

さまざまな環境変化が土壤生態系における

CH₄ 動態におよぼす影響

学位論文内容の要旨

CH₄はCO₂の21倍の温暖化効果を持つ温室効果ガスであり、温暖化寄与率の20%を占める。IPCCによると、地球上のCH₄の全放出量 (Tg CH₄ y⁻¹) は湿地 (92~237)、天然ガス (75~110)、反すう動物 (80~115)、水田 (23~100) などを主要放出源として 598 Tg CH₄ y⁻¹ と見積もられている。一方、CH₄は大気と土壤で酸化分解される。大気のOHラジカルによる化学的酸化が主要であり、土壤のCH₄酸化菌によるCH₄吸収量は10~44 Tg CH₄ y⁻¹と寄与は小さいが、この量は大気中の年間CH₄増加量 (22~37) に匹敵するものである。土壤のCH₄吸収は微生物反応によるため、地温上昇とともに増加し、土壤水分率の上昇とともに低下する。さらにNH₄⁺はCH₄と化学構造が類似するため、土壤のCH₄吸収を阻害することが明らかにされてきた。IPCCによれば、地球温暖化は高緯度地域の温度上昇に伴い降水量を増加させ、低緯度地域の乾燥化に伴い森林火災を拡大させると予測されている。UNEPによれば、食糧生産に伴い環境に散布された窒素量の増加により、NH₄⁺降下量はこの100年間で5倍に増加し、さらに2015年までに1990年比で17%増加すると見積もられている。さらに、農業は窒素施肥により土壤のCH₄吸収を低下させるが、人口の多い温帯では、地域全体のCH₄吸収量の減少や放出量の増加を最小限にとどめるように、これまでの土地利用を改善していくことが望まれている。そこで、北海道を中心に高緯度地域としてシベリア、低緯度地域としてインドネシアの森林、草地、畑地などさまざまな土壤生態系において人為的インパクトによる環境変化が土壤生態系のCH₄動態へおよぼす影響を明らかにすることを本研究の目的とした。

1. シベリア・ヤクーツクで森林火災により永久凍土が融解し、沼地化し、その後周囲から乾燥し、さらに草地化して生じたアラスにおいて、森林から草地、沼にかけてのCH₄動態を調査した。森林では12±9 μg C m⁻² h⁻¹のCH₄吸収を示した。水分の多い沼と沼端ではそれぞれ1663±939 μg C m⁻² h⁻¹、4931±5430 μg C m⁻² h⁻¹の大きなCH₄放出がみられ、草地では9±21 μg C m⁻² h⁻¹の放出を示した。草地ではアルカリ化し、pHが7以上と高いことが低水分率条件でもCH₄放出を示す原因だった。ヤクーツク市近郊4500 km²の森林面積は72%、沼面積は1.4%だったが、全体として73 kg C h⁻¹のCH₄放出源と見積もられた。

2. シベリア・ハバロフスクで森林伐採が土壤のCH₄吸収におよぼす影響を調査した。天然林では63±30 μg C m⁻² h⁻¹のCH₄吸収が見られたが、森林伐採によって植物による水分吸収が低下し、土壤水分が上昇したため、伐採地では最大で188 μg C m⁻² h⁻¹のCH₄放出がみられた。伐採地と択伐林のCH₄吸収は天然林に比べて、それぞれ86、66%低下していた。

3. 北海道望来の農業用水ダムが森林集水域の CH_4 動態におよぼす影響を評価した。森林土壌の CH_4 吸収は平均 $47 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ であり、集水域の森林土壌による CH_4 吸収量は、年間 8.1 MgC と見積もられた。一方ダム湖表面からの CH_4 放出は平均 $193 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ であり、森林土壌の CH_4 吸収より大きかった。ダム湖からの年間放出量は 0.83 MgC であり、その50%はダム湖表面ではなく放流過程で放出された。流域面積の3.1%に相当するダム湖の出現により、流域の CH_4 吸収量は13%低下した。
4. 北海道静内牧場 (457 ha) では、牧場の67%を林間放牧地として利用している。林間放牧地では平均 $40 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 吸収が見られたが、 NH_4^+ 施肥のため、 CH_4 吸収はコーン畑、放牧草地でそれぞれ 4.3 、 $4.7 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ に低下し、採草地では $0.05 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 放出がみられた。本土地利用による年間 CH_4 吸収量は森林開発前の73%の 864 kgC であり、すべて放牧草地として利用すると CH_4 吸収量は22%に低下すると見積もられた。
5. 窒素降下物量が森林土壌における CH_4 吸収におよぼす影響について、北海道のさまざまな森林土壌10地点で調査した。平均 CH_4 吸収には地点間差がみられ ($22 \sim 118 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、その要因を重回帰分析したところ、降水量の増加、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降下物量の増加、全炭素含量の増加、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 降下物量の低下が CH_4 吸収量を有意に低下させる要因であり、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降下物量の増加は降水量の増加について2番目に強い CH_4 吸収に影響をおよぼす要因だった。
6. インドネシア・カリマンタンの熱帯泥炭地の森林および農地において CH_4 動態を調査した。森林では $11 \pm 26 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 吸収が見られた。これまでの全球的な CH_4 放出の見積もりでは、熱帯泥炭地は CH_4 の放出源として Matthews (1987) や Aselmann and Crutzen (1989) が北方泥炭地で求めた $469 \sim 6250 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ が用いられてきたが、これに本研究地の結果を適用すると、湿地からの CH_4 放出の推定値の3~10%に相当する $8.0 \text{ Tg CH}_4 \text{ y}^{-1}$ を過大評価している可能性が認められた。しかし、泥炭火災跡地では $14 \pm 51 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 放出を示し、農地でも NH_4^+ 施肥のために $12 \pm 29 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 放出が見られた。
7. 森林火災中の CH_4 放出をヤクーツクおよびカリマンタンで調査したところ、ヤクーツク ($1.37 \times 10^6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、カリマンタン ($19.1 \times 10^6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) とともに、森林土壌の CH_4 吸収の10万倍から100万倍の非常に大きな CH_4 放出が見られた。
8. 既往のさまざまな森林土壌の CH_4 吸収の報告に本研究結果を加え、緯度との関係をみたところ、緯度別 CH_4 吸収の最大値は放物線を描き、北緯24度で大きく ($283 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、高緯度 (北緯65度: $12 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) および低緯度 (南緯10度: $36 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) 地域では小さかった。
9. 結論として、森林土壌生態系は高い CH_4 吸収能を有し、森林火災、森林伐採、農地への NH_4^+ 施肥、 NH_4^+ 降下物量の増加、降水量の増加は、土壌生態系の CH_4 吸収を低下させることが明らかになった。森林破壊は土壌水分を増加させることにより CH_4 吸収を低下させた。さらに湖沼が生じると、そこは恒常的な CH_4 放出源となっていた。シベリアでは沼沢地が乾燥しても土壌がアルカリ化し、それが CH_4 吸収を抑制した。さらに、森林火災を伴う場合には一時的に大量の CH_4 放出が生じた。熱帯泥炭森林でも CH_4 吸収能を示した。とくに森林土壌の CH_4 吸収能が高い温帯における植林は温暖化の改善に有効であると思われた。土壌生態系の CH_4 吸収能を維持するためには、森林火災を抑え、 NH_4^+ 施肥を適正にし、必要以上に湖沼を生じさせない土地の管理が重要である。森林を伐採しないで、直接放牧地として利用することにより、地域全体の CH_4 吸収量の減少や放出量の増加を最小限にする可能性も示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介
副 査 教 授 高 橋 邦 秀
副 査 教 授 長谷川 周 一
副 査 助教授 中 原 治

学 位 論 文 題 名

さまざまな環境変化が土壤生態系における

CH₄ 動態におよぼす影響

本論文は12章からなり、図48、表42、引用文献242を含む156ページの和文論文である。他に参考論文7編が添えられている。

CH₄はCO₂の21倍の温暖化効果を持つ温室効果ガスであり、大気中CH₄濃度は1750年以降、現在までに155%増加している。湿地土壌は主要なCH₄放出源である一方、森林土壌は主要なCH₄吸収源とされている。土壌のCH₄動態は微生物反応によるため、地温と土壌水分に強く影響を受け、さらにCH₄はNH₄⁺と化学構造が類似するため、土壌中のNH₄⁺酸化はCH₄吸収を阻害する。したがって、地球温暖化やそれに伴う降水量の変化、食料生産と消費にともなう地球を巡る窒素動態の変化などは、土壤生態系のCH₄動態に影響し、さらに地球温暖化を促進する可能性が懸念されている。地域には、森林火災や森林伐採に伴う土地被覆変化、農地の窒素施肥などCH₄動態に及ぼすさまざまな要因があり、そのインパクトの大きさを評価し、CH₄放出の抑制対策を策定する必要がある。

本研究は、北海道を中心に高緯度地域としてシベリア、低緯度地域としてインドネシアの森林、草地、畑地などさまざまな土壤生態系における環境変化が土壤生態系のCH₄動態へおよぼす影響を明らかにすることを目的に行われたものである。

1. シベリア・ヤクーツクで森林火災により永久凍土が融解し、沼地化し、その後周囲から乾燥し、さらに草地化して生じたアラスの4箇所において、森林から草地、沼にかけてのCH₄動態を調査し、森林は12±9 μg C m⁻² h⁻¹のCH₄吸収、草地では9±21 μg C m⁻² h⁻¹のCH₄放出を示し、さらに沼端から沼地はその100から500倍のCH₄放出を認めた。これらの値を用いて、森林72%、沼1.4%を含むヤクーツク市近郊4500 km²の範囲は73 kg C h⁻¹のCH₄放出源になっていると見積もった。
2. シベリア・ハバロフスクで森林伐採がCH₄吸収におよぼす影響を調査し、天然林ではヤクーツクより大きな63±30 μg C m⁻² h⁻¹のCH₄吸収を認めたが、森林伐採地と択伐林では樹木の水吸収低下による土壌水分増加のために天然林に比べて、CH₄吸収がそれぞれ86、66%低下したことを示した。
3. 北海道望来の農業用水ダムにおいて森林集水域のCH₄動態を調査し、森林土壌のCH₄吸収はハバロフスクに類似の平均47 μg C m⁻² h⁻¹であったが、ダム湖表面からはその4倍の平均193 μg C m⁻²

h^{-1} の CH_4 放出があり、さらに放流による CH_4 放出も生じていることを示し、流域面積の3.1%に相当するダム湖の出現により、流域の CH_4 吸収量は13%低下したことを示した。

4. 北海道静内牧場において、農地への転換による CH_4 吸収への影響を調査し、森林では平均 $40 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 吸収が見られたが、コーン畑、放牧草地では、 NH_4^+ 施肥のため、 CH_4 吸収は1/10に低下し、採草地ではむしろ CH_4 放出が生じ、農地化により牧場全体の CH_4 吸収は73%に低下したことを示した。静内牧場では森林を放牧地に利用しているが、これがすべて草地になると CH_4 吸収は22%まで低下すると見積っている。

5. 北海道の北から南までのさまざまな森林10地点で、窒素降下物が CH_4 吸収におよぼす影響を調査し、平均 CH_4 吸収は $22 \sim 118 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の範囲にあり、それらは降水量が多く、 NH_4^+ -N降下物量が多い地点ほど有意に低かったことを示した。

6. インドネシア・カリマンタンの熱帯泥炭地の森林および農地において CH_4 動態を調査し、森林ではシベリアと同程度の $11 \pm 26 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 吸収しかないが、北方泥炭林で報告されているような放出はなく、熱帯硬質土壌と同程度であったことを示した。しかし、泥炭火災跡地、農地ではそれぞれ $14 \pm 51 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $12 \pm 29 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ の CH_4 放出が生じたことを示した。

7. 森林火災中の CH_4 放出をヤクーツクおよびカリマンタンで調査し、ヤクーツク ($1.37 \times 10^6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、カリマンタン ($19.1 \times 10^6 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) とともに、森林土壌の CH_4 吸収の10万倍から100万倍の非常に大きな CH_4 放出が生じることを示した。

8. 本研究結果とともに既往のさまざまな森林土壌の CH_4 吸収も加えて緯度との関係をみたところ、緯度に対して放物線を描き、北緯24度にピークを示し、温帯における土地利用のありかたが CH_4 吸収を大きく左右することを認めるとともに、高緯度および低緯度の大きな森林地帯の森林火災の抑止の重要性、人為起源の湿地化の抑止の必要性を総合的に述べた。

以上のように、本論文は土壌生態系の CH_4 動態を高緯度から低緯度にわたり調査し、その地域特性と地域固有の環境変化の影響について整理したものであり、関連学会においても高く評価されている。よって審査員一同は森下智陽が博士(農学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。