落葉広葉樹林における積雪期の CO_2 放出量

鈴木　覚・中井裕一郎・北村兼三（森林総合研究所北海道支所）

1.はじめに

北海道支所では 1999 年から乱流変動法による森林上の CO_2 フラックスならびに NEE(純生態系 CO_2 交換量)の測定を行っている。森林生態系における正味炭素収支の年間の推移は春から秋にかけて正味に炭素を吸収し、冬季は成長期に固定された炭素の一部が土壌の分解として大気へ拡散して正味の放出となる。積雪地域では冬季の CO_2 放出は気温や地温が低いためにごくわずかであるとされ、重要視されてこなかった。しかし、冬季の長い北海道や高緯度地域は積雪期間を含めた冬季の CO_2 放出量の見積もりが森林生態系の年間の炭素収支見積もりに対して大きな誤差要因となっている。そこで、積雪期の CO_2 放出量の測定精度を向上させることを目的に、地表面（積雪下）の CO_2 濃度を連続的に観測して濃度変動要因を解明するとともに、濃度拡散による雪面からの CO_2 放出量を推定し、NEE 観測値と比較した。

2.方法

森林総合研究所北海道支所内の羊ヶ丘実験林で観測を行った。樹種はシラカンバ、ミズナラ、ハリギリを主要な樹種とする落葉広葉樹林である。

地表面における CO_2 濃度の測定

地表面（積雪層の下）に CO_2 濃度計（GMT222,Vaisala）を設置し、積雪期間における CO_2 濃度変動を連続的に観測した。測定は 10 秒間隔に行い、10 分間の平均値を記録した。測定値は同時に測定した大気圧と地温（-2cm）で補正した。また、積雪深を連続的に観測するとともに週に 2 ないし 3 回の割合で積雪層の平均密度を測定した。

積雪中の CO_2 の移動が鉛直 1 次元の濃度拡散のみで行われるものと仮定し、Fick の法則に従って計算した。計算式は次式で示される。

$$F_{CO2} = D_0\left(\frac{\Delta c}{\Delta z}\right)\left(\frac{T}{273}\right)^n\left(\frac{1013}{P}\right)\theta\cdot\lambda$$

ここで、D_0 は 0℃ 1 気圧における静止大気中の CO_2 の拡散係数。T、P はそれぞれ温度、気圧である。$\Delta c/\Delta z$ は積雪層を挟んだ CO_2 濃度勾配である。ここで、積雪表面の CO_2 濃度を測定していないため、地表面から 2.7m の高さにおける CO_2 濃度測定値で代用した。ことき高度 11m における CO_2 濃度との差が 2ppm 以内の場合を大気の混合が十分で 2.7m と積雪面の CO_2 濃度が近似できるものと考えた。また、気相率(θ)は積雪層の平均密度から計算した。屈曲係数(λ)と温度項の乗数(n)はそれぞれ 0.6 および 1.83 に仮定した。

樹冠上における CO_2 フラックスおよび NEE の測定

対象森林内に建設されている高さ 40m の観測塔を利用し、高度 28m で CO_2 フラックスの測定を行った。超音波風速計(DAT600,Kaijo)を使用し、CO_2 濃度の測定は吸引した空気を 5Hz で測定した(Li6262,Li-Cor)。このとき、フラックスは次式のように鉛直風速および CO_2 濃度の偏差(w'、c')の積の時間平均で計算される。

$$F_{CO2} = \overline{w'c'}$$

データ解析はトレンド除去と座標軸変換を行った。観測塔の5高度におけるCO_2濃度時間変化量から群落内CO_2貯留変化量を求めた。CO_2フラックスと群落内CO_2貯留変化量の和としてNEEを計算した。

3.結果と考察

一般に土壌呼吸量は地温と土壌の水分状態で変化するが、土壌の体積含水比は融雪期を除いた積雪期間における変動が少なかった(Fig.1c)。また、積雪期における地温の変動も小さく、融雪期を除いて4℃から0.5℃まで徐々に減少していた。このような積雪期間を通した3.5℃の地温の低下は、温度係数Q_{10}を2.0とした場合に土壌呼吸速度は約18%減少すると考えられる。しかし、地表面におけるCO_2濃度の変動は、積雪開始初期の800ppmから最大で2300ppmまで時間経過に従って大きくなっていた。また、日平均気温が0℃以上になったとき(Fig.1中の矢印で示した日)は地温や土壌含水比に変化がないにも関わらず地表面のCO_2濃度が大きく減少していた。以上のことから、地表面におけるCO_2濃度の変動は、土壌からのCO_2発生量の変化よりも積雪層のCO_2拡散層としての性質の変化が大きく関わっていることが推察される。

積雪深の増加に対してCO_2濃度が単調に増加していた(Fig.2)。融雪期以外の積雪密度変化が小さいため気相率変動が小さく(Fig.1b)、積雪期間を通した大きなCO_2濃度変動は積雪深の変化によって引き起こされるものと考えられる。

次に、一時的な融雪のない1月12日から2月20日までの期間を抜き出して、気温、大気圧、風速との相関を調べた。季節を通した大きな濃度変動は積雪深によって決まることを前述した。そこで、積雪深変化に伴うCO_2濃度変動を差し引くために以下の操作を行った。すなわち、解析期間における積雪深とCO_2濃度の関係式を導いて、積雪深から予測されるCO_2濃度を計算し、実測値と予測値の差を求めた。こうして求めた差と気温、大気圧、風速との相関を検討したところ、気温との間に弱い負の相関が見られた(Fig.3)。気温変化に伴う積雪表層の温度変化が拡散係数を変化させること、あるいは雪の構造を変化させることなどが考えられるが、CO_2移動に影響を及ぼすメカニズムの特定はできなかった。

Fickの法則による雪面からのCO_2放出速度推定値とNEE測定値の推移を示す(Fig.4)。積雪期全体でNEEはFickの法則による推定値よりも4割程度大きかった(Table1)。このような差が生じた原因は、濃度拡散以外のCO_2発生過程すなわち、地表面乱流、大気圧変動、地表面の起伏によって生じる地表風の圧力変動によるポンピングなどの影響(Massmanら1997)が考慮されていないこと、並びにNEEには地表面以外からの放出が含まれている可能性があること、また、NEEは観測地点を中心としたある程度の広がりを持った領域の平均値であるのに対し、地表面のCO_2濃度は1地点で測定したものであり、観測値の代表性による相違も考えられた。

4.まとめ

1)地表面のCO_2濃度の積雪期間を通した変動は積雪深と強い相関が見られた。
2)積雪深変化の影響を差し引いた場合の濃度変動は気温と相関が見られた。
3) NEEは拡散過程のみを考えた推定値よりも4割程度大きかった。

引用文献

Mass m an,W.J.,Sommerfeld,R.A.,Mosier,A.R.,Zeller,K.F.,Hehn,T.J.,Rochelle,S.G. 1997:A model investigation of turbulence-driven pressure-pumping effects on the rate of diffusion of CO_2,N_2O,and CH_4 through layered snowpacks. J. Geophys. Res.102.18851-18863.

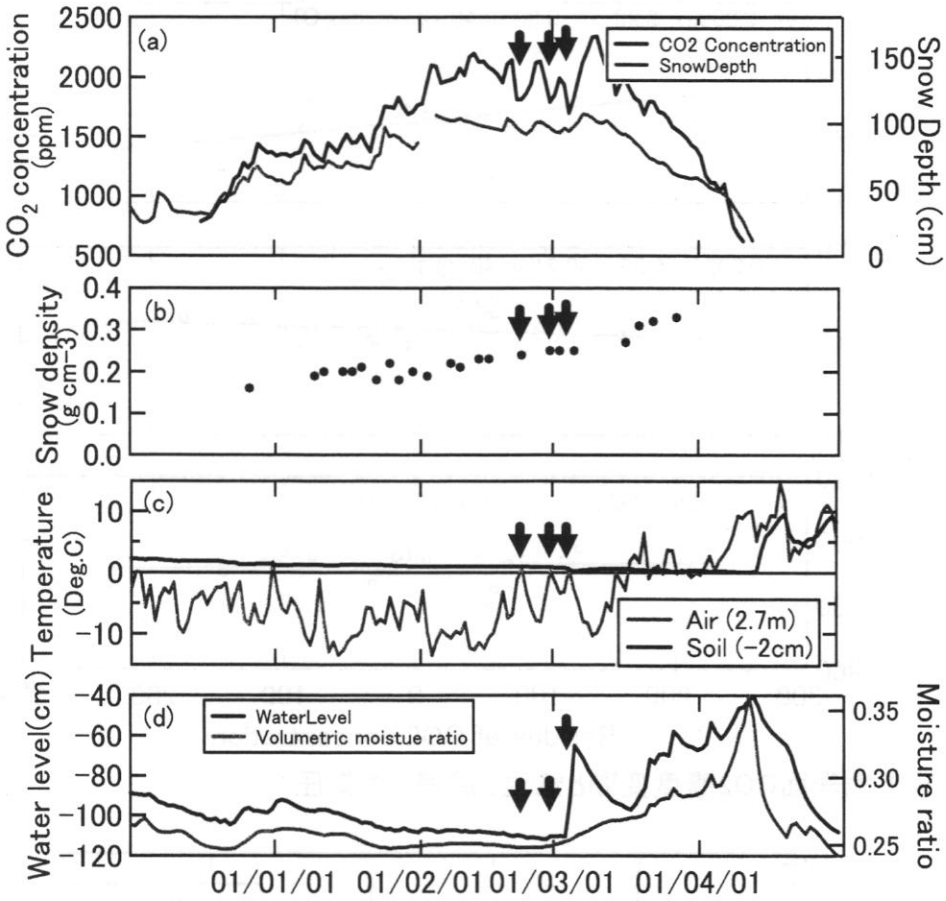

Fig.1 地表面CO2濃度と気象データの推移

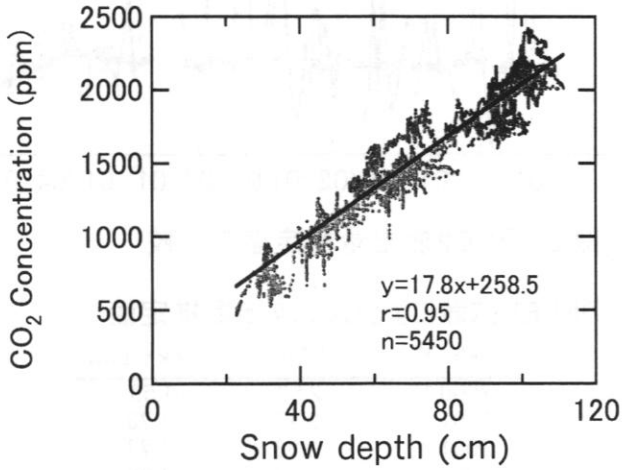

Fig.2 地表面CO2濃度と積雪深

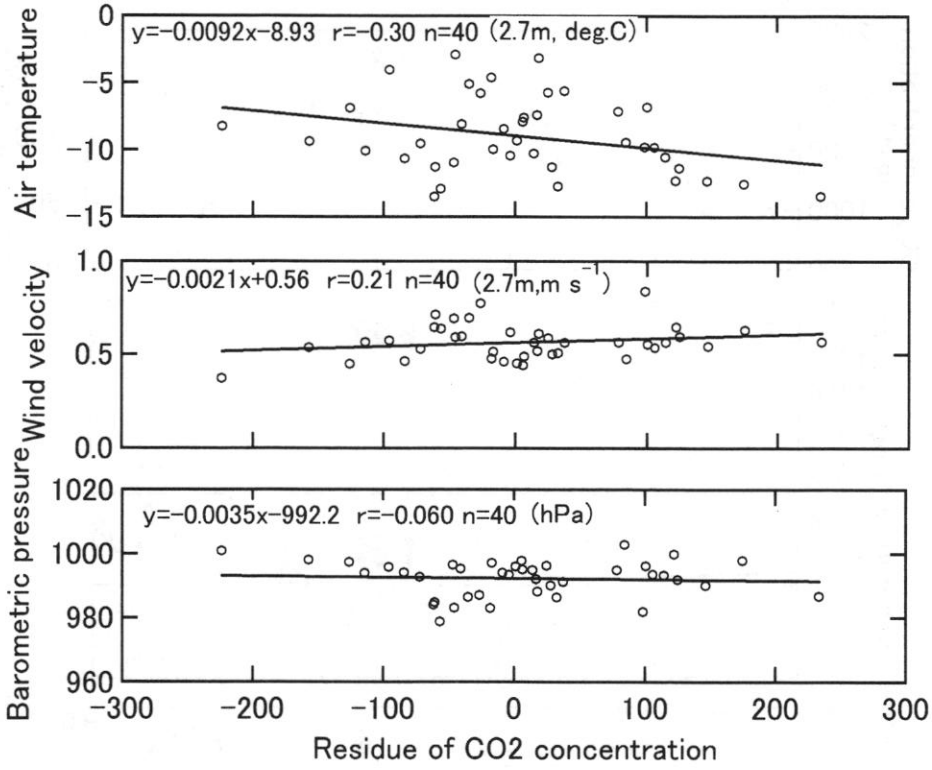

Fig.3 地表面CO2濃度変動と気温、風速、大気圧

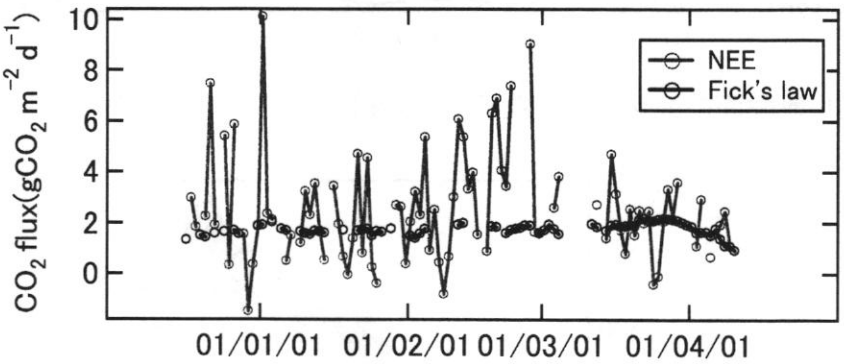

Fig.4 NEEと拡散によるCO2放出量推定値の比較

Table1 月ごとのNEEと拡散によるCO2放出量推定値

Month	NEE	Fick's Law
2000.12	2.53	1.58
2001.1	2.17	1.73
2001.2	3.38	1.77
2001.3	2.23	1.96
2001.4	1.69	1.53
(Average)	2.38	1.71

($gCO_2\ m^{-2}\ d^{-1}$)