

可溶性炭水化物(WSC)および乳酸緩衝能(LBC) がサイレージの発酵品質に及ぼす影響

服部育男・熊井清雄*・福見良平**

Effect of Water Soluble Carbohydrate(WSC) and Lactic Buffering
Capacity(LBC) on Fermentative Quality of Silage

Ikuo HATTORI, Sumio KUMAI* and Ryouhei FUKUMI**

緒 言

サイレージ発酵の原理は、乳酸菌がサイレージ材料草中の可溶性炭水化物(WSC)を資化して乳酸を生成し、pHを4.2以下に下げることによってサイレージを長期にわたって保蔵することである。したがって、材料草中のWSC含量はサイレージ発酵、とくに乳酸発酵に深く関与し、その品質に多大な影響を及ぼすことが知られている^{1, 3, 5, 9)}。

ところで、サイレージ発酵過程において材料草中のWSC含量が充分でない場合には、pHが至適域まで下がらず、酪酸菌などが活動し、サイレージ品質を低下させてしまう。したがって、埋草中のpHをすばやく下げることは、不良発酵を抑制し乾物の損失を防ぐために極めて重要である。サイレージが至適pH域に達するに十分な乳酸を生成するには、WSC含量は一般に乾物中に8~10%以上が必要であるとされている¹²⁾。

ところで、サイレージを調製した場合、同量の乳酸が生成されても材料草によってpHの下がり方に差がある。Virtanen¹³⁾はタンパク質含量が高く、サイレージ化してもpHが至適域まで下がり難い牧草に対し、鉱酸によって強制的にpHを低下させる、いわゆるAIV法を提案した。同氏はアルファルファとアカクロープで実験を行い、両種を至適pH域まで下げるのに必要なAIV液量が違うことを報告した。McDonald⁹⁾は草種によってpHの下がり方が異なるのは、牧草自体の持つ緩衝能の大きさの違いが影響するためとしている。PlayneとMcDonald¹¹⁾は緩衝能の大きさに関与する要因は植物体内に存在する有機酸塩であるとした。また、McDonaldとHenderson⁸⁾は緩衝能を構成する要因は有機酸とタンパク質であり、その中でタンパク質の割合は10~20%程度であるとし、同時に乳酸を使って緩衝能を測定する方法を提唱して、これを乳酸緩衝能(LBC)と定義し、2、3のイネ科草のLBCを測定した。その他、緩衝能の測定方法と数種の牧草についての緩衝能の草種間差異⁴⁾、緩衝能の番草別差異⁷⁾などの研究が行われてきたが、飼料作物・牧草を網羅し、系統立てて緩衝能の測定を行った報告はほとんど見当たらない。

*草地学研究室 (Laboratory of Grassland Science)

**畜産学研究室 (Laboratory of Animal Science)

そこで筆者らは、各種飼料作物・牧草の緩衝能を測定するとともに WSC の分析を行い、それらがサイレージの発酵品質に及ぼす影響を検討した。

材料及び方法

実験材料は愛媛大学農学部圃場(松山市樽味町)において、22草種を1988年4月から1990年8月の期間に栽培した。また、農学部勝山圃場(松山市東野町)、愛媛県美川町大川嶺草地および松山市内の水田より、6草種を採取した。これら28草種を原則としてサイレージの調製適期と思われる出穂期から黄熟期に刈り取り、実験に供した。その詳細を第1表に示した。

Table 1 Forage species used in the experiments.

Classification	Crop	Scientific name	Variety	Growth stage
Corn and sorghum	corn	<i>Zea mays</i> L.	P3352 Yumi 113 Pioneer 956	dough early ripe milk-dough
	sorghum	<i>Sorghum bicolor</i> Moench	High sugar FS-305	dough dough
Soiling millet and paddy rice	African millet barnyard millet	<i>Eleusine coracana</i> (L.) Gaerth. <i>Echinochloa crus-galli</i> P. Beauv. var. <i>frumentacea</i> Wight	Aoba millet	elongation heading
	paddy rice	<i>Oryza sativa</i> L.	Matsuyama-mii	milk
Temperate grass and oats	Italian ryegrass	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	Washikari	heading
	oats	<i>Avena sativa</i> L.		heading
	orchardgrass	<i>Dactylis glomerata</i> L.		flowering
	rescue grass tall fescue	<i>Bromus catharticus</i> Vahl <i>Festuca arundinacea</i> Schreb.		heading flowering
Tropical grass	dallisgrass	<i>Paspalum dilatatum</i> Poir.		flowering
	fall panicum	<i>Panicum dichotomiflorum</i> Michx.		heading
	green panic	<i>Panicum maximum</i> Jacq. var. <i>trichoglume</i> Eyles		flowering
	guineagrass	<i>Panicum maximum</i> Jacq.	Natsukaze	flowering
	napierrgrass	<i>Pennisetum purpureum</i> Schumach		elongation
	Rhodesgrass Sudangrass	<i>Chloris gayana</i> Kunth. <i>Sorghum sudanense</i> (Piper) Stapf	Katambora	heading heading
Temperate legume	alfalfa	<i>Medicago sativa</i> L.	Natsuwakaba	flowering
	crimson clover	<i>Trifolium incarnatum</i> L.		flowering
	red clover	<i>Trifolium pratense</i> L.	Sapporo	flowering
	white clover	<i>Trifolium repens</i> L.		flowering
Tropical legume and soy bean	greenleaf	<i>Desmodium intorum</i> (Mill.) Urb.		elongation
	desmodium			
	phasey bean	<i>Macroptilium lathyroides</i> (L.) Urb.		flowering
	siratro	<i>Macroptilium atropurpureum</i> (DC)		elongation
	soy bean stylo	<i>Glycine max</i> (L.) Merr. <i>Stylosanthes guianensis</i> (Aubl.)	Kurosengoku	pod forming flowering
The other	sunflower	<i>Helianthus annuus</i> L.		dough

供試サイレージは約2 cmに細切した材料草を1 ℓ容のポリ製ミニサイロに詰め込み、密封した後40日間室内に置床して調製した。WSCの分析試料の調製は、細切した材料草の一部を真空凍結乾燥機で乾燥後粉碎し、1 mmのフルイにかけたものを用いた。LBC測定用の試料は、細切した材料草の一部を冷凍庫で一昼夜凍結したものを供試した。

乾物率は新鮮重と真空凍結乾燥機で乾燥したものの乾物重から求め、WSCはアンスロン法¹⁰⁾で、LBCはMcDonaldとHenderson⁸⁾の方法をそれぞれ用いて測定した。pHはガラス電極pHメーター、有機酸組成はフリーク法¹⁰⁾、揮発性塩基態窒素(VBN)は減圧蒸留法¹⁰⁾、全窒素(T-N)はケルダール法¹⁰⁾によってそれぞれ定量した。また、得られたデータの有意差検定は、すべてダンカン法によった。

結 果

サイレージ材料草の乾物率、WSCおよびLBCを第2表に示した。WSC含量についてイネ科牧草とマメ科牧草を比較した結果、前者の平均値が7.5%であったのに対し、後者のそれは6.6%と有意差が認められなかったが、イネ科牧草が高い傾向が認められた。LBCについて比較すると、前者の平均が35.7であるのに対し、後者のそれは46.8とマメ科草が有意に高かった。また、WSC含量とLBCについて寒地型牧草と暖地型牧草を比較した結果、LBCに関しては有意差が認められなかったが、WSC含量については寒地型牧草が有意に高かった。乾物率、WSCおよびLBCについて草種別に比較した結果、乾物率については有意差が認められなかった。WSC含量についてみると、トウモロコシ等のサイレージ用飼料作物は、他と比べ高い傾向を示した。LBCについては、ヒマワリが95.1と最高値を示し、サイレージ用飼料作物は有意に低かった。

これらの材料草で調製したサイレージの発酵品質を第3表に示した。pHについてみると、サイレージ用飼料作物、寒地型イネ科草、オオクサキビ、ネピアグラス、スーダングラス、アルファルファはpHの至適域とされる4.2以下に低下した。一方、青刈雑穀類、暖地型マメ科草およびヒマワリは至適pH域より高い値となった。サイレージ用飼料作物と寒地型イネ科草類の乳酸含量を比較すると、前者の平均が1.97%であるのに対し、後者のそれは2.50%を示し寒地型イネ科草類が高い傾向を示した。酪酸含量はpHが至適域まで低下しなかった草種の内、比較的pHの低かったアカクロバとファゼービーンを除く草種で認められた。酢酸含量は暖地型マメ科草がやや高い傾向を示した。VBN/T-Nについてはサイレージ用飼料作物、寒地型イネ科草、アカクロバおよびアルファルファが低かった。

以上の結果をもとに、DM、WSCおよびLBCとpH、乳酸およびフリーク評点との間のそれぞれの相関係数を算出した(第4表)。このうちDMについては、乳酸含量との間に $p < 0.05$ 、フリーク評点との間に $p < 0.01$ で有意な正の相関が認められた。WSC含量については、フリーク評点、乳酸含量との間に $p < 0.001$ で正の相関、pHとの間に $p < 0.01$ で有意な負の相関が認められた。また、LBCについては、pHとの間に $p < 0.05$ で有意な正の相関があり、フリーク評点とは $p < 0.01$ で有意な負の相関があったが、乳酸との間には有意な相関が見られなかった。

Table 2 DM^{a)}, WSC^{b)} and LBC^{c)} of silage materials.

Species (variety)	DM(%)	WSC(%)	LBC
corn (P 3352)	23.0	15.4	10.0
(Yumi 113)	25.5	12.9	12.3
sorghum (Pioneer 956)	21.5	8.2	14.5
(High sugar)	20.5	13.8	10.4
(FS-305)	26.5	19.5	13.1
mean	23.4 ^A	14.0 ^A	12.1 ^A
African millet	12.2	4.2	50.2
barnyard millet (Aoba millet)	16.5	6.2	45.9
paddy rice	35.4	8.6	31.7
mean	21.4 ^A	6.3 ^B	42.6 ^B
Italian ryegrass (Wasehikari)	17.8	10.2	35.3
oats	19.4	9.5	28.2
orchardgrass	21.5	7.8	32.9
rescue grass	22.9	10.2	37.5
tall fescue	26.4	7.3	42.8
mean	21.6 ^A	9.0 ^B	35.3 ^B
dallisgrass	19.5	4.9	37.8
fall panicum	17.4	9.1	42.2
green panic	19.1	4.5	30.5
guineagrass (Natsukaze)	18.4	4.5	30.0
napierrgrass	15.7	5.8	33.9
Rhodesgrass (Katambora)	18.0	4.4	31.8
Sudangrass	32.9	12.0	45.9
mean	20.1 ^A	6.5 ^B	36.0 ^B
alfalfa (Natsuwakaba)	18.3	7.9	43.6
crimson clover	19.0	7.9	54.4
red clover (Sapporo)	16.5	6.7	57.1
white clover	11.0	7.6	36.1
mean	16.2 ^A	7.5 ^B	47.8 ^B
greenleaf desmodium	14.3	5.3	39.1
phasey bean	17.8	6.9	46.5
siratro	15.8	5.7	40.8
soy bean (Kurosengoku)	24.2	7.7	70.4
stylo	18.9	3.9	32.8
mean	18.2 ^A	5.9 ^B	45.8 ^B
sunflower	12.5 ^A	10.3 ^{AB}	95.1 ^C

a) Dry matter. b) Water soluble carbohydrate.

c) Lactic buffer capacity (lactic acid mg/DM).

Means with different superscripts within columns are significantly different ($p < 0.05$).

Table 3 Fermentative quality of silages after 40 days of ensiling period.

Silage materials (variety)	pH	Organic acid (FM%)				Flieg's score	VBN ^{a)} T-N ^{b)} (%)
		Acetic	Butyric	Lactic	Total		
corn (P 3352)	3.6	0.38	0	1.92	2.30	95	6.0
(Yumi 113)	3.6	0.31	0	2.12	2.43	100	3.9
sorghum (Pioneer 956)	3.6	0.31	0	1.64	1.95	95	5.4
(High sugar)	3.6	0.52	0	2.02	2.54	95	3.6
(FS-305)	3.5	0.50	0	2.13	2.63	95	3.1
mean	3.6 ^A	0.40 ^A	0	1.97 ^{AB}	2.37 ^{AB}	96 ^A	4.4 ^A
African millet	4.6	1.30	0.17	0.35	1.32	30	21.5
barnyard millet (Aoba millet)	4.5	0.54	0.20	1.07	1.81	65	17.5
paddy rice	6.3	0.43	0.16	0.50	1.09	40	13.2
mean	5.1 ^{BC}	0.75 ^A	0.18	0.64 ^C	1.41 ^B	45 ^{BC}	17.4 ^{BC}
Italian ryegrass (Wasehikari)	3.8	0.47	0	1.21	1.68	88	5.4
oats	3.9	0.72	0	2.82	3.54	95	3.9
orchardgrass	3.9	0.65	0	2.42	3.07	95	4.1
rescue grass	4.1	0.56	0	3.10	3.66	95	3.9
tall fescue	3.8	0.51	0	2.94	3.45	95	4.5
mean	3.9 ^A	0.58 ^A	0	2.50 ^A	3.08 ^A	96 ^{AB}	4.4 ^A
dallisgrass	4.5	0.55	0.10	0.71	1.35	50	12.5
fall panicum	3.9	0.38	0	2.10	2.48	95	10.7
green panic	5.4	1.35	0.35	0.13	1.48	20	32.3
guineagrass (Natsukaze)	4.5	1.00	0.08	0.45	1.59	40	19.3
napierrgrass	3.8	0.19	0	1.28	1.47	100	5.3
Rhodesgrass (Katambora)	4.5	1.00	0.03	0.56	1.59	45	18.0
Sudangrass	3.9	0.34	0	2.08	2.42	100	4.3
mean	4.3 ^{AB}	0.68 ^A	0.08	1.04 ^{BC}	1.77 ^B	64 ^{BC}	14.6 ^B
alfalfa (Natsuwakaba)	4.2	1.24	0	1.79	3.03	70	6.4
crimson clover	5.0	0.72	0.54	1.29	2.55	50	21.1
red clover (Sapporo)	4.4	1.20	0	1.76	2.96	70	8.2
white clover	4.6	0.49	0.20	0.78	1.47	45	12.4
mean	4.6 ^{AB}	0.91 ^{AB}	0.19	0.72 ^C	2.50 ^{AB}	59 ^{CD}	12.0 ^{AB}
greenleaf desmodium	5.6	1.07	0.16	0.24	1.47	30	14.0
phasey bean	4.3	0.99	0	1.39	2.38	70	10.7
siratro	4.8	1.81	0.22	0.29	2.32	30	25.1
soy bean (Kurosengoku)	4.7	1.29	0.29	1.41	3.06	45	16.3
stylo	5.2	1.70	0.03	0.29	2.03	40	16.6
mean	4.9 ^{BC}	1.37 ^A	0.14	0.24 ^C	2.26 ^B	43 ^{CD}	16.5 ^B
sunflower	5.2 ^C	0.51 ^B	1.16	0.24 ^C	1.91 ^B	10 ^D	26.6 ^C

a) Volatile basic nitrogen. b) Total nitrogen.

Means with different superscripts within columns are significantly different ($p < 0.05$).

Table 4 Correlation coefficients between pH, lactic acid and Flieg's score and DM, WSC and LBC.

	DM	WSC	LBC
pH	-0.09 ^{NS}	-0.54 ^{**}	0.45 [*]
Lactic acid	-0.45 [*]	0.61 ^{***}	0.30 ^{NS}
Flieg's score	0.47 ^{**}	0.64 ^{***}	-0.53 ^{**}

NS ; not significant.

*, **, *** ; significant at $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$, respectively.

考 察

草種別の WSC、LBC を検討した結果、WSC 含量については、トウモロコシなどのサイレージ用飼料作物が高く、寒地型牧草は暖地型牧草に比べて総じて高かった。一方、LBC については、マメ科草がイネ科草より高かったが、これは McDonald と Henderson⁸⁾ の報告と良く一致した。また、同氏らは LBC には材料草中のタンパク質含量が関与していると報告している⁸⁾ が、本試験の結果においてもタンパク質含量が高いマメ科草の LBC は、イネ科草のそれより高かった。

WSC 含量がサイレージの pH、フリーク評点および乳酸含量に及ぼす影響については、pH との間有意な負の相関 ($p < 0.01$)、フリーク評点、乳酸との間にそれぞれ有意な高い正の相関 ($p < 0.001$) が認められた。これは WSC 含量に応じて乳酸が産生されたことと、それに伴って pH が低下したことを示している。また、pH の低下が酪酸発酵を抑制したことも、フリーク評点が高くなった原因である。したがって、高品質サイレージを調製するには、まず第一に WSC 含量の高い草種を選定することが重要である。^{1, 9)}

次に LBC とサイレージの pH、フリーク評点との関係については、pH と有意な正の相関 ($p < 0.05$)、フリーク評点とは有意な負の相関 ($p < 0.01$) があった。すなわち、LBC は材料草あるいはサイレージの緩衝能の大きさを示すものであるから、LBC が高位置を示す草種は、サイレージの pH を至適域まで下げるために多くの有機酸、とくに乳酸を必要とするので、WSC 含量が不足すると pH が低下せず、その結果、酪酸発酵を起こし易いのでサイレージ用として適さないものと考えられる。

以上述べたように、サイレージ用適草種の具備すべき条件は、WSC 含量が高く、LBC が低いことであることが明らかとなった。したがって、それらの条件を満たしている登熟期のトウモロコシとソルガムは、サイレージ用草種として最適である。一方、その他の草種で WSC が比較的高い材料草で調製したサイレージの発酵品質についてみると、イタリアンライグラスやアルファルファのように LBC が中程度のものは良質サイレージが調製され、ヒマワリや青刈大豆のように LBC がとくに高いものは低品質のサイレージとなった。この結果は LBC がある程度高い草種でも、pH を至適域まで低下させるのに十分な WSC を含有していれば、乳酸含量が高い良質サイレージが調製できることを示している。本試験では、イタリアンライグラスやエンバクのように WSC が高く、LBC が中程度の草種のサイレージは、トウモロコシやソルガムなどの LBC が低いサイレージより多くの乳酸が認められている。また、トウモロコシやソルガムなどの乳酸含量の低いサイレージでは、詰め込み時に尿素や炭酸カルシウムを添加すれば、pH の低下が遅れ、乳酸菌の活動期間が長くなり、高乳酸サイ

レージが調製されたとする報告もある^{2,6)}。

以上の結果、WSC と LBC がサイレージの発酵品質に及ぼす影響については、WSC が品質向上に、LBC がその低下に互いに作用するが、pHを至適域まで低下させるのに十分なWSCを材料草が含有している場合は、LBCの影響が消去される。また、LBCがとくに高いか、もしくはWSC含量が低いときには、発酵品質の劣るサイレージが調製されることが判明した。

摘 要

サイレージの通年給与の普及によってサイレージ用作物の重要性が認識されてきた。そこで28種の材料草を供試して乳酸緩衝能(LBC)および可溶性炭水化物(WSC)がサイレージの発酵品質に及ぼす影響を明らかにし、サイレージ用適草種を選定するために、本研究を実施した。

LBCは青刈ヒマワリ、シコクビエ、栽培ヒエおよびマメ科草が高く、次いでイタリアンと暖地型イネ科草が高かった。トウモロコシとソルガムのLBCは著しく低い値を示した。WSCはトウモロコシとソルガムが高く、次いでイタリアン、ヒマワリおよびオオクサキビが高い値を示した。WSC、LBCと発酵品質に関連する項目との相関係数を求めた結果、WSCはpH、フリーク評点、VBN、乳酸含量、酢酸含量との間に高い相関、総酸含量との間に相関が認められた。一方、LBCはpH、フリーク評点との間に高い相関、VBNとの間に相関が認められた。したがって、WSCはサイレージの品質向上にLBCはその低下に互いに作用するが、材料草中に乳酸菌が乳酸を資化するに十分なWSCを含有していれば、LBCがサイレージの発酵品質に及ぼす影響は軽減されることが示唆された。また、材料草のLBCがとくに高い場合、もしくはWSC含量がとくに低い場合にはサイレージの発酵品質は低いことが明らかとなった。

本試験の結果から、サイレージ用草種としてトウモロコシ、ソルガムが最も適し、次いで寒地型イネ科草、オオクサキビが良く、マメ科草ではアルファルファ、アカクローバ、ファゼービーンが適するものと考えられた。

引用文献

- (1) Barnet, A. J. G. 1954. Silage Fermentation (1st Ed.). pp. 78-97. Butterworths. London.
- (2) Britt, D. G. and J. T. Huber. 1975. Fungal growth during fermentation and refermentation of nonprotein nitrogen treated corn silage. J. Dairy Sci. 58: 1666-1671.
- (3) Elitz, R. W. and P. J. Vandemark. 1959. Fructose dissimilation by *Lactobacillus brevis*. J. Bact. 79: 763-776.
- (4) Greenhill W. L. 1964. The buffering capacity of pasture plants with special reference to ensilage. Aust. J. Agric. Res. 15: 511-519.
- (5) Heath, E. C., J. Hurwitz, B. L. Hokecker and A. Ginsburg. 1958. Pentose fermentation by *Lactobacillus plantarum*. 1. The cleavage of xylulose 5-phosphate by phosphoketolase. J. Biol. Chem. 231: 1009-1029.
- (6) Heinrichs, A. J. and H. R. Conrad. 1984. Fermentation characteristics and feeding value of ammonia treated corn silage. J. Dairy Sci. 67: 82-87.
- (7) Jasaites, D. K., J. E. Wholt and J. L. Evans. 1987. Influence of feed content on buffering capacity of ruminant feedstuffs *in vitro*. J. Dairy Sci. 70: 1391-1403.
- (8) McDonald, P. and A. R. Henderson. 1962. Buffering capacity of herbage samples as a factor

in ensilage. *J. Sci. Food. Agric.* 13 : 395–400.

- (9) McDonald, P. 1981. *The Biochemistry of Silage* (1st ed.). pp. 1–218. John Wiley and Sons. New York.
- (10) 森本 宏 編. 1971. *動物栄養試験法*. 養賢堂. 東京.
- (11) Playne, M. J. and P. McDonald. 1966. The buffering constituents of herbage and of silage. *J. Sci. Food Agric.* 17 : 264–268.
- (12) Smith, L. H. 1962. Theoretical carbohydrate requirement for alfalfa silage production. *Agron. J.* 54 : 291–293.
- (13) Virtanen, A. I. 1947. Silage by AIV method. *Econ. Proc. Roy. Dublin Soc.* 3 : 311–342.

Summary

It is essential to establish a more rational and stable ensiling method for better economical production of ruminant feed. This study was carried out to obtain fundamental data for making good silages by employing 27 plant species. Several forage and legume crops were analyzed for water soluble carbohydrate(WSC) and lactic buffering capacity(LBC). Grasses had higher WSC content than legumes. Forage crops(corn and sorghum) for ensilage gave significantly higher WSC content than grasses and legumes. The LBC values of legumes were higher than those of grasses. The LBC values in almost all temperate forage crops were lower compared with those of tropical crops. Improvement for the fermentative quality of silages was more greatly dependent on WSC rather than LBC. The LBC had no or little influence on the ensilability of forage crops if they contained enough WSC content to produce the necessary lactic acid. However when WSC content was too low, high LBC values deteriorated the fermentative quality of silage.