

## 特集 地球温暖化防止と都市の緑



Urban Green Tech

財団法人 都市緑化技術開発機構

Organization for Landscape and Urban Greenery Technology Development

本誌の作成にあたって、宝くじの普及宣伝事業の助成を受けています。

# 温暖化ガスにかかわる 永久凍土攪乱の抑制技術

Development of Control System of  
Permafrost Disturbance and  
Its Impact to Greenhouse Gas Emission



福田 正己

Masami FUKUDA

北海道大学  
低温科学研究所 教授

Professor,  
Institute of Low Temperature  
Science, Hokkaido University



高橋 邦秀

Kunihide TAKAHASHI

北海道大学 大学院  
農学研究科 教授

Professor,  
Graduate School of Agriculture,  
Hokkaido University

**SUMMARY** : Siberian Taiga occupies the largest forested land area in the world, and it is considered as the major sink of carbon. However recent increasing forest fire occurrence emits a huge amount of Carbon Dioxide and thawing permafrost also emits Methane to the atmosphere. Thus Siberian Taiga is assumed as no more Sink but Source of carbon. It is urgent task to suppress the fire occurrence and to reduce the amount of emission of greenhouse gases. Present authors propose the comprehensive System for fire control and remediation of burned sites in Siberia based on international cooperation.

## 1. はじめに

シベリアの針葉樹林帯（タイガ）は世界の森林面積の約22%を占めている。図1はNOAA衛星画像による夏季の東ユーラシアの植生指数分布を示している。北緯47度から70度でもっとも植生被覆が密になっており、これがタイガ帯に一致する。この地域では年降水量は200-300mm程度と少なく、冬季には気温は-50℃以下になるという厳しい自然環境下にある。にもかかわらずタイガが成立するのは地下に年間と通じて地盤が凍結したままの永久凍土が存在しているからである。その厚さは場所によっては数100

mにも達する。夏季には表層1m程度は融解する。下層の永久凍土はまったく水を浸透させないので、わずかな降水はこの夏季融解層（活動層）に貯留され、これがタイガを涵養している。永久凍土も2万年前の最終氷期（寒冷期）に厚く形成され、1万3千年前からの後氷期以降の温暖化で熱的に不安定化した。しかし後氷期にいち早くタイガが回復し、温度上昇が地中に伝播するのを防いでいるため、永久凍土は大規模融解せずに残存してきた。つまりタイガと永久凍土は相互の存在が依存しあう関係（生態学用語の共生関係）にあると言える。もし表面を覆うタイガが失われると、その下の永久凍土が大規模融解し、その後は土壌が乾燥化して再びタイガが回復しなくなる可能性があるのだ。

NOAA NDVI (1995.7.1~10)

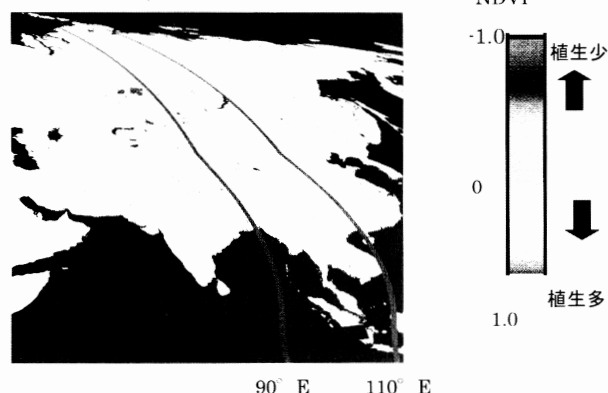


図1 ユーラシア大陸東側の植生指数分布

## 2. 温暖化と森林火災

現在進行しつつある地球温暖化のもとでの100年間の気温上昇は平均で0.6℃程度である。しかし東シベリアタイガ地域に位置するヤクーツクではそれを大きく上回る温暖化が進行している。図2 aはヤクーツクでの1830年-2000年までの長期年平均気温変動を示している。最近100年間の気温上昇は2.5℃にも達する。一般に気温上昇は降水量増加をもたらすが、ヤクーツクでの年降水量変動ではむしろ減少傾向が見られる。(図2 b)。温度上昇と乾燥化は結果

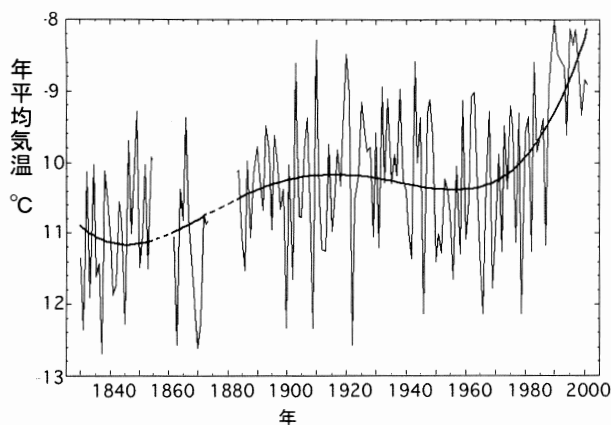


図2a ヤクーツクの長期間気温変動

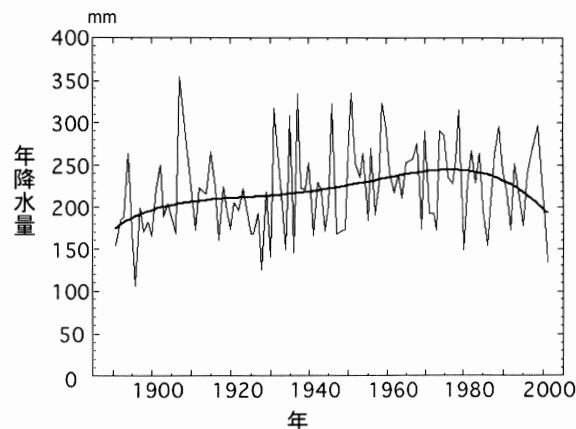


図2b ヤクーツクの長期間年降水量変動

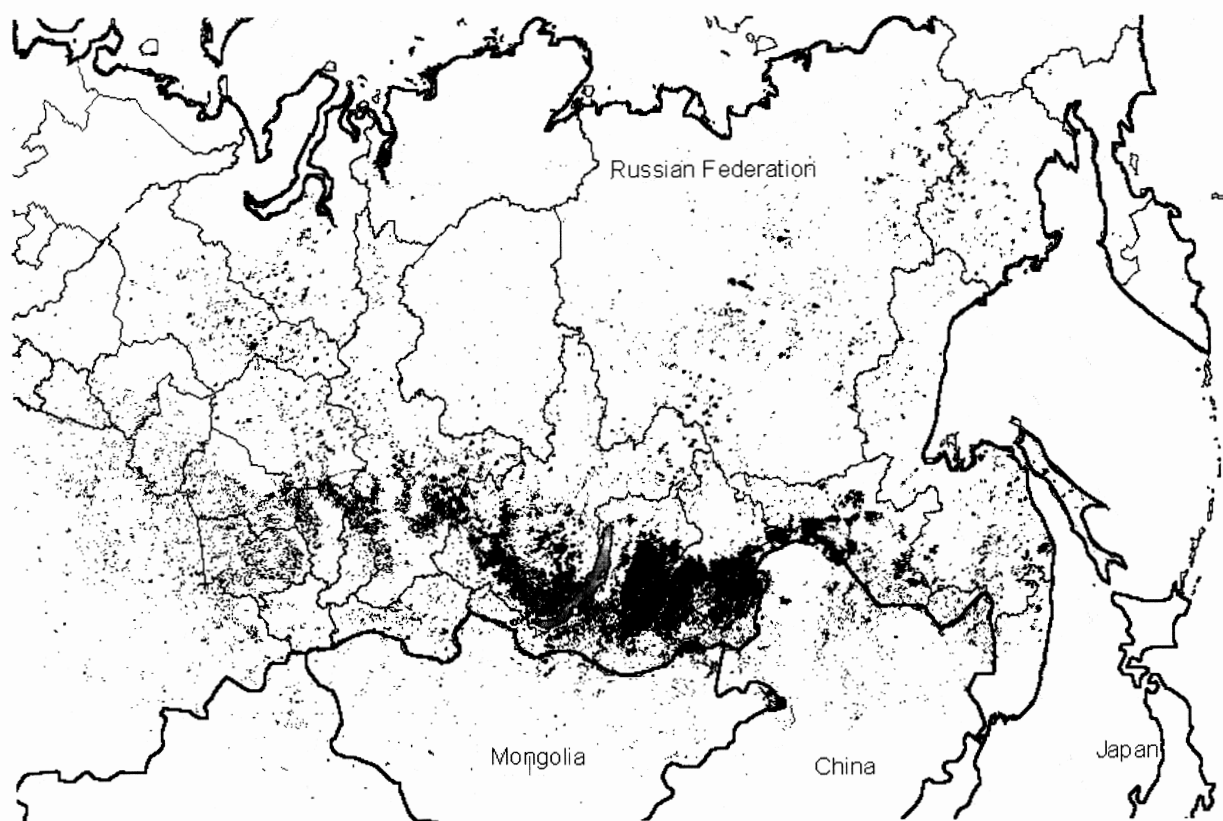


図3 2003年夏季のシベリアでの森林火災発生分布（ロシア科学アカデミー イルクーツク太陽地球物理研究所提供）

として森林火災の多発を引き起こす。図3はNOAA衛星で検出した2003年の夏季（5月－10月）にシベリアで発生した森林火災の分布を示している。この年は夏季雨量が少なくまた高温であったため、火災が多発し、推定の焼失面積は2,000万haと見積もられた。

本来タイガは大気中の二酸化炭素を吸収し、酸素を放出する機能を持ち、いわば「地球の肺」の役割を担っていた。大規模な森林火災はこうした機能に

障害を与えている。しかもその症状は深刻であると言える。2004年夏季にはアラスカでやはり大規模な森林火災が多発した。推定の焼失面積は600万ha以上にも達する。最近の東シベリアとアラスカでの森林火災の発生変動を図4に示す。相互に離れていても変動の傾向に類似性が認められ、特にここ数年間に火災が頻発していることがわかる。火災の主原因はシベリアでは約70%は人為であるが、アラスカでは約70%が落雷などの自然起源である。

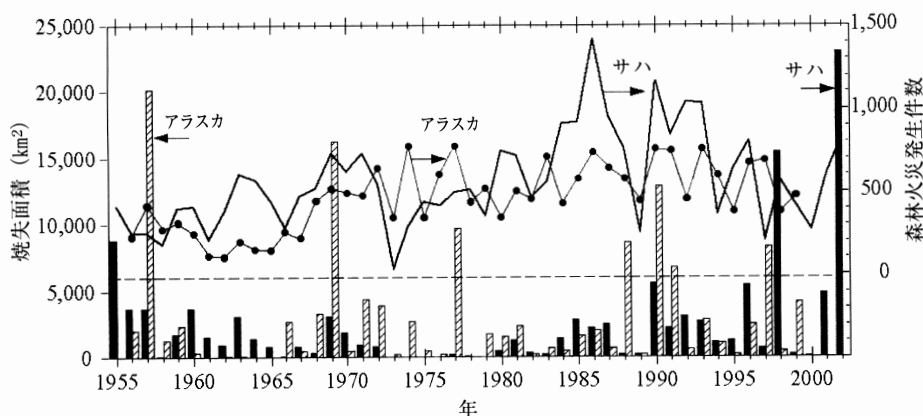


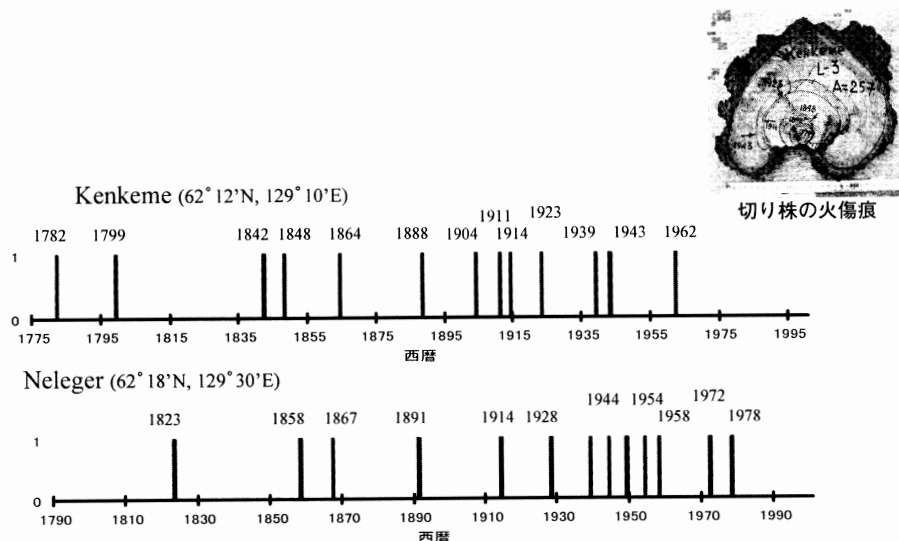
図4 最近の東シベリア（サハ）とアラスカでの森林火災発生変動

### 3. 火災による炭素収支の変動

永久凍土地帯に分布するシベリアタイガはカラムツ林が海原のように続く大森林帯であるが森林火災が年中行事となっており、都市部に近い限りあまり報道もされていない。1,100万 ha に及んだ1998年のロシアでの森林火災はバイオマス約3億5千万トン进行燃やし、1億8千万トンの炭素を放出したと推定されている。平均焼失バイオマス30トン/ha、15炭素トン/haとなる。このような火災による直接的放出の他に火災後の地表や土壌中の有機物分解によりこの2倍もの炭素が放出される。2002年は1170万 ha、2003年は2,000万 ha もの森林地帯が燃

えている。これは炭素放出量がそれぞれ1億8千万トン、2億9千万トンとなる。平均年間炭素吸収量を1トン/haとすると、同一面積の森林が放出量を吸収するには15年間必要となる。また、2年間で放出された炭素量はロシアの60%の森林（約4億7,000万 ha）が1年間に吸収する量に匹敵し、日本の森林（人工林1.77炭素トン/ha、天然生林0.9炭素トン/ha）で吸収するには14倍もの面積が必要となる。

ヤクーツク近郊のカラムツ成熟林で切り株の火傷痕（図5）を調べたところ、最近200年間の平均火災頻度は15年、最短の繰返しは3年、最長でも50年であった。また、2002年の森林火災で全焼した50年



過去200年間の平均繰返し間隔は15年、最短は2年、最長は50年。  
次代を確実に残すには50年以上の間隔が必要。

（安定した林床植生を見るため最近の火災影響の最も少ない林分での調査結果）

図5 森林火災の繰返し

## Net Primary Production (carbon)

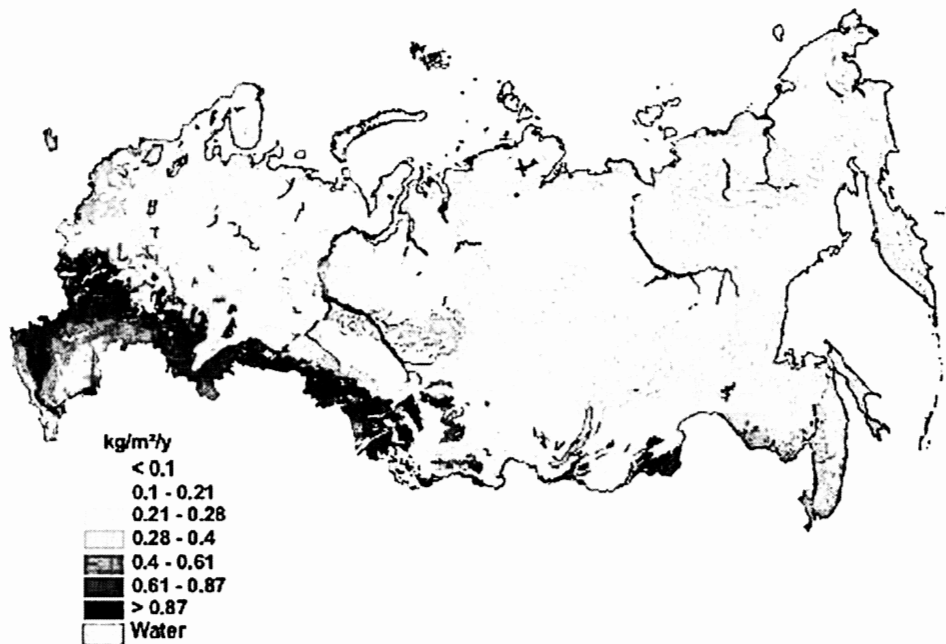


図6 ロシアの植生による純生産量（炭素量）

生前後のカラマツ林からの直接の炭素放出量は32～35炭素トン／haであった。5年前にカラマツが焼失した林地では0.89炭素トン／haの放出あるいは0.07炭素トン／haの吸収となっており、火災後数年間は二酸化炭素を放出している可能性が高い。このように森林火災による炭素放出は、火災強度や土壌有機物量などにより大きく影響される。

一方、シベリアタイガによる二酸化炭素吸収量は樹種構成や樹齢により異なり、これは地域ごとの吸収量の違いとして現れる。IIASAの資料では、ロシアのタイガ植生による年間平均炭素吸収量（図6）は、1～4炭素トン／haとなっており、永久凍土地帯は1炭素トン／haである。しかし、ヤクーツク

近郊の150年生前後のカラマツ成熟林では年間1.24～1.40炭素トン／ha、25年生の若齢林では2.39炭素トン／haの吸収となり、平均よりかなり高くなっている。このように森林による吸収量は林分毎に異なるので炭素収支の見積もりは慎重に行う必要がある。

## 4. タイガ攪乱による永久凍土融解とメタンガスの放出

前述したように現在の永久凍土は温暖化のもとで熱的不安定化が進行している。大規模な火災や伐採の攪乱を受けると、地表面熱収支バランスが崩れて、凍土の融解が促進される。ところがシベリア及びアラスカの永久凍土の表層部には過去の環境下で生成

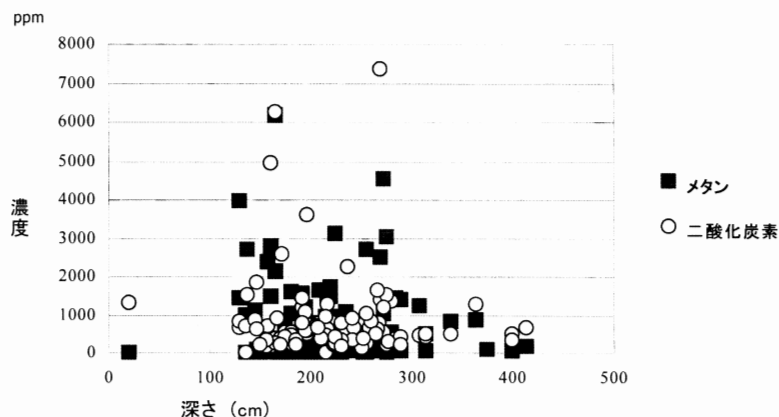


図7 東シベリア永久凍土上層に含まれる温暖化効果ガス



図8 融解する永久凍土からのメタンガスの放出

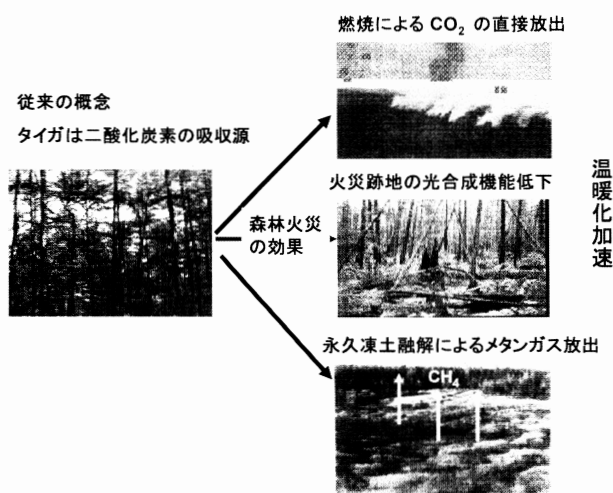


図9 森林火災による温暖化効果ガス放出と温暖化加速

された高濃度のメタンガスが貯留されている。図7は東シベリアでの永久凍土中気泡のメタンガスと二酸化炭素の濃度分布である。大気濃度の数千倍のメタンガスが含まれている。森林攪乱で凍土の融解は深さ8m程度までに達することが観測されおり、高濃度のメタンガスが直接的に大気へ放出される。また図8のように凍土融解で地面が陥没した跡地（この凹地をアラスと呼ぶ）では、融解した水が貯留され、そこでは嫌気的な環境での有機物分解が進行し、凍土融解によるメタンガス放出に加えてメタンガスが発生する。現地での観測結果によると、東シベリアでは夏季には気温上昇と日照時間の長いことから、活発なメタン生成が起こる。その値は $300\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ にも達する。これは日本の湿原での観測値の数倍である。そこでタイガでの火災や攪乱による温暖化促進の過程を図9に示す。

## 5. 抑制法の開発

シベリアでの森林火災による二酸化炭素放出量については3で述べたように、大規模火災時には明らかに吸収を上回っている。そこに凍土融解に伴うメタンガス放出が加わって、森林火災などの攪乱を考慮すると温暖化を加速させている。それはさらに火災を発生しやすくして、温暖化をさらに押し上げる。こうした悪循環が起こりつつあり、温暖化の抑制のためには、森林火災による様々な障害を抑制する必要がある。そこで北海道大学を中心とする研究グループは攪乱にかかわる温暖化効果ガス抑制法の開発の調査・研究を平成12年～平成15年度に実施した（科学技術振興機構 JST 戦略的基礎研究 CREST）。その成果から現在提案中の抑制法を紹介する。

### 1) 火災の早期検出システムの構築

広大なシベリアでは火災の発生箇所を特定するのは容易ではない。そこで NOAA AVHRR あるいは MODIS TERRA という周回頻度の高い衛星によって早期に火災を検知する。検出の分解能は50m平方であり、少なくとも1日1回の検知情報を得ることが出来る。

### 2) 火災拡散の予測システムの構築

夏季のシベリアは乾燥しており、またその広域性から、消火作業のために水や消火液の散布による抑制は困難である。しかしシベリアでの森林火災の拡散は火の粉の飛び火よりも有機物（リッターや枯死した枝）が集積している林床の地表火での拡散によっている。そこで幅5m深さ50cm程度の防火帯を拡散する前面に設けることで、延焼拡散を止めることが可能となる。しかしそのためには、早期検知した

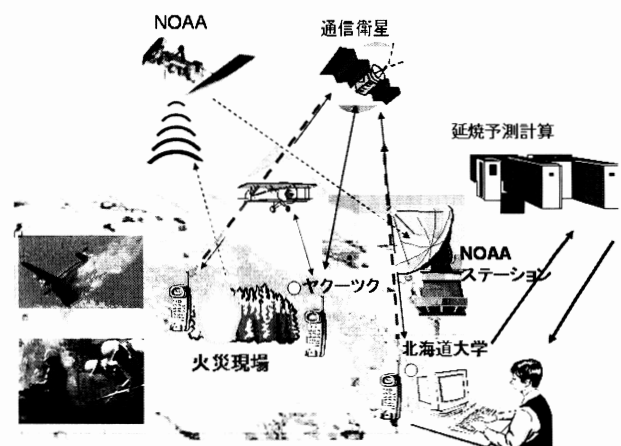


図10 北方森林火災の抑制システム



火災発生箇所での地形、森林タイプ、風向、風速などの情報に基づく延焼予測を行う必要がある。既に研究グループではセルオートマン法による延焼予測の開発を行っている。

以上の火災早期検出と延焼予測を統合的に行うシステムを現在提案している。(図10)。

### 3) 火災跡地の修復技術開発

現在、ロシアにおいて未立木地となっている火災跡地面積は1998年で2,800万 haと見積もられている。この未立木地を森林へ修復するには苗木の人工植栽が手っ取り早いと考えられがちであるが、とくに永久凍土地帯では大面積の人工林造成の経験は皆無に近く、広大な未立木地を植栽による修復を図ろうとする場合、種子の収集・貯蔵、苗畑造成、養苗・植栽・保育技術の確立、労働力確保などインフラ整備も含めかなりの資金と時間が必要となる。適切な間隔での森林火災はシベリアタイガの世代交代に必要なものであり、火災後の条件さえ整えば自然に修復される。それを妨げているのが人間の不注意・無関心により間隔が短くなってしまった火災である。つまりシベリアにおける森林火災は両刃の刃である。現状では、まず同一林地における火災間隔を伸ばすための防火対策が最重要である。同時に、火災跡地の自然修復パターンから、森林への修復不可能（非可逆）となる条件、指標植生などを明らかにし、更新方法を検討することが必要である。当面は自然修復が不可能と判断される林分について、航空機による直播や重機による地がきなどの地表処理技術の確立を目指すべきである。(図11)。

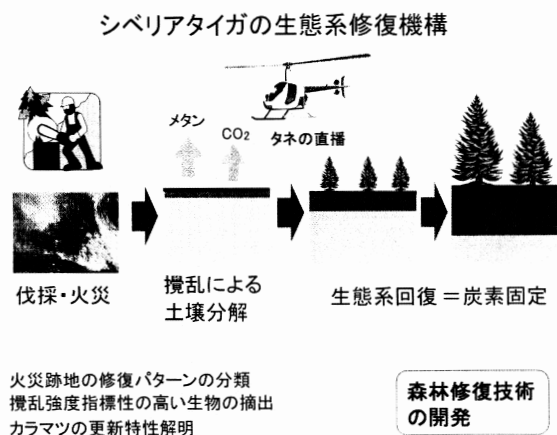


図11 森林修復技術の開発

## 6. おわりに

2004年11月にロシアが京都議定書に批准し、2005年2月には京都議定書が発効した。日本が2008年－2012年の第一次約束期間に削減を達成するのは容易ではない。広大なシベリアで発生する森林火災の発生予知、延焼予測による抑制、焼け跡での適切な修復を日本とロシアが共同で実施することで、かなりの温暖化効果ガス放出を削減出来るはずである。これは批准国相互の共同実施（JI）に該当し、相当分を日本の削減分とすることも可能となる。そうした将来展望を見据えながら、抑制法の具体化が急がれている。

### 〈参考文献〉

- ・ 福田正己（1997）：第5章 永久凍土、極地の科学（共著）、55-68、北海道大学大図書刊行会 pp179
- ・ 高橋邦秀（1997）：第10章 シベリアタイガ、極地の科学（共著）、131-144、北海道大学大図書刊行会 pp179
- ・ 福田正己・高橋邦秀（1999）：シベリアタイガの破壊が何をもちたらずか、科学、69、568-571.
- ・ 福田正己（1999）：シベリアと地球環境問題、岩波地球環境講座 第8巻、175-205.
- ・ 福田正己（1999）：シベリア永久凍土地域の森林破壊と温暖化ガス、北海道の林木育種、42,4-9.
- ・ 高橋邦秀（2001）：北方林から地球環境問題を考える—極東ロシアを中心に—、熱帯林業 51:2-10
- ・ 高橋邦秀（2001）：森は燃えている、森林火災の「功」と「罪」、サイアス 9月号、64-65
- ・ 福田正己（2004）：「地球温暖化」は何が問題か、岩波応用倫理学講座 第2巻、201-209、岩波書店 pp227。
- ・ 福田正己（2004）：大規模北方森林火災発生の背景と実態、自然災害科学、Vol23,315-321.
- ・ 高橋邦秀（2004）：森林火災発生と炭素収支、自然災害科学、Vol23,331-333.
- ・ 早坂洋史（2004）：気候変動に伴う最近の大規模森林火災の発生傾向、自然災害科学、Vol23,321-326.
- ・ 中右浩二（2004）：大規模森林火災の早期検出と対策、自然災害科学、Vol23,341-344.

問い合わせ先：mfukuda@pop.lowtem.hokudai.ac.jp