

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月28日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22255008

研究課題名（和文） 熱帯マメ科早生樹植林地における亜酸化窒素排出メカニズムの解明と抑制プロセスの探索

研究課題名（英文） Mechanism of nitrous oxide emission from fast-growing tree plantations of tropical legumes and a search for the process to suppress the emission

研究代表者 太田 誠一（OHTA SEIICHI）
京都大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号：10346033

研究成果の概要（和文）：近年、湿潤熱帯アジアでは増大するパルプ需要に答えるため大規模な植林事業が展開されており、こうした地域ではアカシア・マンギウム（以下アカシア）を代表とするマメ科早生樹が広く植栽される。しかし、アカシアは窒素固定樹種であるため成長が早い一方、土壌-植生系内を循環する窒素量が増大することで、亜酸化窒素（N₂O）を通常の森林よりも多く排出することを明らかにしてきた。本課題では N₂O 放出緩和オプションの提示を目的として、インドネシア南スマトラ州の大規模産業植林地帯において、以下の研究を実施した。1）リン施用がアカシア林地からの N₂O 放出に及ぼす影響、2）リン施用を導入したアカシア植林施業の温暖化緩和効果の評価。その結果、リン施用は植物根のない状態では N₂O 排出を促進するが、アカシア根による養分吸収がある条件下では植物の窒素吸収を促進することで土壌からの亜酸化窒素排出を抑制する効果を持つことを明らかにした。またアカシア新植時からリン施用を行えば無施用区に比べ、土壌炭素の分解が促進される一方で、N₂O の発生抑制ならびに植栽木のバイオマス生産増によって、全体としては温暖化緩和効果が強化されることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In the Asian tropics tree plantation with leguminous fast growing species is expanding recently, and leguminous fast-growing tree species like Acacia mangium have been widely introduced. However, based on the our precedent study it was indicated the soil under leguminous tree plantation emit more nitrous oxide (N₂O) than those under other species forests because of larger amount of nitrogen cycling in a soil-plant system due to symbiotic nitrogen fixation. In this research project we investigated the following two topics in large-scale industrial plantation in South Sumatra, Indonesia in order to propose possible options to mitigate the N₂O emission; 1) effect of phosphorous application to N₂O emission from Acacia stand, and 2) evaluation of global mitigation effect of Acacia plantation forest with phosphorous application.

The results obtained were as follows. (1) Phosphorous application stimulated N₂O emission from soil under the condition without plant roots, meanwhile it reduced the emission when Acacia mangium roots exist and uptake nutrients through accelerating nitrogen uptake by the plant. (2) Application of phosphorous to newly planted Acacia plantation strengthened the global warming mitigation function by suppressing N₂O emission from soil and promoting biomass production of planted trees, while decomposition of soils organic carbon was higher than in the stand without phosphorous application.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2011年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2012年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
総計	29,400,000	8,820,000	38,220,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：林学・森林工学

キーワード：亜酸化窒素・熱帯・早生樹・植林・温暖化緩和

1. 研究開始当初の背景

1. 研究開始当初の背景

近年熱帯地域では、木材資源の供給や二酸化炭素(CO₂)の固定を目的とした早生樹産業造林の拡大に伴い、マメ科早生樹種が広く導入されている。代表的な熱帯早成樹種の1つである *Acacia mangium* (以下アカシア) は、荒廃地への造林が可能であり、かつ材質が比較的良いことからインドネシア・マレーシア等の東南アジアを中心として、世界的に造林されつつある。しかし、最近の研究によって、このマメ科のアカシア林では、根粒菌による窒素固定によって、アカシアから土壤中に投入される窒素量が増加し、土壌窒素プールの増加および窒素循環の促進が引き起こされ、その結果として、重要な温室効果ガスの1つである亜酸化窒素(N₂O)の放出量が増加していることが明らかにされている(Arai et al. 2008)。土壤中に投入された窒素は、微生物によって分解され、アンモニア態となり、その後大きく分けて3つの経路を通る。1つ目が、硝化菌がアンモニアを硝酸へ変え、脱窒菌が硝酸を窒素ガスへ変える硝化脱窒系で、N₂Oはこのプロセスのうち、硝化の副産物および脱窒の中間生成物として放出されることが知られている。2つ目は微生物による窒素の有機化、すなわち硝化・脱窒菌以外の大多数の微生物が、窒素をその体内へ取り込む過程、そして3つ目は、植物が根から窒素を吸収する過程である。アカシア林では、リター中窒素量の増加に伴い、経路(1)へ流れる窒素量が多くなることによって、N₂O放出量が増加し、植林地の温暖化緩和効果が減少していると考えられている。今後も拡大を続けると予想される熱帯マメ科早生樹植林地において、N₂Oの放出量削減は今後の重要な課題のひとつである。しかし、この課題の具体的な解決策についてはほとんど提示されていない。

2. 研究の目的

本課題では、熱帯でしばしば肥料として用いられるリンに着目した。熱帯では土壌養分のうち、特にリンが不足していることが良く知られており、土壌微生物活動や植物の成長にリンの制限がかかっている

(Vitousek et al. 1984; Cleveland et al. 2002; Cleveland et al. 2006)。このように熱帯生態系において重要な制限要因となっているリンは、肥料として投入されることにより、土壌微生物および植物のリン制限を解除することで、N₂O放出量を変化させる可能性が考えられる。先行研究(Hall and Matson 1999)によると土壌リンの欠乏は土壌微生物による窒素の有機化を抑制することによって硝化脱窒系に流れる窒素量を増加させ、N₂O放出量の増加を招くとされており、リン施用は微生物による窒素の有機化を促進することでN₂O放出量を抑制する可能性がある(仮説①)。またリン施用は、植物の窒素吸収を増加させることによってN₂O放出量を抑制する可能性もある(仮説②)。本課題では、アカシア植林地土壌からのN₂O放出に及ぼすリン施用の影響を明らかにすることを目的とし、調査を行った。

3. 研究の方法

インドネシア南スマトラ州 Muara Enim 県において、試験地を設定し、2007年9月から2009年8月までの2年間、土壌中の窒素動態とN₂O発生について3種類の実験から成る調査を行った。試験地は、Musi Hutan Persada社の所有する約19万ヘクタールのアカシア植林地内に設置した。この地域は、熱帯湿潤気候帯に属し、年間降水量は2750mm、年平均気温は27.3°Cである(Hardjono et al. 2005)。目立った、雨季と乾季は存在しないが、比較的降水量の多い10~3月が多雨期、比較的少ない4~9月が少雨季である。地質は第三紀堆積岩から発達した地層で、世界土壌照合基準では Acrisols に分類される。地形は波上に隆起している。Musi Hutan Persada社が植林をする以前は、この地域一帯はチガヤ原であった。試験地はすべて第2期植栽の林地に設置した。本試験地には、3m間隔でアカシアが植栽されている。

3-1. 実験(1) 室内培養実験

仮説①(リン施用は微生物の有機化を促進することでN₂O放出を抑制する)を検証するため、室内培養実験を行った。

アカシア林分から採取した土壌は根を取り除いた後風乾し日本に持ち帰り、培養実験を行った。土壌

30g を 223mL の広口瓶に、無機態窒素分析用の土壌 5g を 50mL のプラスチック瓶にそれぞれ 3 連で用意し、水分条件を WFPS75% と 100% に調節し、 $2 \text{ mg P g}^{-1} \text{ soil}^{-1}$ のリン水溶液を添加したものと無添加のものを用意して 30 日間培養した。

N_2O 、 NO 、および CO_2 放出量を培養開始 0、0.5、1、3、8、15、22、30 日後に測定した。 N_2O 、 CO_2 濃度は、ECD および TCD ガスクロマトグラフを、 NO 濃度は $\text{NO-NO}_2\text{-NO}_x$ analyzer を用いて測定した。ガスの放出積算量は台形法によって求めた。無機態窒素濃度については、培養前後の土壌 (5g) を 10 倍量の 2 mol L^{-1} 塩化カリウム溶液で抽出し、フローインジェクションを用い、硝酸態窒素濃度をナフチルエチレンジアミン吸光光度法で、アンモニア態窒素濃度をインドフェノールブルー法で測定した。

また、この 30 日間の培養に加え、24 時間のアセチレン阻害法による培養実験を追加的に行い、発生した N_2O における硝化由来のものと脱窒由来のものとの寄与の大きさを明らかにした。

3-2. 実験(2) 植物根排除・リン施用複合実験

仮説② (リン施用は植物の窒素吸収を促進することで N_2O 放出を抑制する) を検証するため、植物根排除とリン施用を組み合わせた実験を行った。

6 年生のアカシア林分において、植物根排除区 (トレンチ法) と非排除区をそれぞれ 6 連で設置しリン施用の影響を比較した。リンは、TSP (Triple Super Phosphate, PT Petrokimia Gresik, East Java, Indonesia) を用いて $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ の区間に施用した (200 kg P ha^{-1})。 N_2O および CO_2 フラックスを、クローズドチャンバー法 (Ishizuka et al. 2002) を用いリン施用後 0、4、7、15、22、29、106 日後に測定した。同時にガス採取チャンバーから約 50cm 離れた地点から深度 0~5cm の土壌を 100mL 採取し WFPS を算出した。

同様に化学分析用土壌をリン施用 7、29、106 日後に採取し 2mm の篩を通した土壌 (6 連) を一つに混合しコンポジットサンプルとした。土壌およびリター層の pH、無機態窒素濃度、全炭素濃度、全窒素濃度、可給態リン濃度を測定した。土壌およびリター層の全リン濃度は、マイクロウェーブによる分解を行った後比色法によって測定した。土壌微生物態窒素およびリンは、クロロホルム燻蒸抽出法 (Vance et al. 1987; Wu et al. 2000) によって算出した。

3-3. 実験 (3) 2 年間のモニタリング実験

実験 (3) では、2 年間のモニタリングを行い、リン施用が N_2O 放出量に与える影響を比較的長期間観測するとともに、樹木および土壌中の炭素蓄積量、 CH_4 吸収量に与える影響と合わせて、植林地の持つ温暖化緩和効果に対するリン施用の影響を総合的に評価した。

アカシア林 3 林分を選び、各林分にリン非施用区 6 連およびリン施用区 4 連をランダムに配置した。各プロットは 12 m 四方で、プロット間は 10 m 以上のバッファーを設けた。土壌中からの N_2O 、 CO_2 、 CH_4 フラックスおよび WFPS を 45 日毎に、土壌およびリター層中の無機態窒素濃度、pH、全炭素濃度、全窒素濃度、全リン濃度、土壌中の可給態リン濃度、微生物態窒素濃度、微生物態リン濃度を 90 日毎に測定した。また植栽 1 年後ならびに 2 年後にプロット内の全木の胸高直径および樹高を測定し、以下のアロメトリー式を用いて地上部バイオマスを算出した。
$$\text{Wa} = 0.0509 \times (\text{dbh}^2 \times \text{H})^{0.8611}$$

ただし、 Wa は地上部バイオマス、 dbh は胸高直径、 H は樹高である。

4. 研究成果

4-1. 実験 (1) 室内培養実験

リン添加によって、 N_2O 放出量はいずれの水分条件においても有意に ($P < 0.05$) 増加した。WFPS75% では、0.5、1 日後のフラックスが、WFPS100% では、1 日後のフラックスがリン添加土壌で有意に ($P < 0.05$) 増加した。また、 N_2O と同時に発生する NO についても、WFPS75% では、0.5、1、3 日後のフラックスが、WFPS100% では、1 日後のフラックスがリン添加によって有意に ($P < 0.05$) 高くなった。 NO の放出積算量は、WFPS100% では差がなかったが、WFPS75% ではリン添加土壌で有意に ($P < 0.05$) 高くなった。

アセチレン阻害実験では、いずれの水分条件においても脱窒由来の N_2O が硝化由来の N_2O を上回っており、脱窒が N_2O の主な放出源であることを示した。 N_2O 放出量は、土壌水分が WFPS75% から WFPS100% へと上昇するに共に、脱窒の貢献も増加した。また脱窒の指標である $\text{N}_2\text{O}/\text{NO}$ 比は常に 1 より大きく、脱窒が主な発生源とするアセチレン阻害実験の結果と一致した。リン添加による N_2O 放出量増加の原因として第一には、リン添加が窒素の循環量を増加させた可能性を、第二には、リン施用が硝化菌および脱窒菌それ自体のリン制限を外した可能性を、更に第三にはリン添加が従属栄養微生物の酸素消費を促進しより嫌氣的な条件を作ることで脱窒が活性化された可能性を指摘した。

以上のように、実験 (1) では、リン添加が硝化・脱窒および N_2O 放出量を抑制するとの仮説①は、本試験地においては成り立たないことを明らかにした。また、本試験地土壌でリン添加は逆に硝化・脱窒を促進させ、 N_2O 放出量を増加させる危険性を示した。

仮説①が成り立たなかった理由としては、第一に本調査地の土壌が高窒素・低炭素であり、窒素の有機化を担う従属栄養微生物の活動が炭素不足によって十分に促進されなかった可能性を、また、本実験の比較的嫌氣的条件のために従属栄養微生物の活動が制限された可能性を指摘した。

4-2. 実験 (2) 植物根排除・リン施用複合実験

プロット間の変動が大きかったため、有意な差は見られなかった (リン施用後 4、7、15 日後の P 値はそれぞれ 0.11 , $P = 0.10$, $P = 0.08$) もの、植物根排除区では、リン施用 106 日後を除いてリン施用土壌からの N_2O 放出量が高い傾向を示した。また、リン施用によって N_2O 放出積算量は 40.4 ± 6.5 から $51.3 \pm 14.4 \text{ mg N m}^{-2} 106 \text{ days}^{-1}$ へ増加した (表 5)。一方植物根非排除区からの N_2O 放出量はリン施用によって有意に減少し (リン施用 15、29、106 日後、 $P < 0.05$ 、特にリン施用 106 日後には、 N_2O フラックスがほとんど観測できないレベルにまで減少した。放出積算量も 71.1 ± 20.2 から $19.3 \pm 5.1 \text{ mg N m}^{-2} 106 \text{ days}^{-1}$ へ有意に ($P < 0.05$) 減少した (表 5)。

植物根非排除区では、WFPS が小さい時にリン施用が N_2O 放出量を減少させている傾向が見られ、 N_2O フラックスを異なる WFPS の範囲ごとと比較すると、WFPS が 30-50% および 60-70% の場合はリン施用によ

って N_2O フラックスは有意に減少していたが ($P < 0.0001$ および $P < 0.05$)、WFPS が 60-70% および 70% 以上の場合にはリン施用の影響は見られなかった ($P = 0.183$ および $P = 0.243$)。一方で、植物根排除区ではそのような傾向は見られなかった。このように、植物根非排除区でのリン施用による N_2O 削減効果は、より含水率の低い状態で特に高い可能性が示唆された。

リン施用は、植物根排除区および非排除区のいずれにおいても、土壌中のリンレベルを明瞭に増加させた。土壌中の全リン濃度、可給態リン濃度および微生物態リン濃度のいずれも、リン施用区で高い値を示した。リンの施用量は、植物根排除区と非排除区で同量であったが、全リン濃度、可給態リン濃度および微生物態リン濃度のいずれも、植物根排除区で非排除区よりも低い値を示した。これはおそらく、アカシアの根がリン肥料を吸収したためと考えられる。このような植物根排除区および非排除区におけるリン施用後の土壌中リン濃度の違いは、リン施用 7 日後には既に確認され、アカシアの急速なリン吸収を示しているといえる。

植物根非排除区では、リン施用は CO_2 放出量を 306.1 ± 27.1 から $432.3 \pm 14.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ へと有意に ($P < 0.05$) 増加させた。植物根排除区においても、リン施用土壌で CO_2 放出量が多くなっていたが、その差は有意ではなかった。植物根排除区では、アンモニア態窒素濃度および硝酸態窒素濃度はリンの施用された土壌で常に高い値をとった。一方植物根非排除区では逆に、アンモニア態窒素濃度および硝酸態窒素濃度ともに、リン施用 106 日後のアンモニア態窒素濃度を除いて、リンの施用された土壌で常に低い値をとった。土壌およびリター層のその他のパラメータについては、特にリン施用の影響は見られなかった (表 7, 8)。

生葉中のリン濃度は、30 日後および 90 日後共にリン施用区で有意に増加した (表 9)。また、それに伴い C:P 比および N:P 比は共にリン施用区で低下した。葉の N:P 比は、植物の制限養分を示す指標として提唱されており、N:P 比が 16-20 を超えると、その樹木の成長にはリンの制限がかかっていると考えられている (Koerselman et al. 1996; Gusewell 2004)。本研究でのアカシアの数値はこれらの数値より高く、強いリン制限がかかっていたことが予想される。リン施用による N:P 比の低下は、リン制限がリン施用によって緩和されたことを示唆している。生葉のその他のパラメータについては、リン施用の影響は見られなかった。

実験 (1) では、アカシア植林地土壌に対するリン添加が N_2O 放出量を増加させる危険性について報告し、その理由についてはリン制限が解除されたことによって窒素循環および硝化・脱窒が促進されたことを提示した。本実験の植物根排除区についての結果は、実験 (1) の結果を支持するものとなった。リン施用によって無機態窒素量は増加し、 N_2O 放出量も増加した。さらに微生物態窒素量はリン施用によって増加することはなく、仮説①のメカニズム (すなわちリン施用は微生物による窒素の有機化を促進することで N_2O 放出量を抑制する) が本試験地では成り立たないことを改めて示した。

一方植物根非排除区では、リン施用は N_2O 放出量

を減少させることが明らかになった。上述のように、植物根排除区および非排除区におけるリン施用後の土壌中リン濃度の違いや生葉の N:P 比の結果から、本試験地のアカシアには強いリン制限がかかっており、施用されたリンを急速に吸収した可能性が示唆された。おそらくこのリンの吸収によるリン制限の解除が、植物の窒素吸収を促進させ、硝化・脱窒系に利用できる窒素の量を減少させることによって N_2O 放出量を減少させたと考えられた。前述のように、リン施用による N_2O 放出削減効果は、WFPS の比較的高い条件では不明瞭であった。このことから、WFPS の高い条件では、根による窒素吸収が酸素不足などによって阻害されている可能性も考えられる。今後、さらに詳しいメカニズムの解明が必要である。

以上のように、実験 (2) では、仮説②が成り立つことを明らかにした。実際の林地においては、植物根は排除されていないため、本実験は、リン施用が N_2O 放出削減に効果的である可能性を示した。一方で、本実験は、植物による窒素吸収が期待できない場合は、 N_2O 放出を助長する恐れがあることを明らかにし、リンを施用する際には、伐採直後等樹木の存在しない時期を避ける必要があることを示した。

4-3. 実験 (3) 2 年間のモニタリング実験

4-3-1. N_2O 放出量に対するリン施用の影響

N_2O フラックスは高い季節的および空間的変動を示した。1 年目の雨季には、 N_2O は非常に高いフラックスを示したが、2 年目にはフラックスは 1 年を通じて低く維持された。リン施用は、特に 2 年目に N_2O 放出量を減少させた。2008 年 9 月、11 月および 12 月、2009 年 5 月および 8 月には、リン施用区で非施用区よりも有意に低い N_2O フラックスが認められた ($P < 0.05$)。1 年目の平均フラックスはリン非施用区 ($2.83 \pm 0.49 \text{ mg N m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) とリン施用区 ($2.31 \pm 0.48 \text{ mg N m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) に違いは見られなかったが、2 年目の平均フラックスは、リン施用によって $0.59 \pm 0.08 \text{ mg N m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から $0.24 \pm 0.05 \text{ mg N m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ へと有意に ($P < 0.001$) 減少した (表 10)。放出積算量についても、2 年目にリン施用区 ($88.3 \pm 23.3 \text{ mg N m}^{-2}$) でリン非施用区 ($198.7 \pm 29.8 \text{ mg N m}^{-2}$) よりも有意に ($P < 0.01$) 小さくなっていた。2 年間を通じての N_2O 放出積算量は、リン非施用区で $1199.8 \pm 198.9 \text{ mg N m}^{-2}$ 、リン施用区で $863.4 \pm 186.1 \text{ mg N m}^{-2}$ であった。

土壌およびリター層中の無機態窒素濃度は、季節変動性を示した。すなわち、多雨期には減少し、少雨期になると増加する傾向を示した。リン施用は 2 年間の平均無機態窒素濃度を $1.61 \pm 0.26 \text{ } \mu\text{g N g soil}^{-1}$ から $1.40 \pm 0.20 \text{ } \mu\text{g N g soil}^{-1}$ へと減少させる傾向を示した ($P = 0.08$)。微生物態窒素は、1 年目にはリン施用区で小さい傾向を示したが ($P = 0.07$)、2 年目にはそのような傾向は見られなかった。リン施用は、雨季に土壌の純アンモニア化速度を増加させる傾向を示し、2 年間の土壌の純硝化速度を有意に ($P < 0.01$) 増加させた。リター層の純アンモニア化速度および純硝化速度には、リン施用の影響は見られなかった。試験期間を通じて土壌中全炭素量および全窒素量は増加する傾向を示した一方、リター層中全炭素量および全窒素量は減少する傾向を示した。土壌中全炭素量および全窒素量の 2 年目の平均値および 2 年間の平均値はリン施用によって有意に ($P < 0.05$)

減少したが、リター層中全炭素量および全窒素量にはそのような違いは認められなかった。リン施用によって、リンの存在量は明瞭に増加した。1年目、2年目、および2年間の土壤中全リン量、リター層中全リン量、土壤中可給態リン量、および微生物態リン量はリン施用区で有意に高かった。2年目にはリン存在量は全体的に減少する傾向を見せたが、それでもなおリン非施用区と比較すると高いレベルを保ち続けた。

本結果は、リン施用が熱帯早生樹植林地における N_2O 放出量を減少させるとの実験(2)の結果を支持している。 N_2O フラックスは1年目にはWFPSと、2年目には土壤全窒素量と有意な正の相関を示しており、土壤中の水分と窒素資源が N_2O 放出量を規定するという過去の研究例と一致した(Matson and Vitousek 1987; Davidson et al. 1991)。リン施用は N_2O 放出量を減少させると同時に、WFPSと土壤全窒素量のいずれをも有意に減少させた。実験(2)の結果と合わせて推察すると、リン施用によって植物の水分吸収や窒素吸収が促進されたために N_2O 放出量が減少したと考えられる(仮説②)。リン施用の N_2O 放出削減効果は、1年目よりも植物の成長した2年目により明瞭であり、リン施用による植物の水分吸収および窒素吸収の促進が N_2O 放出量を削減したとの説明を支持するものであった。このように、リン施用は、実験(2)で示された通り、植物の成長を促進し続ける限り、 N_2O 放出量削減に効果的であることを確認した。

3.3-2. 植林地の持つ温暖化緩和効果全体に対するリン施用の影響

リン施用によって樹上バイオマスは、1年目には $2.28 \pm 0.10 \text{ Tg ha}^{-1}$ から $3.34 \pm 0.19 \text{ Tg ha}^{-1}$ へ、2年目には $15.6 \pm 0.46 \text{ Tg ha}^{-1}$ から $18.7 \pm 0.68 \text{ Tg ha}^{-1}$ へと有意に増加した($P < 0.001$)。この結果を用いて計算された樹木の炭素蓄積量はリン施用によって、1年目には $1.14 \pm 0.05 \text{ Tg C ha}^{-1}$ から $1.67 \pm 0.09 \text{ Tg C ha}^{-1}$ へ、2年目には、 $7.79 \pm 0.23 \text{ Tg C ha}^{-1}$ から $9.35 \pm 0.34 \text{ Tg C ha}^{-1}$ へと増加した。これは、おそらくアカシアに掛かっていたリン制限が解除され、成長が促進されたためと考えられる。アカシアの葉のN:P比はリン施用によって有意に減少しており($P < 0.001$)、リン施用によってリン制限が解除されたことを示唆している。このように、リン施用は、樹木の炭素蓄積量を増加させ、植林地の温暖化緩和効果を増大させることが明らかになった。

CO_2 フラックスは、雨季および2年目に高くなるという季節的および空間的変動を示した。リン施用区の CO_2 フラックスは、常に高い傾向を示した。リン施用によって2年目の平均フラックスは $1.73 \pm 0.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から $2.16 \pm 0.13 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ へ($P < 0.01$)、2年間の平均フラックスは $2.09 \pm 0.06 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から $2.38 \pm 0.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ($P < 0.01$)へと有意に増加したが、1年目については有意な差は認められなかった。2年間を通じての CO_2 放出積算量は、リン非施用区で $1478 \pm 106 \text{ kg C m}^{-2}$ 、リン施用区で $1688 \pm 116 \text{ kg C m}^{-2}$ であった。この CO_2 フラックスの増加は、従属栄養微生物による土壤炭素分解の促進(Cleveland et al. 2002, 2006; Ilsted et al. 2000, 2003; Mori et al. 2010)および植物根呼吸の促進(Mori et al. under review)によると考えられた。実際、既に述べた

ように、土壤炭素蓄積量はリン施用区で非施用区よりも小さかった。また、リン施用による土壤炭素の減少量(0.12 Kg C m^{-2})は、 CO_2 放出量($0.21 \text{ Kg C m}^{-2} \text{ 2years}^{-1}$)より小さく、土壤呼吸の分解に加え、根呼吸も同時に促進されたことを示している。本結果は、リン施用は土壤炭素蓄積量を減少させる可能性を示しているが、今後樹木の成長がリン施用によって促進され続け、土壤へのリター投入量が増加すれば、異なる結果が得られる可能性もある。

CH_4 フラックスは、伐採後数ヶ月は放出を示したが、その後約半年で吸収にシフトし、その後は、 CH_4 吸収量はリン施用区で低くなる傾向が見られた。 CH_4 の平均フラックスは、1年目はリン施用の影響は見られなかったが、2年目には $-0.41 \pm 0.02 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から $-0.33 \pm 0.03 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ へと有意に増加した($P < 0.05$)。2年間を通じた CH_4 収支の積算量は、コントロール区で $-195.4 \pm 34.8 \text{ mg C m}^{-2}$ 、リン施用区で $-92.3 \pm 55.1 \text{ mg C m}^{-2}$ であった。リン施用が CH_4 吸収量を減少させたメカニズムについては、先行研究でリン施用が植物根による水分や窒素の吸収を促進し CH_4 吸収量が増加するとの例が見られるが(Hutsch et al. 1996; Zhang et al. 2011)、本結果はこれらとは逆の結果を示した。このように、リン施用は CH_4 吸収量を減少させる可能性が明らかになったが、リン施用によって減少した CH_4 吸収量は、 N_2O 放出削減量や炭素貯留量の変化と比較すると極めて小さく、植林地の温暖化緩和効果に与える影響としては、無視できるほどのものであった。

以上のように、リン施用は N_2O 放出量を削減し、樹木の炭素蓄積量を減少させた一方、土壤炭素蓄積量および CH_4 吸収量を減少させた。これらの値を温暖化係数を用いて CO_2 量換算すると、 N_2O 削減量は2年間で $1.58 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ (tCO_2e は tCO_2 equivalentの意)、樹木の炭素蓄積増加量は2年間で $5.8 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ 、土壤の炭素蓄積減少量は $4.4 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ (土壤全炭素量のデータを用いて計算)、 CH_4 吸収の減少量は $0.03 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ と計算された。これらの結果を総合すると、リン施用によって、植林地の持つ温暖化緩和効果は、2年間で1hあたり 2.32 ($1.58 - 0.03 - 4.4 + 5.18$) $\text{ tCO}_2\text{e}$ 増大し、リン施用が熱帯マメ科早生樹植林地での温暖化緩和効果を増大させる可能性を示した。また N_2O 放出の抑制はこのうち約68%を占めており、温暖化緩和効果の増大に大きく貢献した。

以上のことから本課題は、熱帯土壤へのリン施用は、植物が存在する限りでは、 N_2O 放出量削減に効果的であること、また、植物による窒素吸収が期待できない場合は、 N_2O 放出を助長する恐れがあり、リンを施用する際には伐採直後等樹木の存在しない時期を避ける必要があることを示した。

主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Effects of phosphorus application on root respiration and heterotrophic microbial respiration in Acacia mangium plantation soil. Tropics, in press

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Effects of phosphorus and nitrogen addition on heterotrophic respiration in an Acacia mangium plantation soil in South Sumatra, Indonesia. Tropics, in press

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Effects of phosphorus application on CH4 fluxes in an Acacia mangium plantation with and without root exclusion. *Tropics*, in press

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Effects of phosphorus addition with and without ammonium, nitrate, or glucose on N2O and NO emissions from soil sampled under Acacia mangium plantation and incubated at 100% of the water-filled pore spaces. *Biology and Fertility of Soils*, Springer 49, pp13-21, 2013.

佐々木卓也・太田誠一・沢悠希子・ウィチャクソノ アグス「アカシア・マンギウム及びユーカリプタス・ペリタ植林は土壌養分環境にどのような影響を与えるか？—インドネシア南スマトラ州における事例から—」(2013年6月発刊の「海外の植林と森林と林業」87号に掲載決定)

[学会発表] (計10件)

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Effects of P addition with and without NH4+, NO3-, or glucose on N2O and NO emissions from Acacia mangium plantation soil, The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security (SUSTAIN 2012), Kyoto, Japan, November, 2012.

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Effects of phosphorus fertilization on methane fluxes in a tropical leguminous forest plantation in Sumatra, Indonesia, International Ergonomic Workshop of IUFRO RG3.03, Nagoya, Japan, October, 2012.

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Phosphorus addition stimulated N2O emissions from a tropical leguminous plantation soil in the laboratory condition, but reduced in the field, ATBC annual meeting, XTBG, Xishangbangna, China, Mar. 2012.

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Phosphorus application accelerated N2O emissions from soils of an Acacia mangium plantation when acacia roots were excluded, but reduced when there were acacia roots, The 5th EAFES International Congress, Ryukoku University, Otsu, Japan, Mar. 2012.

Taiki Mori, Seiichi Ohta, Shigehiro Ishizuka, Ryota Konda, Agus Wicaksono, Joko Heriyanto and Arisman Hardjono, Effects of phosphorus fertilization on microbial respiration and root respiration in an Acacia mangium plantation, International Symposium in Agricultural Meteorology 2012 (ISAM2012), Osaka Japan, Mar. 2012.

Yukiko Sawa, Takuya Sasaki, Seiichi Ohta, "Nutrient Dynamics in Acacia mangium and Eucalyptus pellita Plantations in South Sumatra, Indonesia", November 27-28, 2012., Nutrient Dynamics of Planted Forests, Vancouver, WA, USA.

森大喜、太田誠一、石塚成宏、根田遼太、Wicaksono Agus, Heriyanto Joko, Arisman Hardjono、「リン施用は Acacia mangium 植林地土壌からの N2O 放出を抑制できるのか?」、『日本土壌肥料学会』、鳥取、2012年9月

森大喜、太田誠一、石塚成宏、根田遼太、Wicaksono Agus, Heriyanto Joko, Arisman Hardjono、「Acacia mangium 植林地からの土壌呼吸に対するリン添加の

影響」、『日本熱帯生態学会』、横浜、2012年6月16日 横浜国立大学(神奈川県)

森大喜、太田誠一、石塚成宏、根田遼太、Wicaksono Agus, Heriyanto Joko, Arisman Hardjono、「リン施用は Acacia mangium 植林地土壌からの N2O 放出を促進するが、樹木の存在する場合には抑制する」、『日本農業気象学会』、大阪、2012年3月

沢悠希子、太田誠一、佐々木卓也、Wicaksono Agus, Heriyanto Joko, Arisman Hardjono 「インドネシア南スマトラ州における Acacia mangium 及び Eucalyptus pellita の伐採残渣の分解による養分解放」日本熱帯生態学会、横浜、2012年6月16日 横浜国立大学(神奈川県)

沢悠希子、太田誠一、佐々木卓也、Wicaksono Agus, Heriyanto Joko, Arisman Hardjono 「Acacia mangium 及び Eucalyptus pellita の収穫残渣の分解による養分の開放及び苗木・下層植生による養分吸収」日本土壌肥料学会、鳥取、2012年9月

水野綾、太田誠一、Wicaksono Agus、「熱帯造林樹種の葉リターに由来する溶存性有機物の土壌吸着と土壌特性の関係」、日本土壌肥料学会、鳥取、2012年9月4~6日

金子隆之 太田誠一(京大院農) Jiyana Arta Hardjono Arisman (MHP) 「短伐期施業を繰り返す Acacia mangium 植林地での炭素貯留量の将来予測」第22回日本熱帯生態学会年次大会 2012年6月16日 横浜国立大学(神奈川県)

金子隆之 太田誠一(京大院農) Hardjono Arisman (MHP) 「短期早生樹林業の施業方法の違いによる炭素貯留量の推定」第60回日本生態学会大会 2013年3月6日 グランシップ(静岡県)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

太田誠一 (OHTA SEIICHI)

京都大学大学院農学研究科 教授

研究者番号: 10346033

(2)研究分担者

武田博清 (TAKEDA HIROSHI)

同志社大学理工学部 教授

研究者番号: 60109048

石塚成宏 (ISHIDUKA SHIGEHIRO)

独立行政法人森林総合研究所 研究グループ長

研究者番号: 30353577