

アカシア・マンギウム植林地土壌からの 亜酸化窒素フラックスは どのように季節・空間変動するか？

根田遼太*1・太田誠一*2

1. はじめに

近年、熱帯アジア地域では木材資源の供給を主な目的に、マメ科樹種を中心とした早生樹産業造林が急速に拡大している。特にアカシア類は酸性土壌や貧栄養土壌への生育も可能であるため、産業植林において最も重要な植林候補樹種の一つであり、2000年時点で世界には、8,317,000 haのアカシア植林地が存在し、そのうち96%がアジアに分布するとされる¹⁾。ところが、マメ科樹木はその窒素固定能力によって窒素に富むリター（落葉や枯死根）を土壌に投入し、土壌中での窒素循環を加速することで二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）について重要な温室効果ガスである亜酸化窒素（N₂O）の放出増加を招くことが明らかになっている²⁾。N₂Oは土壌中の硝酸化成（硝化）や脱窒などの微生物プロセスを経て発生するとされ、その発生量は温度、水分含量、窒素や炭素の供給量などの土壌環境要因に大きく影響される³⁾。そのため、N₂Oの地表面フラックスはこれらの環境要因の変化に応じた顕著な季節・空間変動を示し、このことがN₂Oフラックスを広域に高精度で推定することを困難にしている。しかし、これまでマメ科植林地においてN₂Oフラックスの季節・空間変動を検証した例はほとんど無い。本稿ではインドネシア南スマトラに位置するアカシア・マンギウム植林地土壌において2005年8月少雨期、2006年3月多雨期にN₂Oフラックスの空間変動を

測定した事例⁴⁾を中心にマメ科植林地におけるN₂Oフラックスの時空間変動とその規定因子について紹介する。

2. 調査対象地

調査はインドネシア南スマトラ州に位置するアカシア・マンギウム植林地（3°52′40″S, 103°58′40″E）で実施した。なだらかな丘陵地に約19万haの広大なアカシア・マンギウム植林地が造成されており、この地域の年平均気温は27.3℃、年間平均降水量は2,750 mmである。比較的雨の少ない少雨期（月平均降水量<150 mm）が6月から9月まで続き、月平均降水量が250 mmを超える多雨期が11月から4月まで続く。この地域の地質は第三紀堆積岩であり、土壌はAcrisolに分類される。

3. 調査方法

調査は2005年8月少雨期、2006年3月多雨期に実施した。対象林分に平坦面上部、平坦面下部、斜面上部、斜面下部の地形要素を含む60 m×100 mの範囲に長方形プロットを設定し、これを10×10 mの格子60個に分割した。少雨期および多雨期に各一回、各格子点上でクロードチャンバー法によってN₂Oフラックスを測定した。ガスサンプリング後、FH層および土壌（0-10 cm）を採取した。FH層試料については乾重、含水率、無機態窒素量ならびにpH（H₂O）を、土壌試料については容積

Ryota Konda, Seiichi Ohta : Seasonal and Spatial Variability of Nitrous Oxide Fluxes from Soil and Its Determining Factors in *Acacia mangium* Plantation

*1 住友林業株式会社筑波研究所 前京都大学大学院農学研究科, *2 京都大学大学院農学研究科

重, 土壤水分含量 {本研究では Water-filled pore space (WFPS: 土壤中の全孔隙量に対する液相率) を示す}, 無機態窒素量, 全炭素・窒素量, pH (H_2O) 等の関連パラメータを測定した。

空間変動の解析では, 地球統計学的手法 (ジオスタティスティクス) の1つであるセミバリオグラムとクリギングを用い N_2O フラックスの空間構造を明らかにすると共に, 地形要素の違いを含めた各関連パラメータの相互関係から, N_2O 空間変動規定要因を解析した。ジオスタティスティクスの詳細については矢内らの解説⁵⁾ を参照して頂きたい。

4. N_2O 発生の主な規定因子

ここで N_2O の発生を規定する主な因子について簡単に説明しておきたい。土壤中の N_2O 発生プロセスの概念図を図1に示す。 N_2O は硝化の副産物, 脱窒の中間生成物として主に発生するとされている。硝化は微生物による窒素化合物の酸化過程を指し, 好氣的な環境下においてアンモニア態窒素 (NH_4^+-N) から亜硝酸態窒素 (NO_2^--N), NO_2^--N から硝酸態窒素 (NO_3^--N) の2段階の酸化がそれぞれアンモニア酸化細菌, 亜硝酸酸化細菌の独立栄養細菌によって行われる⁶⁾。この過程で N_2O は副産物として生成されることが知られている。脱窒は土壤中の酸素が消費された嫌氣的な環境下で主に従属栄養微生物の呼吸の一種として NO_3^--N ,

NO_2^--N が一酸化窒素 (NO), N_2O や窒素 (N_2) のガス化合物に還元される嫌氣的代謝過程を示し, この過程において N_2O は中間生成物として生成される⁶⁾。従って土壤中における酸素の供給量は硝化, 脱窒, そして N_2O 発生量の大きさを規定する重要な因子とされている。また, 土壤水分含量は土壤中の酸素供給量の最も主要な規定要因であり, 同時に土壤中の窒素, 炭素などの基質の拡散を制限するため, N_2O 発生量と関係することが多い^{3,7)}。土壤中における窒素の供給量, 特に NH_4^+-N , NO_3^--N の供給量はそれぞれ硝化, 脱窒の直接の基質となり, その供給量の増大は土壤中の窒素循環速度を増大させ, 結果的に N_2O の発生量を増大するとされる。例えば熱帯林土壤では NO_3^--N の添加による N_2O フラックスの増大が認められている⁸⁾。また, 従属栄養微生物である脱窒菌は N_2O の生成時のエネルギー源としてグルコースなどの易分解性炭素を利用するため, 土壤有機炭素の供給量もしばしば N_2O 発生を規定する要因となる。また, 土壤有機物分解の過程で, 易分解性炭素はその他多くの従属栄養微生物によって利用され酸素とともに消費されることで, 脱窒に適当な嫌氣的環境が生成される⁹⁾。そのため, N_2O フラックスの時空間変動を明らかにするためには, 土壤水分含量, 窒素, 炭素などの基質の供給量に着目する必要がある。

5. アカシア・マンギウム植林地土壤における N_2O フラックス

アカシア・マンギウム植林地土壤は N_2O の重大な発生源となる可能性が指摘されている^{4,11)}。筆者らが2005年8月少雨期, 2006年3月多雨期にアカシア・マンギウム植林地土壤の N_2O フラックスを測定した結果では, それぞれフラックス平均値が 0.55, 1.85 $mg\ N\ m^{-2}\ d^{-1}$ であった (図2)。石塚らがスマトラ島の天然林で N_2O 発生量を測定した例¹⁰⁾ では年間を通して常に 0.57 $mg\ N\ m^{-2}\ d^{-1}$ を下回っていたことから, 当地域においてアカシア・マンギウム植林地土壤が N_2O の大きな発生源となっていることを示唆した。また, 荒井ら¹¹⁾ は2003年

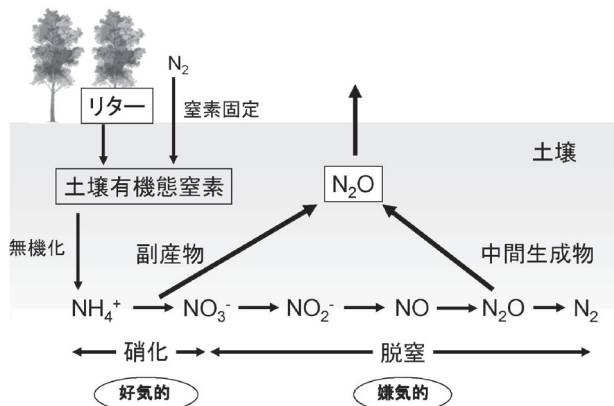


図1 土壤中の N_2O 発生プロセスの概念図

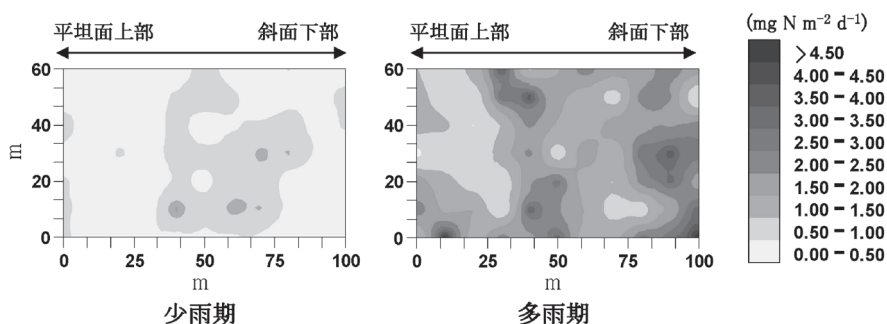


図2 少雨期、多雨期の N_2O フラックス等値線図。Konda *et al.*⁴⁾の図を改変。各季節の N_2O フラックスの平均値は $0.55 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (少雨期), $1.85 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (多雨期)であり、多雨期が有意に高くなった (Studentのt検定 $P < 0.05$)。

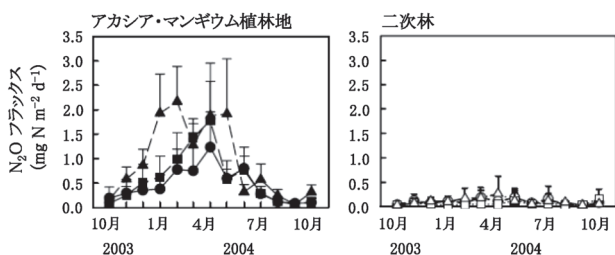


図3 アカシア・マンギウム植林地土壌、二次林土壌における N_2O フラックスの季節変化。Arai *et al.*¹¹⁾の図を改変。

から2004年の1年間、同地域のアカシア・マンギウム植林地および二次林土壌において N_2O フラックスを測定した(図3)。その結果、アカシア・マンギウム植林地土壌の年間 N_2O 発生量($2.56 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)は近接する二次林土壌からの発生量($0.33 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)の約8倍であった。荒井らはその年間発生量から、世界のアカシア植林地からの N_2O 発生量は $18.5 \text{ Gt N yr}^{-1}$ であると推定しており、それは、熱帯林土壌から発生する N_2O の0.6%を占め、今後アジアにおいて更に拡大の予想される熱帯マメ科植林地の N_2O 発生源としての重大性はますます増大すると指摘している。

6. N_2O フラックスの季節変化とその規定因子

熱帯林土壌における N_2O フラックスは雨期に高く、

乾期に低い季節変動が認められることが知られている¹²⁾。アカシア・マンギウム植林地土壌における N_2O フラックスについても同様に、筆者らの結果では多雨期の N_2O フラックス平均値($1.85 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)は少雨期($0.55 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)に比べて有意に高い結果となり、荒井ら¹¹⁾によっても同様に多雨期に高く、少雨期に低い顕著な季節変動が認められた(図2, 3)。

この N_2O フラックスの季節変動は何によって決められているのだろうか。アカシア・マンギウム植林地土壌において荒井ら¹¹⁾、筆者らの結果ではともに、土壌水分含量の高い多雨期に高い N_2O フラックスが得られている。この土壌水分含量と N_2O フラックスの関係は他の熱帯林土壌においても確認されている¹³⁾。従って、多雨期は降雨が増えることで土壌水分含量が増大し、その結果土壌全体が脱窒に適した嫌気的な環境となることで N_2O の発生量が増大したと推測される。加えて、雨期と乾期の季節変化が存在する熱帯林土壌では、乾期に蓄積したリターが雨期の始まりに分解されることで新鮮な基質の供給量が増大し、その結果 N_2O 発生量の増大を引き起こすことが認められている¹⁴⁾。そのため多雨期ではアカシア・マンギウムのリターの分解を通して土壌窒素、炭素などの基質の供給量が増大し、 N_2O 発生量が増大している可能性も考えられる。

7. N₂O フラックスの空間構造とその規定因子

上述した季節変動に加えてN₂O フラックスは顕著な空間変動を示すことが知られている。N₂O フラックスの空間変動は変動係数 (CV) の大きさによって示されることが多く、例えば、インドネシア南スマトラ島の天然林においてN₂O フラックスは109%という高いCV値を示したことが報告されている¹⁵⁾。一方、そのCV値は空間変動の大きさを示す指標値となるものの、その発生実態を定量的に示すものではない。また、高いCV値に表されるN₂O フラックスの大きな空間変動は、特定地点で極端に発生量の高いホットスポットの存在が主な要因とされているが、その発生様式についても明らかとなっていない。そこで、筆者らは地球統計学的手法 (ジオスタティスティクス) の1つであるセミバリオグラムとクリギングを用いてアカシア・マンギウム植林地土壌におけるN₂O フラックスの空間構造を定量的に明らかにすることを試みた。

アカシア・マンギウム植林地土壌におけるジオスタティスティクス解析の結果⁴⁾、N₂O フラックスの空間依存性を示す距離は季節に関わらず約20mとなり、マメ科早生樹植林地ではN₂O フラックスの合理的なサンプリングために20m程度のサンプリング間隔が最適であることを示した。一方、少雨期、多雨期のアカシア・マンギウム植林地土壌におけるN₂O フラックスの空間分布 (図2) では、高低フラックスの領域は季節によって異なる位置に現れることが示された。特に、多雨期は斜面下部で高いフラックスが認められ、その空間構造に地形が大きく関わっていることが明らかとなった。このように空間依存性の距離は季節間で同様でも、その変動パターンは季節によって異なることが認められた。

それではN₂O フラックスの空間構造は何に規定されているのだろうか。アカシア・マンギウム植林地土壌において、多雨期のN₂O フラックスは土壌水分含量、容積重との間に正の相関が認められ、等値線図でも3つの図に強い重なりが見られることが

確認された (図4)。土壌水分含量は斜面下部と平坦面下部において高くなっており、斜面下部という地形の影響に加えて容積重の高い場所で高くなっていった。容積重が高いということは、土壌中の孔隙が少ないことを意味している。つまり地形に沿った水の移動に加えて、容積重が高く孔隙量の少ない土壌では、高い土壌水分含量領域が生まれやすく、そうした箇所では嫌氣的な環境の形成によって脱窒が促進され、高N₂O フラックス領域が生み出された可能性が示唆された。従って、地形に沿った水の移動と容積重の分布に規定された土壌水分含量の分布が多雨期のN₂O フラックスの空間分布を支配していると推定された。

一方、少雨期では、N₂O フラックスはリター層、CO₂ フラックスと正の相関が認められた (図4)。リター層、CO₂ フラックスの間にも関係が認められており、これらのことからリター層が多く蓄積している箇所ではN₂O、CO₂ フラックスが共に高いことが明らかとなった。また、筆者らが別々に実施したリター層除去実験によってリター層そのものが発生源でないことが確認されている¹⁶⁾。CO₂ フラックスいわゆる土壌呼吸速度は微生物による有機物の無機化速度に加え、根の呼吸速度も含まれることからその区分は明瞭ではないものの、リター蓄積量が大きい場所では基質の供給量が局所的に増大しているために、高いN₂O、CO₂ フラックスが観測された可能性がある。つまり、少雨期のアカシア・マンギウム植林地ではリター蓄積量の分布に支配された窒素、炭素資源供給量の分布がN₂O フラックスの空間構造を規定している可能性が示唆された。

それでは、なぜ多雨期と少雨期でN₂O フラックスの空間変動を規定する因子が異なったのか。これには、少雨期における基質供給量の制限を要因の一つとして考えることができる。一般的に、少雨期は降雨が少ないため蓄積したリター層の分解が遅く、更に土壌中の水分移動も少ないことから基質の拡散が制限され、リターから土壌への窒素、炭素など基質の供給が制限されていると考えられる⁷⁾。筆者らが少雨期のアカシア・マンギウム植林地土壌におい

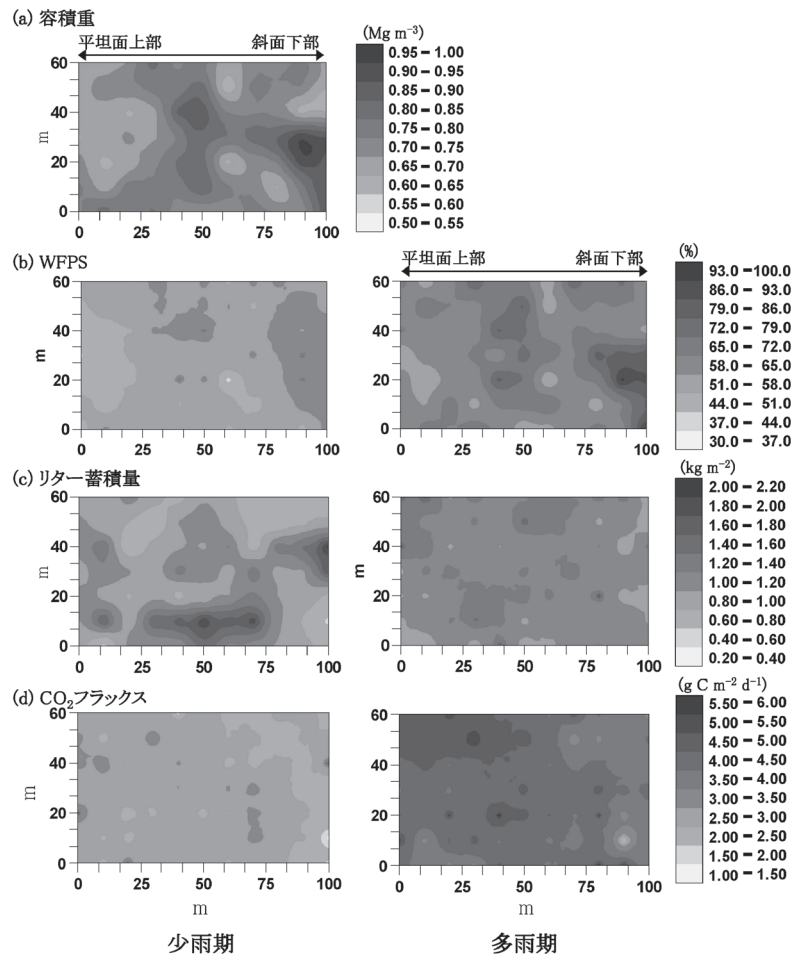


図 4 容積重 (a), 土壌水分含量 (WFPS: 本文調査方法参照) (b), リター蓄積量 (c), CO₂ フラックス (d) の等値線図。Konda *et al.*⁴⁾ の図を改変。容積重は少雨期にのみ測定。N₂O フラックス空間分布 (図 2) との間には多雨期では容積重, WFPS に, 少雨期ではリター蓄積量, CO₂ フラックスに正の相関関係が認められた。また, リター蓄積量, CO₂ フラックスの間にも正の相関関係が認められた (Pearson の相関係数 $P < 0.05$)。

て実施した窒素添加実験¹⁶⁾ では, NO₃⁻-N の添加によって N₂O フラックスが顕著に増大したことが認められ, NO₃⁻-N の供給量が少雨期の脱窒活性と N₂O フラックスを規定する重要な要因であるとともに, 少雨期において NO₃⁻-N の供給が制限されていることが示唆された。従って, 少雨期に N₂O フラックスとリター蓄積量の空間分布に関係がみられたことは, リターが蓄積している場所では, 局所的に NO₃⁻-N など土壌への新鮮な基質の供給が増大することで, N₂O フラックスが増大している可

能性が示唆された。一方, 多雨期は, 降雨の増大とリター分解の促進によって窒素や炭素の基質の供給量が増大することで, 土壌中に N₂O 発生の基質が潤沢に存在していると推定される。従って, 基質の供給が制限されている少雨期は資源環境の空間分布が N₂O フラックスの空間分布を規定し, 一方, 基質の制限の外れた多雨期は好嫌気環境の空間分布が N₂O フラックスの空間分布を規定したと推定された。

8. おわりに

マメ科樹木を中心とした早生樹産業植林地の拡大は、地球規模での新たな N_2O 放出源の出現へつながる可能性の高いことを示している。そのため、その土壌からの N_2O 放出量の広域・高精度な推定と、その発生メカニズムの解明ならびに、それに基づく放出緩和手法の開発は今後ますます重要な課題となる。

本研究の結果からアカシア・マンギウム植林地土壌における N_2O 発生の季節・空間変動のメカニズムに関して、リターからの窒素、炭素の資源供給量と容積重、土壌水分含量に支配された好・嫌気環境の二要因が複合的に関連する可能性を指摘した。例えば、多雨期には容積重の高い土壌が堅密な場所で N_2O 放出量が増大することから、植林施業時など人為要因による土壌コンパクションを極力防ぐことが N_2O 放出を削減する対策の一つとして挙げられるだろう。また、非マメ科樹種の植林やアカシアとの混植を行うこと、そして特に嫌気環境になりやすい斜面下部で非マメ科樹種の植林を行うなどアカシア・マンギウム高窒素濃度リターからの過剰な窒素の投入を適切に管理することも可能性として考えられる。また、多雨期に地形下部が N_2O の大きな発生源となる可能性が示されたことは、平坦面のみでの N_2O 発生量の測定ではその推定の深刻な過小評価につながることを示唆している。従って、 N_2O 発生量を広域、高精度に推定するためには地形の階層化による N_2O 発生量の測定が不可欠と考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたって多大なご助力を頂いた、Musi Hutan Persada社のハルジョノ氏（当時）をはじめとする多くのスタッフの皆様に感謝申し上げます。

〔引用文献〕 1) FAO, 2001. Global Forest Resources Assessment 2000. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 479 pp. 2) Erickson *et al.* (2001) *Ecosystems* 4, 67-84. 3) Davidson *et al.* (2000) *Bioscience* 50, 667-680. 4) Konda *et al.* (2010) Seasonal changes in the spatial structures of N_2O , CO_2 , and CH_4 fluxes from *Acacia mangium* plantation soils in Indonesia. *Soil Biology & Biochemistry* 42, 1512-1522. 5) 矢内純太, 小崎 隆 (2000) *土肥誌*, 71, 726-732. 6) Firestone and Davidson (1989) In : *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. John Wiley & Sons, pp. 7-21. 7) Davidson (1993) In : *The Biogeochemistry of Global Change : Radiative Trace Gases*. Chapman & Hall, pp. 369-386. 8) Keller *et al.* (1988) *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 93, 1600-1604. 9) Azam *et al.* (2002) *Biology and Fertility of Soils* 35, 54-61. 10) Ishizuka *et al.* (2002) *Global Biogeochemical Cycles* 16. 11) Arai *et al.* (2008) *Global Biogeochemical Cycles* 22. 12) Kiese *et al.* (2003) *Global Biogeochemical Cycles* 17. 13) Butterbach-Bahl *et al.* (2004) *Global Biogeochemical Cycles* 18. 14) Werner *et al.* (2007) *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 112. 15) Ishizuka *et al.* (2005) *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71, 55-62. 16) Konda (2011) Spatial structure of nitrous oxide flux from soil and its determining factors in *Acacia mangium* plantation (学位論文).