

B - 6 陸域生態系の二酸化炭素動態の評価と予測モデリングに関する研究

(4) グローバル・カーボン・サイクル・モデルの開発

② 局地二酸化炭素循環のモデル開発とそれを用いた陸上生態系の役割の解明

研究代表者 気象研究所環境・応用気象研究部第3研究室 佐藤康雄

運輸省気象庁気象研究所

気候研究部 第1研究室 馬淵和雄
環境・応用気象研究部 第3研究室 佐々木秀孝・足立万代
(委託先) 筑波大学生物科学系 及川武久・伊藤昭彦

平成8～10年度合計予算額 13,029千円

(平成10年度予算額 4,403千円)

[要旨]

その季節変化等を外部パラメータとして与えられた陸上生態系と大気との間の熱、水、二酸化炭素の交換を数値的に表現する、水平格子間隔30kmの局地二酸化炭素循環モデルを日本列島域を対象地域として1985年8月～1991年の6年半について積分した。植物種としては、常緑広葉樹、落葉広葉樹、混合林、常緑針葉樹、落葉針葉樹、草地、耕作地、都市域等15種類を与えた。境界条件として、気象変数については気象庁の客観解析値、大気中二酸化炭素濃度については空間的には一定値、時間的には東北大の飛行機観測で得られているトレンドを与えた。モデルによって計算された高分解能の局地気候をアメダス等と、大気中二酸化炭素濃度については東北大学による飛行機観測とそれぞれ比較した。モデル計算結果では、植生による二酸化炭素吸収の効果は500hPa面より上空にはこの領域内では現れない。年々変動について調べた結果は1986、87年の2年間は1988年以降と異なって、植物の生育期間が好天であったことによって植物の光合成活動が活発であり、それによって大気中二酸化炭素濃度の減少が下部対流圏大気で卓越した。このことは東北大学による飛行機観測とも対応することが分かった。(気象研究所)

アジア・オーストラリア地域と太平洋・インド洋との境界領域には夏と冬とで風向が反転する、いわゆるアジアモンスーンが卓越しており、それがこの領域の陸上生態系の種類や分布の力学を決定している。また、この領域は世界最大の人口密度を有しており、現在も高い人口増加率を有しているために、土地利用および土地被覆の変化率も大きい。そして現在進行しつつあると見られる地球温暖化はこれらの変化をポジティブフィードバックの形で強化しつつある。

上記の背景のもとに、モンスーンアジア領域の炭素収支がMonsi and Saeki(1953)によって確立された植物生産理論を基にしたSim-CYCLEと呼ばれる地域モデルを用いてシミュレートした。モンスーンアジア(2千60万平方キロメートル、すなわち全地球陸地面積の15%)の陸上生態系を緯度経度0.5度の分解能で28個の植物種に区分けした。C4植物が熱帯乾燥草原の植物現存量の大部分を占めており、これらは植物生理学上の違いによって、C3植物と区別される。Sim-CYCLEを用いて総生産(GPP)、一次の純生産(NPP)、生態系純生産(NEP)の様な炭素フラックスをシミュレートした。(筑波大学)

[キーワード] 局地気候モデル、陸面植生モデル、二酸化炭素フラックス、生態系純生産、
モンスーンアジア

1. 序

二酸化炭素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。産業革命以後の急激な大気中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はいるが、大気-海洋間、大気-陸上生態系間のCO₂交換の見積もりには未解明の問題が多々残されており、全球規模でのCO₂の収支を定量的に説明できるまでには至っていない。本研究ではCO₂循環に深く関係している大気と陸上生態系間のCO₂交換過程を以下の2つの手法によって研究する。

(1) 日本列島域での局地二酸化炭素循環モデルの長時間積分（気象研究所）

局地的な気象・気候を精度良く表現した上で大気と陸上生態系間のCO₂交換を直接表現する局地二酸化炭素循環モデルの長時間積分を行い、その結果を解析することによって、地球規模のCO₂循環に占める陸上生態系の役割を検討する。

①研究方法

出来るだけ細かい分解能（DX=30km）の局地気候モデルの中で、陸上生態系・大気間の熱、水、二酸化炭素の交換を数値的に表現する（図1参照）局地二酸化炭素循環のモデルを日本列島域を対象地域として長時間積分し、二酸化炭素の日変化、季節変化、年による変化を計算で求め、大気中二酸化炭素濃度の観測値と比較する。また、モデル計算結果を解析する。すなわち、その季節変化等を外部パラメータとして与えられた陸上生態系と大気との間の熱、水、二酸化炭素の交換を数値的に表現する、水平格子間隔30kmの局地二酸化炭素循環モデルを日本列島域を対象地域として1985年8月～1991年の6年5ヶ月について積分した。植物種としては常緑広葉樹、落葉広葉樹、混合林、常緑針葉樹、落葉針葉樹、草地、耕作地、都市域等15種類を与えた。境界条件として、気象変数については気象庁数値予報課作成の客観解析値、大気中二酸化炭素濃度については空間的には東北大の飛行機観測から上部対流圏での平均値、時間的には同じく東北大の飛行機観測から得られているトレンドを与えた。大気-植生間、大気-海洋間のCO₂交換においては、それぞれの¹³C/¹²Cの分別過程も扱えるようにした。

②モデル実験結果

得られた高分解能の局地気候をアメダス等の観測値と、大気中二酸化炭素濃度変動については東北大学による飛行機観測結果（Nakazawa et al.(1993)²⁾, Nakazawa and Aoki(1998)³⁾）とそれぞれ比較した。モデル計算結果では、植生による二酸化炭素吸収の効果は500hPa面より上空には現れない。1986、87年の2年間は1988年以降と異なって、植物の生育期間の好天による光合成活動の活発化によって大気中二酸化炭素濃度の減少が下層大気に現れ（図2）、これは東北大学による飛行機観測（図省略）と対応することが分かった。

③今後に残された問題点

陸上生態系と大気との間の二酸化炭素交換を、時々刻々変化する気象条件のもとで、計算するモデルが開発できた。その年々変動の特性は飛行機観測による大気中二酸化炭素濃度変動のそれ

と対応するようである。その一方で、日本の土壌は常時湿っているので、二酸化炭素の交換に水の制限条件が働かないと思われるが、この局地二酸化炭素循環モデルを全球に拡張する場合には、半乾燥域でパラメータの設定が現在の値のままで良いのかどうかのチェックを行う必要があると考えられる。

(2) 地球規模炭素循環モデルを用いたモンスーンアジア地域の炭素収支のシミュレーション (筑波大学)

【目的】地球上の現在の陸域生態系の炭素固定能力と炭素蓄積量を明らかにするとともに、将来の地球環境変化が陸域生態系のこれらの特性にどのような影響を及ぼすかを定量的に見積もるために、ここでは特にアジアモンスーン地域に焦点を当てて、炭素動態のシミュレーション実験を行った。

【方法】Olson et al. (1983)⁴¹⁾の緯度-経度0.5度の現存植生図に基づいて、アジアモンスーン地域(ここでは45° N-10° S、60-180° Eの範囲とする)の陸上生態系の炭素動態を明らかにするために、生理生態特性を組み込んだ機能的な生態系モデル、Sim-CYCLEに各グリッドごとの気象データを与えて、炭素動態のシミュレーションを行う。Sim-CYCLEの構成は図3の通りである。対象としたモンスーンアジア地域の面積は20,629x10³km²(地球全体の陸地面積の15%に相当)であり、図4に示したように、ここは28種類の生態群系から構成されている。大陸中央部にはヒマラヤ・チベットという広大で、しかも世界の屋根と呼ばれるような高標高地や、ゴビ砂漠やタクラマカン砂漠が広がっている上に、冬には大陸から海へ、夏には逆に海から大陸へと風向が変わり、それに応じて乾季と雨季とを繰り返すために、このように多様な生態群系を認めることができる。表1にまとめてあるように、主な生態群系は面積の広い順に、1)暖地草原、2)灌水された畑地、3)熱砂漠、4)水田、5)ツンドラ、6)熱帯季節林、7)熱帯雨林である。このように、10 km以上

の生態群系としては7種を数えることができる。

【結果】この地域の現在の気象条件で定常状態に達したときの純一次生産量(NPP)と植物体及び土壌中の炭素蓄積量が図5にまとめられている。生態群系構成の多様性を反映して、地域ごとにNPPにも炭素蓄積量にも大きな開きが認められる(表1参照)。例えば、赤道域を中心とした熱帯多雨林や熱帯季節林地帯では、NPPは10Mg C/ha/年を超える高い値を示したが、ゴビ砂漠やタクラマカン砂漠などでは、非常に低いNPPを示している。全体をまとめると、植物体に84.8Pg C、土壌に208.4Pg Cと見積もられ、その時の総生産量(GPP)とNPPはそれぞれ16.3Pg C/年と8.7Pg C/年となった。これらの値は世界全体のGPPやNPPのほぼ16%に相当する。また、Sim-CYCLEでは光合成タイプの異なるC3植物とC4植物(主に暖地草原に分布)の生理特性を区別して、炭素動態のシミュレーションも行っている。その結果、C4植物によるGPPは1.64Pg C/年、NPPは0.71Pg C/年と見積もられた(表1参照)。これらの値は全体のそれぞれ10%と8%の寄与に相当する。水田を含む農業生態系全体のNPPはアジアモンスーン地域の総NPP、8.7Pg C/年の24%に相当するものと見積もられた。この比率は世界平均の比率の2倍以上であり、この高い農業生態系の比率がモンスーンアジア地域の大きな特徴である。しかも、今も人口増加率の大きいこの地域では、熱帯林の伐採を伴いながら、この比率は今後、一層高まるものと懸念される。

次に、大気CO₂濃度が年1%増加するものと仮定して得られた3つの代表的なGCMシナリオ(GISS, GFDL, MRI)の70年間の気象の出力結果をSim-CYCLEに入力して、炭素動態をシミュレートした。その結果、GCMシナリオによって多少の差はあるが、GPPとNPPは大気中CO₂の施肥効果によって、それぞれほぼ1Pg C/年と0.3Pg C/年増加するにもかかわらず、生態系純生産(NEP)はかえって減少するものと見積もられた。このように、大気中CO₂の施肥効果が期待されるにもかかわらず、熱帯林の伐採などの土地利用変化がないと仮定しても、アジアモンスーン地域全体としては地球温暖化によって、炭素のソースになる可能性が示唆された。図6にMRIシナリオを用いて得られたNPPの変化が示されている。このような結果が得られた最大の原因は、地球温暖化が進行することによって土壌有機物の分解が促進されるからである。

【結論】アジアモンスーン地域の現在の陸域生態系の炭素特性をかなり正確に見積もることに成功した。さらに、将来の変化についてもある程度の見通しを付けることができた。但し、将来に関してはGCMによる気候変化の予測精度が必ずしも高くないこと、将来の土地利用変化を組み込んでいないことなどから、将来の炭素動態の予測に関しては、今後さらに詰めるべき点を残しているといえよう。

2. 引用文献

- 1) Monsi and Saeki, 1953: Uber den Licht-factor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Sloffproduction., Jap. J. Bot., 14, 22-52.
- 2) Nakazawa, T., S. Morimoto, S. Aoki, and M. Tanaka, 1993: Time and space variations of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan, Tellus, 45B, 258-274.
- 3) Nakazawa, T. and S. Aoki, 1998: (personal communication)
- 4) Olson, J. S., J. A. Watts and L. J. Allison, 1983: Carbon in live vegetation of major world ecosystem. Oak Ridge National Laboratory, USA.

[国際協同研究等の状況]

国際協同研究IGBP/GAIMの国内研究活動として位置ずけて研究を行っている。

[研究発表の状況]

(1) 口頭発表

馬淵和雄、佐藤康雄、木田秀次、1996：植生によるCO₂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)、日本気象学会1996年春季大会

馬淵和雄、佐藤康雄、木田秀次、1996：3次元気候モデルにおける大気-植生相互作用実験(1)、日本気象学会1996年秋季大会

馬淵和雄、佐藤康雄、木田秀次、1998：気候モデルを用いた大気中CO₂濃度の変動と大気-植生相互作用の関係に関する数値実験、日本気象学会1998年秋季大会

(2) 論文発表

佐藤康雄、馬淵和雄、及川武久、三枝信子、1996：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、地球環境研究総合推進費平成7年度研究成果報告集(分冊Ⅱ) 131-150.

Y. Sato, K. Mabuchi, T. Oikawa, N. Saigusa et al., 1996: A study of modeling local CO₂ circulations, CGER'S SUPER-COMPUTER ACTIVITY REPORT, Vol. 4-1995.

佐藤康雄、馬淵和雄、及川武久、三枝信子他、1997: 陸域生態系の二酸化炭素動態の評価と予測・モデリングに関する研究(4) グローバル・カーボン・サイクル・モデルの開発 2. 局地二酸化炭素循環モデル開発とそれを用いた陸上生態系の役割の解明、地球環境研究総合推進費平成8年度研究成果報告集(分冊Ⅱ) 319-323.

Y. Sato, K. Mabuchi, T. Oikawa, N. Saigusa et al., 1997: Development of local CO₂ circulation models and elucidation of role of land ecosystem, CGER'S SUPER-COMPUTER ACTIVITY REPORT, Vol. 5-1996

佐藤康雄、馬淵和雄、及川武久、三枝信子他、1998: 陸域生態系の二酸化炭素動態の評価と予測・モデリングに関する研究(4) グローバル・カーボン・サイクル・モデルの開発 2. 局地二酸化炭素循環モデル開発とそれを用いた陸上生態系の役割の解明、地球環境研究総合推進費平成9年度研究成果報告集(分冊Ⅱ) 135-139.

○K. Mabuchi, Y. Sato, H. Kida, N. Saigusa and T. Oikawa, 1997: A Biosphere-atmosphere Interaction Model (BAIM) and its primary verification using grassland data, Papers in Met. and Geophysics, Vol. 47, No. 3/4, 115-140.

○A. Itoh and Oikawa T., 1999: Global carbon cycle of terrestrial ecosystems: A simulation with a process-based mechanistic model (Sim-CYCLE), Global Biogeochemical Cycles. (in review).

○K. Mabuchi, Y. Sato, H. Kida, 1999: Numerical simulation study of relations between climate and carbon dioxide cycle in a regional scale, (to be submitted to Journal of the Meteorological Society of Japan).

Table 1. Estimated carbon storage and productivity in Monsoon Asia. C4 plant contribution is in parenthesis.

	Area	Plant C	Soil C	GPP	NPP
	10 ³ km ²	Pg C	Pg C	Pg C/year	Pg C/year
tundra	1846.3	0.74	44.86	0.45	0.21
wooded tundra	129.9	0.23	3.16	0.06	0.03
northern taiga	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
main taiga	521.4	1.16	5.25	0.09	0.06
southern taiga	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
cool conifer	258.1	2.97	6.50	0.23	0.16
cool mixed	262.1	3.57	6.37	0.27	0.18
warm deciduous	972.1	11.61	21.42	1.41	0.88
warm mixed	328.6	3.60	5.93	0.31	0.19
warm conifer	32.9	0.57	0.93	0.05	0.03
cool forest/field	232.1	2.35	3.06	0.24	0.13
cool field/woods	78.3	0.52	0.77	0.05	0.03
warm forest/field	770.9	9.04	8.85	1.02	0.55
warm field/woods	577.5	3.76	4.51	0.46	0.24
tropical dry forest	550.5	5.61	4.73	0.79	0.37
tropical seasonal	1240.4	13.21	13.10	1.84	1.00
equatorial evergreen	1097.5	15.50	12.20	1.84	1.01
tropical montane	398.0	4.32	4.65	0.53	0.29
semiarid woods, scrub	15.7	0.05	0.08	0.01	0.00
succulent thorns	139.2	0.05 (0.03)	0.48	0.07 (0.06)	0.02 (0.02)
highland shrub	143.9	0.08	0.50	0.01	0.00
med. grazing	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
cool grass/shrub	794.6	0.30 (0.07)	3.14	0.15 (0.06)	0.04 (0.02)
warm grass/shrub	3257.6	2.03 (0.94)	19.65	2.03 (1.42)	0.94 (0.64)
tropical savanna	42.1	0.05 (0.02)	0.25	0.07 (0.05)	0.02 (0.02)
crops, irrigated	2387.9	0.74	18.08	1.80	1.03
paddy lands	1907.3	0.78	11.87	2.02	1.11
marsh, swamp, bogs	419.0	1.25	5.82	0.24	0.11
hot desert	2036.2	0.30 (0.04)	1.53	0.12 (0.04)	0.02 (0.01)
cool desert	140.5	0.05	0.27	0.03	0.01
coastal edged, mangroves	48.1	0.33	0.43	0.06	0.03
ice	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
total	20628.8	84.78 (1.10)	208.40	16.25 (1.64)	8.70 (0.71)

表 1. モンスーンアジア域で見積もられた炭素の蓄積量と生産力。C4植物の寄与分を括弧で示す。

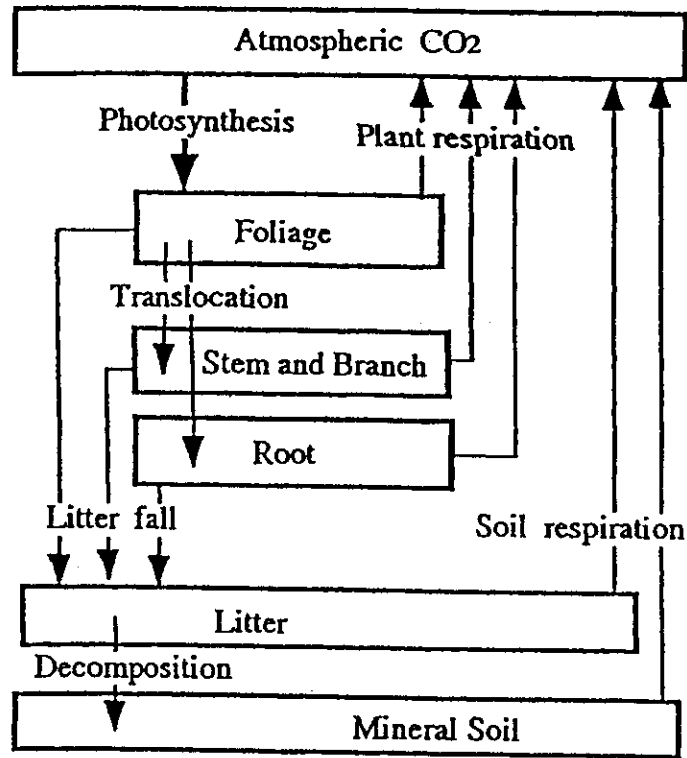
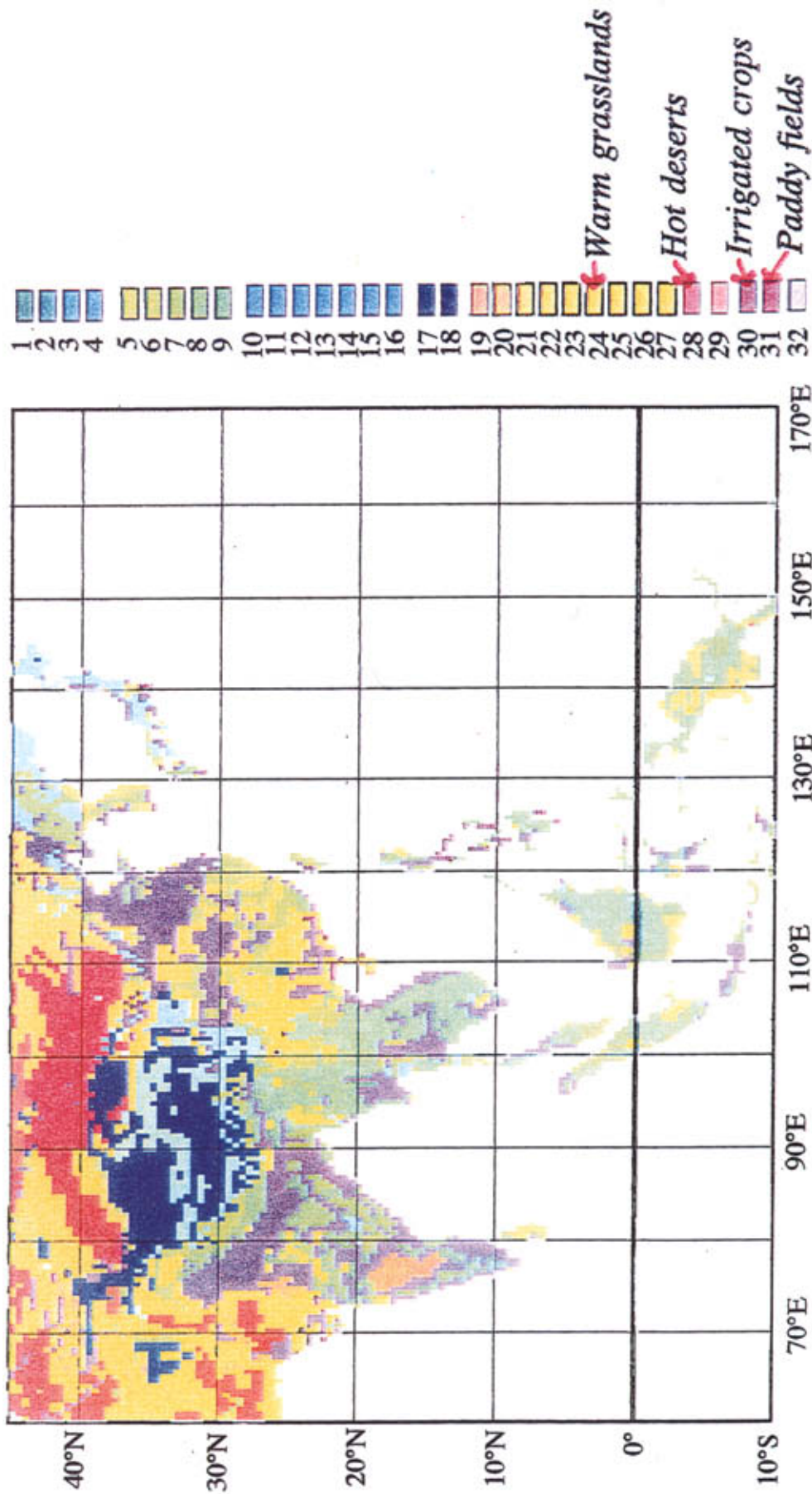


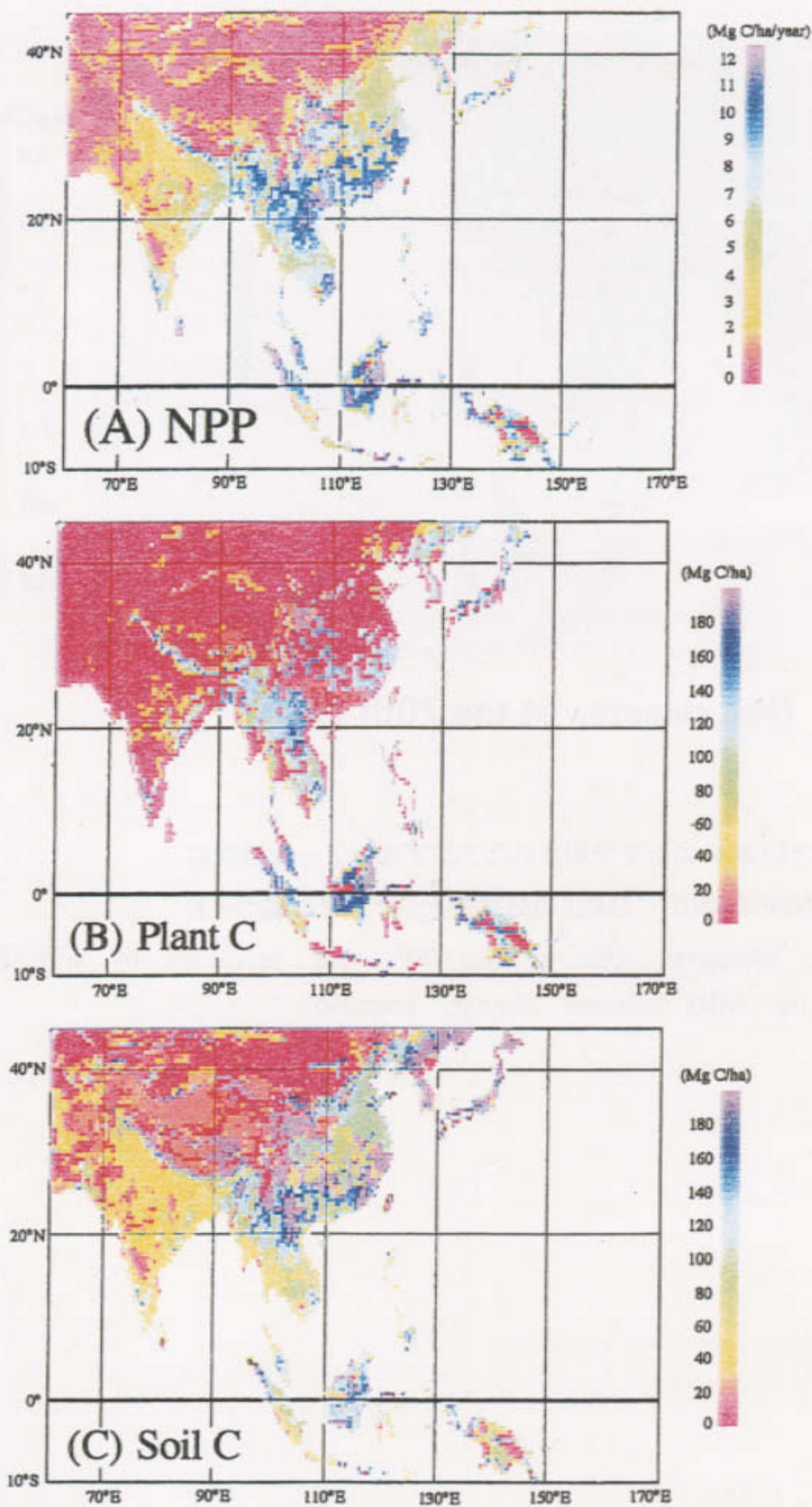
図3. 陸上生態系の炭素収支シミュレーター、Sim-CYCLEの模式図



Biome distribution of Monsoon Asia.

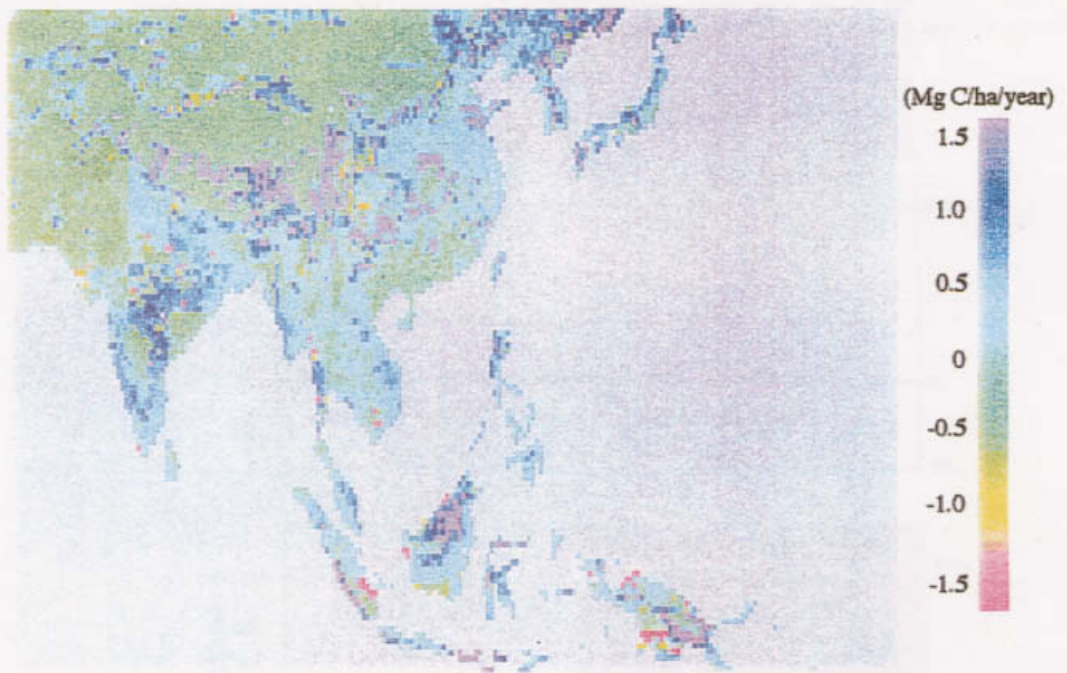
図4 アジアモンスーン地域のバイオームタイプの分布

(Olson et al. 1983 に基づく)



Regional distribution of (A) NPP (B) plant carbon, and (C) soil carbon, in Monsoon Asia, estimated by the equilibrium run.

図5 Sim-CYCLEによって予測されたアジアモンスーン地域の現在の
(A)NPP、(B)植物体炭素、(C)土壌中の炭素。



(MRI climate, at the 70th year)

図6 Sim-CYCLEによって予測されたアジアモンスーン地域の
70年後のNPPの変化 (MRIの気候変化シナリオに基づく)。

Fig.5 NPP in Monsoon Asia at the 70th year predicted by Sim-CYCLE
(based on MRI climate change scenario)