

森とメタンの意外な関係

寺澤和彦

はじめに

皆さんは「メタン」と聞くとどのようなイメージを持たれるでしょうか。沼の底からプクプクと湧き上がる泡、牛や羊などの消化管から出るガス、あるいはメタンハイドレートと呼ばれる海底のエネルギー資源を思う人もいるかもしれません。メタンが地球の温暖化に関わる温室効果ガスのひとつであることをご存じの人も多いと思います。では、「森とメタンの関係」となるとどうでしょうか。森林、正確に言えば森林の土壌が、大気中のメタンを吸収しているという事実は案外知られていないのではないのでしょうか。森林の多くはメタンの吸収源としての役割を果たしているのです。また一方、溪畔や湿地の林では、土壌の中のメタンが樹木の体内を通して微量ながら大気に出ていく場合があることもわかってきました。ここでは、最近の研究で明らかになってきた森林とメタンの関係についてご紹介します。

メタンとは

メタン (CH₄) は、現在の地球の大気中に平均濃度で約 2ppm* (正確には2008年の観測値として1.797ppm) 含まれています。二酸化炭素 (CO₂) の大気中濃度が385.2 ppm (2008年の地球全体の平均) ですから、メタンの大気中濃度は二酸化炭素に比べると2けたも低いことになります。しかし、大気中のメタンの濃度は二酸化炭素と同様に産業革命以降に上昇を続けており、現在の濃度は産業革命前のレベル (約0.7 ppm) の2.6倍に達しています。さらに、地球温暖化に対するメタンの効果 (温暖化係数) は、100年間の時間スケールでみた場合、二酸化炭素の20倍以上も大きいのです。そのため、1750年以降に人間活動で増加した各温室効果ガスの温室効果全体に占める比率は、二酸化炭素が64%で第1位、次いでメタンが18%で第2位と見積もられています。

現在の大气中のメタンのうち、約70%はメタン生成菌という微生物 (細菌) の活動によって発生したものと推定されています。メタン生成菌は、酸素が存在しない環境で生活するため、たとえば湿地や水田の泥の中や動物の消化管の中で活動し、水素と二酸化炭素や酢酸などからメタンを作り出しています。メタン生成菌による発生も含め、メタンの発生源の約6割 (あるいはそれ以上) が人間活動に起因するもので、残りの約4割が自然起源とされていますが、地球全体での具体的な発生源ごとの排出量の見積もりは十分にはできていないのが現状です。

一方、大気中のメタンは、その多くが光化学反応によって消失するとともに、メタン生成菌とは異なる別の微生物の活動によって分解されて消失します。このメタンを分解する方の微生物はメタン酸化菌と呼ばれる細菌で、酸素が供給される土壌の表層などで生活しています。このような発生・消失を繰り返してメタンは循環し、大気中での平均滞留時間は約10年とされています。

森林土壌によるメタンの吸収

いま述べたように、大気中のメタンの一部は土壌中のメタン酸化菌によって分解されて消失します。言い換えれば、土壌は、そこに生息するメタン酸化菌の働きによって大気中のメタンを吸収している、と言えるわけです。では、私たちが関心のある森林の土壌はどのくらいのメタンを吸収するのでしょうか。土壌の種類によって吸収量は違うのでしょうか。

*ppm: 100万分の1の割合を示す単位で1ppm = 0.0001%。ちなみに地球の大気は、窒素が約78%、酸素が約21%である。

森林土壌によるメタン吸収の研究の歴史はそれほど長いものではありません。1980年代に欧米を中心に始まり、日本では1990年代後半から調査が開始されました。2002年からは、日本全国の様々な森林や土壌タイプにおけるメタン吸収量を統一的な手法で測定する共同研究が、独立行政法人森林総合研究所と各地の地方公設研究機関や大学によって実施されました。ここでご紹介するのは、私たちも参加したその共同研究の成果 (Morishita et al. 2007) の一部です。なお、この共同研究では、亜酸化窒素 (N_2O) の排出量についても測定されています。

北海道の森林での調査

北海道では、道央地域のトドマツ林 (73年生) とカラマツ林 (42年生) で調査を行いました。どちらの調査地も、標高約200mの山地の緩斜面に位置しています。さらに、土壌中でのメタンの生成や分解に関わる水分環境がこれらの調査地とは大きく異なる溪流沿いの平坦地のヤチダモ林 (71年生) でも調査しました。調査地の土壌は、トドマツ林とカラマツ林が適潤性の褐色森林土、ヤチダモ林が深さ1m以内に地下水位があるグライ土です。適潤性の褐色森林土は、北海道でごく一般的に分布する土壌のタイプです。

メタン吸収量を測定するためには、地表面にチャンバーと呼ばれるステンレス製の円筒 (直径40cm, 高さ15cm) をあらかじめ浅く差し込んでおきます (写真 1)。測定時にはプラスチック製のふたでチャンバー上面を密閉し、その直後と10分, 20分, 40分後にチャンバー内の空気を注射器で採取します。採取した空気のメタン濃度をガスクロマトグラフという装置で測り、単位時間当たりの濃度の変化量から吸収量 (または排出量) を計算します。チャンバーは各調査地に5個ずつ設置し、測定は冬季も含めて毎月1回行いました (ただし、カラマツ林では積雪期間中は調査を中断)。

各調査地における2003年1月から2004年12月までの測定結果を図 1に示します。いずれの調査地でも土壌が大気からメタンを吸収していることが確かめられました。通年で調査したトドマツ林では、吸収量の季節変化が比較的明瞭で、夏季に大きく冬季に小さい傾向が見られます。カラマツ林での無雪期の吸収量は、調査地内での測定値のばらつきが大きいもののトドマツ林とほぼ同じ程度の吸収量を示しました。測定期間を通じた平均メタン吸収量 (平均値±標準偏差) は、トドマツ林では $56.7 \pm 36.7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、カラマツ林では $93.1 \pm 49.9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ でした。

また、調査した2年間では年次による違いは見られませんでした。

一方、溪流のヤチダモ林では、メタンは土壌に吸収されてはいるものの、その吸収量は山地の2か所の調査地に比べて著しく小さく、平均で $2.9 \pm 5.1 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ でした。



写真-1 土壌のメタン吸収量を測定するための円筒形のチャンバー

(測定時にはプラスチック製のふたで上部を密閉し、チャンバー内のメタン濃度の時間的な変化を測る)

全国の森林での調査

この共同研究では、北海道から沖縄まで15道府県の31か所の森林でメタン吸収量の調査が行われ、そのうち26か所の結果が論文 (Morishita et al. 2007) にとりまとめられています。調査地の森林の種類は、針葉樹人工林 (スギ, ヒノキ, カラマツ, トドマツ, アカマツ) が主体で、その他に落葉・常緑広葉樹林などが含まれます。土壌の種類は、褐色森林土, 黒色土, グライ土, 赤色土, 赤黄色土など

のさまざまなタイプを含みます。

これらの26か所の調査地で、2003年1月から2004年12月までの2年間、月に1回測定されたメタン吸収量の平均値(±標準偏差)は $66 \pm 41 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ でした。したがって、先に述べた北海道の山地の2林分(トドマツ林とカラマツ林)でのメタン吸収量は、全国的に見てほぼ平均的な値といえるでしょう。それに対して、河畔のヤチダモ林での吸収量($2.9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)はやはり大変小さいものであることがわかります。

全国での調査結果では、メタン吸収量に森林の種類による違いはみられませんでした。が、土壌のタイプによる違いが報告されています。すなわち、黒色土(平均 $95 \pm 39 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)では、褐色森林土(平均 $60 \pm 27 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)やその他の土壌(平均 $20 \pm 24 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)より高い吸収量を示しました。その理由としては、一般的に黒色土は孔隙が多いために通気性が良好で、そのことがメタン酸化の活性の高さにつながっているのではないかと考察されています。さらに、土壌タイプごとのメタン吸収量の平均値にそれぞれの土壌タイプの分布面積を掛けて求められた日本全国の森林における年間メタン吸収量は、 124 Gg C (炭素として12.4万トン:不確実性*39%)と推定されています。ちなみに日本国温室効果ガスインベントリ報告書(2010年4月発行)によると、日本全国の水田からの2008年度の年間メタン発生量の推定値は 200 Gg C (炭素として20万トン)です。

植物体を介したメタンの放出

ここまで、森林の土壌によるメタンの吸収の話をしてきました。正確に言えば、土壌の表面で測定したメタンの動きについて述べてきたわけです。しかし、メタンなどの気体は土壌の表面だけを介して大気と土壌の間を出入りするのでしょうか。大気-土壌間に他の通り道はないのでしょうか。実は、湿地や泥炭地に生育するヨシやスゲなどの草本類、あるいは水田のイネでは、根や茎の中に通気組織と呼ばれる連続した空隙(すきま)があり、そこが酸素をはじめ様々な気体の移動経路になっていることがわかっています。湿地や水田の土壌の中で生成されるメタンもこの通気組織を通して大気へ放出されます。たとえば湛水した水田の場合、大気に放出されるメタンのじつに9割がイネの体内の通気組織を經由して出て行きます。では、樹木の体がそのような気体の通り道としての働くことはないのでしょうか。ヤチダモやハンノキのような河畔や湿地に生育する樹木では、滞水した土壌条件下では根系に通気組織に似た空隙が形成されることが苗木の実験で確かめられていますので、土壌中のメタンが樹体を通して放出される可能性はありそうです。

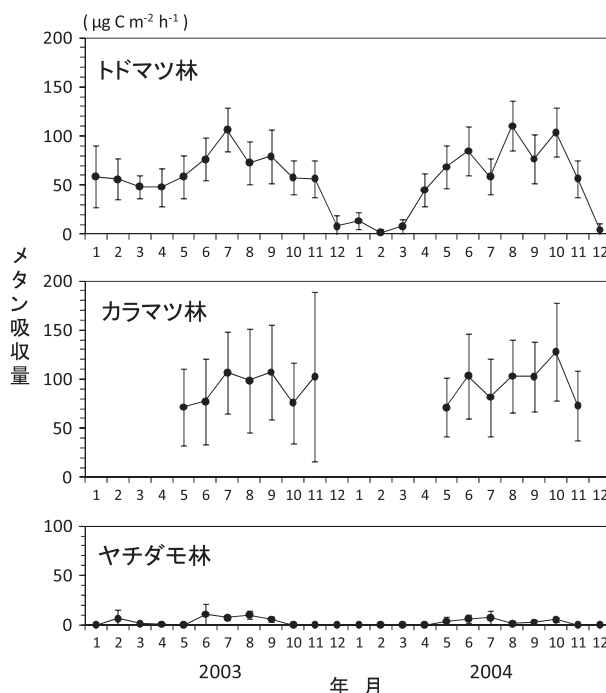


図-1 北海道の3調査地におけるメタン吸収量 (2003年1月~2004年12月)

(各調査地あたり5個のチャンバーの測定値の平均と標準偏差を示す。カラマツ林では積雪期間中の測定を行わなかったため欠測となっている。)

* 不確実性: 真の値からのぶれの度合いを示す統計量で、国単位の温室効果ガスの排出・吸収目録(インベントリ)を気候変動枠組条約事務局に提出する際に排出源・吸収源ごとに定量的に評価して報告することとされている。ここでは、IPCCのガイドラインにしたがって、不確実性=95%信頼区間の半分/排出係数で求められている。

ヤチダモの幹からのメタン放出

そこで、先に述べた溪流沿いのヤチダモ林の調査地で、幹の表面からメタンが出ているかどうかを測ってみることにしました。測定対象としたのは5本のヤチダモ林冠木で、樹高は27～30m、胸高直径は25～38cmです。方法は、土壌表面でのメタン吸収量の測定方法と同様で、幹の表面に金属製のチャンバーを空気の漏れのないようにしっかりと取り付けて、チャンバー内のメタン濃度の変化を測定しました(写真-2)。幹の高さによる違いを見るために、地上15cmと70cmの2つの高さで測りました。同時に、地下40cmまでの土壌中のメタン濃度や、地下75cmの深さから採取した地下水の溶存メタン濃度も測定しました。

5月から10月までほぼ毎月測定した結果、いずれの時期でも幹の表面からメタンが放出されていることが確認されました(図-2)。季節的な変化は明瞭ではなく、樹冠が開葉する前の5月や落葉した後の10月にも着葉時と同じ程度のメタン放出がみられました。幹の表面積あたりの平均放出量は、幹の下部(地上15cm)で $132 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、上部(地上75cm)で $73 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ で、低い位置の方が大きい傾向がみられました。この平均値を用いてヤチダモ1本あたりのメタン放出量(地上5～80cmの範囲からの放出量)を求めると、 $83 \mu\text{g C h}^{-1}$ となります。さらに、この林でのヤチダモの生立密度(250本/ha)を掛け合わせて求めた単位土地面積あたりのメタン放出量は、 $2.0 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ となりました。先に述べたように、このヤチダモ林の土壌表面での平均メタン吸収量は $2.9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ でしたので、土壌面で大気から吸収されているメタンとほぼ同量のメタンが、ヤチダモの幹から大気に放出されていることとなります。

ヤチダモの幹から放出されているメタンがどこから来ているのか、大変興味のあるところですが、私たちは地下水に溶存しているメタンがヤチダモの根や幹の中の空隙を通過して皮目(幹内部と外気との通気のための組織)から出ていると考えています。というのは、地下水の溶存メタンの濃度が1リットルあたり89～454 μg (地下水が採取できた7～10月の値)で、大気メタンとの平衡濃度の1000倍から10000倍も高かったからです。一方、地表から深さ40cmまでの土壌中のメタン濃度はいずれの測定時にも大気メタン濃度より低く、ここが幹から出てくるメタンの発生源とは考えられませんでした。

地下のメタンが樹木の体内を通過して放出される現象は、苗木による実験で



写真-2 ヤチダモの幹からのメタン放出量の測定

(金属製のチャンバー(箱)を白いシール材とゴムバンドで幹に密着させて、チャンバー内のメタン濃度の変化を測定する。チャンバーの右側に光って写っているのはチャンバー内部の圧力調整用のフッ化ビニル製の袋。幹の2か所の高さで同時に測定している。)

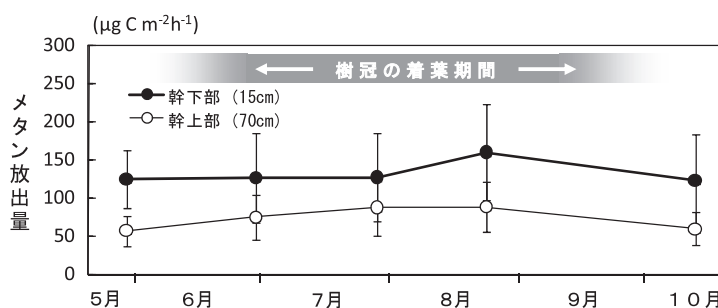


図-2 ヤチダモの幹からのメタンの放出量 (2005年5月～10月)
(5個体での測定値の平均と標準偏差を示す。)

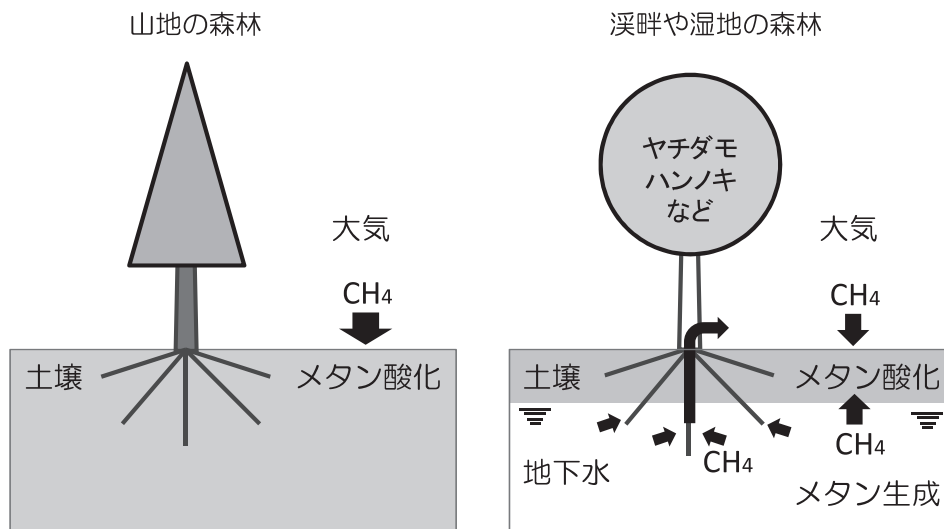


図-3 森林におけるメタンの動きの模式図

(左は一般的な山地の森林，右は地下水位の高い湿地の林を示す。矢印はメタンの動き。ただし，溪畔や湿地の林における樹体を通じたメタンの動きは，幹からのメタン放出量と土壤表層および地下水溶存のメタン濃度から推測した移動経路を示す。)

はヨーロッパのハンノキや北米のヌマスギなどで報告されています。また，イギリスの泥炭地に生育しているハンノキの成木の幹からもメタンが出ていることが最近報告されました。ヤチダモも含めてこれらの樹種はいずれも地下水位の高い場所に生育する樹種です。酸素の欠乏する土壤環境において，植物体の地下部の呼吸を可能にするなんらかの通気組織が，成木においても根系や幹に形成されているものと考えられます。そのような樹体内の通気の経路を通して，地下のメタンが大気に放出されていると考えられるのです。

まとめ

森林とメタンの関係について2つの話題を取り上げてきました。一つめの話題は，森林の土壤による大気中のメタンの吸収でした。図-3の左図に示すように，一般的な山地の森林では，土壤表層のメタン酸化菌の活動によってメタンが分解されるため，大気から土壤にメタンは吸収されています。1時間あたり・1㎡あたりのメタン吸収量は，炭素の重さとして100 μg (0.0001g) 程度ですが，日本の国土に占める森林面積の大きさを考慮すると，全国の森林による吸収量は相当な量になります。

二つめの話題は，地下水位の高い溪畔や湿地の林に限定されたメタンの動きでした。ご紹介したヤチダモ林の例では，図-3の右図に示すように，地下水に浸かった土壤中で生成されたメタンがヤチダモの根や幹下部の内部の空隙を通して，土壤表層のメタン酸化層（メタンを吸収している層）をバイパスする形で大気に放出されていると考えられました。これまで湿地の草本類や水田のイネでは知られていた植物体の通気組織を通じた土壤中のメタンの放出が，溪畔や湿地の樹木でも起こっている可能性が示されたわけです。樹木の内部を経由した滞水土壤中のメタンの放出は，ヤチダモやハンノキのような温帯の樹木だけでなく，熱帯の樹木でも同様のことが起こっていると考えられ，それがもしかすると湿潤な熱帯林で観測されているメタンの予想以上の大きな放出の原因かもしれないと考える海外研究者も出ています。今後，地球規模での発生源ごとのメタン排出量の推定精度の向上に向けた取り組みの中で，樹木からのメタン放出は注目されていくと考えられます。

おわりに

森林が果たすさまざまな役割（多面的機能）のひとつとして地球環境保全があります。その中でも、森林による二酸化炭素の吸収・貯蔵は大変重要で一般的にもよく知られていますが、今回ご紹介したメタンの吸収も地球環境と関連した森林の大切な役割といえるでしょう。一見あまり関係のなさそうな森林とメタンですが、そこに棲む微生物や樹木、あるいは土壌の物理的環境などのさまざまな要因を介して両者が密接に関係し、地球環境の形成に寄与していることがわかりただけたかと思います。普段私たちが身近に見ている森林ですが、そこにはまだまだ知られていない大切な役割があるのかもしれない。

なお、この研究は、農林水産省「先端技術を活用した農林水産研究高度化事業：森林・林業・木材産業分野における温暖化防止機能の計測・評価手法の開発」（平成14～16年度）により実施しました。また、この小論は以下のふたつの原著論文に基づいて作成しました。この小論執筆にあたって有意義なコメントをいただいた（独）森林総合研究所九州支所の石塚成宏氏と同四国支所の森下智陽氏に感謝いたします。

Terazawa,K., Ishizuka,S., Sakata,T., Yamada,K., and Takahashi,M. (2007) Methane emission from stems of *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* trees in a floodplain forest. *Soil Biology and Biochemistry* 39:2689-2692

Morishita,T., Sakata,T., Takahashi,M., Ishizuka,S., Mizoguchi,T., Inagaki,Y., Terazawa,K., Sawata,S., Igarashi,M., Yasuda,H., Koyama,Y., Suzuki,Y., Toyota,N., Muro,M., Kinjo,M., Yamamoto,H., Ashiya,D., Kanazawa,Y., Hashimoto,T., and Umata,H. (2007) Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types. *Soil Science and Plant Nutrition* 53:678-691

(研究参事)