

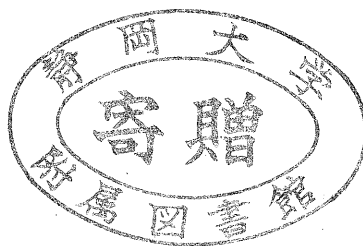
---

# 森林を利用した温暖化ガス固定対策における 土壌呼吸の評価に関する研究

---

(研究課題番号 06556023)

平成6年度～平成8年度科学研究費補助金（基盤研究A(1)）  
研究成果報告書



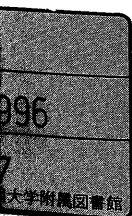
静岡大学附属図書館



平成9年3月

030850625 2

研究代表者 角 張 嘉 孝  
(静岡大学農学部)



## はしがき

本報告書は、文部省科学研究補助金（基盤研究（A）、平成6年度から平成8年度）による「森林を利用した温暖化ガス固定対策における土壌呼吸の評価に関する研究」の成果をとりまとめたものである。

本報告書は 第Ⅰ部 研究の社会的背景、準備状況など、 第Ⅱ部 土壌呼吸測定装置の試作、 第Ⅲ部 土壌呼吸測定法の検討、 第Ⅳ部 森林を利用した炭酸ガス固定システム で構成される。これらは研究コンセプトのなかで、それぞれ独立しながらも相互に関連して構成されている。

### 研究組織

研究代表者：角張嘉孝（静岡大学農学部・教授）

研究分担者：半田 繁（小糸工業株式会社・機電事業部環境調節技術部第4技術グループ・課長）

守谷孝志（小糸工業株式会社・機電事業部環境調節技術部第4技術グループ・係長）

実験補助者：石原健一（静岡大学農学部森林資源科学科平成6年度卒業生）

吉倉利英（静岡大学農学部森林資源科学科平成7年度卒業生）

ライ徳発（静岡大学農学部森林資源科学科平成7年度卒業生）

### 研究経費

平成6年度	9、500	千円
平成7年度	900	千円
平成8年度	900	千円
計	11、300	千円

### 研究発表

講演：

Kakubari, Y. and Odaka N.: Eco-physiological approach to the arid-land afforestation. Intern. Conf. Desert Tech. III 69-72, 1995

角張嘉孝・半田繁・守谷孝志：土壌呼吸測定装置の試作，第106回日本林学会大会講演要旨集，p. 673, 1995

角張嘉孝・吉倉利英・守谷孝志・半田繁：土壌呼吸測定装置の試作（Ⅱ），第107回日本林学会大会講演要旨集，p. 186, 1996



著書：

角張嘉孝（分担）：森林科学論 木平勇吉編書 朝倉書店 1994

角張嘉孝（分担）：大規模緑化にともなう気候変化に関する調査 新エネルギー・産業技術  
総合開発機構、地球産業技術研究機構 162pp,1995

角張嘉孝（分担）：植林による CO<sub>2</sub> のグローバル固定化システムーCO<sub>2</sub> 対策としての砂漠  
緑化技術調査研究会報告書 地球環境産業技術研究機構・日本ガス協会, 1995

角張嘉孝（分担）：大規模緑化にともなう気候変化に関する調査、新エネルギー・産業技  
術総合開発機構、地球環境産業技術研究機構 231 p,1996

論文：

Kakubari, Y.: The present status and problems of Japanese beech forest. Int. Sympo. Restoration  
of Nat. For., Fujinomiya, 95-111, 1995

Kakubari, Y.: Significance of afforestation of desert and its evaluation as a countermeasure  
against carbon dioxide problem. Energy convers. Mgmt vol 36 no.6-9 923-926, 1995

Kakubari, Y.: Technical problems from view point of agriculture in greening on an arid land  
region. (Energy convers. Mgmt vol 36 no.6-9 939-942 ), 1995

Kakubari, Y.: Afforestation of arid land for carbon fixation. 沙漠研究 4 153-160, 1995

小島紀徳・松田 智・角張嘉孝・小宮山宏：要素技術から観た CO<sub>2</sub> 固定のための砂漠緑  
化、第 11 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 479-484, 1995

Kojima, T., Y. Kakubari, S. Matuda and H. Komiyama: Afforestation of arid land for carbon fixa-  
tion. Jour. Arid Land Stud. 4, 153-160, 1995

Kojima, T., Y. Kakubari and H. Komiyama: Significance of afforestation of desert and its  
evaluation as a countermeasure against carbon dioxide problem. Energy Convers.  
Mgmt Vol. 36 6-9 923-926, 1995

Kakubari, Y., S. Kato and H. Komiyama.: Technical problems from view point of agriculture in  
greening on an arid land region. Energy convers. Mgmt vol 36 No.6-9 939-942, 1995

Kakubari, Y., Odaka, N.: Ecophysiological approach to the arid-land afforestation.  
沙漠研究 5S 69-72, 1995

Han, Q. and Kakubari, Y.: Diurnal and seasonal courses of photosynthesis, transpiration and  
water use efficiency of apple and black locust seedlings in different soil water conditions.  
Jap. Soc. Revegetation Tech. vol 21(2) 114-123, 1995

Han, Q. and Kakubari, Y.: Diurnal and seasonal courses of photosynthesis, transpiration and  
water use efficiency of Japanese cypress and Japanese red pine seedlings in different soil  
water conditions. Jap. Soc. Revegetation Tech. vol 21(4) 199-211, 1995

Han, Q. and Kakubari, Y.: Drought-dependent response of photosynthesis, transpiration and  
water use efficiency of Japanese cypress and Japanese red pine seedlings.

J.For.Res. 1(2):67-72, 1996

Kakubari, Y.: Linkage of physiological processes and ecosystem processes by integrating gas exchange and eco-physiological computer simulation model.

Jour. Sustain. For. (in press)

総説：

角張嘉孝：地球環境のフロンティア 1-9 静岡新聞 (1995)

## I はじめに

### 【研究の社会的背景】

地球温暖化、熱帯林の減少、砂漠化などの地球規模の環境問題において、森林が直接・間接に大きく関わっている。ここで取り上げる温暖化ガス（主として炭酸ガス）濃度の上昇問題については、1992年のリオデジャネイロにおける「地球サミット」において、西暦2000年までにその排出量を'90年レベルにすることが世界的に合意された。この解決手段としては炭酸ガス発生量の削減と炭酸ガス固定に限定される。これらの対応策の実行はいずれも容易ではない。核エネルギーに関しては合意形成が容易ではない。技術開発の効率化や省エネにも限界がある。

希薄な炭酸ガスを固定する方法が種々検討された結果、その規模が膨大で、固定の効率がよいこと、固定の期間がながいことなどの理由により、森林の造成が生態的にも安全で、持続可能な手段であることが各方面から評価されている。したがって林学分野として、森林における炭酸ガス固定の資料を早急に提供する必要性が極めて高い。

### 【研究の準備状況】

いろいろなタイプの森林における炭酸ガス収支に関わる項目を検討した結果、①土壌を含めた地下部の呼吸量に関する情報が非常に少ないこと。②研究者による測定値のバラツキが非常に大きいこと。③森林全体の炭酸ガス固定量の推定精度は土壌呼吸の精度に依存していることがわかった（研究業績：18）。したがって森林の炭酸ガス固定能力を評価するためには、土壌呼吸を野外で精度良く測定できる機器の開発が急務であることが認識できる。

### 【研究の目的】

森林における炭酸ガス固定能力を評価するため、これまで未解明部分が多かった土壌呼吸に注目し、その測定法の確立および森林のタイプごとに炭酸ガス収支に占める量的割合を明らかにする。あわせて、森林のタイプごとの炭酸ガス固定能力の基本資料を提供する。

ここでは主として、つぎの3点にしばって研究を進める。

- ①自然に近い状態のまま、野外で土壌呼吸が測定できるシステムを試作する。
- ②高性能機器は膨大なデータを出力するので能率良いデータ処理が可能な計測システムを開発する。
- ③本システムをいろいろな森林のタイプが得やすい富士山に運び、亜高山帯、落葉広葉樹林帯および山麓の照葉樹林において土壌呼吸を測定しその実用性を確かめる。その結果、土壌呼吸資料の充実が計られ、森林の炭酸ガス固定に占める土壌呼吸の位置づけが評価できる。

### 【研究分野における意義】

森林における炭酸ガス固定量を推定するのに現在ふたつの方法がある。ひとつは炭酸ガスの収支項目を忠実に調べる方法（たとえば角張,1992）と炭酸ガスの最終的な転形物である幹の材積（たとえば井上,1991）で評価する方法である。いずれの方法でも、森林全体の炭酸ガス固定量推定のためには土壌呼吸の推定が欠かせない。

これまで、土壌呼吸の測定は密閉容器を林床（地表面）にかぶせKOH溶液に炭酸ガスを吸収させるアルカリ吸収法（単に密閉法とも呼ばれる）が主流だが、Witkamp(1966)が指摘したようにKOH溶液によって炭酸ガスが際限なく土壌空気が吸い上げられ、測定値が過大になる傾向がある。ここに開発される機器は、土壌表面に設置したチェンバーに若干の空気を流がしながら（1時間に数分間だけ数リッター流す）測定するもので、極めて自然に近い状態で土壌呼吸の測定が可能である。したがって森林における炭酸ガス固定能力をこれまでに比べ推定精度が向上すると期待される。

### 【研究成果・状況・実績】

本研究組織は文部省科学研究費補助金によってすでに軽量小型な高性能光合成蒸散測定装置（研究実績：13）や半乾燥地における地表面蒸発測定装置の開発・製品化（研究実績：2）を行った実績があり、工業所有権および実用新案登録などを取得した実績がある。また研究代表者はドイツに留学したおり、土壌呼吸の測定装置を試作し、現地でブナの根および土壌呼吸を測定した経験がある（研究実績：15）。

### 【研究実績】

- 1)森林は、炭酸ガスのシンクか？ソースか？（II）．世界の森林の場合 第104回 日本林学会大会講演要旨集、148p 1993
- 2)半乾燥地における地表面蒸発測定装置の試作、第4回日本砂漠学会講演要旨集、53-54p 1993
- 3)新しい土壌呼吸速度の測定法 第42回日本林学会中部支部大会講演 1993
- 4)自然のエネルギーを利用した炭酸ガス対策技術の現状と将来展望・森林資源 日本機械学会 第3回環境工学総合シンポジウム講演論文集、パネル討論 1993
- 5)Description of productive structure and function in forest by computer simulation model and climatized gas exchange chamber Int. Work.Forest Dynamics and its Mechanisms in Tsukuba, 12p 1993
- 6)Primary productivity changes on the permanent quadrats of natural beech (*Fagus crenata*) forests in the Naeba Mountains. Int. Work. Forest Dynamics and its Mechanisms in Tsukuba, 39p 1993
- 7)スーパーポロメーターと生態・生理学的シミュレーションモデルを用いたブナ林分蒸散量の推定法 日本林学会誌 74(4)263-272 1992

- 8)森林は、炭酸ガスのシンクか？ソースか？ (I) 日本の森林の場合、第103回  
日本林学会大会講演要旨集、111p 1992
- 9)林業生産への影響予測、地球環境変化に伴う農林水産生態系の動態解明と予測技術の開発、農林水産技術会議事務局・農業環境技術研究所、27-34p 1992
- 10)The present status and problems of Japanese beech forest Int.Sympo. Restoration of  
Natural Forest, Fujinomiya, 24-25p 1992
- 11)Primary productivity changes for a fifteen-year period in a natural beech (*Fagus crenata*)  
forest in The Naeba Mountains 日本林学会誌 73(5) 370-374 1991
- 12)Oekophysiologische und biometrische Untersuchungen in einem Buchenbestand (*Fagus*  
*sylvatica* L.) des Sollings als ein Beitrag zur Waldschadens-forschung. B.F.W. 18,  
82p 1991
- 13)蒸散量測定システムの試作とその実用化 科学研究費補助金（試験研究）研究  
成果報告書、28p 1990
- 14)Diurnal and seasonal fluctuations in the bark respiration of standing *Quercus acutissima*  
trees at Nakaizu, Japan. Ann.Scie.For. 529-531 1989
- 15)Der CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Gaswechsel von Buchen im Solling als Indikator fuer latente Schadstoff-  
wirkungen. Bundesministerium fuer Forschung und Technologie, 74S. 1989
- 16)Diurnal and seasonal fluctuations of bark respiration of standing *Fagus sylvatica* trees at  
Solling, West Germany. J.Jpn.For.Soc, 70:64-70p 1988

#### 著書

- 17)植林による炭酸ガスのグローバル固定化システム、炭酸ガス対策としての砂漠緑化技  
術調査研究会中間報告書地球環境産業技術研究機構・日本ガス協会、115p,  
123-126p, 144-157p, 182-188p 1993
  - 18)温室効果ガス（二酸化炭素）安定化のための森林面積純増目標（二酸化炭素吸収源の適  
正目標）に関する調査報告書 日本野生生物研究センター、89p 1992
  - 19)樹木の生理・生態 「朝倉造林学」（川名 明他と共著）朝倉書店 1992
  - 20)ブナの光合成・呼吸・蒸散、ブナ林の現存量・生産量・総生産量、生理・生態学的シミ  
ュレーションモデルによる生産構造・機能の解析、森林の衰退問題、「ブナ林の自然環  
境と保全」ソフトサイエンス、398p 1991
- 半田 繁（小糸工業）：蒸散量測定システムの試作とその実用化 科学研究費補助金  
（試験研究）研究成果報告書、28p 1990 工業所有権（番号 1493336）
- 守谷孝志（小糸工業、係長）野外において林木個体の二酸化炭素収支を計測するための装  
置 名古屋大学演報 NO.9、32-36 1987 実用新案登録（57-082991）

## Ⅱ・土壌呼吸測定装置の試作

### 1. 概要

本装置は、森林を利用した地球温暖化ガス固定対策における土壌呼吸の評価に関する研究を行なうため開発されたもので、土壌呼吸量および根や樹皮からの炭酸ガスフラックス、ならびにマングローブ林の気根の炭酸ガス／水蒸気フラックスを差動型のチェンバー法により高精度に測定するものです。森林内の土壌の呼吸量および根、樹皮からの炭酸ガスフラックスを測定する場合は、バッチ式通気法（5+1 台または 3+3 台のチェンバーに間欠的に順次通気する方法）で、通気流量と炭酸ガス濃度絶対値の変化から炭酸ガス収支を計算する。

本装置は、チェンバー（土壌呼吸用）および流量設定流路切替ユニット、ガス分析ユニット、計測記録ユニット、システムコントローラ、ラックなどから構成される。チェンバー内温度や通気流量はレコーダから、また、炭酸ガス濃度、水蒸気濃度は分析計からレコーダを経由してパソコンに取り込まれ、演算、表示、記憶される。流路切り替えおよび流量設定切り替え信号はレコーダの警報接点を利用して出力する。測定データはチェンバー毎にテキスト形式でファイルされるので、エクセルなど市販の表計算ソフトで処理が可能である。

### 2. 仕様

#### 2.1 機能・性能

方式	差動型バッチ式通気法（5 + 1 系統または 3 + 3 系統） 差動型連続式通気法（1 + 1 系統）
----	---

注) バッチとは？：間欠的に通気することにより、試料を極端な乾燥から守り、できるだけ自然に近い環境下でガス交換を測定しようとする方法。

チェンバー	土壌呼吸用	内寸 200Wx100Dx10H、容積 200ml、温度、湿度成行き
	樹皮呼吸用	（別途作成する必要がある）
	気根用	（別途作成する必要がある）

通気流量	サンプル側	範囲：2～5LM、精度：±3%FS
	比較側	範囲：2～5LM、精度：±3%FS
	コンピュータからの H/L 切り替え信号により設定値を切り替え可能	

#### 切替インターバル

1～1440 分、チャンネル毎に可変（バッチ式通気法の場合）

#### 計測項目

測定月日時分			
サンプル側チェンバー内温度	1～5	熱電対	0～50℃ ±0.5℃



比較側チェンバー内温度	熱電対	0～50℃	±0.5℃
サンプル側通気流量	マスフローコントローラ	0～10LM	±1.5%FS
比較側通気流量	マスフローコントローラ	0～10LM	±1.5%FS
炭酸ガス濃度絶対値	赤外線分析計	0～1000ppm	±1%FS
炭酸ガス濃度差	赤外線分析計	±50ppm	±1%FS
水蒸気濃度絶対値	赤外線分析計	0～3%	±1%FS
水蒸気濃度差	赤外線分析計	±1%	±1%FS
設定項目	ファイル名、実験名、実験者、コメント 大気圧、葉面積、集録回数		
演算項目	炭酸ガスフラックス	±100	μmol/m <sup>2</sup> /s
	水蒸気フラックス	0～10	mmol/m <sup>2</sup> /s
	炭酸ガス収支積算量	0～1000	μmol/m <sup>2</sup>
	水蒸気収支積算量	0～100	mmol/m <sup>2</sup>
電源容量	AC100V±10%、60Hz、300VA (3.0A)		

## 2.2 機器構成

- (1) チェンバー 小糸工業 PAC/S形 6台  
形式: 土壤呼吸用、外形寸法: 220x120x35H(mm)、切り欠き穴: 5φ (No.1～5のみ)  
材質: 透明アクリル樹脂 (本体 10t、フタ 15t)、SUS304 (仕切板 1.0t)  
パッキン: CRスポンジ 5x7mm  
クランプ: フックハチ錠 (タキロンC-1075)、材質: SUS-304  
接続口径: φ 6/4xPT1/8、樹脂製ハーフエيونルボ x4 個、エيونチ x3 個、センサ用 PT1/8x1 個  
排気弁 形式: チャッキ弁 (ゴム製弁付きケース材質: PE) x1 個  
送気配管 材質: PTFE、口径: φ 6/4、長さ: 5m x1 本  
サンプル配管 材質: PTFE、口径: φ 6/4、長さ: 5m x1 本
- (2) 流量設定流路切替ユニット 小糸工業 MC-F+L/S形 1台  
マスフローコントローラ レンジ: 10LM、制御範囲: 2～70%FS、精度: 1.5%FS、差圧: 0.25 kg/cm<sup>2</sup> 専用電源、接続ケーブル、表示部、設定部共 x2 台  
エアープンプ 形式: ダイアラム式、最大流量: 25/28L/min、最大吐出圧: 1.5kg/cm<sup>2</sup>、  
電源: AC100V±10%、50/60Hz、40W、0.95/1.0A 接続: PT1/4 x1 台  
エアークリスタ 濾材: 濾紙、ケーシング: ポリカーボネート x1 個 + (スベア 2 個)  
背圧調整弁 材質: AL、調整範囲: 0.05～1.0kg/cm<sup>2</sup>、オリフィス: 4φ、接続: Rc1/4x1 個  
超小形圧力計 レンジ: 0-1kg/cm<sup>2</sup>、接続: PT1/4、ゲージ径: 40φ x1 個

デイスボ-サブルフィルタ

濾材:PTFE、ケーシング:PP x2 個+(スベ74 個)

送気用電磁弁 直動式二方弁、ワフイス4 φ、定格電圧:DC12V、消費電力:7W、  
接続:Rc1/4 x6 個

切替用三方電磁弁 直動式三方弁、ワフイス3x3.5 φ、定格電圧:DC12V、消費電力:11W、  
接続:Rc1/4 x1 個

サンプル用電磁弁 直動式二方弁、ワフイス1.6 φ、電圧:DC12V、消費電力:4W、接続:Rc1/4  
x6 個

切替用三方電磁弁 直動式三方弁、ワフイス1.8 φ、電圧:DC12V、消費電力:4W、  
接続:Rc1/4 x5 個

サンプル用エアフィルタ 形式:デイスボ-サブル式、材質:PTFE x6 個+(スベ712 個)

サンプリングポンプ

形式:ダイヤフラム式、最大流用 2.5L/minx2 系列、

電源電圧:AC100Vx1 台

パージメータ 形式:ニードル弁付き、流量:0.2~2L/min x2 本

CO<sub>2</sub>吸収器 形式:KF200、30 φ x95、ソーダライム:試薬1級、中粒

乾燥剤容器 形式:KF200、30 φ x95、シリカゲル:試薬1級、中粒

直流電源 出力電圧:DC12V、容量:50W、入力電圧:AC100V、1.5A x1 台

### (3)ガス分析ユニット

赤外線分析計 BINOS 100/4P 形 1 台

方式:NDIR 2Ch 絶対値/差動値型、

測定範囲:Ch1 H<sub>2</sub>O Abs. 0~3% /H<sub>2</sub>O Diff. 0~±1%

Ch2 CO<sub>2</sub> Abs. 0~1000ppm/CO<sub>2</sub> Diff. 0~±50ppm

直線性:<1%FS、分解能:<1%FS

ゼロ点ドリフト:<2%FS per week、感度ドリフト:<1%MV per week

信号出力:0-1V and 0-20mA or 0.2-1V and 4-20mA

インターフェース:RS-232C or RS485(オプション)

表示:4-1/2 桁 LED、応答時間(T90):15 秒、ガス流量:0-1.5L/min

最大圧力:<1500hPa、流量の影響:なし、気圧の影響:<0.1% per hPa

使用温度範囲:+5~+45℃、温度の影響:<0.2% per K

電源:11-30VDC またはパワーサプライ(230/115V±10%,50/60Hz±2%)

消費電力:16W (24VA)

寸法:105x105x360mm (ハウジング:1/4-19",3HU)

重量:約 5kg

#### (4)記録計測ユニット

レコーダ 形式： $\mu$  R1800、点数および測定周期：18点 2.5秒  
記録紙幅：180mm、チャートスピード：1～1500mm  
付加仕様：RS-422Aインターフェース、内蔵アラーム出力リレー（12点）、  
電源：AC90～132V、32VA x1台  
変換器 SEKISUI SI-20 RS-232C/RS-422A用 x2台  
熱電対温度センサ 形式：MES-1103/S、素子：Kタイプ、使用温度範囲：-20～70℃  
保護管：1 $\phi$  x150L, SUS316、スリーブ：7 $\phi$  x40L、  
補償導線：PVC被覆, 10mx6本

#### (5)システムコントローラ

ノート形パソコン EPSON DIRECT Endeavor NT-500T CPU:i486SX、  
33MHz、メインメモリ：4MB、外部メモリ：FD 3.5インチx1、  
RAMドライブ 1.44MB、HDD 130MB、ディスプレイ：白黒液晶、  
OS：DOS/V(MS-DOS V6.2、MS-Windows V3.1) x1台  
RS-232C ケーブル リバース、3m (25P $\times$ 9P $\times$ 変換コネクタ付)x1本

#### 計測制御プログラム

機能：分析計の設定と測定値入力（オンライン操作は含まない）  
レコーダの条件設定と測定値入力  
各種演算、データ表示、テキストファイルでの記憶  
警報接点による流路切替および流量設定値切り替え用リレー出力  
テスト運転プログラム  
言語：BASIC/98

(6)ラック 形式：3段式カート、キャスター径：100 $\phi$ 、塗装：焼付け塗装、x1台  
寸法：630x430x755H、最大過重：100kg、自重：18kg

### 2.3 別途事項

チェンバー（樹皮用、気根用）および接続配管、バッファタンク  
電源引き込み（ELBおよびE3付き）  
校正ガス（ゼロガス、スパンガス、減圧弁）  
データ処理ソフト（表計算ソフト）

## 3. 測定原理

### 3.1 連続通気式測定法の原理

連続通気式で炭酸ガス収支、水蒸気収支測定を測定する場合、濃度差と通気流量の測定

値（瞬時値または数回の平均値）から収支速度を求める。

たとえば、炭酸ガス濃度差（ $C_1 - C_0$ ）、通気流量 $Q$ で、測定面積が $A$ のとき、単位面積当りの呼吸速度 $R_r$ は次式で表される。

$$A \cdot R_r = (C_1 - C_0) \cdot Q$$

### 3.2 バッチ式測定法の原理

バッチ式で炭酸ガス収支、水蒸気収支測定を測定する場合、バッチ測定期間中の濃度差の平均値と通気流量の平均値から収支速度を求める。

たとえば、炭酸ガス濃度差の平均値 $\Sigma (C_1 - C_0) / n$ 、通気流量の平均値 $\Sigma Q / n$ で、測定面積が $A$ のとき、単位面積当りの呼吸速度 $R_r$ は

$$A \cdot R_r = \Sigma (C_1 - C_0) / n \cdot \Sigma Q / n$$

濃度差（ $C_1 - C_0$ ）のピーク値は、チェンバー内空気容積 $V_a$ （チェンバー内容積 $V$ －土壌固形分容積 $V_s$ 、またはチェンバー容積 $V_x$ 空隙率 $k$ ）と呼吸速度 $R_r$ と計測インターバル $T_i$ で決まり、チェンバー内空気容積が小さく、呼吸速度が大きく、計測インターバルが長い程ピーク値は高くなる。

$$(C_1 - C_0) = (R_r \cdot T_i) / V_a$$

パージ時間 $T_p$ はチェンバー内空気容積 $V_a$ と通気流量 $Q$ によりきまり、完全混合の場合の99%応答を基準とすると、時定数（ $V_a / Q$ ）の約5倍程度必要であり、これは土壌の空隙率 $k$ と流量 $Q$ の $H/L$ 切り替えにより変化する。

$$T_p \cong 5 \times (V_a / Q)$$

チェンバー入口濃度が前回より変化している場合、差動形分析計の場合、比較側チェンバーとの濃度差で測定するため誤差を生じますがこれは、前回と今回の濃度差にチェンバー内の空気容積を掛けることにより補正することが可能である。

$$\alpha = V_a \times (C_{0n} - C_{0n-1})$$

空隙率 $k$ は、測定のはじめに炭酸ガスフリー空気 $Q_f$ を流し、出口の炭酸ガス濃度の変化速度 $dC / dt$ （時定数 $T_e$ ）をモニタすることにより推定可能です。なお、空隙率はチェンバー内の水分量の変化とともに変化することが考えられるので補正が必要になる。

$$T_e = V_a / Q_f \quad V_a = k \times V$$

### 3.3 土壌呼吸用チェンバーの応答速度の計算について

#### < 計算条件 >

- (1) チェンバ内寸 200Lx100Wx10H(mm)  
断面 100Wx10H=10(cm<sup>2</sup>)、容積 200(ml)
- (2) チューブ寸法 4/6 φ (mm)x5(m)  
断面 4x4xPI/4=0.1257(cm<sup>2</sup>)、容積 63(ml)
- (3) 通気流量 2~5 (l/min)

#### < 計算例 >

- (1) チェンバーが空で通気流量=2(l/min)と仮定したとき

- a. チューブの輸送遅れ

$$2000(\text{cc/min}) / 0.1257(\text{cm}^2) = 15,910(\text{cm/min}) = 265(\text{cm/sec})$$

$$500(\text{cm}) / 265(\text{cm/sec}) = 1.89(\text{sec})$$

- b. チェンバー内がピストン流と仮定した時の置換時間

$$2000(\text{cc/min}) / 10(\text{cm}^2) = 200(\text{cm/min}) = 3.33(\text{cm/sec})$$

$$200(\text{cm}) / 3.33(\text{cm/sec}) = 6(\text{sec})$$

- c. チェンバー内が完全混合流と仮定した時の 90% 応答時間

$$6(\text{sec}) \times 2.3 = 13.8(\text{sec})$$

- (2) チェンバー内の空隙率が 30% で通気流量=2(l/min)と仮定したとき、上記の各時間はそれぞれ 30% になる。

- a. チューブの輸送遅れ

$$1.89(\text{sec}) \times 30\% = 0.567(\text{sec})$$

- b. チェンバー内がピストン流と仮定した時の置換時間

$$6(\text{sec}) \times 30\% = 1.8(\text{sec})$$

- c. チェンバー内が完全混合流と仮定した時の 90% 応答時間

$$13.8(\text{sec}) \times 30\% = 4.14(\text{sec})$$

※記録計の測定速度(2.5sec)、分析計の応答速度(5~10 秒)から判断して応答時間が1桁程度短い。したがって、配管の長さが短い場合は、通気流量を少なめに設定するか、チェンバー出口に数リットルのバッファタンクを設けて応答速度を後らせる必要がある。

※通気流量を 2~5 l/min にし、空隙率 100% と 30% の場合、下表のようになる。

空隙率 (%)	通気流量 (l/min)	チューブの輸送遅れ (sec) at 5m	置換時間 (sec)	90%応答時間(sec)
100	2	1.89	6.0	13.8
	5	0.76	2.4	5.5
30	2	0.57	1.8	4.1
	5	0.23	0.7	1.7

#### 4. 動作概要

##### 4.1 メニュー画面表示の概要

1. SET 一般的な設定事項はSET画面
2. SET-UP レコーダの設定はSET-UP画面
3. MEAS. 測定の実行はMEAS.画面

##### SET-UP 画面のサブメニュー

1. レコーダの設定値を読み込み、画面に表示
2. レコーダの設定値を読み込み、FD のファイルに記憶
3. FD のファイルの設定値を読み込み、画面に表示
4. FD のファイルの設定値を読み込み、レコーダに設定
5. 終了

※レコーダの設定値は初回は記録計側で設定し、パソコン側にアップロードし、次回からはパソコン側からダウンロードするだけで設定が可能。

##### 4.2 データファイル形式の概要

(ファイルインフォメーション部)

ファイル名	12 文字 (拡張子含む、MS-DOS 準拠)
実験名称	20 文字
実験者名	20 文字
実験日	20 文字
気圧	500~1500hPa
コメント	80 文字

(測定データ部)

データ名	半角 4 文字以内
単位名	半角 4 文字以内

測定データ                    4桁（符号、小数点共）  
                                カウント3桁、チャンバNo

単位名を見やすくするため、H<sub>2</sub>O は水蒸気圧（hPa）であらわし、炭酸ガスの単位は vpm  
で表示する。

REM Date Time L.A PAR A.T L.T F.R iHP dHP iCC dCC P.R T.R S.C  
i.c  
m/dd h:mm cm2 uM/- degC degC ml/m hPa hPa vpm vpm uM/- mM/- M/- vpm  
& & ##### ##### ##### ##### #####.## ##.## ##### #####.##  
##### ##.## ##.## ##.## #####

## 5. 土壌呼吸測定装置の性能確認実験

差動型分析計を用いた連続測定モード（MODE3 1+1）

### (1)目的

差動型分析計を用いた連続測定モード(MODE3 1+1)の測定確度および応答性の確認を行なう。

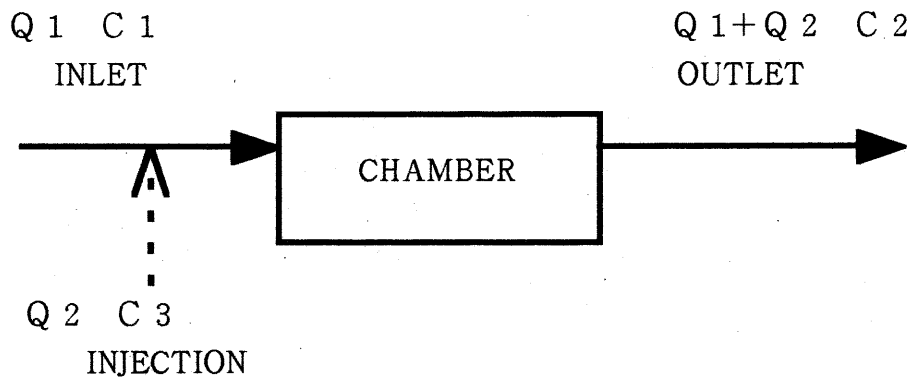
一般に、開放式チェンバー法では出入口ガス濃度差と通気流量がそれぞれ正確に測定されていればガス交換速度は正確に測定できるとされている。しかし、要素ごとの校正ではガスの漏れや分析計の応答速度まで含めた装置としての測定確度や応答性の確認ができない。

そこでガスインジェクション法を用いて既知濃度、既知流量のガスを注入することにより、装置としての測定確度や応答性の確認をすることにした。なお、実験に際して分析計および流量計はあらかじめ校正しておくか、別の分析計および流量計で同時に測定する必要がある。

### (2)方法

実験には図-1 に示すガスインジェクション装置を使用した。これは、ガス分割器、背圧調整弁、マスフローコントローラなどを用いてゼロガス（N<sub>2</sub>）とスパンガス（438ppm CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>balance）を一定の比率で混合し、一定流量の混合ガスを呼吸測定装置に注入するものである。

チェンバー入口にガスを注入した場合の炭酸ガス収支式はつぎのようになる。



Q 1：通気流量                      Q 2：ガス注入量  
C 1,2：入口、出口濃度          C 3：注入ガス濃度

$$Q 1 \cdot C 1 + Q 2 \cdot C 3 = (Q 1 + Q 2) \cdot C 2$$

$$Q 1 \cdot (C 1 - C 2) = Q 2 \cdot (C 2 - C 3)$$

$$C 1 - C 2 = (C 2 - C 3) \cdot Q 2 / Q 1$$

C 3 = 0 のとき

$$C 1 - C 2 = C 2 \cdot Q 2 / Q 1$$

よって、N<sub>2</sub> ガスを Q 2 だけ注入した場合、出入口濃度差 C 1 - C 2 は、出口濃度 C 2 に流量の比 Q 2 / Q 1 をかけた数値に等しくなる。

装置の測定確度はこの C 1 - C 2 を C 2 · Q 2 / Q 1 と比較することにより確認できる。また、応答性は、ガスの注入を停止したときの C 1 - C 2 の応答カーブから判断できる。

### (3)結果

図-2 および表-1 に装置の測定確度の測定結果を示す。図の横軸は通気流量 Q 1 = 2, 3, 4, 5 l/min で、縦軸は出入口濃度差 C 1 - C 2 ppm および計算から求めた C 2 · Q 2 / Q 1 ppm の値で、Q 2 = 20, 200, 400 mml についてそれぞれプロットしてある。

測定確度（計算値に対する測定値の%）は、測定データをランダムに抜きだしてみると、測定下限に近いと考えられる Q 2 = 20 mml（C 1 - C 2 = 1 ~ 5 ppm）において 60 ~ 90%、測定上限と考えられる Q 2 = 200, 400 mml（C 1 - C 2 = 15 ~ 65 ppm）において 90.5 ~ 99.6%であった。

図-3 に装置の応答性の測定結果を示す。図の横軸は時間であり、1 目盛りが 10sec である。

縦軸は出入口濃度差 C 1 - C 2 ppm であり、測定上限の濃度差の状態からガスの供給を止めたときの応答カーブである。30 秒でほぼ完全に応答していることがわかる。



#### (4) 考察

測定精度は測定値のくわしさの尺度であり、この装置では主に分析計の性能できまる。今回の実験では $\pm 0.5\text{ppm}$  程度の精度が得られている。

測定確度は測定値の確からしさの尺度であり、真値からのずれを表す。この種の装置では従来から分析計の確度と流量計の確度から装置の確度を推定していた。ガスインジェクション法はガスのリークや分析計の応答までを含めた装置全体の測定確度を確認することができ、今回の実験により、ガスインジェクション法が精度を確認する手法として有効であることがわかった。

ただ、今回の実験では入口ガスとして室内空気を用いたため入口ガス濃度の時間変動がみられた。

本装置の場合は差動形分析計で数分おきに絶対値モードに切り換えて入口ガス濃度を測定しており、個々の測定データの濃度差は精度よく測れていても、確度の計算に使う絶対値濃度が真値とずれている場合がある。したがって、精密に測定確度を確認する場合は入口ガスとしてスパンガスか既知濃度のエアバフファタンクの空気を使用するのがよいと思われる。

応答性は反応カーブが測定対象のものか、装置の特性かを見極めるために必要なものである。ガスインジェクション法でガスの注入を停止することにより容易に装置の応答性を確認できることがわかった。

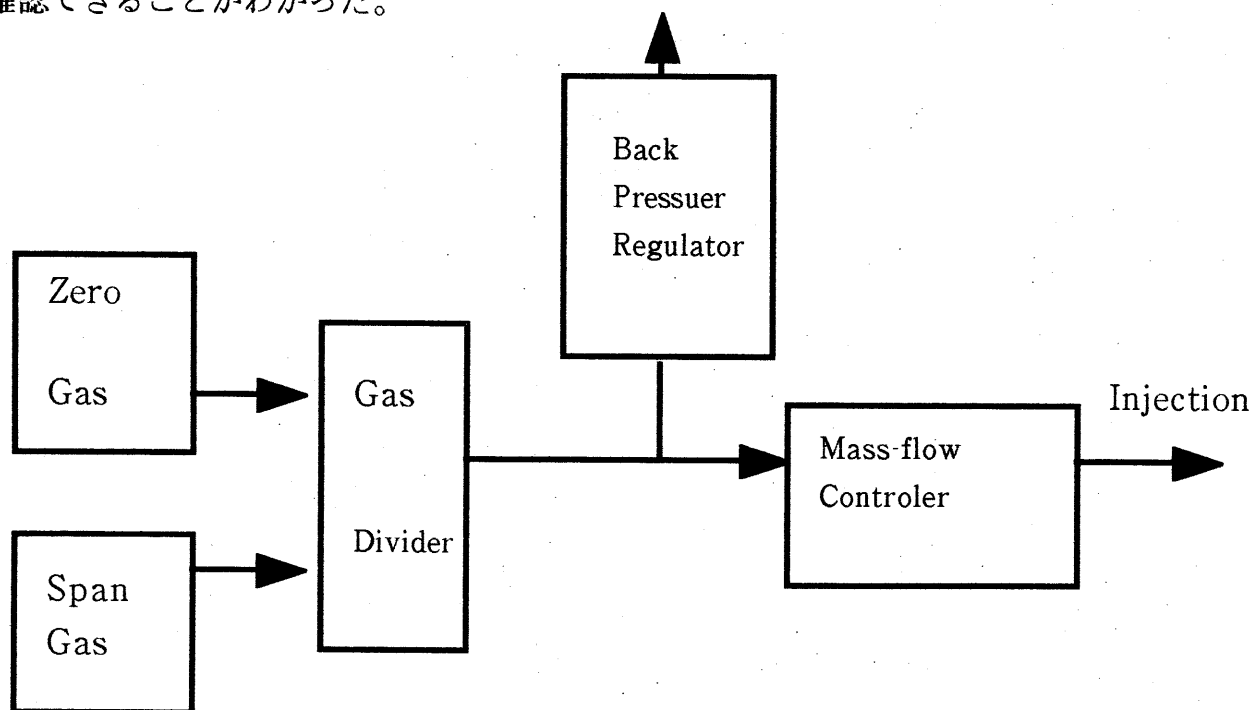


図-1 ガスインジェクション装置のブロック図

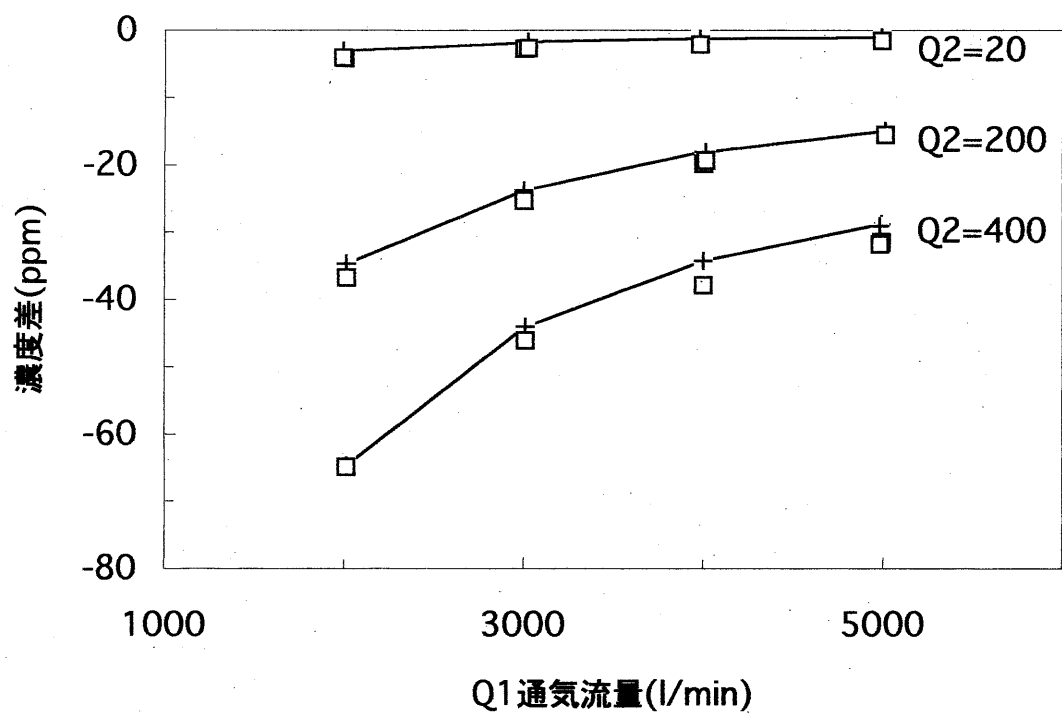


図-2 土壌呼吸測定装置性能確認試験（測定確度）

□  $-(C1-C2) + C2 \cdot Q2/Q1$

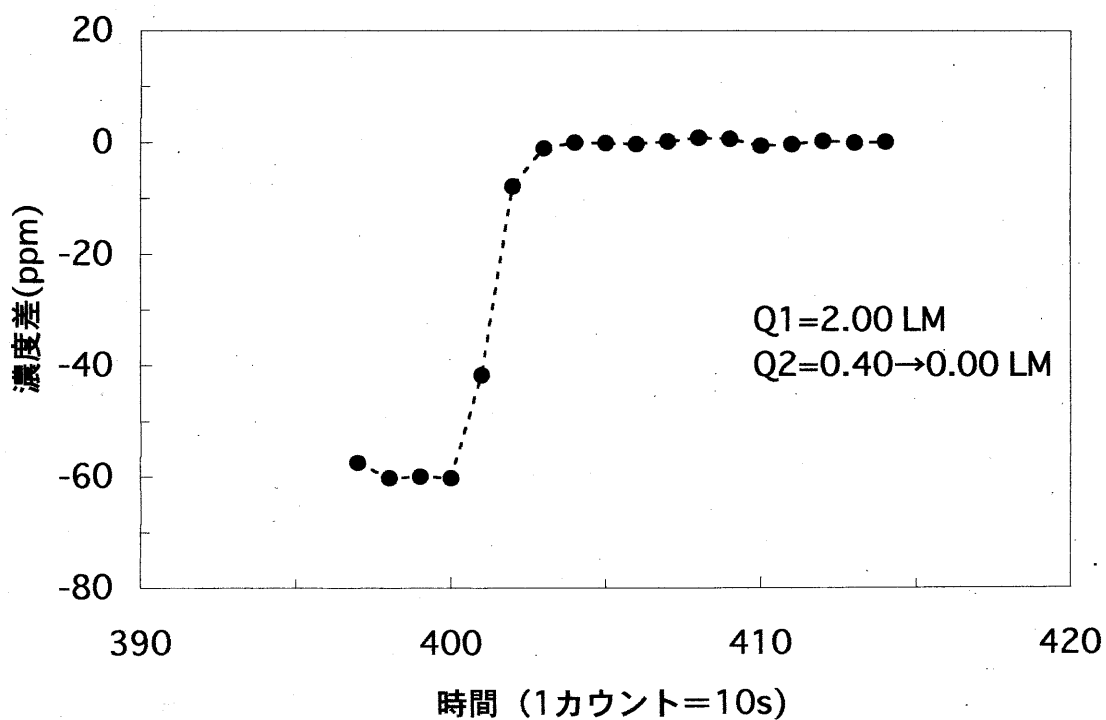


図-3 土壌呼吸測定装置性能確認試験（応答性）

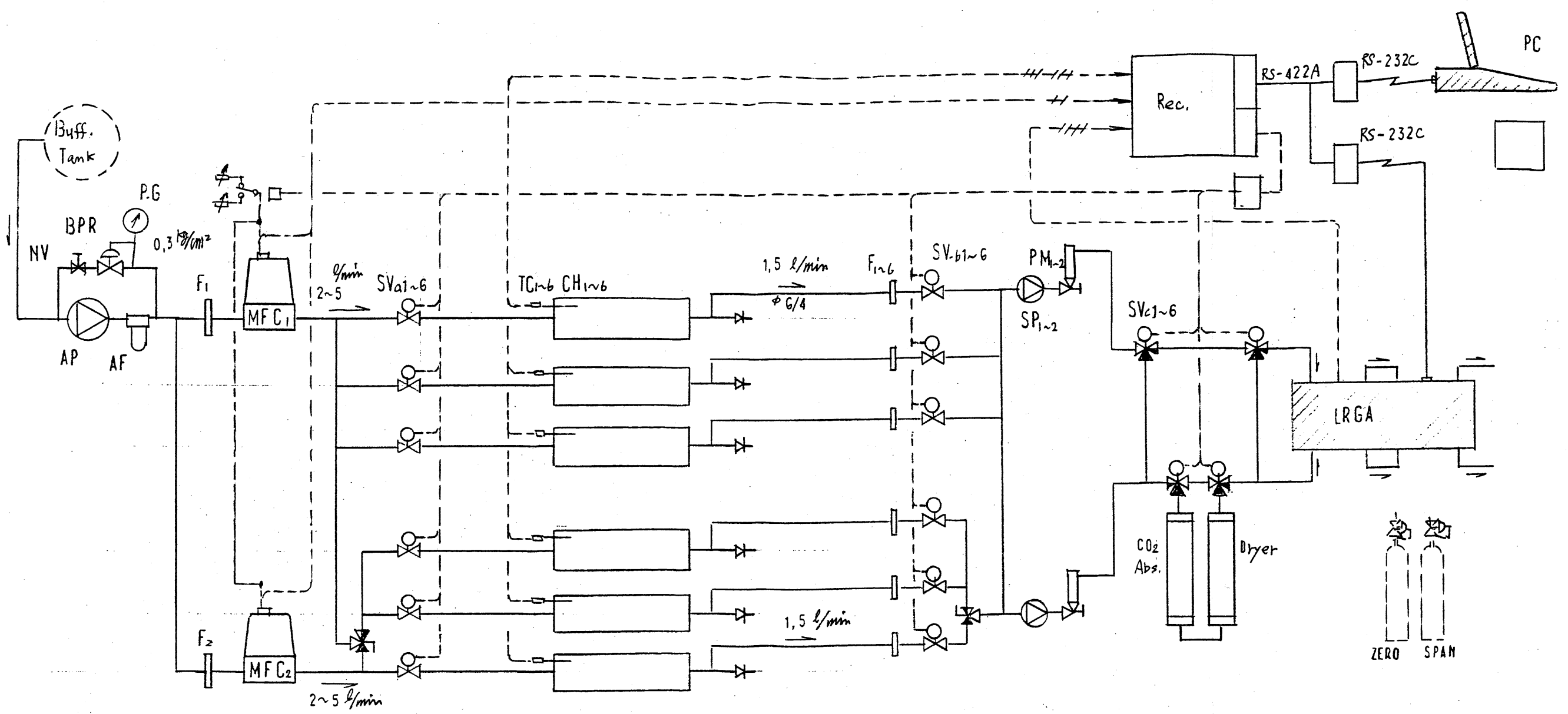
表-1 土壌呼吸測定装置の性能確認実験結果 (1)

カウント	Q1(ml/min)	Q2(ml/min)	C1(ppm)	C3(ppm)	-(C1-C2)	-(C2-C3) x Q2/Q1	Error(%)
84	2000	20	425	0	-3.8	-4.2	90.2
93	1990	20	415	0	-3.1	-4.1	74.9
108	3000	20	415	0	-1.9	-2.8	69.0
111	3020	20	404	0	-1.7	-2.7	63.8
74	3980	20	425	0	-1.3	-2.1	61.1
126	4990	20	404	0	-1.1	-1.6	68.1
204	2010	200	404	0	-34.7	-36.7	94.4
209	3000	200	404	0	-23.8	-25.3	93.9
227	4000	200	414	0	-18.0	-19.8	90.9
235	4010	200	405	0	-18.1	-19.3	93.8
244	5010	400	405	0	-15.0	-15.6	96.3
291	2010	400	391	0	-64.7	-64.9	99.6
299	3010	400	391	0	-44.0	-46.1	95.4
317	4000	400	412	0	-34.2	-37.8	90.5
340	49990	400	420	0	-28.7	-31.4	91.5
344	4980	400	424	0	-29.0	-31.7	91.4
129	5010	400	408	0	-29.4	-30.2	97.3
263	5010	400	405	0	-29.3	-30.0	97.7

6 付図  
装置系統図

D

照号	名 称	部品図・コード番号	材 料	一組分所要数	記 事



支給品  
 別途

承認	調査	元図 番号
半田		~
94.7.12		静岡大学(農)
調査	設計	製図
守谷		
94.7.11		
小糸工業株式会社		— D

### 第Ⅲ部 土壤呼吸測定法の検討

#### 1 はじめに

グローバルな炭素の収支に及ぼす森林の役割のより正確な評価のため、森林面積やその生物体量の変化とともに、それに伴う森林生態系における炭素の循環・収支の動態について、より正確な把握が必要である。炭酸ガス発生源の一部である土壤呼吸については、技術的な困難もあり十分な測定法が確立されていない。

土壤呼吸とは、土壤有機物の無機化や植物の根の呼吸により、土壤表面から放出される炭酸ガスの総称である。現在、この土壤呼吸の測定に最もよく利用されているチェンバー法には、アルカリ吸収法や通気法がある。アルカリ吸収法は土壤水分などの環境要因の変化による影響を受けやすいが、いくつか測定装置を設置することにより広い範囲での測定が可能である。

いっぽう、通気法はアルカリ吸収法に比べて精度が高いが、限定された範囲でしか測定できない。土壤呼吸を定量的に把握するためには、それぞれの測定法の得失を考慮しながらより適切な方法を選択あるいは組み合わせることが必要である。

そこで本章では、アルカリ吸収法と通気法、各土壤呼吸測定法の環境要因による影響を明らかにし、これらの測定法を組み合わせることによる、より詳細な土壤呼吸測定法の確立を目的とした。

なお、本章は平成8年3月静岡大学農学部森林資源科学科の卒業論文として、吉倉利英君によって提出されたものを研究代表者が内容を一部修正し、平成9年3月にまとめなおしたものである。

## 2 研究史

### 2.1 土壤呼吸の測定方法について

鶴田(1992)によると、土壤呼吸を測定する方法は、微気象学的方法とチェンバー法とに大別できる。

(1)微気象学的方法---熱収支法、空気力学的方法、乱流変動法(Denmead et al.,1974; 長谷場,1992)、フーリエ変換型赤外分光法(Gosz et al.,1988)

(2)チェンバー法----密閉法、通気法

#### (2)-1 密閉法

- ・土壤表面にチェンバーをかぶせて外気を遮断し、チェンバー内に設置したアルカリ溶液(KOHやNaOH)にガスを吸収させる方法。

- ・ 土壌表面にチェンバーをかぶせて外気を遮断し、一定時間ごとにチェンバー内の大気を採取してそのガス濃度の増加量からフラックスを求める方法。

## (2)-2 通気法

- ・ チェンバー内に外気を常に一定量通過させて、チェンバーの入口と出口のガス濃度差からフラックスを求める方法。

これらの測定法の中で、乱流変動法は原理的に最も優れているが、風速の鉛直成分と炭酸ガス濃度の少なくとも 5 Hz までの変動成分を精度よく測定することが要求されるため、測器や測定技術などの点から簡便な方法ではない。これに対してその精度は低い、チェンバー法はガスフラックスの測定に多く採用されている。また、フーリエ変換型赤外分光法 (FTIR) による測定機器が土壌からのフラックス測定に応用されれば、面的な把握が可能となる (井上,1986; 鶴田,1992)。

最近では、Bekku ら (1995) がチェンバー法を 2 種の密閉法および通気法、と大別するのではなく、次の 3 タイプに大別している。

- ① アルカリ吸収法 (A A 法—The alkali absorption method)
- ② 密閉法 (C C 法—The closed chamber method)
- ③ 通気法 (O F 法—The open flow infra-red gas analyzer method)

従来のような密閉法の中にアルカリ吸収法が含まれるわけではなく、アルカリ吸収法と密閉法を別の方法として解釈しているため多少混乱がある。本章におけるチェンバー法についての解釈は、この Bekku らによる 3 タイプの大別に従った。

## 2.2 チェンバー法に関する研究

### 2.2.1 アルカリ吸収法

アルカリ吸収法では、吸収剤として主に KOH 溶液とソーダ・ライムが使用され、KOH 法とソーダ・ライム法とに大別できる。

桐田 (1974) は KOH 法による測定値に影響する可能性のある 7 要因 (KOH 量、測定時間、測定容器の大きさなど) について、各要因と炭酸ガス吸収量との関係について実験を行った。その結果、KOH 量の不足や測定時間の進行による抑制を取り除いた炭酸ガス吸収速度の算出法を求めた。測定容器の大きさについては、チェンバー高  $\geq 8\text{cm}$ 、三脚高  $< 25\text{cm}$  を選べば測定値への影響は無視できる。また、チェンバー表面積と KOH 溶液の炭酸ガス吸収面積 (シャーレ表面積) が等しいことが望ましいとして、スポンジ法を考案した。だが、最近この方法では、チェンバー内の炭酸ガス濃度が約 100ppmv 以下に低くなる場合には、土壌呼吸速度を真値よりも大きく見積もってしまう、との指摘がなされている (中台,1991)。

KOH 法とソーダ・ライム法の比較を Nelson (1982) は行い、ソーダ・ライム法による測定値が KOH 法によるそれより大きく、ソーダ・ライムは KOH より効率がよいとし、

測定前後のプレドライの必要性や補正值についても報告している。

Freijer と Bouten (1991) はアルカリ吸収法で密閉型チェンバーとその改良型との比較を行い、密閉型は吸収速度が遅いので炭酸ガスフラックスを過小評価している、と報告している。なお、ほぼ正確な測定ができた改良型はアルカリ吸収部をチェンバー外に置き、チェンバー内の大気をバッテリー駆動のポンプで循環させているので、簡便であり野外調査に適している、と述べている。

### 2.2.2 密閉法

赤外線ガス分析計 (IRGA) を用いた密閉法の確立のため、Bekku ら (1995) がチェンバーから採取する空気の量やその採取周期についての研究を行った。毎回 20 分以内毎にチェンバー体積の 0.2% より少ない量を採取した際、密閉法の通気法からの偏差は 20% 以内であることから、密閉法は通気法と同様に信頼できる方法である、と報告している。また、この密閉法の長所として次の 4 点を挙げている。

- ①測定が短時間に行われたなら、地温、土壤水分、炭酸ガス濃度などの土壤環境をそれほど乱さない。
- ②電源や特別な設備が必要かどうか、場所に抑制されない。
- ③チェンバーを作ったり、移動したり、使用したりするのに費用がかからない。
- ④短時間に多くの測定プロットを得ることができる。

### 2.2.3 通気法

通気法はチェンバー内に常時空気を流しているため、風速によりチェンバー内の炭酸ガス濃度が変化するなどといった影響が生じる。

井上 (1986) は通気法を用いて水田土壌での炭酸ガスフラックスを測定するとともに、換気回数とフラックスとの関係を調べ、必要通気量以上で大気を吸引すれば信頼の高い炭酸ガスフラックスの測定が可能である、と報告している。

チェンバー内炭酸ガス濃度の増加は土壌から大気への拡散に影響を及ぼすだけでなく、土壌微生物の呼吸活動にも影響を及ぼす。Koizumi ら (1991) は通気法により炭酸ガス濃度を変化させて微生物への影響を調べ、炭酸ガス濃度の上昇に伴い土壌微生物の呼吸活動は減少する、と報告している。このことから、アルカリ吸収法では、チェンバー内炭酸ガス濃度が通常より低いために微生物の呼吸活動が促進され、土壌呼吸を過大評価しているおそれがある。簡便な吸収法より、通気法による正確な測定がなされるべきである、と述べている。

最近の Ohashi ら (1995) の報告では、土壌呼吸は炭酸ガスの増加に伴い減少し、風速の増加に伴い減少する。よって、アルカリ吸収法においては、チェンバー内炭酸ガス濃度が炭酸ガス吸収剤のために小さくなるため土壌呼吸が過大評価される。一方、通気法においては、チェンバー内炭酸ガス濃度が外気以上であるため過小評価される。

### 2.2.4 アルカリ吸収法と通気法の比較

土壌呼吸を面的に把握するには、アルカリ吸収法のような簡便な方法と通気法とを組み合わせ測定する必要があるのだが、そのような同時測定はあまり行われていない。

Nakadai (1993) は実験室における混合土、および野外でのアルカリ吸収法（スポンジ法）と通気法の比較実験を行った結果、実験室と野外の両方において、アルカリ吸収法による測定値が通気法によるものの約2倍であった。

既知量の炭酸ガスを流すことによるアルカリ吸収法（ソーダ・ライム法）と通気法との比較実験を S.Mark Nay ら (1994) が行っている。これは微生物などによる生物学的要因のない、吸収能のみを比較している。これによると、アルカリ吸収法では、ある流量までは最大25%の過大評価をし、その流量以上の時は57%まで過小評価した。一方、通気法は常に15%の過小評価であった。

このように、土壌による比較と吸収能のみの比較では結果が異なってくる。土壌呼吸は物理的（通気性、含有水分、温度など）、化学的（含有有機物の種類など）諸条件のみならず、生物学的（優先微生物種など）条件にもかかわる非常に複雑な現象である（小森・関；1995）。

### 2.3 モデル化の試み

微気象学的方法やチェンバー法のように、結果として土壌から放出される炭酸ガスの全量を測定するだけでなく、その機構解明のためにモデル化の試みがなされている。

Carlile と Than (1988) は野外でのソーダ・ライム法の測定により、水分依存の  $Q_{10}$  条件を使ってモデル (FRESP) を考え、湿潤条件ではよい結果を出している。

また、小森と関 (1995) は土中の炭酸ガス発生、拡散機構を検討することにより非定常拡散方程式の解を求め、その解に混合土を用いた土壌呼吸の室内実験で得られた濃度実測値を代入して土壌呼吸速度を見積もる方法を検討した。そして、実験結果に基づいて求めた土壌呼吸速度を工学的な立場からモデル化している。このモデルによると、土壌呼吸速度は混合土への投入堆肥質量に比例し、温度依存性を示す  $Q_{10}$  は2.5であった。

## 3 土壌呼吸測定法

### 3.1 測定法

#### 3.1.1 アルカリ吸収法

図-2-1のように土壌表面にチェンバーをかぶせて外気を遮断し、このチェンバー内に設置したKOH溶液またはソーダ・ライムに土壌から放出される炭酸ガスを吸収させる方法である。本実験では、表面積  $163\text{ cm}^2$ 、高さ  $13\text{ cm}$ 、容量  $1.9\text{ l}$  のチェンバー、および表面積  $73\text{ cm}^2$  のシャーレを使用した。



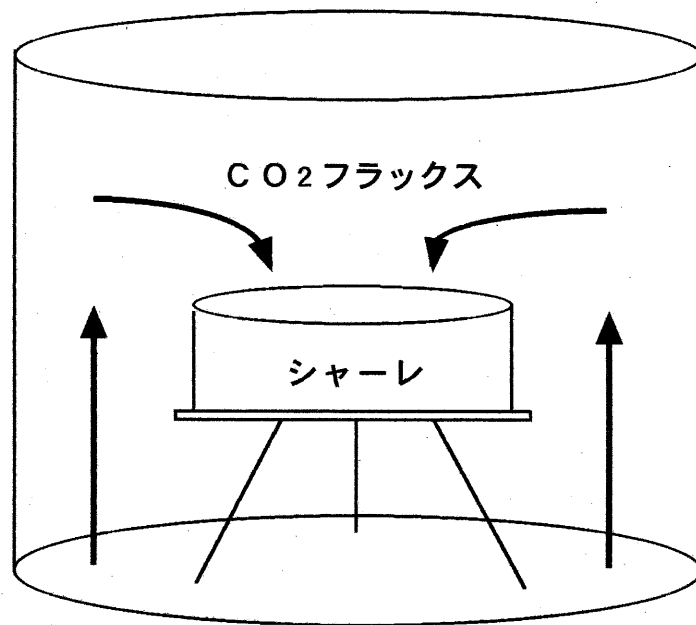


図-2-1. アルカリ吸収法模式図

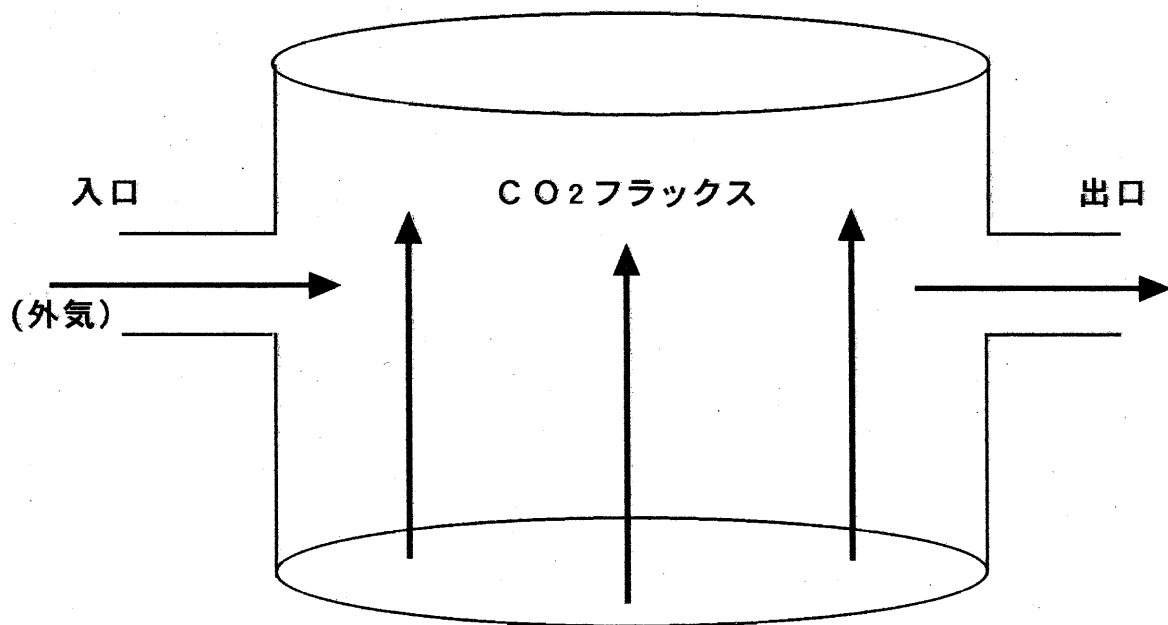


図-2-2. 通気法模式図

#### 3.1.1.1 KOH法

特級粒状KOHを蒸留水に溶かし、KOH溶液を製造した。

#### 3.1.1.2 ソーダ・ライム法

1級ソーダ石灰（2号）を使用した。

#### 3.1.2 通気法

小糸工業製KIPシステム（携帯用光合成蒸散測定装置）を使用した。この測定装置はシステムコントローラー、流量調節器、赤外線ガス分析装置、そしてチェンバーとで構成される。チェンバーは表面積 121 cm<sup>2</sup>、高さ 10 cm、容量 1.2 lで、これには空気の入出口、地温およびチェンバー内外の温度センサー、そして小型ファンが取り付けられている。

原理としては、チェンバーの入口および出口の炭酸ガス濃度差を赤外線ガス分析装置（IRGA）で定量化することにより、土壌呼吸速度を求めている。チェンバーの模式図を図-2-2に示す。また、この測定器に表示される土壌呼吸速度は次の式により算出される。

$$SR = 0.044 \times 0.0446 \times \Delta d \times V \times 1/S$$

SR (mgCO<sub>2</sub>/dm<sup>2</sup>.hr) : 土壌呼吸速度

Δd (ppm) : 入口および出口の炭酸ガス濃度差

V (l/hr) : 単位時間当たりの流量

S (dm<sup>2</sup>) : チェンバー表面積

#### 3.2 土壌呼吸速度算出法

本実験では、測定時間やチェンバーの大きさを考慮し、mgCO<sub>2</sub>/dm<sup>2</sup>.hr という単位で土壌呼吸速度を算出した。

##### 3.2.1 アルカリ吸収法

##### 3.2.1.1 KOH法

KOH法による測定値の計算は、桐田（1971）の方法に従って行った。この計算では測定値から炭酸ガス吸収速度の最大値を推定して使用することにより、アルカリ量と測定時間の両要因の影響を取り除くことができる。

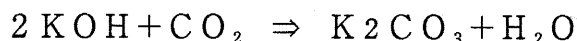
以下、測定終了後から土壌呼吸速度算出までの手順を記す。

25 ml のKOH溶液を用いて土壌呼吸を測定したとき、

A : 土壌呼吸を測定したサンプル

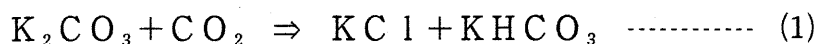
B : 測定前のKOH溶液（ブランク・テスト）

とし、それぞれから 1 ml をとり、1 ml の蒸留水で希釈してから 0.1 規定のHClを用いて中和滴定を行う。

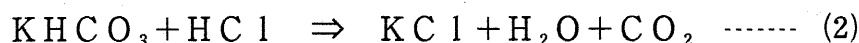


KOHが吸収したCO<sub>2</sub>はK<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>として溶液中に存在する。

最初、HClの注入により残っていたKOHが中和され (KOH + HCl → KCl + H<sub>2</sub>O)、その後、次の(1)、(2)の2段階の中和反応が進む。



この第1の反応は、フェノールフタレインを指示薬として、最後の1滴で桃色が消えるところでやめる。



この第2の反応にはメチルオレンジを用い、黄色から橙黄色へ変わる点を読む。

各段階で要したHCl量を次のようにおく。

	第1段階 (ml)	第2段階 (ml)
A:測定したサンプル	m 1	m 2
B:ブランクテスト	n1	n2

ここで、測定前のKOH量が一定ならば第1段階および第2段階に要したHCl量の和は一定であるから、それを利用して測定中の濃度変化に対する補正をすることができる。

サンプル	中和測定に要した HCL 量			濃度変化のための補正率	第2段階の補正量
	第1	第2	合計		
A	M1	M2	M1+M2	(N1 + N2) / (M1 + M2)	M2 x S
B	N1	N2	N1+ N2		

$$(S = (N1 + N2) / (M1 + M2))$$

これにより、KOH溶液が吸収した炭酸ガス量V[mgCO<sub>2</sub>]は、

$$V = 44 \times N \times (M2 \times S - N2) \times L / 1 \text{ ----- (a)}$$

N: HClの規定量 (= 0.1)

L: 測定に用いたKOH量[ml] (= 25)

1: 中和滴定に用いたKOH量[ml] (= 1)

となる。

つぎに、KOH量の不足や測定時間の進行による抑制を取り除いた炭酸ガス吸収量 (期待最大値 V<sub>t</sub> [mgCO<sub>2</sub>]) を求める。

CO<sub>2</sub>吸収率σ (= V / V<sub>t</sub>) は炭酸ガスによって消費されずに、測定終了時に残ってい

たKOH量の割合、すなわちKOH残余率 $q$ の関数

$$\sigma = (q - 1) / \ln q \quad \text{----- (b)}$$

で定義される。これにより $V_t$ は、

$$V_t = V \times (1 / \sigma) \quad \text{----- (c)}$$

となる。(c)式にもとづいて、種々の $q$ に対する $(1 / \sigma)$ の値を計算し、下の表に示す。

$q$	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	$\infty$	4.65	3.99	3.62	3.35	3.15	2.99	2.86	2.75	2.65
.1	2.56	2.48	2.41	2.35	2.29	2.23	2.18	2.14	2.09	2.05
.2	2.01	1.98	1.94	1.91	1.88	1.85	1.82	1.79	1.77	1.74
.3	1.72	1.1	1.68	1.66	1.64	1.62	1.6	1.58	1.56	1.54
.4	1.53	1.51	1.5	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.41	1.4
.5	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29
.6	1.28	1.27	1.26	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21	1.21	1.2
.7	1.19	1.18	1.17	1.17	1.16	1.15	1.14	1.14	1.13	1.12
.8	1.12	1.11	1.1	1.1	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06
.9	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.02	1.01	1

KOH残余率は滴定結果から次のようにして求められる。

$$q = [M_1 - (M_2 \times S)] / (N_1 - N_2) \quad \text{----- (d)}$$

KOH残余率が0.8以上では、 $V_t$ と $V$ とのちがいは10%であり、理想的には $q$ が0.8以上になるように、KOH量や測定時間を調整することが望ましい。一方、KOH溶液が多量の炭酸ガスを吸収したとき、フェノールフタレインを指示薬とする第1段階の終点は非常に不明確になり、滴定誤差が大きくなるため、 $q$ が0.2以下になるサンプルのKOH溶液は炭酸ガスによってほぼ飽和しているものとみなせる。したがって、 $q$ が0.2以下になるときは測定をやり直すべきである。

こうして求めた炭酸ガス吸収量 $V_t$ から土壌呼吸速度 $R$ [mgCO<sub>2</sub>/dm<sup>2</sup>.day]を算出する。

$$R = V_t \times (24 / t) \times (100 / A)$$

$t$  : 測定時間[h]

$A$  : チェンバー表面積[cm<sup>2</sup>]

なお、本実験においては、測定したサンプル(A)、ブランク(B)について、各2回ずつ中和滴定を行った。それらによる組み合わせ(A1-B1,A1-B2,A2-B1,A2-B2)から4つの $R$ を算出し、平均値や標準偏差を求めた。

### 3.2.1.2 ソーダ・ライム法

ソーダ・ライム法による測定値の計算は Nelson T. Edwards(1982)の方法にしたがって行った。

測定前後に乾燥器 (100℃) で 8 時間以上乾燥させ、重量を測定する。

測定前乾燥後のソーダ・ライム重量 =  $W_1$  [g]

測定後乾燥後のソーダ・ライム重量 =  $W_2$  [g]

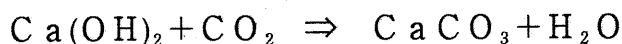
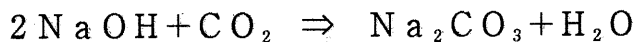
とすると、土壌呼吸速度  $r$  [ $\text{mgCO}_2/\text{dm}^2\cdot\text{day}$ ] は次のように算出される。

$$r = (W_1 - W_2) \times 24 / t \times 100 / A \times 1000$$

$t$  : 測定時間[h]

$A$  : チェンバー表面積[ $\text{cm}^2$ ]

ソーダ・ライムが炭酸ガスを吸収した際の反応は下のようになる。



この時、測定後十分に乾燥させることにより、反応で生じた水分量を取り除かれる。

そこで、

$$(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) / \text{CO}_2 = (44 + 18) / 44 \div 1.4$$

より、 $r$  に 1.4 という補正値を用いるべきである。

よって、補正された土壌呼吸速度  $R$  [ $\text{mgCO}_2/\text{dm}^2/\text{day}$ ] は次のように算出される。

$$R = 1.4 \times r$$

なお、吸収された  $\text{CO}_2$  [mg] が最初のソーダ・ライム重量の 7% に達したならば、そのソーダ・ライムは捨て、新しいものを使用した。

### 3.2.2 通気法 (KIP)

通気法では、時間当たりの土壌呼吸速度  $R_i$  ( $i=1, 2, \dots, 24$ ) [ $\text{mgCO}_2/\text{dm}^2\cdot\text{day}$ ] としてデータが得られる。

1 時間に  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 回のデータが得られたとき、

$$R_i = \sum R_{ij} / j$$

のように、時間当たりの土壌呼吸速度の平均値  $R_i$  を求めた。

これにより、1 日当たりの土壌呼吸速度  $R$  [ $\text{mgCO}_2/\text{dm}^2/\text{day}$ ] はつぎのようにして算出される。

$$R = \sum R_i \quad (i=1, 2, \dots, 24)$$

### 3.3 各測定法の得失

これまでの研究で明らかにされているアルカリ吸収法と通気法、各土壌呼吸測定法の得失を簡単にまとめてみると、下の表のようになる。

表-1. アルカリ吸収法と通気法の得失

－ アルカリ吸収法 －	－ 通気法 －
広範囲の測定が可能	部分的な測定しかできない
量としての結果のみ	時間変化を追うことができる
安価で簡便な装置	高価な機器（電源必要）
結果算出までに時間がかかる （中和滴定）（24 時間乾燥後に重量測定）	デジタルでデータを記録する
チェンバー内の炭酸ガス濃度が外気以下になりやすい	アルカリ吸収法に比べて正確な測定が可能
環境要因の変化や時間経過により吸収力 が変化するおそれがある	風（流速）による影響が生じるおそれがある

## 4 野外実験

### 4.1 野外における測定法の比較実験

#### 4.1.1 試験地概況

試験地：静岡市大谷静岡大学キャンパス内の苗畑試験地脇にあるクヌギ萌芽林に 1m<sup>2</sup> の試験地を設けた。

位置：静岡市の南東部、北緯 34° 58′、東経 138° 24′ に位置する。海拔高は約 30m である。

気候：暖帯

地質：第四期小鹿れき層

植生：3m×10m 内に約 20 本、クヌギの切り株があり、それぞれの切り株から約 1.2m の高さまでクヌギが萌芽更新している。また、試験地の西端には樹高 8m のクヌギ成木が生育している。

土壌：土壌型は BA で、A 0 層は約 1 cm、A 層は約 18cm であった。もともと山の斜面であったところを大学建設時に削り取ったため石礫が多い。

A 層中の質量百分率は根は 0.4%、石礫（粒径 2mm 以上）は 32.3%、細土（2mm 以下）は 67.3% であった。

#### 4.1.2 実験方法

土壌呼吸速度の偏りがなるべく少ないような狭い範囲(1m<sup>2</sup>)内において、各土壌呼吸測定法の環境要因による影響を明らかにするため、野外での比較実験を行った。2種のアルカリ吸収法(KOH法、ソーダ・ライム法)および通気法で土壌からの炭酸ガスフラックスを24時間測定し、1日当たりの炭酸ガス吸収速度を比較した。アルカリ量については、KOH溶液は桐田(1971)の方法に従い1N・25ml、ソーダ・ライムはEDWERS(1982)の方法に従い30gを使用した。

また、毎回同時刻(11:00AM)に土壌を採取して土壌含水比を求めた。

$$\text{土壌含水比 } w(\%) = (w_1 - w_2) / (w_2 - w_0) \times 100$$

$w_0$  : 容器の質量(g)

$w_1$  : (湿潤土+容器)の質量(g)

$w_2$  : (乾燥土+容器)の質量(g)

比較実験は、3種類の測定法(KOH法、ソーダ・ライム法、通気法)の比較を10月から12月の3カ月間に月1に回、KOH法とソーダ・ライム法の比較を9月から12月までの4カ月間に月に2回行った。

#### 4.1.3 結果と考察

図-3に3種類の測定法の比較実験の結果、および実験実施日の土壌含水比(実験前と実験後の平均)と日平均地温を示した。各月において、ソーダ・ライム法、KOH法、通気法の順に炭酸ガス吸収速度が大きかった。通気法に比べてアルカリ吸収法が過大評価しており、特にソーダ・ライム法において著しい。KOH法は炭酸ガス吸収量算出の際にアルカリ量を考慮しているが、ソーダ・ライム法においてはそれがなされていない。ソーダ・ライム量が多すぎるおそれがある。

また、24時間という長時間の測定において、KOH溶液やソーダ・ライムがその吸収力を保っているのかどうか調べる必要がある。通気法についても、時間経過に伴い土壌呼吸が妨げられるといった影響がでていないかどうか調べる必要がある。

図-4にKOH法と通気法の比較実験の結果、および実験実施日の土壌含水比(実験前と実験後の平均)を示した。10月の上・下旬および11月の月上旬においてソーダ・ライム法による炭酸ガス吸収速度がKOH法によるその約3~4倍あり、他の時期が1~2倍であるのに対して著しく大きかった。この時期は猛暑かつ少雨の夏が過ぎ、降水量も回復してきたために土壌含水比が増加している。この土壌含水比の増加がソーダ・ライム法における炭酸ガス吸収速度の増加に関係していると思われる。次の2つの仮説が考えられる。

1. ソーダ・ライムが水分を得たことにより吸収能力を促進した。
2. 土壌から蒸発してきた水分をソーダ・ライムが吸収し、その水分に溶け込んでいた炭酸ガスも吸収した。

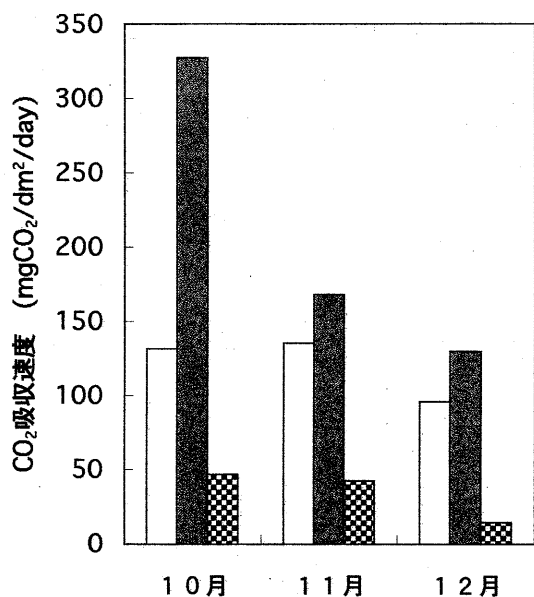


図-3 測定法の比較

□ KOH法 ■ ソーダ・ライム法 ▨ 通気法

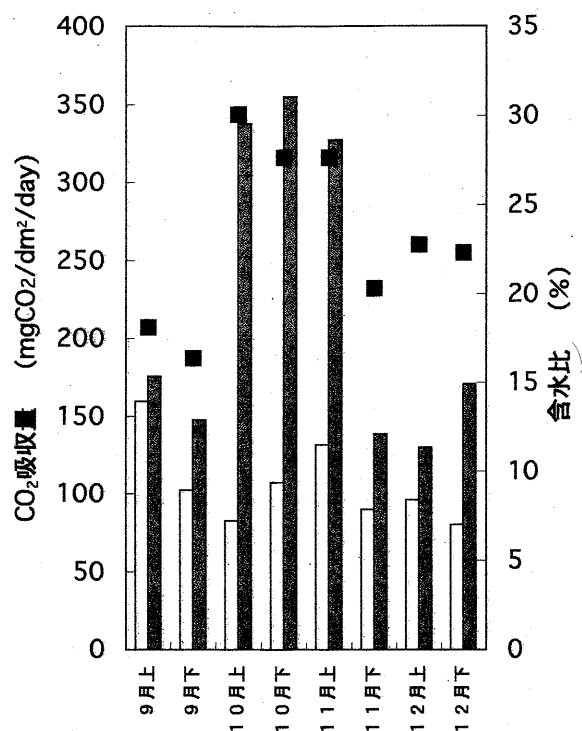


図-4 KOHとソーダ・ライムの比較

□ KOH ■ ソーダ・ライム ▨ 含水比

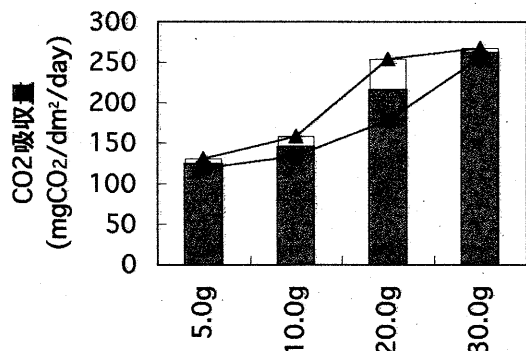


図-5.1 ソーダ・ライム重量による影響  
(10月25日)

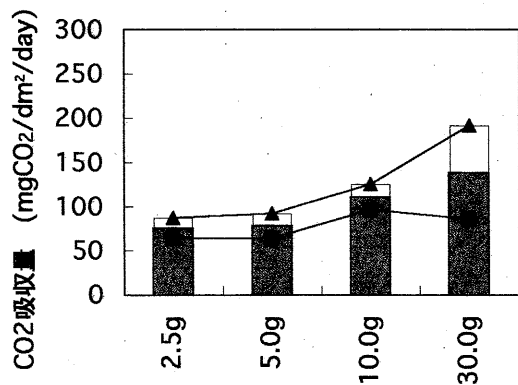


図-5.2 ソーダ・ライム重量による影響  
(11月6日)

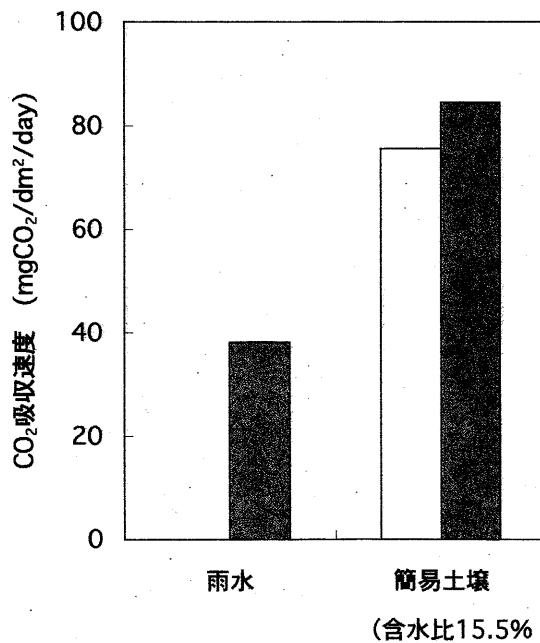


図-7 雨水および簡易土壌におけるアルカリ吸収法

□ KOH ■ ソーダ・ライム (10 g)



3. 仮説1と2の両方、すなわち、土壌水分の増加により吸収能力を促進されたソーダ・ライムが、土壌水分に溶け込んでいた炭酸ガスも吸収するようになった。

#### 4.2 各測定法における問題点の検証

野外での比較実験により上げられた以下の4つの問題点についての検証を行った。

- ・ソーダ・ライム量
- ・土壌水分に含まれる炭酸ガスの吸収
- ・アルカリ吸収法の能力維持
- ・通気法の連続測定

##### 4.2.1 ソーダ・ライム量による影響

###### 4.2.1.1 目的と方法

ソーダ・ライム法において、使用するソーダ・ライムの量（重量）による $\text{CO}_2$ 吸収量への影響を調べるため、4.1と同じ試験地において、5段階（2.5g、5.0g、10.0g、20.0g、30.0g）のソーダ・ライム量について比較実験を行った。1回目（10月25日）は5.0g、10.0g、20.0g、30.0gの4段階について各2組、2回目（11月6日）は2.5g、5.0g、10.0g、30.0gの4段階について各2組を設置し、各重量における炭酸ガス吸収量を比較した。

###### 4.2.1.2 結果と考察

図-5-1、図-5-2に各重量における炭酸ガス吸収量、およびバラツキ（各重量2組の標準偏差）を示した。ソーダ・ライム量の増加に伴い吸収量も増加している。ソーダ・ライム量の増加による吸収力の増大がチェンバー内炭酸ガス濃度の低下を引き起こし、土壌呼吸を促進させたと考えられる。

また、ソーダ・ライム量の増加に伴い、各重量におけるバラツキも大きくなっている。1 $\text{m}^2$ の試験地内での実験であるから、それほどバラツキが大きくはならないと思われる。しかし、このバラツキの大きさが自然における変動性（場所による変異）をよく表している、とも解釈できる。10月における30.0gのバラツキが非常に小さいのは、吸収量が限界に近いためではないかと思われる。

10月に比べて11月は4段階のソーダ・ライム量における吸収量の変動が小さい。これは、11月の方が土壌含水比や土壌呼吸量が小さい、といったことが原因と考えられる。ソーダ・ライム方による測定には、このような土壌含水比が少ない、あるいは土壌呼吸量が少ない時期が適しているのではないかと思われる。

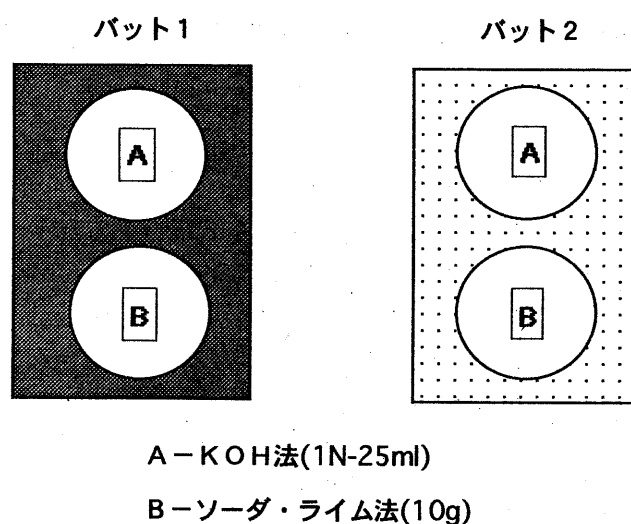
10月は5.0gと10.0gの吸収量がほぼ等しく、11月は2.5gと5.0gのそれがほぼ等しい。これら各2段階のソーダ・ライム量による炭酸ガス吸収量は、図-4でのそれぞれの時期におけるKOH法によるそれと比較するとそれほど大差がない。よって、ソーダ・ライム法による測定では、時期や土壌呼吸量に応じてソーダ・ライム量を調節する必要がある。

#### 4.2.2 土壤水分に含まれる炭酸ガスの吸収

##### 4.2.2.1 目的と方法

野外実験における、土壤水分の増加に伴うソーダ・ライム法の著しい吸収量増加の原因の1つとして、土壤呼吸だけでなく、土壤から蒸発してきた水分に溶け込んでいた $\text{CO}_2$ をもソーダ・ライムが吸収していると考えられた。そこで、土壤表面でなく、土壤のない水面に $\text{KOH}$ 法（1N-25ml）とソーダ・ライム法（10g）を設置したときでも $\text{CO}_2$ 吸収量が確認できるのかどうかを調べた。また、簡易土壤において、雨水と同様に $\text{KOH}$ 法とソーダ・ライム法での測定を行った。

下図のように、2つのバット(350W×250D×50H)にそれぞれ雨水、簡易土壤を設けた。



バット1-雨水（降雨時に野外試験地で容器に貯めておいたもの）

バット2-簡易土壤（野外試験地のA層を2mm目のふるいにかけ、  
石礫を取り除いた土壤）

図-6. 実験4.2.2（土壤水分に含まれる炭酸ガスの吸収）の配置図

##### 4.2.2.2 結果と考察

雨水および簡易土壤においてアルカリ吸収法で測定した際の実験結果を図-7に示した。雨水（バット1）において、 $\text{KOH}$ 法による炭酸ガス吸収は全くないのに対し、ソーダ・ライム法では雨水に含まれる炭酸ガスも吸収することがわかった。野外実験においても、水分に含まれる炭酸ガスが吸収されていたおそれがある。

簡易土壤においては、雨水におけるような $\text{KOH}$ 法とソーダ・ライムとの差は見られなかった。乾燥した土壤においては、土壤水分に含まれる炭酸ガスを吸収するという影響は少ないと考えられる。また、1N-25mlの $\text{KOH}$ 溶液と10gソーダ・ライムとの吸収力がほ

ば等しいといえる。

#### 4.2.3 アルカリ吸収法における炭酸ガス吸収能力の時間変化

##### 4.2.3.1 目的と方法

アルカリ吸収剤（KOH溶液やソーダ・ライム）の吸収能力が時間の経過に伴いどのように変化しているのかを調べるため、下図のように、バット（350w×250D×50H）に設けた簡易土壌（4.2.2で使用したのと同じもの）に通気法のチェンバーを設置し、そのチェンバー内にアルカリ吸収剤を設置した。KOH溶液（1N-25ml）とソーダ・ライム（10g）についてそれぞれ21時間ずつ実験を行った。この場合、通気法の測定結果として得られる土壌呼吸速度をKOH溶液やソーダ・ライムの炭酸ガス吸収能力として、その時間変化を調べた。なお、簡易土壌からの土壌呼吸をできるだけ一定に保つため、インキュベーター内で地温を一定（20℃）に保ちながら実験を行った。

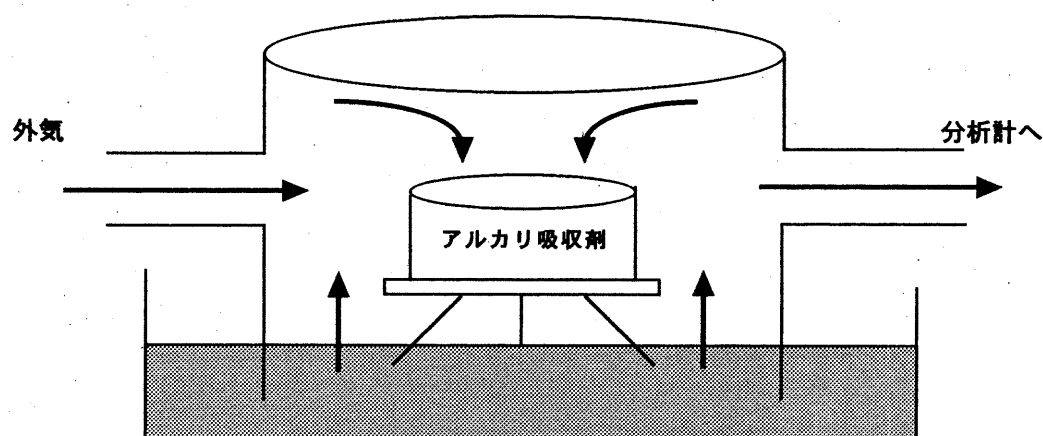


図-8. 実験4.2.3（アルカリ吸収法における炭酸ガス吸収能力の時間変化）の測定模式図

##### 4.2.3.2 結果と考察

KOH溶液、およびソーダ・ライムの炭酸ガス吸収速度の時間変化をそれぞれ図-9-1、図-9-2に示した。KOH溶液は多少の上下があるものの、 $4\sim 5\text{mgCO}_2/\text{dm}^2\cdot\text{hr}$ で吸収力をほぼ保っている。それに対し、ソーダ・ライムの吸収速度は一定の割合で低下している。図-9-2の回帰式は次のようになる。

$$y = -0.0377x + 7.0537 \quad (R^2 = 0.8818)$$

この式によると、24時間後には最初の87%までソーダ・ライムの吸収力が低下していることになる。このことから、ソーダ・ライム法は実験開始時に土壌呼吸を過大評価するお

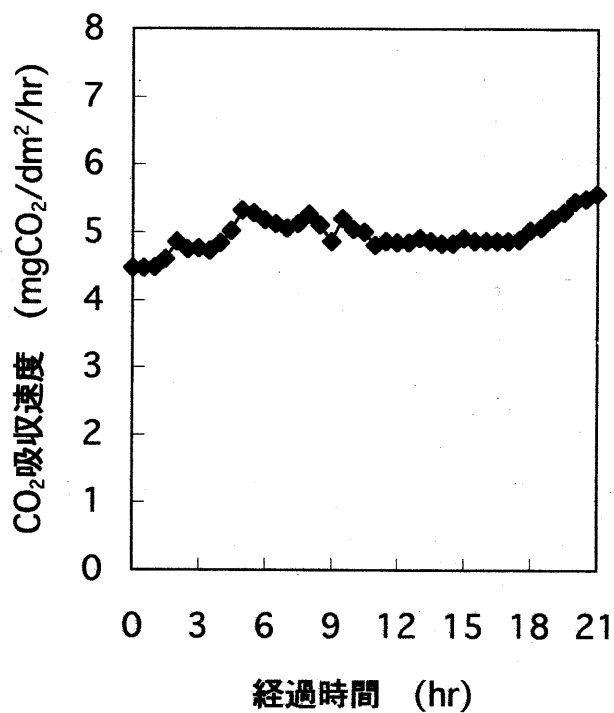


図-9-1 KOHによるCO<sub>2</sub>吸収速度の時間変化

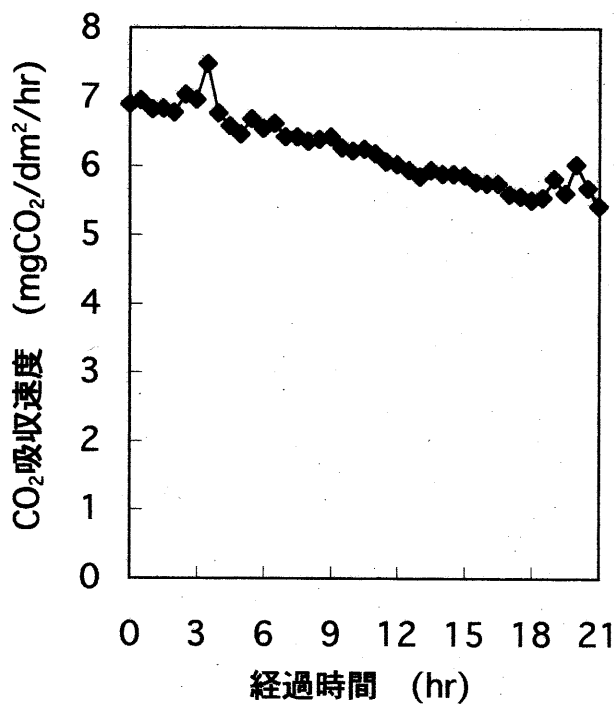


図-9-2 ソーダ・ライムによるCO<sub>2</sub>吸収速度の時間変化

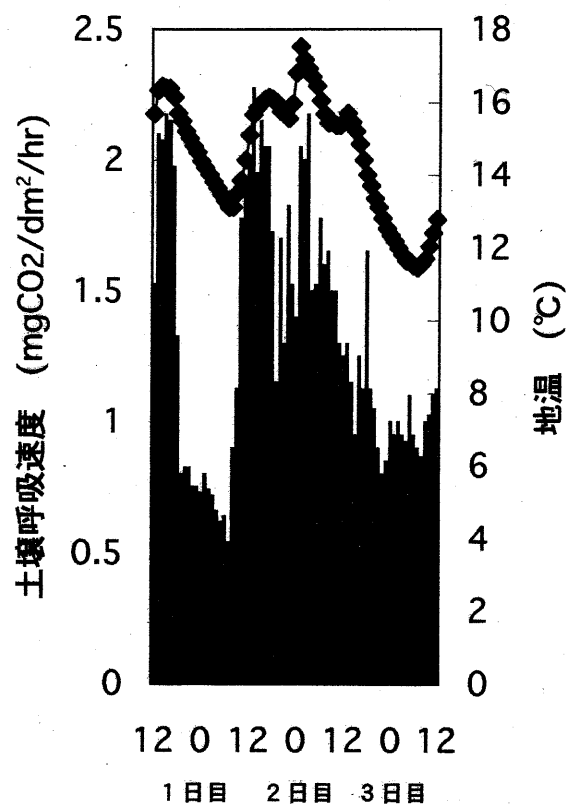


図-10 通気法連続測定 (11/6~11/9)

■ 土壌呼吸速度    ◆ 地温

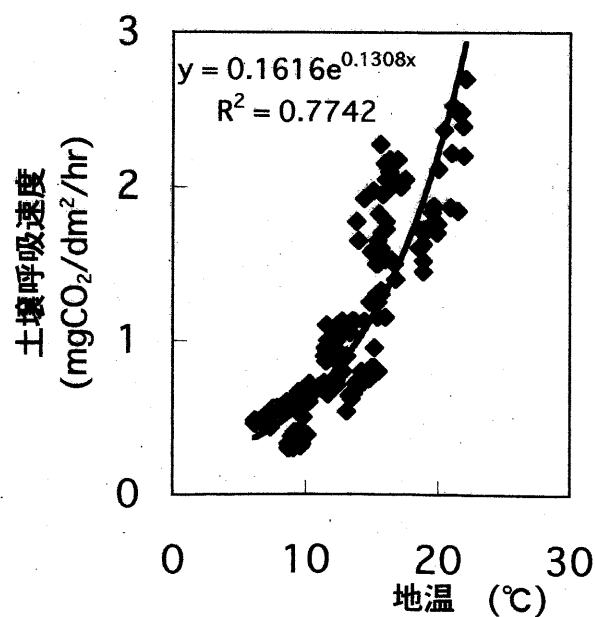


図-12 土壌呼吸速度—地温

それがあるが、24時間の吸収能力としてはさほど大きな低下ではないと思われる。

ソーダ・ライムの吸収速度は徐々に低下しているものの、KOHの1.4倍もの吸収力である。野外実験において常にソーダ・ライム法による吸収量が多かったのは、土壌水分などの環境因子による影響だけでなく、もともとの吸収能力が大きかったといえる。

#### 4.2.4 通気法での長時間の測定による影響

##### 4.2.4.1 目的と方法

通気法で土壌呼吸を測定する際、時間が経過するにつれてチェンバー内の炭酸ガス濃度が高くなることなどによる、土壌呼吸の抑制が懸念される。時間経過にともない土壌呼吸速度が低くなる。この傾向が見られるかどうか、一定の場所で長時間測定することにより、通気法の連続測定による土壌呼吸への影響を調べた。

なお、測定は4.1と同じ野外試験地において、11月6日12時から11月9日12時までの72時間で行った。

##### 4.2.4.2 結果と考察

図-10に3日間における1時間毎の土壌呼吸速度の変化、および地温変化を示した。1日目と2日目の土壌呼吸速度の最大値がほぼ等しく、その後2日目から3日目にかけての深夜にも同じくらいの最大値がある。このことから、チェンバーで土壌を覆うことにより、日毎に土壌呼吸速度が低くなる、といった影響はないと思われる。

2日目から3日目にかけて降雨があったために地温があがり、それに伴って土壌呼吸速度も増加している。その後、3日目の昼に土壌呼吸速度が低いのは、地温が低いために微生物活動の活性がなかった、あるいは土壌孔隙中の炭酸ガスが雨水に溶けて地中へ流された、などといった影響が考えられる。降雨後の土壌呼吸に影響が及ぼされることがわかる。

また、地温と土壌呼吸速度との関連性がよく表れている。

#### 4.3 環境因子（地温・土壌水分）によるアルカリ吸収法への影響

##### 4.3.1 地温による影響

##### 4.3.1.1 目的と方法

野外での通気法の測定により得られた、土壌呼吸速度と地温との関係を図-12に示した。この図からわかるように、土壌呼吸速度は地温にかなり依存しており、地温の上昇に伴い指数関数的に増加している。4.1の野外実験では、土壌水分の増加によりソーダ・ライム法の吸収量が著しく増加したが、地温による吸収能力への影響などは確認できなかった。そこで、KOH法とソーダ・ライム法による測定を同一条件（地温、土壌水分）で行うことにより、KOH溶液またはソーダ・ライムの吸収能力に影響がどうか調べた。

バット（550W×350D×50H）に設けた簡易土壌（4.2.2で用いたのと同じもの）をイ

ンキュベーター内に入れ、地温を制御した。下図のような配置でKOH法（1N-25ml）とソーダ・ライム法（10g、20g）により、簡易土壌から放出される炭酸ガスを吸収させた。また、簡易土壌中の土壌水分にむらがないよう、実験前に水を加えた後で土壌をよくかき混ぜ、実験中に水は加えなかった。

夏、冬のおおよその平均地温として 13℃と 27℃の 2 段階で実験を行った。

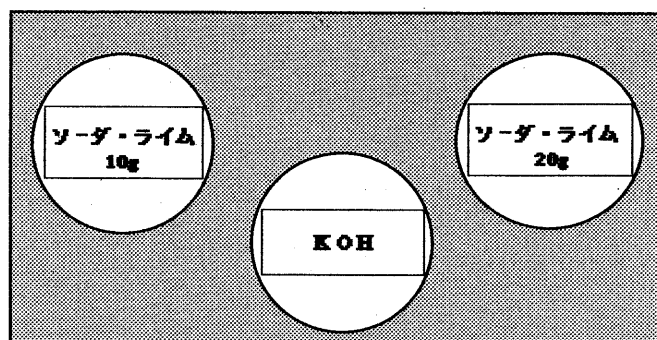


図-11. 実験4.3.1（アルカリ吸収法の地温変化による影響）の配置図

#### 4.3.1.2 結果と考察

地温 13℃、27℃における結果をそれぞれ図-13-1、図-13-2に示した。地温 13℃における炭酸ガス吸収量はKOH、10g ソーダ・ライム、20g ソーダ・ライムの順に大きかった。地温 27℃においては、全体的な吸収量が増加したものの、その順は地温 13℃のときと変わらなかった。このことから、地温が変化することにより、KOHやソーダ・ライムの吸収力が著しく増加、あるいは減少するといったことはないと考えられる。

しかし、地温によりアルカリ吸収剤の吸収能力に増減はないとしても、地温の低下に伴い大本である土壌呼吸量は減少している。土壌呼吸量の多い時期と少ない時期においてアルカリ吸収剤の吸収力が一定であるなら、土壌呼吸量の少ない時期にチェンバー内炭酸ガス濃度が希薄になりやすく、土壌呼吸を促進してしまうおそれがある。そこで、地温の低い土壌呼吸量の少ない時期には、吸収力（アルカリ量）を小さくする必要がある。

#### 4.3.2 土壌水分による影響

##### 4.3.2.1 目的と方法

野外での通気法の測定により得られた、土壌呼吸速度と土壌含水比との関係を図-14に示した。この図より、地温と同様に土壌呼吸は土壌水分にも依存していることがわかる。

4.1の野外におけるKOH法とソーダ・ライム法の比較では、土壌水分とソーダ・ライムの吸収力との関連性が見られ、4.2.2の雨水を使用しての実験では、ソーダ・ライム法での著しい炭酸ガス吸収量増加の原因として、土壌水分に含まれる炭酸ガスを吸収している

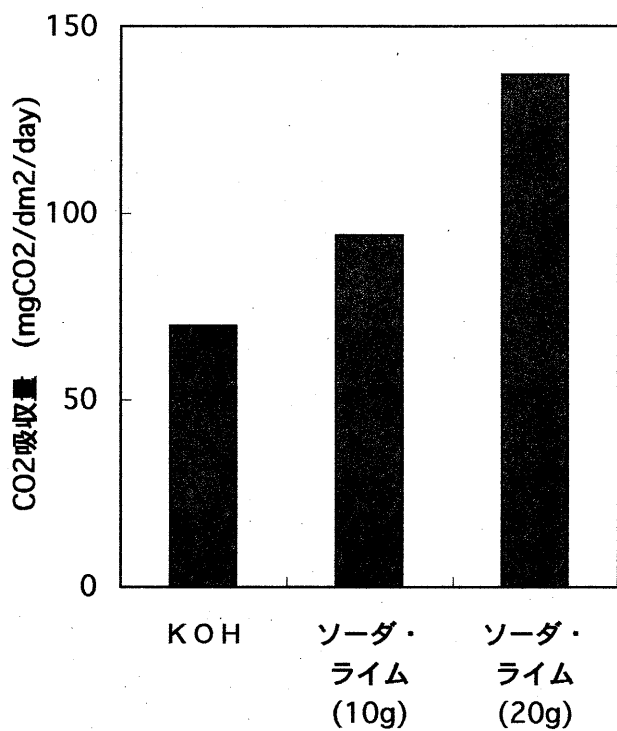


図-13-1 地温による影響 (13°C)

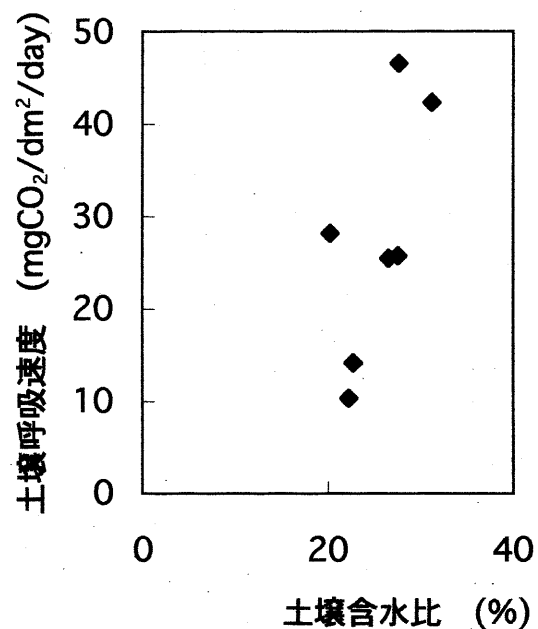


図-14 土壌呼吸速度—  
土壌水分 (通気法)

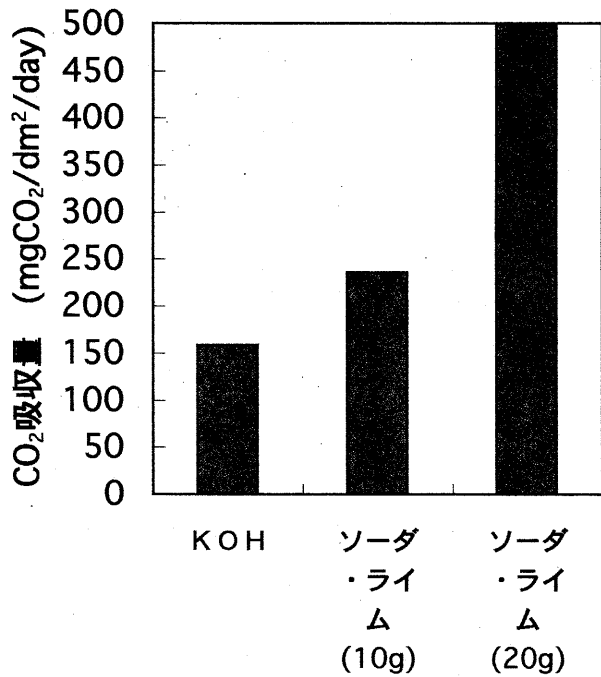


図-13-2 地温による影響 (27°C)

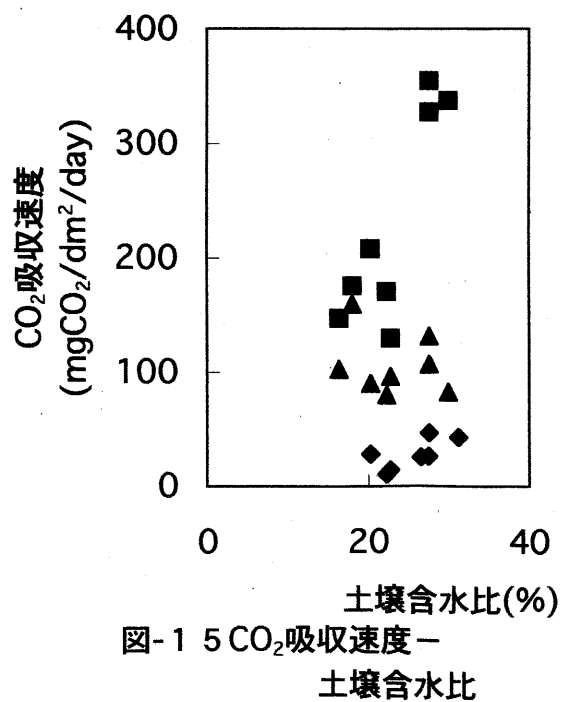


図-15 CO<sub>2</sub>吸収速度—  
土壌含水比

▲ KOH法 ■ ソーダ・ライム法 ◆ 通気法

おそれがあることがわかった。そこで、土壌含水比の程度によるアルカリ吸収法の適、不適を知るため、4.1の野外におけるアルカリ吸収法での測定結果から図-15を作製した。

#### 4.3.2.2 結果と考察

図-15は土壌含水比と各測定法における炭酸ガス吸収量との関係を示している。土壌含水比の増加に伴い、KOH法は通気法と同じような割合で炭酸ガス吸収量が増加しているのに対して、ソーダ・ライム法においては土壌含水比が約25%を越えたとき、著しく吸収量が増加している。土壌含水比25%くらいまでは一定の吸収力を保っており、それより土壌含水比が高くなると急激に吸収力が促進され、土壌水分に含まれる炭酸ガスをも吸収するようになったと考えられる。

よって、KOH法は土壌含水比による影響なく測定できるが、ソーダ・ライム法は土壌含水比がある値を越えて湿潤になったとき、土壌呼吸を著しく過大評価してしまうようになると思われる。

### 5 広範囲における土壌呼吸測定法の確立

#### 5.1 環境条件に応じたアルカリ吸収法の選択

4の実験において、次のような点が明らかになった。

1) 表-2に、図-3における通気法とKOH法およびソーダ・ライム法との炭酸ガス吸収量の比を示した。12月のような地温が低く、土壌呼吸量の少ない時期にアルカリ量が多いと、アルカリ吸収法のチェンバー内炭酸ガス濃度の希薄化に伴い、土壌呼吸を促進してしまう。よって、地温または土壌呼吸量に応じて、通気法との較差が小さくなるようにアルカリ量を調節する必要がある。

2) KOH法は土壌水分の量、すなわち土壌含水比の変化により、吸収力が増減するようなことはなく、安定している。一方、ソーダ・ライム法は土壌水分の量により吸収能力が変化し、湿潤状態における測定には適さない。

以上の点から、地温や土壌水分といった環境因子の状態、環境条件に応じて使用するアルカリ吸収法を選択する際、ソーダ・ライム法に比べてKOH法は環境因子による影響が少ない。よって、KOH法により、KOH溶液量を地温、土壌呼吸量に応じて調節しながら測定を行うことが望ましいと思われる。

しかし、“環境”の因子だけでなく、“労力”という因子も考慮したとき、KOH法に比べてソーダ・ライム法は結果算出までの労力をはるかに少ない。本研究におけるKOH法の野外での測定は、毎回3組ずつ設置して行った。結果算出の際、これら3組とブランクについて各2回ずつ、合計8回の中和滴定を行った。スムーズに行っても、8回の中和滴定に1時間ほどかかってしまう。森林内において広範囲にいくつもKOH法を設置したとき、その全てについて中和滴定を毎回行うには、時間、労力を必要とする。よって、可



能な限りソーダ・ライム法も取り入れた測定が有効ではないか、と感じた。

そこで、これらのことを考慮しながら、環境条件に応じてKOH法かソーダ・ライム法を選択して24時間の測定をする際、どちらの方法をどのくらいの量で使用することが望ましいかを表-3に示した。ここでは、地温と土壌水分、という2つの環境因子について、それぞれ、高・低、乾・湿に区分してアルカリ吸収法を選択した。なお、本研究の野外試験地（クヌギ萌芽林）における、地温の高・低の境界は日平均地温で10℃であった。また、土壌水分の乾・湿の境界は25%であった。

表-2. 野外での測定結果（1日当たりの土壌呼吸速度）の  
KOH法と通気法、ソーダ・ライム法と通気法の比

測定方法	10月	11月	12月
KOH法	2.8	3.2	6.8
ソーダライム法	7.0	4.9	9.2

表-3. 環境条件に応じたアルカリ吸収法の選択

地温/土壌水分	乾	湿
低	ソーダライム法（5～10 g）	KOH法（0.5～1.0 N）
高	ソーダライム法（10 g）	KOH法（1.0 N）

（アルカリ量は、24時間の測定を行う際の適当な量を示している。）

## 5.2 測定値の面的拡大

環境要因に応じて適当なアルカリ吸収法を選択し、通気法と組み合わせて測定した結果を補正する。このことにより、通気法による点のみならず、アルカリ吸収法による面へのスケールアップが可能となり、広い範囲でより正確な評価が期待できる。しかし、土壌呼吸は森林や土壌の種類などにより異なるため、林況がほぼ一定条件内で測定することが望ましい。

以下、アルカリ吸収法と通気法を組み合わせることによる、広範囲での土壌呼吸量を測定するための手法を示す。

1. 調査地を下調べ（地温、土壌水分など）する。
2. 表-3により、アルカリ吸収法を選択する。
3. 広い範囲での測定と同時に、通気法の側にアルカリ吸収法をいくつか設置し、比較実験をする。
4. 比較実験により、アルカリ吸収法の補正值（通気法／アルカリ吸収法）を算出する。  
（本研究のクヌギ林における、表-3のアルカリ吸収法の選択に従って算出した補正值は表-4のようになる。）

5. 広範囲でのアルカリ吸収法で得られた結果を補正し、面的、広範囲における土壤呼吸量を算出する。

- (例) ・全ての測定法による土壤呼吸量を平均し、面積を掛ける。  
・狭い範囲における土壤呼吸量を算出し、それらを積算する。

表-4 クヌギ萌芽林におけるアルカリ吸収法の補正值

地温/土壤水分	乾	湿
低	0.15	0.14
高	0.33	0.33

## 6 おわりに

土壤呼吸には、有機物分解や根の呼吸などといった生物的条件のみならず、土壤構造や土壤成分のような物理的、化学的条件も関わっている。よって、少し場所が変わればその性質や量は異なったものとなるため、従来のような1カ所での測定結果を森林全体にまでスケールアップすることは正確さに欠ける。そこで、アルカリ吸収法と通気法を組み合わせでの測定は、広範囲における土壤呼吸を定量的把握の精度を高めるのに有効であると考ええる。

アルカリ吸収法の環境要因による影響について次のようなことがわかった。アルカリ吸収法は通気法に比べてチェンバー内炭酸ガス濃度が希薄化しやすく、土壤呼吸を過大評価する傾向がある。特に、地温の低さに伴い土壤呼吸速度の小さい時期にはその傾向が著しい。よって、時期によりアルカリ量を調節する必要がある。また、ソーダ・ライム法は土壤水分が多いとき、水分に含まれる炭酸ガスも吸収してしまうおそれがある。土壤の水分条件により、2種類のアルカリ吸収法を使い分ける必要があると言える。

こうした環境要因を考慮したアルカリ吸収法による測定値について、通気法による測定値との比による補正を行い、面的レベルへのスケールアップの手法を述べた。しかし、本研究の野外試験はわずか3カ月の環境条件の変化が少ない期間に行ったため、アルカリ吸収法の選択方法について、おおまかな環境要因の変化についてしか述べることができなかった。より広範囲での細かい配分による選択が望まれる。

また、本研究では通気法による測定値を絶対値としたが、通気法はアルカリ吸収法に比べて精度が高いものの、風速や流量による影響も生じてくる。よって今後、通気法でのより精度高い測定が期待される。そのために現在、間欠的に通気を行うことにより、その通気による影響をできるだけ小さくした土壤呼吸測定装置などが試作されている。

## 7 摘要

森林生態系における炭素循環を正確に把握するためには、土壌呼吸を広範囲において精度高く測定する必要がある。本研究では、アルカリ吸収法（KOH法、ソーダ・ライム法）と通気法の環境要因（地温、土壌水分）による影響を明らかにした上で、これらの測定法を組み合わせることによる、広範囲での土壌呼吸測定法の構築を目的とした。

静岡大学構内のクヌギ萌芽林での各測定法の比較実験において、地温や土壌水分といった環境因子によるアルカリ吸収法の測定値への影響など、各測定法の問題点が上げられた。簡易土壌を用いた室内実験などにより、これらの問題点の検証を行った結果、次のようなことがわかった。

- 1) 24時間の測定による、アルカリ吸収剤の吸収能力の変化、通気法の土壌呼吸への著しい影響はほとんどない。
- 2) 土壌水分が多いとき、ソーダ・ライム法は水分中の炭酸ガスを吸収し、土壌呼吸を過大評価するおそれがある。
- 3) 地温が低く、土壌呼吸量が少ない時期には、チェンバー内炭酸ガスの希薄化に伴い土壌呼吸を促進させてしまう恐れがあるため、アルカリ吸収法のアルカリ量を減らす必要がある。

これらの結果から、実際に野外で測定する際の労力なども考慮し、環境条件に応じてアルカリ吸収法を選び、かつアルカリ量を調節する必要があると考え、その大まかな選択方法を示した。さらに、その選択したアルカリ吸収法の測定値を通気法の測定値により補正し、面的、広範囲における土壌呼吸量を算出するまでの手法について述べた。

本研究では通気法による測定値を基準値としている。通気法でのより正確な測定が可能となれば、さらに精度高い広範囲における土壌呼吸の測定、評価が期待できる。

## 参考文献

- 1) Bekku, Y., Koizumi, H., Nakadai, T. and Iwaki, H.: Measurement of soil respiration using closed chamber method; An IRGA technique. *Ecological Research*, 10 : 369-373. 1995
- 2) Carlye, J.C. and Than, U.B.: Abiotic controls of soil respiration beneath an eighteen-year-old *Pinus Radiata* stand in southeastern Austraria. *Journal of Ecology*, 76 : 654-662. 1988
- 3) Edwards, N.T. 1982: The use of soda-lime for measuring respiration rates in terrestrial system. *Pedbiologica*, 23 : 321-330.
- 4) Freijer, J.I. and Bouten, W.: A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution; Experiments and simulation. *Plant and Soil*, 135 : 133-142. 1991
- 5) Gosz, J.R., Dahm, C.N. and Risser, P.G.: Long-path FTIR measurement of atmospheric trace gas

- concentration Ecology, 69 : 1326-1330 1988
- 6) 長谷場徹也 : 新版 農業気象学. 文永堂出版. 1992
  - 7) 井上君夫: チェンバー法における土壌面炭酸ガスフラックスの測定. 農業気象 42(3) : 225-230. 1986
  - 8) 石原健一: 土壌表面から放出される炭酸ガスフラックスに関する研究 静岡大学農学部 卒業論文 1995
  - 9) 環境庁「地球温暖化問題研究会」: 地球温暖化を防ぐ NHKブックス 1990
  - 10) 桐田博允: 野外における土壌呼吸の測定—密閉吸収法の検討; II. 測定容器の大きさが測定値に与える影響 III. カバーの底面積とCO<sub>2</sub>吸収面積が測定値に与える影響 日生態会誌, 21(1,2) : 37-47. 1971
  - 11) Koizumi, H., Najadai, T., Usami, Y., Satoh, M., Shiyomi, M. and Oikawa, T.: Effect of carbon dioxide concentration on microbial respiration in soil. Ecological Research, 6 : 227-232. 1991
  - 12) 小森友明・関平和: 反応速度論を用いた土壌呼吸速度のモデル化. 農業気象, 51(2) : 145-152. 1995
  - 13) Koizumi, H., Najadai, T., Usami, Y., Satoh, M., Shiyomi, M. and Oikawa, T.: Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land; Effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. Ecological Research, 8 : 65-71. 1993
  - 14) Nakane, K., Yamamoto, M. and Tubota, H.: Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. Jap. J. Ecol., 33 : 397-408. 1983
  - 15) 中根周歩: 森林生態系における炭素循環. 日生態会誌, 36 : 29-39. 1986
  - 16) Nay, S. M., Mattson, K. G. and Bormann, B. T.: Biases of chamber methods for measuring soil CO<sub>2</sub> flux demonstrated with a laboratory apparatus. Ecology, 75(8) : 2460-2463. 1994
  - 17) 沼田 真.: 草地調査法ハンドブック. 東京大学出版会 1962
  - 18) Ohashi, M., Gyokusen, K. and Saito, A.: Effect of carbon dioxide concentration and wind speed using the chamber method on soil respiration. J. Jpn. For. Soc., 77(6) : 599-601 1995
  - 19) Seto, M.: A preliminary observation on CO<sub>2</sub> evolution from soil *in situ* measured by an air current method; An example in rainfall and plowing sequences. Jap. J. Ecol., 32 : 535-538. 1982
  - 20) 鶴田治雄: (講座) 土壌生態系のガス代謝と地球環境 5—二酸化炭素. 日本土壌肥料学雑誌, 63(2) : 237-244. 1992
  - 21) 堤 利夫: 森林生態学. 朝倉書店 1989

## 第Ⅳ部 炭酸ガス吸収源としての森林の評価

### 1 はじめに

#### 【炭酸ガス環境問題の意義】

温暖化、熱帯林の減少、砂漠化あるいは生物種の消滅などの地球規模の環境問題において、森林が直接、間接的に大きく関わっており、近年の急速な森林の消失や衰退がこれらの地球規模の環境問題における重要な要因のひとつになっている。地球環境問題の中でも、ここで取り上げる、温暖化ガス（主として炭酸ガス）濃度の上昇問題は世界の食料、エネルギー問題と密接に関わっており、もっとも重要な問題のひとつである。現在「国連環境開発会議（UNCED）」において、温暖化ガス対策の枠組み条約を含めた国際的な取り決めの作業が進められており、「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の会合でも森林問題が重要な課題のひとつになっている。

大気中の炭酸ガスは現在約 350 ppm で年間約 1.5ppm の割合で増加しているといわれているが、地史的に見れば地球誕生以来、炭酸ガス濃度は幾多の変動を繰り返している。これまでの調査では産業革命前 280 ppm であった濃度が 1900 年には 295 ppm、1950 年には約 310ppm と推移し、最近では特に上昇割合が著しい。大気中の炭酸ガス濃度の上昇はその温室効果によって気温に影響を与えるので、これまで数億年をかけて形成された生物の生存環境が人類の活動によって急速に変えられようとしている。

この原因は主として、化石燃料の多量消費および大規模な森林の消失といわれ、すべて人為に由来している。前者は地球規模で年間約 57 億トン（炭素換算、1987 年）、後者は 16±12 億トンといわれている。このような放出が年間の濃度の上昇に寄与していると見てよい。しかし全炭酸ガス放出量の約半数が年間の炭酸ガス上昇分にあたるところから、残り半分は海洋と陸上生態系に吸収されていることになる。地球全体として森林生態系が炭酸ガスのシンク（吸収源）なのかソース（放出源）なのか、あるいはバランスが取れているのかを日本および世界の立場から定量的に整理していくことの今日的意義は大きい。

しかしながら、森林による炭酸ガスのシンク・ソース機能の評価には、地球の森林タイプごとの面積、現存量および生産量についての正確な資料および資料間の適切なマッチングが必要になるが、個々の資料について実態にあった数値が得られているか確認作業を進めていくには今後の研究に待たねばならない。したがって、試算に用いられた研究資料や統計資料の継続的な検討・研究が必要になるとともに、報告された数値の利用にあたっては十分な配慮をお願いする。

なお、この章は 研究代表者の未発表論文をもとに、本報告書用に一部修正し、まとめなおしたものである。

## 2 研究の動向概説

### 1) 総論

温室効果ガス（ここでは炭酸ガス）濃度の上昇によってもたらされる地球環境の変化によって生態系がさまざまな影響を受けることが予想される。環境の変化は生態系の主要な構成要素と要素間の関係をこれまで予想できないほどの変化を生物界に与える可能性がある。これまで生態系の構成要素と構成要素間の関係について、幾多の研究がなされ、かなり明確になった部分もあるが、本質的にはまだ未知の部分もおおい。われわれは、この段階で新たに温室効果ガスによって影響を受け、さらに複雑になった問題を対象とした研究を開始しなければならない。

IPCC の報告によると過去 10 年間（'80-'89）に人為による炭素の全放出量は  $70 \pm 15$  億トン／年で、大気に残留する量が 34 億トン／年、海洋に吸収される量が  $20 \pm 8$  億トン／年で、差引  $16 \pm 14$  億トン／年の行方が不明であるという（WMO/UNEP, 1991）。北半球の陸上生態系がシンクとして機能している可能性が高い。

炭素循環モデルによる最近の研究によれば、行くえ不明の炭酸ガスのシンクとして海洋の能力が小さく、とくに温帯域の陸上生態系の役割が大きいことが確認されている。

陸上の植物界、とくに森林生態系は植物体および土壌有機物として蓄えており、その一部を焼いたり伐採して森林を破壊すると大変な量の炭酸ガスが大気中に放出されることになる。このことは先に述べたように、最近の温室効果ガスの増大は単に化石燃料の消費ばかりではなく、人為による森林への加速度的な干渉によっても、もたらされた可能性がある。

森林生態系に関する研究の中で、とくにその炭素循環について検討が加えられる必要がある。すなわち森林がいかに関炭酸ガスを吸収し、いかに関炭酸ガスを放出するかを定量的に検討することである。そのためにどんな点に考慮する必要があるか、どんな点が今後必要になるかを明確にする必要がある。

### ①森林生態系の炭素循環

森林を構成する林木の主な構成元素は炭素で、現存量（存在量）のおよそ半数は炭素と考えてよい。植物体の炭素保有総量は 6-7000 億トン程度でそのうち 50-60% は熱帯雨林が占める。そのほかに土壌有機物として林床の未分解有機物の存在がある。この量は 1 兆 2000 億トン程度存在すると予想される。合計すると大気中の炭酸ガスの 3 倍程度の炭素を蓄えていることになる。

これらの有機物は絶えず分解して、大気の炭酸ガスと交換している。したがって、総蓄積量だけでなく、分解速度、交換速度なども検討される必要がある。分解速度は、水分条件が十分であれば温度に指数関数的に比例するので、熱帯雨林で交換速度が早く、亜高山帯の常緑針葉樹で遅い。

したがって次の段階としては、林地の温度情報を加味して炭酸ガスの交換速度を詳細に

把握することが重要である。

## ②シンク・ソースとしての森林

研究者によって提案された、陸上生態系の炭素貯留量には大きな隔たりがある。これの主な理由は、推計に用いられた各タイプの森林面積や現存量の評価が異なることによる。陸上生態系の植物が保有している炭素量の90%を森林が占め、年間1700万haが伐採されているといわれる(FAO,1992)がその実態は政治的・経済的利害と結びつき、実態にそくした統計資料を得ることは困難がともなう。したがって森林のシンク・ソースを論じる場合でも、この統計資料の不確実性に起因する問題は避けて通れない。

森林がシンクでもソースでもないと評価(Bolin,B.,1977, Woodwell,G.M.et al.,1978)があるいっぽうで、シンクとして評価する報告(Armentano,T.V.,et al.,1980, Johnson,W.C.,et al.,1983)もあり混在としている。グローバルスケールでのモニタリングが叫ばれるゆえんでもある。このような不確実性を前提にして、現在の評価を試みる努力がされている。

ここで、おもに取り上げた BIOSIS データベースから検索された論文のかなりの割合は酸性雨または酸性雨関連の論文で占められた。このプロジェクトに有用なテーマ、すなわち、炭酸ガス濃度の上昇にともなう成長変化、光合成速度、蒸散速度への影響に関する研究が盛んになってきた。

たとえば BIOSIS (アメリカのデータベース) 90134175: Growth responses of seven major co-occurring tree species of the northeastern USA to elevated carbon dioxide. BIOSIS 39077537: Effect of doubling atmospheric carbon dioxide concentration on growth dry matter distribution and carbon dioxide exchange of 2 yr old sweet chestnut trees *castanea-sativa* mill. BIOSIS 39089135: Effects of elevated carbon dioxide on photosynthesis and growth of small birch plants *betula-pendula* roth. などがある。しかしながらすでに述べたように、まだ十分な資料の集積があるとはいいがたく、研究動向を見定めるには今後待つ必要もある。

森林に関する個々の現象を記述した情報を長期間に渡って集めるのは困難なので、森林のような場合には得られた成果の一部とその関連性から事象を総合的に統合するシミュレーションモデルを用いた解析が効果的であるから、今後こうした解析が増えるものと期待される。

## 2) 各論

### ①ランドサットのマルチスペクトルスキャナーの利用

100x200km の広範囲のいろいろな植物群落(作物、草原、森林)において、土壌条件(50% 野外容水量)、日射(950 W/m<sup>2</sup>)、気温 25℃以上で、赤と近赤外線を用いて緑被度を推定し、作物、草原、森林の光合成速度が推定されている。灰分の多いローム層で 20-35kg CO<sub>2</sub>/ha.hr で、砂質土壌のローム層が 12-25kg CO<sub>2</sub>/ha.hr で、砂質土壌で 8-15kg CO<sub>2</sub>/ha.hr であった。植被は高密度の穀物畑、作物と草原の混交地、そして草原や森林である。植生

の単位ごとに光合成速度が指標化され、クロロフィルによる炭酸ガス吸収の効果を示すパラメーターとして提案されている (BIOSIS 90023957)。

## ②樹冠内の炭酸ガスフラックスに関する論文

この分野はもっともデータの集積が盛んで、これらの基礎研究は温暖化ガス吸収プロジェクトにおいて種の多様性に対応した光合成速度を決定するのに大いに貢献するものと期待される。

ただし、個々の論文によってはプロジェクトの目的やグローバルな視点からみた場合に、必ずしも十分対応しているとはいえない場合や、対応させるには無理がかなりでてくることが考えられ、単なる情報の提供に終わる場合もある。したがって、ケースバイケースの対応が必要になる。

ブナとカエデの耐陰性に関連した炭酸ガス交換 (BIOSIS 39080424) やダグラスファーの樹冠エネルギーと炭酸ガス拡散に、改良ボーエン比法を適用し、樹冠内のキャノピーコンダクタンス、蒸発散速度、炭酸ガスフラックスが温度変化や飽差に支配される例 (BIOSIS 90014763)、マツを材料にして、外性菌根を植え付けた場合、光合成速度、水利用効率の上昇が見られた (BIOSIS 90038976)。樹高生長、肥大成長を光合成速度と関連性を異なる海拔高でしらべ、海拔高の違いによる成長差を生理学的立場から検討している。光合成速度と地ぎわ径の成長が関連性が高いこと上位高度で年樹高成長量が40%も低下することを明らかにした (90067988)。

## ③シミュレーション 技法の利用

老齢林から若い成長の活発な林に変換した場合に、大気炭酸ガス濃度は減少しないことが明らかになった。老齢林の蓄積は急激に減少し、すくなくとも200年は前の段階に回復しなかった。モデルの中に、木製建築物における炭素の持ち去りを含めていても、木材の収穫は大気に炭酸ガスを放出している。この結果を埋め合わせると木の伐採やほかの長期的な木製品の生産は確実に増えつづける。トータルの収支計算によると、その量は5倍に達する。10ないし6ヘクタール老齢林を伐採し、若い林を作ると、オレゴンやワシントンでは100年間で、1.5倍、10ないし9ヘクタールの場合、1.8倍になる。総数109メガグラム大気に供給される (BIOSIS 89092686)。あるいはC<sub>13</sub>/C<sub>12</sub>をもちいた森林の炭酸ガス循環モデルを用いてパナマの熱帯雨林において放出された炭酸ガスのおよそ7-8%が光合成をとうして循環していることが明らかになった (BIOSIS 89023952)。

また炭酸ガス濃度の増加との関連で、北半球の4つの気候帯が選ばれ、樹幹の年輪解析が行われた。その結果炭酸ガス濃度が上昇すると、成長がよくなることが認められた。こうした結果が得られたところは気温が穏やかで水ストレスがないところに限られる (BIOSIS 87003188)。いっぽう一般的な森林の生態系解析のモデル化の動きの中で、た



例えば BIOSIS 86112342 などのように、森林において炭素、水、窒素循環をモデル化している。FOREST-BGC と呼ばれるモデルは樹冠内のエネルギー吸収、蒸散、光合成、成長、窒素循環、維持呼吸、地上部と地下部の炭素収支について検討を加えている。論文の中ではおもに森林水文と一次生産について検討が加えられている。

## まとめ

研究の動向は、基本的に次のように理解される。

### ①森林生態系の中で炭素の循環を中心とした解析がめだつ。

研究はとくに蓄積量を知ることばかりでなく、その分解過程や交換速度に注目したものがおおい。温度要因とこれらの関係は比較的詳細にわかっているが、球的気候変動にともなう変動シナリオが局所的に検討が可能なほど明確でなくまだ判然としていないので、炭素の分解速度や交換速度のシミュレーションの結果を具体的に検討できない段階にある。

### ②実験生態学的手法による解析が盛ん。

酸性雨と森林衰退問題とも関連して、この分野の研究が盛んである。

高炭酸ガス濃度下における光合成速度の変化、あるいは長期的な成育実験による樹木の高炭酸ガス環境への適用試験などが盛んに行われている。

気候変動シナリオによると 60 年から 90 年後に炭酸ガスが福利的に増え現存濃度の倍増が見込まれている。600—700ppm を想定した炭酸ガス環境下での生理的特性の変化が注目されている。今後実証研究およびシミュレーションによる研究が盛んになるとと思われる。

### ③グローバルスケールのモニタリングに期待する。

地球温暖化の問題は、炭酸ガス収支の算出定義の項目で述べたように、森林を構成する樹木の生理的な特性を詳しい知るばかりでなく、その特性が適用される、森林面積や植生タイプごとの面積を詳細に知ることによって、森林を介した炭酸ガス収支の予測が明らかになるとと思われる。したがって詳細な情報にみあうとバランスの取れた統計資料に関する研究が必要になる。

森林面積は人間の活動と密接に関係することから、その統計資料は政治・経済的利害と結びつき易いと考えられる。したがって、いかにして当該国の自尊心を傷つけること無しに、地球レベルで統一した資料を得るかのコンセンサスが必要であると思われる。

また、森林面積の動態調査ばかりでなく、モニタリング機能を生かした環境継続監視する研究が今後盛んになるとと思われる。

### 3 日本の森林における炭酸ガス収支

#### 1) 炭酸ガス収支に関する算定式の定義

森林生態系での物質の動きを主として炭素について見ると図-1 のようである(岩坪、1990)。林木は土から水と無機物を吸収し、太陽のエネルギーを利用して大気中の炭酸ガスから林木の生命維持の為の有機物に変換する。いっぽう植物はその有機物の一部(葉や枝など)や植物自体を枯死木として林地へ供給する。これらの有機物は土壌動物や土壌微生物によって分解され、炭素は炭酸ガスとして放出されるが、無機養分の大部分は再び林木に利用される。

次に、炭酸ガスの収支項目を図-1 にならって挙げると、シンクの側面として光合成が、ソースの側面として林木の葉、枝、幹、根および土壌からの呼吸がある。具体的な炭酸ガス収支算定手順については図-2 にあげる。

以下、光合成、葉の呼吸消費量、非同化器官の呼吸消費量、土壌呼吸のそれぞれについて算出法および算出する際に用いた仮定について概説する。

#### 2) 光合成量の推定

光合成はたいへん複雑な過程を経るが一般的に、光合成量を求める場合は単位面積(あるいは重量)あたりの光合成速度に葉面積(あるいは葉重)を乗じ、そしてその速度が持続する時間に乗ずると得られる。これらの手続きには生理的な理解、葉量の推定、そして日長時間や生育期間などの関わりを解決しなければならない。

森林タイプごとの平均的な最大光合成速度・暗呼吸速度を表-1 に示す(Larcher,1980)。

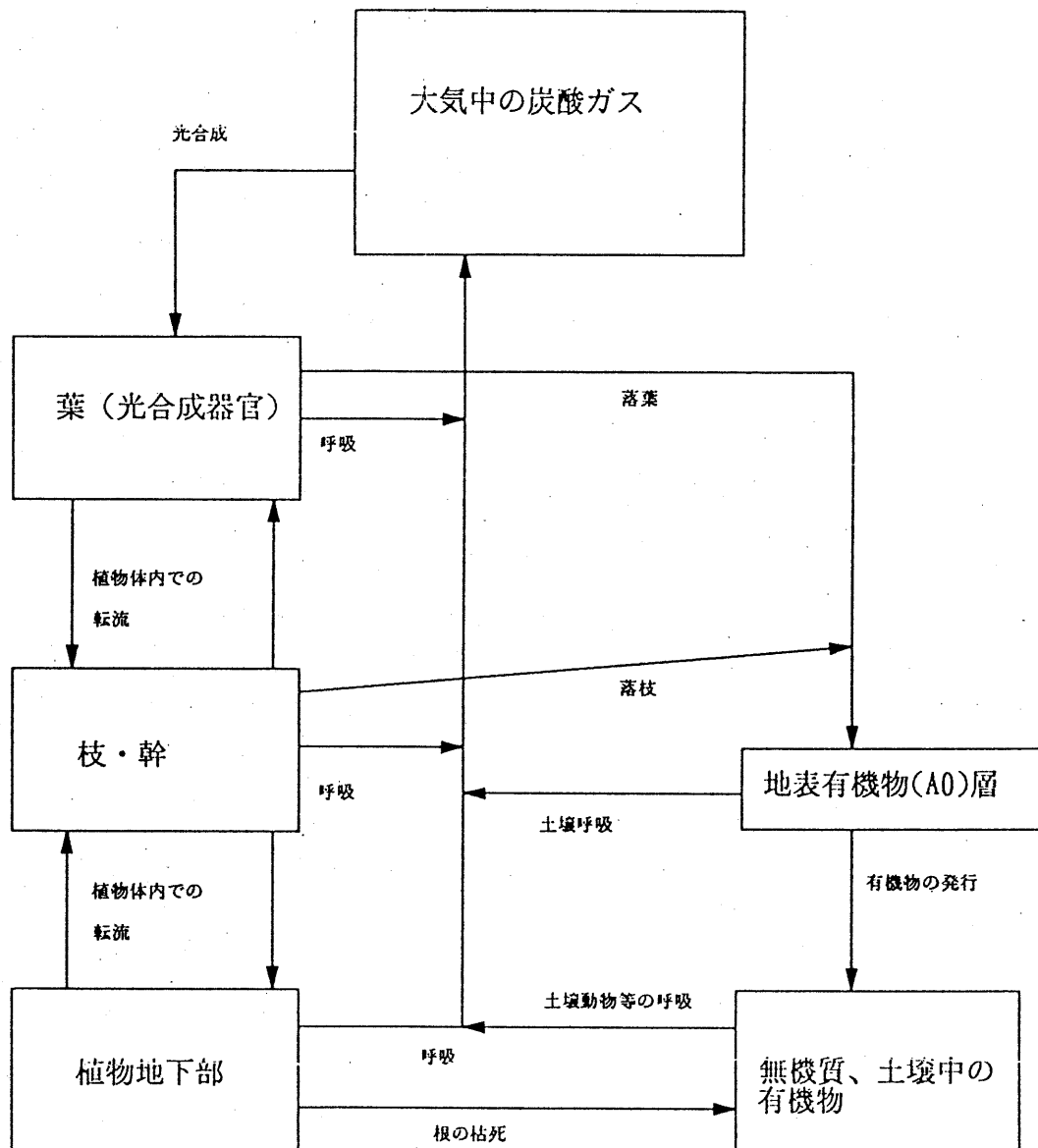
表-1 最適な光・温度条件下での光合成速度および暗呼吸速度\*1)

夏緑林(落葉広葉樹)	15 -25(30)	Sun	3~4
		Shade	1~2
常緑広葉樹(熱帯・亜熱帯)	10 -25	Sun	0.7
		Shade	0.3
冬雨型気候(硬葉樹)	3 -10		
常緑針葉樹	3 -18	Sun	1.0
		Shade	0.2
灌木	4 -6		
コケ	2 -4		

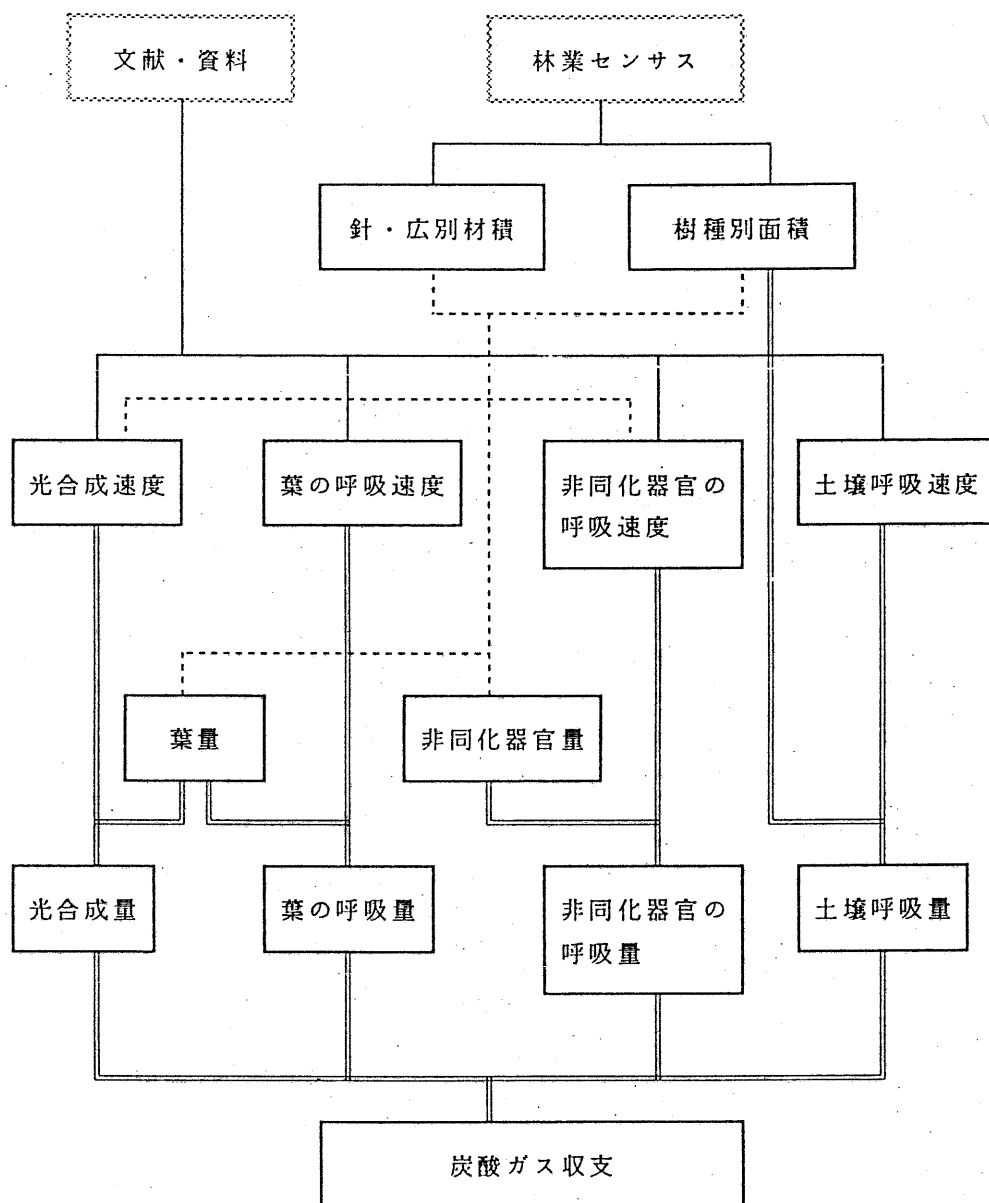
単位: CO<sub>2</sub> mg/gd.hr

注: \*1) Larcher (1980) から抜粋

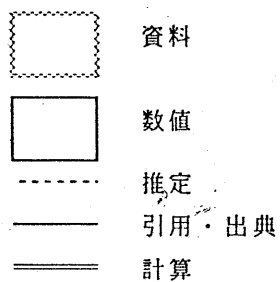
単位はいずれも重量ベースである。試算に用いられた光合成速度および暗呼吸速度は、計算に適用される森林タイプが広葉樹と針葉樹の2つのタイプなので(その理由は後述す



図－1 森林生態系における炭素循環のモデル 岩坪(1991)



凡例：



図－2 炭酸ガス収支算定手順

る)、表-1に挙げた夏緑林と常緑針葉樹のそれぞれを平均したものを表-2に示す。

表-2 試算に用いられた光合成速度および暗呼吸速度

森林タイプ	光合成速度	暗呼吸速度
広葉樹	20.0 mg CO <sub>2</sub> / g.hr	2.5 mg CO <sub>2</sub> / g.hr
針葉樹	10.5 mg CO <sub>2</sub> / g.hr	1.0 mg CO <sub>2</sub> / g.hr

### 3) 葉量の推定

森林タイプ区分およびその面積に関しては次のように整理される。日本の森林帯を構成する森林区分は水平的には亜寒帯林、冷温帯林、暖温帯林、亜熱帯林(中野、1942)に分かれる。これらの森林を構成する主な樹木は常緑針葉樹(カマツを含む)、落葉広葉樹、常緑広葉樹(照葉樹)と考えられる。

いっぽう、わが国の森林資源統計(林業センサス<sup>\*1</sup>)によると、都道府県ごとに次の情報が得られる。

森林面積：人工林、天然林別に、針葉樹・広葉樹の面積

人工林については特定の樹種(針葉樹5種、広葉樹2種)について区分

人工林、天然林別に、齢級ごと(人工林では10クラス、天然林では4クラス)にその面積が区分

森林蓄積量：国有、民有の別、人工林、天然林の別に蓄積量

常緑針葉樹(落葉性の針葉樹も含む)、落葉広葉樹、常緑広葉樹

二つの推定方法によって葉量の推定を行った。すなわち、(1)材積(蓄積)と葉量の相対成長関係を用いる方法と(2)森林の面積あたりの葉量から求める方法である。

注：<sup>\*1</sup>都道府県別の森林蓄積量の算出方法：林業センサスには都道府県別に人工林、天然林の針・広葉樹別面積、人工林の針・広葉樹それぞれの樹種別面積、それに人工林、天然林の蓄積量が記載されている。針・広葉樹別に光合成量、呼吸消費量を求めるのに必要となる都道府県別の針・広葉樹の森林面積はこれより得られるが、蓄積量は人工・天然林別のデータしかないので、人工・天然林における針葉樹と広葉樹の森林面積の比をそれぞれの蓄積量に乗じて、都道府県別の針葉樹・広葉樹蓄積量を算出した。

#### 4) 都道府県別の森林蓄積量及び炭酸ガス収支の算出方法

全国的な炭酸ガス収支を算出するために、林業センサスのデータを利用した。これには都道府県別に人工林、天然林の針・広葉樹別面積、人工林の針・広葉樹それぞれの樹種別面積、それに人工林、天然林の蓄積量が記載されている。針・広葉樹別に光合成量、呼吸量を求めるのに必要となる県別の針・広葉樹の面積はこれより得られるが、蓄積量は人工・天然林別のデータしかないので、人工・天然林における針葉樹と広葉樹の面積の比をそれぞれの蓄積量にかけあわせて、県別の針・広葉樹蓄積量を算出した。当初は樹種別面積を利用して蓄積量を算出し、それぞれの炭酸ガス収支を求めることも考えたが、県によって単位面積当りの蓄積量や樹種の占有率に大きな差があり、誤差が大きくなったためあきらめた。

全国の炭酸ガス収支を算出するうえで今回の林業センサスのデータは不十分であった。面積や蓄積量段階でのデータ不足は、最終的に大きな誤差を引き起こす可能性があり、北海道の森林の炭酸ガス収支において、放出量が吸収量を大きく上回るという計算結果が良い例である。針・広葉樹別および樹種・齢級別の森林面積・蓄積量などのデータがあれば、より詳細かつ正確な結果を得ることができるであろう。

##### (1) 相対成長関係を用いる方法

伐倒調査によって得られた伐倒供試木の幹材積とその葉量との間にはある一定の飽和曲線関係がある。この関係は相対成長関係と呼ばれる。今回の場合のように、対象となる森林の相対成長関係が既知でない場合、つまり単木による材積と葉量の情報がない場合、森林の葉量を推定するにはこの方法は使いにくい。常緑針葉樹、常緑広葉樹、落葉広葉樹の材積と材積に対する葉量の割合の平均値を求め、針葉樹と広葉樹に分けて表-3に示した。

表-3 森林面積、蓄積量および葉量（推定法(1)と(2)）

針葉樹			広葉樹		
面積 (ha)	蓄積量 ( $10^3 \cdot \text{m}^3$ )	葉量 (t)	面積 (ha)	蓄積量 ( $10^3 \cdot \text{m}^3$ )	葉量 (t)
11,934,919	1,154,354	40,115,890	11,815,776	1,176,936	10,610,166
179,023,785			35,447,328		

上段：推定法(1)、下段：推定法(2)

次に都道府県別の蓄積量（ここでいう、材積と同じ）にこの割合を乗じて都道府県別の針葉樹・広葉樹の葉量\*2)を推定し表-4に示す。

表-4 都道府県別針葉樹・広葉樹の蓄積量と葉量

府 県	針 葉 樹			広 葉 樹		
	面積 (ha)	蓄積量 (1000m-3)	葉量 (t)	面積 (ha)	蓄積量 (1000m-3)	葉量 (t)
全 国	11934919	1154354.4	179023785	11815776	1176935.602	35447328
北海道	1996854	133429.3	29952810	3185452	369204.6968	9556356
青 森	265548	20705.043	3983220	358949	46084.95695	1076847
岩 手	473537	35610.853	7103055	655865	66936.14697	1967595
宮 城	197245	15377.372	2958675	209284	18919.6278	627852
秋 田	382232	34369.948	5733480	427930	45227.05243	1283790
山 形	189141	17427.38	2837115	436313	29719.62031	1308939
福 島	374526	33478.297	5617890	549102	46384.70275	1647306
茨 城	144322	20029.278	2164830	58548	4296.722396	175644
栃 木	185831	21344.036	2787465	163120	16037.96401	489360
群 馬	201279	26547.588	3019185	198387	21609.41243	595161
埼 玉	68626	10790.331	1029390	56257	6172.668626	168771
千 葉	85413	7772.4943	1281195	65019	2908.505741	195057
東 京	35125	5528.6968	526875	40154	2736.303234	120462
神奈川	37422	5274.0465	561330	46143	3761.953526	138429
新 潟	165258	21419.762	2478870	552289	40967.23806	1656867
富 山	59427	7072.3711	891405	164516	15778.62886	493548
石 川	101962	15690.827	1529430	168601	15997.1732	505803
福 井	116772	14963.466	1751580	183154	19136.53373	549462
山 梨	189788	13571.777	2846820	136691	13480.22291	410073
長 野	610923	60124.5	9163845	373116	41531.49961	1119348
岐 阜	431556	44186.527	6473340	395685	38077.47337	1187055
静 岡	325266	34553.965	4878990	149448	16334.03483	448344
愛 知	162546	19548.497	2438190	56561	4737.502794	169683
三 重	251852	28321.582	3777780	120382	7907.418022	361146
滋 賀	111395	10031.628	1670925	87162	6504.371858	261486
京 都	186408	24330.596	2796120	147757	16295.40388	443271
大 阪	41331	3279.8204	619965	13812	801.179602	41436
兵 庫	338116	34633.428	5071740	220399	18509.5722	661197
奈 良	179554	29707.401	2693310	100078	11361.59908	300234
和歌山	236566	29449.223	3548490	122818	11946.77692	368454
鳥 取	145143	14537.978	2177145	106111	10271.02244	318333
島 根	209576	17171.644	3143640	293270	24947.35553	879810
岡 山	300150	24232.952	4502250	169634	14471.0485	508902
広 島	402183	32248.069	6032745	202426	16669.93056	607278
山 口	255986	27636.319	3839790	160213	14974.68088	480639
徳 島	204372	22820.77	3065580	101150	8363.229691	303450
香 川	63542	4742.6689	953130	21187	1767.331116	63561
愛 媛	289296	30699.385	4339440	95627	8280.615066	286881
高 知	405712	37804.497	6085680	171924	14779.50347	515772
福 岡	150960	21173.786	2264400	53167	3427.214331	159501
佐 賀	69699	6342.6979	1045485	26798	3044.302091	80394
長 崎	100149	8866.9883	1502235	123506	8887.011682	370518
熊 本	274750	28684.379	4121250	142277	15174.62071	426831
大 分	243147	34341.623	3647205	162937	14070.37709	488811
宮 崎	340570	30858.763	5108550	229923	25193.23734	689769
鹿 児 島	312776	30635.388	4691640	232878	28519.61208	698634
沖 縄	21087	1412.9208	316305	79756	6301.079174	239268

注：\*2)この場合の葉量は、常緑針葉樹に含まれる落葉性の針葉樹（たとえばカラマツ、メタセコイヤなど）をシラベ・エゾマツ・アカマツなどと区別せず一括して取り扱っている。また広葉樹についても、常緑性のものと落葉性のものを区別していない。また地域によって広葉樹を常緑性のものと、落葉性のものに区別していない（将来森林の蓄積量の統計が樹種ごとに取れた段階で再計算がなされよう）。

## (2)森林面積あたりの葉量から推定する方法

各森林タイプを構成する樹種タイプごとに次のように対応することにする。広葉樹の葉量の推定には 3ton/ha を、針葉樹の葉量には 15 ton/ha を用いた（佐藤,1973）。全国レベルでは、針葉樹の葉量がおおよそ 4.5 倍、広葉樹の葉量がおおよそ 3.3 倍に増えていることがわかる。

立木密度の低さが問題になった、北海道では針葉樹では 6.46 倍、広葉樹では 2.87 倍となった。

## 4) 日長時間、持続時間および生育期間（日数）の仮定

光合成量を試算するにあたり、表-2 に示した光合成速度が一日あたり平均何時間持続するかを仮定する必要がある。その理由は、光強度の日変化および天候の変化（晴、曇天、雨など）、葉や土壌の水分条件によって最大光合成速度が変化するため、仮定された日長時間と光合成速度をそのまま乗じては過大に推定することが明白であることによる。ここではおもな生育期間の日長時間を午前6時から午後6時まで平均12時間と仮定する。天候の変化、光合成速度の季節変化（一般に夏に高く、春、秋に低い）などもあわせ考慮すれば、表-2 に示した光合成速度は持続時間平均6時間程度続くと仮定した。

また葉の着葉期間（日数）は、常緑樹の場合は一年間着生しているので、原則的には 365 日になるが、冬季間における生理機能の停止を考慮し、その期間を仮に 11 月から 3 月までと見積もれば、生育日数は 215 日となる。いっぽう落葉広葉樹の生育日数は海拔高や緯度によって一ヶ月ほどのずれが起こり得るが、4 月から 10 月までの 6 ヶ月と見るのが一般的で、おおよそ 180 日程度と見込まれる。広葉樹の中には現在の試算の段階では常緑広葉樹も含まれているので一ヶ月長めに見積もって、210 日と仮定する。これらをまとめると表-5 のようになる。

表-5 光合成・暗呼吸における持続時間および生育期間

森林タイプ	持続時間（時間）	生育期間（日）
広葉樹	6	215
針葉樹	6	210

光合成量を試算する項目について解説を加えてきたが、以上まとめると、光合成量は単



位重量あたり時間あたりの光合成速度（表－2 参照）に葉量（表－4 参照）および着生日数、光合成速度の持続時間を乗ずることによって得られる。

光合成速度はその葉の受ける光条件によって生理的な特性が異なる。一般的に陽葉と陰葉に分かれる。陽葉と陰葉の面積あたりの光合成速度を比べると 2～3 倍程度の開きがある（表－1 参照）。また季節によっても光合成速度が異なる。光合成量の推定精度を上げるには陽・陰の区別、季節変化も加味することが望ましい。また光合成速度は温度によっても影響を受け、最適な光合成速度の存在が認められる。より寒冷な地をおもな生育地とする植物ではより低温側に光合成の最大値が認められる。いっぽうより温暖な地を主な生育地とする場合はこれと反対の傾向がある。今後はこのような点も考慮しながら推定する必要があるかもしれない。

#### 5) 非同化器官の呼吸消費量：

非同化器官量（幹や枝）の推定は同化器官（葉量）の推定の場合と同じように、都道府県別の森林蓄積量から、手元にある常緑針葉樹、常緑広葉樹、落葉広葉樹の伐倒調査の資料を用いて、幹材積と非同化器官の重量の関係から都道府県別の針葉樹・広葉樹の非同化器官量を推定する。つぎに非同化器官量と呼吸速度の関係から呼吸消費量を求めることが考えられる。しかしながら葉の呼吸量推定の場合とことなり、非同化器官の呼吸消費量推定の場合は簡単にはいかない。すなわち、単位呼吸量は篩部、形成層で大きく、木部では内側の年取った部分ほど小さくなる。したがって単位呼吸量を単位面積の森林の値に換算するためには、直径別に得た単位呼吸量と直径別の現存量を使って求める必要がある。しかしながら、このことはすでに葉量の推定（第一項目）の場合で議論したように、今回はデータ不足でこの方針どうりにはいかない。

今回の報告では、これまでに調べられた森林タイプごとの純生産量のデータとそれぞれの呼吸消費量との関係（根岸,1984）を利用して、森林タイプごとの呼吸消費量を仮定するのが妥当と考えられる。若いブナ林では純生産量に対して 30-40%が呼吸消費量であるが、老齢化すると 60-70%に高まる。ここでは平均値をとり、針葉樹の場合は純生産量の 55.8%、広葉樹の場合は純生産量の 55.7%を用いている。

次にその手順を紹介する。森林のタイプごとにこれまで調査された中から純生産量と呼吸消費量の関係を根岸の報告（根岸,1984）から必要な部分を抜粋しまとめ直すと表－6 のようである。

ここでは、森林タイプごとに炭素量、純生産量をまとめた Melillo et al.(1990)、佐藤 (1973)、角張 (1977) のデータから温帯林（夏緑林）および亜寒帯林における純生産量（下ばえも含む）を推定し（表－7）、表－6 に示した純生産量に対する呼吸消費量（根の呼吸消費量は土壌呼吸で取り扱う、その理由は後述）の割合から非同化器官による呼吸消費量を推定する。

表ー6 森林の純生産量と呼吸消費量 (t/ha.yr) \*1)

樹種	林齢	純生産量	呼吸消費量
ヨーロッパブナ	8	7.5	2.3
	25	13.5	3.5
	46	13.5	4.5
	85	11.3	4.6
日本ブナ	30~70	15.3	4.8
クス	46	15.0	-----
コジイなど	60	17.2~	10.8
		19.4	12.8
イスノキなど	成熟林	20.6	22.7
シラベ、アオモリトドマツ			
	15	7.4	5.0*2)
ヒノキ	18	15.4	7.7
サバンナ	成熟林	13.4	18.4
熱帯雨林	成熟林	26.5	18.3

注：\*1)根岸（1970）注：\*2)原表には針葉樹の葉と枝の呼吸消費量が  
コミとなっているが、ここでは枝の呼吸消費量をその50%と仮定して推定。

表ー8ー1 広葉樹および針葉樹の年間土壌呼吸 (CO<sub>2</sub>kg/m<sup>2</sup>.yr)

Species	場所	測定方法	呼吸量	出展
広葉樹				
<i>Fagus crenata</i>	栃木	KOH	1.4	Kawahara et al.(1979)
<i>Quercus serrata</i>	埼玉	KOH	1.5	Kawahara et al.(1975)
Evergreen broad-leaves	奈良	KOH	3.4-4.6	Kirita (1971)
Oak	Minesota(U.S.A.)	Air-flow	1.7	Kucera and Kirham (1971)
Tropical Rain Forest	Indonesia	KOH	1.9	Wanner (1970)
Mix mesophytic	Tennessee	Air-flow	3.8	Edowards and Sallines(1962)
針葉樹				
<i>Pinus densiflora</i>	埼玉(23 years)	KOH	1.6	Kawahara(unpubl.)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	栃木(45 years)	KOH	1.5	Kawahara et al.(1979)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	兵庫(12 years)	KOH	1.6	Kawahara and Yamamoto (1982)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	滋賀(53 years)	KOH	1.0	Kawahara et al.(1971)
<i>C.obtusa</i> & <i>P.densiflora</i>	兵庫(51 years)	KOH	2.1	Kawahara and Yamamoto

				(1982)
<i>C. obtusa</i> & <i>L. leptolepis</i>	山梨(50 years)	KOH	1.1	Kawahara et al.(1977)
<i>Pinus densiflora</i>	京都	KOH	1.0-1.4	Chiba and Tsutsumi(1970)

## 6) 土壌呼吸量

林床の落葉落枝などの有機物は分解して最終的には土壌表面から炭酸ガスとして放出される。土壌呼吸は林床にチェンバーをかぶせ一定時間に放出される炭酸ガスをKOHに吸収させたり（密閉アルカリ吸収法）、ガス分析計で測定する（通気法）が、一般に樹木の根、鉱物質土壌、腐植層、土壌微生物からも炭酸ガスが放出されるので、土壌呼吸量には有機物の分解によるものと根の呼吸などが含まれコミの状態になっている。しかしながら今回の場合、森林生態系のなかで炭素の収支を推定するのであるから両者を項目別に分離する理由がない。したがって、土壌呼吸の中に根の呼吸を含めて計算することにした。

土壌呼吸量は温度に左右され、温度の上昇により土壌呼吸量も大きくなる。したがって夏に多く冬に少なくなる。一年間をとうして調べて平均値で示した土壌呼吸速度を表一 8-2 に示す（河原、1985）。

表一 8-2 一年間の土壌呼吸量 (kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.yr) \*1)

	ブナ	1.4			
落葉広葉樹	コナラ	1.5			
常緑広葉樹		3.4~4.6			
常緑針葉樹	アカマツ	1.6	1.7		
	ヒノキ	1.5	1.4	1.6	1.0
	ヒノキ・アカマツ	2.1	1.6		

注：\*1)河原 (1985)

表一 8-1、表一 8-2 から落葉広葉樹と常緑広葉樹との間には大きな隔たりがあることがわかる。ここでは広葉樹のなかで落葉広葉樹の割合が大部分であることを考慮して常緑広葉樹林で得られた値をほとんど評価しないことにする。

常緑の針葉樹の場合には、これまで調べられた値には比較的似かよった値が示されており、その平均値を用いる。

具体的に試算に用いた値は次のようである。

針葉樹の場合は 1.56 Kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.yr(15.6 t CO<sub>2</sub>/ha.yr), 広葉樹の場合は 1.60 Kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.yr(16 t CO<sub>2</sub>/ha.yr)を用いている。

表-7 温帯林および亜寒帯林における純生産量

樹 種	純生産量(t/ha/yr)		出 所
	上層木	下ばえ	
ダケカンバ	7.6	1.4	9 (2)
ヤマナラシ	8.7	3.6	12.3 (3)
ク ス	13.6	1.6	15.2 (4)
ブナ 550M	6.5	1.4	7.9 角張データ
700M	6.8	1.4	8.2 角張データ
700M	8.2	1.4	9.6 角張データ
900M	7.7	1.4	9.1 角張データ
1100M	7	1.4	8.4 角張データ
1300M	4.3	1.4	5.7 角張データ
1500M	4.2	1.4	5.6 角張データ
1500M	4.1	1.4	5.5 角張データ
広葉樹平均	7.15	1.62	8.77
カラマツ	14.6	0.6	15.2 (5)
カラマツ	12.6	2.7	15.3 (1)
メタセコイア	16.2	1	17.2 (6)
トドマツ	14.5 (+)		14.5 (7)
トドマツ	12.5 (+)		12.5 四大学データ
ヨーロッパトウ	11.7	1.4	13.1 (8)
ヨーロッパトウ	12.4	1.6	14 (8)
ヨーロッパトウ	11.4	1.4	12.8 (8)
ヨーロッパトウ	7.3	1.4	8.7 (8)
アカエゾマツ	7.4 (+)		7.4 四大学データ
ヒ バ	11.8 (+)		11.8 (9)
ヒ バ	19.2 (+)		19.2 (9)
ヒ バ	13 (+)		13 (9)
アカマツ	14.5 (+)		14.5 (10)
針葉樹平均	12.79	0.72	13.51

## 7) 算出

炭酸ガス吸収源として（シンク）の光合成速度の検討、炭酸ガス放出源として（ソース）の非同化器官（幹、枝）および土壌呼吸（L層、F層、H層、鉍質土層、根）、土壌有機物、土壌堆積物などからの炭酸ガス放出速度の検討作業を経て、森林生態系における炭酸ガスの収支に関わる支出項目・吸収項目に分けて計算し、最終的に炭酸ガスの収支として算出する。

計算の過程で用いた統計資料および研究資料が炭酸ガスで表示されている場合や乾物重（量）で表示されている場合、あるいは炭素量で表示されている場合とない場合がありまちまちである。ここでは、炭酸ガス排出量との関連で炭酸ガス表示のほうが比較し易いのではないかとと思われるので炭酸ガス表示とする。

呼吸量は一般に炭酸ガス量で表されている。乾物重から炭酸ガスに換算するには、呼吸の基質をでんぷんと考えて、 $1 \text{ kg CO}_2 = 0.614 \text{ kg}$  乾物とする考えと、樹体のC含有量を50%と考え  $1 \text{ kg CO}_2 = 0.546 \text{ kg}$  乾物として行われる場合がある。ここでは年間の乾物生産に伴う場合なので後者が適当と思われる。

また、時間および面積に関しては種々検討した結果、それぞれ年、ha（ヘクタール）とする。算出にあたって、将来用いられるパラメーターが変更になっても、それを代入しなおし大きな変更無しに炭酸ガス収支が容易に計算できるよう心がけた。

わが国の森林における炭酸ガス収支は次のように算定される。

$$\text{収支} = \text{シンク（炭酸ガス吸収量；光合成量）} - \text{ソース（呼吸消費量；同化器官の呼吸量} + \text{非同化器官の呼吸量} + \text{土壌呼吸量）}$$

すなわち 都道府県別の炭酸ガス収支量を計算し、最終的に日本全体での炭酸ガス収支を積算する。

炭酸ガス収支の計算はすでに葉量の推定の項目で概説したように、2つの異なる方法によって推定されている。したがって炭酸ガス収支は2通りの結果になる。以下順をおって概説しよう。

### (1) 相対成長関係をもとにして葉量を推定した場合

針葉樹林および広葉樹林における炭酸ガス収支をそれぞれ表-9に示す。

表-9 炭酸ガス収支（相対成長関係を葉量推定の基本とした場合）

針葉樹林の炭酸ガス収支

	葉の光合成量 (t/yr)	葉の呼吸量 (t/yr)	非同化器官の呼 吸量(t/yr)	土壌呼吸量 (t/yr)	炭酸ガス収支 (t/yr)
全国	543,369,727	51,749,498	164,406,452	186,184,736	141,029,040

## 広葉樹林の炭酸ガス収支

	葉の光合成量 (t/yr)	葉の呼吸量 (t/yr)	非同化器官の呼 吸量(t/yr)	土壌呼吸量 (t/yr)	炭酸ガス収支 (t/yr)
全国	267,376,179	33,422,022	105,847,880	189,052,416	-60,946,140

## 全国の森林の炭酸ガス収支

	針葉樹の炭酸ガス収支 (t/yr)	広葉樹の炭酸ガス収支 (t/yr)	森林全体の炭酸ガス収支 (t/yr)
全国	141,029,040	-60,946,140	80,082,901

針葉樹林の場合、全国レベルでみると炭酸ガスの収支はおよそ1億4千万トン（炭素換算でおよそ3845万トン）のプラスである。シンクはソースに対しておよそ74%を占め、炭酸ガスの吸収に貢献していることがわかる。ソースの内訳は、葉の呼吸量が13%、非同化器官の呼吸量が41%、土壌呼吸量が46%であった。

いっぽう広葉樹の場合は、全国レベルでみると炭酸ガスの収支はおよそ6095万トンのマイナスである。シンクはソースに対して122.6%を占め、森林が炭酸ガスの放出源となっていることがわかった。なおその内訳は、葉の呼吸量が10%、非同化器官の呼吸量が32%、土壌呼吸量が58%であった。

広葉樹の場合、針葉樹の場合に比べて土壌呼吸量の割合が高いが、これは非同化器官による呼吸消費量が広葉樹の場合、針葉樹の場合よりも相対的に低いために全体として、土壌呼吸による呼吸消費量の割合が高まったものと思われる。

広葉樹の炭酸ガス収支がネガティブな結果となったり、県別のデータで見ると、炭酸ガス収支がポジティブだった針葉樹の場合でも、北海道ではネガティブな結果が得られている。この理由として、森林の単位面積あたりの立木密度が比較的低い北海道では比較的葉量が少なく推定されるためと考えられる。

いっぽう土壌呼吸は面積のオーダで決まるので、相対的に土壌呼吸の割合が高まり、全体としてネガティブになったと考えられる。

## (2)面積あたりの葉量をもとに推定した場合

つぎに、さきに指摘した葉量の推定方法を変え、葉量を単位面積あたりで表現することにする。各植生タイプごとに次のように対応することにする。広葉樹の葉量の推定には3 ton/haを、針葉樹の葉量には15 ton/ha（佐藤,1973）を用いた。修正された葉量を表-4の下段に併せて示す。これを先の葉量の推定方法による結果と比較すると、全国レベルでは、針葉樹の葉量がおおよそ4.5倍、広葉樹の葉量がおおよそ3.3倍に増えていることがわかる。立木密度の低さが問題になった、北海道では針葉樹では6.5倍、広葉樹では2.9倍と

なった。

修正された葉量によって炭酸ガス収支が同じように計算された。葉による呼吸消費量は葉量の変化に応じてかわったが、非同化器官の呼吸量、土壌呼吸量は変更ないものとした。

針葉樹および広葉樹の炭酸ガス収支を表-10に示す。

表-10 炭酸ガス収支（面積当たりを基本に葉量推定した場合）

針葉樹林の炭酸ガス収支

	葉の光合成量 (t/yr)	葉の呼吸量 (t/yr)	非同化器官の呼 吸量(t/yr)	土壌呼吸量 (t/yr)	炭酸ガス収支 (t/yr)
全国	2,424,877,168	230,940,683	164,406,452	186,184,736	1,843,345,297

広葉樹林の炭酸ガス収支

	葉の光合成量 (t/yr)	葉の呼吸量 (t/yr)	非同化器官の呼 吸量(t/yr)	土壌呼吸量 (t/yr)	炭酸ガス収支 (t/yr)
全国	893,272,666	111,659,083	105,847,880	189,052,416	486,713,286

全国の森林の炭酸ガス収支

	針葉樹の炭酸ガス収支 (t/yr)	広葉樹の炭酸ガス収支 (t/yr)	森林全体の炭酸ガス収支 (t/yr)
全国	1,843,345,297	486,713,286	2,330,058,583

表-9と表-10を比べてみると、炭酸ガス収支はおよそ8000万トンからおよそ23億トンまで大きく変化した。炭素換算でおよそ2200万トンからおよそ6億3540万トンになる。

(3)炭酸ガス収支のまとめ

炭酸ガス収支の推定法の(1)および(2)によって得られた値を井上が行った方法と比較検討してみる。

井上(井上,1991)は日本の森林の総材積成長量を1億 $m^3$ と仮定し、その乾物量を55%とすると乾物重は5500万トンとなり、乾物重と炭酸ガスの換算率を $1kg\ CO_2 = 0.546\ kg$ とすれば、およそ1億73万トンの炭酸ガスにあたるとしている。これを今回の試算と比較するために炭素量に換算すると、およそ2746万トンとなる。

総材積成長量の値から先の炭酸ガス収支を検討すると、推定法(II)のほうに近い値となっている。しかし、井上によって用いられた総材積成長量は森林のいわば純生産量にあたるもので、地上部の炭酸ガス量の2倍と推定されている土壌呼吸が含まれていない。したが

って比較するには不十分である。

表-9に示したように炭酸ガス収支がネガティブになっている理由は今後の研究に待たねばならない。単位面積あたりの葉量をもとにした場合、用いられた値が日本の森林全体でみた場合、明らかに葉量が過大に推定されていると判断できる。その理由として、これまで研究・調査された場所（林分）は人工林または土地条件の優れた林分を対象としていることによる。対象地が天然林の場合は森林として安定した段階（樹冠が十分閉鎖された状態）を対象としており、そこで得られる値は、今回求めようとする森林タイプごとの、面積当たりの、平均的な葉量を必ずしも表現しているとは限らない。このことは今回採用した非同化器官や土壌呼吸の速度についても言える。しかしこれまで蓄積された統計資料で得られる森林面積に、実際に平均的にはどの程度の値を割り引いて考えなければならないかを定める資料がない。

結論としては、一見不合理な面積当たりの葉量を基本にした推定方法に基づく炭酸ガス収支の求め方がよいのではないかと判断する。

#### 4 世界の森林における炭酸ガス収支

##### 1) 炭酸ガス収支に関する算定式の定義

###### (1) 森林タイプの区分

世界の森林生態系の炭酸ガス収支を求めるにあたり、世界の植生を次のように区分した。

1) 熱帯雨林、2) 半常緑・雨緑モンスーン、3) 山地針葉樹林、4) 亜寒帯針葉樹林、5) 夏緑針葉樹林、6) 照葉樹林、7) 硬葉樹林、8) 夏緑広葉樹林、9) 乾性の針葉疎林・低木林、10) 熱帯亜熱帯乾林、11) 森林ステップ、12) サバンナ、13) ステップ、14) 乾性ステップ・クッション群落、15) パラモ・湿性プーナ、16) 高山植生、17) 砂漠、18) ツンドラ・寒冷砂漠の18通りに分類する。

###### (2) 光合成量の推定

光合成量は日本の森林における炭酸ガス収支の計算と同様に取り扱うものとする。すなわち光合成量は単位光合成速度に葉量を乗じ、その持続時間を乗じることにより求めるものとする。

単位光合成速度は Larcher (1980) によってとりまとめられたものを使用した。グルーピングは単位光合成速度関連の文献の有無、実用上の困難さなどによって8つのグループにまとめられた。

すなわち、植生タイプのなかで熱帯雨林と半常緑・雨緑モンスーンのグループを一括し、 $17.5 \text{ mgCO}_2/\text{d.g.}\cdot\text{hr}$ とした。同様に、植生タイプの3)と4)に対して  $11.0 \text{ mgCO}_2$ 、5)に対して  $15.0 \text{ mgCO}_2$ 、6)と7)に対して  $12.0 \text{ mgCO}_2$ 、8)に対して  $20.0 \text{ mgCO}_2$ 、9)-11)に対



して 6.5 mgCO<sub>2</sub>、12)-15)に対して 5 mgCO<sub>2</sub>、16)-18)に対して 0 mgCO<sub>2</sub>が適用された。なお暗呼吸速度は植生タイプを常緑広葉樹 (1,2,6,7,12,13,14,15)、常緑針葉樹 (3,4,5,9,10,11)、落葉広葉樹 (8) を中心とする 3 つのグループに分け、それぞれ 0.5, 1.0, 2.5 mg CO<sub>2</sub> d.g.hr を仮定した。

### (3)単位葉量の推定

依田恭二 (森林の生態学)、佐藤大七郎 (陸上植物群落の物質生産)、Larcher (Oekologie der Pflanzen) を参考に以下に示したように、単位面積あたりの葉量を仮定した。

植生タイプ	単位光合成速度 (mg CO <sub>2</sub> /d.g.hr)	単位葉量 (t/ha <sup>1</sup> )
1)熱帯雨林	10-25 (17.5)	8
2)半常緑・雨緑モンスーン		
3)山地針葉樹林	4-18 (11.0)	15
4)亜寒帯針葉樹林		
5)夏緑針葉樹林	10-20 (15.0)	5(3)
6)照葉樹林	10-25	
7)硬葉樹林	3-10 (12.0)	8
8)夏緑広葉樹林	15-25 (20.0)	7(3)
9)乾性の針葉疎林・低木林		
10)熱帯亜熱帯乾林	3-10 (6.5)	1.5(0.5)
11)森林ステップ		
12)サバンナ		
13)ステップ	4-6 (5.0)	0.5
14)乾性ステップ・クッション群落		
15)パラモ・湿性ブーナ		
16)高山植生		
17)砂漠	0	0
18)ツンドラ・寒冷砂漠		

なお、葉量は当初照葉樹・硬葉樹林は 7t/ha、夏緑広葉樹林は 3t/ha とセットされた。しかしながら日本・ヨーロッパなど針葉樹の人工造林が盛んに行われてる地域が潜在的な植生分布上、ほとんどが上記照葉樹・硬葉樹林、夏緑広葉樹林となっていたので実際には大きな割合で針葉樹が含まれている現実を考慮して、それぞれ 8t/ha、7t/ha に葉量を変更した。

### (4)国土面積における植生タイプごとの葉量の推定

国連環境計画による環境データ報告には各国の国土面積が千km<sup>2</sup> 単位で示されている。

耕地、草原、湿地、森林などが国土に対する割合としてそれぞれ示されている。手順としては、まず国土面積に森林の割合を乗じて各国の森林面積を求めた。つぎに世界の植生図から該当する国土面積のうちそれぞれの植生タイプに属する割合を求め、最終的に各国の植生タイプごとの森林面積を得た。表-11-1 から表-11-6 に各国の森林面積を植生タイプごとに、国土面積とともに示す。

どの植生タイプが当該の国にどれだけの面積あるかの求め方を説明する。この作業は次のように行われた。世界地図から、当該の国の国境を透明のフィルム（OHPフィルムを利用）に写し取り（コピー機械の利用）、その上に世界の植生分布（週刊朝日百科付属シースルー世界図セット）の透明のフィルムを重ね、該当地区（たとえばアフリカ地区、ラテンアメリカなど）ごとにスクリーントーンを用いて点格子板のように透明フィルムに焼き付けする。その後、植生タイプごとに色分けされた点格子板の点の数を集計する。その結果当該国の森林面積における植生タイプごとの割合（たとえば熱帯雨林が何%、サバンナが何%という具合）が明らかになる。最終的に、国土の森林面積に乗じて、各国の森林タイプごとの森林面積を得る。

森林面積から葉量への変換は、単位面積（ヘクタール）あたり葉量（t/ha）を各植生タイプごとの面積に乗じて計算する。

葉量の算出の過程で図法上の疑偽について1、2つけ加えておく。用いられた世界地図、植生図はいずれもメルカトル図法で作成されており、モルワイデ図法に比べ極地方ほど面積が大きく表されている。したがって得られた森林面積が正しくないとの疑いがある。しかし、この場合各国の森林面積は別途統計資料で得られているので問題はないと考える。ここで問題になるのは植生タイプの割合である。東西に広い国土を極地方に持つソビエト、カナダなどでは相対的に、ツンドラ、亜寒帯針葉樹、夏緑針葉樹の割合が高まる。ツンドラの場合光合成生産量がその他の森林タイプに比べ無視できる程度の小ささと考えられる。問題は亜寒帯針葉樹である。生育期間は寒冷地で短く光合成量は全体としてそんなに大きいものではないと思われるが、葉量が比較的多いので、今後何らかの修正が必要と思われる。

#### (5)日長時間、持続時間および生育期間の仮定

基本的な考え方は日本の場合と大きく異なることはないが、世界の場合には植生の変異が日本より多いので然るべく対応する必要がある。すなわち、日本の場合と大きく異なるのは、落葉性の針葉樹と常緑性の針葉樹の各種統計資料が整っているのをそれらを生かすようにした。

落葉性の広葉樹と常緑性の広葉樹についても同じ様な考えから区別して扱った。持続時間、生育期間についても日本森林の計算と基本的に大きく矛盾しないよう配慮してある。

表-11-1 アフリカ地区の森林タイプごとの森林面積

Region/country	Forest		山地針葉樹林		照葉樹林		熱帯乾林		サバンナ
	Total land	Woodland	熱帯雨林	亜寒帯針葉樹林	夏緑針葉樹林	硬葉樹林	夏緑広葉樹林	森林ステップ	
	area 1985 (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	
WORLD	130789.00	40544.59	11031.59	6981.02	4134.25	1800.90	3615.53	6769.76	6467.23
AFRICA	29659.12	6821.60	2586.52	0.00	0.00	59.77	0.00	1827.07	2462.79
Algeria	2382.00	47.64	0.00	0.00	0.00	21.44	0.00	0.00	26.20
Angola	1247.00	536.21	19.50	0.00	0.00	0.00	0.00	380.22	136.49
Benin	111.00	37.74	9.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.31
Botswana	567.00	11.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	10.95
Br.Ind.Oc.Tr.	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Burkina Faso	274.00	68.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.50
Burundi	26.00	0.78	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.00
Cameroon	469.00	248.57	177.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71.02
Cape Verde	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cen.African Rep.	623.00	361.34	62.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	299.04
Chado	1259.00	125.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	125.90
Comoros	2.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00
Congo	342.00	212.04	212.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cote d'Ivoire	318.00	73.14	67.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.63
Djibouti	22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Egypt	995.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Equatorial Guinea	28.00	12.88	12.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ethiopia	1101.00	275.25	82.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	193.16
Gabon	258.00	201.24	201.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gambia	22.00	4.18	4.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ghana	230.00	85.10	28.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.73
Guinea	246.00	100.86	78.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.41
Guinea-Bissau	28.00	10.64	10.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kenya	569.00	39.83	3.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.98
Lesotho	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Liberia	96.00	21.12	21.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Libya	1760.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Madagascar	582.00	151.32	75.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75.66
Malawi	94.00	45.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.12	0.00
Mali	1220.00	85.40	3.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.98
Mauritania	1030.00	154.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	154.50
Mauritius	2.00	0.62	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Morocco	446.00	53.52	0.00	0.00	0.00	23.27	0.00	23.27	6.98
Mozambique	784.00	148.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	135.42	13.54
Namibia	823.00	181.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.25	127.81
Niger	1267.00	25.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.34
Nigeria	911.00	145.76	38.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	107.74

Region/country	Forest								
	Total land	Woodland	熱帯雨林	山地針葉樹林	照葉樹林	熱帯乾林	サバンナ		
	area 1985 (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )
Reunion	2.50	0.88	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rwanda	25.00	5.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sao Tome/Principe	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Senegal	192.00	59.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	59.52
Seychelles	0.27	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sierra Leone	72.00	20.88	20.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
somalia	627.00	87.78	3.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.27
South Africa	1221.00	48.84	9.59	0.00	0.00	11.34	0.00	1.74	26.16
St Helena	0.31	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sudan	2376.00	475.20	11.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	463.32
Swaziland	17.00	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02
Tanzania	886.00	425.28	30.38	0.00	0.00	0.00	0.00	324.02	70.88
Togo	54.00	14.58	2.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.66
Tunisia	155.00	6.20	0.00	0.00	0.00	3.72	0.00	0.00	2.48
Uganda	200.00	58.00	27.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.93
Western Sahara	266.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zaire	2268.00	1769.04	1365.09	0.00	0.00	0.00	0.00	390.02	13.93
Zambia	741.00	296.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	280.80	15.60
Zimbabwe	387.00	201.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	192.09	9.15

表-11-2 北アメリカ・中央アメリカ地区の森林タイプごとの森林面積

Region/country	Total land area 1985 (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Forest Woodland area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	山地針葉樹林 熱帯雨林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	亜寒帯針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	照葉樹林 硬葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑広葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	熱帯乾林 森林ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	サバンナ ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )
WORLD	130789.00	40544.59	11031.59	6981.02	4134.25	1800.90	3615.53	6769.76	6467.23
NOR&CEN AMERI	21392.00	6845.44	245.07	3854.60	58.50	365.83	845.51	791.24	659.04
Arntigua/Barbu	0.44	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bahamas	10.07	3.22	3.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barbados	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Belize	22.80	10.03	10.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bermuda	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Br.Virgin Is.	0.15	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Canada	9221.00	3503.98	0.00	3100.61	0.00	36.67	179.27	85.56	101.86
Cayman Is.	0.26	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Costa Rica	51.00	16.32	10.88	0.00	0.00	0.00	0.00	5.44	0.00
Cuba	111.00	26.64	19.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.27
Dominica	0.75	0.31	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dominican Rep.	48.00	6.24	6.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
El Salvador	21.00	1.05	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Greenland	341.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Grenada	0.34	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Guadeloupe	1.76	0.70	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Guatemala	108.00	41.04	41.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Haiti	28.00	0.56	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Honduras	112.00	36.96	30.80	0.00	0.00	0.00	0.00	6.16	0.00
Jamaica	11.00	1.98	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Martinique	1.06	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mexico	1923.00	442.29	52.42	0.00	0.00	114.67	0.00	190.02	85.18
Montserrat	0.10	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Neth.Antilles	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nicaragua	119.00	39.27	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	3.57	0.00
Panama	76.00	40.28	40.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Puerto Rico	8.86	1.77	1.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
St Christopher/	0.36	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
St Lucia	0.61	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
St Pierre/Mique	0.23	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
St Vincent/Grei	0.34	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Trinidad/Tobag	5.00	2.20	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Turks/Caico Is.	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Virgin Is.	0.34	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
USA	9167.00	2658.43	0.00	753.98	58.50	214.49	666.23	500.49	464.74

表-11-3 南アメリカ地区の森林タイプごとの森林面積

Region/country	Total land area 1985 (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Forest Woodland area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	熱帯雨林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	山地針葉樹林 亜寒帯針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	照葉樹林 硬葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑広葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	熱帯乾林 森林ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	サバンナ ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )
WORLD	130789.00	40544.59	11031.59	6981.02	4134.25	1800.90	3615.53	6769.76	6467.23
SOUTH AMERICA	17535.00	9118.20	5150.42	160.48	0.00	311.20	61.83	2399.51	1093.52
Argentina	2737.00	602.14	11.36	0.00	0.00	22.72	41.66	378.70	147.69
Bolivia	1084.00	563.68	338.21	0.00	0.00	0.00	0.00	112.74	112.74
Brazil	8457.00	5666.19	3296.02	160.48	0.00	185.17	0.00	1728.25	296.27
Chile	749.00	89.88	3.67	0.00	0.00	38.52	20.18	0.00	27.51
Columbia	1039.00	519.50	336.71	0.00	0.00	0.00	0.00	38.48	144.31
Ecuador	277.00	124.65	101.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.66
Falkland Is.	12.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
French Guiana	89.15	73.10	73.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Guyana	197.00	163.51	147.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.35
Paraguay	397.00	202.47	0.00	0.00	0.00	64.79	0.00	129.58	8.10
Peru	1280.00	691.20	474.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	216.85
Suriname	161.00	156.17	156.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Uruguay	174.00	6.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.96
Venezuela	882.00	317.52	211.68	0.00	0.00	0.00	0.00	11.76	94.08

表-11-4 アジア地区の森林タイプごとの森林面積

Region/country	Total land area 1985 (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Forest	山地針葉樹林			照葉樹林	夏緑広葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	熱帯乾林	サバンナ
		Woodland area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	熱帯雨林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	亜寒帯針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	硬葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )		森林ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )
WORLD	130,789.00	40,544.59	11,031.59	6,981.02	4,134.25	1,800.90	3,615.53	6,769.76	6,467.23
ASIA	26,788.00	5,357.60	2,642.18	97.26	63.15	451.69	578.61	776.56	778.91
afghanistan	648.00	19.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.72	9.72
Bahrain	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bangladesh	134.00	21.44	21.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bhutan	47.00	32.90	32.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Brunei	5.27	2.74	2.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Burma	658.00	322.42	282.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	39.48
China	9,326.00	1,119.12	71.02	63.67	53.87	166.52	328.14	97.95	337.94
Christmas Is.	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cocos Is.	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cyprus	9.00	1.17	0.00	0.00	0.00	1.17	0.00	0.00	0.00
Gaza Strip	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hong Kong	0.99	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
India	2,973.00	683.79	217.41	0.00	0.00	0.00	0.00	413.78	52.60
Indonesia	1,812.00	1,232.16	1,232.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iran	1,636.00	179.96	0.00	0.00	0.00	0.00	13.01	82.39	84.56
Iraq	434.00	17.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.36	0.00
Israel	20.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
Japan	376.00	251.92	0.00	33.59	0.00	134.36	83.97	0.00	0.00
Jordan	97.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00
Kampuchea	177.00	134.52	134.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Korea	98.00	64.68	0.00	0.00	0.00	0.00	64.68	0.00	0.00
Korea, Dem	120.00	88.80	0.00	0.00	0.00	0.00	88.80	0.00	0.00
Kuwait	18.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Laos	231.00	131.67	94.05	0.00	0.00	0.00	0.00	37.62	0.00
Lebanon	10.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00
Macau	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Malaysia	329.00	200.69	200.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Maldives	0.30	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mongolia	1,565.00	156.50	0.00	0.00	9.27	0.00	0.00	0.00	147.23
Nepal	137.00	23.29	23.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Oman	212.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pakistan	771.00	30.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.91	12.93
Philippines	298.00	113.24	113.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Qatar	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Saudi Arabia	2,150.00	21.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.50
Singapore	1.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sri Lanka	65.00	17.55	13.16	0.00	0.00	0.00	0.00	4.39	1.00
Syria	184.00	5.52	0.00	0.00	0.00	3.94	0.00	1.58	0.00
Thailand	512.00	148.48	140.87	0.00	0.00	0.00	0.00	7.61	0.00
Turkey	771.00	200.46	0.00	0.00	0.00	101.87	0.00	65.72	32.86
United Arab Em.	84.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Viet Nam	325.00	130.00	61.58	0.00	0.00	41.05	0.00	20.53	6.84
Yemen	195.00	15.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.60
Yemen, Dem.	333.00	16.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.65

表-11-5 ヨーロッパ地区の森林タイプごとの森林面積

Region/count	Total land area 1985 (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Forest Woodland area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	熱帯雨林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	山地針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	亜寒帯針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	照葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑広葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	熱帯乾林 森林ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	サバンナ ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )
WORLD	130789.00	40544.59	11031.59	6981.02	4134.25	1800.90	3615.53	6769.76	6467.23
EUROPE	4727.35	1560.03	0.00	494.62	0.00	186.33	855.16	18.48	0.00
Albania	27.00	10.26	0.00	0.00	0.00	0.00	10.26	0.00	0.00
Andorra	0.45	0.10	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
Austria	83.00	32.37	0.00	21.58	0.00	0.00	10.79	0.00	0.00
Belgium	33.00	6.93	0.00	0.00	0.00	0.00	6.93	0.00	0.00
Bulgaria	111.00	38.85	0.00	0.00	0.00	0.00	38.85	0.00	0.00
Czechoslova	125.00	46.25	0.00	0.00	0.00	0.00	42.40	3.85	0.00
Denmark	42.00	5.04	0.00	0.00	0.00	0.00	5.04	0.00	0.00
Faeroe Is.	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Finland	305.00	231.80	0.00	209.37	0.00	0.00	22.43	0.00	0.00
France	546.00	147.42	0.00	0.00	0.00	18.05	129.37	0.00	0.00
German	350.00	102.88	0.00	0.00	0.00	0.00	102.88	0.00	0.00
Gibraltar	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Greece	131.00	26.20	0.00	0.00	0.00	14.29	11.91	0.00	0.00
Hungary	92.00	16.56	0.00	0.00	0.00	0.00	8.28	8.28	0.00
Iceland	100.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ireland	69.00	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00	3.45	0.00	0.00
Italy	294.00	64.68	0.00	4.62	0.00	36.96	23.10	0.00	0.00
Liechtenstei	0.16	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Malta	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Netherlands	34.00	3.06	0.00	0.00	0.00	0.00	3.06	0.00	0.00
Norway	308.00	83.16	0.00	83.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Poland	305.00	88.45	0.00	0.00	0.00	0.00	88.45	0.00	0.00
Portugal	92.00	36.80	0.00	0.00	0.00	7.36	29.44	0.00	0.00
Romania	230.00	64.40	0.00	0.00	0.00	0.00	61.82	2.58	0.00
Sanmarino	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Spain	499.00	154.69	0.00	0.00	0.00	109.57	45.12	0.00	0.00
Sweden	412.00	263.68	0.00	171.39	0.00	0.00	92.29	0.00	0.00
Switzerland	40.00	10.40	0.00	3.47	0.00	0.00	6.93	0.00	0.00
UK	242.00	21.78	0.00	0.00	0.00	0.00	21.78	0.00	0.00
Yugoslavia	255.00	94.35	0.00	0.00	0.00	0.00	90.58	3.77	0.00
USSR	22272.00	9354.24	0.00	2374.06	4012.60	0.00	1274.42	444.23	1248.93



表-11-6 オセアニア地区の森林タイプごとの森林面積

Region/country	Total land area 1985 (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Forest Woodland area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	山地針葉樹林			照葉樹林		熱帯乾林 森林ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	サバンナ ステップ Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )
			熱帯雨林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	亜寒帯針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑針葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	硬葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	夏緑広葉樹林 Square (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )		
WORLD	130789.00	40544.59	11031.59	6981.02	4134.25	1800.90	3615.53	6769.76	6467.23
OCEANIA	8426.53	1516.78	407.40	0.00	0.00	426.08	0.00	512.67	224.04
American Samoa	0.20	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Australia	7618.00	1066.52	13.05	0.00	0.00	384.86	0.00	505.54	163.08
Canton Is.	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cook Is.	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fiji	18.00	11.70	11.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fren Polynesia	3.66	1.13	1.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kiribati	0.71	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nauru	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
New Caledonia	18.76	7.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.13	0.00
New Zealand	269.00	72.63	0.00	0.00	0.00	41.22	0.00	0.00	31.41
Niue	0.26	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Norfolk Is.	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pacific Is.Tr.Tr.	1.78	0.39	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pap New Guinea	452.00	384.20	354.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.55
Solomon Is.	28.00	26.04	26.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tokelau	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tonga	0.67	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tuvalu	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vanuatu	14.76	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wallis Is.	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

植生タイプ	日長時間 (時間)	持続時間 (時間)	生育期間 (日)
1)熱帯雨林	12		
2)半常緑・雨緑モンスーン	12	6	365
3)山地針葉樹林	12	6	120
4)亜寒帯針葉樹林	12	6	120
5)夏緑針葉樹林	12	6	100
6)照葉樹林	12	6	215
7)硬葉樹林	12	6	215
8)夏緑広葉樹林	12	6	180
9)乾性の針葉疎林・低木林	12	6	215
10)熱帯亜熱帯乾林	12	6	215
11)森林ステップ	12	6	215
12)サバンナ	12	6	215
13)ステップ	12	6	215
14)乾性ステップ・クッション群落	12	6	215
15)パラモ・湿性プーナ	12	6	215
16)高山植生	12	4	100
17)砂漠	12	12	215
18)ツンドラ・寒冷砂漠	12	3	60

なお、16)－18)は葉量が非常に小さいので計算を行っていない。

#### (6)非同化器官の呼吸消費量の推定

日本の森林の計算の場合と同様にして求めた。すなわち森林タイプごとの単位面積あたりの純生産量からある一定の割合を乗じて、非同化器官の呼吸消費量を計算した。

以下に Lieth (1972) の資料に基づき地球上の平均的な純生産量を示す。また非同化器官の呼吸消費量についても併せて以下に示す。非同化器官の呼吸は日本の場合と同様に取り扱うこととする。すなわち針葉樹の場合純生産量に対し、55.8%を広葉樹に対して 55.7%を充てている。

植生タイプ	平均的な純生産量 (t./ hayr)	非同化器官呼吸量 (t /CO <sub>2</sub> hayr)
1)熱帯雨林		
2)半常緑・雨緑モンスーン	20	11.2
3)山地針葉樹林		
4)亜寒帯針葉樹林	5	2.8
5)夏緑針葉樹林	12*1)	6.7
6)照葉樹林		

7)硬葉樹林	15	8.4
8)夏緑広葉樹林	10	5.6
9)乾性の針葉疎林・低木林		
10)熱帯亜熱帯乾林	8	4.5
11)森林ステップ		
12)サバンナ		
13)ステップ	0.9	0.5
14)乾性ステップ・クッション群落		
15)パラモ・湿性プーナ		
16)高山植生	0.0	
17)砂漠	0.03	0.0
18)ツンドラ・寒冷砂漠	0.0	

注：\*1):カラマツの純生産量については佐藤大七郎(1973)を参考にした。

#### (7)土壌呼吸量の推定

土壌呼吸についても異本的には日本での取扱いと変わらないが、植生タイプが増えているのでここで改めて示しておく。

植生タイプ	土壌呼吸量 (kg CO <sub>2</sub> m <sup>2</sup> yr <sup>-1</sup> )
1)熱帯雨林	
2)半常緑・雨緑モンスーン	1.9*1)
3)山地針葉樹林	
4)亜寒帯針葉樹林	1.56
5)夏緑針葉樹林	1.1
6)照葉樹林	
7)硬葉樹林	4.0*2)
8)夏緑広葉樹林	1.6
9)乾性の針葉疎林・低木林	
10)熱帯亜熱帯乾林	1.7
11)森林ステップ	
12)サバンナ	
13)ステップ	1.7
14)乾性ステップ・クッション群落	
15)パラモ・湿性プーナ	
16)高山植生	0.0
17)砂漠	0.0
18)ツンドラ・寒冷砂漠	0.0

注：\*1):Wanner,H.(1970) (河原、1985による) 注：\*2):桐田博充

## 2) 世界の炭酸ガス収支

世界の地区別の炭酸ガス収支を表-12-1 から表-12-6 に示す。世界のレベルでは炭酸ガス収支はポジティブで、3973 億トンとなった。

地区別にみても、アフリカ、ヨーロッパ、オセアニア、北アメリカ、南アメリカ、アジアでそれぞれ、17.0%, 3.4%, 3.4%, 12.9%, 34.7%, 19.6% であった。南米、アジアと北米が重要な位置を占めることがわかった。

## 5 提言

1) 全国の炭酸ガス収支を算出するうえで今回の林業センサスのデータは不十分なものである。面積や蓄積量段階でのデータ不足は、最終的に炭酸ガスのそれぞれの収支項目に大きな推定誤差を引き起こす可能性がある。例えば北海道の森林の炭酸ガス収支において、放出量が吸収量を大きく上回る結果となった。その理由のひとつには針・広葉樹別および樹種・齢級別の森林面積・蓄積量などのデータがないため、もしあれば、より詳細かつ正確な結果を得ることができるであろう。

2) 土壌呼吸がその他の項目に比べたいへん大きな値になっている。データの集積が比較的少ない分野なので、この分野のデータの集積如何では今回試算した炭酸ガス収支の値も大幅に変わる可能性がある。

3) データのマッチングには必要以上に気を使ったが、データがほとんどないために選択や判断をする際大変苦労をした。今後ともこうした研究・事業が行われることが大切であることを改めて痛感した。

## 6 参考・引用文献

- 1) 井上蔽雄：森林と地球環境の保全、森林科学、2、1-7、1991
- 2) 岩坪五郎：森林における養分物質の循環、森林と肥培、146、1-7、1990
- 3) Kakubari, Y.: Distribution of primary productivity along the altitudinal gradient. JIBP Synthesis 16, 201-212, 1977
- 4) 桐田博充：照葉樹林の土壌呼吸に関する研究、日生態誌 21、230-243、1971
- 5) 河原輝彦：森林生態系における炭素の循環、林試研報 334、21-52、1985
- 6) Larcher, W: Oekologie der Pflanzen, UTB Ulmer, 390p, 1980
- 7) 中根周歩：森林生態系における土壌有機炭素の循環の季節変動に関するシミュレーションモデル、日生態誌 30、19-29、1980

- 8) 中根周歩：森林生態系における炭素循環、日生態誌 36、29-39、1986
- 9) Melillo, J.M. et al: Effects on ecosystems, Report prepared for IPCC by working group 1, 282-310, 1990
- 10) 根岸賢一郎：樹皮呼吸の生態生理的研究、科研報告書、19p、1984
- 11) 根岸賢一郎：樹木の非同化器官の呼吸、科研報告書、19p、1984
- 12) 大来佐武郎ほか：地球規模の環境問題(特) (講座 地球環境)、中央法規、390p、1990
- 13) 林業統計センサス
- 14) 佐藤大七郎：陸上植物群落の物質生産 Iaー森林ー、共立出版、95p、1973
- 15) 斉藤昌宏：「森林植生への影響」、気候変動と森林生態系、森林総研、142p、1989
- 16) WMO/UNEP: Climate change -The IPCC response strategies, Report of the IPCC by working group III., 1991
- 17) 山中二男：日本の森林植生、築地書館、1980
- 18) 依田恭二：森林の生態学、築地書館、331p、1971□

表-12-1 アフリカ地区 炭酸ガス収支

Region/country	光合成量 (10-6t)	葉の呼吸量 (10-6t)	非同化器官の 呼吸量 (10-6t)	土壌呼吸量 (10-6t)	炭酸ガス収支 (10-6t)
WORLD	521135.32	47909.66	22565.57	53357.63	397302.46
AFRICA	83134.99	5459.18	3508.74	6440.40	67726.67
Algeria	273.94	23.81	19.32	93.61	137.19
Angola	1120.07	190.11	119.92	192.06	617.98
Benin	298.41	18.36	11.98	26.42	241.65
Botswana	4.02	0.86	0.64	3.40	-0.88
Br.Ind.Oc.Tr.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Burkina Faso	22.09	4.42	3.43	20.55	-6.30
Burundi	12.45	0.83	0.53	0.86	10.23
Cameroon	5466.59	315.65	202.41	358.65	4589.88
Cape Verde	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cen.African Rep.	2006.56	128.44	84.73	208.08	1585.31
Chado	40.60	8.12	6.30	37.77	-11.58
Comoros	0.40	0.12	0.08	0.10	0.11
Congo	6501.15	371.49	237.48	402.88	5489.29
Cote d'Ivoire	2071.79	118.65	75.90	129.96	1747.28
Djibouti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Egypt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Equatorial Guinea	394.90	22.57	14.43	24.47	333.44
Ethiopia	2579.24	156.28	101.60	213.92	2107.43
Gabon	6170.02	352.57	225.39	382.36	5209.70
Gambia	128.16	7.32	4.68	7.94	108.21
Ghana	888.02	53.36	34.61	70.92	729.14
Guinea	2412.40	138.88	88.98	155.77	2028.77
Guinea-Bissau	326.22	18.64	11.92	20.22	275.45
Kenya	129.78	9.07	6.12	18.12	96.48
Lesotho	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Liberia	647.54	37.00	23.65	40.13	546.75
Libya	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Madagascar	2344.14	137.44	88.52	166.45	1951.73
Malawi	56.75	17.46	10.83	13.54	14.92
Mali	131.17	11.27	7.93	31.09	80.89

Region/country	光合成量 (10-6t)	葉の呼吸量 (10-6t)	非同化器官の 呼吸量 (10-6t)	土壌呼吸量 (10-6t)	炭酸ガス収支 (10-6t)
Mauritania	49.83	9.97	7.73	46.35	-14.21
Mauritius	19.01	1.09	0.69	1.18	16.05
Morocco	319.69	33.47	25.48	102.15	158.59
Mozambique	174.69	53.28	33.18	44.69	43.54
Namibia	108.20	28.85	19.17	54.32	5.86
Niger	8.17	1.63	1.27	7.60	-2.33
Nigeria	1200.57	73.57	47.97	104.57	974.46
Reunion	26.83	1.53	0.98	1.66	22.65
Rwanda	153.30	8.76	5.60	9.50	129.44
Sao Tome/Princi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Senegal	19.20	3.84	2.98	17.86	-5.48
Seychelles	1.57	0.09	0.06	0.10	1.33
Sierra Leone	640.18	36.58	23.39	39.67	540.54
somalia	134.83	11.59	8.15	31.95	83.15
South Africa	445.18	30.87	22.00	71.95	320.36
St Helena	0.38	0.02	0.01	0.02	0.32
Sudan	513.66	50.70	36.47	161.57	264.92
Swaziland	0.33	0.07	0.05	0.31	-0.09
Tanzania	1361.76	183.19	115.33	176.19	887.05
Togo	93.17	5.86	3.85	9.04	74.42
Tunisia	46.87	4.00	3.25	15.62	24.00
Uganda	839.84	49.42	31.86	60.71	697.86
Western Sahara	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zaire	42348.58	2543.47	1623.20	2714.85	35467.07
Zambia	358.21	109.68	68.17	88.92	91.44
Zimbabwe	244.55	74.93	46.56	60.37	62.69

表-12-2 北アメリカ・中央アメリカ地区 炭酸ガス収支

Region/country	光合成量 (10-6t)	葉の呼吸量 (10-6t)	非同化器官の 呼吸量 (10-6t)	土壌呼吸量 (10-6t)	炭酸ガス収支 (10-6t)
WORLD	521135.32	47909.66	22565.57	53357.63	397302.46
NOR&CEN AMERIC.	72004.05	8549.69	2396.59	9794.36	51263.41
Amtigua/Barbud	1.48	0.08	0.05	0.09	1.25
Bahamas	98.80	5.65	3.61	6.12	83.42
Barbados	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Belize	307.58	17.58	11.24	19.06	259.71
Bermuda	0.31	0.02	0.01	0.02	0.26
Br.Virgin Is.	0.32	0.02	0.01	0.02	0.27
Canada	40140.50	4103.84	1025.00	5326.70	29684.96
Cayman Is.	1.83	0.10	0.07	0.11	1.55
Costa Rica	340.42	21.17	13.49	22.30	283.46
Cuba	596.37	34.41	22.06	38.99	500.90
Dominica	9.43	0.54	0.34	0.58	7.96
Dominican Rep.	191.32	10.93	6.99	11.86	161.54
El Salvador	32.19	1.84	1.18	2.00	27.18
Greenland	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Grenada	0.94	0.05	0.03	0.06	0.79
Guadeloupe	21.58	1.23	0.79	1.34	18.23
Guatemala	1258.29	71.90	45.96	77.98	1062.44
Haiti	17.17	0.98	0.63	1.06	14.50
Honduras	952.08	56.35	35.97	60.37	799.39
Jamaica	60.71	3.47	2.22	3.76	51.26
Martinique	8.45	0.48	0.31	0.52	7.13
Mexico	3293.70	289.21	204.89	640.83	2158.77
Montserrat	1.23	0.07	0.04	0.08	1.04
Neth.Antilles	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nicaragua	661.23	38.91	24.85	41.77	555.70
Panama	1234.98	70.57	45.11	76.53	1042.77
Puerto Rico	54.33	3.10	1.98	3.37	45.87
St Christopher/N	1.88	0.11	0.07	0.12	1.58
St Lucia	2.43	0.14	0.09	0.15	2.05
St Pierre/Miquelc	0.28	0.02	0.01	0.02	0.24
St Vincent/Grenz	4.27	0.24	0.16	0.26	3.61
Trinidad/Tobago	67.45	3.85	2.46	4.18	56.95
Turks/Caico Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Virgin Is.	0.63	0.04	0.02	0.04	0.53
USA	22641.88	3812.78	946.93	3454.07	14428.10



表-12-3 南アメリカ地区 炭酸ガス収支

Region/country	光合成量 (10-6t)	葉の呼吸量 (10-6t)	非同化器官の 呼吸量 (10-6t)	土壌呼吸量 (10-6t)	炭酸ガス収支 (10-6t)
WORLD	521135.32	47909.66	22565.57	53357.63	397302.46
SOUTH AMERICA	167977.93	10750.90	6740.00	12427.80	138059.23
Argentina	1783.53	356.90	153.41	337.05	936.17
Bolivia	10547.61	643.44	411.49	710.24	8782.44
Brazil	107524.84	6826.98	4321.61	7860.82	88515.43
Chile	903.46	124.22	49.14	201.59	528.51
Columbia	10418.56	614.12	393.57	694.59	8716.28
Ecuador	3134.21	180.14	115.36	200.57	2638.14
Falkland Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
French Guiana	2241.34	128.08	81.88	138.90	1892.49
Guyana	4517.17	258.88	165.64	284.51	3808.15
Paraguay	967.96	117.53	85.93	300.47	464.03
Peru	14613.59	845.05	542.12	966.32	12260.10
Suriname	4788.17	273.61	174.91	296.72	4042.93
Uruguay	2.24	0.45	0.35	2.09	-0.64
Venezuela	6535.24	381.48	244.61	433.94	5475.21

表-12-4 アジア地区 炭酸ガス収支

Region/country	光合成量 (10-6t)	葉の呼吸量 (10-6t)	非同化器官の 呼吸量 (10-6t)	土壌呼吸量 (10-6t)	炭酸ガス収支 (10-6t)
WORLD	521,135.32	47,909.66	22,565.57	53,357.63	397,302.46
ASIA	97,924.33	7,776.08	3,957.54	8,440.50	77,750.22
afghanistan	15.36	4.39	2.82	5.83	2.32
Bahrain	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bangladesh	657.35	37.56	24.01	40.74	555.04
Bhutan	1,008.71	57.64	36.85	62.51	851.72
Brunei	84.02	4.80	3.07	5.21	70.94
Burma	8,687.67	498.26	318.87	549.43	7,321.12
China	10,351.31	1,697.45	497.51	1,615.40	6,540.96
Christmas Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cocos Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cyprus	14.49	1.21	0.98	4.68	7.62
Gaza Strip	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hong Kong	3.64	0.21	0.13	0.23	3.08
India	7,203.19	544.43	345.44	552.99	5,760.33
Indonesia	37,778.03	2,158.74	1,380.02	2,341.10	31,898.16
Iran	327.60	86.51	31.29	70.90	138.90
Iraq	21.83	6.72	4.17	5.21	5.74
Israel	12.38	1.03	0.84	4.00	6.51
Japan	3,332.60	492.35	169.29	724.19	1,946.77
Jordan	12.01	1.00	0.81	3.88	6.32
Kampuchea	4,124.38	235.68	150.66	255.59	3,482.45
Korea	977.96	244.49	36.22	103.49	593.76
Korea, Dem	1,342.66	335.66	49.73	142.08	815.18
Kuwait	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Laos	2,930.89	179.33	114.36	189.98	2,447.21
Lebanon	9.91	0.83	0.67	3.20	5.21
Macau	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Malaysia	6,153.16	351.61	224.77	381.31	5,195.46
Maldives	0.28	0.02	0.01	0.02	0.23
Mongolia	75.30	15.06	13.57	54.37	-7.70
Nepal	714.07	40.80	26.08	44.25	602.93
Oman	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pakistan	26.69	7.76	4.94	9.25	4.73
Philippines	3,471.94	198.40	126.83	215.16	2,931.56
Qatar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Saudi Arabia	6.93	1.39	1.08	6.45	-1.98
Singapore	1.53	0.09	0.06	0.10	1.29
Sri Lanka	409.40	24.82	15.85	26.63	342.11
Syria	50.81	4.68	3.69	16.24	26.20
Thailand	4,328.52	249.74	159.60	269.93	3,649.25
Turkey	1,354.86	132.69	102.99	437.07	682.11
United Arab Em.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Viet Nam	2,424.43	158.64	108.72	289.42	1,867.65
Yemen	5.03	1.01	0.78	4.68	-1.44
Yemen, Dem.	5.37	1.07	0.83	5.00	-1.53

表-12-5 ヨーロッパ地区 炭酸ガス収支

Region/country	光合成量 (10-6t)	葉の呼吸量 (10-6t)	非同化器官の 呼吸量 (10-6t)	土壌呼吸量 (10-6t)	炭酸ガス収支 (10-6t)
WORLD	521135.32	47909.66	22565.57	53357.63	397302.46
EUROPE	21136.79	3966.12	778.34	2890.73	13501.61
Albania	155.13	38.78	5.75	16.42	94.19
Andorra	1.23	0.10	0.08	0.40	0.64
Austria	419.52	64.09	12.08	50.93	292.41
Belgium	104.78	26.20	3.88	11.09	63.62
Bulgaria	587.41	146.85	21.76	62.16	356.64
Czechoslovakia	645.87	161.75	24.67	68.99	390.47
Denmark	76.20	19.05	2.82	8.06	46.27
Faeroe Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Finland	2826.46	310.91	71.19	362.51	2081.86
France	2179.60	507.64	87.61	279.20	1305.15
German	1555.55	388.89	57.61	164.61	944.44
Gibraltar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Greece	357.04	59.76	18.67	76.22	202.39
Hungary	135.61	34.50	6.62	15.73	78.75
Iceland	11.88	1.08	0.28	1.56	8.96
Ireland	52.16	13.04	1.93	5.52	31.67
Italy	861.87	130.45	45.28	192.01	494.14
Liechtenstein	0.36	0.03	0.01	0.05	0.27
Malta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Netherlands	46.27	11.57	1.71	4.90	28.09
Norway	987.94	89.81	23.28	129.73	745.11
Poland	1337.36	334.34	49.53	141.52	811.97
Portugal	536.28	118.88	22.67	76.54	318.19
Romania	938.02	234.69	35.24	99.69	568.40
Sanmarino	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Spain	2039.12	283.62	117.31	510.48	1127.72
Sweden	3431.53	533.95	99.67	415.03	2382.88
Switzerland	146.02	29.95	4.85	16.50	94.71
UK	329.31	82.33	12.20	34.85	199.94
Yugoslavia	1374.26	343.84	51.63	146.05	832.74
USSR	60472.39	10041.33	4235.92	10664.42	35530.73

表-12-6 オセアニア地区 炭酸ガス収支

Region/country	光合成量 (10-6t)	葉の呼吸量 (10-6t)	非同化器官の 呼吸量 (10-6t)	土壌呼吸量 (10-6t)	炭酸ガス収支 (10-6t)
WORLD	521135.32	47909.66	22565.57	53357.63	397302.46
OCEANIA	18484.47	1366.33	948.44	2699.40	13470.30
American Sai	4.29	0.25	0.16	0.27	3.62
Australia	5854.54	626.19	467.38	1764.81	2996.15
Canton Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cook Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fiji	358.72	20.50	13.10	22.23	302.89
Fren Polynes	34.79	1.99	1.27	2.16	29.37
Kiribati	0.65	0.04	0.02	0.04	0.55
Nauru	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
New Caledon	8.97	2.76	1.71	2.14	2.36
New Zealand	520.63	44.57	36.20	174.31	265.55
Niue	1.51	0.09	0.06	0.09	1.28
Norfolk Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pacific Is.Tr.1	12.01	0.69	0.44	0.74	10.14
Pap New Guir	10882.98	623.25	398.68	682.69	9178.36
Solomon Is.	798.39	45.62	29.16	49.48	674.12
Tokelau	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tonga	2.47	0.14	0.09	0.15	2.08
Tuvalu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vanuatu	4.53	0.26	0.17	0.28	3.82
Wallis Is.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00