

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

大 滝 英 治*・瀬 尾 琢 郎

作物群落上での炭酸ガスフラックスを正確に把握することは、作物と大気との炭酸ガス交換の研究にとって基本的な仕事である。

従来、作物群落上での炭酸ガスフラックスの測定は空気力学的方法ならびに熱収支法によって行なわれ、多くの知見を得ている (Inoue et al. 1957, Lemon 1960, Monteith and Szeicz 1960, Yabuki and Ishibashi 1968)。しかし、炭酸ガスフラックスが直接測定できる渦相関法の確立が待望されていた (Inoue 1964)。渦相関法による炭酸ガスフラックスの測定には、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り、炭酸ガス測定器の開発の遅れから、この方法による炭酸ガスフラックスの測定は不可能であった。

著者等は最近、炭酸ガス濃度の変動を測定する目的で、長さ 50 cm の測定光路を持つ炭酸ガス変動計を開発した (Ohtaki and Seo 1976 a, 1976 b)。この炭酸ガス変動計と超音波風速計とを組みあわせれば、炭酸ガスフラックス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概要と小麦群落上で行なった炭酸ガス変動計のテスト観測の結果について報告する。

炭酸ガス変動計の製作中に多くの励ましを戴いた高須謙一岡山大学名誉教授に心から感謝します。また、本研究のとりまとめにあたり有益な助言を戴いた岡山大学農業生物研究所米谷俊彦氏と野外観測を援助して下さった竹内敬二氏に感謝します。

1. 測定原理と測定器

炭酸ガスの鉛直フラックスは炭酸ガスの濃度を c 、風速の鉛直成分を w とすれば、

$$F = \overline{w'c'} \quad (1)$$

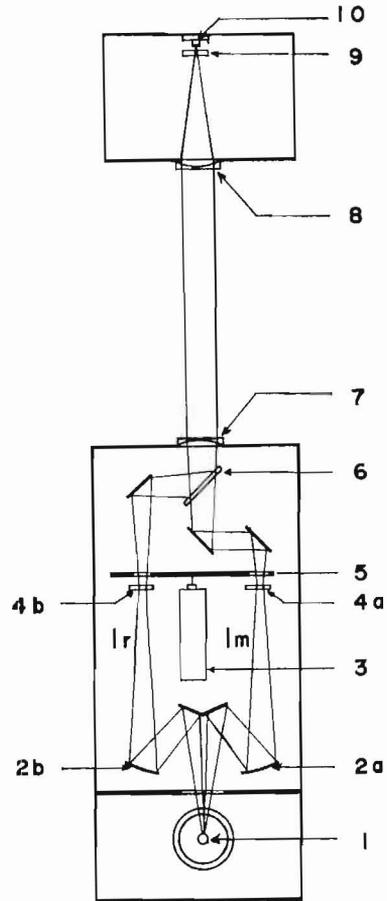
で与えられる。ここで、' は平均値からの変動量を示し、— は測定時間についての平均を表わす。上式から明らかなように、炭酸ガスフラックスの測定に渦相関法を適用するには、炭酸ガスフラックスに寄与している c と w の変動成分を測定する必要がある。風速の鉛直成分の測定器としてはすでに超音波風速計が開発され実用化されている。また、炭酸ガスの濃度変動の測定器としては著者等が最近開発した炭酸ガス変動計が適用可能

* 岡山大学教養部

である。

炭酸ガス変動計の概要はつぎの通りである。炭酸ガス変動計の光学系は光源部と受光部の2つの部分から構成されており、両者の間は開光路となっている。今回の観測で用いた炭酸ガス変動計の光路長は50 cmである。第1図は炭酸ガス変動計の光学系を示している。約1,000 Kに熱した赤外光源1の輻射は反射鏡によって測定光束 I_m と参照光束 I_r に分けられる。 I_m は凹面鏡2aによって狭帯域透過フィルター4a上に集光され、炭酸ガスの固有吸収帯(4.3 μm)に相当する単色光にされる。他方、 I_r は凹面鏡2bによって狭帯域透過フィルター4b上に集光され、炭酸ガスに吸収されない単色光(3.9 μm)にされる。 I_m と I_r は回転チョッパー5によってそれぞれ270 Hz と 30 Hz の断続光にされる。その後、これら2つの断続光は半透過鏡6によって光軸が合わされ、弗化カルシウムでつくられたレンズ7を通して測定光路へ射出される。 I_m は測定光路内の炭酸ガスによって吸収され強度が変化するが、 I_r は変化しない。 I_m と I_r はレンズ8によって赤外線検知器10の上に集光される。使用した検知器はサーモモジュールにより -20°C で作動するPbSe 検知器である。この検知器は1,000 Hz の周波数の断続光を用いたときに波長4.4 μm に対する感度が $5 \times 10^8 \text{VW}^{-1}$ であり、時定数は10 μsec である。なお、迷光の影響を防ぐために検知器の直前に広帯域透過フィルター9を挿入した。光学系の明るさ F 値は約4である。

第2図は炭酸ガス変動計の電気系とその主要部での信号波形を示している。270 Hz と 30 Hz の2つの周波数成分が重畳した検知器出力(A点の波形)は増幅された後、2つの選択増幅器によって270 Hz 成分(M1点の波形)と30 Hz 成分(R1点の波形)とに分離される。分離された270 Hz 成分と30 Hz 成分の信号はそれぞれAC/DCコンバーターにより直流信号に変換された後、0.1秒の時定数をもつ低域濾波器によって平滑される(M3点、R3点の波形)。その後、2つの平滑信号は対数増幅器を経て最後に差動増幅器に接続される。このような光学的複光束方式に基づく2つの信号比をとる方法は光源温度の変化や検知器温度の変化などに起因するドリフトを除去するのに有効である。

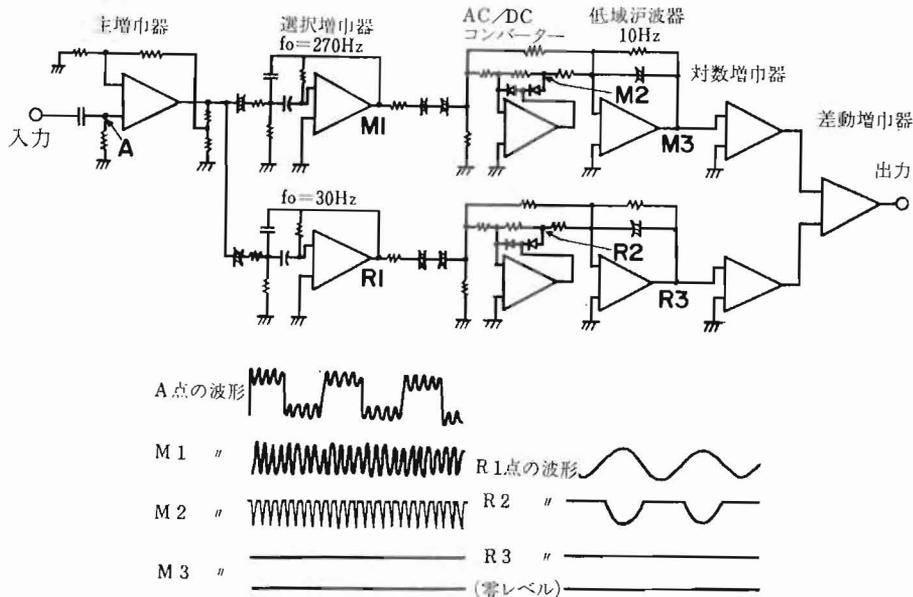


第1図 炭酸ガス変動計の光学系

- 1) 赤外光源 2a), 2b) 反射鏡($f=40 \text{ mm}$) 3) 直流モーター
- 4a) 狭帯域透過フィルター(4.3 μm)
- 4b) 狭帯域透過フィルター(3.9 μm)
- 5) チョッパー 6) 半透過鏡
- 7) 弗化カルシウムレンズ($f=80 \text{ mm}$)
- 8) 弗化カルシウムレンズ($f=40 \text{ mm}$)
- 9) 広帯域透過フィルター
- 10) PbSe 検知器

測定器の大きさ: 光源部 16cm \times 14cm \times 35cm, 受光部 16cm \times 13cm \times 8cm, 測定光路 50cm,

炭酸ガス変動計の検定は測定光路内に長さ 50 cm の検定セルを挿入しセル内に標準ガスを流して行なった。炭酸ガス変動計の感度は 14.5 mV/ppm であった。また、炭酸ガス変動計は感度を変えないで出力電圧のレベルが変えられるように設計されていて使用の便がはかられている。



第2図 炭酸ガス変動計の電気系と主要部での信号波形

炭酸ガス変動計の信号処理系を含めた雑音レベルを見積るために、341 ppm の炭酸ガスを検定セルに流したときの出力信号の標準偏差が計算された。この場合、炭酸ガス変動計の出力信号はアナログテープに集録された後、実験室で 2 Hz の割合で A/D 変換された。算出された標準偏差値は約 6 mV であり、上で述べた感度を考慮すると炭酸ガス変動計の分解能は約 0.4 ppm である。

炭酸ガス変動計の時定数は 0.3 秒と推定された。この時定数の値は炭酸ガス変動計の測定光路中で光束を遮断したとき、つまり、光路中での炭酸ガスの吸収が室内炭酸ガス濃度に対応するある値から無限大に変化するときの炭酸ガス変動計の出力電圧の時間的変化から算出された。

2. 測定結果

渦相関法による炭酸ガスの鉛直フラックスの最初の組織的な測定は岡山大学農業生物研究所の小麦群落上において 1976 年 4 月 16/17 日に行なわれた。この報告では予備的な解析の結果のいくつか、特に炭酸ガス変動計の性能に関する事項について述べる。小麦群落の平均草丈は 55 cm であった。観測期間中の主風向は南一南東であった。観測点での吹走距離は主風向に対して約 100 m であった。観測期間中の大気の成層状態は昼間は弱い不安定で、大気の安定度の指標である $(z-d)/L$ ($z=90$ cm) の値は -0.001 から -0.03

の間であった。また、夜間は弱い安定であった。ここで、群落による地面修正量 d として 35 cm をとった。この値は草丈の 0.63 倍に当る。

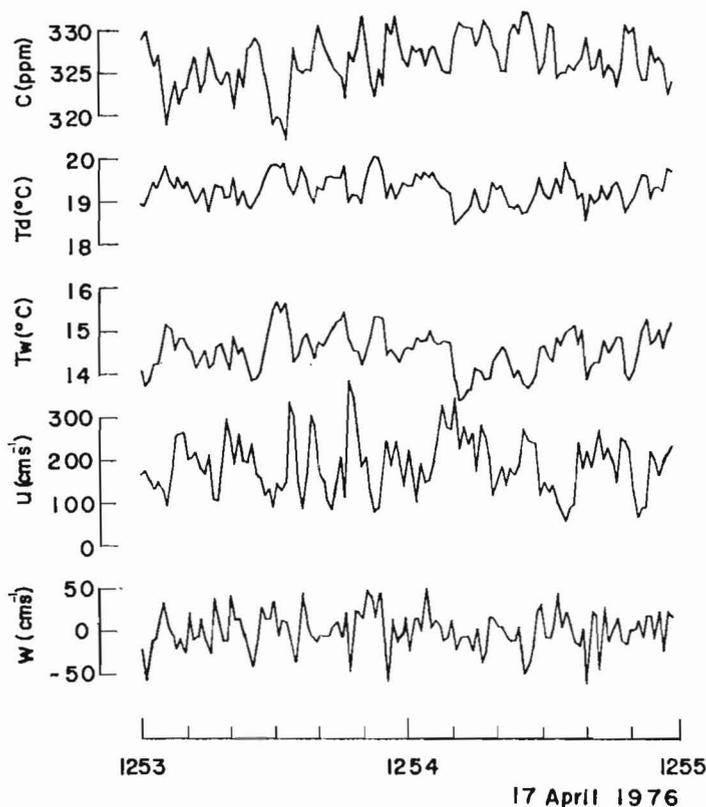
測定要素、測定器ならびに測定高度は右の表の通りである。

測定要素	測定器	測定高度 (cm)
炭酸ガス	c 炭酸ガス変動計	65—115
風速鉛直成分	w 超音波風速計	90
風速水平成分	u 熱線風速計	90
乾球温度	T_d c-c 熱電対(0.1mm ϕ)	90
湿球温度	T_w c-c 熱電対(0.1mm ϕ)	90

測定器の出力は観測点から約 30 m 離れた観測小舎で 7 チャンネルのアナログデータレコーダー (TEAC R-510) に記録され、そのアナログ信号は実験室において電子計算機 (YHP 2100 A) の制御のもとに 12.5 Hz の割合で A/D 変換された。計算は原則として 10 分間のデジタルデータ 7,560 個を使って行なった。

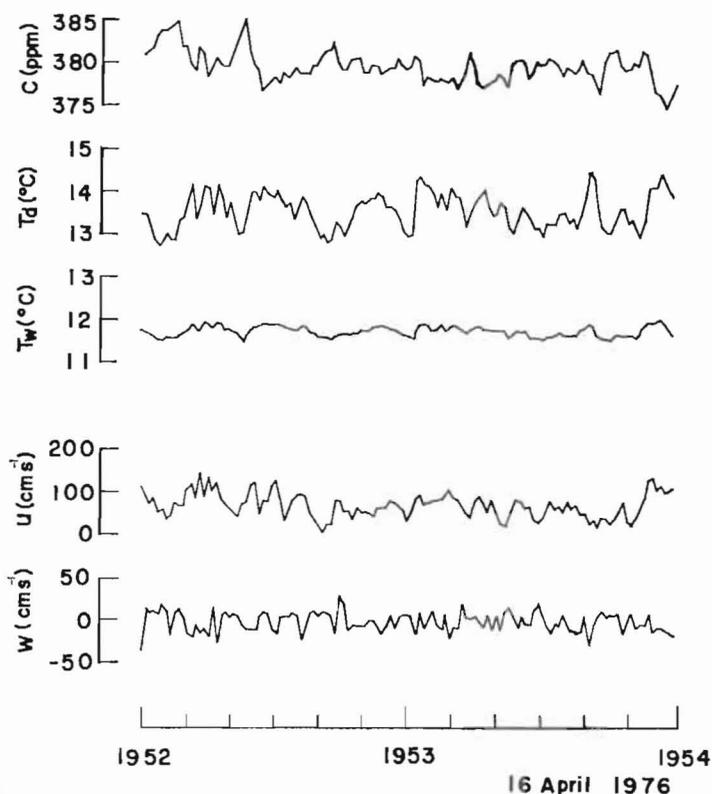
第 3 図と第 4 図は 12.5 Hz でサンプルされたデータを 12 個ずつ平均した値をプロットしたものである。第 3 図は昼間の記録例であり、第 4 図は夜間の記録例である。昼間の例は気層が不安定で 100 cm/s 強の風速がある場合のものであるが、 c は振幅が大きいところでは 5 ppm 以上

もある短周期の変化をしている。このような c の変化は T_d や T_w の変化とは逆位相だが非常によく似ている。また、 c と u との間には正の相関があり、 c と w との間には負の相関が認められる。このような昼間の変化に対して、夜間の c は間歇的に大きな振幅の変化が生じているが一般に変動の振幅は小さい。しかし、 c と T_d あるいは c と T_w との間には昼間のときと同様にかなり大きな負の相関が認められる。また、 c と w 、 c と u との間には昼間のときとは逆にそれ



第 3 図 小麦群落上における昼間の炭酸ガス濃度、乾球温度、湿球温度、風速の水平成分と鉛直成分の記録例

小麦草丈=55cm、測定高度=90cm、



第4図 小麦群落上における夜間の炭酸ガス濃度，乾球温度，湿球温度，風速の水平成分と鉛直成分の記録例

小麦草丈=55cm，測定高度=90cm，

0.1 Hz より高い周波数域で急激な減少を示している。このようなパワースペクトルの急激な減少は炭酸ガス変動計の指示の遅れによる平滑と測定光路 (50 cm) の空間的平滑が原因している。

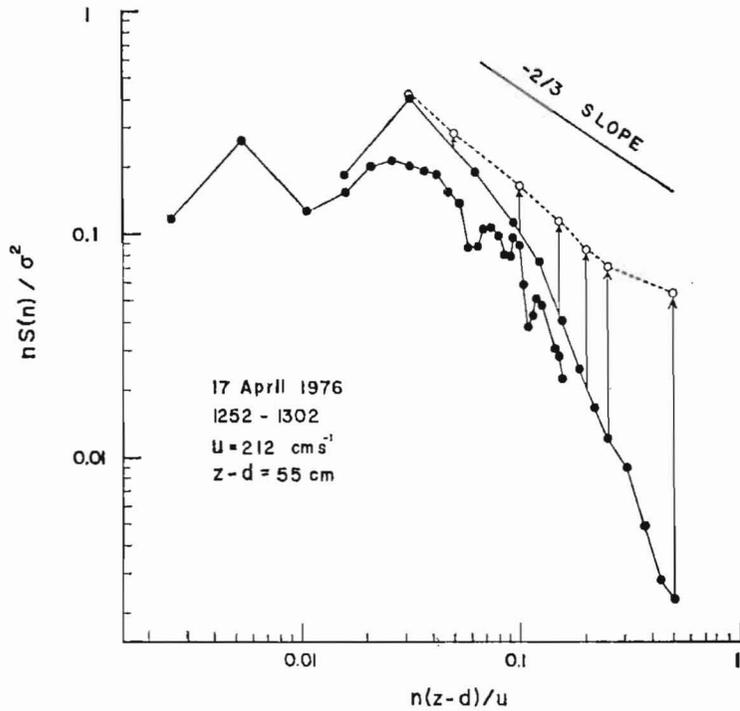
炭酸ガスのパワースペクトルに対する測定器の時定数と測定光路の影響はつぎのようにして見積ることができる。炭酸ガス変動計の時間遅れに伴う周波数応答は RC フィルターの伝達関数と同じ形で表わされ，炭酸ガス変動計の入力信号 V_i と出力信号 V_o の振幅比は次式で与えられる。

$$|V_o/V_i| = 1/\sqrt{1+4\pi^2 n^2 \tau^2} \quad (2)$$

ここで， n は周波数， τ は時定数である。すでに述べた炭酸ガス変動計の時定数 (0.3 秒) を上式に代入すれば，炭酸ガス変動計の時定数による影響を各周波数に対して算出することができる。また，炭酸ガス変動計の測定光路長の影響は Silverman (1968) の考えに従って補正することができる。第5図の点線は測定器の時定数と光路長の影響を補正したパワースペクトルである。補正されたパワースペクトルは 0.03 Hz あたりにピークをもち，0.03 Hz から 0.5 Hz の周波数領域では周波数の $-2/3$ 乗に比例して減少している。

ぞれ正および負の相関が認められる。

第5図は1976年4月17日12時52分から13時02分のデータを使って算出した炭酸ガスのパワースペクトルに周波数をかけ分散で無次元化した値をプロットしたものである。図の横軸は風速と測定高度で無次元した周波数 ($f=n(z-d)/u$) で目盛っている。図中の実線はデータ数7,560個，ラグ50とデータ数756個(上のデータの10個平均)，ラグ30で計算したパワースペクトルを重ねて描いてある。実線で示したパワースペクトルは



第5図 分散の値で無次元化された炭酸ガスのパワースペクトル

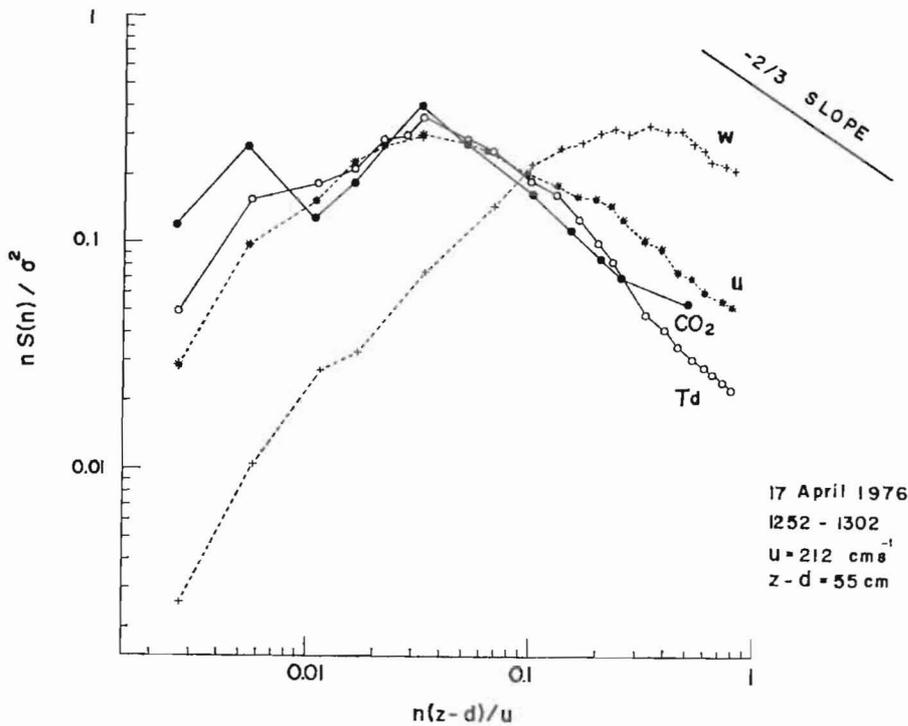
このことは炭酸ガスのパワーのスペクトル密度関数が周波数の $-5/3$ 乗に比例して減少することを意味しており、炭酸ガスについて Inoue (1964) が提案している $-5/3$ 乗則と一致している。

第6図は炭酸ガスのパワースペクトルを同時に測定した他の要素のパワースペクトルと比較したものである。炭酸ガスのパワースペクトルは測定器の時定数と測定光路長の影響を補正している。炭酸ガスや風速の水平成分や乾球温度のパワースペクトルは共に 0.03 Hz あたりにピークをもち、 0.03 Hz より高周波数領域では周波数のほぼ $-2/3$ 乗に比例して減少している。算出された周波数領域では、炭酸ガスのパワースペクトルは、高周数領域で大きなエネルギーをもっている風速の鉛直成分のパワースペクトルよりもむしろ風速の水平成分や乾球温度のパワースペクトルと似ているようである。

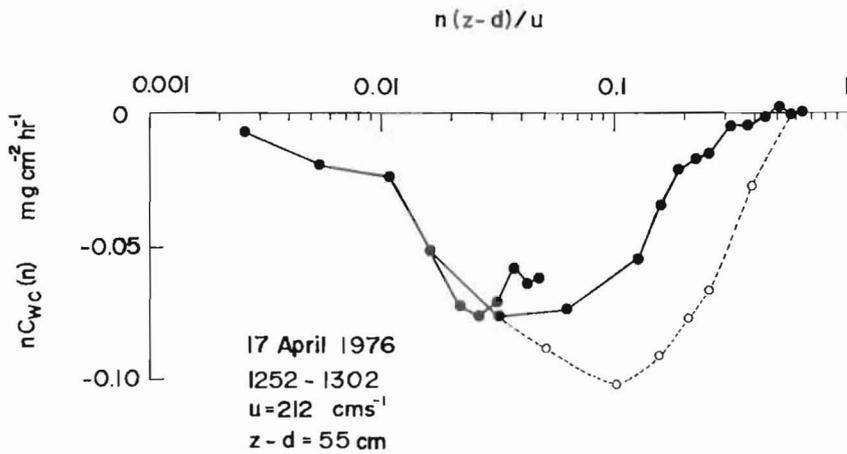
c と w のコスペクトルをパワースペクトルと同じ期間に対して算出し、その結果を第7図に示した。超音波風速計と炭酸ガス変動計を組み合わせたフラックス測定系の周波数応答は測定器の指示遅れに伴う伝達関数と測定光路の空間平均による補正項との積によって与えられる。指示遅れに伴う伝達関数は超音波風速計の時定数は十分小さく、炭酸ガス変動計の時定数が τ であるとすると次式で与えられる (Hicks 1972),

$$A_{wc}(n) = 1/(1+4\pi^2 n^2 \tau^2) \quad (3)$$

ここで、 n は周波数である。また、超音波風速計の有効スパン (20 cm) と炭酸ガス変動



第6図 分散の値で無次元化された炭酸ガス，乾球温度，風速の水平成分と鉛直成分のパワースペクトル



第7図 小麦群落上における昼間の炭酸ガスと風速鉛直成分とのコスペクトル。点線は測定器の時定数と光路の影響を補正したコスペクトル。

計の測定光路 (50 cm) の空間平均の影響は前述のパワースペクトルのところすでに行なったように Silverman (1968) の考えに従って補正することができる。以上の補正を行なってえたコスペクトルが第7図に点線で示されている。コスペクトルは負の符号をも

ち炭酸ガスが昼間鉛直下向きに輸送されていることを示している。補正されたコスペクトルのピークは 0.1 Hz 付近にあり、その下限周波数と上限周波数はそれぞれ 0.001 Hz と 0.6 Hz 程度である。この結果を水蒸気に対する Miyake and McBean (1970) の結果と比較するとほぼ

合致している。炭酸ガスと水蒸気は大気中で共にパンプな物理量であり、同じように取り扱っても大きな相異はないであろうと考えられるから、上の結果を考慮すると炭酸ガス変動計と

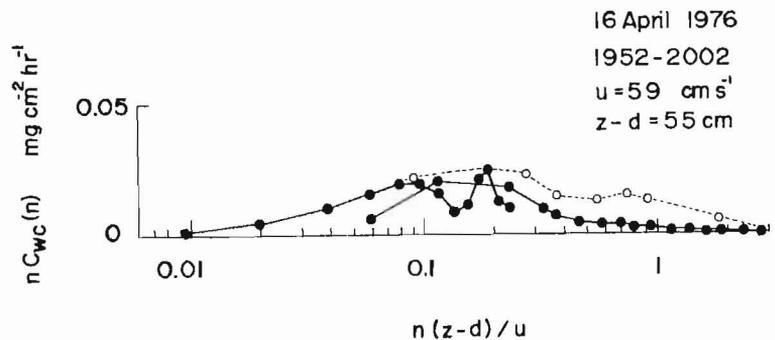
超音波風速計を組みあわせた測定系は測定器の指示遅れや測定光路の影響を補正すれば妥当な結果を与えるとみなすことができる。しかし、炭酸ガス変動計と超音波風速計を植被直上で組みあわせて使用する場合、炭酸ガスフラックスの過少評価量は第7図のコスペクトル曲線から 30%程度になることが予想されるので、炭酸ガスフラックスの算出には十分な注意が必要である。

第8図は c と w の夜間におけるコスペクトルの例である。コスペクトルは正の符号をもち炭酸ガスが夜間には鉛直上方に輸送されていることを示している。しかし、夜間のコスペクトルの値は小さく、補正された炭酸ガスフラックス量も昼間の値の 1/5 程度である。

摘 要

炭酸ガスの濃度変動を測定するために開発された炭酸ガス変動計の概要とその野外テストの結果が述べられた。

小麦群落上で行なった炭酸ガス変動計のテスト観測の結果はつぎのようにまとめられる。(1) 炭酸ガスのパワーのスペクトル密度関数が周波数の $-5/3$ 乗に比例する慣性小領域の周波数帯を有することが示された。また、分散の値で無次元化された炭酸ガスのパワースペクトルは風速の鉛直成分のパワースペクトルよりもむしろ風速の水平成分や乾球温度のパワースペクトルと似ていることが示された。(2) 炭酸ガスと風速の鉛直成分のコスペクトル解析から昼間不安定成層での炭酸ガスフラックスは 0.001 Hz から 0.6 Hz にいたる周波数成分の寄与を受けていることが示された。この結果は水蒸気に対する Miyake and McBean (1970) の測定結果とよく一致している。炭酸ガスと水蒸気の輸送機構の相似性を仮定すると、上の結果から炭酸ガス変動計と超音波風速計を組みあわせた測定系は妥当な結果を与えられる。(3) 炭酸ガス変動計と超音波風速計を植被直



第8図 小麦群落上における夜間の炭酸ガスと風速鉛直成分とのコスペクトル。点線は測定器の時定数と光路の影響を補正したコスペクトル。

上で組みあわせて使用した場合、算出された炭酸ガスフラックスは植被上約 50cm で風速 200 cm/s のときに 30% 程度の過少評価になることが示された。

以上のように炭酸ガス変動計は炭酸ガスフラックスを渦相関法によって直接測定するために十分有用な測定器であることが示されたが欠点も指摘された。炭酸ガス変動計の指示の遅れの影響と測定光路の空間平均の影響が大きいことである。これらの問題を克服するためには炭酸ガス変動計の電気回路を再検討して指示遅れを小さくするとか、測定高度を十分高くして炭酸ガス変動の高周波成分の寄与が少ない所で測定するとかの対策が必要である。なお、炭酸ガス変動計の測定光路は、現在 30 cm に短縮して使用している。

文 献

- Hicks, B. B., 1972. Propeller anemometers as sensors of atmospheric turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.* 3: 214-228.
- Inoue, E., 1964. Turbulent fluctuations in atmospheric CO₂ concentration over the vegetated fields. In: K. Yoshida, *Studies on Oceanography*. Univ. of Tokyo Press. 232-237.
- Inoue, E., Tani, N., Imai, K., and Isobe, S., 1957. The aerodynamic measurement of photosynthesis over the wheat field. *J. Agr. Meteorol. (Japan)* 13: 121-125.
- 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 Jour.* 52: 697-703.
- Miyake, M., and McBean, G., 1970. On the measurement of vertical humidity transport over land. *Boundary-Layer Meteorol.* 1: 88-101.
- Monteith, J. L., and Szeicz, G., 1960. The carbon-dioxide flux over a field of sugar beet. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.* 86: 205-214.
- Ohtaki, E., and Seo, T., 1976 a. Infrared device for measurement of carbon dioxide fluctuations under field conditions. I. Single beam system. *Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ.* 16: 175-182.
- Ohtaki, E., and Seo, T., 1976 b. 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.
- Silverman, B. A., 1968. The effect of spatial averaging on spectrum estimation. *J. Appl. Meteorol.* 7: 168-172.
- Yabuki, K., and Ishibashi, A., 1968. Seasonal change of photosynthesis in rice field. *JIBP/PP. Photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III. Experiments.* 7-10.