

課題名	B-053 ロシア北方林における炭素蓄積量と炭素固定速度推定に関する研究		
課題代表者名	沢田治雄（独立行政法人森林総合研究所）		
研究期間	平成17-19年度	合計予算額	64,348千円（うち19年度18,723千円） 上記の合計予算額には、間接経費 14,851千円を含む
研究体制	<p>サブテーマ（1）凍土地帯の森林生態系における炭素蓄積量と炭素固定速度 （京都大学 大学院 農学研究科）</p> <p>サブテーマ（2）非凍土地帯の森林生態系における炭素蓄積量と炭素固定速度 1）極東地域の森林生態系（北海道大学 大学院 農学研究院） 2）中央シベリアの森林生態系（独立行政法人 森林総合研究所） 3）ヨーロッパ・ロシアの森林生態系（独立行政法人 森林総合研究所）</p> <p>サブテーマ（3）森林火災による炭素蓄積量・炭素固定速度への影響 （北海道大学 低温科学研究所）</p> <p>サブテーマ（4）炭素蓄積量と炭素固定速度の広域評価（独立行政法人 森林総合研究所）</p> <p>〈研究協力機関〉 北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター、龍谷大学・理工学部、 ロシア極東農業大学、ロシア科学アカデミー・スカチュフ森林研究所、 ウラル森林工科大学、ロシア科学アカデミー・寒冷圏生物研究所</p>		
研究概要	<p>1. 序（研究背景等）</p> <p>ヨーロッパ・ロシアから北東ユーラシアの極東地域まで、経度でおよそ東経30度から東経150度までに及ぶ広大なロシアの北方林生態系は世界の森林面積の2割を占め、しかも中央シベリアと東シベリアには凍土地帯に広大なカラマツ林生態系が分布している。温暖化の影響は高緯度地帯で顕著に現れると多くのシミュレーションが警告しており、限界的な環境下に生育しているロシアの森林ではその影響が懸念され、その面積の大きさと蓄積した莫大な炭素量という点から、北半球の陸域炭素循環に与える影響がひじょうに大きいと考えられている。ロシア北方林は、気候変動への影響をはじめとする生態学的重要性が高まっているだけでなく、近年多発傾向にある森林火災や、激変するロシアの経済状況と近隣諸国間で起こる違法伐採の問題など、多くの社会経済的な課題に森林資源が直面し、森林資源量の正確な把握や広域評価に関する適切な手法開発が急がれている。しかし、ロシアの森林と温暖化との関係に関して、公開されている科学的な成果が乏しかった。</p> <p>ロシアの北方林については旧ソ連時代の多くの研究が存在するが、それらはほとんどロシア語による記述で発表されているために国際的には流布しなかった。そのため西側諸国が研究に利用できたのはモスクワ中心の知見がほとんどで、北方林の全貌を知ることはできなかった。また、旧ソ連崩壊後に起こった政治経済状況の混乱から、森林の長期モニタリング研究が途絶えていた。ロシアの北方林は、生態学的・生物地理学的には、ヨーロッパ・ロシアから西シベリア低地まで広がる森林地帯と、中央シベリア南部から極東地域に至る森林地帯が冷温帯・亜寒帯の常緑針葉樹林と落葉広葉樹の混成する針広混交林である。これとは景観が全く異なる森林地帯が、エニセイ川以東の中央シベリアと東シベリアには広がり、それらの地域には永久凍土が連続して分布し、その上は広大な落葉針葉樹林地帯（カラマツ林）となっている。このような実際の森林の特徴と分布を考慮した生態学的な研究と森林資源モニタリング調査はいまだに不十分であり、「モスクワ中心」の知見（常緑針葉樹林生態系偏重）を「外捜」した推定手法が多いのが実情である。京都議定書が発効した現在、林床と土壌を含めた森林生態系全体の炭素蓄積量と炭素固定速度の算定に関する科学的な根拠が求められている。</p> <p>旧ソ連時代から蓄積された研究成果の多くが、ロシア語で公表されたことに起因する困難さを克服するために、我々の研究グループではこれまで培ってきたロシアの永久凍土地帯における共同研究のノウハウを生かし、日露の共同研究が国境を越えた環境問題の解決に貢献できるように、現地調査による炭素蓄積に関するデータ収集と、既存の森林生態系に関する研究資料の系統的な探索を</p>		

進めてきた。本課題ではロシア北方林全域の炭素蓄積量と炭素固定速度を高い精度で推定し、かつ衛星データとリンクさせた広域評価を目指している。

2. 研究目的

上記のような背景から、本研究ではロシア北方林を凍土地帯と非凍土地帯に大別し、その生態学的・生物地理学的な特徴を考慮した既存データのとりまとめを行い、森林の炭素蓄積量と炭素固定速度の推定に適切なデータ構築を目指している。また、凍土地帯では、熱帯から冷温帯の植物生態系で成り立つ法則が成り立たないことが明らかになりつつあり、凍土地帯に特有な森林の成長停滞現象、それに伴う炭素蓄積量と炭素固定速度への関係などの解明を目的としている。非凍土地帯では、森林構造発達に伴う炭素蓄積パターンの解明するために主要な樹種の現存量調査データチェック（実測されたものかどうか）を行い、地上部と地下部のデータセット拡充によって炭素蓄積量推定の精度向上を目的としている。地上部と地下部の炭素蓄積に加えて、ロシア北方林の炭素蓄積に最も大きな貯留の場となっている土壌と林床堆積腐植のデータセットについても、地域特性と土壌特性を考慮して検討する。

さらに、森林火災の影響評価のための手法開発を含む、衛星データとのリンクをはかり、広域評価の適切な手法開発によって、実測データとの統合により、炭素蓄積量と炭素固定速度推定を目指している。広域評価の手法として、サブテーマ（4）ではサブテーマ（1）から（3）で得られる地上観測データと、衛星の時系列観測データを融合させてロシア全域の炭素蓄積量と固定速度を推定する手法を開発することを目的としている。

3. 研究の方法及び結果

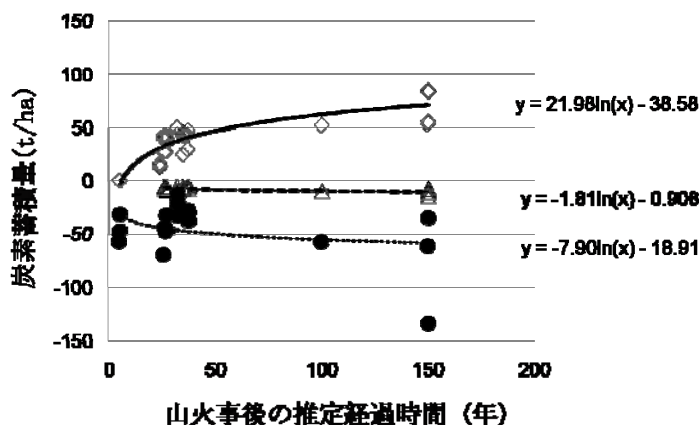
（1）凍土地帯の森林生態系における炭素蓄積量と炭素固定速度

永久凍土地帯に成立するカラマツ林生態系について、既存の森林資源調査データと独自に収集したデータを用いて、生態系の炭素蓄積量と炭素固定速度の推定を試みた。凍土地帯のカラマツ林では地位が悪くなるに従い、自己間引きの法則からはずれる林分発達のパターンを示し、地上部現存量が一定の値に達して頭打ちとなっていた。これに関連した「枯れ下がり」現象に着目して、詳細な成長過程を復元した。初期成長の遅い個体が枯れ下がり現象を起こさずに大きな個体になること、火災後の林床回復と永久凍土面の再上昇、根圏土壌の環境変化と枯れ下がりの関連などが明らかになった。

また、永久凍土地帯のカラマツ林はわずかながら炭素のシンクとして機能するデータを得た。カラマツ林生態系の面積を考慮すると厳しい環境下にもかかわらず、年間0.14 Gton Cの炭素固定をしていると推定した。

（2）非凍土地帯の森林生態系における炭素蓄積量と炭素固定速度推定

極東地域から中央シベリア、ヨーロッパ・ロシア地域までの非凍土地帯について、森林の現存量の樹種特性、土壌有機炭素の蓄積量の既存データを収集・検討した。極東・アムール州では森林火災後の経過年数と炭素蓄積過程の現地測定を行った。極東地域の針広混交林では頻発する森林火災の影響で、従来の遷移とは異なる森林タイプが増加しつつあり、長期的には炭素蓄積量、炭素固定速度の減退が予想された。

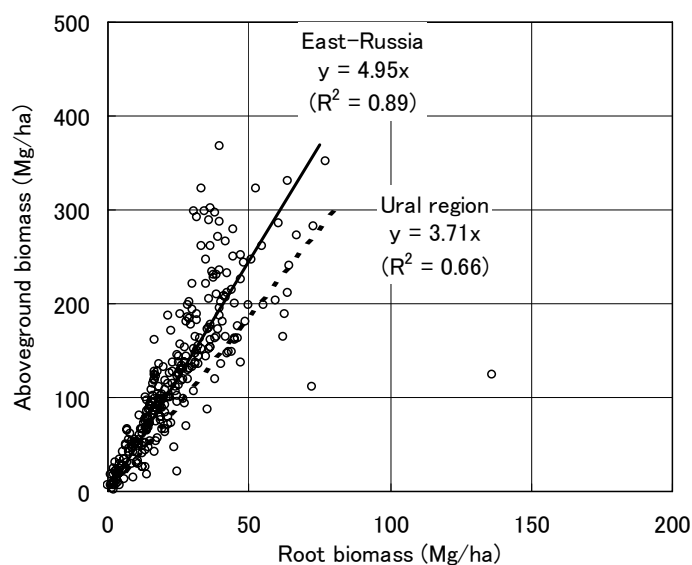


森林火災後の経過年数による炭素蓄積量の変化を示す図。

地上部現存量に蓄積した炭素はおよそ80tonC/ha程度に達すると増加が鈍る。地下部は10tonC/ha程度である。土壌の有機炭素は60 ton C/haになる。

◇ 地上部炭素量(木本のみ) △ 地下部炭素量(木本のみ) ● 土壌炭素

また、地上部現存量と地下部現存量の比、T/R比の樹種特性と地域特性を明らかにするために、ヨーロッパカマツは290林分、トウヒ146林分、カンバ116林分、ヤマナラシ35林分の、地上部と地下部が揃ったデータセットで解析した。炭素蓄積量推定には樹種特性と地域特性を考慮すべきであることを示した。



ヨーロッパカマツの地下部現存量と地上部現存量の関係を示す図。実線はヨーロッパ・ロシア地域、破線はウラル地域。同じ樹種でも地域によってT/R比が異なっている。

既存研究データを検討した結果、ロシアの森林土壌全体の炭素蓄積量74 Gton Cの約7割が非凍土地帯に分布し、3割は永久凍土地帯の森林土壌に分布していた。同様に森林の堆積腐植層に蓄積した炭素量13.5 Gton Cの約7割は非凍土地帯に、3割が永久凍土地帯に分布していることが明らかになった。

(3) 森林火災が炭素蓄積量と炭素固定速度に与える影響

森林火災直後の延焼枯死林分と地表火延焼林分などの7つの土地被覆カテゴリーを中心に、様々な分解能の衛星画像データを用いて、高精度で延焼森林面積を算出する手法を開発した。これまでMODISによる森林火災面積の算出が主流であったが、これには誤差も大きい場合があり、地表火延焼のみの面積と強度の延焼林分の算出には食い違いが生じていた。今回開発した手法では数%の誤差で火災被害地面積の算出が可能となった。この手法ではさらに、葉面積指数、林床の被覆度を見積もることができるので、NPPの広域推定、森林火災跡地からの二酸化炭素放出推定などに応用が可能である。

(4) 炭素蓄積量と炭素固定速度の広域評価

NOAAデータをはじめ、各種のフォーマットで提示されている既存のGISデータおよび地上調査データ等と同じソフトウェア上で総合的に処理可能にし、データセットを作成する。これらのデータのうち、衛星の時系列データにもとづく植生状況の把握手法の開発と、植生生育環境因子として温度などの環境を広域に把握する手法を開発して、広域・長期の炭素固定速度解析を可能にする。また、この地域に特徴的な凍土地帯の判定を可能にする手法を開発する。

NOAA衛星による植生指数 (NDVI) は、植生監視によく利用されているが、成長期間の変化は20年間で10日程度と言われるシベリアで、植生の季節変化を的確に把握するには少なくとも10日間隔での情報が必要となる。また、温度データは森林火災の発見などに使われるものの、地表の温度データとしてはほとんど使われていない。それは、雲や大気の影響を強く受け、表層温度データとして使うのが困難なためである。そのため本研究では、森林総研が開発した衛星データの時系列処理手法 (LMF-KF) を利用して、雲や大気の影響、システムノイズなどを除去した10日間隔植生指数 (LMF-NDVI) および表層温度 (LMF-LST) のデータを利用した。この処理では、数ヶ月間の欠測データも補完でき、20年にわたる728シーンの画像がNDVIとLSTのそれぞれで再生されている。

また、ロシア全域の森林解析を行うためのデータ蓄積構造にかかわるシステム設計を行い、リモートセンシングデータをはじめ、GISデータおよび地上調査データ等を総合的に処理可能にした。このシステム上で既存のGIS情報や衛星情報を集積するとともに、蓄積量などに係る森林調査など

のプロット情報をGISデータとして構築した。このようにして作成したデータベースをもとに、衛星データと地上データ等に基づくモデル化を行い、森林の面積的な変動と炭素蓄積情報を明らかにする手法を開発した。

さらに、研究担当者が開発した時系列データ処理 (LMF-KF) を施した表層温度データ (LMF-LST) と植生指数 (LMF-NDVI) のロシアの森林地帯における特徴を明らかにした。ロシアの森林の成長は植生指数の大きさのみではなく、温度パラメータによって大きく制限されることから、これら2つのデータと成長との関連性が高いことが確認できた。また、森林域の判定もこの2つのデータで作る指数で可能となることがわかった。なお、火災など画素ごとのイベントの効率的な把握は新たな処理手法である記号列処理で可能であることを明らかにした。

LMF-KF処理を施したNOAA衛星データの主な指数としては、植生の芽吹きや落葉の時期を示すオンセット、オフセットの特定、温量指数 (5°C以上の時の積算温度)、生長期間のLMF-NDVIの積算量など、生態学的な立地環境と成長パラメータと関連する指数が生成できる。特に、ロシアで特徴的な凍土地帯は土壤中炭素量も温帯や熱帯の森林に比べて極めて多いため、凍土地帯の融解は極めて大きな温暖化への影響因子となる可能性が高い。温暖化の影響によって、メタンの発生が危惧される凍土地帯を衛星データの凍土指数で自動的に判別する手法を開発した。その有効性が確認するとともに、ロシアの環境変化の概要を把握し、森林の蓄積量および炭素固定量に係わるパラメータ情報をサブ課題 (1)、(2)、(3) の研究との整合性を確認しながら集積した。これらの地上情報と、植生指数 (NDVI) および表層温度指数 (LST) の時系列変動を利用して、森林生育域の判定や、純一次生産量の推定によって、ロシアの全森林における炭素の固定量と固定能の推定法を開発した。衛星の判定ではロシアの森林成立可能域は約75億haであるが、近年は増加傾向にある。一方、純一次生産量に関してはロシア全域で1980年代前期の変動は大きかったが、近年はそれほど大きな変動パターンを示してはいない。近年の純一次生産量は年間約0.8Gtと推定された。

4. 考察

広大なロシア北方林は北半球の陸域炭素循環に大きな影響を持ち、さらにロシアの北方林域で発生した森林火災のヘイズは日本の気候環境にも影響している。この様な点からもロシア北方林の生態学的な基礎情報は重要である。

ロシア北方林が成立している永久凍土地帯と非凍土地帯では、従来考えられているよりも大きな違いを持っていること、その実態は北米やヨーロッパの既存研究の枠では理解できないことを本課題では示してきた。その一つが植物生態学的に新しい知見となるいくつかの成果である。永久凍土地帯のカラマツ林生態系については、地球上で中央・東シベリアにしか成立していない生態系であり、欧米の生態学者たちにとっては未知の生態系である。旧ソ連時代からロシアでは研究が蓄積されていたが、それらを森林生態学的な視点で再解釈し、法則との乖離を証明したのは本課題のサブテーマ (1) である。自己間引きの法則からはずれた群落が成立し、しかも広大な凍土地帯にほぼカラマツのみから成る純林が形成されているという事実が、地理学や生態学では無視されてきた。将来の北半球の陸域に関する温暖化予測や炭素循環モデル構築に、本課題で見いだされたカラマツ林生態系の知見はひじょうに重要になるだろう。

同様に、現存量が大きい森林生態系を扱う野外調査で従来から問題になるのが地下部の現存量と地下部の物質分配である。破壊的調査による実測値を得ることの困難さは、研究進展に大きな障害となる。本サブテーマの (2) では、ロシア北方林の典型的なサイトを選定して、地上部・地下部・土壌の総合的な調査を計画していた。しかしながらロシア国内法規の改定によって、野外調査が予定通りには実行できなくなったため、やむなく既存の研究資料の収集・検討にシフトせざるを得なかった。その限られた研究活動のなかで、我々はUsoltsev (2001) との共同研究によって、多くの知見を既存研究から得ることができた。地上部/地下部比が凍土地帯のカラマツ林ではほぼ1であり、トウヒ、ヨーロッパアカマツ、カンバ、ヤマナラシ等の樹種と地域で変動することが明らかになった。一定の比率を地上部現存量に掛ける従来の推定法では正確な炭素蓄積量推定ができないことを示した。

点のデータを複数揃えることと並行して、面的な広がりの方則性を見だし、点のデータをつきあわせることによって広域評価を高精度で行うのが、本課題の目的である。サブテーマの (3) では森林火災のテストケースとして、東シベリア・ヤクーツク地方で手法開発を進め、適切な手法を開発した。さらにサブテーマ (4) に成果を集約して、地上調査のデータと長期の衛星モニタリングデータの加工により、ロシア全域にわたる生育期間の年変動、NPP年変動等の広域評価につなげることができた。本課題で得られた基礎情報は、森林科学・生態学的な視点のみならず、林業経済、

資源管理学などの学際領域の問題解決に役立てることができる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 永久凍土地帯のカラマツ林生態系が、植物の「自己間引きの法則」に従わない群落構造であることが明らかになった。北東ユーラシアの永久凍土上でのみ成立する群落であり、従来の法則を改訂する知見である。

2) 森林現存量の地上部と地下部のデータが北方林全体に整備されたことは、これまで北米とヨーロッパに偏っていた知見だけに頼らず、周極域の北方林全域を網羅したデータセットが構築できるので、今後の温暖化予測に大きなアドバンテージとなる。

3) 火災影響を広域に評価する衛星データの併用と解析手法を確立できたことは、大規模頻発化する北方林の森林火災影響評価に大きく役立つものである。

4) NOAA衛星の時系列モデルフィルタLMF-KF処理が植生指数、表層温度に対して実用上有効であることがロシアの森林で確認できた。これまで、その実態が分かっていたなかったロシア北方林の立地環境と炭素固定能と年々変動を明らかにした。広大なロシアの森林地帯における成長状況のモニタリングを可能にした。

(2) 地球環境政策への貢献

炭素蓄積量などの基本情報は森林資源管理方針の策定に役立てることができる。広域の炭素蓄積量変動、温室効果気体の放出量予測などに役立てることができる。

本課題の成果は、日露間で開催されている、「極東・シベリア森林保全作業部会」などで二国間の研究協力の基礎になり、得られた知見は森林火災影響予知や影響評価体制を確立する政策に寄与する。

6. 研究者略歴

課題代表者：沢田治雄

1952年生まれ、東京大学大学院農学研究科修士課程修了、農博、独立行政法人森林総合研究所 研究コーディネータ（海外担当）

主要参画研究者

サブテーマ（1）：大澤晃

1954年生まれ、名古屋大学農学部卒業、エール大学大学院修了、PhD（エール大学）、林業試験場（現森林総合研究所）、龍谷大学国際文化学部教授を経て、京都大学大学院農学研究科教授

サブテーマ（2）

1）：小池孝良

1953年生まれ、名古屋大学大学院農学研究科博士課程退学、農博、林業試験場（現森林総合研究所）、東京農工大学農学部助教授、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター教授を経て、北海道大学大学院農学研究院教授

2）：松浦陽次郎

1960生まれ、京都大学大学院農学研究科博士課程退学、農博、独立行政法人森林総合研究所立地環境研究領域土壌資源研究室長

3）：梶本卓也

1960年生まれ、名古屋大学大学院農学研究科博士課程修了、農博 独立行政法人森林総合研究所九州支所育成林動態チーム長

サブテーマ（3）：串田圭司

1968年生まれ、東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了、農博 北海道大学低温科学研究所助教

サブテーマ（4）：沢田治雄（課題代表者に記載）

：鷹尾元

1965年生まれ、東京大学大学院農学研究科修士課程修了、農博 独立行政法人森林総合研究所 北海道支所主任研究官を経て、CIFOR (Center for International Forestry Research) に在籍

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) Kajimoto, T., Y. Matsuura, A. Osawa, A.P. Abaimov, O.A. Zyryanova, A.P. Isaev, D.P. Yefremov, S. Mori, T. Koike: Size-mass allometry and biomass allocation of two larch species growing on the continuous permafrost region of Siberia. *Forest Ecology and Management*, 222, 314-325 (2006)
- 2) Makoto, K. and Koike, T.: Effects of nitrogen supply on photosynthetic and anatomical changes in current-year needles of *Pinus koraiensis* seedlings grown under two irradiances. *Photosynthetica* 45, 99-104 (2007)
- 3) Kajimoto T, Osawa A, Matsuura Y, Abaimov AP, Zyryanova OA, Kondo K, Tokuchi N, Hirobe M: Individual-based measurement and analysis of root system development: case studies for *Larix gmelinii* trees growing on the permafrost region in Siberia. *Journal of Forest Research* 12, 103-112 (2007)
- 4) Kushida, K., Isaev, A.P., Maximov, T.C., Takao, G., & Fukuda, M.: Remote sensing of upper canopy leaf area index and forest floor vegetation cover as indicators of net primary productivity in a Siberian larch forest. *J. Geophys. Res.* 112, G02003, doi:10.1029/2006JG000269 (2007)
- 5) Kushida, K., Isaev, A.P., Takao, G., Maximov, T.C., & Fukuda, M.: Remote sensing of total and surface burn ratios following a wildfire in East Siberia using 30 m - 1 km resolution images. *Eurasian J. For. Res.* 10(1), 105-114 (2007)
- 6) 串田圭司、原田鉦一郎、森淳子、岩花剛、澤田結基、片村文崇、福田正己：永久凍土と活動層のリモートセンシング、雪氷（日本雪氷学会論文集）、69(2)、221-228 (2007)
- 7) Koike, T., Kitaoka, S., Masyagina, O.V., Watanabe, Y., Ji, D.H., Maruyama, Y. and Sasa, K.: Nitrogen dynamics in leaves of deciduous broad-leaved tree seedlings grown in a unmanaged larch plantation in northern Japan. *Eurasian Journal of Forest Research* 10: 115-119. (2007)
- 8) Makoto, K., Nemilostiv, Y.P., Zyryanova, O.A., Kajimoto, T., Matsuura, Y., Yoshida, T., Satoh, F., Sasa, K. and Koike, T.: Regeneration after forest fires in mixed conifer broadleaved forests of the Amur region in Far Eastern Russia: the relationship between species specific traits against fire and recent fire regimes. *Eurasian Journal of Forest Research* 10: 51-58. (2007)
- 9) Zyryanova, O.A., Yabarov, V.T., Tchikhacheva, T.L., Koike, T., Makoto, K., Matsuura, Y., Satoh, F., and Zyryanova, V. I.: The structure and biodiversity after fire disturbance in *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. forests, northeastern Asia. *Eurasian Journal of Forest Research* 10: 19-29. (2007)