

炭素循環モデルによる地球温暖化の
陸上生態系への影響の予測に関する研究

後藤 尚弘

①

炭素循環モデルによる地球温暖化の
陸上生態系への影響の予測に関する研究

鈴木研究室 後藤尚弘

目次

序章 本論文の背景と目的及び本論文の構成	1
0-1 地球温暖化問題	1
0-2 陸上生態系の炭素循環	2
0-3 陸上生態系の炭素循環モデルに関する既往の研究	3
0-3-1 気候分類法	3
0-2-2 ブックキーピングモデル	4
0-2-3 気候モデル	4
0-2-4 炭素循環モデル	5
0-4 本論文の目的	5
0-5 本論文の構成	6
序章参考文献	12
第1章 陸上生態系の炭素循環モデル	15
1-1 モデルの構造	15
1-2 各ボックスにおける炭素収支式	17
1-2-1 植生の炭素循環	17
1-2-2 土壌の炭素循環	17
1-3 各ボックス間の炭素移動式	18
1-3-1 葉の光合成速度	19
1-3-1-1 光特性	21
1-3-1-2 温度特性	25
1-3-1-3 水分特性	26
1-3-1-4 炭酸ガス特性	27
1-3-2 幹の呼吸速度	28
1-3-3 落葉、枯死速度	30
1-3-4 土壌分解速度	30
1-3-4-1 土壌からの炭酸ガス放出速度	30
1-3-4-2 土壌分解速度の温度依存性	31
1-3-4-3 土壌分解速度の土壌水分量依存性	32
1-4 環境条件の設定	33
1-4-1 土壌の水分保持能力(しおれ点、圃場水分量)	33
1-4-2 土壌水分計算法	35
1-4-3 平均日射量及び日長時間の推定法	36
1-5 パラメータの設定	38
第1章参考文献	48

第2章	モデルの検証	54
2-1	植生の炭素循環に関する検証	54
2-1-1	植生の炭素蓄積量	54
2-1-2	植生の純生産速度	55
2-2	土壌の炭素循環に関する検証	55
2-2-1	土壌炭素の鉛直分布	55
2-2-2	土壌炭素蓄積量	56
第3章	地球規模の陸上生態系の炭素循環及びその将来予測	73
3-1	地球規模の陸上生態系の炭素循環	73
3-1-1	地球規模の植生の炭素循環	73
3-1-2	地球規模の土壌炭素蓄積量	75
3-2	気候変動による陸上生態系の炭素循環の変動予測	75
第4章	植生分布変動モデル	84
4-1	植生分布変動モデル	84
4-2	現在の気候下での植生分布	85
4-3	パラメータの植生分布へ及ぼす影響	87
4-3-1	植生の種類に固有のパラメータの植生分布へ及ぼす影響	88
4-3-2	温度条件に関するパラメータの植生分布へ及ぼす影響	88
4-3-3	土壌条件に関するパラメータの植生分布へ及ぼす影響	89
4-4	植生分布の変動予測	90
4-5	非定常状態における植生分布の変動	92
4-6	過去の植生分布の変動	93
4-7	非定常植生分布変動モデルによる将来予測	94
第2～4章参考文献		138
終章	総括と今後の展望	140
5-1	本研究のまとめ	140
5-2	将来への対策	141
5-3	今後の展望	143
終章参考文献		145
Appendix	式一覧	A-1
	記号一覧	A-6
	Program List	A-8
	業績一覧	A-17

序章 本論文の背景と目的及び本論文の構成

本章の目的

本章では現在大気中の炭酸ガス濃度増加による地球温暖化問題についての背景及び問題点について述べ、それに関する既往の研究をまとめる。さらに、こうした点を踏まえ、本論文の目的を設定するとともに、本論文の構成について述べる。

0-1 地球温暖化問題

近年、大気中の炭酸ガスをはじめとする温室効果ガスによる地球温暖化、フロンガスによるオゾン層破壊、大気中の亜硫酸ガスや窒素酸化物による酸性雨、産業廃棄物の海洋投棄や原油の流出による海洋汚染、焼畑農業や森林伐採による熱帯雨林の破壊、過放牧による砂漠化の進行等、様々な地球規模の環境問題がクローズアップされている。

中でも大気中の炭酸ガス濃度上昇による地球温暖化は、地球規模の昇温を引き起こすことが予想される。なぜなら、大気中の炭酸ガスは太陽から地球への放射は吸収しないが、地球からの赤外放射は吸収するという性質があり、現在の大気中の炭酸ガス濃度が上昇すると、ますます地球からの熱が宇宙空間に逃げにくくなるからである。これまでの気候変動についての研究では、炭酸ガスが現在の2倍になったときの平衡状態において、地球の気温は全球平均で1.9~5.2℃上昇し、降雨量は全球平均で3~15%増加することが予想されている。これは、地球の大気中のエネルギーや水蒸気、オゾン、運動量等の収支を記述した大気循環モデル (General Circulation Model、以下GCM) によるものである。Fig. 0-1-1、Table 0-1-1に様々なGCMによる気候変動の予測を示す (気象庁、1990)。但し、Fig. 0-1-1、Table 0-1-1に示してある気候変動は全球の平均であり、地域や季節によって気候変動の幅は異なることも予測されている。このような気候変動のために、南北両極の氷河の融解や水温上昇による海洋の膨張による海面の上昇やそれに伴う地下水の塩分上昇、気温の上昇と降水量の変化による土壌の乾燥化とそれに伴う農業生産量の変動や砂漠化の進行等、人間生活に様々な影響を及ぼすことが予想されている。

一方、大気中の炭酸ガス濃度上昇の原因は石油、石炭等の化石燃料の燃焼と森林破壊によるとされている。Table 0-1-2に示す統計 (茅、1993) によると、1980年から1988年までの間に炭素量にして約480億トンの炭酸ガスが化石燃料の消費によって排出された。この化石燃料の消費によって放出された炭酸ガスがそのまま大気中に残留するとすると、大気中の炭酸ガス濃度は約23ppm増加する計算になるが、Fig. 0-1-2に示すように実際にその間の増加量は日本上空対流圏上部の観測によると約13ppmに過ぎない (田中、1989)。つまり、化石燃料の消費によって放出された炭酸ガスの約57%が大気中に残留し、

残りの約43%は海洋あるいは陸上生物圏に吸収されていると考えられる。しかし、海洋がそれほど莫大な炭酸ガスを吸収する機構は解明されておらず、また、陸上生物圏は近年の森林破壊によって炭酸ガスの吸収源ではなくむしろ放出源であると考えられている。このように、地球規模の炭素循環は未だに解明されておらず、化石燃料の消費によって放出された炭酸ガスの内、大気に残留しない分の吸収源は"Problem of missing sink"として焦点となっている。現在までの知見で得られる地球規模の炭素循環図と主な炭素のリザーバーとフラックスをそれぞれFig. 0-1-3とTable 0-1-3 (Bolin et al., 1979) に示す。

このように大気中の炭酸ガス濃度上昇による地球温暖化問題は、不明な要素が多く、多くの地球環境問題の中でもその対応策を構ることが困難な問題であるといえる。また、こうした地球温暖化問題を考えるとき重要なのは、その視点を地球規模に拡大しなければならないことであり、室内実験や野外調査等では直接成果を上げることが難しいことである。こうした地球温暖化への対応策は、今まで炭酸ガス排出量の制限等様々な方面で検討されているが、どれも科学的根拠に乏しいといえよう。よって、地球温暖化問題に対する有効な対応策を検討するためには、炭酸ガス濃度上昇の原因を定量的に理解し、温暖化による地球環境への影響を高い精度で把握する必要がある。

そのためには大気、海洋、陸上生物圏を含めた地球規模の炭素循環を理解することが不可欠である。Fig. 0-1-4に地球の炭素循環の概略図を示す (Houghton and Woodwell, 1989)。Fig. 0-1-4に示すように、地球の炭素のリザーバーは大きく分けて大気、海洋、陸上生態系が挙げられ、さらに人間活動からの炭酸ガス放出が大きな役割を占めているといえよう。このような炭酸ガスの地球規模の炭素収支を理解し、それを記述するモデルを構築することは極めて重要であるといえよう。そこで、まず取り組むべきことの一つとして、地球規模の炭素循環モデルのサブモデルである陸上生態系の炭素循環を把握することが挙げられる。陸上生態系の炭素循環を把握することによって、森林伐採等の人間活動の陸上生態系への影響が地球規模の炭素循環に及ぼす影響や、逆に気候変動の影響がどう陸上生態系の炭素循環に影響を及ぼすかを検討することができる。こうした点から、陸上生態系の炭素循環を記述する数値モデルを構築し、陸上生態系の定量的かつ時間的な変動を検討することが求められている。また、このような数値モデルを構築するためには、陸上生態系を一つのシステムとして捉え、それを構成する各部分を定式化する必要がある。よって、大気と陸上生態系間の炭素循環を理解し、炭酸ガス濃度上昇に占める陸上生物圏の役割を定量的に理解し、地球温暖化による陸上生物圏への影響を高い精度で把握することが早急に望まれる。

0-2 陸上生態系の炭素循環

陸上生態系の炭素循環を理解するためには、植生や土壌の炭素蓄積量や植生の一次生産量等を把握する必要がある。次頁のTable 0-2-1に過去において推定された陸上生態系の植生、土壌の各炭素蓄積量、植生の一次生産量の推定値を示す。

Table 0-2-1 陸上生態系の炭素循環の推定

植生炭素 蓄積量	土壌炭素 蓄積量	一次生産 GtC/yr	
GtC	GtC		
829	-	73.2	Whittaker and Likens (1973)
-	-	100.2	Lieth (1975)
-	3000	-	Bohn (1976)
-	700	-	Bolin (1977)
-	1456	-	Schlesinger (1977)
592	1672	62.7	Bolin et al. (1979)
560	2070	59.9	Ajay et al. (1979)
-	2946	-	Bohn (1978)
-	1395	-	Post et al. (1982)
608	1213	39.6	依田 (1982)
-	1515	-	Schlesinger (1983)
-	1477	-	Buringh (1983)
560	1500	50	Houghton and Woodwell (1989)
-	1700	-	Bouwman (1990)
-	1394	-	Jenkinson et al. (1991)

これらの値が気候変動によってどう変化するかを予測するためには、陸上生態系の炭素循環をモデル化する必要がある。

0-3 陸上生態系の炭素循環モデルに関する既往の研究

これまでの陸上生態系の炭素循環を地球規模の視点で捉えた研究は、気候分類法、ブックキーピングモデル、気候モデル、炭素循環モデルの4つに分類できる。以下に各研究の概略を述べる。

0-3-1 気候分類法

気候と陸上生態系との対応関係を構築し、それを基に将来の気候に対応する植生を将来の植生とする方法。例えば、Holdridge (1947) はFig. 0-3-1に示すように世界の陸上植生をPotential evapotranspiration ratio、Average total annual precipitation、Mean annual biotemperatureの3つの気候条件によって39に分類した。これに対して、気候条件と土壌分類の関係を直接表す指標というものはないのが現状である。Post et al. (1985) はHoldridgeの植生分類と土壌炭素量との関係を構築している。Prentice (1990) はKöppen

の気候分類やHoldridgeの植生分布図等いくつかの気候と植生の対応関係をGCMでも使用できるように再構築している。また、Emanuel et al. (1985) や Monserud et al. (1992) は、GCMから得られる気候変動後の気候からHoldridgeの植生分類を用いて植生分布図を作り、現在の植生分布図との差から気候変動の影響を評価している。このような方法は植生分布の変動で気候変動を評価しているため、炭素量の変動を定量的に推定できないのが欠点である。これに対して、Prentice and Fung (1990) はHoldridgeの植生分類図と世界各地の植生の現存量のデータを組み合わせて、気候変動による植生の変動を定量的に評価している。

0-2-2 ブックキーピングモデル

ブックキーピングモデルとは世界各地から植生の現存量や一次生産に関するデータを集め、それらをまとめる方法 (Bohn, 1978, Houghton et al., 1983, 1987, Seiler et al., 1980) である。過去の土地利用形態の記録を基にして、森林伐採や焼畑農業等による陸上生態系の大気への炭酸ガス放出量を推定することができる。ブックキーピングモデルは自然は元来、大気との間の炭素収支が釣り合った状態である平衡状態にあり、人間がこの安定した状態を擾乱することによって生じた炭素収支のアンバランスは、再び長時間の時間の経緯を経て、再び新しい平衡状態に至るということを前提として、非平衡状態における炭素の移動を定量的に評価しようとするモデルである。この方法は、応答速度は、光合成や呼吸等の生命活動を考慮するのではなく、地域や植生毎に何年間でのどの程度回復したかというような過去の記録等に基づいて決定される。この手法によって、熱帯雨林の伐採によってどの程度の炭酸ガスが大気中に放出され、それが地球全体の総放出量に対してどの程度の割合に相当するかが計算される。しかしながら、このモデルは基本概念があくまで土地利用形態の変化の影響を評価するところにあるので、式やパラメータの決め方や使い方が経験的であり、気候条件や大気中の炭酸ガス濃度等の変化を考慮することができないため、地球環境の将来予測には適さない。

0-2-3 気候モデル

世界各地の植生の現存量や一次生産に関するデータと、データを測定した場所の気候条件から、植生の現存量や一次生産と気候条件との間に経験式を構築する方法。Lieth (1973) は温度および降水量と一次生産の関係を示す経験式を構築した。Uchijima et al. (1985) は年間純放射、年間降水量、水の蒸発潜熱から植生の純一次生産を求める式を構築した。このモデルを基に清野ら (1990) は気候変動による全地球の一次生産の変動を+9.6~16.2%と推定している。

0-2-4 炭素循環モデル

陸上生態系内の炭素循環をモデルによって解析する研究は、陸上生態系をいくつかのコンパートメントに分けたコンパートメントモデルが主に研究されている。コンパートメントモデルによる陸上生態系内の炭素循環の解析に関する研究は、極めて狭い範囲、つまり、個々の植生を対象とした局所的な炭素循環モデルと、地球上の全植生を総括し、巨視的な視野に立った地球規模的な炭素循環モデルに大別できる。前者は正統的な生態学の一つの支流であり、地道なフィールド調査に基づきツンドラ (Miller et al., 1983) や熱帯雨林 (Oikawa, 1985) やサバンナ (Hunt et al., 1991) 等、個々の植生を解析したものであり、過去より数多くの研究がなされてきた。しかし、地球規模の炭素循環を簡潔に記述するためには、全ての植生を共通のモデルで表す必要があり、こうした個々の植生を対象としたモデルをそのまま適用することは出来ない。また、後者は炭素の蓄積形態によって地球をいくつかのボックスに分け、それらの間の炭素のフラックスを定量的に推定するという方法である。これまでは海洋を含めた地球全体の炭素循環をモデル化している研究が多い (Emanuel et al., 1984, Goudriaan et al., 1984, Gowdy et al., 1975, Harvey, 1989)。また、Jenkinson et al. (1991) は地球全体の土壌の炭素循環をモデル化し、土壌から今後60年間に 61×10^{15} gC放出すると推定している。しかしながら、これらのモデルは地域による違いを考慮していない研究が多く、GCMによって予測されている気候変動の地域による差を組み込むには不十分である。こうした問題を解決するために地球の陸地を幾つかのメッシュに区切る方法が試みられている。Krapivin et al. (1990) は地球を経度5度×緯度4度のメッシュに区切り、各メッシュ内の陸上生態系の炭素循環をモデル化した。ただし、各メッシュの一次生産や土壌の現存量をあらかじめ気候条件から与えており、この点は気候分類法と共通する。Esser (1987) は化石燃料の消費を含めた炭素循環を経験式を積み上げることによってモデルを構築した。さらに、陸地を2433のメッシュに区切り、各メッシュ毎に気候変動の影響を予測した。ただし、各メッシュ内の炭素循環は経験式を積み上げており、この点は気候モデルと共通する。

Table 0-3-1に気候分類法、ブックキーピングモデル、気候モデル、炭素循環モデルの概略をまとめた。

0-4 本論文の目的

以上、大気中の炭酸ガス濃度上昇による気候変動が陸上生態系に与える影響についての背景と既往の研究について述べた。気候変動が陸上生態系に与える影響を定量的に把握するためには、陸上生態系の炭素循環を記述する数理モデルを構築することが不可欠であるといえよう。しかしながら、これまでの陸上生態系の炭素循環を記述するモデルは経験式を積み上げたものであり、将来予測には適さない。また、GCMの計算結果に

よると気候変動の幅に地域や季節による違いが予測されることから、このような地域や季節による気候変動の差を踏まえた将来予測が必要がある。さらに、気候変動によって陸上生態系の炭素循環だけでなく、植生の分布も変動することが予測される。つまり、気候変動による陸上生態系へのインパクトを評価する時、陸上生態系の炭素循環の変動と植生分布の変動の両者を評価する必要がある。よって、本研究では以上を鑑みた陸上生態系の炭素循環を記述する数理モデルを構築することを目的としている。

0-5 本論文の構成

本論文は序章、1～4章及び、終章から構成されており、各章の概要は次の通りである。

第1章においては、陸上生態系の炭素循環モデルの概要を述べるとともに、モデルで使用する各パラメーターについて言及する。

第2章においては、植生の炭素蓄積量と純生産速度及び土壌の炭素蓄積量に関して実測値と計算値を比較することによって、第1章において構築した陸上生態系の炭素循環モデルの検証を行う。

第3章においては、地球規模の陸上生態系の炭素循環を推算し、さらに、気候変動がそれらに与える影響について予測を行う。

第4章においては、定常状態における植生分布の変動モデルの概要について述べ、現在の気候条件における植生分布を記述し、各パラメータが植生分布に与える影響を検討する。また、気候変動が植生分布に与える影響について予測を行う。さらに、こうした植生分布の変動モデルを発展させ、非定常状態における植生分布の変動モデルを構築する。また、非定常状態における気候変動による植生分布の変動について予測を行う。

終章においては、本研究の総括と展望を行う。

本論文の構成をFig. 0-5-1に示す。

Table 0-1-1 最近の大气・海洋混合層モデルによる平衡実験 (気象庁、1990)

実験		研究者	水平解像度	鉛直解像度	日変化	$\Delta T(^{\circ}C)$	$\Delta Pr(^{\circ}C)$	備考
雲量は固定 海流の熱輸送なし	1	Manabe & Stauffer (1981)	R15	9	無	2.0	3.5	GFDL 地球気候モデル研究センター NOAA
	2	Manabe & Wetherald (1986, 88)	R15	9	無	3.2	—	"
雲量は予報 海流の熱輸送なし	3	Schlesinger & Zhao (1989)	4°×5°	2	無	2.8	8	OSU (米国オレゴン州立大学)
	4	Schlesinger (1989)	4°×5°	2	無	4.4	11	"
	5	Noda & Takioka (1989)	4°×5°	5	有	4.3	7	MRI (気象庁気象研究所)
	6	Washington & Meehl (1984)	R15	9	無	3.5	7	NCAR (米国国立大気研究センター)
	7	Washington & Meehl (1989)	R15	9	無	4.0	8	"
	8	Manabe & Wetherald (1986)	R15	9	無	4.0	9	GFDL/NOAA
雲量は予報 海流の熱輸送を考慮する	9	Godon & Hunt (1989)	R21	4	有	4.0	7	AUS/CSIRO (オーストラリア気候研究機関)
	10	Hansen et al. (1979)	8°×10°	7	有	3.9	—	GISS (米国ゴダード宇宙研究所)
	11	Hansen et al. (1984)	8°×10°	9	有	4.2	11	"
	12	Hansen et al. (1984)	8°×10°	9	有	4.8	13	"
	13	Manabe & Wetherald (1989)	R15	9	有	4.0	8	GFDL/NOAA
	14	Wilson & Mitchell (1987)	5°×7.5°	11	有	5.2	15	UKMO (連合王国気象局)
	15	Mitchell & Warrilow (1987)	5°×7.5°	11	有	5.2	15	"
	16	Mitchell et al. (1989)	5°×7.5°	11	有	2.7	6	"
	17	Mitchell et al. (1989)	5°×7.5°	11	有	3.2	8	"
	18	Mitchell et al. (1989)	5°×7.5°	11	有	1.9	3	"
水平高解像度、 雲量は予報、海流 の熱輸送を考慮する	19	Boer et al. (1989)	T32	10	有	4.4	4	CCC (カナダ気候センター)
	20	Manabe & Wetherald (1989)	R30	9	無	4.3	8	GFDL/NOAA
	21	Mitchell et al. (1989)	2.5°×3.75°	11	有	3.5	9	UKMO

R15, R30, T32: 地球を取り巻く紙の数を最大15, 30, 32まで取り扱うスペクトルモデル

4°×5°: 緯度幅が4°, 経度幅が5°の格子点モデル

ΔT : 全球平均した地上気温上昇量

ΔPr : 全球平均した降水量増加率

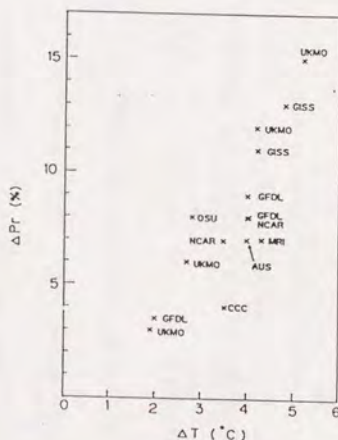


Fig. 0-1-1 Table 0-1-1に示したCO₂倍増時の平衡状態の気候変化を求める実験から得られる全球平均地上気温の上昇量 (ΔT) と全球平均降水量の増加量 (ΔPr) の様子 (気象庁、1990)

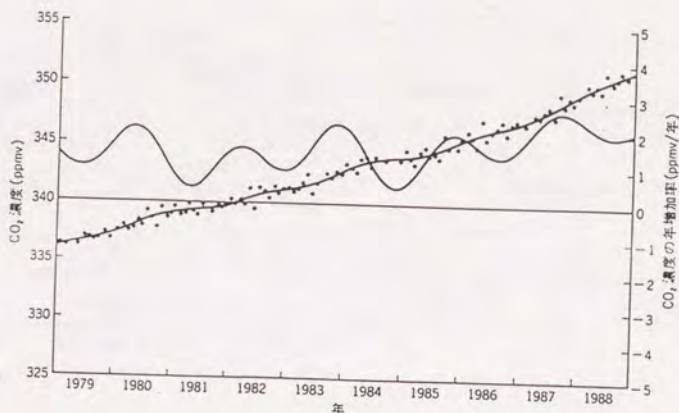


Fig. 0-1-2 日本上空対流圏上部（8 km～圏界面）における炭酸ガス濃度の経年的なトレンド（データ点を伴った右上がりの曲線）と年増加率（波打った曲線）
トレンドは実際の観測値から季節変化を除去して得られる（田中、1989）

Table 0-1-2 エネルギー消費と産業活動による炭酸ガス排出の長期変化（茅、1993）

	石炭	石油	天然ガス	セメント	合計	石炭	石油	天然ガス	セメント	合計
	実数(100万t-C)					構成比(%)				
1860	93	0	0	NA	93	100	0	0	NA	100
1870	144	1	0	NA	145	100	0	0	NA	100
1880	224	3	0	NA	227	99	1	0	NA	100
1890	340	8	2	NA	350	97	2	1	NA	100
1900	505	16	4	NA	525	96	3	1	NA	100
1910	762	35	8	NA	805	95	4	1	NA	100
1920	870	76	13	NA	959	91	8	1	NA	100
1930	898	151	28	NA	1,078	83	14	3	NA	100
1940	1,033	225	43	NA	1,300	79	17	3	NA	100
1950	1,077	423	114	18	1,632	66	26	7	1	100
1960	1,419	850	274	43	2,586	55	33	11	2	100
1970	1,571	1,838	602	78	4,089	38	45	15	2	100
1971	1,571	1,946	641	84	4,242	37	46	15	2	100
1972	1,587	2,056	677	89	4,409	36	47	15	2	100
1973	1,594	2,240	717	95	4,646	34	48	15	2	100
1974	1,591	2,244	724	96	4,655	34	48	16	2	100
1975	1,686	2,131	715	95	4,627	36	46	15	2	100
1976	1,723	2,313	755	103	4,894	35	47	15	2	100
1977	1,786	2,390	750	108	5,034	35	47	15	2	100
1978	1,802	2,383	780	116	5,081	35	47	15	2	100
1979	1,899	2,535	813	119	5,366	35	47	15	2	100
1980	1,921	2,409	813	120	5,263	37	46	15	2	100
1981	1,930	2,272	806	121	5,129	38	44	16	2	100
1982	1,993	2,178	802	121	5,094	39	43	16	2	100
1983	1,998	2,163	798	125	5,084	39	43	16	2	100
1984	2,088	2,191	853	128	5,260	40	42	16	2	100
1985	2,196	2,172	881	130	5,379	41	40	16	2	100
1986	2,253	2,277	895	136	5,561	41	41	16	2	100
1987	2,313	2,290	936	142	5,681	41	40	16	2	100
1988	2,385	2,392	967	150	5,894	40	41	16	3	100

(注) * 石炭には亜炭も含まれている。

<出典> 米国 Oak Ridge 国立研究所, "TRENDS '90" のデータから作成。

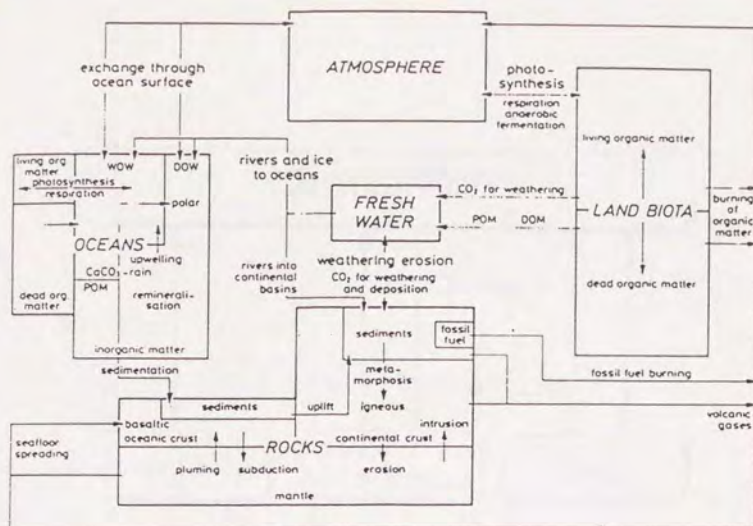


Fig. 0-1-3 地球規模の炭素循環概略図 (Bolin et al., 1979)

Table 0-1-3 主な炭素のリザーバーとフラックス (Bolin et al., 1979)

Reservoirs	10^{13} g C
Atmosphere: Before 1850	
Common assumption: 290 ppm	610
Stuiver (1978)	
Chapter 15, this volume 265 ppm	560
1978 329 ppm	692
Oceans: Total amounts, inorganic	35 000
Above thermocline, low and middle latitudes	600
Dissolved organic matter, Chapter 11, this volume	1 000
Particulate organic matter, biomass, Chapter 10, this volume	3
Land biota: Whittaker and Likens (1975)	827
Bazilevich et al. (1970)	976
Duvigneaud, this chapter	592
Soil, humus: Keeling (1973a)	1 050
Bohn, 1978	3 000
Duvigneaud, this chapter	2 840
Sediments: Total	>10 000 000
Available for dissolution in oceans	
Broecker and Takahashi (1977)	4 900
Fossil fuels	>5 000
Fluxes	10^{13} g C/year
Atmosphere: oceans, gross exchange	100
Atmosphere: land biota, photosynthesis	
Whittaker and Likens (1975)	53
Bazilevich et al. (1970)	78
Duvigneaud, this chapter	63
Ocean photosynthesis: Chapter 10, this volume	
maximum	126
minimum	15
adopted average	45
Lands to oceans: Chapter 12, this volume	
dissolved inorganic matter	0.4
dissolved organic matter	0.1
particulate organic matter	0.06
Deposition in oceans: Peng et al. (1977)	1-10
Fossil fuel combustion, 1978	5

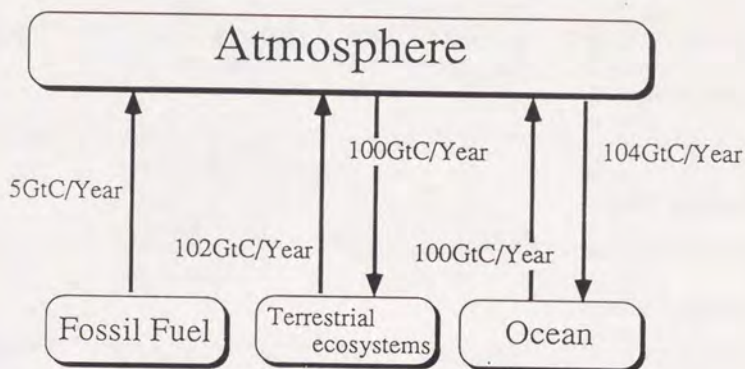


Fig. 0-1-4 地球規模の炭素循環概略図

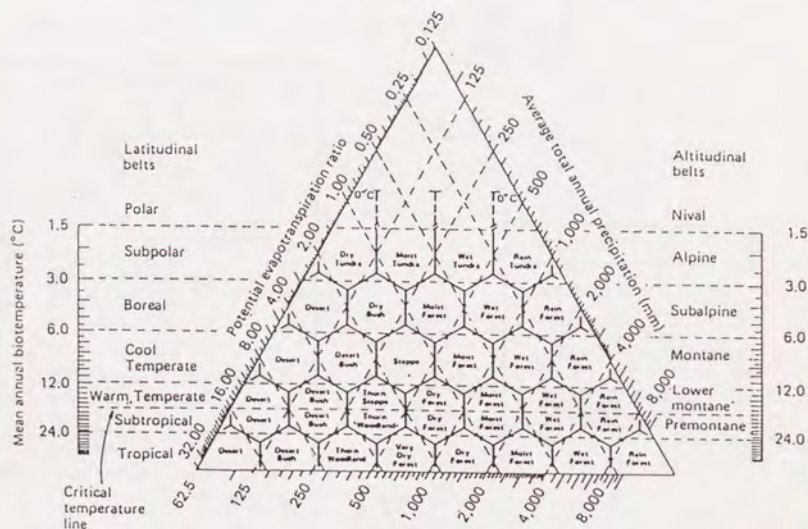


Fig. 0-3-1 Holdridgeの気候分類 (Holdridge, 1947)

Table 0-3-1 陸上生態系モデルの概要

モデル	特徴	長所	短所
気候分類法	・気候条件と陸上生態系との対応関係を構築する	・現状を良く再現できる ・植生の種類の分布図が書ける	・定量的、時間変化的な検討はできない ・土壌に関する検討はできない
ブックキーピングモデル	・過去のデータから、土地利用形態の変化による陸上生態系からの二酸化炭素放出量を予測する	・将来予測できる	・時間変化的な検討はできない ・気候変動の影響は考慮できない
気候モデル	・世界各地のデータを集め経験式を構築する	・現状を良く再現できる	・時間変化的な検討はできない ・各種植生、土壌の特長は考慮されない
炭素循環モデル	・陸上生態系内の炭素のフラックスを模式化する	・定量的、時間変化的な検討ができる ・様々な種類の植生、土壌について検討できる	・モデルの検証が必要

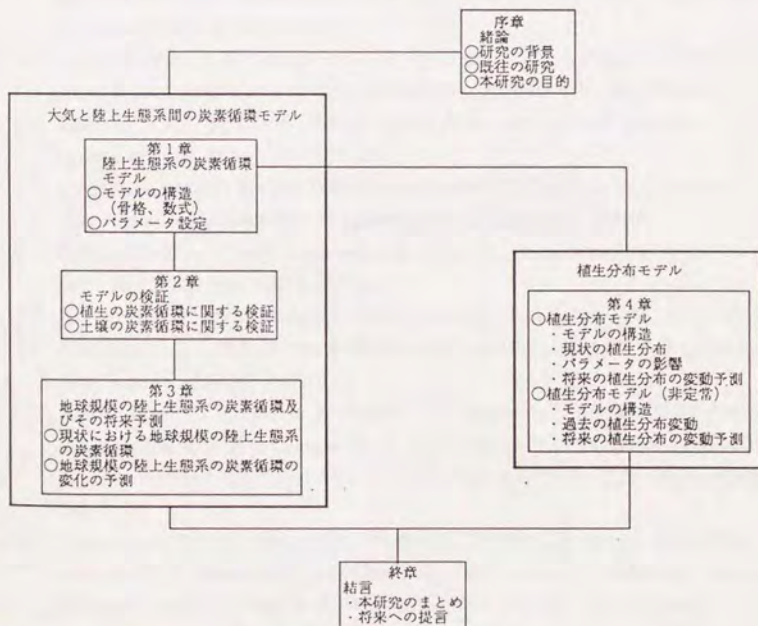


Fig. 0-5-1 本論文の構成

序章参考文献

- 1) Ajtay, G.L., P. Kenter and P. Duvigneayd, B. Bolin, E.T. Degens, S. Kemps and P. Kenter (eds.), 1979, *The Global Carbon Cycle*, SCOPE 13, John Wiley and Sons, New York, 129-182
- 2) Bohn, H.L., 1976, Estimate of organic carbon in world soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 468-470
- 3) Bohn, H.L., 1978, On organic soil carbon and CO_2 , *Tellus*, 30, 472-75
- 4) Bolin, B., 1977, Changes of land biota and their importance for the carbon cycle, *Science*, 196, 613-615
- 5) Bolin B., E.T. Degens, P. Duvigneayd and S. Kempe, 1979, *The Global Biogeochemical Carbon Cycle*, *The Global Carbon Cycle*, B. Bolin, E.T. Degens, S. Kempe and P. Kenter (eds.), John Wiley & Sons, 4-5
- 6) Bouwman, A.F., Soil and the greenhouse effect, John Wiley & Sons, 61, 1990
- 7) Buringh, P., *The global carbon cycle*, John Wiley & Sons, 91, 1979
- 8) Emanuel, W.R., G.G. Killough, W.M. Post and H.H. Shugart, 1984, Modeling terrestrial ecosystems in the global carbon cycle with shifts in carbon storage capacity by land-use change, *Ecology*, 65, 970-983
- 9) Emanuel, W.R., H.H. Shugart and M.P. Stevenson, 1985, Climatic Change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes, *Climatic Change*, 7, 29-43
- 10) Esser, G., 1987, Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts, *Tellus*, 39B, 245-260
- 11) Goudriaan, J. and P. Kenter, 1984, A simulation study for the global carbon cycle, including man's impact on the biosphere, *Climatic Change*, 6, 167-192
- 12) Gowdy, C.M., R.J. Mulholland and W.R. Emanuel, 1975, Modelling the global carbon cycle, *Int. J. Systems Sci.*, 6, 965-976
- 13) Harvey, L.D.D., 1989, Managing atmospheric CO_2 , *Climatic Change*, 15, 343-381
- 14) Holdridge, L.R., 1947, Determination of world plant formations from simple climate data, *Science*, 105, 367-368
- 15) Houghton, R.A. J.E. Hobbie, J.M. Melillo, B. Moore, B.J. Peterson, G.R. Shaver and Woodwell, G.M., 1983, Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO_2 to the atmosphere, *Ecol. Monographs*, 53, 235-262
- 16) Houghton, R.A., R.D. Boone, J.R. Fruci, J.E. Hobbie, J.M. Melillo, C.A. Palm, B.J. Peterson, G.R. Shaver and G.M. Woodwell, 1987, The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use: geographic distribution of the global flux, *Tellus*, 39B, 122-139
- 17) Houghton, R.A. and G.M. Woodwell, 1989, *Global Carbon Cycle*, *Scientific American*, 260, 18-26

- 1 8) Hunt, H.W., M.J. Trlica, E.F. Redente, J.C. Moore, J.K. Detling, T.G.F. Kittel, D.E. Walter, M.C. Foeler, D.A. Klein and E.T. Elliot, 1991, Simulation model for the effects of climate change on temperate grassland ecosystems, *Ecol. Modelling*, 53, 205-246
- 1 9) Jenkinson, D.S., D.E. Adams and A. Wild, 1991, Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming, *Nature*, 351, 304-306
- 2 0) 茅陽一編, 1993, 地球環境データブック, 298, オーム社
- 2 1) 気象庁編, 1990, 温室効果期待の増加に伴う気候変化 (II), 気候問題懇談会温室効果検討部会報告, 126-127, 大蔵省印刷局
- 2 2) Krapivin, V.F. and L.P. Vilokova, 1990, Model estimation of excess CO₂ distribution in biosphere structure, *Ecol. Modelling*, 50, 57-78
- 2 3) Lieth, H., 1973, Primary production : terrestrial ecosystems, *Human Ecology*, 1, 303-332
- 2 4) Lieth, H., 1975, Primary Productivity the Biosphere, Springer-Verlag, New York, 203-215
- 2 5) Miller, P.C., R.O. Keddall and C. Walter, 1983, Simulating carbon accumulation in northern ecosystems, *Simulation*, 119-131
- 2 6) Monserud, R.A. and R. Leemans, 1992, Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic, *Ecol. Modelling*, 62, 275-293
- 2 7) Oikawa, T., 1985, Simulation of forest carbon dynamics based on a dry-matter production model 1. fundamental model structure of a tropical rainforest ecosystem, *Bot. Mag. Tokyo*, 98, 225-238
- 2 8) Post, W.M., W.R. Emanuel, P.J. Zinke, and A.G. Stangenberger, 1982, Soil carbon pools and world life zones, *Nature*, 298, 156-159
- 2 9) Post, W.M., J. Pastor, P.J. Zinke and A.G. Stangenberger, 1985, Global patterns of soil nitrogen storage, *Nature*, 317, 613-616
- 3 0) Prentice, K.C., 1990, Bioclimatic distribution of vegetation for general circulation model studies, *J. Geophysical Res.*, 95, D8, 11811-11830
- 3 1) Prentice, K.C. and I.Y. Fung, 1990, The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change, *Nature*, 346, 48-51
- 3 2) Schlesinger, W.H., 1977, Carbon balance in terrestrial detritus, *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 8, 51-81
- 3 3) Schlesinger, W.H., 1983, The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle, John Wiley & Sons, 111
- 3 4) Seiler, W. and P.J. Crutzen, 1980, Estimates of Gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning, *Climatic Change*, 2, 207-247
- 3 5) 清野 豁、内嶋善兵衛, 1990, 農業気象全国大会要旨, 72
- 3 6) 田中正之, 1989, 二酸化炭素濃度の変動, *科学*, 59, 566-573
- 3 7) Uchijima, Z. and H. Seino, 1985, Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation: (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. *J. Agr.*

Met.,40, 343-352

- 3 8) Whittaker, R.H. and G.E. Likens, 1973, Carbon and biosphere, U. S. Atomic Energy Commission, 281-300
- 4 0) 依田恭二, 1982, 大気中の二酸化炭素濃度に対する陸上生態系の影響, 地球化学, 16, 78-85

第1章 陸上生態系の炭素循環モデル

本章の目的

本章では陸上生態系の炭素循環モデルを構築したのでその構造について述べる。さらに、本モデルで使用したパラメータについても述べる。

1-1 モデルの構造

Fig. 1-1-1に示すようにまず、陸上生態系はその炭素蓄積の形態の違いから植生、土壌の2つに分けることができる。さらに、植生を光合成する部分である「葉」、光合成しない部分である「幹（枝や根も含む）」の2つのボックスに、また、土壌を分解速度の速い「植物遺体」、分解速度の遅い「腐植質」の2つのボックスに分けることができる。これら4つのボックスに「大気」を含めた5つのボックス間の炭素移動をモデル化した。また、各ボックス間の炭素移動は以下のTable 1-1-1のように分類することができる。

Table 1-1-1 各ボックス間の炭素移動の分類

ボックス		フラックス	
大気	→	葉	葉の光合成
葉	→	土壌	落葉
幹	→	大気	幹の呼吸
幹	→	土壌	幹の枯死
植物遺体	→	腐植質	植物遺体の腐植化
植物遺体	→	大気	植物遺体の分解
腐植質	→	大気	腐植質の分解

また、本研究では将来の気候変動の影響を予測するため、陸上生態系の炭素循環に影響を及ぼす様々な環境条件をモデルに組み込んだ。植生に影響を及ぼす環境要因としては以下のTable 1-1-2（田崎、1978）のようにまとめることができる。

Table 1-1-2 各環境要因（田崎、1978）

気候要因：光、温度、水、大気、風など
土壌要因：地温、土壌水、pH、物理性、無機塩、通気など
生物要因
複合要因

地球規模の視点に立ち気候変動を考慮すると、温度、土壌水分量（降雨量）、大気中の炭酸ガス濃度が将来変化することが予測される。さらに、これらは直接的に陸上生態系の炭素循環に影響を及ぼすことが予測される。よって、これらの3つの要因はモデルに組み込む必要がある。特に温度要因は生物の活性に関することなので、すべてのフラックスに影響を及ぼすと考えられる。他の要因も多かれ少なかれ陸上生態系の炭素循環に影響を及ぼすことが考えられるが、間接的かつ局所的であることから、その影響が明確でないことから本モデルには組み込まないとした。

光合成は温度、土壌水分量、大気中の炭酸ガス濃度とさらに光要因の影響も受ける（Hesketh, 1963）。光要因は将来の気候変動によって間接的に変動する（雲量の変動による）ことが予想される。しかしながら、地球上の光強度は緯度方向に沿って異なるので、地球上の植生の分布に影響を及ぼすと考えられる。

呼吸も基本的には光合成と同じ様に環境要因の影響を受ける。同化部分の呼吸は光呼吸と暗呼吸に分けることができ、光呼吸は光強度や炭酸ガス濃度の影響を受ける。一方暗呼吸はこれらの影響を受けない（木村、戸塚、1973）。ただし、本モデルでは非同化部の呼吸のみ考慮するのでこれらの影響は直接受けないとした。土壌水分量に関してであるが、土壌水分量が減少すると当然植物の活性としての呼吸は低下する。しかしながら、その低下の度合は光合成に比べて少ない（Hsiao, 1976）。また、非同化部分の呼吸に関してはその直径に依存するという報告もある（Tranquillini and Schütz, 1970、Tsuno and Fujise, 1965）。よって呼吸速度には水分条件の影響を組み込まず、温度の影響のみとした。

葉の落葉速度及び幹の枯死速度は温度（Bray and Gorham, 1964）や水分（堤、1986）の影響を受ける。しかしながら、その関係は定性的であり、落葉林や常緑林などの個々の植物によって大きく異なる。よって、葉の落葉速度及び幹の枯死速度はその植物の寿命に依存すると仮定し、環境条件の影響は組み込まないとした。

土壌の有機物分解速度も微生物や小動物の活動によるので温度の影響（依田、1971、Yoda and Kira, 1969）と水分の影響（瀬戸、1980、瀬戸ら、1978）を受ける。よって本モデルでは温度と土壌水分量の影響を考慮する。

よって、本研究では各ボックス間の炭素移動に以下のTable 1-1-3のような環境条件の影響を組み込んだ。

Table 1-1-3 各ボックス間の炭素移動に及ぼす環境条件

フラックス	環境条件
光合成速度	日射量、温度、土壌水分、炭酸ガス濃度
呼吸速度	温度
植物遺体の分解速度	温度、土壌水分量
腐植質の分解速度	温度、土壌水分量

以下に本モデルにおける各ボックスの炭素収支式、各ボックス間の炭素移動式及び環境条件が炭素移動式に及ぼす影響を示す。

1-2 各ボックスにおける炭素収支式

1-2-1 植生の炭素循環

これまでは、森林や草原などの局所的な植生の炭素循環に関する研究が多くなされてきた (Hunt et al., 1991, Iwaki et al., 1975, Kira et al., 1978, Miller et al., 1983, Oikawa, 1985)。それらによると、Fig. 1-1-1に示すように植生の炭素循環は大気中の炭酸ガスを光合成によって同化するフラックス、大気中へ炭酸ガスを呼吸によって放出するフラックス、植物から落葉や枯死によって土壌へ炭素を供給するフラックスの3つに分けることができる。これら個々のフラックスに関しては植物学、農学の方面から多くの研究がなされており、特に光合成過程は農作物の成長と直接結び付くので多くの研究がなされてきた。一方で、実際の自然植生は個々の植物が集まって群落を形成していることから、植物群落全体の物質生産や森林内の落葉、落枝を含めた炭素循環の研究が生態学の分野でなされてきた。以下に「葉」及び「幹」の炭素収支式を示す。

$$\text{葉} \quad \frac{dC_1}{dt} = \alpha R_1^P - R_1^L \quad (1-2-1)$$

$$\text{幹} \quad \frac{dC_2}{dt} = (1-\alpha)R_1^P - R_2^R - R_2^L \quad (1-2-2)$$

Eq. 1-2-1において、 C_1 は葉の炭素蓄積量 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$]、 α は光合成によって固定化される炭素のうち葉へ分配される割合 [-]、 R_1^P は光合成速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]、 R_1^L は葉の落葉速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]を示す。同様にEq. 1-2-2においては、 C_2 は幹の炭素蓄積量 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$]、 R_2^R は幹の呼吸速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]、 R_2^L は幹の枯死速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]を、 t は時間 [day]を示す。

1-2-2 土壌の炭素循環

土壌内の炭素のフラックスに関する研究は、植物遺体や腐植質の分解過程に関する研究 (Jenkinson, 1990, Parton et al., 1987, Smith, 1979a, b, 武田, 1987, Yoneda, 1975)、森林や草原内の炭素循環の一部としてモデル化する研究に分けられる (中根, 1975, 1978, 酒井ら, 1987, Van Breemen et al., 1990)。これらの研究によると、Fig. 1-1-1のように土壌の炭素循環は落葉や枯死によって土壌表面に堆積された植物遺体が土壌中の微生物や小動物によって分解され、直接大気へ炭酸ガスとして放出されるフラックス、分解されなかった植物遺体が腐植質に変化し土壌中に蓄積されるフラックス、腐植質がゆっくりと炭酸ガスに分解され大気中へ放出されるフラックスの3つに分けられる。しかしながら、土壌炭素は形態の違いにより土壌断面でFig. 1-1-2に示すように連続的に分布しており、その発達度合によっていくつかの層に分けられるため、土壌炭素を明確なボックスに分けるのは困難である。中根 (1975) は土壌を A_0 層、鉱質土層、根の遺体

に分けて、モデル化している。また、Jenkinson (1990) は土壤炭素を易分解性と難分解性に分けて、モデル化している。よって、本研究では土壤有機物である「植物遺体」及び「腐植質」は、地表からの浸透水により鉛直下方向へ移動するために土壤断面で連続的に分布しているとした。以下に「植物遺体」及び「腐植質」の炭素収支式を示す。

$$\text{植物遺体 (地表)} \quad \frac{\partial C_3}{\partial t} = F \frac{\partial C_3}{\partial z} + R_1^L + R_2^L \quad (z=0) \quad (1-2-3-a)$$

$$\text{植物遺体 (土壤中)} \quad \frac{\partial C_3}{\partial t} = F \frac{\partial C_3}{\partial z} - R_3^H - R_3^D \quad (z>0) \quad (1-2-3-b)$$

$$\text{腐植質} \quad \frac{\partial C_4}{\partial t} = F \frac{\partial C_4}{\partial z} + R_3^H - R_4^D \quad (1-2-4)$$

Eqs. 1-2-3-a, bにおいては、 R_1^L は葉の落葉速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]、 R_2^L は幹の枯死速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]、 C_3 は植物遺体の炭素蓄積量 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$]、 R_3^H は植物遺体の腐植化速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]、 R_3^D は植物遺体の分解速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]を、Eq. 1-2-4においては、 C_4 は腐食質の炭素蓄積量 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$]、 R_4^D は腐食質の分解速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]をそれぞれ示す。 F は浸透水による移流速度 [$\text{m} \cdot \text{day}^{-1}$]であるが本研究では降雨量が蒸発散量よりも大きいときのみ土壤炭素の移流が生じるとした。 t は時間[day]、 z は土壤深さ[m]を示す。

1-3 各ボックス間の炭素移動式

Table 1-1-1に示した各ボックス間の炭素移動式は以下のように記述することができる。

$$\text{葉の光合成速度} \quad R_1^P = \eta_{T-P} \eta_{w-P} \eta_{CO_2-P} r_1^P \quad (1-3-1)$$

$$\text{葉の落葉速度} \quad R_1^L = k_1^L C_1 \quad (1-3-2)$$

$$\text{幹の呼吸速度} \quad R_2^R = \eta_{T-R} k_2^R C_2 \quad (1-3-3)$$

$$\text{幹の枯死速度} \quad R_2^L = k_2^L C_2 \quad (1-3-4)$$

$$\text{植物遺体の腐植化速度} \quad R_3^H = k_3^H C_3 \quad (1-3-5)$$

$$\text{植物遺体の分解速度} \quad R_3^D = \eta_{T-D} \eta_{w-D} k_3^D C_3 \quad (1-3-6)$$

$$\text{腐植質の分解速度} \quad R_4^D = \eta_{T-D} \eta_{w-D} k_4^D C_4 \quad (1-3-7)$$

Eq. 1-3-1において、 η_{T-P} は光合成速度の温度依存性[-]、 η_{w-P} は光合成速度の土壤水分依存性[-]、 η_{CO_2-P} は光合成速度の炭酸ガス濃度依存性[-]、 r_1^P は環境条件の影響を排除した光合成速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$]を示す。Eq. 1-3-2において、 k_1^L は落葉速度定数 [$1 \cdot \text{day}^{-1}$]を示す。Eq. 1-3-3において、 η_{T-R} は呼吸速度の温度依存性[-]、 k_2^R は温度20度における呼吸速度定数 [$1 \cdot \text{day}^{-1}$]を示す。Eq. 1-3-4において、 k_2^L は幹の枯死速度定数 [$1 \cdot \text{day}^{-1}$]を示す。Eq. 1-3-5において、 k_3^H は植物遺体の腐植化速度定数 [$1 \cdot \text{day}^{-1}$]を示す。Eq. 1-3-6において、 η_{T-D} は分解速度の温度依存性[-]、 η_{w-D} は分解速度の土壤水分依存性[-]、 k_3^D は温度

て、 η_{T-D} は分解速度の温度依存性 [-], η_{W-D} は分解速度の土壌水分依存性 [-], k_3^D は温度 20度における植物遺体分解速度定数 [$1 \cdot \text{day}^{-1}$] を示す。Eq. 1-3-7において、 k_4^D は温度 20度における腐植質分解速度定数 [$1 \cdot \text{day}^{-1}$] を示す。

以下にそれぞれの炭素移動式を述べる。

1-3-1 葉の光合成速度

一般に植物の光合成はその炭素固定回路によって、全ての樹木、藻類、ほとんどの草本類などの C_3 植物、カヤツリグサ科、イネ科等の草本類などの C_4 植物、ベンケイソウ科のすべてとパイナップル科の多くなどの CAM 植物に分けられ (石井ら、1978)、光合成速度など様々な特性が異なる。また、光合成を左右する環境要因として、日射量、炭酸ガス、温度、水分などが挙げられるが、それぞれの環境要因に対する反応も異なる。Table 1-3-1 に村田 (1980) が各炭素固定回路の特徴及び、環境要因に対する特性についてまとめたものを示す。また、これらの炭素固定回路は光合成能力についても異なる。村田 (1980) が C_3 、 C_4 植物の個葉の光合成速度について内外の文献を整理したものを Table 1-3-2 に、これらをさらにまとめたものを Table 1-3-3 に示す。

Table 1-3-1 CO_2 固定系を異にする 3 種の高等植物の主な特徴 (村田、1980)

	CO_2 固 定 系		
	カルビン回路 (C_3 系)	C_4 回 路 (C_4 系)	CAM
葉組織の構造	葉肉細胞、葉気孔周囲の葉肉細胞は分取型。維管束は環状に配置されているが、後述しているように葉肉細胞が互いにその間に互いに密に配置されている。維管束間距離大。	互いの葉肉細胞を互いに葉肉細胞周囲の葉肉細胞の間に配置し、葉肉細胞が互いにその間に互いに密に配置されている。維管束間距離小。	葉肉細胞は環状に配置されているが、互いにその間に互いに密に配置されている。維管束間距離大。
CO_2 固定系のエネルギー必要量 (CO_2 : ATP : NADPH)	1 : 3 : 2	1 : 3 : 2	1 : 6.5 : 2
光中で最も主なカルボキシラーゼ	RuBP カルボキシラーゼ	PEP カルボキシラーゼ、次いで RuBP カルボキシラーゼ	PEP カルボキシラーゼおよび RuBP カルボキシラーゼ
光 呼 吸	あ り	葉 肉 固 有	葉 肉 固 有
みか汁の光合成最大値 ($mgCO_2/dm^2/時$)	低い ($<1-50$)	高い ($>40-80$)	低い (平均 $1-4$) (最大 $11-13$)
CO_2 濃度 ($ppmCO_2$)	高い ($>40-70$)	低い (<10)	液中 $q=5$ 24 時間 $0-200$
21% O_2 による光合成の抑制	あ り	な し	あ り
Chl a : b 比率	低い (2.8 ± 0.4)	高い (3.9 ± 0.6)	低い ($2.5-3.0$)
^{13}C 比率 ($\delta^{13}C/^{12}C$)	低い ($-22-34$)	高い ($-11-19$)	変動する ($-13-38$)
光合成の適温	低い ($15-25^\circ C$)	高い ($30-45^\circ C$)	低い ($-35^\circ C$)
光合成の光飽和点	低い (最大日射の $1/4-1/2$)	高い (熱帯としないか、 熱帯としないか) 低い (最大日射で飽和)	不定
CO_2 に対する気孔の反応	鋭 感	鋭 感	—
CO_2 濃度に対する気孔の反応	大 き い	大 き い	—
光合成産物の輸送速度	速 い	速 い	—
葉水含量 (gCO_2/gDW)	大 き い ($450-950$, 平均 600)	小 さ い ($250-350$, 平均 300)	速 し く 小 さ い ($40-150$, 平均 84)
最大生長率 NAR ($g/dm^2/日$)	低い ($0.5-2$)	高い ($4-5$)	著 し く 低い ($0.015-0.018$)
CGR ($g/m^2/日$)	低い (19.5 ± 1.9)	高い (30.3 ± 13.8)	—
生長の適温 ($日$)	低い ($20-25^\circ C$)	高い ($30-35^\circ C$)	低い ($-35^\circ C$)
最大純生産 ($u/ha/年$)	低い (22.0 ± 3.3)	高い (38.6 ± 16.9)	著 し く 変動
呼吸作用 (乾物当たりまたは葉面当たり)	低 い	高 い	—

Table 1-3-2 高等植物の光合成能力の種間差 (村田、1980)

種 名	測定値 mg CO ₂ /dm ² /時	C ₃ の割合	測定者
種子類			
イヌ(5日12品種)	24.4-47.1(40.4)	C ₃	Kishitani & Tsunoda(1971)
コムギ(生収3品種平均)	31.6	*	Stor(1963)
コムギ野生16種	23.4-39.4(33.1)	*	Khan & Tsunoda(1971)
六条オオムギ(2品種)	25.2-28.3(26.7)	*	Nair(1973)
モンパル(20品種)	24.4(23.2)	*	Gravell & Sublett(1971)
ライムギ	28	*	家田と市田川(1976)
イタリヤライムギ	18	*	村田と黒山(1982)
オーストラリアライムギ	20-24(23)	*	Carlson(1971)
トルコライムギ	29.5	*	Brown & Brown(1973)
レジャースタフ	25	*	Wilkinson(1973)
オーストラリアライムギ	33	*	*
オーストラリアライムギ	30	*	Chen(1970)
アジ	32	*	Brown & Gracen(1972)
スギ	34	*	Brown & Brown(1973)
カビ属 <i>Panicum milioides</i>	25.3	*	Heichel & Musgrave(1969)
トウモロコシ(熟葉27品種)	23-35(33)	C ₃	Duncan & Hesketh(1968)
トウモロコシ(熟葉7品種)	21-32(33)	*	Irvine(1967)
チロシント	47	*	Chen(1970)
オオムギ(10品種)	34-36(32)	*	Muramoto(1963)
オオムギ(10品種)	82	*	Brown & Gracen(1972)
オオムギ(10品種)	60	*	(1963)
オオムギ(10品種)	63	*	Chen(1970)
オオムギ(10品種)	43	*	El-Sharkawy(1967)
オオムギ(10品種)	66	*	Hofstra & Hesketh(1969)
オオムギ(10品種)	35-41	*	Chen(1970)
オオムギ(10品種)	62	*	Brown & Gracen(1972)
オオムギ(10品種)	77	*	Chen(1970)
オオムギ(10品種)	45	*	Brown & Gracen(1972)
オオムギ(10品種)	61	*	Chen(1970)
オオムギ(10品種)	63	*	*
双子葉類			
オオムギ(10品種)	31-41	C ₃	Hofstra & Hesketh(1969)
オオムギ(10品種)	34-42	*	El-Sharkawy(1967)
オオムギ(10品種)	30	*	El-Sharkawy & Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	22.3-30.8(24.8)	*	Ishar & Wallace(1967)
オオムギ(10品種)	22-31(27)	*	小島と川島(1968)
オオムギ(10品種)	29.4-43.4(35.2)	*	Dornhoff & Sublett(1968)
オオムギ(10品種)	18	*	Bohning & Burnside(1956)

[注] いずれも CO₂ 濃度約 300 ppm. 光飽和点、最適温度付近における測定値。

* 真の光飽和点。

種 名	測定値 mg CO ₂ /dm ² /時	C ₃ の割合	測定者
オオムギ(10品種)	30-35	C ₃	Hesketh(1967)
オオムギ(10品種)	26	*	村田(1965)
オオムギ(10品種)	23-34	*	Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	18-26	*	*
オオムギ(10品種)	19	*	Elmore(1967)
オオムギ(10品種)	24-31(28)	*	El-Sharkawy(1963)
オオムギ(10品種)	18-25	*	El-Sharkawy & Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	21-26(23.3)*	*	津野と黒山(1982)
オオムギ(10品種)	13-15	*	Hesketh(1967)
オオムギ(10品種)	22	*	Bohning & Burnside(1956)
オオムギ(10品種)	26	*	Chapman & Loomis(1953)
オオムギ(10品種)	24-26	*	Hesketh(1967)
オオムギ(10品種)	25-40	*	岩城(1976)
オオムギ(10品種)	18-27	*	Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	29	*	Elmore(1967)
オオムギ(10品種)	49-51	*	El-Sharkawy & Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	37-43	*	Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	18	*	Chen(1970)
オオムギ(10品種)	36-39	C ₃	Hofstra & Hesketh(1969)
オオムギ(10品種)	41	*	津 元
オオムギ(10品種)	77	*	Chen(1970)
オオムギ(10品種)	67	*	Hesketh(1968)
オオムギ(10品種)	16	C ₃	Keller(1972)
オオムギ(10品種)	9.0-11.8	*	佐伯と野本(1958)
オオムギ(10品種)	7-12	*	Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	6.5	*	Hesketh & Moss(1963)
オオムギ(10品種)	10.2-13.0	*	佐伯と野本(1958)
オオムギ(10品種)	17	*	津元(1967)
オオムギ(10品種)	12	*	Srueger & Baumeister(1951)
オオムギ(10品種)	11.6	*	津元(1967)
オオムギ(10品種)	13	*	岩田(1976)
オオムギ(10品種)	13.6	*	津元(1968)
オオムギ(10品種)	11	*	岩田(1976)
オオムギ(10品種)	5-7	*	Hesketh(1963)
オオムギ(10品種)	9	*	岩田(1976)
オオムギ(10品種)	5.4	*	津元(1968)
オオムギ(10品種)	12.3*	*	岩田(1963)
オオムギ(10品種)	6	*	Norman(1977), Lieh(1959)

[注] いずれも CO₂ 濃度約 300 ppm. 光飽和点、最適温度付近における測定値。

* 真の光飽和点。

Table 1-3-3 植物の個葉の光合成速度 村田 (1980) を改変

単位: $\text{mgCO}_2 \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$

草本類	13~82	(C_3 植物: 13~51、 C_4 植物: 21~82)
木本類	5~17	

Table 1-3-3によると一般に草本類は木本類よりも光合成速度が大きく、同じ草本類でも C_3 植物よりも C_4 植物の方が大きい傾向にある。このように地球上には様々な光合成速度を持つ植生が存在しているが、これらの植生が将来予測される気候変動に対してどのような反応を示すのかが重要である。以下に光合成速度の各環境条件に対する特性について述べる。

1-3-1-1 光特性

光に対する個葉の光合成は C_3 植物と C_4 植物で異なる。 C_3 植物の光合成は30~40klux付近で飽和に達するが、 C_4 植物のそれは極めて強い光強度まで飽和しない。しかしながら、どちらも光に対する個葉の光合成速度はFig. 1-3-1 (Hesketh, 1963) に示すような曲線になることから、以下のように定式化できる。

$$p = \frac{bI}{1+aI} \quad (1-3-8)$$

Eq. 1-3-8において、 p は個葉の光合成速度を、 I は光強度を、 a 、 b は定数を示す。

個葉の光合成速度はEq. 1-3-8で表わせ、その値はTable 1-3-2のようになる。しかしながら、陸上生態系の炭素循環においては、個葉の光合成速度ではなく、植物群落の物質生産を考慮しなければならない。Table 1-3-4に様々な植物群落の物質生産を示す。

Table 1-3-4 各植物群落の物質生産 Cannel (1982) より改変 単位: $\text{tonC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$

Abies	7.3~19.9	Larix	15.67
Accasia	9.1~50.2	Liriodendron	10.53~11.26
Aesculus	13.1	Picea	3.18~47.57
Alnus	25.1	Pinus	3.48~25.07
Bamboo	16	Populus	11.48~24.5
Betula	2.07~18.1	Pseudotsuga	11.04~25.7
Camellia	16.9~26.3	Quercus	8.3~20.29
Castanopsis	18.7~22.66	Shorea	15.16
Cryptomeria	3.4~29.1	Tectona	1.74~4.37
Cupressus	4.03	Thuja	22.8~37.7
Eucalyptus	27.62	Thujopsis	8.36
Fagus	4.09~19.6	Tilia	7.9~11.2

植物群落の物質生産を定式化しようとする、群落内の全ての葉に均一に光が当たらないため、個葉の光合成を直接植物群落全体に適用することはできない。草本群落の光透過は以下の式で近似できる。

$$I(z) = I_0 \exp(-KF(z)) \quad (1-3-9)$$

Eq. 1-3-9において、 $I(z)$ は高さ z における水平強度を、 I_0 は群落最上部における水平照度を、 K は吸光係数を、 $F(z)$ は高さ z までの積算葉面積指数を示す。

このような群落内の光透過の影響を考慮してEq. 1-3-10のように個葉の光合成反応を植物群落に適用することができる (Monsi and Saeki, 1953)。Monsi and Saeki (1953)は草本類の群落の光合成について定式化したものであるが、Kira et al. (1969)によると森林の群落においても同様にEq. 1-3-10が適用できる。Fig. 1-3-2に様々な植物群落内の光透過を示す (依田, 1971)。

$$P = \frac{b}{K a} \ln \frac{(1-m)+K a I_0}{(1-m)+K a I_0 \exp(-K F)} \quad (1-3-10)$$

Eq. 1-3-10において、 P は群落の光合成速度を、 m は葉の光透過率を、 F は植物群落全体の積算葉面積指数を示す。

現在はEq. 1-3-10に葉以外の非同化部分による光の遮断を含める (Kurachi et al., 1986, 1989) などの修正が加えられている。

このように本研究では光合成速度はEq. 1-3-1の環境の影響を排除した光合成速度 r_1^p に様々な環境条件を考慮した式を用いるが、 r_1^p にはMonsi and Saeki (1953)の式を発展させた佐伯の式 (Saeki, 1960)を用いる。また、植物群落全体の積算葉面積指数は葉の比表面積と葉の全乾重量の積で表わす。

$$P = \frac{P_0}{K} \ln \frac{1+(b/P_0)K I}{1+(b/P_0)K I \exp(-K A_L C_1)} \quad (1-3-11)$$

Eq. 1-3-11において、 P_0 は光飽和時の光合成速度 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$]、 K は植物群落内の光の透過係数[-]、 b は光合成速度と光強度関係における初期勾配 [$\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{klux}^{-1}$]、 A_L は葉の比表面積 [$\text{m}^2 \cdot \text{kgC}^{-1}$]を示す。本研究では葉の比表面積は葉乾重と葉面積から求めた。Table 1-3-5に様々な植物の葉の比表面積を示す。

Table 1-3-5 各植物の葉現存量、葉面積及び、葉比表面積

比表面積は葉乾重/葉面積より算出 堤 (1989) より改変

樹種	葉乾重		葉面積		葉の比表面積
	資料数	平均±S.D. [t/ha]	資料数	平均±S.D. [ha/ha]	
落葉広葉樹	141	3.1±1.5		(3~7)	62.0
ブナ	58	3.8±1.6	11	5.7±1.4	66.7
ダケカンバ	23	2.9±0.9	4	4.5±1.0	64.4
シラカンバ	13	1.1±0.3	12	2.8±0.7	39.3
シラカンバ属全体	39	2.2±1.1	16	3.2±1.1	68.8
ハンノキ属 5 種	20	2.8±1.1	2	4.6~5.2	57.1
ハコヤナギ属 4 種	9	3.8±1.8	9	5.1±2.5	74.5
その他11種	15	2.4±1.0	10	5.4±1.9	44.4
落葉針葉樹					
カラマツ	30	3.0±1.0	1	4.24	70.8
常緑広葉樹	40	8.6±2.5		(5~9)	122.9
ウバメガシ	7	8.6±2.0	7	6.7±1.7	128.4
アラカシ	3	6.3±0.5	3	7.1±0.3	88.7
シラカシ	10	8.8±1.9	3	8.4±0.5	104.8
常緑カシ全体	20	8.4±2.0	13	7.1±1.5	118.3
コジイ・スダジイ	9	8.3±2.3	7	8.6±2.1	96.5
タブ	4	12.0±1.2	4	8.9±0.9	134.8
ツバキ	5	8.0±2.7	4	5.7±1.0	140.4
アカシヤ属 2 種	11	5.7±2.3	6	7.1±2.0	80.3
その他 2 種	2	4.1~11.1	1	8.75	86.9
竹林 (常緑)					
マダケ	3	6.8±0.6	3	11.3±1.7	60.2
常緑針葉樹					
マツ林	152	6.8±1.8		(3~6)	151.1
スギ	125	19.6±4.4	12	6.0±1.2	326.7
ヒノキ	26	14.0±2.5	2	5.1~5.2	271.8
上記以外の常緑針葉樹	66	16.9±5.2		(6~10)	211.3
シラベ (オオシラビソ)	38	16.1±4.7	7	9.9±1.9	162.6
モミ属全体	47	16.8±4.9	7	9.9±1.9	169.7

Eq. 1-3-11は1時間当たりの光合成速度であるので、1日の光合成速度は以下のように表わすことができる。

$$P_L^p = \int_{\text{ sunrise }}^{\text{ sunset }} \frac{P_0}{K} \ln \frac{1+(b/P_0)KI}{1+(b/P_0)KI \exp(-KA_L C_L)} dt \quad (1-3-12)$$

本研究では1日の平均光強度と佐伯の式から植物群落の日平均光合成速度を求め、それに1日の日長時間を乗じたものを1日の光合成速度とした。以下に1日の平均光強度から求めた日平均光合成速度の式を示す。

$$P_L^p = D_L \frac{P_0}{K} \ln \left\{ \frac{1+(b/P_0)KI_m}{1+(b/P_0)KI_m \exp(-KA_L C_L)} \right\} \quad (1-3-13)$$

Eq. 1-3-13において、 I_m は1日の平均光強度[klux]、 D_L は1日の日長時間[hr·day⁻¹]を示す。

佐伯の式は1時間あたりの光合成速度を表わし、式の本来の意味からすると1日の光合成速度はEq. 1-3-12のようになるが、本モデルではEq. 1-3-13で近似している。Table 1-3-6に各緯度帯における各月のEq. 1-3-12とEq. 1-3-13及び、Eq. 1-3-12とEq. 1-3-13から求めた年間の炭素蓄積量との差を示す。どの緯度帯においてもEq. 1-3-12の光合成速度の方がEq. 1-3-13よりも大きい、その差はいずれの場合も10%以下であることから1日の光合成速度はEq. 1-3-13で近似できることが示された。ただし、年間の炭素蓄積量の計算方法は第4章参照。

Table 1-3-6 各緯度帯における各月のEq. 1-3-12とEq. 1-3-13との差（次頁へ続く）

	90-80° N	80-70° N	70-60° N	60-50° N	50-40° N	40-30° N	30-20° N	20-10° N	10-0° N
Eq. 1-3-12による光合成速度とEq. 1-3-13による光合成速度との差(%)									
Jan.	0.00	0.00	1.72	4.43	4.98	7.14	6.13	6.44	7.56
Feb.	0.00	0.56	4.60	5.14	6.84	6.04	6.33	7.02	7.88
Mar.	1.67	4.30	5.56	6.42	7.02	7.46	7.80	8.08	8.30
Apr.	2.66	7.06	6.93	7.60	7.02	6.82	6.91	7.25	7.91
May	0.69	7.59	8.84	8.34	7.47	8.08	7.12	6.87	7.50
Jun.	0.43	4.51	10.66	8.33	7.89	7.75	7.59	6.87	7.33
Jul.	0.50	5.33	9.89	8.17	7.64	8.03	7.41	6.86	7.38
Aug.	1.16	10.58	7.81	7.33	8.25	7.31	6.88	6.97	7.67
Sep.	4.70	5.95	6.18	6.51	6.83	7.15	7.48	7.83	8.20
Oct.	0.00	3.02	5.04	5.91	5.92	6.36	6.91	7.50	8.08
Nov.	0.00	0.00	3.92	5.10	5.78	6.68	6.09	6.66	7.70
Dec.	0.00	0.00	0.65	3.54	4.93	6.53	6.26	6.33	7.49
A:GrC	0.00	0.12	36.58	126.70	134.58	83.87	93.79	48.90	69.50
B:GrC	0.00	0.13	39.27	141.06	143.53	87.76	101.20	54.24	74.89
C:%	-	6.9	7.4	11.3	6.6	4.6	7.9	10.9	7.8

Table 1-3-6 (続き)

	0-10° S	10-20° S	20-30° S	30-40° S	40-50° S	50-60° S	60-70° S	70-80° S	80-90° S
Eq. 1-3-12による光合成速度とEq. 1-3-13による光合成速度との差(%)*									
Jan.	7.40	6.85	7.37	8.13	7.59	8.18	9.61	5.57	0.53
Feb.	7.71	7.00	6.86	7.19	8.03	7.30	7.89	9.35	1.30
Mar.	8.25	7.96	7.66	7.35	7.00	6.60	6.09	5.44	4.05
Apr.	8.05	7.41	6.79	6.25	5.90	6.25	4.58	2.34	0.00
May	7.67	6.62	6.08	6.88	5.57	5.50	3.37	0.00	0.00
Jun.	7.48	6.32	6.28	6.48	4.95	3.50	0.45	0.00	0.00
Jul.	7.55	6.41	6.15	7.00	4.94	4.18	2.27	0.00	0.00
Aug.	7.84	6.95	6.27	6.07	7.26	4.90	3.92	1.09	0.00
Sep.	8.26	7.97	7.64	7.24	6.74	6.12	5.30	4.48	1.15
Oct.	7.95	7.33	6.95	6.80	6.89	7.28	6.96	6.89	3.21
Nov.	7.52	6.88	7.08	7.95	7.50	8.11	8.84	8.23	0.74
Dec.	7.33	6.87	7.57	7.77	7.86	8.30	10.54	4.58	0.44
A:GtC	138.70	95.22	53.58	34.79	20.75	11.22	0.25	0.00	0.00
B:GtC	145.10	101.72	57.90	35.85	21.88	11.30	0.27	0.00	0.00
C:%	4.6	6.8	8.1	3.0	5.4	0.8	7.0	-	-

A Eq. 1-3-12による植生の炭素蓄積量(GtC)

B Eq. 1-3-13による植生の炭素蓄積量(GtC)

C Eq. 1-3-12による植生の炭素蓄積量とEq. 1-3-13による植生の炭素蓄積量との差(%)*

*: Result using Eq.(1-3-12)-Eq.(1-3-13)/Eq.(1-3-13)x100 (%)

1-3-1-2 温度特性

植物の温度と光合成の関係はFig. 1-3-3のように釣鐘型になる (Pisek, 1973, Sutcliffe, 1977)。植物は光合成反応をするための至適温度をもち、その温度から遠ざかると低温域でも高温域でも光合成は低下する。特に高温域では呼吸の増大が光合成の増大を上回るため正味の光合成が低下する。また、植物が光合成活動をおこなうには温度範囲があり、その範囲からはずれると光合成活動は停止する。よって、温度と光合成速度の関係は以下の式で近似することができる。

$$\eta_{T-P} = \begin{cases} 0 & T \leq T_{opt} - \frac{\Delta T}{2}, T \geq T_{opt} + \frac{\Delta T}{2} \\ \cos\left(\frac{T - T_{opt}}{\Delta T} \pi\right) & T_{opt} - \frac{\Delta T}{2} \leq T \leq T_{opt} + \frac{\Delta T}{2} \end{cases} \quad (1-3-14)$$

T は温度 [°C]、 T_{opt} は光合成の最適温度 [°C]、 ΔT は光合成が行われる温度範囲 [°C]を示す。

Table 1-3-7に各植物種の、Table 1-3-8に各植物群の光合成速度の温度に対する特性を示す。

Table 1-3-7 各植物の光合成の温度依存性

	至適温度	温度範囲	
Wheat	18℃		Vong et al.(1977)
Barley	18℃		*
Soybean	24℃		*
Rice, indica	24℃		*
Rice, japonica	30℃		*
Maize	30℃		*
Poplar	22℃		Furukawa(1972)
Mandarin	15~22℃		本條ら(1988)
Abies	15℃		Pisek et al.(1973)
Ranunculus glac.	17℃	-6~39℃	*
Taxus	18℃	-5~41℃	*
Betula	16℃	-3~43℃	*
Laurocerasus	23℃	-5~43℃	*
Olea	17℃	-4~47℃	*

Table 1-3-8 各植物群の光合成の温度依存性 Larcher (1975)

植物群	最低温度	至適温度	最高温度
草本植物			
熱帯C ₄ 植物	5~7	35~45	50~60
C ₃ 作物	-2~0以上	20~30	40~50
陽葉植物	-2~0	20~30	40~50
陰葉植物	-2~0	10~20	約40
春咲・高山植物	-7~-2	10~20	30~40
木本植物			
熱帯常緑林	0~5	25~30	45~50
乾燥地の灌木・樹木	-5~-1	15~35	42~55
温帯落葉樹	-3~-1	15~25	40~45
常緑松柏類	-5~-3	10~25	35~42
ヒースの荒地およびツンドラの矮性灌木	約-3	15~25	40~45

1-3-1-3 水分特性

水に対する光合成反応を考える場合、植物にとって水分状態とは何かが重要になる。水分状態として含水率や水欠差、水ポテンシャルなどが挙げられるが、いずれにしろ植物はほとんど根から水を吸収するので土壌中の水分状態がまず重要となる。根が吸収できる土壌水分の上限は圃場容水量、下限はしおれ点で表わされ、この間を有効水量とい

う(田崎、1978)。有効水量と植物の活性はFig. 1-3-4のように表すことができる(Hillel, 1980)。Maruyama et al. (1987)は、ブナなどの苗木を用いて、土壌水分量と光合成の関係がFig. 1-3-4のNo. 3の直線のような結果を得ている。

以上より、土壌水分量と光合成速度の関係は次のように近似できるとした。土壌水分量が圃場容水量(土壌が保持できる土壌水分量の最大値)としおれ点(植物が成長するための土壌水分量の下限值)の間にあるとき光合成速度は土壌水分量に比例する。土壌水分量がしおれ点以下の場合には光合成はおこらない。よって、土壌水分量と光合成速度の関係は以下の式に従うと仮定した。

$$\eta_{w.p} = \begin{cases} 0 & W < W_{wp} \\ \left(\frac{1}{W_{fc} - W_{wp}}\right)(W - W_{wp}) & W \geq W_{wp} \end{cases} \quad (1-3-15)$$

W は土壌水分量[cm]、 W_{wp} はしおれ点[cm]、 W_{fc} は圃場容水量[cm]を示す。

USDA (1965)によると、圃場容水量、しおれ点は土壌の種類に依存する。さまざまな土壌における土壌の水分特性をTable 1-3-9に示す。

Table 1-3-9 各土壌の圃場容水量としおれ点 USDA (1955) を改変
単位:土壌深さ10cm当たりの水分量[mm]

土壌	圃場容水量	しおれ点
Sand	7	2
Fine sand	12	4
Sandy loam	17	5
Fine sandy loam	22	8
Loam	27	10
Silt loam	30	12
Light clay loam	31	13
Clay loam	32	15
Hevy clay loam	32	17
Clay	33	20

1-3-1-4 炭酸ガス特性

炭酸ガスに対する個葉の光合成反応も C_3 植物と C_4 植物で異なる。 C_3 植物の光合成は1000ppm付近までの炭酸ガスと共にほぼ直線的に増加するが、 C_4 植物のそれは400ppm付近で飽和に達する。個葉の光合成は炭酸ガスに対してEq. 1-3-8のような形の式に近似できる。しかし、植物群落の物質生産と炭酸ガスの関係は群落内の炭酸ガスの拡散や風による移流などの影響を受けるため複雑である。Oikawa (1978)は群落内の炭酸ガスの拡

散を微分方程式で表すことによって群落と光合成の関係を求めた。また、Bacastow et al. (1973) や Kohlmaier et al. (1987) は植生の一次生産と炭酸ガスの関係を以下の式のよ
うに表わしている。

$$\text{Bacastow et al.} \quad \Delta NPP = NPP^0 \beta \ln(CO_2/CO_2^0) \quad (1-3-16)$$

$$\text{Kohlmaier et al.} \quad \Delta NPP = NPP^0 (1 + \beta \Delta CO_2 / CO_2^0) \quad (1-3-17)$$

ΔNPP は気候変動による純生産速度の変化 ($=NPP-NPP^0$)、 NPP は将来の炭酸ガス濃度 (CO_2) での純生産速度、 NPP^0 は初期炭酸ガス濃度 (CO_2^0) での純生産速度、 ΔCO_2 は炭酸ガス濃度変化 ($=CO_2-CO_2^0$)、 β は生物成長因子を示す。

純生産速度は光合成速度と呼吸速度の差 ($R_1^P - R_2^R$) で表わすことができ、Eq. 1-3-17 は以下の式のように書き換えることができる。(ただし、 $\beta=0.5$ とした。)

$$R_1^P - R_2^R = (R_{1,0}^P - R_2^R) (1 + 0.5 \ln(CO_2/CO_2^0)) \quad (1-3-18)$$

$R_{1,0}^P$ は炭酸ガス濃度の影響を考慮しない場合の光合成速度 [$kgC \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$] を示す。よって、光合成速度の炭酸ガス濃度依存性は以下の式に従うと仮定した。

$$\eta_{CO_2} = \frac{R_2^R + (R_{1,0}^P - R_2^R) (1 + 0.5 \ln(CO_2/CO_2^0))}{R_{1,0}^P} \quad (1-3-19)$$

1-3-2 幹の呼吸速度

葉の呼吸は明所における光呼吸と暗所における暗呼吸の2種類に分けられ、それぞれ異なる呼吸速度をもつ。また、非同化部分(幹、枝など)の呼吸量は形成層で最も大きく、材の中心へ行くほど少なくなるため、幹の呼吸量はその太さによって異なる。

Table 1-3-10に様々な植物の葉および幹の呼吸速度を示す。

Table 1-3-10 各植物の呼吸速度

単位: $\text{mg CO}_2 \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ $\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 $\text{ton CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ $\text{ton d.m.} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$

Sunflower(葉)	6.20~6.32	佐藤ら(1975)
Sunflower(葉:暗呼吸)	1.24~1.28	*
Bean(葉)	2.02~4.03	*
Bean(葉:暗呼吸)	1.10~1.40	*
Sorghum(葉)	1.38~7.12	*
Sorghum(葉以外)	3.2	*
Corn(葉:暗呼吸)	3.1~6.2	秋山ら(1975)
Corn(葉以外)	1.66~5.33	*
Wheat(葉:暗呼吸)	0.1~0.5 [*]	Iwaki et al.(1976)
Cotton(葉:暗呼吸)	0.3~3.2 ^{**}	Harley et al.(1992)
ヒノキ人工林(林分)	10.32 ^{***}	Ninomiya et al.(1983)
ヒノキ人工林(林分)	10.5 ^{****}	Hagihara et al.(1981)
アイグロマツ(林分)	9.22 ^{***}	Ninomiya et al.(1981)
Magnolia obovata	7.6~9.9	Negishi(1972)

呼吸速度は温度の影響を受け、30~40℃付近で最大値を示す(手塚、1978)。このときの関係は一般に「温度係数(=Q₁₀)」で表わされる。これは温度が10度上昇すると呼吸が何倍になるかを表す。Table 1-3-11に各植物の呼吸速度の温度係数を示す。

但し、地球上の気温は40℃を越えることはほとんど無いため、本研究では呼吸速度の温度依存性は温度20℃を基準として温度係数を2とし、以下の式になるとした。

$$\eta_{T-R} = 2^{((T-20)/10)} \quad (1-3-20)$$

Table 1-3-11 各植物の呼吸速度の温度依存性(Q₁₀)

アイグロマツ	1.14~9.81	Ninomiya et al.(1981)
ヒノキ人工林	1.47~3.52	*
ヨーロッパナ	2.3~2.5	Löhr(1957)
Pinus silverstris	1.82~2.10	Johansson(1933)
Picea excelsa	2.03~2.13	*
Larix europaea	1.88~2.01	*
Larix Kaempferi	2.07~2.08	*
Betula pubescens	2.00~2.06	*
Quercus robur	2.18~2.41	*
Magnolia obovata	0.83~2.45	Negishi(1972)
Wheat	1.9~1.8	Iwaki et al.(1976)

1-3-3 落葉、枯死速度

枯死速度は各器官の寿命に依存する。Reich et al. (1992) は様々な植生の葉の寿命に関する文献を集め、葉の寿命と光合成速度、窒素含有量、植生の生長速度との相関を導いている。Janecek et al. (1989) は落葉の過程をモデルに組み込み、温帯および熱帯落葉樹林の葉と幹の現存量の季節変化をシミュレートした。また、Yoneda (1982) によると材器官の寿命は直径の0.9乗に比例する。Table 1-3-12に様々な植物群落の落葉、落枝量を示す。

Table 1-3-12 各植物の枯死量 単位: $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ $\text{kg CO}_2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}^{-1}$		
熱帯雨林	5.5~15.3	Bray et al.(1963)
暖温帯林	2.4~8.1	*
冷温帯林	1.0~6.2	*
寒帯林	0.6~1.5	*
ブナ天然林	4.4	河原ら(1979)
ヒノキ天然林	2.4~3.1	*
ヒノキ人工林	3.91~4.97	上田ら(1977)
タブ天然林	6.13~7.79	*
Pinus forest	506.1~563.5*	河原(1976)
Quercus forest	522.2~746.1*	*
Larix and chamaecyparis	306.0~390.6*	*
Evergreen Oak Forest	3.37~8.42	Nishioka et al.(1978)

1-3-4 土壌分解速度

1-3-4-1 土壌からの炭酸ガス放出速度

土壌から大気への炭酸ガスのフラックスは一般に土壌呼吸で表わされる。Table 1-3-13に様々な陸上生態系からの土壌呼吸を示す。

Table 1-3-13 様々な生態系における土壌呼吸量

単位: $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ $\text{kg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$

ブナ天然林	6.6	河原ら(1979)
Pinus forest	1.7***	河原(1976)
熱帯常緑乾燥林	340~1272*	Yoda et al.(1982)
Tropical forest	405~6100**	Schlesinger(1977)
Temperate forest	171~1414**	*
Boreal forest	147~653**	*
Woodland and shrubland	399~653**	*
Tropical savanna	515~785**	*
Temperate grassland	74~452**	*
Pine forest	1.0~1.4***	千葉ら(1967)
Mixed mesophytic forests	3.8***	Edwards et al.(1973)
Evergreen forest	3.4~4.6***	Kirita(1971)
Tallgrass prairie	1.7***	Kucera et al.(1971)
swamp	2.6~2.9***	Reiners(1968)
Tropical forest	1.9***	Wanner(1970)
Pine forest	1.1***	Witkamp(1966)
Subalpine coniferous	2.10~3.06	Takai et al.(1977)

土壌呼吸は植物遺体や腐植質の分解による炭酸ガス放出量および根の呼吸量の和であるが、各フラックスを個別に推定しようとする試みもなされている(片桐ら、1979、河原、1976、中根、1980)。Table 1-3-14に土壌呼吸に占める各要素の割合を示す。

Table 1-3-14 土壌呼吸に占めるA₀層、鉱質土層における有機物の分解、根の呼吸の割合(%)

	A ₀ 層	鉱質土層	根の呼吸	
落葉広葉樹	14~22	44~66	20~40	片桐(1988)
Beech/fir	39	20	41	中根(1980)
Evergreen oak	30~32	16~18	47~52	*
Tropical rain	33	18	49	*

植物遺体と腐植質ではその分解速度、土壌における滞留時間に大きな差があり、気候変動に対する応答を推定するためには、その分離が必要であるといえよう。

1-3-4-2 土壌分解速度の温度依存性

土壌呼吸速度は、微生物活動によるので温度の影響を受け、その関係は呼吸速度の温度依存性と同様にQ₁₀で表わされる(Kirita, 1971)。Table 1-3-15に土壌呼吸速度の温

度依存性を示す。

Table 1-3-15 土壤呼吸量の温度依存性(Q_{10}) 酒井ら(1987)を改変

Deciduous broadleaved	2.51~2.66	Anderson(1979)
Hinoki	2.6	萩原ら(1978)
Sugi	4.1	萩原ら(1984)
Japanese larch	3.0	萩原ら(1980)
Deciduous broadleaved	2.12~2.92	片桐ら(1979)
Evergreen broadleaved	2.86	Kirita(1971)
Evergreen broadleaved	2.59~2.89	中根(1975)
Beech-fir	3.17	中根(1978)
Mature akamastu	2.45	Nakane et al.(1983)
Beech	2.18	Phillipson et al.(1975)
Sawara-hinoki	1.8	酒井(1985)
Mixed oak	2.0	瀬戸ら(1978)
Beech and beech-fir	2.0	Virzo De Santo et al.(1976)
Evergreen Oak forest	2.14~2.94	Yoneda et al.(1978)
Subalpine coniferous	2.5~4.0	Takai et al.(1977)
Deciduous broadleaved	1.85~2.33	酒井ら(1987)

一般に土壤有機物の分解速度の温度曲線は30℃~35℃に最大値を持つ(依田、1971)。但し、地球上の気温は40℃を越えることはほとんど無いため、本研究では呼吸の温度依存性と同様に土壤分解速度の温度依存性は温度20℃を基準として温度係数を2とし、以下の式になるとした。

$$\eta_{T-D} = 2^{((T-20)/10)} \quad (1-3-21)$$

1-3-4-3 土壤分解速度の土壤水分量依存性

また、土壤呼吸速度は水分条件の影響も受ける。Ino et al. (1969)によると土壤呼吸速度は含水率が80%のとき最大になる。また、土壤呼吸速度は溶存有機炭素量に直接的な関係があり、含水率とは間接的な関係があるという報告もある(瀬戸ら、1978)。降雨量の変動が土壤呼吸に及ぼす影響は土壤の状態や変動の程度などによって様々であるといえる。よって、本研究では、土壤有機物の分解速度は次のようになるとした。土壤水分量が圃場容水量の80%のときに分解速度が最大になり、土壤水分量がなくなると分解は起こらない。よって、土壤分解速度の土壤水分量依存性は以下の式で表されるとした。

$$\eta_{w-D} = 1 - (W/0.8 * W_{fc} - 1)^2 \quad (1-3-22)$$

1-4 環境条件の設定

本モデルの計算に必要な環境条件として以下のものがあげられる。

- ア. 温度
- イ. 降雨量
- ウ. 土壌の水分保持能力（しおれ点、圃場水分量）
- オ. 土壌水分量
- カ. 日射量、日長時間

これらのうち、温度と降雨量はデータベースとして整っており、その気候観測データをそのまま用いることができるが、土壌の水分保持能力（しおれ点、圃場水分量）、土壌水分量、日射量、日長時間は本モデルで使用できるように他のデータを改変したり、独自に算出する必要がある。以下に土壌の水分保持能力（しおれ点、圃場水分量）、土壌水分量、日射量、日長時間の算出方法を示す。

1-4-1 土壌の水分保持能力（しおれ点、圃場水分量）

本研究では土壌の水分量が植物の成長や土壌有機物の分解速度に影響を及ぼすとしたが、その土壌水分量を決定する土壌特性を土性とした。土性とは土壌中に含まれる砂、シルト、粘土の割合によって決まる特性値であり、土性は土壌の水分保持能力と密接な関係がある。Fig. 1-4-1によると土壌はその土性によって、Table 1-4-1のように12種類に分類することができる（小山、1986）。

Table 1-4-1 土性分類表

1	重埴土	heavy clay : HC
2	砂質埴土	silty clay : SC
3	軽埴土	light clay : LiC
4	シルト質埴土	silty clay : SiC
5	砂質埴壤土	silty loam : SiL
6	埴壤土	clay loam : CL
7	シルト質埴壤土	silty clay loam : SiCL
8	壤質砂土	loamy sand : LS
9	砂壤土	sandy loam : SL
10	壤土	loam : L
11	シルト質壤土	silty loam : SiL
12	砂土	sand : S

また、土壌の水分保持能力は、土壌水分量の最大値を表わす圃場容水量と植物が利用できる土壌水分量の最小値を表わすしおれ点で記述することができる。USDA (1955)によると土性と土壌の水分保持能力の関係はTable 1-3-6のように表わすことができる。ただし、USDA (1955)は土性をsand、fine sand、sandy loam、fine sandy loam、loam、silt loam、light clay loam、clay loam、heavy clay loam、clayの10種類に分類しており、本研究の12の土性分類と異なる。よって、本研究でも対応できるようにUSDA (1955)の土性分類を12に再編した。Fig. 1-4-2に本研究の12の土性分類と土壌の水分保持能力の関係を示す。

本研究は地球規模の炭素循環を計算する必要があることから以上に述べた土壌の水分保持能力の世界分布が必要であり、そのためには土性の世界分布が必要である。しかしながら、既存の世界土壌分布図は土壌の種類によって分類しているため、土性の分布図を得ることはできない。よって、既存の土壌分類と土性との関係を構築する必要がある。まず、世界の土壌を26に分類しているFAO/Unesco (1974-1981)の世界土壌地図にある26種類の土壌についての世界各地から集められた土性のデータから、各土壌と土性との対応関係を構築する。Table 1-4-2に各土壌の土性データ及び、各土壌の代表土性の推定を示す。Acrisolsの土性に関して全部で世界19ヶ所で実測されたデータがあり、その中でheavy clayを示すものが5ヶ所あり、light clayを示すものは4ヶ所、silty loamとloam、sandy loamはそれぞれ2ヶ所、silty clay、clay loam、silty clay loam、loamy sandはそれぞれ1ヶ所、silty clay、silty loam、sandを示すものはなかった。よって、Acrisolsの代表土性はheavy clayであるとした。他の25種類の土壌についても同様に代表土性を選んだ。ただし、土性のデータが十分に無い場合は推測した。

Table 1-4-2 各土壌の土性データ及び、各土壌の代表土性

Soil type	Soil texture												Total data number	Estimated soil texture
	S	LS	SL	SCL	L	SC	SiL	LiC	SiCL	CL	SiC	HC		
Acrisols	0	1	2	1	2	0	2	4	0	1	1	5	19	HC
Andosols	0	0	2	0	1	0	2	2	1	2	0	0	10	SiL
Arenosols	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	LS
Cambisols	0	0	1	2	1	2	1	9	1	1	0	3	21	LiC
Chemozems	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	4	CL
Ferralsols	0	0	0	2	1	1	0	1	0	0	0	8	13	HC
Fluvisols	0	0	0	0	1	0	1	1	3	2	2	4	14	HC
Gleysols	1	0	1	0	0	0	0	2	1	1	1	7	14	HC
Greyzems	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	SiCL
Histosols	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SiL
Kastanozems	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3	0	1	7	CL
Lithosols	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SiL
Luviosols	0	2	5	2	1	2	3	1	1	2	1	3	23	SL
Nitisols	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	2	6	SiC
Phaeozems	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	5	2	11	SiC
Planosols	0	0	0	2	2	0	0	0	1	1	0	0	6	SCL
Podzols	2	2	4	1	0	0	0	0	0	0	1	0	10	SL
Podzolvisols	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	SC
Rankers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SiL
Regosols	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4	S
Rendzinas	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	3	LiC
Solonchaks	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	3	CL
Solonetz	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	1	6	L
Vertisols	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	6	9	HC
Xerosols	1	0	3	0	0	0	0	0	0	1	2	0	7	SL
Yermosol	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	4	SCL

このようにして得られた土壌と土性の対応関係と、Fig. 1-4-2に示したような土性と土壌の水分保持能力の関係から、Fig. 1-4-3に示すようなFAO/Unesco (1974-1981) による土壌分類と土性の分類との対応関係を、さらには水分保持能力との対応関係を構築した。Fig. 1-4-4にFAO/Unesco (1974-1981) の土壌分類に基づいた土壌分布図 (Zobler, 1986) を示す。また、Fig. 1-4-4の世界土壌分布図とFig. 1-4-3の土壌と土性の対応関係から求めた、土性の世界分布図をFig. 1-4-5に示す。

1-4-2 土壌水分計算法

土壌には降雨量として水分が供給され、蒸発散や系外へ流出という形式で水分が放出される。これらの差が土壌に滞留する水分であり、これを土壌水分量とする。土壌における水分収支は以下の式で近似することができる。

$$\int (W_p - W_e - W_{out}) dt = W \quad (1-4-1)$$

Eq. 1-4-1において、 W_p は月毎の降雨量[cm・month⁻¹]、 W_e は月毎の土壌からの水分蒸発散量[cm・month⁻¹]、 W_{out} は月毎の系外へ流出する水分量[cm・month⁻¹]、 W は土壌水分量[cm]を表わす。 W_p は月ごとの気候データを用いる。 W_e はThornthwaiteの蒸発散量推定法 (Thornthwaite, 1948) から算出する。この推定法は温度のみから蒸発散量を推定する方法である。土壌の水分を保持する能力には限界があり、その最大水分保持量は圃場容量水 (W_k) で表わすことができる。土壌には W_p と W_e の差の水分が溜まるが、 W_k を越えた水分は系外へ流出する。Fig. 1-4-6に土壌中の水分収支の概念図を示す。1つの例として、Vicksburg (Mississippi, U.S.A., data from Müller, 1982) における土壌水分量の収支をTable 1-4-3に示す。

Table 1-4-3 Vicksburg(U.S.A.)における土壌水分収支

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperature[°C]	9.4	11.0	14.2	18.7	23.0	26.5	27.7	27.6	24.8	19.7	13.4	10.2
Precipitation [cm・month ⁻¹]	13.0	13.5	14.6	12.5	10.5	8.8	9.9	7.6	6.4	5.2	11.3	12.5
Evapotranspiration [cm・month ⁻¹]	1.6	2.2	3.7	6.6	10.1	13.5	14.8	14.7	11.8	7.3	3.3	1.9
P-E[cm・month ⁻¹]	11.4	11.3	10.9	5.9	0.4	-4.7	-4.9	-7.1	-5.4	-2.1	8.0	10.6
Soil Water [cm・month ⁻¹]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	15.3	10.8	4.1	0.0	0.0	8.0	18.6
Water Effluent [cm・month ⁻¹]	10.0	11.3	10.9	5.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

1月は降雨量が13.0[cm]であるのに対して、土壌からの蒸発散量は気温が9.4度であることから1.6[cm]である。よって、その差である13.0-1.6=11.4[cm]の水分が土壌に溜まる。12月の土壌水分量は18.6[cm]であるから、18.6-11.4=30[cm]が土壌水分量になるが、圃場容水量が20[cm]であるため、30-20=10[cm]が系外へ流出すると考える。また、9月は降雨量が6.4[cm]であるのに対して、蒸発散量は11.8[cm]である。よってその差は6.4-11.8=-5.4[cm]であり、つまり、5.4[cm]の土壌水分が減少することになる。8月の土壌水分量が4.1[cm]であるため、9月の土壌水分量は4.1-5.4=-1.3[cm]となる。しかしながら、土壌水分量が負となることはないので、9月の土壌水分量は0[cm]となる。このようにして各月の土壌水分量を計算する。

<Thornthwaiteによる蒸発散量の推定法>

Thornthwaite (1948) は、丈の低い緑草で密に覆われた地表面から、水不足の起こらないように供給した場合に失われる蒸発散量を可能蒸発散量とし、それを気温だけの関数として次式のように表わした。

$$E_i = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (1-4-2)$$

E_i は可能蒸発散量[cm・month⁻¹]、 T は月平均気温[°C]を示す。

I は熱示数で以下の式のように表わすことができる。

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (1-4-3)$$

$$a = (492390 + 17920I - 77.1I^2 + 0.675I^3) \times 10^{-6} \quad (1-4-4)$$

ただし、上式は気温0～26.5°Cの範囲において有効であり、それ以上の温度ではTable 1-4-4の値を、また0°C以下の月では $E_i = 0$ と仮定する。

Table 1-4-4 月平均気温26.5°C以上の月の E_i

T	E_i	T	E_i	T	E_i	T	E_i
26.5	13.50	29.5	15.89	32.5	17.53	35.5	18.37
27.0	13.95	30.0	16.21	33.0	17.72	36.0	18.43
27.5	14.37	30.5	16.52	33.5	17.90	36.5	18.47
28.0	14.78	31.0	16.80	34.0	18.05	37.0	18.47
28.5	15.17	31.5	17.07	34.5	18.18	37.5	18.50
29.0	15.54	32.0	17.31	35.0	18.29	38.0	18.50

1-4-3 平均日射量及び日長時間の推定法

緯度 α° における1日の平均日射量と日長時間は以下のようにして計算する。ある地点のある時刻における太陽の高度角が α° のとき、その地点の水平面の受ける日射量

$S[W \cdot m^{-2}]$ は以下のように表わすことができる。

$$S = S_0(1-A)\sin\alpha \quad (1-4-5)$$

S_0 は太陽定数 ($=1.38 \times 10^3 W \cdot m^{-2}$) , A は大気における反射率[-]である。

また、太陽の高度角 α は以下の式で表わすことができる。

$$\sin\alpha = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\gamma \quad (1-4-6)$$

δ はある月日における太陽の赤緯 $[\circ]$ である。太陽の赤緯は、夏至の日には $23.5[\circ]$ 、冬至の日には $-23.5[\circ]$ になることから以下の式で表わすことができる。

$$\delta = -23.5 \cos\left(\frac{D+10}{365}2\pi\right) \quad (1-4-7)$$

D は1月1日からの経過日数

γ は時角 $[\circ]$ であり、太陽が南中したときからの角度であるから、以下の式で表わすことができる。

$$\gamma = 15^\circ \times (h-12) \quad (1-4-8)$$

h は時刻を表わす。

1日の平均日射量 $S_m[W \cdot m^{-2}]$ は以下のように近似できる。

$$S_m = \frac{1}{D_1} \sum_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} S \quad (1-4-9)$$

D_1 は1日の日長時間 $[\text{hour} \cdot \text{day}^{-1}]$ 。

太陽放射エネルギー $10.5[W \cdot m^{-2}]$ が照度 $1[\text{klux}]$ に相当する。よって、1日当たりの平均照度 $I_m[\text{klux} \cdot \text{hour}^{-1}]$ は以下のように書き表すことができる。

$$I_m = \frac{S_m}{10.5} \quad (1-4-10)$$

日長時間は日の出から日没迄の時間であり、両者の時刻は $\alpha=0$ である。よってEq. 1-4-6は以下の式のようにになる。

$$\cos\gamma = -\frac{\sin\phi}{\cos\phi} \frac{\sin\delta}{\cos\delta} \quad (1-4-11)$$

上式から日の出、日没時間を求め、その差を日長時間とする。

1-5 パラメータの設定

本研究では植生を5つに、土壌を12に分類し、各ボックス間の炭素移動式のパラメータを設定した。Table 1-5-1、Table 1-5-2にそれぞれ植生及び土壌パラメータを示す。パラメータの値は既往の文献から引用し、該当する文献が無い場合はそれに関連する他の文献から推定した。植物遺体の分解速度、腐植質の分解速度、植物遺体の腐植化速度はすべての土壌に共通であるとした。

Table 1-5-1 植生パラメータ

	熱帯林		温帯常緑林		温帯落葉林		寒帯林		草原	
	value	ref.	value	ref.	value	ref.	value	ref.	value	ref.
p_0	2.7×10^{-4}	*	2.7×10^{-4}	*	2.7×10^{-4}	1)	2.7×10^{-4}	*	1.6×10^{-3}	2)
b	5.8×10^{-5}	*	5.8×10^{-5}	*	5.8×10^{-5}	1)	5.8×10^{-5}	*	7.9×10^{-5}	2)
K	0.40	3)	0.45	3)	0.35	3)	0.30	*	0.30	4)
A_L	110	*	110	5)	60	5)	180	5)	60	*
α	0.30	*	0.30	6)	0.34	7)	0.34	8)	0.60	*
k_2^R	4.0×10^{-3}	*	4.0×10^{-3}	*	4.0×10^{-3}	*	4.0×10^{-3}	*	4.0×10^{-3}	*
k_1^L	1.4×10^{-3}	*	1.4×10^{-3}	5)	2.8×10^{-3}	5)	9.2×10^{-4}	5)	1.4×10^{-3}	*
k_2^L	1.4×10^{-4}	*	1.4×10^{-4}	6)	9.8×10^{-5}	7)	1.2×10^{-4}	8)	2.8×10^{-5}	*
T_{gr}	25	9)	20	9)	20	9)	10	9)	30	9)
ΔT	50	9)	40	9)	40	9)	20	9)	60	9)

Table 1-5-2 土壌パラメータ

	H_{kp}		H_{sp}		F	
	value	ref.	value	ref.	value	ref.
heavy clay	32	11)	17	11)	0.001	*
silty clay	32	*	16	*	0.001	*
clay loam	31	11)	15	11)	0.001	*
silty clay loam	31	11)	15	11)	0.001	*
light clay	31	11)	14	11)	0.001	*
silty loam	29	11)	12	11)	0.001	*
sandy clay	27	*	12	*	0.001	*
loam	27	11)	10	11)	0.001	12)
sandy clay loam	22	11)	7.5	11)	0.05	*
sandy loam	16	11)	5	11)	0.05	*
loamy sand	12	11)	3.5	11)	0.05	*
sand	7.5	11)	2.5	11)	0.05	12)

$$k_3^D=0.008 \quad [1 \cdot \text{day}^{-1}] \quad *$$

$$k_4^D=0.000436 \quad [1 \cdot \text{day}^{-1}] \quad *$$

$$k_3^H=0.0049 \quad [1 \cdot \text{day}^{-1}] \quad *$$

1)Nomoto, 1964、2)Ludlow and Wilson, 1971、3)Kira and Shidei, 1967、4)Kira et al., 1969、5)堤ら、1989、6)Satoo, 1968、7)Satoo, 1974、8)Satoo, 1971、9)Larcher, 1975、10)USDA, 1955、11)Hillel, 1971、*)estimated

本章のまとめ

陸上生態系の炭素循環を記述する数理モデルを構築した。さらに、各ボックス間の炭素フラックスに関する文献を整理することにより、本モデルで用いるパラメータを決定した。

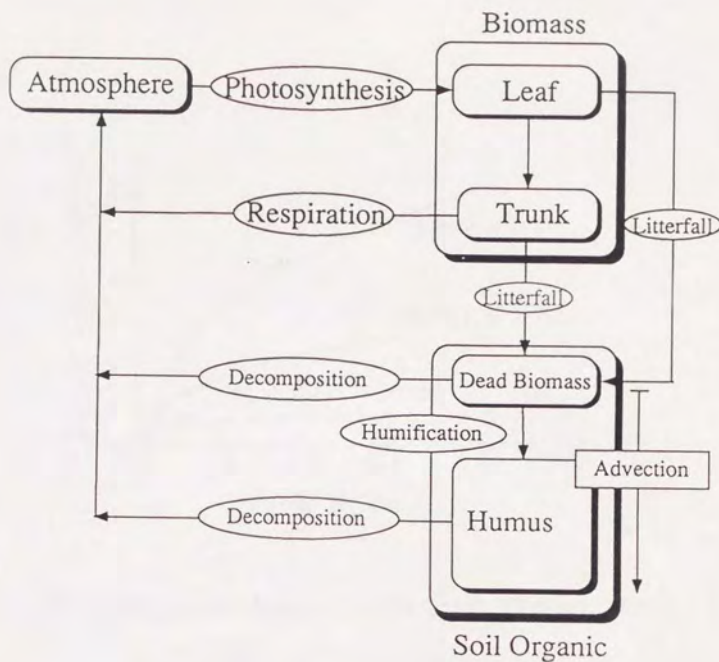


Fig.1-1-1 陸上生態系の炭素循環モデル概略図

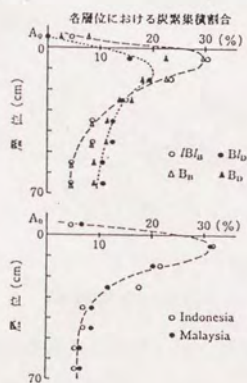


Fig. 1-1-2 土壌中の炭素集積量の垂直分布 (堤利夫、1989)

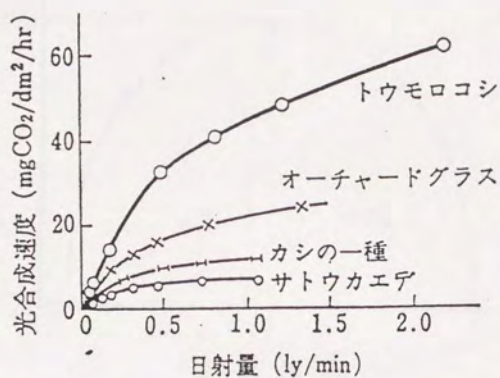


Fig. 1-3-1 C_3 植物と C_4 植物の光合成と日射量の関係 (Hesketh, 1963)

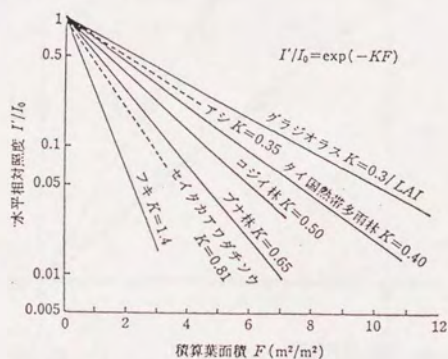


Fig. 1-3-2 いろいろな植物群落内における光の減少 (依田、1971)

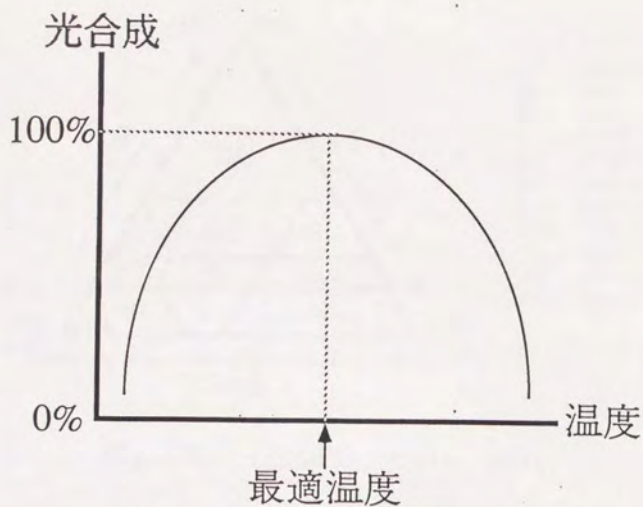


Fig. 1-3-2 温度と光合成速度の関係図

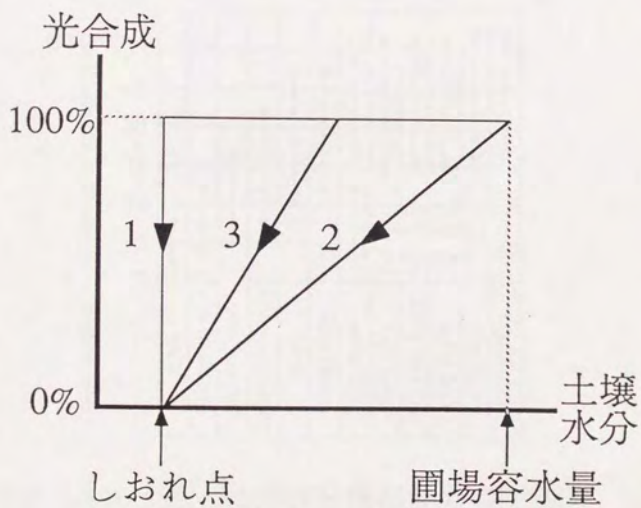


Fig. 1-3-3 土壌水分量と光合成速度の関係図

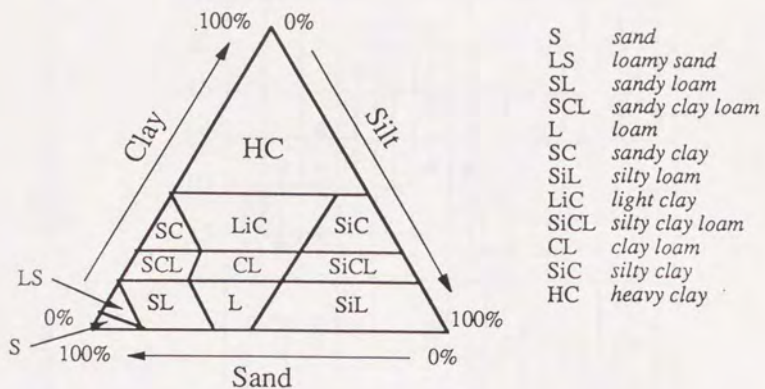


Fig. 1-4-1 土性区分 (小山、1986)

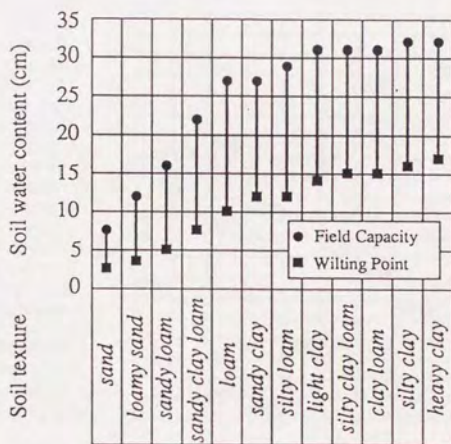


Fig. 1-4-2 土性と土壤水分保持能力の関係図

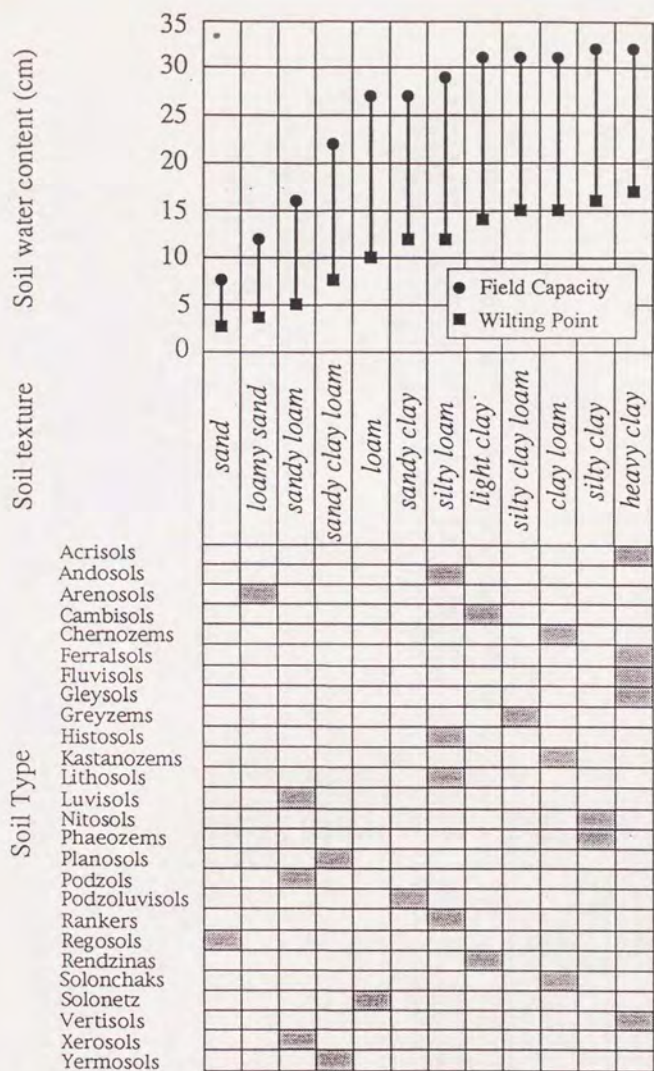


Fig. 1-4-3 FAOによる土壌分類と土壌水分保持能力の関係図



Fig. 1-4-4 FAOの土壌分類に基づいた土壌分布図 (Zobler, 1986)



Fig. 1-4-5 土性の世界分布図

土壤水分=降雨量-蒸发散量

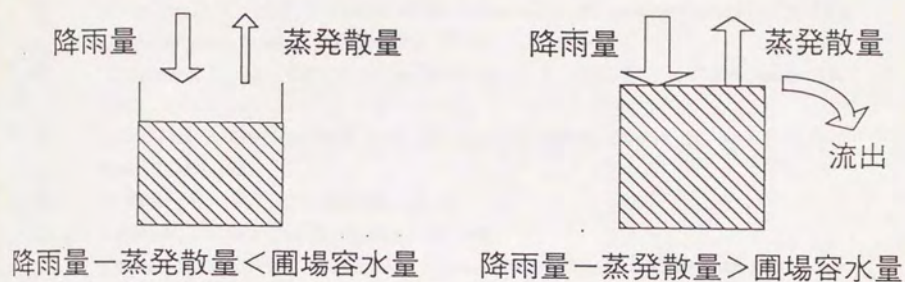


Fig. 1-4-6 土壤水分収支概念図

第1章参考文献

- 1) 秋山侃、武田友四郎, 1975, トウモロコシの物質生産に関する研究 第6報
数学モデルによる個体群光合成量の計算, Proc. Crop Sci. Soc. Japan, 44, 275-280
- 2) Anderson, D.W., 1979, Processes of humus formation and transformation in soils of the
Canadian great plains, J. Soil Sci., 30, 77-84
- 3) Bacasow, R.B. et al., Carbon and the biosphere, U.S. Atom. Energy Commission., 86,
1973
- 4) Bray J. and E. Gorham, 1964, Litter production in forests of the world, Adv. Ecol.
Res., 2, 101-158
- 5) 千葉喬三ら, 1967, 京大農演報, 39, 91
- 6) Edwards, N.T. et al., 1973, Ecology, 54, 406
- 7) Cannell, M.G.R., 1982, World forest biomass and primary production data, Academic
Press
- 8) Emanuel, W.R., G.G. Killough, M.M. Post and H.H. Shugart, 1984, Modeling
terrestrial ecosystems in the global carbon cycle with shifts in carbon storage capacity by
land-use change, Ecology, 65, 970-983
- 9) Emanuel, W.R., H.H. Shugart and M.P. Stevenson, 1985, Climatic Change and the
broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes, Climatic Change, 7, 29-43
- 10) Esser, G., 1984, The significance of biospheric carbon pools and fluxes for the
atmospheric CO₂ Progress in Biometeorology, 3, 253-294
- 11) Esser, G., 1987, Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential
climatic impacts, Tellus, 39B, 245-260
- 12) FAO/Unesco, 1974-1981. Soil map of the world 1-10
- 13) Furukawa, A., 1972, Photosynthesis and respiration in poplar plant, J. Jap. For. Soc.,
54, 80-84
- 14) Goudriaan, J. and P. Kenter, 1984, A simulation study for the global carbon cycle,
including man's impact on the biosphere, Climatic Change, 6, 167-192
- 15) Gowdy, C.M., R.J. Mulholland and W.R. Emanuel, 1975, Modelling the global carbon
cycle, Int. J. Systems Sci., 6, 965-976
- 16) 萩原秋男ら, 1978, 89回日林論, 191
- 17) 萩原秋男ら, 1980, 日林中支講, 28, 43
- 18) Hagiwara, A. and K. Hozumi, 1981, Respiration consumption by woody organs in a
chamaecyparis obtusa plantation, J. Jap. For. Soc., 63, 156-164
- 19) 萩原秋男ら, 1984, 95回日林論, 361
- 20) Harley, P.C., R.B. Thomas, J.F. Reynolds and B.R. Strain, 1992, Modelling
photosynthesis of cotton grown in elevated CO₂, Plant, Cell and Environment, 15,
271-282

- 21) Hesketh, J.D. and D. Baker, 1963, Light and carbon assimilation by plant communities, *Crop Sci.*, 7, 285-93
- 22) Hillel, D., 1980. Applications of soil physics, Academic Press.
- 23) 本條均、鴨田福也、朝倉利員, 1988, カンキツ葉の暗呼吸及び光合成速度に対する温度環境の影響, *J. Agr. Met.*, 44, 23-26
- 24) Hsiao, T.C., E. Acevedo, E. Fereres and D.W. Henderson, 1976, Water stress, growth and osmotic adjustment, *Phil. Trans. R. Soc. London*, B273, 479-500
- 25) Hunt, H.W., M.J. Trlica, E.F. Redente, J.C. Moore, J.K. Detling, T.G.F. Kittel, D.E. Walter, M.C. Foeler, D.A. Klein and E.T. Elliot, 1991, Simulation model for the effects of climate change on temperate grassland ecosystems, *Ecol. Modelling*, 53, 205-246
- 26) Ino, Y. and M. Monsi, 1969, An experimental approach to the calculation of CO_2 amount evolved from several soils, *Jap. J. Bot.*, 20, 153-188
- 27) 石井龍一、村田吉男, 1978, C_3 、 C_4 植物の光合成, *Jap. J. Crop Sci.*, 47, 165-188
- 28) Iwaki, H. and S. Hirotsuki, 1975, A model for plant-growth under nongrazing condition, *JIBP Synthesis*, 13, 263-268
- 29) Iwaki, H., G. Takeda and T. Udagawa, 1976, Ecological studies on the photosynthesis of winter cereals II. photosynthesis of wheat and rye plants under field condition, *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*, 45, 32-39
- 30) Janacek, A., G. Benderoth, M.K.B. Lüdeke, J. Kindermann and G.H. Kohlmaier, 1989, Model of the seasonal and perennial carbon dynamics in deciduous-type forest controlled by climate variations, *Ecol. Modelling*, 49, 101-124
- 31) Jenkinson, D.S., 1990, The turnover of organic carbon and nitrogen in soil, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 329, 361-368
- 32) Johansson, N., 1933, *Svenska Skogvårdsför. Tidskr.*, 31, 53
- 33) 片桐成夫, 1988, 落葉広葉樹林における土壌呼吸に占める根の呼吸量の推定, *J. Jap. For. Soc.*, 70, 151-158
- 34) 片桐成夫ら, 1979, 島根大農研報, 13, 50
- 35) 河原輝彦, 1976, リターの分解について(IV), 土壌呼吸量中の根の呼吸量の推定, *J. Jap. For. Soc.*, 58, 353-359
- 36) 河原輝彦、只木良也、竹内郁雄、佐藤明、樋口国雄、加茂皓一, 1979, プナ天然林とヒノキ人工林の物質生産とその循環, *Jap. J. Ecol.*, 29, 387-395
- 37) 木村充、戸塚績, 1973, 植物の生産過程, 共立出版
- 38) Kira, T. and T. Shidei, 1967, Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of Western Pacific, *Jap. J. Ecol.*, 17, 70-87
- 39) Kira, T., K. Shinozaki and K. Hozumi, 1969, Structure of forest canopies as related to their primary productivity, *Plant and Cell Physiol.*, 10, 129-142
- 40) Kira, T. and K. Yabuki, 1978, Primary production rates in Minamata forest, *JIBP Synthesis*, 18, 131-138

- 41) Kirita, H., 1971, Studies of soil respiration in warm-temperate evergreen broadleaf forests of southwestern Japan, *Jap. J. Ecol.*, 21, 230-244
- 42) Kohlmaier, G. H., H. Brohl, E. O. Sire, 1987, Modelling stimulation of plants and ecosystem response to present levels of excess atmospheric CO₂, *Tellus*, 39B, 155-170
- 43) 小山正忠, 1986, 土壌学, 大明堂
- 44) Kucera, C. L. et al., 1971, *Ecology*, 52, 912
- 45) Kurachi, N. A. Hagihara and K. Hozumi, 1986, Evolution of the light interception by nonphotosynthesis organs in a *Larix leptolepis* plantation, *Ecol. Res.*, 1, 173-83
- 46) Kurachi, N. A. Hagihara and K. Hozumi, 1989, Effect of light in interception by nonphotosynthesis organs on canopy photosynthetic production, *Ecol. Res.*, 4, 189-97
- 47) Larcher, W., 1975, *Physiological Plant Ecology*, Springer-Verlag, Berlin, 49
- 48) Löhner, E., 1957, *Physiol. Plant*, 10, 340
- 49) Ludlow, M. M. and G. L. Wilson, 1971, Photosynthesis of tropical pasture plants I. Illuminance, carbon dioxide concentration, leaf temperature, and leaf-air vapor pressure difference, *Aust. J. Biol. Sci.*, 24, 449-70
- 50) Maruyama, K. and Y. Toyama, 1987, Effect of water stress on photosynthesis and transpiration in three tall deciduous trees, *J. Jap. For. Soc.*, 69, 165-170
- 51) Miller, P. C., R. Kendall and W. C. Oechal, 1983, Simulating carbon accumulation in northern ecosystems, *Simulation*, April, 119-131
- 52) Monsi, M. and T. Saeki, 1953, Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoproduktion, *Jap. J. Bot.*, 14, 22-54
- 53) 村田吉男, 1980, 光合成と物質生産, 理工学社, 437
- 54) Müller, M. J., 1982. Selected climatic data for a global set of standard stations for vegetation science. Dr W. Junk Publisher, 306 pp.
- 55) 中根周歩, 1975, 森林斜面における土壌有機物のダイナミックス, *Jap. J. Ecol.*, 25, 206-216
- 56) 中根周歩, 1978, 大台ヶ原ブナ-ウラジロモミにおける土壌有機物のダイナミックスとその季節変動, *Jap. J. Ecol.*, 28, 335-346
- 57) 中根周歩, 1980, 三タイプの極相林における土壌有機物の循環比較と総合的考察, *Jap. J. Ecol.*, 30, 155-172
- 58) Nakane, K. H. Tsubota and M. Yamamoto, 1983, Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem, *Jap. J. Ecol.*, 33, 397-408
- 59) Negisi, K., 1972, Diurnal fluctuation of CO₂ release from the bark of a standing *Magnolia obovata* tree, *J. Jap. For. Soc.*, 54, 257-263
- 60) Ninomiya, I. and K. Hozumi, 1981, Respiration of forest trees(I) Measurement of respiration in *Pinus dens-thunbergii* Uyeki by an enclosed standing tree method, *J. Jap. For. Soc.*, 63, 8-18
- 61) Ninomiya, I. and K. Hozumi, 1983, Respiration of forest trees(III) Estimation of

- community respiration, J. Jap. For. Soc., 65, 275-281
- 62) Nishioka, M. and H. Kirita, 1978, Litterfall, JIBP Synthesis, 18, 231-238
 - 63) Nomoto, N., 1964, Primary Productivity of Beech Forest in Japan, Jap. J. Bot., 18, 385-421
 - 64) Oikawa, T., 1978, Canopy photosynthesis of the plant population simulated on the basis of light and CO₂ conditions, JIBP Synthesis, 19, 167-183
 - 65) Oikawa, T., 1985, Simulation of forest carbon dynamics based on a dry-matter production model I. Fundamental model structure of a tropical rainforests ecosystem, Bot. Mag., Tokyo, 98, 225-238
 - 66) Parton, W. J., D. S. Schimel, C. V. Cole and D. S. Ojima, 1987, Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands Soil Sci. Soc. Am. J., 51, 1173-79
 - 67) Phillipson, J., R. J. Putman, J. Steel and S. R. J. Woodwell, 1975, Litter input, litter decomposition and the evolution of carbon dioxide in a beech, woodland-wytham wood, Oxford, Oecologia, 20, 203-17
 - 68) Pisek, A., W. Larcher, A. Vegis and K. Napp-Zinn, 1973, Normal temperature range, H. J. Precht, Christophersen, H. Hensel and W. Larcher (eds.), Temperature and life, 102-127,
 - 69) Reich, P. B., M. B. Walters and D. S. Ellsworth, 1992, Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems, Ecol. Monographs, 62, 365-392
 - 70) Reiners, W. A., 1968, Ecology, 49, 471
 - 71) Saeki, T., 1960, Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community, Bot. Mag. Tokyo, 73, 55-63
 - 72) 酒井正治, 1985, 日林関西支講, 36, 96
 - 73) 酒井正治、堤利夫, 1987, 温帯落葉広葉樹林の2タイプの土壌における炭素収支 (II) 土壌呼吸速度の季節変化とそれに及ぼす土壌環境要因, J. Jap. For. Soc., 69, 41-48
 - 74) Satoo, T., 1968, Primary Production and Distribution of Produced Dry Matter in a Plantation of "Cinnamomum camphora" -Materials for the studies of growth in stands. 7.-, Bulletin the Tokyo University Forest, 64, 241-275
 - 75) Satoo, T., 1971, Primary Production Relations in a Plantation of Norway Spruce in Japan -Materials for the studies of growth in stands. 8.-, Bulletin the Tokyo University Forest, 65, 125-142
 - 76) Satoo, T., 1974, Primary Production Relations of a Young Stand of "Metasequoia Glyptostroboides" Planted in Tokyo -Materials for the studies of growth in stands. 13.-, Bulletin the Tokyo University Forest, 66, 153-164
 - 77) 佐藤亨、津野幸人, 1975, 作物体各部位におけるCO₂収支に関する研究 第1報

- トウモロコシおよびソルガムの葉鞘、茎、穂の光合成速度, *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*, 44, 281-286
- 78) Schlesinger, W.H., 1977, Carbon balance in terrestrial detritus, *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 8, 51-81
 - 79) 瀬戸昌之, 1980, 土壌の二酸化炭素の放出速度と土壌の含水率および土壌溶液中の溶存有機炭素量との関係, *Jap. J. Ecol.*, 30, 385-391
 - 80) 瀬戸昌之、松前恭子、田崎忠良, 1978, 林床における二酸化炭素の発生速度の季節変化と土壌の生物及び環境条件に関するいくつかの考察、*生物環境調節*, 16, 103-108
 - 81) Smith, O.L., 1979a, Application of a model of the soil decomposition of soil organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 11, 607-618
 - 82) Smith, O.L., 1979b, An analytical model of the decomposition of soil organic matter, *Soil Biol. Biochem.*, 11, 585-909
 - 83) Sutcliffe, J., 1977, *Plant and Temperature*, Arnold, London
 - 84) Takai, T., S. Kanazawa, H. Wada, T. Asami, H. Takeuchi and S. Takesima, 1977, Decomposition processes of organic matter in the soil, *JIBP Synthesis*, 15, 167-179
 - 85) 武田博清, 1987, アカマツ林における落葉の分解と土壌堆積腐植層の形成過程, *Bulletin the Kyoto University Forest*, 59, 79-90
 - 86) 手塚修文, 1978, *環境植物学* (田崎忠良編), 朝倉書店, 81
 - 87) Thornthwaite, C.W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, *Geog. Rev.* 38, 55-94
 - 88) Tranquillini, W. and W. Schütz, 1970, *Centl. gesamte forestwesen*, 1, 42
 - 89) Tsuno, Y. and K. Fujise, 1965, *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.*, 33, 230
 - 90) 堤利夫, 1986, *森林の物質循環*, 東京大学出版会, 17
 - 91) 堤利夫, 1989, *森林生態学*, 朝倉書店, 57
 - 92) 上田晋之助、堤利夫, 1977, ヒノキ人工林とタブ天然生林のリターフォールについて, *Bulletin the Kyoto University Forest*, 49, 30-40
 - 93) USDA, 1955, *The yearbook of agriculture*
 - 94) Van Breemen, N. and T.C.J. Feijtel, 1990, *Soil and the Greenhouse Effect*, John Wiley and Sons, New York, 195-223, Bouwman, A.F.
 - 95) Virzo De Santo, A., A. Alfani and S. Sapio, 1976, Soil metabolism in beech forests of Monte Taburno (Campania Apennines), *Oikos*, 27, 144-152
 - 96) Vong, N.Q. and Y. Murata, 1977, Studies on the physiological characteristics of C_3 and C_4 crop species I. The effects of air temperature on the apparent photosynthesis, dark respiration, and nutrient absorption of some crops, *Jap. J. Crop Sci.*, 46, 45-52
 - 97) Wanner, H., 1970, *J. Ecol.*, 58, 543
 - 98) Witkamp, M., 1966, *Ecology*, 47, 492
 - 99) 依田恭二, 1971, *森林の生態学*, 築地書館

- 100) Yoda, K. and T. Kira, 1969, Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand V. accumulation and turnover of soil organic matter, with notes on the altitudinal soil sequence on Khao(Mt.)Luang, peninsular Thailand, *Nature & Life in SE Asia*, 6, 83-110
- 101) Yoda, K. and M. Nishioka, 1982, Soil respiration in dry and wet seasons in tropical dry-evergreen forest in Sakaerat, Ne Thailand, *Jap. J. Ecol.*, 32, 539-541
- 102) Yoneda, T., 1975, Studies on the rate of decay of wood litter on the forest floor I. Some physical properties of decaying wood, *Jap. J. Ecol.*, 25, 40-46
- 103) Yoneda, T. and H. Kirita, 1978, Soil respiration, *JIBP Synthesis*, 18, 239-249
- 104) Yoneda, T., 1982, Turnover of live and dead woody organs in forest ecosystems-an assessment based on the changes in the frequency distribution of their diameter (studies on the rate of decay of wood litter on the forest floor IV), *Jap. J. Ecol.*, 32, 333-346
- 105) Zabler, L., 1986, A World Soil File for Global Climate Modelling, NASA Technical Memorandum 87802, NASA Goddard Institute for Space Studies, New York

第2章 モデルの検証

本章の目的

本章では、前章において構築したモデルを計算し、実測値と比較することによってモデルの健全性を検証した。

2-1 植生の炭素循環に関する検証

2-1-1 植生の炭素蓄積量

本節では植生の炭素蓄積量 (Dry Biomass: $DB=C_1+C_2$: $\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$) に関して検証を行うために、植生の炭素蓄積量を計算値と実測値と比較した。成長過程における植生の炭素蓄積量に関して検証を行うために、熱帯林の炭素蓄積量を計算し実測値 (Cannel, 1982, Farnworth and Golley, 1974) と比較した図をFig. 2-1-1に示す。計算は熱帯林が存在する30の観測地点の気候データ (Müller, 1982) を用いて実行し、その中で最大と最小の炭素蓄積量を示したものの結果と実測値をFig. 2-1-1に示す。Table 2-1-1に実測値の地点を示す。Fig. 2-1-1によるとすべての実測値は2つの計算線の間に属していることがわかる。よって、炭素蓄積量に関して本モデルではその成長過程を記述することができるといえる。

Fig. 2-1-2に様々な地点において熱帯林の炭素蓄積量の実測値と計算値の比較図を示す。実測値はCannel (1982) のデータを用いた。Table 2-1-2(a)にデータが実測された位置、植物の年齢、及び実測点と一番近い気象観測点 (この気象観測点のデータを計算に用いた) の位置を示す。また、Table 2-1-2(b)にその気象観測点における気候データ、月平均気温、月降雨量、さらに計算によって得られた月土壌水分量を示す。Fig. 2-1-2においてF、I (太英字は図中の文字を示す) が計算値と実測値とのずれが大きい。F、Iと炭素蓄積量がほぼ等しいG、Hを比べると、Table 2-1-2(b)により温度はほぼ等しいが土壌水分量が少ないのがわかる。このような実測値と計算値の違いは以下のような理由が考えられる。

ひとつは炭素蓄積量の実測点と気候データの観測点の距離である。Table 2-1-2(a)によると炭素蓄積量の実測地と気候データの観測点は必ずしも近くない。これは炭素蓄積量の実測地における気候データと計算で使用している気候データが必ずしも同一ではないことを示している。実測点と観測点の距離が一番近いのはFig. 2-1-2においてはKであり、実測地と観測地のずれは非常に小さい。さらに多くの地点で気候データが観測されれば、こうした実測値と計算値の違いは改善されるであろう。

もう一つの理由として考えられるのは実測点の地形である。以前に述べたように熱帯林においては土壌水分量が植生の炭素蓄積量に大きく影響を及ぼす。たとえ炭素蓄積量

の実測地における気候データと計算で用いる気候データが同一であっても土壌水分量に大きな違いがある可能性がある。本モデルでは熱帯雨林が存在する土壌の水分保持能はすべて同一であるとしており、局所的な土壌の水分保持能の違いは考慮されていない。よって、さらに細かく土壌の水分保持能の違いを考慮すれば、こうした実測値と計算値の違いが改善される可能性がある。

2-1-2 植生の純生産速度

Figs. 2-1-3(a)~(d)は非定常状態における熱帯林、温帯常緑林、温帯落葉林、寒帯林の純生産速度 (Net Primary Production: $NPP = R_1^P - R_2^R$; $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$) についての実測値と計算値の比較を示す。Tables 2-1-3(a)~(d)に実測値の位置と、気候観測値の位置、年平均温度、年降雨量、年平均土壌水分量を示す。一般に純生産速度に関して計算値は実測値をよく記述しているといえる。

熱帯雨林の純生産速度に関してFig. 2-1-3(a)によると、Dにおける実測値と計算値のずれが最も大きい。Table 2-1-3(a)によるとすべての点の平均温度はほぼ同じであるが、Dの土壌水分量が一番小さい。つまり、熱帯雨林の純生産速度についても炭素蓄積量の場合と同様に土壌水分量が大きな影響を及ぼすと考えられる。

実測値と計算値のずれが±50%以上の点はFig. 2-1-3(b)においてはKとH1、Fig. 2-1-3(c)においてはL、O、R、S1、S2、T、Fig. 2-1-3(d)においてはc3、e1、e2、h1、h2、h3、i1、i5である。(英文字が同じで、数字が違うと、実測地は同じであるが樹齢が違うことを示す) 熱帯雨林が土壌水分量の差が原因であったが、これらの場合はいずれも土壌水分が豊富なので、土壌水分量が実測値と計算値のずれの原因ではない。これらの点は実測値と計算値との距離が他の点よりも長い。このように純生産速度に関しても実際の実測点における気候条件に近い気候条件を用いるべきである。しかしながら、その点を考慮すれば本モデルによって植生の純生産速度を記述できるといえよう。

2-2 土壌の炭素循環に関する検証

2-2-1 土壌炭素の鉛直分布

本モデルによって局所的な土壌炭素の循環に関して検証するため、土壌炭素の鉛直分布について実測値と計算値を比較した。土壌炭素の鉛直分布は土壌の重要な特性の一つであり (Bouwman, 1990)、土壌炭素の鉛直分布によって、土壌が分類されるためである。土壌炭素の鉛直分布を計算し、FAO/Unesco (1974~1981) のデータと比較した。土壌炭素は植物遺体と腐植質の両者の土壌炭素の和である ($=C_3+C_4$; $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$) とした。植生の場合と同様に計算に用いた気候データは土壌データの観測点と一番近い気候観測点で観測されたデータをMüller (1982) から引用した。

Figs. 2-2-1(a)~(d)に4つの土壌タイプ、Ferralsol、Cambisol、Podzoluvisol、Yermosol

における土壤炭素蓄積量の鉛直分布をそれぞれ示す。Fig. 1-4-3によるとFerralsol、Cambisol、Podzoluvisolの各土壌の土性はそれぞれheavy clay、light clay、sandy clayである。これらの土壌の土壤有機物の移流速度は $0.001 [\text{m} \cdot \text{day}^{-1}]$ であり、その結果として土壌の上層の炭素蓄積量と下層の炭素蓄積量の差が極めて大きくなっている。一方、Yermosolの土性はsandy clay loamであり、移流速度は $0.05 [\text{m} \cdot \text{day}^{-1}]$ である。そのため、土壤炭素は鉛直方向にはほぼ一定である。本モデルでは土壤有機物の鉛直方向への移流を考慮しているため、土壤炭素の鉛直方向分布を記述できるといえる。

2-2-2 土壤炭素蓄積量

前節で土壤炭素の鉛直分布について実測値と計算値を比較したが、本節では総土壤炭素量 ($=\Sigma(C_3+C_4) : \text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$) について実測値と計算値を比較する。FAO/Unesco (1974~1981) によると、世界の土壌は大きく分けて26種類に分類できる。しかしながら、これらの26種の土壌をその形成過程に基づいて、さらにZonal、Intrazonal、Azonalの3つに分けることができる (Bridges, 1978)。Zonal soilは気候条件の影響を強く受けて形成された土壌である。Intrazonal soilは気候条件と同程度地域的な条件 (母材や地形など) の影響を受けて形成された土壌である。Azonal soilは気候条件の影響をまったく受けて形成された土壌である。FAO/Unesco (1974~1981) による土壌分類と Bridges (1978) による土壌分類との対応表をTable 2-2-2に示す。Table 2-2-2に示すように、Zonal soilは気候条件によって更に細かく分けることができる。本モデルの土壌における炭素の循環は環境条件の影響を受ける。しかし、Azonal soilのように現実の土壌は、環境条件の影響を受けないものもある。本節では、こうした土壌を含めた土壤炭素蓄積量に関して検証を行うために、26種類の土壌を3つに分類し、それぞれの土壌について計算値と実測値との比較を行った。初期条件は $[C_3]_{z=0} = [C_4]_{z=0} = 0.01 [\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}]$ 及び、 $[C_3]_{z=0} = [C_4]_{z=0} = 0.00 [\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}]$ とし、計算は定常状態に達するまで行った。

Figs. 2-2-2(a)~(e)にZonal soilにおける温帯林、寒帯林、熱帯林、草原、砂漠植生における土壌の炭素蓄積量の実測値と計算値との比較を示す。Figs. 2-2-3(a)~(c)にはIntrazonal soilにおける森林、草原、砂漠植生の土壌炭素蓄積量の実測値と計算値との比較を示す。Figs. 2-2-4(a)~(c)にAzonal soilにおける森林、草原、砂漠植生の土壌炭素蓄積量の実測値と計算値との比較を示す。

Fig. 2-2-2(d)、Fig. 2-2-3(b)、Fig. 2-2-4(b)においてそれぞれZonal、Intrazonal、Azonal soilを比べると、Zonal soil (Fig. 2-2-2(d)) の実測値と計算値とのずれが最も小さい。IntrazonalとAzonal soilにおける土壌における実測値と計算値とのずれはいずれも $\pm 50\%$ 以内である。Fig. 2-2-2(d)、Fig. 2-2-3(b)、Fig. 2-2-4(b)に共通することはその土壌を覆っている植生がGrasslandであるということである。土壤炭素は植生から落葉や幹や枝の枯死によって供給されるので、落葉や幹や枝の枯死に含まれる炭素は土壤炭素蓄積量の支配的な要因であると考えられる。よって、本モデルはZonal soilの土壤炭素蓄積量だけでなく、IntrazonalやAzonal soilの土壤炭素蓄積量も十分に記述できるといえる。

また、実測値と計算値のずれには+50%以上の点と-50%以下の点の2つに分類できる。Fig. 2-2-2(b)には-50%以下の点は4点ある。これらの点に共通することは何れも気温がやや高い場所に位置するということである。これら4点の年平均気温は10.5℃である。一方、他の±50%の中にある点の年平均気温は4.0℃である。Fig. 2-2-2(c)について、+50%以上の点が1つある。その点の年平均気温は16.4℃であり、±50%以内の点の年平均気温は22.3℃である。Figs. 2-2-2(b)、(c)の実測値における植生はそれぞれ寒帯林と熱帯林であり、気候条件も寒帯と熱帯を表わしている。その実測地にある植生にとって最適な温度とその実測地の気温の差が大きいと、土壤炭素蓄積量の実測値と計算値の差も大きくなるものと思われる。

本章のまとめ

前章で構築した陸上生態系の炭素循環モデルに関して、植生の炭素蓄積量、純生産速度及び、土壤の炭素蓄積量に関して実測値と計算値の比較を行なった。陸上生態系の炭素循環に関して、本モデルでその記述が十分可能であることが示された。

Table 2-1-1 Fig. 2-1-1における
実測値の位置

Vegetation Observation Spots

A	6°50'N 73°55'W
B	El Verde, Puerto Rico
C	Izabal, Guatemala
D	Darien, Panama
E	Belgian, Congo
F	Guarin, Colombia
G	Benin, S.Nigeria
H	Kumasi, Ghana
I	Kade, Ghana
J	Ivory Coast
K	Nigeria
L	Thailand

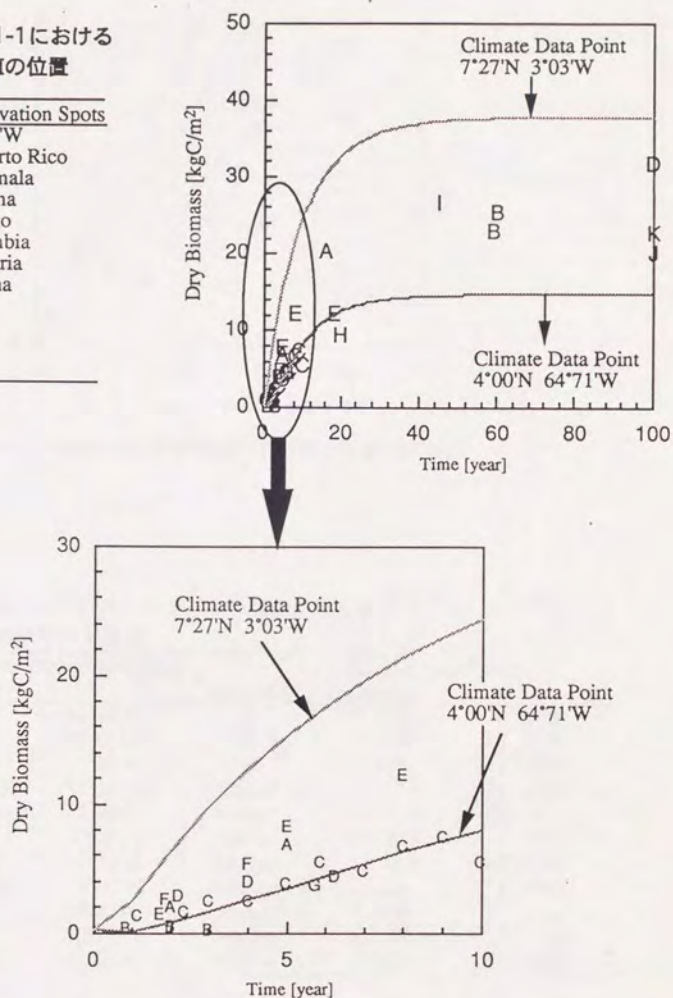


Fig. 2-1-1 成長過程における熱帯林の実測値と計算値の比較

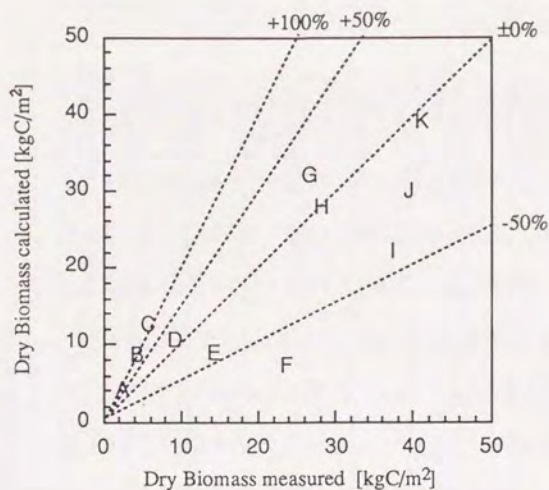


Fig. 2-1-2 熱帯林の炭素蓄積量の実測値と計算値の比較

Table 2-1-2(a) Fig.2-1-2におけるデータの実測地点と計算で使した気候観測点の位置の対応表

Vegetation Observation Spot			Climate Data Points	
Location		Age(year)	Location	
A	8° 39'N 78° 09'W	2	7° 32'N 78° 10'W	
B	8° 39'N 78° 09'W	4	7° 32'N 78° 10'W	
C	8° 39'N 78° 09'W	6	7° 32'N 78° 10'W	
D	24° 52-58'N 83° 3-12'E	Mature	25° 17'N 81° 44'E	
E	18° 30'N 98° 40'E	Mature	18° 47'N 98° 59'E	
F	10° 56'N 103° 24'E	Mature	11° 33'N 104° 55'E	
G	18° 19'N 65° 45'W	Mature	18° 28'N 66° 06'W	
H	8° 30-40'N 78° 00'W	Mature	7° 32'N 78° 10'W	
I	7° 35'N 99° 45'E	Mature	7° 58'N 99° 24'E	
J	2° 59'N 102° 18'E	Mature	2° 12'N 102° 16'E	
K	1° 54'N 67° 06'w	Mature	1° 54'N 67° 03'w	

Table 2-1-2(b) Fig. 2-1-2)において計算で使した気候観測点の気候条件
(A.M.T.=Annual Mean Temperature, A.T.P.=Annual Total Precipitation, A.M.S.=Annual Mean Soil Water)

Climate Data Points	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
A 7° 32'N 78° 10'W	26.1	26.1	26.7	26.7	26.1	26.1	25.6	25.6	25.6	25.0	25.6	25.6	A.M.T.(°C) 25.9
Precipitation(mm)	8	3	28	91	622	411	432	409	353	955	696	305	A.T.P.(mm) 4313
Soil Water(cm)	29.2	27.9	17.2	12.8	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	A.M.S.(cm) 27.3
B 7° 32'N 78° 10'W	26.1	26.1	26.7	26.7	26.1	26.1	25.6	25.6	25.6	25.0	25.6	25.6	A.M.T.(°C) 25.9
Precipitation(mm)	8	3	28	91	622	411	432	409	353	955	696	305	A.T.P.(mm) 4313
Soil Water(cm)	29.2	27.9	17.2	12.8	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	A.M.S.(cm) 27.3
C 7° 32'N 78° 10'W	26.1	26.1	26.7	26.7	26.1	26.1	25.6	25.6	25.6	25.0	25.6	25.6	A.M.T.(°C) 25.9
Precipitation(mm)	8	3	28	91	622	411	432	409	353	955	696	305	A.T.P.(mm) 4313
Soil Water(cm)	29.2	27.9	17.2	12.8	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	A.M.S.(cm) 27.3
D 25° 17'N 81° 44'E	16.1	18.3	24.7	30.6	34.2	33.9	30.0	28.7	28.9	25.9	20.3	16.4	A.M.T.(°C) 25.7
Precipitation(mm)	23	15	15	5	15	127	320	254	213	58	8	8	A.T.P.(mm) 1061
Soil Water(cm)	29.1	29.0	28.9	12.9	0.0	26.0	15.8	26.0	30.0	30.0	29.2	28.4	A.M.S.(cm) 23.8
E 18° 47'N 98° 59'E	21.1	23.1	26.0	28.6	28.7	27.9	27.4	27.0	26.9	26.2	24.5	21.8	A.M.T.(°C) 25.8
Precipitation(mm)	7	7	16	45	146	137	169	223	270	143	40	14	A.T.P.(mm) 1217
Soil Water(cm)	28.9	28.0	28.0	17.3	16.8	26.6	18.2	26.6	30.0	30.0	30.0	29.8	A.M.S.(cm) 25.8
F 11° 33'N 104° 53'E	26.0	27.5	28.9	29.6	28.6	28.1	27.5	27.6	27.2	27.1	26.7	25.6	A.M.T.(°C) 27.5
Precipitation(mm)	8	9	36	74	146	142	146	154	228	256	134	39	A.T.P.(mm) 1372
Soil Water(cm)	23.2	9.7	0.0	0.0	0.0	1.3	0.2	1.3	10.1	21.8	21.7	24.0	A.M.S.(cm) 9.4
G 18° 28'N 66° 06'W	23.9	23.9	24.4	25.0	26.0	26.6	26.7	27.1	27.1	26.8	25.9	24.8	A.M.T.(°C) 25.7
Precipitation(mm)	105	69	53	99	182	148	153	161	153	133	154	124	A.T.P.(mm) 1534
Soil Water(cm)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	29.4	30.0	30.0	A.M.S.(cm) 29.9
H 7° 32'N 78° 10'W	26.1	26.1	26.7	26.7	26.1	26.1	25.6	25.6	25.6	25.0	25.6	25.6	A.M.T.(°C) 25.9
Precipitation(mm)	8	3	28	91	622	411	432	409	353	955	696	305	A.T.P.(mm) 4313
Soil Water(cm)	29.2	27.9	17.2	12.8	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	A.M.S.(cm) 27.3
I 7° 58'N 99° 24'E	27.2	27.8	28.6	28.9	28.1	28.1	28.1	27.5	27.0	27.2	27.2	27.2	A.M.T.(°C) 27.7
Precipitation(mm)	36	38	74	127	297	264	216	244	328	315	193	79	A.T.P.(mm) 2211
Soil Water(cm)	13.6	2.6	0.0	0.0	14.9	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	28.0	A.M.S.(cm) 19.6
J 2° 12'N 102° 16'E	26.7	27.0	27.0	27.2	27.2	27.0	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	A.M.T.(°C) 26.9
Precipitation(mm)	99	94	124	188	173	201	198	262	224	256	221	165	A.T.P.(mm) 2205
Soil Water(cm)	26.4	21.9	20.3	25.2	28.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	A.M.S.(cm) 27.7
K 1° 54'N 67° 03'W	26.3	26.3	26.5	25.9	25.6	25.7	25.4	25.9	26.6	26.7	26.7	26.2	A.M.T.(°C) 26.2
Precipitation(mm)	222	229	206	395	381	390	330	328	249	257	314	220	A.T.P.(mm) 3521
Soil Water(cm)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	A.M.S.(cm) 30.0

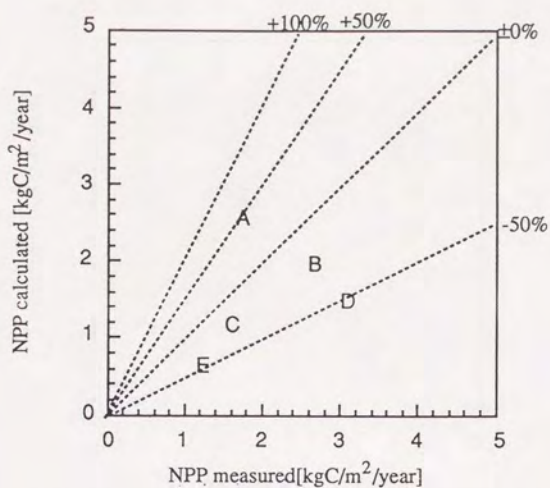


Fig. 2-1-3(a) 熱帯林の純生産速度の実測値と計算値の比較

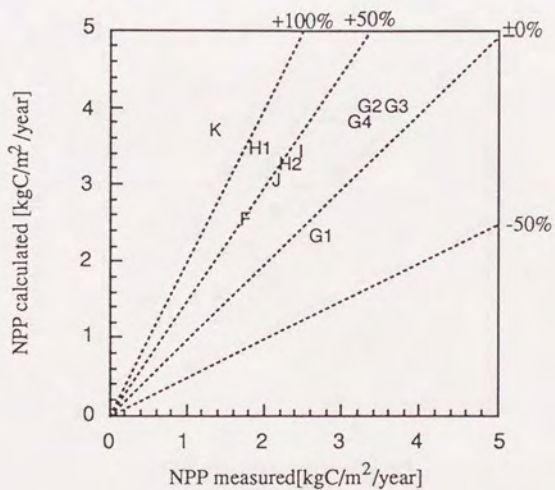


Fig. 2-1-3(b) 温帯常緑林の純生産速度の実測値と文献値の比較

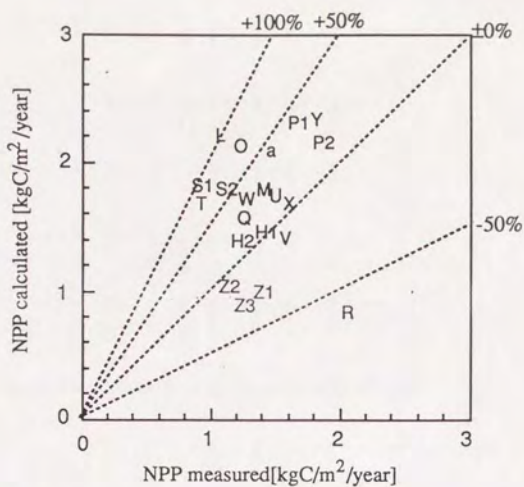


Fig. 2-1-3(c) 温帯落葉林の純生産速度の実測値と計算値の比較

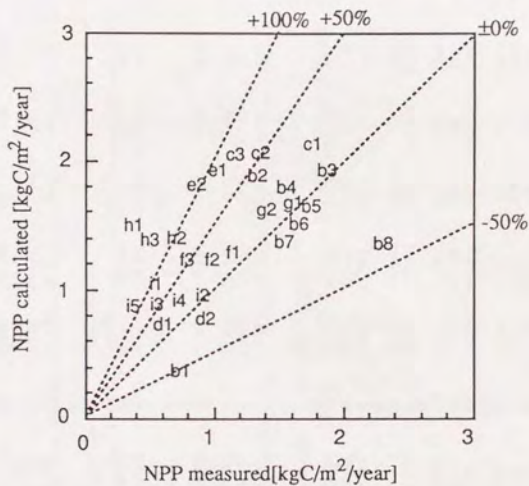


Fig. 2-1-3(d) 寒帯林の純生産速度の実測値と計算値の比較

Table 2-1-3(a)~(d) Fig. 2-1-3(a)~(d)において計算で使用した気候観測点の気候条件

(d)	Vegetation Observation Spots			Climate Data Points			A.M.T. (°C)			A.T.P. (mm)			A.M.S. (m)		
	37 00N	140 40E	Age(yes)	9	38 15N	140 54E	11.28	1231	30.00	11.28	1231	30.00	11.28	1231	30.00
b1	37 00N	140 40E	9		38 15N	140 54E									
b2	37 00N	140 40E	16	+	38 15N	140 54E									
b3	37 00N	140 40E	20	+	38 15N	140 54E									
b4	37 00N	140 40E	26	+	38 15N	140 54E									
b5	37 00N	140 40E	29	+	38 15N	140 54E									
b6	37 00N	140 40E	34	+	38 15N	140 54E									
b7	37 00N	140 40E	45	+	38 15N	140 54E									
b8	37 00N	140 40E	53	+	38 15N	140 54E									
c1	41 30N	139 30E	33	+	43 07N	135 54E	3.91	721	30.00						
c2	41 30N	139 30E	43	+	43 07N	135 54E									
c3	41 30N	139 30E	46	+	43 07N	135 54E									
d1	45 23N	78 33W	84	+	43 40N	79 24W	8.70	776	30.00						
d2	45 23N	78 33W	100	+	43 40N	79 24W									
e1	51 47N	9 35E	34	+	51 19N	9 29E	9.15	629	30.00						
e2	51 47N	9 35E	100	+	51 19N	9 29E									
f1	56 00N	30 00E	72	+	59 58N	30 18E	4.20	559	30.00						
f2	56 00N	30 00E	83	+	59 58N	30 18E									
f3	56 00N	30 00E	100	+	59 58N	30 18E									
g1	58 00N	27 50E	11	+	59 25N	24 48E	4.68	568	30.00						
g2	58 00N	27 50E	84	+	59 25N	24 48E									
g3	58 00N	27 50E	100	+	59 25N	24 48E									
h1	60 50N	23 55E	28	+	61 28N	23 40E	4.11	571	30.00						
h2	60 50N	23 55E	45	+	61 28N	23 40E									
h3	60 50N	23 55E	47	+	61 28N	23 40E									
i1	62 00N	34 00E	22	+	68 58N	33 07E	0.09	386	30.00						
i2	62 00N	34 00E	38	+	68 58N	33 07E									
i3	62 00N	34 00E	45	+	68 58N	33 07E									
i4	62 00N	34 00E	54	+	68 58N	33 07E									
i5	62 00N	34 00E	100	+	68 58N	33 07E									

(i)	Vegetation Observation Spots			Climate Data Points					
	Location	Alt (m)	Alt (year)	Location	A.M.T. (°C)	A.T.P. (mm)	A.M.S. (mm)		
	A	1° 54' N	67° 06' W	100	1° 54' N	67° 01' W	26.15	3321	30.00
	B	2° 59' N	102° 18' E	100	2° 12' N	102° 16' E	26.86	2208	27.68
	C	5° 33' N	4° 40' W	100	5° 15' N	3° 56' W	27.00	2144	21.52
	D	7° 35' N	99° 45' E	100	7° 58' N	99° 24' E	22.74	2211	19.59
	E	24° 55' N	83° 07' E	100	25° 17' N	81° 44' E	25.67	1061	23.78
(b)	Vegetation Observation Spots			Climate Data Points					
	Location	Alt (m)	Alt (year)	Location	A.M.T. (°C)	A.T.P. (mm)	A.M.S. (mm)		
	F	37° 10' N	130° 28' E	50	31° 34' N	130° 33' E	16.83	2316	30.00
	G1	37° 30' N	130° 30' E	3	31° 34' N	130° 33' E	16.83	2336	30.00
	G2	37° 30' N	130° 30' E	4	31° 34' N	130° 33' E	16.83	2336	30.00
	G3	37° 30' N	130° 30' E	5	31° 34' N	130° 33' E	16.83	2336	30.00
	G4	37° 30' N	130° 30' E	7	31° 34' N	130° 33' E	16.83	2336	30.00
	H2	37° 30' N	130° 30' E	14	31° 34' N	130° 33' E	16.83	2336	30.00
	I	37° 30' N	130° 30' E	3	34° 22' N	132° 26' E	14.73	1597	29.68
	J	37° 00' N	134° 07' E	4	34° 22' N	132° 26' E	14.73	1597	29.68
	K	0° 22' S	35° 21' E	7	1° 18' S	36° 45' E	17.05	1066	30.00
	L	37° 30' N	135° 45' E	100	34° 30' N	135° 32' E	13.50	1260	29.50
	(c)	Vegetation Observation Spots			Climate Data Points				
		Location	Alt (m)	Alt (year)	Location	A.M.T. (°C)	A.T.P. (mm)	A.M.S. (mm)	
		M	37° 30' N	84° 00' W	100	35° 36' N	82° 32' W	13.64	961
N1		37° 30' N	84° 17' W	48	35° 36' N	82° 32' W	13.64	961	30.00
N2		36° 51' N	138° 41' E	100	37° 58' N	139° 01' E	12.92	1844	30.00
	P1	37° 30' N	139° 07' E	33	37° 58' N	139° 01' E	12.92	1844	30.00
	P2	37° 30' N	139° 07' E	33	37° 58' N	139° 01' E	12.92	1844	30.00
	Q	46° 05' N	77° 10' W	90	46° 47' N	77° 48' W	12.50	1076	30.00
	R	47° 02' N	89° 34' W	100	47° 47' N	87° 47' W	10.52	843	30.00
	S1	50° 07' N	5° 14' E	66	50° 30' N	6° 06' E	5.67	1510	30.00
	S2	50° 07' N	5° 14' E	100	50° 30' N	6° 06' E	5.67	1510	30.00
	T	50° 07' N	4° 21' E	100	50° 48' N	4° 21' E	9.86	817	30.00
	U	50° 04' N	4° 21' E	55	50° 48' N	4° 21' E	9.86	817	30.00
	V	50° 07' N	5° 13' E	50	50° 30' N	6° 06' E	5.67	1510	30.00
	W	50° 09' N	5° 06' E	90	50° 48' N	4° 21' E	9.86	817	30.00
	X	50° 12' N	5° 01' E	100	50° 48' N	4° 21' E	9.86	817	30.00
	Y	50° 28' N	4° 18' E	14	50° 48' N	4° 21' E	9.86	817	30.00
	Z1	51° 47' N	9° 35' E	59	51° 19' N	9° 29' E	9.15	697	30.00
	Z2	51° 47' N	9° 35' E	80	51° 19' N	9° 29' E	9.15	697	30.00
	Z3	51° 55' N	6° 42' E	100	51° 26' N	6° 58' E	9.56	82	30.00

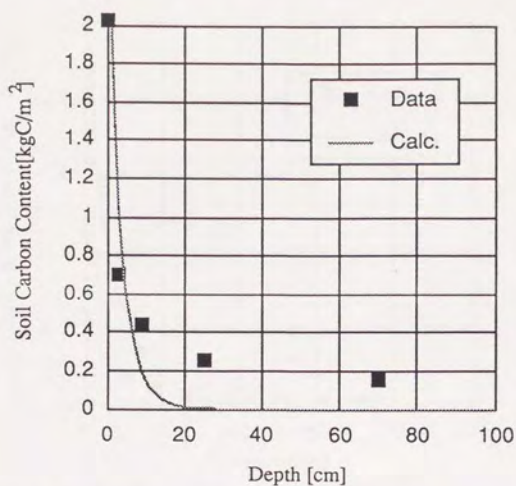


Fig. 2-2-1(a) Ferralsolの土壤炭素の鉛直方向分布
 location: 20° 9' S 47° 7' W
 Vegetation: Second growth forest

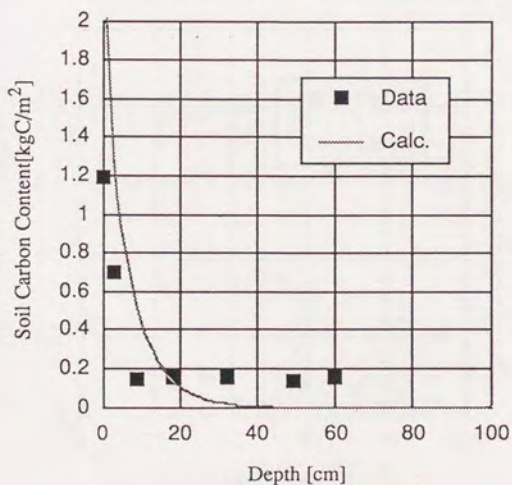


Fig. 2-2-1(b) Cambisolの土壤炭素の鉛直方向分布
 location: 35° N 5° W
 Vegetation: Field crops

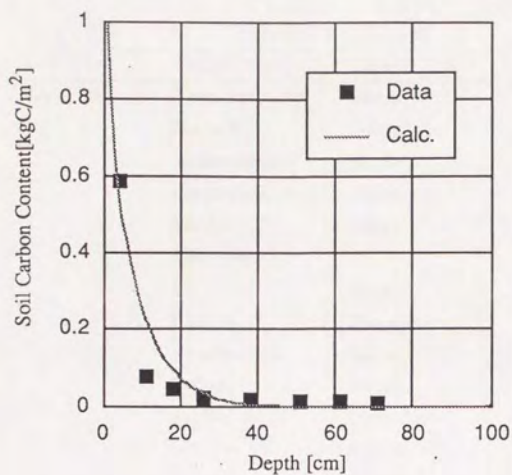


Fig. 2-2-1(c) Podzoluvisol の土壤炭素の鉛直方向分布
 location: 45° N 85° W
 Vegetation: Annual crops, maize, small trains, hay

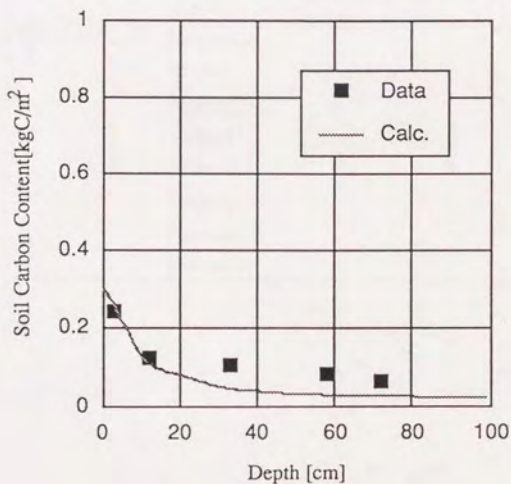


Fig. 2-2-1(d) Yermosol の土壤炭素の鉛直方向分布
 location: 34° N 46° E,
 Vegetation: Originally Mesopotamian steppe

Table 2-2-2 土壤分類

This Work	FAO/Unesco	Climate Zone	Vegetation
Zonal Soil	Yermosol	desert	deseret
	Xerosol	desert	deseret
	Kastanozem	steppe	grassland
	Chernozem	steppe	grassland
	Phaeozem	steppe	grassland
	Greyzem		grassland
	Cambisol	temperate	forest
	Luvisol	temperate	forest
	Podzoluvisol	boreal	forest
	Podzol	boreal	forest
	Acrisol	temperate	forest
	Nitrosol	tropical	forest
	Ferralsol	tropical	forest
Azonal Soil	Fluvisols		grassland
	Gleysol		grassland
	Regosols		forest
	Lithosol		forest
	Arenosol		various
Intrazonal Soil	Rendzinas		forest
	Ranker		forest
	Andosols		forest
	Vertisol		grassland
	Solonchak		grassland
	Solonetz		grassland
	Planosol		deseret
	Histosol		deseret

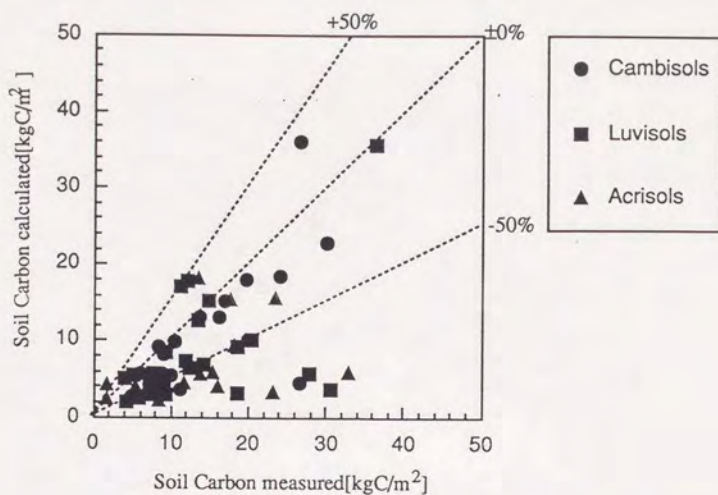


Fig. 2-2-2(a) Zonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Temperate Forest

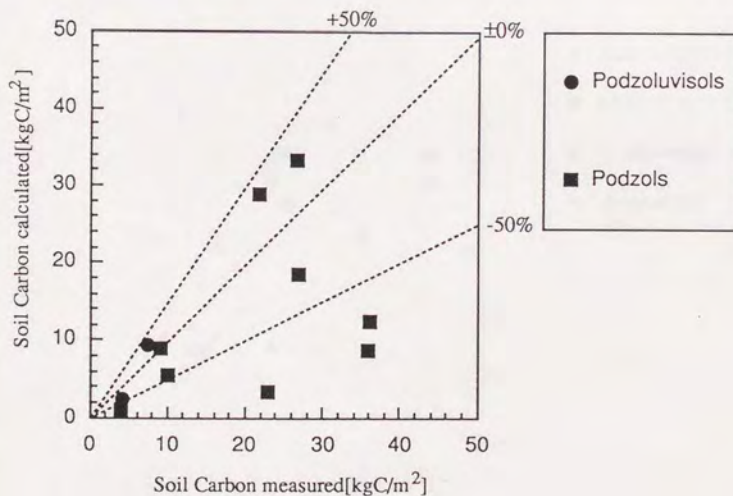


Fig. 2-2-2(b) Zonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Boreal Forest

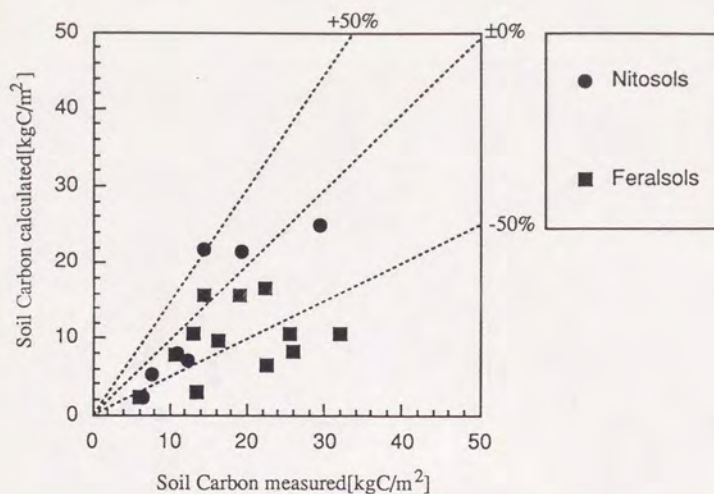


Fig. 2-2-2(c) Zonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Tropical Forest

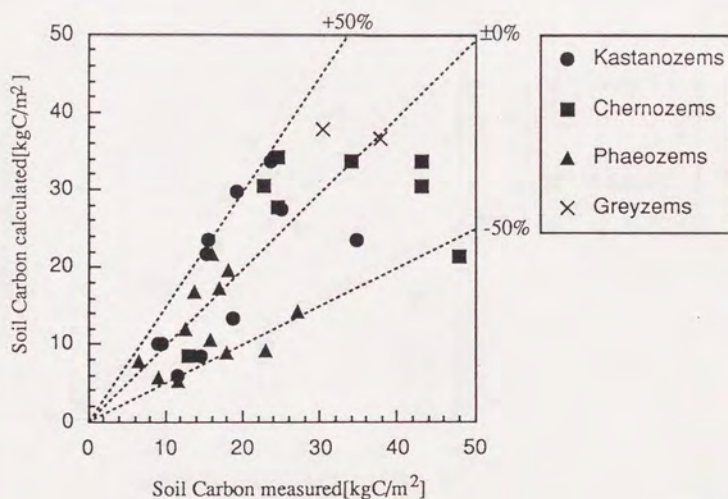


Fig. 2-2-2(d) Zonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Grassland

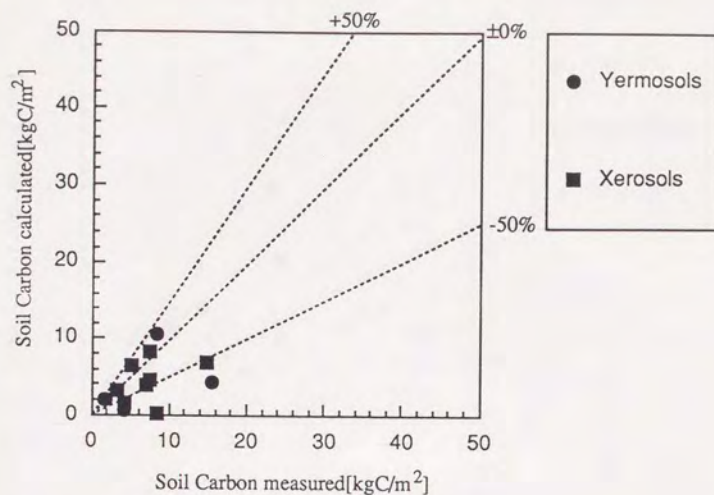


Fig. 2-2-2(e) Zonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Desert Vegetation

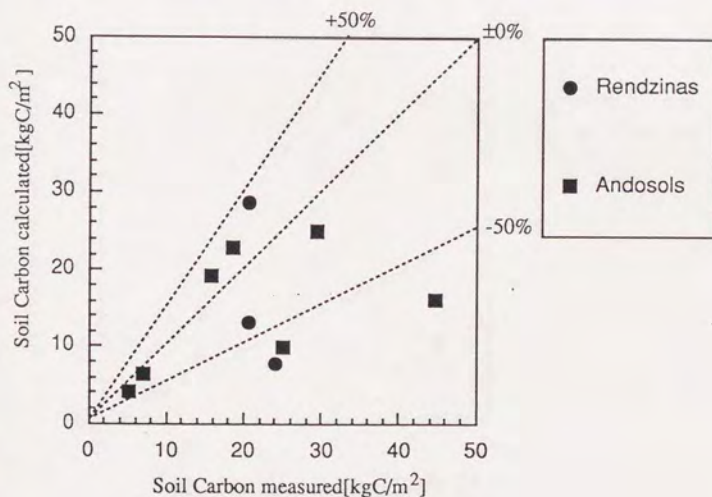


Fig. 2-2-3(a) Intrazonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Temperate Forest

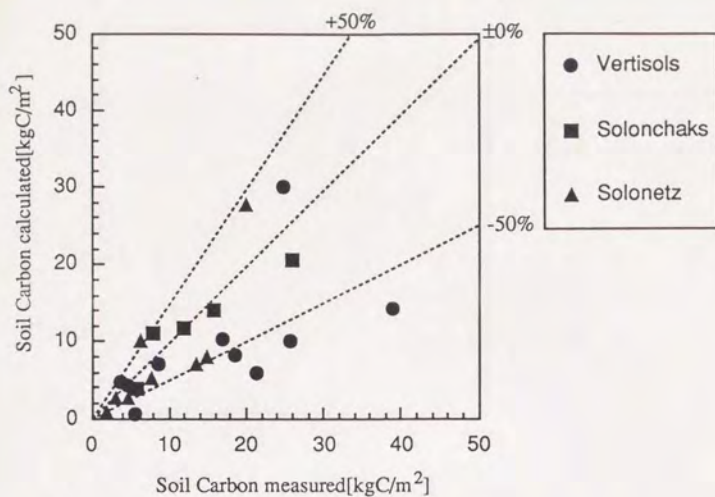


Fig. 2-2-3(b) Intrazonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Grassland

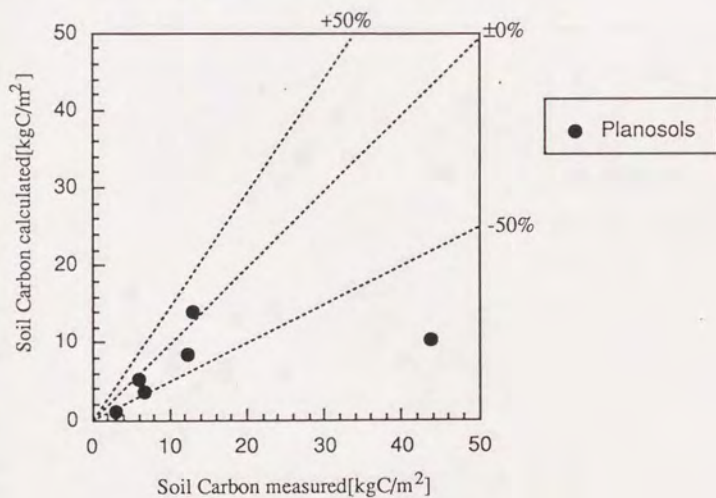


Fig. 2-2-3(c) Intrazonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Desert Vegetation

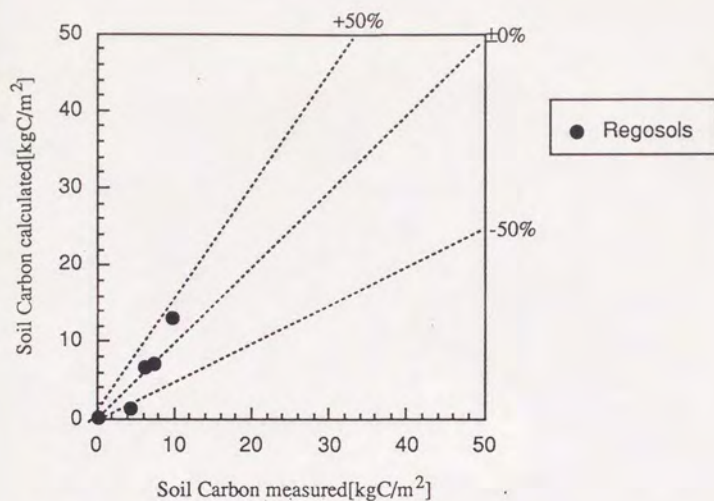


Fig. 2-2-4(a) Azonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation:Forest

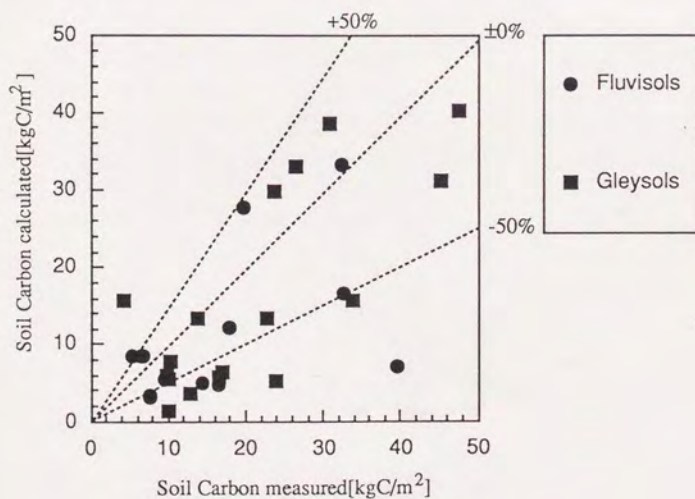


Fig. 2-2-4(b) Azonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation:Grassland

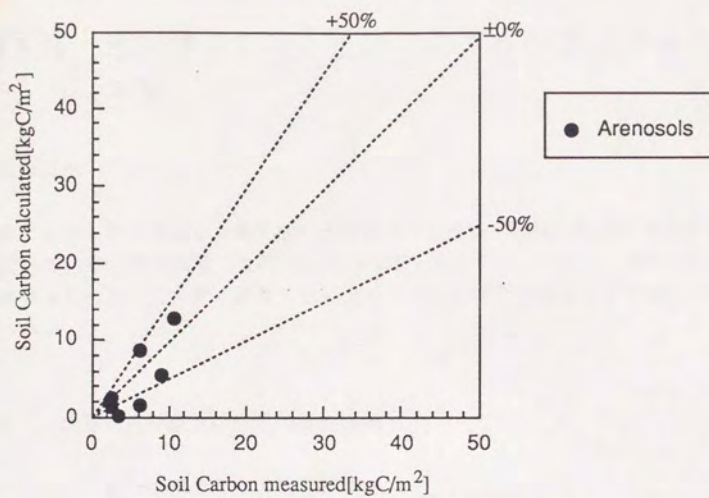


Fig. 2-2-4(c) Azonal soilにおける土壤炭素蓄積量
Vegetation: Desert Vegetation

第3章 地球規模の陸上生態系の炭素循環及びその将来予測

本章の目的

本章では第1章で構築し、第2章でその健全性を検証した陸上生態系の炭素循環モデルを用いて、地球規模の陸上生態系の炭素循環を推算する。さらに、将来の気候変動がその地球規模の陸上生態系の炭素循環にどのような影響を与えるかを予測したのでこれを述べる。

3-1 地球規模の陸上生態系の炭素循環

3-1-1 地球規模の植生の炭素循環

本節では、陸上生態系を熱帯林、温帯常緑林、温帯落葉林、寒帯林、草原の5つのタイプに分け、現在の気候条件を用いてそれぞれの植生の地球規模の炭素蓄積量と純生産速度を計算した。Figs. 3-1-1、3-1-2に現在の気候の炭素蓄積量と純生産速度の世界分布を示す。全陸地を緯度5度×経度5度のメッシュに区切り、各メッシュの気温、降雨量(The IIASA Climate Database, Leemans and Cramer, 1990)、及び土壌分布を用いて、各メッシュの炭素循環を5つの植生について計算した。初期条件は $[C_1]_{t=0}=[C_2]_{t=0}=[C_3]_{t=0}=[C_4]_{t=0}=0.01$ [kgC·m⁻²]及び、 $[C_3]_{t=0}=[C_4]_{t=0}=0.00$ [kgC·m⁻²]とし、計算は炭素蓄積量と純生産速度ともに定常状態に達するまで行った。ただし、本節では植生の分布は不変であるとし、各植生の面積はHoldridgeの植生分布図(Holdridge, 1947, Leemans, 1989, 1990)に基づき算出した。Holdridgeの植生分布図は地球上の植生を38に分類しているが、本研究ではこれらの植生をさらに5つに分類した。Table 3-1-1にHoldridgeの植生分類と本研究の植生分類の対応表を示す。各メッシュの炭素蓄積量と純生産速度は、各メッシュ内の5つの植生のそれら及び5つの植生の占める面積から以下のようにして計算した。

$$Q_{\text{mesh}} = \frac{\sum_{\text{type}=1}^5 Q_{\text{type}} \times A_{\text{type}}}{\sum_{\text{type}=1}^5 A_{\text{type}}} \quad (3-1-1)$$

Eq. 3-1-1において Q_{mesh} は各メッシュにおける炭素蓄積量及び純生産速度 [kgC·m⁻² or kgC·m⁻²·year⁻¹]、 Q_{type} は各メッシュにおける各植生の炭素蓄積量及び純生産速度 [kgC·m⁻² or kgC·m⁻²·year⁻¹]、 A_{type} は各メッシュにおける各植生の占める面積 [m²]を示す。

また、Figs. 3-1-3、3-1-4にHoldridgeの植生分布と依田（1982）の炭素蓄積量と純生産速度の推定値から求めた炭素蓄積量と純生産速度の世界分布を示す。Holdridgeの植生分布は植生の種類の分布図であって炭素蓄積量や純生産速度の分布を表しているのではない。よって、依田（1982）が様々な植生について求めた炭素蓄積量と純生産速度の推定値を5つの植生についてまとめ、その値を用いて炭素蓄積量と純生産速度の世界分布を作成した。

Figs. 3-1-3、3-1-4では炭素蓄積量や純生産速度が一樣である地域が、Figs. 3-1-1、3-1-2では一樣ではないことがわかる。これはFigs. 3-1-3、3-1-4において、ある植生は地球上どの場所においても同一の炭素蓄積量や純生産速度であるとしているからである。しかしながら、全体の傾向、炭素蓄積量や純生産速度が大きな地域（北米とヨーロッパからシベリヤにかけての森林地帯や南米、中央アフリカ、東南アジアの熱帯地方）や小さな地域（極地方、北アフリカ、西オーストラリア）はほぼ一致しているといえよう。つまり、局所的な炭素循環モデルであっても、環境条件をモデルに導入すれば十分に地球規模に拡大できるといえよう。

Table 3-1-2にWhittaker and Likens（1973）、Harvey（1989）、Goudriaan et al.（1984）による地球全体の植生と土壌の炭素蓄積量及び植生の純生産速度の推算を示し、本モデルによる計算結果と比較した。Whittaker and Likens（1973）のそれは、世界各地で実測された炭素蓄積量及び純生産速度に関する資料を集めて、まとめたものであり、Harvey（1989）やGoudriaan et al.（1984）のそれはモデルによる推算である。本研究による計算結果は他の研究よりも植物の炭素蓄積量を大きく見積っている。他の研究の推算は各植生の炭素蓄積量を地球規模の平均から求めており、そこには各地域の環境条件等は含まれていない。これに対して本研究は環境条件を考慮して各メッシュ毎に炭素蓄積量を計算し、それを積み上げている。この方法の差によって植物の炭素蓄積量の違いが生じているものと思われる。

Table 3-1-3にWhittaker and Likens（1973）、依田（1982）による各植生の地球全体の炭素蓄積量及び純生産速度の推算値を示し、本モデルによる計算結果と比較した。依田（1982）の推算値もWhittaker and Likens（1973）と同様に世界各地で実測された炭素蓄積量及び純生産速度に関する資料を集めて、まとめたものである。Whittaker and Likens（1973）は地球上の植生を13に、依田（1982）は17に分類しているが、本研究ではこれらをまとめて5つに分類した。Table 3-1-4にWhittaker and Likens（1973）、依田（1982）の植生分類と本研究の植生分類の対応表を示す。

Table 3-1-3によると、特に草原の炭素蓄積量を本モデルでは大きく見積もっている。これは、Table 3-1-1に示すように、Holdridgeの植生分類では16に分類している植生（非森林）を本モデルでは草原としてまとめているためであるといえる。Holdridgeの植生分類に示してある16の植生は属する気候帯も様々であることから、かなり異なる性質や炭素蓄積量を持つ植生であるといえよう。Table 3-1-4にも同様にWhittaker and Likens（1973）や依田（1982）らの分類でも草原に属する植生の種類が一番多く、多種多様であるといえよう。

3-1-2 地球規模の土壌炭素蓄積量

陸地を緯度5度×経度5度に区切り、各メッシュの土壌炭素蓄積量を計算した。Eq. 3-1-1のように、これら計算した土壌炭素にそれぞれの土壌の占める面積をかけ、それらを地球規模で積み上げた。Table 3-1-2によると他の研究では土壌の炭素蓄積量は植物のその2～3倍程度あるが、逆に本研究では1/2である。前節で述べたように本モデルでは植生の炭素蓄積量を大きく見積もっていることもあるが、土壌の炭素蓄積量に関しては、Harvey (1989) やGoudriaan et al. (1984) のモデルの土壌炭素蓄積量には炭化有機物としての炭素が約半分含まれている。よって、本モデルでは土壌の炭素蓄積量を低く見積もっているため、このような差が生じたと考えられる。しかしながら、Goudriaan et al.によると炭化有機物の分解定数は腐植質のその1/50～1/10、腐植質が炭化有機物へ変化する速度は植物遺体が腐植質へ変化する速度の3/25～1/4としていることから、炭化有機物の他の土壌有機物（植物遺体、腐植質）あるいは大気との炭素交換は遅いと考えられる。さらに炭化有機物の土壌中における滞留時間を500年としていることから、本研究で考える時間スケール（ほぼ100年としている。これは現在の炭酸ガス濃度がほぼ2倍になると考えられる時間である）よりも炭化有機物の土壌中の滞留時間が長いと考えらる。よって、本研究では陸上生態系の炭素循環において炭化有機物の影響は無視できるものとした。

3-2 気候変動による陸上生態系の炭素循環の変動予測

Fig. 0-1-1及び、Table 0-1-1に示すように、現在提案されている様々な大気循環モデルによると、炭酸ガス濃度が現在の2倍になったとき平衡状態で、地球上の気温は全球平均で1.9～5.2℃上昇し、降雨量は全球平均で3～15%増加することが予想されている。本節ではUKMO (Mitchell et al., 1989) のGCMによる気候変動の予測である全球平均で気温は3.5℃上昇、全球平均で降雨量は9%増加した場合の地球温暖化の陸上生態系の炭素循環に与える影響を予測する。

Figs. 3-2-1、3-2-2に炭酸ガス濃度が2倍になった結果、現在の気候よりも全球で一様に平均気温が3.5℃上昇し、平均降雨量が9%増加したときの炭素蓄積量と純生産速度の増減の世界分布図を示す。また、Table 3-2-1に地球の総炭素蓄積量と総純生産速度の変化を示す。Fig. 3-2-1によると地球のほぼ全域で炭素蓄積量が減少しているのがわかる。特に南アメリカ、中央アフリカでの減少が激しい。Table 3-2-1によると総炭素蓄積量は444.2GtC (20.4%) 減少している。これに対して、Fig. 3-2-1によると純生産速度は北アメリカやシベリア等の北方地方で増加しており、熱帯地方で減少している。Table 3-2-1によると総純生産速度は2.6GtC (7.7%) 増加している。このように炭酸ガス濃度上昇による気候変動は現在の植生を衰退させることが予測できる。

次に気温と降雨量の変動がそれぞれの陸上生態系に及ぼす影響について検討する。炭酸ガス増加による効果を考慮せず、現在の気候よりも平均気温のみが3.5℃上昇したと

きとの炭素蓄積量と純生産速度の増減の世界分布図をそれぞれFigs. 3-2-3、3-2-4に示す。また、Table 3-2-2に炭酸ガス増加による効果を考慮せず、現在の気候よりも平均気温のみが3.5℃上昇したとき、及び、平均降雨量のみが9%増加したときのそれぞれの地球の総炭素蓄積量と総純生産速度の変化を示す。

Fig. 3-2-4によると気温の上昇によって、極地方で純生産速度の増大が、熱帯地方で減少が起こっている。これらの地域を占める植生はツンドラであるが、本モデルではツンドラをGrasslandに分類している。Grasslandの光合成の最適温度は30℃であるため、極地方での気温の上昇はこれらの地域の植生の光合成速度を増大させる。しかしながら、他の地域では気温の上昇によってむしろ光合成の最適温度よりも気温が高くなってしまうため、逆に光合成速度が減少してしまう。Table 3-3-2によると気温の上昇によって植物の炭素蓄積量は424.9 [GtC] (28.8%) 減少する。また、Fig. 3-1-3によると、必ずしも極地方の生態系の炭素蓄積量は増大していない。これは気温上昇によって土壌分解速度も上昇し、陸上植生から土壌へ供給される炭素量よりも土壌中における有機分解で大気へ放出される炭素の量が上回り、土壌の炭素蓄積量が減少するためである。Table 3-3-2によると気温の上昇によって土壌の炭素蓄積量は250.9 [GtC] (35.8%) 減少している。このことから極以外の地域でも気温上昇による土壌分解速度の増大によって陸上生態系は大気へ炭酸ガスを放出するものと予測される。

また、Table 3-2-2によると降雨量の増大による植物の純生産速度の増大はわずか0.8 [GtC·year⁻¹] (2.3%) に過ぎない。これは本モデルで土壌の水分保持能力に上限値（圃場容水量）を設定しているからである。よって、現在の気候下ですでに土壌水分量が圃場容水量に達している地域では降雨量の増大によって光合成速度の増大は起こらないためである。よって純生産速度の上昇は現在の気候下では土壌水分量が圃場容水量に達していない地域（草原地帯等）での上昇である。また、Table 3-2-2によると土壌の炭素蓄積量は14.8[GtC] (2.1%) の増加とわずかである。本モデルでは土壌分解速度は土壌水分量が圃場容水量の80%になるとき最大となるとしていることから、降雨量の増加によって土壌分解速度の増加が起こる地域はほとんどないことがわかる。このことから現在の気候下で土壌水分量が圃場容水量に達していない地域が少ないことがわかる。以上より、降雨量の増大によって陸上生態系の炭素蓄積量が微増することが予測される。

Table 3-2-3に炭酸ガス濃度が現在の2倍になったときの気温と降雨量の変動の違いが地球の総炭素蓄積量と総純生産速度に及ぼす影響を示す。Table 3-2-3によると総炭素蓄積量は気温が1℃の上昇では増加するが、2、3℃の上昇では逆に減少する。これは気温上昇の幅が大きくなると、炭酸ガス濃度上昇による光合成速度の増加よりも気温上昇による光合成速度の減少の効果の方が上回るためである。これに対して、降雨量が5、10、15%と増加すると総炭素蓄積量はそれに比例して増加する。このように本モデルで仮定した気候変動の範囲内でも、気温と降雨量の効果はそれぞれ異なることが予測される。

本章のまとめ

炭素循環モデルによって地球温暖化による陸上生態系の炭素循環の変動を予測したが、これらをまとめると以下のようなことがいえる。炭酸ガス濃度倍増による気候変動（気温3.5℃上昇、降雨量9%増加）は陸上生態系の炭素蓄積量を減少させる。気温上昇と降雨量増加の効果を分けて考えると、気温の上昇により陸上生態系の炭素蓄積量は減少するが、降雨量の増加では逆に増大する。しかしながら、降雨量増加による炭素蓄積量の増大よりも気温上昇による減少の方が大きいため、全体としては炭素蓄積量は減少する。また、気温上昇もわずかであれば陸上生態系の炭素蓄積量を増加させる。

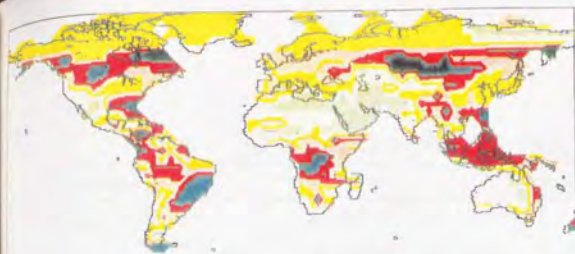


Fig. 3-1-1 現在の気候条件における炭素蓄積量の分布図 (UNEP/GRID)

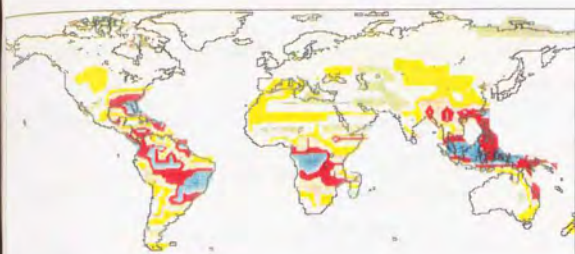
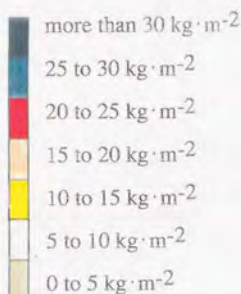


Fig. 3-1-2 現在の気候条件における純生産速度の分布図 (UNEP/GRID)

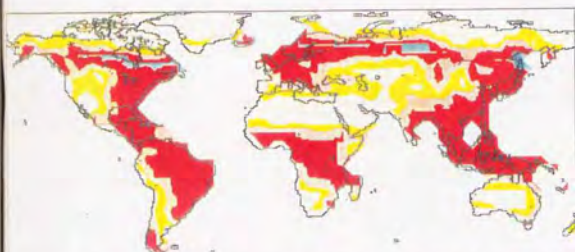
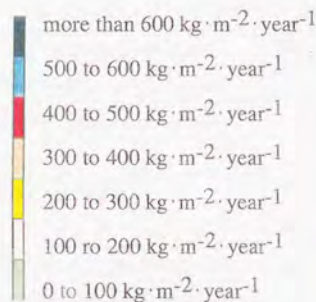


Fig. 3-1-3 Holdridge (1947)、Leemans (1989, 1990) 及び依田 (1982) より推定した現在の気候条件における炭素蓄積量の分布図 (UNEP/GRID)

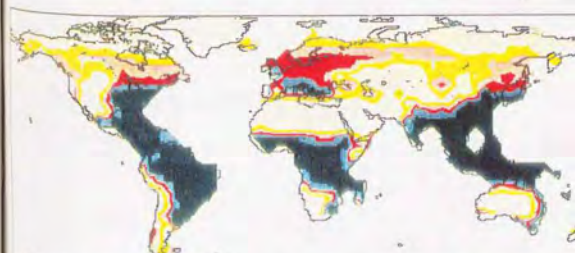
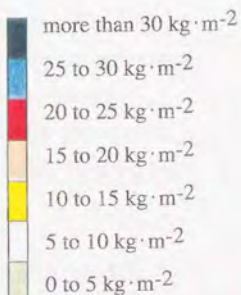


Fig. 3-1-4 Holdridge (1947)、Leemans (1989, 1990) 及び依田 (1982) より推定した現在の気候条件における純生産速度の分布図 (UNEP/GRID)

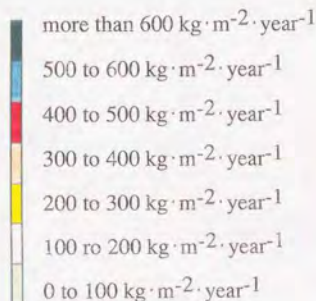


Table 3-1-1 植生分類 (Holdridge, 1947)

This work	Holdridge	
Tropical forest	Subtropical dry forest	Tropical very dry forest
	Subtropical moist forest	Tropical dry forest
	Subtropical wet forest	Tropical moist forest
	Subtropical rain forest	Tropical wet forest
	Tropical rain forest	
Temperate evergreen forest	Warm temperate dry forest	Warm temperate wet forest
	Warm temperate moist forest	Warm temperate rain forest
Temperate deciduous forest	Cool temperate moist forest	Cool temperate wet forest
	Cool temperate rain forest	
Boreal forest	Boreal moist forest	Boreal rain forest
	Boreal wet forest	
Grassland	Subpolar wet tundra	Warm temperate desert scrub
	Subpolar rain tundra	Warm temperate thorn steppe
	Boreal desert	Subtropical desert
	Boreal dry scrub	Subtropical desert scrub
	Cool temperate desert	Subtropical thorn forest
	Cool temperate desert scrub	Tropical desert
	Cool temperate steppe	Tropical desert scrub
	Warm temperate desert	Tropical thorn woodland

Table 3-1-2 陸上生態系の炭素蓄積量と純生産速度の文献値と計算値の比較

	Carbon content in plant [GtC]	Carbon content in soil [GtC]	Carbon content in plant&soil [GtC]	Net primary pro- duction [GtC/yr]
Whittaker and Likens(1973)	827	1456	2283	48.3
Harvey(1989)	731	1596	2327	62
Goudriaan and Kenter(1984)	544.3	1434.8	1979.1	57
This work	1475.2	701.4	2176.6	33.8

Table 3-1-3 各植生の地球規模の炭素蓄積量と純生産速度

Biomass(GtC)	熱帯林	温帯常緑林	温帯落葉林	寒帯林	草原	合計
This work	288	74	111	303	371	1475
Whittaker&Likens(1973)	460	80	95	108	84	827
依田(1982)	270	79	57	104	98	608

Npp(GtC/year)	熱帯林	温帯常緑林	温帯落葉林	寒帯林	草原	合計
This work	6.0	1.3	1.8	3.3	21.4	33.8
Whittaker&Likens(1973)	20.4	2.9	3.8	4.3	16.9	48.3
依田(1982)	13.6	4.1	3.3	4.0	14.2	39.1

Table 3-1-4 植生分類 (Whittaker and Likens、1973、依田、1982)

本研究	Whittaker and Likens (1973)	依田 (1982)
熱帯林	熱帯多雨林	亜熱帯一熱帯 常緑広葉樹林
	熱帯季節林	同 半落葉広葉樹林
		同 落葉広葉樹林
温帯常緑林	温帯常緑林	温帯 常緑針葉樹林
		暖帯 常緑広葉樹林
		暖帯一亜熱帯 硬葉樹林
温帯落葉林	温帯落葉林	温帯一暖帯 落葉広葉樹林
寒帯林	亜寒帯林	亜寒帯 常緑針葉樹林
		同 落葉針葉樹林
		同 落葉広葉樹林
草原	ウッドランド	暖帯一亜熱帯 サバンナ
	低木林	寒帯 ツンドラ
	サバンナ	温帯一暖帯 草原
	温帯草原	亜熱帯一熱帯 草原
	ツンドラ	同 湿原
	高原帯草原	亜寒帯一熱帯 半砂漠
	低木砂漠	同 農耕地
	農耕地	

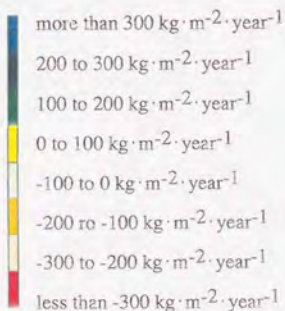
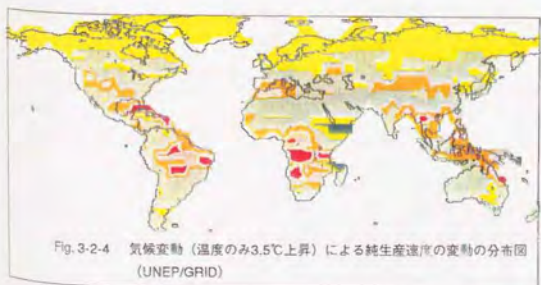
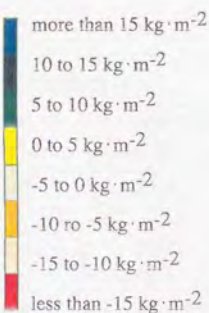
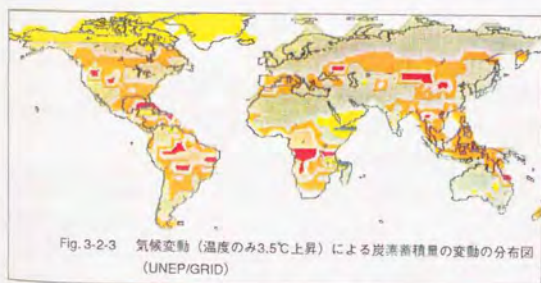
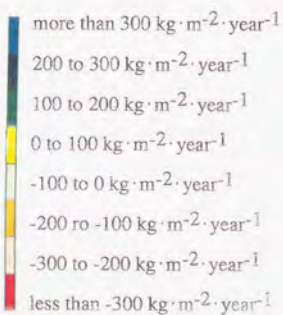
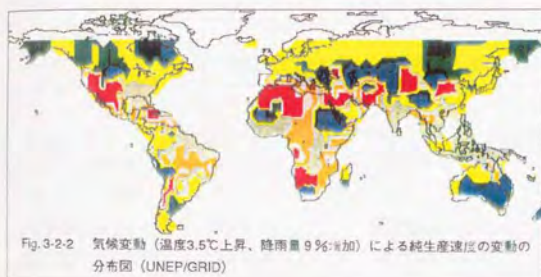
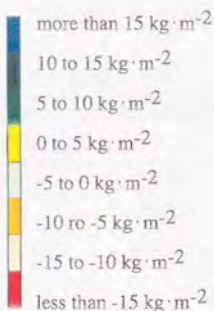
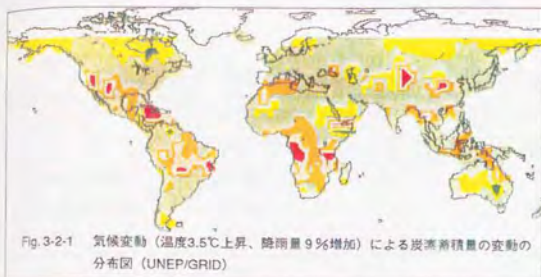


Table 3-2-1 気候変動が陸上生態系の炭素循環へ及ぼす影響 (1)

	Carbon content in plant [GtC]	Carbon content in soil [GtC]	Carbon content in plant&soil [GtC]	Net primary pro- duction [GtC/yr]
Present climate	1475.2	701.4	2176.6	33.8
CO ₂ x 2 climate (Effect:CO ₂ x 2, Temp.+3.5°C and Prec.+9%)	1200.9	531.5	1732.4	36.4

Table 3-2-2 気候変動が陸上生態系の炭素循環へ及ぼす影響 (2)

	Carbon content in plant [GtC]	Carbon content in soil [GtC]	Carbon content in plant&soil [GtC]	Net primary pro- duction [GtC/yr]
Present climate	1475.2	701.4	2176.6	33.8
CO ₂ x 2 climate (Effect:Temp.+3.5°C)	1050.3	450.5	1500.8	25.3
(Effect:Prec.+9%)	1502.8	716.2	2219.0	34.6

Table 3-2-3 気候変動が陸上生態系の炭素循環へ及ぼす影響 (3)

	Carbon content in plant [GtC]	Carbon content in soil [GtC]	Carbon content in plant&soil [GtC]	Net primary pro- duction [GtC/yr]
Present climate	1475.2	701.4	2176.6	33.8
CO ₂ x 2 climate (Temp.+1 °C)	1503.4	729.0	2232.4	42.1
(Temp.+2 °C)	1343.5	639.2	1982.8	38.5
(Temp.+3 °C)	1210.7	550.0	1760.7	37.0
(Prec.+5%)	1697.6	830.0	2527.6	45.0
(Prec.+10%)	1708.5	837.2	2545.7	45.5
(Prec.+15%)	1726.9	847.5	2574.3	46.2

Table 3-2-4 気候変動が陸上生態系の炭素循環へ及ぼす影響

Biomass(GtC)	熱帯林	温帯常緑林	温帯落葉林	寒帯林	草原	合計
Present	288	74	111	303	371	1475
Prec.+5%	286	75	112	310	441	1503
Prec.+10%	326	85	126	351	504	1709
Prec.+15%	331	86	127	351	512	1727
Temp.+1℃	271	77	121	337	470	1503
Temp.+2℃	230	67	115	328	429	1344
Temp.+3℃	191	58	110	326	429	1211
Prec.+9% & Temp.+3.5℃	192	58	108	316	429	1201
Whittaker&Likens(1973)	460	80	95	108	84	827
依田(1982)	270	79	57	104	98	608

Npp(GtC/year)	熱帯林	温帯常緑林	温帯落葉林	寒帯林	草原	合計
Present	6.0	1.3	1.8	3.3	21.4	33.8
Prec.+5%	7.5	1.9	2.6	4.2	28.9	45.0
Prec.+10%	7.2	1.6	2.1	4.1	30.5	45.5
Prec.+15%	7.4	1.7	2.2	4.1	30.8	46.2
Temp.+1℃	6.1	1.5	2.1	4.0	28.3	42.1
Temp.+2℃	5.4	1.4	2.1	4.1	25.5	38.5
Temp.+3℃	4.8	1.2	2.1	4.2	24.7	37.0
Prec.+9% & Temp.+3.5℃	4.8	1.2	2.1	4.0	24.3	36.4
Whittaker&Likens(1973)	20.4	2.9	3.8	4.3	16.9	48.3
依田(1982)	13.6	4.1	3.3	4.0	14.2	39.1