

飼料イネサイレージ中の粕の未消化子実排泄率を 低減させるための調製技術の開発

2009

重田一人

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	穀粒の破碎・粉碎方法	12
1.3	本研究の目的	29
第 2 章	画像処理による破碎物の識別	33
2.1	目的	33
2.2	実験方法	33
2.3	結果及び考察	39
2.4	要約	48
第 3 章	効率的な穀粒剥離・穀粒破碎装置の開発	51
3.1	目的	51
3.2	穀粒破碎機構の設計と試作	52
3.3	実験方法	62
3.4	結果及び考察	64
3.5	要約	69
第 4 章	飼料用穀類の穀粒剥離・穀粒破碎処理と去勢牛への給与	71
4.1	目的	71
4.2	実験方法	72
4.3	結果及び考察	76
4.4	要約	83
第 5 章	総合考察	85

5.1	本研究について	85
5.2	残された問題と今後の展開について	88
	要約	95
	謝辞	99
	引用文献	101

図目次

1.1	先進国の食料自給率 (カロリーベース) の推移	1
1.2	わが国の水田面積とイネ作付け面積の推移	2
1.3	飼料イネ作付け面積の推移	4
1.4	飼料イネの形態と利用	5
1.5	飼料イネロールベール	6
1.6	コンバイン型収穫調製機	7
1.7	フレール型収穫調製機	7
1.8	細断型収穫調製機	8
1.9	自走式ベールラッパ	9
1.10	未消化のまま排出される粉	10
1.11	ハンマーミル構造図	14
1.12	ピンミルの例	15
1.13	ローラの種類	16
1.14	シングルロールミルの例	16
1.15	ダブルロールミル模式図	17
1.16	転動ボールミルの例	19
1.17	振動ミルの例	20
1.18	カッターミルの例	21
1.19	旋回気流型ジェットミルの例	22
1.20	トルネードミルの構造	23
1.21	ドリームミルの粉碎原理図	24
1.22	本研究で用いたダブルロールミルのローラ模式図	27

2.1	供試物の原画像	35
2.2	ラベル処理された画像-破砕物	36
2.3	ラベル処理された画像-無処理物	36
2.4	ハレーションの除去	37
2.5	$r-\theta-\phi$ 座標系	38
2.6	形状解析処理	38
2.7	色判別処理	39
2.8	画像処理結果 (破砕物, 色判別で識別できたもの-その 1)	41
2.9	画像処理結果 (破砕物, 色判別で識別できたもの-その 2)	42
2.10	画像処理結果 (破砕物, 色判別で識別できたもの-その 3)	43
2.11	画像処理結果 (破砕物, 色判別で誤判定し, 形状判別で識別できたもの)	43
2.12	画像処理結果 (無処理物, 色判別で識別できたもの)	44
2.13	画像処理結果 (無処理物, 色判別で誤判定し, 形状判別で識別できたもの)	45
2.14	形状解析による物殻外周長と識別値 ϕ_{ct} との関係	46
2.15	形状解析による破砕物と無処理物との識別	47
2.16	識別率	48
3.1	物殻の剥離力計測方法	52
3.2	圧縮力測定の模式図	53
3.3	せん断力測定の模式図	53
3.4	物から物殻を剥離するのに要する力	55
3.5	ローラによって物に加えられるせん断力	56
3.6	集中荷重を受ける仮想突起	57
3.7	ローラ表面 V 字型溝最適角度のシミュレーション結果	58
3.8	飼料イネサイレー用物破砕装置の外観	59
3.9	ローラ	60
3.10	物破砕装置の模式図	61
3.11	モータの所要動力測定結線図	63
3.12	物破砕率 - 2 つのローラ間周速度比 10% 時	65

3.13	籾破碎率 - ローラ周速度 0.2m/s 時	65
3.14	籾破碎装置の所要動力 - 2 つのローラ間周速度比 10% 時	66
3.15	籾破碎装置の所要動力 - ローラ周速度 0.2m/s 時	66
4.1	飼料イネサイレージの籾破碎作業のための装置の配置図	73
4.2	飼料イネサイレージの籾破碎処理作業	73
4.3	籾破碎処理	76
4.4	飼料イネサイレージの籾破碎率及び所要動力 -ローラ周速度 0.2m/s 及び ローラ周速度比 10% 時	77
4.5	籾破碎装置による飼料イネサイレージの処理前後	78
4.6	籾破碎処理による未消化子実排泄率	81
5.1	籾破碎装置による飼料米破碎作業	92

表目次

1.1	粉碎の粒度別呼称	12
1.2	穀粒のさまざまな破碎・粉碎方式	13
3.1	飼料イネサイレージ用粉破碎装置の諸元	59
3.2	サイレージ用イネの粉の大きさ [mm]	62
3.3	粉破碎率と所要動力	67
3.4	粉に対する処理能力	68
4.1	供試した飼料イネサイレージの化学成分	75
4.2	飼料イネサイレージの粉破碎率と所要動力	79
4.3	消化率と栄養価	80
4.4	咀嚼行動	83
5.1	飼料米の給与対象と調製方法	91

用語一覧

日本語	カタカナ	英語	略号
酸性デタージェント 繊維	サンセイデタージェント センイ	Acid Detergent Fiber	ADF
酸性デタージェント リグニン	サンセイデタージェント リグニン	Acid Detergent Lignin	ADL
可消化エネルギー	カショウカエネルギー	Digestible Energy	DE
乾物	カンブツ	Dry Matter	DM
代謝エネルギー	タイシャエネルギー	Metabolizable Energy	ME
農林水産省	ノウリンスイサンショウ	Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries	MAFF
中性デタージェント 繊維	チュウセイデタージェ ントセンイ	Neutral Detergent Fiber	NDF
畜産草地研究所	チクサンソウチケンキュ ウジョ	National Institute of Livestock and Grassland Science	NILGS
有機酸類	ユウキサンルイ	Nitrogen Cell Wall Free Extracts	NCWFE
高消化繊維	コウショウカセンイ	Organic a fraction in OCW	Oa
低消化繊維	テイショウカセンイ	Organic b fraction in OCW	Ob
細胞内容物	サイボウナイヨウブツ	Organic Cell	OCC
細胞壁物質	サイボウヘキブツシツ	Organic Cell Wall	OCW
ソフトグレイン サイレージ	ソフトグレイン サイレージ	Soft Grain Silage	SGS
標準誤差	ヒョウジュンゴサ	Standard Error	SE
可消化養分総量	カショウカヨウブン ソウリョウ	Total Digestible Nutrients	TDN
完全混合飼料	カンゼンコンゴウ シリョウ	Total Mixed Ration	TMR
飼料イネサイレージ	シリョウイネサイレージ	Whole-Crop Rice Silage	WCRS
稲発酵粗飼料	イネハッコウソシリョウ	Whole-Crop Rice Silage	WCRS

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 食料自給率

我が国の食料自給率は，2007 年に戦後最低の 39% まで低下した。図 1.1 は，主要先進国の食料自給率 (カロリーベース) の推移である (MAFF, 2007)。

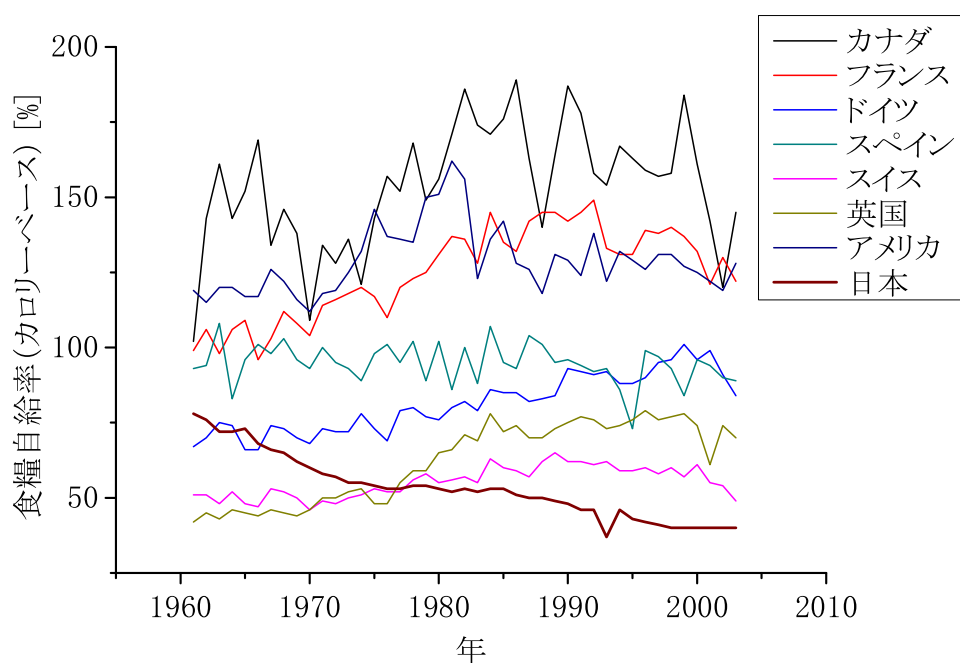


図 1.1 先進国の食料自給率 (カロリーベース) の推移

他の主要先進国が増加または維持傾向であるのと対照的に、わが国の食料自給率は、1960年代は70%以上あったが年々低下し、減少傾向に歯止めがかからない状況である。

この背景には、数十年の間に食生活の洋風化が急速に進んだという特徴があり、この急激な変化が食料自給率を引き下げてきた大きな要因となっている。古くから主食（ごはん）を中心とした食生活が行われてきたが、戦後、副食（おかず）の割合が増え、中でも特に畜産物（肉、乳製品、卵等）や油脂の消費が増えてきた。自給率の高い米の消費が減り、自給率の低い畜産物や油脂の消費が増えてきたことにより、食料全体の自給率が低下したと考えられる。このため、わが国の水田面積は1969年には317万haあったが毎年1%以上の割合で減少し続け、現在も減少傾向が続いている。図1.2は、1997年から2007年までの水田面積とイネ作付け面積の推移を示す(MAFF, 2007)。米の消費量が減少する中で作付け面積も減少の一途をたどり、遊休水田が増加していった。このため、宅地や工業用地等への転用や耕作放棄地の増加により、水田面積も減少し続けている。

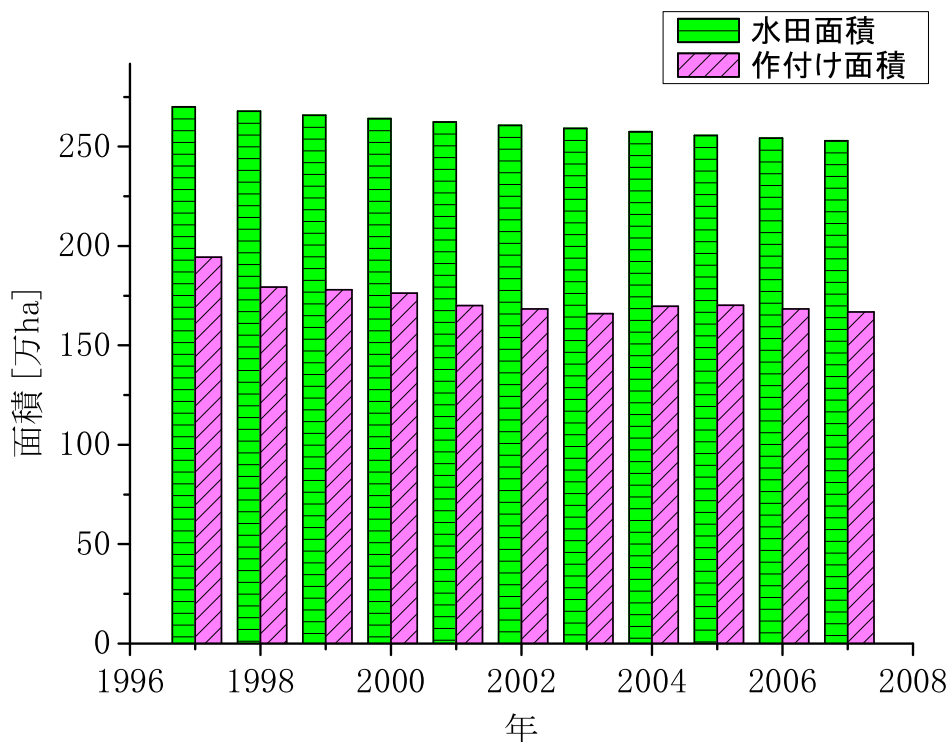


図 1.2 わが国の水田面積とイネ作付け面積の推移

食料自給率の低下は、単に食料消費の変化があったということだけではなく、この消費の変化に食料生産が対応しきれなかったことも要因の一つであるといえる。中でも、消費が増大したのは肉類や乳製品等に代表される畜産物であり、その自給率に大きく影響するのは、家畜用飼料の自給率である。

我が国は、家畜用飼料として、乾草、トウモロコシ、コウリヤン、麦類等の多くを海外からの輸入に頼っている。これらのうち、乳肉牛等大家畜経営においては飼養頭数規模の拡大に見合った飼料基盤の確保の遅れや労働力不足等により、利便性が良く、労働負担の軽減にもつながる輸入粗飼料が利用される傾向が高まり、飼料自給率は近年まで低下傾向が続いており、2006 年度においては純国内産飼料自給率は 25%、粗飼料自給率は 77%、濃厚飼料自給率は 10% と低迷している。中でも、主要な飼料用穀物であるトウモロコシは、その大半を米国からの輸入に依存してきたが、米国において近年の燃料用エタノール生産向け需要の大幅増によって価格が急上昇した。牧草についても、その影響を受けてトウモロコシへの作付けの転換が進みつつあるため、栽培面積が減少し、価格上昇傾向となっている。これらのことから、わが国の畜産用飼料の供給体制は、これまでのような輸入依存から脱却することが必要であり、国内生産基盤の早急な整備が望まれている。

さらに、飼料用稲わらについて見ると、主に肉牛用飼料や農業用資材として重要な役割を持つ資源である。国内消費量のうち、国産稲わらが約 9 割を占めてはいるが、近年主要な輸入元である中国産稲わらについて安全性に疑問が持たれ、輸入が一時停止される措置が講じられた。安定的で、安心・安全な我が国の畜産経営を維持確立するためには、国産稲わらの利用を拡大し、輸入稲わらに依存しない体制の確立が必要となっている。

畜産における水田利用は、転換畑飼料作として約 11.5 万 ha 作付けし、転換全面積のおよそ 19% を占めていた (2003 年) が、その後述び悩んでおり、水田での飼料作物栽培は停滞傾向で推移している。更なる水田の利用拡大のために転換畑に適合して安定多収生産ができる自給飼料生産技術の開発が進められているところであるが、我が国の気候条件から湿潤な転換圃場も多く牧草飼料作の栽培条件にかなう転換畑面積には限りがある。

一方、水田における飼料イネ栽培は、安定した生産を持続しつつモンスーン気候の多雨等に対応でき、環境保全の役目も果たすことが可能である。このため、多様な畜産的土地利用の一貫として水田における飼料イネの生産・利用技術を開発し、イネを湿性飼料作物として湿潤条件の転換圃場に取り入れることは、遊休水田の畜産的有效利用とともに水田

の減少に歯止めをかけることにもつながり、自給飼料生産基盤の拡大並びに飼料自給率向上への期待が大きい。これらのことから、飼料作物の国内生産を拡大するため、主食用水稻の作付けを行わない水田で飼料イネを栽培し、家畜の飼料として利用することが期待されている。

1.1.2 飼料イネの特徴とその生産

2000 年以降、わが国における飼料イネ生産の取り組みは、各地に広がっている。図 1.3 は飼料イネの作付面積の推移である。飼料イネの作付面積は 2000 年からの水田農業経営確立対策等の普及施策によって次第に拡大し、2003 年には約 5200ha まで増加した。その後、補助金の削減によって作付面積はやや減少したが、国産の自給飼料増産の取り組みにより再び拡大に転じ、2007 年度は前年度に対して 1,157ha(22%) 増加するなど、飼料イネサイレージの利用が確実に進んでいると言える。飼料イネの生産・利用は、BSE や口蹄疫の発生による畜産物への不安を解消するうえで、有益な方法と考えられている。安全な飼

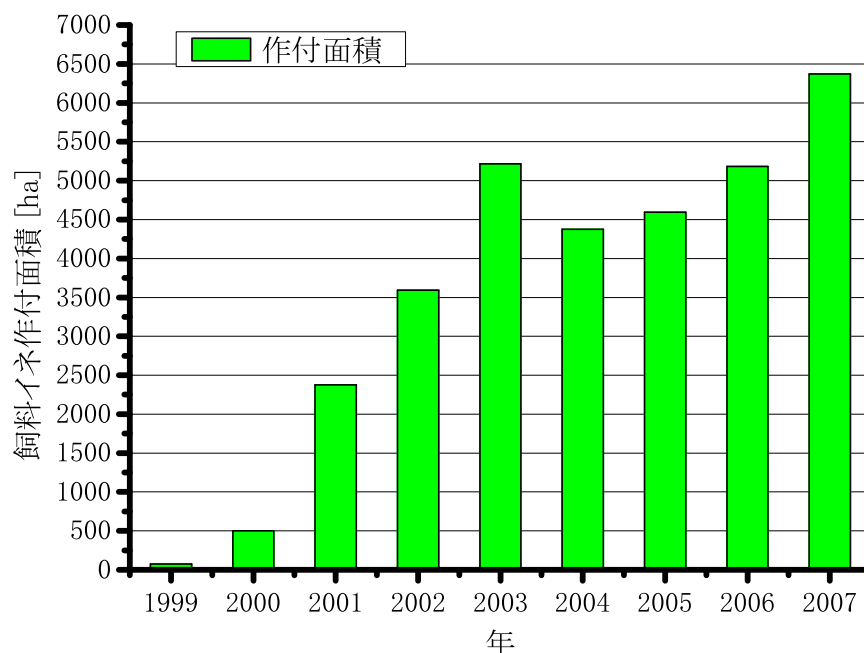


図 1.3 飼料イネ作付面積の推移

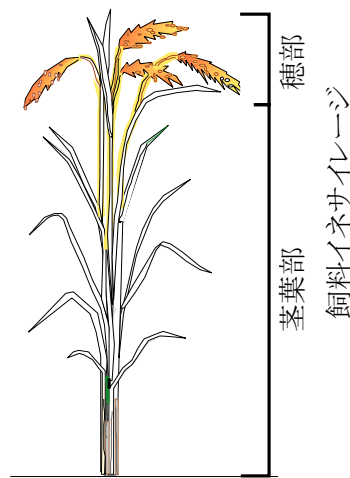


図 1.4 飼料イネの形態と利用

料イネを家畜に給与するとともに、家畜の糞尿を堆肥として水田に還元利用することにより、従来から問題となっている畜産廃棄物の処理に関する問題を同時に解決できる可能性もある。

飼料イネの一般的な利用形態は、糊熟期から黄熟期に地上部のすべてを収穫し(図 1.4)、ロール状に成型し、プラスチックフィルムで包み込んで飼料イネロールバール(図 1.5)として発酵させ、イネホールクロップサイレージ(Whole-Crop Rice Silage, 飼料イネサイレージ)として貯蔵され、乳牛及び肥育牛に給与される。このため、飼料イネサイレージは穀粒と繊維の両方に富み、栄養価が高くて物理性も良く、飼料価値は牧草のイタリアンライグラスと同程度である。飼料イネの生産・利用は、それが水田で行なわれることから、地域社会活性化の観点から耕種農家と畜産農家とのつながりを強化する効果が期待できる。さらに、飼料イネばかりでなく稲わら利用から家畜堆肥による有機栽培等、農業生産におけるゼロエミッションを推進するための効果的手段として、今後世界的に進めなければならない課題と言える。

これまでの飼料イネ研究は、1) 水田作業に適した収穫機の開発、2) 耐病性及び耐倒伏性等を持つ高収量の飼料イネ育成、3) 良質サイレージ調製技術、4) 反芻家畜への給与技術について取り組まれてきた。飼料イネは、通常の食用品種と異なり、高収量、耐病性、耐倒伏性、耐堆肥反応、難脱粒性等の特性を持つものが必要である。これらの育種目標は、食



図 1.5 飼料イネロールベール

用品種と異なり，飼料用であることから，堆肥を活用し，低コストで薬剤に頼らない栽培を行ない，泥等の付着がなく容易に収穫でき，かつ高エネルギー生産物を得ることから生じる。その結果，2006 年までに「ハマサリ」，「リーフスター」，「ベコアオバ」等 8 品種以上が育成され，北海道と一部地域を除きわが国耕地のほとんどをカバーした。これらの品種ごとに適性地域があり，栽培技術が確立されつつある。

収穫及びサイレージ調製機械の開発も進められた。乾田においては牧草収穫用の既存機械による収穫とサイレージ調製は可能であるが，湿田の多いわが国では，過湿水田では使用できない牧草収穫用の既存機械に代わって，クローラ走行部を備え，収穫部とロールベアラを結合した飼料イネ専用収穫調製機や自走式ベールラップが開発された。飼料イネ専用収穫調製機は，コンバイン型 (図 1.6) とフレール型 (図 1.7) がある。

近年，細断型ロールベアラが市販化された。これは，当初トウモロコシのロールベール調製に対応するためのもので，トラクタによるけん引式であったが，飼料イネの収穫調製も可能なように，過湿水田走行可能な自走式の汎用収穫調製機として改良がなされた。これにより，より高密度なロールベール調製が可能となった。図 1.8 に細断型ロールベアラ，図 1.9 に自走式ベールラップを示す。これらの専用収穫調製機が開発される以前はス



図 1.6 コンバイン型収穫調製機



図 1.7 フレール型収穫調製機



図 1.8 細断型収穫調製機

タックサイロ等に調製されたが、詰め込み密度が低く、かつ収穫と埋草作業とのタイムラグが大きく、発酵品質は低かった。

飼料イネは茎の中空構造や付着乳酸菌が少なく、かつ低糖含量によって高い発酵品質を達成することが容易ではなかった。近年、飼料イネ向けの新規乳酸菌「畜草 1 号」が畜産草地研究所他によって開発され、極めて高い発酵品質を達成でき、長期貯蔵安定性が得られるようになった。また、反芻家畜への給与技術についても研究が進められ、乳用牛に対する最大乾物摂取量及び馴致技術が解明された。適切な発酵品質の飼料イネサイレージならば、1 日 1 頭当りの乾物摂取量 6~10kg であることが明らかにされ、高泌乳牛に対する長期給与実験から、完全混合飼料 (Total Mixed Ration, 以下 TMR) 中の飼料イネサイレージの混合割合は、乾物重で 26~30% が最適であることが明らかになった。

肉用牛に対しては、飼料イネサイレージが含有するビタミン E によって、肉色の維持に有効であることが明らかになり、肥育農家によって朗報であるとともに、飼料イネの需要がさらに拡大することが期待されている。



図 1.9 自走式ベールラッパ

1.1.3 未消化子実の問題

このように、飼料イネを取り巻く環境は整いつつあるが、未消化子実の問題が解決されないままとなっていた。飼料イネサイジージは、ホールクロップとして茎葉部と子実部と一緒に給与されるため、他の飼料作物と同様に一部の籾が未消化のままふん中に排泄され、栄養価の損失となることが指摘される。特に、イネの子実には難消化性の堅い殻（籾殻）を持っており、これが咀嚼等により物理的に破砕がなされないと子実の消化が十分進まないためである (Kanaya et al., 2001, Yamamoto et al., 2000)。しかし、イネの子実は粒度が小さいため、咀嚼により破砕される機会はトウモロコシに比べると少ないと考えられる。実際に飼料イネサイレージを去勢牛に給与すると、黄熟期に収穫したイネでは 15% 程度の未消化子実があるのが普通である (Nakui et al., 1988)。図 1.10 は未消化のままふんへ排出される籾の割合を示す (NILGS, 2006)。

未消化籾の割合は収穫熟期によって大きく異なり、籾殻が堅くなる前の乳熟期では排出率が 5% 程度と低いが、黄熟期になると品種に関係なく 15 % 程度になる。さらに、飼料

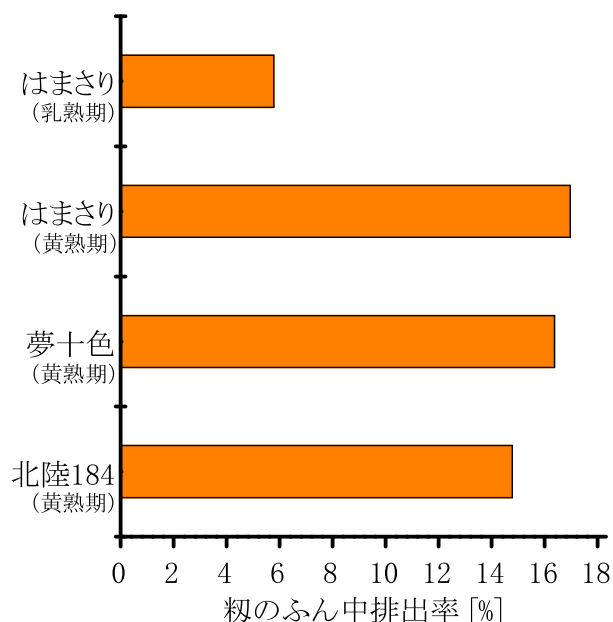


図 1.10 未消化のまま排出される粗

イネの収穫が適期になされずに刈り遅れ等で熟期が進むとさらに増大し、完熟期になるとさらに排出率が高くなる (Matsuyama et al., 2005)。さらに、穂からの脱粒によっても未消化子実の割合は増加する。しかも、これらの数値は維持レベルでの試験値であり、飼料を多給する搾乳牛の場合は消化管通過速度が早まるため、未消化子実排泄率は 50% 程度以上になることもあるとされている。

未消化粗の消化性を高める方法としては、これまでに、化学的手法や給与方法等いくつかの試みがなされてきた。化学的手法としてはアルカリ添加による細胞壁の柔軟化が知られているが (Nakui et al., 1986)、アンモニアを利用する場合はその取り扱いに労力を要することや、さらに調製したサイレージに対する牛の嗜好性が低下する場合がある。したがって、咀嚼や物理的な破碎処理等によって粗殻を剥離するか、粗ごと破碎しない限りほとんど消化されないとの報告がある (Nakui et al., 1988, Kanaya et al., 2001)。

近年では、物理的処理によって消化性を高める方法への関心が高まっている。粗に損傷を与える等の前処理を行うことにより、消化されにくい粗殻の中にある玄米に消化液が到達できるようにして消化性が改善されると考えられたためである。しかし、飼料イネサイレージの既往の収穫調製体系の中で、飼料イネの粗に積極的に傷を付ける等の作用を

行なうことのできる機械は存在しない。市販のロールペールカッタや TMR 調製用混合飼料調製機で検討したところ、刎が切断・破砕される割合は数 % 程度以下でしかなかった (Shigeta, 2007)。これに加えて、飼料イネ専用収穫調製機の種類によっては、収穫時の穀粒損失が増大することもあり (Shigeta, 2007)、飼料イネサイレージの消化性を向上させるだけでなく、子実の損失が少なく汎用性の高い消化性向上技術が求められている。

以上のことから、本研究はこれらの問題点を解決し、飼料イネサイレージの未消化子実排泄率の低減によって飼料イネの利用効率を向上させることを目的とした。これにより、安全・安心な国内産飼料の利用率向上により、低迷する食料の自給率を向上し、安定した我が国の食料基盤の形成への一助となることを目指したものである。

1.2 穀粒の破碎・粉碎方法

1.2.1 分類

本研究は未消化のまま排出される粕の低減のため，物理的に粕を破碎することにより消化性を向上させることが目的であるため，効率的な粕の破碎方法の開発が重要となる。そこで，実際に用いられている破碎・粉碎方式について系統立てて述べるとともに，飼料イネサイレージの粕に適する破碎方式の検討を行なった。

一口に破碎・粉碎用機械と言っても，その対象物は鉱石等地下資源，農林水産業産物，工業材料，産業廃棄物等とさまざまであり，産業別に見ると化学工業，セメント，選鉱，石炭，骨材，リサイクル産業，電子部品産業，食品，飼料，医薬，化粧品，その他と非常に多様である。扱われる個体の大きさも，m オーダーの塊から nm オーダーの超微粒子まで広範囲の広がりを持つ。粉碎を生成物の粒度別に分類すると，およそその目安として表 1.1 のような分け方がされる。これらのうち，粗砕や中砕は主として鉱石や産業廃棄物等を対象とし，穀粒の粉碎で用いられるのは粒度 10mm 以下の「粉碎」以降のものである。

表 1.1 粉碎の粒度別呼称

呼称	粒度範囲
粗砕	100mm <
中砕	10mm ~ 100mm
粉碎	125 μ m ~ 10mm
微粉碎	10 μ m ~ 125 μ m
超微粉碎	< 10 μ m

粉碎前後の粒子径の比のことを粉碎比と呼び，粉碎前後の粒子径をそれぞれ， x_f ， x_p とすると，粉碎比 C_r は

$$C_r = \frac{x_f}{x_p} \quad (1.1)$$

で表わされる。粉碎比は，粉碎方式によって 4 程度までの粗粉碎を行なうものから，1000 以上の粉碎比が得られるものまで幅が広い。

表 1.2 穀粒のさまざまな破碎・粉碎方式

方式	作用	タイプ	具体的装置
叩く	衝撃	回転衝撃式	ハンマーミル ピンミル
潰す 擦る	圧縮 摩擦	ロール式	ロールミル
		媒体式	ビーズミル ボールミル 振動ミル
		石臼式	石臼式ミル
切る	尖断	カッター式	カッターミル
素材同士衝突	同体摩擦 気流利用	衝撃式と同体衝突方式の混合	ジェットミル トルネードミル
		同体摩擦方式	ドリームミル

穀粒の破碎・粉碎方式の分類については，用途別，生成物の大きさ別，方式別等さまざまな分類方法が考えられる。ここでは，食品や飼料用穀粒を対象として，破碎・粉碎方式別に見ることとする。穀粒の破碎・粉碎方法は，表 1.2 に示したように叩く，潰す，擦る，切る，及び素材同士の衝突による方法等，さまざまな方法が実用化されている。これらについて，方式別に特徴及び実際の破碎・粉碎機について述べる。なお，図，写真及び解説の一部は (Ito et al, 2005) を引用した。

「叩く」作用

「叩く」作用を用いたものは，主に回転衝撃式の衝撃作用を利用したものであり，ハンマーミル (図 1.11) としてさまざまなものが商品化されている。スクリーにより粉碎室へ定量供給された碎料は，高速度で回転するハンマーの衝撃，ハンマーと粉碎室に設けられたライニングとの間 (ハンマーギャップ) で摩砕及びせん断等の作用を受けて粉碎される。

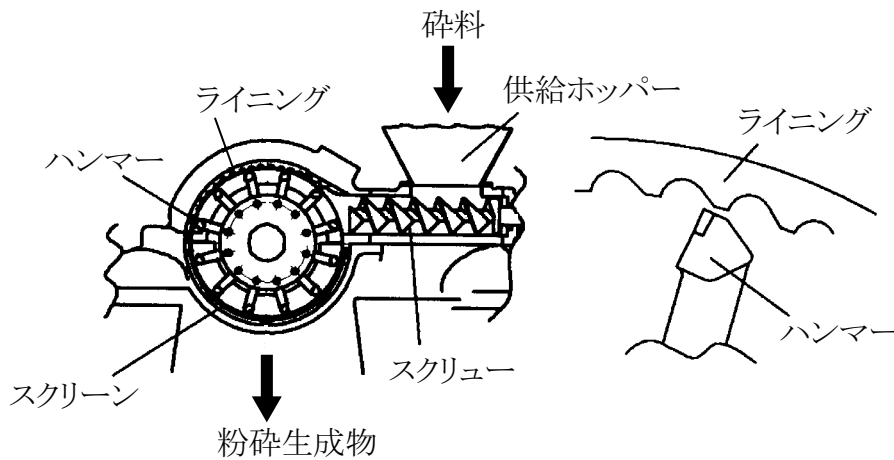


図 1.11 ハンマーミル構造図
(Asai, 2005)

粉碎生成物は、粉碎室に設けられた多孔スクリーンにより分級される。分級程度に達していない粗大粒子は、回転するハンマーによりライニング部へ運ばれ再粉碎される。およその目安として、粒子径 10~1cm のものを 1cm 以下に破碎する。粉碎比は 10~100 程度である。

ハンマーミルの特長は、

- 乾式であり、粉碎用媒介物や圧縮空気等の装備が不要であるため、装置全体がシンプルで操作性が高く、汎用性に優れている
- 粉碎粒度は、ハンマー回転速度を変えること、ライニングの形状やハンマーギャップを変えること、スクリーンの穴径を変えることにより、任意に調整することができる

である。メッシュの目詰まりの原因となるため、材料は乾燥したものである必要があるとともに、粉碎生成物は温度が上昇する場合がある。

同様に衝撃作用を利用したものとして、ピンミルが市販化されている。これは、ピンの回転によって粉碎するもので、向かいあった 2 枚の円板の表面に数十本もしくはそれ以上のピンを互いにかみ合うように植え、片方あるいは両方の円板を高速回転させて砕料を円板中心に供給する。砕料が遠心力で円周方向に移動する間にピンによる衝撃、せん断力



図 1.12 ピンミルの例
(MillSystem, 2008)

により粉碎する。回転数は大きいもので数千から数万 rpm 以上に達し、ピンの大きさも様々である。縦型と横型がある。およその目安として、粒子径 2~1cm のものを $10\mu\text{m}$ 以下に粉碎し、粉碎比は 1000 程度が得られる。比較的強度の低い、顔料、医薬品、食料品、飼料等に適用され、微粉碎可能なものもある。

「潰す」及び「擦る」作用

次に、「潰す」及び「擦る」について見ると、「潰す」は圧縮作用、「擦る」は摩擦作用をそれぞれ利用したもので、これら両方の作用を用いた粉碎装置があり、ロール式「ロールミル」、媒体式「ビーズミル、ボールミル」等、石臼式「石臼式ミル」等が存在する。

ロールミルは、回転する 1 本以上のローラで碎料を引き込みながら圧縮と摩擦作用で擦り潰すことによって粉碎するものである。構造はきわめて簡単であり、ローラの本数によ

り，シングルロールミル，ダブルロールミル等がある。大型のものはロールクラシャと呼ばれている。

ローラ表面の形状は，用途によっていくつかの種類があり，図 1.13 に示すように，凹凸のない平坦な平型，波型，鬼歯型等が存在する。平型は，ローラの開きを小さく取ることが可能で，細かい砕成物を得るときに用いられる。波型や鬼歯型は，ローラ表面の摩擦係数が大きくなるため，大きな塊をかみ込むことが可能になり，軟質な砕料を粗めに破碎する場合に用いられる。およその目安として，粒子径 10cm のものを 1cm 以下に破碎するが，破碎生成物の粒子径は用いるローラによって粗砕 (100mm<) から粉碎 ($125\mu\text{m}\sim 10\text{mm}$) まで幅広く，得られる粉碎比も 1~100 程度と広範囲である。

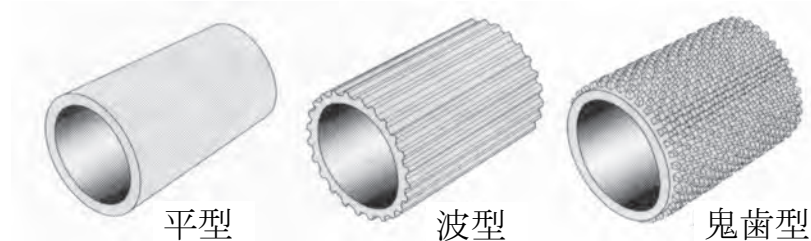


図 1.13 ローラの種類

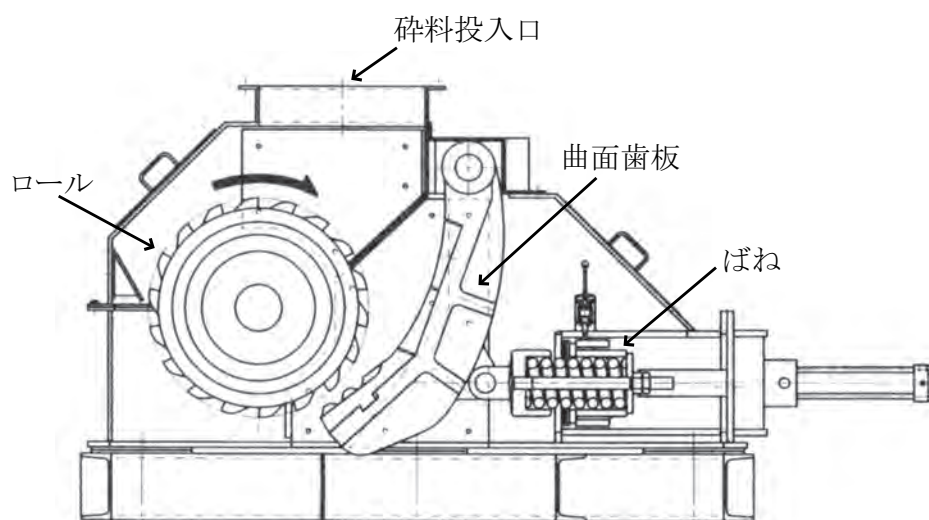


図 1.14 シングルロールミルの例

シングルロールミルは、1 個の水平ローラの外周に、多数の歯を大小交互に配置し、ローラと相対する曲面歯板との間で碎料を破碎する構造を有する。図 1.14 はシングルロールミルの例である。曲面歯板は上部を支点として吊り下げられ、底部はばねで支えられ、金属片等の粉碎困難な異物が混入した場合には曲面歯板に高圧が加わり、ばねが圧縮されて後退し、異物を通過させて機械に故障を生じないようにになっている。

ダブルロールミルは、2 個の水平円筒型ローラが平行にある間隔を置いて設置され、互いに反対方向に回転し、その間にある碎料をかみ込んで強力な圧力によって破碎を行なう。ローラの表面は平滑なものが多いが、これは一般に碎料が硬質の場合であって、碎料が軟質の場合は歯付きローラを使用するものが多い。比較的大型のロールミルで、粉碎比が大きい場合には、波型の表面を与えて粉碎能力の向上をはかることもある。軸受の一方は、ばねまたは油圧装置によって支えられており、過負荷安全装置をも兼ねているので金属片等をかみ込んだ場合でも機械に故障を生じない構造となっている。図 1.15 にダブルロールミルの模式図を示す。ローラの中に供給された原料が積極的にかみ込まれ、砕かれ、そのまま強制的に排出される構造のため、次のような特長を有する。

- 砕成物の微粉発生が少ない
- ローラの開き付近の大きさの粒度範囲の砕成物を多く得られる
- スクレーパを装着することで、粘着性のある碎料にも対応できる

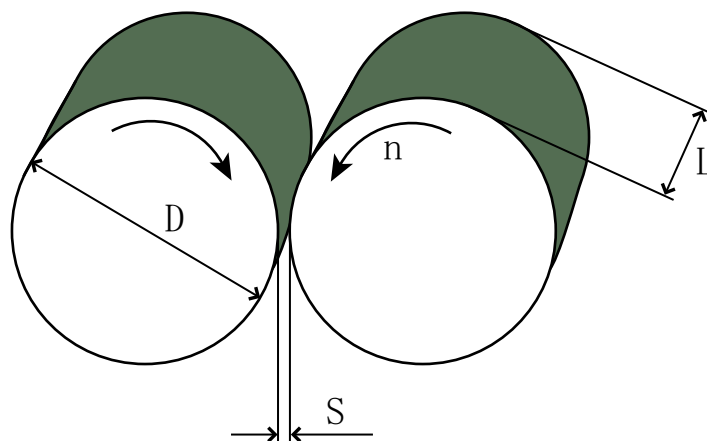


図 1.15 ダブルロールミル模式図

砕料は、重力による自然落下のみでなく、ローラ表面と砕料との摩擦によってローラ隙間に引きずり込まれ、破碎される。

ダブルロールミルの破碎能力は、排出口の面積とローラの周速によって決まり、次式により概略を計算できる。

$$Q = 60n\pi DLS\rho \quad (1.2)$$

ここに

Q : 破碎能力 [t/h]

n : ローラの回転数 [rpm]

D : ローラ直径 [m]

L : ローラ長さ [m]

S : ローラの開き [m]

ρ : 原料のかさ密度 [t/m³]

である。一般に、実際の能力はこの計算能力に 0.25~0.35 の係数を乗じた値になるとされている。

媒体式を用いたビーズミルやボールミルは、アルミナ、ジルコニア、シリカ、窒化ケイ素、天然石、耐摩耗鋼等のビーズやボールを粉碎室内で高速で回転運動させ、材料を擦り潰して微粉碎するものである。比較的少量の材料の微粉碎に用いられる。およその目安として、粒子径 2~1cm のものを 10 μ m 以下に粉碎する。図 1.16 は、転動ボールミルの例である。粉碎機構が単純であるためスケールアップしやすい。回分式 (バッチ) ばかりでなく、分級機と組み合わせて連続式にもできる。乾式、湿式の両方で使用できる。等の特徴がある。

振動ミルは、粉碎媒体を入れた容器 (粉碎筒) を回転するのではなく、振動させるところに大きな違いがある。強制振動させることにより粉碎筒内にエネルギー伝達がなされ、媒体 (ボール) と砕料及び媒体と粉碎筒壁面とが衝突、せん断、摩擦の複合運動を繰り返し、微粉碎が行なわれる。さらに粉碎媒体は個々に衝突しながら全体に大きく公転するため、混合作用も同時進行する。図 1.17 は、振動ミルの例である。

振動ミルの特長は、

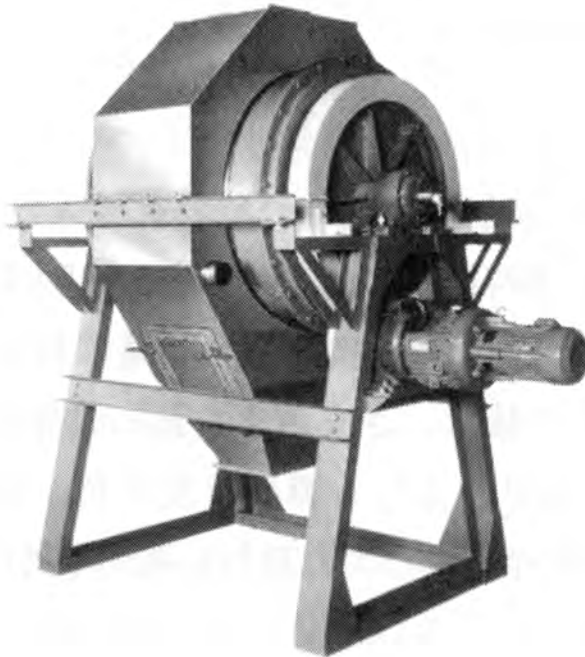


図 1.16 転動ボールミルの例
(Asai, 2005)

- 中砕 (10mm~100 μ m) から微粉碎 (125 μ m 以下) まで広範囲の粉碎が可能
- 乾式粉碎，湿式粉碎が同じ機械で可能
- 原料の入口から出口まで完全密封機であるため，不活性ガス等の封入ができ，爆発，酸化，変色等を嫌う特殊粉碎が可能
- 発塵個所がなく集塵装置が不要

等である。用途原料はあらゆる粉体に適用される。ただし，ゴム質，皮革，プラスチック等の衝撃エネルギーを吸収し変形しにくい原料は適さない。

石臼は，石製の臼の総称で，搗き臼，サドルカーン，ロータリカーンに大別される。搗き臼は，我が国へは有史以前に伝来したとされ，その形状と方式は木製の餅つき臼として受け継がれている。サドルカーンは石板の上で棒状のものや石塊を往復させることによって穀物を挽き潰す方式のもので，古代エジプトで用いられていた原始的なものであり，効率は悪い。一般には石臼はロータリカーンを指すことが多い。これは，丸い円板形をした石を二つ重ね合せたもので，重ね合せた面には細かく溝が刻まれていて，上側の石を回転

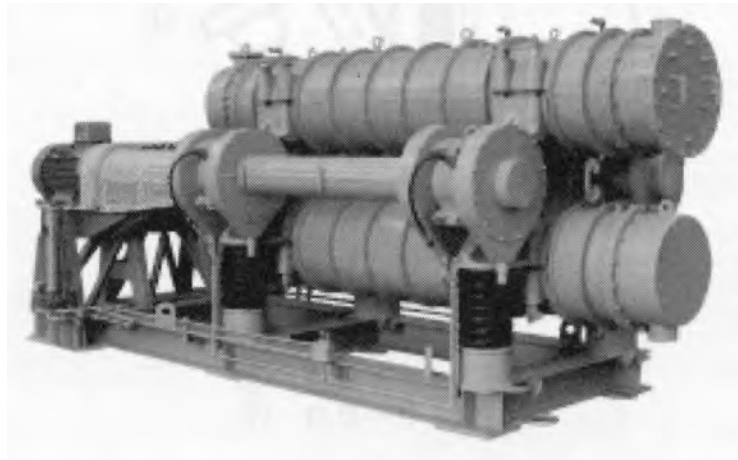


図 1.17 振動ミルの例
(Ueda, 2005)

させながら，上臼にある穴から砕料を入れると，重ね合せ面へ砕料が送られ，せん断力により粉碎される方式である。現在でも，主に小麦や蕎麦粉等の製粉に用いられ，主として製粉用として，食品産業用の大型のものから家庭のキッチン用向けの小型のものまで，手動式と電動式のものが市販されている。

「切る」作用

「切る」は，尖断作用によるもので，カッター式のカッターミルがある (図 1.18)。粉碎室内に複数の刃を置き，高速で回転させることによって材料を切断しながら粉碎するものである。食品から化学原料までさまざまな材料向けのものがある。粉碎比は 10 前後である。カッターミルの特長は，

- 機種ごとに独自形状のカッターと様々な粒度及び粒径の調整が可能なスクリーンにより，解砕物の粒度調整が容易
- 他の方式に比べて，比較的省スペースで設置できる
- 集塵機を内蔵するものが多く，粉塵の飛散を防止できる

等である。

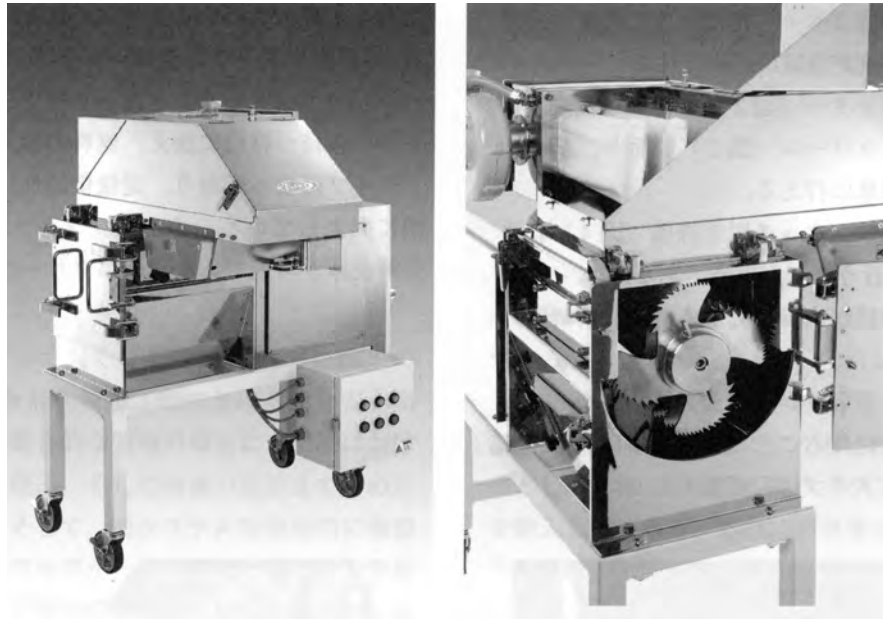


図 1.18 カッターミルの例
(Ikeda, 2005)

以上、「叩く」作用の衝撃式、「潰す」及び「擦る」作用のロール式、媒体式、石臼式、「切る」作用の尖断式について述べた。これら衝撃式から尖断式までの粉碎機に共通の特徴として、以下のことが挙げられる。

- 粉碎時に熱が発生するため、素材の性質が変化する可能性がある
- 異物との接触による粉碎のため、摩擦による異物の混入の可能性がある
- 機械自体が摩耗することや脂分の多い素材の粉碎が困難である

しかし、破碎・粉碎機の設計の自由度が比較的高く、安価に製造できるため、多くの場面で用いられている。

「素材同士の衝突」作用

一方、素材同士衝突方式を利用した粉碎機として、気流によって素材同士の衝突や摩擦を引き起こすことによるものが見られる。衝撃式と自体摩擦方式の混合方式によるものとして、ジェットミルやトルネードミル、自体摩擦方式によるものとして、ドリームミルがあり、微粉碎 ($10\sim125\mu\text{m}$) から超微粉碎 ($<10\mu\text{m}$) 領域の粉碎が可能である。

ジェットミルは、圧縮空気等の流体をノズルから吐出させ、形成される高速乱気流中で砕料を相互衝突させたり、高速の気流で砕料を搬送し、衝突体に衝突させることによって微粉碎や解砕、分散を行なう粉碎機であり、多くの材料が平均粒径数 μm 程度に粉碎される。ジェットミルは、砕料同士や、砕料を衝突体に衝突させて粉碎する「衝突型」、循環する気流中に配された複数の粉碎ノズルで形成される粉碎ゾーン中で、主に砕料の相互衝突により粉碎する「旋回気流型」や「ループ型」、流動層の中で比較的低い流速で砕料同士の衝突や摩擦による表面粉碎で微粉を生成する「流動層型」に大別される。これら 3 形態のジェットミルには、それぞれに固有の特長があるが、ジェットミル全体としては

- 平均粒径数 μm の微粉が乾式で得られ、生成粒度分布は極めてシャープである
- 粉碎生成物が瞬時に連続で得られる
- 解砕効果が大きく、良く分散された粉末が得られる

等の特長を有する。



図 1.19 旋回気流型ジェットミルの例
(Ito, 2005)

図 1.19 は、旋回気流型ジェットミルの一例である。

トルネードミルはサイクロンミルとも呼ばれ、乾式気流粉碎機の一つで、高速回転ミル

とジェットミルの中間の特性を持つ。その粉碎メカニズムは、空気等の媒体に分散した粒子同士の衝突による衝撃、磨砕、せん断等によるもので、このメカニズムによっていろいろな特徴を持つ製品が作られている。トルネードミルは、図 1.20 に示すように、2 つの相

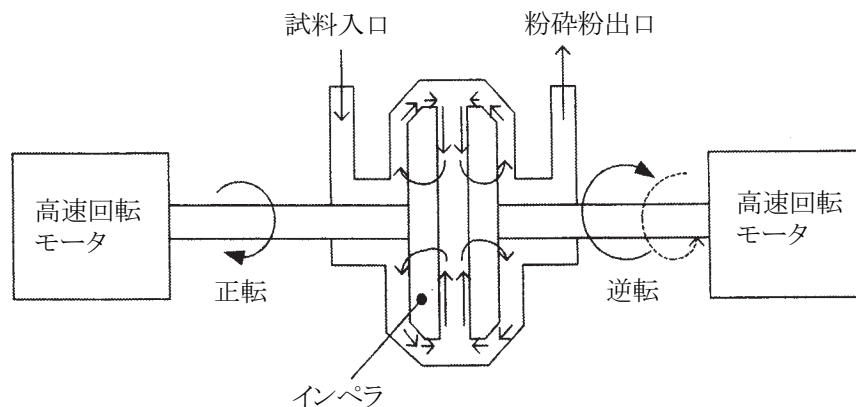


図 1.20 トルネードミルの構造
(Toda, 2005)

対するインペラを正または逆方向に高速回転させることにより、大きな流体せん断力を生み出す方式を採用している。このロータ回転数、ロータ間の間隔等を変えることにより、粉碎粒度を調節することができる。トルネードミルの特長は

- 砕料の汚染が少ない
- 硬い砕料から軟らかい砕料まで広範囲の砕料の微粉碎が可能
- ミル本体が分級能力を持っている
- 粉碎時の発熱が比較的少なく、砕料の変質が少ない
- 構造が簡単で保守が容易
- エネルギー効率が低い

等である。ジェットミルやトルネードミルは、粉碎時に熱の発生があることや、粉碎室内壁への衝突による粉碎があり、粒径の限界は $20\mu\text{m}$ が限界とされる。

近年、食品業界や健康食品業界等において、数 μm から数十 μm の微粉末原料を用いた新規カテゴリ商品の開発や、現有商品の付加価値向上が大きな流れとなっている。これら

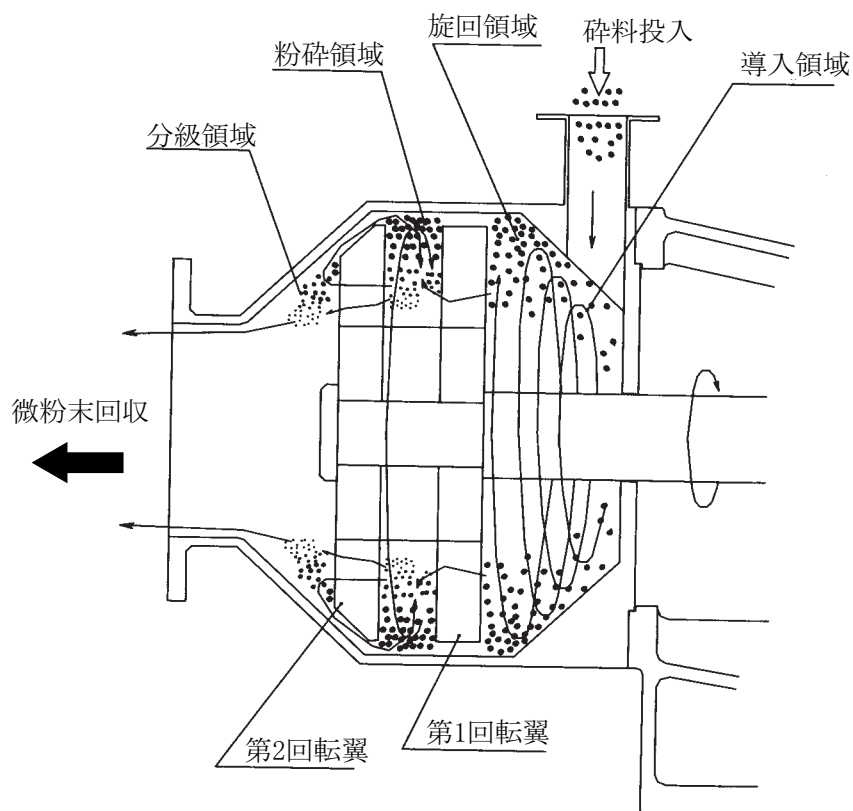


図 1.21 ドリームミルの粉碎原理図
(Hayashimoto, 2005)

の新品に使用される微粉末原料の生産プロセスは，粉碎時の熱の発生による素材の変質と異物混入を嫌い，その要望に対応できる粉碎機が強く求められている。ドリームミル(図 1.21) は純粋な同体摩擦による粉碎であるため，機械的外力を加える粉碎機に比べて熱の発生を極力抑えた粉碎が可能であり，新規商品開発や付加価値をつけた差別化商品開発のツールとして使用されており

- 熱の発生を極力抑えた粉碎が可能
- 素材そのままを微粉碎可能
- 丸い粉碎粒子形状
- 分級機なしでシャープな粒度分布に粉碎できる
- 脂分の多い原料の微粉末化が可能

- 粉碎機の摩耗による異物混入が少ない
- 構造がシンプルでメンテナンス性に優れる

等，多くの特長を有する。

構造と粉碎原理は，図 1.21 に示すように，粉碎機内部は，導入領域，旋回領域，粉碎領域，分級領域で構成され，原料投入口と旋回領域との間に設けられた導入領域は，旋回領域から後方に向けて径が漸減するテーパ壁となっている。碎料投入口から導入領域へ供給された原料は，第一回転翼で発生する旋回気流と吐出側への推進力，並びに回収ファンの吸引力で導入領域から旋回領域，さらに旋回領域から粉碎領域へと移行する。粉碎領域では，第一回転翼と第二回転翼の回転で発生する旋回気流内の速度差で生じる粒子同士の同体摩擦粉碎と，第二回転翼で発生する戻り気流で流動する粒子と，第一回転翼と第二回転翼間で旋回流動する粒子との衝突粉碎が並行して行なわれる。粉碎領域の粉碎粒子は，遠心力の影響を強く受ける大きな粒子ほど外周側に，遠心力の影響の少ない小さな粒子ほど回転中心側に分布する。回転中心側に集まった小さな粒子は回収ファンの吸引力で粉碎領域から分級領域に送り込まれる。分級領域では，第二回転翼の回転により戻り気流が発生している。粉碎が不十分な粒子は，戻り気流で粉碎領域に戻され，分級された微粉末のみが回収ファンで吸引され，後段の捕集手段により粉碎製品として捕集される。

1.2.2 飼料イネサイレージに適応する方式

以上，さまざまな粉碎方式を利用した多種多様な粉碎機が市販化されており，それぞれの特長を生かした利用がなされている。これら既存の穀物等の粉碎機構をふまえた上で飼料イネサイレージの籾から籾殻を剥離または籾ごと破碎するのに適した破碎方式を検討する。まず，砕料としての飼料イネサイレージの特徴は，

- 30～40% 程度の水分を含む高水分原料である
- 茎葉部，穂部が混在している
- 茎葉部は，細断されていないイネの状態のままの茎葉部を含むものから，数 cm 以下に細断されたものまで様々な状態のものがある
- 破碎すべき穀粒径 (厚み) は 2mm 前後である
- 乳酸発酵のため，pH は 4～5 前後と酸性である
- 籾殻には珪酸が多く含まれるため，接触する機械部品の摩耗を考慮する必要がある

等があげられる。

求められる破碎程度としては，籾殻が一部でも剥離するか，籾ごと半分に割れる程度の破碎で十分とされており，胚乳部を完全粉碎する必要はない。従って必要な粉碎比は 1～2 となる。胚乳部が完全に粉碎されて粉状になると，飼料イネサイレージとして均一性が失われるだけでなく，他の配合飼料等と混合して給与する際にも他の粒状飼料との均一な混合ができなくなる恐れがある。さらに，給与時の損失の増大も予想される。

次に，籾殻が微粉碎されると物性が大きく変化することにより，新たな問題が発生することを考慮しなければならない。すなわち，籾殻は珪素やシリカを多く含むため，そのままでは吸水性は高くない材料であるが，微粉碎されて粒子径が 125 μ m 程度以下になると吸水性が非常に高まることが知られており，飼料の物性に影響を及ぼす可能性が高い。さらに，微粉碎されても消化されやすくなるわけではないため，過度の微粉碎はエネルギー効率の点からも得策ではないと考えられる。

以下，方式別に飼料イネサイレージに適する方式を検討する。まず，飼料イネサイレージは 30～40% 程度の水分を含むため，砕料が乾燥していることが必要であるハンマーミルは適用できないことから除外される。次に，飼料イネサイレージは穀粒としての籾だけ

ではなく茎葉部も含むため、茎葉部がからまる可能性が高いピンミルは使用できない。同様に、素材同士の衝突方式も適用しにくい。したがってジェットミル、トルネードミル、ドリームミル等は除外される。

カッターミルは、飼料用カッタと違って粉碎室内で砕料を攪拌しながら回転するカッタが切断する方式であり、珪酸を多く含むイネは刃が摩耗しやすい。砕料は低 pH であるため、耐酸性の切断刃の製造は高コストになる要因にもなる。さらに茎葉部がカッタの歯に絡まる可能性が高いことや、肝心の靱が切断される確率は他の方式に比べて低いことが予想されるため、これも除外される。

振動ミルは、一定量の砕料のバッチ処理が基本となることから、飼料イネサイレージのような嵩の多い砕料の連続処理には適さないと考えられる。さらに、媒体粉碎方式であるビーズミルやボールミルは、飼料イネサイレージのような不均一な砕料の場合、破碎・粉碎処理後の媒体と砕料との分離にコストがかかることが予想されることから、これも適さない。

一方、ロールミルに代表されるロール式の破碎・粉碎機構は、不均一な砕料でも目的の粒度に上げることが可能であり、特にダブルロール方式は、ローラ間に供給された原料が積極的にかみ込まれて碎かれ、強制的に排出される機構を有するため、砕料の物性変化に対する適応性が高い。飼料イネサイレージの破碎に求められる粉碎比 1～2 もロール

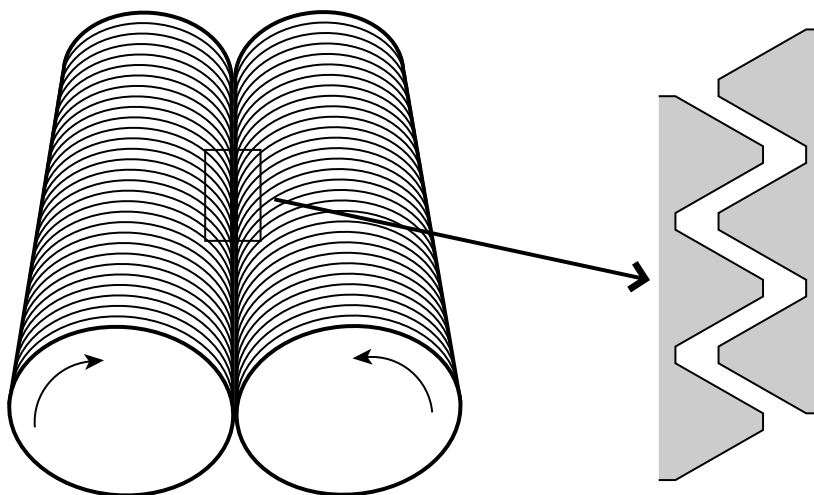


図 1.22 本研究で用いたダブルロールミルのローラ模式図

ミルの粉碎比 (1 ~ 100) によりカバーされる。さらに、構造が簡単なため比較的低コストで生産可能である等、飼料イネへの適応性は高いと考えられる。

そこで、本研究ではロール式を基にして、飼料イネサイレージの粗破碎処理への適応性を高めるために改良した方式を採用した。図 1.22 は、実際に用いたダブルロールミルのローラ部の模式図である。このようなダブルロールミル方式を採用した場合の、粗単体及び飼料イネサイレージに対する理論処理能率を、式 (1.2) を用いて計算する。

まず、粗に対する能率の計算では、装置の条件を

$$\begin{aligned} n &= 60 \text{ rpm} \\ D &= 0.15 \text{ m} \\ L &= 0.30 \text{ m} \\ S &= 2 \text{ mm} \end{aligned} \tag{1.3}$$

とした。ローラの開き S は、粗を破碎するため粗の厚みより若干薄い 2 mm とした。

粗の水分が 15% の場合、かさ密度は

$$\rho_p \approx 0.56 \text{ t/m}^3$$

であるため、式 (1.2) より粗に対する処理能率 Q_p は、

$$Q_p = 0.57 \text{ t/h} \tag{1.4}$$

と試算される。次に、飼料イネサイレージに対する理論処理能率を計算する。飼料イネサイレージでは、サイレージ調製に用いる飼料イネ収穫調製機の種類によって梱包密度が大きく異なることが知られており、梱包密度によってかさ密度は大幅に変化する。前述のように、飼料イネ収穫調製機は、コンバイン型、フレール型及び細断型の 3 種類が市販化されている。サイレージ調製時の乾物梱包密度は

コンバイン型	100~143 kg/m ³
フレール型	140~175 kg/m ³
細断型	156~178 kg/m ³

という報告がある (Momose et al., 2004)。そこで、フレール型収穫調製機で調製されたロールバールサイレージでは、水分 50% でのかさ密度は

$$\rho_s \approx 0.38 \sim 0.35 \text{ t/m}^3$$

と想定され、イネサイレージが通過する際の開きは籾より広がると予想されるため、

$$S = 5 \text{ mm}$$

とすれば、飼料イネサイレージに対する処理能率 Q_s は、

$$Q_s = 0.71 \sim 0.89 \text{ t/h} \quad (1.5)$$

と試算される。

装置の設計において、ローラの寸法や表面形状の工夫によりローラの有効長さを増加させることが可能であり、ローラの開きや回転速度の調整によって能力は変化するが、おおまかな見通しの値としては、この程度の能力は期待できることになる。ローラの形状や破碎方式についての詳細は第 3 章で述べる。

1.3 本研究の目的

先に述べたように、飼料イネサイレージを乳肉牛用飼料として利用する場合、穀実が消化されにくい籾殻に覆われているため未消化のまま排泄される籾が 15%~50% 程度あることが問題となっている。一方、飼料イネサイレージの消化性は簡便に測定する手法がないため家畜を用いた給与実験によって調べられている (Nakui et al., 1988, Yamamoto et al., 2002)。しかし、消化試験は労力がかかる上、長期に渡って同一の飼料を給与する必要があるため、さまざまな方法で調製した飼料の消化試験は実質的に不可能である。

本研究の最終目的は、飼料イネサイレージを乳肉牛に給与した際に未消化となって排出される子実を減らすことによって飼料の利用効率を向上させる技術の開発である。そこで、まず飼料イネサイレージの籾が消化可能かどうかについて客観的に識別する方法の検討を行う。飼料イネサイレージを牛に給与して籾が消化されるかどうかは、実際に給与して排出されるふんを調査しないと正確なことはわからないのが現状であるが、籾に傷を付けたり圧ぺん等の破碎処理をして給与したところ消化率が向上した (Yamamoto et al., 2000) との報告もある。そこで、家畜を用いた実験による実際の消化性改善への効果については第 4 章で検討することとし、第 2 章では籾殻が一部でも剥離または籾が破碎されていれば消化され得るものとの前提に立ち、まず飼料イネサイレージの籾が消化可能かどうかについて客観的に識別できるようにするため、画像処理による方法について検討する。ここでは、籾殻が剥離が破碎されているかどうかを判別できることを目的としている。

第3章では、実際に飼料イネサイレージ中の籾の消化性を改善し、未消化子実の排泄率を低下させることを可能にする技術開発について述べる。籾の消化性を高める方法として、アルカリ処理等の化学的手法による籾殻の柔軟化は嗜好性の低下が問題であった。このため、物理的処理により消化性を向上させ、しかも損失が少なく汎用性の高い消化性向上技術が求められている。籾殻で覆われている籾から、籾殻を剥離するか籾ごと破碎することによって、牛の胃の中で消化液が籾に接触できさえすれば消化率は劇的に向上する(Kanaya et al., 2001, Yamamoto et al., 2000)。このため、物理的に籾殻を剥離するか籾破碎することによって消化性を向上させることのできる技術開発を目指した。

なお、市販の飼料イネ専用収穫機を用いた収穫調製作業における籾破碎率は通常 10% 前後であり、籾の破碎率が比較的高いとされているフレール方式収穫調製機は、収穫時のロスが多いことが問題とされている(Shigeta, 2007)。さらに、飼料混合調製用機械等による調製作業は攪拌・混合が主目的であるため、籾殻剥離や籾破碎効果は小さく、これら既存の機械・装置等による作用で十分な籾殻剥離・破碎効果を期待することはできない。このため、積極的に籾殻を剥離するか、または破碎する装置の開発が必要である。

イネの籾に関連する既存の破碎・粉碎機構としては、籾殻の粉碎用機械が知られており、数社から市販化されている。その多くがバッチ処理方式か、または連続方式でも上下の石臼によってすり潰すことにより、籾殻だけの微粉碎を目的としたものが多く、籾から籾殻をわずかでも剥離して開穎籾とするか、籾ごと破碎する等消化性の向上をねらいとしたものはない。そこで、ここでは飼料イネサイレージの籾殻を効率的に剥離する機構を設計するため、まず籾殻剥離に要する力を、籾に対する力の作用点や作用方向別に計測している。これをもとに効率的に籾殻剥離・籾破碎できる機構を設計し、「籾破碎装置」を試作する。本装置は、まず籾単体に対して性能を明らかにする。ここでは、第2章において提案した籾殻の一部が剥離しているか籾が破碎しているものを判別できる判定手法は、試作した装置によって処理された試料の解析に適用し、籾殻剥離程度の判別に用いている。

第4章では、籾破碎装置の飼料イネサイレージに対する性能を明らかにし、未消化子実排泄率の低減に有効であることを示す。このため、破碎処理を行なった飼料イネサイレージを実際に去勢牛に給与して効果を確認している。

飼料用イネを乳肉牛に給与する場合、茎葉部分も含めたイネ全体を飼料として利用するのが一般的であり、籾破碎処理した飼料についても、その効果を確認する必要がある。そ

こで，ここでは飼料イネサイレージを供試して粉砕処理してその効果を検討している。一般に飼料の評価は，化学分析や近赤外分析等の手法を用いて行なう飼料成分分析によってなされる (Abe, 2001)。これにより，給与飼料の成分や栄養価等を的確に把握でき，飼料設計が可能になる。これに加えて，サイレージでは有機酸組成評価としての発酵品質も飼料価値判定には重要な要素であり，これによって家畜に対する安全性の保障が可能となる。その他，飼料の形状，比重，密度，硬さ等の物理的特性は家畜による消化性や乾物摂取量のほか，反芻家畜の第一胃安定性維持に影響を及ぼすため重要である。

一方，飼料イネサイレージの栄養価に関する報告は多いが，それらの報告での栄養価は，山羊や羊を用いての検討が多く，牛を用いての報告は非常に少ない。さらに，飼料イネサイレージの各化学成分の消化率や可消化養分総量 (Total Digestible Nutrients, TDN) は，牛と羊で異なることが指摘されている (Abe et al., 1988)。本研究の目的は未消化子実を低減する技術の確立であり，最終的に牛を用いた消化試験は避けて通れないものである。そこで，粉砕処理した飼料イネサイレージの，牛に対する維持レベルでの評価を目的として，去勢牛に給与して栄養価や消化性の評価，並びに未消化子実の排出程度を調査するとともに，採食行動の観察から飼料の物理性を評価する。

なお，維持レベルでなく生産レベルでの評価方法としては，搾乳牛や肉牛を用いた試験が考えられる。これについては，別途実験を実施する予定である。これらを総合して，最終的に乳肉牛に飼料イネサイレージを給与する畜産現場において実用可能な，未消化子実の排泄を低減させる調製方式を示すことを目的とする。

第 2 章

画像処理による破碎粕の識別

2.1 目的

飼料イネサイレージの粕が消化可能かどうかについて客観的に識別するため、画像処理による方法を試みた。本研究の結果は、飼料イネサイレージの消化性向上装置の開発や粕の消化性の給与前の推定等に用いることを想定している。そこで、粕殻が剥離しているか否かの画像処理による識別を、比較的簡便に、しかも客観的に行なえる手法の開発を目指した。

飼料イネサイレージを牛に給与して粕が消化されるかどうかは、実際に給与して排出されるふんを調査しないと正確なことはわからない。しかし、粕に傷を付けたり圧ぺん等の破碎処理をして給与したところ消化率が向上した (Yamamoto et al., 2000) との報告がある。そこで、本章では粕殻が一部でも剥離しているか、粕が破碎されていれば消化され得るものとみなし、画像により粕殻の剥離か粕破碎を判別することを目的とした。なお、家畜を用いた実験等による実際の消化性改善への効果については第 4 章で検討する。

2.2 実験方法

2.2.1 供試試料

画像処理に供試した粕材料は、2002 年産の飼料用イネ (品種：はまさり) を飼料イネ専用コンバインベアラ (タカキタ社製 WB1010 型) で収穫・ロールベールサイレージに調製した。これを約 7 ヶ月貯蔵して乳酸発酵させた後開封し、粕を手で脱穀したものである。消化可能とみなす粕 (以下、破碎粕) のサンプル調製は、粕を圧縮によって破碎することに

よって籾殻の一部を剥離または破碎した。その方法は、静的引張圧縮試験装置 (エー・アンド・デイ社製 RTC-1310A 型) によって籾を 1 粒ずつ平面状の圧子によって圧縮し、籾が破壊に至った時点で圧縮を停止した。圧縮速度 0.017mm/s (1mm/min), 破壊に至った時点での荷重は 83 ~ 156N であった。この時点でほとんどの籾は破碎されて籾殻と種皮が裂け、籾内部の乳白色部の一部が露出した。他に籾殻の外・内穎が分離して開き、籾内部の露出には至っていないものもあった。これらの試料を 100 粒作成し、破碎籾とした。さらに、籾殻が剥離したり破碎したりしていないもの (以下、無処理籾) を 100 粒用意し、それぞれの中から破碎籾は 25 粒、無処理籾は 10 粒を無作為に抽出し、合計 35 粒を画像処理に供し、統計処理した。

2.2.2 画像処理プログラムについて

画像処理プログラムは Java 2 SDK と ImageJ を用いて開発した。画像によって破碎籾と無処理籾とを識別するにあたり、籾の外観特性のうち、色か形のどちらを指標とするかが問題となる。破碎籾は、主として外穎と内穎が開くことにより、形状が無処理籾と異なる場合もあるが、ほとんどは表面の籾殻の一部が剥けただけで、形状はほぼ同じ場合もある。一方、無処理籾の色は、サイレージ調製によって褐色や茶色に変化することはあっても白くなることはあまりない。しかし籾殻の内部や胚乳部の色は貯蔵中もほとんど変化せず淡白色を呈している。そこで、まず色を指標とした画像処理によって、破碎籾と無処理籾との識別を試みた。さらに、色判別結果を補正するため形状解析を行なった。

プログラムの構成は、

- 画像取得やパラメータ入力のためのユーザインターフェース部
- 取得した画像のラベリング、分割等の前処理部
- ハレーションによる誤判定を避けるための処理部
- 指定された色としきい値で二値化処理をする色判別部
- 輪郭抽出と $\theta-\phi$ 座標変換による形状解析をする形状判別部
- しきい値との比較により破碎籾と無処理籾の識別をする判定部

からなる。

実験用に取得した画像を図 2.1 に示す。

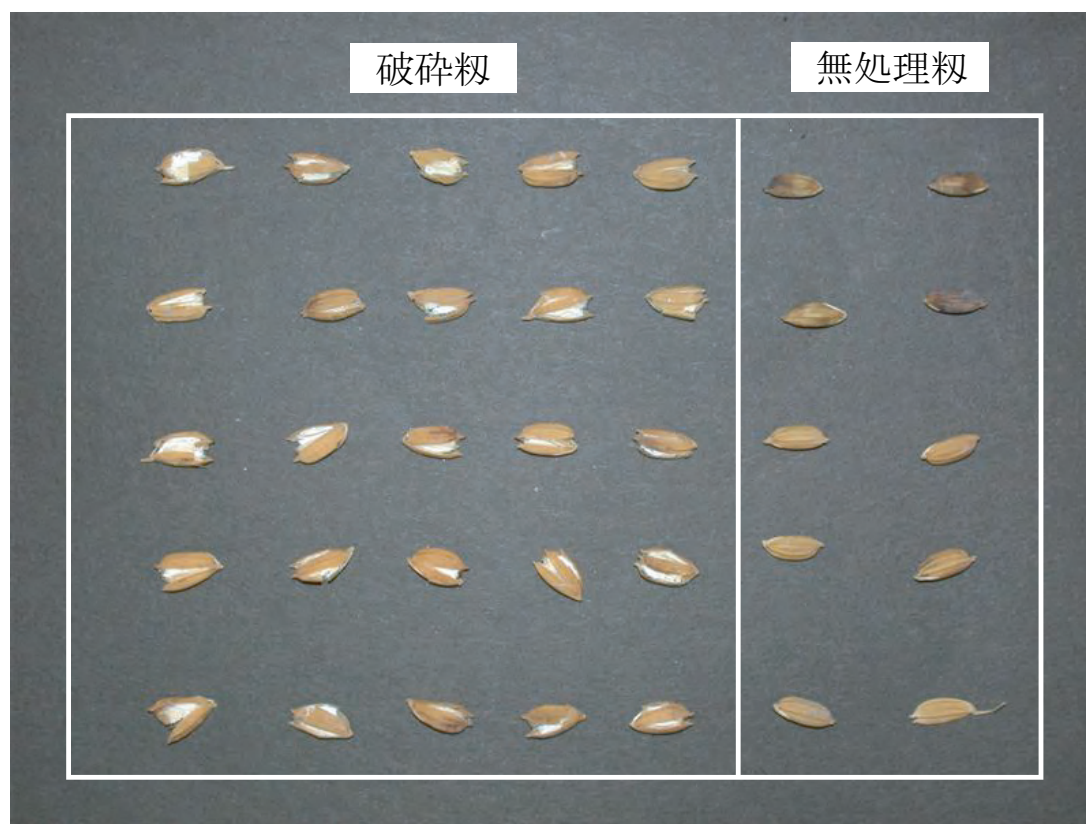


図 2.1 供試粉の原画像

取得画像は 2048×1536 ピクセルの 8 ビット RGB 画像である。画像の取得にあたって、試料を破碎粉 25 粒は左側に、無処理粉 10 粒は右側にそれぞれ黒用紙上に並べ、デジタルカメラ（334 万ピクセル, f:7.2, 1/60s）で撮影し、パーソナルコンピュータに転送した。照明は、色温度約 5,000K の 3 波長昼白色光を用いた。取得した画像は、前処理部により図 2.2 及び 2.3 に示すようにラベル処理を行ない、個々の粉ごとに周囲を 10 ピクセル分の幅の背景を含めた矩形領域に分離し、背景を黒で置換した。

画像取得時に、ハレーションの影響で粉殻表面中で白色になる箇所が存在した。粉画像で白色になるのは、通常は粉殻や表皮が剥離されて胚乳部が露出した箇所に限られるため、色判別処理はそのような箇所を内部の胚乳部と誤判別する可能性があった。ハレーションは主として粉画像周辺に沿って発生することが多かったため、外周部の画像を除去することでこれを回避することにした。この処理では個々の画像ごとに背景のみの画像を用意して黒で置換し、その画像に対して一定の膨張処理を施してマスク画像とした。その

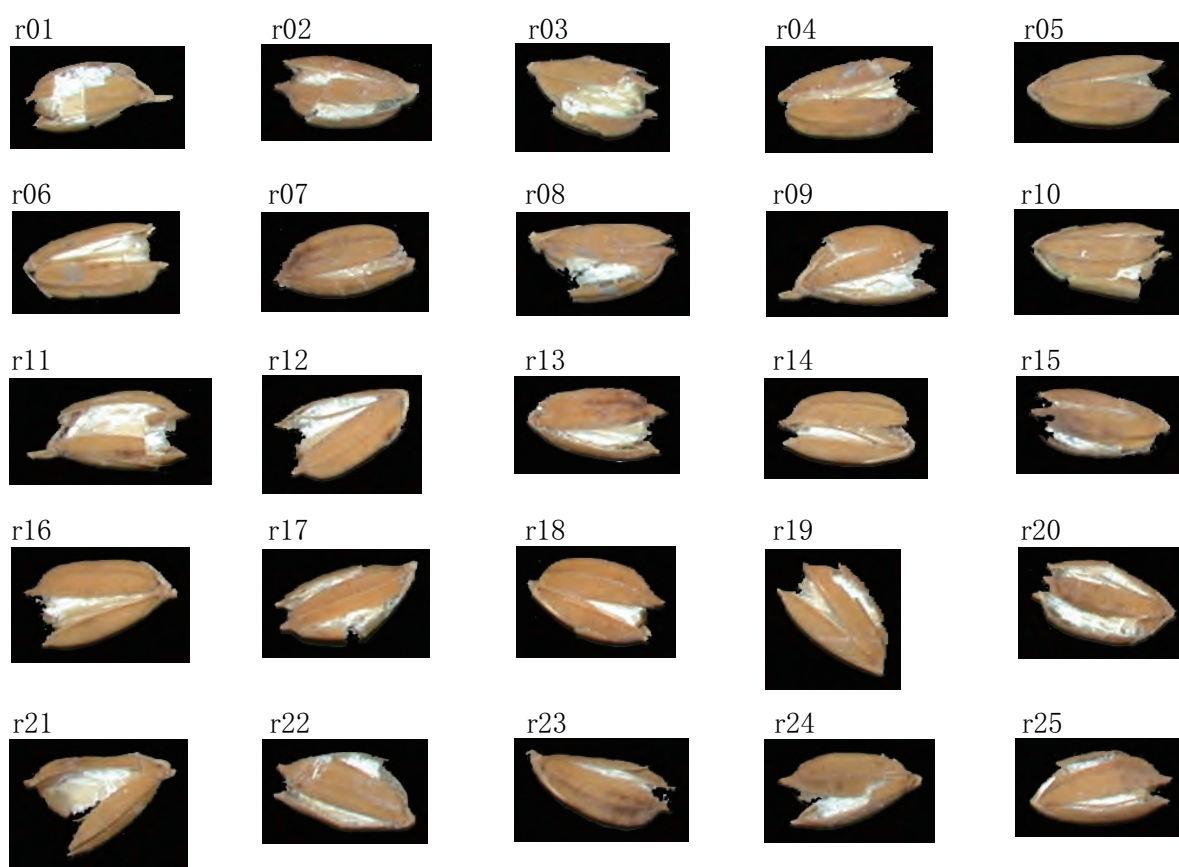


図 2.2 ラベル処理された画像-破碎粒

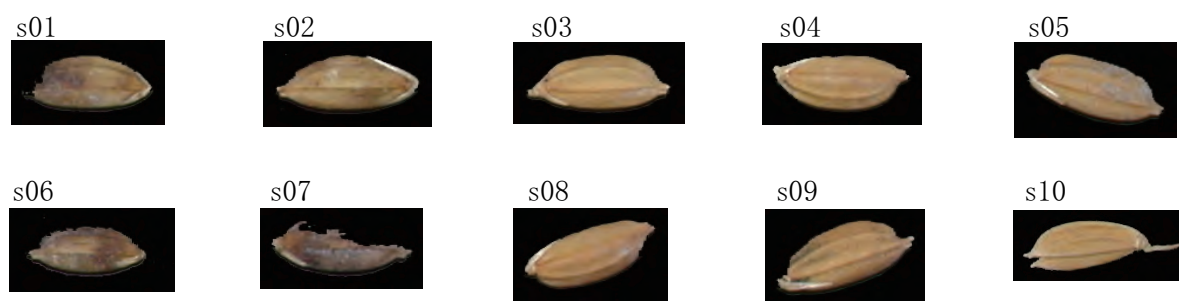


図 2.3 ラベル処理された画像-無処理粒

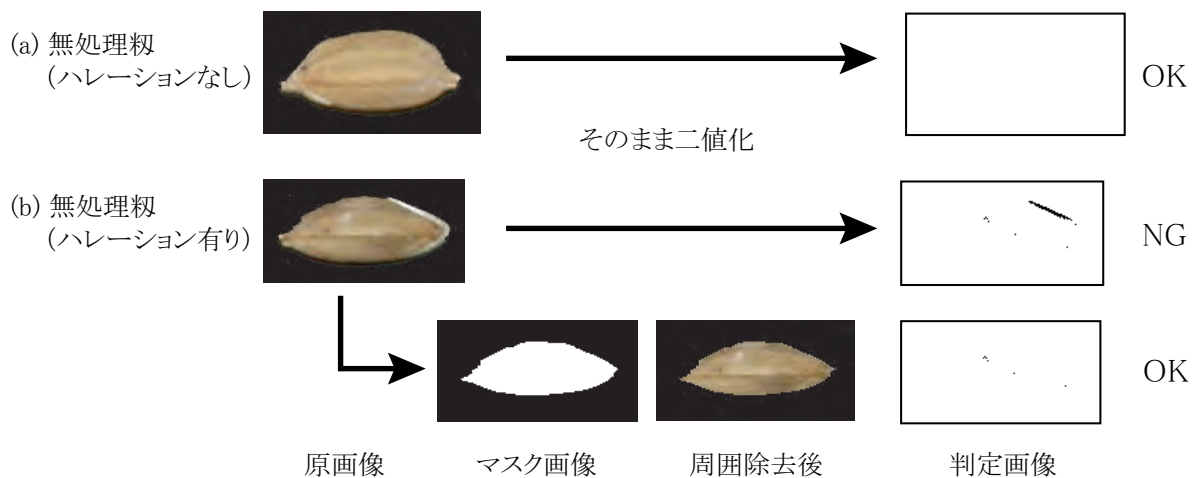


図 2.4 ハレーションの除去

後，原画像とマスク画像との論理積による画像演算を行い，一律に粉周辺部を除去した画像を得た。この一連の処理例を図 2.4 に示す。(a) はハレーションの影響を受けていないため，そのまま二値化しても判定画像に黒色ピクセルが残存せず，誤判定の原因とならないが，(b) では周辺にハレーションによる白色部が見られ，そのまま二値化すると判定画像に黒色ピクセルが残存したため，誤判定の原因となった。そこで，マスク画像との論理積によって周辺を除去し，誤判定しない判定画像を得た。

形状判別部は，粉殻が剥離または破砕しているにもかかわらず胚乳部の乳白色が見えない場合への対応として，粉画像の輪郭を抽出し，形状解析を行なうため開発した。本プログラムで用いた形状解析ルーチン (Motomaga et al., 1998, 1999) は，図 2.5 に示した r (動径) と θ (動径と X 軸のなす角) の極座標系から θ と ϕ (動径と接線のなす角) の接線座標系に座標変換することにより， θ と ϕ を用いて，大きさに依存しない形状のみについての評価を行うものである。形状解析処理の例を図 2.6 に示す。

(a) は無処理粉で輪郭抽出像は楕円に近い。一方，(b) の破砕粉は粉殻が完全には剥離していないが粉殻の外穎と内穎が分離して開いている個所があるもので，原画像左部分に見られる開いた個所は，輪郭抽出像に明瞭に現われた。これらの形状像から θ と ϕ の接線座標系に座標変換したものが $\theta-\phi$ 座標のグラフであり，その曲線は両者で大きく異なった。この違いをもとに形状判別することを試みた。

なお，これらの方法では粉の裏側の画像を取得していないため，粉の裏側の一部だけ粉

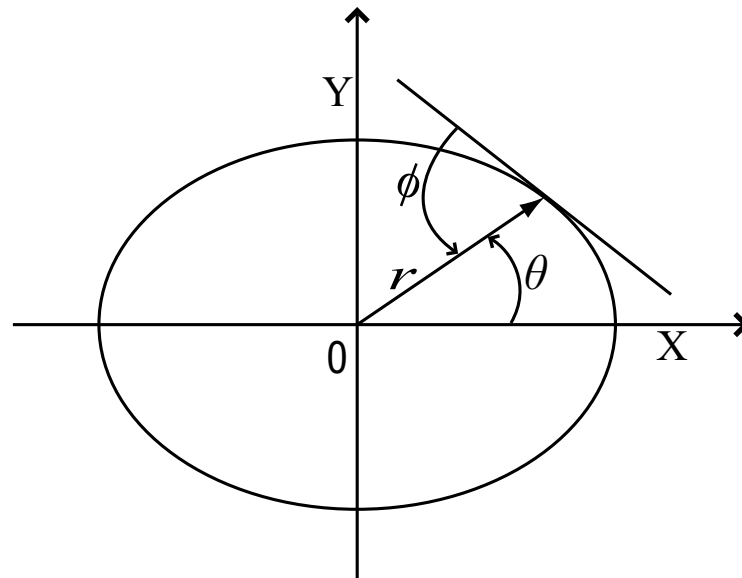
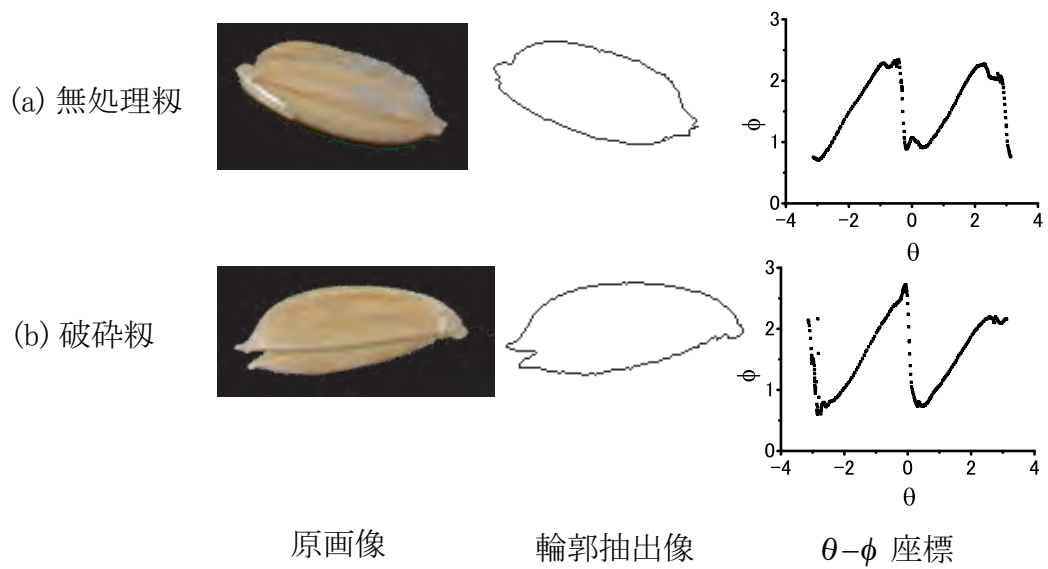
図 2.5 $r-\theta-\phi$ 座標系

図 2.6 形状解析処理

殻が剥離して表側は剥離しておらず，かつ形状が正常なものは誤判定すると考えられる。
このことが最終的な粒破碎率の判別にどの程度影響したかは結果及び考察で述べる。

2.3 結果及び考察

2.3.1 色による判別

色判別部で画像処理した例を図 2.7 に示す。判定画像では，籾殻表面以外と判定された部分は二値化によって黒色ピクセルで表示されている。

(a) は，籾殻の一部が大きく剥れて玄米表面と胚乳部の両方が露出した破砕籾である。籾殻が剥れた個所は内部の胚乳が露出している部分とともに，やや黄色く見える玄米表皮部も，ともに二値化によって判定画像で黒色ピクセルとなり，黒色の占める割合が多くなった。(b) は，外穎と内穎の一部分が開いて玄米表面と胚乳が露出したものであり，その部分は判定画像中に黒色ピクセルとなったが，(a) に比べるとその割合はわずかとなった。一方，(c) は無処理籾であるが外周部にハレーションによる白色部があったため，そのまま二値化するとその部分が判定画像中で黒色となるが，外周部除去により，ハレーションの影響を排除できた。判定画像中に残った黒色ピクセルはわずかであった。

これらの判定画像から，破砕籾は破砕籾と，無処理籾は無処理籾と誤りなく識別できる

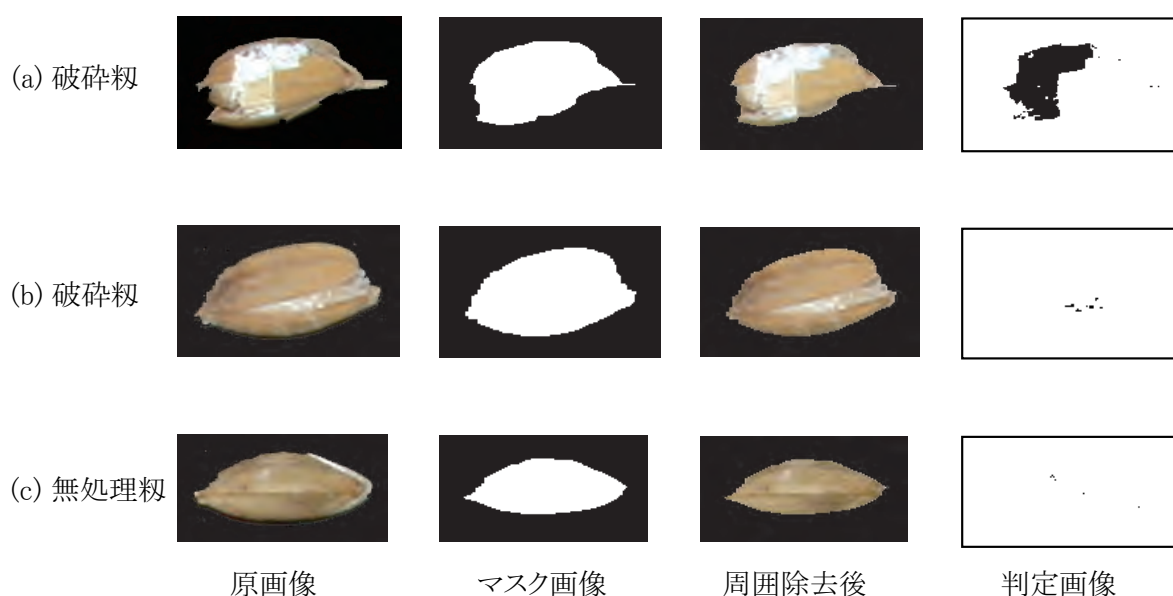


図 2.7 色判別処理

ようにするため，以下のように識別のしきい値を設定した。図 2.7 の (c) に見られたように，無処理粉の判定画像中における黒色のピクセルの存在は，粉の表面の色むらや傷等によるものと考えられ，個々のサンプルにわずかであったが存在していた。

その数の平均値 K_m は，

$$K_m = 1.9 \pm 1.3 \quad \sigma = 4.2 \quad (2.1)$$

であった。そこで，破碎粉と無処理粉とを識別するための判定画像中の黒色部ピクセル数のしきい値は，

$$K_m + \sigma = 6.1 \quad (2.2)$$

であることから，7 をしきい値とした。

図 2.8~2.13 は個々のサンプルごとの原画像，マスク画像，周囲除去後画像，色判別の判定画像，及び形状解析に用いた輪郭抽出像である。破碎粉の大半は色判別処理の判定画像により，破碎粉と識別できた (図 2.8，2.9，及び 2.10)。破碎粉中の 1 サンプルは，図 2.11 に示すように判定画像中の黒色ピクセル数がしきい値より少なかったため無処理粉と誤判定した。無処理粉についても，大半は色判別処理で無処理粉と識別できた (図 2.12) が，1 サンプルは図 2.13 に示すように判定画像中の黒色ピクセル数がしきい値より多かったため破碎粉と誤判定した。

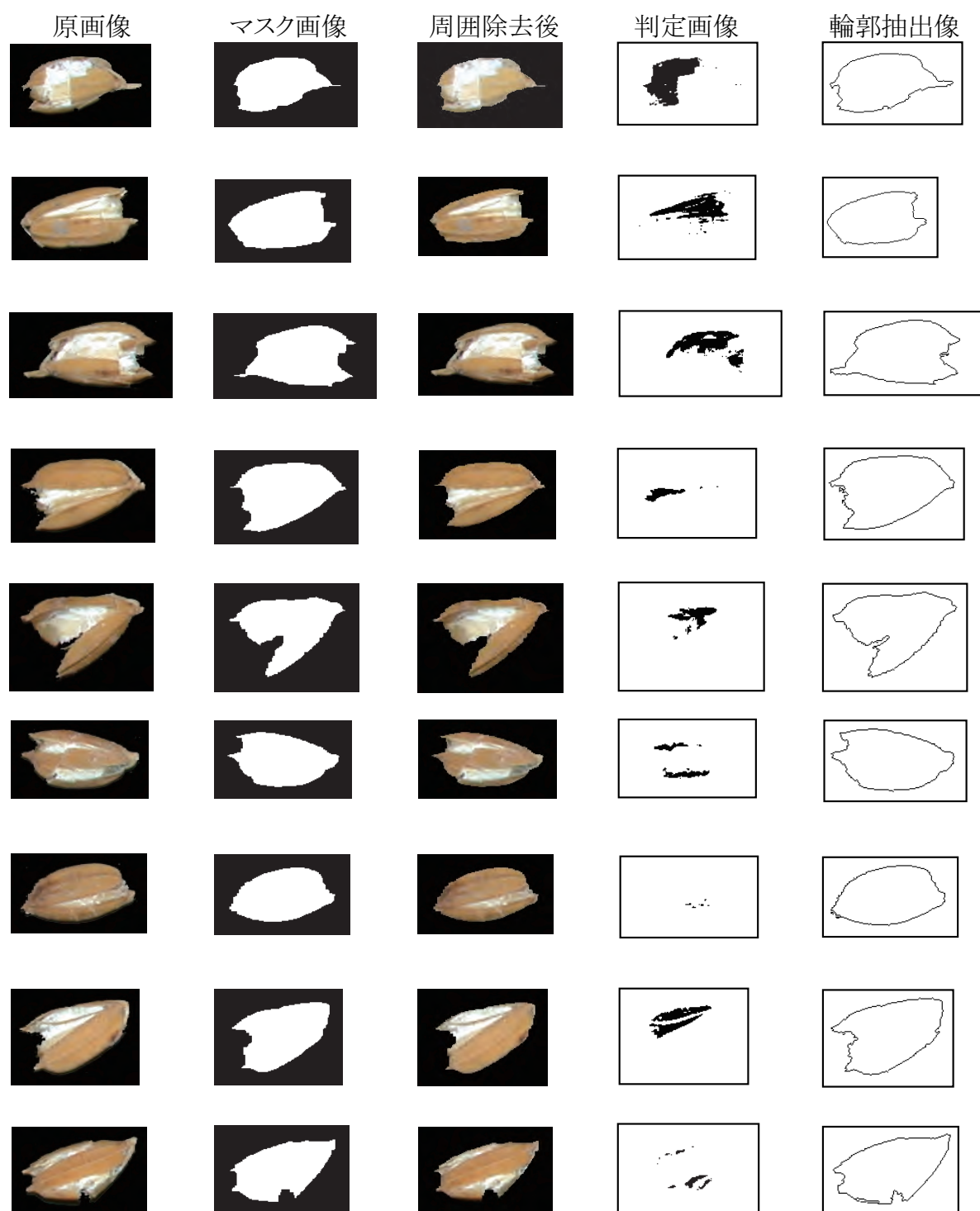


図 2.8 画像処理結果 (破碎粒，色判別で識別できたもの-その 1)

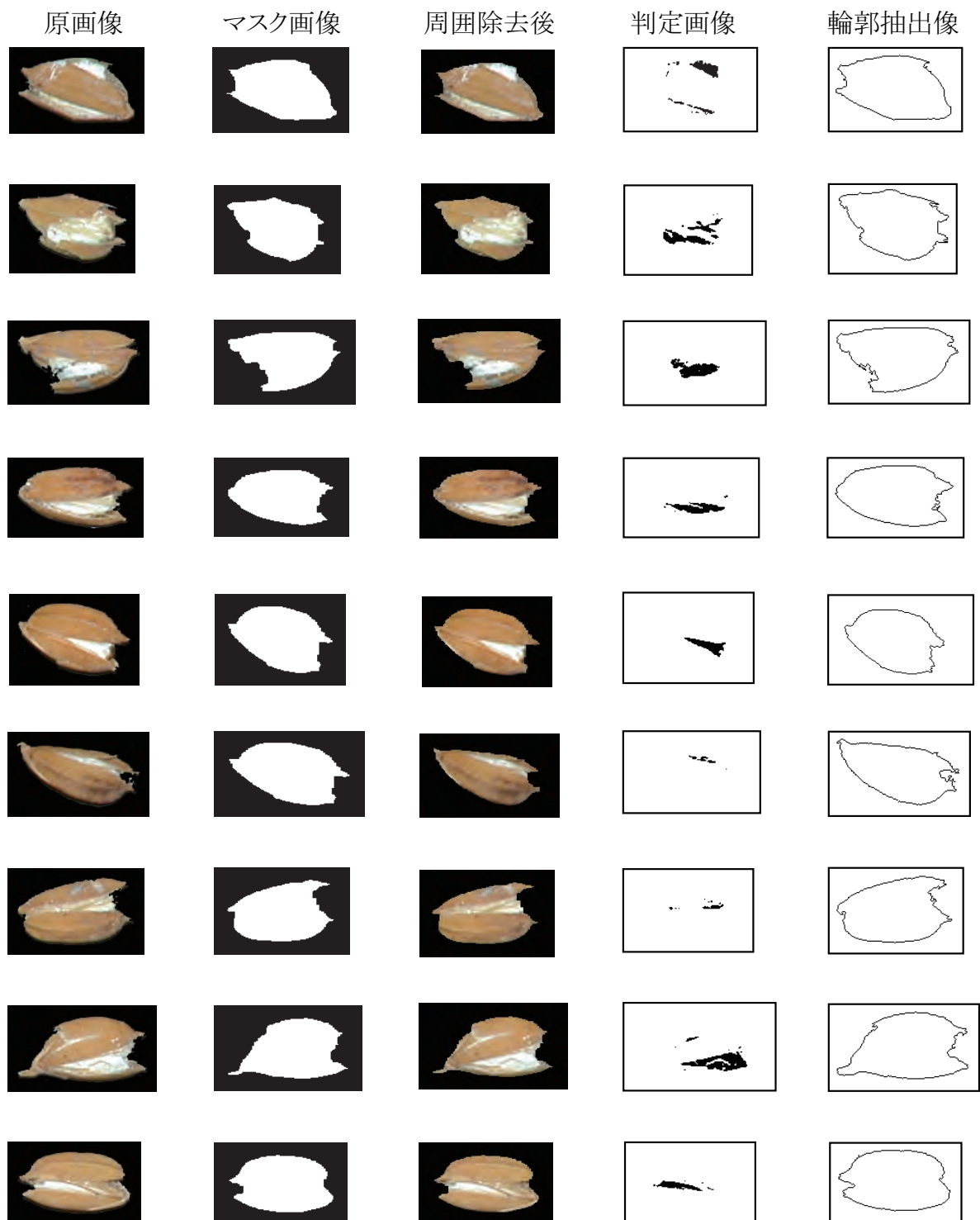


図 2.9 画像処理結果 (破碎物, 色判別で識別できたもの-その 2)

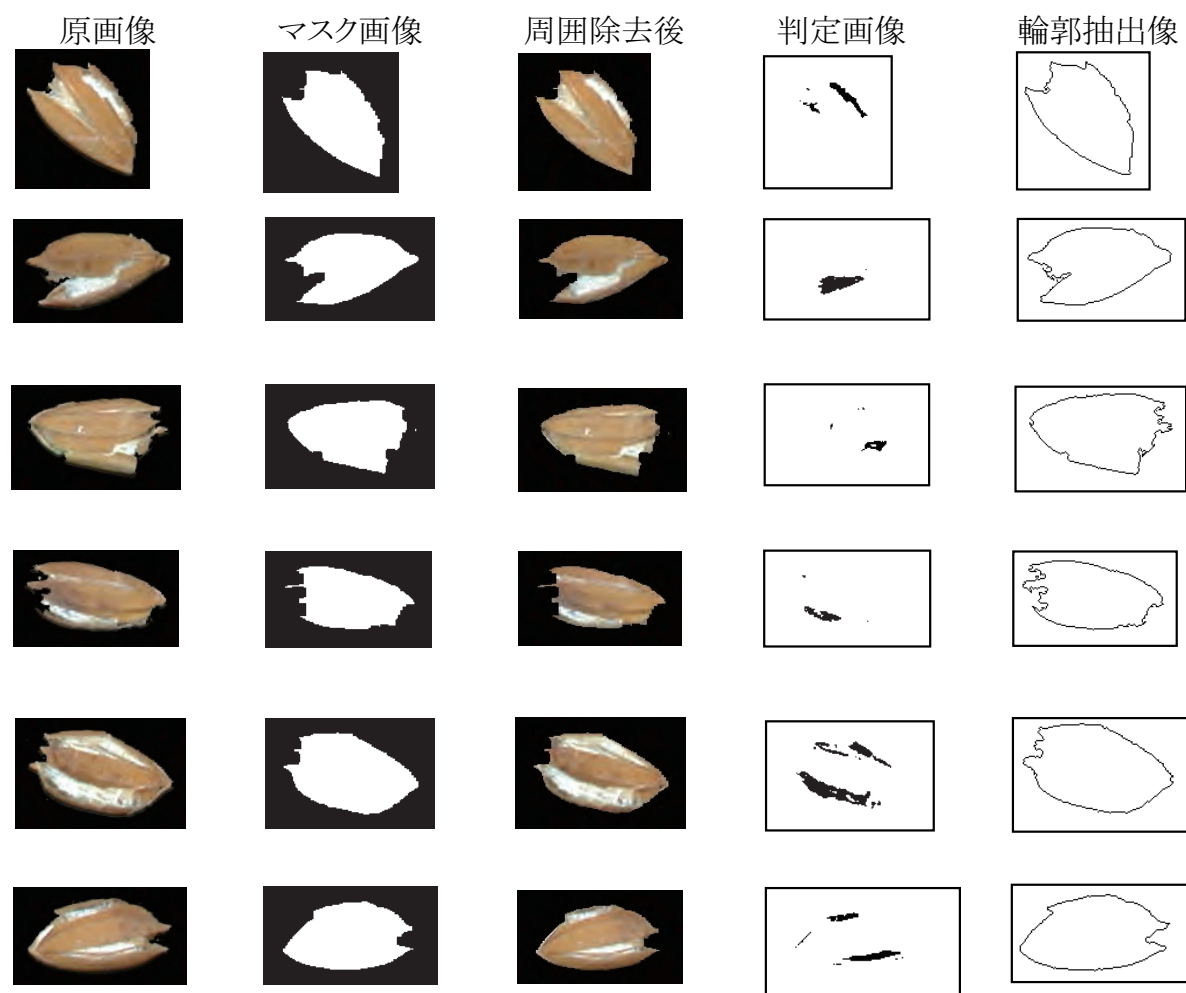


図 2.10 画像処理結果 (破碎粒，色判別で識別できたもの-その 3)

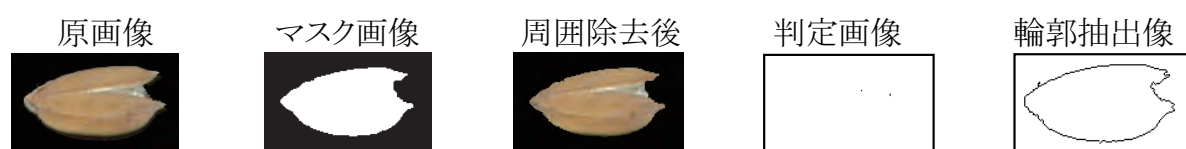


図 2.11 画像処理結果 (破碎粒，色判別で誤判定し，形状判別で識別できたもの)

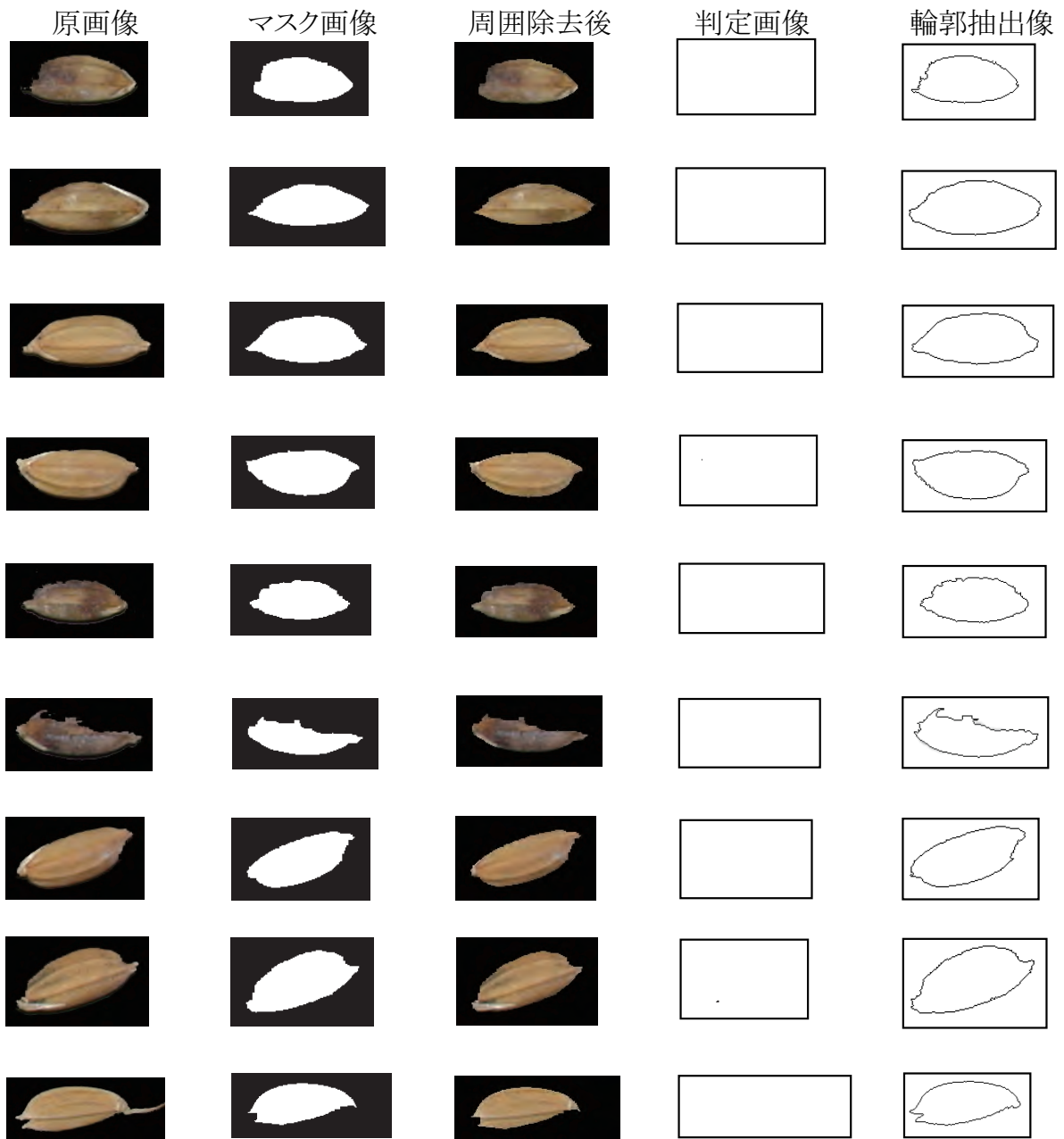


図 2.12 画像処理結果 (無処理粒, 色判別で識別できたもの)

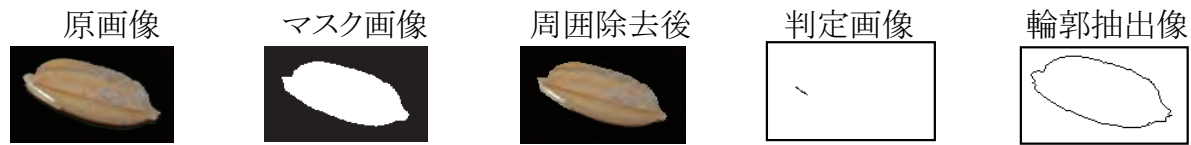


図 2.13 画像処理結果 (無処理籾，色判別で誤判定し，形状判別で識別できたもの)

2.3.2 形状による判別

色判別処理で誤判定したサンプルは，破碎籾と無処理籾の双方に存在した。破碎籾で誤判定したものは，外穎と内穎が開いているが籾殻の一部が剥離したり胚乳部が露出していないため，判定画像中の黒色ピクセル数がしきい値より少なかったものであり (図 2.11)，無処理籾で誤判定したものは，ハレーションによる白色部が籾内部に存在したため，周囲除去処理では除去されず，判定画像中の黒色ピクセル数がしきい値より多かったものである (図 2.13)。そこで，このような試料も正しく判別するため形状解析を行った。個々の籾画像から輪郭を抽出し，その後，輪郭の XY 座標データを r - θ - ϕ 座標系へ変換して籾の形状情報である θ - ϕ データを算出した。 θ - ϕ 座標では，籾の形状によって θ と ϕ との関係を表わす曲線の形状が大きく異なる。さらに籾の外穎と内穎が開いたり周辺が欠落する等して輪郭に凹凸が多いほど，輪郭に沿って一周する過程での ϕ の値が不連続になり大きく変動する。すなわち，形状が不規則であるほど ϕ の変動が大きくなるため，形状判別の識別値として ϕ の変動量を用いることができる。このための識別値 ϕ_{ct} を以下のように定義した。まず，

$$\begin{aligned} d\phi_{ct} &= \sqrt{d\theta^2 + d\phi^2} \\ &= \sqrt{1 + \left(\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2} d\theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

と定義した。 ϕ_{ct} は輪郭抽出された形状画像に沿って 1 周したときの $d\phi_{ct}$ の総和である。これは $d\phi_{ct}$ を π から $-\pi$ まで θ で積分したものである。すなわち，

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} d\phi_{ct} &= \phi_{ct} \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2} d\theta \end{aligned} \quad (2.4)$$

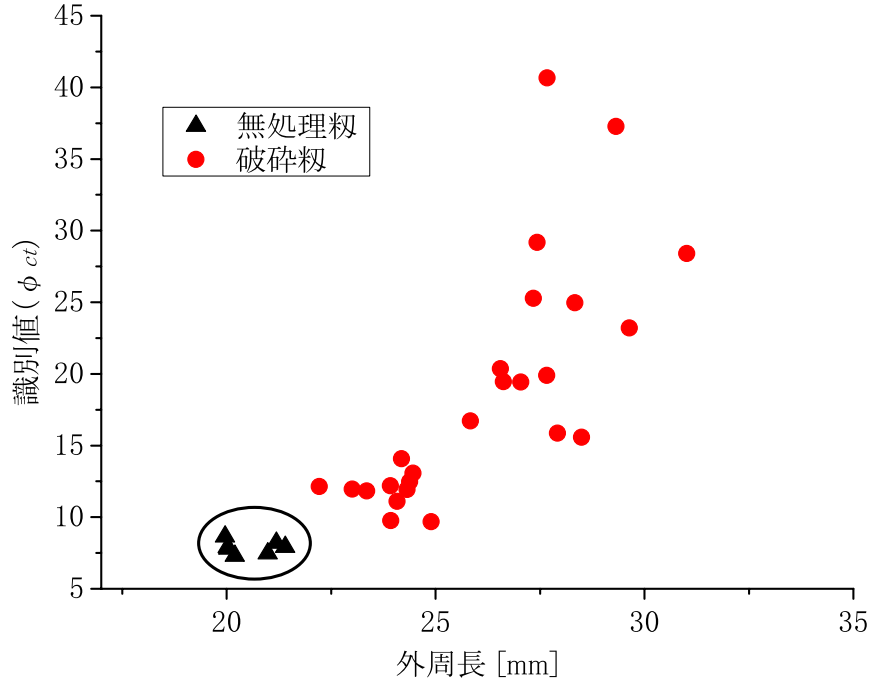


図 2.14 形状解析による籾殻外周長と識別値 ϕ_{ct} との関係

となる。個々の画像から得られた輪郭の外周長と ϕ_{ct} との関係を図 2.14 に示す。無処理籾のプロットはグラフ中に楕円で囲んだ範囲内に存在し、破碎籾と明瞭に区別された。破碎籾と無処理籾それぞれの ϕ_{ct} の平均値 ϕ_{rm} 及び ϕ_{sm} はそれぞれ

$$\phi_{rm} = 18.7 \pm 1.7 \quad \sigma = 8.4 \quad n = 25 \quad (2.5)$$

$$\phi_{sm} = 7.9 \pm 0.17 \quad \sigma = 0.54 \quad n = 10 \quad (2.6)$$

となり、破碎籾と無処理籾とでは ϕ_{ct} に明らかな違いがあることが明らかとなった。そこで、形状判別における識別のしきい値としては

$$\phi_{rm} - \phi_{sm} = 10.3 \quad (2.7)$$

に近い値の 10 を用いた。すると、図 2.15 のように破碎籾と無処理籾とを明確に識別できた。このように、色判別だけでは 90% に留まっていた破碎籾と無処理籾との識別確度は、図 2.16 に示すように色判別と形状解析を合わせることによって 98% となった。

今回用いた識別値 ϕ_{ct} は、 $r-\theta-\phi$ 座標系の $\theta-\phi$ 座標上での ϕ の変動量の総和であり、これに及ぼす因子は形の複雑さ（凹凸等）になり、形状判別における籾殻剥離の程度は輪

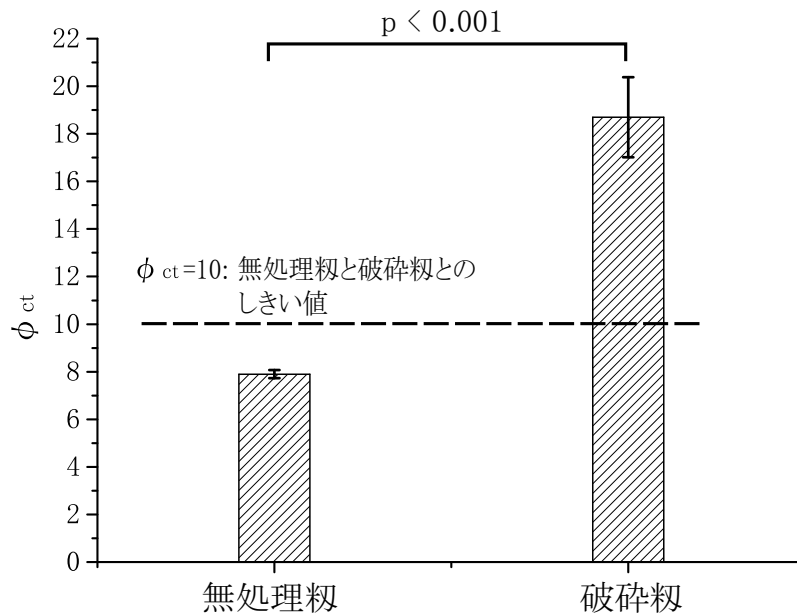


図 2.15 形状解析による破碎粳と無処理粳との識別

郭に凹凸となって表されることから，今回の指標は有効に作用した。今後より多くのサンプルによる検討は必要であるものの，そのしきい値もほぼ普遍的な値であると思われる。

なお，色と形状による判別を通して，粳の裏側の画像を取得することはできず，粳の裏側の一部だけ粳殻が剥離し，なおかつ形状解析で正常と判定されたものは結果的に誤判定に至った。このような試料はごくわずかであったが，このことが識別率を低下させる主原因となった。しかし，このようなサンプルは今回の実験では 1~2% 以下であったことに加え，実際場面でもその存在と結果に及ぼす影響は微々たるものと考えられる。

以上のように，開発した粳識別プログラムにより，粳殻が剥離か破碎した破碎粳と，無処理粳とを識別することが可能となった。

2.3.3 追加実験とその結果

当初の実験に用いたサンプル数は，破碎粳 25 粒，無処理粳 10 粒の合計 35 粒であり，必ずしも十分な数とは言えなかった。サンプル数が増えれば，両種類の粳標本から得られるそれぞれの画像処理の指標値の変動は母集団の指標値変動に近くなると考えられる。新たなサンプルを判別した場合でも判別精度が今回の精度と同様になると予想できる。そこ

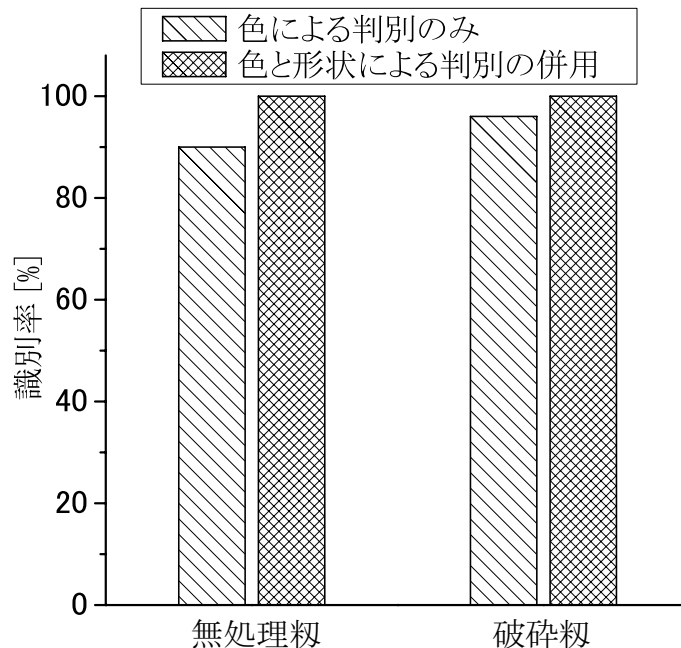


図 2.16 識別率

で新たにサンプルを用意し、これらに対して本論文の2種類の判別手法を適用することにより、今回の結果がほぼ普遍的なものかどうか確認した。サンプルは無処理粒と破碎粒をそれぞれ200粒用意し、それぞれの中から50粒ずつを無作為に抽出し、合計100粒を用いて画像処理を行った。色による判別ではしきい値として7を、形状による判別ではしきい値として10を用いるこれまでと同様の判別手法を適用した。

その結果、無処理粒と破碎粒それぞれの識別率は色による判別では84%、92%、形状による判別では96%、94%といずれも高い識別率が得られた。このことから、本手法は十分な判別精度を有することが明らかとなった。

2.4 要約

飼料イネサイレージの粒が消化可能か否かを識別するため、粒殻が剥離したか粒破碎されているかどうかの判別を画像処理によって行なうことに取り組んだ。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 色判別プログラムにより、ハレーションの影響による誤判定を回避できるとも

に，判定画像中の黒色部ピクセル数として7をしきい値とすることにより，破碎粉と無処理粉とを確度 90% 以上で識別可能であった。

2. 形状解析プログラムは，粉殻の外穎と内穎が開く等して明らかに破碎粉であるにもかかわらず，粉殻の一部が剥離しているわけではないため画像中に乳白色部が存在しない場合の識別に有効となった。色判別と形状解析を合わせることにより，破碎粉と無処理粉との識別確度は 98% であった。

第 3 章

効率的籾殻剥離・籾破碎装置の開発

3.1 目的

飼料イネサイレージ中の籾の消化性を向上させ、しかも損失が少なく汎用性の高い消化性向上技術が求められている。籾殻で覆われている籾から、籾殻を一部でも剥離することによって、牛の胃の中で消化液が籾に接触できさえすれば消化率は劇的に向上するとされている。このため、本研究では物理的に籾から籾殻を剥離または破碎することによって消化性を向上させるための技術開発を目指した。

なお、市販の飼料イネ専用収穫機を用いた収穫調製作業における籾破碎率は通常 10% 前後であり、籾の破碎率が比較的高いとされているフレール方式収穫調製機は、収穫時のロスが多いことが問題とされている。さらに、飼料混合調製用機械による調製作業は攪拌・混合が主目的であるため、籾殻剥離や籾破碎効果は小さく、これら既存の機械・装置等による作用で十分な籾殻剥離・破碎効果を期待することができない。このため、積極的に籾殻を剥離するか、または破碎する装置の開発が必要である。さらに、既存の破碎・粉碎機構としては、籾殻の粉碎用機械が知られており、数社から市販されている。しかし、その多くがバッチ処理方式か、または連続方式でも上下の石臼によってすり潰すことにより、籾殻だけの微粉碎を目的としたものが多い。これらは、籾から籾殻をわずかでも剥離して開穎籾とするか、籾ごと破碎する等消化性の向上をねらいとしたものはない。

飼料イネサイレージの籾から籾殻を効率的に剥離する機構を設計する。まず籾殻の剥離に要する力を、籾に対する力の作用点や作用方向別に計測した。これをもとに効率的に籾殻を剥離または籾ごと破碎できる装置を設計・試作し、その性能を明らかにした。なお、第 2 章において、籾殻の一部が剥離しているか籾が破碎しているものを判別できる簡便で

客観性の高い判定手法を提案した。ここでは、試作した装置によって処理された試料の解析に本手法を適用し、籾殻剥離程度の判別に用いた。

3.2 籾破碎機構の設計と試作

3.2.1 籾粒の籾殻剥離に要する力の計測

飼料イネサイレージ用の籾粒に圧縮，引張り，せん断力等を作用させ，籾殻が剥離・破壊するのに要する力を，力の作用位置や方向別に計測した。籾は飼料イネサイレージ専用品種「ハマサリ」の水分 16% のものを供試し，測定には静的引張圧縮試験装置 (エー・アンド・デイ社製 RTC-1310A 型) を用い，引張りまたは圧縮速度は 0.017mm/s (1mm/min) とした。

圧縮力を作用させた計測では，平板上に籾を置き，上方から平面圧子によって下方へ押し付けて力を測定した。圧縮力で籾殻を剥離させるには，籾殻の剥離，または破壊と籾自体の破碎がほぼ同時に起こるため，籾の破碎をもって籾殻の剥離が起ったとみなし，この

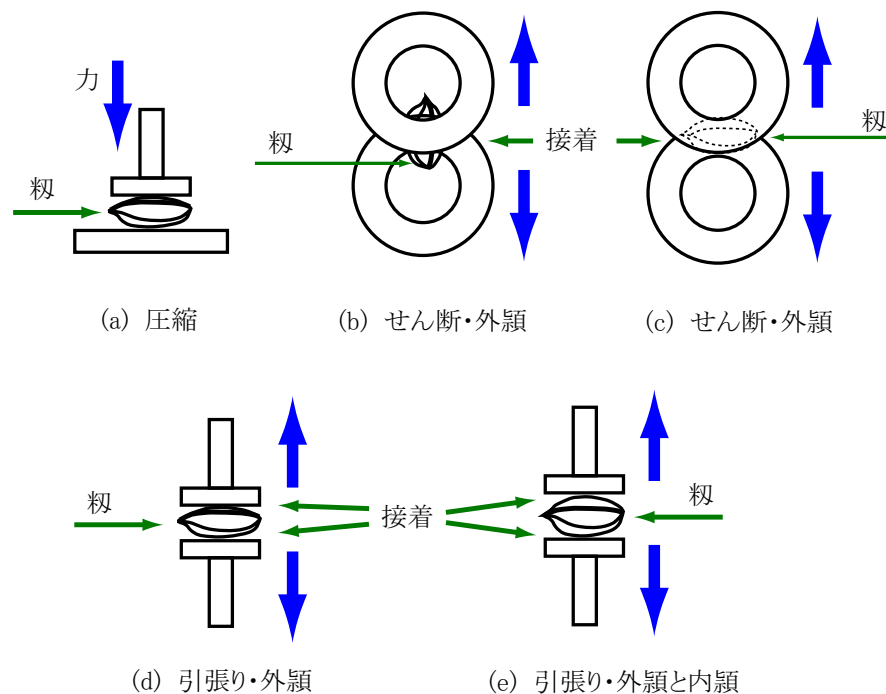


図 3.1 籾殻の剥離力計測方法

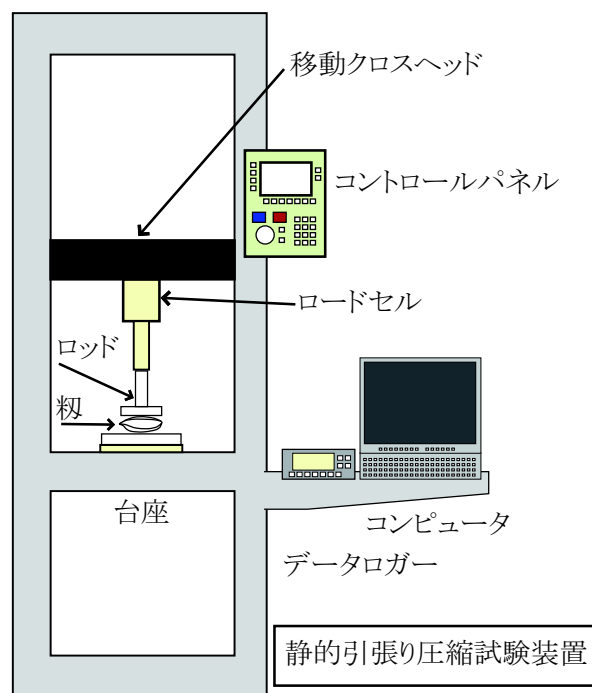


図 3.2 圧縮力測定の様式図

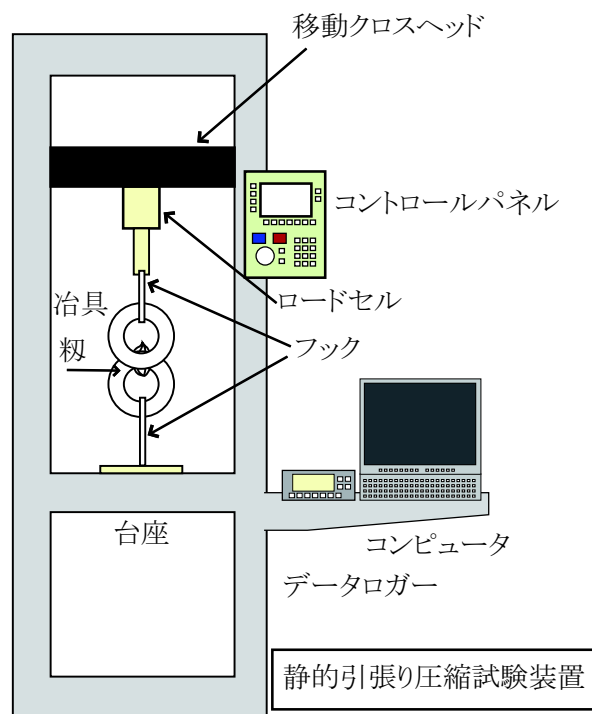


図 3.3 せん断力測定の様式図

時点まで測定を行なった。引張りとせん断力の計測では、籾殻の内穎と外穎のそれぞれに外力を作用させる場合と、外穎同士に作用させる場合の両方で行い、籾殻に外力を加えるための治具を籾と接着し、引張り及びせん断力を作用させて、籾殻が剥離するのに要する力を測定した(図 3.1)。この場合、治具によって引張りまたはせん断力を受けた籾殻が開いて開穎籾となり、さらに作用を受けて籾殻が完全に剥離する時点まで測定を行なった。測定は各 25 点ずつ行なった。圧縮力とせん断力測定装置の模式図を、図 3.2 と図 3.3 に示す。

結果を図 3.4 に示す。圧縮 (a) では籾の破壊に至るまでの圧縮力は 110N と高かったが、せん断では籾の外穎同士を分離する方向では、縦方向 (b) では 10N、横方向 (c) では 7N と小さく、引張りの場合では外穎同士 (d) で 8N、外穎と内穎を分けて引張る場合 (e) では 3N とさらに小さい値となった。このように、籾から籾殻を剥離するのに要する力は、引張り力が最小、次にせん断力となった。ただし、実際の籾殻剥離機構で個々の籾に対して連続的に引張り力を作用させることは構造的に不可能に近いことに加え、一般的には接着が必要であると考えられることから実現は困難であるため、2 番目に小さい力で籾殻剥離が可能なせん断力の活用が有効である。そこで、籾殻剥離機構の設計では、せん断力を効果的に作用させることのできる構造とすることにした。

3.2.2 籾破碎機構設計のためのシミュレーション

1.2.2 項で述べたように、籾破碎機構としてはロール式を採用する。本項では、飼料イネサイレージの籾殻剥離または籾破碎を効率的に行なうためのローラ表面形状の最適値を求めた。まず、試作する籾破碎機構は籾粒にせん断力を作用させることができ、連続処理が可能で構造が簡単であることから、ダブルロール方式、すなわち互いに逆方向に回転する 2 つのローラ間に試料を通過させる構造とした。

ローラ表面の形状は、平坦であっても 2 つのローラの回転に速度差を設けることによるせん断力の作用で一定の籾殻剥離効果は期待できる。しかし、籾殻剥離効果のさらなる増大と処理能率向上をはかるため、表面に V 字型の溝を設けた。表面に V 字型の溝を設けた 2 つのローラがかみ合い、間に入った籾を挟んでいる模式図を図 3.5 に示す。

2 つのローラが互いにかみ合って圧縮力を受けると、溝に挟まれた籾には、図のように籾を押しつける力の V 字型溝によるせん断力成分が作用する。さらに、2 つのローラの回

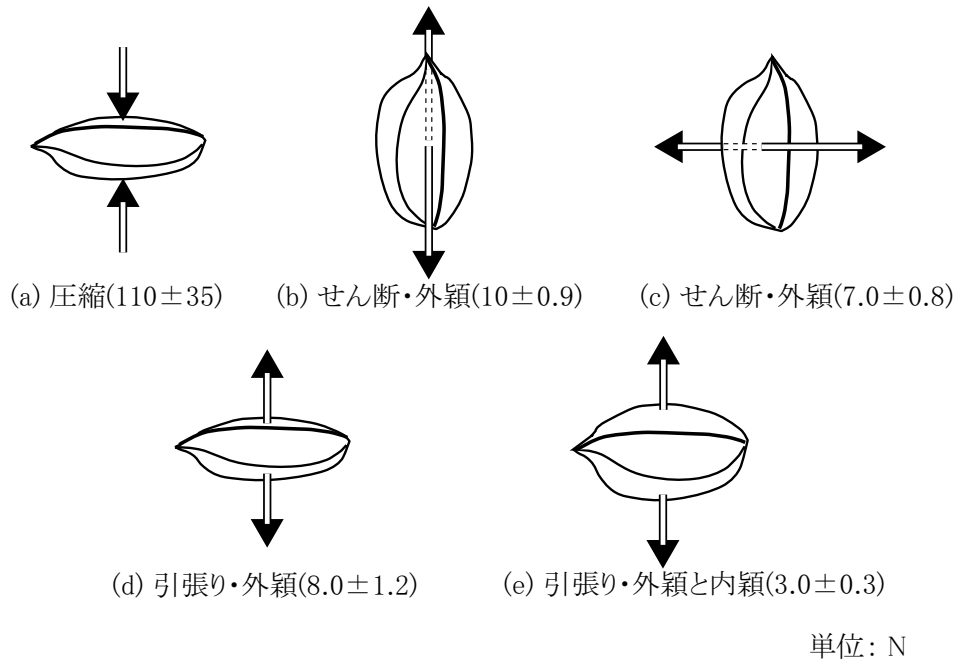


図 3.4 籾から籾殻を剥離するのに要する力

転に速度差を設けることにより，V 字型溝によるせん断力成分とは方向がほぼ 90° 異なるせん断力も発生し，籾殻剥離効果が高まることが期待できる。さらに，V 字型溝によってローラ表面積が増加することにより，表面が平坦なローラを用いるのに比べて処理能率の向上も見込まれる。

次に，V 字型溝の最適角を求めるためシミュレーションを行なった。このため，以下の通り V 字型溝の角度 θ の関数で 3 種類の無次元数

- 溝に挟まれた籾に作用するせん断力の効果 $S_f(\theta)$
- V 字型溝をつけたローラと平坦なローラの表面積の比 $A_r(\theta)$
- 溝と溝との間の突起の強度を表す $S_t(\theta)$

を導入した。

それぞれを，次の式によって表現した。まず， $S_f(\theta)$ は圧縮力のせん断力成分で表し，

$$S_f(\theta) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.1)$$

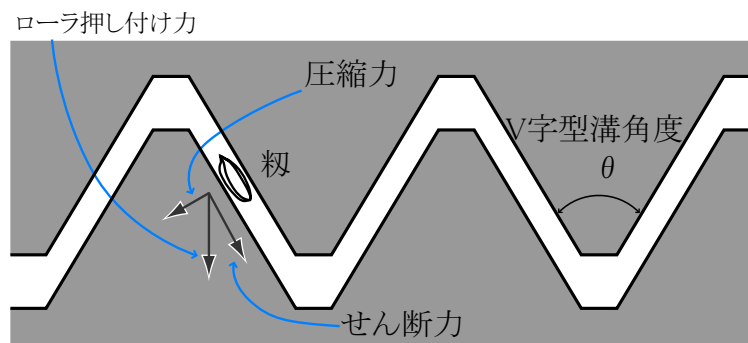
とした。

次に、 $A_r(\theta)$ は、V字型溝をつけたローラと平坦なローラの表面積の比であり、これはローラの長さと、ローラの軸方向に溝に沿った表面の長さとの比で置き換えることができるため

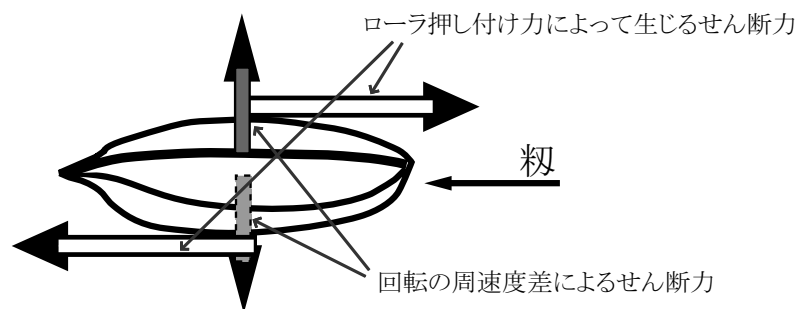
$$A_r(\theta) = \sin^{-1}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.2)$$

とした。表面が平坦なローラに対し、V字型溝を有するローラは表面積が大きく処理能率の向上が期待できるため、この効果を表わしている。

突起の強度 $S_t(\theta)$ は、図 3.6 のようにローラの周囲に形成された V 字型の山の一部で、溝のピッチ h_0 を横幅、奥行き b を一定とする仮想突起を想定し、先端部が横からの集中荷重を受けた場合の、先端からの距離 x の水平断面の断面係数を用いて定義した。この断



(a) ローラのV字型溝によって粉に作用するせん断力



(b) 粉に作用する2通りのせん断力

図 3.5 ローラによって粉に加えられるせん断力

面係数は

$$Z = \frac{bh^2}{6} \quad (3.3)$$

と表現できるが、V字型溝の角度 θ の関数であり、

$$h = 2x \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.4)$$

となる。さらに、 b は一定としたため、

$$Z \cong 4x^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.5)$$

となり、さらに x についても頂点の近傍で一定とすれば、

$$Z \cong \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.6)$$

となる。ここで x や b として具体的な値を用いないことについては、ここでの議論はあくまで角度 θ の突起先端部の強度に及ぼす効果をシミュレーションに取り込むことを主眼にしたためである。以上から、溝と溝との間の突起の強度を表す $S_t(\theta)$ は

$$S_t(\theta) = \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.7)$$

と定義した。これら 3 つの関数の積で表わされる値を、V字型溝角度決定値

$$V_i(\theta) = S_f A_r S_t \quad (3.8)$$

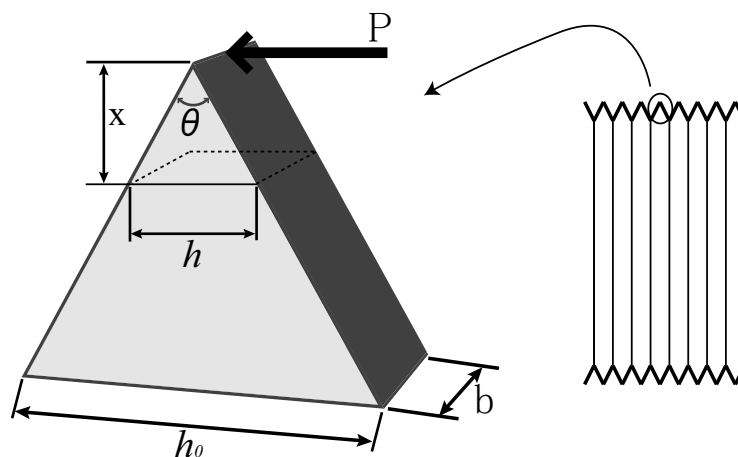


図 3.6 集中荷重を受ける仮想突起

とした。

この値が最大になる角度は、粉に作用するせん断力、ローラ表面積の平坦なローラに対するローラ表面積の比率、及び突起の強度それぞれが比較的高く、適度に釣り合う値とみなすことができる。そこで、 θ と V_i との関係を図示すると、図 3.7 のようになり、 θ がほぼ 60° で最大となった。

θ が 60° では、ローラ間圧縮力の 87% がせん断力成分になり、表面積は平坦なローラの約 2 倍に、さらに凸部は鋭利でなく比較的強度も保ちやすい。そこで、試作装置のローラ表面の V 字型溝角度は 60° とした。

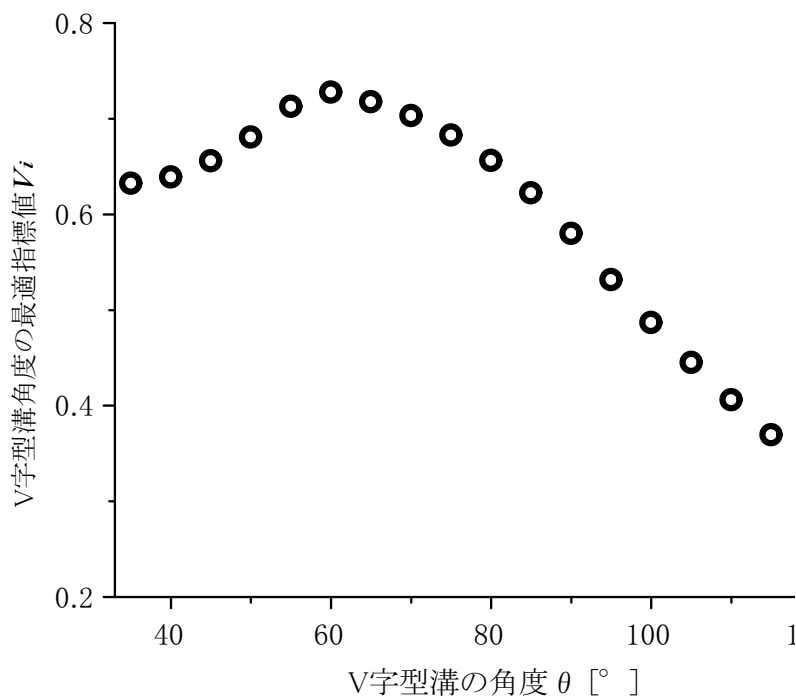


図 3.7 ローラ表面 V 字型溝最適角度のシミュレーション結果

3.2.3 粉破碎装置の設計と試作

ローラ表面の V 字型溝角度のシミュレーション結果を受け、飼料イネサイレージ用粉破碎装置を設計・試作した。装置の諸元を表 3.1 に、全体写真を図 3.8 に、ローラを図 3.9 に示す。

表 3.1 飼料イネサイレージ用粉砕装置の諸元

全長 [mm]	1200
全幅 [mm]	950
全高 [mm]	1550
質量 [kg]	590
ローラ外径 [mm]	150
ローラ長さ [mm]	300
ローラ回転速度 [rpm]	0～120
周速度比 [%]	0, 10, 20
モータ最大出力 [kW]	7.5
インバータ	三相200V用
電源	三相交流200V

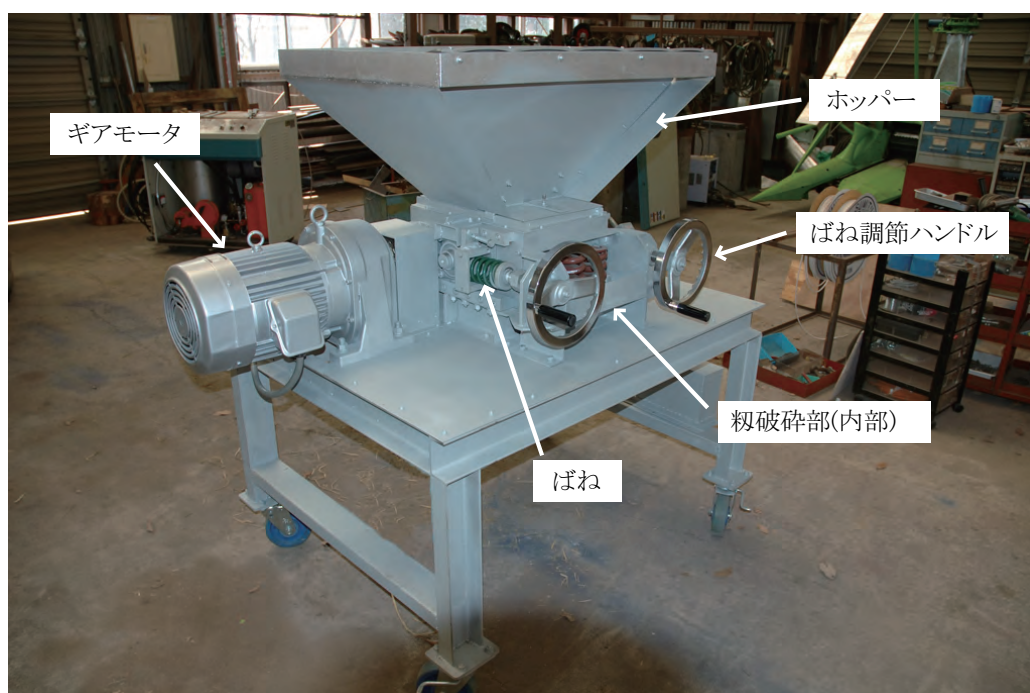


図 3.8 飼料イネサイレージ用粉砕装置の外観



図 3.9 ローラ

本装置は以下のような特長を有する。

- 実験室内で使用可能なようにモータ駆動である
- インバータによってローラ回転数を変えられる
- ばねの初期押し付け力をハンドルで容易に調節できる
- 2つのローラの周速度比を変えることができる

ただし、ホッパーは小さめであり、ローラ長さも 300 mm と短かく実用規模での実験を想定したものでなく、あくまで室内実験用として試作した。

籾破碎用ローラとその表面形状の概略図を図 3.10 に示す。2本のローラは互いにかみ合って逆方向に回転するダブルロール方式である。片方のローラ回転軸は固定で、もう片方は水平方向に 7 mm 可動とし、ばねで回転軸が固定のローラに押し付けられている。この機構により、ローラ間を通過する試料の量の変動した場合にばねが伸び縮みしてローラ間隙が変化し、ほぼ一定の力を試料に加えることができる。

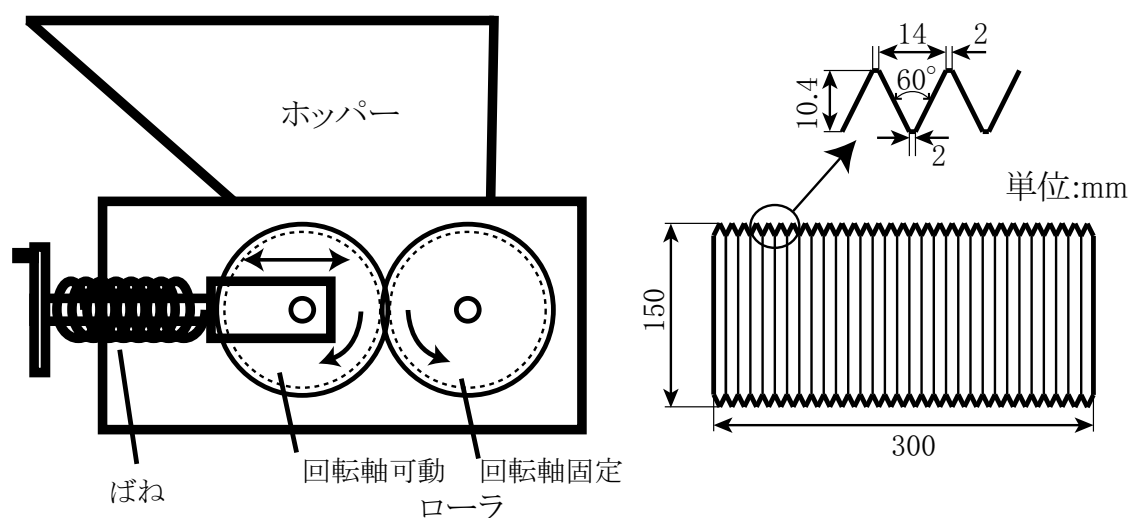


図 3.10 粉砕装置の模式図

ローラの回転速度は、スプロケットの交換によって片方の速度を 0% から最大 20% までは増速できるようにした。駆動は 3 相 200V 電源によりインバータで変速可能なギアモータを用いた。片方のローラを押えるばねの選定に当たっては、あらかじめ種々の圧縮力でテストを行ない、初期圧縮力の必要最大力は 2 kN 程度であることが判明したため、これが実現できるように入手可能なばねの中からばね定数 445 N/mm のものを 2 本用いて、可動ローラの回転軸を支える両側の 2 箇所のパリングを押し付ける構造とした。初期圧縮力はあらかじめばねを圧縮して与えることができる。

さらに、ローラ間の初期間隙を保てるように、水平方向へ可動なローラの移動を制限するストッパを設けた。本ストッパにより、ローラ間の初期間隙は 1.5 mm に設定した。これは以下のように決定した。すなわち、飼料イネサイレージ用専用品種には、高収量、耐倒伏性、耐病害性等を備えた品種が栽培適地別に育成されており、粉の寸法および形状が品種によって異なるものもある。そこで、国内で作付けされている主要な 13 品種について、幅、厚み、長さを 30 点ずつ測定した。このうち数品種についての値を表 3.2 に示す。なお、平均と標準偏差は全 13 品種についての値である。品種によって幅：2.6~3.8mm、厚み：1.9~2.6mm、長さ：6.9~9.3mm の広がりがあり、品種間では幅と厚みとの相関が高かった。ここで厚みの最小値が 1.9 mm であることから、ローラ間の初期間隙は、粉がローラ間をすり抜けることがないように 1.9 mm よりやや狭い 1.5 mm とした。この場合、

ばねによる初期圧縮力をゼロとして、仮にすべての溝に籾が1粒ずつ挟まった場合でも、ばねに

$$1.9 - 1.5 = 0.4 \text{ mm}$$

のばね変位が与えられることになり、ローラの水平移動の摩擦力を無視しても籾1粒ごとに加わるせん断力は、前述のばね定数より17Nとなる。これは図3.4のせん断力より大きく、籾殻を剥離するのに十分なせん断力に達するため、ローラ間の初期間隙の設定値1.5mmで力学的に問題ないと考えられる。

表 3.2 サイレージ用イネの籾の大きさ [mm]

品種名	幅	厚み	長さ
ミナミユタカ	2.6	1.8	9.2
ハマサリ	3.0	2.0	7.7
リーフスター	3.1	2.2	8.2
ホシアオバ	3.3	2.4	8.9
クサホナミ	3.4	2.3	7.0
クサユタカ	3.8	2.7	9.2
平均	3.3	2.3	8.0
標準偏差	0.3	0.2	0.7
コシヒカリ	3.4	2.2	7.4
標準偏差	0.1	0.1	0.1

ホッパーに投入された試料は、互いに逆方向に回転する2本のローラ間を通過する際に圧縮力とせん断力を同時に受けることにより、変形・破碎する。乾燥籾であれば籾殻が剥離しつつ籾も破碎され、水分の高い飼料イネサイレージの籾や収穫直後の籾等は圧縮による変形・籾殻剥離・破裂を受けると考えられる。その後、試料は下方に落下する。

3.3 実験方法

試作した飼料イネサイレージ用籾破碎装置の処理性能や能率等の基本性能の把握のため、籾を試料とした基礎実験を行なった。試料には2005年産コシヒカリの籾水分16%のものを用いた。本実験の試料として飼料イネサイレージでなく籾を用いたのは、以下の理由による。

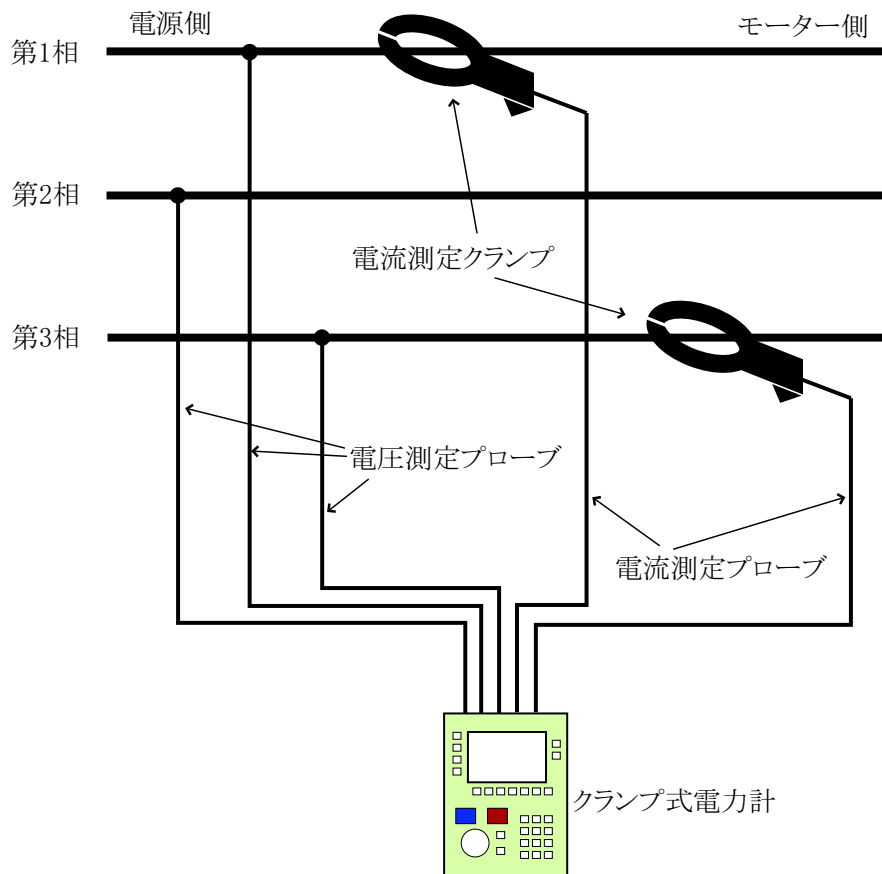


図 3.11 モータの所要動力測定結線図

1. 飼料イネサイレージは籾の混入割合が不定であり，水分，硬さ，切断長等の条件が一定の材料を得にくいいため適さない。
2. 飼料イネサイレージよりも籾を用いるほうが装置の籾殻剥離・籾破碎性能の把握が容易であると考えられた。
3. 実際の場面で調製の対象となるのは飼料イネサイレージ専用品種であるが，実験に使用できるだけの十分な量の籾が入手不可能である。
4. コシヒカリの籾の寸法を飼料イネサイレージ専用品種と比べると (表 3.2)，長さはやや短かめであったが飼料イネサイレージ専用品種の平均 $\pm$ 標準偏差以内であり，幅と厚みについては飼料イネサイレージ専用品種とほぼ同じであった。
5. コシヒカリ乾燥籾の籾殻剥離に要するせん断力は，飼料イネサイレージ専用品種であるハマサリの乾燥籾やサイレージ籾のせん断力の 1.4~3.3 倍であった。

これらのことから，コシヒカリの籾を用いることで本装置の籾に対する性能の把握は可能と判断した。

ローラ間の周速度差を 0, 10, 20% の 3 通り，及び速度の遅いほうのローラ外周の周速度を 0.1, 0.2, 0.4m/s の 3 通りとし，可動ローラの初期圧縮力は 0.2~ 2kN の範囲に設定し，一定速度で回転するローラ上部のホッパーに約 1.5kg の籾を投入し，処理されて落下する籾の一部約 100 粒以上をサンプリングして籾破碎率を計測するとともに，平均所要動力を測定した。籾破碎率の計測には，第 2 章で述べた画像処理による破碎籾の識別プログラムを用い，人力による識別も併用して妥当性を確認した。所要動力の測定には，クランプ電力計 (横河メータ&インスツルメンツ社製 CW121 型) を使用し，図 3.11 のように三相 3 線式結線方式により，電力線の線間電流，電圧及び力率を測定して求めた。

3.4 結果及び考察

ローラ間の初期圧縮力を変えた場合の籾破碎率を図 3.12 及び図 3.13 に，所要動力を図 3.14 及び図 3.15 に示した。なお，画像処理による籾破碎率の識別結果は，人力による識別結果と比べて $\pm 3\%$ 以内の差であったため，画像処理による結果を採用した。

全般的傾向としては，ローラ間初期圧縮力を高めると，籾破碎率は高くなったが，所要動力も増大した。

籾破碎率について見ると，ローラ間周速度比 10% でローラ周速度 0.1, 0.2, 0.4m/s の場合を比較すると，0.2m/s では 0.1m/s よりも 5~10% 以上高く，0.4m/s とほぼ同等の籾破碎性能が得られた (図 3.12)。次に，ローラ周速度 0.2m/s でローラ間周速度比 0%, 10%, 20% の場合を比較すると，10% では，0% や 20% の場合に比べて最も高い籾殻剥離・破碎率が得られた (図 3.13)。図に示していないが，他の条件での結果もふまえると，ローラ間周速度比 10%，ローラ周速度 0.2m/s で最も良い処理性能が得られることが明らかとなった。

一方，所要動力について籾破碎率同様に，まずローラ間周速度比 10% でローラ周速度 0.1, 0.2, 0.4m/s の場合を比較すると，ローラ周速度が増加するほど所要動力は増大する結果となり，特に 0.4m/s では 0.1m/s や 0.2m/s の場合と比べて所要動力が大幅に増大した (図 3.14)。次に，ローラ周速度 0.2m/s でローラ間周速度比 0%, 10%, 20% の場合を比較

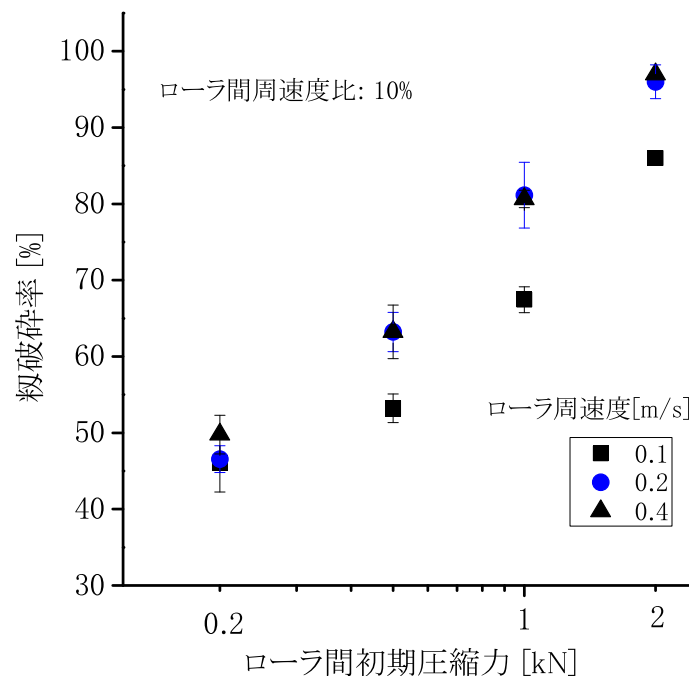


図 3.12 粉破碎率 - 2 つのローラ間周速度比 10% 時

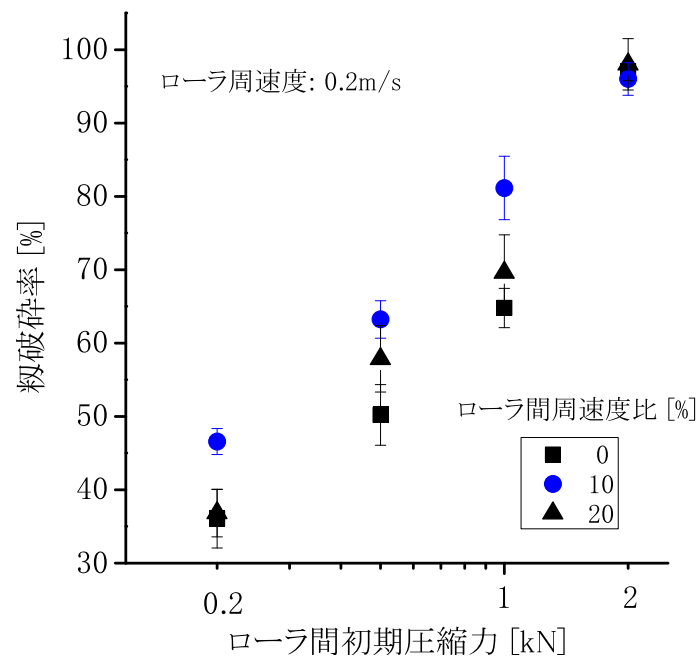


図 3.13 粉破碎率 - ローラ周速度 0.2m/s 時

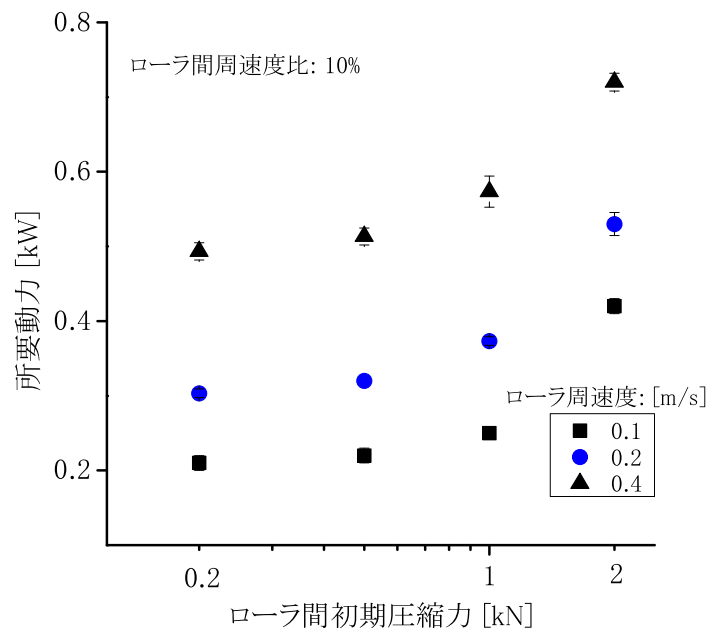


図 3.14 粉破碎装置の所要動力 - 2つのローラ間周速度比 10% 時

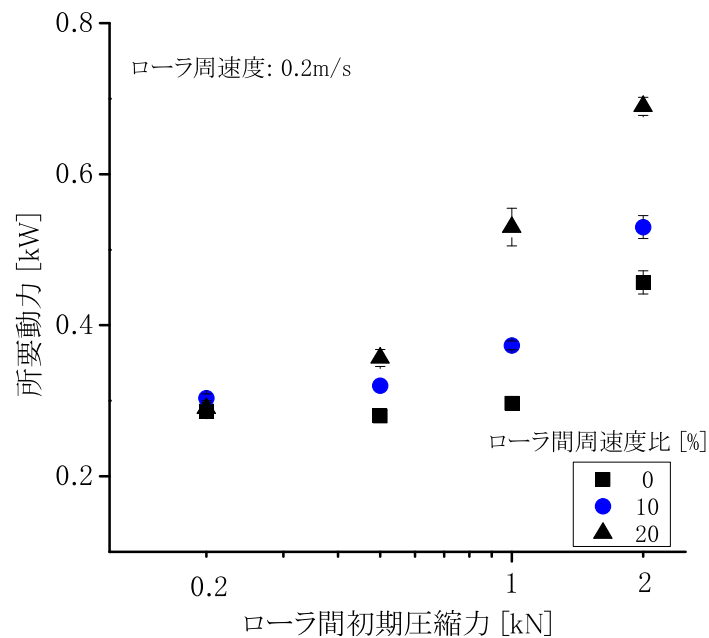


図 3.15 粉破碎装置の所要動力 - ローラ周速度 0.2m/s 時

すると，ローラ間初期圧縮力が大きいほど，ローラ間周速度比が大きくなるにつれて所要動力は増加する傾向となり，これは周速度比 20% の場合に顕著であって，ローラ間周速度比 10% では，20% の場合ほどは増大しなかった (図 3.15)。

これらをまとめると表 3.3 のようになり，ローラ周速度が低くローラ間周速度比が小さいほど所要動力は低かった。しかし粉破碎率との兼ね合いからはローラ周速度 0.2m/s，ローラ間周速度比 10% が最適となった。

表 3.3 粉破碎率と所要動力

ローラ周速度 [m/s]	ローラ間周速度比 [%]	粉破碎率 [%]	所要動力 [kW]
0.1	10	67 A	0.25 A
0.2	0	65 A	0.30 Aa
0.2	10	81 Ba	0.37 B
0.2	20	70 b	0.53 b
0.4	10	79 B	0.57 C

異なる大文字と小文字の記号はそれぞれ有意水準1%と5%で有意差があったことを示す

次に，処理能率について検討する。本装置の構造・寸法でイネ粉を処理した場合に期待される処理能力を式 1.2 を用いて再び計算する。

装置の条件は

$$D = 0.15 \text{ m (ローラ直径)}$$

$$L = 0.30 \text{ m (ローラ長さ)}$$

であり，

ローラの開き S_p は，試料を投入していない時は初期値 1.5mm であるが，実際に粉が通過する際は，粉がローラ間を通過する際にばねを押し広げると考えられる。この大きさは測定できなかったため，粉の最小径である厚みの平均値 2.3mm の 2 倍と見積り，

$$S_p = 4.6 \text{ mm}$$

とした。水分 15% の乾燥粉のかさ密度は

$$\rho_p \approx 0.56 \text{ t/m}^3$$

であり，ローラ周速度 0.2m/s ではローラの回転数

$$n = 30 \text{ rpm}$$

であるため，粉を試料とした場合の処理能力の理論値 Q_p [t/h] は，

$$\begin{aligned} Q_p &= 60n\pi DL S_p \rho_p \\ &= 0.65 \text{ t/h} \end{aligned} \quad (3.9)$$

となった。

表 3.4 粉に対する処理能力

	処理能力 [t/h]	粉破碎率 [%]	所要動力 [kW]
コシヒカリ粉	1.1 ± 0.1	81 ± 4.3	0.37 ± 0.06
ローラ回転速度0.2m/s, ローラ間周速度比10%, ローラ間圧縮力1kNでの平均			

実際の処理能率は，ローラ周速度 0.2m/s，ローラ間周速度比 10%，ローラ間初期圧縮力 1kN の条件下で表 3.4 の通りとなり，1.1t/h であったことから，理論値の 1.7 倍の能力を発揮したことになる。

この結果は以下のように考察できる。すなわち，計算に用いたローラ長さはローラの実長さ 0.3m であった。これはローラ表面が平坦な場合の有効長であり，実際はローラ表面に V 字型の溝を形成したことによって，ローラ有効長は実長さの約 2 倍の 0.6m となったことによる効果が大きい。ローラ表面の V 字型溝は粉に効果的にせん断力を作用させるとともに，処理能力の向上を図って形成したものであり，期待された通り処理能力が向上できた。なお，ローラ周速度を上げることによって処理能率をさらに向上させることは可能であるが，周速度 0.2m/s と 0.4m/s とで粉殻剥離・破碎率は有意に増加しなかったことに加え，所要動力は大幅に増大したため，総合的に判断すると，本実験装置の処理能率はこの程度とするのが妥当と思われる。

飼料イネを用いる実際の現場では，貯蔵してある飼料イネサイレージのロールベールを解体してそのまま給与するか，あるいは必要に応じて切断した後，他の配合飼料等と混合して完全混合飼料 (Total Mixed Ration, TMR) として給与することが多い。本装置の適用

場面としては、TMR に混合する直前に籾殻剥離・破碎処理を行なって消化性の改善を図ることが想定される。そこで、第 4 章では飼料イネサイレージを供試して処理を行ない、実際に給与して栄養価値の改善効果を明らかにした。

3.5 要約

飼料イネサイレージの乳肉牛への給与において問題となっている未消化のまま排出される籾を低減するため、連続的に籾殻剥離・籾破碎する装置を開発した。

1. 飼料イネサイレージ用の籾殻が剥離・破壊するのに要する力は、引張力が最小であり、次にせん断力が小さかった。しかし、設計のしやすさの点から、せん断力を効果的に作用させることのできる構造とした。
2. 飼料イネの籾殻剥離と籾破碎を行なう装置を開発した。籾殻を効率的に剥離するには、籾にせん断力を作用させるのが有効であるため、ダブルロールミル方式の籾殻剥離・籾破碎機構を開発し、ローラ表面には V 字型の溝を設けた。溝の角度は、シミュレーションの結果から 60° とした。
3. 開発した飼料イネサイレージ用籾破碎装置の籾に対する性能は、ローラ周速度 0.2m/s、ローラ間周速度比 10%、ローラ間初期圧縮力 1kN の条件下で最適となり、籾を供試した場合の籾破碎率は 80% に達し、所要動力は 0.3~0.4kW、処理能力は 1.1t/h であった。この処理能力は理論値の 1.7 倍であり、ローラの V 字型溝の処理能力増大効果が有効であった。

第 4 章

飼料イネサイレージの籾殻剥離・籾破碎処理と去勢牛への給与

4.1 目的

飼料イネサイレージは、他の飼料作物と同様に未消化子実が栄養価の損失であるとして指摘される。イネの子実は難消化性の堅い殻（籾殻）を持っており、これが咀嚼等により物理的に破碎がなされないと子実の消化が十分進まないためである (Kanaya et al., 2001, Yamamoto et al., 2000)。しかし、イネの子実は粒度が小さいため破碎される機会はトウモロコシに比べると少ないと考えられる。実際に飼料イネサイレージを去勢牛に給与すると、黄熟期に収穫したイネでは 15% 程度の未消化子実があり、刈り遅れ等で熟期が進むとさらに増大する。さらに、維持レベルでなく生産レベルで給与される搾乳牛では 50% 以上になることも多く (Nakui et al., 1988)、栄養の利用率低下は深刻な問題となっている。本研究では、第 3 章までに飼料イネサイレージ用の籾破碎装置を開発し、籾単体に対して十分な籾破碎性能を有する結果を得た。飼料イネを乳肉牛に給与する場合、茎葉部分も含めたイネ全体を飼料として利用するのが一般的であり、籾破碎装置による処理についても同様の試料に対する効果を確認する必要がある。そこで、本章では飼料イネサイレージを用いて籾破碎処理し、その効果を検討した。

一般に飼料の評価は、化学分析や近赤外分析等の手法を用いて行なう飼料成分分析によってなされる (Abe, 2001)。これにより、給与飼料の成分や栄養価等を的確に把握でき、飼料設計が可能になる。これに加えて、サイレージでは有機酸組成評価としての発酵品質も飼料価値判定には重要な要素であり、これによって家畜に対する安全性の保障が可能と

なる。この他、飼料の形状、比重、密度、硬さ等の物理的特性は家畜による消化性や乾物摂取量のほか、反芻家畜の第一胃安定性維持に影響を及ぼすため重要である。

一方、飼料イネサイレージの栄養価に関する報告は多いが、それらの報告での栄養価は、山羊や羊を用いての検討が多く、牛を用いての報告は非常に少ない。さらに、飼料イネサイレージの各化学成分の消化率や可消化養分総量 (Total Digestible Nutrients, 以下 TDN) は、牛と羊で異なることが指摘されている (Abe et al., 1988)。本研究の目的は未消化子実を低減する技術の確立であり、最終的に牛を用いた消化試験は避けて通れないものである。そこで、籾破碎処理した飼料イネサイレージを去勢牛に給与して栄養価や消化性の評価、並びに未消化子実の排出程度を調査するとともに、採食行動の観察から飼料の物理性を評価した。

4.2 実験方法

4.2.1 供試飼料の籾破碎処理

開発した装置で飼料イネサイレージでなく、籾単体を処理した実験では、試料のホッパーへの供給から処理までの過程において作業停止等の問題は発生しなかった (Shigeta et al., 2008)。しかし今回の試料である飼料イネサイレージは、籾だけでなく茎葉も含まれるため、籾に比べると流動性が低く、一度に多量の試料を籾破碎装置のホッパーに投入するとブリッジの発生やローラに飼料イネサイレージが詰まる現象が見られた。これを回避するには、試料のホッパーへの供給量を一定に保つことが有効と考えられたため、図 4.1 に示すように処理後の試料の受け側だけでなく供給側にもベルトコンベアを配置した。このようにして、実際に籾破碎作業を行なっている様子を図 4.2 に示す。

供試試料の籾破碎処理にあたっては、ローラ間初期圧縮力は籾破碎率と所要動力に大きく影響することから、重要である。給与に用いる飼料の調製に当り、籾破碎装置によって飼料イネサイレージを供試し、籾破碎実験を実施した。

第3章の籾を供試した基礎実験では、処理能率と所要動力のバランスが優れていたのはローラ回転速度 0.2m/s、ローラ間周速度比 10% 時であった。この条件下においてローラ間初期圧縮力を 0.1kN から 2kN まで変化させ破碎実験を行なった。

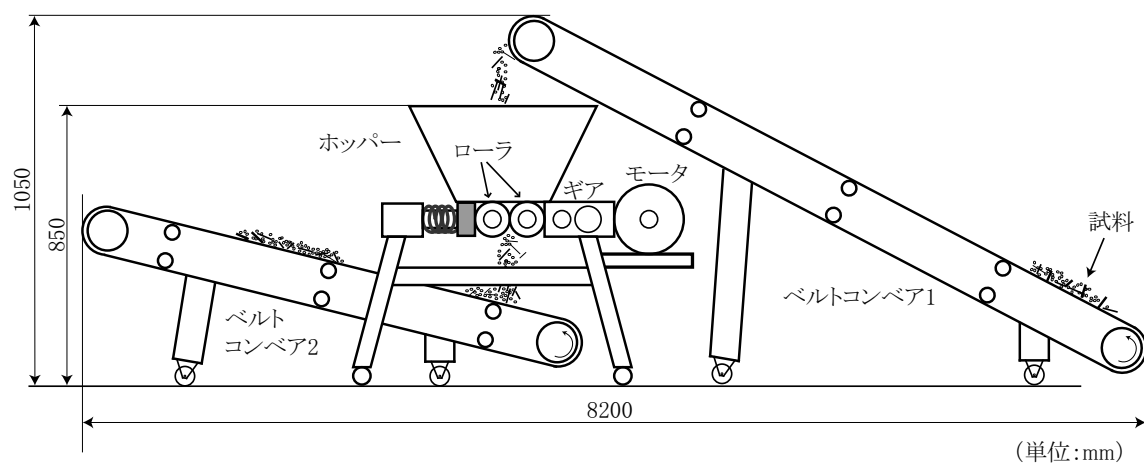


図 4.1 飼料イネサイレージの粉砕作業のための装置の配置図

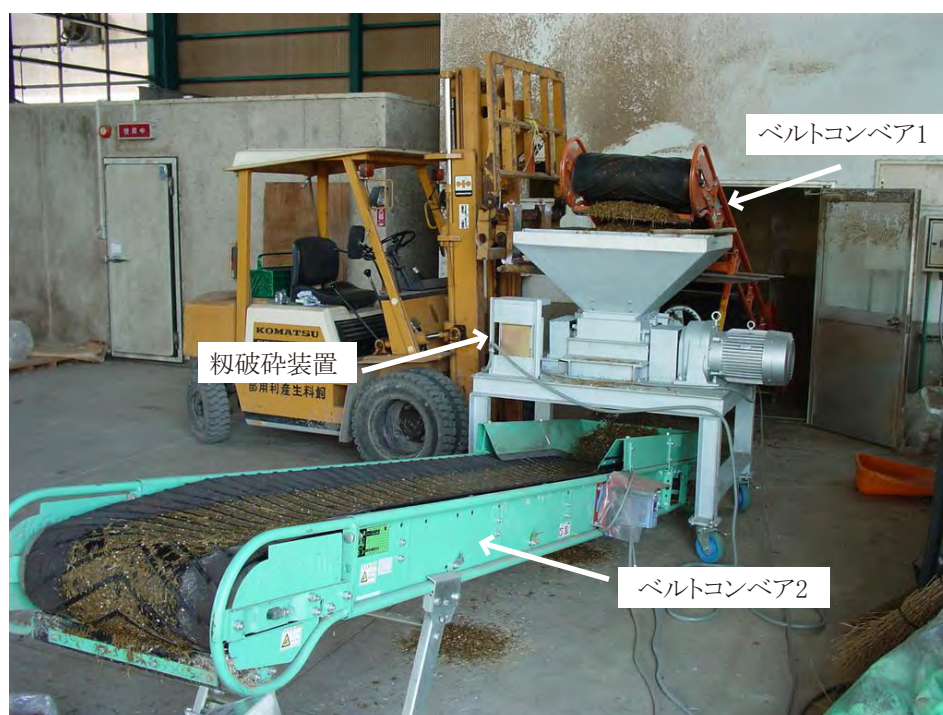


図 4.2 飼料イネサイレージの粉砕処理作業

4.2.2 供試動物及び供試試料

実験には、ホルスタイン種去勢牛 4 頭（平均体重 $449.6 \pm 9.2\text{kg}$ ）を用いた。これらは温度 20 の調温試験室内に設置された個別のストールにスタンションで係留した。供試試料には 2005 年産飼料イネ「ホシアオバ」をロールベール調製したものをを用いた。収穫時期は黄熟期であり、約 6 カ月間の発酵・貯蔵期間を経た後に開封し、飼料切断機で 2cm 程度に切断しただけのもの（無処理イネ）及び、切断後、籾破碎装置で飼料イネサイレージの子実を剥離・破碎したもの、以下（籾破碎処理イネ）の 2 種類を用意した。

本研究で用いた飼料イネサイレージの化学成分は表 4.1 に示した。飼料の給与量は日本飼養標準・乳牛（農林水産省農林水産技術会議事務局 1999）に基づき、維持に必要な代謝エネルギー量とした。

4.2.3 実験設定，分析，計算と統計処理

給与実験は、去勢牛 4 頭と飼料イネサイレージ 2 種類による 2×2 のラテン方格法 (Yoshida, 1992) により実施し、実験期間は、馴致期と予備期を 7 日間ずつ、本期を 6 日間とした。本期中は、全糞採取法による消化試験 (Ishida, 2001) により、採取した糞の一部は分析まで -20 で凍結保存し、残りは 60 の通風乾燥機内で 48 時間乾燥してから 1mm 目のスクリーンを付けたウィレー型粉碎器で粉碎して分析に供した。尿は窒素の飛散を防ぐために硫酸を添加して採取し、分析するまで -20 で凍結保存した。また、供試動物の採食、反芻等の咀嚼行動は、5 分間隔で 24 時間にわたり目視によって観察した。

飼料と糞の一般成分は、常法 (Abe, 2001) で、細胞内容物 (Organic Cell Contents, 以下 OCC)、細胞壁物質 (Organic Cell Wall, 以下 OCW)、OCW 中の高消化繊維 (Organic a fraction in OCW, 以下 Oa) と低消化繊維 (Organic b fraction in OCW, 以下 Ob) 及び非構造性炭水化物と有機酸類 (Nitrogen cell wall free extracts, 以下 NCWFE) は酵素分析法 (Abe, 2001)、デンプンは松山らの方法 (Matsuyama et al., 2005) により、酸性デタージェントリグニン (Acid Detergent Lignin, 以下 ADL) とケイ酸はデタージェント分析法 (Abe, 2001) により分析した。糞の熱量は乾燥した試料を、尿は伊藤と田野の方法 (Ito and Tano, 1977) により新鮮物を凍結乾燥した試料を熱研式熱量計（島津製作所製 CA-4PJ）で分析した。糞

表 4.1 供試した飼料イネサイレーズの化学成分

項目	飼料イネサイレーズ
乾物 [%]	27.7
有機物 [% of DM]	78.8
粗タンパク質 [% of DM]	7.0
粗脂肪 [% of DM]	2.2
細胞内容物 OCC [% of DM]	27.7
細胞壁物質 OCW [% of DM]	51.0
高消化性繊維 Oa [% of DM]	1.9
低消化性繊維 Ob [% of DM]	49.1
中性デタージェント繊維 NDF [% of DM]	47.1
酸性デタージェント繊維 ADF [% of DM]	33.2
酸性デタージェントリグニン ADL [% of DM]	6.2
デンプン [% of DM]	15.7
ケイ酸 [% of DM]	13.9
エネルギー [MJ/kg DM]	15.5

DM: dry matter, 乾物

OCC: organic cell contents, 細胞内容物

OCW: organic cell wall, 細胞壁物質

Oa: organic a fraction in OCW, 高消化性繊維

Ob: organic b fraction in OCW, 低消化性繊維

NDF: neutral detergent fiber, 中性デタージェント繊維

ADF: acid detergent fiber, 酸性デタージェント繊維

ADL: acid detergent lignin, 酸性デタージェントリグニン

に含まれる未消化子実は，新鮮物を用いて水洗法 (Nakui et al., 1988) により分析した。CP(Crude Protein, 粗タンパク質) 消化率は，尿素を給与飼料に添加したことで，糞中代謝性窒素の増加や窒素含有率の高い尿の混入等の可能性があったため算出しなかった。したがって，TDN は可消化有機物含有量と可消化粗脂肪含有量から算出した (Ishida, 2001)。統計処理は，SAS(SAS Institute Japan 1995) を用いて行なった。調査項目は，飼料イネサイレーズの粉砕処理における粉砕剥離・粉砕割合，所要動力，供試飼料の化学成分，消化率，栄養価及び咀嚼行動とした。

4.3 結果及び考察

4.3.1 籾破碎処理

飼料イネサイレージを供試して籾破碎処理を行なった。受け側に加えて試料供給用ベルトコンベアによって単位時間当たりほぼ一定量の試料を供給したことにより，ローラへの試料供給量を安定させることが可能となり，試料のホッパーでのブリッジやローラへの詰まりも防止できた。図 4.3 は，飼料イネサイレージが籾破碎装置に投入されて処理される様子である。



図 4.3 籾破碎処理

籾破碎率と所要動力は，図 4.4 に示した。飼料イネサイレージ中の籾殻の一部が剥離しているか籾が破碎しているものの判別には，試料中の籾とそれ以外の茎葉部等とを，あらかじめ目開き 4mm と 2mm のメッシュふるいで分離した後，第 2 章の画像処理手法を適用して判別した。

ローラ間初期圧縮力を 0.1kN から 2kN まで変化させたところ，籾破碎率は初期圧縮力 0.2kN で 93% に達し，それ以上では破碎率の増加は小さかった。一方，所要動力は初期圧縮力 0.2kN までは増加がわずかであったが，0.2kN を越えると急激に増大した。このた

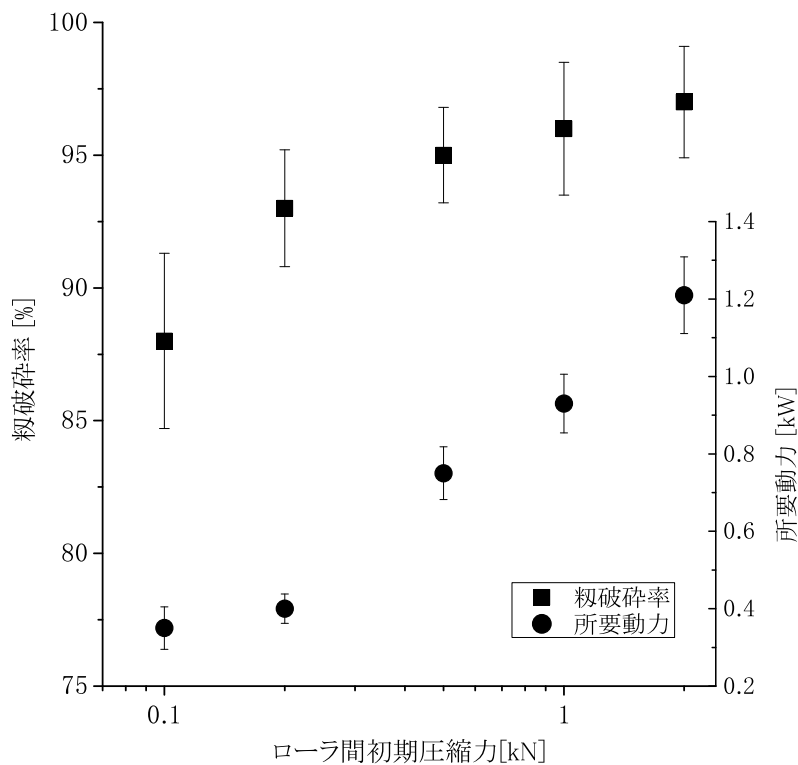


図 4.4 飼料イネサイレージの粉砕率及び所要動力 -ローラ周速度 0.2m/s 及びローラ周速度比 10% 時

め，ローラ間初期圧縮力の最適値は 0.2kN であることが明らかとなった。

粉砕率，所要動力及び処理能力について，籾を供試したデータとともに，表 4.2 にまとめた。コシヒカリ籾のデータは第 3 章の実験結果を引用している。粉砕率について見ると，コシヒカリ籾が 81% に留まったのに対して飼料イネサイレージでは 93% に達した。これは，コシヒカリ籾では装置に投入された全量が籾であったため，ローラの破砕作用を受けずに通過する籾があった。一方，飼料イネサイレージでは籾以外に茎葉部が多く含まれ，相対的に籾の割合が低かったため，大部分の籾がローラの破砕作用を受け，籾単体より高い粉砕率になったと考えられる。

粉砕処理前後の飼料イネサイレージの状態を図 4.5 に示す。外観は，処理前の子実部と茎葉部は同じような淡褐色であったが，粉砕処理後は大部分の籾が籾殻剥離・破砕作用を受けて籾殻が剥離した。子実も破砕作用を受けて内部の胚乳部が露出し，白色を呈す



図 4.5 籾破碎装置による飼料イネサイレージの処理前後

る部分が多く見られた。所要動力は、コシヒカリ籾と飼料イネサイレージで明確な差はなかった。

処理能力については、第3章で籾に対して行なったと同様の検討を行なう。

装置の条件は、第3章と同様に

$$D = 0.15 \text{ m (ローラ直径)}$$

$$L = 0.30 \text{ m (ローラ長さ)}$$

である。ローラの開き S_s は、試料を投入していない時は初期値 1.5mm であるが、実際に飼料イネサイレージが通過する際のローラの開きは数 mm 程度となることが観察されたため

$$S_s = 5 \text{ mm}$$

とした。

供試した飼料イネサイレージの水分は 72% とやや高めであった。梱包密度は第1章で述べたように収穫調製機の種類で大きく異なり、今回はフレール方式収穫調製機で調製したロールベールを用いたため水分 70% でのイネサイレージのかさ密度 ρ_s は

$$\rho_s \approx 0.58 \text{ t/m}^3$$

と想定され、ローラ周速度 0.2m/s ではローラの回転数 $n = 30 \text{ rpm}$ であるため、飼料イネ

サイレージに対する処理能率の理論値 Q_s は、

$$\begin{aligned} Q_s &= 60n\pi DL S_s \rho_s \\ &= 0.73 \text{ t/h} \end{aligned} \quad (4.1)$$

と試算される。

表 4.2 飼料イネサイレージの粗破碎率と所要動力

	粗破碎率 [%]	所要動力 [kW]	処理能力 [t/h]
コシヒカリ粃	81 ± 4.3	0.37 ± 0.06	1.1 ± 0.1
飼料イネサイレージ	93 ± 2.2	0.40 ± 0.04	0.8 ± 0.1

ローラ回転速度0.2m/s, ローラ間周速度比10%

実際の平均処理能力は表 4.2 に示すように 0.8t/h となった。この結果については、粃の場合と同様に計算に用いたローラ長さはローラの実長さ 0.3m であったが、これはローラ表面が平坦な場合の有効長であり、ローラ表面に V 字型の溝を形成したことによって、ローラ有効長は実長さの約 2 倍の 0.6m となったことにより、処理能率が理論値を上回ったと考えられる。この能力を、破碎処理を行わない慣行作業と単純に比較することは適当ではないが、一例として機械設備や人員が豊富な畜産草地研究所内で同様のロールベール解体から給与準備まで約 2t/h 程度で処理されていることからすると、現状の破碎処理は作業能率が十分とは言えない。

ダブルロールミルの処理能率は、式 (1.2) の通り、能率を決定する機械的要因としてはローラ回転数、ローラ長さ、及びローラ直径がある。ローラ長さとローラ直径は一定であるため、ローラ回転数が処理能力を左右する。砕料のローラすき間への供給がローラ回転に追従する限り、ローラ回転数の増加は処理能力向上に有効である。砕料のローラ回転への追従は、砕料の摩擦係数と流動性に大きく依存する。今回用いた砕料である飼料イネサイレージは、ローラ表面でのスリップは見られずローラとの摩擦は十分であったが、ホッパに大量に投入するとブリッジの発生により滞留し、連続して破碎しないことがあったため、流動性は低かった。今回の実験では、飼料イネサイレージの粗破碎装置への供給は、ベルトコンベアにより一定量ずつ落下させることにより、ブリッジを防止できたが、ローラへの供給量低下の原因となった。この問題の解決には、ローラ上部にアジテータを付加

するなどの対策が必要と考える。なお，本研究で用いた籾破碎装置は，基本的処理能力や効果の検証のための実験用であることから，ローラ長さと直径の拡大によって処理能力を向上し，実用化は可能であるとの見通しは得られた。

4.3.2 乾物摂取量，消化率，栄養価及び未消化子実の排泄率

供試した試料の乾物含有率は，水分がやや高めであったため 27.7% と低かったが，細胞内容物 (Organic Cell Contents, 以下 OCC) や細胞壁物質 (Organic Cell Wall, 以下 OCW) 含有率等の化学成分は通常の飼料イネサイレージと比べて遜色ない値であった (表 4.1)。このサイレージを用いて去勢牛に給与し，消化実験で得られた各化学成分の消化率，可消化養分総量 (Total Digestible Nutrients, 以下 TDN)，可消化エネルギー (Digestible Energy, 以下 DE) 及び代謝エネルギー (Metabolizable Energy, 以下 ME) を表 4.3 に示す。

表 4.3 消化率と栄養価

項目	処理		SE	P値
	無処理	籾破碎処理		
消化率				
乾物 [%]	43.9	48.2	2.5	0.18
有機物 [% of DM]	52.0	55.3	2.1	0.22
粗タンパク質 [% of DM]	62.5	64.6	2.1	0.39
粗脂肪 [% of DM]	61.6	68.1	2.3	0.07
細胞内容物OCC [% of DM]	78.1	82.2	1.1	0.03
細胞壁物質OCW [% of DM]	32.6	35.4	3.5	0.47
デンプン[% of DM]	75.5	82.0	3.0	0.13
エネルギー [% of DM]	51.1	54.3	2.4	0.28
栄養価				
可消化養分総量TDN [% of DM]	43.7	46.5	1.8	0.21
可消化エネルギーDE [MJ/kg DM]	9.0	9.5	0.4	0.28
代謝エネルギーME [MJ/kg DM]	7.5	8.0	0.5	0.33
未消化子実排泄率 [% of DM]	13.2	4.5	1.2	0.01

DM: Dry Matter, 乾物

OCC: Organic Cell Contents, 細胞内容物

OCW: Organic Cell Wall, 細胞壁物質

TDN: Total Digestible Nutrients, 可消化養分総量

DE: Digestible Energy, 可消化エネルギー

ME: Metabolizable Energy, 代謝エネルギー

SE: Standard Error, 標準誤差

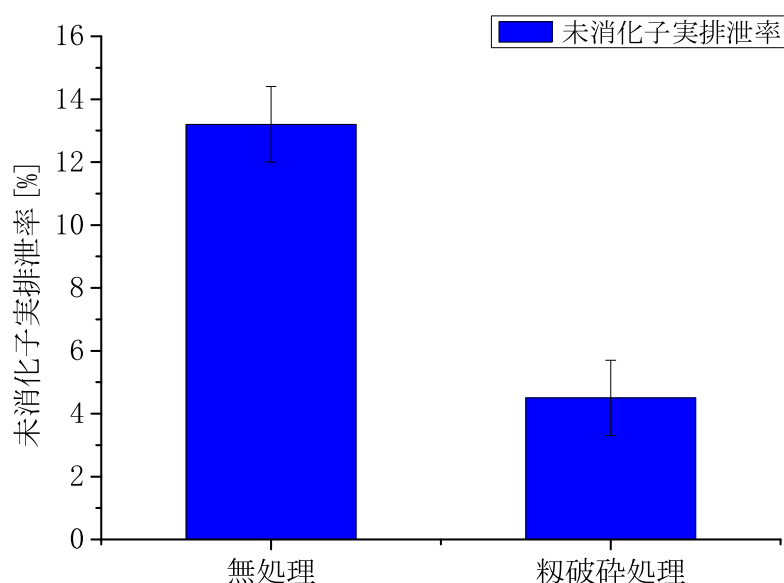


図 4.6 刎破碎処理による未消化子実排泄率

去勢牛への給与においては、馴致を十分行なったことと維持レベルでの実験であったこともあり、残飼はなかった。刎破碎処理イネの乾物消化率は、無処理イネに比べて約 4 ポイント高かったが有意な差ではなかった。有機物消化率を始め各化学成分の消化率は、いずれも刎破碎処理イネが高く、OCC の消化率には有意な差が認められた。さらに、TDN は刎破碎処理イネ 46.5%，無処理イネ 43.7% と刎破碎処理したほうが高い傾向であったが、有意な差ではなかった。大部分の化学成分の消化率において刎破碎処理と無処理間で有意差がなかったことについては、刎破碎処理の効果が主として子実の消化を促進するための物理的作用のみであることから当然であり、むしろ刎破碎処理イネの乾物消化率や有機物消化率を始め、各化学成分の消化率は、いずれも刎破碎処理イネが無処理イネより高い傾向となったことは、茎葉部、子実部ともに繊維質が軟化し、消化しやすくなったためではないかと推察される。

一方、未消化子実の排泄率は、無処理イネで 13.2% であったのに対し、刎破碎処理では 4.5% と有意に低減 (66%) した (図 4.6)。未消化子実の排泄割合が低減したことは栄養価に影響を及ぼし、TDN の改善に作用したと考えられる。そこで、未消化子実排泄割合の低減と TDN 改善効果について検討する。未消化子実排泄率低減による TDN 改善に影

響を及ぼす諸因子として、次のような変数を定義する。

- T_p : 籾の TDN 割合 [%]
- P_s : 飼料イネサイレージ中の籾割合 [%]
- G_{en} : 無処理イネの未消化子実排泄率 [%]
- G_{es} : 籾破碎処理イネの未消化子実排泄率 [%]

とすると、籾破碎処理による TDN 増加量の理論値 T_{up} [%] は、

$$T_{up} = (G_{en} - G_{es})T_s P_s \quad (4.2)$$

で示される。籾の TDN 割合は 80%、さらに通常、飼料イネサイレージ中の籾割合は黄熟期のイネで 50% とされている。そこで各変数値を以下のようにし、

- $T_p = 80$
- $P_s = 50$
- $G_{en} = 13.2$
- $G_{es} = 4.5$

これらを式 4.2 に代入すると

$$T_{up} = 3.5\% \quad (4.3)$$

となった。実際の TDN の改善量は、表 4.3 より、

$$46.5 - 43.7 = 2.8\%$$

であり、理論値をやや下回ったが、未消化子実排泄率の低減が栄養価の改善に効果的に作用したことは明らかである。なお、実際の TDN 改善量が理論値を下回ったのは、供試した飼料イネサイレージ中の籾割合がやや低かったことが要因と考えられる。

本研究で開発した飼料イネの籾破碎装置を用いた処理による飼料イネサイレージの籾破碎率が 93% と高く、子実の消化促進に有効に作用した。未消化子実排泄率が有意に低下したことで、飼料イネサイレージの前処理における本装置の有効性が示された。

4.3.3 咀嚼行動

反芻動物の牛などの特徴である反芻(作用)は、胃内容物をより微細にすり潰し、第一胃内微生物による消化・発酵を助ける重要な作用である。一般に、物理的に粗剛な粗飼料を給与するほど反芻回数・反芻時間も増加し、そうした飼料は採食にかかる時間も長くなることから、採食時間と反芻時間を合わせて咀嚼時間として評価することが多い。表 4.4 に、無処理と粗破碎処理飼料イネサイレージの給与時における採食時間、反芻時間、並びに咀嚼時間を示した。

乾物摂取量当たりの採食時間は、粗破碎処理イネがやや低い傾向となったが有意な差ではなかった。反芻時間は両処理でほぼ同等であったことから、採食時間と反芻時間の和で示す咀嚼時間にも有意差はなかった。今回の実験で、採食時間と反芻時間の和である咀嚼時間において粗破碎処理と無処理の飼料イネサイレージ間で有意差が見られなかったことで、粗破碎処理は反芻を維持するために重要な飼料イネサイレージの繊維の物理性を低下させることはなく、未消化子実の排泄率を有意に低減させることができ、飼料価値を高めることに効果的であることが明らかとなった。

表 4.4 咀嚼行動

項目	処理		SE	P値
	無処理	粗破碎処理		
採食時間 [分/DM kg]	16.4	12.6	5.0	0.50
反芻時間 [分/DM kg]	79.5	80.2	6.6	0.92
咀嚼時間 ^{a)} [分/DM kg]	95.9	92.8	10.5	0.79

a) 咀嚼時間=採食時間+反芻時間

DM: dry matter, 乾物

4.4 要約

飼料イネサイレージの乳肉牛への給与において問題となっている、未消化のまま排出される粗の低減のため、開発した飼料イネサイレージ用粗破碎装置を用いて、粗破碎処理を行なった飼料イネサイレージを実際に去勢牛に給与し、栄養価や未消化子実の排泄率を検証した。

1. 籾破碎装置の飼料イネサイレージに対する性能は、籾破碎率は93%、所要動力は0.4kW、処理能力は約0.8t/hであった。この処理能力は籾に対する場合と同様に理論値を上回った。
2. 籾破碎処理イネは、無処理イネに比べてOCC(Organic Cell Contents, 細胞内容物)の消化率が有意に増加した。さらに、未消化子実排泄率は無処理イネで13.2%であったのに対し、籾破碎処理では4.5%と約66%有意に低減した。
3. 乾物摂取量当たりの、採食時間と反芻時間の和で示す咀嚼時間には籾破碎処理と無処理の飼料イネサイレージで有意な差が認められず、飼料イネサイレージの繊維物理性を損なうことはなかった。

第 5 章

総合考察

5.1 本研究について

画像処理による農作物の形状，色の識別は，果菜類を対象とするものではサイズや等級，米を対象とするものでは，不良米の選別工程の省力化を主目的として技術が進展した。近年，これらの技術を栽培管理や収穫に利用するためのロボットへの応用として研究が進み，主として農業分野では施設型生産現場での管理用ロボットで一部実用化され，今後イチゴやメロン等施設栽培が容易で高価額のものに対して開発が進むと思われる。画像処理が用いられる理由としては，ロボット等との接続，容易性，省力性，安定性，客観性等が挙げられる。ただ，処理すべき画素やビット数が増加するとともに処理に要する時間が大幅に増大するため，実用的な利用には高速な処理装置が必要となった。ただし，この問題に関しては，コンピュータや画像処理用 LSI の高性能化等により，以前ほど問題視されなくなってきた。

本研究において破碎粕の識別に画像処理を用いた最大の理由は，その客観性である。飼料イネサイレージ用の粕が粕殻剥離または粕破碎されているか否かの判定に画像処理を用いることによって，客観的判別を可能にし，実際に粕殻剥離・破碎作用を有する装置を開発するに当たって，破碎機構の設計や機械的条件の決定等を効率的に行なうために用いられることを想定した。画像処理プログラムの開発に当たっては，粕殻が一部でも剥離しているか，または粕が破碎されているかどうかを判別できることを目的として，粕破碎粕の判別には，色と形状それぞれによる識別が可能なように開発を行なった。プログラム言語には Java を用いた。色判別プログラムでは，粕殻が剥離されていない粕でもハレーションの影響で画像周囲が白くなり，胚乳部が露出していると誤判定される可能性があり，この影

響を除去するため、籾画像周辺の白色部を除去するようにして、このような誤判定の影響を排除することに成功した。また、籾殻が剥離されているにもかかわらず、玄米や胚乳部が表面に露出していない籾を正常籾と誤判定する可能性があったため、形状判別処理でこの影響を排除できた。CCD カメラを用い、物理的に破碎処理したものとそうでないものとの画像をコンピュータに取り込んで、本画像処理プログラムで処理して判別を行なったところ、色判別プログラムにより、ハレーションの影響による誤判定を回避できるとともに、判定画像中の黒色部ピクセル数として7をしきい値とすることにより、破碎籾と無処理籾とを確度 90% 以上で識別可能であった。この判別に加えて、形状解析プログラムを適用することにより、破碎籾と無処理籾との識別確度は 98% と非常に高い精度で判別できることになった。このため、籾破碎装置の開発に本画像処理を利用することにより、効率的な開発ができる見通しが得られた。

次に、実際に籾破碎装置を開発するに当たり、本画像処理を用いることにより、籾殻剥離・破碎機構の開発効率を上げることができた。飼料イネの収穫調製に関して、一連の作業が機械化体系化されているが、籾の消化性を改善するための作業は考慮されておらず、市販の飼料イネ専用収穫機のうち、籾の破碎率が比較的高いとされているフレール方式収穫調製機は、収穫時のロスが多いことが問題となっていた。すなわち、消化性を改善するためには、積極的に籾殻を剥離するか、または破碎する装置の開発が必要となった。そこで、籾殻剥離・破碎機構の最適形状設計のため、まず籾粒の籾殻剥離に要する力計測を行ない、飼料イネサイレージ用の籾粒に圧縮、引張り、せん断力等を作用させて籾殻が剥離・破壊するのに要する力を、力の作用位置や方向別に計測した。これらの結果、せん断力を効果的に作用させることのできる構造が望ましいことが判明した。次に破碎機構としては基本的にロール式を採用したため、ローラ表面の最適形状をシミュレーションで求め、表面に V 字型の溝を設け、その角度を 60° と決定して実際に破碎装置を開発した。

開発した飼料イネ用籾破碎装置を用い、籾単体に対する性能を測定したところ、籾破碎率はローラ周速度 0.2 m/s、ローラ間周速度比 10% で最適となり、処理能率はローラ周速度 0.2 m/s、ローラ間周速度比 10%、ローラ間初期圧縮力 1 kN の条件下で 1.1 ± 0.1 t/h であった。ローラ間周速度比が 10% で最適となり、20% では籾破碎率が低下したことについては、詳細な検討を加えることはできなかった。しかし、籾殻剥離・籾破碎に作用するせん断力として、ローラ間の圧縮力によって作用するせん断力と 2 本のローラの周速度差

によって作用するせん断力があることから，ローラ間周速度差を 20% に増大するとローラの周速度差によって作用するせん断力は増加するものの，片方のローラ回転速度をさらに増速することによって，せん断力の作用時間が減少することと，ローラ間の圧縮力によって作用するせん断力と相殺する効果が生じた可能性もあるものと考えられる。

処理能率は，表面が平坦なローラの理論値は 0.65 t/h であったが，ローラ表面に設けた V 字型溝によるローラの有効長さの増加とローラを押し付けるばねの効果等により，理論値の 1.7 倍の能率となり，本装置の機構が処理能力の増加に効果的に作用した。なお，ローラ周速度を上げることによって，さらなる処理能率の向上は期待できるが，周速度 0.2 m/s と 0.4 m/s とで籾殻剥離・破碎率は有意に増加しなかったことに加え，所要動力は大幅に増大したため，本装置の処理能率は 1.1 ± 0.1 t/h とするのが妥当であった。

飼料イネサイレージを用いる実際の現場では，貯蔵してある飼料イネサイレージのロールベールを解体してそのまま給与するか，あるいは必要に応じて切断した後，他の配合飼料等と混合して完全混合飼料 (Total Mixed Ration, 以下 TMR) として給与することが多い。本装置の適用場面としては，TMR に混合する直前に籾殻剥離・籾破碎処理を行なって消化性の改善を図ることが想定されるため，飼料イネサイレージを供試して籾破碎処理を行ない，飼料の栄養価と物理性の評価を行なった。飼料の成分は化学分析で行ない，栄養価については乳肉牛への給与が目的であるため，ここでは実際に去勢牛に給与して評価するとともに，未消化子実の排泄率の改善効果を測定した。さらに，物理性が保たれているかどうかについて採食行動の観察によって確かめた。

籾破碎装置によって処理した飼料イネサイレージは，大部分の籾内部の胚乳部が露出して白色を呈する部分が多く見られ，子実が良く破碎されている様子が外観からも確認できた。平均処理能力は約 0.8 t/h であり，同様のロールベール解体から給与準備まで約 2 t/h 程度で処理されていることからすると，現状の作業能率は十分とは言えなかった。その主な原因は，飼料イネサイレージがかさ密度の低い碎料であったこと，及び流動性が低くブリッジが発生しやすいために籾破碎装置のローラへの供給量が低下したためである。ブリッジの発生は，ホッパー内破碎ローラ上部に攪拌機能を付加することで解決できる見通しを得ている。さらに，籾破碎装置のローラ長さと直径の拡大によって処理能力の向上は見込まれる。

供試した飼料イネサイレージを籾破碎処理したものを給与して得られた各化学成分の

消化率，TDN，可消化エネルギー (Digestible Energy, DE) 及び代謝エネルギー (Metabolizable Energy, ME) 等の比較では，有機物消化率をはじめとする各化学成分の消化率はいずれも粉砕処理イネが高く，細胞内容物 (Organic Cell Contents, OCC) の消化率には有意な差が認められた。さらに，未消化子実の排泄率は無処理イネで 13.2% であったのに対し，粉砕処理では 4.5% と約 66% 有意に低減したことで本装置の当初の目的は達成できた。飼料の物理性を評価するうえでの指標となる採食時間と反芻時間を合わせた咀嚼時間は，粉砕処理イネと無処理イネとの間に有意差がなく，粉砕処理は反芻を維持するために重要な飼料イネサイレージの繊維の物理性を低下させることはなく，未消化子実の排泄率を有意に低減させることができ，試料価値を高めることに効果的であることが明らかとなった。

5.2 残された問題と今後の展開について

5.2.1 飼料イネの普及に向けて

1999 年から農林水産省のプロジェクト研究で飼料イネの品種育成が進められ，東北北部と北海道を除く地域で栽培できる飼料イネの品種が育成された。飼料イネの収穫・調製用機械も改良が加えられ，細断型ロールベアラを搭載した自走式専用収穫機が市販化され，飼料イネ用に開発された乳酸菌「畜草 1 号」と相俟って高品質の飼料イネサイレージ調製が可能となった。さらに，乳用牛及び肉用牛への給与技術も確立されるなど，飼料イネの品種，栽培管理，収穫調製，乳用牛及び肉用牛への給与技術開発が連携して進められ，成果を上げている。

今後の普及のためには，次のような問題解決が求められる。まず，栽培可能地域を全国に広げるため品種を育成するとともに，TDN 収量を高める必要がある。栽培管理では，省力で安定的な飼料イネの直播栽培技術の確立が必要であり，地上部収量と栄養価の向上を目指す必要がある。収穫作業面では，さらなる作業能率の向上と機械の低コスト化が課題である。さらに，給与面では乳肉の機能性成分や美味しさに及ぼす効果を明らかにし，飼料イネサイレージを給与した畜産物の新たな付加価値化を図る必要がある

本研究で開発した未消化子実排泄率低減のための粉砕装置は，子実の消化を促進する効果が認められ，飼料価値を高めるのに有効である。ただし，新たな機械導入のコストを

考えると畜産農家が個別に利用するよりも，自給飼料に飼料イネサイレージを利用するコントラクターや飼料工場等での集団利用が望ましい。今後，飼料米（後述）での利用も視野に入れながら，市販化に向けたプロトタイプの開発を行う予定である。

5.2.2 生産レベルでの粉破碎効果について

本研究は，飼料イネサイレージの利用において残された問題である未消化粉低減のための粉殻剥離・破碎技術を開発し，一定の性能を有する装置を開発した。実際に粉破碎処理した飼料を供試して去勢牛を用いて給与実験を行い，未消化子実排泄率低減に有効であることを確認した。ただし，これは飼料を多給しない維持レベルでの評価結果であり，家畜に対する飼料の評価としての基本となるものである。一方，家畜による生産現場である酪農や肉牛生産等においては，費用対効果を高めるために飼料の多給がなされるため，そのような生産レベルの条件下における粉破碎処理飼料イネの未消化子実排泄率の低減効果を確認する必要があると考えられる。

そこで，これまでに搾乳牛に対する給与実験も実施しており，完全混合飼料 (Total Mixed Ration, TMR) の調製を，粉破碎処理した飼料イネサイレージを用いて調製したもの (粉破碎 TMR) と無処理の飼料イネサイレージを用いたもの (無処理 TMR) を給与して比較した。その結果の概要は次の通りである。

1. 粉破碎 TMR の 1 日当たりの乾物摂取量は無処理 TMR に比べて多くなる傾向となり，1 日当たりの乳量も粉破碎 TMR が多くなる傾向となった。
2. 粉破碎 TMR の乳脂肪，乳タンパク質は，無処理 TMR に比べて向上した。乾物摂取量の増加については，粉破碎処理の圧縮作用によって飼料イネサイレージの茎葉部の繊維が軟化し，消化しやすくなったためではないかと考えられる。
3. 未消化子実排泄率は，粉破碎 TMR12.0%，無処理 TMR40.2% であり，飼料イネサイレージの粉殻を剥離・粉破碎処理することによって約 70% 低減し，搾乳牛においても当初の目的である消化性向上効果が認められた。
4. 咀嚼行動に係わるいずれの数値も，粉破碎 TMR と無処理 TMR の間に違いは認められず，飼料イネサイレージの粉破碎処理が咀嚼行動に及ぼす影響は小さい，すなわち粉破碎処理によって飼料の物理性が損なわれることはなかったと考えられる。

5.2.3 飼料米への展開

我が国の食料自給率低下の原因の一つとして、飼料用穀物のほとんどを輸入に頼っている現状が挙げられ、そのための打開策として、主要な飼料用穀物であるトウモロコシの代替飼料として飼料米の利用が期待されている。2007年度の水稻作付面積は、ピーク時(1969年度)の317万haに比べて約半分の167万haに落ち込んでいる。その分、麦・大豆等畑作物や飼料作物への転用が進んだが、耕作放棄地の増加が深刻な問題となっている。調整水田やこれら耕作放棄地において飼料米を作付することにより、水田機能維持と飼料自給率の向上を図ることができるとの期待が高まっているためである。米の栄養価(可消化養分総量)は、牛・豚・鶏用配合飼料の主な原料であるトウモロコシとほぼ同等であり、その代替品として使用することが可能である。収益性を上げるため、10a当り800kg前後の玄米収量が期待できる多収品種が育成されており、これらの品種は多肥栽培に適しているため堆肥の大量施用にも向いており、資源循環を促進する観点からも望ましいとされている。現状では、畜産と密接に連携している地域や畜産農家が自家利用として生産している例等、限られた地域で飼料用米が生産・利用されているだけであるが、今後作付は飛躍的に増大する見込みである。しかし、現時点においては飼料としての生産・調製・流通・給与等には解決すべき問題が多くある。中でも最大の問題は生産コストである。現在取り組みがなされているところでは、国からの交付金頼みという状況であり、これらの交付金なしでも飼料米の生産が成り立つように、収量増や栽培・管理・収穫調製等の技術革新に取り組む必要がある。

このように、飼料米は未成熟な分野であり、今後普及の可能性は高いものの、現時点においては収穫調製、給与等で技術的に解決すべき問題が多くあるため、牛用飼料としての利用には至っておらず、飼料イネの利用はホールクロップサイレージとしての利用が主体である。

開発した籾破碎装置は、茎葉を含む飼料イネサイレージに対して籾から籾殻を効果的に剥離・籾ごと破碎する機能を有するものであり、当初から茎葉ごと処理できる能力を有する装置として開発してきたが、装置の開発段階で籾単体に対する性能を評価してきており、そもそも本装置は飼料イネサイレージ中に含まれる籾に有効に作用することで籾殻を剥離したり籾を破碎する作用を有するものであるため、茎葉の含まれない籾単体に対する

表 5.1 飼料米の給与対象と調製方法

対象	調製方法		
	玄米	粳米	ソフトグレインサイレージ
豚	○		○
鶏	○	○	○
牛		○	○

全ての方法に粳の破碎・圧ぺん処理が加わる

適応性も高いことを認識している。そこで、飼料イネサイレージだけでなく今後普及が期待される飼料米の配合飼料への利用においても、本研究で開発した粳破碎装置が有効になると考える。

飼料米の収穫から調製・加工までの工程は、現状では食用イネと同様の機械作業体系で行なうのを原則としているが、飼料米固有の作業も必要となる。それは、破碎や粉碎、圧ぺんという作業である。これは食用への横流しを防止するために必要とされるとともに、消化性を改善するために必須の作業である。特に完熟した粳米や玄米では、そのままの給与では大半の粳が未消化のまま排出されるという報告がある。これまでのところ、一部地域で養豚及び採卵鶏向けに利用がなされており、そこでは、飼料全体の 5~15% 配合したものが給与されている。現状では飼料コストが高いので配合割合を高めることは困難であるが、今後は生産・加工・流通等のコスト削減により、配合割合が高まることが期待される。なお、飼料米を食べさせることで肉の品質が高まる研究成果もあり、豚への給与では皮下脂肪内層のリノール酸、 α -リノレン酸含量が下がり、オレイン酸含量が高くなる。採卵鶏給与では、給与割合が高くなるとともに卵黄色が薄くなるという変化が見られるが、これは混合飼料として給与する際に混合する別の飼料を適切に選択することによって調整可能とされている。今後、飼料米の家畜への給与方法としては、表 5.1 の通り大きく 3 通りの方法が考えられる。

1. 収穫した高水分の粳を通常の食用米と同様に乾燥及び粳摺りを行なって玄米とし、破碎処理を行なって給与する玄米給与。
2. 乾燥粳を粳摺りを行なわないで破碎処理だけ行い、粳殻も一緒に給与する粳米給与。
3. 収穫直後の高水分の粳をそのまま破碎処理して密封貯蔵し、サイレージ化して給与するソフトグレインサイレージ (Soft Grain Silage, 以下 SGS) 給与。



図 5.1 粳破碎装置による飼料米破碎作業

玄米給与は、現行の食用米の乾燥調製設備をそのまま用いて玄米化した後に破碎する方式のため、食用米の作業体系に大幅な変更の必要がないという利点があること、粳殻の混入がないためトウモロコシ等の濃厚飼料の代替用として利用しやすいこと等の理由により、特に反芻胃を持たない豚や鶏には、現状では主にこの方法が用いられている。ただし、低コスト生産を目指さなければならない飼料用の調製方法としては、食用米と同等の乾燥調製費用がかかることが問題である。粳米給与は、玄米給与で行なわれている粳摺り工程を省いて粳ごと破碎処理したものを利用する方式であり、粳殻が混入しているため現

状では飼料として認知されていない。しかしながら，飼料米はなるべく低コストで生産する必要があるため，本方式は有効な方法と考えられる。中でも反芻動物である牛への給与は可能とされており，今後粳米の牛用配合飼料として問題なく利用できることを実証していくことに加え，畜産分野への認知度を上げ，利用の定着を図っていくことが必要である。SGS 給与は，黄熟期に収穫を行ない，収穫後の高水分の粳を直ちに破碎してサイレージ貯蔵することで，品質劣化を防ぐとともに嗜好性向上を目指すものである。これまでに，搾乳牛や肉用牛への給与実験等において，飼料用トウモロコシの代替用飼料として利用可能であることが示されており，玄米や粳米に比べて低コストで生産できる可能性が高いため，利用が進むものと思われる。

これら 3 通りのいずれの方法でも，トウモロコシ等の代替飼料としての栄養価を期待して給与するには，粳破碎は避けて通れない処理である。現在，豚用飼料として利用されている場面では，飼料工場で圧ぺん装置を通すことで破碎処理が行なわれている。この作業は手間がかかる上に，粳はトウモロコシに比べて糊化しやすく，そのままでは圧ぺん用のローラに付着しやすいため，十分乾燥する必要があるという制約がある。

図 5.1 は，本研究で用いた飼料イネサイレージ用粳破碎装置により，粳米破碎を行なっている様子である。粳は飼料イネサイレージに比べて流動性が高いため，ホッパー内でブリッジの発生がない。そのため，飼料イネサイレージのように一定量ずつ供給する必要がなく粳を一度に投入でき，処理能率が向上する。破碎処理された粳の搬送にベルコトンベアを利用すれば TMR の調製まで自動化も容易である。粳破碎用ローラ部には，ローラに付着した試料等を分離するためのスクレーパが装着されているため，破碎性能の低下を引き起すことなく粳破碎が行なえる。なお，本装置はあくまで飼料イネサイレージや粳に対する基本的な性能を把握するための実験用として設計・試作したものであるため，動力に三相 200V 電源が必要であり，試料の投入から処理された破碎試料の搬送等に対する考慮がなされていない。実際の利用場面では，装置の駆動をエンジンや油圧モータ等で行なえるように改良する必要がある，さらに試料の投入と処理された試料の搬送が容易でなければならない。今後，これらの条件を備え，効率的に破碎飼料米の調製が可能な実用型装置の開発に向けた研究を進める予定である。

要約

飼料イネサイレージ中の籾の未消化子実排泄率を低減させるための調製技術の開発

飼料イネサイレージの乳肉牛への給与においては、籾が消化されにくい籾殻で覆われているため、未消化のまま排出される籾の多いことが問題となっている。

本研究は、飼料イネサイレージを乳肉牛に給与した際に未消化となって排出される子実を減らすことによって飼料の利用効率を向上させる技術開発を目指し、まず飼料イネサイレージの籾が消化可能かどうかについて画像処理によって識別する方法の検討を行なった。飼料イネサイレージの籾が消化可能かどうかについて客観的に識別するため、籾殻が一部でも剥離または籾が破砕されているかどうかの判別を画像処理によって行なうことに取り組んだ。

次に、飼料イネサイレージの乳肉牛への給与において問題となっている未消化のまま排出される籾を低減することのできる装置開発に取り組み、効率的に籾殻を剥離・籾ごと破砕できる機構の設計と装置の開発を行ない、その性能を明らかにした。

さらに、開発した飼料イネサイレージの籾破砕装置を用いて、実際に飼料イネサイレージの籾破砕処理を行い、処理した飼料イネサイレージを去勢牛に給与し、栄養価や未消化子実の排泄率低減効果を確認した。以下のことが明らかとなった。

1. イネ発酵粗飼料の籾が消化可能かどうかについて客観的に識別するため、籾殻剥離か籾破砕した籾と無傷の籾とを識別するための画像処理プログラムを開発した。
2. 色判別プログラムにより、ハレーションの影響による誤判定を回避できるとともに、判定画像中の黒色部ピクセル数として7をしきい値とすることにより、破砕籾と無処理籾とを確度 90% 以上で識別可能であった。
3. 形状解析プログラムは、籾殻の外穎と内穎が開く等して明らかに破砕籾であるにも

かわらず，籾殻の一部が剥離しているわけではないため画像中に乳白色部が存在しない場合の識別に有効となった。色判別と形状解析を合わせることにより，破碎籾と無処理籾との識別確度は 98% となった。

4. 飼料イネサイレージ用の籾殻が剥離・破壊するのに要する力は，引張り力が最小であり，次にせん断力が小さかった。引張り力は装置として実現しにくいため，次に小さい力であるせん断力を効果的に作用させることのできる構造とした。
5. 飼料イネの籾殻剥離と籾破碎を行なう装置を開発した。籾殻を効率的に剥離するには，籾にせん断力を作用させるのが有効であるため，ダブルロールミル方式の籾殻剥離・籾破碎機構を開発した。ローラ表面には籾にせん断力を作用させやすいように V 字型の溝を設け，溝の角度はシミュレーションの結果から 60° とした。
6. 飼料イネサイレージ用籾破碎装置の籾に対する性能は，ローラ周速度 0.2m/s，ローラ間周速度比 10%，ローラ間初期圧縮力 1kN の条件下で最適となり，籾を供試した場合の籾破碎率は 80% に達し，所要動力は 0.3~0.4kW，処理能力は 1.1t/h であった。この処理能力は理論値の 1.7 倍であり，ローラの V 字型溝の処理能力増大効果が有効であった。
7. 籾破碎装置の飼料イネサイレージに対する性能は，籾破碎率は 93%，所要動力は 0.4kW，処理能力は約 0.8t/h であった。この処理能力は籾に対する場合と同様に理論値を上回った。
8. 籾破碎処理イネは，無処理イネに比べて細胞内容物 (Organic Cell Contents, OCC) の消化率が有意に増加した。未消化子実排泄率は，無処理イネで 13.2% であったのに対し，籾破碎処理イネでは 4.5% と有意に低減した。
9. 乾物摂取量当たりの採食時間と反芻時間の和で示す咀嚼時間には，籾破碎処理と無処理の飼料イネサイレージで有意な差が認められなかったため，籾破碎装置による破碎処理が飼料イネサイレージの繊維物理性を損なうことはなかったことが確認できた。

Efficient Preparation Technology to Improve Digestibility of Paddy in Whole-Crop Rice Silage

Serious problems have been encountered on feeding dairy and beef cattle whole-crop rice silage: many grains are excreted because paddy, which is covered with hull, is difficult to digest. The aim of this paper is to develop a technique to reduce grain excretion in cows that are fed whole-crop rice silage. First, an image-processing program was developed to distinguish crushed paddy in rice silage from which the chaff had been exfoliated and whole undamaged paddy to enable the objective assessment of the digestibility of paddy in whole-crop rice silage in cattle. Next, in order to reduce grain excretion, an apparatus for crushing paddy present in whole-crop rice silage was designed and developed to exfoliate chaff or to crush the paddy itself. The performance of this apparatus for paddy and whole-crop rice silage was measured. Furthermore, whole-crop rice silage prepared using the crushing process was fed to Holstein steers, and the nutrient digestibility and nutrient contents were measured.

The following are the salient features of this study.

1. An image-processing program was developed to distinguish crushed paddy in rice silage from which the chaff had been exfoliated and whole undamaged paddy to enable the objective assessment of the digestibility of paddy in whole-crop rice silage in cattle.
2. Samples of partially exfoliated paddy in which the rice surface or albumen was exposed could be adequately distinguished by color analysis. The accuracy of identification by using this technique, which removed the influence of halation, exceeded 90%.
3. Form analysis could be effectively used to identify paddy whose inside had not been exposed and paddy whose shape had been changed by crushing. The combined use of these two techniques provided a total identification accuracy of 98%.
4. The pulling, shearing, and pressing forces during the removal of chaff from paddy were mechanically measured. The magnitude of the pulling force was the lowest, while that of the shearing force was slightly larger. However, since the mechanical

generation of pulling force is difficult, the apparatus was designed to exert shearing force.

5. An apparatus for crushing paddy present in whole-crop rice silage was developed to exfoliate chaff or to crush the paddy itself. This apparatus applies shearing forces to exfoliate chaff or crush paddy between two crushing rollers that have V-shaped ditches on their surfaces and revolve in opposite directions. The angle between the V-shaped ditches was set to 60° on the basis of the results of computer simulations.
6. The performance of the apparatus for the crushing of paddy was measured. The rate of paddy exfoliation/crushing was 80%; the processing efficiency was 1.1 t/h; and the power required could be reduced to 0.3-0.4 kW when the rotating speed ratio between the two rollers was set to 10% and the circumferential speed was set to 0.2m/s. The observed value of processing efficiency, i.e., 1.1 t/h, was 1.7 times the theoretical value, which showed that the V-shaped ditches were effective.
7. This apparatus was used to exfoliate chaff from whole-crop rice silage or to crush paddy that was blended with silage. The crush rate was 93%; the power required was 0.4 kW; and the processing efficiency was 0.8 t/h. The observed value of processing efficiency exceeded the theoretical value, similar to the findings obtained with regard to the crushing of paddy alone.
8. In Holstein steers, the nutrient digestibility and nutrient contents of whole-crop rice silage prepared via the crushing process were better than those of silage prepared without the crushing process; furthermore, grain excretion was reduced by 66%.
9. The chewing activity remained the same, regardless of whether the crushing process was used for silage preparation. This implies that the crushing process was not detrimental to the physical properties of whole-crop rice silage

謝辞

本論文を結ぶにあたり，研究を遂行する上でご指導とご援助を下さった方々に感謝の意を表します．

本研究の遂行並びに取りまとめにあたり，終始懇切なご指導とご教示を賜った京都大学大学院農学研究科，梅田幹雄教授に深甚の謝意を表します。また，本論文の作成にあたり，有益なご助言とご指導を賜りました京都大学大学院農学研究科，近藤直教授，廣岡博之教授，中嶋洋准教授に深く感謝いたします。さらに，本研究の進め方，穀物破碎用機械の分類等について有益なご助言とご指導を賜った京都大学山下律也名誉教授，株式会社サタケ佐々木泰弘博士に深く感謝いたします。

本研究は，筆者が畜産草地研究所家畜生産管理部，及び関東飼料イネ家畜飼養研究サブチームにおいてこれまで実施してきたもので，遂行当時家畜生産管理部長でおられた小川増弘博士（現日本農業研究所），上席研究官でおられた吉田宣夫博士（現山形大学教授）には，研究の方向や考え方について有益なご指導とご鞭撻を賜りました。また，畜産草地研究所，加茂幹男草地研究監には本論文の取りまとめにあたり，ご助言とご指導を賜りました。さらに，同研究所関東飼料イネ家畜飼養研究サブチーム長，中西直人博士には研究全般に関してさまざまなご指導をいただき，市戸万丈研究管理監には，調製工学研究の進め方について多くのご助言をいただきました。記して深く感謝する次第です。

本研究の主要な成果の一つである籾の画像処理に関してご協力いただいた，新潟大学自然科学系，元永佳孝准教授に厚く御礼申し上げます。また，家畜を用いた給与実験とその成果に関してご協力いただいた，当研究所関東飼料イネ家畜飼養研究サブチーム松山裕城博士，ならびに，同実験にご協力いただいた，遂行当時乳牛飼養研究室に在籍された塩谷繁博士，細田謙次博士，額爾敦巴雅爾博士に深く感謝いたします。

また，本研究の実施にあたり，遂行当時同じ研究室に在籍された喜田環樹主任研究員，

松尾守展研究員，小林礼子女史には，実験上のご協力とご助言をいただきましたことに対し，深く感謝いたします。さらに，株式会社宇佐美の宇佐美勉氏には，研究の過程で共同研究者としてご協力いただきました。ここに記して関係各位に感謝する次第です。

引用文献

- Abe, R., Tanabe, S., Ishii, T., Miyata, Y., 1988. Feed value of whole crop and soft grain rice silage (in Japanese). NARC Research Bulletin, 5, 19-26.
- Abe, R., 2001. Analysis of Experiments for Nutrients. Design of Experiments for Animal Nutrients, New Edition(First Edition)(in Japanese). Yokendo Co., Ltd, Tokyo, 455-496.
- Asai, N., 2005. Hummer mill. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 128.
- Asai, N., 2005. Rolling type ball mill II. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 154.
- Hayashimoto, K., 2005. Dream mill. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 182.
- Ikeda, Y., 2005. Cutter mill. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 122.
- Ishida, M., 2001. Experiments for Digestibility. Design of Experiments for Animal Nutrients, New Edition(First Edition)(in Japanese). Yokendo Co., Ltd, Tokyo, 190-197.
- Ito, H., 2005. Jet mill I. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 164.
- Ito, M., Tano, R., 1977. Determination of the Heat of Combustion in Fresh Feces and Urine with Polyethylene Film. NIAI Research Report, 32, 39-43.
- Kanaya, T., Kasuya, K., Kuniyoshi, M., Arayama, E., Ookawachi, Y., Maruyama, T., 2001. The influence to digestibility by crushing of soft grain rice silage (in Japanese). Proceeding of the 2004 annual conference of the Japanese Society of Grassland Science,

47, 236-237.

- Matsuyama, H., Shioya, S., Ishida, M., Nishida, T., Hosoda, K., Bayaru, E., Ando, S., Islam, M.R., Yoshida, N., 2005. Feed characteristics of rice plant (*Oryza sativa* L. cv., Hamasari, Yumetoiro, Hokuriku-184) as whole crop silage. *Japanese Journal of Grassland Science*, 51, 289-295.
- Mill-system Co., Ltd., 2008. Products Catalog(in Japanese).
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2007. Statistical Report on Agriculture, Forestry and Fisheries.
- Momose, Y., Hara, T., Watanabe, H., Tsuchiya, M., Nakazawa, N., Saito, M., Yuyama, E., 2004. Labor-saving technology for production, preparation and utilization of whole crop rice silage(in Japanese), Research information in Naganao Agricultural Experiment Station.
- Motonaga, Y., Kondou, H., Kameoka, T., Hashimoto, A., 1998. Determination of the standard shape and color of agricultural products. *Proceedings 4th International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, 29-34.
- Motonaga, Y., Kondou, H., Hashimoto, A., Kameoka, T., 1999. Construction of shape and color analyzer for fruits available on internet. *Agricultural Information Research*, 8(2), 69-80.
- Nakui, T., Masaki, S., Aihara, T., Yahara, N., Takai, S., 1986. The nutritive value of unhulled rice stored as high moisture grain feed. *Tohoku Agricultural Research*, 39, 177-178.
- Nakui, T., Masaki, S., Aihara, T., Yahara, N., Takai, S., 1988. The making of rice whole crop silage and an evaluation of its value as forage for ruminants. *Bulletin of Tohoku National Agricultural Experiment Station*, 78, 161-174.
- Nilgs: National Institute of Livestock and Grassland Science, 2006. Research review of whole crop rice silage in Japan(in Japanese). Feed value for ruminants, 38-39.
- Shigeta, K., Motonaga, Y., Kida, T., Matsuo, M., 2007. Efficient preparation technology to improve digestibility of forage rice (Part 1). *Journal of JSAM*, 69(2), 87-92.

- Shigeta, K., 2007. Preparation technology to improve digestibility of forage rice (in Japanese). Kenkyuseika451 “Integrated Research for Providing Fresh and Delicious “Brand Nippon” Agricultural-products III Livestock”, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council, 35-39.
- Shigeta, K., Kida, T., Matsuo, M., 2008. Efficient preparation technology to improve digestibility of forage rice (Part 2). Journal of JSAM, 70(2), 136-142.
- Sunaga, K., 2005. Roll crusher. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 117.
- Toda, Y., 2005. Mechanical cyclone mill II. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 179.
- Ueda, M., 2005. Vibration mill. The high-tech grinding technology and its application(in Japanese). NGT Co., Tokyo, 146.
- Yamamoto, Y., Mizutani, M., Deguchi, Y., Urakawa, S., Yamada, Y., Goto, M., 2000. Improvement of fermentation quality of rice hull crop silage by grass juice fermentation liquid and in situ digestibility by physical crushing (in Japanese). Proceeding of the 2000 annual conference of the Japanese Society of Grassland Science, 46, 292-293.
- Yamamoto, Y., Inui, K., Urakawa, S., Hiraoka, K., Nakanishi, H., Tomita, T., Tanaka, K., Nishikawa, S., Maezawa, S., Goto, M., 2002. Influence to a feed characteristic of rice whole crop silage by feeding of roughage together (in Japanese). Proceeding of the 2002 annual conference of the Japanese Society of Grassland Science, 48, 194-195.
- Yoshida, M., 1992. Latin Square Design. Design of Experiments for Animal Husbandry(6th Edition). Yokendo Co., Ltd, Tokyo, 101-116.
- Yoshida, N., 2002. Alkali treatment of straws and utilization. Grassland Science, 48(4), 392-397.