

## B-6 陸域生態系の二酸化炭素動態の評価と予測・モデリングに関する研究

### (1) 自然生態系の二酸化炭素変動機構のモデル化と予測

#### ④二酸化炭素フラックスと同位体比測定による冷温帯林生態系におけるモデル化と予測

研究代表者 資源環境技術総合研究所

環境影響予測部大気環境予測研究室 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 大気環境予測研究室 吉門 洋・近藤 裕昭・村山 昌平・三枝 信子・兼保 直樹

平成8～10年度合計予算額 8,934千円

(平成8年度予算額 2,978千円)

(平成9年度予算額 2,978千円)

(平成10年度予算額 2,978千円)

#### [要旨]

タワーによるCO<sub>2</sub>フラックス、濃度の通年観測により、大気-冷温帯林間のCO<sub>2</sub>交換量の季節・年々変化を解明するとともに、大気及び土壌空気中のCO<sub>2</sub>の濃度及び同位体比を測定し大気・森林(地上部)・土壌間のCO<sub>2</sub>交換過程の詳細を調べる。さらに観測結果と数値拡散モデルを組み合わせ解析し、森林生態系における炭素循環のモデル化を図る。本研究の成果をまとめると以下の通りである。

(1) CO<sub>2</sub>フラックスの通年観測データを用いて、大気-冷温帯林間のCO<sub>2</sub>交換量の季節・年々変化とその変動要因を解析した。森林生態系の平均的な年間CO<sub>2</sub>吸収量は116gC/m<sup>2</sup>/年であった。しかしそのCO<sub>2</sub>吸収量は気候や植生活動の年々変化、特に夏季の日射量・気温、春季の融雪時期、森林の展葉時期などの年々変動により大きく変化することが分かった。

(2) 1998年7月25日から10月28日の期間の渦相関法によるCO<sub>2</sub>・水・熱フラックスの解析結果から夜間の気温と森林生態系の呼吸量の関係及び大気安定度との関係が解明された。

(3) 日中のCO<sub>2</sub>フラックス測定結果の解析から、森林生態系純生産量(NEP)と一次総生産量(GPP)を推定した。さらに、これらの量と気温および有効光合成放射量(APAR)の関係のモデル式を導出した。モデル式を用いて、観測によるNEPの季節変動が良好に再現された。

(4) CO<sub>2</sub>の炭素、酸素安定同位体比の季節変化を解析した。さらに同位体比とCO<sub>2</sub>濃度の解析からCO<sub>2</sub>濃度の日内、季節変化が大気と森林生態系間のCO<sub>2</sub>交換によることが確認された。しかしながら、酸素同位体比の季節変化の実態は複雑で未解明である。

(5) 人為起源のCO<sub>2</sub>放出源調査及び本観測結果に基づく植物による上述のCO<sub>2</sub>吸収・放出モデルを組み込んだメソスケール化学-移流数値モデルを用いて、観測サイトへの人工起源のCO<sub>2</sub>放出源と植物活動のCO<sub>2</sub>観測結果への影響の度合いが調べられた。また、中部日本におけるCO<sub>2</sub>濃度の時空間分布のシミュレーションを行い、それによりモデルの広域化の見通しを得ることができた。

[キーワード] 森林生態系、CO<sub>2</sub>交換、炭素・酸素同位体、炭素循環モデル

#### 1. 序

大気中のCO<sub>2</sub>濃度の急増に伴う将来の気候変動を予測するためには、大気中に放出されたCO<sub>2</sub>が大気・海洋・生物圏の各リザーバー間でどのように循環しているか定量的に理解することが不可欠である。近年のIPCCの報告書<sup>1)</sup>では、最近の炭素循環に関する理解の進展を踏まえて、CO<sub>2</sub>循環におけるミッシングシンクという考え方を改め、CO<sub>2</sub>の放出量と吸収量の差は、陸上生態系に求めることができるという見解をとっている。その吸収源として北半球中高緯度の森林再生を想定しているが、それを裏付ける証拠は、依然として不足してお

り、大気と同緯度帯森林間のCO<sub>2</sub>交換過程を定量的に解明する調査・研究を緊急に行うことが必要になってきている。

本研究では、中緯度の代表的な森林種である冷温帯落葉樹林においてCO<sub>2</sub>フラックス測定及び各リザーバー間のCO<sub>2</sub>交換の識別に有効な手段として注目されてきているCO<sub>2</sub>の炭素・酸素同位体比測定を行いCO<sub>2</sub>交換過程を定量的に解明する。

## 2. 研究目的

大気と森林生態系（土壌を含む）の間のCO<sub>2</sub>フラックスのデータの蓄積によりその経年変化の実態を明らかにするとともに、大気・土壌空気中のCO<sub>2</sub>の濃度及び炭素・酸素同位体比測定を行い、土壌と森林（地上部）と大気間のCO<sub>2</sub>交換過程を調べる。これらの結果を基に森林生態系における炭素循環モデルを詳細に検討しその高度化を図る。さらに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ることでモデルの一般化を図る。

## 3. 研究方法

1993年に岐阜県高山市の冷温帯林に設営された観測タワー及びその周辺の調査区域において、1. 大気/森林生態系間CO<sub>2</sub>交換量の連続測定、2. CO<sub>2</sub>中の炭素・酸素安定同位体比の測定、3. 土壌水分量および地中熱流量の連続測定、4. 渦相関法による森林上の顕熱と潜熱の連続観測、5. 渦相関法による森林上のCO<sub>2</sub>交換量の連続測定、6. Closed Chamber 法による土壌から放出されるCO<sub>2</sub>・同位体の測定を行い、並行して、7. 森林-大気間の熱・水・二酸化炭素交換モデル、メソスケール数値モデルの構築を進めた。

## 4. 結果と考察

### 4. (1) CO<sub>2</sub>濃度の変化と気象条件の関係

図1に高度27mにおけるCO<sub>2</sub>濃度の日変化の振幅の月平均値の変化を示す。図より融雪後樹木の葉が展開し始める5月から落葉の10月までの間、日変化の振幅が大きくなっており、この期間の活発な生物活動の影響を反映していると考えられる。一方、気温が5℃以下の期間は、生物活動が弱まることを反映して、明瞭な日変化は現れなくなり、数日程度の周期を持った小さな濃度変化が見られた。図1では、年毎の差異が生物活動が盛んな時期に顕著に見られるが、融雪時期や梅雨期間の違い、気温・日射量等の年々の違いに関連した生物活動の年々変化を反映していると考えられる。ちなみに97, 98年は融雪時期が96年より早くこの期間の気温は高く、また98年は、梅雨明け後も天候が不順で他の年と比べて日射量が少なかった。

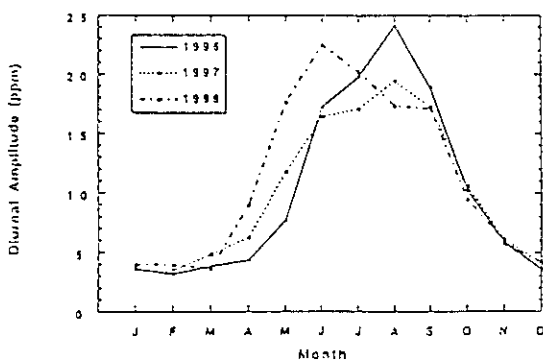


図1. 高度27mにおけるCO<sub>2</sub>濃度の日変化の振幅の月平均値の変化。

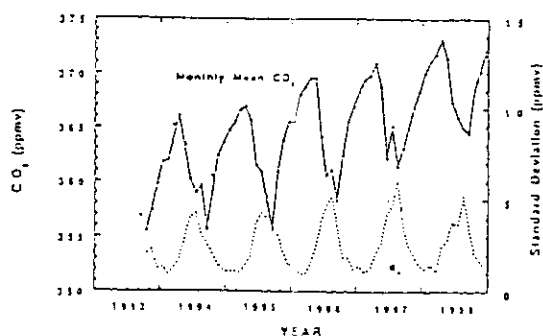


図2. 高度27mにおけるCO<sub>2</sub>濃度の日平均値から求めた月平均値及びその標準偏差の変化。xは、10日以下のデータしか取得できなかった月を示す。

図2に高度27mにおけるCO<sub>2</sub>濃度の日平均値から求めた月平均値及びその標準偏差の変化を示す。生物活動の季節変化を反映して顕著な季節変化を示しており、平均すると4月下旬に最高、9月中旬に最低濃度が現れ振幅は約11ppmであった。人為起源のCO<sub>2</sub>放出に伴う経年増加も見られ、観測期間中の平均的な増加率は1.9ppm/年であった。月内の日々の変化の程度を示す標準偏差は、生物活動が盛んな時期に大きくなっており、日射・気温等の気象要素の日々の変化に伴う、生物活動の変化を反映していると考えられる。季節変化について詳しく見てみると濃度減少期の晩春から早秋にかけて、年によって一時的な濃度増加が見られたり、最低濃度の出現期が変化している。これは、上述のような梅雨期間及びその後の日射量、気温等の気象要素の変化が、この時期の光合成活動によるCO<sub>2</sub>吸収と呼吸・分解活動による放出のバランスを変化させ、この年々の違いがCO<sub>2</sub>濃度の変化の年々の違いを引き起こしたためと考えられる。一方、融雪後、生物活動が活発になり始める4月から5月において、融雪が早く気温が高かった97、98年は、融雪が遅かった96年と比べて最高濃度の出現期が早かった。これは、融雪の起こる時期やこの時期の気温の違いにより、呼吸・分解活動や光合成が活発化し始める時期に年々の違いが生じたためと考えられる。

#### 4. (2) 傾度法による大気/森林間のCO<sub>2</sub>交換量の季節・経年変化

観測タワー（高さ27 m）で測定したCO<sub>2</sub>濃度高度分布、風速等の通年観測データを用いて、CO<sub>2</sub>の交換量をCO<sub>2</sub>濃度傾度と風速傾度から求めている。なお、この落葉広葉樹林は伐採後30年以上を経過した人手の入らない二次林で、全体としては弱小木は自然淘汰され安定期に近づきつつある森林と考えられる。

まず、大気とこの森林間のCO<sub>2</sub>交換量がどのような季節変化、年次変化をしているかを調べてみる。図3は高山の日中、夜間、全日別のCO<sub>2</sub>交換量の月別積算値(1993、10-1998、12)を示す。森林が活動を開始する5月末から光合成が盛んになり、CO<sub>2</sub>交換量が正の値(森林へのCO<sub>2</sub>吸収)となり7、8月にCO<sub>2</sub>吸収量が最大になっている。9月になると森林の生産活動が弱まりCO<sub>2</sub>吸収量は急減する。落葉の時期は10月上旬で、積雪は12月上旬から4月中旬の間見られる。この地点では5月にはまだ樹木の葉は展開していない、また10月には樹木はほぼ活動を停止していると考えられるにもかかわらず、5月および10月において、CO<sub>2</sub>の森林生態系への吸収が見られるのは、日射が林内に入るこの時期に林床に生育するクマイザサ群落が光合成活動をしていることによると思われる。11月から4月の間は日中、夜間共に小さな負の値を示し、積雪期間中も少量ながらCO<sub>2</sub>が森林生態系から大気に放出されている事をうかがわせる。また、夜間のCO<sub>2</sub>交換量(負の値でCO<sub>2</sub>の放出)は植物体の呼吸量および土壌からのCO<sub>2</sub>放出量が温度に依存している事を反映して7、8、9月に大きくなっている。

図4は日中、夜間、全日別のCO<sub>2</sub>交換量の通年積算値(1994から1998年)の年々変動を示す。このような年々変動の要因としては、日射、気温等の差異、融雪時期、樹木の葉の展開時期の早遅等が考えられる。例えば、1994年夏季と1995年夏季の日中のCO<sub>2</sub>吸収量を比較すると、後者は前者の70%程度と小さく、特に6、7月にその傾向が顕著であるが、両年の梅雨期における日射量と気温が大きく異なり、そのために森林の光合成量、有機物分解量が違ったためと考えられる。図5に1994-1997年の6月から9月の月別全日CO<sub>2</sub>交換量と月別気温・日射量平均値の相関関係を示す。

以上から冷温帯落葉広葉樹林への平均的CO<sub>2</sub>取り込み量は390 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/年(1.1 tC/ha/年)程度であるが、気温、日射量の年変化、葉の展開時期により変動している。これらの事実は広域の気候変動によりグローバルスケールでのCO<sub>2</sub>濃度の増加率の年次変化が引き起こされ得ること、気候温暖化が森林のCO<sub>2</sub>収支に影響し得ることを示唆している。

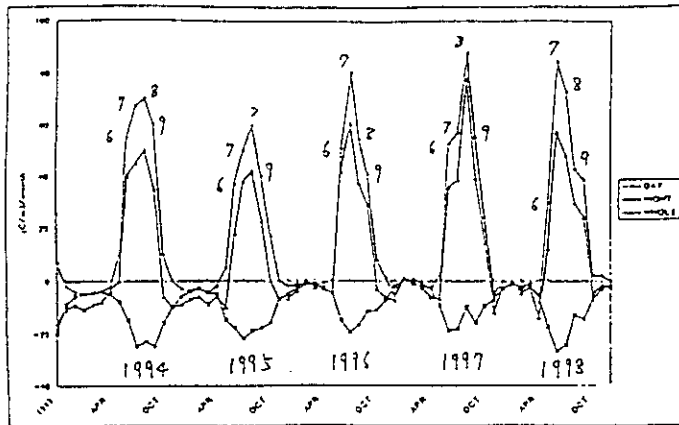


図3. 岐阜県高山市の冷温帯林におけるタワー観測による日中、夜間、全日別CO<sub>2</sub>取り込み量（月別積算値：正值が森林への取り込み）の季節・経年変化。

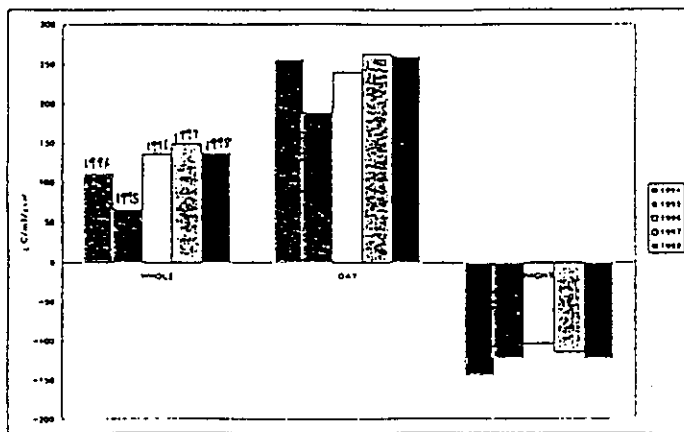


図4. 日中、夜間、全日別CO<sub>2</sub>交換量の通年積算値（1994-1998年）の年々変動。

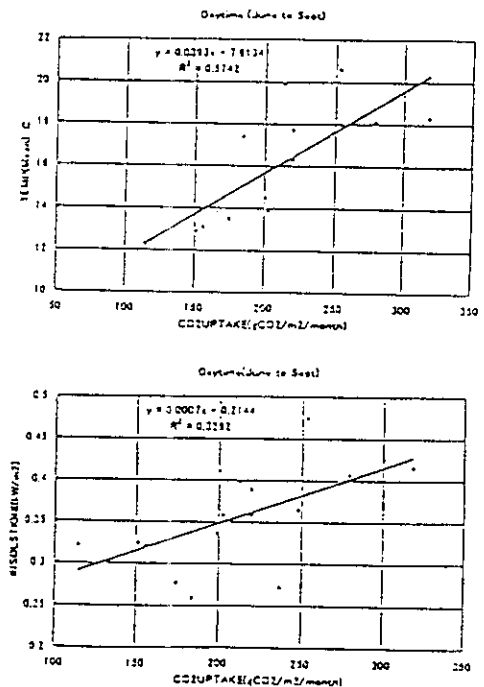


図5. 1994-1997年6月から9月の月別全日CO<sub>2</sub>交換量と月別気温・日射量平均値の相関関係。

#### 4. (3) 渦相関法によるCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、熱フラックスの長期観測とフラックス測定法の検討

##### 4. (3). ① はじめに

1993年以来、2点のCO<sub>2</sub>濃度傾度を利用したCO<sub>2</sub>フラックスの測定を続けてきたが、1998年7月からは渦相関法によるCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>Oフラックスの連続測定を始めた。近年、赤外線ガス分析計の応答速度の改良が進み、Closed path方式の分析計による渦相関法が可能になってきた。しかし、誤差評価や補正法にはまだ問題が残されているほか、通年で安定した測定を行なうには装置の改良も必要である。以下では、今回開始したClosed path方式によるCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>Oフラックス測定の方法について報告する。

##### 4. (3). ② 測定装置の概要

測定には超音波風速計 (KAIJO DAT600) と赤外線ガス分析計 (LICOR LI6262) を用いる (図6)。タワーの高度25mに取り付けた超音波風速計の背面に空気取入口をつけ、長さ35m内径約3mmのテフロンチューブで林床まで流量約4 L/minで空気を引く。CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>O濃度は分析計で連続的に測定し、セル温度と気圧、風速・気温変動と共に5Hzで記録する。分析計のCO<sub>2</sub>スパンの変動を確認するため、CO<sub>2</sub>標準ガスを1日1回流す。H<sub>2</sub>Oの感度は同高度の温湿度計 (VAISALA HMP) と比較して較正する。

4. (3). ③ CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>O濃度の応答速度

Closed path方式では、鉛直風速変動 $w'$ に比べてCO<sub>2</sub>変動 $C'$ とH<sub>2</sub>O変動 $q'$ には時間遅れが生じるうえ、高周波成分の減衰が起こる。表1にチューブの長さやcut-off周波数（振幅の2乗が半分になる周波数： $f_p$ ）の関係を示す。次に1998年7月23-24日に、森林上における $w'C'$ および $w'q'$ の相互相関と遅れ時間 $\tau$ の関係を求めた（チューブ長=35m）。相関係数の絶対値が最大となる $\tau$ は、 $w'C'$ で4.6-5.5秒、 $w'q'$ で5.1-6.1秒の範囲で変化した。

4. (3). ④ Open-path方式との比較

渦相関法でCO<sub>2</sub>フラックスの測定を行なう際に国内で広く用いられているOpen-path方式のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O変動計（ADVANET E009A）との比較を行なった。Open-path方式とClosed-path方式の装置で測定された $w'C'$ および $w'q'$ の相互相関スペクトルを比較すると（図7）、スペクトルのピークを含む低周波側では両者の結果はほぼ一致し、0.4 Hz程度より高周波側ではClosed-path方式の結果がOpen-pathに比べて過小評価になっていることが分かる。しかし、フラックスに及ぼす高周波成分の欠落の影響は通常数%以下であり、CO<sub>2</sub>フラックスの時系列を比較すると（図8）、Open-path方式とClosed-path方式では観測誤差の範囲内ではほぼ一致することがわかった。

表1. チューブの長さやcut-off周波数 (CO<sub>2</sub>)

チューブの長さ (m)	5	35	50
$f_p$ (Hz)	0.48	0.40	0.28

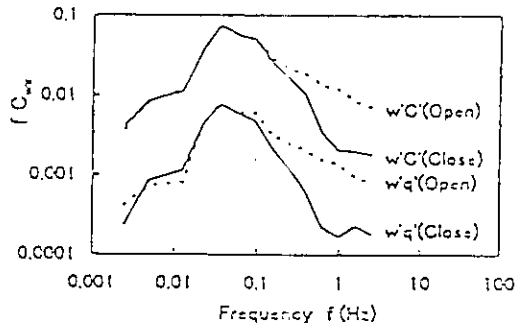


図7. スペクトルの比較 (1998年7/24 11:00-07)

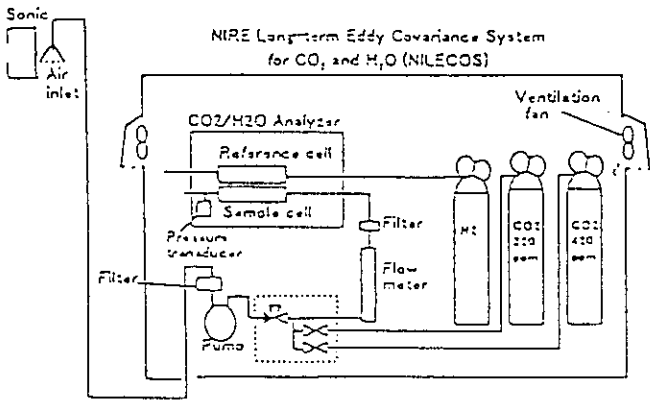


図6. CO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>Oフラックス測定装置概念図

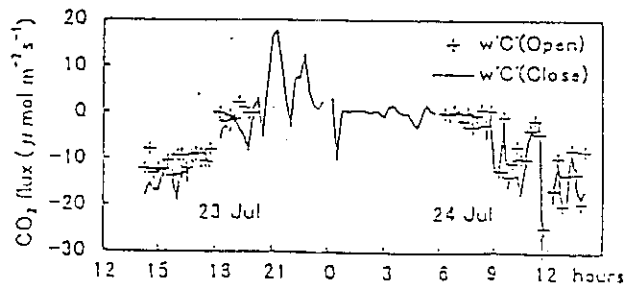


図8. CO<sub>2</sub>フラックスの時系列の比較 (7/23-24)

4. 4. フラックス観測結果のモデル化とそれからの森林の生産量の予備的評価

4. 4. ① はじめに

1998年7月-10月の期間に渦相関法で連続観測されたCO<sub>2</sub>フラックスの結果から、森林の総生産量GPPと生態系純生産量NEPを求め、気象条件との関係を調べた。

4. 4. ② 夜間のCO<sub>2</sub>フラックスと温度の関係

図9に、7月25日-10月28日の間の無降水日に観測された森林上での夜間CO<sub>2</sub>放出量（生態系呼吸R）と気温（T）の関係を示す。夜間に林外の気温（T<sub>25</sub>：高度25 m）が林内気温（T<sub>10</sub>：高度10 m）に比べて0.1℃以上

高い条件下 ( $\Delta T = T_{25} - T_{10} > 0.1$ ) で、生態系呼吸  $R$  が土壌呼吸量 ( $R_{soil}$  岐阜大学データ) に比べて小さくなる傾向があることが分かった。この原因には (1) 林内の空気が冷却される条件下では  $CO_2$  の林内への滞留が無視できない、(2) 夜間冷却が強い条件の日に、何らかの原因によって森林の  $CO_2$  の放出がフラックス観測によって測定できていない、などが考えられる。

ここではまず、 $CO_2$  滞留の影響が少ない条件下で  $R$  をパラメータ化することにして、 $\Delta T < 0.1$  °C において

$$R \text{ [mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}] = A Q^{(T-10)/10} \quad (1)$$

と表した。ただし、 $Q=2.5$  で  $A=0.20$  ( $r^2=0.38$ ) である。

#### 4.4. ③ 総生産量と光合成有効放射の関係

次に森林上の  $CO_2$  フラックスの日積算値から一日ごとの NEP を求め、それに  $R$  を加えることにより、植物による一日ごとの光合成生産量 GPP を求めた。GPP は、樹冠で吸収された光合成有効放射量 APAR の関数として、個々の葉の光合成の実験式にならって以下のような直角双曲線で表した。

$$GPP \text{ [mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}] = NEP + R = b \text{ APAR} / (1 + a \text{ APAR}) \quad (2)$$

7月-10月にかけて1ヶ月ごとに求めた GPP の初期勾配 ( $b$ : 光の利用効率の指標) と最大値 ( $b/a$ : 炭素固定反応速度の指標) を表2に示す、また、GPP の観測値と式 (2) による計算値を図10に示す。

(1)、(2) 式から、NEP は以下の式で表わされる。

$$NEP = b \text{ APAR} / (1 + a \text{ APAR}) - A Q^{(T-10)/10} \quad (3)$$

表2. GPP観測値の(2)式への回帰結果。

	$b$	$b/a$ [mol m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> ]	$r^2$
JUL	0.071	1.53	0.84
AUG	0.089	1.35	0.55
SEP	0.064	1.19	0.55
OCT	0.057	0.47	0.60

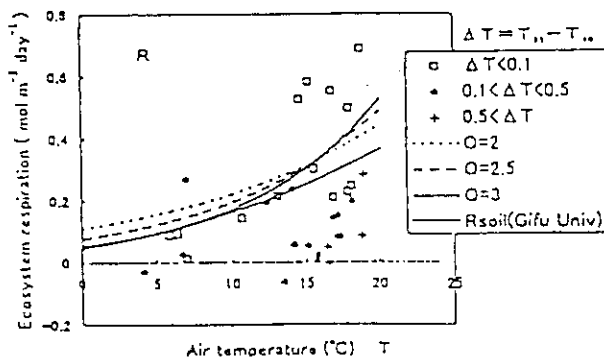


図9. 1998年7月25日-10月28日間の無降水日に測定された森林上における夜間  $CO_2$  放出量。Rsoil は岐阜大学によって作成された土壌呼吸速度の実験式。

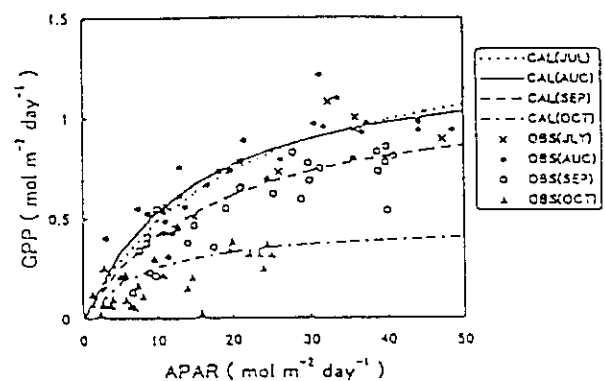


図10. 1998年7月-10月に得られた GPP と APAR の関係 (日降水量 < 20mm)。

#### 4.4.④ 夜間のフラックス観測の問題点

観測された森林上での夜間のCO<sub>2</sub>放出量は、林内へのCO<sub>2</sub>の滞留を考慮に入れても依然として土壌呼吸に比べて少ないと予想される日がしばしば出現した。今後は夜間におけるフラックス過小評価の原因を明らかにしていく必要がある。

#### 4.5. 植生CO<sub>2</sub>吸収・発生量モデルと局地風モデルによるCO<sub>2</sub>輸送の解析

##### 4.5.① 序

日本におけるCO<sub>2</sub>濃度はどこで測定しても人工起源のCO<sub>2</sub>の影響を受ける。また、観測場所も複雑な地形の場所になることが多い。従って、観測場所で実際に観測されているCO<sub>2</sub>濃度変動がこれらの影響をどの程度うけているのかを調べておくことが必要である。このため、メソスケール気象モデルを用いて人工起源CO<sub>2</sub>の影響と大きな地形の作り出す局地循環による風系の影響を明らかにすることを試みている。ここでは、まず産業起源のCO<sub>2</sub>発生量を1994年度のデータをもとに全日本について推定した。次に環境庁作成の植生マップにもとづき日本の植生を12種類に分類し、岐阜大学と資源環境技術総合研究所が1993年度から測定している岐阜県高山市の測定地点におけるデータよりCO<sub>2</sub>の吸収・発生量を気温と日射量をパラメータとしてモデル化した。両者のデータを局地気象モデルに導入し実測と比較した。

##### 4.5.② 産業起源のCO<sub>2</sub>発生量の推定

産業起源の排出源については、大規模工場、小規模工場、事業所、家庭、自動車、船舶、航空機とし、大気汚染物質排出量総合調査（マップ調査）に含まれるセメント焼成炉についてはこれを加えた（表3）。これらを総理府統計メッシュの2次メッシュにまとめた。全国の年間排出量推計結果を表4に示す。この結果は気候変動枠組み条約にもとづく第2回日本国報告書の総排出量より6.6%少ない値となっている。これは零細規模工場が含まれていないこと、船舶・航空機については港湾内および離着陸のみしか考慮していないことなどによると考えられる。

モデルに煙源を組み込むに当たって大規模工場については、排出熱量（ $Q_H$ ）、風速（ $u$ ）からCONCAWEの式

$$\Delta H = 0.175 Q_H^{1/2} u^{-3/4} \quad (4)$$

によって煙上昇高を計算した。

##### 4.5.③ 植生等による二酸化炭素の吸収・発生のパラメータ化

群落におけるCO<sub>2</sub>吸収量 $A$ は、高山で得られた観測データをもとにして、日射量 $I$ と気温 $T$ （℃）の簡単な関数として以下のように与えた。

$$A = \frac{bI}{1 + aI} - R \quad \text{および} \quad R = R_{25} Q^{(T-25)/10} \quad (5)$$

である。ここで、 $R$ は夜間におけるCO<sub>2</sub>放出量、 $R_{25}$ は気温25℃での $R$ の値で、簡単のため、各カテゴリーで共通に $R_{25} = 0.078 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とした。 $Q$ は $R$ の温度係数で $Q = 2$ とした。パラメータ $G_s$ 、 $a$ 、および $b$ の値は、土地利用のカテゴリーごとに、Schulze et al. (1994)<sup>2)</sup>にもとづいて表4のように与えた。

##### 4.5.④ 輸送モデル

CO<sub>2</sub>輸送の計算に用いられたモデルは、NIRE-MM<sup>3)</sup>である。このモデルは静水圧・ブジネスク近似モデルであり、計算は中部日本について行われた（図11）。CO<sub>2</sub>輸送は地形座標において以下の式によって、計算さ

れた。

$$\frac{\partial(DC)}{\partial t} + \frac{\partial(DCu)}{\partial x} + \frac{\partial(DCv)}{\partial y} + \frac{\partial(DCs)}{\partial s} = K_{cx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_{cy} D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{1}{D} \left( \frac{\partial}{\partial s} K_x \frac{\partial C}{\partial s} \right) + Q_c \quad (6)$$

ここで  $s = (z-z_c)/(z_T-z_c)$ 、 $z_c$ 及び $z_T$ はそれぞれ地表面及びモデルの上端レベル、 $D = z_T-z_c$ 、 $C$ は $CO_2$ 濃度、 $Q_c$ は産業起源の $CO_2$ 放出及び森林生態系による $CO_2$ 吸収・放出の総和である。 $Q_c$ は、大規模工場については有効煙突高のグリッドに直接与えるが、他では地上10mの高度に与えた。

#### 4.5.④ 計算結果

計算は1997年7月20-23日の期間について行われた。3時間毎の広域スケールの効果を取り込むために、気象庁地域スペクトルモデル(40km×40km分解能)による気象データを用いた。図12に7月23日午前6時及び午後3時の地上10mの $CO_2$ 濃度の分布を示す。午前6時の分布では産業活動の最も盛んな東京、名古屋、大阪付近で非常に高濃度になっている。午後3時の分布でも依然3地域では高濃度になっているが、最高濃度は低下している。図13に計算された高山及び御前崎沖上空の $CO_2$ プロファイルを示す。また、図14には航空機観測の結果を示す。高山上空における両者の結果は非常によく一致しているが、御前崎沖については若干異なっている。御前崎沖の観測結果では、バックグラウンド濃度が少し高くなっている。図15に高山観測タワーの27m高度における $CO_2$ 濃度の日変化を示す。また、図16に日変化に対する東京、名古屋、高山地域からの汚染の寄与を示した。7月23日の朝の高濃度について、名古屋地域からの汚染が約3ppm分寄与していることが推定された。

表3. 全国年間排出量推計結果

番号	発生源	$CO_2$ 排出量 (1000t-C/y)
01	大規模工場	137,931
02	小規模工場 (及び内院)	59,152
03	鉄・化学工業	101,563
04	軽工業	7,567
05	窯業・窯業工業	2,800
06	電気・ガス業	91,571
07	その他・排気設備	13,441
10	発電所	6,822
20	家庭	18,532
30	自動車	61,421
40	船舶	1,827
50	航空機	756
90	大規模工場を除く計	150,641
99	合計	308,572
	【国産・森林吸収源別】	
	国産発生源計	244,557
	森林発生源計	64,015

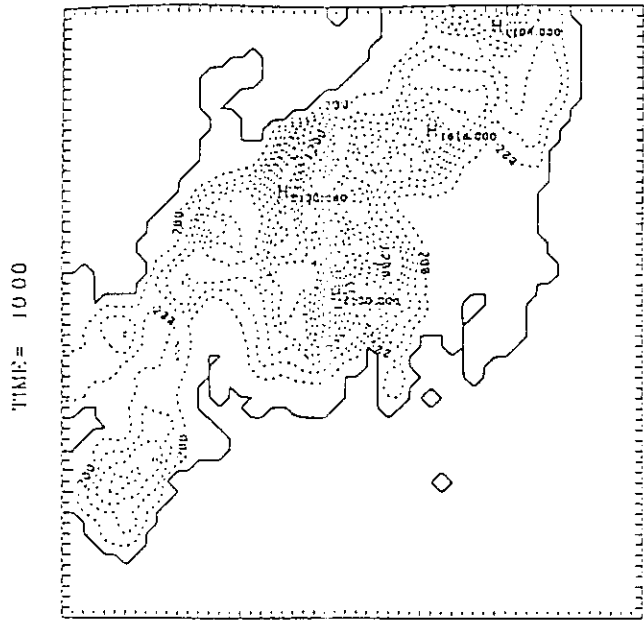


図11. 計算の範囲



表4. モデルで使した土地利用区分と、区分ごとに与えたパラメータの値  
(Schulze et al., 1994を一部改変).

No.	土地利用区分	$G_s$ $\text{mm s}^{-1}$	$a$ $\text{J}^{-1}\text{sm}^2 \times 10^{-5}$	$b$ $\text{mgCO}_2 \text{ J}^{-1} \times 10^{-3}$	備考
1	低木・灌木林	9.4	6.80	0.79	
2	常緑針葉樹林	20.6	6.80	1.71	
3	落葉針葉樹林	11.4	6.80	0.95	
4	落葉広葉樹林	20.7	6.80	1.72	
5	常緑広葉樹林	12.1	6.80	1.01	
6	針広混交林	13.8	6.80	1.15	
7	草原	23.0	6.80	1.92	牧草地, ゴルフ場
8	湿地	5.0	6.80	0.42	湿原, 雪田
9	耕作地	32.5	6.80	2.70	水田, 畑地, 果樹園
10	その他	25.1	6.80	2.08	火山荒原, 耕作放棄地,
11	市街地	--	--	--	公園 市街, 工場, コンクリート面
12	水面	$\infty$	--	--	開放水域

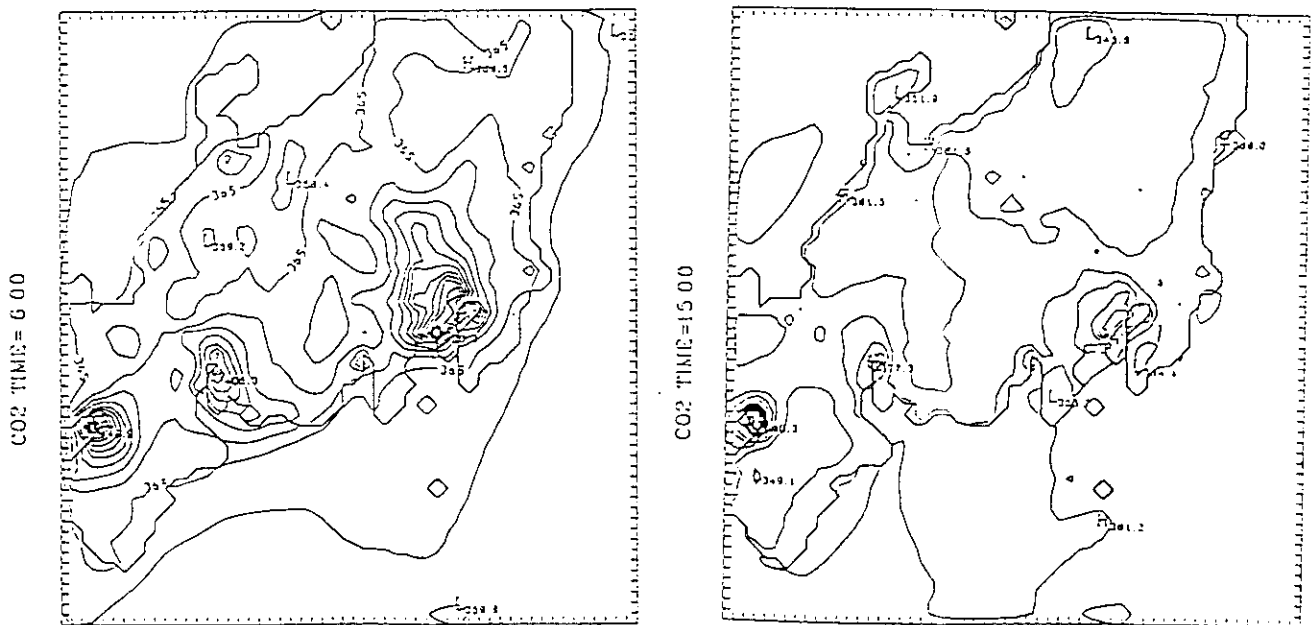


図12. 計算から求められた1997年7月23日午前6時(左図)及び午後3時(右図)のCO<sub>2</sub>濃度の分布。

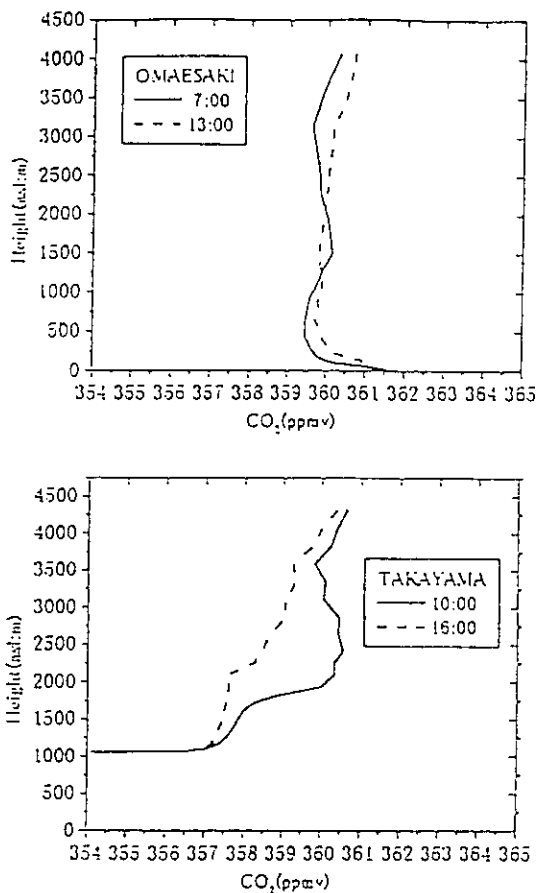


図13. 計算から求められたCO<sub>2</sub>濃度のプロファイル。

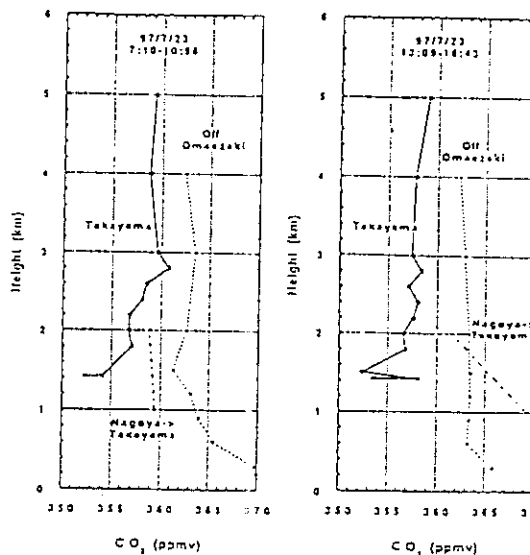


図14. 航空機観測により得られた御前崎、高山でのCO<sub>2</sub>濃度プロファイル。

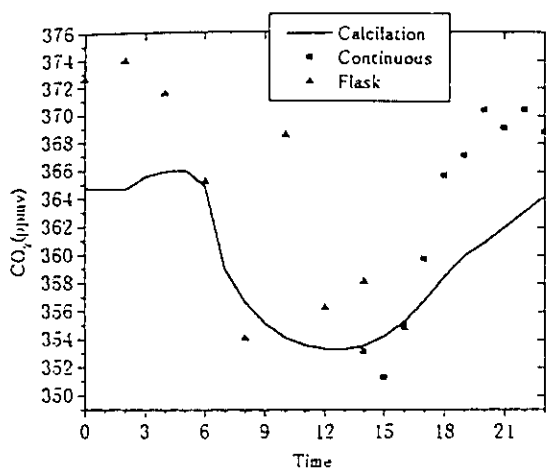


図15. 1997年7月23日高山観測地におけるCO<sub>2</sub>濃度のモデル計算と観測結果の比較。

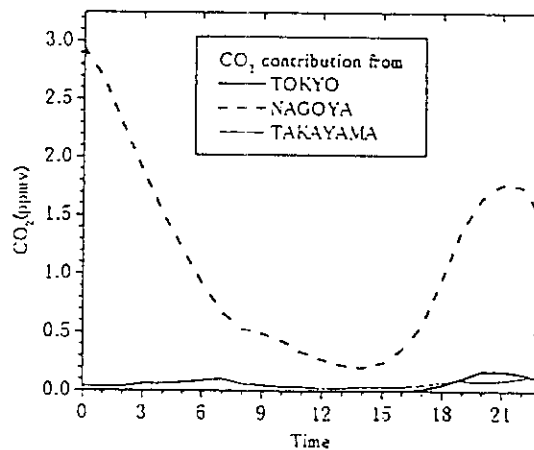


図16. 1997年7月23日に高山観測地で観測されたCO<sub>2</sub>濃度変化に対する東京、名古屋、高山市街域からの産業起源CO<sub>2</sub>による汚染の寄与の見積もり。

#### 4. 6. 大気及び土壌空気のサンプリングによるCO<sub>2</sub>安定同位体比と土壌呼吸量の観測

図17に夏季と冬季に森林直上において観測された大気中CO<sub>2</sub>の濃度及びその炭素・酸素同位体比 ( $\delta^{13}C$ 及び $\delta^{18}O$ )の日変化の例を示す。 $\delta^{13}C$ は、暖候季に、日中に最高値、夜間に最低値を示す顕著な日変化を示

しているが、冬季には日変化はほとんど見られない。 $\delta^{13}\text{C}$ は、また夏に最高、春に最低を示す季節変化を示した。 $\delta^{13}\text{C}$ の日変化及び季節変化を $\text{CO}_2$ 濃度の変化と比較してみるといずれも逆相関が見られ、 $\text{CO}_2$ 濃度の変化に対する $\delta^{13}\text{C}$ の変化率は、日変化、季節変化ともに $-0.05\%/ppm$ であった。このことから、観測された $\text{CO}_2$ 濃度の日変化及び季節変化が付近の生物圏による光合成-呼吸過程の日変化、季節変化を反映したものであることが示唆された。一方、 $\delta^{18}\text{O}$ についても図17に見られるように、暖候季に $\delta^{13}\text{C}$ と同様に、日中に最高値、夜間に最低値を示す日変化を示している。これは、光合成が活発なときには同位体的に重い酸素を持った $\text{CO}_2$ が、呼吸が活発なときには軽い酸素を持った $\text{CO}_2$ が放出されたためと考えられる。一方、 $\delta^{18}\text{O}$ の季節変化は、複雑な変化を示し日変化の時に見られたような $\text{CO}_2$ 濃度との負の相関は見られなかった。 $\delta^{18}\text{O}$ については、大気-植物間の $\text{CO}_2$ 交換以外に土壌水の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変化や日々の気象要素の変化等の影響を受けているため、明瞭な季節変化が見られなかったと考えられる。

地表からの $\text{CO}_2$ 放出量及び放出される $\text{CO}_2$ の同位体比を調べるために、Closed Chamberを用いて、地表部の空気の採取を行った。図18に地表における大気-土壌間の $\text{CO}_2$ フラックスと地温との関係を示す。図中には、岐阜大学の測定から算出された近似式も示されている。観測点は両者で異なっているが、比較的よい一致を示している。同位体比については現在測定準備中であるが、上記酸素同位体の変化要因も含めて、解析する予定である。

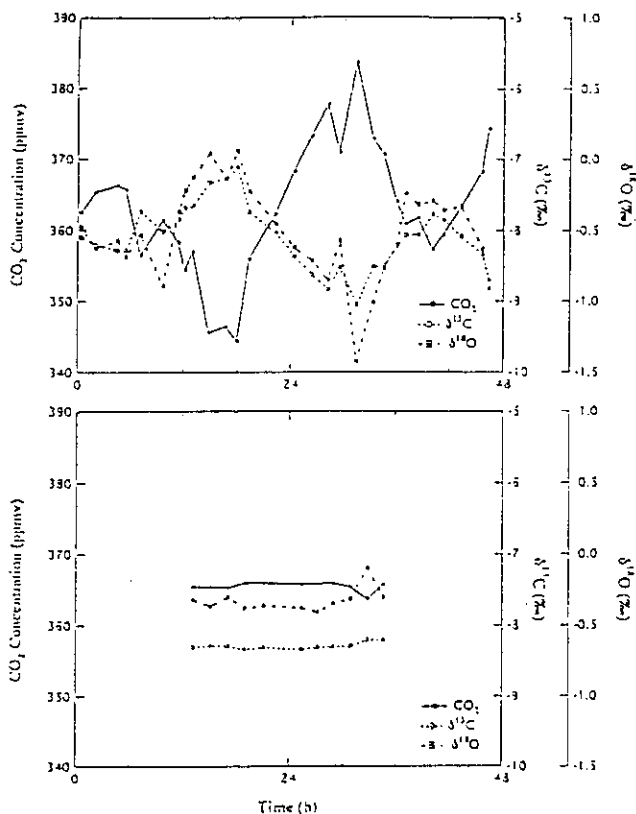


図16. 森林直上における夏季及び冬季の大気中 $\text{CO}_2$ 濃度及び $\text{CO}_2$ の炭素・酸素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ 及び $\delta^{18}\text{O}$ ) の日変化の例。

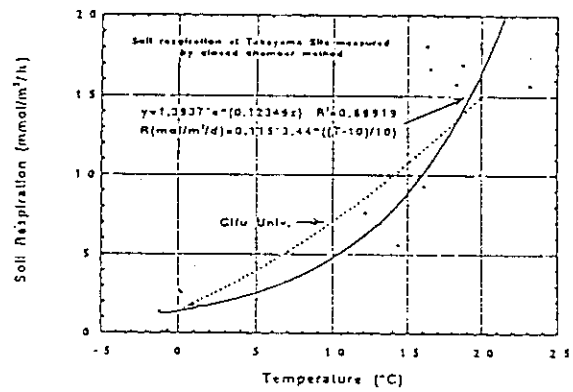


図17. Closed Chamber 法によって見積もられた地表における $\text{CO}_2$ フラックスと地温との関係。岐阜大学によって作成された実験式も示されている。

表5. 冷温帯落葉広葉樹林 (高山) におけるNPP, SR, RRとNEPの推計値 (岐阜大学流域環境研究センター)

NPP <sub>t</sub> (tree)	3.03
NPP <sub>s</sub> (Sasa)	1.18
SR	5.61
RR	2.57
NEP	1.17

$$\text{NEP} = \text{NPP}_t + \text{NPP}_s - (\text{SR} - \text{RR})$$

#### 4.7. タワー観測による炭素収支・固定量の見積もりと森林生態学的調査結果との比較

高山実験地においては資環研のタワーを用いた大気と森林間のCO<sub>2</sub>交換量直接測定と同時に、岐阜大学流域環境研究センターの研究グループによる土壌呼吸量、樹木の落枝・落葉量の季節変化が調べられている。

岐阜大学流域環境研究センターでは樹高1.3 m以上のすべての樹木について種類、胸高直径、樹高を調べた。また17本試料木の抜木調査および抜倒木の年輪解析を行った。さらにリタートラップを用いて落葉・落枝量を調べている。これらのデータを用いて樹木の純生産量 (NPPt) を推定した。笹の純生産量 (NPPs) は別途推計している。これらのNPPtとNPPsと土壌呼吸量SR (土壌微生物・動物の呼吸量 (HR) と根の呼吸量 (RR) の和) の調査結果とRRの推定値を用いてNEPを推定している (表5)。表5のNEPの値1.17 tonC/ha/年はタワー観測による結果と良く一致している。しかしながら、本推定における土壌呼吸量等の推定誤差、地形などによるタワー観測フラックス推定誤差などもありこの結果についてはさらに吟味が必要である。

#### 5. 本研究により得られた成果

中緯度冷温帯林でのCO<sub>2</sub>濃度およびフラックスの長期間観測結果は国際的なデータ交換・協力体制のもとで貴重な資料となり、また、同時に観測されている気象データと比較することにより、気候変動に伴う森林生態系のCO<sub>2</sub>交換の変動予測のために利用されうる。今年度より開始した渦相関法によるフラックス測定はさらなる改良により、高精度長期自動化フラックス測定に適應されうる。フラックス観測結果の気象要素によるモデル化及びそれを用いた森林生産量の予備評価の結果は、森林キャノピーモデルの構築に利用される。同位体のデータは森林生態系のCO<sub>2</sub>交換過程を詳しく調べる上で有力な手段となることが期待される。また、メソスケール数値拡散モデルとの組み合わせによりCO<sub>2</sub>濃度の時空間変化及び産業起源のCO<sub>2</sub>の濃度変化の寄与についての計算結果が得られたが、観測データとの比較・検証により炭素循環モデルの高度化が図られる見通しがついた。

#### 6. 参考文献

- 1). Scimel et al. (1996) Radiative forcing of climate change. In: Climate Change 1995. The science of climate change. (ed. Houghton et al.) Cambridge University Press, Cambridge, UK, 65-131.
- 2). Schulze et al. (1994) Relationships among maximum stomatal conductance, ecosystem surface conductance, carbon assimilation rate, and plant nitrogen nutrition. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 25: 629-660.
- 3). Kondo, H. (1989) Description of NRIPR mesoscale model. Technical Report of National Research Institute for Pollution and Resources, 44, pp. 76.
- 4). Kondo, H. (1995) The thermally induced local wind and surface inversion over the Kanto plain on calm winter nights. *J. Appl. Met.*, 34, 1439-1448.

#### 【国際共同研究等の状況】

IGBP/BAHCの協力の基に世界規模のCO<sub>2</sub>/水蒸気連続測定ネットワーク (FLUX-NET) の構築が進められている。我々はこれに対して、岐阜大学と協力して1993年9月から岐阜県高山市の冷温帯落葉樹林で行っているCO<sub>2</sub>フラックスの観測 (環境庁地球環境総合推進費) の成果をもって、FLUX-NETに加入した。また、1997年9月にはCO<sub>2</sub>/水蒸気フラックスの長期測定とモデリングについての国際ワークショップを広島で開催し、米、英、カナダの研究者を交えて、世界での観測成果について議論した。さらに、1998年6月には米国でフラックス関連の研究者が一堂に会してのワークショップ (FLUXNET1998) が開催され世界での観測の成果の集約と研究・協力体制についての話し合いがなされた。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- 1) 山本 晋、村山 昌平、近藤 裕昭:日本気象学会春季大会(1996)  
「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」
- 2) 山本 晋、村山 昌平、三枝 信子、近藤 裕昭:IGBP/BAHC-LUCC Inter-Core Projects Symposium(1996)  
「Field Measurements of CO<sub>2</sub> Flux between a Temperate Forest and the atmosphere」
- 3) 山本 晋、村山 昌平、近藤 裕昭:大気環境学会年会(1996)  
「温帯落葉樹林におけるCO<sub>2</sub>収支季節変化の観測」
- 4) 三枝信子、及川武久、村山 昌平、山本 晋:日本気象学会秋季大会(1996)  
「草原と森林群落内外におけるCO<sub>2</sub>濃度とδ<sup>13</sup>C値の鉛直分布(モデル計算)」
- 5) N. Saigusa and T. Oikawa: Food Production and Environmental Improvement under Global Climate Change 「A model and experimental study on Inter-annual variations in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange between atmosphere and grassland ecosystem」
- 6) S. Yamamoto, S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo: Fifth International Carbon Dioxide Conference (1997)  
「Seasonal variation of CO<sub>2</sub> exchange between a temperate deciduous forest and the atmosphere」
- 7) S. Yamamoto, S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo: International CO<sub>2</sub> Workshop in Hiroshima (1997)  
「Seasonal and Inter-annual variation of CO<sub>2</sub> exchange between a temperate deciduous forest and the atmosphere in Japan」
- 8) 山本 晋、村山 昌平、近藤 裕昭、三枝 信子:日本気象学会秋季大会(1997)  
「森林地域において観測されたCO<sub>2</sub>濃度変動と広域移流拡散シミュレーション計算の比較」
- 9) N. Saigusa, T. Oikawa, M. Toda and S. Liu: International Workshop on Global Change and Terrestrial environment in Monsoon Asia (1997)  
「Seasonal variation of canopy-scale carbon dioxide flux over a grassland」
- 10) S. Yamamoto: 第6回日米ワークショップ(1998)  
「Uptake rates of carbon dioxide by forest ecosystems」
- 11) 山本 晋、村山 昌平、三枝 信子、近藤 裕昭、中原 和真:日本気象学会春季大会(1998)  
「落葉広葉樹林におけるCO<sub>2</sub>濃度高度分布・フラックスの観測とそのモデル化」
- 12) 三枝 信子、近藤 裕昭、村山 昌平、山本 晋:日本気象学会春季大会(1998)  
「落葉広葉樹林における熱・水・CO<sub>2</sub>フラックス観測」
- 13) 近藤 裕昭、山本 晋、三枝 信子、村山 昌平、神成 陽容:日本気象学会春季大会(1998)  
「局地風モデルによる二酸化炭素輸送の解析」
- 14) 山本 晋、村山 昌平、三枝 信子、近藤 裕昭:大気環境学会年会(1998)  
「冷温帯落葉樹林におけるCO<sub>2</sub>収支の年々変動」
- 15) S. Yamamoto, S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo: Fluxnet Meeting (1998)  
「Seasonal and interannual variation of CO<sub>2</sub> exchange between a temperate deciduous forest and the atmosphere in Japan」
- 16) 山本 晋: BAHC共同研究集会(1998) 温帯落葉広葉樹林におけるCO<sub>2</sub>フラックスの季節一年々変動」
- 17) 山本 晋: 科研費研究報告会(1998) 「大気-森林生態系間のCO<sub>2</sub>交換量の年々変動の要因」

- 18) 三枝 信子、村山 昌平、山本 晋、近藤 裕昭:日本気象学会秋季大会(1998)  
「渦相関法によるCO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>Oフラックスの長期測定」
- 19) 山本 晋:岐阜大学流域環境研究センター第6回シンポジウム(1998)  
「タワー長期観測による森林生態系のCO<sub>2</sub>吸収能の評価」
- 20) 山本 晋、村山 昌平、三枝 信子、近藤 裕昭、三溝 啓:日本気象学会春季大会(1999)  
「大気-冷温帯落葉樹林間のCO<sub>2</sub>交換量の年々変動の要因」
- 21) 三枝 信子、村山 昌平、山本 晋、近藤 裕昭、西村 格:日本気象学会春季大会(1999)  
「CO<sub>2</sub>フラックス観測で求めた森林の総生産量と生態系純生産量」
- 22) 村山 昌平、山本 晋、三枝 信子、近藤 裕昭、三溝 啓:日本気象学会春季大会(1999)  
「冷温帯落葉広葉樹林における大気中CO<sub>2</sub>濃度の観測」
- 23) 近藤 裕昭、三枝 信子、山本 晋:日本気象学会春季大会(1999)  
「群落コンダクタンスを用いた蒸発効率の推定」
- 24) Z. barcza, L. Haszpra, I. Zsuzsanna, H. Kondo, N. Saigusa and S. Yamamoto:Conference of European Geophysical Society(1999)  
「Carbon dioxide flux monitoring over mixed agricultural terrain in Hungary」
- 25) N. Saigusa, S. Yamamoto, S. Murayama and H. Kondo:2nd IGBP Congress(1999)  
「Eddy covariance measurement system for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes over a cool-temperate deciduous forest」

## (2) 論文発表

- 1) 山本 晋、村山 昌平、近藤 裕昭:資源と環境、5、5261-271(1996)  
「森林と大気間の二酸化炭素フラックスの観測」
- 2) 山本 晋:NIRE Annual Report 1996、19(1996)  
「Research on the modeling of the carbon budget in a temperate forest by the field measurements of CO<sub>2</sub> flux」
- 3) 村山昌平:資源と環境、5、5、251-260(1996)  
「安定同位体比分析による温室効果気体の環境挙動の解明(総説)」
- 4) N. Saigusa, T. Oikawa, S. Liu and T. Watanabe:Proceedings of IGBP/BAHC-LUCC Joint Inter-Core Projects Symposium on Interactions between the hydrological cycle and land use/cover、96-99(1996)  
「Seasonal and inter-annual changes in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange between a grassland and the atmosphere」
- 5) 三枝 信子:日本生態学会誌、47(3)、321-326(1997)「陸上生態系の微気象解析」
- 6) T. Nakazawa, S. Murayama, M. Toi, M. Ishizawa, K. Otonashi, S. Aoki and S. Yamamoto:Tellus、49B、364-381(1997)「Temporal variations of the CO<sub>2</sub> concentration and its carbon and oxygen isotopic ratios in a temperate forest in the central part of the main island of Japan」
- 7) N. Saigusa, T. Oikawa, S. Liu:Agricultural and Forest Meteorology、89、131-139(1998)  
「Seasonal variations of the exchanges of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O between a grassland and the atmosphere: An experimental study」
- 8) 山本 晋、村山 昌平、三枝 信子、近藤 裕昭、西村 格:資源と環境、7(2)、73-81(1998)

「森林生態系の二酸化炭素吸収・交換量についての一考察」

○9) 三枝信子:資源と環境, 7(2), 63-71(1998) 「陸上生態系のモデル化」

○10) S. Yamamoto, S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo: Tellus, 51B, in press (1999)

‘Seasonal and interannual variation of CO<sub>2</sub> flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan’

11) 三枝 信子:地球環境調査事典(陸上編), (投稿中) 「植物群落の水・熱・CO<sub>2</sub>フラックス測定法」

(3) 出願特許、受賞等

なし