

ドローンによる空撮画像を用いた水稻の除草剤による生育抑制評価法の検討

宮原克典*・田中美咲¹⁾・奥野竜平・石丸知道・柴戸靖志

水稻除草剤の適用性試験においては、除草効果とともに薬害程度を評価する必要がある。薬害程度を正確に評価するためには、薬害による草丈・茎数の増加抑制や葉色低下などの生育抑制の程度を正確に評価しなければならない。生育抑制の評価は評価者による達観調査をもとに行われていることから、熟練を要し、困難性が高い。本研究では、生育抑制程度を客観的に評価するため、ドローンから撮影した空撮画像を用いて、植被率、NDVIを算出することにより、生育抑制程度の数値化を試みた。植被率、NDVIは、いずれも達観により評価した生育抑制程度と高い相関が認められたほか、草丈および茎数との相関も認められ、生育抑制の程度を的確に捉えることができる指標であると考えられた。このことから、ドローンを用いた撮影画像より算出される植被率やNDVIは、生育抑制程度を正確に把握するのに優れており、薬害程度の評価に活用できることが示された。

[キーワード：画像診断、NDVI、リモートセンシング、植被率、UAV]

Evaluation Methods of Growth Inhibition Degree in Rice Caused by Herbicide, Using Images Photographed by Drone. MIYAHARA Katsunori, Misaki TANAKA, Ryohei OKUNO, Tomomichi ISHIMARU and Yasushi SHIBATO (Fukuoka Agriculture and Forestry Research Center, Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. For. Res. Cent.* 7: 60-65 (2021)

When testing herbicides for rice, the degree of phytotoxicity and herbicidal effects should be examined. Growth inhibition markers, such as the length of the plant and number of tillers, should be evaluated accurately to determine the degree of phytotoxicity. It is difficult to determine the degree of phytotoxicity because the evaluators are required to have the skill of determining the degree of phytotoxicity through sensory evaluation. In this study, we attempted to quantify growth inhibition using vegetation cover rate and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which were calculated from airborne images photographed by a drone. Both vegetation cover rate and NDVI had high correlations with growth inhibition markers, such as the length of the plant and the number of tillers; thus, they were confirmed to be superior indices for evaluating the degree of growth inhibition and biomass. Therefore, vegetation cover rate and NDVI were appropriate in quantifying the degree of growth inhibition and were confirmed useful in evaluating the degree of phytotoxicity.

[Key words: image-analysis, NDVI, remote sensing, UAV, vegetation cover rate]

諸言

水稻生産において、除草剤施用による雑草防除は安定的な収量の確保に欠かせない技術である。新たに開発された除草剤は、農薬登録を取得するために全国の公設試験場などにおいて、適用性試験が実施される。水稻除草剤試験実施基準（日植調2020改訂）において、適用性試験では、除草効果に加え、薬害程度の調査が求められている。薬害は水稻の草丈、茎数、葉色などの形質に現れるが、多くの剤を同時に評価する試験において、すべての試験区の生育調査を経時的に行うことは困難であることから、評価者の観察による達観評価が重要な役割を果たすこととなる。しかしながら、薬害の達観による評価には熟練を要し、困難性が高い項目の一つであることから、客観的で簡便な方法が求められている。

一方、近年リモートセンシング技術の発達とドローンと呼ばれるラジコン電動マルチコプターの登場により、空撮画像を用いた農作物の生育診断技術の発展が目覚ましい。水稻では、植物の活性を示す代表的な植生指数である Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) を

指標に草丈や茎数などの推定や倒伏リスクの診断が可能であること（濱ら2016、田中・近藤2016）や、NDVIと草丈に高い相関がみられること（濱ら2018a）、出穂期後15日のNDVIが玄米タンパクと高い相関を示すこと（濱ら2018b）などが報告されており、空撮画像を用いて水稻の生育や品質をモニタリングする試みがなされている。空撮画像の利活用は、露地野菜品目にも広がりを見せており、パレイシヨ疫病抵抗性検定圃場を空撮し、画像から病害抵抗性を評価した例（Sugiura *et al.* 2016）が報告されている。また、キャベツでは収穫時のNDVIと球重に高い相関が認められること（Yang *et al.* 2008）や、画像解析により算出した生育初期の投影葉面積が収穫時の球重と高い相関が認められること（柝原ら2020）が報告されるなど、リモートセンシング技術は活用場面の多様化が加速している。

本研究ではドローンを用いた空撮画像解析により、水稻除草剤試験における薬害程度の数値化を試みた。草丈や茎数が抑制される生育抑制を対象とし、水稻の生育量を評価するために、空撮画像を用いて面積当たりに植物が占める割合を算出した「植被率」および近赤外画像から

*連絡責任者（豊前分場：miyahara-k0609@pref.fukuoka.lg.jp）

1) 現 福岡県福岡農林事務所福岡普及指導センター

受付2020年7月7日；受理2020年9月10日

算出した植生指数「NDVI」を求め、評価者の達観調査による生育抑制程度との関係を調査した。この結果をもとに、薬害によって生じた生育量の差を正確に評価するための、空撮画像から得られる植被率やNDVIの活用方法について考察したので報告する。

材料および方法

1 耕種概要

2019年に農林業総合試験場豊前分場15号圃および農林業総合試験場農産部第2水田11号圃において試験を実施した。品種は豊前分場では「夢つくし」、農産部では「元気つくし」を用い、豊前分場で6月4日、農産部で6月13日に移植した。豊前分場では3種類の初中期一発処理除草剤を移植後0～14日の間に処理することにより8水準の区を設け、水稻の生育に影響が小さいとされるピラゾレート粒剤を基準量施用した完全除草区を基準区とした。試験規模は5m²/区とし、16区を対象として評価した。農産部では、初中期一発処理除草剤と生育調節剤を組み合わせることにより4水準の区を設け、ピラゾレート粒剤を基準量施用した完全除草区を基準区とした。試験規模は4m²/区とし、14区を対象に評価した。

2 生育抑制程度達観評価および水稻生育調査

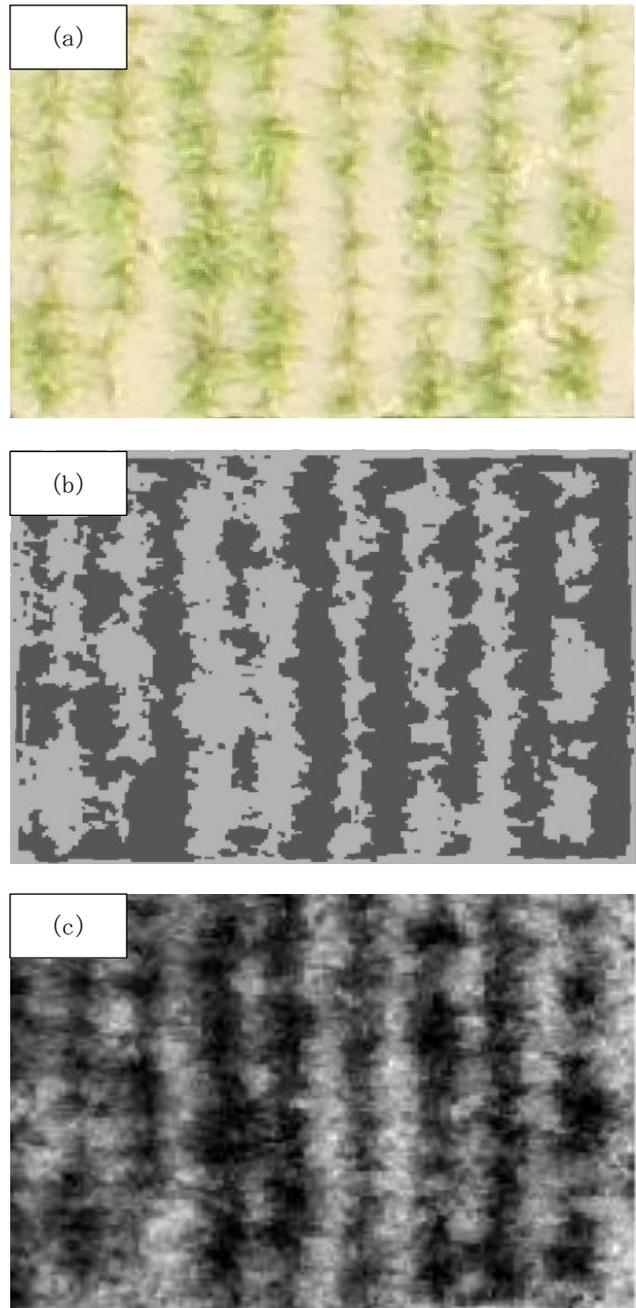
調査は豊前分場では7月8日、農産部では7月4日に実施した。生育量の評価について、観察評価値として、基準区的水稻の生物体量を100とし、各試験区の生物体量を達観により評価した値を用いた。生物体量の達観評価は、草丈、茎数、葉身の幅、葉鞘の太さ、葉色などを勘案し、総合的に判定した。さらに、農産部では各試験区の草丈、茎数を調査した。草丈および茎数は各区10株を調査し、その平均値を区の値とした。

3 画像撮影

撮影は豊前分場では7月8日、農産部では7月5日に実施した。撮影にはドローン Inspire1 (DJI社)を用い、撮影カメラは可視光画像には ZenmuseX3 (DJI社)、近赤外画像には Yubaflex (BIZWORKS社)を用いた。これらを機体下部の水平箇所固定し、2台同時に撮影を行った。撮影の設定は、シャッタースピード優先モード、シャッタースピード 1/1000 秒、ISO 感度 Auto、オーバーラップ率・サイドラップ率各 60%とし、鉛直写真を撮影した。インターバル間隔は ZenmuseX3 で 2 秒、Yubaflex で 4 秒とし高度 30mから撮影した。

4 画像解析

撮影された画像を SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) ソフトウェア Metashape professional v1.5 (Agisoft社)に取り込み、オルソモザイク画像(第1図(a))を作成した。オルソモザイク画像は、可視光画像と近赤外画像それぞれ作成した。作成されたオルソモザイク画像を、オープンソースの地



第1図 豊前分場で撮影した可視光画像と植被率、NDVIの算出に用いた画像

- 1) (a) 可視光画像から作成されたオルソモザイク画像、(b) 植物と植物以外に分類した画像、白が植生、(c) 近赤外カメラで撮影した画像からNDVIに変換した画像、色が濃いほどNDVIが高い

理情報システムソフトウェア QGIS3.0.1 に読み込み、解析に用いた。植被率の算出では、可視光画像から作成したオルソモザイク画像を基に、QGISのプラグイン「Semi-Automatic Classification Plugin」の教師付き分類を用いた。教師付き分類では、作業者が画像上で植生と植生以

外のピクセルをトレーニングサンプルとして抽出し、ソフトウェアにおいて試験区内の全てのピクセルを植生と植生以外に分類した(第1図(b))。それぞれの試験区において植生に分類されたピクセルの割合を算出し、植被率とした。NDVI(第1図(c))は、近赤外画像から作成したオルソモザイク画像を基に以下の式にて算出し、試験区内の各ピクセルが持つNDVIの平均値を試験区の値とした。

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)$$

※IR:近赤外域の反射率, R:可視域赤の反射率

また、農産部ではドローン空撮画像による植被率とNDVIの算出に加え、小型携帯型NDVI測定器GreenSeekerHandheld Crop Sensor(株式会社ニコン・トリンプル,以下GreenSeeker)を用いて、各試験区のNDVIを調査した。GreenSeekerは地際から1mの高さから3秒間トリガーを引き、測定した。ここでは両NDVIを区別するため、それぞれdNDVI(空撮画像)およびgsNDVI(GreenSeeker)と記載する。

結果

1 観察評価値と植被率の関係

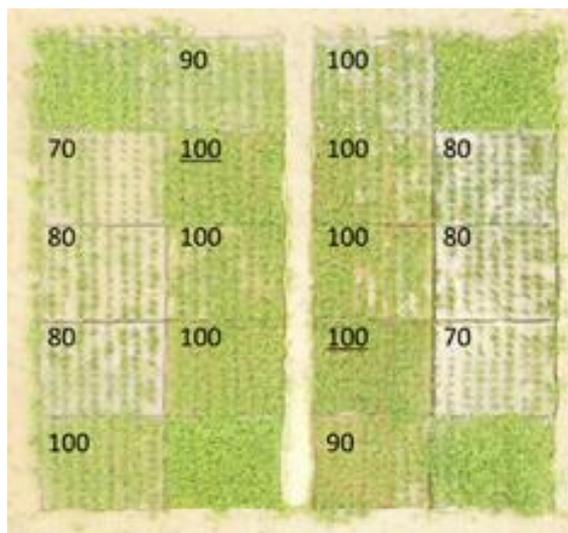
豊前分場では全16試験区中、観察評価値「100」と評価された試験区は基準区を含めて8区、「90」が2区、「80」が4区、「70」が2区となった(第2図)。植被率は、基準区がそれぞれ93%、89%であったのに対し、試験区では22~92%に分布し、観察評価値が高いほど植被率は高い傾向にあった。観察評価値と植被率の相関係数は $R=0.91$ ($P<0.001$)と有意であった(第3図(a))。

農産部では、14試験区中、観察評価値「110」と評価された区が2区、「100」が基準区を含めた5区、「90」が2区、「80」が3区、「70」が2区であった。植被率は、基準区がそれぞれ58%、49%であったのに対し、試験区では16~61%に分布し、豊前分場と同じく観察評価値が高いほど植被率は高い傾向が認められた。観察評価値と植被率の相関係数は $R=0.73$ ($P=0.003$)と有意であった(第3図(b))。

2 観察評価値とNDVIの関係

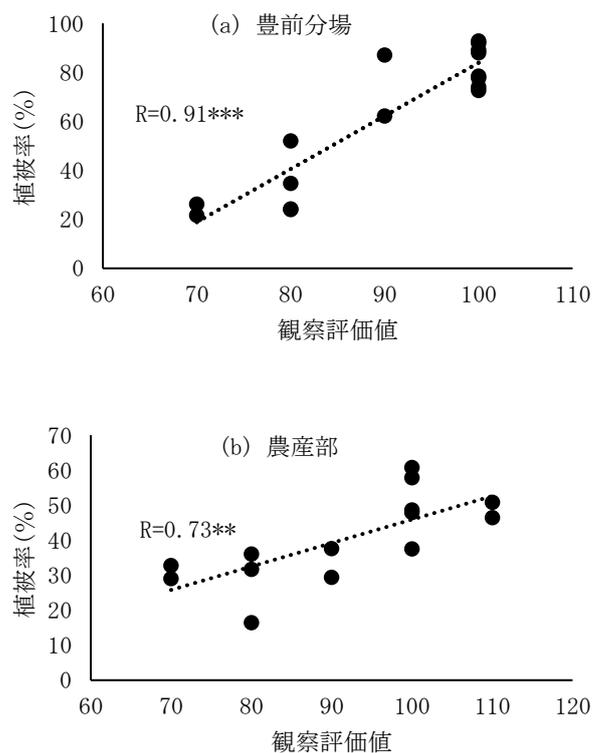
豊前分場での全16試験区におけるNDVIは、基準区の0.27、0.28に対し、 $-0.03\sim 0.28$ に分布し、観察評価値が高いほどNDVIは高かった。観察評価値とNDVIの相関係数は $R=0.96$ ($P<0.001$)と有意であった(第4図(a))。

農産部の全14区において、ドローンによる空撮画像から得られたdNDVIは、基準区の -0.071 、 -0.085 に対し、試験区では $-0.178\sim -0.039$ に分布し、観察評価値が高いほどdNDVIは高かった。観察評価値とdNDVIの相関係数は $R=0.83$ ($P<0.001$)と有意であった(第4図(b))。



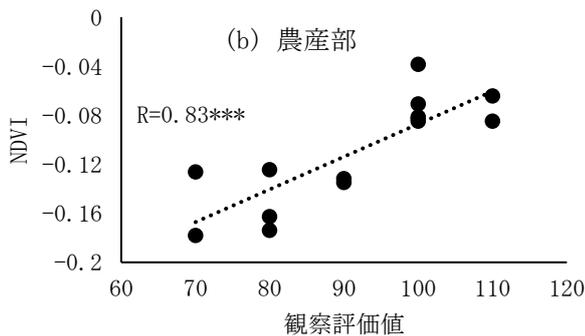
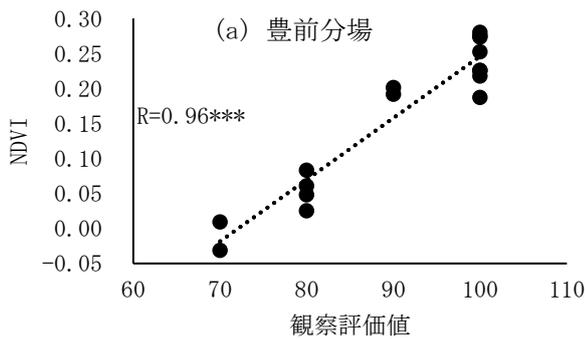
第2図 ドローンから撮影された画像をもとに作成されたオルソモザイク画像と遠観調査による観察評価値(豊前分場)

1) 数字は観察評価値, 下線は基準区



第3図 観察評価値と植被率の関係

1) 相関係数Rの***, **はそれぞれ0.1%, 1%水準で相関が有意であることを示す



第4図 観察評価値とNDVIの関係

- 1) 相関係数 R の***は 0.1%水準で相関が有意であることを示す

3 GreenSeeker を用いた NDVI (農産部)

GreenSeeker により得られた gsNDVI は 0.14～0.37 に分布し、観察評価値が高いほど gsNDVI は高かった。観察評価値と gsNDVI の相関係数は $R=0.76$ ($P=0.002$) と有意であった。また、gsNDVI と dNDVI の相関係数は $R=0.78$ ($P=0.001$) で有意であった。さらに、gsNDVI と 植被率の相関係数は $R=0.73$ ($P=0.003$)、dNDVI と 植被率の相関係数は $R=0.89$ ($P<0.001$) と相互に有意であった (第1表)。

4 草丈、茎数と各種指標の関係

農産部では、観察評価値に加え、草丈および茎数の調査を実施した。草丈と茎数の相関係数は $R=0.70$ ($P=0.005$) と有意な相関が認められ、生育抑制は草丈と茎数に同時に現れた。観察評価値との相関係数は草丈で $R=0.74$ ($P=0.002$)、茎数で $R=0.73$ ($P=0.003$) といずれも 1%水準で有意であり、観察評価値は草丈および茎数の差異を精度高く表現していた。植被率、dNDVI、gsNDVI の草丈および茎数との相関係数はいずれも 5%水準で有意であったが、観察評価値との相関係数に比べ全体的に低い傾向であった (第2表)。

第1表 観察評価値、植被率、dNDVI、gsNDVI の相関係数 (農産部)

	観察評価値	植被率	dNDVI	gsNDVI
観察評価値	1	0.73**	0.83**	0.76**
植被率		1	0.89**	0.73**
dNDVI			1	0.78**
gsNDVI				1

- 1) dNDVI はドローンから撮影した近赤外画像により算出された NDVI、gsNDVI は携帯型 NDVI 測定器 GreenSeeker により計測された NDVI
- 2) **は 1%水準で有意な相関であることを示す

第2表 草丈および茎数に対する観察評価値、植被率、dNDVI、gsNDVI (農産部)

	観察評価値	植被率	dNDVI	gsNDVI
草丈	0.74**	0.60*	0.66*	0.62*
茎数	0.73**	0.65*	0.69**	0.74**

- 1) dNDVI はドローンから撮影した近赤外画像により算出された NDVI、gsNDVI は携帯型 NDVI 測定器 GreenSeeker により計測された NDVI
- 2) **, *はそれぞれ 1%, 5%水準で有意な相関であることを示す

考 察

本研究では、除草剤の影響による生育抑制程度について、達観による生育量の評価と空撮画像から得られる植被率や植生指数 NDVI の関係を調査した。また、携帯型の NDVI 測定器 GreenSeeker で同様に NDVI を調査するとともに、草丈や茎数と各種指標の関係について調査し、葉害などによる生育抑制程度の評価への活用について検討した。

豊前分場では、草丈、茎数の減少に起因すると考えられる生育量の低下や、葉色の低下といった症状の葉害が観察され、農産部でも同様に生育量や葉色の低下をもたらす葉害が認められた。ドローンから撮影した画像により得られた植被率をみると、豊前分場の植被率の分布が 22～92%であったのに対し、農産部では 16～61%であった。これは、豊前分場の調査日が移植後 34 日、農産部の調査日が移植後 21 日で、豊前分場の方が水稻の生育が進んでいたためと考えられる。達観評価の判定と植被率には有意な相関が認められ (第3図)、達観調査において生育抑制程度が大きかった試験区では、植被率が低く算出された。このことから、植被率による生育抑制程度の評価には、高い信頼性があると考えられた。植被率は 100%を超えることが無いことから、生育が進むことにより植被率が 100%に到達した後は、生育量の増加を測ることができな

い。今回の試験では、移植後 34 日目で 90%を超える試験区も多く見られたことから、植被率による生育量の評価を活用できる期間は、移植後 35 日程度までと考えられた。

植被率が面積における植物の占める割合を示す数値であるのに対し、植物の活性を示す NDVI は、葉色と関連の深いクロフィルや植物体内の窒素濃度も反映された指数(安積・志賀 2003)であるため、単位面積当たりの NDVI は、植被率の要素に加え、草丈や葉色の要素も含めた総合的な生育量を捉えるのに適していると予想された。実際に、試験区あたりの NDVI と観察評価値との相関係数は、植被率と観察評価値の相関係数に比較して、豊前分場でも農産部でも高かったことから(第 4 図)、NDVI は達観で生育量や葉色を総合的に捉えた観察評価値に、より近い指標であると考えられた。濱ら(2016, 2018a)は、生育初期から幼穂形成期までの期間は、NDVI が草丈および茎数の増加と関係が深いことを報告している。今回の試験でも一致する結果であったことから、NDVI は植被率と同様に優れた生育抑制程度の指標になると考えられた。

今回の試験においては、雑草の発生が無い条件で実施したことから、植被率や NDVI を水稻の生育量として判断することが出来た。しかしながら、雑草が発生している条件下では、水稻と雑草の区別が困難であることから、植被率や NDVI を水稻の生育量として判断することは出来ない。この点については、十分に留意が必要であるとともに、今後の研究の発展により改善されることに期待したい。

植被率と NDVI はいずれも、水稻の生育量を評価するのに優れた指標であることが示されたが、NDVI の測定には近赤外カメラが欠かせない。本研究では、近赤外カメラを自作のアタッチメントを用いてドローンに装着することにより撮影を行った。NDVI を算出するためには近赤外カメラを準備し、ドローンに装着するなど設備を整える必要がある。これに対し、可視光カメラは調達が容易であり、ドローンに標準で付属するカメラを使用できることから、コストを含めた事前準備におけるメリットは大きい。逆に、QGIS3.0.1 による植被率の算出では、植生と植生以外を分類する手順が必要であり、NDVI の算出に比較するとわずかではあるが手間を要する。植被率と NDVI の算出におけるメリットとデメリットはそれぞれ存在するが、生育量の評価においては、植被率も NDVI も同等の精度が認められたことから、どちらの指標を活用するかについては使用できる設備などの環境に応じて判断することで十分と考えられる。

NDVI については、小型携帯型の装置も開発されており、今回は GreenSeeker を用いて得られた gsNDVI と、近赤外カメラ Yubaflex による dNDVI との関係について評価した。gsNDVI は dNDVI との間に有意な相関が認められ、観察評価値との相関も有意であったことから、GreenSeeker はドローンと近赤外カメラを用いる方法と同様に、生育量の評価に活用できると判断された(第 1 表)。Yubaflex が自然光条件下で赤(600-850nm)と近赤外(700-1050nm)の波長を撮影するのにに対し、GreenSeeker は柄に付随するトリガーを引くことで、赤色光(ピーク波長 660nm、

25nmFWHM)と赤外光(ピーク波長 780nm, 25nmFWHM)を照射し、反射される光を測定することによって NDVI を算出する。こうした違いにより、それぞれの機器により得られた NDVI の絶対値は一致しないが、相対的な生育量を判定する上では、機器の違いによる判定への影響はなかった。残念ながら、GreenSeeker は 2019 年 11 月に販売終了となったが、NDVI を指標とした生育抑制程度の評価においては、ドローンの活用が前提となるものでは無く、携帯型の NDVI 測定器などを用いることで得られる NDVI も十分に活用できると考えられた。

ここまで、実用場面を想定し、観察評価値を軸とした植被率や NDVI の活用について考察を進めてきたが、実際の草丈や茎数との関係についても考察していきたい。はじめに観察評価値と草丈や茎数との関係を見ると、観察評価値は草丈、茎数それぞれと有意な相関が認められた(第 2 表)。

次に草丈について見ると、植被率、dNDVI、gsNDVI との相関係数はいずれも 5%水準で有意であった。濱ら(2018b)は、NDVI を用いて草丈の推定ができることを報告しており、今回の結果とも一致した。しかしながら、草丈と植被率、dNDVI、gsNDVI との相関係数は、草丈と観察評価値の相関係数に比較するといずれも低く(第 2 表)、草丈に現れる生育量の差を捉える能力は評価者が行う達観評価がやや優れている可能性も考えられた。草丈は、上空から鉛直に見下ろした植被率には反映されにくいと推察され、同様に上空からの画像から算出された dNDVI にも反映されにくかった可能性が考えられた。

茎数との関係では、gsNDVI、dNDVI、植被率の順に相関係数が高く、特に gsNDVI、dNDVI は 1%水準以上で有意な相関となっており、NDVI は達観評価と同等の精度で茎数の多少を評価できると判断された(第 2 表)。上空から撮影した画像により、単位面積における植物の占める割合を示す植被率は、茎数を反映するのに適していると予想されたが、茎数と植被率の相関係数は gsNDVI や dNDVI に比較して低かった。しかしながら、5%水準で有意な相関が認められていることから、相対的な茎数の比較においては、十分に利用できると判断された。

薬害程度を判定するためには、ある時点における草丈、茎数、葉色などの情報のみならず、局所的な障害の発生や、回復に要する時間、回復後の生育など様々な要因を総合的に判断する必要がある。さらに、生育抑制以外にも葉の萎凋、奇形、変色などといった症状を示す薬害が存在する。そのため、ある時点の植生指数のみをもとに薬害程度を判定することは避けなければならないが、生育量の正確な評価は薬害程度の評価には欠かせないプロセスの一つである。先にも述べたように、達観による生育抑制程度の評価には、熟練による一定の技能が必要であることから、評価者による評価の誤差はある程度避けられない。しかしながら、こうした植生指数などの客観的数値を活用することにより、その誤差を抑えられる可能性が示された。このように、画像解析を用いた客観的な生育量の把握は、薬害程度を正確に評価するための強力なツールになると

考えられる。

生産現場で、生産者がより安全に安心して除草剤を使用できるように、農薬登録の可否を判断する除草剤試験においては、薬害程度を的確に評価する必要性は極めて高い。ドローンから撮影した空撮画像を用いた客観的な生育量の判定は、除草剤試験における薬害程度の評価に有効に活用できると考えられることから、本手法を発展させることにより、より正確な薬害程度の判定を行うことで、より安全で効果の高い除草剤の開発に寄与していることを期待している。

引用文献

安積大治・志賀弘行(2003) 水稻成熟期の SPOT/HRV データによる米粒蛋白含有率の推定. 日本リモートセンシング学会誌 23 : 451-457.

濱 侃・早崎有香・望月 篤・鶴岡康夫・田中 圭・近藤昭彦(2016) 小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稻生育モニタリング. 水文・水資源学会誌 29 : 44-54.

濱 侃・田中 圭・望月 篤・新井弘幸・平田俊之・八幡竜也・鶴岡康夫・近藤昭彦(2018a) UAV リモートセンシングおよび日射量を用いた水稻の草丈と収量の推定. 水文・水資源学会誌 31 : 68-82.

濱 侃・田中 圭・望月 篤・鶴岡康夫・近藤昭彦(2018b) UAV リモートセンシングおよび登熟期の気象データに基づく玄米タンパク含有率推定. 日本リモートセンシング学会誌 38 : 35-43.

Sugiura R, Tsuda S, Tamiya S, Itoh A, Nishiwaki K, Murakami N, Shibuya Y, Hirafuji M and Nuske S. (2016) Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle. Biosyst. Eng. 148 : 1-10.

田中 圭・近藤昭彦(2016) 小型マルチコプターを用いた近接リモートセンシングによる水稻生育マップの作成. 日本リモートセンシング学会誌 36 : 373-387.

栃原美咲・濱 侃・鶴崎 幸・柴戸靖志 (2020) 画像解析によるキャベツ圃場の生育の可視化と省力的な診断法. 園学研 19 (別1) : 170.

日本植物調節剤研究協会 (2020) 水稻除草剤試験実施基準. 公益財団法人日本植物調節剤研究協会, 東京, <https://japr.or.jp/yakkou/> (2021年2月4日閲覧)

Yang C, T. Liu, J. H. Everitt (2008) Estimating cabbage physical parameters using remote sensing technology. Crop Prot. 27 : 25-35.