九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

携帯型土壌呼吸測定装置の試作

玉泉，幸一郎
九州大学農学部林学科

齋藤，明
九州大学農学部林学科

https://doi.org/10.15017/10900

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 72, pp.53-62, 1995-03-30. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

九大演報（Bull. Kyushu Univ. For.），72：53-62，1995

携帯型土壌呼吸測定装置の試作*

玉　泉　幸一郎**・齋　藤　　明**

抄　　録

土壌呼吸を測定するために，チャンバー型の開放・通気式測定装置を試作した．本装置は呼吸チャンバー，CO_2 濃度分析装置，CO_2 濃度制御装置，エアータンク，エアーポンプ，フローメーターおよび発電機から成り，携帯可能で電源のない屋外でも測定可能である．

この装置を用いて土壌呼吸に及ぼすチャンバー内風速と CO_2 濃度の影響を調べた結果，両因子とも土壌呼吸に影響し，風速があると土壌呼吸は高くなり，また，CO_2 濃度が低いと高くなった．このことから，チャンバー法による土壌呼吸の測定では，測定時の風速と CO_2 濃度を明記する必要性が指摘された．

そこで，風速を一定，CO_2 濃度を可変として土壌呼吸の日変化を測定した．その結果，土壌呼吸の日変化は夜間に低く，日中に高い値が得られ，さらに地温と CO_2 濃度を変数とする関数で近似された．実測された CO_2 濃度と地表面温度のデータから日土壌呼吸を算出すると 22.1g $CO_2 m^{-2}$ day^{-1} となった．

キーワード：土壌呼吸，携帯型土壌呼吸測定装置，スギ林，CO_2 濃度，風速

1．はじめに

森林における炭素の動態研究において土壌呼吸による CO_2 の放出は重要な要因である（依田，1971）．土壌呼吸は主に有機物の分解と根の呼吸から構成されており，測定される土壌呼吸は，森林における微生物活性や植物活力あるいは林地生産力の指標としても利用される（生原ら，1993；堤，1987）．

土壌呼吸の測定法の一つにチャンバー法がある．土壌表面をチャンバーで覆い，チャンバー内に発生する CO_2 量を測定する方法である．この方法には大別して密閉吸収法と通気法の二つがある．密閉吸収法は水酸化カリウムに吸収させた CO_2 を定量する方法（Kirita, 1971）が一般的であり，簡便でしかも同時に多く測定できる長所がある．しかし，容器内の CO_2 濃度が低下するため土壌呼吸を過大評価する恐れがある（Nakadai *et al.*, 1993）．通気法には CO_2 濃度の分析に赤外線ガス分析装置（井上，1986；Kucera *et al.*, 1971），あるいはソーダライム（Edwards *et al.*, 1982；Schlentner *et al.*, 1985）が用いられる．赤外線ガス分析法では短時間の時系列測定が可能であるが，装置が高価でしかも重

---

* GYOKUSEN, K. and SAITO, A. : Improvement of a Portable Soil Respiration Measuring System.

** 九州大学農学部林学科
Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

量が重く，移動が難しい上に多点測定ができないなどの欠点がある（生原ら，1993）．ソーダライム法では積算値の測定となるが，安価で多点測定が可能である（生原ら，1993）．しかし，いずれの方法にも，通気速度が土壌呼吸に影響すること（井上，1986），あるいはチャンバー内の CO_2 濃度が土壌呼吸に影響すること（Nakadai *et al.*, 1993）から，測定条件についていくつかの問題点が残されている．

このように，土壌呼吸は森林の炭素動態を研究する上で重要な要因であるにもかかわらず装置の開発が遅れ，精度の高い測定法が確立されていない．そこで，本研究では赤外線ガス分析装置を用いた通気式の測定装置を小型軽量化し，簡便に移動できる装置を試作した．さらに，チャンバー内の CO_2 濃度と風速を制御できるようにし，土壌呼吸に及ぼすこれらの因子の影響を調べた．

2.　装置の概要

装置の概要を図1に示した．装置は発電機，ポンプ，CO_2 濃度制御装置，エアータンク，フローメーター，CO_2 濃度分析装置および呼吸チャンバーより成り立っている．発電機（EX300：HONDA）は出力100V，重量9.5kgで，一回の給油で約3時間の運転が可能であった．ポンプとしては，外気の吸入用に $5.0\,l\,min^{-1}$ の容量のものを，また呼吸チャンバーと CO_2 分析計への送気（$1.5\,l\,min^{-1}$）としては，水槽用の市販ポンプを改良して用いた．CO_2 濃度制御にはソーダライムを用い，手動の切り替え器でソーダライムを通過する空気と通過しない空気の流量を制御することで CO_2 濃度を調節した．エアーバッグには容量 $20\,l$ のポリエチレンタンクを使用し，フローメーターには浮子式の $2.0\,l\,min^{-1}$ を用いた．CO_2 濃度分析装置は携帯型光合成測定装置（SPB-3：SHIMAZU）を用い，呼吸チャンバーへの送入および排出空気の CO_2 濃度を同時に測定した．呼吸チャンバーはアクリル製で直径24 cm，深さ15 cm，厚さ0.5 cmの筒状とした．筒の上部はアクリル製の板で蓋をし，下部は筒の回りを研いで地中に入り易くした．測定時には，筒の下面を直接土壌に接着させ，少し回しながら下面が約1 cmほど地中に入り込むようにし，特に埋め込むことはしなかった．また，呼吸チャンバーの上部にはファンを取り付け内部の空気が撹拌されるようにした．ファンは直流12Vを用い，発電機からはアダプターを通して電源とした．今回用いたファンは電圧を一定としており平均風速 $4.0\,msec^{-1}$ であった．

装置への通気は，外気から $5.0\,l\,min^{-1}$ 吸入し，その内 $1.5\,l\,min^{-1}$ を CO_2 分析装置に，また，$1.5\,l\,min^{-1}$ を呼吸チャンバーに送入し，残りはタンクに空けた小穴からオーバーフローさせた．CO_2 分析装置に送入された $1.5\,l\,min^{-1}$ の内 $0.5\,l\,min^{-1}$ は分析装置に送り，他はオーバーフローさせた．また，呼吸チャンバーに送入された $1.5\,l\,min^{-1}$ の内 $0.5\,l\,min^{-1}$ を分析装置に送り，他は呼吸チャンバーの上部に空けた直径3mmの穴からオーバーフローさせた．これらの流量の組み合わせによって，装置の流路を陽圧に保ち，外気からの CO_2 の流入を防いだ．なお，本装置の全重量は約25kgで，発電機と CO_2 分析装置を装置から取り外すことで携帯が可能であった．

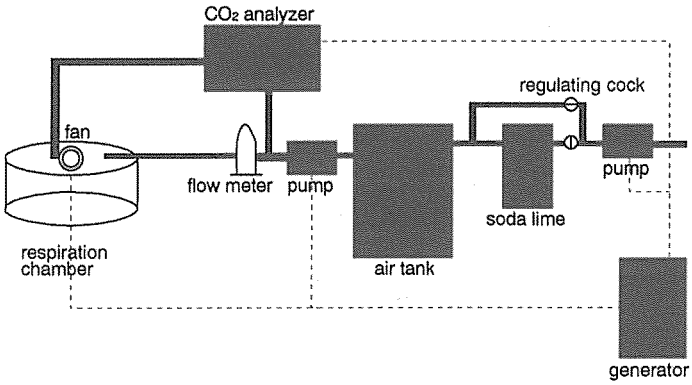

Fig. 1 Outline of the soil respiration measuring system. Solid line shows the air flow and dotted shows the electric line.
図1 土壌呼吸測定装置の概要

3. 土壌呼吸の測定

熊本県林業研究指導所の苗畑に植栽されたスギ人工林で土壌呼吸の測定を行った．スギは8年生で，16000本/haで植栽され，1993年3月に林分を二分し，半分はそのままの本数密度とし，半分は1/2の本数密度になるように間伐した．

3.1. 土壌呼吸に及ぼす風速および CO_2 濃度の影響

1993年9月17日9時から17時に間伐林分の1地点において風速と CO_2 濃度の影響を試験した．天候は曇で時々小雨が降り，日中の気温変化の少ない日であった．今回用いたチャンバーは風速の微調節ができなかったので，ファンの「入」，「切」を30分間隔で繰り返して風速の影響を検討した．試験では，通気中の CO_2 濃度を大気濃度の約360ppmとした場合と，0ppmの二段階に設定した．

土壌呼吸に及ぼす CO_2 濃度の影響については，ファンを「入」の状態で CO_2 濃度を0ppmから360ppmまで30分間隔で変化させた時の土壌呼吸を測定した．さらに，CO_2 濃度の影響を詳しく調べるために間伐林分と無間伐林分の各5地点で，1993年10月から1994年3月まで土壌呼吸を測定した．この測定では通気中の CO_2 濃度を大気濃度の約360ppm（高濃度）とした場合と0ppm（低濃度）とした場合の土壌呼吸を測定し，二点間の傾き（A）を次式で求めた．

$$A=(R_l-R_h)/(C_h-C_l)$$

ただし，R_l は低濃度で測定された土壌呼吸速度，R_h は高濃度で測定された土壌呼吸速度，C_h は高濃度測定時のチャンバー内の CO_2 濃度，C_l は低濃度測定時のチャンバー内 CO_2 濃度である．

3.2. 林床における土壌呼吸の測定

1993年8月12日17時から13日17時まで，間伐林分の1地点で土壌呼吸の日変化を測定した．通気用には外気をそのまま用い，CO_2 濃度は調節しなかった．また，風速は4 $msec^{-1}$ で一定とした．同時に約10m離れた地点で大気中の CO_2 濃度（高さ1m）および地表温度を4分間隔で測定した．大気中の CO_2 濃度は赤外線ガス分析装置（IRA-102：SHIMAZU）を用い，温度の測定には熱電対を用いた．

4. 結果と考察

4.1. 土壌呼吸に及ぼす風の影響

風速の変化に対する土壌呼吸の変化を図2に示した．本装置では風速は可変ではなかったので，電源の「入」と「切」の2条件について検討した．図はファンの「入」，「切」に伴う送入空気と排出空気の CO_2 濃度の変化を示しており，両値の差（図中の斜線部分）が呼吸速度となる．ファンを「切」にすると排出空気の CO_2 濃度は低下し，10分程で安定した値となった．逆に「入」にすると CO_2 濃度は次第に高くなり同様に10分程で「切」以前の濃度まで回復した．「入」，「切」にともなう CO_2 濃度の変化は送入空気の CO_2 濃度に関係なく認められ，また，明確な再現性も認められた．

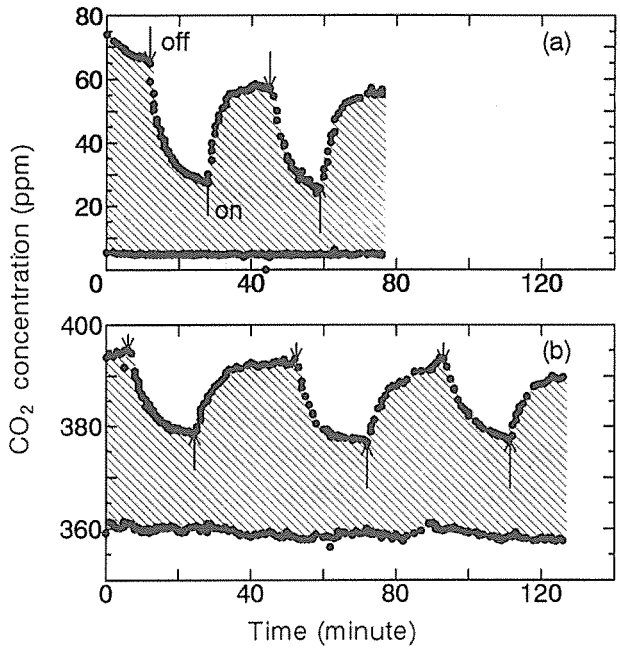

Fig. 2 The effect of wind speed on the soil respiration.
The wind speed was about 4msec^{-1} at 'on' time and nearly 0msec^{-1} at 'off' time. CO_2 concentration of air was regulated to nearly 0ppm (a) and ambient air (b), respectively.
図2　土壌呼吸速度に及ぼす風速の影響

このように，ファンの「入」，「切」に伴ない排出空気の CO_2 濃度は変化し，チャンバー内に風がある場合には土壌呼吸は高く，風の無い場合には低くなることが明らかである．井上（1986）はチャンバー法で測定された土壌呼吸がチャンバーへの通気回数で変化することを見いだし，この原因を土壌中の CO_2 拡散係数の変化にあるとした．今回の結果についても，チャンバー内の風は土壌から大気への CO_2 拡散係数を小さくし，このために風のある場合に土壌呼吸を高くしたと考えられる．密閉吸収法ではほとんど無風状態で測定されるが，通気法では呼吸チャンバーの大きさや流量によってチャンバー内の風速は変化する．つまり，用いる装置によって，測定値が異なることになる．今回の結果が示すように，風速は土壌呼吸に影響を及ぼす重要な因子であることから，通気式のチャンバー法による土壌呼吸の測定では，測定条件として風速を明記する必要性が指摘される．

4.2. 土壌呼吸に及ぼすチャンバー内 CO_2 濃度の影響

土壌呼吸とチャンバー内 CO_2 濃度との関係を図3に示した．送入空気の CO_2 濃度は0ppmから大気濃度の約360ppmまで変化させたが，土壌呼吸による CO_2 発生のためにチャンバー内の CO_2 濃度は232ppmから530ppmまで変化した．Nakadai *et al.*(1993)はファンを装備しない通気式のチャンバーで，送入空気の CO_2 濃度をチャンバー内の CO_2 濃度の代用として用いている．しかし，本装置で用いた撹拌式のチャンバーではチャンバー内 CO_2 濃度は排出空気の CO_2 濃度に等しいと考えられるので，本研究ではチャンバー内の CO_2 濃度として排出空気の CO_2 濃度を用いた．

CO_2 濃度が高くなるにつれて土壌呼吸は低くなり，その関係は直線で近似された．密閉吸収法による測定ではチャンバー内の CO_2 濃度が低下し，土壌呼吸を高く評価する可能性がある（Nakadai *et al.*, 1993）．そこで，この回帰直線を使用してチャンバー内 CO_2

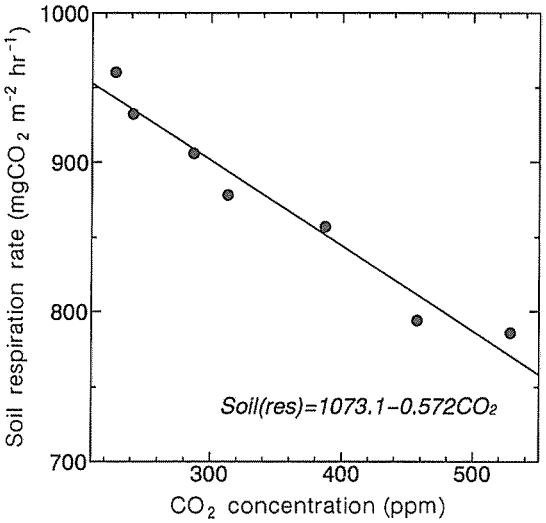

Fig. 3 The effect of CO_2 concentration in the chamber on soil respiration.

図3 呼吸チャンバーの CO_2 濃度が土壌呼吸速度に及ぼす影響

濃度が 360ppm と 0ppm の時の土壌呼吸速度を算出すると，それぞれ 867mg $CO_2m^{-2}hr^{-1}$ と 1073mg $CO_2m^{-2}hr^{-1}$ で，0ppm の方が 360ppm の時よりも 1.24 倍高い値となり，密閉吸収法で得られる土壌呼吸が過大になることが支持される．

このように，土壌呼吸が低 CO_2 濃度で高くなる原因には物理拡散と微生物活性があげられる．つまり，CO_2 は土壌の CO_2 濃度と大気の CO_2 濃度の勾配に応じて拡散するため，低 CO_2 濃度では勾配が大きくなり土壌からの拡散が高まったと考えられ，また，一方では CO_2 濃度が低くなると微生物活性は高くなる（Koizumi *et al.*, 1991）ことから，低 CO_2 濃度で微生物の呼吸量が増えたと考えられる．いずれにしても，土壌呼吸は CO_2 濃度で変化することからチャンバー法で測定された値は測定された時のチャンバー内の CO_2 濃度を記載するか，あるいは図 3 の直線から特定の CO_2 濃度（例えば平均大気濃度の 350ppm）での土壌呼吸を読みとって補正する必要がある．

ここで，図 3 の直線の回帰係数が一定ならば CO_2 濃度で補正して示すことは容易である．そこで，間伐，無間伐の林床で得られた回帰係数の季節変化を図 4 に，さらに，回帰係数と土壌呼吸（夜間濃度に近い 400ppm で補正）との関係を図 5 に示した．回帰係数は 10 月から 2 月まで低下し 3 月には上昇する季節変化が見られた．間伐処理では間伐区の回帰係数が大きく，無間伐区で小さかった．また，土壌呼吸との関係では，土壌呼吸が高いほど係数は大きくなり，直線で回帰される関係にあった．その関係は間伐区と無処理区で異なり，同一の土壌呼吸では間伐区で大きな値をとった．このように同一地点での回帰係数は季節で変動し，その変動は土壌呼吸の値に依存していた．また，間伐処理の違いによっても差が認められた．よって，土壌呼吸を CO_2 濃度で補正するためには，測定地点毎に毎回それぞれの回帰係数を求める必要がある．

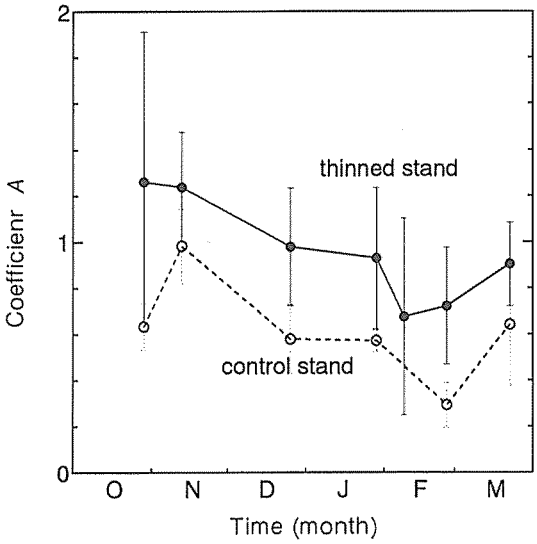

Fig. 4　Seasonal fluctuation of coefficient *A* in thinned and cotrol stands. Each bar shows the standard deviation.
図 4　間伐および無間伐林分における回帰係数の季節変動

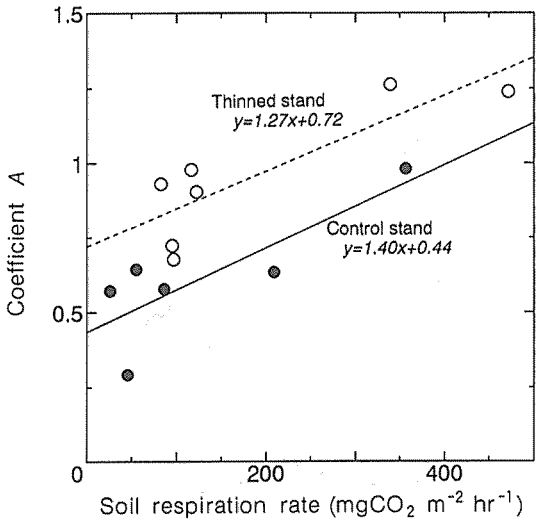

Fig. 5 Relationship between regression coefficient A and soil respiration rate.
図5 回帰係数 A と土壌呼吸速度との関係

4.3. 土壌呼吸の日変化

土壌呼吸の日変化を図7(a)に示した．土壌呼吸は夜間に低く，日中に高い値を示したが，その変動は小さく 800mg $CO_2m^{-2}day^{-1}$ から 900mg $CO_2m^{-2}day^{-1}$ の範囲であった．これらの変動を，土壌温度および CO_2 濃度との関係（図6）で見ると，どちらの因子にも直線で近似される関係があり，土壌呼吸は高い温度で高く，また，低い CO_2 濃度でも高くなった．そこで土壌呼吸速度を従属因子，土壌温度と CO_2 濃度を説明因子として重回帰分析を行い(1)式（$R^2=0.852$）が得られた．

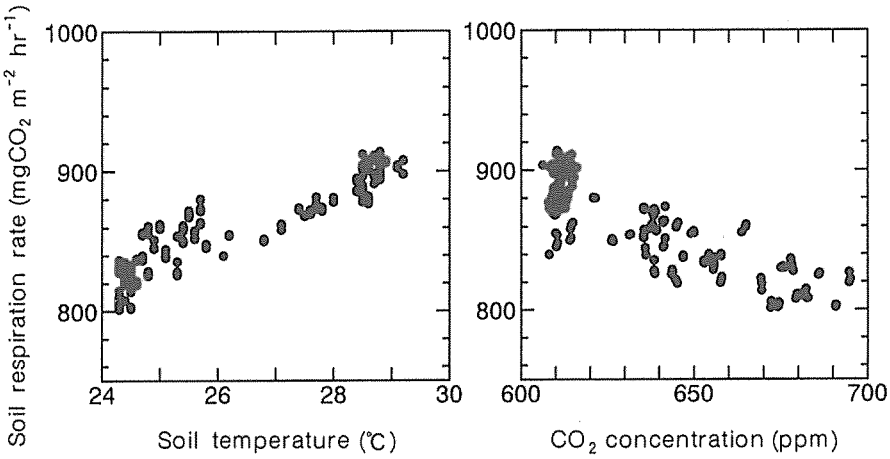

Fig. 6 The effects of soil temperature and CO_2 concentration on the soil respiration rate.
図6 土壌呼吸速度に及ぼす地温および CO_2 濃度の影響

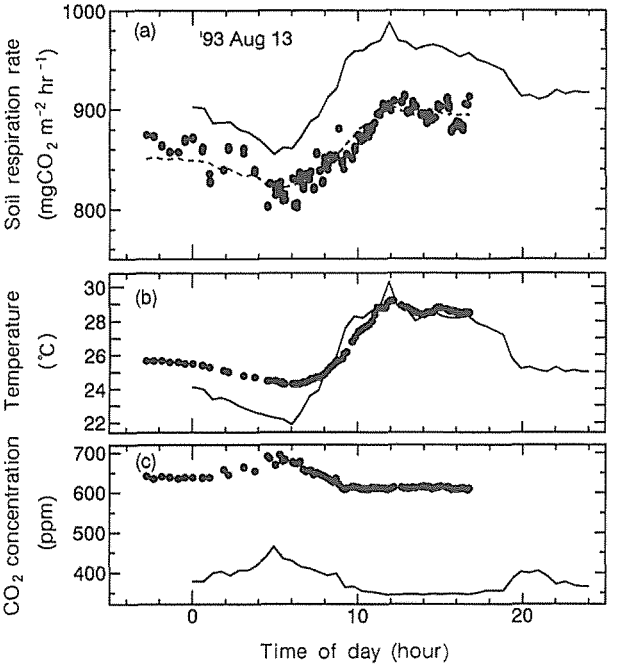

Fig. 7 Diurnal changes of measured and calculated soil respiration rate (a), soil surface temperature (b) and CO_2 concentration (c).
In panel (a), solid dots represent measured soil respiration rate, dotted line represents calculated soil respiration rate using the multiple regression curve (equation (1)), and solid line represents calculated soil respiration rate using soil surface temperature (solid line in panel (b)) and CO_2 concentration (solid line in panel (c)) as independent values in equation (1).
In panel (b), solid dots represent soil surface temperature of the respiration chamber and solid line represents soil surface temperature measured at the site of 10m apart from the chamber.
In panel (c), solid dots represent CO_2 concentration of the chamber and solid line represents CO_2 concentration of ambient air measured at 1m height.
図7　測定および算定された土壌呼吸速度の日変化

$$Soil(res) = 706.2 + 12.375Tem - 0.270CO_2 \qquad (1)$$

ただし，*Soil* (*res*) は土壌呼吸速度 (mg $CO_2 m^{-2} day^{-1}$)，*Tem* は地表面温度 (°C)，CO_2 はチャンバー中の CO_2 濃度 (ppm) である．

土壌呼吸の測定点から 10m の地点で測定された CO_2 濃度（図 7 (c) 実線）と地表温度 (図 7 (b) 実線）を (1) 式に代入して土壌呼吸速度を算定した．この結果，算定値は実測値よりも高い値で推移した（図 7 (a)）．この原因は，主にチャンバー内の CO_2 濃度が外気よりも高い値であったこと（図 7 (c)）にあり，通気式のチャンバー法で土壌呼吸を測定する場合，密閉吸収法とは逆に，チャンバー内の CO_2 濃度を低くしないと過小に評価することになる．算定された土壌呼吸速度を日単位で積算すると 22.1g $CO_2 m^{-2} day^{-1}$ であった．この値は密閉吸収法で測定されたスギ林での 8 月の値 19.2g $CO_2 m^{-2} day^{-1}$（萩原ら，

1984）と近い値であった．しかし，この値は光合成法によって推定されたこの林分の単位土地面積あたりの日光合成量（6.1g $CO_2m^{-2}day^{-1}$：未発表）の約3倍の値であり，この林分が CO_2 のソースとして機能していることになる．間伐直後のために高い土壌呼吸を示した可能性もあるが，前述のように今回の測定では風速を $4msec^{-1}$ としていることから，最大値に近い土壌呼吸を算定した可能性が高い．よって，今後は説明因子として風速を加えた算定式を作成することで，より精度の高い土壌呼吸の測定が可能となる．

5. まとめ

土壌呼吸は森林の炭素動態を研究する上で重要な要因である．しかしながら，土壌呼吸測定装置の開発の遅れからその研究例は少ない．そこで，本研究では携帯型の土壌呼吸測定装置を試作し，その有用性や測定上の問題点を検討し，以下の結果を得た．

(1) 今回試作した土壌呼吸装置は軽量で，電源のない屋外でも容易に土壌呼吸を測定することが可能であった．

(2) 通気式チャンバー法ではチャンバー内の温度，風速，CO_2 濃度が呼吸速度に影響を及ぼす重要な因子であった．土壌呼吸を精度よく測定するためにはこれらの因子を組み込んだ算定式を作成する必要がある．

(3) 本装置で測定されたスギ林床の土壌呼吸は日中に高く，夜間に低かった．また，大気の CO_2 濃度と地表温度から算定された日土壌呼吸は 22.1g $CO_2m^{-2}day^{-1}$ であった．

最後に本研究を推進するにあたり，スギ林の利用を快諾いただいた熊本県林業研究指導所新谷安則所長に深謝申し上げる．

引用文献

EDWARDS, N., T. (1982) : The use of soda-lime for measuring respiration rates in terestrial system. Pedobiologia **23** : 321-339

萩原秋男・勝野真澄・穂積和夫 (1984)：スギ人工林の土壌呼吸．日林論 **95** : 361-362

生原喜久雄・相場芳憲・橘順吉 (1993)：重量法による通気式簡易土壌呼吸測定器の試作．森林と肥培 **156** : 1-5

井上君夫 (1986)：チャンバー法による土壌面 CO_2 フラックスの測定．農業気象 **42** (3) : 225-230

KIRITA, H. (1971) : Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. IV. An improved absorption method using a disc of plastic sponge as absorbent holder. Jap. J. Ecol. **21** : 119-127.

KOIZUMI, H., NAKADAI, T., USAMI, Y., SATOH, M., SHIYOMI, M. and OIKAWA, T. (1991) : Effect of carbon dioxide concentration on microbial respiration in soil. Ecol. Res. **6** : 227-232

KUCERA, C., L. and KIRKHM, D. R. (1971) : Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. Ecology **52** : 912-15

NAKADAI, T., KOIZUMI, H., USAMI, Y., SATOH, M. and OIKAWA, T. (1993) : Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land : Effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. Ecol. Res. 8 : 65-71

SCHLENTNER, R., E. (1985) : Relationships between CO_2 evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. Can. J. For. Res. **15** : 97-106

堤　利夫 (1987) : 森林の物質循環　東京大学出版会, 東京, 124pp.

依田恭二 (1971) : 森林の生態学　築地書館, 東京, 331pp.

(1994 年 11 月 8 日受付 ; 1994 年 12 月 19 日受理)

Summary

A open-flow system capable of regulating wind speed and CO_2 concentration was developed to measure soil respiration. The system consists of infrared gas analyzer (SBP-3 : SHIMAZU), air tank, CO_2 concentration regulator, air pump, flow meter and generator. The system is portable and could be used to measure soil respiration in the field.

The effect of wind speed and CO_2 concentration on the measurement of soil respiration was investigated. Both of these parameters were found to be important factors in determining the soil respiration.

The diurnal change in soil respiration in a thinned sugi stand was also studied. Soil respiration rate was high during daytime and low at night. However the deviation was only within 20% of the maximum value. The diurnal change of soil respiration was fitted well the multiple regression curve using soil surface temperature and CO_2 concentration as independent variables. Using the dsata of soil surface temperature and CO_2 concentration of air collected at the thinned stand, daily respiration rate of the stand was calculated as 22.1 g $CO_2 m^{-2} day^{-1}$.

Key words : soil respiration ; portable soil respiration measuring system ; CO_2 concentration ; wind speed.