



Title	開放系CO2付加施設を利用した林床からのメタン発生検出 : 間伐手遅れ林への対策の提案
Author(s)	小池, 孝良; KOIKE, Takayoshi; Kim, YongSuk 他
Citation	北方森林保全技術, 42, 19-24
Issue Date	2024
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/99064">https://hdl.handle.net/2115/99064</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	43_1-5.pdf



## I - 5 開放系 CO<sub>2</sub> 付加施設を利用した林床からのメタン発生検出

### — 間伐手遅れ林への対策の提案 —

小池 孝良<sup>1,2</sup>, Kim YongSuk<sup>1,3</sup>, 北岡 哲<sup>1,2</sup>, 渡部 敏裕<sup>1</sup>, 市川 一<sup>2</sup>, 高木 健太郎<sup>2</sup>

1 北海道大学・農学研究院, 2 同・北方生物圏フィールド科学センター, 3 現所属・韓国森林研究所

#### はじめに

温暖化を乗り越えて地球高温化が身近な話題になってから久しい（伊豆田，2020；小池，2025）。放射強制力からみると、最近の温室効果ガスの中では CO<sub>2</sub> に次いでメタン（CH<sub>4</sub>）の影響は大きい（図-1）。メタン削減のために牛のゲップ抑制剤、飼料の開発や水田（湿地）での滞水時期（＝嫌気条件）調節や有機物を鋤込まない不耕起栽培などが提案されている（程・犬伏，2019；Wigley et al., 2024）。一方、大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇の原因としては吸収・貯留を担う森林の過度な利用と土壌劣化、そして、石炭や石油など化石燃料の大量消費を挙げることができる。

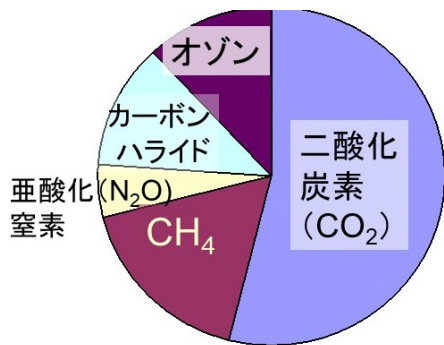


図-1. 温室効果ガスとして二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、メタン (CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) の順に温室効果ガスとして影響する。質量ベースでは CH<sub>4</sub> は CO<sub>2</sub> の 23~25 倍の温暖化影響力がある。

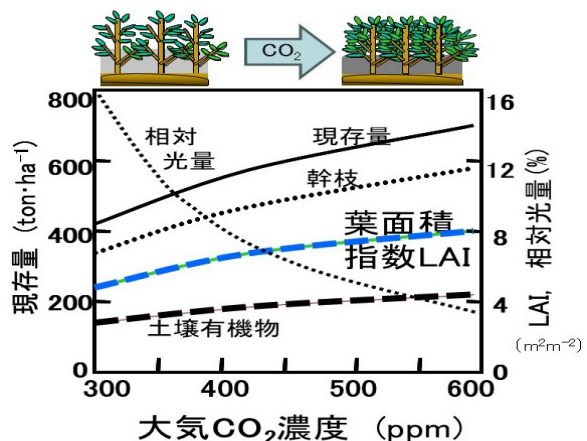


図-2. 大気 CO<sub>2</sub> 濃度と葉面積指数 (LAI)、土壌有機物量、入射光の変化。Oikawa (1986) から作成。

2001 年の日米会議（高木・小池，2001）によって要請された温暖化対策を含む両国にある問題解決に向けて科学技術庁の予算 (RR2002: 人・自然・地球共生プロジェクト) が採択された。この予算によって開放系 CO<sub>2</sub> 増加実験 (FACE) (小池ら，2025) が設置された。実験開始から 3 年目には高 CO<sub>2</sub> (=FACE) 区では、上層木が繁茂し、リター（落葉落枝）生産量が多い傾向があった。リター（落葉落枝）と土壌の間ではワラジムシなどの活動も盛んであった (Matsui, 2008；小池，2023)。この林床からの土壌呼吸の測定と同時にメタン発生も測定した (Kim, 2013)。

現在、林床は好気条件が維持されておりメタン消費（＝吸収）源であるが（e.g., McLain & Ahmann, 2008; Nia & Groffman, 2018）、高 CO<sub>2</sub> 環境が進行すると上層木の樹冠が繁茂し、林床へ到達できる光量が低下し、さらにリター集積の予測がされた (Oikawa, 1986) (図-2)。一方、高 CO<sub>2</sub> での気孔閉鎖は実験室では広く認められていたが、開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加 (FACE) でも確認された (Eguchi et al., 2008)。これらの先行研究が指摘したように林床の土壌の湿潤化が進み、FACE での土壌含水率は高い傾向があった (Eguchi et al., 2005)。一方、2006 年に

は Keppler らの好氣的メタン発生が報じられ、世界は震撼させられた。直ちに我々も好氣的 CH<sub>4</sub>発生を FACE で育成したウダイカンバ、ミズナラ、カラマツで調べた。その結果、カラマツがほか 2 種の約 3 倍の値を示したが、水田から値の 100~200 分の 1 以下であった (Kitaoka et al., 2007)。さらにヤチダモやハンノキの幹から通気組織 (エアレンチマ) を通じて CH<sub>4</sub>が効率よく発生している現象も各地で報告されている (坂部, 2022)。土壌での CH<sub>4</sub>酸化 (消費 = 吸収) は大気 CH<sub>4</sub>の主要な生物学的シンクであるが、気候や土壌水分変動で吸収強度が変化する (Murguia-Flores et al., 2021; Hao et al., 2025)。

本稿では、森林域での CH<sub>4</sub>消費能の減退と通気組織 (エアレンチマ) を介するメタン放出 (寺澤, 2021) を除く、森林からのメタン放出をまとめ、実施してきた FACE で得られた結果から、進行する高 CO<sub>2</sub>環境を踏まえ、これまでの調査例を基礎にして森林域でのメタン消費能の維持のための対策を論じる。

### 森林のメタン発生源への転換の兆候

メタン発生は湿地や水田などの湛水状態によって嫌氣的環境下で有機物にメタン生成菌 (メタン菌 Methanogen) が作用して生成される。牛のゲップにも含まれるため、メタン発生を抑制する飼料の開発も進んできた。水田も湛水時期を増やすことや有機物を鋤き込まない不耕起栽培などが導入されている (程・犬伏, 2019)。彼らは Rice-FACE での高 CO<sub>2</sub>環境では水田からの CH<sub>4</sub>発生が増加することも示唆している。一方、メタンは好氣条件で活動するメタン酸化菌 (Methane Oxidizing Bacteria : Methylococcaceae) によって分解される。

森林土壌が全球の土壌 CH<sub>4</sub>吸収の大部分を担う (Nia & Groffman, 2018)。彼らは、文献調査の結果、北半球での CH<sub>4</sub>吸収量は郊外での低下が都市域より明確に大きいことを示した。これは緑地の減少と蒸散機能低下に起因することを意味する。しかし、1900-2100 年を対象にした

全球モデル研究からは、土壌における CH<sub>4</sub>消費 (=酸化) は大気 CH<sub>4</sub>の主要な生物学的シンクで、気候や土壌水分変動によって吸収強度が変化するが示された (Murguia-Flores et al., 2021)。北海道大学天塩研究林のフラックス観測からは (図-3)、土壌からの CO<sub>2</sub>の放出に伴い CH<sub>4</sub>観測が行われている (小池ら, 2014)。さらに、森林の同一地点での長期モニタリング (1988~2015) からは、緯度による違いはあるが、アメリカ東部の森林では、2010 年までの 10 年において、62%から 53%へと CH<sub>4</sub>吸収能の約 10%の低下が確認された (Nia & Groffman, 2018)。詳細は後述するが、

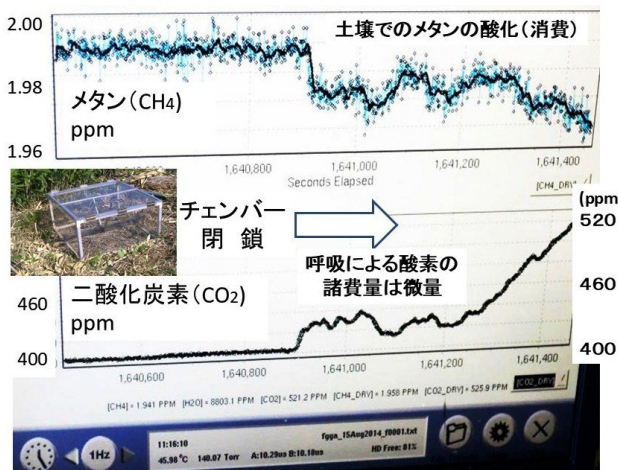


図-3.閉鎖系チャンバーによるメタンと CO<sub>2</sub>の動態の例。小池ら (2014) から改作。

斜面の異なる場所に設けられた島根大学のスギ人工林での CH<sub>4</sub>吸収の研究からは、上部に向かって土壌が乾燥するほど CH<sub>4</sub>吸収量が増加し、それは、伐採など生産活動などにも伴い土壌の堅密度が増加 (空隙が低下) するほど低下することが示唆された (豆谷ら, 2012)。

本報告では、実験的に大気 CO<sub>2</sub>濃度を上げる事で、林床からのメタンの動態を明らかにするため微量なサンプル濃度の変化を検出できる閉鎖式チャンバーを利用した実験を行った結果を紹介する。

材料と方法

試験地：北海道大学北方生物圏フィールド科学センター札幌研究林・実験苗畑に設けられた開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加施設 (FACE リング) の林床であった。リングの土壌は褐色森林土と未成熟火山灰土壌 (苫小牧研究林から客土し深さ 20cm に混入させた) の 2 種であった。CO<sub>2</sub> 付加は開葉から落葉までの約 7 ヶ月行い、この研究は CO<sub>2</sub> 付加後の 6~7 年目に実施された (Kim et al., 2011, Kim, 2013)。



図-4. 閉鎖式チェンバーとサンプリング  
ZFF は CO<sub>2</sub> モニター。

サンプリングと分析：閉鎖式の直径 20cm、深さ 30cm のチェンバーを FACE リング当たり 4 基設置し、記録式温度計で気温・地温を設置して測定値を得た (図-4)。空気をシリンジでサンプリングし、北海道大学土壌学研究室のガスクロマトグラフィー (GC-8A, GC-14B、島津) で分析した (Kim et al., 2011)。データは正規化を確認後、ネスティングを考慮した 2 元配置分散分析を行った。統計解析は SAS (2001) を用いた (Kim et al., 2011)。

北大 FACE の林床からのメタン放出の検出

高 CO<sub>2</sub> (FACE) 区では土壌水分含量が高かった (図-5)。つまり FACE 区土壌は対照区土壌に比べて、褐色森林土では 7%、火山灰土では 17% 高かった。FACE 区の土壌温度は対照区

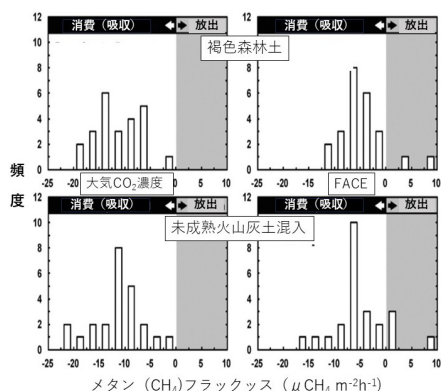


図-5a. 異なる土壌環境での CO<sub>2</sub> 付加によるメタンの発生頻度。Kim (2013) から作成。

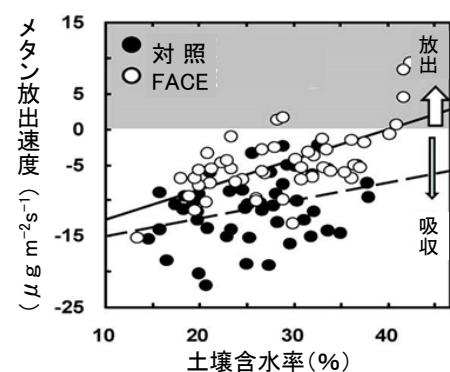


図-5b. 土壌含水率と高 CO<sub>2</sub> に対するメタン発生と吸収 (消費) 速度。Kim (2013) から作成。

よりも有意に低かった。褐色森林土壌では 2%、火山灰土壌では 3% 低かった。さらに、2005 年当時の通常大気 (370~390 ppm) の対照区土壌でのメタン消費 (吸収) 速度は、褐色森林土壌で 10.9 μgCH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>、火山灰土壌で 11.2 μgCH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> であった。FACE 区の値は、それぞれ 50% 以上減少して 4.45 と 5.12 μgCH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> であったが、2 つの土壌タイプ間でメタン消費量に有意な差はなかった (図 5a)。土壌タイプに関わらず、FACE 区のすべての測定点でメタン消費が観察されたが、FACE 区の土壌含水率 30% 以上では、調査地点の 13% でメタン放出が観測された (図 5b)。

メタン消費能を維持する方法

1) 土壌成分

メタン (CH<sub>4</sub>) 吸収のホットスポット (種数は多いが機能が損なわれる危機に瀕している) は、主に温帯林に分布している (Cen et al., 2024)。さらに、現在の N 沈着レベルが全球の森林土壌 CH<sub>4</sub> 吸収を約 3% 減少させていることを定量化した (Wigley et al., 2024)。この抑制効果は、温帯林において、熱帯林や寒帯林よりも顕著である。

窒素が制限要因となる生態系 (やせ地) では、土壌からの CH<sub>4</sub> フラックスは窒素添加に対する感受性が低い (Wu et al., 2022)。考えられる説明の一つは、窒素添加によってメタン酸化菌 (=CH<sub>4</sub> を消費する菌) の活性を低下させていた窒素制限が解消されるからであろう (Wigley et al., 2024)。森林生態系における窒素添加は、地表への落葉量の増加をもたらすので、メタンと酸素の土壌への拡散が抑制されて大気からのメタン消費 (吸収) は減少する。なお、窒素付加後の CH<sub>4</sub> の初期消費が減少し、その後、回復する現象は、過剰な NH<sub>4</sub><sup>+</sup> に耐性を持つメタン酸化菌群集への移行による可能性が示唆された。窒素濃度が高い場合、土壌有機炭素 (SOC) (C/N 大) が多い場合には、メタン酸化菌の活性を抑制する。他の養分として、窒素の制限された環境では、鉄 (Fe<sup>3+</sup>)、硫黄イオン (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、マンガン (Mn<sup>4+</sup>) がメタン酸化を決定づける。メタン酸化古細菌 (methanotroph) は、銅、マンガンなどの影響を強く受ける。

## 2) 施業法

小池・高橋 (2023) は、スギ人工林での保育作業に注目して、間伐を行うことでメタン吸収能を維持・向上できることを示唆した。それは、林床へ光を導入し、増加する土壌表面のリター (落葉落枝) を乾燥させ、好気 (メタン吸収) 環境へ誘導することを提案した。東北地方以北であれば地温の適当な上昇が期待でき、広葉樹を導入することでリター分解を促し、ミミズの活動を“支援”することで、林床の地表付近の土壌を好気条件に誘導することができる。ミミズは土壌を食べることでそこに含まれる養分を得て、糞として排出する (金子, 2023)。この結果として団粒構造の形成が見られる。さらに、貧栄養であれば窒素無機化も期待できる (Makoto et al., 2016)。ミミズ類の活動に期待したい。

一方、Wigley et al. (2024) は総説の中で、老齢林は林冠が疎であり、林床が乾燥している

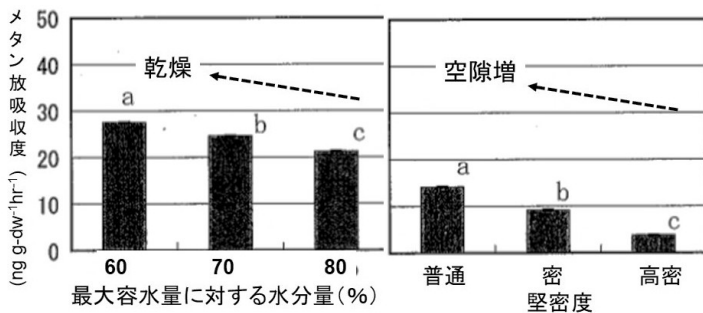


図-6. 異なる水分含有率 (左) と土壌の堅密度でのメタン吸収速度 (豆谷ら, 2013)

のでメタン消費能が高いことを示した。さらに、針葉樹人工林を対象に林床でのメタン吸収 (消費) 能の増加には、間伐の有効性は認められない、とした。ここで対象樹種を見るとラジアータパインなど元々の樹冠が比較的疎な林分を対象とした研究結果であった。

初めにも述べたが、島根大学三瓶演習林の斜面に沿ったスギ人

工林 3 ケ所の土壌を用いて調査した結果 (図-6)、乾燥している斜面上部で高く、作業道などで踏み固められていない場所でのメタン吸収能が高いことが明らかになった (豆谷ら, 2012)。以上を踏まえて、各種タイプの森林での間伐効果を検証することが期待される。

## 謝辞

FACE 稼働のために、RR2002 (人・自然・地球共生) プロジェクト、日本学術振興会、住友財団からの支援に感謝する。また、ガスクロマトグラフィーなどの利用をご支援くださった波多野隆介名誉教授ら土壌学研究室、さらに、施設維持には上田龍四郎氏 (ダルトン KK) と北方生物圏フィールド科学センターの関係者の支援を得た。記して感謝する。

## 引用文献

- Cen, X-Y., He, N-P., Li, M-X., et al. (2024) Suppression of nitrogen deposition on global forest soil CH<sub>4</sub> uptake depends on nitrogen status. *Global Biogeochem. Cycles*, 38, e2024GB008098. <https://doi.org/10.1029/2024GB008098>
- 程 為国・犬伏和之 (2019) 地球環境問題と土壌生化学. 犬伏和之 (編), 土壌生化学, 朝倉書店, pp.144-161.
- Eguchi, N., Funada, R., Ueda, T., et al. (2005) Soil moisture condition and growth of deciduous tree seedlings native to northern Japan raised under elevated CO<sub>2</sub> with a FACE system. *Phyton*, 45: 133-138.
- Eguchi, N., Morii, N., Ueda, T., et al. (2008) Changes in petiole hydraulic structure and leaf water flow in birch and oak saplings in an enhanced CO<sub>2</sub> environment. *Tree Physiol.*, 28: 287-295.
- Hao, Y-F., Mao, J-F., Bachmann, C. M., et al. (2025) Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review. *Climate and Atmospheric Sci.*, 8:16. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00888-8>.
- 伊豆田猛 (2020) 大気環境と植物. 朝倉書店.
- Jian, B-Z., Chen, H-Y., Zhang, J-Q., et al. (2025) Higher temperature sensitivity of forest soil methane oxidation in colder climates. *Nature Comm.*, 57763. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57763-0>
- 金子信博 (2023) ミミズの農業革命. ミスズ書房.
- Keppler, F., Hamilton, J., Braß, M., et al. (2006) Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 439: 187-191. <https://doi.org/10.1038/nature04420>
- Kim, Y. S., Watanabe, M., Imori, M., et al. (2011) Reduced atmospheric CH<sub>4</sub> consumption by two forest soils under elevated CO<sub>2</sub> concentration in a FACE system in northern Japan. *Jpn Jour. Atmospheric Environ.*, 46: 30-36.
- Kim, Y. S. (2013) Soil-Atmosphere Exchange of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in Northern Temperate Forests : Effects of Elevated CO<sub>2</sub> Concentration, N Deposition and Forest Fire. *Eurasian Jour. Forest Res.*, 16: 1-43. <http://hdl.handle.net/2115/53369>
- Kitaoka, S., Sakata, T., Koike, T., et al. (2007) Methane emission from leaves of larch, birch and oak saplings grown under elevated CO<sub>2</sub> in northern Japan –A preliminary study-. *Jour. Agr. Meteor.*, 63: 201-206. <https://doi.org/10.2480/agrmet.63.201>
- 小池孝良・佐藤冬樹・高木健太郎 (2014) 森林からのメタン発生—進行する高 CO<sub>2</sub> 環境の影響—. 北方林業, 66: 284-287.
- 小池孝良 (2023) ワラジムシの力 —タンナーゼの働き. 小池孝良ほか (編), 木本植物の被食防衛. 共立出版, pp.209-210.
- 小池孝良 (2025) 無機環境変化 (CO<sub>2</sub>、窒素沈着、オゾン). 上田裕文ほか (編), 森林生態系の保全管理—森林・野生動物・景観, 共立出版, pp.150-154.
- 小池孝良・高橋絵里奈 (2023) 自然資本を増進する「間伐」の意義. 山林, 1668: 42-59
- 豆谷龍治・藤巻玲路・山下多聞 (2012) スギ人工林土壌における環境要因の変化とメタン吸収との関係. 島根大生物資源科学部研究報, 17: 29-34.
- Matsui, K. (2008) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the decomposition rate of leaf litter through grazing of wood louse (*Porcellio scaber* (Isopoda: Oniscidae)) with special reference to its growth and consumption rate. Master Thesis, Graduate School of Environ., Sci. Hokkaido University, p.15.
- McLain, J. E. T., Ahmann, D. M. (2008) Increased moisture and methanogenesis contribute to reduced methane oxidation in elevated CO<sub>2</sub> soils. *Biol. Fertil. Soils*, 44: 623–631. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0246-2>
- Murguia-Flores, F., Ganesan, A. L., Arndt, S., Hornibrook, E. R. C. (2021) Global uptake of atmospheric methane by soil from 1900 to 2100. *Global Biogeochem. Cycles*, 35, e2020GB006774. <https://doi.org/10.1029/2020GB006774>
- Nia, X., Groffman, P. M. (2018) Declines in methane uptake in forest soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 115: 8587-8590.

- <https://doi.org/10.1073/pnas.1807377115>
- Oikawa, T. (1986) Simulation of forest carbon dynamics based on a dry-matter production model. III. Effects of increasing CO<sub>2</sub> upon a tropical rain forest ecosystem. *Bot. Mag. Tokyo*, 99: 419-430.
- 坂部綾香 (2022) 森林における水文循環がメタンガス交換に与える影響. 土壌の物理性, 151: 49-55. [https://doi.org/10.34467/jssoilphysics.151.0\\_49](https://doi.org/10.34467/jssoilphysics.151.0_49)
- 高木健太郎・小池孝良 (2001) 第9回日米セミナー：地球変動ワークショップ「陸域生態系における炭素循環マネジメント」報告. 北方林業, 54: 18-21.
- 寺澤和彦 (2021) 過湿土壌とメタン放出一樹木を介した地球環境への影響一. 小池孝良ほか (編), 木本植物の生理生態. 共立出版, pp.45-46.
- Wigley, K., Armstrong, C., Smail, S. J., et al. (2024) Methane cycling in temperate forests. Wigley et al. *Carbon Balance & Manag.*, 2024, 19: 37. <https://doi.org/10.1186/s13021-024-00283-z>
- Wu, J-J., Cheng, X-L., Xing, W., et al. (2022) Soil-atmosphere exchange of CH<sub>4</sub> in response to nitrogen addition in diverse upland and wetland ecosystems: A meta-analysis. *Soil. Biol. Biochem.*, 164: 108467. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108467>