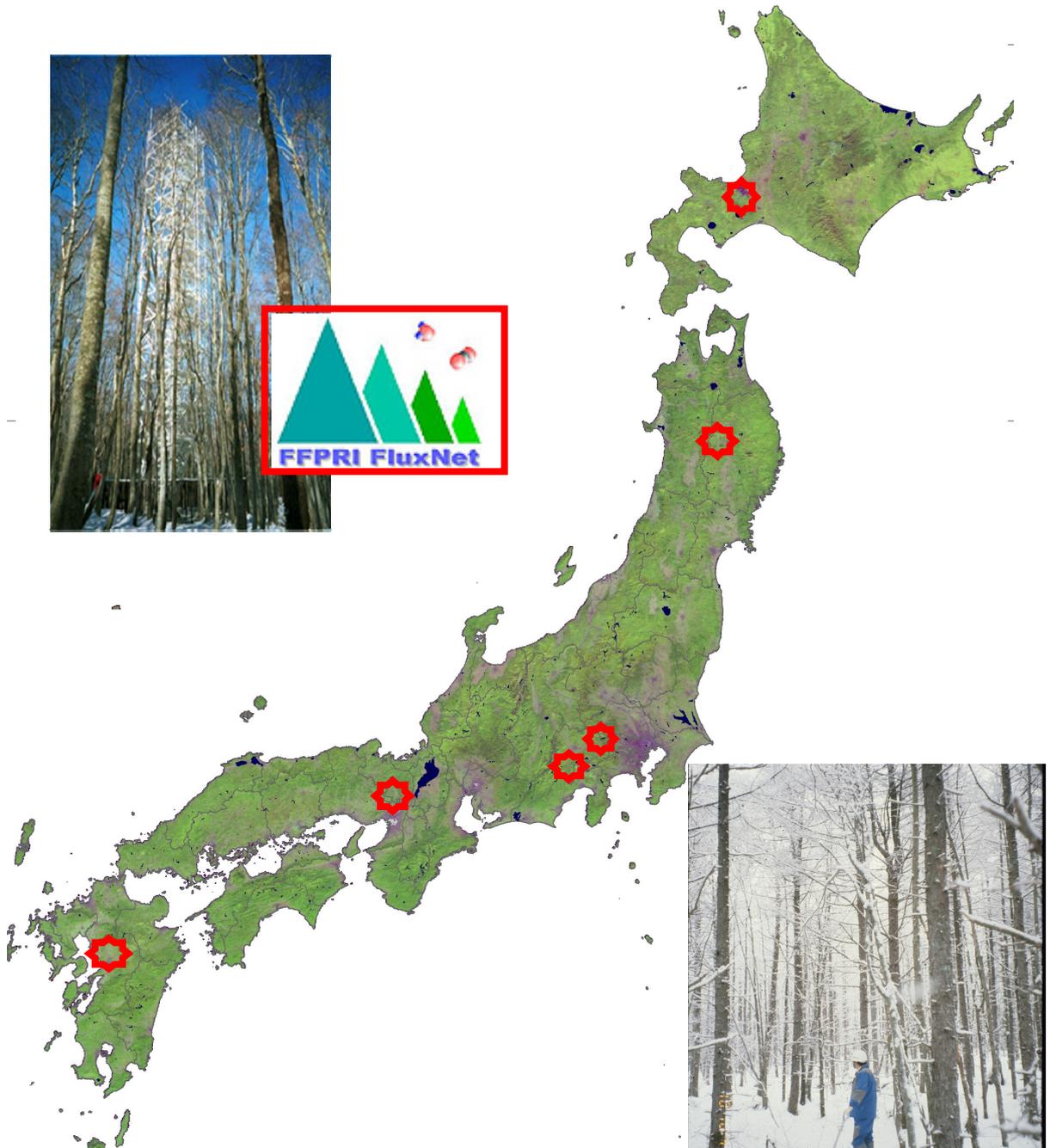


# 地球環境変動の森林への影響と予測

## 温暖化の影響とその対策研究の成果



平成19年3月  
独立行政法人 森林総合研究所  
Forestry and Forest Products Research Institute

## はじめに

地球という惑星は、大気中の水蒸気、二酸化炭素、メタン、オゾンなどのガスが地球から宇宙へ放射されるはずのエネルギーを蓄えることで、地球上に私たち生命体が生活できる環境が作られてきました。しかし産業革命以後、これらの温室効果ガス、とりわけ二酸化炭素の急増が地球環境に深刻な温暖化をもたらしていることが知られています。1800年代半ばと比べると地球の平均気温は約0.6℃上昇したとされています。しかしその影響は、気温上昇だけではなく、局所的な気象変化をもたらし、熱波や台風などの異常気象をもたらすと予想されています。

このような地球環境の変化は森林生態系に多大な影響を与えることが容易に想像できます。一方で、温暖化対策のために、森林生態系における二酸化炭素吸収・固定機能の発揮が期待されています。例えば、1997年12月に京都で開催された「気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）」で採択された京都議定書は、温室効果ガスの削減目標を設定しましたが、日本では削減目標（1990年比で6%）の達成に森林での二酸化炭素吸収を見込んでいます（3.9%分、1300万炭素トン）。

地球温暖化は森林生態系の二酸化炭素吸収・固定に実際にどのような影響を与えているのでしょうか。また、森林は地球温暖化を軽減するために、必要十分な炭素を固定できるのでしょうか。

森林総合研究所では、このような背景と社会的な要請のもとで、平成13年度から17年度までの第1期中期目標期間に、「地球環境変動下における森林の保全・再生に関する研究」を重点分野として設定し、地球温暖化と森林にかかわる研究を行ってきました。

本冊子は、それらの5年間の研究の中から主な成果を取りまとめたものです。本成果集が、温暖化する環境下における森林生態系の状況をご理解頂く上で一助となれば担当者の喜びです。また、これらの成果が持続的な森林管理に具体的に利活用されるようになるために、さらに継続的な研究を行っている課題があることを申し添えます。

なお、本成果集は日本を対象とした研究成果をとりまとめたものですので、海外での取り組みに関しては、第1期中期計画成果集21「世界の森林環境の保全・再生をめざして：海外における森林研究の成果」をご参照下されれば幸いです。

平成19年3月  
独立行政法人 森林総合研究所  
研究コーディネータ（国際研究担当） 沢田治雄

\* 表紙の日本列島画像上の赤い点は森林総合研究所が建設・管理しているフラックスネットワークの観測タワー位置を示しています（本書の6頁参照）。

# 地球環境変動の森林への影響と予測

温暖化の影響とその対策研究の成果

森林総合研究所 第 I 期中期計画成果集 22

## 目次

はじめに

概説 . . . . . 2

### 1) 森林生態系における温室効果ガスの収支観測

- ・ 二酸化炭素収支の特徴を捕らえる森林フラックス観測タワー . . . . . 6
- ・ 森林土壌における温室効果ガスの放出・吸収量計測法を開発 . . . . . 8

### 2) 森林群落における炭素収支の素過程モデルの開発と活用

- ・ 森林群落における二酸化炭素の吸収・放出過程 . . . . . 10
- ・ 樹木の光合成機能の決め手となる樹形構造 . . . . . 12
- ・ 群落炭素収支モデルによる全世界の炭素固定量推定 . . . . . 14

### 3) 温暖化の森林生態系への影響予測

- ・ 気象環境変化が森林植生に及ぼす影響予測 . . . . . 16
- ・ 積雪域の変化がもたらす亜高山帯の植生変化 . . . . . 18
- ・ 人工衛星データから全国の積雪期間を把握する . . . . . 20

### 4) 京都議定書第一約束期間のために

- ・ 日本の森林樹木の炭素吸収量と炭素蓄積量 . . . . . 22
- ・ 日本の森林土壌における炭素蓄積量 . . . . . 24

### 5) 京都議定書第二約束期間以降に向けて

- ・ 温暖化防止に役立つ森林・住宅施策を特定 . . . . . 26
- ・ 木質バイオマスの利用可能量とその利用条件 . . . . . 28

# 地球環境変動の森林への影響と予測

## 温暖化の影響とその対策研究の成果

### 概説

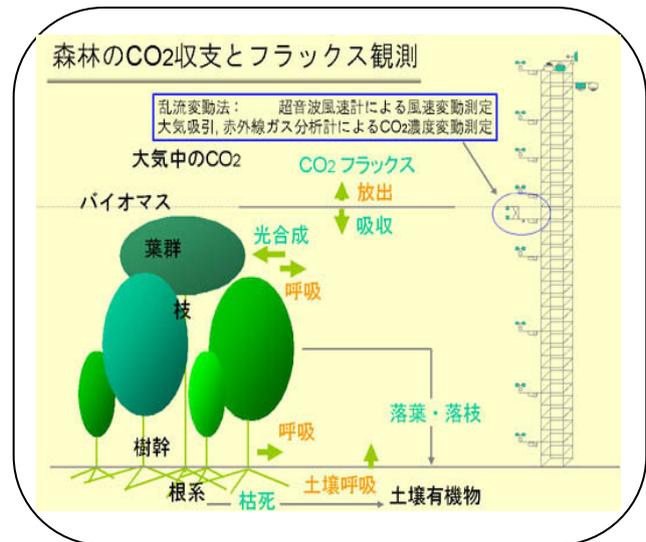
本成果報告では、特に温暖化問題にかかわる研究を対象として、まず森林生態系における温室効果ガスに関する研究をとりあげ、森林群落での炭素収支の観測技術と炭素収支モデルの開発・利用研究の成果を紹介している。また、森林生態系への温暖化の影響予測として、各種のシミュレーション結果から得られた気象要素から森林への影響を予測する研究を取り上げた。さらに、地球温暖化にかかわる京都議定書への対応として、国際的に求められている研究の成果を紹介している。

はじめに

(i)

#### 1) 森林生態系における温室効果ガスの収支観測

森林植生は気温、降雨、日照などの気象条件のもとで光合成を行い、二酸化炭素から炭素を取り入れています。一方で、森林生態系では呼吸や落葉・落枝等を経た分解によって二酸化炭素を大気中へ放出しています。この両者の差が森林生態系における二酸化炭素収支の主な要因となっています。そこで、まずこのようなさまざまな生態系で正確に把握することが必要となります。そのためのシステムとして森林内の微気象や二酸化炭素収支（フラックス）を観測するタワーシステムと、地表面での二酸化炭素収支を観測するシステムを考案・整備しました。これによって、森林生態系の高精度かつ継続的な観測情報が確保できるようになりました。



#### 【森林フラックス観測】

二酸化炭素収支の特徴を捕らえる森林フラックス観測タワー ..... 6

フラックス観測タワーを利用して、二酸化炭素量等を連続的に測定することで、森林の二酸化炭素収支とその特徴を把握し、気象の季節変化や年々変化にともなう変動の解明に役立てました。

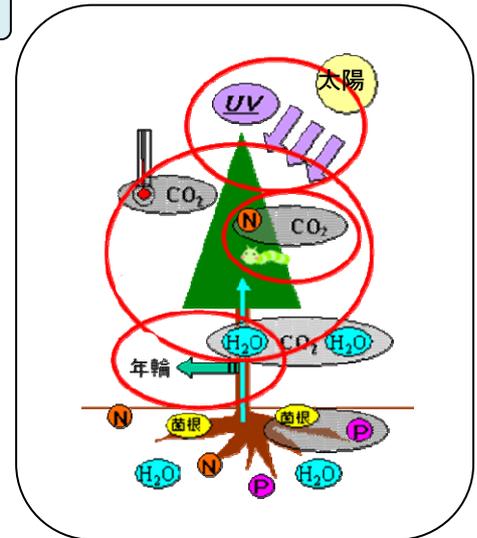
#### 【土壌フラックス観測】

森林土壌における温室効果ガスの放出・吸収量計測法を開発 ..... 8

日本の主要な森林、土壌タイプにおけるメタンや亜酸化窒素の吸収・放出量を測定できるシステムを開発し、日本の森林で放出・吸収される温室効果ガスの特徴の解明に役立てました。

## 2) 森林群落における炭素収支の素過程モデルの開発と活用

観測タワーに設置した計測機器や地表面に設置した機器(チャンバー)から得られるフラックス観測データは、森林内の微気象をはじめとする環境要因に森林生態系が反応したようすを示しています。そこで、その生理的なメカニズムの解明と、フラックス観測データと森林の環境データとを関連づけるモデルを開発する研究を行いました。これらによって、森林の二酸化炭素収支が気象環境の変化によってどのように変動するかを予測できるようになりました。また、この炭素収支モデルを活用して、全世界の森林地帯の純一次生産量を推定しました。



### 【素過程モデル】

森林群落における二酸化炭素の吸収・放出過程

1.0

植生や土壌など、主要な群落構成要素の二酸化炭素フラックスを測定し、森林群落内の炭素吸収および放出過程の解明を進めました。

### 【生理メカニズム】

樹木の光合成機能の決め手となる樹形構造

1.2

森林の二酸化炭素吸収機能を明らかにするために、さまざまな樹木を対象として光合成と呼吸の生理メカニズムを明らかにし、樹形構造と樹木全体の光合成機能の関係を明らかにしました。

### 【純一次生産量】

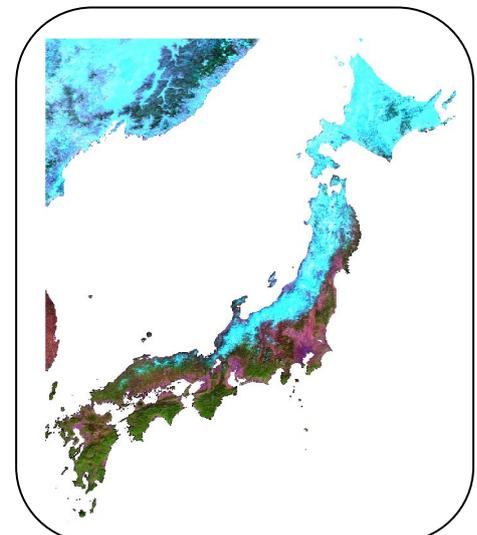
群落炭素収支モデルによる全世界の炭素固定量推定

1.4

群落炭素収支モデルに基づいて、陸域生態系が吸収する炭素量を衛星データなどを用いて推定する手法を開発し、全世界の純一次生産量(NPP)を図化しました。

## 3) 温暖化の森林生態系への影響予測

気象環境の変化に対する森林生態系の応答のようすから、現在の生態系の存続にかかわる限界的な環境があることが分かっています。地球温暖化がさらに続くと日本の森林はどのようになるのか、現在の生態系の存在から生態系が健全に生育できる環境を特定し、温暖化の影響を予測する方法を考案しました。平均気温の上昇が生態系の存続に与える影響とともに、積雪によって維持されてきた生態系への影響を考察し、森林の分布域の変化を予測しました。また、このような研究で必要となる積雪域の情報は気象モデルで作成していましたが、衛星観測で正確に捕らえることも可能にしました。



### 【気温上昇の影響】

## 気象環境変化が森林植生に及ぼす影響予測 ..... 1.6

自然林（ブナ林）と人工林（スギ林）における温暖化の影響程度を予測し、温暖化に対して脆弱な日本の森林地域を特定しました。

### 【積雪変化の影響】

## 積雪域の変化がもたらす亜高山帯の植生変化 ..... 1.8

山岳地域における亜高山帯植生（オオシラビソ）の分布域を規定する積雪環境を明らかにして、分布可能域が温暖化でどう変化するか推定しました。

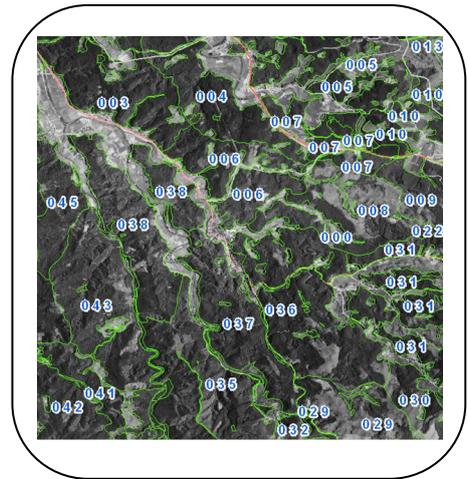
### 【積雪期間の把握法】

## 人工衛星データから全国の積雪期間を把握する ..... 2.0

雲の影響などで地上のようすが捕らえにくい人工衛星データに、「雲取り処理」を施して地表の様子を観測できるようにして、全国の積雪期間図を作ることを可能にしました。

## 4) 京都議定書第一約束期間のために

「気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）」で採択された京都議定書を批准し、日本も温室効果ガスの削減目標を設定しました。日本は第一約束期間（2008年から2012年）に1990年比で二酸化炭素排出量を6%削減する目標を約束しましたが、この達成には森林での二酸化炭素吸収・固定量として3.9%分が見込まれています。しかし、森林におけるこの炭素吸収・固定量を世界が認めるためには、明確な科学的根拠が必要です。そこで、まず日本全国の植生と土壌における炭素蓄積量として、国際的に認められるデータを既存の森林簿データ等で算出しました。



### 【植生炭素蓄積量】

## 日本の森林樹木の炭素吸収量と炭素蓄積量 ..... 2.2

既存の統計情報や調査データ、地理情報等を活用して、日本の森林樹木による炭素吸収量と炭素蓄積量を推定するとともに、その分布図を作成しました。

### 【土壌炭素蓄積量】

## 日本の森林土壌における炭素蓄積量 ..... 2.4

既往の土壌調査データや国土数値情報等を活用して、全国の森林の堆積有機物層および土壌による炭素蓄積量を算出しました。

## 5) 京都議定書第二約束期間以降に向けて

京都議定書問題では第一約束期間後（2013年以降）の活動に関する方針案の議論が進められています。木材利用国である我が国は日本の特色を生かした提案を考えています。例えば、第一約束期間では森林だけを炭素蓄積の場としていましたが、古い家屋を修理して使用し続けることでも炭素固定は続いているので、森林と木造物等を炭素蓄積の場として認めるように提案することを検討しました。

また、地球温暖化の軽減策として、化石燃料の代わりにバイオエネルギーの利用が提案されているため、その利用上の問題点を明らかにしました。これらの知見を京都議定書第二約束期間以降の温暖化対策の国際的な取り組みに反映させることが、日本の国策にとって極めて重要となっています。



### 【全炭素蓄積評価】

#### 温暖化防止に役立つ森林・住宅施策を特定

2.6

森林と住宅を合わせた炭素蓄積量の総量に注目し、どのような行政的施策が温暖化防止に役立つかを数理モデルを開発して推定するとともに、その実効可能性の判断法を示しました。

### 【バイオマスエネルギー】

#### 木質バイオマスの利用可能量とその利用条件

2.8

木質系バイオマス利用の基礎となる森林バイオマスの利用可能量やその推定手法、木質系バイオマスエネルギー利用のための地域システムのあり方を明らかにしました。

## 二酸化炭素収支の特徴を捕らえる森林フラックス観測タワー

### 背景と目的

温暖化防止京都会議(COP3)では国別に温室効果ガス削減目標が定められましたが、森林経営の対象とした森林生態系の炭素収支を評価すれば、これを国別排出量に反映させることができます。そのため、森林群落の二酸化炭素収支を正確に把握することが極めて重要となっています。そこで、森林総合研究所では気候帯や樹種の異なる全国5箇所の森林にフラックス観測タワーを建設し(表紙参照)、森林総研フラックスネットワークを構築して、森林生態系における全国規模の二酸化炭素収支の観測を行っています。本研究では、これらのフラックス観測タワーを利用して、森林の二酸化炭素量等を連続的に測定することで、二酸化炭素収支とその特徴を把握し、気象要素の季節変化や年々変化にともなう変動を解明しています。

### 成果

国内5箇所に設置した森林総研のフラックス観測タワーで、微気象学的な手法により森林群落の純生産量(二酸化炭素吸収量)を継続観測するシステムを開発しました(図1、図2)。これらのシステムでは、微気象学的な手法による純生産量の観測精度に影響を及ぼす様々なパラメータの取り扱い(たとえば大気の摩擦速度のしきい値の選択法)や解析技術(たとえば二酸化炭素フラックスの高周波補正)などを向上させ、長期に安定

して純生産量をモニタリングする手法を確立しました。

異なる森林型に設置したフラックス観測タワーのデータを比較すると、森林群落の純生産量の最大値は、落葉広葉樹林の方が常緑針葉樹林より大きいことが分かりました(図3)。また、純生産量が正の値を示す(森林群落が二酸化炭素を吸収する)期間は、常緑針葉樹林の方が落葉広葉樹林よりも長いことが分かりました。

### 成果の特徴と利活用

この課題による研究で得られた森林群落レベルの炭素収支観測結果やその特性に関する研究成果は、我が国の森林の炭素吸収量の評価に活用しています。

### プロジェクト情報

C02 フラックス観測の深化とモデル化による森林生態系炭素収支量の高度評価(平成15~17年)交付金

### 主要な発表文献

小南裕志ら, *Tellus*, 55B: 313-321, 2003  
大谷義一ら, *Phyton*, 45: 73-80, 2005



図1 森林群落の純生産量を測定するために設置したフラックス観測タワー（山梨県富士吉田試験地、アカマツ林）



図2 微気象学的手法による森林群落の純生産量の測定に使用する測器群（フラックス観測タワーに設置した超音波風速温度計、赤外線CO2分析計、温度・湿度計、気圧計など）

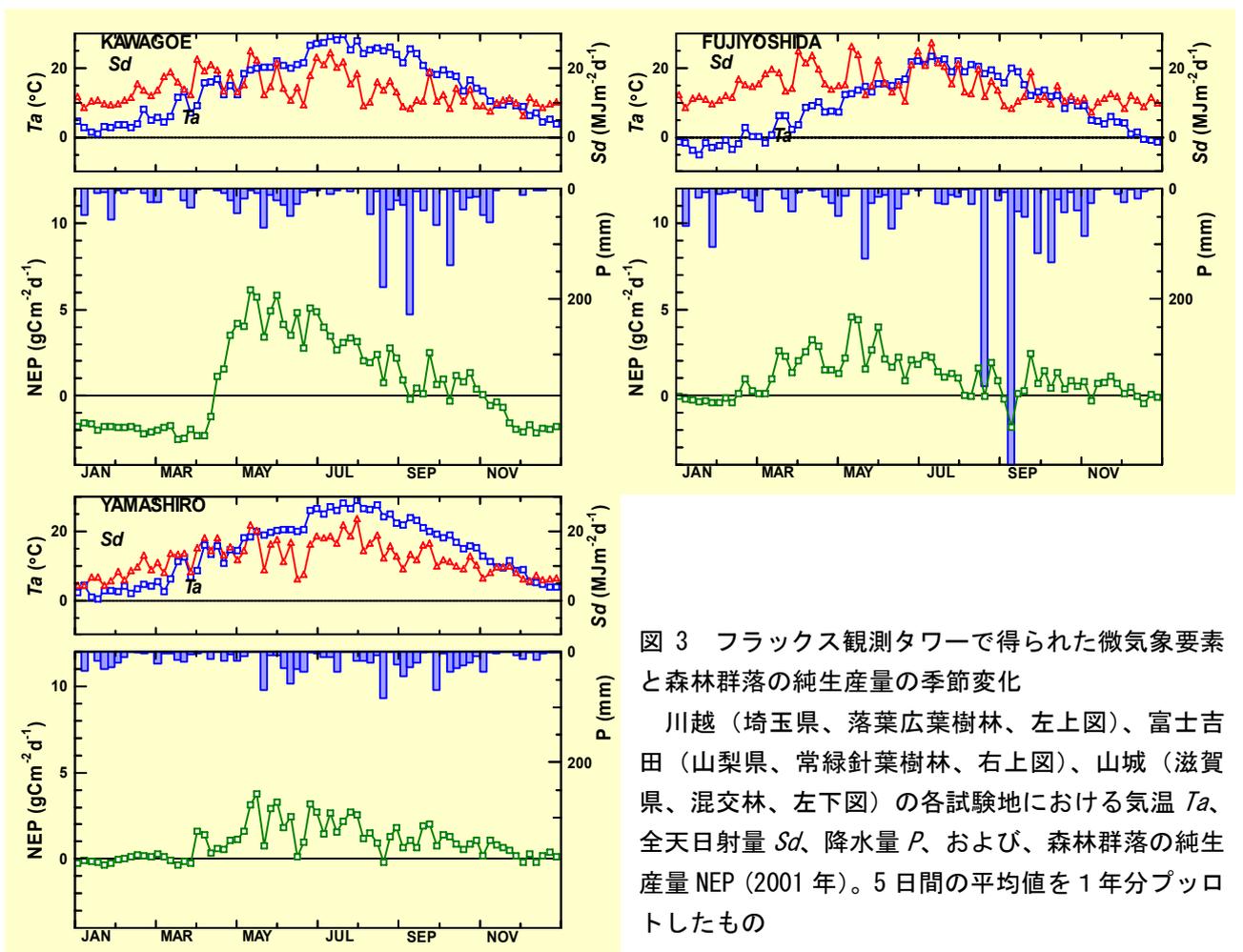


図3 フラックス観測タワーで得られた微気象要素と森林群落の純生産量の季節変化

川越（埼玉県、落葉広葉樹林、左上図）、富士吉田（山梨県、常緑針葉樹林、右上図）、山城（滋賀県、混交林、左下図）の各試験地における気温  $T_a$ 、全天日射量  $S_d$ 、降水量  $P$ 、および、森林群落の純生産量  $\text{NEP}$  (2001年)。5日間の平均値を1年分プロットしたもの

## 森林土壌における温室効果ガスの放出・吸収量計測法を確立

### 背景と目的

京都議定書の発効に伴い日本を含む条約締約国は二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素等温室効果ガスの放出量や吸収量を毎年報告することになりました。そのため、日本の主要な森林、土壌タイプにおけるメタンや亜酸化窒素の吸収量・放出量などを測定できるシステムを開発し、日本の森林で放出・吸収される温室効果ガスの特徴を明らかにしました。

### 成果

#### 多点で測定可能な方法の開発

温室効果ガスの測定装置はさまざまな森林で、より多くの地点の観測をおこなえるように、簡便なものとする必要があります。また、人里離れた森林でガス採取をおこなっても容易に運搬できるように、十分な保存性や耐久性などが確保できる装置を考案しました。その結果、真空ガラスビン（ブチル製ゴム栓付き）を用いた密閉チャンバ一法の採用を決めました。さらに、観測者によって測定の信頼性が変わらないように、試験地設定・機材設置・採取、分析方法などの一連の手法を確立しました。

これらの温室効果ガス観測システムを全国 15 道府県 50 試験地に設置し、約 2 年間メタンと亜酸化窒素のフラックスを計測しました。

#### 放出・吸収される温室効果ガス量

計測の結果、日本の森林土壌 1m<sup>2</sup> あたりの日平均メタン吸収量は 1.58±0.99 mg C で世界的には比較的大きいことがわかりました。メタン吸収量は、黒色土で高い傾向がみられました。これは、黒色土は密度が低くメタンを吸収しやすいためと考えられました。

一方、1m<sup>2</sup> あたりの時間平均亜酸化窒素放出量は 1.88±1.89 μg N と見積もられ、世界的には比較的小さい値でした。亜酸化窒素放出量は、スギ林で大きいことがわかりました。これは、スギ林土壌が、亜酸化窒素を生成する微生物にとって住みやすい（水分が多く、栄養となる窒素源が多い）環境にあるためと考えられました。

### 成果の特徴と利活用

本研究で確立した温室効果ガス観測システムによって、植生や土壌の違いと温室効果ガスの放出・吸収量との関係が明らかになりました。この成果は、地球温暖化問題である京都議定書対応における日本の森林のベースライン情報などとして活用されます。

### プロジェクト情報

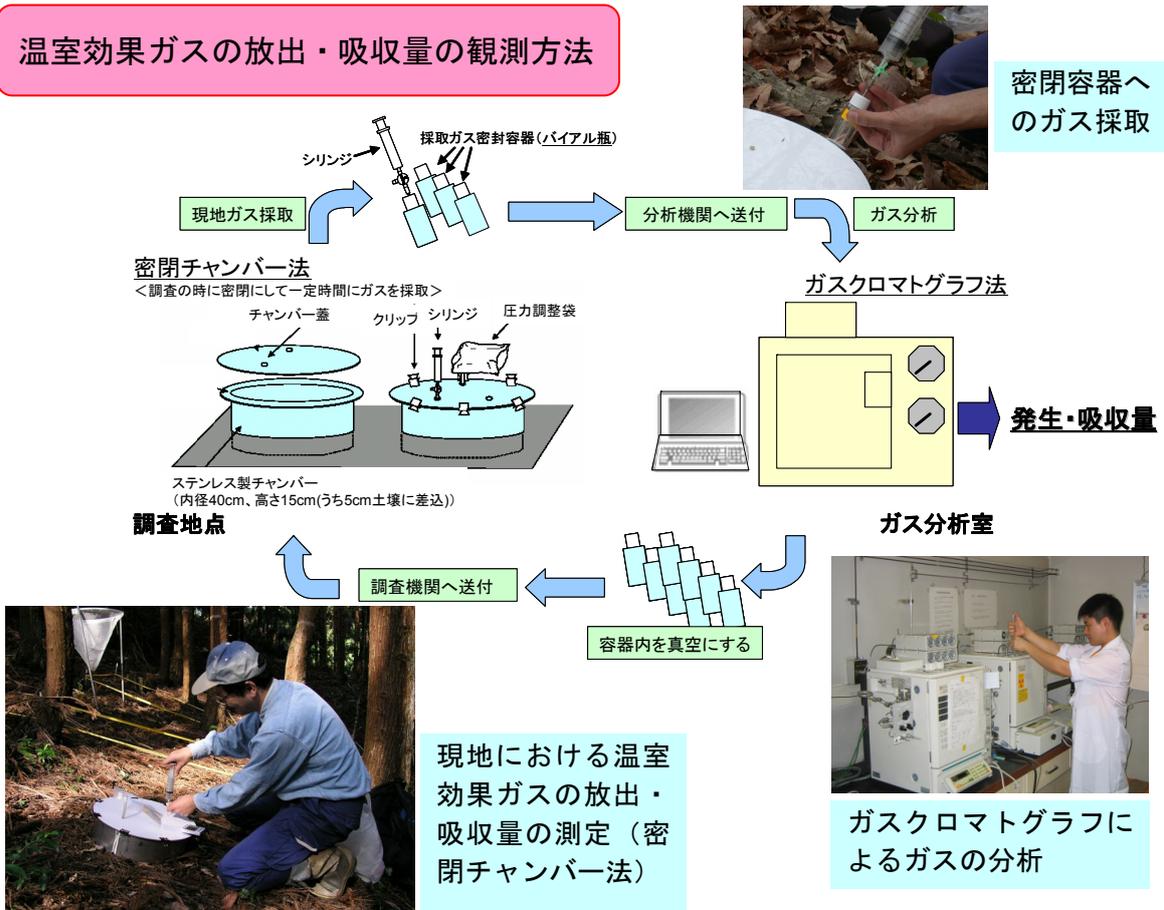
森林・林業・木材産業分野における温暖化防止機能の計測・評価手法の開発（平成 14～16 年）農林水産技術会議受託費

### 主要な発表文献

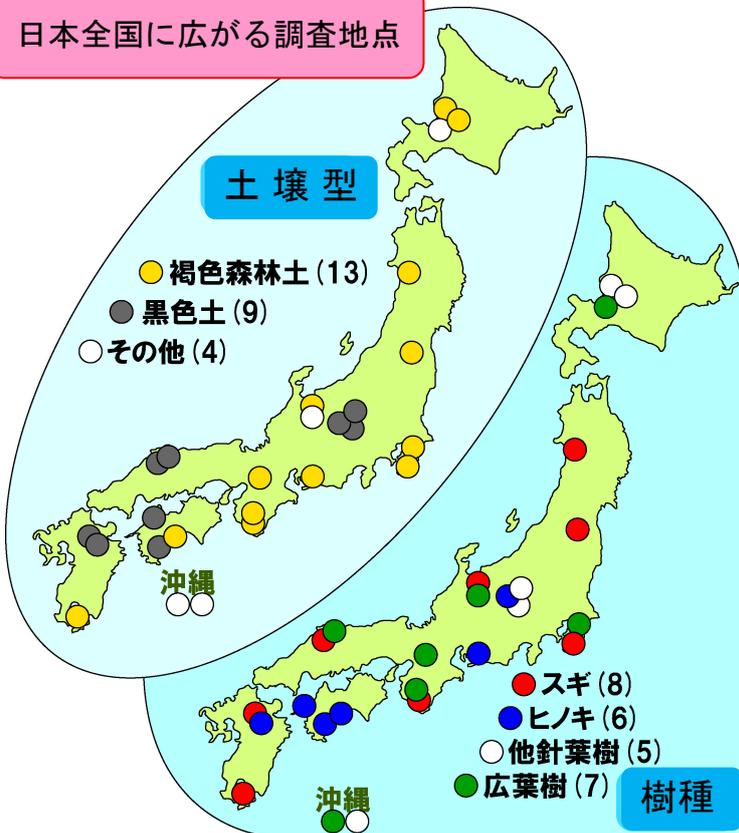
阪田匡司ら，森林総研研報、3、3、259-265. 2004

森下智陽ら，18th World Congress of Soil Science Abstracts、697, 2006

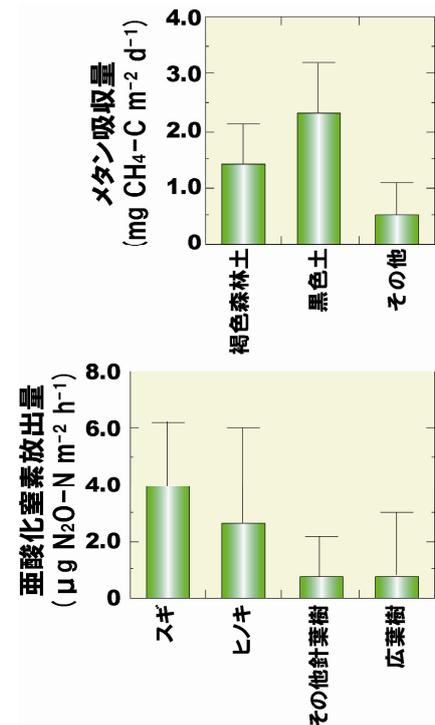
## 温室効果ガスの放出・吸収量の観測方法



## 日本全国に広がる調査地点



## 温室効果ガスの吸収と放出



## 森林群落における二酸化炭素の吸収・放出過程

### 背景と目的

森林群落で環境変化や人為の影響にともなう炭素収支（吸収と放出の差）の変動を予測するためには、その炭素収支過程を各種のパラメータによって記述して、モデル化することが必要となります。そこで、フラックス観測が行われているタワーサイトで、植生や土壌など、主要な群落構成要素の二酸化炭素フラックスを測定し、森林群落内の炭素吸収および放出過程の解明を進めました。

### 成果

フラックス観測タワーを設置した森林で、植物体の光合成と呼吸、土壌の呼吸など、群落を構成する要素の二酸化炭素交換速度を個別に測定し（図1）、森林群落の二酸化炭素収支に係わる各種のパラメータ間の関連を明らかにしました。

特に、光合成有効放射束密度（PPFD）および葉内窒素含量と、光合成（二酸化炭素吸収）パラメータとして重要な最大カルボキシル化速度（ $V_{c_{max}}$ ）と電子伝達速度（ $J_{max}$ ）との関係を月別に解析しました。その結果、冬季を除いていずれとも正の相

関がみられ、光合成にとって太陽光と葉の窒素量が重要なパラメータであることなどが確認できました（図2）。さらに、土壌呼吸速度は主に地温で決まり、夏に最大となる季節変化を示すこと、また土壌水分が低下すると土壌呼吸速度も低下することが分かりました（図3）。

これらによって、気象要素が森林群落における二酸化炭素の吸収・放出に与える影響を数量的に明らかにすることができました。

### 成果の特徴と利活用

この課題による研究で得られた森林群落の炭素収支に関連するパラメータを、群落微気象に基礎を置く群落炭素収支モデルに組み込み、森林群落レベルの炭素収支とその変動予測に活用しています。

### プロジェクト情報

C02 フラックス観測の深化とモデル化による森林生態系炭素収支量の高度評価（平成15～17年）交付金

### 主要な発表文献

韓慶民ら, Tree Physiology, 23: 851-857, 2003



図1 個葉の光合成・呼吸特性および土壌呼吸量測定の様子（左図：自動光合成測定装置による光合成・呼吸特性の測定、右図：自動開閉型チャンバーを用いた土壌呼吸量連続測定、いずれも埼玉県川越試験地）

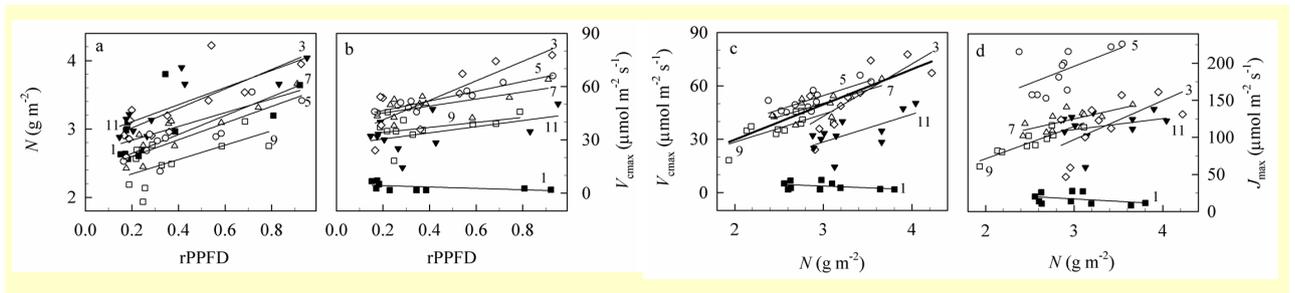


図2 アカマツ林における光合成パラメータ ( $V_{c\max}$ ,  $J_{\max}$ ) の窒素および光条件との関係。（左図：光合成有効放射量  $rPPD$  と窒素含量  $N$  および最大カルボキシル化速度  $V_{c\max}$  との関係；右図：窒素含量  $N$  と最大カルボキシル化速度  $V_{c\max}$  および電子伝達速度  $J_{\max}$  との関係。図中の数字は月を表す。山梨県富士吉田試験地）

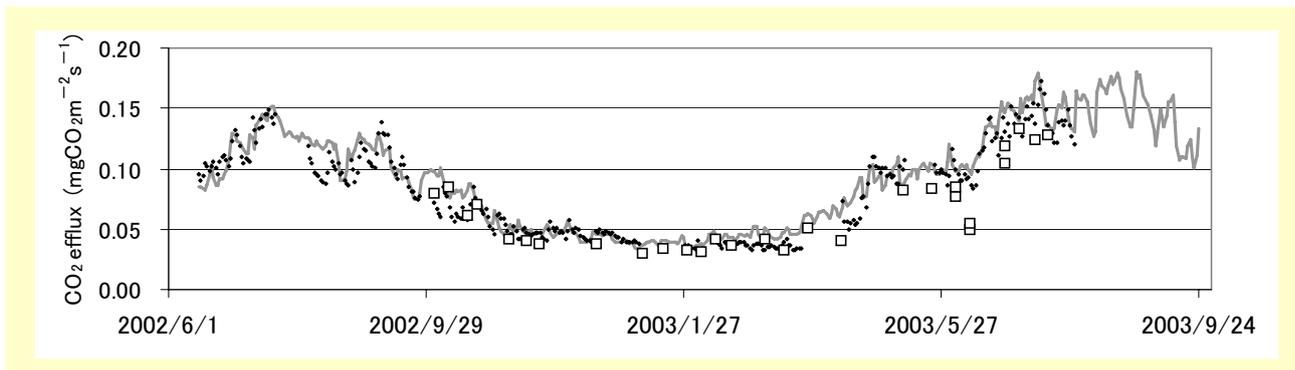


図3 林床面  $CO_2$  フลักスの観測値と計算値の季節変化（◆：自動開閉チャンバーによる測定値、□：マニュアルチャンバーによる測定値、実線：地温と土壌水分による推定値、滋賀県山城試験地（尾根））

## 樹木の光合成機能の決め手となる樹形構造

### 背景と目的

森林は、樹木の光合成活動により、二酸化炭素を吸収して地球温暖化を緩和する機能がありますが、その活性は樹木によって異なります。また葉で光合成を行うため、根や幹は土壌から水や栄養塩を吸い上げて葉に送る一方で、呼吸によって二酸化炭素を放出しています。樹木のこのような二酸化炭素吸収の働きを明らかにするために、さまざまな樹木を対象として光合成と呼吸の生理メカニズムを明らかにしました。

### 成果

ブナの樹冠上部の葉の1日の光合成量は、夏は大きくなりますが、夜間の気温が高く呼吸量も増加します（図1）。

幹の呼吸速度は温度の上昇とともに増加しますが、同じ幹内温度でも春先から初夏（6月）の呼吸量は大きく、7月以降は小さくなることがわかりました。その理由は、春から初夏にかけては幹の直径成長に必要な呼吸（構成呼吸）が盛んで、7月以降は、生細胞維持のための呼吸（維持呼吸）が主となるからでした。

また、明るい樹冠上部の葉（陽葉）と暗い下部の葉（陰葉）では、明るさの違いに適したように形態や生理特性が異なってきます。しかし陽葉と陰葉で

どれくらいの異なった形質を持つかは、樹種によって異なりました。陽葉と陰葉の形質の違いは、ミズメやイヌブナでは小さいが、ブナでは大きいことがわかりました。ブナは樹冠の上部に葉が集中していますが、ミズメやイヌブナでは樹冠下部にも葉を多くつけています（図2）。ブナは、明るい樹冠上部に葉を集中させ、明るい条件に適した陽葉で光合成を行う傾向がありました。一方、ミズメやイヌブナは、光をより樹冠内に透過させ樹冠全体で光合成を高めていました（図3）。これらのことは、陽葉と陰葉の形質の違いと樹形構造とが結びついて、樹木全体の光合成量を大きくしていることを示しています。

### 成果の特徴と利活用

樹木の複雑な光合成や呼吸の生理過程を、季節性や樹種特性、樹冠の空間構造と結びつけて一つ一つ明らかにしてきました。この成果は、気候変動に対応した森林生態系の二酸化炭素吸収能を樹木レベルで解明するために必要な光合成量推定手法として活用しています。

### プロジェクト情報

主要樹種のCO<sub>2</sub>収支特性の解明（平成13～14年）交付金

#### 主要な発表文献

上村章ら, *Trees-Structure and Function* 18: 452-459, 2004

上村章ら, *Tree Physiology* 26: 663-641, 2006

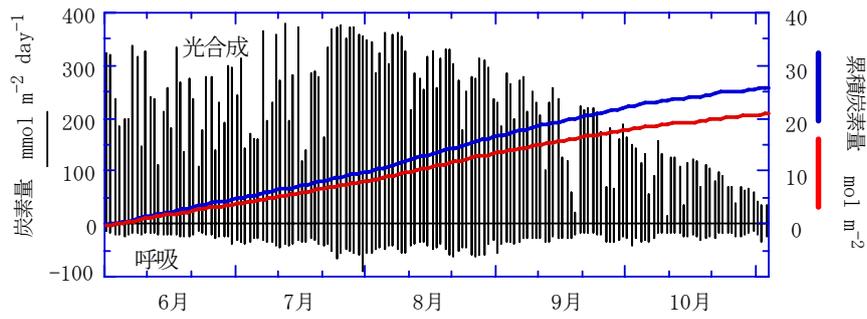


図1 ブナ陽葉の光合成量： 縦のバー（左軸）はシミュレーションされた単位葉面積当たりの日光合成量（プラス値）と呼吸量（マイナス値）、青線（右軸）は光合成による累積炭素量、赤線（右軸）は「(光合成による累積炭素量) - (呼吸による夜間の炭素消費量)」による累積炭素量。

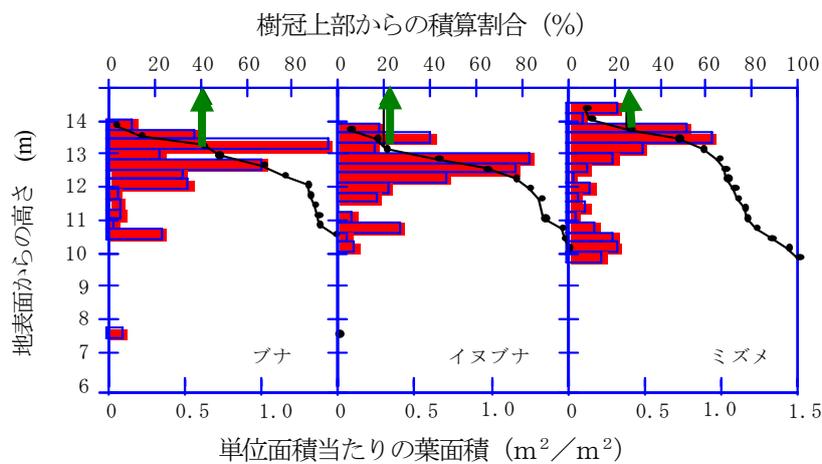


図2 ブナ、イヌブナ、ミズメの樹冠内の葉面積の垂直分布（下軸：赤のバー）。黒線は、樹冠上端から下へ向けての葉面積の積算割合（上軸）を示す。緑の矢印は、個体全体の葉面積に対する樹冠上端から1mの範囲にある葉の割合を示す。ブナでは約40%で、樹冠上部に葉が集中している。

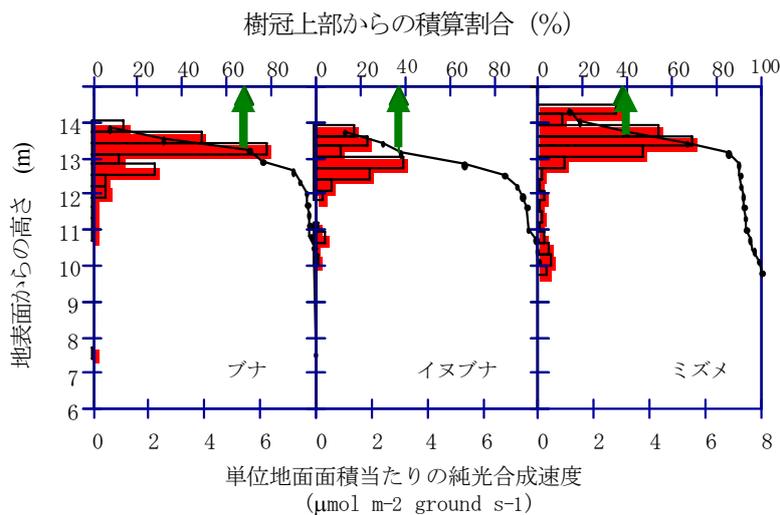


図3 夏の晴れた日中における、ブナ、イヌブナ、ミズメの樹冠内の光合成速度の垂直分布（下軸：赤のバー）。黒線は、樹冠上端から下へ向けての光合成速度の積算割合（上軸）を示す。緑の矢印は、個体全体の光合成に対する樹冠上端から1mの範囲にある葉の寄与率（%）を示す。ブナでは約70%で、上部の葉が光合成に大きく寄与している。

## 群落炭素収支モデルによる全世界の炭素固定量推定

### 背景と目的

二酸化炭素の増加がもたらす地球温暖化は人類の最重要課題のひとつとなっていますが、森林における炭素の収支を明らかにすることが温暖化問題の理解に重要です。そこで、森林内に設置したタワー（フラックス観測サイト）などで計測した炭素循環に関する諸量を解析して炭素吸収量との関係を明らかにし、それを踏まえて群落炭素収支モデルを開発しました。この知見をもとに、衛星データを用いて陸域生態系が吸収する全世界の炭素量（純一次生産量、NPP）を図化しました。

### 成果

落葉広葉樹林のフラックス観測データから、炭素フラックスおよび光合成速度と正規化植生指数（NDVI）の変化が同期していることを明らかにしました（図1）。またブナ林で光合成有効放射（PAR）およびその吸収量と純一次生産量（NPP）が比例し、NDVIとPARの吸収割合（fAPAR）も比例していることを明らかにしました。これらの結果は、日射量とNDVIからNPPを近似的に推定できることを意味しています。

個体サイズの分布や葉群分布等の林分構造をモデル化して、光合成・呼吸・蒸散に関わる生化学モデルと組み合わせることで群落炭素収支モデルを開発しました。この群落炭素収支モデルで二酸化炭素フラックスの日変化と季節変化をよく再現できること

を検証し、ブナ林では7月に1日あたりの二酸化炭素フラックスが最大になることなどを明らかにしました（図2）。

これらの結果を踏まえて、NDVIと日射量などの気象データに基づいたNPP推定モデルを構築しました。特に、ノア衛星の時系列的な電磁的歪みを統計的方法で除去するとともに、植生タイプ毎に光利用効率を設定することでNPPの推定精度が向上しました。8kmメッシュで1982年から1999年にかけての全球NPPを図化しました（図3）。全球NPPは年間約61Pg（炭素）と推定され、20年間で約3%増加し、アマゾンの熱帯林よりもその周辺の亜熱帯域でNPPが高いことが分かりました。

### 成果の特徴と利活用

環境変化が森林群落の炭素収支へ与える影響を予測できるようになりました。また、地球レベルの植生の炭素固定量の年々変動とその地域的な違いを明らかにできます。これらの知見は森林分野における世界の温暖化対策の協働活動に資するものです。

### プロジェクト情報

炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度化に関する国際共同研究（平成13～14年）文科省受託費、陸域生態系モデル作成のためのパラメタリゼーションに関する研究（平成14～18年）文科省受託費、植林地域のバイオマスと植物生産力を推定するためのアルゴリズムの開発（平成13～16年）JAXA受託費

### 主要な発表文献

粟屋善雄ら, International Journal of Remote Sensing 25-9 1597-1613, 2004

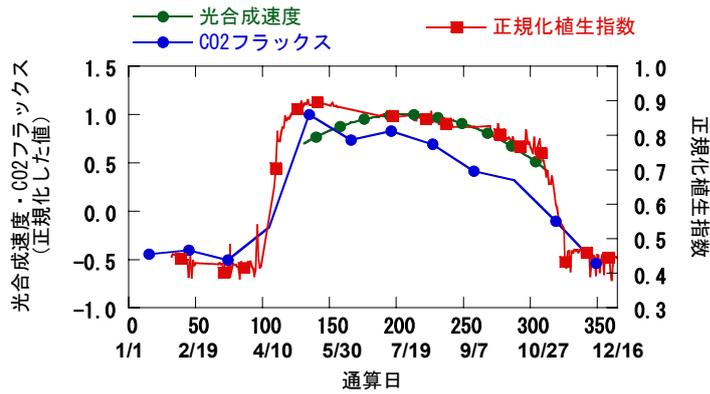


図1 光飽和光合成速度、二酸化炭素フラックスと正規化植生指数の季節変化（埼玉県川越）：落葉広葉樹の芽吹き（4月10日）によって正規化植生指数（NDVI）が急激に大きくなると同時に、群落による二酸化炭素吸収量が増加するとともに、光合成速度が同期して季節変化している。

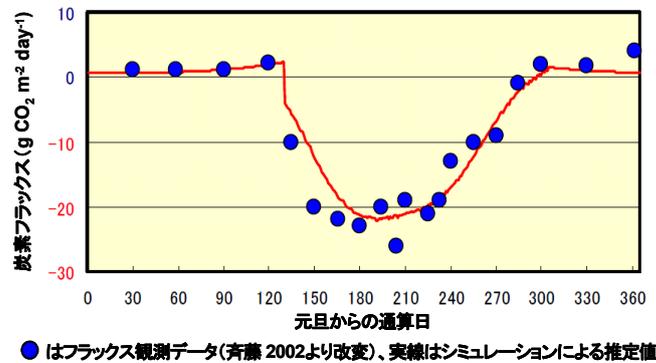


図2 二酸化炭素フラックスの季節変化のシミュレーション結果（岩手県安比）：群落炭素収支モデルによりシミュレーションした結果はフラックス観測値に良く一致し、1日あたりの二酸化炭素フラックスは7月頃に最大になる。

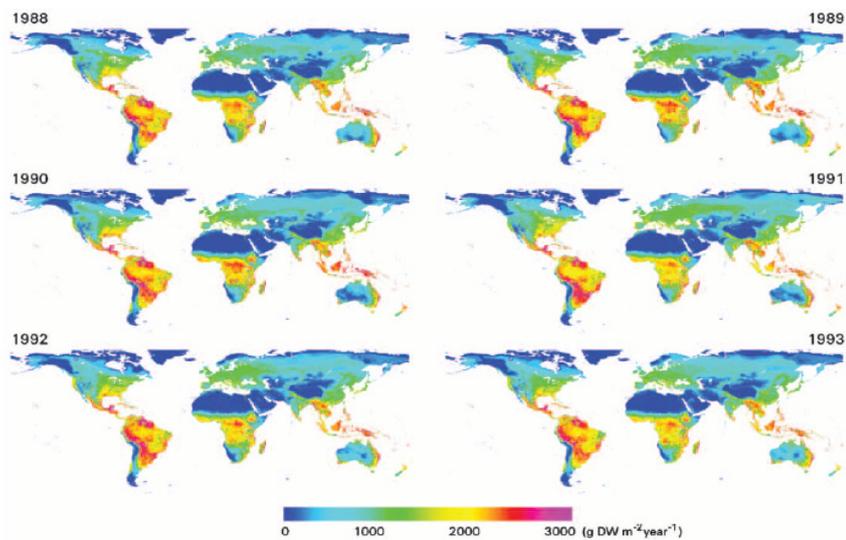


図3 陸域生態系における純一次生産量（NPP）の推定結果（1988～1993年分）：南米アマゾンの熱帯林よりもその周辺の亜熱帯でNPPが高いことなどがわかる。

## 気象環境変化が森林植生に及ぼす影響予測

### 背景と目的

予測されている地球温暖化が日本の生態系へもたらす影響を的確に把握し、生態系の脆弱性評価および温暖化の影響範囲や程度を軽減する適応策の開発を行うことが緊急課題となっています。そこで、日本の自然林（ブナ林）と人工林（スギ林）における温暖化の影響を予測し、温暖化に対する脆弱な地域を特定しました。

### 成果

ブナ林分布地の気候状況に基づいて、ブナ林分布予測モデルを開発しました。このモデルを用いて、二つの気候変化シナリオ CCSR/NIES（東京大学／国立環境研究所開発：平均気温 4.9℃上昇）と RCM20（気象庁開発：平均気温 2.9℃上昇）で今世紀末のブナ林の分布適域を予測しました。

その結果、ブナ林の分布適域（分布確率が50%以上である地域）は、1割（CCSR/NIES シナリオ）あるいは4割（RCM20 シナリオ）に減少することが示されました。もともとブナ林の少ない四国、九州では分布適域が消滅し、ブナ林の多い東北でも分布適域が大きく減少すると予想されました。気候変化に対して脆弱なブナ林は、福島県以南の太平洋側に多いこともわかりました。

### 成果の特徴と利活用

これらの成果は、温暖化影響予測結果として、2006年 IPCC レポートに反映されるとともに、温暖化対策の啓蒙普及に利用されています。

### プロジェクト情報

地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究（平成 11～13 年）環境省受託費、地球温暖化の高山・森林・農地生態系への影響、適応、脆弱性評価に関する研究（平成 14～16 年）環境省受託費、温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究（平成 17～21 年）環境省受託費

### 主要な発表文献：

田中信行ら、遺伝別冊，17：109-118，2003

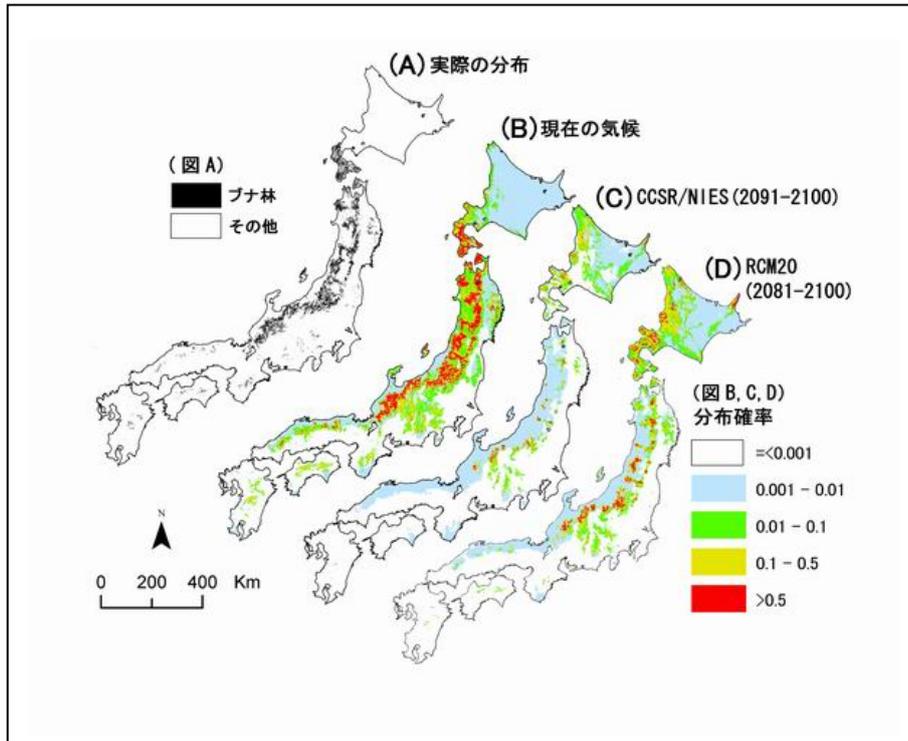


図 1 ブナ林分布の現況と予測. (A) 実際の分布、(B) 現在の気候における分布確率、(C) 気候変化シナリオ CCSR/NIES (2091-2100 年) における分布確率、(D) 気候変化シナリオ RCM20 (2081-2100 年) における分布確率. 図 (B)、(C)、(D) で赤色に示される分布確率 0.5 以上の地域が、ブナ林の成立に適する地域 (分布適域) である. (Matsui *et al.* 2004 を一部改変)

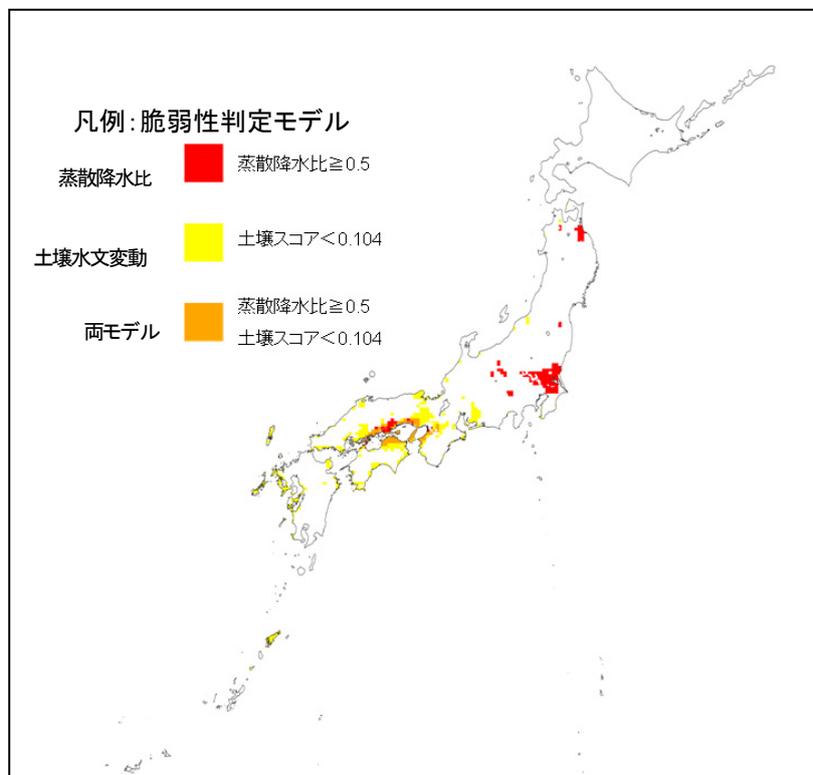


図 2 スギ林の脆弱性判定結果: 蒸散降水比予測モデルおよび土壤水分変動予測モデルにより温暖化に対してスギ人工林が脆弱と判定された

## 積雪域の変化がもたらす亜高山帯の植生変化

### 背景と目的

最近の地球温暖化シナリオでは、従来の予測以上に温暖化が進むとされ、積雪量は劇的に減少する可能性があります。このため亜高山帯など山の上部に分布する植生への影響は予想以上に大きくなる懸念されています。これまで山岳地域では積雪環境の把握が不十分で、積雪条件を考慮して温暖化の影響を予測することは困難でした。そこで、山岳地域における積雪環境の推定精度を高め、植生分布を規定する環境条件を明らかにして、亜高山帯植生の分布可能域が温暖化でどう変化するか推定しました。

### 成果

まずアメダス気象データを用いて日積雪水量の変化を1kmメッシュで推定するモデルを作成しました。このモデルに気候システムセンター（CCSR）の気候変動シナリオによる予測気象データを導入して積雪変動を推定しました。その結果、本州日本海側の平野部で積雪量、積雪期間ともに減少が著しく、2℃の温度上昇で積雪期間は60～70%程度減少することが推定されました（図1）。

また、積雪変化が亜高山帯針葉樹林の更新に及ぼす影響を評価するため、積雪がもたらす針葉樹の更新阻害を調べました。積雪が多いほど地表での針葉樹の定着が阻害される傾向がみられ、コメツガではオオシラビソに比べてより少ない積雪でも定着阻害が起きました（図2）。これは、積雪による地表面温度の違いが実生定着に影響しているためと考えられ

ます。

これらの結果をふまえて現在のオオシラビソ林分布域の立地環境を解析し、温暖化シナリオをもとに将来の分布可能域を推定しました。東北日本の亜高山帯のオオシラビソ林は最大積雪深が100～450cmの範囲に出現し、積雪深が350cm以上の地域では傾斜が緩い場所に集中しています（図3）。この結果を気象庁地域気候モデル（RCM20）の温暖化シナリオにあてはめて将来予測すると、温暖化による積雪深の減少によって、北上山地ではオオシラビソ林の成立が困難になると予想されました。一方、日本海側の山地では雪圧の緩和によってオオシラビソ林の分布可能域は広がるものの、月山を除けば拡大拠点がないため、速やかな分布拡大にはつながりにくいと考えられました。

### 成果の特徴と利活用

山岳地域における積雪の推定精度が向上し、温暖化に対して脆弱な亜高山帯植生の例を示すことができました。この結果は、温暖化による植生への影響予測に寄与するものです。また、積雪推定の成果は、山岳地域における水資源量の把握にも活用できます。

### プロジェクト情報

地球温暖化の生物圏への影響、適応、脆弱性評価に関する研究（平成14～16年）環境省受託費

### 主要な発表文献：

大丸裕武ら, Journal of Agricultural Meteorology, 60: 253-261, 2004

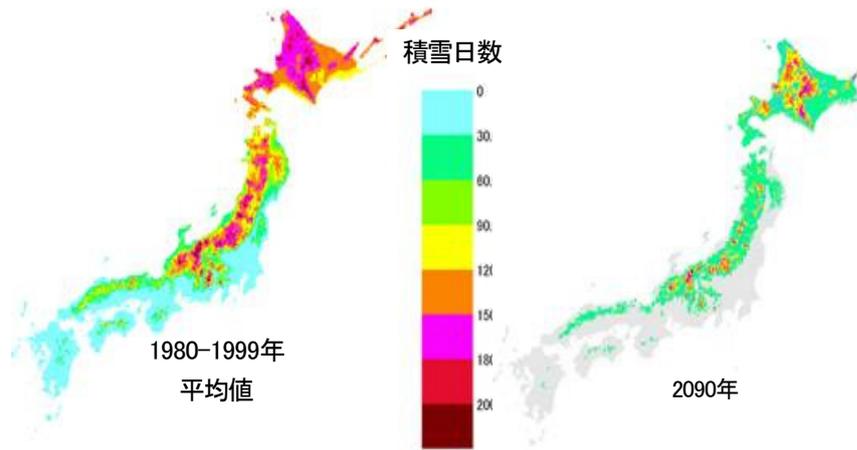


図1 積雪期間の現況と変動：左図は過去20年間の年平均積雪日数、右図はCCSRのシナリオで推定した積雪日数。本州日本海側で積雪期間の減少が著しいと予測。

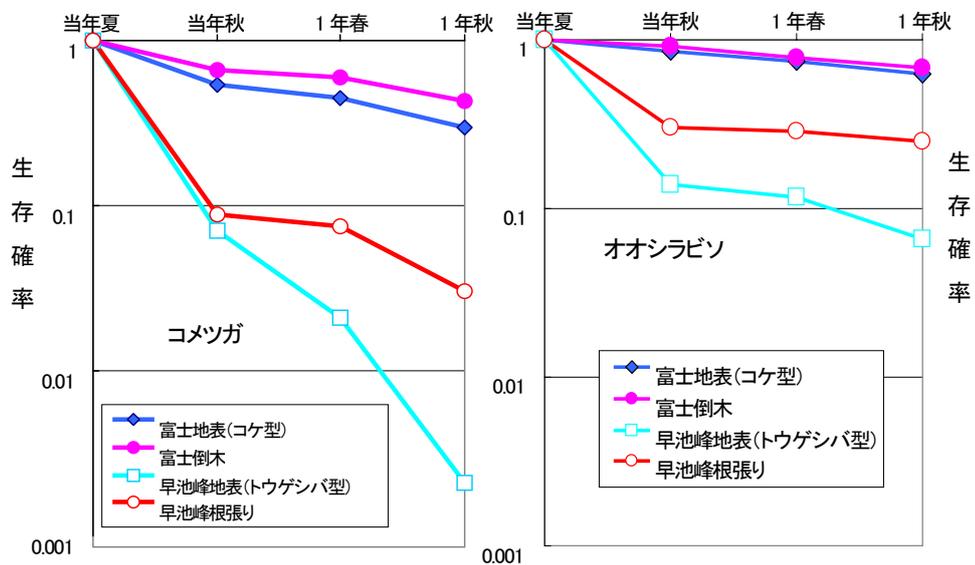


図2 富士山と早池峰山における基質別の針葉樹実生の生残確率：富士山より積雪が多い早池峰山で実生の定着阻害が起きやすく、コメツガではその傾向がより強いことがわかる。

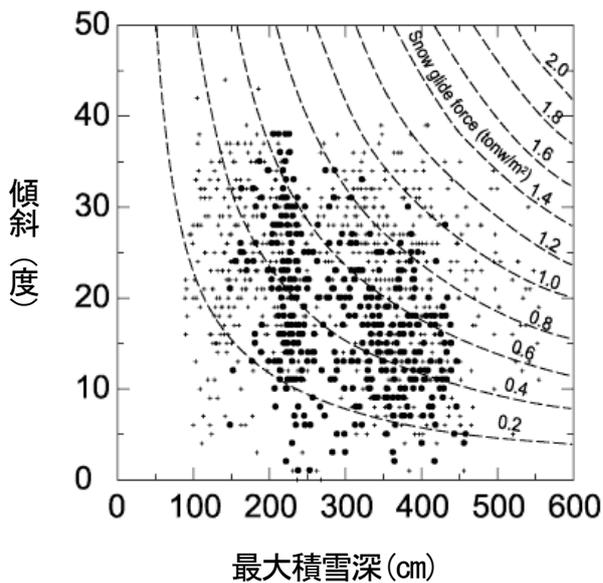


図3 東北日本亜高山帯におけるオオシラビソの分布と立地条件：現在のオオシラビソの分布域（黒丸印）と非分布域（+印）における最大積雪深と傾斜の関係。オオシラビソ分布地の立地条件がわかる。

破線は単位面積あたりのグライド駆動力を表す。温暖化にともなう積雪環境変化で分布がどう変わるかの予測に利用できる。

Daimaru and Taoda (2004) を一部改変

## 人工衛星データから全国の積雪期間を把握する

### 背景と目的

日本の森林生態系は気温、降水量とともに、積雪の期間やその深さの影響を強く受けて成立しています。そのため、積雪域の把握は下流域への水供給だけでなく、森林生態系の持続的な管理にとっても重要です。ところが、これまで得られていた積雪情報はアメダス観測点などのデータだけであるため、ほとんどの地域は気象データと標高データなどで推定していました。そこで、人工衛星のデータを利用して、全国の積雪分布の実態を観測する手法を考案しました。

### 成果

衛星観測データとしては、毎日同じ所を観測できるような高頻度の観測能力を持つ人工衛星 SPOT に搭載された観測器 (VEGETATION) のデータを使うことにしました。このデータは可視、近赤外、中間赤外の太陽光反射で構成されていて、地上分解能 (画素サイズ) は 1 km です。

しかし、毎日観測していても、雪の多い地方は雲も多いためスッキリと晴れた時の情報はなかなか得られません。10 日間で地上が最も良く観測できた画素を集めた「10 日間合成データ」などを利用して、雲などが障害となっています。そこで、まず連続的に観測される衛星データから、雲

の影響を除きながら画素毎に最適な多周期モデルを当てはめる手法を開発しました。この手法で全国の地表画像が 1 年を通じて生成できるようになりました。

また、このデータから積雪域を判定する積雪指標としては、近赤外と中間赤外のデータを利用する「S3 指標」が適していることが分かりました。そこで、この指標を用いて全国の積雪期間図を作成しました。得られた結果は、地点観測されているアメダスデータとの相関も極めて高く、積雪期間が 1 ヶ月以上の地域に関しては、10 日単位で積雪期間を示すことができるようになりました。

### 成果の特徴と利活用

アメダスデータなどの観測地点がほとんどない森林地帯でも積雪期間が 10 日単位で明らかになりました。積雪域の経年的な変化を捉えることで、生態系や水資源問題に利用できます。また、雲取り処理は、SPOT や NOAA 衛星などの高頻度観測による地表データの集積に活用されています。今後、温暖化がもたらす積雪域の変化の検証データとしても活用できます。

### プロジェクト情報

リアルタイム地球観測衛星データ高速通信・高速演算配信によるアジア太平洋防災ネットワークの開発 (平成 10 年～13 年)

### 主要な発表文献

沢田治雄ら、環境情報科学論文集、17 : 71-76、2003

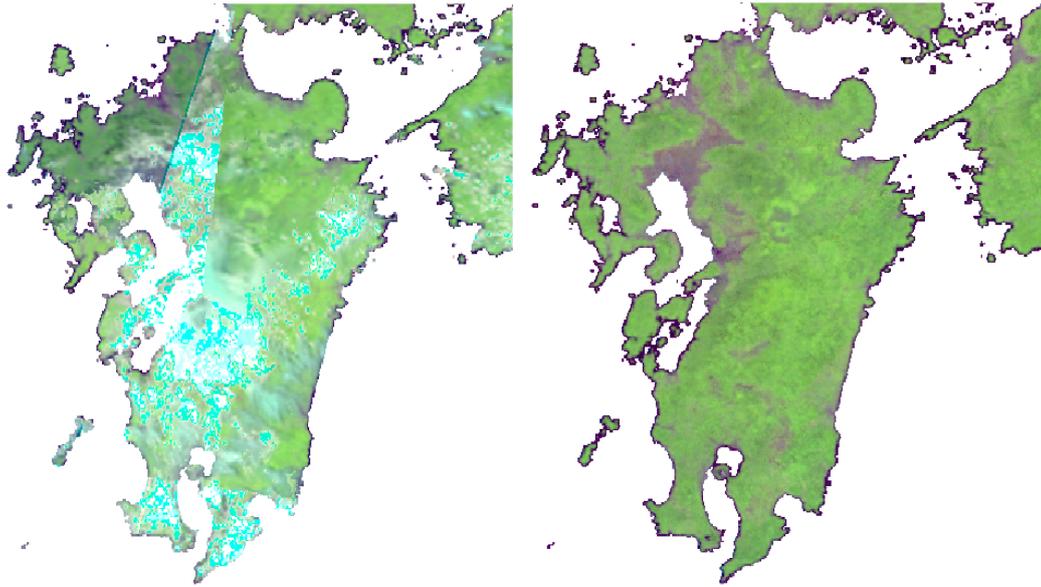


図 1. 雲鳥処理の効果： 雲取り処理前の衛星データの一部(左図)と処理後の同じ場所(右図)  
 左図の白い部分は雲で地上が見えない部分。右図の緑の濃い部分は針葉樹林、鮮やかな緑の部分は草地や広葉樹林、それ以外の色は農地や都市域。

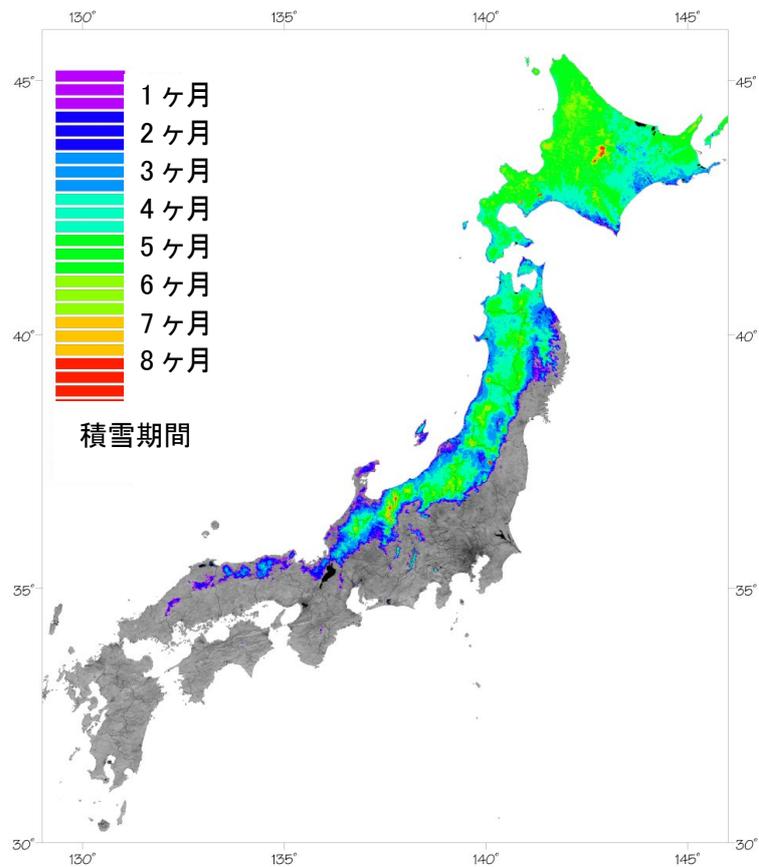


図 2 人工衛星 SPOT のデータから判定した全国の積雪期間

## 日本の森林樹木の炭素吸収量と炭素蓄積量

### 背景と目的

地球温暖化に対処するために、二酸化炭素吸収源としての森林の役割が注目されており、我が国でも森林における炭素吸収量および炭素蓄積量を正確に把握することが求められています。そのため、既存の統計情報や調査データ、地理情報等を活用し、日本の森林樹木による炭素吸収量、炭素蓄積量を推定するとともに、その分布図を作成しました。

### 成果

1990年と2000年の林業センサスを基礎データとして、その森林面積から下式を用いて樹種・市町村・年齢区分ごとの炭素蓄積量を算出しました。

$$\text{炭素蓄積量} = \text{森林面積} \times \text{ha 当り幹材積} \\ \times \text{拡大係数} \times \text{容積密度} \times \text{炭素含有率}$$

樹種区分はスギ、ヒノキなど9区分とし、それらの ha 当り幹材積は、森林資源現況調査から求めた成長モデルによって年齢ごとに推定しました。幹に対する枝・葉・根を含む林木全体の重量比を示す拡大係数は、林齢とそれぞれの部位の配分比の関係から求めた拡大係数モデルを利用しました。容積密度（林木の単位体積に対する乾重量）は、樹種区分ごとの標準値を用い、炭素含有率は0.50としました。

その結果、森林樹木による全国の総炭素蓄積量

は1990年に0.98Gt、2000年に1.18Gtと推定されました（表1）。これは、年平均20Mtの炭素吸収があったことを示しています。1990年と2000年の総炭素蓄積量の差は、森林の成長による吸収と、伐採や自然災害による排出の両方を含んでおり、正味の炭素吸収を表しています。総炭素吸収量の41%はスギによるものでした。

1990年と2000年の炭素蓄積量の分布（図1）とそれらの差から推定した炭素吸収量の分布（図2）から、我が国の森林は広く炭素を吸収しており、特に林業地では吸収量・蓄積量ともに高いことが確認できます。このように日本の森林樹木が吸収・蓄積している炭素の量は、スギを代表する人工林の速い成長と広い面積が反映しているものと考えられます。

### 成果の特徴と利活用

炭素の量と分布に注目した森林樹木による全国の炭素吸収量と炭素蓄積量の推定は初めてのものです。この成果は、京都議定書報告のための算定・報告手法の開発やIPCC（環境変動に関する政府間パネル）報告に利用されました。

### プロジェクト情報

森林、海洋等におけるCO<sub>2</sub>収支の評価の高度化（平成11～14年）交付金

### 主要な発表文献

福田未来ら, Forest ecology and management, 184:1-16, 2003

松本光朗ら, 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集3、21-3, 2004

表 1. 森林樹木による全国の炭素蓄積量と炭素吸収量

樹種	炭素蓄積量		炭素吸収量
	1990年	2000年	
		M t	M t/yr
針葉樹			
スギ	222	305	8.2
ヒノキ	103	124	2.1
マツ	95	106	1.1
カラマツ	51	59	0.8
エゾマツ・トドマツ	10	20	1.0
その他針葉樹	45	59	1.4
小計	526	672	14.6
広葉樹			
落葉樹	378	409	3.2
常緑樹	80	102	2.2
小計	458	511	5.4
合計	984	1,184	20.0
		t/ha	t/ha/yr
森林haあたり	41.4	50.0	0.86

M t = 百万トン

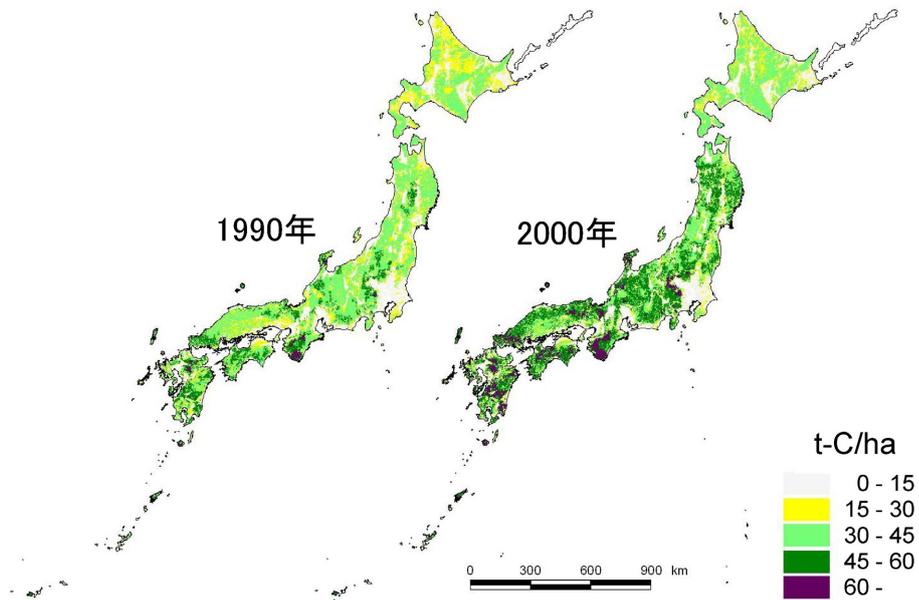


図 1. 1990年と2000年における森林樹木による炭素蓄積量の分布

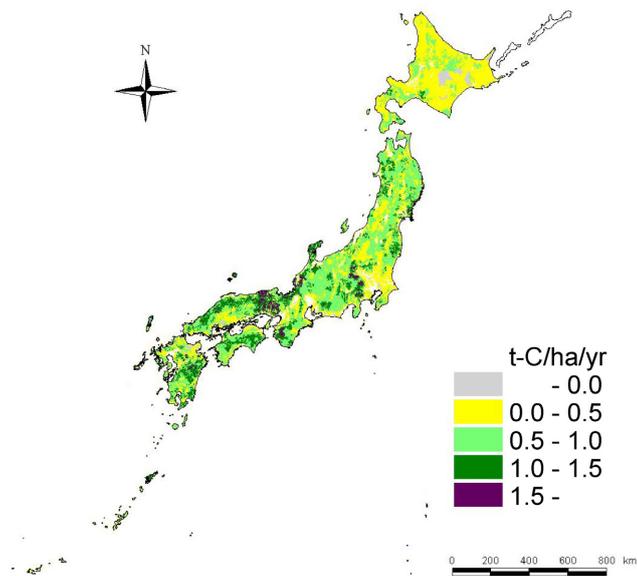


図 2. 森林樹木による年平均炭素吸収量の分布 (1990-2000年)

## 日本の森林土壌における炭素蓄積量

### 背景と目的

京都議定書の発効に伴い、日本をはじめとした締約国は二酸化炭素、メタン等温室効果ガスの変化を毎年報告することとなりました。そのために、まず主要な森林土壌の炭素蓄積能を明らかにする必要があります。そのデータをもとに、全国の森林土壌に蓄えられている総炭素蓄積量を推定しました。

### 成果

既往の土壌調査データ、国土数値情報などを活用して、全国の森林の堆積有機物層および土壌における総炭素蓄積量を算出しました。

その結果、堆積有機物層に 0.17Gt、深さ 1m までの土壌に 4.57Gt の炭素を蓄積していると推定されました。また、単位面積当たりの土壌炭素量（炭素蓄積能）は土壌の種類によって違っていました。すなわち、適潤性褐色森林土に区分される森林土壌は全国の森林面積の 44% を占め、その総炭素蓄積量は全体の 47% で日本の森林土壌では最大の炭素蓄積量があることがわかりました。黒色

土に区分される森林土壌は、面積では約 10% を占めるにすぎませんが、総炭素蓄積量は約 18% を占め、黒色土が日本の森林土壌による炭素蓄積に重要な役割を果たしていることがわかりました。

日本の森林土壌全体での ha あたり平均土壌炭素蓄積量（面積加重）は深さ 30cm までで 90 トン、1m までで 188 トンと推定されました。これらの値は全世界（113 トン）および日本と同じ冷温帯域の平均土壌炭素蓄積量（139 トン）より大きく、日本の森林土壌での炭素蓄積能は世界的にも高いことが明らかになりました。

### 成果の特徴と利活用

日本の森林下における堆積有機物および土壌による炭素蓄積量を明らかにしました。得られた成果の一部は地球温暖化防止に関する国際的討議における日本の見解をまとめる際の科学的根拠として利用されました。

### プロジェクト情報

森林、海洋等における CO<sub>2</sub> 収支の評価の高度化（平成 11～14 年）交付金、京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究（平成 14～16 年）環境省受託費

### 主要な発表文献

小野賢二ら、日本林学会関東支部発表論文集、53、143-144、2002

森貞和仁ら、Geoderma、119、1-2、21-32、2004

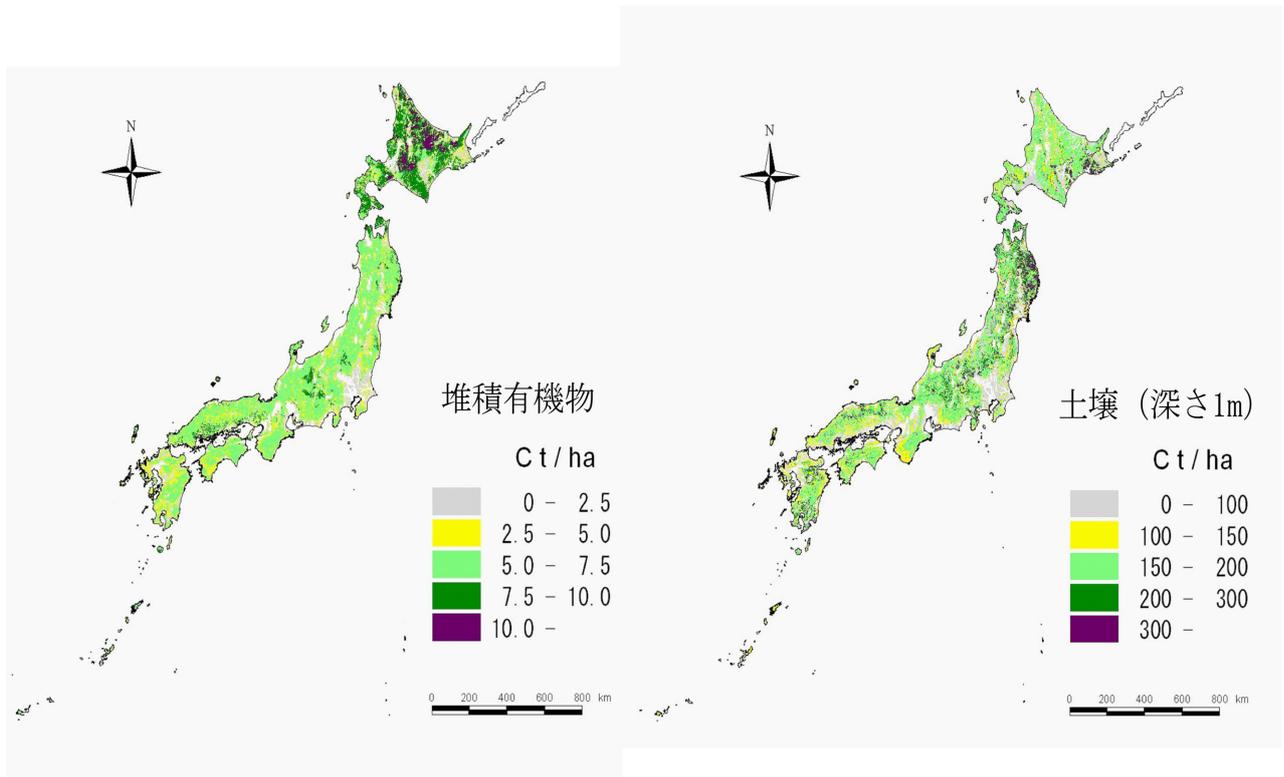


図1 森林における堆積有機物および土壌の炭素蓄積量分布

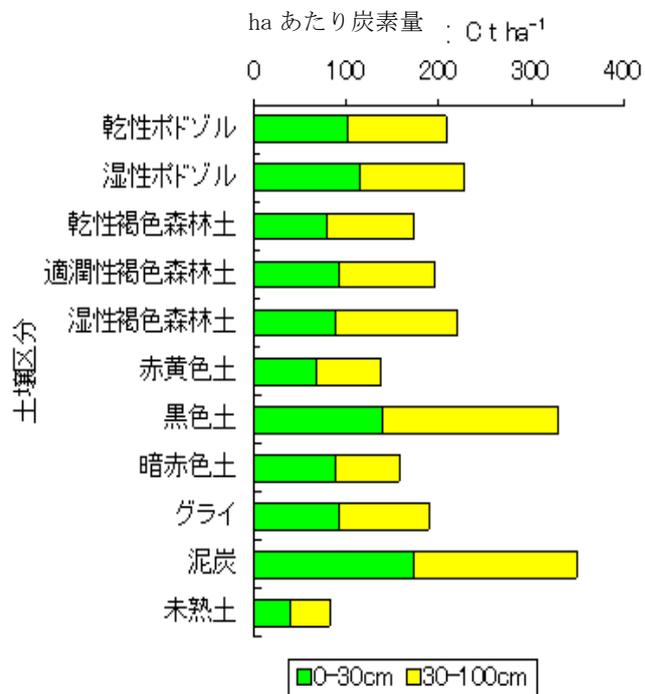


図2 主要な森林土壌の平均炭素蓄積能

## 温暖化防止に役立つ森林・住宅施策を特定

### 背景と目的

森林は、地球温暖化の主因である二酸化炭素を吸収し、炭素という形で蓄積することによって温暖化防止に貢献します。また、住宅においても使われている木材により同じように炭素を蓄積しています。このことから、森林と住宅を合わせた総炭素吸収・蓄積量に注目し、どのような施策が温暖化防止に役立つかを数理モデルを開発して推定しました。また、その森林施策が地域において実行可能かを判断する方法を開発しました。

### 成果

#### 全国モデルの構築

木材の需給均衡モデルを基礎として林業施策の影響をモデル化した森林サブモデルと、新設住宅量と残存量の予測に対して住宅施策の影響をモデル化した住宅サブモデルを開発しました。また、住宅木造率を媒介として両者を連携させて、全国レベルで林業および住宅施策の影響を予測する数理モデルを開発しました。

これを用い、今後 50 年間の推移を推定したところ、炭素吸収量にのみ注目すれば、林業施策では伐採抑制および複層林推進、住宅施策では耐久年数向上が重要であることが明らかになりました（表 1）。

#### 地域モデルの構築

市町村レベルの地域を対象とし、伐採に関する線形計画問題を基礎とする数理モデルを構築しました。そして全国モデルで推定した蓄積増加量と総伐採量の年平均（全国すう勢）値を、地域モデルから得られた総伐採量と期末蓄積増加量の関係図上にプロットすることにより、その実行可能性を評価する手法を開発しました（図 1）。

#### 影響評価モデルのフレームワーク

全国モデルと地域モデルの関係を図 2 のようなフレームワークで取りまとめました。これは、全国モデルで得られた推定値を、具体的な地域に受け渡してその実行性を判定し、その結果によっては全国モデルにフィードバックして再推定を行うというものです。

### 成果の特徴と利活用

森林と住宅を合わせた総炭素吸収・蓄積量に注目し、中長期的な推定を行った研究は初めてのものです。現状の京都議定書のルールでは、住宅や木材製品による炭素の蓄積は算定の対象とはなりません。この成果は算定方法の改善の必要性を明らかにしました。

### プロジェクト情報

地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発（平成 14～17 年）農林水産技術会議受託費

#### 主要な発表文献：

広嶋卓也ら，森林資源管理と数理モデル，5:179-188，2006 .

表 1. 各種施策が炭素吸収量に与える影響

施策内容	森林による炭素吸収量	住宅による炭素吸収量	森林と住宅による炭素吸収量
林業施策			
伐採推進	--	(+)	(-)
伐採抑制	++	(-)	(+)
複層林推進	++	(n)	(++)
住宅施策			
木造率増加	-	+	n
耐久年数向上	(+)	++	(++)

注 1) +:炭素吸収量増加、-:炭素吸収量減少、n:変化無し。  
 2) 記号が多いほど影響大。  
 3) ()は間接的に見込まれる影響を表す。

経済林率 20% の場合

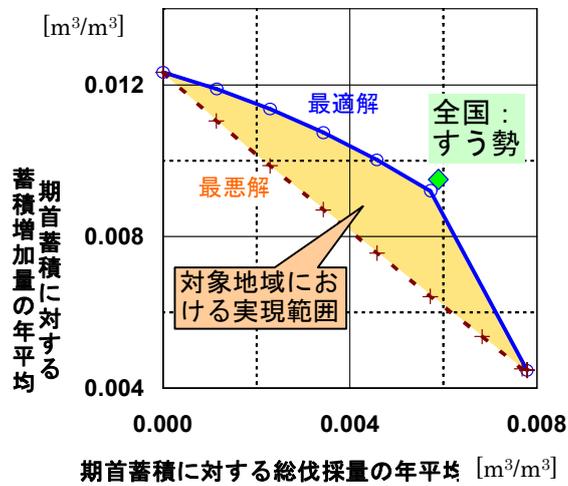


図 1. 地域モデルによる実行可能性の判定

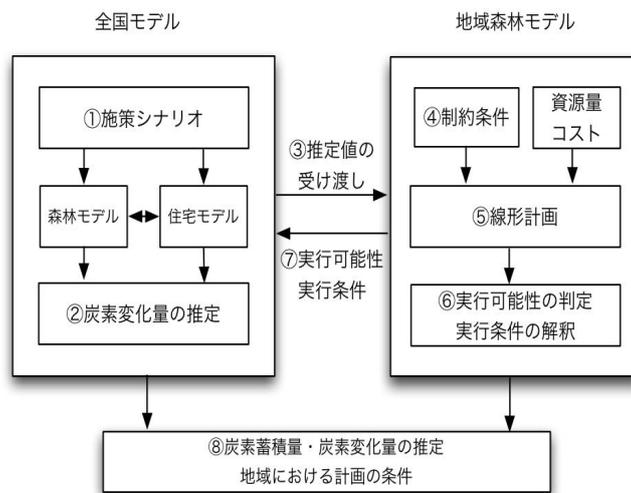


図 2. 影響予測モデルのフレームワーク

## 木質系バイオマスの利用可能量とその利用条件

### 背景と目的

地球温暖化緩和のため、木質バイオマスを用いて物質代替や化石エネルギー代替により化石燃料の使用量を軽減する方策は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第3次報告書でも有効な手段として強調されています。しかし、木質系バイオマス利用の基礎となる森林バイオマスの利用可能量やその推定手法、木質系バイオマスエネルギー利用のための地域システムのあり方について、我が国では明らかになっていませんでした。そのため木質系バイオマスの利用可能量の推定手法を開発するとともに、岩手県遠野地域での木質系バイオマス利用に関して、可能な供給量とエネルギープラント規模を明らかにしました。

### 成果

#### 木質系バイオマスの利用可能量の推定

日本全国の木質系バイオマス資源の利用可能量を評価するため、測樹学的な未利用バイオマス量算出モデルを作成しました。そのモデルと林業統計によって、伐採木材起源の未利用バイオマス量および自然公園等の禁伐林と京都議定書3条4項で使用される1300万炭素トン相当の成長量を除いた成長量余剰分を、バイオマス資源として使えると仮定して利用可能量を推計しました。その結果、伐採分を1995年に約6.7Mt/年、成長量余剰分を約18.0Mt/年と推定しました。その和は日本の1次エネルギー消費量（2000年度）の約2.3%相当でした。

#### 木質系バイオマスエネルギー供給可能条件の検討

岩手県遠野市における木質系バイオマスの発生量を、林地残材予想表と既存の生産量統計等を用いて、含水状態で年間58,000tと推定しました。また、量的確保には林業バイオマスの収集システムの整備が重要であることを明らかにしました。エネルギーコストの推定から、林産残材の利用可能性が高いことを明らかにしました。発生量とコストから供給曲線を導出し、近隣自治体から収集した方が安い燃料を収集可能であることを示しました。なお、現実的な供給可能量は7500t/年であり、中規模のエネルギープラントが妥当と判断できました。

### 成果の特徴と利活用

バイオマスエネルギー利用を念頭に我が国の森林バイオマス資源の利用可能量を明らかにするとともに、具体的な地域における供給可能量や供給システムを提示しました。この成果は我が国の木質系バイオマスエネルギー研究の端緒となり、その後のバイオマスエネルギー研究の基礎となりました。

### プロジェクト情報

木質系バイオマス・エネルギーの利用技術及び供給可能量の評価に関する研究（平成12～14年）環境省受託費

主要な発表文献：

西園朋広ら，Journal of Forest Research Vol. 10 No. 3:211-220, 2003

久保山裕史ら，日本林学会誌 86(2)：112-120, 2004

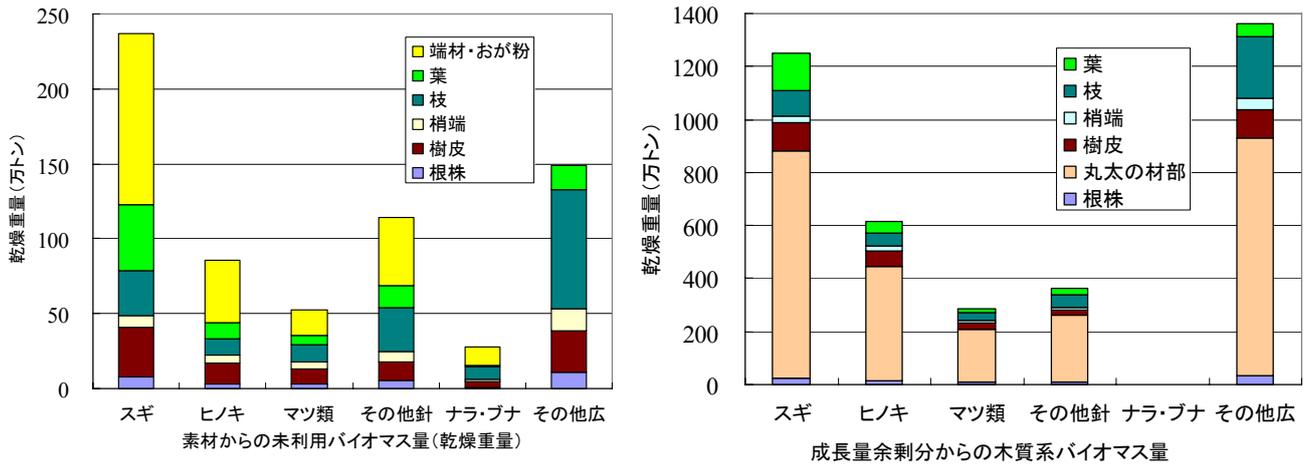


図1. 日本全国の樹種・種類別未利用バイオマス量

注：1995年の資源量をもとに伐採量が1995年相当の場合で推定した。グラフの「その他針」「その他広」とは、樹種名で表した以外の針葉樹、広葉樹である。

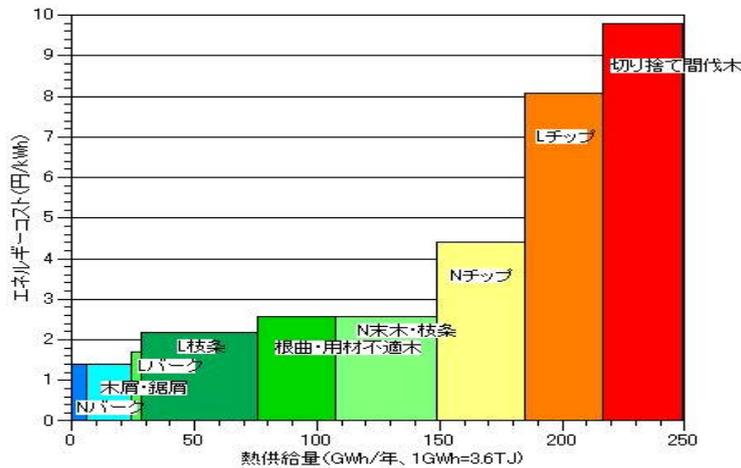


図2. 遠野市周辺5市町村の林業・林産バイオマス供給曲線

注：棒グラフの幅は熱供給量の大きさを、高さはエネルギーコストを表す。グラフの「N」は針葉樹、「L」は広葉樹を表す。

表1. 遠野周辺における木質バイオマス燃料のエネルギーコスト

(含水率)	種類	加工・輸送コスト (円/t)	熱利用の場合(円/kWh)		発電の場合(円/kWh)		
			そのまま利用	含水率30%削減	発電効率10%	発電効率30%	発電効率30%+熱販売
	切り捨て間伐木	14,609	9.8	6.5	68.5	22.8	21.1
林業 (N:100% L:75%)	用材不適木	3,853	2.6	1.7	18.1	6.0	4.3
	針葉樹末木・枝条	3,853	2.6	1.7	18.1	6.0	4.3
	広葉樹末木・枝条	3,853	2.2	1.5	15.2	5.1	3.3
	針葉樹バーク	2,500	1.4	0.9	9.9	3.3	1.5
林産 (75%)	広葉樹バーク	3,000	1.7	1.1	11.8	3.9	2.2
	針葉樹木屑・鋸屑	2,500	1.4	0.9	9.9	3.3	1.5
	針葉樹チップ	7,810	4.4	2.9	30.8	10.3	8.5
	広葉樹チップ	14,328	8.1	5.4	56.5	18.8	17.1
比較対象	A重油	40(円/・)	4.3				

注：エネルギーコストは、熱効率 $e$ をバイオマス70%、重油85%として算出した。

---

---

I S B N 978-4-902606-29-4

[森林総合研究所 第I期中期計画成果集 22]

# 地球環境変動の森林への影響と予測

## 温暖化の影響とその対策研究の成果

発行日 平成19年3月

編集・発行 独立行政法人 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

電話 029-873-3211 (代表)

お問い合わせ 企画調整部研究情報科

メールアドレス [kanko@ffpri.affrc.go.jp](mailto:kanko@ffpri.affrc.go.jp)

ホームページ <http://www.ffpri.affrc.go.jp/>

印刷所 茨城青写真製本社株式会社

本書から転載・複製する場合は、森林総合研究所の許可を得て下さい。

---

---