チャンバー法による土壌面 CO₂ フラックスの測定

井 上 君 夫

(農業環境技術研究所)

Chamber Method for Measuring CO₂ Flux from Soil Surface

Kimio INOUE

(Div. of Agrometeorology, National Institute of
Agro-Environmental Sciences,
P.O. Box 2, Yatabemachi, Tsukubagun, Ibaraki 305 JAPAN)

1. はじめに

土壌中の空気の CO₂ 濃度は大気中のそれより $10^1 \sim 10^2$ 倍も高く、CO₂ は土壌から大気中へ通常拡散している(矢吹, 1965; de Jong and Schappert, 1972; Kanemasu *et al.*, 1974; 瀬戸ら, 1978)。特殊な条件を除き、土壌空気の高 CO₂ 濃度は土壌中の各種有機物の土壌微生物による分解と植物の根の呼吸作用によって維持されている(Witkamp and Frank, 1969)。

従って、大気-土壌間の CO₂ フラックスの定量的評価は、土壌微生物の活性や土壌有機物の分解速度、土壌空気中のガス環境を知るための指標となり得る。また、望ましい有機物施用方法や根圏ガス環境の調節法の策定にも役立つ。各種ガスの鉛直フラックスの測定法には、チャンバー法(通気法、密閉法)、乱流変動法、空気力学的方法、熱収支法などがある(Denmead *et al.*, 1974; Otaki *et al.*, 1984; 井上・陽, 1985; 矢吹, 1985)。それらの測定法の中で乱流変動法は最も高い信頼性をもつが、測器や測定技術などの点から簡便な方法ではない。これに対してその測定精度は低いが、チャンバー法は植物の蒸発散や光合成、あるいは各種ガスフラックスの測定に多く採用されている。

チャンバー法で CO₂ フラックスを評価する場合の大きな問題は、土壌面をチャンバーで覆うことによってチャンバー内のガス拡散状態が外と大きく違ってくることである。すなわち、密閉アルカリ法におけるチャンバー内の CO₂ のガス拡散係数は分子拡散係数に近く、通気法においてもチャンバー外のそれより大幅に小さいものと考

えられる。この場合、チャンバー内のガス拡散状態は土壌ガス環境にも影響を与えている。その他の影響要因であるチャンバー内の温度変化と圧力差については、技術的にそれらの影響を最小限にすることは可能である(Kanemasu *et al.*, 1974)。この通気法において、通気量と土壌面 CO₂ フラックスとの関係を土壌のガス拡散の観点より解析した研究は見られないようである。

本研究では、通気法における通気量と CO₂ フラックスとの関係を実験的に明らかにするとともに、CO₂ 収支モデルによってそれを説明することができたので報告する。

2. 大気中の CO₂ 濃度と CO₂ フラックス の測定

(1) 実験圃場

CO₂ フラックスは土壌の種類や有機物含量、土壌水分、地温、ガス拡散係数などの多くの要因によって変化する。本実験では、土壌の有機物含量および土壌水分の違いは CO₂ 発生強度の違いとなって現われるが、大気-土壌間の CO₂ 交換過程には直接影響を及ぼさないと判断して、つぎの実験条件を設定した。

土壌は日本の耕地土壌の主要な土壌群を対象とし、水田土壌として灰色低地土、黒ボク土、褐色低地土、畑土壌として黒ボク土、対照土壌として川砂を準備した。これらの土壌は 1985 年 4 月 5 日に温室内の枠試験区(3.1 × 1.8 × 0.45 m)内に 30 cm の深さまで充填した。その中の 3 試験区については湛水し、水田状態とした。各土壌の有機物量は僅かであったが、有機物を投入しない状態で、さらに作物を栽培しない裸地状態で実験を行なった。

温室内での実験と並行して、水稻栽培の 3 水田で CO₂ フラックスの測定を実施した。各水田は処理法が異なり、

昭和 61 年 5 月 30 日 全国大会にて発表

昭和 61 年 6 月 20 日 受理

No.1, 2, 3 の試験水田はそれぞれ稲ワラ敷込み, 稲ワラ持出し, 無施肥の状態で, 1980年より水稻が栽培されている。田植えは6月1日で, 品種は信濃糯3号である。また, 1984年には日本晴を栽培している水田で通気量とCO₂フラックスに関する測定を行なった。水田はいずれも黒ボク土壌である。

(2) チャンバーの設置

チャンバーはFig.1に示すように厚さ5mmの亚克力板で作られている。その大きさは58×20×30cmで, 内部に拡散板が取付けられ, さらに上面は二重の亚克力板から成っている。空気の流入口は流出口よりも大きくして内部の負圧を防いだ。チャンバーの外側は内部の温度上昇を防ぐ目的で反射性被覆資材で覆った。

温室内の実験では4月5日に高さ30cmのチャンバーを土壌中に15cm差込み, 水田では7月4日に同様な方法でチャンバーを設置した。

測定は, 前者が9月から12月に, 後者が7月19日から9月25日にかけて行なった。同時に約2cm深さの地温を白金抵抗温度計で計測した。

(3) 空気採集とCO₂濃度測定

新たに製作した多点・連続測定方式の土壌CO₂測定解析装置が実験に使われた。これは自動空気採集器(流量可変型)とCO₂分析計(Beckman model 864), 自動校正器, 記録計などで構成されている。Fig.1に示したように, 各チャンバーの空気流出口からポリエチレンチューブ(直径4mm)を通して吸引した空気はパーマピュアドライヤで除湿される。そして, その中の約700ml min⁻¹の空気が分析計に導びかれる。これらの他に, 温室外の空気と水稻田での高さ2mの空気のCO₂濃度を測定した。CO₂フラックスはこれらのCO₂濃度のデータと通気量, 地温のデータから次式で計算した。

$$F_s = \frac{\alpha(C_1 - C_2)f}{A} \frac{1}{1 + T/273} \frac{H}{760}$$

ここで, F_s はCO₂フラックス(g CO₂ cm⁻² s⁻¹), C_1 と C_2 は通気入口と出口のCO₂濃度(g CO₂ cm⁻³), A はチャンバー底面積(cm²), f は通気量(l s⁻¹), T と H は流量計の近傍での通気温度(K)と通気圧力(mmHg), α は換算係数である。

3. 結果と考察

(1) 落水後の水田における通気量とCO₂フラックスとの関係

自動空気採集器は6点用で, 流量を0~6 l min⁻¹の間で変えることができる。1984年の実験は落水後の水田で11月22日から12月4日にかけて行なった。本装置を使って得た水田での結果がFig.2に示してある。CO₂フラックスは換気回数の増加につれておよそ直線的に増大した。この結果は, 土壌中の高CO₂濃度の空気が換気の影響を受けてチャンバー内に流入していることを示している。これは後述するように, 土壌中のCO₂拡散係数が土壌き裂などによって変化するとき起こると考えられる。そのような条件としては, チャンバー周囲よりの空気漏れと土壌中の無数のき裂を通しての流入が考えられ, 前者についてはその事実のないことを確めた。後者のき裂については, 定量的な評価はしていないが, 土壌表層に大小のき裂が認められた。

非作付け期間で落水状態の供試水田において, チャンバー法(通気法)によるCO₂フラックスの測定結果が山岸ら(1980)によって報告されている。しかし, 筆者の実験では, 土壌にき裂が認められる水田でのチャンバー法による正確なCO₂フラックスの評価は非常に困難であった。これらの相違は土壌の種類あるいは土壌有機物量の差などに関係することも考えられる。両供試土壌の全炭素量は山岸らの土壌が4.5%(0~20cm)であったのに対して本実験の土壌は1.7%と著しく少なかった。

Fig. 1. Schematic diagram for measurement of CO₂ flux from soil surface by chamber method

Fig. 2. Relationship between flux of CO₂ and ventilation rate in the fallow period (Oct. 22-Dec. 4, 1984)

(2) 各種土壌における通気量とCO₂フラックスとの関係

CO₂フラックスに関する土壌間差異を解明するための実験が各種土壌を対象に行なわれた。この実験で、畑土壌の地温と土壌水分は細かく制御していないが、地温は黒ボク土で20~23℃、川砂で19~21℃、同様に各々の含水率は68~79%と8~14%であった。水田土壌の地温は3試験区ともに大差がなく、17~20℃の範囲にあった。

Fig. 3は上記の条件下で得られた各種土壌における換気回数とCO₂フラックスとの関係である。各測定点の値は2~5回の繰り返し試験の平均値である。同図に示した1984年の水田の土壌水分は飽和状態にあった。CO₂フラックスは換気回数の増大に伴って全ての土壌で明らかに増加している。両者の関係は畑土壌(黒ボク土)では変動も大きく、約13回/時以上の換気回数でCO₂フラックスがほぼ定量に達している。同じく畑状態の川砂の場合はこれとは異なり、水田状態のそれに類似している。これは団粒構造をもつ黒ボク土と単粒構造をもつ川砂の

Fig. 3. Relationship between flux of CO₂ and ventilation rate for the various soils

1. Andosol (upland soil), 1985
2. Ando paddy field (paddy soil), 1984
3. Ando paddy field (paddy soil), 1985
4. Brown Lowland soil (paddy soil), 1985
5. Sand (upland soil), 1985
6. Gray Lowland soil (paddy soil), 1985

土壌中のCO₂拡散係数の差異によるものと考えられる。これらに対して、各種の水田土壌では全てが類似した傾向を示しており、換気回数が9~13回/時以上ではほぼ定量に達している。それ故にチャンバー法でも必要通気量以上で吸引すれば信頼性の高いCO₂フラックスの測定が可能である。

(3) CO₂フラックスの評価モデル

Fig. 1に示したチャンバー法に基づいてチャンバー内と土壌層にCO₂収支式を適用すると方程式(1)と(2)が得られる。このモデルの構築には、CO₂収支の定常性と土壌呼吸強度の均一分布、さらにチャンバー内の均一なCO₂濃度分布が仮定されている。

$$D_s d^2 C / dz^2 = r \quad (1)$$

$$\varepsilon U (\bar{C} - C_a) = F_s \quad (2)$$

ここで、 C 、 $\bar{C}$ 、 C_a は土壌中のCO₂濃度およびチャンバー内とチャンバー入口のCO₂濃度(g CO₂ cm⁻³)、 D_s 土壌中のCO₂拡散係数(cm² s⁻¹)、 r 土壌呼吸強度(g CO₂ cm⁻³ s⁻¹)、 U 風速(cm s⁻¹)、 ε 換算係数、 F_s 土壌面CO₂フラックス(g CO₂ cm⁻² s⁻¹)である。

方程式(1)はvan Bavel (1951)やde Jong and Schappert (1972)が土壌中のCO₂濃度分布を明らかにするために用いたものと基本的に同じである。

まず、方程式(1)を解き、 $(C)_{z=0} = \bar{C}$ と $(D_s dC/dz)_{z=0} = F_s$ の境界条件をおくと次式が得られる。

$$C = \bar{C} + F_s z / D_s - r z^2 / 2 D_s \quad (3)$$

いま、CO₂の拡散する土層の深さを L とし、そこでのCO₂濃度を C_L とする。方程式(2)と $(C)_{z=L} = C_L$ の条件下で(3)式を展開すると、土壌中のCO₂濃度と深さ L でのCO₂濃度は次式で与えられる。

$$C = C_a + F_s / \varepsilon U + F_s z / D_s - r z^2 / 2 D_s \quad (4)$$

$$C_L = C_a + F_s / \varepsilon U + F_s L / 2 D_s \quad (5)$$

上式(5)からCO₂フラックス(F_s)はつぎのように求められる。

$$F_s = (C_L - C_a) (1 / \varepsilon U + L / 2 D_s)^{-1} \quad (6)$$

上式(4)と(5)はvan Bavel (1951)らの解に右辺第2項が加わった形になっている。すなわち、土壌中のCO₂濃度はチャンバー内の通気量によって変化し、CO₂フラックスは通気量、土壌中のCO₂拡散係数などによって変化することがわかる。さらに、土壌中のCO₂濃度の鉛直分布は通気量の影響を受けず、CO₂濃度は深さに伴って曲線的に増加することを示している。de Jong and Schappert (1972)や矢吹・北宅(1984)の報告によると、作物生育に伴ってCO₂濃度の鉛直分布は複雑な様相を示すが、非栽培期間や川砂の場合には理論値に近い分布を示している。土壌中に有機物が均一に混入していれば、土壌中のCO₂濃度分布は(4)式に近いものと考えられる。

Fig. 4. Normalized flux of CO₂ as a function of diffusion transfer coefficient for the various soils ($L=15$ cm, $V=15000$ cm³)

D_s をパラメータとして(6)式から計算した換気回数と CO₂ フラックスとの関係が Fig. 4 に示してある。両者の関係は D_s をパラメータとして双曲線関数的に変化している。すなわち、 D_s が小さければ CO₂ フラックスは小さい換気回数で定量に達するが、 D_s が大きい場合には定量に達するに必要な換気回数は非常に大きくなる。Fig. 3 に示した各種土壌における曲線群は Fig. 4 に非常に類似しており、両者の関係は(6)式で説明できることがわかった。

Table 1 は Fig. 3 の各種土壌における平滑化した曲線群から(5)と(6)式を使って求めた D_s と深さ 15 cm における C_L 値である。CO₂ 拡散係数は畑土壌の黒ボク土で $D_s=0.121$ cm² s⁻¹ の最大値を示し、その他の土壌では 0.034~0.042 cm² s⁻¹ の範囲にあった。ここで求めた D_s 値は計算に用いたデータの性質から考えると純粋な空気中の CO₂ 拡散係数ではなく、土壌層における CO₂ の種々な拡散過程を包括した平均的な交換係数であるといえる。従って、CO₂ の空気中の分子拡散係数 (0.155 cm² s⁻¹, $T=15^\circ\text{C}$) と直接的な比較はできないが、畑土壌の黒ボク土の D_s 値は 73.6% の土壌水分量を考慮すると若干大きいといえる (Currie, 1961)。川砂の D_s 値は 10% の土壌水分量で 0.042 cm² s⁻¹ であったが、この値も矢吹・北宅 (1984) の測定値と比較して 2 倍ほど大きなものであった。これは土壌呼吸強度の不均一性や溶存 CO₂ 濃

度の温度による変化などの影響によるものと考えられる。また、 D_s と空隙率との関係を見ると、 D_s は空隙率の小さい褐色低地土と灰色低地土で最小になっており、両者に若干の相関がみられた。

一方、計算された C_L 値は逆に予想より低いものであった。これは D_s 値が大きく推定されたことにも関係している。たとえば、黒ボク土壌 (畑状態) の D_s 値を 0.05 cm² s⁻¹ と仮定して C_L 値を計算すると、その CO₂ 濃度はおよそ 600 ppm となり 100 ppm ほど上昇する。

CO₂ 収支モデルは D_s や C_L を求めるためのものではないが、通気量と CO₂ フラックスとの間に明瞭な関係が見出せるデータであれば妥当な D_s や C_L を推定することは可能である。

(4) 水稻生育期間における水田の CO₂ フラックス

Fig. 5 は換気回数が約 10 回/時で、田植え 50 日後の 7 月 20 日から落水前の 9 月 25 日まで連続測定した CO₂ フラックスと高さ 2 m の大気中の CO₂ 濃度および地温の推移である。試験水田はいずれも処理状態を異にしており、全測定期間を通して有機物混入量が最大である水田 (No.1) の CO₂ フラックスが最大であった。この区では、日平均でみると常に CO₂ フラックスは上向きであった。一方、無施肥区 (No.3) のそれは対照的に推移し、日によっては CO₂ フラックスが下向きであった。各処理区において、CO₂ フラックスが極端に大きな値を示したのは非湛水状態にあったためである。稲ワラが混入している No.1 の場合、CO₂ フラックスは 8 月頃が最も多く、9 月 5 日以降明らかに減少している。この推移は Murayama (1978) が報告している稲ワラ分解率のそれと対応している。すなわち、水田における稲ワラはおよそ 2 カ月間で 50~85% が分解し、その間の分解は指数関数的に進むといわれている。

水稻生育期間における大気-水・地表面間の CO₂ フラックスは山岸ら (1980) によると、生育が進むにつれて 7 月下旬頃から CO₂ の流れは終日上向きとなる。さらに、落水後の CO₂ フラックスは約 4 倍ほどに増加する。本実

Table 1. CO₂ diffusion transfer coefficient in soil layer and CO₂ concentration of depth (15 cm) estimated from Eqs. (5) and (6) and CO₂ flux data

Soil group	D_s (cm ² s ⁻¹)	C_L (ppm)	ϵ (%)	r (%)	Sampling duration
Andosol (upland soil)	0.121	505	17.7	73.6	Sep.-Nov., 1985
Ando paddy field (paddy soil)	0.042	518	5.7	—	Nov.-Dec., 1984
Ando paddy field (paddy soil)	0.041	429	5.7	—	Sep.-Nov., 1985
Brown Lowland soil (paddy soil)	0.035	411	2.3	—	Sep.-Nov., 1985
Sand (upland soil)	0.042	394	33.8	10.0	Sep.-Nov., 1985
Gray Lowland soil (paddy soil)	0.034	385	1.8	—	Sep.-Nov., 1985

Note: $L=15$ cm, $C_a=350$ ppm (1985), $C_a=376$ ppm (1984)

Fig. 5. Seasonal changes in daily CO_2 flux from the rice fields during the rice growing period. T_s is daily mean temperature of soil inside the chamber. C_a is daily mean CO_2 concentration of the atmosphere at the height of 2m. 1. rice field with the application of organic manure 2. rice field without the application of organic manure 3. rice field without fertilizer application.

験での CO_2 フラックスの推移は山岸らのそれと似ているが、落水後については増加すると思われるが先に指摘したとおり、測定はできなかった。

4. ま と め

チャンバー法による土壌面 CO_2 フラックスの推定法を確立するために、各種土壌を対象に通気量と CO_2 フラックスとの関係について実験的に研究し、さらに CO_2 収支モデルによる検証を行なった。得られた結果はつぎのように要約できる。

1. 落水後の水田における CO_2 フラックスは通気量にほぼ比例して増大した。これは土壌中の CO_2 拡散係数が土壌き裂などによって変化したためである。この場合、チャンバー法による CO_2 フラックス測定は非常に困難である。

2. 各種土壌を対象として、畑・水田状態で通気量と CO_2 フラックスとの関係を調べた結果、 CO_2 フラックスがほぼ定量に達する換気回数は畑状態の黒ボク土壌で13回/時以上、その他の水田状態の黒ボク土、褐色低地土、灰色低地土および畑状態の川砂においては9~13回/時以上であることが分った。

3. チャンバー内の CO_2 収支と土壌中のそれから CO_2 フラックスの推定式を導いた。この推定式から CO_2 フラックスは土壌中の CO_2 拡散係数をパラメータとして通気量の増大につれて双曲線関数的に増加することが分った。 CO_2 フラックスの測定データと推定式から計算した各土

壌の CO_2 拡散係数は若干大きな値を示し、逆に深さ15 cmの CO_2 濃度は低い値を示した。また、水田土壌では CO_2 拡散係数と空隙率との間に低い相関が認められた。

4. 水稻生育期において、施肥処理を異にする水田で CO_2 フラックスを測定した結果、無施肥区を除いて CO_2 フラックスは日量ではほぼ上向きであった。そのフラックスの推移は稲ワラの分解速度に相応していることがわかった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御指導と有益な御助言をいただいた農業環境技術研究所気象管理科長内嶋善兵衛博士、同計測情報科三輪哲久博士、同資源・生態管理科加藤好武博士に、また本実験の実施にあたり、便宜を図っていただいた埼玉県園芸試験場稲山光男技官、前気象管理科気候資源研究室長岩崎尚博士と同業務科職員に謝意を表

します。なお、本研究は農水省の大型別枠研究「バイオマス変換計画、BCP-86-I-2-1」の一環として行なったものである。

引用文献

- Currie, J. A., 1961, Gaseous diffusion in porous media, Part 3—wet granular materials, *Brit. J. Appl. Phys.*, **12**, 275—281.
- Denmead, O. T., J. R. Simpson and J. R. Freney, 1974, Ammonia flux into the atmosphere from a grazed pasture, *Science*, **185**, 609—610.
- de Jong, E. and H. J. V. Schappert, 1972, Calculation of soil respiration and activity from CO_2 profiles in the soil, *Soil Sci.*, **113**, 328—333.
- 井上君夫・陽 捷行, 1985, 草地土壌から発生する亜酸化窒素(N_2O)のフラックスの測定, *農業気象*, **41**(2), 145—149.
- Kanemasu, E. T., W. L. Powers and J. W. Sij, 1974, Field chamber measurements of CO_2 flux from soil surface, *Soil Sci.*, **118**, 233—237.
- Murayama, S., 1984, Decomposition kinetics of straw saccharides and synthesis of microbial saccharides under field conditions, *J. Soil Sci.*, **35**, 231—242.
- Ohtaki, E., 1985, On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields, *Boundary-Layer Meteorol.*, **32**, 25—37.
- 瀬戸昌之・松前恭子・田崎忠良, 1978, 林床における二酸化炭素の発生速度の季節変化と土壌の生物および環

- 境条件に関するいくつかの考察, 生物環境調節, **16** (4), 103–108.
- van Bavel, C. H. M., 1951, A soil aeration theory based on diffusion, *Soil Sci.*, **72**, 33–46.
- Witkamp, M. and Frank, M. L., 1969, Evolution of CO₂ from litter, humus, and subsoil of a pine stand, *Pedobiologia*, **Bd. 9**, 358–365.
- 矢吹万寿, 1965, 高畦内土壌空気の炭酸ガス濃度, 農業気象, **21**(3), 113–114.
- 矢吹万寿, 1985, 植物の動的環境, 朝倉書店, pp.200.
- 矢吹万寿・北宅善昭, 1984, 根圏ガス環境の制御に関する研究(1), 農業気象, **40**(1), 1–7.
- Yamagishi, T., K. Okada, T. Hayashi, A. Kumura and Y. Murata, 1980, Cycling of carbon in a paddy field, *Japan J. Crop Sci.*, **49**(1), 135–145.
- 矢吹万寿, 1965, 高畦内土壌空気の炭酸ガス濃度, 農業

Summary

To establish a method for measuring CO₂ flux from soil surface, the relation between CO₂ flux and the ventilation rate of a chamber was studied for the four different soils such as Andosol, Brown Lowland soil, Gray Lowland soil and Sand. The CO₂ concentration in the air at the inlet and the outlet of the chamber was determined with an infrared gas analyzer (see Fig. 1). CO₂ flux from soil surface was calculated from the CO₂ difference between the inlet and outlet of the chamber and the air flow rate.

1. It was found that the CO₂ flux for the soils increases gradually with increasing the ventilation rate, approximating to respective constant levels at the higher ventilation rate. The critical ventilation rates at which the respective CO₂ flux are assumed to approach to constant levels were about 13 times/hr for the Andosol and about 9–13 times/hr for the other tested soils.

2. One dimensional CO₂ balance equations for soil layer and a chamber were solved to derive the relationship between CO₂ flux and the ventilation rate, and to obtain CO₂ profile in the soil layer. The derived relationship indicates that CO₂ flux is affected with effective CO₂ gas diffusivity in a soil layer and ventilation rate (see Fig. 4). The theoretical results agreed well with the experimental results presented in Figs. 2 and 3.

3. The experimental results obtained using the CO₂ chamber system and Eqs. (5) and (6) were used to calculate the average effective CO₂ gas diffusivity over the soil layer with 15 cm depth and the CO₂ concentration at the bottom of soil layer and results obtained are shown in Table 1. Under flooded conditions, the effective CO₂ gas diffusivity for the tested soils was over a range from 0.035 to 0.042 cm² s⁻¹. These values were lower than molecular diffusivity of CO₂ in the air.

4. The chamber method was applied to measurements of the CO₂ flux at the soil surface of three rice plant fields. CO₂ flux measurement was made together with measurements of microclimatic elements during the period of rice cultivation in 1984 and 1985. The results are shown in Fig. 5. The daily CO₂ flux was higher for a rice field with the application of organic manure than without that. It was found that CO₂ flux at the rice field decreases gradually with lowering of soil temperature.