

サイレージ発酵における硝酸塩の役割

酪農学園大学講師

農学博士 安宅 一夫

「生きとし生けるものすべて草なり」(旧約聖書, 創世記第1章30節)。生きとし生けるものの食料として、草の重要性は旧約聖書の時代から認識されている。

酪農は、天の恵みのもとで、土-草-家畜-人間をめぐる循環を基本とした農業であるが、その栄養連鎖の基本成分の一つとして窒素がある。

牧草は、生長に必要な窒素源として硝酸塩を吸収する。根から吸収された硝酸塩は体内の酵素作用を受けて、アミノ酸、蛋白質等に同化される。しかし、植物体内で硝酸塩の吸収と同化のバランスがくずれると、ときとして植物体内に多量の硝酸塩を蓄積することがある。

一方、反芻家畜が硝酸塩含量の高い牧草を摂取すると、食欲減退、下痢、流産、繁殖障害等を起こし、重症の場合には死亡する。これがいわゆる硝酸塩中毒である。

国土の狭隘なわが国では、牧草の高位生産を目的として、窒素肥料の多用や多量の糞尿還元により、硝酸塩含量の高い牧草が生産されやすく、家畜の硝酸塩中毒が大きな問題となっている。従って、家畜にとって安全な牧草の栽培とその利用法

の確立は焦眉の急と考えられる。

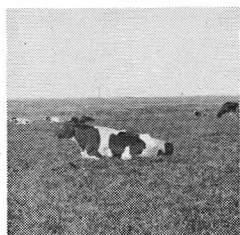
著者は、1971年から約10年間にわたり硝酸塩とサイレージ発酵との関係について研究を行い、サイレージ調製によって硝酸塩含量が減少すること、硝酸塩がサイレージの品質並びに飼料価値を改善するという新しい知見を得たので、その概要を紹介する。

1 サイレージ発酵に及ぼす要因

1) 微生物的要因：サイレージに関与する微生物は、好気性細菌、酵母、カビ、酪酸菌、乳酸菌に大別される。このうち、乳酸菌は有用菌であるが、他の微生物は不良菌である。すなわち、好気性細菌、酵母、カビ等の生育が活発になると、サイレージは堆肥のようになり、飼料として利用できなくなる。これらの微生物の生育はサイロを密閉し、嫌気的条件を保つことにより抑制できる。また酪酸菌の生育が活発になると貯蔵中の養分損失が多くなり、サイレージは悪臭を放ち、家畜の嗜好性が悪くなる。この菌の生育を抑制するには、pHを4.0以下にするか、水分含量を60%以下にするとうい。従って、良質のサイレージを作るには、サ

目次

□昭和57年産乾草の分析結果	表②
■サイレージ発酵における硝酸塩の役割	安宅 一夫… 1
■草地酪農における高収益酪農のための飼料給与方式	
- 飼料給与方式転換の経済性 -	松山 秀和… 6
□高泌乳と粗飼料	前川 裕美… 10
□ホル雄子牛の肥育試験	
- トウモロコシサイレージ給与の経済性 -	梅津 次男… 14
□昭和57年産サイレージの分析結果	表③



放牧季節がやって来る
放牧の前に馴致をお忘れなく

表1 サイレージの品質に及ぼす窒素施肥の影響

窒素 施肥量 (kg/10a)	牧 草				サイ レ ー ジ							
	水分 (%)	粗蛋白質 —	WSC (%DM)	NO ₃ -N —	pH	乳酸	酢酸 — (%) —	酪酸 —	総酸	フリーク 評 点	NH ₃ -N*	
0	72.0	7.1	9.4	0.06	5.32	1.93	0.25	0.34	2.52	56	16.2	
5	71.1	8.3	7.6	0.06	5.31	1.48	0.30	0.83	2.61	33	21.6	
10	71.6	9.9	6.7	0.08	5.93	1.82	0.36	0.83	3.01	37	30.2	
15	72.9	12.5	6.4	0.08	5.72	1.57	0.52	1.30	3.39	24	36.7	

*全Nに対する割合, %

イロを密閉し、嫌氣的条件にして乳酸発酵を促進し、pHを4.0以下にするか、乳酸発酵が期待できない場合には材料を予乾して水分含量を60%以下にするとよい。

2) 化学的要因：化学的要因としては、水溶性炭水化物(WSC)と蛋白質の影響が大きく、WSC含量が高ければ(2~3%)乳酸発酵が促進されて良質のサイレージができ、蛋白質含量が高いと良質サイレージを作ることが難しいとされている。

3) 物理的要因：物理的要因としては、水分、温度、空気が重要である。水分含量が高くなると酪酸菌の生育が活発となり、水分含量が低くなると酵母やカビが増殖しやすくなる。また温度が高くなると不良菌の生育が活発となる。良質サイレージの適温は15~25℃である。サイロ内に空気が侵入すると例外なく品質の悪いサイレージができる。従って、材料を細切し、十分に踏圧して、詰込み後直ちに密封しなければならない。

2 窒素施肥がサイレージの品質に及ぼす影響

牧草の収量は窒素施肥によって著しく増加する

表2 サイレージの品質に及ぼす窒素施肥の影響

年 次	窒素 施肥量 (kg/10a)	牧 草				サイ レ ー ジ							
		水分 (%)	粗蛋白質 —	WSC (%DM)	NO ₃ -N —	pH	乳酸	酢酸 — (%) —	酪酸 —	総酸	フリーク 評 点	NH ₃ -N*	
初年目	0	77.5	17.2	6.6	0.20	5.3	1.73	0.52	0	2.25	96	16.2	
	5	76.3	14.8	6.1	0.21	5.9	1.84	0.57	0	2.41	96	16.8	
	10	78.7	20.8	5.9	0.48	5.7	2.01	0.49	0	2.50	98	13.0	
	20	77.7	21.3	6.5	0.49	5.4	2.09	0.40	0	2.49	99	10.9	
2年目	0	76.1	9.1	8.6	0.06	5.5	1.66	0.41	0.38	2.45	47	19.7	
	5	77.7	10.3	8.3	0.06	5.6	1.23	0.66	0.66	2.55	26	35.5	
	10	79.1	16.3	7.4	0.21	4.7	1.64	0.69	0	2.33	86	11.0	
	20	79.0	16.6	7.2	0.32	4.7	1.76	0.96	0	2.72	77	11.2	
3年目	0	77.9	9.1	12.5	0.04	5.3	1.44	0.30	0.64	2.38	38	13.6	
	5	77.0	11.1	10.2	0.04	5.5	1.22	0.09	0.75	2.06	33	14.2	
	10	79.3	13.5	9.6	0.10	5.7	1.28	0.16	0.79	2.23	33	20.6	
	20	79.1	17.4	9.7	0.20	5.0	1.96	0.39	0	2.35	99	13.0	

*全Nに対する割合, %

ことが知られている。一方、窒素施肥は牧草のWSC含量を減少させ、粗蛋白質含量を増加させる。従って、サイレージ品質は窒素施肥によって影響されると考えられた。窒素施肥がサイレージの品質に及ぼす影響を検討した結果は次のようである。

(1) 窒素施肥によるサイレージの品質劣化

チモシー主体の混播草地に対して、10a当りNを0, 5, 10, 15kgの4段階で施用し、出穂期に刈取り、サイレージを調製した(表1)。牧草の成分は、窒素施肥量の増加に伴って粗蛋白質含量が増加し、WSC含量が減少したが、硝酸塩(NO₃-N)含量には変化がなかった。その結果、サイレージ品質は、窒素施肥量の増加に伴って乳酸含量が減少し、pH、酪酸、NH₃-Nの増加がみられた。サイレージの品質は、乳酸含量が多く、pHが低く、酪酸、NH₃-Nが少なく、フリーク評点の高いものが良質である。従って、窒素施肥量の増加に伴ってサイレージ品質が悪くなるのがわかる。これは、窒素施肥量が増加するのに伴って、乳酸発酵の基材となるWSCが減少し、逆に好ましくない蛋白質含量が増加するからである。

(2) 窒素施肥によるサイレージの品質改善

次に窒素施肥量の増加によってサイレージ品質が改善された例を紹介する。

オーチャードグラスに対して 10 a 当り N を 0, 5, 10, 20 kg の 4 段階で施用し、播種年から 3 年間にわたり出穂期（初年目は生育期）に刈取り、サイレージを調製した(表 2)。牧草の成分は、前実験と同様に、窒素施肥の増加に伴い粗蛋白質含量が増加し、WSC 含量の低下がみられた。一方、NO₃-N 含量は窒素施肥量の増加に伴って増加した。サイレージ品質は、初年目はすべて良質であったが、窒素施肥量の増加に伴ってさらに改善され、2 年目と 3 年目では、それぞれ N 5 kg, N 10 kg まで窒素施肥量の増加に伴って品質が悪くなったが、それ以上の窒素施肥量では逆に著しく改善された。

このように、低窒素施肥の低蛋白質・高 WSC の牧草よりも、高窒素施肥の高蛋白質・低 WSC の牧草から良質のサイレージができたことは従来の理論によって説明できない。これを牧草の NO₃-N 含量とサイレージ品質との関連で考察すると、牧草の NO₃-N 含量が乾物中 0.2% 以上になると常に良質のサイレージができることがわかった。なお、NO₃-N 含量はサイレージ調製によって激減し、サイレージ中の NO₃-N 含量はすべて乾物中 0.2% 以下となった。

以上のことから、著者は、サイレージ品質に及ぼす窒素施肥の影響には 3 つの型があることを見いだした。すなわち、窒素施肥量の増加に伴って、サイレージ品質が①悪くなる、②良くなる、③変わらない、の 3 つである。これを牧草成分との関連でみると、①と②では、窒素施肥量の増加に伴って牧草の粗蛋白質含量が増加し、WSC 含量が減少する。そして、NO₃-N 含量は①では増加しないが、②では多量に増加する（乾物中 0.2% 以上）。一方、③では粗蛋白質含量は増加しても、WSC と NO₃-N 含量は変化しない場合である。

3 サイレージ品質に及ぼす

硝酸塩の影響

(1) 牧草の硝酸塩含量とサイレージ品質

前実験において、硝酸塩がサイレージ品質を改善することが示唆された。そこでこれを確かめるために硝酸塩含量の異なる 31 点のオーチャードグ

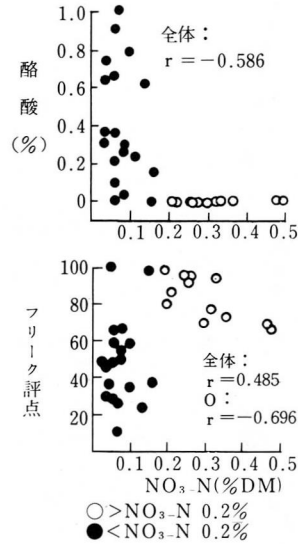


図 1 牧草の硝酸塩含量とサイレージ品質の関係

ラスを用いてサイレージを調製し、牧草の硝酸塩含量とサイレージ品質との関係を調べた。その結果、牧草の NO₃-N 含量が乾物中 0.2% 以上になると常に酪酸の生成がなくなり、フリーク評点の高い良質サイレージができることをつきとめた(図 1)。既に述べたように硝酸塩含量の高い牧草(乾物中 NO₃-N 0.2% 以上)を反芻家畜に給与すると硝酸塩中毒を起こしやすいことは周知の事実であるが、このような硝酸塩含量の高い牧草から常に良質のサイレージができることは注目値する。

(2) 硝酸塩添加によるサイレージの品質改善

硝酸塩がサイレージの品質を改善することを実証するために、アルファルファとオーチャードグラスを用いて、詰込み時に硝酸カリを添加してサイレージを調製する実験を行なった。両草種とも硝酸カリを添加すると、酪酸含量が著しく減少し、フリーク評点が高くなった(図 2)。この場合、サイレージ品質を改善するために必要な硝酸カリの添加量は、アルファルファで 0.1%、オーチャードグラスで 0.2% で十分と考えられた。このように、従来良質のサイレージを作ることが困難とされていたアルファルファにおいても、硝酸塩の添加によってサイレージの品質改善が期待できることが示された。

次にオーチャードグラスサイレージの品質に及

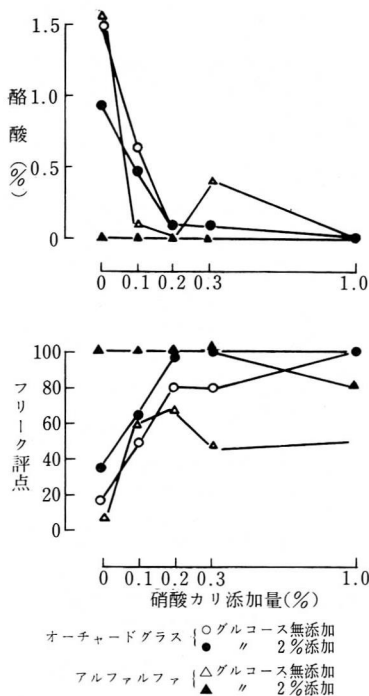


図2 硝酸カリ添加がサイレージ品質に及ぼす影響

ばす硝酸塩添加の効果を貯蔵温度(20℃と30℃)との関連で検討した(表3)。いずれの温度においても、硝酸塩を添加すると酪酸の生成が著しく抑制され、サイレージ品質が改善された。この場合、サイレージ品質を改善するのに必要な硝酸カリの添加量は、20℃で0.2%、30℃で0.4%であった。

以上のことから、従来から知られている低WSC、高温(30℃)という悪条件でも硝酸塩を添加すると良質のサイレージが得られることを明らかにした。

4 サイレージの発酵過程における硝酸塩の動向

図3は、同一の原料から乾草とサイレージを調製し、硝酸塩含量の変化を比較したものである。乾草では硝酸塩含量の減少は少ないが、サイレージでは著しく減少することが認められた。

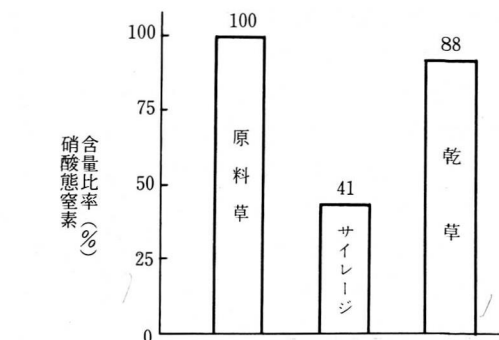


図3 牧草調製法と硝酸態窒素の消失割合

このように、サイレージ調製によって硝酸塩含量が減少することはよく知られているが、そのメカニズムは十分知られていない。そこで、アイトープ(¹⁵N)を用いてサイレージの発酵過程における硝酸塩の還元経路を追跡するとともに、それが品質とどのように関係があるかを調べる実験を行なった(図4)。その結果、NO₃-¹⁵N含量は詰込み後1~2日で急速に減少し、その程度は品質の悪いものほど多かった。一方、NO-¹⁵Nの生成は1~2日目にみられ、4日目以後消失した。NO-¹⁵Nの生成は品質の良いものほど多かった。NH₃-¹⁵Nの生成は品質の悪いものほど多く、いずれも2日目まで急速に増加し、その後は徐々に増加した。

このことから、サイレージの発酵過程における硝酸塩の還元経路には、硝酸塩→亜硝酸塩→アンモニアの同化型と、硝酸塩→亜硝酸塩→一酸化窒素の異化型があることを認め、サイレージの品質が悪くなる場合には同化型の還元経路が支配的となり、良質サイレージができる場合には異化型の還元経路が多くなることをつきとめた。すなわち、サイレージのpHが高くなると硝酸塩の消失量が増加し、消失する硝酸塩のほとんどがアンモニアへ変わることがわかった。一方、pHが低くなると硝酸塩の消失量は少なくなるが、一酸化窒素の生成が増加することがわかった。

これらのことから、硝酸塩がサイレージの品質を改善するメカニズムは、サイレージの発酵過程で生ずる酸化窒素が不良菌、とくに酪酸菌の生育を抑制するためと推測された。なお酸化窒素(無

温度(℃)	硝酸カリ添加量(%)	pH	乳酸(%)	酢酸(%)	酪酸(%)	総酸(%)	フリック評点	* NH ₃ -N
20	0	5.58	0	0.19	0.89	1.08	8	38.9
	0.2	4.71	0.67	0.82	0	1.49	60	17.1
	0.4	4.01	2.07	0.29	0	2.36	100	12.0
	1.0	3.92	1.96	0.12	0	2.08	100	9.4
	0	5.32	0	0.68	1.00	1.68	-7	52.0
30	0.2	4.72	0.60	0.88	0.11	1.59	16	21.4
	0.4	4.39	0.77	0.52	0	1.29	70	12.8
	1.0	4.07	1.60	0.31	0	1.91	99	10.3

* 全窒素に対する割合、%

色～黄・赤褐色，ブリーチ臭）は人間，家畜に有毒であるので，詰込み後 10 日間はサイロに入ってはならない。もし入る場合には，15 分間くらいブロー等で送風してから入らなければならない。

5 サイレージの飼料価値に及ぼす硝酸塩の影響

前節までに硝酸塩がサイレージの品質を改善することを紹介した。サイレージは家畜の飼料とするものであるから，サイレージの良否は，最終的に飼料価値によって判定すべきである。また家畜にとって有害成分を含まないことはいうまでもない。そこで，硝酸塩含量の高い牧草及び詰込み時に硝酸塩を添加してサイレージを調製し，メン羊に給与して，飼料価値及び健康に及ぼす影響を調べた。その結果，硝酸塩含量の高い牧草及び硝酸塩を添加したサイレージは品質が良く，消化率及び栄養価が改善され(表 4)，更にミネラルの利用性も改善されることがわかった。また硝酸塩含量は調製中に著しく減少し，メン羊の血中には亜硝酸塩及びメトヘモグロビンの形成がなく，臨床生化学的に異常は全く認められなかった。

あとがき

従来，硝酸塩というと家畜に対する害作用としてのイメージが強いが，本研究では，硝酸塩はサイレージ調製中に減少すること，更に硝酸塩はサイレージの品質及び飼料価値を改善するという新しい知見を明らかにしたものである。

国土の狭隘なわが国においては，高位生産を目的とした栽培により，硝酸塩含量の高い牧草が生産されやすく，家畜飼養上大きな問題となってい

表 4 サイレージの品質及び飼料価値に及ぼす硝酸塩の影響

窒素施肥量 (kg/10a)	硝酸カリ添加量 (%)	材 料		サイレージ品質			消 化 率 (%)				
		水分 (%)	NO ₃ -N (乾物中%)	pH	酪酸 (%)	NH ₃ -N ¹⁾	乾物	粗蛋白質	CWC ²⁾	ADF ³⁾	GE ⁴⁾
7.5	0	81.8	0.09	5.5	0.7	35	67	74	64	64	62
	0.2	81.6	0.24	4.6	0	12	72	77	71	70	69
	0.4	81.5	0.38	4.8	0.1	15	72	77	70	70	70
15.0	0	80.2	0.13	6.3	0.5	37	68	77	68	68	66
30.0	0	81.3	0.25	5.3	0.1	19	70	80	67	67	67

注 1) 全窒素に対する割合，% 2) 細胞壁物質 3) 酸性デタージェント繊維 4) 総エネルギー

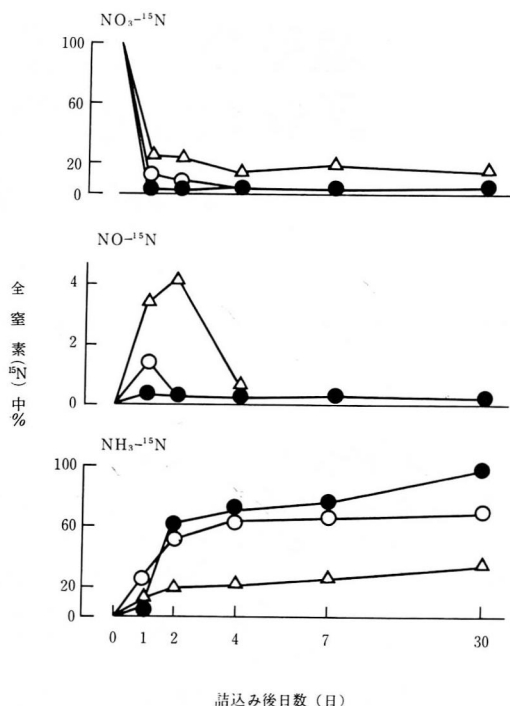


図 4 ¹⁵N-硝酸塩の還元とサイレージ品質の関係
●：劣質，○：良質，△：優

る。従って，本研究の成果がわが国草地酪農の発展のためお役に立てば幸甚である。

なお，本稿は東北大学に提出した博士論文を解説したものである。本研究のとりまとめに懇切なご指導を賜った東北大学名誉教授松本達郎博士に謹んで謝意を表す。

また，本研究の意義を高く評価して頂き，本誌への掲載の機会を与えられた雪印種苗株式会社中野富雄社長に対して謹んで謝意を表す。