

13章:水産養殖動物における低脂肪 DDGS の利用

はじめに

水産養殖業は、世界で最も急速に成長している食用動物産業の 1 つである。2014 年の世界の魚摂取量は過去最高の 20 kg/人だったが、これは主に水産養殖の急速な成長によるものがある(FAO、2016)。実際、世界の水産養殖は、ヒトが消費する魚全体の約50%を賄っており、2014 年の内陸水産養殖における総生産量は 7,380 万トン、ファースト・セール価格では 1,600 億ドル以上である(FAO、2016)。水産養殖の内訳は、魚類 4980 万トン、軟体動物 1610 万トン、甲殻類 690 万トン、両生類 730 万トンであり、主な生産国は中国(4550 万トン)で、次いで、インド、ベトナム、バングラデシュ、エジプトとなっている(FAO、2016)。

魚粉は、たん白質を多く含み、その消化率も高く、アミノ酸バランスが優れ、必須脂肪酸含量、可消化エネルギー価が高く、ビタミンとミネラルの含量も多いことから、これまで、ほとんどの水産養殖動物用飼料の主原料として使用されてきた(Abdelghany、2003)。しかし、魚粉の供給量の減少に伴い価格が高騰していることから、水産養殖の持続可能性を確保するために、魚粉の一部あるいはすべてを、より安価で高品質の植物主体原料と置換することが模索されている。残念ながら、植物性原料で魚粉を置換すると、その他の栄養素、特にアミノ酸の要求量を満たさない限り、発育成績が低下する可能性がある(Mbahinzirek ら、2001; Sklan ら、2004; Gatlin ら、2007)。

ただし、2 種類以上の植物性たん白質源(例えば、DDGS と大豆粕)を組み合わせることにより、飼料中の魚粉をすべての置換することが可能である。さらに、他の陸上畜種とは異なり、多くの水産養殖動物のエネルギーおよび可消化栄養成分の要求量は十分に解明されてはおらず、水産養殖動物用飼料で使用しているほとんどの飼料原料のエネルギーおよび栄養成分の消化率は分かっていないことが、現在、他の陸上食用動物で使用されているような正確な給与プログラムの開発を難しくしてい

る。水産養殖動物用飼料におけるトウモロコシ DDGS を含む植物たん白質源の使用を制限している最大の要因の 1 つは、エネルギーとアミノ酸の組成および消化率が明確ではないことである。乳牛、肉牛、豚、家禽と比較して、水産養殖動物へのトウモロコシ DDGS の給与試験の実施例ははるかに少ないが、本章では、水産養殖動物用飼料における DDGS の使用に関して現在公表されているすべての情報を取りまとめた。

水産養殖動物における DDGS の栄養価

トウモロコシ DDGS は、高濃度のエネルギー、中程度のたん白質、高濃度の可消化リンを含んでいる。ただし、栄養成分含量とその消化率は供給源によって大きく異なっている可能性がある(栄養成分含量とバラツキの詳細については 4 章を参照のこと)。トウモロコシ DDGS のエネルギー含量は、比較的高い脂質含量(粗脂肪: 5~12%)に由来し、残りのでん粉、繊維、たん白質からの寄与は少ない。水産養殖動物における脂肪含量が高い伝統的な DDGS と低脂肪 DDGS のエネルギー消化率に関する研究は行われていないが、豚と家禽を用いたいくつかの報告では、粗脂肪含量は DDGS の可消化エネルギー価の予測因子としては不十分であるとされている。DDGS の粗脂肪含量は様々だが、DDGS 中のトウモロコシ油には、リノール酸が約 58%、リノレン酸が 8%、DHA が 0.14%含まれている。その結果、DDGS の ω (オメガ)6 系脂肪酸と ω 3 系脂肪酸の比率は高い。DDGS のでん粉含量は DDGS 製造プロセス中に酵母によるエタノール発酵の程度に応じて 1.1~7.9%(乾物)の範囲である(Anderson ら、2012)。DDGS 中のでん粉が消化可能であるか、または難消化性であるかは不明である。DDGS の平均粗繊維、ADF(酸性デタージェント繊維)、NDF(中性デタージェント繊維)、TDF(総食物繊維)含量は、それぞれ 6.6、11.1、37.6 および 31.8%であり、TDF の大部分(96.5%)は不溶性繊維である(Urriola ら、2010)。NDF 含

量は DDGS 中で最もバラツキが大きい成分の 1 つであり、これが実験室間誤差に由来するのか、供給源に由来しているのかは明確ではない。DDGS の粗繊維消化率は魚では明らかにされていないが、他の陸上単胃動物では繊維の一部が消化、発酵することにより下部消化管内で揮発性脂肪酸を産生できることが示されているが、その程度は畜種間で差がある。ティラピアやナマズなどの高繊維食を利用する魚種幼飼料では、腸内発酵がほとんどないサケやマス用飼料に比べて DDGS の配合割合が高い。

DDGS は CP(粗たん白質)含量が比較的高い(27%)にもかかわらず、リジン、メチオニン、スレオニンおよびトリプトファン含量は、魚のアミノ酸要求量に比べて比較的低い。さらに、リジン含量はすべてのアミノ酸の中で DDGS の供給源による変動が最も大きく、DDGS 製造工程における加熱の程度により、その消化率も変動する。その結果、DDGS を多量に配合する場合には、結晶アミノ酸の添加が必須となる。ニジマスにおける DDGS の見かけのアミノ酸消化率は比較的高い(トレオニンを除くすべての必須アミノ酸で 90%を超える、Cheng and Hardy, 2004a)。Magalhães ら(2015)による最近の研究では、ヨーロッパバスズキ(European Seabass)およびオオニベ(Meagre)におけるトウモロコシ DDGS の見かけのアミノ酸消化率を報告しており、Lech and Reigh(2012)は、コバンアジ(Pompano)におけるトウモロコシ DDGS の見かけのアミノ酸消化率を報告しているが、その他の魚種におけるアミノ酸消化率は明らかになっていない。DDGS のリン含量(0.85%)は、他の植物主体原料よりも多く、フィチン態リンの多くはエタノール発酵中に分解されるため、単胃動物での利用性は高まる。ただし、魚における DDGS のリン消化率および有効率は明らかになっていない。DDGS 中のカルシウム(Ca)、塩素(Cl)、カリウム(K)などの主要ミネラル含量は魚の要求量に比べて低いため、飼料中に添加する必要がある(Hertrampf and Piedad-Pascual, 2000)。また、DDGS 中の亜鉛(Zn)、鉄(Fe)、マンガン(Mn)、銅(Cu)などの微量ミネラル含量は、通常の魚粉より低いものの、これらの微量栄養素をプレミックスの形で添加することで要求量を満たすことが出来る。

リボフラビン、ナイアシン、パントテン酸、葉酸、コリン

などのビタミンは、トウモロコシに比べて DDGS では約 3 倍多い(Hertrampf and Piedad-Pascual, 2000)。DDGS のキサントフィル含量とその生物学的利用率、魚肉の色調への影響に関するデータは数少ないが、それらのデータから、トウモロコシ DDGS のキサントフィル含量のバラツキは大きい(20~50 mg/kg)、ナマズなどの一部の魚種用飼料に配合するトウモロコシとトウモロコシ併産物の量によっては、フィレ肉への黄色の色素沈着を避けるために、キサントフィルの総含量の配合量が制限される。他の植物原料に対する DDGS の有意性の 1 つは、抗栄養因子(大豆粕におけるトリプシンインヒビター(Wilson and Poe, 1985; Shiau ら, 1987)、ナタネ粕におけるグルコシノレートとエルカ酸、綿実粕におけるゴシポール(Jauncey and Ross, 1982; Robinson, 1991))が含まれていないことであり、また、他の植物性原料よりフィチン酸塩含量が低いことである。したがって、DDGS は、抗栄養因子が含まず、エネルギー含量が比較的高いこと、可消化リン含量が高いこと等により、様々な水産養殖動物用飼料で使用する際に栄養的および経済的に魅力的な原料であると言える。

アワビ (*Haliotis discus hannai*)

アワビは、東アジア、特に中国、韓国、日本で最も商業的に重要な貝類の 1 つあり、養殖生産量は急速に増加している(Cho, 2010)が、アワビ用飼料におけるトウモロコシ DDGS の利用に関する報告はない。ただし、Choi ら(2014)は、アワビ稚貝の成長率について、飼料中の小麦と大豆粕をコメ DDGS で置換(0、15、30、45 および 60%)した場合の影響について、15 および 30%のコメ DDGS を給与した場合の増体量は、対照飼料と差がなかったが、45 または 60%のコメ DDGS を給与した場合には対照飼料に比べて増体量が低かった。育成率、殻の長さとおよび体成分組成には、コメ DDGS 給与による影響はなかった。この結果は、アワビ稚貝用飼料に最大 30%までのコメ DDGS を配合しても許容可能な発育成績と体成分組成が得られることを示しているが、トウモロコシ DDGS を用いた場合でも同様の結果が得られるか否かについては調査が必要である。

クロダイ(*Acanthopagrus schlegelii*)

クロダイは、発育速度が速いことが知られており、アジアにおいて商業的に重要な海洋魚種として種苗生産と養殖技術が確立されている。クロダイ用飼料へのトウモロコシ DDGS の利用に関する情報はないが、Rahmanら(2013)の最近の報告では、クロダイ稚魚に対するコメ DDGS の利用性について検討し、コメ DDGS は、小麦粉とCGM(コーングルテンミール)の適切な代替原料であり、24%まで配合しても最適な発育成績が得られるとしているが、トウモロコシ DDGS を用いた場合でも同様の結果が得られるか否かについては調査が必要である。

アメリカナマズ(*Channel Catsh*, *Ictalurus punctatus*)

アメリカナマズ、アメリカナマズの雑種(アメリカナマズ×ブルーキャットフィッシュ(*Blue catsh*, *I. Furcatus*))およびナマズの1種のスワイ(*Swai*, *Pangasius hypophthalmus*,)に関する13の公表論文におけるDDGSの最適配合割合と実験条件の概要を表1に示した。

ナマズへのトウモロコシDDGS給与に関する最初の研究は、1990年代初頭にTidwellら(1990)により行われた。試験には、粗脂肪含量が10%以上の伝統的な高脂肪DDGSを用いており、DDGSをトウモロコシと大豆粕の一部と置換することで0(対照)、10、20および40%配合した飼料をアメリカナマズの稚魚に11週間給与した。その結果、魚体重、育成率、飼料要求率、PER(たん白効率)には飼料間で差がなかった。同様に、Websterら(1993)は、トウモロコシおよび大豆粕と部分的に置換することによりDDGSを0(対照)、10、20および30%配合した飼料をナマズ幼魚に給与して、魚体重、育成率、飼料要求率、体成分組成、頭、皮、内臓の割合、フィレ肉の官能特性を調査し、飼料間で差がなかったと報告している。これらの試験結果は、ナマズ用飼料に対してDDGSを最大30%まで配合することが可能であり、発育や魚体の成分組成、フィレ肉の風味などには悪影響を及ぼさないことを示している。したがって、DDGSは、ほぼ30年間に

わたって、アメリカナマズ用飼料原料として受入れられてきた(Tidwellら、1990; Websterら、1991; Websterら、1993)。

その後も、Robinson and Li(2008)、Limら(2009)およびZhouら(2010)が、ナマズ用飼料原料としての高脂肪DDGSの利用に関して評価している。Robinson and Li(2008)は、大豆粕の代替えとして、綿実粕あるいはDDGSに結晶リジンを添加した場合の影響に関する2試験を実施し、DDGSを配合した飼料の増体量は対照飼料より優れていた(試験1)あるいは同等(試験2)であって、体脂肪は増加する傾向を示した。この結果は、アメリカナマズ用飼料に最大30%のDDGSを配合しても、結晶リジンを添加することで、満足出来る発育成績を得ることが出来ることを示している。Limら(2009)は、大豆粕、トウモロコシ粉およびDDGSをたん白質等量で0(対照)、10、20、30および40%配合し、リジンを添加した飼料を体重13gのナマズ幼魚に12週間給与した。その結果、発育成績および飼料要求率は飼料間で類似していたが、DDGSの給与により魚体の脂肪含量の増加と水分含量の減少が見られた。同様に、Zhouら(2010)は、大豆粕およびトウモロコシと置換することによりDDGSを30%配合した飼料をアメリカナマズの雑種に給与しても、発育、飼料要求率およびPERは良好であったと報告している。これらの研究の結果は、ナマズにおいては、発育成績や飼料要求率に悪影響を及ぼさずに、DDGSを比較的多量(30~40%)に配合できることを示している。なお、ほとんどの研究で、DDGSの配合量が多い場合に体脂肪含量の増加傾向が認められているが、フィレ肉の色調には影響がないようであった。

残念なことに、トウモロコシDDGSの水産養殖動物用飼料への利用性を評価した公表文献の大部分では、供試したDDGSの栄養成分組成に関する情報が不十分であるが、これらの研究の多くは、粗脂肪含量が10%以上の高脂肪DDGSを使用していたものと想定される。最近、Renukdasら(2014)は、低脂肪DDGSを20%配合した飼料を用いた試験を行っているが、アメリカナマズおよびアメリカナマズの雑種の発育成績や調理特性には影響を及ぼさないと報告している。

表 1. アメリカナマズ (*Ictalurus punctatus*)、アメリカナマズの雑種 (*I. punctatus* × *I. furcatus*) およびスワイ (*Pangasius hypophthalmus*) にトウモロコシ DDGS を給与した場合の発育成績と体組成に関する公表文献

| 魚体重 (開始-終了)g | DDGS % | 置換 原料 | 試験期 間(日) | 魚粉の 配合割 合% | リジン添 加量% | DDGS推 奨配合 割合% | 体成分 組成 | 引用 文献 |
|--|-----------|----------------------------------|--|------------------|-------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| アメリカナマズ (<i>Ictalurus punctatus</i>) | | | | | | | | |
| 21 - 265 | 0 - 20 | トウモロ コシ、大 豆粕 | 186 | 0 | 0.15 - 0.25 | 20 | 体幹の フィレ重 量が減少 | Renukdas et al., 2014 ¹ |
| Varied among experiments | 0 - 40 | 大豆粕 | 330 (Exp. 1) 120 (Exp. 2) 165 (Exp. 3) | 0 - 1 | 0 - 0.80 | 30 to 40 | フィレの 脂肪含量 増加 | Robinson and Li, 2012 |
| 9.1 - 80.4 | 0 - 30 | トウモロコ シ、大豆粕、 ホイトミド リングス | 56 | 5 | 0.30 | 30 | フィレの たん白質 含量減少 | Li et al., 2011 |
| 12.6 - 156.7 | 0 - 30 | トウモロコ シ、大豆粕 | 63 | 0 | 0.30 - 0.39 | 30 | フィレの 脂肪含量 増加、たん 白質含量 低下 | Li et al., 2010 |
| 86 - 491 | 0 - 30 | トウモロコ シ、大豆粕、 ホイトミド リングス | 150 | 0 | 0.10 - 0.20 | Up to 30 | 効果なし | Zhou et al., 2010a |
| 13.3 - 67.1 | 0 - 40 | トウモロコ シ、大豆粕 | 84 | 8 | 0.40 | 40 | 全魚体の脂 肪含量増加 | Lim et al., 2009 |
| 48 - 1,227 | 0 - 40 | 大豆粕、ホ イトミド リングス | 330 | 1 | 0.80 - 0.28 | 30 to 40 | フィレの 脂肪含量 増加 | Robinson and Li, 2008 |
| 33 - 226 | 0 - 30 | トウモロコ シ、大豆粕 | 110 | 8 | none | 30 | 効果なし | Webster et al., 1993 |
| 12.4 - 54.5 | 0 - 35 | トウモロコ シ、魚粉 | 84 | 0 | 0 - 0.4 | 35 | - | Webster et al., 1992 |
| 10 - 79.3 | 0 - 70 | トウモロコ シ、大豆粕 | 84 | 10 | 0 - 0.4 | 35/70 | 全魚体たん 白質含量 減少、脂 肪含量 増加 | Webster et al., 1991 |
| 1.5 - 17.3 | 0 - 40 | トウモロコ シ、大豆粕 | 77 | 8 | none | 40 | - | Tidwell et al., 1990 |
| アメリカナマズの雑種 (<i>I. punctatus</i> × <i>I. furcatus</i>) | | | | | | | | |
| 47 - 703 | 0 - 20 | トウモロコ シ、大豆粕 | 186 | 0 | 0.15 - 0.25 | 20 | 効果なし | Renukdas et al., 2014 ¹ |
| 1.2 - 8.7 | 0 - 30 | トウモロコ シ、大豆粕、 ホイトミド リングス | 56 | 0 | 0.2 | 30 | - | Zhou et al., 2010b |
| スワイ (<i>Pangasius hypophthalmus</i>) | | | | | | | | |
| 40 - 500 | 0 - 15 | トウモロコ シ、フスマ | 118 | 4.5 - 5.8 | 0 | 15 | 効果なし | U.S. Grains Council, 2015 |

1 低脂肪DDGSを使用

コイ (*Cyprinus carpio*)

コイは、アジアとヨーロッパの一部の国で養殖が行われている淡水魚である(Rahman, 2015)。様々な飼料や環境に対する適応力が高いことから、養殖生産業にとって魅力的な魚種であるが(Rahman, 2015)、コイ用飼料における DDGS の至適配合量に関する情報は少ない。U.S. Grains Council(アメリカ穀物協会)の後援によるコイ用飼料への DDGS の至適配合量の検討が、ベトナム・ホアビン省で行われており(U.S. Grains Council, 2007a)、魚体重 26~51g のコイに対して DDGS を 0(対照)、5、10 および 15% 配合した飼料を平均体重が約 200 g に達するまでの 3 か月以上給与した。その結果、増体率、飼料摂取量および育成率には各飼料間で有意差はなかったが、DDGS 10 および 15% 配合飼料では、対照および 5% 配合飼料に比べて発育速度が優れる傾向を示した。試験終了時の魚体の成分組成(水分、CP および粗脂肪)、肉の色調には、各飼料間で差がなかった。結論として、トウモロコシ DDGS は、コイの発育成績や肉質に悪影響を及ぼすことなく、最大 15% 程度配合することが出来る。

ヨーロッパスズキ (*Dicentrarchus labrax*)

ヨーロッパスズキは、地中海地域で多く養殖されている。Magalhães ら(2015)による最近の研究では、スぺ

イン産およびハンガリー産のトウモロコシ DDGS(粗脂肪含量(乾物):スペイン産 11.8%、ハンガリー産 12.8%)の見かけの消化率を測定している。2 種類の DDGS は成分組成が類似していたが、スペイン産 DDGS の乾物、エネルギーおよび CP の見かけの消化率は、ハンガリー産 DDGS より優れていた(表 2)。DDGS の供給源による栄養成分含量と消化率のバラツキは、水産養殖用飼料を精密に設計する際の可消化エネルギーと栄養成分含量、経済的な価値を把握する上で問題となる。特に肉食魚では複雑な炭水化物の消化能力が低いため、この試験で得られた乾物およびエネルギーの見かけの消化率が比較的低いのは、トウモロコシ DDGS の粗繊維含量が比較的高いためであると思われる。しかし、2 種類の DDGS の CP 消化率は、対照飼料中における唯一の CP 供給源である魚粉(89~92%)と同等か優れていた。2 種類のトウモロコシ DDGS のアミノ酸消化率には差がなかったが、主なアミノ酸の消化率は一般的な魚粉に比べて劣った。トウモロコシ DDGS は脂質の優れた供給源であるが、供試した 2 種類の DDGS の粗脂肪消化率は、魚油(98.5%)より劣っていた。

ヨーロッパスズキにおいて、飼育試験は行われていないが、この試験の結果は、トウモロコシ DDGS がヨーロッパスズキ用飼料に配合されている魚粉の一部を十分に置換できることを示している。

表 2. ヨーロッパスズキにおける 2 種類のトウモロコシ DDGS のエネルギーと栄養素の見かけの消化率(%) (Magalhães ら、2015 から改編)

| | スペイン産 DDGS | ハンガリー産 DDGS |
|----------|-------------------|-------------------|
| 乾物 | 63.3 ^a | 56.7 ^a |
| エネルギー | 67.9 ^a | 63.6 ^a |
| 粗たん白質 | 96.3 ^a | 92.1 ^a |
| 粗脂肪 | 89.0 | 87.2 |
| アルギニン | 86.4 | 86.5 |
| ヒスチジン | 85.1 | 84.1 |
| イソロイシン | 83.7 | 83.0 |
| ロイシン | 89.1 | 89.0 |
| リジン | 94.8 | 99.0 |
| メチオニン | 78.3 | 83.9 |
| フェニルアラニン | 81.0 | 85.9 |
| トレオニン | 81.5 | 81.1 |
| バリン | 84.3 | 84.2 |

a-b 異符号間で有意差あり (p < 0.05)

淡水エビ (*Macrobrachium rosenbergii*)

高脂肪 DDGS を配合した淡水エビ用飼料に関する報告はいくつかある。最初の報告は Tidwell ら(1993a)のもので、DDGS を0(対照)、20 および 40% 配合した CP29% の飼料を、体重 0.66g の淡水エビに給与した結果、平均収量(833 kg/ha)、育成率(75%)、終了時体重(57 g) および飼料要求率(3.1)には飼料間で差がなかったとしている。この結果から、DDGS を最大 40% 配合した飼料を飼育密度 19,760/ha で淡水エビに給与した場合、優れた発育成績と育成率が得られることを示している。その後、Tidwell ら(1993b)は、淡水エビの稚エビ(体重 0.51 g)用飼料の魚粉と大豆粉を DDGS で部分的に置換して発育成績などに及ぼす影響を調査した。供試飼料の CP はいずれも 32% で、対照飼料中の魚粉(15%)の半量および全量を大豆粕と DDGS 40% を組み合わせる置換した。その結果、平均収量、育成率、終了時体重および飼料要求率には飼料間で差がなかった。魚粉を大豆粕と DDGS で置換すると、飼料中のグルタミン、プロリン、アラニン、ロイシンおよびフェニルアラニン含量が増加し、アスパラギン酸、グリシン、アルギニンおよびリジン含量が減少した。また、飼料中の脂肪酸組成も 16:0、18:2n-6 および 20:1n-9 が増加し、14:0、16:1n-7、18:1n9、18:3n-3 および 20:5n-3 ならびに 22:5n-3 と 22:6n-3 の比率が減少した。この結果は、温帯域の養殖池で飼育される淡水エビの飼料に使用される魚粉の一部あるいはすべてを大豆粕と DDGS で置換できることを示唆している。Coyle ら(1996)は、DDGS は体重 2 g 以上の稚エビ用飼料原料としてだけでなく、池の肥料として利用できるとしている。

オオニベ (*Meagre, Argyrosomus regius*)

オオニベは、多様化する地中海地域の水産養殖にとって最も有望な魚種と考えられている。トウモロコシ DDGS の給与が発育成績、育成率および体成分組成に及ぼす影響に関する報告はないが、最近、Magalhães ら(2015)は、スペイン産およびハンガリー産のトウモロコシ DDGS (粗脂肪含量(乾物): スペイン産 11.8%、ハンガリー産 12.8%) について、体重 79g のオオニベ幼魚における見かけの消化率を測定している。供試した 2 種の

DDGS は成分組成が類似していたが、スペイン産 DDGS の乾物、エネルギーおよび CP の見かけの消化率は、ハンガリー産 DDGS に比べて優れていた。DDGS の栄養成分含量と消化率のバラツキは、経済的価値を決定する上で重要な問題であり、水産養殖動物用飼料を配合設計する際に用いる可消化エネルギーと可消化成分含量も同様に重要な問題となる。トウモロコシ DDGS の乾物およびエネルギーの見かけの消化率が比較的低いのは、トウモロコシ DDGS では粗繊維含量が比較的高いことに由来すると考えられる。しかし、供試した 2 種類の DDGS の CP 消化率は、対照飼料中に配合した唯一の CP 源である魚粉のそれ(89~92%)と同等かそれ以上であって、両 DDGS のアミノ酸消化率には違いがなかったが、ほとんどのアミノ酸の消化率は一般的な魚粉より低かった。トウモロコシ DDGS は脂質の優れた供給源であり、一部の製品では魚粉(粗脂肪 9.2%)より粗脂肪含量が高かったが、見かけの消化率は魚油(98.5%)より低かった。この結果は、トウモロコシ DDGS がオオニベ用飼料における魚粉の一部を置換できることを示唆している。

サバヒー (*Milkfish, Chanos chanos*)

サバヒーはアジア地域における主要な水産養殖魚種であり、安価なたん白質供給源として利用されている。サバヒーは、食物連鎖の下位に位置しており、大量のたん白質を必要としないため、水産養殖生産に適した魚種の 1 つとして FAO から推奨されている。U.S. Grains Council (2007b) は、サバヒー用飼料へのトウモロコシ DDGS の最大配合量を調査する実証試験を後援している。この試験では、DDGS を0(対照)、10、20、30 および 40% 配合して窒素およびエネルギーを等量とした 5 種類の飼料をサバヒーに対して給与しているが、発育成績には飼料間で差が見られず、DDGS を最大 40% まで配合できることが示唆された。この結果は、Mamaug ら(2017)による最近の報告でも確認されている。この報告では、トウモロコシ DDGS を 0(対照)、15、25、30、35 および 45% 配合した飼料(いずれも、CP 35%、粗脂肪 6%)を 90 日間給与した場合の発育成績、魚体成分組成および小腸の形態を調査しているが、増体量、育成率、飼料摂

取量、飼料要求率および魚体成分には飼料間で差がなかった。

表 3. オオニベ (*Argyrosomus regius*) における 2 種類のトウモロコシ DDGS のエネルギーと栄養素の見かけの消化率 (%) (Magalhães ら、2015 から改編)

| | スペイン産DDGS | ハンガリー産DDGS |
|----------|-------------------|-------------------|
| 乾物 | 65.6 ^a | 57.2 ^b |
| エネルギー | 67.4 ^a | 58.0 ^b |
| 粗たん白質 | 97.9 ^a | 91.8 ^b |
| 粗脂肪 | 87.9 | 82.0 |
| アルギニン | 81.5 | 82.6 |
| ヒスチジン | 63.3 | 59.1 |
| イソロイシン | 75.0 | 76.4 |
| ロイシン | 93.0 | 88.9 |
| リジン | 85.0 | 85.6 |
| メチオニン | 66.3 | 67.0 |
| フェニルアラニン | 76.0 | 83.4 |
| トレオニン | 81.2 | 91.1 |
| バリン | 81.7 | 81.6 |

a-b異符号間で有意差あり (p < 0.05)

表 4. トウモロコシ DDGS の配合割合がサバヒー幼魚 (*Chanos chanos*) の発育成績、育成率および魚体成分組成に及ぼす影響 (Mamauag ら、2017 から改編)

| | DDGS配合割合 | | | | | |
|---------------|----------|------|------|------|------|------|
| | 0% | 15% | 25% | 30% | 35% | 45% |
| 開始時体重 g | 3.08 | 3.01 | 3.08 | 3.10 | 3.11 | 3.08 |
| 終了時体重 g | 21.0 | 18.5 | 20.1 | 22.1 | 18.1 | 19.2 |
| 増体率 % | 582 | 513 | 553 | 614 | 483 | 519 |
| 生存率 % | 82 | 81 | 85 | 82 | 85 | 83 |
| 飼料摂取量 1 | 24.2 | 25.1 | | | | .0 |
| 飼料効率 2 | 0.77 | 0.76 | 0.77 | 0.75 | 0.73 | 0.75 |
| 全魚体成分組成 | | | | | | |
| 粗たん白質 g/kg 乾物 | 732 | 684 | 696 | 694 | 690 | 736 |
| 粗脂肪 g/kg 乾物 | 157 | 194 | 183 | 164 | 153 | 142 |
| 粗灰分 g/kg 乾物 | 93 | 99 | 92 | 90 | 103 | 91 |

1 飼料摂取量 = 乾物g/尾/90日間 2 飼料効率 = 生体重 (g)/乾物摂取量

トウモロコシ DDGS の CP、粗脂肪、炭水化物および乾物の見かけの消化率は、それぞれ 91、85、75 および 52% であり、腸の形態への影響もなかった (表 4)。これらの結果は、トウモロコシ DDGS は、サバヒーの発育成績、育成率、体成分組成および腸の形態に悪影響を与えることなく、45% まで配合できることを示している。

バナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*)

世界のエビの生産量が急速に増加する中で、バナメ

イエビは主要な養殖種となっている。魚粉は、アミノ酸バランスが優れ、必須脂肪酸およびミネラル含量が比較的高いため、エビ用飼料の主要なたん白質源として通常約 20% 配合されているが、エビや他の水産養殖動物用飼料への魚粉の使用は、飼料費の増大を招き、長期的な持続可能性への懸念もあることから、エビ用飼料に使用される魚粉の一部あるいはすべてを DDGS 等の植物性飼料原料で置換する可能性が検討されている。バナメイエビへの DDGS 給与の影響を評価した 4 つの報告の概

要を表 5 に示した。

Royら(2009)による初期の報告では、DDGSを10%配合した飼料を給与した場合の増体率は、魚粉と家禽副産物およびエンドウ豆たん白を置換した場合と同等であったが、死亡率は高まる傾向を示した。その後公表された Sookying and David(2011)による報告では、大豆粕を多量に含む DDGS 10%配合飼料と魚粉 10%配合飼料の最終体重(16.3 vs 16.9g)、育成率(92.2 vs 86.6%)および飼料要求率(1.32 vs 1.35)は差がなかった。Cumminsら(2013)は、魚粉、大豆粉および小麦粉の一部と置換することによりDDGSを最大30%配合し、リジンを追加した場合、バナメイエビの発育が低下した。一方、Rhodesら(2015)は、バナメイエビへの低脂肪 DDGS(粗脂肪: 4.8%)給与による影響評価のために、飼育試験および2回の消化試験を行った。飼育試験では、魚粉を6%配合した飼料中の大豆粕と置換することによりDDGSを0、10、20、30 および 40%配合した等たん白質飼料を用いた。なお、DDGS 30%配合飼料ではリジンを0.06%添加し、

40%配合飼料では、リジン無添加と0.13%添加の2種類を調製した。その結果、DDGSの配合量にかかわらず、最終的なバイオマス、平均体重、飼料要求率および育成率には影響が認められず、DDGS 10%配合飼料では最終的なバイオマスが改善された。また、40%配合飼料へのリジン添加の有無も発育成績に影響を及ぼさなかったことから、リジンは制限アミノ酸ではないことが示唆された。低脂肪 DDGS の乾物、エネルギーおよび CP 消化率は、いずれの試験においても対照飼料より低く、低脂肪 DDGS の見かけの CP 消化率(36.9~44.7%)は Lemosら(2009)が報告している DDGS の消化率(78.5%)に比べて著しく低かった(表 6)。この違いは、DDGS の供給源、CP 含量または分析方法が原因である可能性がある。これらの結果は、低脂肪 DDGS の乾物、エネルギーおよび CP の見かけの消化率は対照飼料より低いものの、40%配合した場合でも許容可能な発育成績と育成率が得られることを示している。

表 5. トウモロコシ DDGS をバナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表文献の概要

| 体重 g (開始 - 終了) | DDGS % | 置換原料 | 試験期間 (日) | 魚粉配 合割合 % | リジン添 加量 % | DDGSの推奨配 合割合 % | 引用文献 |
|-------------------|-----------|---------------------|-------------|-----------------|-----------------|---|------------------------------------|
| 0.49 - 7.2 | 0 - 40 | 大豆粕、 コーンス ターチ | 56 | 6 | 0 - 0.13 | 40 | Rhodes et al, 2015 ¹ |
| 0.99 - 6.1 | 0 - 30 | 魚粉、大豆 粕、フスマ | 56 | 0 | 0 - 0.4 | 魚粉を含まない飼料 で大豆粉をDDGSで部 分的に置換すると成 長成績が低下 | Cummins et al., 2013 |
| 0.04 - 16.3 | 10 | ソルガム | 126 | 0 | none | 10 | Sookying and Davis, 2011 |
| 0.45 - 25 | 0 - 10 | ソルガム、 魚粉 | 63 | 0 | none | Up to 10 | Roy et al., 2009 |

1 低脂肪DDGS (粗脂肪 4.8%)

表 6. バナメイエビ (*Litopenaeus vannamei*) における低脂肪 DDGS および対照飼料の乾物、エネルギーおよび CP の見かけの消化率係数 (Rhodes and Davis, 2015 から改編)

| | 対照飼料 | 低脂肪 DDGS |
|------------|------|----------|
| 試験1 | | |
| 乾物 | 68.2 | 53.8 |
| エネルギー | 74.5 | 55.7 |
| 粗たん白質 (CP) | 85.7 | 36.9 |
| 試験2 | | |
| 乾物 | 73.2 | 42.4 |
| エネルギー | 78.1 | 20.9 |
| 粗たん白質 (CP) | 89.1 | 44.7 |

表 7. コバンアジ (*Trachinotus carolinus*) におけるナタネ粕、CGM および DDGS のエネルギーと CP の見かけの消化率と、必須アミノ酸の見かけの有効率 (Lech and Reigh, 2012 から改編)

| | ナタネ粕 | コーングルテンミール | DDGS |
|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 見かけの消化率 % | | | |
| エネルギー | 21.3 ^c | 57.1 ^a | 30.7 ^b |
| 粗たん白質 (CP) | 38.6 ^{ab} | 57.2 ^a | 20.6 ^b |
| 見かけの有効率 % | | | |
| アルギニン | 53.8 | 68.5 | 35.0 |
| シスチン | 30.3 | 42.5 | 23.0 |
| ヒスチジン | 46.9 | 58.7 | 30.0 |
| イソロイシン | 50.4 | 62.5 | 40.9 |
| ロイシン | 46.8 ^b | 70.8 ^a | 55.6 ^b |
| リジン | 48.4 | 47.9 | 50.4 |
| メチオニン | 91.9 | 84.9 | 91.5 |
| フェニルアラニン | 54.2 | 70.9 | 55.5 |
| トレオニン | 44.6 | 56.9 | 37.6 |
| バリン | 48.1 | 64.7 | 50.4 |

a - c 異符号間で有意差あり (p < 0.05).

コバンアジ (*Pompano*, *Trachinotus carolinus*)

コバンアジの養殖は、長年に渡って関心がもたれていたが、最近まで栄養要求量に関する報告はわずかしかなかった (Lazo ら、1998; Weirich ら、2006; Williams、2008 ; Riche、2009; Gonzalez-Felix ら、2010; Gothreaux ら、2010; Riche and Williams、2010; Lech and Reigh、2012)。

Lech and Reigh (2012) は、トウモロコシ DDGS の CP およびエネルギーの見かけの消化率ならびにアミノ酸の見かけの有効率を測定してナタネ粕および CGM と比較している (表 7)。CGM の見かけのエネルギー消化率は

ナタネ粕および DDGS よりも高く、DDGS のエネルギー消化率はナタネ粕よりも高かった。同様に、CGM の見かけの CP 消化率は DDGS よりも高かったが、ナタネ粕の CP 消化率は CGM と有意差はなかった。さらに、ナタネ粕、CGM および DDGS のアミノ酸の見かけの有効率は、ロイシンを除いて差がなかった。CGM におけるロイシンの見かけの有効率は、ナタネ粕および DDGS に比べて高かった。Lech and Reigh (2012) は、飼料の各栄養成分の消化率は、飼育条件、魚体のサイズ、実験方法が類似している場合でも、報告によって異なることから、様々な魚種において、飼料原料のエネルギーと栄養成分の

消化率を推定するために推定式開発の必要があるとしている。これは、より正確な配合設計のために各飼料原料の栄養価を標準化するのに役立つものと思われる。また、実際の配合設計で使用するためのより現実的な消化率を求めるために、エネルギーと栄養成分の消化率および飼料原料の配合割合の様々な組合せに関する詳細な情報が不可欠であることも示唆している。公開されている飼料の可消化栄養成分値は、魚種毎により異なるばかりではなく、それが配合される飼料にも影響される。したがって、消化率測定の際には、対照として用いる飼料の成分組成をも考慮する必要がある。

ニジマス (*Oncorhynchus mykiss*)

ニジマスなどの肉食魚用の飼料には魚粉を大量に(30~50%)配合する必要があるが、魚粉価格の高騰に伴って、DDGSなどの代替たん白源の評価が行われ、魚粉の一部を置換するようになってきている。トウモロコシ DDGS はサケ科の魚では消化しにくい非貯蔵性多糖類が比較的多量に含まれており、可消化アミノ酸のバランスが悪いため給与飼料の栄養素の吸収が制限される可能性があると考えられていた。しかし、いくつかの報告は、トウモロコシ DDGS がニジマス用飼料における貴重な飼料原料であることを示している(表 8)。Cheng ら(2003)および Cheng and Hardy(2004a, b)らによる初期の研究では、DDGS を 15~22.5%配合してもリジンとメチオニンのいずれかを添加することで、体成分組成への影響を最小限に抑え、または、許容できる発育成績が得られることを示している。Cheng and Hardy(2004a)は、DDGS の CP とアミノ酸の見かけの消化率が高いことを示す未公表のデータがあるとしている(CP= 90.4%、スレオニンを除く必須アミノ酸= 90%以上、システイン以外の非必須アミノ酸= 86%以上)が、ニジマス用飼料に DDGS を配合する場合の制限因子の1つは、魚粉に比べてリジンとメチオニンの含量が比較的低いことにあると指摘している。したがって、ニジマスが十分に発育するためには、DDGS 配合飼料にリジンとメチオニンを添加する必要がある。これを実証するために、Cheng and Hardy(2004a)は、6週間の給与試験を行って、DDGS 配合量(0、7.5、15 および 22.5%)と、リジンとメチオニン添加の有無

が体重 50 g のニジマスの発育成績に及ぼす影響を調査している。すべての供試魚の育成率は 100%であり、DDGS を 15%配合した飼料、または CP およびエネルギー換算で魚粉の 50%を DDGS で置換した飼料は、魚粉を用いた飼料と同等の発育および飼料要求率を示した。

この結果は、リジンとメチオニンの添加を行わずに DDGS を 15%まで配合するか、魚粉の 50%量まで置換することで十分な発育成績が得られること、DDGS は 22.5%まで配合可能であり、リジンおよびメチオニンを添加すれば、魚粉の 75%量までを置換することができることを示している。さらに、Cheng ら(2003)は、大豆粕、DDGS および 1.65 g/kg の MHA(メチオニンヒドロキシルアナログ)を用いて、魚粉の 50%量を置換した飼料を体重 50g のニジマスに給与した場合、増体量、飼料要求率ならびにたん白質及びリンの蓄積量が大幅に改善されたと報告している。

Cheng and Hardy(2004b)は、DDGS の栄養成分の見かけの消化率と、DDGS および様々なレベルの微量ミネラルプレミックスを含むニジマス用飼料にフィターゼを添加した場合の見かけの栄養成分蓄積率への影響を調査している。DDGS を 30%配合した飼料にフィターゼを 0、300、600、900 および 1200 FTU/kg添加した場合の見かけの消化率は、乾物: 49~59%、粗脂肪: 79~89%、CP: 80~92%、総エネルギー: 51~67%、アミノ酸: 74~97%、ミネラル: 7~99%の範囲であった。DDGS を 15%配合し、リジン、メチオニンおよびフィターゼを添加した飼料に様々なレベルの微量ミネラルプレミックスを添加した場合、微量ミネラルプレミックス無添加飼料を除き、増体量、飼料要求率、育成率、体組成および栄養成分の見かけの蓄積率には差がなかった。この結果は、フィターゼが多くミネラルの放出に効果的であり、ニジマス用飼料にフィターゼを添加することで、微量ミネラル添加量を減らすことができることを示唆している。

その後、Stone ら(2005)は、ニジマス用飼料への CGM とトウモロコシ DDGS 配合の影響について検討し、飼料中の魚粉との置換率は、使用する CGM に対する DDGS の比率に依存することを明らかにしている。この報告では、CGM とトウモロコシ DDGS を組み合わせて 18% 配合することで、発育成績に影響を与えることなく魚粉の約 25%を置換出来ることを示唆している。あわせて、トウモ

ロシ DDGS と CGM を配合した飼料の加熱ペレット加工は、非加熱ペレット加工に比べて効果がないことも報告している。

ニジマス用飼料におけるトウモロコシ DDGS の利用に関する最新の報告は、Overland ら(2013)によるヒマワリ粕、ナタネ粕、エンドウ豆たん白の代替えとして DDGS の 25 または 50% 配合した場合の影響調査である。DDGS を 50% 配合した試験飼料は、魚粉と植物性たん白質原料を配合した対照飼料と、対照飼料と試験飼料を 1:1 の割合で混合した飼料 (DDGS 配合率:25%) に比べて、増体量および飼料摂取量が増加し。飼料要求率が改善され、エネルギー消化率が高まる傾向を示したが、CP、ほとんどのアミノ酸およびリンの消化率は飼料間に差はなかった。また、実際、DDGS を 50% 配合した飼料の給与により、対照飼料に比べてエネルギーとリンの蓄積量が高まり、窒素の蓄積量は、対照飼料および DDGS25% 配合飼料に比べて窒素の蓄積量が高まった。さらに、DDGS を配合した飼料を給与しても、食餌を与えても、遠位腸管重量、腸内の酵素活性、血漿代謝産物には影響

がなかった。これらの結果は、トウモロコシ DDGS を、これまで使用されていた植物主体の飼料原料と代替して使用した場合に、ニジマスに適したエネルギー、CP およびリンの供給源であることを示している。

レッドクロウ (Red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus*)

近年、オーストラリアでは淡水性ザリガニの 1 種であるレッドクロウの養殖への関心は高まっているが、現在、この種はオーストラリア以外にも、中国、メキシコ等の数か国で商業生産されている。レッドクロウは人工飼料で飼育することが出来、比較的短期間 (117 日) で急速に発育する (Thompson ら、2004)。この種は、体のサイズがエビより大きく、貯蔵品質に優れており、尾肉がロブスターのような味で風味が良いため、シーフードを好む消費者の人気を得ている。Thompson ら (2006) は、ソルガム、大豆粕、魚粉の代わりにトウモロコシ DDGS を 18.3 または 30% 配合した CP 18% または 28% の飼料を体重 5.75 g

表 8. トウモロコシ DDGS をニジマス (*Oncorhynchus mykiss*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表文献の概要

| 魚体重 (開始 - 終了) g | DDGS % | 置換原料 | 試験期間 (日) | 魚粉の配合割合 % | リジン添加量 % | DDGS の推奨配合割合 % | 体成分組成 | 引用文献 |
|-----------------|--------|----------------------------|----------|-----------|----------|---------------------|--|------------------------|
| 143-359 | 0-50 | ひまわり粕、綿実粕、エンドウ豆 | 77 | 18.9 | none | 50 | - | Overland et al., 2013 |
| 33.6-57 | 0-20 | 魚粉、小麦 | 36 | 30-40 | 0.50 | none | 20% 配合飼料給与により全魚体の粗脂肪が増加 | Barnes et al., 2012 |
| 21-158.4 | 0-30 | コーングルテンミールと組み合わせて魚粉とフスマと置換 | 84 | 0 | none | 30 | 全魚体の CP が減少し、粗脂肪が増加 | Stone et al., 2005 |
| 49.8-96.2 | 0-22.5 | コーングルテンミールと組み合わせて魚粉とフスマと置換 | 42 | 7.5-22.5 | 0-1.23 | 15/22.5 | リジン無添加の 22.5% 配合飼料給与により全魚体の粗脂肪が減少、リジン添加時には影響なし | Cheng and Hardy, 2004a |
| 20.0-78.5 | 15 | - | 70 | 15 | 0.82 | 15 | 効果なし | Cheng and Hardy, 2004b |
| 49.5-114.6 | 18.5 | 魚粉 (ニシン)、小麦、トウモロコシグルテン | 49 | 17.5 | 0-0.48 | メチオニンを添加した飼料では 18.5 | 効果なし | Cheng et al., 2003 |

の稚エビに給与して発育成績等を検討している。その結果、トウモロコシ DDGS と大豆粕を併用して魚粉と置換しても飼料要求率、育成率および体成分組成には影響を及ぼさずことはなく、DDGS はこの給与プログラムで効果的に使用されている。

サンシャインバス (Sunshine bass、*Morone chrysops* x *M. saxatilis*)

シマスズキ (Striped bass、*M. saxatilis*) とホワイトバス (*Morone*、*M. chrysops*) の雑種であるサンシャインバスは重要な食用魚であるだけでなく、米国におけるレクリエーション・フィッシングの対象魚としても最も人気があるが、ほとんどの魚種と同様に、しまスズキやその雑種へのトウモロコシ DDGS の給与に関する研究結果は少ない。

最初の研究は、Websterら(1999年)によって行われている。体重15gのサンシャインバス幼魚に対して、魚粉、トウモロコシおよび肉骨粉と置換することにより DDGS を10%配合した CP 40%飼料を8週間給与した。その結果は、DDGS を配合した飼料では、魚肉の成分組成に影響を及ぼすことなく、許容可能な発育成績が得られた。最近では、Thompsonら(2008)が、サンシャインバスの実用的な飼料原料として利用されている魚粉2試料、家禽副産物2試料、大豆粉および DDGS の乾物、CP、脂質および有機物の消化率を測定している。DDGS の CP および有機物消化率(65および17%)は大型ニシン(メンヘーデン)から調整された魚粉(86および89%)と比べて劣った。この報告で使用された DDGS の品質は明確ではないが、CP および有機物消化率が非常に低いことから、品質が劣っていた可能性がある。この結果は、他の様々な魚種用飼料にある程度の量の DDGS を配合すると満足する結果が得られたとするいくつかの研究結果とは対照的であり、優れた発育成績と栄養成分の消化性を確保するためには、高品質の DDGS のみを使用することが重要であることがわかる。

ティラピア (*Oreochromis niloticus*)

ティラピアは、世界中で最も一般的で、経済的にも重要な温水魚である。このため、水産養殖動物に対するト

ウモロコシ DDGS の給与に関する公表文献の多くはティラピアを対象としたものであり(n = 23)、表9にこれらの概要を取りまとめた。

ティラピアに対するトウモロコシ DDGS の給与に関する報告は Wuら(1994、1996、1997)によるものである。Wuら(1994)の報告では、CGM 18%または DDGS 29%を配合した CP 32%あるいは36%飼料を体重30gのティラピアに給与すると、魚粉を配合した CP 36%の市販飼料を給与したティラピアより増体量が優れた。その後の Wuら(1996)の報告では、DDGS を49%まで、CGF (コーングルテンフィード)を42%まで、CGM を22%まで配合した CP 32、36 および 40%飼料と対照飼料(CP 36%)を体重0.4gのティラピア稚魚に8週間給与した。その結果、対照飼料および DDGS 35%配合飼料における増体量が最も優れた。飼料要求率は、対照飼料(1.05)と、DDGS を35%配合した CP 40%飼料(1.13)および CGF を30%配合した CP 40%飼料(1.12)が優れていた。PER は、対照飼料(3.79)と DDGS を49%配合した CP 36%飼料(3.71)および CGF を42%配合した CP 36%飼料(3.35)が優れていた。この結果から、CP 32、36 および 40%で、DDGS を16~49%配合した飼料では、満足できる増体量、飼料要求率および PER が得られると結論している。

DDGS、CGF、CGM 等のトウモロコシ併産物を多く配合して CP が比較的低い水産養殖動物用飼料を調製する場合、アミノ酸欠乏を防ぐために結晶アミノ酸の追加が必要になることがある。特に、リジンは、発育成績への影響が大きい。Wuら(1997)は、54~92%のトウモロコシ併産物を CP 28 および 32%のリジン、トリプトファン添加使用を体重0.5gのティラピア稚魚に対して8週間給与し、リジンとトリプトファンを添加した DDGS 82%配合飼料の飼料要求率および PER は、グルテンフィード67%と全脂大豆26%を配合した飼料および CP 32%の対照飼料と差がなかったと報告している。この結果からすると、適切な量のアミノ酸を添加することにより、ティラピア幼魚用飼料中の魚粉を DDGS、CGF あるいは CGM で全量置換することが出来る。

Tidwellら(2000)によって行われたその後の研究では、淡水エビと複合養殖しているナイルティラピアの発育成績、育成率および体成分組成へのペレット加工の有無の

影響を調査した。その結果、DDGS 配合飼料をペレット加工すると、未加工の DDGS 配合飼料に比べて増体率が高まった。しかし、いずれも、市販飼料を給与した場合の体重、体長および飼料要求率は劣っていた。ペレット加工したあるいは未加工の DDGS 配合飼料における発育成績は、市販飼料を給与した場合に比べて劣っていたが、生産費は市販飼料(増体量 1 kgあたり 0.66 ドル)にたいして、大きく削減された(ペレット加工:0.37 ドル、未加工:の発育成績は 0.26ドル)。また、淡水エビの生産量は 1,449 kg/haとなり、総産量が 81%高まった。このことから、ティラピア養殖の際に DDGS を利用することで生産費の低減が図れ、かつ、淡水エビを同時に飼育することで、温帯域における養殖池の利用効率を高める可能性がある」と結論している。

Lim ら(2007)の別の研究では、DDGS を 0、10、20 および 40%配合した飼料と、DDGS 40%配合飼料にリジン添加した飼料を体重 9.4 g のティラピア幼魚に連鎖球菌暴露下で 10 週間給与した。リジン無添加の DDGS 40% 配合飼料の増体量、PER および全魚体のたん白質量は最も低かったが、リジン添加により増体量および PER が改善された。なお、DDGS 配合飼料を給与しても、連鎖球菌暴露後の累積死亡率および血液背性状の指標には影響は見られなかったことから、発育成績、体成分組成、血液・免疫学的反応、連鎖球菌感染への抵抗性に影響を及ぼすことなく、大豆粕およびトウモロコシの代替えとして DDGS を最大 20%量まで使用できると結論している。

Abo-Stateら(2009)は、大豆粕の一部あるいはすべてをトウモロコシ DDGS で置換した飼料について、フィターゼ添加の有無が体重 2 g のナイルティラピアに 70 日間給与したが、DDGS を 0、25 および 50%配合したフィターゼ添加飼料の増体率および飼料要求率は最も優れていた。

Schaefferら(2009)は、ティラピア用飼料への DDGS の利用に関する 2 試験を実施した。最初の試験では、魚粉の一部と置換することにより DDGS を 0(対照)、17.5、20、22.5、25 および 27.5%配合した飼料を体重 35 g のティラピアに給与したが、見かけの栄養成分消化率には飼料

間で差がなかった。増体率および PER は、DDGS を配合していない対照飼料が最も優れたが、DDGS 17.5%配合飼料の飼料要求率および PER も満足できる成績であった。2 番目の試験では、DDGS を 20、25 および 30%配合した飼料への生菌剤添加の有無に関する検討を行ったが、増体量、飼料要求率および PER には飼料間で差がなかった。その後、Schaeffer ら(2010)は、DDGS を 17.5 から 27.5%配合した飼料を給与した場合の発育成績への応答によるティラピア幼魚におけるより精密な至適 DDGS 配合量の検討を行なっている。その結果、魚粉を 5%含む DDGS 配合飼料では、対象とした魚粉 15%飼料に比べて増体率が劣った。DDGS 配合飼料の中では、20%配合飼料が最も発育成績が優れていた。

これらの研究の結果は、DDGS がティラピア用飼料において非常に経済的な飼料原料であり、十分量のアミノ酸を補給できる場合には、比較的高い配合率での使用が可能であることを示している。

ティラピア用飼料への DDGS の利用に関する最も有益な情報は、最近、Herath ら(2016)によって報告されている。彼らは、魚粉をトウモロコシ DDGS(52.4%)、トウモロコシたん白濃縮物(19.4%)、CGM(23.5%)および高たん白 DDG(HP-DDG; 33.2%)で置換し、L-リジン(0.4~0.8%)およびDL-メチオニン(0.3~0.4%)を添加した飼料を、体重 4.5 g の稚魚に給与した。その結果、対照飼料と DDGS 52.4%配合飼料の増体率および育成率が最も優れ、ついで、HP-DDG 33.2%配合飼料の成績が優れていた(表 10)。

飼料要求率、PER および全魚体の総アミノ酸含量は、飼料間で差がなかった。全魚体およびフィレ肉の CP 含量は、HP-DDG 配合飼料が最も高く、全魚体およびフィレ肉の粗脂質含量は、DDGS 配合飼料が最も高かった。これらの結果は、トウモロコシ DDGS はナイルティラピア成魚用飼料中の魚粉全量と置換することが出来、発育成績、育成率、飼料の利用性および全魚体およびフィレ肉の成分組成には影響を及ぼさないことを示している。

表9. トウモロコシ DDGS をナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*)、レッド・ティラピアおよびハイブリッドティラピア (*O. aureus* × *O. niloticus*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表論文概要

| 魚体重 (開始 - 終了) g | DDGS % | 置換 原料 | 試験 期間 (日) | 魚粉配 合割合 % | リジン添 加量 % | DDGSの推奨 配合割合 % | 体成分 組成 | 引用文 献 |
|--|-----------|----------------------|-----------------|-----------------|--------------|--|--|-------------------------|
| ナイルティラピア (<i>Oreochromis niloticus</i>) | | | | | | | | |
| 21 - 183 | 52.4 | 魚粉、大豆粕、家禽副産物、小麦粉、でん粉 | 168 | 0 - 10 | 0.4 | 50 | フィレ肉の色調とアミノ酸組成に影響なし、 ω 6系脂肪酸が増加 | Herath et al., 2016 |
| 6.4 - 32.0 | 17 | 大豆粕 | 56 | 0 | 0 - 1.0 | 結晶リジン無添加の際には、アミノ酸バランスを取るために高リジンのトウモロコシたん白濃縮物が使用できる | - | Nguyen and Davis, 2016 |
| 0.98 - 14.2 | 0 - 40 | トウモロコシ、大豆粕 | 84 | 11 | なし | 酵素無添加では20%、酵素添加では30% | 酵素添加した10および20%では魚体たん白が増加、40%で体脂肪増加 | Soltan et al., 2015 |
| 6.0 - 28.3 | 0 - 20 | トウモロコシ、魚粉 | 72 | 11 - 20 | なし | 16 | 効果なし | Gabr et al., 2013 |
| 6.0 - 28.3 | 0 - 20 | トウモロコシ、大豆粕 | 72 | 20 | なし | 10 | 5%以上で魚体たん白が増加し、粗脂肪および灰分が減少 | Khalil et al., 2013 |
| 27.1 - 286 | 0 - 15 | 魚粉 | 123 | 0 - 15 | なし | 15%で経済性が最も良く、11.25%で発育成績が最も良い | 全魚体たん白と灰分が減少、脂質とエネルギーが増加 | Abdelhamed et al., 2012 |
| 18.6 - 35.7 | 0 - 30 | トウモロコシ、大豆粕 | 84 | 20 | 0 - 0.6 | 30 | - | Ibrahim et al., 2012 |
| 34.9 - 67.7 | 0 - 27.5 | トウモロコシ、大豆粕 | 55 | 5 | なし | 17.5 | - | Schaeffer et al., 2010 |
| 6.7 - 11 | 0 - 40 | トウモロコシ、大豆粕 | 42 | 5 | なし | 20 | - | Schaeffer et al., 2009 |
| 3.8 - 35 | 28 | - | 82 | 10 | なし | 57~150mg/kgのフィターゼ添加でDDGS配合飼料の増体量および飼料要求率改善 | - | Tahoun et al., 2009 |
| 2 - 23 | 0 - 55 | トウモロコシ、大豆粕 | 70 | 10 | 0 - 0.4 | 28 to 55 | - | Abo-State et al., 2009 |
| 6.7 - 68.6 | 0 - 60 | トウモロコシ、大豆粕 | 84 | 8 | 0.9 | 60以上 | - | Shelby et al., 2008 |
| 9.4 - 60.5 | 0 - 40 | トウモロコシ、大豆粕 | 70 | 8 | 0 - 0.4 | 20 to 40 | 40%で全魚体たん白が減少 | Lim et al., 2007 |

表9. トウモロコシ DDGS をナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*)、レッド・ティラピアおよびハイブリッドティラピア (*O. aureus* × *O. niloticus*) に給与した場合の発育成績と体成分組成への影響を評価した公表論文概要 (続き)

| 魚体重 (開始 - 終了) g | DDGS % | 置換 原料 | 試験 期間 (日) | 魚粉配 合割合 % | リジン添 加量 % | DDGSの推 奨配合割 合 % | 体成分 組成 | 引用文 献 |
|---|-----------|---|----------------------------|-----------------|--------------|---|---|----------------------------------|
| 2.7 - 68.5 | 0 - 30 | 魚粉、大 豆粕 | 70 | 0 - 8 | なし | 30 | 効果なし | Coyle et al., 2004 |
| 26 - 120 | 0 - 100 | - | 84 | 0 | なし | - | 効果なし | Tidwell et al., 2000 |
| 0.5 - 11.4 | 0 - 82 | コーンゲ ルテン ミール、 大豆粕 | 56 | 0 | 0.25 - 0.75 | なし | - | Wu et al., 1997 |
| 0.4 - 20.9 | 0 - 49 | トウモロ コシ | 56 | 0 | なし | 35 | - | Wu et al., 1996a |
| 30 - 387 | 0 - 29 | トウモロ コシ | 196 | 0 - 6 | なし | 19 | フィレ肉 のたん白 と灰分は 対照飼料 と同等だ が脂肪含 量は減少 、香りには 差はない | Wu et al., 1996b |
| 30 - 122.4 | 19 - 29 | トウモロ コシ、大 豆粕 | 103 | 0 - 6 | なし | 29 | - | Wu et al., 1994 |
| レッドティラピア | | | | | | | | |
| 31.6 - 265.7 | 0 - 40 | 大豆粕、 米ぬか、 ホミニー フィード、 肉骨粉、 コーンゲ ルテン ミール | 120 | 0 | なし | 40以上 | - | Suprayudi et al., 2015 |
| 190 - 907 | 0 - 15 | トウモロ コシ、米 ぬか | 120 | 0 | なし | 15以上 | 効果なし | U.S. Grains Council, 2006 |
| ハイブリッドティラピア (<i>O. aureus</i> × <i>O. niloticus</i>) | | | | | | | | |
| 6.0 - 81.4 2.1 - 63.2 | 0 - 50 | 大豆粕 | 56 (試験1) 84 (試験2) | 5 | 0.0 - 0.27 | 30以上 (試験1) リジンと脂質添 加の場合50以上 (試験2) | - | Chatvijitkul et al., 2016 |
| 3.7 - 63.5 | 0 - 32 | トウモロ コシ、大 豆粕 | 70 | 8 | なし | 30 | - | Welker et al., 2014b |
| 1.5 - 6.1 | 0 - 40 | 魚粉、小 麦 | 90 | 3 | 0.4 | 40以上 | - | U.S. Grains Council, 2007a |

表 10. 様々なトウモロコシの併産物を含む飼料を給与したナイルティラピアの発育成績、育成率、たん白質利用率、全魚体およびフィレ肉の組成 (Herath ら、2016 から改編)

| 測定項目 | 対照 | DDGS | トウモロコシ たん白濃縮物 | コーングル テンミール | 高たん白 DDG |
|-------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 成長率 (SGR) % | 3.56 ^a | 3.53 ^a | 2.63 ^d | 2.75 ^c | 3.30 ^b |
| 飼料摂取量 g | 84.1 ^a | 81.2 ^a | 38.8 ^b | 40.2 ^b | 71.1 ^a |
| 飼料要求率 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.00 | 1.05 |
| 育成率 % | 100.0 ^a | 97.2 ^{ab} | 75.0 ^c | 66.6 ^c | 80.6 ^{bc} |
| たん白効率 (PER) | 3.20 | 3.06 | 2.84 | 3.10 | 2.99 |
| たん白質蓄積率 % | 49.6 ^a | 46.7 ^{ab} | 38.4 ^c | 42.0 ^{bc} | 46.2 ^{ab} |
| 全魚体 % | | | | | |
| 水分 | 69.4 | 69.7 | 71.6 | 70.9 | 68.9 |
| たん白質 | 15.5 ^b | 15.4 ^b | 13.9 ^d | 14.6 ^c | 16.7 ^a |
| 脂質 | 8.5 ^b | 10.0 ^a | 9.6 ^a | 9.8 ^a | 9.9 ^a |
| 灰分 | 6.9 ^a | 5.7 ^b | 5.0 ^d | 4.0 ^e | 5.4 ^c |
| フィレ肉 % | | | | | |
| 水分 | 78.2 | 77.2 | 78.5 | 77.9 | 76.2 |
| たん白質 | 18.8 ^b | 18.3 ^b | 18.7 ^b | 19.2 ^b | 19.8 ^a |
| 脂質 | 1.6 ^c | 3.1 ^a | 1.9 ^{bc} | 2.2 ^b | 2.4 ^b |
| 灰分 | 1.4 | 1.3 | 1.4 | 1.3 | 1.2 |

a - e 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

DDGS 給与による潜在的な健康上の利点

水産養殖動物用飼料への DDGS の利用は、優れた発育成績、育成率および体成分組成が得られるだけでなく、免疫やある種の疾病への耐性を高める可能性を示す証拠が増えている。Lim ら (2009) は、DDGS を 40% 配合した飼料を給与すると、アメリカナズにおけるエドワジェラ・イクタルリ感染症 (腸内細菌科に属するグラム陰性短桿菌の *Edwardsiella ictalur* が引き起こす) への耐性が改善されることを報告している。しかしながら、Lim ら (2007) が行ったナイルティラピアを用いた試験では、DDGS を 40% 配合した飼料は連鎖球菌に対する血液学および免疫学的反応を改善しなかった。同様に、Shelby ら (2008) は、DDGS の給与はナイルティラピアの免疫機能または耐病性に影響しなかったとしている。Aydin and Gumus (2016) は、ニジマス稚魚に対して DDGS を 30% まで配合した飼料を給与した際に、罹患魚は発生せず、血液学および生化学的な反応に影響をなかったとしている。これら、公表されているいくつかの肯定的な影響の要因となっているのは、DDGS には、全体の約 10% を占める

酵母由来の生理活性化合物 (マンナン、 β -グルカン、ヌクレオチド) による可能性が推察されている (Shurson、2018)。DDGS におけるこれらの化合物の含有量に関しては限られたデータしか公表されていないが、DDGS の β -グルカン含有量は約 21.2% と推定されている (Kim ら、2008)。Ringo ら (2012) は、酵母の β -グルカンの様々な魚種に対する給与に関する 14 の公表文献をレビューし、病原体耐性、成長性能および育成率の改善が見られることを報告している。

DDGS 配合飼料のエクストルーダー加工

繊維濃度が比較的高い DDGS の配合量が多い場合、ペレット加工を行う水産養殖動物用飼料ではペレット耐久指数を高く保つことが難しくなる。

DDGS 配合飼料のエクストルーダーとペレットの品質に影響を及ぼす最も重要な要因は、ダイの形状、温度、含水率、スクリーンの速度であると推察している。ペレットの耐久性や単位密度の向上には、各種結着剤の添加が効果的で、その結果、DDGS を 60% 配合した浮き餌を

特定の条件下で生産すると、単位密度値が 0.24~0.61 g/cm³、ペレット耐久性が 96~98%の範囲の製品を製造することが出来る(Chevanan ら、2007; 2009)。DDGS を含む水産養殖動物用飼料のペレット加工に関する包括的なレビューは 16 章で詳述する。

結論

水産養殖動物用飼料で使用されている魚粉の代替えとして植物主体原料を使用するには、世界の水産養殖産業からは大きな関心を寄せられており、その結果、水産養殖動物用飼料へのトウモロコシ DDGS の使用量が増加している。様々な水産養殖動物用飼料への DDGS の至適配合割合に関する研究は限られているが、最近の研究では、十分な発育成績、育成率および肉質を達成しつつ、飼料のコストを大幅に削減できることが示されている。DDGS の配合量は、一般に繊維の使用能力が高い種ほど高いが、置換する原料の種類や、他のたん白質原料(例えば魚粉)の量によって異なる。DDGS は、CP 含量が適度に高いにもかかわらず、可消化リジン含量が比較的低いことから、DDGS の配合割合が高い場合

には、可消化アミノ酸の要求量を充足させるためにリジン、メチオニンおよびその他のアミノ酸の添加が必要になる場合がある。高たん白質の水産養殖動物用飼料では、アミノ酸添加が適切に行われなかった場合には、DDGS の配合量が制限される可能性がある。DDGS の脂質含量が比較的高いと、一部の魚種では全魚体の粗脂肪含量が増加する可能性があるが、DDGS に含まれているトウモロコシ油は DHA が比較的低く、EPA を含んでいないため、魚油を添加することで、十分な必須脂肪酸を担保することができる。水産養殖動物用飼料において DDGS を使用する他の利点は、利用可能なリンの含量が比較的高いため、リンの排泄が減少することであり、抗栄養因子についての懸念はなく、免疫学的利益をもたらす可能性がある。加工条件を適切に保てば、高品質のペレットを製造することが出来る。公表されている文献のデータに基づいて、様々な水産養殖動物種における DDGS の最大配合量を表 11 に示した。これらの何報かでは、評価に用いた DDGS の品質と栄養組成の詳細が示されているが、特に配合割合が高い場合には、栄養成分の消化率を高く保つために色調が明るい、黄金色の DDGS は、使用する必要がある。

表 11. 様々な水産養殖魚種における DDGS の最大配合割合

| 魚種 | DDGSの最大配合割合 (%) |
|----------------|------------------|
| チャンネルキャットフィッシュ | 30~40 (+ 結晶アミノ酸) |
| コイ | 15 |
| 淡水エビ | 40 |
| サバヒー | 45 |
| バナメイエビ | 40 (+ 結晶アミノ酸) |
| ニジマス | 50 |
| レッドクロウ | 30 |
| サンシャインバス | 10 |
| ティラピア | 50 (+ 結晶アミノ酸) |

引用文献

Abdelghany, A.E. 2003. Partial and complete replacement of fish meal with gambusia meal in diets for red tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. mossambicus*. *Aquacult. Nutr.* 9:145-154.

Abdelhamid, A.M., A.A. El-Sheblly, and A.S.I. Sultan. 2012. Effect of dietary graded levels of substituting distillers dried grains with solubles instead of fish meal in tilapia diet. https://www.academia.edu/15415389/EFFECT_OF_DIETARY_GRADED_LEVEL_OF_SUBSTITUTING_DISTILLERS_DRIED_GRA

INS_WITH_SOLUBLES_INSTEAD_OF_FISH_MEAL_IN_TILAPIA_DIET

- Abo-State, H.A., A.M. Tahoun, and Y.A. Hammouda. 2009. Effect of replacement of soybean meal by DDGS combined with commercial phytase on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings growth performance and feed utilization. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 5:473-479.
- Anderson, P.V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. Z. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242-1254.
- Aydin, B. and E. Gumus. 2016. Effects of partial replacement of fish meal by DDGS on blood hematological and biochemical parameters of rainbow trout. *Proc. VII International Scientific Agriculture Symposium – Agrosym 2016, October, 2016, Jahorina, Bosnia, and Herzegovina.* Pp. 2472-2476.
- Barnes, M.E., M.L. Brown, and K.A. Rosentrater. 2012. Juvenile rainbow trout responses to diets containing distillers dried grain with solubles, phytase, and amino acid supplements. *Open J. of Animal Sciences* 2:69-77.
- Chatvijitkul, S., A.A. Davis, and C. Lim. 2016. Lipid extracted distillers dried grains with solubles (LE- DDGS) as a partial replacement for soybean meal in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*) diets. *Aquacult.* 459:131-136.
- Cheng, Z.J. and R.W. Hardy. 2004a. Nutritional value of diets containing distiller's dried grain with solubles for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J. Appl. Aquacult.* 15:101-113.
- Cheng, Z.J. and R.H. Hardy. 2004b. Effects of microbial phytase supplementation in corn distiller's dried grains with solubles on nutrient digestibility and growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J. Appl. Aquacult.* 15:83-100.
- Cheng, Z.J., R.W. Hardy, and M. Blair. 2003. Effects of supplementing methionine hydroxyl analogue in soybean meal and distiller's dried grain-based diets on the performance and nutrient retention of rainbow trout [*Oncorhynchus mykiss* (Walbaum)]. *Aquaculture Research* 34:1303-1310.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Extrusion studies of aquaculture feed using dried distillers grains with solubles and whey. *Food and Bioprocess Technology* 2:177-185.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007. Twin screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles. *Cereal Chemistry* 84:428-436.
- Cho, S.H. 2010. Effect of fish meal substitution with various animal and/or plant protein sources in the diet of the abalone *Haliotis discus hannai*. *In vivo. Aquacult. Res.* 41:e587-e593.
- Choi, J., M.M. Rahman, and S-M. Lee. 2014. Inclusion of distillers dried grain as a partial replacement of wheat flour and soybean meal in the diet of juvenile abalone (*Haliotis discus hannai*). *Fish Aquat. Sci.* 17:249-253.
- Coyle, S. G.J. mengel, J.H. Tidwell, and C.D. Webster. 2004. Evaluation of growth, feed utilization and economics of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*, fed diets containing different protein sources in combination with distillers dried grains with solubles. *Aquaculture Res.* 35:1-6.
- Coyle, S., T. Najeeullah, and J. Tidwell. 1996. A preliminary evaluation of naturally occurring organisms, distiller by-products, and prepared diets as food for juvenile freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *J. Appl. Aquacult.* 6:57-66.
- Cummins, V.C., C.D. Webster, K.R. Thompson, and A. Velasquez. 2013. Replacement of fish meal with soybean meal, alone or in combination with distiller's dried grains with solubles in practical di

- ets for Pacific white shrimp, (*Litopenaeus vannamei*), grown in a clear-water culture system. J. World Aquacult. Soc. 44:775–785.
- Davis, D.A., and D. Sookying. 2009. Strategies for reducing and/or replacing fish meal in production diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. The Rising Tide, Proc. of the special session on shrimp farming, C.L. Browdy and D.E. Jory, eds. World Aquaculture 2009, World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA. Pp. 91–96.
- FAO. 2016. The state of world fisheries and aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Rome, 200 pp.
- Gabr, A.A., F.F. Khalil, and S. E.M. El-Sharkawy. 2013. Utilization of distillers dried grains with solubles in fish nutrition to partial replacement of fish meal and yellow corn by graded levels of DDGS in Nile tilapia fingerlings diets (*Oreochromis niloticus*). J. Anim. Poult. Prod. Mansoura Univ., Egypt. 4:455–467.
- Gatlin, D.M., III, F.T. Barrows, P. Brown, K. Dabroski, T.G. Gaylord, R.W. Hardy. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. Aquaculture Res. 38:551–579.
- Gonzalez-Felix, M.L., D.A. Davis, W. Rossi, and M. Perez-Velazquez. 2010. Evaluation of apparent digestibility coefficient of energy of various vegetable feed ingredients in Florida pompano, *Trachinotus carolinus*. Aquaculture 310:240–243.
- Gothreaux, C.T., R.C. Reigh, M.B. Williams, and E.J. Chesney. 2010. Amino acid availability of soybean meal for Florida pompano. North Amer. J. Aquac. 72:309–313.
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016. Potential use of corn co-products in shrimp meal-free diets for juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Fish Sci. 82:811–818.
- Hertrampf, J.W and F. Piedad-Pascual. 2000. Distillery by-products. In: Handbook on Ingredients for Aquaculture Feeds, pp. 115–124. Boston, MA. Kluwer Academic Publishers.
- Ibrahim, D., E.I. Hassanein, W. Eleraky, and M.F.A. Elgamal. 2012. The combined effect of distiller's dried corn grains with solubles and ginseng on growth performance, nutrient digestibility and some immunological parameters in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). The Global J. of Fisheries and Aqua. Res. Proc. of the 5th Global Fisheries and Aqua. Research Conf., Egypt, Vol. No. 5:299–314.
- Jauncey, K., and B. Ross. 1982. A guide to tilapia feeds and feeding. University of Stirling, Institute for Aquaculture, Stirling, UK.
- Khalil, F.F., A.A. Gabr, and S. E.M. El-Sharkawy. 2013. Utilization of distillers grains with solubles in shrimp nutrition: 1- replacement soybean meal and yellow corn by DDGS graded levels in diet for Nile tilapia fingerlings (*Oreochromis niloticus*). J. Anim. Poult. Prod. Mansoura Univ., Egypt. 4:149–159.
- Kim, Y. N.S. Mosier, R. Hendrickson, T. Ezeji, H. Blaschek, B. Dien, M. Cotta, B. Dale, and M.R. Landisch. 2008. Composition of corn dry-grind ethanol by-products: DDGS, wet cake, and thin stillage. Bioresour. Technol. 99:5156–5176.
- Lazo, J.P., D.A. Davis, and C.R. Arnold. 1998. The effects of dietary protein level on growth, feed efficiency and survival of juvenile Florida pompano (*Trachinotus carolinus*). Aquaculture 169:225–232.
- Lech, G.P., and R.C. Reigh. 2012. Plant products affect growth and digestive efficiency of cultured Florida pompano (*Trachinotus carolinus*) fed compounded diets. PLoS ONE 7(4): e34981. Doi:10.1371/journal.pone.0034981.
- Lemos, D., A.L. Lawrence, and A.J. Sicarri III. 2009. Prediction of apparent protein digestibility of ingredients and diets by in vitro pH-stat degree of protein hydrolysis with species-specific enzymes for juvenile Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture 295:89–98.
- Li, M.H., D.F. Oberle, and P.M. Lucas. 2011. Evaluati

- on of corn distillers dried grains with solubles and brewers yeast in diets for channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquacult. Res.* 42:1424–1430.
- Li, M.H., E.H. Robinson, D.F. Oberle, and P.M. Lucas. 2010. Effects of various corn distillers by-products on growth, feed efficiency, and body composition of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquacult. Nutr.* 16:188–193.
- Lim, C., M. Yildirim-Aksoy, and P.H. Klesius. 2009. Growth response and resistance to Edwardsiella ictaluri of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquac. Soc.* 40:182–193.
- Lim, C.E., J.C. Garcia, M. Yildirim-Askoy, P.H. Klesius, C.A. Shoemaker, and J.J. Evans. 2007. Growth response and resistance to *Streptococcus iniae* of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquacult. Soc.* 38:231–237.
- Magalhães, R., F. Coutinho, P. Pousão-Ferreira, T. Aires, A. Oliva-Teles, and H. Peres. 2015. Corn distiller's dried grains with solubles: Apparent digestibility and digestive enzymes activities in European seabass (*Dicentrarchus labrax*) and meagre (*Argyrosomus regius*). *Aquacult.* 443:90–97.
- Mamauag, R.E.P., J.A. Ragaza, and T.J. Nacionales. 2017. Nutritional evaluation of distiller's dried grains with solubles as replacement to soybean meal in diets of milkfish (*Chanos chanos*) and its effect on fish performance and intestinal morphology. *Aquacult. Nutr.* 0:1–8. <https://doi.org/10.1111/anu.12470>.
- Mbahinzirek, G.B., K. Dabrowski, K.J. Lee, D. El-Saidy, and E.R. Wisner. 2001. Growth, feed utilization and body composition of tilapia fed cottonseed meal-based diets in a recirculating system. *Aquacult. Nutr.* 7:189–200.
- Nguyen, L., and D.A. Davis. 2016. Comparison of crystalline lysine and intact lysine used as a supplement in practical diets of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 464:331–339.
- Overland, M., A. Krogdahl, G. Shurson, A. Skrede, and V. Denstadli. 2013. Evaluation of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller's dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult.* 416–417:201–208.
- Rahman, M.M. 2015. Role of common carp (*Cyprinus carpio*) in aquaculture production systems. *Front. Life Sci.* 8:399–410.
- Rahman, M.M., J. Choi, and S-M. Lee. 2013. Use of distillers dried grains as partial replacement of wheat flour and corn gluten meal in the diet of juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*). *Turkish J. Fisheries and Aquatic Sci.* 13:699–706.
- Renukdas, N. C. Engle, and R. Lochmann. 2014. Performance of alternative diets containing solvent-extracted distillers dried grains with solubles compared to traditional diets for pond-raised channel catfish, *Ictalurus punctatus*, and hybrid catfish, *Ictalurus punctatus* × *Ictalurus furcatus*. *J. World Aquac. Soc.* 45:290–300.
- Rhodes, M.A., D. Yu, Y. Zhou, and D.A. Davis. 2015. Use of lipid-extracted distillers dried grains with solubles (DDGS) in diets for Pacific white shrimp. *North Amer. J. Aquacult.* 77:539–546.
- Riche, M., and T.N. Williams. 2010. Apparent digestible protein, energy and amino acid availability of three plant proteins in Florida pompano, *Trachinotus carolinus* L., in seawater and low-salinity water. *Aqua. Nutr.* 16:223–230.
- Riche, M. 2009. Evaluation of digestible energy and protein from growth and nitrogen retention of juvenile Florida pompano, *Trachinotus carolinus*. *J. World Aquac. Soc.* 40:45–57.
- Ringo, E., R.E. Olson, J.L.G. Vecino, S. Wadsworth, and S.K. Song. 2012. Use of immunostimulants and nucleotides in aquaculture: a review. *J. Marine*

- Sci. Res. Dev. 1:104.
- Robinson, E.H., and M. H. Li. 2012. Summary of distillers grains studies for pond-raised catfish. Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, Mississippi State University Res. Rep. 24:11, 7 pp.
- Robinson, E.H. and M.H. Li. 2008. Replacement of soybean meal in channel catfish, *Ictalurus punctatus*, diets with cottonseed meal and distiller's dried grains with solubles. J. World Aquacult. Soc. 39:521–527.
- Robinson, E.H. 1991. Improvement of cottonseed meal protein with supplemental lysine in feeds for channel catfish. J. Appl. Aquacult. 1:1–14.
- Roy, L.A., A. Bordinhon, D. Sookying, D.A. Davis, T. W. Brown, and G.N. Whitis. 2009. Demonstration of alternative feeds for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low salinity waters of west Alabama. Aquacult. Res. 40:496–503.
- Schaeffer, T.W., M.L. Brown, K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Utilization of diets containing graded levels of ethanol production co-products by Nile tilapia. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 94:E348–E354.
- Schaeffer, T.W., M.L. Brown, and K.A. Rosentrater. 2009. Performance characteristics of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing graded levels of fuel-based distillers dried grains with solubles. J. Aqua. Feed Sci. Nutr. 1:78–83.
- Shiau, S.Y., J.L. Chuang, and G.L. Sun. 1987. Inclusion of soybean meal in tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) diets at two protein levels. Aquaculture 65:251–261.
- Shelby, R., C. Lim, M. Yildirim-Askoy, and P. Klesius. 2008. Effect of distillers dried grains with solubles-incorporated diets on growth, immune function and disease resistance in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquacult. Res. 39:1351–1353.
- Shurson, G.C. 2018. Review – Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: sources, characteristics, animal responses and quantification methods. Anim. Feed Sci. Technol. 235:60–76.
- Sklan, D., T. Prag, and I. Lupatsch. 2004. Apparent digestibility coefficients of feed ingredients and their prediction in diets for tilapia *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus* (*Teleostei, Chichlidae*). Aquaculture Res. 35:358–364.
- Soltan, M.A., A.A. Radwan, A.H. Gomaa, and A.M. Farag. 2015. Using distillers dried grains as an alternative protein source in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. Egypt J. Aquat. Biol. & Fish 19:23–33.
- Sookying, D., and D.A. Davis. 2011. Pond production of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed high levels of soybean meal in various combinations. Aquacult. 319:141–149.
- Stone, D.A.J., R.W. Hardy, F.T. Barrows, and Z.J. Cheng. 2005. Effects of extrusion on nutritional value of diets containing corn gluten meal and corn distiller's dried grains for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. J. Appl. Aquacult. 17:1–20.
- Suprayudi, M.A., D. Yaniharto, N. Priyoutomo, A. Kurniato, J. Ekasari, D. Jusadi, and Y. Haga. 2015. Evaluation of practical diets containing high levels of corn distillers dried grains with solubles on red tilapia floating net cage production performance. Pakistan J. Nutr. 14:708–711.
- Tahoun, A.M., H.A. Abo-State, and Y.A. Hammouda. 2009. Effect of adding commercial phytase to DGS-based diets on the performance and feed utilization of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 5:473–479.
- Thompson, K.R., S.D. Rawles, L.S. Metts, R. Smith, A. Wimsatt, A.L. Gannam, R.G. Twibell, R.B. Johnson, Y.J. Brady, and C.D. Webster. 2008. Digestibility of dry matter, protein, lipid and organic ma

- tter of two fish meals, two poultry by-product meals, soybean meal and distiller's dried grains with solubles in practical diets for sunshine bass, *Morone chrysops* × *M. saxatilis*. *J. World Aquac. Soc.* 39:352–363.
- Thompson, K.R., L.S. Metts, L.A. Muzinic, S. Dasgupta, and C.D. Webster. 2006. Effects of feeding practical diets containing various protein levels, with or without fish meal, on growth, survival, body composition and processing traits of male and female Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) grown in ponds. *Aquacult. Nutr.* 12:227–238.
- Thompson, K.R., L.A. Muzinic, L.S. Engler, S. Morton, and C.D. Webster. 2004. Effects of feeding practical diets containing various protein levels on growth, survival, body composition and processing traits of Australia red claw crayfish *Cherax quadricarinatus*, and on pond water quality. *Aquacult. Res.* 35:659–668.
- Tidwell, J.H., S.D. Coyle, A. Van Arnum, C. Weibel, and S. Harkins. 2000. Growth, survival and body composition of cage-cultured Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed pelleted and unpelleted distillers grains with solubles in polyculture with fresh water prawn, *Macrobrachium rosenbergii*. *J. World Aquacult. Soc.* 31:627–631.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, J.A. Clark, and L.R. D'Abramo. 1993a. Evaluation of distillers dried grains with solubles as an ingredient in diets for pond culture of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *J. World Aquacult. Soc.* 24:66–70.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, D.H. Yancey, and L.R. D'Abramo. 1993b. Partial and total replacement of fish meal with soybean meal and distiller's by-products in diets for pond culture of the freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Aquaculture* 118:119–130.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, and D.H. Yancey. 1990. Evaluation of distillers grains with solubles in prepared channel catfish diets. *Transactions of the Kentucky Academy of Science* 51:135–138.
- Urriola, P.E., G.C. Shurson, and H.H. Stein. 2010. Digestibility of dietary fiber in distillers coproducts fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2373–2381.
- U.S. Grains Council. 2006. Feeding trial of DDGS for Tilapia sh. Activity No. M05GX54318. U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2007a. Feeding trial of DDGS for common carp. Activity No. M06GX64322. U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2007b. The evaluation of dietary DDGS levels for milkfish (*Chanos chanos*) and hybrid tilapia (*O. aurus* × *O. nilotica*). U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2015. Effect of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS) on growth performance and fillet color of swai (*Pangasius hypophthalmus*). Summary report. Washington, DC. p. 1–23.
- Webster, C.D., L.G. Tiu, A.M. Morgan, and A.L. Gannam. 1999. Effect of partial and total replacement of fish meal on growth and body composition of sunshine bass *Morone chrysops* × *M. saxatilis* fed practical diets. *J. World Aquacult. Soc.* 30:443–453.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, L.S. Goodgame, and P.B. Johnsen. 1993. Growth, body composition and organoleptic evaluation of channel catfish fed diets containing different percentages of distiller's grains with solubles. *The Progressive Fish-Culturist* 55:95–100.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, L.S. Goodgame, D.H. Yancey, and L. Mackey. 1992. Use of soybean meal and distillers grains with solubles as partial or total replacement of fish meal in diets for channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture* 106:301–309.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, and D.H. Yancey. 1991. Evaluation of distillers grains with solubles as a

- protein source in diets for channel catfish. *Aquaculture* 96:179–190.
- Weirich, C.R., D.R. Groat, R.C. Reigh, E.J. Chesney, and R.F. Malone. 2006. Effect of feeding strategies on production characteristics and body composition of Florida pompano reared in marine recirculating systems. *North Amer. J. Aquaculture* 68:330–338.
- Welker, T.L., C. Lim, F.T. Barrows, and K. Liu. 2014a. Use of distiller's dried grains with solubles (DDGS) in rainbow trout feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 195:47–57.
- Welker, T.L., C. Lim, P. Klesius, and K. Liu. 2014b. Evaluation of distiller's dried grains with solubles from different grain sources as dietary protein for hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* (♀) × *Oreochromis aureus* (♂). *J. World Aqua. Soc.* 45:625–637.
- Williams, T.N. 2008. An assessment of alternative feed ingredients in practical diets for Florida pompano (*Trachinotus carolinus*) held in low salinity recirculating systems. Master's thesis, University of Maine, Orono, Maine, USA.
- Wilson, R.P., and W.E. Poe. 1985. Effects of feeding soybean meal with varying trypsin inhibitor activities on growth of fingerling channel catfish. *Aquaculture* 46:19–25.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, and P.B. Brown. 1997. Use of corn-derived ethanol products and synthetic lysine and tryptophan for growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *J. Agric. Food Chem.* 45:2174–2177.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, and P.B. Brown. 1996a. Effects of diets containing various levels of protein and ethanol coproducts from corn on growth of tilapia fry. *J. Agric. Food Chem.* 44:1491–1493.
- Wu, Y.V., V.K. Warner, R. Rosati, D.J. Sessa, and P.B. Brown. 1996b. Sensory evaluation and composition of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing protein-rich ethanol byproducts from corn. *J. Aquatic Food Prod. Technol.* 5:7–16.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, D.J. Sessa, and P.B. Brown. 1994. Utilization of protein-rich ethanol coproducts from corn in tilapia feed. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 71:1041–1043.
- Zhou, P., D.A. Davis, C. Lim, M. Yildirim-Askoy, P. Paz, and L.A. Roy. 2010a. Pond demonstration of production diets using high levels of distiller's dried grains with solubles with or without lysine supplementation for channel catfish. *North Amer. J. Aquacult.* 72:361–367.
- Zhou, P., W. Zhang, D.A. David, and C. Lim. 2010b. Growth response and feed utilization of juvenile hybrid catfish fed diets containing distiller's dried grains with solubles to replace a combination of soybean meal and corn meal. *North Amer. J. Aquacult.* 72:298–303.