験飼料はいずれも日清丸紅飼料社製であり, 低魚粉飼料は試験1~3とも共通で, 2軸エクストルーダー (ビューラー) を用いて調製したエクストルーダーペレット (以下, EP) とした。市販飼料として試験1ではペレットミル (CPM) によるスチームドライペレット (以下, DP) を, 試験2および試験3ではEPを用いた。試験飼料の粗タンパク質含量は, 低魚粉飼料では46.3%, 試験1, 2, 3で使用した市販飼料ではそれぞれ43.3%, 42.2%, 41.9%で, 低魚粉飼料の方がやや高かった。粗脂肪含量は, 前者では14.6%, 後者ではそれぞれ15.1%, 13.9%, 16.5%であった。低魚粉飼料, 市販飼料とも飼料の直径は6~8 mmで, 魚体の大きさに適したサイズのものを使用した。

飼育条件

各試験における飼育条件は以下のとおりである。

試験1 2015年7月4日から11月26日までの145日間, 三重県尾鷲市の養殖業者の生簀 (14 m 角の筏に8角形の生簀を取付けたもの, 深さは最大15 m) において試験を行った。試験魚には平均魚体重1,046 g ($n=50$) のマダイ人工種苗 (2歳魚) を用い, それらは試験開始まで主に市販のマダイ用 DP (魚粉50%) を用いて飼育した。開始時の尾数は市販飼料区では4,090尾, 低魚粉区では12,070尾であった。漁場の水深2 mの水温は20.7~28.2°C (平均24.7°C) であった。給餌は, 1週間あたり手撒き給餌1回と自動給餌機2回の計3回を基本とし, 各回とも飽食量を給餌した。試験期間中に約1ヶ月ごとに各区から試験魚を40~60尾ずつ任意に取り上げて魚体重を測定した。測定にあたっては, 1回あたり試験魚を8尾あるいは10尾ずつまとめ

て合計の体重を測定した。

試験2 2015年8月7日から12月25日までの141日間, 愛媛県宇和島市の養殖漁場で試験を実施した。生簀の大きさは11 m 四角で深さは8 m であった。試験魚には平均魚体重478 g ($n=100$) のマダイ人工種苗 (1歳魚) を用いた。開始時の各区の尾数は11,000尾とした。漁場の水深2 mの水温は16.8~27.1°C (平均21.8°C) であった。給餌は1週間に3~4回行い, 給餌量は飽食量とした。毎月1回, 各区から試験魚を50尾ずつ任意に取り上げて魚体重を個体ごとに測定した。

試験3 試験期間は2015年7月8日から2016年1月29日までの206日間とし, 長崎県五島市の養殖漁場で試験を行った。生簀の大きさは10 m 四角で深さは10 m であった。試験魚には平均魚体重543 g ($n=100$) のマダイ人工種苗 (1歳魚) を用いた。飼育尾数は各区とも6,000尾とした。給餌頻度は, 開始時から10月13日までは2日に1回, それ以後終了時までには3日に1回とし, 毎回飽食量を与えた。漁場の水深2 mの水温は15.5~27.0°C (平均23.3°C) であった。試験期間中, 2~3ヶ月ごとに各区から試験魚を50尾ずつ任意に取り上げて魚体重を個体ごとに測定した。

飼育成績

各試験とも, 魚体重測定データのをもとに試験魚の平均魚体重を算出するとともに, 魚体の総重量と給餌量から増重率, 増肉係数, 日間給餌率およびタンパク質効率を次式により求めた。

$$\text{増重率}(\%) = 100 \times \{(TWf + TWs - TWi) / TWi\}$$

$$\text{増肉係数} = F / (TWf + TWs - TWi)$$

$$\text{日間給餌率}(\%) = 100 \times \{F / [t \times (TWf + TWs + TWi) / 2]\}$$

$$\text{タンパク質効率} = (TWf + TWs - TWi) / P$$

TWi : 開始時の総重量 (kg)

TWf : 終了時の総重量 (kg)

TWs : サンプル魚と死亡魚の総体重 (kg)

F : 総給餌量 (kg)

t : 飼育日数

P : タンパク質摂取量 (kg)

肥満度, 肝重量比および血漿化学成分

各試験とも終了時に各区から試験魚を5~10尾ずつ取り上げ, 肥満度を次式により算出するとともに肝臓重量比と内臓重量比を求めた。

$$\text{肥満度} = (W / FL^3) \times 10^3$$

W : 体重 (g)

FL : 尾叉長 (cm)

また試験1および試験3において, 終了時に各区から試験魚を6~10尾ずつ取り上げて尾部血管から採

血し、当日中に血漿化学成分を分析した。分析項目は酵素活性、タンパク質代謝、脂質代謝、糖代謝とした。試験3では総ビリルビンも測定した。分析装置として、試験1では臨床化学自動分析装置（東芝メディカルシステムズ、TBA-200FR）を、試験3では乾式臨床化学分析装置（富士フィルムメディカル、富士ドライケム7000）を使用した。

筋肉の一般化学成分

試験1および試験2において終了時に各区から試験魚を5～6尾ずつ取り上げ、背側筋肉を採取して水分、粗タンパク質、粗脂肪含量を分析した。水分は常圧加熱乾燥法（110℃）で試料を乾燥させて測定した乾燥重量をもとに算出した。粗タンパク質はセミマイクロケルダール法で定量した窒素量に6.25（窒素-タンパク質換算係数）を乗じて算出した。粗脂肪はジエチルエーテルを用いたソックスレー法で分析した。なお、試験1の検体は血漿化学成分の分析のため採血した各区6尾ずつの試験魚とした。

筋肉の破断強度

試験1において筋肉の破断強度を測定した。試験終了時に試験魚を6尾ずつ生簀から取り上げ、直後に延髄刺殺処理した。その後、背鰭前端基部付近の背側筋肉を厚さ10 mmに切り出したものを試料とした。試料を4℃で保存し、死後3 h、24 h、72 h、120 hの破断強度を測定した。測定には卓上型物性測定器（山電、TPU-2C）を用い、直径8 mmの樹脂製円柱状プランジャーを取り付け、貫入速度は2.5 mm/secとした。プランジャーの貫入深度は9 mmとし、その時の最大荷重値を破断強度とした。

普通筋のK値

試験1において普通筋のK値を測定した。試験終了時に各区から3尾ずつ取り上げ、1尾あたり背側の

普通筋を50 g×4検体ずつ採取し、4℃で保存したものを試料とした。死後24 h、72 h、120 h、240 hに、1試料ずつ分析に供した。分析には鮮度計（セントラル科学、KV-202；検出法はポーラログラフ式隔膜酸素電極）を用いた。

血合筋の褐変度

試験1において血合筋の褐変度を測定した。試験魚は血漿化学成分の分析のため採血した各区6尾ずつの検体で、背側筋肉の血合部分を試料として4℃で保存し、死後3 h、24 h、72 h、120 hに、色彩色差計（コニカミノルタ、CR300）を用い、L*a*b*表色系で測定した。測定値よりa*/b*を求め、これを褐変度とした（Ochiai et al. 1988）。

統計学的処理

各区から試験魚を取り上げて計測した魚体重および各形質の値について、対応のない2群の比較検定として、分散が等しいときまたは異なるときのt検定により有意差の有無を検定した。また試験区間の試験魚の死亡率について、カイ二乗検定を行った。検定の有意水準は5%とした。

結 果

飼育成績

各試験の飼育成績をTable 3に、試験魚の平均魚体重の推移をFig. 1に示した。

試験1 低魚粉飼料に対するマダいの摂餌性は、試験開始から3週間程度、市販飼料区に比べてやや不活発であった。その後は摂餌状態が回復して活発となり、終了時まで問題はなかった。試験終了時の平均魚体重は、市販飼料区では1,693 g、低魚粉区では1,625 gで同程度であった。両区の増重率はそれぞれ61.9%、55.4%で市販飼料区の方がやや高かった。日間給餌率

Table 3. Growth and feed performances of the red sea bream fed the control and low-fish meal diets in expts.1-3

Diet	Av. body weight (g)		Growth rate (%)	Feed gain ratio	Daily feed intake (%)	PER	Mortality (%)
	Initial	Final					
<i>Expt. 1</i>							
Commercial diet	1,046	1,693	61.9	2.29	0.75	1.02	0.1
Low-fish meal diet	1,046	1,625	55.4	1.82	0.55	1.18	0.2
<i>Expt. 2</i>							
Commercial diet	483	983	103.5	2.42	2.35	0.99	0.0
Low-fish meal diet	473	1,060	124.1	1.93	2.11	1.12	0.0
<i>Expt. 3</i>							
Commercial diet	567	1,251	120.1	2.38	0.87	1.00	0.3
Low-fish meal diet	519	1,326	155.1	2.02	0.85	1.18	0.2

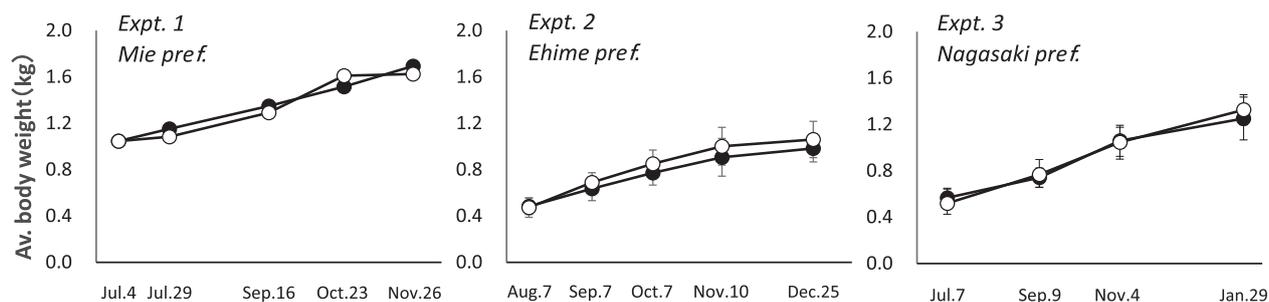


Fig. 1. Growth curves of red sea bream fed the control and low-fish meal diets in Mie, Ehime and Nagasaki prefectures. ●: Control commercial diet; ○: Low-fish meal diet.

は、市販飼料区では0.75%、低魚粉区では0.55%で市販飼料区の方がやや高かった。増肉係数については、市販飼料区では2.29、低魚粉区では1.82で低魚粉区の方が優れていた。各区の死亡率は0.1～0.2%程度と低く、試験期間中に疾病に起因するような高率死亡や遊泳異常の個体はみられなかった。なお、試験1では開始時の市販飼料区と低魚粉飼料区の飼育尾数がそれぞれ約4,000尾、12,000尾と差があったが、収容密度は尾数の多かった低魚粉区でも開始時から終了時まで5.4～8.4 kg/m³程度と推測され、成育に支障をきたすような密度ではなかった。

試験2 試験魚の試験飼料に対する摂餌性は、試験期間中、各区とも活発であった。試験魚の平均魚体重は、9月から終了時の12月まで低魚粉区の方が大きく推移した。終了時の平均魚体重は市販飼料区では983 g、低魚粉区では1,060 g、増重率はそれぞれ103.5%、124.1%で低魚粉区の方が優れていた。終了時の魚体重には市販飼料区と低魚粉区の間には有意差はなかった。日間給餌率は、市販飼料区では2.35%、低魚粉区では2.11%で市販飼料区の方がやや高かった。増肉係数は、市販飼料区では2.42、低魚粉区では1.93で低魚粉区の方が優れていた。また死亡魚は各区とも確認されなかった。

試験3 試験飼料に対する試験魚の摂餌性はいずれの区も活発であった。試験魚の平均魚体重は、開始時から11月までは両区とも同じレベルで推移した。その後は低魚粉区の方が成長が優れ、終了時の平均魚体重は市販飼料区では1,251 g、低魚粉区では1,326 gで低魚粉区の方が大きかった。終了時の魚体重には、両区の間には有意差はなかった。低魚粉区の増重率は155.1%で、市販飼料区(120.1%)より優れていた。日間給餌率は、市販飼料区では0.87%、低魚粉区では0.85%で同程度であった。増肉係数は、市販飼料区では2.38、低魚粉区では2.02で低魚粉区の方が優れていた。各区の死亡率は0.2～0.3%で疾病による高率死亡はみられなかった。

肥満度、肝臓・内臓重量比ならびに血漿化学成分

各試験における肥満度と肝臓重量比の測定結果をTable 4に示した。試験1および試験2の肥満度、肝臓重量比、内臓重量比は、市販飼料区と低魚粉区の間で有意な差がみられなかった。試験3では、肥満度および肝臓重量比に市販飼料区と低魚粉区の間で有意差はみられなかったが、市販飼料区の内臓重量比が低魚粉区に比べて有意に高い値を示した。試験1と試験3における血漿化学成分の分析結果をTable 5に示した。ALP、AST (GOT)、ALT (GPT)の酵素活性は試験1、3とも全般に測定値のバラツキが大きかったが、いずれも両区の間には有意差はなかった。タンパク質代謝系の総タンパクと尿素窒素、および糖代謝系のグルコースの値にも両区の間には有意差はみられなかった。一方、脂質代謝系のうち総コレステロール(以下、TCHO)の値は、両試験とも低魚粉区の方が市販飼料区に比べて有意に低い値を示した。中性脂肪についても、試験1では低魚粉区の方が低い傾向がみられた。試験3で測定した総ビリルビンについては、両区の間には有意差はなかった。

Table 4. Condition factor and relative weights of internal organs to body weights (%) in red sea bream fed the control and low-fish meal diets in expts.1-3. Data are shown as mean ± SD

Diet	Condition factor	Viscerosomatic index*	Hepatosomatic index
<i>Expt. 1 (n=6)</i>			
Commercial diet	23.7 ± 1.6	12.7 ± 3.2	1.41 ± 0.12
Low-fish meal diet	23.8 ± 1.8	11.8 ± 1.5	1.43 ± 0.13
<i>Expt. 2 (n=5)</i>			
Commercial diet	24.9 ± 1.2	12.7 ± 1.3	1.78 ± 0.46
Low-fish meal diet	24.0 ± 1.3	12.2 ± 1.4	1.65 ± 0.33
<i>Expt. 3 (n=10)</i>			
Commercial diet	24.5 ± 1.5	10.6 ± 1.6 ^a	1.08 ± 0.28
Low-fish meal diet	24.4 ± 1.6	9.3 ± 0.8 ^b	1.12 ± 0.19

*Superscript a & b indicate significant difference between control and test groups. (*t*-test, *P* < 0.05)

Table 5. Results of hemochemical examination in red sea bream fed the control and low-fish meal diets in expts.1 and 3. Data are shown as mean \pm SD

	Expt. 1* ¹		Expt. 3* ²	
	Commercial diet	Low-fish meal diet	Commercial diet	Low-fish meal diet
ALP (U/L)	199 \pm 59.2	177 \pm 136	—	—
AST (GOT) (U/L)	52 \pm 78	39 \pm 34	32 \pm 26	32 \pm 17
ALT (GPT) (U/L)	5 \pm 4	6 \pm 2	1 \pm 0	1 \pm 0
Total protein (g/dL)	4.3 \pm 0.3	4.2 \pm 0.2	3.7 \pm 0.4	3.7 \pm 0.4
Blood urea nitrogen (mg/dL)	3.4 \pm 1.0	2.9 \pm 0.8	3.5 \pm 0.5	3.1 \pm 0.4
Total cholesterol (mg/dL)* ³	199.3 \pm 10.7 ^a	145.8 \pm 17.3 ^b	156.9 \pm 29.3 ^a	127.9 \pm 23.4 ^b
Triglyceride (mg/dL)	273 \pm 102	186 \pm 61	116 \pm 28	131 \pm 40
Glucose (mg/dL)	61 \pm 24	44 \pm 4	47 \pm 9	42 \pm 7
Total bilirubin (mg/dL)	—	—	0.1 \pm 0.0	0.1 \pm 0.1

*¹Rearing experiment in Mie prefecture. Sampling date: 26 Nov. 2015. n=6.

*²Rearing experiment in Nagasaki prefecture. Sampling date: 29 Jan. 2016. n=10.

*³Superscript a & b indicate significant difference between control and test groups. (*t*-test, *P* < 0.01)

Table 6. Results of proximate composition analysis of dorsal muscle (%) from red sea bream fed the control and low-fish meal diets in expts.1 and 2. Data are shown as mean \pm SD

Diet	Moisture	Crude protein	Crude lipid
<i>Expt. 1 (n=6)</i>			
Commercial diet	70.5 \pm 1.2	22.5 \pm 0.5	5.7 \pm 1.4
Low-fish meal diet	70.5 \pm 1.3	22.1 \pm 0.3	5.6 \pm 1.7
<i>Expt. 2 (n=5)</i>			
Commercial diet	71.6 \pm 0.5	23.5 \pm 0.5	3.2 \pm 0.5
Low-fish meal diet	72.3 \pm 0.7	22.7 \pm 0.7	3.1 \pm 1.3

一般化学成分

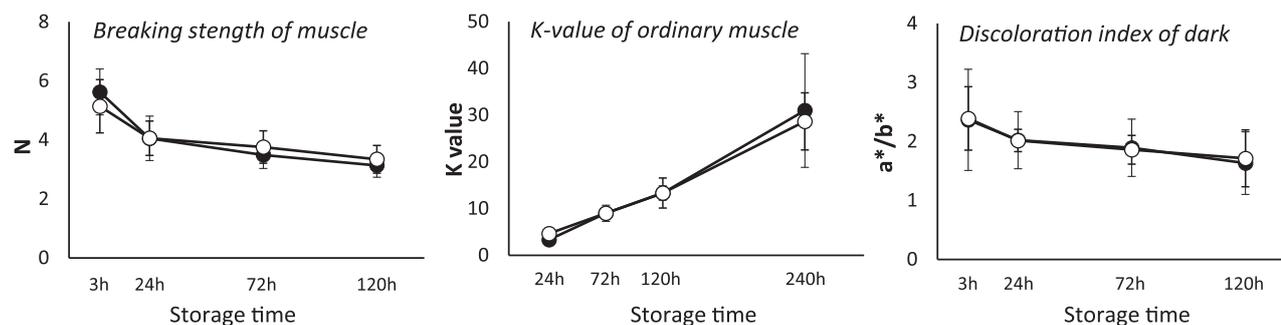
試験1および試験2における水分、粗タンパク質、粗脂肪の含量の分析結果を Table 6 に示した。各試験における市販飼料区と低魚粉区の水分、粗タンパク質、粗脂肪含量は、それぞれ70.5~72.3%, 22.1~23.5%, 3.1~5.7%で、いずれの成分とも両区間に有意差はなかった。試験1と試験2の脂肪含量を比べると、試験1の方がやや高い値を示した。

肉質評価

試験1で実施した筋肉の破断強度、普通筋の K 値および血合筋の褐変度の変化を Fig. 2 に示した。筋肉の破断強度は、市販飼料区、低魚粉区とも死後3hから120hにかけて漸次低下した。各測定時間とも、破断強度の値は両区間に有意差はなく、同様の傾向で推移した。普通筋の K 値は、死後24hから240hにかけて両区とも漸次上昇した。両区間を比較すると、死後240hまで有意差はなく同様の傾向で推移した。血合筋の褐変度は、死後3hから120hにかけて両区とも緩やかに低下した。褐変度についても、死後120hまで両区間に有意差はなかった。

考 察

本研究では、マダイにおける代替タンパク質の有効利用に関する既存の知見をもとに、出荷可能なサイズの成魚を対象に配合設計した低魚粉飼料の現場での実用性を三重県、愛媛県、長崎県の漁場で検証した。その結果、いずれの試験においても低魚粉飼料の給餌に

**Fig. 2.** Evaluation of flesh quality in red sea bream fed the control and low-fish meal diets. Values were expressed as mean \pm SD (n = 6). No significant differences were observed between control and test diet groups in each examination.

●: Control commercial diet; ○: Low-fish meal diet.

起因するような試験魚の遊泳異常や疾病の発生は認められなかった。低魚粉飼料に対するマダイの摂餌性は、愛媛県と長崎県の試験では良好であったものの、三重県の試験では低魚粉飼料への切り替えから3週間程度はやや不活発な状態が観察され、その後は良好となった。摂餌性の低下には飼料の物性や化学的な嗜好性が関係すると考えられるが、三重県の試験のみで低魚粉飼料に対するマダイの摂餌性がやや低下した要因は明らかではない。低魚粉区における終了時の平均魚体重や増重率は、愛媛県と長崎県では市販飼料区よりやや優れ、三重県ではほぼ同等の成績が得られた。また増肉係数については、3県の試験とも低魚粉区の方が優れ、低魚粉区では1.82～2.02、市販飼料区では2.29～2.42であった。飼料の性能は魚粉のタンパク質含量や消化性にも左右されるが、本研究で使用した低魚粉飼料と市販飼料に配合された魚粉の品質に大差がないと仮定すると、本結果から低魚粉飼料はマダイに対して市販飼料と同等かそれ以上の栄養価を有することが示唆された。ただし、上述したとおり三重県の試験のみではあるが、低魚粉飼料に対するマダイの嗜好性が給餌開始から3週間程度悪かったので、その改善について今後の検討が必要である。また低魚粉飼料のコストについては、原料の価格や製造・流通費用が変動するため一概に示すことはできないが、低魚粉飼料と市販飼料の価格が等しいと仮定すると、増肉係数の低い低魚粉区の方が魚体の増重に要する飼料コスト（増肉コスト）は低くなる可能性がある。

マダイでは、代替タンパク質による飼料中の魚粉に対する置換率が高くなるほど、成長や増肉係数は悪化する傾向がある。この要因としては、代替タンパク質の割合が高率となることにより、飼料のタンパク質含量やエネルギー量が低下することや、アミノ酸組成の悪化、不消化成分や残存する抗栄養因子の増加等が挙げられる（青木 2009）。本研究で使用した低魚粉飼料は、魚粉含量を25%まで低減し、代替タンパク質としてSBM、CGMを計45%配合した。SBMとCGMの粗タンパク質含量は、それぞれ45%および65%程度と他の植物性原料と比べて高く（秋元 2009）、低魚粉飼料の粗タンパク質含量を高めるのに有効な原料である。一方、マダイにおけるSBMとCGMのタンパク質の見かけの消化率は魚粉と比べてやや低いことが報告されている（Watanabe 2002）。本研究では、SBMとCGMを用いた低魚粉飼料の粗タンパク質含量が市販飼料のそれより高くなるよう配合設計し、低魚粉飼料の可消化タンパク質量の向上を図った。またSBMとCGMを併用することで、それぞれの第一制限アミノ酸であるリジンとメチオニン（山本 2009）を相互に補うとともに、アミノ酸混合物を添加することで飼

料のアミノ酸組成が改善されたと推察される。これまでの研究においても、低魚粉飼料では同じ魚粉含量でも代替タンパク質を単独で使用する場合と比べて、数種の原料を併用することにより飼料のタンパク質含量やアミノ酸組成を改善でき、飼育成績が向上することが報告されている（Viyakarn et al. 1992; 高木ら 2000b, 2000c）。これらのことから、本研究の低魚粉飼料に使用した代替タンパク質の種類と配合割合は、飼料の栄養価を市販飼料と同等以上に高めるのに適していたと評価された。

マダイに対してSBMを主原料とした低魚粉飼料を長期間給餌すると、成長の阻害や肝臓が緑色を呈する緑肝症を発症すること（Takagi et al. 2006）、また肝臓の組織変性が生じること（天野ら 2012）が報告されている。マダイの緑肝症が発症する機構として、Takagi et al. (2011)はタウリン欠乏に伴い赤血球浸透圧耐性が低下してもたらされる溶血増加により発症するとし、これらの生理的な異常はタウリンの補足添加で改善されることを報告している。本研究では、マダイ稚魚のタウリン要求量を踏まえて、飼料中に0.5%のタウリンを添加した（Matsunari et al. 2008）。その結果、3県の試験ともマダイに緑肝症はみられなかった。また長崎県の試験では、緑肝症の発症と関係する胆汁色素のビリルジンの還元生成物であるビリルビン含量を測定したところ、低魚粉区で異常はみられなかった。これらのことから、マダイにおいて魚粉含量25%の低魚粉飼料の実用化にあたっては、0.5%程度のタウリンを添加することでその不足による悪影響を防止できると考えられた。

本研究では、三重県と長崎県の試験においてマダイの生理状態を評価するために血漿化学成分の分析を行った。その結果、両県とも酵素活性、蛋白代謝、糖代謝の項目には市販飼料区と低魚粉区の間に有意な差はなかったものの、脂質代謝系を示すTCHOと中性脂肪の値は低魚粉区の方が低い傾向がみられた。血中のTCHO量は、摂取した飼料由来または肝臓で生合成される胆汁酸と複合体を形成して排泄された後に腸管から吸収される外因性コレステロールと、主に肝臓においてアセチルCoAを材料に生合成される内因性コレステロールに大別される。内因性コレステロールの合成量は外因性コレステロール量の変動により調節されており、血中での外因性、内因性を合わせたコレステロール量は通常一定量に維持されることから、その測定値は肝機能の指標になりえる。これまで筆者らが実施した研究では、低魚粉・無魚粉飼料を給餌したマダイの血漿TCHO量は、本研究と同様に魚粉主体の飼料区と比べて低くなる傾向にあった（Aoki et al. 1997, 2000）。同様の傾向はブリでも確認されており、

Maita et al. (2006) は無魚粉飼料を給餌したブリでは低 TCHO 血症が起こるとともに、タウリン不足による貧血が誘因となり抗病性が低下することを報告している。現在のところマダイにおける TCHO と抗病性との関係を示す明確な知見はない。しかしながら、ブリとマダイは、いずれも無魚粉飼料の給餌によって緑肝症を発症するとともに血漿 TCHO 量が低下するといった類似した生理的反応を示している。また田中・井上 (2005) によると、高密度でマダイを飼育すると血漿 TCHO 量と抗病性はともに低下することから、TCHO と抗病性には関係性が認められる。これらのことから、TCHO はブリと同様にマダイでも抗病性に関係していると考えられる。本研究では、低魚粉区のマダイにおいて血漿 TCHO 量の低下が認められたものの、死亡率は低く、市販飼料区との間に有意差はなかった。したがって、低魚粉区のマダイは相対的には市販飼料区と比べて肝機能の低下の可能性がうかがわれたものの、健康状態に支障をきたし、抗病性が低下したような異常な状態ではないと評価された。山下 (2013) は、マダイ 1 歳魚の飼料における魚粉削減の影響を調査した結果、魚粉含量の低下に伴い死亡率が上昇するとともに生体防御機能が低下したが、飼料に抗酸化機能の高いアスタキサンチンを配合することで死亡率が改善したことを報告している。本研究で使用した低魚粉飼料では 40 ppm のアスタキサンチンを添加しており、これによってマダイの生理状態が良好に維持され、抗病性も良好に推移した可能性も考えられる。以上のことから、本研究の条件では低魚粉飼料の給餌によるマダイの生理状態への悪影響は認められず、実用的な問題はないと考えられた。なお低魚粉飼料で飼育することによって引き起こされるマダイの血漿 TCHO 量の低下の機構については今後の検討課題としたい。

次に、低魚粉区のマダイの肉質について評価すると、三重県の試験で実施した筋肉の破断強度、普通筋の K 値、血合筋の褐変度は、いずれも市販飼料区と低魚粉区とも経時的に同様の傾向で推移し、両区間に有意差はなかった。したがって、本研究で使用した低魚粉飼料は、マダイの肉質に悪影響を及ぼすものではないと評価された。筋肉の破断強度は、食品のテクスチャーの要素となる力学的特性のうち「硬さ」に関係し、「歯ごたえがある」といった感覚的な評価をもたらし、食品のおいしさに影響する。魚肉のテクスチャー特性や感覚的評価は粗脂肪含量によって影響されることが知られており (國崎ら 1986; 渡邊 1990)、マダイでは脂肪含量の多い養殖魚の方が天然魚と比べて筋肉の硬度が低下することが報告されている (青木ら 1991)。本研究では、市販飼料区と低魚粉区の筋肉の粗脂肪含量

はほぼ同じであったことから、このことが筋肉の破断強度に違いがなかった主な要因ではないかと推察された。一方で、代替原料の配合による養殖魚の筋肉の硬さや破断強度への影響に関する研究については Viyakarn et al. (1992) や青木ら (1996) の例はあるものの、十分な知見が得られているとは言い難い。低魚粉飼料の実用化を進めるうえで、対象とする養殖魚の肉質は重要な評価項目となることから、今後さらなる知見の集積が望まれる。

普通筋の K 値および血合筋の褐変度は、養殖魚の鮮度を評価する指標である。鮮度は魚介類のおいしさと価値を決定づける重要な要素となる。本研究では、両指標とも低魚粉区と市販飼料区において殆ど同レベルで経時変化しており、鮮度保持の特性に差はないと評価された。魚類の鮮度にかかる死後変化については、魚種、保存温度、致死方法等で異なることが明らかにされており (山中 2002)、マダイでは天然魚に比べて養殖魚の方が K 値の上昇が早いことも報告されている (岩本・山中 1986)。マダイの天然魚と養殖魚の K 値の変化にかかるタンパク質の性質の差異は明確ではないが、本研究の結果から飼料の魚粉含量を低下させてもマダイ筋肉の鮮度保持の特性は大きな影響を受けないことが示唆された。一方で、ブリでは飼料中の SBM 配合率が 40% 以上の場合、30% 以下の区と比べて K 値が高いという報告 (Viyakarn et al. 1992) もあることから、低魚粉飼料を給餌した養殖魚の鮮度保持については、今後さらに検討する必要がある。次に、血合筋の褐変については、血合筋における色素タンパク質であるミオグロビンが酸化の進行により褐色を呈するメトミオグロビンに変化することで引き起こされる現象である。褐変度が上昇するとはメトミオグロビン濃度が上昇することを示し、鮮度の低下に関係する。本研究では市販飼料区と低魚粉区のマダイの血合筋の褐変度は同レベルで推移しており、両区の試験魚の鮮度保持には差がないと推察された。

以上のことをまとめると、低魚粉区のマダイの成長および死亡率は市販飼料区と同程度で、増肉係数は低魚粉区の方がやや優れていた。サンプリングした試験魚の肥満度、肝臓重量比、血漿化学成分からみた健康状態は、いずれの区も良好であると評価された。また両区の筋肉の破断強度、普通筋の K 値、血合肉の褐変度の変化には差がなかったことから、低魚粉区のマダイ筋肉は肉質を評価するのに重要なテクスチャーや鮮度保持の点でも市販飼料区と同程度であると考えられた。一方で、低魚粉飼料に対するマダイの摂餌性については、三重県の試験でみられたように養殖現場で魚粉飼料から低魚粉飼料に切り替えた直後には、摂餌性が一時的に低下する可能性があるため、低魚粉飼料

に切り替える際の馴致法の開発や、低魚粉飼料の嗜好性の改善等を検討する必要がある。これらの改善がなされれば、本研究で使用した低魚粉飼料は出荷対象となるマダイ成魚に対する飼料として、現場で実用化できると評価された。また、本研究ではマダイ成魚を対象とした飼育試験を行ったが、低魚粉飼料の性能を評価するには、稚魚から成魚まで長期間給餌した影響を把握することが重要であると考えられ、今後の試験の展開が望まれる。

要 約

出荷対象のマダイ成魚に対し、大豆油粕とコーングルテンミールを併用配合して魚粉含量を25%とした低魚粉飼料の性能を評価した。魚粉含量が40%の市販のマダイ用飼料を対照飼料とした。飼育試験を三重県、愛媛県、長崎県の3県において各養殖業者の所有する大型生簀を用いて実施した。平均体重約500～1,000gのマダイを試験魚とし、市販飼料区と低魚粉区を設置して4～6ヶ月間飼育した。その結果、低魚粉区の平均魚体重、増重率および死亡率は市販飼料区と同程度で、増肉係数は低魚粉区の方がやや優れていた。また試験魚の肥満度、肝臓重量比、血漿化学成分からみた健康状態は両区とも良好であり、筋肉の破断強度、鮮度保持の特性にも差はなかった。これらのことから、本研究で使用した低魚粉飼料はマダイ成魚に対して市販飼料と同等の性能を有すると評価された。一方で、三重県の試験では低魚粉飼料の給餌開始時に試験魚の摂餌性が一時的にやや低下したことから、飼料の嗜好性の改善について検討する必要があると考えられた。

謝 辞

本研究において養殖現場でマダイの飼育管理を行っていただいた三重県、愛媛県、長崎県の各養殖業者の方々に厚く御礼申し上げる。また本論文をまとめるにあたり有益なご助言を賜った東京海洋大学大学院の舞田正志教授に深く感謝申し上げます。本研究は、農林水産省の「農林水産業の革新的技術緊急展開事業」(うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立)による研究資金の支援を受けて実施した。

文 献

青木秀夫・志満津仁子・福重朋昭・赤野裕文・山形陽一・渡邊 武 (1996) 無魚粉飼料で飼育したマダイの肉質について. 三重水技研報, **6**, 47-54. [Aoki, H., H. Shimazu, T. Fukushige, H. Akano, Y. Yamagata and T.

Watanabe (1996) Flesh quality in red sea bream fed with diet containing a combination of different protein sources as total substitution for fish meal. *Bull. Fish. Res. Inst. Mie*, **6**, 47-54 (in Japanese with English abstract).]

Aoki, H., T. Watanabe, M. Furuichi and H. Tsuda (1997) Use of alternative protein sources as substitutes for fish meal in red sea bream diets. *Suisanzoshoku*, **45**, 131-139.

Aoki, H., M. Furuichi, V. Viyakarn, Y. Yamagata and T. Watanabe (1998) Feed protein ingredients for red sea bream. *Suisanzoshoku*, **46**, 121-127.

Aoki, H., M. Furuichi, K. Watanabe, S. Satoh, Y. Yamagata and T. Watanabe (2000) Use of low or non-fish meal diets for red sea bream. *Suisanzoshoku*, **48**, 65-72.

青木秀夫 (2009) 新しい養魚飼料. 魚類の栄養と飼料 (渡邊 武編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 358-389.

青木隆子・鷹田 馨・國崎直道 (1991) 天然および養殖魚6種の一般成分, 無機質, 脂肪酸, 遊離アミノ酸, 筋肉硬度および色差について. 日水誌, **57**, 1927-1934. [Aoki, T., K. Takada and N. Kunisaki (1991) On the study of proximate composition, mineral, fatty acid, free amino acid, muscle hardness, and color difference of six species of wild and cultured fishes. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, 1927-1934 (in Japanese with English abstract).]

秋元淳志 (2009) 飼料原料. 魚類の栄養と飼料 (渡邊 武編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 284-326.

天野俊二・鈴木伸洋・松成宏之・岩下恭朗・山本剛史 (2012) マダイにおける大豆油粕主体無魚粉飼料へのタウリン添加効果の組織学的検討. 水産増殖, **60**, 459-467. [Amano, S., N. Suzuki, H. Matsunari, Y. Iwashita and T. Yamamoto (2012) Histological observation on the hepatopancreas of fingerling red sea bream *Pagrus major* fed defatted soybean meal based non-fish meal diet supplemented with taurine. *Suisanzoshoku*, **60**, 459-467 (in Japanese with English abstract).]

Hanini, I., M. S. A. Sarker, S. Satoh, Y. Haga, S. Corneille, T. Ohkuma and H. Nakayama (2013) Effects of taurine, phytase and enzyme complex supplementation to low fish meal diets on growth of juvenile red sea bream *Pagrus major*. *Aquaculture Sci.*, **61**, 367-375.

岩本宗昭・山中英明 (1986) 天然ならびに養殖マダイにおける死後硬直の顕著の差異. 日水誌, **52**, 275-279. [Iwamoto, M. and H. Yamanaka (1986) Remarkable differences in rigor mortis between wild and cultured specimens of the red sea bream *Pagrus major*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **52**, 275-279 (in Japanese with English abstract).]

國崎直道・鷹田 馨・松浦宏之 (1986) 天然および養殖アジの脂肪含有量, 筋肉硬度および脂肪酸組成について. 日水誌, **52**, 333-336. [Kunisaki, N., K. Takada and H. Matsuura (1986) On the study of lipid contents, muscle hardness and fatty acid compositions of wild and cultured horse mackerel. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **52**, 333-336 (in Japanese with English abstract).]

Maita, M., J. Maekawa, K. Satoh, K. Futami and S. Satoh (2006) Disease resistance and hypocholesterolemia in

- yellowtail *Seriola quinqueradiata* fed a non-fishmeal diet. *Fish Sci.*, **72**, 513-519.
- Matsunari, H., T. Yamamoto, S. Kim, T. Goto and T. Takeuchi (2008) Optimum dietary taurine level in casein-based diet for juvenile red sea bream *Pagrus major*. *Fish Sci.*, **74**, 347-353.
- 農林水産省 (2014) 平成26年漁業・養殖業生産統計. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html, 2016年10月8日.
- Ochiai, Y., C.J. Chow, S. Watabe and K. Hashimoto (1988) Evaluation of tuna meat discoloration by Hunter color difference scale. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **54**, 649-653.
- 水産庁 (2013) 平成25年度水産白書. http://www.jfa.maff.go.jp/e/annual_report/2013/pdf/25suisan1-1-2.pdf, 2016年10月8日.
- 高木修作・細田秀毅・示野貞夫・宇川正治 (2000a) マダイ飼料におけるチキンミールの利用. 日水誌, **66**, 428-438. [Takagi, S., H. Hosokawa, S. Shimeno and M. Ukawa (2000) Utilization of poultry by-product meal in a diet for red sea bream *Pagrus major*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **66**, 428-438 (in Japanese with English abstract).]
- 高木修作・示野貞夫・細川秀毅・宇川正治 (2000b) マダイ稚魚飼料における代替タンパク質源併用による魚粉の削減. 水産増殖, **48**, 523-530. [Takagi, S., S. Shimeno, H. Hosokawa and M. Ukawa (2000) Replacement of fish meal by inclusion of alternative protein sources in a diet for juvenile red sea bream, *Pagrus major*. *Suisanzoshoku*, **48**, 523-530 (in Japanese with English abstract).]
- 高木修作・示野貞夫・細川秀毅・宇川正治 (2000c) マダイ1歳魚飼料における代替タンパク質源併用による魚粉の削減. 水産増殖, **48**, 545-552. [Takagi, S., S. Shimeno, H. Hosokawa and M. Ukawa (2000) Replacement of fish meal by combined inclusion of alternative protein sources in a diet for yearling red sea bream, *Pagrus major*. *Suisanzoshoku*, **48**, 545-552 (in Japanese with English abstract).]
- Takagi, S., H. Murata, T. Goto, T. Ichiki, M. Endo, H. Hatate, T. Yoshida, T. Sasaki, H. Yamashita and M. Ukawa (2006) Efficacy of taurine supplementation for preventing green liver syndrome and improving growth performance in yearling red sea bream *Pagrus major* fed low-fishmeal diet. *Fish. Sci.*, **72**, 1191-1199.
- Takagi, S., H. Murata, T. Goto, H. Hatate, M. Endo, H. Yamashita, H. Miyatake and M. Ukawa (2011) Role of taurine deficiency in inducing green liver symptom and effect of dietary taurine supplementation in improving growth in juvenile red sea bream *Pagrus major* fed non-fishmeal diets based on soy protein concentrate. *Fish. Sci.*, **77**, 235-244.
- 田中真二・井上美佐 (2005) マダイのマダイイリドウイルス病に対する低密度飼育の有効性. 魚病研究, **40**, 181-186. [Tanaka, S. and M. Inoue (2005) Effectiveness of low rearing density against red sea bream iridoviral disease in red sea bream *Pagrus major*. *Fish path.*, **40**, 181-186 (in Japanese with English abstract).]
- Viyakarn, V., T. Watanabe, H. Aoki, H. Tsuda, H. Sakamoto, N. Okamoto, N. Iso, S. Satoh and T. Takeuchi (1992) Use of soybean meal as a substitute for fish meal in a newly developed soft-dry pellet for yellowtail. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **58**, 1991-2000.
- 渡邊 武 (1990) 現状と問題点. 養殖魚の価格と品質 (平山和次編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 9-13.
- Watanabe, T. (2002) Strategies for further development of aquatic feeds. *Fish. Sci.*, **68**, 242-252.
- 渡邊 武 (2009) タンパク質. 魚類の栄養と飼料 (渡邊武編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 60-106.
- 山中英明 (2002) 魚介類の死後変化と品質. 日水誌, **68**, 5-14. [Yamanaka, H. (2002) Relation between post mortem biochemical changes and quality in the muscle of fish and shellfish. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **68**, 5-14 (in Japanese with English abstract).]
- 山下浩史 (2013) マダイの抗病性. 日水誌, **79**, 456. [Yamashita, H. (2013) Disease resistance of the low fish meal diet breeding red sea bream. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **79**, 456.]
- 山本剛史 (2009) 原料の利用性改善. 魚類の栄養と飼料 (渡邊武編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 326-343.