

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12138

研究課題名（和文）温暖化インパクトを包括的に考慮した土壌炭素応答解析：プライミング効果に着目して

研究課題名（英文）Effects of comprehensive environmental impacts on soil carbon dynamics: focusing on priming effects

研究代表者

飯村 康夫 (Iimura, Yasuo)

滋賀県立大学・環境科学部・講師

研究者番号：80599093

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：温暖化や窒素沈着などの複合的な環境インパクトが土壌炭素分解に及ぼす影響について基礎的知見を得ることを目的に研究を行なった。黒ボク土の場合、温度上昇の影響に負けず劣らず植物バイオマス由来の易分解性炭素（グルコース）の供給が土壌炭素分解に強く影響を及ぼすことが示された。また、土壌炭素の質が大きく異なる黒ボク土と未熟土を用いた実験では温暖化や窒素沈着による複合的なインパクトは黒ボク土でより強く影響することが明らかとなった。この結果は難分解性炭素を多く含む黒ボク土で温度依存性が高まったことに起因していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は将来予測されている温暖化や窒素沈着などの環境変化に対する土壌応答について着目したものである。日本を代表する土壌の一つである黒ボク土を用いた実験では、土壌のみに対し温暖化や窒素沈着の影響を与えた場合に比べ植物の影響も加味するとより多くの二酸化炭素が発生することが明らかとなった。また、微生物によって分解されにくい炭素が多い黒ボク土ではそうでない土壌に比べ上記のような反応性が高いことが明らかとなった。これらの結果は将来予測されている土壌からの二酸化炭素放出量を実際はより多くなる可能性を示すものであり、また、これらの反応は土壌タイプによって異なることを示唆するものである。

研究成果の概要（英文）：The investigation was executed to procure fundamental insights regarding the consequences of comprehensive environmental disturbances, namely global warming and nitrogen accretion, on soil carbon decomposition. Pertaining to the Japanese black soil (Kuroboku), the provision of plant biomass-derived biodegradable carbon (glucose) demonstrated a robust influence on soil carbon decomposition, comparable in magnitude to the impact of warming. Experiments employing Kuroboku and another soil, displaying significant disparities in soil carbon quality, indicated that the conjoined influence of warming and nitrogen deposition was more pronounced in the Kuroboku. This outcome was posited to be attributable to the warming dependence observed in the Kuroboku, enriched with more recalcitrant carbon.

研究分野：土壌学、生態学

キーワード：土壌炭素 温暖化 窒素沈着 プライミング効果

### 1. 研究開始当初の背景

陸域最大の炭素プールである土壌は約 2500 Pg ( $\text{Pg} = 10^{15} \text{g}$ ) もの炭素を蓄積しており、この量は大気約 3.3 倍、植物バイオマスの約 4.5 倍にもなる<sup>1)</sup>。そのため、地球温暖化に伴う土壌炭素応答は今後の大気中の  $\text{CO}_2$  濃度に多大な影響を与える可能性が高く、重要な研究課題となっている。土壌炭素の温暖化応答研究はこの 20 年間で爆発的に増加し、レビューも含め多くの研究成果が報告されている。これらによると、温暖化の進行は土壌から放出される  $\text{CO}_2$  量を増加させる可能性が高いことがわかってきた。一般的に温暖化に伴う土壌炭素応答は分解速度の温度依存性として説明され、 $Q_{10}$  という温度係数 (気温が 10 上昇した場合、土壌から放出される炭素は何倍になるか) で示される。例えば、これまでのメタデータ解析によると世界の土壌の  $Q_{10}$  は平均で 2~3 であることが明らかにされている<sup>2)</sup>。

一方、これまで行われてきた温暖化に伴う土壌炭素応答研究には課題もある。それは、温暖化が土壌へ与えるインパクトについて、植物が存在しない表層土壌 (0-20cm 程度) が直接的に温められるという視点に基づく研究が大多数を占める点である (図 1 左)。しかし、実際の温暖化は表層土壌のみならず、深層土壌も含め、時間と共に段階的に、且つ、大気-植物-土壌間の複合的インパクトとして土壌空間全体へと影響を及ぼす (図 1 右)。特に、深さ 40cm 程度までの深層土壌に対する地上部バイオマス由来炭素 (リターや枯死根、根分泌物など) の供給量や、大気由来の窒素沈着量は温暖化に伴い多くの地域で増加することが予測されており<sup>3, 4)</sup>、土壌炭素応答に対し重大なインパクトになり得る。したがって、土壌炭素の温暖化応答をより正確に理解するためには、直接的な気温上昇の影響のみならず、植物バイオマス増大に伴う易分解性有機物供給量増加や窒素沈着量増加など間接的な影響も含めた複合的インパクトを土壌において時空間的に考慮することが不可欠である。しかし、温暖化に伴うこれらの複合的インパクトを深層土壌も含め時空間的に考慮した土壌炭素応答の研究例は極めて少なく、解明が必要である。

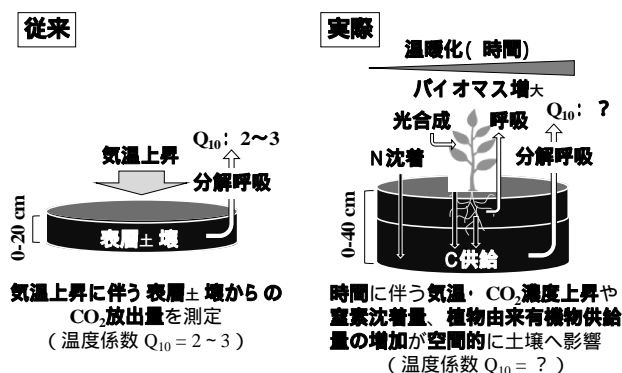


図 1. 従来の温暖化に伴う土壌炭素応答実験 (左) と実際に考慮すべき課題点 (右) の概念図。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は地球温暖化に伴い実際に土壌空間で生じ得る各種インパクト (気温上昇、植物由来有機物供給量の増加、窒素沈着量の増加) を包括的に考慮し、“温暖化に伴う真の土壌炭素応答メカニズム”を解明するための基礎的知見を得ることである。この目的を達成するためにいくつかの培養実験を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 培養実験 1

日本の代表的な土壌タイプの一つである黒ボク土の深層土壌 (40-50cm) を供試土壌として用いた。培養瓶に 2mm 篩に通した生土 (乾土ベースで 50g) を入れ、水分を圃場容水量に調整した。処理区は土壌のみ (S 区)、土壌に窒素源として硫酸アンモニウムを添加した区 (SN 区)、土壌に炭素源として  $^{13}\text{C}$  標識グルコースを添加した区 (SC 区)、土壌に窒素源と炭素源を添加した区 (SCN 区) の 4 処理区を作成した。土壌から放出される  $\text{CO}_2$  はアルカリトラップ + 滴定法で定量した。試験を開始する前に全ての処理区の土壌は土壌のみで 15 下で  $\text{CO}_2$  放出量が安定するまで 1 週間前培養し、その後、SN 区、SC 区、SCN 区にはそれぞれグルコースを土壌 1kg あたり 500mgC、硫酸アンモニウムを土壌 1kg あたり 50mgN 添加し、同時に培養温度を 25 に上げた。その後 3 週間培養を続け、上記と同様に炭素源と窒素源を添加し同時に培養温度を 35 に上げ、さらに 3 週間培養を行なった。培養期間において週 1 程度  $\text{CO}_2$  を定量し、一部炭酸塩化することで炭素安定同位体比を測定した。その結果から土壌由来および添加したグルコース由来  $\text{CO}_2$  を分別定量した。また、培養試験後の土壌からクロロホルム燻蒸法にて微生物バイオマスを抽出し、炭素安定同位体比を測定することで微生物が有する由来別炭素を推定した。試験はすべて 3 連で行なった。

#### (2) 培養実験 2

土壌は腐植酸の腐植化度が大きく異なる火山灰土壌 (黒ボク土: A 型) と非火山灰土壌

(未熟土: Rp 型)の2種を 0-20cm から採取し用いた。処理区は現環境を想定した対照区(以下 CO 区)と将来環境を想定した操作区(以下 FU 区)を設定した。両処理区とも培養瓶に各土壌を深さ 3.7cm になるよう充填し、CO 区は  $^{13}\text{C}$  標識グルコースを乾土 1kg あたり C ベースで 250mg、硫酸アンモニウムを既報の平均 N 沈着量を参考に N ベースで 10mg 添加し網室に静置した。FU 区ではグルコースと硫酸アンモニウム共に 2 倍量添加し、温室に静置した。水分は pF1.8~1.9 になるよう保持した。培養瓶内に NaOH 水溶液を別途設置し、一定量を滴定することで期間内に発生する  $\text{CO}_2$  を定量した。同時に残りの NaOH 水溶液を用いて炭酸塩化( $\text{BaCO}_3$ )し、安定同位体質量分析装置を使用して炭素安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )を定期的に測定することで同位体混合モデル式より土壌由来  $\text{CO}_2$  とグルコース由来  $\text{CO}_2$  を分別定量した。試験はすべて 3 連で行なった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 培養実験 1

培養期間に放出された積算全  $\text{CO}_2$  の経時変化を図 2 に示す。S 区と SN 区は比較的低い値であり、培養期間を通してほぼ同様の変化であった。SC および SCN 区は互いに類似した動きを示し、25 に上昇後  $\text{CO}_2$  量が大きくなり、その後微増した。35 に上昇後は SC および SCN 区はさらに  $\text{CO}_2$  量が増加した。土壌およびグルコース由来の  $\text{CO}_2$  放出量の経時変化を図 3 に示した。土壌由来  $\text{CO}_2$  は全  $\text{CO}_2$  の結果と類似した傾向であり、SC 区と SCN 区は S 区と SN 区よりも有意に高い値を示した。また、25 下では SC 区よりも SCN 区で  $\text{CO}_2$  量が低下する傾向であったことから 25 環境下では土壌炭素分解が窒素添加によって抑制される可能性が示された。グルコース由来  $\text{CO}_2$  の結果を見ると、SC 区よりも SCN 区で特に 35 下において有意に高い値を示したことから窒素添加によりグルコース分解量が増加することがわかった。図 4 に各処理区における培養試験後土壌の微生物バイオマスが有していた由来別炭素量の推定値を示した。SC 区と SCN 区はそれ以外の処理区よりも有意にバイオマス量が高いこと、体内の 9 割以上は土壌由来炭素を占めていることが示された。これらの結果から、SC 区と SCN 区では土壌炭素が微生物によって分解され放出されることで  $\text{CO}_2$  量が他の処理区よりも高くなっていたことが強く示唆された。各処理区における温度依存性(Q10)を算出したところ、SC 区と SCN 区で有意に高い値を示した(図 5)。以上の結果は植物バイオマスや窒素沈着の複合的インパクトによって土壌炭素分解の温度依存性が高くなることを示唆した。

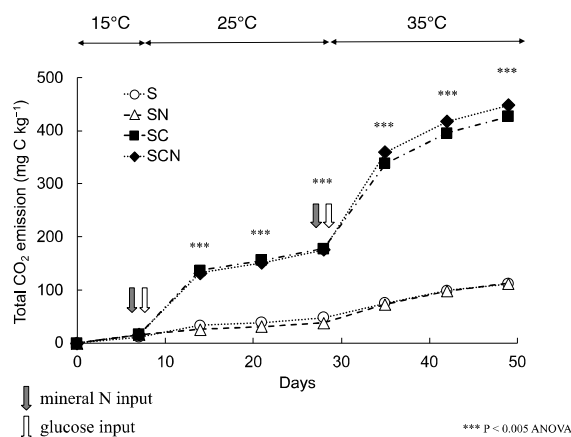


図 2. 各処理区における全  $\text{CO}_2$  の経時変化.

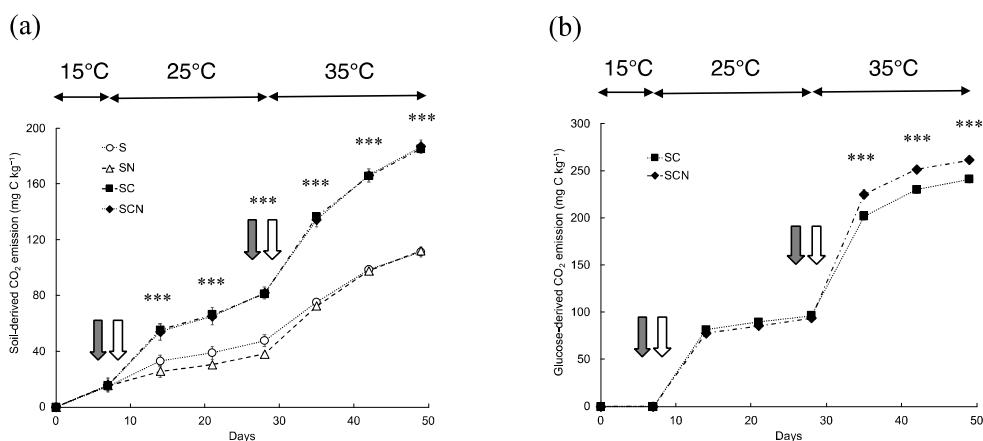


図 3. 各処理区における由来  $\text{CO}_2$  の経時変化. (a)土壌由来、(b)グルコース由来

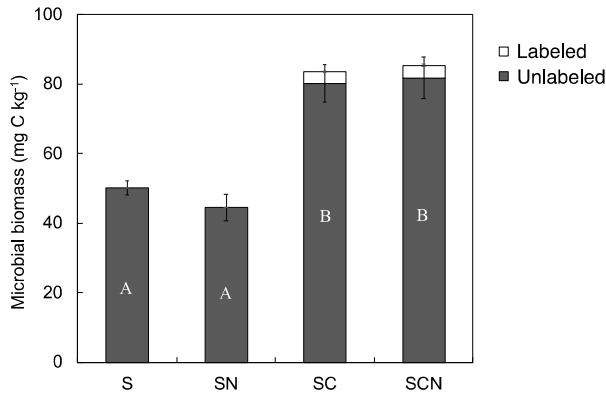


図4. 各処理区における微生物バイオマス体内の由来別炭素量

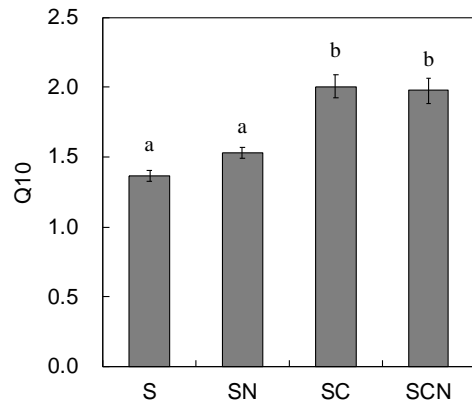


図5. 各処理区の温度依存性 (Q<sub>10</sub>)

## (2) 培養実験2

設置場所の6月下旬～9月上旬におけるCO区およびFU区の平均気温はそれぞれ27.8°Cと30.8°Cであり、FU区で3.0°C高かった(図6)。グルコース由来CO<sub>2</sub>は土壌や処理区に関係なく類似した経時変化を示し、培養3日目までにピークとなり培養6日目以降は急激に低下しその後は徐々に低下傾向を示した(図7)。土壌由来CO<sub>2</sub>は土壌間で少し異なる経時変化を示し、未熟土では培養20日目に、黒ボク土では培養27～34日目にピークを示した(図8)。

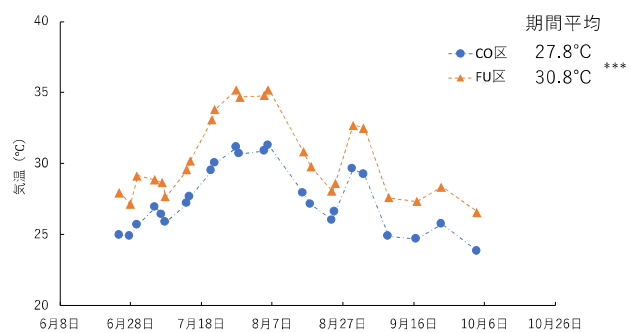


図6. 設置場所における気温変化

培養期間に放出されたグルコース由来CO<sub>2</sub>の積算値は未熟土および黒ボク土ともにCO区よりもFU区でそれぞれ2.7倍、2.2倍高かった。培養期間に放出された土壌由来CO<sub>2</sub>の積算値は未熟土および黒ボク土ともにCO区よりもFU区でそれぞれ1.2倍、1.4倍高かったがグルコースよりも温度依存性は低かった。培養期間における各土壌処理区の炭素収支(Cインプット-Cアウトプット)を算出したところ未熟土CO区、未熟土FU区、黒ボク土CO区、黒ボク土FU区ではそれぞれ-263、-241、-646、-822 μg C g<sup>-1</sup>soilとなり未熟土に比べ黒ボク土では複合的インパクトに伴う正のフィードバック効果が大きいことが示された(図9)。これらの結果は土壌有機物の構造が複雑であるほど温度依存性は増加するというアレニウスの反応速度論を支持しており、両土壌の相対的な質の違い(芳香族性など)が複合的インパクトに対する正のフィードバック効果において重要な因子の一つであることを示唆した。

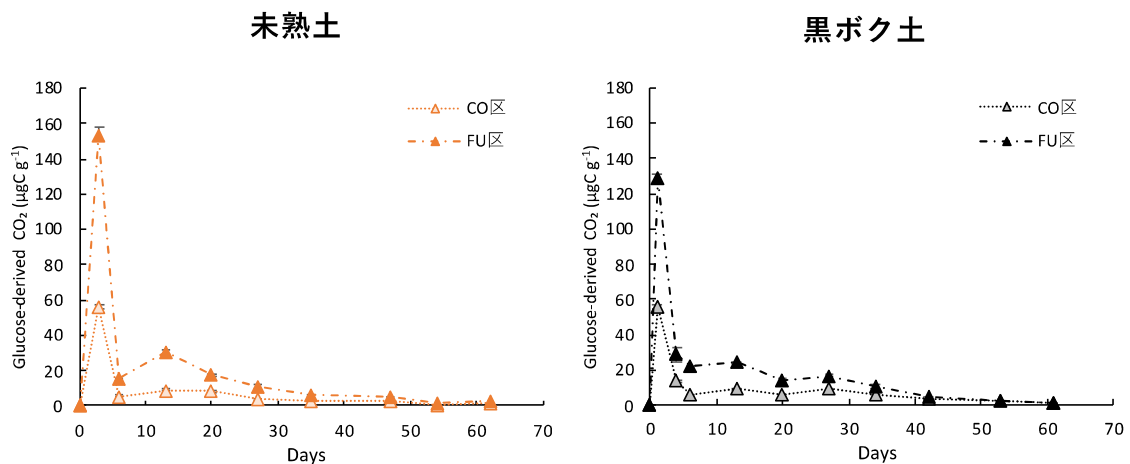


図7. 各処理区におけるグルコース由来CO<sub>2</sub>の経時変化

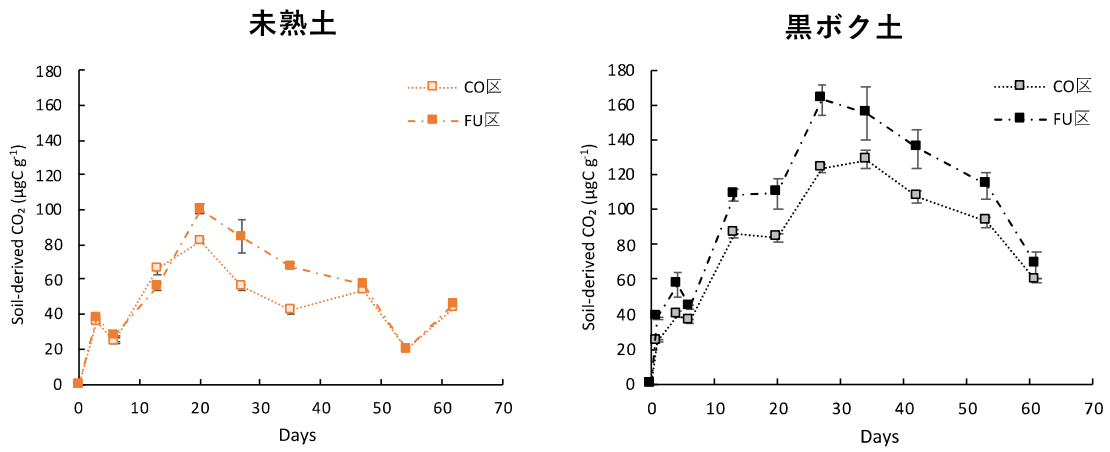


図 8. 各処理区における土壌由来 CO<sub>2</sub> の経時変化

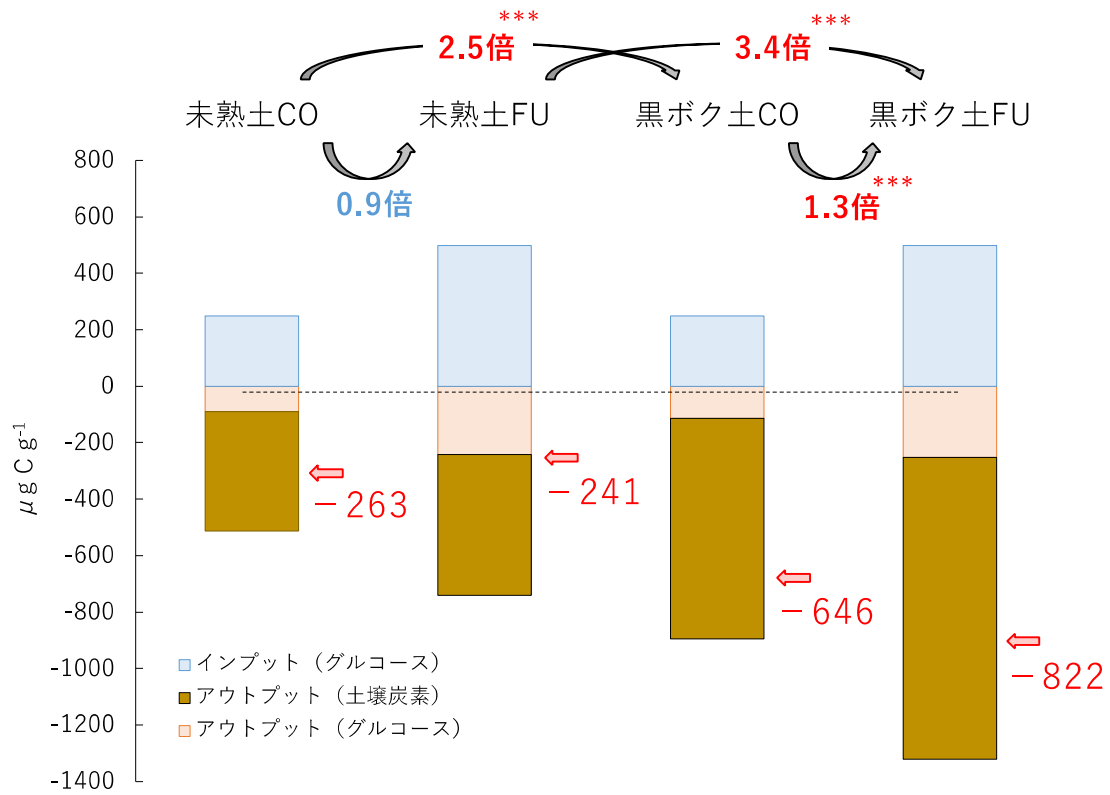


図 9. 培養期間における炭素収支

< 引用文献 >

- 1) Lal et al. (2010) *BioScience* 60: 708-721.
- 2) Davidson & Janssens (2006) *Nature* 440: 165-173.
- 3) Leppälampi et al (2014) *Plant and Soil* 374: 287-303.
- 4) Galloway et al. (2004) *Biogeochemistry* 70: 153-226.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasuo Iimura, Daichi Tanaka, Seiya Nagao, Nobuhide Fujitake, Toshiyuki Ohtsuka	4. 巻 66
2. 論文標題 The mineralization rate of black carbon in the deep layers of Japanese volcanic ash soil may be easily accelerated by labile carbon supply	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 415-420
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2020.1753481	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中大地・飯村康夫
2. 発表標題 温暖化インパクトを包括的に考慮した黒ボク土におけるプライミング効果：地温上昇、グルコースおよび無機態窒素添加の影響
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久司雅登・飯村康夫
2. 発表標題 森林土壌の炭素収支に対する溶存有機物の寄与：火山灰土壌を例に
3. 学会等名 日本腐植物質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芦田あかり・飯村康夫
2. 発表標題 マングローブ土壌の炭素蓄積過程における溶存有機物の寄与：室内モデル実験による評価
3. 学会等名 日本腐植物質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯村康夫・田中大地
2. 発表標題 埋没黒ボク土層におけるプライミング効果：グルコースおよび無機態窒素添加の影響
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中大地・飯村康夫
2. 発表標題 プライミング効果を考慮した埋没黒ボク土における分解温度依存性：グルコース添加を例に
3. 学会等名 日本腐植物質学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯村康夫・田中大地・高橋花鈴
2. 発表標題 グルコースおよび無機態窒素の供給と温暖化の複合的インパクトが土壌有機物分解速度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本腐植物質学会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------