

「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」  
平成10年度採択研究代表者

福田 正己

(北海道大学低温科学研究所 教授)

## 「温暖化ガスにかかわる永久凍土攪乱の制御技術」

### 1. 研究実施の概要

永久凍土地域で地表面を覆う植生が、多発する森林火災や伐採で失われている。こうした攪乱により永久凍土の熱バランスが崩れ、凍土の大規模融解が促進される。また森林（タイガ）は地球規模の二酸化炭素収支で、重要な吸収源とされていた。表層の攪乱がタイガの吸収機能を阻害し、また凍土融解で地下のメタンガスが放出される。こうした永久凍土の変質が、大気中の温暖化効果ガス収支へ大きな影響を与え、結果として更なる温暖化を促進するいわゆる正のフィードバック効果が発生する。またシベリアでの天然ガスパイプラインからのガスの漏洩も、また温暖化促進効果を及ぼす。本研究では、こうした永久凍土攪乱によって引き起こされる温暖化効果ガスの発生源を現地観測で特定し、また発生メカニズムを明らかにするためのデータ解析を実施した。さらに今後の変動予測を行い、発生ルートにおける非線形増幅機構を解明する。そういう結果から、対応処置として発生量抑制のための手法を開発する。平成11年度は、シベリアおよび比較のためのアラスカで、各種観測と野外調査を実施した。それらは2000年1月に開催したシンポジウムで成果として公表し、報告書を出版した。また次年度以降も長期現地観測と実験、それらの解析を行い当初の予定通りの成果が得られるものと期待される。

### 2. 研究実施内容

#### 2 - 1 永久凍土攪乱観測班

ヤクーツク近郊の森林および森林火災跡地における熱収支・CO<sub>2</sub>フラックス観測

##### (a) タワー観測システム設置と長期観測

1999年7月、ヤクーツク近郊の2つのサイトに気象およびフラックス観測タワーを建設し、長期観測を開始した。第1サイトは、東シベリアの典型的タイガ植生であるカラマツ林で、これをFサイトと呼ぶ。第2サイトは、第1サイトから約2 km離れた森林火災跡地で、これをBサイトと呼ぶ。Bサイトは1989年に森林火災によって焼失した直径約150mの地区で、現在は草本植生の中にカンバの幼木がまばらにみられる。Fサイトに高さ21m、Bサイトに高さ9mのタワーを建設し、測器を配置した。測定項目と測器は、超音波風速計およびガス分析

計（クローズドパス）を使用した渦相関法による顕熱・潜熱・CO<sub>2</sub>フラックス，4成分放射量，地中熱流量，気温および湿度（Fサイト：5高度，Bサイト：2高度），風速（2高度），気圧，地温および土壌水分（4深度）である。

観測は，7月19日～10月7日までおこなった。この期間中，気象要素の平均値は欠測が少なく，ほぼ完全に収録できた

#### (b) 地表面熱収支解析

渦相関法による潜熱フラックスを使用できなかったため，熱収支式の残差として潜熱フラックスを求めた。熱収支式は以下のとおりである。

$$R_n + G = H + LE + Q_s + Q_l$$

ここで， $R_n$ :正味放射量， $G$ :地中熱流量， $H$ :顕熱フラックス， $LE$ :潜熱フラックス， $Q_s$ :植生層顕熱貯熱量， $Q_l$ :植生層潜熱貯熱量である。Fサイトのみ， $Q_s$ と $Q_l$ を考慮した。

両サイトにおけるアルベド，正味放射量，地中熱流量の季節変化を，Figure 1に示す。森林（Fサイト）のアルベドが火災跡地（Bサイト）より小さかったため，夏季の全天日射量に対する正味放射量の割合は森林で68%，火災跡地で63%であった。しかし地中熱流量は森林で4%，火災跡地で8%であった。これは森林樹冠の被蔭効果と考えられ，日射を直接受ける火災跡地では土壌が多くのエネルギーを吸収することがわかった。

Fサイトにおける8月の熱収支測定結果を，Figure 2(a)に示す。熱収支式の残差として求めた潜熱フラックスは非常に大きく，正味放射量の75%となった。これを蒸発水深に換算すると，測定期間の降水量と比べてはるかに大きいため，この量は過大推定である。この原因として，渦相関法による顕熱フラックスの過小推定が考えられる。Lee（1998）によると，この地域のように風が弱いと，渦相関法で検知できないマスフローによる輸送が卓越する。ボーエン比法による顕熱フラックスを用いて渦相関法による測定値を補正した（Figure 2(b)）ところ，水収支は改善された。これより算定した森林の蒸発散量は，火災跡地の1.5倍であった。10日ごとの期間における熱収支項の比較を，Figure 3に示す。

#### (c) 活動層熱収支解析

地表面における火災跡地の地中熱流量は森林の約2倍と大きいにも関わらず，この期間の活動層厚の増加は両サイトともほぼ同じ（約20cm）であった。この期間に融解した深度における土壌水分（体積含水率）は火災跡地が7%高く，また深度20mの地温は0.4℃低かった。活動層の熱収支解析から，両サイトの地中熱流量の差は，融解潜熱と凍土層への伝導熱量で説明できた。したがって地表面からの供給熱量と共に，土壌水分量が活動層厚を決定する重要な要素であることがわかった。

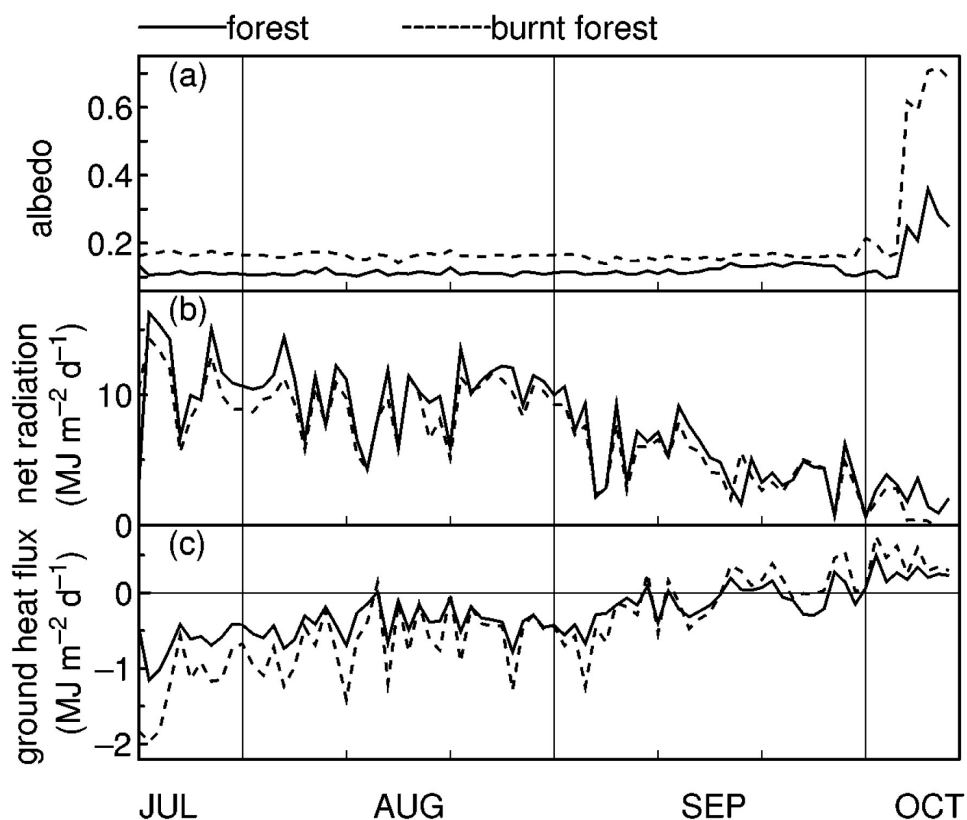


Figure 1. Seasonal changes of (a) albedo, (b) net radiation and (c) ground heat flux in the forest (solid lines) and the burnt forest (broken lines).

(d) CO<sub>2</sub>収支解析

森林におけるCO<sub>2</sub>収支解析をおこない、季節変化を調べた (Figure 4)。光合成によるCO<sub>2</sub>の吸収量は、カラマツが落葉する9月上旬にゼロとなった。夏季のCO<sub>2</sub>放出量は光合成量より小さいが、降雨による土壌水分の上昇時には、一時的に光合成量を上回る放出がみられた。カラマツの落葉後土壌凍結が開始する10月上旬までの期間、CO<sub>2</sub>の持続的放出がみられた。植物の生育期間が短い地域では、この期間のCO<sub>2</sub>放出が年間収支の中で重要であると考えられる。

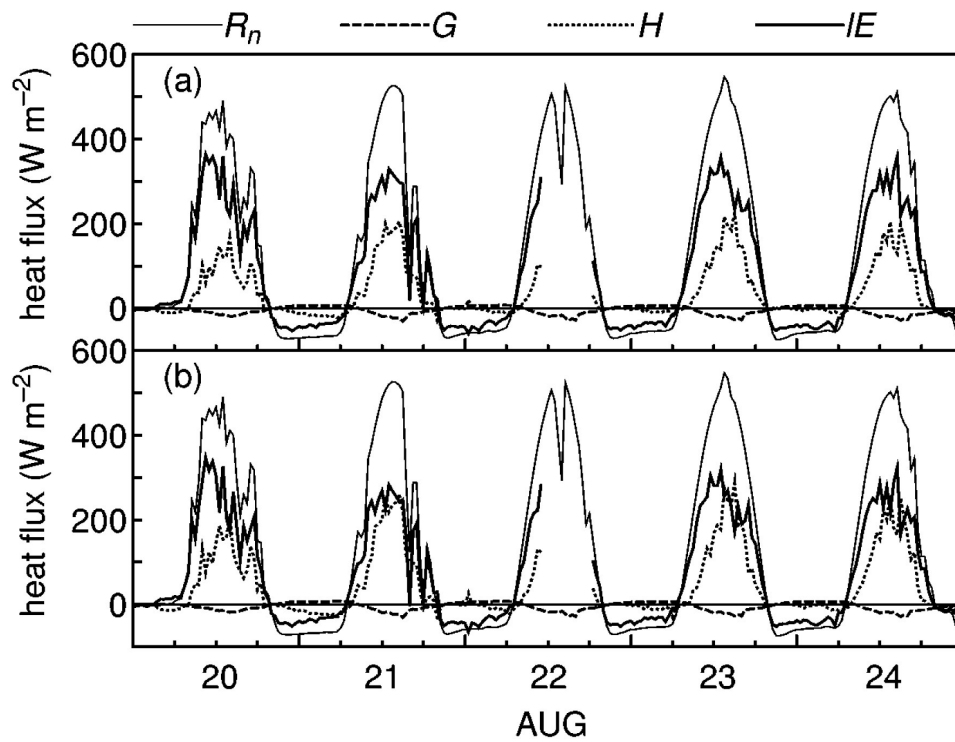


Figure 2. Net radiation ( $R_n$ ), ground heat ( $G$ ), sensible heat ( $H$ ) and latent heat ( $IE$ ) fluxes in the forest from August 20 through 24. (a) measured by the eddy correlation method and (b) corrected by multiplied sensible heat flux. No data was available in daytime on August 22 because of an instrument trouble.

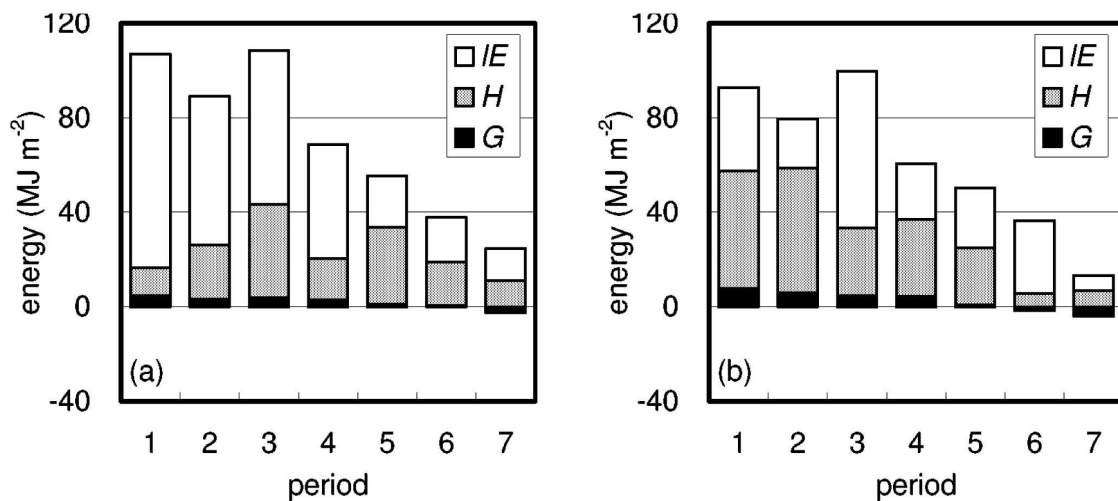


Figure 3. Ground ( $G$ ), sensible ( $H$ ) and latent ( $IE$ ) heat amount totaled in 10-day periods in (a) the forest and (b) the burnt forest. Period 1 begins on July 29 and period 7 on September 27.

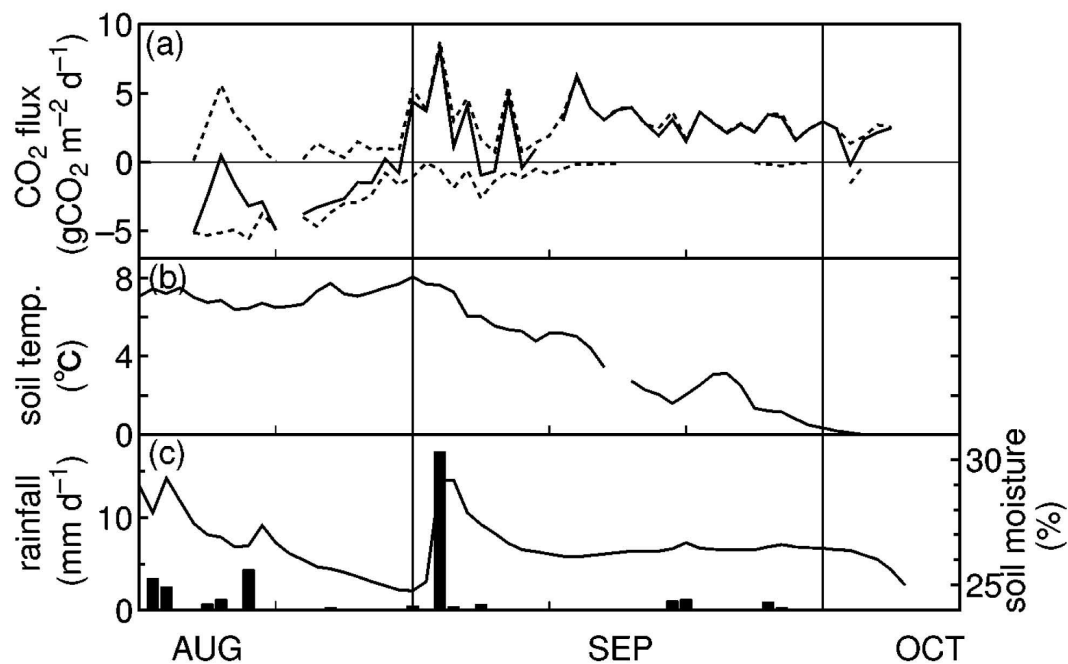


Figure 4. Seasonal changes of (a) CO<sub>2</sub> flux, (b) soil temperature at 0.05 m and (c) rainfall and volumetric soil moisture content at 0.05 m in the forest. The solid line represents daily total value and the upper and the lower broken lines daily total of positive and negative CO<sub>2</sub> fluxes in figure (a), respectively.

## 2 - 2 森林動態調査班

【目的】シベリア凍土地帯における森林に及ぼす火災の影響を明らかにするため、凍土地帯に広く分布するカラマツ林の森林火災後の回復過程を、植生・バイオマスの動態、土壌の理化学性・化学性の変化、森林生態系の炭素循環から解明することを目的とする。今年度は現存量推定、植生の実態把握、土壌呼吸量を明らかにするため以下の項目を調査した。これらの結果から調査地の炭素収支を推定した。

- 1．森林火災後の経過年数が異なるカラマツ林の現存量の推定(調査地ケンケメ)
- 2．森林および隣接する草地の土壌水分・植生比較(ネレガル)
- 3．森林火災跡地、未攪乱カラマツ成熟林での地温と土壌呼吸量(ケンケメ)
- 4．森林火災跡地、未攪乱カラマツ成熟林での土壌微生物呼吸量(実験室)

調査地位置：ケンケメ(62°13'N 129°11'E) ネレガル(62°18'N 129°30'E)

### 【方法】

- 1．林齢がおおよそ25, 50, 120年生, および成熟林(林齢230年生以上)の4林分の毎木調査を行った。それらの結果から, 相対成長関係による推定法, あるいは標準木法を用いて, 地上部各器官量(幹, 枝, 葉)の推定を行った。

また2箇所の林分において、小枝リタ - の採集と、葉リタ - の分解調査を行い、地上部純一次生産量の推定と、葉リタ - の分解速度を測定した。

2．カラマツ成熟林からアラス草地中心の池までの帯状調査区に連続方形区を設定し、Braun-Blanquet法で植生調査を行った。土壌水分は表層厚さ7cm部分のFDRによる平均体積含水率である。

3．クローズドチャンバー法で赤外線ガス分析計により測定した。土壌断面調査で採取した試料についてはC Nコードにより炭素含量を測定した。

4．土壌微生物呼吸量は土壌試料を日本に持ち帰り、実験室内で培養法により測定した。

#### 【結果と考察】

##### 林分の地上部現存量

推定された地上部器官量は表 - 1 の通りである。

表 - 1 地上部器官量

器官量 \ 林 分	25年生	50年生	120年生	成熟林
幹 (t/ha)	15.09	26.90	128.08	123.15
枝 (t/ha)	2.97	2.32	17.55	13.35
	5			
葉 (t/ha)	1.83	1.50	3.95	2.71
	5			
合計 (t/ha)	19.89	30.71	149.58	139.22

\* 林齢230年以上。

これまで報告されたヤク - ツク周辺におけるカラマツ林の現存量と比較すると、およそ140～150t/haが、最大の地上部現存量といえるようである。また、比較的成長が良好な場合、120～130年生で最大現存量に達し、その後は長い期間比較的大きな現存量を保つ傾向があるようである（図 - 1）。120年生林の蓄積は230m<sup>3</sup>/ha前後である。葉量に関しては、120年生林における3.95t/haというのは、ヤク - ツク周辺で報告されたものとしてはほぼ最大である（図3 - 1）が、現存量が100t/ha以上の林分でも、多くの林分の葉量は2.5t/ha以下であり、葉量分布の中心は1.5～2.5t/haにあり、カラマツ林としては小さい傾向が認められる。

器官ごとの炭素量は、器官に関係なくほぼ500mg/gであるので（Schulze et al., 1995）、120年生林の木質現存量145.63t/haは、約270tCO<sub>2</sub>/haの二酸化炭素固定量にあたる。

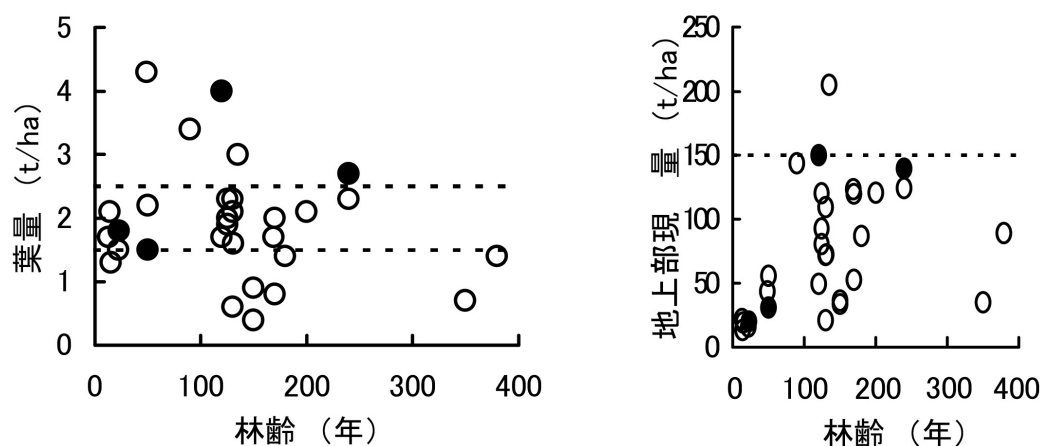


図3 - 1 現存量と葉量（黒丸が今年度の調査データ）

### 植生調査

森林内の植生については1997年に既に調査しているのので、今回は林縁からアラス草地の池までの帯状区を設定し、木本種と草本種についてBraun-Blanquetのコードラート法により調査した。立地条件に対応した優占種及び標徴種を表 - 2、表 - 3 にまとめた。

表 - 2 林内、林縁、草地の優占種、標徴種

Site	Dominant species・Characteristic species
林内（20）	Vaccinium vitis-idea( コケモモ ), Vaccinium uliginosum( クロマメノキ ), Pyrola incarnata ( ベニバナイチヤクソウ )
林縁（39）	Limnas sterelli（リムナス属）, Spiraea media（エゾシモツケの基本種）, Fesdtuca sp.( ウシノケグサ属 ), Artemisia rupestris( ヨモギ属 ), Calamagrostis lapponica（ノガリヤス属）, Poa pratense（ナガハグサ）, Vicia amoena（ツルフジバカマ）, Geranium pratense（フウロソウ属）, Sanguisorba officinalis（ワレモコウ）, Trifolium lupinaster（シャジクソウ）
草地（34）	Elytrigia repens（シバムギ）, Calamagrostis langsdorffii( イワノガリヤス ), Galium verum( エゾノカワラマツバの基本種 ), Potentilla anserine( キジムシロ属 ), Thalictrum simplex（カラマツソウ属）, Potentilla stipularis（キジムシロ属）, Achillea millefolium（セイヨウノコギリソウ）, Inula britannica（オグルマの基本種）, Artemisia integrifolia（ヒロハヤマヨモギ）, Crepis tectrum（フタマタタンポポ属）, Taraxacum ceratophorum（タンポポ属）, Silene repens(カラフトマンテマ), Anemone silvertris（イチリンソウ属）, Lychnis sibirica(センノウ属), Myosotis suaveolens（ワスレナグサ属）, Saussure amara（トウヒレン属）
共通（4）	tVicia craca（クサフジ）, Artemisia tanacetifolia（ヨモギ属）

注 ) ( ) 内の数値は出現種数、二重下線は林内・林縁に出

表 - 3 土壌水分との対応

土壌水分	優占種・標徴種
乾性	Galium verum, Potentilla stipularis, Achillea millefolium, Silene repens, Anemone silvertris, Poapratensis, Lychnis sibirica, Myosotis suaveolens, Saussure amara
湿性	Calamagrostis langsdorffii, Potentilla anserina, Carex vesicaria( オニナルコスゲ ) , Inula britannica, Armoracia sysimbrioides ( アルモラキア属 )

### 土壌呼吸

カラマツ林焼失地、未攪乱カラマツ林とも、土壌呼吸は地温が高いほど高かったが、カラマツ林焼失地では、未攪乱カラマツ林地に比べ、土壌呼吸は有意に低下していた。カラマツ林焼失地では、未攪乱カラマツ林地よりも土壌微生物呼吸速度が高く、これは焼失地の地温が高かったことと、火災により土壌へより多くの有機物供給が生じたことが原因であると考えられた（表 1）。植生が失われたカラマツ林焼失地点における土壌呼吸は、微生物呼吸のみであるが、未攪乱カラマツ林地点では、85%以上が根呼吸により生じていた（表 1）。以上から、カラマツ林焼失地において土壌呼吸が低下した原因は、根呼吸がなくなったためであると考えられる。

土壌植物系が大気から正味に吸収する炭素量（NEP）は、純一次生産量と微生物呼吸量の差として得られる。年間の微生物呼吸量を求めるために、まず、土壌呼吸速度と地温の関係を用いて、年間の地温変化から土壌呼吸速度の変化を推定し（図 1 C, D）これを積算して年間の土壌呼吸量を求めた。その結果未攪乱カラマツ林では2.89 tC/ha/yであったのに対し、カラマツ林焼失地では1.18 tC/ha/yだった。土壌呼吸における微生物呼吸量の占める割合を年間一定とすると、微生物呼吸量は未攪乱カラマツ林では0.38 tC/ha/y、カラマツ林焼失地では1.18 tC/ha/yと見積もられた。

表 1 2 地点における炭素含量と土壌呼吸に対する微生物分解および根呼吸の寄与率

地点	層	炭素含量		土壌呼吸に対する微生物分解の割合	土壌呼吸に対する根呼吸の割合
		%	tCha <sup>-1</sup> *	%	%
Cont (未攪乱カラマツ林)	有機質層	33	10.3	2.5	-
	鉱質層	1.18**	35.5	10	-
	合計		45.8	12.5	87.5
S92 (カラマツ焼失地)	鉱質層	2.93**	51.4	100	0

\* : 土層 1 m までの値    \*\* : 鉱質層の最表層



また、バイオマス調査から未攪乱カラマツ林の純一次生産量は1.67 tC/ha/y、カラマツ焼失地での純一次生産は0.3 tC/ha/yであった。

以上をまとめたものが、図3 - 2である。未攪乱カラマツ林では1.3 tC/ha/yの炭素が大気から吸収され、カラマツ林焼失地点では0.9 tC/ha/yの炭素が大気へ放出されていた。森林火災によりカラマツ林内の炭素循環は大きく変化し、カラマツの焼失により森林生態系は大気へのCO<sub>2</sub>ソースとして振る舞うような変化が認められた。

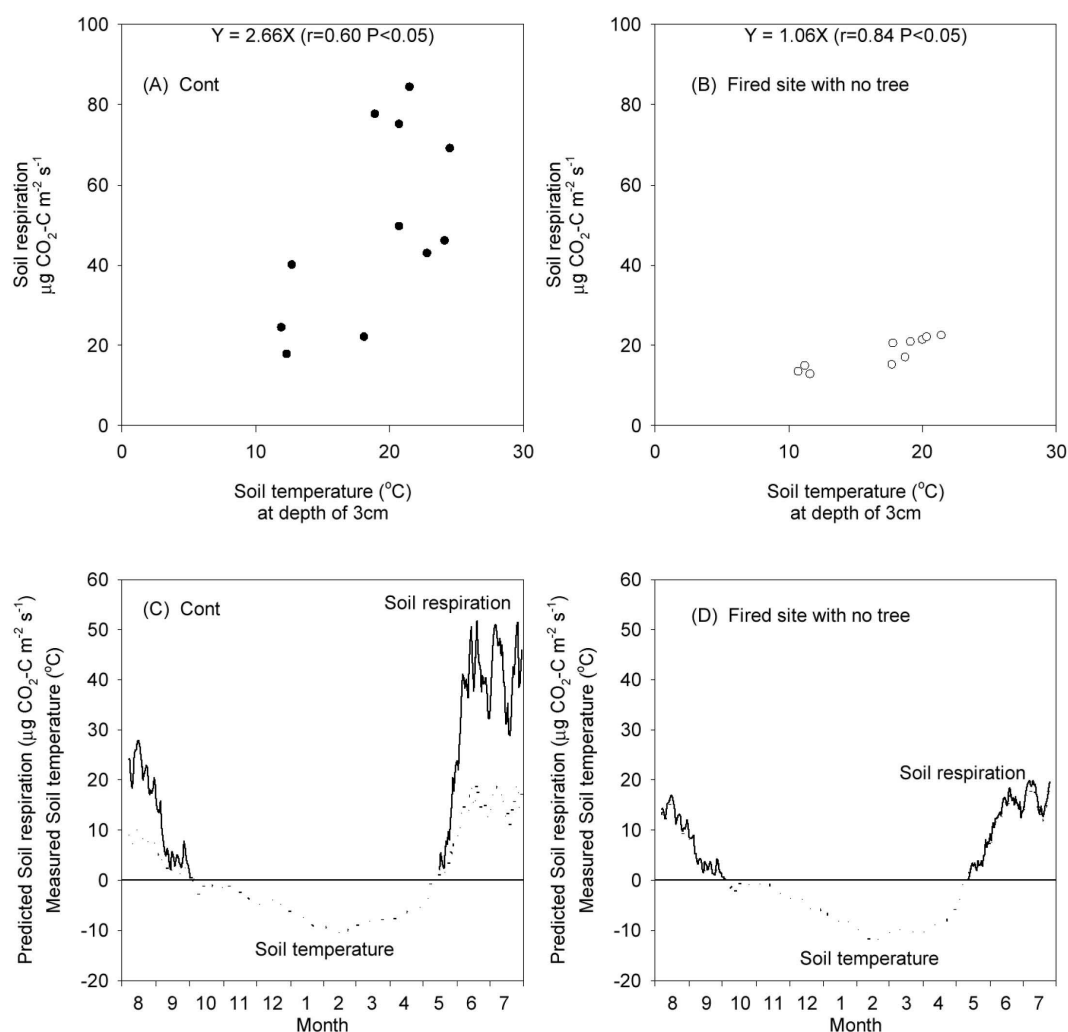


図3 - 2 呼吸量測定結果

## 2 - 3 インフラ実験班

### アラスカ州フェアバンクス野外実験施設建設

平成10年度の実験サイト調査の結果、永久凍土の存在・実験諸設備・実験管理運営等の諸条件から、野外実験はアラスカ州フェアバンクス市から北東に10 km 程の距離にあるNorthwest Alaskan Pipeline がかつて類似の実験を準備した場所を実験サイトとして内定していた。

本年度はボーリング調査により永久凍土と季節凍土の境界を確認し、この境界を横断するよう、パイプの最終設置場所を決定した。

永久凍土の境界をパイプが横断する必要性は、当所の研究目的である「パイプラインに負の温度のガスを流した場合、その周囲地盤が凍結し凍上が起きる。この際最も過酷なパイプストレスを実物大で把握する」ためである。すなわち、パイプは永久凍土側で固定され、季節凍土側で凍上に伴う変位を受け、その境界面近傍で最も大きな曲げ応力を受けると考えられるためである。

このような経緯から実験計画が検討され、以下に示すようなパイプの埋設位置、地盤およびパイプの温度計測位置、パイプの鉛直変位、パイプ直下地盤の凍上量等の計測位置が決定され、平成11年11月から12月にかけて施工された。

施工は突発的な現地施工コストの高騰により1ヶ月ほど遅れたが、最終的には関係機関の協力により完了し、12月11日から実験が開始された。

以下に各種設置状況の概要を記す。

#### 1) パイプの埋設状況

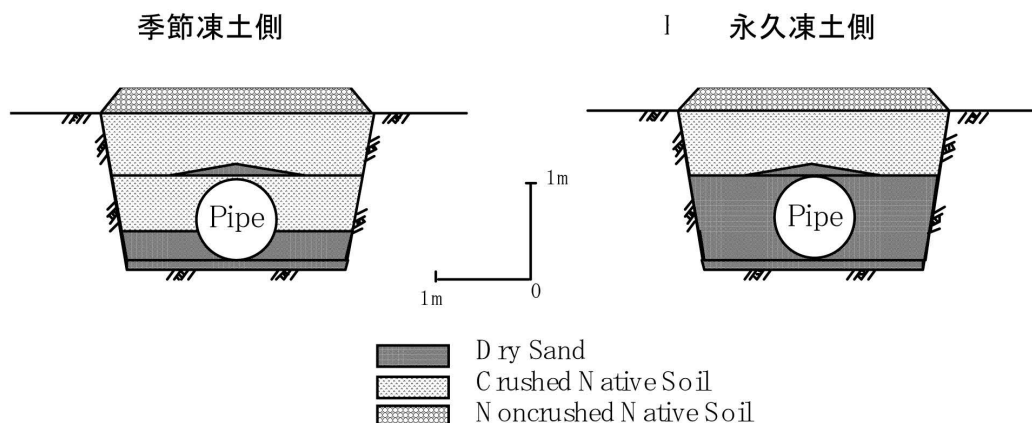


図4-1 パイプの埋設状況（長手方向断面図）

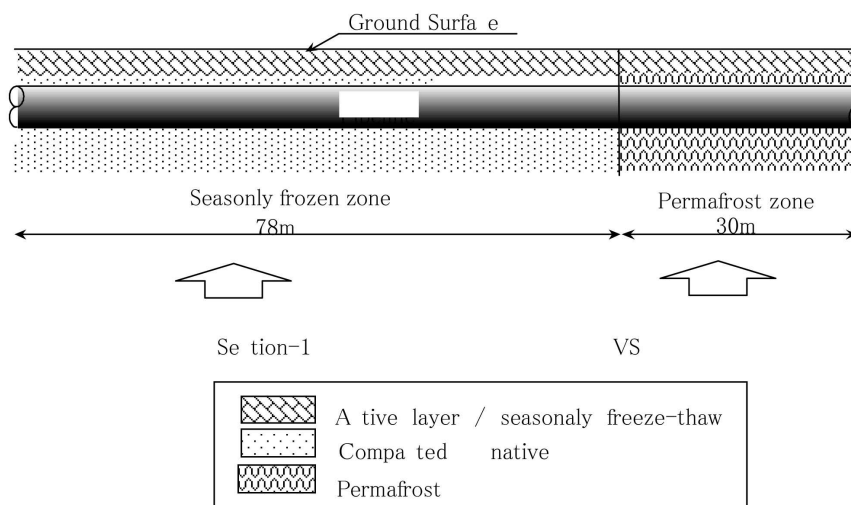


図4-2 パイプ埋設状況（横断方向垂直断面）

### 3 . 主な研究成果の発表（論文発表）

早坂洋史「タイガでの森林火災の現状と地球環境問題」

日本機械学会誌102巻972号 平成11年11月5日掲載

- Proceedings of Symposium on the Joint Siberian

Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999 -

Trend of Spatial Distribution of Larix Trees with Stand Growth in Eastern Siberia

Y.Tsuno, M.Shibuya, K.Takahashi, R.Hatano, T.Sawamoto, A.P.Isaev, A.V.Kononov  
and T.C.Maximov .....16

Vegetation Mapping of Yakutsk Forest for Different Scale Satellite Images G.Takao,  
K.Kushida, T.C.Maximov and A.V.Kononov .....69

Nineteen Years History of Disturbance on a Khabarovsk Forest Detected by  
LANDSAT Images G.Takao .....72

Characteristics of Ground Vegetation at Neleger Alas K.Takahashi, R.Hatano,  
M.Shibuya, T.Sawamoto, G.Yamamoto, Y.Tsuno, A.P.Isaev and T.C.Maximov  
.....77

Componential Spectral Characteristics of Larch and Pine Communities in Eastern  
Siberia K.Kushida, G.Takao, M.Fukuda, T.C.Maximov and A.V.Kononov .....90

Techniques for Recording Rodents in the Boreal Forest, near Khabarovsk T.Koizumi,  
K.Takahashi, H.Hasegawa, M.Shibuya, R.Hatano, L.G.Kondrashov and  
A.P.Sapozhnikov .....98

Comparative Studies of Soil Fauna between a Felling Site and an Unfelling Site in the  
Khabarovsk Suburbs M.Hasegawa, T.Koizumi, K.Takahashi, M.Shibuya, R.Hatano,  
L.G.Kondrashov and A.P.Sapozhnikov .....104

Effect of Forest Fire on Physico-Chemical Properties of Taiga Permafrost Soils, near  
Yakutsk, Russia R.Hatano, T.Sawamoto, R.M.Desyatkin, A.P.Isaev, K.Takahashi,  
M.Shibuya and T.C.Maximov .....111

Methane Uptake of Forest Soil near Khabarovsk T.Morishita, R.Hatano, O.Nagata,  
K.Takahashi, M.Shibuya, A.P.Sapozhnikov and L.G.Kondrashov .....154

Measurements of Methane Flux at a Burnt Forest in West Siberia: Preliminary  
Results T.Nakano, M.Fukuda, M.Utsumi and G.Inoue .....160

Energy and CO<sub>2</sub> Budgets over Burnt and Unburned Larch Forests in East Siberia  
T.Machimura, G.Iwahana, M.Fukuda, S.D.Chambers and A.N.Fedorov .....165

Seasonal Variations of Heat, Water Vapor and CO<sub>2</sub> Fluxes in West Siberian Wetland  
K.Shimoyama, G.Inoue, Y.Fukushima and T.Hiyama .....171

Forest Fires in Boreal Forest - In Case of Alaska Taiga H.Hayasaka, M.Shinohara and

K.Kudo .....	222
Effect of Forest Fire on Carbon Cycling in Taiga Soil-Plant System, near Yakutsk T.Sawamoto, R.Hatano, M.Shibuya, K.Takahashi, A.P.Isaev and T.C.Maximov .....	230
Outline of the Modeling of Forest Fire Effect on CO <sub>2</sub> Cycle in Siberia, and an Example of the Computational Result T.Chikahisa, Y.Hishinuma and H.Nagaoka .....	237
The Role of the Siberian Region in the CO <sub>2</sub> Anomaly in 1998: An Estimation by the Global Carbon Cycle Model of Terrestrial Ecosystems A.Ito and T.Oikawa .....	242
Deep Resistivity Structure of Permafrost Area in Siberia by Transient Electromagnetic Method K.Wada, K.Harada and M.Fukuda .....	264
Dynamics of the Vertical Distribution of the Aerosol Number Concentration over West Siberia (1997-1999) M.Yu.Arshinov, B.D.Belan, G.Inoue, T.Machida, A.I.Nadeev, M.V.Panchenko and A.P.Plotnikov .....	275
Variations of Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration over Siberia T.Machida, T.Nakazawa, G.Inoue, S.Maksyutov, N.Vinnichenko, M.Panchenko, M.Arshinov and N.Fedoseev .....	294
Flux Measurements of Greenhouse Gases by the Aircraft over the Kushiro Bog K.Yazawa, T.Tamaru, T.Tagashira, T.Sakai G.Inoue, S.Maksyutov and T.Machida .....	300
Information Content and Inverse Task for Lower Troposphere CO <sub>2</sub> Profile Retrieving from Ground Based FTS Measurements of Direct Solar Radiation G.Inoue and M.Yu.Kataev .....	306
Long-Range Transport Simulation of Emitted Materials on Frostfire Experiment H.Hatsushika, Y.W.Kim and K.Yamazaki .....	314
Climate in Summer Season around Yakutsk in Siberia K.Kimura, T.Machimura, G.Iwahana, M.Zaiki, M.Akiyama, K.Kushida, Y.Komata and M.Fukuda .....	319