

リモートセンシングによる大豆の倒伏予測技術の開発

宮城県古川農業試験場

今野 智寛

2022年助成者(論文投稿完了した為掲載)

ダイズは倒伏によって減収や品質低下が生じる。倒伏の技術的対策には、過剰な生育が予測される場合に主茎を剪定する「摘芯」がある。しかし、倒伏の危険性が低い生育量の時に摘芯を行うと逆に減収するという報告もあり、摘芯は将来の倒伏発生を予測した上で実施することが重要である。また、生産現場においては、同一圃場内での生育差が生じる可能性が高い。そのため、主茎長を指標とした倒伏予測については、面的に主茎長を計測・予測することが理想的である。面的な生育診断手法としてはリモートセンシングの活用が期待できる。そこで、本研究では主茎伸長モデルによる主茎伸長予測と UAV リモートセンシングによる面的な主茎長推定を組み合わせることにより、面的な倒伏予測法を開発することを目的とした。

実験方法

本研究では、ダイズ品種「ミヤギシロメ」を用いた。「ミヤギシロメ」は在来品種から純系淘汰によって 1961 年に宮城県で育成された品種であり、大粒で外観品質が優れているのが、倒伏しやすいという特徴を持っている[1-2]。宮城県では 40~50% の圃場で栽培されている主力品種である。

1. ダイズにおける倒伏角度モデルの作成

宮城県古川農業試験場内の圃場（宮城県大崎市）において取得した蓄積データ（2018 年、2020 年、2021 年のデータ、 $n=32$ ）を用いて解析した。蓄積データは多様な栽培条件下で得られたものであり、主茎長および倒伏角度について多岐にわたるデータで構成されていた。本データを用いて、Logit 変換した倒伏角度を目的変数、主茎伸長および生育ステージ間の主茎伸長量を説明変数とした重回帰モデルを作成した。

2. ダイズにおける主茎伸長および葉齢モデルの作成

主茎伸長および葉齢モデルの作成に使用した主茎長、葉齢のデータは、宮城県古川農業試験場が報告している 2005 年から 2021 年の作柄解析試験[3-19]から引用した。また、気象データを試験地最寄りの古川アメダス（気象庁 2023）から取得し、日平均気温（°C）を主茎伸長および葉齢モデル、日照時間（hour day⁻¹）を主茎伸長モデルで使用した。なお、各モデルは Nakano ら（2019）[20]の主茎節数モデルにおける気温関数 $f(T_i)$ を利用した。

3. ダイズにおける植被率を考慮した土壤調整植生指数による主茎長推定法の作成

宮城県大崎市において取得した蓄積データ（2018 年、2020 年、2021 年）を用いて解析した。使用データは第 6 葉期（V6）と開花期（R1）[21]における主茎長と UAV リモートセンシングで取得した NIR, Red 波長の画像とした。UAV リモートセンシングは Mavic Pro Platinum (DJI 社製) に Sequoia+ (Parrot 社製) 搭載して空撮を行った。本章では、既往の植生指数 NDVI[22], SAVI[23], MSAVI[24]と本研究で提案する「植被率を考慮した土壤調整植生指数 (Soil adjusted vegetation Index considering vegetation coverage, 以下 SAVI_{vc})」を用いた際の主茎長の推定精度を比較した。なお、解析対象は完全植被前のデータとした。

4. 主茎伸長モデルと植被率を考慮した土壤調整植生指数を組み合わせた面的なダイズ倒伏予測法の作成

作成した倒伏角度モデル、主茎伸長モデル、葉齢モデル、SAVI_{vc}を用いて、下記の手

順で面的な倒伏角度の予測を試みた。なお、倒伏角度モデルは1の研究で得られた下記の式を用いた。

$$\text{Logit}\theta_L = 0.04M_E + 0.03M_L - 4.77$$

$\text{Logit}\theta_L$ は倒伏角度の Logit 変換値, M_E は第6葉期～開花期 (V6～R1) の主茎伸長量, M_L は子実肥大期 (R6) の主茎長を示す。

- ① 葉齢モデルによって、V6 の暦日を予測する。
- ② V6 において UAV リモートセンシングを行い、SAVI_{vc} によって面的に主茎長を推定する。
- ③ R1 までの主茎伸長モデルによって R1 の主茎長を予測し、②で推定した V6 の主茎長との差分から V6～R1 の主茎伸長量を面的に予測する。
- ④ ③で予測した R1 の主茎長を主茎伸長モデルに代入することで、ピーク時 (子実肥大期, R6) の主茎長を予測する。
- ⑤ ③で予測した V6～R1 の主茎伸長量と④で予測した R6 の主茎長を倒伏角度モデルに代入することで、倒伏角度を面的に予測する。

なお、R1 の主茎長を予測するためには開花期 (R1) の暦日も予測する必要がある。

R1 の暦日は、中野ら (2015) [26] の DVR モデルに基づき予測した。

本倒伏予測法の予測精度を検証するために、2019年に大崎市、2022年に大崎市と栗原市で調査したデータを用いた。

実験結果

1. ダイズにおける倒伏角度モデルの作成

成熟期 (R8) の倒伏角度と V6～R1 の主茎伸長量との間には正の関係 ($R^2=0.70$) があり、V6～R1 の主茎伸長量で倒伏角度を概ね説明できることが示された (図 1-1)。さらに、この単回帰分析に R1 以降の主茎長を説明変数に加えた重回帰分析の結果、R6 の主茎長も倒伏角度に対して有意な正の影響を及ぼしていることが明らかとなった (表 1-1)。以上の結果から下記の式 1 を倒伏角度モデルとした。

$$\text{Logit}\theta_L = 0.04M_E + 0.03M_L - 4.77 \quad (\text{式 1-1})$$

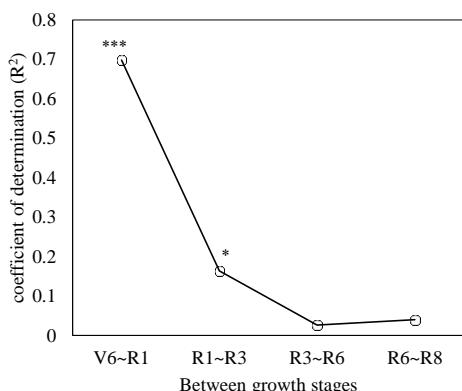


図 1-1 倒伏角度の Logit 変換値と各生育ステージ間の主茎伸長量との間の決定係数 (R^2)

***, *は 0.1%, 5% 水準で有意であることを示す。V6: 第6葉期, R1: 開花期, R3: 莢伸長期, R6: 子実肥大期, R8: 成熟期 (Fehr and Caviness 1977)

表 1-1 R8 における倒伏角度の重回帰分析結果

Multiple regression model	Main stem length stage	Explanatory variable Standard β		VIF		coefficient of determination (R^2)	Model formula
		Main stem elongation V6~R1	Main stem length V6~R1	Main stem elongation V6~R1	Main stem length V6~R1		
Model 1	-	0.84 ***	-	-	-	0.70 ***	$\text{Logit}\theta_L = 0.05M_E - 2.71$
Model 2	R1	0.87 ***	-0.03 ns	3.47	3.47	0.70 ***	$\text{Logit}\theta_L = 0.06M_E - 0.003M_L - 2.57$
Model 3	R3	0.61 **	0.29 ns	2.69	2.69	0.74 ***	$\text{Logit}\theta_L = 0.04M_E + 0.019M_L - 3.98$
Model 4	R6	0.59 **	0.35 *	2.02	2.02	0.77 ***	$\text{Logit}\theta_L = 0.04M_E + 0.030M_L - 4.77$
Model 5	R8	0.85 **	-0.02 ns	4.45	4.45	0.70 ***	$\text{Logit}\theta_L = 0.06M_E - 0.001M_L - 2.65$

***, **は 0.1%, 1% 水準で有意であること, ns は有意でないことを示す. $\text{Logit}\theta_L$ は倒伏角度の Logit 変換値, M_E は主茎伸長量, M_L は主茎長を示す. VIF は独立変数間の多重共線性を検出するための指標であり, $\text{VIF} > 10$ のとき多重共線性があるとされる[26].

2. ダイズにおける主茎伸長および葉齢モデルの作成

V6~R1 の主茎伸長のモデル化では気温と日照時間を考慮した関数を用いた (式 2-1). 日照時間をモデルに組み込むことで, 気温のみの場合のモデルと比較し, R^2 が高く, RMSE は低くなり主茎長との当てはまりが良くなつた (式 2-2) (図 2-1). また, ピークの主茎長は R1 の主茎長から推定できることを示した (式 2-3) (図 2-2). 葉齢のモデル化については, 主茎節数モデルから 2.5 を差し引いたモデルとした (式 2-4) (図 2-3).

$$f(T_i, D_i) = f(T_i) \times \{1 + \exp(-a_1 \times D_i)\} \quad (\text{式 2-1})$$

$$MSL_i = \frac{c}{1 + \exp\{-a_2 \times (\sum_{i=1}^n f(T_i, D_i) - b)\}} \quad (\text{式 2-2})$$

$$MSL_{peak} = a_3 \times MSL_{R1} + b_2 \quad (\text{式 2-3})$$

$$LN_i = \frac{c_2}{1 + \exp\{-a_4 \times (\sum_{i=1}^n f(T_i) - b_3)\}} - 2.5 \quad (\text{式 2-4})$$

T_i は日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$), D_i は日照時間 (hour day $^{-1}$) を示す. MSL_i は出芽 i 日後の主茎長 (cm), MSL_{peak} はピーク時の主茎長 (cm), LN_i は出芽 i 日後の葉齢, 各式の a , b , c はパラメータを示す.

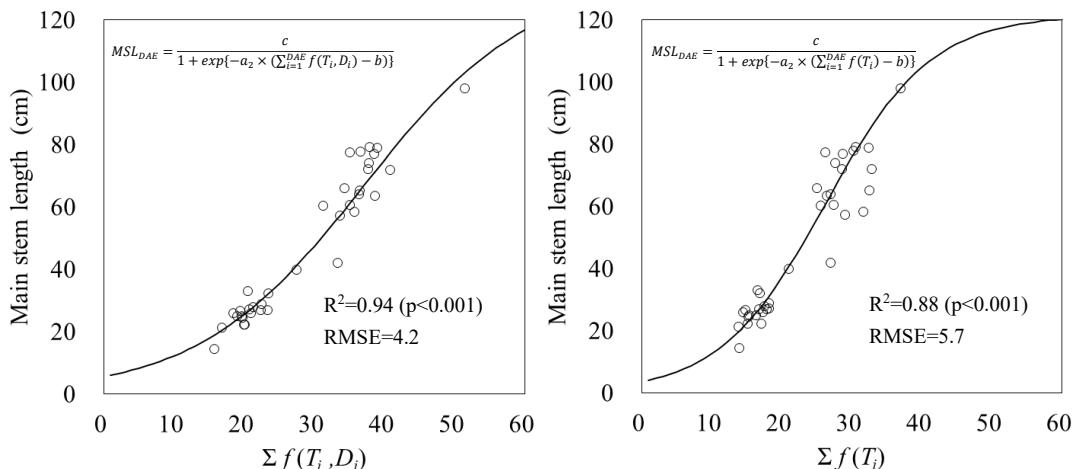


図 2-1 気温・日照時間関数 $f(T_i, D_i)$ および気温関数 $f(T_i)$ の積算値と主茎長の関係

左図が気温・日照時間関数 $f(T_i, D_i)$, 右図が気温関数 $f(T_i)$ を示す.

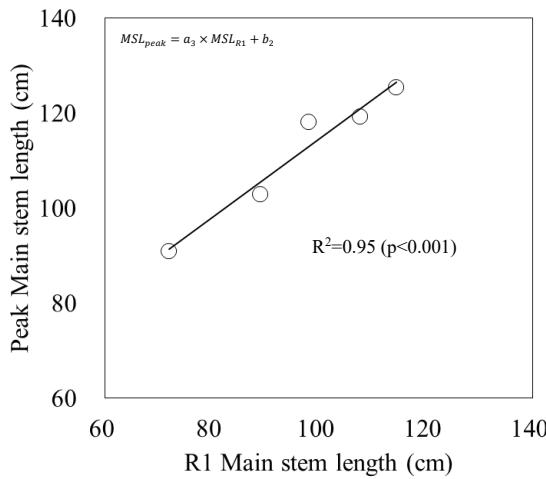


図 2-2 R1 の主茎長と主茎長ピークの関係

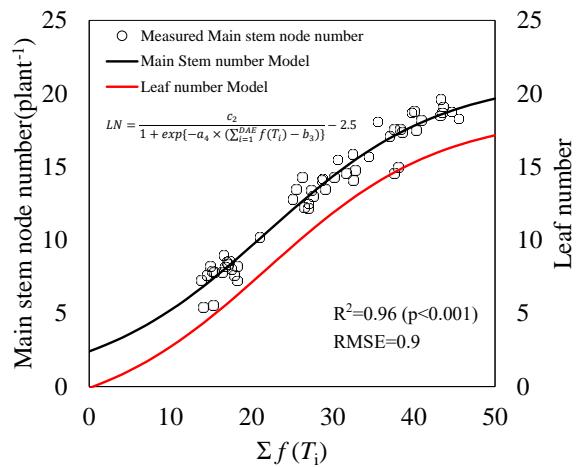


図 2-3 気温関数 $f(T_i)$ の積算値と主茎節数の関係および仮定した葉齢モデル

プロットは実測した主茎節数、黒実線は主茎節数モデル、赤実線は主茎節数モデルから 2.5 差し引いた葉齢モデルを示す。

3. ダイズにおける植被率を考慮した土壤調整植生指数による主茎長推定法の作成

既報の植生指数 (NDVI, SAVI, MSAVI) と $SAVI_{vc}$ (式 3-1) において主茎長との関係を解析した結果、 R^2 が最も高かった植生指数は本研究で提案した $SAVI_{vc}$ ($R^2=0.78$, $p<0.001$) だった (表 3-1)。次いで、NDVI ($R^2=0.69$, $p<0.001$), SAVI ($R^2=0.62$, $p<0.001$), MSAVI ($R^2=0.60$, $p<0.001$) の順で高かった。 $SAVI_{vc}$ と NDVI での回帰式の傾きを比較すると、 $SAVI_{vc}$ が 69.5, NDVI が 120.7 であり、 $SAVI_{vc}$ の方が小さかった。また、その標準誤差は $SAVI_{vc}$ が 5.1, NDVI が 11.1, 95%信頼区間は $SAVI_{vc}$ が 59.2~79.9, NDVI が 98.4~143.0 だった。以上より、主茎長の推定精度は $SAVI_{vc}$ が最も高いことが示された。

$$SAVI_{vc} = \{(NIR - Red) / (NIR + Red + L_{vc})\} \times (1 + L_{vc}) \quad (式 3-1)$$

表 3-1 各植生指数における主茎長の回帰式とパラメータ

R ²	Main Stem Length of the Regression Line										Formula
	Slope		95% Confidence Interval		95% Confidence Interval		95% Confidence Interval				
	Estimate ± SE	Lower Limits	Upper Limits	Estimate ± SE	Lower Limits	Upper Limits	Estimate ± SE	Lower Limits	Upper Limits		
$SAVI_{vc}$	0.78 ***	69.5 ± 5.1 ***	59.2	79.9	14.1 ± 2.4 ***	9.2	19.0	$y = 69.5x + 14.1$			
NDVI	0.69 ***	120.7 ± 11.1 ***	98.4	143.0	-51.5 ± 9.0 ***	-69.4	-33.5	$y = 120.7x - 51.5$			
SAVI	0.62 ***	78.6 ± 8.5 ***	61.5	95.6	13.1 ± 3.6 ***	5.8	20.4	$y = 78.6x + 13.1$			
MSAVI	0.60 ***	63.1 ± 7.1 ***	48.9	77.3	20.3 ± 3.0 ***	14.3	26.3	$y = 63.1x + 20.3$			

***は 0.1% 水準で有意であることを示す。

4. 主茎伸長モデルと植被率を考慮した土壤調整植生指数を組み合わせた面的なダイズ倒伏予測法の作成

主茎伸長モデル (式 2-2), (式 2-3) の合成モデルと $SAVI_{vc}$ (式 3-1) による面的な主茎長推定による面的な倒伏予測では、RMSE=8.8 の精度で成熟期の倒伏角度を予測した (図

4-1). この結果は、倒伏角度モデル（式 1-1）、主茎伸長モデル（式 2-2）、（式 2-3）、葉齢モデル（式 2-4）、 $SAVI_{vc}$ （式 3-1）による主茎長推定が大きな誤差なく予測・推定できていたものと推察する。風速が大きい条件では、予測結果よりも実際の倒伏角度が大きくなつたが、強風の影響を受けなかつた年次、地域、圃場においては精度良く倒伏角度を予測できており、主茎伸長モデルと植被率を考慮した土壤調整植生指数（ $SAVI_{vc}$ ）を組み合わせることにより、面的にダイズの倒伏を予測できる可能性が示された。

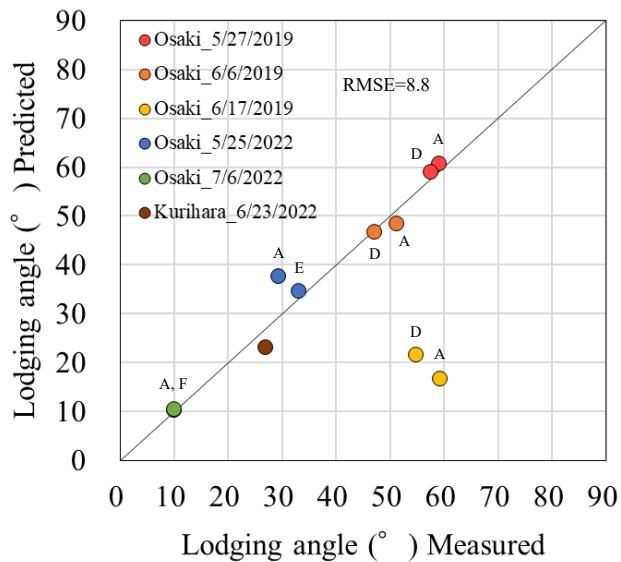


図 4-1 倒伏角度の予測値と実測値の関係

図中のプロット脇のアルファベットは Field ID を示す。

考察

本研究では、既往研究を基に新たな倒伏角度モデル、主茎伸長モデル、葉齢モデル、主茎長推定を目的とした UAV リモートセンシングでの植生指数（ $SAVI_{vc}$ ）を作成してそれらを統合することにより、ダイズにおける面的な倒伏予測法を示した。既往研究ではダイズにおける生育モデルとリモートセンシングを統合した倒伏予測に関する報告は見当たらぬ。本倒伏予測法を活用した対策によって、今後のダイズ生産における収量品質の向上に貢献できるものと考える。

一方で、倒伏角度が主茎伸長量によって予測可能であることが明らかとなつたが、風速の影響も考慮しなければいけないことが示された。しかし、将来的な風速の予測は困難であることから、風速が大きい地域では在来品種のみならず、耐倒伏性品種によるリスク分散も検討する必要があると考える。また、本倒伏予測法は、「ミヤギシロメ」のみを調査対象としたものであり、他品種での適用性については今後検証する必要がある。しかし、Kumagai et al (2021) [27]の報告では、倒伏しやすい「オクシロメ」は他品種に比べて開花盛期（R2）と子実肥大期始期（R5）の主茎長が長く葉面積指数（LAI）が大きかつたとしており、本研究で倒伏に対する影響度が高かつた主茎長の生育ステージと概ね一致している。よって、本倒伏予測法を他品種へ応用できる可能性はあるものと考えられる。

要約

本研究では主茎伸長モデルによる主茎伸長予測と UAV リモートセンシングによる面的な主茎長推定を組み合わせることにより, 面的な倒伏予測法を開発することを目的とした. 成熟期 (R8) における倒伏角度と主茎伸長の関係について, 蓄積データを用いて解析したところ, 第 6 葉期 (V6) ~ 開花期 (R1) までの主茎伸長量と子実肥大期 (R6) の主茎長を説明変数とした重回帰モデルによって説明できることが明らかとなった. この重回帰モデルを用いた倒伏予測法を確立するために, 主茎伸長モデルを作成した. 出芽から R1 までの主茎伸長モデルは, 気温・日照時間関数 $f(Ti, Di)$ を説明変数としたロジスティック回帰式とした. R1 から主茎長ピークまでの主茎伸長モデルは, R1 の主茎長を説明変数とした直線回帰式とした. この 2 つの回帰式を合成したモデルを出芽~R8 までの主茎伸長モデルとした. UAV リモートセンシングによる面的な主茎長推定では, 植被率を考慮した土壤調整植生指数 (SAVI_{vc}) を提案した. SAVI_{vc} は既報の植生指数よりも主茎長の推定精度が高かった ($R^2=0.78$, $p<0.001$). 以上の主茎伸長モデルと SAVI_{vc} を組み合わせて予測した主茎長を倒伏角度の重回帰モデルに代入し, 面的な倒伏予測法の精度を検証したところ, RMSE は 8.8 だった. この結果から, 面的に倒伏角度を予測できることが明らかとなり, 倒伏の危険性に応じた対策が実施できる可能性が示された.

謝辞

本研究を行うにあたり, 研究助成を賜りました公益財団法人タカノ農芸化学研究助成財団ならびに関係者の皆様に心より感謝申し上げます. 株式会社クボタ次世代技術研究ユニットの皆様には, UAV の貸し出しや使用方法の指導など, UAV リモートセンシングにおいて多大なご協力をいただきました. 深く感謝申し上げます. 宮城県古川農業試験場の皆様には, 調査において多大なご協力をいただきました. ここに感謝の意を表します.

引用文献

- 1) 滝澤浩幸, 2006. 宮城県における主要大豆品種の栽培条件と節間長との関係. 東北農業研究 59, 73-74.
- 2) 農林水産省, 2023. 国産大豆の品種特性～加工適性と栽培特性～ [WWW Document]. URL https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d_ziten/attach/pdf/index-5.pdf (accessed 6.3.31).
- 3) 宮城県古川農業試験場, 2006. 宮城県における平成 17 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 4) 宮城県古川農業試験場, 2007. 宮城県における平成 18 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 5) 宮城県古川農業試験場, 2008. 宮城県における平成 19 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 6) 宮城県古川農業試験場, 2009. 宮城県における平成 20 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 7) 宮城県古川農業試験場, 2010. 宮城県における平成 21 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.

- 8) 宮城県古川農業試験場, 2011. 宮城県における平成 22 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 9) 宮城県古川農業試験場, 2012. 宮城県における平成 23 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 10) 宮城県古川農業試験場, 2013. 宮城県における平成 24 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 11) 宮城県古川農業試験場, 2014. 宮城県における平成 25 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 12) 宮城県古川農業試験場, 2015. 宮城県における平成 26 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 13) 宮城県古川農業試験場, 2016. 宮城県における平成 27 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 14) 宮城県古川農業試験場, 2017. 宮城県における平成 28 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 15) 宮城県古川農業試験場, 2018. 宮城県における平成 29 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 16) 宮城県古川農業試験場, 2019. 宮城県における平成 30 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 17) 宮城県古川農業試験場, 2020. 宮城県における令和元年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 18) 宮城県古川農業試験場, 2021. 宮城県における令和 2 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 19) 宮城県古川農業試験場, 2022. 宮城県における令和 3 年度水稻及び大豆・麦類の作柄解析, 宮城県古川農業試験場臨時報告.
- 20) Nakano, S., Purcell, L.C., Homma, K., Shiraiwa, T., 2019. Modeling leaf area development in soybean (*Glycine max* L.) based on the branch growth and leaf elongation. *Plant Prod. Sci* 23, 247-259.
- 21) Fehr, W., Caviness, C., 1977. Stages of soybean development. *Iowa State University Special Report* 80, 1-12.
- 22) Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp* 1.
- 23) Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- 24) Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- 25) 中野聰史, 熊谷悦史, 島田信二, 鮫島良次, 大野宏之, 本間香貴, 白岩立彦, 2015. ダイズ品種の発育モデルの作成と気温上昇が発育速度に及ぼす影響の広域推定. *日作紀* 84, 408–417. <https://doi.org/10.1626/jcs.84.408>

- 26) 吉田光雄, 1987. 重回帰分析における多重共線性と Ridge 回帰について. 大阪大学人間科学部紀要 13, 227–242. <https://doi.org/10.18910/9749>
- 27) Kumagai, E., 2021. Agronomic responses of soybean cultivars to narrow intra-row spacing in a cool region of northern Japan. Plant Production Science 24, 29–40. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1816137>