

jh250024

## 植物空力予測のためのデジタルプラットフォームの構築

高橋裕介（北海道大学）

### 概要

本研究は、植物デジタルモデルによってトウモロコシなどの農作物が自然風により倒伏するメカニズムを解明し、効率的な防止策の構築や、倒伏耐性品種の育種に関する知見を見出すことを目的とする。作物群落内での空気力の変化や、植物のしなりによる空力弾性現象を把握するために、オープンソースのシミュレーションツール（plantFEM, OpenFOAM, preCICE）を活用し、植物のデジタルツインの構築を目指す。本課題では、北海道大学のクラウドシステム・スーパーコンピュータシステム Grand Chariot 2 による計算環境を用いて、植物デジタルモデル生成と流体シミュレーションを実施した。ここでは植物に対して剛体モデルによる解析を行い、群落内の個体ごとの空気力分布や流れの構造変化を明らかにした。さらには流体シミュレーションで得られた圧力分布をモデル表面にマッピングし、弾性解析の試みも行った。実際のトウモロコシに対して、NeRF (Neural Radiance Fields)を用いて精緻なデジタルモデル構築を図った。これらの技術は将来的には作物の倒伏対策や育種・栽培法の改善知見に貢献する。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

北海道大学 情報基盤センター

#### (2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

#### (3) 参加研究者一覧と役割分担

高橋裕介：研究統括、解析モデル構築

友部遼：コード開発、解析モデル構築

中島大賢：デジタルモデル、検証データ構築

武田量：流体構造連成解析（構造）

前田将輝：流体構造連成解析（流体）



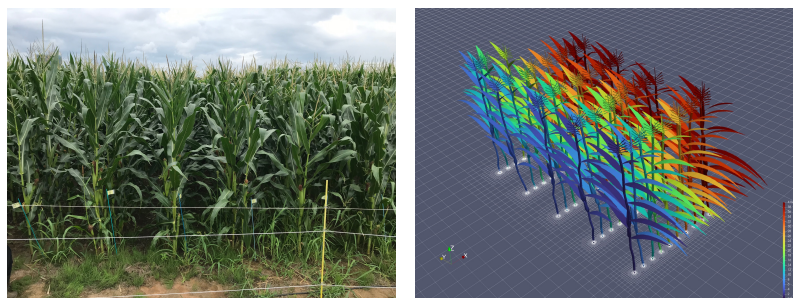
図 1: トウモロコシ群落(北大圃場)

は多くの作物種で主要な減収要因であり、その軽減策として風防の活用や耐倒伏性品種の育種が行われてきた。これらの措置を効率化する上で、自然風環境下で植物体地上部にごどのように空気力が作用するか理解することが重要となる。

図 1 に示すように、一般的に作物は群落と

### 2. 研究の目的と意義

自然風環境下のトウモロコシなどの農作物は、空気力を受けて大きくしなり、特に暴風下で深刻な倒伏が生じることがある。倒伏



- ・ 圃場で栽培される作物を群落デジタルモデルとして構築する**データ駆動 & フィールド研究**。大型計算資源におけるオープンソースソフトを活用して、植物近傍の流れ場、空気力、さらに空力弾性挙動を明らかにする
- ・ 自然風環境においてそれぞれの作物個体にどのような**空気力が働くか？**そして**倒伏を防ぐために、どのような栽培形態をとるか？**どのような**個体を育種するか？**そのヒントを見出し、安定収穫のための答えを考える

図 2. トウモロコシ群落のデジタルツインの試み

して栽培される。群落の構造は、栽植様式や密度、個体の形態特性によって多様かつ複雑であり、これにより群落内の各個体が受ける空気力も変化する。さらに植物体地上部が風を受けて大きくしなった（弾性変形した）とき、流体場にフィードバックが生じ、空気力に影響する連成（空力弾性）が発生する。このような複雑挙動を説明する植物の空気力学・空力弾性学には実用的な需要が存在し、それらの知見を応用することで農学分野の主要な課題解決貢献が期待できる。群落内の個体が受ける空気力を明らかにすることで、どのような品種を育成すべきか（作物の育種）、群落内配置をどのようにすべきか（栽植様式の最適化）といった観点から倒伏対策を講じることが可能になる。

近年の計算機の飛躍に合わせて数値解析は大きく発展しており、構造解析や流体解析にも便利なオープンソースソフトウェア (OSS) が展開されている。本課題では、OSS のひとつである plantFEM、OpenFOAM、preCICE を用いて、圃場における群落のデジタルツインを構築し、群落内個体に働く空気力や、強風下における個体の挙動を明らかにすることに着目した。これらは大規模計算 (HPC) 環境への展開も容易である。

本研究の目的は、OSS に基づく構造・流体・

連成解析と HPC 環境を活用して植物空力予測のためのデジタルプラットフォームを構築し、植物群落における空気力・空力弾性挙動を明らかにすることである。この概要は図 2 に示す通りである。デジタルモデルに基づいて植物の空気力学的特性を把握することにより、群落内の個々の植物にはどのような空気力が働くのか、倒伏を防ぐためにはどのような措置が有効であるのか、工学と農学の学際連携としてその答えを考える。この知見は、新たな作物育種や栽培方法の開発に活用でき、結果として収量増加・安定化に向けた具体的な提案につながる。

### 3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本課題で提案するデジタルプラントプラットフォームは、将来的には高コストな双方向的な流体構造連成解析を行うため、HPC (スーパーコンピュータシステム) (Grand Chariot 2) に使用が重要となってくるも。ただし、HPC 利用に加えて、使いやすいクラウドシステムを利用することは、課題解決の上で取り回しが良い。今年度は HPC のみの利用に絞ったが、将来的には大阪大学 D3 センターの mdx II などの利用も視野に入れたい。本研究で構築したデジタルモデル・計算セットは、将来的には GitHub などの開発プラッ

トフォームで公開する。

本研究は農学と計算工学の学際連携研究である。農学的な見地からのリクエストに基づき、シミュレーションモデル構築を目指す。この過程でシミュレーションモデルが実現現象を適切に再現しているのか検証することは重要である。近年においては、光学スキャンやニューラルネットワークモデルに基づく植物デジタルモデル構築技術が発展しており、迅速かつ安価に行うことも可能となってきた。実際に圃場で栽培した作物の詳細な形状モデル作成が可能となっている。

当拠点（北海道大学）は、大型計算機が設置されている情報基盤センターと圃場の物理的距離が近く、課題参加者の多くもその周辺に拠点を置くため、実際の栽培環境を確認しながらシミュレーションモデル検証のための測定手法検討、議論を行いやすい。このような観点から当拠点を選擇した。

#### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

##### (A) デジタルツイン構築と流れ場のシミュレーション

plantFEM は、植物の成長に関連する現象モデルが実装されており、その成長途中も含む形状を非構造メッシュとして出力できる。加えて離散化形状に基づいて有限要素法に

よる力学的特性評価可能である。ここではトウモロコシを対象とし、そのデジタルモデルを STL データで出力した。

OpenFOAM は、流体解析を始めとした様々な数値解析モデルが実装された OSS ツールボックスである。豊富なプリポスト処理が用意されており、STL から計算格子生成が可能である。

ここでは plantFEM で生成した STL データから、OpenFOAM を用いて計算格子を生成した。さらに計算格子と適切な境界条件に基づき OpenFOAM による流体シミュレーションを行った。植物近傍流れ場の特徴量や空気力も抽出している。図 3 は空気力予測ルーチンである

##### (B) 計測点群データ構築とメッシング

LiDAR 等による計測点群データに基づく 3D メッシングは、解析モデル検証などの点から将来的な応用が広く、群落デジタルツインの作成において有用である。これまでに、複数品種のトウモロコシ個体の高精細点群データ作成に成功している。合わせて図 4 に示すように、メッシングも行っている。使用ソフトウェアの選擇やそれぞれのパラメータ調整などに検討が必要であるが、特徴的な構造を適切に捉えられている。このデータに

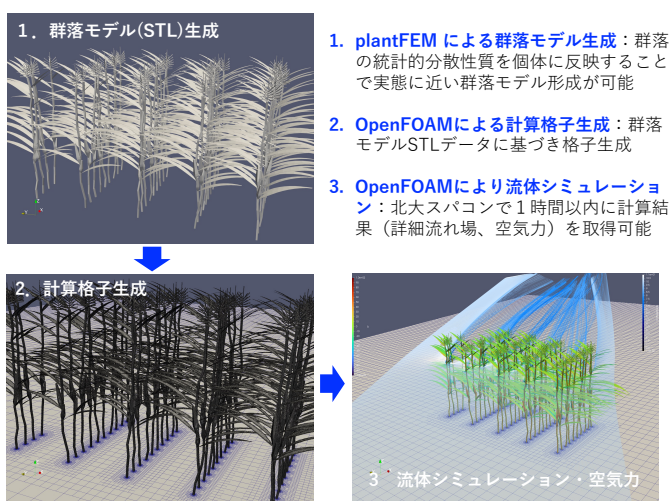


図 3. トウモロコシ群落の空力予測モデル



図 4. 計測点群データに基づくメッシュ

基づいて、3D プリンティングおよび上記の流体シミュレーションも実施が可能であり、その準備も進めている。

## 5. 今年度の研究成果の詳細

### (1) OpenFOAM の GrandChariot2 移植・空力シミュレーション実行

北大情報基盤センターの大型計算機 Grand Chariot 2 が 2025 年 7 月から新規に運用を開始したことから、2024 度に構築したソフトウェア移植を行った後に、シミュレーション実行を実施した。

Grand Chariot 2 に OpenFOAM-v2212 を移植し、動作確認を実施した。plantFEM (植物モデル生成・構造解析) で得られたトウモロコシ群落デジタルデータ近傍の流体計算格子を OpenFOAM/snappyHexMesh 等を用いて生成した。計算格子と適切な境界条件に基づき OpenFOAM/pimpleFoam 及び simpleFoam による流体シミュレーションも行った。ポスト処理として植物近傍流れ場や空気力を抽出する機能が健全に動作することも確認した。

このように OpenFOAM 移植は特に大きな支障なく完遂できた。一方で、インタークラウドシステムの仕様は大きく変わったため、昨年度クラウド構築したソフトウェアは GrandChariot2 あるいは研究室サーバー運用に切り替えることにした。

加えて、昨年度未了となっていた、一様流速を変えたケースや、速度の迎角・スリップ角を変えたケースなど、いくつかのパラメータスタディも進めた。

### (2) トウモロコシ茎葉構造モデルの作成

トウモロコシの茎葉構造は、品種ごとに異なり、各葉位の出葉高や角度、個葉面積、葉幅長および葉幅といった形態的特性が個体の受風態勢を左右する。さらに、品種固有の茎葉構造と栽植密度 (畝間・株間距離) や植

付様式との組み合わせによって群落構造が多様化し、これが異なる流体場を形成する。したがって、圃場環境に即した流体シミュレーションには、品種特異的な茎葉構造を精細に再現した 3D モデルの作成が重要となる。

昨年度までに、SfM (Structure from Motion) や LiDAR (Light Detection and Ranging) など、いくつかの 3 次元点群再構築技術を用いて 3D モデルの作成を試みた結果、NeRF (Neural Radiance Fields) を用いることで精細な 3D モデルを取得することに成功した。

モデル作成の手順として、まず、栽培現場において倒伏リスクが高まる 8 月中下旬の乳熟期頃のトウモロコシ群落から個体を刈取ったのち、室内に搬入し、直立状態の個体について 1 分間程度の動画を撮影し、これをスキャンデータとした (図 5)。次に、取得した動画から画像を切り出し、フォトグラメトリソフト (Metashape, Agisoft) を用いてカメラ位置を推定し、この情報をもとにオープンソースツール (NeRFstudio) を用いて高密度 3D 点群を生成した。

次に、作成した 3D 点群について、オープンソースソフトである CloudCompare を用いてノイズ除去と間引き処理を行ったのち、NURBS 3D モデリングソフト (Rhino 8, Robert McNeel & Associates) の Shrinkwrap 機能を用いてメッシュ化し、STL データとして出力した。生成された 3D メッシュモデルは、茎葉構造を高精細に再現していたものの、雄穂や雌穂の形態や葉身の厚みといった微細構造については改善の余地が認められた。

この手法を用いて、地上部構造と耐倒伏性が異なる 6 品種について 3D メッシュを作成した (図 6)。3D モデルを品種間で比較すると、出葉角度や葉身形状およびそれらの垂直分布といった茎葉構造の品種間差異を捉え

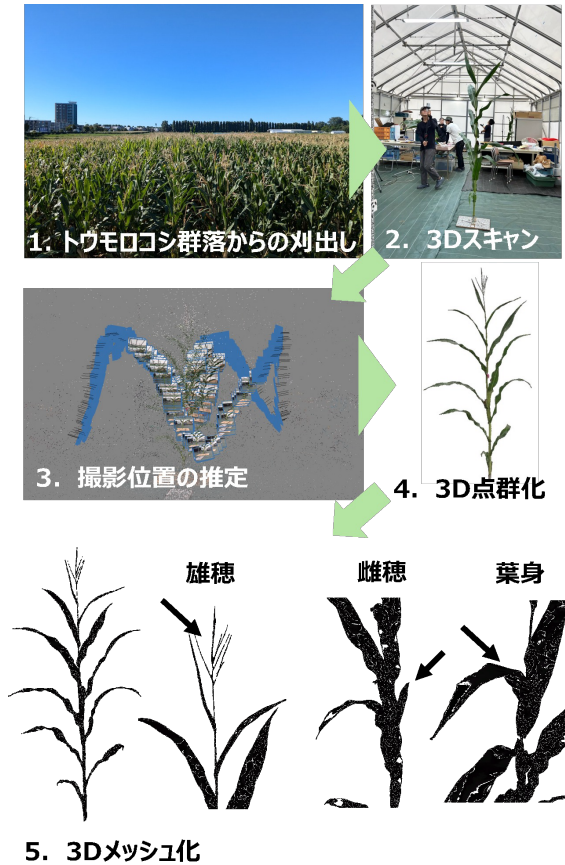


図5. 茎葉構造の3Dモデルの作成手順

ることができた。一方で、P9027 や HK65 の様に、上位葉は密集した構造を示す品種では、雄穂や上位葉の形態が十分に再現できなかった。今後は、撮影方法や点群生成、メッシュ化の処理条件をさらに改良する必要がある。

(3) 表面圧力マッピングを用いた弾性解析 (one-way FSI 解析)

双方向的な流体構造連成解析を行う前段階として、流体シミュレーションでモデル表面の圧力分布をマッピングし、plantFEM を用いて弾性解析 (one-way FSI 解析) の試みを実施した。これにより空気力が働いたときのトウモロコシ振動応答特性を明らかにすることができる。

図7は、OpenFOAM による空力シミュレーションで得られた単一トウモロコシ表面

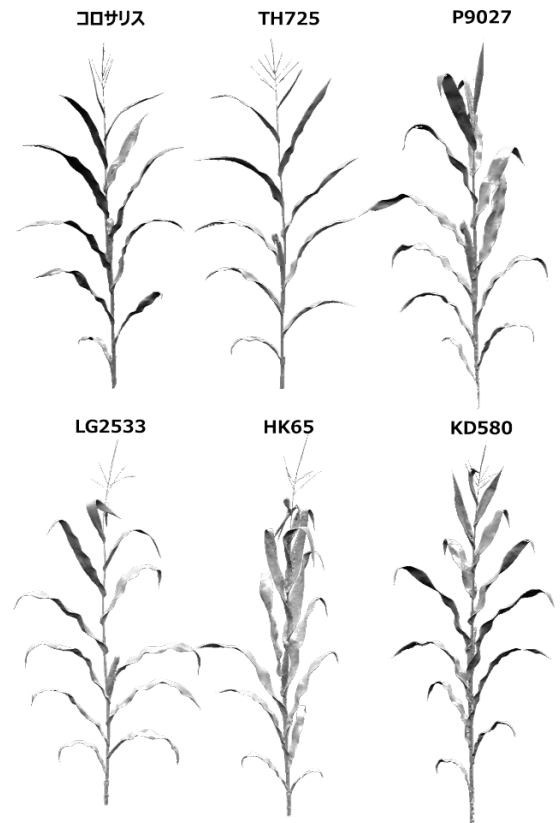


図6. トウモロコシ6品種の3Dモデル

の圧力分布 (左) と、この圧力分布をマッピングし、plantFEM の弾性シミュレーションを行うことで得られた応力第2不変量 J2 の平方根の負値の分布 (右) である。この弾性シミュレーションでは、トウモロコシのヤング率 100 kPa, ポアソン比 0.3, 密度  $9.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  としている。図6右図の負値が高いほど偏差応力が大きくなることを意味する。

今回は単一トウモロコシに対する one-way 的な FSI 解析で弾性応答を確認したが、この発展として、流体場と構造場を双方向的に接続 (two-way FSI 解析) させることで、より実際のなとうもろこし空力弾性挙動を明らかにする。

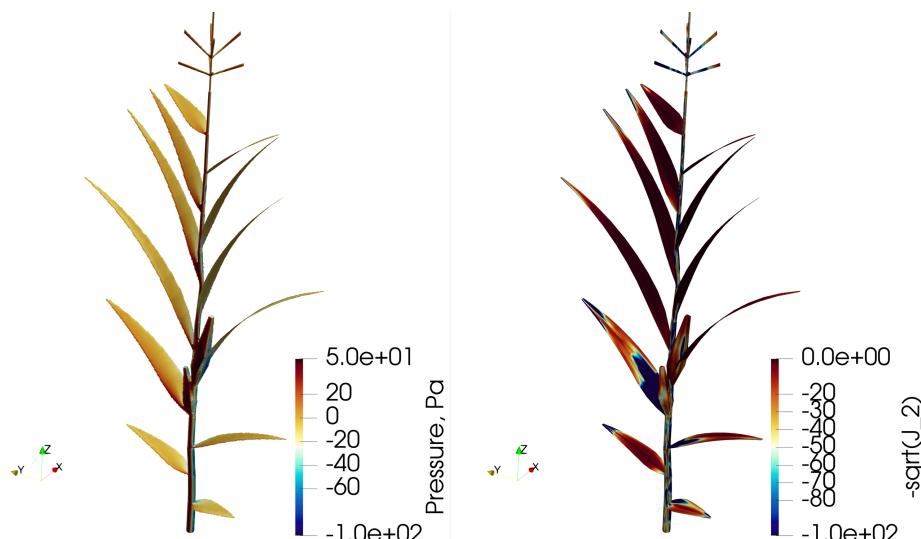


図7. トウモロコシ表面圧力分布（左）および応力の第2不変量J2の平方根負値（右）

### 進捗状況の自己評価と今後の展望

全体的な進捗状況の評価として、大型計算機におけるデジタルツインモデルの構築や空力シミュレーションにおけるパラメータスタディ、精緻なトウモロコシ茎葉構造モデルの構築、一方向流体構造連成解析（圧力マッピングを採用した弾性解析）などにおいて計画を進めていると言える。一方、シミュレーションモデルの検証に繋がる、風洞模型制作や風洞実験、また、双方向的な流体構造連成解析モデルなどにおいて、未達の項目も含んでいる状況である。

将来展望としては以下が挙げられる。

- (1) 大規模群落モデルやパラメータ研究：今回パラメータ研究を進めたが、作物の畝間・株間距離や個体配置（格子状配置・千鳥播種・狭畦密植など）のパラメータスタディも、多くの知見を見出すことが期待できるものであり、その実施は次年度以降も取り組まれる。
- (2) 植物の流体構造連成(FSI)解析モデル：植物と流体の双方向的な流体と構造の連成は正確な空気力予測に必須である。流体場と構造場を独立に解き、連成境界面において空気力・変位を交換することで、連成を成立する分離型連成解法を採用す

る。流体場は OpenFOAM, 構造場は plantFEM であり、カップリングライブラリ preCICE がデータ交換を担う。連成解析モデル構築にあたり preCICE アダプターと呼ばれる小プログラムを作成する必要がある。OpenFOAM はすでに公開されているが、plantFEM にはまだ用意されていないため、アダプターを新規作成する。

※7. 研究業績はウェブ入力です