

B-60 京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究

(1) 森林の炭素吸収量計測システム・評価モデルの開発

1) リモートセンシングを活用したバイオマス計測手法の開発

愛媛大学農学部	末田達彦
国立気象研究所 環境・応用気象研究部 第3研究室	馬淵和雄
独立行政法人森林総合研究所 北海道支所北方林管理グループ	鷹尾元・高橋正義
早稲田大学 人間科学学術院	天野正博
国際航業株式会社	瀬戸島政博・船橋学

〈研究協力者〉 愛媛大学農学部	都築勇人
早稲田大学人間科学学術院	日下部朝子

平成14～18年度合計予算額	60,365千円
(うち、平成18年度予算額)	8,649千円)

※上記の予算額には、間接経費 13,633千円を含む

[要旨] 苫小牧国有林及び愛媛県全県を対象にLiDARによる推定の精度検証を行い、LiDARの計測結果と官庁統計データの間で土地利用及び森林蓄積の数値ともに違いがあることが解った。この違いには土地利用や森林に関する定義が異なること、官庁統計がリアルタイムに現実の動きを反映しきれていないことが背景にある。また広域への適用性を検証するためカナダ西部の亜寒帯林において5年を隔て2回実施したLiDARの調査で、亜寒帯林の森林蓄積は従来言われているよりかなり低いこと、亜寒帯南部は通説のように二酸化炭素のシンクではなくソースになっていることが判明した。つぎに、LiDAR等の遠隔探査技術と森林簿を組み合わせた炭素吸収量推定モデルを開発し、日本全国に適用できるようなモデルを開発した。具体的には、林分上層樹高と立木密度を遠隔探査により直接測定し、それらを「林分密度管理図」の等樹高曲線に代入して幹材積を推定し、さらに炭素量に換算する手法を取った。北海道の人工林について、1999年、2002年にLiDAR観測を行い、21林分で地上調査を行った。その結果、これらの林分での炭素蓄積の推定はやや過小だったが概ね良好であった。

リモートセンシングでは得られた広域での陸面植生データを利用し、観測領域を中心とした地域における森林観測結果を数値実験的に再現することを目的として、大気-植生-土壌を含む一次元の陸面植生モデルを開発した。ベースとなったモデルは3次元気候モデル用に開発した植生モデルBiosphere-Atmosphere Interaction Model (BAIM)である。森林現地調査データを利用し、陸面植生モデルの精度の向上を図るとともに、モデルの高度化を行った。さらに、本陸面植生モデルを導入した3次元気候モデルを開発し数値実験により、モデルで再現された気候値の検証を行った結果、モデルは本研究に必要とされる精度の気候再現性を有していることが確認できた。

[キーワード] 航空レーザー測距法、森林バイオマス、京都議定書、林分密度管理図、3次元気候

モデル

注：このサブサブ課題では、つぎの3つのサブサブサブ課題が実施された。

- a. レーザープロファイラーによるバイオマス生長量の直接計測（愛媛大学）
 - b. LidARによる森林簿精度の向上に関する研究（森林総合研究所）
 - c. 森林バイオマスの変動が気候変動に与える影響メカニズムに関する研究（国立気象研究所）
- それぞれ、独立しているの、サブサブ課題ごとにまとめて、要旨から、6. 引用文献までを記載し、最後に7. 国際共同研究等の状況、8. 研究成果の発表状況は、3つを一緒にまとめて、記載した。

a. レーザープロファイラー（LiDAR）によるバイオマス成長量の直接計測（愛媛大学）

1. はじめに

京都議定書が求める森林による二酸化炭素吸収量の評価には、森林の広域性ゆえにリモートセンシングの援用が不可欠である。しかし航空写真と衛星画像解析には、判読の手間、精度などの点で制約も少なくない。そこで本研究では、これら旧来の方法を補完するか、あるいはこれに代わるものとして、航空レーザー測距法による森林バイオマスと炭素吸収量の広域的な定量法を開発した。航空レーザー測距法は、航空機に搭載したレーザー測距儀により地表事物の高さを得る遠隔探査技術で、植生に適用した場合には高頻度で植生高を得ることができる。植生高は森林蓄積やバイオマスを決める最大の因子であり、その測定が理論的に不可能な衛星画像や、理論上可能だが実質的に不可能な航空写真に比べ、その連続的な測定が広域にわたり高精度、高密度で可能なことが航空レーザー測距法の革新的な特徴で、リモートセンシングによる森林の計測精度を画期的に改善するものである。



図1 苦小牧国有林の航空レーザー測距範囲

2. 研究目的

航空レーザー測距法による森林バイオマスと炭素吸収量の広域的定量法の開発という目的を、以下三つの小目的に分割した。第一は、森林蓄積や炭素吸収量の推定精度の検証であり、比較的小面積を対象とした推定値を地上調査、収穫表、森林簿、二酸化炭素フラックス観測など他の方法による森林蓄積や炭素吸収量と比較した。第二は、航空レーザー測距法の広域への適用性の検証で、これにはカナダ西部の亜寒帯林に設定した長大な単一のトランセクトを対象とした。第三は、京都議定書の炭素収支報告義務にかかわる実用性の検証で、これには愛媛県全県を対象に航空レーザー測距法で土地利用を区分するとともに森林蓄積を推定した。

3. 研究方法

航空レーザー測距法の精度検証には苦小牧国有林の500ヘクタールを研究対象地としたが（図1）、レーザー測距範囲と林小班の区画が

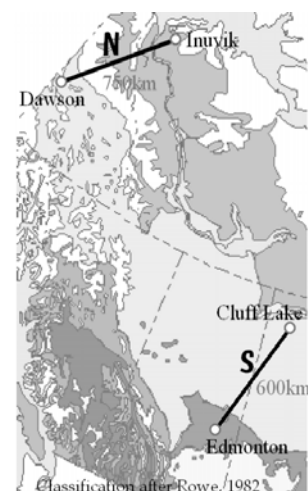


図2 カナダ西部亜寒帯林の航空レーザー測距トランセクト

必ずしも整合していないので、実測蓄積および森林簿蓄積との比較は実際の林小班区分に従い、それがレーザー測距範囲を超える場合は、レーザー推定蓄積を面積比で比例配分した。

広域への適用性の検証にはカナダ西部の亜寒帯林の南北両端に設けたそれぞれ延長600 kmと750 kmのトランセクトを用いた（図2）。南部トランセクト(S)の南端部100 kmはさらに南に広がるプレーリーとのエコトーンにかかっている。また北部トランセクト（N）北部のリチャードソン山脈部分はツンドラとのエコトーンとなっているが、最北端部はマッケンジーデルタの低地に下がるため再度亜寒帯林となる。

京都議定書森林吸収の実用性検証には4 km間隔で愛媛県全県を網羅する23本のベ1500 kmのトランセクトを使った（図3）。

航空レーザー測距法では、森林の縦断面積や空間体積から立木、バイオマス、炭素の蓄積を得る。従って森林の成長量や炭素吸収量を得るためには、一定の時間間隔を隔てた二回以上の蓄積測定が必要であるが、期間と予算の制限上複数回の航空レーザー測距を行う訳にはゆかないので、同一対象の複数回測定をそろえるために前回の地球環境研究総合推進費や科研費などによる測定結果も援用した。その結果、苫小牧国有林とカナダ亜寒帯南部トランセクトではそれぞれ3年と5年を隔てた二回の航空レーザー測距値が確保できたが、カナダ北部トランセクトと愛媛全県では、それぞれ2003年と2005年に行った一回の計測しか確保できていない。

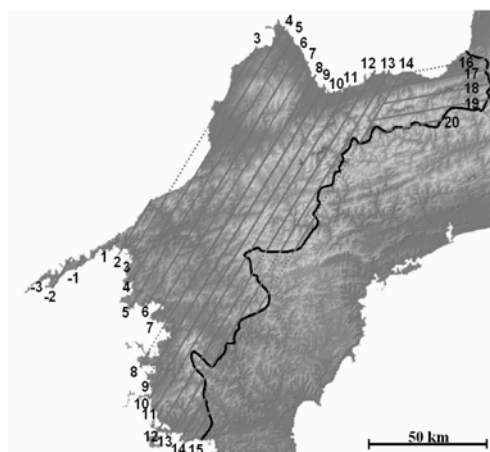


図3 愛媛全県航空レーザー測距トランセクト

4. 結果・考察

【苫小牧国有林における航空レーザー測距法の精度検証】

表1に苫小牧国有林500 haの測距範囲における1999年と2002年の立木蓄積（ m^3/ha ）、バイオマス（乾重 t/ha ）、炭素蓄積（ Ct/ha ）と、三年間の差としての成長量と炭素吸収量を示した。立木蓄積は幹材積だけ、バイオマスは立木の幹、根、枝、葉全ての絶乾重量、炭素蓄積はバイオマスを炭素換算したものである。推定の対象域は、環境省のフラックスタワーを中心とした500 ha（東西8200m、南北600m）と、フラックスタワーが設置されている197林班（24ha）である。

表1 航空レーザー測距法による苫小牧国有林500haおよび197林班（24ha）の立木蓄積、バイオマス、炭素蓄積と生長量

測定対象域	バイオマス	1999	2002	△/年
	立木蓄積 (m^3/ha)	231	249	6.2
全体対象域 (500 ha)	バイオマス (DM t/ha)	147	158	3.9
	炭素蓄積 (Ct/ha)	73	79	2.0
フラックスタワー林 分 (197林班) (24ha)	立木蓄積 (m^3/ha)	260	293	11.0
	バイオマス (DM t/ha)	162	183	7.0
	炭素蓄積 (Ct/ha)	81	92	3.5

苫小牧国有林は、その大半が洞爺丸台風（1954）による壊滅的な風倒の後に植栽されたエゾマツ、トドマツ、カラマツの人工林で、林齢が50年前後にそろっているが、これを道南部で行われた過去の蓄積調査と比較すると、Satoo（1971）では45-47年生のエゾマツ林で193~427 m³/ha、阿部（1980）と帯広営林署（1959）の収穫表ではそれぞれトドマツとカラマツにつきともに45年生で224~386 m³/haと209~229 m³/haとなっており、本研究の推定値231（1999年全林平均）~293 m³/ha（2002年197林班平均）を包含している。さらに本推定値は内部的な整合性も良く、1999年から2002年の間に増加しているほか、この間の平均生長量6.2 m³/ha/yr（全林）と11.0 m³/ha/yr（197林班）も前出の収穫表の生長量5.0~8.8 m³/ha/yrとよく整合している。

さらにこの生長量を炭素換算した2.0 Ct/ha/yr（全林）と3.5 Ct/ha/yr（197林班）は環境省のフラックスタワーにおける観測値2.9~3.9 Ct/ha/yr（Hirano et al. 2003）とも良く整合している。ただしフラックスタワーでは土壌呼吸までが観測対象になっている一方で観測対象の森林の範囲が不明確、逆に本研究では対象森林の範囲は明確だが土壌呼吸が含まれていないという条件の不整合はある。

次いで航空レーザー測距範囲に含まれる59の小班の立木蓄積を、標準地法とビッターリッヒ法により実測したうえ、これを正值としてレーザー推定と森林簿蓄積の精度を比較したところ（表2）、レーザーの9%の過大推定に対し、森林簿では44%の過小推定となった。表1で示したように、レーザーによる推定が過去の測定結果や二酸化炭素フラックスのタワー観測との整合性が良いこと、一般論として森林簿には過小推定の定評があることなどから、この結果も当を得たものと言える。以上により航空レーザー測距の森林蓄積推定精度は、1）森林簿に勝り、2）、少なくとも二酸化炭素のフラックス観測と同程度であり、3）実測には多少劣る、と結論した。

表2 実測蓄積および森林簿との比較

	実測	レーザー	森林簿
蓄積 (m ³)	54,207	59,139	30,620
誤差 (%)	0	9	-44

【カナダ西部亜寒帯林の広域測定】

カナダ西部の亜寒帯林南部（S）と北部（N）に設置したトランセクト沿いに推定した立木蓄積を図4に示した。いずれも元来はそれぞれのトランセクトの始点からの距離で蓄積推定を行っているが、図4では南北のトランセクトをつなぐため、距離軸を緯度に変換し、実際の測定値を細い折線で、これを平滑化した全体的な分布を太い傾向線で示してある。従来、比較的一様と考えられていた亜寒帯のバイオマス分布が南北で大きく違うこと、亜寒帯林平均と考えられているバイオマスで200 DMt/ha（Whittaker, 1972）、あるいはヘクタールあたり数百立米の蓄積は南部の限られた範囲のもので、亜寒帯林の平均蓄積は200 m³/haに満たないことが、この結果から明らかになった。

期間5年を隔て二回の航空レーザー計測値のある南部トランセクトのバイオマス分布の変化を図5に示した。本図から明らかなように、1997年時点で平均72 DMt/haあった森林バイオマスは2002年には63 DMt/haに減少し

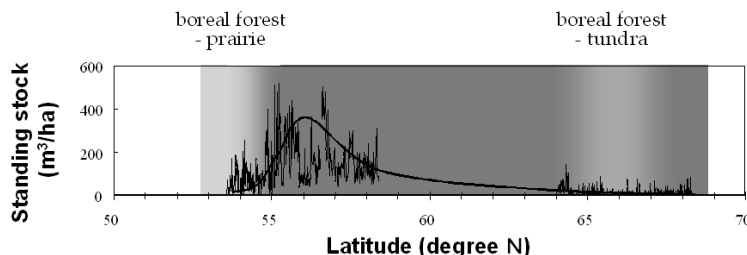


図4 航空レーザー測距法によるカナダ西部亜寒帯林の森林蓄積分布

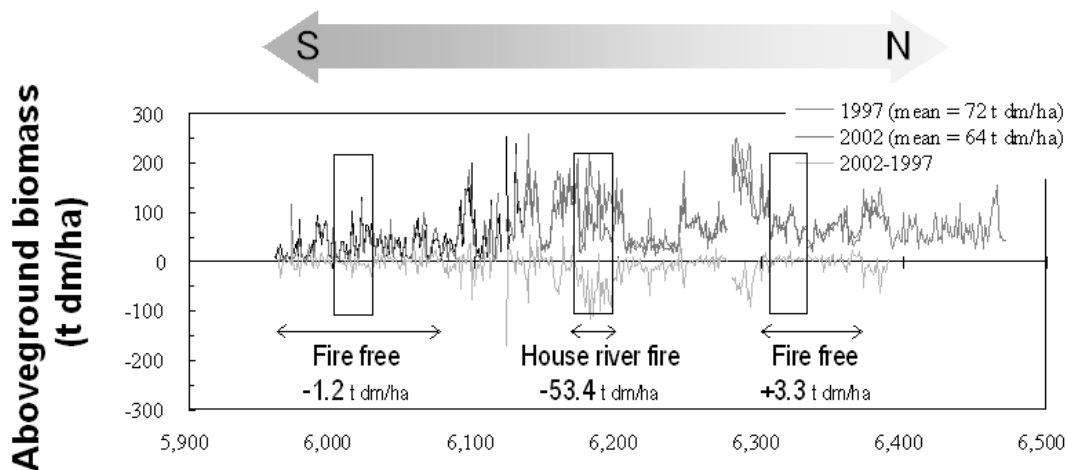


図5 カナダ西部亜寒帯林南部のバイオマスの変化

たが、その主たる原因は2002年に調査したトランセクトを設定した周辺地域に限れば、発生した森林火災による焼失である。その他、大きな傾向として、森林バイオマスはトランセクト南部で微減、同北部で微増を示したが、これは地球温暖化によるプレーリーと亜寒帯林の北進を反映したものである可能性が高い。また、これらの結果は、亜寒帯林を二酸化炭素の吸収源とする衛星画像解析を主体とした従来のIPCCの推定結果(Houghton et al. 1994)とは異なる傾向を示した。

【愛媛全县の土地利用区分と森林蓄積の推定】

京都議定書に対応した愛媛全县の航空レーザー測距ではまだ一回の測定値しか無いため、森林の炭素収支は推定できないが、炭素収支報告義務の前提となる土地利用区分と現時点での森林蓄積を推定し、これらの結果を既存の官庁統計と比較検討した。

まず精度検定のため「飛行距離延長×測線幅」により県土面積を求めたところ、極めて単純な長方形近似にもかかわらず、54.35万haと国土地理院の値に対しわずか0.38%の過小推定に収まった。他方、森林面積は44.6万ha（県土面積の81.7%）と、官庁統計（民有林森林簿+国有林森林簿）の38.5万ha（同70.5%）に対して県土面積比で10%を越える過大推定となった。その原因は、レーザーでは木本植生の有無という景観から森林を認定しているため、自然公園の樹林地やある程度高木化した果樹園などが含まれるほか、高度経済成長に伴い放棄されて森林化した農地（図6）が特に大きく効いているものと考えられる。



図6 愛媛県中予地方の森林化した農地

航空レーザー測距法による愛媛県の森林蓄積は1.76億 m^3 で、官庁統計（民有林森林簿+国有林森林簿）の8,732万 m^3 とはさらに大きな食違いが出た（図7）。航空レーザーの側で過大推定、森林簿の側で過少推定になっていると考えるのが妥当だが、前者では上記の森林面積の過大推定の他、すでに苫小牧国有林でみた航空レーザー測距法に内在する過大推定の性向が考えられる。以

上二つの要因のうち、第一の原因については森林簿に従い森林面積を県土の70.5%とし、第二の原因では苫小牧国有林の実例に従い9%の過大推定があったとして単純比例で当初推定を補正すると、航空レーザーによる最終的な森林蓄積は1.39億 m^3 となる。

他方、森林簿の側も従来から過少推定の定評がある。上記の苫小牧国有林でみた森林簿の44%の過少推定の比率を愛媛県にも適用すると、蓄積は $8,732万m^3 \div 56\% = 1.56億m^3$ と、航空レーザーとかなり近い値となる。また、現行の森林簿蓄積を過去数年の森林資源モニタリング調査により補正した松本（平18年11月アドバイザーボード発表）の計算によれば、森林計画対象森林34.6万haだけでも蓄積は9,415万 m^3 と20%増大

しており、これを国有林と民有林すべてを加えた本島部の森林簿森林面積38.5万haに単純比例配分しても総蓄積は1.05億 m^3 となり、航空レーザー推定との整合性は高まる。

以上の推計で、航空レーザー測距法と森林簿との乖離をかなり縮めることができたが、依然3,000万 m^3 を越える食違いがあり、原因の解明が必要である。その他、県土面積の10%近くに及ぶ森林化した農地が存在する可能性が明らかになったが、これらを京都議定書3条3項のARDに算入することも考慮に入れるべきであろう。

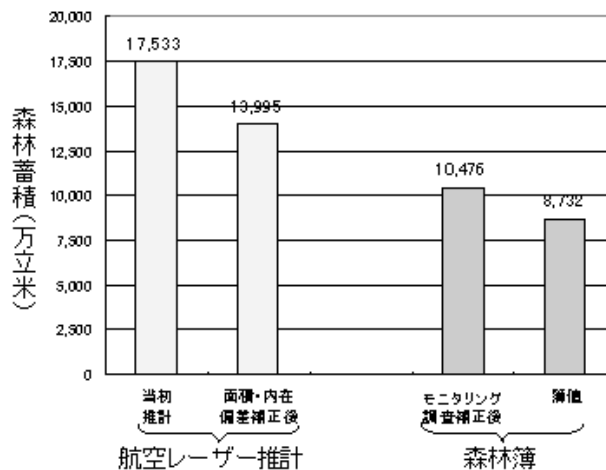


図7 愛媛県の森林蓄積、航空レーザーによる推定値と森林簿との比較

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

科学的意義は三点ある。第一点は本研究により航空レーザー測距法による広域詳細な森林バイオマス測定と炭素収支勘定が実用化のレベルに達したことである。植生量を決める最大の要因が植生高なのでこれを主たる測度とした航空レーザー測距法は、少なくとも推定精度の点で、植生高の情報に欠落する衛星画像や、その広域測定には非現実的な手間暇を要する航空写真を凌駕することが明らかになった。

第二点はカナダ西部の亜寒帯林への適用の結果、同じ亜寒帯林と言えどそのバイオマス蓄積は南北で大きな差があるとともに、従来亜寒帯林の蓄積とされてきた値は南部の高蓄積部のもので、その普遍性に疑念があると分かった。まだトランセクト一本の測定結果につき即断はできないが、従来の亜寒帯林のバイオマス蓄積も、それ故IPCCの陸上生態系の総炭素蓄積550 Gt (Houghton et al. 1990)～610 Gt (Houghton et al. 1994)もかなり過大な推定である可能性が高いことが判明した。

第三点は亜寒帯林の炭素収支で、一般に亜寒帯林は吸収源とされているが、少なくとも本研究の対象としたカナダ西部の亜寒帯林は放出源になっていることが明らかになった。その原因は大規模な森林火災と南部のプレーリーの北進による亜寒帯林の蚕喰であるが、温暖化が亜寒帯の火災頻度と規模を拡大させるという通説に従うなら、温暖化により亜寒帯林からの炭素放出はさらに増える可能性がある。

(2) 地球環境政策への貢献

森林簿の森林蓄積にはかねてから過小推定の疑念があったが、森林簿が日本全国を網羅する一方で、その蓄積と矛盾する測定は大きくても一ヘクタール程度のプロットでの値に過ぎないため、森林簿の精度は長らく曖昧なままになっていた。本研究の結果、数百ヘクタールという苫小牧国有林の場合でも数十万ヘクタールという愛媛県の場合でも森林簿がかなりの過小推定になっていることが明らかになった。わが国の森林蓄積推定の手段を一挙に航空レーザーに切り換えることは非現実的だが、少なくとも部分的な航空レーザー測距の結果を使って森林簿の値を補正することは不可能ではないし、これにより京都議定書の森林吸収の勘定にもより科学的で再現可能な方法での対応が可能となる。

6. 引用文献

- 1) 阿部信行. 1980. トドマツ人工林の施業法に関する研究(Ⅱ) 道有林におけるトドマツ人工林の収穫予想表の作成. 北海道林業試験場報告18: 71-93.
- 2) Hirano, T., Hirata, R., Fujinuma, Y., Saigusa, N., Yamamoto, S., Harazono, Y., Takada, M., Inukai, K. and Inoue G.. 2003. CO₂ and water vapor exchange of a larch forest in northern Japan. *Tellus*, 55B: 244-257.
- 3) Houghton, J.T, Jenkins, G.J. and Ephraums J.J. eds. 1990. *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*. xxxix+365pp. Cambridge University Press, Cambridge.
- 4) Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Lee, H., Callander, B.A., Haites, E., Harris, N., and Maskell, K. eds. 1994. *Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. 339pp. Cambridge University Press, Cambridge.
- 5) Satoo, T. 1971. Materials for the studies of growth in stands. VIII Primary production relations in plantations of Norway spruce in Japan. *Bull. Tokyo Univ. For.* 65: 125-142.
- 6) Whittaker, R.T. 1972. *Communities and Ecosystems*. Xi+158pp. Macmillan, London.

b. LiDARによる森林簿精度の向上に関する研究 (独立行政法人森林総合研究所)

1. はじめに

本研究では、針葉樹人工林による炭素固定量を遠隔探査により推定する透明かつ検証可能な手法を開発する。研究対象地に限定されたモデルパラメータを精度よく推定することは本研究の目的ではない。むしろ、日本全国に展開可能なモデルのプロトタイプを提示し、そのひとつの事例として研究対象地での観測および解析例を示す。

2. 研究目的

遠隔探査技術として航空機搭載LiDARを用いる。LiDARはこれまで他の手法ではほぼ不可能であった森林の高さを遠隔から観測でき、森林の構造の観測および解析に新たな非常に有効な手段となった。さらに、航法装置の進歩により航空機による低高度・高分解能の観測も地図など他の地理情報と直ちに重ねあわせが可能となり、実用性も増加した。

しかし、本研究では、遠隔探査による観測自体(ハード面)の精度向上は求めず、現時点で普及していると考えられる標準的な観測を行う。そして、観測された数値の解析の手段としての炭素

固定量推定手法を示す。これは、将来の普及を考えると、現在のより一般的な観測水準によるほうが特殊な先進事例で手法を開発するよりも、より広範囲に適用しやすくかつ将来から現在を振り返る場合にも適用しやすいためである。この観点から、最新の研究事例においては単木レベルの計測も見られるにもかかわらず、本研究では観測の対象を人工林内の単木ではなく、均質な林相および施業履歴を持つと考えられる林分単位とする。

そして、日本全国に事業レベルで適用可能となるように、これまでに全国で集積された人工林の成長に関する知識を有効利用することと、遠隔探査にかかる地上作業（グラントゥールス収集）を極力軽減することを、大きな目的とする。

3. 研究方法

(1) 研究対象地とデータ

研究対象地は、北海道森林管理局胆振東部森林管理署管内の針葉樹人工林である。樽前山の裾野の非常に平坦かつ緩やかな西斜面上にあり、約500m×800mの矩形の林班を単位として大規模な人工林経営が行われており、地形と森林経営単位の両面から森林の遠隔探査手法の開発に適している。主な植栽樹種は、トドマツ、カラマツ、アカエゾマツ、エゾマツである。研究対象地全域で時代により植栽樹種が異なるため、林齢ごとに樹種が偏っている。

そのうち、ほぼ完全に直線の第一縦断林道の両側の人工林(苫小牧市内)を調査対象地とし、林道を中心として幅600m、延長約10kmの範囲を2002年9月にLiDARで計測した(図8)。また、同一地域を1999年にも計測した。

LiDARデータは航空機から発射されたレーザパルスが地表物に当たり反射した点の3次元座標の集合である。各LiDARデータから局地的最低点を抽出して内挿し、地上分解能1mの地表面高(DEM)を推定した。各LiDAR点のZ座標からその水平位置での地表面高を減じて、そのLiDAR点の林冠高(つまり、そのLiDAR点の水平座標における林冠面の高さ)とした。それらの点のうち、下記の地上プロット内の点のみを抽出して、各プロットのLiDAR点の集合とした。また、2002年に同時に撮影されたオルソ空中写真(空間分解能50cm)も用いた。

地上検証用の林分データは、LiDAR取得範囲から樹種および林齢が広く取られるように21地点選り、プロット内の毎木の胸高直径およびサンプル木の樹高を測定した。また、愛媛大学の測定データも一部利用した。本研究の最終目的は炭素の収支の推定である。ここではまず森林植生の炭素固定の主要部分である幹の材積をプロット調査から推定する。幹材積推定には材積表を使用する。使用した材積表はそれぞれ、エゾマツ・アカエゾマツには「北海道エゾマツ材積表」、トドマツには「札幌トドマツ材積表」、カラマツには「北海道カラマツ材積表」である。さらに、材積表または他の方法で推定された幹材積は、容積密度、バイオマス拡大係数、地上部に対する地下部比、および炭素含有率を乗じて算定した¹⁾。

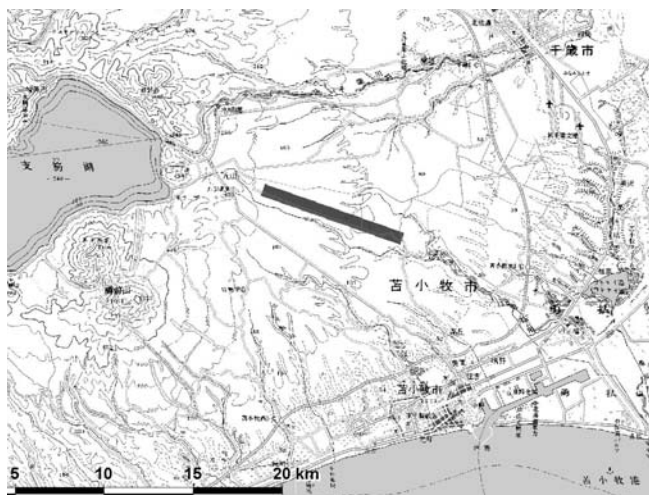


図8 研究対象地

なお、2004年9月の台風18号により地域全体に壊滅的な風倒害が発生し、地上調査プロットを含めた研究対象地も残念ながらほとんど倒壊した。

(2) 方法の概要

LiDARによる材積やバイオマス推定には既に多くの事例がある。それらのほとんどはLiDAR計測から得られたいくつかのパラメータを独立変数として材積などの目的変数に統計的な関連付けを行い、その推定精度を検証するものである。本研究でも、当初はそのような手法を取り、研究対象地内で一般的な関係を対象地外に外挿する手順を考えた。しかし、次章に詳述するとおり、その手法ではいくつかの問題が発生した。それらは、樹種や林齢により関係が異なる、LiDAR計測から得られたパラメータの多くはその生態的意味づけが不明である、局地的に得られた結果がはたして他の地域の森林に外挿可能かどうか判断できない、などの点である。

そこで、より一般化が容易なモデルとして、既存の幹材積推定モデルにLiDAR観測を組み込む階層的モデルを採ることとした。すなわち、「林分密度管理図」と呼ばれる一斉単純林の成長モデルのうち、「等樹高曲線式」というサブモデルを用いて林分平均樹高と立木密度の2変数から林分材積を推定する。「林分密度管理図」は植物の成長と競争を理論的に表し、そのパラメータを実際の計測により推定したものである。日本では莫大な成長試験データ等に基づき主な人工林樹種について地方ごとにすでに調製されている。LiDARから求められるのは林分上層樹高なので、上層樹高による等樹高曲線式を求める必要があるが、これは過去の林分調査データからも再構成可能であろう。林分上層樹高および立木密度はLiDARおよび空中写真で直接物理的に計測可能なものなので、統計的な関連付けやパラメータ調整が不要である。このように、日本全国に拡張可能なモデルの枠組みのなかで事例研究を行うことにより、単なる事例だけでなく実際の拡張可能性を検討することができる。等樹高曲線式を用いた推定手法の詳細を次節に示す。

(3) 遠隔探査と等樹高曲線式を用いた炭素固定量推定

林分密度管理図では立木密度 N [trees/ha]と平均樹高 H [m]とから等平均樹高式(1)により林分蓄積 V [m^3/ha]が求められる。

$$V = 1 / (a_1 H^{-b_1} + a_2 H^{-b_2} / N) \quad (1)$$

ここで、 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 はパラメータである。しかし、LiDARから推定されるのは林分の上層樹高 H_t [m]である。そこで、平均樹高を上層樹高に置き換えて、等上層樹高式(2)により林分蓄積を推定する。

$$V = 1 / (a_1 H_t^{-b_1} + a_2 H_t^{-b_2} / N) \quad (2)$$

a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 を推定するためには、本研究の研究対象地以外から得られた人工林林分データを用い、 N 、 H_t を独立変数、 V を従属変数とした(2)式の当てはめを行う。

林分上層樹高は林冠高の累積相対頻度分布図(図9)より推定する。これは、対象林分内のLiDAR

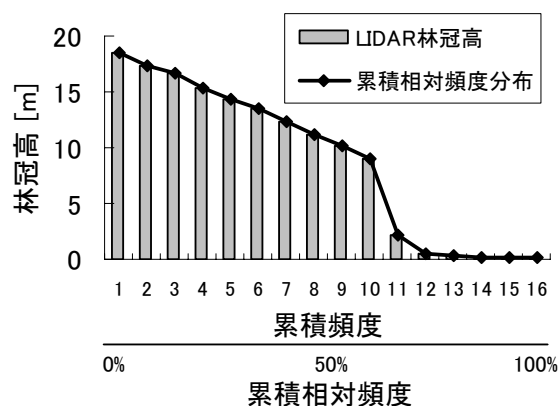


図9 林冠高の累積相対頻度分布図

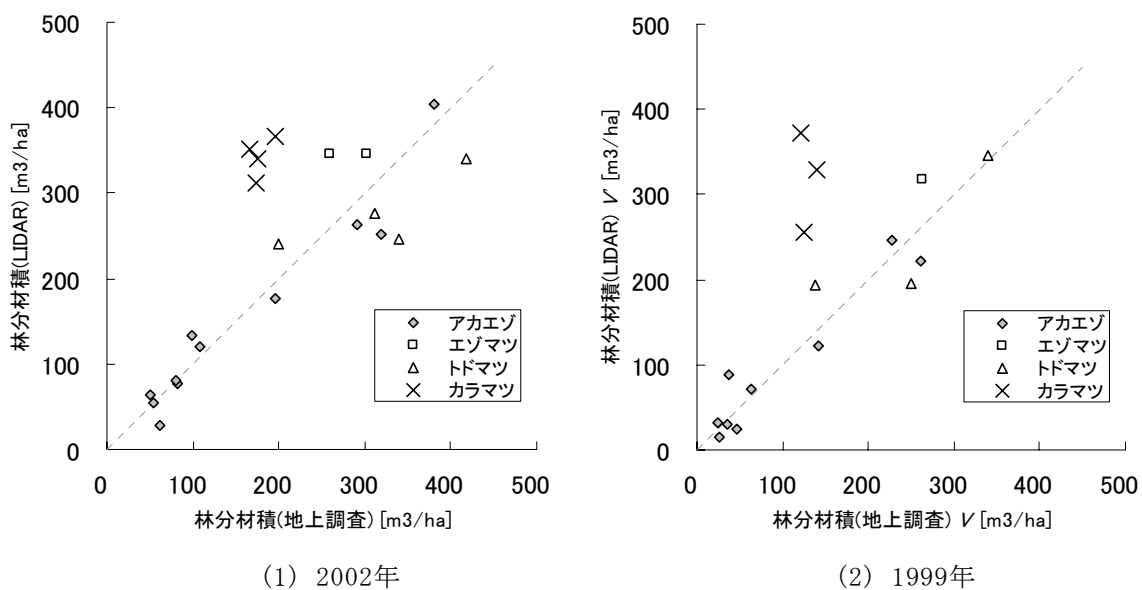


図10 平均林冠高による林分材積推定
カラマツは回帰に用いていない

による林冠高を高いほうから順に並べたもので、これを縦軸に沿って見ると林冠高 h [m]以上の点の累積頻度を表す。林分上層樹高は図9の y 切片として表される。

立木密度は空中写真より梢端を抽出し勘定することにより行う。梢端の抽出にはLocal Maximum Filter (LMF)を用いる。LMFのサイズはあらかじめ多方位セミバリオグラムから決定する。

4. 結果・考察

(1) 林分材積の直接推定とその問題点

立木本数や樹高を考慮せず、平均林冠高（林冠のあらゆる部位の高さの平均値）と林分材積の関係を図10に示す。カラマツは他の樹種と関係が異なるため、関係式の推定に用いていない。これらの関係は統計的關係を推定したデータ自体であることに注意が必要である。2002年と1999年ではそれぞれある程度の統計的關係（カラマツを除き、 R^2 がそれぞれ0.84、0.85）であるが、関係式はお互いに異なり共通の構造を見出せない。さらに、1999年の観測直前に行われた間伐のあとの林冠の回復が樹高方向（すなわち幹材積に大きな影響がある）ではなく樹冠幅方向（すなわち枝などの増加）に表れたのにもかかわらず、平均林冠高は増加したことから、林分材積の成長が過大に評価された林分もあった。このように、統計的にある程度関係は認められながらも、構造が不安定かつ物理的意味づけが不明な局所的モデルを用いて、他の地域への適用可能性を論じるのは困難である。

(2) 等樹高曲線式を用いた階層的推定

a. 林分上層樹高：上位5%の平均樹高としての上層樹高と図9の y 切片としての推定値との関係は大変良好であった（図11）。この方法は統計的なパラメータの調整を行っていないので、観測に依存する地上調査は不要である。なお、この方法では、樹冠形がパラボラのような場合には地形が急峻であると推定値がわずかに過大になることが予想される。本研究とは別に平田²⁾の資料を基に急峻な地形でのスギ人工林の上層樹高の推定を試みたところ、上層樹高の定義が異なるため直

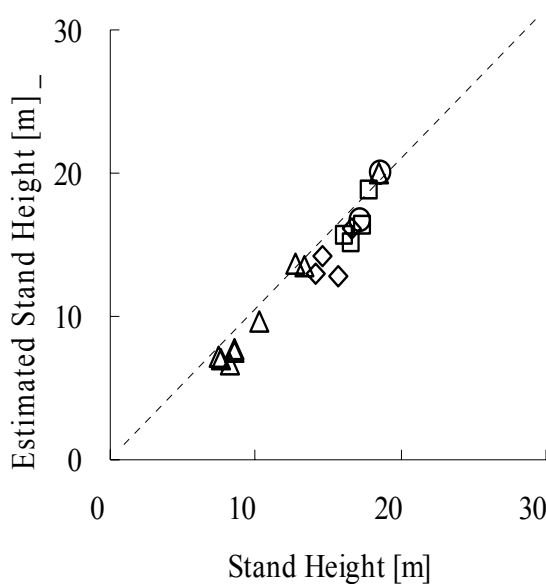


図11 林分上層樹高の推定

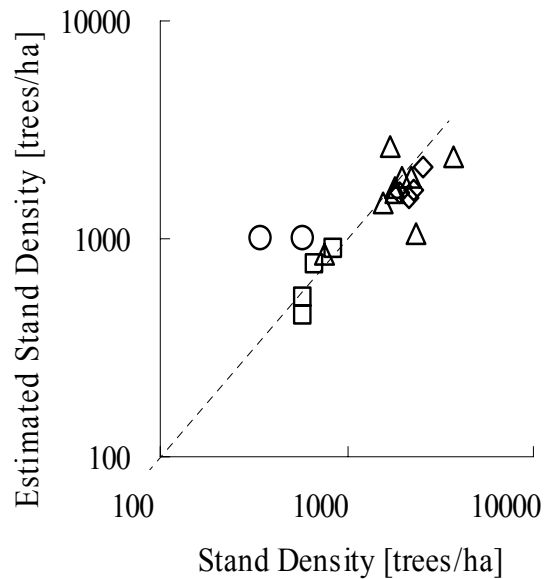


図12 林分密度の推定

(図11、12共通) ◇: トドマツ、□: カラマツ、△: アカエゾマツ、○: エゾマツ

接の比較はできないが、地形の有意な影響は見出せなかった ($n=12$)。

b. 立木密度：空中写真のLMFによる立木密度推定の結果を図12に示す。かなりばらつきが見られる。特に低密度のエゾマツ林では間伐後のギャップの日当たりを林冠と誤認し密度が過大となり、高密度林分では単木樹冠の認識が困難となり過小となった。この方法も前項と同じく、観測に依存する地上調査は不要である。

c. 等樹高曲線式と炭素固定量推定：新たに調製した上層樹高による林分密度管理図により、これらの林分の幹材積、さらに炭素固定量を推定した(図13)。その結果、 $R^2=0.87$ 、バイアスが -7.6 [tC/ha]、RMSEが 19.1 [tC/ha]となり、若干の過小推定となった。もしも上層樹高および林分密度推定に誤差が皆無だった場合には、 $R^2=0.94$ となることも分かった。

(3) 誤差の要因：

等樹高曲線式による誤差の伝播を解析したところ、一般的に上層樹高の推定誤差のほうが林分密度の推定誤差よりも炭素固定量推定に与える影響が大きいことが分かった。したがって、林分密度推定に誤差が大きいことが必ずしも炭素固定量推定に大きな影響を及ぼしているとはいえない。また、上層樹高の推定誤差が炭素固定量推定に与える影響はもともと立木密度が高いほど影響が大きく、立木密度の推定誤差は逆にもともと立木密度が低いほど影響が大きかった。

(4) 考察と提言

以上の通り、遠隔探査による炭素固定量推定モデルを遠隔探査にはまったく依存せずに構築し、遠隔探査をモデルへの入力値としてのみ用いて炭素固定量を推定した。モデル構築自体は観測に依存していないため、ここで得られた結果はこの事例を超えて日本全国で適用可能である。このモデルを構成する上層樹高推定、林分密度推定、そして等樹高曲線式はそれぞれ互いに独立しているため、一部だけを新たに差し替えることが可能である。特に上層樹高推定や林分密度推定についてはさまざまな手法が新たに提案され続けており、観測にパラメータを依存しない限り、状況に適したよりよい手法を採用することが可能である。

等樹高曲線式については、既存のものは平均樹高を用いるため本研究のように上層樹高用に調整しなおす必要がある。しかし、その資料は既存のものを調整したものと同等であればよいので、新たに資料を取り直す必要はない。また、わが国の人工林が全体的に高齢化（長伐期）、高密度化（間伐遅れ）するなかで、新たにそのような林分の資料が加わればさらに良いモデルが得られるであろう。林分密度管理図全体の今後改良されるべき点のひとつに、地位の勘案がある。また、樹高成長の衰えた高齢林分での炭素固定量推定のためには林齢の勘案が必要であろう。これらの事業レベルでの応用のためには地理情報システム(GIS)による林分情報の整理が不可欠である。

森林は複雑な生物の複合体として、そのすべてのプロセスはまだ解明されていない、または計測できない。そのため、計測可能なパターンから目的となる変数を推定せざるを得ない。しかし、入力となる計測値と目的となる変数の間の構造について考察がなく経験的な関係のみに帰すれば、その関係は一般化できない。もし、計測値と目的変数の関係の構造の知識や考察があれば、一般化される新たな関係の構築はより容易である。そして、わが国には人工林の成長に関し、理論的にも計測データとしても、これまで既に非常に多くの経験が積み重ねられてきた。この、世界的には特殊な、恵まれた条件を新たな技術と共にこれからの環境政策に活かすべきである。そのために、蓄積されたデータの絶えざる再吟味と、今後も全国規模の体系的なデータの収集（すなわち、モニタリング）の継続が求められる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ 新たな観測技術と既存の知識とを階層的に組み立てることで、測定から推定までが一貫した柔軟かつ頑強な、森林の炭素固定量推定モデルを提示した。遠隔探査技術として、パラメータ推定を伴わない簡単かつ安定した手法を開発した。

(2) 地球環境政策への貢献

- ・ 林野庁、都道府県、大学等がこれまでに集積してきた収穫試験資料を再整理・再整備することで、全国の広範囲について、航空機遠隔探査を用いた炭素固定量（材積）推定モデルを構築できる。

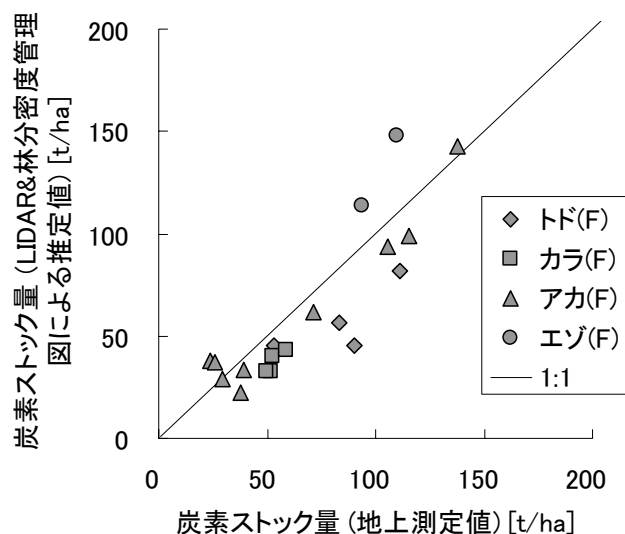


図13 炭素固定量の推定

6. 引用文献

- 1) 環境省 (2006) 温室効果インベントリ報告書
- 2) 平田泰雅 (2005) 航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザ光の林冠透過率と地上照射密度の影響、森林計画学会誌 39(2): 81-95

c. 森林バイオマスの変動が気候変動に与える影響メカニズムに関する研究 (国立気象研究所)

1. はじめに

森林は二酸化炭素を吸収することによって温暖化を軽減するが、他に温室効果をもつ大気中の水分条件にも大きな影響を与えている。そこで、森林が持つ温暖化軽減機能を明らかにするのは、森林面積やバイオマスの増減による気候の変化を再現できるモデルの開発が必要である。

2. 研究目的

当サブサブ課題で実施されているリモートセンシングおよび森林現地調査によって得られた陸面植生データを利用し、森林観測結果を数値実験的に再現することができる高度な陸面植生数値モデルを開発する。本陸面植生数値モデルを、3次元気候モデルに導入し、それを用いた数値実験により、観測によって得られる森林バイオマスの変動と気候変動の関係のメカニズムの解明を行う。

これらのモデルを用いた数値実験を通して、リモートセンシングによるバイオマス計測データの精度の向上、および森林バイオマス計測手法の確立に貢献する。

3. 研究方法

本サブテーマによって実施される、リモートセンシングおよび現地調査によって得られた陸面植生データを利用し、観測領域を中心とした地域における森林観測結果を数値実験的に再現することを目的として、大気—植生—土壌を含む一次元の陸面植生数値モデルを開発した。本陸面植生モデルのベースとなったモデルは、3次元気候モデル用に開発したBiosphere-Atmosphere Interaction Model (BAIM) (Mabuchi et al. 1997)である。本モデルは、任意の地点の植生パラメータおよび外的気象条件を与えることにより、数値実験的手法により、大気—植生間のエネルギー収支・二酸化炭素収支を見積もることができる。

BAIMは、気候モデルにおいて、陸面における諸過程を出来るだけ現実に近い形で再現できる植生—大気相互作用モデルである。BAIMは2層の植物層と3層の土壌層を持ち、それぞれの層の温度と蓄積される水分量が予報変数となっている。積雪が存在する場合には、積雪層は最大3層に分割され、それぞれの層の温度、および各層に蓄えられている雪量と水量が予報される。植物層および土壌層内の水分については、その凍結・融解過程が扱われ、積雪層については積雪・融雪過程が扱われる。BAIMにおいては、 C_3 および C_4 植物の光合成作用および呼吸作用をそれぞれ再現することができる。それによって、陸面—大気間のエネルギーフラックスだけでなく、二酸化炭素フラックスをも推定することができる。

本陸面植生モデルの高度化を図るためのデータの取得を目的として、カナダ寒帯林を対象とした、レーザプロファイラデータの取得地域に対応する森林域における現地調査に参加した。また、開発した陸面植生モデルの単独実験を行い、陸面植生モデル自体の改良点を明らかにすると

ともに、モデルの高度化に向けての検討を行った。3次元レーザープロファイラデータのグランドトゥルスデータ取得を目的とする、カナダ寒帯林・亜寒帯林における森林現地調査によって取得・蓄積された各種の森林の植物生態データは、リモートセンシングによる森林バイオマス計測手法の確立に向けての貴重なデータであるとともに、気候モデル用陸面植生モデルで使用するためのパラメータ値としても、非常に貴重なデータである。蓄積された森林現地調査による森林生態データを、実際に陸面植生モデルのパラメータとして使用するための検討を行った。これらの森林パラメータを使用し、陸面植生モデルの精度の向上を図るとともに、モデルの高度化を行った。さらに、本陸面植生モデルを導入した3次元気候モデルを開発し、それを用いた数値実験により、モデルで再現された気象学的気候値および大気中二酸化炭素濃度の再現性に関する検証を行った。また、陸域炭素収支の再現性およびそれらの変動と、気候変動との関係に関する解析を行った。さらに、将来予測に向けたモデルの高度化を行った。

4. 結果・考察

(1) 日本域および東アジア域を対象としたモデルの検証

植生-大気相互作用モデルBAIMを気象庁数値予報課開発の日本域モデル(JSM)に導入した地域気候モデル(JSM-BAIM)による数値実験を行い、モデルによる日本域の気候の再現性に関する検証を行った。検証の対象としたデータは、Kida et al. (1991)による波数空間結合(SBC)を用いて行った6年間のモデル積分結果である。

検証は、客観解析値(JANAL)およびアメダス観測値を用いて行った。850hPa面および500hPa面での、高度、気温、および風の場のモデル計算結果と客観解析値を比較した結果、主に夏の気温および夏と冬の風の場に統計的に有意な差が現れた。これらの差の主な原因は、本地域気候モデルと客観解析値の、分解能の差および陸面過程その他の物理過程に起因するそれぞれの持つ情報の差と考えられる。アメダス観測値による検証は、日本列島の特徴的気候区分ごとに降水量、地上気温、および日照時間を用いて行った。その結果、モデルはこれらの気候区分ごとの季節変化、および年々変動をよく再現していることが示された。

JSM-BAIMは、時間的には少なくとも季節変化から年々変動のスケールでの、また空間的には日本列島の気候区分スケールでの陸面植生と局地気候との相互作用を再現できる程度の精度があることが確かめられた。

東アジア域を対象とした数値実験は、JSMをLambert projectionに変更し、対象領域をシベリア南部、中国、インド、インドシナ半島、フィリピン、及び日本を含む東アジア域に拡張して行った(基準経度105° E)。モデルの分解能は、水平グリッド数151x111、鉛直23層とし、水平分解能はLambert基準緯度(15° N、50° N)で60kmである。大気境界条件はNCEP再解析値を用い、また、SSTについてもNCEP解析値を与えた。土壌水分、凍土及び土壌温度の初期値を作成した後、1988年7月31日12Zから1998年12月31日12Zまでの10年5ヶ月間の積分実験を行った。時間積分には、Kida et al. (1991)による波数空間結合(SBC)を用いた。

まず、モデルによって再現された降水の再現性について検証を行った。降水の再現性の良さは、モデルの大気場の再現性の良さを裏付ける。また、地表面における諸過程に大きな影響を与える放射量、土壌水分量などの物理量の再現性の良さに結びつき、地表面でのエネルギー収支、および二酸化炭素収支の再現性の良さに結びつく。

検証は、モデルの境界領域を除く領域を24区画に均等分割し、その各領域平均及び全領域平均の降水量について、1989年1月から1998年12月までの10年間の各年の各月ごとに、CMAP降水量解析値とモデル計算降水量を比較することにより行なった。その結果、モデル南西端域および高緯度域で、モデル降水量がCMAP降水量に比べ少ない傾向があった。一部相関が悪いケース（特に低緯度での多雨期でCMAP降水量の年々変動シグナルが小さい場合など）があるが、モデルは各領域・各月の降水量の年々変動をかなり良く再現していることが分かった。また、モデルは各領域・各月の降水量の10年間の長期トレンドを、非常に良く再現していることが分かった。

次に、実験期間中の特徴的な年である1997年と1998年の東アジアの気候と植生活動の関係に関する解析を行った。1997年8月と1998年8月のCMAP降水解析値と、それに対応するモデルによる降水計算値の月平均値を比較した。両年のCMAP降水分布の違いの大きな特徴は、特に中国及び日本において、1997年8月においては少雨傾向を示しているのに対して、1998年8月においては、反対に多雨傾向を示していることである。1998年の夏においては中国長江流域、中国北東部、およびチベット域で洪水が発生している。モデルの降水量は、特に1998年8月において、朝鮮半島付近を中心とした領域で、CMAP降水解析値より降水量が少ない傾向があるが、全体的には、モデルは1997年及び1998年の8月の降水分布の地域的な特徴、およびその年々変動の特徴を、良く再現していることが分かった。さらに、春から夏にかけての特徴についての解析を行った。1997年と1998年の5月における降水量、地表における下向き短波放射量、蒸散量、および正味の二酸化炭素吸収量の月平均値を比較した。夏における比較では、1998年は、1997年より中国及び日本において、植生活動に必要な短波放射が少なかったため、植生活動が不活発で、植生による二酸化炭素吸収量も少なかったが、5月においては、特に朝鮮半島から日本の中北部にかけて1998年の方が短波放射量が多く、その地域における蒸散量および正味の二酸化炭素吸収量が多くなっている。モデルで再現された気候学的物理量の比較からは、日本付近においては、植生活動に与える短波放射量の影響が重要と言えるが、春においては、植物の展葉時期の年々の変動も重要と考えられる。これらのことから、気候モデルにおいても、植物の生物季節変化の年々変動も考慮に入れる必要がある事が分かった。

（2）BAIM Ver. 2 (BAIM2)の開発

気候モデル用の陸面植生モデルとして開発されたBAIM(Ver. 1)は、陸面一大気間のエネルギー収支、および二酸化炭素収支を再現できるモデルとして開発された。しかし、葉面積指数や、樹高、植物内及び土壌中の蓄積炭素量などは、植生タイプごとに月ごとの定数として与えていた。そのため、蓄積炭素量の変動、植物形態の変動を陽に再現することができていなかった。その欠点を改善し、BAIM(Ver. 1)の植物生態モデルとしての特性をより高めるため、植物内及び土壌中炭素蓄積量をモデル内変数として取り入れたBAIM Ver. 2 (BAIM2)を開発した。

BAIM2の基本的構成は、BAIM(Ver. 1)と変更はないが、炭素蓄積量として、植物の葉、幹、根、リター層、および腐植土層それぞれに蓄積される炭素量を、陽に再現できるものとした。林床植生が仮定される場合には、それぞれの炭素量も見積もられる。各部分の炭素蓄積量は、光合成により獲得された炭素の配分による増加量、呼吸及び落葉・落枝などによる減少量、リター層への蓄積量などの収支を見積もることにより、日単位でその変動が見積もられる。呼吸量やリターの量などは、それぞれの層に蓄積されている炭素量に応じた量として見積もられる。また、葉面積及び樹高は、それぞれの要素に蓄積されている炭素量から見積もられる。それによって、植物の

物理的要素の変動が日単位で再現されることになる。また、落葉樹などの物理的要素の季節変化が大きい植生については、その季節変化も再現される。これらの植物の物理的要素の季節変化は、基本的にモデルで再現される温度と土壌水分量によって制御される。

(3) BAIM Ver.2 (BAIM2)を導入した気候モデルによる数値実験

BAIM2を組み込んだT63L21全球気候モデルを用いて、現存植生を与えたコントロール数値実験を実施した。本気候モデルにおいては、大気中の二酸化炭素濃度も予報変数としている。よって、BAIM2を本3次元気候モデルに直接組み込むことにより、物理的気象要素及び大気中二酸化炭素濃度の時間的・空間的変動と、陸面植生の物理的形状及び植生・土壌内炭素蓄積量の時間的・空間的変動の相互作用がon-lineで再現される。コントロール数値実験の結果に関する詳細な検証を行った。本数値実験においては、人工排出による陸面からの二酸化炭素放出も考慮している。再現された植生タイプごとおよび全球平均値としての葉・幹・根・リターのバイオマス量および土壌

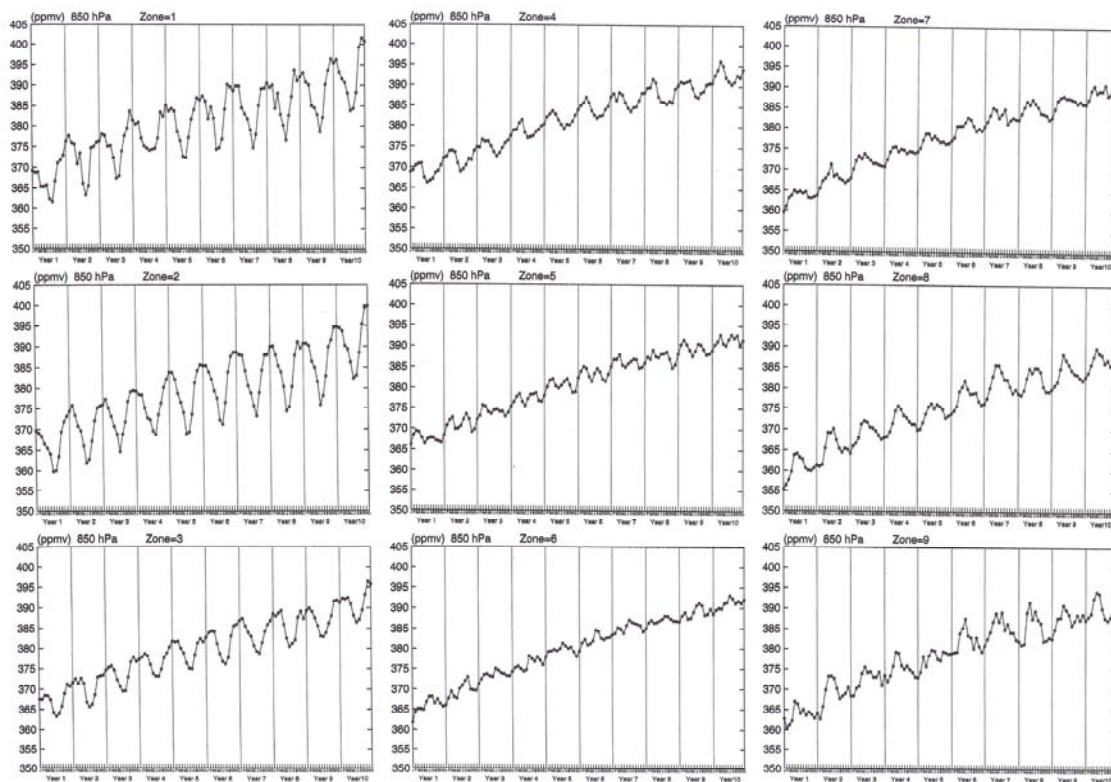


図14. 図14 モデルで再現した二酸化炭素濃度の分布パターン。

(850hPaで月平均を9つの緯度帯に分けて算出したものである。図の左列が上から zone1、2、3、中央列が4、5、6、右列が7、8、9となっている)

蓄積炭素量は、他の研究による見積量と概ね一致することが確認できた。また、GPP、NPP、呼吸量およびNEPなどについても、一般的な特徴が再現できていることが確認できた。本気候モデルにより再現された大気中二酸化炭素濃度について、観測地点データを用いた検証を行った。検証は、特定地点として選択した綾里およびマウナロアの2地点および全球を9緯度帯にわけた地域ごとに行った。その結果、モデルは特定2地点および9緯度帯における大気中二酸化炭素濃度の年増加量、およびそれぞれの季節変化の特徴を再現できていることが分かった(図14)。

本気候モデルを用い、アジア熱帯域森林破壊の影響に関する数値実験を行った。インドシナ半島(ICP)(熱帯季節林)および海洋大陸(MTC)(熱帯雨林)の森林植生をC₄草原植生に変更したインパクト実験を行い、コントロールとインパクトそれぞれの30年間の炭素収支を比較した。コントロール実験においてはCO₂施肥効果により、植物による炭素吸収量の増加傾向が見られるが、インパクト実験においては、C₄植生への変化により、その傾向は顕著ではない。インパクト実験での比較において、MTCはICPよりGPPは多いが、植物呼吸量、土壌呼吸量が多く、土壌蓄積炭素量の減少が著しい。MTCでは、C₄植生への変化で、高温・乾燥化する傾向が明瞭で、呼吸量の増加とC₄植生のCO₂施肥効果の小ささとがあいまって、NEPがコントロールより少なくなる傾向がある。これはアジア熱帯雨林地域での継続的な森林の減少が、継続的な大気中からのCO₂吸収量の減少傾向の持続をもたらし、大気中CO₂濃度の上昇傾向に拍車をかける可能性を秘めていることを示していると考えられる。ICPではC₄植生への変化で、GPP・NPPともに増加し、呼吸量も増加するが、相対的に低温である事も影響してNEPはMTCほど減少せず、大気中CO₂濃度への影響はMTCほど大きくならない可能性がある。以上の数値実験結果より、アジア熱帯域における森林破壊による大気中CO₂濃度上昇への影響は、ICP(熱帯季節林)よりMTC(熱帯雨林)における森林破壊の影響の方が大きくなる可能性があることが分かった。

本来は他の課題と連携しながら、陸面植生モデルを開発すべきであるが、当課題での解像度が他の課題と違い過ぎ、データの共有などの協力がうまくできなかった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

リモートセンシングおよび森林現地調査によって得られた陸面植生データを利用し、森林観測結果を数値実験的に再現することができる高度な陸面植生数値モデルを開発することができた。また、本研究により開発された陸面植生モデルBAIM2、およびそれを導入した3次元気候モデルを用いた数値実験の結果の解析等により、陸域炭素収支システムのメカニズム、および、陸域炭素収支の変動と、気候変動との相互作用のメカニズムに関する新たな知見が得られた。

本研究により開発された植生モデルおよびそれを導入した気候モデルは、リモートセンシング観測によって得られる森林バイオマス量の変動と気候変動の関係のメカニズムの解明を行うためのシステムモデルとして、また、陸域植生による炭素吸収・放出の将来予測モデルとして、非常に有効であることが確認できた。

また、これらのモデルを用いた数値実験は、リモートセンシングによるバイオマス計測データの精度の向上と森林バイオマス計測手法の確立のために必要な、理論的裏付けとしての情報を提供することができると思われる。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究により開発された植生モデルおよび炭素循環気候モデルは、地域的な気候変動と炭素循環変動の関係のメカニズムを解明するためのシステムモデルとして活用することができると考えられる。それにより、日本域および東アジア域における陸域炭素収支の現状の把握、および将来予測に貢献できると共に、関連する政策に対する科学的裏付けのための情報を提供することができると考えられる。

6. 引用文献

- (1) Mabuchi, K., Y. Sato, H. Kida, N. Saigusa, and T. Oikawa, 1997: A Biosphere - Atmosphere Interaction Model (BAIM) and its primary verifications using grassland data. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **47**, 115-140.
- (2) Kida, H., T. Koide, H. Sasaki and M. Chiba, 1991: A new approach for coupling a limited area model to a GCM for regional climate simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 723-728.

注：以下の7と8は、3つのサブサブサブ課題に共通した内容である。

7. 国際共同研究等の状況

本研究によるカナダ亜寒帯の植生変化（バイオマス変化）の検出により、広域航空レーザー測距法による全球的な植生変化の検出研究の重要性にかかわる認識が国際的に高まった。こうした流れを受けて2003年と2006年に二回の国際シンポジウムを組織し下記の国際共同研究を立案し、国際学術連合（ICSU）と世界気象機構（WMO）主催の第四回国際極年のリードプロジェクトの候補計画として採択された。しかし目下のところ予算的な裏付けが取れないため、実行には至っていない。

- 1) 国際共同研究計画名：ICSU International Polar Year 2007-2008
- 2) 協力案件名： Complete Carbon Assessment by Ground Ranging and Echoing for Arctic/Boreal Regions (COCO GRANDE)
- 3) カウンターパート氏名・所属・国名
 Ross Nelson・NASA-Goddard Space Flight Center・USA
 Erik Naesset・Norwegian University of Life Sciences・Norway
 Hakan Olsson・Swedish University of Agricultural Sciences・Sweden
 Mike A. Wulder・Canadian Forest Service・Canada
 Ross W. Wein・University of Alberta・Canada
 N. Tchebakova・V.N. Sukachev Institute of Forest・Russia
 Vladimir Sokolov・V.N. Sukachev Institute of Forest・Russia

8. 研究成果の発表状況

- (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Mabuchi, K., Y. Sato and H. Kida: J. Meteor. Soc. Japan, 80, 621-644 (2002)
 “Verification of the Climatic Features of a Regional Climate Model with BAIM”
- 2) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: J. of Climate, 18, 410-428 (2005a)
 “Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region Part I: Case of the Northern Hemisphere summer”
- 3) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: J. of Climate, 18, 429-446 (2005b)
 “Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region Part II: Case of the Northern Hemisphere winter and impact on the extratropical circulation”
- 4) Mabuchi, K., H. Kida: In: Voinov, A., Jakeman, A., Rizzoli, A. (eds). Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: “Summit on Environmental Modelling and Software”. International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, USA, July 2006. CD-ROM (2006)
 “On-line climate model simulation of the global carbon cycle and verification using the in situ observation data”
- 5) 日下部朝子、都築勇人、末田達彦：日本森林学会誌、88, 21-29. (2006)
 「シベリア亜寒帯林を対象とした航空レーザー測距法による葉面積指数の広域推定」
- 6) 都築勇人、日下部朝子、末田達彦：日本森林学会誌、88, 103-113. (2006)
 「航空レーザー測距法によるカナダ亜寒帯林の広域森林蓄積推定」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) T.Kusakabe, H.Tsuzuki, and T.Sweda: Proc. 5th Int’l. Symp. on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, 257-264. (2002)
 “Inherent bias in regional estimate of leaf area index resulting from simple scaling-up of point estimates”
- 2) H.Tsuzuki, T.Kusakabe, and T.Sweda: Proc. 5th Int’l. Symp. on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, 439-447. (2002)
 “Uncertainty of point measurement in regional estimation of forest biomass as compared with line estimate with airborne laser altimetry”
- 3) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次：日本学術会議IGBP/GAIM研究会講演予稿集, (2002)
 「アジア域熱帯植生の変動が気候に与える影響に関する数値実験」
- 4) 2. 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次：IGBP/GAIM通信, No. 24, 6 (2002)
 「アジア域熱帯植生の変動が気候に与える影響に関する数値実験」
- 5) 馬淵和雄：環境ハンドブック, 76-479 (2002)
 「熱帯林の減少—気候への影響—」
- 6) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次：2002年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, 48 (2002)
 「地域気候モデル（J S M - B A I M）を用いた数値実験—1997年及び1998年の東アジアの気候—」
- 7) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次：2003年度日本気象学会春季大会講演予稿集, 48 (2003)

- 「地域気候モデル(JSM-BAIM)を用いた数値(Ⅱ) —1997年及び1998年の東アジアの気候と植生活動—」
- 8) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: Abstracts of IUGG 2003, Sapporo, Japan, B396 (2003)
 “Numerical study of the impact of vegetation changes on climate in Asian tropical region”
- 9) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: Proceedings of International, Conference on Earth System Modeling, 286 (2003)
 “Numerical study of the impact of vegetation changes on climate in Asian tropical region”
- 10) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次: 2003年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, 116 (2003)
 「地域気候モデル(JSM-BAIM)を用いた数値実験(3) —降水再現性に関する検証—」
- 11) T. Sweda, H. Tsuzuki, and T. Kusakabe: Proc. ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, 107-113. (2003)
 “Climate-induced vegetation change in Canadian boreal forest as detected by airborne laser profiling”
- 12) 末田達彦: 学術月報、57(5), 426-433. (2004).
 「北極圏植生移動観測計画COCO GRANDE」, “Integrating profiling LIDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization”
- 13) 馬淵和雄: 各種陸上生態系における炭素・水・熱フラックスの相互関係の微気象生態学的解析研究成果報告書, 47-48 (2004)
 「植生モデルBAIMを導入した地域気候モデルの降水再現性の検証」
- 14) 馬淵和雄, 木田秀次: 2004年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, 119 (2004)
 「陸面植生モデルBAIM Ver.2 (BAIM2) とそれを組み込んだ地域気候モデルによる予備的数値実験」
- 15) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: Extended abstracts of The 6th International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME CD-ROM (2004)
 “Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region”
- 16) 馬淵和雄、木田秀次: 2005年度日本気象学会春季大会講演予稿集, 219 (2005)
 「陸面植生モデルBAIM Ver.2 (BAIM2) とそれを組み込んだ気候モデルによる数値実験(Ⅱ)」
- 17) Mabuchi, K. and H. Kida: Extended abstracts of The 7th International carbon dioxide conference CD-ROM (2005)
 “On-line simulation study of the carbon cycle between land surface and the atmosphere using 3-D. global climate model”
- 18) 馬淵和雄、木田秀次: 2005年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, 124 (2005)
 「陸面植生モデルBAIM2を組み込んだ全球気候モデルによる炭素循環数値実験」
- 19) 馬淵和雄: 第5回名古屋大学地球水循環研究センター公開講演会講演要旨集, 32-40 (2005)
 「全球気候モデルを用いた植生と気候の相互作用に関する数値実験」
- 20) 馬淵和雄、木田秀次: 2006年度日本気象学会春季大会講演予稿集, 68 (2006)

「アジア熱帯域森林植生変動が炭素循環に与える影響について－B A I M 2 を導入した全球気候モデルによる数値実験－」

- 21) Alexandrov, G. A., D. Chan, M. Chen, K. Gurney, K. Higuchi, A. Ito, C. D. Jones, A. Komarov, K. Mabuchi, D. M. Matross, F. Veroustraete, W. W. Verstraeten: Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software". International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, USA, July 2006. CD-ROM. (2006)

“Model-data fusion in the studies of terrestrial carbon sink”

- 22) 馬淵和雄、高橋清利、木田秀次：2006年度日本気象学会秋季大会講演要旨集, 134 (2006)
「近年の東アジア陸域における炭素収支変動の特徴－B A I M 2 を導入した地域気候モデルによる数値実験－」

- 23) Mabuchi, K. and H. Kida: Proceedings of the AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco, USA, CD-ROM (2006)

“Numerical experiment of the relationship between the carbon balance and the climate under deforestation conditions in the Asian tropical region”

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) T.Kusakabe and H.Tsuzuki: Proc. 15th Ehime University United Graduate School Summer Seminar, 1-16. (2002)
“Airborne laser altimetry of boreal forests for extensive mensuration of biomass and leaf area”
- 2) T.Sweda, H.Tsuzuki, T.Kusakabe, and T.Hogg: 25th Polar Biol. Symp., 74. (2002)
“Detection of regional biomass/LAI changes using airborne laser altimetry”
- 3) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次: 日本学術会議 I G B P / G A I M 研究会 (2002)
「アジア域熱帯植生の変動が気候に与える影響に関する数値実験」
- 4) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次: 2002年度日本気象学会秋季大会 (2002)
「地域気候モデル (J S M - B A I M) を用いた数値実験－1997年及び1998年の東アジアの気候－」
- 5) 馬淵和雄: 京都大学理学研究科セミナー (2002)
「地球のエネルギー収支と陸面植生」
- 6) 馬淵和雄: 黄河研究会 (2002)
「J S M - B A I M を使った黄河領域の1997-98年の特徴」
- 7) H.Tsuzuki, K.Hirai, T.Kusakabe, and T.Sweda: Proceeding of International Workshop on Flux Observation and Research in Asia, 50-51. (2003)
“Airborne laser altimetry as a complementary means to flux observation of carbon dioxide”
- 8) K.Hirai, T.Kusakabe, H.Tsuzuki, and T.Sweda: 26th Polar Biol. Symp., 82. (2003)
“Biomass change estimate for boreal forests using airborne scanning laser altimetry”
- 9) T.Kusakabe, H.Tsuzuki, H.Ikezoe, and T.Sweda: 26th Polar Biol. Symp., 81. (2003)

- “Estimation of forest leaf area using airborne laser altimetry in Canada’ s western arctic”
- 10) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次: 2003年度日本気象学会春季大会 (2003)
「地域気候モデル(JSM-BAIM)を用いた数値 (II) —1997年及び1998年の東アジアの気候と植生活動—」
- 11) Sato, Y., K. Mabuchi, S. Kadokura, and H. Kato: Conference on Regional Climate Modeling, Trieste, Italy (2003)
“Simulations of East Asia summer monsoon climate in 1997 and 1998 using two regional climate models: MRI-JSM-BAIM and CRIEPI RegCM3”
- 12) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: IUGG 2003, Sapporo, Japan (2003)
“Numerical study of the impact of vegetation changes on climate in Asian tropical region”
- 13) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: International, Conference on Earth System Modeling, 286 (2003)
“Numerical study of the impact of vegetation changes on climate in Asian tropical region”
- 14) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次: 筑波大学科研費研究会 (2003)
「植生モデルBAIMを導入した地域気候モデルの降水再現性の検証」
- 15) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次: 2003年度日本気象学会秋季大会 (2003)
「地域気候モデル(JSM-BAIM)を用いた数値実験 (3) —降水再現性に関する検証—」
- 16) 馬淵和雄: 気象庁環境気象課セミナー (2003)
「陸面植生モデルBAIMを導入した気候モデルによるCO₂循環実験」
- 17) 都築勇人, 日下部朝子, 池添浩之, 末田達彦: 第115回日本林学会大会, 588. (2004)
「航空レーザー測距法によるカナダ北西部亜寒帯林-ツンドラ移行帯の地上・地下バイオマス」
- 18) 日下部朝子, 白木紘平, 都築勇人, 末田達彦: 第115回日本林学会大会, 568. (2004)
「航空レーザー測距法と衛星画像IKONOSの組み合わせによる亜寒帯林森林葉面積推定の可能性」
- 19) 末田達彦, 都築勇人, 平井杏子, 日下部朝子: 第115回日本林学会大会, 361. (2004)
「温暖化に伴う植生変化のモニタリング」
- 20) 末田達彦: 全国測量技術大会2004 「レーザ計測 現在と未来」, 88, 55-76. (2004)
「地球環境研究分野での利活用」
- 21) T. Otsuka, T. Kusakabe, H. Tsuzuki, K. Shiraki, K. Murakami, and T. Sweda: 27th Polar Biol. Symp., 97. (2004)
“A new method of estimating leaf area index using airborne laser altimetry”
- 22) T. Kusakabe, H. Tsuzuki, and T. Sweda: 27th Polar Biol. Symp., 96. (2004)
“Possibility of estimation of leaf area index using combination with airborne laser altimetry and satellite image IKONOS in Canadian boreal forest”
- 23) H. Tsuzuki, T. Kusakabe, T. Otsuka, and T. Sweda: 27th Polar Biol. Symp., 32. (2004)

- “Biomass distribution along western North American boreal forest-tundra transect as estimated by airborne laser altimetry”
- 24) 鷹尾元：第116回日本林学会大会、2004
「2004年台風18号による針葉樹人工林の風倒被害」
- 25) 馬淵和雄, 木田秀次：2004年度日本気象学会秋季大会 (2004)
「陸面植生モデルBAIM Ver. 2 (BAIM2) とそれを組み込んだ地域気候モデルによる予備的数値実験」
- 26) Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida: The 6th International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME (2004)
“Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region”
- 27) 日下部朝子、都築勇人、末田達彦：第116回日本森林学会大会. 札幌. (2005)
「レーザー測距法と衛星画像を用いたカナダ亜寒帯林における広域的な葉面積指数の推定」
- 28) T. Kusakabe, T. Otsuka, H. Tsuzuki, and T. Sweda: Silviscan. Virginia, USA. Abstract: 12. (2005)
“An entirely new method of estimating LAI using airborne laser altimetry”
- 29) H. Tsuzuki, K. Murakami, T. Kusakabe, and T. Sweda: Silviscan. Virginia, USA. Abstract: 34. (2005)
“Multi-temporal airborne laser altimetry of the Tomakomai national forest for timber stock comparison with national forest inventory, C flux comparison with tower measurement and assessment of windthrow by typhoon”
- 30) 村上和弥、大塚寿二、都築勇人、末田達彦：日本森林学会関西支部大会. 奈良. (2005)
「航空レーザー測距法による森林蓄積推定の精度評価—実測値および森林簿との比較—」
- 31) 馬淵和雄, 佐藤康雄, 木田秀次：気候植生フォーラム (2005)
「アジア域熱帯林変動が気候に及ぼす影響について」
- 32) 馬淵和雄、木田秀次：2005年度日本気象学会春季大会 (2005)
「陸面植生モデルBAIM Ver. 2 (BAIM2) とそれを組み込んだ気候モデルによる数値実験 (II)」
- 33) 馬淵和雄：ポストGAME計画立案のための国内ワークショップ (2005)
「陸面モデルBAIM2を組み込んだ3次元気候モデルによるアジアモンスーン域大気—陸面相互作用・水循環システムの解明」
- 34) Mabuchi, K. and H. Kida: The 7th International carbon dioxide conference (2005)
“On-line simulation study of the carbon cycle between land surface and the atmosphere using 3-D. global climate model”
- 35) 馬淵和雄、木田秀次：炭素循環および温室効果ガス観測ワークショップ (2005)
「炭素循環システムの理解に向けた植生—大気on-line結合3次元気候モデルの開発」
- 36) 馬淵和雄、木田秀次：2005年度日本気象学会秋季大会 (2005)
「陸面植生モデルBAIM2を組み込んだ全球気候モデルによる炭素循環数値実験」
- 37) 馬淵和雄：第5回名古屋大学地球水循環研究センター公開講演会 (2005)
「全球気候モデルを用いた植生と気候の相互作用に関する数値実験」
- 38) 馬淵和雄：京都大学理学部セミナー (2005)

- 「植生モデルBAIM2を導入した気候モデルによる炭素循環実験」
- 39) Y. Maeda, H. Tsuzuki, R. Nelson, and T. Sweda: Proc. Silvilaser 2006 International Conference on Airborne Laser Scanning of Forests, 24-29. (2006)
 “Land use classification of Ehime prefecture, Japan using airborne laser altimetry”
- 40) H. Tsuzuki, R. Nelson, and T. Sweda: Proc. Silvilaser 2006 International Conference on Airborne Laser Scanning of Forests, 82-87. (2006)
 “Timber stock estimate by airborne laser profiling for entire Ehime prefecture, Japan”
- 41) T. Kusakabe, H. Tsuzuki, and T. Sweda: Proc. Silvilaser 2006 International Conference on Airborne Laser Scanning of Forests, 181-185. (2006)
 “Vegetation-topography relationship in central Siberia as observed by airborne laser altimetry”
- 42) R. Kaneko, Y. Suzuki, J. Gotoh, C. Eino, K. Makino, H. Tsuzuki, and T. Sweda: Proc. Silvilaser 2006 International Conference on Airborne Laser Scanning of Forests, 207-210. (2006)
 “Stand density estimation of young plantation forests by digitally modified aero-photographs: verification of the method with data of the growing stock investigation project for CO2 sink over the stands in Ehime prefecture, Japan, by airborne laser altimetry”
- 43) S. Ueda, S. Yano, H. Tsuzuki, and T. Sweda: Proc. Silvilaser 2006 International Conference on Airborne Laser Scanning of Forests, 231-236. (2006)
 “Forest habitability for wildlife as evaluated by airborne laser profiling”
- 44) G. Takao, T. Sweda, H. Tsuzuki, T. Kusakabe et al.: Silvilaser 2006, Matsuyama, Japan, 2006
 “Conifer plantation volume estimation by combination of lidar observation and conventional growth models”
- 45) 馬淵和雄、木田秀次：2006年度日本気象学会春季大会（2006）
 「アジア熱帯域森林植生変動が炭素循環に与える影響について－BAIM2を導入した全球気候モデルによる数値実験－」
- 46) 馬淵和雄：「環境物理学－先端境界領域の創出へ向けて」研究会（2006）
 「物理気候モデルへの陸域生態システムの導入とそれによる圏間相互作用研究」
- 47) Mabuchi, K. and H. Kida: Third Biennial Meeting of International Environmental Modelling and Software Society (2006)
 “On-line climate model simulation of the global carbon cycle and verification using the in situ observation data”
- 48) 馬淵和雄、高橋清利、木田秀次：2006年度日本気象学会秋季大会（2006）
 「近年の東アジア陸域における炭素収支変動の特徴－BAIM2を導入した地域気候モデルによる数値実験－」
- 49) Mabuchi, K. and H. Kida: The AGU 2006 Fall Meeting (2006)
 “Numerical experiment of the relationship between the carbon balance and the climate

under deforestation conditions in the Asian tropical region”

- 50) 末田達彦、都築勇人：平成18年度四国森林・林業研究発表集、117-120. (2007)
「航空レーザー測距法による愛媛全県の森林蓄積の推定」
- 51) 前田佳子：平成18年度四国森林・林業研究発表集、121-124. (2007)
「航空レーザー測距法による愛媛全県の森林蓄積の推定」
- 52) 植田彩容子、都築勇人、末田達彦：平成18年度四国森林・林業研究発表集、125-129. (2007)
「赤外線感知式自動撮影カメラと航空レーザーで捉えた野生動物にとって住みよい森林」
- 53) 前田佳子、R. F. Nelson、都築勇人、末田達彦：第118回日本森林学会大会. 福岡. (2007)
「航空レーザー測距法による愛媛県の土地被覆区分」
- 54) 都築勇人、R. F. Nelson、T. Sweda：第118回日本森林学会大会. 福岡. (2007)
「航空レーザー測距法による愛媛全県の森林蓄積推定」
- 55) 長谷川宏一、松山洋、都築勇人、末田達彦：第118回日本森林学会大会. 福岡. (2007)
「多方向放射観測データを用いた葉面積指数推定法の提案-Normalized Hotspot signature Vegetation Index-」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 国際ワークショップ「森林資源調査の可能性研究」（2004年7月6-9日、早稲田大学、世界5カ国から研究者10名を招聘して）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 愛媛新聞（2002年8月1日）
- 2) 朝日新聞（2002年12月14日）
- 3) NHK コラム新世紀（2003年3月10日、「地球温暖化の兆候を探る」について10分ほど）
- 4) NHKラジオ ネットワークにつぼん（2005年2月15日、「航空レーザーによる森林測定」について6分ほど）
- 5) 愛媛新聞（2005年11月9日）（国際極年について）
- 6) 愛媛新聞（2005年11月27日）（国際極年について）
- 7) 愛媛新聞（2006年1月3日）（地球温暖化について）