

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00524

研究課題名(和文) プライミング効果による土壌炭素分解：温暖化応答メカニズムの解明

研究課題名(英文) Soil carbon mineralization by priming effect: Temperature sensitivity mechanism of soil carbon mineralization

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化に伴う土壌炭素の分解反応を理解することは重要な研究課題であり、これらを解明するためには易分解性有機物の混入に伴う既存の土壌炭素の分解速度変化、すなわち、プライミング効果(PE)を同時に考慮することが必要である。我々は日本を代表する土壌の一つである火山灰土壌を対象としてPEを考慮した土壌炭素の温度依存性評価を試みた。その結果、PEを考慮した場合は考慮しない場合に比べ明らかに温度依存性が増加した。すなわち、日本の火山灰土壌における炭素は現在予測されているよりも温暖化の進行に伴って分解される量が増える可能性があり、土壌炭素の温度依存性はPEを考慮することが重要であることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌は陸域最大の炭素貯蔵庫であるため、温暖化の進行にともなう土壌炭素の分解量の増減は温暖化の行方にも大きな影響を及ぼす可能性がある。そのため、土壌炭素の温暖化応答を理解することは重要な研究課題となっている。本研究では温暖化に伴って土壌への影響が強くなり得る植物由来の炭素供給に着目しこれらの影響に伴う土壌炭素分解量の変化を考慮した温暖化応答を評価した。その結果、植物の影響評価の有無によって温暖化に伴う土壌炭素分解量は大きく変化する可能性を見出した。これらの成果は今後の温暖化に伴う土壌炭素予測にとっても重要な知見になり得る。

研究成果の概要(英文)：The response of soil organic carbon (SOC) to global warming is a crucial subject. Changes in the mineralization of native SOC, i.e., priming effect (PE) may strongly affect the temperature sensitivity of SOC turnover in the presence of global warming. We investigated the temperature sensitivity of SOC in a Japanese volcanic ash soil considering PE phenomenon. We found that soil-originated CO₂ emission clearly increased with increasing temperature on the assumption that the temperature and substrate supply increase at the same time. These results suggest that not only the temperature increase but also the labile carbon supply may be important for the temperature sensitivity of Japanese volcanic ash soil.

研究分野：土壌化学

キーワード：温暖化 土壌 炭素 プライミング効果 炭素安定同位体比 土壌微生物

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土壌は陸域最大の炭素プールであり、その量は地上部バイオマスの3~4倍にもなる。そのため、温暖化に対する土壌の応答は大気中のCO₂濃度に多大な影響を与えるとして多くの研究者から関心が寄せられている。現在のところ、植物バイオマスから土壌へ供給される植物リター(C)と土壌から放出されるCO₂(C)は両者とも約60 Pg (Pg = 10¹⁵ g)と見積もられており、その収支はゼロとされている⁽¹⁾。一方、多くの場所では温暖化の進行により土壌から放出されるCO₂(C)は増加する可能性が指摘されている⁽²⁾。また、温暖化の進行に伴い、植物の光合成は促進され、土壌へ供給される植物リター(落葉・落枝・枯死根)や根からの滲出物などは増大すると予測されている。したがって、温暖化に対する土壌応答評価は直接的な温度の影響のみならず、植物由来有機物の供給量増大という間接的な影響も加味することが不可欠であるが、現在のところほとんど考慮されず多くは謎のままである(図1)。

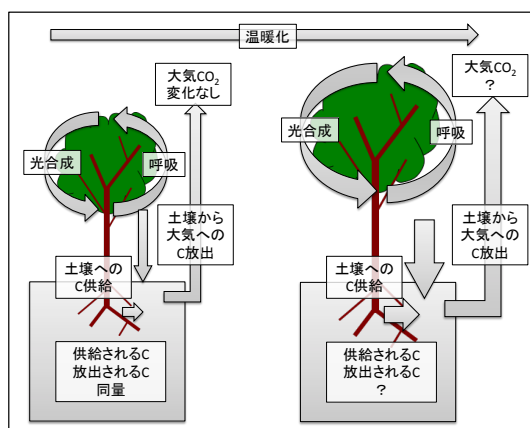


図1 陸域生態系での炭素収支及び温暖化に伴う土壌炭素応答の概念図

このような温暖化に対する土壌応答の謎を解く鍵となるのが“プライミング効果: PE”である。PEとは、植物由来の易分解性有機物が土壌へ新たに混入し、それに伴って既存の土壌炭素の分解反応速度が変化する現象である。しかし、PEに関する研究の多くは“現象”そのものを捉える段階にあり、PEの温暖化応答やPEを考慮した土壌炭素の温暖化応答に関する研究は少なく、詳細は不明である。

このような温暖化に対する土壌応答の謎を解く鍵となるのが“プライミング効果: PE”である。PEとは、植物由来の易分解性有機物が土壌へ新たに混入し、それに伴って既存の土壌炭素の分解反応速度が変化する現象である。しかし、PEに関する研究の多くは“現象”そのものを捉える段階にあり、PEの温暖化応答やPEを考慮した土壌炭素の温暖化応答に関する研究は少なく、詳細は不明である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、日本を代表する土壌について1)PEを考慮した実際に近い土壌炭素の温暖化応答を明らかにすること、2)これらのメカニズムについて特に微生物バイオマスとの関係を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究は日本を代表する土壌を供試土壌として、室内培養実験を通してプライミング効果を考慮した土壌炭素の温暖化応答を明らかにするものである。

(1) 供試土壌について

日本に約31%分布する火山灰土壌を供試土壌として用いた。土壌は岐阜県高山市の高山サイト(岐阜大学流域圏科学研究センター試験地内)に分布する火山灰土壌を用いた。この土壌(深さ1m程度)は約5000年前の火山灰を主な母材として生成したものと推定され、0~50cm程度は厚い黒色層(A層)となっている。本研究では、温暖化の影響が特に生じやすいと考え、表層0~20cmを対象とした。採取した土壌は2mm篩に通し、植物根など残渣を除去した後、培養実験に供試した。供試土壌の主な理化学性について表1に示した。

表1 供試土壌の諸特性

Depth (cm)	pH			T-C (g kg ⁻¹)	C:N ratio	CEC (cmolc kg ⁻¹)	δ ¹³ C (‰)	A ₆₀₀ /C
	(H ₂ O)	(KCl)	(NaF)					
0-20	4.9	4.2	10.3	125.0	13.8	35.3	-23.8	8.2

pH (H₂O)、pH (KCl)、pH (NaF) はそれぞれ水、塩化カリウム、フッ化ナトリウム時のpH、T-Cは全炭素、C:N ratioは全炭素:全窒素比、CECは陽イオン交換容量、δ¹³Cは炭素安定同位体比、A₆₀₀/Cは単位炭素濃度あたりの600nm吸光度(黒色度)を示す。

(2) 培養実験

500mL培養瓶に水分を保持量の60%に調整した土壌10g(乾土ベース)を入れ、ナチュラル¹³Cトレーサーであるトウモロコシ葉粉末(C4植物)を土壌1kgに対し2.5gC添加した(S+M区)。他方を土壌のみのコントロール区(S区)とした。CO₂フリー空気で培養瓶内を置換し密閉した後、15°C、25°C、35°Cの恒温槽で25日間培養した。CO₂発生量はアルカリトラップ法で培養3、7、14、25日目に測定し、CO₂の炭酸塩化を同時に行いδ¹³Cを測定後、培養期間中のPEを以下の式に基づき算出した(図2)。

$$R_{soil} + R_{sub} = R_{total}$$

$$R_{soil} \times \delta^{13}C_{soil} + R_{sub} \times \delta^{13}C_{sub} = R_{total} \times \delta^{13}C_{total}$$

R_{soil} 、 R_{sub} 、 R_{total} はそれぞれ土壌由来 CO_2 、トウモロコシ由来 CO_2 、全 CO_2 を示し、 $\delta^{13}C_{soil}$ 、 $\delta^{13}C_{sub}$ 、 R_{total} はそれぞれ土壌 $\delta^{13}C$ 、トウモロコシ $\delta^{13}C$ 、全 $\delta^{13}C$ を示している。

(3) その他

培養後の土壌を用いて微生物バイオマスを ATP 法⁽¹⁾に準じて測定した。また、土壌炭素の温度依存性を評価するため、 Q_{10} 値(気温が 10°C 上昇した場合に土壌からの CO_2 放出量が何倍になるかの指標)を求めた。

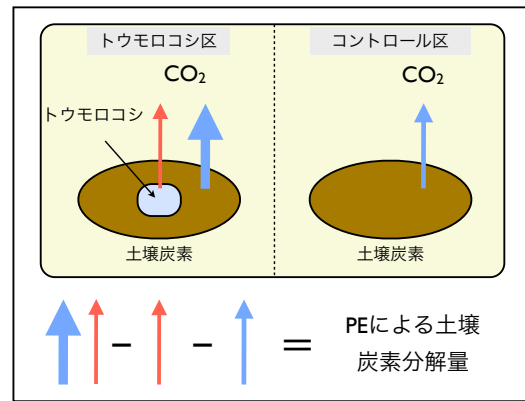


図2 プライミング効果 (PE) の算出イメージ。同位体混合モデルから放出 CO_2 を分別定量する。

4. 研究成果

(1) 各処理区における CO_2 放出量

培養期間における各処理区での CO_2 放出量を表 1 に示した。いずれの温度条件下でもトウモロコシ葉粉末が添加された場合、全放出 CO_2 量は明らかに増加し、その 86~90%はトウモロコシ葉由来であった。コントロール土壌 (S 区)、トウモロコシ添加区 (S+M 区)、S+M 区の土壌由来およびトウモロコシ由来の Q_{10} 値はそれぞれ 2.6、1.0、0.9、1.0 であり、トウモロコシが添加されるよりも土壌のみのほうが温度依存性が高いことがわかった。

表 2 培養期間中に放出された由来別 CO_2 量および Q_{10} 値

Temp. °C	CO_2 emission (mg C kg ⁻¹)			
	Control soil	Maize amended		
		Soil-derived	Maize-derived	Soil + Maize
15	6.9 ± 4.2 ^a	108.8 ± 8.0	658.1 ± 9.1	766.9 ± 3.3 ^a
25	10.4 ± 0.7 ^a	55.5 ± 11.2	710.2 ± 7.6	765.7 ± 9.7 ^a
35	45.9 ± 2.3 ^b	79.0 ± 40.1	742.6 ± 54.8	821.6 ± 15.7 ^b
Q_{10}	2.6	0.9	1.1	1.0

異なるアルファベットは Tukey's HSD 法に基づく有意差 ($P < 0.05$) を示す

(2) プライミング効果 (PE)

培養期間中に生じた各温度条件下でのプライミング効果 (PE) の積算値の結果を図 3 に示した。15°C、25°C、35°Cすべての温度条件下で正の PE が認められた。また、3つの温度間で PE を比較すると、PE は 15°Cで最も度合いが高く、25°C、35°Cでは有意に低下した。このような温度の上昇と PE 低下傾向はバラツキは大きいものの、25°Cと 35°Cの間にも見られた。このことは、はじめからトウモロコシ葉など比較的分解されやすい有機物 (易分解性有機物) が火山灰土壌に混合している場合、温度が低いほど PE は正方向に高くなる可能性を示唆している。このような現象の普遍性については、メカニズム面を含め、今のところ不明ではあるが、実際のフィールド環境も合わせて、更なる調査・実験・検証が必要であろう。

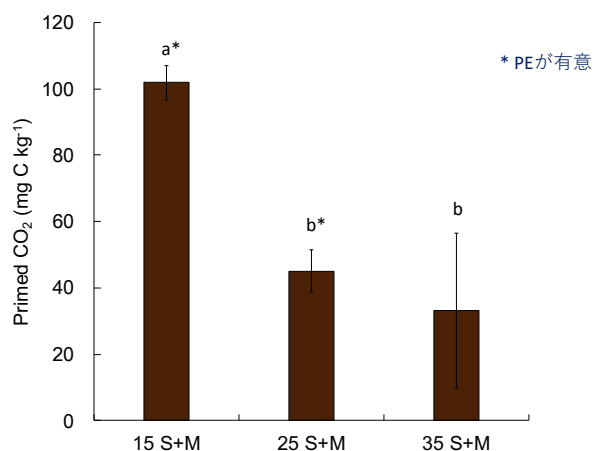


図3 各温度条件下におけるプライミング効果 (PE)。異なるアルファベットは Tukey's HSD 法に基づく有意差 ($P < 0.05$) を示す

(3) 微生物バイオマス

培養後に採取した土壌中の微生物バイオマスについて調査した結果を図4に示した。土壌のみの場合、いずれの温度条件下でも微生物バイオマスには有意差が認められなかった。一方、トウモロコシ葉を添加した場合は土壌のみと比べていずれの温度条件下でも微生物バイオマスは有意に増加し、温度が上昇するに従ってその値は低下する傾向を示した。また、トウモロコシ葉添加区におけるこれらの傾向はPEと強い相関関係が認められた。このことは、培養開始から25後に増殖している比較的活性化速度が遅いk戦略微生物バイオマス(r-k戦略説)がPE強く影響を及ぼしている可能性を示すものである。

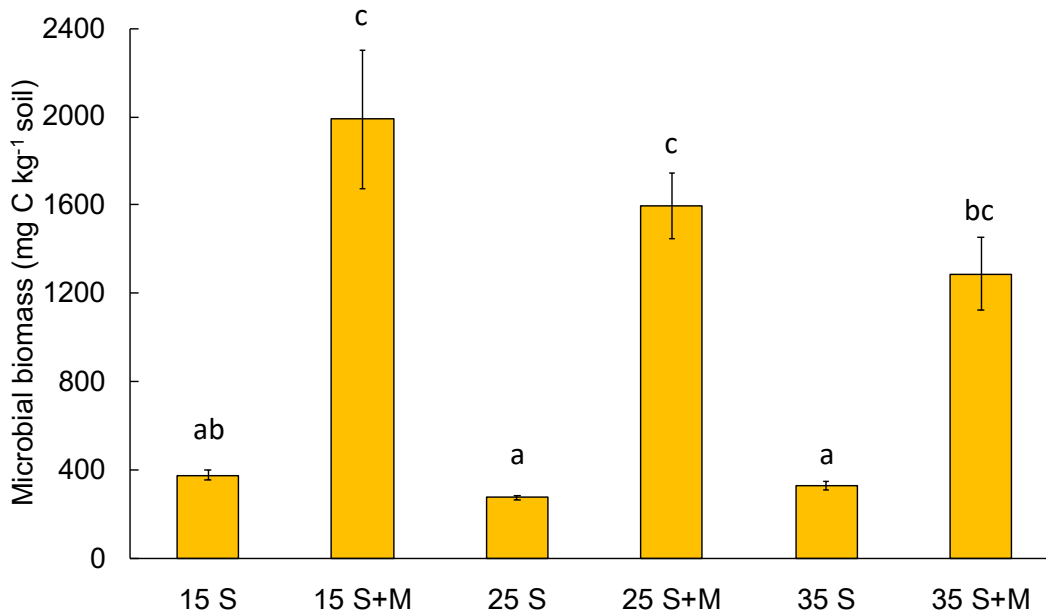


図4 各処理区における微生物バイオマス。異なるアルファベットは Tukey's HSD 法に基づく有意差 ($P < 0.05$) を示す

(4) PE を考慮した土壌炭素の温度依存性

本研究における培養実験結果を基に、土壌への直接的な温暖化の影響と間接的な植物由来炭素供給の影響が徐々に、且つ、同時的に進行していくと仮定した場合の Q_{10} 値を算出した結果を図5に示した。土壌のみの場合 (通常の Q_{10} 値算出法)、 Q_{10} 値は2.6であるのに対し、徐々に温度およびトウモロコシ葉の添加が生じたと過程した場合、 Q_{10} 値は3.4となった。この結果は、今後、実際に温暖化によって生じ得る土壌へのインパクト (直接的な温度の影響や地上部バイオマスを介した植物由来の易分解性有機物供給量の増大など) が温度のみを考慮した場合に比べ土壌炭素の温度依存性が増大する可能性を示している。これらについては他の土壌タイプも含め、実際のフィールド実験等を通して検証していく必要がある。

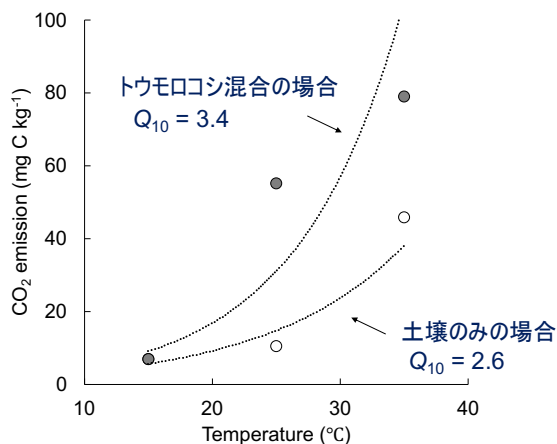


図5 温度上昇およびトウモロコシ添加が徐々に、且つ、同時進行的に生じると仮定した場合のコントロール区とトウモロコシ葉添加区の Q_{10} 値。

土壌のみの場合は温度のみが徐々に上昇する仮定。一方、トウモロコシ添加区では25°Cのときに初めてトウモロコシ葉が添加され、35°Cでも引き続きトウモロコシ葉の添加が生じると仮定している。

(5) まとめ

地球温暖化に伴う土壌炭素の分解反応を理解することは重要な研究課題であるが、これらについては未だ不明な点が多い。易分解性有機物の混入に伴う既存の土壌炭素の分解速度変化、すなわち、プライミング効果 (PE) は地球温暖化に伴う土壌炭素分解反応にも強く影響を及ぼす可能性がある。我々はナチュラル ^{13}C トレーサー (C4 植物: トウモロコシ葉) を火山灰土壌に添加し、異なる温度条件下 (15, 25, 35°C) で培養試験を行った。また、トウモロコシ添加の有無による土壌炭素分解反応の温度依存性を Q_{10} として評価し、それらと PE の関係について評価した。その結果、いずれの温度条件下でも正の PE が認められ、温度が高いほど PE の程度は低くなる傾向であることを見出した。また、PE は培養後の土壌微生物バイオマス量と一致する傾向を示した。コントロール区 (土壌のみ) では温度上昇に伴い二酸化炭素 (CO_2) 放出量は増大したが ($Q_{10}=2.6$)、トウモロコシ添加区での CO_2 放出量は温度上昇に伴いほとんど変化しなかった ($Q_{10}=1.0$)。一方、温度上昇とトウモロコシ添加が同時に生じると仮定した場合、土壌由来の CO_2 放出量は温度上昇に伴い明らかに増大した ($Q_{10}=3.4$)。以上より、日本の火山灰土壌では、地球温暖化に伴う土壌炭素の分解反応に対し、温度上昇だけでなく易分解性炭素の供給も重要であることを示唆した。

<引用文献>

- (1) Smith P (2008) Land use change and soil organic carbon dynamics. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 81, 169-178.
- (2) Leppälampi et al (2014) *Plant and Soil* 374: 287-303.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Iimura Y, Tabara I, Izumitsu K, Fujitake N	4. 巻 65
2. 論文標題 Priming effect of the addition of maize to a Japanese volcanic ash soil and its temperature sensitivity: a short-term incubation study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 444-450
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2019.1665969	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 Iimura Y, Matsuhara M, Ohtsuka T, Tomotsune M, Yoshitake S, Koizumi H	4. 巻 65
2. 論文標題 Priming effect of Miscanthus sinensis derived biochar on brown forest soil	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 550-556
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2019.1672101	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 Iimura Y, Kinjo K, Kondo M, Ohtsuka T	4. 巻 65
2. 論文標題 Soil carbon stocks and their primary origin at mature mangrove ecosystems in the estuary of Fukido River, Ishigaki Island, southwestern Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 435-443
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2019.1660589	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 飯村康夫・Vilanee Suchewaboripont・廣田充・吉竹晋平・大塚俊之	4. 巻 90
2. 論文標題 大白川ブナ・ミズナラ成熟林（old-growth forest）における土壌窒素無機化速度の空間変動解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本土壌肥科学雑誌	6. 最初と最後の頁 415-423
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 飯村康夫・森田悠介・大塚俊之	4. 巻 90
2. 論文標題 冷温帯落葉広葉樹林における林床ササ群落 (Sasa senensis) の有無が火山灰土壌の窒素無機化に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本土壌肥科学雑誌	6. 最初と最後の頁 381-385
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3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 飯村康夫・田原一聖・泉津弘佑・藤嶽暢英
2. 発表標題 火山灰土壌におけるプライミング効果の温度依存性
3. 学会等名 日本土壌肥科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯村康夫・夏原政明
2. 発表標題 バイオチャー の添加に伴う土壌有機物分解速度変化
3. 学会等名 日本腐植物質学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯村康夫・小林美春
2. 発表標題 土壌深層でのプライミング効果：セルロース添加に伴う火山灰土壌層の応答を例に
3. 学会等名 日本土壌肥科学会
4. 発表年 2017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	泉津 弘佑 (IZUMITSU KOSUKE) (20579263)	滋賀県立大学・環境科学部・講師 (24201)	
研究分担者	藤嶽 暢英 (FUJITAKE NOBUHIDE) (50243332)	神戸大学・農学研究科・教授 (14501)	