

# 1. 森林と気候のかかわり

北海道大学 低温科学研究所 渡辺 力

## 1. はじめに

地球上の陸地表面は、赤道から南北両極に向かって、熱帯多雨林、サバンナ・低木林、砂漠、温帯林、温帯草原、落葉針葉樹林、ツンドラ、雪氷域のようにほぼ緯度にそって帶状に分布する植生帶に大まかに分類できます。これらの植生帶は、気温や降水量によって表される気候帶の分布とほぼ一致しています。また、同じ気候帶の中であっても、高い山に登ってみれば、標高が上がるにつれて植生の分布が変わっていく様子を見ることができます。こちらも、標高とともに気温が下がるなど、気候条件の変化とよく対応しています。植生は、種類によって生育できる環境条件に違いがあるため、それぞれの気候帶に適したものだけが生存できるのです。つまり、植生の分布は気候によって決まると言えます。

ですが、植生は一方的に気候に支配されるばかりではなく、気候に対してかなりの影響を及ぼしてもいます。今盛んに話題にされている、地球温暖化抑制のための植林などはそれをあてにした具体例です。現在、地球温暖化などの気候変動を数値モデルによって予測する研究が、世界各国の研究機関で進められています。しかし、気候の予測結果には未だに多くの不確実性が残されているのが現状です。数値モデルの予測結果に不確実性をもたらす要因には、大気中の雲や水蒸気あるいは粒子状物質などの影響がモデルの中でうまく表現されていないことなど数多くあります。その中で、実は、森林などの植生が気候に及ぼす影響も、うまく表現されていない項目の1つなのです。そのような背景のもと、私達は、森林が気候に影響を及ぼす基本的なメカニズムを解明し、それを適切にモデルで表現するための研究を進めています。

## 2. 森林と気候が影響を及ぼし合うしくみ

森林が大気と影響を及ぼし合う経路には大きく分けて3通りの経路があります（図1）。そのまず第1は、CO<sub>2</sub>の吸収・放出を通して影響しあう経路です。つまり、森林が大気中のCO<sub>2</sub>を吸収することによって温室効果が軽減され、気候に影響が及びます。一方、森林は吸収したCO<sub>2</sub>を使って成長し变化します。森林が変化するとCO<sub>2</sub>の吸収量も変化し、それが大気に再び影響を及ぼすことになります。第2は、大気がもつ運動量を森林が吸収することによって相互作用する経路です。森林の樹木などは、風を遮ることによって大気の流れに抵抗を及ぼします。すると、森林のすぐ上の風は弱まりますが、もっと上の風はあまり弱まらないため、高さ方向に大きな風速勾配ができます。その結果、

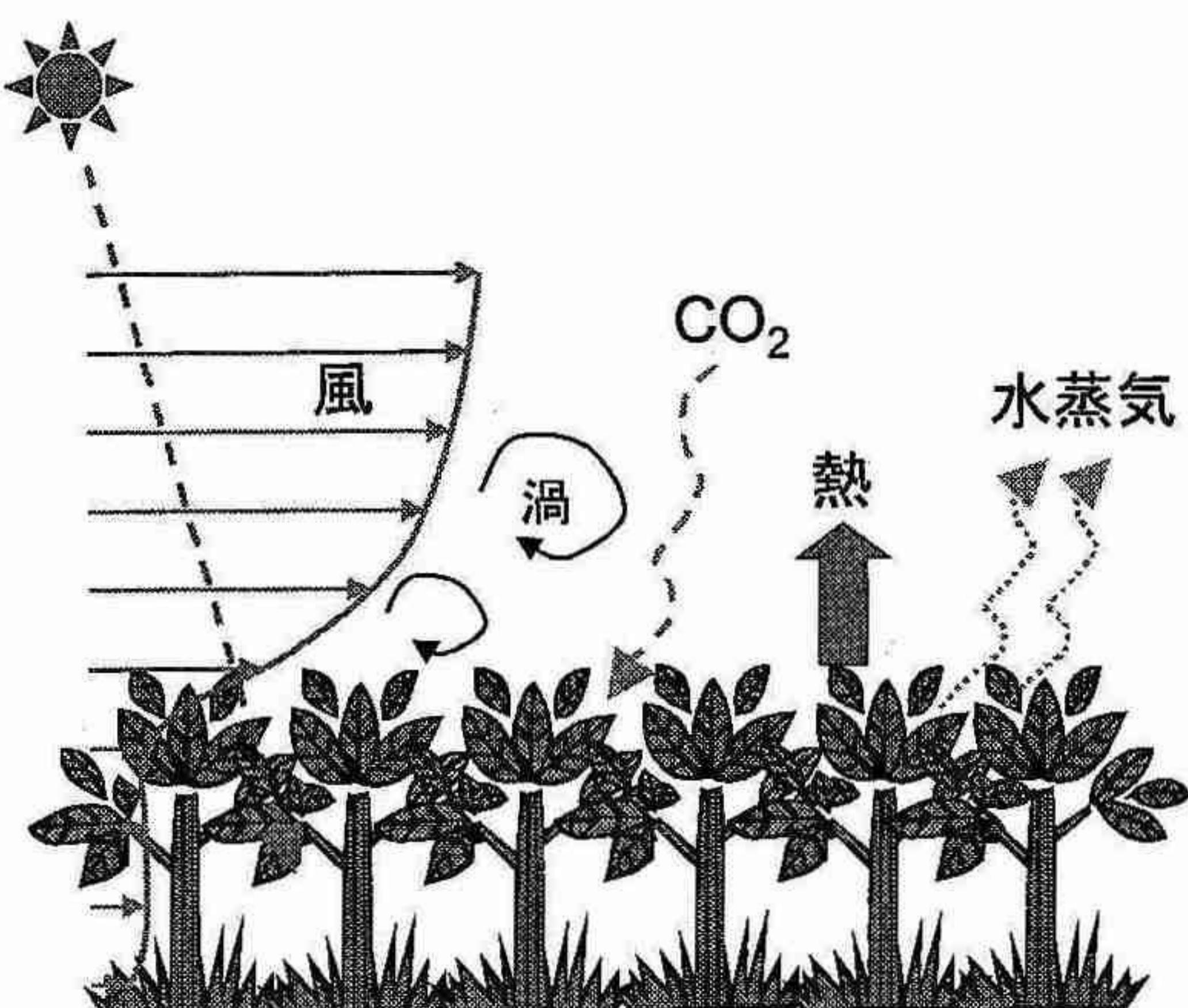


図1 森林と大気とが影響を及ぼしあう基礎過程の模式図

風の歪みが元になって、樹高の数倍程度の大きさをもつ渦がたくさん作られます。こうして作られる渦が、森林と大気との間で CO<sub>2</sub> や熱などを運ぶ役割を果たし、第1第3の経路に寄与します。一方、樹木にとってみれば、風に強く押されることによって風害を受けたり、ひどい場合には倒木によって森林が衰退したりしてしまうこともあります。そして第3の経路は、熱や水蒸気の交換を通しての相互作用です。非常に荒っぽく言ってしまえば、地球上の気候は、大気が太陽エネルギーをどこでどれだけ吸収するか、によって決まっています。しかし、大気は透明ですので、太陽エネルギーを直接吸収することはあまりありません。一旦、地表面がエネルギーを吸収し、下から大気を暖めることによって、太陽エネルギーが大気に伝わることになります。このとき、地表面上に植生があるかないか、仮に植生があったとしても葉の茂り具合はどうか、また葉に無数にある気孔が開いているか閉じているかによって、大気に伝えられるエネルギー量が変わってきます。すると、大気の循環が変化し、エネルギーが運ばれていく先が変わります。逆に植物にとっては、適度な温度と湿り気があると最も効率よく光合成ができますが、極度な高温や乾燥にさらされると光合成や蒸散（気孔を通した水分蒸発）の機能に障害をうけてしまうことになります。

### 3. 森林と大気のやりとりの観測ネットワーク

上に述べたように、森林が気候に影響を及ぼすおもとは、ひとつひとつの森林がどれだけの CO<sub>2</sub> を吸収し、また熱や水蒸気をどれくらい大気とやりとりしているか、ということにあります。ですので、究極的な目標は、それらひとつひとつをモデルで正確に再現することになります。しかし、世界には、光合成や蒸散の機能が異なるたくさんの種類の森林があります。しかも、同じ種類の森林であっても、生育条件が違えば環境に対する応答の仕方が異なってきます。したがって、まずはその現状を把握するために、世界中の森林で実際にどのようなやりとりが行われているかを知る必要があります。そのような目的で、現在、世界中の森林で気象観測タワー（図2）を用いた観測が実施されています。得られた観測データは、FLUXNET（フラックスネット； <http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/>）と呼ばれる観測ネットワークのデータセンターに集められ、世界中からデータを見ることができるようになっています（図3）。また、FLUXNET は地域ごとのサブネットに分割されていて、日本を含むアジア各国の観測サイトは AsiaFlux（アジアフラックス； <http://www.asiaflux.net/>）の下に統合されています。

では、実際にどのようなデータが取られているのかを見てみましょう。図4は、私達がこれまで観測を行ってきた埼玉県川越市にある落葉広葉樹林での、CO<sub>2</sub> 吸収量の季節変化についての観測結果です。この森林では、冬は葉がなく、4月中旬頃に葉が出始め、12月に落葉するという季節変化が起こります。それと合わせて見ると、この森林は葉のある期間（4～11月）は CO<sub>2</sub> を吸収していますが、それ以外の期間は逆に CO<sub>2</sub> を放出しているということが分かります。樹木が光合成できるのは葉のある期間だけであるのに対して、樹木や土壌微生物の呼吸は一年中続くからです。これらを1年間積算して初めて、この森林が正味としてどれだけの CO<sub>2</sub> を吸収しているかが分かります。また、図5は、森林に吸収された日射のエネルギーが、大気の加熱（顯熱）、水分の蒸発（潜熱）、樹木および土壌の加熱（貯熱）のそれぞれにどのように割り振られているのか、またそれがどのように季節変化しているのかを示したものです。まず、冬

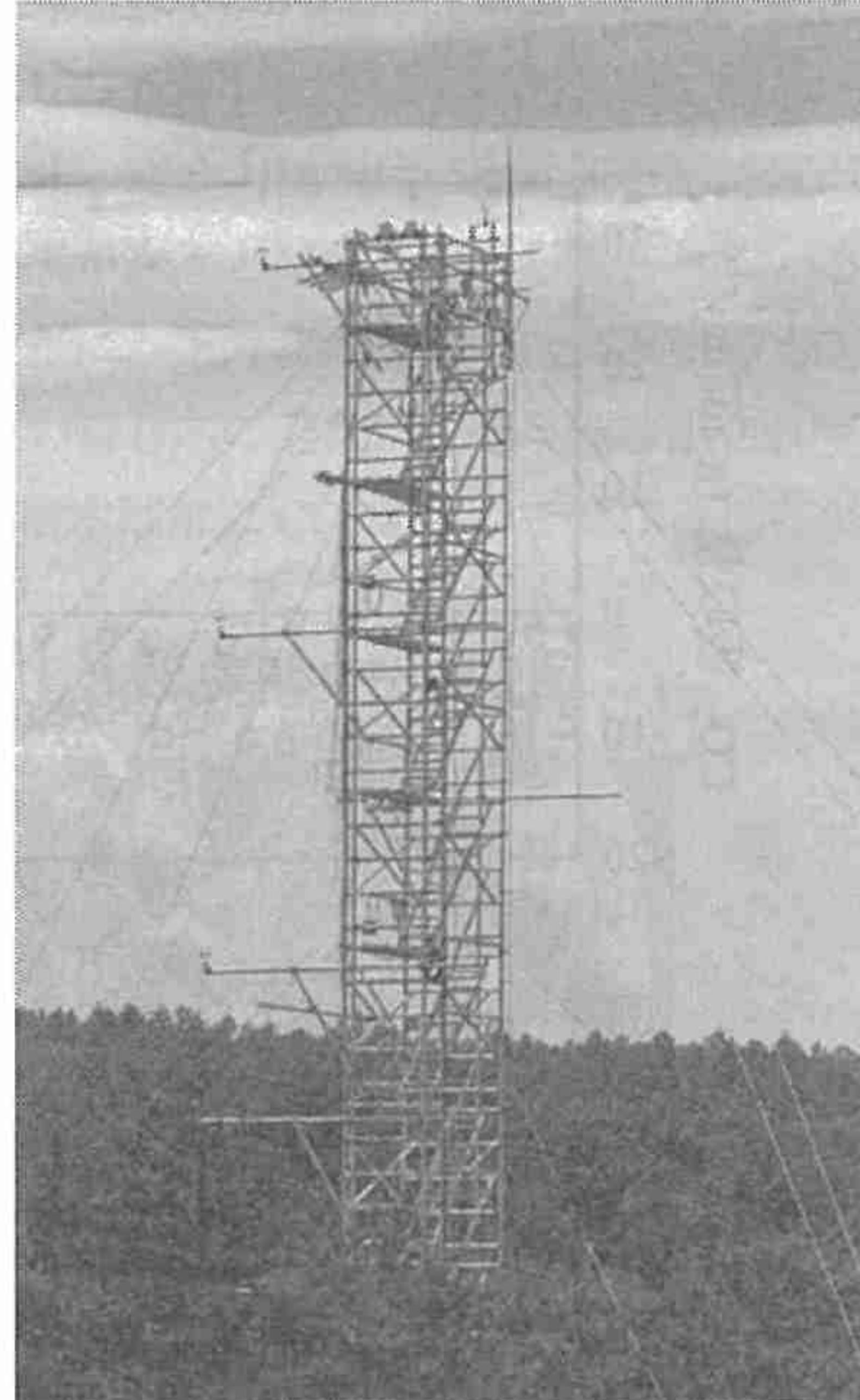


図2 気象観測タワーの例（森林総合研究所の富士吉田試験地）

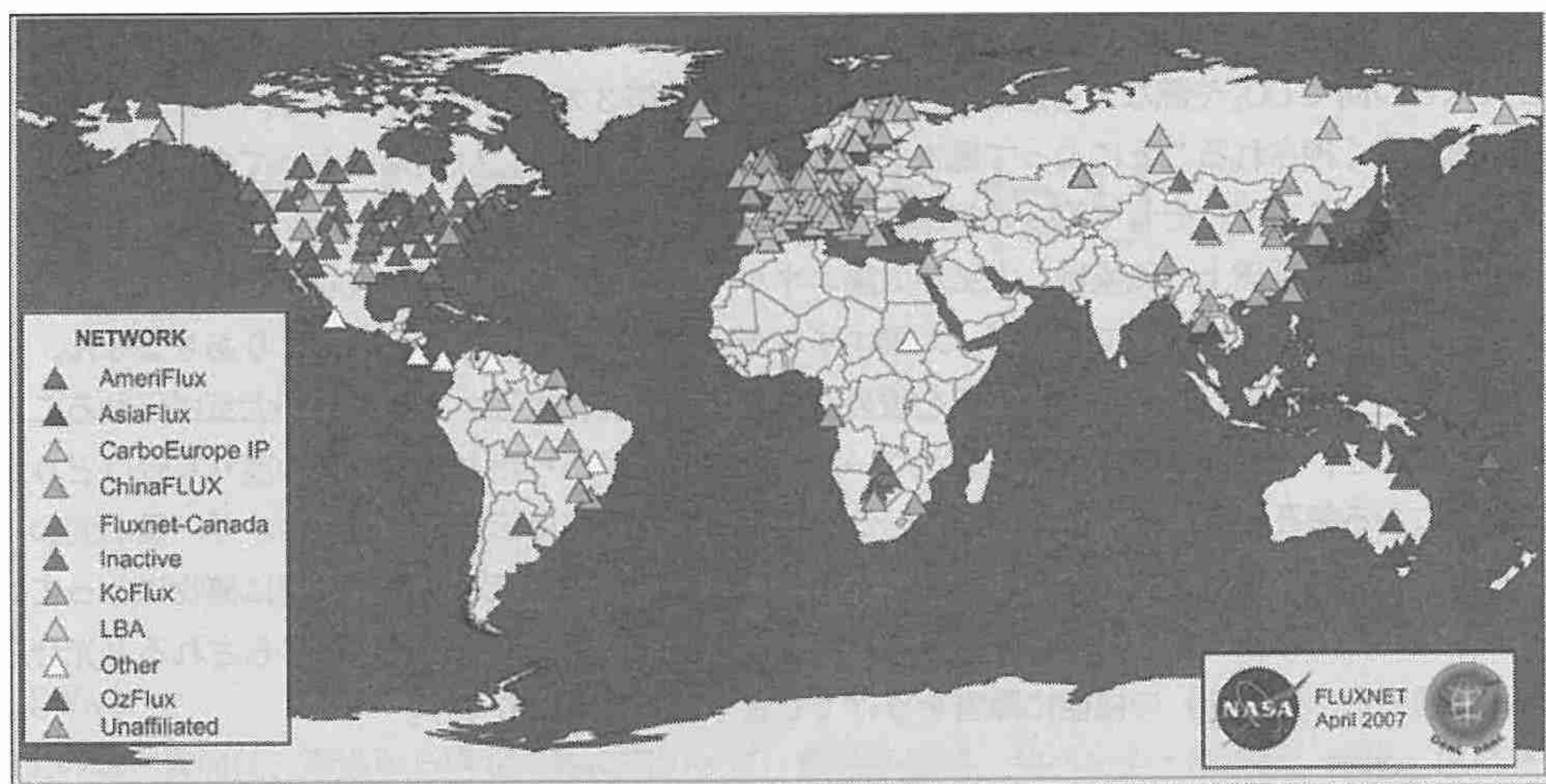


図3 FLUXNETに登録されている観測サイトの位置 (FLUXNETのHPより)

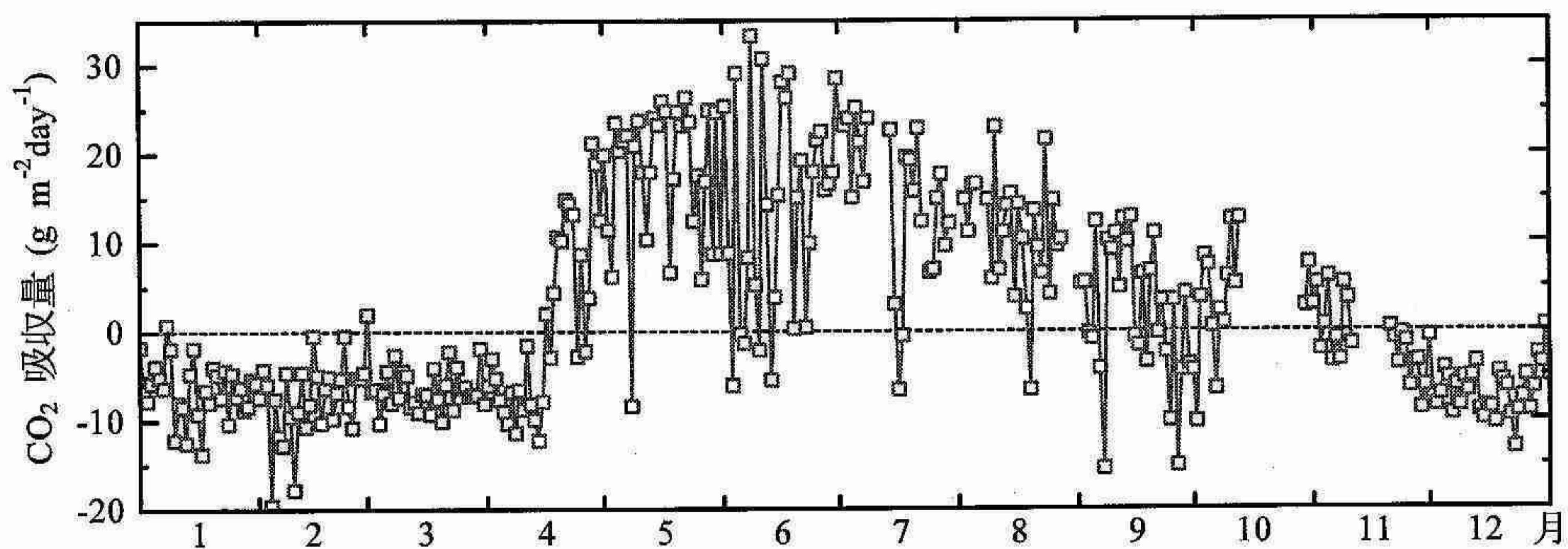


図4 森林によるCO<sub>2</sub>吸収量の季節変化 (森林総合研究所の川越試験地での観測結果)

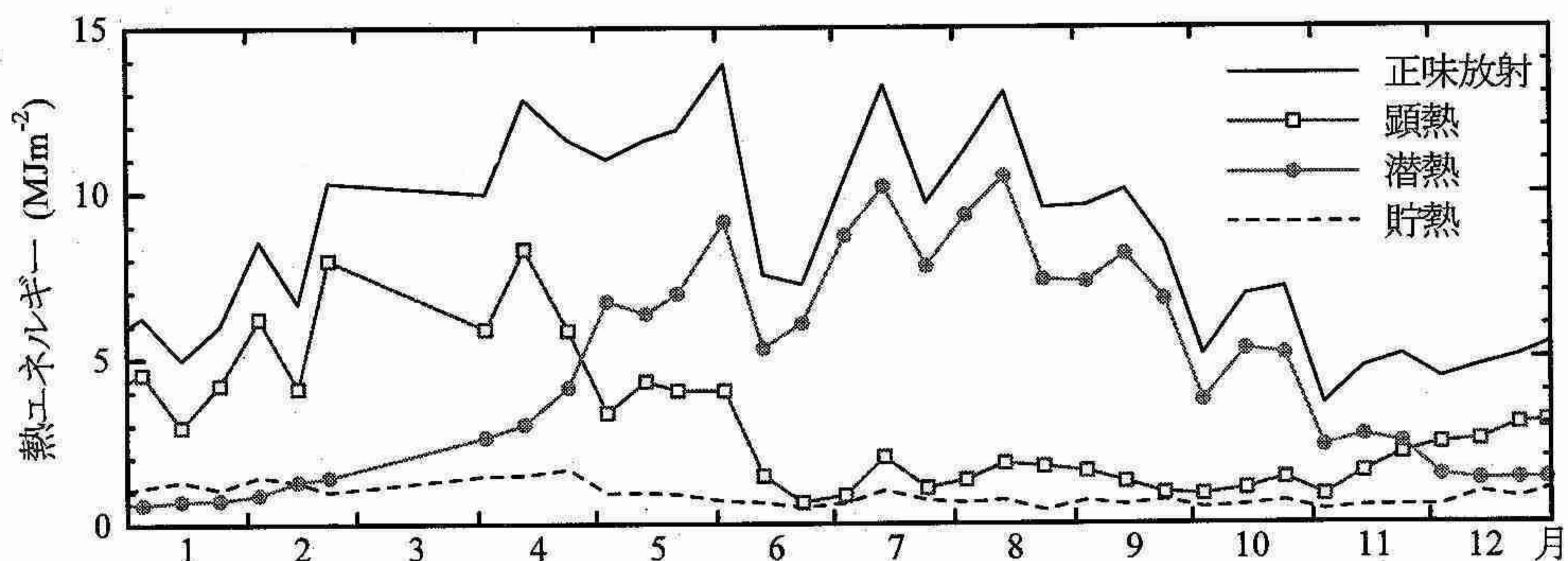


図5 日射エネルギーの配分の様子 (森林総合研究所の川越試験地での観測結果)

正味放射：ほぼ森林に吸収される日射エネルギーに対応、顕熱：大気を加熱するエネルギー、  
潜熱：水分の蒸発に使われるエネルギー、貯熱：樹木と土壤を加熱するエネルギー

(落葉期)には、水分を蒸散する葉がないために潜熱の割合が小さく、結果として日射エネルギーの大部分が顕熱となり、森林が大気を強く加熱する形になっています。この状況は、葉が開くとともに急変し、潜熱の占める割合が大きくなります。樹木が活発に蒸散を行うようになり、日射エネルギーの多くがそれに使われるようになります。このため、夏(着葉期)には顕熱へのエネルギーの配分が小さくなります。また、貯熱に費やされるエネルギーは年間を通してあまり大きくありません。このように、落葉樹林には、冬は大気を加熱する作用が大きく、夏には蒸散による熱消費が大きいという、気温の変動を緩和するのに都合のよい働きがあることが分かります。

#### 4. 森林をふく風の働き

光合成も蒸散も木の葉っぱ1枚1枚の上で起こる現象です。そんな小さな現象が広い地域の気候に影響を及ぼすのは、大気中のCO<sub>2</sub>が風によって森林の中へ運び込まれたり、蒸散された水蒸気が風によって森林から運び出されたりしているからです。したがって、森林と大気のやりとりをモデルで再現するためには、風によるこうした輸送効果をうまく取り入れる必要があります。そのためには、森林付近の風がどのようにして流れているのかを知る必要がありますが、風は非常に複雑に乱れながら流れているため、その様子を観測で把握するのは大変困難です。そこで、数値シミュレーションによって森林付近の風の様子を再現し、風による輸送効果を明らかにする研究が行われています。図6は、シミュレーションによって得られた、ある一瞬間ににおける風速の上下方向の成分とCO<sub>2</sub>濃度の分布を示したものです。図6上図では、上昇流と下降流が風下方向に向かって交互に並んでいる様子が見られます。時計回りの渦が次々と発生しながら流されていることを表しています。また、図6下図では、それらの渦に対応するように、下降流の部分では高濃度のCO<sub>2</sub>を含む上空の空気が森林の内部に進入し、上昇流の部分では濃度の低い森林内の空気が上空へ運び出されていることが分かります。こうした風の働きがあるおかげで、森林内の樹木は常にCO<sub>2</sub>の供給を受けることができ、光合成を続けられるのです。

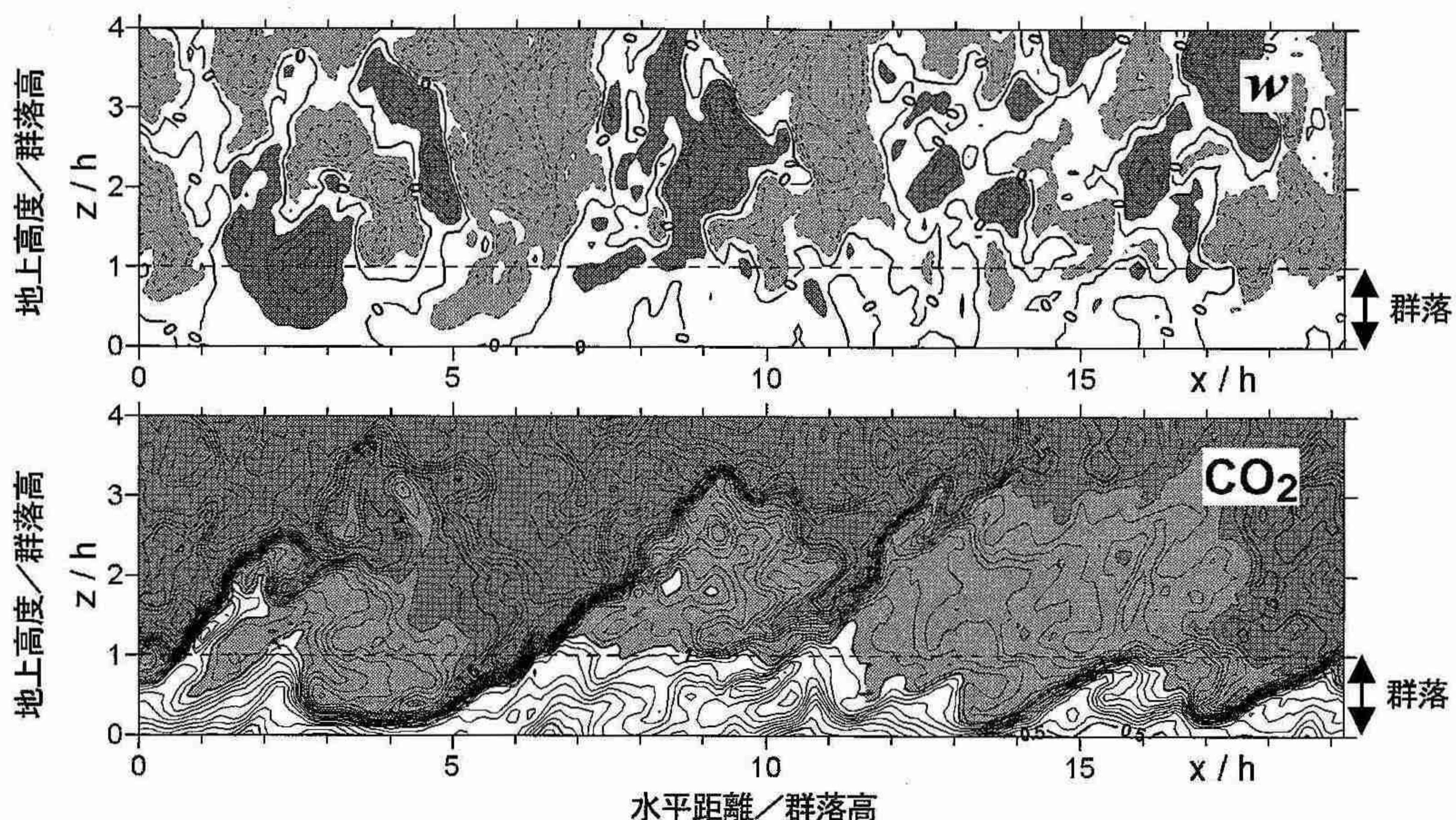


図6 森林付近の風とCO<sub>2</sub>濃度の数値シミュレーション結果

上図：風速の上下方向成分（薄い灰色：下降流、濃い灰色：上昇流）

下図 CO<sub>2</sub>濃度（色が濃いほど濃度が高い）

## 5. 森林と大気のやりとりのモデル

森林上に降り注ぐ日射のエネルギーは、一部が葉面などで反射され、別的一部分が林冠を透過して地面に達しますが、残りの大部分は葉などに吸収されます。吸収されたエネルギーによって、葉などに含まれる水分が蒸発（蒸散）したり、それらに接する空気が暖められたりします。このとき群落内の大気中に放たれた熱や水蒸気は、上述のように、森林内をふき抜ける風によって群落の外へ運び出され、大気中へ広がっていきます。また、植物は天候などに応じて葉の気孔を開閉し、光合成の速度を調節していますが、このとき同時に蒸散の速度も変化します。すると、日射エネルギーのうち蒸散に使われる割合が変化し、大気に及ぶ影響が変化することになります。そのため、森林と大気のやりとりを再現するためには、光の吸収や風による輸送効果などの物理的な過程の他に、光合成や気孔の開閉など、生物としての機能をモデルに取り入れる必要があります。幸い、植物生理学の分野において、植物の光合成や気孔制御を再現できるよいモデルが既に作られています。それを物理過程のモデルと組み合わせれば、森林を総合的に扱うモデルを作ることができます（図7）。こうして作られるモデルを、先の FLUXNET で得られた観測データに基づいて調整していくけば、世界中の森林がどれだけ  $\text{CO}_2$  を吸収したり熱や水蒸気を大気とやりとりしたりしているかを予測できるモデルが構築できるはずです。その一例として、川越の観測結果をシミュレートした結果を図8に示します。森林に吸収される日射のエネルギーが時間変化すると、それに応じて蒸散に使われるエネルギー（潜熱）や大気を加熱するエネルギー（顕熱）が変化する様子がよく再現されています。

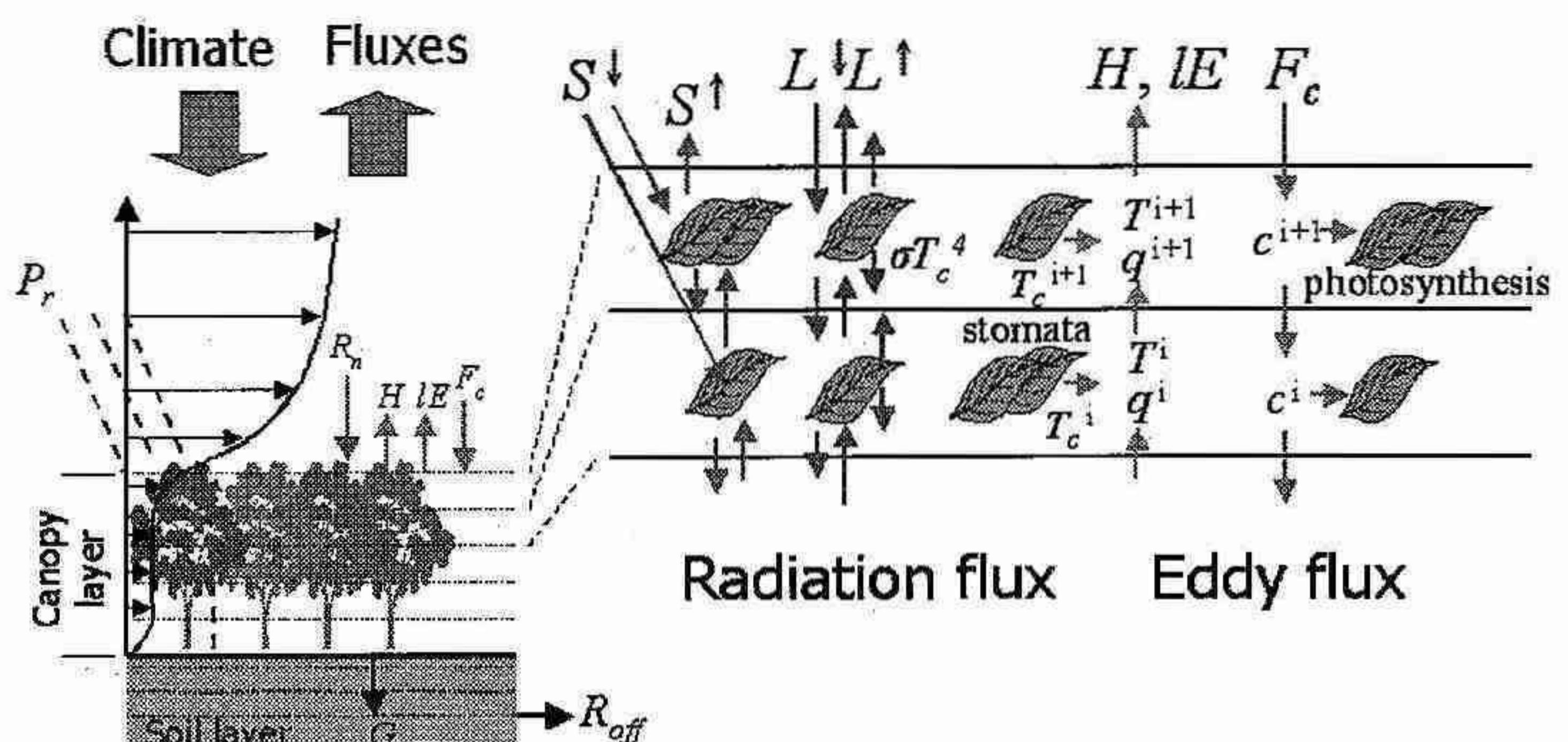


図7 森林と大気とのやりとりを再現する総合モデルの模式図

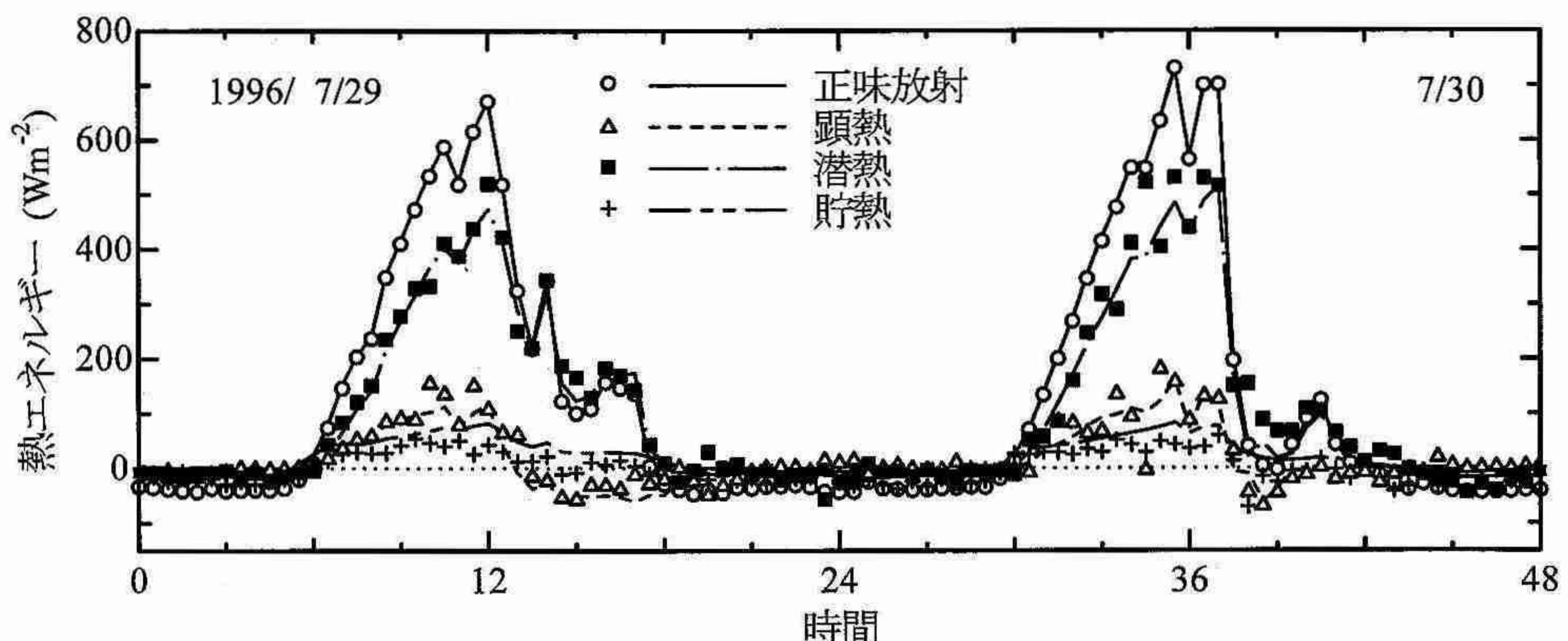


図8 日射エネルギーの配分のシミュレーション結果  
点：観測値、折れ線：モデルによる計算値

## 6. 気候に対する影響評価の例

さて、森林が気候に及ぼしている影響を調べるにはどうしたらいいでしょうか？たとえば、現存する森林を広範囲に伐採し、それによる気象の変化を各地でモニターすれば分かるかも知れません。ですが、それで私達がいかに森林の恩恵を被っていたかが分かったとしても、もう後の祭りです。一度伐ってしまった森林が元に戻るには百年オーダーの時間がかかります。そのように現実にはできないことも、数値モデルを使えば仮想的に実験してみることができます。

一例として、日本の真夏の気温に対する森林の影響を調べた結果を紹介します。日本の国土は約7割が森林に覆われていますが、その森林における蒸散能力が一斉に半減してしまったらどうなるでしょうか。図9がその仮想実験の結果です。このシミュレーションは、数百km四方の領域の風や気温などを予測する数値モデル（局地循環モデルと言います）に、上述したような森林モデルを組み合わせて行われたものです。図9は、森林の蒸散能力が半減して一日が経過したとき、通常の場合に比べて真夏の15時における気温がどの程度上昇するのかを示しています。これによると、一般には森林の多い山地で気温が大きく上昇しますが、松本や甲府などの盆地や伊那地方などの谷状地の底にあたる地域では、現地には森林が少ないにもかかわらず、気温が上昇します。これは、山地を広く覆う森林と大気との熱のやりとりが変化するために、いたるところで風の強さや分布が変化し、その結果、山地から盆地へ向かう水平方向の熱の移動量が増加するためです。こうして森林の影響が広範囲に広がっていくことになります。

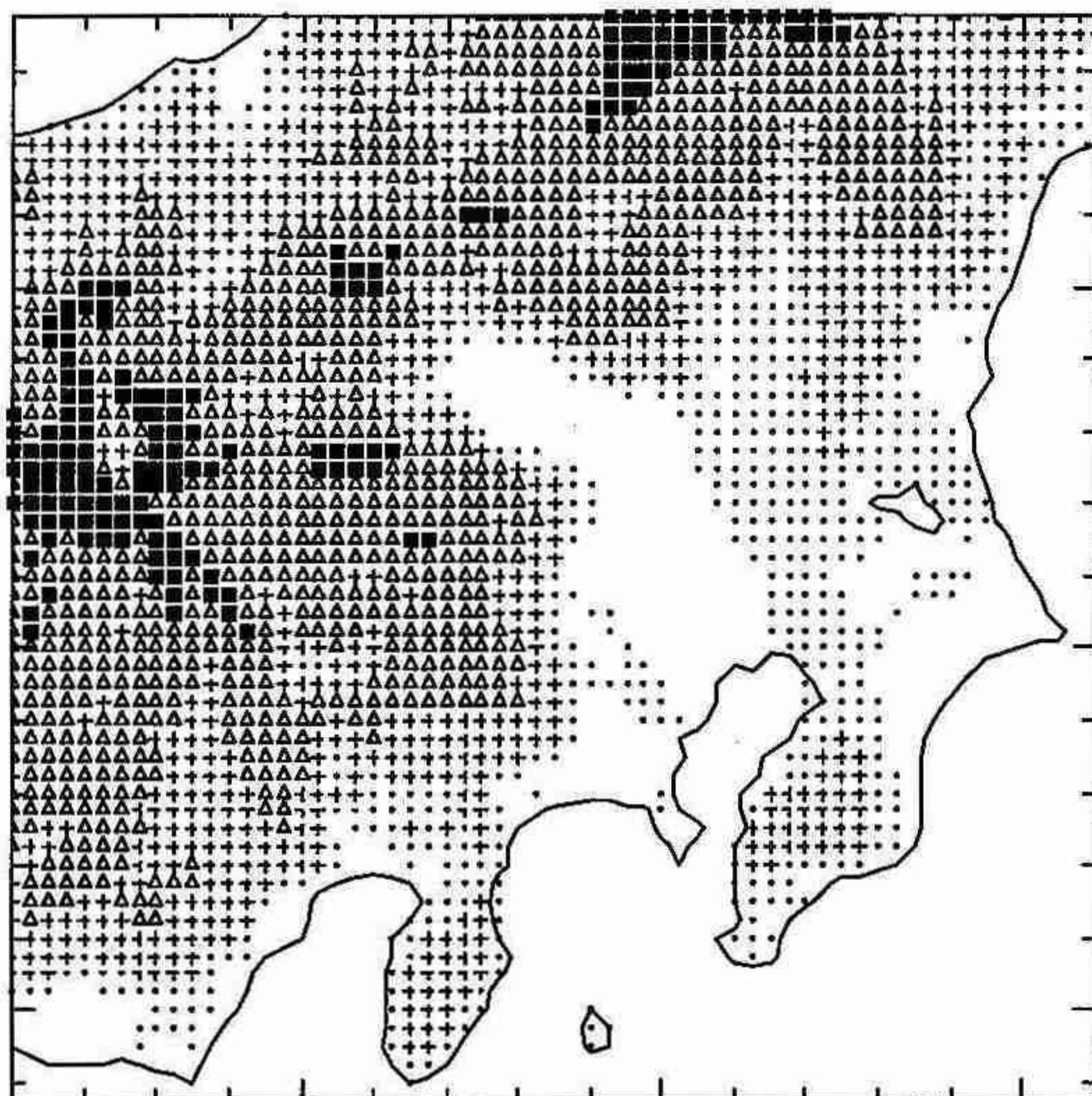


図9 森林の蒸散能力を半減させた場合の気温上昇量の分布  
(・ : 0.3–0.6°C, + : 0.6–0.9°C, △ : 0.9–1.2°C, ■ : 1.2°C以上)

## 7. おわりに

以上、1枚1枚の葉っぱの上で起こっている現象が、風の働きによって広い範囲の気候に影響を及ぼす様子を見てきました。しかし、話はまだ終わりではありません。数十年、数百年といった長期的な視野で見ると、植生は気候の変化に適応して光合成などの特性を変化させたり、その分布域を変化させたりします。そして、そのことが再び気候に影響を及ぼすことにつながります。気候が変化すると再び植生がそれに応じて変化します。こうして、植生と気候は互いに影響を及ぼし合いながら変動していきます。ですから、長期の気候変動を予測・研究するためには、動的に変化する植生と気候との相互作用を考慮して行かなければなりません。それには、植物が成長したり枯れたり、他の種類の植物と競争して分布を広げたり、といった生態学的な過程をもモデルに取り入れていく必要があります。既に、それに向けた研究が世界各国で精力的に進められています。