

B-1 地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究  
(6) 亜寒帯林生態系における炭素循環・収支の定量的解析

研究代表者 広島大学総合科学部自然環境研究講座 中根周歩

農林水産省 農業環境技術研究所 環境管理部 資源・環境動態研究室 袴田 共之  
(委託先)

広島大学 総合科学部 自然環境研究講座 中根周歩・河野貴宏・木原丈晴

平成5-7年度合計予算額 10,586千円  
(平成7年度予算額 3,954千円)

[要旨] カナダのサスカチュワン州キャンドルレイク地域の亜寒帯林(黒トウヒ林: *Picea mariana*)において、2ヶ所(調査区A, B)でその炭素の循環動態(特に土壌炭素循環)を1993年8月から1995年8月にかけて調査した。その結果、地下水位が高いB区よりも水位が低いA区の方が、循環量が大きく、循環速度は速かった。具体的に、A<sub>0</sub>層と土壌腐植の分解率は、それぞれA区で0.0616、0.0039y<sup>-1</sup>、B区で0.0275、0.0017y<sup>-1</sup>となった。これは、高い地下水位の為、土壌温度が低く抑えられることと、過湿が影響していると思われた。また、この亜寒帯トウヒ林と日本の冷温帯ブナ林の土壌炭素の循環を比較すると、土壌炭素のフローはブナ林よりも小さく、リザーバーであるA<sub>0</sub>層量は多いが、土壌中炭素量は逆に小さかった。すなわち、土壌温度と対応して、亜寒帯林は一段と循環速度が遅く、しかも、土壌炭素が土壌表層に集中し、土壌表層で炭素循環の大半が行われている実態が解明された。さらに、今回の調査結果から、この亜寒帯林の土壌が年間、0.1~0.2tC ha<sup>-1</sup>の大気中二酸化炭素を吸収していることが判った。これは、大気中の二酸化炭素濃度の増大が森林の一次生産力を増加させているとの仮定で得られたモデル計算結果と良く一致した。

[キーワード] 亜寒帯林、炭素循環・収支、土壌呼吸、コンパートメントモデル、Black Spruce

### 1. 序

最近化石燃料の大量消費や熱帯林の破壊などによる二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の増加がもたらす地球温暖化問題が大きな関心を集めているが、二酸化炭素濃度の増加による気候への影響はまだ定量的かつ詳細に知られていないだけでなく、人間の産業活動により大気中に放出された二酸化炭素の内、約3割の2Gtの行方が明らかにされない( IPCC 1990)<sup>1)</sup>。ところが最近、温帯・亜寒帯の森林が二酸化炭素の大きな吸収源となっている可能性が示唆されるようになり(Tans et al., 1990)<sup>7)</sup>、IPCC(1994)<sup>2)</sup>でも、ミッシング・シンクを解消し、北半球の森林の再生と二酸化炭素濃度の上昇などによる一次生産力の増大で約2Gt吸収されているとした。そこで、温帯・亜寒帯の森林における炭素循環・収支の定量的評価の重要性が再認識されている。しかし、具体的に上昇する二酸化炭素肥効化効果の温帯、亜寒帯林において実証されているわけではない。また、温暖化による気候変化の影響をこの亜寒帯林が最も強く受けると予測されているだけに、そのフ

ードバック効果の解明という点からも、亜寒帯林生態系における炭素循環・収支の研究が急がれている。

そこで本研究では、カナダのサスカチュワン州キャンドルレイク地域の亜寒帯林（黒トウヒ林：*Picea mariana*）において、その炭素の循環動態（特に土壌炭素循環）を解明し、さらには、地球レベルでの二酸化炭素問題に対して、亜寒帯林の役割を明らかにする上で重要な基礎的データを提供することを目的とした。

## 2. 調査地の概況

調査対象地域は、カナダのサスカチュワン州キャンドルレイク地域（標高約600m）の80～120年生の黒トウヒ林とした（53° 55' N, 105° 5' W）。この森林における土壌有機物を含む生態系の諸性質はほぼ定常状態を保っていると考えられた。林床は一面コケ類に覆われており、コケ層の下層は比較的厚いA<sub>o</sub>層が蓄積していた。また、この地域の土壌では、明瞭な灰白色の洗脱層と集積層が発達していた。調査対象地域付近のプリンス・アルバートで観測された1991～1993年にかけての月平均気温は1.5℃、最暖月の平均気温は16.7℃、最寒月の平均気温は-16.9℃であった。また、年降水量は389mmと、年降水量は少ないものの、森林内は比較的湿潤に保たれていた。

調査地は、高木層の高さが15～20mになる黒トウヒ林としては大きな林と、そこから約1.5km離れた高木層樹高10m前後の林の2地点とした。調査地における植生の概況は、両調査区とも各層に黒トウヒが占めており、単純な植生を呈していた。前者においては、高木層にジャック・マツ（*Pinus banksiana*）が加わっており、後者の地点に比べて比較的乾燥した土壌環境をもつものと思われた。

## 3. 調査方法

黒トウヒ林にそれぞれA区（樹高, 15～20m；地下水位, 鉍質土層より40cm）、B区（樹高, 10m；地下水位, 鉍質土層表層付近）を設置し、以下の調査を行った。

(1) 毎木調査：4.5cm以上の全立木について毎木調査を行った。また、地上部現存量を推定するとともに、両調査区において生長垂により採取した年輪のコアサンプルについて林齢の推定を行った。

(2) 土壌含水率および土壌温度測定：土壌呼吸量測定時に、両調査区において50x50cmおよび15x15cmの方形枠を用いて、モス、A<sub>o</sub>層およびA層を5点ずつ回集し、重量比で含水率（%）を求めた。同時に土壌表層温度および地上1.5m温度を自記記録温度計（カデック Model II）で測定した。

(3) 落葉枝量測定：落葉枝量測定のために、リタートラップをA区で8個、B区で4個設置した。回収したリターは、葉、枝、種子、その他に分画し、各調査日毎の乾燥重量（85℃）を求めた。

大型・中型落枝量については、リタートラップとは別に測定し補正した。

(4) A<sub>o</sub>層蓄積量測定：コケの生長部と枯死部を区分してA<sub>o</sub>層を採集することは困難であったため、今回はコケ層（主に菌糸が発達していた部分より上層）とその下のA<sub>o</sub>層に分けて方形枠を用いてサンプリングを行った。

(5) 土壌分析および根量測定：土壌試料採集のために、各区で2カ所、それぞれ100×50×100cmの穴を掘り、直径5cm、高さ5cmの円筒のコアサンプラーにて、その壁面沿いに5cm刻みに土

壤サンプルを採集した。採集した土壌サンプルはC-Nコーダーで各サンプル毎に分析し、深度別の炭素含有量を求め、その総和をもって炭素蓄積量を推定した。土壌試料採取のために掘った補助の穴に含まれている全部の土と根をビニールシート上に広げ、そこから可能な限り根を取り出して根量の測定も行った。一方、A<sub>0</sub>層中にも多くの根が含まれていたため、A<sub>0</sub>層から区分した根および枯死根についてもその根量を測定した。

(6) A<sub>0</sub>層消失率と枯死根消失率：A<sub>0</sub>層中には、樹木の落葉枝に由来するリターと林床を覆っているコケに由来するリターが蓄積していた。そこで各リター毎の消失率を測定するために、約1mmメッシュのサラン製の袋（リターバッグ）に落葉枝リターとコケリターを区分して詰め、各リターバッグ毎の風乾重量を測定した後、落葉枝リターバッグはコケ上の窪んだ部分に設置し、コケリターバッグはA<sub>0</sub>層中に設置した。一方、土壌試料採取のために掘った補助の穴から得られた根を直径（φ）別にルートバッグに詰め、風乾重量を測定した後、A<sub>0</sub>層下の鉍質土層表層に埋めた。このようにして設置したリターバッグとルートバッグの初期風乾重量と回収時の風乾重量の重量減少率から、A<sub>0</sub>層消失率および枯死根消失率を求めた。

(7) 土壌呼吸量：桐田（1971）<sup>31</sup>のスポンジ法を用いて土壌呼吸量の測定を行った。土壌呼吸の測定は、生育期は月3回を原則として測定した。今回設定した調査区の林床はコケで覆われていたため、土壌呼吸を測定するにあたっては、コケの生長部は取り除いた状態で、A<sub>0</sub>層を含めた全土壌呼吸量と、A<sub>0</sub>層を取り除いた鉍質土層からの呼吸量を測定し、A<sub>0</sub>層中に含まれていた根の呼吸を考慮して、この両者の差からA<sub>0</sub>層のみからのCO<sub>2</sub>放出量（A<sub>0</sub>層呼吸量）を求めた。

#### 4. 結果及び考察

(1) 植生構造：両調査区とも林内は単純な種構成、層構造を呈しており、地上部現存量はA区においては133.9t ha<sup>-1</sup>、B区においては100.6t ha<sup>-1</sup>であった。一方、樹齢を年輪解析から推定した結果、A区における樹齢の平均値は98年（標準偏差 12.8年）、B区においては128年（標準偏差17.3年）であった。B区においては、樹高にして5~10mの樹木が胸高断面積のかなりの割合を占めていた。今回、樹齢測定の対象とした樹木は、各調査区において最上層を形成していたDBHの大きな樹木としたため、B区で得られた128年という値は、林齢を考える際には過大評価している可能性があると思われた。

一方、林床は両調査区ともコケ類に覆われており、その代表的なものとして、イワダレゴケ (*Hylocomium splendens*)、タチハイゴケ (*Pleurozium schreberi*)、ダチヨウゴケ (*Ptilium crista-castrensis*) などがみられた。

(2) 土壌含水率および土壌温度測定：土壌温度については、11月から5月上旬まで土壌温度は気温が-10~-30℃となっていたが、積雪は浅いが厚いコケ層に覆われて、0~-5℃の範囲にあった。当然、土壌は凍結していた。土壌融解後、土壌温度は上昇し、7~8月で10~15℃の最高となり、その後急速に低下し、9月に5~10℃、10月0~5℃となった（図1）。

AとB区の土壌含水率について、コケ層の含水率については両調査区においては有意な差は認められなかった。A<sub>0</sub>層の含水率は、B区の含水率の方が相対的に高い傾向がみられた。これはB区の方がA<sub>0</sub>層が厚く蓄積しており、A区に比べて高い保水能力を持つためだと思われる。鉍質土層においてはB区の方がA区に比べかなり高い含水率を示した。これはB区付近の地下水位はかなり高く、鉍質土層の表層付近まで達していたことによるものと思われた。

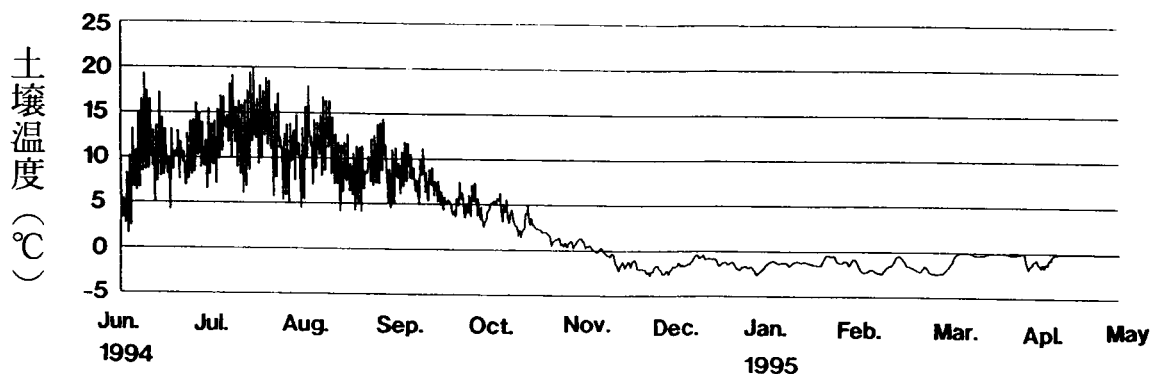


図1 黒トウヒ林A区における土壌表面温度の季節変動

(3) 落葉枝量測定：リタートラップによって得られたAおよびB区の落葉枝量において、今回の測定期間内については、全落葉枝量に明確な季節変動は認められなかった。年間の落葉枝量は、A区で $0.91 \text{ tC ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 、B区では $0.54 \text{ tC ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ となった。このうち、大型落枝がA区で $0.24$ 、B区で $0.015 \text{ tC ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ と推定された。

また、両調査区における落葉枝成分の割合を見ると、8月以降において葉量の占める割合が多くなっており、各成分毎の落葉枝量については季節変動をしていることが示唆された。

(4) A<sub>0</sub>層蓄積量測定：コケ層中の各リターの蓄積量は、A区で $2.09 \text{ tC ha}^{-1}$ （コケに由来するリター）、 $2.48 \text{ tC ha}^{-1}$ （樹木に由来するリター）、B区ではそれぞれ $3.16$ 、 $2.99 \text{ tC ha}^{-1}$ であった。

一方、その下層のA<sub>0</sub>（F+H）層蓄積量は、A区において $18.15 \text{ tC ha}^{-1}$ 、根量は $4.42 \text{ tC ha}^{-1}$ 、枯死根量は $1.45 \text{ tC ha}^{-1}$ であった。B区では、A<sub>0</sub>（F+H）層蓄積量が $36.11 \text{ tC ha}^{-1}$ 、根量は $8.02 \text{ tC ha}^{-1}$ 、枯死根量は $1.48 \text{ tC ha}^{-1}$ であった。

コケ層およびその下層のA<sub>0</sub>層に含まれていた総A<sub>0</sub>層蓄積量は、A区では $22.72 \text{ tC ha}^{-1}$ 、B区においては $42.26 \text{ tC ha}^{-1}$ となった。

A区における各調査日毎に測定したA<sub>0</sub>層蓄積量には、図2が示すように明確な季節変動は見られなかった。今回対象とした調査地は、物質循環特性において比較的安定した森林であり、冬季の間は土壌が凍結し、有機物の分解が抑制されることもあり、今回推定したA<sub>0</sub>層蓄積量をもって、年間の平均A<sub>0</sub>層蓄積量とした。

(5) 土壌分析および根量測定：両調査区における土壌中炭素蓄積量の垂直分布を調べたところ、B区の表層付近は高い値を示したが、これは山火によるものと思われる木炭などが薄く堆積しており、その影響を受けたものと思われた。深度別に炭素含有量を求め、その総和をもって表

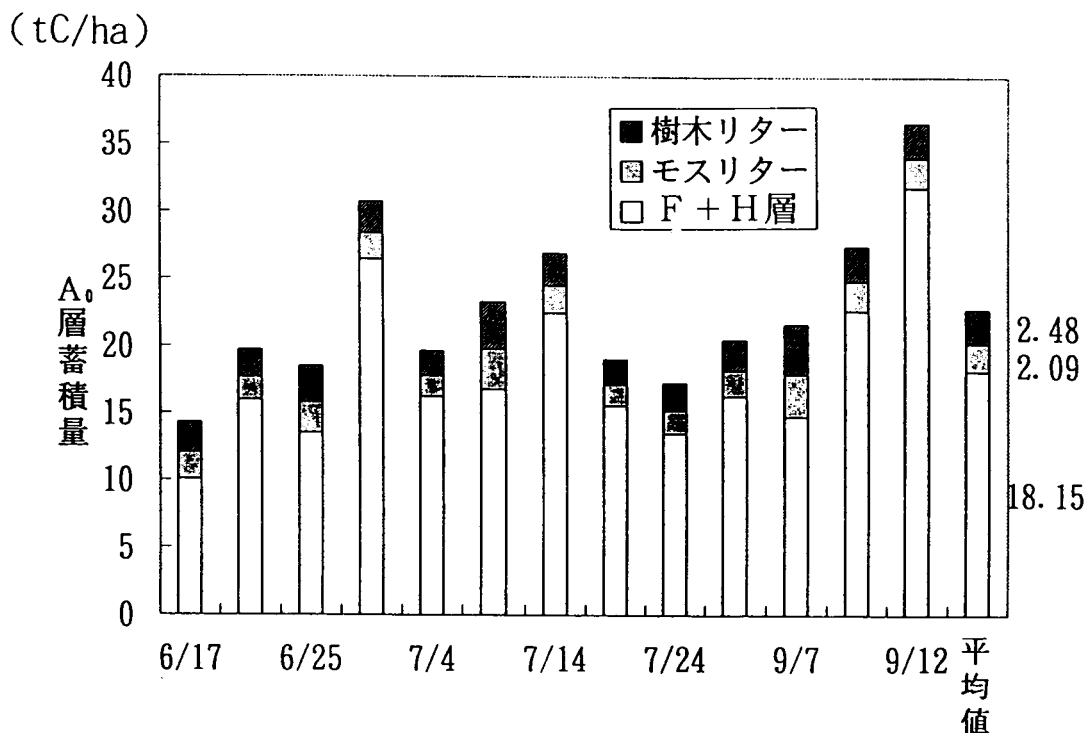


図2. トウヒ林、A区におけるA<sub>0</sub>層蓄積量の季節変化

した土壌炭素蓄積量は、採土した深さの40cmまでで、A区で25.9 tC ha<sup>-1</sup>、B区で54.9 tC ha<sup>-1</sup>であった。深さ1mまでではA区では30.85 tC ha<sup>-1</sup>、調査区Bにおいては58.30 tC ha<sup>-1</sup>となった。

調査区AでpHが低いのは、寒冷なために有機物の分解が不良となり、有機物の不完全な分解によって生じた有機酸によって土壌が強酸性になるポドソル土壌の性質のためと思われた。

φ<1cmの細根量は、A区で7.03 tC ha<sup>-1</sup>、B区で11.51 tC ha<sup>-1</sup>であった。

(6) A<sub>0</sub>層消失率と枯死根消失率：リターバッグ法から得られたA<sub>0</sub>層の年間消失率は、A区で7.1%、B区で3.0%であった。また、枯死根の消失率は年間で、A区で9.2%、B区で16.3%と推定された。

(7) 土壌呼吸量：両調査区における実測した土壌呼吸量は、土壌温度が凍結していない、5℃以上では測定時の土壌温度のほぼ指数関数として表現が可能であった。しかし、土壌凍結の直前や融解直後は急速に土壌呼吸速度が低下、または上昇しており、5℃以上の場合と異なった傾き（温度係数）を持つ指数関数で近似できた（図3）。これは、凍結中はほぼ土壌呼吸は停止するために起こる現象であると思われる。このそれぞれ二つの指数関数から、土壌温度を与えることによって、年間の土壌呼吸量を推定した。ただし、土壌凍結の期間（11月－5月）は土壌呼吸は停止しているとした。

その結果、A区の全土壌呼吸速度は3.56、無機土壌呼吸は1.56 tC ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>となった。一方、B区はそれぞれ、2.72、1.10 tC ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup>となった。

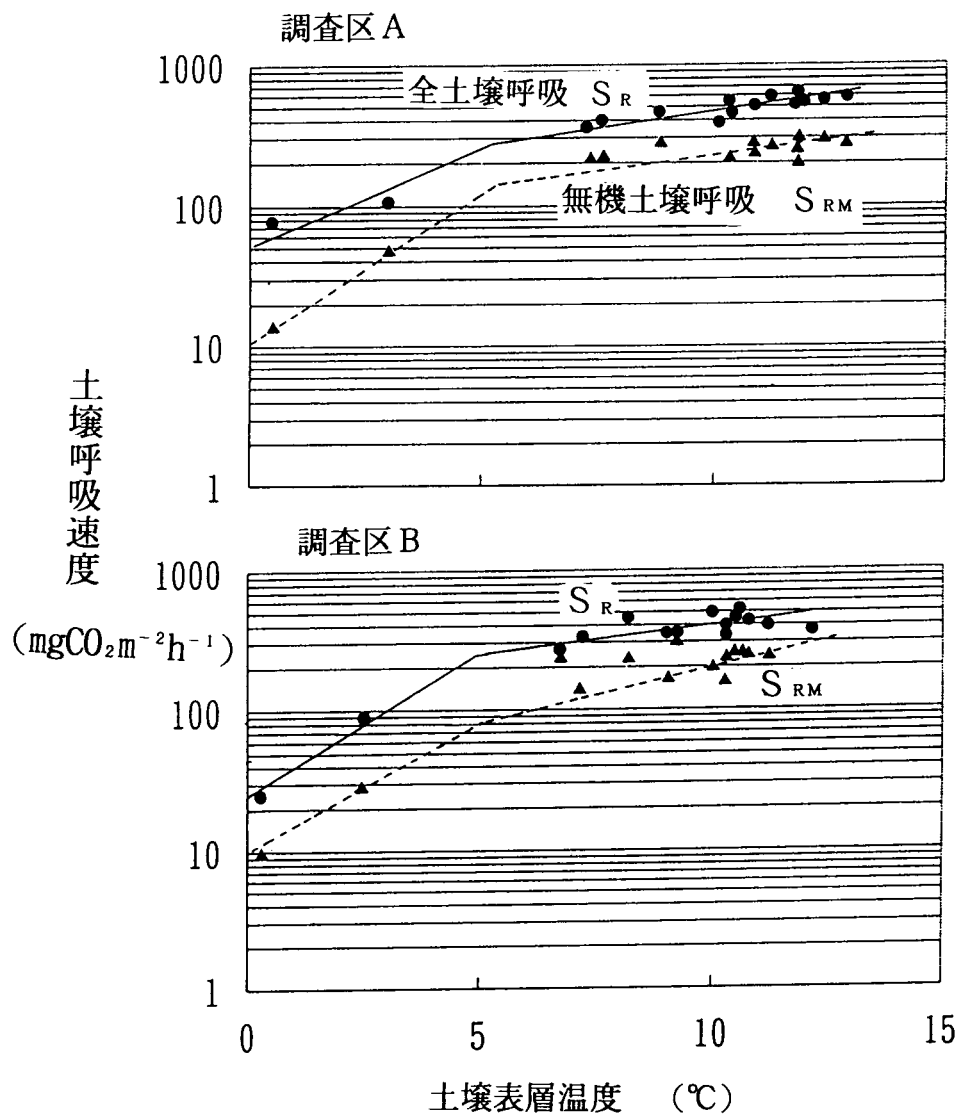


図3. トウヒ林における土壌温度と土壌呼吸速度との関係

(8) コンパートメントモデルによる土壌炭素循環解析

以上の結果を、調査区Aについて、コンパートメントモデルで解析した結果を図3に示す。図4が示すように、トウヒ林のA層の分解率と移行率は、A区でそれぞれ $0.0616$ 、 $0.0095 \text{ y}^{-1}$ 、B区で $0.0275$ 、 $0.0028 \text{ y}^{-1}$ となった。また、土壌腐植の分解率は、A区で $0.0039 \text{ y}^{-1}$ 、B区で $0.0017 \text{ y}^{-1}$ と推定された。

B区はA区よりも、循環速度がかなり遅くなっている。これは、地下水位がB区で深さ10cmの

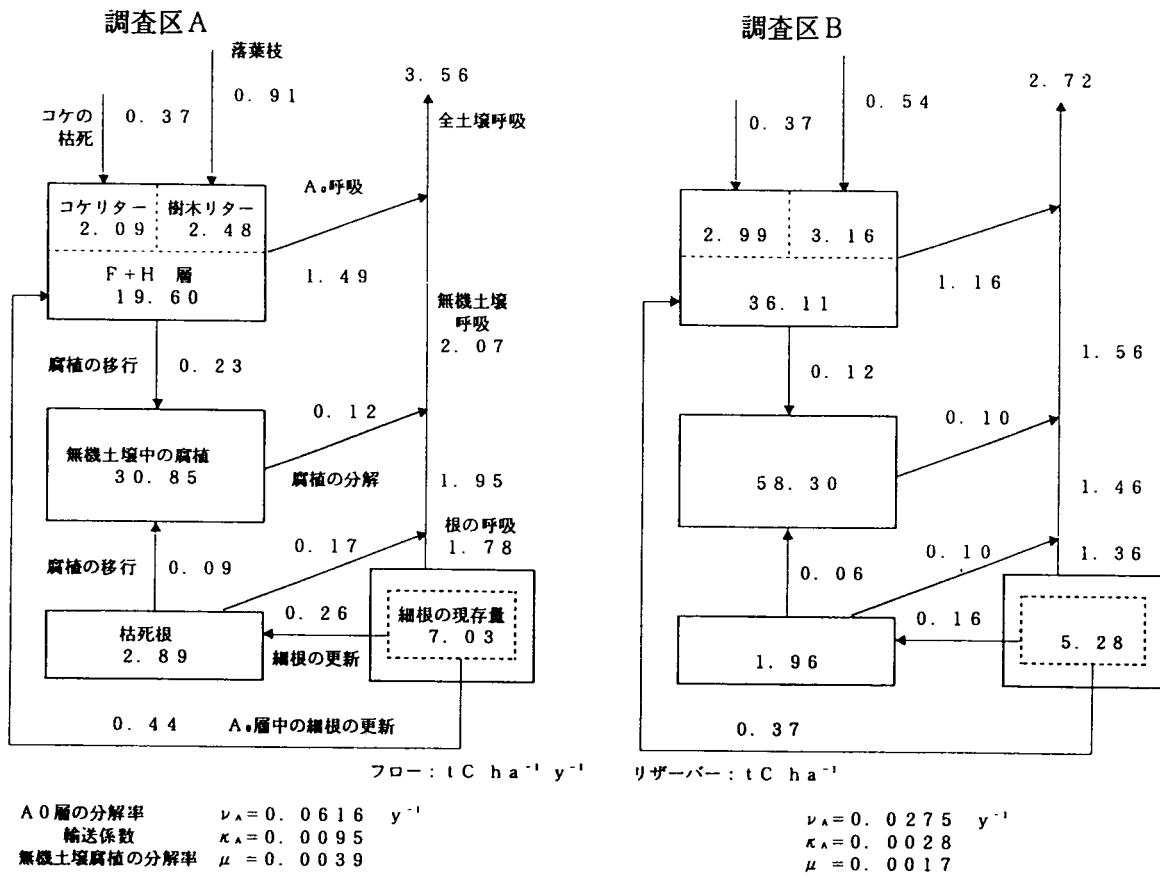


図4. トウヒ林のA、B区における年間の土壌炭素循環解析結果

ところにあり、これによって土壌温度がA区よりも常に1~2℃低くなっていること、さらに過湿のため土壌有機物の分解が強く抑制されていることによると思われる。落葉枝量を見ても半分近いことから、この過湿が一次生産力を低く抑えているものと考えられる。一方、A<sub>0</sub>層から無機土壌への腐植の移行率は、従来報告されているどの林分より大きく低下している。これは、少ない降水が厚いコケ層に遮られ、腐植の輸送を阻止していることと、浅い地下水が土壌水の下方への浸透を遮っていることによると思われる。

両区の土壌炭素の年間収支はA区で0.2、B区で0.1 tC ha<sup>-1</sup>となった。これは、Nakane & Lee (1995)<sup>6)</sup>が土壌炭素のシミュレーションモデルを用いて、二酸化炭素の陸上生態系一次生産力への肥沃効果を0.25 % ppmCO<sub>2</sub><sup>-1</sup>として計算した結果と良く対応している。

(9) 他の気候帯の林分(冷温帯、暖温帯林)との比較

今回得られた、亜寒帯トウヒ林の土壌炭素循環解析結果を、同様な手法で測定され、解析されたさらに、この結果を中根(1975, 1978)<sup>4, 5)</sup>が同様な手法で解析した冷温帯ブナ林、または暖温帯照葉樹林の解析結果と比較したのが、図5である。ここでは、トウヒ林におけるA<sub>0</sub>層中の根の更新によるA<sub>0</sub>層へのリターの供給は、樹木の落葉枝(リター)に含めている。

図5が示すように、亜寒帯林が冷温帯、暖温帯林と比較して、一段と循環速度が遅くなっていることがわかる。それぞれの土壌温度の年平均値が順に1.9、7.2、13.1℃であることから、湿潤

クロトウヒ林 A区

ブナ林 (中根, 1978)

照葉樹林 (中根, 1975)

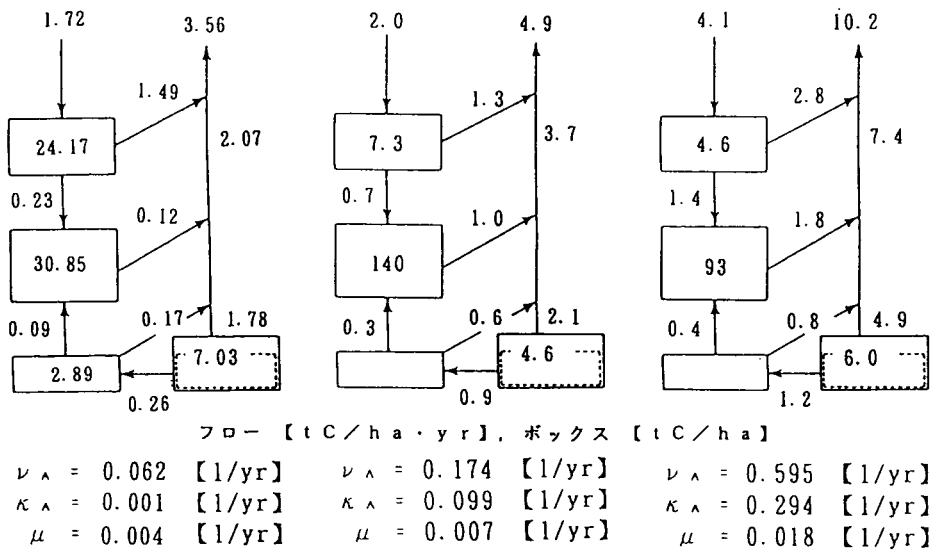


図5. 亜寒帯林と冷温帯、暖温帯林との土壌炭素循環の比較

系列の森林では、ほぼ循環が土壌温度によって制御されていると言えよう。ただ、亜寒帯林においては、土壌炭素が土壌表層に集中しており、土壌表層で炭素循環の大半が行われていることが判明した。この現象は、地球の温暖化の程度が最も大きいとされる亜寒帯林 (IPCC 1990)<sup>1)</sup> が、循環システムの面からその影響を受けやすく、温暖化によるフィードバック効果が強く現れてくる森林であることが予測される。

### 5. まとめ

カナダのサスカチュワン州キャンドルレイク地域の黒トウヒ林 (*Picea mariana*) において、2ヶ所 (調査区A, B) でその炭素の循環動態 (特に土壌炭素循環) を1993年8月から1995年8月にかけて調査した。その結果、地下水位が高いB区よりも水位が低いA区の方が、循環量が大きく、循環速度は速かった。具体的に、A<sub>0</sub>層と土壌腐植の分解率は、それぞれA区で0.0616、0.0039y<sup>-1</sup>、B区で0.0275、0.0017y<sup>-1</sup>となった。これは、高い地下水位の為、土壌温度が低く抑えられることと、過湿が影響していると思われた。また、この亜寒帯トウヒ林と日本の冷温帯ブナ林の土壌炭素の循環を比較すると、土壌炭素のフローはブナ林よりも小さく、リザーバーであるA<sub>0</sub>層量は多いが、土壌中炭素量は逆に小さかった。すなわち、土壌温度と対応して、亜寒帯林は一段と循環速度が遅く、しかも、土壌炭素が土壌表層に集中し、土壌表層で炭素循環の大半が行われている実態が解明された。さらに、今回の調査結果から、この亜寒帯林の土壌が年間 0.1~0.2tC ha<sup>-1</sup>の大気中二酸化炭素を吸収していることが判った。これは、大気中の二酸化炭素濃度の増大が森林の一次生産力を増加させているとの仮定で得られたモデル計算結果と良く一致した。



## 6. 引用文献

- 1) IPCC (1990) Climate change. In: the IPCC Scientific Assessment, (eds. Houghton J. T., Jenkins G. J. & Ephraums J. J.), Cambridge University Press, Cambridge, U. K.
- 2) IPCC (1995) Climate change 1994, radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. (eds. Houghton J. T. et al.), Cambridge University Press, New York and Melbourne.
- 3) 桐田博充 (1971) 野外における土壌呼吸の測定法—密閉法の検討. IV. スポンジを利用した密閉吸収法の開発. 日本生態学会誌, 21:119-127.
- 4) 中根周歩 (1975) 森林斜面における土壌有機物のダイナミクス. 日本生態学会誌, 25:206-216.
- 5) 中根周歩 (1978) 大台ヶ原ブナ-ウラジロモミ林における土壌有機物のダイナミクス. 日本生態学会誌, 28:335-346
- 6) Nakane K. & Lee N. J. 1995. Simulation of carbon cycling and carbon balance following clear-cutting in a mid-temperate forest and contribution to the sink of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Vegetatio*, 121: 147-156.
- 7) Tans, P. P., Fung, I. Y. & Takahashi, T. (1990). Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. *Science*, 247:1431-1438.

## 国際共同研究

本研究は、米国NASAとカナダ国農務省を中心とする亜寒帯林と大気圏研究 (Boreal Ecosystem—Atmosphere Study : BOREAS) に参加し、相互の研究交流、データ交換を進めている。

## 研究発表

- 中根周歩. 1996. カナダ亜寒帯林における土壌炭素の循環解析 II. 日本生態学会第43回大会講演要旨集
- Nakane K., Kohno T., Horikoshi T. & Nakatsubo T. (1996) Soil carbon cycling in a black spruce (*Picea mariana*) forest in Saskatchewan, Canada. *Journal of Geophysics Research*, (in press)
- Nakane K., Kohno T. & Horikoshi T. 1996. Root respiration rate before and just after clear-cutting in a mature deciduous broad-leaved forest. *Ecological Research*, (in press)
- 中根周歩・河野貴宏・木原丈晴. 1995. カナダ亜寒帯林における土壌炭素の循環解析 I. 日本生態学会第42回大会講演要旨集
- Nakane K. 1995. What mechanism in forest ecosystems contributes to global carbon cycling as a net sink of atmospheric CO<sub>2</sub> ?. *Proceeding of Global Carbon Cycle Workshop in Tsukuba*. 134-138.

- Nakane K. & Lee N. J. 1995. Simulation of carbon cycling and carbon balance following clear-cutting in a mid-temperate forest and contribution to the sink of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Vegetatio*, 121: 147-156.
- Nakane, K. 1995. Soil carbon cycling of a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation. *Forest Ecology and Management*, 72:185-197.
- Nakane K. 1994. Modeling the soil carbon cycling of pine ecosystems. *Ecological Bulletines*, 43:161-172.
- Gower S. T., Gholz H. L., Nakane K. & Baldwin V. C. 1994. Production and carbon allocation patterns of pine forests. *Ecological Bulletines*, 43:115-135.