

大気境界層における炭酸ガス輸送の測定

大 滝 英 治

Measurements of Turbulent Transport of Carbon Dioxide in the Atmospheric Boundary Layer

Eiji OHTAKI

Faculty of General Education, Okayama University

Summary

The fast response instrument designed to measure simultaneous fluctuations of carbon dioxide and water vapor is described. The measuring frequency was 30 Hz. The sensing path length of the instrument was 20 cm. This is compatible with the path length of the standard type of a sonic anemometer. The noise level was about 0.8 ppm for carbon dioxide measurement and about 0.02 g/kg for water vapor measurement. The cospectrum estimate of carbon dioxide and vertical wind velocity showed that the high frequency loss due to smoothing effect of sensing path length was about 2% for $w'c'$ 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.

The carbon dioxide flux measured by the eddy correlation technique showed a well defined diurnal variation over a paddy field characterized by the negative values in the daylight hours and positive values in the nighttime. 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_c/K_m increases with increasing instability of the air layer as a function of $(1-16z/L)^{1/4}$.

Key words : Carbon dioxide, Eddy correlation

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 65, 3-9, 1992)

1. はじめに

大気境界層での炭酸ガスの輸送量を気象学的方法で最初に測定したのは Huber である。彼は、工業用の赤外線ガス分析計 (URAS) を使って芝生上 5 cm と 5 m の 2 高度の炭酸ガス濃度を測定し、昼間は炭酸ガス濃度が植被直上で低く、夜間は逆に炭酸ガス濃度が植被直上で高くなることを示した¹⁾。そして、炭酸ガス輸送量が、2 高度間の炭酸ガス濃度差と風速の鉛直分布から求めた拡散係数との積として算出される、いわゆる空気力学的傾度法によって推定できることを示した。その後、空気力学的傾度法は井上等の先駆的研究²⁾を経て、作物群落上での炭酸ガス輸送量の測定に広く適用されている^{3,4,5)}。また、拡

散係数をエネルギー収支の関係から求める熱収支法も開発され、炭酸ガス輸送量の測定に使用されている^{6,7,8)}。しかし、Huber も指摘しているように、運動量輸送や熱輸送に対する拡散係数が炭酸ガス輸送の場合に適用されるかどうかは未定の問題であった。そこで、Inoue は炭酸ガス輸送量を、渦相関法によって直接測定すべきであることを示唆した⁹⁾。渦相関法による炭酸ガス輸送量の測定には、後で述べるように、炭酸ガス濃度と風の鉛直成分の 5 Hz 程度までの変動を正確に測定する必要がある。風の鉛直成分の変動量の測定は、超音波風速計の実用化によって解決された¹⁰⁾。他方、炭酸ガス濃度の変動測定は、空気をサンプルする従来の赤外線ガス分析計では不可能であり¹¹⁾、開光路を持つ応答の速い炭酸ガス変動計の開発が必要であった。

現在、炭酸ガス変動計は日本¹²⁾、カナダ¹³⁾、米国¹⁴⁾、ソ連¹⁵⁾で開発されているが、いずれの炭酸ガス変動計の場合

も測定原理は同じで、炭酸ガス分子が4.3ミクロンの赤外線吸収する性質を利用している。そこで、ここでは、我々が開発している炭酸ガス変動計の概要を紹介し、続いて、炭酸ガス変動計を使って測定した大気中の炭酸ガス濃度変動の特性や乱流輸送の特性について紹介する。

2. 炭酸ガス変動計としての必要要件

開発当初、渦相関法に適用する炭酸ガス変動計は、次のような要件を満たす必要があると考えた。

- 1) 大気中の炭酸ガス濃度は、作物群落上では約300ppmであり、その変動成分は数ppmである¹⁶⁾。このため、炭酸ガス変動計の分解能は1ppmよりよくなければならない。
- 2) 渦相関法では炭酸ガス輸送量 (F) 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、 c は炭酸ガス濃度である。 $'$ は平均値からの変動量を意味し、 $\overline{\quad}$ は測定時間についての平均値を意味している。また、 $C_{wc}(n)$ は w と c のコスペクトル密度であり、 n_L と n_H は炭酸ガスの乱流輸送に寄与している下限および上限の周波数である。顕熱や潜熱の乱流輸送の場合、 $n_L=0.001$ Hz、 $n_H=5$ Hz程度なので¹⁷⁾、炭酸ガスの場合も同様に考え、0.001 Hzから5 Hz程度の炭酸ガスの濃度変動を正確に測定する必要がある。

- 3) 測定感部での空間平均の影響を少なくするために、測定感部の長さは20cm程度が望ましい。20cmの光路長は標準型の超音波風速計のスパン長と同じである。

3. 炭酸ガス変動計の概要

図1は、以上のような要件を満たすように設計した、炭酸ガス変動計の光学計である。この炭酸ガス変動計では、炭酸ガスと水蒸気の濃度変動が同時に測定できる。約1,000Kに熱したセラミックヒーターから放射された赤外線は、フッ化カルシウムレンズによって平行光線にされ、20cmの開光路に射出されている。開光路内に存在する炭酸ガス分子によって吸収された赤外線は、別のフッ化カルシウムレンズで-10℃に電子冷却されている赤外線検出器 (PbSe) 上に集光されている。PbSe 検出器の直前には、30Hzで回転しているチョッパーディスクがある。このチョッパーディスクには、炭酸ガスと水蒸気の固有吸収帯の赤外線を分光する干渉フィルターと参照用の赤

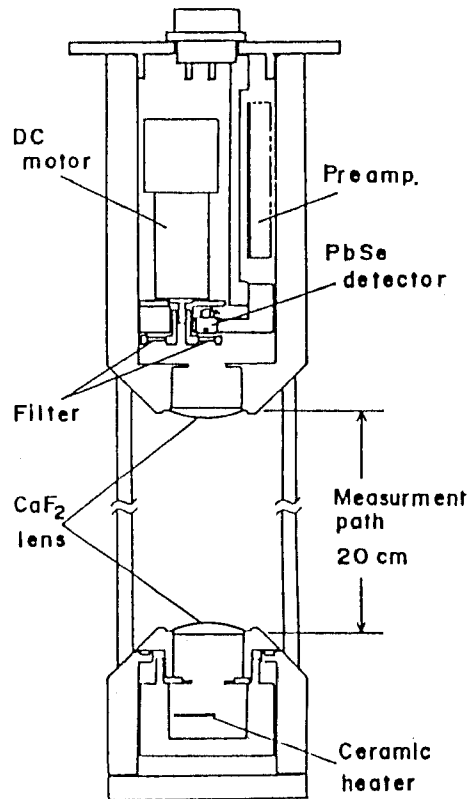


図-1 炭酸ガス変動計の光学系

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

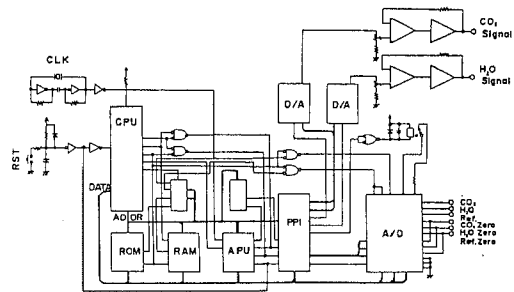


図-2 炭酸ガス変動計の電気系ブロック図

Fig. 2 Electronic block diagram of fast response carbon dioxide instrument

外線を分光する干渉フィルターが固定されている。それぞれのフィルターを透過した信号は、光反射型のリモセンサを使ってサンプルホールドされる。

図2は、サンプルホールドされた炭酸ガスと水蒸気濃度の信号が A/D 変換され、デジタル演算されて、最終

段階で再び D/A 変換されている電気系ブロック図を示している。ここでの注目は演算プロセッサ (APU) の働きである。炭酸ガスと水蒸気濃度の変化を線形の信号に変換するために、APU で割算と対数演算が実行されている。この演算プロセッサの採用により、炭酸ガスと水蒸気濃度の広い範囲にわたる変化に対して、リニアな出力信号が得られるようになり、雑音レベルを著しく低下させることができた。変動計の雑音は、炭酸ガス変動計としては約 0.8ppm 、水蒸気変動計としては約 0.02 g kg^{-1} である。

4. 炭酸ガス輸送量の測定例

図3は1989年8月17日、岡山大学農学部附属八浜農場の水稲群落上で測定した風の鉛直成分 (w)、気温 (T)、炭酸ガス (c)、水蒸気 (q) 乱流変動の典型的なモニター記録を示している。 w が上向きの時、 c は低下し、 w が下向きの時、 c が増加していることが分かる。また、 c の

変化が q や T の変化と逆位相になっていることも注目される。これらの変化は、水稲群落が炭酸ガスの吸収源として働き、顕熱や潜熱の湧源として働いていることを示している。更に、 c の変化には、短周期の乱流変動に加えて、20–30秒周期の鋸歯状型の変化が重ね合わさっているように見える。もちろん、鋸歯状型の変化は q や T の記録にも認められる。このような変化は、水稲群落上で、対流性のプルームが存在¹⁸⁾していることを示している。

図4は、モニター記録で示した8月17日12時30分から12時45分までの15分間の w と c の変動値を使用して算出したコスペクトル、 $nC_{wc}(n)$ 、を周波数 (n) の関数としてプロットしている。 $nC_{wc}(n)$ 曲線は測定された全周波数帯で負の成分を有し、炭酸ガスが大気から水稲群落の方に鉛直下向きに輸送されていることを示している。炭酸ガスの輸送に最も大きな寄与をしている周波数は 0.1 から 0.2 Hz の領域である。炭酸ガス輸送に寄与している下限の周波数 n_L は解析時間の長さによって決まるが、図

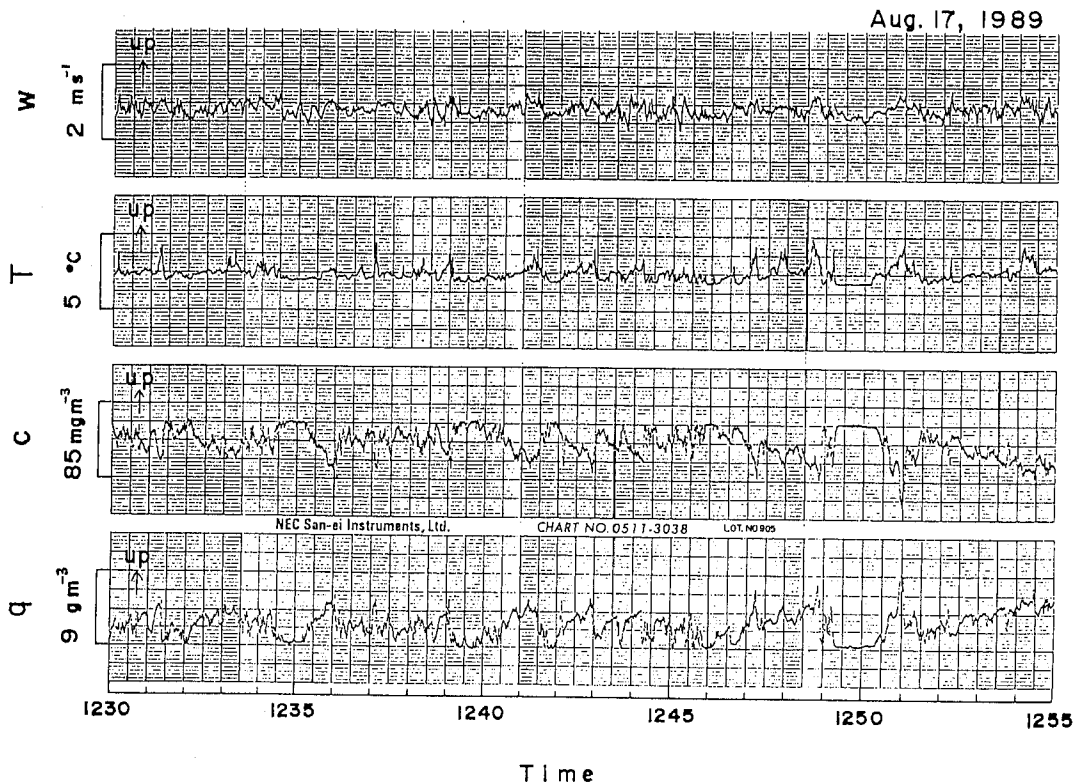


図-3 水稲群落上での炭酸ガス (c)、風速の鉛直成分 (w)、気温 (T)、水蒸気 (q) のモニター記録例

Fig. 3 Typical records of turbulent fluctuations of carbon dioxide (c), vertical wind velocity (w), temperature (T), and water vapor (q), measured over paddy field on August 17, 1989

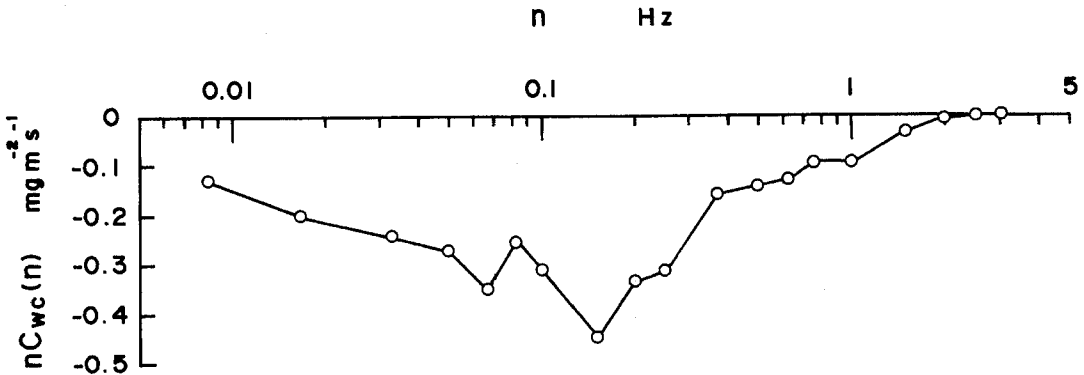


図-4 1989年8月17日12時30分-12時45分に水稻群落上で測定された炭酸ガスと風速の鉛直成分とのコスペクトル

Fig. 4 Cospectral estimate of carbon dioxide and vertical wind velocity over paddy field. Spectral calculation was made using data obtained from 12:30-12:45, August 17, 1989

に示した値を外挿すると、0.002Hz程度である。また、炭酸ガス輸送に寄与している上限の周波数 n_H は 2 Hz 程度である。これらの上、下限周波数の値は、炭酸ガス変動計の必要要件のところでも検討していた周波数の範囲内である。

今回使用した炭酸ガス変動計と超音波風速計は20cmの測定スパンを有しているため、高周波数の炭酸ガスの濃度変動と風速の変動成分は平滑される。この平滑化による影響は、炭酸ガスの場合は Silverman¹⁹⁾が与えた表を使って算出でき、風速の場合は Kaimal 等²⁰⁾が与えた表を使って算出することができる。図4の w と c のコスペクトルでは、高周波領域での過少評価量は約2%であった。この測定誤差は実質的には無視できる大きさであり、炭酸ガス変動計と超音波風速計とを組み合わせて使用すれば、炭酸ガス輸送量がほぼ正しく測定できると考えてよい。

図5は、1989年8月17日から18日にかけて、渦相関法で測定された炭酸ガスの乱流輸送量 (F) と純放射 (Rn)、顕熱 (H)、潜熱 (λE) の時間変化を示している。夜間 F は正で、炭酸ガスが上向きに輸送されていることを示している。観測時には、水田圃場は約10cmの灌漑水で覆われていたため、この上向きの炭酸ガス輸送量は水稻群落の呼吸の強さを示している。日以後、 F は負となり、炭酸ガスが下向きに輸送され、水稻群落に固定されていることを示している。群落が固定する炭酸ガス量は、正午頃最大となり、その値は約 $-1.3 \text{ mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。この値は水稻群落の生育ステージで異なる。

昼間、 H は λE と比べると非常に小さく、水稻群落上では、熱が主として潜熱の形で輸送されていることが分かる。 λE は Rn の約50%である。また、正午頃の λE

$=370 \text{ Wm}^{-2}$ という値は、約 0.5 mmh^{-1} の蒸発散に相当している。 λE が終日正の値を示しているが、これは、圃場が灌漑水で覆われていることによる。

固定される炭酸ガス量は水稻群落の生育ステージによって異なる。図6は、岡山大学農学部附属八浜農場で測定した水稻群落が1日に固定した炭酸ガスの季節変化を示している。固定される炭酸ガス量は、田植後、徐々に増加して、出穂期の8月下旬に最大となる。その値は、 4 mg/cm^2 である。9月以降、固定される炭酸ガス量は急速に低下し、収穫直前の10月下旬にはほとんどゼロとなる。固定される炭酸ガス量の季節変化を考慮すれば、田植から収穫に至るまでに、水稻群落は約28トンの炭酸ガスを固定したことがわかる。

渦相関法で炭酸ガスの輸送量が測定できれば、炭酸ガスに対する拡散係数、 $K_c = \overline{w'c'}/(\Delta C/\Delta z)$ 、を計算することができ、熱や運動量に対する拡散係数 (K_h , K_m) の値と比較することができる。それには、データがたくさん蓄積されている、以下に示す無次元勾配と呼ばれるパラメーターを用いるのが好都合である。

$$\phi_c = (kz/c_*) \cdot (\Delta C/\Delta z)$$

$$\phi_h = (kz/T_*) \cdot (\Delta T/\Delta z)$$

$$\phi_m = (kz/u_*) \cdot (\Delta U/\Delta z)$$

ここで、 k はカルマン定数 (0.4)、 $z = \sqrt{z_1 \cdot z_2}$ は勾配を表す高度である。 u_* , c_* , T_* はスケール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。

$$u_* = \sqrt{-\overline{w'u'}}; c_* = -\overline{w'c'}/u_*; T_* = -\overline{w'T'}/u_*$$

拡散係数と無次元勾配の定義式から次の関係式を得る。

$$K_c/K_h = \phi_h/\phi_c$$

$$K_c/K_m = \phi_m/\phi_c$$

従って、 K_c と K_h あるいは K_c と K_m の関係を知るには

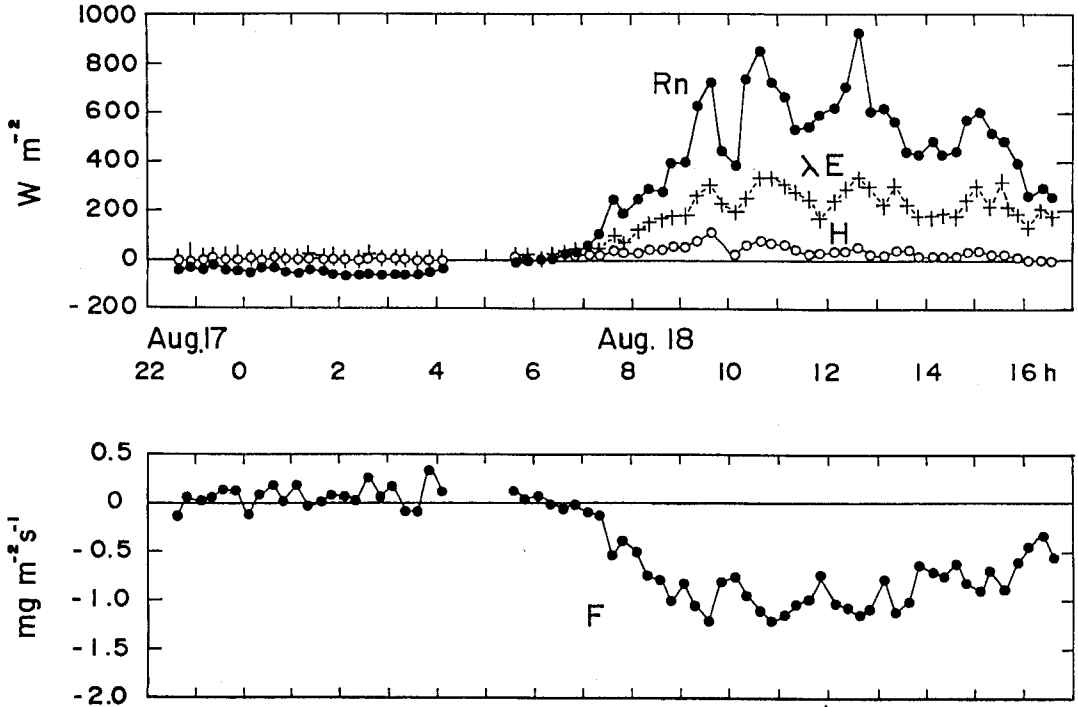


図-5 水稲群落上での炭酸ガス (F), 純放射 (Rn), 顕熱 (H), 潜熱 (λE) 輸送量の時間変化
 Fig. 5 Time variation of vertical fluxes of carbon dioxide (F), latent heat (λE), sensible heat (H), and net radiation (Rn) over paddy field

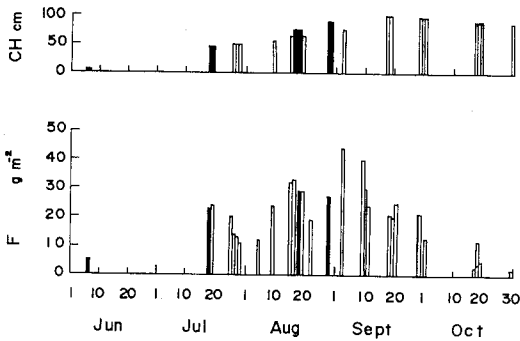


図-6 水稲群落上で測定した1日当りの炭酸ガス固定量と草高の季節変化
 ■ : 1989年の渦相関法による測定値
 □ : 空気力学的傾度法と熱収支法による測定値⁷⁾

Fig. 6 Seasonal variation of daytime flux of carbon dioxide over paddy field, and paddy height. Solid bars indicate data measured by the eddy correlation technique in 1989; open bars indicate data measured aerodynamic and heat balance techniques in 1969

ϕ_c と ϕ_h あるいは ϕ_c と ϕ_m の関係を知ればよい。 ϕ_h と ϕ_m については, Dyer and Hicks は, モニオン・オブコフの大気不安定度のパラメーターを z/L とすると,

$$\phi_h = (1 - 16z/L)^{-1/2}$$

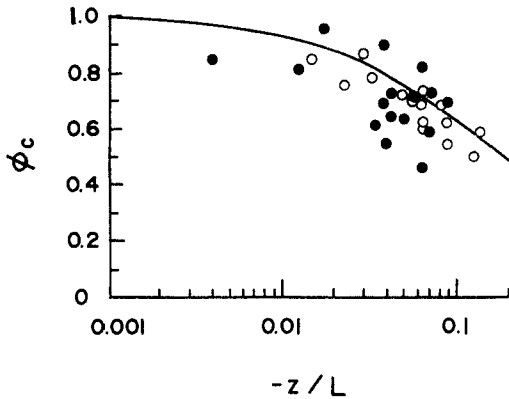
$$\phi_m = (1 - 16z/L)^{-1/4}$$

で表わせることを示した²¹⁾。 ϕ_c と z/L の関係を知るために, 上で示した式から ϕ_c の値を算出し, z/L に対してプロットした(図7)。プロットされた値は, z/L の狭い領域に限られているが, 図中の曲線, $(1 - 16z/L)^{-1/2}$ によく合っている。このことは, 炭酸ガスの無次元勾配が温度の無次元勾配と同じ関数形で表され, 風の無次元勾配とは少し異なった関数関係にあることを意味している。拡散係数の関係に直すと次のように書ける。

$$K_c = K_n$$

$$K_c = (1 - 16z/L)^{1/4} \cdot K_m$$

つまり, 炭酸ガスの拡散係数はスカラー量である熱輸送の拡散係数を使って代用することができるが, ベクトル量である運動量の拡散係数で代用するときには不安定度による補正が必要である。実際の野外観測でよく経験する大気不安定度 $z/L = -1$ の場合には, K_c が K_m の2倍にもなり得ることを示している。



図—7 炭酸ガスの無次元勾配の安定依存性。図中の曲線は安定度の関数 $(1-16z/L)^{-1/2}$ である
 ● : 1982年8月31日—9月1日の水稲群落上での測定値
 ○ : 1982年8月13日のソルガム群落上での測定値

Fig. 7 Non-dimensional gradient ϕ_c for carbon dioxide as a function of the Monin-Obukhov stability parameter z/L . Solid line represents the empirical relationship : $\phi_c = (1 - 16z/L)^{-1/2}$. Solid circles indicate data measured over paddy field on August 31 to September 1, 1982, and open circles indicate data measured over sorghum field of August 13, 1982

4. おわりに

大気中の炭酸ガスの収支を解明する直接的な方法は、炭酸ガスの大気—海洋、大気—植物間の輸送量を測定することである。このような研究目的に応えるために炭酸ガス変動計の開発が行われている。しかし、現在の炭酸ガス変動計は、渦相関法に適用するセンサーとしての必要要件をきろうじて満たしているにすぎない。ドリフトの減少、測定感度の増加等炭酸ガス変動計は改良すべき問題を多く残している。炭酸ガスの乱流輸送量を正確に測るために、上のような基本的な問題の改善はもとより、大気の流れ場を乱さない、全天候型の炭酸ガス変動計の完成をめざして努力していきたい。

参考文献

1) Huber, B.: Registrierung des CO_2 -Gefälles und Berechnung des CO_2 -Stromes über Pflanzengesellschaften mittels Ultrarot-Absorptionsschreiber. Ber.

- Dtsch. Bot. Ges., **63**, 52—63 (1950).
 2) 井上栄一, 谷 信輝, 今井和彦, 磯部誠之: 麦畑における炭素同化作用の空気力学的測定, 農業気象, **13**, 121—125 (1958).
 3) Lemon, E.R.: Photosynthesis under field conditions. II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. Agron. J., **52**, 697—703 (1960).
 4) Monteith, J.L.: Measurement and interpretation of carbon dioxide fluxes in the field. Neth. J. Agric. Sci., **10**, 334—346 (1962).
 5) Yabuki, K. and Aoki, M.: The effect of wind speed on the photosynthesis of rice field. Monsi, M. and Saeki, T. (ed.) *Ecophysiology of photosynthetic productivity*, Univ. Tokyo Press, 152—159 (1978)
 6) Monteith, J.L. and Szeicz, G.: The carbon dioxide flux over a field of sugar beet. Quart. J. Roy. Met. Soc., **86**, 205—214 (1960).
 7) Seo, T. and Ohtaki, E.: Atmospheric flux of carbon dioxide over paddy fields estimated by heat balance approach. Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ., **16**, 79—92 (1974).
 8) Uchijima, Z. and Udagawa, T.: Carbon dioxide environment and CO_2 -transport above and within crop canopies — Measurements and simulation —. Monsi, M. and Saeki, T. (ed.) *Ecophysiology of photosynthetic productivity*, Univ. Tokyo Press, 129—139 (1978).
 9) Inoue, E.: Turbulent fluctuations in atmospheric CO_2 concentration over the vegetated fields. Yoshida, K. (ed.) *Studies on Oceanography*, Univ. Tokyo Press, 232—237 (1964).
 10) Mitsuta, Y.: Sonic anemometer-thermometer for general use. J. Met. Soc. Japan, **44**, 12—24 (1966).
 11) Desjardins, R.L. and Lemon, E.R.: Limitations of an eddy-correlation technique for the determination of the carbon dioxide and sensible heat fluxes. Boundary-Layer Met., **5**, 475—488 (1974).
 12) Ohtaki, E. and Matsui, T.: Infrared device for simultaneous measurement of carbon dioxide and water vapor. Boundary-Layer Met., **24**, 109—119 (1982).
 13) Brach, E.J., Desjardins, R.L. and StAmour, G.T.: Open path CO_2 analyser. J. Phys. E. Sci. Instrum., **14**, 1415—1419 (1981).

- 14) Anderson, D.E., Verma, S.B. and Rosenberg, N.J. : Eddy correlation measurements of CO₂, latent heat and sensible heat fluxes over a crop surface. *Boundary-Layer Met.*, **29**, 263—272 (1984).
- 15) Elagina, L.G. and Lazarev, A.I. : Measurements of the frequency spectra of turbulent CO₂ fluctuations in the atmospheric surface layer. *Izvestiya, Atmos. and Ocean. Phys.*, **20**, 502—506 (1984).
- 16) Ohtaki, E. and Seo, T. : Measurement of gradient of carbon dioxide and estimation of its flux over a paddy field (1). *Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ.*, **15**, 89—110 (1972).
- 17) Dyer, A.J., Hicks, B.B. and King, K.M. : The fluxatron — A revised approach to the measurement of eddy fluxes in the lower atmosphere —. *J. Appl. Met.*, **6**, 408—413 (1967).
- 18) Kaimal, J.C. and Businger, J.A. : Case studies of a convective plume and a dust devil. *J. Appl. Met.*, **9**, 612—620 (1970).
- 19) Silverman, B.A. : The effect of spatial averaging on spectrum estimation. *J. Appl. Met.*, **7**, 168—172 (1968).
- 20) Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C. and Haugen, D.A. : Deriving power spectra from a three-component sonic anemometer. *J. Appl. Met.*, **7**, 827—837 (1968).
- 21) Dyer, A.J. and Hicks, B.B. : Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **96**, 715—721 (1970).

(受稿年月日1991年12月2日)