

Greenhouse gas fluxes from tropical peatland of Sarawak, MALAYSIA

(マレーシアサラワクの熱帯泥炭からの温室効果ガスフラックス)

学位論文内容の要旨

主要温室効果ガス(GHG)である CO₂、CH₄および N₂O の大気濃度は、産業革命以来、年間それぞれ 0.5%、0.8%および 0.3%ずつ上昇している。大気中の温室効果ガスの濃度はほぼ正確に押さえられてきているが、個々の生態系からの温室効果ガスの発生程度は十分ではなく、とくに熱帯泥炭での測定例は断片的である。熱帯泥炭は世界の泥炭地(約 4 億 ha；全陸地面積の 3%)の 8%に過ぎないが、泥炭地全体が持つ炭素(約 3500 億 t；陸地炭素の 25%)の 20%を占め、地球の炭素循環に大きな影響を与えているとされている。

熱帯泥炭は、東南アジアとくにインドネシア、マレーシアに広がっている。これらの国では、現在、熱帯泥炭森林を主にサゴヤシやアブラヤシのプランテーションに開発している。それらの生態系での土壌からの温室効果ガスフラックスの報告例はない。このことが世界の温室効果ガスの収支に大きな不確実性を与えている原因の一つとされている。その発生、吸収量とそれらの支配因子を知ることは、世界の温室効果ガスの収支を見積もるために重要である。

以上から、本研究では、熱帯泥炭の森林、サゴヤシ、アブラヤシ生態系土壌からの年間を通した温室効果ガスフラックスを測定し、それらの生成吸収プロセスとそれを支配する環境因子を決定することを目的とした。地球温暖化ポテンシャルも見積もった。

1. 温室効果ガスフラックスは、閉鎖系チャンバー法で測定した。測定した3つの生態系はマレーシア、サラワク州のムカ地区の半径 10km 以内にある。測定は毎月 1 度 2002 年の 8 月から 2003 年の 7 月までの 1 年間行った。

土地利用変化の環境因子への影響を理解するため、土壌および環境因子に主成分分析を適用した。主成分分析の結果は森林をサゴヤシ、アブラヤシのプランテーションへ転換した影響を良く表していた。森林の転換はサゴヤシ、アブラヤシともに有意に相対湿度を下げ、地温を上げた。これはサゴヤシとアブラヤシの林冠が小さく、十分に閉じていないことによると思われた。部分的に泥炭表面が大気にさらされていることにより、地表面近くの大気と土壌温度変化を大きくした。またサゴヤシの栽培は地下水位と土壌水分を上げ、より嫌気的な環境を作り出した。

2. 土壌からの CO₂ フラックスは森林で最も高く(2.1 kg C m⁻² yr⁻¹)、続いてアブラヤシで(1.5 kg C m⁻¹ yr⁻¹)、サゴヤシ(1.1 kg C m⁻¹ yr⁻¹)であり、アブラヤシとサゴヤシの土壌からの CO₂ フラックスは森林にくらべ、それぞれ 29%、48%低下した。森林土壌からの CO₂ フラックスは過去の報告のなかで最大であり、アブラヤシ、サゴヤシはボルネオの水田やアマゾンの草地で報告された値と類似していた。CO₂ フラックスへの環境因子の影響の程度に応じて階層的に CO₂ フラックスを抽出する樹形回帰分析(tree regression analysis)の結果、森林では相対湿度、サゴヤシでは土壌温度、アブラヤシでは土壌水分が CO₂ フラックスを説明する最も主要な環境因子であった。このことは、土地利用変化に伴う微気象と土壌環境の変化が熱帯泥炭からの CO₂ フラックスに強く影響していることを示している。

3. 森林とサゴヤシは CH₄ の発生源であり、それぞれ、18.3 mg C m⁻² yr⁻¹、180 mg C m⁻² yr⁻¹

のフラックスを示した。アブラヤシだけが、 CH_4 の吸収源であり、 $-15.1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ を示した。これらの値は、IPCC で用いられている $54750 \text{ mg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ より小さかった。樹形回帰分析の結果、森林では相対湿度が、サゴヤシとアブラヤシでは地下水位が主要な環境因子であることを示していた。森林からサゴヤシへの転換は地下水位の上昇により約 10 倍 CH_4 放出量を増加させ、反対に、アブラヤシへの転換は地下水位を下げるため CH_4 を吸収することになる。

4. すべての生態系は N_2O を放出した。 N_2O 放出はサゴヤシで最も大きく、 $3.3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、ついでアブラヤシの $1.2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ で森林では $0.7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ だった。これらの値は、IPCC で用いられている $16 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ より著しく小さかった。 N_2O の放出は複雑な過程をたどると思われた。それは単一の土壌環境因子で決定されておらず、分離できなかった。 N_2O 生成に関わる土壌因子が相互に同時に影響しあっていると考えられた。それゆえ、重回帰分析によりその支配因子を推定したところ、それぞれの生態系で異なる因子が N_2O 放出を支配していた。主要因子は森林では、地下水位、25-50 cm 層の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度であり、サゴヤシでは 5cm の地温、0-25 cm の $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度であり、アブラヤシでは土壌水分、5cm の地温、0-25cm の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度であった。施肥が行われるアブラヤシの増加は森林の 71% 増加していたが、地下水位が高まるサゴヤシへの転換により N_2O 放出量は森林と比べて 371% 増加した。

5. 本研究では熱帯泥炭の土地利用変化による温室効果ガス放出は IPCC で報告されたものより大きくないことが示された。おのおのの温室効果ガスへの支配因子の統計的手法を用いた決定はそれぞれの生態系において温室効果ガス発生の温室効果ガスの支配因子が異なっており、同一のものではないことを示している。すなわち、熱帯泥炭での温室効果ガスの大気と土壌における交換は異なる土地利用により異なる影響を受ける。土壌環境因子を実質的に変化させる熱帯泥炭の農地への転換は土壌からの温室効果ガス発生を変化させる。したがって、熱帯泥炭の生態系タイプは温暖化ポテンシャルを見積もる上で考慮しなければならない。本研究で示した 3 つの生態系の温暖化ポテンシャルは CO_2 フラックスに支配されていた。このことは熱帯泥炭森林土壌が世界レベルにおいて大気 CO_2 の重要な発生源として機能していることを示している。今後の課題は、生態系の CO_2 収支のための熱帯泥炭森林の年間炭素固定量の見積もりである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介
副 査 教 授 大 崎 満
副 査 教 授 長谷川 周 一

学 位 論 文 題 名

Greenhouse gas fluxes from tropical peatland of Sarawak, MALAYSIA

(マレーシアサラワクの熱帯泥炭からの温室効果ガスフラックス)

本論文は10章からなり、図43、表17、引用文献442を含む200ページの英文論文である。他に参考論文5編が添えられている。

京都議定書は地球温暖化抑止のために温室効果ガス排出量の正確な見積もりを要求している。土壌は主要温室効果ガス(GHG)であるCO₂、CH₄およびN₂Oの主要排出源であり、土地利用変化により、その排出量は変化することが知られている。しかし、個々の生態系からの見積もりは十分ではなく、とくに熱帯泥炭での測定例は断片的であり、このことが世界の温室効果ガスの収支に大きな不確実性を与えている原因の一つとされている。熱帯泥炭は、東南アジアとくにインドネシア、マレーシアに広がり、これらの国では、現在、熱帯泥炭森林を主にサゴヤシやアブラヤシのプランテーションに開発している。

本研究では、熱帯泥炭の森林、サゴヤシ、アブラヤシ生態系土壌からの年間を通した温室効果ガスフラックスを測定し、それらの生成吸収プロセスとそれを支配する環境因子を決定することを目的とした。地球温暖化ポテンシャルも見積もった。

1. 土地利用変化の環境因子への影響を理解するため、土壌および環境因子に主成分分析を適用した結果、森林に比べ林冠が小さく十分に閉じていないサゴヤシ、アブラヤシでは有意に相対湿度が低下し、地温が上昇していた。さらにサゴヤシは森林に比べ地下水位が上昇し、土壌水分が増加し、より嫌氣的な環境であったことを明らかにした。

2. 土壌からのCO₂フラックスは森林で最も高く(2.13 kg C m⁻² yr⁻¹)、続いてアブラヤシで(1.54 kg C m⁻² yr⁻¹)、サゴヤシ(1.11 kg C m⁻² yr⁻¹)であり、アブラヤシとサゴヤシでは、森林にくらべ、それぞれ29%、48%低下していた。森林土壌からのCO₂フラックスは過去の報告のなかで最大であった。CO₂フラックスへの環境因子の影響の程度に応じて階層的にCO₂フラックスを抽出する樹形回帰分析(tree regression analysis)の結果、森林では相対湿度、サゴヤシでは土壌温度、アブラヤシでは土壌水分がCO₂フラックスを説明する最も主要な環境因子であった。このことは、土地利用変化に伴う微気象と土壌環境の変化が熱帯泥炭からのCO₂フラックスに強く影響していることを示している。

3. 森林とサゴヤシは CH_4 の発生源であり、それぞれ、 $18.3 \text{ mg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、 $180 \text{ mg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ のフラックスを示した。アブラヤシだけが、 CH_4 の吸収源であり、 $-15.1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ を示した。これらの値は、IPCC 報告書に引用されている熱帯泥炭林からの放出量見積りの原単位 ($4106 - 27000 \text{ mg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) より著しく小さかった。樹形回帰分析の結果、森林では相対湿度が、サゴヤシとアブラヤシでは地下水位が主要な環境因子であった。森林からサゴヤシへの転換は地下水位の上昇により約 10 倍 CH_4 放出量を増加させ、反対に、アブラヤシへの転換は地下水位を下げるため CH_4 を吸収した。

4. すべての生態系は N_2O を放出した。 N_2O 放出はサゴヤシで最も大きく、 $330 \text{ mg N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であり、ついでアブラヤシの $117 \text{ mg N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ で森林では $70.2 \text{ mg N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ だった。これらの値は、IPCC で用いられている $16 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ より著しく小さかった。 N_2O の放出は複雑な過程をたどると思われた。それは単一の土壤環境因子で決定されておらず、分離できなかった。重回帰分析によりその支配因子を推定したところ、森林では、地下水位と $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度、サゴヤシでは地温と $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度、アブラヤシでは土壤水分と地温、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度であった。アブラヤシは施肥により、サゴヤシは地下水位が高まることにより、森林にくらべ、放出量はそれぞれ、71%、371%増加した。

5. 本研究では熱帯泥炭の土地利用変化による温室効果ガス放出は IPCC で報告されたものより小さかった。ただし、統計的解析の結果、それぞれの生態系において温室効果ガス放出の支配因子は異なっており、熱帯泥炭での温室効果ガス放出は異なる土地利用により異なる影響を受けることになり、熱帯泥炭の生態系タイプは温暖化ポテンシャルを見積もる上で考慮すべき要因であった。本研究で示した3つの生態系の温暖化ポテンシャルを見積もった結果は CO_2 フラックスが 90% 以上を占めていた。このことから熱帯泥炭森林土壌は世界規模での大気 CO_2 の重要な発生源であることを示している。今後の課題は、生態系の CO_2 収支のための熱帯泥炭森林の年間炭素固定量の見積もりである。

以上のように、本論文はこれまで測定例がなかった熱帯泥炭土壌からの温室効果ガス発生量を示し、その支配因子を示したもので、地球規模での温室効果ガスの発生量見積りの精度をあげるのに貢献するとともに、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 Lulie Melling 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。