

番号: A-10-1J

PJ: 岩石と場の特性を活用した風化促進技術“A-ERW”の開発

テーマ名: プロジェクトの概要と適用岩石の拡大

担当機関名: 早稲田大学, 三菱重工業

問合せ先: takao.nakagaki@waseda.jp



### A-ERWの全体概要と炭素会計情報基盤

アルカリ度のモニタリングによる海洋固定の炭素会計の計算例  
Kanzaki, et al., PNAS Nexus, 2023, 2, 1-9  
https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad059

プロジェクト単位の精細な固定量算定  
Σプロジェクト = All Japanのポテンシャル  
技術経済分析 TEA  
ダイナミックLCA (~2050)

岩石に応じた前処理技術と所要エネルギーデータ

砕石事業所  
岩石採掘  
粉砕  
岩石の地理的分布 (詳細版: 北海道)  
岩石の鉱物組成データ

砕石エネルギー実測値の例 (玄武岩ダスト)  
粉砕能力: 900~1000 kg/h  
平均電圧値: 205.6 V  
平均電流値: 56.65 A  
平均電力: 20.17 kW  
950kg処理として, 20.17 kWh = 72612 kJ = 76.4 kJ/kg  
0.010 t-CO<sub>2</sub>/t-Rock (売電元の排出係数)  
※J-LCAのCR2 PJ報告書 0.013 t-CO<sub>2</sub>/t-Rock

蛇紋岩・橄欖岩

アルカリ玄武岩

日本型ERWの成功のカギ:  
3条件の重なるロケーションの選定 = ERWに適した岩石地層 (道総研・全国大は産総研)  
× 砕石業・粉砕業の事業所 (砕石協会・タルク協会等)  
× 散布適用の適地 (国立公園、人口密集地、林道なし等を除外)

森林傾斜地 休廃止鉱山  
石灰中和処理  
石炭中和処理  
Ca<sup>2+</sup> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>  
CO<sub>2</sub>  
海のアリカリ化

農地散布モデル計算  
CO<sub>2</sub> 鉱物化・土壌炭素収支 (QPAC)  
根域モデル精緻化・精度向上  
N<sub>2</sub>O 削減は市民科学として 南澤PMプロジェクトと協力

最も単純な炭素会計 → 気固接触ハウス  
北海道砕石業のエネルギー消費実データ入手

分散後:  
アルカリ度 2.40mmol/L  
pH=8.05  
DIC=2.12mmol/L  
ΔDIC=+0.04mmol/L  
⇒ 表層海水へのCDR (残存率83%と仮定)

分散前:  
アルカリ度 2.35mmol/L  
pH=8.04  
DIC=2.08mmol/L

海→河川→地下水については本事業では論文ベース  
海洋アルカリ化 CO<sub>2</sub>吸収増  
海洋生物による炭素固定

農地耕起 森林への残留蓄積  
炭素収支の動的変化  
散布時 1年後 数年後

京都府立大学  
京大PMプロジェクトと協力

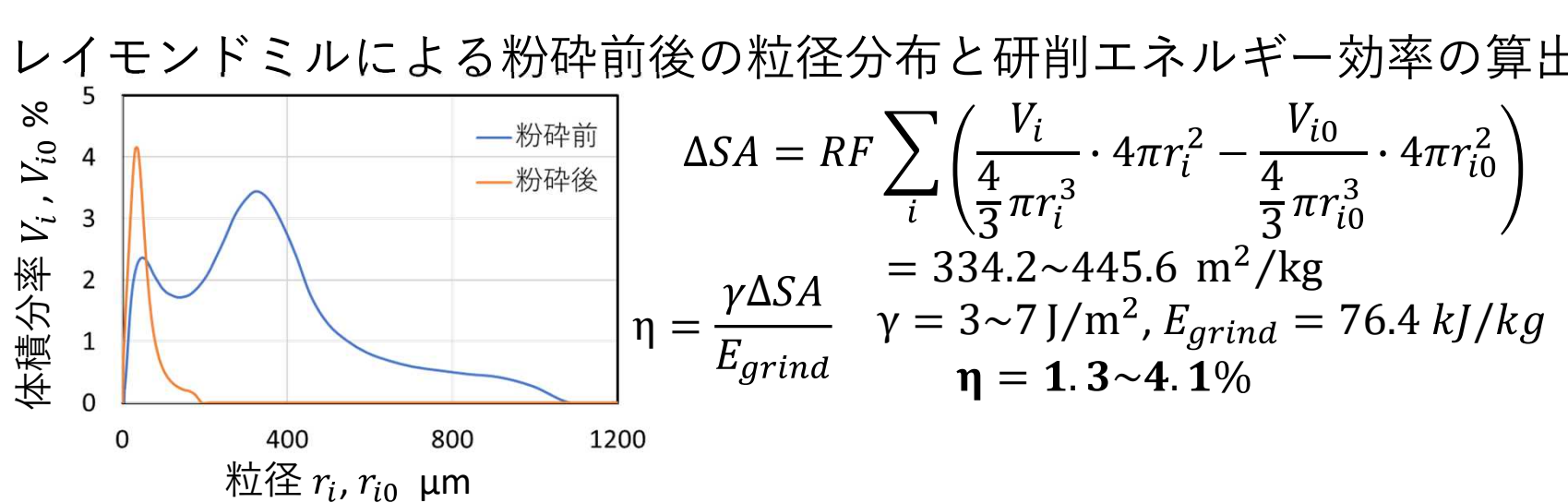
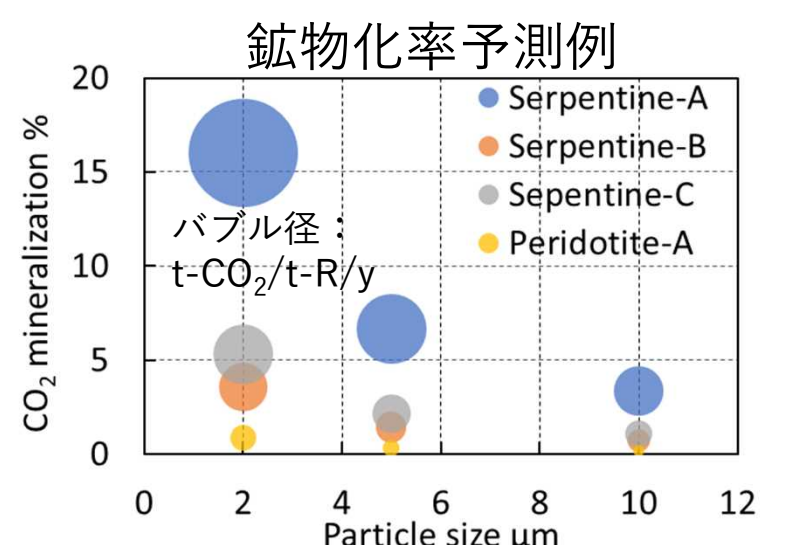
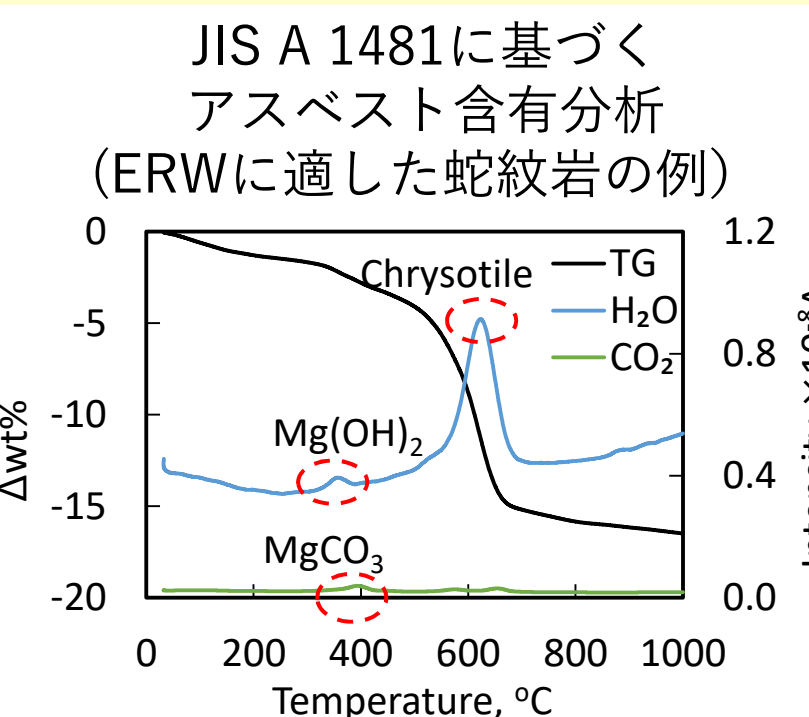
文字の凡例  
黒: 森本PMのERWプロジェクトと共有 Firewall/とりまとめ QJ Science  
青: A-ERW  
水色: 森本PMチーム実施  
赤: 2PJ対象外 (論文ベース推算)

北海道大学  
HOKKAIDO UNIVERSITY  
国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所  
地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 (道総研)  
国土防災技術株式会社

JIRCAS 琉球大学 北海道大学 東京大学 農研機構

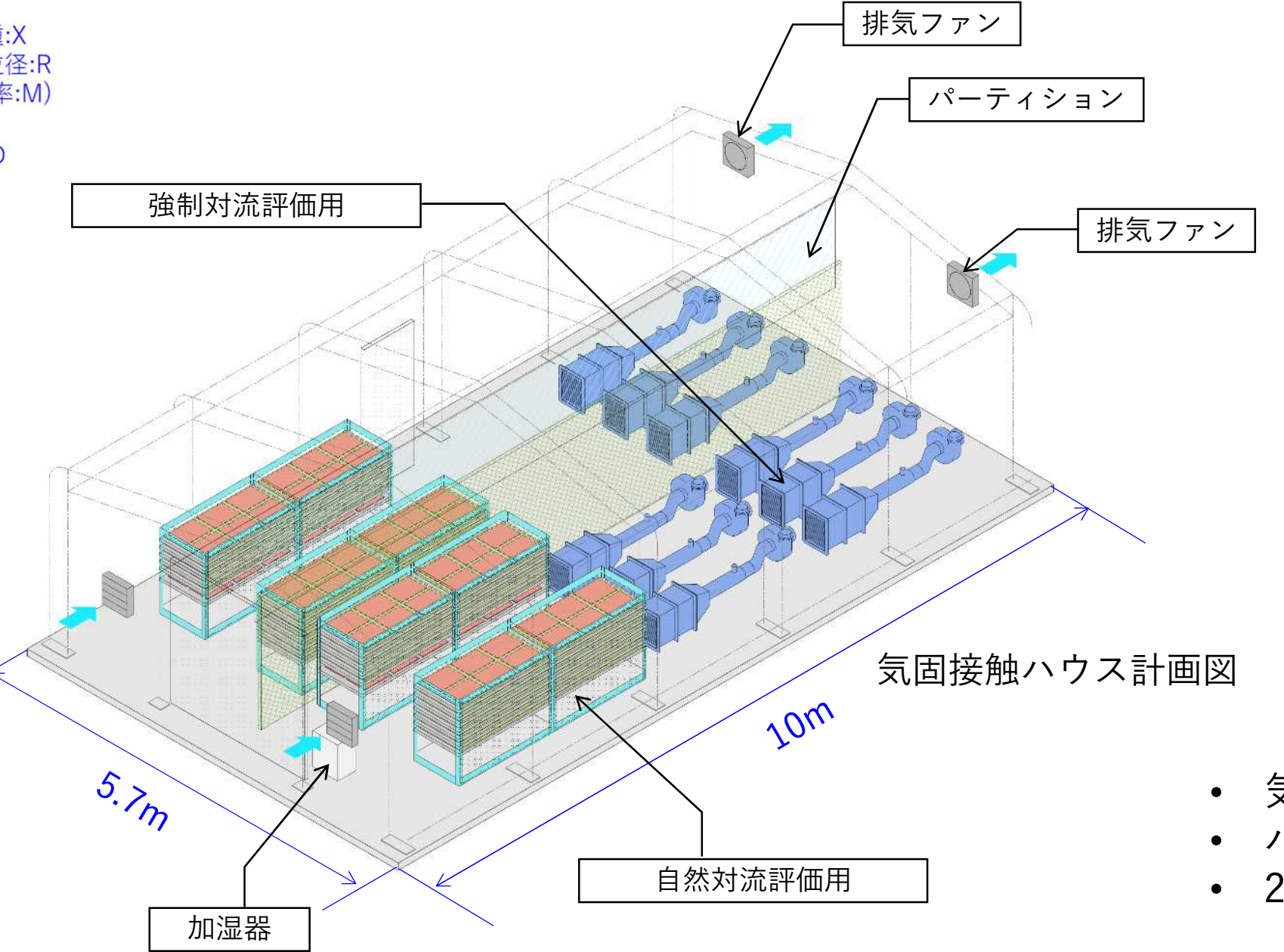
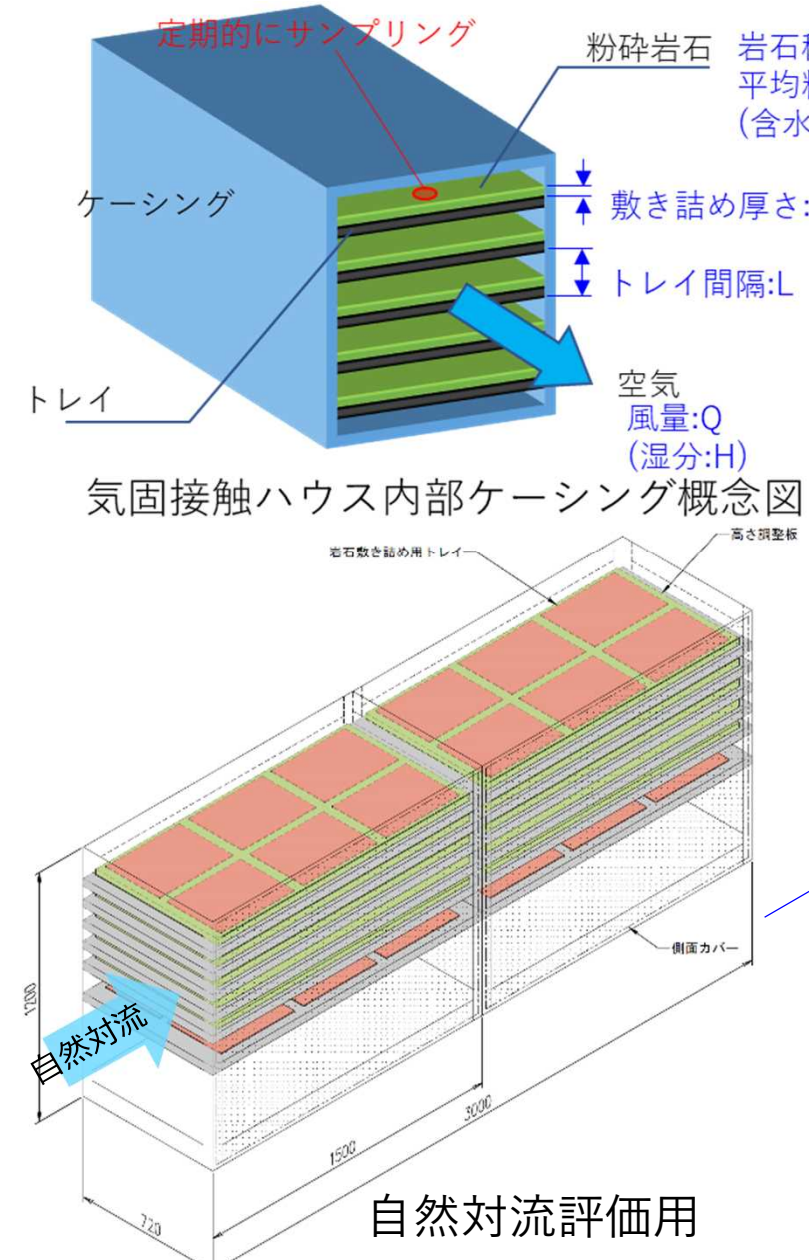
### A-ERW技術適用による年間の面積当たりのCDR量ポテンシャル

	気固接触ハウス	休廃止鉱山	森林傾斜地	農地 (一例)
t-CO <sub>2</sub> /ha/y	6,600~13,200	50 (サイトあたり)	0.3	3.0
ポテンシャル試算例	33,000~66,000 t-CO <sub>2</sub>	50 t-CO <sub>2</sub> /y	37,500 t-CO <sub>2</sub>	20,000 t-CO <sub>2</sub>
条件	北海道の一つの砕石事業所で 0.1ha×50サイト=5 ha程度を基準 鉱物化ポテンシャル 0.5t-CO <sub>2</sub> /t-R 鉱物化率 44% 敷地面積0.1ha/サイト 岩石量3,000~6,000t/y/サイト 年に2mずつ採掘	鉱物化ポテンシャル 0.0492t-CO <sub>2</sub> /t-R 鹿部町精進川鉱山に1000 t/y ※廃水源のため面積制約ではなく、河川や廃水処理場への投入総量に制約	農地×1/10=0.3と仮定 鹿部町精進川鉱山に20 t/ha (農地の1/2) 全国の森林総面積は 2.5×10 <sup>7</sup> ha×1%に散布	ソバ畑の全国作付け面積 65,200 ha×10% ※福島でのソバ畑への実績, 150 t/ha散布で0.59 t-CO <sub>2</sub> /ha/2.5か月から推算 全農地は4.3×10 <sup>6</sup> ha

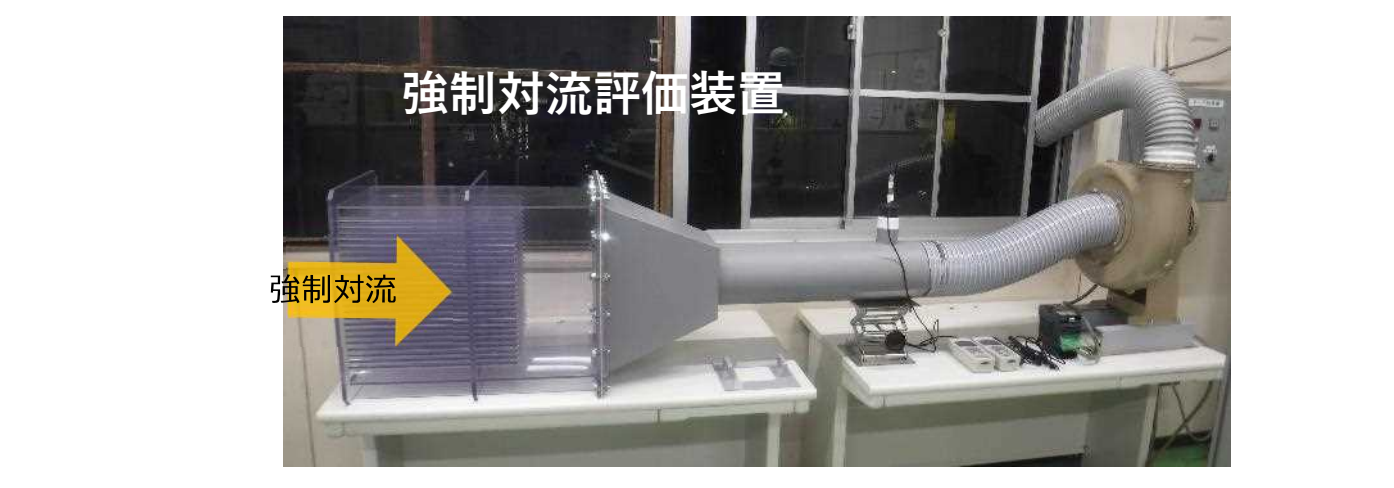


Beerlingらの論文を基にしたベンチマーク風化促進の速度

農地散布	単位	玄武岩質	
		アルカリ	ソレライト
SS:土壌固定	t-CO <sub>2</sub> /ha/y	1.42	1.55
	t-CO <sub>2</sub> /t-R/y	0.035	0.039
OS:海洋固定	t-CO <sub>2</sub> /ha/y	6.66	2.70
	t-CO <sub>2</sub> /t-R/y	0.166	0.068
SS+OS	t-CO <sub>2</sub> /ha/y	8.08	4.25
	t-CO <sub>2</sub> /t-R/y	0.202	0.106
ポテンシャル	t-CO <sub>2</sub> /t-R	0.345	0.320
	1年後風化	62.6%	50.9%



SS: Soil Sequestration, OS: Ocean Sequestration  
100年後も83.1%が残存と仮定



- ・ 気固接触ハウスの詳細設計、建築確認申請を完了
- ・ ハウス建設済み、2024年2月までに内装設備完了予定
- ・ 2024/4~2025/3 (1年間) でCO<sub>2</sub>鉱物化データを取得予定



## 岩石(鉱物)の風化を促進するためには?

### 鉱物の溶解速度一般式

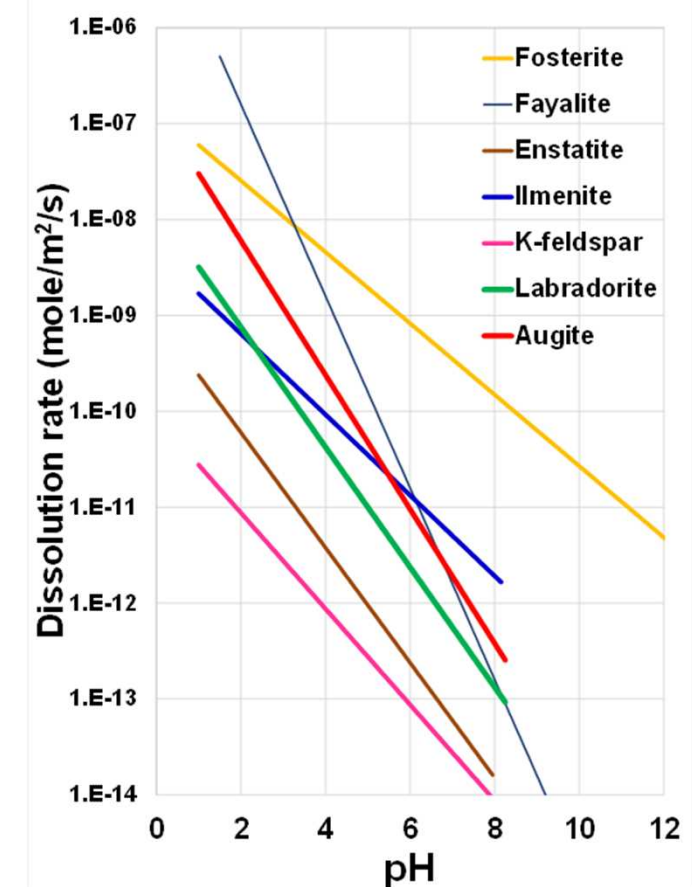
$$r = A_s k_+ a_{H^+} \left( 1 - \frac{Q}{K} \right)$$

平衡からのズレ

r: 鉱物の溶解速度  
 A<sub>s</sub>: 鉱物の反応表面積  
 K<sub>+</sub>: 鉱物固有の速度定数  
 a<sub>H<sup>+</sup></sub>: H<sup>+</sup>の活量(pH)  
 Q: イオン活量積  
 K: 平衡定数



農地への玄武岩粉末の散布の様子



鉱物の溶解速度のpH依存性

- (1) 反応表面積を大きくする
- (2) 反応溶液のpHを低くする
- (3) 平衡からのズレを大きく保つ

## 休廃止鉱山廃水および森林傾斜地へ適用を考えた理由



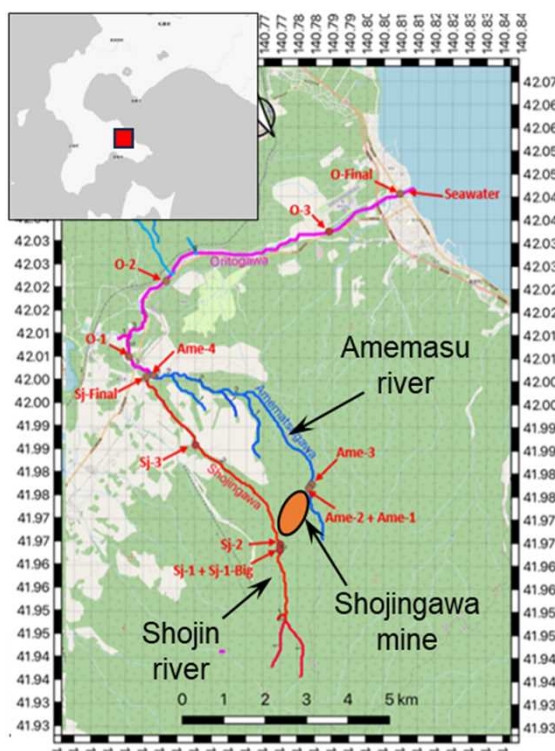
- 強い酸性の水が流れる河川がある。
- 国内でも100カ所程度の対策が必要な鉱山廃水がある。
- 長年調べられてきているので、岩石を投入する前の状況がよく把握されている場合が多い。
- そもそも有害な重金属等が含まれていることが多いので、玄武岩投入の理解が得られやすい。
- 玄武岩によって廃水が浄化されるかもしれない。



- 国内には広大な森林地がある(全国土の2/3)。
- 降雨時には大量の雨水が表層を流れる。
- 玄武岩の投入によって森林土壌の改善につながる可能性がある。
- 地滑り防止につながる可能性がある。

## 休廃止鉱山での小規模現場試験

### 試験の詳細



鉱山廃水が流入する2つの河川の水質

[mg/L]	Amemasu	Shojin
pH	3.04	3.00
Fe	16.22	26.37
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	549.69	306.31
Ca	15.09	6.78
Mg	2.31	1.87
Na	4.30	3.13
K	2.33	3.35
Si	20.75	11.28
Al	10.42	5.31
Cl	6.04	6.45
As	0.103	0.087
Pb	0.101	0.056

小規模現場試験を実施した休廃止鉱山とその廃水が流れる河川の位置およびモニタリングポイント

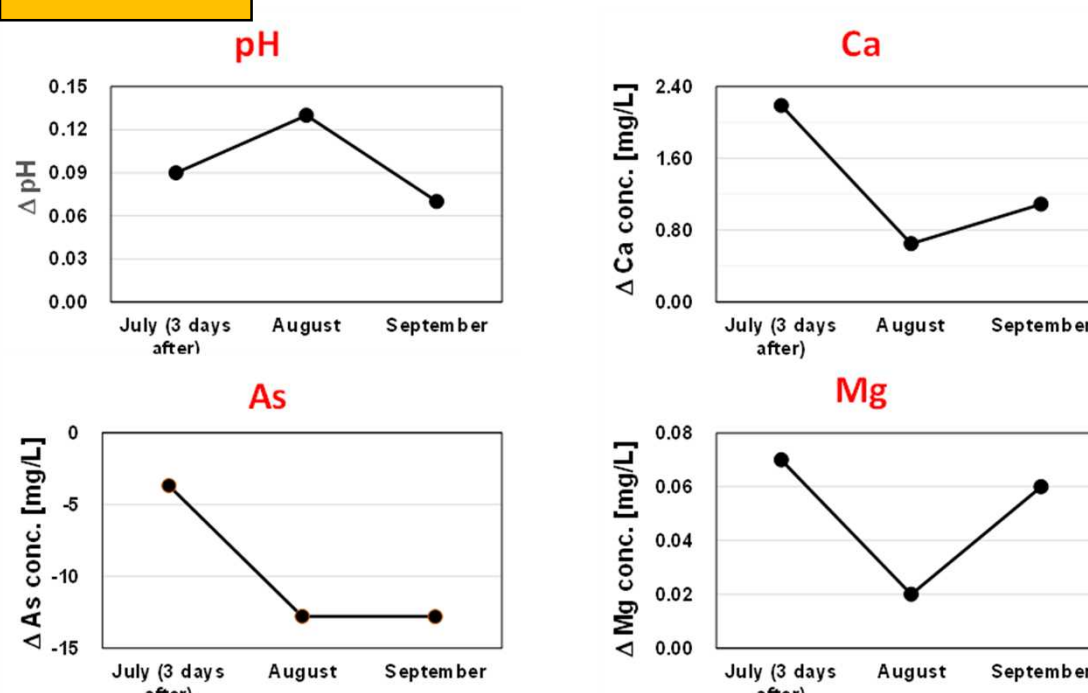
### 河川に投入した玄武岩

北海道函館市鉄山協和組(精進川に投入)  
 北海道福島町吉岡砕石工業(雨鱒川に投入)  
 製品として出荷する採石を造るときに出るダスト(細かく粉砕された岩石)を使用  
 粒径: 1-2mm φ  
 ポリプロピレン製(0.5mm φ)の袋に5kgずつ分取(問題が生じた時に撤去するため袋で投入)

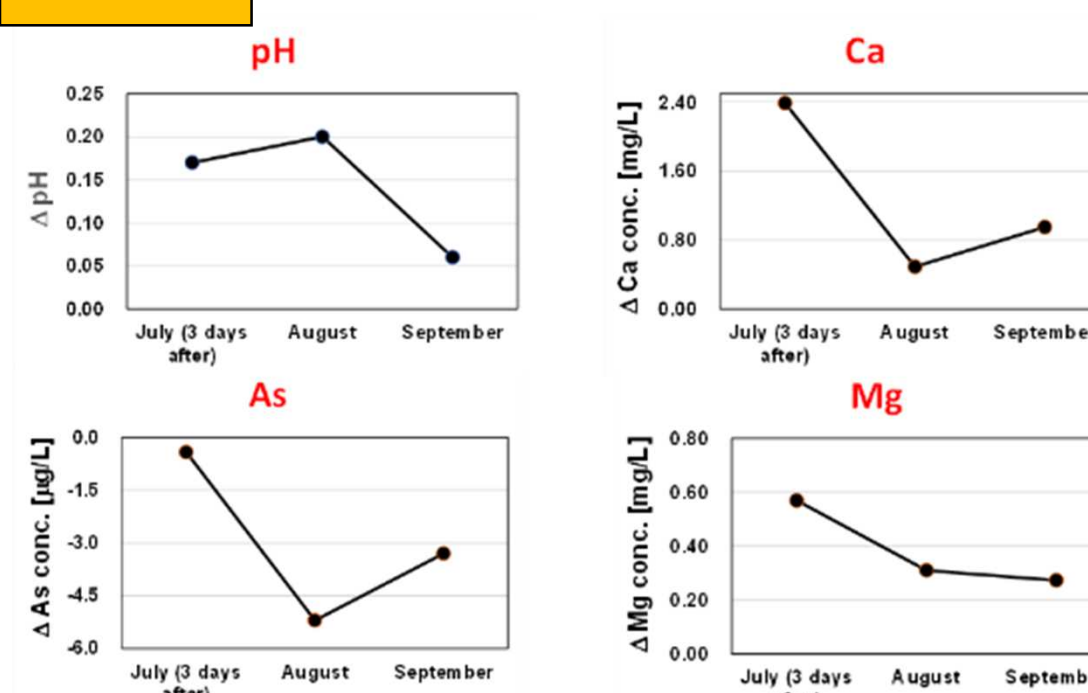


### 試験の結果: 玄武岩投入前後の水質の変化

#### 雨鱒川



#### 精進川



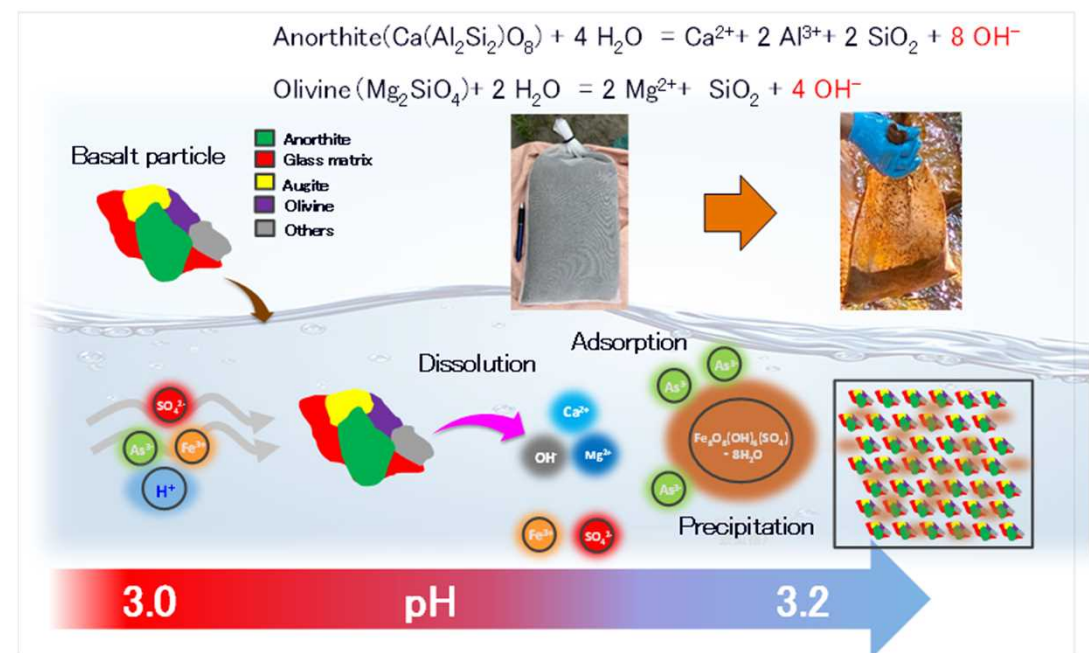
### 投入79日前後の玄武岩バックの変化



体積が半分くらいに減っていたバックもあった。

橙色の鉄の沈殿物が大量に生成していた。

### 玄武岩の投入で何が変わったか?



- pHが上昇していた。
- 玄武岩含有鉱物からCaやMgイオンが溶出した。
- 廃水に含まれるヒ素イオン濃度が低下していた。

酸性鉱山廃水への玄武岩の投入で、風化が促進され、ヒ素濃度は低減していた。

## 森林傾斜地での小規模現場試験

### 試験の詳細

メインプロット外観



休廃止鉱山のある雨鱒川流域にある森林傾斜地で実施

ズリ区(傾斜: 約20°)

森林区(傾斜: 約30~35°)

### 森林傾斜地に投入した玄武岩

北海道福島町吉岡砕石工業  
 製品として出荷する採石を造るときに出るダスト  
 岩石粉(150-250μm)とペレット(8mm)を散布  
 散布量: コントロール、4 kg/m<sup>2</sup>、8 kg/m<sup>2</sup>

### サブプロット



### 鉱物バック試験



### 原位置暴露試験



異なる条件で鉱物相の変化や反応溶液の変化を把握

## 炭素会計

本フェーズでは玄武岩と反応した休廃止鉱山廃水と森林表層水によるCDRを対象

### 自然プロセス

地球化学反応モデリングで定量化

酸性鉱山廃水による玄武岩含有鉱物の溶解  
 森林傾斜地に散布した玄武岩含有鉱物の雨水による溶解(プロセス1)

プロセス1によってインプットされたCaイオンが海洋へ流入してアルカリ度が上昇  
 ↓  
 二酸化炭素を吸収(プロセス2)

### 工業プロセス

森本Pとの連携

#### 玄武岩の採掘



#### 玄武岩の粉砕

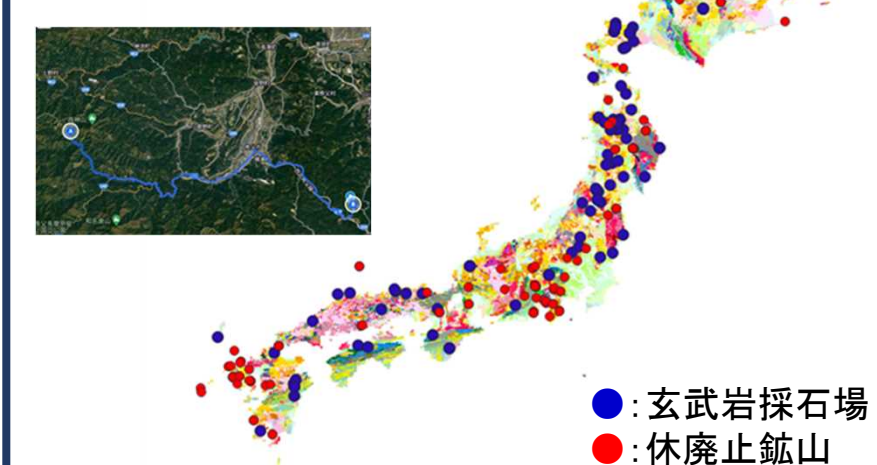


#### 玄武岩粉末の運搬



本邦に存在する休廃止鉱山で試行中

- 各鉱山で1年間に消費できる玄武岩量を地球化学反応モデリングで算出
- その玄武岩を採掘・粉砕する際に排出されるCO<sub>2</sub>量を算出
- 各鉱山の最寄りの玄武岩採石場からの道のりを導出
- 運搬する玄武岩量と道のりから排出されるCO<sub>2</sub>量を算出



●: 玄武岩採石場  
 ●: 休廃止鉱山



# 00 プロジェクトのあらまし

ムーンショット目標4では「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」を掲げ、2030年までに、温室効果ガスに係る循環技術の開発および、ライフサイクルアセスメントの観点からの技術検証が明記されている。その技術として、「炭酸塩化によるCO<sub>2</sub>吸収:岩石を粉砕・散布し、風化を人為的に加速させる技術等」との記載がある。本プロジェクトではこの目標に対し、自然岩石を利用した風化促進技術、とりわけ日本の農地を活用した風化促進におけるCO<sub>2</sub>鉱物化の加速技術と、LC-CO<sub>2</sub>の観点での炭素会計情報基盤の開発を行う。

農学班では主に、農地における事業環境調査および岩石散布農地での風化促進技術開発(01)、実環境場試験と効率的モニタリング法開発(02)、自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発と大規模実証概念設計(03)を担当している。岩石散布の効果は農地が置かれた環境条件によっても、散布する岩石の種類等によっても大きく異なることが予想されるため、多くの研究機関(京都府立大学、北海道大学、農研機構、東大、国際農研、琉球大)が参画し、カラムスケールから圃場スケールまで幅広い試験設定で研究を進めている(図00-1~3)。

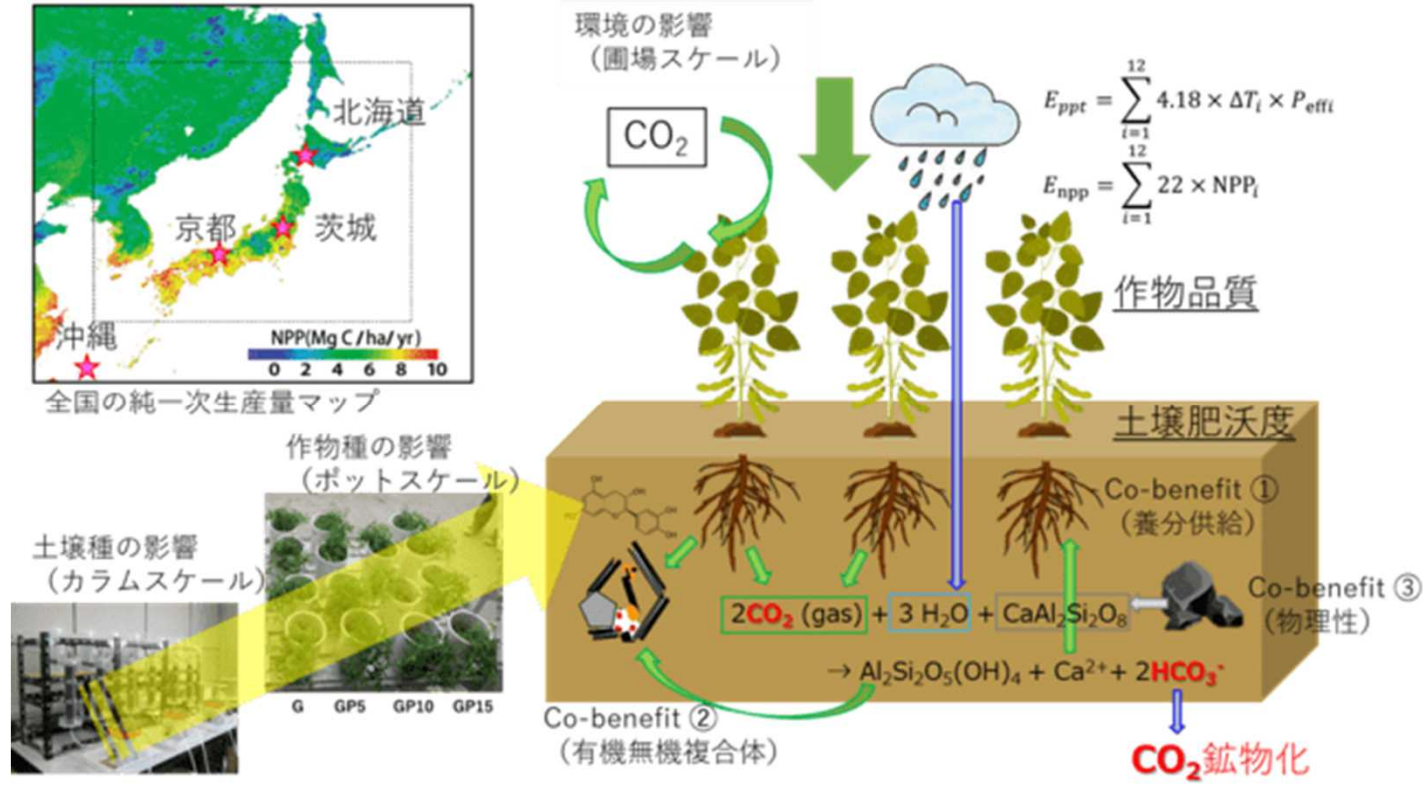


図00-1. 農学班が実施する研究計画の全体像を示した模式図

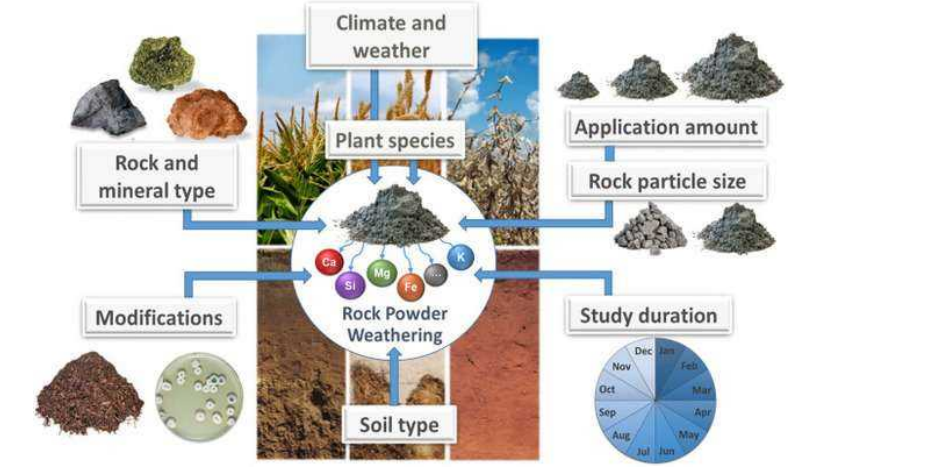


図00-2. 岩石散布による作物への養分供給 (Swoboda et al. 2022)

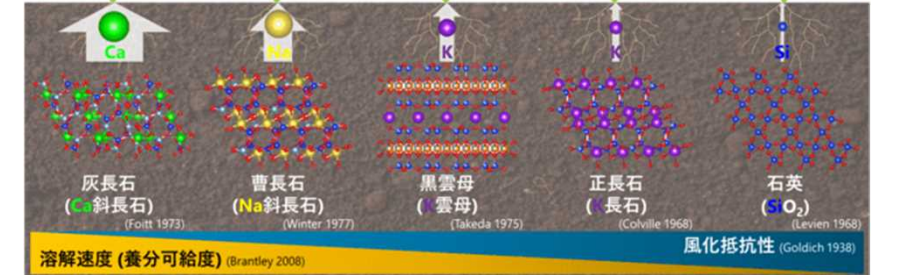


図00-3. 鉱物種ごとの風化のしやすさと供給養分の違い

# 01 事業環境調査 & 岩石散布農地での風化促進技術開発

## 事業環境調査:

岩石採掘場から近距離にある農地ほど輸送に伴うCO<sub>2</sub>発生量が抑えられるのは明らかである一方、農地の土壌タイプによる風化促進効果の違いは検証されていなかった。そこで本プロジェクトでは全国178地点の農耕地土壌の物理・化学性および鉱物組成を分析し、散布効果に影響する土壌側の特徴を調べた。その結果、火山近郊に分布する黒ボク土の多くが玄武岩と同様に易風化性鉱物を元々含んでいるため、非火山性の土壌群と比べると散布効果が小さくなる可能性が示された(図01-1)。

## 農地での風化促進技術開発:

風化促進技術開発の前段階として、農地に散布された岩石の風化や付随したCO<sub>2</sub>固定を定量する技術開発が不可欠である。そこで粉末X線回折(PXRD)法など、様々な手法を検討し、最適な定量法の開発を進めている。PXRD法については鉱物定量精度の大幅な向上を達成することができた(図01-2)。また、効率的な風化促進が可能な栽培条件を解明するために、幅広い実験条件でポット栽培試験を実施した。その結果、土壌と作物の組み合わせによって収量が増加する場合も、逆に減少する場合もあった(図01-3)。

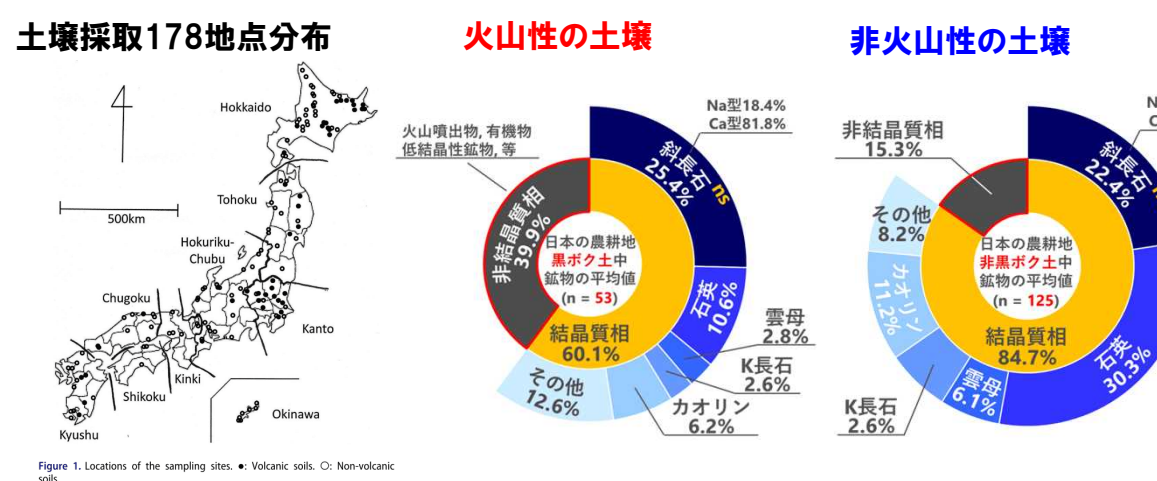


図01-1. 全国農耕地土壌の鉱物組成の網羅解析の結果



図01-3. 北大(左)および石垣(右)の土壌を用いた大豆栽培試験

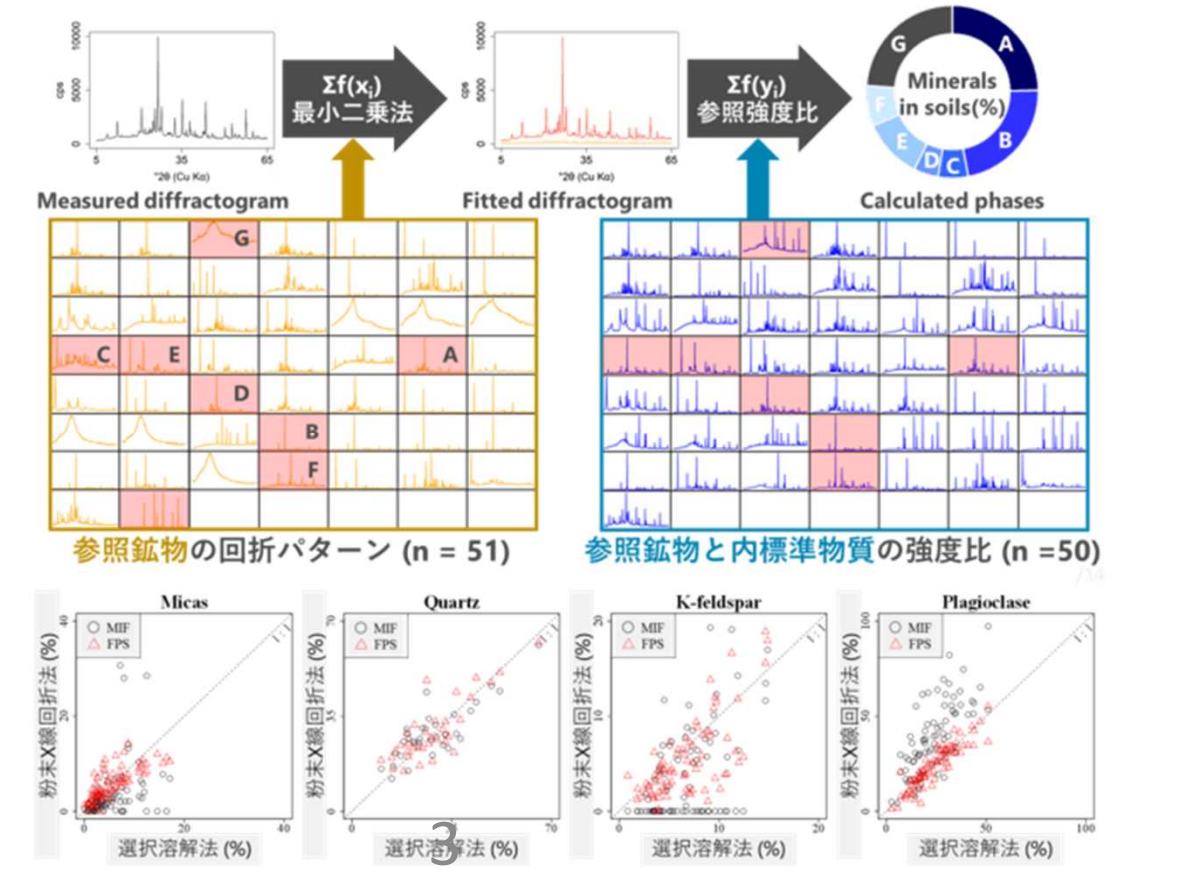


図01-2. PXRD法を用いた土壌鉱物組成の定量

# 02 実環境場試験と効率的モニタリング法開発

4圃場(北海道、茨城県、京都府、沖縄県)の実環境で圃場試験を実施し、作付け期間中の採水および環境モニタリング(図02-1)を実施するとともに、作付け終了後の収量および土壌-作物間などの元素移動量を実測した。北海道および茨城県での圃場試験では、大豆栽培におけるERWによるコベネフィット効果の検証および有機炭素フラックスに基づいた年間CO<sub>2</sub>吸収量(ERWCO<sub>2</sub>)の試算を行っている(図02-2)。茨城県では、夏季にERWCO<sub>2</sub>量が増加する季節パターンとともに、測定期間中の正味のERWCO<sub>2</sub>量の増加を観測することができた(図02-3)。

北大ではチャンパー法基準やCO<sub>2</sub>センサー基準など3パターンのERWCO<sub>2</sub>試算方法が試され、いずれも概ね類似の試算量が示された。手法間で誤差要因や作業量の点で一長一短あるため、最適法の探索に更なる検証が必要である。京都での圃場試験では、湛水環境での風化の進行について調べるとともに、水稲に対するコベネフィット効果の検証を行い、玄武岩の風化とイネのケイ酸吸収量の増加を捉えることができた(図02-4)。沖縄での圃場試験では、サトウキビ栽培試験区では栽培を継続しており2024年2月末収穫予定である。



図02-1. モニタリング装置設置の様子@つくば

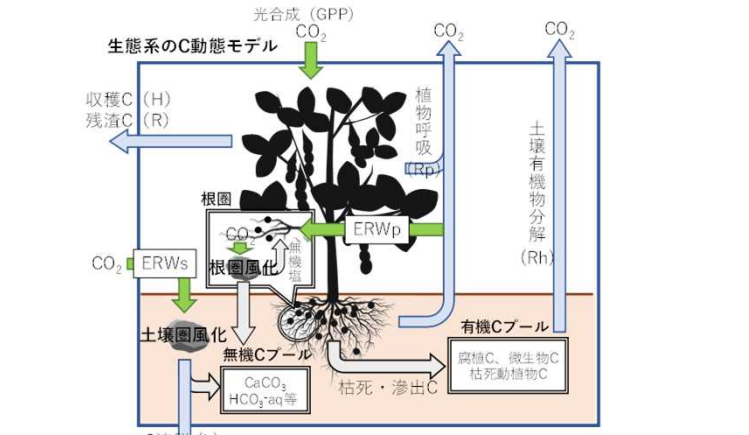


図02-2. ERW-CO<sub>2</sub>量試算の概念図

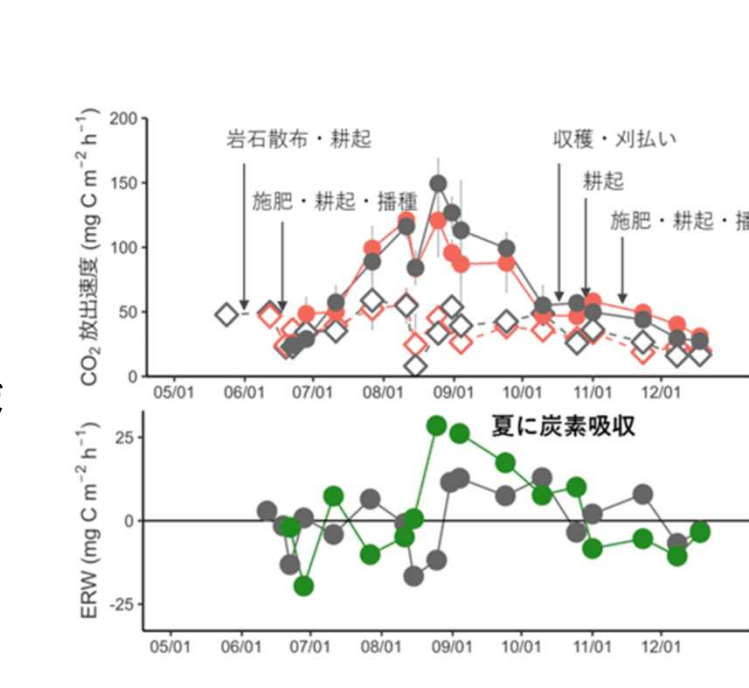


図02-3. 茨城研(つくば農研機構圃場)でのERWCO<sub>2</sub>の経時変化。玄武岩区(ピンク)と無添加区(灰色)での土壌呼吸によるCO<sub>2</sub>放出速度の差分を用いてERWCO<sub>2</sub>を算出している。

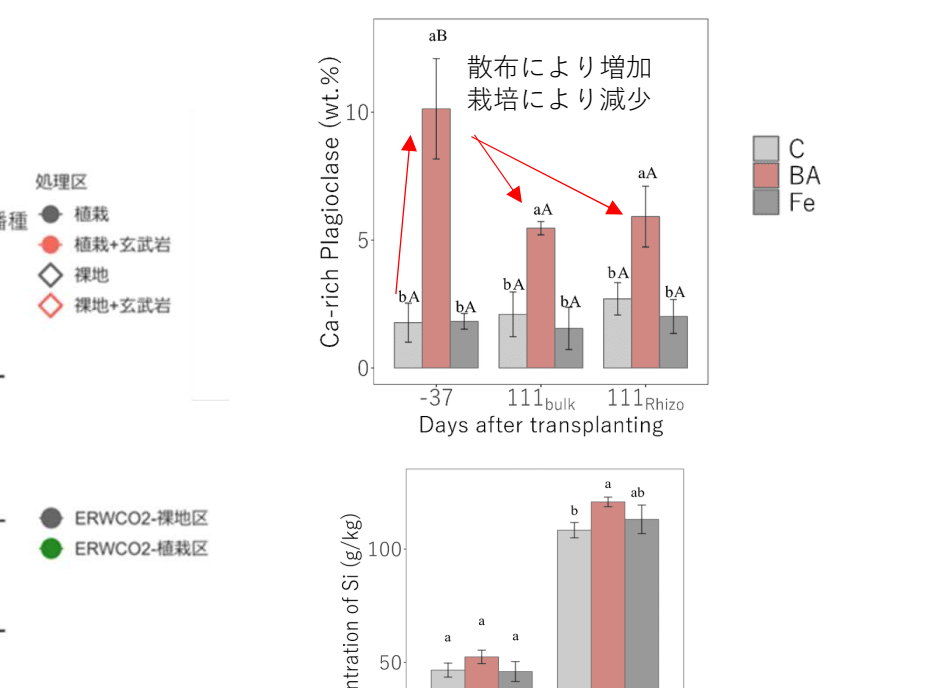


図02-4. 水田での鉱物風化量(上)、イネのケイ酸吸収量(下)@京都

# 03 自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発 & 大規模実証概念設計

## 自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発:

CO<sub>2</sub>センサーを含む各種センサーを搭載したカラム試験で溶脱水中の無機炭素量を実測するとともに、土壌パラメータを用いたモデル予測を試みた(図03-1)。その結果、土壌中のCO<sub>2</sub>分圧と土壌pHを用いて高い精度で予測できることが立った(図03-2)。現在は、CO<sub>2</sub>分圧を考慮した反応輸送モデルの改良を進めており、圃場スケールでの実測データを用いたモデル予測の精度検証を行っている。

## 大規模実証概念設計:

耕作地への岩石散布による風化促進において、パイロットレベルの実証試験フィールドの準備について検討を開始した。まず、営農水田での小規模な試験実績をつくるために、京都府と謝野町の営農者に水田への岩石散布の許可を取り、2023年度米の栽培を行った。岩石散布がコメの品質に悪い影響を示さないことが検証されたことを受け、2024年度は同町内の複数地点で面積を広げた試験を実施する予定である。さらに、この実績を受け、北海道および福井県の自治体でも2024年度に水田への岩石散布の実証試験を開始する予定である。

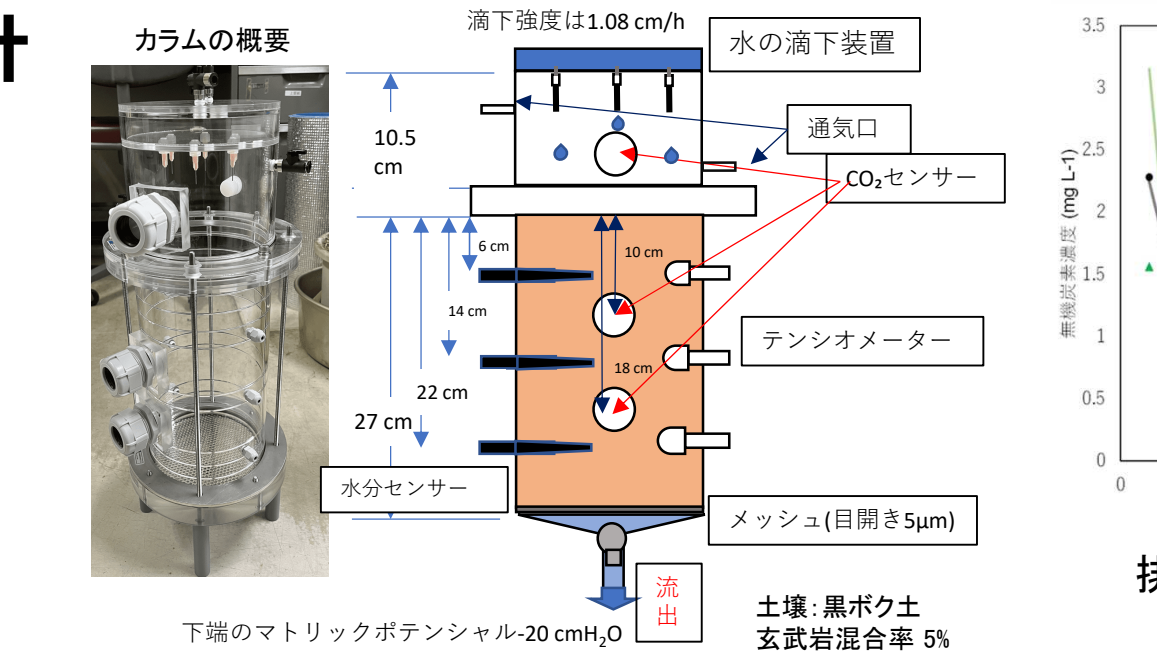


図03-1. 溶脱無機炭素量の計測と土壌パラメータの取得を平行して行うためのカラム試験の設計

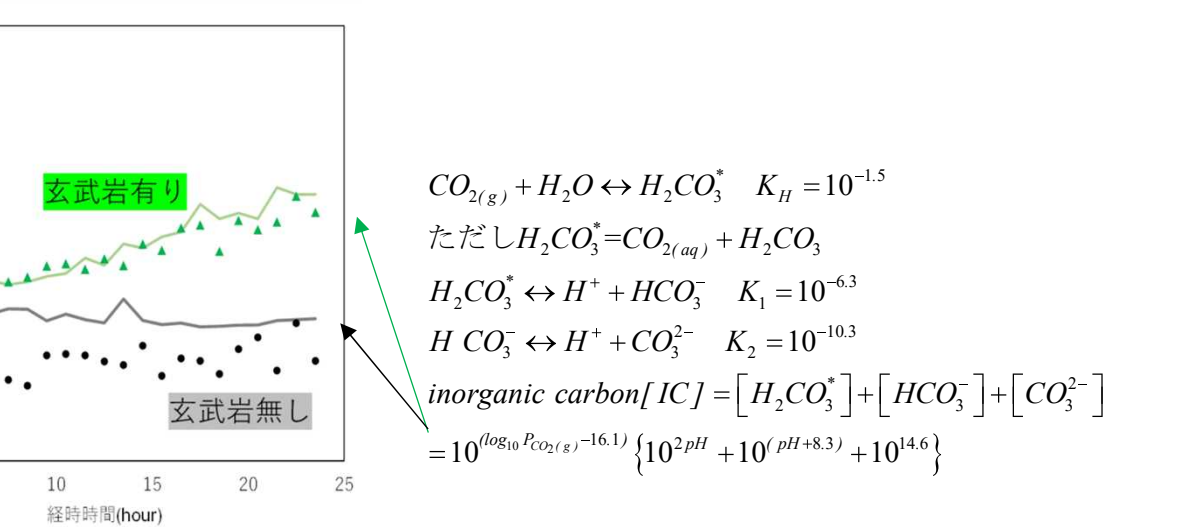


図03-2. カラム試験で得られた無機炭素溶脱量の実測値とpHおよびCO<sub>2</sub>分圧を用いた推測値との比較

# 04 まとめ & 今後の展望

## まとめ:

2023年度の研究成果から、農地に元々存在する、もしくは玄武岩散布により増減した易風化性鉱物の量を定量することで、散布に適した農地の判別や風化した鉱物量の試算が可能となった。炭素固定量については実測もモデル推定も改良を重ねているが、信頼性の高い数値の提案には更なる検討が必要である。ポット試験の結果から作物へのコベネフィットとして期待できるのは主にケイ酸の供給とpH矯正だと判断されたが、後者は生育阻害要因にもなり得るため、栽培システム構築に慎重な判断が必要となる。

## 今後の展望:

今年度の成果を基に、CO<sub>2</sub>固定量のモデル計算やコベネフィット評価に必要なパラメータの種類・測定方法・タイミング等について条件の絞り込みを行う(図04-1)。屋内ライシメータ(国際農研・石垣支所)を用いた栽培試験により炭素収支の定量評価を行う(図04-2)。国際連携によって、岩石散布効果の高い海外フィールドの探索に挑戦する(図04-3)。岩石散布後複数年経過した農地における土壌特性やCO<sub>2</sub>固定量の変化を追跡し、正確な炭素会計に資する情報の収集および体系化を目指す(図04-4)。

## 1) より正確に、より迅速に、より包括的に

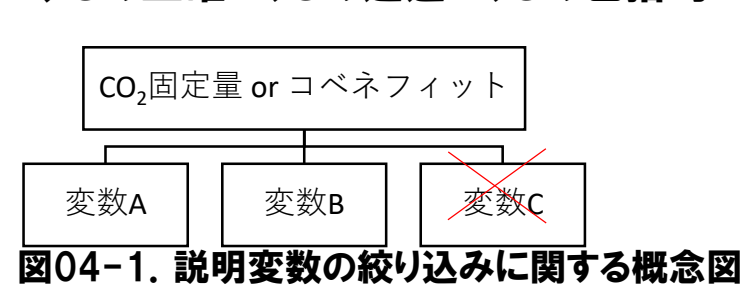


図04-1. 説明変数の絞り込みに関する概念図

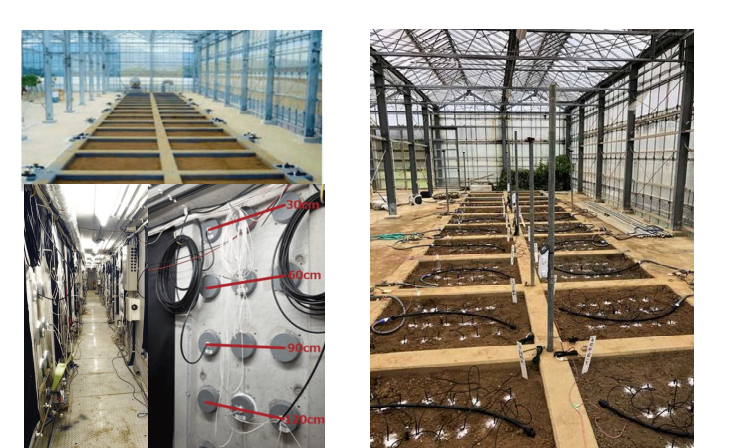


図04-2. 屋内ライシメータを用いた炭素収支の定量評価@石垣

## 2) より広い地域への展開をさぐる

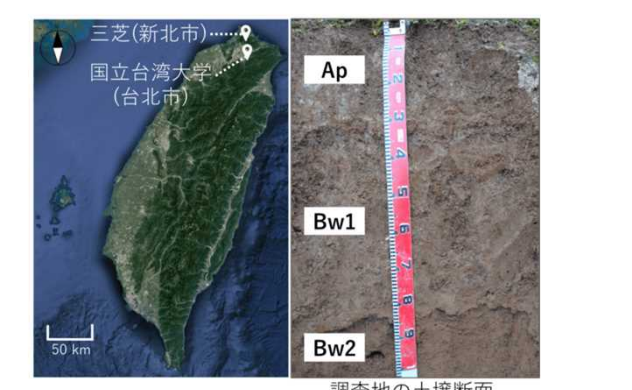


図04-3. 国際共同研究による玄武岩散布試験の様子@台湾

## 3) より長い期間の影響を計測・予測する

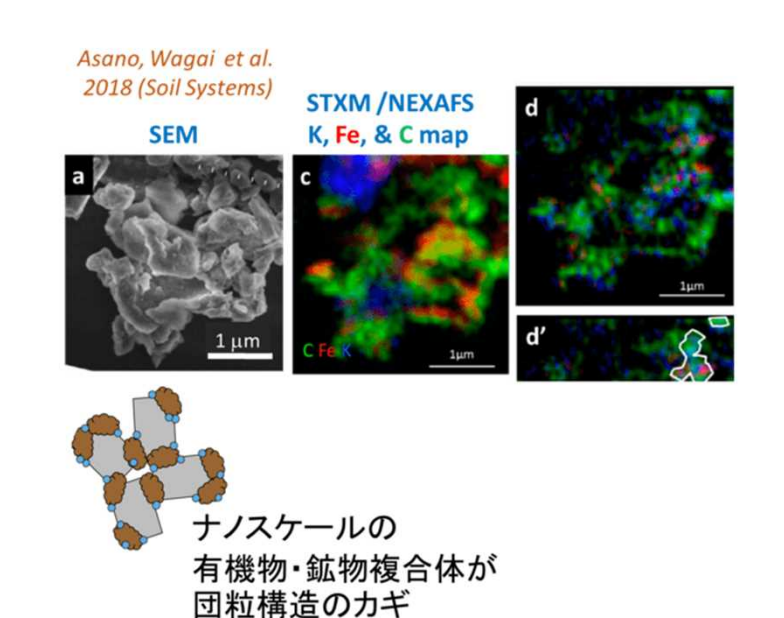


図04-4. 団粒構造中での有機物・鉱物複合体形成の様子(玄武岩風化で増加?)