

B-1 気候変動の将来の見通しの向上を目指したエアロゾル・水・植生等の過程のモデル化に関する研究

(3) 地球温暖化における陸上生態系フィードバックに関する研究

独立行政法人森林総合研究所

気象環境研究領域 気象研究室

渡辺 力・安田幸生・大谷義一・溝口康子

気象害・防災林研究室

岡野通明

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部 食料生産予測チーム

横沢正幸

独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理研究部門 大気環境評価研究グループ

近藤裕昭・飯塚 悟・三枝信子

東京大学生産技術研究所

沖 大幹・鼎 信次郎

北海道大学低温科学研究所

寒冷陸域科学部門 寒冷生物圏変動研究室

原 登志彦・隅田明洋

平成12～14年度合計予算額 44,223千円
(うち、平成14年度予算額 16,123千円)

【要旨】本サブテーマでは、気候システムにおける陸上生態系によるフィードバック機構を明らかにすることを目的とし、群落スケールにおける相互作用、領域スケールへの集積過程、大陸規模でのモデル検証に関する研究を進めてきた。得られた主な成果は以下の通りである。(1) 北海道大学雨竜試験地における現地調査の結果、北方林で顕著に見られるような、林床にササ等の下層植生が密生する林分においては、土壌中の資源を巡る上層木と下層植生との競争が、群落構造の形成に重大な影響を及ぼすことが明らかとなった。そのため、従来は無視されることが多かった林床下層植生の役割を、特に北方林における環境変動と森林動態の研究では、十分考慮に入れる必要のあることが示唆された。(2) 気候-陸上生態系間の動的な相互作用過程(フィードバック)を表現することのできる陸面モデルのプロトタイプが開発された。このモデルは、スギ及びカラマツの人工林に適用され、単一樹種林分における植物個体群動態に関する観測データをよく再現することが確認された。さらに、このモデルは樹種間の競争過程が表現されるように拡張され、広範な生態系への適用が可能となり、これによって広域へ適用するための準備が整えられた。また、アジアの代表的陸面形態の一つである水田生態系に関して、その特徴である湛水層の熱的影響を陸面モデルに適切に導入する手法が開発され、それによって実際の水田での観測値が再現されることが示された。(3) 複雑地形上における生態系フラックスの領域スケールへの集積過程を解析するため、大気のLES(Large Eddy Simulation)モデルを開発して山岳地形に応用した。計算された山岳周辺の風速場を風洞実験による測定データと比較することにより、モデルの性能を検証し、必要な改良を行った。また、シミュレーションの結果、山岳周辺での物質(CO₂など)の輸送には熱的影響よりも力学的影響が大きいことや、剥離流や地表面粗度の影響を受けて物質濃度が著しく変動する領域が地表面付近に形成される様子が明らかとなった。(4) 陸面モデルを、河川流量データを用いて広域スケールにおいて検証することを可能にするための予備的研究

を行った。その結果、モデル検証のためには、陸面水収支に関する長期シミュレーションを実行する必要があるが、その際に必要となる大気外力データのうち、特に降水量についてはシミュレーション結果の敏感度が高く、統計学的手法を用いて入念にデータを作成しなければならないことが明らかになった。また、今後行われることになる各種陸面モデルの検証作業に供するため、世界中の大河川における流量データが取り揃えられた。

[キーワード] 陸面モデル、スケールアップ、モデル検証、現地観測、気候-生態系相互作用

1. はじめに

地球温暖化等の気候変動過程において、陸上生態系は大気中二酸化炭素濃度の収支に影響を及ぼすだけではなく、熱・水循環を通じて気候変化にフィードバックを及ぼす。すなわち、二酸化炭素濃度、放射量、温度、降水量などの変化（気候変化）により、気孔開度、植生量、さらには植生タイプの地理的分布に変化が生じ（生態系変化）、これが蒸発散、放射収支などの変化を通じて温度や湿度にさらなる変化（気候変化へのフィードバック）を与える。しかし、従来の気候モデルには、陸上生態系が気候変動に対して動的に応答することによる影響が十分に反映されているとは言えず、気候変動の見通しに不確実さをもたらす原因の1つとなっていることが考えられる。したがって、陸上生態系フィードバックの機構を明らかにし、気候モデルによる気候変動の見通しにおいて将来的にこれを反映することが、見通しの不確実さを減少させることにつながると言える。本サブテーマでは、少しでも早くこの大目標に近づくことを目指し、生態系プロセスの全球規模へのスケールアップを念頭におき、群落スケールにおける相互作用、領域スケールへの集積過程、大陸規模でのモデル検証といった空間スケールの異なる研究を並行して進めた。実施された研究の具体的なテーマは次の通りである。

- (1) 森林生態系における現地観測
- (2) 植生動態を考慮した陸面モデルの開発
- (3) 複雑地表面上におけるフラックス集積過程の解明
- (4) 陸面モデルの大陸スケールにおける検証手法の開発

以下では、ここに示した各研究テーマ別に節を分け、それらの成果の概要を報告する。

2. 森林生態系における現地観測

(1) 研究目的

地球上の植生は多種・多様であり、その気候に対する影響や、気候変動時の応答過程には未解明の部分が多い。本サブテーマにおける研究の究極の目的は、全地球規模での気候-生態系間のフィードバック過程をモデル化することにあるが、そのためには数多くの生態系に関する実測データがなによりも必要である。現在、世界各国においてFLUXNET やFACEといった、気候変動にともなうバイオマス変動やフラックス変動を長期的にモニタリングする観測が実施されているが、生態系動態を究極的に支配する要因である種間・個体間競争の実態を示すデータはきわめて少ない。そこで、本サブテーマにおいては、種間・個体間競争に関するデータや知見の蓄積に資する

ため、北方林における林冠木の水・炭素収支に対する林床植生の影響を調査した。

北方林は複雑な階層構造をもつ熱帯林とは異なり、林冠層と稚樹層からなる単純な構造であり、また林床植物が繁茂しているのが特徴である。今回調査を行った森林は、林冠層はダケカンバに、林床はササ類にそれぞれ覆われているという、北海道に広く分布する典型的な森林形態をもつ。林床に密生するササ類は樹木の新規加入を妨げることはもちろん、上層木に供給されるべき水分や栄養塩を奪い取る存在である。ササ類が樹木の実生の定着を直接左右することは数多く研究されてきたが、林床におけるササの繁茂が林冠木の生育状態にどのような影響を持っているかについては未知の点が極めて多い。特に、ササと樹木の水や栄養塩などの競合が、林冠木の資源獲得の機構を変化させている可能性があり、この点を重点的に調査した。

(2) 研究方法

調査は、北海道大学農学部附属雨龍地方演習林の、林床にチシマザサが優占するダケカンバ二次林において行った。樹高約6 m (20年生) と12 m (40年生) のダケカンバ林に、それぞれ2箇所ずつの調査プロットを設定し、各1プロットについて林床のササをすべて刈り取った。以下、ササを残したプロットを「ササ区」、ササを刈り取ったプロットを「除去区」と呼ぶ。各プロットにおいて、土壌水分、上層木の成長速度・枯死率などを測定し、代表プロットにおいて上層木の光合成速度、ササの蒸散速度、樹冠通過雨量、樹幹流量、土壌面蒸発量、林内微気象などの測定を行った。また、ササの除去が林冠木の空間構造にもたらす変化を把握するため、樹冠投影図(林冠木の葉群の水平分布)や樹冠断面図(林冠木葉群の鉛直分布)を作成するとともに、林冠木の葉面積指数(LAI)や樹冠内外の光環境(光合成有効放射束密度:PPFD)の測定を行った。

(3) 結果・考察

①樹冠構造:ダケカンバ林冠木のLAIは、ササ区で $3.91 \pm 0.36 (\text{m}^2/\text{m}^2)$ 、除去区で $3.43 \pm 0.36 (\text{m}^2/\text{m}^2)$ であり、ササ区の方が除去区より高かった(t 検定 $p < 0.001$)。この結果は、ササを除去した方がダケカンバ林冠の着葉量が少なくなるということを示す。LAIの空間分布と樹冠の分布は一致しており、ササ区では、特に樹冠が重なっている場所でLAIが高くなっていると考えられた(図1)。

②光環境:ダケカンバ樹冠内外の相対PPFDは、ササ区で $30.3 \pm 33.7\%$ 、除去区で $30.6 \pm 35.1\%$ であり、両区間で差が見られなかった(t 検定 $p > 0.05$)。両処理区とも、高さが減少するにつれて相対PPFDの平均値が減少する傾向が得られたが、その減少の仕方は処理区間で異なった(図2)。除去区の方が、高さが減少するにつれて相対PPFDが急激に下がり、樹冠内を通過すると急激に暗くなる、つまり光の吸収効率が高いことが示唆された。しかしながら、ダケカンバ林冠木の樹冠下での相対PPFDは、ササ区の方が除去区よりも有意に低かった(図2、Mann-Whitney's U test $p < 0.001$)。これは、ササ区では樹冠内での光の減少は緩やかであるが(図2)、樹冠が深く、2層になっている場所もあり(図3)、葉群が厚い(LAIが高い)からだと考えられた。つまり、ササの有無によって林冠構造が変化し、それに伴って光の空間分布が変化することが示唆された。

③光合成速度:ダケカンバ林冠の個葉の光合成能力は、上層と下層間で異なったが、処理区間では大きな差は見られなかった(図4)。しかしながら、ダケカンバの林冠構造と林冠内の光環境、すなわち生産構造が異なる(図1, 2, 3)ので、林冠レベルでの光合成生産は処理区間で大きく異なることが示唆される。今後、林冠の上層・下層におけるダケカンバ個葉の光-光合成曲線と、林

冠内の相対光量子密度の空間分布から、林冠の光合成生産の概算を試みる予定である。

④林冠木の動態：ダケカンバ林冠木の平均直径成長量は、処理区間で異ならなかった。しかしながら、サイズクラス別で見ると、中間のサイズで除去区の方がササ区よりも有意に直径成長が大きかった（図5）。つまり、ササを除去することによって林分全体の成長量は増加しないが、一部のサイズ階での成長が改善されるため、サイズ構造が変化することが示唆された。また、ダケカンバ林の死亡率は、年により様々であり、一定の傾向は見られなかった（図6）。20年生の林分で除去後2年後（2000年）に、40年生の林分で除去後3年後（2001）に、ササ区よりも除去区の枯死率の方が高くなった。除去後4年間で、小さいサイズの個体が枯死し、サイズの大きい個体は成長し、サイズ分布は右にシフトしたが、サイズ構造は処理区間で明瞭な差は見られなかった（図7）。今後は、どのような個体が枯死したのかという点とサイズ階級別の成長量についてさらなる解析を行い、なぜ処理区間で異なる林冠構造が形成されたのかを解明したいと考えている。

⑤本調査によって得られた知見：これまでの研究では、林床の密なササが上層木の実生による森林更新を阻害することが多く報告されてきているが、本研究では、林床のササの存在が上層木の樹木（本研究ではダケカンバ）の個体間競争、生長、そして林冠構造にも直接影響を与えていることがはじめて明らかとなった。ササが土壌の水分を大量に吸水・蒸散することで土壌が乾燥し、上層木であるダケカンバの個体間競争の程度が弱められる。その結果、個体間競争が強い場合に見られる森林構造、つまり林冠を占有する極端に大きな少数の個体と下層に集中する極端に小さな多数の個体という構造（一方向的競争の結果）は見られず、林冠上層から中層、下層まで、そこそこの大きさの個体がすべての層にまんべんなく存在する（二方向的競争の結果）というのが林床にササが存在する森林の構造となる。その結果、一般的な予想に反して、林床にササが存在するほうが存在しない場合よりも林冠上層木全体としては葉面積指数とバイオマスが高くなることが明らかとなった。森林動態の研究では、無視されることが多かった林床下層植生であるが、特に北方林における環境変動と森林動態の研究では、これら林床下層植生も十分考慮に入れなければならないであろう。

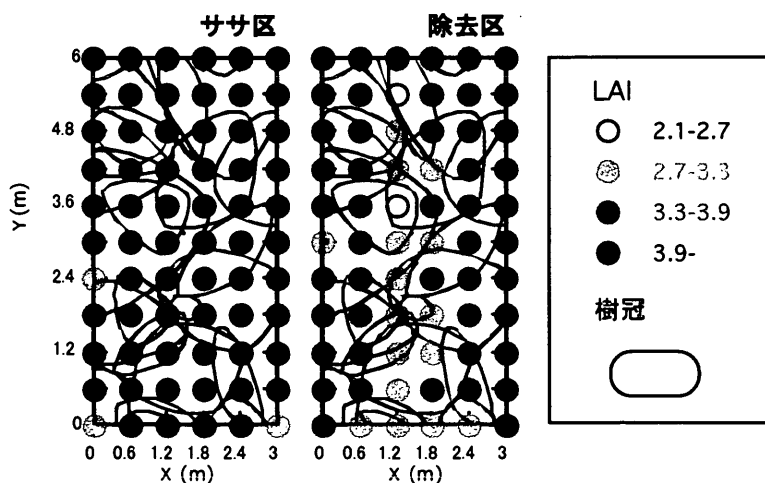


図1. ダケカンバ林の樹冠投影図とLAIの空間分布（水平方向）

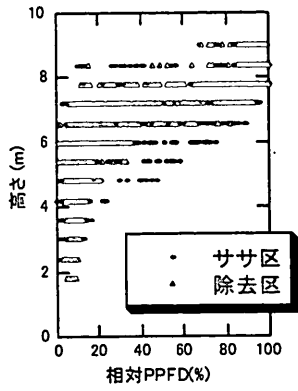


図2. ダケカンバ若齢林における
相対光子束密度 (PPFD) と高さの関係

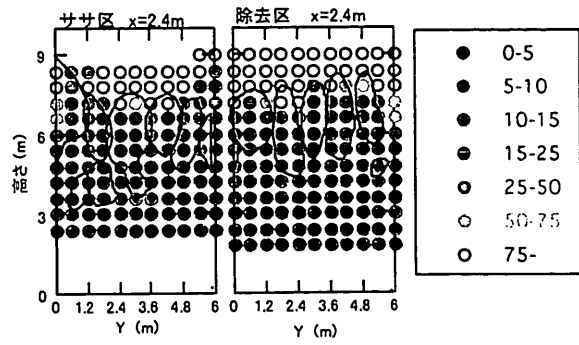


図3. ダケカンバ若齢林における樹冠断面図と相対PPFDの
空間分布 (垂直分布) の一例

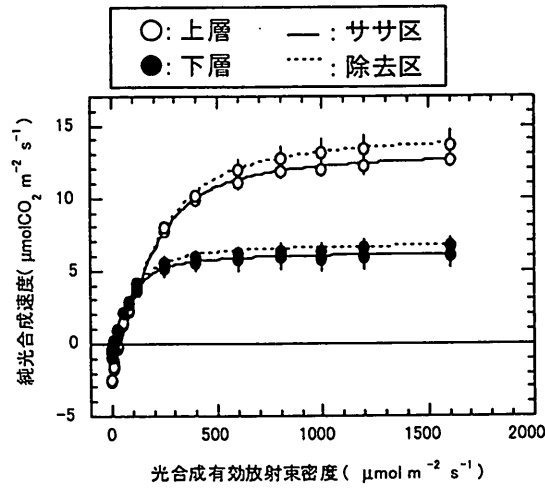


図4. ダケカンバ個葉の光-光合成曲線

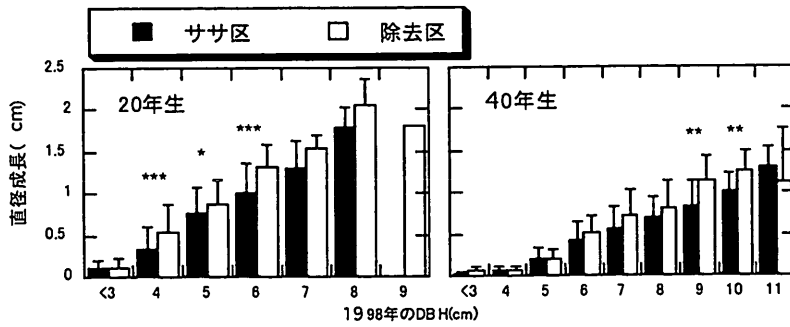


図5. ダケカンバ林における胸高直径 (DBH) 階級別直径成長

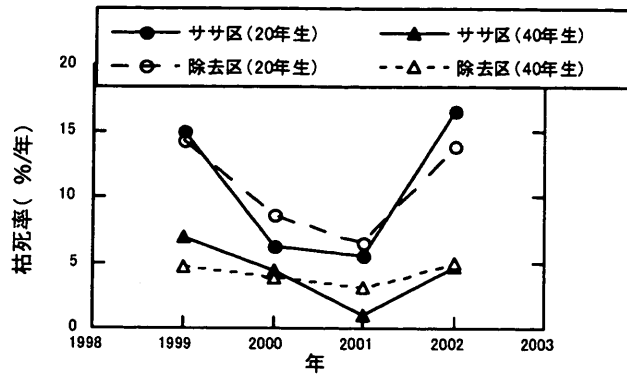


図6. ダケカンバ林の枯死率の年変動

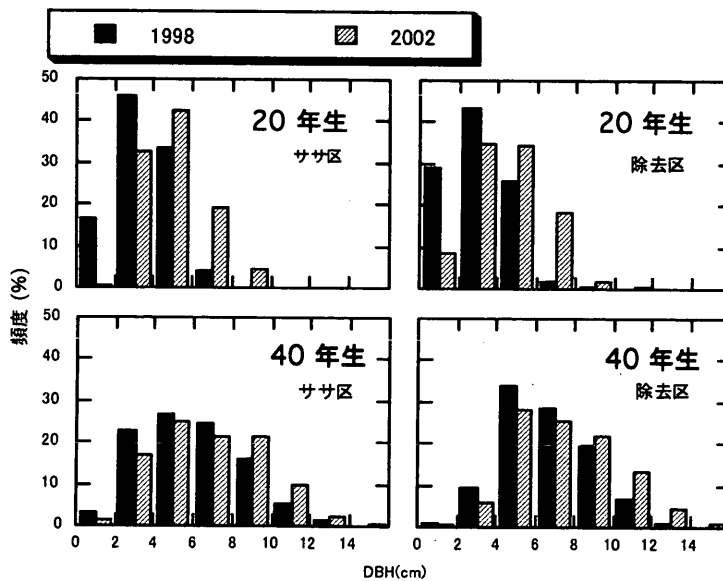


図7. ダケカンバ林の4年間の胸高直径 (DBH) 分布の変化

3. 植生動態を考慮した陸面モデルの開発

(1) 研究目的

従来、気候モデルに組み込まれている陸面モデルにおいては、植生タイプや葉面積などの地表面条件は、現在の状態に基づいてあらかじめ決められているものが多い。当然ながら、このようなモデルでは、本サブテーマの大目標である、気候と陸上生態系との動的な相互作用を再現することができない。生態系の発達、遷移、衰退といった動態を考慮に入れた陸面モデルの開発が必要である。一方、実際の生態系においては、気候変動などによる大きな環境変化が生じると、新

たな環境への適応を巡って植物個体間に競争が生じ、その結果によって、生態系の分布や生態系内の樹種構成が変化する。したがって、生態系動態をプロセスに基づいて現実的に（経験的手法によるのではなく）再現するためには、種間・個体間の競争過程をなるべく現実的に表現し、なおかつグローバルスケールへの計算に適用した際に計算負荷が大きくなりすぎないようなスキームを開発することが要求される。

そういった植物群集スケールにおける種間・個体間の競争を表現するモデルは、これまでも数多く開発されてきた。しかし、その多くは高々数10m四方程度の狭い範囲に生存する植物個体の成長を1個体ずつ別々に予測するタイプのモデル（個体ベースモデル）である。それらのモデルは、現実的なシミュレーションが可能である反面、詳細な計算を必要とするため、グローバルスケールへの適用は現実的に不可能である。そこで、本サブテーマでは、生態系に関して扱う情報量は減らしながらも生態系内部の競争過程の本質は表現できるという特徴を持つ、個体サイズ動態モデル（Yokozawa et al., 1996¹⁾）を採用し、これに群落内の微気候を再現する多層キャノピーモデル（Watanabe and Mizutani, 1996²⁾）を組み合わせることで、生態系動態を陽にとりいれた陸面モデルの開発を目指すこととした。

また、このようなモデル開発を行う場合、多くの研究ではグローバルスケールなど広域への展開が先行し、モデルの基本的な検証が十分に行われないうま用いられる傾向がある。そのような場合、気候変動にともなう植生分布の変遷など、仮に興味深い結果が得られたとしても、その信憑性については明らかとは言えないだろう。本サブテーマでは、拙速に広域展開を目指すのではなく、検証を十分に行うことによるモデルの基本的な性能の把握と向上を優先し、いわば「素性の明らかなモデル」の開発を目指した。

（2）研究方法

植物群集の個体間競争過程を記述する個体サイズ動態モデルと群落微気候を再現する多層キャノピーモデルを統合し、群落微気候—植物個体群間の相互作用モデルを構築した（図8；MINoSGI：Multilayered Integrated Numerical Model of Surface Physics—Growing Plants Interaction）。一般に、植物群集における植物個体のサイズ構造は、樹高、幹直径、重量など個体サイズを特徴づけるパラメータの頻度分布によって表現され、これが種子の発芽、各個体の成長、枯死などによって時間的に変化する。開発したモデルでは、このような過程を頻度分布空間における移流拡散方程式で表現し、個体群の成長速度や枯死率を各サイズクラス別の光合成・呼吸量に応じて評価することにより、頻度分布の時間発展が記述される。一方、植物群落内では放射等の物理環境が鉛直方向に大きな勾配を持ち、それが各個体の光合成・呼吸や蒸発散と強く相互作用するため、そのような過程を多層キャノピーモデルによって表現する。キャノピーモデルには、植物群落内の放射伝達、乱流輸送、個葉の熱・水収支や光合成・呼吸、土壌中の熱・水輸送など、群落微気候の形成に関連するあらゆる生物物理的な過程が考慮されている。このモデルは、サイズ動態モデルによって出力される群落構造を参照し、群落内微気候の計算を行い、それに応じて各個体の光合成・呼吸量を評価する。それを受けて、サイズ動態モデルにおいて新しい時間ステップにおけるサイズ構造が求められ、その結果に応じた新たな群落構造が再びキャノピーモデルに返される。こうした計算プロセスを繰り返すことによって群落微気候—植物個体群間の動的な相互作用過程が記述される（図8 参照）。

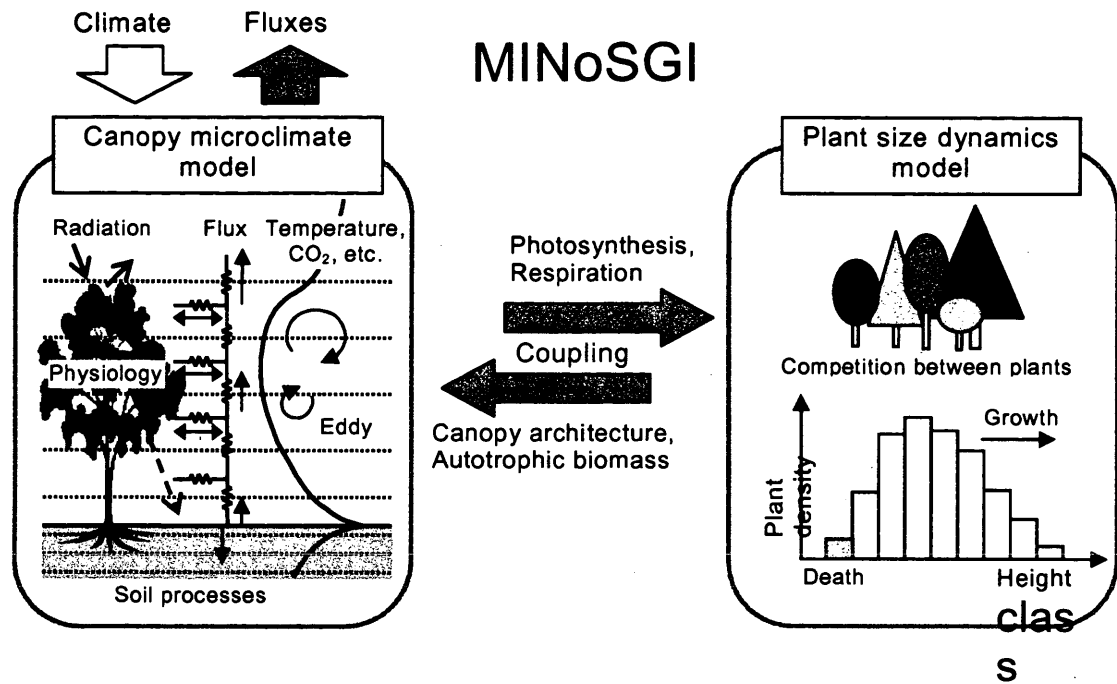


図8. 群落微気候—植物個体群間の相互作用モデル (MINoSGI) の概念図

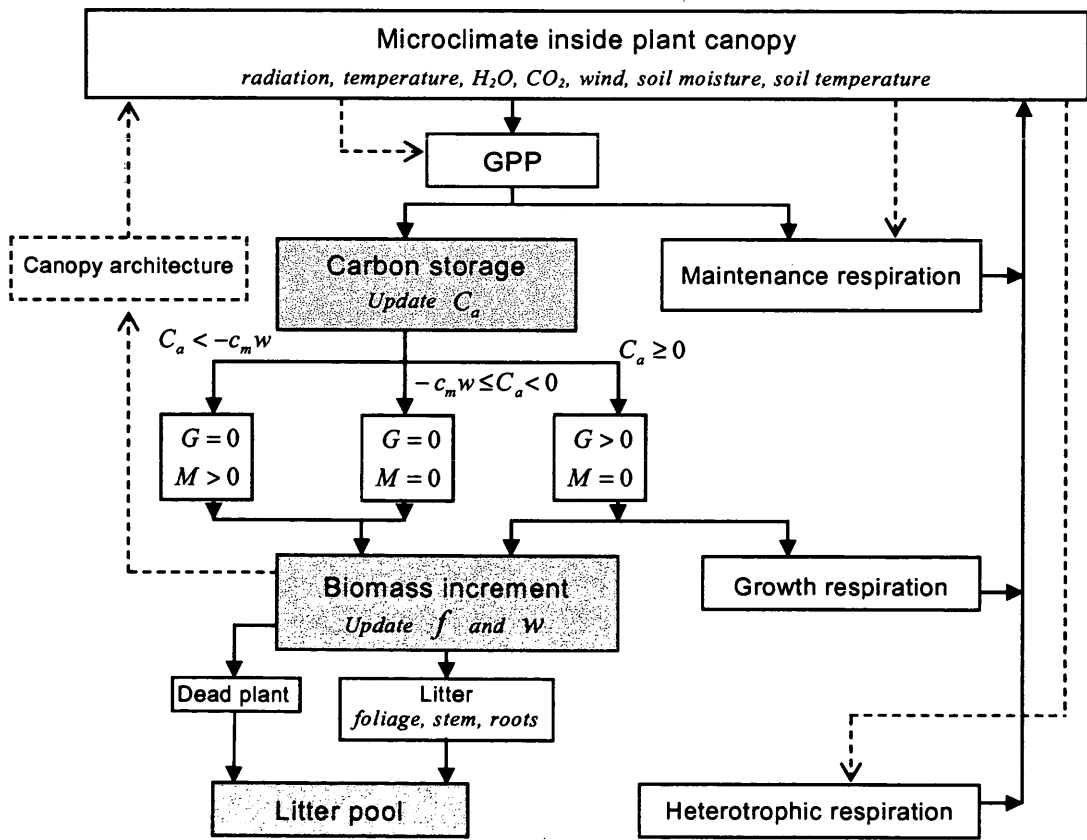


図9. モデル内における炭素の流れを示す模式図

実線矢印が炭素の流れを、波線矢印は個体—微気候間の相互影響を表す。また、記号 G と M はそれぞれ個体の成長速度と枯死速度を表し、それらは個体の貯蔵炭素量 C_a の大きさに応じて計算される。

このモデルを、まず群落構造や個体間の競争様式が比較的単純な単一樹種林分に適用し、モデルの基本的性能の確認と必要な改良を行うため、名古屋大学稲武演習林におけるスギ（常緑針葉樹）とカラマツ（落葉針葉樹）の人工林を対象にした5年間のシミュレーションを行った。この際、モデルを走らせるために必要な現地の気象データ（1時間値）は、付近のAMeDAS観測所や気象測候所におけるデータから推定した。そうして得られた計算結果を、現地で実測された個体別成長量や樹高頻度分布などと比較することにより、モデルの検証と改良を行った。その後、より多様な生態系への適用を目指すため、多樹種間の競争過程を表現できるよう、モデル基本構造の拡張を行った。

（3）結果・考察

図9は開発されたモデル内における炭素（もしくは炭素同化物）の流れを模式的に示したものである。植物が光合成で獲得する炭素（GPP）のうち、呼吸（維持呼吸：Maintenance respiration；構成呼吸：Growth respiration）によって消費された残りが植物個体の成長に用いられ、バイオマスとして蓄積されるが、それらの一部はリターや枯死木となって地上に落下する。現実の森林生態系において見られるこうした炭素循環の過程がモデル内で再現されている。ただし、現在の段階では、リター層や土壌中の有機物の分解など、土壌炭素の動態を表現するモデルが未開発（未結合）のため、土壌炭素量の増加・減少が問題になるような長期間のシミュレーションを行うことはまだ不可能である。これについては今後適切なモデル化を行う予定であるが、本研究で行った計算（以下に示す）はすべて数年以内の短期間のものである。

①スギ林における検証結果：対象としたスギ林における実測データは勝野（1990³⁾によった。図10は1983年の5月に現地で測定された樹高の頻度分布である。この値を初期値として、個体群動態の数値計算を5年間にわたって行った。このとき必要な気象データ（1時間毎）は付近のアメダス観測値におけるデータなどを用いて作成してある。また、このモデルには多くのモデルパラメータを与えなければならない。それらについては極力現地での測定データや文献値を参照して決めたが、一部のパラメータは計算結果と実測データとを比較しながらチューニングせざるを得なかった。図11はそのような過程を経た後に計算された5年後の樹高頻度分布を、1988年に測定されたデータと比較したものである。モデルパラメータをチューニングして得た結果ではあるが、頻度分布の高さや分布形が観測データとよく一致する結果となった。チューニングによって決定されたパラメータの値も非現実的なものではないことが確認されており、これによってモデルの基本構造には大きな問題はないことが確認された。また、計算途中の各年における、樹高別の成長量を実測値と比較したものが図12である。いずれの年においても、樹高の高い個体ほど成長量が高く、その一方で樹高の低い個体は枯死するという、非対称的な（一方向的な）成長特性がよく再現されたことが分かる。なお、詳細は省略するが、図12の結果には上述したパラメータチューニングの影響はあまり入っていないため、ここでよい一致が見られたことにより、純粋にモデルの性能が確認できたことになる。

②カラマツ林における検証：上では常緑樹を対象とする検証を行ったが、ここでは落葉樹の一種であるカラマツを対象とし、林木の季節的な葉量変化過程（落葉・展葉）をモデルに取り込み、個体群動態に関する実測データ（倉地，1989⁴⁾）との比較を行った。ところで、落葉樹は落葉期の呼吸消費と次期の展葉のために必要となる養分を着葉期に貯蔵しているものと考えられる。しか

し一般に、葉の展葉、落葉時期の決定、および養分貯蔵の様式についての生物学的な知見および体系的な観察データは少ない。ここでは、ひとまず以下の簡単な仮定を置き、シミュレーション結果と実測との比較を通して、モデルの落葉樹林分への適用可能性と諸過程の検討を行うこととした。1) 落葉・展葉は一斉に起きるとする。2) 落葉・展葉の時期は一定とし、年々変動は無いとする。3) 展葉してからのある期間は同化産物を用いて生長するが、その後、落葉時期まではすべての同化産物を貯蔵する (Kurachi et al., 1993³⁾)。4) 展葉は落葉期の呼吸消費を差し引いた貯蔵物質で行い、残りは着葉期の初期生長に用いる。

これらの仮定に基づいてモデルを構築し、実測された樹高頻度分布 (図13) を初期条件として5年間のサイズ構造変化のシミュレーションを行った。図14はモデルによって計算された純生産量 (Pn) と群落の葉面積指数 (LAI) の時間変化である。ここでは、5月1日に一斉展葉し、11月1日に一斉落葉すると仮定したため、LAIの変化はステップ状になっている。純生産量は年によって増減があるものの、初夏に高く、盛夏に減少した後、秋に再び増加するという季節変化を示した。このうち、展葉後8月までは同化産物はすべて個体の成長に使われ、8月以降になって初めて同化産物の貯蔵が行われると仮定されている。そのため、計算途中の1983年には、同化産物の貯蔵時期における純生産量が小さかったことが影響し、翌1984年の展葉量が少なくなり、最大群落LAIはおよそ3程度にとどまった。落葉期には呼吸により純生産量は当然負となるが、年間積算した純生産量は正となり、群落は全体として成長した。図15は計算開始後1, 3, 5年後における樹高頻度分布の計算値と実測値との比較である。頻度が最大となる樹高クラス的位置はおおむね再現できたが、3年後から上層木の頻度が過大評価される。これは、上層木個体の展葉量が過大であることにおもに起因し、着葉時の葉群動態を改良する必要があると考えられる。また、現行モデルでは、展葉、落葉時期を固定しているが、気候モデルに組み込むことを考慮した場合、個体サイズによる着葉時期の差異などとあわせて群落内部の条件によって決める (例えば、個葉レベルの純生産による展葉時期の判定) 必要がある。これらについてさらに適切な改良を行うことにより、モデルは落葉樹群落にも適用可能である。

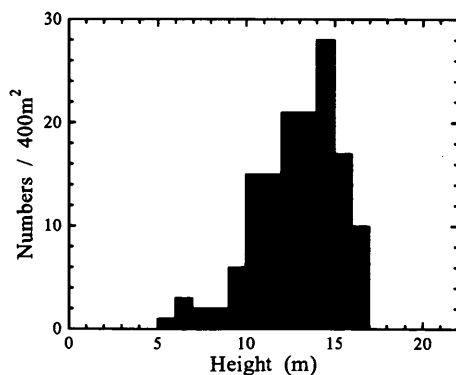


図10. スギ林における樹高頻度分布の実測値 (初期値)

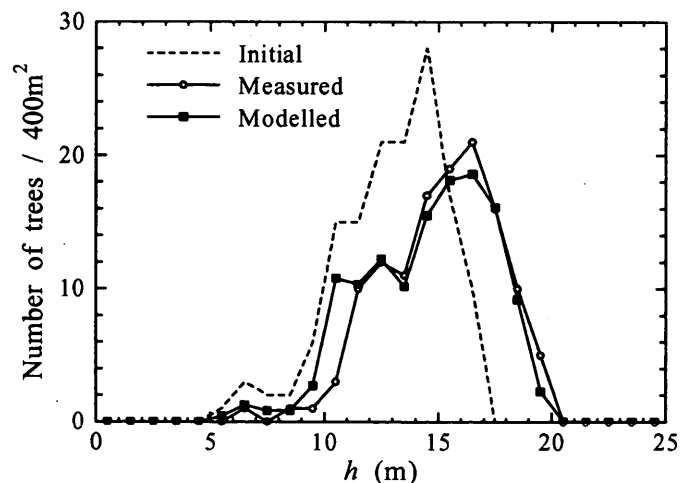


図11. スギ林における5年後の樹高頻度分布についての実測値とモデル計算値との比較

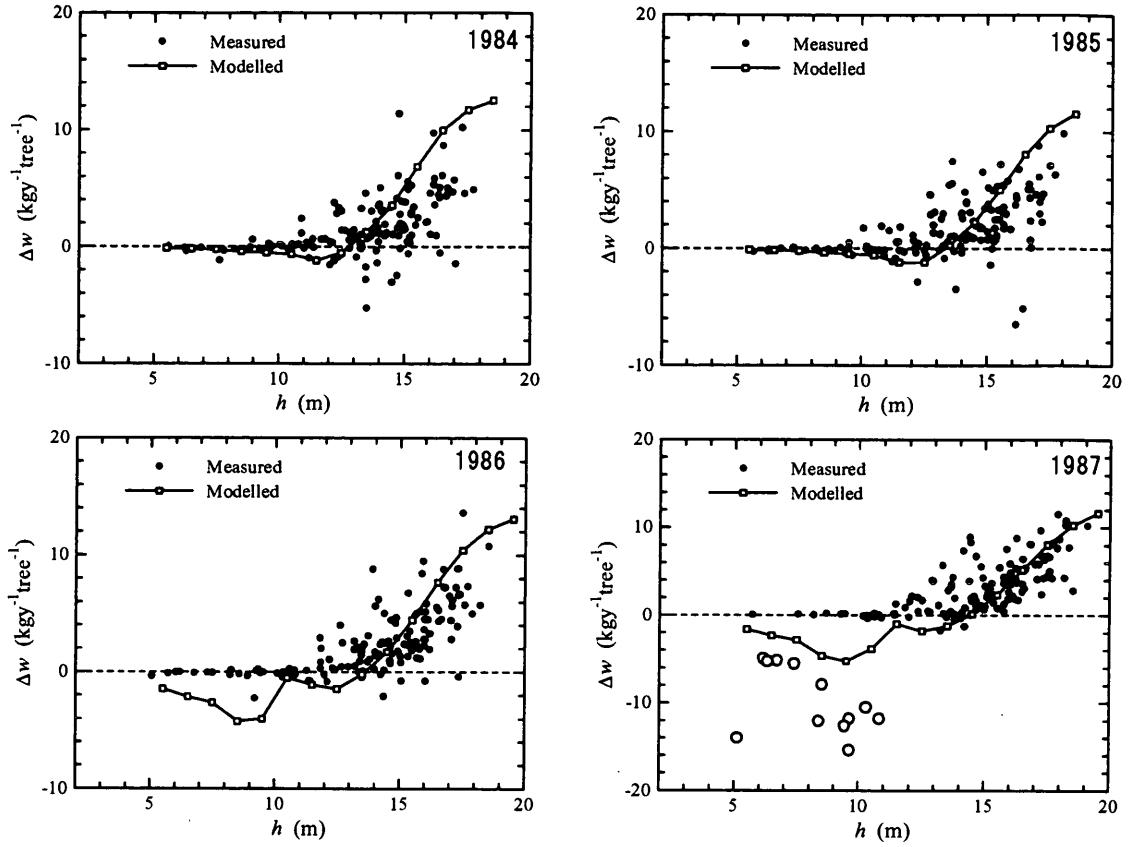


図12. スギ林における各年毎の重量成長量の樹高サイズ分布
 (折れ線：計算値、点：実測値、○：各年に枯死した個体の重量の実測値)
 計算値が大きくマイナスの値をとる部分はモデル内の枯死を表す

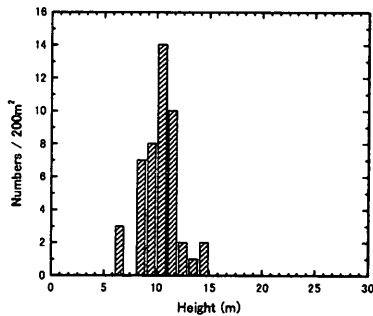


図13. カラマツ林における樹高頻度分布
 の実測値 (初期値)

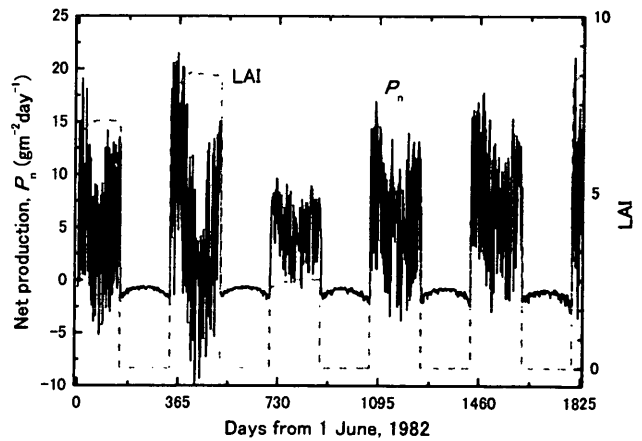


図14. カラマツ林における群落の純生産量 (日量) と
 面積指数の変化 (いずれもモデル計算値)

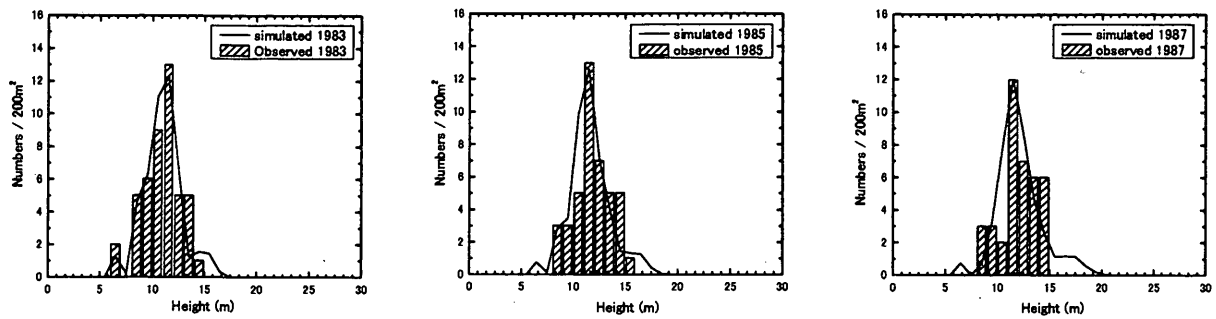


図15. カラマツ林における1, 3, 5年後の樹高頻度分布に対する実測値とモデル計算値との比較
(ヒストグラム: 実測値, 折れ線: 計算値)

③多樹種生態系へのモデルの拡張: 上述した計算結果は、いずれも単一樹種のみからなる森林を対象としたものであった。いずれの例でも、おおむね妥当な予測が可能であることが判明し、モデル基本構造の妥当性が確認された。そこで、気候変動に伴う樹種構成の変化などの予測を可能とするために、モデルの基本構造を多樹種間の競争過程をも表現できるよう拡張した。拡張されたモデルを用い、すべてのモデルパラメータを全個体について同一とした場合(標準条件)と、光合成パラメータ(V_{max} : 最大カルボキシル化速度)だけを半数の個体について半減させた場合(競争条件)の2つの条件を設定し、上述したスギ林のシミュレーションに用いた5年分の気象データを繰り返しモデルに与えながら、20年間の仮想的な数値実験を行った。得られた結果の図は省略するが、競争条件においては、光合成パラメータを半減した樹種の成長は標準条件よりも大幅に遅れる一方で、標準条件と同じパラメータをもつ樹種の成長はむしろわずかに促進される(高樹高の個体数が増加する)ことなどが示された。これは、競争条件においては、成長の早い樹種が群落上層部を素早く占有することにより、その他の樹種に比べて光に対する競争が有利になったためと解釈でき、妥当な結果と考えられる。具体的な実測データとの比較などは今後に残されたが、これによって多樹種からなる林分における種間・種内競争過程をも表現しうる陸面モデルが得られたことになる。

4. 複雑地表面上におけるフラックス集積過程の解明

(1) 研究目的

現在の気候モデルに導入されている陸面モデルの多くは、植物群落内の微気象過程や個葉の生理過程など、プロットスケールのパラメタリゼーション手法を用いて構築されている。しかし、現実の地表面は、異なる地表面被覆が混在し複雑な地形が存在するなど、複雑多様であり、プロットスケールのモデルを気候モデルのグリッド全体にそのまま適用することには本来問題がある。この問題は以前から指摘されてはいたのだが、問題の本質的困難性から、その解決は先送りにされてきた。しかし、近年の数値計算技術の発達にともない、現実の複雑多様な地表面プロセスを詳細に再現する数値シミュレーションも可能になりつつある。そこで、本サブテーマでは、陸上

生態系フラックスの複雑地形上における集積過程の解明を目指し、複雑地形に適用できる高精度な数値乱流モデルの開発とそれによる解析を行うこととした。

(2) 研究方法

一般に大気乱流の変動は広範なスペクトルにより構成されるが、このうち比較的スケールの大きな変動については大気の運動方程式

(Navier-Stokes式) から直接計算し、それより小さなスケール (SGS: sub-grid scale) の変動は適切なモデルを用いて表現することによって乱流場を再現する手法をLES (Large Eddy Simulation) という。本研究で開発する森林生態系を含む複雑地形上大気環境中のCO₂輸送・拡散解析のための数値モデル (図16参照) は、こ

のLESをベースとし、これに熱輸送解析及び物質 (CO₂) 輸送解析を連成することにより構築される。ベースとなるLESは近年多くの注目を集める高精度乱流解析手法であり、より汎用的な乱流解析手法であるRANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) モデルに比べて、①モデル化・パラメタリゼーションの度合が少ない、②乱流の非定常性や構造の詳細解析が可能、といった点に大きな特徴を持っている。

本モデル開発は、1) ベースとなる大気乱流解析モデルの開発、2) 大気乱流解析モデルの予測精度検証、3) 大気乱流+熱輸送+物質 (CO₂) 輸送の連成解析モデル (大気環境中のCO₂輸送・拡散解析モデル) の開発、4) 連成解析モデルの予測精度検証、の4つの段階を踏まえて進められた。本モデル開発では特に、1)、2) の大気乱流解析モデルの開発・予測精度検証を重点的に行う。大気乱流解析モデルの開発・予測精度検証で得られる、SGSモデルや計算スキームなどに関する研究成果の多くは熱輸送や物質輸送の解析モデルの開発においても十分に活用できる。また、2)、4) の予測精度検証は実験や実測との詳細な比較を通じて行う。このような比較検証を通じて、開発する数値モデルの高精度化・信頼性の向上を図る。

(3) 結果・考察

①複雑地形上の大気乱流解析モデルの開発と予測精度検証

LESに基づく大気乱流解析モデルを開発し、石原ら (1998⁶⁾) の2次元山岳地形モデル上の中立大気乱流場の風洞実験 (図17参照) を対象とした解析を行い、その予測精度を検証した。A) LESのSGSモデルと B) 地表面被覆条件に着目して、これらが予測精度に及ぼす影響について検討した。

A. 各種SGSモデルの性能比較

7種類に及ぶSGSモデルの比較を行ったが、以下ではその代表例として、(a) 標準Smagorinskyモデル (Sモデル; Smagorinsky, 1963⁷⁾)、(b) dynamic Smagorinskyモデル (DSモデル; Germano et al., 1991; Lilly, 1992^{8), 9)})、(c) ハイブリッドモデル (aとbの結合モデル) の3種類のSGSモデルを比較した結果を示す。尚、この比較では地表面被覆条件として地表面全体が高さ5m程度

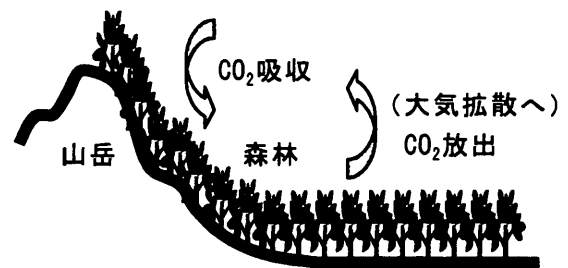


図16. 森林生態系を含む複雑地形上大気環境中のCO₂輸送・拡散

の樹木に覆われた条件を用いている（図17参照；石原ら，1998）。

A-1. SモデルとDSモデルの比較：図18に時間平均風速ベクトルを流線と重ねて示す。両SGSモデルの結果ともに山頂（ $x_1=0$, $x_3=1$ ）付近で流れの剥離が生じ、山後方に循環流域を形成している。しかしその大きさは大きく異なり、Sモデルに比べてDSモデルの循環流域は遥かに小さい。図19は時間平均風速（主流方向成分）の鉛直分布について、風洞実験結果（石原ら，1998⁶⁾）とSモデル及びDSモデルを比較したものである。Sモデルは実験と良く一致した結果となっている。一方、DSモデルは山後方の循環流域を過小評価するため、速度回復が早くなり、山後方領域で実験との差異が大きい。

A-2. DSモデルの問題点：上述したDSモデルの予測精度の悪化は、主に山に入り込んでくる流れ（接近流）の地表面近傍の予測精度に起因している。図20に接近流の地表面近傍の様子（ $x_1=-3.75$ における地表面付近の時間平均風速ベクトル）を示す。DSモデルはSモデルに比べて地表面ごく近傍まで風速が増加した分布となっている（これはDSモデル中のモデル係数の過小評価に起因する。この仕組みの詳細については、Kondo et al. (2001¹⁰⁾）を参照）。DSモデルではこのような接近流の分布性状が山上の剥離性状に悪影響を及ぼし、その結果、山後方循環流域の予測精度が大きく悪化したものと考えられる（図19）。

A-3. ハイブリッドモデルの適用：以下では、DSモデルの予測精度改善を目的として導入したハイブリッドモデルの結果を示す。このハイブリッドモデルは、DSモデルで問題となっている地表面近傍にSモデルを用い（Sモデルが適用される領域はごく僅か）、それ以外の領域はDSモデルとするものである。図21に時間平均風速（主流方向成分）の鉛直分布を示す。ハイブリッドモデルはSモデルと同様、実験と極めて良く一致した結果となっている。図22は乱流エネルギーの鉛直分布について、実験、Sモデル及びハイブリッドモデルを比較したものである。Sモデルの結果は山後方の剥離されて

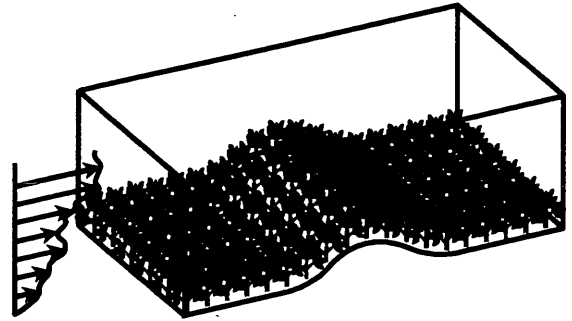
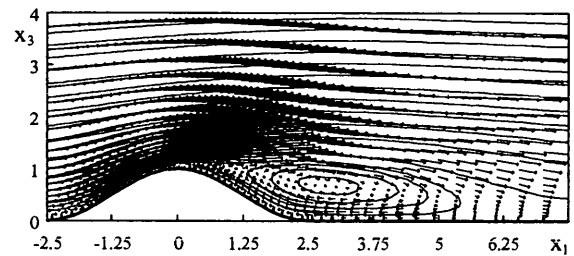
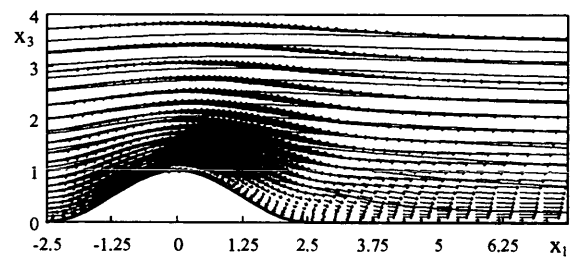


図17. 2次元山岳地形モデル上の中立大気乱流場



(1) Sモデル



(2) DSモデル

図18. 平均風速ベクトルと流線

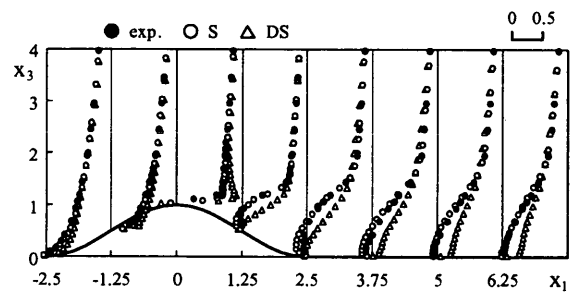
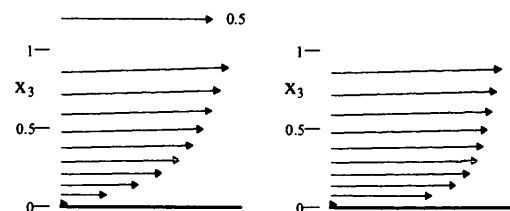


図19. 平均風速の鉛直分布



(1) Sモデル

(2) DSモデル

図20. 接近流の地表面近傍の様子

きた流れと循環流域の間（自由せん断層域）付近をピークとして乱流エネルギーを過大評価し、実験との差異が大きい。一方、ハイブリッドモデルの結果は、剥離直後では依然として実験との差異が認められるものの（ $x_1=1.25$ のライン参照）、それ以降の領域ではSモデルに比べて実験との対応が大幅に改善されている。ハイブリッドモデルで自由せん断層域及びその付近に適用されているモデルはDSモデルであり、上述の精度改善はDSモデルの効果による。つまり、ハイブリッドモデルでは地表面近傍にSモデルを適用することにより、山への接近流の地表面近傍の予測精度が向上し、剥離性状や山後方循環流域を正しく予測する（図21）。さらに、山後方領域においてはDSモデルの効果により、自由せん断層域を中心として乱流性状の予測精度が向上する（図22）。

B. 地表面被覆条件の違いが及ぼす影響

地表面全体が高さ5m程度の樹木に覆われた粗面の条件（A.の解析で用いている地表面被覆条件）と地表面全体が10数cm程度の草に覆われた滑面の条件の下で行った解析結果を比較し、地表面被覆条件の違いが大気乱流場に及ぼす影響について検討した。以下では、SGSモデルとしてハイブリッドモデル（地表面近傍にSモデル、それ以外の領域にDSモデルを適用したSGSモデル）を用いた場合の結果を示す。

図23に平均風速ベクトルを流線と重ねて示す。粗面の条件と滑面の条件では流れパターンが大きく異なる。粗面の条件の場合、山頂部付近の高い位置で流れの剥離が生じ、山後方に大きな循環流域を形成している。これに対し滑面の条件の場合、粗面の条件に比べて剥離点が風下側の低い位置に移動し、山後方の循環流域は遥かに小さくなっている。ここで解析対象としている2次元山の場合（図17参照）、剥離した後の流れ場の性状は剥離点の高さ位置に支配されるため（石原ら, 1998⁶⁾）、このような違いが生じる。一方、剥離点位置の違いは地表面近傍の流れ方向の運動量の増減が大きな理由と考えられる。図は省略するが、滑面の条件の場合、粗面の条件に比べて接近流の地表面近傍の流れ方向の運動量が大きく、その結果、地表面近傍の逆圧力勾配が小さくなり、剥離しにくくなったものと考えられる。以上のような地表面被覆条件の違いによる流れ場の変化は風洞実験結果（石原ら, 1998⁶⁾）で見られる傾向と良く一致している。一方、この傾向はゴルフボールの例で見られるような一様流中の物体まわ

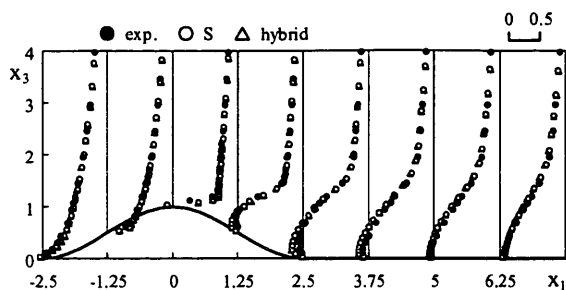


図21. 平均風速の鉛直分布

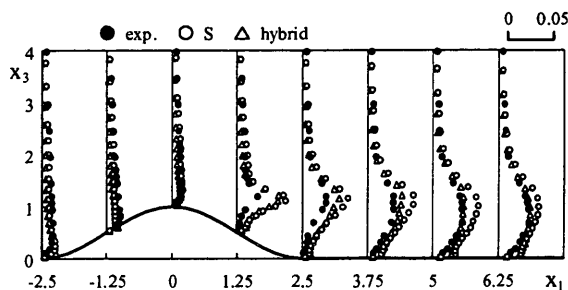
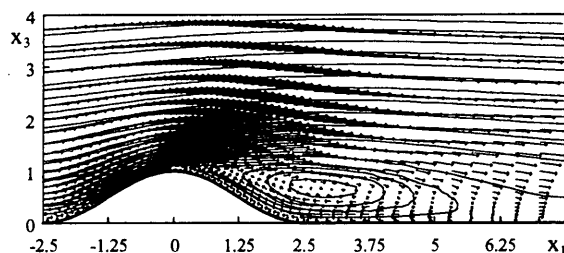
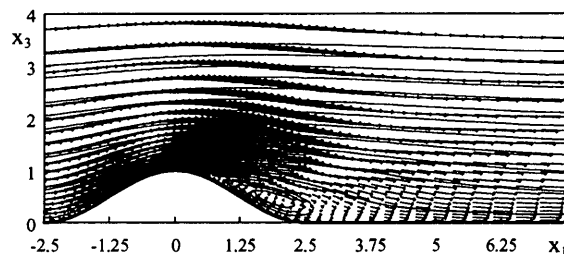


図22. 乱流エネルギーの鉛直分布



(1) 粗面条件



(2) 滑面条件

図23. 平均風速ベクトルと流線

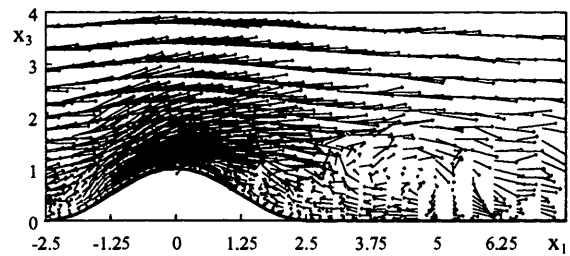
りの流れで生じる現象とは逆である。つまり、一様流中の物体まわりの流れでは物体表面が粗面の方が滑面に比べて剥離点が風下側に移動する。この違いは、ここで対象としている物体（2次元山）が乱流境界層流中にあること、また地表面全体で被覆条件が異なるため、物体への接近流の性状がそもそも異なることによる。

②森林生態系を含む複雑地形上大気環境中のCO₂輸送・拡散解析モデルの開発

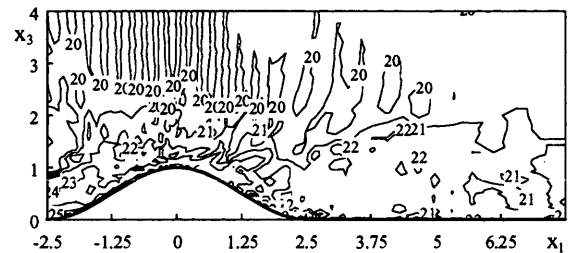
①で述べた大気乱流解析モデルに熱輸送解析及び物質（CO₂）輸送解析を連成し、大気環境中のCO₂輸送・拡散解析モデルの開発を行った。本モデル開発では熱輸送解析も物質輸送解析もSGSモデルを導入するLESの考え方に基づいており、①の大気乱流解析モデルの開発・予測精度検証で得られた研究成果・知見が十分に活用されている。以下では、この解析モデルを用いて解析を行った結果を示す。解析対象は、地表面全体が高さ5m程度の樹木に覆われている2次元山岳地形モデル上

（地形形状、地表面被覆ともに①で用いた条件と同じ）の不安定大気乱流場中のCO₂輸送・拡散過程である。熱の条件は日中を想定し、地表面を40℃、

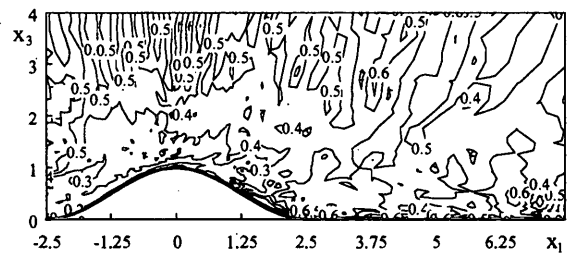
大気代表温度を20℃で与えた。CO₂に関しては空間全体に初期濃度1を与え、樹木による吸収（樹木直上で濃度0）と流入風（濃度0.5）で濃度が希釈される状況を設定した。図24は、初期状態から代表風速（山の高さの流入平均風速）が解析領域（山の高さの60倍の広さ）1周分通過する時間を経過した後の瞬時の風速ベクトル、温度分布、CO₂濃度分布を示したものである。流れ場（図24(1)）は中立大気乱流場の結果（図18(1)、図23(1)参照）とほぼ同様で、山頂付近で流れの剥離が生じ、山後方に大きな循環流域を形成している。今回の条件では熱の影響は小さく、強制対流支配の乱流場となっている。CO₂濃度分布（図24(3)）に関しては、流れが剥離する前の風上側斜面では樹木の吸収効果により濃度が希釈されている様子が見られる。一方、剥離した後の山後方領域では樹木の吸収効果は十分でなく、逆に循環流の影響により高濃度が地表面付近に集積する結果となっている。本解析は仮想的な条件の下に行った予備的なものであるが、今後はCO₂観測サイトなどの実際現場を対象とした解析を行い、CO₂輸送・拡散過程の詳細説明を行っていく予定である。



(1) 風速ベクトル



(2) 温度



(3) CO₂濃度

図24. 諸量の瞬時分布

5. 陸面モデルの大規模スケールにおける検証手法の開発

(1) 研究目的

従来、陸面モデルの検証は、タワー観測等による定点のプロット観測データに基づいてなされてきた。しかし、4節の最初でも述べたように、現実の地表面は複雑多様であり、それらが総合的に大気に及ぼす影響が、陸面モデルによって正しく表現されているか否かを検証するためには、個別のプロット観測データだけでは不十分である。今後、本サブテーマで開発中の陸面モデルを含め、多くの新モデルが開発され適用されることが予想されるが、現時点において広領域スケールでの陸面モデルの検証手法を確立しておくことは、今後のモデル開発を効率的に進める上で大きな意義がある。そこで、本サブテーマでは、広域水循環の情報が反映された河川流量データに着目し、これを用いることで陸面モデルの精度検証やキャリブレーションをすることを目的とし、予備的な研究を行った。それはまた同時に、大規模の陸上水収支を精度高く計算することに直結し、気候変動下におけるグローバルな水循環を定量化する手法を得ることにもつながる。

ここでは、主として以下の二点を目的として研究を進めた。第一が、これまでの気候モデル用の陸面モデルには欠けており、しかしアジアの土地利用としては広範にわたるため非常に重要な位置を占める水田を適切にモデル化し、その陸面水収支や大気陸面相互作用に与える影響を分析することである。このモデル化は、その当時(2000年度)より過去からの経緯もあり、SiB2 (Sellers et al., 1996¹¹⁾) というモデル上に実装されたが、最終的には以下で述べるMATSIRO (Takata et al., 2003¹²⁾) 上に定式化されたものを実装し直す予定である。第二の目的は、2000年度前後に国立環境研究所及び森林総合研究所と東京大学の共同によって開発されつつあったCCSR/NIES GCM用の陸面モデルMATSIROの地球規模での水収支の算定を行うことと、そこから得られた知見を用いて改良を進めることであった。これは、第一の目的の実行時期までの時代には、諸外国で開発されてきたモデルを国内の研究者が利用するのが一般的であったが、日本の本分野における研究が近年急速に進展するにともない、日本独自に進めているモデル開発のいっそうの進展をはかることが、国内研究を推進する上で肝要であろうとの意図に基づくものである。

(2) 研究方法

①水田スキームの開発・検証：タイ王国スコタイ水田観測地 (17° 03'N, 99° 42'E) において、夏および秋のそれぞれ一週間程度フラックス観測を行い、大気・植生内・水田水体・地中の結合系における水・熱収支データを取得した。(この地域は雨季と乾期が明瞭で、9月に月降雨量が最大(230mm)となり、1月に最小(5mm)となる。)このデータを用い、従来から世界的に広く用いられている陸面モデルであるSiB2の再現性を検証し、問題がある場合には水田を表現するための新たなスキームを開発し、再現性の改善を図ることとした。

②MATSIROを用いたグローバル陸上水収支の数値計算：観測の河川流量と対比させて検証を進めるためには、過去最低でも10年、できれば数十年の水循環シミュレーションが必要である。過去の長期流量シミュレーションには、降水量・気温・風速といった大気データが入力値として必要であるが、長期にわたる大気外力のグローバルな観測値はほとんど存在しない。例えば今現在もっとも頻繁に使用されているISLSCP-I CDRM (NASA他が開発)はわずか2年間の大気外力でしかない。2003年春に公開予定のISLSCP-IIでも10年のデータがせいぜいである。そこで、入手可能な

全球の月降水量や月気温などの長期観測値から、水文モデルの入力値として適当な長期大気外力データセットを作成し、入手不可能なものに関しては入手可能なものから推測するか、あるいは陸面水収支への敏感度が低いため気候値を用いても問題がないことを示すこととした。またその途上で発見された陸面モデルの欠点等に関しては、詳細な分析をし、今後の改良へと生かすこととした。

(3) 結果・考察

①水田スキームの開発・検証：オリジナルのSiB2は、次に示すいくつかの点で熱帯水田におけるフラックス観測データ（1時間間隔）を再現できなかった。すなわち、[1]潜熱をやや過小評価し、かつピークが早くなってしまふ；[2]逆に顕熱は過大評価し、その割合は特に晴れた日中には観測値の2倍に達する；[3]SiB2の「地中熱流量」と観測された水田水体内熱収支は日変動が全く一致しない。また、SiB2の「地温」は水田水体の温度とも一致せず、ときに10度程度も差が開くことがある。そこで、オリジナルのSiB2に地表面に一定厚さの水体（湛水層）があることを前提とした熱収支計算を行う「熱帯水田スキーム」を新たに付加したSiB2-paddyを開発し、同様な検証を行った。

SiB2-paddyでは、上記に述べたオリジナルSiB2の欠点のいくつかが劇的に改善された（図25）。特に改善が目立つのは顕熱・地中熱流量・水体貯熱量であった。これにより、SiB2-paddyはSiB2に比べて熱帯水田に対する適合度ははるかに高いことが示された。ただし、SiB2-paddyでもキャノピー温度・地温・水体温度・潜熱はやや過小評価ないし過大評価していた。そこで、空気力学的抵抗に関するパラメータをWebベースのSiB2操作プラットフォーム（後述）を用いて微調整させた結果、これらの項目においても観測フラックスと計算フラックスとが絶対値についても日中サイクルについても高い精度で一致するようになった。ここで、WebベースのSiB2操作プラットフォームとは、SiB2を用いて膨大な種類のパラメータを調整しながら多数の計算を行うなど、操作上の手間を軽減するために作成されたシステムであり、そのディスプレイイメージの一部を以下に図示（図26）する。本システムは、現在はソフトウェアのメンテナンス作業が中断されているものの、いかなる陸面モデルにも適用できる汎用性を目指して作成されたものであるため、MATSIRO等にも使うことができ、今後の利用が期待される。

②MATSIROを用いたグローバル陸上水収支の数値計算：まず、どの大気外力がモデルの水収支計算に対して重要であるかを調べるため、モデルを駆動するために必要な大気外力すべてに対して感度実験を行った結果、降水の時間スケールに対する水収支計算への感度が高いこと、風速、地表気温、地表気圧、比湿などの影響は小さいことが判明した。降水量に対する水収支計算の感度が高い地域としては、葉面積指数が2程度以上で、月降水量が100mm前後の地域が抽出された。また、月降水量が100mm前後より少ないまたは多い地点では感度が減少する傾向にあった。次に、月降水量データをモデルの時間ステップに対して適切な頻度分布に分解して与える手法を検討した。降水量に対する水収支の感度が高い地域において、月降水量から日降水量の時系列を擬似的に作成する手法としてガンマ分布を適用したところ、降水量の観測値を与えた場合とほぼ同様の水収支が算定され（図27）、陸面モデルによる水収支計算に耐えうる精度があることが判明した。

そこで、以上の知見をもとに、ガンマ分布法を用いて過去100年の全球降水量データを作成した。他の大気外力に関しても、再解析と月降水量、月気温データから近似式を用いて作成している。

また、長期大気外力データを用いた過去の長期流量シミュレーションを行った際に比較検討可能な世界の河川流出データに関して整理した（図28）。これら全てで約700地点に上る。

また、これらのシミュレーションの中で、表層の土壌水分や、あるいは流出量が他のモデルによる結果と異なることが示唆され、その検討を以下のように行い、MATSIROの土壌水分計算の改良に関して示唆を与えた。

これまでMATSIROの第一層の深さが5cmと浅く定義されているため、Fw（土壌層間の水フラックス）が大きい場合にしばしば土壌水の移動がCFL（的）条件を満たさずに計算不安定を引き起こすことが指摘されてきた。そこで、土壌水分移動式の各項の取りうる範囲を別個に検討しFwの取りうる値を考察した。飽和透水係数や毛管ポテンシャルに関して検討した結果、MATSIROの時間ステップとして使っているのはオフライン計算で1時間～6時間であり、温暖化実験でAGCMとカップリングされたオンライン計算では3時間ステップであるため、砂が飽和している状態では3時間の間に152（mm）土壌水が移動することになってしまうが（水分フラックスの標準的な値として $1.41 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ を用いた場合）、この値は表層に蓄えられる土壌水（20mm）の7倍近い量となるため、CFL条件が破られる。例えばロームでは、同様の算定をすると、36.5（mm）の変化となり、やはり第一層の最大の土壌水量よりも多くなるためCFL条件を満たさない。結局、土壌層だけ異なったタイムステップ（10分）を適用するスキームを追加することで回避が図られた。また、非常に乾燥したときにモデルの中で設定される土壌水分の最小値（SATMIN）が小さ過ぎると他の場所で発散を招くことが確認され、おおよその理論的な最小値に対する考察の後、その値は0.01へと変更された。

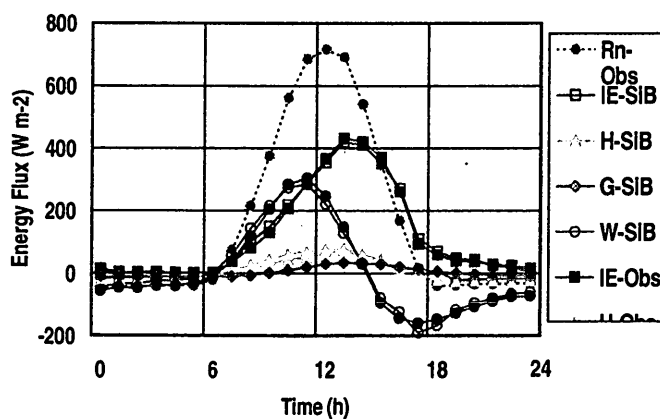


図25. SiB2-Paddyによるタイの天水田における地表面熱収支のシミュレーション結果

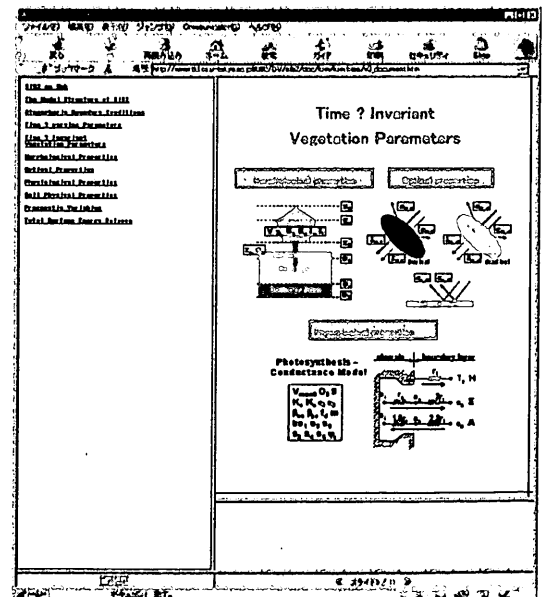


図26. SiB2-PaddyシミュレーションのためのWebベースGUI

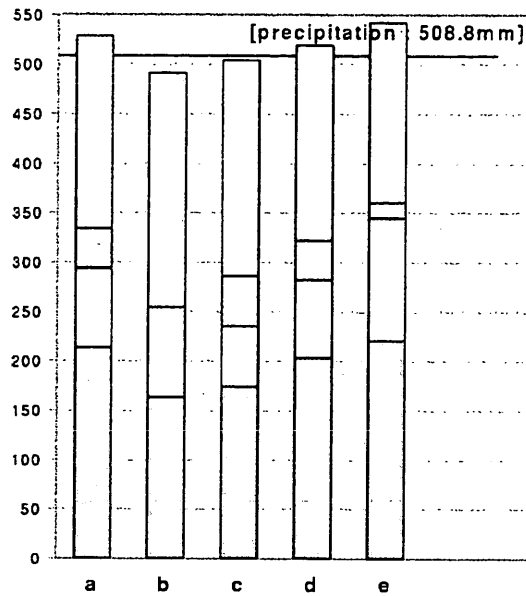


図27. 日本のある一グリッド（ほぼ千葉に相当）において雨の与え方を変化させて行った敏感度実験結果。結果は夏季3ヶ月の水収支であり、下から流出、蒸散、裸地蒸発、遮断蒸発。aが実際の雨の変化を入力したもので、eが月雨量をガンマ分布させて入力したもので、bからeは他の方式で分布させたもの。

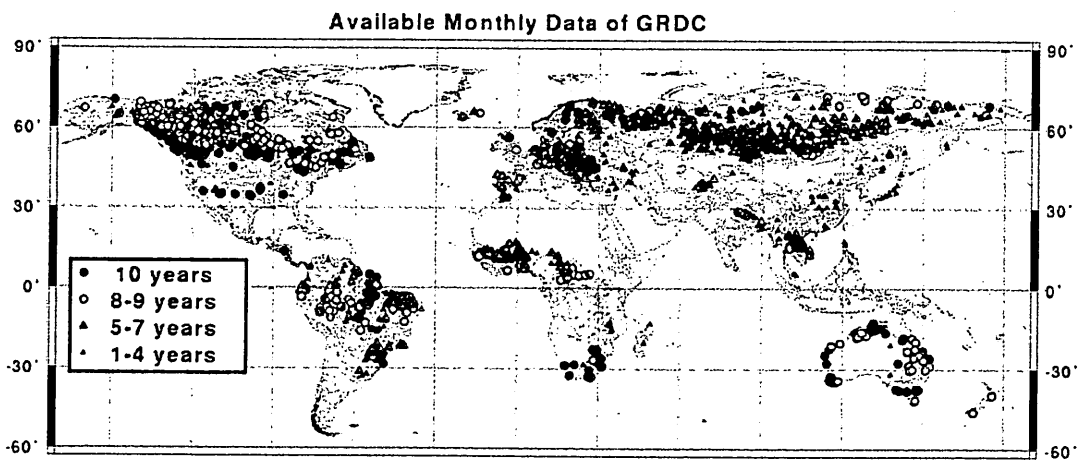


図28. 複数年の月別世界の河川流出量データが整理された地点

6. 本研究により得られた成果

本研究で得られた成果をまとめると次のようになる。

- (1) 北方林で顕著に見られるような、林床にササ等の下層植生が密生する林分においては、土壌中の資源を巡って繰り上げられる上層木と下層植生との競争が、群落構造の形成に重大な影響を及ぼすことが明らかとなった。そのため、従来は無視されることが多かった林床下層植生の役割を、特に北方林における環境変動と森林動態の研究では、十分考慮に入れる必要があることが示された。
- (2) 気候－陸上生態系間の動的な相互作用過程（フィードバック）を表現することのできる陸面モデルのプロトタイプが開発された。このモデルは、スギ及びカラマツの人工林に適用され、単一樹種林分における植物個体群動態に関する観測データをよく再現することが確認された。さらに、このモデルは樹種間の競争過程が表現されるよう拡張され、広範な生態系への適用が可能となり、これによって種々多様な生態系が存在する広領域へ適用するための準備が整えられた。また、アジアの代表的陸面形態の一つである水田生態系に関して、その特徴である湛水層の熱的影響を適切に陸面モデルへ導入するための手法が開発され、それによって実際の水田における熱収支の観測値が再現されることが確認された。
- (3) 近年大気乱流解析に応用が進んできたLESモデルを山岳地形上の大気乱流場に応用し、風洞実験との比較が行われた。この際、サブグリッドスケールのモデル化について、先進的モデルとされてきた Dynamic Smagorinsky model には大気乱流への応用において問題があり、Hybrid model を用いることでそれが解決できることが明らかとなった。また、山岳周辺での、CO₂などスカラー量の輸送には熱的な影響よりも力学的影響が大きいことが明らかになり、また、山岳後流での剥離や地表面粗度の差によって地表面付近にスカラー濃度のきわめて大きな変動がもたらされることなどが明らかとなった。
- (4) 陸面モデルを、河川流量データを用いて広域スケールにおいて検証するためには、陸面水収支に関する長期シミュレーションを実行する必要があるが、その際に必要となる大気外力データのうち、特に降水量についてはシミュレーション結果の敏感度が高く、統計学的手法を用いて入念にデータを作成しなければならないことが明らかになった。また、今後行われることになる各種陸面モデルの検証作業に供するため、世界中の大河川における流量データが取り揃えられた。

7. 引用文献

- 1) Yokozawa, M., Y. Kubota, and T. Hara, 1996: Crown architecture and species coexistence in plant communities. *Annals of Botany*, **78**, 437–447.
- 2) Watanabe, T., and K. Mizutani, 1996: Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **80**, 195–214.
- 3) 勝野真澄, 1990: スギ人工林の総生産量に関する基礎的研究. 名古屋大学博士論文, pp.1-350.
- 4) 倉地奈保子, 1989: カラマツ人工林の生産構造. 名古屋大学博士論文, pp.1-274.
- 5) Kurachi, N., Hagihara, A., and Hozumi, K. 1993: Canopy photosynthetic production in a Japanese larch forest.

II. Estimation of the canopy photosynthetic production. *Ecological Research*, 8, 349-361.

- 6) 石原孟, 日比一喜, 1998 : 急峻な山を越える乱流境界層に関する実験的研究. 第15回風工学シンポジウム論文集, 61-66.
- 7) Smagorinsky, J., 1963 : General circulation experiments with the primitive equations; Part 1 The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.
- 8) Germano, M., U. Piomelli, P. Moin, and W.H. Cabot, 1991 : A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Phys. Fluids*, A3(7), 1760-1765.
- 9) Lilly, D. K., 1992 : A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. *Phys. Fluids*, A4(3), 633-635.
- 10) Kondo, H., N. Saigusa, S. Murayama, S. Yamamoto, and A. Kannari, 2001: A numerical simulation of the daily variation of CO₂ in the central part of Japan -summer case-. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79, 11-21.
- 11) Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. Berry, C. Field, D. A. Dazlich, and C. Zhang, 1996: A revised land-surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Climate*, 9, 676-705.
- 12) Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe, 2003: Development of the minimal treatments of surface interaction and runoff (MATSIRO), *Global and Planetary Change*, (in press).

8. 国際共同研究等の状況

本課題の一部は、研究担当者の一人（沖）が座長の一角を占めるGlobal Soil Wetness Project及び、GEWEX Asian Monsoon Experiment Tropicsと関連して行われた。

9. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

- ① T. Arai, W. Kim, T. Oki, and K. Musiake : *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 44, 175-180(2000)
“Application of SiB2 to a tropical paddy field and inclusion of water body”
- ② E. Ikoma, T. Arai, W. Kim, T. Oki, and M. Kitsuregawa : *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 13, 291-303(2000)
“Development of a workbench for a land surface model and its application to the observed data in a tropical paddy field”
- ③ W. Kim, T. Arai, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 79, 387-400(2001)
“Application of the Simple Biosphere Model (SiB2) to a Paddy Field for a Period of Growing Season in GAME-Tropics”
- ④ W. Kim, Y. Agata, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : *IAHS Publ.*, No.270, 19-26(2001)
“Hydrological simulation by SiB2-Paddy in ChaoPhraya river basin, Thailand”

- ⑤ H. Kondo, N. Saigusa, S. Murayama, S. Yamamoto, and A. Kannari : J. Meteor. Soc. Japan, 79, 11-21(2001)
 “A numerical simulation of the daily variation of CO₂ in the central part of Japan -summer case-”
- ⑥ T. Watanabe, Y. Yasuda, K. Yamanoi, Y. Ohtani, M. Okano, and Y. Mizoguchi : Proceedings of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, (CGER-M-011-2001), 11-17(2001)
 “Seasonal variations in energy and CO₂ fluxes over a temperate deciduous forest at Kawagoe, Japan”
- ⑦ Y. Yasuda, and T. Watanabe : Boundary-Layer Meteorology, 100, 191-208(2001)
 “Comparative measurements of CO₂ flux over a forest using closed-path and open-path CO₂ analyzers”
- ⑧ 神田 学、渡辺 力、M. O. Letzel, S. Raaash : 水文・水資源学会誌、15,243-252(2002)
 「LESによる熱収支インバランス問題に対する検討（第1報）大気境界層スケールの対流構造の影響」
- ⑨ K. Takahashi, S. Uemura and T. Hara : Eurasian Journal of Forest Research, 5, 49-53(2002)
 “Effect of understory dwarf bamboo on seasonal changes in soil temperature in a *Betula ermanii* forest, northern Japan”
- ⑩ 渡辺 力、神田 学 : 水文・水資源学会誌、15,253-263(2002)
 「LESによる熱収支インバランス問題に対する検討（第2報）水平一様な植生キャノピー層を含む中立接地境界層における検討」
- ⑪ 平林 由希子、鼎 信次郎、沖 大幹、虫明 功臣 : 水工学論文集、47,169-174(2003)
 「陸面水文モデルに対する降水時間スケールのグローバル影響評価」
- ⑫ 飯塚 悟、近藤裕昭 : 日本建築学会環境系論文集、568, 41-48(2003)
 「複雑地形上流れのLES（その1）Dynamic SGSモデルの問題点とハイブリッドモデルの適用」
- ⑬ 飯塚 悟、近藤裕昭 : 日本風工学会誌、95, 29-30(2003)
 「山岳地形上流れのLES—non-Smagorinsky型渦粘性モデルの適用—」
- ⑭ T. Nakatsuka, K. Ohnishi, T. Hara, A. Sumida, D. Mitsuishi, N. Kurita, and S. Uemura : Geochemical Journal(2003)
 “Oxygen and carbon isotopic ratios of tree-ring cellulose in a conifer-hardwood mixed forest in northern Japan” (in press)
- ⑮ K. Takahashi, D. Mitsuishi, S. Uemura, J. Suzuki, and T. Hara : Forest Ecology and Management, 174, 39-50(2003)
 “Stand structure and dynamics during a 16-year period in a sub-boreal conifer-hardwood mixed forest, northern Japan”
- ⑯ K. Takahashi, S. Uemura, J. Suzuki, and T. Hara : Ecological Research (2003)
 “Effects of understory dwarf bamboo on soil water and growth of overstory trees in a dense secondary *Betula ermanii* forest, northern Japan” (in press)

<学術誌（査読なし）>

- ① 近藤裕昭、三枝信子、村山昌平、山本 晋、飯塚 悟 : 風工学会誌、91, 43-47(2002)
 「領域モデルによる二酸化炭素収支の解析」

<書籍>

- ① T. Hara, Watanabe, T., Yokozawa, M., Emori, S., Takata, K., and Sumida, A.: TERRAPUB, 173-185(2001)
 “A multi-layered integrated numerical model of surface physics - growing plants interaction, MINoSGI. In: Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling. Matsuno T, Kida H, eds., Tokyo”
- ② M. Yokozawa : Springer-Verlag(2003)
 “The mode of competition and spatial pattern formation in plant communities. Morphogenesis and Pattern Formation in Biological Systems, eds., Sekimura, T., Noji, S., Ueno, N. and Maini, P.K.” (in press)

<報告書類等 >

なし

(2) 口頭発表

- ① S. Emori, T. Watanabe, M. Yokozawa, T. Hara, A. Sumida, and K. Takata : AGU 2000 Fall Meeting, supplement to Eos, Transactions, AGU, 81(48), F30 (U22A-07)(2000)
 “Development of a multi-layered integrated model for interactions between land surface processes and vegetation dynamics.”
- ② 江守正多 : 日本植物学会第64回(静岡)大会研究発表記録、57 (1SH5) (2000)
 「地球規模の物理環境と植生の変動」
- ③ T. Hara : The 14th Toyota Conference: The Present and Future of Modeling Global Environmental Change -- Toward Integrated Modeling -- (Mikkabi, Shizuoka, Japan)(2000)
 “A multi-layered integrated model of land surface processes-vegetation dynamics interactions”
- ④ 原 登志彦 : 日本生態学会・中部地区大会(2000)
 「植生動態と気候変動を統合するモデル開発の試み」
- ⑤ 金 元植、安形 康、鼎 信次郎、沖 大幹、虫明功臣 : GAME国内ワークショップ、日本、北海道(2000)
 「改良型SiB2によるGAME-T領域のエネルギー・水収支の推定」
- ⑥ W. Kim, T. Arai, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, AGU, Tokyo. Japan(2000)
 “Application of the Simple Biosphere Model (SiB2) to Paddy Field in GAME-Tropics”
- ⑦ W. Kim, T. Arai, S. Kanae, T. Oki, K. Musiake, and H. Lee : The Ecological Society of Korea, Kumi, Korea (2000)
 “Application of The Simple Biosphere Model (SiB2) to Paddy Field in GAME-Tropics”
- ⑧ W. Kim and T. Arai : GAME-T Workshop in Thailand, Petchaburi, Thailand(2000)
 “Application of biosphere model in GAME-T”
- ⑨ 沖 大幹、虫明功臣、金 元植、新井崇之 : 日本気象学会(2000)
 「陸面水文植生モデル面への熱帯水田でのフラックス観測成果の活用」
- ⑩ 渡辺 力、横沢正幸、江守正多、高田久美子、原 登志彦 : 日本気象学会予稿集、77, 383 (P383) (2000)
 「陸上植生動態－気候間の相互作用のモデル化」
- ⑪ T. Watanabe, K. Yamanoi, Y. Yasuda, Y. Ohtani, M. Okano and Y. Mizoguchi : 24th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 16-17(2000)
 “Seasonal variations in the energy budget and CO₂ flux over a temperate deciduous forest”

- ⑫ T. Watanabe, Y. Yasuda, K. Yamanoi, Y. Ohtani, M. Okano and Y. Mizoguchi : International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation, 19(2000)
 “Seasonal variations in energy and CO₂ fluxes over a temperate deciduous forest at Kawagoe, Japan”
- ⑬ 安田幸生、渡辺 力、岡野通明、大谷義一、溝口康子 : 日本気象学会予稿集、77, 232 (P217) (2000)
 「落葉広葉樹林上におけるCO₂フラックスの長期連続観測」
- ⑭ 横沢正幸、渡辺 力、江守正多、高田久美子、原 登志彦 : 日本生態学会講演要旨集、47, 142 (E124) (2000)
 「植生のサイズ分布動態と物理環境変動との相互作用のモデル化」
- ⑮ 横沢正幸、渡辺 力、江守正多、高田久美子、隅田明洋、原 登志彦 : 日本農業気象学会講演要旨、422-423 (P19) (2000)
 「植生動態と気候間の相互作用のモデル化」
- ⑯ 平林由希子、瀬戸心太、沖 大幹、鼎 信次郎、虫明功臣 : 日本気象学会秋季大会要旨集、日本気象学会、78, 159(2001)
 「衛星観測土壌水分の数値気候モデルへの適用手法の構築」
- ⑰ 飯塚 悟、近藤裕昭 : 日本気象学会2001年春季大会、448(2001)
 「LESによる山岳地形まわりの複雑乱流場解析 (第1報)」
- ⑱ 飯塚 悟、近藤裕昭 : 日本流体力学会年会、321-322(2001)
 「Dynamic LESによる山岳地形上の乱流場解析」
- ⑲ 飯塚 悟、近藤裕昭 : 広域風環境研究会 (東京大学生産技術研究所) (2001)
 「山岳地形上流れへのLESの適用」
- ⑳ 飯塚 悟、近藤裕昭 : 第3回非静力学モデルに関するワークショップ、32-33(2001)
 「山岳地形上流れのLES—地表面粗度の違いが流れ場に及ぼす影響について—」
- ㉑ 飯塚 悟、近藤裕昭 : 日本気象学会2001年秋季大会、358(2001)
 「LESによる山岳地形上流れの解析 (第2報) —地表面粗度の違いが流れ場に及ぼす影響について—」
- ㉒ W. Kim, Y. Agata, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : Challenges of a Changing Earth- Global Change Open Science Conference, Amsterdam. Netherlands(2001)
 “The Effect of the Expansion of Agricultural Area on Decreasing Runoff in the Chao Phraya River Basin, Thailand”
- ㉓ W. Kim, Y. Agata, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : International Association of Hydrological Sciences, Maastricht. Netherlands(2001)
 “Hydrological simulation by SiB2-Paddy in Chao Phraya river basin, Thailand”
- ㉔ W. Kim, H. Lee, Y. Agata, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : The Ecological Society of Korea, Wonjoo, Korea(2001)
 “The Effect of the Expansion of Agricultural Area on Decreasing Runoff in the Chao Phraya River Basin, Thailand”
- ㉕ W. Kim, Y. Agata, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : 2001 Workshop on GAME-T in Thailand , Phuket, Thailand(2001)
 “Effect of a paddy field to the energy and water balance in Chao Phraya river basin, Thailand”
- ㉖ 渡辺 力 : 日本農業気象学会講演要旨、149 (D509) (2001)
 「Large Eddy Simulationによる群落乱流構造の解析」

- ② 渡辺 力：水文・水資源学会広域乱流研究会（甲府(2001)
「キャノピー乱流へのLESの適用」
- ③ 平林由希子、鼎 信次郎、虫明功臣、沖 大幹：2002年秋季大会講演予稿集、日本気象学会、82, p452(2002)
「降水の変動特性が陸域水収支へ及ぼす影響についての数値実験」
- ④ 平林由希子、鼎 信次郎、沖 大幹、虫明功臣：水文・水資源学会2002年研究発表会要旨集、水文・水資源学会、120-121(2002)
「AGCMにおける降水量の変動特性が陸域水収支に与える影響」
- ⑤ 飯塚 悟、近藤裕昭：日本建築学会関東支部研究報告集、645-648(2002)
「CO₂排出・吸収問題の最近の動向」
- ⑥ 飯塚 悟：日本建築学会関東支部研究報告集、661-664(2002)
「LESのSGSモデリングの動向—dynamic mixedモデルの新しい展開—」
- ⑦ 飯塚 悟、近藤裕昭：日本流体力学会年会2002、338-339(2002)
「各種SGSモデルによる山岳地形上流れのLES」
- ⑧ 飯塚 悟、近藤裕昭：第4回非静力学モデルに関するワークショップ、23-24(2002)
「山岳地形上流れのLES（その2）各種SGSモデルの比較」
- ⑨ 石井弘明、小林 剛、田畑あずさ、隅田明洋、原 登志彦、高橋耕一：第49回日本生態学会大会（2002年3月27日）(2002)
「林床チシマザサの除去がダケカンバ林の水分動態に与える影響」
- ⑩ 小林 剛、石井弘明、田畑あずさ、隅田明洋、原 登志彦、植村 滋、高橋耕一、半場裕子、中谷暢丈、及川真平：第49回日本生態学会大会（2002年3月27日）(2002)
「林床チシマザサの除去がダケカンバ林冠葉のフェノロジーを変える—土壤条件の変化と個葉～シュートレベルでの光合成生産—」
- ⑪ 鯨岡啓輔、原登志彦、隅田明洋、小野清美、秋林幸男、植村 滋：2002年度日本生態学会北海道地区大会（2002年12月14日）(2002)
「北海道におけるダケカンバのアロメトリーとその季節変化」
- ⑫ 本谷 研、増田耕一、高田久美子、沖 大幹：2002年秋季大会講演予稿集、日本気象学会、82, P368(2002)
「グローバルな水収支は降水量計捕捉率補正を考慮した場合どう変わるか？」
- ⑬ 及川真平：第49回日本生態学会大会（2002年3月27日）(2002)
「林床チシマザサの除去がダケカンバ林冠葉のフェノロジーを変える—土壤条件の変化と個葉～シュートレベルでの光合成生産—」
- ⑭ 小野清美、田畑あずさ、鯨岡啓輔、加藤京子、隅田明洋、植村 滋、原 登志彦：第50回日本生態学会大会（2003年3月22日）(2003)
「ダケカンバ林冠葉の光合成活性などの季節変化—林床のササ除去区と非除去区の比較」
- ⑮ 田畑あずさ、小林 剛、石井弘明、隅田明洋、原 登志彦、植村滋、高橋耕一、小川健一、江藤典子、田中亮一、田中 歩：第49回日本生態学会大会（2002年3月27日）(2002)
「ダケカンバの光合成機能の環境ストレスに対する応答」
- ⑯ 戸田 求、渡辺 力：2002年 CGER フラックスリサーチミーティング、P-50(2002)
「Large eddy simulation (LES) を用いた大気境界層における乱流輸送特性」
- ⑰ 渡辺 力：日本気象学会予稿集、221 (P118(2002)

「LESによるキャノピー乱流構造の解析」

- ④ 渡辺 力：日本農業気象学会講演要、257 (PA15) (2002)
「植生動態を含む陸面過程の多層モデル-MINoSGI」
- ④ 渡辺 力：日本農業気象学会フラックス観測・評価研究部会、48-52 (2002)
「Large Eddy Simulationによるフラックス測定手法に関する検討. フラックス観測の最近の進歩」
- ④ T. Watanabe, M. Yokozawa, S. Emori, K. Takata, A. Sumida, and T. Hara : Proc. VIII INTECOL, 285-286(2002)
“Developing a multilayered integrated numerical model of surface physics--growing plants interaction, MINoSGI”
- ④ 渡辺 力：2002年 CGER フラックスリサーチミーティング、P-4 (2002)
「長時間スケールにおける植生--大気相互作用のモデリング」
- ④ 安田幸生、渡辺 力、岡野通明：関東の農業気象、28, 33-34 (2002)
「個葉のCO₂交換から樹冠レベルのCO₂交換へのスケールアップ」
- ④ 安田幸生、渡辺 力：2002年 CGER フラックスリサーチミーティング、P-35 (2002)
「個葉の光合成パラメータと葉群光合成速度の季節変化」
- ④ Y. Hirabayashi, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiake : IUGG/IAHS Conf., Sapporo (2003)
“Analysis of simulated hydrological budget sensitivity to temporal characteristics of precipitation”
- ⑤ 飯塚 悟：日本建築学会関東支部研究報告集 (2003)
「LESのSGSモデリングの動向 (その2) dynamic SGSモデルの問題点と scale-dependence を考慮した dynamic SGSモデル」
- ⑤ 飯塚 悟、近藤裕昭：第18回NSTシンポジウム、41-47
「各種渦粘性型SGSモデルによる複雑地形上流れのLES」
- ⑤ S. Iizuka, and H. Kondo : 8th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ2003), Tsukuba, Japan, 42
“Numerical Prediction of Wind Environment over Complex Terrain”
- ⑤ S. Iizuka and H. Kondo : 11th International Conference on Wind Engineering (11ICWE), Texas, USA. (2003)
“Large Eddy Simulations of Turbulent Flow over Complex Terrain”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

10. 成果の政策的な寄与・貢献について

なし