

「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)

## 「温暖化効果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

温暖化効果ガスの発生状況を掌握するために、二酸化炭素及びメタンガスについての現地観測をシベリア各地で実施した。まず東シベリア・ヤクーツク地域では、典型的なタイガ内で攪乱の影響を受けていないと考える森林と、過去において明らかな森林火災の影響を受けた地域で、各々高さ21mと7mの観測タワーを設置し、大気・森林の熱及び水収支変動、及びCO<sub>2</sub>の吸収及び放出についての連続観測を実施した。これに関連し、永久凍土上部の活動層の変動とそれに影響を与える表層有機層の熱的性質などを現地観測を実施した。森林が攪乱を受けることで、表面熱収支の変動が発生し、その結果として永久凍土の融解が進行する過程についての、基礎データを収集することが出来た。既に攪乱によって変動を受けた地域では、電磁気探査手法を適用し、過去に起こった大規模な融解とその後の永久凍土回復の履歴が、凍土内に残存することを明らかにした。

凍土を覆う森林が貯留する炭素とその放出過程を明らかにするために、森林動態班は昨年に続いて、タイガ各地での現地観測を実施し、火災等の攪乱による炭素蓄積量変動を定量化した。また表層土壌からの呼吸によるCO<sub>2</sub>放出が、葉からの呼吸量を超えることが明らかになった。これと併行して、衛星画像を用いた森林攪乱とその回復過程の現地及び衛星画像解析が実施された。森林内及び周辺の湿原でのメタンガス放出の観測が、西シベリアで比較検討された。その周辺上空での大気化学観測との比較から、夏季のCO<sub>2</sub>とメタンガスの放出量が推定された。変動予測モデルとして、火災によるエアロゾル放出と拡散の予測が、関連地域のアラスカでの事例を挙げ、そこでの数値予測モデルをシベリアに適用する試みもなされた。制御技術開発では、森林火災発生モデルの構築と火災によるダメージの評価見積もりモデルが検討された。対応した事例としてアラスカ・カナダでの情報収集を実施した。

永久凍土地域からの温暖化効果ガスの発生制御で、大きな比率を占める天然ガスパイプラインからの漏洩を抑制する技術開発のために、アラスカ・フェアバンクス郊外に設置した実規模のパイプライン実証実験では、年間を通じた観測が行われ、パイプに作用する力の大きさと方向とが新たに得られた。これに基づく応力解析を

実施している。

## 2．研究実施内容

### 2 - 1 永久凍土攪乱観測班

平成12年5月から10月の期間、ヤクーツク北西25kmの Nereger において現地調査観測をおこなった。今年度は、森林および森林火災跡地の水・熱収支季節変化の観測、森林および森林火災跡地の CO<sub>2</sub>年間収支の観測、融解深分布の調査と活動層熱収支解析を目的とした。

#### 森林と火災跡地の熱・水収支季節変化

観測上の問題として、熱収支が閉じない問題がある。渦相関法による潜熱・顕熱フラックスの合計と有効エネルギーを比較すると、風速が小さく、乱流混合が弱い場合に熱収支が閉じない傾向が見られた。風速以外の気象条件が相似の観測データを比較したところ、渦相関法から計算したボーエン比は風速によらず相似であったため、これを利用して熱収支が閉じるように顕熱・潜熱フラックスに比例配分する補正法が有効であると考えられる。

次に、熱・水収支の季節変化を解析した。顕熱フラックスは、森林、火災跡地ともに6月中旬にピークとなり、その後は漸減した。潜熱フラックスは植物の生長とともに増加し、7月中旬にピークとなったが、その出現時期は森林のほうが若干早かった。その後は蒸散の低下とともに、9月中旬にはピーク時の80%、9月にはほぼ0に減少した。

3ヵ月間の活動層水収支を解析した。降水量、蒸発散量、活動層土壌水分変化は観測値を用い、活動層融解による水分供給は過去の報告を参照した。降水および融解による水供給は蒸発散と土壌水分変化による水分消費とほぼ一致し、水収支は閉じることがわかった。

#### 森林および森林火災跡地の CO<sub>2</sub>年間収支

観測された生態系 CO<sub>2</sub>収支を生態系光合成と生態系呼吸に分離するため、夜間の渦相関法による CO<sub>2</sub>フラックスから呼吸速度推定をおこなった。森林において、呼吸速度は気温の一次関数として推定できた。火災跡地においては、呼吸速度は地温の指数関数で近似され、さらに土壌水分によって係数が異なることがわかった。生態系呼吸の成分として、森林では樹木の呼吸、火災跡地では土壌呼吸が優占するため、このような環境要因に対する呼吸速度の応答の差が生じたと考えられる。また過年度に、森林において呼吸速度の風速依存が観測されたが、これは弱風時の森林内気層への CO<sub>2</sub>蓄積が原因であることがわかった。

気温、地温、土壌水分から推定した生態系呼吸と渦相関法による生態系 CO<sub>2</sub>収支測定値の差を生態系光合成量として、それらの季節変化を調べた。森林で

は6～8月にCO<sub>2</sub>を吸収したが、火災跡地では吸収は7月のみであった。冬季間(10～4月)の生態系CO<sub>2</sub>収支を0と仮定し、年間CO<sub>2</sub>収支を計算した。森林では約1100gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>の吸収、火災跡地では約130gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>の吸収で、森林火災によって生態系CO<sub>2</sub>吸収能力が著しく低下することがわかった。生態学的手法による過去の年間収支の報告と比較すると、森林と火災跡地の差は同程度であったが、絶対値としては本研究の吸収が約500gCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>過大であった。この原因として、夜間のフラックスの過小評価、冬季間のCO<sub>2</sub>放出が考えられる。これを評価するため、現在チャンバ法によって冬季間のフラックス測定を継続している。

#### 融解深分布と活動層熱収支解析

森林、火災跡地ともに、4月下旬に融解が開始し、8月中旬に最大深度に達した。表面からの再凍結は、10月初旬から始まった。土壌水分は、6月中旬までは両地点とも全層が飽和していたが、森林ではその後飽和度が低下した。火災跡地では前年の凍結時の水分が多かったため、表層を除いて常に飽和であった。8月中旬に融解深分布の調査をおこなった。融解深平均値は森林が104cm、火災跡地が112cmで、差はわずかであった。一方、融解深の標準偏差は15および18cmで、最大値と最小値の偏差は両地点とも80cm以上であった。このように、融解深は森林と火災跡地の差よりも、それぞれの地点内のばらつきが大きかった。森林において、地表状態と融解深の関係を調べたところ、コケモモなどの地表植生が厚い地点は、地表植生がない地点より融解深が有意に浅かった。このことから、地表植生の熱的特性が凍土融解に影響することが示唆された。

地表からの加熱、活動層の貯熱、凍結融解潜熱、下方の凍土層への熱伝導を考慮した活動層の熱収支解析をおこなった。地表からの加熱は8月まで継続し、9月からは放熱に変化した。6月までの融解深が急激に増加する時期では、火災跡地の融解潜熱が森林よりも大きかった。樹冠被覆がないため火災跡地の地表からの加熱は森林より大きい。この差は融解潜熱の差でほぼ解消され、他の要素には大差なかった。これは火災跡地において、前年凍結時の含水率が高かったため、融解に大きな熱量を要するためと考えられる。

### 3 - 2 - 1 森林動態調査班(バイオマスチーム)

#### 調査の目的と方法

ネレゲル試験地の事前調査

ネレゲル成熟林の試験予定地を5mメッシュの100プロットに分割し、Braun-Blanquet法により全プロットの植生調査を行った。

試験予定地の林分バイオマス及び養分量の推定

二酸化炭素収支の基礎資料として、毎木調査とサンプル木の器官量配分の測定、サンプリングプロットでO<sub>1</sub>層（落葉部分）、O<sub>2</sub>層（腐植部分）の厚さと乾物重量、林床の植生量・落枝量の測定をし、リターバッグ、リタートラップの設置を行った。

#### 修復プロセスの評価

ケンケメの火災履歴の異なる林分について固定調査地の継続調査とリターバッグ、リタートラップの設置を行った。

#### 結果

林床植生は、タワー設置場所等を除く91プロットにはコケモモが圧倒的に優占し、被度 IV 以上のプロットが7割以上を占めていた。木本は高木類が4種、灌木類が6種、草本は35種、蘚苔類は15種が確認された。また、今年は当年性のカラマツ実生が多数芽生えており、プロット平均85本/m<sup>2</sup>、最高本数は424本/m<sup>2</sup>であった。プロット単位の植生種数は4～18、コケモモの被度 V のプロットでは少なかったが、被度 I～IV では違いが見られなかった。林床のバイオマス関係は表1に示す。O<sub>1</sub>層は3cm前後と浅く、O<sub>2</sub>層は融解表層の凹凸を反映して4.3～11.5cmの幅があった。

表1 . L・H 層の厚さと土壌表層の乾物量

	厚さ (cm)		乾物量 (kg/m <sup>2</sup> )			
	O <sub>1</sub> 層	O <sub>2</sub> 層	O <sub>1</sub> 層	O <sub>2</sub> 層	植生量	落枝量
平均	2.9	9.0	0.50	3.47	0.20	1.69
Min・Max	2.0-3.5	4.3-11.5	0.34-0.65	2.35-4.90	0.05-0.63	0.53-3.71

これらの林床調査をもとに試験プロットを設定した。

ケンケメでも同様の林床調査を120年生林分、25年生林分でも行った。

ネレゲルの試験予定地、ケンケメの120年生林、新たに対照区として設定した成熟林における毎木調査の結果を下表に示す。

	胸高直径 m	樹高 m	密度 本/ha
ネレゲル成樹林	11.1	10.4	1640
	0.2 - 36.3	1.4 - 20.5	
ケンケメ120年生林	7.4	9.7	5903
	3.7 - 13.5	4.8 - 14.6	
ケンケメ成樹林	15.8	13.6	1120
	1.0 - 38.7	2.1 - 20.7	

ネレゲル成熟林、120年生林、25年生林のサンプル木で測定した器官量配

分は、立木の個体サイズが大きくなるほど幹の比率は大きく、葉の比率が小さくなる傾向を示した。枝、樹皮の比率はサイズの違いによる差はほとんどみられず、サイズ依存性が小さい。

林床のO<sub>1</sub>層、O<sub>2</sub>層の有機物集積量は65～100t/haであり、サイズの大きい林分で大きく、植生量はコケモモの被度の大きいネレゲル成熟林が多くなっている。落枝量は林分間で差が認められなかった。

有機物層のC/N比の平均値は、カラマツの葉よりやや大きい31～35であり、3林分間の差は認められなかった。

純生産量は120年生林が多く、6.5t/ha/yearであった。この値は亜寒帯常緑針葉樹に比べ小さい値となっている。C増加量は120年生林で約3t/ha、25年生林で約2.5t/ha、成熟林が最も少なく2t/ha以下であった。

N増加量は120年生林で最も多く、約70kg/haであった。各林分ともN増加量の80～90%は葉に含まれている。

### 3 - 2 - 2 森林動態班（土壌チーム）

#### ヤクーツクの永久凍土地域における窒素循環の特徴

「背景と目的」 土壌生態系の窒素動態は、生態系内の内部循環 - 植物吸収、リターフォール、有機物の分解による無機化とその再吸収 - と、大気からの流入および土壌からの流出によって構成される。そして、窒素負荷は、地域あるいは地球的な環境、すなわち富栄養化、酸性化、温暖化に影響を与える。農業活動は施肥あるいは家畜の放牧によって、しばしば窒素負荷を増大させている。森林火災は植生の燃焼によって内部循環系を破壊することによって、窒素負荷に影響を与えるだろう。本研究では、森林、森林火災地、および農耕地における窒素負荷量を評価することを目的とした。

「調査地点」 ヤクーツク（62 .13N, 129 .10E）のケンケメ、ネレゲル、アラスにおいて、カラマツ森林4地点、火災地2地点、農地10地点を調査した。すなわち、カラマツ森林は、ネレゲルローム質土壌200年生以上の林分、ケンケメ砂質土壌の25、120、および200年以上の3林分において調査を行った。火災地は、1992年に火災を受けたケンケメにおいて、農地はヤクーツク市から北東70 - 90kmにある7つの村において行った。

「窒素フロー見積の方法」 窒素収支の項目は以下の通りである。湿性および乾性降水物、植物吸収、化学肥料、リターフォール、堆肥施用、家畜放牧、無機化、アンモニア揮散、脱窒、窒素固定である。湿性および乾性窒素降水物は、ネレゲル森林サイトにおいて、降水サンプルを採取して測定した。森林および火災地の植物吸収・リターフォールの窒素フローは実測したが、農地におけるそれは聞き取り調査から見積った。施肥および家畜の放牧による窒素フ

ローについても聞き取り調査から見積った。アンモニア揮散は堆肥の10%とした。無機化は有機物インプットに対する有機物分解の比率から見積った。窒素固定あるいは脱窒は生態系のインプットとアウトプットの収支とした。

「結果と考察」 大気からの窒素降下物量は0.22kgN/ha/yであり、これは日本平均値の40分の1であった。120日間の放牧による家畜の排泄物によって2kgN/ha/yの窒素が土壌に供給されていた。化学施肥は用いられておらず、平均で5.1kgN/ha/yの堆肥が施与されていた。カラマツによる窒素吸収は15~32kgN/ha/yであったが、これは若い林分で大きかった。火災地の植物吸収は5~6kgN/ha/yであり、作物吸収は平均で17kgN/ha/yであった。窒素固定量の平均値は、森林で13kgN/ha/y、農地で12kgN/ha/y、火災地では脱窒量が2.2kgN/ha/yと見積られた。以上から、タイガ森林では主に窒素固定と植物吸収によって窒素循環が形成されていた。農業活動は、堆肥施肥と家畜放牧によって窒素循環を維持していた。しかしながら、森林火災によって植物吸収および窒素固定量といった窒素循環量が減少し、窒素負荷が増加していた。

ヤクーツクにおける森林火災が森林土壌生態系の純生態系生産 (NEP) に与える影響

「背景と目的」 森林生態系では、植物の光合成、地上部・地下部(根)の呼吸、土壌有機物分解が主要なCO<sub>2</sub>のフローである。森林土壌の純生態系生産 (NEP; net ecosystem production) は純一次生産量 (NPP; net primary production) と土壌の有機物分解量 (OMD; organic matter decomposition) の差として計算される。森林火災は、これらのCO<sub>2</sub>フローを大きく変化させると思われる。本研究では、年間土壌呼吸量とその有機物分解量の割合、NPP および NEP を、ロシアヤクーツクの成熟林および火災を受けた地点において見積ることを目的とした。

「材料と方法」 調査地点は、ケンケメおよびネレゲルの砂質土壌3地点・ローム質土壌2地点である。砂質土壌では カラマツ成熟林(200年以上) 火災荒地(5年目) カラマツ再生林(25年生) ローム質土壌では カラマツ成熟林(200年以上) 火災荒地(5年目)において調査した。測定項目 土壌呼吸(チャンバー法)および地温(3cm深) 土壌呼吸に対する有機物分解量の見積(培養法による) 年間地温の測定(ロガーによる) バイオマス現存量とNPP。

「結果と考察」 土壌呼吸と地温には有意な相関が認められた。土壌呼吸は、火災地で有意に低下し、カラマツ再生林分では成熟林分と同程度の値を示した。その関係式と年間地温のデータを用いて年間土壌呼吸量を推定した。ただし、地温が0以下では土壌呼吸はゼロと仮定した。年間土壌呼吸量(kgC/ha/y)

は、砂質土壌成熟林2619、砂質土壌火災地1589、砂質土壌再生林分2528、ローム質土壌成熟林2511、ローム質土壌火災地208であった。土壌呼吸に対する有機物分解量を見積った結果、カラマツ成熟林および再生林で70%以上と高かった。このため、火災地の土壌呼吸の低下は根呼吸低下のためと判断された。NPP (kgC/ha/y) は、砂質土壌成熟林1246、砂質土壌火災地302、砂質土壌再生林分2843、ローム質土壌成熟林1813、ローム質土壌火災地338であった。以上から計算した、NEP (kgC/ha/y) は森林火災によって大きく変化した。すなわち、砂質土壌の地点において、成熟林は+958であったが、火災後-1287に低下し、再生中の林分では+2211に増加した。ローム質土壌の地点は、成熟林で+1436であったが、火災地では+130まで低下した。このように、森林火災は炭素循環過程に大きな影響を与えている。

#### ヤクーツク近郊の森林 - アラス生態系からの CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O フラックス

「目的」 シベリアにはアラスと呼ばれる沼を伴う草地が森林に点在している。アラスは森林火災による凍土の融解と関係があると言われているが、森林火災によってアラスが形成され沼や草地が生じると、温暖化ガスの CH<sub>4</sub> や N<sub>2</sub>O が放出する可能性がある。そこで本研究では森林を含むアラスで土壌からの CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O フラックスを測定し、フラックスに影響を及ぼす要因について考察した。

「方法」 2000年7月にロシアヤクーツク (N62° E130°) 近郊の森林、草地、沼が連続するアラス4地点で観測した。これらの地点で土壌温度 (4 cm)、水分率 (0 - 7 cm)、チャンバー法による CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O flux (単位: ug C or N m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) を測定した。またアラスの1地点で土壌中 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 濃度 (0, 5, 10cm) を測定した。

「結果・考察」 CH<sub>4</sub> は森林土壌では吸収され (-8 ~ -37)、草地と沼からは放出していた (13 ~ 84)。草地と沼の境界である沼端では大きな放出が認められた (47 ~ 21000)。N<sub>2</sub>O は沼端で大きな放出が見られ (2.8 ~ 140)、沼では吸収されていた (-0.8 ~ -2.2)。森林および草地においては、N<sub>2</sub>O は放出も吸収も見られた (-2.1 ~ 31)。表層 0 - 5 cm の気相率および土壌中 0、5 cm の CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 濃度を用いて flux を計算し、チャンバー法による flux と比較したところ、森林、草地ではその値が比較的一致し、フラックスは土壌中ガス濃度を反映していたが、沼端ではチャンバー法、拡散法でそれぞれ、N<sub>2</sub>O は放出と吸収の逆のフラックスを示した。これは表層 5 cm 以内で生産された N<sub>2</sub>O が放出しているためかもしれない。また、CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O は、土壌表層水分率の高い地点ほど放出が大きく、両フラックスには土壌表層の役割が大きいことが示唆された。

ヤクーツクタイガの理化学性～森林火災の影響について～

「調査地点と目的」 ロシア連邦ヤクーツク市（北緯62° 05' 東経129° 45'）の西40kmに位置する Kenkeme および北北西30kmに位置する Neleger において、1997～1998年の夏に土壌断面調査および土壌採取を行った。調査は、大きく分けて Kenkeme で砂質平坦面の SK1、砂質斜面の SK2、ローム質台地の LK、また、Neleger ではアラス（数千年前に大規模な森林火災によって永久凍土が溶解し、陥没して草地となった地点）内外の LN で行った。Kenkeme では、50年生以上の森林である control 地点（SK1-L200、SK2-L50、LK-L200）と、火災後草地となった地点（SK1-G5、SK2-G25、LK-G5）、さらに火災後森林が復活した地点（SK1-L1、SK2-L25）を調査地点とした。Neleger においては、アラス脇の森林（LN-L200）を control とし、アラス内の草地（LN-Galas）およびアラス内のピンゴと呼ばれる小山（LN-Gpingo）を調査地点とした。本研究では、各地点の土壌理化学性を詳しく調べ、森林火災が土壌に与える影響を調べることを目的とした。

「調査項目」 調査項目は、一般的な土壌断面調査と一般化学性分析に加え、三種の選択抽出実験（ジチオナイト - クエン酸抽出、酸性シュウ酸塩抽出およびピロリン酸抽出）である。さらに、Keys to Soil Taxonomy 8th edition(1999)における土壌分類も行った。

「結果と考察」 pH、EC、有機態炭素、塩基飽和度は、火災後5年の地点で control に比べて高い値を示した。また、火災後25年の地点では、いずれも control と比べて差は認められなかった。これは、森林火災によって塩基が供給され、火災後の年数とともに元に戻ったことによると考えられる。また、火災跡地では凍結深度が深く、土壌水分率が上昇していた。断面調査の際には、ポドゾルのような断面形態を持つ地点がいくつか見られたが、選択抽出実験の結果、これらの地点はいずれも Taxonomy におけるポドゾル化の基準を満たさなかった。Keys to Soil Taxonomy 8th edition(1999)における土壌分類の結果、全ての土壌の Order 名は永久凍土の影響が認められる Gelisol とされた。また、火災の影響を受けて草地化した地点（SK1-G5、SK2-G25、LK-G5、LN-Galas）は、ピンゴを除く全地点で Mollic 表層を持つとされ、Mollorthel もしくは Molliturbel に分類された。すなわち、Keys to Soil Taxonomy 8th edition (1999)による土壌分類は、森林火災によって土壌有機物が増加し、塩類が集積し、凍土が溶解して土壌水分率が上昇する影響を、的確に反映していることが分かった。

### 3 - 3 凍土構造解析班

目的



タイガ森林の攪乱による永久凍土の融解とその後形成される陥没地形（アラス）についての基礎データを得ることを目的とする。ここでは、時間領域電磁探査法（Transient Electromagnetic Method、以下 TEM 法）による調査を実施し、解析された深部比抵抗構造からタイガ森林火災予定地における永久凍土の性状を把握する。

#### 調査期間

2000年8月8日～8月22日

#### 調査概要

#### 調査場所

調査は Yakutsk 西 約15kmの Magan 地域と Yakutsk 北西 約25kmの Neleger 地域で行った。Magan には周囲を約5mの崖で囲まれたアラス地形があり、孔井内での温度データや電気探査プロファイルから、部分融解層のタリクが発達していることが判明している。本地域では、TEM 法により得られた比抵抗構造と永久凍土層との関係を検証した。Neleger 地域ではタイガ森林からアラスにかけての永久凍土の性状変化を捕捉するため、キャンプサイトから約1km南方に位置するアラスからタイガ森林へ連続する測線（860m）に沿って地表付近から地下400m以深までの比抵抗構造を明らかにした。また、火災延焼実験の基礎データとするため、キャンプサイト近傍のタイガ森林内での測定を行った。

#### 調査地域の地質構造

Yakutsk 周辺の地質構造は、Ignatchenk $\alpha$  (1961) により詳しく述べられている。Yakutsk-Kangalassy はボーリング調査や地震探査、重力探査から Viluysky 向斜構造の南東部に位置し、Yakutsk 近傍ではジュラ紀の地層の下に先カンブリア系結晶片岩がボーリングによって確認されている。Yakutsk から南方の Pokrovsk では地表に厚さ1,000mのカンブリア紀の炭酸塩岩が覆っている。調査地の Neleger では、地表下数m以深はジュラ系の砂岩・泥岩の互層からなる陸成堆積物が1,000m以上の厚さで分布し、北方へ著しく厚さを増している。Magan でも1964年に行われたのボーリング結果(2D)から、厚さ18.6mの第四紀の砂層・泥層からなり、その下部はジュラ系の砂岩・泥岩の互層からなる事が判明している。

#### 測定方法

昨年度の測定結果から、本地域の永久凍土は400m以上の厚さがあることが判明したため、送信モーメント（送信電流とループ面積の積）をできる限り大きくする様努めた。Magan では100m以浅の温度プロファイルとの比較を行うため、100m×100mの送信ループを用いたが、Neleger では、200m×200mの送信

ループを用いた。電流遮断後770 $\mu$ s以降の測定時間範囲では片側7.0~7.6Aの両極50%デューティーサイクルの送信電流を印加した。磁場測定の時間範囲は送信電流遮断後6.3 $\mu$ sから20ms以上であった。調査機器はカナダの Geonics 社製 PROTEM-47 及び PROTEM-57 システムを用いた。

## 解析結果

### Magan 地域

現在の Magan は、Hkomstah 湖を中心に住宅地、電線、産業廃棄物投棄場所など測定環境は必ずしも良好ではなかった。測定点として選択した箇所は、ボーリング 2D の400m程度離れたアラス内であった。比抵抗値は5~300ohm-mの範囲に分布し、全体的に低比抵抗を呈し、第四系堆積物やジュラ系の砂岩・泥岩の互層の地質条件と整合していた ( Fig. 1 )。

地表浅部の凍土層は、厚さ約25mの高比抵抗層として捕捉され、その下部にはタリクを示すものと考えられる低比抵抗層が検出され、温度プロファイルからの値と調和するものであった。

### Neleger 地域

アラス中の2箇所のピンゴを貫き、タイガ森林へと至る全長860mの測線上 ( 測線4000 ) で20mの間隔で44点の測定を行った。比抵抗値は10~1,000ohm-mの範囲に分布し、特に最深部では10~17ohm-mと非常に低比抵抗となる。アラスとタイガ森林では150m以浅の比抵抗構造が明らかに異なることが特徴的である ( Fig. 2 )。すなわち、アラスでは150ohm-m以上の高比抵抗層が50m程度と薄く、タイガ森林では150m程度と厚い。アラスではその下に40~80ohm-mの中間的な比抵抗を呈する50m程度の厚さの層が見られる。

キャンプサイトではタイガ森林中で17点の測定を行った。大局的構造は、測線4000のタイガ森林下の構造と類似するが、測線4000で見られた深度50~75m付近の局所的な低比抵抗層は顕著ではない。両地域ともに深度約200m及び300mには顕著な低比抵抗層と高比抵抗層が存在する。前者は融解層、後者は凍土層と考えられる。

## インバージョン誤差と等価層の問題

Neleger での測線4000では、インバージョン誤差は6.5%以下で、ほとんどが2.0~5.5%に分布しており、高精度の解析結果が得られた。しかし、上述した深度50m付近の低比抵抗層は、その層厚と比抵抗値との *resolution matrix* の値が-0.4付近にあり、両者の解に逆相関が強く見られ、等価層となっている。この低比抵抗層はキャンプサイトのタイガ森林でも若干見られ、同じく等価層となっている。したがって、この層の詳細議論については、注意を要する。

## アラスの凍結・融解モデル

現在のアラス下の比抵抗構造から永久凍土構造を推定し、相変化を伴う多孔質体の熱伝導計算から以下のような凍結・融解過程のモデルを提案した。地下550m程度まで成長した永久凍土は、森林火災などを原因とする融解地形陥没により *thermokarst lake* が形成され、その結果湖底温度は2 程度に上昇し地表浅部からの融解が進行した。その後、5 600年程度を経て深度200m付近まで融解し、地球内部からの熱により永久凍土の基底深度も程度400mまで浅くなった。その後、湖が干上がり、本地域の年平均気温 - 10 で再凍結が始まり、約230年で深度100m程度まで凍結が進行した。

#### 現在までの調査の成果

Magan で実施した温度プロファイルとの比較では、比抵抗と温度との相関が明確に見られた。

Neleger 地域では、永久凍土層と考えられる高比抵抗層が捕捉された。

本地域の永久凍土層の最下部は400m以上である。タイガ森林の下ではアラス下より、その深度が若干大きく、400~450mである。

深度100mから200m（場所により300m）付近に融解層と考えられる比抵抗20ohm-m前後の低比抵抗層が調査地域全域に見られ、永久凍土層を浅部と深部の2層に分断している。

浅部永久凍土層の深さはアラスで深度100m程度と浅く、タイガ森林では150m程度である。ただし、アラスの浅部永久凍土層の下半分は部分融解層と考えられる。

Neleger 地域のアラスの凍結・融解過程のモデルを提案した。

#### 今後の課題

比抵抗構造との比較・検証用の温度プロファイルと地質情報の揃ったボーリング資料が不足。

Neleger 地域の凍結・融解モデルは、含水率に大きく依存する。本地域のジュラ系砂岩泥岩の測定例や、あるいは浅層ボーリングによるデータ取得が可能なら、一層の精度向上に寄与する。

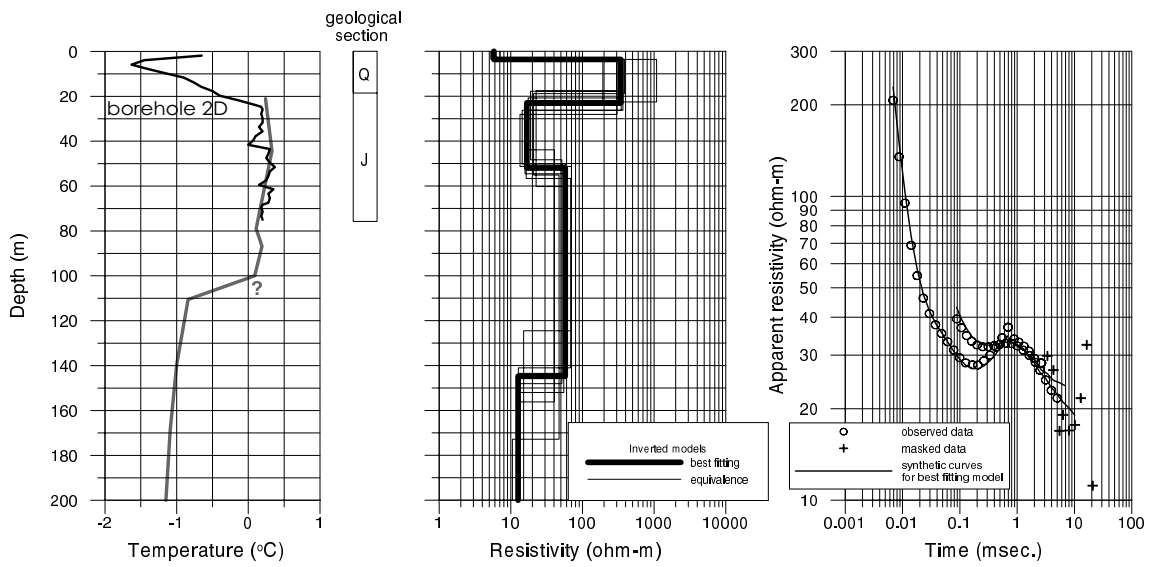
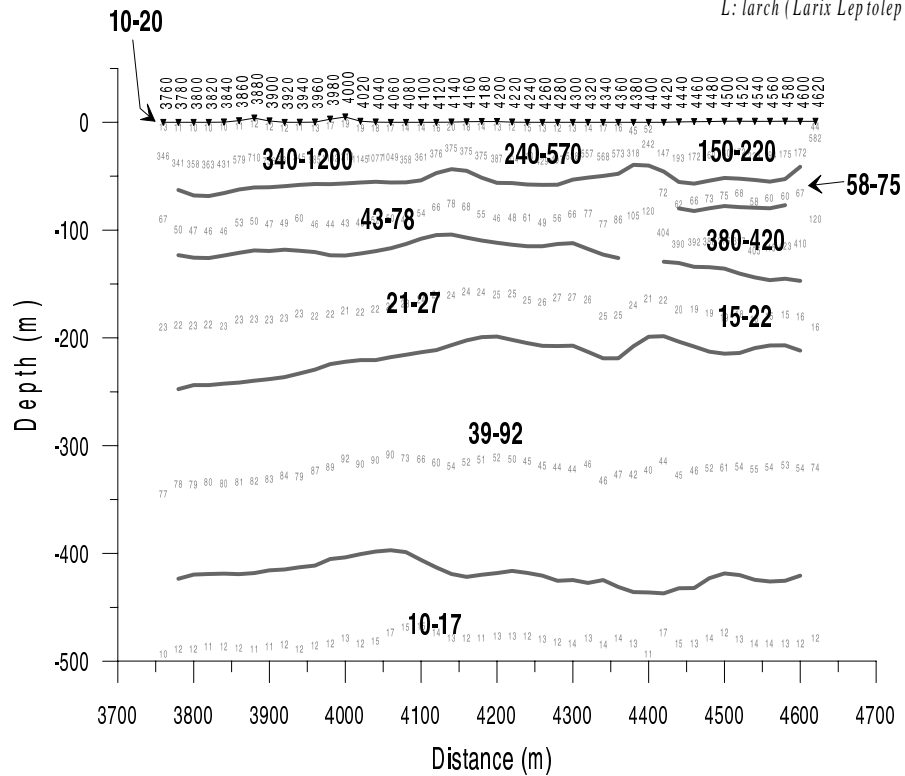
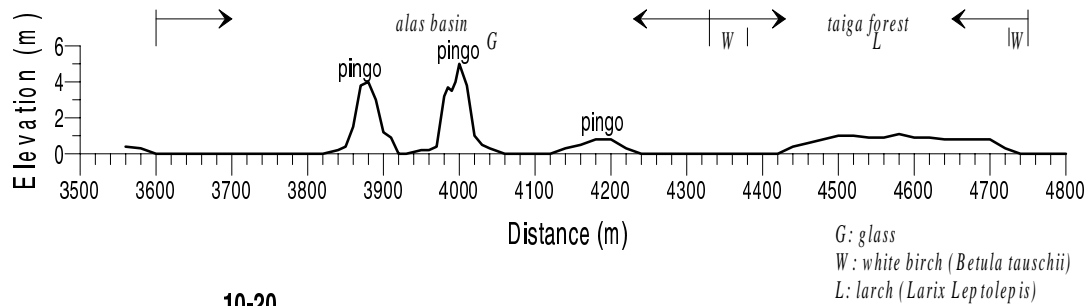


Fig. 1 Temperature profiles at the borehole site 2D with litjology near Lake Hkomstah in Magan, and interpreted resistivity-depth models and apparent resistivity curves derived from the TEM survey at an observation point about 400 m southwest of the borehole 2D.



### 3 - 4 リモートセンシング班

#### 概要

リモートセンシング班では、ロシア永久凍土地帯における森林火災とその後の更新が温暖化ガス収支に与える影響を広域にわたり評価するために、次の3段階のスケールに分けて研究を行っている。

植生の構成要素と配置による分光反射構造の解析（串田）

林分レベルでの森林構造の解析（鷹尾）

大陸レベルでの森林火災発生状況の把握（工藤）

本年度の現地調査は下記の通り行われた。

2000年6月25日～7月20日 ロシア・ヤクーツク 鷹尾・串田

2000年11月14日～11月25日 ロシア・ヤクーツク 鷹尾

各担当者による研究報告は次の通り。

#### 植生の構成要素と配置による分光反射構造の解析（串田）

東シベリアタイガ帯は、降水量が200～300ミリと少なく、連続的に永久凍土が広がる。タイガと永久凍土は擬似的「共生関係」にあるが、この地帯を特徴づける現象である森林火災は、火災の規模や起こった場所などといった状況によっては、この「共生関係」を壊してしまう。地球規模の温暖化の進行は、森林火災の発生件数、規模を増大することが指摘されている。リモートセンシングはマクロな視点でフィールド観測を補うという特性があるが、光の情報によって、現象をとらえるという側面を見ると、ミクロからマクロまで相補的に現象をとらえ、葉一枚の分光特性といったミクロな視点からも、消失面積把握といったマクロな把握に確固たる根拠を与えなければならない。一連の研究での最終目的は、森林火災地を含む東シベリアタイガについて、空中写真、衛星写真による実際の3次元構造と個葉、幹、林床などの群集を構成する単位のスペクトルを用いて、放射伝達数値シミュレーションを行い、群集の方向性分光反射特性から樹種の構成、葉面積指数、アルベド、個葉スペクトル、林床の状態といった群集要素を推定する方法を提案することである。今年度はこの一連の研究の中で、現地での分光測定結果に基づく林床のスペクトルのモデル化を目的とした。

#### 研究対象と方法

東シベリアタイガ帯に属するヤクーツク近隣の2カ所の森林を対象とする。連続永久凍土帯である東シベリアタイガ帯は、ダフリアカラマツとヨーロッパアカマツが優先し、シラカンバ、草地も広がる。対象地の一つであるネレゲルは、ダフリアカラマツ、シラカンバ、草地のほかに火災後10年程度経過した林分を含んでいる。またもう一つの対象地である、ケンケメは、森

林火災後様々な年数を経たヨーロッパアカマツ、ダフリアカラマツ林を含んでいる。これら2つの対象地内に、森林火災後極相近くに達しているダフリアカラマツ林、ヨーロッパアカマツ林、シラカンバ林、森林火災（樹冠火）後10年程度経過したダフリアカラマツ林、森林火災（樹冠火）後25年程度経過したダフリアカラマツ林、草地の6つの30mX30mプロットを設けた。各プロットにおいて、20点程度の観測点を設け、直径20cmの範囲の350nm～2500nmの鉛直上方への分光反射係数を測定した。太陽光の変動の影響を除くため、一つの観測点で、最低5回の反復を行い、分光反射係数の変動係数が可視域では10%、近赤外域では15%以内のデータのみを解析に用いた。各観測点のデータは120の波長での反射係数であるが、主成分分析によってその変動がいくつのスペクトルの成分の重ね合わせで表されるか解析した。

#### 結果と今後の課題

主成分分析の結果、6つのプロットとも3～4つの成分で変動の99%以上を説明することが明らかになった。残りの1%以内の変動を攪乱成分と見なせば、東シベリアのダフリアカラマツ成熟林、25年生、火災跡地、およびヨーロッパアカマツ成熟林、シラカンバ林の林床、草地のスペクトルを、それぞれ4から5つの要素の線形混合モデルによって表せる事を意味する。巨視的に見ると、ダフリアカラマツ林は、落ち葉とコケモモの2つの部分、ヨーロッパアカマツ林は、焼け跡とコケモモの2つの部分から成ることを考えると、本モデルは、こうした2つの部分の面積割合を反映するものと考えられる。平成13年度には、高解像度衛星 IKONOS による林冠3次元構造の把握を行い、葉、幹の構成要素の分光特性および林床のスペクトルモデルとを併せて、6つのプロットについて、計算機上で森林の放射伝達場を構築し、モンテカルロ法により群落内の放射伝達と群落からの方向性分光反射を算出する。Landsat 7 ETM+ および Terra 衛星の MISR, MODIS, ASTER といったセンサーにより対象地の3次元放射伝達シミュレーション結果を検証する。平成14年度には、日照条件（入射角度、直達光成分の割合）や個葉、幹、土壌の分光特性の変動性を考慮して、方向性分光反射特性と樹種の構成、葉面積指数、アルベド、林床の状態、個葉分光特性といった群集要素および森林火災後の経過年数、回復状況といったものとの関係を解析する。

#### 林分レベルでの森林構造の解析（鷹尾）

シベリアに広がる永久凍土上のタイガでは、森林攪乱により不可逆的な植生変化が地上炭素固定量の低下を引き起こすことが懸念されている。

タイガへの攪乱の影響を評価するために、現在の林相とその分布を把握する必要がある。そこでロシア・ヤクーツク市（62N, 130E）周辺の攪乱を受けた森

林で現地調査をもとに衛星画像による林相推定を行った。

#### 方法

研究対象地の中から、衛星画像の予備分類により調査候補地点を選定し、そのうち58点について2000年夏にプロットレスサンプリングにより樹種、胸高直径、樹高（抽出）の調査を行った。各プロットについて、直径階ごとおよび全体の立木本数  $N$ 、平均胸高直径  $D$ 、胸高断面積合計  $BA$ 、蓄積  $V(BA \times H)$ （樹高）、樹高密度  $HD$  などのパラメータを求めた。

使用した衛星画像は LANDSAT 7 ETM+ (path : 122, row : 016, 1999/10/30) である。この時期にはレナ川以外の水面は完全に氷結し、対象地全体に積雪がある。また、マツ以外の高木はすべて落葉している。雪期の画像では森林と無立木地との分離が容易である。また、積雪期の画像は林床の影響を画像から取り除く効果がある。使用したバンドは 2、4、5 である（それぞれ  $B2$ ,  $B4$ ,  $B5$ ）。各バンドの全体の最小値と局地的最大値を用い大気補正を行った。次に  $B2$ ,  $B4$ ,  $B5$  は互いの相関が高いので、 $B2$  から  $B4$ ,  $B5$  へ単回帰を行いその残差画像をそれぞれ  $B4R$ ,  $B5R$  とした。さらに残差をもとのバンドの値で割った画像をそれぞれ  $B4Rr$ ,  $B5Rr$  とした。

プロット調査から得られたパラメータとその近傍 9 ピクセルの各画像の平均値との関係を解析した。

#### 結果および考察

全生立木  $BA$  から  $B2$  への減衰曲線の逆関数の当てはめから、可視域での積雪と立木のコントラストが森林バイオマスに関連することがわかる。 $B4Rr > 0$  のプロットからマツ  $BA$  へ回帰から、常緑高木の落葉樹からの分離が可能なが示される。 $B5R$  とカラマツおよびマツの  $HD$  との関係からは、積雪と立木の反射率の関係より、林冠の混雑程度による上空からの林床観測可能性が  $B5R$  に現れているものと考えられる。ただし、同一画像上でも地域により関係が表れない部分 (Kenkeme, Bilyui) があり、原因の究明が必要である。

今後、各モデルにおける樹種別の重みを推定する必要がある。

#### 結論

対象地森林のバイオマスを衛星データから求めるためには  $BA$ ,  $HD$  など相対的指標に加え  $H$  など絶対量を推定する必要がある。また、攪乱後の森林の更新状態を推定するために、これらのパラメータの組み合わせによるトラジェクトリの推定が必要である。

大陸レベルでの森林火災発生状況の把握 (工藤)

本年度の主な研究目標は、気象衛星ノアの画像解析することによりロシアシ

ベリア地域で発生している(1)大規模森林火災のモニタリング手法の開発と(2)シベリアでの森林火災 DB 開発である。本研究では既存の火災検出方法から得られる誤検出を目視で修正し、火災情報の正解を3次元ヒストグラムにデータベースとして蓄積する方法を開発し、ロシア極東ハバロフスク・サハリン周辺地域の1997年～2000年までの4年間にわたる画像解析を試みた。

#### 火災情報の正解獲得方法

これまで気象衛星ノアからの画像を用いて種々の火災検出方法が提案されている。

まず、本研究では Flasse らのしきい値による火災検出アルゴリズムを用いて火災候補地点を検出する。次に、時系列画像から候補地点を目視で確認し、火災の正解だけを特定した。その手順は次の通りである。

- (1) Flasse らのしきい値検出
  - 各画素において
    - ・ CH3 > 316K
    - ・ CH3 - CH4 > 10K
    - ・ CH4 > 250K
- (2) 時系列画像から目視による確認および修正
  - ・ 火災の煙の有無
  - ・ 高温部の時系列的な変化
  - ・ NDVI による火災跡の確認

#### 解析結果

表1は1997年～2000年までの夏期(4月～9月)同地域における火災検出結果である。この表から火災は春から夏にかけて多く発生することが分る。また、1998年は他の年に比べてはるかに火災が多く発生したことが分かった。図2は同年に発生した火災を積算して表示したものである。火災はアムール川の下流域に多く集中しており、沿岸からの煙の一部はサハリンまで達していることが分かる。

表1 ハバロフスク・サハリン周辺地域の1997年～2000年まで火災検出結果 (km<sup>2</sup>)

月	1997	1998	1999	2000
4	510.6	53.2	496.1	300.8
5	327.9	105.3	405.4	1187.0
6	462.2	488.8	393.3	664.3
7	21.8	7833.5	4849.7	537.2
8	33.9	7868.6	106.5	7.3
9	13.3	5760.8	12.1	50.8
計	1363.7	20588.2	6229.1	2723.7



## 課題

本研究では火災検出の正解を獲得するために、燃焼中あるいは火災により温度の高い部分の検出を行っている。これは火災のリアルタイム検出に相当するが、火災現場の一部に雲がかかっている場合は正確な消失面積が算出できない問題が生じる。したがって、消失面積の算出では鎮火後の植生変化から面積の算出を行なう方法を検討中である。

## まとめ

ノア画像を用いた大規模森林火災のモニタリング手法の開発のために、提案したリアルタイム火災検出方法の信頼性を高める必要がある。そのため、さらに過去の森林火災情報の蓄積を行なう予定である。また、シベリアの森林火災 DB 開発も引き続き行う予定である。

### 3 - 5 大気化学班

#### 観測の目的：

森林火災後の地表面状態の変化によって CO<sub>2</sub> フラックス及び CH<sub>4</sub> フラックスがどのように変化するか、またその変化がどのような環境要素の変化にตอบสนองして生じたのかを明らかにすること。

#### 観測場所

トムスク州プロトニコボより東に15kmほどの森林火災跡と近傍の白樺林

#### 観測期間

2000年6月18日～7月2日（15日間）

2000年9月7日～9月16日（10日間）

#### 測定項目

- ・ CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> フラックス

クローズドチャンバー法を用い、上記滞在期間中に測定を行った。

- ・ 気温・湿度

森林火災跡における気温・相対湿度を6月から9月までの夏季を通して、30分間隔で自動記録した。また、白樺林においては、上記の滞在期間中のみ、30分間隔で記録した。

- ・ 地中温度

CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> フラックス測定時に、各測定サイトにおける5cm深、10cm深の地温をマニュアルで測定したほか、森林火災跡の1地点における5、10、20、30cm深の温度を6月から9月までの期間にわたり、30分間隔で自動記録した。

- ・ 土壌水分、水深

CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> フラックス測定時に、各測定サイトにおける土壌の体積含水率を

TDR を用いて測定した。また、湛水している場所では水深を測定した。

- ・日射量

森林火災跡における日射量を 6 月から 9 月までの夏季を通して、10 分間隔で自動記録した。

- ・水位のモニタリング

6 月及び 9 月の滞在期間中に、森林火災跡のドレイン（排水路）の 1 地点において、毎日、水位をマニュアルで測定した。

#### 観測結果

- ・白樺林では、地点・時期を問わず、 $\text{CH}_4$  は吸収、 $\text{CO}_2$  は放出という結果が得られたのに対し、火災跡では地表面の水分状態に応じて、異なるフラックスが得られた。
- ・6 月後半：非常に湿潤で火災跡土壌表面の体積含水率は 60 ~ 80%。このような湿潤な土壌表面では、メタンは微量の放出、二酸化炭素も放出。やや乾燥して、地衣類が生えている表面では、メタンは吸収、二酸化炭素は放出。ドレインや水たまりなど水に覆われているところでは、メタンは微量の放出、二酸化炭素のフラックスはほぼゼロであった。
- ・9 月前半：6 月に比べずいぶん乾燥。また草が急速に成長して、6 月には土壌表面だったところにヤナギランが生い茂っていた。草が生えたところでは、メタンのフラックスはほぼゼロで吸収も放出もしておらず、二酸化炭素は日射に応じて、吸収・放出のどちらの値もとった。

#### まとめ

以上の結果から、森林火災後の地表面状態の変化にともなう  $\text{CH}_4$ ・ $\text{CO}_2$  の吸収・発生の変化として、次のような知見が得られた。

$\text{CO}_2$  フラックスの変化：今回の結果からは森林の土壌呼吸による  $\text{CO}_2$  放出に対し、火災後の  $\text{CO}_2$  放出は全般に小さくなっていることが分かった。これは植物根が失われたこと、及び湿潤化による土壌のガス拡散係数の低下によるものと考えられる。しかし、生態系全体としてみると、樹木による光合成がなくなったことから、二酸化炭素吸収が著しく小さくなっているものと推察される。

- ・ $\text{CH}_4$  フラックスの変化：火災前の森林は常にメタンを吸収していた。火災後、湛水している間、またその後の湿潤な間はメタンは土壌から大気へと放出されていた。しかし、土壌が湿潤でも表面にゼニゴケが生えた場所では非常に大きな吸収が見られた。また、乾燥がすすみ、草本が生育し始めるとフラックスはほぼ 0 となり、吸収も放出も見られなくなった。

### 3 - 6 予測班

#### 概要

1999年7月9～11日にアラスカ・フェアバンクス郊外で行われた森林火災実験（Frostfire）から放出されたガスとエアロゾルの長距離輸送シミュレーションを行い、放出されたエアロゾルは直径が $8\mu$ 以下であれば、全放出量の28～35%が北極域大気中へ輸送され、7%が北極域へ沈着することがわかった。成果は英文論文としてまとめた。

#### 方法

火災時のビデオ映像から火災の煙が多く放出された時間を同定した。さらに煙の到達高度を3段階に区分した。6時間毎のECMWF(European Centre for Median-range Weather Forecast)作成の客観解析データを用いて流跡線法により多数の粒子を流すことによりガスやエアロゾルの長距離輸送を調べた。データは緯度・経度 $0.5$ 度の高分解能のものである。客観解析データの信頼性は、現地気象観測による地上風のデータとの比較などにより確認した。

計算は以下のように行う。火災サイトを中心にした緯度・経度 $0.5$ 度の範囲内に、強い(高い)火災の場合は $700\text{hPa}$ 高度まで達するとし $16,224$ 個、中程度の場合は $770\text{hPa}$ とし $11,494$ 個、弱い(低い)場合は $850\text{hPa}$ とし $6,084$ 個の粒子を置き、流跡線法により各粒子の軌跡をECMWFの3次元の風データを使って計算する。期間中の全放出粒子数は $295,412$ 個である。エアロゾルの場合は、ススを想定した密度を与え、その大きさに依存する重力落下速度を考慮した。また雲に取り込まれ降水で落下する効果も考慮した。さらに地面付近に達すると沈着したものとして取り扱った。エアロゾル直径を $0.4, 1, 2, 5, 8, 10, 20\mu$ と変えて実験を繰り返した。ガスの場合は重力落下効果と降水効果は考えなかった。計算は1999年7月9日から19日まで行った。

#### 解析結果

期間の後半に高気圧がアラスカを東進しその西側で強い南風となった。この南風に乗って7月15日以降、それまでアラスカ付近にあった粒子は北極海上へ運ばれた。上からそれぞれ、ガス、 $0.4\mu$ 、 $10\mu$ 、 $20\mu$ の場合である。大気中密度の空間パターンはガスと $0.4\mu$ でほとんど変わらないが、量的には $0.4\mu$ の場合のほうが少ない。一方、ガスは、ほとんど沈着しない。 $10\mu$ 粒子の場合は $0.4\mu$ 粒子にみられたハワイ沖への輸送がみられず大気中密度は少なくなる。一方、沈着粒子密度パターンは $0.4\mu$ の場合と似ているが量が増える。 $20\mu$ 粒子はアラスカ周辺に落下し長距離輸送しない。7月19日の時点で $73^\circ\text{N}$ 以北の北極域大気中にある粒子は全放出数に対し、ガスでは43%、 $0.4\sim 5\mu$ では35%、 $8\mu$ では28%、 $10\mu$ では7%である。北極域へ沈着する粒子の割合はガス及び $20\mu$ 粒子は0%、 $0.4\sim 8\mu$ 粒子は7%、 $10\mu$ 粒子は19%であった。Frostfireの場合は $0.4\mu$ 付近にピークがあるという観測結果があるので、35%のエアロゾル

が北極域大気中へ輸送され、7%が沈着したものと推定される。

#### 議論

大気中のエアロゾルは直接・間接の放射効果により気候へ影響を与える。従ってアラスカの森林火災はアラスカ域のみならず、北極域にも影響を与えるものと推定される。また積雪で覆われた海氷域に沈着したエアロゾルは表面アルベドを低下させると思われる。北極域への輸送は Frostfire の特殊事例かどうか、NCEP の再解析データを用いて南北風を調べてみると夏には対流圏下層で強い南風がアラスカで吹く確率は少なくないことがわかった。従って、Frostfire のケースは特殊ではないと推定される。

アラスカの森林火災から北極域へ沈着するススが起こす 1 cm 水当量の積雪面のアルベド変化を見積もってみた。アラスカ域での年間の森林火災面積、Frostfire での燃焼面積、放出炭素量の推定、放出炭素量に占めるススの割合、今回の研究から得られた北極域への輸送割合から推定すると、きれいな積雪面のアルベドを 0.1 下げるには 2 オーダー小さい。しかし、森林消失面積は数倍多くなる年もあり、ススが表面に集積する傾向があること、さらに温暖化に伴い火災が増加する可能性等を考慮すると、0.01 くらいアルベドの変動要因としてアラスカの森林火災から放出されるエアロゾルの効果は無視できない可能性がある。

#### 今後の課題

今回の手法をシベリアでの森林火災に適用することが考えられる。

今回は森林火災によるガスやエアロゾルの到達高度を与えたが、火災の面積や温度及び気象条件から到達高度を推定する方法を開発したい。

### 3 - 7 インフラ保全技術開発グループ

#### 概要

昨年度に設置した実大チルドガスパイプラインの稼働を継続し、計測を継続した。

パイプラインは当所の予定どおり永久凍土と季節凍土の境界を過って敷設されており、計画通りの鉛直曲げ応力が両者の境界でパイプラインに発生させることに成功した。今年度もこの挙動を各所計測機器により継続的に計測している。

#### 実験状況

現地の状況は昨年度の報告の通りである。今年度は昨年度予算の都合で設置できなかった地盤用凍上ロードおよび地表変位マーカーを追加設置した。また、初期の計測プログラムの機能が不完全であったため、新たに計測プログラムを開発し現地計測システムに導入し、計測および実験管理の品質向上を図っ

た。また、パイプライン近傍の地盤に地盤観察用のボーリング孔を掘削し、CCD カメラにより凍土および未凍土の状況を観察した。

#### 地盤の凍結状況

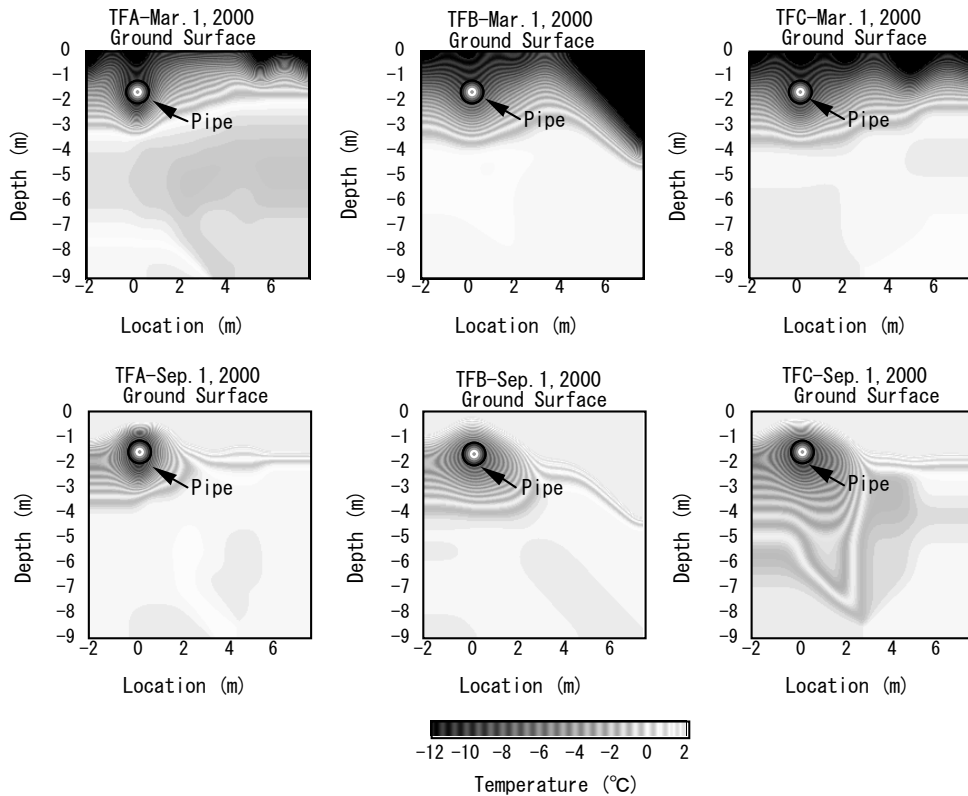


図3 - 7 - 1 サーマルフュージョン A, B, C に於ける3月および9月の温度分布

サーミスター温度計による温度計測結果を2次元分布に解析した結果を図3 - 7 - 1に示す。このこれら図から、冬期および下記の典型的な地中温度分布と、低温ガスパイプ周囲の温度場の状況が良好に把握できる。

これらのデータより実験は良好に運営され、当初予定した実験が実施されていることが確認された。

#### パイプの鉛直変位

下図にパイプ上端の鉛直変位分布を示す。図中横軸の0 - 30m程が永久凍土に埋設してある部分である。その右側は季節凍土中に埋設されている部分の鉛直変位である。

6月中旬までは前年度報告の傾向、すなわち永久凍土側が上方に変位せず季節凍土側が顕著に凍上している傾向が認められていた。しかし8月末には凍土側の20 - 30mが上昇したことが分かる。これは夏季の活動層の成長によりこの部位の永久凍土がパイプを拘束しきれなくなり、パイプが跳ね上がったものと

考えられる。この傾向は11月まで継続している。

このようなパイプラインの挙動は今後のパイプラインの敷設断面を考える上で大変貴重なデータになる。

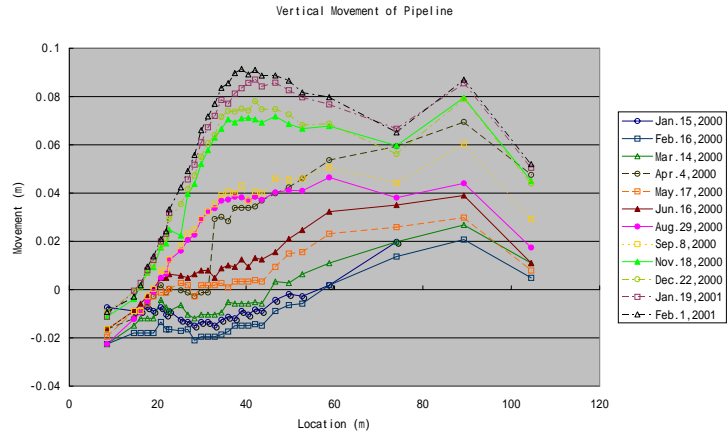
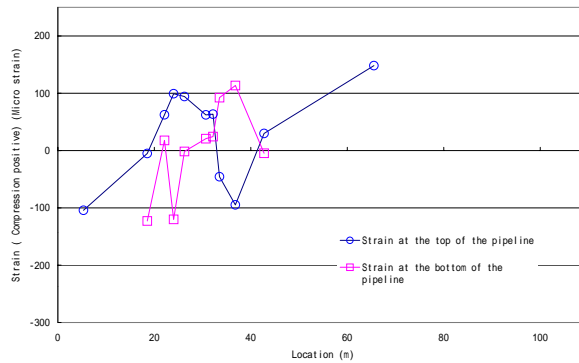
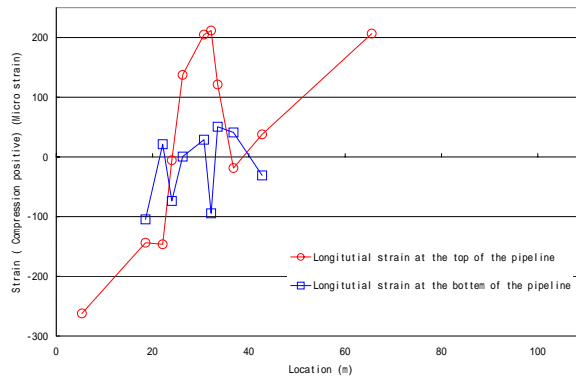


図 3 - 7 - 2 パイプ上端面の鉛直変位



(a) 5月1日に於けるパイプの応力



(b) 9月1日に於けるパイプの応力

図 3 - 7 - 3 8月末のパイプ跳ね上がり前後のパイプひずみ分布変化

### パイプに発生した鉛直曲げ挙動

図3 - 7 - 3の(a)および(b)に12年度最大の変化の状況を示す。

図(a)に示すように、32m付近に曲げの中心が認められる。これは当所の予定どおりである。図(b)にはより複雑なひずみ分布が認められる。この状況は5月1日の状況とはかなり異なる。

今後のひずみデータの解析により一層現象の理解が高まることが期待される。

### まとめ

本年度は実験そのものは一応順調に実施することができた。各所データから実験は当所の予定どおり実施されていることが確認できた。また、予期せぬパイプラインの挙動を記録することもできた。

### 3. 主な研究成果の発表(論文発表)

Kazushige Wada, Koichiro Harada and Masami Fukuda(2001)

Deep Resistivity Structure of Permafrost Area in Siberia

T. Chikahisa, H. Nagaoka, Y. Hishinuma, and K. Kudo(2001)

Modeling of Forest Fire Effect on CO<sub>2</sub> Cycle in Siberia and Basic Data for the Analysis

H. Hayasaka and M. Lynch(2001)

Forest Fires and Lightning in Alaska

Hatano, R., Sawamoto, T., Shibuya, M., Saito, H., Tuno, Y., Takahashi, K., Kobayashi, Y., Iwahana, G., Desyatkin, R. V. and Isaev A. P.(2001)

Characteristics of Nitrogen Cycling in Permafrost Regional Ecosystems in Yakutsk, Russia

T. Sawamoto, R. Hatano, M. Shibuya, H. Saito, Y. Tuno, K. Takahashi, A. P. Isaev, R. V. Desyatkin, and T. C. Maximov(2001)

Effect of forest fire on NEP in Taiga soil ecosystems, near Yakutsk, Russia

T. Nakano, C. Asahi, G. Inoue, and M. Fukuda(2001)

Measurements of methane and carbon dioxide fluxes in a birch forest in West Siberia after burning

T. Watai, T. Machida, N. Fedoseev, S. Maksyutov and G. Inoue(2001)

Observation of CO<sub>2</sub> Concentration in Lower Troposphere over Yakutsk

T. Machida, G. Inoue, T. Nakawaza, S. Maksyutov, N. Vinnichenko, M. Panchenko,

M. Arshinov and N. Fedoseev(2001)

Temporal and spatial variations of atmospheric methane over Siberia

T. Morishita, R. Hatano, T. Sawamoto, O. Nakahara, K. Takahashi, A. P. Isaev, R. V. Desyatkin and T. C. Maximov (2001)  
Methane Fluxes in Forest, Grassland, and Wetland Soils, Near Yakutsk, Russia.

Kobayashi, Y., Machimura, T., Iwahana, G., Fukuda, M. and Fedorov, A. N. (2001)  
Fire Effect on Fluxes and Active Layer Dynamics in Taiga Forest Over East Siberia Permafrost Region 1. Energy and Water Budgets in Burnt and Unburned Larch Forests

G. Takao, K. Kushida, T. C. Maximov, A. V. Kononov, R. M. Desyatkin, A. N. Fedorov, Y. Torgovkin (2001)  
Biomass Estimation of Taiga Forests in Yakutsk with Winter LANDSAT7 ETM+ Image

K. Imanishi, A. Ito and T. Oikawa (2001)  
Model analysis of carbon dynamics of each type of vegetation in the eastern Siberia

A. Ito, K. Imanishi and T. Oikawa (2001)  
Modeling of temporal change in CO<sub>2</sub> balance at a larch forest in eastern Siberia : compartment system and phenology

Y. Tsuno, M. Shibuya, H. Saito, K. Takahashi, T. Sawamoto, R. Hatano, A. P. Isaev and  
T. C. Maximov (2001)  
Aboveground biomass, nitrogen and carbon contents in *Larix* stands in eastern Siberia

Alexander P. Isaev (2001)  
Post-fire Dynamic of Larch Forests in North-East Siberia ( Yakutia )

Alexander Fedorov and Masami Fukuda (2001)  
Some Observation Results of Surface Dynamics in Permafrost Landscapes, Yakutsk Area

. Y. Konstantinov, V. G. Rusakov and . Fukuda (2001)  
Thermal regime of the upper permafrost layers in taiga landscapes, Yakutsk area, 1996-2000

Radomir Argunov (2001)  
Spatial variability of active layer ground moisture in the Yakutsk area

K. Harada ( Miyagi Agricultural College, Japan ) , K. Wada, M. Fukuda (2001)  
Resistivity Structure of Permafrost Area by Transient Electromagnetic Method. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to



the Arctic, 29-38.

H. Hayasaka ( Hokkaido Univ., Japan ) M. Lynch ( 2001 )

Forest Fires and Lightning in Alaska. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 39-39.

K. Kushida ( Hokkaido Univ., Japan ) Y. W. Kim, S. Kojima, M. Shibuya, S. Tsuda, M. Fukuda, ( 2001 )

Spectral Decomposition of Tundra Vegetation in Alaska for Its Spatial Decomposition. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 46-51.

J. Kudoh ( Tohoku Univ., Japan ) S. W. George, S. I. Akasofu, ( 2001 )

Alaska Image Database Using NOAA AVHRR. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 52-54.

G. Takao ( Forestry and Forest Products Research Institute, Japan ) K. Kushida, T. C. Maximov, A. V. Kononov ( 2001 )

Biomass Distribution of Disturbed Boreal Forests in Yakutsk, Russia. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 55-56.

M. Shibuya ( Hokkaido Univ., Japan ) Y. Tsuno, H. Saitoh, K. Takahashi, T. Sawamoto,

R. Hatano, A. P. Isaev, T. C. Maximov ( 2001 )

Chronosequential Analysis of Aboveground Biomass and Nitrogen and Carbon Contents in Natural Larch Stands in Eastern Siberia. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 57-66.

A. N. Fedorov ( Permafrost Institute, Yakutsk, Russia ) M. Fukuda, ( 2001 )

Post Disturbance Dynamics of the Ground Surface in Permafrost Landscapes, Yakutsk

Area. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 98-102.

P. Konstantinov ( Permafrost Institute, Yakutsk, Russia ) M. Fukuda, ( 2001 )

Temperature Regime of the Upper Permafrost in the Yakutsk Area. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 103-106.

M. Fukuda, V. Rusakov ( Permafrost Institute, Yakutsk, Russia ) A. Egorov ( 2001 ) Interannual Variability of Frozen Ground Temperatures in Yakutsk. Proceedings of Second International Workshop on Global Change : Connection to

the Arctic, 107-111.

T. Morishita( Hokkaido Univ., Japan ) R. Hatano, K. Takahashi, R. V. Desyatn In  
( 2001 )

Assessing the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O Fluxes in Thermokarst Ecosystems in Yakutsk,  
Russia. Proceedings of Second International Workshop on Global Change :  
Connection to the Arctic, 115-116.

Y. Kobayashi ( Japan Science and Technology Corporation and Hokkaido Univ.,  
Japan )

T. Machimura, G. Iwahana, M. Fukuda, A. N. Fedorov,( 2001 )

Characteristics of Water and Heat Exchanges in Burnt and Unburned Larch  
Forests, Eastern Siberia. Proceedings of Second International Workshop on  
Global Change :

Connection to the Arctic, 117-119.

G. Iwahana( Hokkaido Univ., Japan ) K. Kobayashi, A. N. Fedorov, M. Fukuda,  
T. Machimura( 2001 )

Spatial distribution of active layer in boreal forest over continuous permafrost  
region near Yakutsk, Eastern Siberia . Proceedings of Second International  
Workshop on Global Change : Connection to the Arctic, 120-123.