平成 29 年度日本水産学会賞

持続可能な水産養殖用飼料の開発に関する研究

佐 藤 秀 一

東京海洋大学学術研究院

Studies on the development of sustainable feed for aquaculture

SHUICHI SATOH

School of Marine Life Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

世界の水産養殖業は近年著しく発展しており、2011年には肉牛の生産量、また2015年には漁獲漁業の生産量を上回るに至っている。これに伴い、魚類養殖に用いる飼料の重要性が増している。飼料がなければ魚類は成長しない。飼料の性能によって成長に影響が表れる。さらに飼料中の栄養素の過不足により栄養性疾患を発症もする。また、飼料中の未利用な栄養素が養殖魚から排泄され自家汚染を招き、赤潮等により甚大な被害を被ることもある。また、近年、養殖業の著しい発展により飼料の主な原料である魚粉の供給が逼迫し、魚粉価格の高騰が生じている。このような状況のもと、筆者は長年、養魚飼料の開発に関する研究を行ってきた。特に主な飼料原料である魚粉の栄養価とその利用性について、タンパク質の栄養価、微量元素の利用性、また、免疫能に及ぼす各種栄養素の影響について研究を行った。この状況に鑑み、魚粉の配合を減少させる飼料の開発に関する研究を行った。この総説では、これらの一連の研究について、魚粉、リン、亜鉛、タウリンをキーワードとし解説する。

魚粉に含まれる栄養素とその利用性

魚粉は養魚飼料用の原料として最も適しているものとして知られている。それは、タンパク質含量が高く、魚類に必要な不可欠アミノ酸がバランスよく含有されているからである。一方、骨由来の灰分が高い場合もあり、それに伴い、骨由来のリンが多く含まれることもある。また、亜鉛等の必須微量元素も豊富に含まれる。しかしながら、魚粉の利用性は様々である。身粕、荒粕など様々な原料で調製された魚粉をニジマスに給餌し、その利用性を検討した結果、魚粉のタンパク質含量により飼育成績が影響されることはもちろんであるが、含まれている灰分量にも影響されることを報告している。^{1,2)} 魚粉中に灰分が多く含まれているとタンパク質等の消化率が低く

なり、利用性が低下することが分かった。また、魚粉には亜鉛等の微量元素も豊富に含まれている。しかしながら、魚粉主体の飼料に亜鉛をさらに添加しないとニジマスでは亜鉛の欠乏症である白内障や短駆症の発生³⁾が、コイではマンガンを添加しないと短駆症の発生がみられた。⁴⁾ (図1, 2) 海水魚のブリ、⁵⁾ マダイ、⁶⁾ サバヒー⁷⁾においては、リンや亜鉛を添加しないと成長が劣ることがわかった。魚粉主体飼料には精製飼料を用いて求められた要求量以上の亜鉛が含まれていたが、精製飼料で求められた亜鉛の要求量以上の40 µg/gの亜鉛を添加しないと、白内障や短駆症が発生した。⁸⁾ その原因として、骨などの硬組織に含まれているハイドロキシアパタイト由来のリンが亜鉛などの吸収に影響を及ぼすことがマスノスケ⁹⁾やニジマス¹⁰⁾で知られていたが、飼料中の第三リン酸カルシウムにより亜鉛の吸収が阻害されて、成長などに影響を及ぼしていることを明らかにした。¹¹⁾ (図3) リンは魚類にとって必須の栄養素であり、不足すると成長不良、骨格形成異常、脂質の代謝異常等を生じる。しかしながら、飼料中の有効リン含量が1.5%を超えるとニジマスのタンパク質や亜鉛の消化吸収率が低下し、成長が劣ることがわかった。¹²⁾ そこで、リンを多く含んだ魚粉中の灰分等を軽減した除骨魚粉を調製すると、微量元素の利用率が改善された。¹³⁾ ところが、この除骨魚粉は非常に価格が高くなるため、実用的ではないと考えられる。そこで、飼料中のリン含量を低下させる為に、リン含量の低い大豆油粕を配合した飼料で亜鉛の利用性の改善を試みた。大豆油粕の配合により、飼料中のリンの含量は低下する。しかしながら、植物性飼料原料にはリンの蓄積物質であるフィチンが増加することがわかった。フィチンは微量元素の吸収阻害等をもたらすことが知られている。そこで、第三リン酸カルシウムとフィチンの相互作用をニジマス¹⁴⁾およびアメリカナマズ¹⁵⁾において検討した結果、飼料には第三リン酸カルシウムと

図1 ニジマスにおける魚粉主体飼料への亜鉛無添加の影響

図2 マゴイにおける魚粉主体飼料へのマンガン無添加の影響

図3 ニジマスの亜鉛吸収に及ぼす飼料第三リン酸カルシウムの影響

フィチンを両方配合することにより、単独配合よりも成長や魚体の亜鉛含量に影響を及ぼすことがわかった。そこで、大豆油粕中のフィチンを低減する目的でエクストルーダーを用い高温高压で処理した結果、大豆油粕を150℃程の高温で処理することにより、大豆油粕中のフィチンを2割程度低減することができた。この大豆油粕を用いて飼料中の魚粉を代替したところ、ニジマスの成長は魚粉主体飼料と同等以上を示した。¹⁶⁾ また、前述したように魚粉と大豆油粕やコーングルテンミールを配合すると、ハイドロキシアパタイトだけではなく、フィチンとの相互作用も考えられる。そこで、ほ乳類で、微量元素阻害物質の影響を受けにくくするように開発された、有機微量元素の添加効果を検討した。その結

果、ニジマスでは有機微量元素の中でもアミノ酸キレート微量元素の有効性が高く、ハイドロキシアパタイトやフィチン酸の影響を弱くする効果のあることがわかった。^{14,17-19)} 特に魚体中の亜鉛の増加がみられ、感染症に対する抵抗性も向上した。²⁰⁾

このように、魚粉にはタンパク質や無機質が豊富に含まれているが、硬組織由来のハイドロキシアパタイトにより、その利用性が著しく影響をうけることがわかった。また、植物性飼料原料に含まれているフィチンにおいても同様の影響があり、ハイドロキシアパタイトとフィチンの相乗作用も考慮する必要性がわかった。これらの影響を軽減するためには、魚粉中の硬組織を除去するのが有効であるが、経済的には難しいと思われる。そこで、無機質の少ない植物性飼料原料が有効であると思われるが、それに含まれるフィチンが、タンパク質や微量元素の利用性に影響を及ぼすため、植物性飼料原料を高温でエクストルーダー処理することや、アミノ酸キレート微量元素添加が有効であることがわかった。

環境にやさしい飼料の開発

リンは魚類にとって、必須の栄養素であり、要求量を満たさないと成長低下や脂質の蓄積等の欠乏症があらわれる。しかしながら、飼料に過剰に含まれていると、それらのリンは容易に排泄される。魚粉主体飼料では、タンパク質中の窒素とリンの蓄積率は多くても30%程度

とされている。²¹⁾ すなわち、魚体に蓄積されない窒素やリンが排泄される。その多くが原因で自家汚染等を引き起こし、ひいては赤潮を発生させている可能性がある。そこで、できるだけ魚体から窒素やリンの排泄を低減させる環境にやさしい養魚飼料の開発が必要である。窒素の蓄積には、質の良いタンパク質を飼料に配合することが一番よいが、それでも、多くの窒素が排泄される。そこで、油脂をエネルギー源とし、タンパク質節約効果を促し、窒素の排泄低減をブリを用いて検討した。タンパク質含量は同じだが、脂質含量を20%、25%、30%に調製した飼料を100gのブリ幼魚に給餌した。その結果、ブリの成長にはほとんど差はみられなかったが、脂質を30%に調製した区では、増肉係数が他区に比較し有意に改善された。これにより、窒素の排泄量が著しく改善された。(図4) また、リンの排泄量も脂質含量を高くすることにより低減することができた。²²⁾ さらに、リンの少ない大豆油粕、コーングルテンミールを配合し、魚粉の配合量を20%まで、さらに血粉やフェザーミールを配合し魚粉を15%まで低減した飼料に最小必要量のリンを添加した飼料でニジマス稚魚を長期間飼育した。成長は魚粉を15%まで低減しても、影響を受けなかった。リンの蓄積量は飼育期間を通して、魚粉の配合量を低下させることにより改善した。^{23,24)} このことにより、リンの排泄量が大幅に低減できることがわかった。これらのことにより、魚粉などのリン含量の高い飼料原料をあまり使用しないで、リン含量が少ない飼料原料を使用することにより、リン等の排泄量が少ない環境にやさしい飼料が開発できるものと推察された。

魚粉中のリンの吸収率は胃のある魚では50-70%、コイ科のように胃のない魚あるいはフグのように胃腺の発達が不十分な魚では、0-24%以下と報告されている。²⁵⁾ そこで、魚粉中のリンの吸収率を改善する目的で、クエン酸やギ酸などの有機酸の添加効果を検討した。魚粉主体飼料でマダイ稚魚を飼育すると、リンを添加しないと有効リン含量が不足し成長が劣るが、クエン酸を添加するとリンの吸収率が改善され、リンを添加と同様の効果

を示した。^{26,27)} また、この方法により、リンの排泄量が大幅に削減できることがわかった。また、リンの少ない植物性飼料原料を配合した低魚粉飼料でブリ稚魚を飼育すると、成長が劣るが、クエン酸あるいはアミノ酸キレート微量元素を添加することによりリンを添加しなくても成長が改善されることがわかった。²⁸⁾ さらに、クエン酸をリン無添加飼料に添加することにより、リンの排泄量が半分程度に減少することが明らかとなった。また、低魚粉飼料へ麹発酵物を添加することにより、マダイではタンパク質とリンの消化吸収率が改善され、成長が向上し、窒素とリンの排泄量が低減することがわかった。²⁹⁾

このように、リンの少ない飼料原料である植物性飼料原料を多く配合し、それに含まれている栄養阻害物質の影響をできるだけ受けないようにすることや、飼料原料中のリンの利用性を高めることなどにより、リンや窒素の排泄量を低減できる環境にやさしい養魚飼料の開発が可能となると思われる。

魚粉代替飼料の開発

我が国では、かつてマイワシを養殖用餌料として活用していた。しかしながら、1990年以降のマイワシ資源の減少により、養魚用餌料原料の供給が危惧された。その頃に初期の低・無魚粉飼料の開発に関する研究が始められた。ニジマスでは植物性飼料原料や動物性飼料原料を配合し魚粉を全く使用しない無魚粉飼料を用いても、魚粉主体飼料と同様の成長を示すことが報告された。³⁰⁾ 一方、海水魚のブリでは、同様の無魚粉飼料を給餌すると最初の40-50日は成長するがそれ以降は、摂餌が低減し、成長しないことが報告された。³¹⁾ さらに、肝臓が緑色になる緑肝症が認められた。³²⁾ このように、ニジマスのような淡水魚とブリのような海水魚で、「何が異なるのか」を多くの研究者が研究した結果、³³⁻³⁵⁾ ブリのような海水魚では、必須アミノ酸の一つであるメチオニンを栄養素のタウリンに代謝できないことがわかった。高木ら³⁶⁾は、大豆濃縮タンパク質を主原料とした無魚粉飼料へタウリンを添加することによりブリの成長が改善されることを報告した。そこで、低魚粉飼料へのタウリンの添加効果をブリを用いて検討した。その結果、魚粉を30%まで低減させ、大豆油粕やコーングルテンミールを配合した飼料では、魚粉主体飼料と成長成績はさほど変わらないこと、さらに魚粉を20%まで低減した場合はタウリンを添加することにより、魚粉飼料と同等の成長を示すことがわかった。³⁷⁾ 同様の試験をカンパチ³⁸⁾で実施したが、ブリと同じ結果が得られた。

また、魚粉に代わるタンパク質源として、大豆油粕やコーングルテンミールが主な代替飼料原料として考えられる。現在、これら多くの飼料原料の由来となる植物

図4 ブリの窒素排泄に及ぼす飼料脂質量の影響

は、多くが遺伝子組換え作物である。そこで、これら遺伝子組換え作物由来の飼料原料の有効性をニジマス,^{39,40)} マゴイ,⁴¹⁾ ティラピア⁴²⁾を用いて検討した。その結果、タンパク質の利用性は、非組換え植物由来の原料と変わらないことがわかった。また、遺伝子組換え時に挿入された遺伝子の一部は数日間、魚体に残っているが、5日後には検出されないことがわかった。これらのことより、遺伝子組換え由来の植物を原料とした植物性原料は、非組換えのものと同様に使用できるものと考えられる。

最近、バイオエネルギーの利用が盛んに行われるようになった。バイオエタノール生産時にできる副産物の一つである乾燥穀物蒸留粕 (DDGS) も魚粉代替飼料原料の候補となり得ると考えられる。従来の DDGS に含まれるタンパク質含量は 30% 程度とやや低く、養魚飼料原料として DDGS は適していなかった。そこで、高タンパク質の DDG (HPDDG) が開発されたので、その利用性をニジマス⁴³⁾とティラピア^{44,45)}で検討した。ニジマスでは、コーングルテンミールとはほぼ同等の利用性を示した。一方、ティラピアにおいては、DDGS あるいは HPDDG を配合すると摂餌が促進され、成長が顕著に良くなる傾向がみられた。

植物性飼料原料に含まれるタンパク質の消化吸収率は魚粉と比較し、やや劣ることが知られている。そこで、それらを改善するためにタンパク質分解酵素のプロテアーゼ、種々の炭水化物分解酵素やフィチン分解酵素を含んだ麹菌発酵物の添加効果をマダイを用いて検討した。²⁹⁾ その結果、麹菌発酵物を低魚粉飼料へ添加することにより、マダイのタンパク質およびリンの消化吸収率が改善され、飼育成績が向上することがわかった。一方、飼育水が 20℃ よりも低くなるとその効果は低減した。このように、魚類は変温動物である為に飼育環境に即した酵素混合物の添加が有効であることが示唆された。

植物性飼料原料の他に、動物性飼料原料であるポークミールやチキンミールなども、魚粉代替飼料原料の候補となる。動物性飼料原料は、2001 年に我が国で狂牛病の発生が見られてから、全面禁止になった。その後、順次、チキンミールやポークミールの使用が認められ、現在では危険部位を除いたものから生産された牛由来のミートミールおよびミートアンドボーンミールの利用も可能となった。そこで、家禽由来のチキンミール等の飼料原料の利用性をニジマスを用いて検討した。⁴⁶⁾ チキンミールやフェザーミール、血粉などを配合した低魚粉飼料を調製し、ニジマスに給餌したところ、植物性飼料原料で代替した飼料に比較し、やや優れた飼育成績を示した。さらに、動物性飼料原料のみで魚粉を完全に代替した飼料では、魚粉主体飼料と同等の成績を示した。このように動物性飼料原料を配合することにより、大幅に魚

図5 無魚粉飼料を給餌したブリの成長、(魚粉主体区●, 濃縮大豆タンパク質配合無魚粉飼料1区○, ポークミール配合無魚粉飼料区○, 濃縮大豆タンパク質配合無魚粉飼料2区△)

粉を代替できるものと推察される。しかしながら、現在、我が国ではこれらの動物性飼料の流通量が多くなく、あまり使用できないのが現状である。良質の動物性飼料原料の今後の供給が望まれる。

そこで、これらの状況を鑑みこれまでの知見を応用し、出荷対象のマダイに対する魚粉 30% 飼料の実用性を 3 つの異なる地域の養殖場で実証したところ、魚粉主体飼料と遜色ない成長結果が得られた。⁴⁷⁾ そして、ブリを用いて実用的な無魚粉飼料の開発を行った。濃縮大豆タンパク質の配合量をできるだけ低く 30% とし、大豆油粕やコーングルテンミールとともにタウリン、アミノ酸キレート亜鉛、酵素混合、魚類エキスを添加した無魚粉飼料を調製した。また、濃縮大豆たんぱく質の代わりにポークミールを同量配合した飼料についても検討した。ブリを飼育した結果、魚粉主体飼料と同等の成長を示すことがわかった。⁴⁸⁾ (図5)

このように、植物性飼料原料、動物性飼料原料さらにタウリン等を配合することにより魚粉を代替できることがわかった。

魚油代替飼料の開発

前述したように魚粉代替に関する知見は集積されてきた。一方、海水魚の必須脂肪酸は $\omega 3$ 高度不飽和脂肪酸である DHA などである。この DHA の主な供給源は魚油である。ところが、世界的な養殖産業の発展に伴い、魚粉と同様に魚油の供給も逼迫しており、価格も高騰している。そこで、魚油をどの程度低減代替が可能かを、マダイ稚魚を用いて検討した。その結果、三分の一程度はキャノーラ等の植物油で代替できることがわかった。⁴⁹⁾ また、低塩分の飼育水でマダイを飼育するとマダ

イの必須脂肪酸である DHA の代謝に関連する遺伝子の発現がみられ、魚体中の DHA 含量が増加することがわかった。⁵⁰⁾ このように海水魚用飼料においても、魚油を低減することは可能であると思われる。しかしながら DHA の供給源として魚油に代わるものが必要である。最近、DHA を産生する微細藻類のシゾキトリウムの大量培養が可能となり、それを乾燥したものがアルジーミールとして開発された。そこで、植物性飼料原料の大豆豆粕、濃縮大豆タンパク質、コーングルテンミールを主原料とし、アルジーミールを配合した無魚粉・無魚油飼料を調製し、マダイ稚魚に給餌した。その結果、魚粉と魚油を配合した飼料と同等の成長が得られた。このように、魚粉と魚油を全く配合しなくても、海水魚に必要な栄養素を過不足なく配合し、栄養阻害物質の影響をできるだけ少なくすることなどにより、海水魚においても成長させることができることがわかった。他の海水魚においても検討を重ねることにより、真のヴェジタリアン養殖魚の創成が可能と思われる。

おわりに

本研究は、魚類における魚粉中の微量元素の利用性に関する研究という非常に限られた範囲の研究から、環境にやさしい飼料の開発、養殖魚生産者にもやさしい飼料の開発と発展した。一見小さく見える研究でも、研究次第で大きなテーマに発展できるものと思われる。

前述したように、これまでの魚類の栄養要求・栄養素の代謝の知見を活かし、様々な原料を組合せることにより、魚と環境と人にやさしい持続可能な水産養殖用飼料の開発が可能となった。今後は、供給量が豊富で、価格の安定した飼料原料を用いても、魚粉主体飼料よりも優れた飼育成績の得られる飼料の開発が望まれる。そのためには、飼料原料の加工や処理方法の検討、新しい飼料原料の開発などが必要である。

また、魚類は生息環境や食性によって栄養要求が異なる。この現象をさらに詳しく解明することで、それぞれの魚類に適した飼料の開発が可能となる。さらに、飼料開発と育種のタイアップも必要であろう。そして、魚類の栄養要求の差異の原因を究明することで、魚類の進化の謎に迫れるのではないかと期待している。

謝 辞

本研究は筆者の研究室に所属した多くの学生・大学院生たち、一緒に研究をして頂いた研究者の努力の賜物であります。筆者とともに研究を進めてきたすべての方々、に心より感謝いたします。また、水族栄養学をはじめとする研究の楽しさを教えて頂いた渡邊 武先生、竹内俊郎先生、常日頃から多くの励ましを頂いた渡部終五先生に深く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Watanabe W, Nanri H, Satoh S, Takeuchi M, Nose T. Nutritional evaluation of brown meals as a protein source in diets for rainbow trout. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1983; **49**: 1083-1087.
- 2) 佐藤秀一, 竹内俊郎, 渡辺 武, 星 昌和, 外山健三. 養魚飼料タンパク源としてのスクラップミールの栄養価. 日本水産学会誌 1984; **50**: 2077-2083.
- 3) 佐藤秀一, 山本裕夫, 竹内俊郎, 渡辺 武. ニジマスに対する各種微量元素無添加魚粉飼料の影響. 日本水産学会誌 1983; **49**: 425-429.
- 4) 佐藤秀一, 山本裕夫, 竹内俊郎, 渡辺 武. コイに対する各種微量元素無添加魚粉飼料の影響. 日本水産学会誌 1983; **49**: 431-435.
- 5) Satoh S, Ishida R, Takeuchi T, Watanabe T, Mitsunashi N, Imaizumi K, Seikai T. Necessity of mineral supplement to fish meal based feed for yellowtail and Japanese flounder. *Suisanzoshoku* 2001; **49**: 191-197.
- 6) Satoh S, Ishida R, Takeuchi T, Watanabe T, Seikai S. Necessity of mineral supplement to fish meal based red sea bream feed. *Suisanzoshoku* 1998; **46**: 535-540.
- 7) Minoso MGG, Borlongan IG, Satoh S. Essentiality of phosphorus, magnesium, iron, zinc, and manganese in milkfish diet. *Fish. Sci.* 1998; **65**: 721-725.
- 8) Satoh S, Takeuchi T, Watanabe T. Availability to rainbow trout of zinc in white fish meal and of various zinc compounds. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1987; **53**: 595-599.
- 9) Richardson NL, Higgs DA, Beams RM, McBride JR. Influence of dietary calcium, phosphorus, zinc and sodium phytate level on cataract incidence, growth and histopathology in juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *J. Nutr.* 1985; **115**: 553-567.
- 10) Hardy RW, Shearer KD. Effect of dietary calcium phosphate and zinc supplementation on whole body zinc concentration of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1985; **42**: 181-184.
- 11) Satoh S, Tabata K, Izume K, Takeuchi T, Watanabe T. Effect of dietary tricalcium phosphate on availability of zinc to rainbow trout. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1987; **53**: 1199-1205.
- 12) Satoh S, Porn-Ngam N, Takeuchi T, Watanabe T. Influence of dietary phosphorus levels of growth and mineral availability in rainbow trout. *Fish. Sci.* 1996; **62**: 483-487.
- 13) Satoh S, Porn-Ngam N, Sasaki T, Ishida R, Takeuchi T, Watanabe T. Effect of deboning of white fish meal on the zinc availability to rainbow trout. *Suisanzoshoku* 1997; **45**: 267-273.
- 14) Apines MJS, Satoh S, Kiron V, Watanabe T, Aoki T. Availability of supplemental amino acid-chelated trace elements in diets containing tricalcium phosphate and phytate to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 2003; **225**: 431-444.
- 15) Satoh S, Poe WE, Wilson RP. Effect of supplemental phytate and/or tricalcium phosphate on weight gain, feed efficiency and zinc content in vertebrae of channel catfish. *Aquaculture* 1989; **80**: 155-161.
- 16) Satoh S, Porn-Ngam N, Akimoto A, Takeuchi T, Watanabe T. Effect of substitution of white fish meal with extruded soybean meal in diets on zinc and manganese availability to rainbow trout. *Suisanzoshoku* 1997; **45**: 275-284.

- 17) Apines MJ, Satoh S, Kiron V, Watanabe T, Nasu N, Fujita S. Bioavailability of amino acids chelated and glass embedded zinc to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fingerlings. *Aquac. Nutr.* 2001; **7**: 221–228.
- 18) Apines MJ, Tsukioka T, Satoh S, Kiron V, Watanabe T, Fujita S. Bioavailability of amino acids chelated and glass embedded manganese to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fingerlings. *Aquac. Res.* 2001; **732(S)**: 18–25.
- 19) Apines MJS, Satoh S, Kiron V, Watanabe T, Fujita S. Bioavailability and tissue distribution of amino acid-chelated trace elements in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Fish. Sci.* 2003; **69**: 722–730.
- 20) Apines-Amar MJS, Satoh S, Kiron V, Watanabe T. Effect of supplemental amino acid-chelated trace elements on the immune response of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* subjected to bacterial challenge. *J. Aquat. Anim. Health*, 2004; **16**: 53–57.
- 21) Pillay TVR, *Aquaculture and the environment*, 1992, Fishing News Books, Cambridge, 191p.
- 22) Satoh S, Sarker MdSA, Satoh K, Kiron V. Effect of dietary lipid and phosphorus levels on nitrogen and phosphorus excretion in young yellowtail *Seriola quinqueradiata*: A preliminary observation. *Fish. Sci.* 2004; **70**: 1082–1088.
- 23) Satoh S, Hernandez A, Morishita Y, Tokoro T, Kiron V, Watanabe T. Comparison of phosphorus retention efficiency between rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a commercial diet and a low fish meal based diet. *Aquaculture* 2003; **224**: 271–282.
- 24) Hernandez A, Satoh S, Kiron V, Watanabe T. Phosphorus retention efficiency in rainbow trout fed diets with low fish meal and alternative protein ingredients. *Fish. Sci.* 2004; **70**: 580–586.
- 25) 佐藤秀一. 無機質. 「改訂 魚類の栄養と飼料」(渡邊武編) 恒星社厚生閣, 東京. 2009; 148–168.
- 26) Sarker MdSA, Satoh S, Kiron V. Supplementation of citric acid and amino acid-chelated trace element to develop environment-friendly feed for red sea bream, *Pagrus major*. *Aquaculture* 2005; **248**: 3–11.
- 27) Sarker MdSA, Satoh S, Kiron V. Inclusion of citric acid and/or amino acid-chelated trace elements in alternate plant protein source diets affects growth and excretion of nitrogen and phosphorus in red sea bream *Pagrus major*. *Aquaculture* 2007; **262**: 436–443.
- 28) Sarker MdSA, Satoh S, Matsumoto S, Sasaki S, Miyashita H, Kiron V, Yamamoto Y, Miyazaki T. Effect of dietary supplementation of citric acid and amino acid-chelated trace elements on growth and excretion of nitrogen and phosphorus in young yellowtail, *Seriola quinqueradiata*. *Aquacult. Sci.* 2009; **57**: 389–397.
- 29) Hanini I, Sarker MdSA, Satoh S, Haga Y, Corneillie S, Ohkuma T, Nakayama H. Effects of taurine, phytase and enzyme complex-supplementation to low fish meal diets on growth of juvenile red sea bream *Pagrus major*. *Aquacult. Sci.* 2013; **61**: 367–375.
- 30) Watanabe T, Verakunpiriya V, Watanabe K, Kiron V, Satoh S. Feeding of rainbow trout with non-fish meal diets. *Fish. Sci.* 1997; **63**: 258–266.
- 31) Watanabe T, Aoki H, Shimamoto K, Hadzuma M, Maita M, Yamagata Y, Kiron V, Satoh S. A trial to culture yellowtail with non-fish meal diets. *Fish. Sci.* 1998; **64**: 505–512.
- 32) 舞田正志, 青木秀夫, 山形陽一, 渡邊哉子, 佐藤秀一, 渡邊 武. 無魚粉飼料を給餌したブリにみられた緑肝症について. 日本水産学会誌 1997; **63**: 400–401.
- 33) Goldstein L, Luer C, Blum P. Taurine accumulation by the heart of embryonic skates, *Raja erinacea*. *J. Exp. Biol.* 1990; **150**: 449–452.
- 34) King PA, Cha CJ, Goldstein L. Amino acid metabolism and cell volume regulation in the little state, *Raja erinacea*, 2. Synthesis. *J. Exp. Biol.* 1980; **212**: 79–86.
- 35) Yokoyama M, Takeuchi T, Park GS, Nakazoe J. Hepatic cystathionine sulfoxide decarboxylase activity in fish. *Aquacult. Res.* 2001; **32**: 216–220.
- 36) Takagi S, Murata H, Goto T, Endo M, Yamashita H, Ukawa M. Taurine is an essential nutrient for yellowtail *Seriola quinqueradiata* fed non-fish meal diets based on soy protein concentrate. *Aquaculture* 2008; **280**: 198–205.
- 37) 羽野元秀, 長野泰三, 佐藤秀一, 白鳥 勝, 植田 豊. ブリ養殖現場で確認した低魚粉飼料へのタウリン添加効果. 水産増殖 2009; **57**: 595–600.
- 38) 前野幸二, 村瀬拓也, 平江多積, 柳 宗悦, 佐藤秀一. 合成タウリンを添加した魚粉低減飼料給餌によるカンパチの成長. 鹿水技研報 2012; **3**: 21–33.
- 39) Chainark P, Satoh S, Hino T, Kiron V, Hirono I, Aoki T. Availability of genetically modified soybean meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets. *Fish. Sci.* 2006; **72**: 1072–1078.
- 40) Chainark P, Satoh S, Hirono I, Aoki T, Endo M. Availability of genetically modified feed ingredient II—Investigations of ingested foreign DNA in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Fish. Sci.* 2008; **74**: 380–390.
- 41) Suharman I, Satoh S, Haga Y, Hirono I, Aoki T. Suitability of genetically modified soybean meal in dietary ingredient for common carp, *Cyprinus carpio*. *Fish. Sci.* 2010; **76**: 111–117.
- 42) Suharman I, Satoh S, Haga Y, Takeuchi T, Endo M, Hirono I, Aoki T. Utilization of genetically modified soybean meal in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* diet. *Fish. Sci.* 2009; **75**: 967–973.
- 43) Prachom N, Haga Y, Satoh S. Impact of dietary high protein distillers dried grains on amino acid utilization, growth response, nutritional health status, and waste output in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult. Nutr.* 2013; **19**: 62–71.
- 44) Herath SS, Haga Y, Satoh S. Effect of long-term feeding of corn co-product-based diets on growth, fillet color, and fatty acid and amino acid composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture* 2016; **464**: 205–212.
- 45) Herath SS, Haga Y, Satoh S. Potential use of corn co-products for fish meal-free diets for juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Fish. Sci.* 2016; **82**: 811–818.
- 46) Lu F, Haga Y, Satoh S. Replacement of fish meal with rendered animal protein and plant protein sources on growth response, biological indices and amino acid availability of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Fish. Sci.* 2015; **81**: 95–105.
- 47) 青木秀夫, 松倉一樹, 山下浩史, 宮本敦史, 清水砂帆子, 金田典久, 興石友彦, 佐藤秀一, 石田典子. 出荷対象のマダイに対する低魚粉飼料の実用性. 水産増殖 2017; **65**: 221–230.
- 48) 津崎龍雄, 吉田一範, 堀田卓朗, 中川雅弘, 山田真之, 佐藤秀一, 興石友彦, 前野幸二, 秋山敏男, 石田典子. 完全無魚粉化 extruded-pellet (EP) 飼料を用いたブリ *Seriola quinqueradiata* の長期飼育試験. 水産増殖 2015; **63**: 29–38.
- 49) Huang SSY, Oo AN, Higgs DA, Brauner CJ, Satoh S.

- Effect of dietary canola oil level on the growth performance and fatty acid composition of juvenile red sea bream, *Pagrus major*. *Aquaculture* 2007; **271**: 420–431.
- 50) Al-Amin Sarker Md, Yamamoto Y, Haga Y, Sarker MdSA, Miwa M, Yoshizaki G, Satoh S. Influences of low salinity and dietary fatty acids on fatty acid composition and fatty acid desaturase and elongase expression in red sea bream *Pagrus major*. *Fish. Sci.* 2011; **77**: 385–396.