

## 積雪期と非積雪期における森林土壌からの温室効果ガスフラックスの違い

阪田匡司 (森林総研)・橋本徹 (森林総研北海道支所)・小野賢二 (森林総研東北支所)・森下智陽 (森林総研四国支所)・石塚成宏 (森林総研九州支所)・平井敬三 (森林総研)

**要旨:** 積雪期の森林土壌の温室効果ガスフラックスの挙動を把握するために、岩手県八幡平市安比試験地において、CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>O フラックス観測を積雪期も含めた通年でおこなった。フラックス測定は、非積雪期は地表に、積雪期は雪面にチャンバーを設置し、月に1~2度の頻度でおこない、大気・土壌表面・深さ5cmの土壌中のガス濃度測定もおこなった。その結果、積雪期の方が非積雪期よりもCO<sub>2</sub>およびN<sub>2</sub>O放出が小さく、CH<sub>4</sub>吸収が小さかった。特にCH<sub>4</sub>吸収は地温や土壌水分の影響を考慮した推定値と比較しても小さい値を示した。この原因として、土壌表面および土壌中のCH<sub>4</sub>濃度が積雪期では非積雪期に比べて低下し、さらに積雪深が大きくなるほど低下していたことから、積雪によって大気から土壌へのCH<sub>4</sub>供給が阻害されていると考えられた。そのため、積雪期のCH<sub>4</sub>吸収の推定には土壌温度や水分の影響だけでなく、積雪の影響を考慮する必要があることが示された。

**キーワード:** メタンフラックス, 積雪, ガス拡散阻害

**Abstract:** In order to understand the greenhouse gas of forest soil during snow cover season, we observed CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O flux over the year at Appi experimental site in Iwate prefecture. We measured the gas flux and the gases concentration in the soil at 5cm depth, atmosphere, and the surface soil once or twice a month. As a results, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emission or CH<sub>4</sub> uptake during snow season were smaller than that during non-snow season. Especially, CH<sub>4</sub> uptake during snow season showed smaller values as compared with the value estimated by considering the effect of soil temperature. The cause of this results, it was considered to be due to CH<sub>4</sub> exchange of the atmosphere and the soil is inhibited by the snow cover. Therefore, it was considered in order to estimate the CH<sub>4</sub> uptake during snow season, as well as the influence of moisture and soil temperature, must take into account the snow effects.

**Keywords:** methane flux, snow cover, gas exchange inhibition

## I はじめに

森林生態系は大気とさまざまな物質交換をおこなって相互作用を受けているが、森林生態系のガス動態は近年注目されている大気中の温室効果ガス濃度に強く影響をおよぼしている(3)。森林生態系に関与する主な温室効果ガスはCO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>Oの3種であり、それらについて、観測をはじめさまざまな研究が世界各地でおこなわれている(3)。

CO<sub>2</sub>は最も重要な温室効果ガスの1つである。森林生態系には莫大な炭素が貯留されており、動植物の呼吸・土壌有機物の分解によってCO<sub>2</sub>が放出されている一方、光合成によってCO<sub>2</sub>が吸収されており、その収支によって森林生態系は放出源にも吸収源にもなり、大気中のCO<sub>2</sub>濃度におよぼす影響が大きい(3, 4, 7)。CH<sub>4</sub>は森林土壌において通常では吸収されていることから森林生態系はCH<sub>4</sub>の吸収源である(3, 5)。N<sub>2</sub>Oは土壌中の硝化や脱窒の

過程で発生し、近年の大気からの窒素降下物の増加に伴って、N<sub>2</sub>O放出量が増加することが危惧されている(5,6)。これらの温室効果ガスフラックスの変動要因として、温度や水分があげられ、例えば、観測値を元にした温度・水分・土壌特性値などによるモデル推定式から広域評価などがなされている(2,5)。それらら多くの温室効果ガスフラックスのモデル推定式はさまざまな観測結果を元にしてはいるが、積雪地域の観測例が非常に少ないのが現状である(1)。特に積雪時期の観測例はほとんどなく、非積雪期間の観測値から年間値を推定している。そのため、推定精度向上のためには、積雪による影響を評価することが非常に重要であると思われる。

そこで、森林土壌の温室効果ガスフラックスにおよぼす積雪影響を明らかにすることを本研究の目的とし、積雪期・非積雪期の温室効果ガスフラックスおよび温室効果ガス濃度の垂直分布の違いを明らかにし、年間推定に

Tadashi SAKATA (Forestry and Forest Products Institute (FFPRI), Tsukuba, Ibaraki 305-8687), Toru HASHIMOTO (Hokkaido Research Center, FFPRI, Sapporo, Hokkaido 062-8516), Kenji ONO (Tohoku Research Center, FFPRI, Morioka, Iwate 020-0123), Tomoaki MORISHITA (Shikoku Research Center, FFPRI, Kochi, Kochi 780-8077), Shigehiro ISHIZUKA (Kyushu Research Center, FFPRI, Kumamoto 860-0862), Keizo HIRAI (FFPRI, Tsukuba, Ibaraki 305-8687), Difference in greenhouse gas flux at forest soil during non-snow season and snow season.

および積雪期の観測値の必要性や積雪によるガスフラックスにおよぼす影響を評価した。

## II 調査方法

岩手県八幡平市の西森山北麓に広がる台地状の緩傾斜地に位置する安比森林気象試験地(42°00'N 140°56'E)で調査をおこなった。本試験地はブナを主とする冷温帯性落葉広葉樹の二次林で、約80年生の、林床植生は少ない林分である。標高は825mで土壌型は火山放出物を母材とする適潤性褐色森林土である。年平均気温は6.1°Cで、年間降水量は1207mmである。また、厳冬期には最大積雪深が2m程度である。

温室効果ガスフラックス測定はチャンバー法を用いて行った(8)。非積雪期間は土壌に、積雪期間は雪面に内径40cm高さ15cmのステンレス製円筒チャンバーを数cm差し込んだものを用い、チャンバーに蓋をして0, 10, 20, 40分後のチャンバー内空気を40mL採取した。また、フラックス測定と同時に大気(地表面あるいは積雪面から高さ5cm程度)、地表面(リター層直下)、土壌中(深さ5cm)の空気をシリンジで40mL採取した。それらのガス試料中のCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O濃度をガスクロマトにより分析し、温室効果ガスフラックスおよびガス垂直分布を得た。観測期間は2010年7月～2012年8月で、頻度は1か月に1～2度程度でおこなった。土壌深さ5cmの地温および土壌水分を1時間間隔で測定記録した。

指数関数による非線形回帰モデルはSigmaPlot(Systat Software Inc, Version11)を、重回帰分析およびその他の統計量の計算にはJMP(SAS Institute Inc, Version6)を用いた。

## III 結果

本調査地における土壌の温度水分環境は明瞭な季節性を持ち、夏は高温で乾湿の変動が大きく、冬は低温で適湿な状態で概ね保たれていた(図-1)。ただ、積雪期の土壌水分はほぼ一定で推移したが、融雪時期に土壌水分が上昇し、融雪が終わると急激に積雪時の水準にまで低下していた。

土壌および雪面の温室効果ガスフラックスは、CO<sub>2</sub>およびN<sub>2</sub>Oに関しては全ての観測値において放出フラックス、CH<sub>4</sub>に関しては吸収フラックスであった(図-2, 図-3, 図-4)。CO<sub>2</sub>放出とCH<sub>4</sub>吸収は夏に大きく、冬の積雪期間は非常に小さく、明瞭な季節変化を示した。N<sub>2</sub>O放出は2010年の夏は大きな放出が見られたが、2011年の夏にはほとんど放出が見られず、明瞭な季節変化は見

られなかった。また、積雪期間中も大きくはなかったが放出が観測された。

温室効果ガス濃度の垂直分布は、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oとも明瞭な季節変化が見られた(図-2, 図-3, 図-4)。大気中のCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O濃度は季節によらずほぼ一定であった。土壌中のCO<sub>2</sub>濃度は夏に上昇、秋に低下したのち、冬は積雪に伴い上昇し、融雪とともに低下していた(図-2)。地表面のCO<sub>2</sub>濃度は土壌中のCO<sub>2</sub>濃度と同様の季節変化を示したが、夏の上昇はそれほど大きくなかった(図-2)。土壌中のCH<sub>4</sub>濃度は夏から冬にかけて徐々に低下し、融雪時期に急激に上昇し、その後、元の水準まで低下していた(図-3)。一方、地表面のCH<sub>4</sub>濃度は大気中よりわずかに低い水準で夏から秋にかけて推移し、冬の積雪に伴って土壌中のCH<sub>4</sub>濃度の水準まで低下し、融雪時期に急激に上昇後、大気レベルと同水準に推移した(図-3)。土壌中および地表面のN<sub>2</sub>O濃度はともに同様に季節変化し、春から秋にかけてほぼ一定で推移し、冬は徐々に上昇、融雪時期にピークになり、融雪とともに急激に低下した(図-4)。

CO<sub>2</sub>放出は地温の影響を強く受け、深さ5cmの地温(*T*(°C))と有意な指数関数式で示された(図-5)。積雪期の測定値を含む場合と含まない場合においてその関係式のパラメータに大きな違いが見られなかった(式1:非積雪期のみ、式2:積雪期を含む)。

$$\text{CO}_2 \text{ 放出速度} = 25.7 \cdot \exp(0.105 \cdot T) \quad (\text{式 } 1)$$

$$\text{CO}_2 \text{ 放出速度} = 23.7 \cdot \exp(0.109 \cdot T) \quad (\text{式 } 2)$$

CH<sub>4</sub>吸収も地温の影響を受けていると考えられた(図-5)。ただ、積雪期間中の測定値が非常に小さく、非積雪期間の測定値と地温から得られた指数回帰曲線から離れて、不連続的であった(図-5)。そこで、地温と積雪深(*D*(cm))とを説明変数として重回帰分析をおこなった結果、下記のような有意な回帰式が得られた(式3:非積雪期のみ、式4:積雪期を含む(ガス観測時の最小積雪深は45cm))。

$$\text{CH}_4 \text{ 吸収速度} = 28.6 \cdot \exp(0.033 \cdot T) \quad (\text{式 } 3)$$

$$\text{CH}_4 \text{ 吸収速度} = 24.6 + 1.51 \cdot T - 0.141 \cdot D \quad (\text{式 } 4)$$

N<sub>2</sub>O放出は温度や水分、積雪深などの説明要因では有意な関係式が得られなかった。上記のCO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>の回帰式を用いて年間フラックスを推定すると、積雪期の観測値を考慮しない場合とした場合で、CO<sub>2</sub>放出は2%、CH<sub>4</sub>吸収は29%ほど異なっていた(表-1)。

## IV 考察

積雪期間中の温室効果ガスの放出・吸収フラックスは

全てのガス種で非積雪期間よりも小さかった。また、温室効果ガス濃度分布の挙動がガス種によって異なり、積雪による影響がガス種によって異なっていると考えられた。

CO<sub>2</sub>濃度は夏および冬にともに上昇し下降するパターンを示し、地表面と深さ 5cm の土壌ガスの濃度差（濃度勾配）は夏大きく冬の積雪期には非常に小さかった（図-2）。これは、夏においては温度が高く生物活動が増えるに伴って CO<sub>2</sub> 生成が増大し、冬において低温のため生物活動が低下し、CO<sub>2</sub> 生成は非常に小さいことを示している。しかし、積雪初期から融雪初期まで、地表面および土壌中ともに CO<sub>2</sub> 濃度が上昇していることから、積雪期間中も小さくとも土壌から常に CO<sub>2</sub> 放出がなされていたと考えられる。これらについては積雪面の CO<sub>2</sub> 放出結果とも矛盾しない。

CH<sub>4</sub> 濃度も CO<sub>2</sub> 濃度と同様に土壌表層の濃度勾配が夏は大きく、冬は非常に小さかった（図-3）。これは CO<sub>2</sub> 放出と同様に CH<sub>4</sub> 吸収も生物活動に伴っておこなわれるため、温度の高い夏の方がより吸収されていたと考えられ、CH<sub>4</sub> フラックス測定値からも矛盾しなかった。融雪時期は土壌表面および土壌中の CH<sub>4</sub> 濃度が急上昇していたが、特に土壌中の CH<sub>4</sub> 濃度は大気 CH<sub>4</sub> 濃度の水準まで高くなっており、CH<sub>4</sub> 吸収は非常に小さいと考えられ、積雪面の CH<sub>4</sub> 吸収もそれを支持する結果であった。融雪時期は局所的に湛水条件になって CH<sub>4</sub> 放出が起こる可能性が考えられるが、観測結果からは CH<sub>4</sub> 放出は見られなかった。

N<sub>2</sub>O 濃度は CO<sub>2</sub> および CH<sub>4</sub> 濃度とは異なり、土壌表層の濃度勾配が年間通じてほとんど同じで非常に小さいことから、N<sub>2</sub>O 放出は年間通じて小さいと考えられた。実際に、N<sub>2</sub>O 濃度測定をおこなわれた 2011 年の N<sub>2</sub>O フラックス測定値も小さく矛盾しない。しかし、2010 年の夏に大きな N<sub>2</sub>O 放出が観測され、N<sub>2</sub>O 放出の年次変動が大きいと考えられた。また、融雪期や落葉期に N<sub>2</sub>O 放出が見られることから（図-4）、落葉や融雪水によって土壌に有機物が多量の供給されることによって一時的に N<sub>2</sub>O 放出が見られた可能性がある。ただし、これら測定値において検出下限付近のものが多く、反復間の変動も大き

かったことから、N<sub>2</sub>O 放出の変動要因を明らかにするためには、より詳細な観測（例えばより高精度な測定法の開発や、多地点での観測など）が必要であろう。

年間フラックス推定における積雪影響について、CH<sub>4</sub> 吸収の年間推定におよぼす影響が大きく、本調査地においては積雪期の測定値を考慮しないと 30%ほど過大評価していた。積雪深が大きくなるほど CH<sub>4</sub> 吸収は小さくなることから（式 4）、積雪が大気から土壌への CH<sub>4</sub> の拡散を抑制していることが示され、積雪期の測定値は重要であることが示された。

引用文献

- (1) GROFFMAN, PM., HARDY, JP., DRISCOLL, CT. and FAHEY, TJ. (2006) Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest. *Global Change Biology*: **12**, pp.1748-1760
- (2) HASHIMOTO, S., MORISHITA, T., SAKATA, T., ISHIZUKA, S., KANEKO, S. and TAKAHASHI, M. (2011) Simple models for soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O fluxes calibrated using a Bayesian approach and multi-site data. *Ecological Modelling*: **222**, pp.1283-1292
- (3) IPCC (2007) Climate change (2007) The Physical Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge UK, 996pp.
- (4) ISHIZUKA, S. *et al.* (2006) High potential for increase in CO<sub>2</sub> flux from forest soil surface due to global warming in cooler areas of Japan. *Annual Forest Science*: **63**, pp.537-546
- (5) MORISHITA, T. *et al.* (2007) Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types. *Soil Science and Plant Nutrition*: **53**, pp.678-691
- (6) 大浦典子 (2010) 大気由来の窒素負荷が森林生態系の窒素循環および林床からの N<sub>2</sub>O 放出に与える影響. *農環研報*: **27**, pp.1-84

表-1. 温室効果ガスフラックスの年間推定値

	積雪期データを考慮しない推定値	積雪期データを考慮した推定値	割合
CO <sub>2</sub> 放出(MgC/ha/y)	6.13 (0.6)	6.00 (0.7)	1.02
CH <sub>4</sub> 吸収(kgC/ha/y)	3.24 (1.1)	2.50 (0.8)	1.29
N <sub>2</sub> O 放出(kgN/ha/y)	-	-	-

(カッコ内は 95%信頼区間)

- (7) SCHLESINGER, WH. and ANDREWS, JA. (2000)  
Soil respiration and the global carbon cycle.  
Biogeochemistry: 48, pp.7-20
- (8) 森林立地調査法編集委員会編 (2010) 改訂版  
森林立地調査法. 博友社, 東京, pp.284

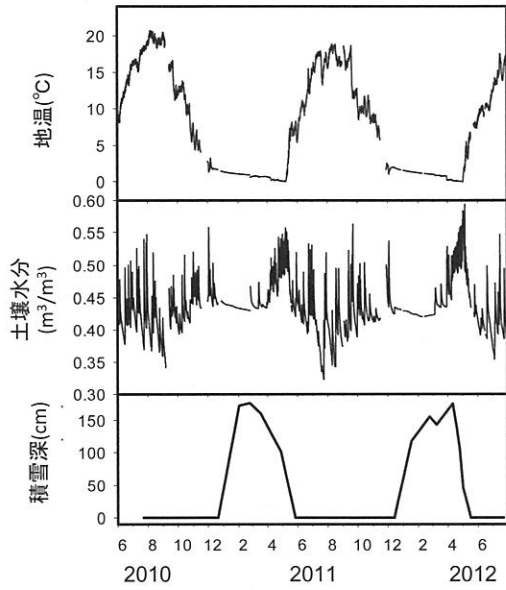


図-1. 積雪深・地温・土壌水分の季節変化  
Fig-1. Seasonal fluctuation of snow depth, soil temperature, and soil moisture

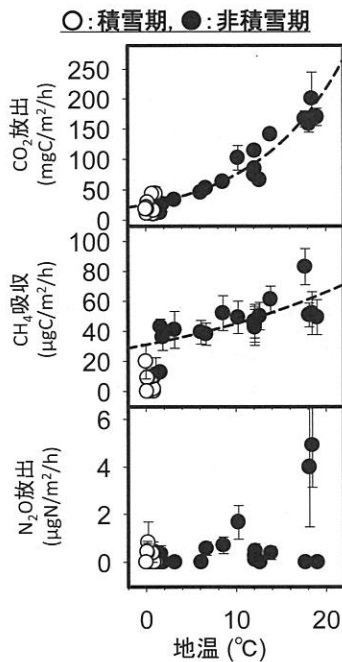


図-5. 温室効果ガスフラックスの温度特性  
(点線は非積雪期データの回帰曲線、エラーバーは標準誤差(n=5))  
Fig-5. The relationship between temperature and GHGs gas flux

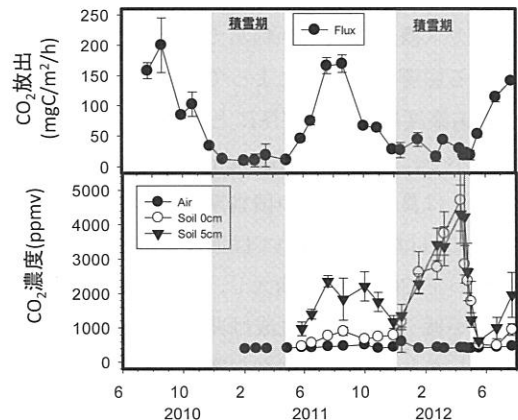


図-2. CO₂フラックスとCO₂濃度の季節変化  
(エラーバーは標準誤差(n=5))  
Fig-2. Seasonal fluctuation of CO₂ flux and CO₂ concentration

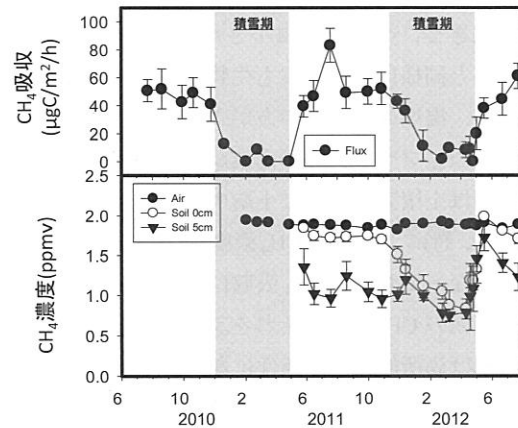


図-3. CH₄フラックスとCH₄濃度の季節変化  
(エラーバーは標準誤差(n=5))  
Fig-3. Seasonal fluctuation of CH₄ flux and CH₄ concentration

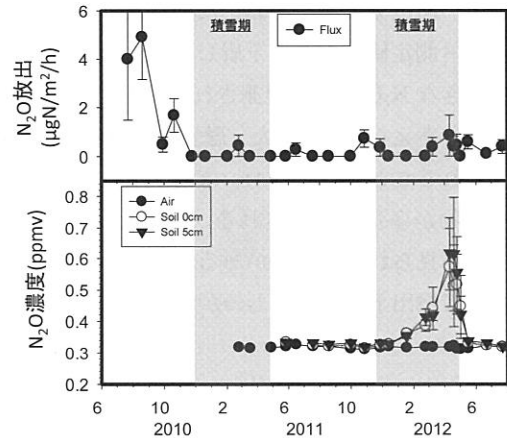


図-4. N₂OフラックスとN₂O濃度の季節変化  
(エラーバーは標準誤差(n=5))  
Fig-4. Seasonal fluctuation of N₂O flux and N₂O concentration