

研究題目

シベリア永久凍土分布域における森林火災がハンモック地形のダイナミクスに及ぼす影響

研究従事者

川東 正幸 (日本大学 生物資源科学部)

研究目的

永久凍土分布域は地温と蒸散量が低いために、降水量が500mm以下と少ないにも関わらず、土壌は湿潤で水分を多く含んでいる。多湿・低温な土壌条件はリターの集積により厚い0層を発達させて、鉱質土壌への有機物の供給と蓄積を可能にしている。この結果、0層を含む永久凍土分布域土壌は陸域最大の炭素貯蔵庫としての役割を果たしており、地球温暖化に繋がる有機態炭素の無機化の軽減が注目される現在ではその生態系は重要な位置づけにある。一方、永久凍土上の低温多湿な土壌は地温の変動に伴って凍結・融解を繰り返しており、この過程が同地域に独特の凹凸の繰り返しからなるハンモック地形の形成を可能にしている。ハンモック地形内の凹凸は、温度や水分の水平・垂直分布に影響し、地衣類、蘚苔類の分布や木本の根分布にも影響するため、永久凍土分布域の一次生産に深く関与するものと考えられる。

このような自然条件において、森林火災は植生と0層に多大な影響を及ぼす因子であり、近年では、シベリアの永久凍土分布域で火災の発生頻度が増加傾向にあり、上述の炭素循環や地形の形成に影響を及ぼすものと考えられた。そこで、本研究ではシベリアの永久凍土分布域において、火災発生後の経過年数が異なる地点を3か所選出し、経過年数とハンモック地形の発達程度および0層の発達程度（厚さ、単位面積当たり重量）、そして0層の土壌への物質供給ポテンシャルとの関係について検討した。また、ハンモック地形の崩壊が鉱質土壌の成層に及ぼす影響を土壌調査から明らかにする。

調査地概要

・調査地点

ロシア連邦エベンキア共和国トゥラ (N64°、E100° 図1) において、カラマツを主体とするタイガ林地で火災を受けた林地を対象とした。また、隣接する対照地は火災地と500m内外の範囲にあり、100年以上火災を受けていない林地とした。火災発生年度は、1951年 (51site)、1981年 (81site)、1990年 (90site)、1994年 (94site)、2005年 (05site) であり、これら5地点においてハンモック地形と0層の堆積に着目して研究を進めた。また、51site、90site、94siteでは土壌調査を実施し、地形との関係を検討した。

・永久凍土

エニセイ河の東岸以東のロシア全土には多かれ少なかれ永久凍土が分布する (図. 1、ただし、カムチャッカ半島南部、樺太は含まない。)。その分布面積は1000万km²以上におよぶ。



図.1 ロシアにおける永久凍土分布（“Land resources of Russia”より引用）. 調査対象地は黒枠で囲んだ地域である。

永久凍土には、島状永久凍土（永久凍土分布面積<50%、層厚<数m～数十m、地温約0℃）、不連続永久凍土（永久凍土分布面積50～90%、層厚<10m～150m、地温約-2～0℃）、連続永久凍土（永久凍土分布面積>90%、層厚<300～500m、地温約-10～-2℃）、があり、今回の調査対象地であるトゥラは連続永久凍土分布域に相当する。

・地形

地表面に凹凸（Mound とTrough）の繰り返す地形が認められる。これは、凍結岩（岩の間の水が凍結してできたもの）の上部で、氷の体積膨張により地上部に生じるマウンド地形や鉍質土壌の凍結融解作用により地表面に形成される凹凸によって特徴づけられるハンモック地形（写真1）に相当する。ハンモック地形における繰り返しの凹凸の大きさと深さは地点によって異なっており、土性やレキ含量などの土壌の物理的性質が影響していると考えられた。また、火災地においても隣接する非火災地とハンモックの地形が異なっていることが地表面観察から見てとれた（写真1）。



写真1 对照地と火災跡地の地表面。写真左が对照地であり、厚い0層に被覆されながらも凹凸の地形が観察できる。比較的水分含量が低い凸部では地衣類が多く、凹部ではコケ類

が主体であった。写真右が火災跡（2か月後）地であり、ハンモック地形が残っている。表層被覆植生は変化してきており、焼けた0層から草本類が発芽生育している様子が窺える。

・ 植生

調査地域は北方タイガ林地帯に属し、主な植生はカラマツ (*Lalix gmelinii* L.) である。観察した林地はいずれも疎林であり、且つこれらの木本植生は生長程度が悪く、胸高直径で10cm前後と細かった。地表面はコケ類 (*Pleurozium schreberi* Mitt., *Hylocomium splendens* B.S.G. and *Aulacomnium palustre* Schwaegr.) で厚く被覆されており、パッチ状に地衣類 (*Cladina*, *Cetraria* spp.) が認められた。この他、イソツツジ (*Ledum palustre* L.) ブルーベリー (*Vaccinium myrtillus* L.) やコケモモ (*Vaccinium vitis-idaea* L.) の矮化した灌木も認められた。

・ 土壌

シベリアでは、永久凍土層を有する土壌とポドソル土、未発達土壌が大部分を占める (図. 2)。その中で、調査地域は北極域グライ土 (Cryosol: WRB, Gelisol: USDA, Cryozem: Russia) の分布域に相当する。すなわち、土壌表面から1mまたは2m (USDA) 以内に永久凍土層を有する土壌である。しかしながら、土壌は微地形に大きく影響を受けるため、実際には狭い面積の中でパッチ状に幾つかの土壌が分布している。また、火災跡地では、0層被覆が薄くなっており日照による地温の上昇が永久凍土を後退させるために土壌層位が厚く土壌生成作用の特徴が明瞭でないRegosols (WRB), Entisol (USDA) または風化が認められる層位を有するInceptisols が分布していた。

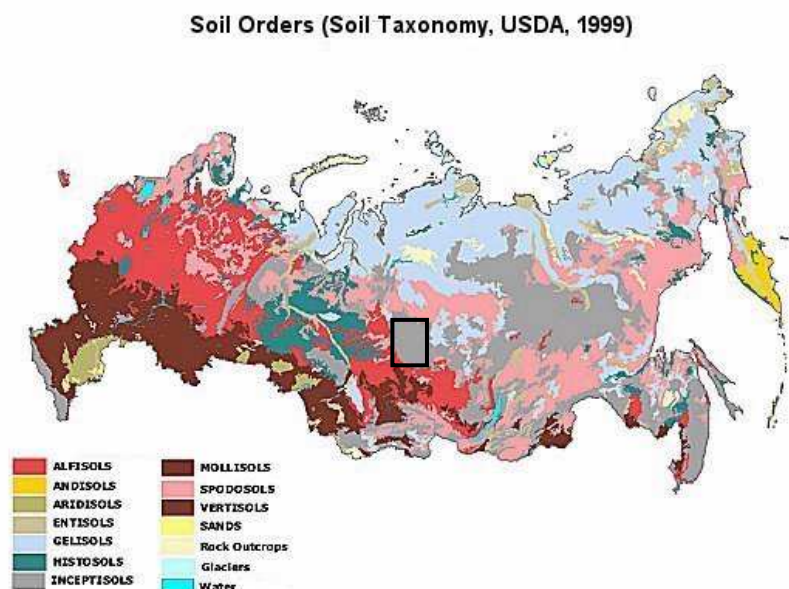


図2 アメリカ農務省の土壌分類法に基づいたロシアの土壌図。黒枠囲が調査地域に相当する。

実験・研究方法

・ 土壌断面調査

凹地と凸地の土壌断面を同時に比較調査できるように、地表面の凹凸起伏を含む範囲で永久凍土またはレキ土に到達するまで掘削し、断面作成を行った。土色、土性、レキと植物根の分布、土壌構造について調査した。土色の判定には標準土色帳を用い、その他の項目は目視による特性として評価した。

・ 凹凸起伏の深さ

地表面において凹地の底から凸地の頂部までスケールで直接測定した。調査地点1か所につき8か所測定し平均と標準偏差を算出した。

・ 土壌温度

地表面下の5cmまでに温度ロガーを埋設し、2時間に1回のデータ取得を6月8日（春）から9月11日（秋）の3カ月間実施した。外気温は地上120cmの位置で測定した。

・ 土壌水分

土壌断面から層位ごとに採取した試料を野外実験施設内の乾熱器を利用して105℃で十分に乾燥させて、乾燥前後の重量減少から算出した。

・ 0層の形態特徴

・ 0層の厚さ

一つの方形区において8か所の試料採取地点を設けた。各地点より0層試料を切り出して、0層の形態に基づいてそれぞれの厚さを直接スケールで測定した。

・ 0層の仮比重

0層の厚さから算出した体積と65℃条件での乾熱処理後の重量とから算出した。また、仮比重から単位面積当たりの重量を算出した。

・ 土壌中の酸化鉄含量

酸性シュウ酸塩溶液抽出法により非晶質酸化鉄含量を求めた。さらに、ジチオナイト還元クエン酸塩抽出法により遊離（非晶質と結晶質鉄）酸化鉄含量を求めた。両者の比は鉄酸化物の結晶化や反応性と関係することが指摘されている。

・ 0層からの溶存炭素、塩基、陰イオン分析

0層試料から純水で抽出される水溶性成分を原子吸光分析、イオンクロマトグラフィー分析、溶存有機態炭素（TOC）分析でそれぞれ測定した。

結果と考察

1. 土壌断面形態と土壌分類名

対照地では50cm深でレキ土が観察された90siteを除いて永久凍土層が1m以内に確認されたため、CryosolsまたはGelisolsと分類された。90site対照地もレキ土の下層の地温が0℃を下回ったことから1m以内に永久凍土層を有する土壌と判断してGelisolsに分類した。一方、火災地の土壌は永久凍土の上端を確認できなかったことと、土壌構造が未発達であったことからRegosolsに分類された。土壌断面内にレキが多く観察されることも調査対象地の土壌の特徴であると考えられた。特に、51siteと90siteの火災地では角レキが多かった。また、両者の対照地も土壌断面内のレキ含量が高く、

現代の凍結融解現象で砕けた母岩や上部からの再堆積などが考えられた。また、上部層位から下層に至るまでレキが含まれていることから、鈹質土壤が重力やクライオターションによって攪拌されている可能性が考えられた。一方、94siteでは火災地と対照地共にレキを殆ど確認できなかった。94siteは他の2地点に対して幅数十メートルの河川の対岸に位置する。従って、岩盤の風化程度が異なっており、風化レキを多く含まない土壤になっていることが推測された。以下に各地点の調査結果を記す。土壤分類名以下、層位名、層位幅（深さ）、土色、土性、有機物含量、構造、レキ含量、粘着性、可塑性、根分布、水分、層界の順に記載した。

・ 51site（対照地）（写真2-1）

土壤分類名：Haplic Cryosols (WRB), Typic Haplorthels (USDA)

Oi : +5~+15cm, 2.5YR3/4暗赤褐, 中細小根すこぶる富む, 多湿, 層界波状判然

Oea : 0~+5cm, 2.5YR2/3極暗赤褐, 中細小根すこぶる富む, 多湿, 層界波状判然

A1 : 0~10cm, 10YR3/4暗褐, CL, 有機物富む, カベ状構造, 角レキ(2-5cm頗富)、粘着性強, 可塑性中, 最小根含む, 湿, 層界波状漸変

(A2) : 10~13cm, 10YR3/4暗褐, CL, 有機物富む, カベ状構造, 角レキ(1-2cm頗富)、粘着性強, 可塑性中, 最小根有, 湿, 層界不連続

Bw : 10~25cm, 10YR4/4 褐, LiC, 有機物含む, カベ状構造, 角レキ(1-2cm頗富)、粘着性強, 可塑性強, 半湿, 層界波状漸変

C : 25~40, 10YR2/3 黒褐, LiC, 有機物あり, カベ状構造, 角レキ(2-5cm頗富)、半湿、粘着性強, 可塑性中, 不朽レキおよび炭化物含む層界波状判然

Cf : 40cm+, 永久凍土層



写真2-1 51siteの対照地土壤

・ 51site（火災地）（写真2-2）

土壤分類名：Haplic Regosols (WRB), Typic Cryorthents (USDA)

Oi : +3~+12cm, 2.5YR3/4暗赤褐, 中細小根すこぶる富む, 多湿, 層界波状判然

Oea : 0~+3cm, 2.5YR2/3極暗赤褐, 中細小根すこぶる富む, 多湿, 層界波状判然

A1 : 0~10cm, 10YR2/3暗褐, CL, 有機物富, カベ状構造, 角レキ(2-5cm頗富)、粘着性強, 可塑性中, 最小根含む, 湿, 層界波状漸変

(A2 OR 2A) : 20~50cm, 7.5YR2/3 極暗褐, CL, 有機物富む, カベ状構造, 角レキ (2-5cm頗富)、粘着性強, 可塑性中, 最小根有, 湿, 層界不連続

Bw : 20~60+cm, 10YR2/3 極暗褐, CL, 有機物含む, カベ状構造, 大角レキ (5-10cm頗富)、粘着性強, 可塑性強, 半湿, 層界不連続



写真2-2 51siteの火災地土壤

・ 90site (対照地) (写真3-1)

土壤分類名 : Haplic Cryosols (WRB), Typic Haplorthels (USDA)

Oi : +10~+20, 5YR2/4極暗赤褐, 中小細根含む, 半乾, 層界平坦判然

Oea : 0~+10, 5YR2/3極暗赤褐, 大根有中根含む小細根富む, 半乾, 層界平坦明瞭

A1 : 0~10cm, 10YR3/4 暗褐, CL, 有機物富, 弱度亜角塊状構造, 中小根頗富、細根富, 粘着性中, 可塑性中, 半湿, 層界波状判然

Bw : 10~30cm, 10YR4/4 褐, CL, 有機物あり, 弱度亜角塊状構造, 中小細根あり, 粘着性中, 可塑性中、半湿, 層界不規則漸変、

2A : 30~45cm, 10YR3/4褐, SCL, 有機物富, 弱度亜角塊状構造, 細根まれ, 粘着性中, 可塑性弱, 半湿, 層界平坦明瞭、(炭化物多く残留)

2C : 45~50+cm, 10YR4/4 褐, レキ土, 層界平坦明瞭



写真3-1 90siteの対照地土壤

・ 90site (火災地) (写真3-2)

土壤分類名 : Haplic Regosols (WRB), Typic Cryorthents (USDA)

Oea : 0~+5cm, 5YR2/3極暗赤褐, 半乾, 層界平坦判然

A : 0~15cm, 10YR3/2 黒褐, CL, 有機物富, 炭化物あり, 屑粒状構造, 中根有小細根含む, 粘着性中, 可塑性中, 中角レキ含む, 半湿, 層界不規則判然

Bw : 15~30cm, 10YR4/5 褐, CL, 有機物含む, 弱度亜角塊状構造, 小細根含む, 粘着性中, 可塑性弱、角レキ (2-5cm) 富, 半湿, 層界不規則漸変

2A : 30~35cm, 10YR3/2 黒褐, CL, 有機物富, 弱度亜角塊状構造, 小根含む, 粘着性弱, 可塑性弱, 半湿, 角レキ (2-5cm) 含む, 層界不規則漸変

2BC : 35~40cm, 10YR4/4 褐, L, 有機物有, 弱度亜角塊状構造, 粘着性弱, 可塑性弱, 湿, 層界波状漸変

2C : 40cm~, レキ土 (角レキ5cm) 、巨岩あり



写真3-2 90siteの火災地の土壤

・ 94site (対照地) (写真4-1)

土壤分類名 : Haplic Cryosols (WRB), Typic Haplorthels (USDA)

Oi : +10~+20 5YR2/3極暗赤褐, 半乾, 細小中根富, 層界平坦判然

Oea : 0~+10cm, 5YR2/3極暗赤褐, 半乾, 大根あり, 細小中根富, 層界平坦判然

A : 0~10cm, 10YR3/3 暗褐, CL, 有機物富, 炭化物含む, 屑粒状構造, 中根有小細根含む, 粘着性中, 可塑性中, レキなし, 半乾, 層界波状判然

AB : 10~20cm, 10YR3/3 暗褐, CL, 有機物含む, 炭化物含む, 弱度亜角塊状構造, 小細根含む, 粘着性中, 可塑性弱、レキなし, 湿, 層界波状漸変

BC : 20~30cm, 10YR4/6 褐, CL, 有機物含む, 炭化物含む, 弱度亜角塊状構造, 細根含む, 粘着性中, 可塑性弱, 湿, レキなし, 層界波状漸変

C : 30~45cm, 10YR3/4 暗褐, CL, 有機物含む, 炭化物含む, 弱度亜角塊状構造, 粘着性中, 可塑性弱, 湿, 層界波状漸変

Cf : 45cm~, 永久凍土, レキなし



写真4-1 94siteの対照地土壤

・ 94site (火災地) (写真4下)

土壤分類名 : Haplic Regosols (WRB), Typic Cryorthents (USDA)

Oea : 0～+5cm, 5YR2/3 極暗赤褐, 半乾, 大根あり, 細小根富, 層界平坦判然

A : 0～10cm, 10YR3/3 暗褐, CL, 有機物富, 炭化物含む, 屑粒状構造, 中根有細根含む, 粘着性中, 可塑性中, レキなし, 半乾, 層界波状判然

A2 : 10～20cm, 10YR4/3 にぶい黄褐, CL, 有機物含む, 炭化物含む, 弱度歪角塊状構造, 小細根含む, 粘着性中, 可塑性弱、レキなし, 半湿, 層界波状漸変

Bw1 : 20～30cm, 10YR4/3 にぶい黄褐, CL, 有機物含む, 炭化物含む, 弱度歪角塊状構造, 細根含む, 粘着性弱, 可塑性弱, 半湿, レキなし, 層界波状漸変

Bw2 : 30～45cm, 10YR3/4 暗褐, CL, 有機物含む, 炭化物含む, 弱度歪角塊状構造, 粘着性弱, 可塑性弱, 湿, 層界波状漸変

BC : 45cm～, 10YR3/2 黒褐, CL, 有機物含む, 炭化物含む, 弱度歪角塊状構造, 粘着性弱, 可塑性弱, 湿, レキなし



写真4-2 94siteの火災地土壤

2. 土色と土壤水分

Gelisolsである対照地とRegosolsである火災地では透水性が異なるため、酸化還元電位に影響し、ひいては鉄の形態に変化を与えて両土壤の土色に違いが認められることを予測した。Gelisolの下層では凍土の融解から供給される水分によって土壤層（活動層）が還元による青灰色を示すことが予測される。一方で、Regosolsでは酸化的条件下で鉄の酸化が進行し、土色が褐色になると予測した。しかしながら、実際には両土壤の下層土壤の土色は褐色系であり、酸化還元の条件を反映した結果が得られなかった。このことには土壤母材が影響していると考えられた。調査地域の中央シベリアでは広く玄武岩が分布しており、土壤母材となっている。玄武岩は黒色を呈する岩石であり、風化後の土壤の基色として黒色味を与えている。従って、調査土壤における黒色味は上層では有機物の影響であり、下層では母材に由来するものと考えられた。酸化鉄の形態を選択溶解抽出法で分析したところ、図3に示すように火災地では非晶質の鉄（Fe_o）が比較的少なく、二次的に生成した遊離の酸化鉄（Fe_d）との比も低くなる傾向が認められた。酸化鉄の形態の相違は土壤水分環境を反映した結果であると考えられた。

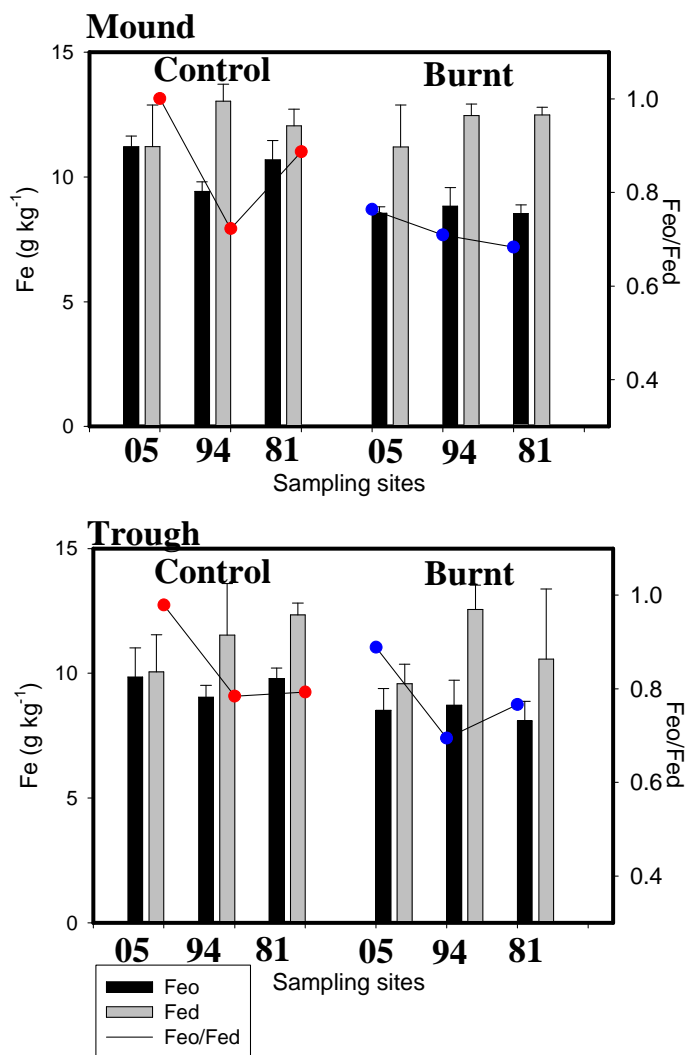


図3 選択溶解法による各鉍質土壤の酸化鉄の形態。深さ0-5cmの表層土壤を供試した。

3. クライオターベーション

いずれの土壌断面においても比較的大きな炭化物が下層で確認されたことから、古くから火災が多く発生していたことがうかがえる。また、土壌擾乱作用、いわゆるクライオターベーションによっても炭化物が上下に移動・輸送されたものと推測された。層界が湾曲したり、不連続になったりしていることからクライオターベーションの働きがうかがえる。また、地表面の凹凸は層界の形状と類似している層位もあったため、ハンモック地形の形成にクライオターベーションが影響していたことが予測された。土壌断面内では凹地形下の鉍質土壌は土色が黒色化する様子や炭化物が比較的多く存在する様子も目視確認できた。地表面に残留していた炭化物が凸部地形の形成に伴って凹部へ流れ込み、土壌断面内に取り込まれたものと考えられた。炭化物を収集し、年代を明らかにすることも興味深い。

4. ハンモック地形

先述したように、ハンモック地形の凹凸の起伏は地点によって異なっていた。図4にハンモック地形の凹凸の振幅幅を1地点につき8か所測定した平均値と標準偏差として示した。火災地と対照地で凹凸の振幅に有意差がある場合は星印を付した。凹凸の振幅は地点によって異なるが、火災地と対照地との差は火災発生後から広がっていることがわかる。火災発生後25年経過した81siteでは最も振幅幅の差が大きくなっており、50年以上経過した51siteでは再び有意差が認められなくなっている。このことは、土壌中の熱伝導と関係があると考えられた。

すなわち、火災発生直後は火災地は対照地と同様の起伏を維持したままであるが、0層の被覆が薄くなった火災地では時間の経過に伴って、日照により地温が上昇し、永久凍土が後退する。図5に94siteの凸地で測定した火災地と対照地の地表面温度の3ヶ月間の変動を示した。1-2°C程度、火災地の地温が高いことがわかる。さらに、地表面だけでなく、下層の鉍質土壌においても火災地と対照地で温度に差があることがわかる（図6）。

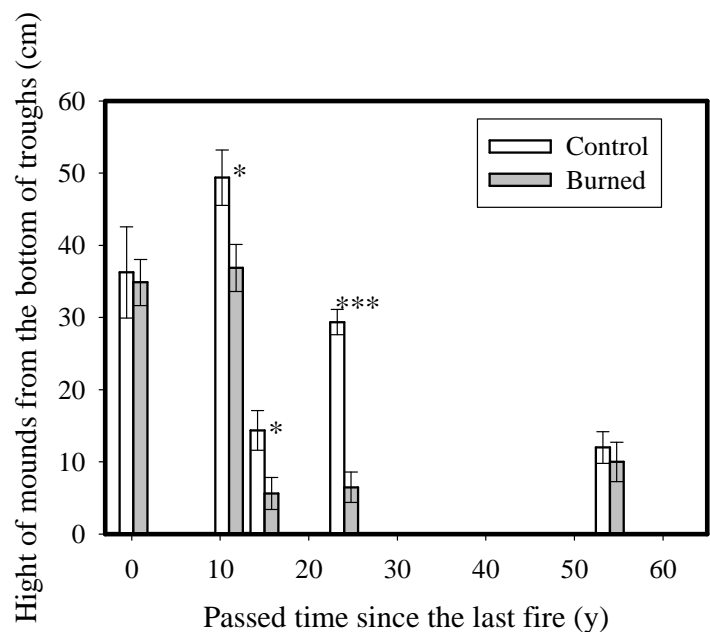


図4 各地点の凹凸地形における凸地頂部から凹地底部までの振幅幅を示した。有意差は*、***はそれぞれ $P<0.5$ 、 $P<0.01$ に相当する。

この温度差は永久凍土の出現深さにも関係し、地温が高く、永久凍土の位置が深いほど、鉍質土壌は凍結しがたくなる。ひいては、地表面付近での鉍質土壌の体積変化が起こらなくなる。そして、火災地の地表面は融雪時の流水や夏季の風食などによっ

て次第に、凹凸起伏を失うものと考えられた。しかし、地表面の植被が回復するにつれて、地温は低下し、再び永久凍土の上昇が鉍質土壌を押し上げると同時に、凍結による体積膨張を起こしやすくすると考えられた。51siteにおける凹凸振幅の差が火災地と対照地で明瞭でなくなっているのは0層の回復と永久凍土の上昇によるものと考えられた。

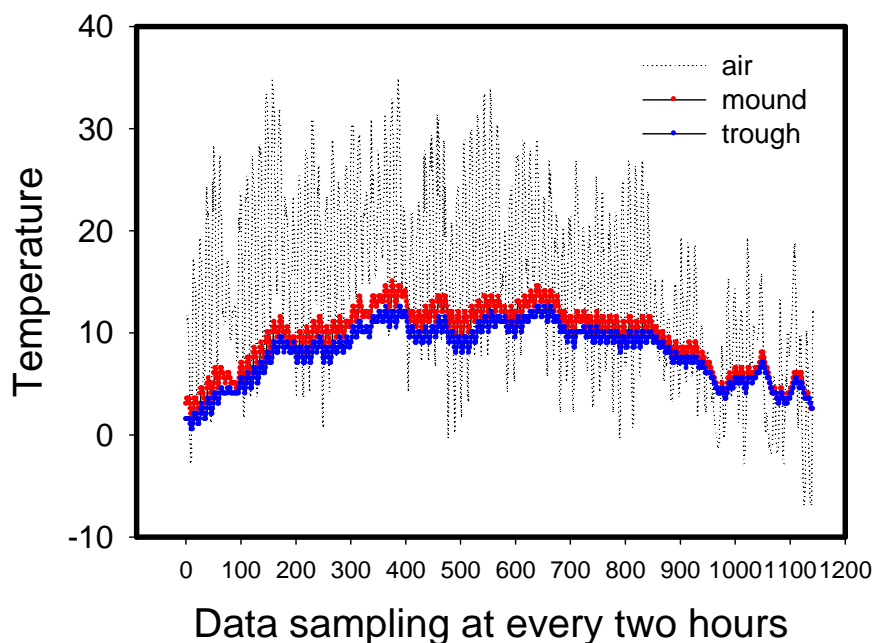


図5 94siteにおける凸地（Mound）と凹地（Trough）の地表面温度の経時的変化。6月8日より測定を開始し、9月11日までの間の2時間ごとのデータサンプリングを行った結果である。

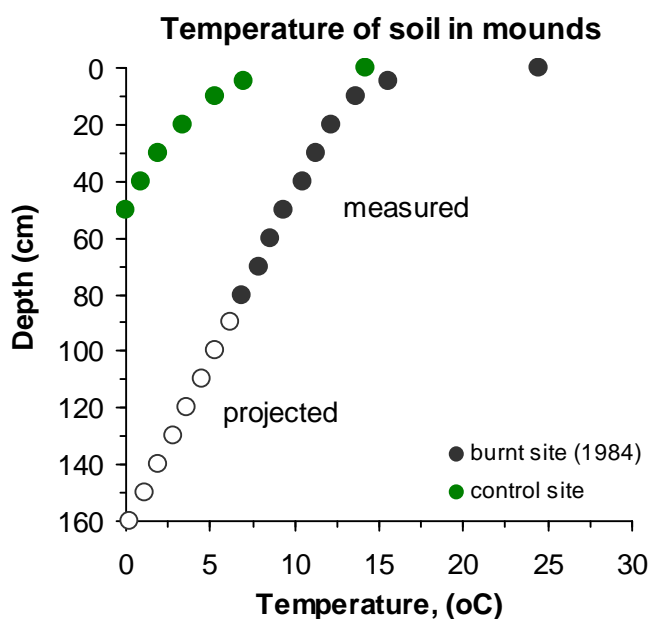


図6 81siteにおける火災地と対照地の土壌断面内での地温の変化

5. 火災後の0層の回復

0層は外気からの熱伝導に対する断熱材の役割をしており、永久凍土の動態への支配因子の一つといえる。火災後の0層の厚さを比較した結果を図7に示した。いずれの研究サイトにおいても対照地の方が火災地よりも厚い0層を形成していることがわかる。しかしながら、火災地の0層の厚さは地形の影響を強く受けており、凸地は火災による燃焼によってかなり薄くなっているのに対して、凹地では燃焼による消失量が凸地に比べて少ないことがわかる。しかし、年数の経過に伴って対照地との差が広がる傾向も認められ、火災地における0層の減少は単純な焼失だけではないことが予測された。恐らく、地温上昇がもたらす微生物活性の増大に伴って分解減少する可能性も考えられた。

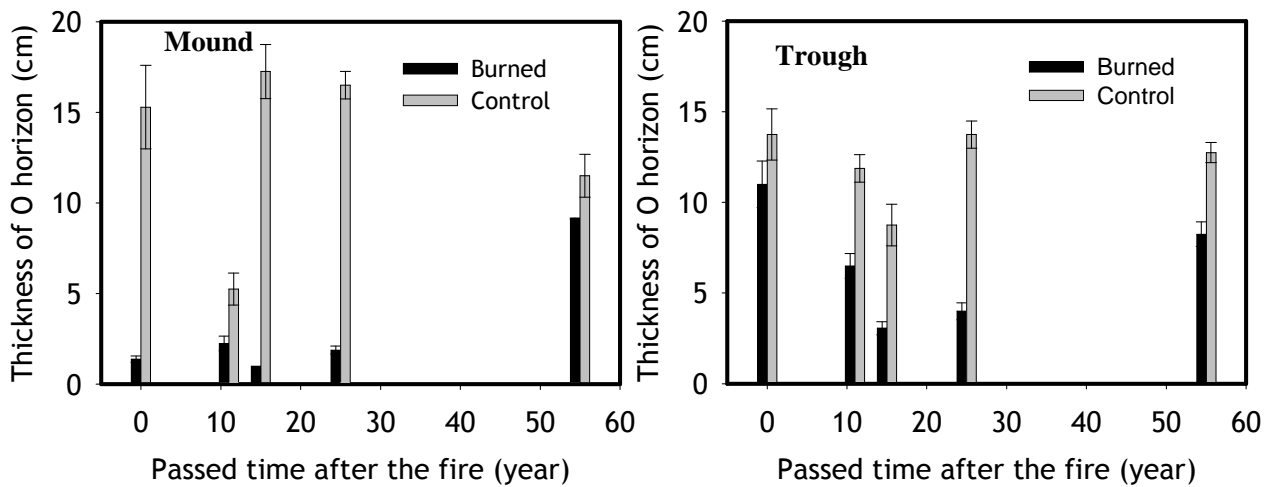


図7 火災後の経過年数と0層の厚さ。経過年数の少ない方から05site、94site、90site、81site、51siteに相当する。

永久凍土上で凹凸地形が発達する環境条件下で凸地と凹地で植生やその被覆程度が異なることはこれまでも報告されており (Kojima, 1994, Johnson et al., 1996)、その植生の相違には凸地と凹地における微生物バイオマスや活性、植物養分となる窒素の無機化が関与すること (Biasi et al., 2005, Johnson et al., 1996) も報告されている。しかし、本研究の調査地域では凸地で植物バイオマス量が多く、構成植生種にも大きな違いが認められなかった。過去にも火災歴があったと考えられること (Zyryanova et al., 2002) から、火災によって焼失したのちに厚い0層を回復する過程があると考えられ、この0層の火災後の発達過程はこれまでの研究で確認された環境と異なると思われる。その主たる原因の一つには養分を比較的多く供給できる玄武岩質母材の土壤にあると考えられた。また、カラマツ林の存在が凸地土壤からの水分蒸発を抑制し、林床植生の被覆と0層の発達を可能にしていると考えられた。

0層の単位体積当たりの重さ、すなわち仮比重を算出した (図8)。火災地の0層の仮比重は対照地のそれよりも明らかに高い。また、凸地でその傾向は顕著である。燃焼によって薄くなった後、水や土壤動物の作用によって鉍質土壤と混和したためと考えられた。火災地の凸地で凹地よりも仮比重が大きいことも同様の理由であると考えられる。0層の厚さおよび仮比重ともに火災後の年数経過に伴って増加する傾向が認められるが、51siteでは最も低い値になっている。

これは、調査地の斜面の向きや傾斜などの要因によって、日照時間、地温、鉍質土壌からの養水分供給が異なるためであると推測された。実際、対照地においても 51site は最も低い仮比重を示している。

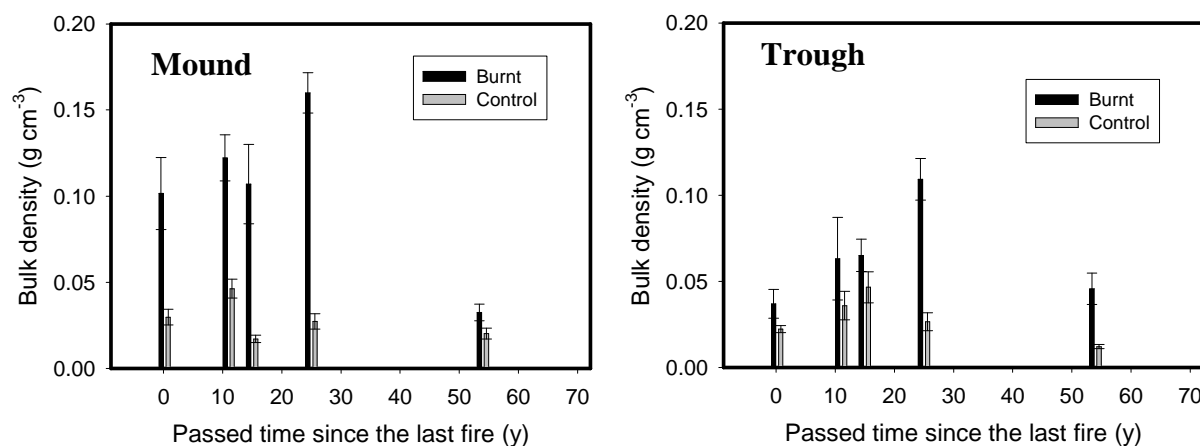


図 8 火災後の経過年数と 0 層の仮比重。経過年数の少ない方から 05site、94site、90site、81site、51site に相当する。

一方、興味深いことに単位面積当たりの O 層の重さは火災地と対照地で明瞭な差が見られなくなっている (図 9)。これは、火災後の O 層が仮比重が大きく、厚さが薄く、体積が小さいのに対して、対照地の O 層は厚さがあるために体積が大きいが、仮比重が小さいためである。算術上、当然の帰結であるが、火災で焼けた後でも単位面積当たりの重さに大きな変化がないことは興味深い。O 層の重さ当たりの微生物分解 (生分解) 率や元素溶出量に大きな差がなければ、燃焼によって O 層が焼失することは O 層を介した生態系の物質循環に大きな変化が生じないということになる。

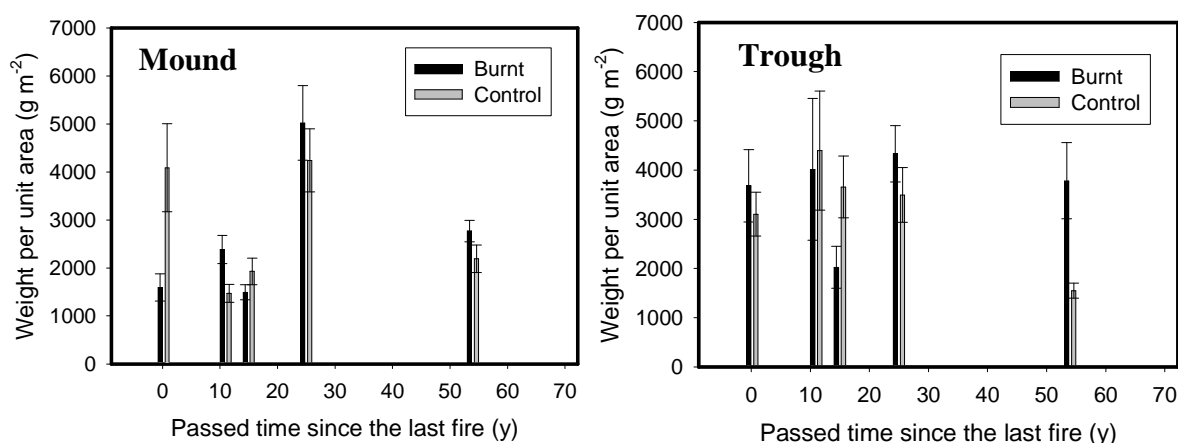


図 9 火災後の経過年数と単位面積当たりの O 層重量。経過年数の少ない方から 05site、94site、90site、81site、51site に相当する。

この火災後のO総重量に変化が認められない事実に対し、同地域の火災後のO層において生分解性をCO₂の発生量から調べたところ、明瞭な違いがないことを最近の研究データとして得ている(図10)。

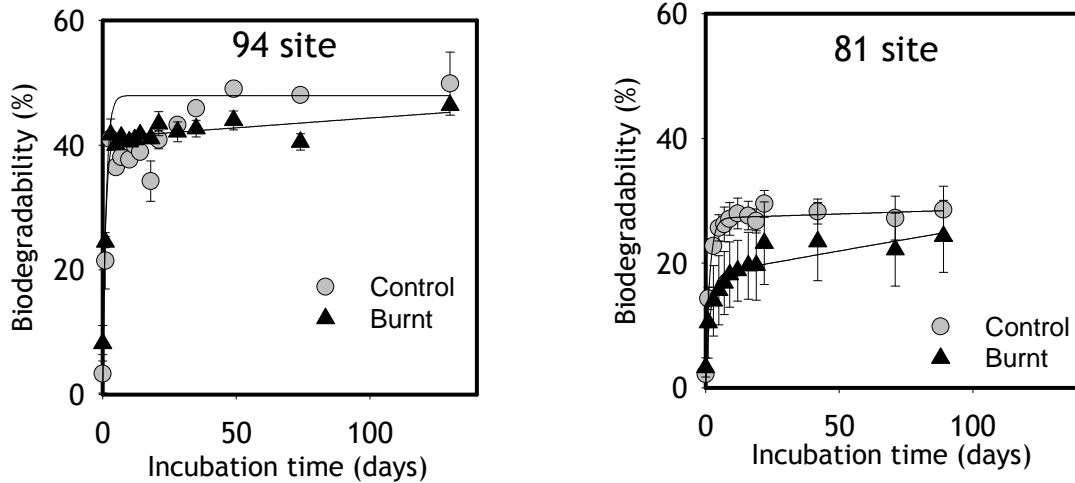


図10 94siteと81siteにおけるO層からの水溶性有機物の生分解性(未発表既存データ)。誤差線は標準誤差。

一方、陰イオンや陽イオンのO層からの溶出は火災地では凸地よりも凹地で多く、凹地では火災後にO層の堆積および厚さが減少したにもかかわらず、水溶性成分の溶出量が対象地に匹敵する程度にまで高くなっている。これは凸地の燃焼残渣や溶存成分が地形に沿って凹地に供給されて残留富化したためと考えられた。このことはハンモック地形における火災後の植生回復が凸地よりも凹地で開始され、経時的に進行するというこれまでの研究成果(Kokelj et al., を裏付ける結果だと言える。

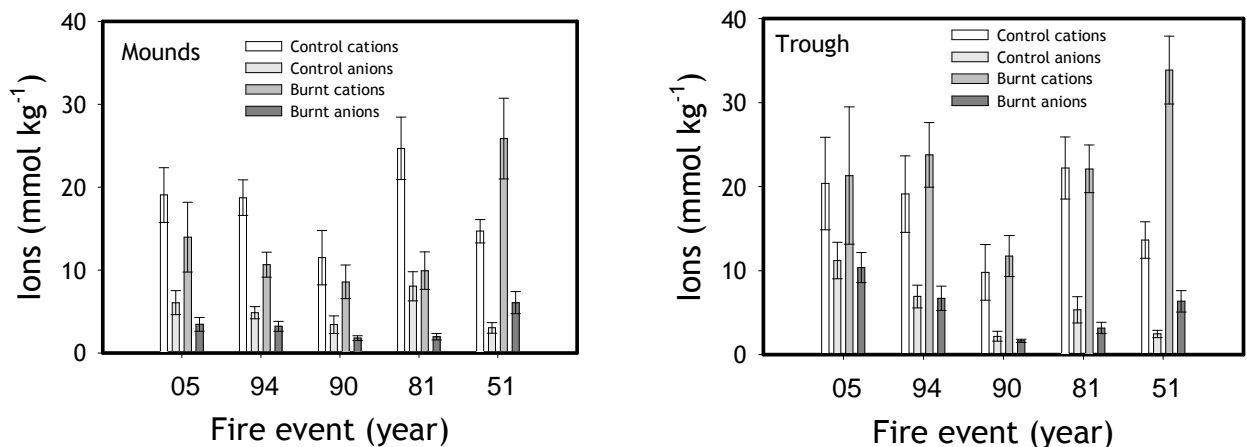


図10 O層から溶出した総陽イオン量と総陰イオン量の火災地と対照地との比較。誤差線は標準誤差

また、陽イオンや陰イオンの溶出は単位面積当たりの有機態炭素量に依存することも全炭素量との間で相関関係が認められることからわかった（図 11）。このことは同地域の一次生産（植物生育）に対してハンモック地形に沿って分布する O 層の存在が重要な役割をしていることを示唆している。すなわち、養分イオンの供給は主に、O 層の生分解を通じてなされていると考えられる。

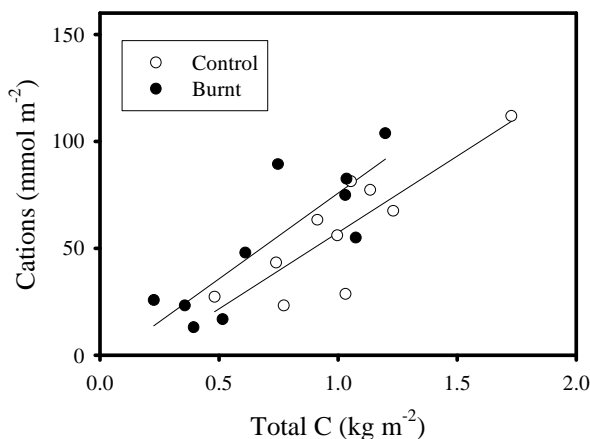


図 11 単位面積当たりの全炭素量と O 層からの溶出する総陽イオン量との関係

以上のように、火災によって焼失する O 層、その後に回復する O 層は永久凍土分布域の炭素や養分元素という生元素の動態に深く関与しており、その火災などのインパクトが生じた際の変化を知ることは重要である。O 層に着目して、活動層、永久凍土、地形、植生回復の関係を以下のように考えることができる。

O 層の形態（厚さ、仮比重）に依存してその断熱効果に変化することは、永久凍土の位置（活動層の深さ）に影響し、この永久凍土の動態が上部に位置する鉍質土壌（活動層）の凍結融解を制御しており、さらにはこの活動層の凍結融解現象が地表面の凹凸、ハンモック地形の形成を可能にしている。ハンモック地形の形成は O 層の発達と関係すると同時に、周期的に発生する森林火災に対して O 層の燃焼程度に違いを与える。すなわち、凹地と凸地で残留する O 層の量が異なり、その後の地温分布や植生回復に影響すると考えられた。

結論

シベリアの永久凍土地帯での森林火災は主に地表面の O 層を燃焼して広がっていく。この O 層の燃焼程度にはハンモック地形が影響しており、火災後の凹地と凸地の O 層の残存量の違いがそのことを示唆していた。また、ハンモック地形における凹凸の振幅は斜面の向きや傾斜の影響を受けるものの、火災後の経過年数に応じて変化する様子も実データをもって把握することができた。また、火災後の経過年数に伴う凹凸振幅の変化や、凹凸部を被覆する植生の量と組成はこれまでの研究報告と異なることがわかり、本調査地である中央シベリアにおいては、比較的乾燥して貧栄養と考えられてきた凸地で O 層の発達が著しいことが相違点として明らかになった。このことは、本調査地点の森林においては凸地形であっても養水分供給が十分な環境であることを示唆しており、その条件にはカラマツ林による日照量の抑制と玄武岩質土壌が持つ養分供給能に

関係することが考えられた。また、土壌断面調査ではクライオターベーションの痕跡を有機物と炭化物の分布から推測できた。これらの断面内の分布が、ハンモック地形の形成に強く影響する土壌の凍結融解現象（クライオターベーション）に応じて規則的に生じていることを土壌分析から明らかにする必要がある。

また、低温且つ湿潤な条件下において鈹質土壌の風化の進行が遅いものに対して、0層の分解に伴う塩基類を主体とした生元素の供給は同生態系の一次生産に重要な役割を果たしている。この0層からの生元素の溶出に対して、火災による0層の燃焼は大きくそのポテンシャルを損なうが、ハンモック地形における凹地の0層は火災前の0層よりも高い溶出ポテンシャルを持つに至ることが明らかとなった。このことから、地形に応じた0層の分布は火災後の植生及び永久凍土の回復、そしてハンモック地形の形成への重要なトリガー因子になることが予測できた。先に示したクライオターベーションが土壌生成に及ぼす影響に関する研究課題に、さらに地形に応じた0層の分布とその元素溶出ポテンシャルの成果を合わせると、ハンモック地形および0層の分布が極北域の鈹質土壌の土壌生成に関与する過程を論じることが可能になると考えられる。

謝辞

本研究は国土地理協会の平成21年度助成事業として採用され、その助成金で進行することができた。ロシア国内ではDr. Prokushkinの協力を得て、現地調査および分析を実施することができた。また、本研究を遂行するに当たり、生分解性の分析、炭化物の同定と定量、水溶性成分の溶出と分析とデータ解釈について、農業環境技術研究所の平館研究員、神戸大学の藤嶽准教授、金沢大学の長尾教授、宇都宮大学の平井准教授、日本大学の隅田准教授のご指導およびご協力を頂いた。以上の団体および個人に対して、ここに謝意を表す。

引用文献

- Biasi, C., Wanek, W., Rusalimova, O., Kaiser, C., Meyer, H., Barsukov, P., Richter, A., 2005. Microtopography and plant-cover controls on nitrogen dynamics in hummock dynamics in hummock tundra ecosystems in Siberia. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 37, 435-443.
- Johnson, L.C., Shaver, G.R., Giblin, A.E., Nadelhoffer, K.J., Rastertter, E.R., Launder, J.A. Murry, G.L., 1996. Effects of drainage and temperature on carbon balance of tussock tundra microcosms. *Oecologia*, 108, 737-748.
- Kokelj SV Burn CR Tarnocai C (2007) The structure and dynamics of earth hummocks in the subarctic forest near Inuvik, Northwest territories, Canada. *Arct Antarct Alp Res*, 39: 99-109
- Kojima, S., 1994. Relationships of vegetation, earth hummocks, and topography in the high arctic environment of Canada. *Proceedings NIPR (National Institute of Polar Region) symposium Polar Biology.* 7, 256-269.
- Zyryanova, O.A., Bugaenko, T.N., Abaimov, A.P., Bugaenko, N.N., 2002. Pyrogenic transformation of species diversity in Larch forests of the Permafrost zone. *in* *Lesnye ekosistemy Eniseiskogo Meridiana (Forest ecosystems of the Yenisei Meridian)* Pleshikov, F.I. (ed). Akad Nauk, Novosibirsk.

