

14章: DDGS を配合した水産養殖動物用飼料のエクストルーダ加工

はじめに

エクストルーダ加工は、水産養殖動物用飼料製造時に最も一般的に使用されている加工工程であり、飼料の効率とペレット密度を改善し、水中での安定性を高め、生産性と汎用性を向上させる (Khater ら、2014)。エクストルーダ加工は、でん粉の糊化、たん白変性、水和性、物性改善、部分的な脱水、微生物や有毒化合物の破壊も引き起こす (Khater ら、2014)。残念ながら、DDGS を配合した飼料は、でん粉含量が低く、繊維含量が高いため、エクストルーダ加工時の問題となる (Chin ら、1989)。飼料中のでん粉含量が減少すると、加工中に膨化しにくくなり、繊維含量を高めると、エクストルーダーの強度と耐久性が低下する (Chevanan ら、2007a)。

エクストルーダ加工

エクストルーダ加工は、ピストンまたはスクリューを使用して、所定の形状のオリフィスまたはダイを通して、飼料または食品材料を押し出す一連の工程である。エクストルーダ加工は水産養殖動物用飼料製造時に使用される最も一般的な加工工程であり (Khater ら、2014)、豚 (Rojas ら、2016) や家禽 (Lundblad ら、2011) 用飼料では、エネルギーおよび栄養成分の消化率が改善されるという利点もある。工程中では、流体の移動、熱と物質の移動、混合、剪断、粒子サイズの縮小、溶融、圧縮、カラメル化、可塑化、成形等が起こる (Camire、1998)。エクストルーダ加工には、従来のスチーム・ペレット加工と比べて、オンライン調整が可能で希望する物理的特性が得やすい、多くの種類の飼料製品に対応できる、排水がない、エネルギー効率が高い、乾燥あるいは粘性が高い原料から湿潤した原料まで、幅広い原料に対応できる等の利点がある (Maskan and Altan、2011)。エクストルーダーにはいくつかのタイプがあるが、一般的にはスクリューの数に基づいて一軸エクストルーダーと二軸エクストルーダーに分類される。一軸エクストルーダーは、二軸エク

ストルーダーに比べて、初期投資と運用コストが低いため、飼料業界で広く使用されている。一軸エクストルーダーは、ダイの圧力、バレル壁でのスリップおよびスクリューが充填される範囲により作動する。一方、二軸エクストルーダーは、2つのスクリューが回転する方向と2つのスクリュー間の噛み合いの範囲により作動する (Chevanan ら、2005)。一軸エクストルーダーは、金属バレル内に1本のスクリューが設置されており多くのパターンがある。一軸エクストルーダーの主要な構成要素は、フィーダー、移動、圧縮、計量工程であり、飼料または原料がホッパーに入り、スクリューの回転によって移動部分に運ばれ、以後、スクリューの幅が徐々に狭くなることで材料が圧縮され、その物理的エネルギーにより材料温度が上昇して、でん粉の糊化と凝集が起こる。材料は計量部分から供給され続けるため、圧縮・加熱された材料はダイの開口部から押し出されて射出する。二軸エクストルーダーは、一軸エクストルーダーに比べて、前処理の必要がない、セルフクリーニングを必要としない、長さ対直径比の範囲が広い、材料を混合しやすい、滞留時間が短く熱伝達が良い、幅広い水分含量の材料に対応できる等の利点がある (Harper、1989)。

水産養殖動物用飼料のエクストルーダ加工に影響する要因

エクストルーダ加工された沈降性および非沈降性飼料、スチーム・ペレット加工飼料、様々なサイズのクランブル等、様々な形態の養殖水産動物用飼料が生産されているが、スチーム・ペレット加工とエクストルーダ加工は養殖水産動物用飼料製造の際の主要な方法となっている。

多くの魚種ではペレット状の非沈降性の浮き餌を必要とするか、少なくとも浮き餌を摂取できるように訓練することができるが、エビには沈降性のペレットが必須である (Craig、2009)。スチーム・ペレット加工は、水中で急速に沈む高密度のペレットを製造するために一般的に使

用される。エクストルーダ加工は一般に浮き餌の製造に使用されており、スチーム・ペレットと比べて、幅広い水分含量の飼料を処理できる、エネルギー効率が良い、乾燥したあるいは粘性のある原料を処理できる、テクスチャーおよび味覚特性を改善できる、処理中の熱変性を最小限に抑えることが出来る、製造した飼料の水中での安定が良く水面に浮く、様々な飼料原料に対応できる等の利点がある(Chevananら、2005; Brownら、2012)。

エクストルーダ加工した水産養殖動物用飼料の生産効率と品質特性に影響を与える要因には、栄養成分(CP(粗たん白質)、粗脂肪、粗繊維、粗灰分)含量と水分含量、粒度分布、使用機器の処理能力、スクリュウの構成と回転速度、温度などがある(Chevananら、2005)。エクストルーダ加工水産養殖動物用飼料の品質を測る重要な測定値は、見かけと真のかさ密度、多孔度、水分含量、PDI(ペレット耐久性指数)、壊れにくさ、水中での安定性指数、吸水指数、浮力等であるが、これらを評価する標準的方法はない(Chevananら、2005)。高品質のエクストルーダ加工水産養殖動物用飼料の製造には、栄養成分組成が重要だが、Kannadhasanら(2011)は、CP含量がエクストルーダ加工時の飼料の品質を左右する重要な要件であることを示している。エクストルーダ加工に大きく影響する飼料原料特性は、水分含量、粒子サイズおよび化学組成である。でん粉は膨化と糊化に必要で、繊維は膨化、糊化、耐久性および水中安定性を低下させる(Brownら、2012)。高CP原料や飼料をエクストルーダ加工すると、膨化が制限され、より多孔性でテクスチャーが高い製品が得られる。脂質含量が高い飼料は、潤滑剤として機能するため、でん粉の糊化と膨化が低下する(Brownら、2012)。

DDGSを含むエクストルーダ加工水産養殖動物用飼料

エクストルーダ加工に最大の影響を与える飼料原料特性は、水分含量、粒子サイズおよび成分組成である。DDGSの成分組成は、米国のエタノール産業が生産性と収益性を高めるための技術革新を進めているために進化し続けている。DDGSの成分組成はペレットとエクストルーダ加工製品の品質に影響を与える重要な要素で

あるため、それらの供給源間におけるバラツキと部分的な油抽出の影響を理解しておく必要がある。伝統的なDDGS(Spiehsら、2002; Belyeaら、2004)は、現在生産されているトウモロコシ油の一部を抽出した低脂肪DDGS(Kerrら、2013)に比べて、粗脂肪含量、NDF(中性デタージェント繊維)およびでん粉含量が高く、CP含量が低い(表1)。ただし、これらの成分組成の変化に関わらず、他の一般的な飼料原料と比べて、DDGSはでん粉含量が非常に低く、粗脂肪およびNDF含量が比較的高いことから、DDGSの配合割合が高い飼料では、これらの成分変化がPDIに悪影響を与えるため、エクストルーダ加工が難しくなる。したがって、DDGSを配合したエクストルーダ加工飼料でより高いPDIを得るためには、粘結剤を添加する必要がある。表2には、様々な粘結剤と一般的な添加量および水産養殖動物用飼料で使用するための特性の概要を示している。

DDGSを様々な割合で配合した水産養殖動物用飼料の品質特性を評価した研究成果を表3に取りまとめた。このうち、9報では一軸エクストルーダーを使用し、5報では二軸エクストルーダーを使用している。これらの報告では、成分組成、使用した粘結剤、DDGSの配合割合、単位密度およびPDIとともに、飼料の多くの物理的および化学的特性が記されている。DDGSの配合割合が高い場合に様々な影響があるが、種々の粘結剤を添加すると単位密度とPDIが向上した。Chevananら(2009)およびRosentraterら(2009b)による報告を除き、エクストルーダ加工されたDDGS配合飼料の単位密度は1.0 g/cm³未満で、浮遊性を示した。さらに、DDGSを最大60%配合した飼料でPDIは85%を超えており、DDGSの配合量の増加に伴うPDIの減少を報告しているのはわずかに2報(Chevananら、2008およびKannadhasanら、2011)のみであった。具体的には、Chevananら(2007b)は、ホエーを粘結剤として使用したトウモロコシ、きな粉、魚粉を含む飼料にDDGSを60%まで配合しても高品質(高PDIおよび低単位密度)のペレットを製造が可能であることを示している。Kannadhasanら(2011)は、一軸エクストルーダーの様々な物理的特性に対するDDGSの配合量とCP含量、でん粉源の影響を評価し、DDGS配合量とCPを高めると、単位密度とペレットの耐久性が向上することを明らかにしている。一般的に、水分含量を高めるとPDI

が高まるが、単位密度は減少する。ダイの温度が上昇すると PDI と単位密度が低下するが、ペレットの L:D を高めると、ペレット品質評価値がわずかに向上する。したがって、DDGS の配合量が比較的高く、粘結剤(ホエーまたはでん粉)を配合した水産養殖動物用飼料では、工程中の水分含量、ダイの温度および L:D を適切に管理することで許容できる品質の製品を製造することが出来る。Hiltonet ら(1981)は、エクストルーダ加工とスチーム・ペレット加工が、飼料の耐久性、吸水率、マスの生理学的反応に及ぼす影響を評価しているが、エクストルーダ加工飼料は、スチーム・ペレット加工飼料に比べて吸水性が高く、水安定性も優れていたと報告している。

要約すると、水産養殖動物用飼料に DDGS を多く配合

することに、より大きな経済的利点があるが、PDI の低下により飼料工場での DDGS の使用が制限されることがよくある。いくつかの報告では、DDGS の配合割合と、様々な粘結剤の利用、エクストルーダーのタイプが加工製品の単位密度と PDI に及ぼす影響が評価されている。PDI 低下の原因となるエクストルーダ加工変数間の相互作用には一貫性が見られない点も数多くあるが、DDGS を配合した飼料をエクストルーダ加工すると、適切な単位密度と PDI を達成できることがいくつかの研究で示されている。様々な水産養殖動物種に対して DDGS を含む水産養殖動物用飼料の化学組成を最適化するにはさらなる研究が必要である。

表 1. 部分的な油抽出による DDGS の栄養成分の平均と範囲(乾物)

栄養成分 %	トウモロコシDDGS(粗脂肪 > 10%)	トウモロコシDDGS(粗脂肪 < 10%)
水分	11.1 (9.8-12.8) ¹	12.5 (10.0-14.5)
粗たん白質 (CP)	30.8 (28.7-33.3) ^{1,2}	31.2 (29.8-32.9)
粗脂肪	11.5 (10.2-12.6) ^{1,2}	8.0 (4.9-9.9)
NDF	41.2 (36.7-49.1) ¹	32.8 (30.5-33.9)
でん粉	5.3 (4.7-5.9) ²	2.4 (0.8-3.4)
粗灰分	5.2 (4.3-6.7) ^{1,2}	5.4 (4.9-6.1)

1 Spiehs ら(2002); 2 Belyea ら(2004); 3 Kerr ら(2013)

表 2. 水産養殖飼料のスチーム・ペレット加工時に一般的に使用されている粘結剤(Lovell, 1989 から改編)

粘結剤	添加量 %	備考
カルボキシメチルセルロース	0.5 to 2.0	粘結剤として優れているが、高価格
アルギン酸類	0.8 to 3.0	湿飼料に適しているが、効果を得るには2価または多価イオンと組み合わせる必要あり
Polymethylcarbamide	0.5 to 0.8	粘結剤として非常に優れているが、FDA未承認で、一部の魚種では嗜好性が悪い
グアガム	1.0 to 2.0	粘結剤として優れているが、高価格
ヘミセルロース	2.0 to 3.0	粘結剤としての効果は中程度だが、コストは中程度
リグニンスルホン酸	2.0 to 4.0	粘結剤として優れており、価格も中程度
ナトリウムおよびカルシウム・ベントナイト	2.0 to 3.0	有機質の粘結剤より効果が低い
糖蜜	2.0 to 3.0	粘結剤としての効果は中程度だが、栄養価がある
ホエイ	1.0 to 3.0	粘結剤としての効果は中程度だが、栄養価がある
トウモロコシ、ジャガイモ、モロコシ、米、キャッサバの糊化澱粉	10 to 20	栄養価を持つ優れたバインダーだが、多量に添加する必要がある
小麦グルテン	2.0 to 4.0	粘結剤として優れているが、高価格

表 3. エクストルーダーのタイプ、飼料組成、バインダー、押出養殖飼料の DDGS 濃度の要約

エクストルーダーのタイプ別の引用文献、魚種	飼料の組成	粘結剤	DDGS %	単位密度 g/cm ³	PDI %	
一軸エクストルーダー						
Chevannan et al. (2008)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、ビタミンミネラル (VM)プレミックス	なし	20	0.96	89	
			30	0.93	65	
			40	0.93	56	
Chevannan et al. (2009)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、VMプレミックス	ホエー	20	1.05	94	
			30	1.07	94	
			40	1.06	94	
Chevannan et al. (2007a)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、VMプレミックス	ホエー	40	0.88 – 1.03	85 – 98	
Kannadhason et al. (2011) ティラピア アメリカナマズ	きな粉、魚粉、ホエイ、VMプレミックス	キャッサバでん粉	20	0.78	82	
			30	0.88	84	
			40	0.86	86	
		コーンスターチ	20	0.90	85	
			30	0.94	76	
			40	0.91	63	
		ジャガイモでん粉	20	0.79	82	
			30	0.88	85	
			40	0.90	87	
Rosentrater et al. (2009a) ティラピア	コーンスターチ、大豆粕、魚粉、ホエー、VMプレミックス	コーンスターチ	20	1.03	71	
			25	1.01	91	
			30	1.02	70	
Kannadhason et al. (2009) ティラピア	大豆粕、魚粉、ホエー、VMプレミックス	タビオカでん粉	20	0.94	90	
			25	0.93	96	
			30	0.99	84	
Rosentrater et al. (2009b) ティラピア	大豆粕、魚粉、ホエー、VMプレミックス	ジャガイモでん粉	20	0.85	89	
			25	0.97	96	
			30	0.93	82	
Ayadi et al. (2013) ナイルティラピア	トウモロコシ、魚粉、大豆粕 (30,40,50%)、VMプレミックス	ホエー	20	0.97	94	
			30	0.89	95	
			40	0.90	95	
Ayadi et al. (2016) ナイルティラピア幼魚	大豆粕、トウモロコシ、魚粉、ホエー、VMプレミックス	アミロース 70: アミロペクチン 30	20	0.97	93	
			100%アミロペクチン	20	0.99	94
二軸エクストルーダー						
Chevannan et al. (2007b)	きな粉、トウモロコシ、魚粉、VMプレミックス	ホエー	20	0.24	98	
			40	0.34	98	
			60	0.61	97	
Kannadhason et al. (2010) ティラピア	大豆粕、トウモロコシ、魚粉、大豆油、VMプレミックス	ホエー	0	0.73	93	
			17.5	0.90	97	
			20	1.00	97	
			22.5	0.88	95	
			25	0.87	97	
			27.5	0.92	93	
Ayadi et al. (2011) ニジマス	魚粉、コーングルテンミール、小麦粉、イワシ油、セルロース、VMプレミックス	なし	0	0.93	83	
			10	0.89	91	
			20	0.89	89	
			30	0.94	88	
			40	0.97	92	
			50	0.99	95	
Fallahi et al. (2011) ナイルティラピア	大豆粕、トウモロコシ、魚粉、大豆油、VMプレミックス	ホエー	20	0.92 – 1.02	94 – 99	
Fallahi et al. (2012) イエローパーチ	高たん白DDG、魚粉、コーングルテンミール、小麦粉、油脂、結晶アミノ酸、VMプレミックス	CMC	31	0.66	99	
			上記+高たん白発酵大豆粕	31	0.60	99
			上記+大豆たん白	31	0.50	99

引用文献

- Ayadi, F.Y., K.A. Rosentrater, K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2016. Effects of amylose-to-amylopectin ratios on binding capacity of DDGS/Soy-based aquafeed blends. *J. Food Res.* 5:43–56.
- Ayadi, F.Y., P. Fallahi, K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2013. Modeling single-screw extrusion processing parameters and resulting extrudate properties of DDGS-based Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. *J. Food Res.* 2:11–28.
- Ayadi, F.Y., K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and M.L. Brown. 2011. Twin-screw extrusion processing of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feeds using various levels of corn-based distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 88:363–374.
- Belyea, R.L., K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2004. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. *Bioresource Tech.* 94:293–298.
- Brown, M.L., T.W. Schaeffer, K.A. Rosentrater, M.E. Barnes, and K. Muthukumarappan. 2012. Feeding DDGS to nsh. In: *Distillers Grains – Production, Properties, and Utilization*, K. Liu and K.A. Rosentrater (eds.), CRC Press, Boca Raton, FL.
- Camire, M.E.. 1998. Chemical changes during extrusion cooking. Recent advances. *Adv. Exp. Med. Biol.* 434:109–21.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2005. Utilization of distillers dried grains for fish feeds by extrusion technology – a review. *ASAE Annual International Meeting*, July 17–20, 2005, Tampa, FL, Paper no. 056025. 20 pp.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and J. Julson. 2007a. Effect of die dimensions on extrusion processing parameters and properties of DDGS based exudates. *Cereal Chem.* 84:389–398.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007b. Twin screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles. *Cereal Chem.* 84:428–436.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2008. Effect of DDGS, moisture content and screw speed on the physical properties of exudates in single screw extrusion. *Cereal Chem.* 85:132–139.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS. *Food Bioprocess Technol.* 3:111–120.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Extrusion studies of aquaculture feed using distillers dried grains with solubles and whey. *Food Bioprocess. Technol.* 2:177–185.
- Chin, H.K., A.M. Joseph, and T.M. Jeffrey. 1989. Properties of extruded dried distillers grains (DDG) and –our blends. *J. Food Proc. and Preserv.* 13:219–231.
- Craig, S., 2009. Understanding fish nutrition, feeds and feeding. VCE Publications, Virginia Tech. <https://www.pubs.ext.vt.edu/420/420-256/420-256.html> (accessed 6.24.17).
- Fallahi, P. K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and M.L. Brown. 2012. Twin-screw extrusion processing of vegetable-based protein feeds for yellow perch (*Perca avarescens*) containing distillers dried grains, soy protein concentrate and fermented high protein soybean meal. *J. Food Res.* 1:230–246.
- Fallahi, P. K.A. Rosentrater, K. Muthukumarappan, and M. Tulbek. 2011. Effects of conditioner steam, extruder water and screw speed on physical properties of DDGS-based extrudates in twin-screw extrusion. *ASABE Annual International Meeting*, August 7–10, 2011, Louisville, KY, paper no. 1110887, 40 pp.
- Harper, J.M. 1989. Food extruders and their applications. In: *Extrusion Cooking*, C. Mercer, P. Linko, and J.M. Harper (eds.). Amer. Assoc. Cereal chem., St. Paul, MN. Hilton, J.W., C.Y. Cho, and S.J. Slinger. 1981. Effect of extrusion processing and steam pelleting diets on pellet durability, pellet water absorption and the physiological response of rainbow trout. *Aquaculture* 25:185–194.
- Kannadhasan, S., K. Muthukumarappan, and K.A.

- Rosentrater. 2011. Effect of starch sources and protein content on extruded aquaculture feed containing DDGS. *Food Bioprocess. Technol.* 4:282–294.
- Kannadhasan, S., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Twin screw extrusion of DDGS-based aquaculture feeds. *J. World Aqua. Soc.* 41:1–15.
- Kannadhasan, S., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and tapioca starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:6–21.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Khater, E.S.G., A.H. Bahnasawy, and S.A. Ali. 2014. Physical and mechanical properties of fish feed pellets. *J. Food Process. Technol.* 5:1–6.
- Lovell, R.T. 1989. Nutrition and feeding of Fish. Van Nostrand Reinhold publisher. Lundblad, K.K., S. Issa, J.D. Hancock, K.C. Behnke, L.J. McKinney, S. Alavi, E. Prestløkken, J. Fledderus, and M. Sørensen. 2011. Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs and broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 169:208–217.
- Maskan, M., and A. Altan. 2011. *Advances in Food Extrusion Technology*. CRC Press, Boca Raton, Fla. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Rojas, O.J., E. Vinyeta, and H.H. Stein. 2016. Effects of pelleting, extrusion or extrusion and pelleting on energy and nutrient digestibility in diets containing different levels of fiber and fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:1951–1960.
- Rosentrater, K.A., K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2009a. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and corn starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:44–60.
- Rosentrater, K.A., K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2009b. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:22–38.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639–2645.
- extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and corn starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:44–60.
- Rosentrater, K.A., K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2009b. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:22–38.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639–2645.