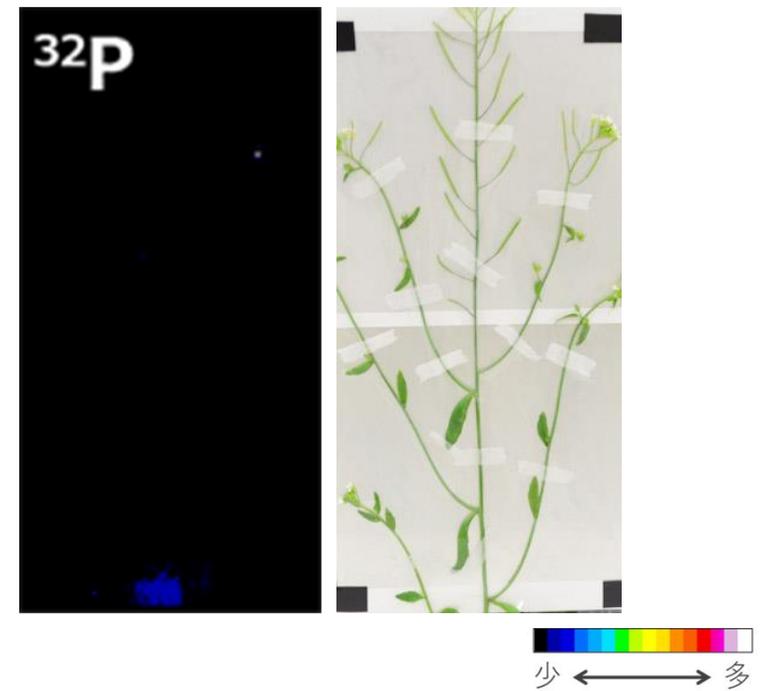


見えない土の力を見える化する：  
ダイズ×土壌科学の最前線

# 自己紹介

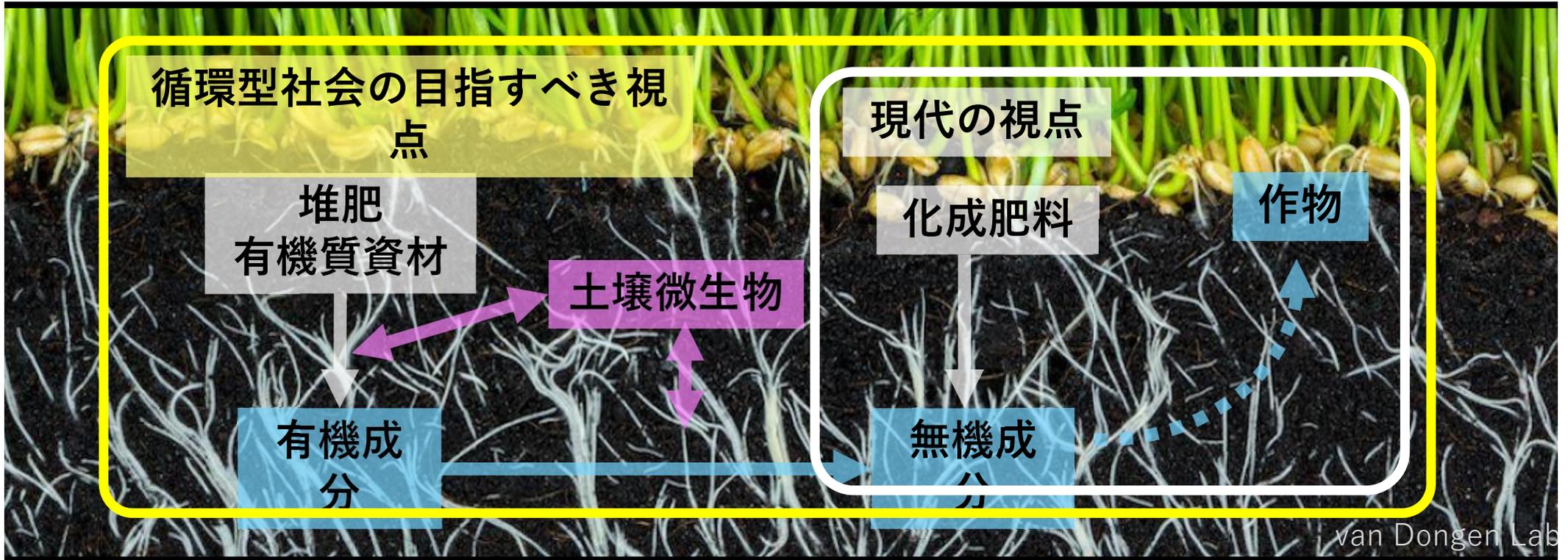
---

- 福島県いわき市生  
(1971～)
- 福島県農業総合センター  
畑作物、環境保全型農業  
(1998～2011)
- 福島県庁農林水産部  
食の安全(放射線)  
(2011～2013)
- 東京大学大学院  
農学生命科学研究科  
(2013～2020)
- 福島大学食農学類  
(2020～)
- 福島国際研究教育機構 (F-REI)  
(2024～)



# 土の中

植物と微生物と土壌の各階層が複雑に絡み合っている



# 近代農業

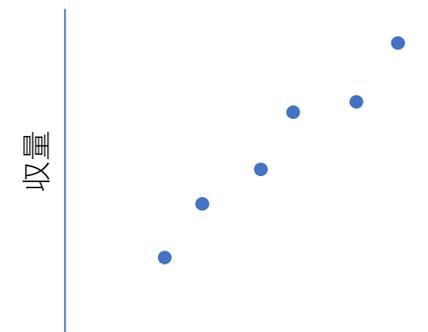
## ● リービッヒ “無機栄養説”(1840年)

## ● 化学肥料の開発

“あらゆる植物の栄養源は腐植のような有機物ではなく、炭酸ガス、アンモニア（または硝酸）、水、リン酸、硫酸、カルシウム、マグネシウム、カリウムなどの無機物質である”

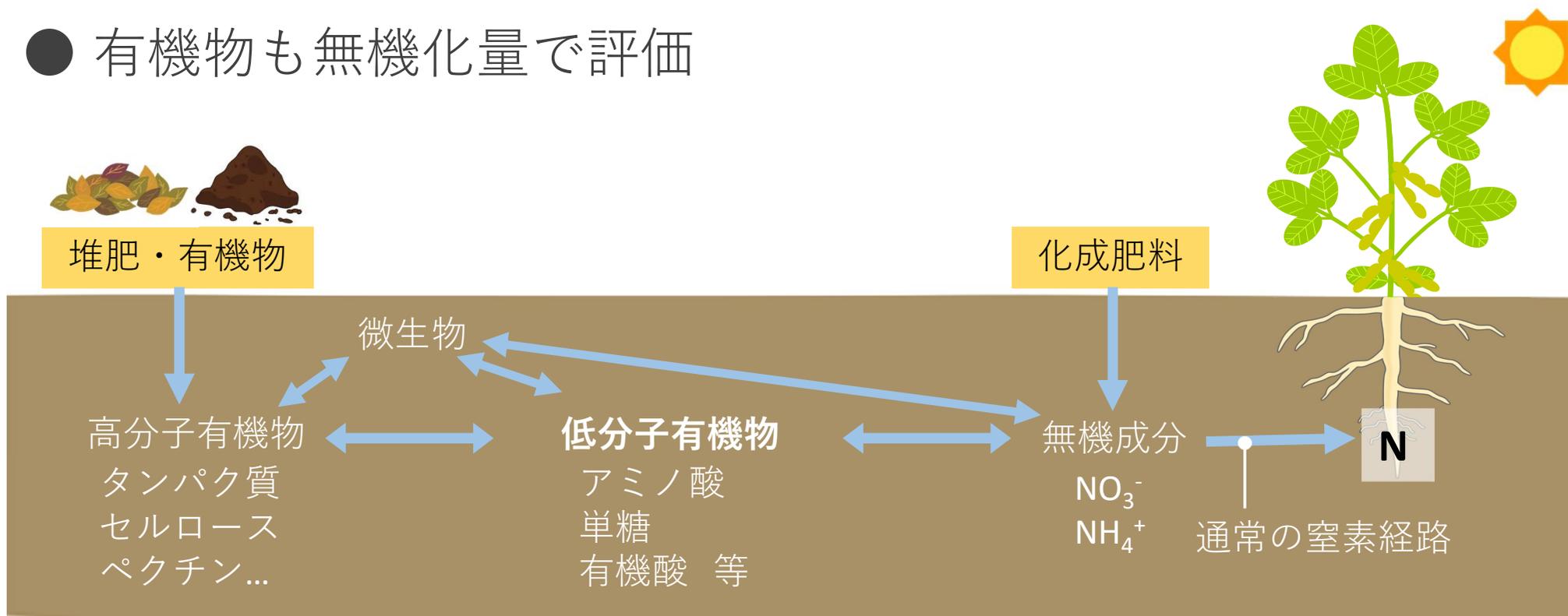


Plögg et al., 1999  
Antonkiewicz & Labetowicz, 2016



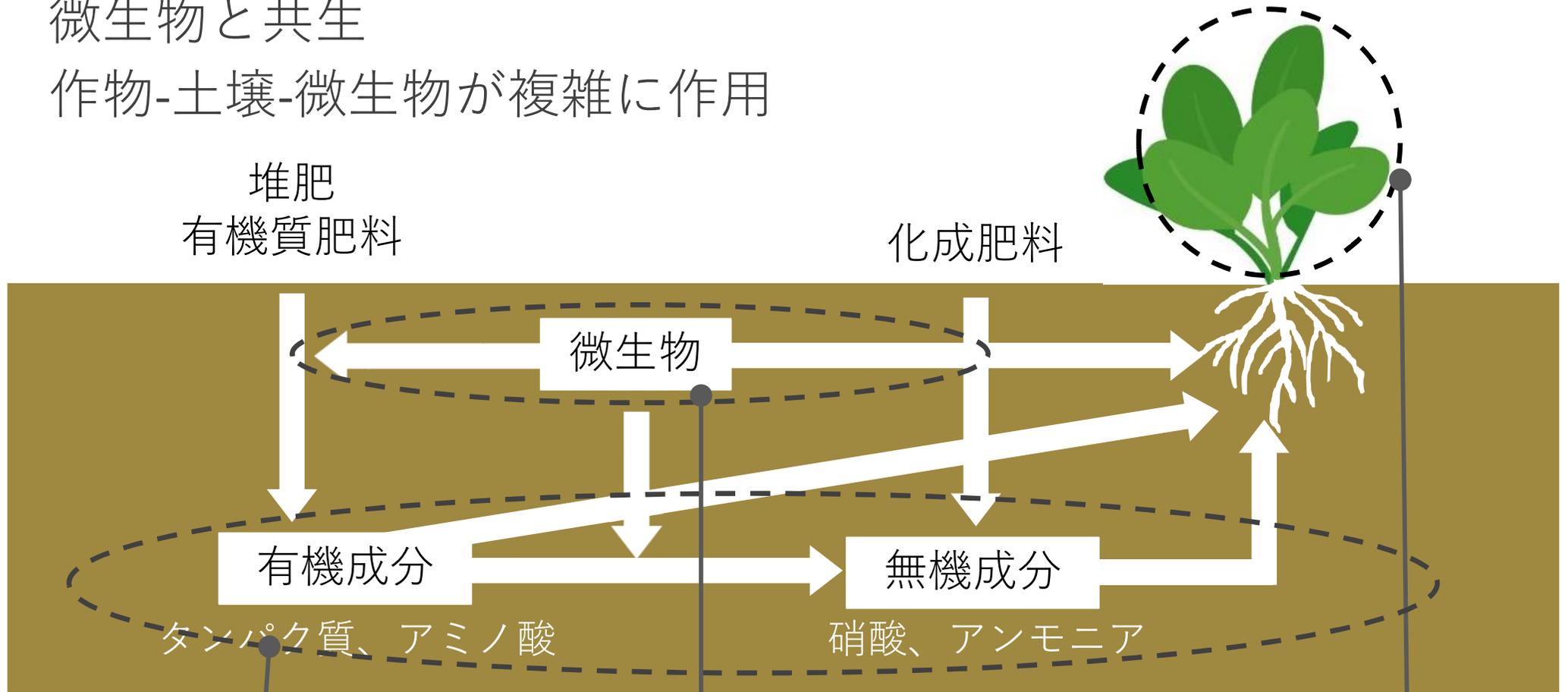
土壌の硝酸濃度

## ● 有機物も無機化量で評価



# 実際の圃場では？

作物は有機成分の吸収可能  
微生物と共生  
作物-土壌-微生物が複雑に作用



**土壌**

化学性 { pH、EC、CN、イオン  
一次代謝物、二次代謝物  
揮発物質

物理性 { 透水性、保水性、  
粒度分布、硬度

**微生物**

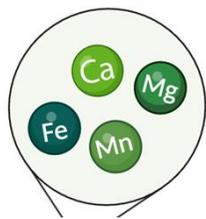
根圏  
微生物叢

非根圏  
微生物叢

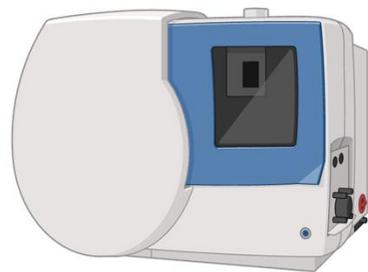
**作物**

草丈、収量、イオン  
一次代謝物、二次代謝物  
発現遺伝子  
食味、貯蔵性

# Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)



Ions



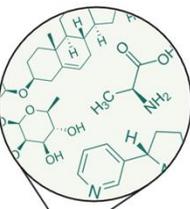
Sample

	Ca	K	Mg	Na	Al	Mn	Fe	Co	Ni
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

# Mass Spectrometry (MS)



Soil sample



Metabolites

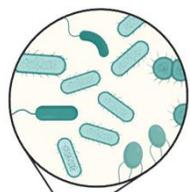


GC-MS

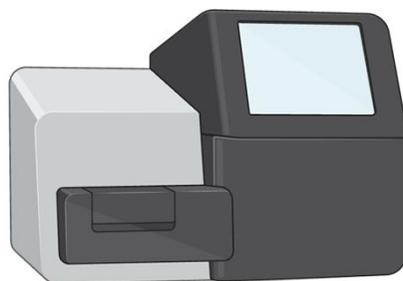
Sample

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

# LC-MS Next-Generation Sequencing (NGS)



Bacteria species (ASV)



Sample

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

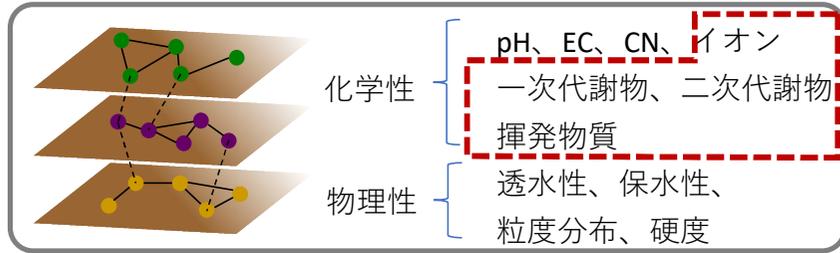
Sample

Spectrum

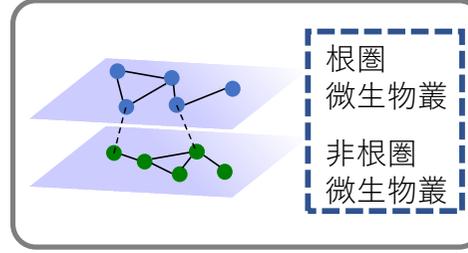
Data

# 土壌、微生物、作物の測定

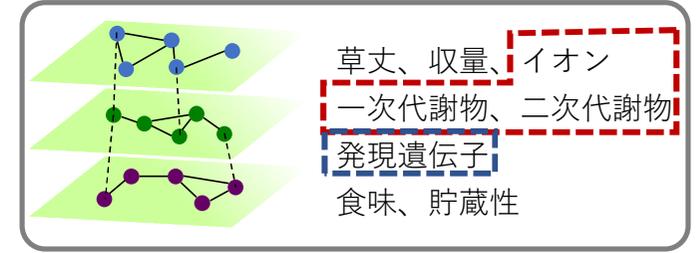
## 土壌



## 微生物



## 作物

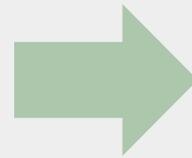
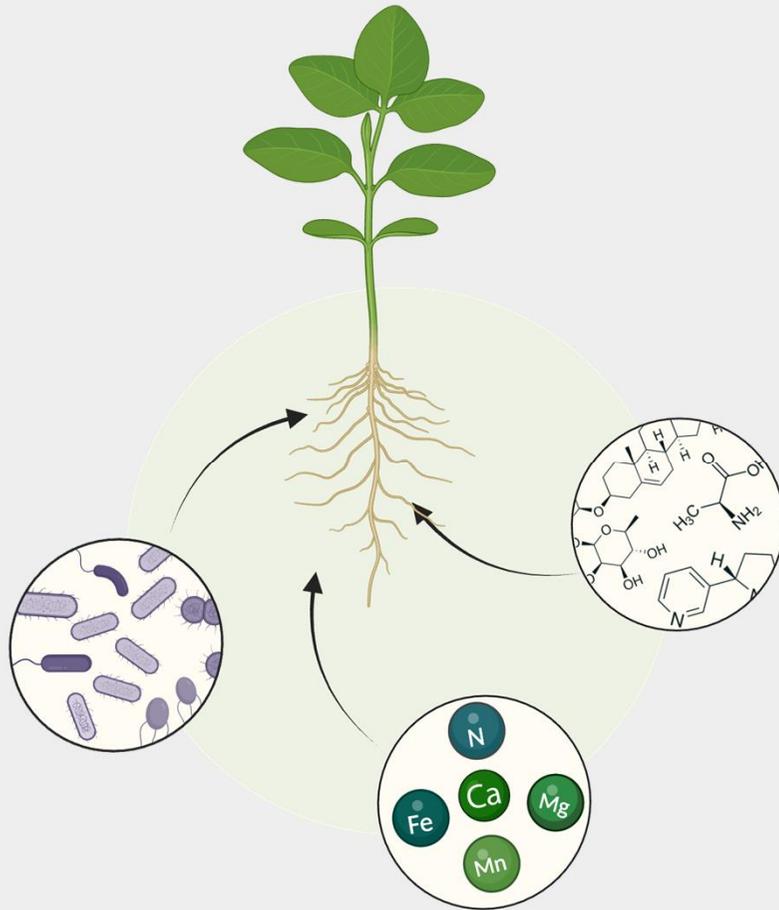


測定項目：従来数十 → 数百～数千

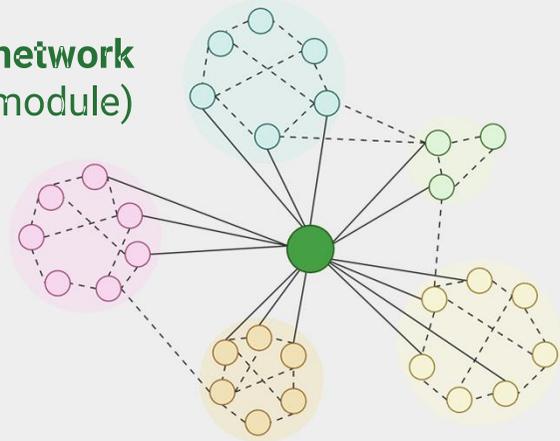


# Descriptive & Diagnostic

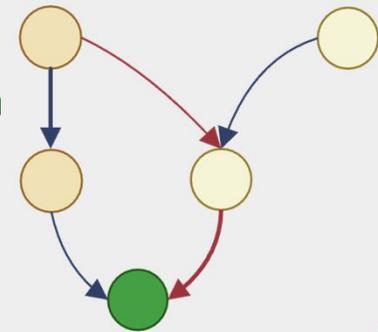
データを統合



Correlation network  
(with module)



Directed  
causal graph



# ダイズ

日本食と縁が深い  
タンパク質源としても着目



豆腐購入（2019年）

1位 盛岡市 4位 仙台市 9位 福島市

納豆購入（2019年）

1位 福島市 3位 盛岡市 4位 山形市

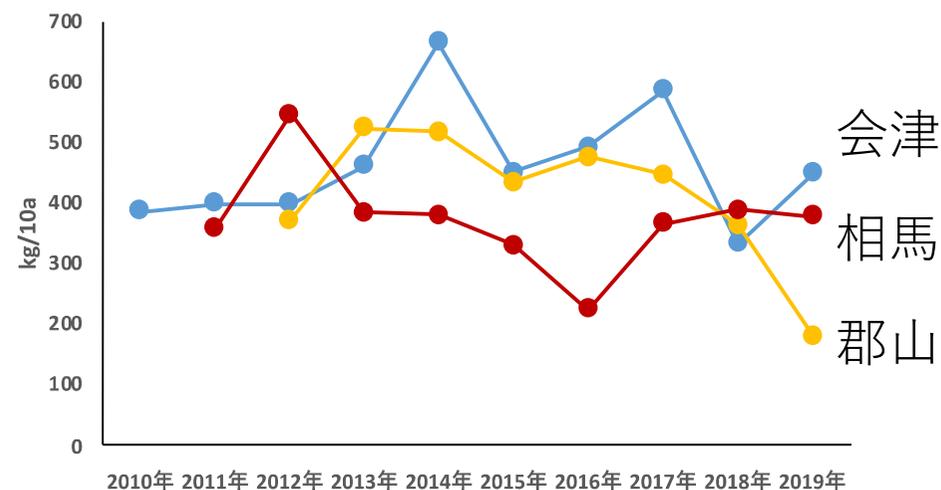
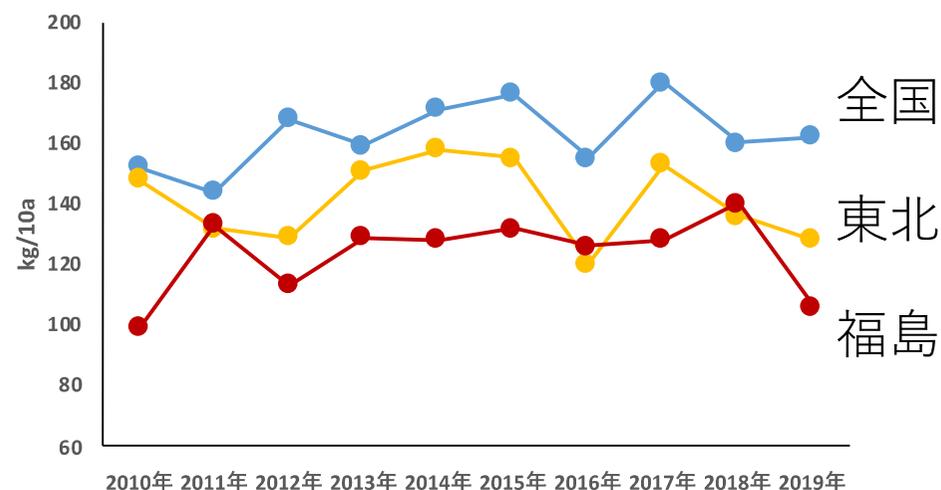
# 単収

自給率約20%（食用）

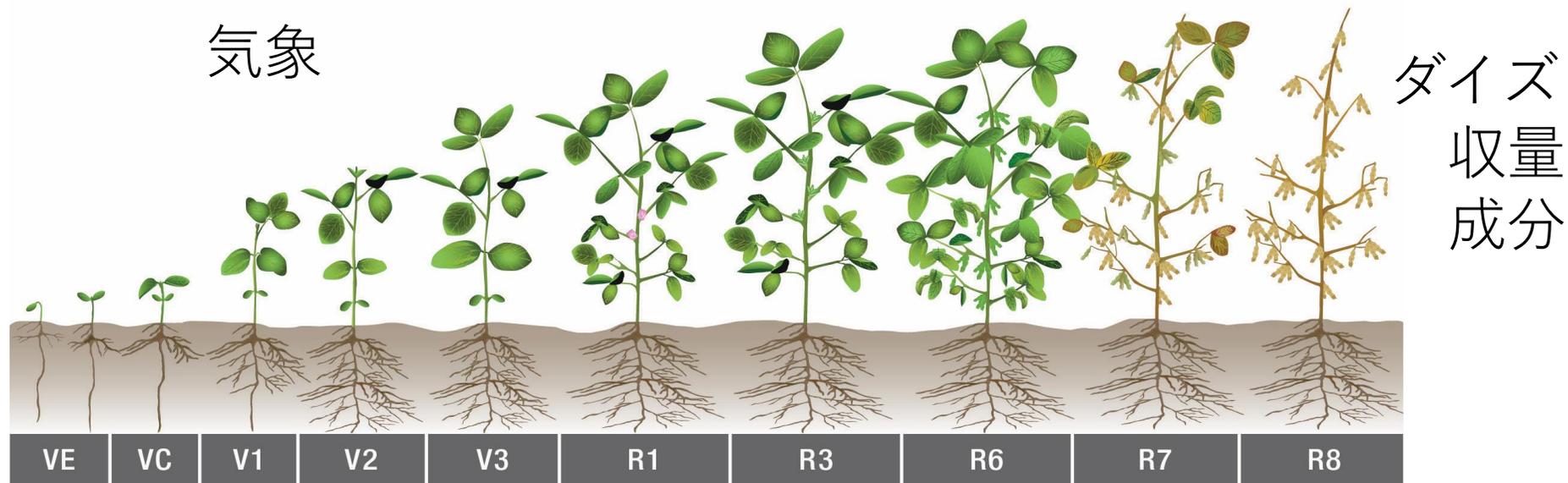
福島県の単収低い

福島県内でも差がある

# 収量に関する要因解明



# 収量に関連する要因解明

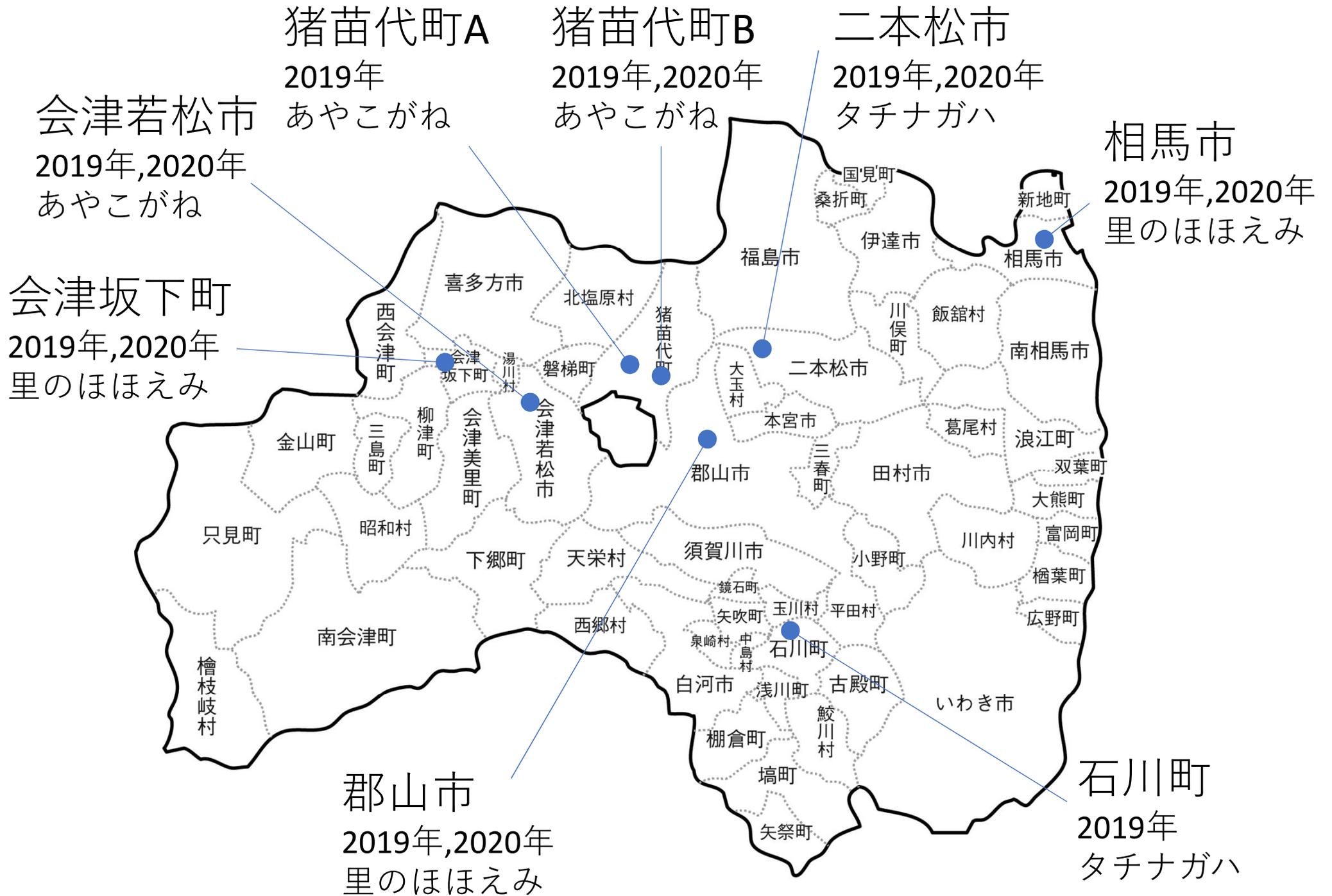


Source: University of Illinois, 1999

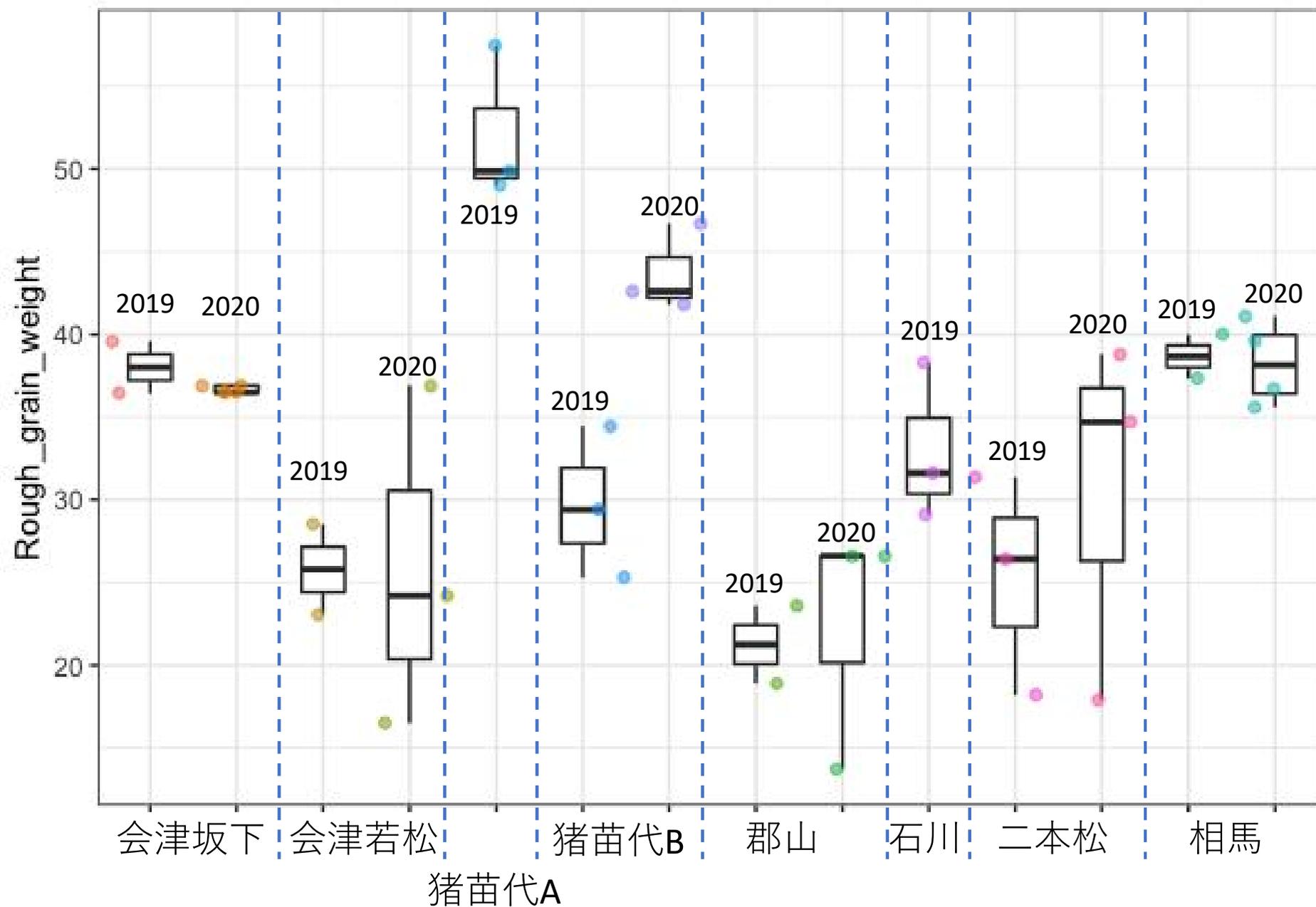
土壌：化学性、物理性、生物性

気象、土壌化学性、物理性、生物性データのうち  
収量に関連するデータを選抜

# 採取地点



# 収量（粗子実重）

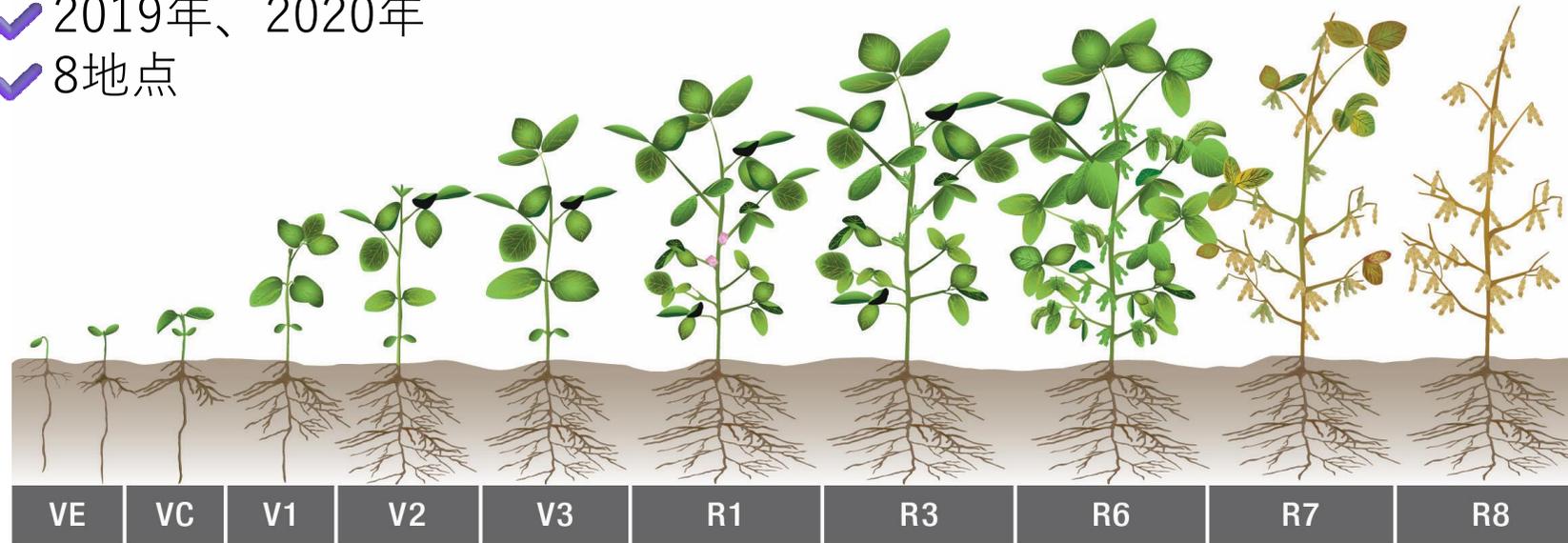


猪苗代A、猪苗代Bで高く、郡山で低い

# 気象データ

(株)ハレックスより各圃場の気象データ (約 1 km メッシュ) 購入

- ✓ 気温、降水量、日射量、風速
- ✓ 1時間ごと
- ✓ 2019年、2020年
- ✓ 8地点



Source: University of Illinois, 1999

播種期—開花期

開花期—成熟期

播種期—成熟期

積算平均気温  
最高気温  
最低気温  
最高-最低差平均

積算降水量  
積算日射量  
平均風速

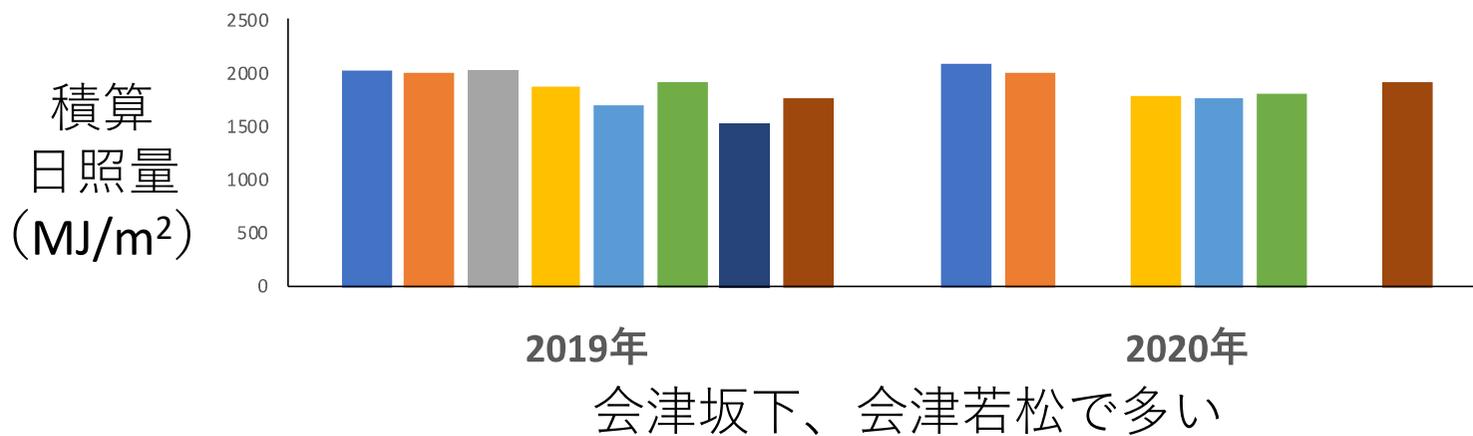
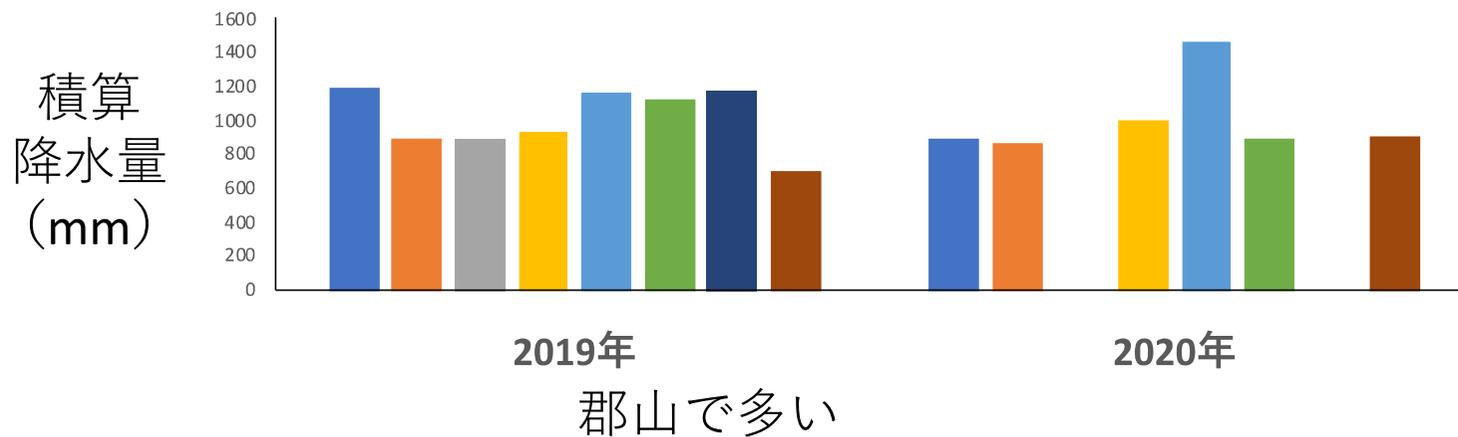
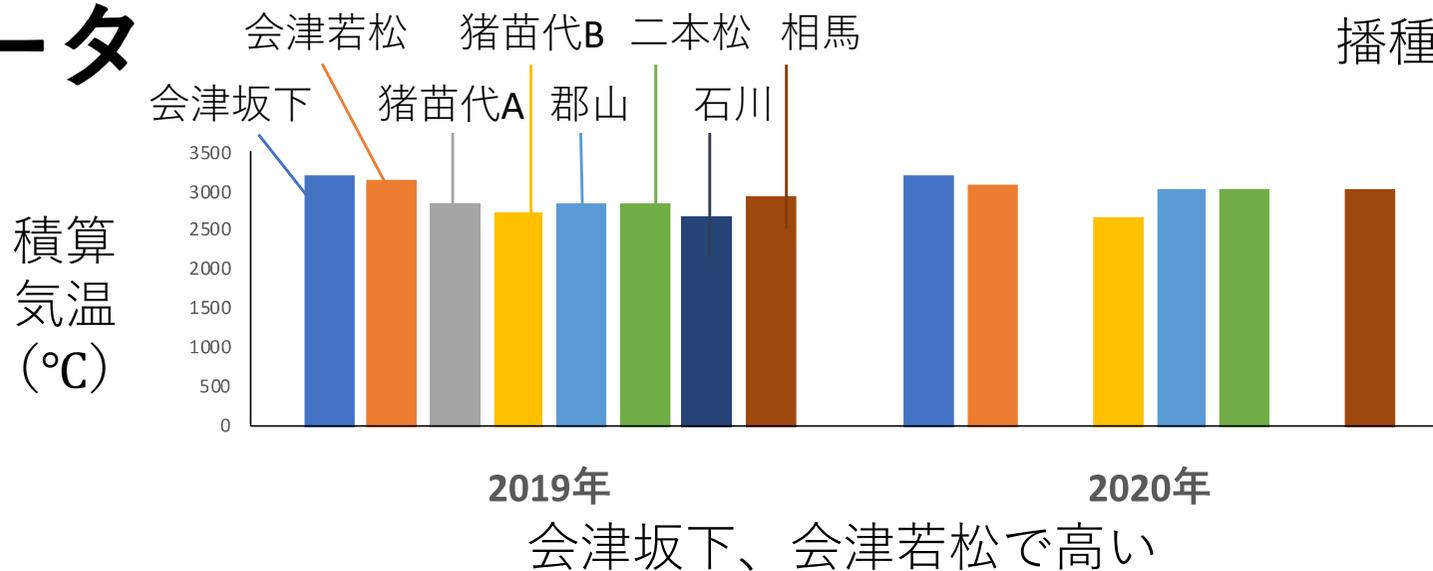
×

播種期—開花期  
開花期—成熟期  
播種期—成熟期

21データ

# 気象データ

播種期-成熟期



# 土壌データ

# 化学性

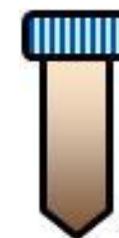
# 36データ

pH  
EC  
全炭素  
全窒素  
C/N  
イソフラボン

交換性陽イオン	水溶性陽イオン
Ex_Ca	W_Ca
Ex_K	W_K
Ex_Mg	W_Mg
Ex_Na	W_Na
Ex_Mn	W_Mn
Ex_Fe	W_Fe
Ex_Co	W_Co
Ex_Mo	W_Mo
Ex_Cu	W_Cu
Ex_Rb	W_Rb
Ex_Sr	W_Sr
Ex_Cd	W_Cd
Ex_Cs	W_Cs
Ex_Li	W_Li



土壌サンプル

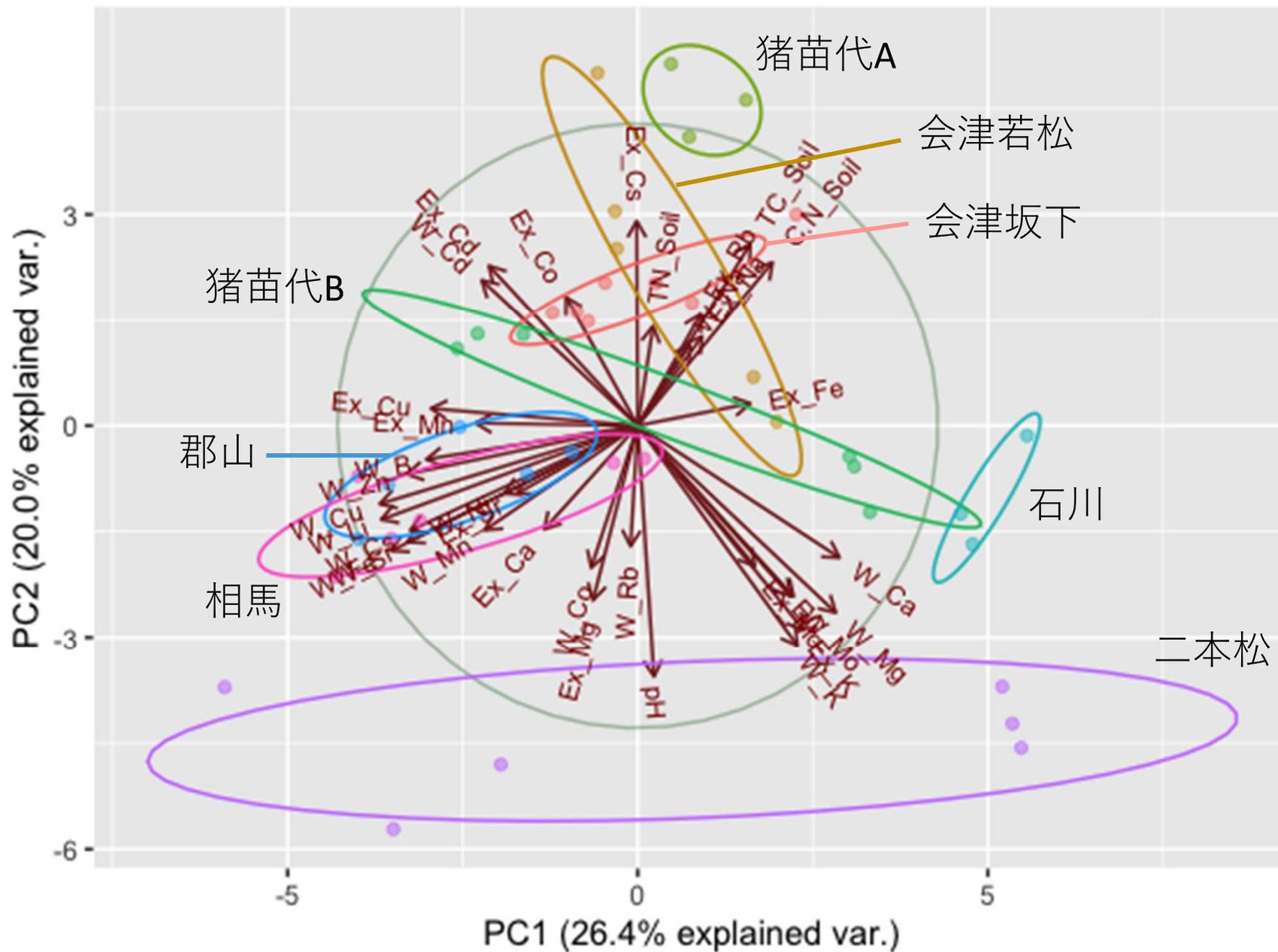


酢酸アンモニウム抽出  
水抽出



ICP-OESまたはICP-MS

# 土壌データ 化学性



# 土壌データ 物理性 6データ

飽和透水係数

容積重

土粒子密度

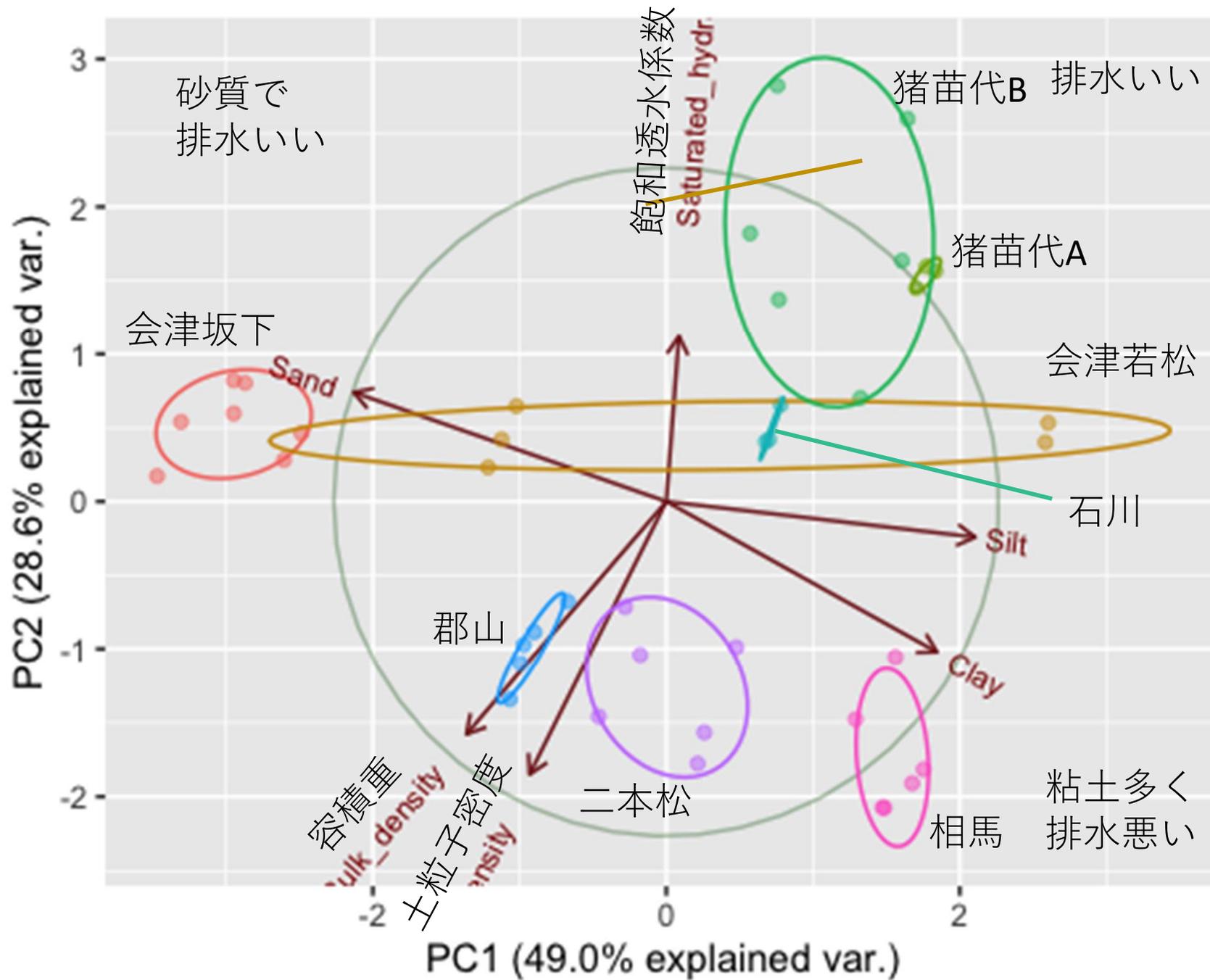
砂

シルト

粘土

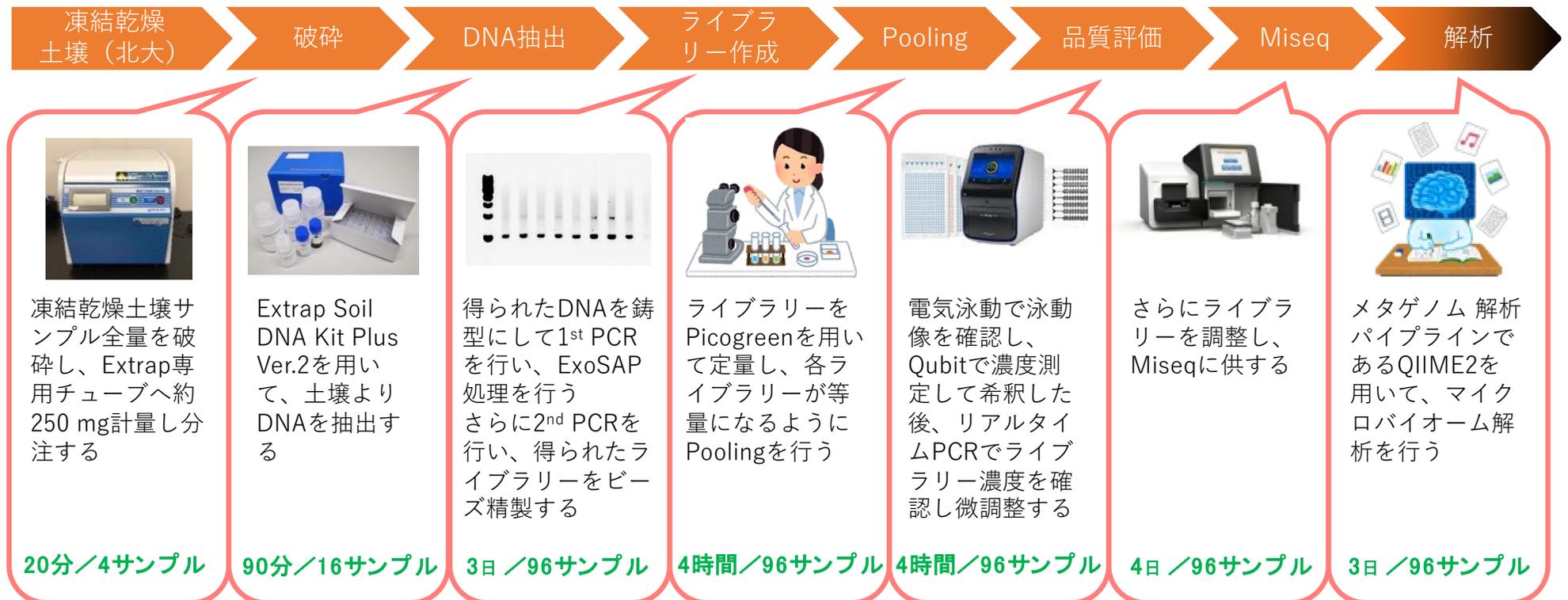


# 土壌データ 物理性

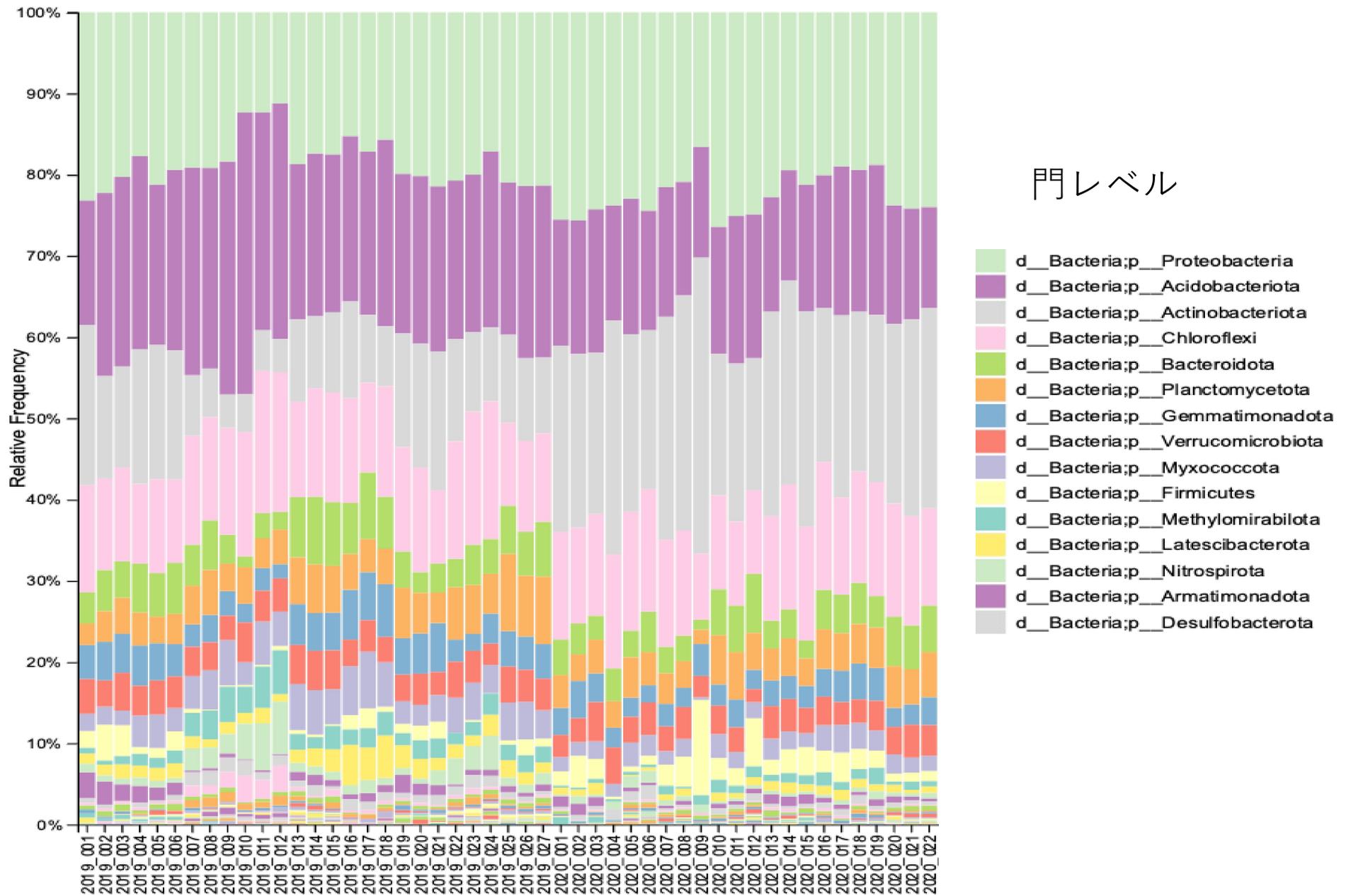


# 土壌データ 生物性

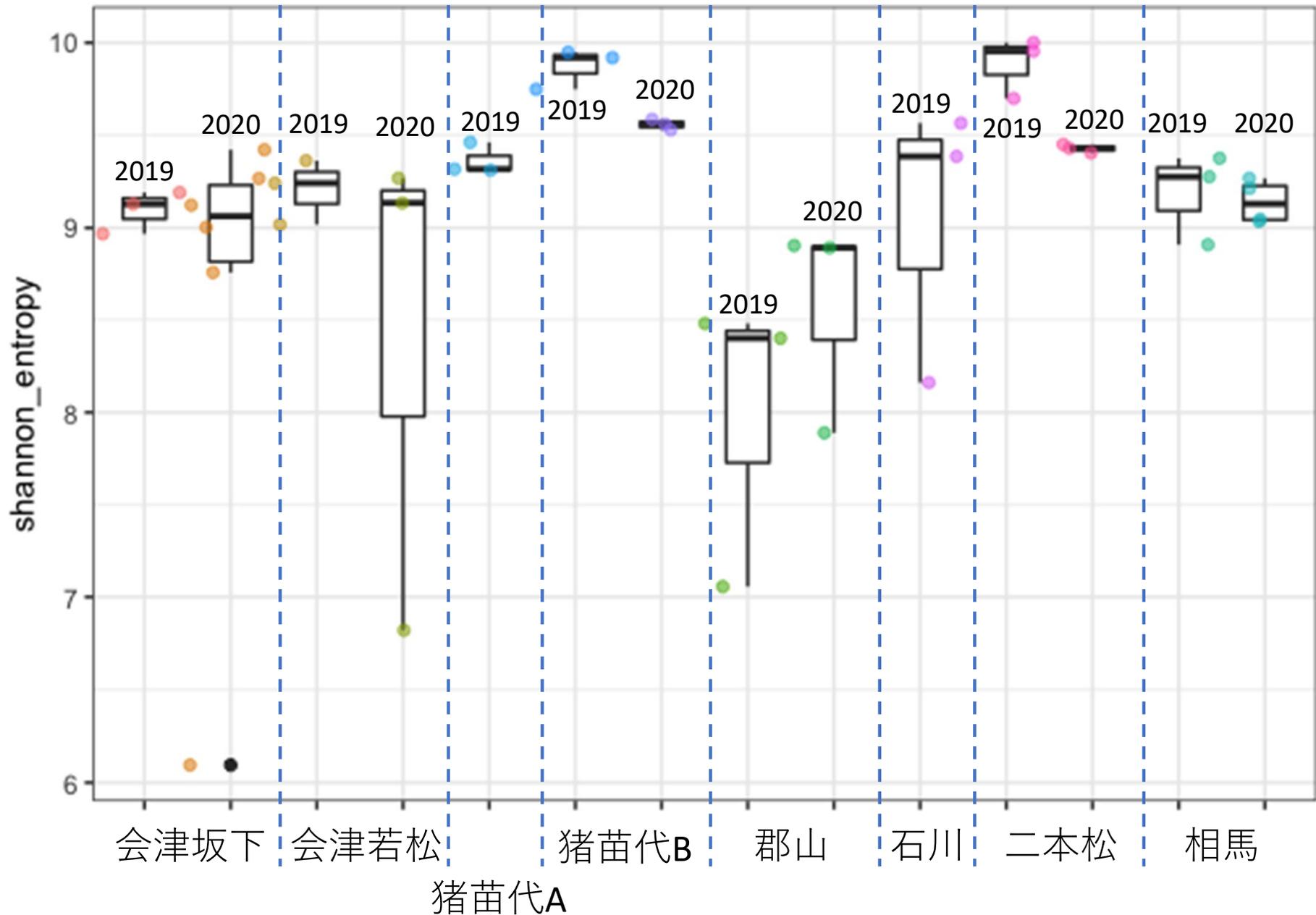
細菌叢解析：NGS（次世代シーケンサー）解析によって得られた16SrRNA遺伝子配列データの帰属分類群を推定し、圃場に存在する細菌の割合を網羅的測定



# 土壌データ 生物性 1996データ

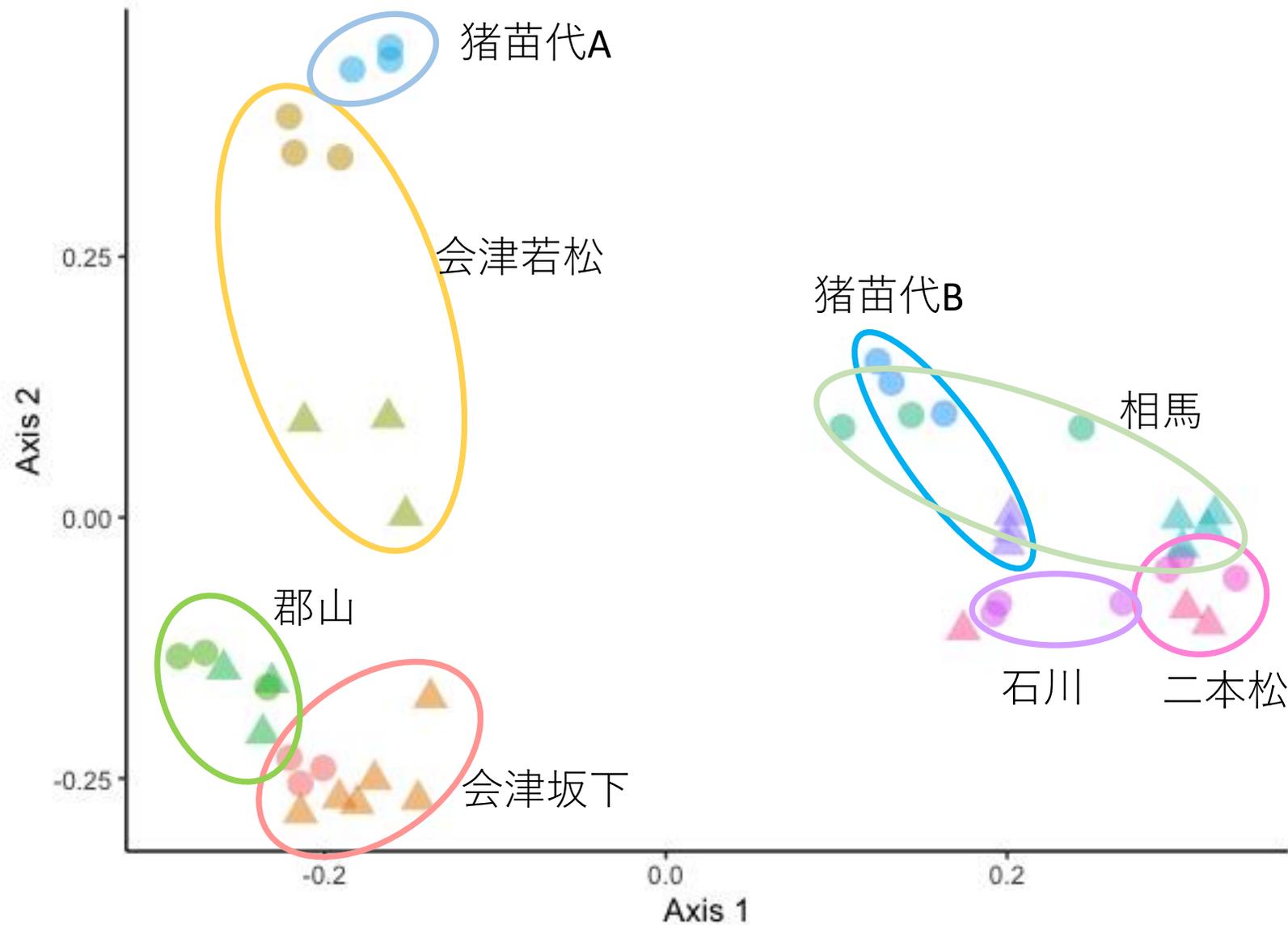


# 土壌データ 生物性 $\alpha$ 多様性 (圃場内の多様性)



$\alpha$ 多様性は猪苗代B、二本松が高く、郡山が低い

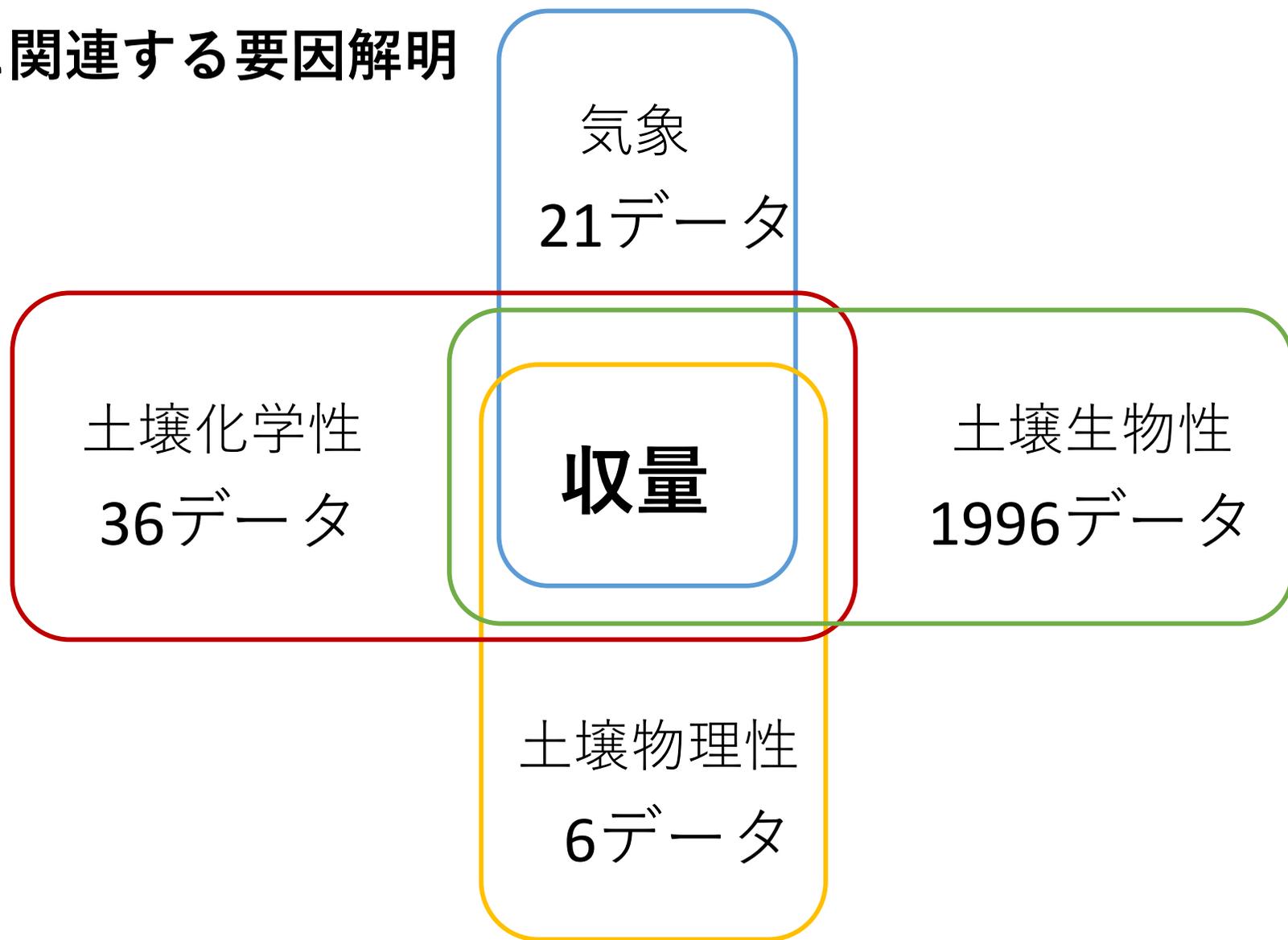
# 土壌データ 生物性 $\beta$ 多様性 (圃場間の多様性)



3グループに分かれる

- 会津坂下、郡山
- 猪苗代A、会津若松
- 猪苗代B、石川、二本松、相馬

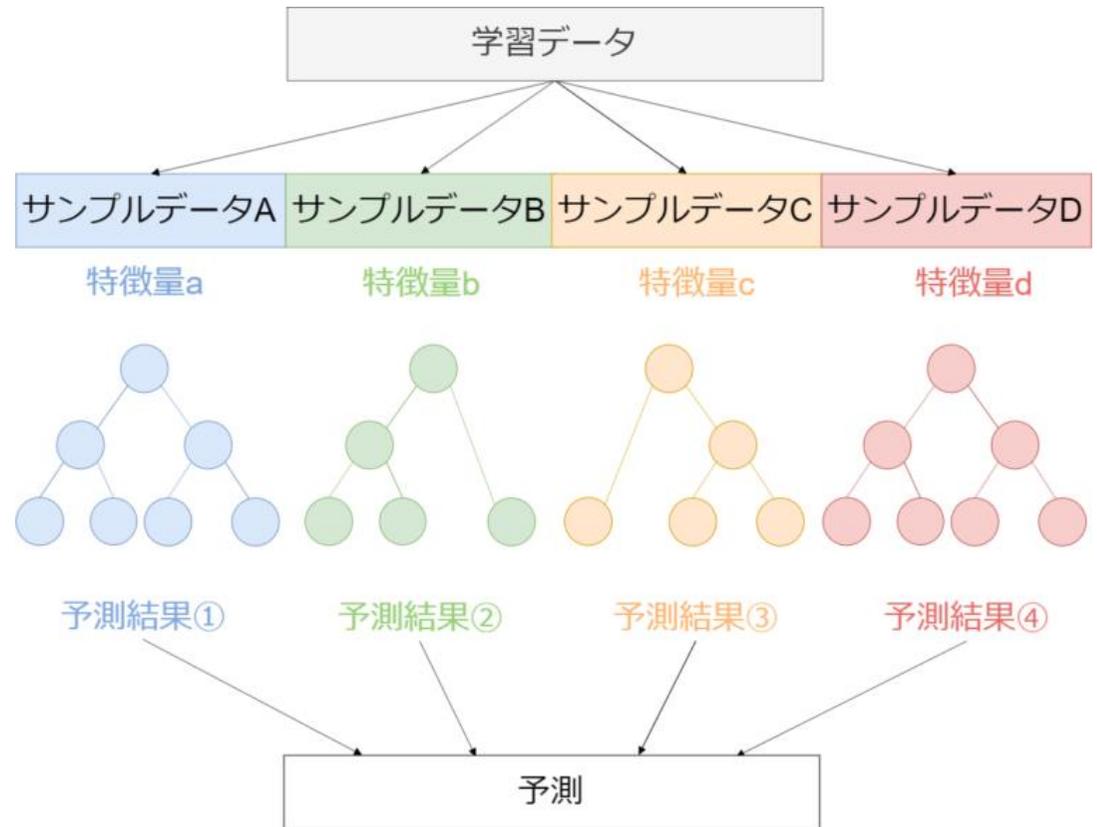
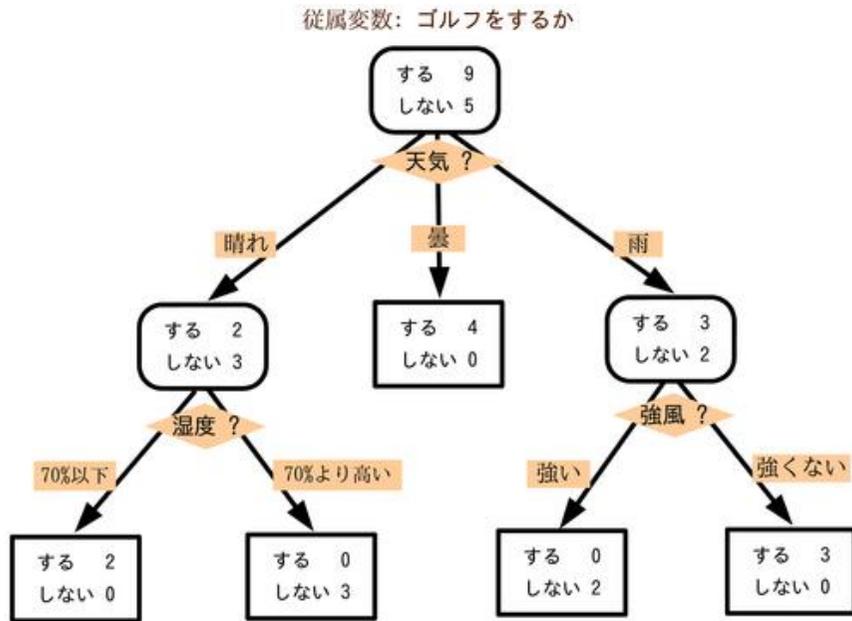
# 収量に関連する要因説明



気象、土壌化学性、物理性、生物性の各階層毎に  
収量を目的変数として  
機械学習（ランダムフォレスト）により特徴量を抽出

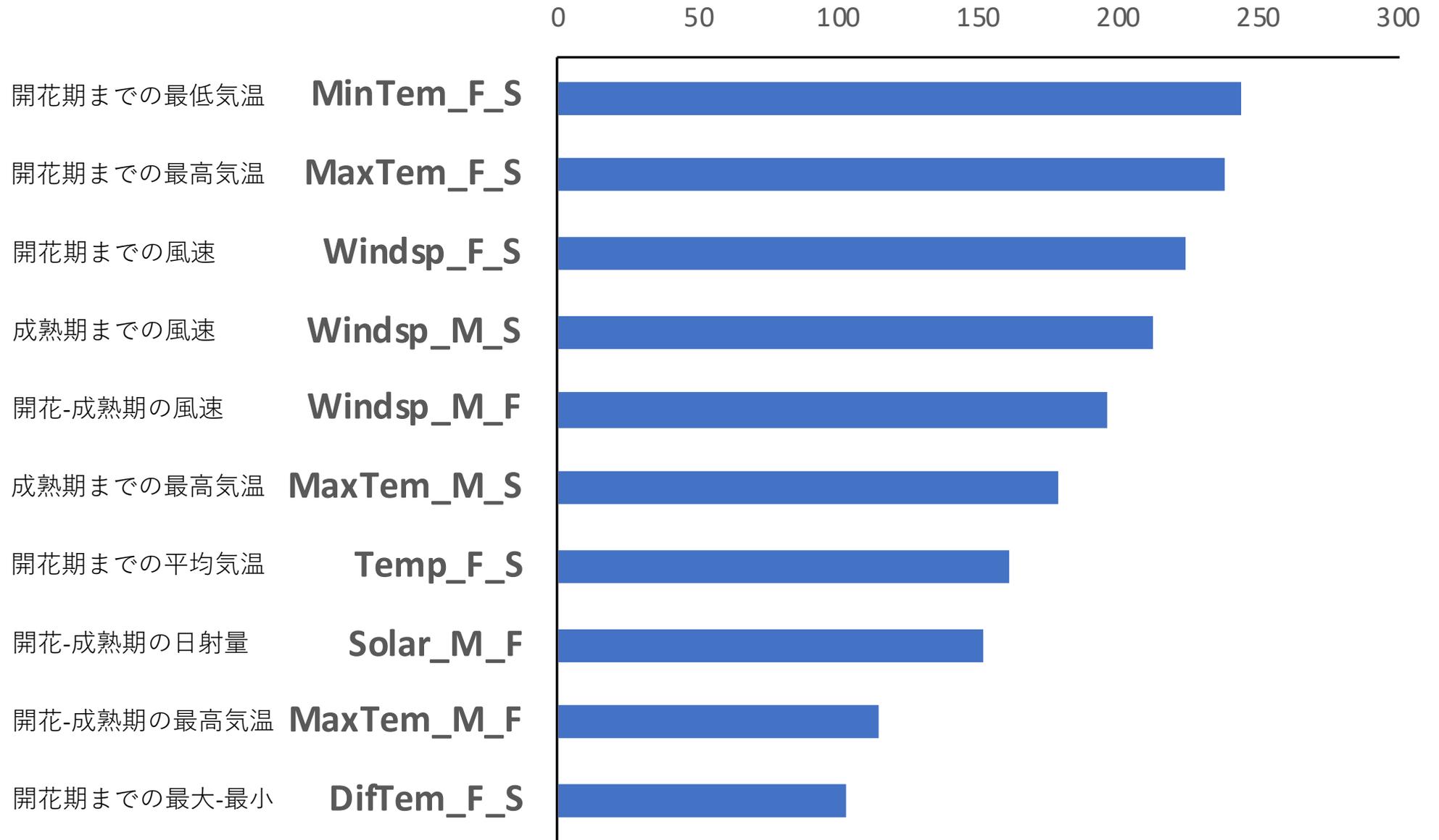
# 決定木

# ランダムフォレスト



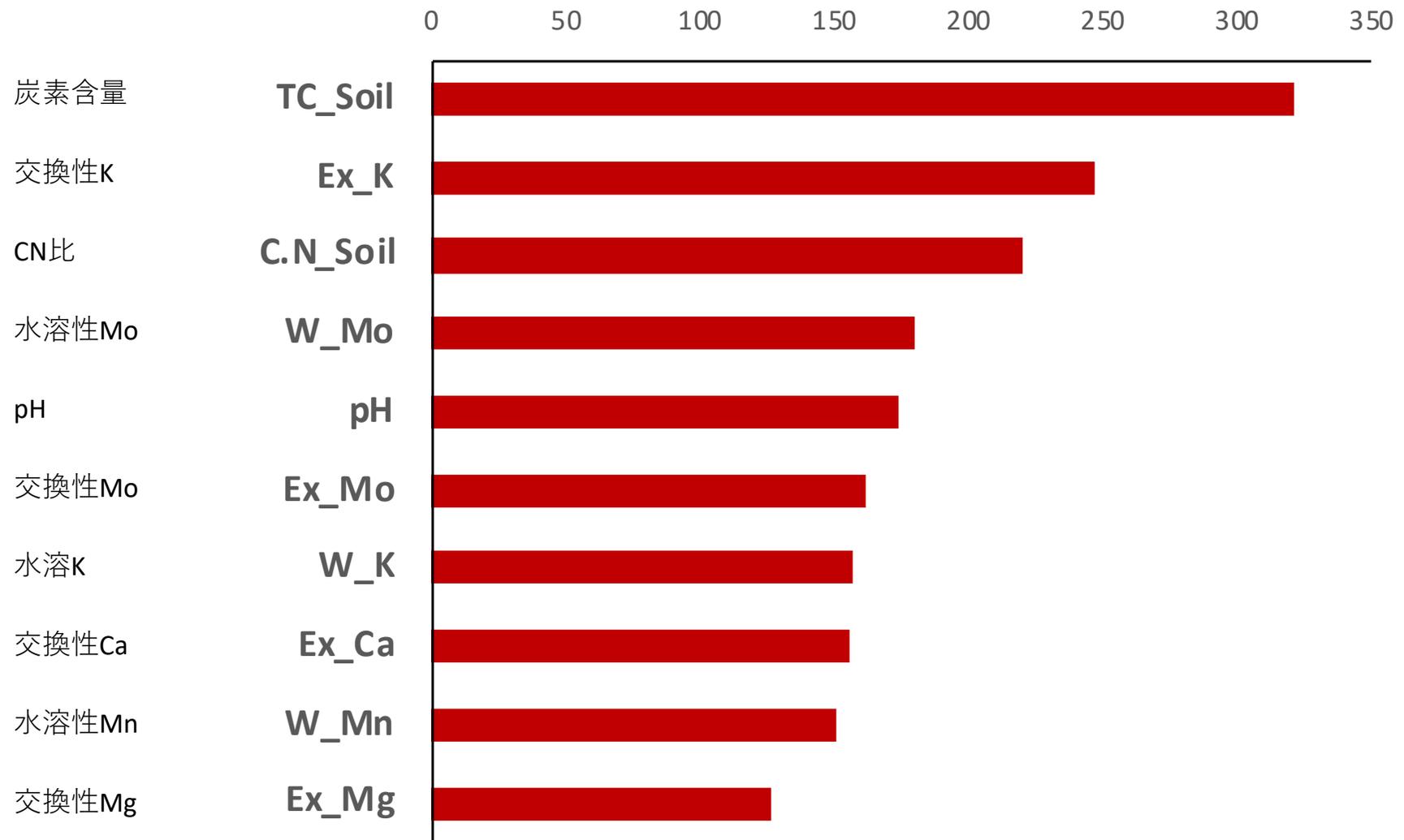
目的変数（収量）の分類に重要な特徴量をRで算出

# 特徴量の重要度 気象データ (21データ)



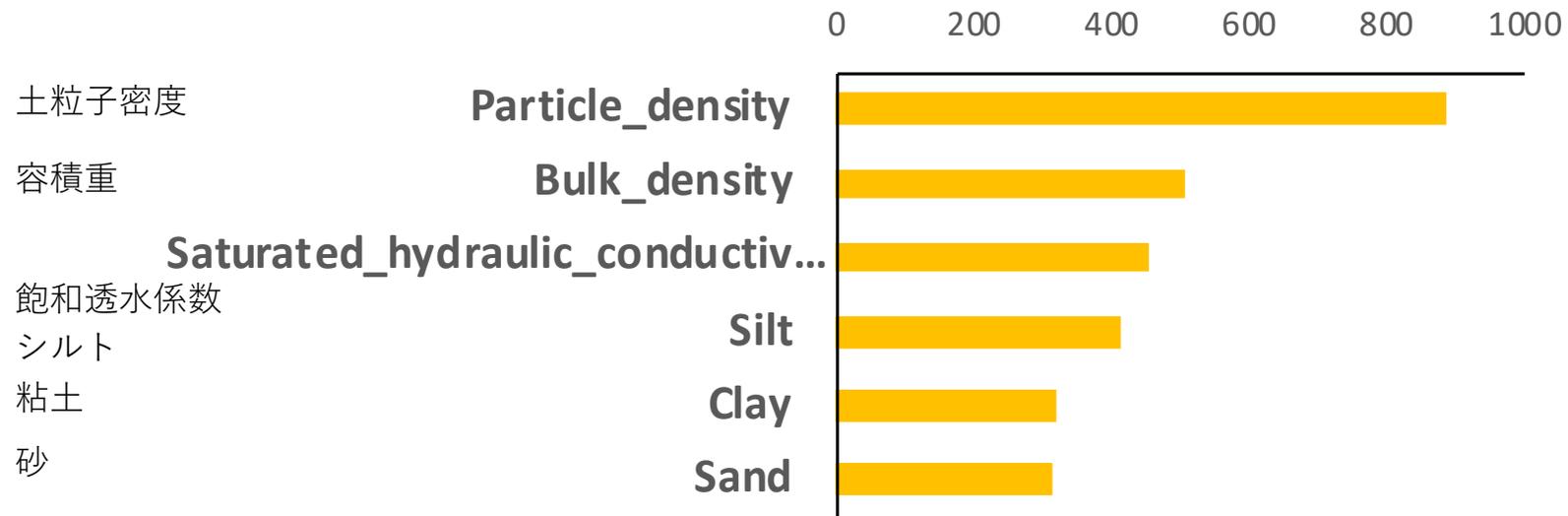
開花期までの気象 (気温、風速) が重要

# 特徴量の重要度 化学性データ (36データ)



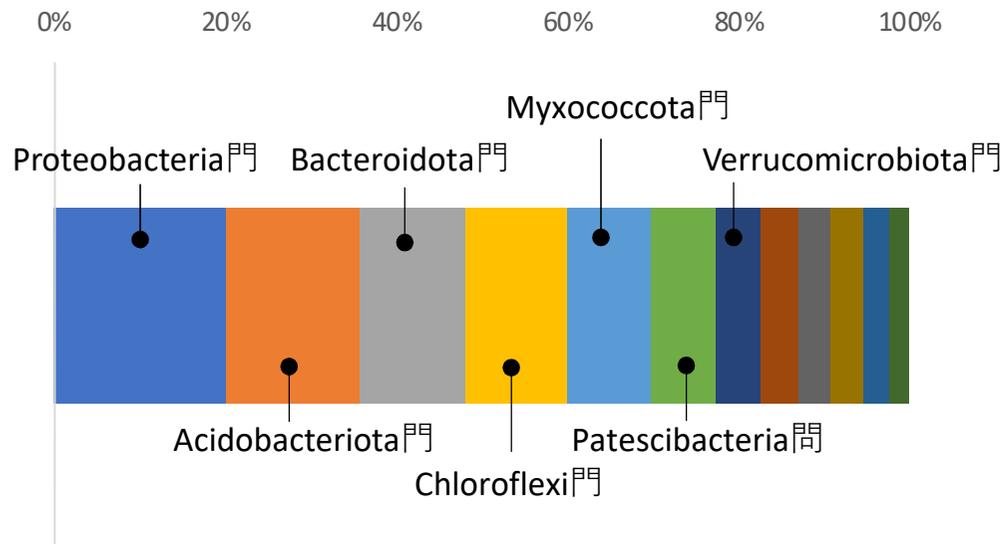
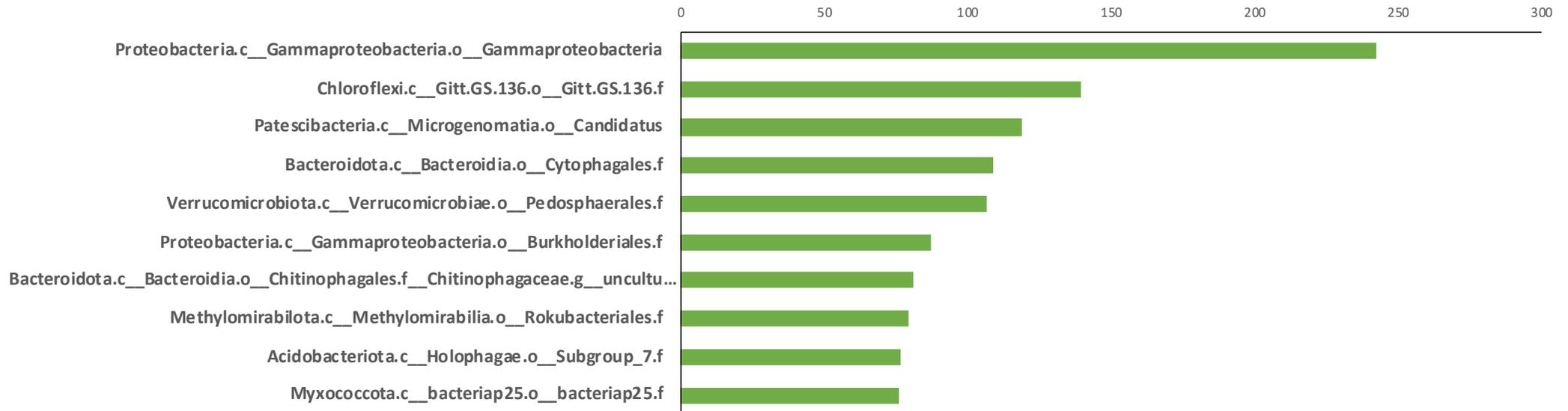
炭素含量、カリウム、モリブデン、pHが重要

# 特徴量の重要度 物理性データ (6データ)



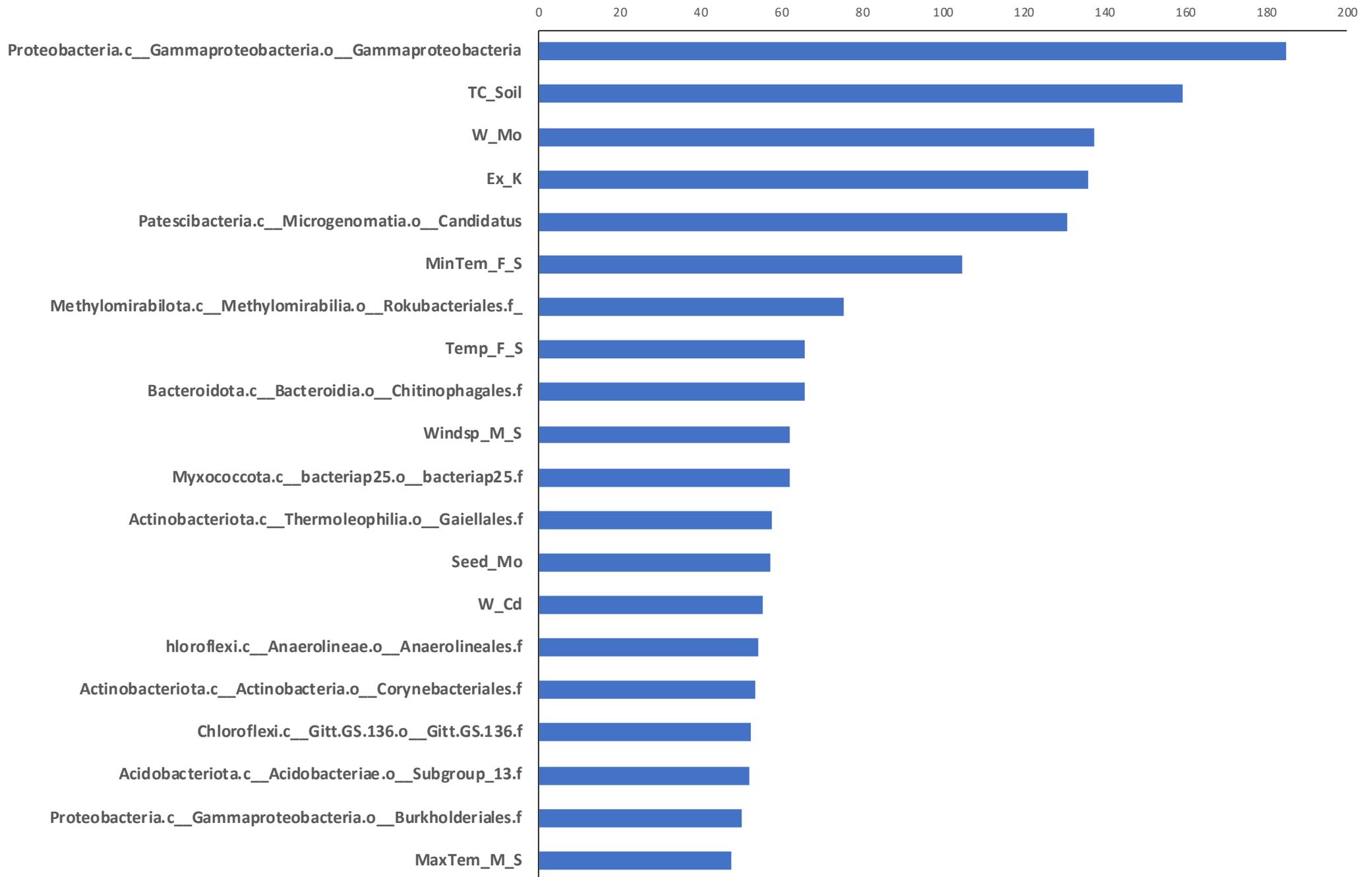
土粒子密度、容積重、飽和透水係数が重要

# 特徴量の重要度 生物性データ (1996データ)



上位2.5%の細菌で80%の重要度を占める

# 特徴量の重要度 全データ



微生物性、化学性が重要

# まとめ

## 1) 収量を決める要因として重要な項目

気象 : 開花期までの気温、風速

化学性 : 炭素含量、カリウム、モリブデン、pH

物理性 : 土粒子密度、容積重、飽和透水係数が重要

生物性 : Proteobacteria.c\_\_Gammaproteobacteria.o\_\_Gammaproteobacteria  
Chloroflexi.c\_\_Gitt.GS.136.o\_\_Gitt.GS.136.f  
Patescibacteria.c\_\_Microgenomatia.o\_\_Candidatus

## 2) 全データを含めた解析より重要な階層

微生物性データ、化学性データ

本調査は福島県農業総合センター、福島県県中農林事務所の協力で実施した。

また、本研究の一部は、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (S I P) 「スマートバイオ産業・農業基盤技術」(管理法人: 農研機構生研支援センター) および内閣府ムーンショット型農林水産研究開発事業(管理法人: 生研支援センター)によって実施した。

# 例 コマツナ・太陽熱処理

✓ 土壌病害や雑草防除

✓ 生育促進効果

← 要因は不明

① 太陽熱処理 ー 化成

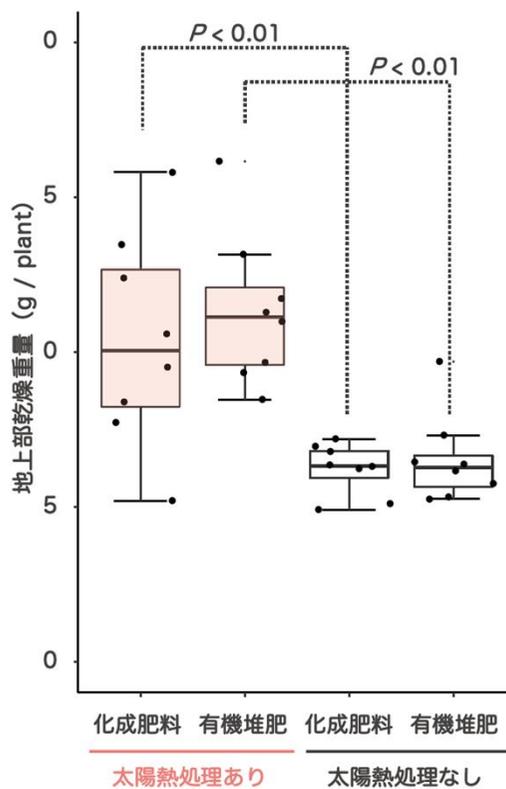
② 太陽熱処理 ー 堆肥

③ 太陽熱未処理 ー 化成

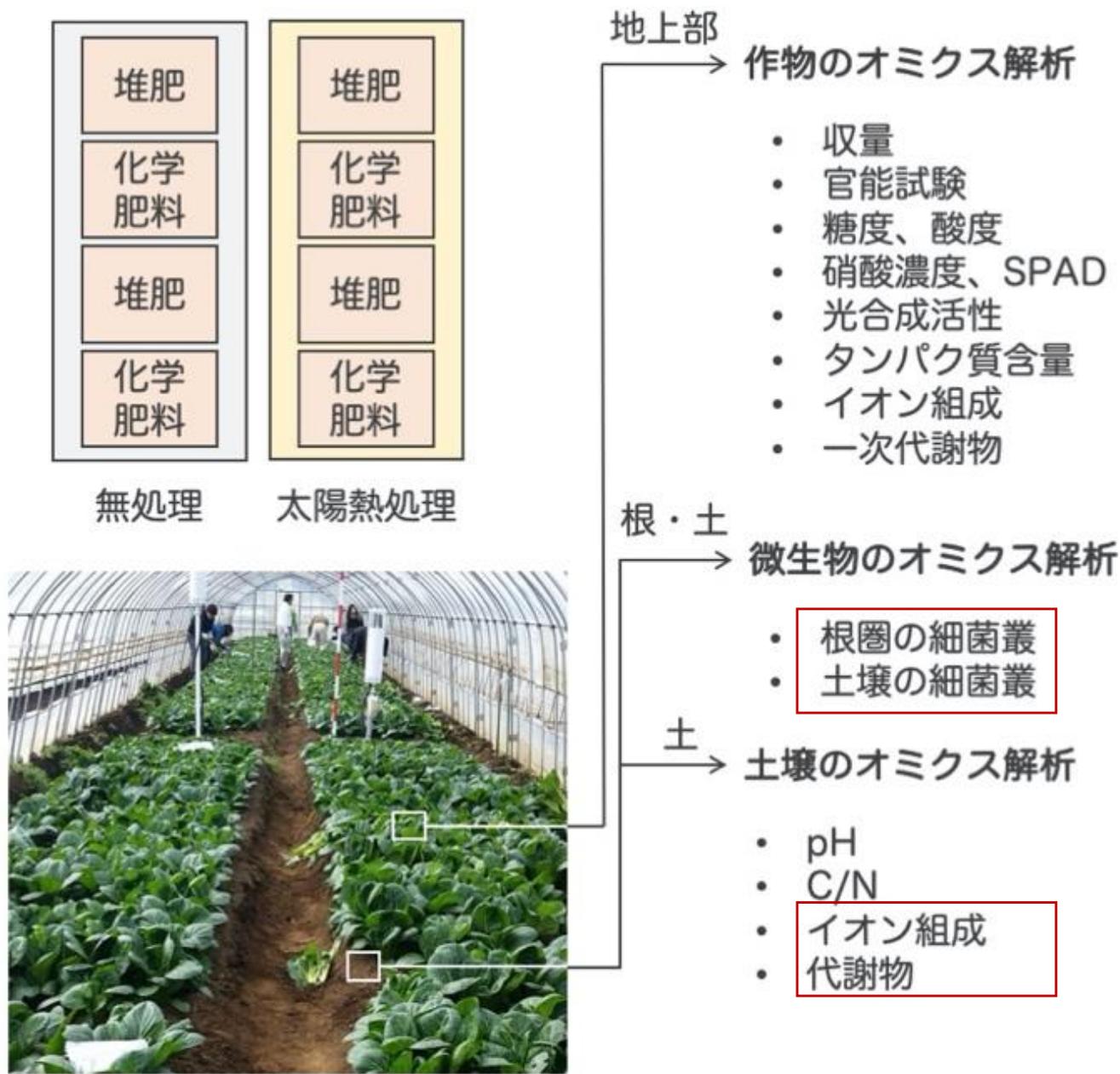
④ 太陽熱未処理 ー 堆肥



# 作物の生育

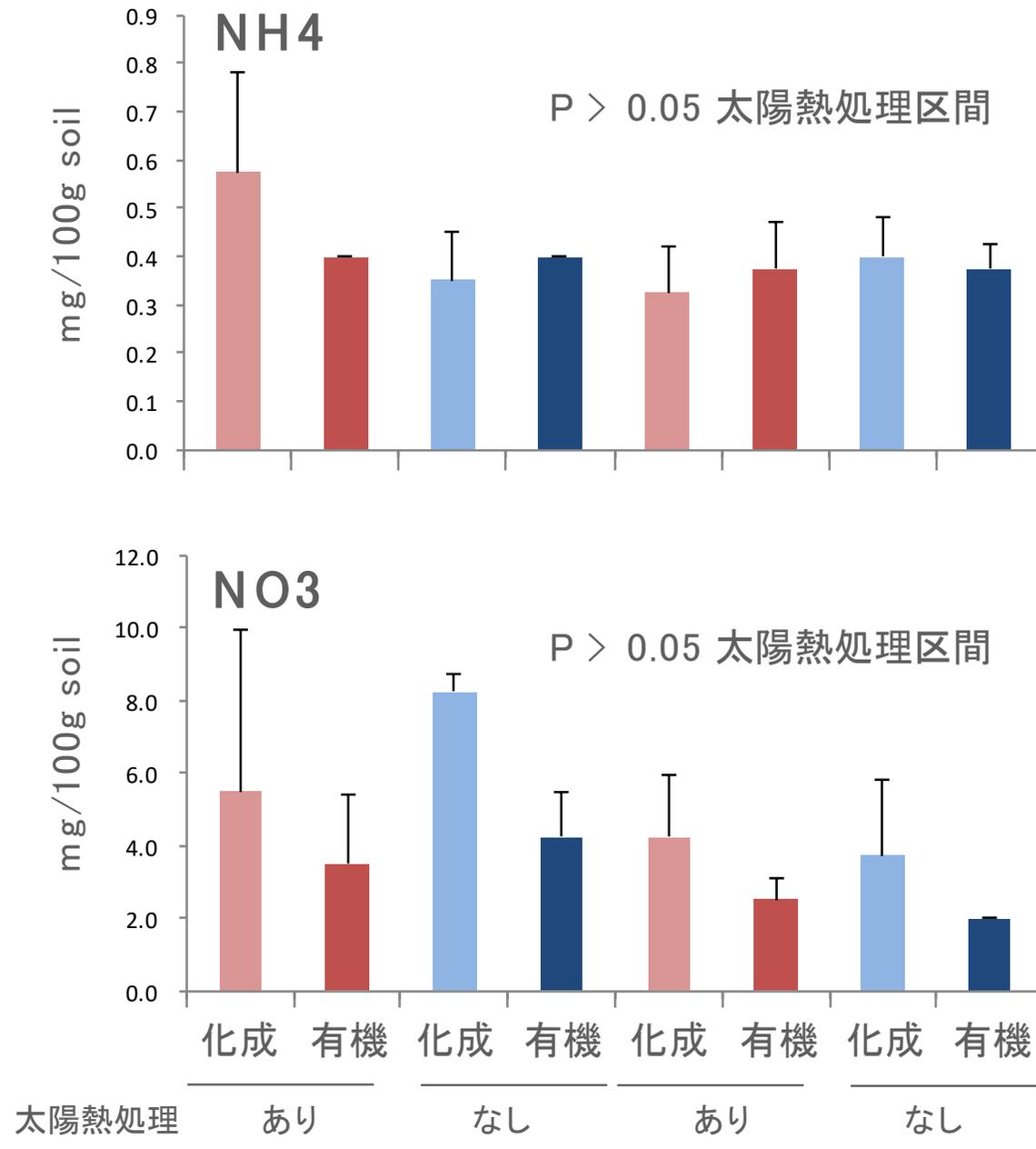


# 測定



測定項目数：約**400**

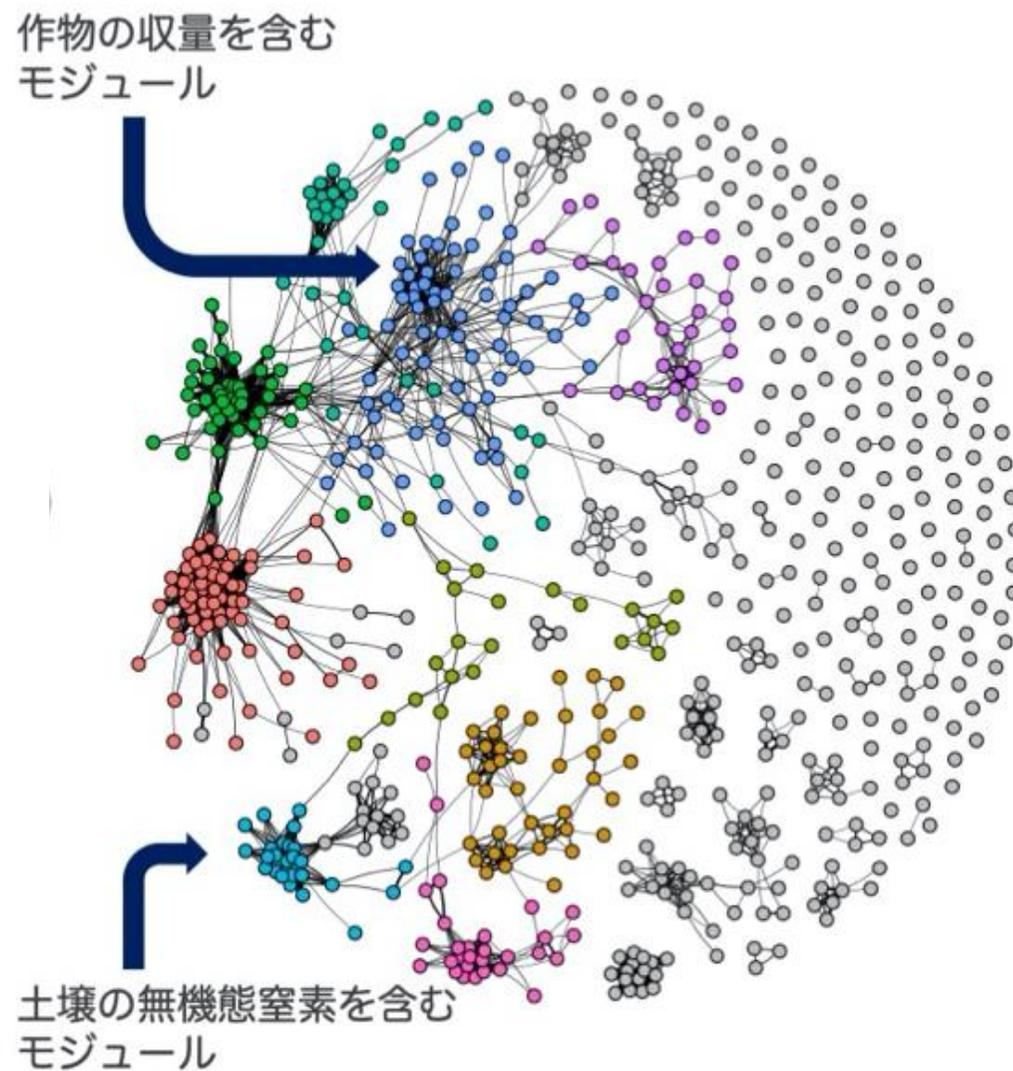
# 土壌化学性



無機態窒素量は試験区間で変化なし

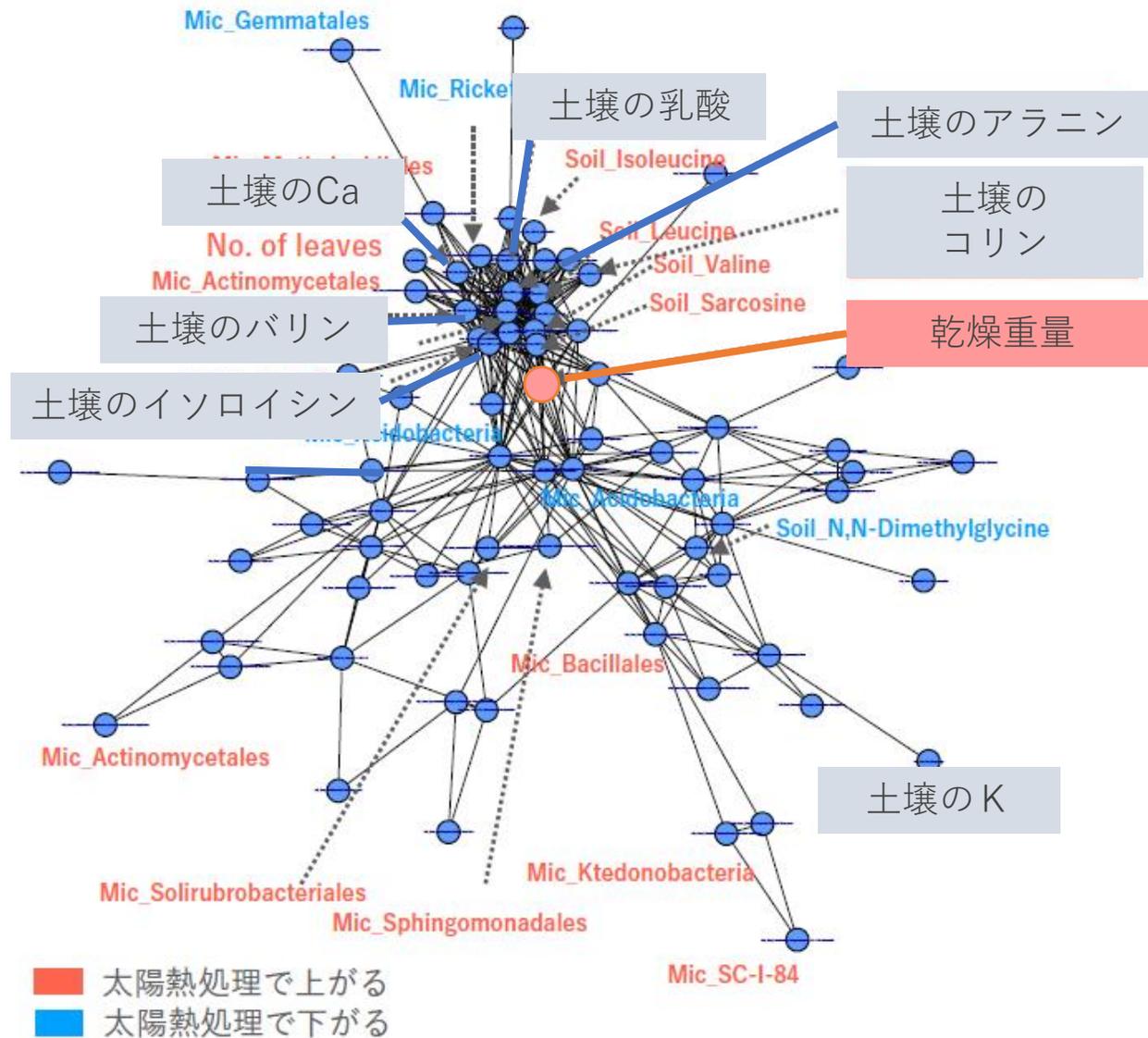
# 収量要因

---



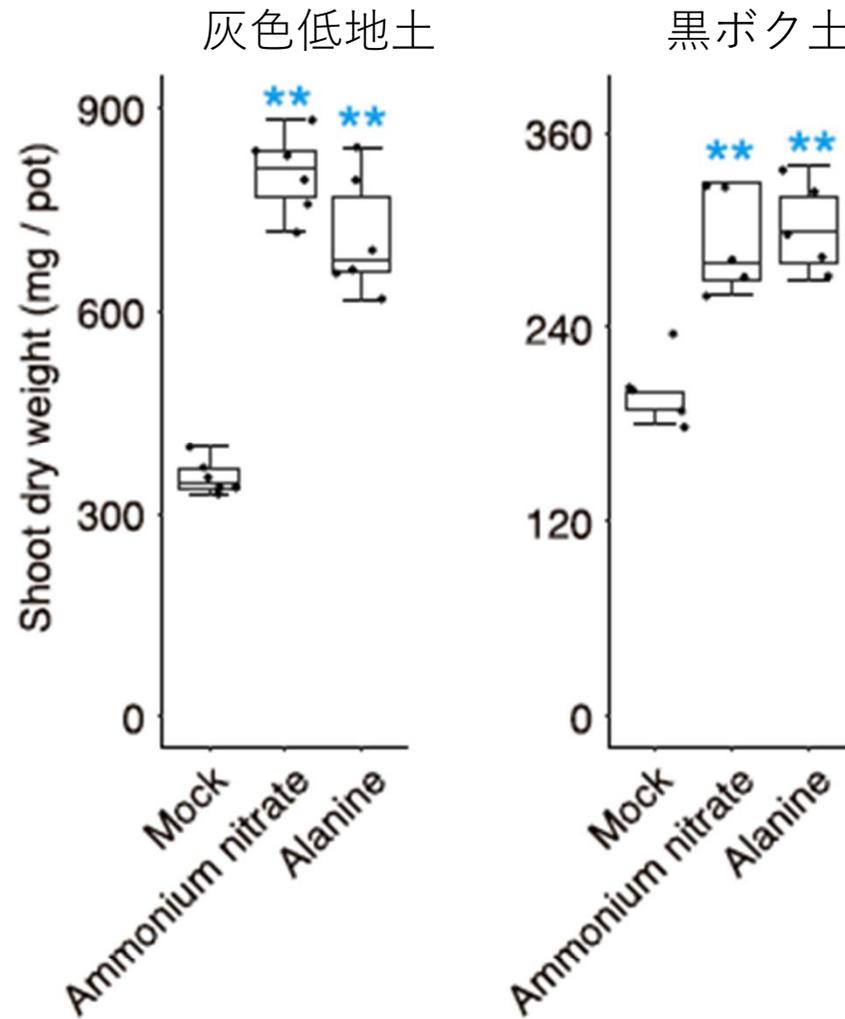
- 乾燥重量に関連する項目の可視化

# 収量要因



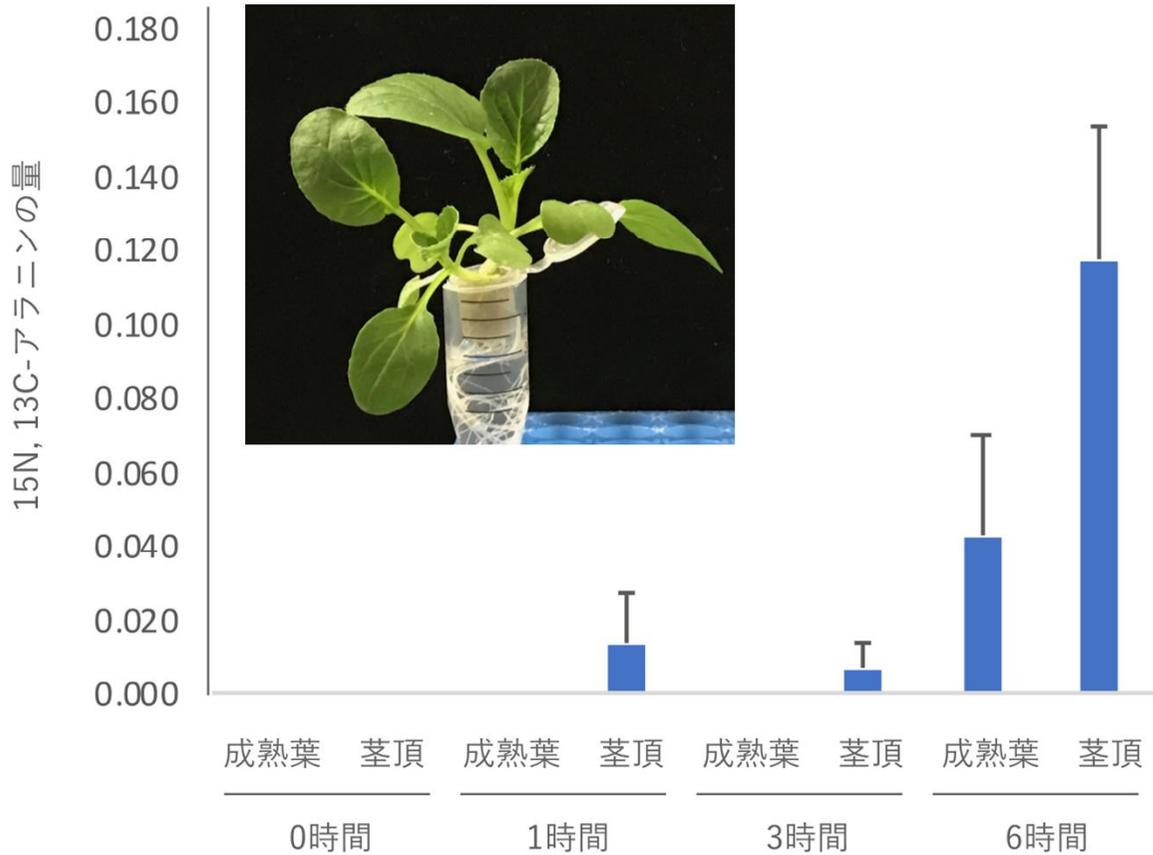
- ・ 乾燥重量に関連する項目の可視化に**成功**
- ・ 一部の**アミノ酸**（アラニンら）が生育促進に関与

# アラニンの吸収

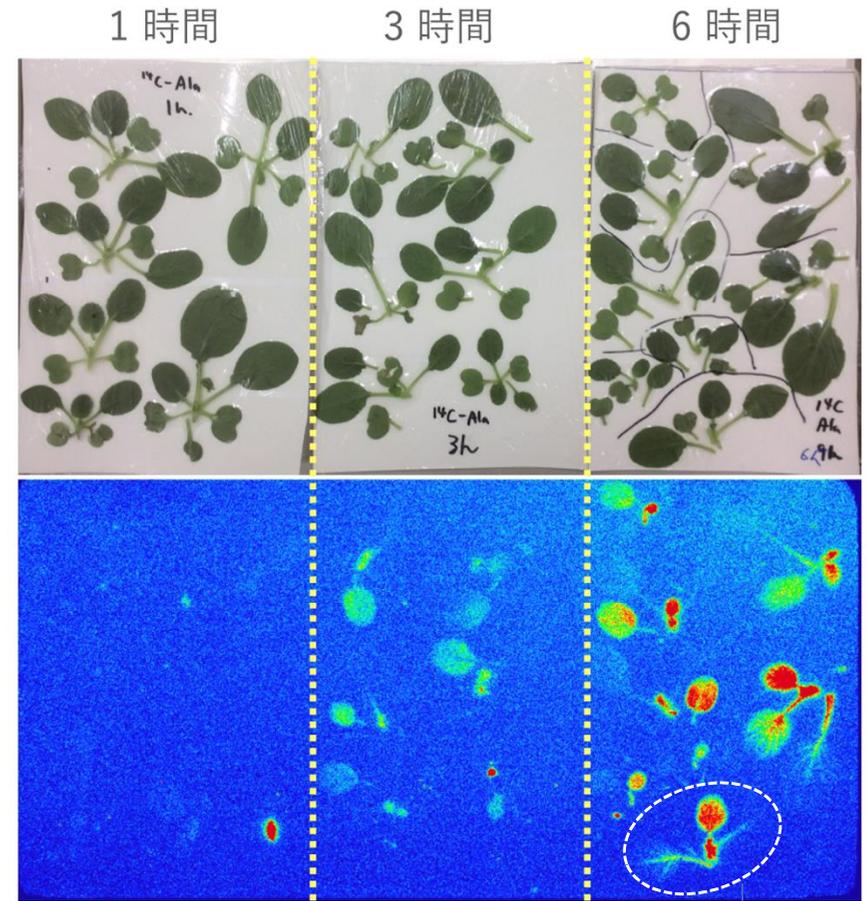


Mock      Ammonium nitrate      Alanine

# アラニンの吸収

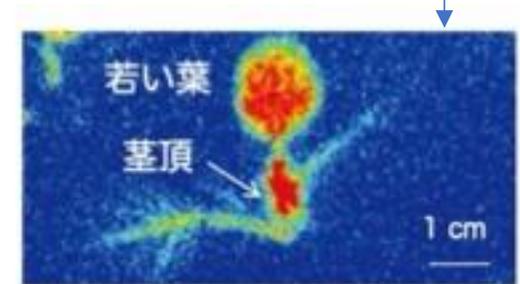


$^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ -Alaの吸収



$^{14}\text{C}$ -Alaの吸収

アラニンを**直接**吸収  
特に**若い**組織に蓄積



アラニン由来の炭素を可視化

# 近代農業

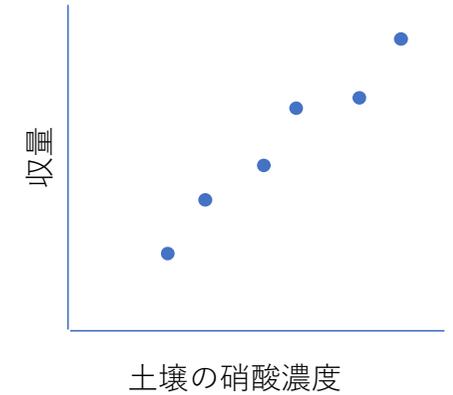
## ● リービッヒ “無機栄養説”(1840年)

## ● 化学肥料の開発

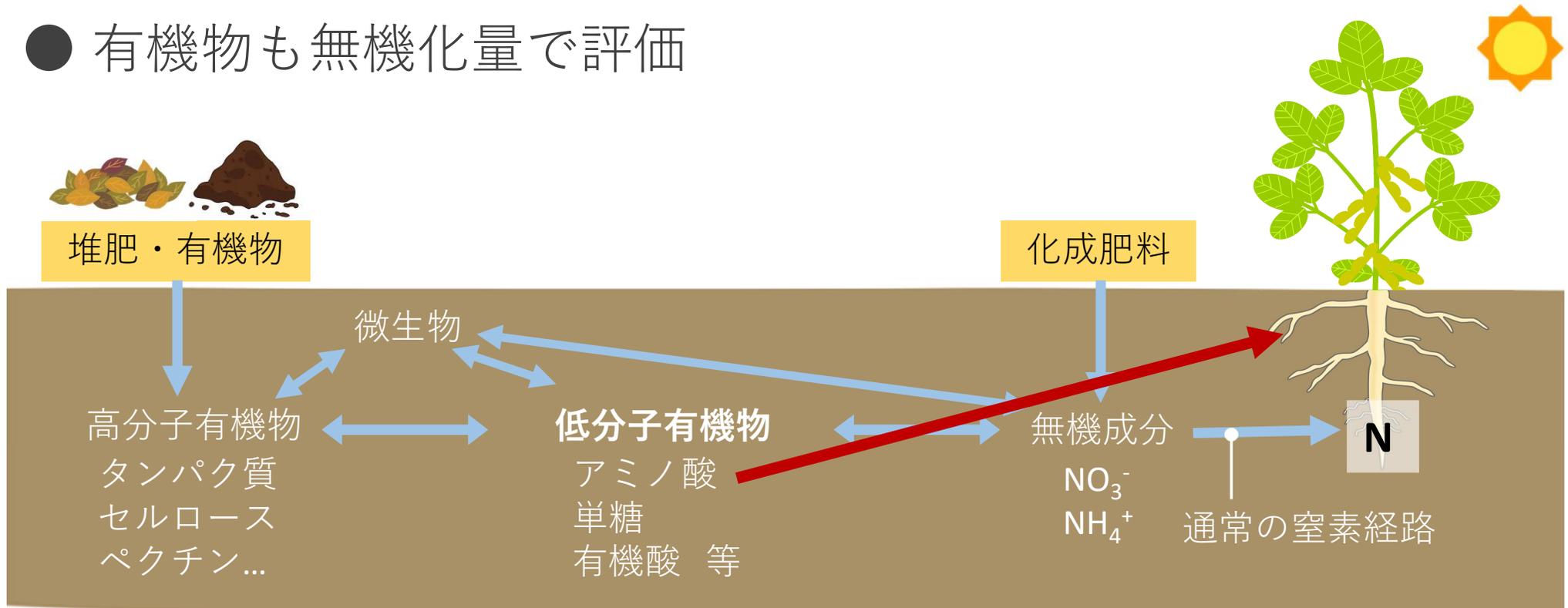
“あらゆる植物の栄養源は腐植のような有機物ではなく、炭酸ガス、アンモニア（または硝酸）、水、リン酸、硫酸、カルシウム、マグネシウム、カリウムなどの無機物質である”



Ploeg et al., 1999  
Antonkiewicz & Labetowicz, 2016



## ● 有機物も無機化量で評価



# アミノ酸だけで生育するか？

---

✓ アミノ酸20種類を窒素源(5mM)

として無菌栽培

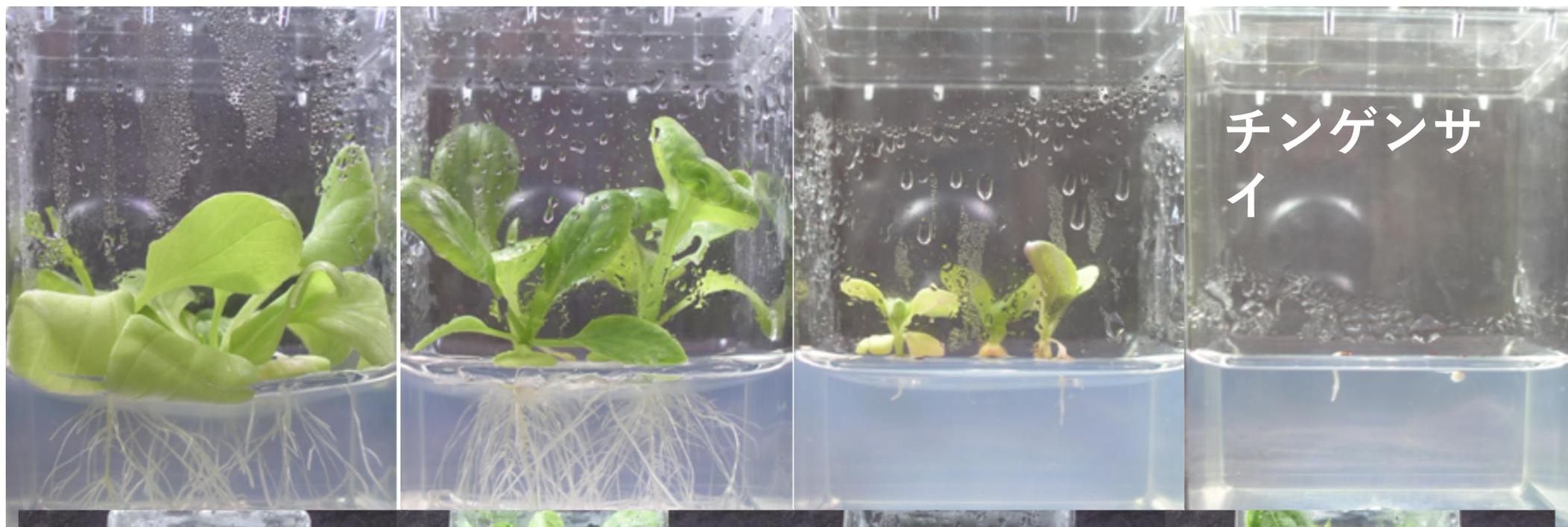
✓ イネ、コマツナ

コムギ、キュウリ

ダイズ



「植物のアミノ酸吸収」 (2018年7月日本バイオスティミュラント協議会 第1回講演会)



NO<sub>3</sub>

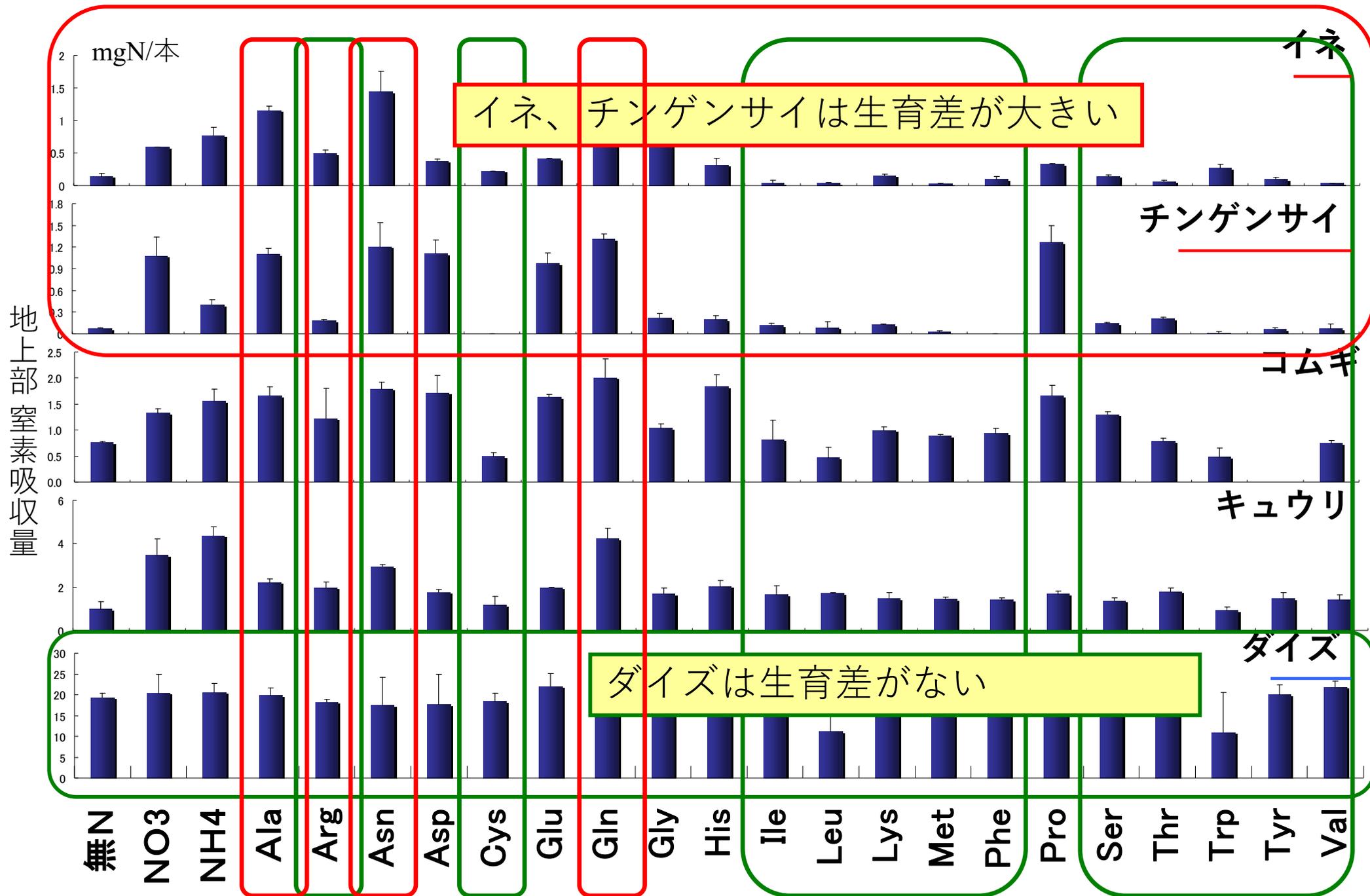
グルタミン酸

グリシン

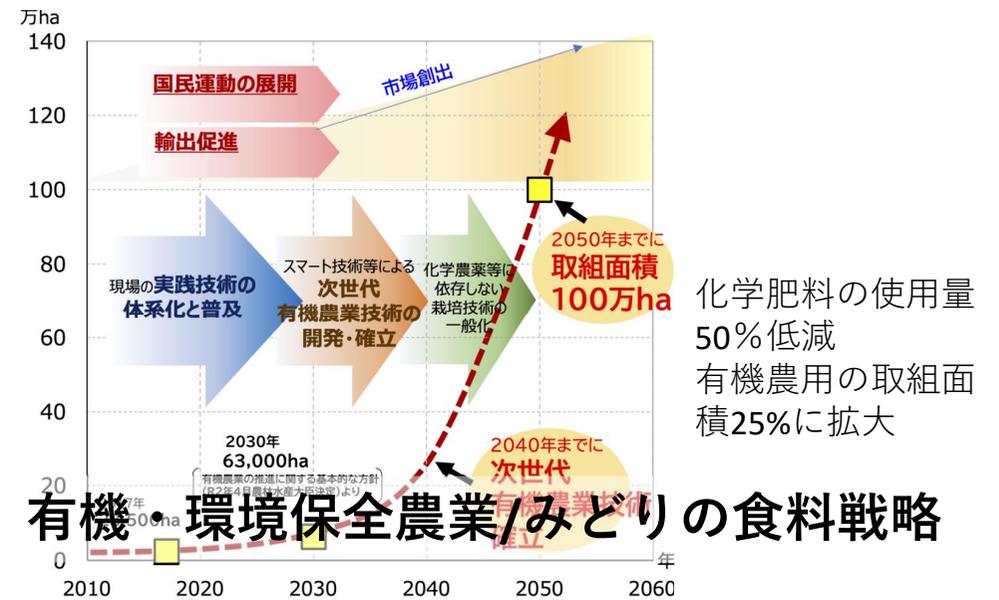
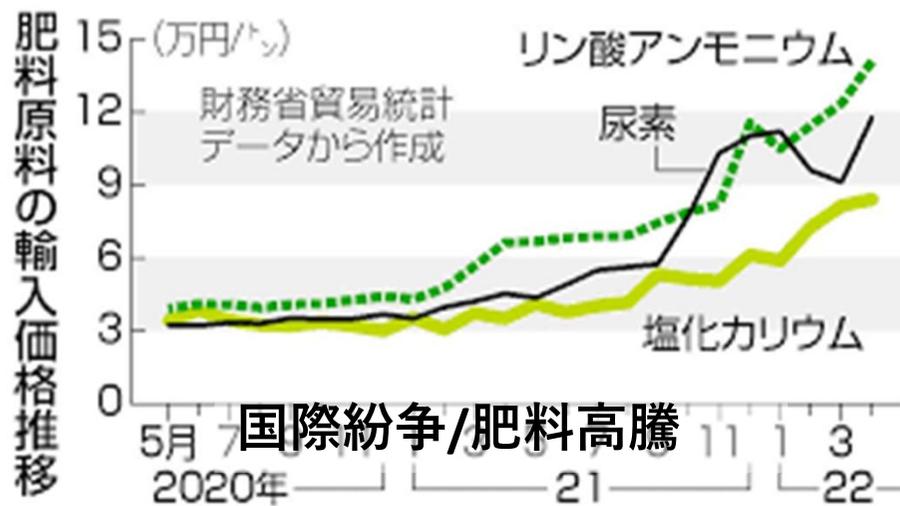
フェニルアラニン

# 窒素吸収量

## 植物ごとの酸の違い



# 土壌劣化、化学肥料依存



化成から有機物へ (収量の低下)

# 根粒菌との共生



根粒菌がダイズと共生関係を形成  
根粒菌→ダイズ：窒素  
ダイズ→根粒菌：炭素

空気中の窒素を固定  
 $N_2 \rightarrow NH_3$

ダイズの窒素吸収量のうち40-80%  
が根粒菌由来

窒素施肥量が増えると、根粒の着生  
が減る→基肥は抑えめ

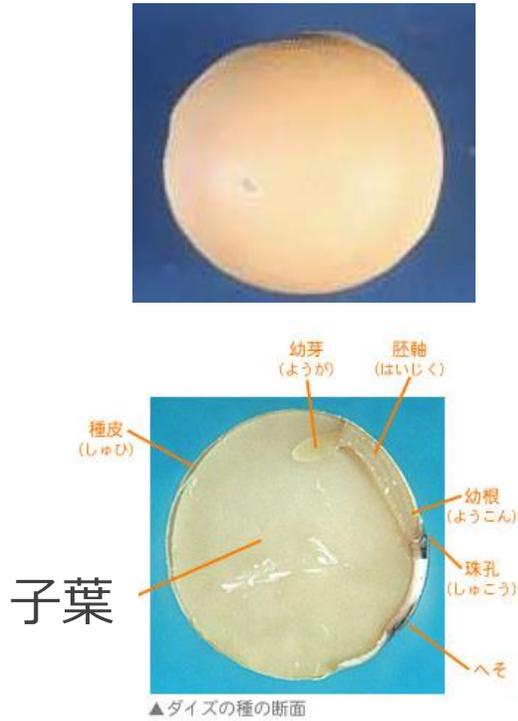


生きている根粒の内部は赤い。赤色はレグヘモグロビン。  
レグヘモグロビンは酸素を運ぶ役割を果たす。

根粒菌が窒素を供給するのは  
開花期まで  
子実肥大期以降もダイズの窒  
素吸収は継続→追肥が重要

根粒菌は湿害に（ダイズより）  
弱い→排水対策が重要

# 土地消耗型



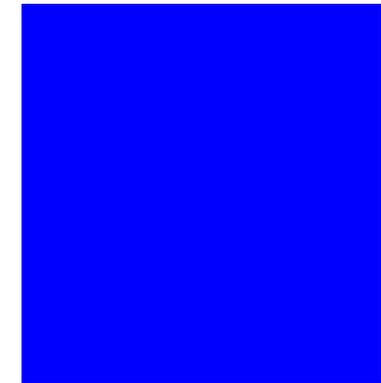
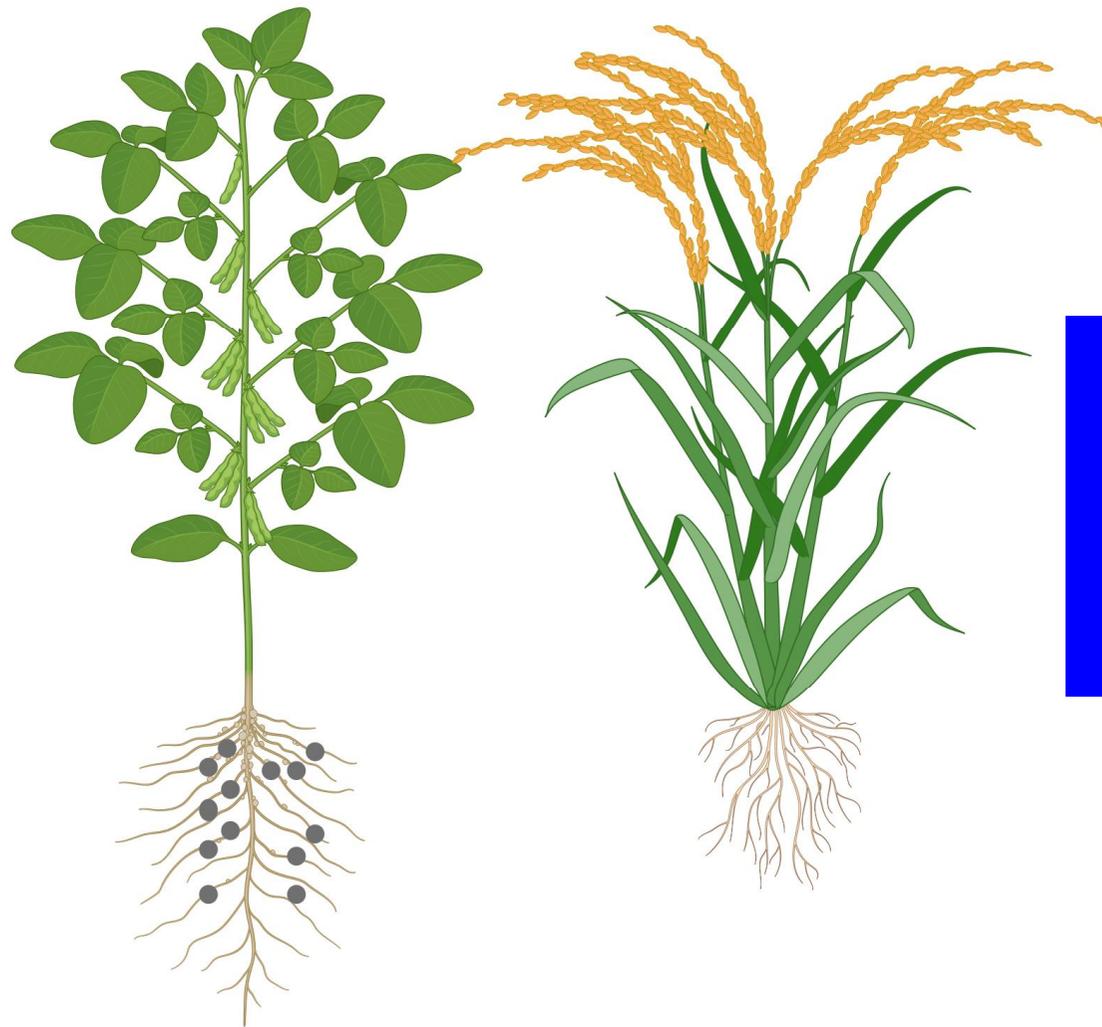
N 6g

K 2000mg

Ca 180mg

P 500mg

(100gあたり)



N 2g

K 230mg

Ca 10mg

P 300mg

(100gあたり)

ダイズ子実の栄養価は高い  
ダイズは土地消耗型→土づくりが重要

# 有機物利用の課題

✓ 利用

## 経験と勘

利用法は様々



✓ 品質

## 不均一

独自の作成



✓ 効果

## 不明確/遅効

25%減  
(Seufert, et al. *nature*, 2012)



✓ 施用量

## 無制限

海外では制限



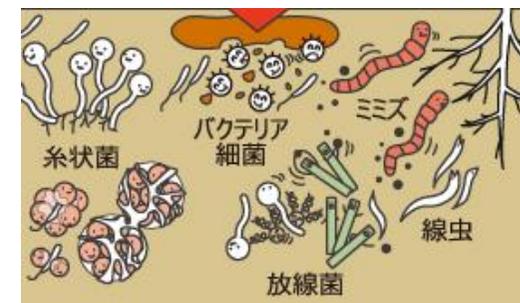
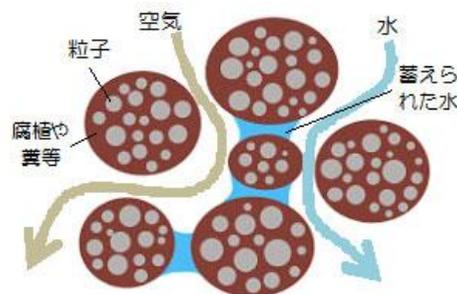
✓ 散布

## 人手/機械不足

手間 労力



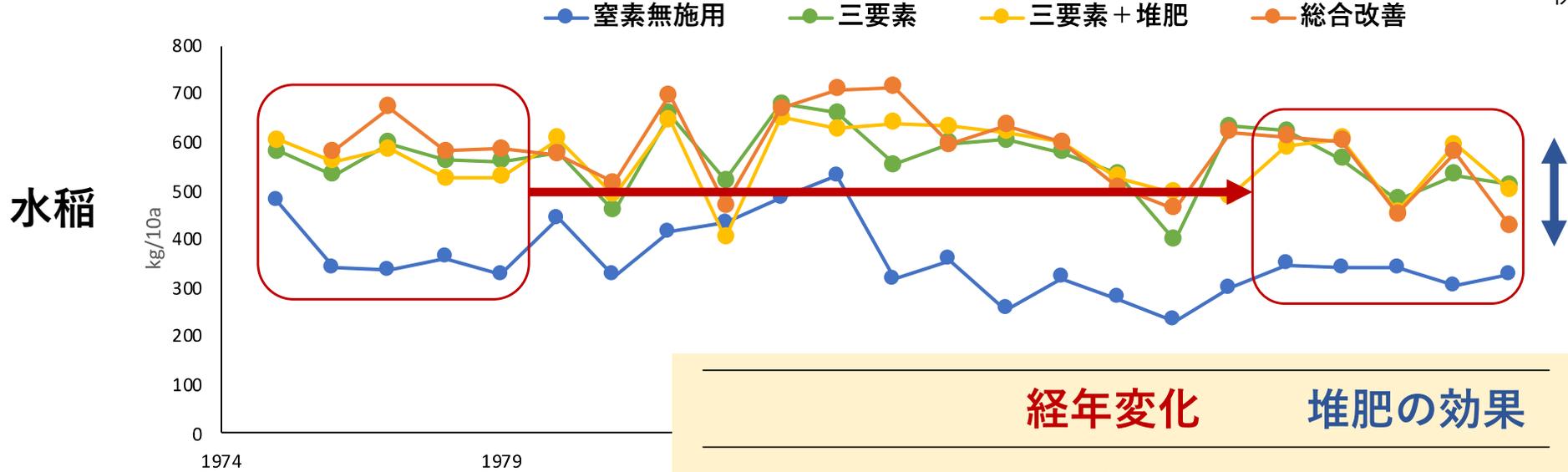
有機物に期待される役割：養分供給源、保水・排水性確保、微生物多様化等



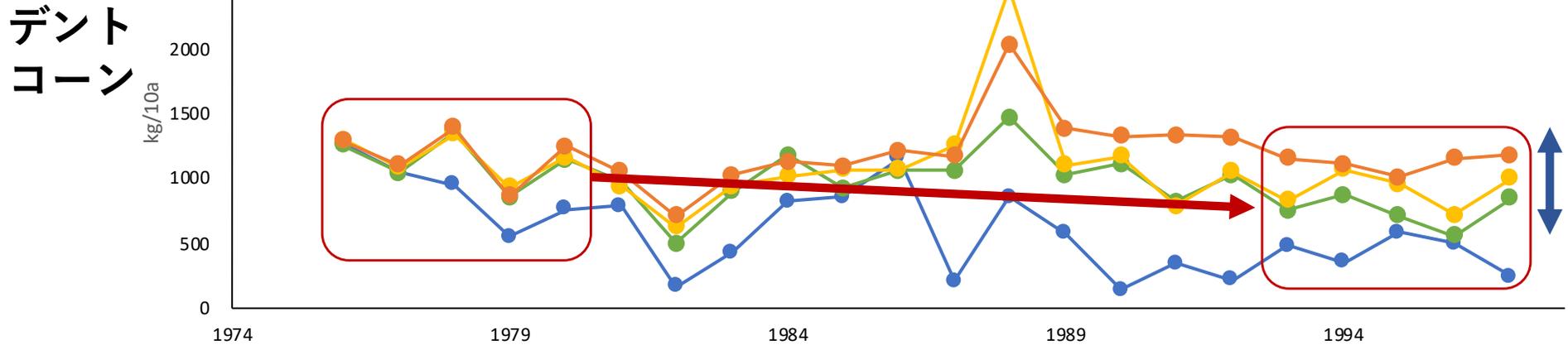
有機物ならではの効果が明確になれば農家も利用？

# 水田と畑作の経年変化

秋田県



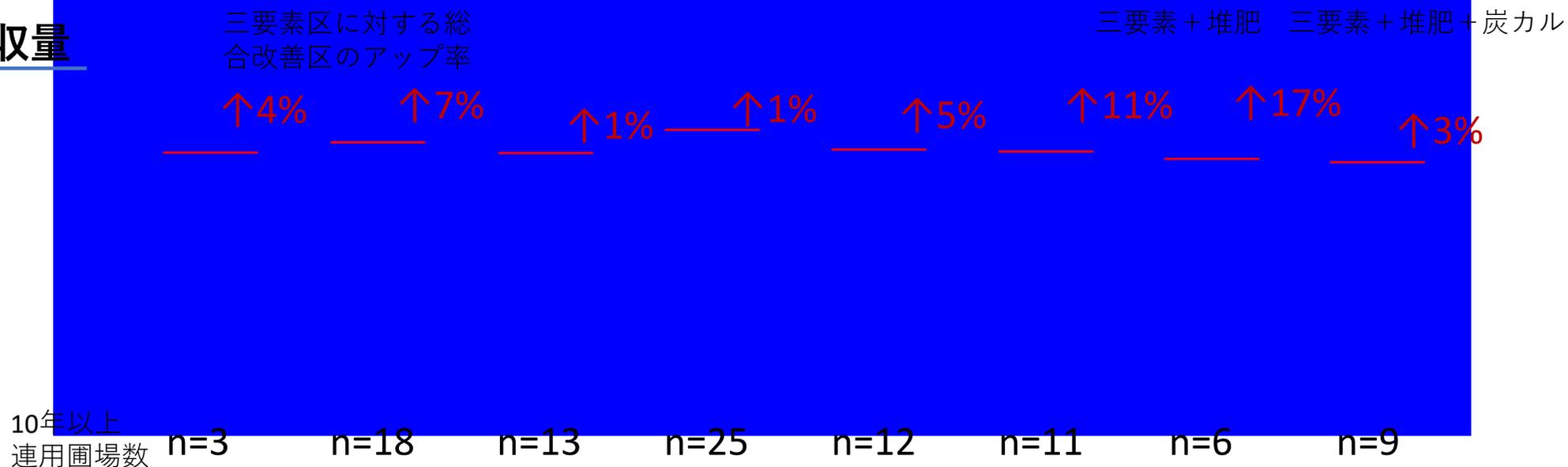
	経年変化	堆肥の効果
水稲	ほぼ同じ	1-10%
デントコーン	40-50%減少	40-50%



畑作物の方が連作により収量が低下する

# 収量と生育不良年の生育低下

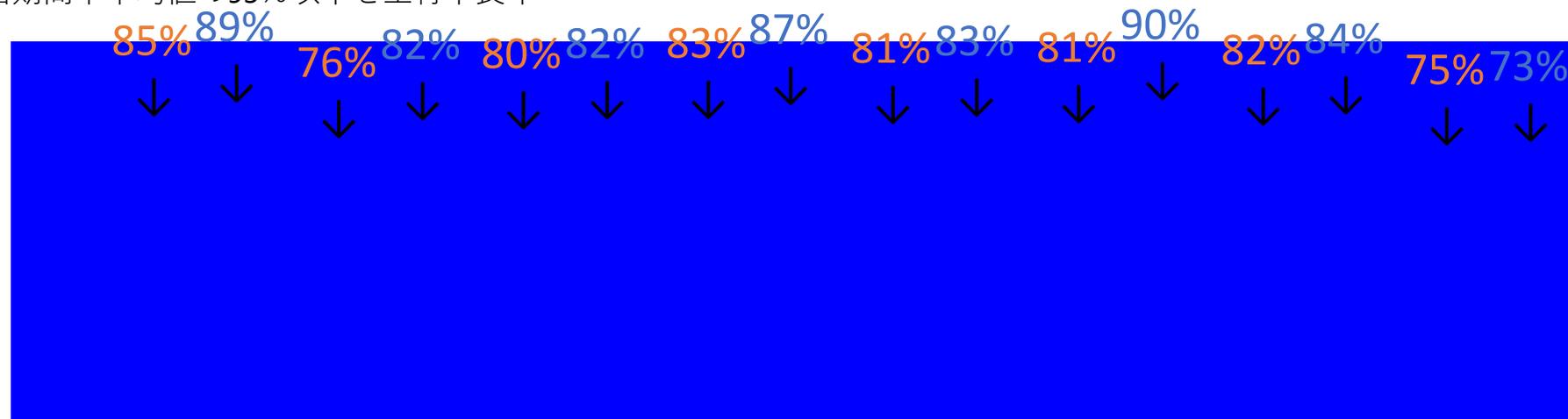
## 収量



堆肥施用により、1-17%収量増加

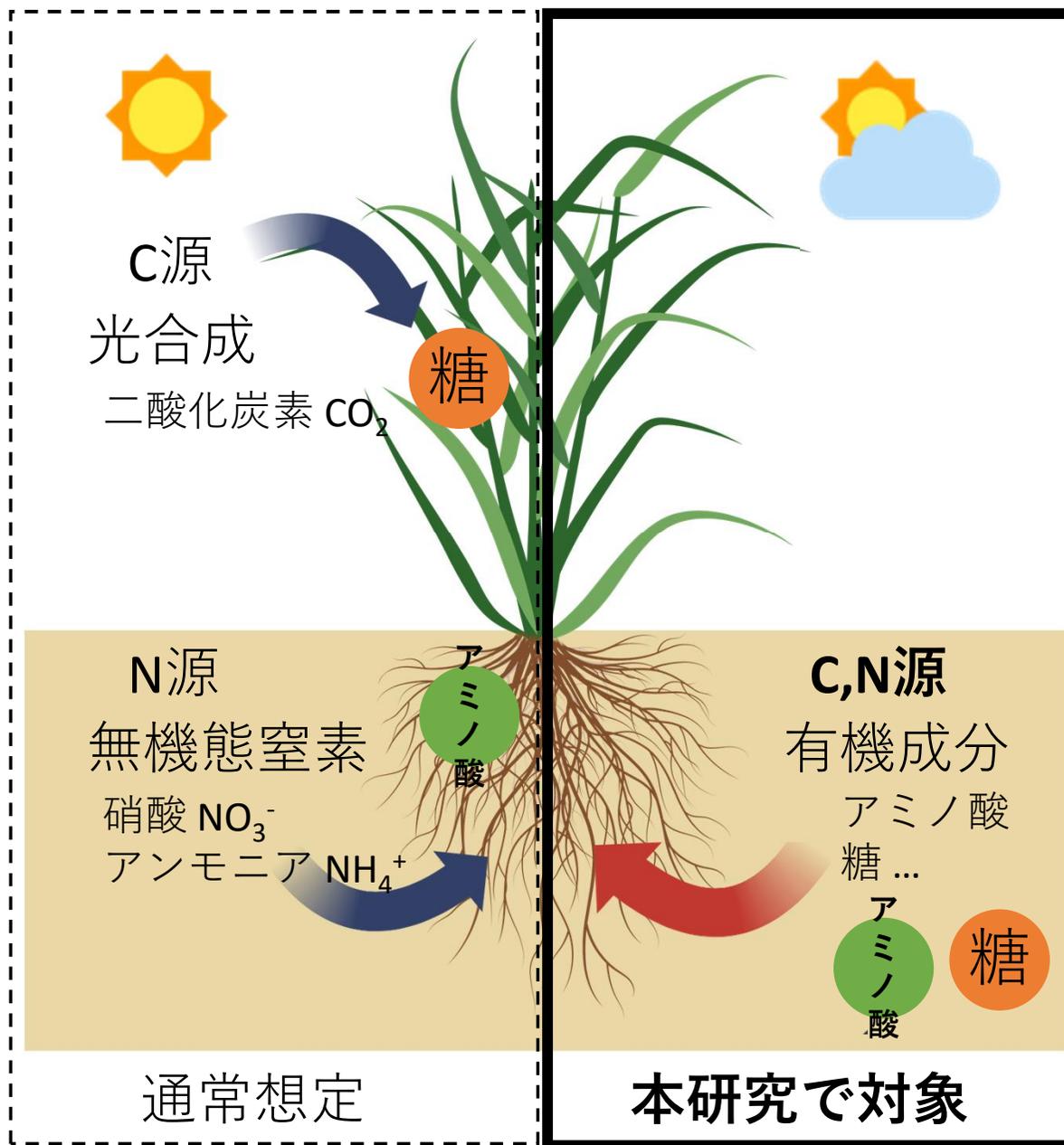
## 生育不良年\*/生育良好年

\*栽培期間中平均値の95%以下を生育不良年



堆肥施用により、生育低下が抑制

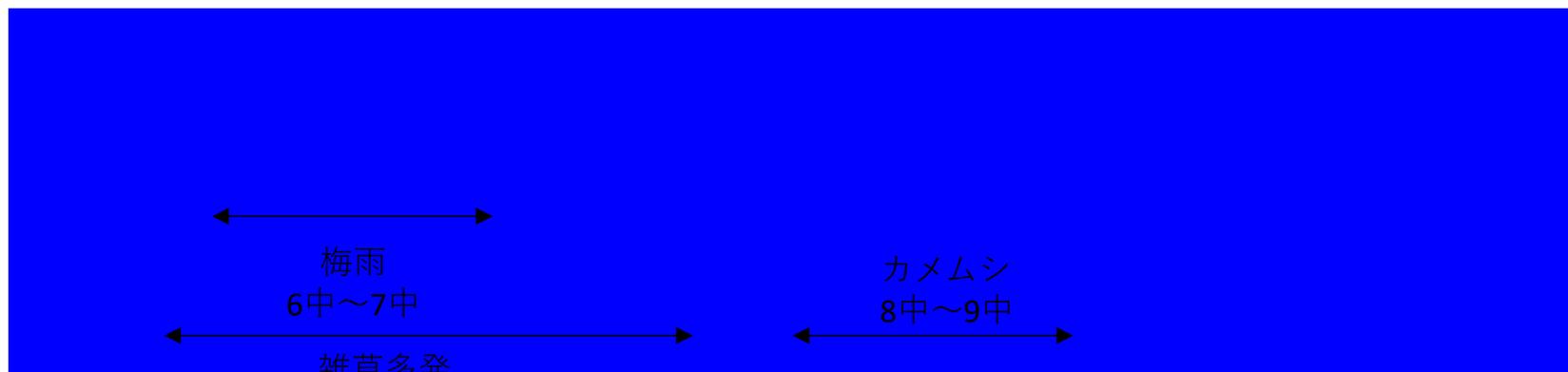
# 有機成分利用による環境ストレス軽減メカニズム



植物は通常、光合成で二酸化炭素から糖を生産、無機態窒素を吸収しアミノ酸を合成

曇天、高温等で光合成が抑制した場合、根からアミノ酸、糖を直接吸収し、生育低下を抑制しないだろうか？

# 温暖化対策 狭畝密植・極晩播栽培



	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
<b>慣行栽培</b>	施肥耕起	播種 除草	中耕 除草	防除 中耕 追肥 除草	防除	防除	収穫
<b>省力栽培</b>		有機物	耕起	播種			収穫

	慣行栽培	省力栽培
播種時期	6月	7月 (梅雨後)
耕起深	15～20cm	5～10cm
畝間	70cm	35cm
中耕・培土	2～3回	0回
病虫害防除	2～4回	0回

- ✓ 温暖化, 虫害, 雑草 → 極晩播
- ✓ 雑草対策 → 密植, 事前耕起
- ✓ 施肥 → 有機物
- ✓ 団粒形成 → 浅耕
- ✓ 収益 → 有機栽培



ご清聴ありがとうございました。

