ISSN　0386 － 5878
土木研究所資料第4239号

# 土　木　研　究　所　資　料

## 肥培潅漑による生産環境改善効果の解明

平成 24 年 9 月

独 立 行 政 法 人　土 木 研 究 所
寒地土木研究所
寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reversed. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は, 独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土 木 研 究 所 資 料
第4239号　2012年9月

# 肥培潅漑による生産環境改善効果の解明

寒地農業基盤研究グループ資源保全チーム　上席研究員　横濱　充宏
総括主任研究員　大深　正徳
研究員　桑原　淳

要　旨

潅漑用水で希釈した乳牛ふん尿の好気発酵残渣である曝気スラリーの牧草地への散布が牧草地の土壌理化学性や牧草収量に及ぼす影響について検証した結果、重粘土において、土壌表層の膨軟化、排水性や肥料の保持能力等の改善が、また、基準収量以上の牧草収量の維持が認められ、肥培潅漑による作物生産性の向上効果が確認された。黒色火山性土では重粘土ほど顕著な改善効果は現れなかった。一方、曝気スラリーの長期連用に伴う亜鉛や銅等の微量要素の牧草地の土壌表層や牧草中への過剰な蓄積はなかった。また、曝気スラリーの牧草地への施用に伴う無機態窒素の土壌下層への集積もなかった。よって、肥培潅漑による地下水汚染は生じないと推察された。これらの現象は、肥培潅漑土壌における環境負荷物質収支の検討結果からも推察された。

肥培潅漑施設導入による地球温暖化ガス削減効果を検証した結果、肥培潅漑施設での処理は従来の処理に比べて、被害額が増加するため、この抑制にあたり曝気スラリー貯留槽の有蓋化等の対策が必要なことが示唆された。

キーワード：肥培潅漑、曝気スラリー、土壌理化学性、牧草、環境

## まえがき

大規模な土地利用型農業の利点を生かした北海道の酪農地帯では、これまでに国や自治体等による農業農村整備事業の進捗に伴い肥培潅漑施設が広く普及してきた。肥培潅漑とは、潅漑水によって乳牛ふん尿を希釈し、撹拌・調整したもの（以下、調整スラリーと略記する）を液肥として草地圃場に散布することであり、肥培潅漑施設とはこのシステムである。従来、作物生産性の向上や営農の効率化等生産環境改善効果を主な目的として肥培潅漑施設は導入してきたが、昨今では、環境保全への国民の関心が高まる中、この施設がもたらす環境負荷抑制効果についても期待されるようになってきている。

しかしながら、肥培潅漑施設の導入によってもたらされる効果の検証にあたっては、ふん尿取り扱い性の向上、調整スラリー施用に伴う土壌理化学性改善とこれに伴う環境負荷物質の保持能力の増大、さらには土壌・牧草間の微量要素収支の変化等の長期的な観測が必要とされるものが多い。

そこで、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所では、平成 20 年度～平成 22 年度にかけて重点プロジェクト研究として「肥培潅漑による生産環境改善効果の解明」の個別課題を立ち上げ、下記の 3 項目について研究を実施した。

1) 個別処理システムの生産環境改善効果の解明（H20～22）

調整スラリー散布が重粘土草地や火山性土草地における土壌理化学性と牧草収量等へ及ぼす影響について検証。

2) 肥培潅漑土壌における環境負荷物質収支の解明（H20～22）

調整スラリー散布による環境負荷物質の土壌中の集積状況を把握し、地下水の水質への影響を推察するために無機態窒素の集積状況を調査。また、調整スラリー散布を長年実施してきた圃場と化学肥料を主とした施肥方法による圃場の両圃場において、1 番草収穫後から 2 番草収穫までの牧草の再生長時期に、環境負荷物質として窒素、及び微量要素の含有量調査を実施し、動態を解明。

3) 個別処理システムによる環境負荷改善効果の解明（H21～22）

乳牛ふん尿処理利用システムにおける肥培潅漑施設導入前後の地球温暖化ガス（メタン、亜酸化窒素、二酸化炭素）発生量及び被害額を試算し、肥培潅漑施設の導入による地球温暖化ガス削減効果を検証。

本資料は、これら 1)～3)の 3 項目の検討を通して得られた、個別処理システムに関する研究成果を報じるものである。家畜ふん尿の嫌気性・好気性処理、施設の共同・個別利用型の選択や組み合わせを検討する際に、得られた個別処理システムによる生産環境改善効果及び環境負荷軽減効果に関する情報が施設の共同利用型処理技術に関する既存知見と対照するための情報として役立てば良いと考えている。本資料が、地域にとって最良なバイオマスの循環利用方法の策定に資する技術資料として活用されれば幸甚である。

# 目　　次

まえがき ..... 1
１　個別処理システムの生産環境改善効果の解明..... 3
1-1　重粘土草地における生産環境改善効果の解明..... 3
1-1-1　調査方法..... 3
1-1-2　調査結果..... 5
1-1-3　小括 ..... 15
1-2　黒色火山性土草地における生産環境改善効果の解明..... 16
1-2-1　調査方法..... 16
1-2-2　調査結果..... 18
1-2-3　小括 ..... 31
２　肥培潅漑土壌における環境負荷物質収支の解明..... 32
2-1　肥培潅漑圃場における無機態窒素の集積状況..... 32
2-1-1　調査方法..... 32
2-1-2　調査結果..... 32
2-2　環境負荷物質としての窒素、及び微量要素の動態調査..... 34
2-2-1　調査方法..... 34
2-2-2　調査結果..... 40
2-2-3　小括 ..... 51
３　個別処理システムによる環境負荷改善効果の解明..... 52
3-1　調査手法 ..... 52
3-2　調査結果 ..... 53
あとがき ..... 55
参考文献 ..... 56

## １　個別処理システムの生産環境改善効果の解明

家畜ふん尿を潅漑水で希釈して好気性処理を施した調整スラリーは、窒素、リン酸、カリウム等の肥料成分を含み、牧草地に液肥として散布すれば、長期的には土壌の理化学性を改善するとともに牧草収量・品質にも影響を及ぼすと考えられる。土壌の理化学性とは、粒径組成、透水係数、三相分布、容積重等の土壌の物理学的性質と pH、腐植、塩基置換容量等の土壌の化学的性質を指す。

そこで、調整スラリーの長期連用が牧草地土壌の理化学性と牧草収量・品質に及ぼす影響を検証した。

### 1-1　重粘土草地における生産環境改善効果の解明

#### 1-1-1 調査方法

調整スラリー散布の実績がある北海道北部の重粘土草地において、調整スラリー散布年数の長短のデータが均等に得られるように 13 箇所の牧草地を調査圃場に選定し、調整スラリー散布の有無、及び調整スラリー散布年数の長短に伴う土壌理化学性への影響を調査した。調査対象とした重粘土草地の調査圃場の概要を表－1 に示す。これらの調査圃場においてそれぞれ土壌調査と牧草収量調査を実施した。

表－1　重粘土草地の調査圃場の概要

| 圃場番号 | 調査圃場状況 | | |
|---|---|---|---|
| | 利用形態 | 草地更新後経過年数 | 調整スラリー散布年数 |
| 1 | 採草地 | 20 年 | 18 年 |
| 2 | 放牧地 | 2 年 | 18 年 |
| 3 | 放牧地 | 16 年 | 18 年 |
| 4 | 採草地 | 3 年 | 4 年 |
| 5 | 採草地 | 15 年 | 7 年 |
| 6 | 採草地 | 23 年 | 10 年 |
| 7 | 採草地 | 12 年 | 11 年 |
| 8 | 採草地 | 6 年 | 12 年 |
| 9 | 採草地 | 16 年 | 12 年 |
| 10 | 採草地 | 3 年 | 散布なし |
| 11 | 採草地 | 7 年 | 散布なし |
| 12 | 放牧地 | 20 年 | 散布なし |
| 13 | 放牧地 | 15 年 | 散布なし |

土壌調査では、1 圃場につき 6 箇所で、深さ 0～5cm（以下、表層 1 層目と略記する）と 5～10cm（以下、表層 2 層目と略記する）の 2 層から土壌試料を採取し、下記の分析を行った。

(1) 腐植：乾式燃焼法
(2) 塩基置換容量（CEC）：ショーレンベルガー－水蒸気蒸留法
(3) 交換性塩基（CaO、MgO、$K_2O$）ショーレンベルガー－原子吸光度法
(4) pH($H_2O$)：ガラス電極法
(5) 容積重：炉乾燥法
(6) 三相比：実容積測定法
(7) 孔隙分布：遠心法

なお、調整スラリー散布が土壌の理化学性に及ぼす影響を検証するためには、牧草地土壌では、表層 1 層目の性状把握が重要となることから [1), 2)]、一般的には、肥培潅漑圃場と非肥培潅漑圃場の表層 1 層目の土壌分析値を単純に比較することが考えられる。しかし、この方法では、農家の管理手法の違いや、地形条件の違いに由来する土壌理化学性の変異幅が大きく、調整スラリー散布による影響のみを抽出できない。そこで、調整スラリー散布による影響のみを抽出する評価方法として、乳牛スラリー原液及びその発酵液の圃場散布に伴う窒素動態に及ぼす散布条件の影響 [3)] に関する過年度の検討実績を参考にして、表層 1 層目の土壌分析値から、表層 2 層目の土壌分析値を差し引いた値（以下、層差と略記する）によって比較する方法を採用した。ここでは、調整スラリー散布直後の地中への浸透深さは 5cm 程度に留まると想定した。これで、草地更新作業等の他の要因に由来する変異幅分を分離することができる。

また、牧草収量調査では、13 調査圃場の内、9 つの採草地〔肥培潅漑圃場 7 圃場（表－1 中の圃場番号 1，4～9)、非肥培潅漑圃場 2 圃場（表－1 中の圃場番号 10，11)〕において 1 番草を対象に下記に示す成分分析を行った。調査した採草地は全てチモシー主体のクローバ混播草地（写真－1）であった。牧草の刈取り時期はチモシーの穂揃期とした。牧草試料について、新鮮重、乾物重、牧草割合、雑草割合の測定を行った後、下記に示す成分分析を行った。

写真－1　チモシー主体のクローバ混播草地

(1) 粗蛋白質：近赤外分光法
(2) 可消化養分総量：近赤外分光法及び蛍光 X 線分析
(3) 硝酸態窒素：吸光分光光度法

### 1-1-2 調査結果

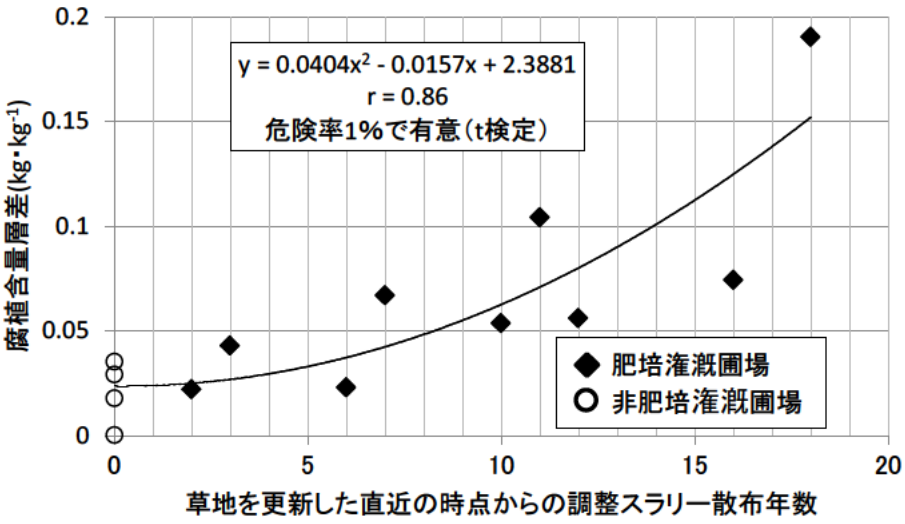
#### 1-1-2-1　土壌化学性への影響

（１）腐植の増加

腐植は、土壌の団粒構造の形成に重要といわれている。団粒構造とは土壌構造のひとつで、土壌粒子を結合して集合体となり（団粒）、これらが互いに接触して骨組を作っている状態をいう[4]。団粒構造が発達した土壌には、後述する土壌の保肥力増大、排水性や保水性の改善といった効果も期待される[5]。草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と腐植含量層差の関係を図－1 に示す。

牧草地土壌においては、年数の経過とともに、牧草の根や牧草地上部が枯死脱落することで、土壌表層を中心に有機物が自然に集積し、腐植に変化する。そのため、本調査圃場の非肥培潅漑 4 圃場（表－1 中の番号 10～13、図－1 中の散布年数 0 年にプロットした○、後続の図も同様）のうち 3 圃場（表－1 中の番号 11～13）において、表層 1 層目に腐植の集積が確認された。

一方、肥培潅漑圃場（図中の◆のプロット、後続の図も同様）では、調整スラリー散布開始から 5～6 年目までは非肥培潅漑圃場と比較しても腐植含量層差に大きな差は見られなかった。しかし、その後の散布年数の増加に伴い、表層 1 層目における腐植の集積が顕著となった。この近似曲線の相関係数 r は、危険率 1%で有意であった。図－1 から判断すると、調整スラリー散布による腐植の集積が顕著となるのは、調整スラリー散布開始から 5～6 年が経過した後と思われる。



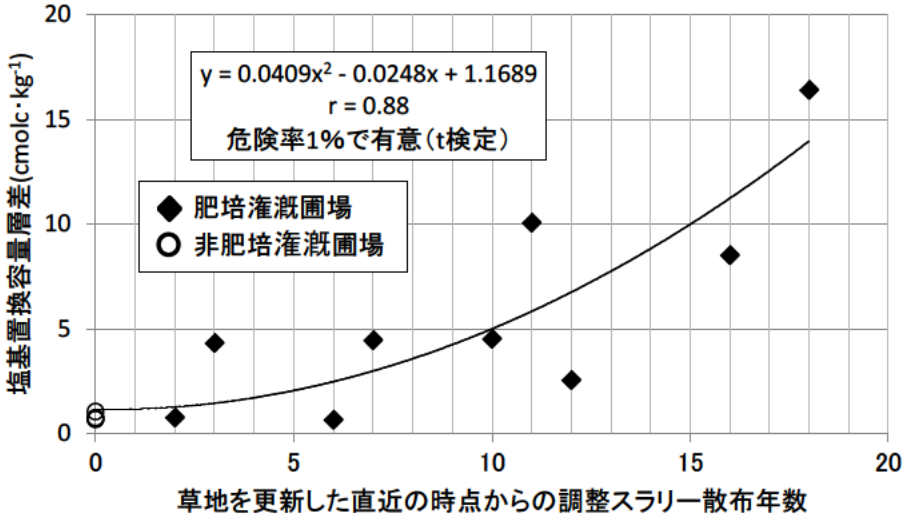

図－1　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と腐植含量層差の関係

（２）保肥力の改善

土壌が持つ保肥力の大小は、塩基置換容量の大小で表すことができる[5]。塩基置換容量が大きければ、土壌は植物の栄養分であるカルシウム（Ca）、マグネシウム（Mg）、カリウム

（K）をより多く保持できるようになる。これら塩基はアルカリ性を呈し、下層へ溶脱せずに表層に保持されれば、土壌表層の酸性化防止効果も期待できる。草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と塩基置換容量層差の関係を図－2 に示す。

非肥培潅漑圃場と比較すると、肥培潅漑圃場では、調整スラリー散布開始から 5～6 年目までは土壌表層における塩基置換容量層差に明確な増大傾向は見られなかった。しかし、その後には 2 次曲線的に増大しているのがわかる。この近似曲線の相関係数 r は、危険率 1%で有意であった。以上より、塩基置換容量の増大効果が見られるのは、腐植の集積と時を同じくして、調整スラリー散布開始から 5～6 年と推測される。




図－2　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
塩基置換容量層差の関係

（3）塩基の集積

塩基置換容量が大きい圃場では、Ca、Mg、K 等の塩基が保持されやすくなる。また、調整スラリーには塩基が含まれているため、毎年継続的に調整スラリーを散布している圃場では、塩基の供給量が多くなる傾向があると言われている。

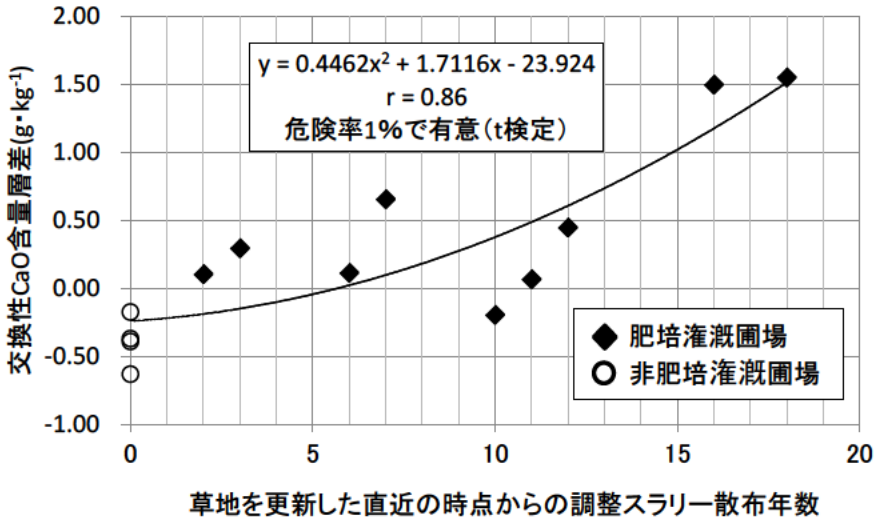
これらのことを証明するように肥培潅漑圃場の表層には Ca、Mg が集積している様子が確認された。それぞれの相関係数 r は、Ca が危険率 1%、Mg が危険率 5%でともに有意であった（図－3、図－4）。

非肥培潅漑圃場では、交換性 CaO 含量層差が負の値となっており、Ca が表層 1 層目から下層土へ溶脱していたことが推測される。また、肥培潅漑圃場では、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数が 10 年を過ぎたあたりで、表層における Ca の集積傾向が顕著となり、その後は飛躍的に増大した。これは調整スラリー散布により Ca が表層に保持されやすくなったと推測される（図－3）。

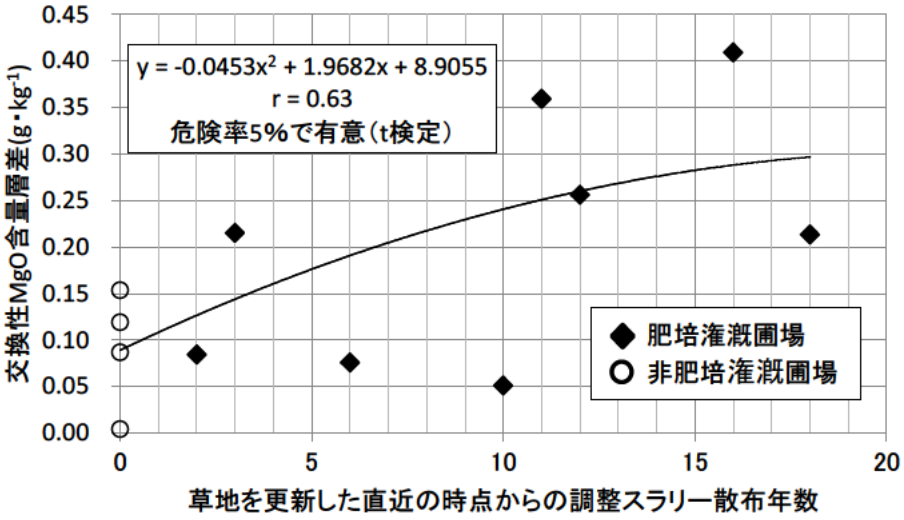
Mg は、調整スラリーの散布直後から表層に集積する傾向が認められたが、散布から 15 年を過ぎたあたりで横ばい傾向を示した（図－4）。

K の集積は明確な傾向が認められなかった。これは、人為的な加里系化学肥料の投入量の違いが土壌表層の K の集積に大きく影響を及ぼしているためと考えられる（図－5）。

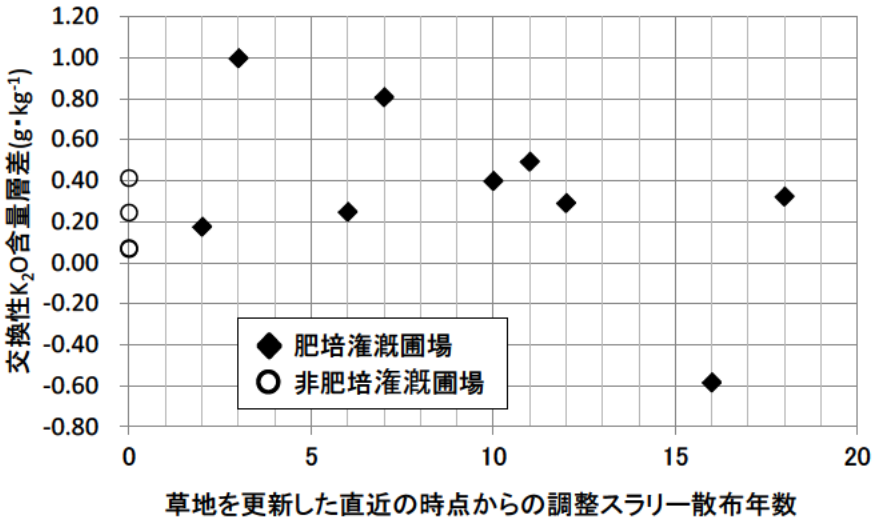
家畜ふん尿中には K が多く含まれる[6]ことから、減肥を伴わない化学肥料と調整スラリーの施用は K の集積を招きやすくし、また、これを原因とする牛の Mg 欠乏症状の発症を生じやすくする[7]。逆に K が欠乏すると、マメ科牧草の衰退を招き、根粒菌による窒素固定機能の停止から最終的に草地の荒廃化へといった連鎖的な影響が生じる[2]。したがって、調整スラリー中の K 濃度を分析した上で、K の施肥計画を立てることが重要と考えられる。




図－3　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と交換性 CaO 含量層差の関係




図－4　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と交換性 MgO 含量層差の関係




図－5　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と交換性 $K_2O$ 含量層差の関係

（4）土壌 pH の維持

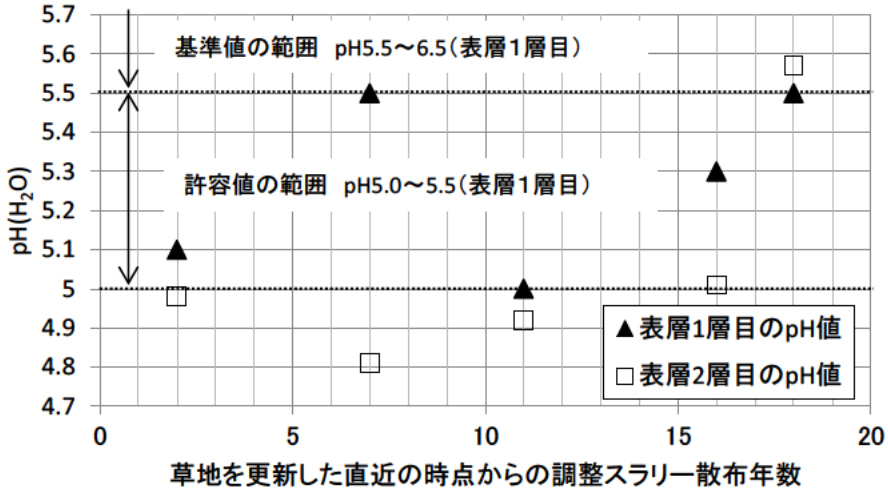
牧草地土壌の特徴の 1 つに、表層 1 層目の酸性化がある。牧草地土壌は、硫酸アンモニウム等の生理的酸性肥料を施肥し続けると、表層 1 層目の酸性化が進行する [1]。しかし、牧草は肥料なしでは生育できないため、施肥と酸性化防止策の組み合わせが重要となる [2]。特に、今回調査を行った疑似グライ土（写真－2）の牧草地では、土壌表層における pH の値が、草地更新の 1 指標とされている [8]。今回、pH のデータを集めることができた調整スラリー散布 5 圃場の土壌表層 1 層目、2 層目における pH の値を図－6 に示す。

写真－2　調査圃場の土壌断面（土壌名；疑似グライ土）

＊ 疑似グライ土とは、北海道の特殊土壌のひとつである。灰色台地土（特に粘質のもの）にほぼ相当するものであり、重粘土の中心概念をなす土壌である。ほぼ平坦または緩い傾斜の台地、丘陵地にある、排水の悪い土壌である。表土、心土とも土性は粘質で、心土の色は灰色～灰褐色、土が硬いのが特徴である [9]。

＊ 土壌の呼び方には農水省の方式以外に北海道で古くから使われている呼称方法がある。「特殊土壌」、「疑似グライ土」という呼称名は北海道で昔から使われている。

図－6 から、調整スラリー散布年数が 7 年目のデータ以外では、表層 1 層目と表層 2 層目の pH の差は－0.1～0.3 程度であり明確な差は認められなかった。また、土壌表層 1 層目の pH だけに着目すると、草地を更新した直近の時点から調整スラリー散布年数が 10 年以上を経過した牧草地であっても、pH の値は 5.0～5.5 と許容値の範囲内を維持していた。このことから、肥培潅漑圃場の表層 1 層目においては、草地更新からの経過年数に伴う急激な酸性化が進行していないことが推測される。




図－6　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
表層 1 層目・2 層目の pH($H_2O$)

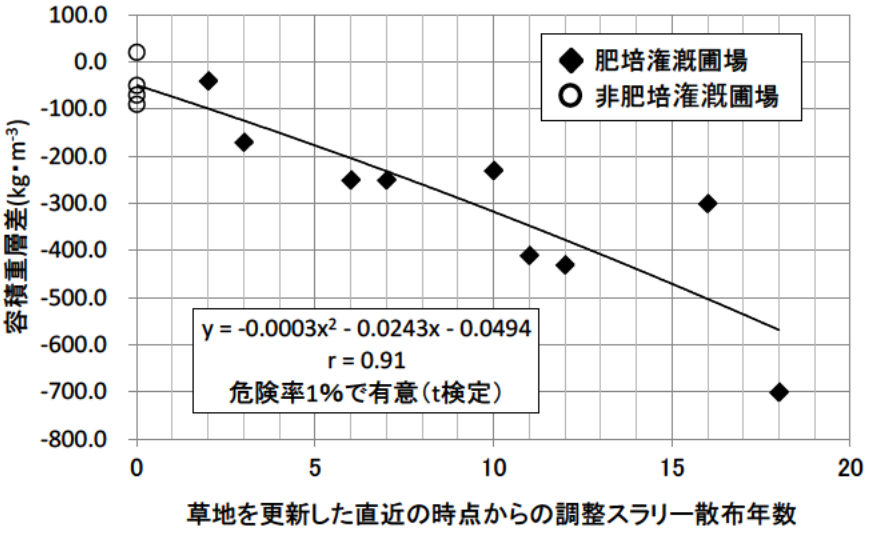
### 1-1-2-2　土壌物理性への影響

（1）土壌の膨軟化

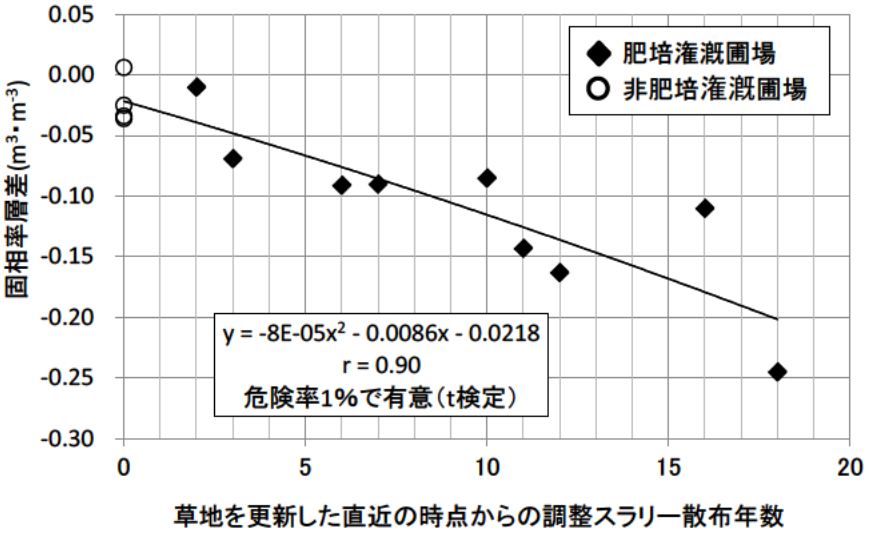
牧草地土壌では大型機械の走行等により土壌表層は圧縮される。牧草地土壌が圧縮されると容積重や固相率が増大する。このような土壌の緻密度が高いと生育が著しく低下する。これは、粗孔隙の減少により、作土層において通気不足となり、牧草の窒素及び吸収が抑制されること、ならびに根の下層への伸長が阻止され、養水分の吸収が円滑に行われないためである [10]。特に、疑似グライ土の牧草地は排水性、通気性が不良な上、乾燥によって堅密化しやすい [11]。

草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と容積重層差の関係を図－7 に、同じく調整スラリー散布年数と固相率層差の関係を図－8 に示す。

これらの図から、肥培潅漑圃場では散布年数の増加とともに容積重と固相率が直線的に低下しており、すなわち土壌の膨軟化が顕著に進行していたことがわかる。この散布図の近似曲線の相関係数 r は容積重、固相率ともに危険率 1%で有意であった。調整スラリーの長期的散布は、土壌表層の堅密化を防ぎ、植物の根の伸長に役立っているといえる。




図－7　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と容積重層差の関係

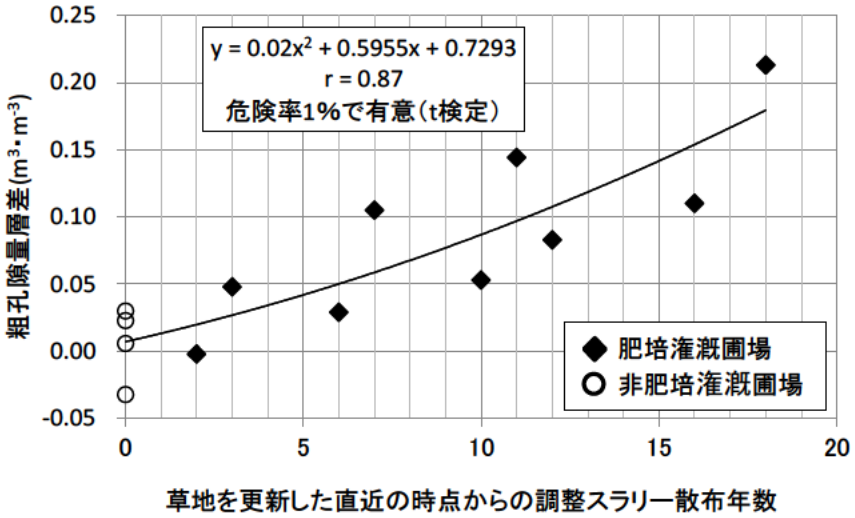



図－8　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と固相率層差の関係

（2）排水性・通気性の改善

土壌の排水性・通気性が改善されたかどうかは、土壌の粗孔隙量が増大したかどうかで評価できる。これは粗孔隙量が、余剰水分の迅速な排水と大気の土壌への流入に関与しているからである[2)]。図－9 に草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と粗孔隙量層差の関係を示す。

肥培潅漑圃場では、調整スラリーを長期的に散布している圃場ほど、粗孔隙量が増大している。また、非肥培潅漑圃場との差が生じ始めるのは、調整スラリー散布開始から 5～6 年が経過した後であることがわかる。この近似曲線の相関係数 r は危険率 1%で有意であった。以上より、長期的な調整スラリーの散布は、営農機械の走行による粗孔隙量の減少を防ぐだけでなく、粗孔隙量の増大による排水性・通気性の改善をもたらしているといえる。

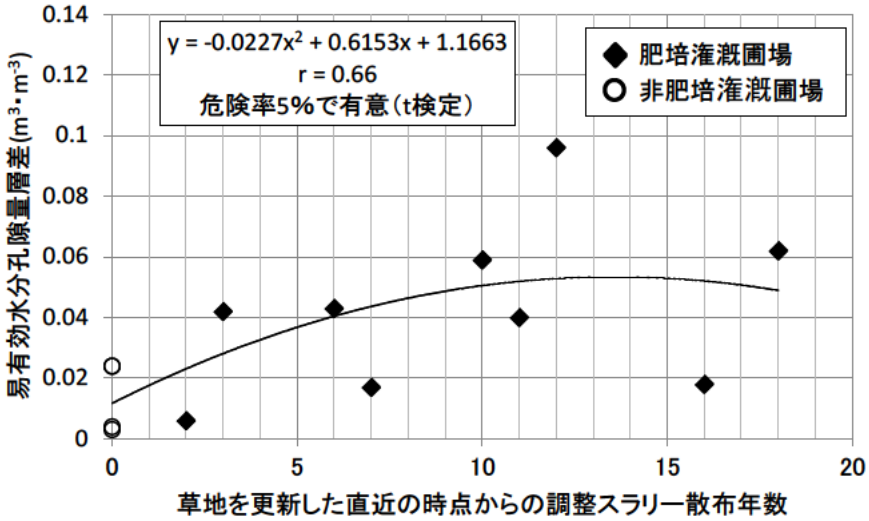



図－9　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と粗孔隙量層差の関係

（3）保水性の改善

易有効水分孔隙量は、植物が容易に吸収できる水分の保持にかかわる孔隙であり、作物の水分供給において、重要な役割を担う。図－10 に草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と易有効水分孔隙量層差の関係を示す。

粗孔隙量の増加ほど明確ではなかったが、肥培潅漑圃場では、調整スラリーの散布年数の増加に伴って、10 年目ぐらいまでは易有効水分孔隙量が上昇しているのが読み取れる。この時の近似曲線の相関係数 r は危険率 5%で有意であった。調整スラリーの散布は 15 年目ぐらいまでは牧草地土壌表層の保水性を増大させる効果があるといえる。




図－10　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
易有効水分孔隙量層差の関係

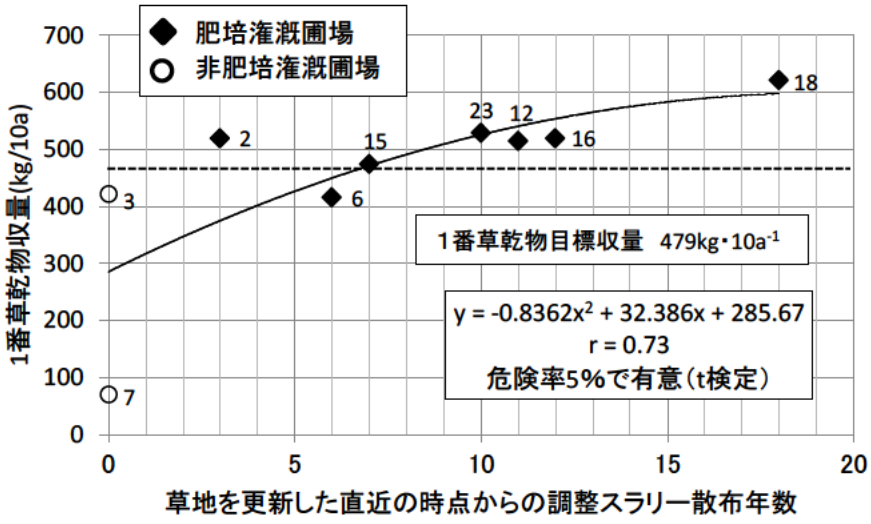
### 1-1-2-3　牧草収量への影響

（1）生産量の改善

草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と乾物収量の関係を示す（図－11）。なお、乾物収量は雑草を取り除いた牧草のみの重量とした。図－11 中のプロット横の数字は、草地を更新した直近の時点からの経過年数を示す（図-12 も同様）。また、1 番草乾物の目標収量として、チモシー主体草地の地域別平均乾物収量データにおける道北地方の値 479kg／10a [12] を示す。

牧草収量は、多くの場合、草地更新から 4～6 年目にピークを迎え、その後は牧草個体の消滅と雑草の進入によって低下していく。しかし、肥培潅漑圃場の乾物収量にはそのような傾向が見られず、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数が増えるに従って、徐々にではあるが増加傾向を示した。その結果、調整スラリー散布から 18 年を経過した圃場でも高い収量を維持していた。さらに、草地を更新した直近の時点からの経過年数が 23 年目（調整スラリー散布年数は 10 年目）を迎える草地であっても乾物収量は 529kg／10a と目標収量以上であった。この近似曲線の相関係数 r は危険率 5%で有意であった。

以上より、調整スラリーの長期連用は、牧草収量の経年的な低下を防ぐだけでなく、目標収量の維持に寄与しているといえる。



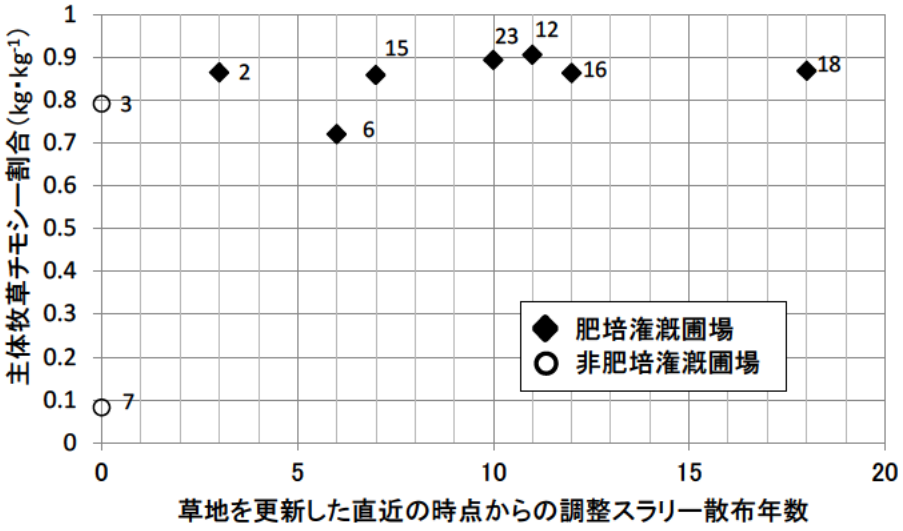

図－11　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
1 番草乾物収量の関係

（2）草種構成割合の維持

牧草収量は、裸地の割合や雑草の進入に左右されるため、草地の草種構成割合と密接な関係がある [13]。たとえば、収量の多い草地では、主体となるイネ科牧草の割合が十分であって、雑草や裸地の割合が少ない傾向がある [13]。

草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と主体イネ科牧草であるチモシー（写真－1）の全生草重（雑草を含む）に対する割合の関係を図－12 に示す。

肥培潅漑圃場では、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数が 10 年以上を経過した牧草地であっても、チモシーの全生草重に対する割合は 8 割以上を維持していた。さらに、草地を更新した直近の時点からの経過年数が 23 年目を迎える草地でもチモシーの割合は 89kg･kg$^{-1}$ であった。これらのことから、肥培潅漑圃場では、草地を更新した直近の時点からの年数経過に伴うチモシーの減少は起きにくく、長期間にわたって主体イネ科牧草が維持されるのが推測される。



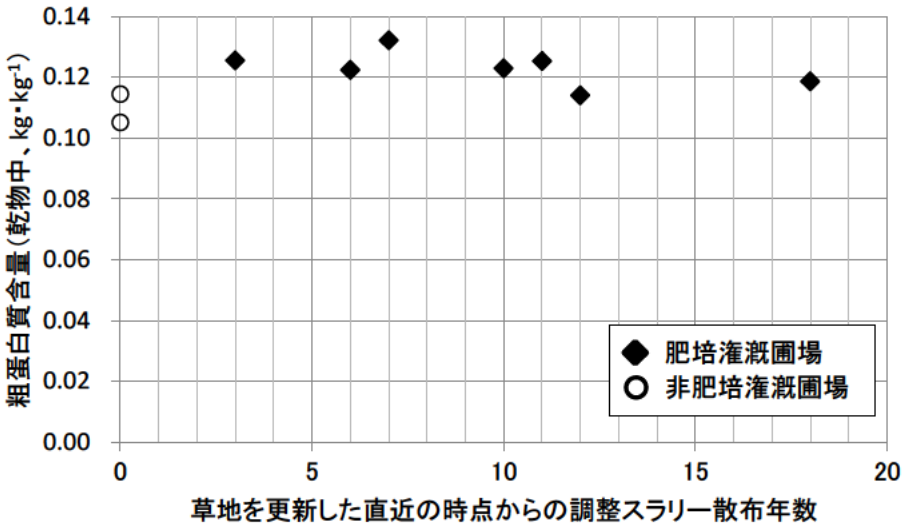

図－12　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と主体牧草割合の関係

### 1-1-2-4　牧草品質への影響

（1）粗蛋白質

蛋白質は、生物のからだを構成する基本的な物質である。そのため、家畜の成長と生産を順調に行うには、蛋白質を過不足なく含んだ牧草飼料を供給することが重要である [14]。草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と牧草乾物中の粗蛋白質含量の関係を図－13 に示す。

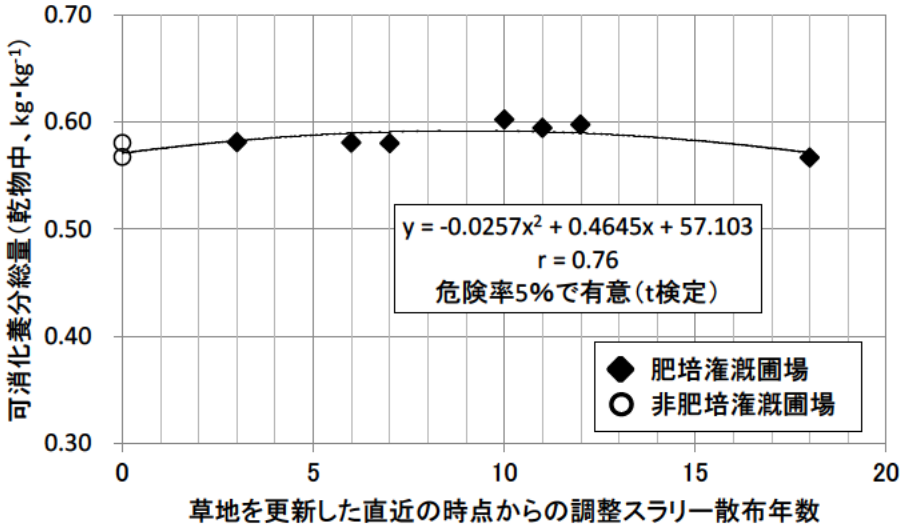
図－13 から肥培潅漑圃場と非肥培潅漑圃場の粗蛋白質含量に明確な差は確認できなかった。また、肥培潅漑圃場の粗蛋白質含量は、調整スラリーの散布年数に関係なく、ほぼ一定であった。これらのことから、粗蛋白質含量は、調整スラリーの長期連用による影響を受けていないといえる。




図－13　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
牧草乾物中の粗蛋白質含量の関係

（2）可消化養分総量

草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と牧草乾物中の可消化養分総量との関係を図－14 に示す。




図－14　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
牧草乾物中の可消化養分総量の関係

可消化養分総量とは牧草中に含まれる養分の内、乳牛にとって消化吸収可能な養分の総量である[15]。適期収穫を行い、可消化養分総量の高い牧草を収穫することが望ましい。

図－14 を見ると、肥培潅漑圃場の可消化養分総量は、調整スラリーの散布年数に関係なく、ほぼ一定であった。また、調整スラリー散布から 18 年目の草地でも牧草乾物中の可消

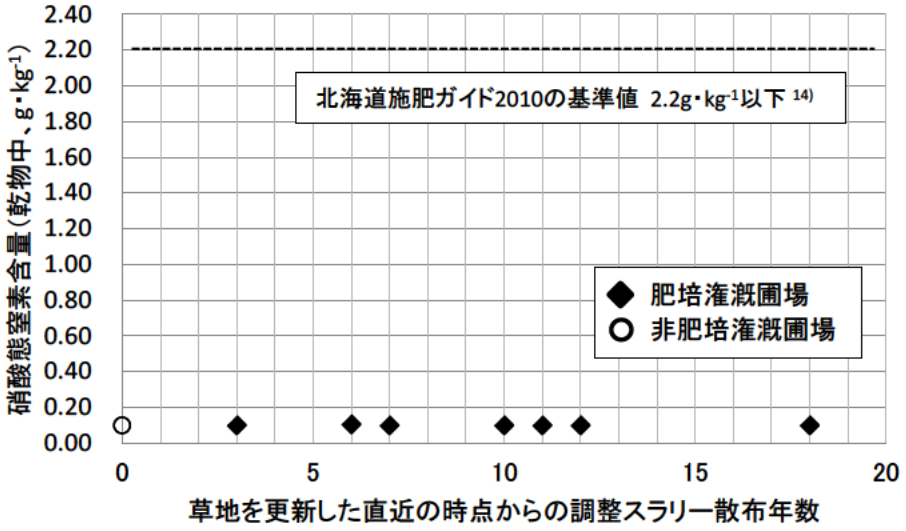
化養分総量は非肥培潅漑圃場と同程度であり、高い栄養価の牧草が維持されていることがわかった。以上より、可消化養分総量についても、調整スラリーの長期連用による影響を受けていないといえる。

（3）硝酸態窒素

調整スラリーは窒素成分を含むため、液肥として大量に散布すれば、牧草体内の硝酸態窒素含量が増加する [16]。それにより、牧草乾物中の硝酸態窒素含量が、乳牛の硝酸中毒を引き起こす限界値とされる 2.0g・$kg^{-1}$ を著しく超える可能性が指摘されている [16]。また、北海道農政部編、北海道施肥ガイド 2010（施肥標準・診断基準・施肥対応）〔以下、施肥ガイド〕では、作物栄養診断基準（牧草）の中で、家畜栄養上の基準値を 2.2g・$kg^{-1}$ 以下としている [17]。

草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と牧草乾物中の硝酸態窒素の関係を図－15 に示す。

肥培潅漑圃場、非肥培潅漑圃場に関係なく、牧草乾物中の硝酸態窒素は 0.1 g・$kg^{-1}$ であり、これらの限界値や基準値を超えていなかった。このことから、硝酸態窒素は、調整スラリーの長期連用によって目安とされる値を超えるほど増加しないことが推察される。




図－15　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
牧草乾物中の硝酸態窒素の関係

### 1-1-3　小括

長期的な調整スラリーの散布が重粘土草地の土壌理化学性や収量・品質に及ぼす影響を明らかにした。その結果、肥培潅漑圃場では、草地を更新した直近の時点からの経過年数に伴う土壌表層の理化学性や草種構成の悪化はなく、また、草地更新から 23 年が経過していても、目標値以上の牧草収量を維持していることが確認できた [18]、[19]。

## 1-2　黒色火山性土草地における生産環境改善効果の解明

### 1-2-1　調査方法

調整スラリーの長期連用が黒色火山性土草地の土壌や牧草に及ぼす影響を検証するために、計 23 圃場〔肥培潅漑圃場 16 圃場（表－2 の圃場番号 14～29)、非肥培潅漑圃場 7 圃場（表－2 の圃場番号 30～36)〕で調査した。黒色火山性土草地の調査圃場の概要を表－2 に示す。

表－2　黒色火山性土草地の調査圃場の概要

| 圃場番号 | 利用形態 | 草地更新後経過年数 | 調整スラリー散布年数 | 土壌分析の有無 | | 牧草分析の有無 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 一般成分 | 微量要素 | 一般成分 | 微量要素 |
| 14 | 採草地 | 2 年 | 2 年 | ○ | × | × | × |
| 15 | 採草地 | 不明 | 2 年 | × | × | ○ | ○ |
| 16 | 採草地 | 3 年 | 3 年 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 17 | 採草地 | 4 年 | 4 年 | ○ | ○ | × | × |
| 18 | 採草地 | 4 年 | 4 年 | ○ | × | × | × |
| 19 | 採草地 | 5 年 | 5 年 | ○ | ○ | ○ | × |
| 20 | 採草地 | 不明 | 5 年 | ○ | ○ | × | × |
| 21 | 採草地 | 10 年 | 6 年 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 22 | 採草地 | 6 年 | 6 年 | ○ | ○ | ○ | × |
| 23 | 採草地 | 7 年 | 7 年 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 24 | 採草地 | 7 年 | 7 年 | ○ | ○ | ○ | × |
| 25 | 採草地 | 8 年 | 8 年 | × | × | ○ | × |
| 26 | 採草地 | 10 年 | 10 年 | ○ | ○ | ○ | × |
| 27 | 採草地 | 14 年 | 12 年 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 28 | 採草地 | 14 年 | 13 年 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 29 | 採草地 | 15 年 | 15 年 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 30 | 採草地 | 11 年 | 散布なし | × | × | ○ | ○ |
| 31 | 採草地 | 11 年 | 散布なし | × | × | ○ | × |
| 32 | 採草地 | 10 年 | 散布なし | ○ | ○ | ○ | × |
| 33 | 採草地 | 3 年 | 散布なし | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 34 | 採草地 | 12 年 | 散布なし | ○ | ○ | ○ | × |
| 35 | 採草地 | 7 年 | 散布なし | ○ | × | × | × |
| 36 | 採草地 | 8 年 | 散布なし | ○ | × | × | × |

＊　上記表内の圃場番号は表－1 の圃場番号の連番とした。

＊　「土壌分析の有無」、「牧草分析の有無」の欄の○は分析の実施を、×は未実施を示す。

黒色火山性土草地の土壌調査でも、前述の重粘土草地の土壌調査と同様に、1 圃場につき 6 箇所で土壌試料の採取を行った。1 箇所につき表層 1 層目と表層 2 層目の 2 層から土壌試料を採取し、一般成分分析及び微量要素分析を実施した。表－2 中に、分析を行った圃場に○印を、分析を行っていない圃場には×印を記した。また、表－3 に分析項目と分析手法を示す。なお、重粘土草地と黒色火山性土草地とで分析項目が異なるのは、黒色火山性土草地では肥培潅漑が及ぼす生産性への影響だけに限定せず環境への影響も配慮した結果、牧草の栄養成分と重金属を含む微量要素を分析対象に加えたためである。

牧草収量調査は 1 番草を対象に実施した。調査圃場は全てチモシー主体のクローバ混播

表－3　分析項目と分析手法

| 試料種 | 分析項目 | | 分析手法 | 黒色火山性土と重粘土草地の分析項目の違い |
|---|---|---|---|---|
| 土壌 | 一般成分 | 1.腐植 | 乾式燃焼法 | 違いなし |
| | | 2.塩基置換容量（CEC） | ショーレンベルガー－水蒸気蒸留法 | 〃 |
| | | 3.容積重 | 炉乾燥法 | 〃 |
| | | 4.孔隙分布 | 遠心法 | 〃 |
| | 微量要素 | 1. 全亜鉛 | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 重粘土草地では未実施 |
| | | 2. 可溶性亜鉛 | 0.1N 塩酸浸出－原子吸光法 | 〃 |
| | | 3. 全銅 | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 〃 |
| | | 4. 可溶性銅 | 0.1N 塩酸浸出－原子吸光法 | 〃 |
| | | 5. 全マンガン | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 〃 |
| | | 6. 易還元性マンガン | １N 酢酸アンモニウム抽出－原子吸光法 | 〃 |
| | | 7. 全ホウ素 | 過塩素酸分解－ICP 発光分析法 | 〃 |
| | | 8. 可溶性ホウ素 | 熱水抽出法－ICP 発光分析法 | 〃 |
| 牧草 | 一般成分 | 1. 粗蛋白質 | 近赤外分光法 | 違いなし |
| | | 2. 可消化養分総量 | 近赤外分光法及び蛍光 X 線分析 | 〃 |
| | | 3. カルシウム | 蛍光 X 線分析法 | 重粘土草地では未実施 |
| | | 4. マグネシウム | 蛍光 X 線分析法 | 〃 |
| | | 5. カリウム | 蛍光 X 線分析法 | 〃 |
| | | 6. 硝酸態窒素 | 吸光分光光度法 | 違いなし |
| | 微量要素 | 1. 全鉄 | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 重粘土草地では未実施 |
| | | 2. 全亜鉛 | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 〃 |
| | | 3. 全銅 | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 〃 |
| | | 4. 全マンガン | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 〃 |
| | | 5. 全モリブデン | 過塩素酸分解－原子吸光法 | 〃 |
| | | 6. 全ホウ素 | 過塩素酸分解－ICP 発光分析法 | 〃 |

草地であった。調査時期は平成 22 年 6 月 21、22 日であり、当時、圃場内の全チモシーの内、約 2 割のチモシーが出穂していた。牧草試料は、1 圃場あたり 6 箇所に 1m$^2$ の牧草収量枠を設置し、地上から約 10cm の位置で刈り取った。刈り取った牧草は、雑草を取り除いた後に乾物重を測定し、表－3 に示す一般成分分析と微量要素分析に供試した。

各土壌分析項目の評価として、黒色火山性土草地の検証においても、肥培潅漑による影響のみを抽出するために層差を用いた。この層差の値と草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との関係から調整スラリーの長期連用による土壌理化学性への影響を検証した。

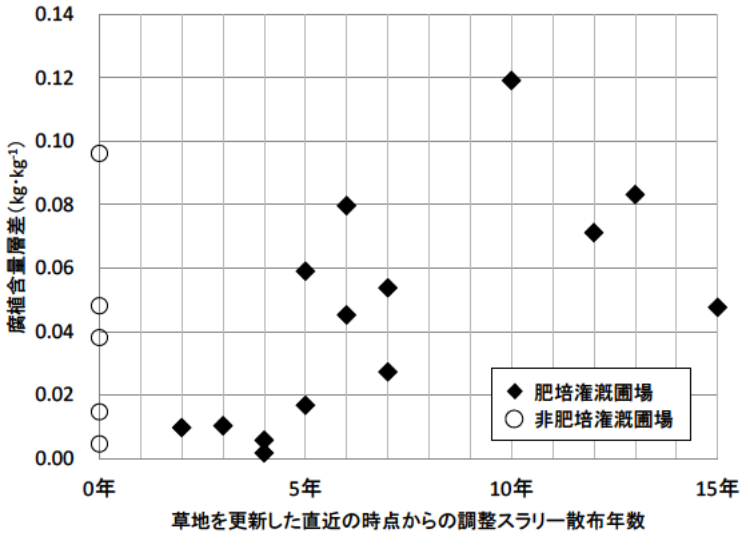
### 1-2-2　調査結果

#### 1-2-2-1　土壌理化学性への影響

（1）腐植の増加

腐植含量層差と草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との関係を図－16 に示す。

図－16 より、腐植含量層差と草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に明確な相関はなかった。この理由として、もともとの土壌に含まれる腐植含量が多かったためと推察される。採取した試料の表層 2 層目の腐植含量の平均値は 0.14 kg・kg$^{-1}$ であった。土壌に 0.1kg・kg$^{-1}$ 以上の腐植が含まれると、すこぶる富むと表現されることから、黒色火山性土にはそもそも腐植が十分に含まれているといえる。このため、黒色火山性土では、表層 1 層目における腐植の集積が前述の重粘土ほど明確には現れにくいと推察される。



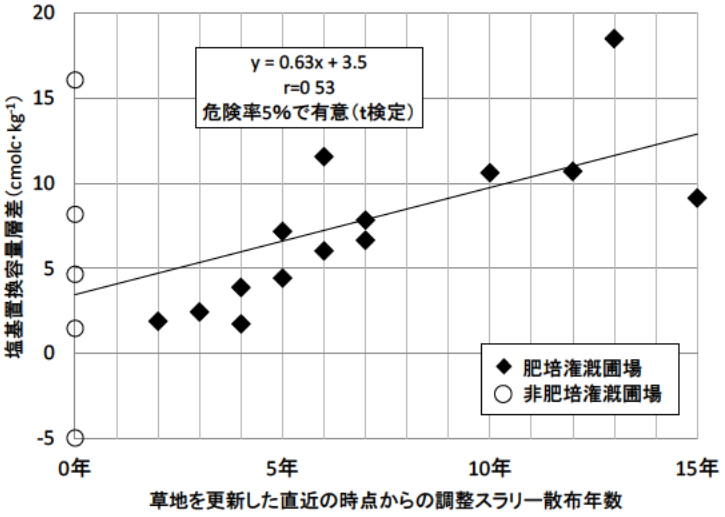

図－16　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と腐植含量層差との関係

（2）保肥力の改善

塩基置換容量は腐植含量や粘土含量の多い土壌ほど増大する。すなわち、調査圃場のような腐植に富む黒色火山性土は土壌自体のもともとの保肥力が高いため、肥培潅漑の影響を受けにくい表層 2 層目においても塩基置換容量が大きい値を示すことが予想された。

図－17 に草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と塩基置換容量層差との関係を示す。非肥培潅漑圃場のみのデータで塩基置換容量層差と草地を更新した直近の時点からの経過年数との関係を整理した場合、これらの間には相関が認められなかった。しかし、肥培潅漑圃場では塩基置換容量層差と草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に相関が認められた。肥培潅漑圃場では表層 1 層目の塩基置換容量は経年に伴い増大していたと判断される。また、肥培潅漑圃場及び非肥培潅漑圃場の全データをあわせて整理した場合でも塩基置換容量層差と草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との回帰直線には t 検定において危険率 5%の有意性が確保された。塩基置換容量の目標値は 20cmolc・$kg^{-1}$ 程度であり、調整スラリーの長期連用に伴う塩基置換容量の改善が黒色火山性土草地においても推察される。

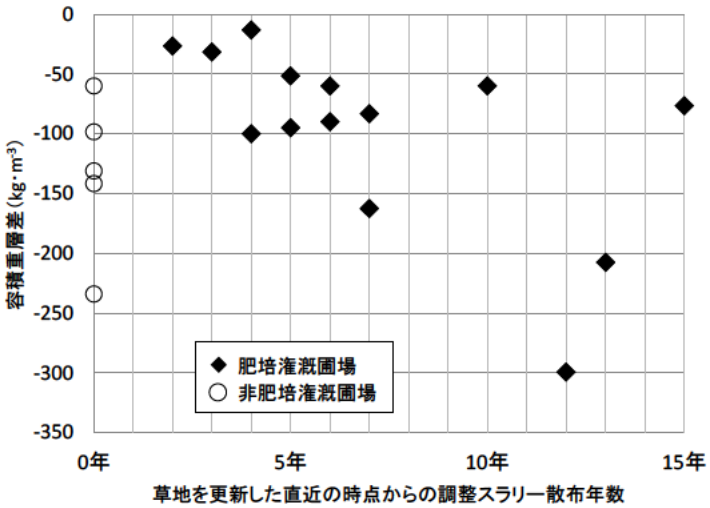
なお、塩基置換容量層差と草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との回帰直線が増加傾向を示していることから、表層 1 層目における塩基置換容量の増大を確認した。層差とは、表層 1 層目から表層 2 層目の分析値を差し引いた値であるので、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数の増加に伴って塩基置換容量層差との回帰直線が増加傾向を示す場合には、表層 2 層目より表層 1 層目の分析値の方が大きいと理解できる。図－17 の場合、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数に伴い表層 2 層目の塩基置換容量に影響が及ばないことから表層 1 層目に塩基置換容量が増大していると判断される。




図－17　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と塩基置換容量層差との関係

（3）土壌の膨軟化

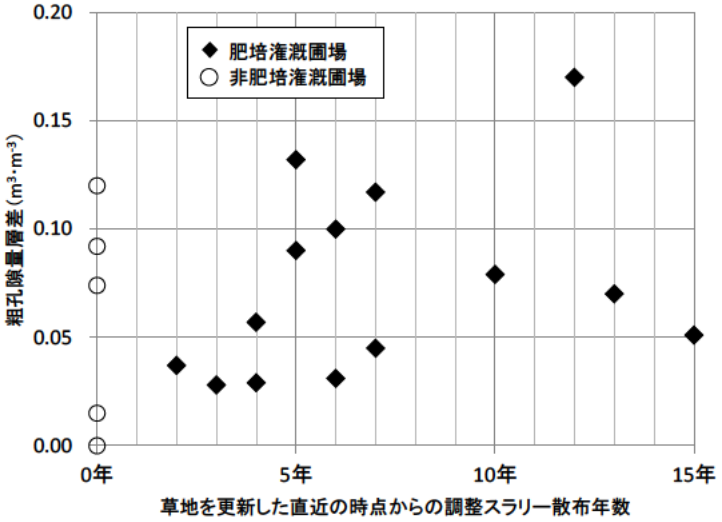
採取した黒色火山性土の表層 2 層目の容積重平均値は 350kg・$m^{-3}$ であり、手で揉みほぐすとすぐに崩れるほど柔らかであった。また、表層 1 層目の容積重についても経年による変化がなく、土壌表層の堅密化は進行していない。容積重層差と草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との関係を見ても、両者の間に相関は見られなかった（図－18)。調整スラリー散布による容積重の減少といった効果は、堅密化しにくい黒色火山性土土壌においてはほとんどなく、重粘土土壌ほど顕著には現れなかった。



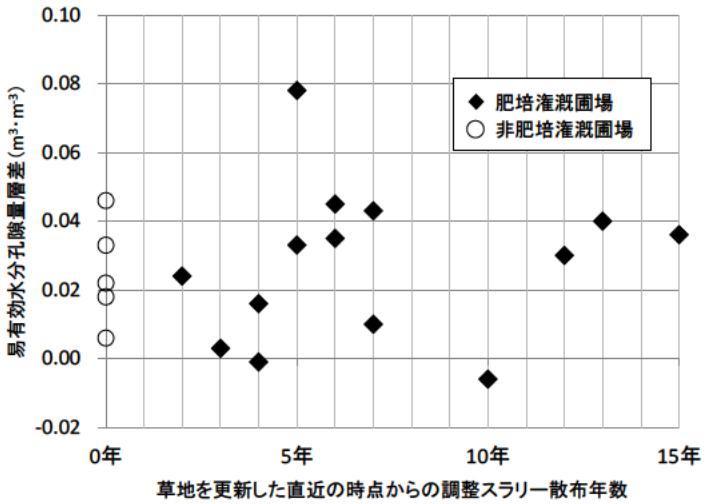

図－18　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と容積重層差との関係

（4）排水性、通気性、保水性の改善

草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と粗孔隙量層差との関係を図－19 に、易有効水分孔隙量層差との関係を図－20 に示す。




図－19　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と粗孔隙量層差との関係




図－20　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
易有効水分孔隙量層差との関係

黒色火山性土では、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と粗孔隙量層差との間に、また易有効水分孔隙量層差との間にも相関関係はなかった。黒色火山性土では、粗孔隙量層差や易有効水分孔隙量層差は草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数に伴い増大するといった変化が現れにくいことから、肥培潅漑による土壌の膨軟化に対する改善効果も明確には現れにくいと推察される。

### 1-2-2-2　土壌表層の微量要素含量への影響

調整スラリーには、亜鉛や銅等の微量要素が含まれている。調整スラリーは毎年牧草地に散布されるため、長期連用された牧草地ではこれら微量要素が土壌表層に蓄積する懸念がある。そこで、ここでは前述までの層差による評価に加えて、表層 1 層目における微量要素の含有量についても農用地における管理基準値（上限値）と比較して肥培潅漑が土壌表層の微量要素含量へ及ぼす影響を考察した。

（1）全亜鉛、可溶性亜鉛含量

図－21 に草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と土壌表層 1 層目の全亜鉛、可溶性亜鉛含量の関係を示す。草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と全亜鉛、可溶性亜鉛含量層差の関係を図－22 に示す。

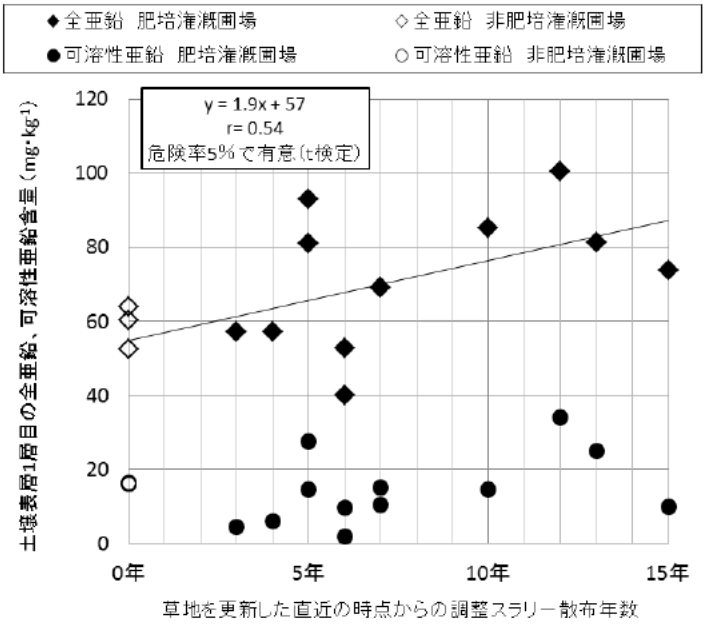
農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る全亜鉛含量の管理基準値は、120mg・kg$^{-1}$ である [20]。これと比較すると、調整スラリーを 15 年間連用した圃場であっても全亜鉛含量は基準値未満であったことがわかる（図－21）。

また、施肥ガイドによると、畑土壌の作土の化学性に関する土壌診断基準値として作物の生長に必要な可溶性亜鉛含量の範囲が 2～40 mg・kg$^{-1}$ と示されている [17]。可溶性亜鉛含量は、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に有意な関係は見ら

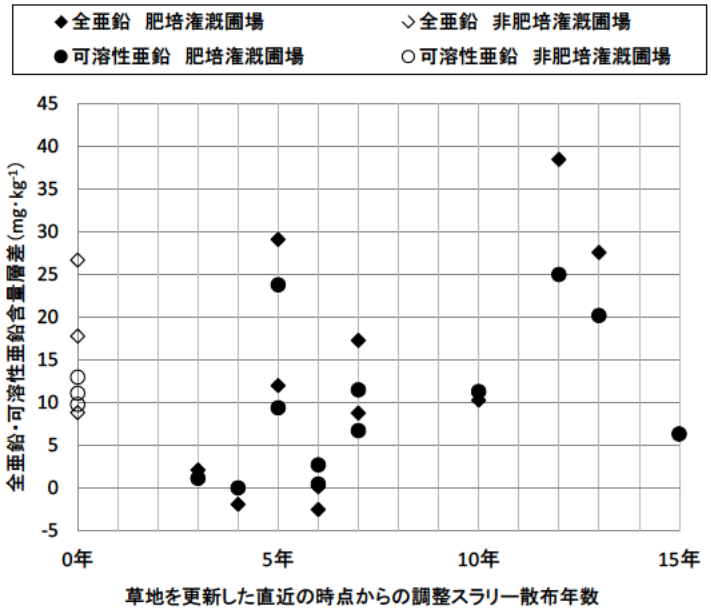
られず、散布年数に関係なく基準値の範囲内にあった（図－21）。

全亜鉛、可溶性亜鉛含量層差は、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に有意な関係はなく、調整スラリー散布年数の増加に伴う直線的な増加傾向が認められなかった。（図－22）。

以上より、調整スラリーの長期連用によって全亜鉛、可溶性亜鉛の過剰な蓄積につながることはなかった。



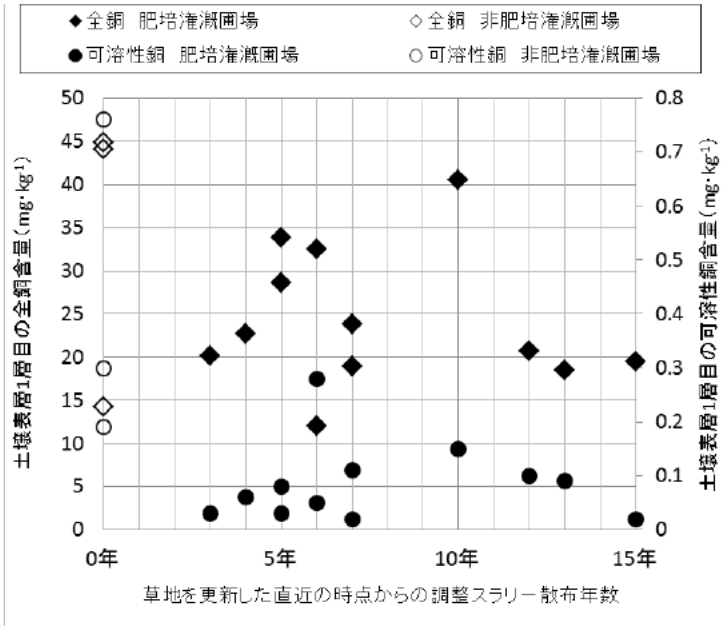

図－21　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と土壌表層１層目の全亜鉛、可溶性亜鉛含量の関係



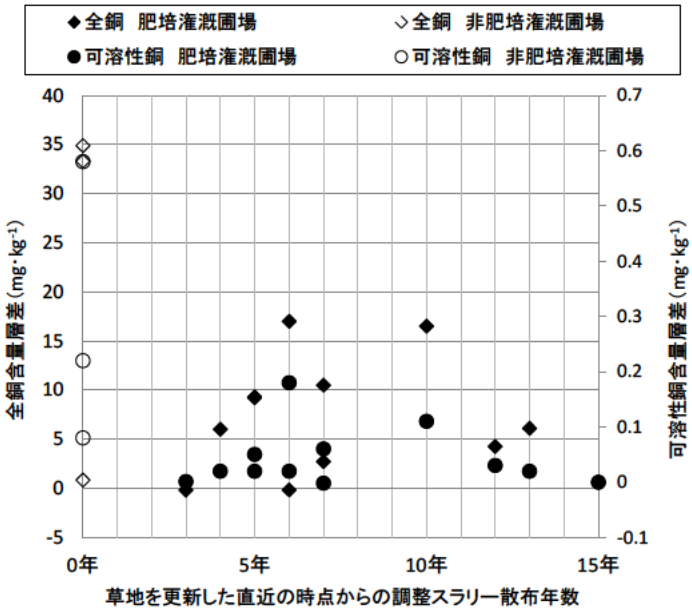

図－22　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と全亜鉛、可溶性亜鉛含量層差の関係

（2）全銅、可溶性銅含量

図－23 に草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と土壌表層 1 層目の全銅、可溶性銅含量との関係を示す。図の左側の縦軸に表層 1 層目の全銅含量を、右側の縦軸に表層 1 層目の可溶性銅含量を示す。草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と全銅、可溶性銅含量層差の関係を図－24 に示す。図の左側の縦軸に全銅含量層差を、右側の縦軸に可溶性銅含量層差を示す。




図－23　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と土壌表層 1 層目の全銅、可溶性銅含量の関係



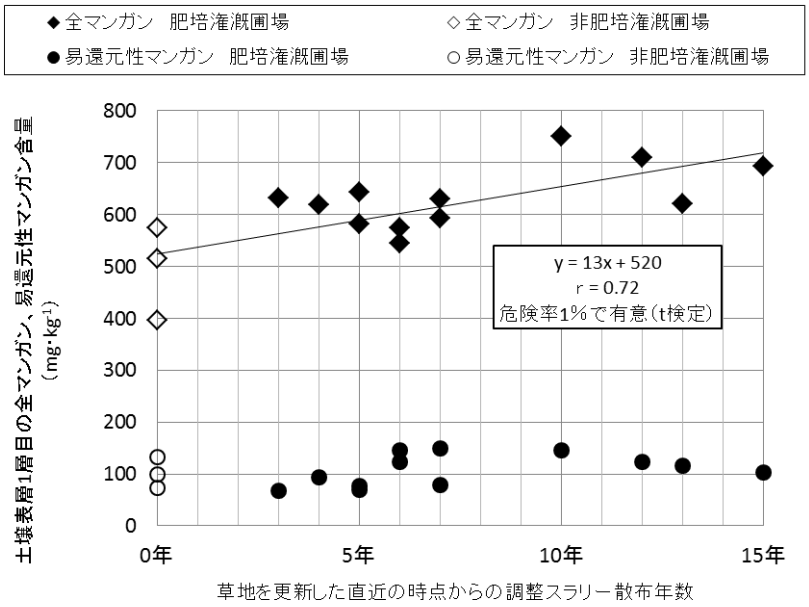

図－24　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と全銅、可溶性銅含量層差の関係

表層 1 層目の全銅含量、表層 1 層目の可溶性銅含量ともに草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に相関は見られず、調整スラリーの長期連用の影響はないといえる。全銅含量層差、可溶性銅含量層差についても草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に相関は見られなかった。散布年数が増加するにつれて表層 1 層目に全銅及び可溶性銅が蓄積することはなかった。なお、全銅含量の基準値は定められていない。可溶性銅含量は作物の生育上、0.3～8mg/kg$^{-1}$ が必要とされており [17]、全ての調査圃場の表層第 1 層の可溶性銅含量は必要量を下回っていた。

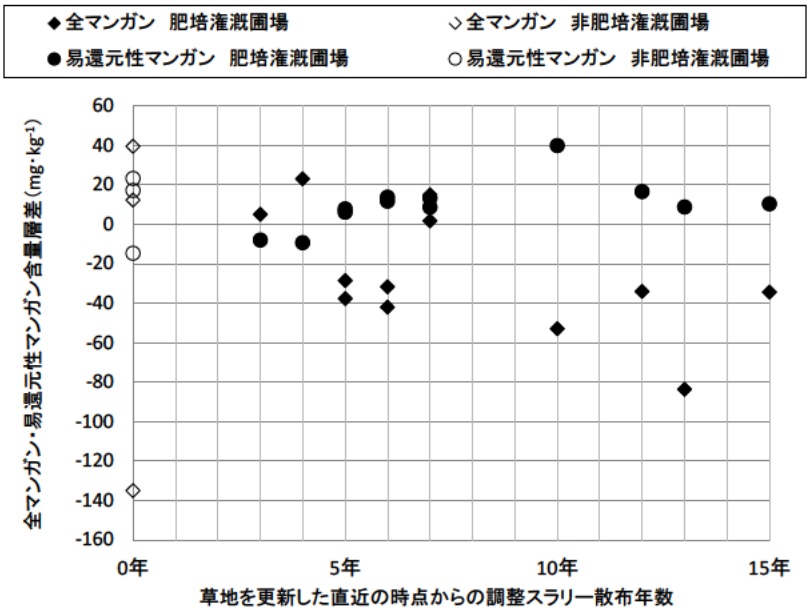
（3）全マンガン、易還元性マンガン含量

図－25 に草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と土壌表層 1 層目の全マンガン、易還元性マンガン含量の関係を示す。草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と全マンガン、易還元性マンガン含量層差の関係を図－26 に示す。

全マンガン含量は草地を更新した直近の時点からの調整スラリーの散布年数の増加に伴い増加していた。この近似直線の相関係数は、 t 検定において危険率 1%で有意であった。易還元性マンガン含量については草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に有意な関係は見られず、全マンガン含量の増加が易還元性マンガン含量の増加には影響していなかった。全マンガン含量の基準値は定められていないが、易還元性マンガン含量の基準値には作物の生育上の必要量の範囲として、50～500mg・kg$^{-1}$ が示されている [17]。これと比較すると易還元性マンガン含量は基準値内であり、問題とならないことがわかる。全マンガン、易還元性マンガン含量層差も草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数との間に相関は見られなかった。



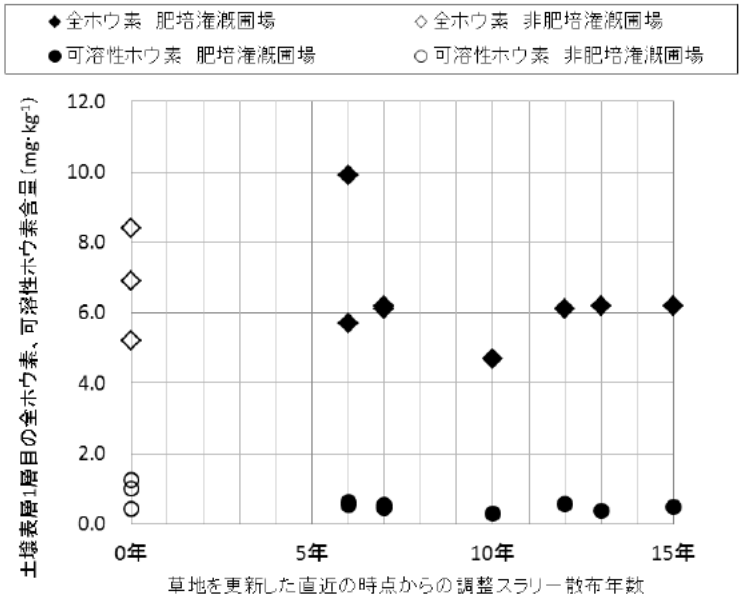

図－25　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
土壌表層 1 層目の全マンガン、易還元性マンガン含量の関係



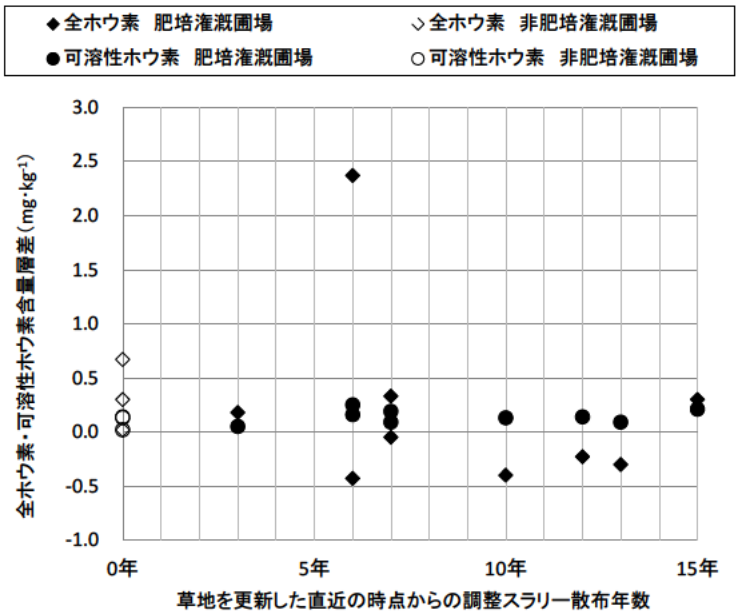

図－26　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
全マンガン、易還元性マンガン含量層差の関係

（4）全ホウ素、可溶性ホウ素含量

土壌表層 1 層目の全ホウ素と可溶性ホウ素含量については、欠測が生じたため、分析を行った肥培潅漑圃場の 8 圃場と非肥培潅漑圃場の 3 圃場の結果を図－27 に示す。草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数とホウ素、可溶性ホウ素含量層差の関係を図－28 に示す。




図－27　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
土壌表層 1 層目の全ホウ素、可溶性ホウ素含量の関係




図－28　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
全ホウ素、可溶性ホウ素含量層差の関係

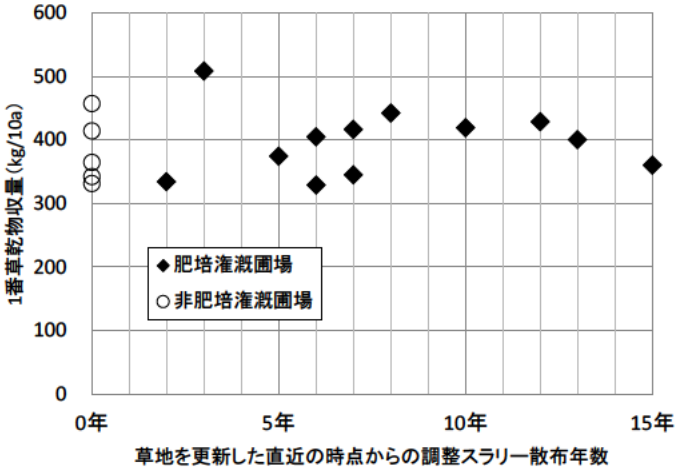
表層 1 層目の全ホウ素、可溶性ホウ素含量ともに草地を更新した直近の時点からの調整スラリーの散布年数との間に相関が見られず、長期間の調整スラリーの散布が表層 1 層目の全ホウ素含量と可溶性ホウ素含量へ及ぼす影響はないと推察される（図－27）。また、可溶性ホウ素含量の基準値の範囲は 0.5～1.0mg・kg$^{-1}$ である[17]。肥培潅漑圃場の中には、可溶性ホウ素含量が若干不足している圃場はあったが、基準値の上限を超える圃場はなかった。調整スラリーの散布によってホウ素が牧草地土壌表層に過剰に蓄積することはなかった（図－27）。図－28 において全ホウ素、可溶性ホウ素含量層差ともに増加傾向を示す直線的な回帰直線が存在しないことからも、表層 1 層目に全ホウ素、可溶性ホウ素ともに蓄積していないことがわかる。

### 1-2-2-3　牧草収量・品質に及ぼす影響

（1）生産量の改善

草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と 1 番草乾物収量との関係を図－29 に示す。肥培潅漑圃場、非肥培潅漑圃場のそれぞれの 1 番草を対象にした乾物収量の平均値は、肥培潅漑圃場で 400kg／10a であり、非肥培潅漑圃場で 380kg／10a であった。両圃場の乾物収量の平均値は、ｔ検定において有意な差がないことから、同程度の収量とみなされる。

また、肥培潅漑圃場では、牧草収量がピークを迎える草地更新後 3 年目以降[13]においても、乾物収量に大きな減少は見られなかった。肥培潅漑圃場では長期間にわたって収量が維持されていた。




図－29　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と 1 番草乾物収量の関係

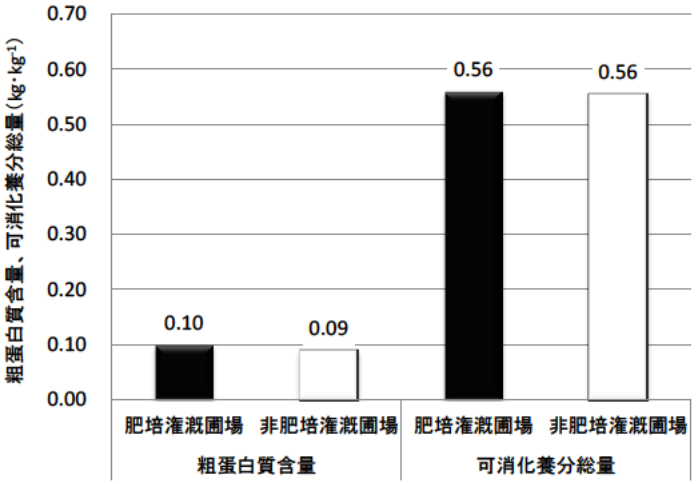
（2）牧草の栄養価

牧草の栄養価を評価するために、主要栄養素である粗蛋白質含量と乳牛が消化吸収可能な総量を表す可消化養分総量[15]について、分析を行った。

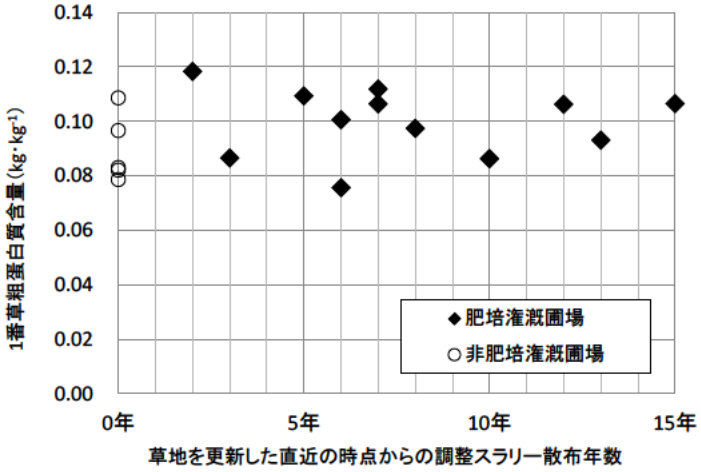
粗蛋白質含量の肥培潅漑圃場の平均値と同じく非肥培潅漑圃場の平均値を比較した結果、有意な差はなく、可消化養分総量においても同様の結果であった（図－30）。

また、草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と 1 番草粗蛋白質含量との関係を図－31 に、同じく可消化養分総量との関係を図－32 に示す。

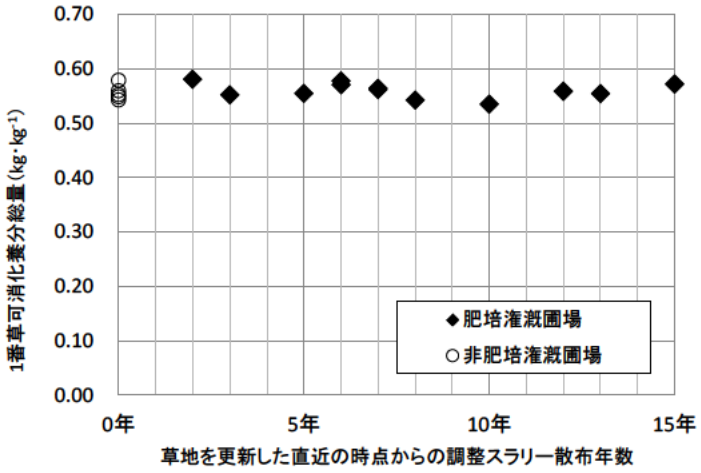
これらの調査結果から、1 番草の粗蛋白質含量と可消化養分総量には草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数に伴って変化がなく、長期間の調整スラリーの散布が粗蛋白質含量と可消化養分総量に及ぼす影響は見られなかった。




図－30　肥培圃場と非肥培圃場の
粗蛋白質含量と可消化養分総量の平均値




図－31　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
1番草粗蛋白質含量の関係



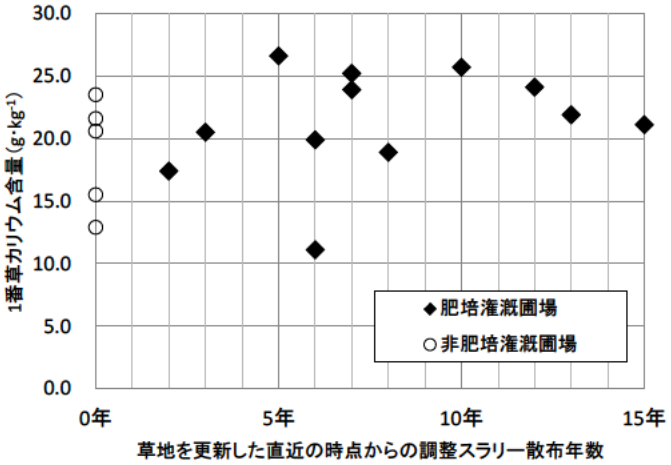

図－32　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
1番草可消化養分総量の関係

（3）牧草養分含量と硝酸態窒素含量

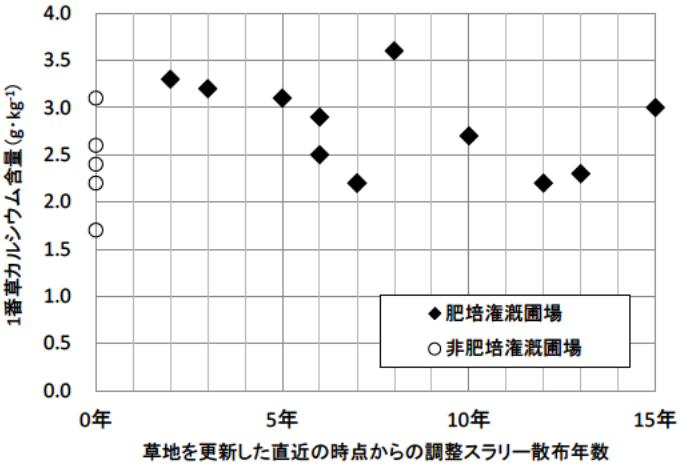
牧草養分含量の指標となっている、カリウム、カルシウム及びマグネシウムの含量を分析した（図－33～35）。また、家畜の硝酸中毒発生の原因となる硝酸態窒素含量についても分析を行った（図－36）。

施肥ガイドの基準値は、カリウムでは 17～35g・$kg^{-1}$、カルシウムでは 2～4g・$kg^{-1}$、マグネシウムでは 1～2g・$kg^{-1}$ であり、硝酸態窒素では、2.2 g・$kg^{-1}$ 以下である [17)]。

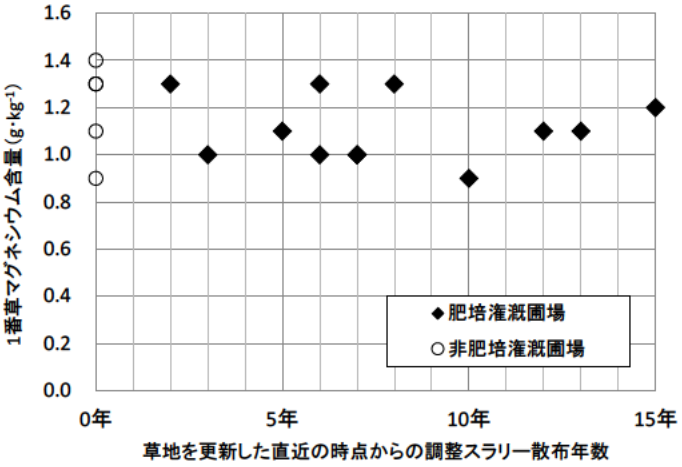
これらの調査結果から、各圃場の牧草試料には、非肥培潅漑圃場と同程度の養分量が確認され、また硝酸態窒素の過剰な蓄積はないことが示された。草地を更新した直近の時点からの調整スラリーの散布年数が 15 年と長期間散布された牧草試料であっても、養分や硝酸態窒素の過剰な蓄積はなく、適正な含有量を維持していた。



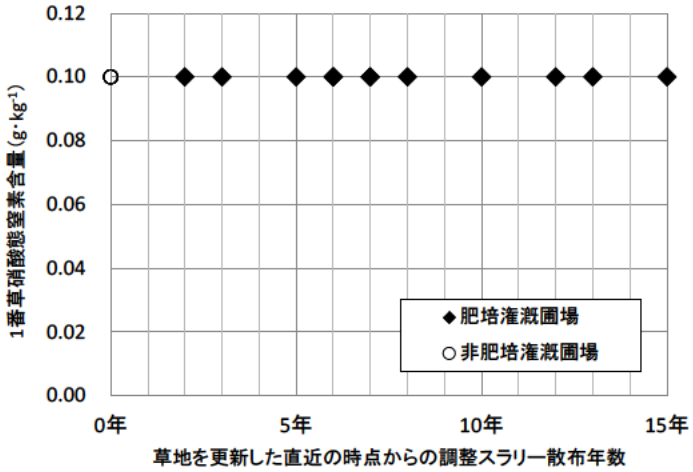

図－33　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
１番草カリウム含量の関係




図－34　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
１番草カルシウム含量の関係



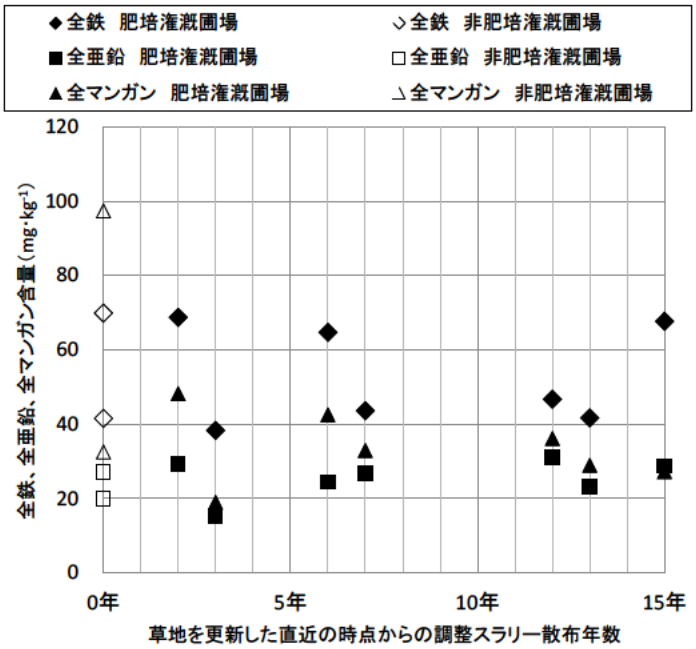

図－35　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
１番草マグネシウム含量の関係



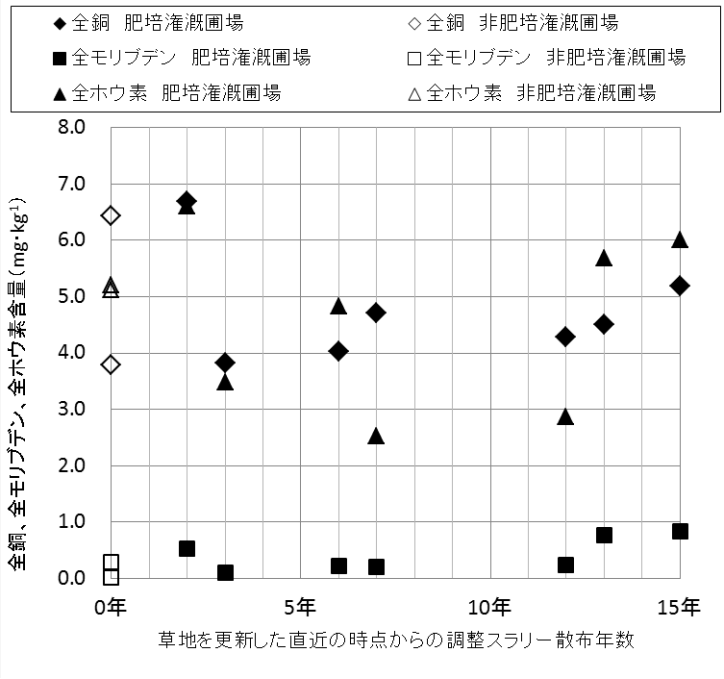

図－36　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
1 番草硝酸態窒素含量の関係

### 1-2-2-4　牧草試料の微量要素含量に及ぼす影響

牧草試料の微量要素含量について調整スラリー散布による影響を検証した。対象とした微量要素は、全鉄、全亜鉛、全マンガン、全銅、全モリブデン、全ホウ素である。これら微量要素は、微量ながらも牧草の生長に必要な元素であるため [7]、牧草試料中の必要量が定められている [17]。適量範囲は、全鉄と全亜鉛の含有量が 20mg・kg$^{-1}$ 以上、全マンガンが 15～300mg・kg$^{-1}$、全銅が 4mg・kg$^{-1}$ 以上、全モリブデンが 0.1mg・kg$^{-1}$ 以上、全ホウ素が 2mg・kg$^{-1}$ 以上である [17]。草地を更新した直近の時点からの調整スラリーの散布年数と牧草試料の微量要素含量の関係を示す（図－37、38）。




図－37　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
牧草試料中の全鉄、全亜鉛、全マンガン含量の関係




図－38　草地を更新した直近の時点からの調整スラリー散布年数と
牧草試料中の全銅、全モリブデン、全ホウ素含量の関係

両図から、調整スラリーを 15 年間散布した牧草試料であっても各分析項目において、過剰に蓄積している微量要素はなく、適正な範囲を維持しているのがわかる。

非肥培潅漑圃場の微量要素含量と比較しても、明らかに増えている微量要素はなく、調整スラリーの散布によって牧草試料中にこれら微量要素が蓄積することはなかった。

### 1-2-3　小括

調整スラリーを散布している圃場では、黒色火山性土においても土壌表層の理化学性が改善している様子が見られた。ただし、黒色火山性土は、元来、営農上、土壌理化学性の悪化が問題となりにくく、土壌理化学性は良好なことが多い。そのため、重粘土と比べて土壌理化学性の改善効果が現れにくかったと推察された。

また、土壌表層の微量要素含量と牧草収量･品質に与える影響について検証した結果、調整スラリーの長期連用によって、土壌表層や牧草中に微量要素が過剰に蓄積することはなかった。さらに、牧草収量と牧草栄養価は、肥培潅漑圃場と非肥培潅漑圃場の間で明確な差はなく、同程度であった。

## ２　肥培潅漑土壌における環境負荷物質収支の解明

### 2-1　肥培潅漑圃場における無機態窒素の集積状況

#### 2-1-1　調査方法

肥培潅漑圃場において環境負荷の影響が懸念される無機態窒素に着目して、北海道東部で調整スラリーを散布している火山性土圃場を 9 圃場と泥炭土圃場を 1 圃場、さらに同じく火山性土の非肥培潅漑圃場を 2 圃場、合計 12 圃場を選定し、これらの圃場の表層から深度 80cm までの集積状況を調査した。

火山性土の肥培潅漑圃場の調査圃場を選定するにあたっては、肥培潅漑年数が 2～15 年の圃場の中から肥培潅漑年数が長い圃場、短い圃場、中間的な年数の圃場で調査できるように 2 年目、3 年目、7 年目、10 年目、15 年目の圃場を各 1 圃場、4 年目、8 年目の圃場を各 2 圃場選定した。

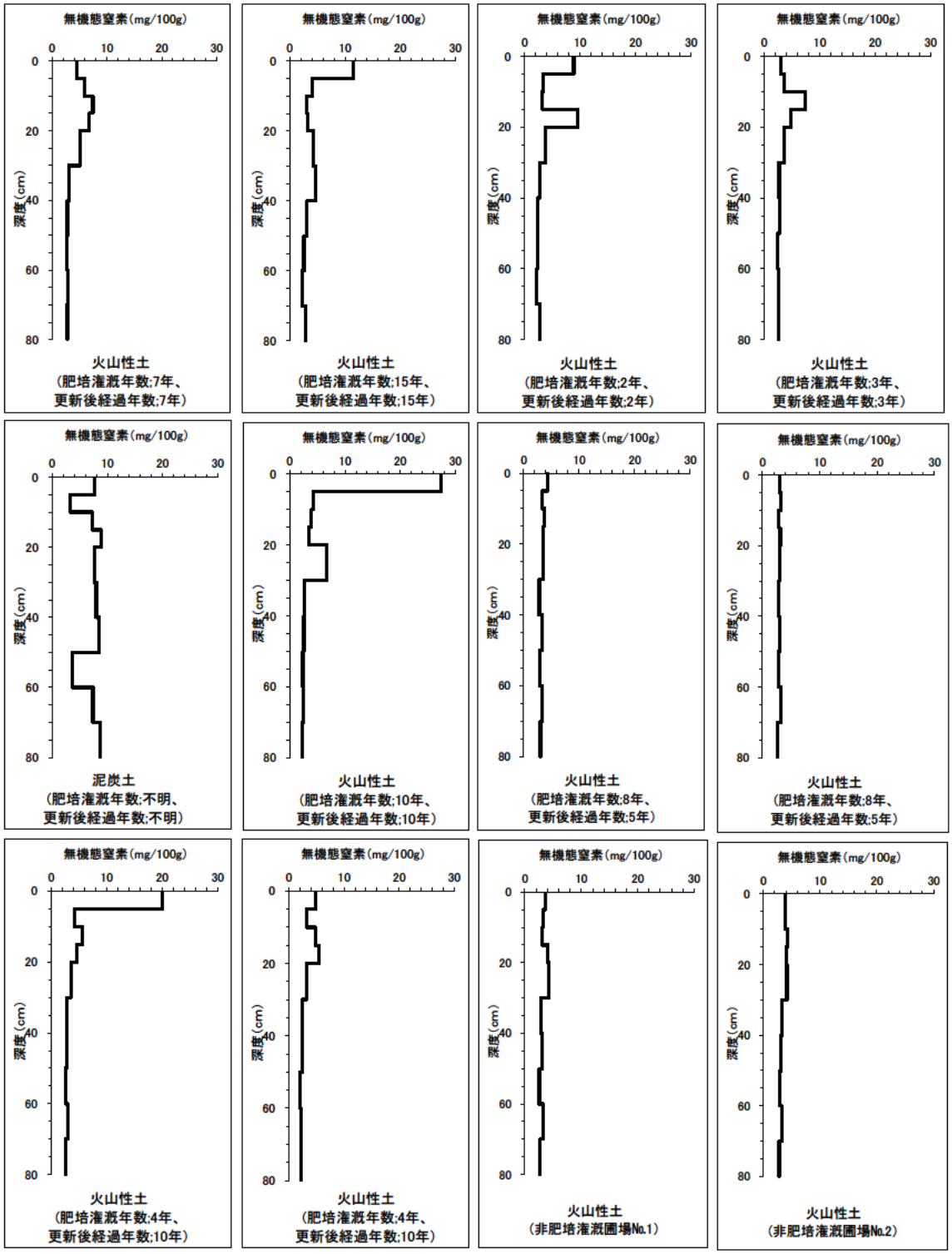
分析用試料は、地表面から深度 80cm までの間を深度 5cm ごとに採取することとし、1 圃場につき 1 箇所で実施した土壌断面調査の試坑を利用して採取することとした。各深度の採取試料数は 1 試料である。採取試料のアンモニア態窒素、硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素(合算)を分析し、これらの合計値を無機態窒素とした。なお、アンモニア態窒素、硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素(合算)の分析法は 10%KCL 抽出－水蒸気蒸留－滴定法によることとした。

#### 2-1-2　調査結果

調査した 12 圃場の表層から深度 80cm までの無機態窒素の垂直分布を図－39 に示す。なお、中段左のグラフは泥炭土圃場のもので、それ以外の 11 のグラフは火山性土圃場のものである。

有機物である泥炭の堆積層からなり、泥炭の分解により無機態窒素が生成しやすい泥炭土の圃場のデータを残りの火山性土のデータと比較することはできないが、火山性土における厚さ 30cm 程度の作土層下の無機態窒素含量は、肥培潅漑年数を経過しても非肥培潅漑圃場とほとんど変わらず、調整スラリー散布により下層土に無機態窒素が集積する傾向は認められなかった。このことから、地域の営農指導に基づく調整スラリー散布では下層への無機態窒素の移動集積による地下水汚染の影響は少ないものと推察される。

なお、調査した肥培潅漑圃場の表層において、無機態窒素含量に大きな差が生じているが、これは、調査時期が秋期の調整スラリー散布時期と重なったため、調査圃場に秋期の調整スラリー散布前の調査圃場と散布後の調査圃場が混在したためである。




図－39　　無機態窒素垂直分布

## 2-2　環境負荷物質としての窒素、及び微量要素の動態調査

### 2-2-1　調査方法

今回の調査における、窒素収支及び微量要素（全鉄、全マンガン、全亜鉛、全銅、全モリブデン、全ホウ素、塩化物イオン）収支のとりまとめ方、調査圃場、調査期間、調査項目及び方法は次のとおりである。

（1）窒素収支及び微量要素収支のとりまとめ方

圃場での環境負荷物質等の収支は次の関係式によって整理されると考えた。

土壌中蓄積量=A－B＋C＋D＋E－F－G＋H　　(式-1)

ここに、A：収支計算開始前の元の土壌中蓄積量

B：作物の吸収量

C：化学肥料､堆肥、土壌改良資材等の施肥に伴う供給量

D：降雨や潅漑用水からの供給量

E：地表面からの流入量（流出の場合はマイナス)

F：深部への浸透量（たとえば、溶脱等)

G：大気への搬出量（たとえば、揮散や脱窒等)

H：窒素の場合、微生物による大気中窒素の土壌内固定等の大気からの土壌への供給量

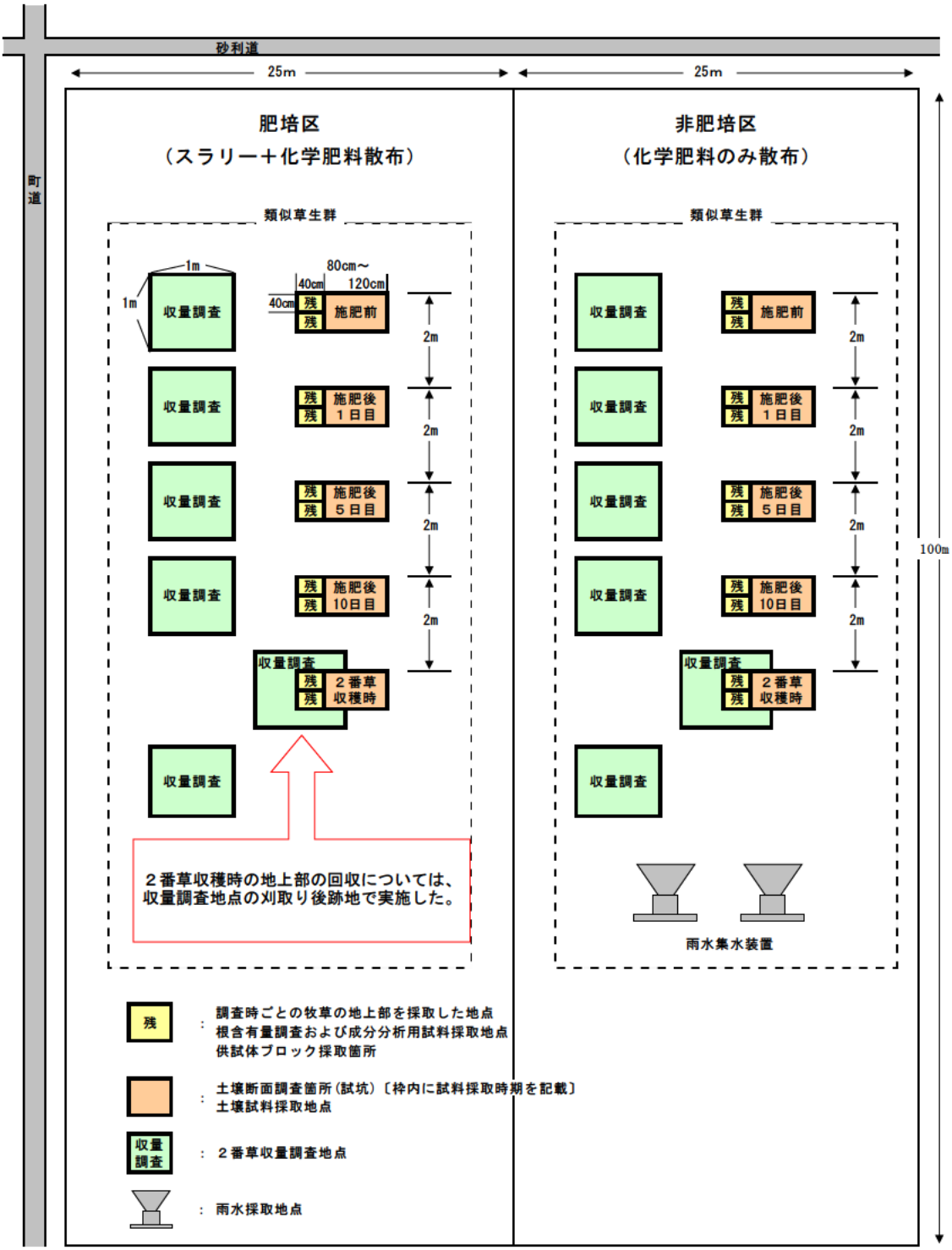
この関係式に基づき圃場内での物質収支を整理する場合、窒素、及び微量要素ごとにこの関係式に関わる各項目の物質量を全て把握する必要がある。本調査では、これらの項目の内、土壌中蓄積量、作物の吸収量、施肥に伴う供給量、降雨からの供給量（ここでは潅漑用水は供給されていなかった）を把握するために、土壌、根を含む作物、肥料、雨水に含まれる窒素、微量要素の含有量を測定することとした。その他の項目の地表面からの流入量、深部への浸透量、大気への搬出量、微生物による大気からの土壌への供給量については、土壌と作物間の動態に重点をおいて検討することとしたため、未計測とした。

（2）調査圃場

調査対象とした圃場は､北海道の東部、浜中町内の 1 圃場であり、平成 21 年は牧草採草地として利用されている。平成 11 年に草地の更新が行われており、また、この調査圃場の所有者は平成 16 年 3 月に肥培潅漑施設を導入し、その年より調整スラリーの散布を開始している。

この調査圃場内には、調整スラリー散布を行う区域（肥培区）と、肥培潅漑施設が導入された後も従来どおりの慣行的な方法に従い継続的に化学肥料のみを施肥する区域（非肥培区）が設けられている。本調査では、この肥培区と非肥培区のそれぞれで土壌分析等の

現地調査を行うこととした。調査圃場内での区域の設定範囲や試料採取詳細位置等は図－40 に示すとおりである。




図－40　調査圃場内詳細図

また、調査圃場では調整スラリーの散布が行われてから既に満 5 年が経過しており、今回の調査結果は肥培潅漑 6 年目に入った圃場で得られた成果となる。そこで、過年度の施用実態を明確にするため、調整スラリー等の施用に関する過去 6 年間の実態を整理しておく（表－4)。なお、各年度のスラリー散布量、化学肥料散布量はそれぞれの肥効率を考慮して求められていた。

H17～21 年度にかけて散布された各年度の N(窒素)、$P_2O_5$(リン酸)、$K_2O$(カリウム)の各肥料成分量は、それぞれを肥培区と非肥培区で比較すると多少の差が認められ、窒素とリン酸は非肥培区の方が、カリウムについては肥培区の方が大きかった。このことから、化学肥料のみを施肥してきた非肥培区の方が肥培区に比べて、多少なりとも窒素の蓄積量が大きくなっていることが調査前に予測された。

表－4　調査圃場における過去 6 年間の施用実態

| 年度 | 散布期 | 肥培区 | | | | | | | | | | 非肥培区 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | スラリー成分量 | | | | 化学肥料成分量 (t/10a) | | | 成分量合計 (t/10a) | | | 化学肥料成分量 (t/10a) | | |
| | | 散布量 | 成分量(t/10a) | | | | | | | | | | | |
| | | (t/10a) | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| H16 | 春　先 | － | － | － | － | 4.00 | 8.00 | 5.20 | 4.00 | 8.00 | 5.20 | | | |
| | １番後 | 2.60 | 0.80 | 0.50 | 4.20 | 4.90 | － | 7.40 | 5.70 | 0.50 | 11.60 | | | |
| | ２番後 | 0.40 | 0.10 | 0.05 | 0.70 | 0.10 | － | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 0.80 | | | |
| | 計 | 3.00 | 0.90 | 0.55 | 4.90 | 9.00 | 8.00 | 12.70 | 9.90 | 8.55 | 17.60 | | | |
| H17 | 春　先 | 1.61 | 1.03 | 0.49 | 3.73 | 4.76 | 3.96 | 5.79 | 5.79 | 4.45 | 9.52 | 5.70 | 7.20 | 7.30 |
| | １番後 | 0.92 | 0.66 | 0.20 | 1.55 | 2.23 | 2.03 | 3.21 | 2.89 | 2.23 | 4.76 | 5.00 | 1.20 | 5.30 |
| | ２番後 | 1.61 | 1.09 | 0.36 | 3.73 | － | － | － | 1.09 | 0.36 | 3.73 | － | － | － |
| | 計 | 4.14 | 2.78 | 1.05 | 9.01 | 6.99 | 5.99 | 9.00 | 9.77 | 7.04 | 18.01 | 10.70 | 8.40 | 12.60 |
| H18 | 春　先 | 2.33 | 1.10 | 0.20 | 3.70 | 4.70 | 4.80 | 6.10 | 5.80 | 5.00 | 9.80 | 5.70 | 7.20 | 7.30 |
| | １番後 | 0.65 | 0.50 | 0.10 | 1.90 | 2.40 | 2.60 | 4.30 | 2.90 | 2.70 | 6.20 | 5.00 | 1.20 | 5.30 |
| | ２番後 | 1.38 | 1.30 | 0.30 | 2.00 | － | － | － | 1.30 | 0.30 | 2.00 | － | － | － |
| | 計 | 4.36 | 2.90 | 0.60 | 7.60 | 7.10 | 7.40 | 10.40 | 10.00 | 8.00 | 18.00 | 10.70 | 8.40 | 12.60 |
| H19 | 春　先 | 2.70 | 1.10 | 0.30 | 3.70 | 4.70 | 4.10 | 5.80 | 5.80 | 4.40 | 9.50 | 5.70 | 7.20 | 7.30 |
| | １番後 | 1.80 | 0.60 | 0.20 | 1.90 | 2.30 | 2.00 | 2.90 | 2.90 | 2.20 | 4.80 | 5.00 | 1.20 | 5.30 |
| | ２番後 | 1.40 | 0.80 | 0.40 | 3.70 | － | － | － | 0.80 | 0.40 | 3.70 | － | － | － |
| | 計 | 5.90 | 2.50 | 0.90 | 9.30 | 7.00 | 6.10 | 8.70 | 9.50 | 7.00 | 18.00 | 10.70 | 8.40 | 12.60 |
| H20 | 春　先 | 2.90 | 0.76 | 0.22 | 3.72 | 5.04 | 4.28 | 5.78 | 5.80 | 4.50 | 9.50 | 5.70 | 7.20 | 7.30 |
| | １番後 | 1.00 | 0.59 | 0.20 | 1.86 | 2.31 | 2.00 | 2.94 | 2.90 | 2.20 | 4.80 | 5.00 | 1.20 | 5.30 |
| | ２番後 | 1.40 | 1.22 | 0.60 | 3.70 | － | － | － | 1.22 | 0.60 | 3.70 | － | － | － |
| | 計 | 5.30 | 2.57 | 1.02 | 9.28 | 7.35 | 6.28 | 8.72 | 9.92 | 7.30 | 18.00 | 10.70 | 8.40 | 12.60 |
| H21 | 春　先 | 3.60 | 1.30 | 0.59 | 3.72 | 4.50 | 3.91 | 5.78 | 5.80 | 4.50 | 9.50 | 5.70 | 7.20 | 7.30 |
| | １番後 | 1.50 | 0.50 | 0.23 | 1.86 | 2.40 | 1.97 | 2.94 | 2.90 | 2.20 | 4.80 | 5.00 | 1.20 | 5.30 |
| | ２番後 | 3.30 | 1.18 | 0.96 | 3.70 | － | － | － | 1.18 | 0.96 | 3.70 | － | － | － |
| | 計 | 8.40 | 2.98 | 1.78 | 9.28 | 6.90 | 5.88 | 8.72 | 9.88 | 7.66 | 18.00 | 10.70 | 8.40 | 12.60 |

（3） 調査期間

収支計算を行う期間を 1 番草の収穫後から 2 番草収穫時までとした。調査期間中の具体的な作業経過を表－5 に示す。①1 番草収穫後、かつ、肥料投入前(以下、施肥前)、②肥料を施用した 1 日後(以下、施肥後 1 日目)、③肥料を施用した 5 日後(以下、施肥後 5 日目)、④肥料を施用した 10 日後(以下、施肥後 10 日目)、⑤2 番草収穫直前(以下、2 番草収穫時)の 5 時期に試料を採取した。この表からわかるように、今回の調査は 1 番草刈り取り後 29 日目から 77 日目にかけての調査であった。

表－5　作業経過

| | 年月日 | 作業内容 | 1 番草刈り取り後の経過日数 | 施肥後の経過日数 |
|---|---|---|---|---|
| ① | 平成 21 年 7 月 13 日 | 1 番草刈り取り | 0 | － |
| | 平成 21 年 8 月 11 日 | 施肥前の試料サンプリング等 | 29 | － |
| ② | 平成 21 年 8 月 12 日 | 施肥 | 30 | 0 |
| | 平成 21 年 8 月 13 日 | 施肥後 1 日目試料サンプリング等 | 31 | 1 |
| ③ | 平成 21 年 8 月 17 日 | 施肥後 5 日目試料サンプリング等 | 35 | 5 |
| ④ | 平成 21 年 8 月 22 日 | 施肥後 10 日目試料サンプリング等 | 40 | 10 |
| ⑤ | 平成 21 年 9 月 28 日 | 2 番草収穫時試料サンプリング等 | 77 | 47 |

（4）調査項目及び調査方法

窒素及び微量要素の収支計算を行うためには、関係式(式-1)に関わるそれぞれの物質量を把握しなければならない。すなわち、ここでは、土壌、根を含む作物、肥料、雨水のそれぞれの重量とこれらに含まれる窒素及び微量要素の含有率が必要となる。一方で、窒素やリン酸等は、それらが存在する環境によって様々な形態をとることから、時間経過に伴う物質量を正確に把握することが難しい。そこで、本調査では、窒素、微量要素の全量を追従することとし、次の分析項目に着目した分析を行った。

(1) 窒素関連；全窒素

(2) 微量要素関連（全 7 種類）；全鉄、全マンガン、全亜鉛、全銅、全ホウ素、全モリブデン、塩化物イオン

また、採取試料は大きく分けて、土壌、作物、肥料､水に区分される。試料の種類ごとの分析項目に対する成分分析方法は表－6 のとおりである。

成分分析用ならびに重量測定用の試料採取方法、ならびに重量測定方法は次のとおりである。

1）土壌

1 番草の収穫後から 2 番草収穫時までの 5 時期ごとに肥培区、非肥培区のそれぞれで土壌断面調査用の試孔を深度約 50cm まで掘り、その試孔の側面から次の 7 つの土層ごとの土壌分析用試料を採取した。また、各層の含水率及び容積重を把握するための試料採取も土壌分析用試料採取と併せて行った。

土壌分析には、採取した土壌試料をふるいにかけて根を取り除いてから供試することとした。

①表層 0～2.5cm 層、②2.5cm～5.0cm 層、③5.0～10.0cm 層、④10.0～20.0cm 層、⑤20.0～30.0cm 層、⑥30.0～40.0cm 層、⑦40.0～50.0cm 層

表－6　試料の種類ごとの分析項目に対する成分分析方法

| 試料種＼分析項目 | 全窒素<br>(T-N) | 全鉄<br>(T-Fe) | 全マンガン<br>(T-Mn) | 全亜鉛<br>(T-Zn) |
|---|---|---|---|---|
| 土壌 | ｹﾙﾀﾞｰﾙ分解－<br>水蒸気蒸留－<br>滴定法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 |
| 作物<br>(地上部)<br>(根) | ｹﾙﾀﾞｰﾙ分解－<br>水蒸気蒸留－<br>滴定法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 |
| 肥料<br>(スラリー)<br>(化学肥料) | ｹﾙﾀﾞｰﾙ分解－<br>水蒸気蒸留－<br>滴定法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 |
| 水<br>(雨水) | 紫外線吸光光度法 | 原子吸光法 | ICP 質量分析法 | ICP 質量分析法 |

| 試料種＼分析項目 | 全銅<br>(T-Cu) | 全モリブデン<br>(T-Mo) | 全ホウ素<br>(T-B) | 塩化物イオン<br>($Cl^-$) |
|---|---|---|---|---|
| 土壌 | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>ICP 質量分析法 | 加圧分解－<br>ICP 質量分析法 | 水抽出－<br>イオンクロマト<br>グラフ法 |
| 作物<br>(地上部)<br>(根) | 過塩素酸分解－<br>原子吸光法 | 過塩素酸分解－<br>ICP 質量分析法 | 過塩素酸分解－<br>ICP 質量分析法 | 水抽出－<br>イオンクロマト<br>グラフ法 |
| 肥料<br>(スラリー)<br>(化学肥料) | 過塩素酸分解－<br>ICP 質量分析法 | 過塩素酸分解－<br>ICP 質量分析法 | 加圧分解－<br>ICP 質量分析法 | 水抽出－<br>イオンクロマト<br>グラフ法 |
| 水<br>(雨水) | ICP 質量分析法 | ICP 質量分析法 | ICP 質量分析法 | イオンクロマト<br>グラフ法 |

2）作物

牧草を地上部（以下、地上部と略記する）と牧草の根（以下、根と略記する）に分けて採取した。

施肥前、施肥後 1、5、10 日目の地上部を採取するにあたっては、図－40 に示すように試料採取時期ごとに肥培区と非肥培区において土壌断面調査を実施し、その試坑に隣接した 2 箇所（図－40 の黄色で着色し、「残」と記載した箇所であり、1 箇所あたりの回収面積は 40cm×40cm）から牧草を採取した。牧草の根元から数 cm 上で一旦刈り取り、さらに、残った地上部は地表面すれすれに「はさみ」で刈り取った。これらをイネ科、マメ科、雑草に分けて回収した。

2 番草収穫時の地上部は 2 回に分けて採取した。1 回目は、2 番草の収量調査を通して採取した。2 番草の収量調査は、肥培区と非肥培区において 6 箇所ずつ（図－40 の緑色で着色し、「収量調査」と記載した箇所。1 箇所あたりの調査面積は 1.0m×1.0m）実施した。採取した牧草はそれぞれの箇所ごとでイネ科、マメ科、雑草に分けて回収した。2 回目は、肥培区と非肥培区の 6 箇所ずつの収量調査跡地のうち、それぞれ 1 箇所で土壌断面調査を行い、施肥前等の採取方法と同様の採取方法によって収量調査後に残った牧草を採取した。これらもイネ科、マメ科、雑草に分けて回収した。

根の採取にあたっては、表層 0～2.5cm 層､2.5～5.0cm 層に含まれる根を採取した。具体的な採取方法は次のとおりである。地上部を取り除いた箇所から大きなひとかたまりの土塊を掘り起こし、その大きな土塊を実験室に持ち込んだ後、表層 0～2.5cm 層､2.5～5.0cm 層にあたる箇所の小さな土塊を切り出した。現地で採取した土塊の大きさはおおむね幅 30cm×長さ 50cm×厚さ(深度方向)15cm であり、実験室で切り出した土塊は幅 4cm×長さ 17cm×厚さ 2.5cm である。実験室で切り出した土塊に含まれていた根の重量を秤量し、単位体積あたりに含まれる根の乾物重を求めた。根の含有量測定用の土塊を取り除いた後に残った土塊から表層 0～2.5cm 層､2.5～5.0cm 層にあたる箇所の土層に含まれる根の成分分析用試料を採取した。

3) 肥料

散布直前のスラリーは農家地先のスラリータンクから直接、採取した。化学肥料については、表－4 の化学肥料成分量をもとに肥培区用、非肥培区用に事前調整された、硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、塩化カリウムの混合物をそれぞれ入手し、成分を分析した。

4) 雨水

調査圃場内の 2 箇所に､写真－3 に示す装置を設置し、雨水を集水した。この装置は、2L のプラスチック製ポリ瓶とロートで構成されている｡ポリ瓶内に溜まった雨水は平成 21 年 8 月 14 日、9 月 8 日、9 月 15 日に回収した。回収した雨水はそれぞれの回収日ごとに分析した。降水量はアメダスデータ（茶内原野）を用

写真－3　雨水集水装置

いた。なお、本調査期間中、調査圃場では雨水以外の水の供給はなかった。

### 2-2-2　調査結果

（1）調査圃場の土壌断面

肥培区、非肥培区それぞれの土壌断面図を図－41 に示す。

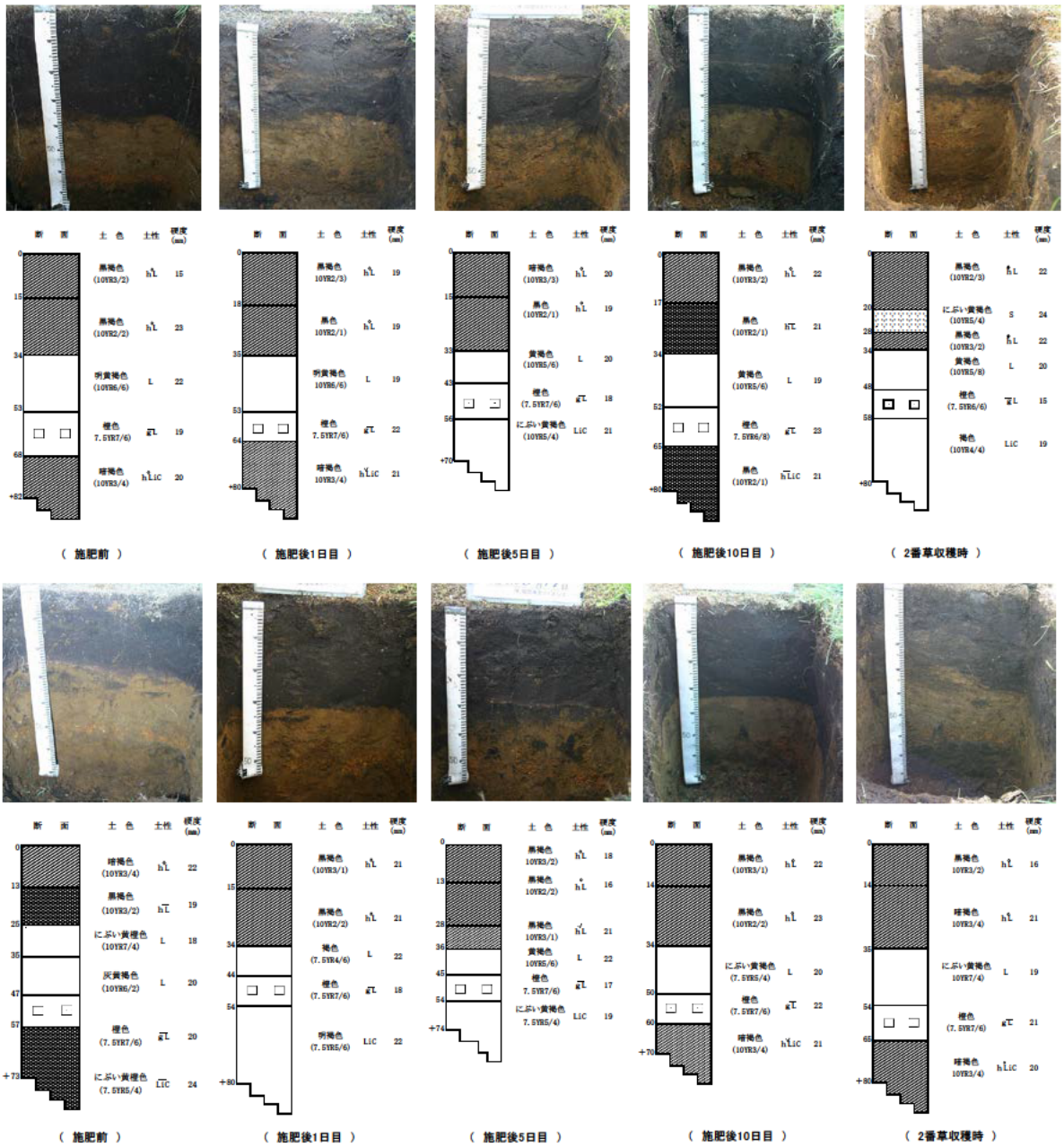


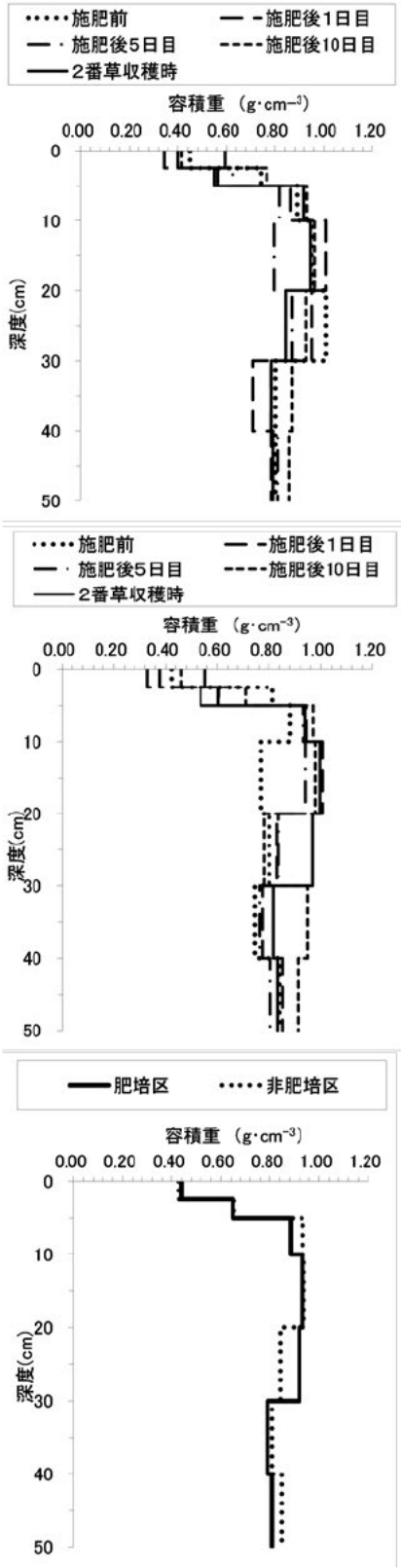

図 41　土壌断面図（上；肥培区、下；非肥培区）

肥培区、非肥培区の土壌断面を比較すると、層厚、土色、土性、土壌構造、有機物含量等に多少の違いは認められるが、どの調査地点であっても、土壌が黒色火山性土、地形が波状を呈した台地、地質（母材）が第四紀更新世（上層；新期火山灰、下層；古期火山灰）に分類される。

また、窒素や微量要素の動態は土壌の緻密度に影響されやすいと考えられたので、調査区域の容積重を確認した。肥培区、非肥培区ごとに、試料採取時別容積重の垂直分布を整理すると、図－42 の上図と中央図になる（肥培区が上図、非肥培区が中央図）。深度ごとの容積重を平均し、肥培区と非肥培区で比較した図が図－42 の下図である。

調査前には、調査圃場内の同一区域の容積重は、調査期間が 77 日間と短いので試料採取時期が異なっても同一深度からの試料採取であればほぼ同じ値を示すと考えられた。しかし、同一区域の同一深度の容積重は試料採取時期ごとに差があった。たとえば肥培区の深度 0～5cm では 0.34～0.59g･cm$^{-3}$ の間で、その下層の深度 5～10cm では 0.55～0.76 g･cm$^{-3}$ の間でばらついていた。そのため、調査圃場内の同一区域であっても土壌の緻密度のバラツキが大きく、その影響を受けた窒素や微量要素の土壌中含有量の結果しか得られず、施肥前から 2 番草収穫時にかけて時間を追った窒素や微量要素の動態を示す結果が得られないと懸念された。

そこで、 t 検定を用いて、肥培区、非肥培区それぞれの深度ごとに、容積重の試料採取時期による有意差を確認した。たとえば、肥培区の深度 0～5cm において得られた 2 番草収穫時の 0.59 g･cm$^{-3}$ の容積重の値は、同じ肥培区の深度 0～5cm において 2 番草収穫時以外に得られた容積重の値の平均値との間に有意差があり、




図－42　容積重の垂直分布

（上；肥培区、中央；非肥培区、下；肥培区と非肥培区ごとの平均値）

棄却できるかを検定した。その結果、肥培区では深度 10～20cm ならびに深度 30～40cm で、非肥培区では深度 20～40cm において 1%水準の有意差が認められる容積重の値はわずかしか見られず、その他に 1%水準の有意差を伴う容積重の値は認められなかった。

どの調査地点であっても同じ土壌分類に区分されたこと、ならびに容積重の有意差が認められた箇所が少なかったことから、肥培区、非肥培区のどちらの調査区域でもそれぞれの調査区域の平均的な箇所で試料を採取していたと推察された。

図－42 下図では、肥培区と非肥培区間でも深度が同じであれば容積重に有意差は認められなかった。また一方では、本調査圃場の肥培区は調整スラリー散布開始後 6 年目であり、まだ容積重に影響が表れるほど肥培潅漑の効果が浸透していなかったと考えられた。

（2）窒素、及び微量要素の動態と収支

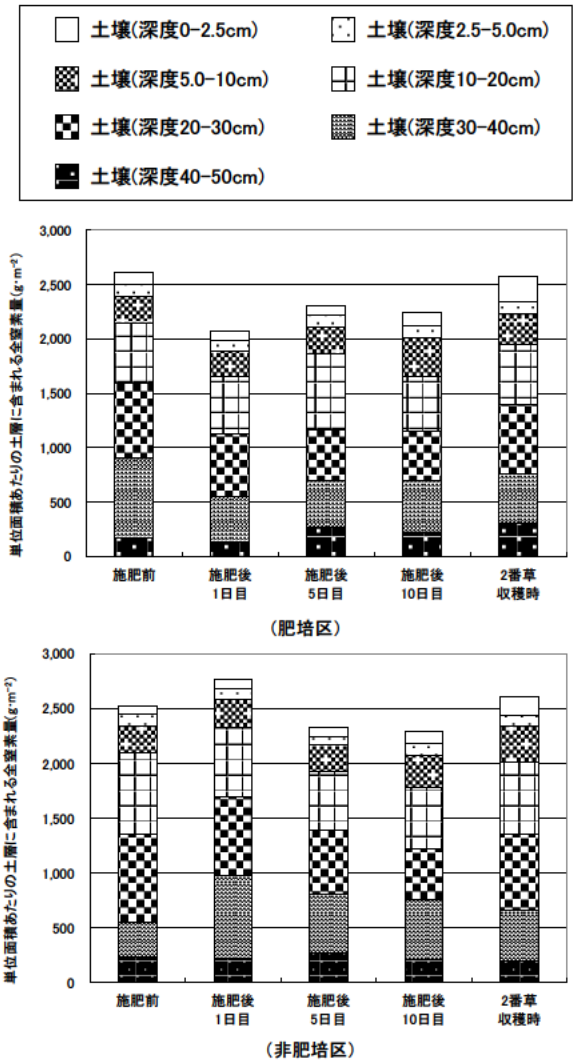
土壌、根を含む牧草、肥料、雨水に含まれる窒素、及び微量要素の含有量を試料採取時ごとに整理し、それぞれの物質動態を考察する。また、その動態から物質収支の整理を試みた。

1）窒素成分の動態

① 土壌に含まれる全窒素量の変化

試料を採取した時期ごとに、かつ、試料採取した 7 つの土層ごとに土壌に含まれる全窒素量を求め、表層 0cm から深度 50cm までの積み上げ棒グラフを用いて深度 50cm までの土壌に含まれる全窒素量を整理した（図－43）。なお、各土層に含まれる全窒素量は単位面積あたりの土層に含まれる量として表した。

肥培区では、表層 0cm から深度 50cm までの土壌に含まれる全窒素量は、調査期間中、試料を採取するたびに変動しており（t 検定で 5%水準の有意差があった）、2,000～2,600g･m$^{-2}$ の範囲にあった。非肥培区の土壌に含まれる全窒素量も肥培区と同様に常に変動していた。約 2,300～2,800g･m$^{-2}$ の範囲にあり、肥培区とほぼ同じ範囲にあった。



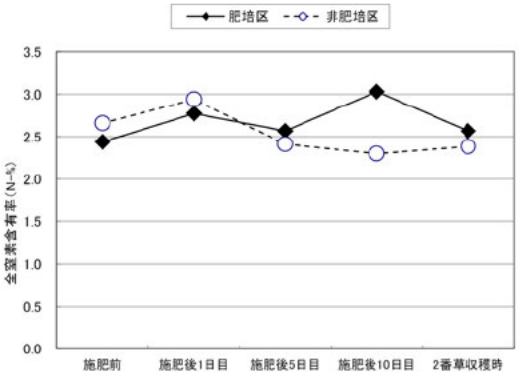

図－43　深度 50cm までの土壌に含まれる全窒素量

（上；肥培区、下；非肥培区）

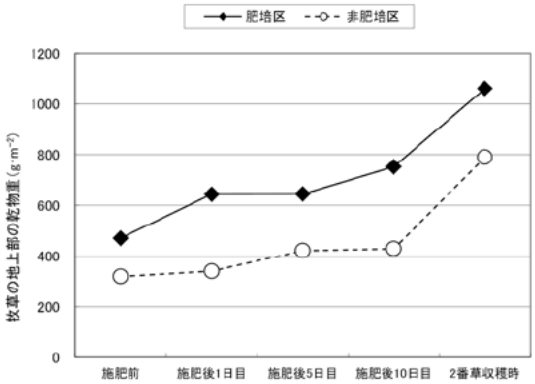
また、同じ時期の深度 50cm までの土壌に含まれる全窒素量を肥培区と非肥培区で比較すると、施肥後 1 日目は非肥培区の方が大きいが、施肥前、施肥後 5 日目、10 日目、2 番草収穫時では肥培区と非肥培区の間で差が認められなかった（t 検定で 1%水準の有意差があるとはいえなかった）。

7 つの土層ごとに土壌に含まれる全窒素量を肥培区と非肥培区で比較すると、表層 0cm～深度 5cm までの土壌に含まれる全窒素量は肥培区、非肥培区ともに施肥前から 2 番草収穫時にかけて増加傾向を示した。これはマメ科牧草の根粒菌による大気中の窒素固定によると推測される。ただし、肥培区と非肥培区の表層 0cm～深度 5cm までの土壌に含まれる全窒素量に大きな差はなかった。深度 5cm より深い層の土壌に含まれる全窒素量を比較しても、どの深度とも肥培区と非肥培区の間に大きな差はなかった。

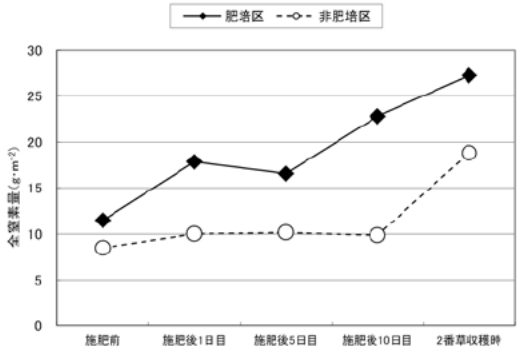
これらを整理すると、肥培区、非肥培区それぞれの土壌に含まれる全窒素量は 2 番草生長過程においてバラツキがあるが、調整スラリー散布によって土壌中への全窒素の蓄積が促進しないことがわかった。調整スラリーも化学肥料と同様に使用しても差し支えないと推察された。




図－44　牧草の地上部に含まれる単位乾物重あたりの全窒素含有率




図－45　牧草の地上部の単位面積あたりの乾物重




図－46　牧草の地上部の単位面積あたりの乾物重に含まれる全窒素量

② 牧草の地上部に含まれる全窒素量の変化

牧草の地上部に含まれる単位乾物重あたりの全窒素含有率を図－44 に示す。牧草の地上部に含まれる単位乾物重あたりの全窒素含有率は、調査期間中を通して、また、肥培区と非肥培区を比較しても差が認められなかった。

牧草の地上部の単位面積あたりの乾物重は図－45 に示すとおりである。この図より、肥培区、非肥培区ともに地上部の乾物重が施肥前から 2 番草収穫時にかけて約 2 倍になっていることがわかる。

また、地上部の単位面積あたりの乾物重に牧草の地上部に含まれる単位乾物重あたりの

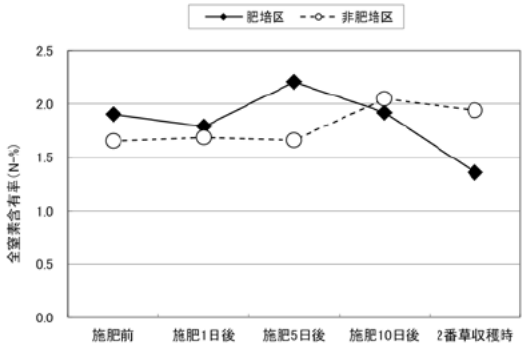
全窒素含有率を乗じて牧草の地上部の単位面積あたりの乾物重に含まれる全窒素量を求めた（図－46)。牧草の地上部の単位面積あたりの乾物重に含まれる全窒素量は、非肥培区で施肥前から施肥後 10 日目にかけてほぼ横ばいで推移しているのに対して、肥培区ではすみやかに増加していた。また、肥培区と非肥培区間で全窒素量に 5%水準の有意差が認められた。したがって、肥培区は非肥培区に比べて、施肥後、すみやかに窒素成分が牧草の地上部に吸収されたと推察される。

③ 牧草の根に含まれる窒素成分量の変化

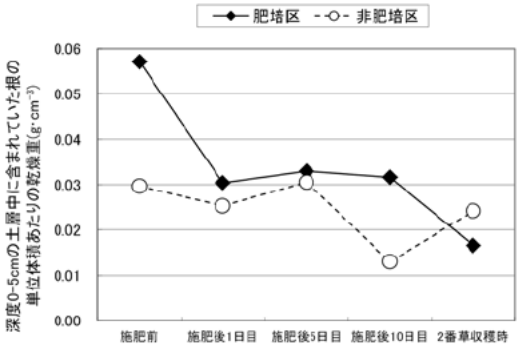
牧草の根に含まれる単位乾物量あたりの全窒素含有率を図－47 に示す。根に含まれる全窒素含有率は地上部と同様に調査期間中を通して、また、肥培区と非肥培区を比較しても大きな差は認められなかった。

一方、図－48 に示すとおり、深度 0～5cm の土層に含まれる単位体積あたりの根の乾物重をみると、肥培区では 2 番草収穫時の根の乾物重が施肥前に比べて約 7 分の 2 にまで減少していた。また、非肥培区でも施肥前から 2 番草収穫時にかけて緩やかな減少傾向が見られた。参考文献[16] によると、刈り取り直後において牧草の再生長過程の初期の一時期に生長の活性が低下するとの報告があるが、本調査において根の乾物重が減少した理由は不明である。

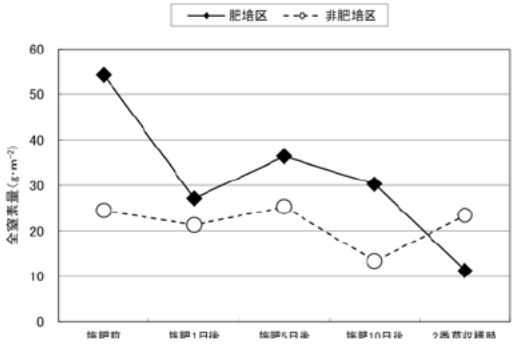
深度 0～5cm の土層中に含まれる根の全窒素量は、肥培区では、根の乾物重の減少が影響し、施肥前から 2 番草収穫時にかけて減少した。非肥培区ではほぼ横ばいで推移した（図－49)。




図－47　牧草の根に含まれる単位乾物重あたりの全窒素含有率




図－48　深度 0～5cm の土層に含まれる単位体積あたりの根の乾物重




図－49　深度 0～5cm の土層中に含まれる根の全窒素量

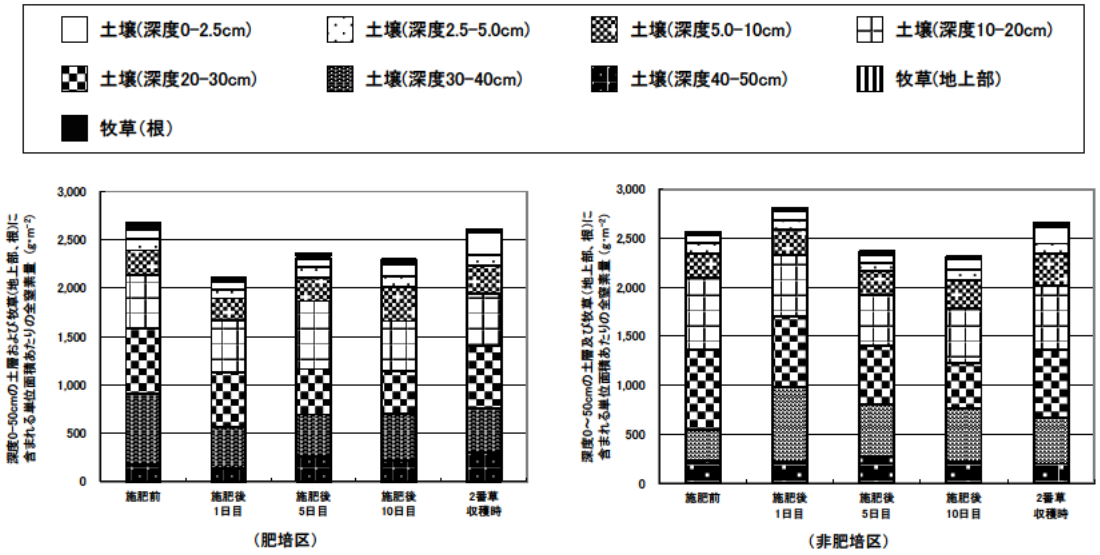
④ 全窒素の収支

「(1) 環境負荷物質収支のとりまとめ方」に示した関係式（式－1）に基づき、全窒素の収支を整理したが、牧草の地上部や根に含まれる全窒素量は土壌に含まれる全窒素量に比べてごく微量であったため、2 番草生長過程の全

窒素の動態を把握できなかった。

土壌、牧草の地上部、根それぞれに含まれる全窒素量の積み上げ棒グラフを図－50 に示す。また、単位面積あたりに散布した肥料中の全窒素量を表－7 に、単位面積あたりに降った雨水中の全窒素量を表－8 に示す。

図－50 では、肥培区、非肥培区ともに牧草の地上部や根に含まれる全窒素量は土壌に含まれる全窒素量に比べてごく微量であることがわかる。また、単位面積あたりに散布した肥料中の全窒素量は、肥培区で 7.21g･m$^{-2}$、非肥培区で 5.66 g･m$^{-2}$ である（表－7）。単位面




図－50　土壌、牧草の地上部、根それぞれに含まれる全窒素量
（左；肥培区、右；非肥培区）

表－7　単位面積あたりに散布した肥料中の全窒素量

| 項目 | 単位 | 肥培区 | | | 非肥培区 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | スラリー | 化学肥料 | 合計 | 化学肥料 |
| 散布量 | g･m$^{-2}$ | 1,520 | 27.32 | － | 39.32 |
| 全窒素量 | g･m$^{-2}$ | 4.86 | 2.35 | 7.21 | 5.66 |

表－8　単位面積あたりに降った雨水中の全窒素量

| 期　間 ＼ 項　目 | 降水量（㎜） | 全窒素(g/m$^2$) |
|---|---|---|
| 施肥前～施肥後 1 日目まで | 0.0 | 0.00 |
| 施肥後 1 日目～5 日目まで | 57.5 | 0.01 |
| 施肥後 5 日目～10 日目まで | 31.0 | 0.01 |
| 施肥後 10 日目～2 番草収穫時まで | 187.5 | 0.07 |
| 調査期間中の合計量 | 276.0 | 0.09 |

積あたりに降った雨水中の全窒素量は合計でわずか 0.09g･m$^{-2}$ であり（表－8)、表層 0cm から深度 50cm までの土層に含まれている全窒素量と比較すると 1%にも満たなかった。適正な施肥設計に基づく施肥管理を行っている圃場では、肥培区、非肥培区ともに土壌に含まれる全窒素量に対して牧草に吸収される全窒素量や肥料や雨水から供給される全窒素量の影響は小さいと推察される。

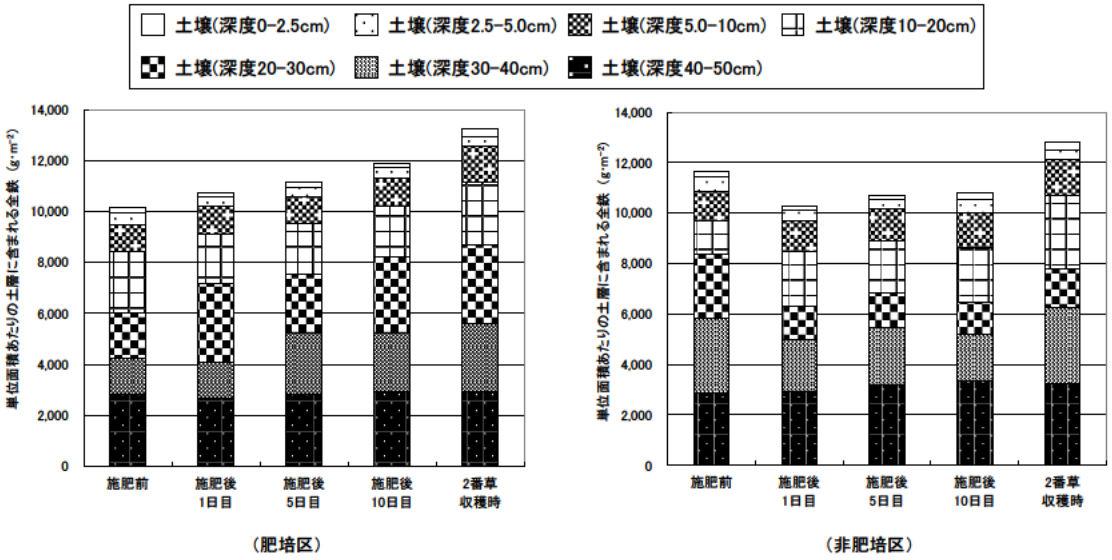
2) 微量要素の動態

① 土壌、牧草中に含まれる各微量要素の変化

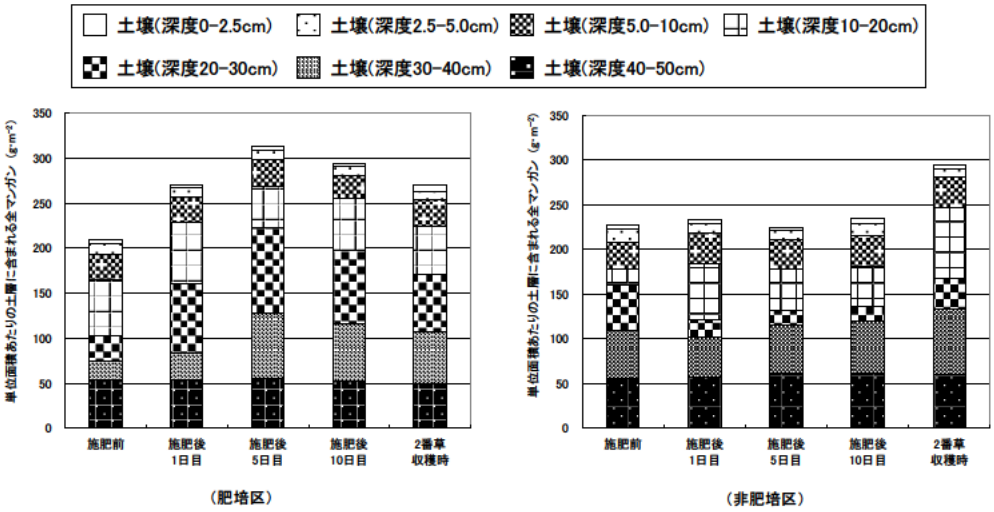
試料採取時期ごとの深度 50cm までの土壌に含まれる、全鉄、全マンガン、全亜鉛、全銅、全ホウ素、全モリブデン、塩化物イオンを肥培区、非肥培区ごとに示す（図－51～57)。また、牧草に含まれる単位乾物重あたりの微量要素量は図－58、図－59 のとおりである。

施肥前から 2 番草収穫時にかけての土壌における各微量要素含有量の変化を肥培区と非肥培区で比較したが、全鉄、全マンガン、全亜鉛、全銅、全モリブデンについては肥培区と非肥培区間での差が認められなかった。これらの微量要素については調整スラリー散布によって微量要素が土壌に蓄積しやすくなるとは考えにくい。全ホウ素及び塩化物イオンでは肥培区と非肥培区で差があるが、原因については不明である。

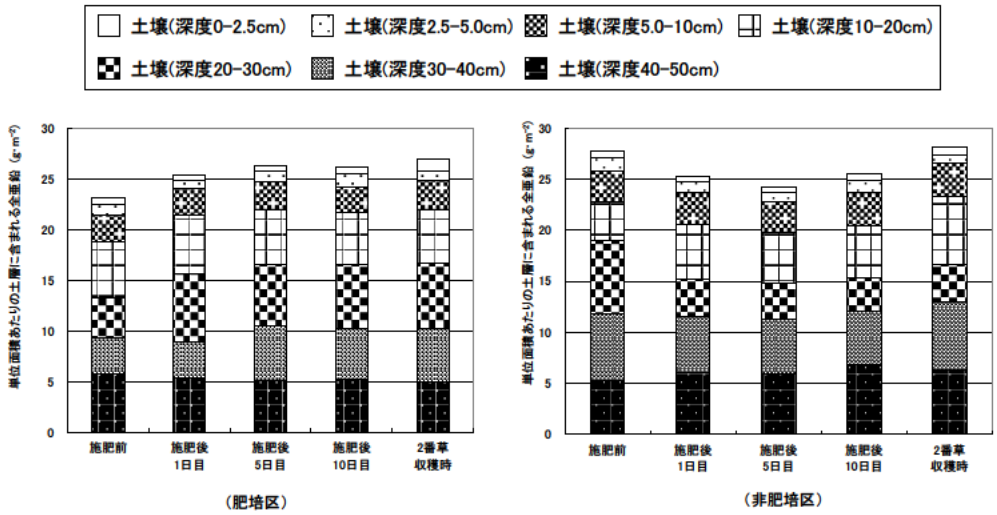
また、牧草の根に含まれる 7 種類の微量要素量を肥培区、非肥培区でそれぞれ比較してみたが、有意な差は認められなかった。試料採取時期でも根に含まれる単位乾物重あたりの微量要素量に差がなかった。牧草の地上部についても根と同様に肥培区と非肥培区間で差は認められなかった。調整スラリー散布によって微量要素が牧草に蓄積しやすくなるとも考えにくい。



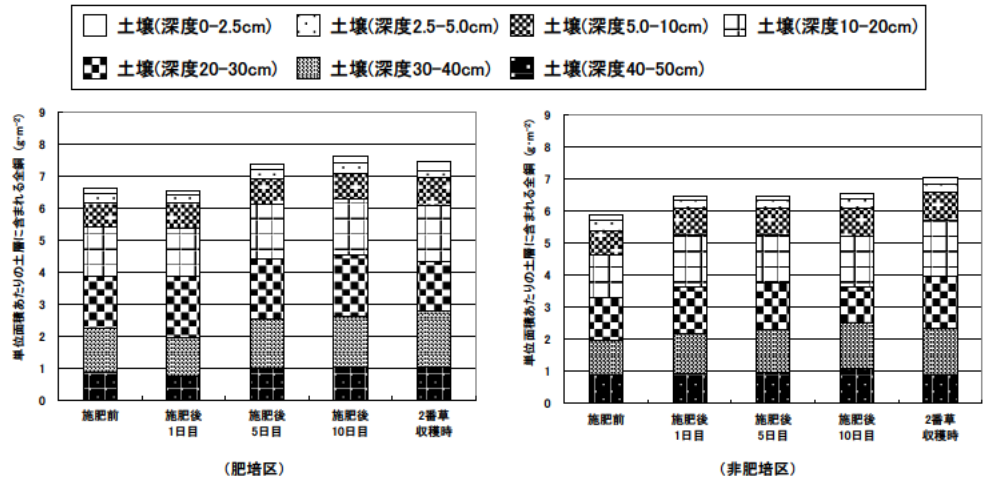

図－51　深度 50cm までの土壌に含まれる全鉄（左；肥培区、右；非肥培区）



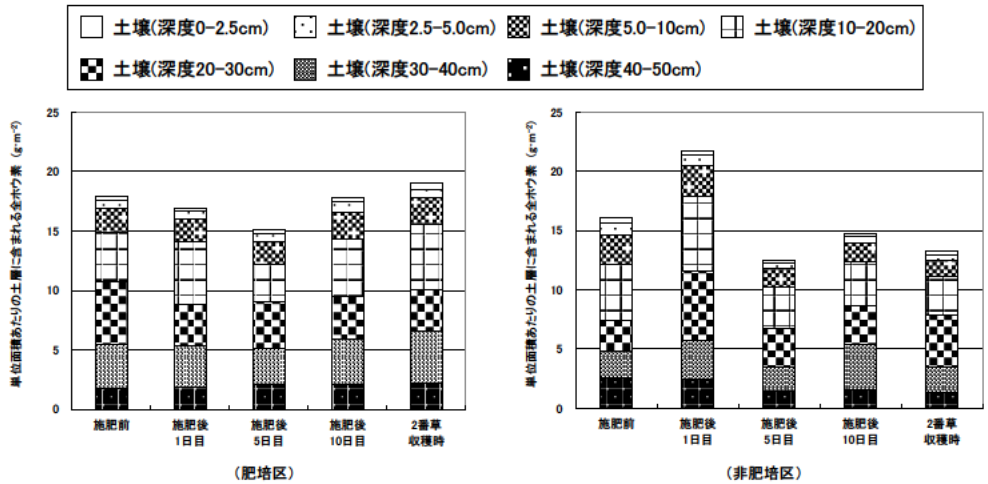

図－52　深度 50cm までの土壌に含まれる全マンガン（左；肥培区、右；非肥培区）



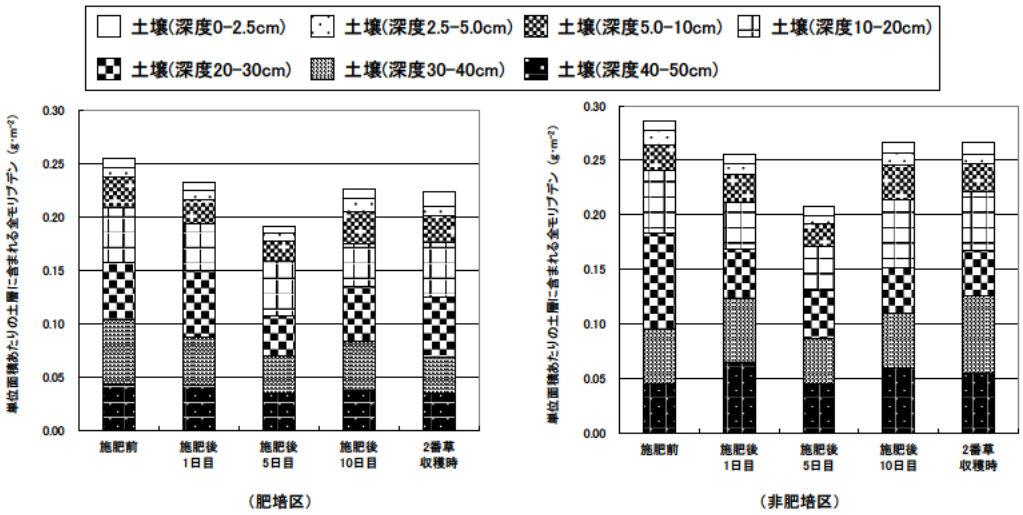

図－53　深度 50cm までの土壌に含まれる全亜鉛（左；肥培区、右；非肥培区）



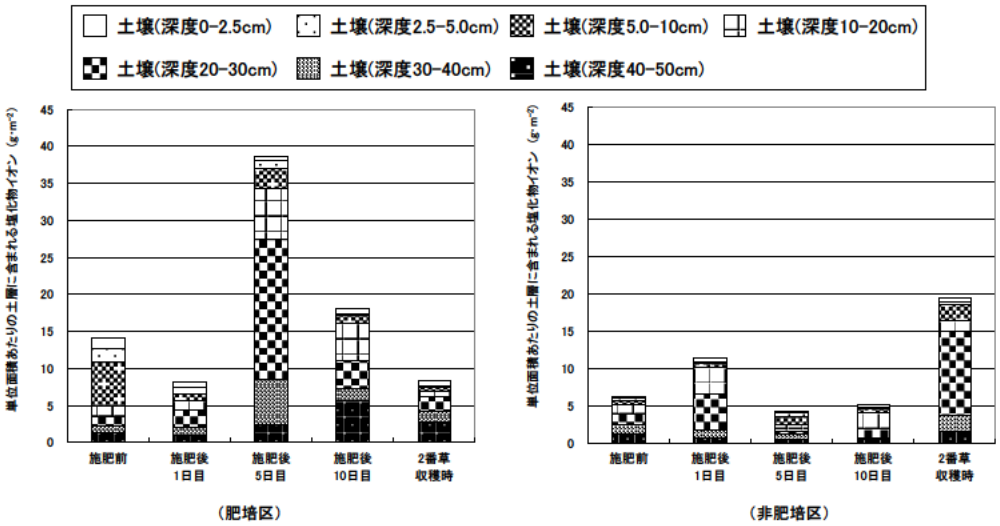

図－54　深度 50cm までの土壌に含まれる全銅（左；肥培区、右；非肥培区）



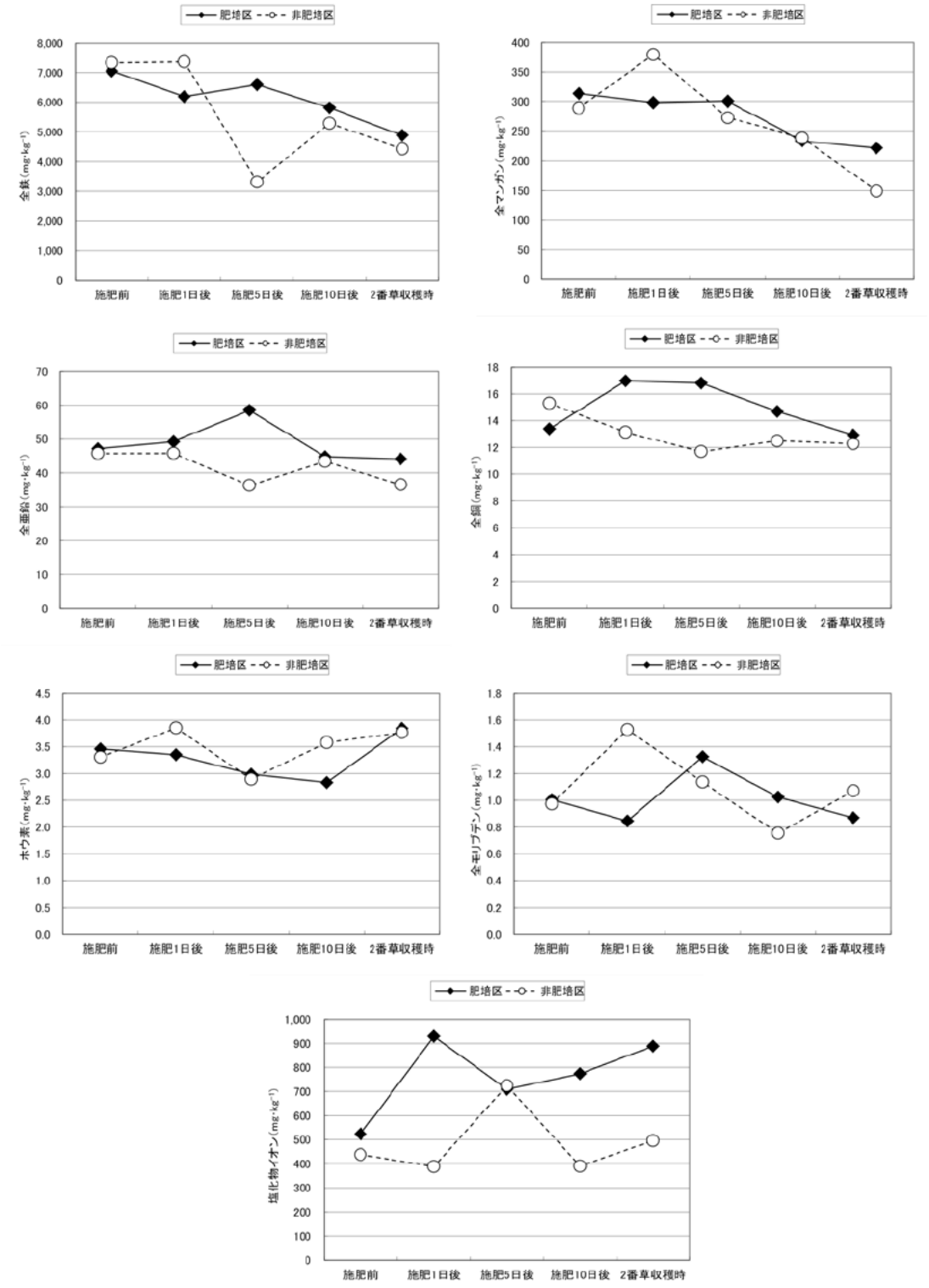

図－55　深度 50cm までの土壌に含まれる全ホウ素（左；肥培区、右；非肥培区）



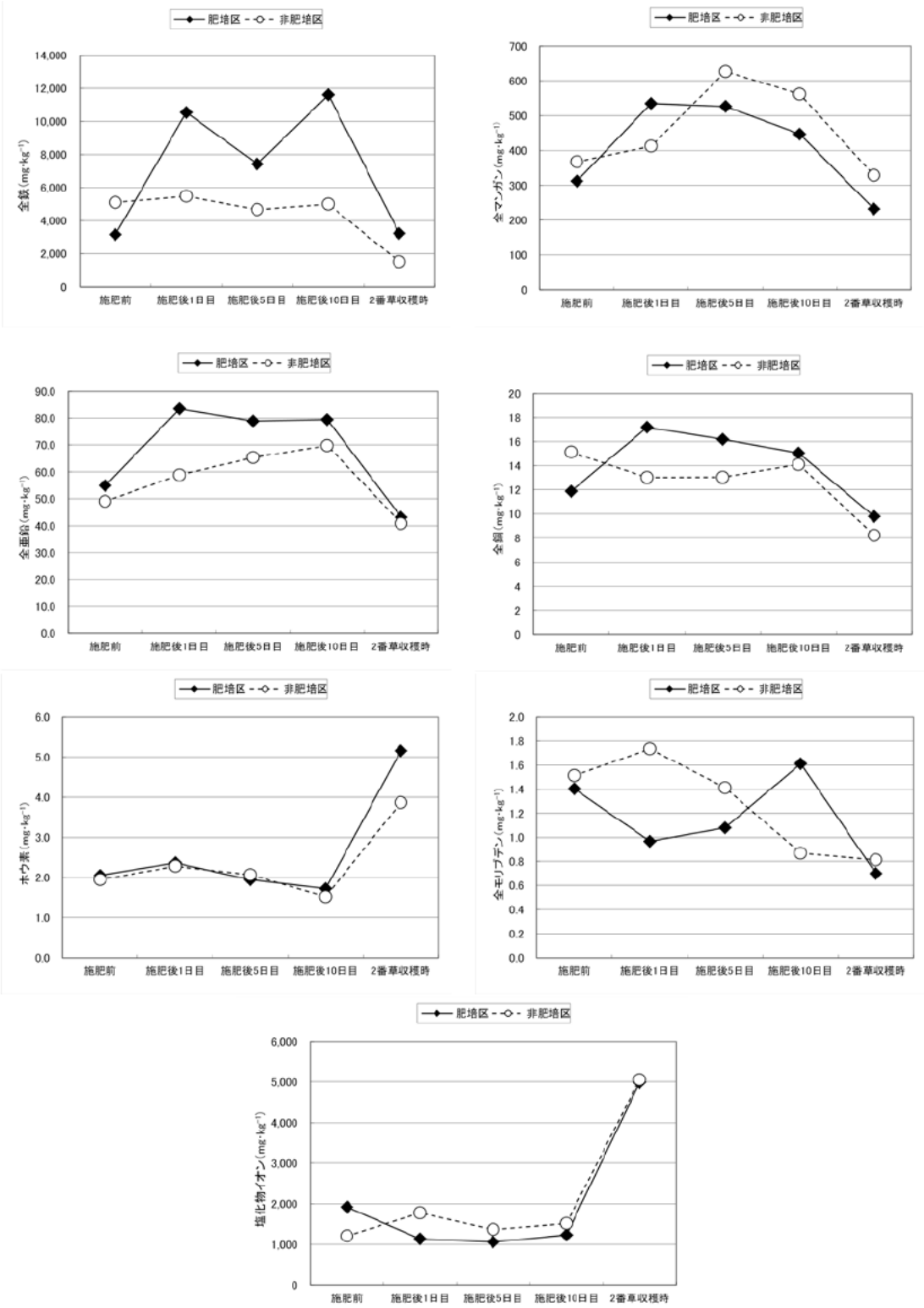

図－56　深度 50cm までの土壌に含まれる全モリブデン（左；肥培区、右；非肥培区）




図－57　深度 50cm までの土壌に含まれる塩化物イオン（左；肥培区、右；非肥培区）




図－58　牧草の根に含まれる単位乾物重あたりの微量要素量




図－59　牧草の地上部に含まれる単位乾物重あたりの微量要素量

② 微量要素の収支

深度 50cm までの土壌に含まれる各微量要素の含有量についても全窒素と同じく、試料採取時ごとでデータがばらついており、試料の採取時期と含有量との間に相関は認められなかった。また、どの微量要素も、土壌に含まれる量に対して牧草の吸収量が小さく、肥料や雨水からの供給量も小さかった(表－9、表－10)。

表－9　単位面積あたりに散布した肥料中の微量要素量

| 項目 | 単位 | 肥培区 | | | 非肥培区 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | スラリー | 化学肥料 | 合計 | 化学肥料 |
| 散布量 | $g \cdot m^{-2}$ | 1,520 | 27.32 | － | 39.32 |
| 全鉄 | $g \cdot m^{-2}$ | 0.071 | 1.59 | 1.65 | 0.948 |
| 全マンガン | $g \cdot m^{-2}$ | 0.016 | 0.087 | 0.10 | 0.035 |
| 全亜鉛 | $g \cdot m^{-2}$ | 0.005 | 0.08 | 0.08 | 0.03 |
| 全銅 | $g \cdot m^{-2}$ | 0.001 | 0.005 | 0.006 | 0.002 |
| ホウ素 | $g \cdot m^{-2}$ | 0.001 | 0.005 | 0.006 | 0.002 |
| 全モリブデン | $g \cdot m^{-2}$ | 0 | 0.004 | 0.004 | 0.002 |
| 塩化物イオン | $g \cdot m^{-2}$ | 1.003 | 147.3 | 148.3 | 130.7 |

表－10　単位面積あたりに降った雨水中の微量要素量

| 期間＼項目 | 降水量 (mm) | 全　鉄 ($g \cdot m^{-2}$) | 全ﾏﾝｶﾞﾝ ($g \cdot m^{-2}$) | 全亜鉛 ($g \cdot m^{-2}$) | 全　銅 ($g \cdot m^{-2}$) | ホウ素 ($g \cdot m^{-2}$) | 全ﾓﾘﾌﾞﾃﾞﾝ ($g \cdot m^{-2}$) | 塩化物イオン ($g \cdot m^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 施肥前～施肥後 1 日目まで | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 施肥後 1 日目～5 日目まで | 57.5 | 0.002 | 0.0001 | 0.0005 | 0.0003 | 0.001 | 0.0004 | 0.0058 |
| 施肥後 5 日目～10 日目まで | 31.0 | 0.0009 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0006 | 0.0002 | 0.0031 |
| 施肥後 10 日目～2 番草収穫時まで | 188 | 0.004 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0009 | 0.004 | 0.001 | 0.26 |
| 調査期間中の合計量 | 276 | 0.007 | 0.0009 | 0.002 | 0.002 | 0.006 | 0.002 | 0.27 |

### 2-2-3　小括

全窒素や微量要素は、土壌の含有量に対する肥料、雨水、牧草に含まれる量が小さく、土壌中の動態に影響を及ぼすほどの量でないことがわかった。また、肥培潅漑と従来型の化学肥料を主とした施肥方法とを比べた結果、調整スラリー散布によって窒素や微量要素の土壌や牧草内への蓄積を示す傾向は認められなかった[21)]。

## ３　個別処理システムによる環境負荷改善効果の解明

肥培潅漑施設導入前の従来の乳牛ふん尿処理利用システムと肥培潅漑導入後の乳牛ふん尿処理利用システムにおける地球温暖化ガス（メタン、亜酸化窒素、二酸化炭素）発生量及び被害額を算出し、肥培潅漑施設導入による地球温暖化ガス削減効果を検証した。

### 3-1　調査手法

肥培潅漑施設導入前後の乳牛ふん尿の各処理利用工程を表－11 の左欄のように区分した。工程ごとに各種地球温暖化ガス（表－11）の単位あたり排出量を既往の文献[22)～26)]から整理した。

表－11　地球温暖化ガスの単位当たり発生量の算出根拠

| 項　　目 | メタン | 亜酸化窒素 | 二酸化炭素 |
|---|---|---|---|
| 堆肥発酵･堆積時 | 有機物 1kg あたり 3.3g [22)] | 全窒素 1kg あたり 11.8g [22)] | 重機での切り返しによる軽油消費 1 L あたり 2.64kg [26)] |
| 液状ふん尿･尿溜め液貯留時 | 有機物 1kg あたり 9.2g [22)] | 全窒素 1kg あたり 11.8g [22)] | カーボンニュートラルのため 0.0kg と算定 |
| 液状ふん尿･尿溜め液の調整時 | 有機物 1kg あたり 0.25g [22)] | 全窒素 1kg あたり 0.0011g [23)] | カーボンニュートラルのため 0.0kg と算定 |
| 調整スラリー貯留時 | 有機物 1kg あたり 9.2g [22)] | 全窒素 1kg あたり 11.8g [22)] | カーボンニュートラルのため 0.0kg と算定 |
| 完成堆肥の圃場施用時 | 0.0g [24)] | 全窒素 1kg あたり 0.94g [22)] | カーボンニュートラルのため 0.0kg と算定 |
| 液状ふん尿･尿溜め液の圃場施用時 | 0.0g [24)] | 全窒素 1kg あたり 2.8g [22)] | カーボンニュートラルのため 0.0kg と算定 |
| 調整スラリーの圃場施用時 | 0.0g [24)] | 全窒素 1kg あたり 2.8g [22)] | カーボンニュートラルのため 0.0kg と算定 |
| 肥培潅漑施設での電力消費時 | 0.0g [25)] | １ｋWh あたり 0.0021g [25)] | １ｋWh あたり 425g [25)] |

備考：圃場施用機械の軽油消費に伴う二酸化炭素発生量は考慮していない。

表－12　乳牛ふん尿及びその発酵生成物の年間処理利用量、有機物含量及び全窒素含量

| 項　　目 | 肥培潅漑施設 | | | 従来処理方式 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 肥培潅漑施設導入後 | | | 肥培潅漑施設導入前 | | |
| | 処理利用量 | 有機物含量 | 全窒素含量 | 処理利用量 | 有機物含量 | 全窒素含量 |
| | (Mg) | (g･kg$^{-1}$) | (g･kg$^{-1}$) | (Mg) | (g･kg$^{-1}$) | (g･kg$^{-1}$) |
| 堆肥原料(固形ふん尿) | － | － | － | 5,120 | 161 | 5.0 |
| 堆肥原料(分離固分) | 3,120 | 225 | 5.5 | － | － | － |
| 完成堆肥 | 937 | 216 | 7.7 | 1,540 | 155 | 7.0 |
| 液状ふん尿(従来方式で圃場施用) | － | － | － | 7,680 | 54.0 | 3.9 |
| 尿溜め液(従来方式で圃場施用) | － | － | － | 4,830 | 28.8 | 2.1 |
| 調整スラリー(肥培潅漑施設で圃場施用) | 18,000 | 34.5 | 4.0 | － | － | － |

乳牛ふん尿の年間処理利用量は寒地土木研究所が別海町に保有する共同型バイオガスプラント（別海プラント）における平成 19 年度実績と同様と仮定した（表－12）。なお、完成堆肥の量は既往の研究成果[22]より堆肥原料の 1/3 とした。また、乳牛ふん尿及びその処理物の有機物含量及び全窒素含量は平成 19 年度の分析結果の平均値を用いた。ただし、固形ふん尿の有機物含量及び全窒素含量は平成 13 年度分析結果の平均値で、固形ふん尿の堆肥化により生成する完成堆肥の有機物含量及び全窒素含量は下記の計算式により求めた。

① 固形ふん尿からの完成堆肥の有機物含量
　＝固形ふん尿の有機物含量×分離固分からの完成堆肥の有機物含量／分離固分の有機物含量

② 固形ふん尿からの完成堆肥の全窒素含量
　＝固形ふん尿の全窒素含量×分離固分からの完成堆肥の全窒素含量／分離固分の全窒素含量。

過年度の調査により、肥培潅漑施設及び別海プラント導入前の農家地先における液状ふん尿貯留槽、尿溜め液貯留槽及び消化液貯留槽の形状を表－13 に示す。この結果に基づき、地球温暖化ガスは密閉型では発生せず、解放型に限って発生するものとして発生量の計算を行った。

なお、有機物の分解によって発生する二酸化炭素の由来は植物が光合成により固定した大気中の二酸化炭素であり、大気中の二酸化炭素増加には寄与しないと考えられる（カーボンニュートラル）ので、地球温暖化ガスの発生量としては算入しなかった。

また、完成堆肥、液状ふん尿、尿溜め液または調整スラリーの圃場施用時の施用機械の軽油消費に伴う二酸化炭素の発生量の算出は考慮していない。

表－13　各種貯留槽の型式

| 施設名 | 肥培潅漑施設 | | 従来処理方式 |
|---|---|---|---|
| | 肥培潅漑施設導入後 | | 肥培潅漑施設導入前 |
| | プラント | 農家地先 | 農家地先 |
| ① 液状ふん尿貯留槽 | 密閉型 | 密閉型 | 開放型 |
| ② 尿溜め液貯留槽 | なし | 密閉型 | 密閉型 |
| ③ 調整槽 | 密閉型 | なし | なし |
| ④ 調整スラリー貯留槽 | 開放型 | なし | なし |

### 3-2　調査結果

表－14 に肥培潅漑施設導入後の乳牛ふん尿処理利用システム（肥培潅漑施設処理）及び肥培潅漑施設に依らない従来の乳牛ふん尿処理利用システム（以下、従来処理）での年間地球温暖化ガス発生量と被害額の算定結果を示す。

メタン、亜酸化窒素及びカーボンニュートラルでない二酸化炭素の年間排出量は、肥培潅漑施設処理で各々9.52 Mg、0.969 Mg、80.1 Mg であり、従来処理で各々6.52 Mg、0.777 Mg、24.0 Mg であった。

これらに各地球温暖化ガスの被害額換算値[27] を掛け合わせることにより、メタン、亜酸化窒素及びカーボンニュートラルでない二酸化炭素の排出に伴う被害額は、肥培潅漑施設処理で合計 1,110,000 円であり、従来処理では合計 771,000 円となった。

このように、肥培潅漑施設処理では従来処理に比べて、被害額にして 44%、339,000 円の増額であり、これは調整スラリー貯留中のメタン及び亜酸化窒素の揮散量が多かったことが主な要因である。地球温暖化の防止には調整液貯留槽の有蓋化を図る等、調整スラリーの貯留中における地球温暖化ガスの揮散を防ぐことが重要である。

表－14　地球温暖化ガス年間発生量の試算

| | ①　肥培潅漑施設 | | | ②　従来処理方式 | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 肥培潅漑施設導入後 | | | 肥培潅漑施設導入前 | | | |
| | メタン | 亜酸化窒素 | 二酸化炭素 | メタン | 亜酸化窒素 | 二酸化炭素 | |
| | (Mg) | (Mg) | (Mg) | (Mg) | (Mg) | (Mg) | |
| 堆肥発酵･堆積時 | 2.31 | 0.203 | 14.6 | 2.71 | 0.302 | 24.0 | 二酸化炭素はフロントローダーによる切り返し作業による |
| 液状ふん尿･尿溜め液貯留時 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.81 | 0.353 | 0.00 | |
| 液状ふん尿･尿溜め液の調整時 | 0.160 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 調整スラリーの貯留時 | 7.05 | 0.611 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 完成堆肥の圃場施用時 | 0.00 | 0.00700 | 0.00 | 0.00 | 0.0100 | 0.00 | |
| 液状ふん尿･尿溜め液の圃場施用時 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.112 | 0.00 | |
| 調整スラリーの圃場施用時 | 0.00 | 0.145 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 肥培潅漑施設での電力消費時 | 0.00 | 0.00300 | 65.5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 合計 | 9.52 | 0.969 | 80.1 | 6.52 | 0.777 | 24.0 | |
| 被害額換算値(円/kg) [27] | 44.16 | 569.2 | 1.714 | 44.16 | 569.2 | 1.714 | |
| 被害額小計(円) | 420,000 | 552,000 | 137,000 | 288,000 | 442,000 | 41,000 | |
| 被害額合計(円) | 1,110,000 | | | 771,000 | | | |

＊　被害額小計、被害額合計は有効数字 3 桁でそろえたため合計が合わない。

## あとがき

肥培潅漑による調整スラリー散布が土壌理化学性や牧草収量等に及ぼす影響について検証した結果、次のようなことが確認された。

① 肥培潅漑圃場では、重粘土の牧草地の土壌表層において膨軟化や、排水性、肥料の保持能力等の土壌理科学性の改善効果が確認された。黒色火山性土では重粘土ほど顕著な改善効果は現れなかった。

② 牧草収量は期待される目標値と同程度の収量が長期間にわたって維持されていた。

③ 調整スラリーの長期連用によって牧草地土壌表層や牧草試料中に亜鉛や銅といった微量要素の過剰な蓄積はなかった。さらに、肥培潅漑圃場では無機態窒素の下層への集積もなく、調整スラリー散布による地下水汚染の影響は少ないものと推察された。

④ 肥培潅漑土壌における窒素や微量要素の収支を検討した結果、土壌の全窒素量や微量要素量に対する肥料、雨水、牧草に含まれるそれぞれの含有量は微量であり、土壌の各成分動態を説明できるほどの量でないことが確認された。

⑤ 肥培潅漑を従来型の化学肥料を主とした施肥方法と比べた結果、調整スラリー散布によって窒素や微量要素の土壌や牧草内への蓄積はないことが確認された。

⑥ 肥培潅漑施設導入による地球温暖化ガス削減効果を検証した結果、肥培潅漑施設処理では従来処理に比べて、被害額が増加し、地球温暖化の防止には調整液貯留槽の有蓋化を図る等、調整スラリーの貯留中における対策の重要性が示唆された。

以上、肥培潅漑技術の酪農地域への普及を図るための基礎的情報の整理ができた。

## 参考文献


1） 松中照夫：土壌学の基礎 －生成・機能・肥沃度・環境－、pp.284-289、社団法人農山漁村文化協会、2006.

2） 土壌物理研究会編：土壌の物理性と植物生育、p.210、pp.270-274、養賢堂、1979.

3） 横濱充宏、中川靖起：乳牛スラリー原液およびその発酵液の圃場散布に伴う窒素動態におよぼす散布条件の影響、北海道開発土木研究所月報【報文】、第 627 号、2005

4） 藤原俊六郎、安西徹郎、小川吉雄、加藤哲郎編者：新版　土壌肥料用語辞典、p.54、社団法人農山漁村文化協会、1998.

5） 前田正男、松尾嘉郎：図解土壌の基礎知識、pp.58-73、社団法人農山漁村文化協会、1996.

6） 財団法人畜産環境整備機構編：家畜ふん尿処理・利用の手引き、p8、1998.

7） 松中照夫：土壌学の基礎－生成・機能・肥沃度・環境－、pp.222-234、社団法人農山漁村文化協会、2006.

8） 北海道農政部編：北海道施肥ガイド（施肥標準・診断基準・施肥対応）、p228、社団法人北海道農業改良普及協会、2002.

9） 地方独立行政法人　北海道立総合研究機構　農業研究本部　ホームページ：農業技術情報広場、北海道の耕地土壌　Ｑ＆Ａ －土壌の種類、分布や土壌図に関する質疑応答集－、http://www.agri.hro.or.jp/center/seika/soilqa/soilqamain.htm（2012.8.10 現在）

10） 日本土壌肥料学会北海道支部編：北海道農業と土壌肥料 1987、pp.396-412、財団法人北農会、1987.

11） 北海道農協「土づくり」運動推進本部編：草地の土づくり、pp.4-6、2007.

12） 北海道農業試験研究推進会議編：平成 11 年度研究成果情報（北海道農業）、p199、農林水産省北海道農業試験場、2000.

13） 酪農総合研究所編：目で見る牧草と草地、pp.39-59、1999.

14） 並河澄、大森昭一朗、米倉久雄、吉本正、内海恭三、新井肇：畜産、pp.30-32、社団法人農山漁村文化協会、1994.

15） 農林水産省北海道農業試験所編：北海道の牧草栽培技術－基礎編－、pp.217-226、農業技術普及協会、1982.

16） 原田勇：牧草の栄養と施肥、pp.87-123、pp.165-172、養賢堂、1977.

17） 北海道農政部編：北海道施肥ガイド 2010（施肥標準・診断基準・施肥対応）、社団法人北海道農業改良普及協会、pp.35，pp.192-216、2010.

18） 桑原淳、横濱充宏：曝気スラリー散布が土壌理化学性と牧草収量･品質に及ぼす影響、寒地土木研究所月報【報文】、第 668 号、2009

19） 桑原淳、池田靖彦、煤孫英夫：曝気スラリー散布が土壌理化学性に及ぼす影響、第 52 回北海道開発局技術研究発表会論文集、2009

20） 環境省法令：農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について、環水土 149 号、昭和 59 年 11 月 8 日公布.
21） 大深正徳、横濱充宏、松里浩二、佐藤貢一：肥培潅漑圃場における環境負荷物質および微量要素の動態について、平成 22 年度農業農村工学会大会講演会(発表予定)、2010
22） 社団法人畜産技術協会：畜産における温室効果ガスの発生制御（総集編）、pp.84-155、2002
23） 北海道立根釧農業試験場草地環境科、酪農施設科：臭気・ガス揮散抑制のためのスラリー散布及び曝気処理技術、平成 15 年度北海道農業試験会議成績会議成績概要書、2004
24） 農村工学研究所農村総合研究部資源循環システム研究チーム：メタン発酵消化液の施用による土壌からの温室効果ガス発生量、平成 19 年度農村工学研究所研究成果情報、pp.9-10、2007
25） LCA 日本フォーラム：https://lcadb.jemai.or.jp/lca/servlet/Default（LCA データベース）
26） 南齋規介・森口祐一・東野　進：産業連関表による環境負荷原単位データブック、pp.22,34-35、2002
27） 伊坪徳宏、稲葉敦編著：ライフサイクル環境影響評価手法　LIME-LCA,環境会計,環境効率のための評価手法･データベース、社団法人産業環境管理協会発行、2005

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of P.W.R.I.
No.4239 September 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所　寒地技術推進室
〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号 電話 011-590-4046