

B-4 シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

(3) 森林生態系における二酸化炭素貯留と収支の解明に関する研究

研究代表者 森林総合研究所北海道支所 高橋 邦秀

農林水産省 林野庁 森林総合研究所

北海道支所

造林研究室

金澤 洋一・大澤 晃・九島 宏道

樹木生理研究室

小池 孝良・田淵 隆一

土壌研究室

太田 誠一・松浦 陽次郎・

真田 勝

天然林管理研究室

猪瀬 光雄

東北支所

土壌研究室

佐々 朋幸

林業経営部

遠隔探査研究室

鷹尾 元

生産技術部

物質生産研究室

石塚 森吉

平成3年～5年度合計予算額 38,704千円
 (平成5年度予算額 14,129千円)

[要旨] ヤクーツク市郊外に設定されたスパスカヤパイト試験地とアラス試験地でシベリアタイガの二酸化炭素貯留量とその収支を推定するために、林分調査、バイオマス調査、年輪解析、土壌調査、樹木のガス交換能の測定、二酸化炭素フラックスの測定手法の検討等を行った。

ヤクーツク周辺のタイガの主要構成樹種はカラマツ、ヨーロッパアカマツ、シラカンバの3樹種であり、年間成長量は日本の1/3前後である。代表的なカラマツ林のバイオマスは、葉量で1.7ton/haと非常に少なく、幹に対する根の量はおおよそ1/1となり、相対的に根量が多い形態となっている。葉量を除いた地上部バイオマスは122ton/ha、下層植生やリターを含めたバイオマスは約36ton/ha、地下部バイオマスはおおよそ100ton/ha、下層植生も含めたカラマツ林の年間生産量は約3ton/haとなった。この林分の二酸化炭素貯留量は約450ton/ha、年間の二酸化炭素固定量は約5.4ton/haとなる。レナ川左岸の森林土壌における活動層の厚さは110～180cmとなり、カラマツ林で浅く、アカマツ林で深い傾向を示しているが、レナ川右岸のアラス草地の活動層は250cmを越えるものもある。土壌中の全炭素貯留量は、左岸の林内でおおよそ85～200ton/haとなり、アカマツ林<シラカンバ林<カラマツ林の傾向を示した。右岸のアラスではカラマツ林で50～85ton/ha、平坦草地では340～420ton/ha、底部の湿地では700ton/haを越えている。土壌pHは6～10と高く、下層ほど高い傾向を示した。カラマツの年輪解析から成長に30年周期が認められたが、最近100年間の成長曲線からは大気中のCO₂上昇の影響は認められない。また、年輪には森林火災による痕跡が認められた。乾燥気候のためカラマツ、アカマツの光合成速度は日中の低下が大きい。早朝や夕方には8mgCO₂/hr/gr前後の値を示し、水分条件の良いシラカンバは20mgCO₂/hr/grを示した。

[キーワード] シベリアタイガ、バイオマス、年輪解析、土壌炭素、光合成

1. 序

大気中の温室効果ガスの増加が地球規模で問題にされており、21世紀中には平均気温が数度上昇するとの予測も出されている。IPCC報告書等が指摘しているように、平均気温の急激な上昇は森林生態系に大きな影響を与え、とくに全地球の土壌炭素量の25%を保持しているといわれる寒帯・亜寒帯の森林生態系では植生のみならず土壌有機物の分解により二酸化炭素やメタンの放出により温暖化を加速する可能性も危惧されている。寒帯・亜寒帯で管理されていない森林の割合が最も大きい地域は永久凍土地帯に位置する東シベリアのサハ共和国といわれており、その森林面積は約1億5千万ha（日本の約6倍）、総蓄積量は約93億m³（同約3倍）である。このため、シベリア凍土地帯の代表的な森林タイプについて地上部、地下部、土壌中の炭素現存量と固定量を測定し、シベリアタイガの二酸化炭素貯留量と収支を推定し、環境変動に対する代表樹種の適応性も含めて温暖化の影響評価を行う必要がある。なお、本課題はロシア科学アカデミー・ヤクーツク生物学研究所との共同研究として実施した。

2. 研究目的

本研究の目的は以下の4つに集約される。

（1）シベリア凍土地帯のタイガを代表する森林について、森林の現存量及び二酸化炭素固定量、土壌中の炭素及び土壌からの二酸化炭素放出量を測定し、二酸化炭素の貯留量と収支の推定を行う。

（2）主要樹種の年輪解析により過去約300年間の成長周期と気候変動等との関係を検討し、年輪成長に影響している環境因子の検討と温暖化による影響を推定するベースデータとする。

（3）タイガの森林内外での二酸化炭素濃度の変化から、二酸化炭素フラックスを求め、タイガの森林群落としての炭素固定能力を推定する。

（4）環境変動とくに温暖化条件に対する主要樹種の適応性を、ガス交換機能を指標として、現地及び人工気象室を用いた実験により調べ、影響を評価する。

3. 研究方法

ヤクーツク市（62°05′N 129°45′E）郊外の北約30kmにある試験地で、年輪調査による成長解析、土壌調査、土壌の水熱環境の測定、樹木のガス交換機能の測定、林内二酸化炭素濃度の測定法の検討等を行った。また、試験地内の固定プロットの毎木調査データ及び東シベリアの森林の現存量についてロシア側の調査資料を入手した。試験地周辺の地形や森林分布の把握には衛星データを用いた。

年輪調査はカラマツの胸高部分から成長錘によりコアを採取し、過去の気候変動や大気中の二酸化炭素濃度との関係を検討するために成長の時系列データの解析を行った。土壌調査はカラマツ林、シラカンバ林、欧州アカマツ林及びアラスで斜面系列に沿って調査地を選定し、永久凍土層までの土壌断面（活動層）の形態調査を行い、炭素貯留量測定及び土壌呼吸量測定のための試料を採取した。土壌試料については、炭素含有量を測定し、容積重と層厚を乗じて炭素貯留量を算出した。土壌呼吸量は恒温恒湿条件下で採取サンプルのインキュベーションを行い、試験地の土壌温度から推定した。現地での林内二酸化炭素濃度の測定は、簡易型の赤外線ガス分析計を利用し、樹木のガス交換機能の測定にはKIP-9010を用いた。

初年度は、現地情報の収集と文献調査、カウンターパートの決定、共同研究体制の確立、現地調査対象地、現地調査方法、測器類等の検討を行った。2年目は、ヤクーツク生物学研究所が管理するヤクーツク郊外のスパスカヤパイト試験地に共同調査地を設定し、森林の概況調査、有機物炭素量推定のためのカラマツ、アカマツ、シラカンバの各林分での土壌調査、年輪解析用のコアサンプルの採取、林内CO₂濃度や気温、土壌水分等の測定機器類の設置と調整をおこなった。3年目はバイオマス調査に着手し、シベリアタイガで最も優占しているカラマツ林について、毎木調査をもとに林床植物、低木も含めた層別刈り取り調査、試料木6本の器官別重量測定をおこない、林分の炭素貯留量、年間固定量等を推定するためのデータを収集した。土壌調査は、森林帯からアラスまで断面調査とサンプル採取をおこない、貫入試験により活動層厚も調査した。カラマツ、アカマツ、シラカンバについてはガス交換速度の日変化を測定し、同時に樹体内水分状態、葉温、気温、光強度との関連も調べた。ヤクーツクより生産力の高いと思われるレナ川上流のカチガロワ(60°N 117°E付近)の森林について林分の概況調査をおこなった。

4. 調査結果

(1) 試験地の概要：スパスカヤパイト試験地についての正確な地図情報がロシア側から得られないため地上踏査を行った。その結果、天然林地域に二十数プロットの固定調査地が存在しており、これら固定調査地の1954年と1977年のロシア側調査データを入手した。天然林の高木はカラマツ、欧州アカマツ(*Pinus sylvestris*)、シラカンバの三樹種(カラマツ、シラカンバについては正確な学名を未確認)により構成されている。樹種分布は地形と人為攪乱により制約されており、緩やかな丘陵上部にはアカマツ林、斜面中部や沢筋にはカラマツ林、シラカンバ林、カラマツ・シラカンバ混交林となっている。シラカンバ単純林は、伐採や山火事など明らかに人為の影響を受けたと思われる所に出現している。ロシア側調査データと今回の日本側調査結果から、本試験地の林齢、樹高、直径、立木密度の範囲を示すと表-1のようになる。本調査地の生産力は、ロシアの森林の生産力等級1~5の中で4等級に相当し、かなり低いと思われる。

表-1 試験地の森林の概要

樹種	林齢(年)	平均樹高(m)	平均直径(cm)	立木密度(No./ha)
カラマツ	49~250~	7.7~18.4	7.0~26.7	48~4127
欧州アカマツ	113~175	6.8~12.6	9.5~16.8	48~3472
シラカンバ	30~68	9.0~13.2	5.8~12.2	16~4770

(2) 年輪解析：個々の成長コアについて過去約300年間について成長周期や成長曲線の変化について解析した。ほとんどの木の成長に30年周期が認められるが、最近100年間には成長曲線の変化は認められなかった。今年度の調査結果は、近年の大気中の二酸化炭素濃度の増加と試験地の樹木の成長と間に相関は認められないことを示している。また、年輪には森林火災の痕跡が認められ、30年周期は火災発生の周期とほぼ一致しており(図-1)、今後検討していきたい。

(3) スパスカヤパイト試験地のカラマツ林(林齢169年、立木密度900本/ha、平均樹高16.9(MAX. 23.7-MIN. 6.1)m、平均胸高直径18.0(40.2-6.3)cm)のサンプル木5本について地下部も含めてバイオマス調査をおこなった(図-2、表-2)。葉量は1.7ton/haと非常に少なく、日本カラマツの約1/2であるが、幹に対する根の量はおおよそ1/1となり、相対値で日本カラマツの4倍となっている。本試験地のカラマツ林は葉量を除いた地上部バイオマスは122ton/ha、下層植生やリターを含めたバイオマスは約36ton/ha、地下部バイオマスについては夾雑物を完全に除去できていないが、おおよそ100ton/ha、下層植生も含めたカラマツ林の年間生産量は約3ton/haとなった。この林分の二酸化炭素貯留量は約450ton/ha、年間の二酸化炭素固定量は約5.4ton/haとなる。

表-2 カラマツ林の現存量

	幹枝	葉	枯死部	根	粗リター	細リター	合計
高木層	121.76*	1.68		108.59			232.68
低木層	0.58	0.086	0.003	0.501			1.17
草本層	0.496	0.942	0.104				1.542
林床	11.14				10.00	14.92	36.06
合計	133.976	2.708	0.107	109.091	10.00	14.92	271.452

* 幹に着生している地衣類を含む。

(4) 土壌の形態と理化学性：調査地はレナ川の河岸段丘上に位置する極めて緩やかな丘陵地形で、レナ川の堆積物を母材とする粗粒質・貧栄養の土壌である。丘陵頂部平坦地の欧州アカマツ林を除く4調査地の土壌はいずれも腐植の集積層(spodic層)を持つSpodosolであり、インボリションによる独特の模様が認められた(図-3)。欧州アカマツ林の土壌は集積層がなく、Inceptisolに分類された。世界土壌図やヤクーツク自治共和国(現サハ共和国)農業地図を対照すると、本調査地の土壌はシベリア地域としてはやや特殊な土壌と判断される。活動層の厚さは120~180cmで欧州アカマツ林で深く、カラマツ林で浅い傾向が認められた。一方、レナ川右岸のアラス草地では方位により活動層が3mに達するところもある(図-4)。

粗大有機物を含めた土壌中の全炭素貯留量はおおよそ85~200tonC/haとなり(表-3)、アカマツ林<シラカンバ林<カラマツ林の順に炭素貯留量が大きくなっている。しかし、アラス周辺のカラマツ林では50~85tonC/ha、平坦な草地では340~420tonC/ha、底部の湿地では600tonC/haを越えている。土壌pHは6~8で一般に下層で高くなる傾向を示すが、アラス草地では表層でpH8から10にもなる。

表-3 凍土活動層中の有機物炭素含有量 (ton/ha)

試験地 調査地*	スパスカヤパイト						アラス					
	YK-2	YK-3	YK-1	YK-5	YK-4	SP-2	AS-1	AS-2	AS-5	AS-4	AS-6	AS-3
炭素量	70.3	97.8	145.1	174.5	102.8	109.8	46.7	39.2	365.3	651.9	302.1	182.6

* 図中の記号と同じで、同順である。

(5) 土壌呼吸量：カラマツ林、アカマツ林、シラカンバ林の表土層と溶脱層について恒温恒湿でインキュベーションを行った結果と試験地の土壌温度から、反応速度モデル推定式 $C = C_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)] + B$ 、ならびに $k = A \cdot \exp(-E_a / R \cdot T)$ を用いて推定した。ただし、 C_0 ：易分解性炭素量(mg/100g乾土)、 t ：時間(日)、 k ：反応速度定数、 R ：気体定数(1.987 cal/deg./mol)、 T ：絶対温度、 E_a ：活性化エネルギー(cal/mol)である。その結果、表層10cm厚からの二酸化炭素放出量は、おおよそ50KgCO₂/ha/年となり、かなり小さい値となった。これは地温が低く、0℃以上の期間が3カ月前後しかないこと、土壌微生物の種数や個体数が少ないことが影響していると思われる。

(6) 林内の二酸化炭素濃度及び樹木の光合成：林内の二酸化炭素濃度の測定例では、日の出前に地上20cmと樹冠部で600ppmと380ppmであったものが日中には320ppm前後と両者の差は無くなった。主要樹種の光合成は乾燥気候のため、カラマツ、アカマツでは日中の木部圧ポテンシャルの低下が影響し、マイナスになることもあるが、早朝や夕方には8mgCO₂/hr/gr前後の値を示し、湖岸に近く水分条件の良いシラカンバは20mgCO₂/hr/grを示した(図-5)。アカマツの枝の伸長成長と5月～6月の雨量との相関は高く、生育期の土壌や樹体内の水分条件が生長量の制限因子になっている可能性が高い。最低気温が0℃以上になっているのは5月末から8月中旬までの約3カ月であり、光合成が盛んな期間は50日程度と考えられる(図-6)。

5. 考察

年輪解析の結果から、当該試験地の樹木の成長量は北海道の同一樹種の1/3以下と推定され、単木単位の炭素固定量は小さい。これは、葉量が少ないこと、短い生育期間、200mm程度の年間降水量、長い土壌凍結期間などの厳しい条件が大きく影響している。カラマツやアカマツでは日中の気孔閉鎖によるガス交換機能の著しい低下がみられる。これは樹体内水分の低下によるものであり、ヤクーツク周辺の永久凍土地帯では日中の高温・乾燥のため吸水が蒸散に追いつかないために起こる現象であり、土壌水分と地温が二酸化炭素固定の制限因子になっている可能性が高い。また、アカマツの連年伸長量と5、6月の降水量合計値との相関が高いこともこれを裏付けている。年輪解析にみられる30年周期については、興味ある結果であるが森林火災だけでなく、気候変動の影響も含め今後の検討が必要であろう。土壌からの二酸化炭素放出量の今回の推定値は、非常に小さい値となっており、今後、現地での実測を重ねていく必要がある。

K. N. Kobackのレビュー³⁾によると寒帯地域の土壌中の炭素貯留量は情報が少なくバラツキが大きいが、凍結-融解土壌の1m土層内の有機炭素量は50~400tonC/haとなっており、スパスカヤ

パイト試験地の85~199tonC/haは寒帯の中では比較的少ない炭素貯留量と考えられる。これは、調査地の落葉・腐植層の厚さがアカマツ林やシラカンバ林では5cm以下と予想外に薄かったことから、リターの供給量が少ないことも起因している可能性がある。

本課題の目的である二酸化炭素貯留量と収支については、現地調査が当初計画より大幅に遅れているため、推定するに足る調査データを得ていないが、カウンターパートより提供されたデータによると、既往の文献^{3) 4)}の推定値よりかなり小さい値となる²⁾。本課題は国際共同研究としてようやく相互の協力体制を作りあげたばかりであり、アカマツ林、シラカンバ林についてはバイオマスが未着手であり、森林内外の二酸化炭素フラックスは測器も改良の余地があり、現地のカウンターパートに測定を依頼できる状態になっていない。また、シベリアタイガでは乾燥気候のため森林火災が頻発しており¹⁾、二酸化炭素収支への森林火災の影響は無視できないと思われる。

6. まとめ

ヤクーツク市郊外に設定されたスパスカヤパイト試験地とアラス試験地で林分調査、バイオマス調査、年輪解析、土壌調査、樹木のガス交換能の測定等をおこなった。

(1) レナ川左岸の森林土壌における活動層の厚さは110~180cmとなり、カラマツ林で浅く、アカマツ林で深い傾向を示しているが、レナ川右岸のアラス草地の活動層は250cmを越えるものもある。土壌中の全炭素貯留量は、左岸の林内でおおよそ85~200tonC/haとなり、アカマツ林<シラカンバ林<カラマツ林の傾向を示した。右岸のアラスではカラマツ林で50~85tonC/ha、平坦草地では340~420tonC/ha、底部の湿地では700tonC/haを越えている。土壌pHは6~8と高く、下層ほど高い傾向を示すが、アラス草地では表層でpH8~10を示す。

(2) カラマツ林(林齢169年、立木密度900本/ha、平均樹高16.9m、平均胸高直径18.0のバイオマスは、葉量で1.7ton/ha(乾物量)と非常に少なく、幹に対する根の量はおおよそ1/1となり、相対的に根量が多い形態となっている。葉量を除いた地上部バイオマスは122ton/ha、下層植生やリターを含めたバイオマスは約36ton/ha、地下部バイオマスはおおよそ100ton/ha、下層植生も含めたカラマツ林の年間生産量は約3ton/haとなった。この林分の二酸化炭素貯留量は約450tonC/ha、年間の二酸化炭素固定量は約5.4tonC/haとなる。

(3) カラマツの年輪解析から成長に30年周期が認められたが、最近100年間の成長曲線からは大気中のCO₂上昇の影響は認められない。また、年輪には森林火災による痕跡が認められた。ロシアでは年間の森林火災面積が140万ha~1000万haにおよび、二酸化炭素収支に与える影響は無視できない。

(4) 林内の二酸化炭素濃度の測定例では、日の出前に地上20cmと樹冠部でそれぞれ600ppmと380ppmであったものが日中には320ppm前後と両者の差は無くなった。乾燥気候のためカラマツ、アカマツの光合成速度は日中の低下が大きい、早朝や夕方には8mgCO₂/hr/gr前後の値を示し、水分条件の良いシラカンバは20mgCO₂/hr/grを示した。

7. 研究発表の状況

1)大澤 晃 1992.10, 周北極地域の針葉樹に見られる成長変化の30年周期. 日本生態学会北海道地区大会1992年度大会

- 2)大澤 晃 1992.10, Global warming and forest growth:Records for the past centuries and implication. 日本農業気象学会50周年記念国際シンポジウム
- 3)高橋邦秀 1992.11 ロシア極東の森林管理の動向について(森林資源の現状と環境問題). 日本学術会議林学研連主催シンポジウム
- 4)太田誠一他4名 1993.2, シベリア永久凍土地帯のタイガ林調査から. 森林科学7:68-73
- 5)高橋邦秀 1993.2, シベリア森林開発と永久凍土. ウォディアレター110:4-7
- 6)大澤 晃他4名 1993.2, 東シベリアの森林現存量. 日林北支論41:238-239
- 7)高橋邦秀 1993.3, ロシア極東の森林資源の現状と環境問題. 北方林業45:57-60
- 8)K.Takahashi 1993.3, Feedback of global warming in Siberian permafrost regions: carbon storage and carbon dioxide budget in forest ecosystems. Proceedings of First Symposium on Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1992: 47-50
- 9)A.Osawa 1993.3, Field reconnaissance of Skaspayapait forest site. 同上:51-54
- 10)A.Osawa 1993.3, Dendroclimatological analysis of tree growth patterns. 同上:55-58
- 11)S.Oota, Y.Matsuura, M.Sanada 1993.3, Soil characteristics and C and N storage in soil. 同上:59-65
- 12)T.Sasa 1993.3, Nutrient analysis in tree leaves. 同上:66
- 13)T.Sasa 1993.3, Estimation of soil respiration. 同上:67
- 14)T.Koike, R.Tabuchi1993.3, A trial of measurement of CO₂ concentration in a forest and photosynthesis of woody species native to eastern Siberia. 同上:69-74
- 15)T.Koike 1993.4, An ecophysiological approach to the study of global change: potential effect of evaluated CO₂ on northern forest dynamics of eastern Asia. IUFROセミナー「北方・極地 方針林の恒常性機能研究会」サン・ディエゴ州立大学
- 16)高橋邦秀 1993.4, ロシア極東の森林資源と環境問題. 木材情報23:14-16
- 17)小池孝良他5名 1993.8 Measurement of the height growth of trees and CO₂ concentration in eastern Siberia. 15回国際植物学会講演旨集
- 18)太田誠一・松浦陽次郎・真田 勝 1993.10, シベリア東部レナ川河岸段丘の永久凍土活動層における物質集積量. 104回日林論:323-324
- 19)高橋忠幸・小池孝良・佐々朋幸・B. I. Ivanov・T. C. Maximov 1993.10, シベリアタイガ地帯にみられる主要3樹種の葉内養分濃度. 同上:325-326
- 20)佐々朋幸・長谷川浩一 1993.10, シベリア・タイガ地帯に生育し, 山火事被害を受けた針葉樹の材成長. 同上:599-600

8. 参考文献

- 1) R. K. Dixon and O. N. Krankina 1993, Forest fires in Russia: carbon dioxide emissions to the atmosphere. Can. J. For. Res. 23:700-705
- 2) T. P. Kolchugina and T. S. Vinson 1993, Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest biomes in the former Soviet Union. Can. J. For. Res. 23:81-88
- 3) K. N. Koback (内嶋善兵衛訳) 1991, 地球上の炭素サイクルと生物. pp196

4) R. V. Desyatokin et al. 1994, Carbon storage of plant ecosystems in Yakutia.
In "Interim Report of Joint Research between FFPRI and YIB "Carbon storage and carbon dioxide budget in Forest Ecosystems" eds. by K. Takahashi

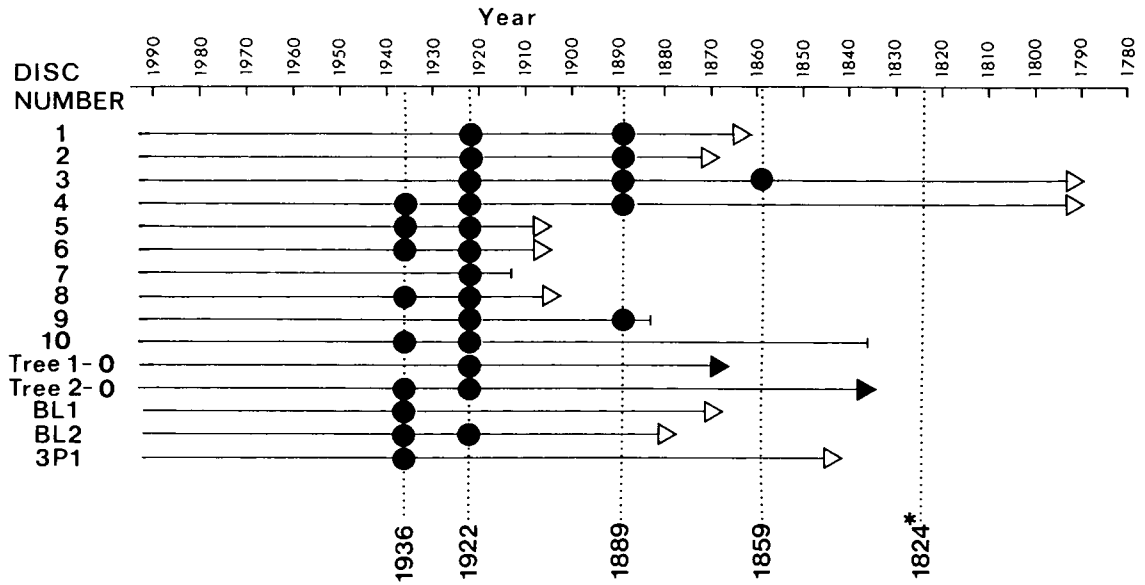


図-1 年輪にみられる森林火災の痕跡

- Fire Scar
- ▶ Year of origin of stem center at 0 m aboveground
- ▷ Year of origin of stem center at 0.2 m aboveground
- └ Earliest measurable year

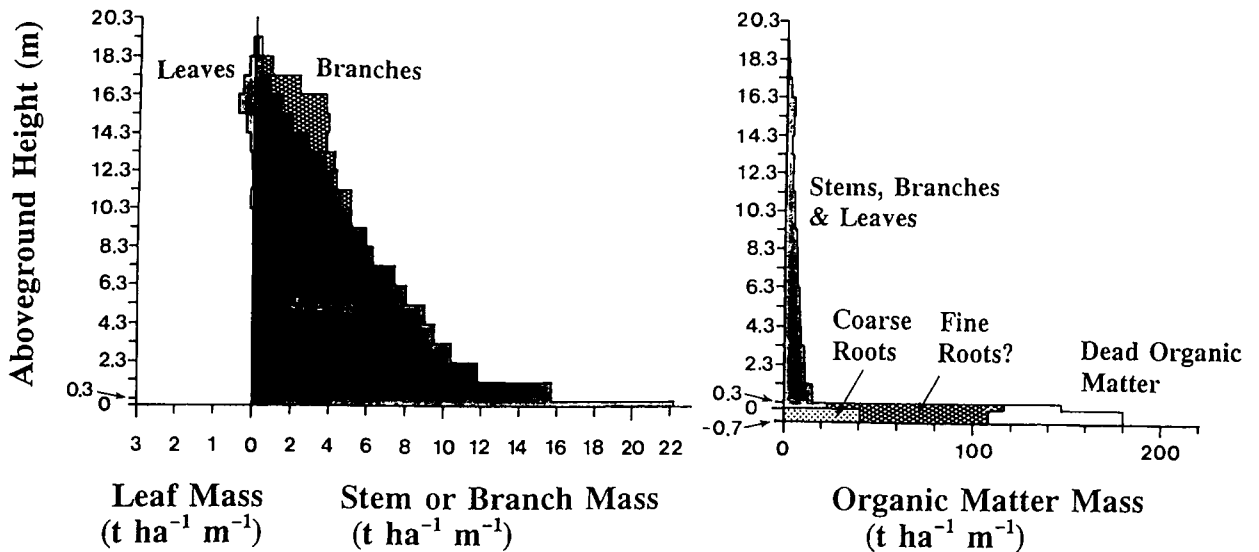
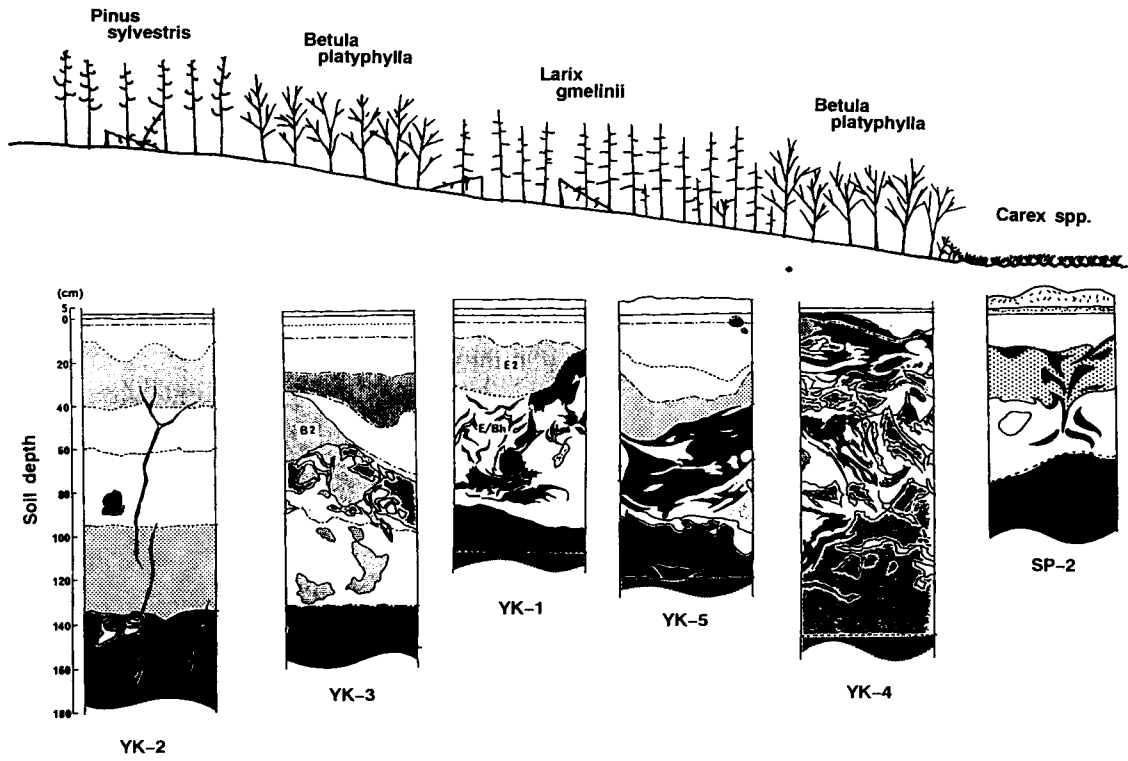


図-2 カラマツ林の生産構造図



Schematic representation of soil catena in Spaskajapad Experimental Forest.

図-3 スパスカヤパイト試験地の土壤断面図

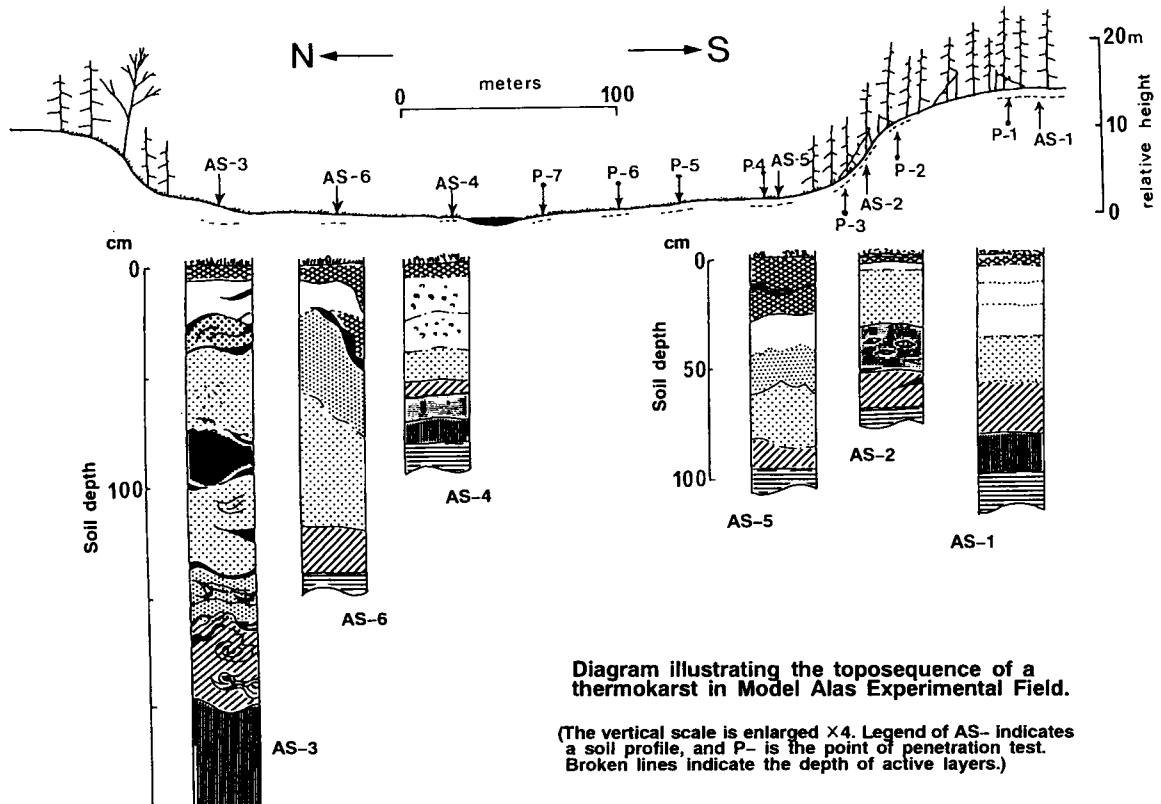
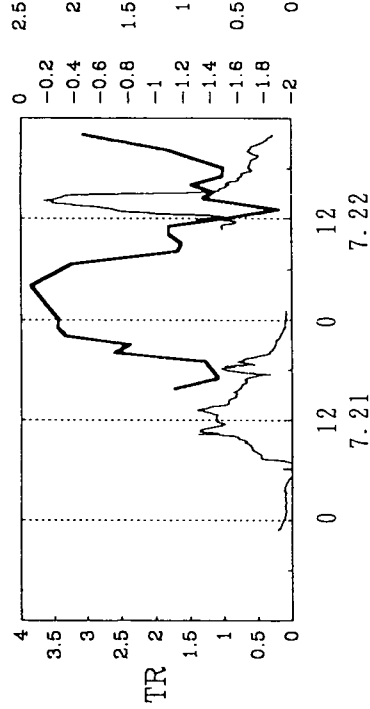
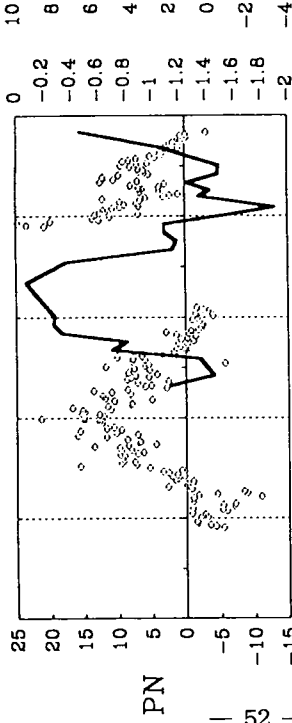
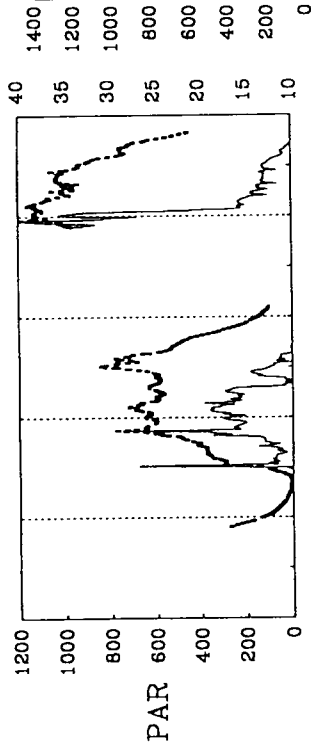


Diagram illustrating the toposequence of a thermokarst in Model Alas Experimental Field.

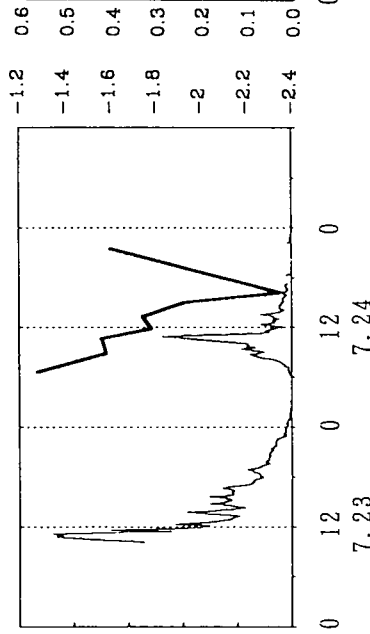
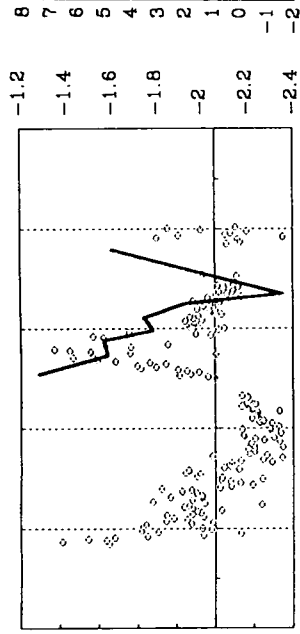
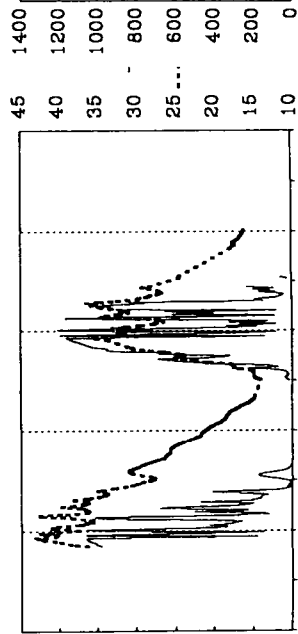
(The vertical scale is enlarged $\times 4$. Legend of AS- indicates a soil profile, and P- is the point of penetration test. Broken lines indicate the depth of active layers.)

図-4 アラス試験地の土壤断面図

Betula platyphylla



Pinus sylvestris



Larix dahurica

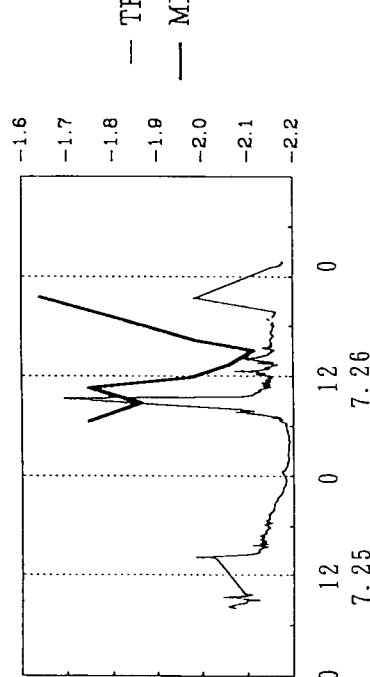
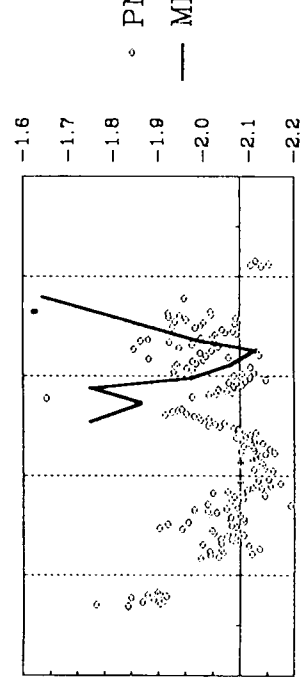
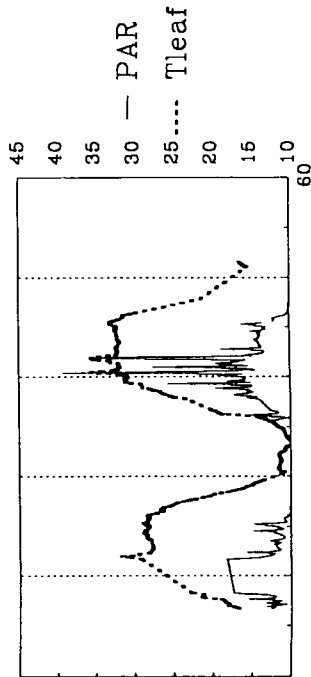


図-5 主要樹種のガス交換能及び木部圧ポテンシャルの日変化

— PAR: 光合成有効放射束密度 ($\mu E \cdot m^{-2} s^{-1}$)

— Tleaf: 葉温 ($^{\circ}C$)

— MPa: 木部圧ポテンシャル (MPa)

○ PN: 光合成速度 ($mgH_2O \cdot dm^{-2} hr^{-1}$)

— TR: 蒸散速度 ($mgCO_2 \cdot dm^{-2} hr^{-1}$)

