

## ソルガム群落上での炭酸ガスフラックスの測定

大滝英治\*・米谷俊彦・瀬尾琢郎\*\*

### 緒 言

作物群落が光合成で取り込む炭酸ガスの大気からの供給を支配しているのは乱流輸送である。炭酸ガスの乱流輸送量は空気力学的傾度法、熱収支法、渦相関法等によって測定することができるが、仮定の少ない渦相関法による測定が最もすぐれている。鉛直方向の炭酸ガスの乱流輸送量を渦相関法によって測定するには炭酸ガスの濃度変動と風速の鉛直成分の変動を正確に測定する必要がある。しかし、炭酸ガス変動計の開発の遅れから、この方法による炭酸ガスの乱流輸送量の測定は不可能であった。

最近、我々は炭酸ガス濃度変動を測定する目的で長さ 20 cm の開光路を持つ炭酸ガス変動計を開発した (Ohtaki and Matsui, 1982)。この炭酸ガス変動計と既に開発されている超音波風速計 (Mitsuta, 1966) とを組み合わせると炭酸ガスの乱流輸送量を渦相関法によって測定することが可能である。本論文では炭酸ガス変動計の光学系と電気系の構成を略述すると共に、ソルガム群落上での炭酸ガスの乱流輸送量を渦相関法によって測定した結果について報告する。

本研究のとりまとめにあたり丁寧に原稿に眼を通して戴いた岡山大学農業生物研究所 木村和義教授に感謝します。

### 測定原理と測定器

渦相関法では炭酸ガスの乱流輸送量は次式で与えられる。

$$F = \overline{w'c'} = \int_{n_L}^{n_H} C_{wc}(n) dn \quad (1)$$

ここで、 $w$  は風速の鉛直成分であり、 $c$  は炭酸ガス濃度である。' は平均値からの変動量を示し、 $\overline{\quad}$  は測定時間についての平均値を表わしている。また、 $C_{wc}(n)$  は  $w$  と  $c$  のコスペクトル密度であり、 $n_H$  と  $n_L$  は炭酸ガスの乱流輸送に寄与している上限および下限の周波数である。Miyake and McBean (1970) は接地気層内での顕熱の乱流輸送の場合、 $n_L=0.001$  Hz、 $n_H=5$  Hz 程度であることを実験的に示し、Dyer *et al.* (1967) はフラックスatronを作成する際、 $n_L=0.005$  Hz と  $n_H=0.5$  Hz を採用している。炭酸ガス

昭和61年1月8日受理

\* 現岡山大学教養部

\*\* 岡山大学名誉教授

と顕熱の乱流輸送の構造が相似であると仮定すると、炭酸ガス変動計は0.001 Hz から5 Hz 程度までの炭酸ガス濃度変動を測定することが必要である。

今回報告する炭酸ガス変動計は試作1号機 (Ohtaki and Seo, 1976; 大滝・瀬尾, 1977) を改良したものであり、その測定原理は炭酸ガス分子が固有な赤外線吸収する性質を利用している。炭酸ガス変動計の設計基準、光学系と電気系の構成については既に Ohtaki and Matsui (1982) で述べているので、ここではそれらの概要を述べることにする。

Fig. 1 は炭酸ガス変動計のセンサー部の光学系を示している。約1000 Kに熱したニクロム光源から放射された赤外線は  $\text{CaF}_2$  レンズによって平行光線にされ、長さ20cmの開光路部に射出される。開光路部に存在する炭酸ガス分子によって吸収を受けた赤外線は別の  $\text{CaF}_2$  レンズで赤外検知器 (PbSe) 上に集光される。PbSe 検知器は感度をあげるため  $-10^\circ\text{C}$  に電子冷却されている。検知器の直前には30 Hz で回転しているチョッパーがある。今回の炭酸ガス変動計は炭酸ガス濃度と水蒸気濃度の変動が同時に測定できるように設計されており、炭酸ガスの  $4.3\ \mu\text{m}$  帯と水蒸気の  $2.6\ \mu\text{m}$  帯及び参照信号用の  $3.9\ \mu\text{m}$  帯の赤外線を分光する3枚の干渉フィルターがチョッパー上に固定されている。使用した干渉フィルターの中心波長、最大透過率、半値幅の値は Table 1 に示す通りである。なお、赤外光源の温度上昇を防ぐためにポンプで外部空気を吸引し、発熱部とは隔壁されている周縁のフィン部を強制空冷している。

Fig. 2 は炭酸ガス変動計のセンサー部と電気演算部のブロック図で

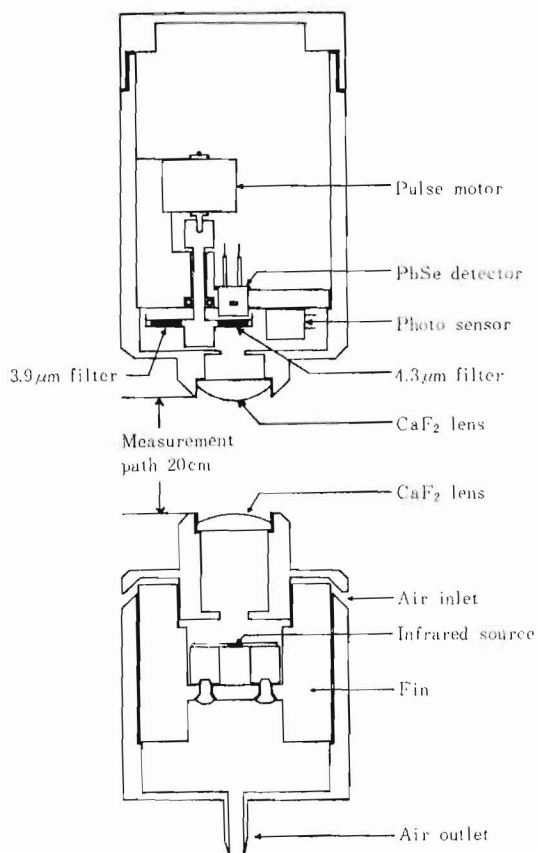


Fig. 1. Opto-mechanical details of fast response carbon dioxide instrument.

Table 1. Specifications of the narrow band-pass filters employed in a fast response carbon dioxide instrument.

	4.3 $\mu\text{m}$ filter	2.6 $\mu\text{m}$ filter	3.9 $\mu\text{m}$ filter
Center wavelength ( $\mu\text{m}$ )	4.249	2.597	3.932
Half width ( $\mu\text{m}$ )	0.094	0.093	0.080
Peak transmission (%)	68	65	67

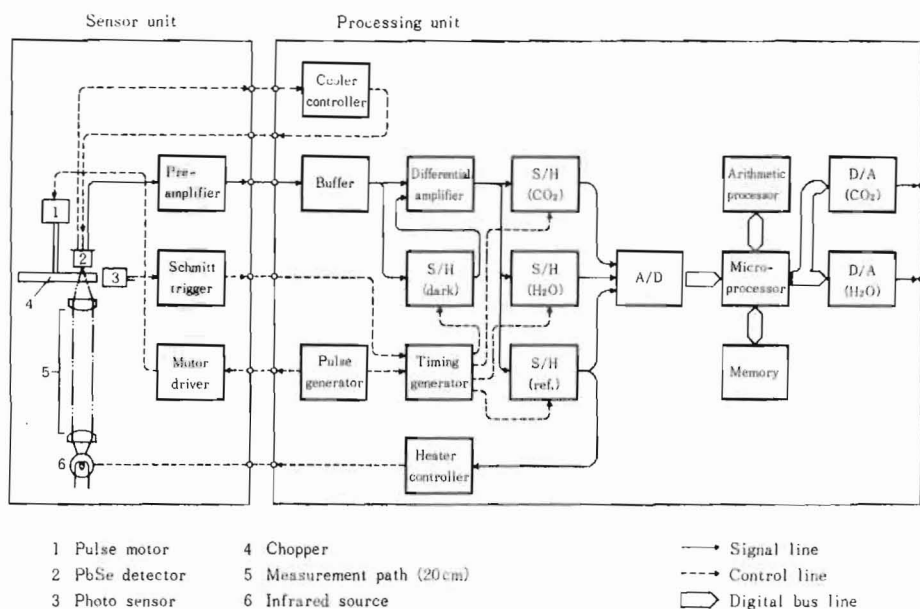


Fig. 2. Block diagram of sensor unit and processing unit of fast response carbon dioxide instrument.

ある。図中で実線はアナログ信号、点線は制御信号、二重線はデジタルバス信号を示している。赤外検知器の出力信号は前置増幅器とバッファンプを経て差動増幅器に入力されている。差動増幅器では検知器に赤外線が入射しないときのいわゆるダーク状態の信号を差し引き、炭酸ガスと水蒸気に関する信号のみをとり出している。これらの信号はサンプルホールドされ、順次 A/D 変換される。デジタル化された炭酸ガスと水蒸気の信号を演算プロセッサで対数演算などのデジタル処理を

行い炭酸ガスや水蒸気濃度に比例した量にかえる。このようなデジタル処理過程はマイクロプロセッサ (Z-80) によって制御されている。デジタル信号は電気系の最終段で再び D/A 変換され、炭酸ガスと水蒸気濃度のアナログ信号として別々に出力されている。

Fig. 3 は炭酸ガス変動計の開光路部に長さ 20 cm の検定セルを挿入し、セル内にいる

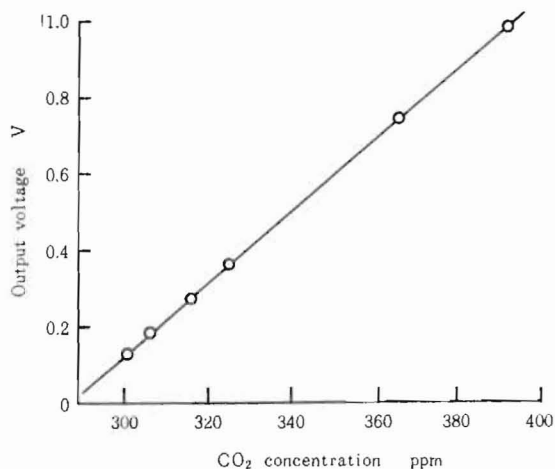


Fig. 3. Output voltages vs. carbon dioxide concentration.

んな濃度（体積比）の炭酸ガスを流したときの出力電圧をプロットしたものである。この検定曲線は 300 ppm から 400 ppm 程度の炭酸ガス濃度範囲では直線とみなせる。直線の勾配から求めた測定感度は約 10 mV/ppm である。また、検定セル内に 411 ppm の炭酸ガスを流しながら出力電圧をシンクロスコープで観察すると約 8 mV の雑音が認められた。炭酸ガス変動計の測定感度を考慮すると、この雑音は約 0.8 ppm の炭酸ガス濃度に相当する。ドリフトは 1 時間当たり約 1 ppm であった。これらの値は試作 1 号機 (Ohtaki and Seo, 1976; 大滝・瀬尾, 1977) の値と比べると約 1 桁改善されている。

### 観測結果及び考察

炭酸ガス変動計の野外テストとして 1982 年 8 月 13 日に岡山大学農学部付属八浜農場のソルガム群落上で炭酸ガスの乱流輸送量の観測を行った。ソルガム群落の平均草高は 165 cm であった。炭酸ガス変動計と超音波風速計は地上 250 cm の高度に設置した。炭酸ガス濃度、水蒸気濃度や風速などのアナログ信号をデータレコーダーに記録した。アナログデータは観測終了後、実験室で 10 Hz の割合で A/D 変換した。時系列データを 15 分毎に区切り各種統計量を計算した。

Fig. 4 は 13 時 15 分から 13 時 30 分にかけての風速の鉛直成分 ( $w$ ) と炭酸ガス濃度 ( $c$ ) のコスペクトル  $nC_{wc}(n)$  曲線を示している。横軸は周波数  $n$  (Hz) を対数表示している。 $nC_{wc}(n)$  曲線と横軸で囲まれる面積は炭酸ガスの鉛直方向の乱流輸送量に比例している。図から明らかなように、炭酸ガスの乱流輸送に寄与している周波数は  $n_L=0.005$  Hz から  $n_H=3$  Hz 程度である。これらの値は従来、顕熱の乱流輸送の場合に示された上限および下限周波数の値とほぼ一致している (Miyake and McBean, 1970; Dyer et al., 1967)。そして、乱流輸送に最も寄与している周波数は 0.1~0.2 Hz の領域であり、1 Hz 以下の低周波数成分が乱流輸送量の 95% 以上を占めていることも明らかである。

使用した炭酸ガス変動計と超音波風速計は 20 cm の測定スパンを有している。このため、炭酸ガス濃度 ( $c$ ) と風速の鉛直成分 ( $w$ ) の高周波成分が平滑化され過小評価される

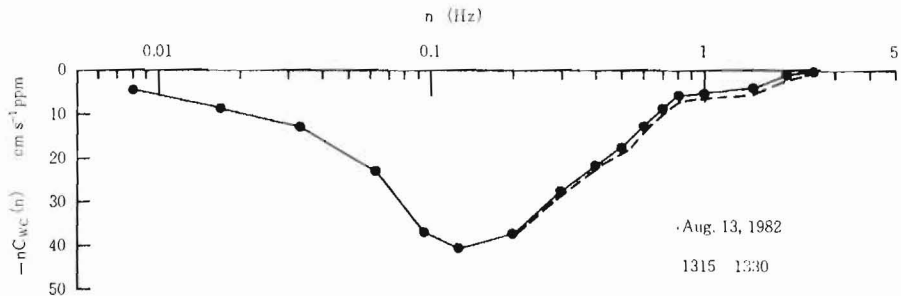


Fig. 4. Cospectral estimate of carbon dioxide and vertical wind velocity. Dashed line shows cospectrum corrected for line-averaging effects due to sensing path length of the instruments used. Data are collected over a sorghum field from 13h 15m to 13h 30m on 13 August, 1982. Measuring height is 250 cm above the ground and crop height is 165 cm.  $\overline{w'c'} = -7 \text{ g/m}^2/\text{h}$ .

恐れがある。平滑化による過小評価量は  $w$  成分についてはベクトル量に対する Kaimal *et al.* (1968) の補正值,  $c$  成分についてはスカラー量に対する Silverman (1968) の補正值を使って見積ることができる。  $w$  と  $c$  成分についてそれらの空間的平滑化の影響を補正したコスベクトルの値を図中に点線で示した。補正されたコスベクトル曲線と横軸がなす面積と補正のないコスベクトル曲線と横軸がなす面積を比べると, 補正のないときの炭酸ガスの乱流輸送量は約 3% の過小評価となる。しかし, 3% の補正值は実質的には十分小さいとみなせるので, 炭酸ガス変動計と超音波風速計とを組み合わせ使用すればほぼ正しい炭酸ガスの乱流輸送量が測定できると考えてよい。

Fig. 5 はソルガム群落上での炭酸ガスの乱流輸送量 ( $\overline{w'e'}$ ) の時間変化を示している。また, 図には地上 250 cm の風速 ( $u$ ), 250 cm と 175 cm 間の炭酸ガス濃度差 ( $\Delta C$ ) と炭酸ガスの拡散係数 ( $K_c = |\overline{w'e'}| / \frac{dC}{dz}$ ) の時間変化も示している。ソルガム群落上での炭酸ガス濃度差 ( $C_{250} - C_{175}$ ) は正の値を有し, 炭酸ガスが鉛直下向きに輸送されていることを示している。その下向きの炭酸ガス輸送量は 12 時 30 分頃に最大 ( $-140 \text{ ppm} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ )

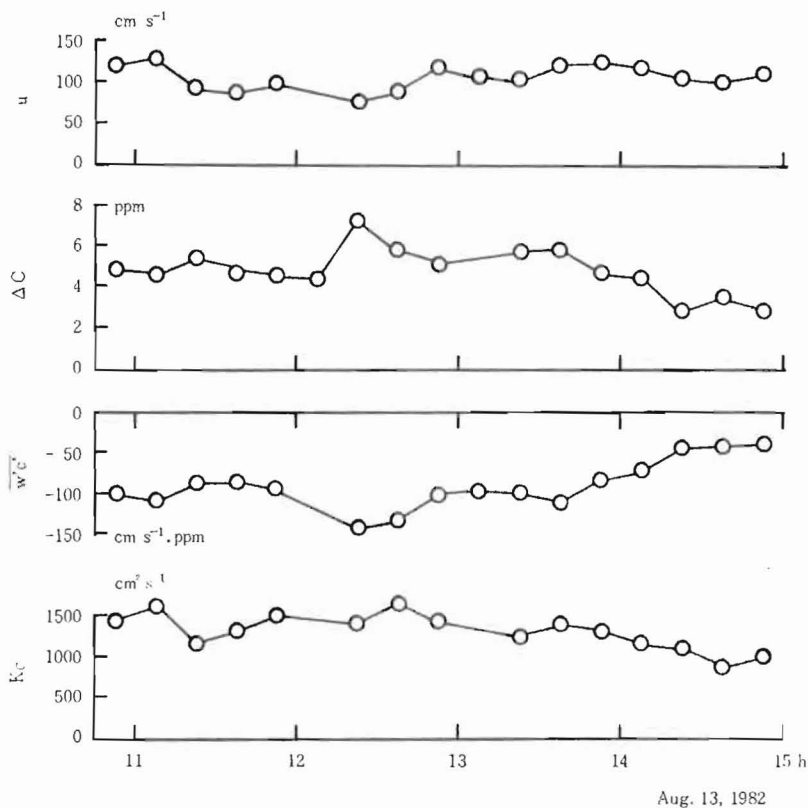


Fig. 5. Example of daytime variations of carbon dioxide flux ( $\overline{w'e'}$ ) together with variations of related parameters; wind speed ( $u$ ), carbon dioxide difference ( $\Delta C$ ) between heights of 250 and 175 cm, eddy diffusivity of carbon dioxide ( $K_c$ ).

となり、その後は徐々に減少している。炭酸ガス濃度（体積比）の変換率を  $1 \text{ CO}_2 \text{ ppm} = 1.96 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$  とすると、炭酸ガスの下向き輸送量の最大値は約  $10 \text{ g/m}^2/\text{h}$  となる。この値はソルガムと同じ  $\text{C}_4$  植物であるトウモロコシ群落上での炭酸ガスの輸送量 (Lemon, 1960) と一致している。これに対し、 $\text{C}_3$  植物である水稲や小麦群落上での下向きの炭酸ガス輸送量の最大値は約  $5 \text{ g/m}^2/\text{h}$  であった (Seo and Ohtaki, 1974; Ohtaki, 1984)。ソルガム群落と水稲や小麦群落上での炭酸ガス輸送量の最大値が異なる理由として、(1)  $\text{C}_4$  植物の光合成速度が  $\text{C}_3$  植物に比べて約 2 倍大きい (村田等, 1976)、(2) ソルガム群落の葉面積指数 (約 8) が水稲や小麦群落 (約 4) に比べて約 2 倍大きいことが考えられる。しかし、現時点では上の 2 つの事項がどのように作用しているかを定めることはできない。

Fig. 5 の最下段には炭酸ガスの拡散係数 ( $K_c$ ) の時間変化を示している。従来は炭酸ガスの輸送量を直接測定することが不可能であったので、熱や運動量の拡散係数 ( $K_H$ ,  $K_M$ ) で代用されていた量である。今回のテスト観測値を使って  $K_c$  と  $K_H$  あるいは  $K_c$  と  $K_M$  の関係を調べることができる。それには以下に示す無次元勾配と呼ばれているパラメーターを用いるのが都合である。

$$\phi_c = \frac{k(Z-d)}{c_*} \frac{dC}{dZ} \Rightarrow \frac{k(Z-d)}{c_*} \frac{\Delta C}{\Delta Z} \quad (2)$$

$$\phi_H = \frac{k(Z-d)}{T_*} \frac{dT}{dZ} \Rightarrow \frac{k(Z-d)}{T_*} \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (3)$$

$$\phi_M = \frac{k(Z-d)}{u_*} \frac{du}{dZ} \Rightarrow \frac{k(Z-d)}{u_*} \frac{\Delta u}{\Delta Z} \quad (4)$$

ここで、 $k$  はカルマン定数 (0.4)、 $d$  は零面変位、 $Z-d = \sqrt{(Z_1-d)(Z_2-d)}$  は炭酸ガス濃度の勾配を表わす高度である。 $u_*$ ,  $c_*$ ,  $T_*$  はスケーリングパラメーターと呼ばれ、それぞれ次のように定義されている： $u_* = \sqrt{-\bar{w}'u'}$ ,  $c_* = -\bar{w}'c'/u_*$ ,  $T_* = -\bar{w}'T'/u_*$ 。無次元勾配と拡散係数の定義式から次の関係式を得る。

$$\frac{K_c}{K_H} = \frac{\phi_H}{\phi_c} \quad (5)$$

$$\frac{K_c}{K_M} = \frac{\phi_M}{\phi_c} \quad (6)$$

したがって、 $K_c$  と  $K_H$  あるいは  $K_c$  と  $K_M$  の関係を知るには  $\phi_c$  と  $\phi_H$  あるいは  $\phi_c$  と  $\phi_M$  の関係を知ればよい。 $\phi_H$  と  $\phi_M$  についてはすでに実験結果が多く蓄積されている。例えば、Dyer and Hicks (1970) はモニン・オブコフの大気安定度のパラメーターを  $\zeta_v$  とすると、 $\phi_H = (1-16\zeta_v)^{-\frac{1}{2}}$ 、 $\phi_M = (1-16\zeta_v)^{-\frac{1}{4}}$  で表わされることを示した。 $\phi_c$  と  $\zeta_v$  の関係を知るために、(2) 式を使って  $\phi_c$  を算出し、その値を  $\zeta_v$  に対しプロットした (Fig. 6)。今回の観測では  $\zeta_v$  が狭い範囲に限られているが、この  $\zeta_v$  の領域は  $\phi_c$  の値が大きく変化している領域に対応している。算出された  $\phi_c$  の値は図中に実線で示した曲線  $(1-16\zeta_v)^{-\frac{1}{2}}$  によく合っている。図中の曲線はもともと Dyer and Hicks (1970) によって温度と水蒸気の無次元勾配を表わす実験式として導入されたものであるから、炭酸ガス

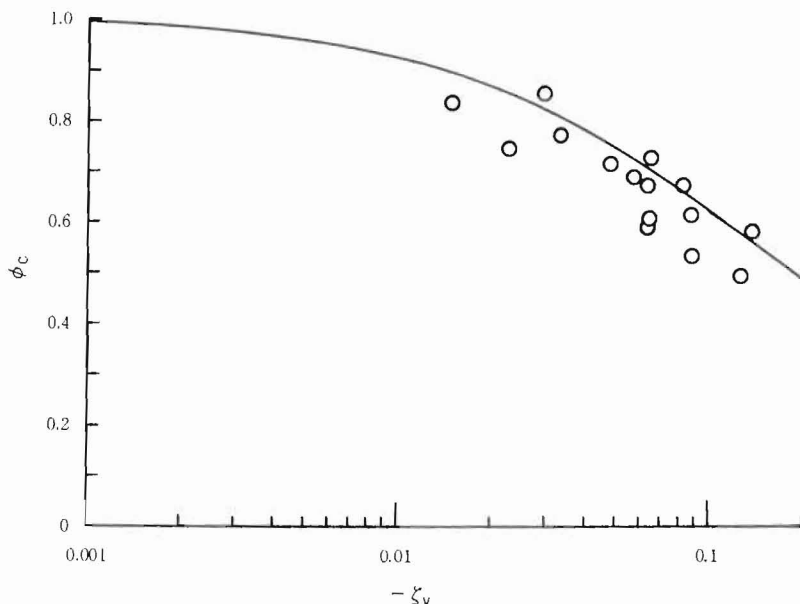


Fig. 6. Nondimensional gradient  $\phi_c$  for carbon dioxide as a function of the Monin-Obukhov stability parameter  $-\zeta_v$ . Solid line represents the empirical relationship  $\phi_c = (1 - 16\zeta_v)^{-1/2}$ , which is proposed for the non-dimensional gradient of temperature and humidity by Dyer and Hicks (1970).

の無次元勾配が他の2つのスカラー量の無次元勾配と同じ関数形で表わされることを意味している。これらの結果を考慮すると、(5)式と(6)式は、

$$K_c = K_H \text{ 又は } K_w \text{ (水蒸気の拡散係数)} \quad (7)$$

$$K_c = (1 - 16\zeta_v)^{-1/4} K_M \quad (8)$$

となる。つまり、炭酸ガスの拡散係数を熱や水蒸気の拡散係数で代用することはできるが、運動量の拡散係数で代用するときには注意が必要である。(8)式は大気不安定度が  $\zeta_v = -1$  の場合には  $K_c$  が  $K_M$  の2倍にもなり得ることを意味している。

### 摘 要

開光路を有する応答の速い、高感度の炭酸ガス変動計の光学系と電気系の概要を述べると共に、その炭酸ガス変動計をソルガム群落上での炭酸ガス輸送量の測定に応用した結果について報告した。得られた結果のうち主なものを以下に示す。

1) 炭酸ガス変動計の出力は炭酸ガス濃度が 300 ppm から 400 ppm の範囲では直線とみなすことができる。直線の勾配から求めた炭酸ガス変動計の測定感度は 10 mV/ppm であった。また、炭酸ガス変動計の雑音とドリフトはそれぞれ 0.8 ppm と 1 ppm/時であった。

2) 渦相関法によって測定した炭酸ガスの乱流輸送量の測定誤差は約3%であり、試作した炭酸ガス変動計の有効性が立証された。

3) ソルガム群落上での炭酸ガスの鉛直下向きの輸送量は正午過ぎに最大となり約10g/m<sup>2</sup>/hであった。この値はソルガムと同じC<sub>4</sub>植物であるトウモロコシ群落上での炭酸ガス輸送量と一致している(Lemon, 1960)。

4) 炭酸ガスの拡散係数は熱や水蒸気の拡散係数で代用することができるが、運動量の拡散係数で代用する場合には注意が必要である。たとえば、モニン・オブコフの大気安定度のパラメーターが $\zeta v = -1$ の時には炭酸ガスの拡散係数は運動量の拡散係数の約2倍になり得る。

## 文 献

- Dyer, A. J. and Hicks, B. B. 1970. Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 96: 715-721.
- Dyer, A. J., Hicks, B. B. and King, K. M. 1967. The fluxatron-A revised approach to the measurement of eddy fluxes in the lower atmosphere. *J. Appl. Meteorol.* 6: 408-413.
- Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C. and Haugen, D. A. 1968. Deriving power spectra from a three-component sonic anemometer. *J. Appl. Meteorol.* 7: 827-837.
- Lemon, E. R. 1960. Photosynthesis under field conditions. II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. *Agronomy J.* 52: 697-703.
- Mitsuta, Y. 1966. Sonic anemometer-thermometer for general use. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 44: 12-24.
- Miyake, M. and McBean, G. 1970. On the measurement of vertical humidity transport over land. *Boundary-Layer Meteorol.* 1: 88-101.
- 村田吉男, 攻村敦彦, 石井龍一. 1976. 作物の光合成と生態. 276頁. 農山漁村文化協会, 東京.
- Ohtaki, E. 1984. Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. *Boundary-Layer Meteorol.* 29: 85-107.
- Ohtaki, E. and Matsui, T. 1982. Infrared device for simultaneous measurement of fluctuations of atmospheric carbon dioxide and water vapor. *Boundary-Layer Meteorol.* 24: 109-119.
- Ohtaki, E. and Seo, T. 1976. Infrared device for measurement of carbon dioxide fluctuations under field conditions. II. Double beam system. *Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ.* 16: 183-190.
- 大滝英治, 瀬尾琢郎. 1977. 炭酸ガス変動計の試作とその野外テストの結果について. *農学研究* 56: 95-103.
- Seo, T. and Ohtaki, E. 1974. Atmospheric flux of carbon dioxide over paddy fields estimated by heat balance approach. *Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ.* 16: 79-92.
- Silverman, B. A. 1968. The effect of spatial averaging on spectrum estimation. *J. Appl. Meteorol.* 7: 168-172.



## Measurements of Turbulent Transport of Carbon Dioxide Over a Sorghum Field

Eiji OHTAKI, Toshihiko MAITANI and Takuro SEO

### Summary

The newly developed infrared absorption instrument proved to be applicable for the measurement of turbulent fluctuations of carbon dioxide in field experiments: 1) The noise and the zero drift of the present instrument were 0.8 ppm and 1 ppm per an hour, respectively. 2) The cospectral estimate of carbon dioxide and vertical wind velocity showed that the high frequency loss due to an open sensing path of the instrument is about 3% for  $\overline{w'c'}$  measurement. This denotes that the present instrument is promising for flux measurements of carbon dioxide by the eddy correlation technique in conjunction with a sonic anemometer. 3) The downward flux of carbon dioxide showed a well defined diurnal variation over a sorghum field of  $C_4$  plant. The maximum value of about 10 g/m<sup>2</sup>/h showed good agreement with that over the corn field of  $C_4$  plants (Lemon, 1960). 4) Examination of the stability dependency of eddy diffusivities for carbon dioxide ( $K_C$ ), sensible heat ( $K_H$ ) and momentum ( $K_M$ ) showed that the ratio  $K_H/K_C$  is unity, but the ratio  $K_M/K_C$  increases with increasing instability of the air layer as a function of  $(1-16 \zeta_V)^{\frac{1}{4}}$ .