

令和3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4年5月

北海道大学

本報告書は、令和3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。

1. 目次

2. これまでの研究	3
3. 報告内容	3
3.1. 委託業務の目的	3
3.2. 消化液散布の栄養素利用効率調査システムの検証・最適化	4
3.2.1. 消化液の散布スケジューリングや実施	4
3.2.2. 消化液利用効率の計算	10
3.3. 実際の運用に向けた最終調整	11
3.3.1. システム運営に関連したツールの開発	11
3.3.2. データ蓄積や精度向上のための試験	17
4. まとめ	24

2. これまでの研究

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、概ね目的を順調に達成することができた。具体的には、まず衛星情報と地上における営農データ（ふん尿散布など）を融合させ可視化するアプリケーションを開発した。過去に遡って牧区のふん尿散布履歴を閲覧し、地域の平均散布量と比較することや、衛星画像を利用して牧草生育量を地域の平均値と比較することができるようになった。また、地域の中でより効率の良いふん尿由来栄養素の循環を促すようなアラートシステムをシステムに組み込むことができた。例えばふん尿を多量に投入しているにも関わらず衛星画像から計算された牧草生育量が低い場所を示すアルゴリズムを導入した。

さらに、実際に今行われているふん尿散布情報管理方法からの移行を見据え、現在の管理情報と類似したフォーマットでデータを管理できるようにした。具体的には、これまで手動で入力していたトラクターの運行履歴をトラクターに配備したGPSを用いて自動で取得し、ドライバー名や業務時間などを追加で入力することにより、現在紙媒体で手入力している情報をデジタル管理できるようにした。

最後に、牧草の生育や今後の利用が期待される緑肥（小麦後に作付けする被覆植物）への消化液散布効果に関しては、衛星だけではなくドローンや地上撮影などを駆使し衛星画像の精度や年毎のばらつきなどを評価することができた。

3. 報告内容

3.1. 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。

3.2. 消化液散布の栄養素利用効率調査システムの検証・最適化

3.2.1. 消化液の散布スケジューリングや実施

この部分では、去年までの散布履歴とは異なる新たな散布スケジュールの構築、実施を行い、その状況をデジタル化し衛星画像と比較しながらモニタリングを行った。具体的には2020年度と比較し2021年度においてはより広域に消化液が散布され、その結果単位面積あたりの散布量は平均値では減少したことがわかった（図 1～図 3）。

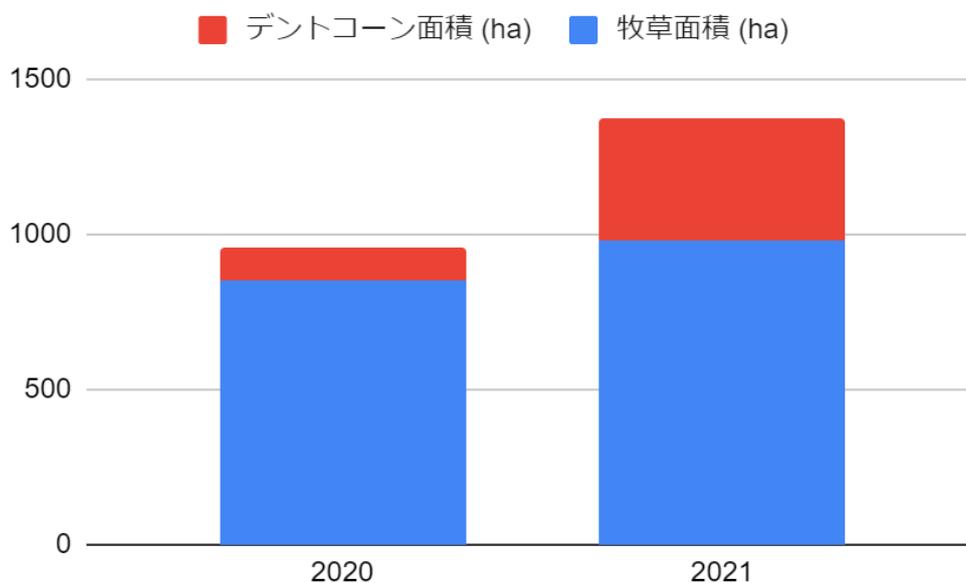


図 1 消化液散布延べ面積

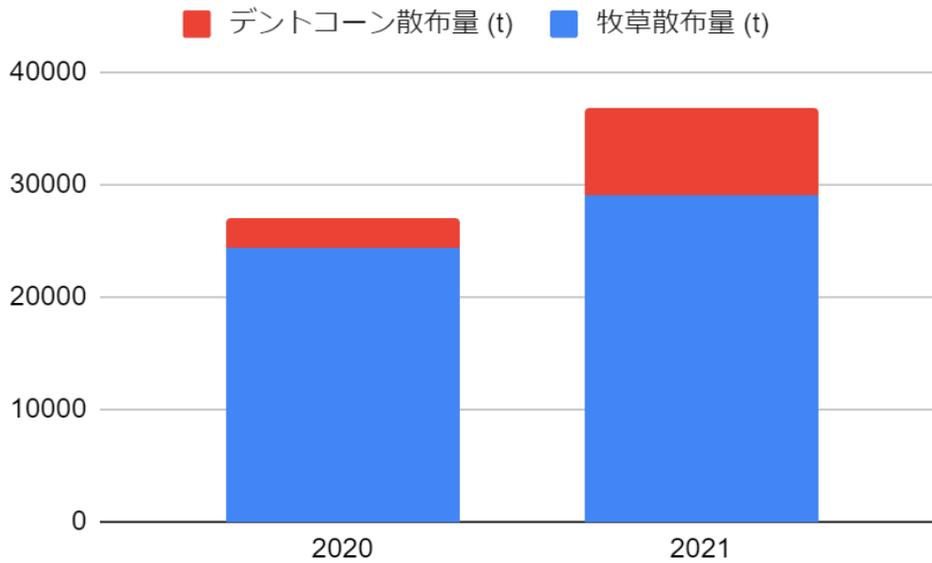


図 2 消化液散布量

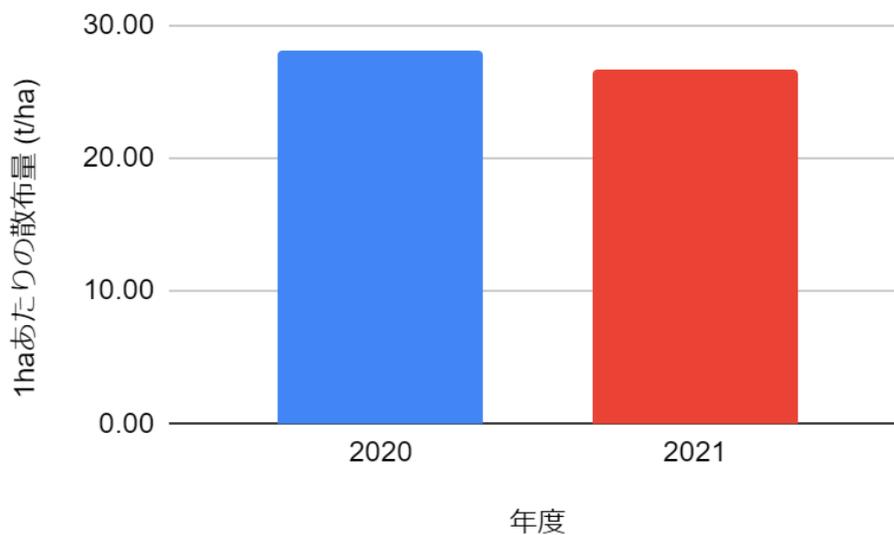


図 3 単位延べ面積あたりの消化液散布量

一方で、やはり消化液槽近くの牧区においては必要以上の消化液が散布されている可能性を示唆するデータも得ており、平均値ではなく散布状況を面的に可視化し、衛星画像を用いた牧草生育状況のデータと比較することが必要であった。そこで、散布状況をデジタル管理し、衛星画像と比較、モニタリングするために、新たに「家畜ふん尿由来液肥の集約的かつ他牧区利用向け管理システム」を開発した。このシステムでは、既存のクラウド型データベ

ース管理システムで散布履歴データを収集・管理できる。具体的にはGoogleフォームから得られた散布履歴データをGoogleスプレッドシートに蓄積でき、かつその視覚化やマップ化に関しては統計ソフトRベースのオンラインアプリであるShinyを用いることでシステム化を達成した。

まず、散布スケジュールのデータであるが、現場では消化液散布するタンカーの運行履歴が手書きの日報として保存されている。日報には散布した牧区名（多くの場合、農場所有者名と番号）、散布台数（何回牧区と消化液槽を往復したのか）、日付などが記録されており、これらデータは農協がデジタル化し地図上などで表示できるよう保存している。農協は牧区名と地図上の牧区データ（場所や面積、作物種等）を紐づけ、PCアプリケーションで管理しているが、このアプリケーションは一般的に用いられているGISデータ管理アプリケーション（例：ArcGIS、QGIS、Rなど）と互換性が無く、消化液の散布スケジュールを外部が把握するためのやり取りは非常に煩雑であった。

そのため、まずこのデータのやり取りを効率化し手書き・紙媒体での管理から脱却を目指すためにGoogleフォームを構築した（図4）。Googleフォームはウェブにアクセスできる環境であれば、スマートフォンなどから誰でも無料で回答が可能である。回答情報は即座にGoogleスプレッドシート上に反映されるため、情報の管理と整理を自動で完了できる。Rからスプレッドシート上のデータの取得には、googlesheets4パッケージ（Bryan, 2019）を使用した。

データ収集フォームは、「散布時期」「作業日」「牧区ID（牧区名）」「散布量（トン/反）」を必須記入事項とし、備考欄を設けた（図4）。「散布時期」とは、本システムを構築するのに参考とした北海道の農業地域で、春（3-4月頃）、一番草収穫後（6月頃）、二番草収穫後（8月頃）、秋（11-12月頃）の4回のタイミングで行われることが多いことから、この4項目から選択して登録する仕組みとした。本項目は、管理対象地域の管理形式に沿って容易に変更可能である。

消化液散布 作業記録

*必須

season *
時期を選択してください

選択 ▼

date *
作業日を選択してください

日付

年 / 月 / 日 □

id *
牧区を選択してください

選択 ▼

amount *
量 (トン/反) を記入してください

回答を入力

note
備考

回答を入力

送信

図 4 消化液散布履歴を入力するためのGoogleフォーム

マップとグラフの表示

また、散布が行われる予定の牧区に関しては、RStudioでleafletライブラリを用い、用意した牧区のポリゴンデータのSHPファイルを衛星画像マップ上に表示した。地形の衛星画像レイヤーは、ArcGISが無償提供するWorld Imagery (<https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer>. 2021年10月8日参照) を利用した。消化液散布量データは、先述したフォームからオンラインのスプレッドシートに登録されたものすべてを、アプリケーション開始時に取得する。サイドパネルで表示する年を変更すると、取得したデータから選択年の各牧区のデータが取り出され、ポリゴンの色を変更され、各年

の地区全体の散布量の傾向を一目で把握できる。また、牧区の形や位置（ポリゴン）データと散布量データを分けて処理することにより、管理牧区の変更がない限り、表示情報の自動的な更新・修正を可能とした。

これら散布データとマップデータを合わせ可視化することによって、各牧区ポリゴンのマウスオーバーにより、牧区名が表示されるようにした（図 5）。またクリックすると、マップ下にその牧区の消化液散布履歴が棒グラフで表示され、年間の積み上げ型で4つの散布時期で色分けされ、重ねて、地区全体の年間平均散布量が示される。これにより、各時期、各年、地域全体との散布量の比較が、視覚的・直感的に可能となる。またデータはスプレッドシートとRの連携によりほぼリアルタイムで更新されるため、各時期の散布場所や量の確認と調整に役立てられる。

消化液散布～牧草生育マップ

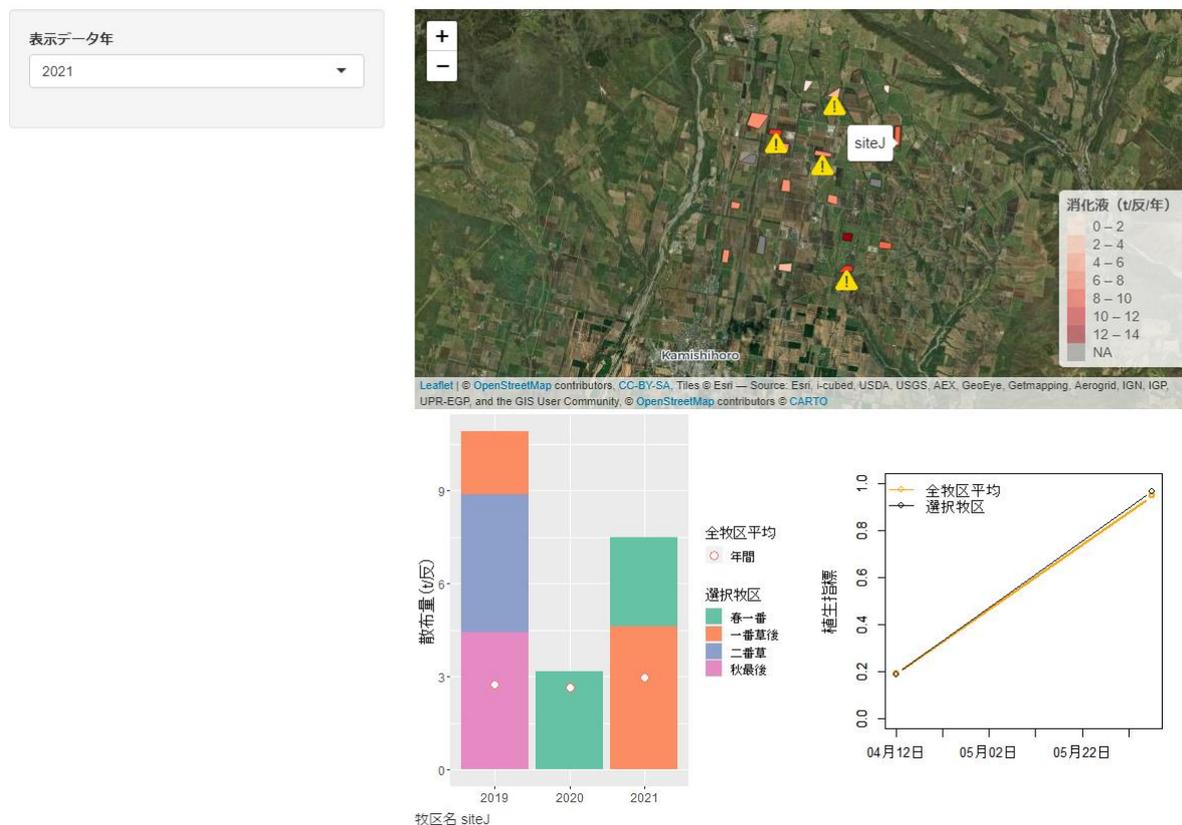


図 5 衛星画像と消化液散布履歴を利用した消化液散布と牧草生育可視化アプリケーション。地図上で牧区をクリックすることで下中央の散布履歴と右下の牧草生育状況がわかるようになっている。この場合、下中央のグラフのマル印が地域の平均散布量となるため、この牧区は過去三年間平均よりも多い消化液散布が行われてきたことがわかる。一方右下の図では、地域の平均生育（黄色線）よりもわずかに選択牧区の生育が早いことがわかる。この右下図は衛星画像から計算されたものである。

図 5の右下で示している牧草の生育データとして、これまでに衛星データによる近赤外観測域と赤色可視光観測域を用いたNDVI（正規化植生指数、Normalized Difference Vegetation Index）などの指標が用いられてきた。しかし、牧草の生育最盛期には最大値を超えてしまうため（Huete et al., 2002）、牧草収穫前の牧区ごとの差を見るには指標として不十分であることが課題として上げられており、我々の去年度までの調査においても同様の傾向が見られた。そこで、NDVIを改良したEVI（拡張植生指数、Enhanced Vegetation Index）を用いて評価を行った。EVIは近赤外域と赤色可視光域に加えて青色可視広域を考慮することによって、大気や背景土壌の影響を受けにくく植生を評価する数値の幅が広がるとされている。今回用いたデータでは、一番草の収穫のみに注目してEVI値の解析を行い、牧草生育状況を評価した。

牧草収量の予測解析に用いた人工衛星画像は欧州宇宙機関から無償で提供されているCopernicus Open Access Hub（<<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>, 2021年10月8日参照）から大気上端反射率（TOA）として補正されたSentinel2画像データをダウンロードした。対象地域の画像から雲の影響が無いものを選び、画像の中から、可視域青（B2）、可視域赤（B4）、近赤外域（B8）を示す波長データをQGISの機能である「仮想ラスタの構築」により重ね合わせた。これを牧区のポリゴンを示した前述のシェープファイルを用いて「マスクレイヤによる切り抜き」を使用して切り抜き、「ラスタ計算機」を使用して以下の計算式を用いて牧草生育量の指標となるEVI値を算出した（Huete et al., 2002）。

$$EVI = GNIR - REDNIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L$$

NIR, RED, BLUEはそれぞれ近赤外域、可視域赤、可視域青の波長を示している。また、Lは土壌を背景とした補正、C1、C2はエアロゾルの抵抗係数を示しており、それぞれ、L=10000、C1=6、C2=7.5、G（gain factor）=2.5として計算を行った。Sentinel2においては、大気上端反射率は0から10000の単位で表わされるため、Lの値を10000とした。最後に牧区ごとに計算したEVI値をQGISのプラグインの一つである「ゾーン統計量計算」を用いてシェープファイルの属性テーブルに結合させた。属性テーブルのデータはGoogleスプレッドシートに貼り付け、R Shinyと連携できるようオンラインデータベース化した。

牧草生育量は、春先の雪解け後すぐのEVIデータと、一番草収穫直前のEVIデータの差を日数で割り、傾き（生長速度）を出すことで評価した。絶対量ではなく牧区における年間の相対的な生長量を指標にすることにより、地理・地質的な差異を除いて全牧区平均と各牧区の生長量を比較できるようにした。マップ上の各牧区をクリックして選択すると、サイドパネ

ルの選択年におけるEVIの変化が地区全牧区の平均とともに線グラフで表示される。これらのデータ（消化液散布量と衛星画像からの牧草生育予測データ）から、平均と比較して消化液散布量が多く、かつ牧草生育量の小さい牧区を、「注意牧区」としてR上でリスト化した。マップでは、これらの牧区上にアラート画像を表示した。アラートの表示は、サイドパネルの年を変更することで、選択年の結果に切り替えられる。

本システムはクラウド上のデータを利用したウェブアプリケーションであり、膨大で更新されるデータの記録や確認を従来よりも容易かつ直感的に行うことができる。施肥管理作業を行う個人はこのアプリケーションを利用することで、管理する牧区の状態を、より広範な期間や地域と即座に比較して把握できる。現場での施肥管理の把握や改善への利用が期待される。一方で、衛星画像を用いた牧草収量の推定法としては、本研究で用いたEVIの他にも多数あり（引用）、地域における牧草タイプや収穫時期などと合わせた精度の継続的な検証が必要である。本システムはまた、ほかのIoT機器やシステムと組み合わせて発展させることができる。現状では消化液散布の量を表示しているが、例えば、消化液の成分を計測し記録する機器と合わせることで、より正確な窒素の投入状況を把握することができる。農家だけでなく、環境の管理や研究を行う機関や個人にとって有用なシステムとなりうる。

3.2.2. 消化液利用効率の計算

また、先述した消化液散布実施データを用いて、消化液由来栄養素の再利用効率が実際にどれだけ向上したのかを数値化した。2020年度では、投入窒素量は19.44 kg/10aであったのに対し、牧草として収穫することができた窒素収量は16.95 kg/10aであった。一方、2021年度では、投入窒素量は13.70 kg/10a、牧草として収穫できた窒素収量は22.84 kg/10aであった。2021年度では2020年度と比較して窒素利用効率が上昇したといえるが、土壌に元々ある窒素量などの評価は精緻に行えないため、土壌中の余剰窒素の増減が消化液利用効率にある程度の影響を与えていると考えられる。

複数年度における窒素収支データから、土壌中へ消化液由来窒素が蓄積していることが示唆される。そのため、数年間の窒素収支データを蓄積し、消化液施用量の減少があっても牧草収量が減少しない場合は、さらなる消化液施用量の減少を促すなど、先述したアプリケーションのアルゴリズムと組み合わせた牧区毎の管理を行うことができる。

実際にこの地域で消化液が適正に利用された場合に削減できる化学肥料に関しては、この地域で運営しているエネルギー地産地消事業などで算出されているが、消化液生産量は20万

を越えることが予想されており、アンモニア態窒素量としては40万kgに相当する。約1万haであるこの地域の耕地面積を考慮に入れ、その平均的な窒素施肥量が100kgN/haであるとすれば、その4割を賄える計算になる。この量の栄養素が一部の耕地にのみ用いられている現状を踏まえるとさらなる効率化を推進することで、より持続的なふん尿利用が促進できると考えられる。

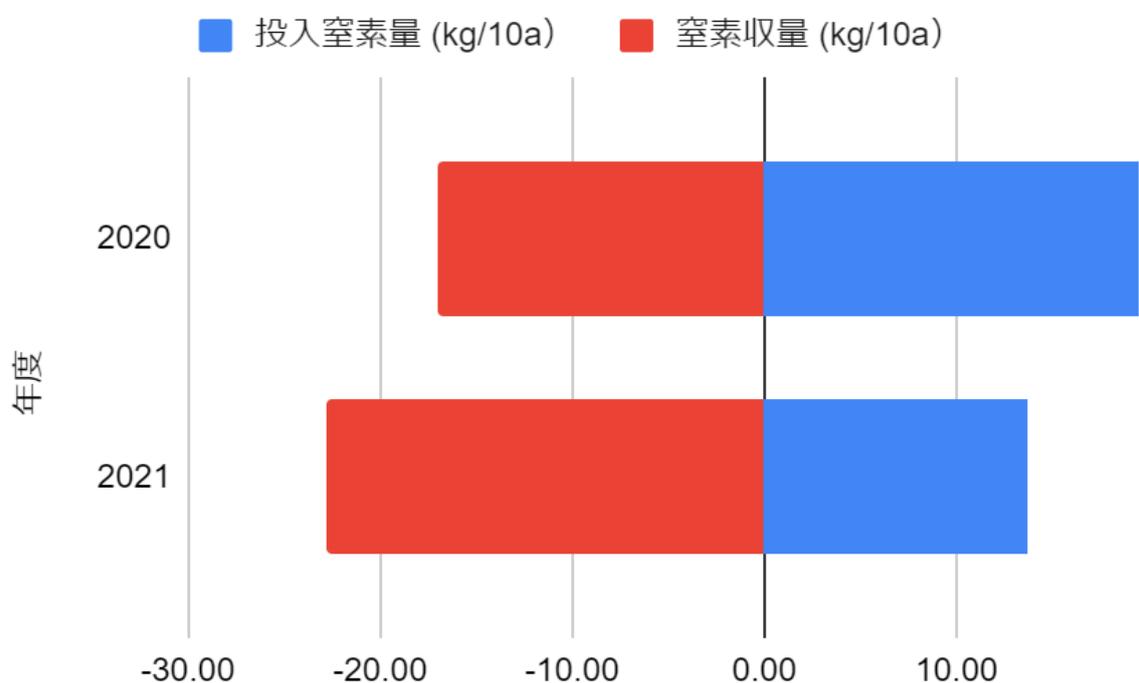


図 6 窒素収支のグラフ

3.3. 実際の運用に向けた最終調整

3.3.1. システム運営に関連したツールの開発

ここまでの研究で、消化液散布履歴の収集と衛星画像を用いた牧草生育のばらつき予想をデジタル管理できるようになったが、現場での利用を段階的に進めるために、さらに、役場・農協・現場（農家や散布を行うコントラクター）の連携をアシストするツールや方法を構築・確立した。具体的にはデモデータを用いたアプリケーションの開発を行った。このアプリはトラクターに取り付けた運行履歴を取り込み、そのデータを、消化液散布を行う委託会社が現状管理しているフォーマットに落とし込むことを目指している。将来的には先述した衛星画像を用いるアプリケーションと連動させることを目指すが、現場では役場・農協・

コントラクターすべてが一度に消化液散布データを紙媒体管理からデジタル管理へとトランスフォームすることは様々な理由から困難であると結論できる。このような現在の管理法とトータルでデジタル管理できるアプリケーションを繋げるシステムを開発することで、営農記録のデジタル化はスムーズに進むと考える。

この部分のアプリケーション全体図（図 7）では、トップページで消化液散布を予定している場所やトラクターの運行履歴を作業員や日付などを指定し表示できる。

データ入力

作業日選択
2021/07/01

タンカー1
作業員氏名
作業員1
トラクター番号
1
タンカー番号
1
1分当たり散布量(kg)
50
1 100

タンカー2
作業員氏名
作業員2
トラクター番号
2
タンカー番号
2
1分当たり散布量(kg)
50
1 100

ローリー1
作業員氏名
作業員3
ローリー番号
1
1分当たり散布量(kg)
50
1 100

ローリー2
作業員氏名
作業員4
ローリー番号
2
1分当たり散布量(kg)
50
1 100

入力保存+日報作成
入力リセット
日報ダウンロード

消化液散布量集計アプリ

走行経路
作業機械
タンカー1

消化液散布量
作業員データ

作業員氏名	作業機械名	号車	圃場番号	滞在時間	消化液散布量(t)
作業員1	タンカー	1-1	Naitai74-2	00:25:59	77.95
作業員2	タンカー	2-2	Sugawara13-0	00:53:59	161.95
作業員3	ローリー	1	Naitai74-1	02:18:58	416.90
作業員4	ローリー	2	Suncllover56-0	01:14:00	222.00

集計データ

圃場番号	消化液散布量(t)
Naitai74-1	416.90
Naitai74-2	77.95
Sugawara13-0	161.95
Suncllover56-0	222.00

Made with Streamlit

図 7 消化液散布量集計アプリのトップページ。ページURL : <http://160.251.123.145:8501/demo/>として公開されている。

本アプリは、現在は日報のような形で、毎日作業後に記載する紙媒体の様式を模したものである。ただ、GPS履歴の修正などが必要となる場合も想定し、遡ってデータを確認したり記載したりできるようになっている。過去の作業日を選択することで走行経路や消化液散布量の集計データを確認することが出来る（図 8）。

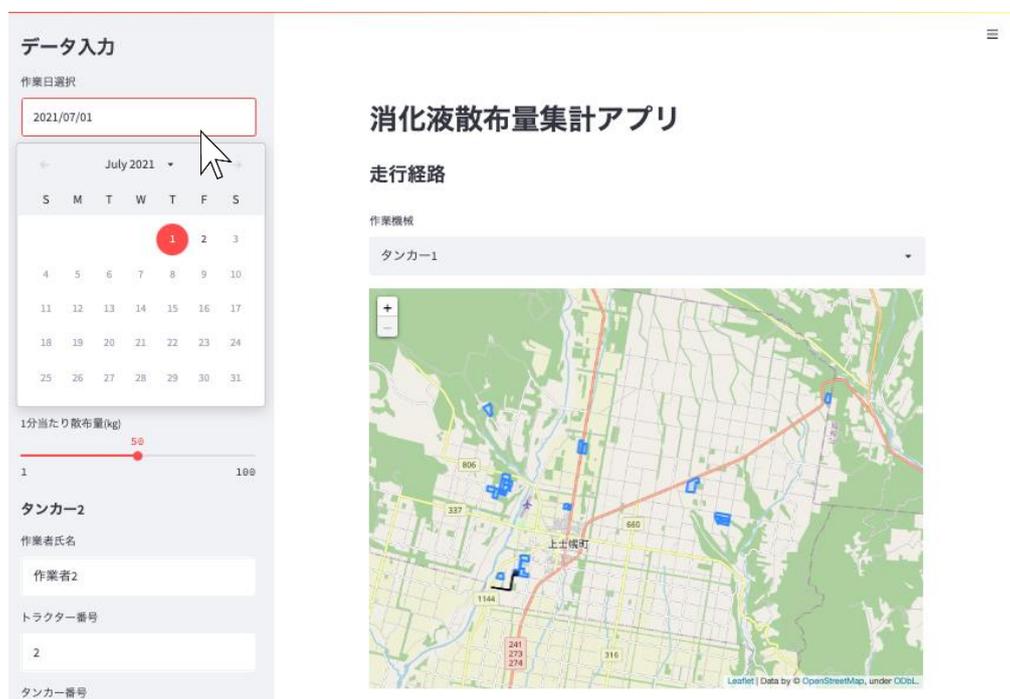


図 8 消化液散布量集計アプリの日付選択画面

また、日報は作業員毎に現在は作成されているため、作業員に応じたデータの編集が行えるようにした。消化液の散布量はこれまでは一律で（例：5^{トン}／10^分）計算せざるを得なかったが、このアプリケーションでGPSの走行履歴（一つの牧区で何分走行したか）が記録されるため、より正確な散布量が計算できるようになった。



図 9 作業者データの編集画面

それぞれの作業者によって行われる消化液散布は下記のような形で記録される（図 10）。図内の黒線が示すように、作業者は消化液貯留槽（図では左下）から牧区（青枠内）を往復し、少しずつ消化液を散布する。GPSはこの場合ローリー1に取り付けているが、牧区内に打たれたGPSのポイント数とポイントを打つ頻度からどの程度のスピードで消化液を散布していたのかを計算することができる。

作業機械

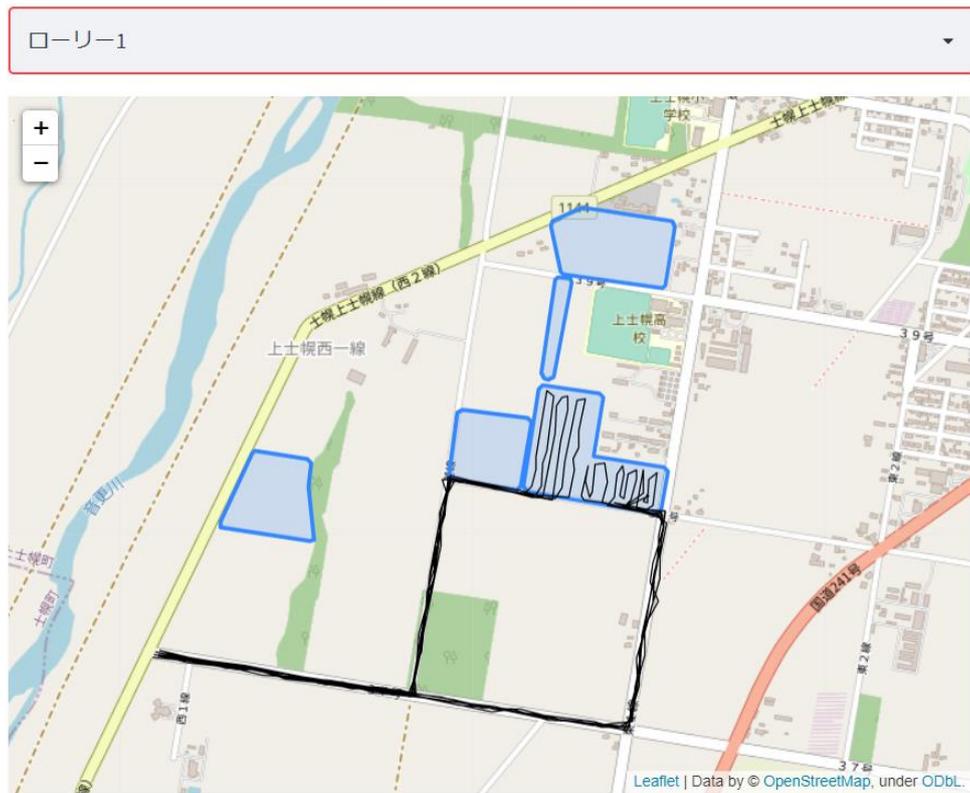


図 10 消化液散布集計アプリ内で記録・表示されるローリーによる消化液散布場所。

これらデータはすべてデータベース化され、必要に応じて牧区の散布履歴などとして出力できるようにしてあるが、日々の作業管理としては、このようなデータを目視等で作業者が確認した後、日報として出力し印刷管理したり、農協等のデータを共有したりできるようにした。具体的には、図 9 の日報ダウンロードボタンから図 12 の日報をスプレッドシート形式で出力できる。作業時間などの勤務時間管理データなども入力しており、給与の計算など従来の方法から以降しやすい形式を目指して本アプリケーションは開発された。



図 11 各種ボタン

農作業受託事業作業日誌（消化液散布作業）										
【日時】	2021年 07月 01日									
【委託者】	TMRセンター 殿									
【作業者並びに勤務時間】				【作業時間】						
会社名	作業者氏名	作業機械名		午前	開始	7時30分				
JA上土幌	作業者1	タンカー			終了	12時00分				
JA上土幌	作業者2	タンカー		午後	開始	13時00分				
JA上土幌	作業者3	ローリー			終了	16時00分				
JA上土幌	作業者4	ローリー		稼働時間	7	時間	30	分		
JA上土幌										
JA上土幌										
【面積・台数確認】										
圃場番号	面積 (a)	確認台数	散布台数	JA担当者 確認署名	燃料	免税軽油	課税軽油			
Naitai74-1	538.19	台	台		使用機械					
					【トラクター】		【タンカー】			
Naitai74-2	262.68				1号車		1号車			
					2号車		2号車			
Sugawara13-0	405.41				号車		号車			
					号車		号車			
Sunclover56-0	312.93				号車		号車			
					号車		号車			
					【ローリー】					
					1号車		2号車			
					号車		号車			
					利用施設					
					上音更 上土幌 北門 萩ヶ岡					
					【タンク 記入不要】					
					1台		494.85 t			
					【ローリー 記入不要】					
					1台		428.35 t			
					* 太枠は記入しない					
					* 確認面積は実測終了後の数値とする					
					* 昼休みは控除する<1時間>					
					* 作業終了後、速やかに担当者へ提出する					
					決裁	検証	作成	合議		

図 12 スプレッドシート形式で出力された消化液散布作業用の日報。

3.3.2. データ蓄積や精度向上のための試験

この部分においては、衛星画像データと牧草等作物の質・量の関連性を継続して評価し、精度を向上させるために、去年度から継続した調査を行った。このような調査を継続して行うことで衛星データの牧草生育予測精度が向上され、我々の開発するツールの信頼度を向上させていく必要があると考えている。

まず、採草地13ヶ所において、2021年の4月20日、5月6日、5月18日、6月1日、6月9日、6月15日、7月8日、7月26日、8月17日に生育および収量調査を行った。1番草の乾物収量は443～867kg/10a、2番草は342～636kg/10aであり1番草収量の方が2番草収量よりもやや多かった。また、圃場間での収量は1番草（11圃場）と2番草（13圃場）ともに約2倍程度の差があった（図 13 (a), (b)）。質に関して、1番草の乾物収量あたりのCPは11.9～16.8%、2番草は10.3～17.3%であり1番草と2番草のCPは同程度であった。また、1番草の乾物収量あたりのNDFは58.5～68.2%、2番草では53.2～61.0%であり、2番草の方が1番草よりもNDFがやや低かった（図 13 (c), (d)）。

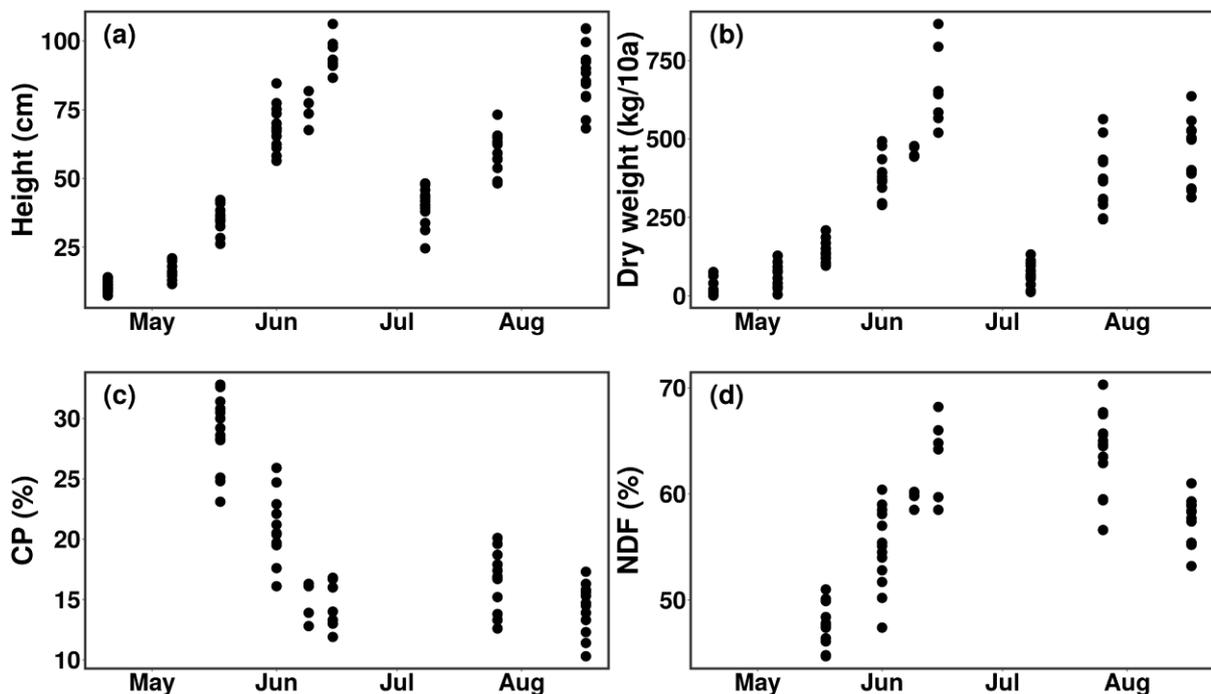


図 13 北海道上士幌町における13ヶ所の採草地における牧草の (a) : 草丈、(b) : 牧草乾物収量、(c) : CP、(d) : NDFの時系列推移。草丈と牧草乾物収量は4月20日～8月17日において計9回の調査を行い、CPとNDFは全調査のうち6回分析を行った。1番草収穫直前の調査は6月9日に4圃場と6月15日に7圃場、2番草収穫直前の調査は8月17日に13圃場で実施した。

Copernicus Open Access Hubから、Level-2AのSentinel-2衛星画像をダウンロードし、以下の指標を計算した。

- $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$
- $EVI = 2.5 \times (NIR - Red) / (NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1)$
- $NDI(B11, B5) = (B11 - B5) / (B11 + B5)$ (Suvarnaら 2021)
- $NDI(B8a, B7) = (B8a - B7) / (B8a + B7)$ (Suvarnaら 2021)

乾物収量、CP、NDFと計算された指数の相関解析を行った。まず、全調査から得られた乾物収量、CP、NDFとそれぞれに対応する指標との相関を調べた。さらに、1番草と2番草収穫時に絞り込んで相関を調べた。

4月20日～8月17での1番草、2番草収穫調査を含む全9回の調査から得られた牧草乾物収量とNDVI、EVIの間には、有意な正の相関関係 ($R^2=0.44$ 、 $R^2=0.53$ 、ともに $P<0.001$) が見られた (図 14)。NDVIの値はEVIの値と比較して、牧草生育のより早い段階で頭打ちとなる傾向がみられた。この傾向がR2値がNDVIより EVIの方が高かった理由として考えられる。

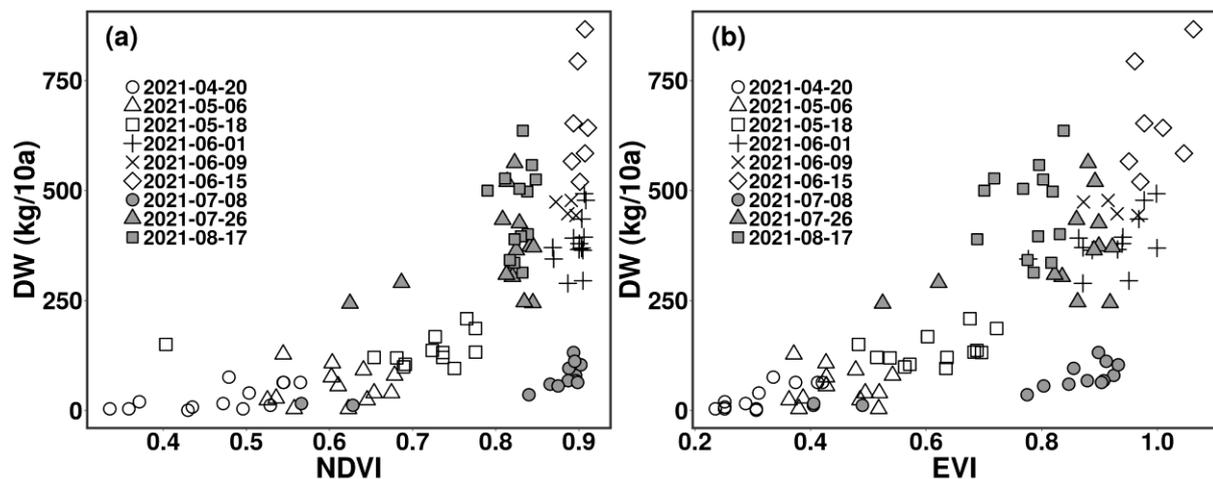


図 14 NDVI及びEVIと牧草乾物収量の関係 (a) : NDVIと牧草乾物収量の関係 (b) : EVIと牧草乾物収量の関係 ; プロットの形が調査日を示し、1番草収穫以降はプロットをグレーで示す。

ここでは、1番草、2番草の収量を予測することを目指して、その時期のデータに絞り込んだ解析を行った。1番草収穫調査時は、NDVI及びEVIはともに牧草乾物収量との間に正の相関関係が見られたが、2番草収穫調査時は、NDVI及びEVIと牧草乾物収量との間に相関関係が見られなかった (図 15)。1番草収穫時のEVIと牧草乾物収量の相関関係 ($R^2=0.41$ 、 $P<0.05$) は、NDVIと牧草乾物収量の相関関係 ($R^2=0.30$ 、 $P=0.079$) より高かった。

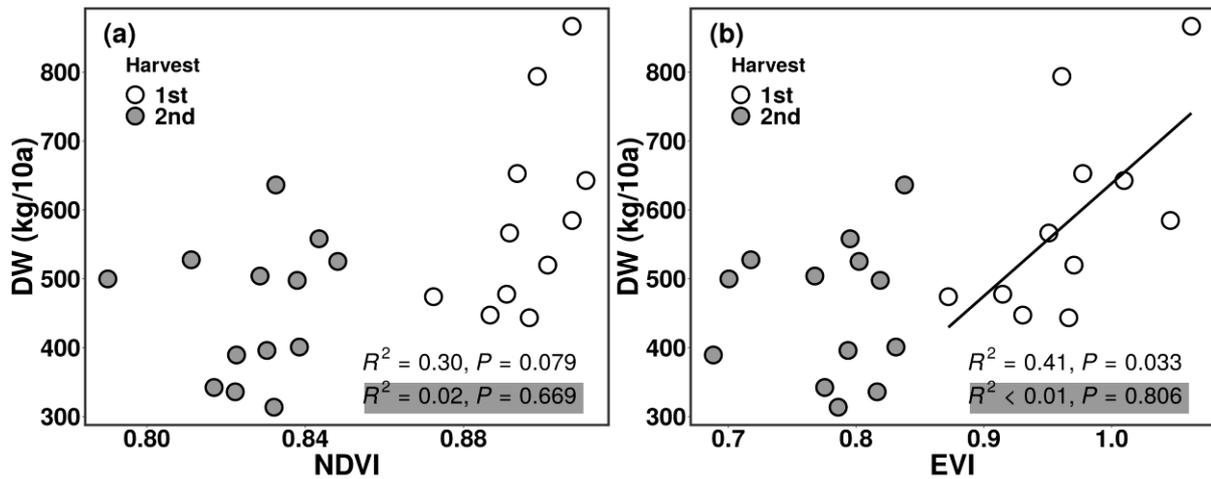


図 15 1番草及び2番草収穫時のNDVI及びEVIと牧草乾物収量の関係 (a) : 収穫調査時のNDVIと牧草乾物収量の関係 (b) : 収穫調査時のEVIと牧草乾物収量の関係 ; ○が1番草収穫調査 (6月9日、6月15日) を示し、○ (グレー) が2番草収穫調査 (8月17日) を示す。

2番草収量とNDVI及びEVIの間には相関関係が見られなかったことから、1番草収穫時と2番草収穫時におけるNDVI及びEVIの値の分布を比較した。また、NDVIに比べてEVIの方が収量との相関が大きかったことから、収穫時のNDVI及びEVIの値の分布を比較した。

NDVIのピクセル値は2番草収穫時の方が1番草収穫時よりばらつきが大きい傾向が見られた (図 16 (a))。EVIのピクセル値も2番草収穫時の方が1番草収穫時よりもややばらつきが大きい傾向が見られた (図 16 (b))。また、NDVIとEVIのピクセル値の分布はEVIの方がNDVIよりもばらつきが大きい傾向が収穫時期に関わらず見られた (図 16)。

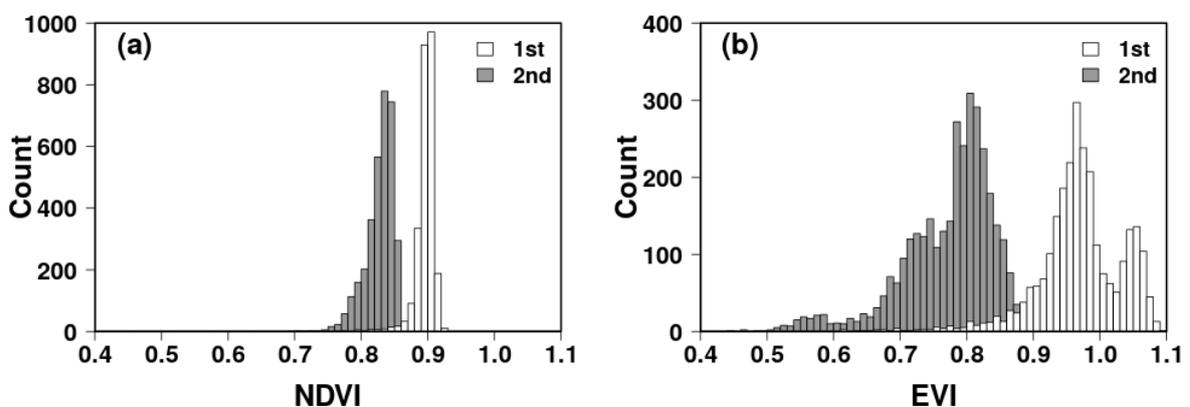


図 16 NDVI及びEVIのピクセル値のヒストグラム (a) : 収穫調査時のNDVIのピクセル値の頻度分布 (b) : 収穫調査時のEVIのピクセル値の頻度分布 ; 白のバーが1番草収穫時。グレーのバーが2番草収穫時のNDVI及びEVIの頻度を示す。

5月18日～8月17日までの1番草、2番草収穫調査を含む全6回の調査から得られたCPと(B11-B5)/(B11+B5)の値の間には相関関係が見られなかった(図17(a))。また、1番草、2番草収穫調査時の(B11-B5)/(B11+B5)の値とCPの間にも相関関係は見られなかった(図17(b))。

5月18日～8月17日までの1番草、2番草収穫調査を含む全6回の調査から得られたNDFと(B8a-B7)/(B8a+B7)の値の間には相関関係が見られなかった(図17(c))。一方、1番草収穫調査時は、(B8a-B7)/(B8a+B7)の値とNDFの間には正の相関関係($R^2=0.47$, $P<0.05$)が見られたが、2番草収穫調査時は(B8a-B7)/(B8a+B7)の値とNDFの間には相関関係が見られなかった(図17(d))。

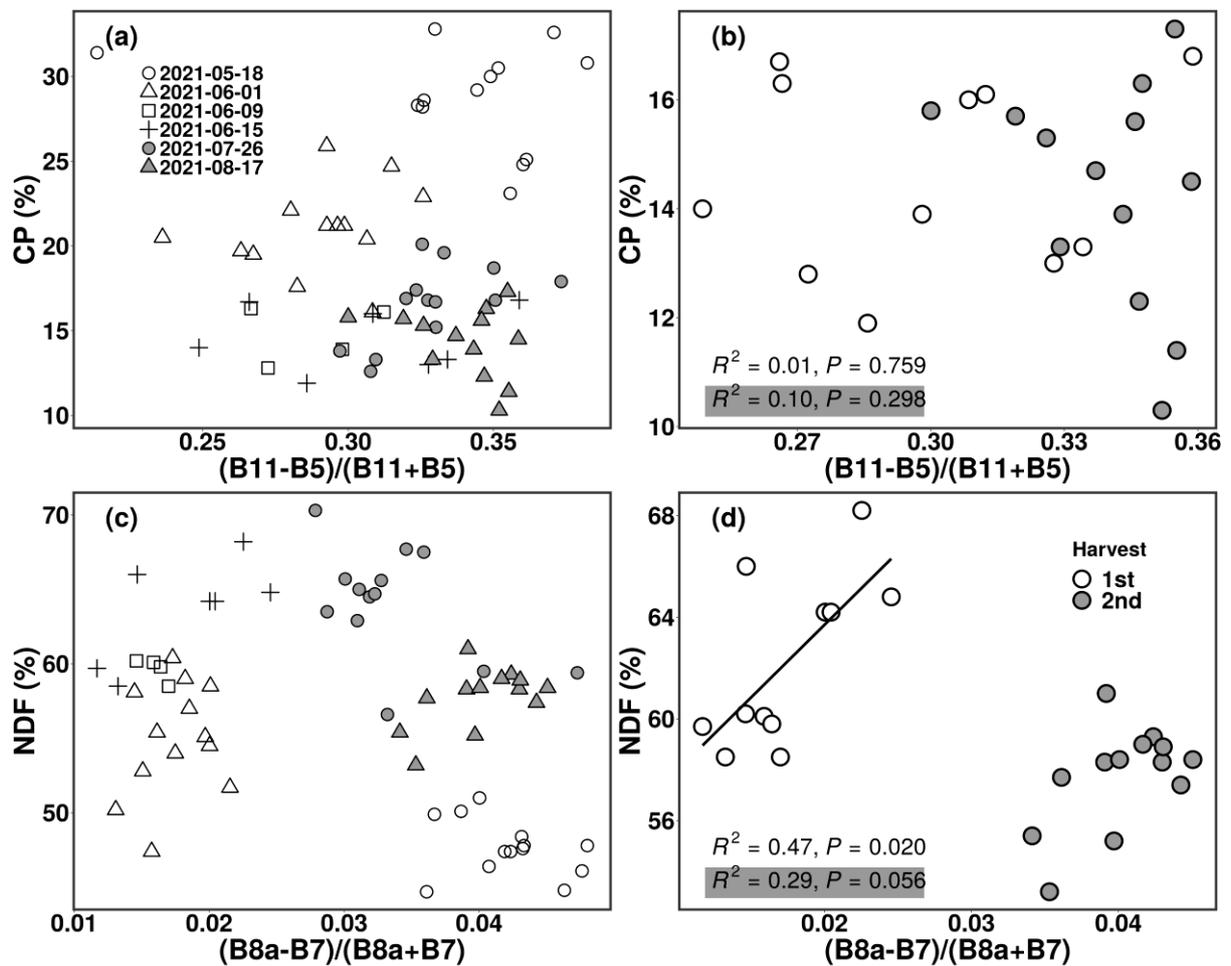


図17 衛星画像から計算された正規化指標とCP及びNDFの関係 (a) : (B11-B5)/(B11+B5)とCPの関係 (b) : 収穫調査時の(B11-B5)/(B11+B5)とCPの関係 (c) : (B8a-B7)/(B8a+B7)とNDFの関係 (d) : 収穫調査時の(B8a-B7)/(B8a+B7)とNDFの関係 ; (a) と (c) はプロットの形が調査日を示し、1番草収穫以降はプロットをグレーで示す。(b) と (d) は○が1番草収穫調査(6月9日、6月15日)を示し、●が2番草収穫調査(8月17日)を示す。

また、この地域において、消化液散布を行う場所として、牧草地と家畜飼料であるデントコーン畑が中心となっている。一方で、これまでの調査で牧草地とデントコーン畑のみで消化液を利用するのは栄養素循環面から見て効率が最適化されていないことがわかってきている。そこで、牧草地以外で消化液の散布が行える場所として、小麦の後に植えられる緑肥に注目した試験を町と連携して行った。緑肥の生育を向上させるために従来、硫安などの化学肥料が用いられてきたが、その代替として消化液を用いることができるかを調べる研究を本年度行った。また、消化液の効果について不明である、もしくは信頼していない等の理由から、消化液と化学肥料両方を散布している場所もこの地域で観られるため、両方散布した場合さらなる生育向上は見られないと仮定した試験も行った。具体的には3件の圃場を選定し、消化液のみ、消化液+硫安、硫安のみの三試験区を隣り合わせて設け、緑肥生育を調査した。

結果として、消化液は硫安の代替として同等の効果があることがわかった。具体的には硫安のみ散布した区に比べて、消化液のみを散布した区で25%ほど収量を増加させることができた。この結果から、消化液は緑肥に用いられる硫安（20kg/10a）の代替として有効に活用できることがわかった。図 18～図 20に示すように、緑肥の生育中ドローンを用いたNDVI指数の評価も行った。その結果、硫安のみを散布した試験区と消化液のみを散布した試験区はNDVI指数の大きな変化は見られなかった。一方で硫安と消化液両方を用いた試験区は他二試験区と比較してNDVI指数が増加した場合（図 18と図 19）と逆に減少傾向を示す場合（図 20）が観察された。この変化は元々の土壤に栄養素が多く含まれているかいないかにより、過剰な栄養素散布が生育阻害を引き起こすか否かが決定されるからではないかと推察できる。試験区が小さいため、衛星画像を用いた同様の検証は困難であったが、現場ではより広い範囲に緑肥が栽培されるため、類似のアルゴリズムを用いた消化液の効果の検証が可能となることが示唆されている。

緑肥は食用作物ではなく、畑地に鋤き込まれるという特徴があり、今後消化液の利用が進みやすいと考えられる。小麦の後にすべての農業従事者が緑肥を作付けするわけではないが、上土幌町だけで小麦の作付け面積は600haあり（2020年農林業センサス）、これら広大な緑肥畑に消化液が利用できれば、消化液散布量がhaあたり100トンを超えている草地もあるこの地域の現状を踏まえ、そのような場所の消化液量を減らせることができる。

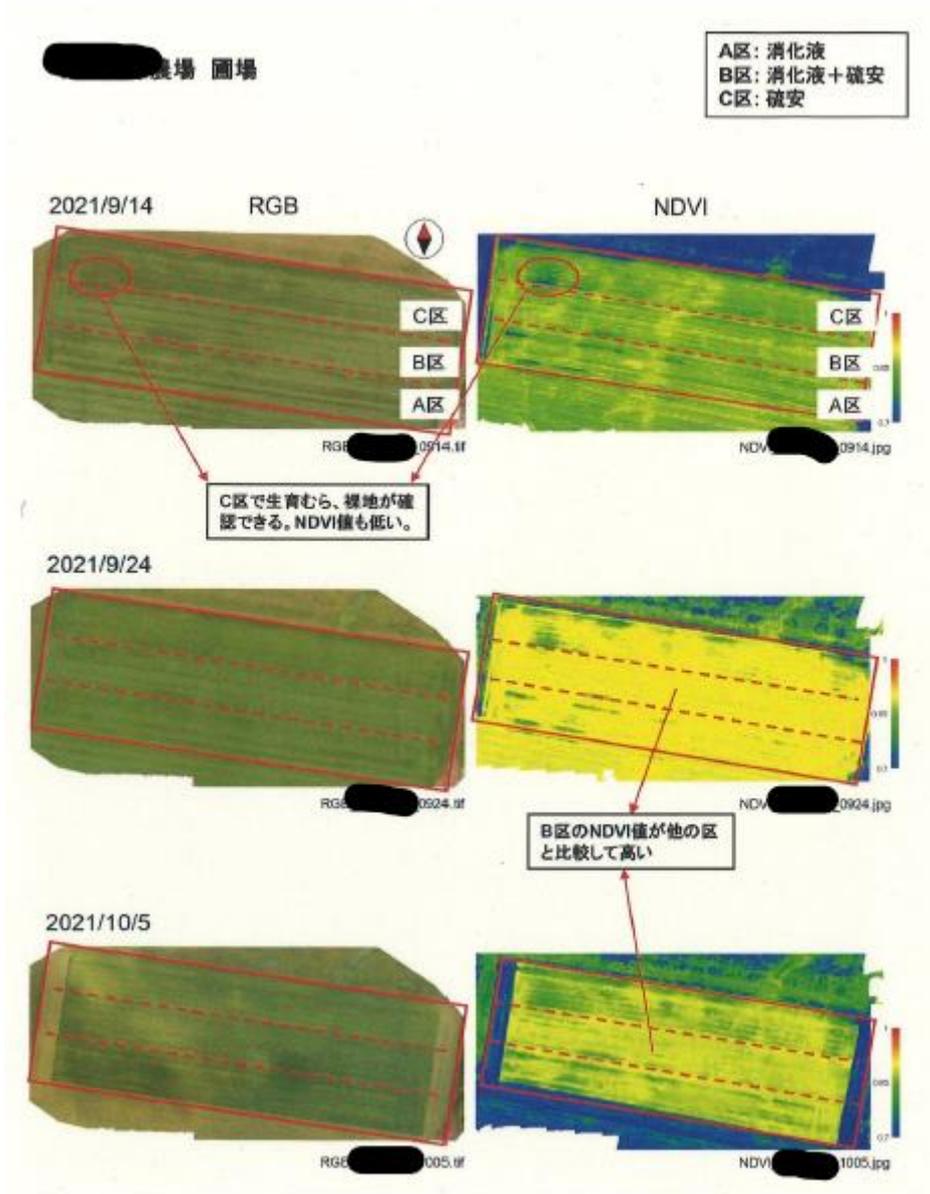


図 18 緑肥試験圃場 (A圃場) のUAV画像

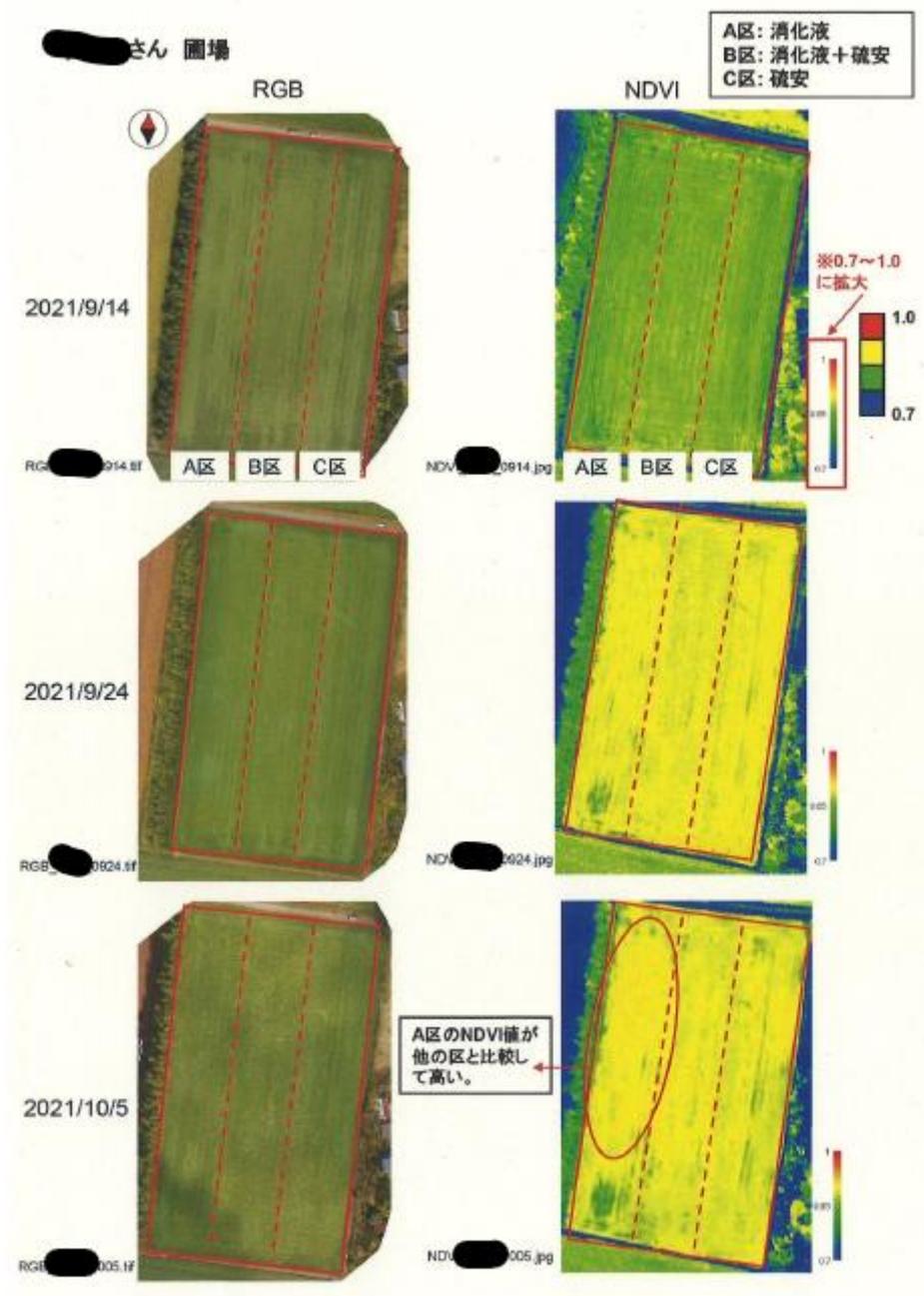


図 19 緑肥試験圃場 (B圃場) のUAV画像

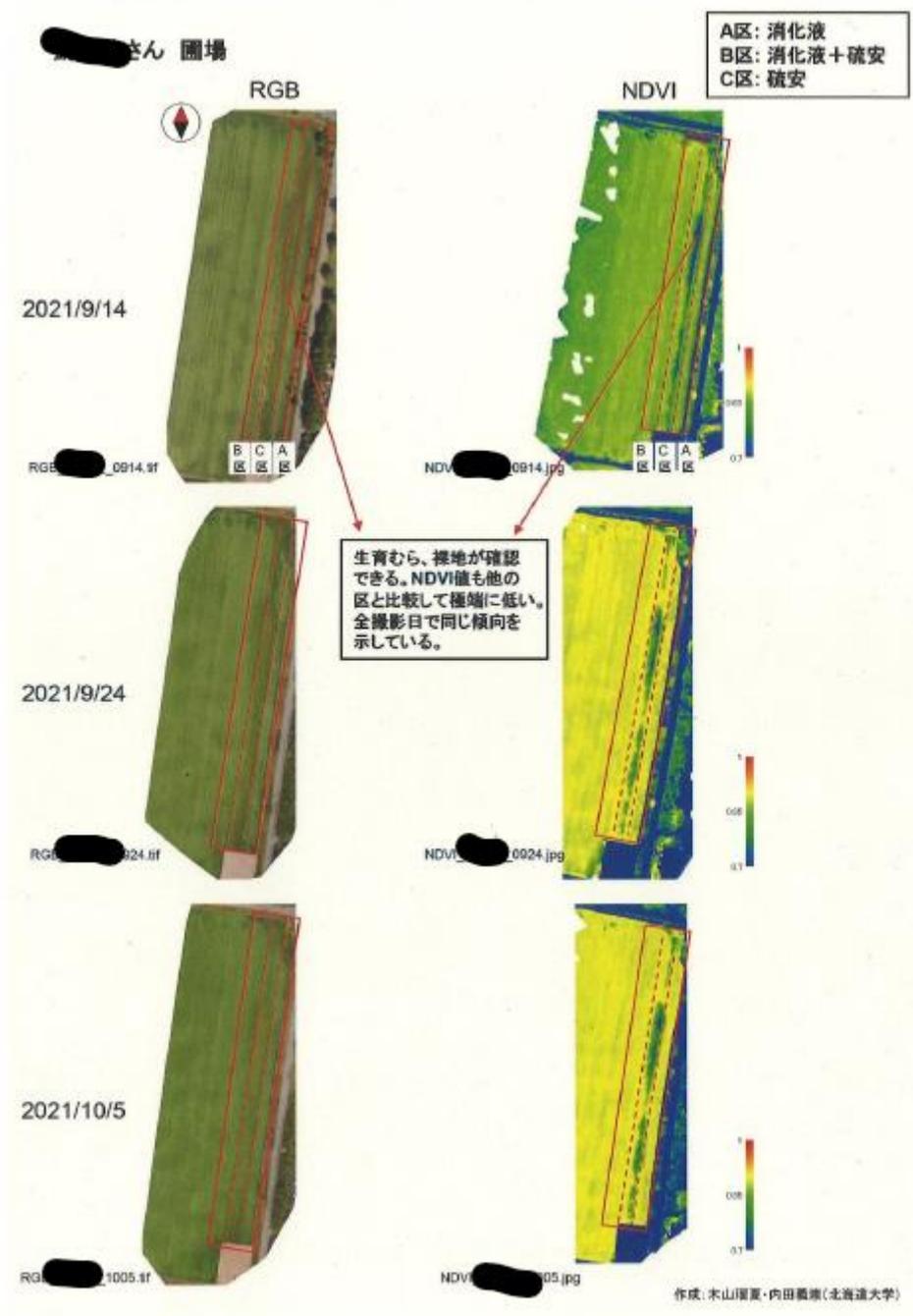


図 20 緑肥試験圃場 (C圃場) のUAV画像

4. まとめ

本プロジェクトは最終年度となったが、概ね目的を順調に達成することができた。二つの家畜糞尿由来廃棄物の農地散布最適化を目指すシステムを開発し、一つは衛星画像利用と過

剰散布防止を目指し、もう一つは既存の作業日報作成業務からのスムーズな移行を目指すと同時に、散布量のばらつきというこれまで調べられていなかった部分を定量することを目的としたアプリケーションとして完成させた。プロジェクト全体としては期間中に消化液散布面積は広がりを見せたが、今後は消化液散布がこれまであまり普及していない土地利用への応用が必須となる。このような背景で町と連携して行った緑肥（小麦後に作付けする被覆植物）への消化液散布効果に関しては、衛星だけではなくドローンや地上撮影などを駆使し衛星画像の精度や年毎のばらつきなどを評価することができた。このような研究は来年度も一部継続する予定であり、継続することでデータの信頼度も高まっていくことが期待される。現場の衛星画像への期待度は高いことは実感できたが、衛星画像を利用するためには営農履歴（作業データ）の効率の良い収集が必須である。この部分のデジタル化やデータの有効な利活用という部分でさらなる取り組みが必須であることもこのプロジェクトを通して理解できた。これまで紙媒体やFaxのやり取りなどで管理されていた多量のふん尿管理データを今後は段階的にデジタル化する必要がある、そのことで町全体でのふん尿由来栄養素利用効率を向上させるための段階的目標やそれぞれのステークホルダーのアクションを制定できる。このような動きを作るためには本事業成果である異なるシステムを利活用しながら、継続した地上での踏査を行う必要がある。