

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：82656

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02684

研究課題名（和文）気候と気象を考慮した土壌CO<sub>2</sub>ガス放散量の推定式構築と温暖化に伴う増加率の推定研究課題名（英文）Formulation of formula to estimate soil CO<sub>2</sub> gas flux considering climate and weather and its increase rate with global warming

研究代表者

佐々木 久郎（Sasaki, Kyuro）

公益財団法人未来工学研究所・研究センター・研究員

研究者番号：60178639

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土壌CO<sub>2</sub>フラックスのフィールド測定を実施し、自然界では土壌CO<sub>2</sub>フラックスが土壌温度や水分、土壌有機分の関数で表したモデル式を構築した。とくに、その最大値以上のCO<sub>2</sub>フラックスが検出された場合に地下貯留層からの漏えいを検知できることを明らかにし、陸域CO<sub>2</sub>貯留サイトにおけるモニタリングと警戒に関わる手法を提示した。さらに、国内外で測定された土壌CO<sub>2</sub>ガスフラックスデータを収集・分析した結果、温暖化によって表層土壌温度が1℃上昇すると仮定した場合、全世界の陸域から大気へ放散される土壌CO<sub>2</sub>量が約10%（年間220億トンに相当）増加するポテンシャルを有することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温暖化対策として期待されているCO<sub>2</sub>地中貯留において実施周辺地域の住民の安全・安心を担保する上で地表CO<sub>2</sub>ガスフラックスのモニタリングは必要であり、本研究で構築する関係式は、CO<sub>2</sub>貯留を実施している地域でのCO<sub>2</sub>漏えい判定に関わる土壌温度などに対するCO<sub>2</sub>ガス放散量の自然ベースラインの確立にも寄与する。また、気温、降雨量などの気象条件、土壌温度および水分などの環境条件と土壌CO<sub>2</sub>ガス放散量との関係式を構築し、この関係式から約1℃の表層土壌温度の上昇に対する土壌CO<sub>2</sub>ガスフラックスの増加量を推算し、温暖化に伴うフィードバック効果を検証することは地球環境を考慮すると学術的に意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：Field measurements of soil CO<sub>2</sub> flux were conducted, and a model formula to express soil CO<sub>2</sub> flux at the natural ground level as a function of soil temperature, moisture, and soil organic matter was constructed. We have proposed monitoring and warning methods for terrestrial CO<sub>2</sub> storage sites by CO<sub>2</sub> leakage from geological storage. In particular, we clarified that a CO<sub>2</sub> gas leak from underground CO<sub>2</sub> storage reservoirs can be detected when CO<sub>2</sub> flux exceeds the maximum line of the soil CO<sub>2</sub> flux vs. temperature. Furthermore, we collected and analyzed soil CO<sub>2</sub> flux data measured overseas and in Japan. It has been revealed that the increasing potential rate of global soil CO<sub>2</sub> emissions is about 10% (equivalent to 22 billion tons per year) assuming surface soil temperature rises by 1 deg. C due to global warming of the atmosphere.

研究分野：地球資源システム工学

キーワード：地球温暖化 CO<sub>2</sub>地中貯留 土壌CO<sub>2</sub>ガス 土壌温度 森林 分離・回収

## 1. 研究開始当初の背景

地球全体においては、年間約 9000 億トンの CO<sub>2</sub> が放出と吸収を繰り返し循環している。また、人類の活動に起因する CO<sub>2</sub> 排出量は年 330 億トン程度と推定されており、その約 1/3 の 100 億トンの CO<sub>2</sub> が大気中に残留し、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が年 2ppm ずつ上昇する原因となっている。一方、地球上の表層土壌中には陸上の全バイオマスに含まれる炭素量の約 3 倍に相当する約 1 兆 5000 億トンの炭素が内在している。また、土壌から大気への自然 CO<sub>2</sub> ガスフラックス(フラックス)は、全 CO<sub>2</sub> 循環量の約 1/4 を占め、人為起源による CO<sub>2</sub> フラックスの約 7 倍に相当すると算定されていることから、その増加は地球環境にフィードバックされることが推測される。いま、地球温暖化によって大気温度が 1~2°C 上昇すると表層土壌温度も少なくとも 1°C 上昇し、土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスの増加を誘引する可能性が高い。例えば、平均 5% 増加すると仮定した場合、COP21 で合意された削減量に匹敵する年 100 億トンと概算されることから、熱帯から寒帯までの全ての土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスの変化量に関わる予測が必要である。一方、CO<sub>2</sub> 地中貯留は、化石燃料を利用しながら大気中への CO<sub>2</sub> 排出量を削減できる方法として商業化が世界で進められている。概ね 1000m 以深の帯水層を対象とした CO<sub>2</sub> 地中貯留に関わる商業プロジェクトや実証試験が世界で実施されている。貯留された CO<sub>2</sub> は貯留層上の泥岩層などにより地表への移流(漏えい)が遮蔽されるが、その安全性に関するアセスメントやモニタリングは周辺地域の住民の合意や理解を得るために不可欠である。貯留された CO<sub>2</sub> の漏洩挙動や季節変動や降雨などの影響を受ける自然土壌 CO<sub>2</sub> 挙動を評価するためには、少なくとも年単位のモニタリング期間を要する。一方、地表から大気中へは年 5000ton/km<sup>2</sup> 程度の CO<sub>2</sub> ガスが放散密度と概算され、量的には漏えい CO<sub>2</sub> の放散密度と同等レベルとなることが想定される。したがって、陸域の CO<sub>2</sub> 地中貯留実施地域において CO<sub>2</sub> 漏えいの有無を CO<sub>2</sub> ガスフラックスから判断するためには、自然土壌 CO<sub>2</sub> ガスの放散特性を十分に把握しておくことが求められる。とくに、自然土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスは季節の温度変化や降雨などの様々な気象条件によって日々変動しており、更に土壌水分の飽和度によってもそのフラックスは大きく変化し、漏えいに伴う増加と区別するためには、表層土壌温度や水分などの条件に対する関係式の構築が必要である。この関係式は、季節による土壌温度の変化に対する CO<sub>2</sub> ガスフラックスを表すものであるが、今後の温暖化に伴う表層土壌温度の上昇による地球上の全ての土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスの増加率推定にも利用できると推定され、熱帯から寒帯に至る異なった気候条件を包含する研究が重要である。

## 2. 研究の目的

地球温暖化に伴い、世界の地表近傍の大気温度が今後 1~2°C 程度上昇すると予想されており、それに伴って地表から 30cm 程度の表層土壌温度も 1°C 程度上昇する可能性を有する。これらの土壌からの自然 CO<sub>2</sub> フラックスは、全地球の炭素循環量の約 1/4 を占め、その増加は地球温暖化と気候変動に対しフィードバック効果を持つ可能性があること懸念されるが、その影響は世界的に十分に評価されていない。本研究は、申請者らが開発を完了した土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックス・モニターを用いて、九州大学試験フィールドおよび熱帯や亜寒帯フィールドにおいて、表層土壌から大気への CO<sub>2</sub> ガスフラックスの長期連続測定を実施し、自然土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの変化予測を実施することを目的としている。とくに、九州大学伊都キャンパスの測定フィールドで、3 つの異なる地点における環境要因や土壌特性が土壌 CO<sub>2</sub> フラックスに及ぼす影響を調べ、気温、降雨量などの気象条件、土壌温度および水分などの環境条件と土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスとの関係式を構築し、この関係式から約 1°C の表層土壌温度の上昇に対する土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスの増加量を推算し、温暖化に伴うフィードバック効果を検証することを目的としている。また、陸域 CO<sub>2</sub> 地中貯留実施地域に居住する住民の安全・安心を担保する上で必要な地表 CO<sub>2</sub> ガスフラックスのモニタリングに不可欠な土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスの自然ベースラインの確立方法を提示する。

## 3. 研究の方法

### (1) 測定実施フィールド

本研究では、九州大学伊都キャンパス西側に位置する測定フィールド(図 1)で土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの測定を実施した。このフィールドは、これまでさまざまな環境研究に使用してきており、気象庁のデータベースによると、2017 年の平均気温は 17.6°C で、1 月の最低月平均気温は 7.4°C、8 月の最高月平均気温は 29.5°C となっている。10 月には最大 289.5mm、11 月には最小 23.5mm の平均降水量となっている。

土壌特性が土壌 CO<sub>2</sub> フラックスに影響を与える可能性が高いことから、以下に示す測定フィールド内の異なった 3 地点を選択した、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの連続測定を実施した。

地点 A: 落葉と草で覆われている土壌面

地点 B: 草で覆われた柔らかい土壌面

地点 C: 小石が多く、草や落葉がない硬い土壌面

### (2) 土壌 CO<sub>2</sub> フラックスおよび土壌温度の測定方法

土壌 CO<sub>2</sub> フラックス  $F_s$  ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) を正確に測定するために、著者らは、独自に開発した閉鎖チャンバー法に基づいた測定装置を用いて土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの測定を実施した。土壌から放出されたガスをトラップするために、直径 0.20m、高さ 0.35m の気密チャンバーを構成し、測定システムを構築した(図 2)。さらに、1ppm の感度を有する CO<sub>2</sub> ガスセンサー、自動開閉方式のバタフライ弁を土壌表面から 0.26m のチャンバー内に配置し、チャンバー上部の循環ファンを使用してチャンバー内の空気を大気に置換した。

土壌温度は、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスに関連する最も重要なパラメータである。土壌温度を測定する適切な深さを決定するために、土壌表面 5, 7 および 10cm の深さで温度測定を行った結果、表面から深さ 7 cm の温度がより安定しており、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスと最も高い相関係数を示したことから、本研究では、主に 7cm の深さで記録された温度データに対する土壌 CO<sub>2</sub> フラックスに焦点を当てて議論した。

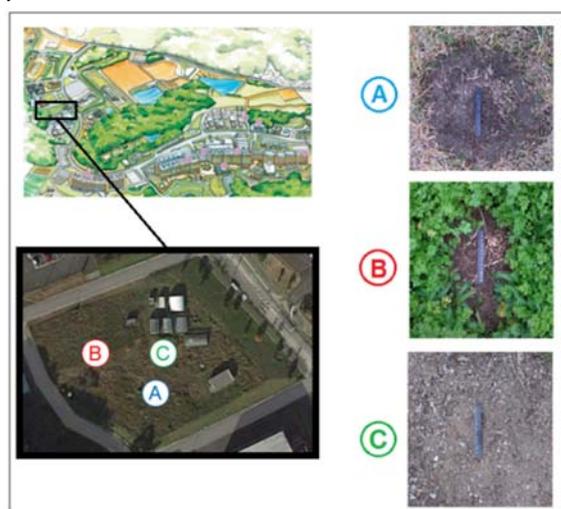


図 1 九州大学伊都キャンパスにある測定フィールド内の異なる測定地点 A, B, C

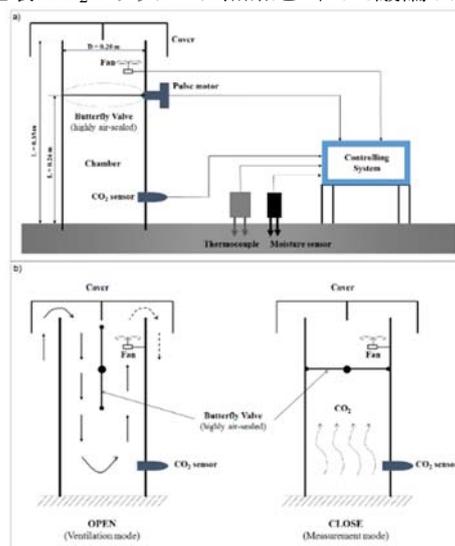


図 2 閉鎖チャンバー法を用いた土壌 CO<sub>2</sub> フラックス測定システム a) システムの概略図, b) 測定サイクルでバタフライ弁を用いた操作手順

土壌 CO<sub>2</sub> フラックス測定のための 1 サイクルの時間は 16 分で、測定に 10 分、空気循環に 1 分、バタフライ弁の開閉に 5 分で構成される。CO<sub>2</sub> 濃度と土壌温度を含むすべてのデータは、4 秒ごとに記録した。一方、CO<sub>2</sub> 濃度の時間勾配は、データロガーを使用して 16 分ごとに記録を行った。

### (3) 土壌水分の測定

土壌静電容量は、0~2500 mV の範囲のセンサー出力によって測定される。これは、それぞれ 0 および 100% の含水率に相当する。したがって、土壌水分は、出力電圧と測定された土壌水分との相関関係から計算される。土壌水分容量は土壌タイプと相関関係があるため、土壌水分出力はサンプリングされた土壌を使用して校正する必要がある。土壌水分センサーからの出力電圧と実験室での水分測定値との相関関係を検証するために、測定フィールドの地点 A, B, および C からいくつかの土壌サンプルが採取された。この相関関係を使用して、実験室の乾燥土壌に適切な量の水を加えて、水分含有量の異なる混合土壌サンプルを調製した。次に、土壌サンプルは、現場の元の量と一致するプラスチック容器に詰められました。2 つの土壌水分センサーを土壌サンプルに挿入し、センサー出力、水分飽和度、体積含水量、および土壌の重量含水量をさまざまな含水量について記録した。水の飽和度  $S_w$  (%) は単位細孔容積あたりの水の量として定義した。土壌水分量には、質量または体積として測定された重量分析および体積測定の水が含まれる。土壌水分量は、湿った土壌と 105°C で乾燥した土壌との差、またはオープン乾燥重量として測定した。

### (4) 土壌有機物 (Soil organic matter; SOM) の測定

土壌有機物 SOM(-) と土壌水分は、測定フィールドの地点で 2.5cm の地下土壌層から採取された 1g の土壌サンプルを使用して実験室で分析された。まず、水分の重量は、最初の土壌サンプルの重量から、105°C のオープンで 1 時間乾燥した後の土壌サンプルの重量を差し引くことによって算定した。次に、灰分の重量を測定するために、土壌サンプルを 500°C の電気炉に 1 時間保持し、その後温度を 800°C に上昇させ 45 分間加熱し、さらに真空キャニスター内で冷却した。この加熱前後の土壌サンプル質量の差から水分量を算定した。最後に、土壌有機物の質量は、最初の土壌サンプルの質量から水分と灰分の質量を差し引くことによって算出し、その比率から SOM を求めた。

### (5) 土壌中におけるガス浸透率の測定

降雨直後において土壌表面から排出される土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの減少は、主に土壌水分飽和度の増加によって土壌内の孔隙が水で満たされるため、CO<sub>2</sub> ガスの拡散が抑制されるためである。したがって、本研究では、地点 A および B からの充填土壌 (断面積 6.38 cm<sup>2</sup>, 長さ 21.8 cm) を使用し、ダルシーの式に従って CO<sub>2</sub> ガス浸透率を求め、土壌中の水分飽和度とガス浸透率の関係を検証した。土壌のガス浸透率の測定結果から、水分飽和度が高くなると、気孔率が低下するため、CO<sub>2</sub> ガス浸透率が低下する。ガス浸透率と水分飽和度の間の明確な相関関係として、土壌中の含水量の増加によって CO<sub>2</sub> 拡散が抑制されていることを示している。その結果、土壌への水分の物理的影響により、土壌の CO<sub>2</sub> フラックスが土壌水分の増加とともに減少することを実験によって確認した。ただし、土壌水分飽和度の範囲が低い ( $S_w \leq 0.3$ ) 場合、土壌中の微生物活性が高まるため、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスへの影響が異なる。その結果、地点 A の土壌の浸透率が地点 B のそれよりも低くなることがわかった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 土壌 CO<sub>2</sub> フラックスに対する環境要因の影響

土壌 CO<sub>2</sub> フラックスと土壌温度との関係を調べるために、地点 A で長期のデータを連続的に収集した結果を図 3 に示す。土壌 CO<sub>2</sub> フラックスが土壌温度に対し指数関数的に増加し、土壌温度 0~28°C の範囲で上昇し、ピークを迎えている。しかしながら、土壌温度が 28°C を超えると、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスは 35°C では 75% に減少している。この現象は、8 月の約 2 週間、降雨がなく、高い土壌温度 (28°C 以上) が長期間続いたときに、土壌微生物の活動が低下したことが原因と推定される。これらの結果は、夏場の極めて高い温度条件では、微生物の炭素分解が抑制され、それによって CO<sub>2</sub> ガス生成が低下する可能性があることを示す。さらに、乾燥条件下では根と微生物の活性が通常低く、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスも低下することを示している。しかしながら、大部分の土壌温度範囲では、土壌温度の上昇が土壌 CO<sub>2</sub> フラックスを増加させる原因となっている。

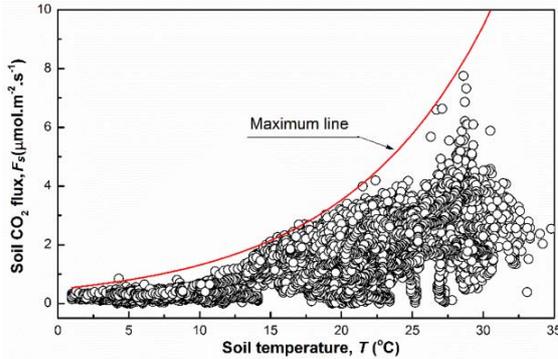


図 3 地点 A での土壌温度と土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの測定結果

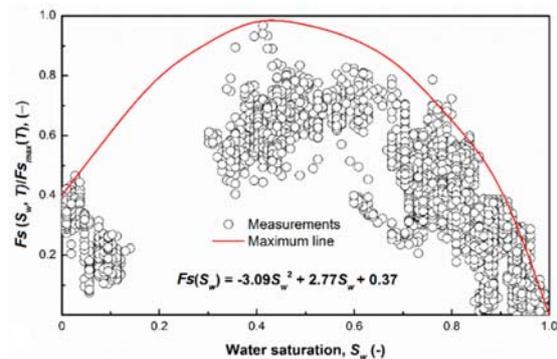


図 4 地点 A で記録された土壌 CO<sub>2</sub> フラックスと水分飽和度 ( $S_w$ ) との関係

図 4 に示すように、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスは  $S_w=0\sim 30\%$  の範囲で土壌水分飽和度とともに増加する傾向を示すが、30% を超えると土壌水分飽和度の上昇とともに減少に転じている。これは高水分飽和度レベルの土壌からの CO<sub>2</sub> フラックスの減少を示す。土壌中の孔隙が水で満たされ、その結果として土壌から大気へのガス拡散率が低下するためと考えられる。土壌水分の増加は一般に土壌の生物活性を増加させるが、非常に高い土壌水分条件下では、酸素の拡散が制限され、その後 CO<sub>2</sub> 排出量が減少するため、土壌の総 CO<sub>2</sub> フラックスが減少している。水分飽和度  $S_w > 0.4$  の条件下では、土壌の孔隙率が低下するため、拡散による CO<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> ガス分子の相互の交換速度が低下する。

土壌 CO<sub>2</sub> フラックスと水分飽和度との相関関係は次式でまとめられる。

$$Fs(S_w, T)/Fs_{max} = -3.09S_w^2 + 2.77S_w + 0.37 \quad (a)$$

一方、低い水分飽和度レベル ( $S_w < 0.4$ ) では、根や植物から炭素を分解することによって生成される CO<sub>2</sub> ガスは、表面から拡散する十分な酸素分子の下で水分によって加速される。全体として、 $S_w = 0.4$  の場合、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスは、O<sub>2</sub> ガスの拡散を促し、かつ土壌中の微生物による炭素分解を促進することによってピークに達している。したがって、乾燥状態と湿潤状態の両方で、土壌から表面への CO<sub>2</sub> ガスフラックスがともに減少する。

##### (2) 異なった地点での土壌 CO<sub>2</sub> フラックス測定結果

異なった土壌特性と環境要因が土壌 CO<sub>2</sub> ガスフラックスに及ぼす影響を調べるために、3 か所の測定地点から収集したデータを比較したものが図 5 である。3 か所の測定地点での土壌 CO<sub>2</sub> フラックスと土壌温度の関係に関するデータは、測定地点 A での土壌 CO<sub>2</sub> フラックスが土壌温度の上昇とともに指数関数的に増加したことを示している。同様の傾向は、地点 A よりもかなり多い量の土壌 CO<sub>2</sub> フラックスを伴う地点 B でも記録された。反対に、測定地点 C では最小の土壌 CO<sub>2</sub> フラックスが記録された。以上の 3 地点における土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの測定結果をまとめたものが式 (b)~(d) である。

$$\text{地点 A: } Fs_{Max} = 0.487e^{0.099T} \quad (b)$$

$$\text{地点 B: } Fs_{Max} = 1.76e^{0.099T} \quad (c)$$

$$\text{地点 C: } Fs_{Max} = 0.128e^{0.099T} \quad (d)$$

ここで、 $T(^{\circ}C)$  は土壌温度であり、 $Fs_{Max}(\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s})$  はその温度に対する土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの最大値である。全体として、土壌中の SOM の量が多いほど、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスは大きくなっている。

##### (3) 土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの包括的モデル式の構築

一般的に土壌 CO<sub>2</sub> フラックスと関連する要因との相関関係は以下のように表すことができる。

$$Fs_{Max} = C_j \cdot C_s \cdot e^{bT} \quad (e)$$

ここで、 $C_j$  は SOM に関連する係数、 $C_s$  は水分飽和度に関連する係数、 $b(^{\circ}C^{-1})$  は土壌温度  $T(^{\circ}C)$  の影響を表す指数である。 $C_j$  と SOM および  $C_s$  と  $S_w$  の関係は、それぞれ次式となった。

$$C_j = 46.27SOM^2 + 2.13SOM ; \quad C_s = -3.09S_w^2 + 2.77S_w + 0.37 \quad (f)$$

以上の結果に基づいて、包括的な土壌 CO<sub>2</sub> フラックスのモデル式を求めたところ、次式が得られた。

$$F_s(T, \text{SOM}, S_w) = (46.27\text{SOM}^2 + 2.13\text{SOM}) \cdot (-3.09S_w^2 + 2.77S_w + 0.37)e^{0.0997T} \quad (\text{g})$$

この包括的推定式は、測定フィールドサイトの3地点の土壌 CO<sub>2</sub> フラックスのベースラインデータを表す。このデータは、陸域の CCS サイトからの CO<sub>2</sub> ガス漏れを特定するためのベースラインのモデル式として使用できることを示す。漏えい事態に対する閾値線は、各 CCS サイトの通常の条件下でのさまざまな土壌温度にわたる土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの最大値( $F_{s\text{Max}}$ )を結ぶラインに準拠して設定できることを表す。ただし、閾値線を大きく超える CO<sub>2</sub> フラックス値が観測された場合、CO<sub>2</sub> 漏出が自然破壊または構造断層によって発生したことを示す証左となるものである。ただし、土壌表層への漏出源やその位置を特定するためには、より広範囲に測定地点を増やす二次的なモニタリングが必要とされる。

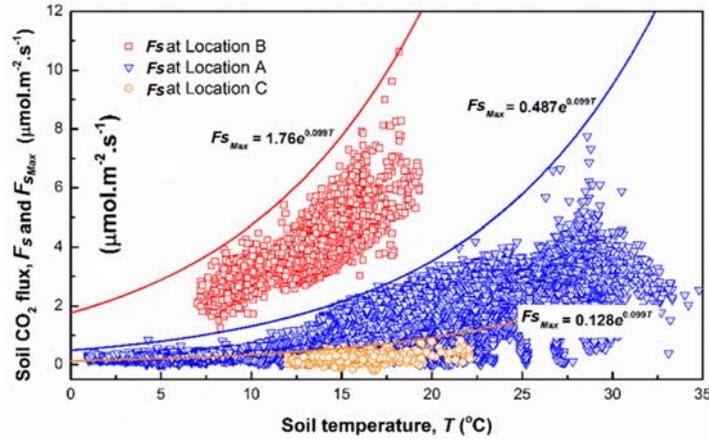


図5 測定地点 A, B および C における土壌 CO<sub>2</sub> フラックスと土壌温度との相関関係の比較

#### (4) 温暖化に伴う土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの増加ポテンシャル

本研究では、測定された九州大学キャンパスにおける長期の土壌 CO<sub>2</sub> フラックスデータに基づき、土壌温度の日変動と季節変動に対するモデル式をアナロジー的に温暖化に対しても適用できるものと判断し、地表面大気温暖化に伴う表層土壌温暖の上昇を 1°C と仮定し、土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの増加ポテンシャルを比率  $\delta$  (°C<sup>-1</sup>) を推定したところ、以下に示す式(h)

$$\delta = \frac{F_s(T_s)}{F_s(T_s)} = b; \quad F_s(T_s) = \frac{\partial F_s(T_s)}{\partial T_s} \quad (\text{h})$$

で示される温度指数  $b$  (°C<sup>-1</sup>) によって評価できることがわかった。すなわち、異なった気候や土壌利用条件に依らず、温暖化に伴う土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの増加ポテンシャルを推定できることになり、多くの研究に適用できる可能性が示された。

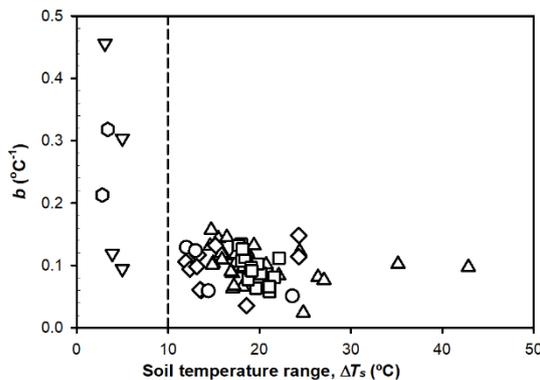


図6 土壌温度の測定範囲  $\Delta T_s$  に対する土壌からの CO<sub>2</sub> 排出増加比率  $b$  (°C<sup>-1</sup>)

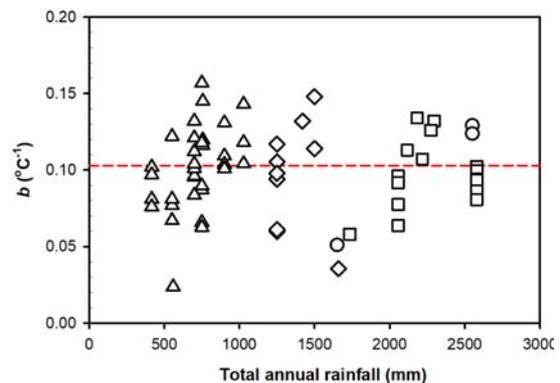


図7 年間降雨量(mm)に対する土壌からの CO<sub>2</sub> 排出増加比率  $b$  (°C<sup>-1</sup>)

本研究における九州大学・伊都キャンパスを含む 10 か国 71 か所の測定に関わる公表データに基づき、土壌温度  $T$  (°C) の測定範囲  $\Delta T_s$  (°C) に対して  $b$  (°C<sup>-1</sup>) の値をプロットした結果を図 6 に示す。土壌温度の測定範囲  $\Delta T_s$  は測定地点り土壌温度の最大値と最小値の差を表し、 $\Delta T_s$  が 10°C 以下のデータは、土壌温度の測定範囲が狭いため  $b$  の算定誤差が大きく、その値がバラついている理由と判断される。一方、 $\Delta T_s$  が 10°C 以上の算定誤差が少ない場合には、概ね  $b=0.10$ °C<sup>-1</sup> であることがわかる。一方、年間降水量に対して、 $b$  (°C<sup>-1</sup>) の値をプロットした結果を図 7 に示す。土壌用途や土壌特性が強く影響される年間降水量に依らず、平均的に  $b=0.10$ °C<sup>-1</sup> が示されている。

いま、地球上の陸域全体からの土壌 CO<sub>2</sub> 排出量を 220 億トンおよび土壌温度が平均 1°C 上昇すると仮定すると、 $\delta=10\%$ °C であることから年 220 億トンの土壌 CO<sub>2</sub> 排出量の増加ポテンシャルが算定され、その値は国連などが公表している世界の CO<sub>2</sub> 排出量の削減量目標に近い値に匹敵することが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Qiang Sun, Kyuro Sasaki, Qinxu Dong, Zhenni Ye, Hui Wang, Huan Sun	4. 巻 1187
2. 論文標題 Analysis of pressure response at an observation well against pressure build-up by early stage of CO2 geological storage project	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jrmge.2023.03.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Marly Orrego, Ayumi Katayama, Motohiro Hasegawa, Tsutomu Enoki	4. 巻 11
2. 論文標題 Effects of differences in aboveground dead organic matter types on the stand-scale necromass and CO2 efflux estimates in a subtropical forest in Okinawa Island, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 European Journal of Soil Biology	6. 最初と最後の頁 103493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejsobi.2023.103493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoshitaka Wakisaka, Hirokazu Okawa, Takahiro Kato	4. 巻 62
2. 論文標題 Ultrasound-assisted oxidative desulfurization of bitumen and analysis of sulfur forms in a treated bitumen	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acaeb4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hemeng Zhang, Xiaoming Zhang, Yongjun Wang, Wei Dong, Jiafeng Fan, Kyuro Sasaki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Application of aging effect model in numerical simulation for predicting spontaneous combustion of coal stockpiles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10973-022-11708-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 大川浩一	4. 巻 34
2. 論文標題 超音波を利用した第三級アミン水溶液からの二酸化炭素の低温脱離	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 24-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Makoto Kobayashi, Pamela H. Templer, Ayumi Katayama, Osamu Seki, Kentaro Takagi	4. 巻 13-7
2. 論文標題 Early snowmelt by an extreme warming event affects understory more than overstory trees in Japanese temperate forests	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ECOSPHERE	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ecs2.4182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayato Abe, Ayumi Katayama, Shingo Taniguchi, Atsushi Takashima, Tomonori Kume, Kazuho Matsumoto	4. 巻 37-5
2. 論文標題 Effects of differences in aboveground dead organic matter types on the stand-scale necromass and CO2 efflux estimates in a subtropical forest in Okinawa Island, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 609-922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1440-1703.12317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyuro Sasaki, Salmawati	4. 巻 2022-2
2. 論文標題 Formulation of soil CO2 gas efflux with soil conditions to estimate its increasing rate and a baseline for CO2 capture and geological storage in shallow aquifers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 40-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2022.2.40	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshitaka Wakisaka, Hirokazu Okawa, Kumi Saigo, Takahiro Kato, Katsuyasu Sugawara	4. 巻 61
2. 論文標題 Extraction and oxidative desulfurization of bitumen from oil sand using n-pentane and ultrasound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4929	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takuo Hishi, Erika Kawakami, Ayumi Katayama	4. 巻 180
2. 論文標題 Changes in the abundance and species diversity of Collembola community along with dwarf bamboo density gradient in a mountainous temperate forest of Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Soil Ecology	6. 最初と最後の頁 104606-104606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsoil.2022.104606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyuro Sasaki	4. 巻 23-2
2. 論文標題 From the beginning of oil and gas industry to carbon reverse engineering: implications for mining and petroleum-engineering education	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Global Journal of Engineering Education	6. 最初と最後の頁 79-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Shimono, Ayumi Katayama, Tomonori Kume, Tsutomu Enoki, Masaaki Chiwa, Takuo Hishi	4. 巻 27-1
2. 論文標題 Differences in net primary production allocation and nitrogen use efficiency between Moso bamboo and Japanese cedar forests along a slope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 28-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13416979.2021.1965280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ayumi Katayama, Izuki Endo, Naoki Makita, Kazuho Matsumoto, Tomonori Kume, Mizue Ohashi	4. 巻 311
2. 論文標題 Vertical variation in mass and CO2 efflux of litter from the ground to the 40m high canopy in a Bornean tropical rainforest	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2021.108659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuya Kitamura, Hirokazu Okawa, Takahiro Kato, Katsuyasu Sugawara	4. 巻 60
2. 論文標題 Desorption of carbon dioxide from monoethanolamine solution via calcium chloride addition under ultrasound irradiation and evaluation of the characteristics of generated calcium carbonate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abec8c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuya Kitamura, Hirokazu Okawa, Takahiro Kato, Katsuyasu Sugawara	4. 巻 60
2. 論文標題 Desorption of carbon dioxide from monoethanolamine solution via calcium chloride addition under ultrasound irradiation and evaluation of the characteristics of generated calcium carbonate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abec8c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 大川浩一	4. 巻 51
2. 論文標題 超音波を利用した第一級 および第三級アミン溶液 からの二酸化炭素の低温 脱離	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 分離技術	6. 最初と最後の頁 212-221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大川浩一, 藤原達央, 北村優弥, 加藤貴宏, 菅原勝康	4. 巻 33
2. 論文標題 超音波照射と塩化カルシウムを用いたモノエタノールアミン溶液からのCO2ガスの低温脱離およびその脱離機構	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 49-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okawa Hirokazu, Ito Hiroyasu, Fujiwara Tatsuo, Kitamura Yuya, Kato Takahiro, Sugawara Katsuyasu	4. 巻 60
2. 論文標題 Utilization of tertiary amine solutions and ultrasound irradiation for CO2 desorption at low temperature in a CCS process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDD01 ~ SDDD01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abe2e8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuriyama Takashi, Quoc Huy Phung, Salmawati Salmawati, Sasaki Kyuro	4. 巻 2-34
2. 論文標題 A Threshold Line for Safe Geologic CO2 Storage Based on Field Measurement of Soil CO2 Flux	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Carbon Research	6. 最初と最後の頁 1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/c7020034	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Hemeng; Sasaki Kyuro; Zhang Xiaoming; Sugai Yuichi; Wang Yongjun	4. 巻 2020
2. 論文標題 Formation of Cross-linked Gel from Complex Water-Solution of Sodium Metasilicate Nonahydrate and Polyvinyl Alcohol to Inhibit Spontaneous Coal Combustion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Combustion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00102202.2020.1867544	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計33件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 佐々木久郎
2. 発表標題 炭化水素エネルギー資源の生産および利用と二酸化炭素の地中貯留に関する研究
3. 学会等名 資源・素材学会 2023年度春季大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木久郎
2. 発表標題 気温と土壌特性を考慮した土壌CO <sub>2</sub> ガス放散量の推定式と今後の増加率の推定
3. 学会等名 石油技術協会・令和4年度春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木久郎
2. 発表標題 原油および石油製品などの月別消費量の変動の動向について
3. 学会等名 石油技術協会・令和4年度春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kyuro Sasaki
2. 発表標題 Analysis of the impact of COVID 19 on the consumption and inventory of fossil fuels crude oil, petroleum products, LNG and coal in Japan
3. 学会等名 3rd International Symposium on In-situ Modification of Deposit Properties for Improving Mining (IMDPIM2022)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木久郎
2. 発表標題 日本における新型コロナウイルス感染症に伴う化石燃料の国内消費量とそれによるCO2排出量の変化動向について
3. 学会等名 資源・素材2022(福岡)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木久郎
2. 発表標題 原油および石油製品の消費量と在庫量について
3. 学会等名 資源・素材2022(福岡)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅井 裕一, 小松 祐斗, 江崎 丈裕, Ronald Nguete, 佐々木 久郎
2. 発表標題 土壌CO2フラックスのベースライン策定を目的とした土壌特性の検討
3. 学会等名 資源・素材2022(福岡)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kyuro Sasaki
2. 発表標題 Consumption trends of crude oil and petroleum products and decarbonization in Japan over the past decade
3. 学会等名 CMG East Asia Workshop: Dynamic Modelling of the Energy Transition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kyuro Sasaki
2. 発表標題 Direct geological damping of sodium carbonate gel for CO2 sequestration in shallow aquifer
3. 学会等名 5th International Conference on Environmental Sustainability and Climate Change (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木久郎
2. 発表標題 炭化水素エネルギー資源の生産および利用と二酸化炭素の地中貯留に関する研究
3. 学会等名 資源・素材学会 2023年度 春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大川浩一
2. 発表標題 電池材料および二酸化炭素回収貯蔵(CCS)技術に対する超音波の利用
3. 学会等名 第31回ソノケミストリー討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大川浩一
2. 発表標題 超音波を用いたスコロダイトの合成とその応用
3. 学会等名 第23回反好会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大川浩一, 藤田知花, 高頭周作, 加藤貴宏
2. 発表標題 二酸化炭素を加圧吸収させたアミン溶液からの二酸化炭素の超音波を用いた低温脱離
3. 学会等名 資源・素材2022(福岡)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇坂佳孝, 大川浩一, 加藤貴宏
2. 発表標題 Ultrasound-assisted oxidative desulfurization of bitumen and analysis of sulfur forms in the treated bitumen
3. 学会等名 第43回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇坂佳孝, 大川浩一, 加藤貴宏
2. 発表標題 超音波とコンデンセートを用いたオイルサンドからのピチューメンの分離および酸化脱硫法による硫黄の低温脱離
3. 学会等名 資源・素材2022(福岡)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山歩美, 安宅未央子, 高梨聡, 久米朋宣
2. 発表標題 モウソウチク稈CO2放出の日変化-温度と樹液流速の影響-
3. 学会等名 第69回日本生態学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花谷周亮, 遠藤いず貴, 福澤加里部, 片山歩美, 中路達郎, 牧田直樹, 大橋瑞江
2. 発表標題 帯雨林の三次元構造がもたらす葉リターの分解プロセスの多様性
3. 学会等名 第69回日本生態学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山田美森, 阿部隼人, 菱拓雄, 片山歩美
2. 発表標題 土壌侵食が森林土壌の生態系機能に与える影響
3. 学会等名 第69回日本生態学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部隼人, 小山田未森, 久米朋宣, 兵藤不二夫, 片山歩美
2. 発表標題 九州南部のブナの衰退と土壌侵食との関係性
3. 学会等名 第69回日本生態学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮崎 拓馬, 篠原 慶規, 徳本 雄史, 片山 歩美, 久米 朋宣
2. 発表標題 下層植生の衰退した広葉樹林におけるUAVを用いた土壌侵食量の面的評価
3. 学会等名 日本森林学会大会発表データベース
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 孫強, 佐々木久郎, 菅井裕一, ンゲレロナルド
2. 発表標題 初期CO2 地中貯留段階における圧入井と観測井の圧力応答について
3. 学会等名 石油技術協会・令和3年度春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木 久郎
2. 発表標題 陸域CCSのための土壌成分と水分を考慮した土壌CO2フラックスの推定式
3. 学会等名 資源・素材2021(札幌)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅井 裕一, 西田 悠太, ンゲレロナウド, 佐々木 久郎
2. 発表標題 地下からの漏洩メタンの検出方法に関する検討
3. 学会等名 資源・素材2021(札幌)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Orrego Morales Marly, Katayama Ayumi, Hasegawa Motohiro, Enoki Tsutomu
2. 発表標題 モソ竹林の落葉落枝分解における茎屑と土壌生物相の役割
3. 学会等名 日本生態学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片山歩美, 久米朋宣
2. 発表標題 森林生態系における土壌圏炭素動態の計測法入門
3. 学会等名 個体群生態学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田知花, 大川浩一, 加藤貴宏
2. 発表標題 超音波を利用した第三級アミン溶液からの二酸化炭素の低温脱離
3. 学会等名 第30回ソノケミストリー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 脇坂佳隆, 大川浩一, 西郷来実, 加藤貴宏, 菅原勝康
2. 発表標題 n-ペンタンと超音波を用いたオイルサンドからのピチューメンの分離及び酸化脱硫
3. 学会等名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大川浩一, 藤田知花, 加藤貴宏, 菅原勝康
2. 発表標題 超音波を用いた第三級アミン溶液からの二酸化炭素の低温脱離
3. 学会等名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大川浩一, 北村優弥, 加藤貴宏, 菅原勝康
2. 発表標題 低周波数超音波を用いたアミン溶液からの二酸化炭素の低温脱離
3. 学会等名 資源・素材2021(札幌)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大川浩一, 加藤貴宏, 菅原勝康
2. 発表標題 CCSIにおける二酸化炭素の低温脱離を目的とした第三級アミン溶液と超音波の利用
3. 学会等名 資源・素材2021(札幌)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sasaki Kyuro
2. 発表標題 Three technical challenges to reduce CO2 emissions by extinguishing a large scale of natural coal fires and spontaneous combustions
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 久郎, 菅井 裕一, シンゲレ ロナルド
2. 発表標題 ケイ酸ソーダ溶液を利用したゾル・ゲル生成によるCCUSシステムについて
3. 学会等名 資源・素材2020(仙台)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 久郎, チェサムニアン, 菅井 裕一, シンゲレロナルド
2. 発表標題 油層内原位置ゲル生成技術を用いたEORとCO2固定
3. 学会等名 令和2 年度 石油技術協会学術大会 開発・生産部門シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大川 浩一 (Okawa Hirokazu) (00375221)	秋田大学・理工学研究科・教授  (11401)	
研究分担者	片山 歩美 (Katayama Ayumi) (70706845)	九州大学・農学研究院・助教  (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	Liaoning Technical University		
インドネシア	Gadjah Mada University		