トウモロコシサイレージにおける破碎処理が乳牛の 炭水化物およびタンパク質利用に及ぼす影響

谷川珠子¹・大坂郁夫²・川本 哲¹・原 悟志¹

¹ 北海道立畜産試験場, 北海道新得町 081-0038

² 北海道立中央農業試験場, 北海道長沼町 069-1395

(2009. 7. 6 受付, 2009. 10. 5 受理)

要 約 トウモロコシサイレージ (CS) における破碎処理が, 乳牛の養分利用に及ぼす影響を検討した。黄熟期に設定切断長 17 mm で調製した未破碎 CS, および切断長は同様としローラ間隔 5 mm で破碎処理して調製した破碎 CS を用い, 飼料全体の粗タンパク質 (CP) 含量が 14% となるように, 各 CS に大豆粕を 84 : 16 (乾物比) の割合で混合したものを供試した (未破碎区, 破碎区)。これらをルーメンおよび十二指腸カニューレを装着したホルスタイン種乾乳牛 3 頭に給与した。CS の化学成分は破碎処理の影響がなかったが, 破碎区は乾物, CP およびデンプン摂取量が有意に高かった ($P < 0.05$)。ルーメン内のデンプン消化率は破碎区が 30% 高い傾向にあったが ($P = 0.08$), NDF の消化率は区間に差がなかった。総消化管におけるデンプン消化率は破碎区で高く ($P < 0.05$), CS の TDN は破碎 CS で 3.5% 高まった。ルーメン液の pH および反芻時間は区間に差がなく, 採食時間は破碎区で短かった ($P < 0.05$)。ルーメン内可消化有機物量に対する微生物体窒素合成効率は区間に差がなく, 破碎 CS に適した併給タンパク質飼料の給与方法について検討が必要と考えられた。以上より, 設定切断長が 17 mm のとき, 破碎処理をしても総咀嚼時間は変化せず, NDF 消化率を低下させずに, デンプンの利用亢進が可能であった。

日本畜産学会報 81 (1), 11-19, 2010

トウモロコシは登熟に伴い, 収量および乾物含量が増加するだけではなく, 総体に占める子実割合が高まるため, デンプン含量が増加する。しかし, 登熟に伴い子実表面のデンプンがルーメン内微生物の消化を受けにくい角質状デンプンに変化するため, デンプンの消化率は低下する (Philippeau と Michalet-Doreau 1997)。さらに, 登熟に伴い中性デタージェント繊維 (NDF) の消化率も低下する (Bal ら 1997 ; Andrae ら 2001)。谷川ら (2008) は, 乳熟期に比べ黄熟期のトウモロコシサイレージ (CS) では, ルーメン内におけるデンプンおよび NDF 消化率が 20% 以上低く, ルーメン内可消化炭水化物量が減少するために微生物体窒素の合成効率が低い傾向にあることを報告し, 黄熟期以降ではルーメン内の養分消化率を高める必要があることを示した。

黄熟期以降の CS の養分消化率を高めるために, 飼料用トウモロコシの破碎処理技術が 1980 年代にヨーロッパで開発され, 北海道では 2000 年頃から利用され始めた。これまでのトウモロコシの収穫では, ハーベスタのフィードローラでトウモロコシを引き込み, カッター

ヘッドで細断した後, ブローで吹き上げられる。破碎処理とは, カッターヘッドとブローの間に溝の付いた 2 本のローラからなる装置を取り付け, 回転するローラの間隙を通すことで細断したトウモロコシをすり潰す行程のことである。破碎処理によって, 子実の破壊によるデンプンの暴露, 茎葉部の損傷による脆弱化および表面積の増加が起るため, ルーメン内の微生物発酵を受けやすくなり, 消化率が高まることが期待される。

破碎処理した CS の *in situ* デンプン消失率, 総消化管における養分消化率, 乳生産へ及ぼす影響は多くの試験で報告されている (Bal ら 1997 ; Bal ら 2000 ; Weiss と Wyatt 2000 ; Johnson ら 2002a)。破碎処理による子実および茎葉部の損傷は, 総消化管における養分消化率だけではなく, ルーメン内における養分消化率に影響し, ルーメン内可消化養分量の変化はルーメン内微生物の合成量に影響すると考えられるが, ルーメン内の養分消化率や微生物体窒素合成についての報告は少ない (Johnson ら 2002a, b)。破碎処理した CS のルーメン内の発酵様相を明らかにすることは, 破碎処理 CS の栄養を効率的に利

連絡者: 谷川珠子 (fax : 0156-64-5349, e-mail : t.tanigawa@agri.pref.hokkaido.jp)

用した併給飼料の給与方法を検討するためにも重要である。

そこで本研究では、破碎処理 CS を効率的に利用した乳生産を図ることを目指し、破碎処理の有無が乾乳牛の養分利用に及ぼす影響を検討した。

材料および方法

1. 供試飼料、供試動物および飼養管理

ルーメンおよび十二指腸カニューレを装着したホルスタイン種乾乳牛 3 頭（試験開始時の平均体重 683 ± 79 kg）を供試した。

トウモロコシの品種は 39B29（早生の早）を用い、北海道立畜産試験場内の圃場で栽培した。供試 CS は 2003/10/10（黄熟中期）に、自走式ハーベスタで設定切断長を 17 mm として、破碎処理なし（未破碎 CS）またはローラ間隔 5 mm で破碎処理し（破碎 CS）、それぞれ畜産試験場内の 50 t 容のバンカーサイロに詰め込み、シートをかけて密閉した。サイロは調製後 50 日経過した後開封し、CS を供試した。

それぞれの CS に飼料全体の粗タンパク質（CP）含量が 14% となるように大豆粕（大豆油かす；丹波屋、北海道）を混合し、残食量が原物で給与量の 10% となるように飽食給与した。未破碎 CS および破碎 CS を給与した区をそれぞれ未破碎区および破碎区とした。CS と大豆粕の乾物混合比は未破碎区、破碎区とも 84 : 16 であった。飼料は 1 日 1 回 10 : 30 に給与した。ミネラル剤（バイミルク；日本全薬工業、福島）200 g をトップドレス給与し、水は自由摂取とした。

試験期間は予備期 9 日間、本期 5 日間とし、破碎区、未破碎区の順で試験を行った。養分消化率は酸化クロムを指標として推定した。酸化クロム、フスマおよび糖蜜を酸化クロム含量が 10%（乾物比）となるように混合し成型したペレットを作成し、予備期 9 日間および本期 3 日目までの 9 : 00 および 21 : 00 にペレット 50 g をルーメンカニューレから投与した。

供試動物へのカニューレの装着および飼養管理については、北海道立畜産試験場動物実験規約に基づいて行った。

2. 試料採取および分析方法

飼料摂取量は、本期 1～5 日目に給与量から残食量を差引くことにより求め、5 日間の平均値を統計分析に用いた。本期 1～3 日目の 9 : 00 に給与 CS のサンプルを、9 : 00 および 21 : 00 に糞サンプルを直腸から採取し、60℃ で 48 時間通風乾燥した後、CS サンプルの一部および個体ごとの糞サンプルをそれぞれ 3 日分混合して 1 mm のスクリーンをつけたウィレー型粉碎機で粉碎した。通風乾燥した CS サンプル約 200 g を、目開き 19.0, 9.50 および 1.18 mm の篩および受け皿をつけた電磁式篩振とう器を用いて篩別し、CS の粒度分布を測定した。

給与した大豆粕のサンプルは、本期 1 日目の 9 : 00 に採取し、通風乾燥せずに粉碎した。十二指腸内容物は本期開始から 3 日間、1 日ごとに 1 時間ずつ採取時間をずらして 3 時間間隔で十二指腸カニューレから約 500 mL 採取し、個体ごとに 3 日分を混合した。十二指腸内容物の一部をアンモニア態窒素濃度（NH₃-N）濃度測定のため、-28℃ で凍結保存し、残りは凍結乾燥したあと粉碎した。給与飼料、糞および十二指腸内容物の乾物、粗灰分、CP、粗脂肪および NDF 含量は常法（自給粗飼料品質評価研究会 2001）に準じて分析した。デンプンは Total starch assay kit（Megazyme, Co., Wicklow, Ireland）を用いて測定した。糞および十二指腸内容物のクロム含量はリン酸カリ試薬法（武政 1992）を用いて測定した。

本期 4 日目の 8 : 00 から 5 日目の 8 : 00 までの 24 時間の供試牛の行動をビデオで撮影し、行動型を採食、反芻、立位および横臥の 4 区分に分けて、1 分間隔で記録し、採食時間、反芻時間およびそれらを合計した総咀嚼時間を算出した。

本期 5 日目の 10 : 00 から翌日の 10 : 00 まで 3 時間おきにルーメンフィステルからルーメン液約 500 mL を採取し、採取後すぐに pH メーター（PH82；横河電機、東京）により、pH を測定した後、一部を NH₃-N 濃度および揮発性脂肪酸（VFA）濃度の測定まで -28℃ で凍結保存した。十二指腸内容物およびルーメン液の NH₃-N 濃度はインドフェノール法（日本分析化学会北海道支部 1981）に準じて測定した。ルーメン液の VFA 濃度はガスクロマトグラフ（GC-17A；島津製作所、京都）を用いて測定した。採取したルーメン液の一部を 4 重ガーゼで漉し、個体ごとに混合して、ルーメン液中の微生物体の分離に用いた。ルーメン液からの微生物体の分離は Smith と McAllan（1974）の方法、プリン体含量の測定は Zinn と Owens（1986）の方法に準じて行った。

3. 各種指標の計算および統計処理

十二指腸内容物流量および糞量は、1 日の酸化クロム投与量を十二指腸内容物および糞の酸化クロム濃度で除して算出し、消化管部位別のみかけの養分消化率を下記の式を用いて算出した。

*ルーメン内消化率 = (摂取した養分量 - 十二指腸へ移行した養分量) / 摂取した養分量 × 100

*総消化管消化率 = (摂取した養分量 - 糞中へ排泄された養分量) / 摂取した養分量 × 100

給与飼料の TDN 含量は、NRC 乳牛飼養標準（NRC 2001）に従い、飼料中の非繊維性炭水化物（NFC）、CP、粗脂肪および NDF 含量に、それぞれの総消化管消化率を乗じることにより算出した。

*TDN = 可消化NFC + 可消化CP + 可消化粗脂肪 × 2.25 + 可消化NDF - 7

十二指腸へ移行した総窒素に占める微生物体由来の窒素割合は、微生物体のプリン体濃度を十二指腸内容物の

プリン体濃度で除して求めた。十二指腸への微生物体窒素および飼料由来の窒素移行量は下記の式を用いて算出した。

* 微生物体由来窒素移行量 = 十二指腸への窒素移行量 × 微生物体窒素割合

* 飼料由来窒素移行量 = 十二指腸への窒素移行量 - (微生物体窒素移行量 + NH₃-N移行量)

処理間の有意差の検定は対のある t 検定を用い、有意水準は $P < 0.05$ とした。

結果および考察

1. 給与飼料の化学成分、CS の粒度分布および養分摂取量

未破砕 CS、破砕 CS および給与飼料の化学成分および CS の粒度分布を表 1 に示す。未破砕 CS と破砕 CS でいずれの化学成分も差はなく、黄熟期のトウモロコシにおいて破砕処理は CS の化学成分に影響しないことが示された。大豆粕を混合した飼料全体でも化学成分に差はなかった。Andrae ら (2001) および Ebling と Kung (2004) も、破砕処理は CS の化学成分に影響しないことを報告しており、本試験の結果はこれらと一致するものであった。未破砕 CS の 19.0 mm 以上の飼料片割合は 14% であったのに対し、破砕 CS では 1% と大きく低下しており、1.18 mm 以下の飼料片割合が 24% と高まった。Andrae ら (2001) および Cooke と Bernard (2005) も、本試験

と同様に破砕 CS では 19 mm 以上の飼料片割合が低下し、10 mm 以下の飼料片割合が高まることを示している。

乾物および養分摂取量を表 2 に示す。乾物摂取量は未破砕区 11.2 kg/日、破砕区 12.5 kg/日で、破砕区が高く ($P < 0.05$)、給与飼料の成分含量は区間に差がなかったため、乾物摂取量の高い破砕区で CP およびデンプン摂取量が高く ($P < 0.05$)、NDF および NFC 摂取量も高い傾向にあった。本試験と同様に、Bal ら (2000) および Andrae ら (2001) も、破砕処理によって乾物摂取量は増加する傾向にあることを示している。Andrae ら (2001) は、破砕 CS は未破砕 CS より飼料片の粒度が小さく、ルーメンからの通過速度が高まるため (Weigand ら 1993)、破砕処理 CS 給与時に乾物摂取量が増加すると考察している。さらに、Dhiman ら (2000) は、破砕処理により CS 調製時の詰め込み密度が高まり、発酵品質が向上するため、乾物摂取量が増加したと考察している。本試験では、CS の発酵品質は測定していないが、Dhiman ら (2000) と同様に、破砕 CS で発酵品質が向上していた可能性がある。破砕処理による CS の飼料片粒度の低下と発酵品質の向上が、本試験の破砕区でも乾物摂取量が高まった原因と考えられる。

2. 消化管部位別の消化率および TDN

ルーメン内および総消化管における見かけの消化率および給与飼料の TDN を表 3 に示す。有機物 (OM) およ

Table 1 Nutrient composition of experimental corn silage, soybean meal and diets and particle size distribution of corn silage

		Corn silage ¹		Soybesn meal	Diet ²	
		Unprocessed	Processed		Unprocessed	Processed
Nutrient composition						
DM	(%)	31.7	29.3	90.4	35.4	33.1
OM	(% DM)	95.7	95.1	93.3	95.3	94.8
CP	(% DM)	7.5	7.5	49.8	14.4	14.5
NDF	(% DM)	51.1	50.7	10.2	44.3	44.0
Starch	(% DM)	20.8	21.1	0.8	17.5	17.7
NFC	(% DM)	36.2	35.6	32.0	35.4	35.0
Particle size distribution						
> 19.0 mm	(%)	14	1	—	—	—
> 9.50 mm	(%)	10	8	—	—	—
1.18 to 9.50 mm	(%)	68	68	—	—	—
< 1.18 mm	(%)	8	24	—	—	—

DM, Dry matter ; OM, Organic matter ; CP, Crude protein ; NDF, Neutral detergent fiber ; NFC, Non fibrous carbohydrates

— ; Not determined

¹ CS was harvested at yellow ripe stage of maturity. Roller clearance for processed silage was set at 5 mm and theoretical length of cut for processed and unprocessed CS was 17 mm.

² Diet was a mixture of corn silage and soybean meal at proportion of 84 : 16 (DM basis)

び CP 消化率は区間に差がなかった。他の研究において破砕処理は総消化管における OM および CP 消化率に影響しないことが示されており (Bal ら 2000 ; Johnson ら 2002b ; Cooke と Bernard 2005), 本試験の結果もこれらの報告と一致した。

ルーメン内の NDF 消化率は区間に差がなかった。本試験と同様に、破砕処理をしてもルーメン内の NDF 消化率は変化しないことが報告されているが (Johnson ら 2002a), *in situ* NDF 消失率は破砕 CS で高まること示されており (Andrae ら 2001), 破砕処理の影響が *in situ* と *in vivo* で異なっている。破砕処理により CS 飼料片の表面積は増加するものの、飼料片のサイズは低下し、ルーメンの通過速度が高まるため (Schwab ら 2002 ; Ebling

と Kung 2004), 結果として *in vivo* では破砕処理をしてもルーメン内の NDF 消化率に差がなかった可能性がある。総消化管における NDF 消化率は未破砕区 62.1% に対して、破砕区 66.1% で破砕処理によって約 4% 高まる傾向にあり ($P = 0.10$), この結果は、総消化管における NDF 消化率が 3~9% 高まることを示した過去の報告と一致した (Weiss と Wyatt 2000 ; Johnson ら 2002a ; Cooke と Bernard 2005)。しかし、Bal ら (2000) および Dhiman ら (2000) は、破砕 CS 給与時に NDF 消化率が低下することを示した。彼らは、破砕 CS は以下に示すようにデンプン消化率が高まるために繊維分解菌の活性が低下し、さらに飼料片粒度が小さいためルーメン内容物の通過速度が高まり、NDF 消化率が低下すると考察し

Table 2 Effects of feeding of mechanically processed corn silage on nutrient intake of cows

		Corn silage		Significant difference ¹
		Unprocessed	Processed	
DM	(kg/day)	11.2 ± 0.5	12.5 ± 0.6	*
OM	(kg/day)	10.7 ± 0.5	11.9 ± 0.6	*
CP	(kg/day)	1.6 ± 0.1	1.8 ± 0.1	*
NDF	(kg/day)	1.8 ± 0.1	2.2 ± 0.1	$P = 0.06$
Starch	(kg/day)	2.8 ± 0.1	3.2 ± 0.2	*
NFC	(kg/day)	4.0 ± 0.2	4.4 ± 0.2	$P = 0.07$

Mean ± standard deviation

¹ * $P < 0.05$

Table 3 Effects of feeding of mechanically processed corn silage on apparent ruminal digestibility, total tract digestibility and total digestible nutrients (TDN) of diets

Item		Corn silage		Significant difference ¹
		Unprocessed	Processed	
Ruminal digestibility				
OM	(%)	56.5 ± 9.1	60.6 ± 1.0	NS
NDF	(%)	54.6 ± 14.0	56.7 ± 1.2	NS
Starch	(%)	53.9 ± 24.9	86.0 ± 5.7	<i>P</i> = 0.08
NFC	(%)	68.7 ± 6.8	73.2 ± 4.3	NS
Total tract digestibility				
OM	(%)	77.3 ± 1.5	77.0 ± 3.2	NS
CP	(%)	80.7 ± 1.1	81.3 ± 1.2	NS
NDF	(%)	62.1 ± 2.8	66.1 ± 1.9	<i>P</i> = 0.10
Starch	(%)	96.7 ± 1.6	99.9 ± 0.1	*
NFC	(%)	89.3 ± 1.8	92.9 ± 1.0	*
TDN	(% DM)	68.1 ± 1.1	71.2 ± 1.1	*

Mean ± standard deviation

¹ NS : Not significant ($P > 0.10$), * $P < 0.05$

ている。Bal ら (2000) は、設定切断長が 9.5 mm のとき、ローラ間隔 1 mm で破碎処理すると NDF 消化率は大きく低下することを示しており、設定切断長が短い場合にローラ間隔を狭くして破碎処理すると、飼料片粒度が低下し、ルーメンの発酵速度および通過速度が大きく高まるため、NDF 消化率が低下する可能性がある。本試験のように、設定切断長を 17 mm と長くし、ローラ間隔を 5 mm とした破碎処理条件では、ルーメン内の NDF 消化率は変化しないことが示唆された。

ルーメン内におけるデンプンの消化率は未破碎区 53.9% であったのに対して、破碎区 86.0% と約 30% 高まる傾向にあった ($P = 0.08$)。破碎処理によるルーメン内デンプン消化率の向上は、*in situ* (Bal ら 2000) および *in vivo* (Johnson ら 2002a) の結果と一致している。破碎 CS は未破碎 CS に比べて、損傷を受けた子実の割合が高く、内部の消化されやすいデンプンが露出しているため、ルーメン微生物にデンプンが利用されやすくなると考えられている (Johnson ら 2002c ; Ebling と Kung 2004)。実際、本試験とほぼ同様の飼料サンプルを用いた *in situ* 分析において、破碎 CS へのデンプン分解菌の付着および増殖促進が確認されている (Kozakai ら 2007)。Bal ら (2000) および Andrae ら (2001) は、*in situ* において、24 時間のデンプン消失率は未破碎に比べ、破碎処理 CS で 10~20% 高まることを示し、Johnson ら (2002a) は *in vivo* において、破碎処理によりルーメン内のデンプン消化率が 15~20% 高まることを報告している。本試験のルーメン内のデンプン消化率は、未破碎区に比べ、破碎区で約 30% 高く、Johnson ら (2002a) の報告よりも消化率が大きく向上した。Johnson ら (2002a) では飼料中の CS 割合が乾物比で 26% であったのに対して、本試験の飼料中 CS 割合は 84% と高かったため、破碎処理がデンプン消化率に及ぼす効果が表れやすかったと考えられる。総消化管においても破碎区でデンプン消化率が高かった ($P < 0.05$)。本試験の結果と同様に、総消化管におけるデンプン消化率が破碎処理によって高まることは多くの試験で報告されている (Johnson ら 2002a ; Ebling と Kung 2004 ; Cooke と Bernard 2005)。しかし、総消化管におけるデンプン消化率の向上は本試験および過去の報告ともに 3~5% 程度であり、ルーメン内のデンプン消化率に比べて破碎処理の影響は小さかった。破碎処理は特にルーメン内のデンプン消化率の向上に大きく影響することが示された。

給与飼料の化学成分は区間に差がなかったが (表 1)、総消化管 NDF 消化率は破碎区で高い傾向にあり ($P = 0.10$)、NFC 消化率も破碎区で高かったため ($P < 0.05$)、給与飼料の TDN は未破碎区 68.1%、破碎区 71.2% で破碎区が 3% 向上した ($P < 0.05$)。Johnson ら (2002a) も、破碎処理によって飼料全体の TDN が約 2% 高まることを示しており、本試験の結果と一致した。大豆粕の

TDN を乾物中 89.6% (農業技術研究機構 2001) とし、各区の CS と大豆粕の混合比から CS の TDN を試算すると、未破碎 CS は 64.5%、破碎 CS は 68.0% となり、設定切断長 17 mm の条件では、ローラ間隔 5 mm の破碎処理によって CS の TDN は 3.5% 高まることが示された。Cooke と Bernard (2005) は、ローラ間隔 1~2 mm で破碎処理の効果が得られ、間隔が 8 mm ではすり潰し効果が十分に得られないため、養分消化率は向上しないことを示したが、本試験の結果からローラ間隔 5 mm でも 1~2 mm で破碎処理したときと同程度にデンプン消化率および TDN を高められることが示唆された。

3. 十二指腸への窒素移行量、微生物体窒素合成およびルーメンのアンモニア態窒素濃度

窒素摂取量、十二指腸への窒素移行量および微生物体窒素合成効率を表 4 に、飼料給与 24 時間後までのルーメン液の $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度の推移を図 1 に示す。ルーメン内における飼料由来の CP 消化率は区間に差がなかったが、破碎区は窒素摂取量が高いため ($P < 0.05$)、飼料由来の CP の可消化量は破碎区で高い傾向にあった ($P = 0.09$)。破碎区は未破碎区に比べ、十二指腸への窒素移行量は多い傾向にあったが ($P = 0.10$)、微生物体由来および飼料由来の窒素移行量は区間に差がなく、ルーメン内可消化 OM 量に対する微生物体窒素合成量 (微生物体窒素合成効率) も区間に差がなかった。OM 摂取量が増加すると、十二指腸への窒素移行量も増加することが示されており (Clark ら 1992)、破碎区で十二指腸への窒素移行量が高かったのは、OM 摂取量が多かったことが要因であった可能性がある。

破碎区の $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度は、飼料給与 5.5 時間後に未破碎区に比べて有意に高く ($P < 0.05$)、それ以降も破碎区で高く推移する傾向にあり、これは破碎区で CP 摂取量が高く (表 2)、可消化窒素量が多い傾向にあったため (表 4) と考えられた。微生物体窒素移行量および微生物体窒素合成効率は区間に差がなかった。微生物体窒素の合成量はルーメン内の炭水化物とタンパク質の分解速度および分解量が同期化することによって増加するといわれており (Herrera-Salsana ら 1990)、本試験の破碎区は未破碎区に比べ、ルーメン内のデンプン消化率は高く、可消化窒素量が多い傾向にあったにも関わらず、微生物体窒素移行量は増加しなかった。破碎処理 CS 給与時に適した併給タンパク質飼料の給与方法について、今後検討が必要である。また、本試験で得られたルーメン内可消化 OM (OMDR) 当たりの微生物体窒素合成効率は 14.1 および 12.6 g/kgOMDR であり、過去の報告で示された 13~32 g/kgOMDR (Herrera-Salsana ら 1990 ; Aldrich ら 1993) の下限に近い値であった。これらの報告では泌乳牛を用いているが、本試験では乾乳牛を用いており、乾物摂取量が少なく、ルーメン内容物の通過速度が低く、微生物体窒素合成効率が低くなった可能性がある (Clark

Figure 1 Effects of feeding of mechanically processed corn silage on ruminal pH, concentrations of ammonia-nitrogen and total VFA, and molar proportions of individual VFA in cows fed diets containing unprocessed (◇) or processed (◆) corn silage. Vertical bar represents standard deviation. *: significantly different from unprocessed ($P < 0.05$).

ら 1992)。

4. ルーメン pH および VFA 濃度

飼料給与 24 時間後までのルーメン液の pH および VFA 濃度の推移を図 1 に示す。破碎区はルーメン内デンプン消化率が高い傾向にあったが ($P = 0.08$)、ルーメン液の pH は飼料給与後 15~19 時間で有意差があるものの、区間の差は小さく、それ以外の時間でも区間に差はみられなかった。Bal ら (2000) および Schwab ら (2002) は、破碎処理により CS の NDF 含量は変化しないが、未破碎に比べ、破碎 CS 給与時には乾物摂取量が高まること

により、NDF 摂取量も高まるため、デンプン消化率が高くてもルーメン液の pH は変化しないと報告している。本試験でも破碎区は未破碎区に比べ、NDF 摂取量が高い傾向にあったため (表 2)、ルーメン内のデンプン消化率が高かったにもかかわらず (表 3)、ルーメン液の pH は区間に大きな差がなかった可能性がある。しかし、ルーメン液の pH が最低となった時間は、未破碎区が飼料給与 8.5 時間後であったのに対し、破碎区は 5.5 時間後と早く、破碎処理によってデンプンの消化率とともに、消化速度も高まったことが示唆された。

ルーメン液の総 VFA 濃度は飼料給与 5.5 時間後に破碎区が高く ($P < 0.05$), それ以降は 17.5 時間後に有意差はあるものの区間の差は小さかった。また, VFA 中の酢酸割合はすべての時間において区間に差はなかったが, 破碎区は未破碎区に比べ, プロピオン酸割合が低く, 酪酸割合が高く推移する傾向にあった。本試験と同様に, Rojas-Bourrillon ら (1987) は, 破碎処理により VFA 中のプロピオン酸割合が低く, 酪酸割合が高まることを示した。破碎 CS では, デンプン主体の子実がより利用されやすい形態となっていると考えられ, デンプン消化にかかわるルーメン細菌のうち, 酪酸生成菌の割合が高かった可能性がある。しかし, Dhiman ら (2000) は, 本試験とは逆に, 破碎処理 CS 給与時にはルーメン液の pH および VFA 中の酢酸割合が低下し, プロピオン酸割合が高まることを報告しており, Bal ら (2000) および Johnson ら (2002b) は, 破碎処理がルーメン液性状に及ぼす影響は小さいことを示した。破碎処理がルーメン液

性状や微生物相に及ぼす影響については一定の結果が得られておらず, 今後検討が必要である。

5. 咀嚼行動

咀嚼時間, 採食速度および粗飼料価指数 (RVI) を表 5 に示す。反芻時間および総咀嚼時間は区間に差がなかったが, 破碎区では採食時間が短く ($P < 0.01$), 採食速度が高かった ($P < 0.05$)。Schwab ら (2002) も, 未破碎に比べ, 破碎処理 CS 給与時には, 採食速度が高まるが, 反芻時間は変化しないことを示した。設定切断長が 19 mm と同じでも, 破碎処理すると 19 mm 以上の飼料片割合が低下し (Ebling と Kung 2004), 実平均切断長は 2.25 mm 短くなることが報告されている (Schwab ら 2002)。本試験においても破碎処理によって 19 mm 以上の飼料片割合が大きく低下しており, 採食時咀嚼が少なくても嚥下しやすくなり, 破碎区で採食速度が高まったと考えられる。

破碎処理により, 飼料片粒度は低下するにも関わらず

Table 4 Effects of feeding of mechanically processed corn silage on nitrogen (N) intake, flow of N fractions to the duodenum and efficiency of microbial N synthesis of cows

Item			Corn silage		Significant difference ¹
			Unprocessed	Processed	
N intake	(g/day)		258 ± 13	295 ± 15	*
N digestibility in the rumen	(%)		81.0 ± 8.6	79.8 ± 2.2	NS
N digested in the rumen	(g/day)		209 ± 23	235 ± 13	$P = 0.09$
Flow to duodenum	Total N	(g/day)	159 ± 8	175 ± 16	$P = 0.10$
	NH ₃ -N	(g/day)	6 ± 1	6 ± 1	NS
	Microbial N	(g/day)	104 ± 17	109 ± 21	NS
	Dietary N	(g/day)	49 ± 22	60 ± 7	NS
Efficiency of microbial N synthesis	(g/kgOMDR ²)		14.1 ± 1.2	12.6 ± 2.3	NS

Mean ± standard deviation

¹ NS : Not significant ($P > 0.10$), * $P < 0.05$

² OMDR : OM truly digested in the rumen.

Table 5 Effects of feeding of mechanically processed corn silage on chewing activities of cows

		Corn silage		Significant difference ¹
		Unprocessed	Processed	
Eating time	(min/day)	332 ± 18	261 ± 15	**
Ruminating time	(min/day)	488 ± 119	549 ± 7	NS
Total chewing time	(min/day)	820 ± 106	810 ± 16	NS
Intake rate	(gDM/min)	33.8 ± 2.3	48.2 ± 4.8	*
RVI ²	(min/kgDM)	73.1 ± 7.8	64.7 ± 4.1	NS

Mean ± standard deviation

¹ NS : Not significant ($P > 0.10$), * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

² RVI : Roughage value index = Total chewing time (min)/DM intake (kg)

(Weigand ら 1993 ; Ebling と Kung 2004), 反芻時間は減少しなかった。De Boever ら (1993) は, 設定切断長を 4 mm から 8 mm にすると反芻時間は増加するが, 8 mm 以上にしても反芻時間はそれ以上増加しないことを示しており, 本試験の設定切断長は 17 mm と長く, 破碎処理によって 9.50 mm 以上の飼料片割合が低下しても (表 1), 未破碎区と同程度の反芻刺激が確保できたと考えられる。

本試験で得られた RVI は未破碎区 73.1 分/kg, 破碎区 64.7 分/kg で区間に差はなく, CS の設定切断長が 19 mm のときの RVI は 66.1 分/kg であることを示した Sudweeks ら (1981) の報告と同程度の値であった。咀嚼時間はルーメン内の緩衝作用を持つ唾液の分泌量と密接に関連することが知られている (Sudweeks ら 1981)。本試験において, 破碎区の反芻時間および総咀嚼時間は未破碎区と同程度であり, 緩衝作用のある唾液が十分に分泌されたことより, 破碎区はルーメン内のデンプン消化率が高くて, ルーメン液の pH が大きく低下しなかった可能性がある。

6. 結論

黄熟期のトウモロコシを設定切断長 17 mm, ローラ間隔 5 mm で破碎処理すると, ルーメン内のデンプン消化率は約 30% 高い傾向にあったが, NDF 消化率は差がなかった。破碎 CS 給与時には, 総消化管においてもデンプンおよび NFC 消化率が高く, CS の TDN は 3.5% 向上した。以上より, 設定切断長を 17 mm と長くすることにより, 総咀嚼時間やルーメン液の pH が適正に維持され, NDF 消化率を低下させずに, デンプンの利用亢進が可能と考えられた。しかし, ルーメン内可消化 OM 量に対する微生物体窒素合成効率には破碎処理の影響がみられず, ルーメン内のアンモニア態窒素濃度は破碎 CS 給与時に高かったことから, 破碎 CS に適した併給タンパク質飼料の給与方法について検討が必要と考えられる。

謝 辞

本論文を御校閲賜った北海道大学大学院農学研究院の小林泰男教授に深謝いたします。また, 家畜飼養管理および研究の補助をしていただいた北海道立畜産試験場病態生理科の皆様にご感謝の意を表します。

なお, 本試験は「破碎処理トウモロコシサイレージの第一胃内性状と消化性」(平成 13 年度研究開発調査費課題 (課題番号 118140)) の成果を取りまとめたものである。

文 献

Aldrich JM, Muller LD, Varga GA, Griel LC Jr. 1993. Nonstructural carbohydrate and protein effects on rumen fermentation, nutrient flow, and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science* **76**, 1091-1105.
 Andrae JG, Hunt CW, Pritchard GT, Kennington LR, Harrison JH,

Kezar W, Mahanna W. 2001. Effect of hybrid, maturity, and mechanical processing of corn silage on intake and digestibility by beef cattle. *Journal of Animal Science* **79**, 2268-2275.
 Bal MA, Coors JG, Shaver RD. 1997. Impact of the maturity of corn for use as silage in the diets of dairy cows on intake, digestion, and milk production. *Journal of Dairy Science* **80**, 2497-2503.
 Bal MA, Shaver RD, Jirovec AG, Shinnors KJ, Coors JG. 2000. Crop processing and chop length of corn silage : Effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science* **83**, 1264-1273.
 Clark JH, Klusmeyer TH, Cameron MR. 1992. Microbial protein synthesis and flows of nitrogen fractions to the duodenum of dairy cows. *Journal of Dairy Science* **75**, 2304-2323.
 Cooke KM, Bernard JK. 2005. Effect of length of cut and kernel processing on use of corn silage by lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* **88**, 310-316.
 De Boever JL, De Brabander DL, De Smet AM, Vanacker JM, Boucque CV. 1993. Evaluation of physical structure. 2. Maize silage. *Journal of Dairy Science* **76**, 1624-1634.
 Dhiman TR, Bal MA, Wu Z, Moreira VR, Shaver RD, Satter LD, Shinnors KJ, Walgenbach RP. 2000. Influence of mechanical processing on utilization of corn silage by lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* **83**, 2521-2528.
 Ebling TL, Kung, Jr. L. 2004. A comparison of processed conventional corn silage to unprocessed and processed brown midrib corn silage on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science* **87**, 2519-2527.
 Herrera-Saldana R, Gomez-Alarcon R, Torabi M, and Huber JT. 1990. Influence of synchronizing protein and starch degradation in the rumen on nutrient utilization and microbial protein synthesis. *Journal of Dairy Science* **73**, 142-148.
 自給粗飼料品質評価研究会編. 2001. 改訂粗飼料の品質評価ガイドブック. pp. 5-40. 社団法人日本草地畜産種子協会, 東京.
 Johnson LM, Harrison JH, Davidson D, Robutti JL, Swift M, Mahanna WC, Shinnors K. 2002c. Corn silage management I : Effects of hybrid, maturity, and mechanical processing on chemical and physical characteristics. *Journal of Dairy Science* **85**, 833-853.
 Johnson LM, Harrison JH, Davidson D, Swift M, Mahanna WC, Shinnors K. 2002a. Corn silage management II : Effects of hybrid, maturity, and mechanical processing on digestion and energy content. *Journal of Dairy Science* **85**, 2913-2927.
 Johnson LM, Harrison JH, Davidson D, Swift M, Mahanna WC, Shinnors K. 2002b. Corn silage management III : Effects of hybrid, maturity, and mechanical processing on nitrogen metabolism and ruminal fermentation. *Journal of Dairy Science* **85**, 2928-2947.
 Kozakai K, Nakamura T, Kobayashi Y, Tanigawa T, Osaka I, Kawamoto S, Hara S. 2007. Effect of mechanical processing of corn silage on in vitro ruminal fermentation, in situ bacterial colonization and dry matter degradation. *Canadian Journal of Animal Science* **87**, 259-267.
 National Research Council (NRC). 2001. Nutrients requirements of dairy cattle. 7th revised edn. National Academy Press, Washington DC.
 日本分析化学会北海道支部. 1981. 水の分析 (第 3 版). pp. 210, 358. 化学同人, 北海道.
 農業技術研究機構編. 2001. 日本標準飼料成分表 (2001 年度版). pp. 40-46. (独)農業技術研究機構, 東京.

- Philippeau C, Michalet-Doreau B. 1997. Influence of genotype and stage of maturity of maize on rate of ruminal starch degradation. *Animal Feed Science and Technology* **98**, 25–35.
- Rojas-Bourrillon A, Russell JR, Allen Trenkle, McGilliard AD. 1987. Effects of rolling on the composition and utilization by growing steers of whole-plant corn silage. *Journal of Animal Science* **64**, 303–311.
- Schwab EC, Shaver RD, Shinnors KJ, Lauer JG, Coors JG. 2002. Processing and chop length effects in brown-midrib corn silage on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science* **85**, 613–623.
- Smith RH, McAllan AB. 1974. Some factors influencing the chemical composition of mixed rumen bacteria. *British Journal of Nutrition* **31**, 27–34.
- Sudweeks EM, Ely LO, Mertens DR, Sisk LR. 1981. Assessing minimum amounts and form of roughages in ruminant diets : roughage value index system. *Journal of Animal Science* **53**, 1406–1118.
- 武政正明. 1992. リン酸カリ試薬による酸化クロム定量法の改良. 畜産試験場報告 **52**, 7–13.
- 谷川珠子, 大坂郁夫, 原 悟志, 川本 哲. 2008. 熟期の異なるとうもろこしサイレージの給与が乳牛の炭水化物およびタンパク質利用性に及ぼす影響. 日本畜産学会報 **79**, 29–35.
- Weigand E, Meyer U, Guth N. 1993. Intake, chewing activity and carbohydrate digestibility by lactating dairy cows fed maize silage with a different physical structure. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* **69**, 120–132.
- Weiss WP, Wyatt DJ. 2000. Effect of oil content and kernel processing of corn silage on digestibility and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science* **83**, 351–358.
- Zinn RA, Owens FN. 1986. A rapid procedure for purine measurement and its use for estimating net ruminal protein synthesis. *Canadian Journal of Animal Science* **66**, 157–166.

Effects of feeding of mechanically processed corn silage on carbohydrate and protein utilization in dairy cows

Tamako TANIGAWA¹, Ikuko OOSAKA², Satoshi KAWAMOTO¹ and Satoshi HARA¹

¹ Hokkaido Animal Research Center, Shintoku, Hokkaido 081-0038, Japan

² Hokkaido Central Agricultural Experiment Station, Naganuma, Hokkaido 069-1395, Japan

Corresponding : Tamako TANIGAWA (fax : +81 (0) 156-64-5349, e-mail : t.tanigawa@agri.pref.hokkaido.jp)

The object of this study was to evaluate the effects of feeding of mechanically processed corn silage (CS) on carbohydrate and protein utilization in cows. CS was prepared by harvesting field corn at yellow ripe stage of maturity in 17 mm theoretical length of cut (TLC) with or without subsequent kernel processing using steel rollers set at 5 mm width and ensiling in a bunker silo (processed and unprocessed CS, respectively). CS was given to three ruminally and duodenally cannulated dry cows with soybean meal to equalize crude protein supply. Mechanical processing did not affect chemical composition of CS. DM, crude protein and starch intake of processed CS were significantly higher ($P < 0.05$) than those of unprocessed CS. Ruminal digestibility of starch tended to increase ($P = 0.08$) by mechanical processing, though that of neutral detergent fiber was not affected. Total tract digestibility of starch and content of total digestible nutrients of processed CS were significantly higher ($P < 0.05$) than those of unprocessed CS. Efficiency of microbial nitrogen synthesis was not affected by mechanical processing. Ruminal pH and ruminating time were not affected by mechanical processing, while eating rate was significantly higher ($P < 0.05$) when processed CS was fed. The results suggest that mechanical processing with 17 mm TLC increased utilization of starch without detracting total chewing time of cows.

Nihon Chikusan Gakkaiho **81** (1), 11–19, 2010

Key words : corn silage, dairy cow, digestibility, mechanical processing, microbial nitrogen synthesis.