

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21405037

研究課題名(和文) 熱帯泥炭湿地荒廃地および湛水造林地からのメタン放出

研究課題名(英文) Methane efflux from refooded and reforested tropical peatland

研究代表者

小島 克己 (Kojima, Katsumi)

東京大学・アジア生物資源環境研究センター・教授

研究者番号：80211895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円、(間接経費) 4,110,000円

研究成果の概要(和文)：開発熱帯泥炭土地域からの二酸化炭素放出を抑制するために再湛水化して森林を再生した場合のメタンの放出量の変動を予測するために、土壌からのメタン放出の水位応答と *Melaleuca cajuputi* の樹体を介したメタン放出を調べた。土壌からのメタン放出は、湛水状態では非湛水状態と同等あるいはそれよりも少なく、再湛水化による増大の懸念はないことが明らかとなった。樹体を介したメタン放出が検出され、水位応答性や時間変動が認められたが、量的には少なく、再湛水化による二酸化炭素放出の抑制効果に対する影響は非常に小さいことが明らかとなった。樹体を介したメタン放出の主な経路は樹皮であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In order to predict the response of methane emission accompanying reflooding and reforestation aiming at emission reduction of CO<sub>2</sub> from drained tropical peatlands, response of soil methane efflux to water level and methane efflux through *Melaleuca cajuputi* trees were investigated. Soil methane efflux under flooded conditions were similar or less than under drained condition, suggesting little possibility of increase in soil methane efflux by reflooding. Methane efflux through *Melaleuca* trees were detected, showing water level response and temporal fluctuation, which was rather small value when compared with the CO<sub>2</sub> emission reduction by reflooding. The thick, multi-layered bark of *Melaleuca* trees was revealed to be the major pathway of the methane efflux through tree body.

研究分野：生物資源環境学

科研費の分科・細目：境界農学・環境農学

キーワード：メタン 熱帯泥炭湿地 再湛水 *Melaleuca cajuputi* 生態系修復・整備 地球温暖化ガス排出削減  
国際研究者交流 タイ

## 1. 研究開始当初の背景

熱帯には3,000万～4,600万 haの泥炭土壌が分布し、そのうち2,000万 haが東南アジアに分布している。非常に厚い木質泥炭が堆積した熱帯泥炭土壌は、膨大な炭素ストックになっている。また、東南アジアの泥炭土壌の自然植生は泥炭湿地林であり、湛水によりリターの分解が抑制されているため、持続的な炭素吸収源となっている。東南アジアでは近年、この泥炭土壌がオイルパーム等のプランテーション開発により排水され好気的な条件になり、ストックされていた泥炭が微生物の活動により分解され、大きな二酸化炭素放出源に転換している。プランテーション開発に伴う火災により泥炭の焼失も起きており、さらに大きな二酸化炭素放出が起きている。この熱帯泥炭土壌の土地利用変化に伴う二酸化炭素放出の増加は、地球環境政策の上でも大きな問題になっているが、効果的な対策が立てられていない。これは、泥炭土壌の土地利用の現状や開発による泥炭の分解、焼失等の科学的な知見の集積が少なく、炭素吸収源への修復についてはほとんど例がないためである。開発された熱帯泥炭湿地からの多量の二酸化炭素放出を抑制するには再湛水化するのが効果的であるが、それを実現可能とするためには湛水状態で運用可能な土地利用の選択肢を提示することが重要である。我々は、再湛水化後に湛水状態で生育可能な熱帯樹木 *Melaleuca cajuputi* (メラルーカ) を植栽して、そのバイオマスを利用するシステムの確立を目指してきた。システムの確立には再湛水化による二酸化炭素の放出の抑制効果を明らかにすることが必要であるが、その算定の上では、湛水によって放出が増大する可能性があるメタンの放出の挙動を把握することが欠かせない。

湛水によって嫌気的な条件になるとメタン生成菌の活動により、泥炭からのメタンの放出が増加する。メタンの温暖化係数(同濃度の二酸化炭素と比べた温室効果の強度)が21であるため、メタンの放出の増加は、温室効果ガスの排出削減量に大きな影響を与える。このため、乾地化した泥炭地を再湛水して造林する吸収源プロジェクトでは、メタン放出量の評価が必須となる。

熱帯泥炭土壌からのメタン放出量に関しては、日本の研究グループが大きな貢献をしてきた(Ueda et al. 2000 *Biogeochemistry* 49:191-215、Inubushi et al. 2003 *Chemosphere* 52:603-608、Melling et al. 2005 *Soil Biology and Biochemistry* 37:1445-1453、Inubushi et al. 2005 *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71:93-99、Furukawa et al. 2005 *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71:81-91、Jauhiainen et al. 2005 *Global Change Biology* 11:1788-1797)。これらの研究成果によると、熱帯泥炭土壌からのメタン放出量は水田よりも少ない。これは泥炭土壌では pH が低いため、あるいは窒素等の栄養が少ないためにメタン生成菌の活動が抑制されているためであると考えられる。しかし、推定値のばらつきが大きく、また、乾地化した泥炭土壌

のデータが少ないので、これらの既存の数値をそのまま熱帯泥炭土壌での吸収源プロジェクトにおけるメタン放出量評価に用いることは困難である。水田土壌からのメタン放出については、日本の研究者の貢献により多くのデータが集積しているが、泥炭土壌についてもデータの蓄積が求められている。

また、植物体を経由して放出される量を考慮すると、放出量が多くなる可能性もある。一般的に植生があるところでは、嫌気土壌中で生成されたメタンの多くは、植物体中の通気組織を通過して大気中に放出されるといわれている。通気組織をもつ水稲の場合、植物体を通してメタンが放出され、その量が非常に大きいことがわかっている(犬伏ら 1989 *日本土壌肥料学会誌* 60:318-324)。自然湿地に生育する草本種でも同様のことが報告されており(Vandemat et al. 1998 *Biogeochemistry* 41: 1-22、Ding et al. 2005 *Atmospheric Environment* 39: 3199-3207 など)、生態系としてのメタン放出量推定がなされているが、熱帯泥炭湿地に関する知見はない。タイの湿地に生育する木本種にも二次通気組織が樹皮部に確認されており(山ノ下卓ら 2001 根の研究 10:51-57)、草本種と同様に大きなメタン放出経路となっている可能性がある。しかし、樹木を経由したメタン測定は困難であり、樹木の通気組織経由のメタン放出を含めた森林の放出量推定をしている報告はほとんどない(Purvaja et al. 2004 *Global Change Biology* 10: 1825-1834 など)。

## 2. 研究の目的

二酸化炭素放出源となっている熱帯泥炭土壌を再湛水化して二酸化炭素放出を抑制しつつ森林を再生したときのメタンの放出量の変動を予測し、正確な排出削減効果の推定を通じて泥炭保全の意義を科学的に説明する根拠を得ることを目的とする。そのために、水位条件の異なる環境における土壌からのメタン放出速度を測定し、再湛水化によるメタン放出の増大の可能性を検討する。また、樹体を介したメタンの放出の有無を確認し、放出が認められた場合にはその態様を把握し、再湛水後の森林造成によるメタン放出の変動への影響を検討する。

## 3. 研究の方法

タイ国ナコンシタマラート県の開発湿地に試験地を設置して以下の項目について研究を実施した。

(1)水位条件の異なる環境における土壌からのメタン放出の把握

再湛水化による土壌からのメタンの放出量の変動を予測するためには、メタン放出速度の水位応答性の把握が必要である。測定時期や測定場所を選ぶことによって水位条件の異なる環境において土壌からのメタン放出速度を測定し、放出速度の水位応答性を解析した。土壌からのメタン放出速度の測定には、塩化ビニル製の内径 20 cm の円筒状のチャンバーを使用し、クロードチャンバー法を採用した。チャンバーの設

置による土壌構造の攪乱の影響を抑えるために、測定の前少なくとも1日前までにはチャンバーを設置するようにした。チャンバーの上端に縁を付け、蓋板となる塩化ビニル板との間にリング状のパッキンを挟むことにより、蓋板との密閉性を高めた。蓋板には試料ガス採取、测温、バッファのための孔をそれぞれ穿ち、採取導入管、熱電対、テドラバックをそれぞれ取り付け後にパテで隙間を埋め、チャンバーの密閉性を確保した。バッファは、試料ガスを採取する際にチャンバー内の圧力が低下して土壌の気相のガスが強制的にチャンバー内に引き込まれるのを防ぐためのものである。チャンバーを閉鎖してから一定時間間隔で試料ガスを4-5回採取し、予め真空にしておいたバイアル瓶に注入して実験室に持ち帰り、メタン濃度をガスクロマトグラフ(GC2014, Shimadzu, カラム:Porapak-Q 80/100, キャリアーガス: N<sub>2</sub>, カラム温度: 40 °C, 検出器: FID, インジェクション量: 1 ml)によって測定した。メタン濃度の増加速度と、チャンバーの容積とチャンバー温度、チャンバーに覆われた土壌表面面積から、単位土壌面積あたりのメタン放出速度を算出した。メタン濃度の増加速度の推定には直線回帰あるいはHMモデルを適用した。

## (2) 樹体を介したメタンの放出の把握

樹体を介したメタンの放出の理解を深める方法として、個体全体のメタン放出量の把握のための幹切断法の開発と、メタン放出の態様を明らかにするための幹表面チャンバーを用いた一連の解析という、2つのアプローチにより研究を実施した。

### 幹切断法の開発

幹を地際で切断し、切断面からのメタン放出速度を測定することによって個体全体のメタン放出量を推定できるかどうかを明らかにするために、*Melaleuca cajuputi*(メラルーカ)の実生を用いて同法の適用可能性を検討した。容積 0.43 m<sup>3</sup> のコンテナに泥炭土壌を詰めてメラルーカの実生を植え付け、ある程度成長させた後に実験に供した。個体全体のメタン放出量を測定するために、個体チャンバーを製作した。個体チャンバーは、透明のプラスチック板で作成した円筒とその両端にはめる長さ6 cmの塩化ビニル製のリングからなる。リングの内側に厚さ3 cmの円形のフォームをはめ込み、リングを円筒の両端にはめることによってチャンバーが閉鎖される。リングとフォーム、円筒との接触部位の隙間をパテで埋め、チャンバーの密閉性を確保した。下端のリングのフォームには切り込みを入れて実生の地際部を挟み込めるようにし、上端のリングのフォームには、試料ガス採取、测温、バッファのための孔をそれぞれ穿ち、採取導入管、熱電対、テドラバックをそれぞれ取り付け後にパテで隙間を埋め、チャンバーの密閉性を確保した。実生の地際部にリングを設置してから5V DCファンを設置後に実生に円筒を被せ、円筒上端にリングをはめて密閉した。チャンバーを閉鎖してから一定時間間隔で試料ガスを4-5回採取し、予め真空にしておいたバイアル瓶に注入した。

試料ガス採取時には採取用シリンジを3回ポンピングしてから試料ガスを採取した。試料採取が完了した後、下端のリングを残してチャンバーを外し、実生の地際部で地上部を切除し、再度チャンバーを被せて閉鎖し、切除前と同様に試料ガスを採取した。採取した試料ガスを実験室に持ち帰り、メタン濃度をガスクロマトグラフによって測定した。土壌からのメタン放出速度の算出と同様の方法で個体からのメタン放出速度を算出し、放出速度を切除前後で比較し、切断法の適用可能性を検討した。適用可能性が確認された後、メラルーカ成木2個体について切断法を適用した。成木の幹地際部の直径よりもやや径の大きな縁付円筒チャンバーを作成し、幹との隙間をフォームで埋めることによって密閉性を確保した。チャンバーの蓋板は土壌チャンバーと同様の3孔付塩化ビニル板を用いた。幹地際部で地上部を伐倒した後、切断面に円筒チャンバーを被せて閉鎖し、一定時間間隔で試料ガスを4-5回採取し、予め真空にしておいたバイアル瓶に注入して実験室に持ち帰り、メタン濃度をガスクロマトグラフによって測定した。上記と同様の方法でメタン放出速度を算出した。

### 幹表面からのメタン放出の空間変動

切断法は個体全体のメタン放出量を把握するには適しているが、破壊的な方法であるためにメタン放出の動態を把握するには不向きである。動態把握のために、非破壊的測定法として、幹表面を覆う幹チャンバー法を採用し、本項以下の測定を行った。幹チャンバーは塩化ビニル製の長さ23 cmの円筒を縦2つに切り分けたものを使って製作した。チャンバーの半身に3孔を穿って試料ガス採取導入管、熱電対、テドラバックをそれぞれ取り付け後にパテで隙間を埋めた。測定木に合わせて円筒の直径サイズを複数用意した。チャンバーを測定木に取り付ける際に、チャンバー両端にあたる部分の幹に帯状フォームを巻き付けて、取り付け部位の太さがチャンバーに合うように調整した。チャンバーを取り付けた後、チャンバー両端、円筒半身の接合部をパテで密閉した。チャンバーを閉鎖してから一定時間間隔で試料ガスを4-5回採取し、予め真空にしておいたバイアル瓶に注入して実験室に持ち帰り、メタン濃度をガスクロマトグラフによって測定した。チャンバー内の幹の両端の周囲長と幹の長さからチャンバー内の幹の体積を算出し、空のチャンバー容積から幹の体積を差し引くことにより、測定時のチャンバー容積を算出した。上記と同様の方法でメタン放出速度を算出した。幹表面からのメタン放出が地際からの高さによってどのように異なるかを明らかにするために、地際約50 cmと約100 cmに幹チャンバーを取り付け、放出速度を測定した。

### 幹表面からのメタン放出の時間変動

幹表面からのメタン放出の時間変動を明らかにするために、未明から夕方にかけて1.5-2時間おきに幹チャンバー法により幹からのメタン放出速度を測定した。

### 幹表面からのメタン放出の水位環境応答

幹表面からのメタン放出が水位条件によってどのように変化するかを明らかにするために、水位の異なる時期に幹チャンパー法により幹からのメタン放出速度を測定し、比較した。

#### 幹表面からのメタン放出の経路の推定

植物体中のメタンの移動経路としては蒸散流で運ばれる経路と根や茎の内部に発達した空隙(通気組織)を移動する経路とがあるが、通気組織が発達した植物では後者が主であると考えられている。メラルーカの樹皮は、厚く、気相に富んだ多層構造を有しており、通気組織のようにメタンの移動経路となっている可能性がある。メラルーカの幹表面からのメタン放出の経路を推定するために、樹皮を剥離する前後に幹からのメタン放出速度を測定し、木部と樹皮の移動経路としての寄与度を比較した。幹チャンパーを用いて剥皮前のメタン放出速度を測定した後、チャンパー直下の樹皮を2 cmの幅で剥離し、パテで剥離部分を覆った後に再度メタン放出速度を測定した。剥離後のメタン放出速度を木部経由のメタン放出の最大可能放出速度とみなし、剥皮前後での放出速度の差を樹皮経由のメタン放出速度として評価した。試料ガスのメタン濃度の測定の際に同時に二酸化炭素濃度も測定し(検出器:TCD)、幹表面からの二酸化炭素放出速度を併せて評価した。

#### 4. 研究成果

再湛水化による土壌からの二酸化炭素放出の抑制効果との比較をするために、メタンの温暖化係数を21としてCO<sub>2</sub>量に換算したヘクタールあたりの年間放出量(tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>)としてメタン放出速度を評価した。

##### (1)水位条件の異なる環境における土壌からのメタン放出の把握

非湛水状態でも土壌表面からのメタン放出が検出された。同じ水位条件下でも測定地点による放出速度の変動が大きく、数m程度の距離でも放出速度に10倍以上の差がある場合もあった。水位-35 cm~-5 cmの範囲で水位の変化に対して放出速度に一定の傾向は認められず、0.004 - 4.4 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>の範囲にあった。一方、湛水状態では、水位15 cm~50 cmの範囲で0.05 - 0.16 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>の範囲にあった。本研究で調査の対象としたタイ国ナコンシタマラートの開発湿地域は、水位管理があまり厳密には行われておらず、降雨の多少にともなって水位が変動し、湛水と非湛水の状態を繰り返す環境にある。水位が-50 cm以下を長期にわたって維持することはまれであり、非湛水でも表層土壌が極度に乾燥することなく部分的に飽和状態にあるような立地であるため、好気層が発達しにくく、下層の嫌気条件で生成されたメタンが表層部で酸化されることなくそのまま土壌表面から放出されやすい条件にある。非湛水状態でも湛水状態と同等あるいはそれ以上のメタン放出が検出された原因にはこのような立地要因が関与していると考えられる。このような条件では、再湛水化して森林を造成して持続的に利用するシステムを構築する際に、土壌からのメタン放出の増大の可能性を

懸念する必要はないといえる。湛水状態でのメタン放出速度については、これまでの限られた先行研究においても水田で0.2 - 0.5 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>の値が報告されている以外は0.2 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>以下の値である。マレーシアなどにみられるような、厳格な水位管理の下に水位-50 cm以下に維持しているような開発湿地域については、非湛水状態では土壌からのメタン放出がほとんどない場合もあるが、そのような場合でも再湛水化した場合のメタン放出の増大は0.2 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>以下であると考えられる。この値は、再湛水化によって見込まれる二酸化炭素の放出抑制(15 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>)に比べると非常に小さく、全体としての温室効果ガス放出抑制効果は依然として大きいといえる。

##### (2)樹体を介したメタンの放出の把握

###### 幹切断法の開発

メラルーカ実生の地上部を切除した前後でメタン放出速度を個体チャンパーを用いて比較したところ、よい相関( $r = 0.875$ )が得られたことから、個体全体のメタン放出速度を測定する方法として幹切断法の有用性が示された。実際にメラルーカ成木2個体について幹切断法によりメタン放出速度を測定したところ、それぞれ1.1 μgCH<sub>4</sub> h<sup>-1</sup> tree<sup>-1</sup>、2.2 μgCH<sub>4</sub> h<sup>-1</sup> tree<sup>-1</sup>の放出が検出された。

###### 幹表面からのメタン放出の空間変動

幹チャンパー法によりメラルーカ成木の幹表面からのメタン放出が検出された。地際50 cmでは地際100 cmに比べて放出速度が高く、10倍あるいはそれ以上の差があった。幹表面からのメタン放出速度には個体による差異が大きいが明らかとなった。本研究で得られた放出速度の最大値とメラルーカの相対成長式から推定した15年生メラルーカ人工林1 haの幹表面積をもとに、メラルーカ人工林において樹体から放出されるメタンの量を試算した。試算にあたり、地際1.3 m以上では放出速度が地際の1/10であると仮定した。試算値は0.097 tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>となり、土壌からのメタン放出と合わせても再湛水化による二酸化炭素の放出抑制効果に比べて非常に小さいことが明らかとなった。

###### 幹表面からのメタン放出の時間変動

メラルーカ成木の幹表面からのメタン放出速度は未明から昼過ぎにかけて増加する傾向が認められた。メタン放出速度の時間変化の要因として樹液流の変動による溶存メタンの樹体への輸送量の変動を想定し、メタン放出速度の測定と同時に樹液流速を測定し、両者の対応を解析したが、明瞭な対応は認められなかった。土壌面からのメタン放出速度にも幹表面からの放出と同様の時間変化の傾向が認められたため、土壌の温度変化などに起因する土壌中のメタン濃度の時間変化が幹表面からのメタン放出の時間変化の要因の一つである可能性がある。

###### 幹表面からのメタン放出の水位環境応答

非湛水時に比べて湛水時のほうが幹表面からのメタン放出速度が大きいことが明らかとなった。

###### 幹表面からのメタン放出の経路の推定

幹表面からのメタン放出の主要な経路は樹皮であり(放出全体の 65-89%)、幹からのメタン放出速度の大きな個体間差異の要因であることが明らかとなった。樹皮経由のメタン放出と木部経由のメタン放出には正の相関が認められたが、放出速度が少ない個体については相関が不明瞭であった。樹皮経由のメタン放出が幹からのメタン放出に占める割合には個体間で差異があり、幹断面積や樹皮断面積、あるいはそれらの比に対する依存性は認められなかった。幹表面からの二酸化炭素放出にも樹皮を経由する放出を確認した。幹からのメタン放出速度が小さい個体については樹皮を経由するメタンの放出速度と樹皮を経由する二酸化炭素の放出速度との間に正の相関があった。非湛水時には、幹からのメタン放出速度が小さく、木部経由のメタン放出は検出されなかった。また、幹からの二酸化炭素放出速度も小さく、樹皮経由の二酸化炭素放出が不検出の個体があった。樹皮経由のメタン放出速度が大きな個体は木部経由のメタン放出速度も大きかったことから、メタンの供給源である土壌中のメタン濃度の不均一性が幹からのメタンの放出の個体間差異をもたらしている可能性がある。メタン放出の水位応答性からこのことが推察される。樹皮経由のメタン放出速度と二酸化炭素放出速度との間に相関関係があったことから、樹皮内部の空隙の様態の違いによる通気特性の違いや樹皮周囲への漏気性の違いなどが樹皮経由のメタン放出速度に影響を与えている可能性が示唆される。非湛水時には樹皮経由の二酸化炭素放出が不検出の個体があったことから土壌中における樹皮周囲のガス拡散特性が地上部の樹皮経由のガス放出に影響を与えていることが示唆される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Nagano, T., Osawa, K., Ishida, T., Sakai, K., Vijarnsorn, P., Jongskul, A., Phetsuk, S., Waijaroen, S., Yamanoshita, T., Norisada, M., Kojima, K. (2013) Subsidence and soil CO<sub>2</sub> efflux in tropical peatland in southern Thailand under various water table and management conditions. *Mires and Peat* 11: 1-20. (査読有)

[学会発表](計4件)

則定真利子, 山ノ下卓, 古川原聡, 小島克己. (2014) 熱帯低湿地に生育する *Melaleuca cajuputi* の樹体からのメタン放出の経路の推定. 第125回日本森林学会大会, 2014年3月26日~同30日, 大宮.

Norisada, M., Yamanoshita, T., Adachi, K., Osawa, K., Nagano, T., Inoue, M., Ishida, T., Vijarnsorn, P., Kojima, K. (2012) A sustainable woody biomass production system for tropical peatlands. 14th International Peat Congress. 3-8 June 2012, Stockholm, Sweden.

則定真利子, 山ノ下卓, 小島克己. (2012) 熱帯泥炭湿地に生育する *Melaleuca cajuputi* の樹体からのメタン放出. 2012年3月26日~同29日, 第123回日本森林学会大会, 宇都宮.

則定真利子, 山ノ下卓, ピスット=ビジュアルソン, 小島克己. (2010) 熱帯泥炭湿地開発地の再湛水化とメタン放出. 第121回日本森林学会大会, 2010年4月2日~同5日, つくば.

[図書](計1件)

小島克己(共編著), 東京大学出版会, アジアの生物資源環境学 - 持続可能な社会をめざして, 2013, 244.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小島 克己(KOJIMA, Katsumi)

東京大学・アジア生物資源環境研究センター・教授

研究者番号:80211895

### (2)研究分担者

( )

研究者番号:

### (3)連携研究者

( )

研究者番号: