

令和2年度地球観測技術等調査研究委託事業

「家畜糞尿由来廃棄物の農地散布を最適化するための衛星画像利用システムの開発」

委託業務成果報告書

令和3年5月

北海道大学

本報告書は、令和２年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人北海道大学が実施した令和２年度「家畜糞尿由来廃棄物の農地散布を最適化するための衛星画像利用システムの開発」の成果を取りまとめたものです。

## 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1. これまでの研究と当該年度の研究計画         | 3  |
| 1.1. 研究の概要                   | 3  |
| 1.2. 研究実施体制                  | 3  |
| 1.3. 前年度までの研究                | 4  |
| 1.4. 当該年度の研究計画               | 5  |
| 2. 報告内容                      | 5  |
| 2.1. 委託業務の目的                 | 5  |
| 2.2. 人工衛星画像解析                | 6  |
| 2.2.1. プロジェクトの総合推進           | 6  |
| 2.2.2. 牧草の質に関する衛星画像解析        | 9  |
| 2.2.3. 牧草の質に関する解析が重要である理由    | 9  |
| 2.2.4. Sentinel 2データを用いた解析   | 10 |
| 2.2.5. Planet社製衛星画像データを用いた解析 | 13 |
| 2.2.6. 農家・現場向け説明会の実施         | 15 |
| 2.3. 非効率地域の調査                | 16 |
| 2.3.1. 土壌微生物と消化液散布の関連性調査     | 16 |
| 2.4. 散布最適化モデルの作成             | 19 |
| 2.5. 実施した会議等について             | 22 |
| 3. まとめ                       | 23 |

## 1. これまでの研究と当該年度の研究計画

### 1.1. 研究の概要

畜産業が盛んな北海道において、家畜糞尿を農地に散布し、栄養素を効率よく循環させることは重要な課題である。我々はこれまで、いつ・どこに・どれだけ糞尿を散布すれば最も効率よく栄養素が再利用されるのか、というテーマで研究を進めてきた。その結果、道内の数々の市町村では、町ぐるみで糞尿散布スケジュールが組まれており、その散布を持続可能な方法で行うために、不均一な草地・畑地の生育状況や複雑な環境負荷リスクをリアルタイムに近い形で得ることの重要性、また農家のアクティビティなどの地上データを蓄積することの重要性が示唆された。そのため本研究では、家畜糞尿由来廃棄物を有効的に利活用することを目指すシステムを衛星画像と地上データを合わせて構築する。衛星画像で週一程度、農場の牧区レベルで生育量のバラつきや町全体でのランキングがわかるようにし、地上で所得する土壤水分データ、肥料散布データ、播種や採草といったデータと合わせ、その週の糞尿散布スケジュールを組み立てることが出来るシステムを開発する。

### 1.2. 研究実施体制

実施体制、役割分担として、北海道大学内では土壤採取や衛星画像データの解析を行う。また、北海道大学大学院農学研究院と複数年にわたり共同研究を行ってきている（株）住商アグリビジネスと連携して現場での調査を進める。（株）住商アグリビジネスは施肥データや土壤分析、農家との連携やシステム構築と言った分野で貢献する。また、町との連携体制としては、上士幌農業再生協議会の全面的な協力を得る。この組織は、農業従事者に向けた総合的な支援を行っており、上士幌町役場やJA上士幌といった組織が連携して運営している（図 1）。

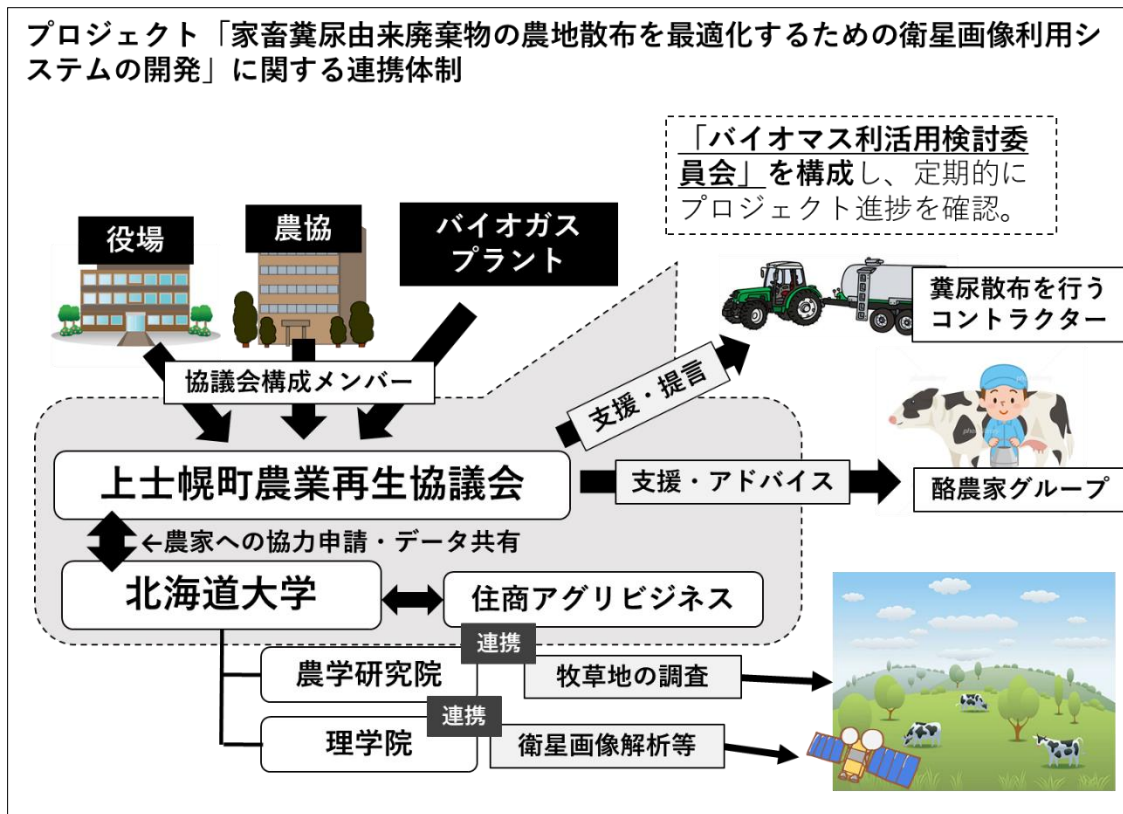


図 1 研究実施体制図

### 1.3. 前年度までの研究

家畜糞尿由来廃棄物の農地散布を最適化するための衛星画像利用システムを開発することを目指す本研究に関して、これまでの研究は概ね目的を順調に達成することができた。具体的には、多くの地上データを衛星情報と紐づけ、バイオガス消化液散布の効果を把握するための基礎情報を蓄積することができた。さらに、バイオガス消化液のほとんどが草地に散布されている現状を踏まえ、家畜糞尿散布後の牧草に関する既存の生育調査データと、2019年春～秋の衛星画像データを用いた解析を行った。糞尿散布履歴は紙媒体で管理されており、すべてを入手するのは難しかったが、一部の散布データと衛星画像から計算する作物生育量の指標となる解析データ（NDVI）を合わせ、糞尿を散布してからの日数とNDVIの増加量の相関を作物毎に明らかにすることができた。これにより、バイオガス消化液散布効果が高かった場所から低かった場所の比較を行うことができたが、NDVIは春先一番草収穫前には頭打ちになる傾向があったため、この意義についてさらなる調査が必要である。

また、多数の地点で秋の生育調査、土壌分析や土壌微生物の変化、潜在的に土壌に存在する病害菌の変化などの基礎データを収集した。それに加えて土壌の栄養素量や、水分量、物理性などの基礎情報を多数収集した。さらに、土壌から栄養素が流亡するリスクについても

評価した。具体的にはTMRセンターを対象とした調査を行うことでそれを評価した。この部分では、さらなる調査を引き続き行うことで、年毎のばらつきや長期的な評価を行う必要がある。また、衛星画像とこれら地上踏査を組み合わせ持続的な糞尿利用法に関連したシナリオを構築していく必要がある。

#### 1.4. 当該年度の研究計画

まず、人工衛星画像解析と地上データの関連性を精緻に評価するために、現場（役場・農協等）との連携を進める。土壌・牧草・たい肥等の分析を継続して多数取り、去年度と比較することで、年度ごとのばらつきについてのデータを得る。さらに、牧草の質に関する衛星画像解析を行う。なぜなら、家畜糞尿由来消化液の効果をコントロールしている要因の一つとして、牧草の質（雑草率など）が重要であることがわかってきたからである。そのため、牧草の量だけではなく、質に関しても衛星画像で分析できるかどうかを調査する。さらに、農家・現場向け説明会を実施するために、農家や消化液散布に関係する人々を集め、消化液利用推進検討委員会を開催する。また、非効率地域（消化液散布効果が表れていない場所）の調査を継続するが、特に土壌微生物と消化液散布の関連性を評価する。この部分では消化液をより有効に使えるために土壌をどう整えるか、という重要な課題への対策として、引き続き土壌微生物に関する研究を進める。上士幌町内での微生物のばらつきや、季節変動、土地利用の影響などを考慮に入れ、衛星を利用して消化液散布案を考察する際のパラメタの一つとする。また、散布最適化モデルを作成するために衛星画像と地上データを用いて現場に即した幾つかの散布シナリオを構築する。

## 2. 報告内容

### 2.1. 委託業務の目的

畜産業が盛んな北海道において、家畜糞尿を農地に散布し、栄養素を効率よく循環させることは重要な課題である。我々はこれまで、いつ・どこに・どれだけ糞尿を散布すれば最も効率よく栄養素が再利用されるのか、というテーマで研究を進めてきた。その結果、道内の数々の市町村では、町ぐるみで糞尿散布スケジュールが組まれており、その散布を持続可能な方法で行うために、不均一な草地・畑地の生育状況や複雑な環境負荷リスクをリアルタイムに近い形で得ることの重要性、また農家のアクティビティなどの地上データを蓄積することの重要性が示唆された。そのため本研究では、家畜糞尿由来廃棄物を有効的に利活用することを目指すシステムを衛星画像と地上データを合わせて構築する。衛星画像で週一回程度、農場の牧区レベルで生育量のバラつきや町全体でのランキングがわかるようにし、地上

で所得する土壌水分データ、肥料散布データ、播種や採草といったデータと合わせ、その週の糞尿散布スケジュールを組み立てることが出来るシステムを開発する。

## 2.2. 人工衛星画像解析

### 2.2.1. プロジェクトの総合推進

この部分では、雪解けからフィールドデータを所得するために、現場（役場・農協等）との連携を進めた。土壌・牧草・たい肥等の分析を継続して多数取り、去年度と比較することで、年度ごとのばらつきについてのデータを得た。

まず、研究対象地で用いられており、本研究で散布の最適化を目指すバイオガスプラント由来消化液であるが、運用から三年度を経て栄養素の質の推移の理解が深まってきた。2018年度は運用初年度であるため消化液の質が安定しなかったことが聞き取り調査でわかっているが、その後の二年は年の前半にアンモニア成分が若干高く、夏以降にはアンモニア成分濃度が薄まる傾向があった（図 2）。この傾向は貯留槽に降る雨や原材料の水分量が原因と考えられる。

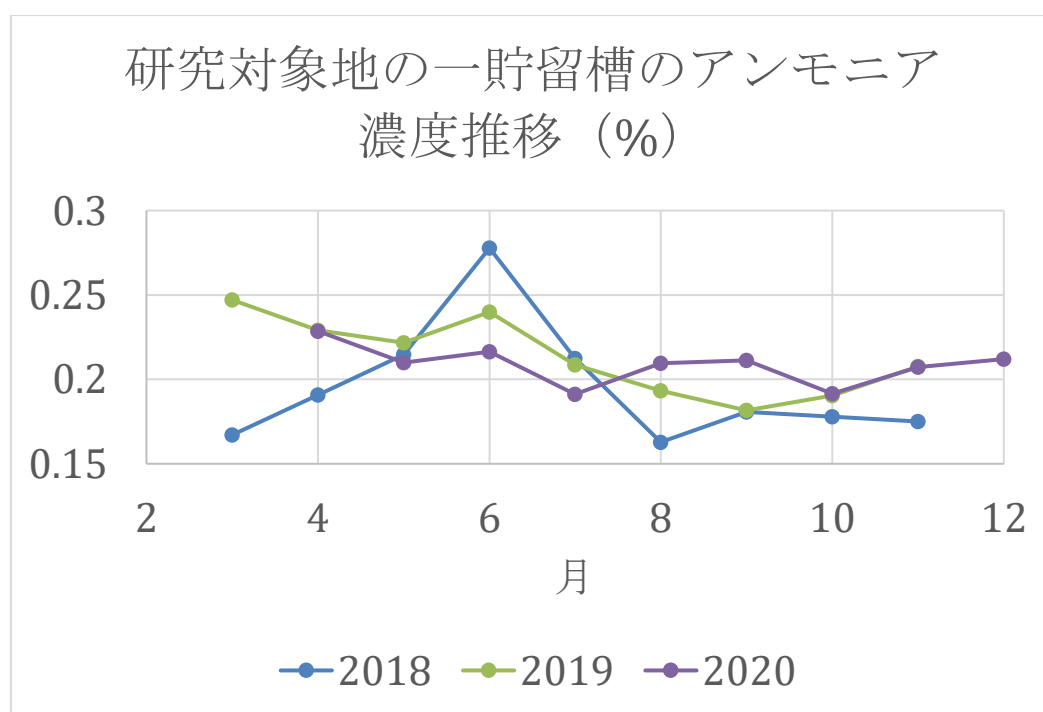


図 2 研究対象地におけるバイオガスプラント由来消化液のアンモニウム態窒素濃度の年間を通しての推移。Y 軸は原物中の%濃度であり、X軸は該当年（2018～2020年）の月である。

研究対象地では、消化液を散布するタンカーの運用制度などの理由から、散布量を精緻にコントロールできないのが現状である。つまり、どの牧区に対しても消化液は同じ体積を散

布しているため、消化液中の栄養素が低くなった時期は牧区への栄養素還元量は減少する。そのため、消化液の散布効果（牧草生育への影響）を、人工衛星画像などを用いて把握する再には、消化液由来栄養素量の季節変動を考慮に入れる必要があることが理解できた。

牧草生育に関しては、隣り合わせで消化液散布をする、しないという処理を施した二カ所の牧区に関しての継続定点生育調査を下記に示す。この試験は長期的な消化液散布の牧草への影響を評価するために行っている。二カ所の牧区について、場所を下記図にて示す。



図 3 上士幌町において長期の継続定点生育調査を行っている牧区。試験区名は町で管理する牧区名から、北側の試験区を65、南側試験区を74と呼んでいる。それぞれ二牧区で構成され、消化液散布あるなしの牧区として管理されている。

まず、試験区65についてであるが、H30、R1、R2で消化液散布あり、なしの影響はばらついており、一定の傾向は見られなかった。このことは、消化液散布による栄養素以外の何らかがこの試験区における牧草生育の制限要因となっていることを示唆している。一方で試験区74に関しては消化液散布無し圃場で継続して収量が減少しており、散布した牧区では収量がある程度維持されているという結果が得られた。



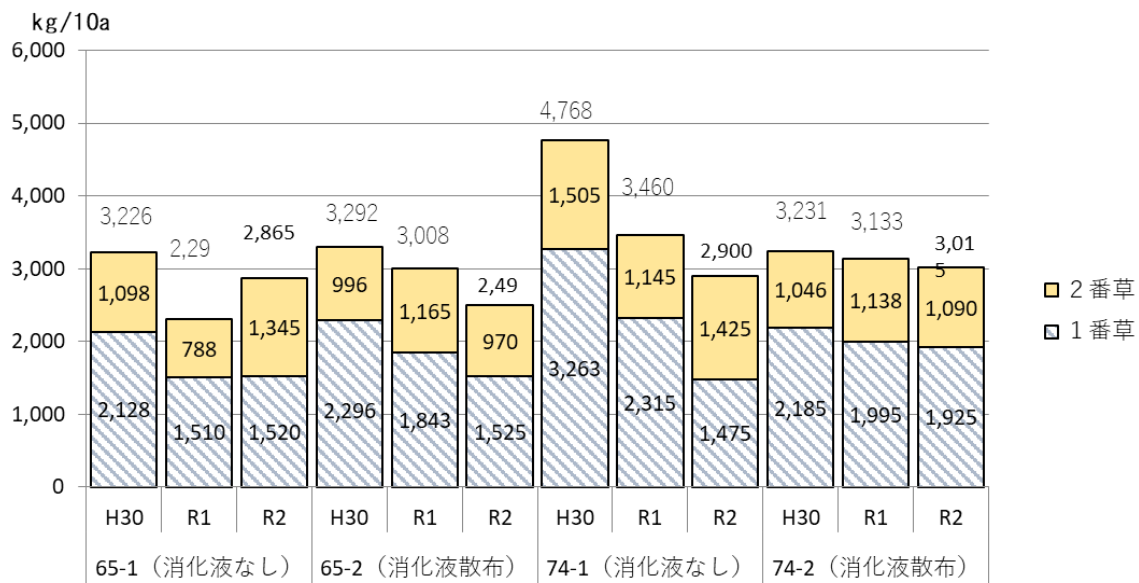


図 4 過去三年間の継続定点生育調査の結果。試験地は二カ所（65と74）、それぞれの試験地に消化液を散布した牧区としていない牧区がある（65-1、2と74-1、2）。それぞれの牧区に関して三年分のデータがバーグラフで示されており、バーの色は一番草と二番草の収量（kg / 10a）である。

これらのデータから、消化液散布の効果は牧区毎に大きくことなること、また数年かけて効果の良し悪しが理解される場合があることがわかってきた。例えば74-1牧区は元々肥沃な土壌を有しておりポテンシャルの高い圃場であることが、複数回の訪問や地元からの聞き取りでわかっているが、このような圃場は継続的な消化液の投入が無ければ収量が減少する可能性があることがわかった。一方で消化液散布有り無しの効果がはっきりとしない試験区65では牧草の生育は消化液利用のありなしによって制限されておらず、その制限要因を取り除かなければ、消化液を継続的に散布しても消化液由来栄養素の効果的なリサイクルが達成できない可能性が示唆された。

さらに、消化液の継続散布が土壌にどのような影響を与えているのかについては、牧草と同様に先述した65番と74番試験地において継続調査を行っている土壌栄養素の量的変化から検証した。牧草の生育と同様、消化液の散布有り無しの影響は二地点で共通しておらず、牧区が元々持つ特徴を理解しつつ消化液散布を行うことの重要性が再確認できた。人工衛星画像などで牧区が元々持つ特徴をある程度解析できれば、消化液散布場所を決定する手がかりの一つとして利用できる。さらに消化液散布を複数年継続した場合の影響も試験区により異なっていた。しかし、リン酸やカリに関しては、二年度の継続試験では見られなかったが三年度になり栄養素の蓄積が観察されるようになってきた（図 5）。特にカリの蓄積は二つの試験区で共通して三年度目に顕著に表れており、牧草の質に問題が出ないかを観る必要がある。

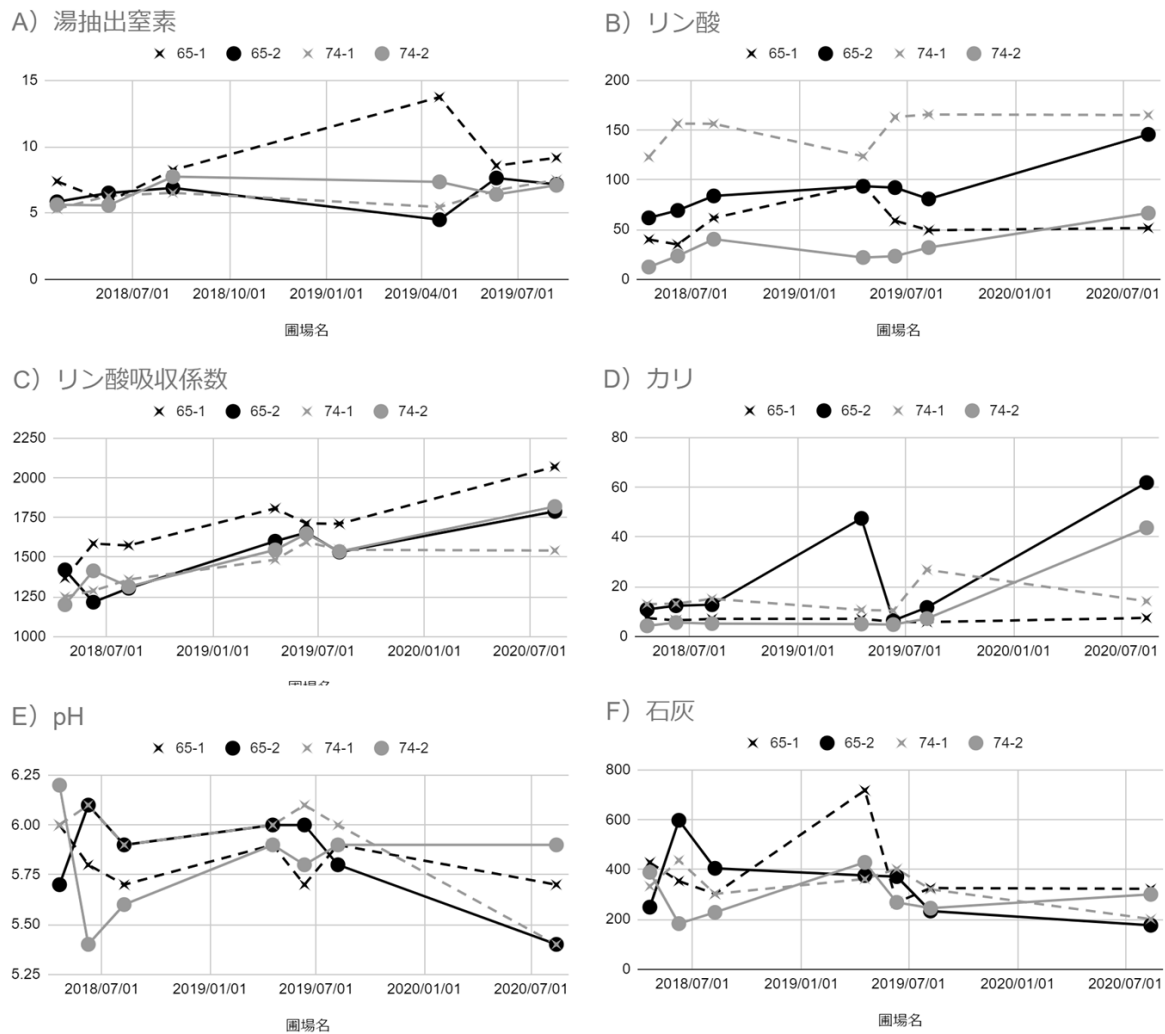


図 5 継続定点調査地における土壌分析データの推移。消化液散布ありなしの牧区を整備した二カ所（65と74）について、それぞれ散布が行われた区を●、行われていない区を×としている。X軸単位は日付、Y軸単位はpHを除いて mg/100g土壌である。

## 2.2.2. 牧草の質に関する衛星画像解析

上述した試験やこれまでの研究から、家畜糞尿由来消化液の効果をコントロールしている要因の一つとして、牧草の質（雑草率など）が重要であることがわかってきた。そのため、牧草の量だけではなく、質に関しても衛星画像で分析できるかどうかを調査する。

## 2.2.3. 牧草の質に関する解析が重要である理由

ここで、牧草地において量と質両方の画像解析が必要となる理由を簡潔に述べる。それは自給率向上と深く関連するからである。研究対象地である上士幌町TMRセンター（大規模な混合飼料生産施設）では、粗飼料と呼ばれる自給した牧草と、輸入した濃厚飼料（穀物な

ど)を混合し飼料生産を行っている。輸入濃厚飼料の混合率は自給した牧草の質と負の相関があるため、質の高い牧草をなるべく多く収穫できれば、濃厚飼料の必要量を減少させることができるのである。

しかし、牧草に関して、この質と量を両立させるのは難しい。牧草の質は簡易的にはCP率と呼ばれる粗タンパク質含量で表わされるが、CP率は牧草が生育するにつれて減少するからである。そのため、あまりにも早い段階で収穫を行うとCP率は高いが量が得られないため、土地面積あたりの生産性効率が悪くなる。一般的には、イネ科牧草は出穂する直前に収穫が行えれば最も効率よくタンパク質を生乳へと作り変える経営が成り立つとされている。

さらに、町全体規模で考えるのであれば、牧草を収穫する労働力のキャパシティについても考慮に入れる必要がある。基本的な考え方として上士幌町TMRセンターでは牧草地で年に二度収穫を行う経営系を有している。この収穫を行えるトラクターの運転手の数には限りがあり、かつ経営面でこの数を増やすのは難しい。なぜなら牧草の収穫は季節により繁閑の差が激しいため、一時的に労働力を増やすといった経営策を取りにくいからである。

この限られた労働力を最大限生かすため、上士幌町では幾つかの品種を牧区毎に植え分け収穫適期が短い時期に集中しないよう対策している。出穂期が早い品種から早生、中生、晩生と呼ばれるが、熟期が異なる牧区を見分ける画像解析技術を開発することを本研究で目指している。

#### 2.2.4. Sentinel 2データを用いた解析

当該年度においては、コロナ禍で春の収量調査が大規模に行えなかったため、1番草収穫後から2番草収穫までの牧草生育状況、特に牧草の質に関連するデータを把握し、衛星画像と比較する調査を行った。牧草の質に関しては、粗タンパク率に関するデータを評価した。調査のタイミングは、1番草収穫から数週間後の7月半ばと、2番草収穫直前の8月半ばの二回である。調査地は上士幌町内の牧草地(採草地)26か所であった(図6)。

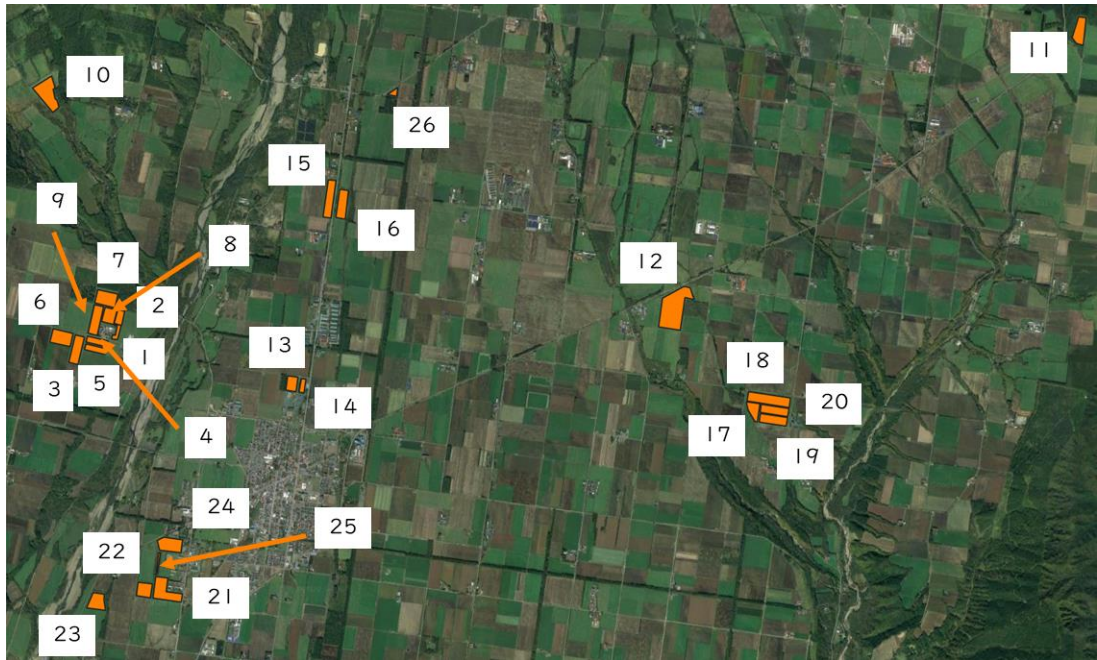


図 6 上士幌町内において、2020度の牧草地調査を行った場所。番号は便宜上割り当てた。

これら牧区に対して、収量調査と土壌採取・分析を行った。牧草の収量調査に関しては、草丈、坪刈り（決まった面積内の牧草重量を測定する方法、図 7）、草種構成（牧草種の割合）、栄養素分析（粗タンパク質率など）を行った。

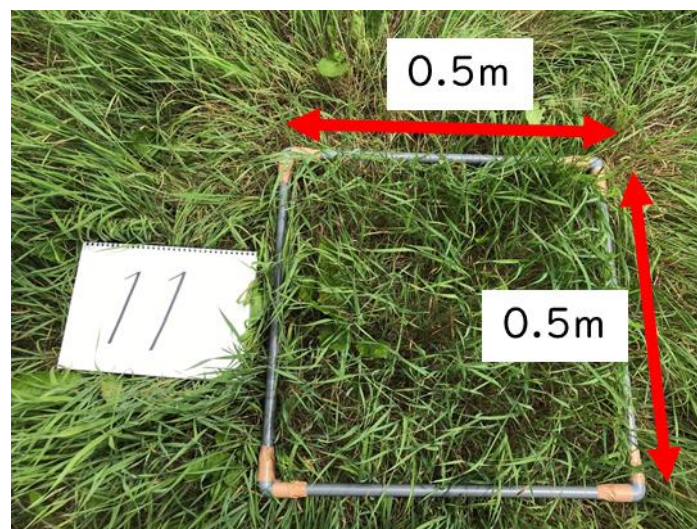


図 7 坪刈りを行っている様子。プラスチックパイプを組み合わせた枠を牧区の代表地点に置き、その内部の牧草をすべて刈り取り、重量を測定する方法を用いた。

結果として、牧草の収量に関しては、7月の調査から得られた値より8月の調査から得られた値の方が大幅に高かった（図 8・草丈、乾重量）。一方で牧草の質を示すCPなどは同時期に減少していることがわかる。このことは、この時期に牧草は出穂し質を大きく落としたことを示している。



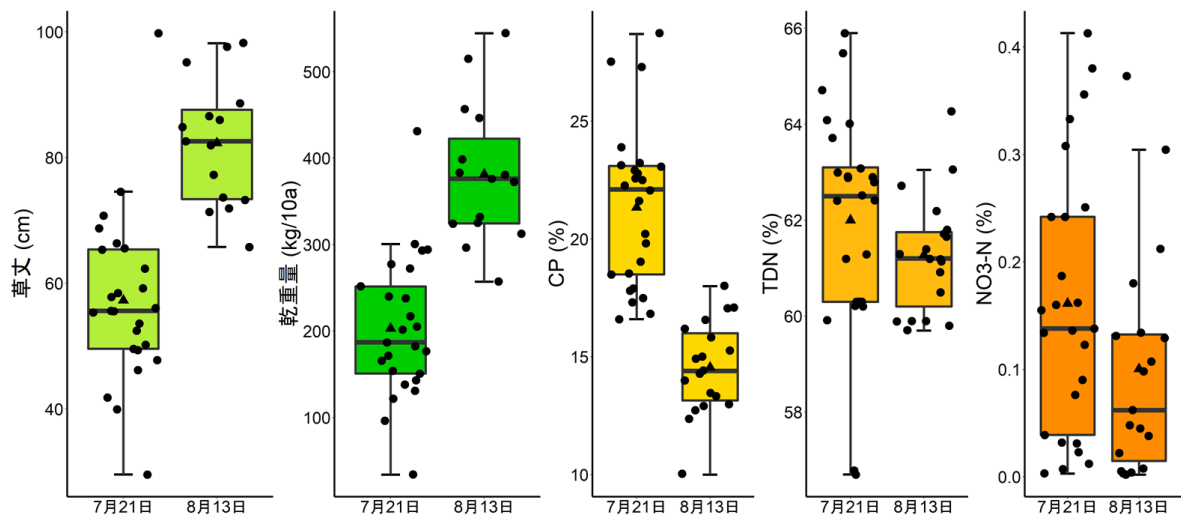


図 8 牧草生育調査・栄養素解析結果。左から草丈 (cm、牧区あたり5本の牧草丈を測定し平均)、乾重量 (kg/10a)、粗タンパク質率 (CP%)、可硝化栄養分総量 (TDN%)、硝酸態窒素量 (NO3-N%)。牧区の平均値は●で表わされており、全体の平均値をボックスプロットで表わしている。

次に、これらの結果、つまり二番草収穫前の牧草の生育量増加と質の減少を、衛星画像解析法で説明できるかをSentinel 2画像を用いて評価した。評価に用いたのは、フィールド調査タイミングに近く、かつ雲被覆率が低い7月31日と8月12日の画像である。このデータを用いて多数の既存パラメタ（波長データの組み合わせ法）を評価したが、ここでは興味深い結果を示した三パラメタについて説明する。Sentinel 2画像は12の波長データで構成されており、植物生育を時系列で評価する際は二つから三つの波長間の比を計算し評価する場合が多い。これは、撮影日毎のばらつきを低減する効果があるとされている。

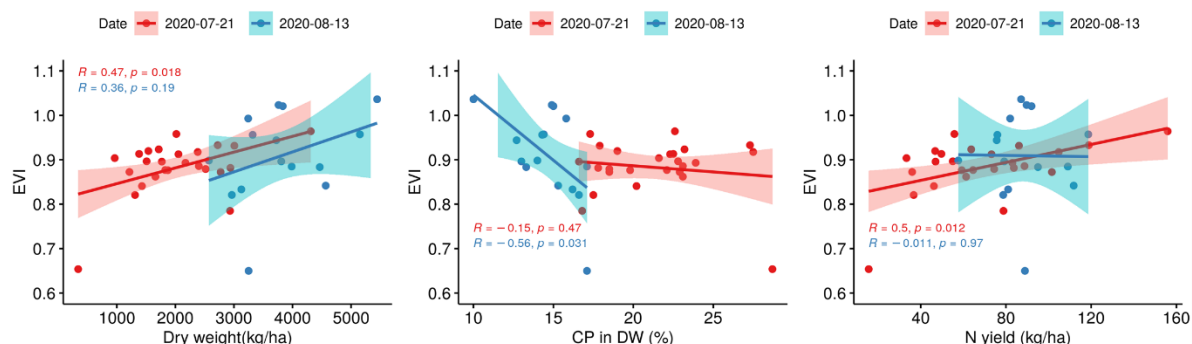
用いた三つのパラメタは下記である。

- Enhanced Vegetation Index (EVI)
 
$$= 2.5 * (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6 * \text{Red} - 7.5 * \text{Blue} + 1)$$
- modified Normalized Difference Vegetation Index (mNDVI)
 
$$= (\text{R740} - \text{R705}) / (\text{R740} + \text{R705})$$
- PI1
 
$$= \text{R705} / \text{R443}$$

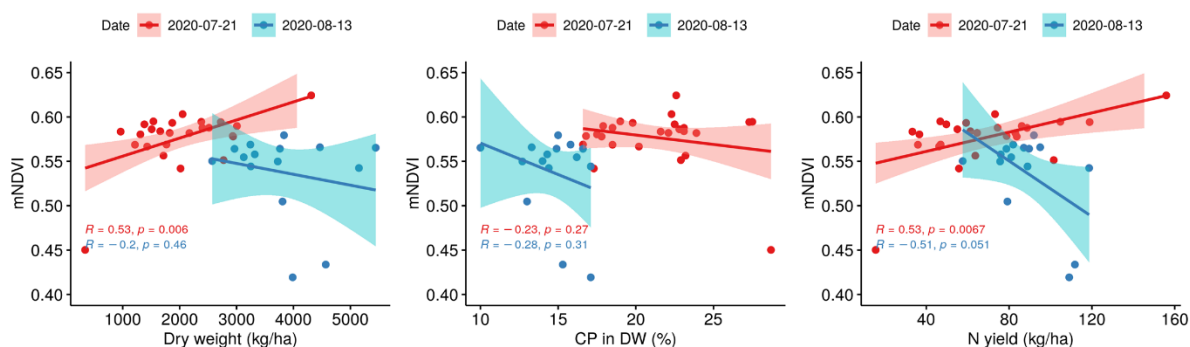
その結果、EVIは7月と8月の調査両方で同じ傾向が観察された。EVI値は7月よりも8月に高い傾向を示したため、出穂してからもある程度EVI値は増加することがわかった（図 9）。逆に、EVIとCP値（牧草の質）は負の傾向があることがわかった。対照的に、mNDVIは7月の調査では収量と正の相関があったのに対し、8月の調査では負の相関が観察された。一方でm

NDVIとCP値の相関ははっきりとはしなかったが、8月より7月の方が、値が高くなる傾向が見られた（図 9）。最後にPI1値に関しては、タイミング毎に全く違う傾向を示したため、撮影日の影響が強い可能性がある。

## EVI



## mNDVI



## PI1

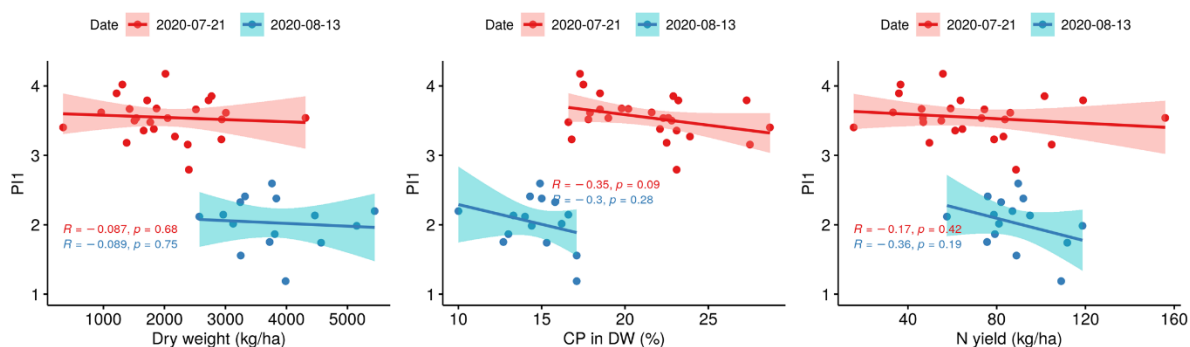


図 9 上土幌町において2020年度に行った二番草収量調査の結果とSentinel2衛星画像データ由来のパラメタの相互関係。X軸として用いたのは、単位面積あたり牧草乾重量 (kg/ha)、粗タンパク質率 (CP%)、単位面積あたりの窒素収量 (kg N/ha) であり、それぞれ1、2、3列目に示す。また、衛星画像データ由来パラメタとして EVI、mNDVI、PI1を用い、それらは1、2、3行目に示す。数値は7月の調査データを青、8月の調査データを赤で示し、近似線とエラー値を同様の色で示した。

## 2.2.5. Planet社製衛星画像データを用いた解析

上述した解析に加え、Sentinel 2よりも高頻度（毎日）、かつ高解像度で地表面撮影を行っているPlanet社による衛星画像サービスを用いた解析も行った。Planet社衛星画像サービ

スにより提供されたデータは有料である点やバンド数がSentinel 2データに比べて大幅に少ない点（Red、Green、Blue、Near InfraRedの4バンド）が欠点であるが、特に春先のフィールド調査が行えない時期のデータを補完する意味でも解析を行えたことは非常に意義がある。

一方で、高頻度で撮影が行われているPlanet社データではあるが、雲被覆率が低く上士幌町全域の解析に使えるデータはそれほど多くなく、2020年の植物生育期においては11点の画像に留まった。本報告書ではこれら11点の画像を様々な方法で解析し、牧草の質を解析する指標を模索した結果を述べる。

この部分の研究では、Planet社提供画像に付随する4バンドデータを利用し下記の指標を計算した。去年度は主にNDVIを用いた解析を行ったが、春先早い段階で頭打ちとなり、先述した出穂後の牧草の質に関する変化を定量するのが難しかったため、NDVIに加えそれ以外の幾つかの指標について評価した。

表 1 Planet社提供画像に対して用いた計算式。Planet社からの画像は4枚で構成されており、それぞれ赤色波長 $R_R$ 、緑色波長 $R_G$ 、青色波長 $R_B$ 、近赤外波長 $R_{NIR}$ である。これら波長は反射率として提供されており、撮影日の影響が最小化されている。

| 指標名   | 計算式                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------|
| NDVI  | $(R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R)$                     |
| RGBVI | $(R_G * R_G) - (R_R * R_B) / (R_G * R_G) + (R_R * R_B)$ |
| GLI   | $(2 * R_G - R_R - R_B) / (2 * R_G + R_R + R_B)$         |
| VARI  | $(R_G - R_R) / (R_G + R_R - R_B)$                       |
| NGRDI | $(R_G - R_R) / (R_G + R_R)$                             |

その結果、春先5月末頃に頭打ちとなり、それ以降大きな推移を見せないNDVIに対し、他の五種類の指数は春先以降もある程度推移することがわかった。特に5月の末から6月半ばにかけて減少傾向を示す部分は、出穂し牧草の質が落ちる時期と重なっており、同時期にほとんど変化しなかったNDVIと比較すると、より有効に牧草の質を見分ける指数として利用できる可能性がある（図 10）。

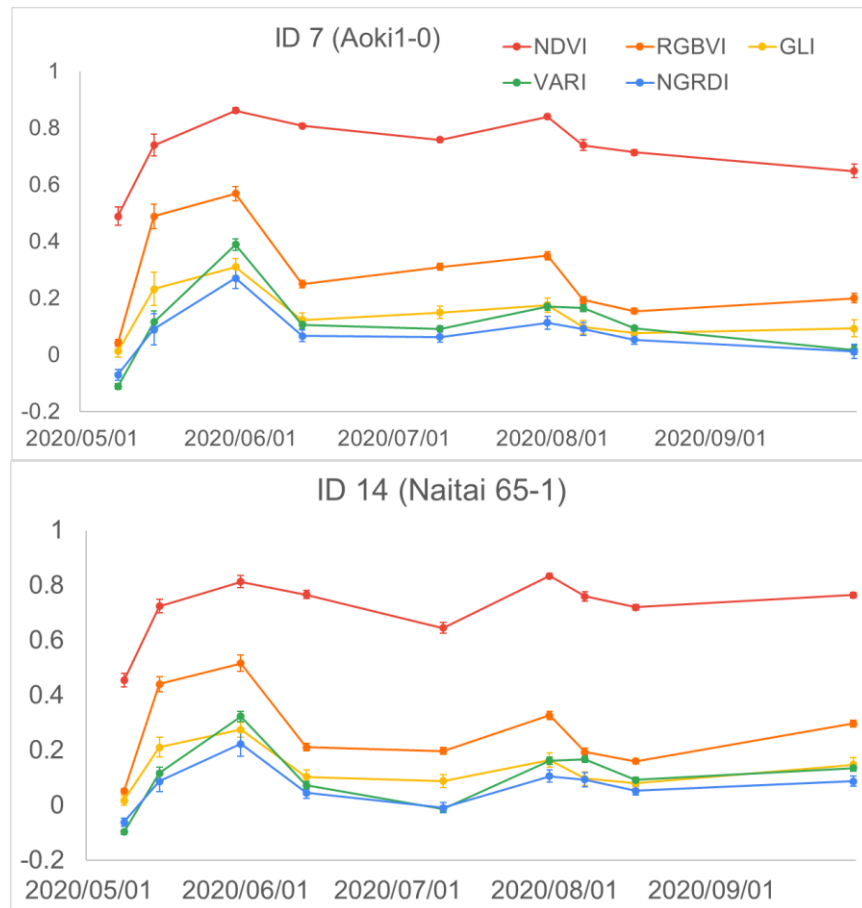


図 10 Planet社により提供された衛星画像データ（4バンド）を用いて解析した上士幌町牧草地の時系列データ。5タイプのパラメタを用い（NDVI、RGBVI、GLI、VARI、NGRDI）、それぞれ異なる色で示されている。春先に頭打ちとなるNDVI値（赤）に対し、山なりの形状で6月頭頃にピークを迎えるのが他パラメタの傾向であった。

#### 2.2.6. 農家・現場向け説明会の実施

農家や消化液散布に関係する人々を集め、消化液利用推進検討委員会を開催する予定であったが、コロナ禍で中止を余儀なくされた。その代替として、上士幌町役場等に依頼され、消化液利用の現状などを報告書としてまとめ報告した。一部の情報を秘匿したが、図 11のような紙媒体で表や図を用い分かりやすく説明した。



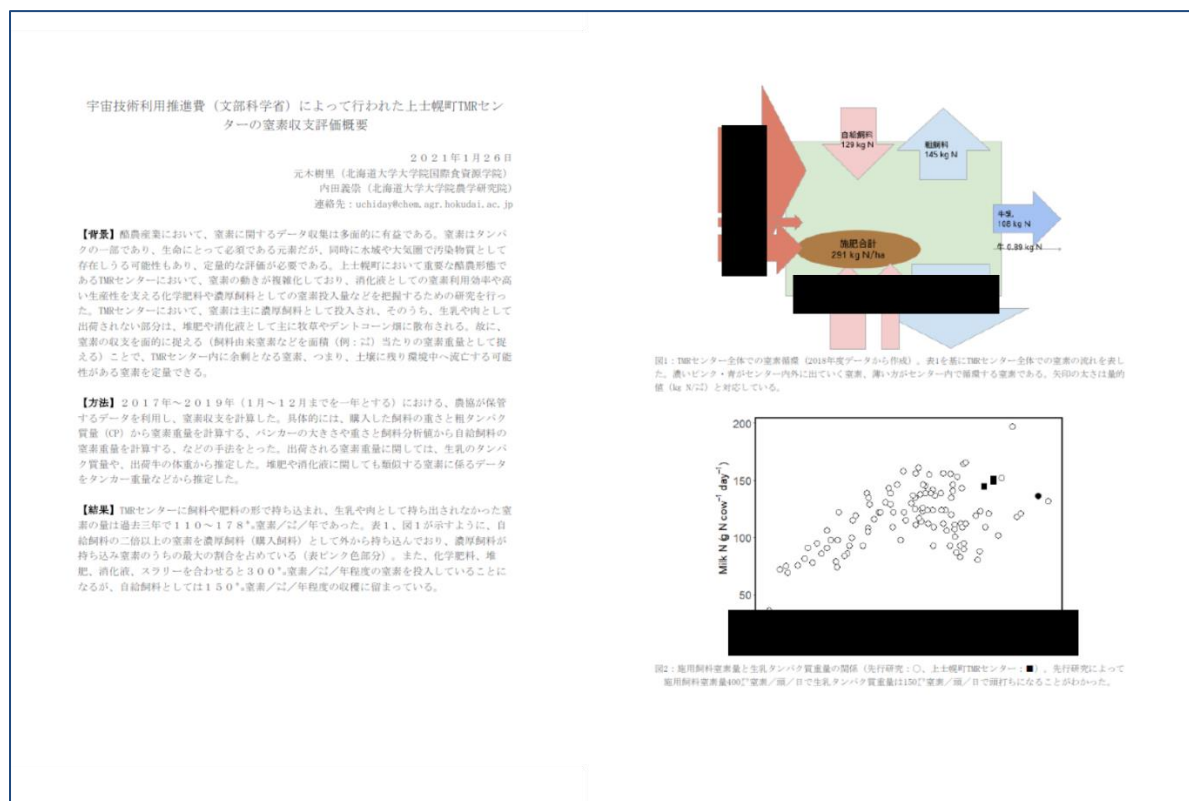


図 11 上士幌町に報告した報告書の抜粋。黒塗り部分は非公開情報とする。ここでは、大規模酪農形態であるTMRセンターにおける栄養素収支計算方法と結果を報告し、消化液利用を含む栄養素循環について考察・コメントしている。

## 2.3. 非効率地域の調査

### 2.3.1. 土壌微生物と消化液散布の関連性調査

この部分では、消化液による生育向上効果と関連して、植物の生育を左右する土壌微生物叢を評価している。土壌微生物叢は消化液由来栄養素を一時的に保持する機能を有しているため、土壌微生物は消化液栄養素の循環効率を変化させる一つの要因と考えられる。そのため、土壌微生物の量的また質的变化（例：多様性の変化）についての基礎情報を当該地域で蓄積していくことは、消化液が牧草や作物生育にどの程度効果を及ぼすかを精緻に理解するために重要であり、消化液散布によって作物生育が改善する場所を判別する方法の確立へと繋がる。

また、消化液を積極的に用いることに対しての懸念の一つが、土壌微生物に対する影響である。土壌、消化液双方は大量の微生物を有しており、それらが混合されたときにどのよう

なことが起きるのか、例えば病害菌の発生や有機物分解能の阻害などは起きないのか、という疑問に答えなければ消化液の安全な利用を推進することは出来ない。

そのため、ここでは、土壌を適正に改良すれば消化液由来の微生物の土壌微生物への影響を少なくできるのではないかと仮定し、研究を進めた。この研究の狙いは上士幌町内での微生物のばらつきや、季節変動、土地利用の影響などを考慮に入れ、衛星を利用して消化液散布案を考察する際のパラメタの一つとすることである。

土壌の改良案としては、現場で実際に用いられている事例として土壌pHに着目した試験を行った。農業現場では土壌pHが酸性寄りになった再、石灰などを施用しpHを調整する。このことで牧草が適正に栄養素を吸収し生育するようになるが、我々はこのpH調整が土壌微生物へも影響を与え、消化液散布の影響を緩和する可能性があると考えた。

実験系としては上士幌町の土壌を用いて、遠沈管チューブ内（50 ml）に充填し石灰を投与しpHを5から6程度まで上昇させた。その後石灰投与有り無しのチューブに消化液を現場と同様投入し、土壌微生物の変化を観察した。その結果、石灰を施用した土（Lime）の方が石灰を施用しなかった土（No Lime）に比べ、消化液による微生物への影響が弱かった。つまり、石灰を施用することによって土壌微生物の抵抗力を高めることができた。土壌微生物コミュニティの変化は非常に複雑であるため、ここではPCoA法によって2次元化した図を示す（図 12）。PCoA法では、類似したコミュニティは近くにプロットされる。この図から、土壌微生物コミュニティは消化液によって大きく変化することがわかり、さらに石灰によってpH調整を施していないNo Limeの微生物コミュニティが石灰を施用した土壌微生物コミュニティ（Lime）より大きく変化していることもわかった。

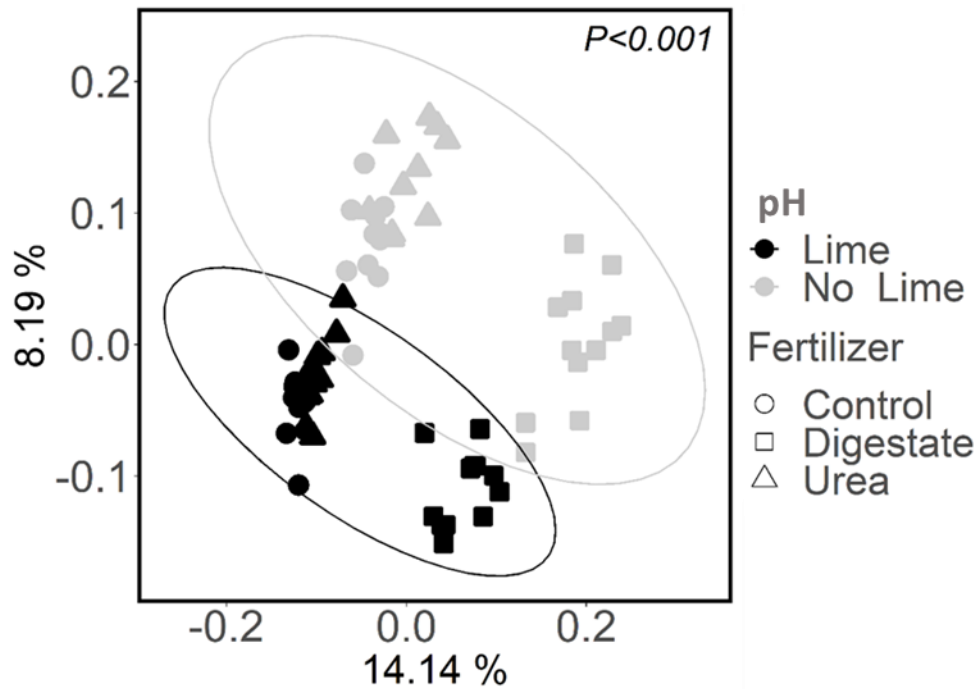


図 12 石灰を施用した土 (Lime) と施用しなかった土 (No Lime) に、何も散布しない場合 (● Control)、尿素を散布した場合 (▲ Urea)、消化液を散布した場合 (■ Digestate) の土壌微生物コミュニティの変化をPCoA法で2次元化し示した図。

さらに、化学肥料である尿素 (Urea) を施用した場合は、何も施用しない場合と比較して土壌微生物コミュニティ構造はほぼ変化がなかったが、消化液を散布した場合はコミュニティ構造に変化が見られることもわかった。このような化学肥料と消化液の根本的な違いについて知見を深め現場へ還元する意味でもこの実験は大きな成果を挙げることができた。また、消化液による微生物への影響を最小限にするためには、土壌pHをより中性に調整しておくことが望ましいこともわかった。

具体的になぜ石灰を散布した場合に消化液の土壌微生物影響が緩和されたのかを調べるために、石灰散布有り無し土壌の微生物コミュニティの比較をさらに行った。その結果、石灰無しの土壌では *Alphaproteobacteria* 綱が消化液散布により増加する傾向があることがわかったが、その傾向は石灰散布を行った土壌でははっきりしなかった (図 13)。この微生物綱は土壌中で有機物を分解するなどの機能を有しているが、消化液散布によってこれらが変化したことが土壌の健全度や肥沃度にどのように関連しているのかはまだはっきりしないため、さらなる研究が必要である。また、人工衛星画像解析と組み合わせることを目指し、土幌町全体として牧草地のpHの現状やばらつきなどを画像で捉えられるか (牧草の生育や色味など) についても検証が必要である。

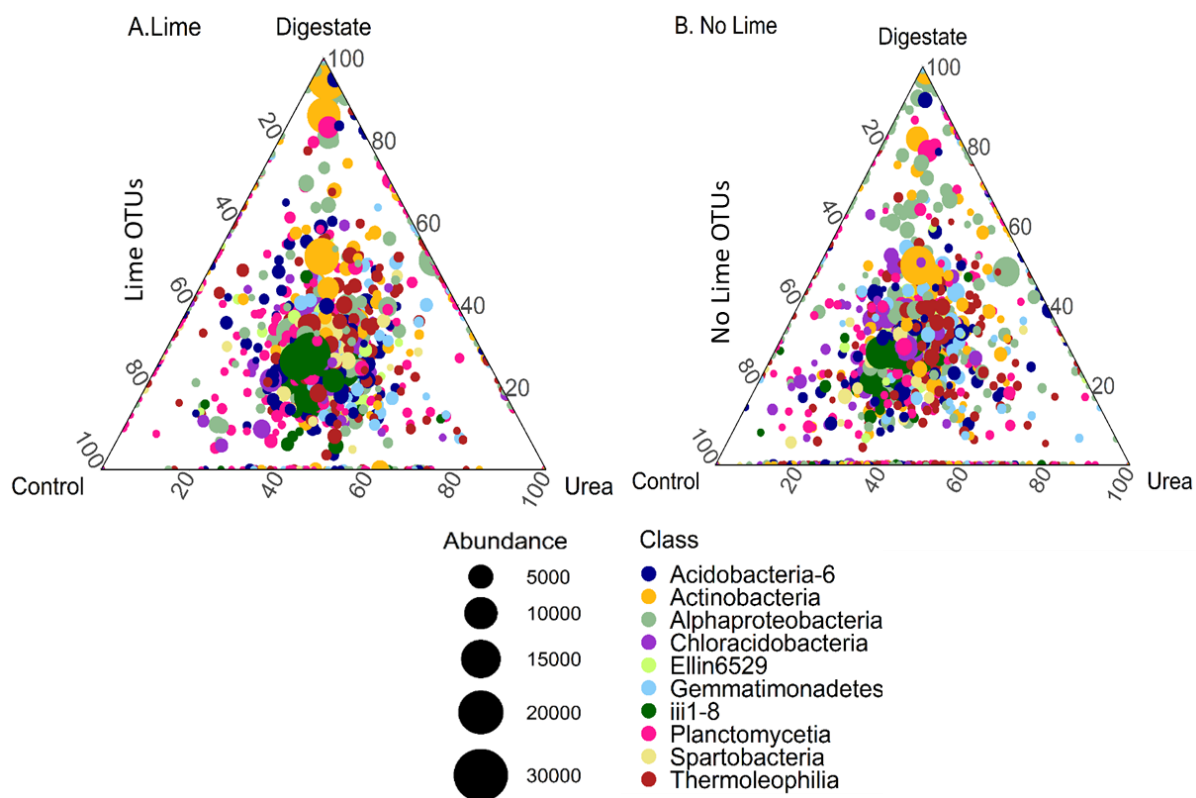


図 13 石灰を施用した土壌 (Lime、左側) としていない土壌 (No Lime、右側) の土壌微生物コミュニティの変異を示した三相図。この三相図のそれぞれの頂点が、消化液散布後 (Digestate)、尿素散布後 (Urea)、無施肥 (Control) の微生物コミュニティを表している。

## 2. 4. 散布最適化モデルの作成

この部分では、衛星画像と地上データを用いて現場に即した幾つかの散布シナリオを構築した。まず、衛星画像を用いて雪解けのタイミングを評価するシステムを開発した。現状では、研究対象地域における栄養素リサイクル効率は理想的ではないため、段階的に消化液利用法を改善することで、地域全体に投入する資源、資材を減少させつつも収量（生乳生産量）を維持することを目指す必要がある。我々の研究結果によると、消化液、堆肥、化学肥料を併せた散布量は窒素量に換算すると300<sup>kg</sup>/ha/年程度に上っている。しかし、牧草やデントコーンなどの作物として収穫できている窒素量は150<sup>kg</sup>/ha/年程度であり、このことはかなりの量の窒素が土壌中で余剰となっていることを示唆している。そこで、散布する場所をより広域に広げるシナリオを組み、散布する場所を段階的に二倍程度に増やすことで、余剰窒素を半分程度に減少させられるのではないかと考えて研究を進めた。既に研究対象地域では、なるべく広域に消化液を散布するため雪解け後なるべく早い時期に消化液散布を開始することを目指しているが、雪量や土壌凍結深度が牧区によって異なり、散布開始の適正日は牧区によって大きく異なることがわかっていった。現在は、消化液を散布するタン

カーの運用に詳しい人材が見回りなどによって消化液散布場所やタイミングを決定している。

そこで、本プロジェクトは衛星データを用いて、雪解けタイミングの町内におけるばらつきを視覚的に判別するシステムを作り、得られた結果から、散布シナリオを提案した。雪解けタイミングの見える化システムはウェブベースのアプリであるShinyを用いて開発した。衛星画像から算出した雪解けを示唆する指標はNDSI (Normalized Difference Snow Index) 正規化積雪指標であり、下記の式を用いて計算される。

- $$NDSI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR)$$

\*SWIR = 短波長赤外 (1~1.7  $\mu m$ )

この指標を上士幌町の代表的な牧区毎に計算し、値により色分けした図が下記である。この図は研究対象地において2月末~4月半ばまでの衛星画像を用いて計算した結果であるが、この時期に上士幌町は雪解け時期を迎えたことがわかった。さらに、牧区毎で雪解けタイミングは大きくばらつくこともわかった(図 14)。これらの結果から消化液散布、特に一年の始め(春)の散布タイミングシナリオを構築するためのツールを構築することができた。一方で、消化液散布は雪が解けている牧区であれば行えるという単純なシナリオは現場で用いることができない。なぜなら、雪に覆われていた牧区は土壌凍結深度が浅く、逆に雪に覆われていなかった牧区は土壌が凍結しており消化液散布タンカーが牧区に入りにくいといった現状があるからである。この部分では、今後もシナリオ構築法をより現場での実施体制と合わせて精査することが必要である。

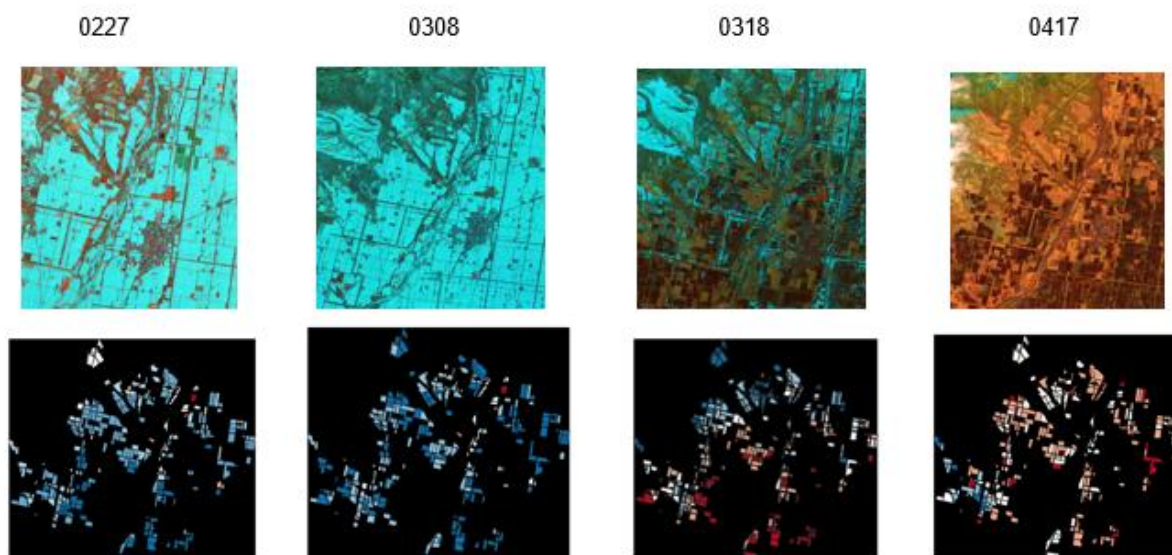


図 14 研究対象地においてSentinel 2データを用いて計算したNDSI値を用いて作成した雪解けマップ。上側の4図は研究対象地全体の図であり、下側の4図は同じ日に研究対象牧区（牧草地など）の形で上図をくりぬき、指標値を高い（青）値から低い値（赤）まで塗分けた図である。NDSI値は高い方が、雪が多いと考えられるため、赤い部分は雪が溶けたのが早い牧区であると考えられる。

また、上図を統計ソフトRやウェブツールShinyを用いて、より現場で利用しやすいツールとして公開した。このことで、統計ツールなどを利用できない人でも自ら対象地域を拡大するなどが可能となった（図 15）。

## Kamishihoro318

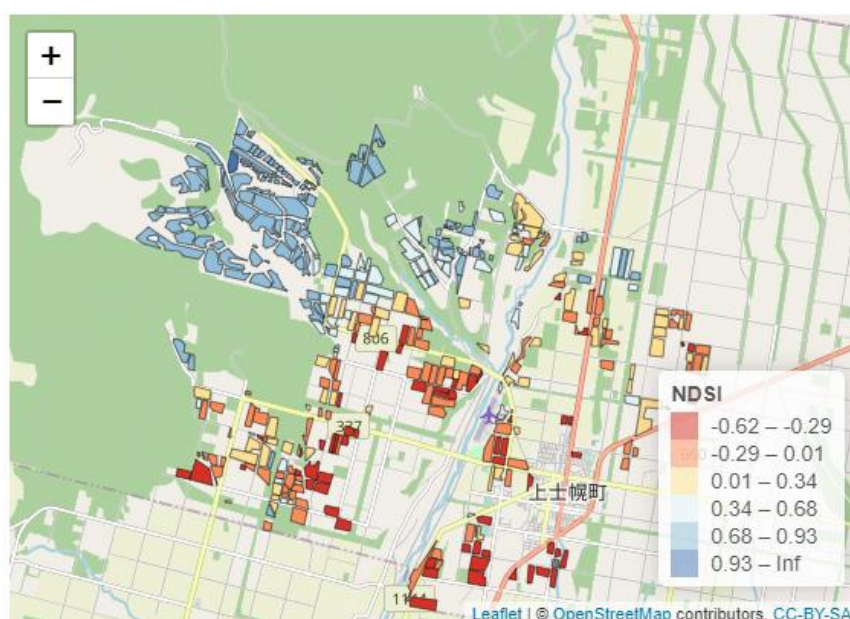


図 15 RとShinyを用いて構築した上士幌の雪解け圃場可視化ウェブツール。



さらに、消化液散布履歴についても同様に牧区毎の履歴が見えるウェブアプリケーションを開発し、過剰な散布を未然に防ぐことができるようにした（図 16）。まず、研究対象地において紙媒体で管理されている消化液散布タンカーの日報から情報（散布が行われた日、牧区、量）を抜き出し、ウェブベースのスプレッドシートに入力し、そのデータとウェブ地図を連携させ、牧区をクリックするとその牧区の散布履歴を閲覧できるようにした。

Kamishihoro Map



図 16 統計ソフトRとウェブツールShinyを用いて消化液散布履歴が可視化できるツール。

今年度はこれらツールと現場での実施に関わる様々な制御要因（散布希望農家数や消化液の量、タンカー運転手数など）を組み合わせ、これまでよりも広域に散布を行うシナリオを構築した。具体的には、これまでの散布履歴が無いもしくは少ない牧区を抽出し、雪解けの状況を多面的に評価しつつ春先から消化液散布を行う予定である。

## 2.5. 実施した会議等について

本研究は、現場での会議を定期的に行いながら進めている。主要な会議や打ち合わせの内容について主なものを下記に示す。会議資料は個人情報を含むため公表を差し控える。

- 2020年6月19日 オンライン会議



- フィールド調査、コロナ禍対応など
- 2020年7月21日 フィールド調査打ち合わせ
- 2020年8月13日 フィールド調査打ち合わせ
- 2020年9月14日 フィールド調査打ち合わせ
- 2020年11月18日 JA上士幌での打ち合わせ
- データのまとめ方や公開方法、足りないデータのやりとりについてなどを打ち合わせた。
- 2021年3月23日 来年度調査などの打ち合わせ（上士幌町役場）
- 2021年3月24日 来年度調査などの打ち合わせ（JA上士幌町）

### 3. まとめ

本年度は概ね目的を順調に達成した。去年度から継続して、現場（役場・農協等）との連携を進め、土壌・牧草・たい肥等の分析を継続して多数取り、去年度と比較することで、年度ごとのばらつきについてのデータを得た。さらに、去年度は牧草の量的変化を衛星画像解析で調べたが、さらに今年度は質に関する情報も蓄積した。なぜなら、家畜糞尿由来消化液の効果をコントロールしている要因の一つとして、牧草の質（雑草率など）が重要であることがわかってきたからである。また、現場向けの説明会は対面では行えなかったが、役場からのリクエストにより分かりやすい資料を作成するなど、社会への研究成果の還元を積極的に行った。さらに、消化液効果を向上させるための非効率地域の調査の一環として、土壌微生物と消化液散布の関連性調査を行った。特に土壌pHと微生物バランスに関する研究を行い、上士幌町内での微生物のばらつきや、季節変動、土地利用の影響などを考慮に入れ、衛星を利用して消化液散布案を考察する際のパラメタの一つとすることができた。最後に、最終年度に向けた散布最適化モデルを作成し、衛星画像と地上データを用いて現場に即した幾つかの散布シナリオを構築した。