



資源循環の最適化による 農地由来の温室効果ガスの排出削減

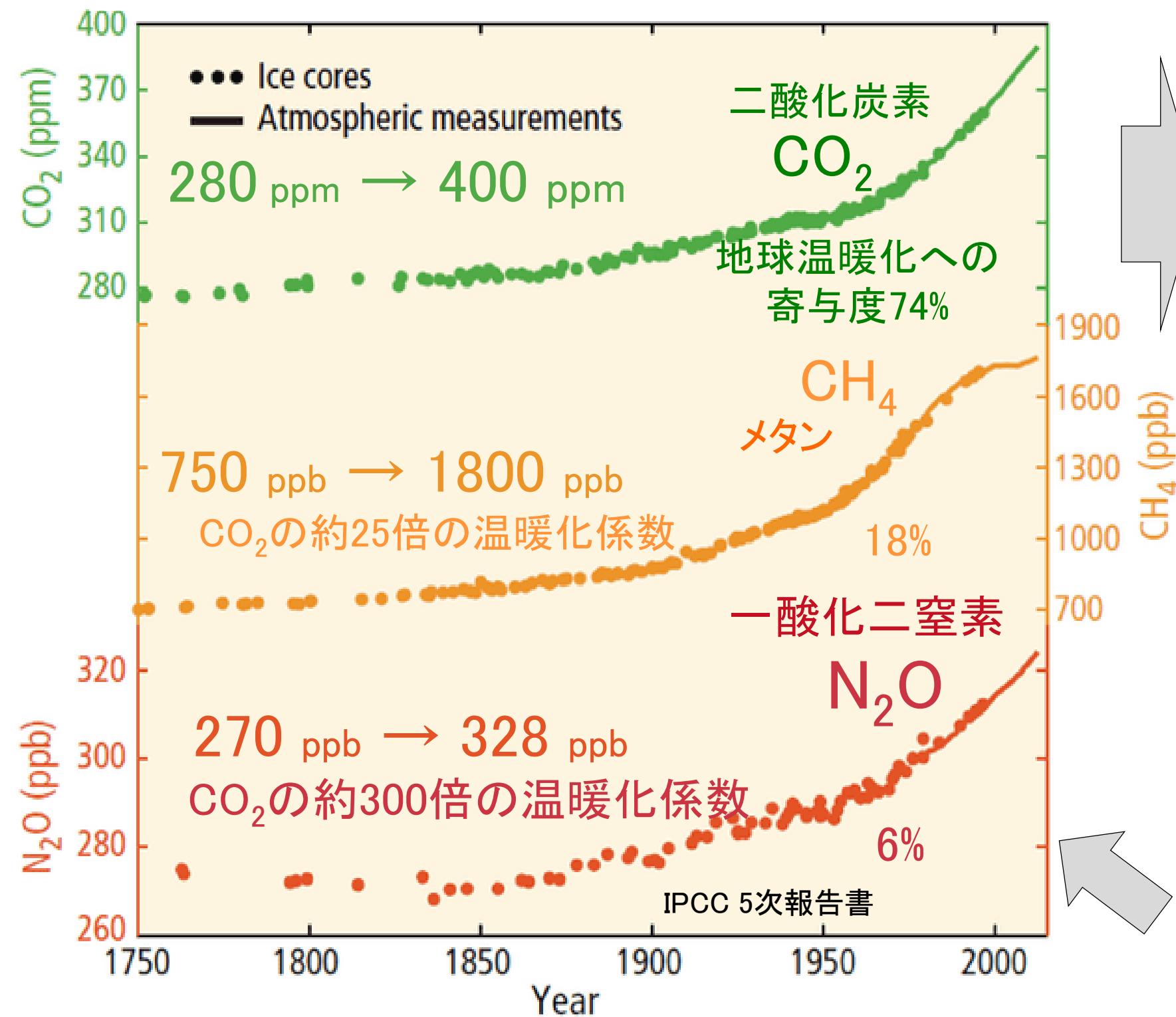


PM：南澤 究

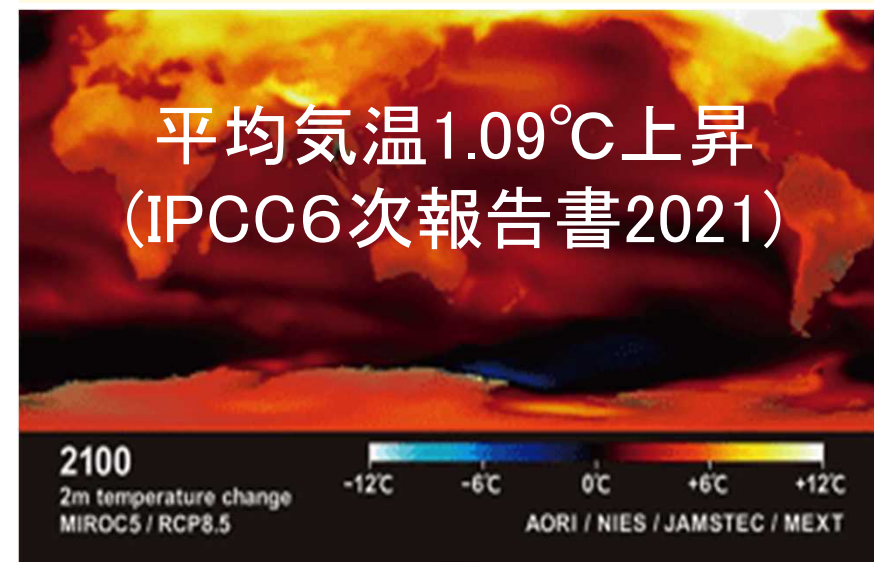
国立大学法人東北大学大学院 生命科学研究科
特任教授

参画機関：国立大学法人東北大学、
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
再委託機関：東京農工大学、岩手大学、帯広畜産大学、龍谷大学、
理化学研究所、森林研究・整備機構、愛媛大学、
株式会社林原、産業技術総合研究所、
十勝農業協同組合連合会

大気中の温室効果ガス(GHG)濃度の上昇



人為的なGHG排出による地球温暖化



気候変動リスクの増大

甚大な災害
生活基盤の破壊

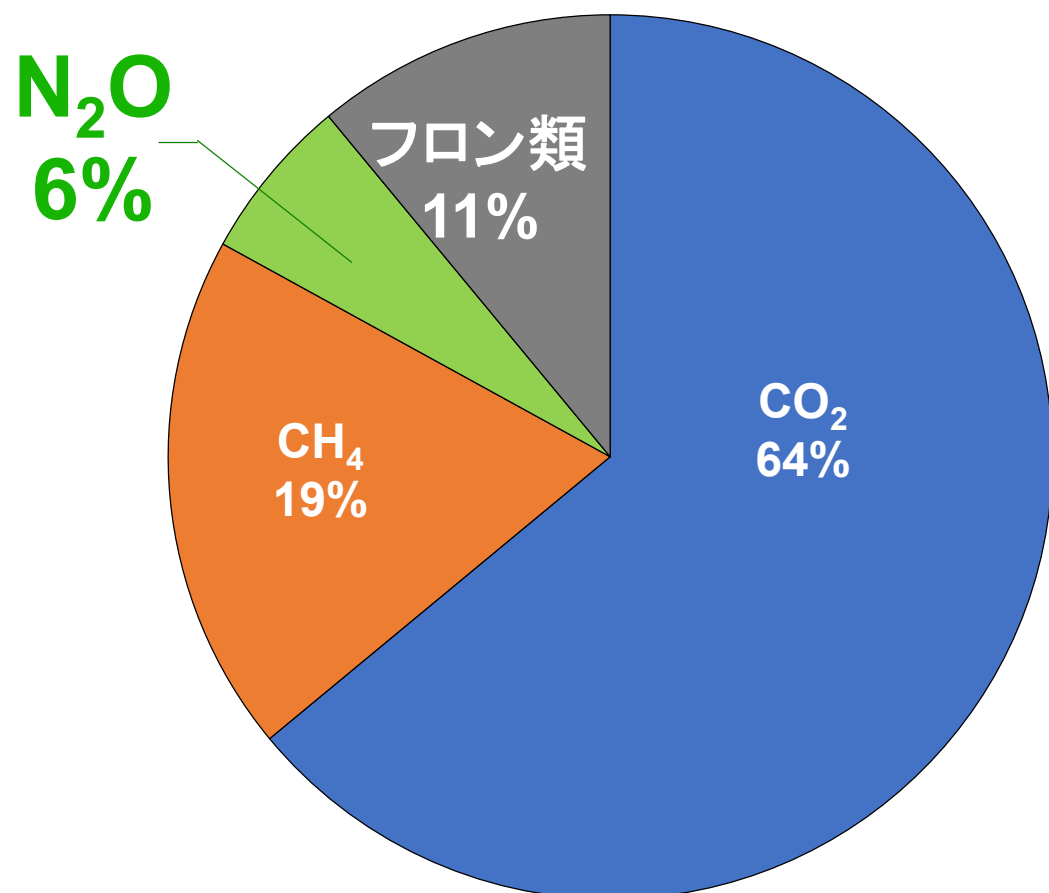
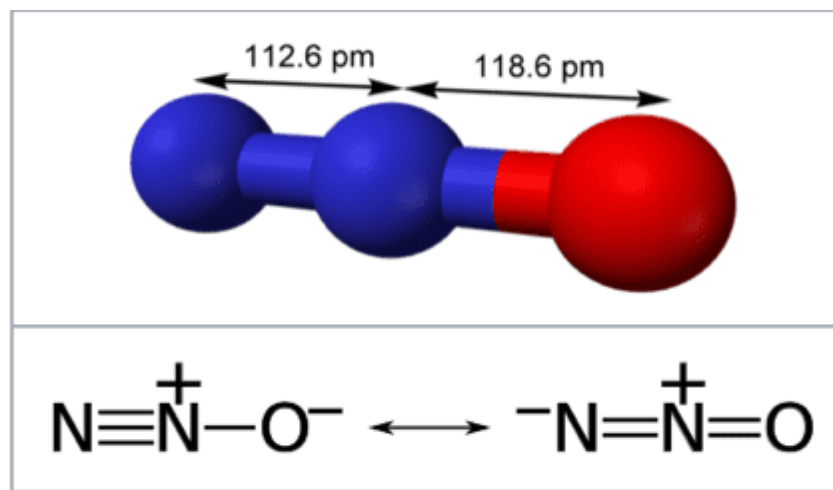


いかにCO₂, CH₄, N₂Oの人為的な排出を削減するか？

気温上昇を産業革命時から1.5°C以内に抑える(パリ協定、COP26)ためには
CO₂以外の温室効果ガス削減も必須

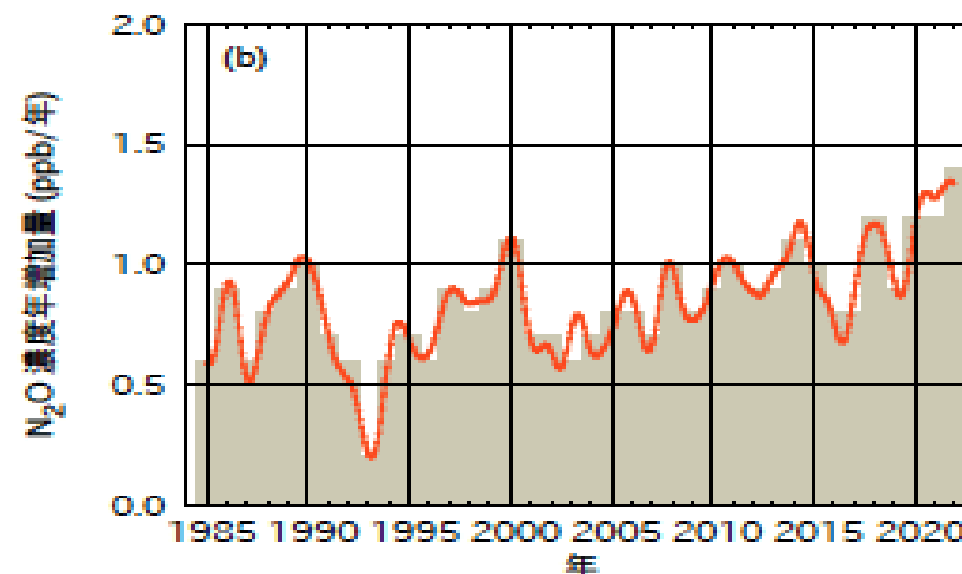
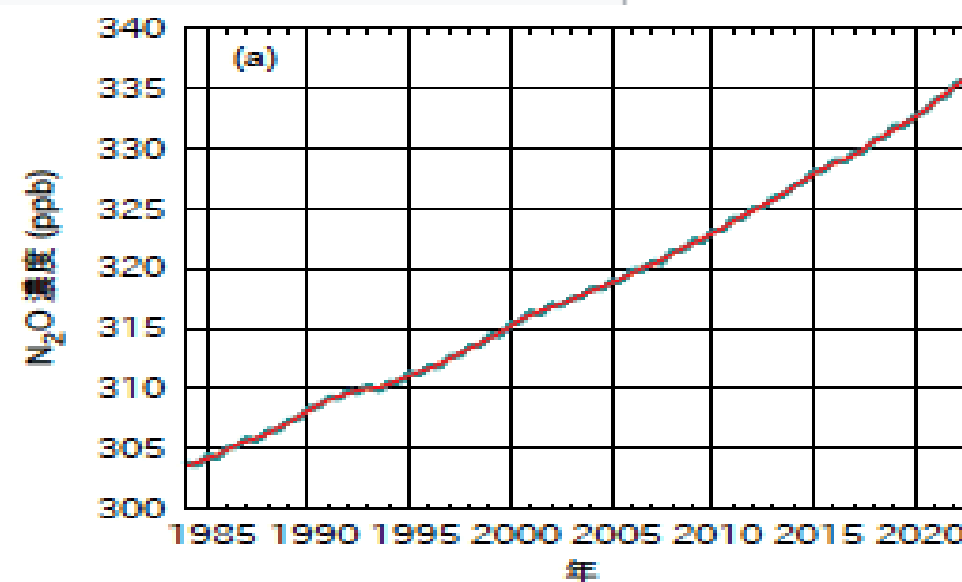
一酸化二窒素(N₂O)とは

- 二重三重結合により**化学的に安定**
- CO₂の**約300倍の温暖化係数**
- 長寿命温室効果ガス(**半減期121年**)
- 成層圏**オゾン層破壊物質**
- 大気中N₂O濃度は336 ppb (2022年)で、前年比 **1.4 ppb 増加**。

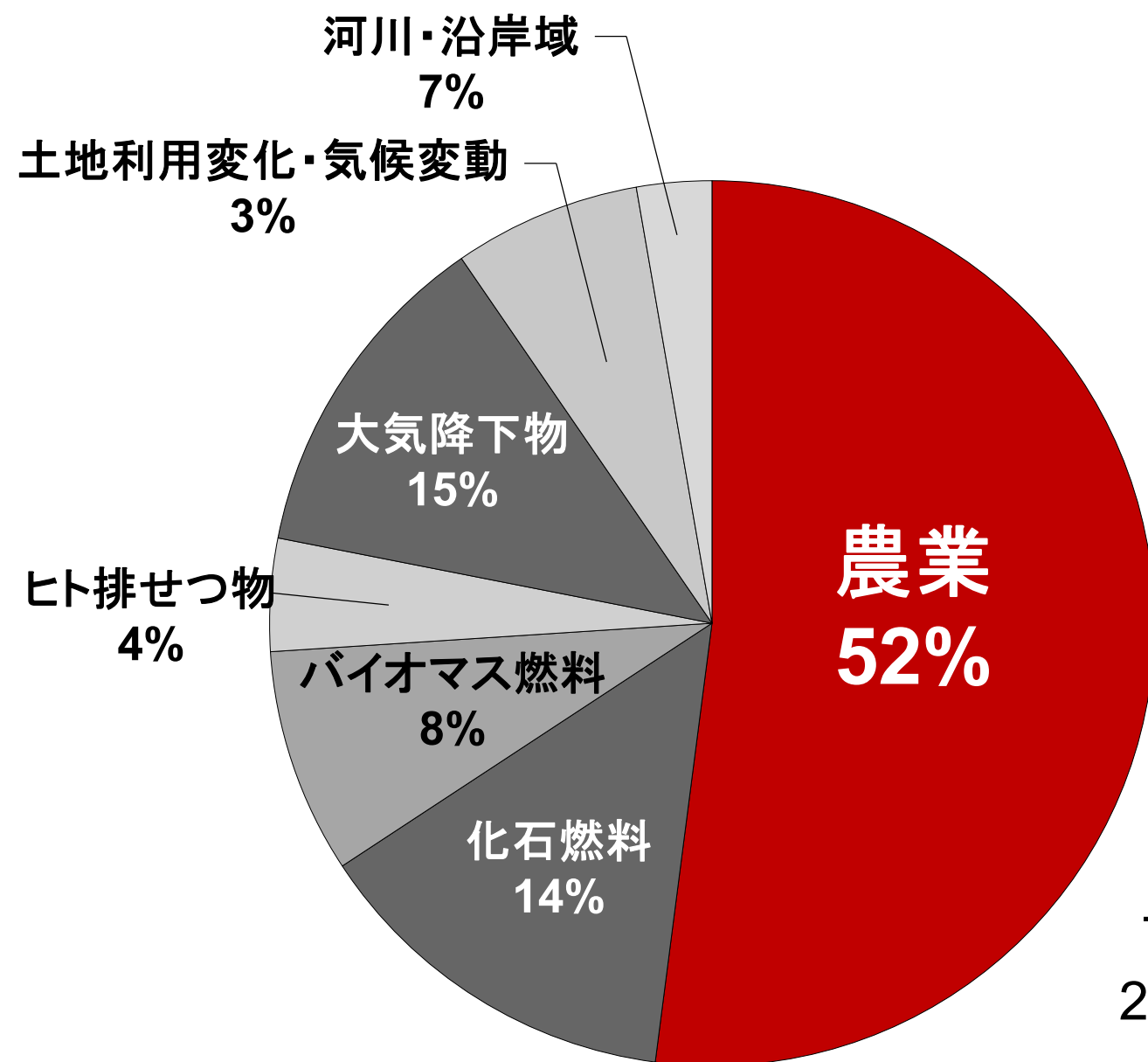


産業革命以降の人為的な温室効果ガスの地球温暖化への寄与度

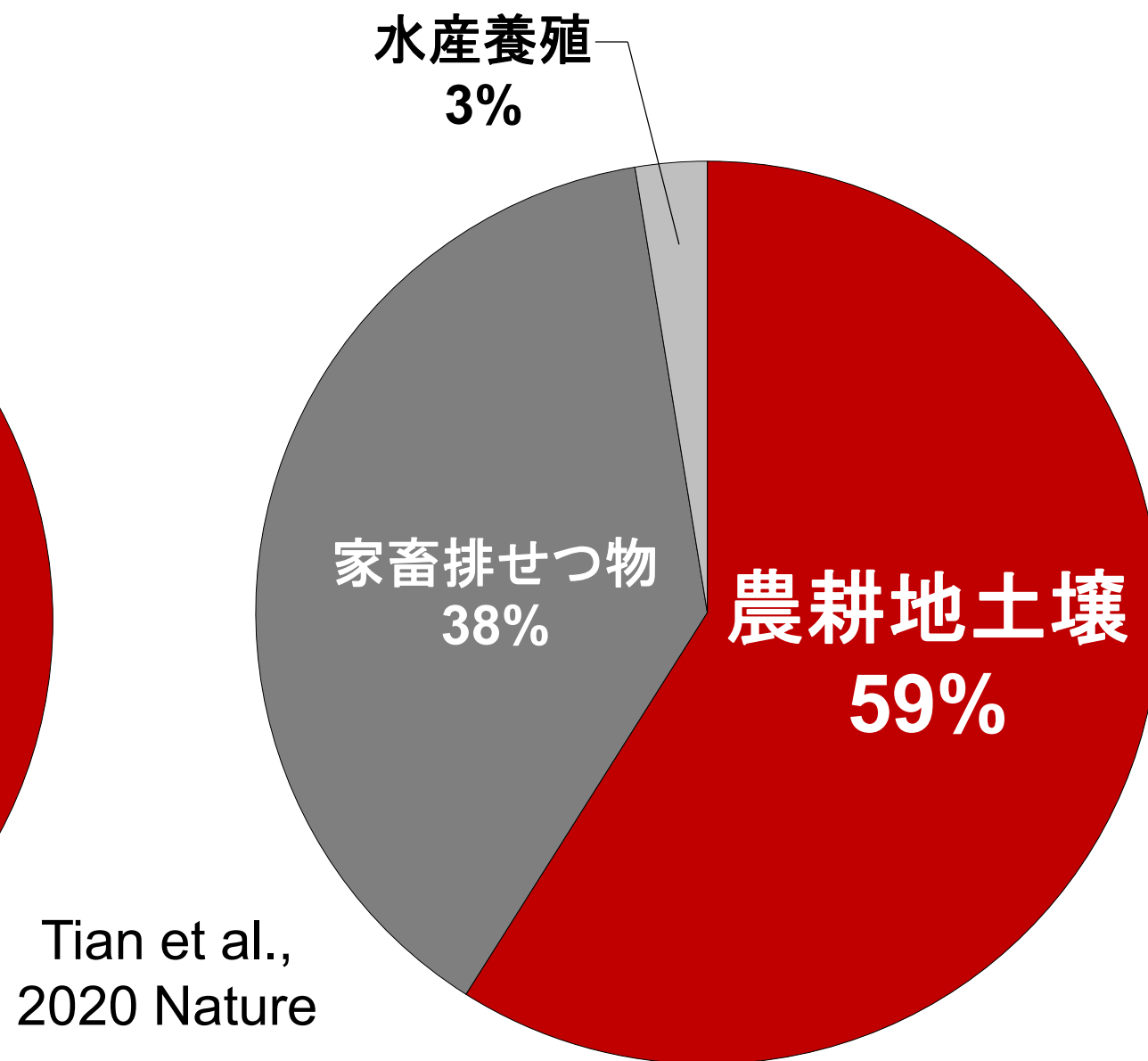
WMO, 2023



大気N₂Oの(a)世界平均濃度と(b)一年あたりの増加量



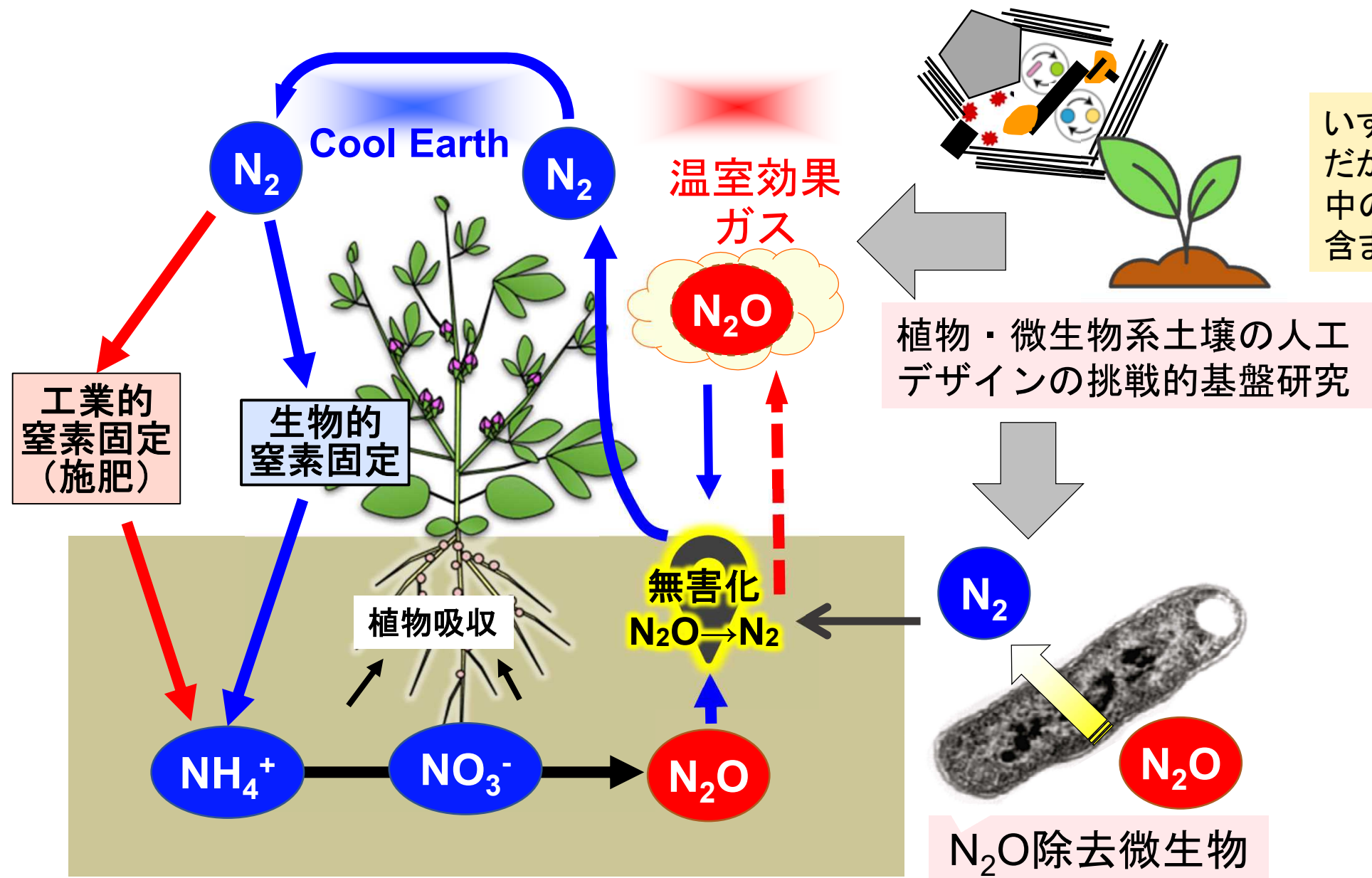
世界のN₂Oの人為的発生源の内訳



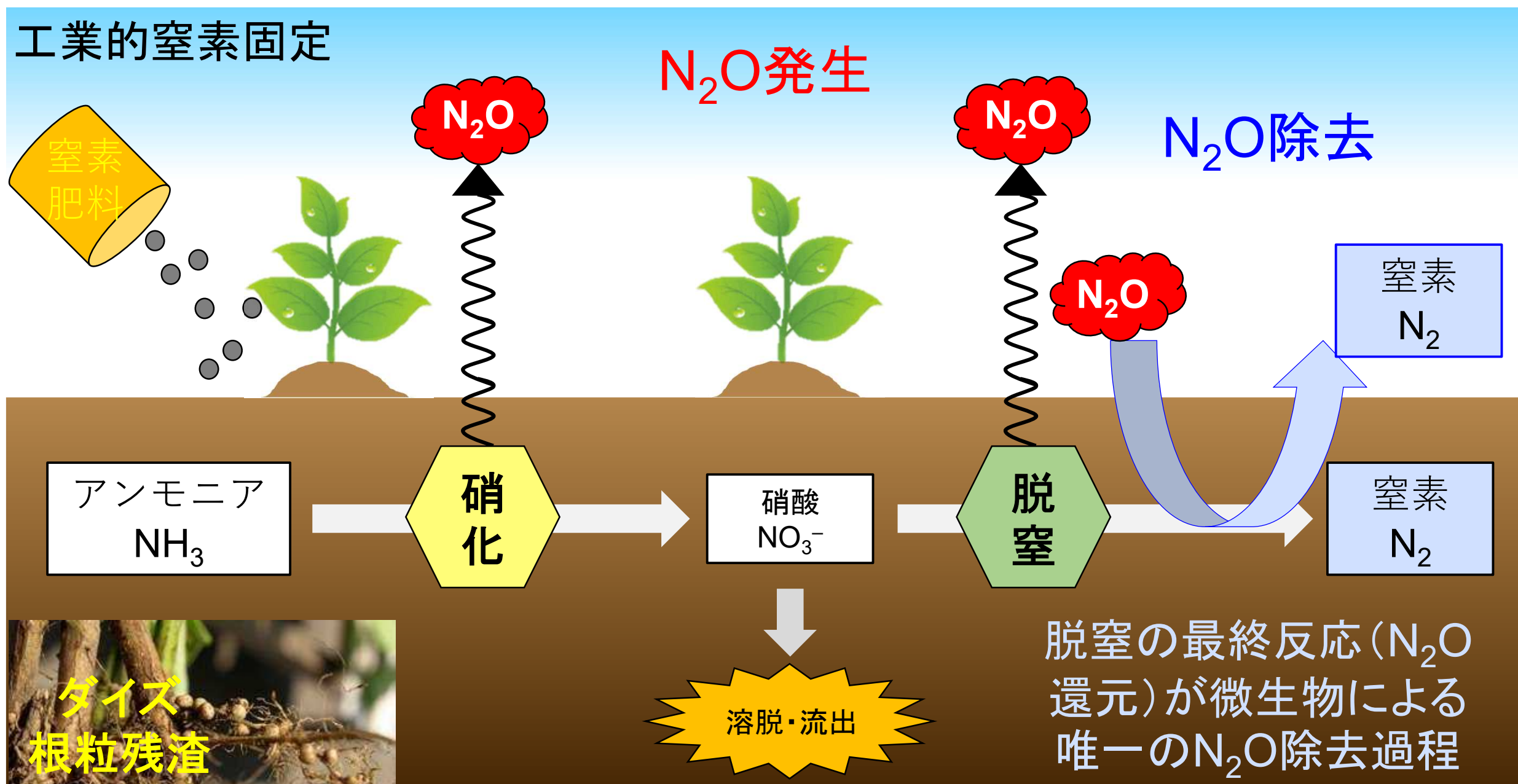
Tian et al.,
2020 Nature

農業分野におけるN₂O発生源の内訳

農業はN₂Oの人為的排出源の50%以上を占め、その約60%は農耕地土壌由来である。



N₂O除去微生物の機能を最適化した植物・土壌の人工デザイン



窒素肥料や根粒残渣はアンモニアを生成し、硝化や脱窒によって大気へのN₂O排出が起る。

実施体制（実施期間2020-2024年度）



代表 和穎朗太(農研機構)



PM
南澤究



代表 今泉温子(農研機構)

微生物資材

●人工団粒

和穎朗太(農研機構)・
藤井一至(森林総研)・
光延聖(愛媛大)

●材料開発

菅野学(産総研)

●資材化

多胡香奈子(農研機構)

N₂O循環

●ダイズ根粒菌

板倉学(東北大)・東山隆信(林原)

●比較ゲノム

佐藤修正(東北大)・白須賢(理研)

●共生最適化

今泉温子(農研機構)・菅原雅之(帯畜大)
川原田泰之(岩手大)・岡崎伸(農工大)
別役重之(龍谷大)

●市民科学 大久保智司(東北大)

評価

●N₂O削減実証

秋山博子(農研機構)

●社会実装基盤

三口雅人(十勝農協連)



代表 秋山博子(農研機構)



知財支援

小川隆由氏(INPIT)



アドバイザー

八木一行氏(愛知大学教授)
鎌形洋一氏(産総研 生命工学領域長補佐)
柴田大輔氏(東北大生命科学客員教授)

根粒菌



人工団粒



実績があるものから
より高度な戦略へ

資材名	現状の資材化案	対象作物	N ₂ O削減の時期	圃場でのN ₂ O年間削減目標率 (日本N ₂ O発生量)	農家のメリット
根粒菌	まめぞう+PGPM①	ダイズ	収穫期	10% ('24年度) ③ 37% ('29年度) ③ (43 ktCO ₂ eq/y)	増収・施肥削減
人工団粒	人工団粒、人工担体②	一般畑作物 (含ダイズ)	施肥直後	10-50% ('29年度) (2,131 ktCO ₂ eq/y)	土壌改良等 ('24年度 具体化予定)

<特記事項>

- ① 生育促進菌(PGPM)は室内試験でダイズ根粒の窒素固定活性が上昇、圃場試験を実施中。
- ② 人工団粒は天然土壌団粒の知見を生かして作成。
- ③ 収穫期(根粒崩壊期)のみでのN₂O削減目標は30%('24年度)、50%('29年度)となる。

目指すべき製品の仕様(2029年度)

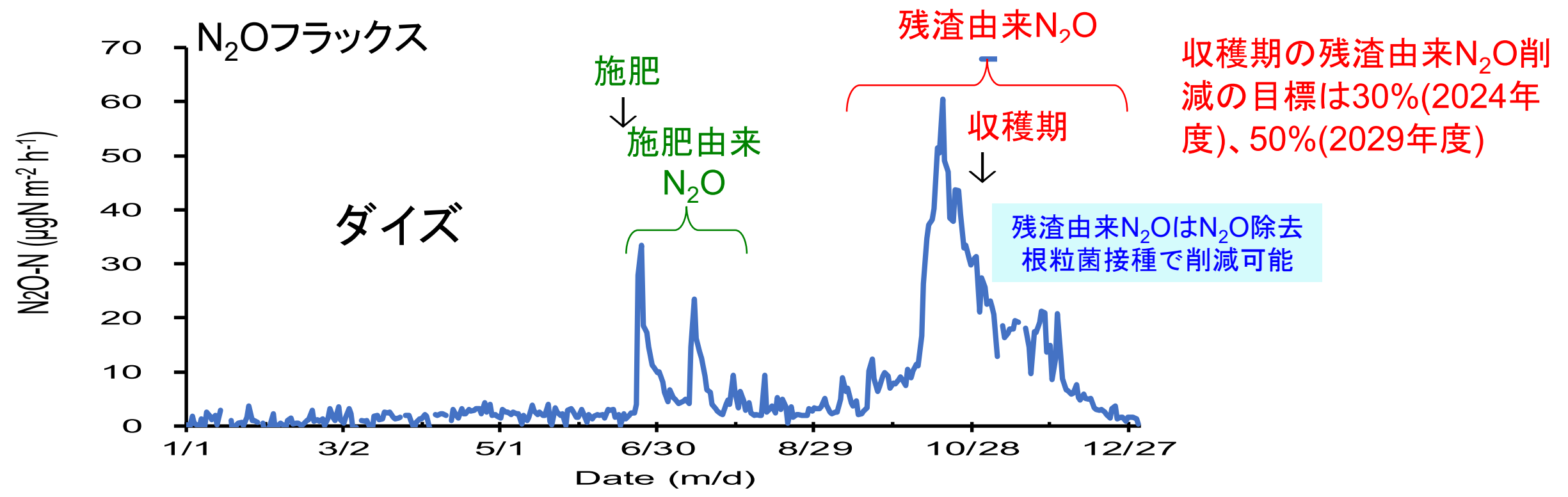
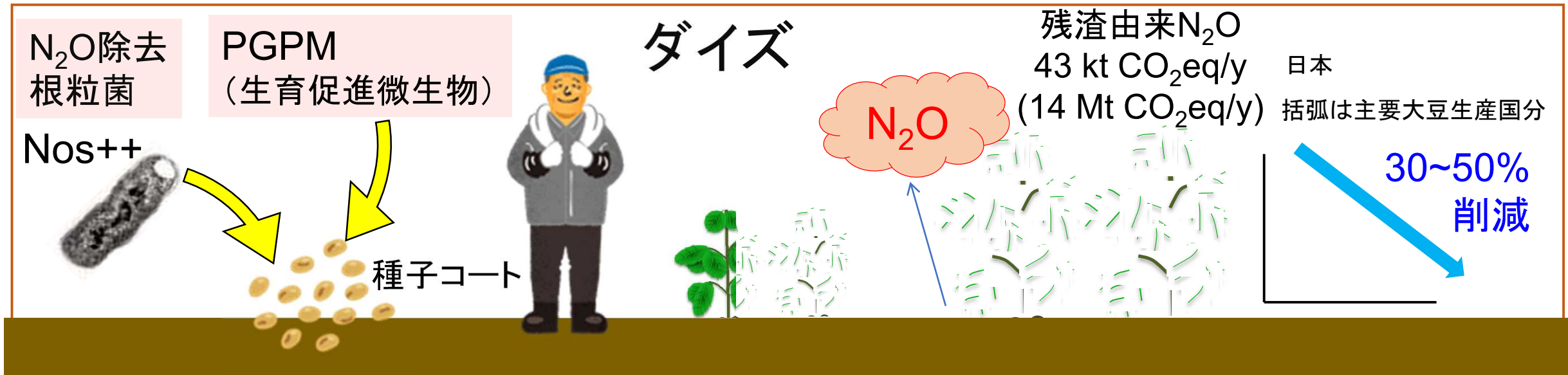
根粒菌・PGPM等の組合せ技術(ユニークな根粒菌活用技術、重要特許準備中)

- 1)ダイズ収穫期の温室効果ガスN₂O発生を約半分にできる(排出量取引)
- 2)ダイズ収量増(10%程度)(品質の高い国内ダイズ不足解消と農家収入増)

人工団粒(複数の企業や市民科学参加者・マスコミ関係者から期待)

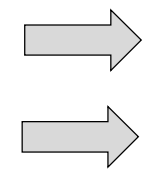
- 1)肥料由来の温室効果ガスN₂O発生を約半分にできる(排出量取引)
- 2)土壌改良・作物生育促進など農家メリットを検討中

N₂O除去根粒菌の背景とR&D



根粒菌資材化の研究開発方針

優れたN₂O除去根粒菌資材
 PGPM(生育促進微生物)共接種



収穫期N₂O発生削減
 増収(農家のメリット)

高いN₂O除去活性を有する根粒菌株の創製と探索

B. diazoefficiens

NasSはNasTと
二成分制御系として機能

Termination

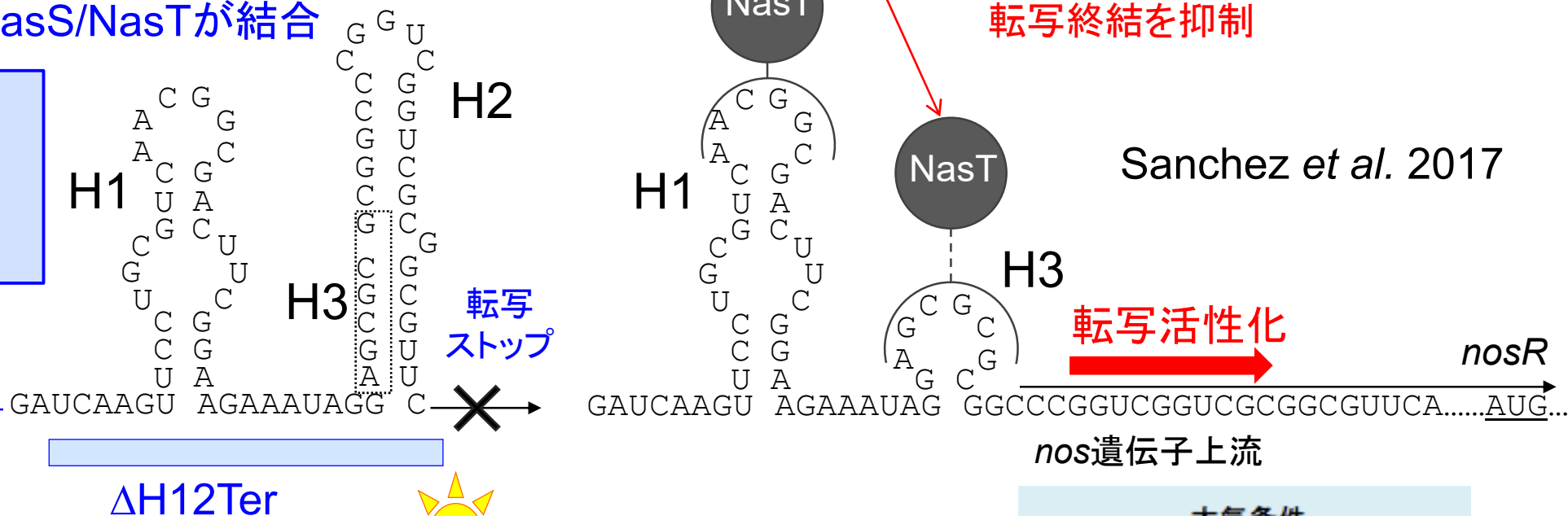
Antitermination

ただ、組換え体？

通常は
NasS/NasTが結合

変異NasS
NasTがヘアピンに結合し
転写終結を抑制
*nasS*変異株はNasTを遊離

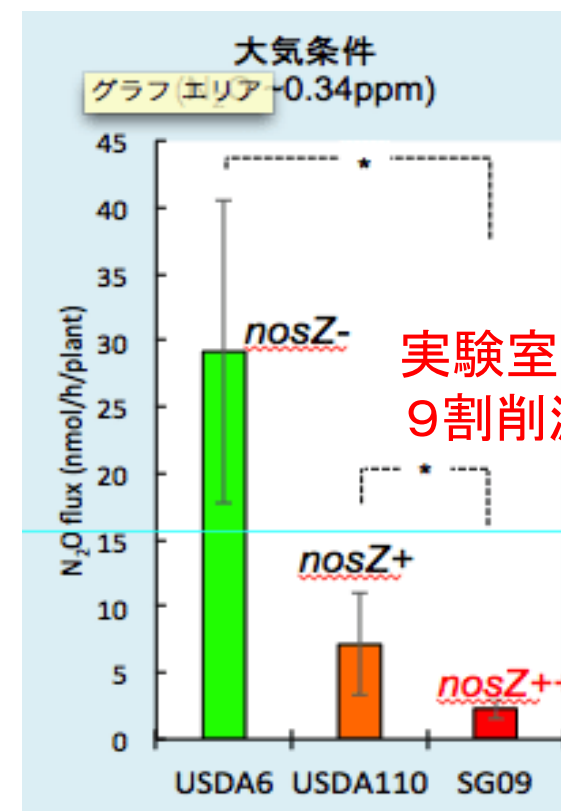
ヘアピン削除株は*nos*遺伝子発現のみを活性化
理想的なNos強化株！



Sanchez et al. 2017

*nos*遺伝子上流

N₂O還元能の高い野生株はないか？



MSでN₂O還元活性の高い
*B. ottawaense*を発見

Wasai-Hara et al. 2020 M&E
Wasai-Hara et al. 2023

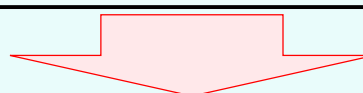
B. ottawaense のN₂O還元活性が高いメカニズムは?

Wasai-Hara et al. 2023

*nosZ*遺伝子の転写活性

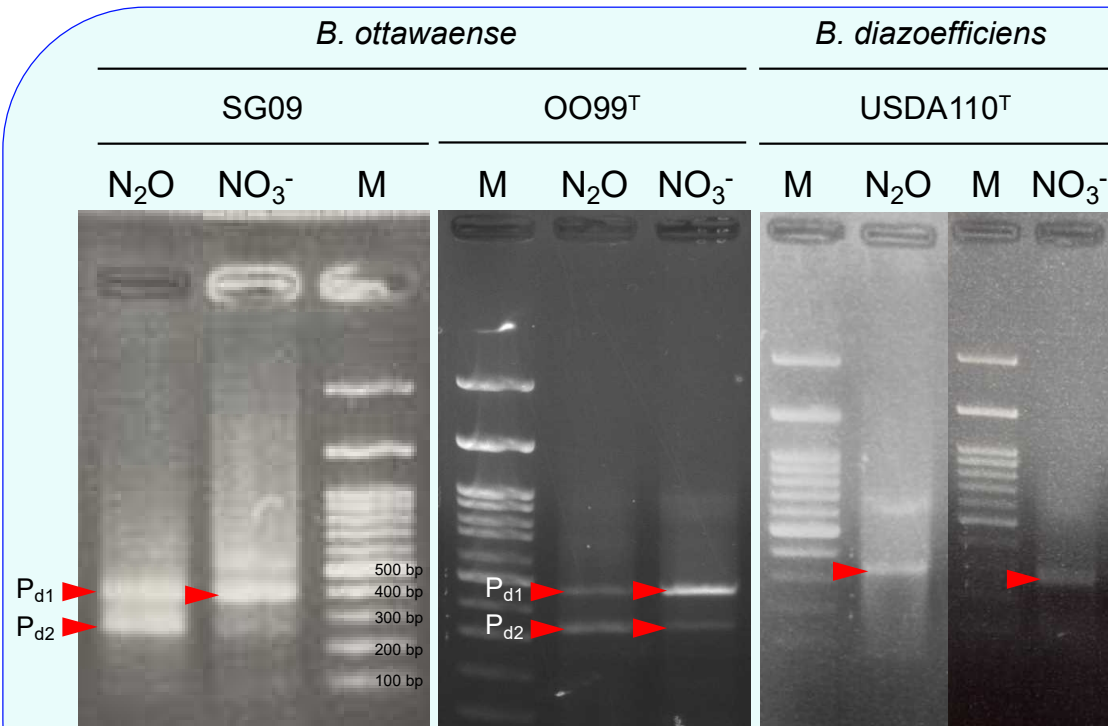
Relative expression of *nosZ* gene under a N₂O-respiring condition by RT-qPCR

Strain	Relative Expression		NasST effect (1)/(2) (%)
	Wild type (1)	$\Delta nasS$ (2)	
<i>B. diazoefficiens</i> USDA110 ^T	1	3	29
<i>B. ottawaense</i> SG09	212	430	49
<i>B. ottawaense</i> OO99 ^T	164	337	48

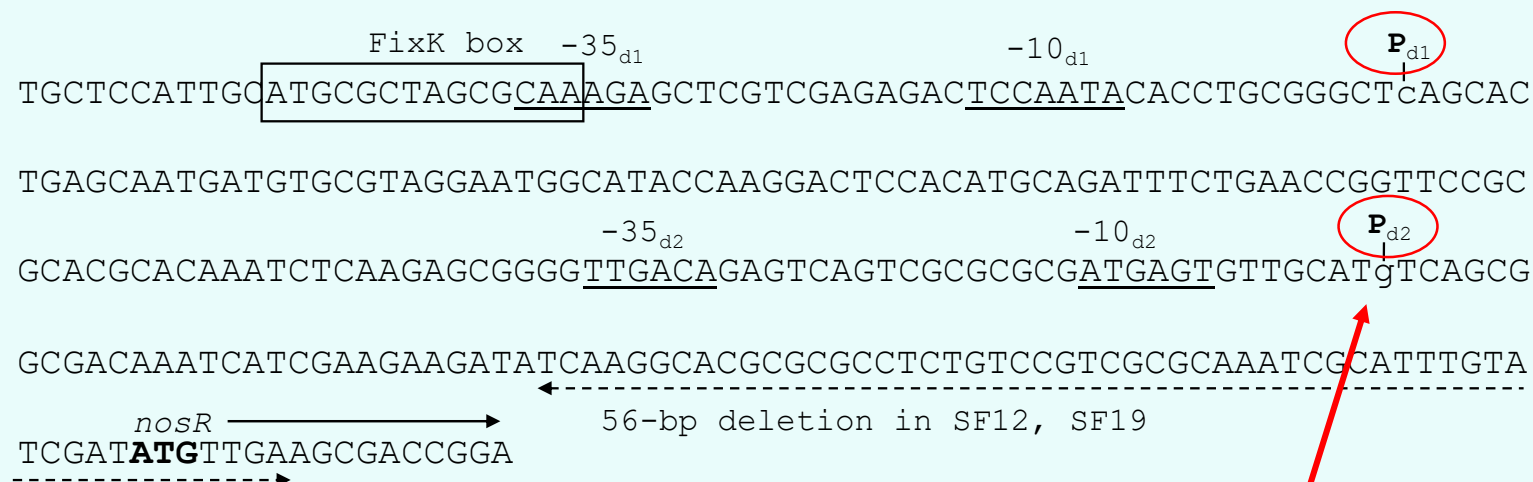


N₂O呼吸下で*B. ottawaense*の*nosZ*遺伝子は*B. diazoefficiens*の100倍以上高発現

転写開始点とプロモータ



Electrophoresis images of 5' RACE analysis in *B. ottawaense* SG09, OO99^T, and *B. diazoefficiens* USDA110^T



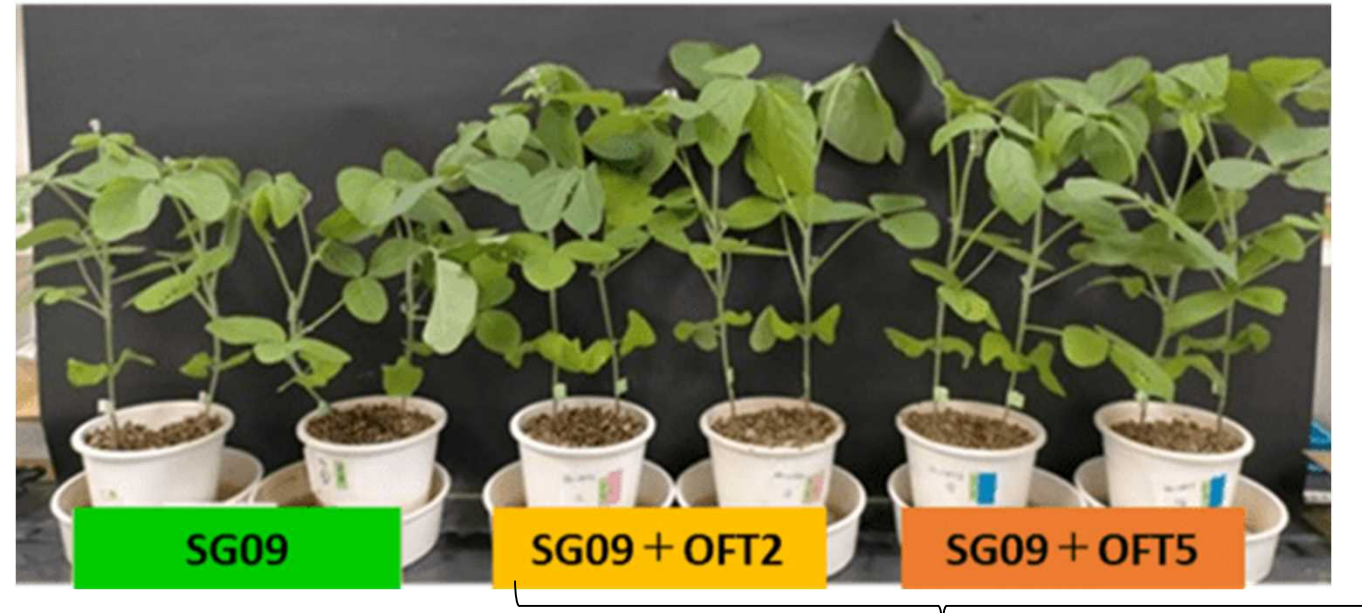
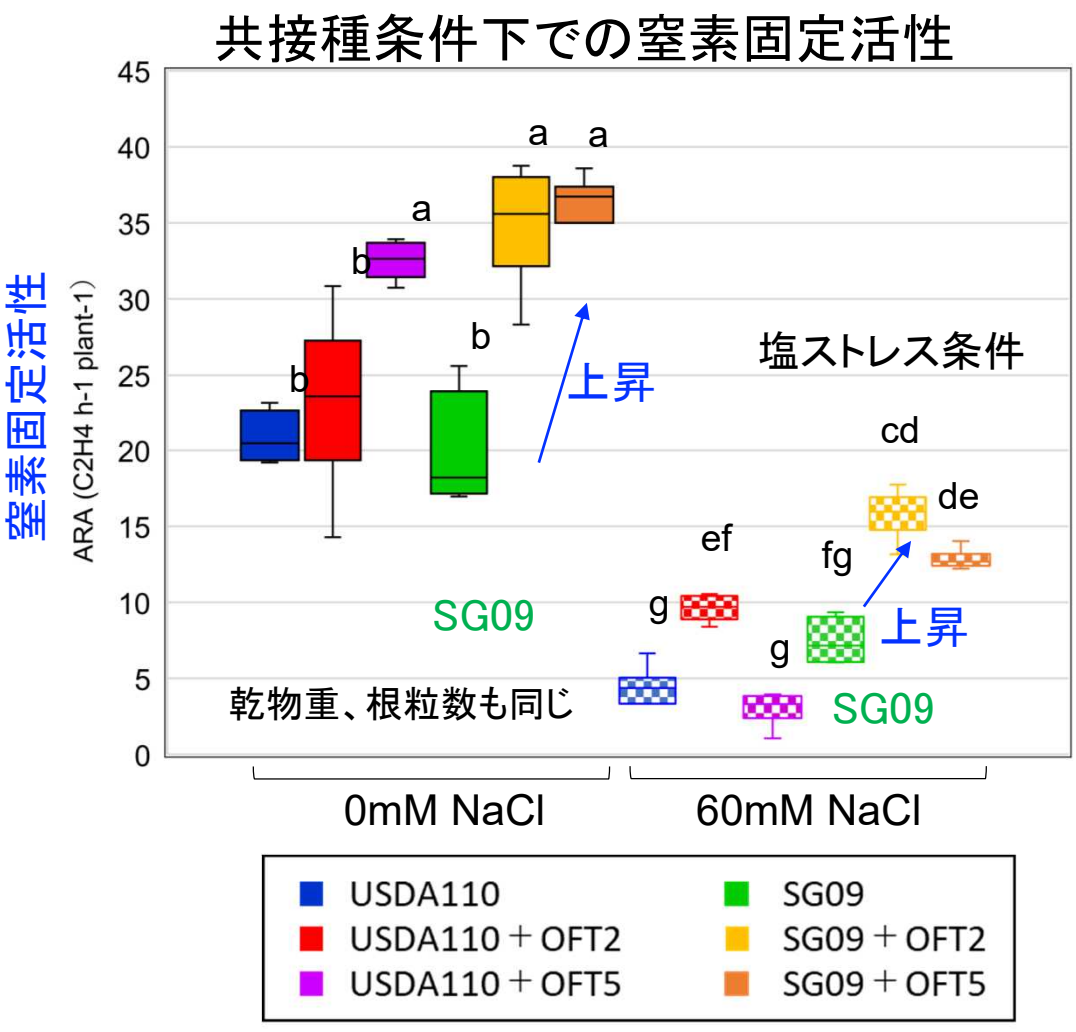
Transcriptional organization of *nosR* in *B. ottawaense* SG09 and OO99^T

N₂O呼吸の転写開始点Pd2により高発現?

II-7 「共生最適化」の成果

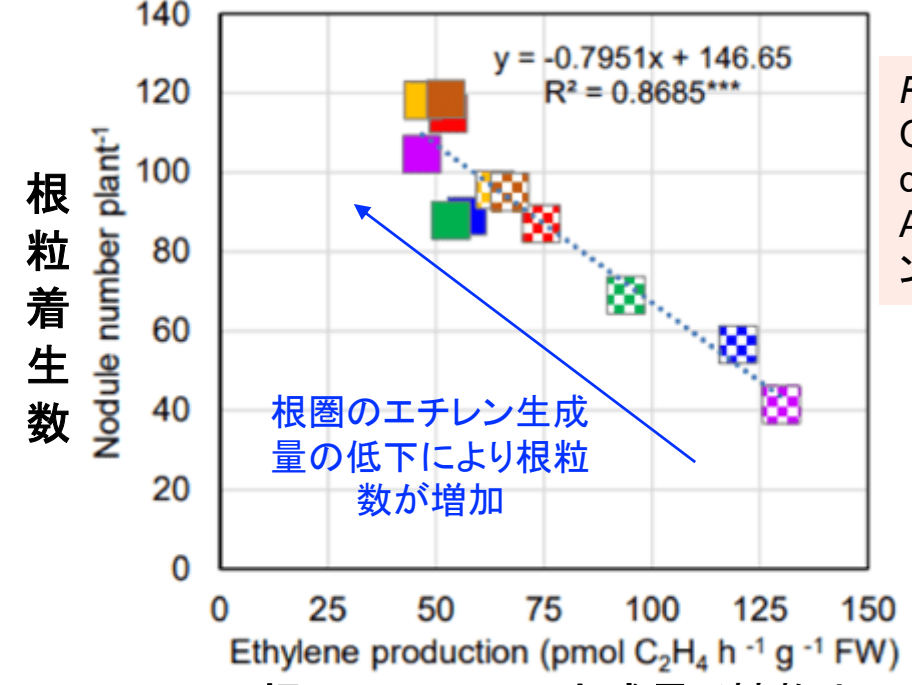
■ *Pseudomonas* 生育促進菌 (PGPM) による共生促進

PGPM (Plant Growth-Promoting Microbe) 共接種による共生能と塩耐性の向上



Win et al. 2023

共接種によるダイズ植物体の生育促進効果



Pseudomonas sp. OFT2 株と OFT5 株が保有している ACC deaminase (エチレン中間体の ACC を分解する酵素) によるエチレン生成能の低下の可能性

メカニズムが分かっている微生物接種資材

Pseudomonas sp. OFT2 株
Pseudomonas sp. OFT5 株
 による *B. ottawaense* SG09 の窒素固定能・生育能・塩ストレス耐性の向上

N₂O 除去根粒菌資材に利用可

圃場試験でも農家メリットの創出

■根粒菌資材の試作品の製造・評価

大量培養時の培養特性と品質調査

→凍結保存性、試作品製造後の品質調査



N₂O除去型新規根粒菌株の資材の
試作品の製造・評価

■根粒菌資材の形態

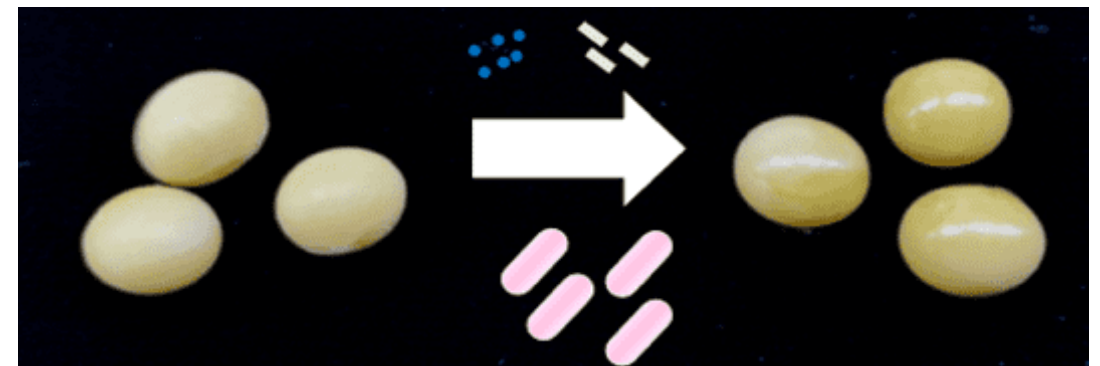
まめぞう

ピートモース根粒菌
資材(十勝農協連)

菌数は安定だが、
農家が現場で接種



種子コート技術の開発

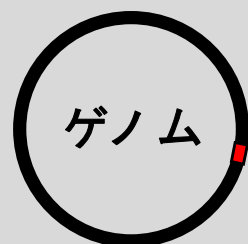


農家の省力化が可能だが、
接種根粒菌の死滅が問題

根粒菌接種による土壌環境影響評価

微生物接種は土壌生態系にどのような影響を与えるか？

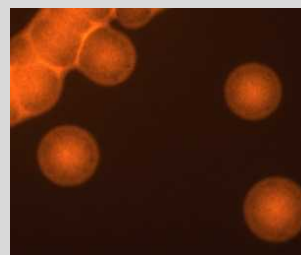
N₂O吸収活性の高い *Bradyrhizobium* 属根粒菌 (



マーカー遺伝子による標識

薬剤耐性遺伝子

蛍光遺伝子

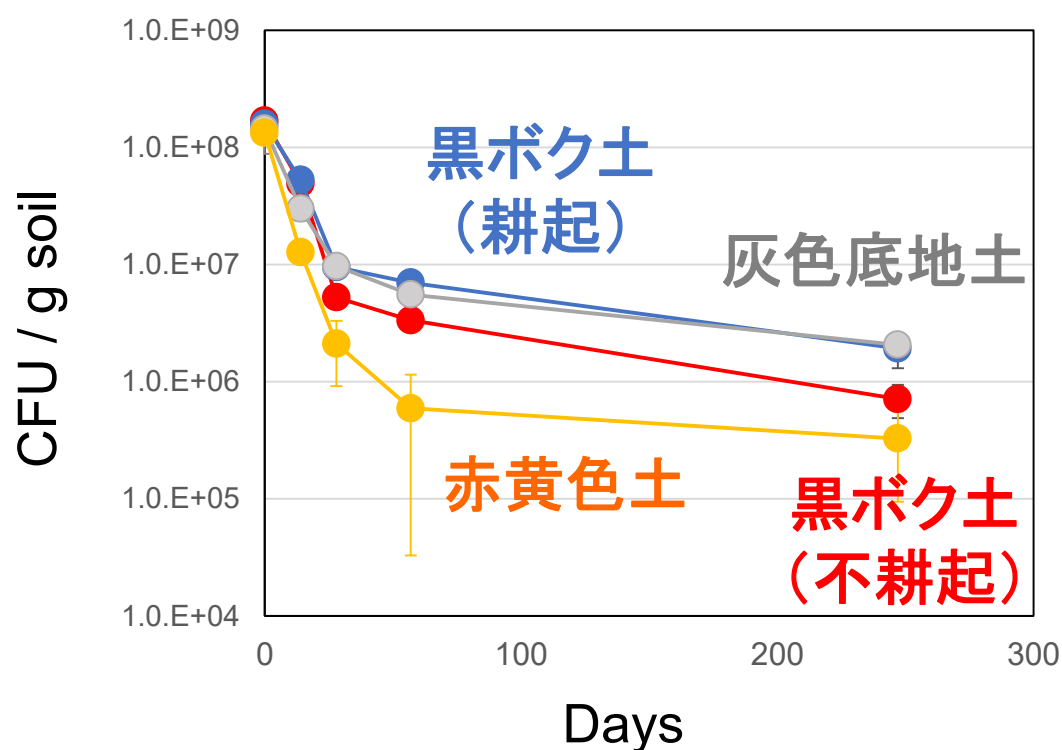


土壌マイクロコズム
10⁸ (細胞/g)を土壌に接種

黒ボク土壌
(**耕起**・**不耕起**)
灰色低地土
赤黄色土

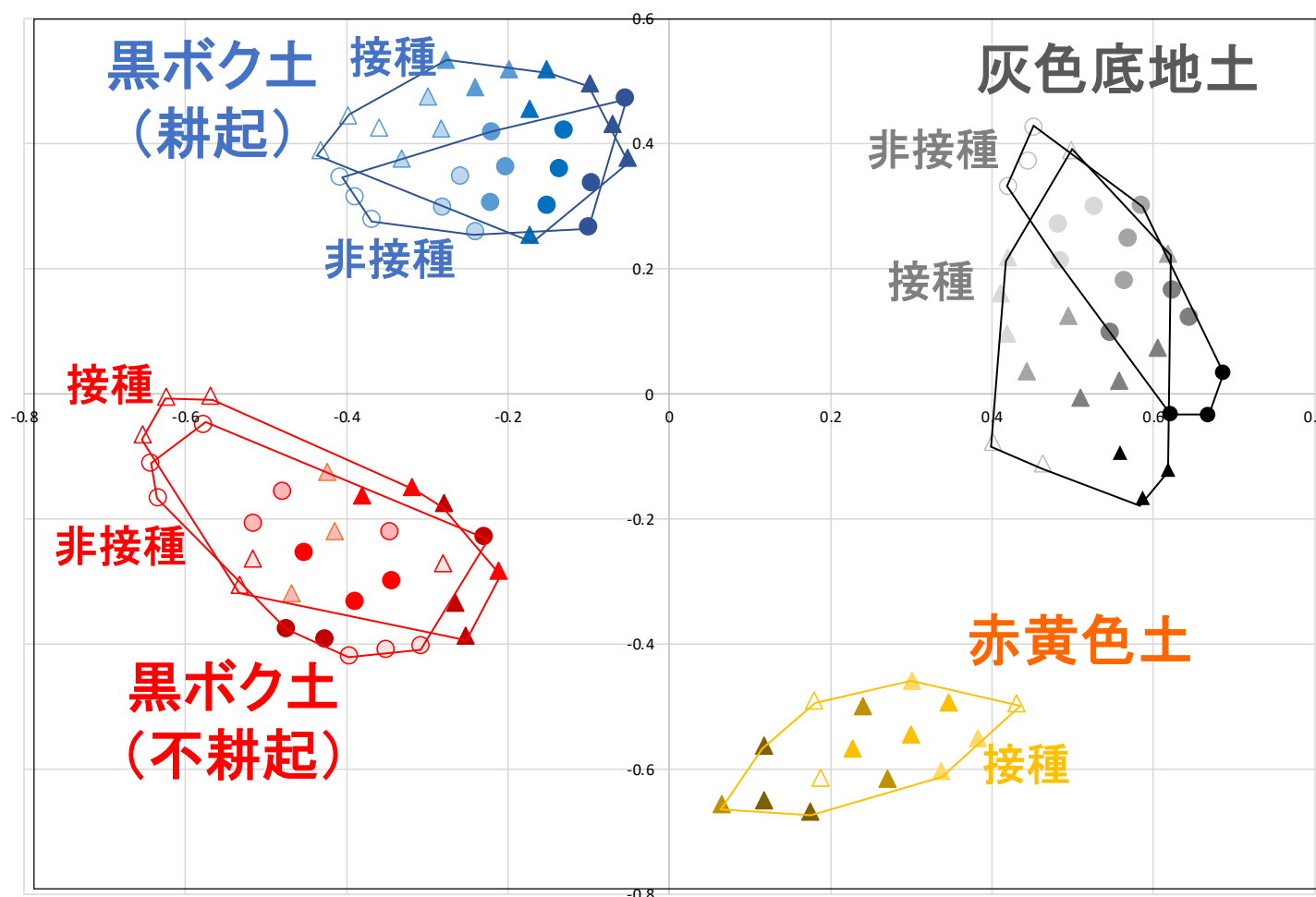


250日までの土壌生残性



接種根粒菌は減少しながらも長期的に生残した。一方、土着の細菌叢組成や多様性に与える影響は極めて小さかった。

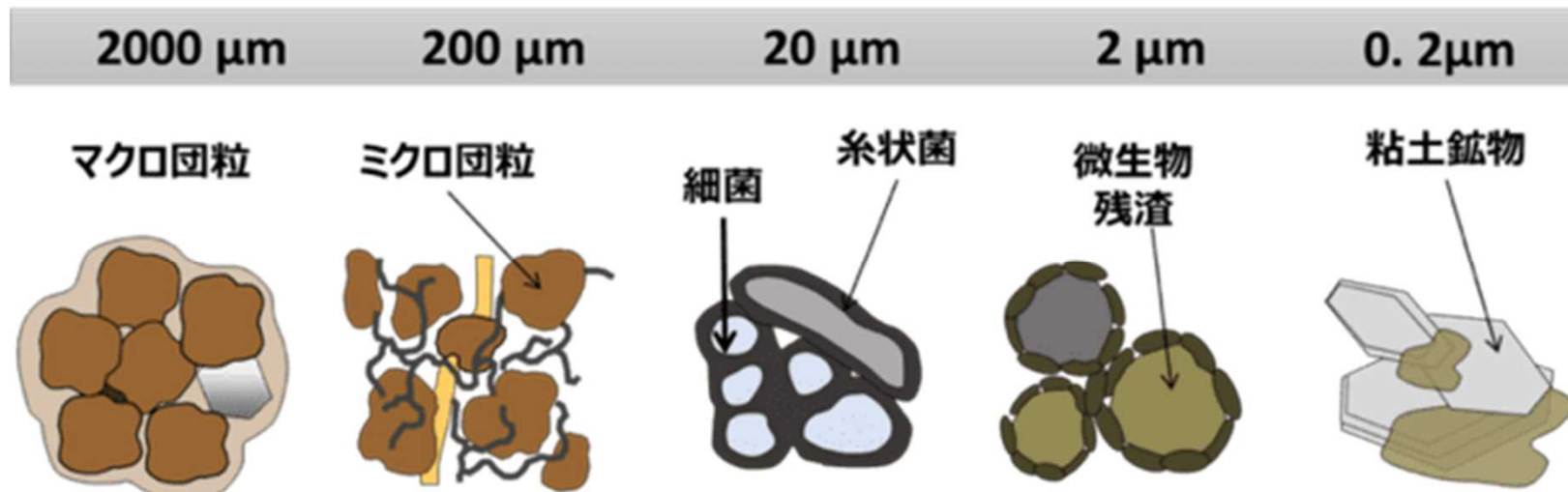
細菌叢組成への影響



土壌団粒の階層的構造 → 土壌の多機能性



土壌団粒には孔隙ネットワークがあり微生物のすみかに

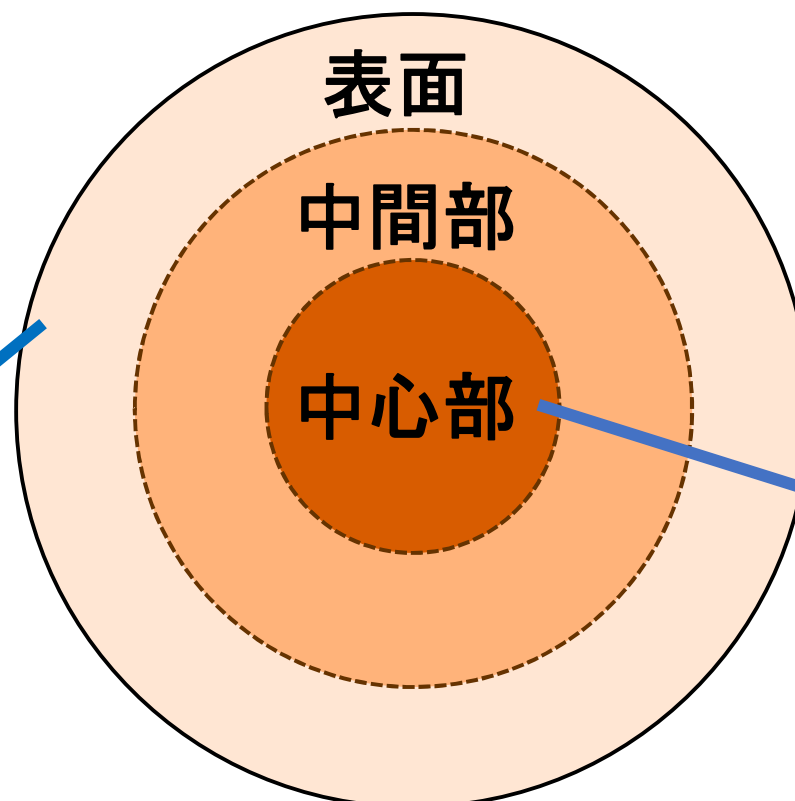


Aggregate Hierarchy Model (Tisdall & Oades, 1982)

土壌マクロ団粒



好気的環境



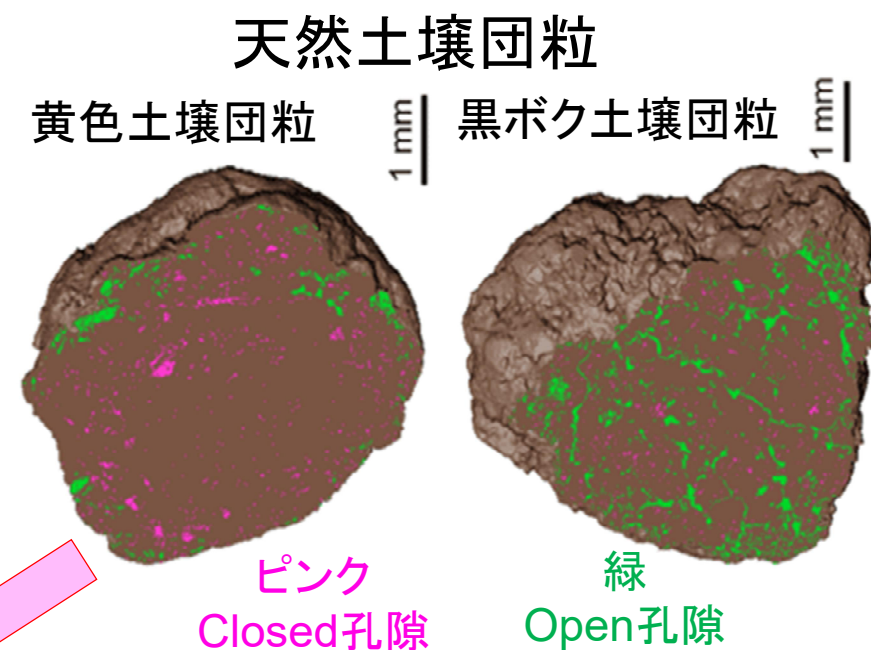
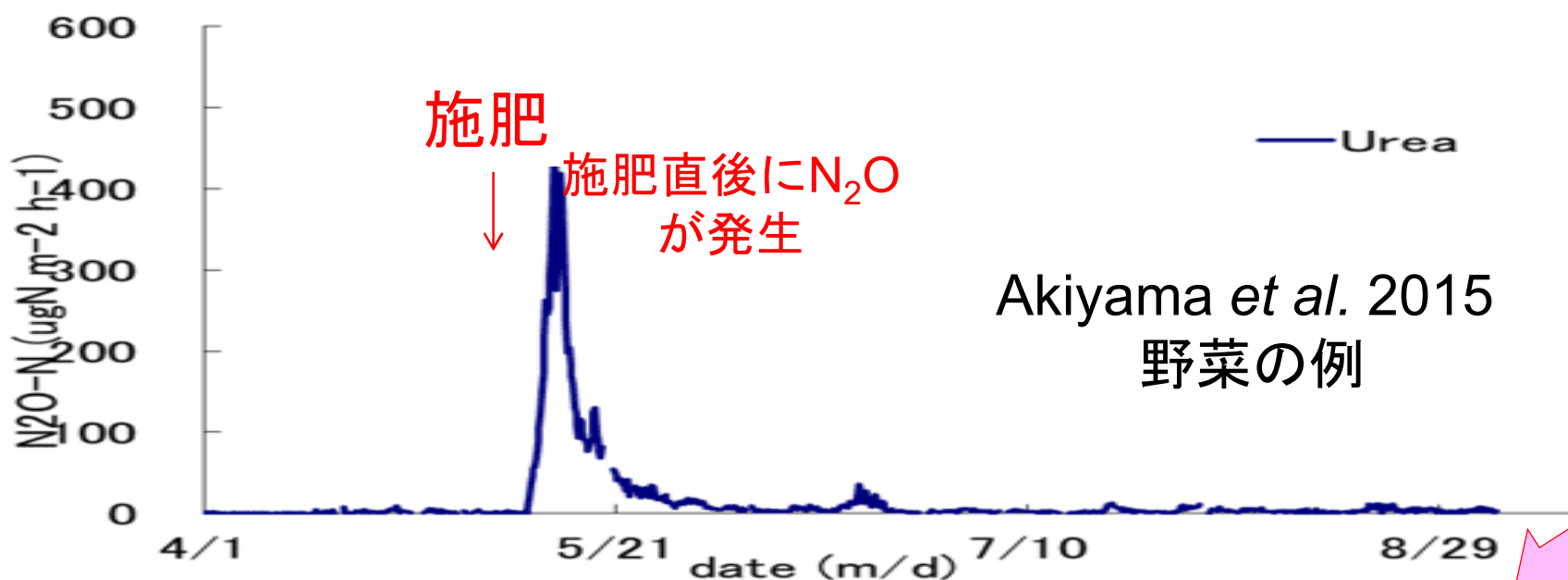
嫌気的環境

団粒中心部は嫌気的環境で、表面は酸化環境であり、微生物の棲み分けと土壌機能の分化がN₂O削減に重要



Andosol 2011

N₂Oフラックス

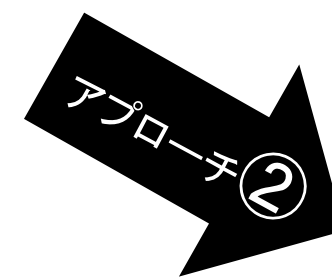
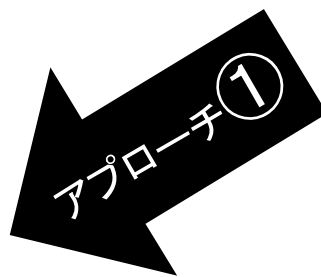


N₂O除去に好ましい土壤団粒の物性・要素

微生物資材
作製時の指針

- 孔隙(孔隙サイズ、closed孔隙率)
- 粘度 鈹物含有量
- 電子供与体(エネルギー源)
- 酸化還元度(低酸素)
- 構造安定性(耐水性、耐乾性)
- その他(N₂O還元活性の持続性)

目的：土壌における微生物安定化機構解明と
肥料由来N₂O除去微生物資材の開発



2つのアプローチと成果物

人工団粒

人工担体

原料・アプローチ

- ・天然の鉱物が原料
- ・高N₂O除去微生物群集や単一菌を導入

原料・アプローチ

- ・多孔質材料を対象に加工して最適化
- ・N₂O除去菌の複合系等を導入

ある多孔質資材にN₂O還元細菌を導入し、定着能力を評価中のSEM
(走査型電子顕微鏡)イメージ

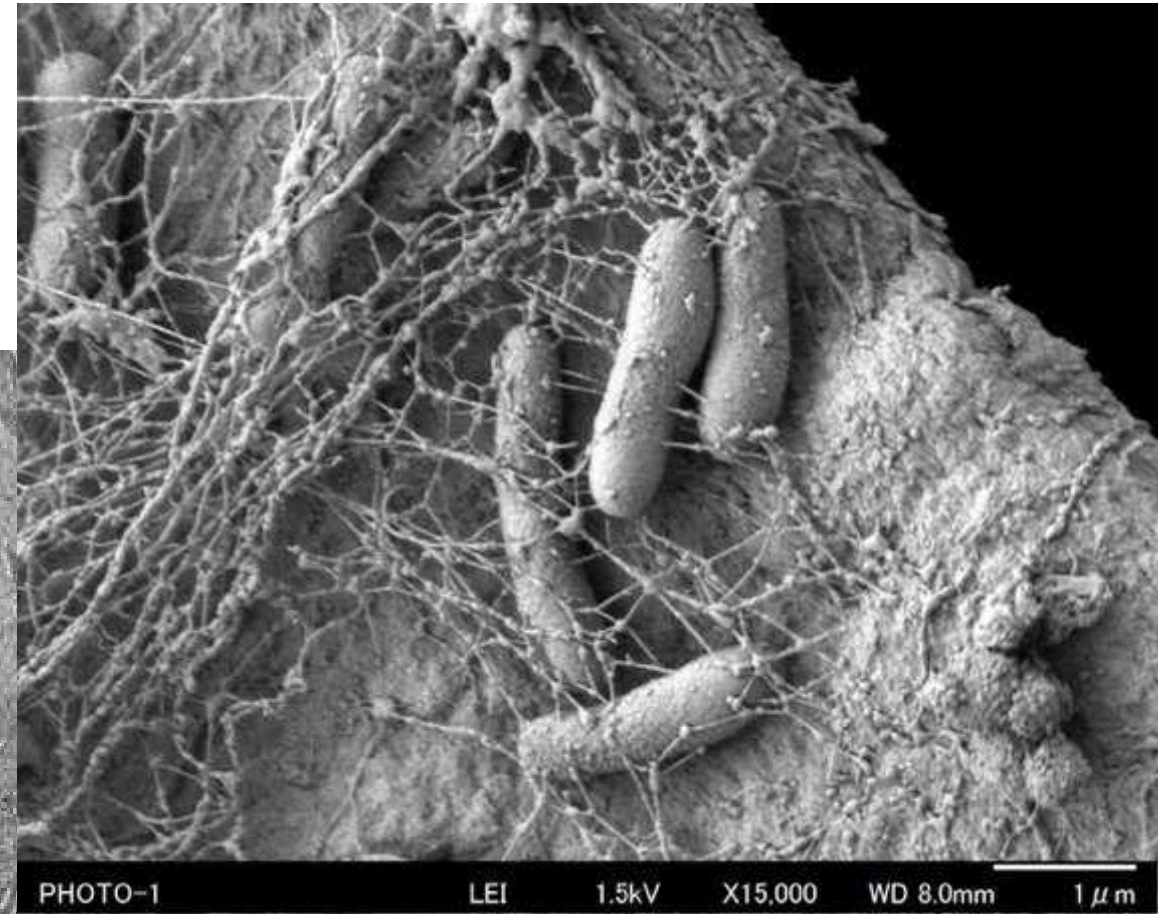
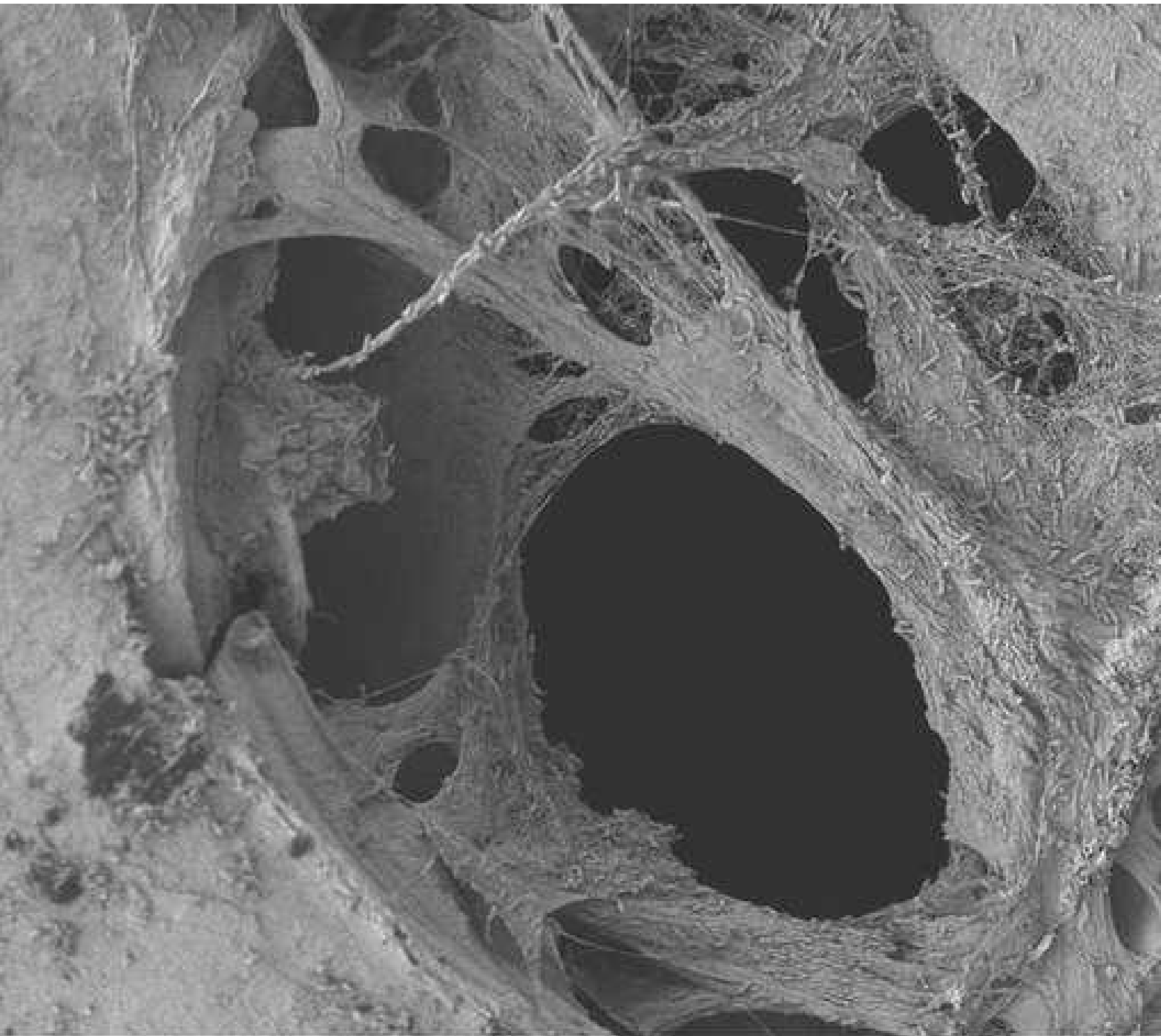


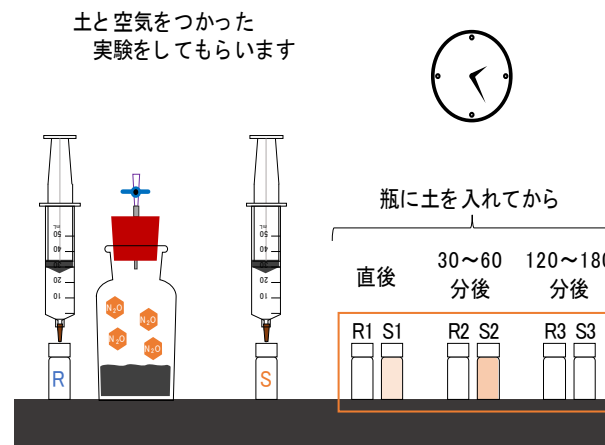
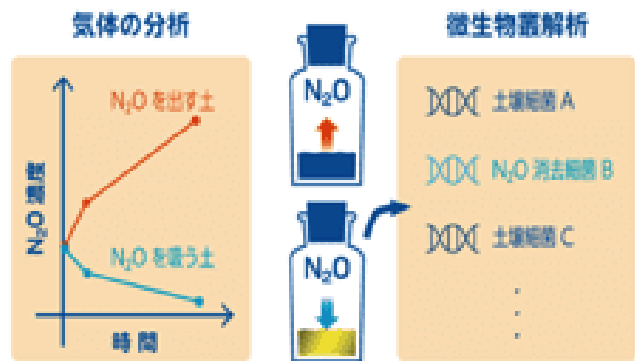
PHOTO-1 LEI 1.5kV X15,000 WD 8.0mm 1 μm

多孔質資材の内部断面の表層を走査型電子顕微鏡で観察して微生物が担体内部に定着できていることを確認



PHOTO-1 LEI 1.5kV X700 WD 8.0mm

市民科学「地球冷却微生物を探せ」の概要



市民科学 (国民との対話)

知る

触る

話す

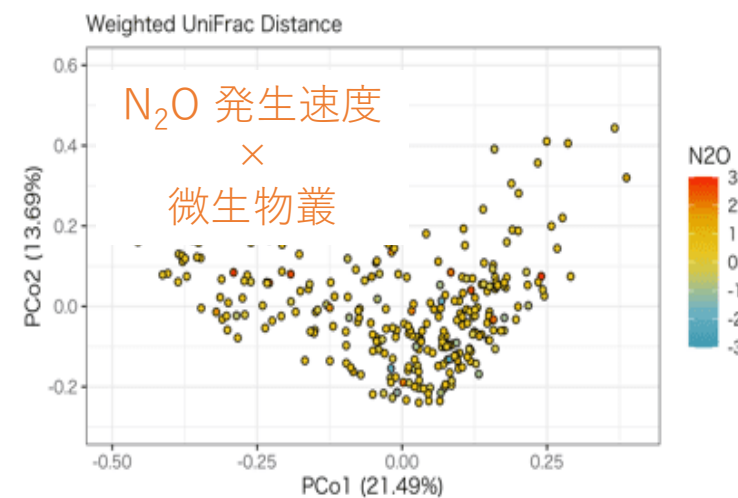
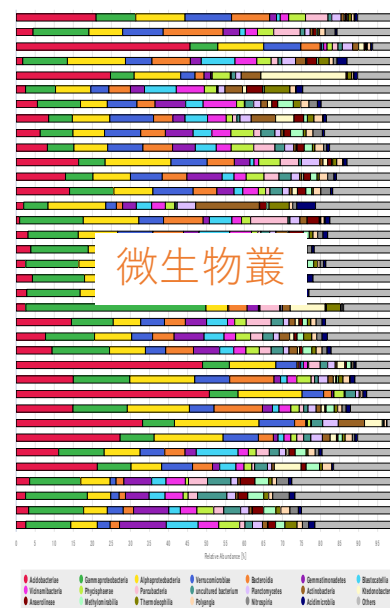
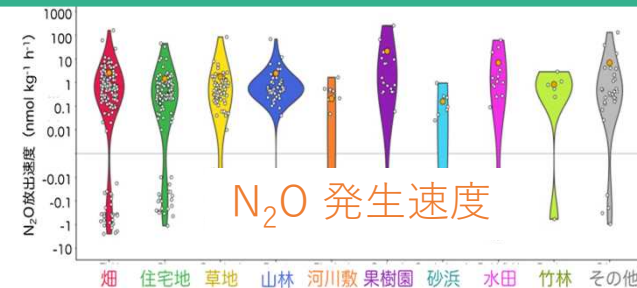
創る



【地球冷却微生物を探せプロジェクト】
ビデオマニュアル実験編
674 回視聴 - 9ヶ月間

ASOIL Project

市民科学 #soilnobottle #citizen-science #科学 #研究 #理科 #実験 #論文 #実験 #土壌 #環境 #地球温暖化 #微生物 #地球冷却



Dig up! 2022

8.30 The 20:00-21:00 【おらが圃】の土で気候実験に立ち向かう
藤井 一志 博士

7.30 The 20:00-21:00 土壌と気候変動 - 農業と環境を繋ぐ -
仁科 一哉 博士

8.11 The 20:00-21:00 土壌微生物の住み家はどうか? 土壌微生物の住み家はどうか?
杉田 明大 博士

8.28 The 20:00-21:00 生物多様性と土壌生態系
栗田 宏和 博士

オンラインデータ説明会・ELSIワークショップ

Dig up! セミナー (参加者限定特典)

市民科学(Citizen Science)は第6期科学技術政策やEU Soil が重要課題と記載



□ 地球冷却微生物を見つける

高い N_2O 消去活性をもつ微生物を探索し、その微生物がすむ環境の特性を明らかにし、 N_2O 削減微生物資材としての利用を目指す。

□ 市民との対話、知識の共有、ユーザー開拓

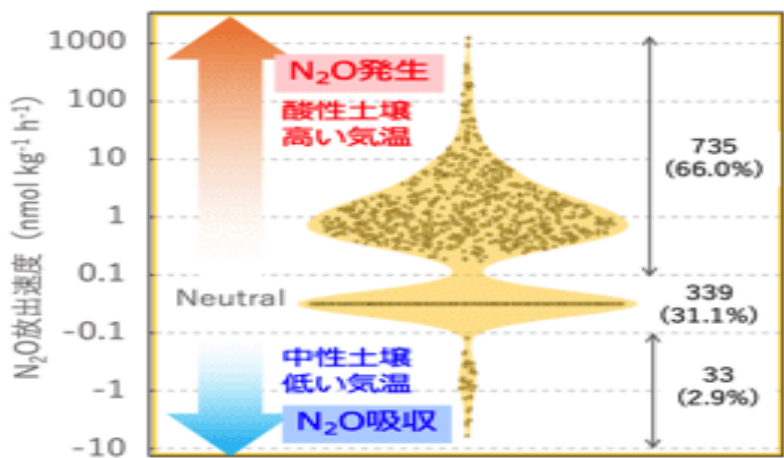
実験を通じて、市民に地球環境・土壌・身のまわりの微生物へ興味をもってもらい、科学を楽しむ文化を醸成する。双方向コミュニケーションによりGHG削減微生物等の社会実装に必須の課題を探る。

□ 土壌と微生物のデータを蓄積する

日本中から膨大な数の土壌と空気を収集し、その大規模なデータ(微生物叢、メタデータ)で土壌微生物研究を変革できる。

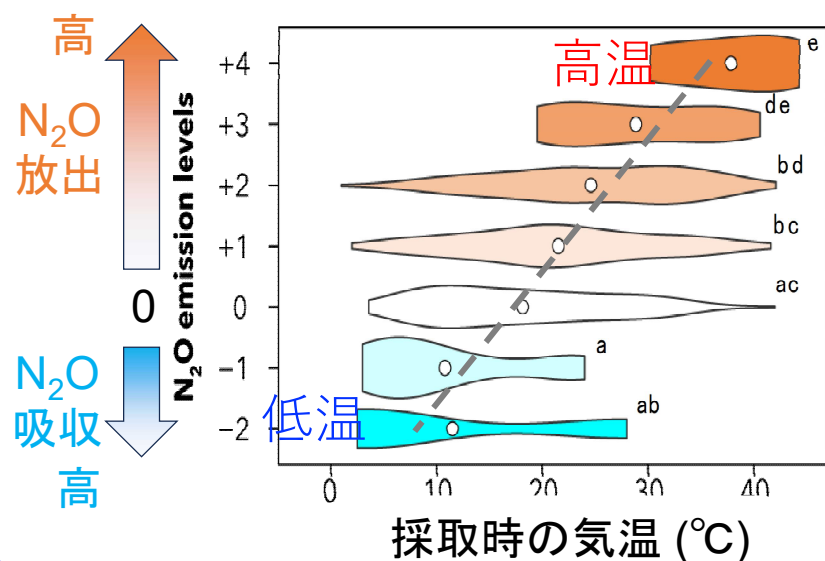
■ 全国からサンプルとデータの収集

N₂O吸収土壌が確かにある
3.7% (53/1443)



N₂O速度・微生物叢・
環境データ

N₂O速度は気温とpHに依存



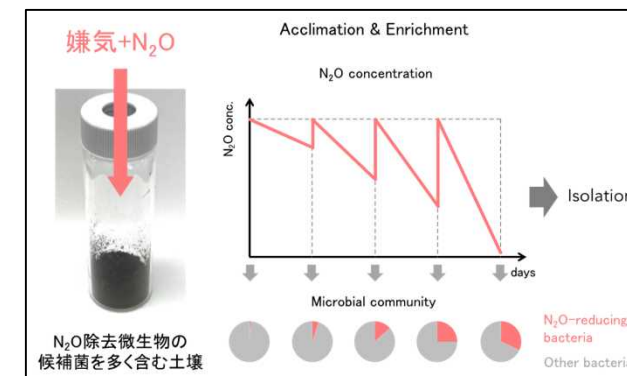
土壌

■ N₂O除去微生物の分離・培養

ダイズ根粒菌(44株)



一般微生物(7株)



予測

微生物学として
面白い

分離株

■ データベース

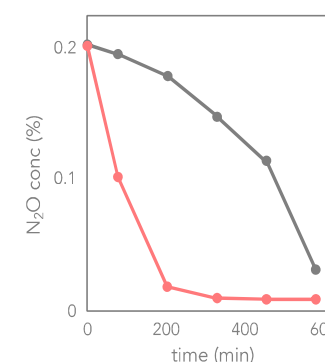


N₂O放出速度
16S rRNA
*nosZ*遺伝子
環境データ

→ 機械学習

比較

■ 分離株の性能評価



N₂O還元
活性比較
↓
株の選抜

試料付き情報基盤

新規N₂O除去微生物

「市民科学」の成果 (1) ダイズ根粒菌

SG09タイプの*nosZ*遺伝子が
検出された土壌

SG09タイプの*nosZ*遺伝子が検出された場所の特徴

宮城県、京都府、東京都、
北海道など28都道府県から

全81サンプル
(81/1256; 3.9%)



ダイズ接種実験

前回
43地点の土 (43/820)
→ 4地点から44株

今回
38地点の土 (38/1256)
→ さらなる分離株

前回

今回

山の極(麓)

河川の脇

砂浜



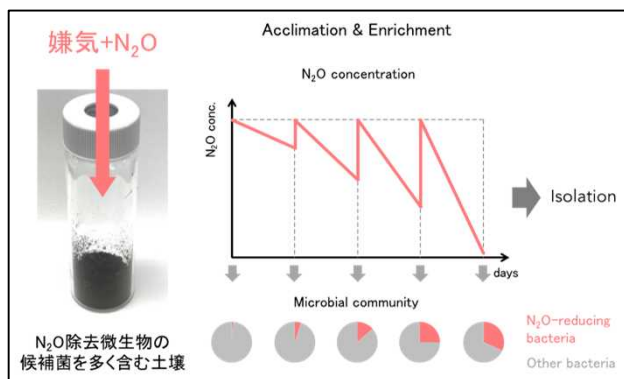
岡山県、広島県、宮城県など
13サンプル

長野県、群馬県、京都府など
33サンプル

神奈川県、東京都、宮城県など
5サンプル

新たなSG09タイプの*nosZ*保有土壌を発見：場所は前回と類似
新たな高N₂O除去型ダイズ根粒菌を分離できる可能性

「市民科学」の成果 (2) 一般微生物



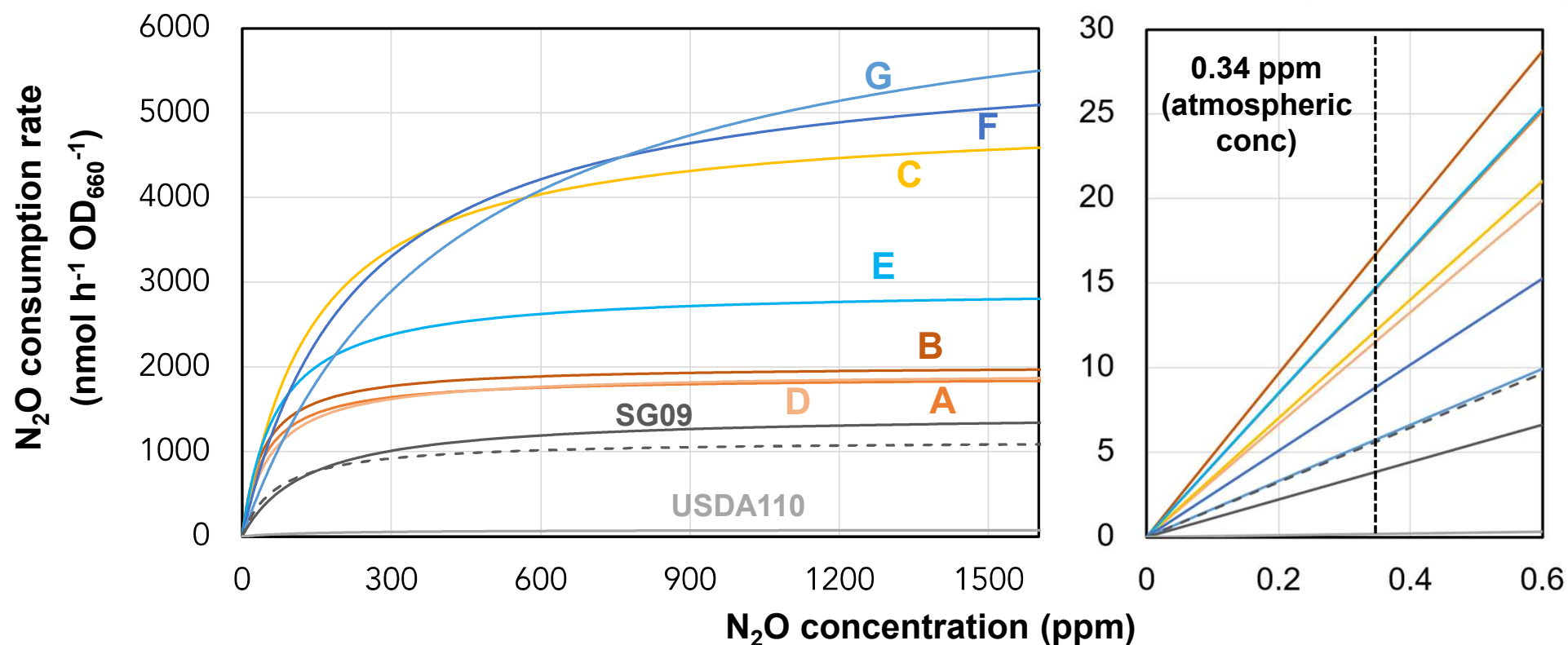
土壌集積培養実験



ダイズ畑の土壌から新たにN₂O還元菌を2属7株分離した
→ 新規株A~G



N₂O自動連続測定系で細胞のN₂O還元活性の反応速度論的解析

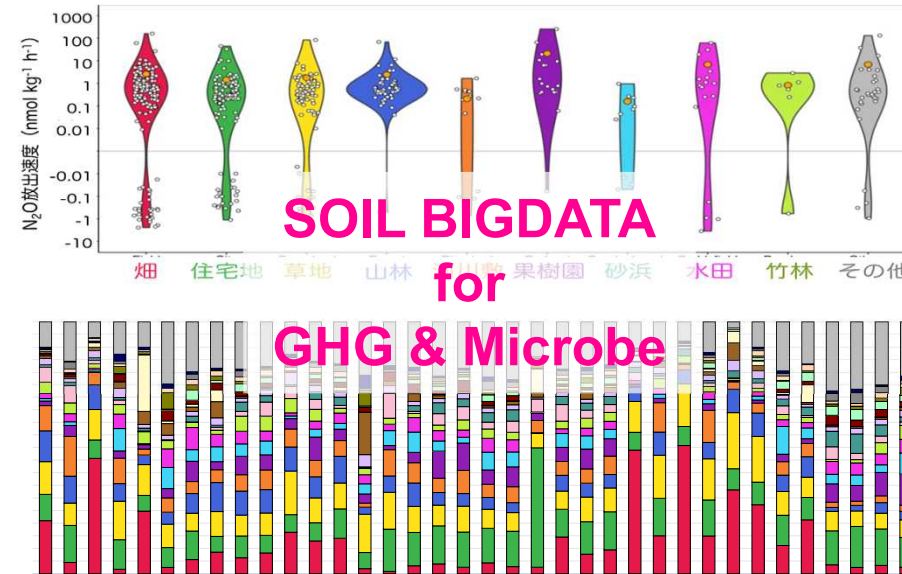


Strain	V_{max} (nmol h ⁻¹)	K_s (ppm)	$V_{0.34}$ (nmol h ⁻¹)	Medium
新規株A	1886	44	14.4	R2A
新規株B	2020	42	16.4	R2A
新規株C	4994	142	11.9	R2A
新規株D	1935	58	11.3	R2A
新規株E	2925	69	14.4	R2A
新規株F	5815	228	8.7	R2A
新規株G	6932	418	5.6	R2A
<i>B. ottawaense</i> SG09	1451	131	7.4	HM
<i>B. diazoefficiens</i> USDA110	82	157	0.3	HM

7株中4株がSG09に比べて低い K_s 値、5株が大気濃度でのN₂O還元速度が高い！

N₂O除去分離菌の細胞レベルのN₂O還元パラメーター取得

サイバー空間(データ世界)



AI

データ取得の高度化

データ利活用の促進

読

フィジカル空間(現実世界)



市民科学データを長期的に広範なステークホルダーで活用する基盤整備

■ 2023年の7つのメディア報道により市民の温室効果ガスN₂Oへの認知を拡大



8/18 NHK 「シチズンラボ」



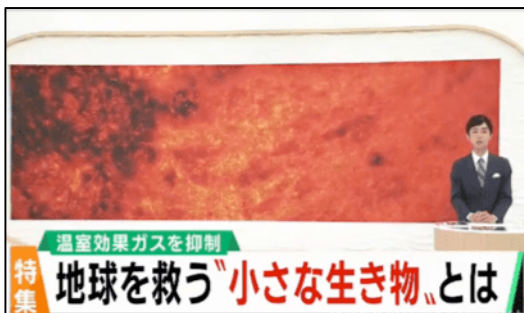
5/22 NHKサイエンスZERO



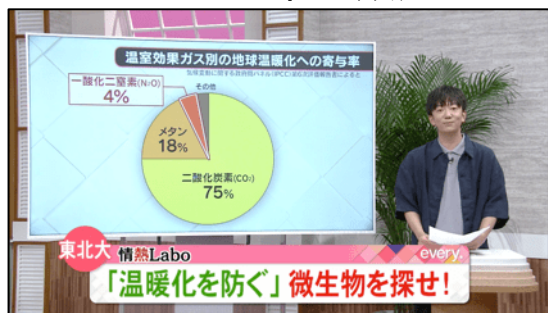
3/6 ABEMAnews



10/27 tbc東北放送



5/24 東日本放送



6/30 宮城テレビ放送



9/17 テレビ朝日系列「松岡修造のみんなが晴れ」



■ 実験を通じて科学を楽しむ文化を醸成 ■ 双方向コミュニケーションによりGHG削減微生物利用の社会実装に必須の課題を議論

南澤MS主導で共催シンポジウムを開催(2023)

第4回日本植物生理学会年会シンポジウム
植物×土壌×微生物の人工デザインで地球温暖化を止める

日時: 2023年3月15日(水) 14:00~17:00
場所: 東北大学IPキャンパス

化学肥料の使用による作物生産の増大、人口増加に伴う農地の拡大は温室効果ガスである一酸化二窒素やメタンの増大を加速させてきた。
ムーンショット研究「資源循環の最適化による農地由来の温室効果ガスの排出削減」では、植物、土壌、微生物の機能を組み合わせることで新たな生態系のデザインを目指している。本シンポジウムではプロジェクトの中から4つのピックを取り上げ、その目的と取り組みについて紹介する。

14:00~14:15	はじめに	プロジェクトマネージャー 南澤 実(東北大学)
14:15~14:45	温暖化緩和のための土壌微生物の機能と人工設計デザイン	和頭 朗大、松岡 かつり(農研機構)
14:45~15:15	植物共生の最適化によりN ₂ O削減ダイズ栽培系をつくる	今泉(安輪) 温子(農研機構)
15:15~15:30	休憩	
15:30~16:00	根系デザイン: メタン根排出抑制の設計を目指して	宇賀 優作(農研機構)
16:00~16:30	シチズンサイエンスによる温室効果ガス削減微生物の探索	大久保 智司(東北大学)
16:30~17:00	総括討論	

The 36th JSME & The 13th ASME Program

微生物N₂O削減研究の最前線

Date 28th - 30th November 2023
Venue Hamamatsu, Japan
Hamamatsu ACT Congress Center

2023/3/15 第64回植物生理学会年会
2023/11/30 微生物生態学会第36回大会

「地球冷却微生物を探せ」から考える市民科学の未来



2023/10/8 日本科学振興協会(JAAS)

●論文	68報 (うち投稿中15)	●招待講演	31件
●研究発表・講演	109件	●各種受賞	7件
●特許	6件 (国際1件, 国内2件, 外国3件) + 申請予定3件		

● 報道関係(テレビ以外)

- 2021/7/16 日本経済新聞電子版
「東北大、根粒菌の共生ゲノム領域の柔軟性を明らかに」
- 2021/9/20 日刊工業新聞
「地球を救え！ムーンショット NEDOプログラム」
- 2022/1/4週刊ポスト
「2030年の気温上昇はまだ食い止められる 脱炭素に挑む情熱科学者たち」



● 国際シンポジウム開催



2021/3/1参加登録716名, 参加国 27ヶ国

● NEDOサイトビジット



2023/12/11

研究活動を市民・科学者・企業・NEDOに知ってもらおう！

風化促進技術“A-ERW”の開発(CO₂)

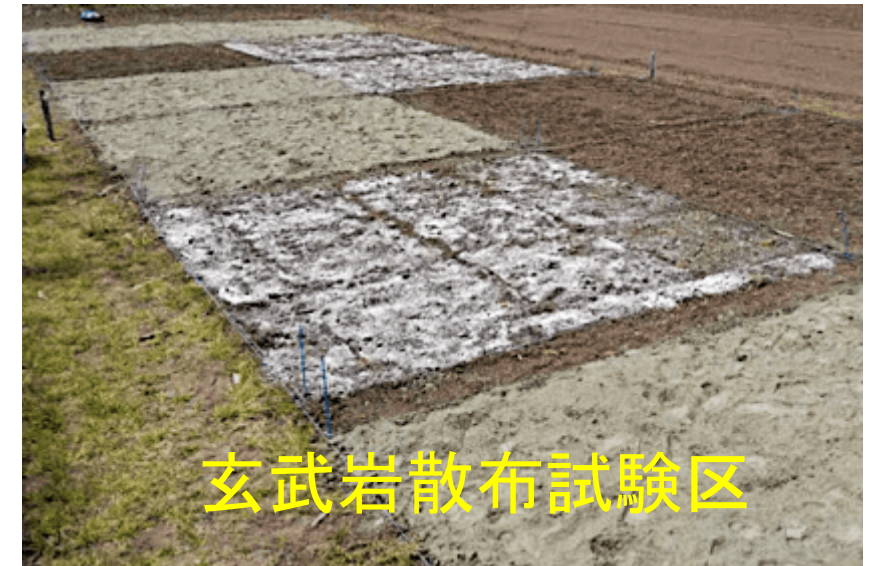
岩石による大気CO₂除去



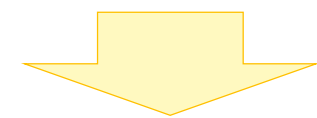
中垣
PM



森本
PM



市民科学研究のシステムでコラボ開始



土壌団粒は鍵！



将来CO₂もN₂Oも削減する技術？

農地由来の温室効果ガスの排出削減(N₂O)

N₂O還元微生物の人工団粒によるN₂O除去



南澤
PM

