

サイレージ調製の諸問題

酪農学園大学 安宅 一夫

「生きとし生けるものすべて草なり」旧約聖書の創世紀には、神による天地万物の創造のことが述べられている。それによると、神は天と地を造り、ついで最初の生物として草を造ったのである。すなわち、草は人間を含めたすべての動物の食料として重要な役割をもっていたのである。ちなみに人間が肉を食べるようになったのは、ノアの方舟以後のことであり、おもに牛や羊などの反芻動物のものに限られた。

乳牛は人間が利用することのできない草を食べ、牛乳という高価な食品を人間に与えてくれる。草の利用法として、サイレージは約数千年前の古代エジプト時代から知られていたが、今世紀に入ってからようやく普及し、第二次世界大戦後、急速に利用が増加した。すなわち、酪農の進歩に伴い、サイレージの重要性がますます認識され、サイレージシステムは乳牛飼養の中核技術になろうとしている。したがって、これからは現状以上にサイレージの利用を推進し、新しいサイレージの技術を展開する必要がある。

そこで、本稿では、サイレージ調製に関する最近までの研究成果について解説したい。

1. サイレージ発酵を規制する要因

サイレージ調製は、紀元前4,000年頃すでにエジプト地方において穀物の貯蔵法としておこり、その後地中海地方に発達し、ローマ時代には緑草の貯蔵が行われたとされている¹⁾。サイレージについての最も古い記録は1842年とされ、それによるとPit(穴)に生の草をできるだけ速く詰込み、かつ注意深く踏み込み、空気を排除して、さらに板をのせ、その上に1フィートの土をかぶせたと報告されている¹⁾。

わが国では、1887年に神津牧場で、1889年には北海道大学第一農場にサイロが建設されたのがサイレージ調製の始まりとされている^{1,2)}。その後サイロ数は、1930年には、5,722基のものが、

1935年に15,000基となり、現在では、固定サイロ39.3万基、半固定及び補助サイロは7.4万基と推定され、全国で年間約1,300万トンのサイレージが調製されている^{3,4)}。

サイレージ発酵の機序及びそれに影響する要因に関する研究は主として、今世紀に入ってから行われるようになった。とりわけ、ノーベル賞受賞の生化学者VIRTANENは、サイレージがでるまでの生化学的過程を詳細に調べ、鉍酸添加法による安全な調製法を考案し、AIV法と名づけ、サイレージ調製の研究並びに実用面に大きな業績を残した⁵⁾。これまでの業績を総説した著書としては、古くはBARNETT、WATSON and NASH⁶⁾及び須藤^{1,7)}のものが著名であり、さらにMC CULLOUGH⁸⁾、MC DONALD⁹⁾の著書には最近までの業績が網羅されている。

サイレージ調製の成否、すなわちサイレージの発酵品質(以下、単にサイレージ品質と称する)に影響する要因は、微生物的、化学的及び物理的な要因の3つに大別できる¹⁰⁾。これらの要因についてこれまで明らかにされた知見を要約すると次のようである。

(1) 微生物的要因

サイレージに関与する微生物としては、乳酸菌、酪酸菌、好気性細菌、酵母及びカビ(糸状菌)が重要である^{10,11)}。

乳酸菌：乳酸菌の作用により、乳酸発酵が活発に行われ、乳酸含量が1~1.5%になり、pHが4.2以下になると、不良微生物の増殖が抑えられ良質のサイレージができる⁶⁾。したがって乳酸菌はサイレージ発酵の主役的役割を演じるものである。

WOOD¹²⁾は、乳酸菌による糖の発酵形式から、乳酸菌をホモ型とヘテロ型に分類した。前者は1モルのグルコースから2モルの乳酸を生成するのに対し、後者は、1モルのグルコースから1モルの乳酸とアルコール、炭酸ガスなどを生成する。

最近、BECK⁸⁾はサイレージ調製中における乳酸菌の変化を報告している。それによると、良質サイレージでは、ホモ型の乳酸桿菌によって急速にpHが低下し、4日目で乳酸桿菌の85%がホモ型となり、その後ヘテロ型が増加し、142日目では75~97.5%がヘテロ型になったとしている。

LANGSTON and BOUMA¹³⁾は、良質サイレージに優勢する乳酸菌はLactobacillus plantarum、L. brevis及びPediococcus spであると報告している。

乳酸菌が生成する乳酸には、右旋性のL(+)乳酸と左旋性のD(-)乳酸がある^{9,14)}。安宅らは高水分サイレージではD(-)乳酸の割合が多いが、低水分サイレージ及び、蟻酸添加サイレージではL(+)乳酸が多くなることを認め¹⁵⁾、さらにL. caseiを添加するとL(+)乳酸の割合が著しく増加することを示した¹⁶⁾。

一般に乳酸菌は蛋白質を分解しないが、アミノ酸を合成することもできない¹⁷⁾。

酪酸菌：酪酸菌は糖及び乳酸を消費して酪酸を生成し、かつアミノ酸を分解してアンモニアを生成する。このためこの菌が増殖すると貯蔵中の養分損失が大きく、サイレージの飼料価値は著しく低下する^{9,17)}。サイレージに優勢する酪酸菌は、Clostridium tyrobutyricum、Cl. butyricum、Cl. progenes及びCl. sphenoidesであり、まれにCl. bifermentans、Cl. tetranomorphum及びCl. perfringensがみられる¹¹⁾。

サイレージの酪酸菌は、pHが4.2以下または水分が70%以下になると増殖が抑えられる⁵⁾。

好気性細菌：サイレージにみられる好気性細菌として、Escherichia coli、Aerobacter aerogenes、A. cloacaeなどの大腸菌をはじめ、Pseudomonas、Proteus、Achromobacter、Micrococcus、Sarcina、Brevibacterium、Klebsiella、Bacillusなどに属する細菌が報告されている¹¹⁾。

これらの菌は一般に埋蔵初期に一時的に増殖し、糖を消費して、主に酢酸を生成するが、発酵が正常であれば、乳酸菌の増殖によって抑圧され、次第に消失するとされている^{10,11)}。また、これらの

菌と乳酸菌との競合関係を認めた報告があり¹⁸⁾、できるだけ早期にこれらの菌の増殖を抑制することが、乳酸発酵を促進し、良質サイレージを調製するため必要であると考えられている¹⁰⁾。

酵母・カビ：BECK⁸⁾によると、サイレージにみられる酵母は、下面酵母と産膜酵母に分類され、前者は糖を発酵するものであり、後者は乳酸を分解する。酵母が生成するエタノール及びその他のアルコールは貯蔵に対してほとんど効果がなく、また酵母の多いサイレージは二次発酵を起こしやすいことが知られている¹⁹⁾。したがって、サイレージ調製において酵母が増殖することは好ましくない。二次発酵の原因となる酵母としては、Hansenula anomala、Pichia membranaefaciens、P. fermentans及びCandida kruseiなどが知られている^{20,21)}。

カビは、好気性であるため、詰込後急速に嫌気性となる通常の発酵においては大きな意味を持たない¹⁰⁾。二次発酵を起こしたサイレージにはPenicillium、Aspergillus、Geotrichum、Byssoschlamys、Monascus、Mucorなどに属するカビがみられる^{20,21)}。

従来の数多くの研究成果を総合すれば、サイレージ調製の原理は、第1に嫌気的条件を付与することによって好気性微生物の増殖を抑制すること、第2に嫌気的条件下において増殖する好ましくない微生物、すなわち酪酸菌による変敗を防止することの二点につきる²²⁾。したがって、サイレージ調製において微生物の問題が重要であることはいうまでもない。しかし、微生物の活動は、化学的及び物理的要因によって大きく影響される¹⁰⁾。

(2) 化学的要因

サイレージ発酵に影響する原料の化学成分として、可溶性炭水化物(WSC)、蛋白質及び硝酸塩が重要である。

WSC：サイレージの乳酸発酵におけるWSCの重要性については、すでに広く認められており、原料にWSC含量が高ければ良質サイレージができること、また原料のWSC含量が低い場合にはグルコースその他の糖を添加することによってサイレージ品質が著しく改善されたという報告は枚挙にいとまがない^{5,8,22)}。また、WSCの影響と他

の要因との関連では、大山ら²³⁻²⁵⁾は、埋蔵温度が高い条件あるいは、埋蔵当初乳酸菌数が少ない条件においても、原料にWSC含量が高ければ良質サイレージができることを明らかにしている。

牧草のWSC含量は、草種、刈取時期、施肥量などによって影響される¹⁰⁾。

蛋白質：従来、蛋白質含量の高い原料を用いた場合に劣質のサイレージができやすいことはよく知られている。この理由としては、蛋白質そのものが悪影響を及ぼすことと、蛋白質含量の高い牧草は一般にWSC含量が低いことの二つに分けて考えられる。すなわち、MCCULOUGH⁸⁾は、高蛋白質の牧草は緩衝作用が大きくなるため良質サイレージができないと報告している。一方、大山ら²⁶⁻²⁸⁾は炭水化物の量とは独立に添加蛋白質の悪影響を認めたが、常に高蛋白質条件が悪いというのではなく、蛋白質を添加しても良質のサイレージが得られることもあると報告している。また、高蛋白質条件においてむしろ品質が改善された例もみられ²⁹⁻³²⁾、蛋白質以外の要因の関与が示唆される。

硝酸塩：安宅³³⁾は高蛋白質の原料から良質のサイレージが得られる理由の一つとして硝酸塩の影響を考え、一連の実験を行った。まず窒素施肥レベルを異にするオーチャードグラスを用い、原料草の化学成分とサイレージ品質との関係を調べ、原料草の硝酸態窒素含量が乾物中0.2%以上になるとWSCや蛋白質含量にかかわらず、常に酪酸のない良質サイレージができることを見出した^{34,35)}。ついで原料草に硝酸カリウムを添加すると酪酸発酵が抑制されることを認め、硝酸塩がサイレージ品質を改善することを実証した³⁶⁻³⁸⁾。また、サイレージ発酵過程における硝酸塩含量のメカニズムとサイレージ品質との関係が明らかにされた^{39,40)}。

(3) 物理的要因

サイレージの微生物の活動に影響を及ぼし、サイレージの品質を左右する物理的要因としては、原料の水分含量、細切・圧傷・踏圧、空気、湿度などがある¹⁰⁾。

水分：原料を予乾して水分含量を少なくすると良質のサイレージが得られることは広く認められている⁵⁾。この機序は、原料の水分含量が少なくなると、発酵全体が抑制されるが、とくに酪酸発

酵が抑制されることにあり、乳酸発酵を促進するものでない。すなわち、WIERINGA⁴¹⁾は、水分含量を低くすると原料の浸透圧が高まり、その結果比較的高いpHにおいても酪酸菌の生育が阻害されるとしている。一方、水分含量が高い場合、発酵は促進されるが、乳酸発酵が支配的になるか、酪酸発酵が支配的になるかは、他の要因によって左右される²²⁾。

細切・圧傷・踏圧：原料を細切あるいは圧傷すると、埋蔵当初における牧草汁液の浸出が早められ、発酵が促進されることは広く認められている¹⁰⁾。しかし、この影響の様相は温度、WSC含量などの他の要因によって左右される⁴²⁾。

また、原料を詰込む際に十分に踏圧を行うことの重要性は古くから指摘されている。踏圧の影響について、正面から研究した例は多くはないが、高橋⁴²⁾は、埋蔵密度によって踏圧の影響を詳細に検討している。それによると埋蔵密度は、原料のWSCあるいは水分含量が不十分である場合にその効果を補足し、発酵を好ましい方向に制御するものとして重要であるとしている。

空気：空気の影響に関しては、密封が完全な場合に残存する空気の影響と外部から侵入する空気の影響について研究されている。前者では、詰込み直後にサイロ内の空気を酸素または窒素で置きかえて、極度に好氣的あるいは嫌氣的な条件を設定した場合、その後の密封が完全ならば品質に差はみられなかったと報告されている⁴³⁾。一方、詰込後2～3日間外部の空気を導入し、その後密封すると、通常の水分含量の場合、例外なく劣質サイレージができることが明らかにされた⁴⁴⁾。そしてその機序は、空気の導入によって埋蔵初期にグラム陰性菌の増殖が顕著となり、乳酸菌の増殖が抑えられ、密封後に嫌氣的条件となり、酪酸が顕著に生成されるためである⁴⁵⁾。また、密封遅延によっても、これと同様の影響が認められている⁴⁶⁾。

温度：サイロ内の温度は外気温とともに、原料の物理的条件によっても支配される。

WIERINGA⁴⁷⁾は、温度とサイレージの酪酸及び NH_3 -N含量との関係について検討し、30℃前後で上記のいずれの値も最高となることを認めている。また、大山ら²²⁾は、高温(30℃)と低温

(15℃)の条件を設定し、種々の原料について、サイレージ品質を調査したところ、多くの場合15℃では乳酸発酵が支配的になったが、30℃では酪酸発酵が優勢になることを明らかにした。

以上のように、サイレージ発酵に及ぼす要因とその相互関係については、かなり詳しく解明されたと考える。すなわち、密封が完全な場合、原料の水分が低い、原料の水分含量が高くてWS C含量が高ければ良質のサイレージができることが明らかにされた²²⁾。

2. サイレージ調製の技術的問題

(1) 草種・品質の選定

良質で栄養価の高いサイレージを調製するためには、まず原料草としてどのような草種あるいは品種を選定すべきかが問題になる。一般に草種・品種の選定は、栽培のしやすさや収量に重点がおかれ、サイレージ適性についてはあまり考慮されていない。

既述したように糖含量の高い作物ほど乳酸発酵主体の良質サイレージが調製される。したがって、サイレージを大量に調製する場合には糖含量の高い作物の選定が重要な課題となる。高野⁴⁾は、草種別・刈取時期別の乾物中WS C含量とサイレージ品質との関係について次のように述べている。すなわち、常に優秀なサイレージ品質を得るためには乾物中WS C含量が20%以上必要であり、これにはトウモロコシが属する。また、WS C含量が12~18%の作物からは安定した良好な品質のサイレージが得られ、これには各種のホールクロップサイレージ、春1番刈のイタリアンライグラスが属する。一方、WS C含量が9~11%の作物からは高水分で安定的に良質サイレージを得ることは難しいとし、これにはオーチャードグラス、チモンシーなどが相当する。さらにイネ科牧草の2番草、アカクロバ、アルファルファなどWS C含量が3~7%と著しく低い作物からは高水分の状態では常に劣質のサイレージができるとしている。

北海道で栽培されている牧草の主要8草種についてそれぞれ1~5品種供試して、無予乾でサイレージを調製した結果は表1のようである⁴⁸⁾。原

料草の化学成分は草種間で異なるが、同一草種間では水分含量及びアカクロバのWS C含量以外大きな差がみられない。チモンシーは一般に水分含量が低く、ホクシュウを除くと71~77%であった。WS C含量は、イタリアンライグラス、HIライグラスがそれぞれ22%、17%と最も高く、アルファルファ及びアカクロバのアルターシェードでは約5%と最も低い値を示している。サイレージ品質では、ライグラス類及びトールフェスクが最も良質であり、チモンシーはホクセン2号A及びホクシュウを除いて良質であった。一方、メドフェスク、アカクロバ及びヘイキングを除いたオーチャードグラスは最も劣質であった。また、一般にサイレージ調製が難しいといわれているアルファルファにおいては、pHが高いにもかかわらず、酪酸生成のない良質サイレージができたことは注目される。アルファルファから良質サイレージができた理由としては、原料草に乳酸菌が多く付着していたことが考えられる。

牧草のWS C含量は窒素施肥によって低下する⁴⁹⁾。したがって、窒素施肥量が多くなるとサイレージの品質が悪くなりやすい^{49,50)}。

(2) 収穫適期

サイレージ原料作物の収穫時期は、収量、栄養価及びサイレージ適性などを考慮して総合的に決定される。一般に収量が最高に達する時期は、イネ科牧草は出穂期、マメ科牧草は開花期、トウモロコシでは糊熟後~黄熟とされている^{4,51)}。一方、牧草における生育時期と成分との関係は図1のようである⁵²⁾。生育が進むにつれて細胞壁物質(CW, NDF)が増加し、細胞内容物(CC)は減少する。したがって生育が進むにつれて摂取量や消化率が減少する⁵³⁾。サイレージ品質と関係のある成分では、生育が進むにつれて乾物含量とWS C含量が増加する。このことから、生育が進むにつれてサイレージ品質が向上することが予想される。しかし、出穂期をすぎるとWS C含量が減少し、サイレージ品質が悪くなる^{54,55)}。近年、栄養価の高い牧草を収穫するため早刈りの傾向にあるが、このことは無予乾で良質のサイレージ調製することを困難にしている。

トウモロコシでは、乾物含量は生育に伴い増加

表1. サイレージ品質における草種・品種間差異

原料草	サイレージ										
	水分 (%)	CP (乾物%)	WSC	pH	乳酸 (%)	酢酸 (%)	プロ ピ オン 酸 (%)	酪酸 (%)	総酸 (%)	評点 (%)	2,3-ブタン ジオール (%)
<u>オーチャードグラス</u>											
キタミドリ	83.2	10.6	8.1	4.74	0.32	0.17	0	0.39	0.88	14	0.13
フロンテア	82.3	9.9	9.9	4.43	0.42	0.04	0	0.38	0.84	22	0.20
ヘイキング	79.8	10.9	8.3	4.47	0.93	0.10	0	0.09	1.12	60	0.05
<u>メドーフエスク</u>											
ファスト	81.0	9.0	10.4	4.75	0.18	0.08	0	0.41	0.67	11	0.33
<u>トールフエスク</u>											
ホクリョウ	80.0	13.8	9.5	4.09	1.52	0.18	0	0	1.70	100	tr
ケンタッキー31 フエスク	81.3	15.4	9.4	3.99	1.31	0.19	0	tr	1.50	100	0.03
<u>イタリアンライグラス</u>											
エース	87.7	9.6	21.8	3.86	0.95	0.28	0	0.01	1.24	96	0.11
<u>HJライグラス</u>											
テトリライト	78.8	6.7	17.1	3.79	1.18	0.11	0	tr	1.29	100	0.11
<u>アルファルファ</u>											
ソア	81.4	18.4	5.6	4.80	0.98	0.62	tr	0	1.60	72	0
サラナック	78.4	18.5	5.5	4.89	0.86	0.68	0	tr	1.54	67	0.02
<u>チモシー</u>											
センボク	76.6	6.8	6.8	3.81	1.11	0.06	0	0.01	1.18	100	0.03
ホクオウ	76.3	5.9	7.6	3.94	1.13	0.07	0	0.04	1.24	70	0.15
ノサップ	75.3	5.7	6.8	3.84	1.08	0.07	0	0.01	1.16	100	0.03
ホクセン2号A	71.3	5.5	9.9	5.02	0.16	0.05	0	0.36	0.57	11	0.30
ホクシュウ	85.1	4.8	9.5	4.30	0.46	0.35	0	0.09	0.90	26	0.52
<u>アカローバ</u>											
サッポロ	84.8	15.5	9.4	5.06	0.63	0.31	0	0.30	1.24	28	0.30
ハミドリ	85.2	16.0	7.7	5.42	0.13	0.58	0	0.71	1.42	-7	0.63
アルターズエード	81.8	17.0	5.2	5.34	0.50	0.32	0	0.45	1.27	19	0.25

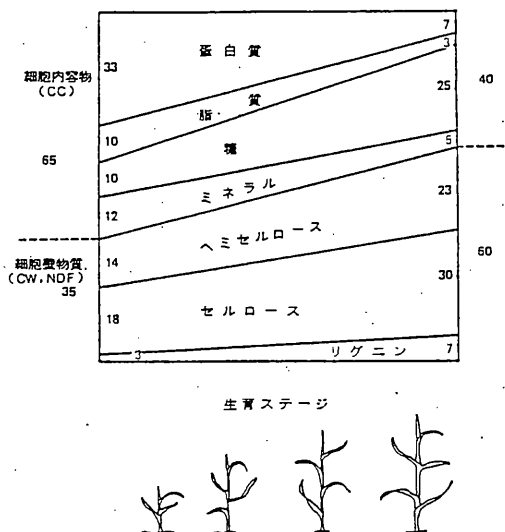


図1. 牧草の生育に伴う成分変化

し、WSC含量は糊熟期まで増加し、その後減少する^{56,57)}。したがって、良質のサイレージを調製するためには糊熟後～黄熟期が適期と考えられる。

以上のことから、収量、栄養価、サイレージ品質の面から総合的に判断した刈取適期は、イネ科牧草は穂ばらみ～出穂初期、マメ科牧草は開花初期、トウモロコシは黄熟期と考えられる。

(3) 水分調節

原料草の水分含量は、サイレージ品質、養分損失及び栄養価などに影響を及ぼす。高水分の原料草を用いると、①酪酸発酵しやすい②排汁損失がある③摂取量が低下する④調製に際し運搬量が多くなるなどの不利がある⁹⁾。

酪酸発酵を抑制し、乳酸発酵主体の良質サイレージを調製するには、水分含量を70%以下に調節する必要がある。また、水分含量を60%以下にすると、乳酸発酵も抑制されるが、特に酪酸発酵が抑制される。したがって、低水分サイレージ(ヘイレージ)では、原料草の糖含量に関係なく良質サイレージができる。

サイロからの排汁の量は、サイロのタイプ、踏圧の程度、切断長などによっても影響されるが、原料草の水分含量に大きく左右される。原料草の

水分含量と排汁との関係を調べた多くの研究結果は、水分含量が75%に低下すると排汁がほとんどなくなり、71%になると排汁は完全になくなることを示している^{9,58)}。一方、蟻酸など酸を添加すると排汁量が増加することが報告されている⁵⁹⁻⁶¹⁾。排汁には1～10%の乾物が含まれ、その含量は詰込後の日数経過に伴って増加する⁹⁾。排汁の成分はWSCや可溶性窒素を多量に含み栄養価に富んでいるので、排汁量の増加は、養分損失の増加を意味する。また、排汁には多くのミネラルが含まれている^{9,60)}。高野ら⁶⁰⁾は、排汁によってサイレージでは原料草に比較してCa、Mg及びMnの含量が減少することを認めている。

原料の水分含量を調節する方法としては、刈取時期の遅延、予乾、乾物の添加などがある。トウモロコシでは登熟を進めて黄熟期に収穫すると水分含量は68～72%となり、そのまま適水分となる。牧草では予乾による水分調節が一般的である。この方法は、80～90%の原料水分を65～75%に減少させる軽予乾と40～65%に低下させる強予乾に区分される⁵¹⁾。水分を調節する手段として乾物を添加する場合、使用する乾物としてはイナワラ、フスマ、ビートパルプ及び配合飼料などがあげられる⁵¹⁾。これらの乾物を10%程度添加すると水分含量が6～7%減少する⁵¹⁾。粗飼料と濃厚飼料を混合して調製したサイレージはオールインサイレージと呼ばれ、日本のコンプリートフィードとしてこれからの利用が期待されている^{14,62)}。

(4) 切断長

原料草の細切は、サイロ内密度の向上、サイレージ発酵の促進と二次発酵の抑制、サイレージの取り出し作業を容易にするなどの効果をもたらす。これらの効果は切断長が短くなるほどよくなる。

一方、切断長が短くなると咀嚼時間の減少^{63,64)}、消化率の低下⁶⁵⁾、乳脂率の低下⁶⁵⁾などが起こり、反芻家畜の消化栄養生理上好ましくないとされている。消化生理及びルーメン発酵の面から切断長は6～12mmが最適と考えられる⁶⁶⁾。

(5) 踏圧・加重

サイレージ調製における踏圧の重要性は古くから指摘されているが、機械作業による省力化のた

め、踏圧が省略されることが多くなってきた。

サイレージ品質に対する踏圧の効果は、原料の化学成分や水分含量によって異なる。一般的な条件では、踏圧によって密度を高めるとサイレージ品質は向上するが、高水分、低WSC、高温という悪条件が重なると踏圧によって品質が低下する可能性がある⁴²⁾。したがって、実用的には、高水分でWSC含量の低い若刈りの原料草ではあまり密度を高めないよう注意する必要がある。一方、熟期の進んだ作物や予乾原料草、あるいは粗大な作物では、細切、踏圧、加重に十分留意して密度を高める必要がある。このようにして、原料草の条件に応じて密度を調節することにより高水分やWSC不足などの欠点をかなり補正できる。

また、二次発酵には、サイレージの化学成分の他に密度の高低が大きく影響しているので、密度を高めることによって二次発酵の発生をある程度くい止めることができる^{42,67)}。

(6) 密 封

既述したようにサイレージ調製の必須条件は嫌氣的条件を保持することである。サイレージの発酵初期に空気を導入したり、サイロを開放状態にしておくと、必ず品質の悪いサイレージができる^{44,46)}。そして、この影響は高水分の原料ほど著しい。

サイロの密封法としては、小・中型サイロではサイロ壁にビニールを着装して密封する方法(サイロ内袋法)、サイロ水蓋に注水する方法(サイロ水蓋法)、サイロ壁上部に止水板を入れ、サイレージの上にビニールをかけ、クリップする方法(止水板法)などがある¹⁴⁾。

(7) 添加物

良質サイレージを

調製するための条件が不足する場合、これを補足し、品質を改善するために添加物が用いられる。また、原料草に不足している栄養素を補足することを目的として使用する添加物もある。添加物の利用はかなり古くから行われ、これまでに用いられた添加物の数は枚挙にいとまがないほど多い。現在アメリカでは153種類の添加物が商品化され⁶⁸⁾、イギリスでは42種類の添加物が市販されている⁶⁹⁾。わが国で市販されている添加物の種類は表2のようである¹⁴⁾。第1のグループは乳酸発酵を促進し、第2のグループは不良微生物の生育を抑制するものである。そして、第3のグループは二次発酵を抑制するものであり、第4のグループは発酵よりもむしろ栄養価を改善するものである。代表的な添加物について解説する。

乳酸菌：現在最も人気のある添加物である。その理由はバイオテクノロジーの発展に伴い乾燥製品が開発され、農家が容易に利用できるようになったためである。これまで乳酸菌の効果については否定的なものが多かったが⁷⁰⁾、最近優良菌株の発見と製品化技術の向上により、添加効果が認められるようになった^{16,71,72)}。これまで多くの製品は主要な菌種として、*L.plantarum*を用いてい

表2. サイレージ添加物の種類

タイプ	種 類	製 品
乳酸発酵を促進するもの	乳 酸 菌	サイラバック1177、バイオマックス、トリブルバック、サイロゲン、新トモキンS、東亜菌末、ビタコーゲン
	糖 及 び 炭 水 化 物	ブドウ糖、砂糖、糖蜜、穀類、糠類、ビートパルプ
	酵 素 発 酵 代 謝 産 物	サイロガード、スーパーGX、メイセラーゼ カルバック
不良発酵を抑制するもの	蟻 酸	サイベスト
	プ ロ ビ オ ン 酸 ホ ル マ リ ン	プロサン、アドバサイザー
	ヘキサミン製剤	コファジルプラス
二次発酵を抑制するもの	プ ロ ビ オ ン 酸	プロサン、アドバサイザー
	蟻酸カルシウム製剤	メイゾコファジル
	ア ン モ ニ ア	アンモニア
栄養価を改善するもの	窒 素 化 合 物	尿素、アンモニア、ダイブ
	ミ ネ ラ ル	炭酸カルシウム、石灰石、リン酸カルシウム 硫酸マグネシウム、

るが、最近、ATAKUら¹⁶⁾及びHELLINGSら⁷²⁾はL. caseiの方がすぐれていることを見出した。

酵素：バイオテクノロジーの進出に伴い、この種の添加物が普及してくると思われる。なかでもセルラーゼの効果が期待できるが⁷³⁾、現在のところ製品の価格が高すぎるようである。

蟻酸：蟻酸の添加は、1920年代に採用されたが、均一に添加することが難しかったため最初は失敗に終わったが、ハーベスターの導入と自動添加装置の開発により1960年代からヨーロッパ及び日本において広く普及するに至った。蟻酸の添加は、原料草のpHを4.2以下にすると植物の呼吸作用や不良微生物の生育を抑制できるという原理に基づいている。すなわち蟻酸は、pHを低下させる力において有機酸の中で最も強く、添加適量はイネ科牧草0.3%、マメ科牧草0.5%とされている^{74,75)}。蟻酸添加により、養分損失の減少^{59, 61, 74, 75, 76)}及びルーメン内における蛋白質の分解度の低下、摂取量の増加、産乳量・増体の改善などの効果が認められている⁷⁷⁾。しかし、蟻酸は酪酸菌の増殖を強く抑制し、乳酸菌の増殖をも抑制するが、酵母やカビの増殖を抑制することができない⁹⁾。このため蟻酸添加サイレージは二次発酵を起こしやすいとされている⁹⁾。

プロピオン酸：プロピオン酸は、酪酸発酵を抑制する力では蟻酸に劣るが、酵母やカビの生育を抑制する点ではすぐれている⁹⁾。このため低水分サイレージの品質保持や二次発酵防止に効果が期待できる⁷⁷⁾。

ホルマリン：最近、ヨーロッパでこの添加物が注目されている。この理由は、ホルマリンはすべての微生物の生育を抑制して無発酵サイレージを作ること、ルーメン内における蛋白質の分解を著しく抑え、バイパス蛋白質を増加させることができるなどのためである⁹⁾。しかし、欠点として①少量添加(0.3%以下)ではむしろ不良発酵が助長される②多量添加(0.8%以上)では摂取量と消化率が低下する③二次発酵を起こしやすいなどがある⁹⁾。これらの欠点を補足し、効果を確実なものにするためホルマリンと蟻酸を併

用した方がよいとされている⁷⁷⁾。

その他：その他の添加物として、亜硝酸・ヘキサミン複合剤⁷⁶⁾、蟻酸カルシウム複合剤⁶⁷⁾、アクリル酸ソーダ⁷⁸⁾などがある。

3. 二次発酵とその防止対策

サイレージの基本技術は、嫌気的条件下で微生物の生育を制御することである。しかし、利用に際し、サイロを開封するとサイレージの表面が空気にならされて好気的条件下になる。このような条件下では、微生物相が著しく変化し、サイレージ品質が劣化することがある。このような状態を好気的変敗³⁵⁾というが、一般に二次発酵と呼んでいる。二次発酵が起こると、養分の損失、飼料価値の低下、有害物質の生成などがみられる^{9,35)}。

二次発酵の発生は、発熱によって察知されるが、発熱のパターンには図2のように山が二つのものと一つのものがある⁷⁹⁻⁸²⁾。山が二つの場合、最初の発熱は酵母の増殖によるものであり、次の山はカビによるものである。山が一つの場合は一般にカビによるものである。

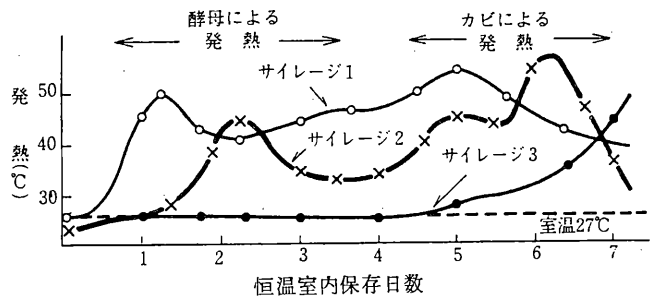


図2. 二次発酵による発熱パターン

サイロ開封時における牧草サイレージの化学成分と開封後の品質変化との関係を調べたOHYAMAら⁸³⁾の結果は表3のようである。これによると、サイレージの乾物含量が増加するにつれて酵母が増殖し、変敗しやすくなり、酪酸含量の多いサイレージは二次発酵を起こしにくいことがわかる。後者の知見は、酪酸が酵母やカビの生育を抑制するためである^{21,79,84)}。一方、良質のサイレージは二次発酵を起こしやすいとされたが、最近、PAHLOW⁷¹⁾ and ZIMMERは乳酸菌を添加したり、

表3. サイロ開封時のサイレージ特性と開封後の変化との相関※

	サイロ開封時の特徴								
	DM	pH	乳酸	酢酸	酪酸	WSC	酵母	カビ	細菌
発熱開始時間	-0.47**	-0.16	0.17	0.44**	0.36**	0.08	-0.58**	0.29**	0.29
最高温度	-0.07	-0.19	0.25	-0.16	-0.35*	0.24	0.05	0.31*	0.02
pHの上昇	0.25	0.06	0.05	-0.34*	-0.25	-0.22	0.28*	0.13	-0.45**
乳酸の減少	-0.20	-0.30*	0.41**	-0.06	-0.14	-0.19	0.02	0.30*	-0.20
酢酸 "	0.06	-0.55**	0.33	-0.44**	-0.70**	0.35*	0.25	0.25	-0.02
WSC "	0.12	0.01	-0.27	-0.05	-0.26	0.62**	0.50**	-0.25	-0.13
酵母(7日間)	0.63**	0.10	-0.44**	-0.56**	-0.38**	0.15	0.88**	-0.47**	-0.44**
カビ(")	0.26	-0.34*	0.13	-0.47**	-0.74**	0.58**	0.35*	0.11	-0.02
細菌(")	-0.17	0.11	0.25	0.27	-0.06	-0.21	-0.24	0.10	0.15

* P<0.05, ** P<0.01

※ 英文の表を著者が書き改めた。

密度を高めることにより酵母の生育を抑制し、二次発酵をある程度防止できることを示している。この場合、開封時における酵母の数を1g当り 10^5 以下にする必要がある。また、名久井⁶⁷⁾はトウモロコシサイレージの二次発酵の実態を調査し、1 m^3 当500kg以下の低密度のサイレージは二次発酵を起こしやすいと報告している。

これらのことから、二次発酵を防止する方法は、微生物的には、乳酸発酵を促進して酵母の少ないサイレージを調製することであり、物理的には細切と踏圧により密度を高めることである。また、1日当りの取出量を多くすることも重要である。また、名久井⁶⁷⁾は化学的方法として、プロピオン酸、蟻酸カルシウム複合剤などの添加によってある程度二次発酵が抑制できることを認めている。

むすび

サイレージ調製の成否は、サイレージの発酵が好ましい方向に制御できるかどうかによってさまる。サイレージ調製の技術は、最初エジプト時代における発酵の物理的制御に始まり、今世紀初めの化学的制御の時代を経て、ついにバイオテクノロジーによる微生物的制御の時代をむかえた。そして、これまでの研究成果によってどんな原料を用いても確実に良質のサイレージを調製することが可能になったといえよう。

文 献

- 1) 須藤 浩, サイレージの調製と利用法, 追補第5版. 養賢堂. 東京. 1967.
- 2) 大原久友・高野信雄, 放牧・乾草・サイレージ, 明文書房. 東京. 1971.
- 3) 高野信雄, 各種サイロの経営及び技術的対応, 酪農総合研究所. 1-19. 1980.
- 4) 高野信雄, サイレージ調製給与の理論と展開, 日本草地協会. 1984.
- 5) WATSON, S.J. and M.J. NASH, The Conservation of Grass and Forage Crops. Oliber and Boyd. Edinburgh and London. 1960.
- 6) BARNETT, A. J. G., Silage Fermentation. Butterworths Scientific Publication. London. 1954.
- 7) 須藤 浩, サイレージと乾草, 養賢堂. 東京. 1971.
- 8) MCCULLOUGH, M.E. (Ed), Fermentation of Silage—A Review. National Feed Ingredients Association. West Des Moines. 1978.
- 9) MCDONALD, P., The Biochemistry of Silage. John Wiley and Sons. New York. 1981.
- 10) 大山嘉信, 日畜会報, 42:301-317.

- 1971.
- 11) 佐々木博, 北大農学部邦文紀要, **8**: 188-251. 1972.
 - 12) WOOD, W.A., *Bacteria*. Vol. II. Academic Press. New York and London. 1961.
 - 13) LANGSTON, C.W and C. BOUMA, *J. Dairy Sci.*, **43**: 1575-1584. 1960.
 - 14) 高野信雄・安宅一夫(監修), サイレージの理論と実際. 酪農学園短期大学酪農学校. 1984.
 - 15) 安宅一夫・栖崎 昇・菊地政則・大原久友, 日草誌, **24**(別): 165-166. 1978.
 - 16) ATAKU, K., H. NAKAMURA, N. NARASAKI and M. KIKUCHI, *Proc. XV Int. Grassld Congr.*(in press)
 - 17) McDONALD, P; *Forage Conservation in the 80's*, *Brit. Grassl. Soc.*, *Occ. Symp. No. 11*: 67-75. 1980.
 - 18) LANGSTON, C. W. and C. BOUMA, *J. Dairy Sci.*, **45**: 618-624. 1962.
 - 19) BECK, TH und F. GROSS, *Wirtschaft seigene Futter*, **10**: 298-312. 1964.
 - 20) 大山嘉信, 畜産の研究. **35**: 998-1002, 1118-1120. 1981.
 - 21) 佐々木西二, 農林水産業特別試験研究費補助金による研究報告書. 1974.
 - 22) 大山嘉信, 森地敏樹, 微生物の生態, **6**: 161-178. 学会出版センター. 東京. 1979.
 - 23) 大山嘉信・榎木茂彦・森地敏樹, 日畜会報, **44**: 59-67. 1973.
 - 24) OHYAMA, Y., S. MASAKI and T. MORICHI, *Jap. J. Zootech. Sci.*, **44**: 404-410. 1973.
 - 25) OHYAMA, Y. and S. MASAKI, *Jap. J. Zootech. Sci.*, **45**: 419-423. 1974.
 - 26) 大山嘉信・榎木茂彦, 日畜会報, **39**: 61-67. 1968.
 - 27) OHYAMA, Y. and S. MASAKI, *Jap. J. Zootech. Sci.*, **40**: 109-115. 1969.
 - 28) 大山嘉信・榎木茂彦・森地敏樹, 日畜会報, **42**: 9-15. 1971.
 - 29) 坂東 健・齋野 保, 北農試集報, **21**: 39-47. 1970.
 - 30) 和泉康史・西埜 進・大橋尚夫・小林道臣, 北農, **38**: 46-52. 1971.
 - 31) 和泉康史・岡本全弘・大森昭治, 新得畜試研報, **4**: 1-7. 1973.
 - 32) 大山嘉信・榎木茂彦, 日畜会報**39**: 61-67, 1967.
 - 33) 安宅一夫, 酪農学園大紀要, **9**: 209-319. 1982.
 - 34) 安宅一夫・栖崎 昇・野 英二, 日草誌, **27**: 100-105. 1981.
 - 35) 安宅一夫・栖崎 昇, 日草誌, **27**: 308-317. 1981.
 - 36) 安宅一夫・栖崎 昇・山本秀樹・菊地政則・松井幸夫, 日草誌, **27**: 421-427. 1982.
 - 37) 安宅一夫・栖崎 昇・菊地秀利, 日草誌, **28**: 310-314. 1982.
 - 38) 安宅一夫・栖崎 昇, 日草誌, **28**: 315-318. 1982.
 - 39) ATAKU, K., M. HORIGUCHI and T. MATSUMOTO, *Proc. XIV Int. Grassld Congr.* 663-665. 1982.
 - 40) ATAKU, K., N. NARASAKI, M. HORIGUCHI and T. MATSUMOTO *Proc. V WCAP*, Vol. 2: 617-618. 1983.
 - 41) WIERINGA, G. W., *Neth. J. Agr Sci.*, **6**: 204-210. 1958.
 - 42) 高橋正行, 学位論文. 東北大学. 1980.
 - 43) 大山嘉信・榎木茂彦, 日畜会報, **39**: 168-174. 1968.
 - 44) 大山嘉信・榎木茂彦・滝川明宏, 日畜会報, **41**: 620-624. 1970.
 - 45) 大山嘉信・榎木茂彦・森地敏樹, 日畜会報, **41**: 625-631. 1970.
 - 46) 高野信雄・井上 登・正岡淑邦・萬田富治, 草地試研報, **11**: 98-105. 1977.

- 47) WIERINGA, G. W., Proc. 8th Int. Grassld. Congr. 497-502. 1960.
- 48) 安宅一夫・栖崎 昇・上原昭雄・深瀬公悦・五十嵐俊賢, 日草誌, **29**(別): 239-240. 1983.
- 49) 安宅一夫・栖崎 昇, 酪農学園大紀要, **7**: 55-62. 1977.
- 50) 須藤 浩・内田仙二・守分俊彦・国眼重雄, 岡山大農学報, **38**: 39-50. 1971.
- 51) 農林水産技術会議編, サイレージ研究の成果と展望, 中央畜産会. 1974.
- 52) OSBOURN, D. F., Grass, Its Production and Utilization, (Ed. W. HOLMES); Black well. London. 1980.
- 53) VAN SOEST, P. J., Animal Science Mimeograph Series, **75**: 48-53. Cornell University. 1984.
- 54) 高野信雄・山下良弘, 日草誌, **16**: 22-28. 1970.
- 55) 正岡淑邦・高野信雄, 草地試験法, **8**: 27-32. 1976.
- 56) 戸澤英男, 道立農試報告, **53**: 1-129. 1985.
- 57) 安宅一夫, 近代酪農, **38**: (8)30-33. 1985.
- 58) MILLER, W. J. R. and CLIFTON, C. M., J. Dairy Sci., **48**: 917-923. 1965.
- 59) 高野信雄・萬田富治・井上司朗・渡辺和雄・増渕敏彦・小池袈裟美・小川美恵子, 草地試研報, **4**: 9-15. 1973.
- 60) 高野信雄・萬田富治・正岡淑邦, 草地試研報, **7**: 71-80. 1975.
- 61) 箭原信男・西部慎三, 北農試報, **111**: 111-118. 1975.
- 62) 高野信雄, 自給飼料, **1**: 20-22. 1984.
- 63) 岡本全弘・出岡謙太郎・坂東 健, 新得畜試研報, **10**: 33-36. 1979.
- 64) SUDWEEKS, E. M., L. O. ELY, D. R. MERTENS and L. R. SISK, J. Animal Sci., **53**: 1406-1411. 1981.
- 65) MILLER, C. N., C. E. POLAN, R. A. SANDY and J. T. HUBER, J. Dairy Sci., **52**: 1955-1960. 1969.
- 66) SUDWEEKS, E. M., L. O. ELY. and L. R. SISK, J. Dairy Sci., **62**: 292-296. 1979.
- 67) 名久井忠, 農業技術, **34**: 495-498, 544-547. 1979.
- 68) BOLSEN, K. and J. I. HEIDKER, Silage Additives USA, Chalcombe Publication. Manhattan. 1985.
- 69) VANBELLE, M. and G. BERTIN, Ensilage, Sanofi Sante Animale. Paris. 1985.
- 70) 大山嘉信, 畜産の研究, **30**: 380-384. 1976.
- 71) PAHLOW, G. and E. ZIMMER, Proc. XV Int. Grassld Congr. (in press)
- 72) HELLINGS, Ph., G. BERTIN and M. VANBELLE, Proc. XV Int. Grassld Congr. (in press)
- 73) NO. E., Y. HARASAWA, K. ATAKU, N. NARASAKI, and T. SUEYOSHI, Proc. XV Int. Grassld Congr. (in press)
- 74) 高野信雄・井上司朗・萬田富治, 草地試研報, **4**: 1-8. 1973
- 75) 箭原信男・西部慎三, 北農試研報, **111**: 103-109. 1975.
- 76) 箭原信男・太田 繁, 東北農試研報, **56**: 79-85. 1977.
- 77) 藤田 裕, 日畜会報, **55**: 903-910. 1984.
- 78) 内田仙二・石川正洋・扇 順二・堀米隆男, 岡山大農学報, **60**: 39-47. 1982.
- 79) 山下良弘・山崎昭夫, 北農試験報, **110**: 81-95. 1975.
- 80) 原慎一郎・大山嘉信, 日畜会報, **49**: 794-801. 1978.
- 81) OHYAMA, Y., S. HARA and S. MASAKI, J. Sci. Food Agric., **28**: 369-374. 1977.
- 82) OHYAMA, Y., S. HARA and S. MASAKI, J. Sci. Food Agric., **30**: 107-

111. 1979.
- 83) OHYAMA, Y., S. HARA and S. MA
SAKI, Forage Conservation in the
80's, Brit. Grassl. Soc., Occ Symp.
No 11: 257-261. 1980.
- 84) OHYAMA, Y. and S. HARA, Jap.J.
Zootech. Sci., 46: 713-721. 1975.