HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 乳牛ふん尿の液肥利用を目的とした固液分離併用型好気性発酵 |
| Author(s) | 山下, 善道 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(農学) |
| Dissertation Number | 甲第11831号 |
| Issue Date | 2015-03-25 |
| DOI | https://doi.org/10.14943/doctoral.k11831 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/58874 |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | Yoshimichi_Yamashita.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# 乳牛ふん尿の液肥利用を目的とした固液分離併用型好気性発酵

2014 年度

北海道大学　大学院農学院
環境資源学専攻　博士後期課程

山　下　善　道

# 目次

**第 1 章　緒論** ..... 1

1.1　家畜排せつ物管理の現状 ..... 1

1.1.1　家畜排せつ物の発生量及び管理状態 ..... 2

1.1.2　牛ふん尿の性状とその処理方法 ..... 2

1.1.3　液肥化処理の課題 ..... 4

1.1.4　固液分離を利用した乳牛ふんの全量利用 ..... 5

1.2　固液分離 ..... 6

1.2.1　固液分離機の種類とその特徴 ..... 6

1.2.2　固液分離機の課題 ..... 6

1.3　堆肥化処理 ..... 7

1.3.1　堆肥化とは ..... 7

1.3.2　堆肥化の条件および課題 ..... 9

1.4　家畜排せつ物由来の液肥化処理 ..... 9

1.4.1　液肥化の方法およびその特徴と課題 ..... 9

1.4.2　液肥の利用先とその課題 ..... 10

1.5　研究目的と本論文の構成 ..... 11

**第 2 章　スクリュープレスを用いた乳牛ふん尿の固液分離** ..... 12

2.1　はじめに ..... 12

2.2　実験方法 ..... 12

2.2.1　材料および方法 ..... 12

2.2.2　測定項目 ..... 16

2.2.3　分離効率 ..... 17
2.3　結果と考察 ..... 18
2.3.1　乾物と水分 ..... 20
2.3.2　質量収支 ..... 23
2.3.3　分離効率 ..... 27
2.3.4　かさ密度と有機物組成の変化 ..... 28
2.4　まとめ ..... 34

**第 3 章　固液分離後固形分の堆肥化** ..... 36
3.1　はじめに ..... 36
3.2　材料および方法 ..... 36
3.3　結果及び考察 ..... 39
3.3.1　堆肥原料 ..... 39
3.3.2　堆肥化過程 ..... 40
3.3.3　堆肥化一次発酵後の性状 ..... 54
3.4　まとめ ..... 55

**第 4 章　固液分離後液分の液肥化** ..... 56
第 1 節　発酵槽の酸素供給能力の検討 ..... 56
4.1.1　はじめに ..... 56
4.1.2　実験装置および方法 ..... 57
4.1.3　結果及び考察 ..... 63
4.1.4　まとめ ..... 65
第 2 節　発酵槽における最適通気量の検討 ..... 66
4.2.1　はじめに ..... 66

4.2.2　実験方法 ..... 66
4.2.3　結果及び考察 ..... 70
第 3 節　有機液肥の作成 ..... 75
4.3.1　実験条件 ..... 75
4.3.2　結果及び考察 ..... 77
4.4　まとめ ..... 80

**第 5 章　有機液肥の評価とキュウリの灌水同時栽培への適用** ..... 81
第 1 節　有機液肥の物理的性質評価 ..... 81
5.1.1　はじめに ..... 81
5.1.2　実験方法 ..... 82
5.1.3　結果及び考察 ..... 85
5.1.4　まとめ ..... 87
第 2 節　有機液肥のキュウリ栽培への適用 ..... 88
5.2.1　はじめに ..... 88
5.2.2　実験方法 ..... 88
5.2.3　結果及び考察 ..... 91
5.2.4　まとめ ..... 94
5.3　まとめ ..... 95

**第 6 章　総括** ..... 96

**参考文献**

**謝辞**

# 第1章　　緒論

## 1.1　家畜排せつ物管理の現状

### 1.1.1　家畜排せつ物の発生量および管理状態

日本全体では年間約 8295 万トンもの家畜ふん尿が発生している(農林水産省, 2014)。そのうち乳牛ふん尿の発生量は約 2400 万トンであり，北海道では約 1340 万トン発生している。従来, 家畜ふん尿は堆肥化や液肥化などといった処理を施されることで，再び飼料作物や農産物の生産に有効利用されてきたと言われている。しかしながら，実際には家畜排せつ物を単に積み上げて放置する野積みや，地面に掘った穴に貯留する素掘りなどの不適切な管理が行われていた。このため，家畜排せつ物の河川への流出や地下浸透を通して引き起こされる地下水汚染や水質汚濁などが問題となった。加えて，酪農家の規模拡大と酪農家と一般住宅の混在化に伴い，周辺地域からの悪臭による苦情も増えてきていた。このような家畜排せつ物による環境問題を防ぎ，適正に管理し，有効利用促進を目的として 1999 年「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が施行された。

この法律により，一定規模以上の畜産農家に対して，家畜排せつ物を管理する施設は，不浸透性材料の床材を使用した施設とすることが義務付けられた。これにより，ほとんどの酪農家に堆肥舎が作られた。しかし，堆肥舎は作られたものの，半数は堆肥化の際に切り返しを行わず，堆肥舎が満杯になると，家畜排せつ物を農地に散布するまでの間に一時的に野積みする例も見られることが，谷川ら（2007）の報告からも明らかになっている。また，実際に堆肥化を行っている酪農家における課題は,「切り返しに手間がかかること」,「水分調整

用副資材が高価」であることがあげられる。しかしながら，近年の化学肥料の高騰などから家畜排せつ物由来の有機質肥料の価値が相対的に上昇しており，利用法に合わせた家畜排せつ物の肥料化が必要である。

### 1.1.2　牛ふん尿の性状とその処理方法

前項で述べた通り，依然として家畜排せつ物の有効利用は進んでおらず，堆肥化の課題は解決されていない。特に乳牛ふん尿は含水率が高く，水分調整用副資材を投入し多大な労力と時間がかかる。また，飼養方式や敷料の使用量などによってふん尿の性状も大きく変わる。このため代表的な乳牛ふん尿の性状とその目安となる水分および処理方法を表 1.1 に示す。

表 1.1　牛ふん尿の性状と水分，処理方法（農林水産省，2000）

| 性状 | | 水分 | 処理方法 |
|---|---|---|---|
| 固形状 | ソリッド | 84%未満 | 堆肥化処理<br>乾燥処理 |
| 半固形状 | セミソリッド | 84～87% | 堆肥化処理<br>乾燥処理<br>分離処理 |
| 液状 | スラリー | 87%以上 | 乾燥処理<br>分離処理<br>スラリー処理 |

近年，酪農経営の大規模化に伴い，つなぎ飼い方式に比べ敷き料使用量が少ないフリーストール牛舎が導入されている。このため，高水分なスラリー状，セミソリッド状のふん尿が排出され堆肥化が進まない問題がある（山田洋文，2010）。これらの高水分なふん尿は流動性が高く，0.5～1 m ほどの高さまでしか堆積できず，堆肥化も進まないため堆肥舎を有効利用できない。このため乳牛ふんの処理方法として液肥化が用いられている。ふん尿の処理方法には，す

のこや固液分離機を用いてふんと尿に分けてそれぞれ処理を行う「ふん尿分離」処理，ふんと尿を混合した状態で処理を行う「ふん尿混合」処理があるが，「ふん尿分離」処理の割合が北海道では 47.5%であり，全国でも 45.5%と非常に高い。表 1.2 に全国および北海道におけるふん尿分離状況およびその処理方法を示す。ふん尿分離後の尿はそのほとんどが「貯留」であり，ふん尿混合の強制発酵には従来の肥培かんがい施設によるスラリー処理が入るため，液肥化は広く用いられているもののそのほとんどが牧草地などには還元されているが，貯留時に嫌気状態になっているため散布時に悪臭の問題があること，および有機物分解が十分でないことの問題があるため，農園芸分野には用いられていない。

表 1.2 北海道および全国におけるふん尿の処理方法の頻度

| ふん尿の状態 | | 処理方法 | 北海道 | 全国 |
|---|---|---|---|---|
| ふん尿分離 | ふん | 強制発酵 | 0.1% | 6.6% |
| | | 堆積発酵等 | 99.9% | 90.1% |
| | | 天日乾燥 | 0.0% | 2.0% |
| | | その他 | 0.0% | 1.3% |
| | 尿 | 強制発酵 | 0.2% | 1.7% |
| | | 貯留 | 99.8% | 89.6% |
| | | メタン発酵 | 0.0% | 1.9% |
| ふん尿混合 | | 天日乾燥 | 0.1% | 11.0% |
| | | 火力乾燥 | − | 0.0% |
| | | 強制発酵 | 21.1% | 22.9% |
| | | 堆積発酵 | 47.2% | 50.9% |
| | | 浄化 | 0.0% | 2.0% |
| | | 貯留 | 17.4% | 15.4% |
| | | 焼却 | − | 1.0% |
| | | メタン発酵 | 2.7% | 17.0% |
| | | 公共下水道 | − | 1.0% |
| | | 放牧 | 11.6% | 5.5% |
| | | その他 | 0.0% | 1.2% |

※農林水産省，2011年．家畜排せつ物処理状況調査結果より作成

### 1.1.3　液肥化処理の課題

乳牛ふん尿を液状肥料として畜産分野のみならず，農園芸分野で利用するためには施肥方法と物理的性質の２つの問題がある。家畜ふん尿由来の液状肥料は化学肥料と比べ肥料成分が少なく、作物の生育に必要な量を一度に施肥した場合水分過多となる可能性が高い。このため，基肥としてではなく，必要に応じた施肥が行える方法が望ましく，方法の一つとして灌水と施肥を灌水チューブにより同時に行う灌水同時施肥があげられる。しかし，また，家畜ふん尿由来の液状肥料は夾雑物を多く含み、粘性が高いため，管路配送時に配管にかかる内圧が非常に大きくなり配管径が大きいものを選定する必要があることが報告されている（寺山ら，2006)。このため、そのまま施用するとハウスなどで使用する比較的小さい径のパイプで送ることは難しく，ましてや灌水チューブのような細いチューブでは詰りが起こるため利用できない。未処理のままの状態で搬送する，真空式管路システムを用いた輸送なども検討されている（(独）寒地土木研究所ら，2011）ものの，これは特別な装置を必要とし，根本的な解決に至っていない。

以上のことから，搬送及び施肥方法を従来のパイプラインによる輸送を可能とし，灌水と施肥を灌水チューブにより同時に行う灌水同時施肥を可能にする液肥化手法の開発が必要である。これにはふん尿中の夾雑物の除去および微生物分解が必要となる。

従来の液肥化を目的としたスラリー処理では，敷き料を取り除く必要があったが,機械的に除去されておらず多くの夾雑物が含まれていた。しかしながら，機械的に固液分離することで多くの夾雑物が取り除かれた搾汁液を得ることが出来る。また，これまでスラリーを散布する際は直前に数日間曝気することで臭気を抑えてきたが，密閉した発酵槽で従来よりも曝気量を増やした好気性発

酵を行うことで，速やかに臭気を落とし粘性が低くハンドリングしやすい製品に変える処理をすることができれば，後の貯留による分解も促進され，畜産分野のみならず，農園芸分野においても使用できる液肥を製造することが可能であると考えられる。

### 1.1.4　固液分離を利用した乳牛ふんの全量利用

以上のように，化学肥料・水分調整用副資材の高騰により有機質肥料の価値が相対的に上昇しているが，依然として乳牛ふん尿の肥料化は進んでいない。液肥化処理の課題で述べたように，乳牛ふん尿由来の液肥を高度利用するためには機械的な固液分離操作が必要となる。この固液分離操作は従来，固液分離後の固形分の利用のために使用されてきた。このため，液肥化のみならず固液分離後の固形分の堆肥化にも必要な技術となる。

乳牛ふん尿は高水分であるためそのままでは堆肥化が難しく，多量の水分調整剤用副資材を必要とするが，固液分離をすることで水分調整用副資材を必要とせず堆肥化を行うことができる。堆肥は緩効性の肥料であり土壌改良材としての働きを持つため，搾汁液のような無機態窒素が多い即効性肥料とは異なった性質を持つ。このように固液分離操作をし，緩効性肥料である堆肥を安定的に生産し，灌水同時施肥のような施設園芸に利用できる液肥にすることを可能にすれば，これらを有用な地域資源として活用し，酪農家での自家消費のみならず，酪農家が耕種農家に販売することによる収入増及び有機栽培による野菜のブランド化などにも貢献できると考える。

## 1.2　固液分離

### 1.2.1　固液分離機の種類とその特徴

前節で述べたように固液分離操作は重要な操作である。固液分離機は，主に水処理の分野で活用されており，家畜排せつ物管理においては，スラリー処理での固形物除去を目的に用いられていることが多い。固液分離の方法は，大別すると自然分離法と機械的分離法に分けられる。前者はすのこを利用したすのこ分離が主であり，後者は，畜舎から搬出されたふん尿を，重力，圧力，真空，遠心力などを利用して固液分離を行う。固液分離の方法はそれぞれの畜産農家のふん尿処理方式によって異なり，スラリーや余剰汚泥などの固液分離にはスクリュープレス，プレスセパレータ，ベルトスクリーン，遠心脱水機などが使われている。その操作とその後の搾汁液の性状について検討されてきた(Møller, H.B ら, 2000)。

家畜排せつ物は 365 日毎日発生するものであり，一日に何トンもの固液分離処理が必要となることが想定される。また，混入する敷料の種類も多くある。そして混入する敷料を始めとした粗大な夾雑物を取り除くことが必要である。

### 1.2.2　固液分離機の課題

敷料を含まないスラリー状のふん尿を対象とした固液分離機は，ポンプを用いて定量供給が可能であるため，多く存在している。しかし，多様な敷料が混合されたセミソリッド状のふん尿を対象とした固液分離機の開発は遅れている。セミソリッドふん尿を対象とした固液分離機導入に関する経営的評価を行った論文によると，初期投資額はスラリー用固液分離機の導入に比べると低コスト

となり，利用費用についても堆肥化する場合と比べると低コストと試算されたが，利用費用は経営費の約 1 割に相当する上に，導入によって農業所得が減少することが明らかになった。よって，導入の検討にあたっては，費用負担について技術的な効果と堆肥販売や肥料費削減による経営的な効果を考慮して，総合的に評価する必要がある（山田洋文，2010）と評価されている。また北海道立畜産試験場環境草地部畜産環境科技術体系化チーム，北海道立根釧農業試験場研究部酪農施設科，北海道立十勝農業試験場生産研究部栽培環境科技術体系化チームによるセミソリッド用固液分離装置と分離液の肥効特性（2007）に関する研究が行われており，固液分離装置についてと搾汁液についての特性については報告されている。さらに固液分離には原料含水率と分離後固形分の含水率に相関があることが報告されている。即ち，固液分離操作により分離後固形分の含水率は落ちるものの，固形分と搾汁液の流量比を自由に設定できないことを表す。しかしながら，固液分離操作を行うことは堆肥化と液肥化を両方行うことであるため，その流量比を変えることや，後の液肥化を円滑に進めるために搾汁液には夾雑物が少ないことが望ましいものの，報告はない。

そこで，本研究の第 2 章では固液分離時の圧力を変えることで分離後固形分の含水率を変化させた場合の物質収支，およびその分離後固形分の後の堆肥材料としての特性，またその一次発酵時の詳しい発酵過程を調べた報告をする。

## 1.3　堆肥化処理

### 1.3.1　堆肥化とは

堆肥化とは堆肥材料中に含まれる有機物が，酸素のある条件下で，バチルス属を始めとした好気性微生物の代謝によって分解，低分子化される好気性発

酵のことである。この過程で分解時に微生物による反応熱が発生する。この反応熱により 70℃から 80℃程度まで昇温し，雑草種子や病原菌を不活化させることができる。堆肥化処理の目的は，家畜排せつ物を作物生産に寄与する物質に変化させることである。

家畜排せつ物を始めとした有機性廃棄物を農地施用する場合には以下の問題点があるが，堆肥化によって改善が可能である（中村ら，2005）。

① 汚物感がある。

堆肥化による発酵熱で水分が蒸発することにより軽減される。

② 腐敗しやすい。貯蔵性が悪い。

易分解性の有機物が堆肥化過程で分解され，性状が安定する。

③ 含水率が高く，輸送効率が悪い。

堆肥化による発酵熱で水分が蒸発し，質量が減少する。

④ 土壌施用直後に急激に分解することにより,作物の生育障害を起こす危険性がある。

易分解性の有機物が堆肥化過程で分解されるので，急激な分解は起きないため，生育障害を起こす危険性が低くなる。

⑤ 病原菌・雑草種子の混入の危険性がある。

堆肥化過程で発生する熱により,病原菌は死滅し,雑草種子は不活性化する。

⑥ 悪臭がある。

堆肥化過程で一部揮散，一部分解されるため製品堆肥ではその含有量が減少する。また嫌気性の分解に比べアンモニアをのぞく悪臭物質の発生が抑制される。

### 1.3.2　堆肥化の条件および課題

堆肥化は好気性微生物の代謝による酸化分解反応である。このため，好気性微生物の活動が活発になるように環境条件を整えることが重要である。環境条件要因には，①栄養源，②水分，③酸素の供給，④微生物，⑤温度，⑥堆肥化期間がある。しかしながら，通常，堆積方式の堆肥化過程において操作できる条件は，主に水分と酸素の供給である。堆肥原料の含水率は一般的に 60～65%と言われているが，牛ふん尿の含水率は前述のとおり 80～90%と高い。また，酸素の供給は主に切り返しにより行われるが，堆肥材料自体の通気性が確保されている必要がある。

## 1.4　家畜排せつ物由来の液肥化処理

### 1.4.1　液肥化の方法およびその特徴と課題

液肥化はスラリー処理と言われ，フリーストール牛舎からローダー等で直接スラリーストアやラグーンに貯留されるもの，牛舎床下の地下貯留槽に貯留されるもの，固液分離機により機械的に固液分離された搾汁液が対象となる。これらのスラリーのうち，敷料を含めた粗大な固形分である夾雑物が取り除かれるものは機械的に固液分離された搾汁液だけである。このため，曝気処理による好気性発酵が行われ，液肥化されたスラリーであっても蒸発残留物が 6.1%と高い値を示すことが報告されている（糟谷，1998）。

スラリー処理は曝気をすることでスラリー中の有機物を好気性菌によって代謝することで分解・低分子化を行うことである。しかし，スラリーは粘性が高く，通気が困難であるため，加水を行いスラリーの粘性を低くした状態で液肥

化を行う肥培かんがい施設などもあることが嶋ら（1996）により報告されているが，ふん尿の量が増えるため発酵槽や貯留槽の増大などの問題があり望ましくない。また，未分解のスラリーを曝気すると著しく発泡が起き，スラリーが泡になり体積が増加するため発酵槽外へ流れ出てしまうため，消泡操作が必ず必要となる。このため，十分な消泡能力を持った発酵槽でなければ短期間に処理を行うことが難しい。そのため，使用直前にのみ曝気処理を行われることもあるが，未処理のまま貯留することで表面にスカムが 50cm 以上できるといった報告もある（糟谷，1998)。

以上のような課題を解決するため，加水を行わずに従来以上の曝気処理を行う必要がある。加えて，曝気処理を行う際の発泡を抑制する必要がある。

### 1.4.2　液肥の利用先とその課題

灌水同時施肥とは水に肥料成分を混合し灌水と同時に施肥を行う方法である(佐藤ら，2005)。この方法は灌水チューブから作物周辺に灌水同時施肥を行うため，固形肥料を土壌に混合する慣行の施肥方法に対して，肥料成分・水の節約，施肥・灌水労力の削減，といった利点をもっている。本研究で用いた灌水チューブは水圧や水量に関わらず一定の水量で水を放出するための機構として，チューブの灌水孔に水量調節装置が内蔵されている。そのため，夾雑物を多く含んだり，粘性が高い液体を施用すると，灌水チューブが詰まるため，事前に夾雑物の除去を必要とする。メタン発酵消化液や家畜ふん尿など多くの有機性液肥は，肥効はすでに確認されているものの多量の固形物を含み，灌水チューブを用いて施肥することは困難とされてきた(芳野ら，2012)。

また，灌水同時施肥は施用頻度，施用量並びに施用時間を自由に設定可能であるという特徴を持つ。一般に生物系廃棄物由来の肥料は窒素濃度が低い。この

ため搾汁液の必要量を一度に施用した場合に水分過多となる可能性があるが，固液分離をして微生物分解した乳牛ふん尿由来の液体肥料を灌水同時施肥に用いることが出来れば，1 日あたりの施用量が多くないことから，短所である含有窒素が低いという問題点も同時に解決できる。

## 1.5　研究目的と本論文の構成

近年の化学肥料の高騰に伴い，ふん尿由来の有機質肥料の利用が必要である。しかし，乳牛ふん尿は含水率が高く，堆肥化には大量の水分調整剤を必要とし，液肥化した場合は夾雑物が多く粘度も高いことから畜産分野以外での利用は難しかった。そこで本研究では，これらの問題を解決するために，農園芸での利用，特に直径 0.5 mm の点滴孔を通り，灌水同時施肥に使用できる液肥を作成することを目的に，乳牛ふん尿を機械的に固液分離し，固形分は堆肥化を行い，搾汁液は好気性発酵による液肥化を行う新しいシステムを構築した。

本研究の目的は，乳牛ふん尿を固液分離し，固形分および搾汁液の物質収支およびその物理特性を明らかにし，その後の堆肥化および液肥化プロセスを明らかにし，作成した液肥の灌水同時施肥栽培での利用可能性を明らかにすることである。

# 第２章 スクリュープレスを用いた乳牛ふん尿の固液分離

## 2.1　はじめに

第１章で述べたように，近年，酪農経営の大規模化に伴い，つなぎ飼い方式に比べ敷料使用量が少ないフリーストール牛舎が導入されている。このため，高水分なスラリー状，セミソリッド状のふん尿が排出され，切り替えし作業に投入する労働力が不足し，水分調整剤を投入する費用もかさむため堆肥化が困難であるという問題がある（山田，2010)。高水分な乳牛ふん尿の処理方法として，水分調整剤を必要としない固液分離があり，固液分離装置と分離液についての特性は報告されている。しかし，圧力操作をした際の固液分離特性と固液分離後固形分ならびに搾汁液の性状については検討されていない。また，固液分離を用いた堆肥化・液肥化システムを導入する上で固液分離前後の質量収支および，分離後材料の物性を明らかにすることは極めて重要である。そこで本章では固液分離前後の物質収支に加え，固液分離時の圧力操作による乳牛ふん尿の物性の変化を調べることを目的とした。

## 2.2　実験方法

### 2.2.1　材料及び方法

供試材料として，北海道大学生物生産研究農場の敷料がほとんど含まれない乾乳牛の乳牛ふんを用いた。本農場ではつなぎ飼い方式のため，乳牛ふんには食べ残しと敷料としてのおがこが混入している。バイオガスプラントを設置している本農場では，乳牛ふんをポンプで輸送する際，わらなどの副資材が多く混入していると輸送することが困難となるため敷料におがこが用いられ，その量も多くはない。しかしながら，敷料は一般的にその地域において容易に入手

できるものが用いられ，わらやかんなくずなどが用いられ，その量は多い。ゆえに，固液分離を用いた堆肥化・液肥化システムを検討するためには，実際の敷料の量を検討する必要があった。以上のことから，4 章で用いた固液分離機を用いた液肥化システムを導入している北海道室蘭市の牧場にて，1 日に投入する敷料ならびに，発生する固液分離後の固形分，搾汁液および食べ残しの量を調査した。調査を基に，敷料，食べ残し分を想定した投入乳牛ふん尿に対する湿潤質量割合で 1.6%の乾草を乳牛ふんへ投入した。

供試機械は可動部が少なく堅牢なつくりであり，敷料の種類も問わず利用することが出来るバンチングメタルのメッシュを用いたスクリュープレス方式の固液分離機（(株)葵興産，SD-300A）を用いた。固液分離機概観を図 2.1，および仕様を表 2.1 に示す。本固液分離機は投入口から出口へかけてシャフトにテーパーがつき，スクリューのピッチも小さくなる。また，回転速度が調整可能であり，本章では本装置標準の回転速度である 3.6 rpm とした。図 2.2 に本装置の固液分離イメージを示す。本機の特徴として，固形分排出部ステンレス鋼性の円板（圧力版）（図 2.3）を持つ。この圧力版の面積は 0.110 $m^2$ であり，バネ定数 43.9 $N \cdot mm^{-1}$ の圧縮コイルバネ 2 本により排出部に向けて抑える力が加わるように設置されている。バネが自由長の時，ちょうど円盤が排出部の出口と距離が 0 になっており，最大 100 mm 押し込むことができる。そこで，このバネを 0 ～ 60 mm の間で押し込むことで静止時の固液分離機の排出部に加わる圧力（背圧）を調整した。排出時の様子を観察したところ，オーガの外径である直径 300 mm 以上では既に排出される固形分が破断し膨軟化していたため，圧力板全体ではなく接触している部分のみが排出される固形分に圧力をかけていると考え，その面積は 0.0350 $m^2$ であった。この面積とバネ定数を用いて背圧を計算し，背圧 0，25，50，75，100，125，150 kPa の計 7 条件を設定した。

実験手順は以下のように行った。固液分離機にはその特性上，内部に前回の実験時の残留乳牛ふんがある。これを取り除き，総投入量と総排出量の誤差を少なくし，かつ設定した背圧条件で定常的に固液分離を行うために，約 200 kg の乳牛ふんをベルトコンベアを用いてホッパーより投入し，事前に固液分離操作をした。その後，本試験として約 300 kg の乳牛ふんと乾草の混合物を固液分離した。本試験の際，投入前の乳牛ふんと乾草，および排出される固形分，搾汁液は質量を測定し，サンプリングを行い。これに加え固形分はかさ密度の測定を行った。なお．固形分およびかさ密度の測定は固液分離試験開始から終了まで 3 回行った。この測定は 2011 年 7 月 15 日から 8 月 1 日まで計 8 回，10 月 17 日から 11 月 17 日まで計 6 回の合計 14 回行った。

図 2.1 スクリュープレス型固液分離機 SD-300 の概観

表 2.1 固液分離機仕様

| | | |
|---|---|---|
| 型式 | | SD-300 |
| 固液分離方式 | | スクリュープレス |
| スクリーン | | パンチングメタル |
| オーガ長 | (mm) | 1860 |
| 軸径/外径 | (mm) | 160～210/300 |
| 平均ピッチ | (mm) | 232.5 |
| 処理能力 | (t/h) | 0.7-2.5 |
| 所要動力 | (kW) | 3.7 |
| 回転速度 | (rpm) | 1.6-5.6 |
| メッシュ径 | (mm) | 4.5 |

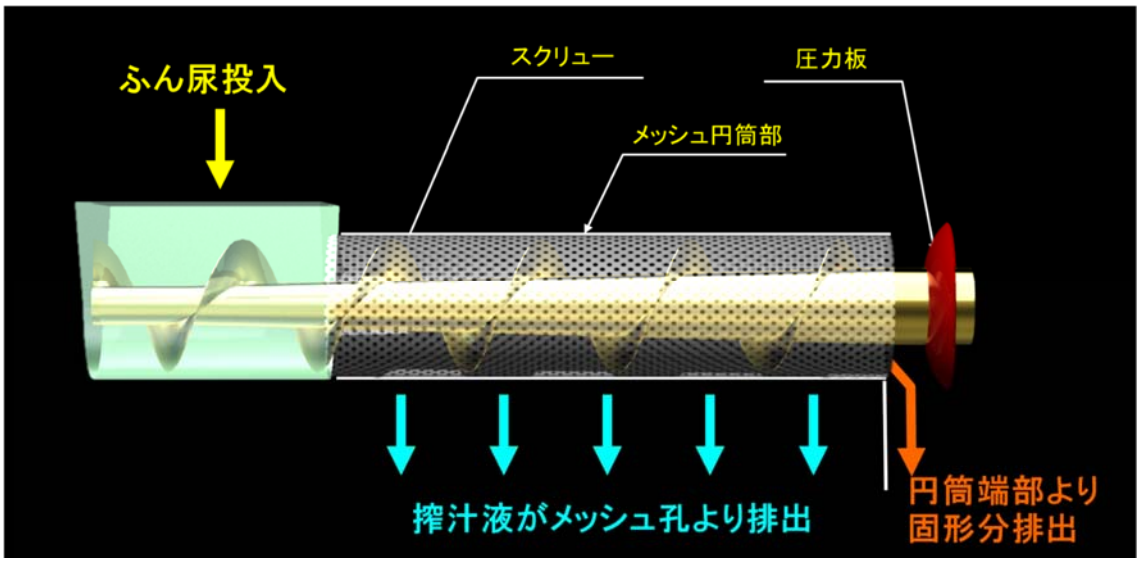



図 2.2 固液分離イメージ

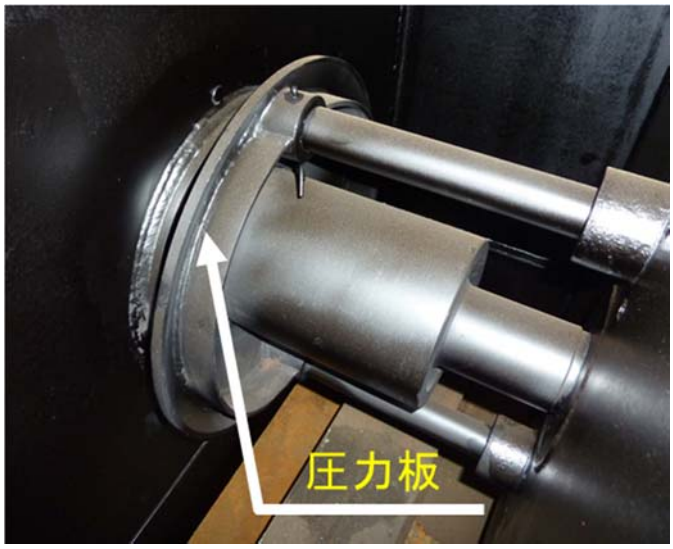



図 2.3 固形分排出部および圧力板外観

### 2.2.2　測定項目

1）試料湿潤質量

台車秤を用いた。

2）含水率

乾熱法(105℃，24 時間)により測定した。

3）有機物含有率

粉砕・絶乾した試料の強熱減量率(600℃，2 時間)を有機物含有率 VS とした。含水率および有機物含有率を基に有機物量 VM，粗灰分 ASH を計算した。

4）かさ密度（$kg \cdot cm^{3}$）

ペール缶に材料をすりきり一杯いれ，質量を測定し，ペール缶の容積で除しかさ密度とし，$kg \cdot m^{-3}$ と表した。

5）酸性デタージェント可溶有機物(ADOM)，酸性デタージェント繊維(ADF)

堆肥等有機物分析法(2010 年版)の酸性デタージェント繊維および酸性デタージェント溶液可溶有機物の分析方法に準拠し，$mg \cdot gDM^{-1}$ で表した。また，本研究では難分解性有機物の指標である酸性デタージェントリグニン（ADL）を含む酸性デタージェント繊維（ADF）を難分解性有機物。酸性デタージェント可溶有機物（ADOM）を易分解性有機物として取り扱う。

6）元素分析

マイクロコーダーJM10 を用いて，炭素・水素・窒素の 3 元素の割合を測定した。

### 2.2.3　分離効率

固液分離の評価の一つとして分離効率がある。これは固液分離前後の材料の水分と質量から固液分離方法の異なる固液分離機の性能を客観的に評価する指標として用いられており，Robert ら（2003）や Morten ら（2013）などにより提案されているが，これらは乳牛ふん尿中の N や P などをどれだけ回収できるかを検討するためのものであり，主にふん尿中乾物の分離後固形分への移動のみを着目したものである。しかしながら本研究では乳牛ふん尿を固液分離し，固形分を堆肥化し，搾汁液は曝気による好気性発酵を施した液肥として用いることを目的としているため，固形分の含水率の低下，即ち原料から搾汁液への水分の移動が求められる。また，搾汁液の液肥化時には搾汁液中の固形分である夾雑物が少ない方が望ましい。したがってこれらを検討するために，式(1)，(2)は Robert ら(2003)で提案された分離効率に加え，新たに水分の移動割合を示す式(3)，搾汁液中への乾物移動割合を示す式(4)を加えた以下の分離効率を用いた。

① 乾物率における低下率を分離効率とする

$$Eff_{TS}(\%) = \frac{TS_{in} - TS_{liq}}{TS_{in}} \times 100 \quad (1)$$

$TS_{in}$：投入乾物率 (%)　$TS_{liq}$：搾汁液乾物率(%)

式(1)は搾汁液の乾物率が低くなることで高い分離効率を示す。

② 原料中乾物の分離後固形分への乾物移動割合を分離効率とする

$$\mathrm{Eff}_{\mathrm{capture-solid}} = \frac{m_{in} \times TS_{in} - m_{liq} \times TS_{liq}}{m_{in} \times TS_{in}} \times 100 \quad (2)$$

$m_{in}$：投入質量 (kg)　$m_{liq}$：搾汁液質量(kg)

式(2)は分離前後の質量と乾物率を測定することで，質量を基にどれだけ乾物が固形分側へ移動したかを示す分離効率である。

③　原料中水分から搾汁液への，水分の移動割合を分離効率とする。

$$\mathrm{Eff}_{liq-liq} = \frac{m_{liq}\times(100-TS_{liq})}{m_{in}\times(100-TS_{in})}\times 100 = 100 - \frac{m_{sol}\times(100-TS_{sol})}{m_{in}\times(100-TS_{in})}\times 100 \qquad (3)$$

$m_{sol}$：分離後固形分質量 (kg)　$\mathrm{TS}_{sol}$：分離後固形分乾物率(%)

式(3)は搾汁液への水分の移動が多いほど高い分離効率を示し，投入原料に含まれる水分からいかに水分を取り除けたのかを表す。

スクリュープレス型固液分離機では装置内に固液分離操作が不十分な原料が残る。このため，排出される搾汁液の質量は小さくなる。そこで今回は $\mathrm{m}_{liq}$ に比べ誤差が少ないと考えられる分離後固形分質量 $\mathrm{m}_{sol}$ を用い本項の分離効率を算出した。

④　原料中乾物の搾汁液への乾物移動割合を分離効率とする。

$$\mathrm{Eff}_{capture-liquid} = \frac{m_{liq}\times TS_{liq}}{m_{in}\times TS_{in}}\times 100 = 100 - \mathrm{Eff}_{\mathrm{capture-solid}} \qquad (4)$$

式(4)は搾汁液への乾物率が高くなることで高い分離効率を示す。

## 2.3　結果及び考察

表 2.2 に全試験の結果一覧を示す。試験区分の S は夏期の試験，F は秋期の試験を表す。当牧場では夏期は牧草を主に食べ，秋期はサイレージや乾草を食べるため，原料である乳牛ふんの質が変化し固液分離の結果に影響すると考えられるため，乳牛ふんの性状について検討する必要がある。図 2.4 に夏期と秋期における分離後固形分と搾汁液の易分解性有機物および難分解性有機物含有量を示す。全ての条件で有意差があり，本試験において季節による乳牛ふんの質が変化していたことが示唆された。そこで本章では必要に応じて夏期と秋期の季節変動に留意しながら検討する。

# 表 2.2 全試験の固液分離前後の性状

| 試験区分 | 測定日 | 背圧 (kPa) | 流量 | | | 原料 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 原料 (kg) | 固形分 (kg) | 搾汁液 (kg) | 乳牛ふん尿含水率 (%) | 投入原料含水率 (%) |
| S-1 | 7月15日 | 75 | 320 | 138 | 197 | 84.8 | 83.6 |
| S-2 | 7月15日 | 0 | 317 | 142 | 147 | 84.8 | 83.6 |
| S-3 | 7月19日 | 150 | 293 | 104 | 186 | 85.2 | 83.9 |
| S-4 | 7月19日 | 75 | 304 | 116 | 151 | 85.2 | 84.0 |
| S-5 | 7月27日 | 125 | 294 | 83 | 166 | 86.3 | 85.0 |
| S-6 | 7月27日 | 100 | 308 | 101 | 196 | 86.3 | 85.1 |
| S-7 | 8月1日 | 50 | 327 | 116 | 149 | 84.6 | 83.5 |
| S-8 | 8月1日 | 25 | 300 | 117 | 186 | 85.8 | 84.5 |
| F-1 | 10月17日 | 150 | 301 | 122 | 163 | 86.0 | 84.8 |
| F-2 | 10月17日 | 75 | 294 | 84 | 187 | 86.1 | 84.8 |
| F-3 | 10月17日 | 25 | 302 | 98 | 213 | 87.6 | 86.4 |
| F-4 | 10月27日 | 150 | 1017 | 316 | 684 | 85.7 | 84.5 |
| F-5 | 11月17日 | 75 | 516 | 209 | 307 | 85.7 | 84.5 |
| F-6 | 11月17日 | 25 | 501 | 210 | 287 | 86.2 | 85.0 |

| 固形分 | | | | | 搾汁液 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含水率 (%) | VS (%d.b) | 易分解有機物 ($mg \cdot gDM^{-1}$) | 難分解有機物 ($mg \cdot gDM^{-1}$) | かさ密度 ($kg \cdot m^{-3}$) | 含水率 (%) | VS (%d.b) | 易分解有機物 ($mg \cdot gDM^{-1}$) | 難分解有機物 ($mg \cdot gDM^{-1}$) |
| 68.0 | 90.2 | 355 | 555 | 271 | 93.2 | 74.1 | 540 | 201 |
| 69.9 | 89.4 | 332 | 567 | 267 | 93.3 | 74.5 | 554 | 191 |
| 65.2 | 91.1 | 326 | 571 | 219 | 93.3 | 74.5 | 575 | 171 |
| 68.0 | 88.6 | 353 | 541 | 259 | 93.1 | 71.8 | 559 | 159 |
| 65.4 | 91.8 | 361 | 554 | 228 | 93.6 | 73.9 | 573 | 166 |
| 66.0 | 92.6 | 358 | 567 | 238 | 93.9 | 74.2 | 576 | 165 |
| 70.0 | 89.9 | 388 | 499 | 275 | 93.5 | 71.8 | 561 | 156 |
| 70.2 | 90.7 | 371 | 532 | 255 | 93.6 | 72.5 | 585 | 140 |
| 76.0 | 83.2 | 427 | 419 | 413 | 91.5 | 69.7 | 471 | 226 |
| 70.3 | 87.1 | 430 | 445 | 240 | 93.6 | 69.5 | 480 | 215 |
| 70.7 | 87.4 | 370 | 510 | 268 | 94.1 | 68.2 | 496 | 186 |
| 67.7 | 91.4 | 426 | 488 | 254 | 92.1 | 77.9 | 533 | 247 |
| 73.7 | 90.3 | 470 | 433 | 313 | 92.6 | 79.2 | 574 | 218 |
| 74.5 | 90.8 | 436 | 472 | 309 | 92.4 | 78.4 | 575 | 209 |

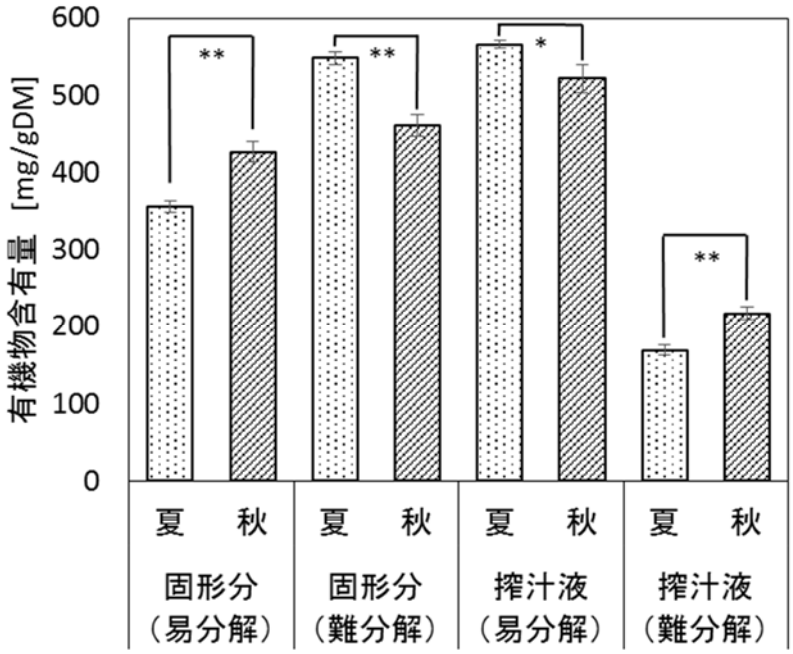



図 2.4 季節による有機物含有成分量の変化

ステューデントの t 検定により以下の有意水準で

平均値に有意差があったことを表す。**p<0.01 *p<0.05

### 2.3.1　乾物と水分

図 2.5 に全試験における固形分含水率を示す。背圧が上昇するに連れ，含水率が下がる傾向が見られ，10/17 の背圧 150 kPa の試験を除き，回帰直線をひいたところ，凡例×が大きく外れた。他の 150 kPa の試験では安定して含水率 70 %を下回っていたため, 以降の結果では全て 10/17 の背圧 150 kPa の試験を除いたものを述べる。

本農場の技術職員にヒアリングによる調査を行ったところ,「放牧草だと下痢をしたかの様になる。サイレージは、沢山食べる牛はゆるく、少なく食べる牛は固めに感じます。乾草の場合はどんな食べ方をしても硬い糞をしているみたいです。」とのことであった。つまり, 夏は牛ふん尿の物理性状が一定であるが,

秋期の試験では乳牛がサイレージや乾草を食べているため，投入牛ふん尿の物理性状が一定ではなかったと考えられる。また，牧草のサイレージ調整に伴う飼料成分についても報告がある（小川ら，1980)。生草，予乾草の NDF と ADF の比率はほぼ同じであるが，サイレージ化することにより，タンパクの分解率が上がり，NDF の比率が高くなる。これはサイレージ化中にセルロースなどが分解されたことを意味し，サイレージを給与した牛の中でヘミセルロースが分解され，ふんに含まれる総繊維量が少なくなると考えられる。このため，ふんの形状を保つ構造材たる繊維が分解・低分子化されたため，秋期の乳牛ふん尿は保水性を富む物理性状になり，ふん尿中から水分を適切に分離できなかったと考えられる。実際に秋季の 10/17 150kPa 区の実験では搾汁液の含水率が他の試験に比べ著しく大きい値であったことから，特にサイレージを給与されたふん尿であったことが推察される。

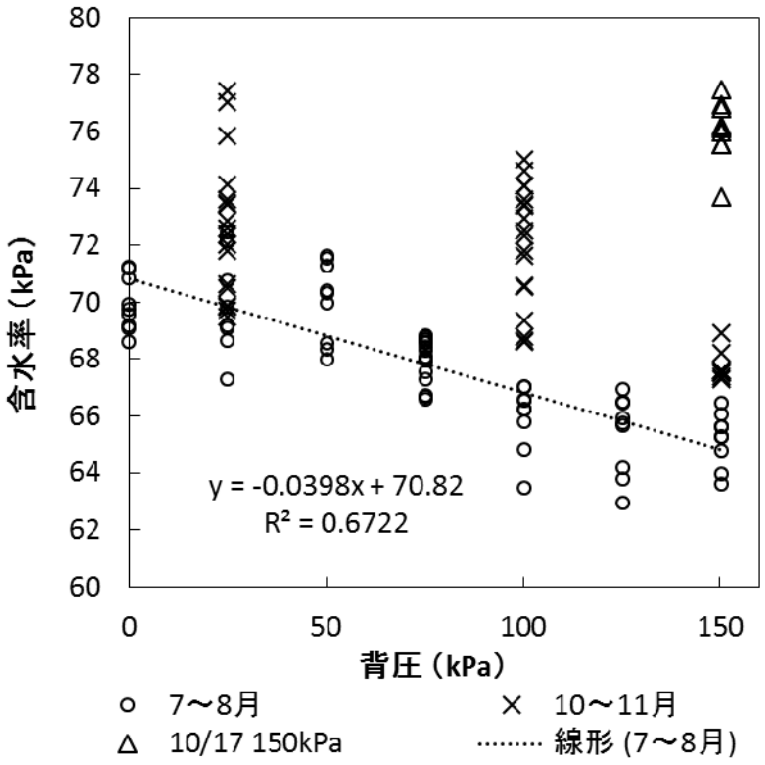



図 2.5 全試験における固形分含水率

図 2.6 に固液分離前後の投入原料, 分離後固形分, 搾汁液の含水率を示す。エラーバーは標準偏差を表す。投入原料は乳牛ふん尿に乾草を投入した後の状態であり，含水率は 84 ～ 87%の範囲であった。このため，本試験で用いた乳牛ふん尿はセミソリッド状に分類される。

分離後固形分は含水率 70%前後であった。この値は堆積・切り替えしによる乳牛ふん尿の堆肥化に適した値であり，十分に脱水が行うことができたと言える。scheff の多重比較検定を行ったところ, 0, 25, 50 kPa と 100,125,150 kPa の間で優位な差が確認された。

搾汁液ではいずれの背圧条件においても含水率約 93%であり，背圧による差は見られなかった。つまり，圧力板を操作し背圧を変化させることでスクリュー内の排出部付近での圧力が増大し，分離後固形分から搾汁液への水分の移動量が増大したと考えられる。

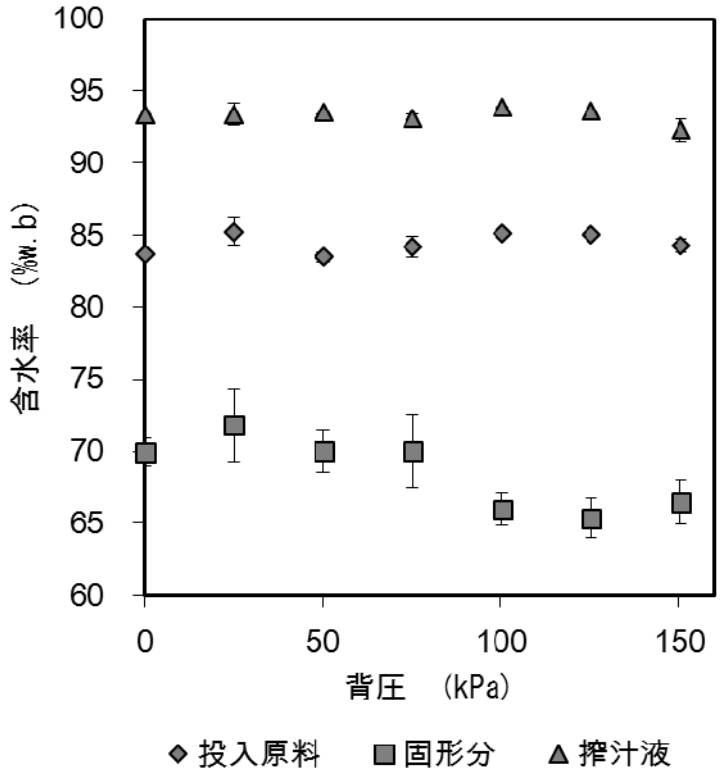



図 2.6 固液分離前後の含水率の変化

### 2.3.2　質量収支

図 2.7 は分離後固形分および搾汁液中の水分と乾物の割合を示す。2.2.3 で述べた通り固液分離終了時に固液分離機内には十分に固液分離されていない原料が残る。そこで質量収支は排出された固形分と搾汁液を基に算出した。

分離後固形分における乾物の排出割合は約 11～15%程度であり，背圧による大きな変化はなかった。しかし，固形分中の水分排出割合は 22～34%と幅があり，背圧が高まるにつれて減少した。

搾汁液における乾物の排出量は 3～5%であり，大きな変化はなかったが，搾汁液中の水分排出割合は 47～62%と背圧が高まるにつれて増加した。

このことから，固液分離機の背圧を変化させ，排出時に固液分離機内の原料に加わる圧力を増大させることで，水分は搾汁液側へ多く移動する傾向が見られた。乾物に関しては圧力を変化せることによる大きな移動はなかった。乾物の移動に関して，M. Hjorth ら(2011)は Møller ら(2002)の報告を基にスクリュープレスでは圧力を増加させると分離後固形分の乾物含有量を増加させるが，小粒子は固液分離機の孔を通って搾汁液に移動するため，小粒子の大部分は搾汁液に移動すると報告している。しかしながら，これらの報告における小粒子とは主に 1mm 以下のものを指しているが，本研究の搾汁液を観察すると乾草などの破片が存在する。これらは排出時に圧力が加わることで，投入原料中の構造材である乾草や食べ残しがせん断され小さくなったものが，固液分離機のメッシュを通り搾汁液に移動したと考えられる。今回はメッシュ径（4.5 mm）より著しく大きい乾草を用いたため，メッシュ径から搾汁液へ移動する乾物が少なかったと考えられる。即ち，スクリュープレス型固液分離機では投入原料中の副資材によって搾汁液への移動が変化すると推測される。そこで，既往の研究である，セミソリッド用固液分離装置と分離液の肥効特性(北海道立根釧農

業試験場研究部酪農施設科，北海道立十勝農業試験場生産研究部栽培環境科技術体系化チーム，2007)と比較した。表 2.2 に本実験と既往研究の総排出量に対する固形分への乾物の移動割合と固液分離原料の乾物率を示した。既往研究でのメッシュ径は 5 mm である。副資材の違いに注目すると，麦稈に比べオガクズは乾物移動割合が大きいことから副資材の種類に依存し，また麦稈の量の違いが乾物移動割合が変化していることから，副資材の投入量にも依存すると考えられる。

図 2.8 は表 2.3 を基に固形分への乾物移動割合と原料乾物率をグラフにしたものである。四角と丸のプロットはそれぞれ既往研究の麦稈, オガクズを示し，三角は本研究での値を示している。原料の乾物率が大きいほど乾物の移動割合が大きくなることが認められた。つまり，固形分への乾物の移動割合は原料の乾物率が影響を与えていることが示唆された。

以上のことから，メッシュを容易に通るおがくずや乳牛ふん由来の小粒子は圧力操作や副資材による影響を受けにくいが，副資材の量や圧力が大きくなることで副資材がせん断されメッシュを通ることができる乾物が増えると言える。しかしながら，搾汁液の乾物量は分離後固形分の乾物量に比べ著しく小さく，固液分離による移動は主に水分であり，投入原料から搾汁液への移動が行われていたと考えられる。

また，先の既往研究(北海道立根釧農業試験場研究部酪農施設科，北海道立十勝農業試験場生産研究部栽培環境科技術体系化チーム，2007)では，原料水分と分離後固形分の水分の間に高い相関が確認され，分離後固形分の水分は原料水分に依存すると報告されている。しかし，本研究では原料の種類によっては背圧の制御により同じ原料水分において，有意に分離後固形分の水分を調整できることが認めらており，乾物の移動割合はほぼ一定であることが明らかになった。このように背圧を制御することにより，分離後固形分の水分の移動量が

変化し，固形分の流量割合を変化させることが出来れば，搾汁液を貯留するラグーンや液肥化施設の設計は容易になると考えられる。

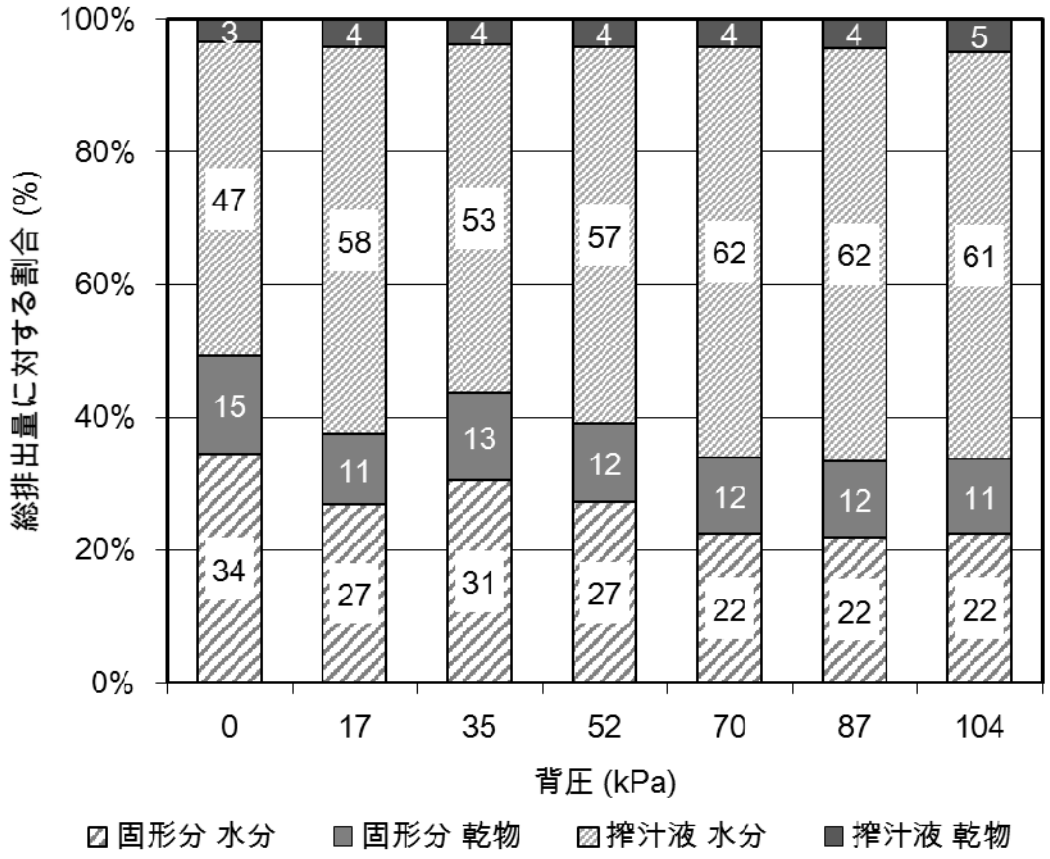



図 2.7 固液分離後固形分と搾汁液中の水分と乾物の割合

表 2.3 原料乾物率および副資材の違いによる乾物移動割合の変化

| | 原料乾物率 | 固形分への乾物移動割合 |
|---|---|---|
| | % | % |
| 本試験(乾草) | 16 | 78 |
| 麦稈(1 号機) | 15 | 70 |
| 麦稈(2 号機) | 14 | 69 |
| 麦稈少量(3 号機) | 13 | 67 |
| 麦稈多量(3 号機) | 18 | 81 |
| オガクズ(2 号機) | 22 | 86 |
| オガクズ(3 号機) | 17 | 83 |

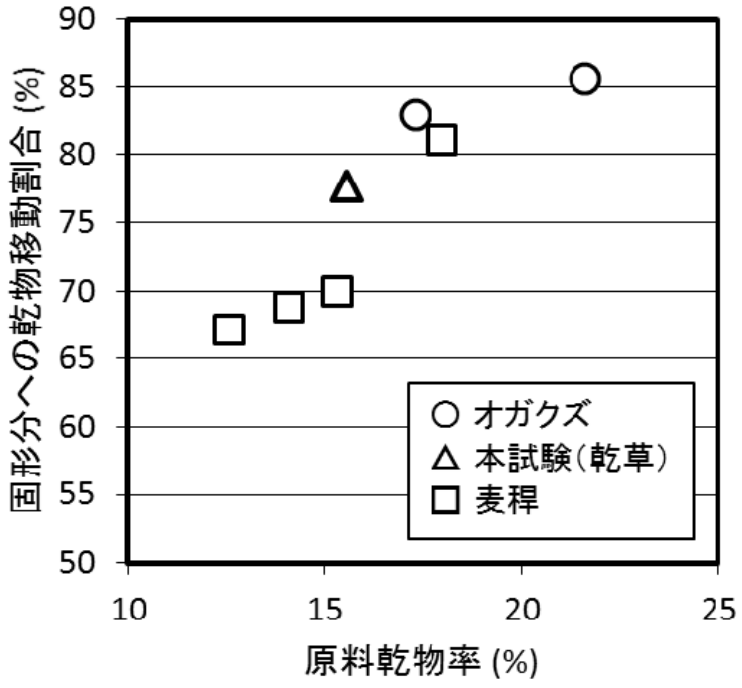



図 2.8 固形分の乾物移動割合と原料乾物率の関係

### 2.3.3　分離効率

図 2.9 は式(1)～(4)から算出した分離効率である。

（1）固形分における乾物率の低下

平均 56.9%となり，分離効率の変化はほとんどなかった。

（2）乾物の固形分への移動量

平均 75.6%となり, 2.3.2 質量収支での指摘した通り乾物の移動は背圧の変化による乾物の移動は小さかったことが明らかになった。

（3）搾汁液への水分移動割合

平均 70.4%となり，背圧を高めるにつれて分離効率は増加傾向にあることが示唆された。即ち，背圧を高めるほど水分は搾汁液側へ移動していく傾向があると考えられる。

（4）搾汁液への乾物移動割合

（2）でも述べたとおり，固形物への乾物移動割合の変化が少なかったことから，搾汁液への乾物移動割合も小さかった。

以上より，分離効率を用いて背圧による固形分および水分の移動を検討したところ，背圧をあげることによる乾物の移動は小さく，主に水分の移動が行われることがわかった。

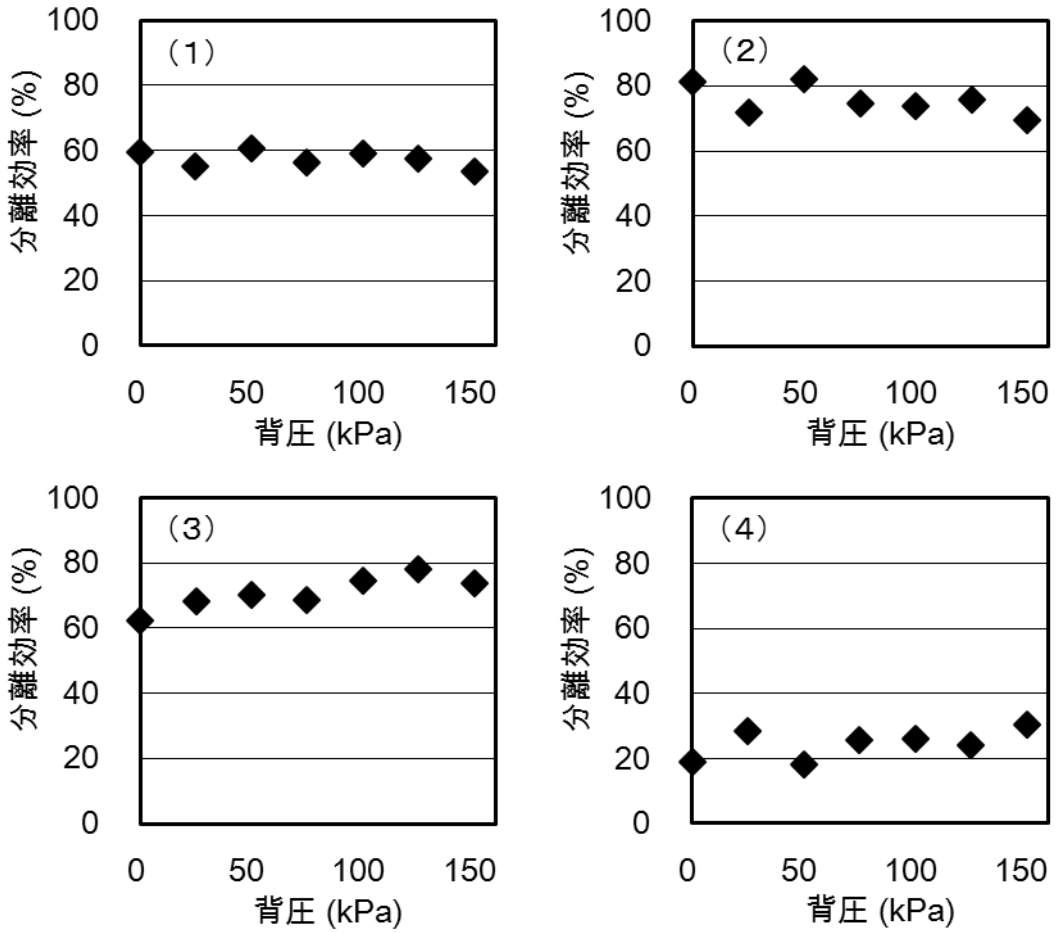



図 2.9 分離効率

（1）乾物率の低下率　　（2）乾物の固形分への移動量

（3）搾汁液への水分移動割合（4）搾汁液への乾物移動割合

### 2.3.4　かさ密度と有機物組成の変化

固形分の水分および通気性の指標として，かさ密度の測定を行った。各背圧における固液分離後固形分のかさ密度を図 2.10 に示す。

全データの平均かさ密度は 238 kg/m$^3$ となった。かさ密度は副資材により変化し，オガクズなどでは 400～700kg/m$^3$ 前後（表 2.4）の報告がある（大川内ら，2005；吉田ら，2005，2006；田邊，2008）。このため，固液分離後固形分

は著しくかさ密度が低く，通気性に優れていることがわかった。

また背圧を高めていくにつれて，かさ密度は緩やかに小さくなっていく傾向が確認できた。このとき背圧条件による有意差を確認し，水分と同様に 52 kPa 前後で有意差を示した。

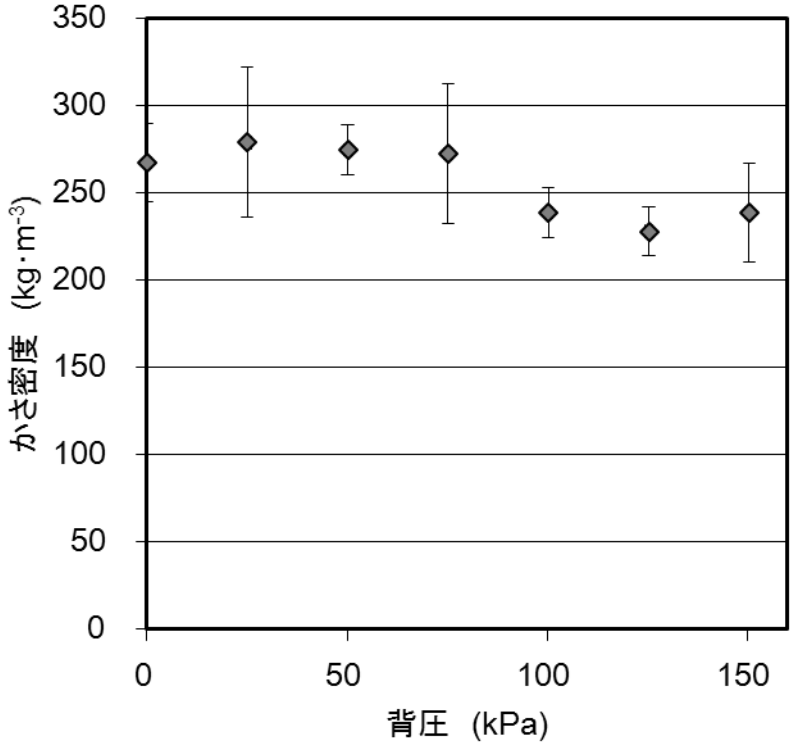



図 2.10 分離後固形分のかさ密度に及ぼす背圧の影響

表 2.4 乳牛ふんに副資材を混合した際のかさ密度

| 副資材 | かさ密度 ($kg \cdot m^{-3}$) |
|---|---|
| 本試験（固液分離） | 265 |
| 廃菌床 | 685 |
| 木くずチップ | 570～600 |
| オガクズ:クリンカ =9:1 | 400 |
| オガクズ:クリンカ =7:3 | 490 |
| オガクズ:クリンカ =5:5 | 550 |
| ダム流木 | 670 |
| 加工廃材 | 630 |
| オガクズ | 610 |
| 戻し堆肥 | 550 |

かさ密度が，水分と同じような傾向を示した理由として，乾物中に保持できる水分の量が異なるからであると考えた。図 2.11 にかさ密度と含水比の関係を示す。含水比は水分を乾物率で除した値で，乾物中に含まれる水分の割合を示している。図 2.11 より，かさ密度が大きくなるほど含水比も大きくなる傾向が確認された。つまりかさ密度が大きいほど乾物中に保持されている水分の量は増えることが示唆された。固液分離したときの分離後固形分は膨軟化するためかさ密度が減るが，分離後固形分の持つ水分保持能力は本試験の範囲では変わらないため，含水率が低いほど通気性が良い堆肥材料であると言える。

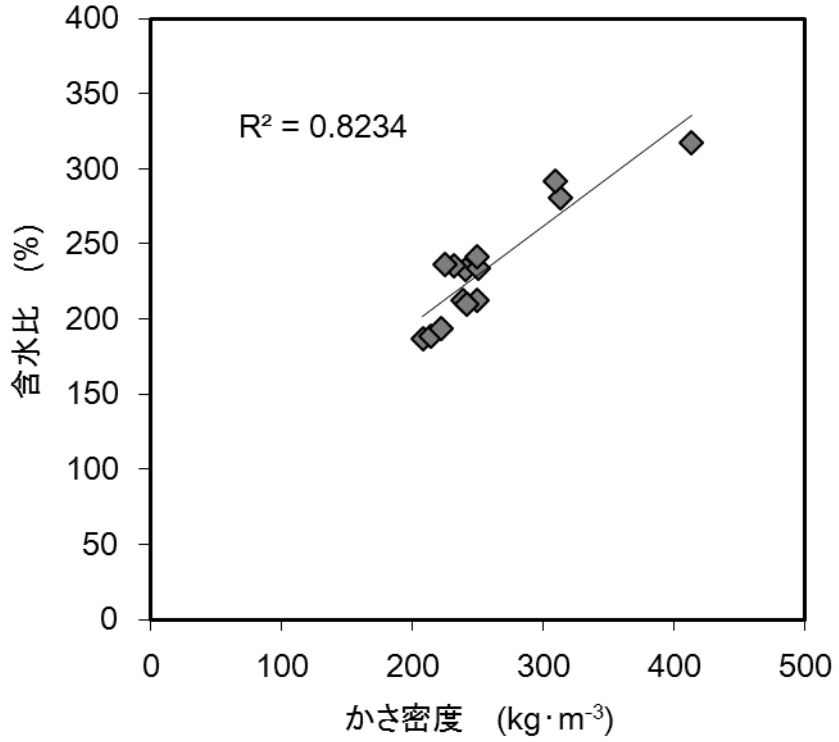



図 2.11 かさ密度と含水比の関係

次に，固液分離後固形分および搾汁液の乾物中の組成について検討した。図 2.12 および，図 2.13 から総和である投入原料の乾物率は 16%前後であった。

固形分の有機物 VM の平均値は 10.9%であった。固形分は数値のばらつきが大きく，傾向を確認することができなかった。これは含水率にばらつきがあったことが原因であると考えられる。また，無機物 ASH は平均値 1.2%であり，大きな変化は見れらなかった。

搾汁液中の有機物 VM の平均値は 3.0%であった。また，無機物 ASH は平均値 1.1%前後でほとんど変化はなかった。

固形分では難分解性有機物，易分解性有機物はともに多く存在するが，搾汁液ではその多くが易分解性有機物であることが分かった。易分解性有機物の主な構成要素は，糖類やタンパク質といった比較的分子量の小さな物質で構成されている。そのため，水分が液分側へ移動するのと共に移動しやすいと考えられる。それに対して難分解性有機物は繊維質が主な成分であるので，ほとんど

の難分解性有機物は固形分側へ排出されたものと考えられる。搾汁液中に含まれる難分解性有機物の多くは，メッシュを通過するような微細なわら，あるいは牛ふん中に含まれている消化しきれなかった繊維と考えられる。

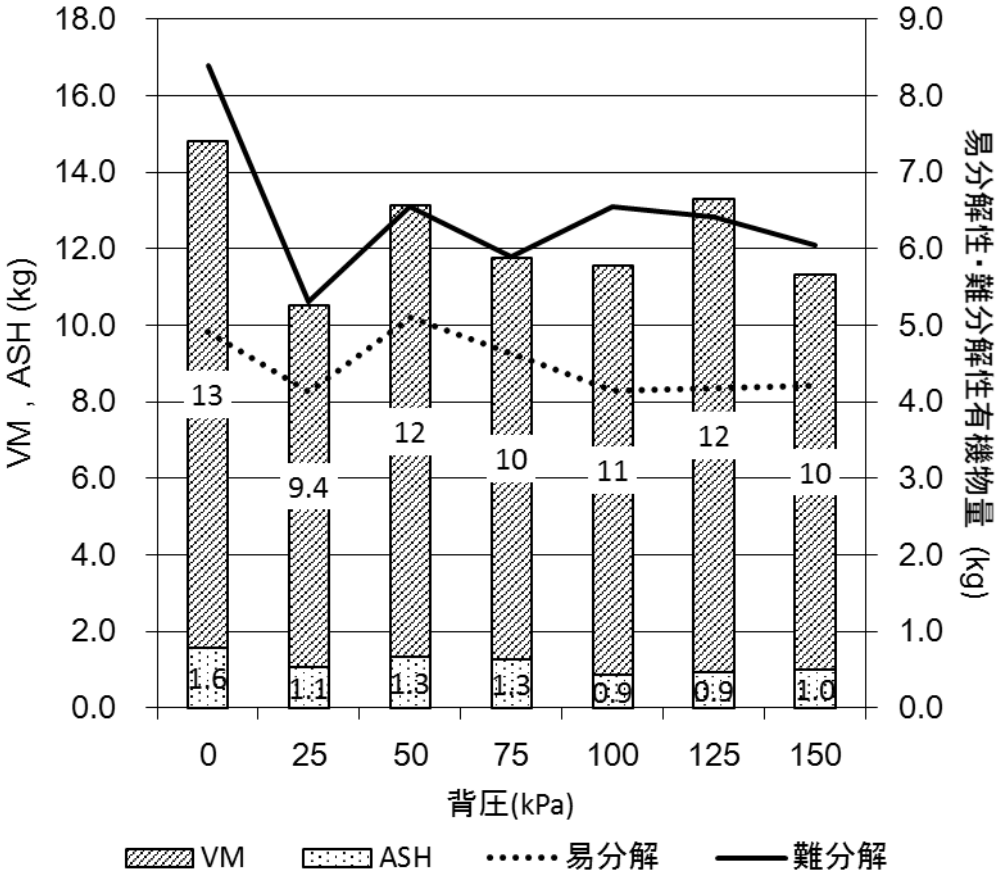



図 2.12 分離後固形分 100kg 中における乾物組成の背圧による変化

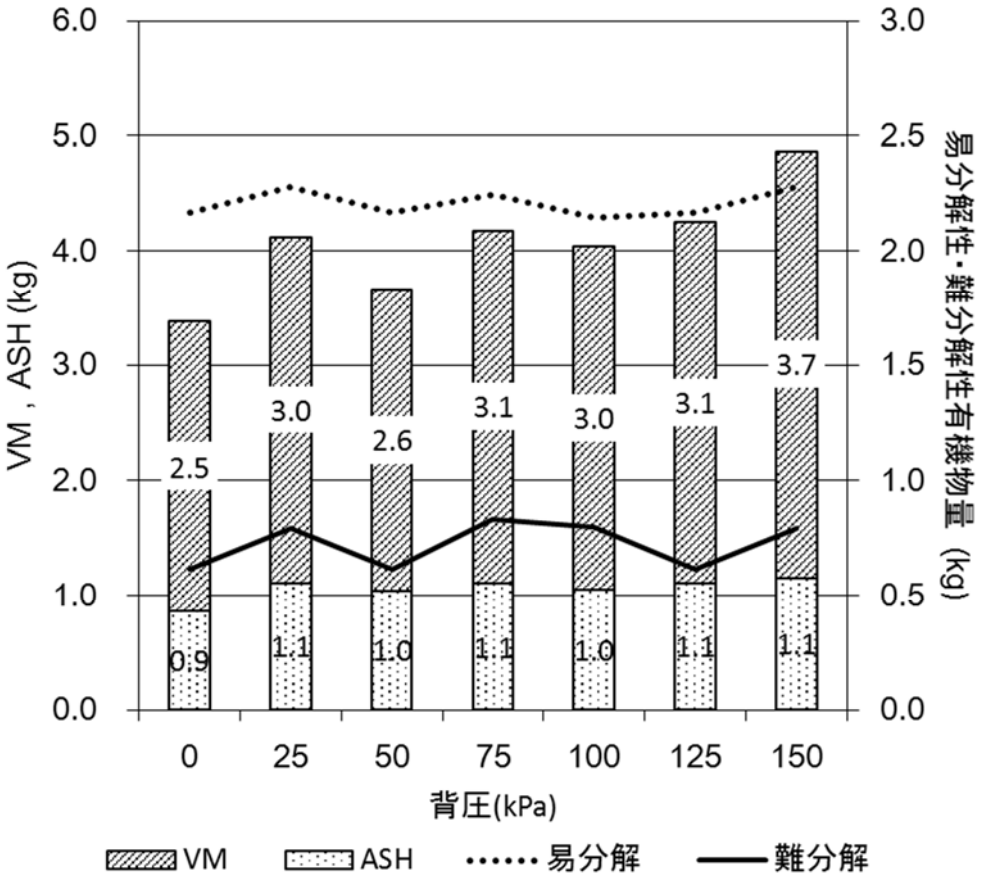



図 2.13 搾汁液 100kg 中における乾物組成の背圧による変化

次に C/N について検討した。図 2.14 に固液分離後固形分および搾汁液の C/N を示す。藤原ら（2003）の報告によると，凍結乾燥法は加熱乾燥に比べ堆肥のアンモニアの揮発が少ないという報告があるため，サンプルを凍結乾燥させた後，C/N 比を測定した。このため，窒素成分の揮散は少ないと考えられる。固形分ではばらつきがみられたが搾汁液ではほとんど同様の値を示し，平均値は 9.4 であった。また，搾汁液の C/N 比が固形分の C/N 比と比べ相対的に小さいことから，窒素成分の多くが搾汁液へと移動したと考えられる。

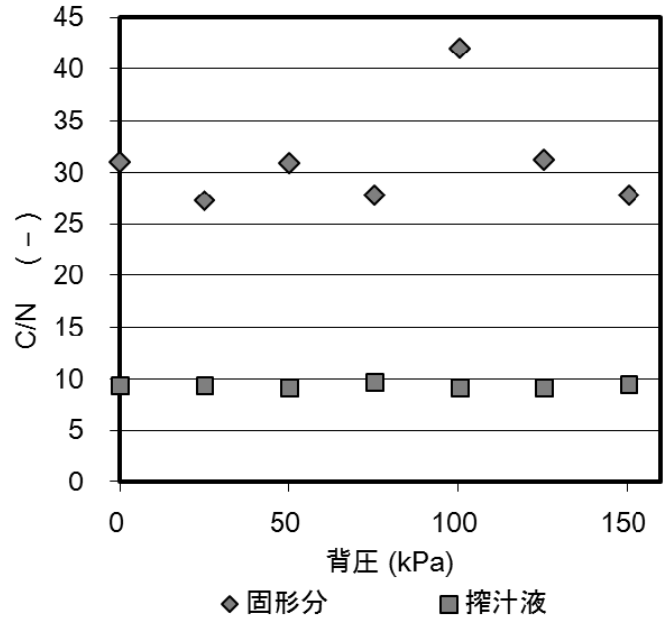



図 2.14 固液分離後固形分および搾汁液の C/N

## 2.4 まとめ

本章で行った，スクリュープレス型固液分離機を用いた乳牛ふん尿の固液分離試験を行った全測定項目の測定値の平均値を表 2.5 に示す。

表 2.5　固液分離前後における全測定項目の平均値

| | 単位 | 固液分離前 | 固液分離後 | |
|---|---|---|---|---|
| | | 投入原料 | 固形分 | 搾汁液 |
| 質量割合 | % | 100 | 38 (6) | 62 (6) |
| 水分 | %w.b. | 84.5 (0.8) | 69.2 (2.9) | 93.3 (0.6) |
| かさ密度 | $kg \cdot m^{-3}$ | － | 265 (25) | － |
| 有機物(湿潤基準) | %w.b | 13.2 (0.8) | 27.2 (2.9) | 5.0 (0.6) |
| 有機物(乾物基準) | %d.b | 84..8 (1.8) | 90.0 (1.7) | 73.9 (3.3) |
| 易分解性有機物(ADOM) | $mg \cdot gDM^{-1}$ | 450 (16) | 375 (26) | 554 (18) |
| 難分解性有機物(ADF) | $mg \cdot gDM^{-1}$ | 367 (16) | 529 (34) | 181 (20) |
| C/N比 | － | 20 | 31 | 9 |

※表中（ ）は標準偏差を示す。

全試験を通し，固形分と液分の流量比はおよそ 5：5～3：7 であった。また，

背圧を高めることにより，固形分が減少し，搾汁液が増加した。これは分離効率などを検討した結果，水分の移動が主に影響しており，乾物の移動割合は小さいことがわかった。既往研究(北海道立根釧農業試験場研究部酪農施設科，北海道立十勝農業試験場生産研究部栽培環境科技術体系化チーム，2007)では，原料水分と分離後固形分には相関があることが認められていた。しかし，本研究では同じ水分の原料から異なる水分の固形分を製造できることが認められ，原料の水分の移動を変化させ，液分を貯留するラグーンなどの付属の施設の設計に資すると考えられる。

分離後固形分の水分は堆肥材料として適切と考えられる含水率 70%前後に脱水することが可能であり，かさ密度も平均 265 kg/m$^3$ で，既存の水分調整材を用いた堆肥材料と比較すると極めて低く空気の通りやすい材料とすることができた。また，易分解性有機物の割合が 37.7%と通常の堆肥化材料と近い値を示した(易分解性有機物による堆肥の品質評価，高橋ら，1999)。

搾汁液は背圧を上げるにつれ乾物量はわずかながら増加した。また，乾物中の有機物量 VM は主に易分解性有機物であり，C/N も低いことから窒素成分の多くが搾汁液側へ移動したことが確認された。

以上のことから，分離後固形分は堆肥化材料に適した組成であり，良好な堆肥化発酵が期待できると考えられる。また，搾汁の組成はほぼ一定であり，粗大な有機物が少ないため難分解性有機物が少なく，易分解性有機物が多く含まれていることから，好気性発酵処理によって有機物を微生物分解することで，固形物の少ない液体肥料にすることができると考えられる。

# 第 3 章　固液分離後固形分の堆肥化

## 3.1　はじめに

第 2 章では固液分離特性および分離後固形分および搾汁液の性状について検討した。分離後固形分は省力化の観点からも堆積方式の堆肥化が望ましく，分離後固形分はその含水率が 70%前後，かさ密度も著しく小さいため堆肥化が容易であると考えられるが，北海道立根釧農業試験場研究部酪農施設科，北海道立十勝農業試験場生産研究部栽培環境科技術体系化チームら（2007）により固液分離後の固形分温度上昇，良好な有機物分解などの確認はされているものの，堆肥化過程に及ぼす背圧の影響について詳しい報告はない。そこで本章では，固液分離後固形分を堆肥として利用するために，背圧操作をして含水率を変化させた固形分の堆肥化一次発酵過程を明らかにすることを目的とした。また，堆肥化反応に大きく関わる水分，かさ密度，有機物分解とその組成，および温度の経時変化に基づいて検討した。

## 3.2　材料および方法

### (1) 堆肥化材料

第 2 章と同じ条件で固液分離した固形分からパイルを作り，経過を観察した。図 3.1 に堆肥化時の外観を示す。堆肥化材料として，背圧をそれぞれ 25 kPa，75 kPa，150 kPa で設定した固液分離後固形分と，乾草と牛ふん尿を堆肥化に適正な水分に調整した対照区の計 4 条件を設定した。なお，反復数は 2 とした。

対照区の水分調整は，（社）中央畜産会　堆肥化施設設計マニュアルに基

づき式 3.1 を用い, 目標含水率を 70%として水分調整剤の投入量を決定した。

$$m_b = m_m \times \frac{w_m - w_c}{w_c - w_b} \quad (式\ 3.1)$$

$m_m$：生ふん量 (kg)　$m_b$：水分調整材添加量(kg)

$w_m$：生ふん水分 (%)　$w_b$：水分調整材水分(%)

$w_c$：対照区水分 (%)

**(2)堆肥化期間**

2011 年 10 月 17 日より同年 12 月 15 日まで 2 反復行った。調査期間は切り返しを行っても温度上昇がほとんど見られなくなる堆肥化一時発酵の期間である約１ヶ月とした。また，中温および高温微生物および，未分解の有機物を均一にすることを目的に，切り返しは一週間に一度行い同時にサンプリングを行った。なお，2 反復目の 150 kPa 区では実験場所の移動を行う必要があったため，切り返しを 4 日目にも行った。

図 3.1　堆肥化試験に供した分離後固形分外観

**(3)測定項目**

1) 試料湿潤質量

第 2 章と同様。

2) 含水率

第 2 章と同様。

3) pH($H_2O$)

湿潤試料を乾物重あたりで蒸留水を用いて 10 倍に希釈し，15 分振とうした後の液体をガラス電極法で測定した。

4) 有機物含有率

第 2 章と同様。

5) 有機物分解率

ある時の有機物分解率を灰分（無機物）ASH に対する有機物量 VM の割合を元に，灰分 ASH の量が堆肥化過程で変化しないと仮定し算出した。

$$有機物分解率(\%\ \mathrm{d.b}) = 100 - \frac{VM_1}{VM_0} \times \frac{ASH_0}{ASH_1} \times 100$$

$VM_0$：初期有機物量 (kg)　$VM_1$：有機物量(kg)

$ASH_0$：初期灰分量 (kg)　$ASH_1$：灰分量(kg)

6) かさ密度　(kg･$m^{-3}$)

第 2 章と同様。

7）酸性デタージェント可溶有機物(ADOM) (mg･$gDM^{-1}$),

酸性デタージェント繊維(ADF) (mg･$gDM^{-1}$)

第 2 章と同様。

8) 元素分析

第 2 章と同様。

## 3.3　結果及び考察

### 3.3.1　堆肥原料

表 3.1 に堆肥原料の組成を示す。Run1 の試験では質量 100 kg 前後，Run2 の試験では 200 ～ 300 kg 前後で行った。固液分離を行う際，投入原料が多いほど安定した条件で固液分離操作を行うことができ，その後の堆肥化においてもスケールが大きいほど堆肥化材料の断熱効果により，外部との熱の移動が少なく内部の温度を高い状態で維持できると考えられる。

また，第 2 章で述べた通り，夏と秋では乳牛ふんの質が異なり固液分離後の固形分の含水率に影響を与えた。このため Run1 の 150 kPa 区では他の試験区や同じ背圧条件下のものに比べ含水率が著しく高かった。しかしながら，Run2 では第 2 章の結果に近い結果が得られた。

かさ密度に関しては十分に低く，堆積方式の堆肥化を行うには十分な値であった。しかし，対照区のみかさ密度が 100 kg･m$^{-3}$ と著しく低かった。これはふん尿が塊になってしまい，均一に混和することが困難であったことが考えられる。

表 3.1　堆肥原料の組成

| | | Run 1 | | | | Run 2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 背圧 | (kPa) | 150 | 75 | 25 | Control | 150 | 75 | 25 | Control |
| 質量 | (kg) | 122 | 83.6 | 98.0 | 50.4 | 316 | 209 | 210 | 35.4 |
| 含水率 | (%w.b.) | 76.0 | 70.3 | 70.7 | 70.4 | 67.7 | 73.7 | 74.5 | 75.7 |
| かさ密度 | (kg･m$^{-3}$) | 413 | 243 | 268 | 102 | 255 | 313 | 314 | 102 |
| 有機物率(w.b.) | (%w.b) | 20 | 26 | 26 | 26 | 29 | 24 | 23 | 22 |
| 易分解性有機物 | (mg･gDM$^{-1}$) | 488 | 433 | 436 | 323 | 426 | 470 | 472 | 566 |
| 難分解性有機物 | (mg･gDM$^{-1}$) | 419 | 445 | 510 | 371 | 427 | 430 | 370 | 500 |
| C/N | ( - ) | 22 | 25 | 28 | 14 | 24 | 20 | 19 | 14 |
| pH | ( - ) | 7.4 | 7.8 | 8.0 | 7.3 | NO DATA | 7.8 | 7.9 | 7.1 |

### 3.3.2　堆肥化過程

堆肥散布時のハンドリング性に関わる含水率, かさ密度について検討する。また，肥料として用いるためには有機物が十分に分解されていることが必要なことから，温度および有機物分解率について検討する。

（1）含水率

図 3.2 に含水率の経時変化を示す。どの試験区においても堆肥化が進むにつれて減少した。これは堆肥化による分解熱と堆肥材料自身の風乾によるものがある。

Control 区はふん尿が均一に混和することが難しかったため，標準偏差が大きくなったが, 固液分離した区画に関しては含水率が 76 %のような高い状態であっても標準偏差が小さく，均一な状態で発酵したことが考えられる。

固液分離した区画では初期の含水率が同じ場合，堆肥化中も同じような水分で推移した。Tom L.Richard ら（2002）は 50～70%までの含水率を基に堆肥化時の微生物の呼吸速度をモデル化し，堆肥原料の含水率により微生物分解速度が異なり，この範囲外では微生物分解速度の著しい現象があることを報告している。このため，初期含水率の高い順に①Run1 150 kPa 区，②Run2 25,75 kPa 区，③Run1 25,75 kPa 区，④Run2 150kPa 区，⑤Control 区の 5 点で堆肥化終了後の有機物分解率に違いがあると考えられたが, Run1 は Run2 に比べ堆肥材料が少ないため堆肥材料の温度維持が行われず Run 間の比較はできなかったものの, 同一 Run 内では近い含水率であれば他の測定項目は似た変化を示した。

堆肥化終了時の含水率は 53～70 %となった。堆肥を散布する際の水分は 70%以下にすることが目安であるとされている（堆肥化施設設計マニュアル）。このため，どの区画においてもハンドリングのしやすい材料となったことが

わかった。実際に切り返し時に観察したところ，含水率 70%であってもふん尿のような臭気やべたつきもない堆肥になっていた。

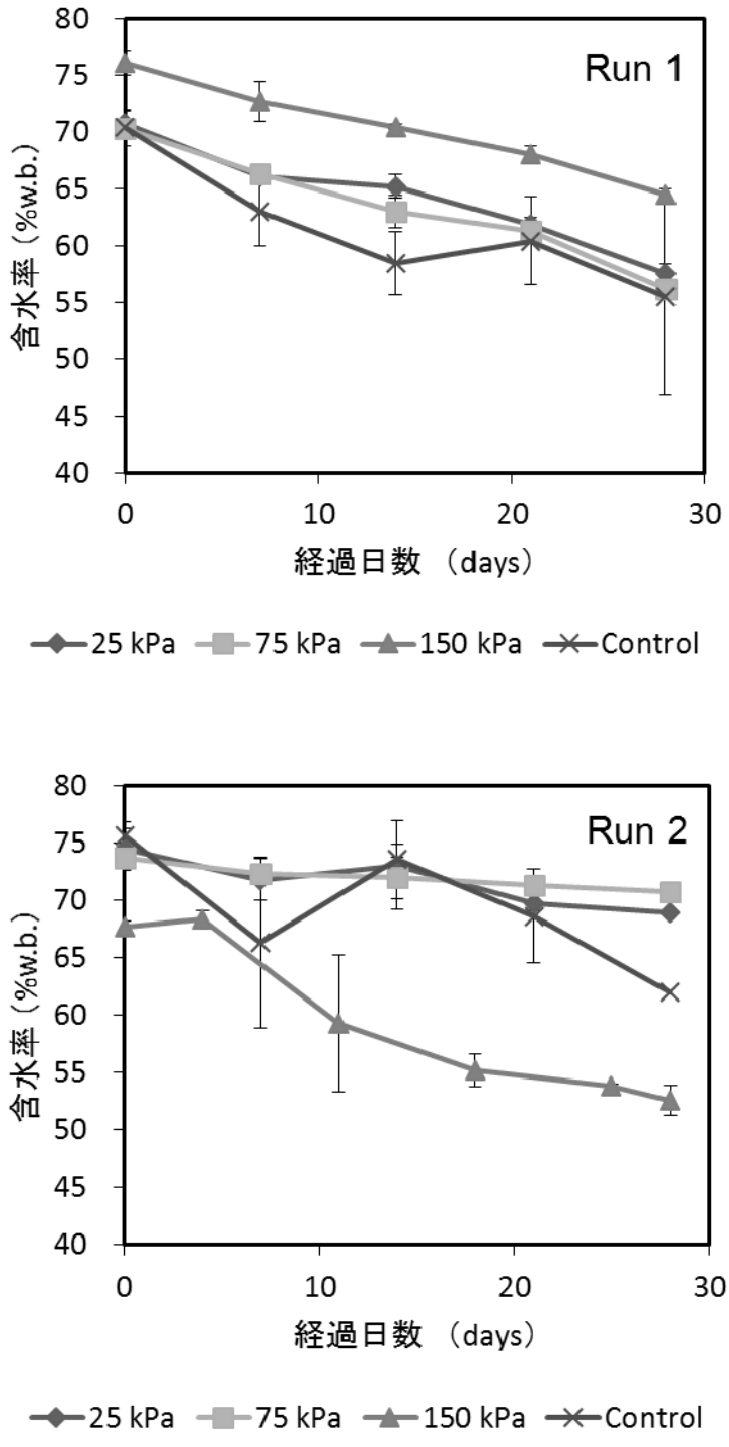



図 3.2　含水率の経時変化

（2）かさ密度

図 3.3 にかさ密度の経時変化を示す。含水率と同様に，初期含水率が同じ区画では似た変化を示した。堆肥化が進むにつれて含水率が低下し，有機物分解が進むことでかさ密度に影響があることが予想されたが，初期含水率が高かった Run1 150 kPa 区のみかさ密度が約 100 kg･m$^{-3}$ 減少した以外では減少傾向にあったものの，大きな変化はなかった。堆肥化終了時には約 200～300 kg･m$^{-3}$ であった。このため，堆肥化初期の含水率が 76%といった他の試験区と比べ大きな値であってもかさ密度には大きな違いが無いことがわかった。

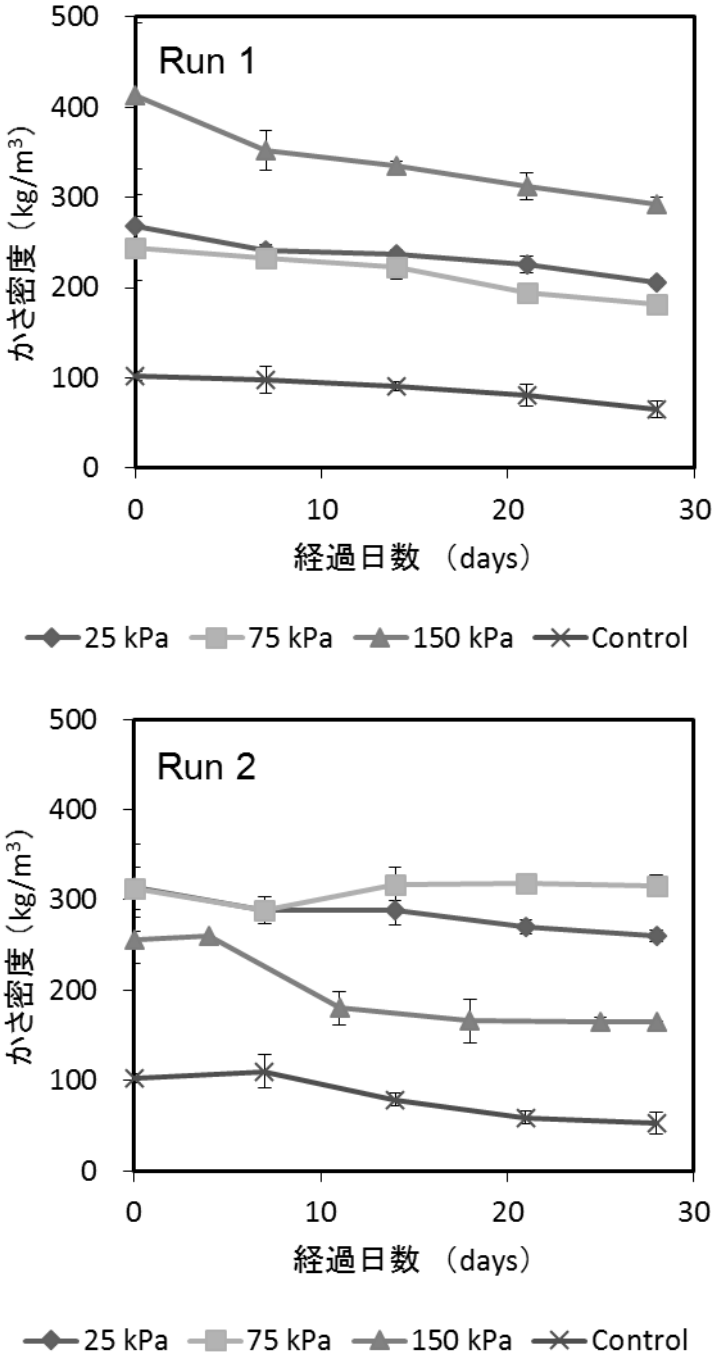



図 3.3　かさ密度の経時変化

（3）温度

図 3.4 に堆肥化時の温度変化を示す。矢印は切り替えし日を示している。固液分離した試験区では，堆肥化開始とともに温度上昇し，初めの 2 週間ほどは 50℃以上の温度が保たれた。Run 2 150 kPa 区は 4 日目に実験場所の移動のため切り返しをした以外は 7 日ごとに切り返しを行ったため，急激に温度が下がっている日は切り返しを行った日である。Run 1 に比べ Run2 では高い温度が維持されているが，これは堆積させた質量の違いによるものだと考えられる。

堆肥温度を高く保つことで有機物分解の他に，雑草の種子や病原菌などの死滅が期待され，衛生的な堆肥が製造できる。そうした堆肥を製造するためには温度 60℃以上で数日間の維持が必要である。一例を表 3.2 に示す（堆肥化施設設計マニュアル，2000）。Run 1 では切り替えしを行った後に 60℃以上の温度上昇が見られなかったが, Run 2 では切り替えし後にも 60℃以上上昇したため，衛生的な堆肥が製造できたと考えられる。また，固液分離後の固形分を実規模で堆肥化する際には Run2 での質量以上であることが考えられるため，雑草の種子や病原菌の問題は起きにくいと考えられる。

表 3.2 堆肥の発酵熱による病原菌，雑草種子の死滅時間

| 種類 | 温度（℃） | 時間（min） |
|---|---|---|
| 腸チフス菌 | 55～60 | 30 |
| 赤痢菌 | 55 | 60 |
| ブドウ球菌 | 50 | 10 |
| 大腸菌 | 55 | 60 |
| | 60 | 15～20 |
| 回虫（卵） | 60 | 15～20 |
| クリプトスポリジウム | 60 | 30 |
| | 常温・乾燥 | 1～4日間 |

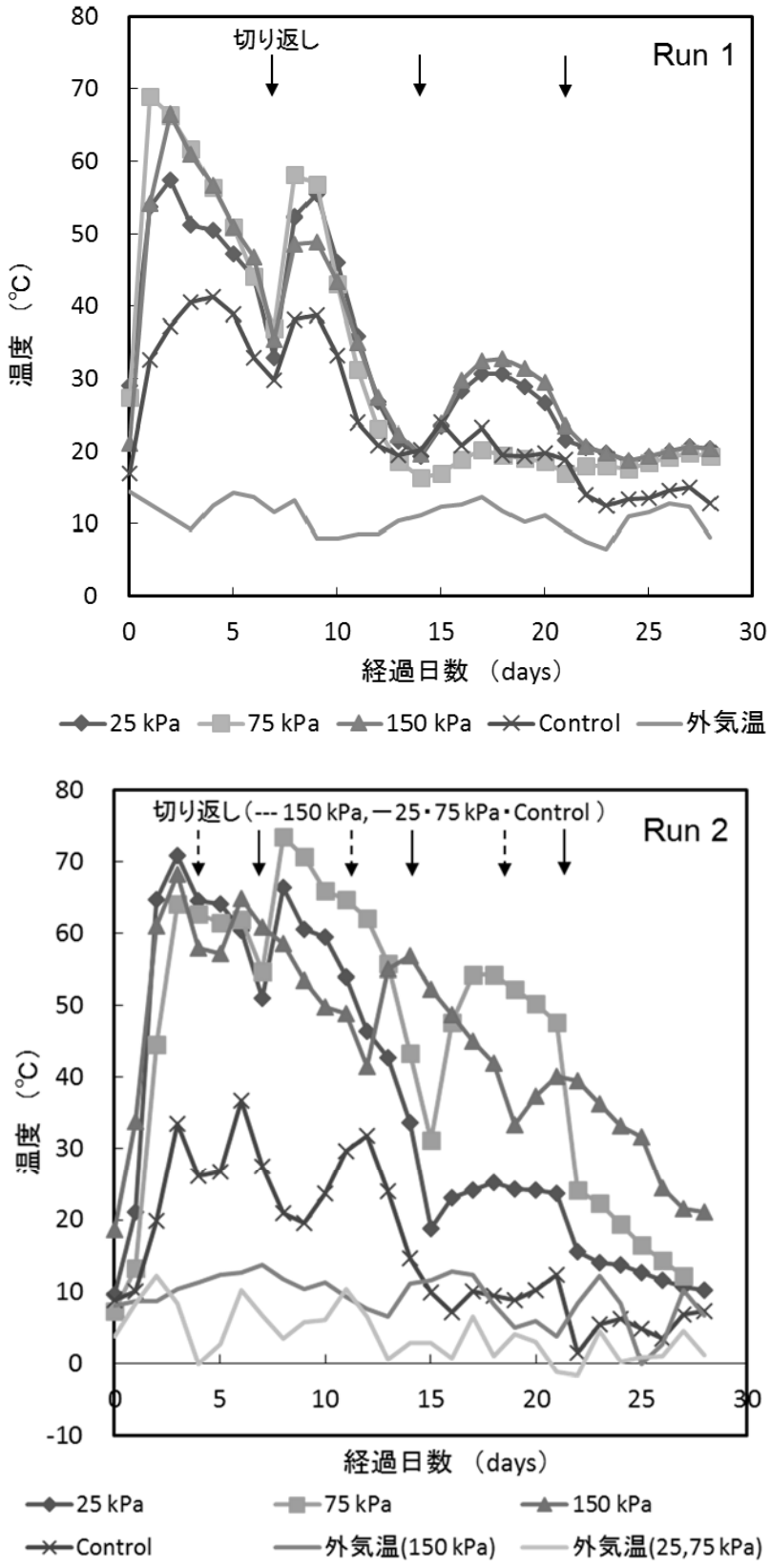

Run 1
切り返し
温度（℃）
経過日数 （days）
25 kPa
75 kPa
150 kPa
Control
外気温
Run 2
切り返し（--- 150 kPa, ― 25・75 kPa・Control ）
温度（℃）
経過日数 （days）
25 kPa
75 kPa
150 kPa
Control
外気温(150 kPa)
外気温(25,75 kPa)

図 3.4 堆肥の温度変化

（4）有機物分解

1）有機物分解率

図 3.5 に有機物分解率の経時変化を示す。Run1 での有機物分解率は 30%前後であったが，Run2 では 50%前後と高い値であった。これは Run1 では堆肥パイルの質量が少なかったことから高い温度が維持されず，有機物分解を担う微生物の活性が高い 40℃または 60℃に保たれる時間が短かったことが考えられる。また，Run1 の Control 区では有機物分解率は停滞しなかったものの 40%前後までであったことからも，固液分離した試験区では十分な有機物分解が行われたと考えられる。一方で，Run2 の Control 区では Run1 の Control 区に比べ質量が小さかったこととから，堆肥化による発酵熱が逃げてしまうことで温度が安定せず，有機物分解が十分に行われなかったと考えられる。

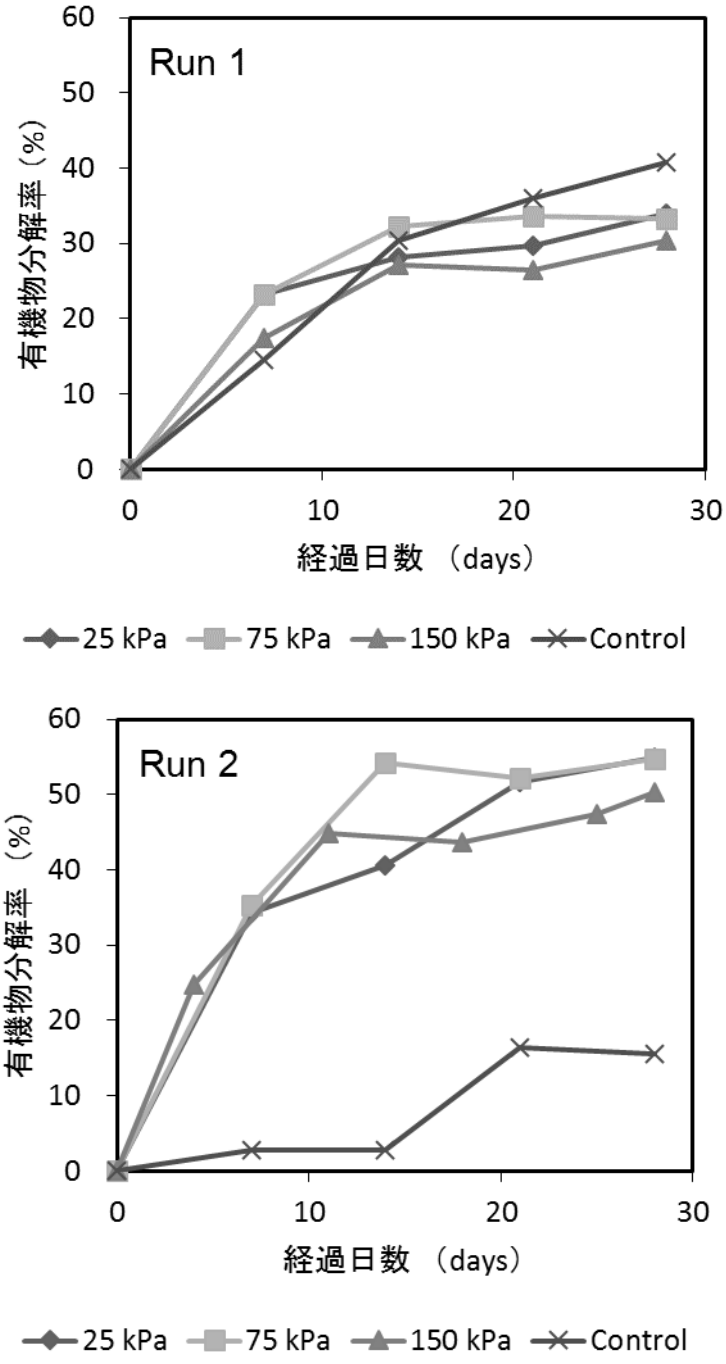



図 3.5 有機物分解率の経時変化

2）易分解性有機物

図 3.6 に乾物あたりの AD 可溶有機物量，即ち易分解性有機物の割合を示す。固液分離することで易分解性有機物は搾汁液へ移動するため，Control 区は他の試験区に比べ相対的に易分解性有機物の割合が高かった。また，Control 区では全期間を通じて易分解性有機物の割合が減少していった。前項で述べた有機物分解率が最後まで停滞しなかったことから，有機物分解は主に易分解性有機物が分解されたと考えられる。また，Run1 の Control 区以外のどの試験区においても切り返しを行った 14 日後では大きく減少し，堆肥化終了時の 28 日後までほとんど変化はなかった。

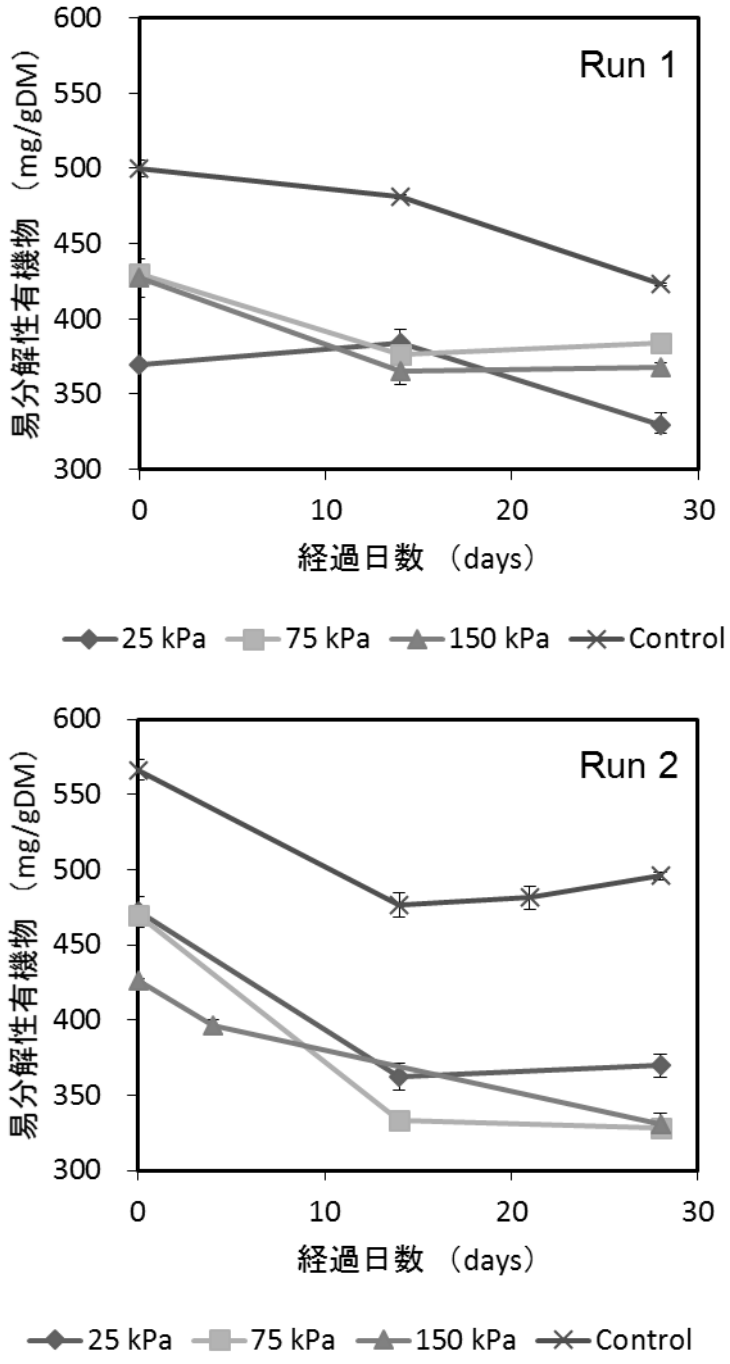



図 3.6 易分解性有機物の経時変化

3) 難分解性有機物

図 3.7 に乾物あたりに占める ADF, 即ち難分解性有機物性有機物の割合の経時変化を示す。Control 区を含めた全体の傾向として，停滞もしくはやや増の傾向を示した。これは難分解性有機物も分解されたためと考えられる。これは有機物分解が行われ乾物量が減少している中で，易分解性有機物のみが分解されるのであれば，難分解性有機物の割合は大きく上昇するためである。したがって，堆肥化一次発酵過程では通常の堆肥化と変わらず易分解性有機物が主に分解されることが確認され，難分解性有機物も緩やかに分解されることが確認できた。

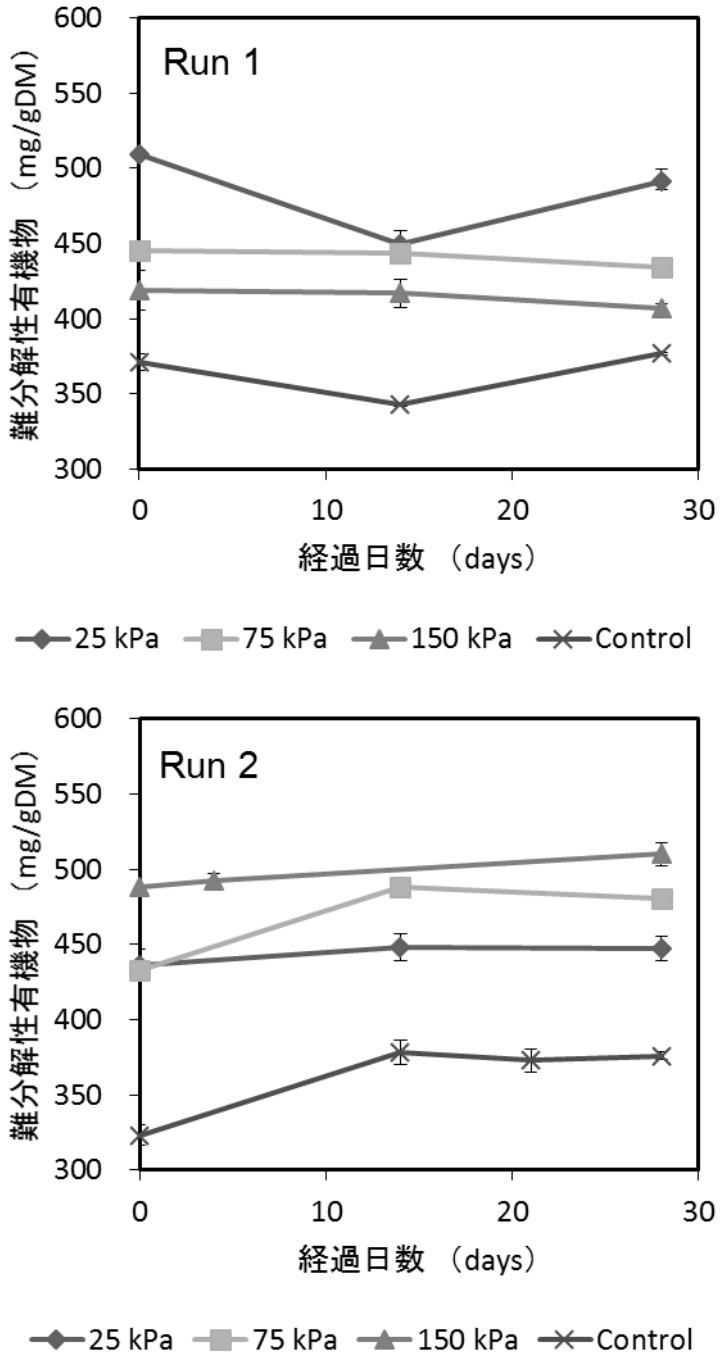



図 3.7 難分解性有機物の経時変化

4) 乾物中の成分

図 3.8，図 3.9 に乾物中の成分変化を示す。固液分離した区に関して，易分解性有機物は 28 日後には 30～40%が含まれ, 難分解性有機物は 40～50%が含まれていた。それに対し対照区は，易分解性有機物が 50%程で，難分解性有機物が 40%程と易分解性有機物の割合のほうが高い状態であった。

易分解性有機物に関する既往の研究において, 易分解性有機物が 30%以下になるのに, 牛ふんで約 100 日を要するとの研究結果がある(高橋ら, 1999)。今回，固液分離をした試験区である Run1 25 kPa 区，Run2 75 kPa 区，150 kPa 区で, 終了時点(28 日後)で既に 33%まで易分解性有機物が減少していた。即ち，堆肥化一次発酵で主に分解される易分解性有機物が固液分離により減少するため，堆肥の発酵期間の短縮に貢献することが示唆された。また，このうち Run1 は有機物分解率が低いことを考慮すると，堆肥として利用するには背圧 75 kPa 以上で固液分離することが望ましいと考えられる。

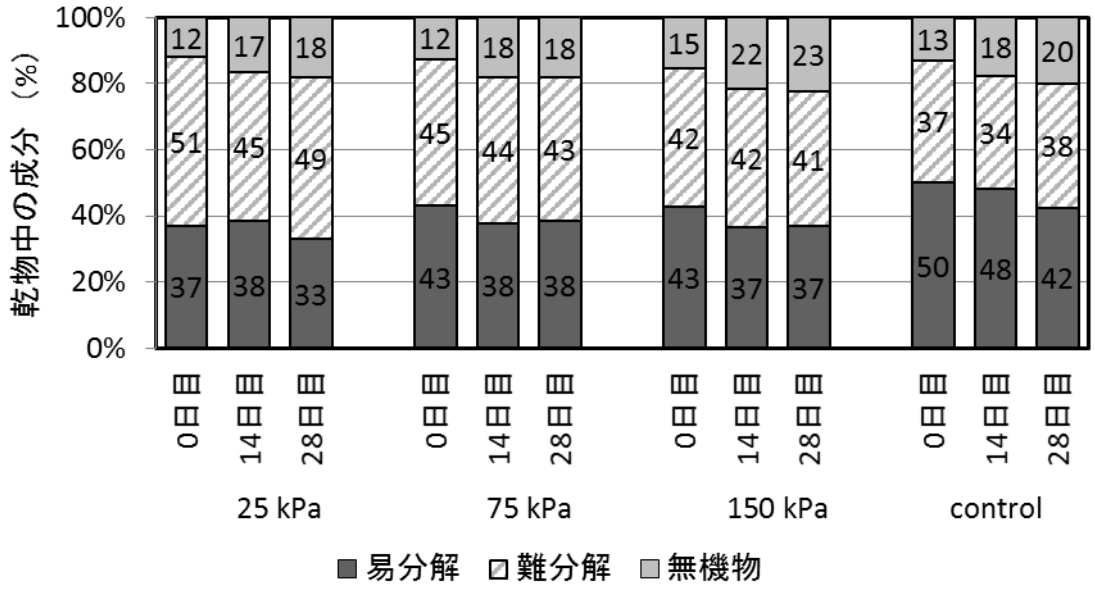



図 3.8 乾物中の成分変化（Run1）

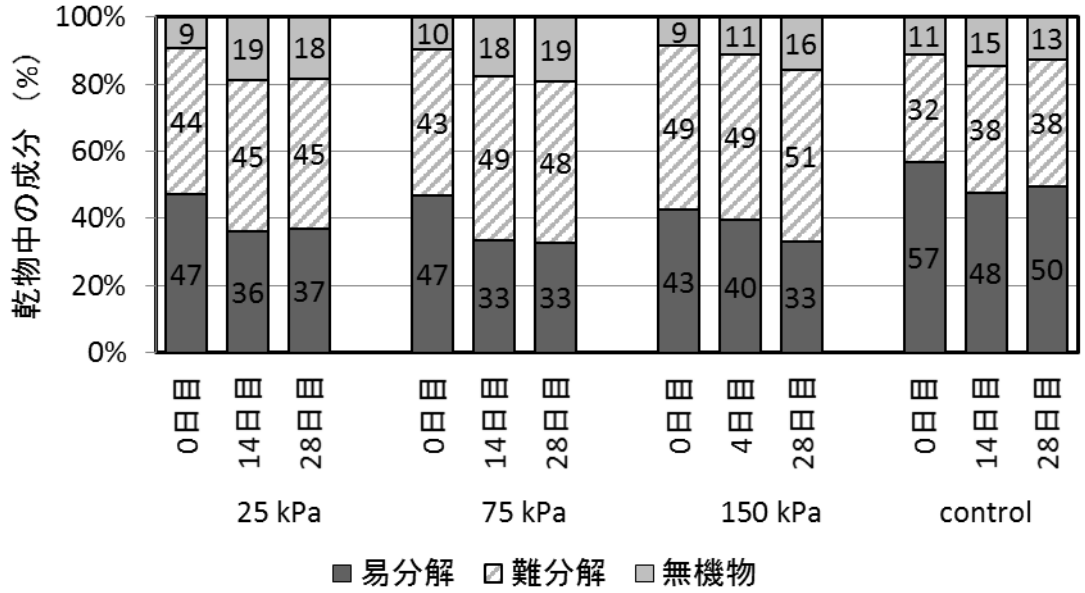



図 3.9 乾物中の成分変化（Run2）

### 3.3.3　堆肥化一次発酵後の性状

表 3.3 に各試験区の堆肥化終了時の成分を示す。固液分離したどの試験区においても堆肥化による温度上昇による水分の蒸発及び有機物分解が良好に行われたため，堆肥化開始時よりも質量は減少した。また，かさ密度と質量から体積減少率を計算したところ，固液分離した区画では 30%から 60%減少した。背圧が低い試験区であるほど堆肥化初期の含水率が高いため体積減少率が高い値となった。また，かさ密度は 165～316 kg･m$^{-3}$ と低く外観及び触った感触は柔らかく空気を十分に含んだ状態であり，土壌改良資材としても十分に利用できると考えられる。

固液分離した試験区における一次発酵後堆肥の C/N 比は 13～19 であった。堆肥の品質基準である 30 以下（堆肥化施設設計マニュアル，2000）を満たしており，易分解性有機物の割合も減少していることから，遅効性の肥料として使用できると考えられる。また，小柳ら（2011）によると難分解性有機物が易分解性有機物より多い堆肥は土壌改良剤，炭素貯留に向いているという報告がある。本研究で作成した固液分離後の堆肥は全て難分解性有機物が易分解性有機物よりも多いため，一次発酵後の状態であっても土壌改良剤として用いることが可能であると考えられる。

表 3.3　堆肥化終了時の成分

| | | Run 1 | | | | Run 2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 背圧 | (kPa) | 150 | 75 | 25 | Control | 150 | 75 | 25 | Control |
| 質量 | (kg) | 57 | 43 | 31 | 17 | 157 | 130 | 75 | 26 |
| 質量減少率 | (% ) | 53 | 49 | 69 | 66 | 50 | 38 | 64 | 27 |
| 体積減少率 | (% ) | 34 | 31 | 59 | 47 | 23 | 38 | 57 | -40 |
| 含水率 | (%w.b.) | 64.5 | 56.2 | 57.5 | 55.5 | 52.6 | 70.8 | 68.9 | 62.0 |
| かさ密度 | (kg･m$^{-3}$) | 293 | 181 | 206 | 66 | 165 | 316 | 260 | 53.2 |
| 有機物率（w.b.） | (%w.b.) | 28 | 36 | 35 | 36 | 40 | 24 | 25 | 33 |
| 有機物分解率 | (%d.b.) | 30 | 33 | 34 | 41 | 50 | 55 | 55 | 16 |
| 易分解性有機物 | (mg･gDM$^{-1}$) | 368 | 384 | 330 | 423 | 331 | 328 | 370 | 496 |
| 難分解性有機物 | (mg･gDM$^{-1}$) | 407 | 434 | 491 | 377 | 510 | 480 | 447 | 376 |
| C/N | ( - ) | 15 | 15 | 19 | 13 | 13 | 13 | 14 | 12 |

## 3.4　まとめ

背圧を変えることにより含水率 70%前後の堆肥材料が得られるが，固液分離した堆肥材料はどの条件であってもかさ密度が低いことから通気性が良く，堆肥パイルの質量が 200 kg 前後であれば堆肥温度が 60～70℃まで上昇し十分に有機物分解した。特に 75 kPa 以上の背圧条件では有機物分解率が高く，易分解性有機物の割合も低かった。このため，固液分離した堆肥はそのまま堆積し，適宜切り返すだけで十分に堆肥化が行え，雑草の種子や病原菌などの衛生面も問題ないと考えられる。また，固液分離した堆肥は初期の易分解性有機物の割合が低いことから堆肥化の発酵期間の短縮の可能性が示唆された。堆肥の使用時期も考慮する必要があるものの，堆肥生産を迅速に行うという観点からは本研究の装置では背圧 75 kPa 以上で固液分離を行うことが望ましい。しかしながら，背圧を高めることで搾汁液の量および搾汁液中に含まれる乾物が増加するため，後の液肥化を考慮すると背圧 75 kPa 前後が適当であると考えられる。

# 第 4 章　搾汁液の液肥化

第１章で述べたように，搾汁液を曝気による好気性発酵をさせることによって搾汁液中の有機物を十分に分解することができれば，畜産分野以外の園芸分野で利用することが出来る有機液肥を製造することが出来る。

一般に搾汁液は曝気時に著しく発泡し，操作に支障を来すことが多いため，消泡機やオイル添加で発砲抑制し曝気処理を行っている。さらに搾汁液は粘性が高く，酸素供給効率の低さも課題である。そこでオイル添加無しで消泡し，かつ効率的な酸素供給を図るため，以下の方法を考案した。即ち，好気性処理済み搾汁液と新鮮な搾汁液との混合による発泡抑制，ブロワーや曝気レータといった曝気装置と循環ポンプの組み合わせによる十分な酸素供給，そして搾汁液の霧化散布による発泡抑制と酸素供給を同時に行う方法である。

そこで本章では，従来よりも多くの曝気量を確保し，2 つの発酵槽を含めた 4 槽を用いて好気性処理が行える好気性発酵処理システム（(株) 葵興産 製 葵式家畜ふん尿処理プラント）を用いて連続的に曝気処理を行い，搾汁液の液肥化プロセスの検討を行った。

## 第 1 節　発酵槽の酸素供給能力の検討

### 4.1.1 はじめに

本章で使用する発酵槽は曝気レータやブロワーなどの通常の通気装置の他に，消泡機とは別に消泡を主な目的として散液装置（搾汁液を循環ポンプにて発酵槽上部より散布する際，回転板に当てて散布を行う装置）やシャワーが設置されている。

本装置では用いた散液装置やシャワーといった消泡を目的とした装置は，ふん尿を噴霧，即ち霧化を行っているため，液体の表面積が大きくなり酸素供給に寄与することが考えられる。これまでに行われてきた既往のスラリー処理（Matsuda et al，1995；松浦ら，2008）では，曝気レータやブロワーといった通常の曝気装置のみを用い，その能力については検討されてきた（Cumby, 1987)。曝気した酸素の一部のみがスラリーに溶解するため，曝気した酸素を最大限に利用するために深層曝気法と呼ばれる数 10 m に及ぶ深い層の下部で曝気を行う方法も検討されてきた（森嶋ら，2002；長澤ら，2002)。本装置では，曝気装置を用いた搾汁液の曝気時に供給されきれなかった酸素を散液装置やシャワーによって霧化した搾汁液に供給できると考えられる。また，仮に霧化による酸素供給能力が高ければ，霧化を主とした発酵が可能であると考えられ，発酵槽の制御の組み合わせを決める要素の 1 つとなる。以上のことから，曝気レータやブロワーを組み合わせたものを曝気，散液装置やシャワーを霧化としてその組み合わせを変えることで，酸素供給能力を検討した。

### 4.1.2 実験装置および方法

（1）発酵槽の仕様および特徴

曝気システムの試験は北海道の内村牧場に設置された（株）葵興産製 葵式家畜ふん尿処理プラントの発酵槽を用いて実施した。外観写真を図 4.1.1 に示す。手前に写っているものが発酵槽であり，その隣にコントロール室を備える。冬期間の気温低下に備え，曝気に用いる空気は全てコントロールボックス内から取り込む。

図 4.1.2 に使用したシステムのフロー図を示す。このシステムは 4 つの要素で構成されており，一時貯留槽，2 つの発酵槽と貯留槽がある。1 日に処理する搾汁液の量を調整でき，連続的に曝気処理を行う。発酵槽Ⅰで曝気処理され

た搾汁液が発酵槽Ⅱで曝気処理され，処理が終わった搾汁液が貯留槽へ移送される。発酵槽Ⅰで取り扱う搾汁液は未分解のものが混合されるため，発酵槽Ⅱよりも大型の曝気装置を選定している。1 章で述べたように，加水を行わずに従来以上の曝気処理を行い，曝気処理時の発泡を抑制する必要がある。このため，消泡装置や曝気レータなどを組み合わせた発酵槽を 2 つ用意し，常に十分に発酵処理を行った搾汁液と曝気処理されていない搾汁液を混合できるようにした。これは好気性菌が優占化された状態を維持するだけでなく，発泡を抑えることが目的であり，一度曝気処理を施した搾汁液に未分解の搾汁液を投入することで急激な発泡が抑えられることが報告されている（根釧農業試験場 農施設課ら，1999）また，発酵槽が 2 つあることで片方に異常が発生した際にも稼働できるよう冗長性を確保した。加えて, 2 つの発酵槽で処理された搾汁液は，従来の肥培かんがい施設等同程度に曝気処理を行う貯留槽にて好気性発酵を行うこととした。これらの発酵槽を用いて従来のスラリー処理よりも好気性発酵による微生物分解を行った液肥化を行う。

図 4.1.3 に発酵槽内部の装置概要を示す。中央部に曝気レータ，そして発酵槽の前方後方にブロワーを配置し，曝気を行う。また槽内前方からシャワーおよび散液装置を用いて，搾汁液を槽内に循環させる。後方には循環ポンプがついているため，後方から前方へとの流れができる。さらに，曝気による発生した泡は消泡機で消泡および，シャワーと循環ポンプにて強制的に液中に循環させる仕組みになっている。発酵槽Ⅱでは発酵槽Ⅰに比べて有機物の分解が進んでいるため，散液装置は付属しない。

発酵槽 1 つの容量は約 25 $m^3$ であり，最大 100 頭規模を想定している。曝気による発泡を制御する観点から，最大で発酵槽の約半分程度までしか搾汁液を投入しないことが望ましい。また，フロートにより槽内の搾汁液量を調整しているため，発酵槽の水理学的滞留日数 HRT を設定することが可能である。

図 4.1.1 発酵槽外観

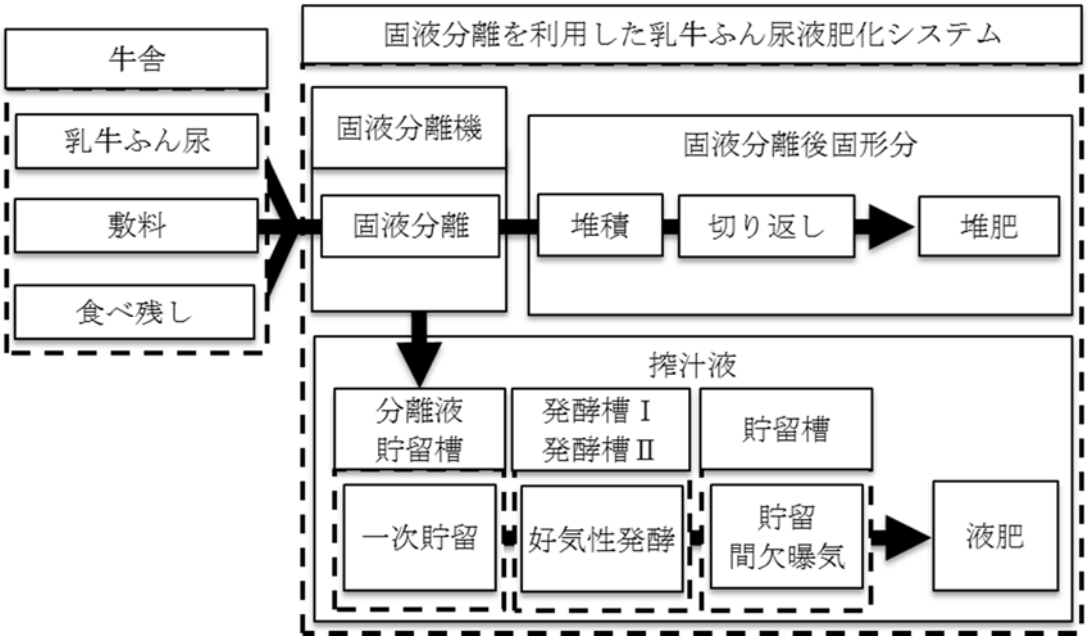
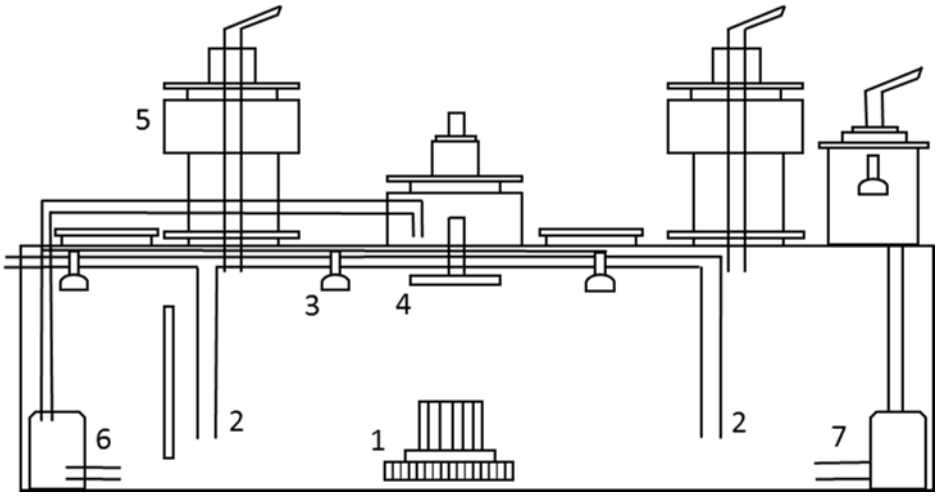



図 4.1.2 固液分離を用いた液肥化処理フロー




1.曝気レータ　2.ブロワー　3.シャワー　4.散液装置

5.消泡機　6.シャワー，散液用循環ポンプ　7.循環ポンプ

図 4.1.3 発酵槽Ⅰ内部の装置概要

（2）発酵槽の運転方法

通常，ブロワー等による曝気は搾汁液を強く発泡させるため，循環ポンプやシャワーなどを組み合わせ, シーケンス制御を用いて運転している。本節では，曝気レータおよびブロワーを組み合わせた「曝気」, シャワーおよび散液装置を組み合わせた「霧化」を検討するためにシーケンス制御を用いず，手動で装置を制御した。表 4.1.1 に曝気装置の組み合わせ条件を示す。

表 4.1.2 にブロワー，曝気レータの通気量および，シャワー等に用いる循環ポンプの吸出し量を示す。前述のとおり，発酵槽Ⅱでは曝気レータの容量が発酵槽Ⅰよりも小さく，3 分の 2 程度の通気量を持つ。

表 4.1.1 曝気装置の組み合わせ条件

| | 霧化＋曝気 | 霧化のみ | 曝気のみ |
|---|---|---|---|
| 循環ポンプ | ○ | ○ | ○ |
| シャワー | ○ | ○ | × |
| 散液装置 | ○ | ○ | × |
| ブロワー | ○ | × | ○ |
| 曝気レータ | ○ | × | ○ |

※ON：○　OFF：×

表 4.1.2 曝気および霧化装置の仕様

| | | | |
|---|---|---|---|
| 発酵槽Ⅰ | ブロワー | ($m^3$/min) | 0.63 |
| | 曝気レータ | ($m^3$/min) | 32 |
| | 循環ポンプ | ($m^3$/min) | 0.50–0.55 |
| 発酵槽Ⅱ | ブロワー | ($m^3$/min) | 0.63 |
| | 曝気レータ | (m3/min) | 22 |
| | 循環ポンプ | (m3/min) | 0.50–0.55 |

（3）実験方法

水の分析，第 4 版，日本分析化学会北海道支部編を参考にし，曝気装置の組み合わせによる酸素供給を測定した。

現地の地下水を用いた。水 1 L，DO 1.0 m･$L^{-1}$ あたり 100 g の亜硫酸ナトリ

ウムを添加し，溶存酸素 DO を下げてから，通気を行った。また，触媒として塩化コバルト(Ⅱ)を添加した。なお，後述する測定項目は DO が 0.00～0.05 の間に安定した後，8.00 mg･$L^{-1}$ 程度上昇するまで 5 分ごとに測定した。EC は通気により値が変化しないため，実験開始時のみ測定を行った。各測定装置は水面から測定部が約 15 cm 程度の深さになるように設置した。これらの測定を 2013 年 6 月 27 日から 7 月 2 日まで計 10 回行った。各回の実験条件は表 4.1.3 に示す。通常の運転時では水位を 72 cm から 145 cm 程度まで設定できる。このため，水位は 100 cm 前後とした。

表 4.1.3 各回の実験条件

| No. | 実験日時 | 発酵槽 | 条件 | | EC | 水位 | 水量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 曝気 | 霧化 | (mS･$cm^{-1}$) | | ($m^3$) |
| 1 | 6月27日 | Ⅰ | ○ | ○ | 0.634 | 116 | 10.5 |
| 2 | 6月27日 | Ⅱ | ○ | ○ | 0.598 | 96 | 8.3 |
| 3 | 6月30日 | Ⅱ | ○ | | 0.752 | 95 | 8.2 |
| 4 | 6月30日 | Ⅱ | | ○ | 0.977 | 95 | 8.2 |
| 5 | 7月1日 | Ⅱ | ○ | ○ | 1.372 | 95 | 8.2 |
| 6 | 7月1日 | Ⅱ | | ○ | No Data | 95 | 8.2 |
| 7 | 7月1日 | Ⅰ | ○ | ○ | 0.873 | 91 | 7.7 |
| 8 | 7月1日 | Ⅰ | | ○ | 10.29 | 91 | 7.7 |
| 9 | 7月2日 | Ⅰ | ○ | | 12.05 | 91 | 7.7 |
| 10 | 7月2日 | Ⅰ | ○ | ○ | 14.02 | 91 | 7.7 |

（4）測定項目

1）　溶存酸素　（mg･$L^{-1}$, %）

溶存酸素の測定は東亜電波(株)ポータブル溶存酸素計 DO-24P を用い，隔膜式ガルバニ電池法により測定した。

2）　pH　(-)

pH の測定は東亜電波（株）製 ポータブル pH メータ HM-21P を用い，ガラス電極法により測定した。

3）　水温　(℃)

水温の測定は東亜電波（株）製 ポータブル pH メータ HM-21P を用いて測定した。

4）　酸化還元電位（ORP）（mV）

酸化還元電位の測定は東亜電波（株）製ポータブル ORP メータ RM-20P を用いて，白金電極法により測定した。

5）　電気伝導度（EC）　($mS \cdot cm^{-1}$)

EC の測定は横河(株)パーソナル SC メータ ModelSC82 を用いて，交流２電極法により測定した。

### 4.1.3 結果及び考察

図 4.1.4 に曝気および霧化操作の組み合わせによる溶存酸素量変化を示す。全試験において 25 分ほどで定常状態に達したため，25 分前後までのデータを示した。なお，全実験中の水温は 16 ℃から 19 ℃であり，一回の実験では約 0.5℃温度が上昇した。また，pH は変化が見られなかった。ORP は開始時に 100 mV 前後で，終了時には 300mV 前後の値となった。

曝気のみによる効果は発酵槽Ⅰの方が大きかった。これは曝気レータの曝気量が大きいため差が生まれたと考えられる。また，曝気よりも霧化の方が溶存酸素の立ち上がりが早く，最終的な溶存酸素量も高かった。これは，曝気による酸素の供給は主に発酵槽の下部から中部で行われるのに対して，霧化は水が空気中に噴霧されることで，空気中の酸素が水滴へと移動し，それが水面に落ちることで酸素が供給される。また，表面では霧化による水滴が落ちることで水面と水面に近い空気中より酸素の移動が起きていると考えられる。このため，測定部が水面に近いこともあり，曝気のみに比べ溶存酸素

が高くなったと考えられる。曝気と霧化の両方を組み合わせた場合，曝気・霧化それぞれ単独の場合に比べ初期に早い立ち上がりを示した。そこで，それぞれ単独で操作したものを重ね合わせたところ溶存酸素 4 mg/L までの範囲では曝気および霧化を同時に行った場合とほぼ重なりあった。即ち，霧化と曝気を組み合わせることで槽内全体の溶存酸素の立ち上がりが早くなったと考えられる。搾汁液やふん尿混合物であるスラリーの曝気処理を停止すると，速やかに溶存酸素が 0 になることが報告されている（小菅ら，1997）。このため，曝気が行われている場所に速やかに未曝気の搾汁液を供給する必要がある。これらの観点から，霧化と曝気を組み合わせることで，従来の曝気処理に比べ搾汁液への酸素移動効率が高くなると考えられる。

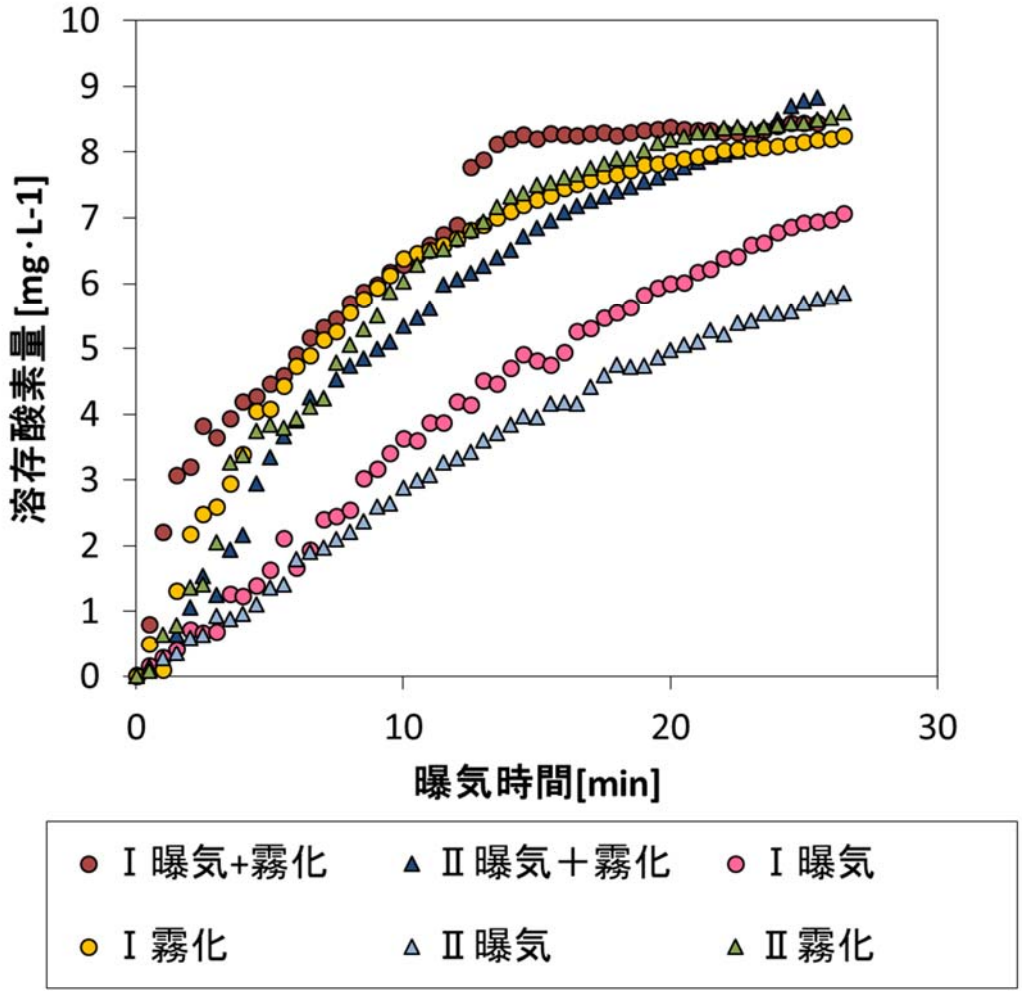



図 4.1.4 曝気および霧化操作の組み合わせによる溶存酸素量変化

### 4.1.4 まとめ

加水していない乳牛ふん尿の搾汁液を曝気処理する際，DO はすぐに消費されてしまうという報告がある。また，曝気による酸素供給を高めるために深槽曝気槽といった深い曝気槽を用いた研究もあった。このため，搾汁液に対する酸素供給能力を検討する際は初期の DO の立ち上がりを評価すべきである。今回，曝気に加えて霧化を行うことで，従来よりも速くかつ多くの酸素を供給できる可能性が示唆された。

# 第 2 節　発酵槽における最適通気量の検討

## 4.2.1 はじめに

ここでは，考案した発酵処理システムにおける通気量についての詳細な検討結果について報告を行う。家畜ふん尿処理利用の手引き（2004）によると，スラリーを散布するには積算曝気量がスラリー現物 1 t あたり約 100m$^3$ になったときとされている。この状態は「臭気の低減が図られ，急激な発泡を越えて安定した状態」とされている。通常のスラリーストアでこの条件を設定すると，数か月の曝気を必要とする。しかし，本発酵処理システムでは 2 つの発酵槽を処理した段階でこの急激な発泡を越えて安定した状態にすることで，後の貯留時の間欠曝気による好気性分解にかかる負担を減らす必要がある。このため，本節では一日の曝気時間を変えることで，最適通気量の検討を行うことを目的とした。

## 4.2.2 実験方法

（1）発酵槽の通気条件

発酵システムは搾汁液を貯留する「分離液槽」，分離液槽より移送された搾汁液に曝気処理を行う「発酵槽Ⅰ」，発酵槽Ⅰにて処理を行った搾汁液を曝気処理する「発酵槽Ⅱ」，発酵槽Ⅱにて処理を行った搾汁液を貯留および曝気する「貯留槽」の 4 槽で構成されている。

毎朝，搾汁液は一時貯留槽，発酵槽Ⅰ，発酵槽Ⅱ，貯留槽の順に移送される。搾汁液の移送方法は次にあげた方法である。

１）スクリュープレスで分離された搾汁液は分離液槽に貯められる。

２）搾汁液の量が 5 $m^3$･$day^{-1}$ に見たないときは，不足分を補うために発酵処理された搾汁液を発酵槽Ⅱから一時貯留槽に返送する。

３）発酵槽Ⅱに残っている発酵処理された搾汁液は貯留槽へと移送される。

４）発酵槽Ⅰから 5 $m^3$ の搾汁液が発酵槽Ⅱへと移送される。

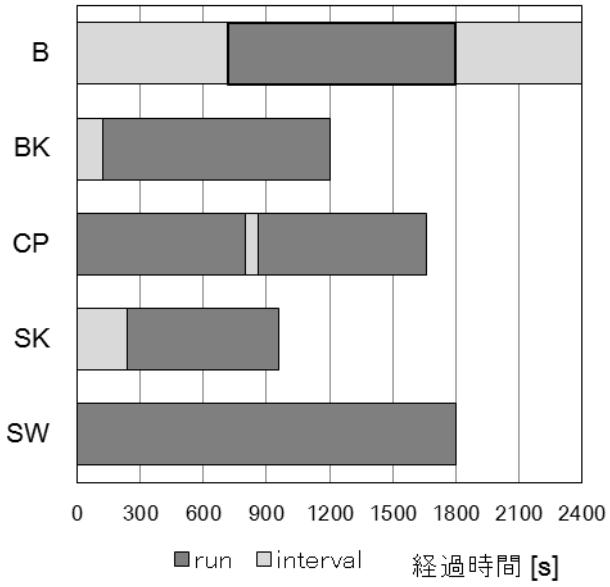
５）分離液槽から 5 $m^3$ の発酵液が発酵槽Ⅰへと移送される。

その後，発酵槽ではブロワーと曝気レータで間欠通気が行われ，シャワーと回転板のついた散液装置で液体の撹拌を行った。加えて曝気によって生じた気泡は消泡機を用いて消泡した。発酵槽でのこれらのプロセスはシーケンス制御で行った。発酵槽Ⅰ・Ⅱではそれぞれの通気量は約 75.3, 23.8 $m^3$ $m^{-3}$-slurry $cycle^{-1}$ とした。なお，シャワーによる通気効果はカウントしていない。１サイクルはそれぞれ約 40,43 分とした。

１つの発酵槽に入る搾汁液の容積は 7.8 $m^3$ と設定した。このため，発酵槽Ⅰと発酵槽Ⅱの合計した水理学的滞留日数 HRT は約 7.8 日である。

図 4.2.1, 4.2.2 に曝気サイクルを示す。ブロワーや曝気レータにより強く発砲するため，発生した泡を消しつつ酸素供給するために霧化は常に行うように設定した。また，発酵槽Ⅰでは搾汁液の分解が十分ではなく粘性が高いことが予想されるため，循環ポンプはインターバルを入れることとした。

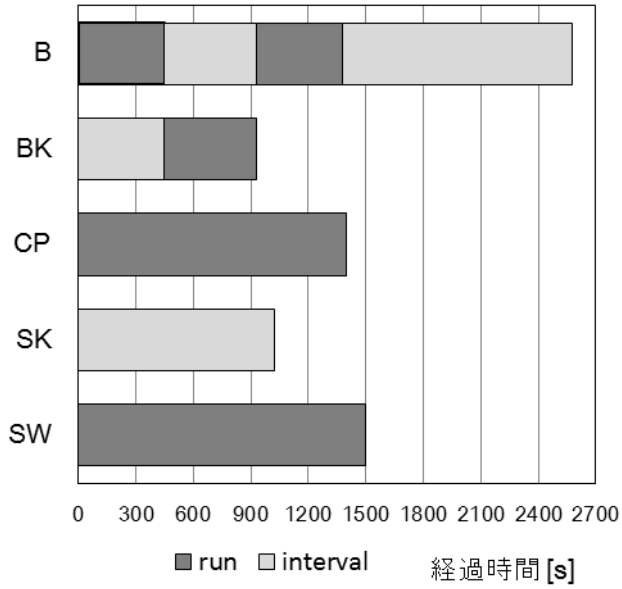
曝気処理を行う時間は 9 hr，11.5 hr，14 hr とした。2 つの発酵槽を合わせた単位体積当たりの総通気量はそれぞれ 1363 $m^3$･$m^{-3}$･$day^{-1}$，1660 $m^3$･$m^{-3}$･$day^{-1}$，2132 $m^3$･$m^{-3}$･$day^{-1}$ であった。曝気処理時間を設定した後，HRT の 2 倍以上の曝気処理時間経過後にサンプリングを行った。




B：ブロワー　BK：曝気レータ　CP：循環ポンプ

SK：散液装置　SW：シャワー

図 4.2.1 発酵槽□の運転サイクル




B：ブロワー　BK：曝気レータ　CP：循環ポンプ

SK：散液装置　SW：シャワー

図 4.2.2 発酵槽Ⅱの運転サイクル

（2）測定項目

1）　アンモニア態窒素濃度（$NH_4$-N）

水蒸気蒸留法により測定し，mg･$L^{-1}$ で表した。

湿潤試料 5g に，絶乾させた酸化マグネシウム 1 g を添加して，水蒸気蒸留した。発生した蒸気を 4%ホウ酸により捕集し，0.1 mol･$L^{-1}$ 流酸で滴定して，測定した。

2）　硝酸性窒素濃度　（$NO_3$-N）

水蒸気蒸留法により測定し，mg･$L^{-1}$ で表した。

アンモニア態窒素測定後の試料にデバルダ合金 3 g を添加して水蒸気蒸留した。発生した蒸気を 4%ホウ酸により捕集し，0.1 mol･$L^{-1}$ 流酸で滴定し，測定した。

3）　ケルダール窒素濃度　（TK-N）

ケルダール法により測定し，mg･$L^{-1}$ で表した。

湿潤試料 5 g に，ケルタブ($K_2SO_4$,4.5g+$CuSO_4$･$5H_2O$，0.5g)，硫酸 10 mL を加え，加熱分解した。分解終了後，32%水酸化ナトリウムを加え水蒸気蒸留し，発生した蒸気を 4%ホウ酸により捕集し，0.1 mol･$L^{-1}$ 硫酸で滴定し，測定した。また，ケルダール窒素濃度の値から，アンモニア態窒素濃度の値をひいた値を有機態窒素濃度の値とした。

4）　揮発性脂肪酸

湿潤試料 10 g に，濃リン酸 5mL を加えて水蒸気蒸留し，フェノールフタレインを指示薬として水酸化ナトリウム溶液で滴定し,以下の式により算出した。

$$VFA = \frac{\text{消費した水酸化ナトリウムの量}(ml)\times 60}{\text{試料重量}(g)} \times 100(ppm)$$

5）　pH　(-)

第 4 章第 1 節と同様。

6）　酸化還元電位（ORP）（mV）

第 4 章第 1 節と同様。

7）　粘度（Pa･s）

CANNON 製 LV-2000 を用いて測定した。その後，ずり速度と粘度より粘性応力τ（Pa）を求めた。

8) 有機物含有率

第 2 章と同様。

## 4.2.3 結果及び考察

（1）通気量と温度の関係

図 4.2.3，4.2.4，4.2.5 に発酵槽温度の推移を表す。外気温は発酵槽に隣接するコントロール室の温度であり，曝気に用いる空気はコントロール室より供給した。

曝気に用いる外気温の影響を受けたため,通気量による比較はできなかった。しかし，曝気時間を 9 hr 区から 11.5 hr 区に移行させた 10 日間において，通気に用いる外気温は 6℃～20℃で安定しており，その期間の発酵槽内の温度は 9 hr 区より 5℃高い 25℃まで上昇した。このことから，通気量は 11.5 hr 区の 1660 $m^3$･$m^{-3}$･$day^{-1}$ 以上が望ましいと考えられる。また，14.5hr 区においては 11.5hr 区では見られなかった，外気温が低い状態であっても通気を増やすことで好気性菌による分解が起こり，発酵槽Ⅱにおいて温度上昇が見られた。しかしながら，微生物化性を考慮すると，発酵槽内の温度は 20℃前後は保たれる必要がある。このため，コントロール室温度を最低でも 5℃以上に保てば冬期間であっても十分に発酵処理を行うことができることが示唆された。

（2）性状の変化

表 4.2.1，4.2.2 にそれぞれ pH 及び VFA の経時変化，有機物分解率の変化を示す。また，有機物分解率はそれぞれ 14.8 %，10.5 %となり，9 hr 区の方が良い結果となった。14.5hr 区では DM が上昇したことから菌体が増加し，有機物分解による無機化を上回ったと見られ，有機物分解率はマイナスとなった。また，粘度はずり速度 6 rpm での値がそれぞれ 0.443 Pa・s，0.546 Pa・s，0.517 Pa・s であり，両者は擬塑性流体から水と同じニュートン流体に大きく近づいた（図 4.2.6，図 4.2.7，図 4.2.8）。14.5hr 区の発酵槽Ⅱ開始時の流動曲線が他の試験区における発酵槽Ⅰでの流動曲線と同じことから，有機物が増加したことがわかる。pH は発酵槽Ⅱでの処理が終わった時点でそれぞれの試験区で 8.00，8.16，7.95 となった。これは両試験区の有機態窒素の無機化によるアンモニア態窒素の増加がほとんど見られなかったが，VFA が減少したことが原因で pH が増加したと考えられる。また，両試験区の発酵処理後の搾汁液は茶褐色から褐色であり，未処理の搾汁液に見られる強いアンモニア臭はなかった。

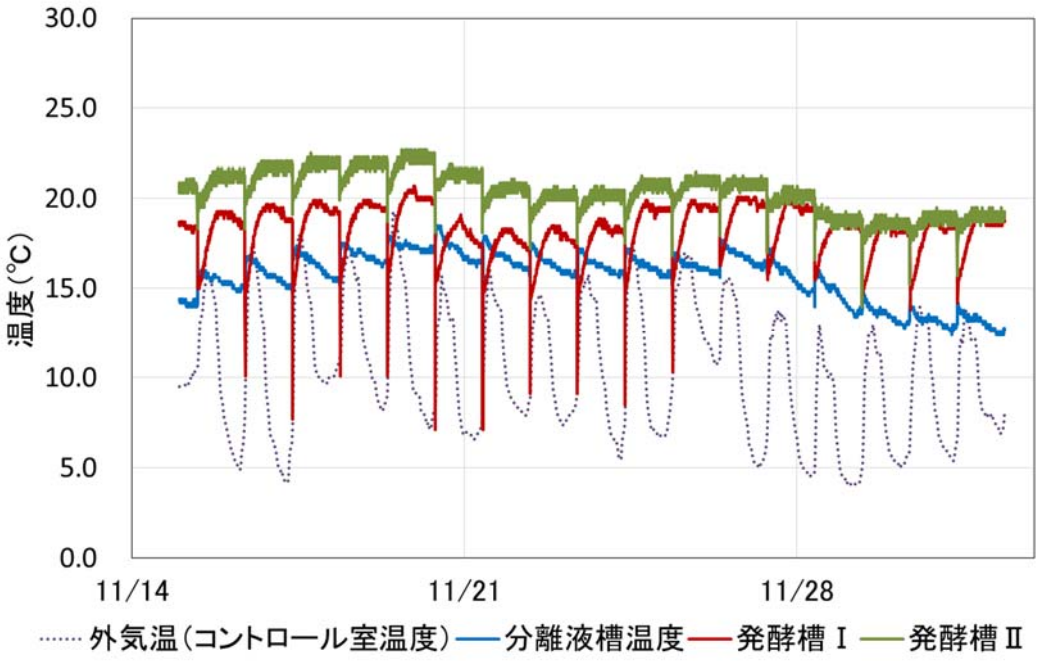



図 4.2.3 9hr 区における発酵槽温度の推移

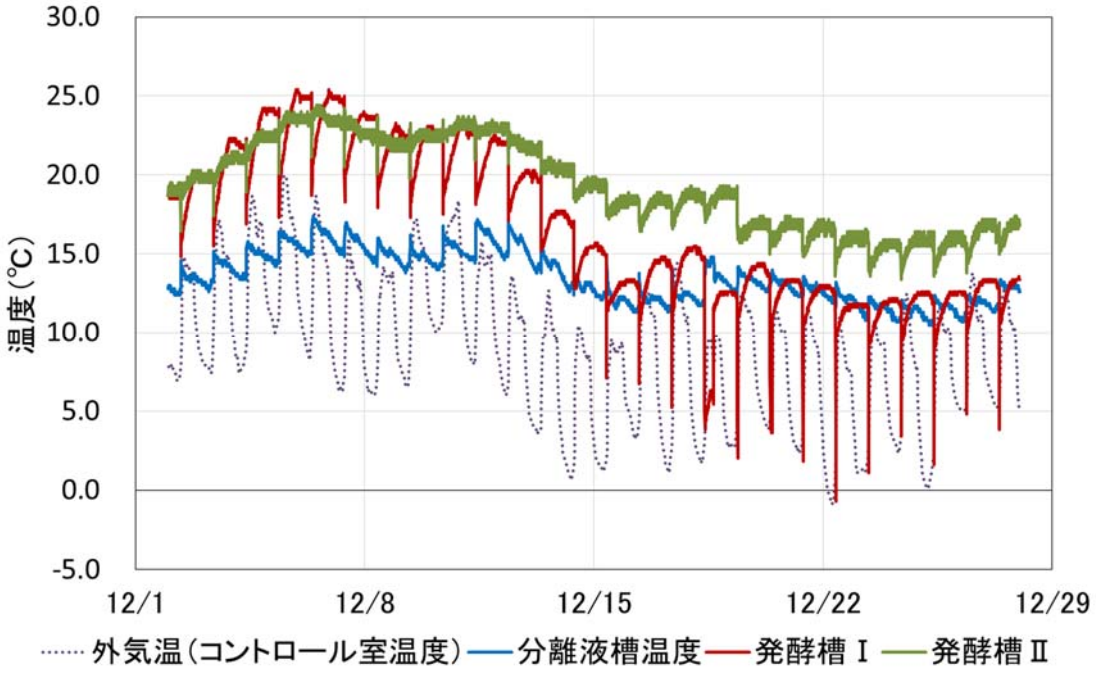



図 4.2.4 11.5hr 区における発酵槽温度の推移

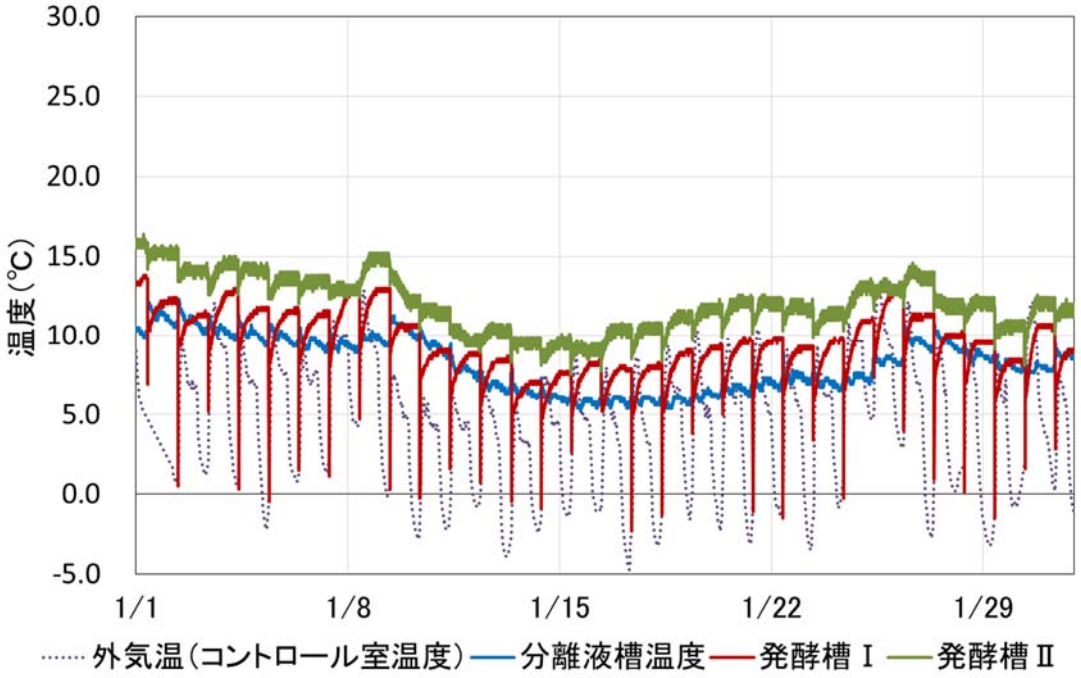



図 4.2.5 14.5hr 区における発酵槽温度の推移

表 4.2.1 pH と VFA の推移

| サンプル名 | 採取時刻 | pH (−) | | | 低級脂肪酸量(mg·kg$^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 9hr区 | 11.5hr区 | 14.5hr区 | 9hr区 | 11.5hr区 | 14.5hr区 |
| 分離液槽 | 8:30 | 7.32 | 7.60 | 7.65 | 3196 | 5799 | 4731 |
| 発酵槽Ⅰ開始 | 9:30 | 7.74 | 7.86 | 7.81 | 3799 | 5648 | 3741 |
| 発酵槽Ⅰ終了 | 8:30 | 7.70 | 8.02 | 7.89 | 3022 | 5099 | 2854 |
| 発酵槽Ⅱ開始 | 9:30 | 7.92 | 8.11 | 7.91 | 6491 | 4242 | 2441 |
| 発酵槽Ⅱ終了 | 8:30 | 8.00 | 8.18 | 7.95 | 2842 | 3723 | 2182 |

表 4.2.2 有機物分解率の推移

| | 9hr区 | | | 11.5hr区 | | | 14.5hr区 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ASH (%) | VM (%) | 有機物分解率(%) | ASH (%) | VM (%) | 有機物分解率(%) | ASH (%) | VM (%) | 有機物分解率(%) |
| 分離液 | 1.55 | 4.59 | 0 | 1.55 | 4.59 | 0 | 1.38 | 4.00 | 0.0 |
| 分離液槽 | 1.43 | 4.41 | −4.2 | 1.54 | 4.50 | 0.9 | 1.61 | 4.62 | 0.9 |
| 発酵槽Ⅰ開始 | 1.62 | 4.43 | 7.6 | 1.58 | 4.51 | 3.5 | 1.64 | 4.55 | 3.8 |
| 発酵槽Ⅰ終了 | 1.65 | 4.21 | 13.4 | 1.56 | 4.40 | 4.6 | 1.62 | 4.66 | 0.6 |
| 発酵槽Ⅱ開始 | 1.44 | 4.96 | −16.9 | 1.54 | 4.46 | 2.3 | 1.26 | 4.93 | −35.3 |
| 発酵槽Ⅱ終了 | 1.62 | 4.08 | 14.8 | 1.61 | 4.25 | 10.5 | 1.29 | 4.94 | −32.4 |

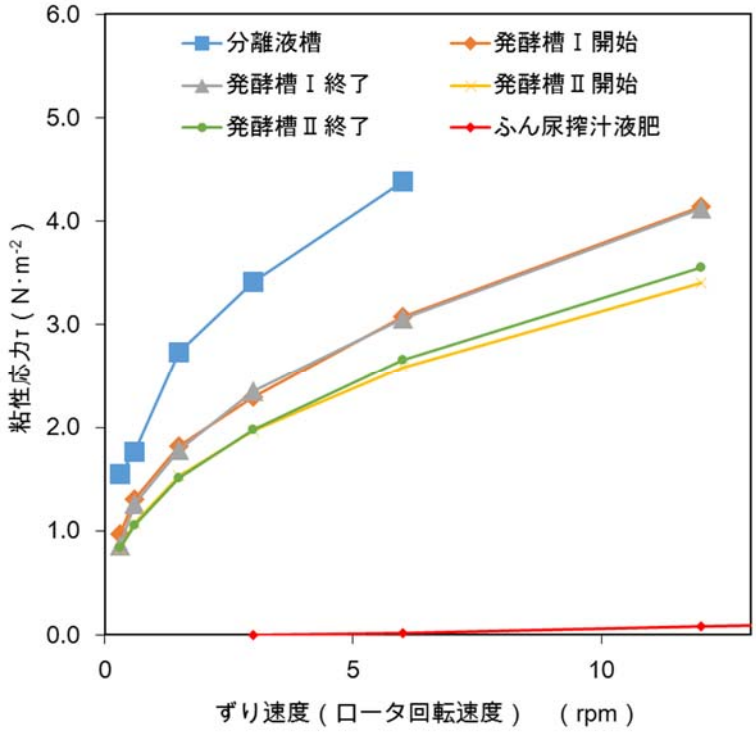



図 4.2.6 9hr 区の流動曲線

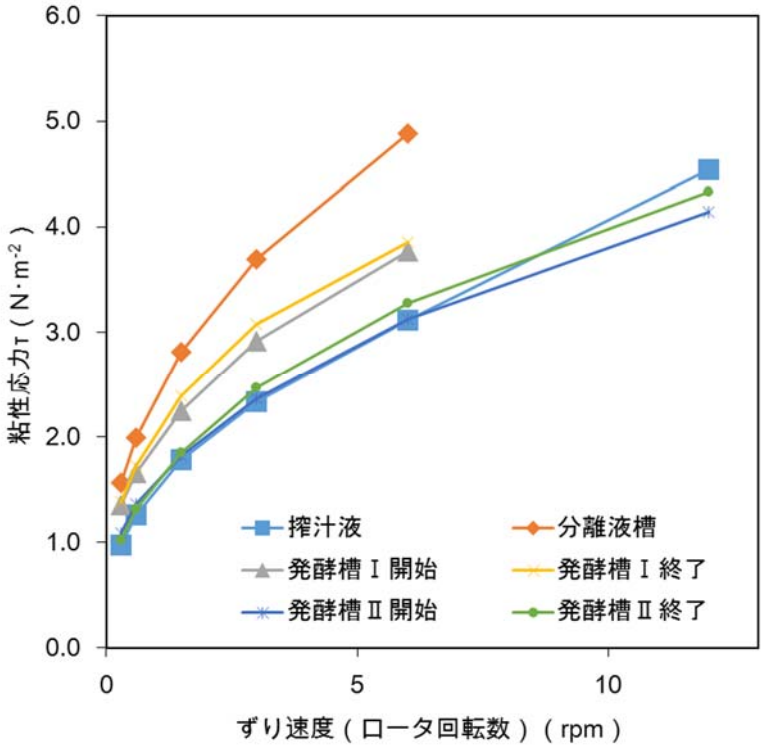



図 4.2.7 11.5hr 区の流動曲線

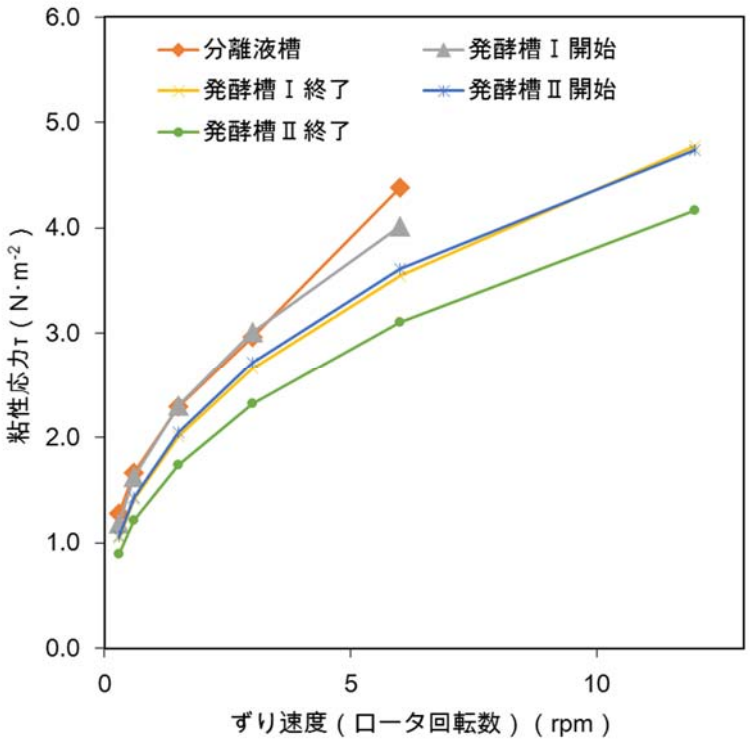



図 4.2.8 14.5hr 区の流動曲線

## 第 3 節　有機液肥の作成

### 4.3.1　実験条件

（1）有機液肥作成条件

第 1，2 節を踏まえ，有機液肥の作成を 2 回行った。曝気時間は午前 9 時 30 分から午後 6 時 30 分までの 9 時間曝気と，午前 10 時から午後 10 時まで 12 時間とした。積算通気量は発酵槽Ⅰ・Ⅱにおいて，約 611，122 $m^3$･$m^{-3}$ならびに約 815,163 $m^3$ $m^{-3}$-slurry $day^{-1}$とした。水理学的滞留日数 HRT は約 13 日であった。これは発酵槽には 13 $m^3$ の搾汁液が入るようにし，投入される新鮮な搾汁液の量は約 2 $m^3$ であったからである。また，一日の処理量を 5 $m^3$ としたため，搾汁液貯留槽より発酵槽Ⅰに投入される搾汁液は，新鮮な搾汁液 2 $m^3$ と発酵槽Ⅱの曝気処理が行われた 3 $m^3$ の搾汁液の混合物であった。これによ

り発酵槽Ⅱの優占化した好気性微生物が新鮮な搾汁液と混合され，好気性微生物の優占化を促した。その後，貯留槽にて間欠曝気を行った。貯留槽の容積は約 520 $m^3$ であり，散布を行わない期間の貯留量を想定しており，約半年間の貯留を行う。したがって，貯留槽の曝気量を計算するに当たり，貯留は 6 ヶ月間行われたと仮定した。なお，間欠曝気は発酵槽が稼働している時間内に 3 分おきに 10 分間の曝気を行う。また，ブロワーは発酵槽と同じものを使用した。単位体積あたりの曝気量は 6 ヶ月間の総通気から算出し，9 時間曝気，12 時間曝気では貯留槽において，ぞれぞれ 131 $m^3$・$m^{-3}$-slurry・$day^{-1}$，167 $m^3$・$m^{-3}$-slurry・$day^{-1}$ の曝気を行った。

9 時間曝気区に関しては発酵槽Ⅰ・Ⅱの経時変化を確認した。サンプル採取は 1, 3, 5, 7 および 9 時間後とした。

（2）測定項目

1）　化学的酸素要求量　(Chemical Oxygen Demand；COD)

重クロム酸法により測定し，mg/L で表した。

試料を蒸留水で適当な倍率で希釈し，その後遠心分離機で 3000rpm，15 分間遠心分離した後，上澄液を重クロム酸溶液に 2mL 加え，150℃で 120 分間分解させた後，比色計(HACH 製 DR2000)により測定した。

2）　pH　(-)

第 4 章第 1 節と同様。

3）　酸化還元電位（ORP）（mV）

第 4 章第 1 節と同様。

4）　粘度（Pa・s）

第 4 章第 2 節と同様。

5) 有機物含有率

第 2 章と同様。

### 4.3.2　結果及び考察

本発酵処理システムを用いて作成した有機液肥を始めとしたスラリーの固形物量を図 4.3.1 に示す。ここでは貯留槽までの搾汁液の性状変化について報告する。また，参考に第 5 章で取り扱う固液分離を行わず，曝気による好気性発酵のみを行う従来の肥培かんがいスラリーも示した。

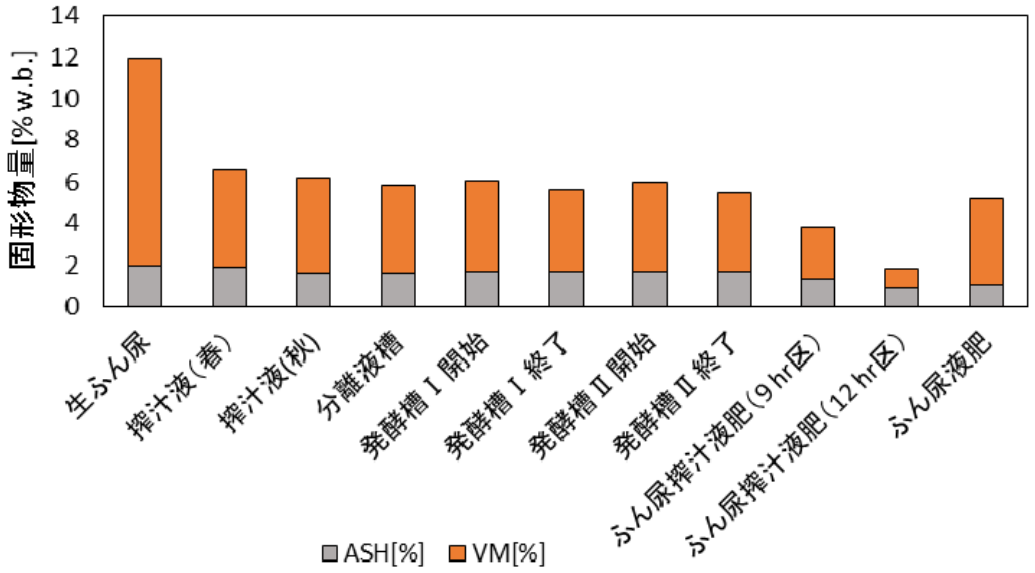



図 4.3.1 搾汁液の液肥化による固形物分解

（1）発酵槽における搾汁液の性状変化

図 4.3.2 に pH,および ORP の変化を示す。pH は，発酵槽Ⅰで 8.03 まで上昇し，発酵槽Ⅱでは一度減少した後に 8.36 まで上昇した。これは発酵槽Ⅰから発酵槽Ⅱへと移送され混合されたため一度減少したと考えられる。曝気により VFA の分解，有機態窒素の分解によりアンモニア態窒素が増加したことにより pH が上昇したと考えられる。また，発酵槽Ⅰ，Ⅱともに ORP は約-450mV で推移し，発酵槽Ⅰではわずかに上昇した。

図 4.3.3 に COD の経時変化を示す。COD はいったん上昇し，８時間後には

大きく減少した。これは曝気により酸素が供給され，微生物が増殖したことにより COD も増加し，増加した微生物により有機物や VFA が分解されて COD が減少したと考えられ, 有機物分解率も 8 時間以降大きく増加した(表 4.3.1)。COD は TS にも影響してくるため, 好気性処理を行うには最低でも 8 時間は本条件で曝気処理を行う必要があると考えられる。

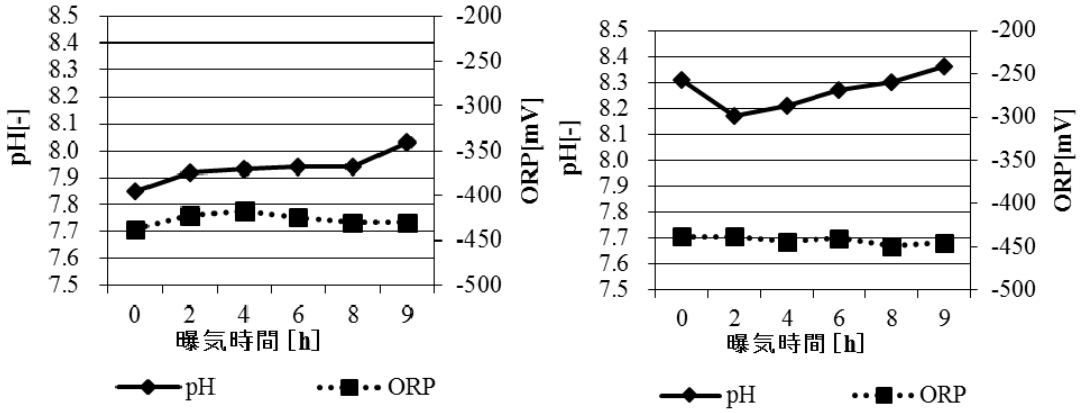



図 4.3.2 曝気中の発酵槽における pH，ORP 変化

（左図：発酵槽Ⅰ，右図発酵槽Ⅱ）

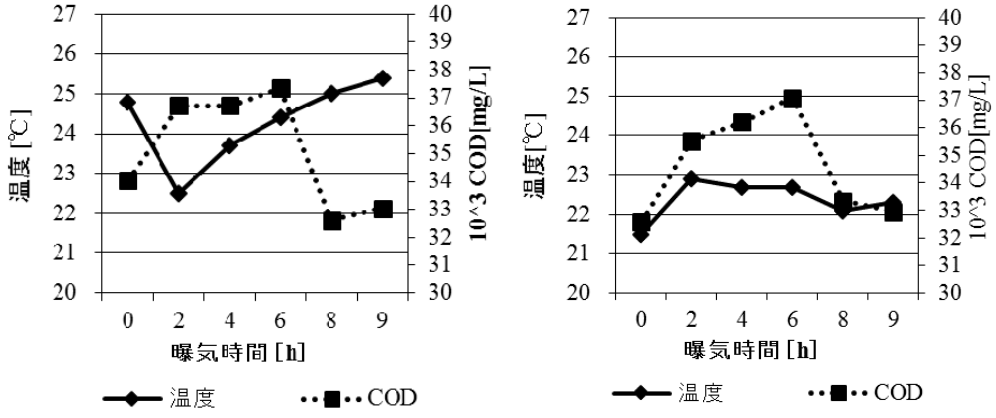



図 4.3.3 曝気中の発酵槽における COD 変化

（左図：発酵槽Ⅰ，右図発酵槽Ⅱ）

表 4.3.1 曝気処理中の有機物分解の経時変化

| サンプル名 | 時刻 | TS[%w.b.] | VS[%d.b.] | ASH[%] | VM[%] | 有機物分解率[%] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 搾汁液 | | 6.21 | 74.2 | 1.60 | 4.61 | 0.0 |
| 分離液槽 | 11:30 | 5.87 | 72.1 | 1.64 | 4.23 | 10 |
| 発酵槽Ⅰ開始 | 10:30 | 5.99 | 72.1 | 1.67 | 4.32 | 10 |
| 発酵槽Ⅰ | 12:30 | 6.21 | 74.6 | 1.58 | 4.63 | −2.2 |
| 発酵槽Ⅰ | 14:30 | 6.00 | 73.3 | 1.60 | 4.40 | 4.5 |
| 発酵槽Ⅰ | 16:30 | 6.07 | 72.9 | 1.64 | 4.42 | 6.3 |
| 発酵槽Ⅰ | 18:00 | 6.06 | 72.7 | 1.65 | 4.41 | 7.1 |
| 発酵槽Ⅰ終了 | 8:00 | 5.64 | 70.7 | 1.65 | 3.98 | 16 |
| 発酵槽Ⅱ開始 | 10:30 | 5.98 | 71.7 | 1.69 | 4.29 | 12 |
| 発酵槽Ⅱ | 12:30 | 6.06 | 74.0 | 1.58 | 4.48 | 1.1 |
| 発酵槽Ⅱ | 14:30 | 5.98 | 72.9 | 1.62 | 4.36 | 6.2 |
| 発酵槽Ⅱ | 16:30 | 5.97 | 72.4 | 1.65 | 4.32 | 8.7 |
| 発酵槽Ⅱ | 18:00 | 5.96 | 71.9 | 1.68 | 4.28 | 11 |
| 発酵槽Ⅱ終了 | 8:00 | 5.47 | 69.7 | 1.66 | 3.81 | 20 |

発酵槽Ⅱまでは主に有機物が分解し，最大で 20%ほど分解したことがわかった。

（2）貯留槽における搾汁液の性状変化

その後の貯留および間欠曝気を行ったところ, 有機物量 VM が主に減少した。また，貯留槽内で夾雑物が一部沈殿するため，最終製品であるふん尿搾汁液肥では粗灰分 ASH の量も減少していた。以上のことから，発酵槽を用いて短期間好気性処理を行い，曝気しても急激に発泡しない状態まで分解することで，既往の肥培かんがい施設で推奨されているような単位体積あたり 100 $m^3$ の 1.5 倍程度の通気量があれば，後の貯留槽での間欠曝気でも十分に分解することがわかった。

## 4.4 まとめ

本試験で用いた発酵槽では，好気性処理済み搾汁液と新鮮な搾汁液との混合による発泡抑制，ブロワーや曝気レータといった曝気装置と循環ポンプの組み合わせによる十分な酸素供給，そして搾汁液の霧化散布による発泡抑制と酸素供給を同時に行うことで，従来の曝気処理に用いる曝気量の 10 倍にあたる，単位体積当たり 1000 $m^3$･$day^{-1}$ 以上の曝気を行うことができた。また，発酵槽で処理された搾汁液は最大で約 20%の有機物分解が行われ臭気も減少し，牧草地へ表面散布が可能な性状であった。その後，半年間の貯留および間欠通気を 160 $m^3$･$day^{-1}$ 前後で行うことで TS2 %DM 以下の有機液肥を作成できることが明らかになった。

# 第 5 章　有機液肥の評価と キュウリの灌水同時栽培への適用

第 4 章で作成した乳牛ふん尿搾汁液を好気性発酵させた液肥(以下ふん尿搾汁液肥）は貯留槽で間欠曝気をすることでより微生物分解が進み，液中の夾雑物がさらに小さくなる。このように本研究で作成した有機液肥は粘性が小さく，液中の夾雑物が小さいため，第 1 章でも述べたように固液分離後の搾汁液を施設園芸で用いることができれば畜産分野以外の新たな出口となる。しかしながら，実際に使用した際に灌水チューブに目詰まりが起きないか，並びに肥効が未検討であった。そこで今回は，これまで灌水同時施肥栽培による施肥管理技術が確立され，有機質肥料でもメタン発酵消化液のような使用事例(芳野ら，2012)のあるキュウリを用い，栽培試験を行った。

本章では，乳牛ふん尿を固液分離機で固液分離し，その搾汁液を曝気処理したふん尿搾汁液肥と，固液分離しない従来の肥培かんがい施設の液肥などの物理的性質を比較検討するとともに，ふん尿搾汁液肥を灌水同時施肥に用いてキュウリの栽培を行い，乳牛ふん尿の搾汁液の灌水同時施肥の利用可能性および化学肥料の代替可能性について検討した。

## 第 1 節　有機液肥の物理的性質評価

### 5.1.1　はじめに

乳牛ふん尿由来の液状肥料は夾雑物を多く含み，粘性が高い。このため，そのまま灌水同時施肥に用い，施用すると灌水チューブが詰まるため，事前に夾雑物の除去および粘性を下げるための微生物分解が必要となる。従来の肥培か

んがい施設で作成された液肥は曝気による好気性発酵処理が行われ，微生物分解が進められているが，機械による固液分離はされておらず十分に夾雑物の除去が行われていない。

そこで本節では牛ふん尿を固液分離機で固液分離し，その搾汁液を曝気処理したふん尿搾汁液肥と，固液分離しない従来の肥培かんがい施設の液肥などに含まれる夾雑物の大きさとその量を比較検討することを目的とした。

## 5.1.2 実験方法

### (1) 材料および方法

図 5.1.1 に実験材料の処理条件を示した。(a)乳牛ふん尿は，北海道室蘭市の牧場より採取したものを使用した。(a)乳牛ふん尿を固液分離した「(c)搾汁液」，およびこの(c)搾汁液に曝気処理を施し好気性発酵を行った「(d)ふん尿搾汁液肥」は，いずれも後述する家畜ふん尿処理設備により製造されたものを使用した。また，固液分離などを行わず，好気性発酵である曝気処理を行う肥培かんがい施設で製造された(b)ふん尿液肥を比較に用いた。製造されたふん尿搾汁液肥は，後述するキュウリの栽培試験にも用いた。病原性大腸菌群などに対する安全性を確保するために，バーナー加熱によって 75 ℃で 12 分間殺菌処理を施した。

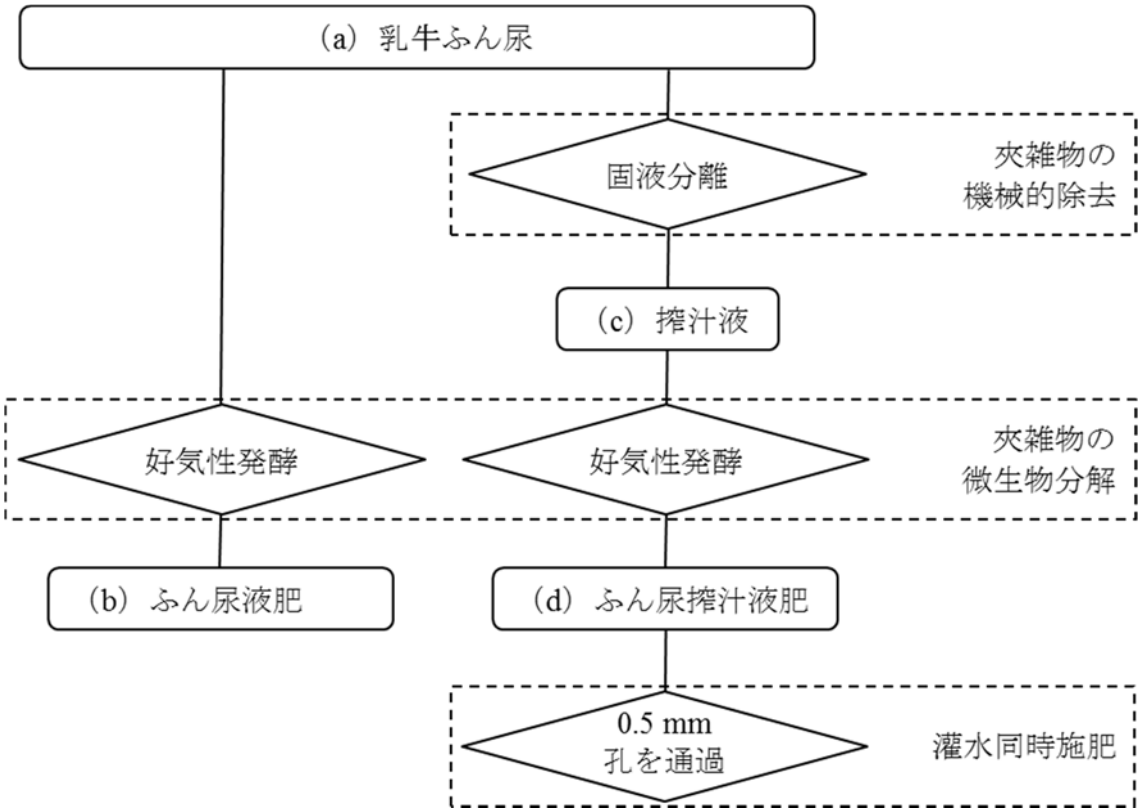



図 5.1.1　実験材料の処理条件

曝気による好気性発酵を行ったふん尿液肥，およびふん尿搾汁液肥の作成条件を以下に示す。

1)　(b)ふん尿液肥

北海道上川郡清水町の牧場に設置された，肥培かんがい施設の貯留タンクより採取した。乳牛ふん尿を直径 21.5 m，深さ 4.25 m の貯留タンクに約 3 m の高さまで乳牛ふん尿を貯め，曝気処理を行い，発生した泡は消泡機を用いて消した。曝気はブロワーにより 4.7 $m^3 \cdot min^{-1}$ ，１日 3～4h，3～5 ヶ月間行う。本試験で用いたふん尿液肥はヒアリングおよび現地調査により，貯留槽の充填率 60～65%，1 日 3.5 時間，5 ヶ月間の曝気として曝気量を計算し，試料 1 $m^3$ あたりの積算曝気量は約 156 $m^3$ であった。乳牛ふん尿スラリーを曝気処理し散布する際の基準として，100 $m^3 \cdot m^{-3}$-slurry が推奨されており肥培かんがい施設における一般的な曝気量を十分に超えている（家畜ふん尿処理利用の手引

き，2004)。

2) (d)ふん尿搾汁液肥

第４章で述べたようにシーケンス制御を用いて曝気処理を行った。発酵槽Ⅰ・Ⅱではそれぞれの単位スラリー容積当たり通気量は１サイクルあたり約 45.3, 14.3 $m^3 \cdot m^{-3}$ とした。なお，シャワーによる通気効果はカウントしていない。１サイクルはそれぞれ約 40 および 43 分とした。搾汁液の急激な発泡が起きた場合など，制御に万が一問題が起きたときに備えて，酪農家の作業時間である午前 10 時から午後 10 時まで曝気を行った。2 つの発酵槽に入っている固液分離後液分の容量はそれぞれ約 13.0 $m^3$ とした。1 日分の処理量を約 5 $m^3$ とし，足りない場合は発酵槽Ⅱから分離液貯留槽へ移送した。一日に発生する搾汁液の量は約 2 $m^3$ 前後であったことから水理学的滞留日数 HRT は 13 日前後であった。したがって, 積算通気量は発酵槽Ⅰ・Ⅱにおいて, それぞれ約 815,163 $m^3 \cdot m^{-3} \cdot day^{-1}$ であった。この後，貯留槽にて貯留し，間欠通気を行った。

## (2) 測定項目

1) 試料湿潤質量（g）

電子天秤を用い，0.0001g 単位で測定した。

2) 全固形物量 TS

「水の分析-第 4 版-」(日本分析化学会北海道支部, 1994)に従い, 試料を 105℃で恒量になるまで，少なくとも 24 時間以上乾燥し測定を行った。

3) 粘度（Pa･s）

CANNON 製 LV2000 を用いて測定した。測定時の液温は 10～15 ℃とした。

4) 粒径分布

「土壌物理実験法」(宮崎ら,2011)に従い， Yoder 法に準拠した湿式篩別法に

よっておこなった。試料は質量で 300 g 前後とし, 湿式ふるい装置(振幅 3 cm, 20 回/分)の中に水を入れ，その中で標準組ふるい(篩目 2.0, 1.0, 0.5, 0.25, 0.1 mm)を組み立てた。0.1 mm 以下の粒子は試料の総固形物量とそれぞれのふるい上に残った固形物量の差から求めた。なお，ふるい上の固形物量 DM は TS 同様に 105℃-24h 法で測定した。

### 5.1.3 結果及び考察

採取した(a)乳牛ふん尿，(b)ふん尿液肥，(c)搾汁液，(d)ふん尿搾汁液肥の性状を表 5.1.1 に示す。試験に用いた(a)乳牛ふん尿はふんと尿の混合物であるため含水率約 88%であり, 一般的な乳牛のふんは含水率 84～86%と比べ高かった（畜産環境整備機構，1998)。しかし，乳牛ふんの堆肥化を対象とした前田ら（2009）の研究および，スラリー処理を目的とした岡本ら（2005）では 87%～89%であり, 本試験で用いた乳牛ふん尿は一般的な性状であると考えられる。液肥中の TS 及び粘度が大きいと灌水チューブの点滴孔が夾雑物で詰り，灌水同時施肥に利用しにくい。(d) ふん尿搾汁液肥は従来の手法で作成された (b) ふん尿液肥, (c) 搾汁液に比べ TS,粘度ともに大きく減少していた。しかしながら，液肥中の夾雑物が灌水チューブの点滴孔より大きいと，夾雑物が点滴孔をつまらせ使用できなくなる。そこで本研究で用いた灌水チューブ孔の最も小さい径を調べたところ，最小径は約 0.5 mm であった。液肥中夾雑物の粒径が 0.5 mm 以下であると使用できると考えられる。

表 5.1.1 乳牛ふん尿から製造された
ふん尿液肥，搾汁液およびふん尿搾汁液肥の粘度と TS の比較

| | (a)<br>乳牛ふん尿 | (b)<br>ふん尿液肥 | (c)<br>搾汁液 | (d)<br>ふん尿<br>搾汁液肥 |
|---|---|---|---|---|
| 粘度 [Pa･s] | - | 0.225 | 0.330 | 0.007 |
| TS [% w.b.] | 11.9 | 5.2 | 6.6 | 1.8 |

※粘度はロータ回転数 12 rpm での値

図 5.1.2 に各試料湿潤質量 1kg 中の夾雑物分布を示す。(a)乳牛ふん尿と(c)搾汁液の TS 分布を比較すると，乳牛ふん尿中の粒径 0.5 mm 以上の夾雑物がスクリュープレスを用いた固液分離操作によって機械的に分離されたことにより約 25 %除去された。また，(b)ふん尿液肥は微生物分解はされているが機械的に分離されていないため，0.5 mm 以上の夾雑物が(a)乳牛ふん尿と比べ少ない。しかし，(b)ふん尿液肥の 0.5mm 以上の粒子が残っているため，灌水同時施肥には使用できないと考えられる。また，表 5.1.1 に示したように粘度は(c)搾汁液が(b)ふん尿液肥の約 2 倍であった。これは(c)搾汁液は固液分離操作によって粗大な夾雑物が取り除かれたが，0.5 mm 以下の夾雑物割合が増加したことと，(b)ふん尿液肥のように微生物分解による夾雑物の微細化が行われていないと考えられる。一方，(d)は粒径 0.5 mm 以上の夾雑物が 0.03g しか存在していない。これは(c)搾汁液を十分に曝気処理した(d)ふん尿搾汁液肥は微生物による分解により夾雑物が十分に微細化されたということを意味しており，灌水同時施肥に利用可能と考えられる。即ち，スクリュープレスを用いた固液分離操作により夾雑物を取り除くことで，後の微生物分解における夾雑物の微細化が容易に実現できた。

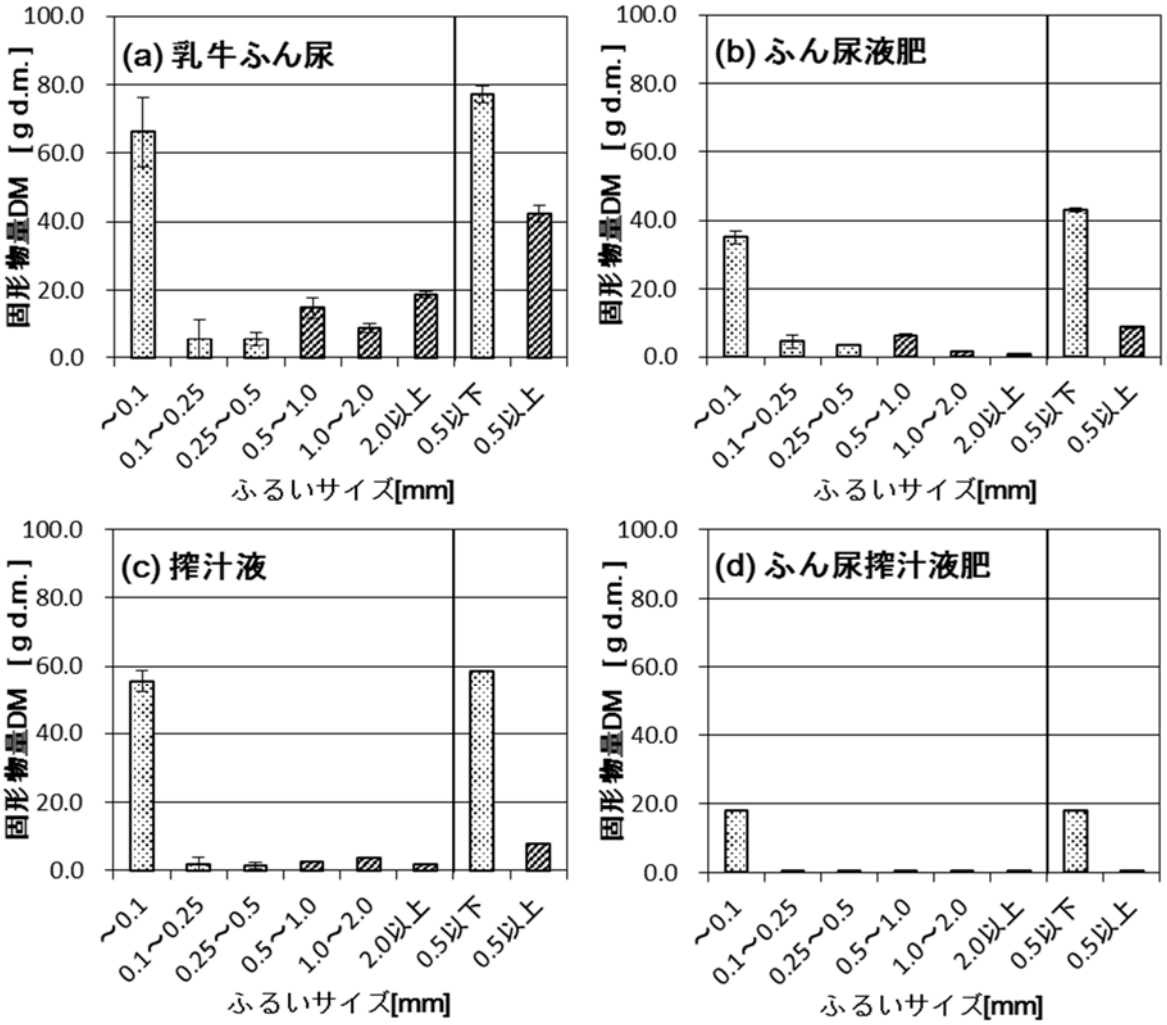



図 5.1.2 試料 1kg w.b 中の DM 分布

（a）乳牛ふん尿，(b)ふん尿液肥，（c）搾汁液，（d）ふん尿搾汁液肥

エラーバーは標準偏差 SD を示す

## 5.1.4 まとめ

灌水同時施肥に用いることを目的として作成した(d)ふん尿搾汁液肥を，固液分離を行わず好気性発酵である曝気処理のみを行う従来の肥培かんがい施設で作成した(b)ふん尿液肥などの粒径分布等を測定し比較した。

乳牛ふん尿を機械的に固液分離することにより多くの粗大な夾雑物を除去し

た(c)搾汁液は，0.5 mm 以上の夾雑物量が従来の(b)ふん尿液肥とほとんど変わらなかった。この機械的な固液分離操作と好気性処理により(d)ふん尿搾汁液肥は 0.5 mm 以上の夾雑物を十分に除去することができた。

## 第 2 節　有機液肥のキュウリ栽培への適用

### 5.2.1　はじめに

ふん尿搾汁液肥を実際に灌水チューブに流し，エミッター部での詰りが無く利用可能であることを本項で検証する。一般に乳牛ふん尿には多量の夾雑物が含まれているため，灌水同時施肥に用いることは難しい。しかしながら，本研究で作成したふん尿搾汁液肥には粗大な夾雑物がほとんどないため，灌水同時施肥栽培に適用できると考えられる。

そこで，これまで灌水同時施肥栽培による施肥管理技術が確立され，メタン発酵消化液のような有機質肥料でも使用事例のある(芳野ら，2012)キュウリの灌水同時施肥栽培を行い，乳牛ふん尿の搾汁液の灌水同時施肥の利用可能性と化学肥料の代替となるかを検討した。

### 5.2.2　実験方法

#### (1) 実験方法及び供試材料

茨城大学農学部附属フィールドサイエンスセンターの農場ハウスに設置された　灌水チューブ式養液土耕栽培システムに，ふん尿搾汁液肥を適用して栽培試験を行った。栽培したキュウリの品種にはフリーダム，台木にはヒカリパワーＺ２を用い 2010 年 6 月 30 日に定植した。定植時の葉数は本葉 4 枚とし，1 試験区あたり幅 1.6 m×長さ 6 m，株間は 50 cm で 12 株とした。３つの試験区を設定し，ふん尿搾汁液肥を用いた有機液肥区，化学肥料区，無施肥区とし

それぞれ 3 反復行った。灌水チューブはネタフィム社製ユニラム RC を用い，全長約 48 m であった。灌水は 1 日 150 $L \cdot a^{-1}$ とした。

各試験区の総施肥量は表 5.2.1 に示す。有機液肥区は窒素に比べカリウムを多く含むため，N と $K_2O$ が 1：1 になるように有機液肥に尿素を添加した。化学肥料区では，尿素，塩化カリウム，重焼リンを用いた。無施肥区は施肥をしなかった。有機液肥区，化学肥料区ともにリンは基肥として使用した。窒素の施肥方法は以下のように行った。有機液肥区，化学肥料区では最初の葉数測定を行った 7 月 13 日までは 1.5 $kgN \cdot ha^{-1}$ とした。2 週間に一度生育調査を行い，各試験区より代表株を 5 株選抜して葉数を調査した。増加した葉数から式 1（佐藤ら，2007）により直前の 14 日間の窒素吸収量を算出し，その窒素吸収量を 14 等分し，その後の 14 日間毎日施肥した。

$$窒素吸収量(g/m^2/14d)=増加葉数(枚/m^2/14d)\times 0.0441+2.189 \quad (1)$$

9 月 21 日時点で，化学肥料区と有機液肥区において，標準収穫量である 1000 $kg \cdot 10\ a^{-1}$ を超えたのでそれ以後の施肥を中止し，灌水のみを行った。

収穫は 7 月 12 日から 9 月 28 日まで行った。販売可能果は実の曲がりが 4cm 以下のものとした。土壌分析は栽培前後に行った。

表 5.2.1 各試験区における化学肥料，有機液肥総施肥量

| 試験区 | 化学肥料 (kg·ha$^{-1}$) | | | 有機液肥 (kg·ha$^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 有機液肥区 | 122 | 268 | 0 | 58.7 | 38.8 | 181 |
| 化学肥料区 | 176 | 400 | 176 | 0 | 0 | 0 |
| 無施肥区 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

## （2）測定項目

1)　アンモニア態窒素濃度（$NH_4$-N）

水蒸気蒸留法により測定し，mg･L$^{-1}$ で表した。

湿潤試料 5g に，絶乾させた酸化マグネシウム 1g を添加して，水蒸気蒸留した。発生した蒸気を 4%ホウ酸により捕集し，0.05 mol･L$^{-1}$ 硫酸で滴定して，測定した。土壌分析の際は，土壌：KCl 水溶液(2M)=10 g：100 g で抽出し，No.6 の濾紙で濾過した後の抽出液を，ブレムナー法による酸化マグネシウムを用いた水蒸気蒸留法にて測定した。

2)　硝酸性窒素濃度　($NO_3$-N)

水蒸気蒸留法により測定し，mg･L$^{-1}$ で表した。

アンモニア態窒素測定後の試料にデバルダ合金 3 g を添加して水蒸気蒸留した。発生した蒸気を 4%ホウ酸により捕集し，0.05 mol･L$^{-1}$ 硫酸で滴定し，測定した。

3)　ケルダール窒素濃度　(TK-N)

ケルダール法により測定し，mg･L$^{-1}$ で表した。

湿潤試料 5 g に，ケルタブ($K_2SO_4$，4.5 g + $CuSO_4 \cdot 5H_2O$，0.5g)，硫酸 10 mL を加え，加熱分解した。分解終了後，32%水酸化ナトリウムを加え水蒸気蒸留し，発生した蒸気を 4%ホウ酸により捕集し，0.05 $mol \cdot L^{-1}$ 硫酸で滴定し，測定した。

また，ケルダール窒素濃度の値とアンモニア態窒素濃度の差を有機態窒素濃度の値とした。

4)　リン（$P_2O_5$）

試料を湿式灰化した後，原子吸光光度法にて測定した。

5)　カリウム（$K_2O$）

試料を湿式灰化した後，原子吸光光度法にて測定した。

### 5.2.3 結果及び考察

栽培期間中，使用した灌水チューブでは目詰まりは見られずなかった。

図 5.2.1 に生育調査の葉数変化を示す。実験開始 6 週間後に葉数は十分増加し，その後はほぼ同じ値で推移した。また，8 月 24 日の時点で葉数が大幅に減少した理由は密生していた枝葉を刈り取ったためである。ある測定日における各試験区の葉数を Fisher の制限付き LSD 多重比較検定により比較を行ったところ，それぞれの日における有機液肥区，化学肥料区間では差は見られなかった。このため，生育全期間において有機液肥区と化学肥料区では生育の差はなかった。また，実際に施肥した窒素量は葉数同様，化学肥料区，有機肥料区ともにほぼ同じ値で推移した。

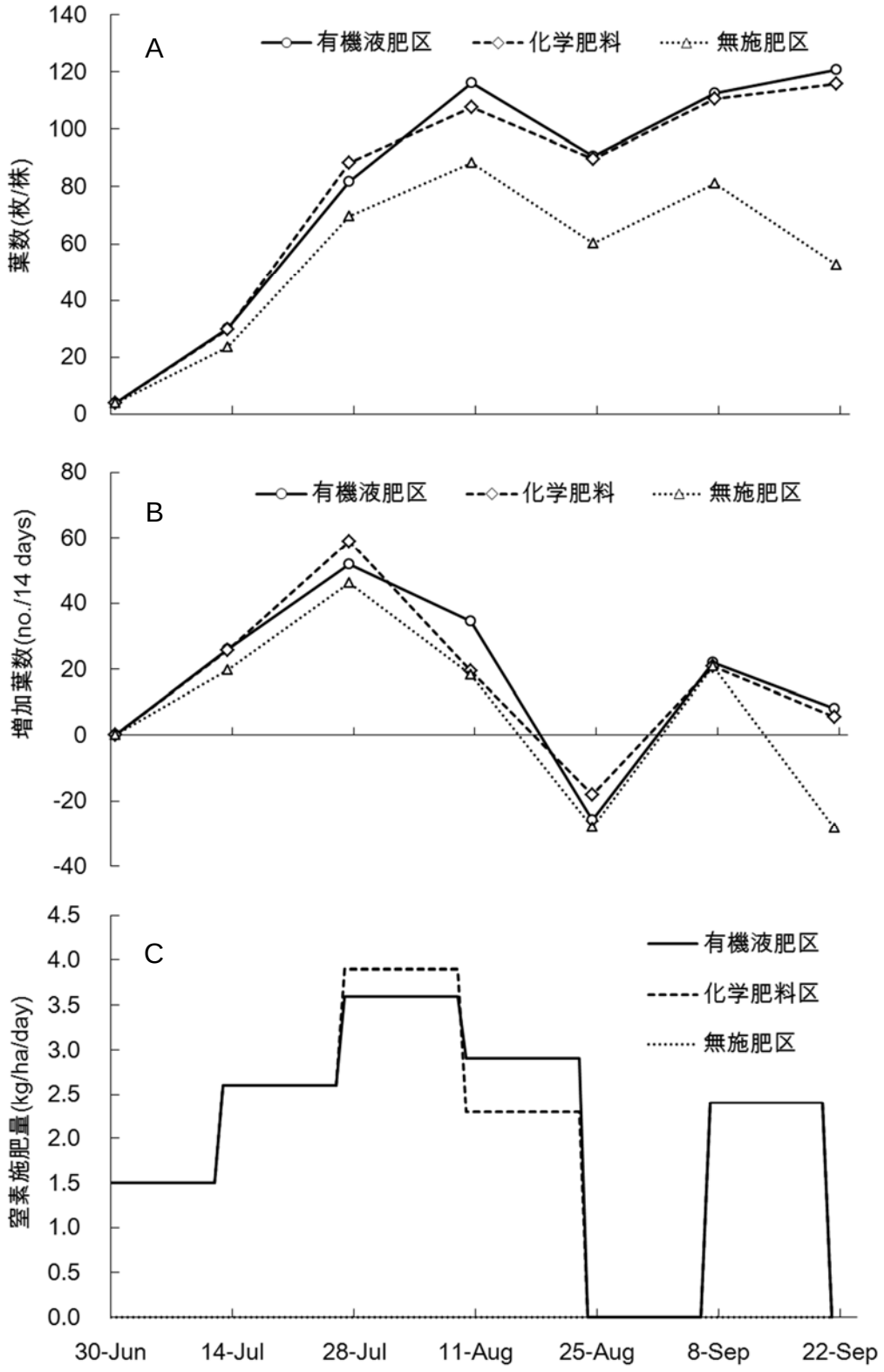



図 5.2.1 各試験区における葉数の変化とそれに応じた施肥量

（A）株ごとの葉数,（B）増加葉数,（C）窒素施肥量

図 5.2.2 にキュウリの総収量と可販果収量を示す。各試験区間の平均値をフィッシャーの制限付き LSD 多重比較検定で検定した。有意水準は 5%とした。総収量，総数，可販可数では差はあらわれなかったが，可販果で有機液肥区と無施肥区で差が見られた。これにより化学肥料区と有機液肥区には収量の差は無く,化学肥料の代替として有機液肥を使用することが出来たと言える。また，有機液肥区は化学肥料区と比べ標準誤差が小さく，試験区内でのバラつきが少なかった。

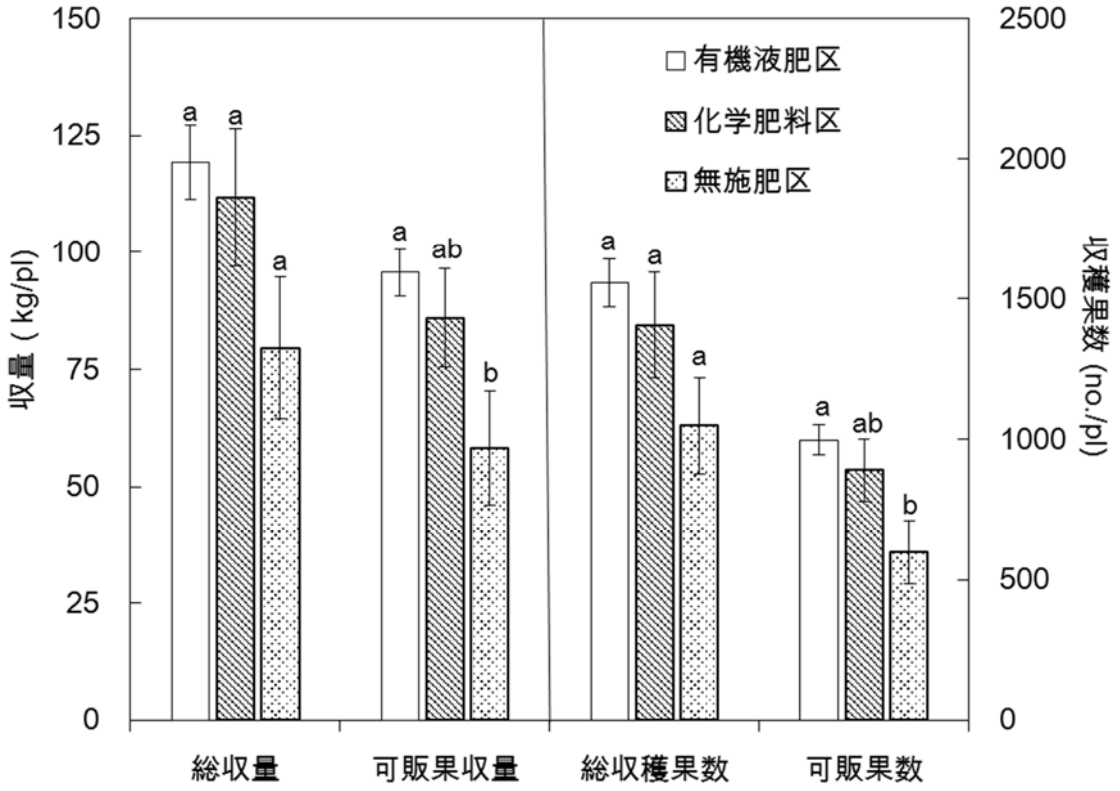



図 5.2.2 肥料の違いによるキュウリの収量および収穫数

エラーバーは標準誤差 SE を示す。また，エラーバー上部の文字が同じ場合は有意水準 5%で有意差が無いことを示す。

表 5.2.2 に栽培前後の土壌中窒素量を示す。栽培後土壌において化学肥料区内の収量の少なかった試験区は窒素の土壌残留が見られた。これらが土壌中に集積したのは，化学肥料区では生育後半に生育が衰えてきて肥料を吸収しきれなかったためと考えられる。これらのため，生育後半において化学肥料区では有機液肥区ほど生育が良くなかった可能性がある。

表 5.2.2 土壌中に含有するアンモニア態 N，硝酸態 N，およびケルダール N

| | | $NH_4$-N ($mg \cdot kg^{-1}$) | | $NO_3$-N ($mg \cdot kg^{-1}$) | | TK-N ($mg \cdot kg^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD |
| 施肥前 | | 30 | 9 | 59 | 13 | 3541 | 433 |
| 施肥後 | 有機液肥区 | 14 | 3 | 18 | 14 | 3466 | 606 |
| | 化学肥料区 | 22 | 13 | 98 | 60 | 3562 | 449 |
| | 無施肥区 | 16 | 3 | 11 | 3 | 3278 | 191 |

## 5.2.4 まとめ

本研究で作成した(d)ふん尿搾汁液肥を灌水同時施肥に適用した。粗大有機物やリンの結晶によるチューブの目詰まりが懸念されたが，目詰まりを起こすことなく順調にシステムを運用できた。またキュウリ栽培においては，(d)ふん尿搾汁液肥を用いた試験区では化学肥料区と収量において差が無かった。このため，ふん尿搾汁液肥は化学肥料の代替に使用できると考えられる。一方で，原料となる乳牛ふん尿により製造できる成分が異なる可能性があるが，実際の現場では本項のように足りない成分を化学肥料で補って使用するため問題はないと考える。

## 5.3 まとめ

本章では乳牛ふん尿由来の有機質液肥を灌水同時施肥に用いることを目的とし，乳牛ふんを固液分離し好気性発酵処理を加えたものを灌水チューブ式の溶液土耕栽培へ応用した。

これまで，液状堆肥の還元先は主に牧草地のみであったが，それは夾雑物である粗大有機物が十分に取り除かれていないことと，曝気処理による微生物分解が十分でないことによるハンドリングの悪さが大きい。たとえば新たな使用先として施設園芸が考えられるが，チューブに流そうとすると取り除かれていない粗大有機物がチューブを目詰まりさせることがあり使用することが困難であった。

本研究においても粗大有機物やリンの結晶によるチューブの目詰まりが懸念されたが，目詰まりを起こすことなく 2 ヶ月半の使用にも問題なく順調にシステムを運用できた。またキュウリ栽培においては，本研究で用いたふん尿搾汁液肥を用いた試験区では化学肥料区と収量において差が無かった。このため，ふん尿搾汁液肥は化学肥料の代替として使用できると考えられる。

本章により，ふん尿搾汁液肥は灌水同時施肥栽培に十分に適用可能であり，化学肥料と同様に使用できることが示された。

# 第 6 章　総括

近年の化学肥料の高騰に伴い，ふん尿由来の有機質肥料の利用が必要である。しかし，従来の堆肥は緩効性肥料であり，水分調整剤としての大量の副資材と長期間の堆肥化が必要となる。本研究では短期間に堆肥化処理を行いつつ，即効性肥料として有機液肥を同時に生産することができる方法として，固液分離を用いた乳牛ふん尿管理システムを作成した。このシステムでは，乳牛ふん尿を固液分離することで固形分は堆肥化に，液体分は曝気処理を行うことで液肥化を行う。従来，乳牛ふん尿由来の液肥は夾雑物を多く含むため，畜産分野以外の出口は存在せず，その利用方法が模索されてきたがそのほとんど圃場利用を目的としたものであった。しかしながら，乳牛ふん尿由来の液肥中の夾雑物を減少させるとともに粘性の低い扱いやすいものにできれば，施設園芸分野に用いることが可能となる。したがって,本研究の目的は，農園芸での利用，特に直径 0.5 mm の点滴孔を通り，灌水同時施肥に使用できる液肥を作成することを目的に，乳牛ふん尿を固液分離しその搾汁液の液肥化を行うシステムを作成し，そのプロセスと作成した液肥の利用可能性を明らかにすることを目的に検討を行った。

1）スクリュープレスを用いた乳牛ふん尿の固液分離　（第 2 章要約）

第 2 章では，圧力操作をした際の固液分離特性と固液分離後固形分ならびに搾汁液の性状について調査した。また，固液分離を用いた堆肥化・液肥化システムを導入する上で固液分離前後の質量収支および，分離後材料の物性を明らかにすることは極めて重要であるため，固液分離前後の物質収支に加え，固液分離機時の圧力操作による乳牛ふん尿の物性の変化を検討した。

圧力を変えて固液分離することで，固形分と液分の流量比がおよそ 5：5～3：7 で排出された。また，背圧を高めることにより，固形分が減少し，搾汁液が増

加した。この要因を検討するために分離効率などを算出した結果, 水分の移動が主に影響しており, 乾物の移動割合は小さいことがわかった。既往研究では, 原料水分と分離後固形分には相関があることが認められていたが, 本研究では圧力を変化させることで同程度の含水率の原料から, 異なる水分の固形分を製造できることが認められ, 原料の水分の移動を変化させ, 液分を貯留するラグーンなどの付属の施設の設計に資すると考えられた。

分離後固形分の水分は堆肥材料として適切と考えられる含水率 70%前後に脱水でき, かさ密度も平均 265 $kg \cdot m^{-3}$ と, 既存の水分調整材を用いた堆肥材料と比較すると極めて低く空気の通りやすい材料とすることができた。また, 易分解性有機物の割合が 37.7%と通常の堆肥材料と近い値を示した。

一方, 搾汁液は背圧を上げるにつれ乾物量はわずかながら増加し, TS 6～7 %DM であった。また, 乾物中の有機物量 VM は主に易分解性有機物であり, C/N 比も低いことから窒素成分の多くが搾汁液側へ移動したことが確認された。

以上のことから, 分離後固形分は堆肥化材料に適した組成であり, 良好な堆肥化発酵が期待できると考えられた。また, 搾汁の組成はほぼ一定であり, 粗大な有機物が少ないため難分解性有機物が少なく, 易分解性有機物が多く含まれていることから, 後の好気性発酵処理を始めとした微生物分解をするうえで, スクリュープレスを用いて機械的に固液分離することが効果的であることが示唆された。

2) 固液分離後固形分の堆肥化　(第 3 章要約)

第 3 章では, 固液分離後の固形分を堆肥として利用するために, 背圧操作をして含水率を変化させた固形分の堆肥化一次発酵過程を明らかにすることを目的に行った。堆肥化反応に大きく関わる水分, かさ密度, 有機物分解とその組成, 温度の経時変化に基づいて検討した。

背圧を変えることにより含水率 70%前後の堆肥材料が得られた。固液分離した堆肥は含水率 76%のような条件であってもかさ密度が低いことから通気性が良く，堆肥温度も 70℃前後まで上昇した。また，堆肥パイルの質量が 200 kg 前後と十分にあれば 60～70℃の品温を保つことができ，有機物分解率は 50%前後であった。このため，固液分離した堆肥はそのまま堆積し，適宜切り返すだけで十分に堆肥化が行え，雑草の種子や病原菌などの衛生面も問題ないと考えられる。また，固液分離した堆肥は 350 mg･gDM$^{-1}$ 前後と低いことから，堆肥化期間の短縮の可能性が示唆された。

3）搾汁液の液肥化　（第 4 章要約）

第 4 章では，乳牛ふん尿を固液分離して得られた搾汁液を，2 つの発酵槽にて連続的に曝気処理を行い，液肥化プロセスの検討を行った。一般的に搾汁液は曝気時に著しく発泡し，操作に支障を来すことが多いため，消泡機やオイル添加で発泡抑制し曝気処理を行っている。さらに搾汁液は粘性が高く，酸素供給効率の低さも課題である。そこでオイル添加無しで消泡し，かつ効率的な酸素供給を図るため，以下の方法を考案した。即ち，好気性処理済み搾汁液と新鮮な搾汁液との混合による発泡抑制，ブロワーや曝気レータといった曝気装置と循環ポンプの組み合わせによる十分な酸素供給，そして搾汁液の霧化散布による発泡抑制と酸素供給を同時に行う方法である。その結果，発酵槽では従来の曝気処理に用いる曝気量の 10 倍にあたる，単位体積当たり 1000 m$^3$ 以上の曝気を 1 日で行うことができた。また，発酵槽で処理された搾汁液は最大で約 20 %の有機物分解が行われ臭気も減少し，牧草地へ表面散布が可能な性状であった。その後，半年間の貯留および間欠通気を 160 m$^3$･day$^{-1}$ 前後で行うことで TS2 %DM 以下の有機液肥を作成できることが明らかになった。

4）有機液肥の評価とキュウリの灌水同時栽培への適用(第 5 章要約)

第 4 章で作成した乳牛ふん尿搾汁液を好気性発酵させた液肥は貯留槽で間欠曝気をすることでより微生物分解が進み, 液中の夾雑物がさらに小さくなる。このように本研究で作成した有機液肥は粘性が小さく，液中の夾雑物が小さいため, 施設園芸で用いることができれば畜産分野以外の新たな出口となる。しかしながら，実際に使用した際の灌水チューブの目詰まり並びに肥効が未検討であったため, 牛ふん尿を固液分離機で固液分離し, その搾汁液を曝気処理したふん尿搾汁液肥と，固液分離しない従来の肥培灌漑施設の液肥などに含まれる夾雑物の大きさとその量の比較を行った。また, 実際に灌水チューブ式養液土耕栽培システムに有機液肥を用いて, キュウリの栽培を行い, 乳牛ふん尿由来の有機液肥の灌水同時施肥への利用可能性と化学肥料の代替可能性を検討した。

従来粘性が高く夾雑物を多量に含むため市販の灌水チューブに流すことができなかったが，本研究で作成した有機液肥は従来のふん尿由来の液肥に比べて夾雑物が少なく，夾雑物の大きさも 0.5 mm の灌水チューブの点滴孔以下であった。これは, 機械的に固液分離したことと，後に十分に微生物分解が行われたことが原因であると考えられた。化学肥料を用いて N 分を補った有機液肥を実際にキュウリの灌水同時施肥栽培に用いた結果, 2 ヵ月間チューブの目詰まりを起こすことなく順調にシステムを運用できた。また, 化学肥料区と収量において差が無く，化学肥料の代替に使用できることがわかった。

本研究論文によって，乳牛ふん尿を原料とし灌水同時施肥に用いることができる有機液肥の性状が明らかになり，その作成過程において必要な固液分離操作に関する特性を明らかにした。また, 乳牛ふん尿由来の液肥が持つ, 肥料成分が比較的少ないこと，基肥として一度に施用すると水分過多になってしまうこと，液状であるため堆肥に比べ散布が困難であることは灌水同施肥に用いることで解決された。また, 作成した有機液肥は水と同じ性質を持つ流体であるため,

従来のような特別な輸送方法を用いる必要がない。今後，他の施設園芸分野，たとえば花卉栽培時の液肥散布や，耕起を行わない果樹園などでの利用が行われれば，畜産分野以外への出口が広がり，適切な家畜排せつ物管理に資すると考えられる。また，十分に好気性発酵が行われた堆肥や液肥を酪農家が生産することで，近隣の耕種農家との物々交換や肥料の販売を通し，地域の耕畜連携が進むことで，家畜排せつ物はやっかいものでなく，地域にとって有用な資源として利用され，適切な家畜排せつ物管理に資すると考える。

# 参考文献


大川内康郎，高橋理平，岡山清司，2005．家畜ふん堆肥化における未利用木質資源の副資材適正．富山県農業技術センター研究報告，22，13～20

岡本優，小池則義，斉藤忠史，神辺佳弘，脇坂浩，2005．効率的なスラリー処理技術の確立に関する試験．栃木県畜産試験場研究報告，21，5-13

小川増弘, 1980. 牧草のサイレージ調整に伴う飼料価値の変化. 日草誌, 26(2), 185-190

小菅定雄，山本義弘，1997．スラリーかんがいシステムを上手に使うために．社団法人 北海道土地改良設計技術協会，27

小柳渉, 2010. 堆肥等有機物分析法（2010 年版）. 財団法人 日本土壌協会, 50-52

T.R. Cumby，1987．A Review of Slurry Aeration 3. Performance of Aerators. Journal of Agricultural Engineering Research，36(3)，175-206

佐藤達雄，古都透，高柳りか，米山裕，2005．葉数をもとにした簡易窒素施肥指標によるキュウリのかん水同時施肥栽培の現地導入効果. 農作業研究, 40(2), 73-78

嶋栄吉，堤聰，大久保博，1996．肥培潅漑における畜産雑排水の実態と貯留施設の検討．農業土木学会誌，64(9)，35-39

高橋　朋子，1999．易分解性有機物による堆肥の品質評価．馬畜試研報　第 6 号，90-99

田邊　眞, 2008. 戻し堆肥だけを使用した乳牛ふんの堆肥化発酵処理について, 畜産環境情報．40，18-21

谷川昇，2007．アンケート調査による北海道の畜産農家における家畜排せつ物適正処理の現状分析．廃棄物学会論文誌，18(6),392-399

中央畜産会，2000．堆肥化施設設計マニュアル．中央畜産会，15，110

寺山貢平，保井聖一，2006．粘性特性からみたスラリー処理施設設計における留意点．農業土木学会誌，74(3)，231-232

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所，積水化学北海道株式会社，2011.真空式管路システムによる家畜ふん尿の搬送に関する研究．共同研究報告書，整理番号第 422 号

中村真人，岩渕和則，柚山義人，2005．堆肥化技術，講座「バイオマス利活用」（その 2）．農業土木学会誌，73(7)，55-60

長澤太郎，森嶋章，2002．畜産液状ふん尿処理技術の開発－(その２）消化・再曝気による窒素除去－．土木学会第 57 回年次学術講演会，北海道大学，395-396

糠谷秦，1998．スラリー処理家畜ふん尿処理・利用の手引き．財団法人 畜産環境整備機構編，財団法人 畜産環境整備機構，p.39-41
農林水産省，2000．水田を中心とした土地利用型農業活性化のための技術資料集（6）家畜ふん尿の有効利用．
http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_manual/pdf/6_6.pdf
Accessed Jan. 8, 2015
農林水産省，2011．家畜排せつ物処理状況調査結果．
http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/pdf/syori-joukyou.pdf
Accessed Jan. 8, 2015
農林水産省，2014．平成 26 年畜産統計．
http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001127029
Accessed Jan. 8, 2015
農林水産省，2014．畜産環境をめぐる情勢．
http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/pdf/meguru_jousei.pdf
Accessed Jan. 8, 2015
藤原孝之，原正之，村上圭一，2003．家畜ふん堆肥の腐熟度評価における試料の乾燥法の影響．日本土壌肥料学雑誌，74(5)，607-614
原田靖生，1998．家畜ふん尿処理・利用の手引き．財団法人 畜産環境整備機構編，財団法人 畜産環境整備機構，p.5
北海道立畜産試験場　環境草地部畜産環境科　技術体系化チーム，北海道立根釧農業試験場　研究部酪農施設科，北海道立十勝農業試験場　生産研究部栽培環境科　技術体系化チーム，2007．セミソリッドふん尿用固液分離装置と分離液の肥効特性．北海道農業試験会議(成績会議)資料，1-74
北海道立畜産試験場　根釧農業試験場研究部 農施設課，土壌肥料課，1999．乳牛ふん尿のばっ気処理技術の確立．成績概要書
北海道立農業畜産試験場　家畜ふん尿プロジェクト研究チーム，2004.家畜ふん尿処理利用の手引き 2004．北海道立畜産試験場
北海道，2008．北海道家畜排せつ物利用促進計画．
http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/tss/21/kankyo/keikaku.pdf
Accessed Jan. 8, 2015
Maibritt Hjorth, K.V. Christensen, M.L. Christensen, and Sven G. Sommer, 2011．Solid-Liquid Separation of Animal Slurry in Theory and Practice. Springer，Sustainable Agriculture Volume 2，953-986
H.B.Moller，S.G.Sommer，B.K.Ahring，2002．Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions. Bioresource Technology，85(2)，189-196

前田武己，小藤田久義，立石貴浩，築城幹典，2009．異なる副資材を用いた乳牛ふん堆肥化早期のアンモニア揮散．71(5)，81-87
松浦拓也，高橋好範，折坂光臣，2008．液状コンポストの成分特性及びその利用法．岩手県農業研究センター研究報告，8，63-73
Juzo Matsuda, Akinori Takekawa, Jun-ichi Himoto, 1995. Aeration and Slurrigation of Slurry Separated from Dairy Cattle Manure. Journal of the Society of Agricultural Structures. Japan, 25(4), 209-214.
Morten L. Christensen, Knud V. Christensen and Sven G. Sommer, 2013. Solid-Liquid Separation of Animal Slurry. Animal Manure Recycling, Svwn G. Sommer, Moriten L. Christensen, Thomas Schmidt and Lars Stoumann Jensen, WILEY, Chapter 7.2
湊啓子，渡部敢，田村忠，阿部英則，2007．石炭灰（クリンカアッシュ）の牛ふん堆肥化副資材としての利用性．北海道立畜産試験場，26，24-30
森嶋章，長澤太郎，2002．畜産液状ふん尿処理技術の開発－(その１)超深層曝気法による一次浄化－．土木学会第 57 回年次学術講演会, 北海道大学, 393-394
山田洋文，2010．家畜ふん尿における新技術導入の経済的評価：セミソリッド用固液分離装置を事例として．フロンティア農業経済研究，15(1)，63-73
吉田周司，高木喜代文，井上一之，渋谷清忠，衛本憲文，2005．木くずチップを副資材とした乳用牛ふんの堆肥化処理技術．九州農業研究，67，100
吉田周司，阿部正八郎，2006．きのこ廃菌床を水分調整材とした乳牛ふんの堆肥処理技術．大分県畜産試験場，平成 17 年度試験成績報告書，35，43-46
芳野未央子，佐藤達雄，アニ　ウィディストゥティ，加藤亮，井上栄一，岩田将英，福司健治，岩田幸司，渡辺史生，2012．メタン発酵消化液を用いる灌水同時施肥装置の改良とキュウリへの施肥効果．園芸学研究，11(1), 29-35.
Robert T. Burns, Lara B. Moody, 2003. Development of a Standard Method for Testing Mechanical Manure Solids Separators . ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, UAA
http://www3.abe.iastate.edu/wastemgmt_old/asae%202003%20no%20034131.pdf
Accessed Jan. 8, 2015

# 謝辞

本研究を遂行および学位論文を取りまとめるにあたり，主査として多大なる御指導、御助言および本論文全般にわたり御高閲をいただいた，北海道大学大学院農学研究院生物生産工学講座(農業循環工学研究室) 岩渕和則 教授に心から深く感謝の意を表します。氏には，厳しくそして時にはやさしく，辛抱強く見守っていただいたことは生涯忘れません。また，副査として御校閲ならびに貴重な御助言を頂き，さらに日頃より様々な問題に丁寧に応対していただきました清水直人 准教授に深く感謝いたします。北方フィールド科学センターの荒木肇教授には，副査として固液分離試験や作物栽培試験など，多岐にわたりご指導を承りました。深く感謝いたしております。北海道大学大学院農学研究院生物生産工学講座(作物生産システム工学研究室)の柴田洋一 教授には副査として本論文のとりまとめにあたり多くのご助言をいただきました。深く感謝いたしております。また，博士課程への進学および研究全般にわたり多大な御支援，ご指導を承りました松田従三 名誉教授，ならびに近江谷和彦 名誉教授には深く感謝いたします。

固液分離試験におきましては，堆肥化プロジェクトを通じて多くのご支援とご指導をいただきました環境科学研究院の藤井賢彦 准教授に深く感謝いたします。また，キュウリの灌水同時施肥栽培試験につきましては，多くの御支援・御指導を賜りました茨城大学 佐藤達雄 准教授には深く感謝いたします。

北海道大学大学院国際広報メディア・観光学院の河合剛 准教授には，英語IIの TA が御縁で英語論文のみならず，研究の進め方，心構えなどを励ましながら指導していただきました。深く感謝いたします。

北海道大学研究農場の職員の皆様，室蘭市内村牧場の皆様，株式会社葵興産の皆様，そして北海道大学大学院農学研究院農業循環工学研究室の皆様には，研究全体の遂行にあたり，ご協力いただき，楽しい研究生活を送らせていただきました。心よりお礼申し上げます。最後に，いつも応援し，見守り励まし続けてくれた両親と兄姉に，心からの感謝の気持ちを送ります。

高校生の時に家畜ふん尿問題を解決しようと夢を描き，北海道大学に入学して始めることができた本研究が博士論文という形にできました。数えきれないほどの多くの人に支えられ，夢の一歩を踏み出せることを皆様に深く感謝の意を表して謝辞といたします。本当にありがとうございました。