

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05537

研究課題名（和文）ドローン支援表現型解析技術を用いたイネ科作物の理想的群落構造の再設計

研究課題名（英文）Redesigning ideal crop canopy architecture using drone-based phenotyping techniques

研究代表者

中島 大賢（NAKASHIMA, TAIKEN）

北海道大学・農学研究院・助教

研究者番号：70710945

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：作物の収量性と耐倒伏性の両立に寄与しうる群落・茎葉構造特性を明らかにするため、飼料用トウモロコシを対象として、地上部構造と風応答の関係性を検討した。そのための手法として、多視点画像からの三次元点群再構築技術を活用した構造解析や群落内における作物地上部の風応答を定量的に評価するためのシステムを開発した。その結果、倒伏抵抗性に優れる品種では、群落上層から中層にかけての葉面積密度や葉身形状が倒伏感受性品種に比べて顕著に異なり、強風下において群落上層の風圧を受け流すうえで有利な構造特性を備えていることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

台風が毎年のように襲来するわが国では、倒伏による作物の減収が農学の重要課題となっており、収量性の向上と倒伏リスクの軽減を両立するための方策が求められている。これまでも作物の倒伏研究は盛んに行われてきたが、根系支持力強化や茎の強靱化に焦点を当てたものが多く、実際に風圧を受ける作物地上部の構造や葉の形状・配置に関する報告は少ない。今後、根系や茎部をさらに強化しつつも、本研究で示唆された風圧を受け流すうえで有利な地上部の構造特性を倒伏抵抗性品種の育種に利用することで、地上部・地下部構造の最適化を通して耐倒伏性と収量性の両立に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The relationship between wind response of crop canopy structure and its architectural characteristics was evaluated in maize to clarify the ideotype possessing both high yielding ability and lodging resistance with minimal biomass allocation to stalk and root system. To this end, we developed platforms to facilitate characterization of canopy structure and plant architecture with the aid of three-dimensional point cloud reconstruction technique, as well as to quantify the dynamic wind response of above-ground plant structure under natural wind using ultra-micro accelerometers mounted on the stalk. The results suggested that the areal density and morphological traits of leaves in the upper to middle layers of the canopy differed significantly in the lodging resistant variety, which could potentially function as avoidance mechanisms of high wind pressure on the canopy when lodging risk was elevated under strong wind.

研究分野：作物学

キーワード：子実用トウモロコシ 倒伏 風応答 草型 群落構造

## 様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

作物の増収を達成するためには、光利用効率を左右する群落の受光態勢を改善することに加えて、生育期間を通して群落構造を健全に保つことが不可欠である。群落構造は、作物や品種ごとに異なる地上部の茎葉構造(=草型)と栽植様式、栽培管理および気象条件の組み合わせによって決定され、群落内部まで光が透過しやすい構造が光利用効率の観点から良いとされてきた。既往研究では、葉身傾斜角や葉身形状、個葉面積などの形態特性と群落内におけるこれらの空間分布が受光態勢に影響することが知られている。一方、群落構造を保つという観点において、台風などの強風下で生じる倒伏は群落崩壊を招く代表的な現象であり、耐倒伏性の改善はこれまで多くの作物種で重要課題となってきた。耐倒伏性改善に向けた既存の戦略では、根系支持力の強化や茎部の強靱化、および半矮性育種に代表される地上部の低重心化によって耐倒伏性向上がはかれてきた。しかし、これらの戦略は根系や茎部への乾物投資の増加、および半矮性化に起因する受光態勢悪化のリスクを伴うため、収量性とトレードオフの関係にあると考えられる。

本研究では、群落が強風下で受ける風圧を受け流すことで、根系や茎部にかかる地上部負荷量を低減し、これにより耐倒伏性を高め、さらには受光態勢にも優れる理想的な群落・茎葉構造特性が明らかになれば、収量性と耐倒伏性の両立に貢献できると考えた。しかし、地上部の構造特性と風応答の関係は未解明な点が多く、これを明らかにするためには、多大な労力を要する群落や茎葉の構造解析が必須となる。また、群落・茎葉構造の違いが風応答に及ぼす影響についても、定量的な評価手法がないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、作物の群落・茎葉構造と風応答の関係性を検討することで、収量性と耐倒伏性の両立に寄与しうる有用な構造特性を明らかにすることを目的とした。そこで、地上部の構造解析が比較的容易である飼料用トウモロコシをイネ科のモデル作物と位置づけ、多視点ドローン画像からの点群再構築技術を活用した解析手法を確立することで、構造データの高精度化と構造評価の迅速化を試みた。また、葉身形状やその鉛直分布といった群落・茎葉構造決定形質が風圧の受け流しに及ぼす影響を明らかにするうえで、群落内における作物地上部の風応答を定量的に評価する必要がある。そのための手法として、極小加速度センサーを用いた自然風下における風応答測定システムを構築した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 個体群スケールでの群落構造解析手法の開発

東京および札幌の2地点において、収量特性と耐倒伏性、および草型が異なる2品種を圃場で栽培した。東京では、生育初期にあたる6月下旬から収穫期前の10月上旬までの約4ヶ月間、経時的に複数回のドローン空撮を実施した。得られた高解像度多視点画像をもとに SfM (Structure-from-Motion) により高密度三次元点群データを生成し、トウモロコシの群落表層構造の経時変化を観測した。また、生育後期では群落内部の構造情報が取得できない問題を解決するため、全方位カメラを搭載したローバー型地上走行ロボットを作成し、畦間を走行させることで群落内部の構造情報を取得した。破壊調査も並行して実施し、生育・老化過程を評価した。札幌では、経時的なドローン空撮に加えて、登熟初期における地上部構造特性について個体・群落規模で破壊的に調査した。構造解析には層別刈り取り法のほか、各葉位の着葉位置や葉身傾斜角度を実測して草姿骨格解析も行った。

#### (2) 個体スケールでの茎葉構造解析手法の開発

個体スケールでの茎葉構造解析手法についても検討を行った。まず、基本的な測定条件を確立するため、ポット栽培したトウモロコシ個体の周囲に各種マーカーおよび高解像 RGB カメラを配置し、3D モデル構築プラットフォームを作成した。これを用いて、生育初期における茎葉構造の3D モデルを生成するうえで適切な条件を検討した。得られた結果をもとに、モデル構築条件の最適化とモデル構築プラットフォームの拡張を行い、圃場で栽培した長大なトウモロコシ成熟個体の3D モデルの生成を試みた。

#### (3) 草型および耐倒伏性が異なるトウモロコシ品種の草型解析

耐倒伏性と収量性の両立に関わる茎葉構造を明らかにするため、耐倒伏性および草型が異なる2品種を圃場で2カ年栽培し、地上部構造と根系支持力に関わる形態形質を比較解析した。調査は、倒伏リスクが高まる開花後3週目の植物体について行った。まず、降雨前後の引き倒し抵抗力を根系支持力の指標として測定し、地下部モーメントの品種間差異を評価した。次に、地上部を地際から刈り取り、(2)で確立した手法を用いて三次元点群データを取得したのち、全着生葉について、着生位置および葉身傾斜角、個葉面積、葉身長・幅、節間長などの基本的な草型決定形質を実測した。最後に、根系を掘り出し、節根数や出根角度、側根乾物割合などの根系支持力に関わる地下部構造についても調査し、耐倒伏性の品種間差異を決定する地上部および地下部構造について解析した。

(4) 茎葉構造の違いがトウモロコシ地上部の風応答に及ぼす影響の検討

圃場で栽培したトウモロコシの茎基部および着雌穂節，最上位葉節の 3 箇所に極小加速度センサーを取り付け，各部位にかかる加速度を群落直上に設置した風速計の出力とともにデータロガーで記録した．計測は開花後 3 週目以降の植物体について数週間継続的に行い，風速 10 m 程度の強風が観測された日を含む数日間のデータを用いて，地上部モーメントと風速の関係性を品種間で比較した．なお，地上部モーメントは，着雌穂節の加速度と着雌穂高，および地上部総体新鮮重の積から算出した．

4. 研究成果

(1) 生育初期から収穫期までに複数回の多視点ドローン画像の撮影を行い，SfM で生成した高精度な群落表面構造データから群落の形成と老化の過程を観測することができた(図 1A-B)．生育後期では，群落上層に位置する葉によって群落内部の構造を観測することができないため(図 1C)，全方位カメラを取り付けたローバー型地上走行ロボットを作成し(図 1D)，群落内部の畦間を自走させることで，雌穂着生位置や葉身分布の概観をとらえることができた(図 1E)．これらの観測と破壊的な構造解析から，群落の構造特性には品種間差異が

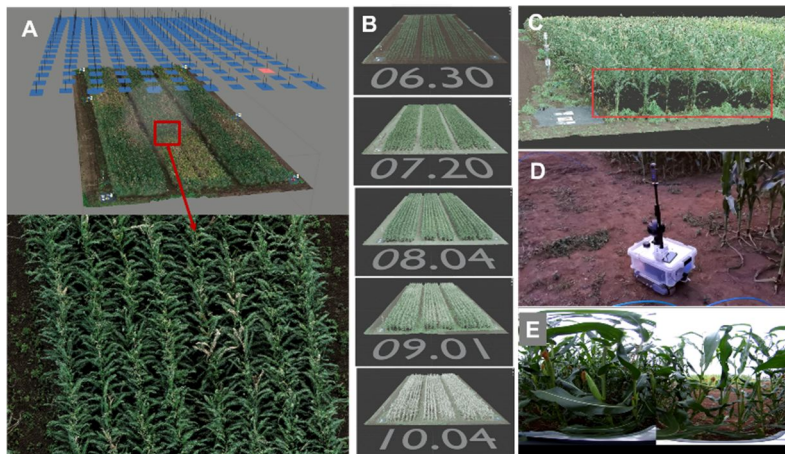


図 1. ドローン空撮画像から生成したトウモロコシ群落表面構造の高密度三次元点群データ(A)とその経時変化(B)，および群落内部のデータ欠損領域(C)，全方位カメラを搭載したローバー型地上走行ロボット(D)ならびに全方位カメラで取得した群落内部の画像(E)．

認められ，群落上層の葉面積密度や中位葉の葉身傾斜角，着雌穂高，群落吸光係数といった受光態勢および耐倒伏性にかかわる形質のほか，葉の老化過程も品種間で異なることが明らかとなった．一方で，群落構造特性の品種間比較において，破壊調査のほうが労力は要するものの点群データ解析に比べて得られる情報量が依然として多く，さらなる技術改良の必要性が示唆された．

(2) ポットで栽培したトウモロコシ幼植物体について，多視点画像をもとに SfM による 3D モデルの生成が可能となり，これにより生育に伴う地上部構造の変化を経時的に観測することができた(図 2A)．しかし，草丈が 3 m 以上にもなるトウモロコシ成熟個体の 3D モデルを構築するためには，プラットフォームの拡張と測定条件の最適化が必要となった．そこで，幼植物体でのモデル構築条件に改良を加え，マーカー密度やサイズ，撮影方法，およびモデル化プログラムの調整を行った．その結果，群落から切り出した成熟個体においても，精緻な 3D モデルを生成することに成功し，茎葉構造の品種間差異をとらえることができた(図 2B)．一方で，トウモロコシ茎葉構造特性の数値化については手動計測にとどまっております(図 2C)，自動計測プログラムの構築・導入による迅速化が，本手法を実装するうえで不可欠と考えられた．

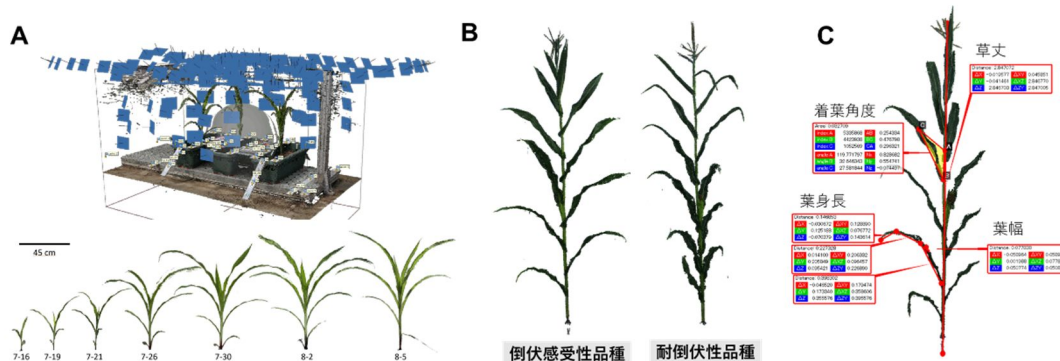


図 2. SfM を利用した 3D モデル構築プラットフォームと異なる成長段階におけるトウモロコシ幼植物体の 3D モデル(A)，および群落から切り出した耐倒伏性が異なるトウモロコシ品種の 3D モデル(B)と構造データを用いた形態計測の例(C)．



(3) 耐倒伏性が異なる品種について、地上部・地下部の構造特性を解析した結果、個体および群落の構造特性には顕著な品種間差異が認められた。個体あたりの緑葉数や葉面積には品種間で有意差は認められなかったものの、倒伏抵抗性品種では中層に位置する個葉の面積が有意に小さかった(図 3A, B)。また、葉身形状にも有意な品種間差異が認められ、倒伏抵抗性品種では上層・中層で葉長/葉幅比が大きいことから、葉身が細長い形状であることが明らかとなった。これらの形態形質は、強風を受けやすい群落上・中層の受風面積の低減や受風圧を受け流すうえで有用な形質になりうると考察された。一方で、倒伏抵抗性品種では、群落吸光係数が大きく、受光態勢との両立は確認できなかった。また、葉身形質のほかにも、地上部総体新鮮重が2カ年とも倒伏抵抗性品種で小さく(図 4A, B)、これには高い総体乾物率が関わっており(図 4C, D)、地上部自重モーメントを低減する一因と考えられた。さらに、倒伏抵抗性品種では根系支持力も強く、その要因として、上位節根の理想的な出根角度や側根への乾物分配率が高いことが明らかとなった。これらの結果から、倒伏抵抗性品種では地上部および地下部の構造が倒伏リスクの軽減において重要であること示唆された。

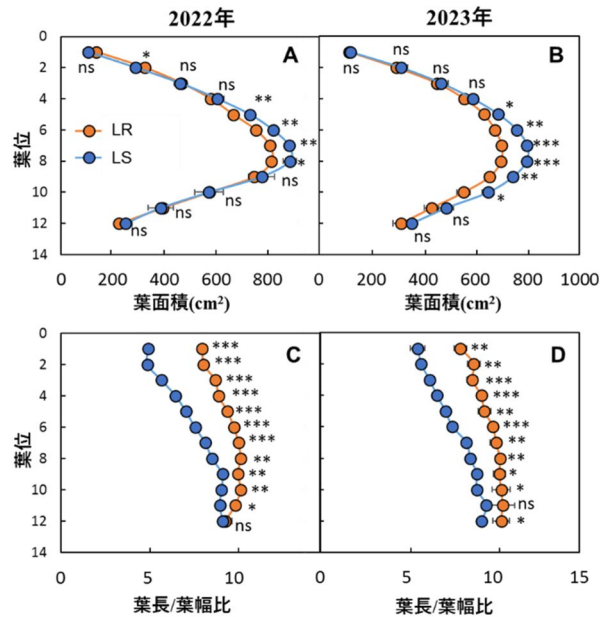


図 3. 倒伏抵抗性品種 (LR) ならびに倒伏感受性品種 (LS) の異なる葉位における個葉面積 (A, B) および葉長/葉幅比 (C, D)。

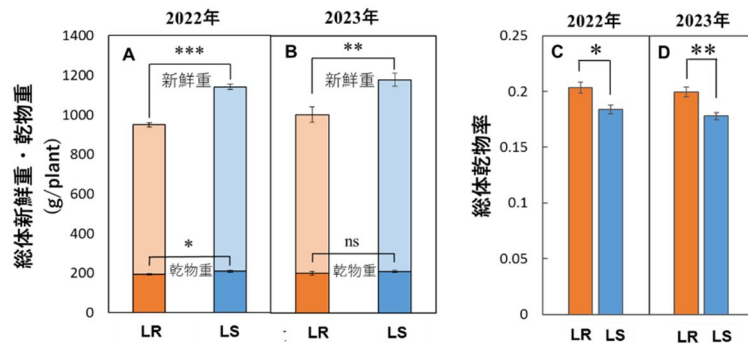


図 4. 倒伏抵抗性品種 (LR) ならびに倒伏感受性品種 (LS) における総体新鮮重と乾物重 (A, B) および総体乾物率 (C, D)。

(4) 茎葉構造の品種間差異が風応答に及ぼす影響を評価するため、(3)で供試した地上部構造が異なる2品種の茎部に加速度センサーを取り付け、地上部モーメントを実測した(図 5A)。その結果、品種間に有意差はないものの、倒伏抵抗性品種では強風域で地上部モーメントを低く維持する傾向にあった(図 5B, C)。このことから、(3)で

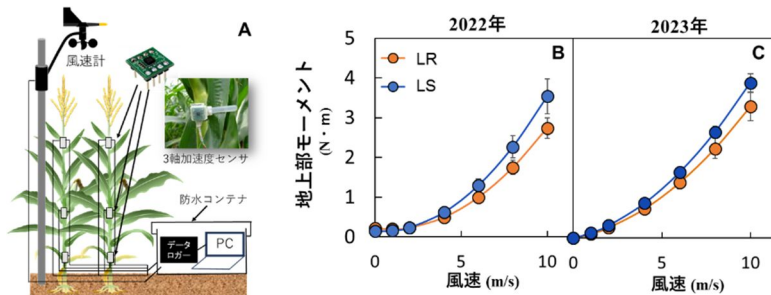


図 5. 風応答測定システムの概略図 (A) ならびに倒伏抵抗性品種 (LR) および倒伏感受性品種 (LS) の異なる風速域における地上部モーメントの応答曲線 (B, C)。

明らかとなった倒伏抵抗性品種の茎葉構造は、強風下における地上部の安定性を高め、倒伏リスクの軽減に寄与することが示唆された。さらに、地上部モーメントが地下部モーメントを上回る倒伏限界風速を推定したところ、倒伏抵抗性品種では倒伏感受性品種よりも 5-7 m/s 程度強い風速まで倒伏を回避できると見積もられた。

以上より、本研究で供試した倒伏抵抗性品種では、茎葉および根系の構造特性が倒伏リスクの低減に寄与していることが示唆された。このような地上部・地下部構造の最適化が効率的な乾物利用を可能にし、生育期間の短い寒地向けトウモロコシ早生品種の耐倒伏性と収量性を両立するうえで重要と考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Taiken Nakashima, Haruka Tomobe, Takumi Morigaki, Mengfan Yang, Hiroto Yamaguchi, Yoichiro Kato, Wei Guo, Vikas Sharma, Harusato Kimura, Hitoshi Morikawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Non-destructive high-throughput measurement of elastic-viscous properties of maize using a novel ultra-micro sensor array and numerical validation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4914
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-32130-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森垣拓巳, 楊夢凡, 松井康真, 松村悠生, 柏木純一, 友部遼, 郭威, 加藤洋一郎, 市川伸次, 中島大賢
2. 発表標題 耐倒伏性が異なるトウモロコシ品種における地上部構造の品種間差異
3. 学会等名 日本育種学会・日本作物学会北海道談話会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊夢凡, 森垣拓巳, 松井康真, 松村悠生, 柏木純一, 尾島徳介, 市川伸次, 中島大賢
2. 発表標題 トウモロコシの耐倒伏性強化に関わる根系形質の品種間比較
3. 学会等名 日本育種学会・日本作物学会北海道談話会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊夢凡, 森垣拓巳, 松井康真, 松村悠生, 山田敏彦, 柏木純一, 尾島徳介, 市川伸次, 中島大賢
2. 発表標題 北海道向けトウモロコシ品種の耐倒伏性に関わる構造特性
3. 学会等名 日本草地学会札幌大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 劉凡渝, 中島大賢, 加藤洋一郎
2. 発表標題 生育後期の窒素施用に対するトウモロコシの成長応答
3. 学会等名 日本作物学会第255回講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 友部遼, 中島大賢, 森垣拓巳, 楊夢凡, 山口寛登, Vikas Sharma, 木村春里, 盛川仁, 加藤洋一郎
2. 発表標題 極小加速度センサーアレイを用いたトウモロコシの弾性特性のハイスループット計測技術
3. 学会等名 日本作物学会第255回講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	加藤 洋一郎  (Kato Yoichiro)  (50463881)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授   (12601)	
研究分担者	郭 威  (Guo Wei)  (70745455)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授   (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------