

## B-1 地球温暖化に係わる二酸化炭素・炭素循環に関する研究

### (9) 局地二酸化炭素循環のモデル開発に関する研究

研究代表者 運輸省気象庁気象研究所応用気象研究部第1研究室 佐藤康雄

#### 気象庁気象研究所

気候研究部 第一研究室 馬淵和雄

第二研究室 千葉 長、小出 孝、柴田清孝

応用気象研究部 第一研究室 佐々木秀孝、里村雄彦、足立万代、山本 哲

(委託先) 筑波大学生物科学系 及川武久、三枝信子

平成5-7年度合計予算額 14,685千円

(平成7年度予算額 4,633千円)

[要旨] 3次元気候モデルに組み込む事を前提として開発した簡略化陸面植生モデルについて、単独での検証を行った。本モデルは、C3植物及びC4植物の光合成過程を陽に表現している。筑波大学水理実験センターの草原圃場における観測値を用いて、C3草本及びC4草本に対する検証を行い、より精密にモデルの精度の確認を行った。一般的には、モデルによって計算された熱、水、二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）の流量は観測値と良く一致した。特に、正味のCO<sub>2</sub>の流量にはC3、C4植物に対するパラメータの違いが明らかに影響している事が分かった。モデルで使用している陸面植生の生理的・形態学的パラメータに関する感度実験を実施し、各パラメータの値に対するモデルの応答を調べた。各パラメータの値を±50% 変化させた場合、正味放射量、顕熱流量、潜熱流量及び地中熱流量の平均値の基準実験の値との差の最大値は、それぞれ±15W/m<sup>2</sup>(±11%), ±8W/m<sup>2</sup>(±103%), ±9W/m<sup>2</sup>(±7%)及び±1W/m<sup>2</sup>(±112%)であった。また、CO<sub>2</sub>流量の平均値の基準実験との差の最大値は、C3パラメータに対して±5mol/m<sup>2</sup>/s(±68%)、C4パラメータに対して±7mol/m<sup>2</sup>/s(±118%)であった。さらに、土壌水分量の違いが、各熱流量及びCO<sub>2</sub> 流量に大きな影響を与える事も確認する事ができた。

草原圃場においてCO<sub>2</sub>と水蒸気の流量を傾度法を用いて測定した。この圃場は31種の草本から成っており、そのうち8種はイネ科のC4植物に属している。地上の植物現存量も生育期間について測定がなされた。春先には、ヒロハウシノケグサ (C3) がこの草原圃場で優占していた。盛夏期にはC4植物のチガヤとメリケンカルカヤが優占するようになった。開発した多層キャノピーモデルはこの草原上のCO<sub>2</sub>と水蒸気の流量の観測された日変化、季節変化をよく再現した。さらに、大気と陸上生態系間のCO<sub>2</sub>と水の交換を評価するための多層キャノピーモデルを開発した。このモデルはC3、C4植物の気孔・光合成応答の違いを考慮したものである。キャノピーの光合成と蒸発散に関するC3、C4キャノピーの応答特性の違いをいくつかの数値実験の結果によって議論した。

[キーワード] 気候モデル、生物圏モデル、二酸化炭素フラックス、C3草本、C4草本

## その1. 気候モデル組み込み用簡略化陸面植生モデルの開発と検証 (気象研究所)

### 1. 序

二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の循環機構及び収支の解明は、地球温暖化現象の研究において特に重要な基礎的課題である。その中でも、現時点でも依然として解決していないと考えられるCO<sub>2</sub>のミッシングシンク(人為起源の二酸化炭素の収支の不明; IPCC<sup>1)</sup>(1994)第2次報告書では行き先はある程度特定できるから、ミッシングシンクという言い方は不相当であると述べている。)は、我々がCO<sub>2</sub>の循環についての確かな知見を有していないことを示している。この問題の解明ぬきには、温暖化現象の将来像についての精度の高い予想をすることは難しい。CO<sub>2</sub>の循環には生態系が深く関与しているが、その関与の仕方は局地的な気象・気候に大きく影響を受ける。そのため、局地的なスケールの気象・気候を精度よく表現した上でCO<sub>2</sub>循環を扱う必要がある。

本研究では、陸上生態系を含む地表面過程と局地的気象の関係を数値モデル化し、CO<sub>2</sub>のフラックスを求め、局地的なCO<sub>2</sub>の大気中濃度の時間変化を日変化の段階から数値的に再現し、結果として大気中に残るCO<sub>2</sub>の量を評価することを目的とする。それによって、ミッシングシンクの解明の候補として考えられている、各種要因の役割やその重要性の相対的大きさの評価が可能になるものと期待される。

### 2. 研究方法

精度の良いマルチネスティッド局地気候モデルを開発する。そのモデルに植生を含む地表面過程モデルを開発して組み込み、陸上生態系と局地気象の係わりの中で、CO<sub>2</sub>のフラックスを陽に扱うモデルを開発する。また、そのモデルを用いて数値実験を行い、局地的なCO<sub>2</sub>の収支を調べる事を通して、ミッシングシンクの解明の候補と考えられている各種要因の役割やその重要性の相対的大きさを検討する。気象研究所においては3次元局地気候モデルに組み込み可能な簡略化地表面過程モデル(キャノピー層は2層、土壌3層)を開発テストすることと、それを用いた長時間積分を行う。筑波大学生物科学系では筑波大学水理実験センターの圃場の草原群落における観測と多層キャノピーモデルの開発テストを行う。この多層精密モデルと、気象研究所が開発している局地気候モデル組み込み用の簡略化地表面過程モデルに同一の群落条件を与え、結果を比較することにより簡略化モデルのパラメータの妥当性を検証することができる。

### 3. 結果

最初に、開発した簡略化陸面植生モデルの概念図を図1に示す。我々はこのモデルを生物圏-大気圏相互作用モデル(Biosphere-Atmosphere Interaction Model; 以後BAIMと略記)と呼んでいる。BAIMは2層の植物層、3層の土壌から成っている。BAIMは大気-地表面間の熱フラックスを扱うだけでなく、陸上生態系の光合成、呼吸作用によるCO<sub>2</sub>の吸収・放出に関わるCO<sub>2</sub>フラックスをも陽に表現する。BAIMはまた地表面での積雪・融雪過程、土壌中の水分の凍結・融解をも時間の関数として扱っている。図1の左側の経路が潜熱とCO<sub>2</sub>の経路、右側が顕熱の経路である。このモデルでは、C3とC4植物の光合成過程の違いが表現されている。すなわち、草本にはC3C4の2種類があり、それらは温度と乾燥度に対する光合成作用の違いとして特徴づけられ、C3植物に比べてC4植物は高温乾燥の条件でも相対的に活発な光合成作用を行うことが知られている。つま

り、中緯度育ちのC3植物に対して、C4植物は熱帯育ちといえる。生態系と大気間のH<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>のフラックスに密接に関係しているキャノピーと地表面植生の全体としての気孔抵抗が個葉の気孔抵抗を積分することによって得られる。BAIMの上部境界条件は大気境界層内のある高さでの大気変数で、気温、水蒸気圧、CO<sub>2</sub>濃度、風速、大気下端での下向き日射、下向き赤外放射、降水量強度で下部境界条件は最深部（第4層）の土壌温度である。BAIMの予報変数は表1に挙げられている大気境界層中の温度と湿度である。しかし、これらが積雪のあるなしによって、取扱が3通りに分かれている。植物圏と大気圏との間の熱とCO<sub>2</sub>のフラックスは電気の類推、すなわち、フラックス=電位差/抵抗という形で表現される。各種抵抗とフラックスの関係が図1に示されている。各々の抵抗、フラックスの求め方については紙面の都合で省略する。

このBAIMに大気側の境界条件を与えることにより、モデルの振舞いの検証を行った。検証には筑波大学水理実験センターの草原圃場における観測データを用いて、C3草本及びC4草本に対する検証を行い、より精密にモデルの精度の確認を行った。一般的に言えば、モデルによって計算された潜熱、顕熱、CO<sub>2</sub>のフラックスは観測値と良い一致を示した。特に正味のCO<sub>2</sub>のフラックスに対してC3草本に対するパラメータを用いた場合と、C4草本に対するパラメータを用いた場合で、明らかな違いがあることが分かった。また、モデルで使用している陸面植生の植物生理学的・形態学的パラメータに関する感度実験を実施し、各パラメータの値に対するモデルの応答について確認した。モデルの検証に使われたデータは猛暑であった1994年に筑波大学水理実験センターの草原圃場で得られた観測値である。表2にこの年の6月から9月にかけてのC3、C4植物の占有率の月平均値、全体の葉面積指数、全面積を植生が覆っている割合、キャノピー（草）上端の高さが示されている。（詳細は本稿その2、筑波大学生物科学系担当分参照）

この検証には1994年の6月から9月の各月からそれぞれ数日が選ばれた。各月で比較実験に使われた日の全降水量は、6月0.0mm、7月11.6mm、8月0.1mm、9月97.1mmであった。C3とC4草本のモデルの応答の違いを調べるために各々の月に対してC3、C4草本それぞれに対するパラメータを用いた実験を行った。これらの実験においては、キャノピー植生だけが存在し、地表植物はないと仮定した。数値積分の時間間隔は1時間である。上記の植生パラメータを用い、表3に示される主要なパラメータの値を用いて観測と計算結果を比較した基準実験の結果について簡単に述べる。

図2は8月の熱、水、CO<sub>2</sub>のフラックスの観測値とモデル計算値である。モデル計算値にはC4植物に対するパラメータを用いている。一般的には、モデルによって計算された正味の放射の溜りに対する潜熱フラックスの比は観測のそれと一致している。正味のCO<sub>2</sub>の植物による吸収量は、観測値はかなりバラついているが、その平均的傾向は計算値と対応している。モデルによって計算されたボーエン比は午前中は観測値と一致したが、午後はモデルの顕熱フラックスが小さいため観測値よりも小さめだった。モデルによって計算された正味の放射の溜りに対する土壌中への熱フラックスの比は放射の溜りの大きい部分で観測値に比べてわずかに大きかった。これは6月の結果（図省略）でも同じである。

図3は8月の場合についてキャノピー温度と全体のアルビードの観測値と計算値である。地表温度の計算値も示されている。8月には、地面は殆ど草で覆われていたので、地面温度よりもむしろキャノピー温度の計算値が観測された温度と一致した。モデルによって計算された全体のアルビードは8月の観測値と一般的には一致した。

さらに、モデルで使用している陸面植生の生理的・形態学的パラメータに関する感度実験を実

施し、各パラメータの値に対するモデルの応答について確認した。その結果の一部を表4に示す。各パラメータの説明は表3を参照してほしい。各パラメータの値を±50% 変化させた場合、正味放射量、顕熱流量、潜熱流量及び地中熱流量の平均値の基準実験における値との差の最大値は、それぞれ±15W/m<sup>2</sup>、±8W/m<sup>2</sup>、±9W/m<sup>2</sup> および±1W/m<sup>2</sup>であった。また、CO<sub>2</sub>フラックスの平均値の基準実験との差の最大値は、C3パラメータに対して±5μmol/m<sup>2</sup>/s、C4パラメータに対して±7μmol/m<sup>2</sup>/sであった。逆に他のパラメータとの比較において、大きな影響を示さなかったパラメータとしては、葉の角度分布、葉の長さ、土壤最深部（第4層）の温度が挙げられる。また、土壤水分量の違いが、各エネルギーフラックスおよびCO<sub>2</sub>フラックスに大きな影響を与えることも確認することができた（表省略）。

#### 4. まとめ

3次元気候モデル組み込み用の生物圏-大気圏相互作用モデル（BAIM）を開発した。BAIMはキャノピー2層、土壤3層から成っており、各々の層の温度と層中の水分が時間の関数として計算される。地面が雪で覆われているときには、最大3層の雪の層の温度と層中の雪・水の量が時間の関数として計算される。BAIMは陸上生態系と大気間のエネルギーフラックスだけではなくCO<sub>2</sub>フラックスをも評価する。モデルにはC3植物とC4植物に対する光合成過程の違いが表現されている。BAIMはまた地表面の積雪・融雪過程と土壤中の水分の凍結・融解をも時間の関数として計算する。一点観測ではあるが草原圃場での微気象学的観測を用いて、雪のない条件でBAIMを単独で検証した。一般的には、モデルによって計算された熱、水、CO<sub>2</sub>のフラックスは観測のそれと良く一致した。特に、正味のCO<sub>2</sub>のフラックスに対してC3草本に対するパラメータを用いた場合とC4草本に対するパラメータを用いた場合で、明かな違いがあることが分かった。

さらに、モデルで使用している陸面植生の生理的・形態学的パラメータに関する感度実験を実施し、各パラメータの値に対するモデルの応答について確認した。各パラメータの値を±50% 変化させた場合、正味放射量、顕熱流量、潜熱流量及び地中熱流量の平均値の基準実験における値との差の最大値は、それぞれ±15W/m<sup>2</sup>、±8W/m<sup>2</sup>、±9W/m<sup>2</sup>および±1W/m<sup>2</sup>であった。また、CO<sub>2</sub>フラックスの平均値の基準実験との差の最大値は、C3パラメータに対して±5μmol/m<sup>2</sup>/s、C4パラメータに対して±7μmol/m<sup>2</sup>/sであった。逆に他のパラメータとの比較において、大きな影響を示さなかったパラメータとしては、葉の角度分布、葉の長さ、土壤最深部（第4層）の温度が挙げられる。但し、前2者については、テストが草原についてのものであることを指摘しておかなければならない。今回は実行できていないが、森林の場合には当然別の結果がでる可能性がある。また、土壤水分量の違いが、各エネルギーフラックスおよびCO<sub>2</sub>フラックスに大きな影響を与えることも確認することができた。

これまでに行ったモデルの検証としては本稿で述べた中緯度の草原圃場、北米大陸の落葉広葉樹林（佐藤他<sup>2)</sup>、1995）で、これまでの所、BAIMは検証に耐え得る良好な結果を示している。しかし、言うまでもなく、BAIMの検証を他の植物種についても行っていく必要がある。雪と氷の取扱についても検証が必要である。適切な観測データが十分にあるわけではないが、今後それらの検証を可能な限り行っていく予定である。現在、このBAIMを3次元局地気候モデル（解像度ΔX=30km）に組み込む作業を行っている。今後、この3次元局地気候モデルを日本列島域に適用し、日本列島上空のCO<sub>2</sub>濃度の日変化、季節変化の再現実験を行うことを計画している。

## その2. 陸上植生の多層キャノピーモデルの開発と検証 (筑波大学 生物科学系)

### 1. 序

大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度の系統的観測の結果、CO<sub>2</sub>濃度は季節変化を伴いながら増加を続けていることがわかっている(Keeling et al.<sup>3)</sup>, 1989)。地球大気が形成されて以来、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は自然的要因によって変化してきたが、産業革命以後の急激な濃度の増加は、化石燃料の大量消費や、森林伐採などの人間活動の影響であると考えられている。しかし、地球上の炭素循環に対するわれわれの理解は、全球規模でのCO<sub>2</sub>の収支を定量的に説明できるまでには至っていない。特に、陸上生態系-大気間、海洋-大気間のCO<sub>2</sub>交換過程にはまだ未説明の問題が多く残されている。

大気中のCO<sub>2</sub>濃度の経年変化は、規則的な季節変化を伴っており、これは主として北半球の陸上生態系の光合成活動の季節変化を反映したものと考えられている。近年では、CO<sub>2</sub>濃度の季節変化の振幅が年々増加傾向にあること(Keeling et al.<sup>3)</sup>, 1989)、エルニーニョや南方振動のような3~10年程度の時間スケールをもつ気候変動や火山の大噴火のような突発的な事件とCO<sub>2</sub>濃度の不規則な変動成分とが相関をもつこと(Nakazawa et al.<sup>4)</sup>, 1991)などが示されるようになってきた。日射量・降水量・気温などの気象条件の変動は、陸上または海洋生態系の光合成や呼吸速度に影響を及ぼすことが予想される。近年のこれらの研究成果は、生態系の応答が全球規模での大気CO<sub>2</sub>濃度の変動に大きく寄与している可能性があることを示唆している(中澤<sup>5)</sup>, 1993)。しかし現在では、実際に寄与の大きい生態系を特定し、その応答のメカニズムを明らかにすることは、まだきわめて困難である。

さて、陸上植物は光合成経路の違いにより、大きくC<sub>3</sub>植物・C<sub>4</sub>植物・CAM植物の3つに分けることができる。C<sub>4</sub>植物は、C<sub>3</sub>植物に比べて光合成適温が高く、また耐乾性が強いため、サバンナなど中・低緯度の草原で非常に優勢である。C<sub>4</sub>植物は、気孔開度を小さくしても、あるいは大気中のCO<sub>2</sub>濃度が低下しても、効率よく光合成を行うことができる。その結果、大気との二酸化炭素・水交換過程においてC<sub>3</sub>植物とは異なる応答を示す。そこで地球の環境条件の変化、特に気温の上昇やCO<sub>2</sub>濃度の増加に伴う草原生態系-大気間の二酸化炭素・水交換の応答を理解するためには、C<sub>3</sub>植物・C<sub>4</sub>植物の短期的な光合成・気孔応答の違いをはじめ、草原群落の種別バイオマスの季節変化や年々変化、さらにそれぞれの植物種の分布域の変化などの問題を明らかにしていく必要がある。

そのために、まず詳細な観測データの得られる群落において群落上のCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>Oフラックスの野外観測を行い、さらに観測された各フラックスの気象要因依存性を詳細に再現しうるモデルを開発・検証することは、今後の植生-大気間のCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O交換に関する相互作用を明らかにしていく上で、きわめて重要な課題である。筑波大学の研究グループでは、1992年度以降、30種を越える草本種から成る草原群落を対象として、種別の現存量調査を行うとともに、群落-大気間のCO<sub>2</sub>交換量の観測を行ってきた。本報告では特に、冷夏であった1993年と猛暑になった1994年の生育期において、植物のバイオマスと群落上のCO<sub>2</sub>フラックスの季節変化を観測した結果と、数値モデル計算の結果について報告する。

## 2. 観測場所と観測方法

### (1) 観測場所と気象条件

筑波大学水理実験センター内にある半径約80mの円形の草原において、1993年と1994年の生育期に植物の種別現存量の調査を行った。まず、水理実験センターで観測された日射量と気温の月平均値、および月降水量を図4a～cに示す。1993年は1994年に比べて、日射量が7～8月に約6 MJ/m<sup>2</sup>/d 日射が少なく、気温は4～5℃低温であった。

### (2) 地上部現存量と葉面積指数の調査方法

1993年4月～9月および1994年4月～11月の期間に植物種別の現存量を調査した。群落は多種の草本種により形成されており、調査には次の方法を用いた。まず、月1～2回、2×2mのコドラート約160個ごとの優占種の被度を記録し、そのうち約10カ所において50×50cmの面積内の地上部をすべて刈り取り、現存量と被度との回帰関係を求めた。次に、得られた現存量－被度の関係を用いて調査地内の種別の現存量を推定した。また、葉面積指数(LAI)は、各月ごとに、種別の比葉面積(葉面積/葉重比)を求め、葉重の測定結果からLAIを計算した。

### (3) 草原群落上のCO<sub>2</sub>フラックスの観測方法

植物群落上のCO<sub>2</sub>フラックスの測定を1993年8月～10月、および1994年4月～11月に行った。CO<sub>2</sub>フラックスは傾度法に基づき、大気安定度を考慮して、群落上のCO<sub>2</sub>濃度勾配と水理実験センターにおける超音波風速計の観測データを用いて計算した。

CO<sub>2</sub>濃度勾配は、群落上の2高度(z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub>)の空気を、ビニールチューブにより赤外線ガス分析計(富士電機 ZFU)に流量1 l/minで流して測定した。CO<sub>2</sub>濃度測定高度は、群落高の季節変化に応じて、z<sub>1</sub> = 0.4～1.0m, z<sub>2</sub> = 1.6～2.0m の範囲で変化させている。また、水理実験センターで常時観測している正味放射量、顕熱、地中伝導熱のデータを解析に用いた。

## 3. 多層キャノピーモデル

次に、群落－大気間のCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O交換過程の環境要因依存性を解析するために開発された多層キャノピーモデルについて述べる。このモデルは、Kondo and Watanabe<sup>6)</sup>(1992)の多層キャノピーモデルに堀江<sup>7)</sup>(1981)にもとづく気孔・光合成モデルを組み込み、C<sub>3</sub>植物とC<sub>4</sub>植物の光合成・気孔応答の違いを取り入れたものである。モデルは群落内外を数十層に分け、各高さでの風速・気温・比湿・放射エネルギー、および各高さの大気と個葉との間の運動量・熱・CO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O交換量を計算する。

個々の葉の気孔抵抗は、従来の研究により光合成有効放射量、葉面－大気の湿度差、気温、細胞間隙のCO<sub>2</sub>濃度などに依存して変化することが報告されているが、第一次近似的には光合成有効放射量の関数であると考えられ、ここでは、堀江<sup>7)</sup>(1981)による実験式を用いた。実験式に必要とされるパラメータの値は、C<sub>3</sub>植物(ヒロハウシノケグサ)とC<sub>4</sub>植物(チガヤ)について、それぞれスーパーポロメータを用いて野外で気孔抵抗を実測した結果をもとに決定した。また、堀江<sup>7)</sup>(1981)によれば、個々の葉の単位葉面積あたりのCO<sub>2</sub>吸収量(みかけの光合成速度)は個葉に隣接する大気のCO<sub>2</sub>濃度、CO<sub>2</sub>補償点、CO<sub>2</sub>の拡散に対する葉面境界層抵抗と気孔抵抗、葉肉抵抗(残差抵抗とも呼ばれる)等の関数とされる。ここで、C<sub>3</sub>植物についてはCO<sub>2</sub>補償点を葉温

の関数とし、C4植物については光呼吸がないと考えてCO<sub>2</sub>補償点 =0ppmvとした。以上に述べた気孔・光合成モデルにおいて、C3植物はC4植物に比べて低温領域で光合成速度が高いことが表現されている(図省略)。暗呼吸速度と土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度は、それぞれ葉温および土壌面の温度の関数とした。土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度については、圃場での密閉法による土壌呼吸速度の観測結果をもとにパラメータの値を決めた。

多層モデルに入力する境界条件には、水理実験センターにおける観測データから、高度1.6mでの風速、気温、水蒸気圧、CO<sub>2</sub>濃度、全天日射(1時間平均値)の観測値を用いた。長波放射量には、高層気象台における観測データを用いた。また、群落の高さやLAIには各月の現実の草原の観測値を与えた。モデルでは、各層での放射の吸収・射出、個々の葉と各層の大気の間での運動量・エネルギー・H<sub>2</sub>O・CO<sub>2</sub>の交換量、および群落内外のこれら環境要素の鉛直分布を計算する。

#### 4. 結果

##### (1) 植物種別の葉面積指数(LAI)の季節変化

調査を行った草原において認められた植物は合計31種、このうちイネ科が11種を占めた(表省略)。C3植物は23種、C4植物はすべてイネ科で8種であった。図5a, bに種別のLAIの季節変化を示す。1993年、1994年ともに、4~6月にかけては寒地型牧草であるヒロハウシノケグサ(*Festuca elatior*; イネ科)をはじめとするC3植物が急速に成長した。ヒロハウシノケグサは、6月後半に出穂・開花し、その後地上部が枯れてLAIは減少した。このような、気温の上がる夏季に地上部が枯れる現象は、夏枯れと呼ばれる寒地型牧草に広く見られる現象である。一方、気温が上昇した7~8月にかけては、C4植物のメリケンカルカヤ(*Andropogon virginicus*)、チガヤ(*Imperata cylindrica*)のLAI増加が著しかった。

群落の優占種がC3植物からC4植物へ移り変わる時期は、1993年では7月から8月の間に、1994年では6月から7月の間に顕著に見られた。また、1994年の7月にはLAIは順調に増加したが、冷夏であった1993年の7月には、特にC4植物の増加が抑えられる傾向にあった。

1993年および1994年の9月で比較すると、草原全体の現存量とLAIは、それぞれ454g/m<sup>2</sup>、3.4(1993年)、542g/m<sup>2</sup>、4.5(1994年)であり、1994年の方が現存量でおよそ20%高い値を示した。また、3種の優占種について、各年に観測された最大のLAIの値を比較すると、1993年に比べて1994年ではC3植物は42%減少し、C4植物は32%増加した。

##### (2) 群落上CO<sub>2</sub>フラックスの日変化とモデル計算の結果

図6に、1993年8月22日、9月20日、10月11日に観測された各種気象要素とCO<sub>2</sub>フラックスの1時間平均値を示す。図7の上段には、高さ1.6mにおける大気中CO<sub>2</sub>濃度の時間変化を示す。CO<sub>2</sub>濃度は、明け方に400ppmvを越える高い値を示す。これは、夜間に植物と土壌からCO<sub>2</sub>放出があるためと、夜間に大気が安定になり、鉛直上方へのCO<sub>2</sub>の拡散が抑えられているためである。一方、日中は植物の光合成によるCO<sub>2</sub>の吸収と、大気の活発な鉛直混合の結果、群落上のCO<sub>2</sub>濃度は約350ppmvに近づく。

図6の下段には、各日に観測されたエネルギー収支の結果を示す。実線は群落が正味で吸収した放射量(正味放射量  $R_{net}$ )、破線は群落が大気を直接加熱するエネルギー(顕熱フラックス  $H$ )、点線は土壌を加熱するエネルギー(地中伝導熱  $G$ )である。一点鎖線は蒸発や蒸散など、

水の蒸発に使われるエネルギー（潜熱フラックス  $lE_{en}$ ）であり、この値は、水理実験センターにおけるルーチン観測データを用いて、熱収支の残差から求めた（ $lE_{en}=R_{net}-H-G$ ）ものである。白丸は、同じく潜熱フラックスであるが、これは水理実験センターに埋設されているライシメータのデータ（1時間積算値）に3時間の移動平均をかけて求めた値（ $lE_{ly}$ ）である。ライシメータは観測塔の西側約10mの地点に位置し、直径と深さは約2 m、土壌は不攪乱で植生は周囲の群落とほぼ類似である。 $lE_{en}$ と $lE_{ly}$ の値の違いには、観測誤差や観測圃場のエネルギー収支のアンバランスが含まれる。今回の観測では、 $lE_{en}$ と $lE_{ly}$ は、観測誤差の範囲内で一致するものとみなした。

図6の中段は、群落上のCO<sub>2</sub>フラックス( $F_c$ )を表わす。 $F_c$ の符号は、群落による吸収(下向き)を正とした。ここで、●はフラックス観測によって得られた値、実線と破線はモデル計算の結果で、実線は群落が全部C3植物と仮定して得られた値、破線は群落が全部C4植物と仮定して得られた値である。

日中、光合成速度は呼吸速度および土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度を上回るため、計算・観測結果共に、 $F_c$ は正（下向き）、夜間は植物・土壌からのCO<sub>2</sub>放出により負（上向き）となる。観測値と計算値を比較すると、8月の観測値はC4植物群落の計算値に近い値を示し、9月にはC3植物・C4植物どちらに近いとも判断できない状態、そして10月の観測値の日変化の形はC3植物に近いが、 $F_c$ の絶対値はC3植物の計算値より系統的に低い結果になった。このことから、次のような現象が推測される。まず、群落全体のCO<sub>2</sub>交換に対して、8月はC4植物が主として寄与しており、9月にはC4植物の寄与率は減少し、10月には主としてC3植物が寄与していた可能性がある。次に、10月に入ると、C3・C4植物共に葉のエイジングなどの理由により8月に比べると、個々の葉の光合成速度が低下していた可能性がある。

そこで、まず個々の葉の光合成速度の低下を第一次近似的に考慮するため、モデル計算において、8月以降、C3・C4植物は光合成に寄与する葉の葉面積を同じ速度で低下させた。1994年には、観測圃場で最も葉面積の多いチガヤの黄変した葉の割合を測定したが、モデル計算では全葉面積のうち光合成を行う葉の面積割合を、チガヤの観測データを参考にして、8月20日に100%、11月10日に50%となるように減少させた。

このように光合成に寄与する葉面積の低下を考慮した結果、1994年における全観測期間の $F_c$ および潜熱フラックスの観測値と計算値の比較（日平均値）は図7のようになった。ここで、+は群落がすべてC3植物であるとして計算した値、×はすべてC4であるとして計算した値、田はC3の計算値とC4の計算値を、C3とC4のLAIの比率を用いて重みづけ平均した値で、C3・C4混成群落の計算値である。これらの図から、C3・C4混成群落のCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O交換のモデル計算結果は、観測値をよく再現できることがわかる。

### （3）気象条件の年々変動と草原群落の応答のモデル解析

次に、1993年～1994年にかけて水理実験センターで得られた気象データを用いて、C3・C4植物群落のCO<sub>2</sub>およびH<sub>2</sub>O交換過程についての数値シミュレーションを行った。計算に用いた気象データはすべて1時間平均値である。また、モデル計算には実際に毎月観測された植物群落の葉面積と群落高度の値をもとに、葉面積と群落高の日々の値を推定して与えた。

図8に、観測とモデル計算で得られた潜熱フラックスの日平均値を示す。観測値はライシメー



タによる蒸発散量から計算した潜熱フラックス、計算値は群落上の潜熱フラックスと植物キャノピーの下の土壌面における潜熱フラックスを示した。これらの結果によると、まず3~4月にかけて入力放射量の増加に伴い蒸発散量は $50\text{W}/\text{m}^2$  ( $1.8\text{mm}/\text{day}$ )程度まで増加するが、蒸発散量の大部分は土壌面からの蒸発であることがわかる。5月以降は葉面積の増加に伴い、蒸発散量に対する土壌面蒸発の割合は低下し、7~8月には、蒸発散のほとんどは葉からの蒸散となる。蒸発散量のピークは1993・1994年ともに7~8月であり、ピーク値は $100\text{W}/\text{m}^2$  ( $3.5\text{mm}/\text{day}$ )を越える。

次に、モデル計算によるC3・C4植物群落上のCO<sub>2</sub>フラックスの季節変化を図9に示す。C3・C4植物群落のCO<sub>2</sub>吸収量の季節変化は、1993年と1994年では大きな違いが見られた。すなわち、1993年の生育期にはC3植物群落で $0.10\text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ( $8.6\text{gCO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ )、C4植物群落で $0.20\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ( $17\text{gCO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ )程度の活発なCO<sub>2</sub>吸収が計算されたが、1994年の7~8月にかけては、特にC3植物群落におけるCO<sub>2</sub>吸収量は大きく減少して負の値を示した。C4植物でも7~8月のCO<sub>2</sub>吸収量は6月に比べて減少した。この原因として、1994年の夏季が高温であったため、植物の暗呼吸速度と土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度が増加したこと、さらにC3植物では光呼吸が増加したため、個々の葉において正味のCO<sub>2</sub>吸収量が減少したことが考えられる。

## 5. まとめ

以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

(1) 筑波大学水理実験センターのC3・C4混成草原で、1993年と1994年に植物種別のLAIの季節変化を測定した結果、4~6月にかけてはイネ科の寒地型牧草であるヒロハウシノケグサ(*Festuca elatior*)をはじめとするC3植物が急速に成長し、気温が上昇した7~8月にかけては、C4植物のメリケンカルカヤ(*Andropogon virginicus*)、チガヤ(*Imperata cylindrica*)のLAI増加が著しかった。また、3種の優占種について、各年に観測された最大のLAIの値を比較すると、1993年に比べて1994年ではC3植物は42%減少し、C4植物は32%増加した。

(2) C3・C4植物の気孔・光合成応答の違いを考慮した多層キャノピーモデルを開発した。草原一大気間のCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O交換量に対するC3とC4植物の寄与率が、優占種のLAIのC3・C4の比率に等しいと仮定すると、C3・C4混成群落のCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O交換のモデル計算結果は、観測値をよく再現することができた。

(3) 多層キャノピーモデルを用いて、C3・C4植物群落上のH<sub>2</sub>O・CO<sub>2</sub>フラックスの季節変化のシミュレーションを行った。その結果、1994年の夏季に、C3植物群落のCO<sub>2</sub>吸収速度が顕著に抑制されたことが予想された。この原因は、1994年の7~8月が特に高温であったため、植物の暗呼吸速度と土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度が増加したこと、そして特にC3植物では光呼吸速度が増加したため、個々の葉において正味のCO<sub>2</sub>吸収量が減少したためと解釈される。

今後は、このような草原群落と大気との間のCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O交換過程が、気温や降水量などの気象条件の年による違いによってどのように影響を受けるか、また地球の温暖化やCO<sub>2</sub>濃度の増加によって陸上生態系がどのような影響を受けるかという点について、さらに研究を進めていきたい。

[引用文献]

- 1) IPCC, 1994: Radiative forcing of climatic change, IPCC.
  - 2) 佐藤康雄, 馬淵和雄, 及川武久, 三枝信子他, 1995: 地球温暖化に係わる二酸化炭素・炭素循環に関する研究, (9) 局地二酸化炭素循環に関する研究, 環境庁地球環境研究総合推進費平成6年度研究成果報告集(中間報告)(I) 195-199.
  - 3) Keeling, C.D., R.B. Bacastow, A. F. Carter, S. C. Piper, T. P. Wholf, M. Heimann, W. G. Mook and H. Roeloffzen, 1989: A three dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data. In: Aspects of climatic variability in the Pacific and the Western Americas. Peterson, D.H.(ed.), AGU Geophysical Monograph, 55, Washington, American Geophysical Union.
  - 4) Nakazawa, T., S. Aoki, S. Murayama, M. Fukabori, T. Yamanouchi, H. Murayama, M. Shiobara, G. Hashida, S. Kawaguchi, and M. Tanaka, 1991: The concentration of atmospheric carbon dioxide at the Japanese Antarctic Station, Syowa, Tellus, 43B, 126-135.
  - 5) 中澤高清, 1993: 大気中の炭酸ガス I - 濃度増加と人間活動 -, 気象研究ノート, 第181号, 67-89.
  - 6) Kondo, J. and T. Watanabe, 1992: Studies on the bulk transfer coefficients over vegetated surface with a multilayer energy budget model, J. Atmos. Sci., 49, 2183-2199.
  - 7) 堀江武, 1981: 気象と作物の光合成, 蒸散, そして成長に関するシステム生態学的研究. 農技研報告, 28, 1-181.
- Clapp, R.B. and G.M. Hornberger, 1978: Empirical equations for some soil hydraulic properties, Water Resour. Res., 14, 601-604.
- Dorman, J.L. and P.J. Sellers, 1989: A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB), J. Appl. Meteor., 28, 833-855.
- Dyer, A. J. and Hicks, B. B., 1970: Flux-gradient relationships in the constant flux layer, Quart. J. R. Met. Soc., 96, 715-721.
- Kondo, J., 1975: Air-sea bulk transfer coefficient in diabatic conditions, Boundary Layer Meteorol., 9, 91-112.
- 及川武久, 劉厦, 1993: 地球温暖化の草原生態系への影響の生理・生態学的解析, 大学等における地球圏-生物圏国際共同研究計画平成4年度成果報告書. 29-32.

[国際協同研究等の状況]

特になし

[研究発表の状況]

1. 論文

- Mabuchi, K., Y. Sato, H. Kida, N. Saigusa and T. Oikawa, 1996: Development and Tests of a Biosphere-Atmosphere Interaction Model (BAIM) for Use within Physical Climate Models, Global Biogeophysical Cycles, (submitted).
- Saigusa, N., S. Liu, T. Oikawa and T. Watanabe, 1996: Seasonal change in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange between grassland and atmosphere, Annales Geophysicae, (in press).

2. 学会発表

Mabuchi, K., Y. Sato, H. Kida, N. Saigusa and T. Oikawa, 1995: Development and Tests of a Biosphere-Atmosphere Interaction Model (BAIM) for Use within Physical Climate Models, First IGBP/GAIM Science Conference, Garmisch-Partenkirchen, Germany.

馬淵和雄、佐藤康雄、木田秀次, 1993: 植生によるCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を導入した陸地表面モデル (序報)、日本気象学会1993年秋季大会

馬淵和雄、佐藤康雄、木田秀次, 1994: 植生によるCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を導入した陸地表面モデル (II)、日本気象学会1994年秋季大会

馬淵和雄、佐藤康雄、木田秀次, 1995: 植生によるCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を導入した陸地表面モデル (III)、日本気象学会1995年秋季大会

馬淵和雄、佐藤康雄、木田秀次, 1996: 植生によるCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を導入した陸地表面モデル (IV) (積雪・融雪及び土壌内水分凍結・融解に関する検証)

表 1. 生物圏-大気圏相互作用モデル (BAIM) の予報変数

Symbol	Description
Tc	Canopy temperature
Tg	Ground cover temperature or snow surface temperature (= T1 in the absence of snow)
Ts	Temperature of the second snow layer
T0	Temperature of the bottom snow layer (= T1)
T1	Temperature of the surface soil layer (= Tg or T0)
T2	Temperature of the second soil layer
T3	Temperature of the third soil layer
Wwc, Wsc	Liquid water and snow (water equivalent) stored on the canopy leaves
Wwg, Wsg	Liquid water and snow (water equivalent) stored on the ground cover or in the surface snow layer
Wws, Wss	Liquid water and snow (water equivalent) stored in the second snow layer
Ww0, Ws0	Liquid water and snow (water equivalent) stored in the bottom snow layer
Ww1, Wi1	Liquid water and ice (water equivalent) content of the surface soil layer
Ww2, Wi2	Liquid water and ice (water equivalent) content of the second soil layer
Ww3, Wi3	Liquid water and ice (water equivalent) content of the third soil layer

表 2. 1994年、筑波大学水理実験センターの草原圃場における植生データの月平均値

	June	July	August	September
C3 grasses (%)	64	38	29	31
C4 grasses (%)	36	62	71	69
Total vegetation coverage (%)	70	90	100	100
Total leaf area index	2.0	3.0	3.7	4.0
Mean height of the canopy (cm)	50	75	75	75

表3. BAIMの検証に用いられている主要なパラメータの値。V<sup>c</sup>、Ll<sup>c</sup>、Z2 に対しては6月から9月までの各月の値が与えられた。Trn、Ref、Srf の値は Dorman and Sellers(1989) より、また土壌の水理学的パラメータの値は Clapp and Hornberger(1978) より得られた。

Symbol	Description	Values	Units	Q <sub>10</sub>
V <sup>c</sup>	Fractional area covered by the canopy (6, 7, 8, 9)	0. 7, 0. 9, 1. 0, 1. 0		
X <sup>c</sup>	Leaf angle distribution of the canopy	-0. 3		
Ll <sup>c</sup>	Leaf area index of the canopy (6, 7, 8, 9)	2. 0, 3. 0, 3. 7, 4. 0		
Z2	Height of the canopy top (6, 7, 8, 9)	50, 75, 75, 75	cm	
Z1r	Rate of the canopy bottom height to the canopy top height	0. 02		
Ls	Length scale of the canopy leaf	0. 01	m	
Ds1	Thickness of the first soil layer	0. 02	m	
Ds2	Thickness of the second soil layer	0. 48	m	
Ds3	Thickness of the third soil layer	3. 00	m	
Ds4	Thickness between the bottom of the third soil layer and the depth T4 is defined	1. 50	m	
Grn <sup>c</sup>	Green leaf fraction of total leaf area index of the canopy	0. 9		
Vcm	Maximum velocity of the carboxylase (C <sub>3</sub> )	200	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	2. 0
Vcm4	Maximum velocity of the carboxylase (C <sub>4</sub> )	40	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	2. 0
Kc	Michaelis-Menten constant for CO <sub>2</sub>	31. 0	Pa	2. 1
Ko	Michaelis-Menten constant for O <sub>2</sub>	16. 3	KPa	1. 2
Roc	Ratio of the maximum velocity of the oxygenase to that of the carboxylase	0. 21		
Qa	Leaf absorptance to PAR	0. 86		
Qef	Quantum efficiency for CO <sub>2</sub> uptake (C <sub>3</sub> )	0. 08	mol mol <sup>-1</sup>	
Qef4	Quantum efficiency for CO <sub>2</sub> uptake (C <sub>4</sub> )	0. 048	mol mol <sup>-1</sup>	
C4k	Initial slope of photosynthetic CO <sub>2</sub> response of C <sub>4</sub> plants	0. 7	mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	2. 0
Gsa	Stomatal conductance slope parameter (C <sub>3</sub> )	8		
Gsb	Minimum stomatal conductance (C <sub>3</sub> )	0. 01	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
Gsa4	Stomatal conductance slope parameter (C <sub>4</sub> )	3		
Gsb4	Minimum stomatal conductance (C <sub>4</sub> )	0. 08	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
Rdf	Standard respiration rate	1. 0	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	2. 0
Pmi	Minimum soil water potential root can extract	-1. 5	MPa	
Trn	Transmittances of canopy leaves (live; VIS, NIR)	0. 07, 0. 25		
	(dead; VIS, NIR)	0. 22, 0. 38		
Ref	Reflectances of canopy leaves (live; VIS, NIR)	0. 11, 0. 58		
	(dead; VIS, NIR)	0. 36, 0. 58		
Srf	Soil reflectances (VIS, NIR)	0. 10, 0. 20		
Cd	Drag coefficient of the canopy leaf	0. 37		
Z0g	Roughness length of the ground/groundcover	0. 005	m	
Ψ	Soil water potential parameter	7. 12		
Ks	Hydraulic conductivity of saturated soil	0. 2*10 <sup>-4</sup>	m s <sup>-1</sup>	
ψs	Soil water potential at saturation	-0. 086	m	
Po	Soil pore space	0. 42	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
T4	Deep soil temperature	13. 9	°C	

表4. 植生の生理的・形態学的パラメータの値の変化に対するモデルの応答実験結果。RN: 正味放射量、H: 顕熱流量、E: 潜熱流量、G: 地中熱流量、AT: 二酸化炭素吸収量、RES: 呼吸量、AB: 正味二酸化炭素流量 (AB=AT-RES)。“%”を付した値が百分率で表したそれぞれの基準実験との差。(+) : パラメータの値を50%増加させた場合、(-) : パラメータの値を50%減少させた場合。エネルギーフラックスの単位はW/m<sup>2</sup>、二酸化炭素フラックスの単位はμmol/m<sup>2</sup>/s。

		RN	%	H	%	E	%	G	%	AT	%	RES	%	AB	%
CONTROL		147.2		7.7		138.2		0.75		11.1		4.4		6.7	
V <sup>c</sup>	(+)	145.1	-1.4	6.3	-17.3	137.8	-0.3	0.43	-43.2	13.2	19.3	5.1	17.1	8.1	20.7
	(-)	150.6	2.3	10.3	34.7	138.2	0.1	1.41	87.9	6.8	-38.8	3.5	-20.3	3.3	-50.9
Grn <sup>c</sup>	(+)	149.0	1.3	7.7	0.7	140.0	1.3	0.75	-0.2	11.8	6.7	4.5	2.8	7.3	9.2
	(-)	137.4	-6.6	8.4	9.3	127.7	-7.6	0.78	3.7	6.8	-38.8	3.8	-13.3	3.0	-55.7
X <sup>c</sup>	(+)	147.7	0.4	7.8	1.9	138.5	0.2	0.82	9.3	10.9	-1.7	4.4	0.1	6.5	-2.9
	(-)	146.5	-0.4	7.5	-1.8	137.8	-0.3	0.68	-9.7	11.2	1.5	4.4	-0.1	6.8	2.5
Li <sup>c</sup>	(+)	146.2	-0.6	7.6	-0.2	137.7	-0.4	0.36	-51.8	12.6	13.9	5.1	15.2	7.5	13.0
	(-)	149.6	1.7	8.7	13.2	138.9	0.6	1.36	81.8	7.7	-30.9	3.7	-15.0	3.9	-41.3
Z2	(+)	148.2	0.7	4.3	-43.8	143.0	3.5	0.24	-68.1	11.2	1.4	4.3	-1.2	6.9	3.2
	(-)	144.9	-1.5	9.2	19.9	133.3	-3.5	1.82	143.1	10.8	-2.4	4.5	3.5	6.3	-6.3
Z1	(+)	146.4	-0.5	10.9	43.0	133.6	-3.3	1.32	76.4	11.0	-0.4	4.5	1.4	6.6	-1.6
	(-)	147.7	0.4	4.2	-45.1	142.5	3.1	0.41	-45.4	11.1	0.4	4.4	-1.0	6.8	1.3
Ls	(+)	146.9	-0.2	7.9	2.8	137.7	-0.3	0.76	1.4	10.9	-1.3	4.4	0.2	6.5	-2.3
	(-)	147.5	0.2	7.3	-5.2	138.9	0.5	0.74	-1.7	11.3	2.0	4.4	-0.2	6.9	3.4
Cd	(+)	146.4	-0.5	10.9	42.4	133.7	-3.3	1.23	64.2	10.9	-1.5	4.5	1.3	6.5	-3.3
	(-)	146.8	-0.2	6.0	-21.7	139.3	0.8	0.94	25.7	11.1	0.6	4.4	0.6	6.7	0.7
Z0g	(+)	147.6	0.3	4.8	-37.4	141.8	2.6	0.45	-39.8	11.1	0.3	4.4	-0.9	6.8	1.1
	(-)	145.7	-1.0	13.2	71.9	130.0	-5.9	1.92	156.1	11.0	-0.7	4.5	2.7	6.5	-3.0
Vcm	(+)	147.2	0.0	7.4	-3.4	138.5	0.2	0.75	-0.1	11.4	2.9	4.4	-0.1	7.0	4.9
	(-)	146.8	-0.2	9.1	19.4	136.3	-1.3	0.76	1.5	9.5	-14.3	4.4	0.4	5.1	-24.0
Kc	(+)	146.6	-0.4	10.0	31.2	135.2	-2.1	0.76	2.2	8.6	-22.3	4.4	0.6	4.2	-37.3
	(-)	147.7	0.3	5.5	-28.2	140.8	1.9	0.74	-1.3	14.5	30.7	4.4	-0.5	10.1	51.3
Ko	(+)	147.5	0.2	6.3	-17.7	139.8	1.2	0.74	-0.9	13.0	17.7	4.4	-0.3	8.7	29.6
	(-)	146.1	-0.7	12.3	60.6	132.5	-4.1	0.78	3.8	6.9	-37.3	4.4	1.2	2.5	-62.5
Rdf	(+)	147.1	-0.1	8.0	4.0	137.8	-0.3	0.75	0.4	11.1	0.5	6.6	50.1	4.5	-32.1
	(-)	147.2	0.1	7.4	-3.9	138.5	0.3	0.75	0.0	11.0	-0.5	2.2	-50.0	8.8	32.1
Qef	(+)	147.7	0.4	5.4	-29.3	141.0	2.0	0.74	-1.7	14.9	34.7	4.4	-0.5	10.5	57.9
	(-)	145.9	-0.9	13.4	75.4	131.1	-5.1	0.79	5.1	5.9	-47.0	4.5	1.4	1.4	-78.9
Gsa	(+)	147.9	0.5	4.4	-41.9	142.1	2.9	0.73	-2.1	11.9	7.6	4.4	-0.7	7.5	13.0
	(-)	145.3	-1.3	16.3	113.4	127.5	-7.7	0.81	7.7	8.3	-25.4	4.5	2.2	3.8	-43.6
T4	(+)	147.1	-0.0	7.7	0.3	138.2	0.0	0.68	-9.0	11.1	0.0	4.4	0.0	6.7	-0.0
	(-)	147.2	0.0	7.6	-0.3	138.1	-0.0	0.82	9.3	11.1	-0.0	4.4	-0.0	6.7	0.0
Trn	(+)	135.8	-7.7	2.5	-67.7	132.0	-4.5	0.77	3.3	11.4	2.9	4.3	-1.6	7.1	5.9
	(-)	155.0	5.3	11.5	50.9	142.1	2.9	0.74	-1.5	10.8	-2.7	4.4	1.1	6.3	-5.1
Ref	(+)	131.4	-10.7	0.6	-92.1	129.4	-6.3	0.76	1.5	11.5	4.2	4.3	-2.2	7.2	8.4
	(-)	162.3	10.3	15.0	96.7	145.9	5.6	0.76	1.6	10.6	-4.4	4.5	2.1	6.1	-8.7
Srf	(+)	141.1	-4.1	6.2	-19.6	134.0	-3.0	0.43	-42.2	11.1	0.1	4.4	-0.6	6.7	0.5
	(-)	153.1	4.0	9.1	19.5	142.3	3.0	1.06	41.0	11.1	-0.1	4.4	0.6	6.6	-0.5

ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

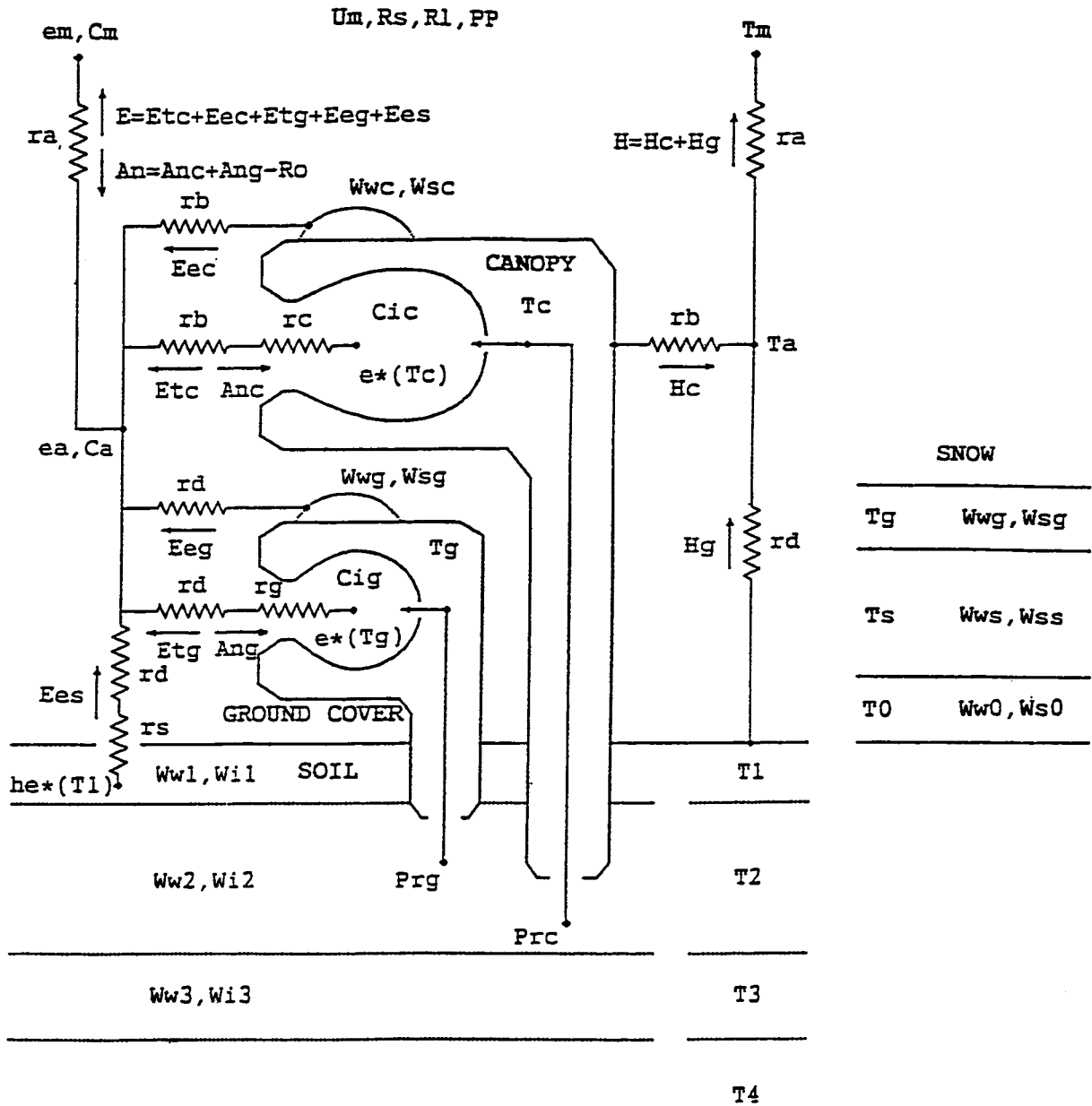


図1. 生物圏-大気圏相互作用モデル (The Biosphere-Atmosphere Interaction Model; BAIM) の概念図。左側は潜熱フラックス及び二酸化炭素フラックス、右側は顕熱フラックスを示している。

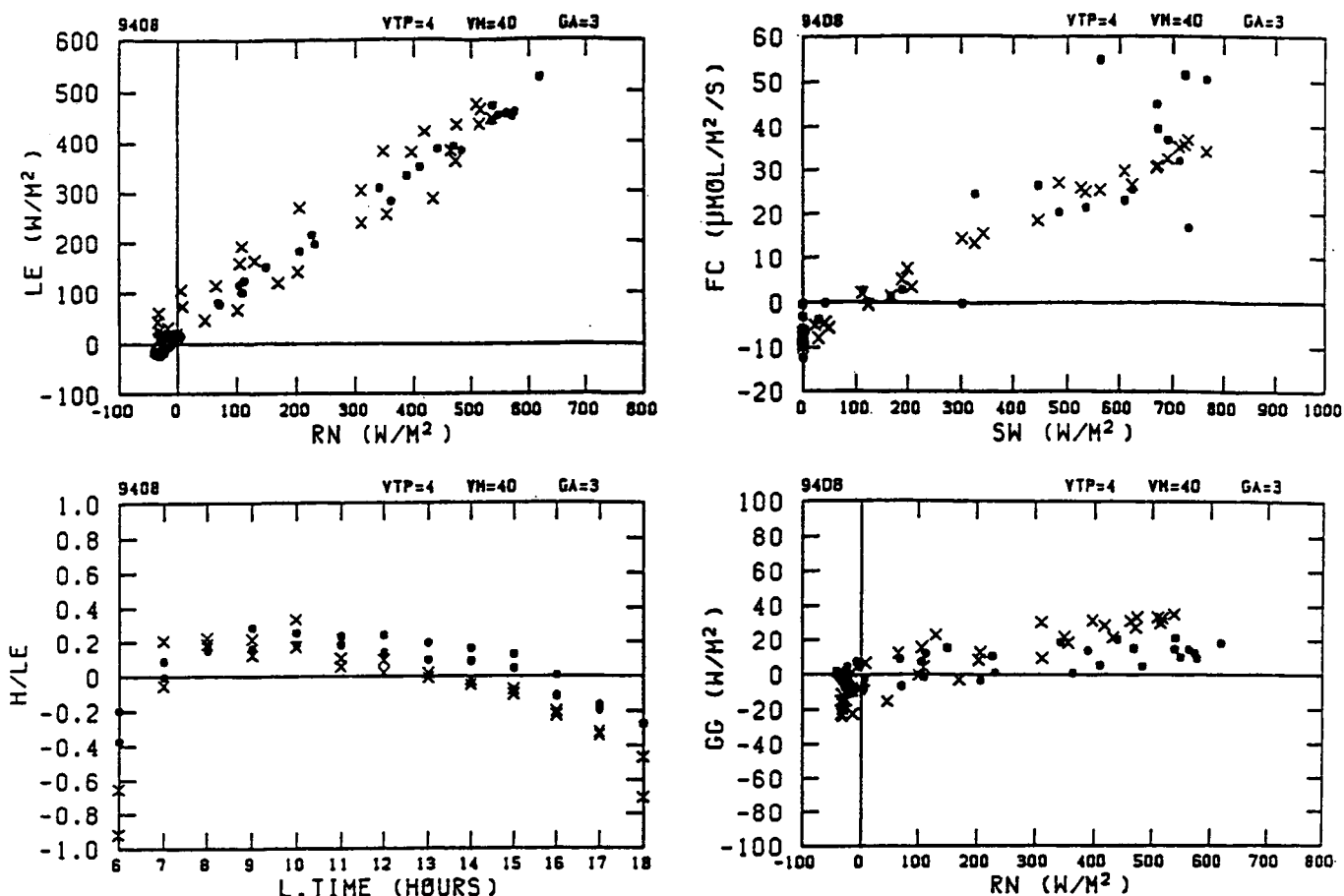


図2. 8月の潜熱、顕熱、二酸化炭素フラックスの観測値と計算値の比較。黒丸が観測値、×印がC4植物に対するパラメータを用いた計算値。LE; 潜熱フラックス (上向きが正)、RN; 正味の放射フラックス (下向きが正)、H/LE; ボーエン比、L.TIME; 地方時、FC; 正味の二酸化炭素フラックス (下向きが正)、SW; 下向き日射 (観測値)、GG; 土壌熱流量 (下向きが正)。

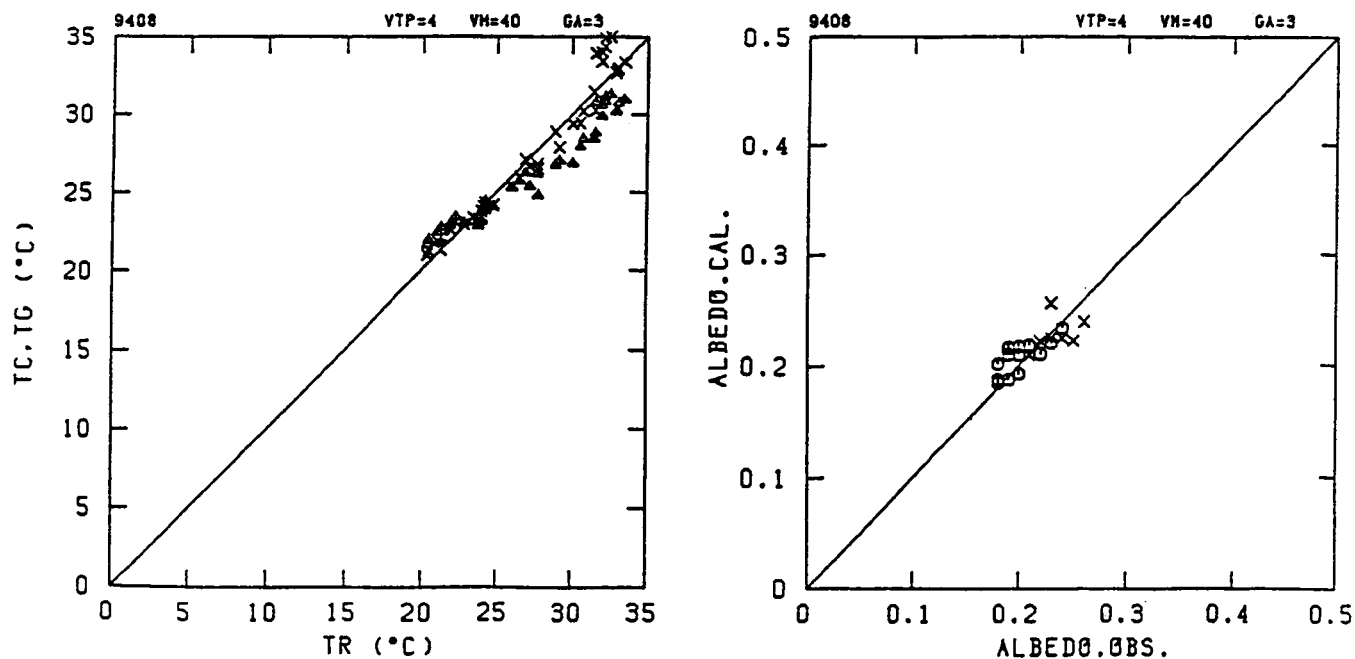


図3. 8月のキャノピー温度と全アルビードの観測値と計算値との比較。計算値はC4植物に対するパラメータを用いた結果である。モデルによって計算されたキャノピーの温度TCが×印、地表面温度TGが比較のために三角印で示されている。TRは温度の観測値。アルビードの図では×印が太陽高度が低い時のアルビードの計算値を示している。



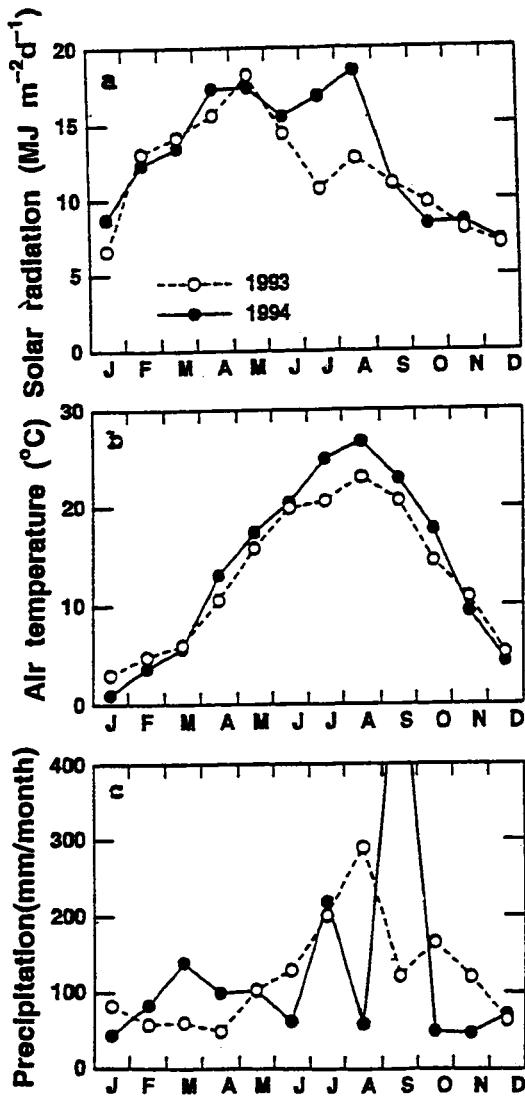


図4. 水理実験センターにおける月平均日射量(a), 気温(b), 月降水量(c).  
○は1993年, ●は1994年の値.

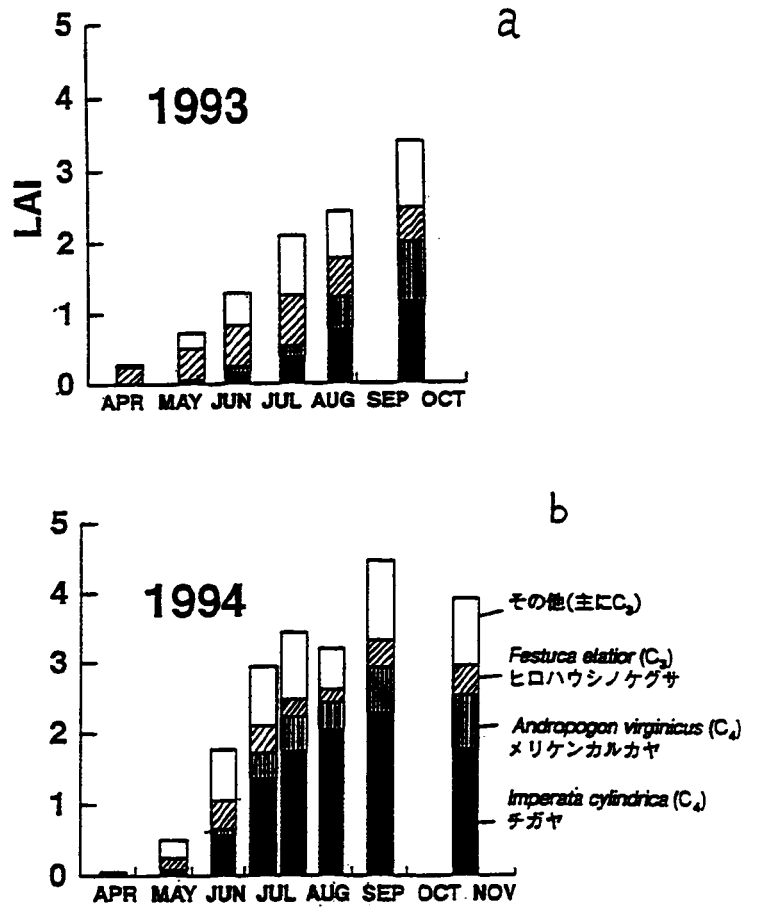


図5. LAI の季節変化. aは1993年, bは1994年.

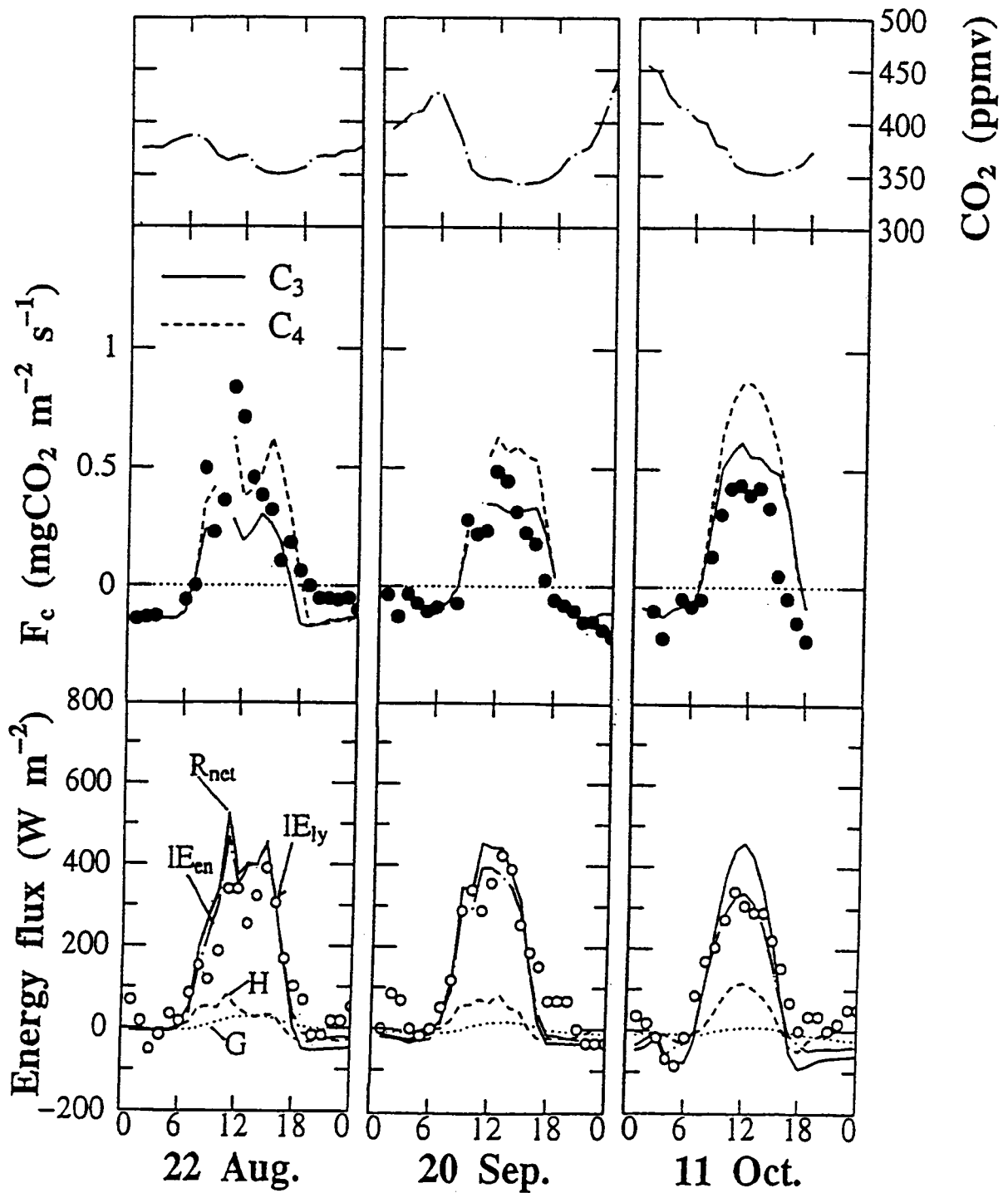


図6. 1993年8月22日, 9月20日, 10月11日に観測された各種気象要素とCO<sub>2</sub>フラックスの1時間平均値. 上段は, 高さ1.6 mにおける大気中CO<sub>2</sub>濃度の時間変化. 中段は, 群落上のCO<sub>2</sub>フラックス(F<sub>c</sub>). 下段は, 各日に観測されたエネルギー収支の結果.

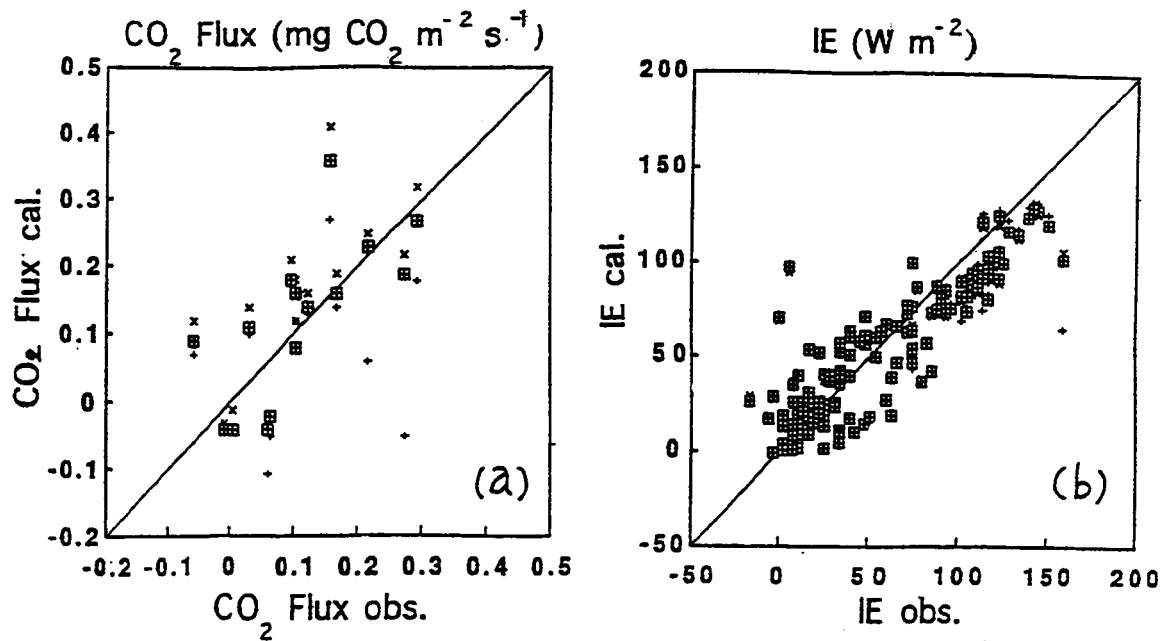


図7. 1994年に観測されたCO<sub>2</sub>フラックスおよび潜熱フラックス（ライシメータデータ）と計算値の比較. +はC<sub>3</sub>植物, ×はC<sub>4</sub>植物群落の計算値, 田は混成群落の計算値.

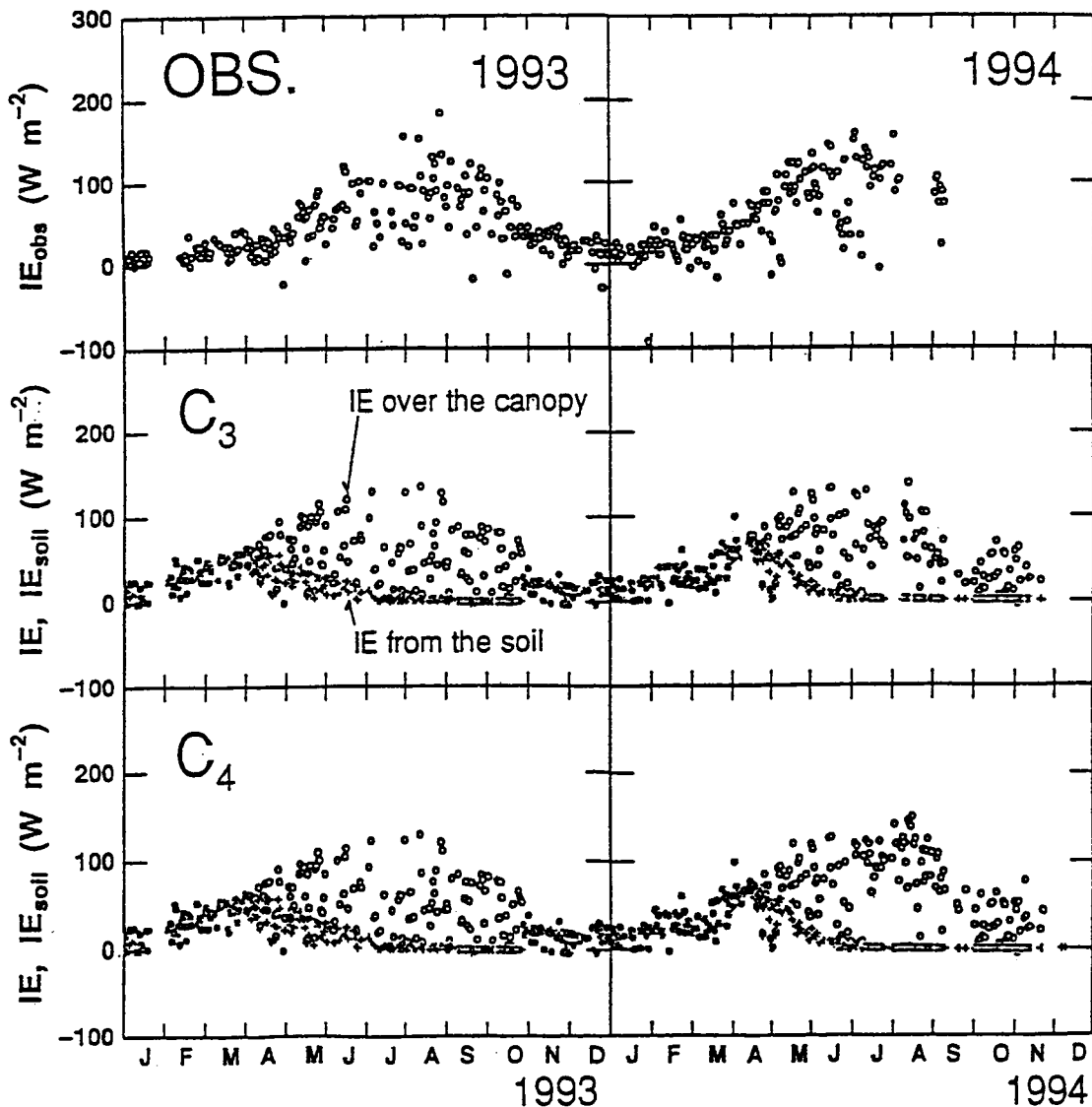


図8. 観測とモデル計算で得られた潜熱フラックスの日平均値. IE<sub>obs</sub>はライシメータによる観測値, IEは群落上の潜熱フラックスの計算値, IE<sub>soil</sub>はキャノピーの下の土壌面における潜熱フラックス.

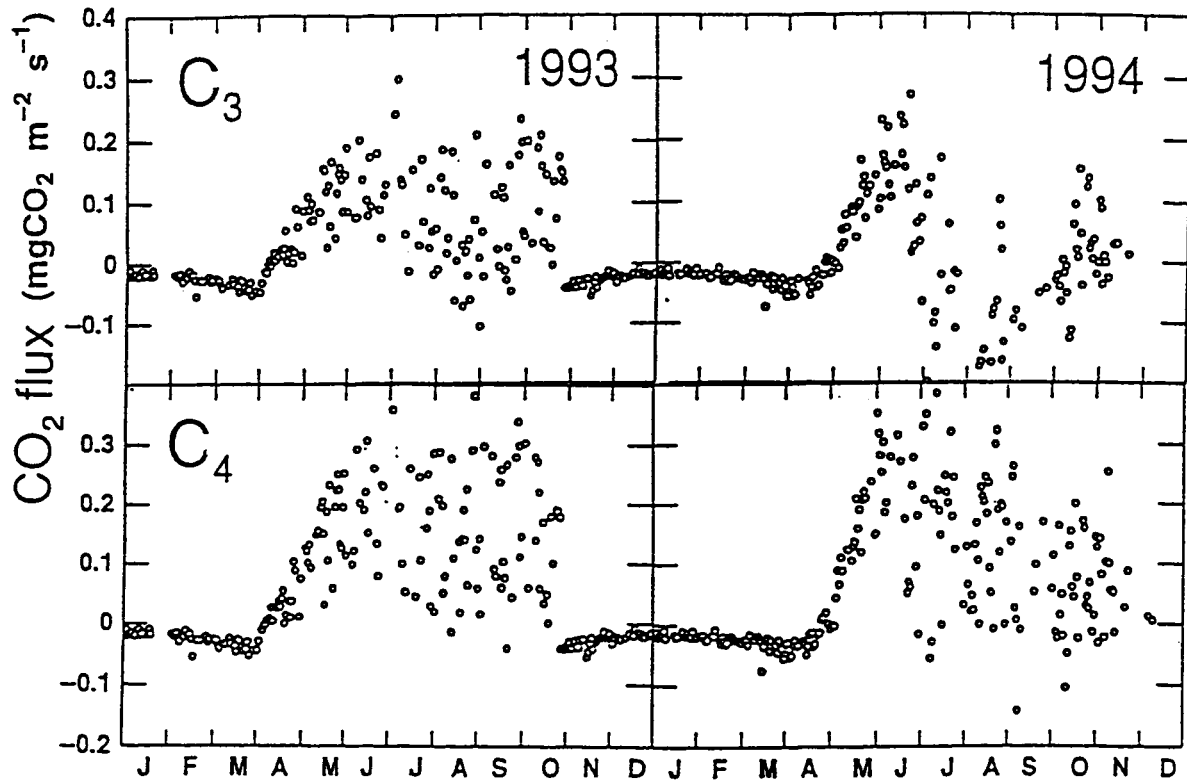


図9. モデル計算によるC<sub>3</sub>・C<sub>4</sub>植物群落上のCO<sub>2</sub>フラックスの日平均値.