

## B-2 西シベリアにおける温室効果気体の収支推定と将来予測に関する研究

### (2) 森林における二酸化炭素収支に関する研究

農林水産省森林総合研究所

北海道支所土壌研究室

松浦陽次郎

東北支所多雪地帯林業研究室

梶本 卓也

東北支所育林技術研究室

森 茂太

北海道大学農学部演習林北方森林保全学講座

小池 孝良

龍谷大学国際文化学部

大澤 晃

平成9～12年度合計予算額 22,085千円

(うち平成12年度予算額 3,990千円)

〔要旨〕 永久凍土の連続分布域に成立した中央シベリアのカラマツ林生態系において、群落レベルの炭素シークエストレーションを解明するために、モデル化に必要な諸機能量を測定した。厳しい環境条件でありながら、カラマツ (*Larix gmelinii*) の最大光合成速度は、ニホンカラマツの約1.5倍であった。林木の呼吸速度は地上部が112 gC/m<sup>2</sup>/yr、地下部は104 gC/m<sup>2</sup>/yrとなった。土壌呼吸速度は331gC/m<sup>2</sup>/yrであり、約3割が根の呼吸が占めていた。地上部と地下部の現存量はおよそ1:1となっていて、地下部が炭素集積の場として重要なシンクと考えられた。永久凍土地帯では従来とは異なる自然間引きが起こっていて、土壌養分が大きな要因と考えられた。土壌有機炭素集積量及び、植物にとって厳しい窒素循環の様子が解明された。

〔キーワード〕 永久凍土、シベリア、カラマツ林、地上部-地下部現存量、炭素集積量

#### 1. はじめに

熱帯林について広い面積を持つ北方林には、植物体に蓄積された炭素量は熱帯林の半分程度ではあるが、土壌に集積した炭素量は熱帯林の3倍、温帯林の6倍の量が蓄積していると思われる (Kasischke 2000)。また、北方林と区分される地域には、連続分布する永久凍土地帯、不連続分布 (点状分布も含む) 永久凍土地帯が広がっている (図1)。これらを合わせると、実に北方林の約7割が何らかの影響を永久凍土によって受ける地域に成立していることになり、凍土と北方林の関係を無視することはできない。

陸上生態系が炭素収支に及ぼす影響評価が近年求められており、温室効果ガスの一つである二酸化炭素の収支に、森林生態系はシンクかソースかという問いに関する科学的な裏付けと機能の評価が求められている (Potter & Klooster 1997, Schulze et al. 1999)。本課題では、北方林の評価をする際にこれまで扱われてこなかった、北東ユーラシアの永久凍土地帯に成立するカラマツ林生態系の構造と機能を明らかにし、炭素収支とそれを規定する生態的要因の解明を行ってきた。北東ユーラシアが、従来から研究の中心となっている北米大陸やヨー

ロツパ北部の森林地帯と大きく違うのは、同緯度の他地域に比べて寡雨・気温年較差が大きいという厳しい気候条件下にあること（表1）、そして永久凍土上に森林が成立していることである。これは、他に例のない生態系である。

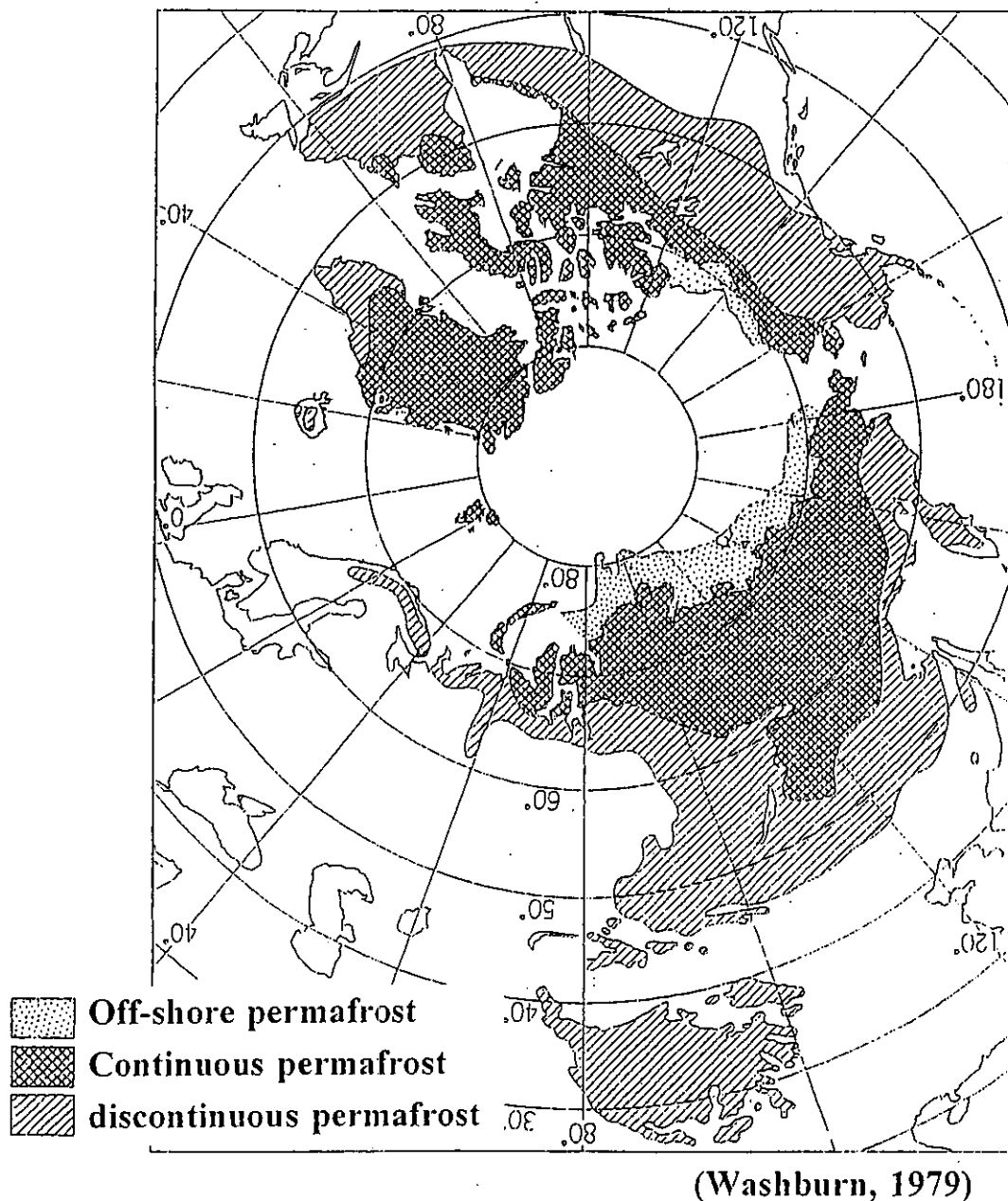


図1. 周極域の永久凍土分布

表1. 北東ユーラシアの厳しい環境条件

地点名	緯度-経度	年平均気温	年降水量	大陸性気候指数
ヤクーツク	62N-129E	-10.1 °C	213 mm	97
オイミヤコン	63N-143E	-16.3	193	96
トゥラ	64N-100E	-9.2	317	80
ブルン	71N-128E	-15.0	225	75
ニジュニ・コリムスク	69N-161E	-14.5	177	74
-----				
フェアバンクス	65N-148W	-3.4	287	57
カヤーニ	64N-28E	2.5	564	33

※大陸性気候指数は、次式によって算出される数値である。

$$\text{大陸性気候指数} = \{ 1.7A / \sin(\varphi + 10) \} - 14$$

(ただし  $\varphi$  は緯度, A は最暖月平均気温と最寒月平均気温の較差。)

1997年度から開始された第三期（当初の研究期間は1997-1999であったが、当該サブテーマは2000年度まで延長）においては、シベリアの永久凍土地帯の森林生態系における二酸化炭素収支とそのモデル構築を目的として、いくつかの炭素ストックとフローのパラメーター測定を行ってきた。

## 2. 研究目的

群落レベルの炭素シークエストレーション・モデルの構築に必要な機能量を求めることを目的として、以下の項目について測定を行った。測定したのは、(1) カラマツ及び北方林構成樹種の光合成特性、(2) 樹体の呼吸速度および土壌呼吸速度、(3) 地上部と地下部の現存量配分、(4) 林分密度の時間変化と自然間引きの関係、そして(5) 土壌有機炭素集積量と窒素無機化速度である。

## 3. 研究方法

本課題では、同一林分におけるパラメーター測定を行うため、北緯64度-東経100度に位置する中央シベリアのトゥラ実験林（ロシア科学アカデミー・スカチョフ森林研究所が所管）の中に、各測定項目に適する林分を選定した。この地域は典型的な連続永久凍土分布域のカラマツ林タイガで、森林火災後に一斉更新した林分である。

主要な樹種はカラマツで、水分条件が良好な河岸付近にはトウヒが混生し、斜面上でも水分条件の良好な立地にはハンノキの近縁種 *Duschekia fruticosa* が灌木層を形成している。林床はツツジ科低木類、灌木生のカンバ (*Betula nana*)、蘚類及び地衣類で覆われている。

### (1) 光合成特性

トゥラ実験林の中で、南向き斜面と北向き斜面ではカラマツと林床植生の光合成特性を測定した。南向き斜面と北向き斜面で、林木の生育状態、活動層の厚さ、下層植生構成等を記載した。測定対象樹種は、カラマツ (*Larix gmelinii*)、トウヒ (*Picea obovata*)、ヤナギ類 (*Salix* sp.)、シラカンバ (*Betula platyphylla*)、デシユキアハンノキ (*Duschekia fruticosa*)、イソツツジ (*Ledum palustre*)、クロウスゴ (*Vaccinium uliginosum*)、ハスカップ類 (*Lonicera* sp.)、ウラシマツツジ (*Arctostaphylos erythrocarpa*)、ネズミサシ (*Juniperus sibirica*) などである。葉のクロフィル量も、極性の高い溶媒 DMSO によって抽出し定量と組成を測定した。

測定にはライカー社 (米国) の LI-6200 を用いた。LI-6200 は閉鎖型のガス交換システムを採用しており、極めて迅速な測定が可能である。前日に雨が降った日を選び、快晴条件の下で 2 日間、南向き斜面から測定を開始した。日中の測定は水分ストレスの影響があるので避け、午後から北向き斜面の測定を重点的に行った。

### (2) 呼吸速度、及び土壌呼吸速度

森林全体の CO<sub>2</sub> フラックスの季節変動と年間交換量を測定するには、タワーによる渦乱流測定が有利である。しかし、森林全体のフラックスの構成要因となる樹木や土壌、樹冠部の CO<sub>2</sub> 収支を直接分析出来ないため、タワーでの測定に平行して様々な生理生態学的測定を樹木や土壌に対して個別に行うこと必要がある。特に、フラックスの構成要因の中で最も重要な森林生態系全体の樹木個体自体の CO<sub>2</sub> 収支は樹木個体が大きいため、直接測定した例は殆ど無い。本研究では個体レベルの日中の暗呼吸を測定する方法を独自に開発し、生態系全体の樹木呼吸消費の年間量推定を試みた。さらに土壌呼吸を測定して、樹木の呼吸消費と比較検討した。

カラマツ個体地上部、地下部 (根) の呼吸については、14 個体の地上部の呼吸を閉鎖系の個体呼吸測定装置で測定した。閉鎖循環式であるため内部の CO<sub>2</sub> 濃度は直線的に上昇し、その上昇速度から個体の呼吸速度を計算できる。閉鎖式であるため微量の呼吸速度も積算値として計算でき、開放系に比べて精度が高い。さらにタワーによる測定では水蒸気中にある CO<sub>2</sub> を評価出来ないが、この閉鎖式測定法では殆ど問題とならない。チャンバーのサイズは個体の大きさに応じて 7 種類の大きさを用意し、測定対象となる個体サイズに大きな幅をつけた。個体地上部の生重量は 8g~55kg、樹高は約 25cm~9m であった。さらに、地上部の呼吸を測定した一部の個体の地下部を出来るだけ傷をつけないよう地下部から掘り出した。掘り出した根表面の土壌を落とした後、地上部全体の呼吸測定と同じチャンバーに入れ同様の方法で個体の呼吸速度を測定した。また、コントロールサイト以外の山火事後 8 年経過した林分のカラマツ個体の根も測定対象とした。対象とした 15 個体の根の生重量は 1.7g~8.6kg であった。切断に対する影響を評価するため測定個体を地際で切断し、その前後で呼吸を比較したが切断後一定時間は影響がみられなかった。本測定ではこの時間内に根の呼吸を測定したので切断による影響は殆ど無かったと考えた。さらに、根の呼吸について地下部の CO<sub>2</sub> 濃度が 2000 ppm 程度までは呼吸阻害を起こさないことも報告されており、根の地下部からの掘り出しも呼吸に大きな影響を与えないと考えた。

土壌呼吸は LI-6200 に専用の土壌呼吸チャンバーを接続して8月に測定した。測定点数は18点、凹凸のあるアースハンモック地形で行った。土壌呼吸と同時に、それぞれの土壌呼吸測定点で地表下3cmの地温を測定し、年間の土壌呼吸量を推定するために地温変動を1時間ごとに年間を通じて測定した。

### (3) 地上部—地下部現存量

カラマツの老齢1林分(C1;260~280年生)と山火事後ほぼ一斉に更新した3林分(TM101, TM103, TM104;約100年生)を対象に、地上部及び地下部の現存量を推定し、林齢及び立地の違いによる炭素蓄積量の差異を検討した。なお3つの若齢林分は同一斜面の上・中及び下部からそれぞれ選定した。地上部各器官(幹, 枝, 根)と大径根(直径5mm以上)の現存量は、2つの林分(C-1, TM104)で採取したカラマツ計14個体で得られた胸高直径と乾燥重量のアロメトリー式を用いて推定した。細根量は、各林分で土壌コア(深さ20cm, n=9)を採取し、直径1mm以上と以下に分けて測定した乾重の平均値から推定した。さらに、林床の低木・草本の現存量については、各林分に方形枠(20×40cm)を設置し(n=3)、刈り取り調査から求めた。この方形枠では、林床の地衣・コケ類及びその下に堆積した未分解リター層の現存量も、参考までに測定した。

### (4) 林分密度の時間変化と自然間引きの関係

トゥラ実験林の森林火災後に更新したカラマツ同齢林(火災後5年から160年まで)を60箇所選定し、個体密度と胸高直径・樹高測定を行ない、個体密度と地上部現存量との関係を求めた。凍土の活動層の厚さと地上部現存量関係を検討した。

### (5) 土壌有機炭素集積量と窒素の年間無機化速度

トゥラ実験林の東向き斜面と西向き斜面の斜面系列、及び南向き斜面と北向き斜面で土壌調査と土壌試料の採取を行った。調査深度は、永久凍土面までとし、土壌有機炭素の集積量推定は土層1mまでとした。永久凍土面が1mより浅く存在する場合には、活動層最下部の状態が続くものと仮定して深さ1mまでの推定値を求めた。1997年から2000年までの研究期間に得られた土壌試料は、農林水産省指令9横植665号、同指令10横植698号、同指令11横植584号、同指令12横植554号の許可に従って日本に持ち帰り、所定の化学分析処理を行った。土壌試料は、有機炭素、無機態炭素(炭酸塩)、及び全窒素の定量を行ない、各層位の細土率、仮比重などから集積量を推定した。土壌有機炭素と土壌のC/N比の関係を検討した。

土壌の肥沃度を明らかにするために、不攪乱土壌コア—イオン交換樹脂吸着法による野外の窒素無機化速度推定(*in situ* N mineralization)のための実験設定を1998年夏の現地調査時に、行ない、1999年の現地調査時に回収して1年間の野外における窒素無機化速度を求めた。

## 4. 結果・考察

### (1) 光合成特性

葉のクロロフィル含量(Chl)には生育地の影響がほとんどなかったが、組成は特に集光部

分に関する Chl.a/Chl.b の値が北向き斜面で小さく, Chl.b の値が北向き斜面で相対的に大きいことがわかった (図 2)。光合成速度はシラカンバ, カラマツで高く, 特に南向き斜面中腹での測定値が最も高く, 北向き斜面中腹付近の材料では小さかった。中でも南向き斜面の常緑針葉樹低木のネズミサシが最も低かった。

主要な樹種であるカラマツの短枝の光合成速度は, 北向き斜面の材料が南向きより若干低い値を示した (図 3)。しかし, ニホンカラマツなどに比べ, 最大光合成速度は 1.5 倍程度高かった。この高い光合成速度は, 生育期 (6~8 月) の短い光合成期間を有効に利用する補償能力と理解できる。しかし予想していた光-光合成曲線とクロロフィルとの間には明瞭な関係はなかった。今後, 光・温度環境などを基礎に光合成生産量の推定を行ない, 環境変化の影響を精度高く予想する必要がある。

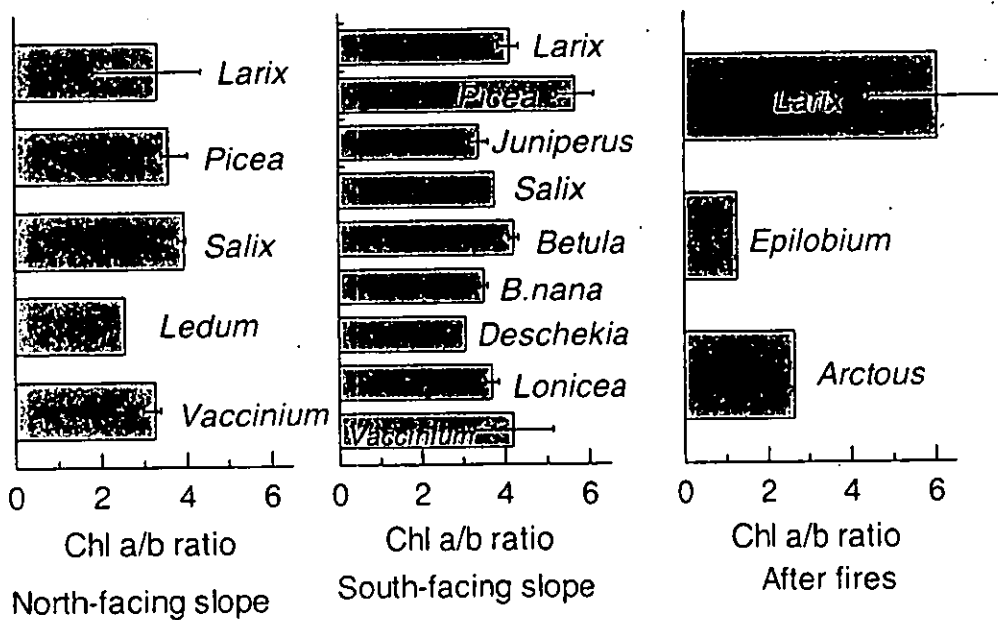


図 2. 葉のクロロフィル含有量

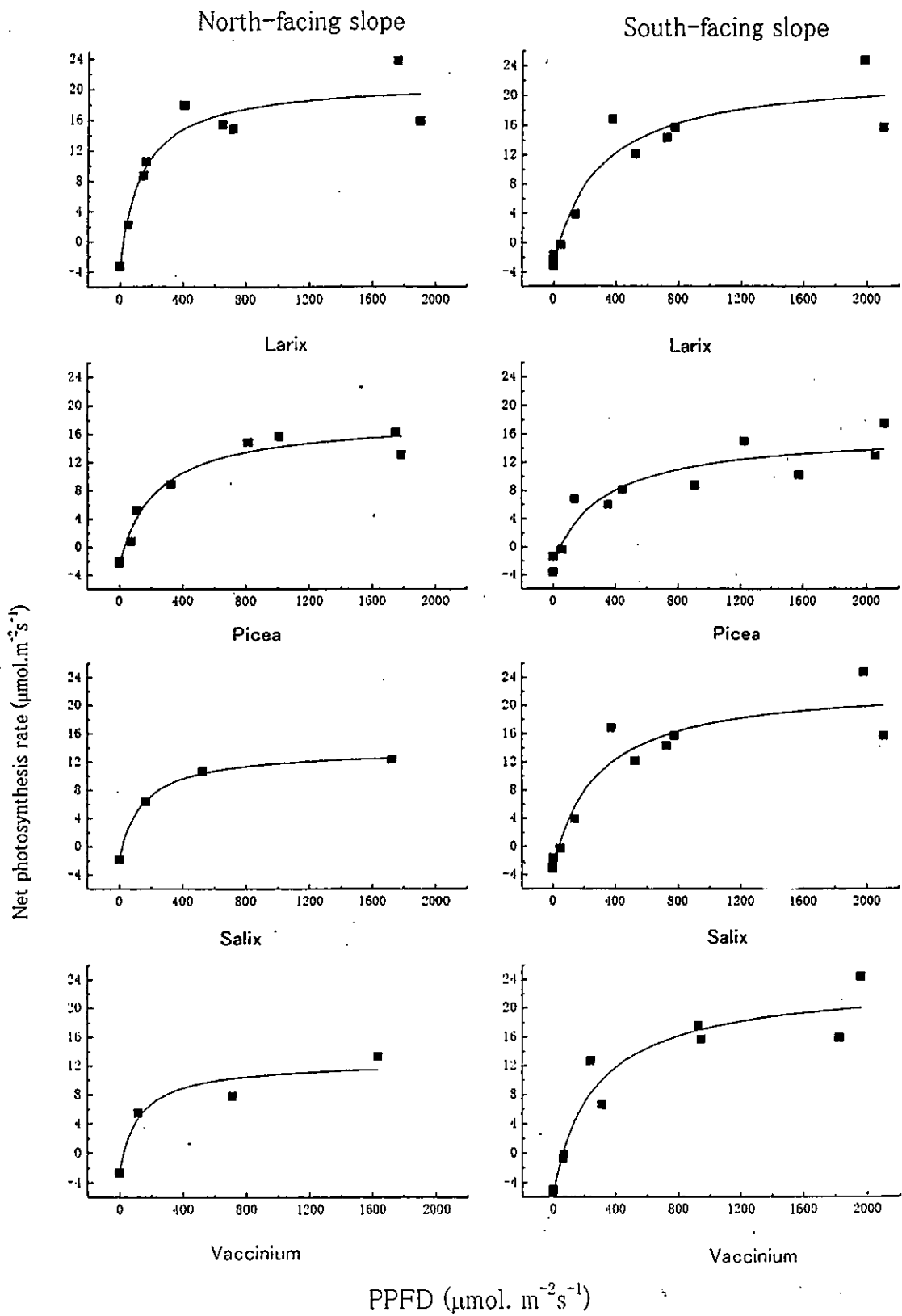


図3. 北向き斜面と南向き斜面における光合成測定結果

## (2) 呼吸速度, 及び土壌呼吸速度

個体当たりの地下部と地上部の呼吸速度  $r$  ( $\mu\text{molCO}_2/\text{tree}/\text{sec}$ ) とそれぞれの生重量  $w$  (kg) の関係を図4 (個体呼吸速度と個体重量) に示した。個体当たりの呼吸速度は地下部も地上部も同じ重量では同じ値を示した。 $r-w$  の関係は地下部と地上部で分離すること無く以下の巾乗式で近似できた。

$$r = 0.3866 w^{0.9116} (r^2=0.98)$$

この式とコントロールサイトの毎木調査のデータから推定した林分全体の個体の地下部, 地上部の生重量の値から林分全体の呼吸速度を推定した。さらに, 地上部の温度依存性をチャンパー内の温度を変化させて測定したところ  $Q_{10}=2$  であったので, この値が年間を通じて一定であると仮定した。この仮定と, 気温と地温の年変動をもとに林分全体の地上部全体と地下部全体の呼吸速度の年変動と年間量を推定した結果, 地上部・地下部の年呼吸量は 112 及び 104  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$  であった (表2)。

地下部, 地上部でそれぞれの呼吸速度  $r$  と重量  $w$  の  $r-w$  関係は分離せず, 一定の巾乗式で近似され, 個体レベルの呼吸が林齢, 立地条件に関わりなく一定の値を示した。さらに,  $r-w$  関係が時間軸上でその関係を変えることなく一定の関係を示すことは, 森林生態系の炭素収支を時間軸上でモデル計算する際の基礎的資料として極めて重要である。今回の結果では,  $r-w$  関係の巾乗式の巾指数は 0.9116 であった。この値が1の場合は個体の呼吸速度は重量比例となり, 巾指数が 0.67 (=2/3) の場合は, 樹型が相似形と仮定すれば呼吸速度は表面積比例となるが, 今回の値はその中間的な値であった。

土壌表面の微地形凹部では, 凍土面に近いために地温は低く, 一方凸部では凍結面から離れるとともに輻射熱で地温は高くなり, 全体として地温は 4.5~20.4°C と大きく変動した。こうした幅の広い地温のレンジに応じて土壌呼吸  $R$  ( $\text{gC}/\text{m}^2/\text{sec}$ ) も約 15~165  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{sec}$  と大きく変動した。両者の関係は図5 (土壌呼吸—地温関係) に示したように以下の式で近似した。

$$R = 4.56t - 8.27 (r^2 = 0.47)$$

次に1年を通じて1時間毎に測定した地温のデータを元に年間の土壌呼吸量を推定した。推定に際して, 地温がマイナスになる期間は土壌表面が凍結しており, 土壌呼吸はこの間ゼロになると仮定した。さらに, 年間を通じて土壌呼吸は上式に従って変動すると仮定した。これら仮定のもと土壌呼吸の年変動を推定した結果を図6 (土壌呼吸の年変動) に示した。この土壌呼吸の年変動を積分して, 年間の土壌呼吸量を推定したところ, 331  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$  であった。推定した年土壌呼吸量はこれまでに報告された北方林の土壌呼吸の値とおおむね合致する (Raich & Schlesinger 1992)。しかし, 推定のもととなった測定は, 夏季1回の測定であり, しかも, 土壌呼吸—地温の関係は必ずしも年間を通じて一定ではない。今後は土壌融解が開始される春季, および土壌凍結が始まる秋季などにも測定を行って温度依存性の季節による違いを検討する必要がある。また, 同調査地は凹凸のあるアースハンモック地形であり,



こうした不均質な土壌面では、地温も一様ではないために凹面と凸面では生育する植物も異なり、それぞれがパッチ状に地表面を覆っている。こうした地表面の割合を定量的に把握した上で林分全体の土壌呼吸を推定することも今後は必要であろう。

本研究では、土壌呼吸速度が 331 gC/m<sup>2</sup>/yr, 根の呼吸は 104 gC/m<sup>2</sup>/yr と推定された。根の呼吸速度は土壌呼吸速度の約 30%程度を占めていた。

表 2. 年間の土壌呼吸, 地上部・地下部呼吸量

Soil respiration rate (g C/m <sup>2</sup> /yr)	Respiration rate of Larch trees (g C/m <sup>2</sup> /yr)	
	Aboveground parts	Belowground parts (including fine roots)
331	112	104

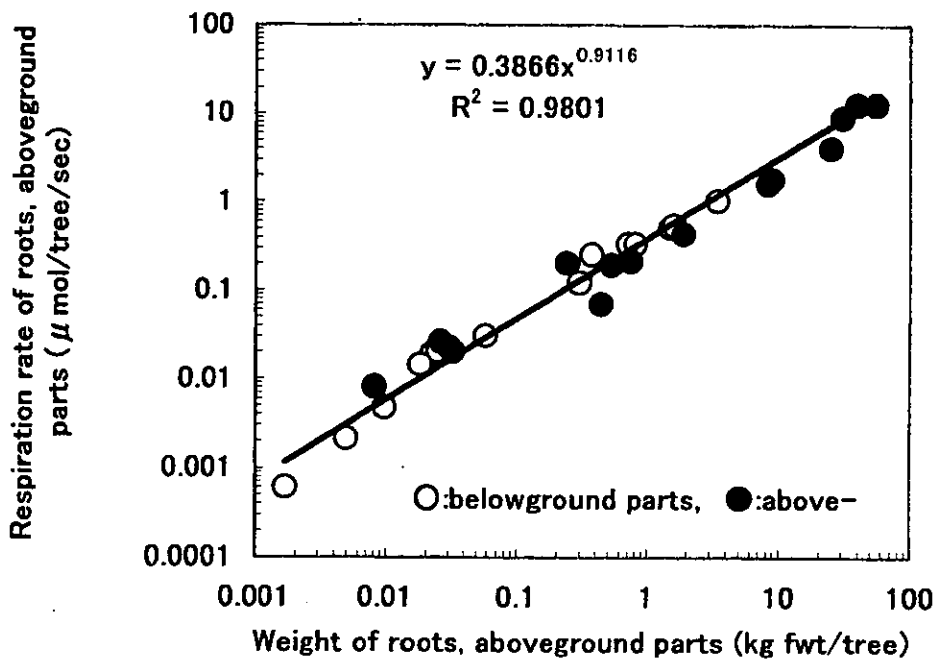


図 4. 個体呼吸速度と個体重量の関係

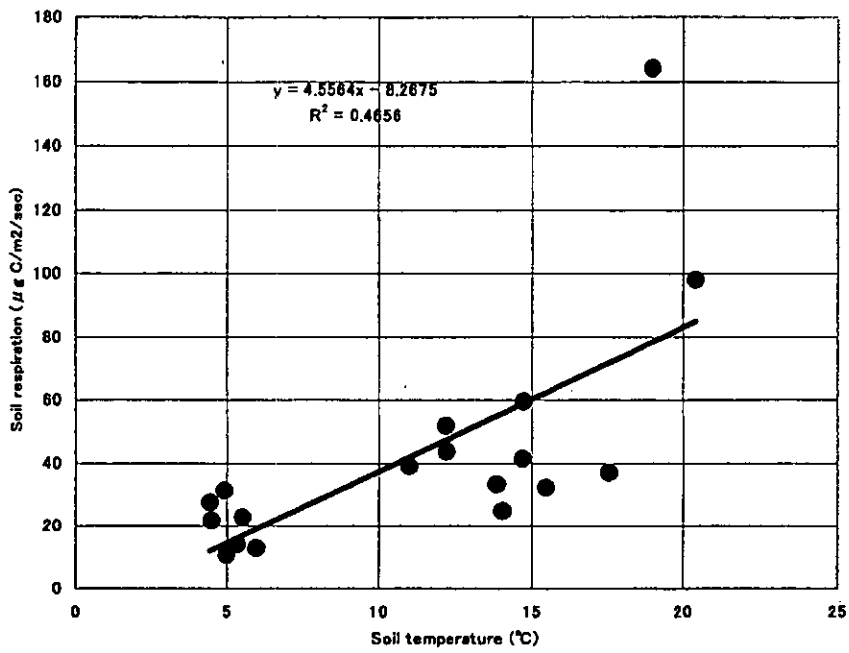


図5. 土壤呼吸と現場測定地温の関係

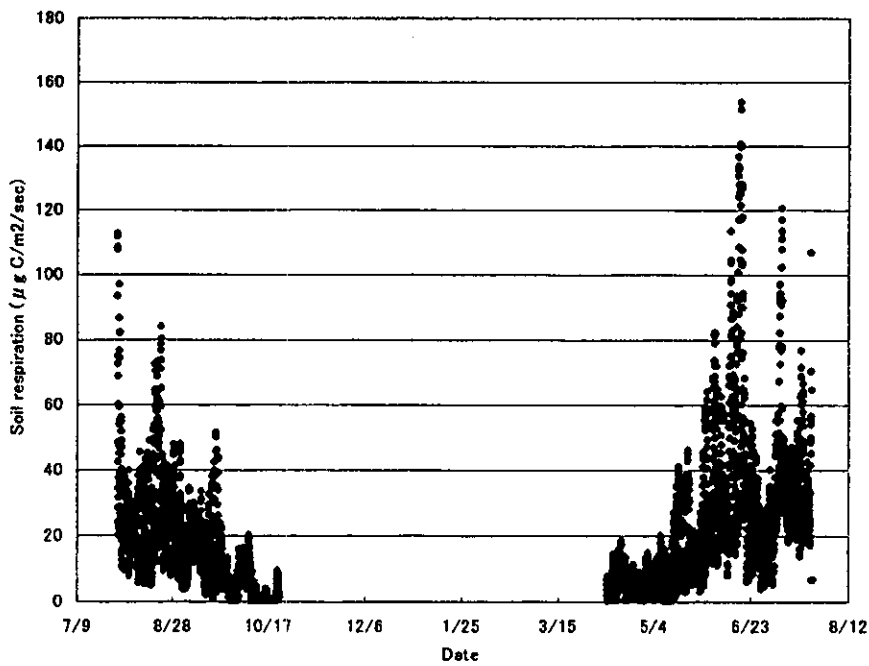


図6. 1年間の地温測定結果に基づく土壤呼吸の推定値

(3) 地上部-地下部現存量

各調査林分の全現存量は、16~41 ton/ha の範囲に推定された(表3)。若齢林の全現存量は、斜面下部の湿潤地に成立する林分(TM104)を除くと、2林分とも(TM101, 103)老齢林分とほぼ同じ値に達していた。

表3. シベリアカラマツ調査林分の概況及び現存量推定値

プロット No.	C1	TM101	TM103	TM104
林齢(年生)	260~280	100	100	100
立木密度(/ha)	1910	1462	2911	2653
平均直径(cm)	6.8	8.1	6.2	3.4
平均樹高(cm)	5.5	8.9	6.9	3.1
<b>現存量 (ton/ha)</b>				
幹	18.06	14.44	17.14	5.36
枝	3.21	2.96	3.45	1.04
葉	1.01	0.91	1.08	0.34
地上部合計	22.28	18.31	21.67	6.74
林床植生 (低木・草本)	1.45	0.97	2.83	1.38
根(φ>5mm)	10.84	8.85	11.01	3.71
(1-5 mm)	4.40	4.87	3.26	2.00
(<1 mm)	1.50	2.59	2.65	2.05
地下部合計	16.74	16.31	16.92	7.76
林分合計	40.47	35.59	41.42	15.88
T/R	1.3	1.1	1.3	0.9

現存量を器官別にみると幹への配分が最も多かった。しかし、地上部全体と地下部の比(T/R)は0.9~1.3となり、いずれの林分でも根が全現存量の約半分を占めていた。とくに若齢3林分について根の現存量を直径サイズ別にみると、TM104のように成長が悪くその結果同じ100年生でも全現存量が少ない林分ほど、細根の占める割合が高くなる傾向が認められ

た。

今回得られた T/R の値 (約 1.0) は、すでに東シベリアのカラマツ数林分 (180 年生以上) で得られている値とほぼ一致し、他の気候帯に属する森林の平均的な値 (TR=4~5) を大きく下回った。すなわち、シベリアのカラマツ林では、山火事更新後 100 年以上経ると現存量は頭打ちになり、地上部と地下部にほぼ半分づつ蓄積されることを意味している。相対的に根の現存量が多いことは、カラマツが永久凍土の貧栄養条件、とくに窒素に関して厳しい条件下にあるため、個体レベルで積極的に同化産物を養分吸収のための根に配分していることを示唆している。

各調査林分について、さらに林床に堆積した厚い未分解のリター層の現存量 (約 22ton/ha ; TM103, 104) を加味すると、林分全体の炭素量は地上部にはごくわずかで、その大半が地表及び地下部に存在することになる。したがって、現在の気候条件下におけるシベリアのカラマツ林生態系は、地下部が炭素のシンク機能の上で重要な役割を果たしていることが示唆される。

#### (4) 林分密度の時間変化と自然間引きの関係

60 箇所の測定結果をまとめたところ、林分の個体密度が  $0.5 \text{ 本/m}^2$  ( $5000 \text{ 本/ha}$ ) 以下になると、カラマツ (*Larix gmelinii*) 林の地上部現存量は乾重量でおよそ  $5 \text{ kg/m}^2$  ( $50 \text{ ton/ha}$ ) に収斂する (図 7)。この様な地上部現存量の収斂現象は、一斉更新後約 30 年までに現れ、その後は現存量がほぼ一定のまま次の森林火災イベントまで保たれている (図 8)。図 7 に示す自然間引き現象は、地上部現存量が一定という条件の下で進むことになり、一般的に成り立つ「自然間引きの法則」に反する現象であり、植物生態学の常識とされてきた法則が永久凍土地帯の森林では何らかの原因で成り立たないことになる。

現存量の増加が見られなくなる原因の一つに、土壤養分条件の厳しさが考えられる。これは後述の窒素無機化速度の測定からも明らかである。さらに、現存量の頭打ちは、森林火災後に一旦は沈降した凍土面が林床植生の回復とともに再び上昇する時期に一致している。この様な永久凍土面の変動に関する知見から、北東ユーラシアの永久凍土地帯にひろがるカラマツ林の地上部現存量の上限あるいは漸近値は、凍土の活動層厚に関係があると予測できる。そこで、これまで得られた北東ユーラシアの調査地点における活動層厚と地上部現存量をプロットすると、図 9 に見られるような関係が見いだされた。永久凍土の生態系で植物に利用可能な養分は、凍結していない土層の厚さと単位体積に含まれる養分量に関係するので、図 9 に示されるような活動層厚と地上部現存量の漸近値との関係が存在すると考えられる。

この様に、連続分布する永久凍土地帯では凍土面の存在によって養分の制限が常態化し、通常とは異なる自然間引きのパターンが起こっているといえる。北方林のおよそ 2 割は永久凍土の連続分布地域に成立しているので、「現存量一定の自然間引き」は、これまでの常識を覆す生態学的発見として大きな意味を持つ。

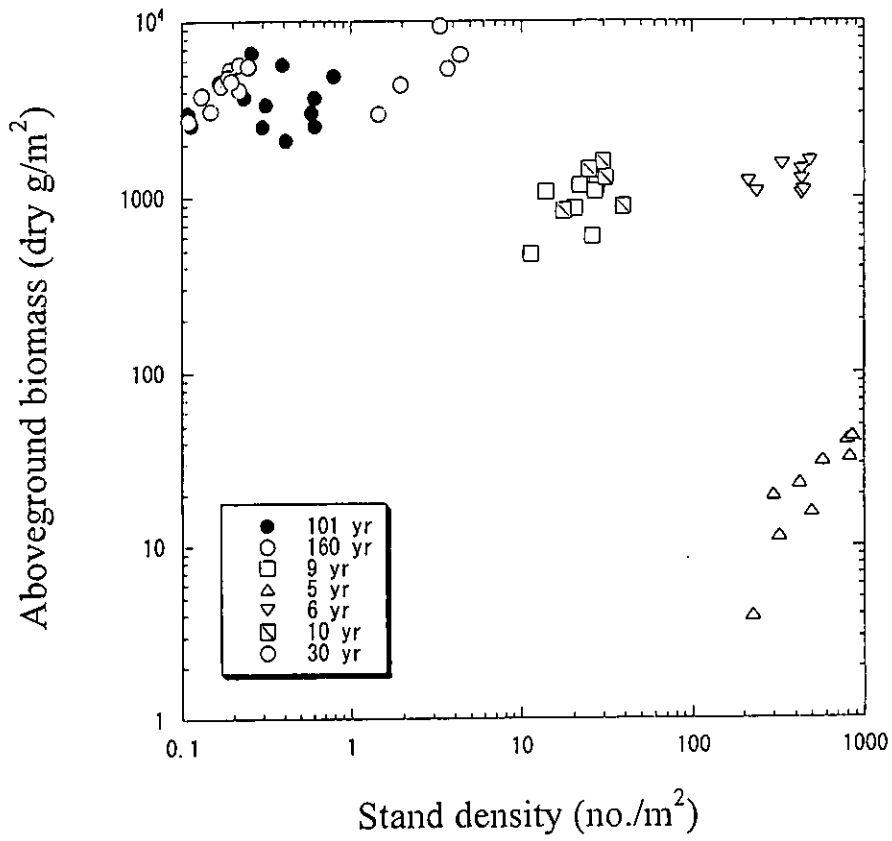


図7. 個体密度と平均地上部現存量の関係

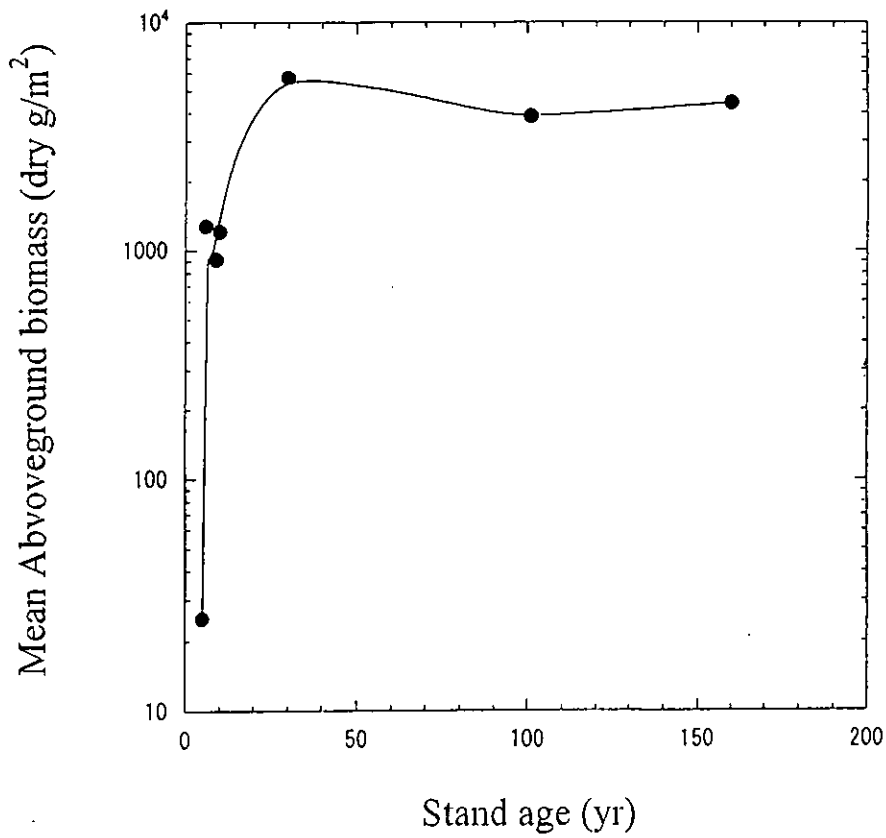


図8. 林齢と平均地上部現存量の関係

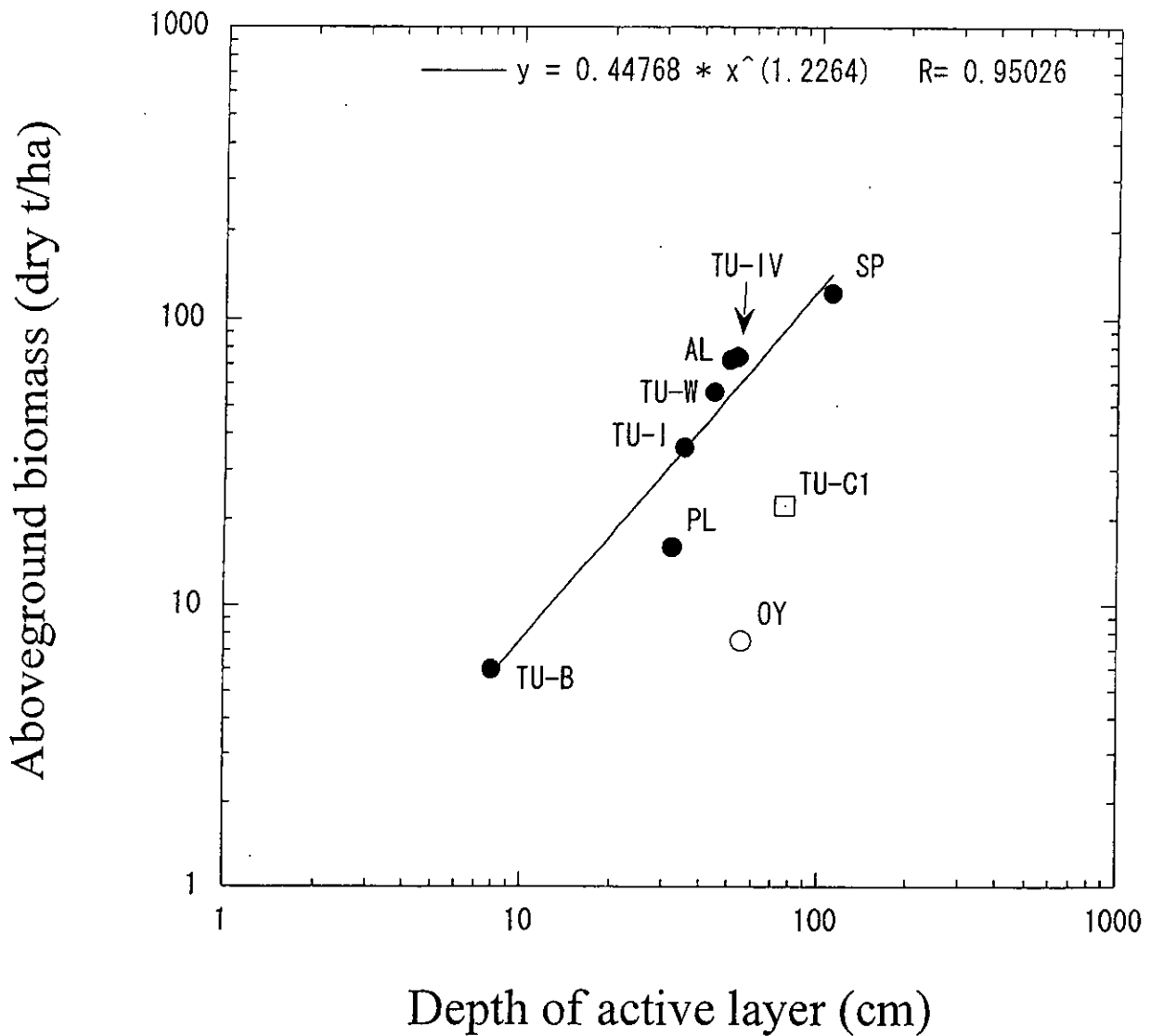


図9. 活動層の厚さと地上部現存量の関係

(5) 土壤有機炭素集積量と窒素の年間無機化速度

トウラ実験林内における10地点の土壤調査の結果、土壤有機炭素の平均集積量は  $9.73 \text{ kgC/m}^2$  ( $97.3 \text{ tonC/ha}$ ) になった。土層に石礫の含有率が低く、細土率の高い埴壤土では有機炭素集積量が高く、石礫が多く細土率の低い地点では、集積量が低くなった。

降水量が少なく夏期に高温乾燥気味となるこの地域では、高緯度にもかかわらず無機態の炭素（炭酸塩）集積が認められた。常時乾燥気味の南向き斜面では、表層から数十 cm にかけて、また火災後数年を経過した跡地の表層土などに炭酸塩集積が認められ、ところによっては  $1\sim 5 \text{ tonC/ha}$  に達していた。

土壤有機炭素集積量にはばらつきがあるが、土壤の CN 比は  $18.3\sim 22.9$  の範囲にあり、火災直後の1箇所を除くと平均の CN 比は  $20.0$  であった。土壤有機炭素 (SOC) 集積量と CN 比の関係をプロットすると、図10のようになる。

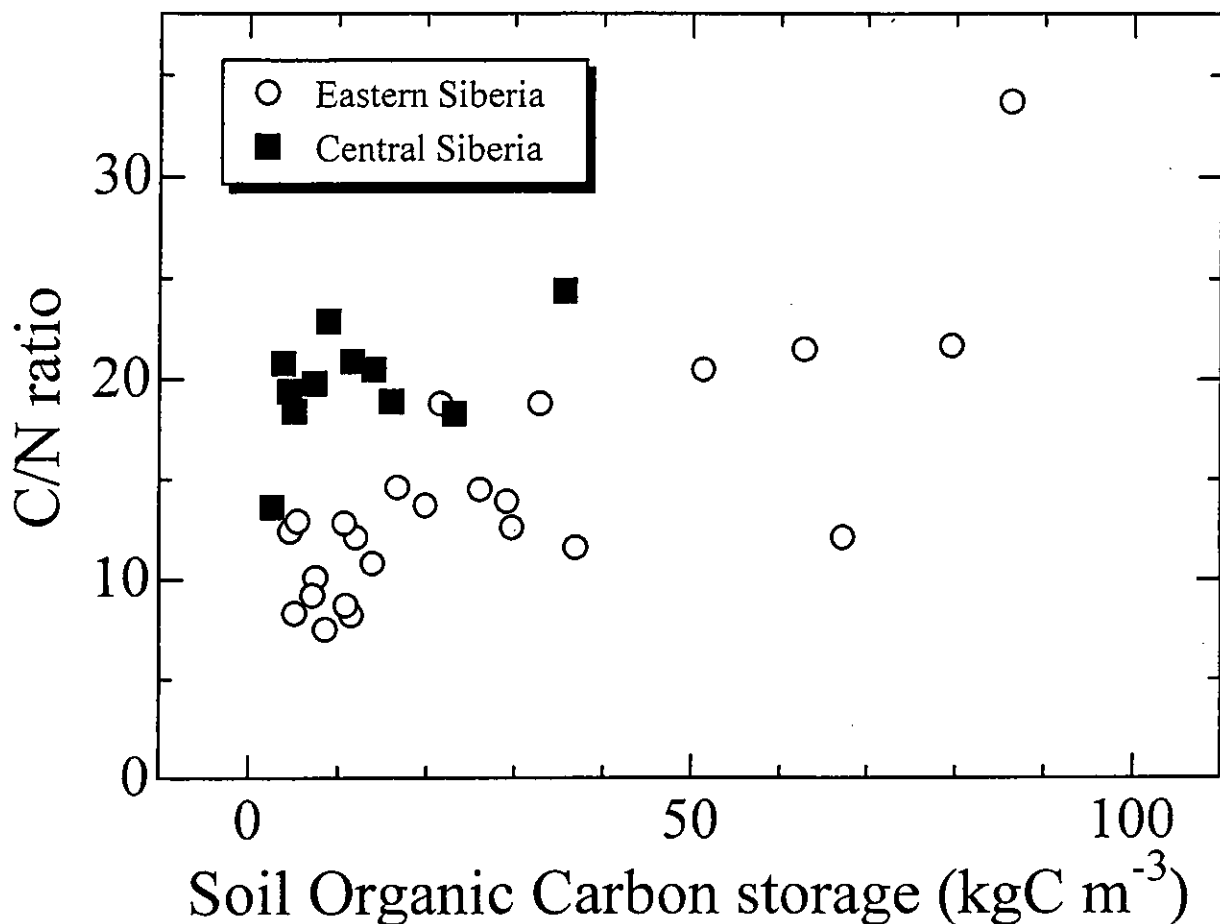


図10. 土壌有機炭素 (SOC) 集積量と CN 比の関係

東シベリアのカラマツ林土壌と中央シベリアのカラマツ林土壌を比較すると、東シベリアの北極海沿岸地域に広がる森林ツンドラの湿地土壌を除き、CN比15を下回る土壌が多いのに対して、中央シベリアではおおよそCN比が20前後に収斂している。ともに永久凍土の連続分布域でカラマツ林の広がる両地域ではあるが、両地域の土壌の違いは、東シベリアではレナ川、コリマ川などの大河川による2~4万年前の堆積物で、氷河に覆われなかったツンドラステップであった時代に生成された植物起源の腐植物質や、大型草食獣の凍結化石含むエドマと呼ばれる堆積物層が土壌の母材である。それに対して中央シベリアはアンガラ盾状地に広がるテラス状地形の岩屑が土壌母材であるためと考えられる。土壌のCN比の違いは、将来の温暖化影響のシナリオにも差が生じる可能性を示唆する。

陸上生態系の土壌養分のなかで、植物生育にとって窒素は重要である。窒素の無機化速度は気候帯によって大まかに分かれ、北方林生態系のこれまでの研究では、年間の窒素無機化速度は1~10 gN/m<sup>2</sup>/yrのオーダーである (Nadelhoffer et al. 1992)。トゥラ実験林における野外無機化測定の結果、硝化速度はすべての地点でプラスとなっていたが場所によって無機化

速度はゼロまたは負の値を示していた。これはアンモニア態窒素の段階で、微生物の取り込みが大きいことを示している。窒素無機化速度は、最も大きな値でも  $0.43 \text{ gN/m}^2/\text{yr}$  を越えなかった。

伐倒調査によって求めた、生育期のカラマツ針葉に含まれる窒素量、落葉中の窒素量、落葉前に回収される窒素量をそれぞれ推定すると、図11のようになる。この結果は、落葉で失われる窒素量が土壌の無機化によってすべて補完されない状態が、老齢林で生じている可能性が高いことを示している。前述のように、窒素循環の逼迫によって生じる養分不足は、地上部現存量が上限漸近値に収斂する原因の一つといえる。

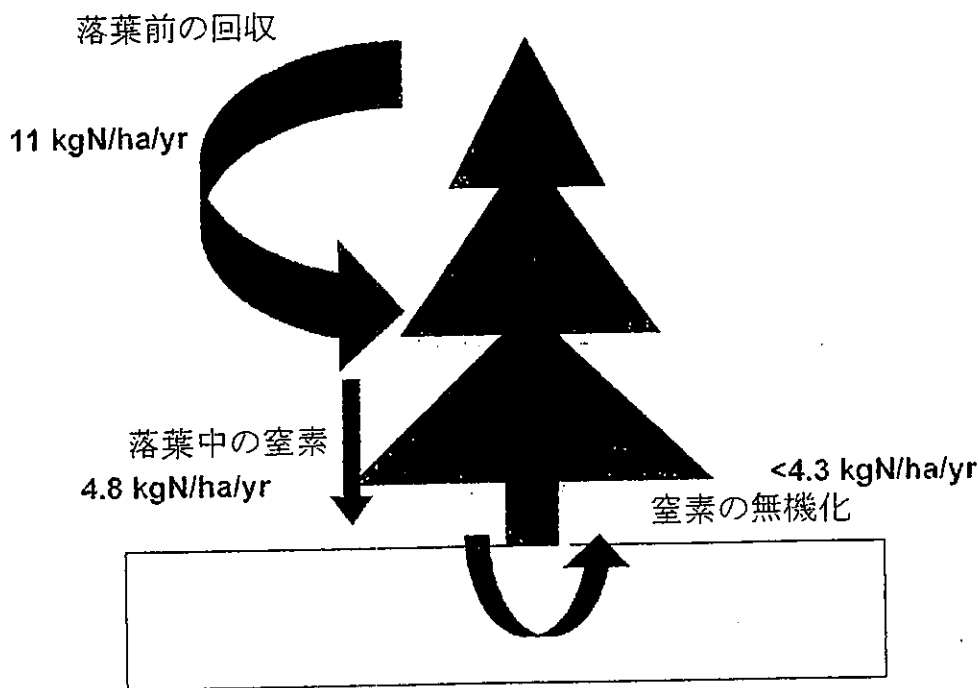


図11. 中央シベリアの永久凍土地帯のカラマツ林生態系における窒素循環

## 5. 本研究により得られた成果

本研究によって、永久凍土地帯のカラマツ林生態系ではこれまでの植物群落とは異なる群落構造や法則性が認められた。また、炭素固定のモデル化に必要なパラメーターとして、土壌呼吸のおよそ3割が地下部の呼吸であること、地上部と地下部の現存量配分比率が0.9~1.3になっていること、平均地上部現存量に上限漸近値が存在し、林齢30年前後に  $50 \text{ ton/ha}$  に達すること、平均地上部現存量が凍土の活動層厚と密接な関係にあること、土層1mまでの土壌有機炭素集積量が約  $100 \text{ tonC/ha}$  でありCN比が20に収斂すること等が明らかになった。



## 6. 引用文献

- Kasischke ES, Stocks BJ (eds.) (2000) Fire, climate change and carbon cycling in the boreal forest., 461pp, Springer-Verlag, New York.
- Nadelhoffer KJ, et al. (1992) Microbial processes and plant nutrient availability in arctic soils. In "Arctic ecosystems in a changing climate", 281-300pp., Academic Press, Inc., San Diego.
- Potter CS, Klooster A (1997) Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soils pools: response o changes in vegetation quality and biomass allocation. *Tellus* 49B: 1-17.
- Raich JW, Schlesinger WH (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationships to vegetation and climate. *Tekkus* 44B:81-99.
- Schulze E-D et al. (1999) Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink – a synthesis. *Global Change Biology* 5:703-722.

### [国際共同研究の情勢]

北方林生態系で、永久凍土の分布域がまだ生態学的空白域となっている。北東ユーラシアでは、ドイツのMax Plank研究所Biogeochemistry部門のグループが、エニセイ川西岸のヨーロッパアカマツ林でCO<sub>2</sub>のflux測定と生態学調査のクロスチェックを開始した。ロシア国内における輸送機関の未整備などの原因で、北東ユーラシアにおける研究推進には困難が多いが、スカチョフ森林研究所などのレベルの高いグループとの共同研究は今後とも推進すべきである。

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上発表 (学術雑誌)

- ①Kajimoto T, Matsuura Y, Sofronov MA, Volokitina AV, Mori S, Osawa A, Abaimov AP: *Tree Physiology*, 19:815-822, (1999). Above- and belowground biomass and net primary productivity of a *Larix gmelinii* stand near Tura, central Siberia.
- ②Koike T et al.: Proc. 8th symposium on the joint Siberian permafrost studies in 1999, 23-28pp, (2000), Annual ring growth of larch trees grown on the contrasting north- and south-facing slopes in eastern central Siberian taiga under global changing environment.
- ③Matsuura Y and Abaimov AP.: Proc. 8th symposium on the joint Siberian permafrost studies in 1999, 129-134pp, (2000), Nitrogen mineralization in larch forest soils of continuous permafrost region, central Siberia. – An implication for nitrogen economy of a larch stand.
- ④Osawa A and Abaimov AP.: Proc. 8th symposium on the joint Siberian permafrost studies in 1999, 36-41pp, (2000), Tree size-density relationship and size-dependent mortality in *Larix gmelinii* stands.
- ⑤Osawa A, Abaimov AP, Zyryanova OA: *Canadian Journal of Forest Research*, 30:580-588, (2000). Reconstructing structural development of even-aged larch stands in Siberia.
- ⑥Abaimov AP, Zyryanova OA, Prokushkin SG, Koike T, Matsuura Y: *Eurasian Journal of Forest Research*, 1:1-10, (2000). Forest ecosystems of the cryolithic zone of Siberia; Regional features, mechanisms of stability and pyrogenic changes.
- ⑦ Koike T et al.: *Eurasian Journal of Forest Research*, 1:31-37, (2000). Photosynthetic

characteristics of Dahurian larch, Scots pine and white birch seedlings native to eastern Siberia raised under elevated CO<sub>2</sub>.

⑧Sofronov MA, Volokitina AV, Kajimoto T, Matsuura Y, Uemura S: Eurasian Journal of Forest Research, 1:51-57, (2000). Zonal peculiarities of forest vegetation controlled by fires in northern Siberia.

⑨Prokushkin AS, Prokushkin SG, Shibata H, Matsuura Y, Abaimov AP: Eurasian Journal of Forest Research, 2:45-58, (2001). Dissolved organic carbon in coniferous forests of middle Siberia.

⑩Osawa A, Abaimov AP: Canadian Journal of Forest Research, 31:910-918, (2001). Feasibility of estimating stem size distribution from measurement on the largest trees in even-aged pure stands

(2) 口頭発表

①Kajimoto T et al.: Workshop on spatial-temporal dimensions of high-latitude ecosystem change (The Siberian IGBP transect), Krasnoyarsk, Russia, 1997.9, "Biomass and growth patterns of roots in larch forest at Tura, Central Siberia".

②Mori S et al.: Workshop on spatial-temporal dimensions of high-latitude ecosystem change (The Siberian IGBP transect), Krasnoyarsk, Russia, 1997.9, "Carbon budget estimated by non-destructive measurement of the whole plant respiration including under-ground parts in Siberian larch forest".

③Matsuura Y et al.: 49th Arctic Science Conference, Fairbanks, USA, 1998.10, "Soil C/N ratio derived from edoma sediment and weathered rock fragments in continuous permafrost region of north-eastern Eurasia".

④Kajimoto T et al.: Advances in terrestrial ecosystem carbon inventory, measurements, and monitoring, Raleigh, USA, 2000.10, "Above- and below-ground carbon stocks in Siberian larch forest ecosystems".

⑤Matsuura Y: Advances in terrestrial ecosystem carbon inventory, measurements, and monitoring, Raleigh, USA, 2000.10, "Soil carbon storage in continuous permafrost region in central and eastern Siberia".

⑥Matsuura Y et al.: The 3rd International Conference on Cryopedology, Copenhagen, Denmark, 2001.8, "Soil carbon and nitrogen storage and forest biomass in continuous permafrost region of Siberia" (Abstract accepted).

(3) 出願特許

無し。

(4) 受賞等

無し。

(5) 一般への公表・報道等

①サイアス (2000年9月号, 朝日新聞社): 「タイガはいま」

②平成12年度森林総合研究所北海道支所研究発表会

(2001年3月2日, 於北海道教育文化会館): 「極北の森林生態系」