

養殖用飼料における植物性原料の利用性とその改善に関する研究

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	山本, 剛史
巻/号	76巻3号
掲載ページ	p. 344-347
発行年月	2010年5月

平成 21 年度水産学進歩賞

養殖用飼料における植物性原料の利用性とその改善に関する研究

山本 剛 史

佃水産総合研究センター養殖研究所玉城庁舎

Studies on the utilization and improvement of the nutritional value of plant protein ingredients
for fish feeds

TAKESHI YAMAMOTO

Inland Station, National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, Tamaki, Mie 519-0423, Japan

世界的な水産物需要の増大が見込まれるなかで、天然水産物の漁獲には限界があることから、魚類・甲殻類の養殖生産量が 2020 年には倍増するという予測もある。¹⁾ 養殖用飼料には栄養価が高いことから魚粉が多用され、我が国でもかつては北洋魚粉、次いでマイワシ魚粉が利用され、その後現在では南米等からの輸入魚粉を中心に飼料に 50% 程度配合されている。²⁾ しかしながら近年では、養殖用のみならず中国等における家畜飼料向けの需要増大から、輸入魚粉の供給が逼迫して価格が高騰する事態にしばしば陥っている。世界の魚粉生産量が養殖生産量の増大、すなわち養殖用飼料の需要に追いつかないことが明らかであることから、かつては「安価な原料」と位置付けられていた魚粉代替原料を本格的に養殖用飼料に利用せざるを得ない状況に直面している。

我が国では現在、家畜の加工副産物由来の原料は法的に使用が制限されており、配合可能なものについても栄養価や供給量などの点で養殖用飼料に十分配合できる状況にはない。このため、大豆油粕やコーングルテンミールなどの植物性タンパク質原料を魚粉代替原料として活用する必要がある。しかしながら、単純に魚粉をこれらの代替原料で置き換えるだけで従来と同等の飼育成績が得られる訳ではない。魚粉に比べ代替原料ではタンパク質の栄養価が劣ることが多い。家畜用飼料に比べ養殖用飼料は高タンパク質である。それゆえ、著者らもタンパク質を構成するアミノ酸組成に着目して代替原料配合飼料の栄養価を改善するための研究をしていたが、それだけでは飼育成績を十分には改善できない状況に直面した。本稿では著者らがこれらの問題解決のためにニジマスを実験魚に取り組んできた研究成果を紹介する。

1. 植物性タンパク質原料の特徴

養殖用飼料はタンパク質含量が 35~50% 程度と家畜用飼料よりかなり高いため、魚粉の代替原料としては高タンパク質のものが要求される。そのため、植物性タンパク質原料では、種子から油脂あるいはデンプンなどを食用向けに抽出して、結果的にタンパク質含量が高くなった残さが魚粉代替原料として検討されることが多い。著者らが検討した大豆油粕は大豆から油脂を、コーングルテンミールはとうもろこしから油脂およびデンプンを抽出した残さであり、麦芽タンパク質はビール製造の際に大麦麦芽から糖質を抽出した残さから穀皮を除去したものである。

タンパク質を構成する必須アミノ酸組成の特徴として、一般的に豆類ではメチオニンやシスチン（準必須アミノ酸）という含硫アミノ酸が少ないが、リシンは魚粉より少ないもののある程度含まれている。一方、麦や米、とうもろこしなど穀類では含硫アミノ酸が豊富であるもののリシンが少ないという特徴がある。

植物には動物生理に悪影響を及ぼすさまざまな抗栄養因子が含まれている。³⁾ 中でも特に問題となるのがプロテアーゼインヒビターであり、動物が分泌するタンパク質分解酵素の活性を阻害して消化不良の原因となる。これについては適切な加熱処理により阻害活性が低下することが魚類でも明らかにされており、加熱処理済みの大豆油粕が飼料用として流通している。

2. 飼料のアミノ酸バランスの改善

要求量に比べて飼料中に不足する必須アミノ酸を結晶形で添加することは、飼料の栄養価を向上させる手段と

して家畜用飼料では実用化されており、メチオニンやリシンなどが飼料添加物として認可されている。養殖用飼料でも研究レベルでは古くから試みられている手法であり、著者らも魚粉を段階的に削減して麦芽タンパクで置き換えたニジマス用飼料への必須アミノ酸の添加効果を検討した。その結果、魚粉ベースの飼料と同等の飼育成績（成長、飼料効率など）が得られたのは、必須アミノ酸を添加しない場合は40%代替飼料までであったが、アミノ酸の添加により60%までの代替が可能であった。⁴⁾しかしながら、魚粉の80%以上を代替するとアミノ酸添加効果は認められなかった。これは、そもそも魚体内で飼料タンパク質が消化されて、その構成アミノ酸が吸収されるタイミングに比べ、飼料に添加した結晶アミノ酸の吸収が早く、魚体内でのタンパク質合成に必ずしも有効利用されないことに加え、⁵⁾後述するように麦芽タンパク（や大豆油粕）の構成アミノ酸の吸収が魚粉のそれよりかなり遅いことも原因していると考えられた。

日本の伝統的な食文化は、「米と味噌（大豆）」と言われる。ごはん味噌汁あるいは豆腐などの組み合わせは、少し前の我が国の食卓では当たり前のように見られた光景である。これは、食事のアミノ酸バランスの改善の観点からは理にかなったものである。すなわち、米にはリシンが少なく大豆には含硫アミノ酸が少ないという欠点を、リシンの多い大豆と含硫アミノ酸の多い米が補い合って、それぞれを単独で摂取する場合より食事のアミノ酸バランスが改善されて栄養価が向上するというものである。そこで、この理論をニジマス用飼料に応用した。前述の通り、アミノ酸を強化しない場合には麦芽タンパク単独で魚粉の40%しか代替できないが、麦芽タンパクと大豆油粕を併用した場合、魚粉の60%を代替することが可能であった。⁶⁾また、麦芽タンパクと大豆油粕をタンパク質換算で1:1で併用配合した場合にもっとも飼育成績が改善されたことから、原料の配合比率の重要性も指摘された。同様のことが、大豆油粕とコーングルテンミールなどの組み合わせでも明らかとなった。⁷⁾

これらを踏まえ、原料のアミノ酸組成を考慮して大豆油粕、コーングルテンミールおよび少量の肉骨粉を併用配合した無魚粉飼料を調整した。その結果、必須アミノ酸の強化なしでは飼育成績は多少劣ったものの、アミノ酸の強化により魚粉ベースの飼料と同等の飼育成績が得られた。⁸⁾なお、原料に不足する必須アミノ酸だけでなく、とうもろこしのタンパク質にかなり多く含まれるロイシンの過剰症についても検討したが、組織のアミノ酸代謝プールでは分岐鎖アミノ酸の拮抗作用が認められたものの、飼育成績への影響は軽微であった。⁹⁾

以上の結果から、必須アミノ酸の不足する代替原料により飼料中の魚粉を削減する場合、複数の原料それぞれ

のアミノ酸組成に配慮し、飼料としてのアミノ酸バランスが可能な限り良好になるように配合比率を調整して、それでもなお不足する場合には少量の結晶アミノ酸を補足することが効果的であると言える。

3. タンパク質の消化吸収

前述の3種の植物性原料のタンパク質の消化吸収率をマダイなども含めた4魚種で検討したが、魚種により多少の違いは見られるもののおおむね85~95%と良好であり、タンパク質を構成する個々のアミノ酸の消化吸収率もタンパク質のそれに近似していた。¹⁰⁾また、エクストルーダー処理により大豆油粕や麦芽テンパクのタンパク質・アミノ酸の消化吸収率が向上することも分かった。一方、大豆油粕と麦芽タンパクをニジマスに給餌して血漿中の遊離アミノ酸濃度の変化を調べたところ、魚粉では給餌後12時間で必須アミノ酸の濃度がピークに到達したのに対し、大豆油粕などでは21時間後にピークが認められた。¹¹⁾従って、魚粉と植物性原料では消化管からのタンパク質構成アミノ酸の吸収に時間差があることから、魚体内では必ずしも吸収したアミノ酸のバランスが改善されておらず、見た目（飼料のアミノ酸組成の分析値）よりも植物性原料を配合した飼料タンパク質の栄養価が劣ることが示唆された。

4. 自発摂餌を利用した摂餌性の評価

代替原料を配合した魚粉削減飼料では、摂餌性が劣ることがしばしば指摘されている。摂餌性を左右する要因として、飼料の物性や味、有害物質の存在などが考えられるが、従来より魚類も陸上動物と同様にエネルギーの摂取量を調節することが示唆されていた。著者らは、それをまず証明するために自発摂餌装置を利用して、魚粉ベースでエネルギー源（タンパク質・脂質・炭水化物の配合比率）の異なる飼料や、^{12,13)}油脂の添加量によりエネルギー含量を変えた飼料¹⁴⁾をそれぞれニジマスに自由に摂取させた。その結果、いずれの場合も可消化エネルギーの摂取量が一定であり、魚類に可消化エネルギーの摂取量を調節する能力のあることが示された。次にカゼインとゼラチンの配合比率を調整してアミノ酸バランスの良い飼料と極端に悪い飼料を同時に供したところ、アミノ酸バランスの良い飼料を選択することや、¹⁵⁾小麦グルテンベースのリシン充足飼料をリシン欠乏飼料とは区別して摂取することなどを明らかにした。¹⁶⁾また、それらアミノ酸バランスの悪い飼料のみを自由に摂取させた場合、アミノ酸バランスの良い飼料に比べて摂餌量が低下した。これらの結果は、代替原料を配合した飼料ではアミノ酸バランスを整えないと摂餌量低下の一因となることを示すものである。

5. 大豆抗栄養因子の影響とその改善

前述の通り、大豆油粕とコーングルテンミールに肉骨粉を併用し、不足すると思われる必須アミノ酸を添加した無魚粉飼料をニジマスに給与した場合には魚粉ベースの飼料と同等の飼育成績が得られたが、大豆油粕とコーングルテンミールのみをタンパク質源とする飼料では必須アミノ酸を強化しても飼育成績が劣り、血液性状も悪化した。¹⁷⁾ 折しも海水魚ではタウリンの必須性が指摘され始めた頃であったが、この飼料にタウリンを強化してもまったく改善効果が認められず、アミノ酸やタウリン以外に何らかの原因があると推察された。

それまでもブリでは、大豆油粕などの代替原料を配合した飼料を給与すると消化管重量が増えることが指摘されていた。¹⁸⁾ ニジマスでも同様の現象が見られたことから組織学的な検討を行ったところ、直腸の粘膜上皮細胞に空胞変性などの異常が認められた。¹⁹⁾ 大豆油粕を配合した魚粉削減飼料を与えた大西洋サケの直腸に組織異常が認められることがノルウェーでは既に報告されていたが、²⁰⁾ 大豆油粕とコーングルテンミールからなる無魚粉飼料をニジマスに給与して詳細に検討したところ、直腸以外にも肝細胞の萎縮や胆のう胆汁および腸管内容物中の胆汁酸量の減少などの異常が認められた。²¹⁾ 大西洋サケでは大豆油粕の配合により抗病性が低下することも示唆されているが、²²⁾ ニジマスでは粘膜上皮の微絨毛に発達不良や融解壊死が見られたことから、病気に対する抵抗性が低下することが懸念された。

著者らは、粘膜上皮細胞の空胞変性は脂質の代謝異常にあると推察されたことからリン脂質（大豆レシチン）を、胆汁酸量が減少することから胆汁塩（胆汁末やタウロコール酸）をそれぞれ無魚粉飼料に強化したところ、前述の異常が改善され、胆汁塩強化飼料では魚粉ベースの飼料と同等の飼育成績が得られた。^{21,23)} また、大豆油粕を *Bacillus* 属が主体の複合菌種で発酵させて無魚粉飼料に配合することでも種々の生理異常が改善され、魚粉ベースの飼料と同等の飼育成績が得られることを昨年の水産学会大会で報告した。

大豆の抗栄養因子のうち、プロテアーゼインヒビター以外に養殖用飼料でその影響が詳細に検討されているのは、ミネラルの吸収阻害の原因となるフィチンぐらいである。大西洋サケでは大豆油粕のアルコール抽出物により腸管組織変性が起こることが報告されているが、²⁴⁾ ニジマスでもアルコール抽出物をカゼインベースの飼料に添加して、大豆油粕を与えた場合と同様の異常が、腸管のみならず肝臓や胆汁にも認められた。²⁵⁾ 現在、個々の大豆抗栄養因子を単独あるいは併用配合した場合の影響などを検討しているところであるが、腸管組織変性にはアルコール可溶性のサポニンなどが関与しているようであり、また、胆汁塩の添加によりその害作用が改善され

ている。^{25,26)}

6. おわりに

魚粉代替原料は高タンパク質素材であり、その利用性に関する従来の研究手法は、栄養化学的な観点からタンパク質の消化吸収率やアミノ酸バランスを考慮し、魚粉をどの程度置き換えることができるかということであった。多くの研究者は、10年ほど前まではそのような検討を繰り返しながら栄養価の改善に限界を感じていた。その突破口の1つとなったのが本学会でも多くの報告がされている海水魚におけるタウリンの必須性である。大豆油粕やコーングルテンミールにはタウリンが含まれていないため、合成タウリンが飼料添加物として認可された今日では、タウリンを添加した魚粉削減飼料を実用化するための研究開発が進められている。しかしながらタウリンを添加してもなお、飼育成績や抗病性などが劣る場合がある。一方、ニジマスは種々の生理調整作用を持つタウリンを体内で合成できるようであるため、大豆抗栄養因子による生理阻害作用も海水魚に比べて明瞭に現れると考えられる。今後はニジマスにおける種々の生理異常の原因となる大豆抗栄養因子の特定とその作用機構の解明を進める予定である。一方、大豆油粕の発酵効果についても、発酵により低減する因子の特定とともに、より適切な発酵条件の探索が必要である。これらの知見を活用し、生産量の多い海水魚において、より経済的な方法で魚粉削減飼料の栄養価を改善する方法を開発することが、今後の養殖業にとって急務の課題であろう。

謝 辞

本研究は著者が養殖研究所において20年に亘り関わってきた研究活動で得た成果の一部であり、文献リストにあるように研究に携わっていただいた多くの共同研究者に深く感謝いたします。特に研究所へ配属当初から秋山敏男博士および尾形博博士には栄養飼料研究の実施に関して懇切丁寧な御指導御助言を賜った。自発撰録の研究ではハード面の取り扱いで三重大大学の神原淳博士および研究所（当時）の島隆夫博士には多大な御指導を頂いた。また、東海大学の鈴木伸洋博士および沼津工業高等専門学校の後藤孝信博士には無魚粉飼料の影響を組織・生理学的に解析する新たな切り口を開いて頂いた。飼育や分析では研究室の研究員や支援職員を始めとする研究所の多くの職員や研修生・留学生と、東海大学および沼津工業高等専門学校の学生にご協力を頂いた。直接研究には関与しないまでも私を励まして頂いた方を含め、関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) Tacon AGJ, Metian M. Global overview on the use of fish

- meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. *Aquaculture* 2008; **285**: 146-158.
- 2) 2007年水産油脂統計年鑑. 日本水産油脂協会, 東京, 2008.
 - 3) Francis G, Makkar PSH, Becker K. Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish. *Aquaculture* 2001; **199**: 197-227.
 - 4) Yamamoto T, Marcouli PA, Unuma T, Akiyama T. Utilization of malt protein flour in fingerling rainbow trout diets. *Fish. Sci.* 1994; **60**: 455-460.
 - 5) 山本剛史. アミノ酸. 「改訂 魚類の栄養と飼料」(渡邊武編) 恒星社厚生閣, 東京. 2009: 69-84.
 - 6) Akiyama T, Unuma T, Yamamoto T, Marcouli P, Kishi S. Combinational use of malt protein flour and soybean meal as alternative protein sources of fish meal in fingerling rainbow trout. *Fish. Sci.* 1995; **61**: 828-832.
 - 7) Yamamoto T, Unuma T, Akiyama T. The effect of combined use of several alternative protein sources in fingerling rainbow trout diets. *Fish. Sci.* 1995; **61**: 915-920.
 - 8) Yamamoto T, Shima T, Furuita H, Suzuki N. Influence of feeding diets with and without fish meal by hand and by self-feeders on feed intake, growth and nutrient utilization of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 2002; **214**: 289-305.
 - 9) Yamamoto T, Shima T, Furuita H. Antagonistic effects of branched-chain amino acids induced by excess protein-bound leucine in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 2004; **232**: 539-550.
 - 10) Yamamoto T, Akimoto A, Kishi S, Unuma T, Akiyama T. Apparent and true availabilities of amino acids from several protein sources for fingerling rainbow trout, common carp, and red sea bream. *Fish. Sci.* 1998; **64**: 448-458.
 - 11) Yamamoto T, Unuma T, Akiyama T. Postprandial changes in plasma free amino acid concentrations of rainbow trout fed diets containing different protein sources. *Fish. Sci.* 1998; **64**: 474-481.
 - 12) Yamamoto T, Shima T, Unuma T, Shiraishi M, Akiyama T, Tabata M. Voluntary intake of diets with varying digestible energy contents and energy sources, by juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, using self-feeders. *Fish. Sci.* 2000; **66**: 528-534.
 - 13) Yamamoto T, Konishi K, Shima T, Furuita H, Suzuki N, Tabata M. Influence of dietary fat and carbohydrate levels on growth and body composition of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* under self-feeding conditions. *Fish. Sci.* 2001; **67**: 221-227.
 - 14) Yamamoto T, Shima T, Furuita H, Suzuki N. Influence of dietary fat level and whole body adiposity on voluntary energy intake by juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) under self-feeding conditions. *Aquacult. Res.* 2002; **33**: 715-723.
 - 15) Yamamoto T, Shima T, Furuita H, Shiraishi M, Sánchez Vázquez FJ, Tabata M. Self-selection of diets with different amino acid profiles by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 2000; **187**: 375-386.
 - 16) Yamamoto T, Shima T, Furuita H, Suzuki N, Sánchez Vázquez FJ, Tabata M. Self-selection and feed consumption of diets with a complete amino acid composition and a composition deficient in either methionine or lysine by rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquacult. Res.* 2001; **32 Suppl. 1**: 83-91.
 - 17) 山本剛史, 鞍本裕子, 古板博文, 鈴木伸洋, 神原 淳. 大豆油粕およびコーングルテンミール主体ニジマス稚魚用無魚粉飼料の有効性. 水産増殖 2003; **51**: 211-217.
 - 18) 示野貞夫, Ruchimat T, 松本将哉, 宇川正治. プリ稚魚飼料に対する含脂大豆の配合. 日水誌 1997; **63**: 70-76.
 - 19) 鈴木伸洋, 山本剛史. 大豆油粕無魚粉飼料で飼育したニジマスに認められた腸管組織変性とレシチン添加の組織学的観察. 東海大学紀要海洋学部 2004; **2(3)**: 25-36.
 - 20) van den Ingh TSGAM, Krogdahl Å, Olli JJ, Hendriks HGCJM, Koninkx JGJF. Effects of soybean-containing diets on the proximal and distal intestine in Atlantic salmon (*Salmo salar*): a morphological study. *Aquaculture* 1991; **94**: 297-305.
 - 21) Yamamoto T, Suzuki N, Furuita H, Sugita T, Tanaka N, Goto T. Supplemental effect of bile salts to a soybean meal-based diet on the growth and feed utilization of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Fish. Sci.* 2007; **73**: 123-131.
 - 22) Krogdahl Å, Bakke-Mckellep AM, Røed KH, Baeverfjord G. Feeding Atlantic salmon *Salmo salar* L. soybean products: effects on disease resistance (furunculosis), and lysozyme and IgM levels in the intestinal mucosa. *Aquacult. Res.* 2000; **6**: 77-84.
 - 23) Iwashita Y, Suzuki N, Yamamoto T, Shibata J, Isokawa K, Soon AH, Ikehata Y, Furuita H, Sugita T, Goto T. Supplemental effect of cholytaurine and soybean lecithin to a soybean meal-based fish meal-free diet on the hepatic and intestinal morphology of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Fish. Sci.* 2008; **74**: 1083-1095.
 - 24) van den Ingh TSGAM, Olli JJ, Krogdahl Å. Alcohol-soluble components in soybeans cause morphological changes in the distal intestine of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *J. Fish Dis.* 1996; **19**: 47-53.
 - 25) Yamamoto T, Goto T, Kine Y, Endo Y, Kitaoka Y, Sugita T, Furuita H, Iwashita Y, Suzuki N. Effect of an alcohol extract from defatted soybean meal supplemented to a casein-based semi-purified diet on the biliary bile status and intestinal conditions in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquacult. Res.* 2008; **39**: 986-994.
 - 26) Iwashita Y, Suzuki N, Matsunari H, Sugita T, Yamamoto T. Influence of soya saponin, soya lectin and cholytaurine supplemented to a casein-based semi-purified diet on intestinal morphology and biliary bile status in fingerling rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Fish. Sci.* 2009; **75**: 1307-1315.