

水田転換畑ダイズの安定多収化に向けた
リモートセンシングによる生育予測に関する研究

2019

村田 資治

| | |
|--|----|
| 第1章 緒論..... | 1 |
| 第2章 奈良県の集落営農法人におけるダイズ収量の年次間変動の要因解析..... | 4 |
| 材料と方法 | 5 |
| 結果..... | 7 |
| 考察..... | 11 |
| 結論..... | 13 |
| 第3章 水田転換畑におけるダイズの乾物生産と収量に及ぼす栽植密度および 耕起法の影響..... | 15 |
| 第1節 ダイズ品種「サチユタカ」の乾物生産と収量に及ぼす密植の効果..... | 15 |
| 材料と方法 | 18 |
| 結果..... | 22 |
| 考察..... | 29 |
| 第2節 ダイズ品種「サチユタカ」の乾物生産と収量に及ぼす 不耕起栽培の効果..... | 32 |
| 材料と方法 | 33 |
| 結果..... | 35 |
| 考察..... | 41 |
| 第3節 結論..... | 43 |
| 第4章 近接リモートセンシングを用いたダイズ地上部乾物重の推定法の 高精度化..... | 44 |
| 材料と方法 | 47 |
| 結果..... | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 考察 | 55 |
| 結論 | 59 |
| 第 5 章 携帯型センサーおよびマルチコプター搭載カメラを用いたダイズ地上部 乾物重推定手法の簡易化..... | 60 |
| 材料と方法 | 61 |
| 結果 | 65 |
| 考察 | 71 |
| 結論 | 74 |
| 第 6 章 総合考察 | 76 |
| SUMMARY..... | 81 |
| 引用文献..... | 84 |
| 謝辞 | 94 |
| 本論文に関する公表済み文献..... | 95 |

第1章

緒論

ダイズは豆腐，味噌，醤油などの原料であり，日本の食生活を支える重要な作物である．日本で栽培されるダイズのうち8割以上が水田転換畑に作付けられているが（農林水産省 2018a），その生産量は依然として低く日本のダイズの自給率は2016年で7%にとどまっている（農林水産省 2018b）．さらに，単位面積当り収量が低く不安定であることが国産ダイズの価格変動につながっており，実需者である大豆加工メーカーにとっても問題となっている（田口 2017）．そのため，水田転換畑作ダイズの収量の増大と安定化は重要な課題である．

日本の水田転換畑におけるダイズ低収要因については，地力低下，土壤物理性の悪化，土壤水分の変動による光合成速度や窒素固定活性の低下が指摘されており（島田 2006），各府県において排水対策，灌漑および土壤改良の必要性などが認識されている（浅生 1999，橋本 1999）．しかし，生産現場においては経営面積の拡大および，特に中山間地域を中心とした農業従事者の高齢化と労働力不足により，適切な栽培管理を実施できない事例も多くみられる．さらに中山間地域の集落営農法人では，その設立目的から条件不利圃場も集積せざるを得ない状況にあり，条件不利圃場で栽培されるダイズにおいては主要な栽培管理作業が行われていない可能性が指摘されている（坂本 2017）．

こうした問題はダイズ生産に限られたことではなく，日本の農業は農業従事者の高齢化・減少を背景に大きな構造転換に直面している（渋澤 2018）．労働力不

足や農業技術の継承の危機が予想される状況の中、解決策のひとつとしてスマート農業が注目されている。スマート農業とはロボット技術や ICT (Information and Communcation Technology) 等の先端技術を活用し、超省力化や高品質生産等を可能にする新たな農業のことであり、その中にはリモートセンシングを活用した精密農業も含まれる (農林水産省 2014)。水稻やコムギではリモートセンシングによって取得した生育情報をもとに最適な栽培管理を行う技術が実用化されている (奥野 2005, 原ら 2015, 境谷 2016)。

ダイズにおいても少ない労働力で効率的に収量を向上させるためには、圃場あるいは年次ごとの生育変動を把握し、その変動に応じて適切な栽培管理を施す必要がある。そのためにはリモートセンシングによる生育診断が有効と考えられる。しかし、水稻に比較して水田転換畑ダイズにおいては、生産現場の栽培管理にリモートセンシングはほとんど活用されていない。これは、ダイズの生育とセンシングのデータが生産者に利用可能な形で関連づけられていないことが原因と考えられる。したがって、より効率的にダイズの収量向上を図る上では、まず生産現場におけるダイズの生育収量の指標となる形質を明らかにし、それをリモートセンシングによって測定できる技術の開発が必要であると考えられる。

以上のことから、本研究はリモートセンシングによるダイズの生育診断を可能とする技術の開発を目的に行った。第2章では奈良県桜井市の集落営農法人が管理する圃場群において、ダイズの収量と生育を3年間にわたって調査し、ダイズ収量の年次間変動に及ぼす要因を乾物生産および気象の面から明らかにした。第3章では、ダイズの乾物生産および収量を向上させるための栽培管理として密植および耕起方法に着目した。密植については栽植密度を30本 m^{-2} 以上に高めることによってダイズ品種「サチユタカ」の増収が可能であるかどうかを、奈良県および山口県という異なる環境かつ異なる年次において、分枝の発生および乾物生産の

面から明らかにした。耕起方法については、不耕起栽培と耕起栽培を比較し、耕起方法の違いが乾物生産に及ぼす影響を降水量と関連づけて検討した。第4章ではダイズの収量性を決定する上で重要な地上部乾物重を、従来の手法よりも高い精度でリモートセンシングにより推定することを目的に、新たな指標として植生指数と日射量の積の積算値を提案し、その有効性を検証した。第5章では、近年急速に普及しつつあり、ダイズ生産現場でも利用可能な携帯型NDVIセンサーおよびマルチコプターを使用して、第4章で明らかにした植生指数と日射量によるダイズ地上部乾物重の推定を行うことが可能かどうか検討した。第6章ではこれらの研究を総括し、リモートセンシングによるダイズ地上部乾物重の推定が生産現場において利用可能かどうか考察を行った。

第2章

奈良県の集落営農法人におけるダイズ収量の 年次間変動の要因解析

日本のダイズ収量はアメリカなどと比べて低いうえ、年次間の収量変動が大きく国産大豆の需給関係を不安定にしている。大豆収量の年次間変動の要因についてはこれまでに多くの研究が行われており、気象や作付体系が影響することが明らかにされている。例えば、気象に関しては生育期間中の気温（阿部 1959, 多田ら 1986, 高橋ら 1990, 湯本・土屋 1991, 内川ら 2003, 松田ら 2011), 降水量（酒井ら 1985, 今野ら 2012, 内川・森田 2015), 日照時間（井上ら 1995, 鄭ら 2012) が影響するとの報告がある。作付体系に関してはダイズ連作で収量変動が増大し減収することが示されている（櫛淵ら 1970, 鈴木ら 1995, 持田 2009). その要因として、ダイズ作付け回数の増加による土壌の可給態窒素の減少があげられている（住田ら 2005, 松本・吉川 2010, 服部ら 2013). しかし、可給態窒素の減少が必ずしもダイズの減収を引き起こすわけではないことも報告されており（高橋ら 2005, 坂東・藤山 2011, 小田原ら 2012), 小田原ら（2012) は可給態窒素よりも孔隙率などの土壌物理性の影響が大きいと指摘している。

このようにダイズ収量の年次間変動の要因については様々な研究が行われているものの、こうした研究では試験場内での作況試験（酒井ら 1985, 多田ら 1986, 内川ら 2003, 鄭ら 2012) や市町村（山根・国分 2016) および都道府県単位（服部ら 2013) を対象に解析されていることが多く、実際の生産現場において生産者単位を対象にして収量の年次間変動の要因を解析した研究はほとんどない。ダイズ生産現場においては生産者単位で栽培管理が行われており、その単位でダイズ

収量の年次間変動の要因を解明することが栽培管理の改善につながると考えられる。さらに、これまでの研究では解析の対象とするダイズの形質は成熟期の収量および収量構成要素に限られている場合が多く、生育途中の乾物生産を解析した事例は少ない。

そこで本研究では、奈良県桜井市の集落営農法人が管理する圃場群において、ダイズの収量と生育を3年間にわたって調査し、ダイズ収量の年次間変動に及ぼす要因を乾物生産および気象の面から明らかにした。

材料と方法

調査は、奈良県桜井市大泉において、2012年から2013年の3年間行なった。調査対象圃場は同地域の集落営農法人が管理するダイズ圃場とした。この法人ではダイズは全て水田転換畑で栽培されており、作付体系は水稻-コムギ-ダイズの二年三作またはコムギ-ダイズの二毛作であった。そのうち、本研究では二毛作圃場7枚を3年間継続して調査した(第2-1図)。ダイズは前作コムギの収穫後の6月中下旬に播種された。ダイズ品種は3年間とも「サチユタカ」だった。各年次において、開花期と子実肥大期に各圃場2か所からダイズを子葉節で切断して採取し、80°Cで72時間以上通風乾燥して乾物重を測定した。成熟期にも同様に各圃場2か所から大豆を採取し、個体密度、地上部乾物重、収量と収量構成要素を調査した。収量は子実を脱穀後に篩選せず目視で未熟粒を除去して算出した。莢数は不稔莢数を含めた全莢数とした。収量および百粒重の水分は15%換算した。各年次における開花期、子実肥大期および成熟期の調査日は2012年8月5日、9月10日、10月31日、2013年8月10日、9月12日、10月30日、2014年8月13日、9月11日、11月3日だった。



第2-1図 調査圃場の位置。
画像は奈良県桜井市大泉周辺の航空画像。
黄色の部分為調査圃場。

2012年8月4日と2013年8月4日に調査圃場を含む一帯をラインセンサ（ADS-40, LEICA GEOSYSTEMS 社製）を搭載した航空機で撮影し、近赤外波長帯（835～880 nm）と可視域赤色波長帯（610～660 nm）の画像を取得した。撮影時には標準白色板を設置した。分解能は20 cm×20 cmだった。撮影した画像をGISソフト（QGIS 2.14, QGIS Development Team）に取り込み、調査圃場ごとにポリゴンを作成した。近赤外画像と赤色画像について、各ポリゴンに含まれるピクセル値を平均した。圃場ごとの平均値を標準白色板のポリゴンに含まれるピクセル値の平均値で除することで標準化し、これを各波長の反射率とした。以下の式に従って正規化植生指数（NDVI）を算出した。

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$$

ここで、 R_{NIR} および R_{Red} は上記の方法で取得した近赤外および赤色画像における反射率を示す。

2012年から2014年において、ダイズの生育期間に当たる6月から11月の平均気温（°C）、積算降水量（mm）、積算日射量（MJ m⁻²）の日別値を奈良県奈良市の気象庁アメダスデータから取得した。

結果

第2-1表に成熟期の個体密度，地上部乾物重，収穫指数，収量および収量構成要素を示した。ダイズ収量は有意な年次間差があり，2014年が最も多収で2012年が最も低収だった。3年間の平均収量は 381 g m^{-2} だった。莢数，一莢粒数，百粒重および地上部乾物重に有意な年次間差がみとめられた。一方，個体密度と収穫指数に有意な年次間差はみとめられなかった。第2-1表の各項目において年次間の変動係数を算出した（第2-2図）。収量の変動係数は26%だった。収量は地上部乾物重と収穫指数の積，あるいは収量構成要素の積と考えられる。地上部乾物重と収穫指数を比較した場合，地上部乾物重の変動係数が27%と大きく，収量構成要素では莢数の変動係数15%と最も大きかった。一莢粒数，百粒重，収穫指数および個体密度の変動係数は10%以下と小さかった。つまり，地上部乾物重と莢数は有意な年次間差があり，なおかつ変動係数も大きかった。そこで，収量と地上部乾物重および莢数の関係を第2-3図に示した。地上部乾物重と莢数はいずれも収量と強い直線関係にあり，収量の年次間差には地上部乾物重と莢数が強く影響したことが示唆された。

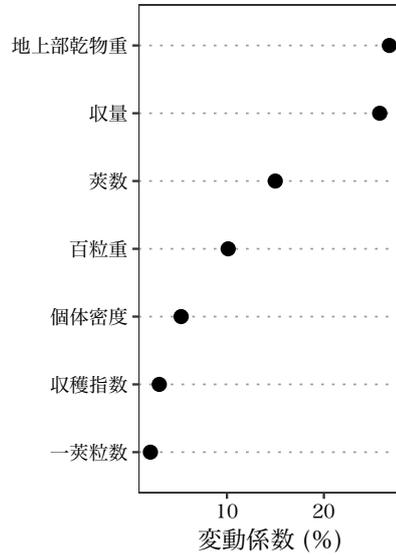
第2-1表 年次別の収量と収量構成要素および地上部乾物重と収穫指数。

| 年次 | 個体密度 本 m^{-2} | 莢数 個 m^{-2} | 一莢粒数 | 百粒重 g | 収量 g m^{-2} | 地上部乾物重 g m^{-2} | 収穫指数 |
|------|---------------------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|
| 2012 | 19.0 ± 3.3 | 659 ± 127 | 1.67 ± 0.1 | 27.9 ± 0.8 | 305 ± 58 | 451 ± 63 | 0.57 ± 0.06 |
| 2013 | 20.1 ± 5.7 | 704 ± 167 | 1.74 ± 0.1 | 28.4 ± 3.6 | 346 ± 91 | 543 ± 129 | 0.54 ± 0.03 |
| 2014 | 21.2 ± 3.8 | 871 ± 105 | 1.70 ± 0.1 | 33.4 ± 2.2 | 492 ± 43 | 755 ± 68 | 0.55 ± 0.02 |
| 年次 | ns | * | ns | *** | *** | *** | ns |

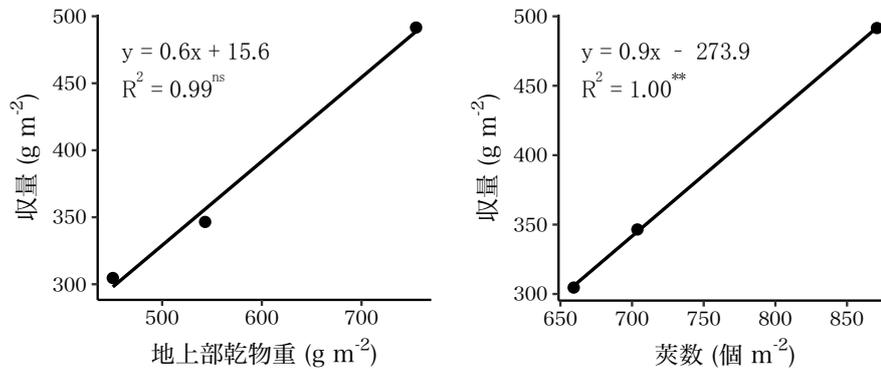
***, *は分散分析の結果，それぞれ0.1%，5%水準で有意であることを示す。

nsは5%水準で有意でないことを示す。

収穫指数は子実重/地上部乾物重として算出した。子実の水分は0%とした。



第 2-2 図 収量, 収量構成要素, 地上部乾物重および収穫指数における年次間の変動係数.



第 2-3 図 収量と成熟期の地上部乾物重および莢数の関係.

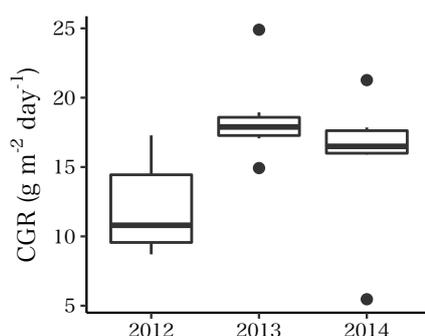
点は年平均値を示す.

**、ns はそれぞれ 1%水準で有意であること、および 5%水準で有意でないことを示す.

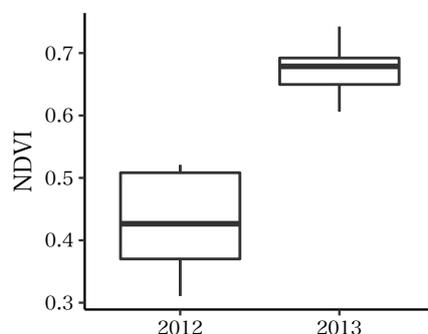
開花期から子実肥大期の乾物生産量を比較するため、各年次において開花期にあたる 8 月上旬と子実肥大期にあたる 9 月中旬に調査した地上部乾物重から、同期間の群落生長速度 (CGR, g m⁻² day⁻¹) を算出した. CGRは多収だった2014年

と比べて2013年では変わらなかったが、2012年では低かった（第2-4図）。開花期のNDVIについては、2014年では調査していないため不明なものの、2012年では2013年と比べて小さかった（第2-5図）。つまり、収量の低かった2012年では開花期のNDVIが小さく、開花期から子実肥大期にかけての乾物生産速度も他の年と比べて劣っていた。

第2-2表に各年次における生育期間中の気象を示した。年次間の変動係数は降水量が最も大きく12%だった。平均気温と積算日射量の変動係数は4%以下と小さかった。7月から8月の降水量についてみると、収量の低かった2012年では開花期



第 2-4 図 各年次における開花期から子実肥大期の CGR。
CGR は各年次において調査圃場ごとに算出した。
各年次においてデータの四分位範囲の 1.5 倍を超えるものは外れ値として黒丸で示した。



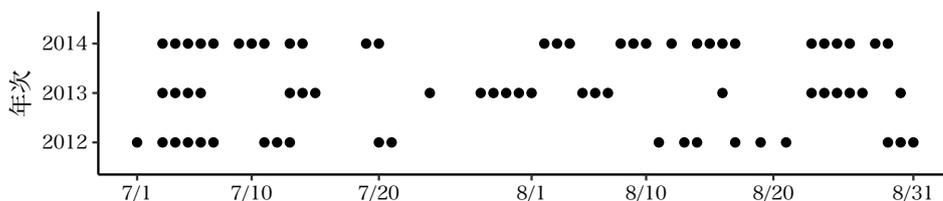
第 2-5 図 各年次における開花期の NDVI。
NDVI は各年次において調査圃場ごとに算出した。

の前後にあたる7月下旬から8月上旬まで20日以上も降水がなかった（第2-6図）。
 気象上の被害としては、2013年では着莢期から子実肥大期にあたる9月5日と9月16日にそれぞれ台風17号と台風18号が相次いで奈良県の付近を通過し、多くのダイズ圃場で倒伏が生じた。

第 2-2 表 ダイズ生育期間中の気象と年次間の変動係数.

| 年次 | 平均気温 °C | 積算降水量 mm | 積算日射量 MJ m ⁻² |
|-------------|------------|-------------|-----------------------------|
| 2012 | 23.1 | 968 | 2487 |
| 2013 | 24.0 | 982 | 2398 |
| 2014 | 22.9 | 784 | 2309 |
| 変動係数 (%) | 2 | 12 | 4 |

数値は6月から11月までの平均値または積算値.



第 2-6 図 各年次における7月と8月の降水の有無。
 点は0.5mm以上の日降水量があったことを示す。

考察

本研究では奈良県桜井市大泉の集落営農法人が管理する圃場群において3年間にわたってダイズの収量を調査し、その変動要因をダイズの生育から明らかにした。2012年から2014年における対象地域のダイズ収量の平均値は 381 g m^{-2} で変動係数は26%だった。阿部（1959）は岩手県農試における18年間のダイズ収量の変動を調査しているが、早生ダイズの変動係数を23%としており、本研究とほぼ一致する。本研究では3年間の収量の平均値に対して2012年と2013年の収量が低く、2014年の収量が高かった。以下、2014年に対して2012年と2013年の収量が低かった要因を考察する。

田中ら（1978）は北海道で行われたダイズの生産力検定試験の結果から、収量の年次間変動には莢数の影響が大きいとしている。本研究においても、収量構成要素（莢数、一莢粒数、百粒重）の中で莢数の年次間変動が最も大きく、収量とも直線関係にあった。このことから、莢数の変動が収量の年次間変動の主な要因であったと考えられた。開花期から子実肥大期の乾物生産量は莢数と密接な関係があるとされている（浅沼 1977）。本研究において、開花期から子実肥大期のCGRを年次間で比較したところ、2012年では2014年よりもCGRが小さかった。このことから、2012年では開花期から子実肥大期の乾物生産が小さかったため、莢数も少なくなり減収したと考えられた。しかし、2013年のCGRは2014年と変わらなかった。2013年において莢数が少なかったのは、開花期から子実肥大期の乾物生産の以外の要因があると考えられた。

次に、2012年において開花期から子実肥大期の乾物生産が低かった要因を受光率から考察する。本研究ではダイズ群落の受光率を直接測定していないものの、2014年を除いて開花期にあたる8月上旬に各圃場のNDVIを調査した。NDVIは受

光率と相関があることが報告されていることから (Daughtry et al. 1992), NDVI を受光率の指標として各年次で比較した. その結果, NDVIは2013年と比べて2012年で低く, 2012年では少なくとも開花期までのダイズ群落の発達が劣り, 受光率が低かったと考えられた. このことが, 開花期から子実肥大期の乾物生産速度が低下した要因と考えられた.

今野ら (2012) は山形県でダイズ収量が低かった2011年では, 本研究と同様に前半の生育量が小さく, 収量構成要素では莢数が減少したことを報告しており, その原因として生育初期の湿害および乾燥害をあげている. 内川・森田 (2015) も福岡県で初期の乾燥害で低収となった2013年では栄養生長量が抑制され, 粒数が減少したことを報告している. このように本研究と同様に低収年では栄養生長が抑制されて莢数や粒数が減少する事例がある. これらの例では低収年となった要因は降雨がなかったことによる生育初期の乾燥とされている. 本研究でもダイズの生育期間に当たる6月から11月の日平均気温, 積算降水量および積算日射量の年次間の変動係数を比較すると, 積算降水量の変動が最も大きかった. 低収年の2012年では7月中旬から8月上旬まで20日以上も降水がなく, 開花期の前後に乾燥害を被った可能性があった. 一方, 2013年も2014年と比べて収量は低かったが, 開花期の前後に定期的に降雨があり, 乾燥害が低収要因とは考えられなかった. しかし, 2013年では9月上中旬に台風が2つ通過して倒伏が生じており, これが収量に影響した可能性があった. 齊藤ら (2012) は時期別の倒伏がダイズの収量に及ぼす影響を調査しており, 開花期までの倒伏では減収率は9%と少ないが, 着莢期では34%, 子実肥大期では24%と減収程度が大きくなることを示している. 着莢期以降の倒伏では莖重が減少し, 収量構成要素では莢数と百粒重が減少するとしている (齊藤ら 2012). 本研究において, 台風が通過した9月上中旬はダイズの着莢期から子実肥大期にあたる. このことから, 2013年では台風による倒伏によって

地上部乾物重および莢数が減少し、収量が低下したと考えられた。

以上のことから、2014年と比べて2013年と2012年は収量が低く、2012年では開花期前後の乾燥害によって開花期以降の乾物生産速度が低下し、莢数が減少したと考えられた。一方で、2013年では開花期前後にも定期的な降雨があり、開花期から子実肥大期の乾物生産速度も多収だった2014年と変わらなかったが、その後の台風による倒伏で莢数が減少して収量が低下したと考えられた。年によって減収要因は異なるものの、2014年と比べて2012年と2013年では成熟期の地上部乾物重および莢数が減少していることは共通しており、乾燥害または倒伏による開花期以降のダイズ群落の乾物生産量の低下が、莢数の減少を通して収量を低下させたと考えられた。

結論

本研究では、奈良県の集落営農法人が管理するダイズ圃場において、3年間にわたってダイズの生育および収量を調査して、その年次間変動の要因を解析した。その結果、低収年では開花期以降の乾物生産量の低下が莢数の減少につながり、収量が低下したと考えられた。そして、この乾物生産量の低下は、開花期前後の乾燥害による受光率低下と台風などによる倒伏に起因すると推察された。乾燥害による開花期以降の低い受光率に起因する乾物生産量の低下を防ぐためには、畝間灌漑や地下灌漑の適切な実施が必要である。これらに加えて、群落の受光率は個体密度と関係があり、個体密度が高いほど最大の受光率を得るまでの期間が短いことが知られている (Shibles & Weber 1966)。したがって、一般的に栽植密度を高めることが収量の安定化につながる可能性がある。ただし、栽植密度の制御は中耕培土とともに倒伏を防止するうえでも重要であり、必要以上に密植しない

ことが求められる。生産現場において、倒伏を防止しつつ多収を得るためには、乾物生産量および収量の面から最適な栽植密度を明らかにする必要があると考えられた。

第3章

水田転換畑におけるダイズの乾物生産と収量に及ぼす 栽植密度および耕起法の影響

第2章では奈良県桜井市におけるダイズ生産現場における収量の年次間変動を調査した。その結果、収量が低い年は開花期以降の乾物生産が少ないことが明らかとなった。したがって、生産現場におけるダイズ収量の向上・安定化には乾物生産の向上・安定化が重要と考えられる。乾物生産を高めるための栽培管理として窒素施肥が一般的だが、ダイズに関しては施肥窒素は根粒窒素固定活性を阻害することから、窒素施肥による乾物生産および収量の増加は容易でない（有原2000）。そこで、本章では生産者が実施可能かつダイズの乾物生産に影響を与える可能性のある栽培管理として栽植密度と耕起方法に着目し、その効果を検証した。

第1節 ダイズ品種「サチユタカ」の乾物生産と収量に及ぼす密植の効果

ダイズにおける栽植密度と収量に関する研究はこれまでに数多く行われており、栽植密度を増加させるほど収量も増えるという結果も多く得られている。例えば、池田・佐藤（1990）は条間と株間を調整して栽植密度を6本 m^{-2} から100本 m^{-2} まで変化させ、100本 m^{-2} （条間10 cm，株間10 cm）の時に最大収量が得られることを報告している。Parvez et al.（1989）も栽植密度を6本 m^{-2} から42本 m^{-2} まで変化させ、42本 m^{-2} （条間30 cm，株間8 cm）の時に最大収量が得られたと報告しており、条間と株間の比が一定の場合には栽植密度の増加によって増収す

るとしている。これらの報告では、密植によって分枝数および分枝節数が増えることが増収の要因であるとしている。一方で、栽植密度の増加による増収には限界があり、ある密度で最大収量が得られることを示す研究もある。小松ら（1989）は栽植密度12.5本 m^{-2} から100本 m^{-2} まで4水準でダイズを栽培し、50本 m^{-2} （条間20 cm，株間10 cm）と比べて100本 m^{-2} （条間20 cm，株間5 cm）では増収しないことを示し、その要因として過繁茂と倒伏による群落構造の悪化を挙げている。中野ら（2004）は栽植密度6.3本 m^{-2} から44.4本 m^{-2} まで6水準の正方形植えてダイズを栽培し、11.1本 m^{-2} （条間30 cm，株間30 cm）で最高収量が得られること、それ以上密植しても分枝数と総節数の増加量が小さくなるとともに結莢率や一莢粒数が減少するために収量は低下することを示した。Duncan（1986）はダイズ収量の反応性から栽植密度を3つの段階に分けることを提唱した。段階1では栽植密度の増加に比例して収量が増加し、段階2では群落の受光率95%が達成可能な栽植密度を超えてもさらに収量は増加し、段階3ではそれ以上栽植密度を増加させても収量は変化しない、としている。Egli（1988）は無限伸育型と有限伸育型品種を用いてこの仮説を検証し、無限伸育型では仮説が成立すること、有限伸育型品種では段階2が存在せず、群落の受光率95%を達成する密度で最大収量が得られることを明らかにした。Egli（1988）の研究では有限伸育型で最大収量が得られた時の密度は6本 m^{-2} だった。このように、栽培環境、栽植様式および品種によって値の違いはあるものの、栽植密度の増加による増収には限界が存在することが示されている。

本研究で対象としているダイズ品種「サチユタカ」は耐倒伏性に優れており密植に適応性があることから、栽植密度の変更に着目した研究がいくつか行われている（松永ら 2003, 池尻ら 2007, 古畑ら 2008）。「サチユタカ」においては、20本 m^{-2} を超えると収量は増えないとする報告がある。例えば、松永ら（2003）は

熊本県で条間70 cm として「サチユタカ」を栽培したが、栽植密度を20本 m^{-2} から41本 m^{-2} に増やしても増収しなかったとしている。ただし、栽培期間中に台風が通過しており、その影響を受けた可能性もある。池尻ら (2007) は山口県で条間75 cmとして株間を調整することで栽植密度を変更して「サチユタカ」を栽培したが、栽植密度を10本 m^{-2} (株間13 cm) から20本 m^{-2} (株間7 cm) に増やすと増収するが、20本 m^{-2} から25本 m^{-2} (株間5 cm) に増やしても増収しないことを報告している。こうしたことから、山口県では播種適期を6月中旬～7月上旬として15～20本 m^{-2} となる播種量を推奨している。奈良県、岡山県、島根県、広島県など「サチユタカ」を採用している他の地域でもほとんど同様に、適期播種での栽植密度は20本 m^{-2} 以内を推奨している。このように、「サチユタカ」においても栽植密度の増加による増収には限界があると考えられる。

これまでの研究から、栽植密度を増やしても必ずしもダイズ収量が増えない理由はいくつか考えられる。密植することで個体当りの分枝節数や分枝莢数が減少するため、面積当りの収量が増加しないという分枝の可塑性によるもの (Carpenter & Board 1997, Agudamu et al. 2016)、または収量に影響する開花期以降の受光量 (浅沼 1977, Egli 1988) や乾物生産量 (浅沼ら 1977) が密植しても増加しない可能性である。しかし、「サチユタカ」において、密植しても増収しない理由を分枝の可塑性や受光量の観点から解析した研究はほとんどない。さらに、作物において受光量は日射利用効率 (RUE) に従って乾物重に変換されるため (Monteith 1977, Sinclair & Muchow 1999)、受光量と収量の関係を考察するためにはRUEも考慮する必要がある。

そこで本研究では、奈良県および山口県という異なる環境かつ異なる年次において栽培したダイズ品種「サチユタカ」の分枝の発生、収量構成要素、受光量、日射利用効率および乾物生産に及ぼす密植の影響を明らかにした。

材料と方法

試験は2011年に奈良県桜井市大西の農家圃場で、2017年に山口県山口市の農林総合技術センター内圃場で行なった。いずれも水田転換畑で、作土の土性は奈良が砂質埴壌土で山口が壤土だった。各地域において、栽植密度が20本 m^{-2} 未満の慣行区と30本 m^{-2} 以上の密植区を設置した。その際、畝間を一定として株間を変更することで栽植密度を変更した。品種は「サチユタカ」を用いた。第3-1-1表に播種日、畝間、株間、1株本数および栽植密度を示した。奈良では手播きしたが、山口では機械播きしたのち、本葉が1枚展開した時点で間引いて1株2本立てとした。播種様式は1畝1条とした。処理区は乱塊法にしたがって配置し、各処理区の大きさは75 m^2 として反復数は奈良で3、山口で4とした。いずれの年次においても窒素施肥は行わなかった。雑草および病害虫防除については、奈良ではチラウム水和剤で種子処理し、播種後にベンチオカーブ・ペンディメタリン・リニュロン粒剤、2011年8月22日にダイアジノン粒剤を散布した。山口ではチアメトキサム・フルジオキシニル・メタラキシルM水和剤で種子処理し、播種後にアラクロ

第3-1-1表 各処理区における栽植様式。

| 場所 | 播種日 | 処理区 | 畝間 | 株間 | 本数 | 栽植密度 |
|----|-----------|-----|----|----|-----------------|------------|
| | 年/月/日 | | cm | cm | 株 ⁻¹ | 本 m^{-2} |
| 奈良 | 2011/6/30 | 密植 | 60 | 10 | 2 | 33 |
| | | 慣行 | 60 | 20 | 2 | 17 |
| 山口 | 2017/7/10 | 密植 | 75 | 9 | 2 | 30 |
| | | 慣行 | 75 | 18 | 2 | 15 |

奈良は手播き、山口は機械播種したのち間引いたため、表中の栽植密度は奈良は播種量、山口は間引き後の本数を示す。

ール・リニュロン粒剤, 2017年9月8日にアゾキシストロビン水和剤とクロラントラニリプロール水和剤, 9月20日にジノテフラン液剤を散布した. 中耕培土は開花前の2011年7月29日, 2017年8月2日に歩行型管理機で1回行った.

生育期間中にダイズ地上部を, 奈良では8回, 山口では10回採取した. 奈良では1回につき各反復当り4株を, 山口では0.75 m² に生育する株を子葉節で切断した. 採取時の播種後日数は, 奈良では29, 40 (開花期), 49, 60, 74 (子実肥大期), 88, 97および118日, 山口では11, 22, 31, 36 (開花期), 43, 49, 60, 71 (子実肥大期), 85および99日だった. 採取した個体数と採取面積から各時期の個体密度を算出した. 地上部を分枝と主茎に分解し, それぞれの節数を調査した. その後, 80°Cで72時間以上通風乾燥してから乾物重を測定した. 奈良では播種後60日 (2011年8月29日) と74日 (9月12日), 山口では播種後71日 (2017年9月19日) に倒伏程度を調査した. 倒伏程度は倒伏なしを0, 完全な倒伏を5として, 0.5刻みで達観で調査した.

開花期の前後に群落の植被率を調査した. 調査は奈良では播種後35日, 49日および60日, 山口では播種後28日, 43日, および60日に行った. 調査方法は白岩ら (2011) と同様に, 群落上方からデジタルカメラでダイズ群落を撮影し, 撮影した画像を二値化して植被率を算出する方法とした. ただし, 本研究では二値化処理を簡単にするため, デジタルカメラには近赤外画像を撮影可能なものを使用した. 奈良では植被率カメラ (GACS1, 有限会社木村応用工芸) を使用し, 山口では市販のカメラ (EX-Z57, カシオ計算機株式会社) のローパスフィルターをIRフィルター (IR-78, 富士フイルム株式会社) に交換したものを使用した. 撮影した画像はR version 3.4.2 (R Core Team 2017) およびパッケージimager version 0.41.1 を用いて二値化した.

生理的成熟期は奈良で播種後118日 (2011年10月26日), 山口で播種後113日

(2017年10月31日) であり, 生理的成熟期を確認後にダイズ地上部を採取した. 各反復当りの採取面積は奈良では0.5~1.0 m², 山口では3 m² とした. 地上部を採取後, 分枝と主茎ごとに節数, 莢数, 粒数, 子実重, 子実水分を調査し, m² 当り節数, m² 当り莢数, 収量, 百粒重および一莢粒数を算出した. 子実の調査に際して, 奈良では脱穀後に篩選せず目視で未熟粒を除去し, 山口では脱穀後に7.3mmで篩選した. 収量と百粒重は子実水分15%として算出した. 調査において分枝と主茎の分類は鳥越ら (1982) に従った.

ダイズ群落の受光率の推定には様々な方法が用いられているが (Sinclair & Muchow 1999, 白岩ら 2011), これまでの研究から正規化差分植生指数 (NDVI) と受光率には直線的な関係があり, ダイズにおいてNDVIから受光率を推定できることが知られている (Daughtry et al. 1992). 本研究では測定が容易であることから, 受光率の推定値としてNDVIを使用し, 開花期から子実肥大期までの期間におけるダイズ群落の日射量および日射利用効率を算出した.

NDVIの測定方法は次の通りとした. 分光反射率測定機 (携帯式生育情報測定装置, 株式会社荏原電産) を使用して生育期間中にダイズ群落の分光反射率を測定した. 機器の詳細は紺屋 (2004) に述べられている. 奈良では7回, 山口では11回測定した. 測定時の播種後日数は, 奈良では22, 29, 40, 49, 60, 74および97日, 山口では11, 14, 19, 23, 28, 36, 43, 49, 60, 71および85日だった. 奈良では地上部採取を行う地点で地上部採取の直前に測定を行い, 山口では毎回同じ地点で測定した. 以下の式に従って, 測定した分光反射率から NDVI を算出した.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$$

ここで R_{NIR} と R_{Red} はそれぞれ近赤外領域 (880 nm) と可視域赤 (650 nm) の反

射率を示す。

算出したNDVIを基に、年次および処理水準別に日々のNDVIを推定した。竹澤(2009)はある期間における測定値から連続的な推定値を得る方法として、ノンパラメトリック回帰が移動平均やパラメトリックな多項式回帰と比較して優れていることを指摘している。そこで本研究では、ノンパラメトリック回帰の一種である平滑化スプラインによる平滑化回帰で生育期間中の測定値から日々のNDVIを推定した。平滑化スプラインはデータと推定値の残差二乗和に凹凸ペナルティを加えた値が最小となるように推定式が決定される。この結果は凹凸ペナルティの係数である平滑化パラメータの値によって変化するが、本研究では平滑化パラメータは一般化クロスバリデーション (GCV) によって最適化した。推定した日々のNDVIに日別の日射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$) を乗じて日々の受光量とした。これを開花期から子実肥大期までの各地上部乾物重調査時点まで積算し、各地上部乾物重調査時点までの積算受光量を算出した。次に地域および処理区ごとに開花期以降の地上部乾物重から開花期の地上部乾物重を減じることで各地上部乾物重調査時点までの乾物生産量を算出した。各年次において乾物生産量を目的変数、栽植密度と積算受光量を説明変数として共分散分析を行った。ただし、積算受光量が0の場合は乾物生産量も0と考えられるので、切片は0とした。共分散分析で得られた回帰直線の傾きが日射利用効率 (RUE) に相当する。栽植密度間でのRUEの違いは回帰直線の傾きが有意に異なるかどうかで判断した。

ダイズの日射利用効率は生育初期に増加し、その後安定して推移し、子実肥大期を過ぎたあたりから減少することが報告されている (白岩・橋川 1993)。本研究で対象とした期間 (開花期～子実肥大期) は概ねこの安定期に該当することから、期間内で日射利用効率は変化しないと仮定して計算を行った。これらの方法で算出した受光量 (IR) と日射利用効率 (RUE) はNDVIによる推定値であること

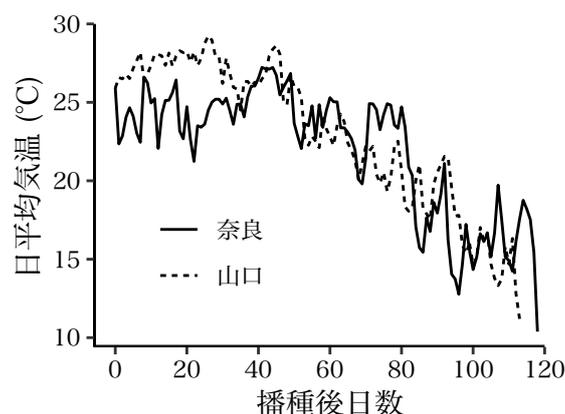
から、本研究ではそれぞれ IR_{NDVI} と RUE_{NDVI} と表記した。

ダイズ栽培期間中の日別の平均気温、積算降水量および日射量のデータを農研機構メッシュ農業気象データから取得した。データは各試験圃場を含む1kmメッシュの値として取得した。

検定は地域別に栽植密度2水準について行なった。地上部乾物重と収量および収量構成要素はWelchのt検定を行った。日射利用効率に及ぼす栽植密度の効果の有無は、乾物生産量を目的変数、栽植密度と積算受光量を説明変数として共分散分析において交互作用が有意かどうかで判断した。有意水準はいずれも5%とした。統計解析にはR version 3.4.2 (R Core Team 2017) を使用した。

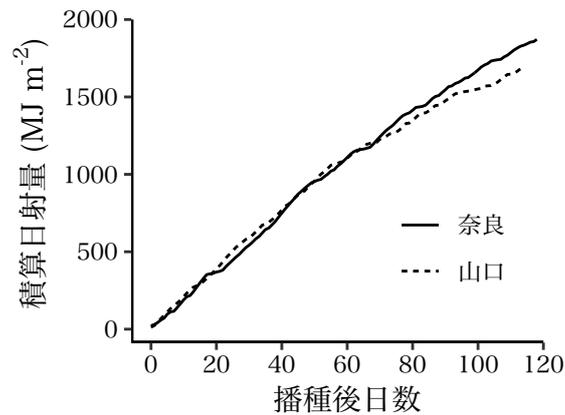
結果

第3-1-1図にダイズ生育期間中の気象を示した。日平均気温は両地域とも播種後50日ごろから成熟期に向かって低下した。播種から子実肥大期までの日平均気温の平均値は奈良 24.3°C 、山口 25.9°C で山口の方が高かった。子実肥大期から生理

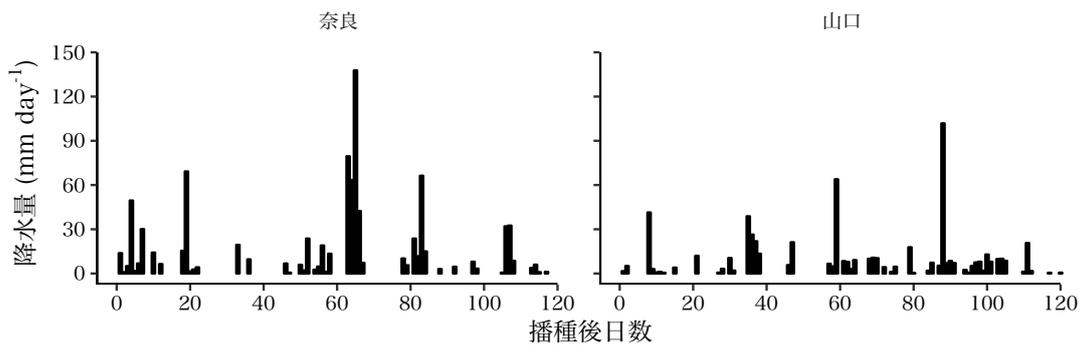


第3-1-1図 ダイズ生育期間中の日平均気温の推移。

データは農研機構メッシュ農業気象データから試験圃場を含む1kmメッシュの値として取得した(第3-1-2図、第3-1-3図も同様)。



第3-1-2図 ダイズ生育期間中の積算日射量.
日々の日射量を播種日から生育期間にわたって積算した.



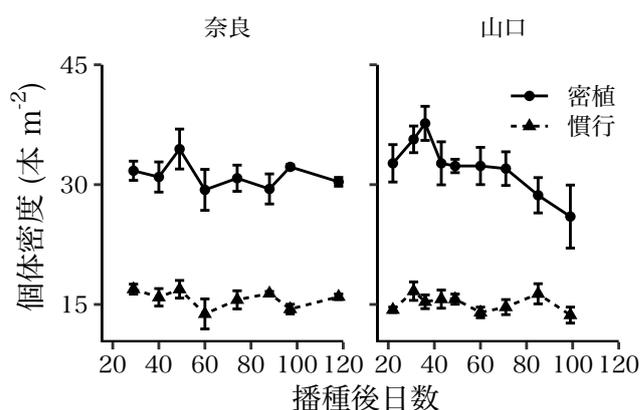
第3-1-3図 ダイズ生育期間中の日降水量.

的成熟期までの平均値は奈良17.9°C，山口18.0°Cでほとんど変わらなかった。播種から子実肥大期までの積算日射量は奈良1295 MJ m⁻²，山口1227 MJ m⁻²で，子実肥大期から生理的成熟期までの積算日射量は奈良540 MJ m⁻²，山口 427 MJ m⁻² だった (第3-1-2図). 山口では奈良と比べて子実肥大始期までの気温が高く，子実肥大期以降の日射量は少ない環境だった。両地域とも生育期間を通して定期的な降雨があった。2011年は播種後63日から67日の5日間に330 mmの降雨があった (第3-1-3図). 2011年は播種後60日の時点で，倒伏程度はいずれの処理区も0で

倒伏はなかったが、次に調査を行なった播種後74日（子実肥大期）に倒伏が確認された。この間の300 mm を超える大雨で倒伏したと考えられた。倒伏程度は密植区1.2，慣行区0.3だった。2017年は播種後69日に台風18号が九州南部から四国を通過したため、山口県でも風が強まり、ダイズが倒伏した。播種後71日（子実肥大期）に倒伏程度を調査したところ、倒伏程度は密植区と慣行区でいずれも1.4で、倒伏程度は処理区間で変わらなかった。

第3-1-4図に個体密度の推移を示した。時期によって変動はあるものの、密植区の方が慣行区よりも常に個体密度が高く推移した。栽植密度の違いによって生育期間中の群落の個体密度が異なることが示された。地上部乾物重の推移は両地域で同じ傾向であった（第3-1-5図）。すなわち、慣行区と密植区はいずれも苗立ちから播種後100日ごろまで地上部乾物重は増加し続けた。その後、成熟期に向かって地上部乾物重は低下した。開花期のおよそ10日後までは慣行区と密植区に有意差があったが、それ以降は5%水準で有意差はなかった。

収量はいずれの地域においても5%水準で処理区間に有意差はなく、密植によって収量が高まるとはいえなかった（第3-1-2表）。その要因を収量構成要素からみ

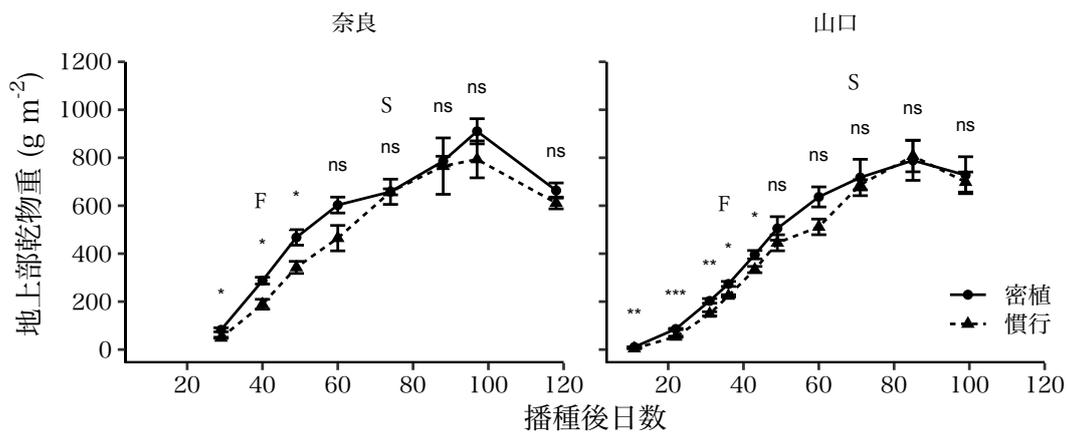


第3-1-4図 個体密度の推移。

縦棒は標準誤差を示す。

いずれの時期においても5%水準で処理区間に有意差があった。

ると、処理の効果は地域によって異なっていた。すなわち、奈良では面積当り節数および節当り莢数にはいずれも処理区間で有意差はなかった。一方、山口では面積当り節数は密植区の方が有意に多かったが、節当り莢数は有意に少なかった。その結果、いずれの地域においても面積当り莢数に処理区間で有意差はなかった。



第 3-1-5 図 地上部乾物重の推移。

図中の F と S はそれぞれ開花期と子実肥大期を示す（以下の図も同様）。

縦棒は標準誤差を示す。

***, **, * および ns はそれぞれ 0.1%, 1%, 5%水準で有意差ありおよび有意差なしを示す。

第 3-1-2 表 成熟期における収量と収量構成要素および地上部乾物重と収穫指数。

| 場所 | 処理 | 個体密度 本 m ⁻² | 節数 m ⁻² | 節あたり莢数 | 莢数 m ⁻² | 一莢粒数 | 百粒重 g | 収量 g m ⁻² | 地上部乾物重 g m ⁻² | 収穫指数 % |
|----|----|---------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|------|----------|-------------------------|-----------------------------|-----------|
| 奈良 | 密植 | 30.1 | 611 | 1.2 | 721 | 1.6 | 31.7 | 355 | 562 | 54 |
| | 慣行 | 15.9 | 495 | 1.3 | 649 | 1.6 | 31.5 | 324 | 516 | 53 |
| 山口 | 密植 | 26.1 | 568 | 1.1 | 631 | 1.4 | 37.9 | 331 | 559 | 50 |
| | 慣行 | 12.3 | 368 | 1.6 | 592 | 1.5 | 37.8 | 334 | 528 | 54 |
| 奈良 | | *** | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 山口 | | ** | ** | * | ns | * | ns | ns | ns | * |

***, **, * および ns は t 検定の結果、処理区間に 0.1, 1, 5%水準で有意差ありおよび有意差なしを示す。

収穫指数は子実水分 0%として算出した。

第3-1-3表 成熟期における主茎と分枝における節数、節あたり莢数および莢数.

| 場所 | 処理 | 節数 m ⁻² | | 節あたり莢数 | | 莢数 m ⁻² | |
|----|----|-----------------------|----------|-----------|-----------|-----------------------|----------|
| | | 主茎 | 分枝 | 主茎 | 分枝 | 主茎 | 分枝 |
| 奈良 | 密植 | 510 ± 18 | 101 ± 33 | 1.2 ± 0.1 | 1.0 ± 0.1 | 619 ± 20 | 102 ± 34 |
| | 慣行 | 272 ± 13 | 224 ± 19 | 1.2 ± 0.1 | 1.4 ± 0.1 | 341 ± 39 | 307 ± 41 |
| 山口 | 密植 | 417 ± 32 | 150 ± 11 | 1.0 ± 0.1 | 1.4 ± 0.0 | 427 ± 53 | 204 ± 16 |
| | 慣行 | 233 ± 14 | 134 ± 4 | 1.7 ± 0.2 | 1.5 ± 0.0 | 389 ± 30 | 203 ± 12 |
| 奈良 | | *** | * | ns | * | ** | * |
| 山口 | | ** | ns | * | ns | ns | ns |

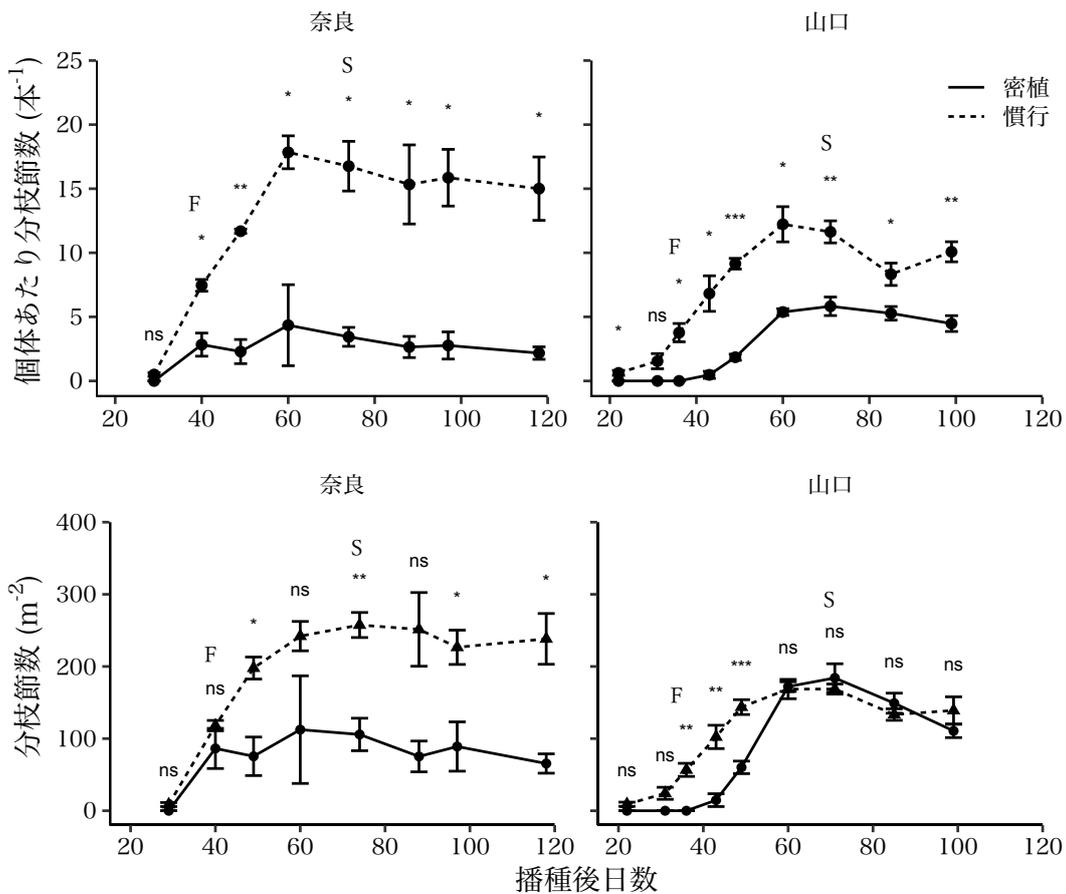
***, **, *および ns は t 検定の結果, 処理区間に 0.1%, 1%, 5%水準で有意差ありおよび有意差なしを示す.

±数値は標準誤差を示す.

一莢粒数および百粒重といった収量構成要素についても, 有意差はなかった. ただし, 山口の一莢粒数のみ5%水準で密植区の方が有意に少なかったが, その差はわずかだった.

節数と莢数の関係を主茎と分枝別にみると (第3-1-3表), 奈良では密植区で面積当りの主茎節数と主茎莢数が増加したが, 分枝の面積当り節数, 分枝の節当り莢数および面積当り莢数が有意に減少した. 山口では密植区では主茎の面積当り節数が有意に増加したが, 主茎の節当り莢数が有意に減少したため, 面積当りの主茎莢数は変わらなかった. 面積当り分枝節数, 分枝の節当り莢数および面積当り分枝莢数は密植しても変わらなかった. つまり, いずれの地域でも密植することで群落の主茎の節数は増加したが, 奈良では分枝の節数および節当り莢数が減少したため, 山口では主茎の節当り莢数が減少したため, 結果的に群落の莢数は慣行と比べて増加しなかった.

第3-1-6図に個体当りおよび面積当り分枝節数の推移を示した. 個体当り分枝節数は両地域とも開花期以降, 密植区の方が慣行区と比べて有意に少なかった. 面積当り分枝節数は, 奈良では開花期以降密植区の方が常に少なく推移した. 山口



第3-1-6図 個体当たり（上）および面積当たり分枝節数（下）の推移。

縦棒は標準誤差を示す。

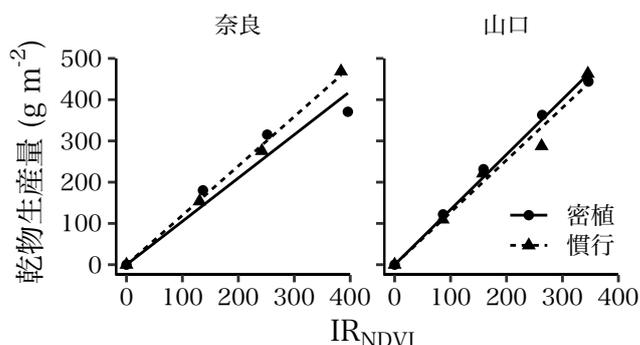
***, **, * および ns はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差ありおよび有意差なしを示す。

では開花期から2週間は密植区の方が面積あたり分枝節数は有意に少なかったものの、それ以降は密植区と慣行区でほとんど変わらなかった。つまり、密植すると個体当たり分枝節数は年次にかかわらず少なくなったが、その減少程度は奈良と山口で異なり、奈良では面積当たり分枝節数を減少させたが山口では面積あたり分枝節数を減少させるほどではなかった。

第3-1-7図に開花期から子実肥大期における地上部乾物生産量と受光量の関係を示し、第3-1-4表に同期間の RUE_{NDVI} を示した。第3-1-4表における RUE_{NDVI} の値は第3-1-7図における回帰直線の傾きである。いずれの地域においても RUE_{NDVI} に栽植密度間で有意差はなかった。密植区における開花期から子実肥大期までの受光

量も慣行区の1.03倍（奈良）と1.00倍（山口）であり、密植区と慣行区でほとんど変わらなかった。これらのことから、開花期から子実肥大期においては密植区では受光量とRUEがほとんど変化しないため、乾物生産量が増加しなかったと考えられた。

第3-1-8図に開花期前後のダイズ群落の植被率を示した。植被率は開花前では密植区の方が高い値を示したが、いずれの栽植密度でも開花期にかけて増加し、少なくとも開花9日後には栽植密度にかかわらず90%以上の値を示した。さらに、植被率は開花後20日以上でも90%以上に維持されていた。

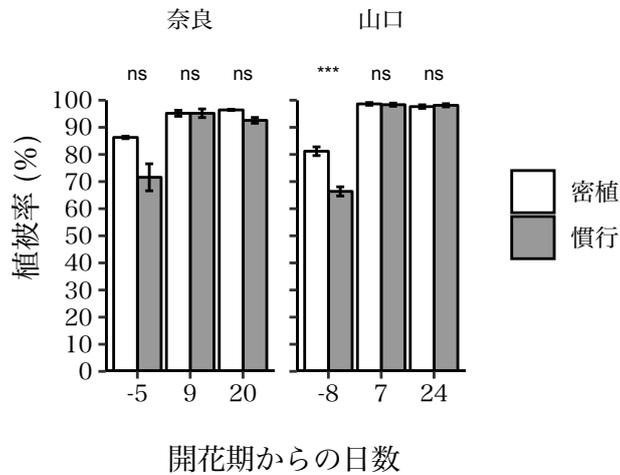


第 3-1-7 図 開花期から子実肥大期におけるダイズ群落の受光量と乾物生産量の関係。
 IR_{NDVI} は NDVI から推定したダイズ群落の積算受光量，直線は各年次における共分散分析の結果を示す。

第 3-1-4 表 奈良と山口における植密度の違いが NDVI から推定した日射利用効率 (RUE_{NDVI}) に及ぼす影響。

| 処理 | RUE_{NDVI} | |
|------|--------------|------|
| | 奈良 | 山口 |
| 密植 | 1.05 | 1.34 |
| 慣行 | 1.20 | 1.27 |
| 処理間差 | ns | ns |

ns は 5%水準で有意でないことを示す。



第3-1-8図 開花期前後におけるダイズ群落の植被率。
 縦棒は標準誤差を示す。
 ***および ns はそれぞれ0.1%水準で有意差あり、5%水準で有意差なしを示す。

考察

本研究では、異なる年次と地域で栽培したダイズ品種「サチユタカ」の分枝の発生、受光量、日射利用効率および乾物生産を調査し、慣行に比較して密植しても収量が増えない理由を検討した。

6月下旬から7月上旬に「サチユタカ」を密植しても慣行と比べて収量は増加しなかった。先行研究において山口県（池尻ら 2007）および福岡県（松永ら 2003）でも同様の結果が得られている。Carpenter & Board (1997) は、アメリカのダイズ品種「DeltaPine 415」を密植（23.4本 m^{-2} ）しても、慣行の密度（16.4本 m^{-2} ）と比べて収量が増加しないことを示し、その要因として密植すると個体当りの分枝節数および分枝莢数が少なくなることを指摘している。Agudamu et al. (2016) も栽植密度間での収量の安定性に分枝の可塑性が影響することを報告している。本研究でも密植することで個体当りの分枝節数は少なくなった。さらに、

奈良では成熟期の面積当り分枝節数および分枝の節当り莢数が減少したため、面積当りの節数と莢数はそれぞれ慣行の1.2倍と1.1倍しか増加しなかった。一方、山口では個体当りの分枝節数が減少しても面積当りの分枝節数は減少しなかったため、密植すると成熟期の面積当り節数は慣行の1.5倍に増加した。しかし、主茎の節当り莢数が減少したため、結果的に面積当り莢数および収量は増加しなかった。つまり、「サチユタカ」を密植しても莢数と収量が増加しないのは、個体当りの分枝節数が減少することで群落の節数が増加しないことだけが原因ではなく、主茎と分枝の節当り莢数が減少することも原因のひとつであると考えられた。

そこで、密植しても莢数が増加しない理由を群落の受光量および日射利用効率の観点から検討した。ダイズの遮光試験によって開花始期から莢伸長期の乾物生産は莢数と、それ以降の乾物生産は百粒重と密接な関係があることが明らかにされている（浅沼 1977, 浅沼・田辺 1986）。本研究では開花始期から子実肥大始期の群落の積算受光量は密植してもほとんど変わらなかった。さらに、同期間のRUEも密植によって変化しなかったため、乾物生産量も増加しなかった。白岩・橋川（1993）は栽植密度を変えても安定期のRUEが変化しないことを報告しており、本研究の結果はこれと一致する。これらの結果は、密植しても開花期から子実肥大始期の受光量が変わらなければ、群落の節数が増加しても莢数と収量の増加にはつながらないことを示唆している。植被率は少なくとも開花9日後には栽植密度にかかわらず90%以上の高い値を示しており、それは開花後20日以上経過しても維持されていた。このことが栽植密度が異なっても開花期以降の受光量が変わらなかった理由と考えられた。以上のことから、本研究では慣行の栽植密度を15本と17本 m^{-2} 、密植区を30本と33本 m^{-2} としたが、この密度で「サチユタカ」を密植しても開花期以降の群落の受光量および日射利用効率が慣行の場合と変わらないため、莢数と収量が向上しなかったと考えられた。百粒重については各地域に

において栽植密度間で差がなかった。

倒伏が分枝の発生とRUEに及ぼした影響について考察する。Board & Settini (1986) は分枝数のおよそ3分の2は開花期から子実肥大期に出現することを示している。本研究ではいずれの地域と処理区においても子実肥大期には分枝の発生は終了していた(第3-1-6図)。倒伏が生じたのはいずれも子実肥大期の直前であり、時期的には倒伏が分枝節の発生を抑制した可能性はあり得る。しかし、倒伏程度が0.3と小さくほとんど倒伏の影響を受けていないと考えられる奈良の慣行区でも分枝節数の発生子実肥大期には終了していたこと(第3-1-6図)、倒伏程度は最大でも1.4と比較的軽微だったことから、密植において倒伏が分枝節数に及ぼす影響は小さかったと考えられた。次に、RUEに及ぼす倒伏の影響について考察する。奈良では倒伏の影響があると考えられるのは第5図における3点目から4点目にかけてである。そこで4点目を除いて検定を行ったところ、密植区と慣行区の回帰直線の傾きはほぼ同じ値で有意差もなく、RUEには密植区と慣行区で差はなかった(データ略)。したがって、奈良の密植区が倒伏しなかったとしても密植区のRUEは慣行区と変わらなかったと考えられた。山口では播種後69日の台風による倒伏は、子実肥大期(播種後71日)の2日前の出来事であり、RUEへの影響は小さいと考えられた。

以上の結果から、年次と地域が異なっても、30本 m^{-2} 以上の密植によって (1) 「サチユタカ」の収量は増加しないこと、(2) 個体当たり分枝節数が減少すること、(3) 開花期以降の受光量、日射利用効率および乾物生産量が向上しないことの3点は共通していた。一方、栽植密度に対する群落の節数の反応は地域により異なっており、密植によって個体当たり分枝節数が減少しても群落の分枝節数は減少せず、群落の節数が増加する場合があった。これらのことから、適期播種した「サチユタカ」において密植しても収量が増加しないのは、密植によって個体当たり分枝節

数が減少して群落の節数が増加しなくなるためではなく、密植しても開花期以降の受光量および日射利用効率が向上しない、すなわち乾物生産量が向上しないことが原因であると考えられた。

第2節 ダイズ品種「サチユタカ」の乾物生産と収量に及ぼす不耕起栽培の効果

西日本においてダイズの播種適期は梅雨時期と重なっており、降雨によって作業できないことも多い。例えば、通常の耕起後に播種を行う体系では耕起後に降雨があった場合、圃場内でのトラクタの走行が不可能となるため播種作業が行えない。一方、不耕起栽培では地耐力が高いため、降雨直後であっても播種作業が可能であり、より短い期間で播種作業を行うことが可能である（濱田ら 1986）。水田転換畑において不耕起栽培したダイズ（以下、不耕起ダイズ）の収量に関して、その収量は耕起栽培したダイズ（以下、耕起ダイズ）と同等以上とする報告が多い（小柳ら 1998, 高橋・中村 2004, 長野間 2004, 谷ら 2008, 坂東・藤山 2010）。一方、水田転換畑における不耕起ダイズの生育については、初期の主茎長が短く生育が抑制気味になるという報告はあるものの（長野間ら 1991, 丸本ら 1992）、栽培期間を通した不耕起ダイズの生育特性は明らかではない。

一般的に、水田転換畑は地下水位が高いため生育初期には梅雨の影響により多湿となりやすく（中山 2002）、ダイズの開花期である 7 月中旬から 8 月下旬にかけては、蒸発量が降水量に比較して多くなるため乾燥するという特徴がある（平沢 1995）。水田転換畑において開花期までの降水量が平年より多い場合は、開花期のダイズの主茎長や葉身窒素含有率が小さく、子実収量が減少するという報告があり（古畑ら 2011）、水田転換畑におけるダイズの生育収量は降水量の影響を強く受けることが考えられる。不耕起栽培したダイズにおいても降水や土壤水分

が生育に影響することが報告されている。播種直後に降水があった場合には、不耕起圃場では表面に凹凸が残っているため、表面水の滞水や排水不良からダイズの出芽苗立ちを低下させるが（濱田ら 2007）、逆に乾燥時には、不耕起土壌は耕起土壌と比較して土壌水分が高く維持されるため、ダイズの生育に有利である（吉永ら 2008）とされている。

このような特徴を持つ日本の水田転換畑においては、単に不耕起ダイズの乾物生産過程や群落の成長速度を明らかにするだけでなく、それらを降水量の多少と関連付けることが重要と考えられる。そこで本研究では、水田転換畑において異なる降水条件下で生育した不耕起ダイズの乾物生産過程を耕起ダイズのそれと比較することにより、不耕起ダイズの生育特性を明らかにした。

材料と方法

試験は2009年および2010年に大阪府高槻市の京都大学大学院農学研究科附属高槻農場の水田転換畑で実施した。作土の土性は埴壤土だった。供試水田における試験開始前の4年間（2005年から2008年）の作付けは水稻単作であり、2009年の夏作からダイズの水田転換畑作（冬期休閑）を開始した。

圃場を4分割して、それぞれの中に不耕起区と耕起区を設けた。2009年はそのうち3区画を3反復として使用し、2010年は4区画を4反復として使用した。各反復の大きさは、4 m×5 m とした。第3-2-1表に、ダイズ播種前の作土の化学性を示した。各年次において、全炭素、全窒素、EC、pH (H₂O) および可給態窒素に耕起法間で有意差が認められなかった。年次間では、ECが2009年と比べて 2010年で有意に低かった。可給態窒素および pH (H₂O) に年次間で有意差が認められなかった。

両年ともに、ダイズ品種「サチユタカ」を供試した。耕起区は播種前に作土約15 cm を2回耕起した。不耕起区は前作の収穫後から耕起を行わなかった。2009年は6月19日に、株間20 cm, 条間40 cm (12.5株 m⁻²) で播種した。2010年は6月28日に、株間15 cm, 条間30 cm (22.2株 m⁻²) で播種した。両年とも、1株2粒播種し、初生葉展開後に、間引きを行って1株1本立てとした。両年とも窒素施肥は行わなかった。生育期間中の管理は無中耕無培土とし、雑草と病害虫の防除を適宜行った。

日降水量を圃場近傍に設置した転倒柵式雨量センサー (TE525 - MM, Campbell Scientific Inc.) で測定し、データロガー (CR10X, Campbell Scientific Inc.) を用いて記録した。地表から深さ20 cm までの土壤水分含量を、TDR (Tektronix 1502 C, Campbell Scientific Inc.) を用いておよそ7日間隔で測定した。

2009年は播種後49 (開花期), 74 (着莢期), 97日 (子実肥大期) および128日 (成熟期), 2010年は播種後44 (開花期), 63 (着莢期), 85日 (子実肥大期) および121日 (成熟期) に地上部の生育を調査した。1回の調査で反復当たり2009年は

第3-2-1表 播種前作土の化学性.

| 年次 | 耕起法 | 全炭素 % | 全窒素 % | EC mS m ⁻¹ | pH (H ₂ O) | 可給態 窒素 mg kg ⁻¹ |
|---------|-----|----------|----------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 2009 | 耕起 | 2.74 | 0.21 | 10.4 | 6.0 | 50.8 |
| | 不耕起 | 2.70 | 0.19 | 10.0 | 5.8 | 57.1 |
| 2010 | 耕起 | - | - | 6.2 | 6.0 | 58.0 |
| | 不耕起 | - | - | 6.0 | 5.9 | 71.9 |
| 耕起法 (A) | | ns | ns | ns | ns | ns |
| 年次 (B) | | - | - | * | ns | ns |
| A × B | | - | - | ns | ns | ns |

*, ns; 5%水準でそれぞれ有意差あり, 有意差なし.

6株, 2010年は9株の地上部を子葉節で切断して採取した. 採取したサンプルの主茎長と主茎節数を測定した. 開花期と着莢期において, 採取したサンプルのうち1株について葉面積を計測した. その後, サンプルを80°Cで72時間通風乾燥し, 乾物重を測定した. これらから, 開花期から着莢期における個体群成長速度 (CGR), 純同化率 (NAR) および平均葉面積指数 ($\overline{\text{LAI}}$)を算出した. 開花期と着莢期のダイズ葉身の窒素含有率をケルダール法により測定した. 2010年は開花期と着莢期に, ダイズ地上部のサンプリングと同時に, Takahashi et al. (1993) の方法に従い相対ウレイド法により根粒の窒素固定活性を測定した.

収穫期に反復当り2009年は6株, 2010年は15株を採取し, 収量調査を行った. 採取した個体の莢数, 粒数, 百粒重, 含水率を測定して, 子実収量および収量構成要素を算出した. なお, 子実収量の含水率は15% とした.

得られたデータについて, 各項目について耕起法と年次で2要因分散分析を行った.

結果

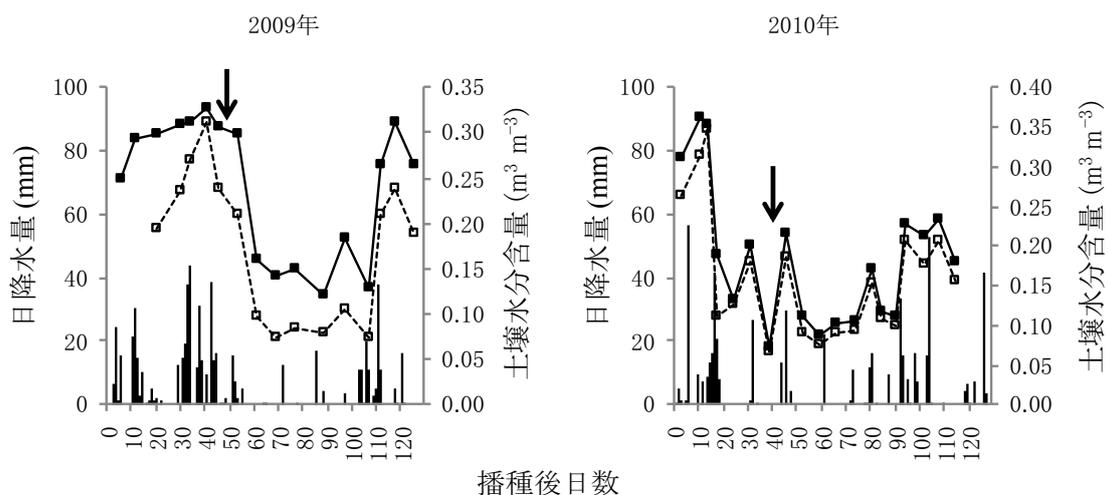
第3-2-2表に2009年および2010年における6月から10月までの月別日射量を示した. 開花期から着莢期を含む8月の日射量は, 2009年と比較して2010年が高かった. 第3-2-1図に, ダイズ生育期間中の日降水量と表層から20 cm の土壤水分含量を示した. 2009年, 2010年いずれの年次においても, 生育初期に降水が多く, そ

第3-2-2表 月別日射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

| 年次 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 |
|------|------|------|------|------|------|
| 2009 | 20.0 | 17.0 | 18.1 | 17.1 | 13.0 |
| 2010 | 17.9 | 18.6 | 20.4 | 16.0 | 12.2 |

播種日から成熟期までの日別値を月ごとに平均して算出した.

の後、降水は減少し、生育後半に再び降水が多くなる傾向が認められた。播種から開花期までの積算降水量は2009年が406 mm、2010年は234 mm であった。また、播種から開花期までの全日数（2009年；49日間、2010年；44日間）のうち、1 mm 以上の降水を観測した日数の割合は2009年と2010年でそれぞれ 55%と33%であった。つまり、2009年は、2010年と比較して、播種から開花期までの降水の頻度が高く総降水量も多かった。表層から20 cm の土壤水分含量は、2009年、2010年いずれの年次においても日降水量の推移と同様に、生育初期は高く維持されて、その後急激に低下し、生育後半に再び高く維持される傾向が認められた。また、2009年は土壤水分含量が開花期まで高く維持されたのに対して、2010年は播種後2週間程度で低下した。つぎに、耕起法間で比較すると、2009年は生育期間を通して耕起と比較して不耕起は土壤水分含量が高く推移した。2010年は、播種後2週間は耕起と比較して不耕起で土壤水分含量が高く推移し、その後は耕起法間に相違はみられなかった。



第 3-2-1図 ダイズ生育期間中の日降水量と土壤水分含量の推移。
 棒は日降水量、折れ線は土壤水分含量を示す。
 ■:不耕起, □:耕起. 矢印は開花期を示す。

第3-2-3表 生育時期別のダイズ主莖長 (cm).

| 年次 | 耕起法 | 開花期 | 着莢期 | 子実肥大期 | 成熟期 |
|---------|-----|------------|------------|------------|------------|
| 2009 | 耕起 | 42.3 ± 0.3 | 49.5 ± 1.0 | 46.0 ± 3.0 | 46.6 ± 2.4 |
| | 不耕起 | 33.8 ± 1.3 | 39.6 ± 2.3 | 39.2 ± 1.8 | 42.2 ± 2.5 |
| 2010 | 耕起 | 45.0 ± 2.6 | 47.1 ± 3.1 | 47.5 ± 1.9 | 48.6 ± 2.7 |
| | 不耕起 | 42.0 ± 0.9 | 48.7 ± 1.8 | 49.0 ± 1.8 | 47.9 ± 1.4 |
| 耕起法 (A) | | * | ns | ns | ns |
| 年次 (B) | | ** | ns | * | ns |
| A × B | | ns | * | ns | ns |

平均値±標準誤差.

**, *;それぞれ 1%, 5%水準で有意差あり.

ns;5%水準で有意差なし.

第3-2-4表 生育時期別のダイズ主莖節数.

| 年次 | 耕起法 | 開花期 | 着莢期 | 子実肥大期 | 成熟期 |
|---------|-----|------------|------------|------------|------------|
| 2009 | 耕起 | 14.4 ± 0.7 | 14.0 ± 0.3 | 14.4 ± 0.1 | 14.2 ± 0.3 |
| | 不耕起 | 12.7 ± 0.3 | 13.9 ± 0.1 | 13.9 ± 0.1 | 14.2 ± 0.2 |
| 2010 | 耕起 | 13.0 ± 0.3 | 13.0 ± 0.2 | 13.1 ± 0.2 | 13.2 ± 0.2 |
| | 不耕起 | 12.9 ± 0.1 | 12.8 ± 0.2 | 13.4 ± 0.1 | 12.8 ± 0.3 |
| 耕起法 (A) | | ns | ns | ns | ns |
| 年次 (B) | | ns | *** | *** | *** |
| A × B | | ns | ns | * | ns |

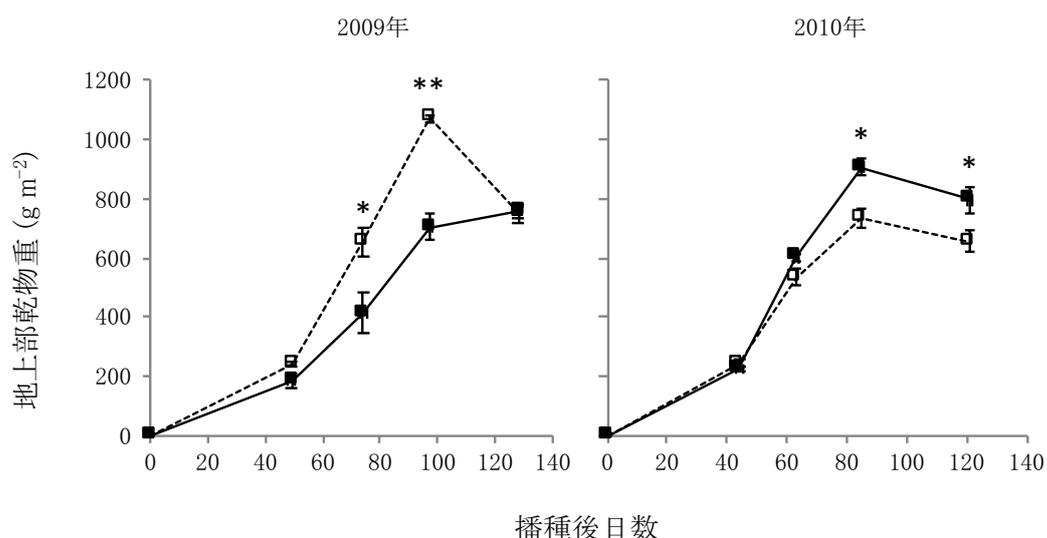
***, *;それぞれ 0.1%, 5%水準で有意差あり. ns;5%水準で有意差なし.

第3-2-3表に、生育時期別のダイズの主莖長を示した。開花期の主莖長は耕起と比べて不耕起で有意に短かった。年次で比較すると、2009年は2010年よりも主莖長が短かった。2010年は着莢期以降、不耕起と耕起で主莖長はほとんど変わらなかったことに対して、2009年は生育期間を通して耕起と比較して不耕起の主莖長が短い傾向であった。主莖節数も同様の傾向であった。すなわち、2010年は不耕起と耕起で主莖節数は変わらなかったが、2009年では開花期において耕起と比べて不耕起で主莖節数が少なかった（第3-2-4表）。年次で比較すると、2009年は2010年よりも主莖節数が着莢期以降有意に多かった。

第3-2-2図にダイズ地上部乾物重の推移を示した。2009年は開花期において、耕起と比較して不耕起の地上部乾物重が小さい傾向であった。着莢期と子実肥大期では耕起と比較して不耕起の地上部乾物重が有意に小さかった。2010年は着莢期において、耕起と比較して不耕起の地上部乾物重が大きい傾向であった。子実肥大期および成熟期では耕起と比較して不耕起で有意に地上部乾物重が大きかった。

第3-2-5表に収量、収量構成要素および収穫指数を示した。2009年および2010年において、収量と収量構成要素に耕起法間で有意差が認められなかった。年次で比較すると、2009年は2010年と比較して莢数と収量が有意に多かった。

第3-2-6表に、開花期から着莢期のCGR、NARおよび \overline{LAI} を示した。2009年は、耕起と比較して不耕起のCGRおよびNARが有意に小さかった。2010年は、耕起と比較して不耕起のCGRおよびNARが有意に大きかった。2009年、2010年いずれも、 \overline{LAI} に耕起法間で有意差が認められなかった。CGRおよびNARに、年次と耕起法の間で有意な交互作用が認められた。



第3-2-2図 耕起法別の地上部乾物重の推移。

■:不耕起, □:耕起. バーは標準誤差を示す.

** , * ;それぞれ 1%, 5%水準で耕起法間に有意差があることを示す.

第3-2-7表に、開花期と着莢期のダイズの葉身窒素含有率を示した。開花期の葉身窒素含有率には耕起法と年次の間に交互作用があった。2009年は、耕起と比べて不耕起の葉身窒素含有率が低かったが、2010年は耕起法間で変わらなかった。一方、着莢期には耕起法間で有意差が認められなかった。年次間では、開花期および着莢期において2009年と比較して2010年の葉身窒素含有率が有意に高かった。第3-2-8表に、開花期と着莢期における相対ウレイド値を示した。各時期において、相対ウレイド値に有意な耕起法間差は認められず、根粒の窒素固定活性に耕起法間で相違はみられなかった。

第 3-2-5 表 ダイズの収量と収量構成要素.

| 年次 | 耕起法 | 莢数 m ⁻² | 一莢粒数 | 百粒重 g | 子実重 g m ⁻² |
|---------|-----|-----------------------|-----------|------------|--------------------------|
| 2009 | 耕起 | 934 ± 88 | 1.6 ± 0.1 | 33.3 ± 0.7 | 506 ± 15 |
| | 不耕起 | 956 ± 38 | 1.6 ± 0.0 | 32.9 ± 0.4 | 515 ± 24 |
| 2010 | 耕起 | 799 ± 7 | 1.6 ± 0.0 | 33.4 ± 0.8 | 433 ± 8 |
| | 不耕起 | 783 ± 16 | 1.6 ± 0.0 | 32.5 ± 0.6 | 410 ± 17 |
| 耕起法 (A) | | ns | ns | ns | ns |
| 年次 (B) | | ** | ns | ns | *** |
| A × B | | ns | ns | ns | ns |

平均値±標準誤差.

***, **;それぞれ 0.1%, 1%水準で有意差あり.

ns;5%水準で有意差なし.

第 3-2-6 表 開花期から着莢期における個体群成長速度 (CGR), 純同化率 (NAR) および平均葉面積指数 ($\overline{\text{LAI}}$).

| 年次 | 耕起法 | CGR $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | NAR $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | $\overline{\text{LAI}}$ |
|---------|-----|--|--|-------------------------|
| 2009 | 耕起 | 16.5 ± 1.6 | 3.3 ± 0.2 | 4.9 ± 0.2 |
| | 不耕起 | 9.1 ± 2.0 | 2.3 ± 0.2 | 4.0 ± 0.6 |
| 2010 | 耕起 | 15.3 ± 1.0 | 3.2 ± 0.1 | 4.8 ± 0.2 |
| | 不耕起 | 19.7 ± 0.9 | 3.8 ± 0.2 | 5.1 ± 0.2 |
| 耕起法 (A) | | ** | ** | ns |
| 年次 (B) | | ns | ns | ns |
| A × B | | ** | *** | ns |

平均値 ± 標準誤差.

***, **; それぞれ 0.1%, 1% 水準で有意差あり.

ns; 5% 水準で有意差なし.

第 3-2-7 表 開花期と着莢期における葉身窒素含有率 (%).

| 年次 | 耕起法 | 開花期 | 着莢期 |
|---------|-----|-----------|-----------|
| 2009 | 耕起 | 2.8 ± 0.2 | 4.6 ± 0.0 |
| | 不耕起 | 1.6 ± 0.0 | 4.6 ± 0.1 |
| 2010 | 耕起 | 4.8 ± 0.0 | 5.4 ± 0.1 |
| | 不耕起 | 4.8 ± 0.1 | 5.5 ± 0.0 |
| 耕起法 (A) | | *** | ns |
| 年次 (B) | | *** | *** |
| A × B | | *** | ns |

平均値 ± 標準誤差.

***; 0.1% 水準で有意差あり.

ns; 5% 水準で有意差なし.

第 3-2-8 表 2010 年の開花期と着莢期における
相対ウレイド値 (%).

| 耕起法 | 開花期 | 着莢期 |
|-----|------------|------------|
| 耕起 | 67.1 ± 1.6 | 67.4 ± 8.8 |
| 不耕起 | 61.9 ± 1.6 | 76.4 ± 2.3 |

平均値 ± 標準誤差.

各時期において 5% 水準で耕起法間に有意差なし.

考察

ダイズ生育初期に過湿が特に生じやすい水田転換畑において、異なる降水条件下で生育した不耕起ダイズの乾物生産過程を耕起ダイズのそれと比較することにより、水田転換畑作不耕起ダイズの生育特性を降水量の多少と関連付けて検討した。

主茎長、主茎節数、地上部乾物重を耕起法間で比較したところ、2009年における不耕起ダイズの生育は耕起ダイズと比較して抑制されていたが、2010年における不耕起ダイズの生育は耕起ダイズと比較して旺盛であった。特に、地上部乾物重の増加が著しい開花期から着莢期のCGRに年次と耕起法間で有意な交互作用が認められた。同時期のCGRの年次間の変動係数は不耕起と耕起でそれぞれ52%と5%であり、耕起と比べて不耕起でCGRの年次変動が大きいことが明らかになった。

2009年において、不耕起ダイズの開花期から着莢期のCGRが耕起と比較して低かったのは、同時期の不耕起ダイズのNARが耕起と比較して低かったためであった。葉身窒素含有率は個葉光合成速度と密接な関係があることから (Sinclair & Horie 1989), NARに影響を及ぼす要因のひとつと考えられる。2009年は耕起と比較して不耕起で開花期の葉身窒素含有率が有意に低かったために、開花期から着莢期のNARが低かった可能性が推察された。不耕起で葉身窒素含有率が低かった要因のひとつとして、2009年は、2010年と比較して播種から開花期までの降水量が多く、なおかつ、播種から開花期まで、不耕起では耕起と比較して土壌水分の高い状態が維持されたことが考えられた。水田転換畑において、開花前の花芽分化期に過湿条件におかれると、ダイズの主茎長が短くなるとともに、葉身窒素含有率が低下することが報告されている (杉本 1994)。これらのことから、本研究

において、2009年は不耕起で土壌の過湿が著しかったものと考えられた。

一方、播種後2週間程度で土壌水分が低下した2010年では、耕起と比較して不耕起のCGRおよびNARが高かった（第3-2-1図, 第3-2-6表）。本研究の結果と同様に、畑地において、不耕起ダイズは耕起ダイズと比較して、NARの増加によって開花期以降CGRが大きくなることが示されている（Yusuf et al. 1999）。しかし、不耕起ダイズのNARが開花期以降に大きくなる理由については明らかではない。本研究の結果では、2010年の開花期と着莢期の葉身窒素含有率および根粒の窒素固定活性に有意な耕起法間差は認められなかったことから、2010年のNARの耕起法間差には窒素以外の要因が関与した可能性があると考えられた。

不耕起栽培においてダイズの乾物生産が収量に及ぼす影響について、本研究では各年次において開花期以降の乾物生産に耕起法間で差があったが、莢数および収量に耕起法間で差が認められなかった。これは第2章および先行研究（浅沼 1977）とは異なる結果であった。しかし、第2章の結果を含めて、これまでの乾物生産と収量に関する研究結果は栽植密度や播種時期を変更したダイズ群落について行われたものであり、本研究のように耕起方法を変更したものではない。耕起方法を変更した場合の乾物生産と収量の関係についてはさらなる研究が必要と考えられる。本研究では収量に年次間差があり、2010年は2009年に比べて収量が低かった。これまでの研究から、播種期が遅くなると、主茎節数および莢数が減少することにより、収量が低下することが明らかにされている（浅沼・奥村 1991, 内川ら 2009）。2010年は2009年と比較して、主茎節数および莢数が減少したことから、2010年の収量の低下には、播種時期の遅れによる主茎節数および莢数の減少が影響したと考えられた。

以上のことから、出芽・苗立ち後の降水量が少ない年には、開花期以降の不耕起ダイズの生育は耕起と比較して旺盛となるが、出芽・苗立ち後の降水量が多い

年には、不耕起では土壌が過湿となってダイズの葉身窒素含有率が低下するため、開花期以降のダイズの生育は耕起と比較して抑制される可能性が示された。

第3節 結論

本章ではダイズの乾物生産を向上させる可能性のある栽培管理として栽植密度と耕起方法に着目し、ダイズ品種「サチユタカ」におけるそれらの効果を検証した。その結果、栽植密度については30本 m^{-2} 以上に密植しても、15~17本 m^{-2} 程度と比較して開花期以降の受光量および日射利用効率が向上しないため、乾物生産量は向上しないことが明らかとなった。耕起方法については、不耕起栽培を行うことで開花期以降の乾物生産は変化するものの、その効果は降水量によって変動する可能性があること、不耕起栽培によって開花期以降の乾物生産が高まっても収量の向上にはつながらないことが明らかとなった。これらを第2章の結果とあわせて考えると、生産現場におけるダイズ収量を向上および安定化させるためには、適切な栽植密度（15本 m^{-2} 程度）を確保し、排水対策および灌漑の実施によって土壌水分の変動を抑える栽培管理が必要であると考えられた。

第4章

近接リモートセンシングを用いたダイズ地上部乾物重の 推定法の高精度化

これまでに述べてきたとおり、ダイズ栽培では地上部乾物重の管理が重要であり、先行研究においても地上部乾物重に着目した生育指標が提案されている。例えば、藤井ら（1985）は山形県において安定多収には播種から開花期までの乾物重増加量が $280\sim 320\text{ g m}^{-2}$ 必要であること、Board & Modali（2005）はアメリカ南部で多収を達成するためには開花始期と子実肥大始期のダイズ地上部乾物重がそれぞれ 200 g m^{-2} と 600 g m^{-2} 必要であることを示している。Board & Modali（2005）が示した式によると、子実肥大始期の地上部乾物重が 600 g m^{-2} のとき、予想される収量は 375 g m^{-2} である。こうした指標をもとに、生産現場において地上部乾物重の圃場内・圃場間の変動を正しく迅速に評価できれば、低収量要因の解明や生産性向上技術の開発につながると期待される。しかし、ダイズの生育期間中に地上部乾物重の圃場内・圃場間の変動を刈取法のみによって調査することは、多大な労力が必要で生産者はもちろん農業改良普及員や研究者にとっても容易ではない。また、生産現場で調査することから、非破壊的手法のほうが望ましく、ダイズ地上部乾物重の圃場内・圃場間の変動を非破壊法によって正しく迅速に調査する方法の開発が進められている。

広範囲の植生の状態を非破壊で調査するにはリモートセンシングが適している。これまで、マルチスペクトルセンサーやハイパースペクトルセンサーを用いて、ダイズの生育量と分光反射の関係について数々の研究が行われてきた。その結果、

分光反射率を組み合わせた植生指数を使うことで、ダイズの葉面積指数 (LAI) (Holben & Tucker 1980, 山本・本條 1990), 受光量 (Baret & Guyot 1991, Daughtry et al. 1992), クロロフィル含量 (Gitelson et al. 2005, Inoue et al. 2016) を推定できることが明らかにされている。しかし, 地上部乾物重については, 植生指数の単回帰では十分な精度で推定できないとする報告が多い (Holben & Tucker 1980, Thenkabail et al. 1994)。山本・本條 (1990) は九州で栽培した「フクユタカ」において, 近赤外領域 (850 nm) と可視域赤 (650 nm) の分光反射比を用いて地上部乾物重の推定を行ったが, 推定が可能な時期は子実肥大始期までで, それ以降は異なる波長 (450 nm と 1050 nm) の分光反射比を利用する必要があるとしている。このように生育期間を通じたダイズの地上部乾物重の推定は 1 つの分光反射比による単回帰モデルでは難しいと考えられる。

一方, Monteith (1977) が提唱した群落の生産速度は群落の受光量に比例するというモデルに基づき, 植生指数を利用した乾物生産量の推定が試みられている。Monteith (1977) が提唱したモデルは以下の通りである。

$$TDM = \int_{t_1}^{t_2} RUE \times f \times I dt \quad (1)$$

ここで TDM はダイズ地上部乾物重 ($g m^{-2}$), t_1 は播種日, t_2 は播種日から任意の時点までの日数, RUE は日射利用効率 ($g MJ^{-1}$), f は群落の受光率, I は群落に入射する日射量 ($MJ m^{-2}$) である。Daughtry et al. (1992) はダイズにおいて正規化植生指数 (NDVI) と群落の受光率が直線関係にあることを示した。

$$f \propto NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (2)$$

ここで R_{NIR} と R_{Red} はそれぞれ近赤外領域と可視域赤の反射率である。

さらに (1) 式と (2) 式から,

$$TDM \propto \int_{t_1}^{t_2} NDVI \times I dt \quad (3)$$

としてトウモロコシとダイズの地上部乾物重の推定が行われている (Daughtry et al. 1992). しかし, NDVIを用いた地上部乾物重の推定では, 生育後半の葉の老化に伴うクロロフィル含量の低下が生じると f が増加してもNDVIは増加しなくなること (Viña & Gielteson 2005), NDVIによって f は推定できても RUE は推定できないため, RUE を定数として与える必要があり, 生育環境が異なる作物群落の地上部乾物重を推定するには精度が低くなることが指摘されている (Gitelson et al. 2006). 実際に年次間で異なる推定式が導かれている (Daughtry et al. 1992).

Gitelson et al. (2006) は, これらの問題を解決する方法として, 群落のクロロフィル含量を推定するクロロフィル指数 (Chlorophyll Index, 以下CI) の利用を提案し, CIと光合成有効放射の積によってトウモロコシとダイズの日中の群落総光合成速度を推定できることを示した. モデルは以下の通りである.

$$CI = \frac{R_{NIR}}{R_{Green}} - 1 \quad (4)$$

$$GPP \propto CI \times PAR \quad (5)$$

ただし, R_{NIR} と R_{Green} はそれぞれ近赤外領域 (840-870nm) と可視域緑 (545-565nm) の反射率, GPP は日中の群落総光合成速度 ($\text{mgCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), PAR は光合成有効放射 ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) である.

Gitelson et al. (2006) が示したのは群落の光合成速度 ($\text{mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) であるが, このことを応用して以下のように (3) 式におけるNDVIの代わりに (4) 式のCIを導入することで, NDVIよりも高い精度でダイズの地上部乾物重を推定できると考えた.

$$TDM \propto \int_{t1}^{t2} CI \times I dt \quad (6)$$

ただし、 $t1$ は播種日、 $t2$ は播種日から任意の時点までの日数、 CI は日別のクロフィル指数、 I は日別の日射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) とする。

本研究では、ダイズの地上部乾物重を、従来の手法よりも高い精度でリモートセンシングにより推定することを目的に、 CI と日射量の積の積算値（以下、 $\Sigma(CI \times I)$ とする）が新たな植生指数として有効であるかどうかを検証した。比較対象の植生指数として、これまでにダイズの地上部乾物重が推定可能と報告されている近赤外領域と可視域赤の分光反射比RVI（山本・本條 1990）およびNDVIと日射量の積の積算値（Daughtry et al. 1992）（以下、 $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ とする）もあわせて検証した。

材料と方法

試験は2009年、2011年、2013年の3年間行った。2009年は奈良県農業総合センター（奈良県橿原市）、2011年と2013年は大豆生産者の水田転換畑圃場（奈良県桜井市）で行った。ダイズ品種は「サチユタカ」を用いた。播種日は2009年6月18日、2011年6月29日、2013年6月25日であった。

栽培様式は畝立て栽培で1株2粒播きとした。それぞれの年において狭畦区と慣行区を設けた。2009年は株間を20 cm として畝間を狭畦区45 cm、慣行区70 cm とした。栽植密度はそれぞれ22.2本 m^{-2} と14.2本 m^{-2} となった。2011年は株間を10 cm として畝間を狭畦区40 cm、慣行区60 cm とした。栽植密度はそれぞれ50.0本 m^{-2} と33.3本 m^{-2} となった。2013年は株間を15 cm として畝間を狭畦区50 cm、慣行区75 cm とした。栽植密度はそれぞれ40.0本 m^{-2} と17.8本 m^{-2} と

なった。施肥について、2009年は基肥を窒素成分で 2.4 g m^{-2} 施用し、追肥は施用しなかった。2011年と2013年は施肥を行わなかった。2009年は2反復、2011年と2013年は4反復とした。中耕培土、雑草防除および病害虫防除は現地慣行に従い適宜行った。

ダイズ群落の分光反射率を携帯式生育情報測定装置（株式会社荏原電産）で測定した（第4-1図）。携帯式生育情報測定装置は主に水稲での使用を想定して作成された近接リモートセンシング用の分光反射測定器である。測定部位の上下にセンサが配置され、上向きのセンサで入射光強度を、下向きのセンサで作物体からの反射光強度を同時に測定する。反射光強度を入射光強度で除して反射率とする。550 nm（可視域緑、以下 R_{Green} ）、650 nm（可視域赤、以下 R_{Red} ）、880 nm（近赤外領域、以下 R_{NIR} ）の3波長を同時に測定する。群落上端から60 cmの高さで測定することで直径約60 cm の円内の分光反射率を測定することが可能である。機器の詳細は紺屋（2004）の報告に述べられている。携帯式生育情報測定装置によるダイズ群落の分光反射率の測定を苗立ち後の7月中旬から子実肥大期の9月下旬までの間に行なった。2009年は4回、2011年は6回、2013年は3回測定した。いずれも測定は午前中に、処理区1反復につき1箇所を群落の上端から60 cm の高さで行っ



第 4-1 図 携帯式生育情報測定装置.

た. 測定を行った場所からダイズ4株(約8本)を子葉節で切断して採取し, 80°Cで72時間通風乾燥して重量を測定した.

測定した R_{Green} , R_{Red} , および R_{NIR} を用いて, 比植生指数RVI (Holben & Tucker 1980, 山本・本條1990), 正規化差分植生指数NDVI (Holben & Tucker 1980, Thenkabail et al. 1994), クロロフィル指数CI (Gitelson et al. 2005, Gitelson et al. 2006, Peng & Gitelson 2012)を算出した. NDVIとCIはそれぞれ(2)式と(4)式から算出した. RVIの算出方法は以下のとおりとした.

$$RVI = \frac{R_{NIR}}{R_{Red}} \quad (7)$$

調査期間中の $\Sigma(NDVI \times I)$ および $\Sigma(CI \times I)$ は次のとおり算出した. まず, 日々の日射量 I ($MJ m^{-2} day^{-1}$) は気象庁が公開しているデータのうち奈良県奈良市の合計全天日射量の日別値 ($MJ m^{-2}$) を用いた. 次に, NDVIとCIの測定値からそれぞれの日々の値を平滑化スプラインで推定した. 平滑化スプラインによる回帰においては, 播種日の値を0と仮定するとともに, 推定値が負の値となった場合は0とした. 得られた日々のNDVIおよびCIに日射量 I を乗じて日々の $NDVI \times I$ および $CI \times I$ を求め, 播種から地上部乾物重調査時点までの値を積算した.

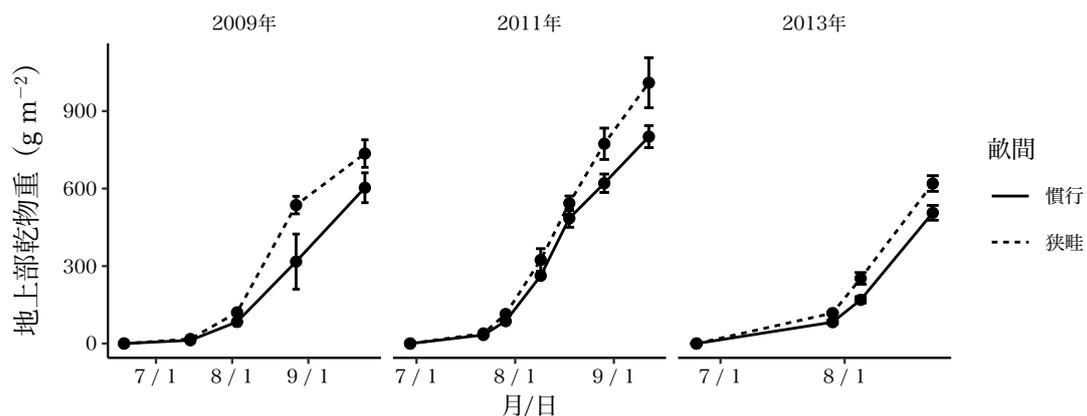
本研究では各植生指数を用いたモデルと実測した地上部乾物重との平均平方二乗誤差 (RMSE) を対照モデルのそれと比較することによって, 植生指数がダイズ地上部乾物重の推定に有効であるかどうか評価した. 対照モデルの設定については次のとおりとした. 本研究では各年次において各処理区を圃場内に無作為に配置したことから, 各時期におけるダイズ地上部乾物重の変動の大部分は年次, 畝間, および調査日までの積算日射量で説明できると考えられる. そこで, ダイズ地上部乾物重を目的変数とし, 年次, 畝間, 積算日射量およびそれらの交互作用を説明変数とするモデルを対照モデルとした. 統計解析にはR version 3.4.2. (R Core

Team 2017) を用いた。平滑化スプラインの計算にはパッケージ gss 2.1-7 (Chong 2014) を用いた。

結果

第4-2図に2009, 2011, 2013年に奈良県で栽培したダイズの地上部乾物重の推移を示した。いずれの年においても7月中旬の苗立ち後から9月中下旬の子実肥大期まで地上部乾物重は増加し続けた。慣行区と比べて狭畦区では地上部乾物重が高く推移した。

第4-3図に対照モデルによるダイズ地上部乾物重の推定結果を示した。決定係数は0.98で地上部乾物重の変動のほぼすべてを積算日射量と年次と畝間で説明することができた。第4-4図に平均平方二乗誤差 (RMSE) を示した。対照モデルのRMSEは栄養生长期間 (苗立ち期から開花期まで), 生殖生长期間 (開花期後), お

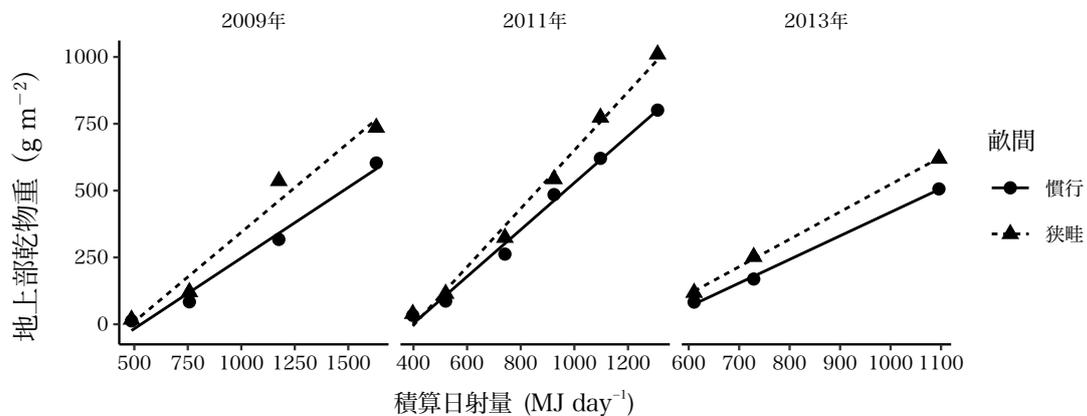


第4-2図 ダイズ地上部乾物重の推移。

2009年は奈良県橿原市, 2011年と2013年は奈良県桜井市で栽培したダイズのデータ。栽植密度は2009年は慣行区14.2本, 狭畦区22.2本 m^{-2} , 2011年は慣行区33.3本, 狭畦区50.0本 m^{-2} , 2013年は慣行区17.8本, 狭畦区40.0本 m^{-2} 。バーは標準誤差を示す。2009年は2反復, 他は4反復。

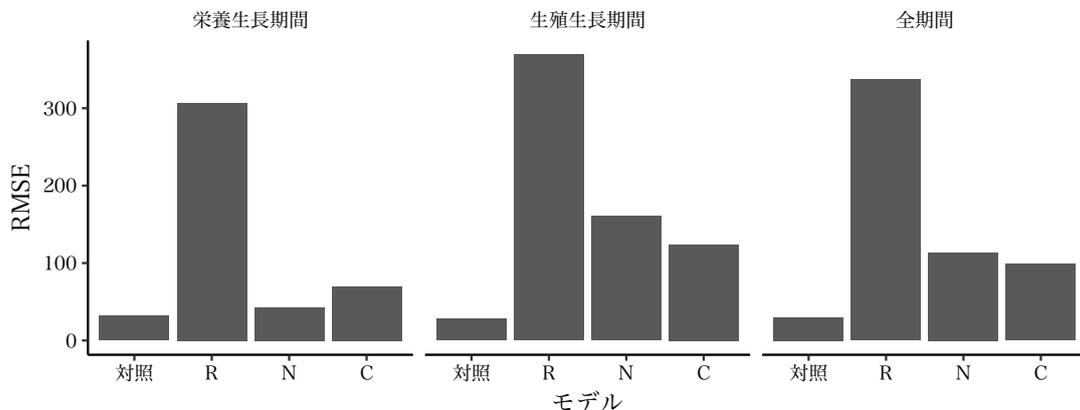
よび全期間でそれぞれ31.8, 28.0, および30.1だった。

第4-5図に地上部乾物重とRVIの関係を示した。値は年次と調査時期と処理区の組み合わせごとに反復を平均して算出した。2009年, 2011年, 2013年の3年分のデータを使用した。地上部乾物重とRVIの関係は開花期を境に異なっていた。すなわち, 栄養生长期間ではRVIと地上部乾物重には正の関係があった。一方, 生殖生长期間では, RVIと地上部乾物重に負の関係があった。しかし, 開花期後の決定係



第4-3図 ダイズ地上部乾物重と年次, 畝間別の積算日射量の関係。

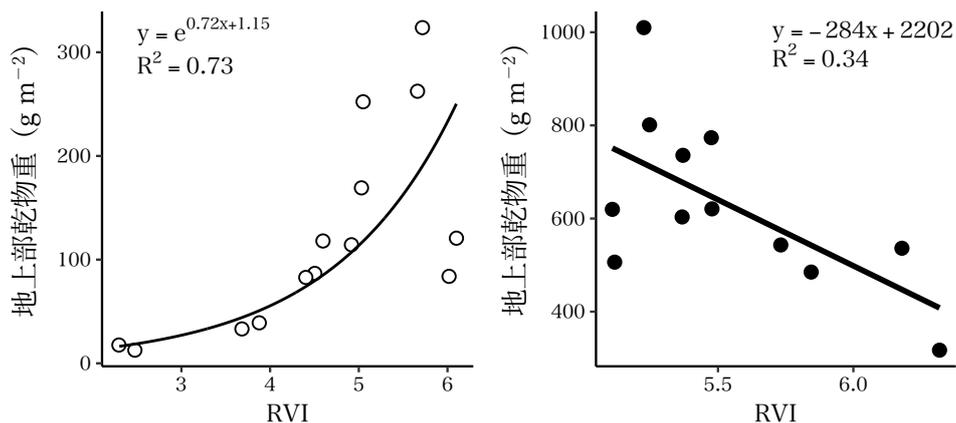
地上部乾物重のデータは第4-1図と同じ。積算日射量は奈良県奈良市の気象台の日々の日射量($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)を播種日から地上部乾物重調査日まで積算した。直線は対照モデル(地上部乾物重 \sim 積算日射量 + 年次 + 畝間 + 交互作用)による推定結果を示す。自由度調整済み決定係数は0.98。



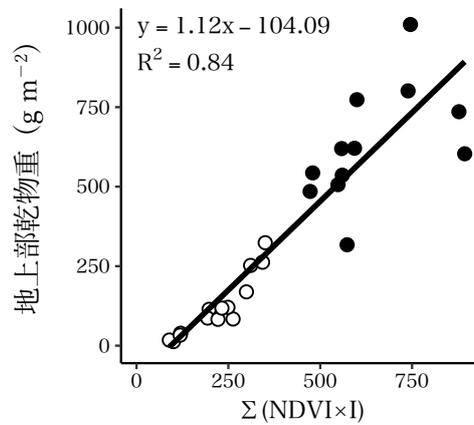
第4-4図 地上部乾物重を目的変数とする異なるモデルにおける平均平方二乗誤差 (RMSE)。対照は対照モデル, R, N, およびCはそれぞれRVI, $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$, および $\Sigma(\text{CI} \times I)$ を説明変数とするモデルを示す。RVIを説明変数とするモデルは栄養生长期間と生殖生长期間で異なる回帰式を適用した(第4-5図参照)。

数は0.34で開花期までの決定係数0.73と比べて非常に低かった。時期別のRMSEは栄養生长期間、生殖生长期間、および全期間でそれぞれ306.9、369.1、および337.0で対照モデルよりも約10倍大きかった（第4-4図）。RVIによるダイズ地上部乾物重の推定精度は低いことが示された。

第 4-6 図に $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ と地上部乾物重の関係を示した。2009年、2011年、2013年の3年分のデータを使用し、地上部乾物重は年次と調査日と処理区の組み合わせごとに反復を平均して算出した。地上部乾物重と $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ には有意な正の相関関係があった。時期別の RMSE は栄養生长期間、生殖生长期間、および全期間でそれぞれ 42.7、160.9、および 113.7 だった（第 4-4 図）。RMSE は対照モデルよりも大きかったが RVI モデルよりも改善した。しかし、栄養生长期間の誤差に対して生殖生长期間の誤差が大きかった。第 4-7 図に NDVI の推移を示した。NDVI は年次と畝間によらず同程度の値を示していた。

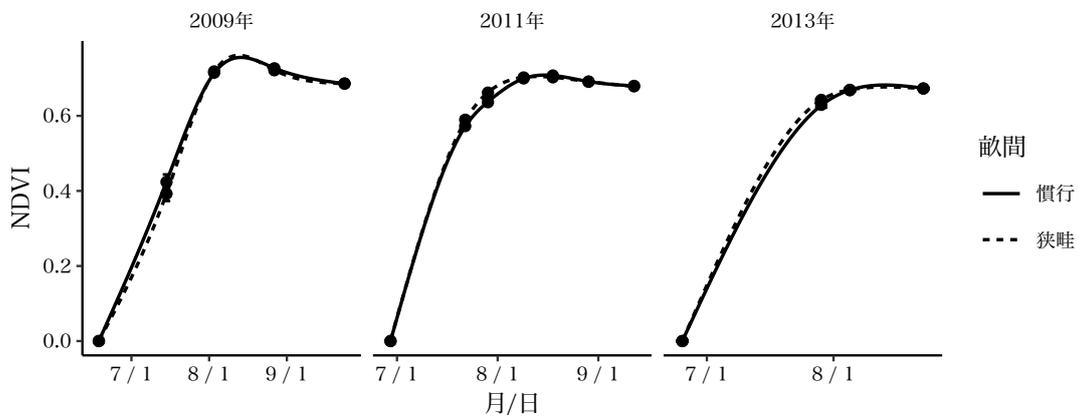


第 4-5 図 ダイズ地上部乾物重と RVI の関係（左：栄養生长期間，右：生殖生长期間）。値は年次と調査時期と処理区の組み合わせごとに反復を平均して算出した。苗立ちから開花期までを栄養生长期間、開花期より後を生殖生长期間とした。説明変数の効果は 栄養生长期間で 0.1%、生殖生长期間で 5%水準で有意。



第 4-6 図 ダイズ地上部乾物重と $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ の関係.

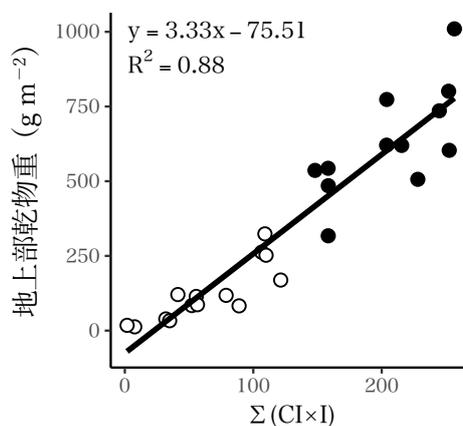
地上部乾物重は年次と調査日と処理区の組み合わせごとに反復を平均して算出した。白丸は栄養生長期（開花期以前）、黒丸は生殖生長期（開花期後）を示す。回帰直線は2つの生育期間を込みにして算出した。回帰式における説明変数の効果は0.1%水準で有意。



第 4-7 図 NDVI の推移.

曲線は平滑化スプラインによる平滑化回帰の結果を示す。図中の各調査時期における NDVI の値は反復の平均値として示したが、平滑化回帰には反復別のデータを用いた。バーは標準誤差を示す。

第4-8図に $\Sigma(CI \times I)$ と地上部乾物重の関係を示した。2009年, 2011年, 2013年の3年分のデータを使用し, 地上部乾物重は年次と調査日と処理区の組み合わせごとに反復を平均して算出した。地上部乾物重と $\Sigma(CI \times I)$ の間には有意な正の相関関係があり, 決定係数は0.88だった。時期別のRMSEは栄養生長期間, 生殖生長期間, および全期間でそれぞれ69.7, 123.9, および98.5だった(第4-4図)。 $\Sigma(NDVI \times I)$ モデルと比べて, RMSEは栄養生長期間では大きかったが, 生殖生長期間では小さかった。結果的に, 全期間のRMSEは $\Sigma(NDVI \times I)$ モデルより小さかった。このことから, 生育期間を通してダイズ地上部乾物重の推定を行う場合, $\Sigma(CI \times I)$ は $\Sigma(NDVI \times I)$ よりも精度が良いことが明らかとなった。第4-9図にCIの推移を示した。CIは年次および畝間で値の変動が大きく, CIは年次や畝間によるダイズの生育の違いを反映していたと考えられた。

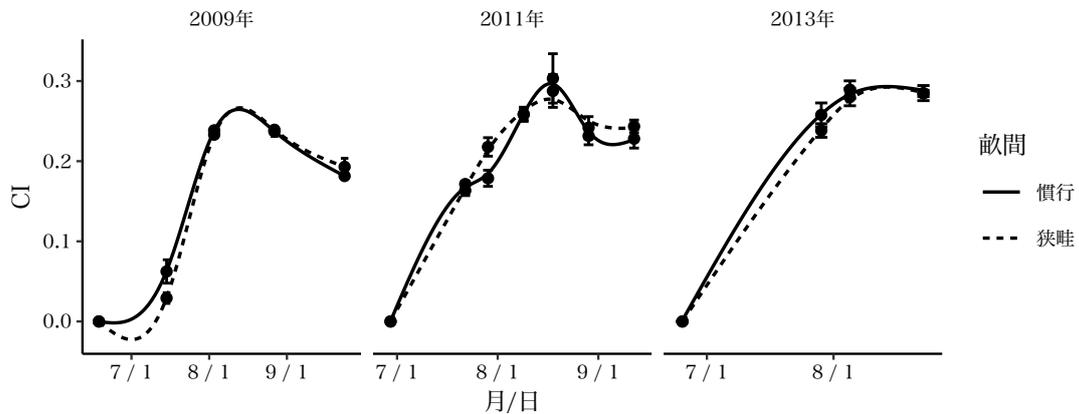


第4-8図 ダイズ地上部乾物重と $\Sigma(CI \times I)$ の関係。

地上部乾物重は年次と調査日と処理区の組み合わせごとに反復を平均して算出した。

白丸は栄養生長期間(開花期以前), 黒丸は生殖生長期間(開花期後)を示す。回帰直線は2つの生育期間を込みにして算出した。

回帰式における説明変数の効果は0.1%水準で有意。



第 4-9 図 CI の推移.

曲線は平滑化スプラインによる平滑化回帰の結果を示す.

図中の各調査時期における CI の値は反復の平均値として示したが、平滑化回帰には反復別のデータを用いた.

バーは標準誤差を示す.

考察

本研究では、リモートセンシングによってクロロフィル含量から群落の総生産速度を推定する植生指数 $CI \times I$ の積算値 $\Sigma(CI \times I)$ を使って、ダイズの地上部乾物重を推定することが可能かどうか、RVI や $\Sigma(NDVI \times I)$ と比較しつつ評価した. 評価は対照モデルの誤差 (RMSE) と各指数を説明変数とするモデルの RMSE を比較することで行なった. 対照モデルはダイズ地上部乾物重を目的変数とし、年次、畝間、積算日射量およびそれらの交互作用を説明変数とするモデルとした.

RVIによるダイズ地上部乾物重の推定について、栄養生長期間ではRVIと地上部乾物重には正の関係があったが、生殖生長期間ではRVIと地上部乾物重に負の関係があった. しかし、開花期後の決定係数は0.34で開花期までの決定係数0.73と比べて非常に低かった. 山本・本條 (1990) はダイズ品種「フクユタカ」において、子実肥大初期まではNIRとRedの分光反射比による単回帰で推定できるものの、子実肥大中期以降の地上部乾物重は十分に推定できないことを報告している. 本

研究では、開花期以前の地上部乾物重はRVIから推定できたことから、生育前半における地上部乾物重の推定は「サチユタカ」でも有効と考えられた。ただし、RMSEは対照モデルよりも約10倍大きく、推定精度は高いとはいえなかった。本研究には山本・本條（1990）の結果と異なる点もあった。まず、推定可能な時期が開花期までと短かったことであり、次に、山本・本條（1990）の報告した式では地上部乾物重が 200 g m^{-2} の時のRVIは10を超えていたが、本研究ではRVIはおおよそ6と小さい値だったことである（第4-5図）。推定可能な時期が短かったことについては、栽植密度の違いが影響していると考えられた。本研究では比較的密植だったため、早期に草冠により地表面が被覆され、地上部乾物重の変動がRVIに反映されなくなったと考えられた。次に、RVIの値の違いについては、供試したダイズ品種の違いや測定時の植物体の状態に起因する可能性がある。葉色、葉の表裏、葉の組織構造、毛茸やワックスの有無は葉の分光反射率に影響することが明らかにされている（玖村・石井 1971）。さらに、分光反射率の測定方法の違いも影響しているかもしれない。本研究で用いた携帯型生育情報測定装置では測定可能な NIR の中心波長は880 nm で、反射率は上向きのセンサで測定した入射光強度を用いて算出した。一方、山本・本條（1990）の用いた分光反射計ではNIRの中心波長は850 nm とやや短く、反射率は標準白色板の反射強度を用いて算出している。ただし、ダイズでは700 nm から900 nm にかけて波長が長いほど反射率が高くなることから（山本・本條1990）、本来であれば携帯型生育情報測定装置の方がRVIの値が高くなると考えられる。本研究で逆の結果が得られた理由については判然としなかったが、RVI による地上部乾物重の推定を行う際には測定機器や反射率の算出方法を統一すべきであると考えられた。

$\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ による地上部乾物重の推定では、RMSEは対照モデルよりも大きかったがRVIモデルよりも改善した。しかし、栄養生長期間の誤差に対して生殖生

長期間の誤差が大きかった。Gitelson et al. (2006) は、NDVIを用いたGPPの推定について、推定値と実測値とのばらつきが大きく、リモートセンシングによる推定には不向きであるとしている。その理由としては日射利用効率が生育期間を通じて変動するにも関わらず、NDVIにはその変動が反映されないためとされている (Gitelson et al. 2006)。実際にダイズでは開花期ごろにNDVIが飽和し、黄葉が始まるまでNDVIは変化しなくなる (Tucker et al. 1978)、NDVIはLAIや葉のバイオマスと非線形的な関係があるためLAIや葉のバイオマスが高くなるとNDVIは飽和してほとんど変化しなくなる (Holben & Tucker 1980) が明らかにされている。本研究においても地上部乾物重は8月上旬の開花期以降、畝間や年次で異なる値を示していたにも関わらず (第4-2図)、NDVIは年次と畝間によらず同程度の値を示していた (第4-7図)。このことから、 $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ ではダイズの地上部乾物重を精度よく予測できなかつたと考えられた。

$\Sigma(\text{CI} \times I)$ モデルは $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ モデルと比べて、栄養生長期間ではRMSEが大きかったが、生殖生長期間では小さかった。結果的に全期間のRMSEは $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ モデルより小さかった。このことから、生育期間を通してダイズ地上部乾物重の推定を行う場合、 $\Sigma(\text{CI} \times I)$ は $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ よりも精度が良いことが明らかとなった。CIは年次および畝間で値の変動が大きく、CIは年次や畝間によるダイズの生育の違いを反映していたと考えられた (第4-9図)。このことが、 $\Sigma(\text{CI} \times I)$ でダイズの地上部乾物重を精度よく推定することができた理由と考えられた。

ただし、対照モデルと比べると $\Sigma(\text{CI} \times I)$ モデルのRMSEは3.3倍であり、誤差が十分小さいとはいえなかつた。その理由は畝間の違いとセンシングの頻度の低さにあると考えられた。畝間の違いについて、センシングに使用した生育情報測定装置はセンサ部を中心として半径30 cmの円内を測定する。本研究ではセンサ部が畝の直上となる位置で測定した。したがって畝間が30 cm以上であればいかなる

第4-1表 $\Sigma(CI \times I)$ を説明変数とするモデルの比較.

| モデル式 | AIC | R ² |
|---|-------|----------------|
| 地上部乾物重 $\sim \Sigma(CI \times I)$ | 242.7 | 0.88 |
| 地上部乾物重 $\sim \Sigma(CI \times I) + \text{畝間} + \text{交互作用}$ | 234.7 | 0.92 |

AICは赤池情報量規準, R²は自由度調整済み決定係数を示す.
 栄養生長期間と生殖生長期間を込みにして算出した.
 畝間は慣行0, 狭畦1の2値に変換して分析した.

畝間であろうと, 測定範囲内に入るのは1畝である. 本研究では畝間40~75 cmでダイズを栽培し, いずれも畝間は30 cmより大きかった. そのため携帯型生育情報測定装置で測定したCIには, 個体の生育状態の違いは反映されても, 畝間の違いによる個体密度の違いは十分反映されなかったと考えられた. そのため, 第4-8図の $\Sigma(CI \times I)$ による地上部乾物重の回帰式において説明変数に畝間を加えると赤池情報量規準AICは242.7から234.7に変化してモデルの予測力は改善された(第4-1表). したがって, 異なる畝間が存在する条件下で携帯型のセンシング機器を使用する場合には, 事前に畝間の情報を入手する, 畝間の違いを反映するためにある程度上方から広範囲の測定を行う, 畝と垂直の方向に連続的に測定を行うなどの対策が必要であると考えられた. 次にセンシングの頻度については, 本研究では $\Sigma(CI \times I)$ を算出するため, 定期的にCIを測定し, 平滑化回帰によって日々の値を推定した. この方法では測定間隔が短いほど精度が高まると考えられる. しかし, 本研究では2009年は4回, 2011年は6回, 2013年は3回と測定頻度は高くなかった. 測定頻度が最も高かった2011年と最も低かった2013年のRMSEを計算したところ, それぞれ54.2と60.0であり, モデルの精度はCIの測定頻度に影響される可能性が示唆された. これらのことが $\Sigma(CI \times I)$ モデルの誤差が対照モデルよ

りも大きかった理由と考えられた。

こうした問題はあるものの、 $\Sigma(CI \times I)$ は生育期間を通して地上部乾物重の推定が可能であり、生育ステージによって使用する波長を変更しなければならない RVIよりも測定が容易で、 $\Sigma(NDVI \times I)$ よりも推定精度が高いという利点があると考えられた。

結論

以上のことから、本研究で考案した $\Sigma(CI \times I)$ によって播種期から子実肥大期までのダイズ地上部乾物重を従来の方法に比較して精度高く推定できることが明らかとなった。ただし、開花期までの地上部乾物重の推定であれば、これまでに報告されている $\Sigma(NDVI \times I)$ でも十分推定が可能であった。これらの指数を利用する場合、その精度は測定頻度に影響される可能性がある。したがって、実際の生産現場でダイズ地上部乾物重をより高い精度で推定するためには、苗立ち後から高頻度（1～2週間に一度）で定期的なセンシングを行う必要がある。そのため、近年、普及が進んでいる携帯型NDVIセンサーやマルチコプター型のドローンは、操作の容易さから高頻度のセンシングに向いていると考えられる。本章で明らかにしたダイズ地上部乾物重の推定手法を生産現場に普及するためには、こうした機器を利用したセンシングの可能性について検討する必要がある。

第5章

携帯型センサーおよびマルチコプター搭載カメラを用いた ダイズ地上部乾物重推定手法の簡易化

第4章において、奈良県における3年間の研究の結果、植生指数と日射量を組み合わせることで大豆の地上部乾物重を近接リモートセンシングで推定できることを示した。奈良県の結果では、正規化差分植生指数（NDVI）およびクロロフィル指数（CI）ではどちらも地上部乾物重を推定できたが、子実肥大期までの期間であればCIの方がNDVIよりも推定の精度が高かった。いずれの植生指数を使う場合にも、苗立ち後から定期的なセンシングが必要と考えられた。そこで本章ではダイズ生産現場においても利用可能なセンシングの方法について検討することとした。

第4章でリモートセンシングに使用した携帯型生育情報測定装置は容易に作物群落の分光反射率を測定可能であるものの、近年、より小型で安価な携帯型NDVIセンサーが市販されており、農業現場での活用が模索されている（佐々木ら 2014）。携帯型センサーを利用することで、低コストかつ簡便にセンシングが可能となる。農業現場への普及が期待されるが、ダイズの生育予測に応用した研究は少なく、ダイズ生産における利用可能性は明らかではない。さらに近年、マルチコプターも急速に普及しており、農業生産への活用が期待されている。田中・近藤（2016）は自作のマルチコプターに市販のデジタルカメラを搭載して圃場上空からRGBおよび近赤外（NIR）の画像を取得し、植生指数を算出することで水稻の生育予測を行っている。マルチコプターに搭載可能なマルチスペクトルカメラも市販され

ており、植生指数の計測およびマッピングを行うサービスもいくつか市販されている。しかし、現状ではマルチコプターの利用範囲はこうした植生指数マップの作成や観察にとどまっており、これまでに蓄積されたリモートセンシングに関する研究成果の活用、およびマルチコプターで取得したデータを作物の栽培管理に利用可能な情報に変換する段階には至っていないという問題が指摘されている（井上・横山 2017）。

そこで本研究ではダイズ生産現場でも利用可能なこれらの携帯型センサーおよびマルチコプターを使用して、第4章で明らかにした植生指数と日射量を組み合わせた指標によるダイズ地上部乾物重の推定が可能であるか検討した。

材料と方法

試験は2018年に山口県農林総合技術センター（山口県山口市）内の水田転換畑で行なった。供試品種はダイズ「サチユタカ」で、2018年7月10日に畝立て播種した。畝間75cmで1株2本立てとした。株間を変更することで栽植密度2, 5, 10, 15, 30本 m^{-2} の5水準設定した。各水準の株間は133 cm, 53 cm, 27 cm, 18 cm, 9 cmだった。反復数は4として乱塊法に従って試験区を配置した。1反復は75 m^2 とした。以下、各処理区を2本区, 5本区, 10本区, 15本区, 30本区と表す。2本区は1穴3粒, 5本区と10本区は1穴2粒で手播きし, 15本区と30本区は機械播種した。2本区, 15本区および30本区は苗立ち後の7月23日（播種後13日）に間引いて1株2本立てとした。窒素施肥は行わなかった。病害虫防除として播種前にチアメトキサム・フルジオキサニル・メタラキシルM水和剤で種子処理し, 9月11日（播種後63日）にアゾキシストロビン水和剤, ジノテフラン液剤, テフルベンズロン乳剤を散布し, 9月27日（播種後79日）にクロラントラニリプロール水和剤, クロチア

ニジン水溶剤を散布した。雑草防除として播種直後にベンチオカーブ・ペンディメタリン・リニュロン粉粒剤を散布して、8月10日（播種後31日）にグルホシネート液剤を畝間散布した。中耕培土は歩行型の管理機を用いて8月7日（播種後28日）に1回行なった。2018年はダイズの播種後19日まで全く降雨がなく、さらに8月末まで7日しか降雨がなかったため、7月25日、8月3日、8月10日、8月22日（それぞれ播種後15、24、31、43日）に畝間灌水を行なった。

生育期間中の気象について、降水量と日射量を調査した。降水量は気象庁による山口県山口市の気象観測データから取得した日別値 (mm day^{-1}) を使用した。日射量は山口県山口市における観測データがないため、農研機構メッシュ農業気象データから取得した試験圃場を含む1kmメッシュの日別値 (MJ day^{-1}) を使用した。

ダイズ生育期間中に携帯型NDVIセンサーとマルチコプターに搭載したデジタルカメラを用いてダイズ群落の植生指数を調査した。携帯型NDVIセンサーはGreenSeeker Handheld Crop Sensor (株式会社ニコン・トリンプル) を用いた (第5-1図)。GreenSeeker は可視域赤と近赤外域の光を照射してその反射光を計測することでNDVIを算出する。機器の詳細は佐々木ら (2014) の報告に述べられている。以下、携帯型センサーと表す。携帯型センサーを使用してダイズ群落のNDVIを播種後15、22、31、37、45、48、52、63、66、74および79日の11回測定した。測定は畝の直上かつダイズ群落の上端からおよそ60 cm の位置で畝方向に2 m の距離を連続的に測定して、平均値を算出した。各反復において植生指数の測定を行う場所は固定して、その場所を常に調査した。

マルチコプターによる植生指数の調査は次のように行なった。機器はデジタルカメラ付きマルチコプター (Phantom4 Pro, DJI JAPAN 株式会社) とインター



第 5-1 図 携帯型 NDVI センサー.

バル撮影が可能なトレイルカメラ (TREL 10J-D, 株式会社GISupply) を用いた (第5-2図). トレイルカメラは近赤外画像を撮影可能にするため, あらかじめローパスフィルターを除去してIRフィルター (IR-76, 富士フイルム株式会社) に交換した. 撮影は播種後17, 22, 31, 38, 44, 48, 63, 66および79日の10回行なった. まず, マルチコプターのカメラで圃場のRGB画像を撮影した. 続いて, マルチコプターに改造したトレイルカメラを搭載してインターバル撮影で圃場の近赤外 (NIR) 画像を撮影した. いずれの画像も上空およそ50mから撮影し, 1チャンネル8 bit とした. いずれの画像においても撮影時には標準白色板も同時に撮影した. 標準白色板は市販の亚克力板に水性塗料 (アトムハウスペイント水性スプレースチールグレー, アトムサポート株式会社) を塗布し, 乾燥後につや消し用の水性塗料 (アトムハウスペイント水性スプレーつや消しクリア, アトムサポート株式会社) を塗布したものをを使用した. 作成した標準白色板は市販の標準白色板 (Camera Reflectance Calibration Ground Target Package, MAPIR) で校正した. GISソフト (QGIS, QGIS Development Team) を使用して, 撮影したR, G およびNIR画像において, 携帯型センサーで調査した場所を含む2畝×2 m のポリゴンおよび標準白色板を含むポリゴンを作成し, それらに含まれるピクセル値の

平均値を取得した。各反復のピクセル値を校正後の標準白色板のピクセル値で除し、それを各反復における反射率とした。NDVIとCIは以下のように計算した。

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (1)$$

$$CI = \frac{R_{NIR}}{R_{Green}} - 1 \quad (2)$$

ここで、 R_{Red} 、 R_{Green} および R_{NIR} は上記の方法で取得したR、GおよびNIR画像における反射率を示す。

播種後15、22、31、37、45、52、62および72日の計8回、ダイズ地上部を採取し乾物重を調査した。ダイズは子葉節で切断して採取した。1回あたりの採取面積は2本区1.00 m²、5本区0.80 m²、10本、15本および30本区は0.75 m² とした。採取したダイズを80°Cで72時間以上通風乾燥させてから乾物重を測定した。光合成有効放射測定装置 (AccuPAR LP-80, METER Group, Inc.) を使用して、ダイズ群落の受光率を調査した。調査は播種後14、22、31、37、45、48、52、63、74および80日の10回行った。ダイズ群落の上端で光合成有効放射を測定したのち、速



第 5-2 図 マルチコプター搭載カメラ (左) とトレイルカメラ (右).

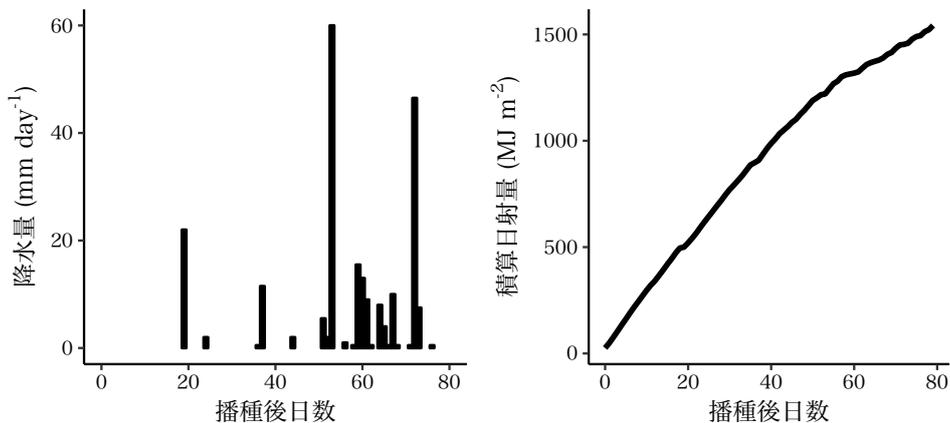
やかに群落の下端でも測定した。これを場所を変えつつ1反復あたり5回繰り返して、上端の平均値を下端の平均値で除して1から差し引くことで群落の受光率を算出した。各反復における測定場所は携帯型センサーと同じ場所とした。

植生指数と日射量を組み合わせた指標による地上部乾物重の推定は第4章と同様の方法で行った。まず、上記の方法で取得したNDVIとCIから平滑化スプラインで日々の値を推定した。次に、こうして推定した値と日々の日射量 (MJ day^{-1}) を日毎に掛け合わせた。それを地上部乾物重調査時点まで積算した。以下、NDVI およびCIと日射量の積の積算値をそれぞれ $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ および $\Sigma(\text{CI} \times I)$ と表す。最後に、地上部乾物重をそれぞれの積算値に回帰し、その誤差を測定機器および植生指数の間で比較した。誤差の評価には平均平方二乗誤差 (RMSE) を使用した。

結果

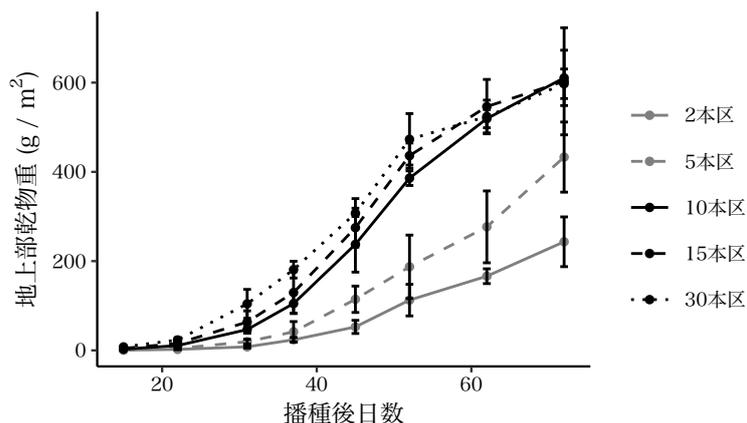
第5-3図に降水量と積算日射量の推移を示した。播種後19日まで降雨がなく、ダイズの出芽は平年よりも遅かった。播種後50日頃までは曇りや降雨が少なく、積算日射量はほぼ直線的に増加した。それ以降は天候が悪化する日もあり、積算日射量の増加量はやや少なくなった。

第5-4図にダイズ地上部乾物重の推移を示した。地上部乾物重は調査期間においていずれの処理区も増加し続けた。播種後52日まで栽植密度が高いほど地上部乾物重も大きかったが、播種後62日になると10本区、15本区、30本区の差が小さくなり、播種後72日では10本区、15本区、30本区では差はなくなった。一方、10～30本区と比べて、5本区と2本区の地上部乾物重は常に少なく推移し、2本区の地上部乾物重は常に最も小さかった。播種後15日から72日までの調査期間において、



第 5-3 図 日別の降水量と積算日射量の推移。

降水量は気象庁の山口県山口市の気象観測データ，積算日射量は農研機構メッシュ農業気象データから取得した。



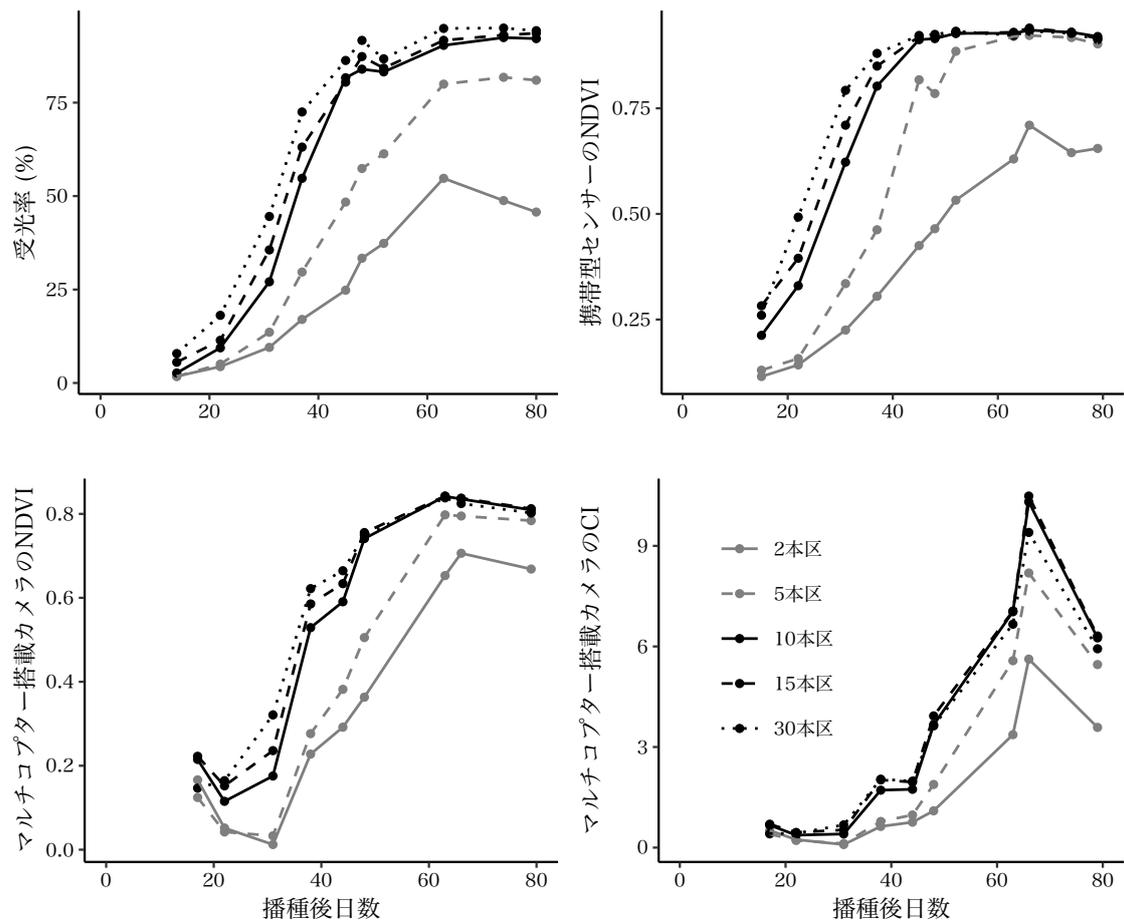
第 5-4 図 ダイズ地上部乾物重の推移。

点は処理区ごとの平均値を示す。
バーは標準偏差を示す。

反復別にみた地上部乾物重の最小値は 0.2 g m^{-2} ，最大値は 731 g m^{-2} であり，地上部乾物重には時期および処理によって大きな変動があった。

第5-5図に受光率および植生指数の推移を示した。受光率は播種後日数とともに増加し，播種後63日で頭打ちになった。播種後63日の受光率は最小の2本区で55%，最大の30本区で95%だった。10～30本区では播種後22日まで受光率は低く推移し，播種後22日から45日にかけて急激に増加した。携帯型センサーのNDVIは播種後

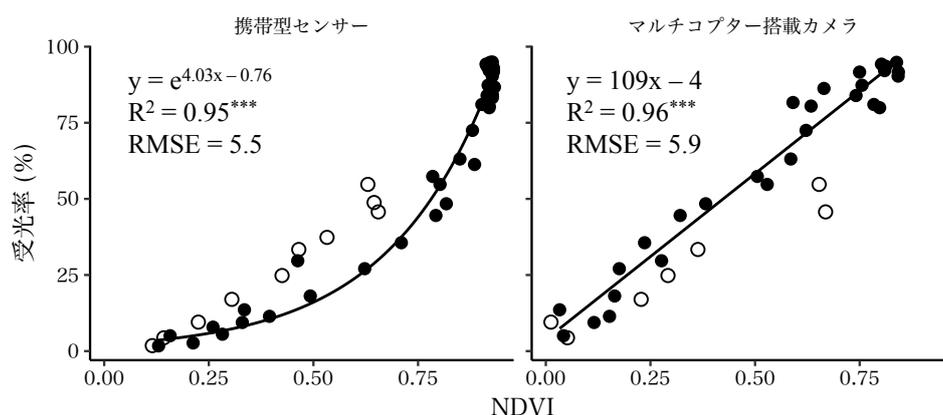
日数とともに増加したが、10～30本区では播種後15日から35日まで急激に増加し、播種後42日で頭打ちとなった。マルチコプター搭載カメラのNDVIは30本区を除いて、播種後31日まで停滞または低下した。その後増加して播種後63日に頭打ちになった。つまり、10～15本区において、受光率とNDVIにはその推移に差がみられた。すなわち、携帯型センサーのNDVIは受光率と比べて早い時期から増加し始め、頭打ちになる時期も20日程度早かった。マルチコプター搭載カメラのNDVIは増加し始める時期と頭打ちになる時期は受光率とほぼ同じだったが、初期にNDVIの低下がみられた。マルチコプター搭載カメラのCIはNDVIの場合と異なり初期に大きく低下することはない。いずれの処理区も播種後31日まで停滞し、そ



第5-5図 受光率および植生指数の推移。
点は処理区ごとの平均値を示す。

の後増加した。ただし、CIはいずれの処理区においても播種後66日に突出して高い値を示した。

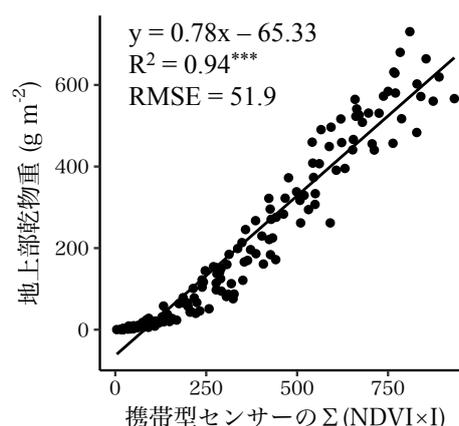
携帯型センサーまたはマルチコプター搭載カメラで算出したNDVIと群落の受光率の関係を第5-6図に示した。ただし、受光率の調査と携帯型センサーおよびマルチコプター搭載カメラによるNDVIの調査は基本的に同日に行ったが、作業上の理由からいずれかの調査が翌日にずれることがあった。受光率とNDVIの調査日が1日ずれた場合でも同時期に行ったとして図に含めた。受光率と携帯型センサーまたはマルチコプター搭載カメラで計測したNDVIには有意な回帰直線が存在しており、NDVIから受光率を推定することができた。しかし、その誤差 (RMSE) はマルチコプター搭載カメラが8.5だったことに対して携帯型センサーが9.8であり、携帯型センサーの方が誤差が大きかった。携帯型センサーでは受光率がある程度高まるとNDVIが反応しなくなった、つまり受光率に対してNDVIが飽和していた。さらに、2本区では受光率とNDVIが直線的な関係であるのに対して、5～30本区では指数関数的な関係だった。言い換えると、2本区における受光率とNDVIの関係を基準にした場合、5～30本区は群落の受光率に対してNDVIが高くなる傾



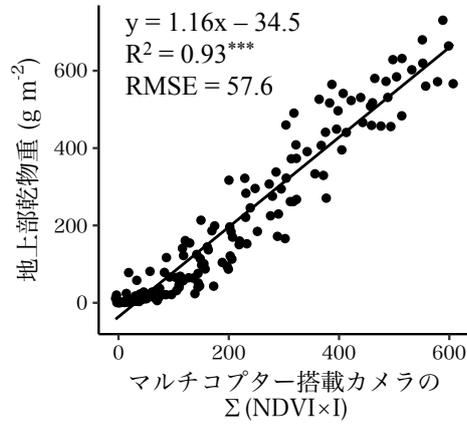
第 5-6 図 NDVI と受光率の関係。
 調査時期別、反復別の値をプロットした。
 白抜き点は 2 本区を示す。
 実線は 2 本区を除いて回帰した結果を示す。

向があった。

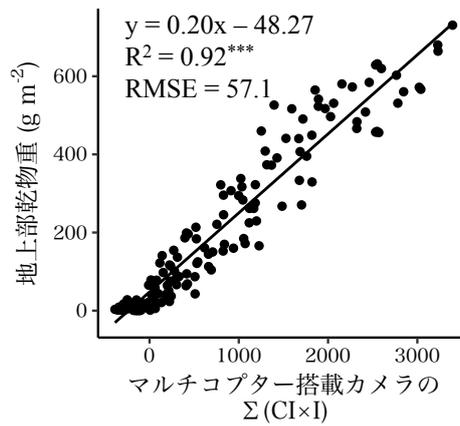
第5-7図から第5-9図に地上部乾物重と植生指数と日射量の積の積算値の関係を示した。地上部乾物重は $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ および $\Sigma(\text{CI} \times I)$ を説明変数とする一次回帰直線で表すことができた。一次回帰直線の傾きはいずれも高度に有意であったが ($P < 0.001$)、その誤差は説明変数によって異なっていた。携帯型センサーとマルチコプター搭載カメラの $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ を説明変数とした場合のRMSEはそれぞれ51.9と57.6で、携帯型センサーの $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ の方が誤差が小さかった(第5-7図, 第5-8図)。つまり、携帯型センサーはマルチコプター搭載カメラよりも地上部乾物重推定精度は高かった。携帯型センサーと地上部乾物重の関係をみると、 $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ が200程度までは地上部乾物重がほとんど増加していなかった(第5-5図)。マルチコプター搭載カメラにおいて $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ と $\Sigma(\text{CI} \times I)$ を比較すると、 $\Sigma(\text{CI} \times I)$ を説明変数とする回帰直線のRMSEは57.1で誤差はわずかに小さかった(第5-8図, 第5-9図)。しかし、携帯型センサーの $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ を説明変数とした場合よりも誤差は大きかった。



第5-7図 地上部乾物重と携帯型センサーの $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ の関係。
点は各調査時期における各反復の値を示す。
***は0.1%水準で有意であることを示す。



第 5-8 図 地上部乾物重とマルチコプター搭載カメラの $\Sigma(\text{NDVI} \times 1)$ の関係.
 点は各調査時期における各反復の値を示す.
 ***は 0.1%水準で有意であることを示す.



第 5-9 図 地上部乾物重とマルチコプター搭載カメラの $\Sigma(\text{CI} \times 1)$ の関係.
 点は各調査時期における各反復の値を示す.
 ***は 0.1%水準で有意であることを示す.

考察

本章では、第4章で明らかにした植生指数と日射量の組み合わせによるダイズ地上部乾物重の推定を、市販の携帯型NDVIセンサーまたはマルチコプターを利用することでより簡易に行う方法について検討した。その結果、携帯型センサーまたはマルチコプター搭載カメラのいずれを使用しても子実肥大期までのダイズ地上部乾物重を推定することができた。しかし、使用する機器および植生指数によって推定誤差は異なっていた。

まず、NDVIによるダイズ地上部乾物重の推定について考察する。第4章で述べたとおり、NDVIと日射量の積の積算値 ($\Sigma(\text{NDVI} \times I)$) でダイズの地上部乾物重を推定できるのはNDVIと群落の受光率に相関があり、 $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ が群落の受光量の指標と考えられるためである (Daughtry et al. 1992)。本研究ではマルチコプター搭載カメラのNDVIは受光率と直線関係にあったが、携帯型センサーでは栽植密度によってNDVIと受光率の関係が異なっていた。すなわち、携帯型センサーのNDVIにおいて、2本区では受光率と直線関係にあったが、5~30本区では指数関数的な関係にあった。2本区と5~30本区で異なる関係が見られたのは、携帯型センサーの測定方法と畝間および株間の関係が影響していると考えられた。本研究の栽植様式は畝間75cmの1畝1条播種で、株間を変更することで栽植密度を変更した。2本区を除く全ての区において、株間よりも畝間が広がったことから、群落の受光率には畝間における群落の発達程度の違いが大きく影響したと考えられた。携帯型センサーのNDVIは畝の中心かつ群落上部60cmから測定した。機器の仕様からこの方法で測定できる範囲は幅25cmであり、畝間の1/3の範囲に過ぎない。さらに、畝方向に移動しながら連続的に測定した。これらのことから、携帯型センサーの測定範囲には群落の一部しか含まれておらず、特に、畝間におけるNDVI

の変化を測定できていなかったと考えられる。したがって、携帯型センサーのNDVIは群落の受光率に対して過大な値を示すこととなり、結果的に受光率とNDVIは指数関数的な関係になったと考えられた。一方、2本区では株間が133cmと畝間（75cm）を大きく上回っており、株間における群落の発達を受光率に大きく影響したと考えられた。畝方向に沿ってNDVIを測定したことで、群落の受光率がよく反映されたと考えられた。その結果、2本区では携帯型センサーのNDVIと受光率に直線関係がみられた。これらのことから、ダイズのように水稲や麦類と比べて比較的広い畝間（条間）で栽培される作物において携帯型センサーでNDVIを測定する場合には、畝方向ではなく畝と垂直に連続的に測定するなどの対策が必要であると考えられた。一方、マルチコプター搭載カメラでは受光率とNDVIに直線関係が認められた。これはマルチコプター搭載カメラでは比較的広い範囲においてNDVIを測定することが可能であり、畝間と株間の違いに影響されずに群落のNDVIを測定できたためと考えられた。マルチコプター搭載カメラでは携帯型センサーに比べて畝間や株間によって測定方法を変更する必要がないという利点があると考えられた。

携帯型センサーでもマルチコプター搭載カメラでも、 $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ によって地上部乾物重を推定することができた。しかし、携帯型センサーでは $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ が200以下では回帰直線とデータの乖離が大きかった。これは携帯型センサーのNDVIと受光量の関係が指数関数的であったため、受光量の増加に比べてNDVIの増加量が大きく、 $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ が乾物重に対して過大な値となったことが原因と考えられた。一方、マルチコプター搭載カメラでは $\Sigma(\text{NDVI} \times I)$ と地上部乾物重の関係には携帯型センサーのような特徴は見られなかったが、誤差は携帯型センサーよりも大きかった。携帯型センサーとマルチコプター搭載カメラのNDVIの推移を比べると、携帯型センサーのNDVIは生育が進むにつれて値が大きくなり最大

値に達したのに対して、マルチコプター搭載カメラのNDVIは生育初期の播種後17日に比較的高い値を観測した後低下し、再び増加に転じた。NDVIは土壌の影響を受けることが知られており、土壌が暗色になるとNDVIは高くなる (Huete 1988)。マルチコプター搭載カメラのNDVIが高い値を示した播種後17日は畝間灌水の2日後だった。この時、畝と畝間の水分には大きな差があり、畝は白く乾いていたが、畝間は黒く湿っていた。携帯型センサーの測定範囲は畝に限られるが、マルチコプター搭載カメラでは畝間も含まれる。そのため、マルチコプター搭載カメラで測定した播種後17日のNDVIが高くなったと考えられた。土壌の影響を避けるためにSAVI (Huete 1988) などの植生指数を利用することで、より精度を高めることができると考えられた。

次にCIによるダイズ地上部乾物重の推定について考察する。第4章では奈良県で栽培したダイズにおいて、日射利用効率 (RUE) の影響を受けると考えられる $\Sigma (NDVI \times I)$ よりも、クロロフィル指数を使った $\Sigma (CI \times I)$ の方がダイズ地上部乾物重の推定精度が高いことを示した。マルチコプター搭載カメラにおいてダイズ地上部乾物重を $\Sigma (CI \times I)$ に回帰したところ、 $\Sigma (NDVI \times I)$ を用いた場合よりも誤差は小さくなった。第4章で述べた結果はマルチコプター搭載カメラを用いても再現されたと言えるものの、誤差の減少はわずかであり、 $\Sigma (NDVI \times I)$ と $\Sigma (CI \times I)$ の推定精度の違いはほとんどなかった。

マルチコプターを利用したリモートセンシングにおいては日射の変動は重要な誤差因子であり、撮影条件の選定が重要であることが指摘されている (井上・横山 2017)。マルチコプター搭載カメラで測定したCIの推移において播種後63日と66日を比べると、測定間隔はわずか3日であるにもかかわらず、播種後66日ではCIが著しく増加した。しかし、この時期にダイズ群落の葉色や葉面積の著しい変化は観察されなかった。したがって、播種後63日から66日におけるCIの変化は、ダ

イズの生育の違いを反映しているものではなく、測定条件の違いによるものと考えられた。マルチコプター搭載カメラによる画像の撮影は基本的に晴天時に行ったが、播種後66日は曇天であり、CIはその影響を受けて増加したと考えられた。一方、NDVIでは播種後63日と66日の変化はほとんどなく撮影条件によらず安定していた。マルチコプター搭載カメラで測定したCIはNDVIよりも撮影時の天候に影響されやすい可能性があると考えられた。これらのことから、マルチコプター搭載カメラでの地上部乾物重の推定において、 $\Sigma(CI \times I)$ を使っても $\Sigma(NDVI \times I)$ よりも推定誤差が顕著に改善しなかったのは、CIはNDVIよりも撮影時の天候に影響されやすかったことが要因のひとつと考えられた。したがって、測定条件によっては $\Sigma(CI \times I)$ を使っても $\Sigma(NDVI \times I)$ よりも地上部乾物重の推定誤差が小さくなるわけではないと考えられた。

結論

第2章においてダイズ生産現場における収量の変動要因として開花期以降の乾物生産が影響していることを明らかにした。開花期以降のダイズ地上部乾物重を推定する指標として、第4章では日々の植生指数（NDVIまたはCI）と日射量の積の積算値が利用可能であることを示した。本章の結果から、第4章で示したダイズ地上部乾物重の指標は携帯型センサーでもマルチコプター搭載カメラでも利用可能であることが明らかとなった。しかし、携帯型センサーでは測定方法によっては受光率との非線形な関係が生じること、マルチコプター搭載カメラでは撮影時の土壌の状態を含めた撮影条件の影響を受けること、これらによって地上部乾物重の推定精度が低下する可能性が示された。生産現場において数 ha から数十 ha のダイズ圃場をセンシングするには、労力の面からマルチコプター搭載カメラが適

していると考えられるが、マルチコプター搭載カメラを使用する場合は降雨や灌水後を避けるなど、可能な限り土壌や天候の条件を揃えたうえで撮影することが必要である。

第6章 総合考察

日本で栽培されるダイズのうち 8 割以上が水田転換畑に作付けられているが、収量が低く不安定であることが問題となっている。水田転換畑作ダイズの単位面積当たり収量の増大と安定化は重要な課題である。ダイズ栽培では、基本的に品種選択、土壌改良、排水対策、耕起、施肥、播種、中耕培土、雑草防除、病害虫防除、収穫といった作業が行われる。各作業においても目的に応じて複数の手法が存在する。例えば排水対策であれば、明渠、暗渠、サブソイラ、地下水位制御システムFOEAS (藤森 2007)、チゼルプラウ (片山 2018) の施工、播種であれば、不耕起 (濱田 1993)、耕耘同時畝立 (細川 2004)、有芯部分耕 (吉永ら 2008) による播種などがある。さらに深層施肥 (高橋 1995) や摘心 (林ら 2008) といった技術も開発されている。ダイズの安定生産は、これらの技術を生産環境の違い、すなわち年次、地域、および圃場の違いに応じて適切に選択して組み合わせることで実現可能となる。そのためには、それぞれの環境におけるダイズの生育を把握することが重要である。さらに、各技術および技術体系の実用的価値は生産現場におけるダイズの生育および収量を通して評価されるべきである。こうした視点から、本研究は生産現場における利用を目指してリモートセンシングによるダイズの生育診断を可能とする技術の開発を行った。

まず、第2章では奈良県桜井市の集落営農法人が管理する圃場群において、ダイズの収量と生育を3年間にわたって調査し、ダイズ収量の年次間変動に及ぼす要因を乾物生産および気象の面から明らかにした。その結果、低収年では台風による

倒伏または乾燥害が生じており、このことが開花期以降のダイズ群落の乾物生産量を低下させ、最終的に収量を低下させたと考えられた。つまり、生産現場におけるダイズ収量の年次間変動の要因のひとつは開花期以降の地上部乾物重の変動であり、ダイズの生育収量の変動を把握するためには開花期以降の地上部乾物重を診断する技術が必要であることを明らかにした。

次に、第3章ではダイズの乾物生産および収量を向上させるための栽培管理として生産者が実施可能かつダイズの乾物生産に影響を与える可能性のある栽培管理として栽植密度と耕起方法に着目し、その効果を検証した。その結果、栽植密度については30本 m^{-2} 以上に密植しても、15~17本 m^{-2} 程度と比較して開花期以降の受光量および日射利用効率が向上しないため、開花期以降の乾物生産量は向上しないことが明らかとなった。耕起方法については、不耕起栽培を行うことで開花期以降の乾物生産は変化するものの、その効果は降水量によって変動する可能性があることが明らかとなった。これらのことから生産現場におけるダイズ収量を向上あるいは安定化させるためには、適切な栽植密度（15本 m^{-2} 程度）を確保し、排水対策および灌漑の実施によって土壌水分の変動を抑える栽培管理が必要であると考えられた。

そして、第4章ではダイズの収量性を決定する上で重要な開花期以降の地上部乾物重を、従来の手法よりも高い精度でリモートセンシングにより推定することを目的に、新たな指標として植生指数と日射量の積の積算値を提案し、その有効性を検証した。本研究で考案した $\Sigma(CI \times I)$ によって播種期から子実肥大期までのダイズ地上部乾物重を従来の方法に比較して精度高く推定できることを明らかにした。ただし、開花期までの地上部乾物重の推定であれば、これまでに報告されている $\Sigma(NDVI \times I)$ でも十分推定が可能であった。

最後に、第5章では、近年急速に普及しつつあり、ダイズ生産現場でも利用可能

な携帯型NDVIセンサーおよびマルチコプターを使用して、すでに第4章で明らかにした植生指数と日射量によるダイズ地上部乾物重の推定を行うことが可能かどうか検討した。日々の植生指数（NDVIまたはCI）と日射量の積の積算値によるダイズ地上部乾物重の推定は携帯型センサーでもマルチコプター搭載カメラでも可能であることが明らかとなった。ただし、携帯型センサーでは測定方法によっては受光率との非線形な関係が生じること、マルチコプター搭載カメラでは撮影時の土壌の状態を含めた撮影条件の影響を受けること、これらによって地上部乾物重の推定精度が低下する可能性を指摘し、問題点を明らかにした。

以上の各研究を通して、ダイズの収量変動を診断する上で重要な形質を明らかにして、それをリモートセンシングの情報と結びつけることができた。本研究で開発したダイズのリモートセンシングによる地上部乾物重推定技術の生産現場における利用可能性について、水稲や小麦において実用化されているリモートセンシング技術と比較しつつ考察する。青森県津軽地域では水稲を対象に登熟期の衛星画像から子実タンパク質含有率の推定を行ってマッピングし、区分集荷による付加価値米生産と栽培指導に利用している（境谷 2016）。小麦においては北海道でセンサーベースの可変施肥技術（原ら 2015）とマップベースの収穫適期予測技術が実用化されている（奥野 2005）。小麦では幼穂形成期や止葉期に追肥を行うが、その際トラクタに搭載した生育センサーで小麦をセンシングし、目標とする窒素吸収量から必要な窒素追肥量を計算して可変施肥を行っている（原ら 2015）。収穫適期の予測では登熟期の衛星画像からNDVIを算出し、成熟の早晚を判断している（奥野 2005）。小麦の収穫適期予測技術は収穫時期を逃すことによる品質低下を防ぐだけでなく、客観的な圃場情報を提供することによって、収穫順序の決定に伴う生産者間の人間的な軋轢を解消する効果も大きいと考えられている（奥野 2005）。このように生産現場におけるリモートセンシング導入の可否は収量、

品質の向上効果だけでなく社会的な影響も含めて決定されていると考えられる。

西日本において、ダイズでは通常の速効性肥料を用いた追肥による増収効果が明瞭ではなく（有原 2000）、コムギのようにリモートセンシングによって目標とする窒素吸収量から必要な窒素追肥量を計算して可変施肥することは難しいと考えられる。追肥によらずに生育量を制御する方法として、本研究では密植と不耕起栽培の効果を検証したが、どちらも地上部乾物重を制御するには至らなかった。しかし、これら以外にも排水、灌漑、摘心など様々な生育量制御技術が存在する。特に日本の水田転換畑においては土壌水分の管理がダイズの安定多収化に重要である（島田 2006）。近年、水田転換畑作ダイズにおいてもFOEASによる地下灌漑が普及しているが、生産現場では水稻との競合からダイズの灌漑用に十分な水を得られないことも多い。地上部乾物重推定技術を利用することで生育量の小さい圃場から優先的に灌漑を行うなど、効率的な水管理が可能となると考えられる。今後は地上部乾物重推定技術と栽培管理の組み合わせによって、圃場内および圃場間のダイズの生育量の変動を是正することで、ダイズの安定多収化が可能であるかどうかの検証を進める必要がある。栽培管理以外の活用方法としては、実需者への情報提供にも利用できる可能性がある。国産ダイズは需要があるにも関わらず、その生産量が不安定なことが問題となっている（田口 2017）。収穫前に生育状況を把握することで、実需者は製品出荷ペースの調整や在庫管理によってダイズ供給量の過不足にある程度対応できると考えられる。ただし、そうした対応を行う上で最も重要な情報はダイズの収量および品質であると考えられるが、本研究の技術は地上部乾物重の推定にとどまっており、これを収量および品質の推定へと展開する必要がある。

以上のことから、本研究ではダイズ生産現場での収量の年次間変動の要因のひとつとして開花期以降の地上部乾物重の変動があることを明らかにし、ダイズの

地上部乾物重をリモートセンシングで予測する技術の高精度化を試み、その改善方向を提示した。この技術を利用することで、生産者単位でダイズの生育量を把握することが可能となり、ダイズの生育に応じた効率的な栽培管理が可能となると考えられる。今後は、リモートセンシングで得られた地上部乾物重の情報に基づく栽培管理の変更がダイズの収量変動の是正に有効であるかどうかの現地実証を進めるとともに、この技術を収量と品質の推定に展開することが必要である。

Summary

Studies on Predicting the Growth of Soybeans Using Remote Sensing in an Upland Field Converted from a Paddy Field to Help Increase and Stabilize Yields

Motoharu Murata

In Japan, most soybeans are grown in an upland field that has been converted from a paddy field. However, the yield is low and unstable. Site-specific crop management according to variations in growth is important to increase soybean yield. Analyses of growth variations in rice and wheat and their site-specific crop management have been performed using remote sensing. However, remote sensing is not practically used in soybean cultivation. The purpose of this study is to reveal the growth characteristics that indicate variations in soybean yield and develop a method to measure these characteristics using remote sensing in Japanese upland fields that have been converted from paddy fields.

Chapter 2 describes the 3-year-investigation in which the variations in soybean growth and yields in a farmer's field were analyzed within Nara Prefecture, Japan. These results showed that a decrease in the production of soybean dry matter after the flowering stage was a factor that decreased the number of pods and the overall yield. A decrease in the absorption of sunlight caused by drought stress during the flowering stage and by lodging

during typhoons caused a decrease in the production of soybean dry matter. Therefore, it was clear that the control of dry matter production after flowering was an important factor for increasing and stabilizing soybean yield.

Chapter 3 describes the process by which the effects on soybean yield of high-density planting and using no-tillage methods on dry matter production after flowering were examined. Firstly, in the soybean cultivar ‘Sachiyutaka’, dry matter production after flowering and soybean yield did not significantly increase with high-density (30–33 plants m^{-2}) planting compared with those of normal-density (15–17 plants m^{-2}) planting. The lack of an increase in dry matter production and yield after high-density planting was the result of unchanged absorption of sunlight and radiation use efficiency after flowering. Secondly, use of the no-tillage method changed dry matter production, but the effect varied by the amount of precipitation. Considering the results presented in chapter 2, these results indicated that normal-density planting and reducing variations in the amount of water in the soil by drainage and irrigation are important factors to stabilize soybean yield.

Chapter 4 describes a new growth index that combines the chlorophyll index (CI) with a measure of solar radiation [$\Sigma(CI \times I)$]. The new index was tested to assess whether it could estimate the weight of soybean dry matter using proximal remote sensing. The usefulness of $\Sigma(CI \times I)$ was assessed by comparing it to the ratio vegetation index (RVI) and an index combining the normalized differential vegetation index (NDVI) with the measure of solar radiation [$\Sigma(NDVI \times I)$]. The relationship between the indices and the weight of soybean dry matter was examined. Thus, $\Sigma(CI \times I)$ and $\Sigma(NDVI \times I)$ could estimate dry matter

weights over the growth period, whereas RVI could not estimate that weight after flowering. Additionally, $\Sigma(CI \times I)$ could estimate the dry matter weight more precisely than $\Sigma(NDVI \times I)$. These results indicate that we can assess the growth of soybeans in the fields using either $\Sigma(CI \times I)$ or $\Sigma(NDVI \times I)$.

Chapter 5 describes how the handheld NDVI sensor and the camera that was mounted on a multicopter (CMM) were used to measure $\Sigma(CI \times I)$ and $\Sigma(NDVI \times I)$ and estimate dry matter weights. These devices became popular in Japanese agricultural fields, because they were inexpensive and easy to operate. Both the handheld sensor and CMM could measure $\Sigma(CI \times I)$ and $\Sigma(NDVI \times I)$, and estimate dry matter weights. However, the precision of the measurements by CMM was affected by environmental conditions, such as the weather and water content in the soil. Using CMM to measure these indices has the advantage of covering a wide area but needs to be done under similar conditions.

The results of this study helped clarify that the control of dry matter production after flowering was an important factor for increasing and stabilizing soybean yield, and dry matter weights can be estimated by remote sensing using the new growth indices. Therefore, this study objective, which was to determine the growth characteristics that affect variations in soybean yield and develop a method to measure these characteristics using remote sensing, was achieved. In the future, to be able to use remote sensing to help site-specific soybean management, it is necessary to examine whether changing these management techniques based on the information on soybean growth obtained by remote sensing are able to increase and stabilize soybean yield.

引用文献

- 阿部亥三 1959. 気象要素の年次間変動に関する農業気象的考察 第1報 盛岡における夏期気象と水稻並に大豆の生育, 収量との関係. 農業気象 15: 10-14.
- Agudamu, T. Yoshihira and T. Shiraiwa 2016. Branch development responses to planting density and yield stability in soybean cultivars. Plant Prod. Sci. 19: 331-339.
- 有原文二 2000. ダイズ 安定多収の革新技術—新しい生育のとらえ方と栽培の基
本—. 農山漁村文化協会, 東京. 146-151.
- 浅沼興一郎・中潤三郎・小暮秩 1977. 秋ダイズにおける乾物生産と栽植密度との
関係. 香川大農学報 28: 11-18.
- 浅沼興一郎 1977. 開花期前後の遮光が秋ダイズの収量成立に及ぼす影響. 香川大
農学報 29: 11-16.
- 浅沼興一郎・田辺和司 1986. 登熟期の遮光が秋ダイズの乾物生産と子実生産に及
ぼす影響. 日作四国支報 23: 41-46.
- 浅沼興一郎・奥村美智夫 1991. ダイズの乾物生産と子実生産に及ぼす播種期の影
響. 日作紀 60: 484-489.
- 浅生秀孝 1999. 富山県における転換畑大豆の現状と問題点. 北陸作物学会報 34:
161-162.
- 坂東悟・藤山英保 2010. 水田転換畑におけるダイズ不耕起無培土栽培の継続が土
壤理化学性に及ぼす影響. 土肥誌 81: 472-480.
- 坂東悟・藤山英保 2011. 水田転換畑におけるダイズ不耕起狭畦無培土栽培の継続

- による収量, 品質の経年変化. 日作紀 80: 426-432.
- Baret, F. and G. Guyot 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35: 161-173.
- Board, J. E. and J. R. Settimi 1986. Photoperiod effect before and after flowering on branch development in determinate soybean. *Agron. J.* 78: 995-1002.
- Board, J.E. and H. Modali 2005. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crop Sci.* 45: 1790-1799.
- Carpenter, A. C. and J. E. Board 1997. Branch yield components controlling soybean yield stability across plant populations. *Crop Sci.* 37: 885-891.
- Chong, G. 2014. Smoothing Spline ANOVA Models: R Package gss. *Journal of Statistical Software* 58: 1-25.
- Daughtry, C. S. T., K. P. Gallo, S. N. Goward, S. D. Prince and W. P. Kustas 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sens. Environ.* 39: 141-152.
- Duncan, W. G. 1986. Planting patterns and soybean yields. *Crop Sci.* 26: 584-588.
- Egli, D. B. 1988. Plant density and soybean yield. *Crop Sci.* 28: 977-981.
- 藤井弘志・荒垣憲一・中西政則 1985. ダイズの生育診断法 1. 開花期の乾物重による生育診断. *土肥誌* 56: 336-339.
- 藤森新作 2007. 転換作物の安定多収を目指す地下水位調節システム—水田リフォーム技術の開発—. *農及園* 82: 570-576.
- 古畑昌巳・森田弘彦・山下浩 2008. 暖地での狭畦密植栽培におけるダイズ品種サチユタカの乾物と子実生産の特徴. *日作紀* 77: 409-417.
- 古畑昌巳・足立一日出・大野智史 2011. 圃場排水性の良否が北陸地域のダイズの乾物と子実生産に及ぼす影響. *日作紀* 80: 65-72.

- Gitelson, A. A., A. Viña, V. Ciganda, D. C. Rundquist and T. J. Arkebauer 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters* 32: L08403, doi:10.1029/2005GL022688.
- Gitelson, A. A., A. Viña, S. B. Verma, D. C. Rundquist, T. J. Arkebauer, G. Keydan, B. Leavitt, V. Ciganda, G. G. Burba and A. E. Suyker 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research* 111: D08S11, doi:10.1029/2005JD006017.
- 濱田千裕・伊藤清一・澤田恭彦・宮下陽里 1986. ダイズ栽培の機械化に関する研究 第1報 不良条件下における高性能播種技術の開発. *愛知農総試研報*18: 67-74.
- 濱田千裕 1993. ダイズ不耕起播種技術の開発と栽培の安定化—愛知県における試験研究を中心として—. *日作紀* 62: 470-474.
- 濱田千裕・釋一郎・澤田恭彦・小島元 2007. ダイズ不耕起播種栽培の出芽期における冠水害の発生要因. *日作紀* 76: 212-218.
- 原圭祐・須田達也・渡部敢 2015. センサベース可変施肥の小麦生産における評価. *農業食料工学会誌* 77: 485-493.
- 橋本良一 1999. 石川県の大麥・大豆栽培における現状と課題. *北陸作物学会報* 34: 163-165.
- 服部誠・南雲芳文・佐藤徹・藤田与一・樋口泰浩・大山卓爾・高橋能彦 2013. 新潟県における水田転換畑ダイズの収量低下要因. *日作紀* 82: 11-17.
- 林元樹・濱田千裕・谷俊男・平岩確 2008. ダイズにおける省力的摘心機の開発と処理効果. *愛知農総試研報* 40: 93-97.
- 平沢正 1995. 水環境が作物の生理・生態に及ぼす影響. *土壌の物理性* 72:39-46.

- Holben, B. N. and C. J. Tucker 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 46: 651-656.
- 細川寿 2004. 大豆の耕うん同時畝立作業機による重粘土転換畑の湿害回避技術. *農業機械学会誌* 66: 14-16.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25: 295-309.
- 池田武・佐藤庚 1990. ダイズ栽培における栽植密度と収量構成要素との関係. *日作紀* 59: 219-224.
- 池尻明彦・岡本賢一・中司祐典・吉永 巧・中山暁子・小林行高・金子和彦・岩本哲弥・村山秀樹 2007. 大豆品種「サチユタカ」の機械化体系に対応した栽培技術 第1報 播種期および栽植密度. *山口農試研報* 56: 51-61.
- 井上健一・酒井究・山田実 1995. 重粘土転換畑における大豆の物質生産に及ぼす気象要因の解析. *北陸作物学会報* 30: 93-95.
- Inoue, Y., M. Guérif, F. Baret, A. Skidmore, A. Gitelson, M. Schlerf, R. Darvishzadeh and A. Oliso 2016. Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content: a comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation. *Plant, Cell and Environment* 39: 2609-2623.
- 井上吉雄・横山正樹 2017. ドローンリモートセンシングによる作物・農地診断情報計測とそのスマート農業への応用. *日本リモートセンシング学会誌* 37: 224-235.
- 片山勝之・川崎洋平・山崎諒・亀井雅浩 2018. 山間地域水田転換畑のチゼルプラウ耕は排水性改善によりダイズの生育・収量を向上させた. *日作紀* 87: 312-318.

- 小松典行・津川兵衛・西川欽一・丹下宗俊 1989. ダイズの窒素固定能と収量に及ぼす栽植密度の影響. 日作紀 58: 164-170.
- 今野悟・高部真典・柴田康志 2012. 山形県庄内地域における2011年産ダイズの減収要因解析. 東北農業研究 65: 77-78.
- 紺屋秀之 2004. 携帯式作物生育情報測定装置. 農業機械学会誌 66: 28-30.
- 玖村敦彦・石井龍一 1971. 葉における光の反射・吸収・透過. 戸荊 義次監修, 作物の光合成と物質生産. 養賢堂, 東京. 29-34.
- 榎淵欽也・和田純二・佐藤亮一・松田幹男 1970. 畑輪作に関する研究 第6報 収量構成要素よりみた連作障害の検討. 日作東北支部報 12: 73-74.
- 丸本卓哉・吉村靖生・野田健一・東俊雄 1992. ムギ収穫同時ダイズ点播機械を用いたダイズの不耕起栽培. 山口大農学報 40: 25-36.
- 松田裕之・柴田康志・森静香・藤井弘志 2011. 山形県庄内地域における登熟期間の気温がダイズの百粒重に及ぼす影響. 日作紀 80: 43-48.
- 松本静治・吉川正巳 2010. 転換畑における黒ダイズの連作にともなう収量および土壌の化学性の変化. 日作紀 79: 268-274.
- 松永亮一・高橋将一・小松邦彦 2003. 耐倒伏性に優れたダイズ新品種「サチユタカ」の密植・無中耕無培土栽培. 日作九支報 69: 53-55.
- Monteith, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences 281: 277-294.
- 持田秀之 2009. 東北地域における気象要素による地帯区分と大豆生産の変遷. 日作東北支部報 52: 53-54.
- 長野間宏・児玉徹・金田吉弘・山谷正治 1991. 耕起方法が低湿重粘土汎用水田の土壌物理性に及ぼす影響. 土壌の物理性 62: 43-52.

- 長野間宏 2004. 輪換水田の土壌管理とイネ・ムギ・ダイズ不耕起栽培技術の開発.
土肥誌 75: 561-564.
- 中野尚夫・平田清則・大西政夫 2004. ダイズの栽植密度による光受容の変化と生育・収量. 日作紀 73: 175-180.
- 中山則和 2002. 農林水産研究文献解題 No.27 大豆 農林水産省農林水産技術会議事務局編. 農林統計協会, 東京. 194-198.
- 農林水産省 2014. 「スマート農業の実現に向けた研究会」検討結果の中間とりまとめ. http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_smart_nougyo/pdf/cmatome.pdf. (2018/11/10閲覧)
- 農林水産省 2018a. 農林水産統計. <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/attach/pdf/index-21.pdf>. (2018/11/11閲覧)
- 農林水産省 2018b. 食料自給率の推移. http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/pdf/26suii.pdf. (2018/11/10閲覧)
- 小田原孝治・福島裕助・荒木雅登・兼子明・荒巻幸一郎 2012. 筑後川流域の田畑輪換圃場における土壌肥沃度とダイズ子実収量性の実態. 土肥誌 83: 405-411.
- 奥野林太郎 2005. 衛星リモートセンシングを用いた小麦適期収穫支援システム. 農業機械学会誌 67: 17-19.
- 小柳敦史・南石晃明・土田志郎・長野間宏 1998. 汎用水田において耕起および不耕起栽培したコムギ, ダイズおよび水稻の根の垂直分布の解析. 日作紀 67: 49-55.
- Parvez, A. Q., F. P. Gardner, and K. J. Boote 1989. Determinate- and indeterminate-type soybean cultivar responses to pattern, density, and planting date. *Crop Sci.* 29: 150-157.
- Peng, Y., A. A. Gitelson 2012. Remote estimation of gross primary productivity in

- soybean and maize based on total crop chlorophyll content. *Remote Sens. Environ.* 117: 440-448.
- R Core Team 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (2018/7/9閲覧).
- 齊藤邦行・西村公仁子・北原利修 2012. ダイズの倒伏が子実収量に及ぼす影響—倒伏防止処理と人為的倒伏処理—. *日作紀* 81: 27-32.
- 酒井真次・長沢次男・橋本鋼二 1985. 生産力検定試験からみたダイズの収量変動と気象条件による東北地方の地域的特徴. *日作東北支部報* 28: 109-111.
- 境谷栄二 2016. 青森県内における高品質米生産へのリモートセンシング技術の利用. *計測と制御* 55: 801-805.
- 坂本英美・駄田井久・横溝功 2017. 中山間地域における転作大豆の単収に及ぼす要因と課題—広島県における集落営農法人を事例として—. *農林業問題研究* 53: 31-36.
- 佐々木大・村上則幸・林怜史 2014. 携帯型NDVIセンサの特性と利用の検討. *農作業研究* 49: 155-161.
- Shibles, R. M. and C. R. Weber 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Sci.* 6: 55-59.
- 澁澤栄 2017. ICTシステムを活用した未来を創造するスマート農業. *機能材料* 37: 3-10.
- 島田信二 2006. 水田輪換畑作ダイズの多収化戦略. *日作紀* 75: 394-399.
- 白岩立彦・橋川潮 1993. ダイズ個体群の光エネルギー変換効率の変動要因の解析. *日作紀* 62: 1-8.
- 白岩立彦・川崎洋平・本間香貴 2011. 作物群落の日射利用効率の推定. *日作紀* 80:

360-364.

Sinclair, T.R. and T. Horie 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency. *Crop Sci.* 29: 90-98.

Sinclair, T. R. and R. C. Muchow 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* 65: 215-265.

杉本秀樹 1994. 水田転換畑におけるダイズの湿害に関する生理・生態学的研究. *愛媛大学農学部紀要* 39: 75-134.

住田弘一・加藤直人・西田瑞彦 2005. 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壤肥沃度の変化. *東北農研研報* 103: 39-52.

鈴木光喜・佐藤雄幸・井上一博・小池寿 1995. 大豆連作における減収軽減に関する研究 第10報 輪換畑及び輪換畑土壌を用いた場合の大豆連作年数と生育・収量. *日作東北支部報* 38: 101-104.

多田久・穴水孝道・井畑勝博 1986. 青森県におけるダイズの生育と気象 第2報 出芽と気象. *日作東北支部報* 29: 59-60.

田口光弘 2017. 総合農業研究叢書第72号 大豆フードシステムの新展開. 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター, 茨城県.

高橋英博・持田秀之・執行盛之 1990. 東北地域における大豆生産の地帯区分. *東北農業研究* 43: 133-134.

高橋幹・中村卓司 2004. 根粒超着生ダイズの特性と実用化への試み. *土肥要旨集* 50: 219.

高橋智紀・松崎守夫・塩谷幸治・細川寿 2005. 転換畑におけるダイズの収量に及ぼす土壤特性の影響—新潟県上越地域の事例—. *中央農研研報* 6: 51-58.

Takahashi, Y., T. Chinushi and T. Ohyama 1993. Quantitative estimation of N₂ fixation activity and N absorption rate in field grown soybean plants by relative

- ureide method. 新大農研報 45: 91-105.
- 高橋能彦 1995. 肥効調節型肥料による施肥技術の新展開 3 ダイズの深層施肥技術. 土肥誌 66: 277-285.
- 竹澤邦夫 2009. Rによるノンパラメトリック回帰の入門講義. メタ・ブレーン, 東京. 21-30.
- 田中茂夫・森義雄・砂田喜与志・後藤寛治 1978. ダイズにおける収量構造の解析 第1報 子実収量とそれに関連する諸形質の年次間変異. 北大農邦文紀要 11: 166-173.
- 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.
- 谷俊男・小出直哉・林元樹・遠藤征馬・濱田千裕 2008. 浅耕鎮圧整地と組み合わせたダイズ不耕起播種栽培の安定性. 日本作物学会講演要旨集 226: 82-83.
- 鄭紹輝・牧山繁生・秀島好知・森敬亮 2012. 暖地における秋ダイズ子実収量の制限要因解析—佐賀県における30年間の作況試験から—. 日本作物学会講演要旨集 233: 396-397.
- Thenkabail, P. S., A. D. Ward, J.G. Lyon and C. J. Merry 1994. Thematic mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 60. 437-442.
- 鳥越洋一・進士宏・栗原浩 1982. ダイズの発育形態と収量成立に関する研究 第2報 花房着生の規則性と次位別花房の開花習性. 日作紀 51: 89-96.
- Tucker, C. J., J. H. Elgin, Jr. and J. E. McMurtrey, III 1978. Monitoring corn and soybean crop development by remote sensing techniques. National Aeronautics and Space Administration. NASA-TM-79607.
- 内川修・福島裕助・松江勇次 2003. 北部九州におけるダイズの収量と気象条件と

- の関係. 日作紀 72: 203-209.
- 内川修・田中浩平・宮崎真行・松江勇次 2009. 北部九州における晩播狭畦栽培ダイズの生育収量および窒素固定能について. 日作紀 78: 163-169.
- 内川修・森田茂樹 2015. 福岡県における2013年産大豆の収量低下要因. 日作九支報 81: 31-32.
- Viña, A. and A. A. Gitelson 2005. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophysical research letters* 32: L17403, doi:10.1029/2005GL023647.
- 山本晴彦・本條均 1990. 分光反射特性を利用した暖地ダイズの葉面積指数およびバイオマスの推定. *農業気象* 46: 19-22.
- 山根正博・国分牧衛 2016. 東北地方におけるダイズ収量の年次・地域間変動と気象要因との関係. 日作紀 85: 198-203.
- 吉永悟志・河野雄飛・白土宏之・長田健二・福田あかり 2008. 転換畑ダイズ作における有芯部分耕栽培が土壌水分および生育・収量に及ぼす影響. 日作紀 77: 299-305.
- Yusuf, R. I., J. C. Siemens and D. G. Bullock 1999. Growth analysis of soybean under no-tillage and conventional tillage systems. *Agron. J.* 91: 928-933.
- 湯本節三・土屋武彦 1991. ダイズ品種における収量構成要素の年次変動と気温との関係. *育種・作物学会北海道談話会会報* 32: 6-7.

謝辞

本研究の遂行ならびに論文の作成にあたり，京都大学大学院農学研究科稲村達也教授には終始懇切丁寧なご指導とご鞭撻をいただいた。心より感謝申し上げます。

同大学農学専攻栽培システム学分野井上博茂博士をはじめ同分野の皆様には試験の実施において多大なご協力をいただいた。京都大学大学院農学研究科白岩立彦教授，元京都大学農学部教授久馬一剛博士には論文の作成にあたって貴重なご助言ならびに叱咤激励をいただいた。奈良県桜井市の福田勝美氏には試験圃場の提供および圃場管理を行っていただいた。奈良県農業総合センター作物研究ユニットの皆様には試験の実施に多大な協力をいただいた。山口県農林総合技術センター農業技術部金子和彦室長には論文作成に対するご理解とご協力をいただいた。これらの方々に，深甚なる感謝の意を表します。

本論文に関する公表済み文献

- 村田資治・井上博茂・稲村達也 2012. 水田転換畑における不耕起ダイズの生育に及ぼす降水の影響. 日作紀 81: 397-403. (第3章)
- 村田資治・山下紘輝・稲村達也. 奈良県と山口県においてダイズ品種「サチユタカ」を密植しても増収しない要因の解明. (日作紀に投稿中) (第3章)
- 村田資治・山下紘輝・足立紘一・日田早織・稲村達也 2018. 近接リモートセンシングを用いたダイズ地上部乾物重の推定法の高精度化—クロロフィル指数と日射量を組み合わせた新しい植生指数—. 農作業研究 53: 133-142. (第4章)