

異なる森林生態系における積雪表面 CO₂フラックスと積雪特性の考察

○北海道大学大学院 栗田 孝

北海道大学低温科学研究所 兒玉 裕二

北海道大学低温科学研究所 石川 信敬

JST/CREST 中井 太郎

1. はじめに

1997年のCOP3において地球温暖化対策として京都議定書が採択され、「森林等の吸収源による温室効果ガス吸収量を算入」が明記された。そして2005年2月、京都議定書が発効となり、森林生態系における炭素動態の解明がさらに重要視されてきている。しかし、北半球の陸地の半分近くを占める積雪地帯の土壌内の炭素量が世界の約30%に相当すると指摘されているにもかかわらず、積雪時の土壌-積雪-大気間におけるCO₂放出過程の解明は測定が困難なことからあまり進んでいない。特に、積雪の圧密・融雪現象が積雪を通して放出するCO₂フラックスに及ぼす効果や、寒冷積雪地帯の森林における積雪期間中の林床積雪表面からのCO₂放出量の定量化に関する研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、寒冷積雪地帯の2つの森林において、林床積雪から大気へのCO₂放出過程における積雪の効果の解明と、積雪期間中の両林における積雪表面からのCO₂放出量の定量化を目的とする。

2. 観測方法

2004年11月から2005年4月まで、北海道大学雨龍研究林(44°21′44″N, 142°15′54″E)におけるヨーロッパトウヒ林と針広混交林を対象に観測を行った。ヨーロッパ

トウヒ林の林床はリター層が約5cmであり、林床植生はほとんど見られない。針広混交林はアカエゾマツ・トドマツ・ミズナラ・カンバ等の樹木で構成されており、林床はリター層が約3cm、林床はササや低木が群生している。

現地では、11・12月が積雪初期、1・2月が厳冬期、3・4月が融雪期である。

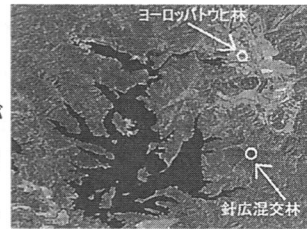


図1 雨龍研究林 周辺図

両林において積雪表面から大気へのCO₂フラックスを測定するため、クローズドチャンバー法とフィックの拡散則を用いたCO₂濃度勾配法により測定した。

観測に用いたクローズドチャンバー(図2a)は、高さ40cm、底面積491cm²の塩化ビニール製(Gas Analyzer:LI-COR社製, LI-820)であり積雪に15cm挿入した。ヨーロッパトウヒ林では11月から1月までは一台で、2月から4月は5台で測定した。

針広混交林では全期間5台で測定した。

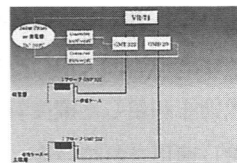


図2a チャンバー配置 b 濃度計配置

また、積雪表面と土壌表面（積雪下）CO₂濃度を測定するために、CO₂濃度計（VAISALA社製,GMT220,GMD20）を両林の積雪表面と積雪下に設置し、1反復ずつ測定した。（図2b）

気象データの観測項目は気温・地温・風速・風向・気圧であり、積雪データの観測項目は積雪深・全層平均密度・積雪水量・含水率である。

また、月に一回程度、積雪断面観測を行った。

3. 積雪表面 CO₂フラックス算出方法

3. 1. クローズドチャンバー法（CC法）

チャンバー密閉後の経過時間とチャンバー内 CO₂濃度の関係を直線回帰してチャンバー内 CO₂濃度の平均増加速度を求め、以下の式を用いてフラックスを算出した。

$$F_{CO_2} = \rho \times \frac{273}{T} \times \frac{dC}{dt} \times \frac{V}{A}$$

ここで、F_{CO₂}はCO₂フラックス(mgCm⁻²h⁻¹)、 ρ は標準状態におけるCO₂密度(=1.96mgm⁻³×(12/44))、Tは密閉時のチャンバー内部平均気温(K)、dC/dtは密閉時のチャンバー内CO₂濃度の平均増加速度(10⁻⁶m³m⁻³h⁻¹)、Vはチャンバーのサンプリング体積(m³)、Aはチャンバーの底面積(m²)である。

3. 2. CO₂濃度勾配法（FD法）

フィックの拡散則は以下の式で表される。

$$F = \frac{Q}{A} = -D_p \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

ここで、Fはガスフラックス(gm⁻²s⁻¹)、Qは流量(gs⁻¹)、Aは面積(m²)、D_pはガス拡散係数(m²s⁻¹)、dC/dxは濃度勾配(gm⁻³m⁻¹)である。

過去の研究で用いられているフィックの拡散則を利用した濃度勾配法の多くは土壌層に対し適用されている。

本研究では、積雪層中のCO₂拡散係数を決

定するために、Currie(1970)による土壌におけるガス拡散係数と気層率の関係を表した以下の経験式を積雪層に適用する。

$$D_p = \left(\frac{a}{n}\right)^4 n^{\frac{3}{2}} D_a \quad (2)$$

ここで、D_pは積雪層中のCO₂拡散係数(m²s⁻¹)、aは積雪の気層率(m³m⁻³)、nは積雪の空隙率(m³m⁻³)、D_aは標準状態の大気中におけるCO₂拡散係数(=0.138m²s⁻¹)である。そして空隙率nは気層率aに等しいと仮定した。

よって(2)式は、

$$D_p = n^{\frac{3}{2}} D_a \quad (3)$$

となる。積雪層中のCO₂拡散係数は空隙率の関数で表現した。以上の式(1)(3)より、濃度勾配法によるCO₂フラックスの算出式は以下のように表される。

$$F_{CO_2} = n^{\frac{3}{2}} \times D_a \times \left(\frac{T}{273}\right)^{1.83} \times \left(\frac{1013}{P}\right) \times \left(\frac{dC}{dx}\right)$$

ここで、F_{CO₂}はCO₂フラックス(mgCm⁻²h⁻¹)、Tは気温(K)、Pは気圧(hPa)である。

4. 観測結果

4. 1. CO₂データと気象・積雪状態

図3、図4はそれぞれ観測期間中のヨーロッパパトウヒ林、針広混交林におけるCO₂フラックス・CO₂濃度・気温・地温・積雪深・全層積雪密度の推移を示す。ヨーロッパパトウヒ林・針広混交林の最大積雪深は2月に146cm、171cmを記録し、気温が1月に-27℃、-19℃まで下がったが、地温は期間中を通して0℃以上を保った。これは、1m以上の積雪が堆積することで、地中の熱を保持したためであると考えられる。

また、期間中の平均積雪表面CO₂濃度はそれぞれ463ppm、454ppmであり、観測中ほとん

ど変化しなかった。土壌表面 CO_2 濃度は両林とも11月から2月にかけて増加し、濃度計の限界値を超えて2,400ppm以上であった。よって解析には2,400ppm未満のデータを用いた。なお3月・4月において濃度は大きく変動した。

積雪表面 CO_2 フラックスはヨーロッパトウヒ林において $0\sim122\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 、針広混交林において $0\sim98\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ の範囲であった。

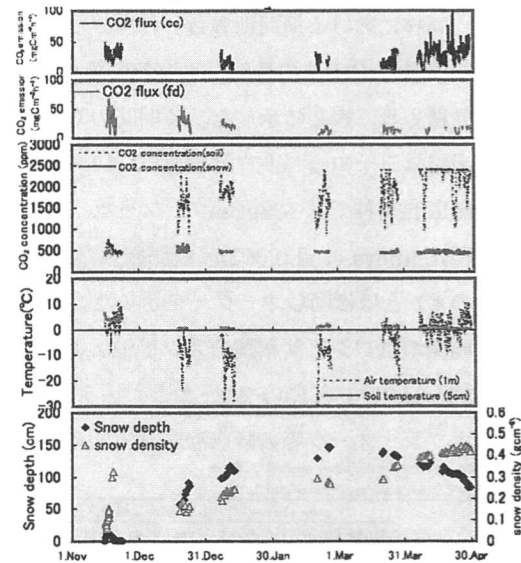


図3 ヨーロッパトウヒ林における観測結果

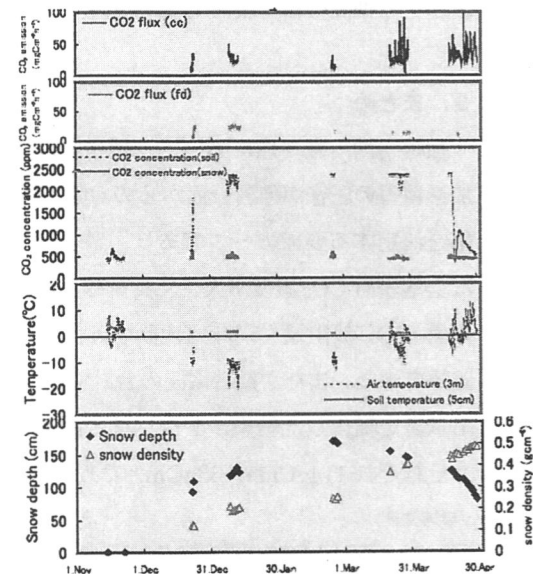


図4 針広混交林における観測結果

4. 2. 土壌表面 CO_2 濃度と積雪状態量

図5～7に示したグラフは、全層平均密度 $\rho = 0.25\text{gcm}^{-3}$ を閾値として低密度雪と高密度雪に分類したヨーロッパトウヒ林の積雪深・全層積雪密度・積雪水量に対する土壌表面 CO_2 濃度の応答である。低密度雪(図中●)は11月～2月のデータ、高密度雪(図中▲)は3月と4月のデータである。これらによると、積雪初期・厳冬期は積雪深・全層平均密度・積雪水量が増加するにつれて土壌表面 CO_2 濃度も増加している。しかし、融雪期では各項目とも値に関係なく土壌表面 CO_2 濃度のばらつきが大きかった。

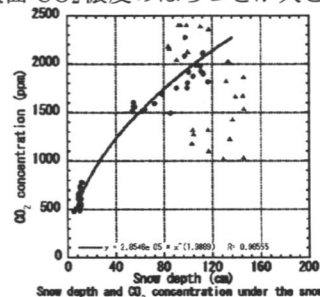


図5 積雪深と土壌表面 CO_2 濃度

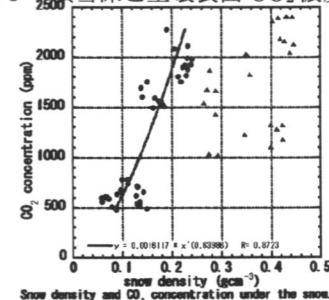


図6 全層積雪密度と土壌表面 CO_2 濃度

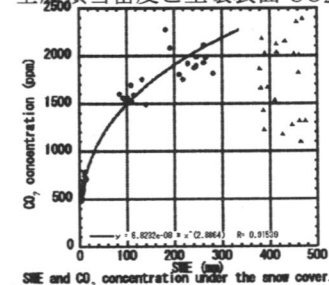


図7 積雪水量と土壌表面 CO_2 濃度

針広混交林の結果も同様の傾向を示した。したがって、積雪初期・厳冬期において、積雪深

や積雪の圧密が土壌表面 CO₂ 濃度を決定し、結果として積雪表面からの CO₂ 放出量を左右する要因の一つであると考えられる。また融雪期において、土壌表面 CO₂ 濃度は大きく変動しており、積雪表面 CO₂ 放出量が同様に変動する可能性を示唆した。

4. 3. 月別日平均 CO₂ フラックス

表 1 に CC 法と FD 法によって算出した両林の月別日平均積雪表面 CO₂ フラックスを示す。

11・12月から1・2月にかけて両林の CO₂ フラックスは減少傾向にあることが分かった。さらに、3・4月になると CC 法では増加傾向にあり、特にこの期間の CO₂ フラックスの偏差が他の月と比較して大きかった。これは、融雪期において土壌表面 CO₂ 濃度が大きく変動した結果（図 5、6、7）と合致した。

また、ヨーロッパトウヒ林の 4 月（図 8）と針広混交林の 3 月・4 月（図 9）において、FD 法と CC 法のフラックス変動傾向を比較した。その結果、融雪期に FD 法は CC 法に対し過小評価することが明らかになった。

Period	snow surface CO ₂ fluxes, (gCm ⁻² d ⁻¹)			
	Spruce Forest		Mixed Forest	
	CC method	FD method	CC method	FD method
November	0.74±0.10	0.86±0.23		
December		0.76±0.05	0.42±0.14	0.32±0.17
January	0.36±0.06	0.57±0.04	0.64±0.07	0.63±0.03
February	0.51±0.05	0.31±0.05	0.37±0.08	0.44±0.01
March	0.42±0.09	0.36±0.03	0.72±0.14	0.36±0.01
April	0.75±0.17	0.37±0.09	0.86±0.16	0.29±0.05

Table 1. Mean month CO₂ fluxes from different forest snow cover (mean ± s.d.)

表 1 両林の月別日平均 CO₂ フラックス

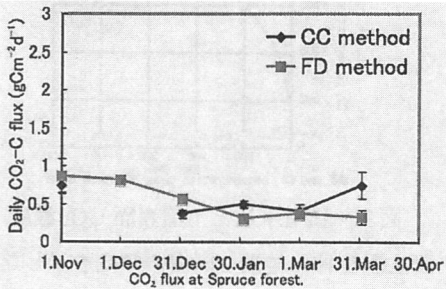


図 8 ヨーロッパトウヒ林の月別日平均値

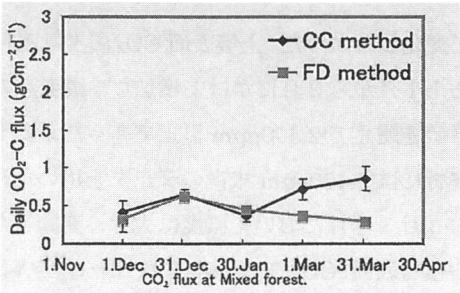


図 9 針広混交林の月別日平均値

4. 4. 積雪期間中の CO₂ 放出量

両林における期間別の合計積雪表面 CO₂ 放出量を CC 法の月別日平均値の結果から見積もり、表 2 に示した。冬期間の CO₂ 放出量はヨーロッパトウヒ林では 114gCm⁻²、針広混交林では 133gCm⁻² となった。また、Kurganova et al.(2003)の観測結果（表 2 中の*）とほぼ同じオーダーを示した。なお、観測地はロシア共和国モスクワ地区(54° 50′ N,37°35′ E)のマツ・カンバ・ライム・ポプラ・オーク等の針広混交林である。

Table 2. Mean cold and snow cover period CO₂ fluxes from different forest snow cover (mean±s.d.)

Period	snow surface CO ₂ fluxes(gCm ⁻² period ⁻¹)			
	Spruce Forest	Mixed Forest	Mixed forest*	Mixed forest*
December-February	48±16	48±15	63±38	55±34
November-April (cold)	114±36	133±46	150±66	143±69

表 2 冬期間の積雪表面 CO₂ 放出量

5. まとめ

積雪初期・厳冬期において、積雪深の増加や積雪の圧密が積雪表面からの CO₂ 放出量を決定する要因の一つであり、融雪期には土壌表面 CO₂ 濃度が大きく変動し、積雪表面 CO₂ 放出量も同時に変動することが確認できた。また、積雪期間の合計 CO₂ 放出量を定量化した結果、トウヒ林・混交林でそれぞれ 114gCm⁻²,133gCm⁻²であった。

[参考文献]

1)パソコンで学ぶ土の物理学(自然環境管理の基礎),鹿島出版会 (1987)ゲイロン S.キャンベル著 中野政詩・東山勇 監訳
2) I.KURGANOVA et al.2003: Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils, Tellus,55B,338-344