

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

馬淵和雄
気象庁気象研究所

1. はじめに

地球環境に対する問題意識の高まりとともに、気候形成における陸面の諸過程の役割の重要性が強く認識される様になり、大気—陸面相互作用に関する研究がこれまでに数多くなされてきている。陸面は大気にとっての下限境界となっており、大気と陸面間においては各種のエネルギーや、二酸化炭素に代表される温室効果気体が交換される。これらの交換過程においては、陸域の生態系が大きく関わっており、最近の気候研究においては、無視することのできない要素となっている。

陸面に存在する植生を陽に扱った大気大循環モデルあるいは気候モデル用の陸面過程モデルが開発され使用され始めたのは、1980年代半ばごろからである。これらの代表的なものとしては、Dickinson et al. (1986)によるBiosphere—Atmosphere Transfer Scheme (BATS)や、Sellers et al. (1986)による Simple Biosphere Model (SiB)などがあげられる。これらのモデルは、大気—植生間のエネルギー交換のみを扱うモデルであったが、その後、二酸化炭素交換をも扱うことのできるモデル (Sellers et al. 1996)が開発され、現在までに多くのモデルが開発されている。

ここでは、気候モデル用に開発した陸面植生モデル (Biosphere—Atmosphere Interaction Model: BAIM) (Mabuchi et al. 1997) を例にとり、その概要とそれを組み込んだ3次元気候モデルによる圏間相互作用研究の一端を紹介する。

2. 植生モデルの概要

モデルの概念図を図1に示す。モデルは、最大2層の地上植物層と3層の土壌層によって構成されている。植物層は、想定される植生タイプによって、2層または1層に設定され、さらに植物層なし（裸地など）の場合も設定可能になっている。

モデルにとっての上方の境界条件は、気温 (T_m)、水蒸気圧 (e_m)、二酸化炭素濃度 (C_m)、風速 (U_m)、降水量 (P_m)、下向きの短波放射量 (R_s) および下向きの長波放射量 (R_l) で、下方の境界条件は、深層の土壌温度 (T_4) である。モデルにこれらの境界条件を与えることにより、植物および土壌の各層の温度 (T_c, T_g, T_1, T_2, T_3) と、各層に蓄えられている水分量 ($W_{wc}, W_{sc}, W_{wg}, W_{sg}, W_{w1}, W_{i1}, W_{w2}, W_{i2}, W_{w3}, W_{i3}$) を予報する。水分量の中で、添え字 "w" で表される量は各層に水として蓄えられている水分量であり、"s" および "i" で表される量は、各層に雪または氷として蓄えられている水分量を表している。植物層および土壌層に蓄えられている水分に

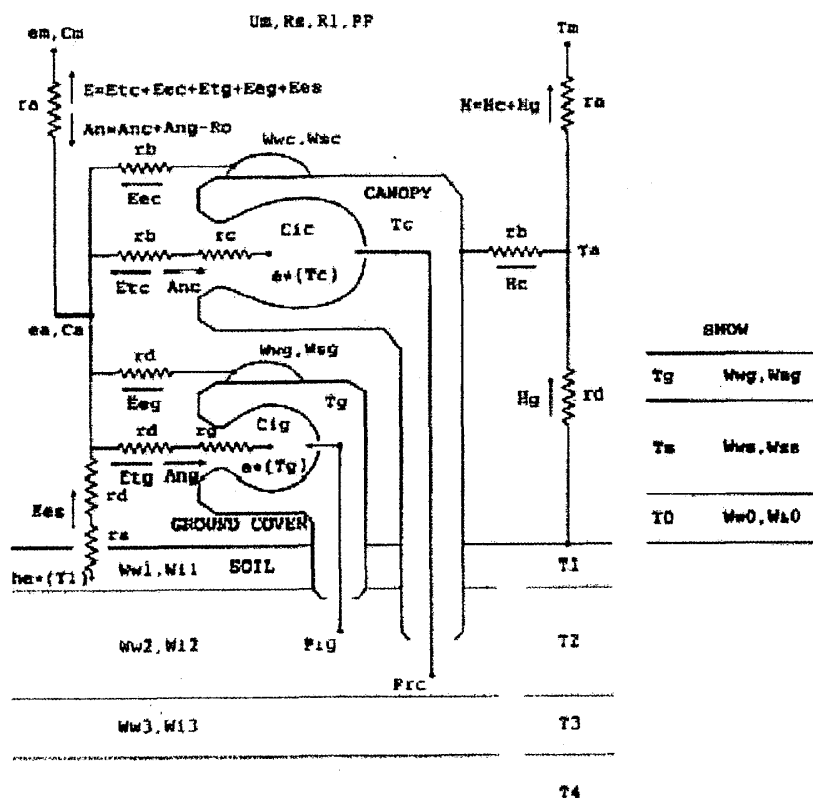


図1. Biosphere-Atmosphere Interaction Model (BAIM)の概念図。左側は潜熱フラックス及び二酸化炭素フラックス、右側は顕熱フラックスの流れを示している。

ついては、その凍結・融解過程を扱うと共に、地上に積雪がある場合にはその積雪・融雪過程についても扱う。地上の積雪は、その深さに従って最大3層に分割され、それぞれの層の温度(T_g, T_s, T_o)、および各層に蓄えられている雪量(W_{sg}, W_{ss}, W_{so})と水量(W_{wg}, W_{ws}, W_{wo})が予報される。図1中の T_a, C_a 、及び e_a は、それぞれ植物層内大気中の気温、二酸化炭素濃度、及び水蒸気圧を表している。 C_{ic} 及び C_{ig} は、各植物層の気孔内の二酸化炭素濃度、 $e^*(T_c)$ 、 $e^*(T_g)$ 及び $he^*(T_i)$ はそれぞれ各植物層の気孔内飽和水蒸気圧及び表層土壌空隙内の水蒸気圧である。また、 P_{rc} 及び P_{rg} はそれぞれの植物層の根が吸収可能な土壌水分の割合を表しており、これにより土壌水分ストレスが見積もられる。土壌水分が少なくなると植物は土壌水分ストレスにより気孔を閉じる。本モデルが気候モデルに組み込まれた場合には、上方の境界条件は気候モデルによって計算される大気最下層での大気条件が与えられることになる。

このモデルは、大気-植生間の顕熱(H)・潜熱(E)フラックスと共に、植物による光合成作用および呼吸作用に基づく二酸化炭素フラックス(A)の見積りも行う。植物はその光合成過程の違いによって、大きく分けて、 C_3 植物、 C_4 植物、およびCAM植物の3種類に分けられる。本モデルでは、相対的に優占度の低いCAM植物(サボテン等)を除く、 C_3 植物と C_4 植物のそれぞれの光合成作用の相違(主に、光-光合成曲線の特性的違い及び温度・湿度等の環境条件に対する気孔応答の違い)を陽に取り入れることにより、それぞれの光合成作用による二酸化炭素フラ

ックスを計算する。図中の r で示されている量は、各フラックスに関わる層間抵抗を表している。この中で r_c および r_g は各植物層の全体としての気孔抵抗を表している。気孔抵抗は、植物層に吸収される光合成有効放射 (photosynthetically active radiation: PAR、光合成に使われる400~700nmの波長域の光) の量およびその他の気孔の開度に影響を与える環境要因の関数として求める。 r_s は裸地面からの水分の蒸発に関わる抵抗を表している。その他の抵抗は空気力学的な抵抗である。潜熱フラックスは、気孔を通しての蒸散成分 (E_t)、降水遮断・結露水分の蒸発成分 (積雪面からの蒸発・昇華を含む) および裸地面からの直接蒸発成分 (E_g) に分けてそれぞれ見積もられる。蒸散によって植物層から失われる水分を補うための根による水分の吸収は土壌水分に影響を与え、また裸地面からの直接蒸発は表層土壌の水分変化に影響を与える。顕熱フラックスは、各植物層 (裸地面からの成分を含む) からの成分ごと (H_c, H_g) に見積もられる。二酸化炭素フラックスは、各植物層の気孔を通しての正味の吸収成分 (A_n) および茎・根・土壌呼吸成分 (R_o) に分けて見積もられる。一般的に言って、 C_3 植物 (木本、冷温帯草本) に比べ、 C_4 植物 (イネ科、カヤツリグサ科等の草本に多い) は、その光合成回路の特徴から、高温・乾燥に強い (C_3 植物より適温範囲が高温側にシフトしている) 性質を持っている。本モデルが大気モデルと組み合わせられた場合には、上記の各フラックスの他に、植生タイプごとに規定される粗度を介して、大気—陸面間の運動量輸送も見積もられる。

さらに、本植生モデルの最新バージョン (BAIM2) においては、植物生態モデルとしての特性がより高められたものとなり、陸域生態系における炭素動態を陽に再現できるものとなっている。本モデルにおいては、炭素蓄積量として、植物の葉、幹、根、リター層、及び腐植土層それぞれに蓄積される炭素量の変動を再現できる。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、植物形体の変動が日単位で再現されることになる。また、落葉樹などの植物形体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。これらの植物形体の季節変化は、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. 植物生態モデルの物理気候モデルへの導入とそれによる圏間相互作用数値実験

上記の植物生態モデルを、3次元の全球気候モデルおよび領域気候モデルに組み込み、幾例かの気候と陸域生態過程との相互作用に関する数値実験を行ってきている (Mabuchi et al. 2000; 2005a; 2005b、Mabuchi and Kida 2006a; 2006b)。これらの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、植物生態モデルを、これらの3次元気候モデルに直接組み込むことにより、物理的な大気—陸面相互作用の再現とともに、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、陸域植生の物理的形体及び植生・土壌内炭素蓄積量の時間的・空間的変動が、各要素間の相互作用を介して一体となったモデル空間

として再現できることになる。

ここでは、上記の気候モデルを用いた数値実験の具体例を幾つか紹介する。図2に数値実験に用いた全球気候モデルにおける、陸域植生マップを示す。

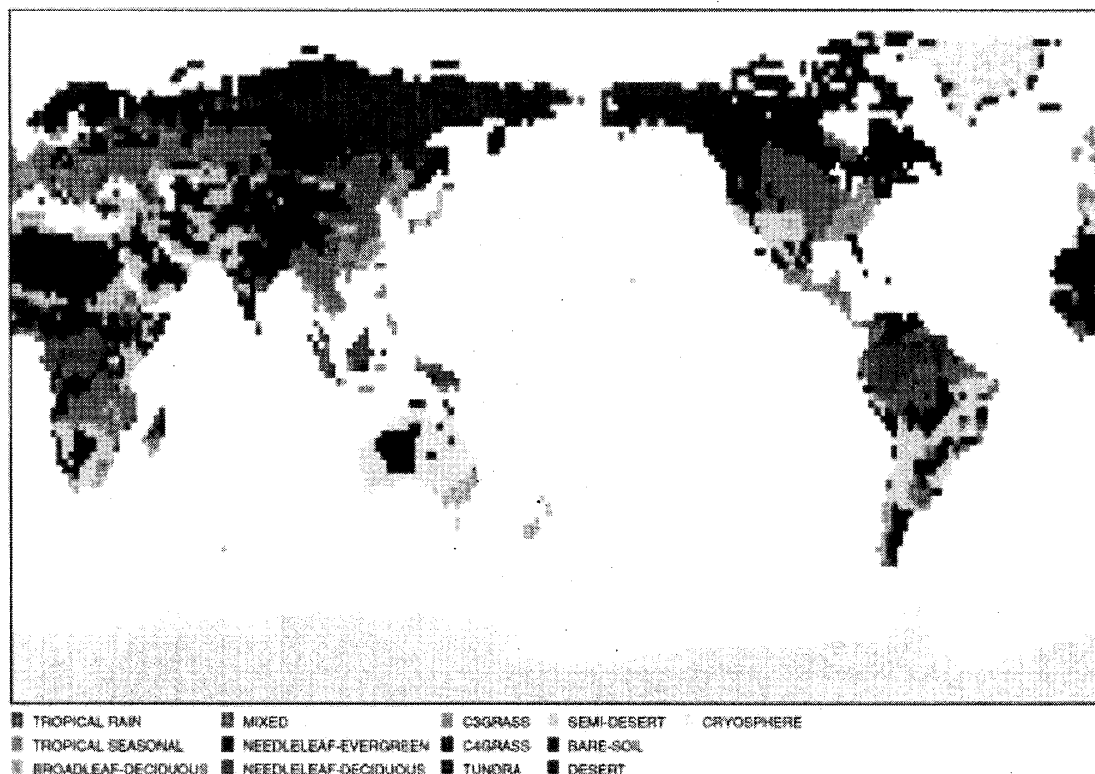


図2. 全球気候モデルにおける陸域植生マップ。植生タイプは13種類（含雪氷域）。

本全球気候モデルは、水平分解能が緯度・経度 1.875° (192×96 グリッド)で、鉛直に21層の大気レベルを持つ。予報変数は、各大気レベルの気温、水蒸気量、風の発散・渦度成分、二酸化炭素濃度、および地上気圧で、時間ステップは約20分である。モデルの各グリッドポイントにおいて、植物生態モデルにより、大気—陸域間のエネルギー収支および二酸化炭素収支が見積もられ、陸域における炭素動態が見積もられる。

図3に、本気候モデルにより再現された大気中二酸化炭素濃度の時間変化の例を示す。北半球においては、冬季に濃度が高まり、夏季に濃度が低下する様子、また、南半球においては、濃度の季節変化の振幅が北半球より小さく、季節変化の位相が北半球の逆になる様子が再現されている。

本気候モデルを用いて、インド亜大陸からインドシナ半島、および海洋大陸域のアジア熱帯域の植生変動が、気候に与える影響に関する数値実験を行った。その結果、アジア熱帯陸域生態系の変動は、地域的なエネルギー収支や水収支に影響を与えるとともに、アジアモンスーンの大気循環に影響を与え、アジア熱帯域の降水分布に影響を与えることが明らかになった。また、アジア熱帯域の生態系変動は、地球規模の大気大循環にも影響を与え、中緯度の大気循環にも影響を及ぼす可能性があることも数値実験的に明らかになった。

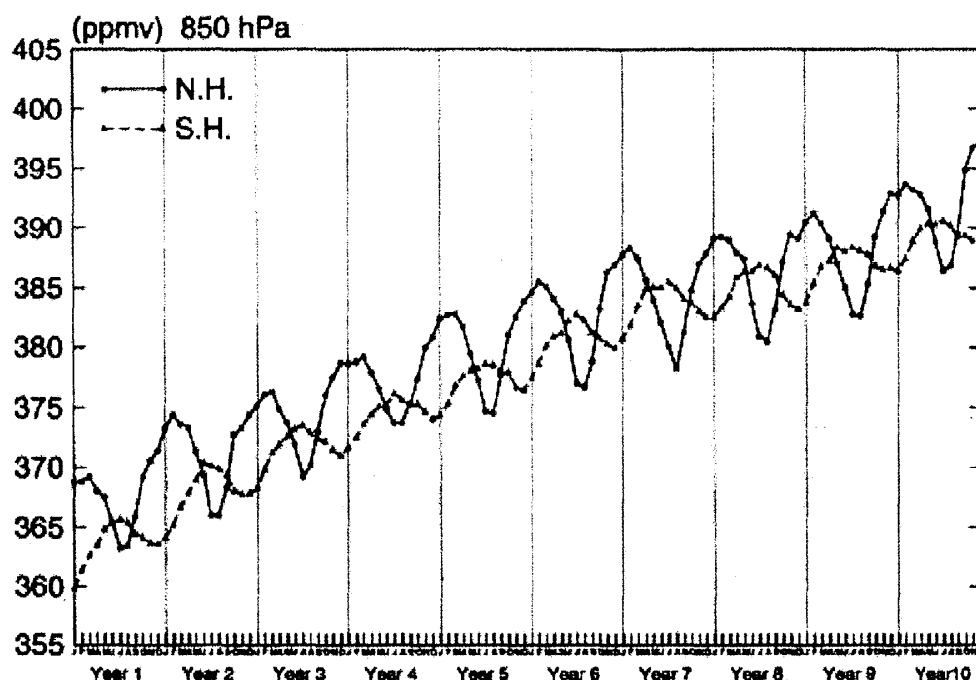


図 3. 気候モデルによって再現された大気中二酸化炭素濃度変動。10 年分の各月平均値の時間変化を示す。実線 (N. H.) : 北半球平均値、破線 (S. H.) : 南半球平均値。

また、アジア熱帯域の森林破壊がもたらす気候変動と、それによる炭素循環変動に関する数値実験を行った結果、アジア域における熱帯林破壊は、海洋大陸において高温・乾燥化を招き、それは、大気中からの二酸化炭素吸収量の減少傾向の持続をもたらし、大気中二酸化炭素濃度の上昇傾向に拍車をかける可能性があることが明らかとなった。

以上の実験例の様に、物理的な気候モデルに、陸域生態系モデルを導入することにより、地球システムの中における物理過程と陸域生態過程の融合を総合的に再現することが可能となり、複雑な圏間相互作用を数値実験的に再現し解析することによって、そのメカニズムに関する理解を促進することが可能となってきた。

4. まとめ

近年の地球温暖化問題に代表される様な地球環境変動のメカニズムを解明していくうえで、陸上に存在する生態系の役割を無視することはできない。気候モデルを使い大気－陸面相互作用に関する研究を行おうとする時、陸面に存在する生態系を何らかの形でモデル化する必要に迫られ、今までにも様々なモデルが提案されてきた。陸上に存在する多種多様な生態系を一般化しモデル化することは、非常に困難であるが、多種多様な中にもそこに存在する一般性を何らかの形で見出し、それぞれの目的に合ったモデルを構築していく必要がある。そのためには、関連する研究者間の専門の枠を超えた協力が必要となっている。本件は、システム研究における学際的な研究協力関係構築の必要性を示す典型的な一例と言えらるとともに、このような研究協力は、今後ますます重要になると考えられる。

引用文献

- Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers, P. J. Kennedy and M. F. Wilson, 1986: Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/TN-275+STR 69pp. Boulder.
- 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 Meteor. Geophys.*, **47**, 115-140.
- Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida, 2000: Numerical study of the relationships between climate and the carbon dioxide cycle on a regional scale. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 25-46.
- Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida, 2005a: Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region Part I: Case of the Northern Hemisphere summer. *J. Climate*, **18**, 410-428.
- Mabuchi, K., Y. Sato, and H. Kida 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. *J. Climate*, **18**, 429-446.
- Mabuchi, K. and H. Kida, 2006a: On-line climate model simulation of the global carbon cycle and verification using the in situ observation data. 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.
- Mabuchi, K. and H. Kida, 2006b: Numerical experiment of the carbon balance response to the climate change induced by the deforestation in the Asian tropical region. *J. Climate*, (submitted).
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531.
- Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo and L. Bounoua, 1996: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Climate*, **9**, 676-705.