

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 BUI The Khuynh  
 論文題目 Study on the genetic diversity of soybean roots under field conditions (圃場におけるダイズの根の遺伝的多様性に関する研究)

### 論文審査担当者

主 査 名古屋大学教授 中園幹生

委 員 名古屋大学教授 芦荊基行

委 員 名古屋大学教授 犬飼義明

委 員 名古屋大学准教授 高橋宏和

委 員 名古屋大学助教 縣 歩美

## 論文審査の結果の要旨

BUI The Khuyhnh は、ダイズの水分ストレスに対するダイズの根系解析や GWA 解析、根系形質予測モデルの構築などを行い、ダイズの根における品種間多様性や根系発達のための重要な候補遺伝子を明らかにした。以下にその要旨を記載する。

「水」は人間や動物だけではなく、植物にとっても生育に不可欠である。世界人口は拡大を続け、2025 年頃には世界人口が 80 億人を超えると予測されている。それに伴い、農業における水の必要量は 2025 年までに 17%増加すると予想されているにもかかわらず、都市化や開発により農業に利用可能な水量は制限されつつある。その結果、2025 年頃には 27 億人が深刻な水不足や食料不足に陥ることが危惧されている。また、近年、地球規模の気候変動や局所的な異常気象が深刻化していることから、環境の変化に適応できる作物品種の開発に対する需要が高まっている。気候変動の中でも降水量の変化は世界中で広域的に発生しており、1970 年代後半以降世界各地で強い干ばつが発生している。世界的には天水に依存して作物を栽培する農耕地が多いため、干ばつによる作物生産への甚大な被害が頻繁に発生している。また、灌水システムが構築された地域においても、降水量の減少による水不足が危惧されている。したがって、節水農業や乾燥地域での作物栽培のための技術及び新規品種開発が求められている。

ダイズは世界的に広く栽培されている作物の一つである。2018 年のダイズの需要量は過去最高を記録しており、今後さらに需要が拡大することが予想されることから、ダイズの収量性向上が求められている。しかし、ダイズは干ばつ被害面積が世界最大の作物であることから、ダイズの乾燥ストレス耐性の向上は、収量性向上のための重要な育種目標であると考えられる。

植物の根は、養水分の吸収に関わるとともに、干害、湿害、塩害などの環境ストレスの際に最初に影響を受ける器官である。そのため、根系は水分ストレス耐性向上のための重要なターゲットであると言える。これまで収量構成要素に関わる重要な形質について、非常に数多く研究され、育種が行われてきたものの、根系（地下部）に関する育種は進んでいないのが現状である。その要因として、根系は土壌中に形成することから、観察や測定に大きな労力やコストが必要であり、また経時的な観察が困難であることが挙げられる。これらの問題解決のために水耕栽培による観察が広く行われてきたが、土壌栽培と水耕栽培では根系形成に大きな違いがあり、水耕栽培で土壌中の根系を再現することは不可能である。これらのことが根系形質に着目した育種を困難にしてきた要因であると考えられる。

そこで本研究では、ダイズの根系に着目した節水栽培のための品種育成のための基盤構築を目的として解析を行った。そのために、少ない系統で遺伝的変異を幅広くカバーするダイズコアコレクションを用いて、圃場における根系のフェノタイプング技術を確立し、表現型の解析を行った。198 系統のダイズを、根系の回収が比

## 論文審査の結果の要旨

比較的容易な砂質圃場である鳥取大学乾燥地研究センターの砂質圃場で栽培を行った。砂質圃場を灌水区と非灌水区に分け、2017年から2021年までダイズコアコレクション 198 系統を栽培した。各系統 3 反復、約 1188 個体を播種後 15 日目から、灌水区では一日当たりたり 5L の灌水を 3 回に分けて行い、非灌水区では灌水を行わずに、各々 20 日間栽培を行った。その後、全ての個体について根系のサンプリングし、14 種類の根系形質について評価を行った。

第 2 章では、このうち 2017 年、2019 年、2020 年の根系データを用いて、表現型解析を行ったところ、根の平均直径を除いて多くの根系形質が灌水区でその値が大きくなった。また、各年度間で灌水に対する応答には相関があったものの、圃場での栽培は環境の影響を受けることから、3 年分のデータを用いて全ての根系形質について各系統の BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) 値を算出し解析に用いた。BLUP 値から Shannon-Weaver diversity index ( $H'$ ) を算出し、各根系形質について集団の多様性について評価したところ、全ての形質で 70% 以上の値を示し、今回使用した集団が根系形質においても多様性を有していることが明らかとなった。次に、各系統について、増加比 (灌水区 / 非灌水区)、相対増加比 (灌水区  $\times$  非灌水区 / 非灌水区<sup>2)</sup>、multi-trait stability index (MTSI) を算出し、年度間、処理間の形質の安定性を考慮し、灌水区及び非灌水区で安定して大きな根系を発達させる 6 系統を選抜した。これらの系統は、根系形質に着目した育種の素材として有用であると考えられる。

第 3 章では、第 2 章で算出した BLUP 値を用いて Genome Wide Association (GWA) 解析を行った。GWA 解析の結果、7 つの QTL を検出した。検出した QTL のうち遺伝子のコード領域上に多型が存在し、非同義置換が生じることが推定された遺伝子を選抜した。さらに、ハプロタイプ解析から総根長及び太い根の割合に関与する候補責任遺伝子として Glyma07G084300 と Glyma14G072200 をそれぞれ選抜した。Glyma07G084300 のシロイヌナズナホモログは、CYCLIN-DEPENDENT KINASE 1A1 をコードし、その変異体では根の発達が大きく阻害されることから候補責任遺伝子であることが強く示唆された。

第 4 章では、近年様々な分野において、ビッグデータを活用し、機械学習を利用したモデル化を通じて任意のデータを予測することが試みられていることに着想を得て、比較的計測が容易な地上部の形質から根系形態を予測することができれば、根系形質に着目した育種を加速することが可能になるのではないかという考えに至った。この仮説を検証するために、ゲノミック予測及び機械学習を用いた根系形質の予測をするモデルの構築を目指して解析を行った。ゲノミック予測では、ランダムに選抜した 10 万 SNPs を使用し、標的形質として総根長を用いた。4 種類のアルゴリズムを試行し、予測精度を確認したところ、GBLUP が最も高い精度を示し

## 論文審査の結果の要旨

た。そこで、他の形質についても応用したところ多くの根系形質で  $R=0.4\sim 0.6$  程度の精度で予測精度が明らかとなった。一方で、二次側根数や根粒数など遺伝率の低い形質については、予測精度が  $r=0.4$  を下回ったことから、形質にはよるものの根系形質についてゲノミック予測が可能であることが示唆された。次に、植物の表現型に加え、葉における 19 種類のイオンデータを用いて、5 種類の機械学習アルゴリズムを試行し、総根長の予測精度を確認した。その結果、RandomForest が最も高い精度を示した。今回の解析により根系データに加え、19 種類イオンデータを加えることで予測精度が向上し、またこのうち寄与率の高い 5 種類のみイオンデータ使用した際も予測精度は向上することが明らかとなった。また、この手法でも複数の根系形質が予測可能であり、太さごとの根長のような根系の形態も予測が可能であることが示された。今回予測精度が低かった形質についても、今後高精度で予測することが可能になれば、根系を破壊、採取することなく、ある程度の精度で根系の形態を予測することが可能となる。これにより、根系形質に着目した育種のための大幅な労力やコストの削減が可能となり、育種が加速することが期待される。

したがって、本委員会は本論文が博士（農学）の学位論文として十分な価値を有すると認め、論文審査に合格と判定した。