

論文の内容の要旨

論文題名 森林土壌におけるメタンおよび N_2O フラックスに関する研究

氏 名 石塚 成宏

メタンと一酸化二窒素 (N_2O) は気候変動枠組条約京都議定書で指定された、二酸化炭素に次ぐ重要な温室効果ガスである。陸域生態系におけるこれらのガス動態は地球規模のガス収支に大きく影響を及ぼす。これらのガスについて、これまでの地上観測はほとんどが北米、南米、ヨーロッパにおいて行われ、東南アジア、東アジア、アフリカ、豪州における観測例はほとんどなく、全球規模におけるガス収支推定の不確定要素の最大の要因になっている。さらに観測例のない地域のガスフラックスについては観測が行われている地域で得られたガス生成メカニズムを用いて推定されており、異なるメカニズムが存在することを想定していない。全球の陸域生態系のガス収支推定に対して、メタンについては土壌のガス拡散によって推定する方法を、 N_2O については炭素量・土壌栄養状態・有効水分量・酸素分圧・土壌有機物分解速度の指標を作成し推定する方法を用いている。本研究の第一の目的は、これら限られた地域で得られた観測値とメカニズムによって推定された値が、日本の森林土壌と東南アジア湿潤熱帯林の土壌において適合するかどうかを検証することである。そのために、日本とインドネシアのそれぞれ 28 ヶ所においてフラックス観測を行った。その結果、日本のメタン吸収フラックスは既存の観測例の中では高いグループに属し、土壌物理性から推定されていた値よりもかなり大きいことを明らかにした。また、インドネシア湿潤熱帯林では推定されていた N_2O フラックスよりも小さい値が観測されることが明らかになった。そこで本研究の第二の目的は、これらのフラックスが推定値と異なる原因について、メタンに関しては土壌内メタン酸化活性の垂直分布とガス拡散係数から

作成したメタンガス移動モデルを用いることにより、 N_2O に関しては窒素循環パラメータとフラックスの関係を調べることにより、それぞれ解明することである。

日本の森林 28 ヶ所にチャンバーを設置し、メタンフラックスの観測を行い、日変化、季節変化、年変動などの変動パターンを明らかにした。その結果、日変動は小さく、季節変動は夏季に吸収フラックスが大きくなり冬季に小さくなる地点と年間を通してほとんど変化しない地点の両方が存在した。年変動は認められなかった。これらから、同一地点におけるフラックス変動は主として地温によって決定されていると考えられた。日本の森林土壌におけるメタン吸収フラックスは概ね $2.2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度と考えられ、北米の観測値とほぼ同程度、ヨーロッパの観測値の約 2 倍であることが明らかになった。この結果から過去にヨーロッパの観測値をもとに推定されている全球メタン吸収量は過小評価であると考えられた。メタン吸収フラックスは表層 0~5cm の土壌円筒試料の培養実験から得られたメタン酸化活性の指標である b-value 値と土壌の CN 比を用いて次の式で推定可能であった。

$$\text{Flux (mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}) = 2.161 \times 10^{-3} \cdot \text{b-value (h}^{-1}) - 0.183 \cdot \text{CN 比} + 4.224 \quad (R^2=0.888, p<0.01, n=14)$$

これらから、日本の森林土壌におけるメタン吸収フラックスが大きいのは、表層 0~5cm のメタン酸化活性が高いためと考えられた。

b-value 値と土壌のガス拡散係数を用いて土壌内ガス移動モデルを作成し、年間を通して土壌表面のメタン吸収フラックス値と土壌中のメタン濃度を推定し、実測値との比較をおこなった。その結果、メタンフラックスの季節変化、土壌中のメタン濃度分布はこのモデルによって概ね説明できた。

メタン酸化活性は垂直的に不均質な分布を示すことが多く、今まで 5cm 以深の土壌におけるメタン吸収量の実態は不明であった。これを解決するために、上記のガス移動モデルを使用して解析したところ、0~5cm の土壌が b-value 値で 200 h^{-1} 以上であれば、0~5cm の土壌がメタンフラックスの 62~89% を占め、 200 h^{-1} 以下であれば 5cm より深い層位でのメタン酸化量の方が表層土壌よりも大きくなることが明らかになった。また同じモデルを用いて複数の温暖化シナリオに対するメタン吸収量の変化を推定した結果、大気メタン上昇によってメタン吸収量は増大したが、温度の上昇にはほとんど影響を受けないことが明らかになった。

日本の森林土壌からの N_2O フラックスを観測し、脱窒酵素活性、脱窒菌の計数、基質添加実験、アセチレン阻害法の適用など種々の実験を行った結果、 N_2O 生成メカニズムは地形によって異なり、渓流域では主として脱窒過程で生成し、硝酸態窒素の供給がその脱窒速度に大きく影響していることが明らかになった。谷斜面や尾根では N_2O は硝化過程で主として生成していることが明らかになった。

インドネシア湿潤熱帯林におけるメタン吸収フラックスは $0.55 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であり、過去の熱帯林観測で得られた値と同程度であった。また、多くの地点でシロアリが原因と考えられるメタン発生が認められた。日本の土壌で得られたメタン吸収フラックスと b-value 値

の関係はインドネシア土壤においても認められ、インドネシアの吸収フラックスが小さいのは0~5cm深さの土壤のb-value値が小さいためと考えられた。b-value値からメタン吸収フラックスを推定する方法は、全球規模で適用可能であると考えられた。

インドネシア湿潤熱帯林におけるN₂Oフラックスは9.11 μg N m⁻² h⁻¹で、土壤の性質によって異なった。最も大きかったのは湿性の土壤で、硝化速度との関係から脱窒によるN₂O生成が示唆された。Andisols土壤ではN₂Oフラックスは小さく、これは硝化速度に対するN₂O生成の発生係数が他の土壤と異なるためと考えられた。日本とインドネシアの観測結果と既存の研究の結果をまとめると、次のような式でN₂Oフラックスが推定された。

【Andisolsの場合】

$$\text{N}_2\text{O フラックス}(\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = \text{硝化速度}(\mu\text{g N g}^{-1} \text{ d}^{-1}) \times 1.344 + 0.8868 \quad (R=0.9100)$$

【Andisols 以外の場合】

$$\text{N}_2\text{O フラックス}(\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = \text{硝化速度}(\mu\text{g N g}^{-1} \text{ d}^{-1}) \times 9.277 - 0.3949 \quad (R=0.9044)$$

インドネシアにおける観測結果は、他の熱帯林で観測された中では小さいグループに属し、これは低い硝化速度とAndisols土壤が広く分布するためと考えられた。この結果から既存の東南アジア熱帯林からの年間N₂O生成量の推定値は過大評価であり、インドネシア熱帯林だけでも年間0.037 Tg程度過大評価であると考えられた。この量は、全熱帯湿潤林の年間発生量の約3%程度であった。

土地利用の観点からは、メタン吸収フラックスに関しては森林土壤がオイルパーム林、ゴム林、アランアラン草原等に比べて大きいこと、森林から始まるいかなる土地利用変化も温暖化促進要因となることが明らかになった。N₂Oフラックスに関しては伐採時の影響を考慮に入れなければ、森林伐採によって一時的にフラックスは減少するが、長期的に見ればアランアラン草原になった場合は温暖化抑制効果を、その他のゴム林やオイルパーム林になった場合は森林と大きく変化がないと推測された。

メタンフラックスに関する過去の研究例ではガス拡散が最も重要なフラックス決定因子であり、世界中の土壤のメタン吸収フラックスをガス拡散から推定できるという考え方が主流であった。これは、当初の研究対象がメタン吸収フラックスの小さいところで行われ、本研究からそのような場所では表層土壤のメタン酸化速度が小さく、より下層の土壤の寄与率が高くなり、従ってその下層土へのガス拡散が最も重要な要因になっていたためと考えられる。しかし、その考え方では本研究で観測されたような高いメタン吸収フラックスを説明できない欠点があった。本研究では、表層土壤のメタン酸化速度が大きい場合は表層土壤のメタン酸化がメタンフラックスの大半を占め、表層土壤のメタン酸化速度が小さい場合は、より下層の土壤の重要性が増すということを明らかにした。これにより、地球規模で考えた場合、異なる生態系間のメタンフラックスの違いは、表層土壤のガス拡散係数の違いによって決定されるのではなく、表層土壤のメタン酸化速度の大きさによって決定されているということを初めて明らかにした。

N₂O生成については、今まで得られていた硝化—N₂Oフラックスの関係式が、生態系や

地誌の異なる東アジアや東南アジア地域でも概ね適合するという証拠が得られた。しかし、Andisols 土壌での N_2O 生成は少ないと予想されることが初めて明らかになった。これは Andisols 土壌の硝化速度に対する N_2O の発生係数がその他の土壌の 7 分の 1 程度であるためである。しかもインドネシアと日本の森林土壌に同じ係数が適用できることが明らかになったことは意義が大きい。このことは今まで他の土壌と同じと考えられていた Andisols における窒素循環メカニズムが、他の土壌とは異なる可能性があることを示唆している。窒素循環を基本としたプロセスモデルに本研究で得られた発生係数を適用することにより、Andisols 固有の窒素循環メカニズムが明らかになる可能性も高く、今後の窒素循環理解への波及効果が期待される。

以上から、日本およびインドネシアの森林土壌特有のメタン・ N_2O 代謝の存在を確認し、そのメカニズムの一端を明らかにすることができた。これにより地球規模のこれらガス代謝の理解に大きく貢献したと考えられる。