

大規模酪農地帯における効率的なふん尿スラリー調整技術の開発に関する研究

—現地調査および室内試験によるふん尿スラリー発酵条件の整理—

寒地土木研究所 資源保全チーム
道東支所
道東支所

○中山 博敬
吉澤 淳
大山 武士

北海道東部の大規模酪農地帯では、国営環境保全型かんがい排水事業で整備される肥培かんがい施設により、乳牛ふん尿を希釈し空気を送り込んでふん尿スラリーの腐熟を促進し、流動性の向上や臭気の低減を図っている。ふん尿スラリーの発酵条件を明らかにするためには、発酵条件を任意に調整可能な室内実験を行う必要がある。本報告では、水槽内でふん尿スラリー温度を一定にすることができる実験装置を構築し、ふん尿スラリーの濃度および送り込む空気量の違いによる好気性発酵の性状変化を測定した。その結果、良好な好気発酵を行うためにはふん尿スラリーを希釈することが重要であると示唆された。

キーワード：肥培かんがい、省エネルギー、曝気、希釈

1. はじめに

北海道東部の大規模酪農地帯では、家畜ふん尿のかんがいで有効活用と水質浄化等環境の保全に配慮した国営環境保全型かんがい排水事業が進められている。事業で整備される肥培かんがい施設では、ふん尿を希釈して空気を送り込むこと（以下、曝気と標記）でふん尿スラリーの腐熟を促進し、流動性の向上や臭気の低減を図っており、これに必要な曝気ポンプや攪拌ポンプなどの稼働時に電力を消費する。また、酪農業ではふん尿処理以外にも、牛乳冷却、畜舎換気などで多くの電力を消費しており、エネルギー消費量の削減が課題である。寒地土木研究所では、良好な腐熟を維持しながら効率的にふん尿スラリーを処理する運転方法を解明し、施設の消費エネルギーを削減するための研究を行っている。

ふん尿スラリーの発酵には、ふん尿固形物濃度、液温、曝気量、曝気時間など、多くの要因が関係するため、発酵条件を整理するためには、現地調査に加えて発酵条件を任意に調整可能な室内実験を行う必要がある。そこで本報では、主に室内での曝気試験の結果を報告する。

2. 方法

室内実験は、主に曝気時間を変えて2回行い、実験1では曝気時間を24時間に設定し、実験2では曝気時間を12時間または6時間に設定した。

(1) 実験1

図-1に室内実験装置の概要を、写真-1に実験状況を、表-1に設定条件を示す。使用した未曝気ふん尿スラリーは、現地調査を実施している肥培かんがい施設の流入口より2017年9月26日に採取し、全固形物(TS)濃度は7.0%であった。実験1では希釈しない未曝気ふん尿スラリーまたは蒸留水でTS濃度を4%に調整した未曝気ふん尿スラリー1000mlを2000mlメスシリンダーに投入した。ふん尿スラリーを投入したメスシリンダーは水温を20℃および30℃に制御した水槽内に静置した。ふん尿スラリーの希釈倍率とTS濃度との関係は、既往の文献¹⁾によると2倍希釈でTS濃度が約6%、3倍希釈で4%と述べられており、これを参考にTS濃度を調整した。メスシリンダーを水槽に静置した理由は、曝気による好気性発酵時には発酵熱によりふん尿スラリーの液温が上昇することから、ふん尿スラリーの温度を一定に保持するためである。曝気

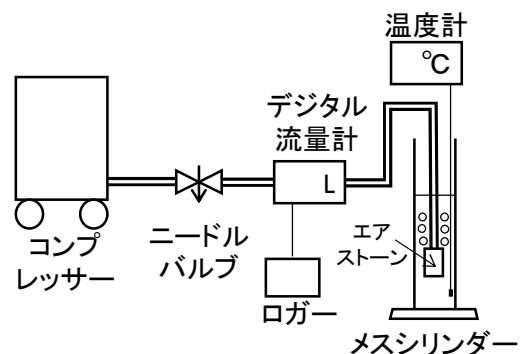


図-1 室内実験装置（実験1）

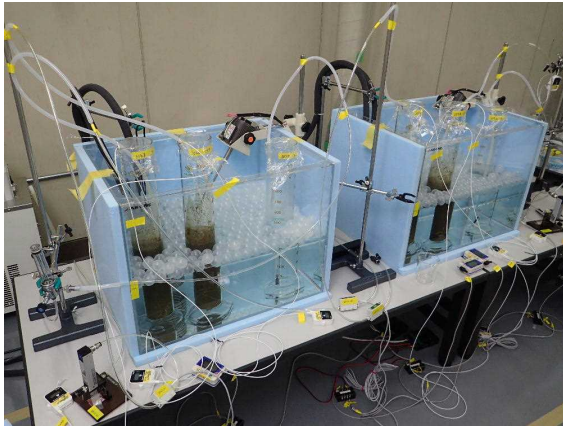


写真-1 実験状況 (実験1)

表-1 設定条件 (実験1)

試験区名	液温 (°C)	TS濃度 (%)	空気流量 (L/min)	曝気時間 (h)	ふん尿スラリー量(ml)
20TS4_24h	20	4	0.13	24	1,000
20TS7_24h		7			
30TS4_24h	30	4			
30TS7_24h		7			

方法は約0.13L/minに調整した空気を観賞魚用エアストーンを用いてメスシリンダー内に24時間送気した。調整した空気量は現地施設での空気量²⁾よりも多くなるように設定した。空気流量はデジタル流量計で測定し、小型データロガーで記録した。実験期間は2017年10月5日～10月21日の17日間である。

ふん尿の性状変化は、曝気による有機物分解量を把握するため、実験開始前および実験終了後のふん尿スラリーを105°Cで24hrs乾燥しTSを求めた。さらにTS測定後に550°Cで5時間燃焼し強熱減量(VS)を求め、有機物量と見なした。また、実験期間中は1日1回、臭気センサー(畜環研式ニオイセンサ、東京デオドラント)で臭気指数を測定した後、一時的に送気を停止し、ガラス棒でメスシリンダー内のふん尿を攪拌し、水素イオン指数(pH)、酸化還元電位(ORP)、電気伝導度(EC)を測定した。そのほか、液温を測定した。

(2) 実験2

図-2に室内実験装置の概要を、写真-2に実験状況を、表-2に設定条件を示す。実験1で用いた装置のエアチューブに電磁バルブとタイマーを取りつけ、曝気時間を任意に設定できるように改造した。使用した未曝気ふん尿は2017年11月20日に実験1とは異なる肥培かんがい施設の流入口より採取した。未曝気ふん尿スラリー採取時のTS濃度は8.9%であり、これを蒸留水で希釈してTS濃度を約6%および4%に調整した未曝気ふん尿スラリーを作成し、2000mlメスシリンダーに1500ml投入した。その後、水温を20°Cおよび30°Cに制御した水槽内に静置した。曝気量は約0.13L/minに調整し、曝気時間は5:00～17:00の

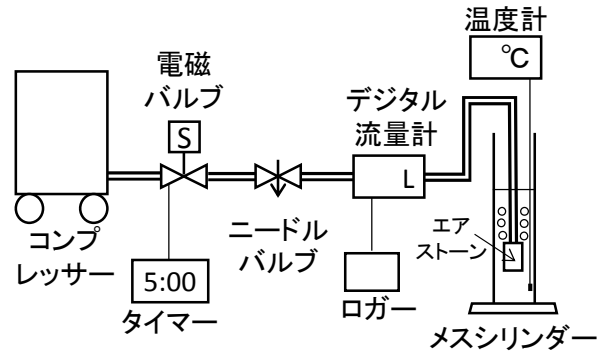


図-2 室内実験装置 (実験2)



写真-2 実験状況 (実験2)

表-2 設定条件 (実験2)

試験区名	液温 (°C)	TS濃度 (%)	空気流量 (L/min)	曝気時間 (h)	ふん尿スラリー量(ml)
20TS4_6h	20	4	0.13	6	1,500
20TS4_12h				12	
20TS6_6h		6		6	
20TS6_12h				12	
30TS4_6h	30	4		6	
30TS4_12h				12	
30TS6_6h		6		6	
30TS6_12h				12	

12時間連続で曝気する区と、0.5時間の曝気と0.5時間の曝気停止を5:00～17:00の間に繰り返して合計6時間曝気する区を設けた。実験期間は2017年12月7日～12月26日の20日間である。その他の測定、分析項目および方法は実験1と同様である。

3. 結果

(1) 実験1

a) 曝気量および液温

表-3に空気流量および液温を示す。各試験区とも空気流量は0.13±0.01 L/minで安定しており、試験期間中の空気量合計は2800～2900L程度となった。

ふん尿スラリーの液温は概ね設定した温度で推移した。

表-3 空気流量および液温

試験区名	空気流量 ^(※) (L/min)	空気量合計 (L)	液温 ^(※) (°C)
20TS4_24h	0.13±0.01	2829	19.8±0.1
20TS7_24h	0.13±0.01	2909	19.9±0.1
30TS4_24h	0.13±0.01	2839	30.3±0.1
30TS7_24h	0.13±0.01	2892	30.3±0.1

※: 平均値±標準偏差

b) TSおよび有機物減少率

表-4にTSおよび有機物含量を示す。有機物減少率が12.1%と最も大きかったのは30TS4_24h区であり、逆に1.8%と最も小さかったのは20TS7_24h区であった。温度の影響を見るため20TS4_24h区と30TS4_24h区および20TS7_24h区と30TS7_24h区をそれぞれ比較すると、温度が高い試験区での有機物減少率が大きかった。また、ふん尿スラリーの濃度の影響を見るため20TS4_24h区と20TS7_24h区および30TS4_24h区と30TS7_24h区をそれぞれ比較すると、TSが小さい試験区での有機物減少率が大きかった。

表-4 TSおよび有機物含量

試験区名	TS(%FM)		有機物含量(%FM)		有機物減少率(%)
	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	
20TS4_24h	3.9	3.7	3.3	3.1	6.1
20TS7_24h	6.7	6.6	5.6	5.5	1.8
30TS4_24h	3.9	3.5	3.3	2.9	12.1
30TS7_24h	6.7	6.5	5.6	5.3	5.4

c) pH, ORP, EC

図-1にpHの推移を示す。試験開始時のpHはTS4の両区で6.5、TS7の両区で6.7であり、曝気開始後にはすべての試験区でpHが上昇し、曝気開始後8~9日目にはTS4の両区でpHが約8.5に達した後、概ね一定の値で推移した。TS7の両区ではTS4の両区より緩やかに上昇し、曝気開始15~16日目に約8.5となった。

図-2にORPの推移を示す。ORPは溶液の酸化力、還元力の強さを表す値で、好气的状態では電位が高く、嫌气的状態では電位が低い³⁾。TS4の両区では曝気開始後3日目までORPが低下し、その後-400mV程度で推移した後

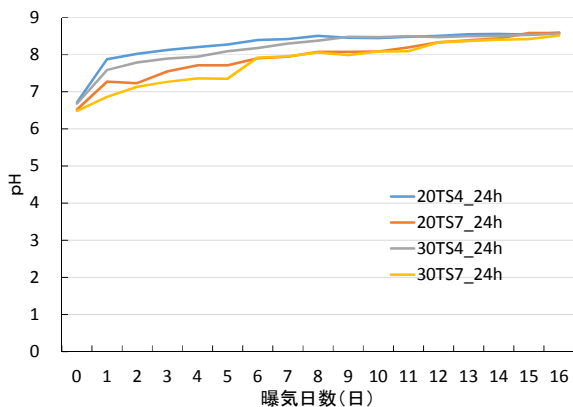


図-1 pHの推移

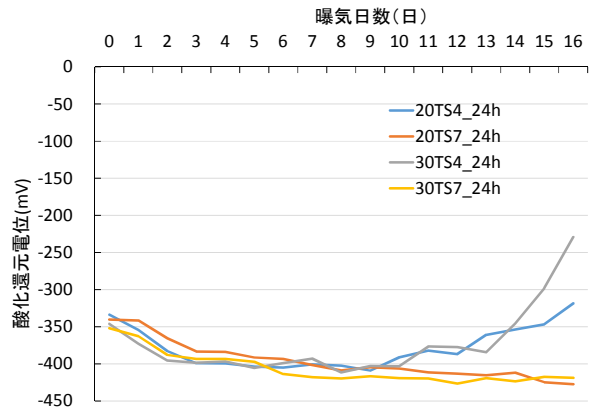


図-2 酸化還元電位 (ORP) の推移

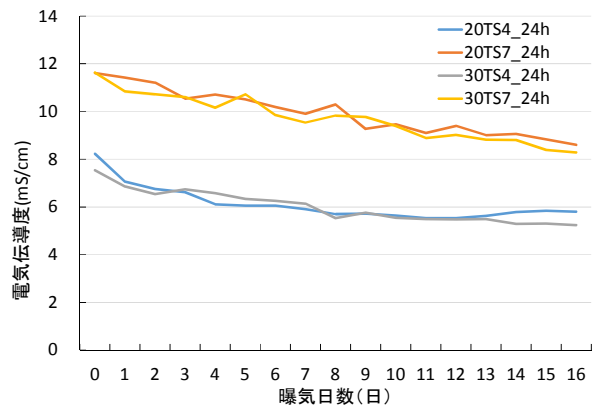


図-3 電気伝導度 (EC) の推移

9~10日目から上昇し始め、30TS4_24h区では13日目以降に20TS4_24h区よりも大きく上昇した。一方TS7の両区では試験開始終了時まで、ORPは緩やかに低下し続けた。図-3にECの推移を示す。ECは溶液中の電解質の総量を表す指標であり³⁾、ふん尿スラリー中の肥料成分の変化の目安となる。TS4の両区では曝気開始後8日目まで徐々に低下した後、概ね一定の値で推移した。一方TS7の両区では試験終了時まで値は低下し続けた。

d) 臭気指数

図-4に臭気指数の推移を示す。なお、測定に用いた臭気センサーの測定上限が臭気指数40までとなっており、曝気開始時の一部の試験区では臭気指数が40を超えている。臭気指数規制ガイドライン⁴⁾によると、6段階臭気強度表示法による臭気強度と養牛業における臭気指数の関係は表-5のとおりである。曝気開始前のふん尿スラリーはすべての試験区において臭気指数が35以上となっており、非常に強いにおいであった。曝気開始後1日目には臭気指数が大きく低下したものの30TS7_24h区では臭気指数が22を示し比較的強いにおいであった。次いで30TS4_24h区で19、20TS7_24h区で18を示し、楽に感知できるにおいであった。なお、20TS7_24h区では臭気指数が16以上で推移したものの、30TS4_24h区では徐々に低下し、試験終了時には臭気指数が6となり、においが大

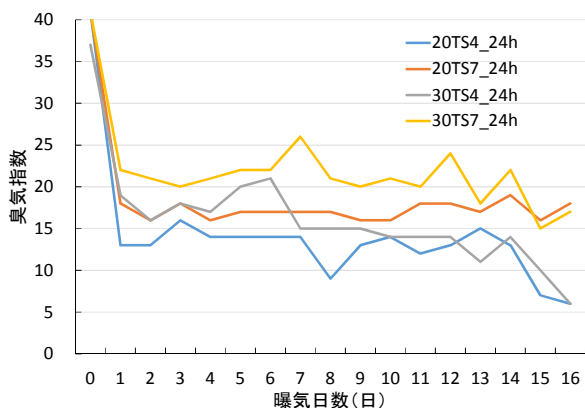


図4 臭気指数の推移

表-5 臭気強度と臭気指数の関係

臭気強度	内容	臭気指数
0	無臭	
1	やっと感知できるにおい(検知閾値濃度)	
2	何のにおいかわかる弱いにおい(認知閾値濃度)	
(2.5)	(2と3の間)	11
3	楽に感知できるにおい	16
(3.5)	(3と4の間)	20
4	強いにおい	
5	強烈なにおい	

大きく低下した。また20TS4_24h区は曝気開始後1日目の臭気指数が13を示し、その後も16以下で推移し、試験終了時には臭気指数が6となった。

(2) 実験2

a) 曝気量および液温

表-6に空気流量および液温を示す。各試験区とも空気流量は0.13~0.14L/minで安定しており、試験期間中の空気量合計は6時間曝気の試験区で907~947L、12時間曝気の試験区で1805~1873L程度となった。ただし、30TS4_6h区では曝気開始後11日目5時の曝気開始時に設定量の空気が流れていないことを確認したため、曝気開始後12日目にエアストーンを交換したところ空気流量が回復した。また、曝気開始18日目頃からは複数の試験区において5時の曝気開始直後に所定の空気が流れていないことが確認されたが、速やかに所定の流量に回復したためエアストーンは交換しなかった。

ふん尿スラリーの液温は概ね設定した温度で推移した。

表-6 空気流量および液温

試験区名	空気流量 ^(※) (L/min)	空気量合計 (L)	液温 ^(※) (°C)
20TS4_6h	0.13±0.01	947	20.2±0.1
20TS4_12h	0.14±0.02	1848	20.2±0.1
20TS6_6h	0.13±0.01	927	20.2±0.1
20TS6_12h	0.14±0.01	1838	20.1±0.1
30TS4_6h	0.13±0.02	915	30.2±0.1
30TS4_12h	0.14±0.00	1873	30.1±0.1
30TS6_6h	0.13±0.02	907	30.1±0.1
30TS6_12h	0.13±0.00	1805	30.2±0.1

※: 平均値±標準偏差

b) TSおよび有機物減少率

表-7にTSおよび有機物含量を示す。有機物減少率が最も大きかったのは30TS4_12h区であり、温度が高くTSが小さい試験区での有機物減少率が大きかった。曝気時間の影響を見るため30TS4_6h区と30TS4_12h区を比較すると、曝気時間の長い12h区の有機物減少率が高いがその差は小さく、他の試験区では曝気時間の違いによる有機物減量率に違いは認められなかった。

表-7 TSおよび有機物含量

試験区名	TS(%FM)		有機物含量(%FM)		有機物減少率(%)
	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気19日目)	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気19日目)	
20TS4_6h	3.6	3.3	3	2.6	13.3
20TS4_12h	3.6	3.3	3	2.6	13.3
20TS6_6h	5.6	5.3	4.5	4.2	6.7
20TS6_12h	5.6	5.3	4.5	4.2	6.7
30TS4_6h	3.6	3.3	3	2.6	13.3
30TS4_12h	3.6	3.2	3	2.5	16.7
30TS6_6h	5.6	5.1	4.5	4.1	8.9
30TS6_12h	5.6	5.1	4.5	4.1	8.9

c) pH、ORP、EC

図-5にpHの推移を示す。試験開始時のpHは6.4~6.6であり、曝気開始後1日目にはすべての試験区でpHが上昇したが、その後一時的に低下した後、徐々に上昇する傾向を示した。曝気開始後2日目以降のpH低下は、30°Cの試験区が20°Cの試験区よりやや大きかった。試験終了時には、20TS4_12h区と30TS4_12h区でpHが8.0となった。

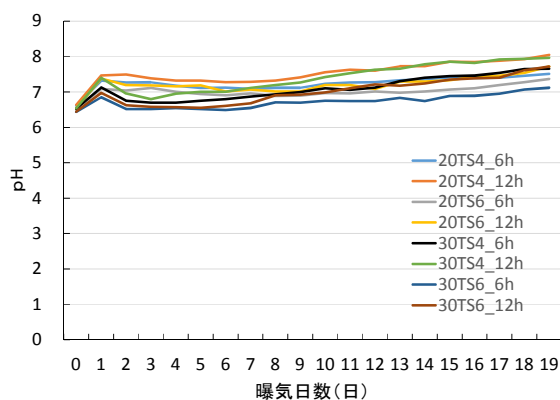


図-5 pHの推移

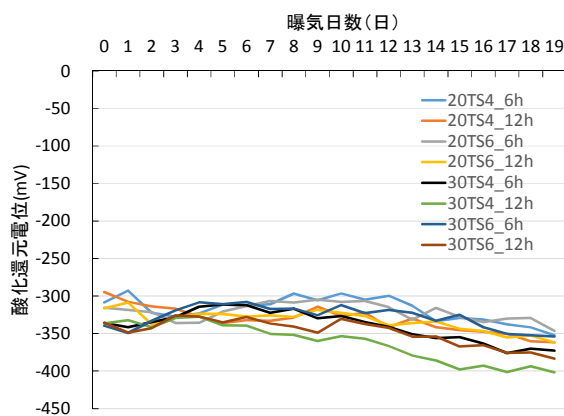


図-6 酸化還元電位 (ORP) の推移

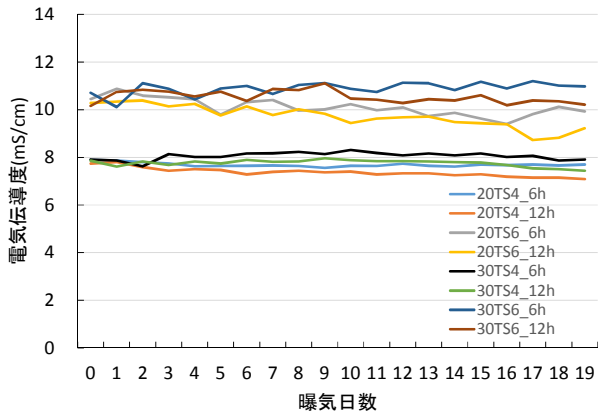


図-7 電気伝導度 (EC) の推移

図-6にORPの推移を示す。一時的に上昇する試験区があったものの、いずれの試験区も低下する傾向を示した。

図-7にECの推移を示す。TS4の4つの試験区では曝気期間中のECの変化が小さく、TS6の4つの試験区では液温、曝気時間とECの変化に一定の傾向は認められなかった。

d) 臭気指数

図-8に臭気指数の推移を示す。臭気指数は試験期間中とおして大きく変動し、一定の傾向は認められなかった。要因の一つに臭気の測定時刻が影響している可能性がある。たとえば、曝気開始後1日目に臭気指数が小さくなったものの2日目には再び大きな値を示しており、1日目の測定時刻は8時頃で、2日目の測定時刻は6時頃であった。また、曝気開始後9日目には臭気指数が高い値を示したものの翌日10日目には大きく低下しており、9日目の測定時刻は6時頃で、10日目の測定時刻は9時頃であった。実験2では、17時から翌朝5時までは曝気を行っていないため、5時の曝気開始直後には一時的ににおいが強くなっていることが考えられる。

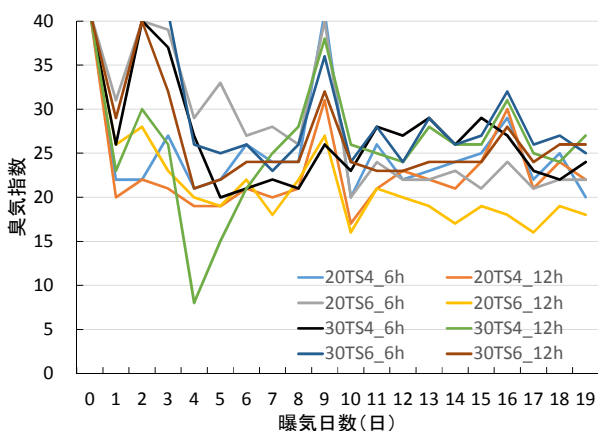


図-8 臭気指数の推移

4. 考察

今回の室内試験では実験1および2とも空気流量を0.13L/min程度で調整することを目標にした。これは、現地施設ではふん尿スラリー1m³あたりの総空気量の目安が150m³であるため²⁾、室内実験では現地施設よりも空気量が多くなるように設定し、液温およびTSの違いによる各種測定項目への影響を明らかにしようと試みたためである。空気量は両実験ともふん尿スラリー1m³あたりに換算して約600~2900m³の空気量となっており、現地施設より4倍以上多い空気量となった。

実験1でのORPは、TS7の両区では試験終了まで緩やかに低下し続けたものの、TS4の両区では曝気開始後10日目以降に上昇に転じた。すなわち、TS4の両区では9~10日目まで好氣的分解がある程度まで進み、その後、酸素の供給量が消費量よりも多くなったと考えられる。

実験1でのpHはTS4の両区において、曝気開始後8~9日目まで徐々に上昇した後、概ね一定の値で推移した。また、実験1でのECはTS4の両区において、曝気開始後8日目まで徐々に低下した後、概ね一定の値で推移した。すなわち、上述のORPが上昇に転じた日数と同じ時期に値が一定となっている。

実験開始時と終了時の測定結果から求めた有機物減少量は、実験1では温度が高くTSが小さい30TS4_24h区での有機物減少率が最も大きいことが明らかとなり、温度を高くすることは有機物の分解、すなわち腐熟に有利であることが確認された。現地施設を運転する際の指標として、調整槽の温度を30℃にすることが腐熟の目安として示されており¹⁾、液温を高く維持することは腐熟を進める上で有効である。一方、前述のORP、pH、ECの推移からは、20TS4_24h区でも好気性発酵が順調に進んでいる可能性があり、良好な好気性発酵を行うためにはふん尿スラリーを希釈することが重要であると示唆される。臭気指数は、TSが多いふん尿スラリーではにおいの強い状態が継続するが、TSが少ないふん尿スラリーではにおいの低下が顕著であることが明らかになり、ふん尿スラリーを希釈することはにおいを低下させる面からも重要である。

実験2については、ORPは曝気開始初期には一時的に上昇する試験区があったものの、その後はすべての試験区において低下傾向が続き、実験1のように大きく上昇に転じる試験区は見られなかった。また、pHはすべての試験区において緩やかに上昇し続け、ECにおいては液温および曝気時間の違いによる傾向が判然としなかった。しかしながら、実験2の有機物減少率が最も大きかった30TS4_12h区ではその値が16.7%となり実験1で最も大きかった30TS4_24h区の12.1%よりも大きい結果となっており、実験2においても腐熟は進んでいると考えられる。実験2では実験1と比較して曝気時間を短く設定し、ふん尿スラリー量を1.5倍にしたことと、使用した未曝

気ふん尿スラリーが異なることから、その要因を明らかにすることができなかった。

5. おわりに

今回の室内試験は、好気性発酵の発酵熱による液温変化の影響を取り除くため、ふん尿スラリーの液温を一定に保持した状態での曝気実験を行った。今後、室内試験の設定条件を工夫し、現地施設での施設管理に活用できる曝気条件を明らかにしていきたい。

謝辞：現地施設での調査に当たり、釧路開発建設部根室農業事務所のご協力をいただきました。また、調査対象施設の酪農経営者には、ふん尿スラリー採取等を快諾いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 村上功, 西脇康善 (2016) : 環境保全型かんがい排水事業における肥培施設整備前後の効果検証—第九報—, 第59回 (平成27年度) 北海道開発技術研究発表会.
- 2) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 (2013) : 肥培かんがいシステムに関する参考資料(案)、p. 42.
- 3) 社団法人農業土木学会 (2003) : 農業土木標準用語辞典、改訂五版.
- 4) 環境省環境管理局 (2001) : 臭気指数規制ガイドライン、p. 22