

17章:乳牛における低脂肪 DDGS

はじめに

トウモロコシ DDGS は、泌乳中の乳牛用飼料において優れた飼料原料であり、米国で生産される DDGS (3,800 万トン) の約 30% が乳牛用飼料原料として使用されている。DG(ジスチラーズグレイン)は、乳牛、乾乳牛および後継育成牛にとって、優れたエネルギー、容易に発酵可能な繊維、たん白質、ミネラル源となっている。乳牛へのトウモロコシ DDGS の利点、制限および給与方法に関する優れた総説がいくつか公表されている(Schingoethe ら、2009; Kalscheur ら、2012a, b; Kalscheur、2013)。多くの研究成果から、TMR に DDGS を 20% 配合すると、産乳量を最大にし、最適な乳成分組成を得ることが可能であり(Schingoethe ら、2009)、糞尿中への過剰なリンの排泄量を最小限に抑えることが出来る(Schmit ら、2009)。TMR に 20% 以上の DDGS を配合した場合の懸念としては、DDGS 中の脂質には PFA(多価不飽和脂肪酸)が多く含まれていることにより、乳脂率の低下を引き起こす可能性があることである。ルーメンへの不飽和脂肪酸の負荷は、DDGS が乳脂率の低下を引き起こす最も大きな要因となるとの考え方が主流だが、唯一の原因ではない(Kalscheur、2013)。乳脂率の低下を引き起こす要因は、飼料の組成、有効繊維供給量の不足および易発酵性炭水化物供給量の増加である。実際、Kalscheur(2005)は、DDGS を含む飼料を給与した場合に乳脂率の低下が起こるのは、粗飼料の給与割合が 50% 未満または NDF(中性デタージェント繊維)が 22% 未満の場合にのみであることを明らかにしている。したがって、DDGS の含量が多い(20% 以上)飼料を給与する場合は、飼料全体の NDF の少なくとも 22% を粗飼料から供給することが望ましい。さらに、現在生産されている DDGS の大部分は、これまで利用されてきた高脂肪 DDGS(粗脂肪含量 10% 以上)と比べて粗脂肪含量が低い(5~9%)ため、DDGS 中の脂質がルーメン微生物を変化させる恐れは少なく、ルーメン微生物の環境と乳脂率の低下リスクは低くなっている。したがって、DDGS を給与する際に適切な配合設計を行えば、乳脂率の低下を招くことはない。

乳牛における DDGS の栄養成分

乳牛に対する DDGS の栄養上の利点

トウモロコシ DDGS には、乳牛用に利用されている他のたん白原料と比べて、栄養上の利点がいくつかある(Yildiz and Todorov、2014)。

1. CP(粗たん白質)含量が比較的高い(26~38%)
2. エネルギー含量が高い(NE_L(産乳に要する正味エネルギー): 2.03 Mcal/kg)
3. バイパスたん白質が多い(CP の 55%)
4. でん粉含量が少ないため、高エネルギー飼料におけるルーメンアシドーシス発症の可能性が低下する
5. 含まれている細胞壁物質はビタミンを豊富に含み、嗜好性、繊維の消化性、ルーメン微生物によるたん白質合成能を高める
6. エネルギー含量を増やし、ルーメン微生物を刺激する NDF 含量が高い
7. メチオニン含量が高く、メチオニン含量が低い飼料原料の選択幅が広がる
8. リン含量が比較的高く(0.7~0.9%)で、入手が容易で安価なリン源として利用できる
9. 抗栄養素を含まない
10. リジン含量が比較的低いにもかかわらず、大豆粕およびナタネ粕に匹敵する産乳成績が得られるため、乳たん白量に影響を与えず、リジン:メチオニン比を推奨の 3:1 に近づけることが出来る

トウモロコシ DDGS を泌乳中の乳牛用の飼料原料として使用することで、これらの栄養学的な利点のすべてを備えていることから、米国の酪農家では好んで使用されるエネルギーおよびたん白源となっている。

エネルギー

低脂肪 DDGS の反すう家畜におけるエネルギー価と栄養成分消化率に関する報告は比較的少ない。しかし、Schingoethe ら(2009)は、現在公表されているデータからトウモロコシ DDGS のエネルギー価をまとめ、平均 NE_L は 2.25 Mcal/乾物kgであると報告している。これはトウモロコシより約 10% 高く、NRC(2001)による値(1.97 Mcal/

乾物kg)よりも高い。これは、トウモロコシ DDGS の粗脂肪含量が比較的高く(5~12%)、消化率が高い NDF 含量が高い(38%)ためである。DDGS 中の繊維にはリグニンが少ないため、消化率が高い(62~71%; Birkelo ら、2004; vander Pol ら、2009)。

Nuez-Ortín and Yu (2011)は、NRCによる公表データと生物学的アプローチにより、DDGS の乳牛におけるエネルギー価を推定している(表 1)。それによると、トウモロコシ DDGS の真の可消化 CP および NFC(非繊維性炭水化物)含量は小麦 DDGS よりも低く、可消化脂肪酸と NDF 含量ははるかに多い。その結果、3 倍のメンテナンスで推定した NE_L は Schingoethe ら(2009)による報告(2.3 Mcal/乾物kg)と差がなかった。

最近、Foth ら(2015)は、泌乳中の乳牛における低脂肪 DDGS(粗脂肪含量 6.2%)のエネルギー価は、1 倍のメンテナンスで DE(可消化エネルギー)が 3.82 Mcal/乾物kg、ME(代謝エネルギー)が 3.41 Mcal/乾物kg、 NE_L は 3 倍のメンテナンスで 2.03 Mcal/乾物kgであると推定しており、これらは Schingoethe ら(2009)によって報告された高脂肪 DDGS(粗脂肪含量 10%以上)のエネルギー価より低い、NRC(2001)による NE_L 価とが差がない。要約すると、高脂肪 DDGS の NE_L 価は 2.25~2.30 Mcal/乾物kgであり、低脂肪 DDGS では約 2.0 Mcal/kgである。

DDGS の脂肪含量と脂肪酸組成

泌乳中の乳牛用飼料にトウモロコシ DDGS を使用することに関する懸念材料は、粗脂肪と不飽和脂肪酸含量

が比較的高く、乳脂率の低下につながる可能性があることである。Owens (2009a)および NASS(米国農務省農業統計局、2007)の調査では、DDGS を使っていない米国内の酪農家における、使用しない主な理由は、DDGS の粗脂肪含量が高いことである。

しかし、Kalscheur(2005)は、公表されている24報のデータを用いてメタ分析を行い、DDGSを含む飼料を給与した場合に乳脂率が低下するのは、給与飼料中の粗飼料の割合が50%未満またはNDF含量が22%未満の場合のみであることを明らかにしている。さらに、現在生産されているDDGSの大部分は、過去に使われていた高脂肪DDGS(粗脂肪含量10%以上)より粗脂肪含量が低い(5~9%)ため、DDGS中の脂質がルーメン微生物を変化させる恐れは少ない。Diaz-Royón ら(2012)は、いくつかの研究からのトウモロコシ DDGS の脂肪酸組成のデータをまとめている(表 2)が、DDGS から抽出されたトウモロコシ油に最も多く含まれているのはリノール酸(C18:2)とオレイン酸(C18:1)で、DDGS の総脂肪酸の約74%に相当する。ただし、表 2 で示した脂肪酸組成はDDGS の供給源、分析施設、分析手順などによりかなり変動する可能性がある。

DDGS 中のルーメン分解性および非分解性たん白質

Yildiz and Todorov(2014)は、これまでに公表されているトウモロコシ DDGS の小腸におけるRDP(ルーメン分

表 1. *in situ*による小麦およびトウモロコシの DDGS の真の可消化栄養成分含量とエネルギー価の比較(乾物、Nuez-Ortín and Yu、2011 から改編)

項目	小麦DDGS	トウモロコシDDGS
真の可消化粗たん白質 %	33.5	22.7
真の可消化非繊維性炭水化物 %	23.6	6.4
真の可消化脂肪酸 %	3.7	15.1
真の可消化NDF %	17.3	33.9
推定エネルギー価		
DE _{3x} kcal/kg 乾物(乳用牛)	3,470	3,791
ME _{3x} kcal/kg 乾物(乳用牛)	3,069	3,439
NE _{L3x} kcal/kg 乾物(乳用牛)	1,979	2,299
NE _m kcal/kg 乾物(肉用牛)	2,110	2,340
NE _g kcal/kg 乾物(肉用牛)	1,439	1,630

解性たん白質)と RUP(ルーメン非分解性たん白質)の消化率(dRUP)をまとめている(表 3)。トウモロコシ DDGS のルーメンにおけるたん白質の分解率と小腸における消化率に大きな変動があるのは、DDGS 製造時の乾燥温度の違いによるものと考えられる。豚および家禽においても、DDGS のアミノ酸消化率、特にリジンの消化率にも、同様に供給源の違いによるバラツキが認められる。しかし、一般的に、トウモロコシ DDGS のルーメン分解性は比較的低いことから、反すう家畜用の飼料原料としては有利である。トウモロコシ DDGS は、dRUP の優れた供給源であり、その含量は CP の 47~64%である。さらに、ほとんどのアミノ酸の小腸消化率は 93%を超えており、リジンの消化率が大豆粕(97%)より著しく低い(8%)

ことを除けば、大豆粕よりわずかに低い程度である。

Schingoethe ら(2009)と Mjoun ら(2010c)は、アミノ酸、特にリジンの含量と小腸消化率に関して、リジン含量は CP 中 3.15%であり、小腸消化率は NRC(2001)に示された値より高いことを示している。

アミノ酸消化率

高泌乳牛では、乳生産と乳たん白質合成を高いレベルで保つために、毎日大量の CP を摂取し、十二指腸に流入するアミノ酸の供給とバランスをとる必要がある。一般に、泌乳中の乳牛に高 CP 飼料を給与すると、乳たん白質の濃度がわずかに増加する。単一の飼料原料には、適切な量の RUP が含まれておらず、乳中のアミノ酸組成

表 2. トウモロコシ DDGS の脂肪酸組成 (全脂肪酸中の%) に関する研究の要約(Diaz-Royón ら、2012 から改編)

脂肪酸	Tang et al. (2011)	Ranathunga et al. (2010)	Nyoka (2010)	Owens (2009b)	Martinez-Amezcuca et al. (2004)	Anderson et al. (2006)	平均
C12:0	0.02	ND	ND	0.01	0.04	0.78	0.21
C14:0	0.07	0.42	3.95	0.38	0.09	2.45	1.23
C16:0	16.7	14.7	16.9	12.5	12.8	15.5	14.9
C16:1	0.16	0.13	2.46	0.11	0.18	ND	0.61
C18:0	2.62	1.99	2.82	1.68	2.03	2.38	2.25
C18:1	23.1	26.9	21.4	38.2	23.2	17.0	25.0
C18:2	53.7	50.7	40.2	40.3	56.3	52.5	49.0
C18:3	0.45	1.60	1.44	1.05	1.48	4.79	1.80
C20:0	1.99	0.39	0.55	0.26	0.39	1.45	0.84
C20:1	0.29	0.22	3.46	0.14	0.27	ND	0.88
C20:2	ND	0.03	0.13	0.03	0.05	ND	0.06

表 3. 乳牛小腸における DDGS のルーメン分解性たん白質(RUP) 含量と非分解性たん白質(RUP)の消化率(Yildiz and Todorov, 2014 から改編)

ルーメン分解性たん白質 (RDP) %	ルーメン非分解性たん白質(RUP)消化率 (dRUP) %	引用文献
46.0	-	Firkins et al., 1984
63.3	50.5	Carvalho et al., 2005
48.7	88.8	MacDonald et al., 2007
57.0	86.2	Kononoff et al., 2007
22.0 – 36.5	-	Kleinschmit et al., 2007a
47.0 – 64.0	-	Schingoethe et al., 2009
38.0	64.0	Cao et al., 2009
-	92.4	Mjoun et al., 2010c
43.7 – 66.9	91.9 – 92.1	Kelzer et al., 2010
45.0	-	Schingoethe et al., 2009
69.3	-	Oba et al., 2010

と乳生産のための要求量と一致する必須アミノ酸の理想的なバランスは保たれていない。その結果、一般的に入手可能な飼料原料を使用して、乳生産のためのすべての必須アミノ酸の要求量を充足する泌乳牛用飼料を設計することは困難である。

DDGS や他のトウモロコシ併産物のアミノ酸組成は、乳中のアミノ酸組成とは異なっており、特にリジン含量が低いため、近年、DDGS を含む泌乳中の乳牛用飼料へのバイパスリジンの補給に大きな関心が向けられている。現在の代謝モデルを使用する場合、飼料原料の変動性、牛間乳量の遺伝的な差異、環境条件およびそれらの相互作用のために、代謝性たん白質の飼料中でのバランスをとることは困難である。ただし、DDGS を配合した乳牛用飼料へのバイパスアミノ酸補給の効果に関していくつかの研究が行われ、乳量と組成における潜在的な利益が得られることが示唆されている。

Boucher ら(2009)は、5 試料の DDGS について、RUP 画分の小腸アミノ酸消化率を測定し、ルーメンで分解され、小腸では消化されない一定のたん白質画分の有無について検討している。その結果、DDGS には、ルーメンでは分解できず、小腸では消化できない一定のたん白質画分が含まれていなかった。したがって、この研究で得られた難消化性の値に基づいて、DDGS には、小腸では消化できないが、ルーメンで部分的に分解されたのちに小腸で消化できる、またはその両方のたん白質画分が含まれている可能性がある。

Swanepoel ら(2010a)は、バイパスリジン製品について、高泌乳牛における DMI(乾物摂取量)、消化率、乳生産および乳成分への影響を調査した。バイパスリジンを補給した飼料を給与しても、DMI、乳量、乳中たん白率および乳糖率には影響はなかったが、乳脂率と乳脂肪量は低下した。リジンを除くほとんどのアミノ酸の血漿中濃度は、バイパスリジンを給与すると低下した。これは、リジンがこれらの飼料における第一制限アミノ酸であったことを示唆しており、バイパスリジンを補給すると、他のアミノ酸の吸収と利用が改善された。ただし、バイパスリジンの補給は、乳たん白質合成に影響を及ぼさず、血漿 3-メチルヒスチジン濃度を低下させた。これは、筋肉たん白質合成量が増加したか、その分解が減少したことを示唆している。リジンは筋肉たん白質とエネルギー代謝に影

響を及ぼし、アミノ酸の摂取、代謝、吸収さらには乳生産に差をもたらした可能性があり、腸で吸収されるリジンの必要量の予測性が低下する可能性を考えると、バイパスリジンの補給は推奨できないとしている。

Swanepoel ら(2010b)による、さらなる研究では、3 種類の代謝予測モデルを比較して、乳牛用飼料で小腸に流入したたん白質のアミノ酸組成を推定し、一般的な反芻家畜におけるバイパスアミノ酸プレミックスの開発と、その補給が十分な栄養学的効果があるか否かについて検討している。その結果、乳牛においてバイパスアミノ酸プレミックスの使用効果には一貫性があるものの、どのモデル予測が正しいかを判断することは不可能であるとしている。

Robinson 等(2011)は、リジン欠乏飼料給与時のバイパスリジンの小腸への流入量および高泌乳牛の DMI、乳生産および血漿アミノ酸組成に対する影響を調査した。バイパスリジンを補給すると、泌乳中期の牛の血漿リジン濃度が上昇したが、リジン要求量を超えていることから、バイパスリジンの補給は必要がないことが示唆された。彼らは、以前実施した試験の結果に基づき、体たん白質の代謝回転がアミノ酸利用の最初の優先事項であり、乳成分の合成は、それに続いて起こると推考している。

Li ら(2012)は、小麦と小麦 DDGS ならびにトウモロコシとトウモロコシ DDGS について、*in situ*での CP のルーメン分解性、RUP のアミノ酸組成およびアミノ酸の *in vitro* 消化率を調査した。CP のルーメン分解率は、原料穀物よりも DDGS の方が低かったが、小麦 DDGS とトウモロコシ DDGS の間には差がなかった。必須アミノ酸のルーメン分解率は、トウモロコシ DDGS と比べて小麦 DDGS が高く、RUP のアミノ酸組成は、穀物と、それを原料とした DDGS の間で異なっていた。総アミノ酸および必須アミノ酸の小腸消化率は、個々のアミノ酸および飼料原料間で大きく変動したが、小麦 DDGS とトウモロコシ DDGS の間では差はなかった。これらの結果は、アミノ酸の利用性が穀物と DDGS によって大きく異なっていることを示唆している。

Paz ら(2013)は、バイパスリジン添加(60g/日)あるいは無添加の DDGS を含む飼料(0、10 または 20%)を給与し、乳量、乳組成およびアミノ酸の血漿中濃度に対す

る影響を調査している。DDGS を 10%または 20%含む飼料を給与すると、対照飼料に比べてDMIと産乳量には差がなかった。DDGS を 20%含む飼料では、乳たん白率と乳たん白量が高まったが、他の乳成分は、対照あるいは DDGS を 10%含む飼料と類似していた。DDGS を含む飼料へのバイパスリジンの補給は、産乳量や乳成分組成には影響しなかった。血漿中アルギニン、ヒスチジン、バリン濃度は低く、ロイシンとメチオニン濃度は、DDGS を 10 および 20%含む飼料では対照飼料より高かった。DDGS の量の増加に伴い、血漿中リジン濃度が低下したが、バイパスリジンの補充は、他の必須アミノ酸の血漿濃度に影響を及ぼさなかった。

その後の研究で、Paz and Kononoff(2014)は、低脂肪 DDGS を 15 または 30%含む等窒素・等カロリー飼料へのバイパスリジン補給の有無が産乳成績とアミノ酸の利用性に及ぼす影響を調査した。低脂肪 DDGS の量は、DMI、乳量、乳脂肪および乳糖率に影響を与えなかったが、低脂肪 DDGS を 30%含む飼料を給与すると、乳たん白率が低下した。ただし、低脂肪 DDGS を 30%含む飼料では、15%含む飼料に比べて、アミノ酸の排泄率が高く、バイパスリジンを給与すると乳たん白率が高まる傾向を示した。この結果は DDGS を 30%含む飼料では飼料中のリジンが不足していたことを示しているが、乳たん白量には飼料間で差はなかった。また、これらの試験結果は、供試したバイパスリジン製品の代謝性リジン量は予想より低く、これらの飼料でリジン、アルギニン、フェニルアラニンが制限アミノ酸であったことを示しており、乳牛用飼料にバイパスアミノ酸を補給することは不足しているアミノ酸の供給に役立つ可能性があるものの、これらのアミノ酸の生物学的な利用能に関する正確な情報が必要であるとしている。

Mjoun ら (2010a)は、溶剤抽出大豆粕、圧搾大豆粕、エクストруд大豆、高脂肪 DDGS、低脂肪 DDGS、高たん白 DDG およびモディファイド DDGS について、*in situ* および *in vitro* の CP およびアミノ酸のルーメン内分解率と小腸消化率を調査した。トウモロコシ DDGS の大部分のアミノ酸の小腸消化率は、リジンでは 84.6%であったが、それ以外のアミノ酸では 92%であって、大豆製品(97.3%)に比べてわずかに低かった。このことは、トウモロコシ DDGS と大豆製品との間で乳牛におけるアミノ

酸の利用性はほぼ同等であることを示している。

Mjoun ら(2010b)は、泌乳初期の乳牛に高脂肪 DDGS を 22%、または低脂肪 DDGS を 20%含む飼料を給与し、産乳成績とアミノ酸の利用性を評価した。なお、DDGS を含まない対照飼料を含め、各飼料の CP、粗脂肪、NDF および NE 含量は同一とした。その結果、体重、体重変化および BCS スコアは飼料間で類似していたが、対照飼料では、DDGS を含む飼料に比べて、BCS が高まる傾向を示した(表 4)。DMI、たん白質摂取量、正味エネルギーには差がなかった。すべての牛は、泌乳開始後 35~120 日で正のエネルギー出納を示したが、対照飼料では、エネルギー出納が高まり、DDGS を含む飼料に比べてエネルギー蓄積量が高まり、エネルギー効率が低下する傾向を示した。この結果は、対照飼料を給与した牛では、ME をエネルギー蓄積に向けて優先的に分配し、乳生産や乳成分合成に使用してはいないことを示している。飼料間で産乳量、乳脂肪と乳糖量に差がなかったが、DDGS を含む飼料を給与した牛は、乳たん白量と産乳量が多く、さらに、飼料効率および窒素効率が高くなる傾向を示した。アミノ酸の利用率は乳生産のピーク時(泌乳開始後 9 週間)に測定したが、乳腺におけるリジンの取り込み率は、対照飼料(65%)と比べて DDGS を含む飼料で高かった(76%)。しかし、リジンの乳腺への取り込み量には各飼料で類似していた(乳中 2.56 g/kg)。さらに、メチオニンの乳腺への取り込み量は、DDGS を含む飼料で増加する傾向があった。明らかなリジン欠乏状態にも関わらず、DDGS を含む飼料では乳たん白率が高まった。これらの結果は、高脂肪および低脂肪 DDGS を 20%程度含んでいる場合、エネルギーと代謝性アミノ酸の優れた供給源となることを示しており、リジン含量と生物学的利用率は、泌乳量 40 kg の乳牛における乳生産または乳たん白質合成を制限しないことを示している。

Mjoun ら(2010c)は、泌乳中期の乳牛に大豆粕と置換して低脂肪 DDGS(粗脂肪含量 3.5%)を 0、10、20 または 30%含む飼料を給与した場合の産乳量と乳成分に及ぼす影響を調査した。その結果、DDGS の量を高めても、DFI と産乳量には影響はなく、乳脂肪率が直線的に増加し、乳脂肪量も増加する傾向を示した。乳たん白量への DDGS の配合による影響はなかったが、乳たん白率は二次直線的に高まった。また、DDGS の配合により、乳

生産効率は向上したが、窒素効率には影響がなかった。乳腺からのリジンの取り込み量は DDGS の配合量と対応して直線的に増加し、メチオニンの取り込み量は直線的に低下した。これらの結果から、低脂肪 DDGS を最大 30% 含む飼料を給与すると、大豆たん白質主体の対照飼料と同様の産乳成績と栄養成分の利用効率を得られることが明らかとなった。

Pereira ら(2015)は、泌乳後期の乳牛(乳量; 21~27

kg/日)に対して、大豆粕と DDGS を置換し、バイパスリジンとメチオニンを添加した飼料を給与して、泌乳成績への影響を調査した。その結果、DDGS とバイパスリジンおよびメチオニンの組合せにより、低CPTウモロコシサイレージとライグラスサイレージ主体飼料中の大豆粕と置換しても、産乳量と乳成分組成の維持に効果的であることを示している。

表 4. 高脂肪または低脂肪 DDGS を泌乳初期の乳牛に給与した場合の産乳成績、エネルギーおよびアミノ酸の利用率と乳成分に及ぼす影響(Mjoun ら、2010a から改編)

	対照	高脂肪DDGS 22%	低脂肪DDGS 20%
(体重および状態)			
開始時体重 kg	693	682	660
終了時体重 kg	734	722	704
体重の変動 kg	0.47	0.47	0.53
BCS ¹	3.43	3.32	3.34
BCSの変化/日	0.14	0.02	0.00
(乾物、たん白質、エネルギー摂取量)			
乾物摂取量 kg/日	24.8	24.7	24.6
たん白質摂取量 kg/日	4.3	4.3	4.3
NE _I Mcal/日 ²	41.3	40.1	40.3
NE _M Mcal/日 ³	11.0	11.0	11.0
NE _L Mcal/日 ⁴	26.4	26.5	27.4
エネルギー出納 Mcal/日 ⁵	4.39	1.98	1.98
総エネルギー蓄積量 ⁶	20.7	20.0	20.1
エネルギー効率 ⁷	63.1	66.9	68.1
(産乳および効率)			
産乳量 kg/日	39.2	38.9	39.8
エネルギー補正乳量 ⁸	38.0	37.8	39.5
乳脂肪補正乳量 ⁹	35.7	35.3	37.1
飼料効率 ¹⁰	1.50	1.57	1.61
窒素効率 ¹¹	24.5	26.9	26.5
乳腺における必須アミノ酸取り込み量 g/産乳量 kg¹²			
ヒスチジン	0.80	0.91	0.98
イソロイシン	2.07	2.40	2.45
ロイシン	3.09	4.03	4.38
リジン	2.52	2.49	2.68
メチオニン	0.58	0.83	0.81
フェニルアラニン	1.14	1.39	1.58
トレオニン	1.18	1.19	1.30
トリプトファン	0.14	0.64	0.50
バリン	2.35	2.87	2.87

表 4. 高脂肪または低脂肪 DDGS を泌乳初期の乳牛に給与した場合の産乳成績、エネルギーおよびアミノ酸の利用率と乳成分に及ぼす影響(Mjoun ら、2010a から改編) (続)

	対照	高脂肪DDGS 22%	低脂肪DDGS 20%
(乳成分組成)			
乳脂肪%	3.63	3.24	3.57
乳脂肪 kg/日	1.33	1.34	1.40
乳たん白質 %	2.82	2.88	2.89
乳たん白質 kg/日	1.07	1.15	1.14
乳糖 %	4.90	4.99	4.96
乳糖 kg/日	1.94	1.94	1.96
乳固形分 %	12.3	12.0	12.4
乳固形分 kg/日	4.73	4.70	4.90
乳中尿素窒素 mg/dL	11.8	10.9	10.1
体細胞数スコア % ¹³	3.38	3.91	3.83

- 1 BCS (Body condition score) : 1 = 削瘦 ~ 5 = 肥満
- 2 NE_i : 正味エネルギー摂取量 = NE (正味エネルギー) Mcal/kg × 乾物摂取量 kg/日
- 3 NE_M : 維持に要するNE = 体重^{0.75} × 0.08 ; NRC (2001)
- 4 NE_L : 泌乳に要するNE = [産乳量 kg × (0.029 × 乳脂肪率%) + (0.0563 × 乳たん白質率%) + (0.0395 × 乳糖%) ; NRC (2001)]
- 5 エネルギー出納 : $NE_i - (NE_M + NE_L)$
- 6 総エネルギー蓄積量 : (絶食時体脂肪率 × 9.4) + (絶食時体たん白率 × 5.55); NRC (2001)
- 7 エネルギー効率 : $NE_i / NE_L × 100$
- 8 エネルギー補正乳量 : (0.327 × 産乳量 kg) + (12.95 × 乳脂肪量 kg) + (7.2 × 乳たん白量 kg)
- 9 乳脂肪4%補正乳量 : (0.4 × 産乳量 kg) + (15 × 乳脂肪量 kg)
- 10 飼料効率 : (エネルギー補正乳量 / 乾物摂取量) × 100
- 11 窒素効率 : (乳中窒素量 kg/日) / (窒素摂取量 kg/日) × 100
- 12 乳腺における必須アミノ酸取り込み量 : 動静脈差 × 乳房血漿流量
- 13 体細胞数スコア : 体細胞数の対数値

リン

リンは家畜の栄養上最も重要で、価格も高いミネラルの1つだが、過剰に給与すると排泄物中に高濃度のリンが排泄されるため、集約的な畜産における環境負荷の大きな要因と見なされている(Humer and Zebeli, 2015年)。Schmit ら(2009)は、泌乳中の乳牛用飼料中のリン濃度を適切に保てば、リン排泄量は大幅に増加しないが、乾乳牛と未経産牛用の飼料にDDGSを配合すると、排泄物を施肥した時に植物が利用できるリンの量が増加し、作物におけるリンの養分要求量を超えるとしている。DDGS中のリン含量は高く(0.65~0.95%)、反すう家畜での利用率は高い(Mjoun ら、2008)。また、高泌乳牛は、飼料中へのリンの添加が必須であるため、DDGSは、価格が高い無機リン源の一部を置換するために使用することが出来る。

過剰なリンの排泄量を最小限に抑えるために、乳牛用飼料中のリンは、牛の1日要求量に合わせるように配合する必要がある(NRC, 2001)。

高脂肪 DDGS の給与と泌乳成績および乳成分組成を評価した初期の研究成果

Schingoethe ら(2009)は、乳牛に対する高脂肪 DDGS の給与に関する多数のデータを取りまとめている。トウモロコシ DDGS は、CP が豊富(30 乾物%以上)で、RUP も豊富(CP の約55%)な優れたたん白質原料である。かつ、中程度の粗脂肪含量(5~12 乾物%)と易消化性繊維(NDF 含量約39%)がもたらす優れたエネルギー源でもある(NE_L は約2.25 Mcal/乾物kg)。

DDGSまたはWDGS(未乾燥のDGS)を給与した場合の泌乳成績には大きな差がないが、一部の報告では、WDGSを給与した場合にわずかに利点があることが示されている。

トウモロコシ DDGS は、濃厚飼料と粗飼料のいずれの場合にも部分的な代替原料として使用することが出来るが、一般的には濃厚飼料の代替原料として使用されることが多い。これは、DDGS を泌乳期の乳牛用飼料中の粗

飼料と置き換える場合、乳脂率の低下を防ぐために必要な有効繊維を十分量確保できない可能性があるためである。泌乳期の乳牛用飼料は、飼料の栄養バランスが確保できる場合、乾物ベースで 20~30%の DDGS を含むことができる。実際、いくつかの研究では、DDGS を最大 30%含む飼料を給与すると、一般的な飼料原料を含む飼料を給与した場合と比べて、産乳量は同等または増加することが示されている。DDGS は 30%(乾物)以上含むことが出来るが、ルーメンの容積が DMI と乳生産を抑制する可能性がある。DDGS 中の繊維は通常、トウモロコシなどのでん粉含量が高い飼料原料の代替物と見なされ、その結果、アシドーシスのリスクを最小限に抑えることが出来るが、必ずしも排除するわけではない。

Kalscheur(2005)は、過去に行われた乳牛への WDGS または DDGS を給与した 23 のデータについてメタ分析を行っている。これらの試験は 1982 年から 2005 年の間に公表された高脂肪 DDGS を用いている。低脂肪 DDGS の給与を含む最近の報告の概要は、後述する。WDGS および DDGS の飼料への利用量が産乳成績に及ぼす影響を評価するために、配合量は 5 つのカテゴリー(0%、4~10%、10~20%、20~30%、30%以上、乾物)に区分し、形態(WDGS および DDGS)の違いも対象とした。

DMI は、配合量および形態の両方に影響を受けた(表 5)。DDGS を給与した場合、DDGS の配合量が増加すると DMI が増加し、配合量が 20~30%の飼料を給与で最大で、DDGS を配合していない対照飼料に比べて 0.7 kg /日多かった。DDGS 配合量が 30%以上の場合の DMI は、対照飼料とほぼ同様であった。DDGS を 20~30%

含む飼料では、DMI が増加したが、WDG を含む飼料では、配合量が低い場合(4~10%および 10~20%)に最大値を示した。WDG の配合量が 20%以上の場合は DMI は減少し、30%以上の場合は対照飼料より 2.3 kg /日少なく、4~10%配合飼料より 5.1 kg /日少なかった。これらの結果は、DDGS を乳牛用飼料の最大 20%配合すると嗜好性が高まって DMI が増加することを示している。配合量がより高い場合の DMI の減少は、粗脂肪含量が高まること、WDGS では水分含量が高まることである可能性がある。

産乳量は、形態の違いによる影響は受けなかったが、WDGS または DDGS の配合量の増加に伴い曲線的な増加傾向を示した(表 5)。4~30%の DG を含む飼料の産乳量は対照飼料を給与した牛より約 0.4 kg/日多かったが大きな差ではなかった。WGDS あるいは DDGS を 30%以上配合した飼料を乳牛に給与すると、産乳量が減少する傾向があり、対照飼料に比べて産乳量が約 0.8 kg/日少なかった。ただし、WDGS を 20%以上配合した飼料では産乳量が減少しており、DMI の減少に関連している可能性が最も高い。

乳脂率は、WDGS あるいは DDGS を配合した飼料で変化したが、配合量や水分含量の影響はなかった(表 6)。この広範なデータの要約で観察された乳脂率における反応は、WGDS あるいは DDGS を多く含む飼料を給与することによる乳脂率の低下という懸念を払しょくするものである。乳脂率の低下には多くの要因が影響を与える可能性があり、ルーメンの機能を十分に維持するために飼料から十分な繊維を供給することで避けることが出来る。

表 5. WDGS と DDGS の配合量が乳牛の乾物摂取量と乳量に及ぼす影響(Kalscheur、2005)

配合割合 (乾物)	乾物摂取量 kg/日			産乳量 kg/日		
	乾燥	生	すべて	乾燥	生	すべて
0%	23.5 ^c	20.9 ^b	22.2 ^b	33.2	31.4	33.0
4 - 10%	23.6 ^{bc}	23.7 ^a	23.7 ^a	33.5	34.0	33.4
10 - 20%	23.9 ^{ab}	22.9 ^{ab}	23.4 ^{ab}	33.3	34.1	33.2
20 - 30%	24.2 ^a	21.3 ^{ab}	22.8 ^{ab}	33.6	31.6	33.5
> 30%	23.3 ^{bc}	18.6 ^c	20.9 ^c	32.2	31.6	32.2
SEM	0.8	1.3	0.8	1.5	2.6	1.4

a - b異符号間に有意差あり (p < 0.05)

表 6. WDGS と DDGS の配合量が乳牛の乳脂率およびたん白率に及ぼす影響 (Kalscheur, 2005)

配合割合	乳脂率 %	乳たん白率 %
0%	3.39	2.95 ^a
4 – 10%	3.43	2.96 ^a
10.1 – 2%	3.41	2.94 ^a
20.1 – 30%	3.33	2.97 ^a
> 30%	3.47	2.82 ^b
SEM	0.08	0.07

a – b 異符号間に有意差あり ($p < 0.05$)

WGDS あるいは DDGS の NDF 含量は 28~44%であるが、NDF は細かく切断されており、ルーメン内で急速に分解される。その結果、DDGS 中の繊維は、反すう家畜に効果的な繊維ではなく、食物繊維と同等と見なすべきではない。さらに、WGDS や DDGS が含む高含量の脂質は、ルーメンの機能に影響を与えて乳脂率の低下をきたす可能性があるが、一般的には、乳脂率の大幅な低下につながるの、単に WGDS や DDGS だけの問題ではなく、いくつかの要因が絡んでいる。

乳たん白率は WGDS あるいは DDGS を 0~30%含む飼料では差はなく、形態も乳たん白率に影響しなかった (表 6)。ただし、対照飼料と比べて、30%以上の WGDS あるいは DDGS を含む場合、乳たん白率は 0.13%低下した。WGDS や DDGS を多く含む飼料では、WGDS や DDGS を飼料中の他のすべてのたん白源と置き換えられている可能性が高い。WGDS や DDGS の量が多い場合、たん白質の小腸消化率が低下し、リジン含量の低下およびアミノ酸バランスの不均衡が、乳たん白率の低下に影響した可能性がある。ただし、DDGS の栄養成分組成と消化率が、1980 年代と 1990 年代に実施された試験では、乳たん白率が現在の値より低いことには注意する必要がある。最近の研究では、あまり触れられていないが、リジンは熱に非常に敏感であり、一部のエタノール工場での製造および乾燥中における過加熱によって DDGS に悪影響を与えていた可能性がある。しかし現在のエタノール工場では、これらの研究が行われて以来、製造と乾燥の技術が劇的に改善されており、DDGS のリジンとアミノ酸の消化率が向上している。

高脂肪 DDGS、低脂肪 DDGS の給与と泌乳成績、乳成分組成、ルーメン発酵、栄養成分消化率に及ぼす影響に関する最近の研究成果

最近公表されているいくつかの報告では、最大 30%の高脂肪および低脂肪 DDGS を含む飼料を泌乳中の乳牛に給与すると、産乳量と乳成分組成ならびにメタン排出量と、基礎的なルーメン発酵および栄養成分の消化反応が低下するという数多くの利点を示されている。メタン排出量、栄養成分の排泄量および乳脂率を低下させる潜在的なリスクを含むいくつかの理由から、トウモロコシ DDGS を泌乳中の乳牛に給与することによるルーメン発酵および栄養成分の消化率への影響を理解することは重要である。

Benchaar ら (2013) は、泌乳中の乳牛飼料中のトウモロコシと大豆粕を高脂肪 DDGS で、0、10、20、30%置換することで腸内メタン排出量、ルーメン発酵特性、見かけの全消化管消化率、窒素出納および産乳成績に及ぼす影響を調査した。DDGS の量が増加すると、DMI と産乳量が増加したが、乾物と総エネルギーの見かけ全消化管消化率は低下した (表 7)。ルーメンにおける酢酸:プロピオン酸比 (A:P 比) は、酢酸濃度の低下に伴って直線的に低下し、メタン生成は DDGS の給与量に伴って直線的に減少した。メタン生成の減少は、DDGS によって供給される脂質量の増加と、ルーメン内での繊維の分解、A:P 比およびプロトゾア数に対する影響に起因している。DDGS の給与量を高めることで窒素効率は改善されたが、窒素排泄量は増加した。この結果は、DDGS を泌乳中の乳牛に給与すると、メタン排出を削減すると同時に、DMI

と乳量の改善に効果があることを示している。

表 7. 泌乳能力の向上、第一胃の pH、第一胃の揮発性脂肪酸とアンモニアの生産、栄養成分の見かけの全消化管消化率および糞便排出量に対する、高レベルの低脂肪 DDGS を授乳中の乳牛に給与した場合の影響 (Benchaar ら、2013 から改編)

	0% DDGS	10% DDGS	20% DDGS	30% DDGS
開始時体重 kg	700	701	697	698
終了時体重 kg	710	714	724	730
日増体量 kg/日	0.29	0.35	0.76	0.95
乾物摂取量 kg/日	24.2	24.6	24.4	25.3
(産乳量、飼料効率、乳成分)				
産乳量 kg/日	32.6	35.1	35.8	36.6
エネルギー補正乳量 kg/日	35.3	37.8	37.3	37.1
乳脂肪4%補正乳量 kg/日	32.1	34.5	34.1	33.7
産乳量/乾物摂取量	1.40	1.44	1.44	1.45
エネルギー補正乳量/乾物摂取量	1.51	1.55	1.50	1.46
脂肪補正乳量/乾物摂取量	1.37	1.42	1.37	1.33
乳脂率 %	3.93	3.91	3.69	3.47
乳脂量 kg/日	1.27	1.36	1.32	1.27
乳たん白率 %	3.49	3.41	3.31	3.31
乳たん白量 kg/日	1.13	1.19	1.18	1.20
乳糖率 %	4.60	4.63	4.59	4.58
乳糖量 kg/日	1.50	1.62	1.65	1.68
乳中尿素窒素 mg/dL	11.1	10.0	9.9	10.6
体細胞数 × 10 ³ /mL	75	82	133	89
(ルーメン pH)				
最低値	5.92	5.92	5.98	5.97
最高値	6.56	6.59	6.64	6.55
平均	6.21	6.21	6.27	6.22
プロトゾア数 × 10 ⁵ /mL	5.12	5.28	5.42	4.48
(揮発性脂肪酸)				
総揮発性脂肪酸 mM	99.3	96.1	93.6	91.1
酢酸 mol/100 mol	63.4	62.7	61.8	60.1
プロピオン酸 mol/100 mol	21.8	22.1	22.3	23.1
イソ酪酸 mol/100 mol	0.8	0.8	0.7	0.7
酪酸 mol/100 mol	11.5	12.0	12.8	13.7
イソ吉草酸 mol/100 mol	1.4	1.2	1.2	1.1
吉草酸 mol/100 mol	1.2	1.2	1.2	1.3
酢酸/プロピオン酸比(A/P 比)%	63.4	62.7	61.8	60.1
アンモニア mg/dL	8.4	7.5	6.7	6.1

表 7.泌乳能力の向上、第一胃の pH、第一胃の揮発性脂肪酸とアンモニアの生産、栄養成分の見かけの全消化管消化率および糞便排出量に対する、高レベルの低脂肪 DDGS を授乳中の乳牛に給与した場合の影響 (Benchaar ら、2013 から改作) (続)

	0% DDGS	10% DDGS	20% DDGS	30% DDGS
(メタン生産)				
g/日	495	490	477	475
g/乾物摂取量 kg	0.6	20.1	19.7	18.9
%/GE摂取量	6.09	5.80	5.61	5.23
%/DE摂取量	8.75	8.39	8.17	7.74
g/乳量 kg	15.6	14.2	13.6	13.2
g/脂肪補正乳量 kg	15.7	14.3	14.3	14.4
g/エネルギー補正乳量 kg	14.3	13.1	13.0	13.0
g/乳脂肪 kg	396	363	372	390
g/乳たん白 kg	446	415	411	400
(栄養成分摂取量、見かけの全消化管消化率)				
乾物摂取量 g/日	23.4	24.4	24.8	25.2
乾物消化率 %	70.7	70.2	69.6	68.1
有機物摂取量 g/日	21.7	22.7	22.9	23.3
有機物消化率 %	72.5	71.9	71.1	69.8
GE摂取量 g/日	104	111	115	119
GE消化率 %	69.6	69.2	68.7	67.6
NDF摂取量 g/日	7.5	8.2	9.0	9.5
NDF消化率 %	56.0	56.9	57.4	54.8
ADF摂取量 g/日	5.1	5.3	5.7	5.9
ADF消化率 %	60.6	60.4	60.3	60.6
粗たん白質摂取量 g/日	3.8	4.0	4.1	4.3
粗たん白質消化率 %	67.3	68.3	68.4	69.2
でん粉摂取量 g/日	4.3	3.9	3.4	2.8
でん粉消化率 %	94.7	95.4	96.2	98.8
粗脂肪摂取量 g/日	0.9	1.2	1.5	1.8
粗脂肪消化率 %	53.0	53.8	57.4	59.4
窒素摂取量 g/日	606	642	655	682
糞中窒素排泄量 g/日	198	204	207	211
糞中窒素排泄量/窒素摂取量 %	32.7	31.7	31.6	30.8
尿中窒素排泄量 g/日	204	209	213	223
尿中窒素排泄量/窒素摂取量 %	33.7	32.7	32.7	32.6
総窒素排泄量 g/日	402	413	419	434

表 7. 泌乳能力の向上、第一胃の pH、第一胃の揮発性脂肪酸とアンモニアの生産、栄養成分の見かけの全消化管消化率および糞便排出量に対する、高レベルの低脂肪 DDGS を授乳中の乳牛に給与した場合の影響 (Benchaar ら、2013 から改作) (続)

	0% DDGS	10% DDGS	20% DDGS	30% DDGS
全窒素排泄量/窒素摂取量 %	66.4	64.4	64.3	63.5
乳窒素量 g/日	177	187	185	189
乳窒素/窒素摂取量 %	29.4	29.1	28.2	27.7
窒素蓄積量 g/日	33	42	51	60
窒素蓄積量/窒素摂取量 %	5.3	6.5	7.6	8.9
窒素生産量 g/日	204	229	236	248
窒素生産量/窒素摂取量 %	34.6	35.6	35.7	36.5

- 1 エネルギー補正乳量 (ECM) : $(0.327 \times \text{乳量 kg}) + (12.95 \times \text{乳脂肪 kg}) + (7.2 \times \text{乳たん白質 kg})$
 2 乳脂肪4%補正乳量 = $0.4 \times \text{産乳量 kg/日} + 15 \times \text{乳脂肪量 kg/日}$

Castillo-Lopez (2014) は、低脂肪 DDGS を 0~30% 含む飼料を給与した場合の産乳成績、ルーメン発酵、微生物体窒素の腸内流入および全消化管消化率を調査している。低脂肪 DDGS 給与量の増加は、産乳量および乳脂肪量に影響を与えなかったが、乳たん白量を増加させる傾向を示した(表 8)。低脂肪 DDGS の給与により、ルーメン pH が低下したが、これは、TMR の粒子サイズが小さくなったことが一部影響している可能性があり、咀嚼するための唾液を産生に費やす時間が短くなり、その結果、ルーメン pH に対する緩衝効果が低下したものと推察している。ルーメン内の揮発性脂肪酸とアンモニア濃度および微生物体窒素の小腸への流入は DDGS の量には影響を受けなかった。乾物、有機物、NDF、NFC の消化率は、低脂肪 DDGS の量が高まると改善される傾向を示した。この結果は、最大 30% の低脂肪 DDGS を給与すると、ルーメン内の揮発性脂肪酸濃度と微生物体窒素の供給量には影響を及ぼさずに優れた産乳成績と乳成分組成を得ることが出来、栄養成分の見かけの全消化管消化率を高める傾向があることを示している。

Ramirez-Ramirez 他(2016)は、高脂肪 DDGS S(粗脂肪含量 12.0%)と低脂肪 DDGS(粗脂肪含量 6.6%)を 30% 含む、バイパス油脂の添加の有無(1.9%)が、ルーメン発酵、産乳成績および乳脂肪組成に及ぼす影響を調査した(表 9)。DMI と産乳量は、高脂肪あるいは低脂肪 DDGS の給与により増加した。DMI の増加は、DDGS を含む飼料において粒度が 1.18 mm 未満の割合が 1.8 倍多かったことに起因しているものと推察された。その

結果、DDGS の給与によりルーメン液中の揮発性脂肪酸組成に変化が生じ、酪酸濃度が低下した。高脂肪性 DDGS を給与すると乳脂率と乳脂肪量が減少したが、低脂肪 DDGS を給与した場合には対照飼料牛と差がなかった。ルーメン微生物の多くは *Bacteroidetes*(54%)と *Firmicutes*(43%)であって、飼料の違いによる相対的な変化は少なかった。DDGS を含む飼料を給与すると、対照飼料に比べて PFA 摂取量が増加し、ルーメン pH が低下したが、ルーメン内で DDGS が発酵することにより、咀嚼回数と唾液産生量が減少したことによる影響の可能性はある。これらの発酵の変化により、微生物による水素添加と CLA(共役リノール酸)の組成が変化した。乳脂肪合成を阻害することが知られているトランス 10-CLA、シス 12-CLA は高脂肪 DDGS を給与した数頭の牛の乳汁から検出されたが、他の飼料を給与した牛からは検出されなかった。さらに、DDGS を含む飼料を給与した牛の乳中トランス-10 18:1 濃度と総量は、対照飼料を給与した牛と比べて約 10 倍増加した。したがって、低脂肪 DDGS を含む飼料では、乳脂率の減少に関連するトランス 10 18:1 のルーメンへの供給と生成量が減少しているようであり、低脂肪 DDGS を含む飼料では、高脂肪 DDGS を含む飼料とルーメン pH には差がなかったものの、乳脂率や乳脂肪量の低下は見られなかった。この結果は、高脂肪 DDGS と低脂肪の DDGS を含む飼料を給与すると DMI が増加し、粗飼料由来の NDF が不足していても優れた乳生産と乳成分組成を保つことが出来ることを示している。トランス 10-CLA およびシス 12-CLA は

表 8.泌乳能力、第一胃の pH、第一胃の揮発性脂肪酸とアンモニアの生産、栄養成分の見かけの全消化管消化率および糞便排泄に対する還元油 DDGS のレベルの増加が泌乳乳牛に与える影響(Castillo-Lopez、2014 から改作)

	DDGS 0%	低脂肪DDGS 10%	低脂肪DDGS 20%	低脂肪DDGS 30%
体重 kg	687	688	693	697
BCS	3.06	3.10	3.14	3.18
乾物摂取量 kg/日	25.0	23.8	25.9	27.9
(産乳量と乳成分)				
産乳量 kg/日	34.4	33.2	34.5	34.2
乳脂率 %	3.59	3.74	3.64	3.67
乳脂量 kg/日	1.24	1.23	1.25	1.26
乳たん白率 %	3.08	3.18	3.15	3.19
乳たん白量 kg/日	1.06	1.04	1.07	1.09
乳糖率 %	4.80	4.70	4.73	4.73
乳糖量 kg/日	1.66	1.58	1.62	1.63
乳中尿素窒素 mg/dL	16.24	15.54	16.23	15.94
(ルーメン pH)				
最低値	6.08	6.17	6.06	6.03
最高値	6.95	8.88	6.83	6.77
平均	6.53	6.49	6.38	6.35
pHが6.5以下の時間 分/日	546	834	941	1,040
pHが6.5以下の範囲 pH×分/日	126	158	357	334
pHが6.3以下の時間 分/日	279	382	936	946
pHが6.3以下の範囲 pH×分/日	45	47	180	169
(揮発性脂肪酸)				
総揮発性脂肪酸量 mM	136	135	139	131
酢酸 mol/100 mol	63.4	63.4	60.8	60.0
プロピオン酸 mol/100 mol	22.1	22.0	25.0	26.1
イソ酪酸 mol/100 mol	0.8	0.8	0.7	0.7
酪酸 mol/100 mol	11.2	11.2	10.6	10.7
イソ吉草酸 mol/100 mol	0.6	0.6	0.6	0.6
吉草酸 mol/100 mol	1.8	1.9	2.1	2.2
酢酸/プロピオン酸比(A/P 比)%	2.98	2.94	2.52	2.39
アンモニア mg/dL	19.0	18.8	19.3	17.6
(栄養成分摂取量、見かけの全消化管消化率)				
乾物消化率 %	65.5	65.4	73.0	73.4
糞中乾物含量 kg/日	6.94	7.20	5.65	5.61
有機物摂取量 kg/日	19.6	19.9	20.0	19.3
有機物消化率 %	67.7	67.7	74.9	75.2
非繊維性炭水化物摂取量 kg/日	7.8	7.6	7.4	6.7
非繊維性炭水化物消化率 %	89.7	90.1	92.6	92.7
NDF摂取量 kg/日	7.0	7.5	7.8	7.9
NDF消化率 %	44.0	43.2	57.0	58.0
窒素摂取量 kg/日	0.63	0.63	0.63	0.62
窒素消化率 %	64.3	67.7	74.7	76.9
糞中窒素 kg/日	0.20	0.20	0.15	0.15
リン摂取量 g/日	73	86	96	109
リン消化率 %	28.1	35.0	50.2	50.5
糞中リン g/日	46	54	53	53

表 9. 第一胃不活性脂肪を含むまたは含まない 30%低脂肪 DDGS(6.6%粗脂肪)、または 30%従来の高脂肪 DDGS (12%粗脂肪)を含む総混合飼料を給与した乳牛への影響 泌乳能力、牛乳組成、ルーメン発酵、栄養成分の見かけの総消化管消化率(Ramirez-Ramirez ら、2016 から改編)

	DDGS 0%	高脂肪DDGS 30%	低脂肪DDGS 30%	低脂肪DDGS 30%+バイパス 油脂
体重 kg	607 ^b	619 ^a	616 ^a	619 ^a
BCS	3.1	3.2	3.1	3.2
乾物摂取量 kg/日	21.6 ^b	25.8 ^a	26.1 ^a	26.1 ^a
(乳量および乳成分)				
産乳量 kg/日	32.2 ^b	33.8 ^a	33.8 ^a	34.0 ^a
乳脂肪3.5%補正乳量 1	33.2 ^b	32.8 ^b	34.3 ^{ab}	35.0 ^a
乳脂率 %	3.69 ^a	3.27 ^b	3.65 ^a	3.70 ^a
乳脂量 kg/日	1.18 ^a	1.11 ^b	1.22 ^a	1.25 ^a
総脂肪酸量 g/日	1,103 ^a	1,036 ^b	1,137 ^a	1,166 ^a
総不飽和脂肪酸 g/日	314 ^c	400 ^a	365 ^b	398 ^a
総多価不飽和脂肪酸 g/日	49	79	77	78
総飽和脂肪酸 g/日	787 ^a	636 ^b	765 ^a	766 ^a
18:1 trans-10	5.6 ^b	18.9 ^a	6.4 ^b	7.6 ^b
18:2 cis-9, trans-11	4.8 ^d	13.7 ^a	9.1 ^c	11.0 ^b
18:2 trans-10, cis-12	-	0.05	-	-
乳たん白率 %/日	3.07 ^c	3.22 ^a	3.21 ^a	3.12 ^b
乳たん白量 kg/日	1.00 ^b	1.10 ^a	1.07 ^a	1.06 ^a
乳中尿素窒素 mg/dL	15.3 ^b	15.2 ^b	16.4 ^a	15.9 ^a
(ルーメン発酵)				
pH	6.17 ^a	5.80 ^b	5.78 ^b	6.02 ^{ab}
総揮発性脂肪酸 mM	116	121	127	119
酢酸 mol/100 mol	67.3 ^a	60.9 ^c	61.4 ^{bc}	63.2 ^b
プロピオン酸 mol/100 mol	18.2 ^c	23.6 ^a	23.1 ^a	20.7 ^b
イソ酪酸 mol/100 mol	0.85	0.66	0.69	0.76
酪酸 mol/100 mol	11.6	12.5	12.3	12.8
イソ吉草酸 mol/100 mol	0.56	0.56	0.51	0.62
吉草酸 mol/100 mol	1.62 ^b	1.84 ^{ab}	2.00 ^a	1.91 ^a
酢酸/プロピオン酸比(A/P 比) %	3.74 ^a	2.64 ^c	2.68 ^{bc}	3.05 ^b
アンモニア mg/dL	25.6	28.5	27.4	26.5
(見かけの全消化管消化率)				
乾物消化率 %	50.6 ^c	58.0 ^b	67.1 ^a	59.1 ^b
有機物消化率 %	52.6 ^c	59.9 ^b	69.3 ^a	60.9 ^b
NDF消化率 %	32.5 ^c	43.8 ^{ab}	53.0 ^a	43.2 ^b
窒素消化率 %	53.2 ^c	63.8 ^b	72.6 ^a	64.4 ^b

1 乳脂肪3.5%補正乳量 = (乳脂量 kg × 16.216) + (産乳量 kg × 0.4324)

乳脂肪生産の低下に関連するが、低脂肪 DDGS を含む飼料を給与した場合には検出されず、低脂肪 DDGS を 30%含む飼料では乳脂率低下のリスクが低くなる。

Whelen ら(2017)は、多年生ライグラス草地で放牧している泌乳中期の乳牛用飼料の大麦および大豆粕の 11.6 あるいは 31%を、大豆皮、DDGS およびパーム核粕

の混合物で置換した場合の影響を調査している。その結果、産乳成績、消化および代謝特性に影響を及ぼさず、飼料中の大麦および大豆粕を大豆皮、DDGS、パーム核粕で置換できることを報告している。

牛乳の消費者の満足度と健康上の利点

いくつかの研究では、泌乳中の乳牛に DDGS を給与すると、乳中の不飽和脂肪酸の濃度が増加し、過酸化と異臭の発生につながる可能性があることが報告されている。Testroet ら(2015)は、DDGS を 0、10 または 25% 含む飼料を給与した乳牛における乳汁の化学組成および風味特性に及ぼす影響を調査した。その結果、乳中の過氧化物および遊離脂肪酸の含量はほとんど検出限界以下であって、DDGS を含む飼料を給与すると乳成分組成は変化するものの、異臭の発生には関連しないことを示している。近年、ヒトの健康上有益な効果をもたらす物質の乳中濃度を高めることにより、ヒトの健康上の利点を改善することに大きな関心が寄せられている。これらの物質の 1 つは、シス 9、トランス 11-CLA であり、発癌性とアテローム性動脈硬化のリスクを軽減し、免疫力を高めることが報告されている。飼料の配合組成を変更することで、乳中 CLA 含量を増加させる手法がいくつか試みられている。アンダーソンら(2006)および Sasikala-Appukuttan ら(2008)は、DDGS を 10~20%を含む飼料を給与すると、DMI、産乳量、乳脂率に影響を及ぼすことなく、乳中の CLA 濃度を増加させることを示している。最近では、Kurokawa ら(2013)が、DDGS を 0、10 または 20%含む高 NDF(46%)飼料を泌乳中の乳牛に給与すると、産乳量が増加し、CLA 含量が著しく増加することを明らかにしている。したがって、泌乳中の乳牛に DDGS を含む飼料を給与することで、ヒトの健康上有効な牛乳を生産できることも利点の 1 つであると思われる。

春機発動前の若雌牛へ DDGS の給与

乳牛への DDGS の給与に関する研究のほとんどは泌乳中の乳牛を用いたものであり、乳牛の発育成績とその後の長期的な繁殖成績および産乳成績への影響に焦点をあてた研究は限られている。これまでの研究では、未

経産牛に DDGS を給与すると繁殖成績が向上することが示されている(Martin ら、2007; Engle ら、2008)。Anderson ら(2015a, b)は、低脂肪 DDGS を 22%含む飼料を給与した未経産牛と、高脂肪 DDGS を 34%給与した未経産牛では、ADG(日増体量)が高く(0.96 kg/日)、栄養成分の全消化管消化率が高いことを示している。さらに、Anderson ら(2015b)は、高脂肪 DDGS を含む飼料の給与は、低脂肪 DDGS を含む飼料に比べて、レプチン(脂肪組織で作られる、食欲の抑制とエネルギー代謝の調節に関わるホルモン)、IGF-1(インスリン様成長因子)、インスリンの血漿濃度に基づくエネルギー状態は同等に維持されるが、血漿コレステロールと脂肪酸濃度が増加したと報告している。これらの血漿中脂質の増加は、繁殖成績を改善する可能性があることが示されている(Talavera ら、1985; Thomas ら、1997; Funston、2004)。これらの反応をさらに評価するために、Anderson ら(2015c)は、トウモロコシ・大豆製品主体の対照飼料、低脂肪 DDGS を 22%含む飼料および高脂肪 DDGS を 34%含む飼料を春機発動前の若雌牛 33 頭に対して、分娩前 24 週間から分娩後 4 ヶ月まで給与した。その結果、初回発情日齢、人工授精回数、受胎日齢または分娩日齢には差が見られなかった(表 10)。高脂肪性 DDGS を含む飼料では、対照飼料および低脂肪 DDGS を含む飼料と比べて、体高と体長が短かった。低脂肪 DDGS を含む飼料では、他の飼料に比べて産乳量が多かったが、乳たん白率と乳脂率および乳たん白量と乳脂量は類似していた。これらの結果は、春機発動前の若雌牛に対して、高脂肪あるいは低脂肪 DDGS をトウモロコシと大豆製品と置換して給与することで、繁殖能力や産乳成績に悪影響を及ぼさないか、あるいは改善できることを示している。さらに、DDGS 由来の脂質は、トウモロコシを与える場合に供給されるでん粉と効果的に置き換えることができ、その後の成績に悪影響を及ぼさないことが明らかとなっている。

その後の研究では、高脂肪および低脂肪 DDGS の給与による安定した利点も示されている。Suarez-Mena (2015)は、粗飼料と濃厚飼料の給与割合(50:50 または 75:25)と DDGS の量(0、7、14 または 21%)が、春機発動前の若雌牛における消化率とルーメン発酵に及ぼす影響を調査した。乾物、有機物、ADF、NDF の見かけの

表 10.生殖能力、身体測定、 出産前 24 週間とその後 4 か月の泌乳期間に 22%低脂肪 DDGS と 34%高脂肪 DDGS を含む飼料を給与した乳用未経産牛の泌乳成績と牛乳組成(Anderson ら、2015c から改作)

	DDGS 0%	低脂肪DDGS 22%	高脂肪DDGS 34%
初回発情日齢	394	400	398
人工授精回数	2.11	2.89	1.78
受胎日齢	455	483	444
初産日齢	733	764	728
(分娩前3週)			
体重 kg	681	678	638
体高 cm	144 ^a	144 ^a	140 ^b
十字部高 cm	147	147	144
胸囲 cm	206	206	203
体長 cm	145 ^a	144 ^a	140 ^b
BCS	3.4	3.4	3.4
(分娩時)			
体重 kg	634	621	590
BCS	3.3	3.1	3.2
産子体重 kg	40.8	41.6	41.6
異常産子数	1	2	2
移行期が順調に推移した頭数	9	9	9
分娩日齢	732	764	728
産乳量 kg/日	33.0 ^b	36.4 ^a	34.7 ^{ab}
エネルギー補正乳量 kg/日 1	34.4	37.9	35.1
乳たん白率 %	2.94	3.01	3.03
乳たん白量 kg/日 1	0.98	1.08	1.03
乳脂率 %	3.98	3.94	3.86
乳脂量 kg/日 1	1.28	1.41	1.28
体細胞数 × 10 ³ /mL	53.4	124.4	299.6

a,b異符号間に有意差あり (p<0.05)

1エネルギー補正乳量 (ECM) : (0.327 × 乳量 kg) + (12.95 × 乳脂肪 kg) + (7.2 × 乳たん白質 kg)

消化率は、DDGS を 14%含む飼料において最も優れたが、DDGS 給与量の増加に伴い、窒素保持量が減少した。粗飼料の給与割合が高い飼料では、DDGS 給与量の増加に伴ってルーメン液中の酢酸濃度が減少し、プロピオン酸濃度が増加する傾向を示した。さらに、DDGS 給与量が増加すると、ルーメンプロトゾア数が減少した。これらの結果は、DDGS を 14%含む飼料を給与すると、粗飼料と濃厚飼料の比率が異なる飼料を給与した未経産牛における栄養成分の利用性とルーメンにおける発酵性が改善されたことを示している。

Manthey and Anderson(2016)は、乾草を自由摂取させ、

DDGS あるいはトウモロコシ・大豆粕を体重の 0.8%量給与した未経産牛の DMI、体重、ADG および飼料効率は類似しており、体型の各測定項目や BCS にも差がなかった。Manthey ら(2016)は、DDGS の含有量を最大 50%とした飼料を制限給与すると、飼料効率、乾物および CP の見かけの全消化管消化率が改善されることを報告しており、BCS を高めることなく、体全体の発育を維持できることを示唆している。

Manthey と Anderson(2017)は、粗飼料と DDGS を置換した飼料を制限給与(実験 1)、および乾草を自由摂取させ DDGS を給与(実験 2)の 2 試験を実施した。試験 1 で

表 11. 乳牛に対する DDGS の推奨最大配合量(Kalscheur ら、2012b から改編)

ステージ	DDGS %	配合設計上で考慮すべき重要な栄養成分
離乳前の子牛	25	リジン、繊維、粗脂肪
育成期	30	粗脂肪/エネルギー、イオウ
乾乳期	15	粗脂肪/エネルギー、イオウ、カルシウム/リン
泌乳期	20	全脂質/多価不飽和脂肪酸、有効繊維、イオウ、カルシウム/リン、RUP、リジン

は、ホルスタイン種未経産牛に DDGS を 30% (体重の 2.65%)、40% (同 2.50%)、または 50% (同 2.35%) 給与し、残りは乾草と微量プレミックスを給与した。試験 2 では、トウモロコシ・大豆粕または DDGS を体重の 0.8% 量給与し、乾草を自由摂取させた。その結果、制限給与の場合、DDGS を乾草の最大 50% 置換出来ること、また、乾草を自由摂取できる場合には、トウモロコシと大豆粕を置換しても、十分な栄養成分消化率と発育成績が得られることを示している。

Manthey ら(2017)は、制限給与する粗飼料と置換して DDG を 30、40 または 50% を給与した場合の代謝能と初回発情への影響も調査している。各飼料給与時の血漿グルコース、インスリン、IGF-1、レプチンおよびトリグリセリドは類似していたが、総脂肪酸および PFA は、DDGS の飼料量の増加に伴って高まった。初回発情日齢と、その時点の体重も、各飼料間で差がなかった。この結果は、DDGS を最大 50% まで含む飼料を制限給与しても、脂肪組織の過剰蓄積をもたらさず、エネルギー状態を維持し、初回発情日齢や体重に悪影響を及ぼさないことを示している。

最後に、Rodriguez-Hernandez (2017) は、ナタネ粕中のグルコシノレートの種類と含量が、乳牛の DDGS または他の油糧種子粕と比べて、嗜好性と摂取量に影響があるか否かを調査している。その結果、未経産牛では DDGS を含む飼料の嗜好性が最も優れ、次いで、アマニ粕、ナタネ粕、ナタネ粕、カノラミールの嗜好性が優れ、ナタネ粕が最も劣った。

結論

トウモロコシ DDGS は、泌乳牛のエネルギー、たん白質、リンの優れた供給源である。多くの研究により、トウモロコシ DDGS は、泌乳中の乳牛の DMI、産乳量、乳脂

量および乳たん白量を低下させることなく、飼料中に 20% までの配合することが出来る。実際に、DDGS を 20 ~ 30% 含んだ飼料の給与は、DDGS を含まない飼料と同等か、それ以上の乳生産が可能であり、飼料の設計を適切に行えば、乳脂率は低下しない。さらに、DDGS を 30 ~ 50% 含んだ育成牛用飼料を給与すると、優れた発育成績、繁殖成績およびその後の産乳能力を得ることが出来る。Kalscheur ら(2012b)は、乳牛および子牛の生産の様々な段階における DDGS の推奨飼料含有率と、DDGS を含む飼料を設計する際に考慮すべき主要な成分を示している(表 11)。

引用文献

- Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015a. Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: I. Effects on growth performance and total-tract digestibility of nutrient. *J. Dairy Sci.* 98:5699-5708.
- Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015b. Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: II. Effects on metabolic prole. *J. Dairy Sci.* 98:5709-5919.
- Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015c. Short communication: Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: III. Effects on posttrial reproductive and lactation performance. *J. Dairy Sci.* 98:5720-5725.
- Anderson, J.L., D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, and A.R. Hippen. 2006. Evaluation of dried and wet distiller's grain included at two concentration in the diets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:3133-3142.
- Benchaar, C., F. Hassanat, R. Gervais, P.Y. Chouinard, C.

- Julien, H.V. Petit, and D.I. Masse. 2013. Effects of increasing amounts of corn dried distillers grains with solubles in dairy cow diets on methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance and milk production. *J. Dairy Sci.* 96:2413–2427.
- Birkelo, C.P., M.J. Brouk, and D.J. Schingoethe. 2004. The energy content of wet corn distillers grains for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 87:1815–1819.
- Boucher, S.E., S. Calsamiglia, C.M. Parsons, H.H. Stein, M.D. Stern, P.S. Erickson, P.L. Utterback, and C.G. Schwab. 2009. Intestinal digestibility of amino acids in rumen-undegraded protein estimated using a precision-fed cecectomized rooster bioassay: II Distillers dried grains with solubles and fish meal. *J. Dairy Sci.* 92:6056–6067.
- Cao, Z.J., J.L. Anderson, and K.F. Kalscheur. 2009. Ruminal degradation and intestinal digestibility of dried or wet distillers grains with increasing concentrations of condensed distillers solubles. *J. Anim. Sci.* 87:3013–3019.
- Carvalho, L.P.F., D.S.P. Melo, C.R.M. Pereira, M.A.M. Rodrigues, A.R.J. Cabrita, and A.J.M. Finseca. 2005. Chemical composition, *in vivo* digestibility, N degradability and enzymatic intestinal digestibility of five protein supplements. *Anim. Feed Sci. Technol.* 119:171–178.
- Castillo-Lopez, E., H.A. Ramirez-Ramirez, T.J. Klopfenstein, D. Hostetler, K. Karges, S.C. Fernando, and P.J. Kononoff. 2014. Ration formulations containing reduced-fat dried distillers grains with solubles and their effect on lactation performance, rumen fermentation and intestinal flow of microbial nitrogen in Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 97:1578–1593.
- Diaz-Royón, F., A. Garcia, and K.A. Rosentrater. 2012. Composition of fat in distillers grains. *Agricultural and Biosystems Engineering Publications*, 391. http://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_pubs/391.
- Engel, C.L., H.H. Patterson, and G.A. Perry. 2008. Effect of dried corn distillers grains plus soluble compared with soybean hulls, in late gestation heifer diets, on animal and reproductive performance. *J. Anim. Sci.* 86:1697–1708.
- Firkins, J.L., L.L. Berger, G.C. Fahey, Jr., and N.R. Merchen. 1984. Ruminal nitrogen degradability and escape of wet and dry distillers grains and wet and dry corn gluten feeds. *J. Dairy Sci.* 67:1936–1944.
- Foth, A.J., T. Brown-Brandt, K.J. Hanford, P.S. Miller, G. Garcia Gome, and P.J. Kononoff. 2015. Energy content of reduced-fat dried distillers grains with solubles for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:7142–7152.
- Funston, R.N. 2004. Fat supplementation and reproduction in beef females. *J. Anim. Sci.* 82(E Suppl.):E154–E161.
- Humer, E., and Q. Zebeli. 2015. Phytate in feed ingredients and potentials for improving the utilization of phosphorus in ruminant nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 209:1–15.
- Kalscheur, K.F. 2013. Use of low-fat DDGS in diets for lactating dairy cattle. *Proceedings 34th Western Nutrition Conference – Processing, Performance & Prot*, September 24–26, 2013, Saskatoon, SK., p. 139–145.
- Kalscheur, K.F., A.D. Garcia, D.J. Schingoethe, F. Diaz-Royón, and A.R. Hippen. 2012a. Feeding biofuels co-products to dairy cattle. In: *Biofuel Co-products as Livestock Feed – Opportunities and Challenges*. H.P.S. Makkar, ed. FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/docrep/016/i3009e/i3009e00.htm> pp 115–153.
- Kalscheur, K.F., A.R. Hippen, and A.D. Garcia. 2012b. Feeding distillers grains products to dairy cattle. In: *Distillers Grains: Production, Properties and Utilization*, K. Liu and K.A. Rosentrater, eds. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 265–295.
- Kalscheur, K.F. 2005. Impact of feeding distillers grains on milk fat, protein and yield. *Proc. Distillers Grains Technology Council, 9th Annual Symposium*, Louisville, KY.
- Kelzer, J.M., P.J. Kononoff, L.O. Tedeschi, T.C. Jenkins, K. Karges, and M.L. Gibson. 2010. Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products. *J. Dairy Sci.* 93:2803–2815.

- Kleinschmit, D.H., J.L. Anderson, D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur and A.R. Hippen. 2007a. Ruminant and intestinal degradability of distillers grains plus solubles varies by source. *J. Dairy Sci.* 90:2909–2918.
- Kononoff, P.J., S.K. Ivan and T.J. Klopfenstein. 2007. Estimation of the proportion of feed protein digested in the small intestine of cattle consuming wet corn gluten. *J. Dairy Sci.* 90:2377–2385.
- Kurokawa, Y., H. Shibata, S. Tateno, S. Kanada, K. Takaura, S. Ishida and H. Itabashi. 2013. Rumen fermentation, milk production and conjugated linoleic acid in the milk of cows fed high fiber diets added with dried distillers grains with solubles. *Anim. Sci. J.* 84:106–112.
- Li, C., J.Q. Li, W.Z. Yang and K.A. Beauchemin. 2012. Ruminant and intestinal amino acid digestion of distiller's grain vary with grain source and milling process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 175:121–130.
- MacDonald, J.C. T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson and W.A. Grifn. 2007. Effect of dried distillers grains and equivalent undegradable intake protein or ether extract on performance and forage intake of heifers grazing smooth bromegrass pastures. *J. Anim. Sci.* 85:2614–2624.
- Manthey, A.K., and J.L. Anderson. 2017. Feeding peripubertal dairy heifers diets high in distiller's grains with varying forage-to-concentrate ratios. *J. Dairy Sci.* 100(Suppl. 1):183 (Abstr.)
- Manthey, A.K., J.L. Anderson, G.A. Perry and D.H. Keisler. 2017. Feeding distillers dried grains in replacement of forage in limit-fed dairy heifer rations: Effects on metabolic profile and onset of puberty. *J. Dairy Sci.* 100:2591–2602.
- Manthey, A.K., J.L. Anderson and G.A. Perry. 2016. Feeding distillers dried grains in replacement of forage in limit-fed dairy heifer rations: Effects on growth performance, rumen fermentation and total-tract digestibility of nutrients. *J. Dairy Sci.* 99:7206–7215.
- Manthey, A.K., and J.L. Anderson. 2016. Growth performance of dairy heifers limit-fed distillers dried grains with ad libitum forage. *J. Dairy Sci.* 99(E-Suppl. 1):680–681 (Abstr.)
- Martin, J.L., A.S. Cupp, R.J. Rasby, Z.C. Hall and R.N. Funston. 2007. Utilization of dried distillers grains for developing beef heifers. *J. Anim. Sci.* 85:2298–2303.
- Martinez-Amezcuca, V., C.M. Parson and S.L. Noll. 2004. Content and relative bioavailability of phosphorus in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 83:971–976.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010a. Rumen degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144–4154.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010b. Performance and amino acid utilization of early lactation dairy cows fed regular or reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:3176–3191.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, and D.E. Little. 2010c. Lactation performance and amino acid utilization of cows fed increasing amounts of reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:288–303.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2008. Ruminant phosphorus disappearance from corn and soybean feedstuffs. *J. Dairy Sci.* 91:3938–3946.
- NASS (National Agricultural Statistics Service). 2007. Ethanol Co-Products Used for Livestock Feed. U.S. Agricultural Statistics Board, U.S. Department of Agriculture.
- NRC. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th Rev. Ed. National Academy of Science, Washington, DC.
- Nuez-Ortín, W.G., and P. Yu. 2011. Using the NRC chemical summary and biological approaches to predict energy values of new co-product from bioethanol production for dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 170:165–170.
- Nyoka, R. 2010. Fat and rumen undegradable protein for grazing cows: Effect on composition of milk and quality of cheese. Master's thesis, South Dakota State University, Brookings.
- Oba, M.G.B., T.D. Penner, T.D. Whyte and T.D. Wierenga. 2010. Effects of feeding triticale dried distillers grains

- plus solubles as a nitrogen source on productivity of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:2044–2052.
- Owens, F. 2009a. Nutrition & Health: Dairy. Cattle nutritionists. *Feedstuffs*, p.22–25.
- Owens, T.M. 2009b. Risk of milk fat depression for dairy cows fed high moisture corn and distillers grains in diets containing monensin. Ph.D. Thesis, South Dakota state University, Brookings.
- Paz, H.A., and P.J. Kononoff. 2014. Lactation responses and amino acid utilization of dairy cows fed low-fat distillers dried grains with solubles with or without rumen-protected lysine supplementation. *J. Dairy Sci.* 97:6519–6530.
- Paz, H.A., M.J. de Veth, R.S. Ordway and P.J. Kononoff. 2013. Evaluation of rumen-protected lysine supplementation to lactating dairy cows consuming increasing amounts of distillers dried grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 96:7210–7222.
- Pereira, A.B.D., L.K. Zeringue, C. Leonardi, B.F. Jenny, C.C. Williams, M.E. McCormick and V.R. Moreira. 2015. Short communication: Substituting dry distillers grains with solubles and rumen-protected amino acids for soybean meal in late-lactation cows' diets based on corn silage or ryegrass silage. *J. Dairy Sci.* 98:8121–8127.
- Ramirez-Ramirez, H.A., K.J. Harvatine and P.J. Kononoff. 2016a. Short communication: Forage particle size and fat intake affect rumen passage, the fatty acid profile of milk and milk fat production in dairy cows consuming dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 99:392–398.
- Ramirez-Ramirez, H.A., E. Castillo Lopez, C.J.R. Jenkins, N.D. Aluthge, C. Anderson, S.C. Fernando, K.J. Harvatine and P.J. Kononoff. 2016b. Reduced-fat dried distillers grains with solubles reduces the risk for milk fat depression and supports milk production and ruminal fermentation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 99:1912–1928.
- Ranathunga, S.D. K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010. Replacement of starch from corn with nonforage fiber from distillers grains and soyhulls in diets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:1086–1097.
- Robinson, P.H., N. Swanepoel, I. Shinzato and S.O. Juchem. 2011. Productive responses of lactating dairy cattle to supplementing high levels of ruminally protected lysine using a rumen protection technology. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:30–41.
- Rodriguez-Hernandez, K., J.L. Anderson and M.A. Berhow. 2017. Preference of carinata meal compared with other oilseed meals and distiller's dried grains by dairy heifers. *J. Dairy Sci.* 100(Suppl. 1):178 (Abstr.).
- Sasikala-Appukuttan, A.K., A.R. Hippen, K.F. Kalscheur, K. Karges, M.L. Gibson. 2008. The Feeding Value of Corn Distillers Solubles for Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 91:279–287.
- Schingoethe, D.J., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and A.R. Garcia. 2009. The use of distillers products in dairy cattle diets. *J. Dairy Sci.* 92:5802–5813.
- Schmit, T.M., R.N. Boisvert, D. Enahoro and L.E. Chase. 2009. Optimal dairy farm adjustments to increase utilization of corn distillers dried grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 92:6105–6115.
- Suarez-Mena, F.X., G.J. Lascano, D.E. Rico and A.J. Heinrichs. 2015. Effect of forage level and replacing canola meal with dry distillers grains with solubles in precision-fed heifer diets: Digestibility and rumen fermentation. *J. Dairy Sci.* 98:8054–8065.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson and L.J. Erasmus. 2010a. Amino acid needs of lactating dairy cows: Impact of feeding lysine in a ruminally protected form on productivity of lactating dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 157:79–94.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson and L.J. Erasmus. 2010b. Amino acid needs of lactating dairy cows: Predicting limiting amino acids in contemporary rations fed to high producing dairy cattle in California using metabolic models. *Anim. Feed Sci. Technol.* 161:103–120.
- Talavera, F., C.S. Park and G.L. Williams. 1985. Relationships among dietary lipid intake, serum cholesterol and ovarian function in Holstein heifers. *J. Anim. Sci.* 60:1045–1051.

- Tang, S.C., I. Zulki-i, M. Ebrahimi, A.R. Alimon, A.F. Soleimani and K. Filer. 2011. Effects of feeding different levels of corn dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass yield and meat fatty acid composition in broiler chickens. *Intl. J. Anim. Vet. Adv.* 3:205–211.
- Testroet, E.D., G. Li, D.C. Beitz and S. Clark. 2015. Feeding dried distillers grains with solubles affects composition but not oxidative stability of milk. *J. Dairy Sci.* 98:2908–2919.
- Thomas, M.G., B. Bao and G.L. Williams. 1997. Dietary fats varying in their fatty acid composition differentially influence follicular growth in cows fed isoenergetic diets. *J. Anim. Sci.* 75:2512–2519.
- Vander Pol, K.J., M.K. Luebbe, G.I. Crawford, G.E. Erickson and T.J. Klopfenstein. 2009. Performance and digestibility characteristics of finishing diets containing distillers grains, composites of corn processing coproducts or supplemental corn oil. *J. Anim. Sci.* 87:639–652.
- Whelan, S.J., W. Carey, T.M. Boland, M.B., Lynch, A.K. Kelly, G. Rajauria and K.M. Pierce. 2017. The effect of by-product inclusion level on milk production, nutrient digestibility and excretion and rumen fermentation parameters in lactating dairy cows offered a pasture-based diet. *J. Dairy Sci.* 100:1055–1062.
- Yildiz, E., and N. Todorov. 2014. The comparison of the main protein sources for dairy cows. A review. *Bulgarian J. Agricult. Sci.* 20:428–446.