

## B-1 地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究

### (8) 温帯林における炭素循環過程の直接測定とそのモデル化に関する研究

研究代表者 資源環境技術総合研究所 山本 晋

通商産業省 資源環境技術総合研究所

環境影響予測部 水野 建樹

大気環境予測研究室 山本 晋・吉門 洋・近藤 裕昭・

兼保 直樹・村山 昌平

広域域間環境研究室 林 正康・蒲生 稔

平成5-7年度合計予算額 41,117千円

(平成7年度予算額 13,749千円)

〔要旨〕本研究では野外観測に基づき、大気と温帯林間のCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を定量的に解明し、CO<sub>2</sub>循環モデルの定式化を計り、モデルのパラメーターの季節変動、日射・気温・風等の気象条件との関係を解明する。研究の概要は以下の通りである。

① 岐阜県高山市の温帯落葉林の観測タワーにおいて、CO<sub>2</sub>濃度および気象条件の通年観測を継続して行ない、葉面積指数(LAI)の観測をした。更に、1994年7、8月(盛夏時)および11月(晩秋時)、1995年7、8月(盛夏時補足)にCO<sub>2</sub>濃度変動、乱流観測および空気のサンプリングを行った。

② 上記強化観測結果に基づき、渦相関法と傾度法(空気力学的方法)によりCO<sub>2</sub>フラックスを計算し、両者の比較から傾度法の拡散係数の大気安定度、昼夜による変化を調べた。さらに、種々の解析を行い、CO<sub>2</sub>フラックスの時間変化、日射・気温との関係を調べた。

③ 傾度法によりCO<sub>2</sub>フラックスの季節変動を推定し、5-9月は正味として植物圏がCO<sub>2</sub>を吸収し、10月-4月はCO<sub>2</sub>を放出する事が分かった。また、通年のCO<sub>2</sub>収支を推定し、460(93.10-94.9)、210(94.10-95.9) gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/yearの植物圏への吸収という試算結果を得た。

④ 上記の結果を従来の森林生態学的調査・文献と比較、検討した。

〔キーワード〕温帯林、CO<sub>2</sub>フラックス、光合成、タワー観測、炭素循環モデル

#### 1. 序

IPCC等で重要な問題となっている炭素吸収・放出全球収支の解明において、温帯・寒帯林の吸収源としての役割の再検討の必要性が指摘されている<sup>1),2)</sup>。即ち、海洋の吸収量には現状の知見では限界があること、北半球の中・高緯度におけるCO<sub>2</sub>大気中濃度の季節変化が海洋の吸収だけでは説明出来ないことなどから温帯・寒帯林の役割の抜本的見直しが必要となっている。本研究ではこの様な現状を踏まえて、フラックスの直接測定法を用いて、大気と温帯林間のCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を定量的に解明し、CO<sub>2</sub>循環モデルの定式化に貢献する。

#### 2. 研究目的

本研究では冷温帯林に設置したタワーによるCO<sub>2</sub>大気中濃度の高度変化、フラックスの直接測定に基づき、大気と温帯林間のCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を定量的に解明し、CO<sub>2</sub>循環モデルの定

式化を計る。モデルのパラメータの季節変動、日射・気温・風等の気象条件との関係を解明する。又、従来より使用されているバルク法、コンパートメント法による循環モデルのパラメータの検証、比較を行う。また、CO<sub>2</sub>濃度の増大に伴う野外環境の森林の施肥効果の検討も重要な課題となっている<sup>3)</sup>。

### 3. 研究方法

#### 3.1 観測の概要

冷温帯林（岐阜県高山市ノカンバ、ミズナラ、カエデ類、高度約1400m、平均樹高17m、最大樹高30m）の野外観測フィールド（図-1参照）に立てられた観測タワー（高度27m）を用いてCO<sub>2</sub>濃度および気象条件の通年観測を継続して行った。更に、1993年9月（初秋時）、1994年7、8月（盛夏時）および1995年11月（晩秋時）に強化観測期間を設定し、CO<sub>2</sub>濃度変動、乱流観測および空気のサンプリングを行った。測定用タワーの高度は25mで、頂部に2mの測定ブームをつけている。測定項目及び測定高度は次の通りである。

表-1 測定項目および測定高度

測定項目	測定高度
CO <sub>2</sub> 濃度変動（強化期間）	25.5 m
H <sub>2</sub> O濃度変動（ // ）	26 m
風速・風向・気温変動（ // ）	26 m
CO <sub>2</sub> 平均濃度（通年観測）	27,18,8.8,5.8 m
全天日射（ // ）	25.5 m
平均風速・風向（ // ）	26,9.5 m
湿度・気温（ // ）	25.5,9 m

#### 3.2 CO<sub>2</sub>フラックスの計算方法

これらの観測データに基づき、以下の方法でCO<sub>2</sub>フラックスを計算し、CO<sub>2</sub>収支の季節変化を調べた。CO<sub>2</sub>フラックスの計算方法は次の通りである。

①渦相関法（風の乱れ： $w'$ と濃度変動量： $C'$ の積による方法）： $FCO_2 = -w' C'$

フラックスの直接的推定が可能な方法、しかし変動量を測定するためデータ量が多く、測定機器の関係で通年連続観測は困難。

②傾度法（微気象学的方法）： $FCO_2 = K \Delta C / \Delta z$

平均濃度傾度（ $\Delta C / \Delta z$ ）から求める方法で通年測定が可能。拡散係数（ $K$ ）として落葉広葉樹林での熱・運動量フラックス観測結果に基づき、Watanabe他(1990)<sup>4)</sup>を参考に混合距離 $l$ により表現し、 $l$ の大きさを強化観測時の渦相関法と傾度法の比較から次の様に決定。

$$K = l^2(z) \Delta U / \Delta z \quad (z=26m)、ここで \quad l = 2.69 m \text{ (日中)} : l = 2.28 m \text{ (夜間)}。$$

表-2に大気安定度による混合距離の変化をまとめて示す。混合距離の安定度による変化は少ないので、日中の大気安定度による変化は無視し、上記のように日中と夜間別に決めた。

③通年のCO<sub>2</sub>フラックスの試算

傾度法で通年のCO<sub>2</sub>フラックスを計算し、季節変化、年間でのCO<sub>2</sub>収支の見積りを試みた。

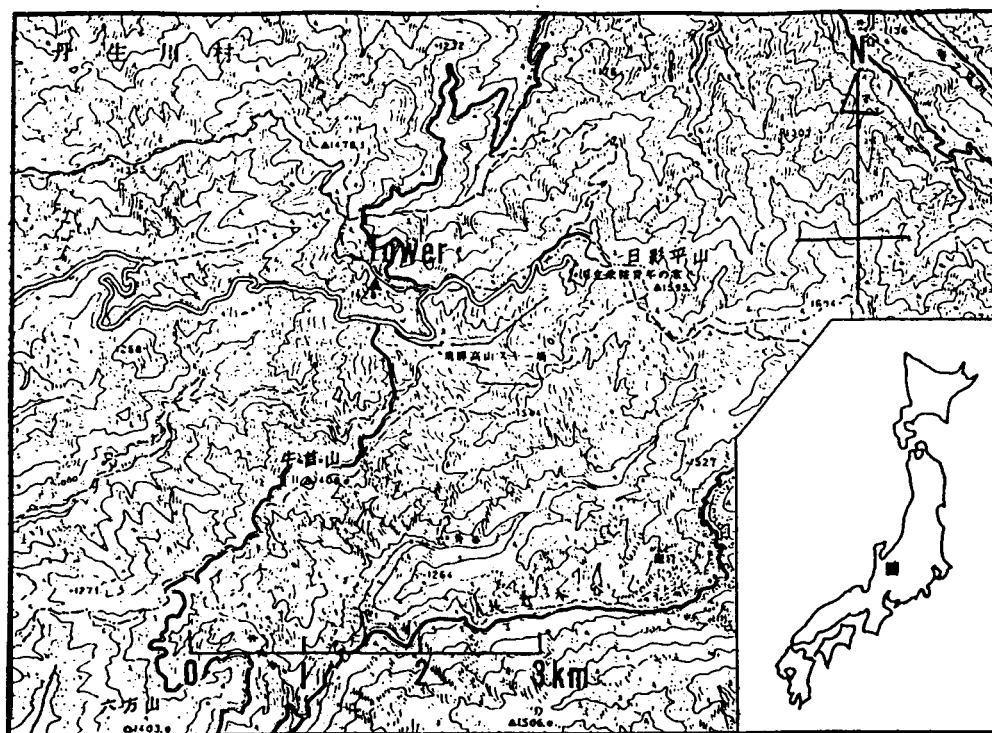


図-1 観測タワーの周辺地図（岐阜県高山市）

表-2 大気安定度（日射量、風速）による混合距離の変化

U (m/s)	I <sub>s</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> > 0.5 ( DAY )		0.5 ≥ I <sub>s</sub> > 0.02 ( DAY )		I <sub>s</sub> ≤ 0.02 ( NIGHT )	
		3.0 m	9hrs	2.8	14	2.3	42
0 < U < 3		3.0 m	9hrs	2.8	14	2.3	42
U ≥ 3		2.6	11	2.7	10	(2.8)	7

( 1994 7/28-30, 8/24-26, 11/1, 2 : T A K A Y A M A )

#### 4. 観測結果

図-2はCO<sub>2</sub>日平均濃度（z=27m）の季節変化（1993年9月から1994年12月）を示す。データのばらつきはあるが4月に最大値（約367ppmv）、9月に最小値（約355ppmv）を取っている。

図-3は秋季落葉前（1993, 9/30-10/6）のCO<sub>2</sub>濃度（a）、日射量（b）、CO<sub>2</sub>フラックス（c）の時間変化測定例である。これから、CO<sub>2</sub>濃度は日中は弱いながらも光合成によるCO<sub>2</sub>吸収を反映して小さくなっており、夜間は呼吸及び土壌からの放出の影響で大きな値となっている。その濃度変化幅は10-20ppmvである。また、バルク法で計算したCO<sub>2</sub>フラックスは日中は下向き（正の値：森林による取り込み）、夜間は上向き（負の値：森林からの放出）となっている。

図-4は図-3と同様であるが、冬季積雪時（1993, 12/21-12/27）の測定例を示す。この時期は地面は雪に覆われ、落葉して森林の光合成も停止していると考えられ、CO<sub>2</sub>濃度及びフラックス変動幅は非常に小さく、周期的な日内変化も見られない。

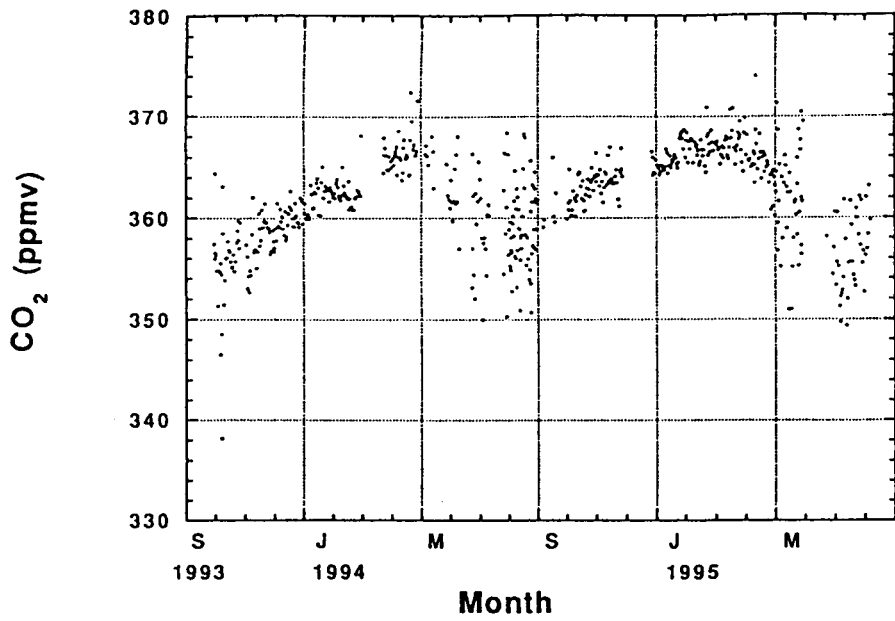


図-2 CO<sub>2</sub>濃度日平均値（測定高度27m）の季節変化（1993年9月～1995年8月）

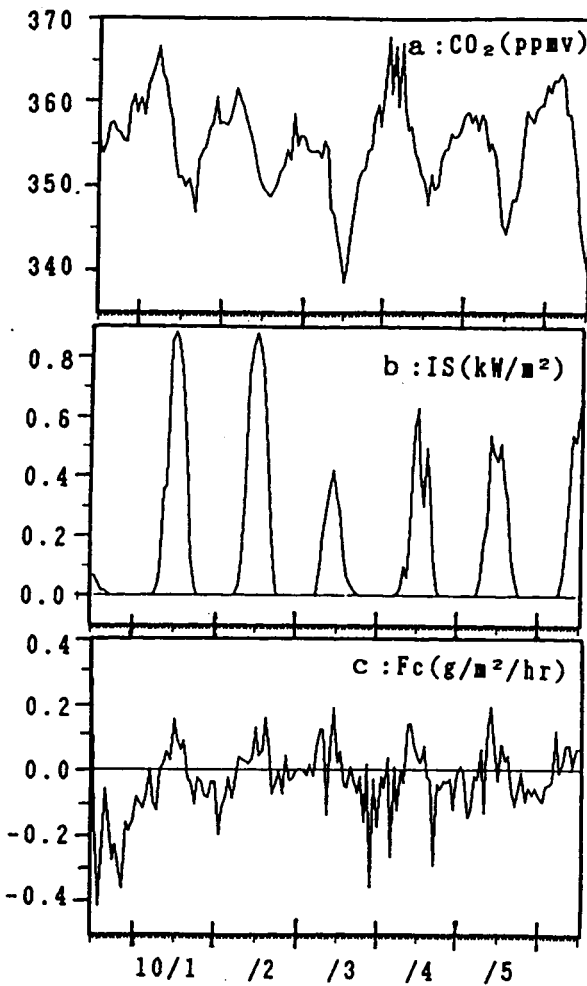


図-3 秋季落葉前（1993,9/30-10/6）のCO<sub>2</sub>濃度（a）、日射量（b）、CO<sub>2</sub>フラックス（c）の時間変化測定例

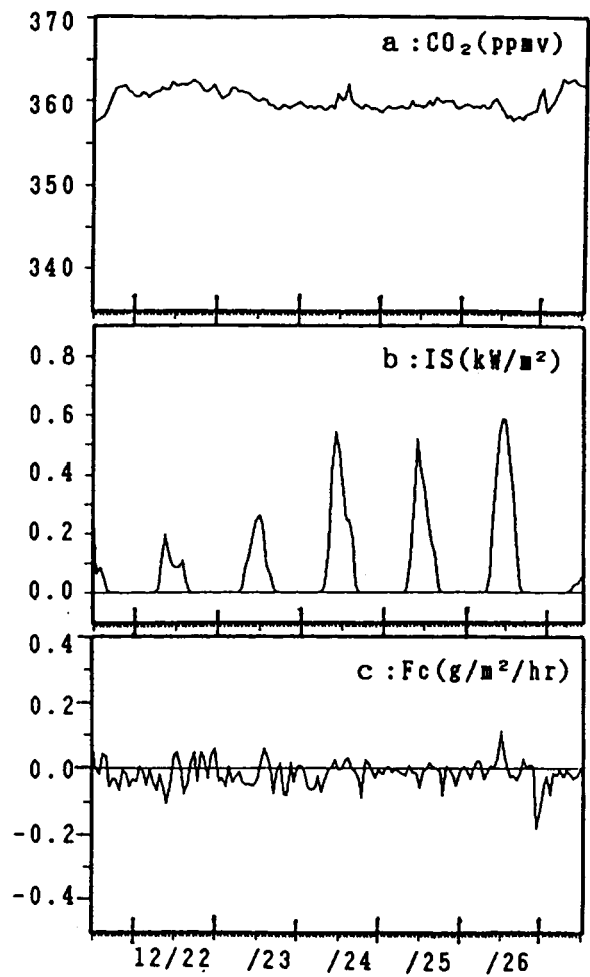


図-4 冬季積雪時（1993,12/21-12/27）のCO<sub>2</sub>濃度（a）、日射量（b）、CO<sub>2</sub>フラックス（c）の時間変化測定例

図-5は渦相関法によるフラックス(FCO2EC)と傾度法によるフラックス(FCO2AD)の時間変化(1994 7/28 19h -7/30 12h)を比較したものである。この図から分かるように日中の両フラックスの時間変動はほぼ一致している。夜間においてはフラックスの絶対値が小さい事もあり両者の変動の一致は余り良くないが、前節における拡散係数K(夜間)の値は両者の夜間平均値が一致するように決めた。尚、両者の相関係数は0.91である。本報告においてはフラックスは土壌も含む森林生態系の全体としてのネットの値で、正值は大気から森林へのCO2の吸収、負値は森林からの放出を示す。

図-6は7、8月強化観測時(6日間)における日中のFCO2ECと日射量の関係を示す。ばらつきが大きい、日射量が0.5 kW/m<sup>2</sup>がより小さい時はフラックスは日射量と共に大きくなるがそれより大きいと増加が止まり、減少の傾向さえ見える。

図-7は夜間におけるFCO2AD(非積雪時:1993.10,11 1994.6-9)の気温との関係を示す。ばらつきは大きい、気温の低下と共に放出量は減少している。

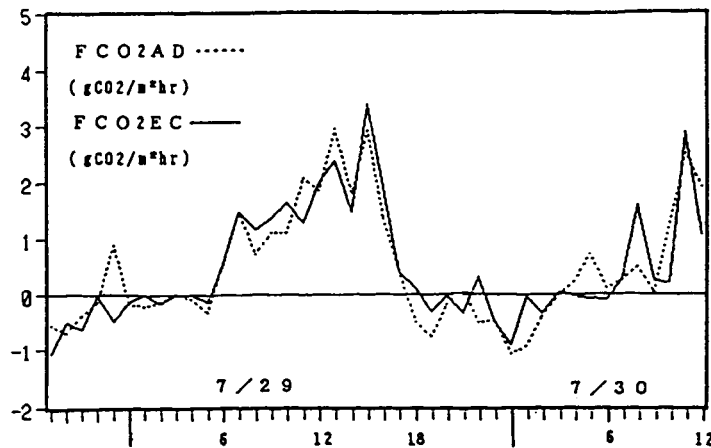
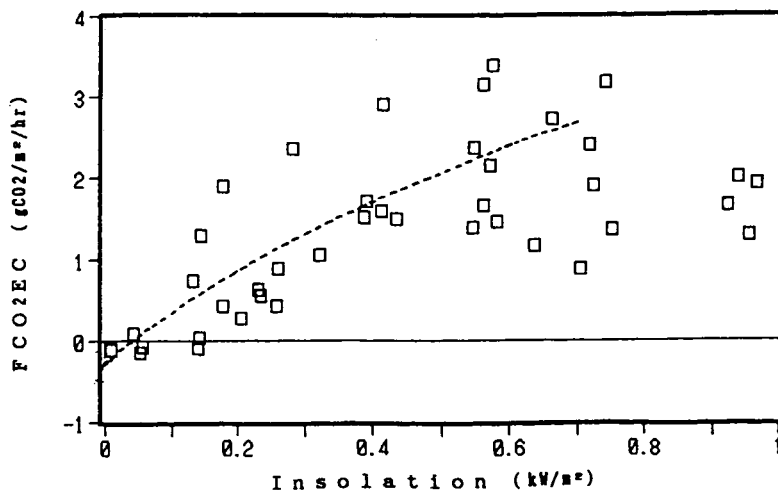
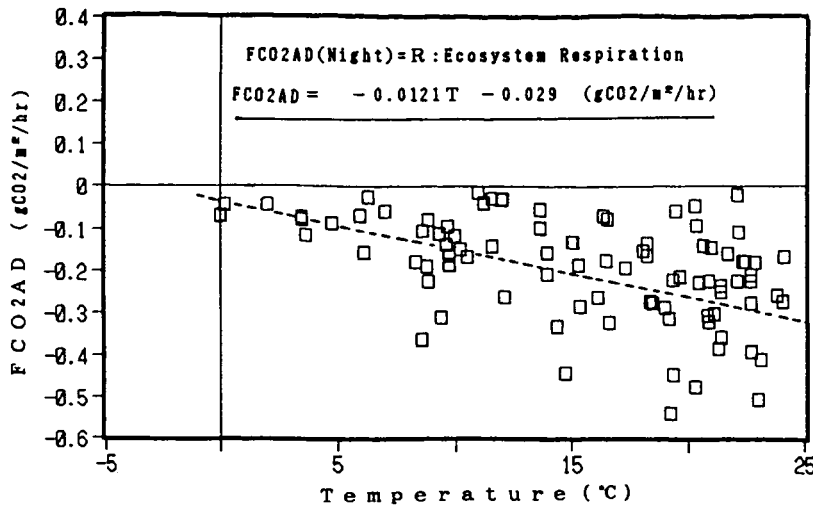


図-5 渦相関法(FCO2EC)と傾度法(FCO2AD)によるフラックス時間変化(1994 7/28 19h- 7/30 12h)の比較



高山:  $FCO_2(DAY) = 6.2 * I_s / (1 + 0.68 * I_s) - 0.28$  (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/hr)  
 (参考) 西表:  $FCO_2(DAY) = 5.81 * I_s - 0.46$  (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/hr)

図-6 日中(7,8月強化観測時:6日間)のFCO2ECと日射量の関係



高山:  $FCO2(Night) = -0.0121 * T - 0.029 \text{ (gCO}_2\text{/m}^2\text{/hr)}$   
 (参考) Raich 他:  $FCO2(Night) = -0.0107 * T - 0.126 \text{ (gCO}_2\text{/m}^2\text{/hr)}$

図-7 夜間におけるFCO2AD (非積雪時: 1993.10,11と1994.6-9) の気温との関係

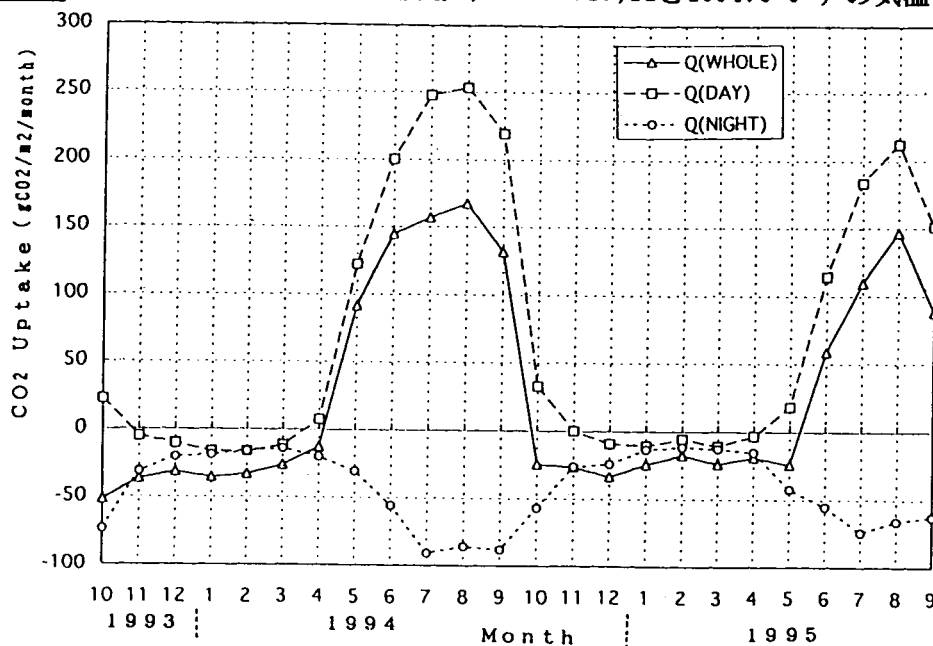


図-8 日中、夜間、全日別のFCO2ADの月別積算値の時間変化 (1993.10-1995.9)

図-8は日中、夜間、全日別のFCO2AD月別積算値(1993.10-1995.9)のグラフである。尚、この森林の大部分を占める落葉樹の紅葉・落葉の時期は10月上旬で、積雪は11月末から4月中旬の間に見られる。森林が活動を再開する5月から日中の光合成が盛んになり、正の値を取るようになり7、8月にCO2吸収量が最大になる。9月になると植物の生産活動が弱まりCO2吸収量は急減する。11月から4月の間は日中、夜間共に小さな負の値で積雪時においても少量ながらCO2が森林生態系から大気へ放出されている事をうかがわせる。また、夜間のFCO2ADの値は土壌のCO2放出が温度に依存している事を反映して7、8、9月に大きい。これから、1994年夏季に比べて1995年夏季の日中のCO2吸収量は70%程度とかなり小さい。特に6、7月にその傾向が顕著である。夜間のCO2放出量も1995年夏季はやや小さめで(1994年の80%程度)である。このような年々変動は光合成量、有機物分解量が日射量、気温の変動に左右されるためと考えられる。

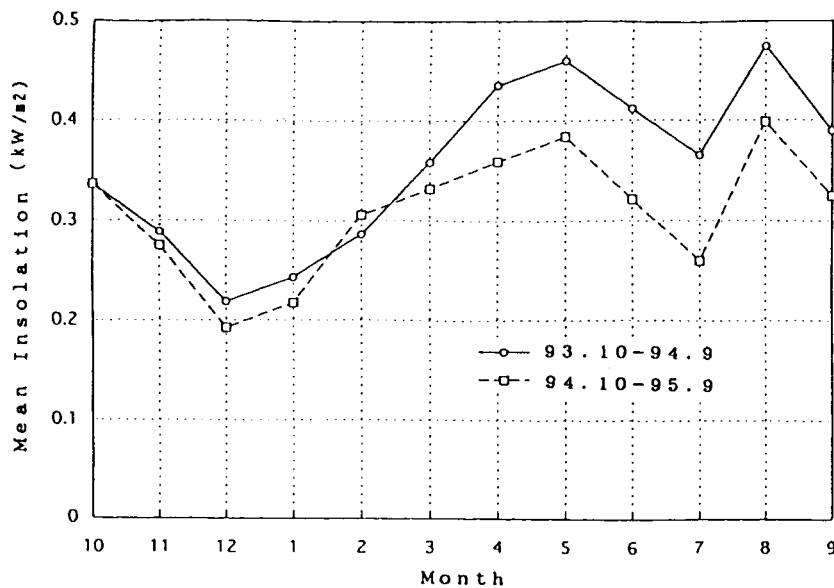


図-9 日射量の月別平均値の変化の比較 (kW/m<sup>2</sup>、実線:93.10-94.9、破線:94.10-95.9)

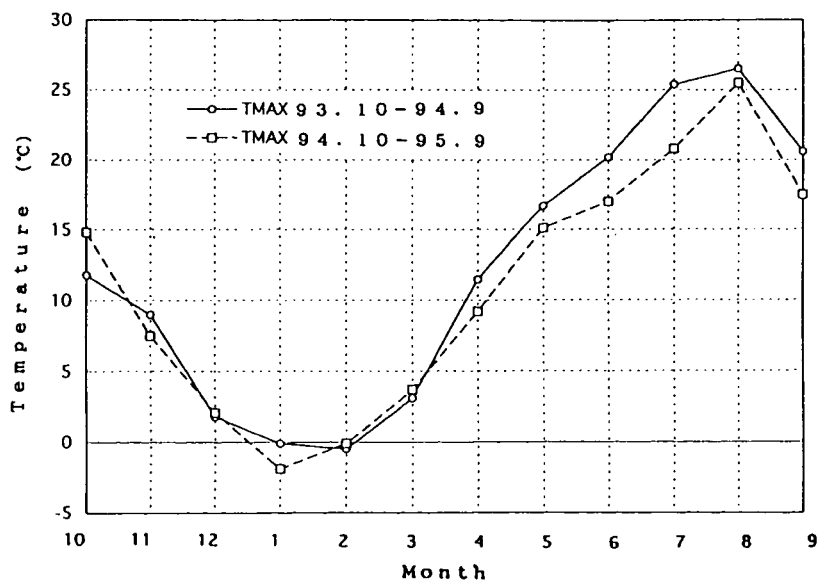


図-10 日最高気温の変化の比較 (°C、実線:93.10-94.9、破線:94.10-95.9)

図-9、図-10に日射量(日中平均)と日最高気温の月別平均値の時間変化(93.10-94.9/94.10-95.9)を示す。これらから、1995年夏季の日射量が1994年に比較して小さい事、特に新葉の形成、成長等の樹木活動が活発になる6、7月に70-75%と極端に少ない。最高気温についても、1995年6、7月は1994年6、7月に比べて3-4°C程度低温であった。また、降水量についても平年の20%程度しかなかった1994年7月に対して1995年7月は極端に多く平年の2倍で、梅雨明けも7月末と遅かった。

表-3及び図-11に大気と森林生態系間の全日、日中、夜間別のCO<sub>2</sub>交換量の期間別年間積算値を示す。通年のCO<sub>2</sub>収支は460(93.10-94.9)、210(94.10-95.9) gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/yearの植物圏への吸収という結果になっているが、上述のように兩年夏季の気象条件が違ったために、このようにCO<sub>2</sub>の放出/吸収量が大きく異なったものと考えられる。

表-3 全日、日中、夜間別のCO<sub>2</sub>交換量の期間別年間積算値(1993.10-1995.9)

期 間	全 日		日 中		夜 間	
SEP-DEC	11	3	225	173	-214	-171
JAN-APR	-108	-85	-38	-31	-70	-54
MAY-AUG	559	289	822	528	-263	-238
年 間	462	208	1009	671	-547	-463

左:93.10-94.9/右:94.10-95.9 (gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/期間)

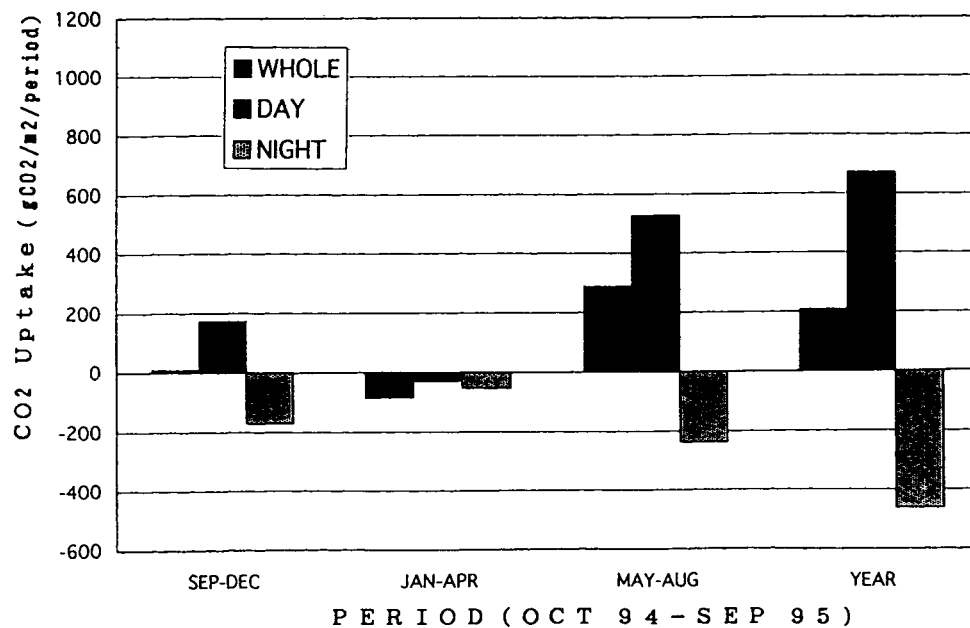
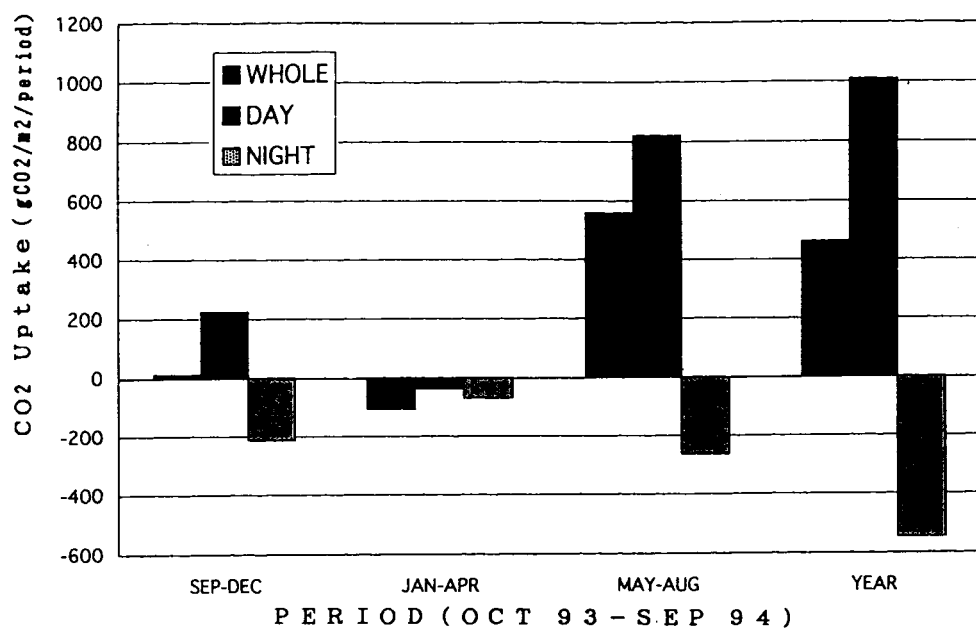


図-11 全日、日中、夜間別のCO<sub>2</sub>交換量の期間別年間積算値(1993.10-1995.9)



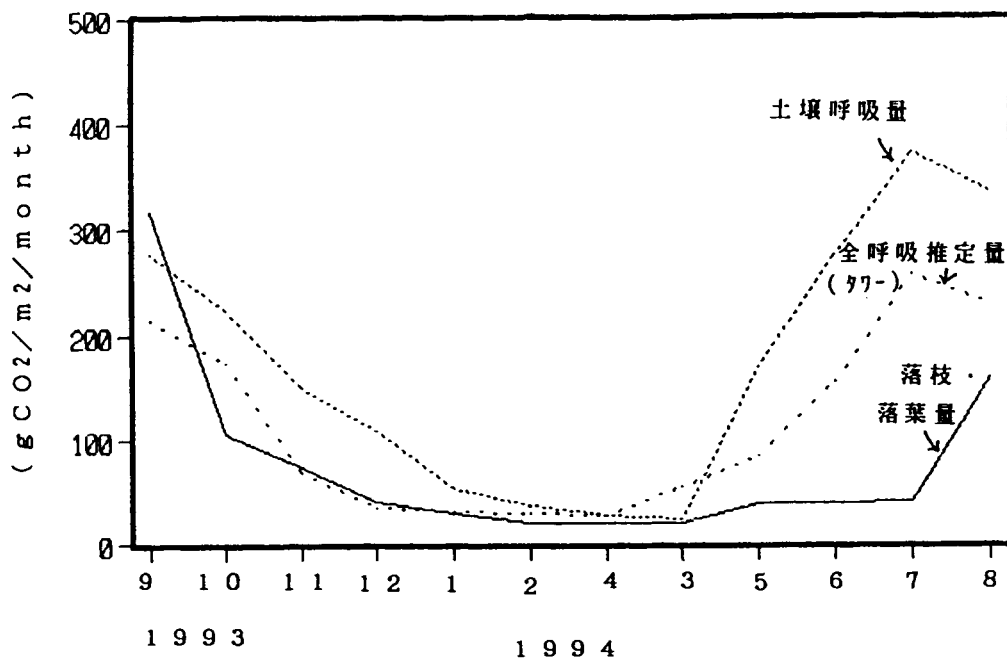


図-12 タワー観測によるCO<sub>2</sub>呼吸推定値と岐阜大学による土壌呼吸量、落枝・落葉量の月別積算値の季節変化の比較

図-12ではタワー観測によるCO<sub>2</sub>呼吸推定値と岐阜大学による土壌呼吸量、落枝・落葉量の月別積算値の季節変化の比較を試みた。また、表-4にはこれらの量の期別（SEP-DEC、JAN-APR、MAY-AUG）積算値、年間（1993.10-1994.9）積算値（gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/期間）を示す。これらからは土壌呼吸測定値が落枝・落葉量、全呼吸タワー推定値に比べて大きめという結果が得られている。なお、笹の落枝・落葉量については考慮されていない。表-5には参考のためにプラントキャナル・77ライザーにより測定した葉面積指数の季節変化（1995年7-11月）を示す。

表-4 土壌呼吸量、落枝・落葉量の期別（SEP-DEC、 JAN-APR、MAY-AUG）積算値、年間（1993.10-1994.9）積算値（gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/期間）

期 間	全呼吸推定値 (TOWER)	土壌呼吸量 (岐阜大)	落枝・落葉 (岐阜大)
SEP-DEC	493	760	536
JAN-APR	144	140	90
MAY-AUG	725	1150	274
YEAR	1362	2050	900

(gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/期間)

測 定 日	LAI
1995 7/26-29	4.2
8/21-23	3.5
9/21-22	3.3
10/25	2.2
11/21-22	0.7

## 5. 考察

高山（温帯落葉樹林）のCO<sub>2</sub>フラックスの結果を西表島（亜熱帯林）及びつくば市（松林）でのCO<sub>2</sub>フラックス測定結果<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>と比較してみた。高山の夏季日中でのCO<sub>2</sub>の正味としての呼吸量は1.5-2.5 gCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·hr)と西表島日中（2-4 gCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·hr)）よりやや小さく、つくば市夏季と比べるとほぼ同程度である。これらの3地点でのフラックスと日射量の関係を調べると、どの地点でも日射量が小さい時にはフラックスはほぼ日射量に比例するが、高山では他の測定地点と異なり、0.5-0.6 kW/m<sup>2</sup>以上で日射量が増えてもフラックスは一定のままかもしくはやや減少する傾向が見られる。この差異が樹種、地形条件等何に因るものか検討する必要がある。尚、高山夏季のこの結果（日射量=0.5 kW/(m<sup>2</sup>·hr)で2.03 gCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·hr)）はアメリカ北東部の温帯林での値<sup>7)</sup>と同程度で、アマゾンの熱帯林におけるCO<sub>2</sub>フラックス 2.41 gCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·hr)<sup>8)</sup>に比べて20%程小さく、カナダ寒帯林夏季での値（1.5 gCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·hr)）<sup>9)</sup>と比べてやや大きめの値となっている。夜間のフラックス（土壌も含む生態系の呼吸）は気温の一次式で近似されるが、今回の結果はRaich et al.(1992)<sup>10)</sup>等の結果と矛盾しない。積雪時のCO<sub>2</sub>の大気への放出量は値は小さいが、その期間が長いためにその積算値は無視できない。

## 6. まとめ

本研究では野外観測に基づき、大気と温帯林間のCO<sub>2</sub>の吸収・放出過程を定量的に解明し、CO<sub>2</sub>循環モデルの定式化を計り、モデルのパラメーターの季節変動、日射・気温・風等の気象条件との関係、CO<sub>2</sub>フラックスの季節変化、年々変動について重要な成果を得た。研究の概要をまとめると以下の通りである。

- ① 渦相関法と傾度法（空気力学的方法）によりCO<sub>2</sub>フラックスを計算し、両者の比較から傾度法の拡散係数の大気安定度、昼夜による変化を調べた。さらに、種々の解析を行い、CO<sub>2</sub>フラックスの時間変化、日射・気温との関係を調べ定式化した。
- ② 傾度法によりCO<sub>2</sub>フラックスの季節変動を推定し、5-9月は正味として植物圏がCO<sub>2</sub>を吸収し、10月-4月はCO<sub>2</sub>を放出する事が分かった。また、通年のCO<sub>2</sub>収支を2年間について推定し、460および210 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/yearの植物圏への吸収という試算結果を得た。
- ③ 上記の結果を従来の森林生態学的調査・文献と比較、検討した。

## 7. 本研究により得られた成果

本研究においてはCO<sub>2</sub>フラックス、気象条件の測定タワーを用いて、通年観測及び強化観測を精力的に行い、データを蓄積した。それらを用いて、渦相関法と傾度法（空気力学的方法）によりCO<sub>2</sub>フラックスを計算し、両者の比較から傾度法の拡散係数の値を確定した。さらに、種々の解析を行い、フラックスと日射量、気温の関係を求めた。これらの成果はCO<sub>2</sub>フラックスの季節/日内変化のモデル化、CO<sub>2</sub>循環モデルの構築に貢献する。通年観測データに傾度法を適用してCO<sub>2</sub>フラックスの季節変動、年々変動を推定したが、このような通年にわたるCO<sub>2</sub>フラックスの変動、気象条件との関係の解明は実験例が少なく、炭素循環モデルにおける森林の役割を定量化する上で貴重な成果である。

今後に残された研究課題としてはタワー観測を継続して行い、CO<sub>2</sub>フラックスの経年変化（通常年、異常年の差等）をさらに調べ、本観測によるCO<sub>2</sub>積算値と岐阜大学の樹木成長量調査等の

森林生態学的調査結果との比較・検討を試みたい。さらに、空気サンプリングによる炭素、酸素の同位体比測定を行い、土壌呼吸と樹林呼吸・光合成過程等を分別してCO<sub>2</sub>呼吸・放出量を調べる手法についても検討したい。このような観点から長期的で地道な観測の継続が必要となる。

また、観測場所の地形が複雑で結果の代表性が問題となるが、現地観測結果とローカルスケールの数値拡散モデルを組み合わせて成果を一般化すると共に他機関・他の森林種の調査とも合わせて、本研究の成果を位置づけ、広域スケールの炭素循環モデルに結合したい。

## 8. 引用文献

- (1) IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change),1994: Radiative Forcing of Climate Change.
- (2) Dixon et al.,1994: Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems.Science 263 185-190.
- (3) Drake,B.G.,1992: The Impact of Rising CO<sub>2</sub> on Ecosystem Production, Water,Air and Soil Pollution 64,25-44.
- (4) Watanabe,T.,J.Kondo,1990: The Influence of Canopy Structure and Density upon the Mixing Length with in and above Vegetation,J.Meteor. Soc. Japan 68,227-235.
- (5) 山本 晋他,1992: 西表島における二酸化炭素自然発生源の研究,公害 27,73-82.
- (6) Yamamoto S.,et al.,1996: Airplane Measurements of Carbon Dioxide Distribution on Iriomote in Japan, Atmospheric Environment 30, 1091-1097.
- (7) Wofsy et al.,1993: Net Exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest,Science 260, 1431-1438.
- (8) Fan S.-M. et al.,1990: Atmospheric-biosphere Exchange Exchange of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in the Central Amazon forest,J.Geophys.Res.95,16,851-16,864.
- (9) Desjardins R.L. et al.,1994: Airborne Flux Measurements of CO<sub>2</sub>,Sensible, and Latent Heat over the Hudson Bay Lowland,J.Geophys.Res.99,1551-1561.
- (10)Raich J.W.,W.H.Schlesinger,1992:The Global Carbon Dioxide Flux in Soil Respiration and its Relationship to Vegetation and Climate, Tellus,44B,81-99.

### [研究発表の状況]

- (1)Yamamoto S.,1993: In Search of the Missing Sink-Refining Models of Carbon Dioxide Circulation in the Environment, Now & Future Vol.8,JITA.
- (2)山本 晋, 1994: 野外調査によるCO<sub>2</sub>循環過程の解明、第1回資源環境シンポジウム、工業技術連絡会議・資源環境連合部会.
- (3)山本 晋他、1994: 温帯落葉樹林におけるCO<sub>2</sub>収支季節変化の観測(その1)、第35回大気汚染学会.
- (4)Yamamoto,S, S.Murayama and H.Kondo,1995: Seasonal Variation of CO<sub>2</sub> Flux between Air and Temperate Forest,10th World Clean Air Congress,Helsinki,Finland.
- (5)山本 晋他、1995: 温帯落葉樹林と大気間のCO<sub>2</sub>フラックス季節変化の観測(その1)、日本気象学会1995年度春季大会.

- (6)山本 晋他、1995：温帯落葉樹林と大気間のCO<sub>2</sub>フラックス季節変化の観測（その2）、日本気象学会1995年度秋季大会。
- (7)山本 晋他、1995：温帯落葉樹林におけるCO<sub>2</sub>収支季節変化の観測（その2）、第36回大気環境学会。
- (8)Yamamoto S., et al., 1996: Airplane Measurements of Carbon Dioxide Distribution on Iriomote in Japan, Atmospheric Environment 30, 1091-1097.
- (9)Yamamoto, S., 1996: Emission/Balance of Green House Gases (Seasonal Variation of CO<sub>2</sub> Flux between Air and Temperate Forest, 4th Japan-US Workshop on Global Change and Land Use/Cover Change and Global Environmental Conservation, Tsukuba, Japan.
- (10)山本 晋他、1996（予定）：温帯落葉樹林と大気間のCO<sub>2</sub>フラックス季節変化の観測（まとめ）、日本気象学会1996年度春季大会。