



二酸化炭素変動計の開発*

大 滝 英 治¹ 瀬 尾 琢 郎² 松 井 哲 司³

1. はしがき

化石燃料の消費の増加に伴って大気中の二酸化炭素濃度は着実に増加している。二酸化炭素は赤外部にある強い吸収帯のはたらきによって地表面や大気を保温し、気候の温暖化をもたらす心配がある。現在、大気中に放出される二酸化炭素の1/2量が大气中に蓄積され、残り1/2量が海洋と植物によって吸収されていることになっている(例えば杉浦・杉村, 1978)が、その正確な分配率は確定していない。大気中の二酸化炭素濃度の収支を把握するためには、大気とさまざまな状態における地表面との二酸化炭素の交換量(垂直フラックス)に関する情報が必要である。

接地気層内での二酸化炭素のフラックスを微細気象学的方法で最初に測定したのは Huber (1950) 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 高度の二酸化炭素の濃度差を測定し、それに風速の鉛直分布から求めた渦動拡散係数を掛け合せて二酸化炭素のフラックスが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 Inoue *et al.* (1957), Lemon (1960), Monteith (1962), Yabuki *et al.* (1968) 等によって発展させられた。また、渦動拡散係数をエネルギー収支の関係を使って求めた熱収支法も開発され、作物群落上での二酸化炭

素のフラックスの測定に適用された (Monteith and Szeicz, 1960; Uchijima and Udagawa, 1978)。しかし、Huber が指摘しているように、運動量輸送や熱輸送に対する渦動拡散係数が二酸化炭素の輸送の場合に適用されるかどうかは未定の問題であるので、Inoue (1964) は二酸化炭素のフラックスを渦相関法によって直接測定すべきことを示唆した。渦相関法による二酸化炭素のフラックスの測定には、あとで述べるように、二酸化炭素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測定の問題は超音波風速計の実用化によって解決された (Mitsuta, 1966)。他方、二酸化炭素濃度の変動の測定は空気をサンプルしてセル内で赤外吸収を測定しなければならない赤外線ガス分析計 (URAS) では原理的な制約があり不可能であった。そこで、我々は開光路で二酸化炭素の赤外吸収を測定する方式の二酸化炭素変動計を開発することを計画した。開発に着手したのは1967年頃である。試作を重ね、野外測定用として実用に耐える測器を実現したので、この機会に開発の経緯を辿り、二酸化炭素変動計について説明することにした。

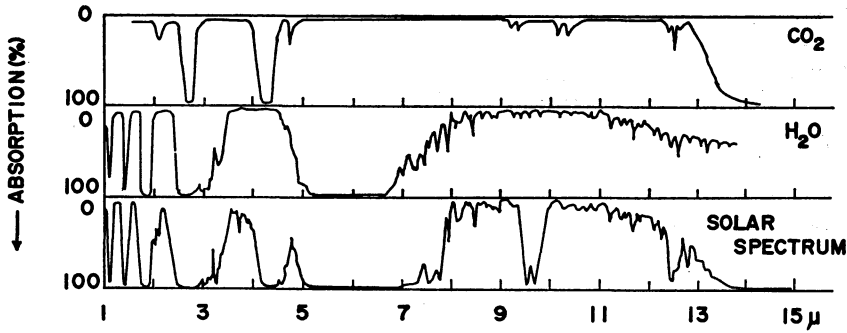
最近では、二酸化炭素変動計はカナダの Jones *et al.* (1978) と Brach *et al.* (1981)、米国の Bingham, ソ連の Elagina・Lazarev (1984) 等によっても試作されている。このうち、Brach *et al.* の開発した変動計はカナダ農務省の人々によって軽飛行機に搭載され、湖面や森林上での二酸化炭素の交換過程の解明に応用されている (Desjardins *et al.*, 1982; Alvo *et al.*, 1984)。また、Bingham が開発した変動計はネブラスカ大学の人々に

* Development of fast response carbon dioxide instrument.

1 Eiji Ohtaki, 岡山大学教養部物理教室。

2 Takuro Seo, 岡山大学名誉教授。

3 Tetsuji Matsui, アドバンスシステム(株)。



第1図 近赤外領域における二酸化炭素と水蒸気の吸収スペクトル。

よって作物群落上での二酸化炭素の交換過程の研究に応用されている (Anderson *et al.*, 1984; Anderson and Verma, 1986). 1986年7月にこれら2種類の二酸化炭素変動計と我々の開発した変動計との性能比較観測をカナダのウイニペグ市において実施した. このとき受けた印象では, カナダと米国にある二酸化炭素変動計は共に実験段階の試作機の域をでていないように思った. 比較観測に参加した二酸化炭素変動計の概要はすでに光田ら (1986) によって紹介されているので参照されたい.

大気-海洋間の二酸化炭素の相互作用に関する研究は Jones・Smith (1977), Smith・Jones (1985) によって行われている. 彼等の二酸化炭素変動計は開光路が 10 cm, 応答周波数が 10 Hz, ノイズが 0.3 ppm (rms) という性能を有している. この変動計の特徴は2つの赤外検出器を用いて赤外光源の変化や測定光路内での異常を補償する光学系を採用していることである. しかし, この場合, 2個の赤外検出器の特性が一致していなければそこから新たな誤差がもたらされる恐れがある.

赤外線湿度計 (Elagina, 1962) の経験を生かし, 開光路で光路を多重反射させる方式の二酸化炭素変動計を Elagina・Lazarev (1984) が開発した. この変動計の分解能は $5 \times 10^{-4} \text{ g m}^{-3}$ である. 観測データの発表を期待している.

上で述べたように, 現在では何種類かの二酸化炭素変動計が開発され, 二酸化炭素の地(海)-空相互作用を渦相関法によって研究しようとする試みが緒についたばかりである. このような時期に, 本稿が二酸化炭素の交換過程の問題に関心を寄せていただくための一助になれば幸いである.

2. 二酸化炭素変動計

開発当初, 次のような条件が二酸化炭素変動計が満たすべき要件だと考えられた.

- (1) 大気中の二酸化炭素濃度は植物群落上では約 300 ppm であり, その変動成分は数 ppm である (Ohtaki and Seo, 1972). このため, 二酸化炭素変動計の分解能は 1 ppm よりよくなければならない.
- (2) 渦相関法では二酸化炭素のフラックス $P (\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ は

$$P = \int_{n_L}^{n_H} C_{wc}(n) dn,$$

で与えられる. ここで, $C_{wc}(n)$ は二酸化炭素濃度 $c (\text{g m}^{-3})$ と風の鉛直成分 $w (\text{m s}^{-1})$ とのコスペクトル密度であり, n_L と n_H はフラックスに寄与している下限と上限の周波数 (Hz) である. Miyake・McBean (1970) は接地境界層内での顕熱フラックスの場合, $n_L = 0.001 \text{ Hz}$, $n_H = 5 \text{ Hz}$, 水蒸気フラックスの場合, $n_L = 0.001 \text{ Hz}$, $n_H = 0.5 \text{ Hz}$ 程度であることを示した. また, オーストラリアで開発されたフラックスサトロンでは $n_L = 0.005 \text{ Hz}$ から $n_H = 0.5 \text{ Hz}$ の周波数成分を使って顕熱フラックスが測定されている (Dyer *et al.*, 1967). 二酸化炭素の輸送の場合にも同様の周波数分布になるとして, 0.001 Hz から 5 Hz 程度までの二酸化炭素濃度の変動成分を正確に測定する必要がある.

- (3) 開光路部の空間平均の影響を小さくするために, 測定光路は 20 cm 程度が望ましい. 20 cm 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.

以上のような要件を満たす二酸化炭素変動計の可能性を見積もってみた. 使用する波長は二酸化炭素の 4.3

第1表 使用した赤外検出器の規格

	Thermistor F-S25-S	Thermofilm LP-11	InSb Labyrinth	PbSe OTC-11-52
Responsivity ($V W^{-1}$)	240	10	3.5	5000
Resistance	2.6 $M\Omega$	15 $k\Omega$	0.6 $k\Omega$	1 $M\Omega$
Time const.	2.8 ms	20 ms	0.1 μs	10 μs
Spectral peak	—	—	6.0-6.3 μm	4.3-4.5 μm
Detectivity ($cm Hz^{-\frac{1}{2}} W^{-1}$)	1.5×10^7	—	1×10^8	7.5×10^9

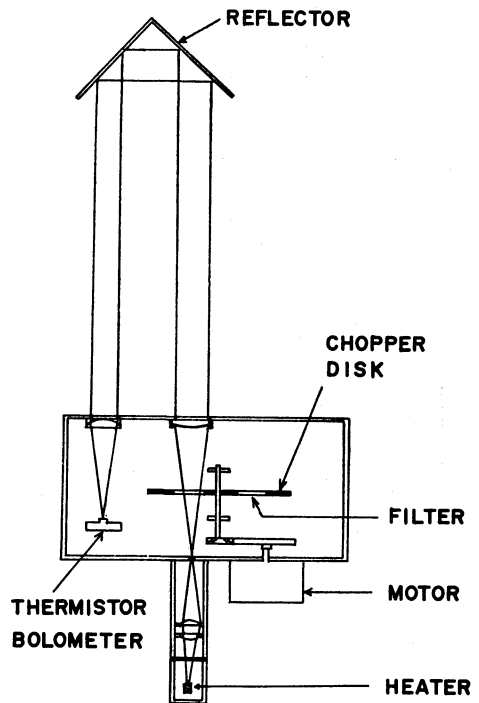
μm の吸収帯の赤外線が利用できる。第1図から明らか
なように、二酸化炭素のこの吸収帯は比較的強い吸収を
示し、水蒸気の吸収帯からも離れている。また、この波
長の近くには二酸化炭素と水蒸気の吸収が無視でき、基
準波長としてとり得る波長帯 (3.9 μm) がある。

Hutchinson・Jarratt (1971) によると光学系の明る
さの指標が F である場合、検出器に入射するエネルギー
(H_λ) は次式で与えられる。

$$H_\lambda = \phi_\lambda \cdot W_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot (1 - \bar{A}) / 4 F^2,$$

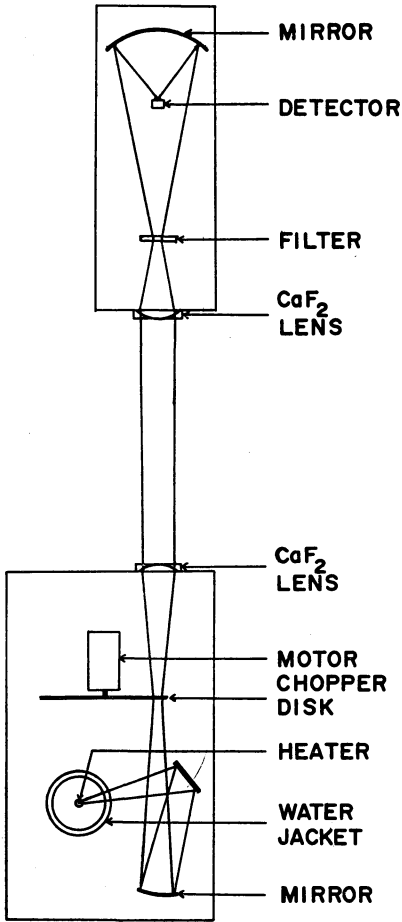
ここで、 ϕ_λ は光学系の効率であり、 W_λ は光源の黒体放
射である。 \bar{A} は二酸化炭素の吸収帯の平均吸収量であ
る。光路長 20 cm の場合、大気中の二酸化炭素濃度を
300 ppm とすると、4.3 μm 帯の平均吸収量は $\bar{A} = 0.2$
となる (Burch *et al.*, 1962)。また、光源の温度を 1000
K にすると、4.3 μm 付近での放射エネルギー $W_\lambda = 1$
 $W cm^{-2} \mu m^{-1}$ である。後で述べる試作1号機のような
光学系では反射鏡、フッ化カルシウムレンズや赤外光源
の放射率を考慮すると $\phi_\lambda = 0.15$ 程度と推定される。 $\Delta\lambda$
は干渉フィルターの半値巾とする (0.1 μm)。光学系の
 f -値を $F = 3$ と仮定すると、 $H_\lambda = 3 \times 10^{-4} W cm^{-2}$ とな
る。赤外検出器の面積とその感度を考えると、結局、
 $10^{-6} W$ 程度の放射エネルギーが赤外検出器に入射する
ことになり、検出も可能であるだろう。

以上のような概略計算のもとで部品集めを行った。赤
外検出器は Barnes 社のサーミスターボロメーター (F-
S 25-S) を入手した。赤外検出器の特性を第1表に示
す。表には後になって開発した改良型の二酸化炭素変動
計で使用した赤外検出器の特性もまとめて示してある。
4.3 μm 帯の赤外線を分光するための干渉フィルターは
OCL 社 (Optical Coating Lab., Inc) のストックリス
トから選んだ。フィルターは半値巾が 0.1 μm 、最大透



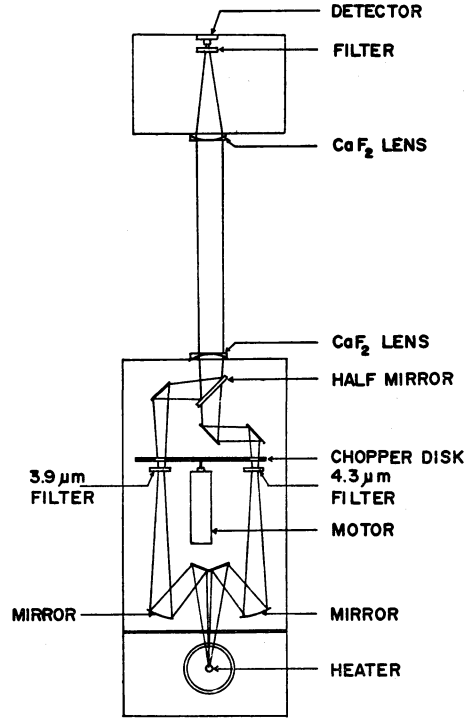
第2図 二酸化炭素変動計 (試作1号機) の光
学系。

過率が60~80%の特性を有していた。光源は URAS 用
の部品を使うことにした。バラックセットでテストを繰
り返しているとき、京都大学の光田教授が赤外線湿度
計の改造を計画しておられ、それに並行して二酸化炭素
変動計を組み立てることになった。赤外線湿度計の設計
技術を二酸化炭素変動計に転用することにして、光学系
を測機舎 (株)、電気系を海上電機 (株) が担当して下さ



第3図 二酸化炭素変動計(試作2号機—単光束型)の光学系。

った。光学系の概略を第2図に示す。この試作1号機では $4.3\ \mu\text{m}$ と $3.9\ \mu\text{m}$ のフィルターを 48 Hz で回転しているチョッパーディスクにはめ込んでいる。このため光学系が非常にすっきりしているのが特徴である。光路内の二酸化炭素による赤外吸収をあげるため反射鏡で赤外光束を折り返している。当時は思うような性能が出なかったで理解できなかったが、この光学系の設計は先見性に富んだものであった。また、電気系も超音波風速計で用いているパルス技術を駆使した巧妙なものであった。しかし、残念ながらこの試作1号機では十分な S/N 比が得られなかった。このような結果に終わったのは (1) 光学系の明るさがレンズの口径で制約され、検出器に到達する放射強度が不足したこと、(2) チョッパーディスクの回転ムラを制御できなかったこと、(3) 光学系



第4図 二酸化炭素変動計(試作3号機—複光束型)の光学系。

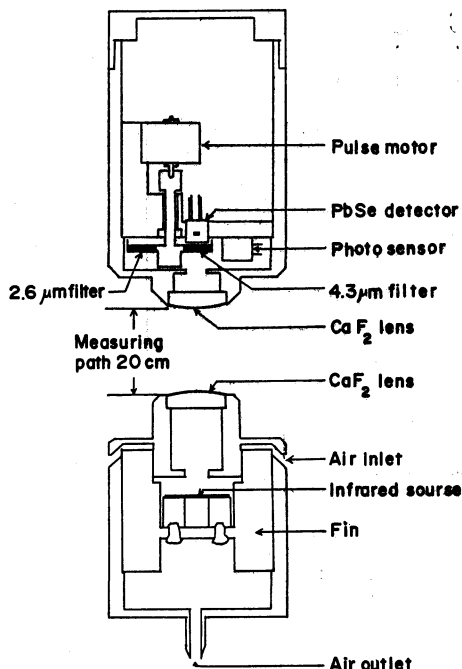
の主要部品を納めている筐体の気密が不十分であったためである。

この後、失敗の原因を一つ一つチェックすることにした。これらの改良はリッソ応用光学(株)が引き受けてくれることになった。単光束方式の光学系を採用した試作2号機ではフィルターを筐体に固定した(第3図)。また、サーミスターボロメーターは素子抵抗が大きく熱雑音の原因となっていたので、赤外線検出器も変更することにした。最初、室温用の InSb 検出器を用いてみた。InSb 検出器の場合、温度変化によるドリフトが問題であることがあらかじめわかっていたので、温度補償用のもう一つの InSb 検出器を使うなどドリフトの影響を小さくするよう努力した。しかし、ドリフトの問題を解決することはできなかった。結局、感度はよくないがより安定な出力を与えるサーモフィルム検出器を使った。この2号機は野外テストでも二酸化炭素濃度の変動を測定することに成功はしたが、単光束方式につきもののドリフトを抑えることができなかった。また、分解能も十分とはいえなかった (Ohtaki and Seo, 1976a)。

つぎに複光束方式の3号機を試作した(第4図)。こ

第2表 干渉フィルターの特性値

	二酸化炭素用フィルター	水蒸気用フィルター	参照用フィルター
中心波長 (μm)	4.249	2.597	3.932
最大透過率 (%)	68	65	67
半値幅 (μm)	0.094	0.093	0.080



第5図 二酸化炭素変動計 (試作4号機) の光学系。この型では二酸化炭素と水蒸気の濃度変動が同時に測定できる。

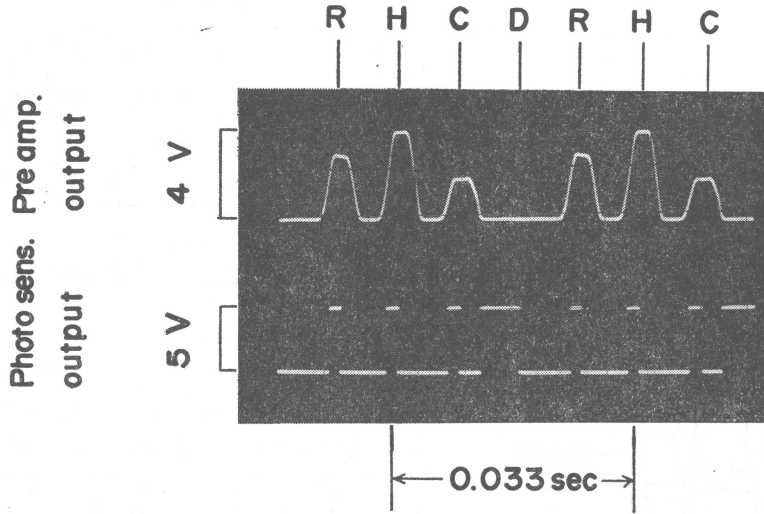
のときには、Optoelectronics社の電子冷却型のPbSe検出器を使うことができた。この検出器は最大感度が4.4 μm 付近にあって、DetectivityはサーミスターポロメーターやInSbに比べて2桁程度大きい。

試作3号機は、最初光路長を50 cmとして使用していたが途中から30 cmに短縮した。性能は分解能が1 ppm、時定数が0.3秒程度であった。ドリフトは30分程度の測定ならあまり問題にならなかった。感度変化もほとんど認められなかった。この3号機は麦畑や水田での観測によく使用され、実用に耐えうる性能を示した(Ohtaki and Seo, 1976b; Ohtaki, 1980)。また、この3号機の電気系をそのまま使用し、干渉フィルターのみを交換することによって水蒸気の濃度変動の測定にも応用できることが示された(Seo and Ohtaki, 1976)。この場合、水蒸気濃度の測定波長として2.6 μm を、参照波長として2.2 μm を使った。水蒸気変動計としての分解能は比湿で表して0.1 g kg⁻¹程度であった。この複光束方式を採用した二酸化炭素変動計の試作によって、かくうじてではあるが当初の目標を満たす形の測定器を開発することができた。開発のこの段階までの経過につい

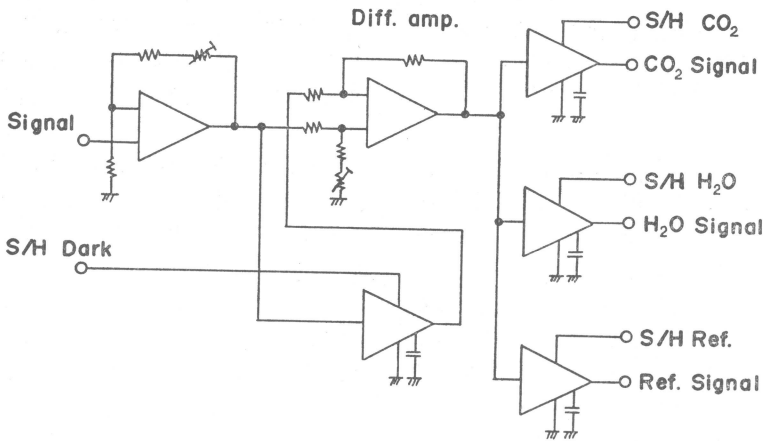
ては既に発表した総合報告(瀬尾・大滝, 1977)を参照されたい。

しかし、この二酸化炭素変動計の光学系は複雑であり、形状も少し大型であった。そこで野外使用に耐えうるようにセンサー部を小型軽量化することを考えた。当然のことながら、今までの技術を生かして二酸化炭素と水蒸気の濃度変動が同時に測定できる変動計の開発を狙った。この場合、干渉フィルターは少なくとも二酸化炭素用、水蒸気用と参照用の3枚必要であるから、試作2、3号機のように干渉フィルターを筐体に固定する方式では光学系を小型化することは不可能である。光源を1個、検出器も1個、しかも干渉フィルターを3枚使用する光学系を単純化するためには、試作1号機で採用していたように干渉フィルターをチョッパーディスクに固定して回転させる方式が最も有効である。かくして二酸化炭素変動計の開発にたずさわって10余年目にして原点に立ちかえることになった。しかし、以前と比べて技術的な進歩が著しく、今回は小型で滑らかに駆動できるモーターやデジタル方式の電子技術が存分に駆使できるような環境になっていた。

第5図は二酸化炭素と水蒸気の濃度変動を同時に測定するために1982年に開発した試作4号機の光学系を示している(Ohtaki and Matsui, 1982)。約1000 Kに熱したニクロム線光源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、20 cmの開光路に射出されている。光路内に存在する二酸化炭素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°Cに電子冷却されている赤外検出器(PbSe)上に集光されている。PbSe検出器は国産のものよりDetectivityが1桁程大きいOptoelectronics社製品を使用している。PbSe検出器の直前には30 Hz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二酸化炭素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外線を分光する干渉フィルターが固定されている。これらの干渉フィルターは日本真空光学(株)で作成されたものである。使用した干渉



第6図 PbSe 検出器の増幅した信号と光反射型ホットセンサーによるトリガ信号。H: 水蒸気信号, C: 二酸化炭素信号, R: 参照信号, D: 暗信号。チョッパーディスクの回転は 30 Hz.



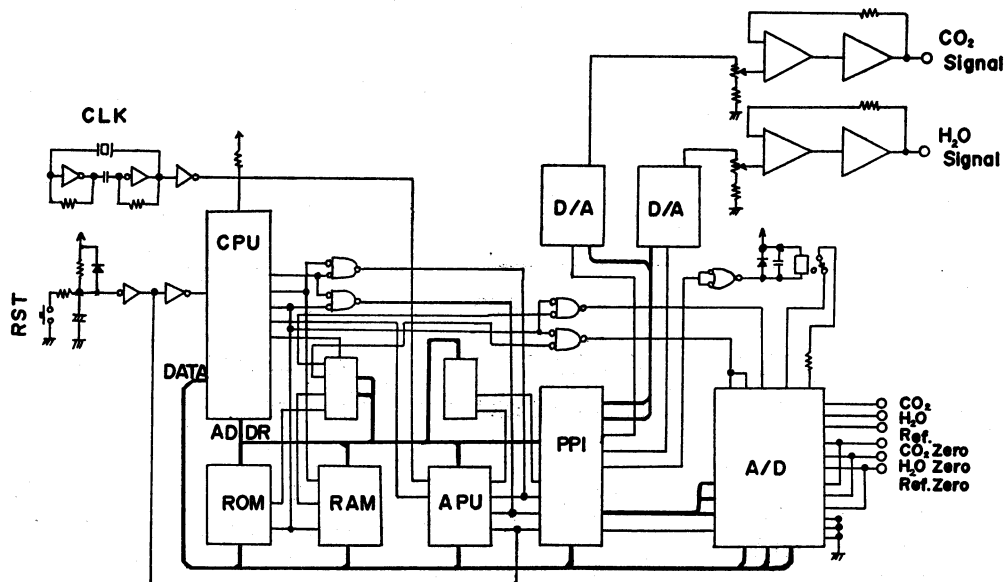
第7図 二酸化炭素, 水蒸気, 参照信号のサンプルホールド回路.

フィルターの中心波長, 最大透過率, 半値巾は第2表の通りである。

ホットセンサー(光反射型)は後述するように, 各フィルターの位置決めを使用している。

PbSe 検出器に入射した赤外線は検出器の抵抗変化を生じ, 結果として, 電圧変化をもたらす。増幅された検出器の信号と光反射型ホットセンサーでつくられたトリガパルスのシンクロスコープ画面を第6図に示す。プリアンプの信号で, R は $3.9\mu\text{m}$ 帯の参照信号, H は 2.6

μm 帯の水蒸気信号, C は $4.3\mu\text{m}$ 帯の二酸化炭素信号, D は暗信号を意味している。チョッパーディスクが 30 Hz で回転しているので, 初めの H 信号から次の H 信号までの時間間隔は 0.033 sec である。ホットセンサーのトリガパルスの立下がりを使って R, H, C, D 各信号を切り出し, 差動増幅器によって C-D, H-D, R-D の形にする。少し複雑になるが差動増幅器とサンプルホールドの回路を第7図に示しておく。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



第8図 デジタル演算処理回路。CPUはZ-80。

された二酸化炭素信号(C-D)と水蒸気信号(H-D)は演算プロセッサ(APU)によって参照信号(R-D)で割算され、次に同じAPUで対数演算が実行されている。従来、この割算と対数演算はオペアンプで処理していたが、オペアンプの特性が悪くかなり大きな雑音を有していた。このため電気回路の終段部に入れた低域濾波回路でも雑音を完全に除去することはできていなかった。今回採用した演算プロセッサによるデジタル演算方式は二酸化炭素濃度の広い範囲にわたりリニアな出力を与えることができる点と雑音レベルを低下させる点において非常に有効であった。この時点での信号は光路中の二酸化炭素濃度や水蒸気濃度に比例した量となっている。これらのデジタル演算の処理はマイクロプロセッサ(Z-80)で制御されている。デジタル信号は最終段階で再びD/A変換され、二酸化炭素濃度と水蒸気濃度に関するアナログ信号として別々に出力されている。実用の便を考えてデジタル演算処理部と最終段のD/A変換部の回路を第8図に示した。

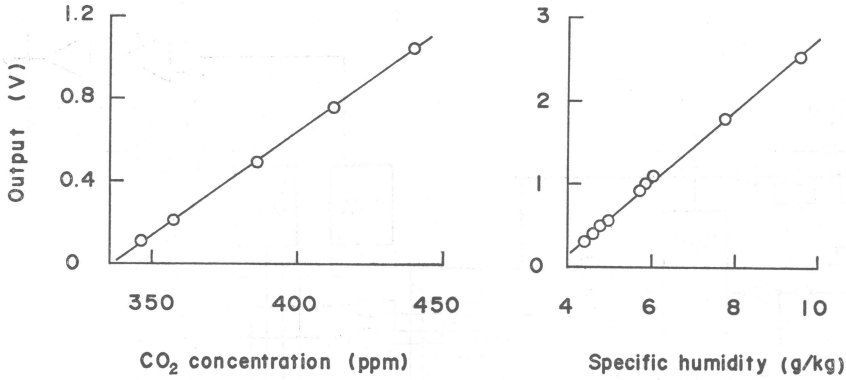
3. 二酸化炭素変動計の動作特性

二酸化炭素変動計としての較正は開光路内に長さ20cmの較正セルを挿入し、セル内にいろんな濃度の二酸化炭素の標準ガスを流して行う。また、水蒸気変動計としての較正は、センサー部を恒温恒湿装置内に入れて水

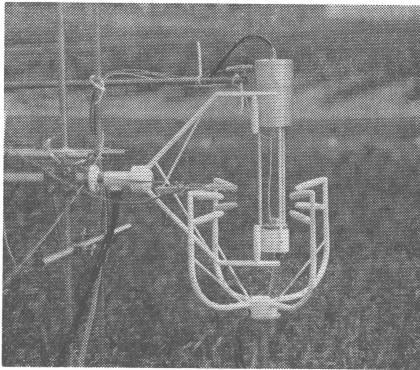
蒸気濃度を変化させて行う。第9図は二酸化炭素濃度と水蒸気濃度を変化させたときの出力電圧をプロットしたものである。較正曲線の勾配から求めた測定感度は二酸化炭素変動計としては約 10 mV ppm^{-1} であり、水蒸気変動計としては約 0.4 V/g kg^{-1} である。

二酸化炭素変動計の雑音レベルを見積もるために較正セル内に 411 ppm の二酸化炭素の標準ガスを流した。このときシンクロスコープで測定した雑音は二酸化炭素変動計も水蒸気変動計も共に約 8 mV ($k-p$ 値)であった。上で求めた測定感度を考慮すると、雑音は 0.8 ppm の二酸化炭素濃度と 0.02 g kg^{-1} の水蒸気濃度に相当している。また、ドリフトは 1 ppm/時 および $0.03\text{ g kg}^{-1/時}$ であった。試作3号機ではバランスが崩れて大きな雑音がいつ生じるかわからなかったので常に緊張していたが、今回の二酸化炭素変動計では S/N 比が十分あるので二酸化炭素濃度の変動が小さくなる朝、夕の中立時にも安心して見ていられた。

二酸化炭素変動計の動作特性を調べるための野外観測を1982年4月20日に岡山大学農業生物研究所の実験圃場で行った。圃場は $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ の面積をもち、小麦を栽培していた。小麦の平均草高は 65 cm であった。二酸化炭素変動計は3次元超音波風速計や熱電対乾湿計と組み合わせて、地上 110 cm の高度に固定した(第10図)。



第9図 二酸化炭素濃度計測と水蒸気濃度計測用の較正曲線。



第10図 超音波風速計と組み合わせて使用されている二酸化炭素変動計。超音波風速計と二酸化炭素変動計のスパン長は共に20 cm。

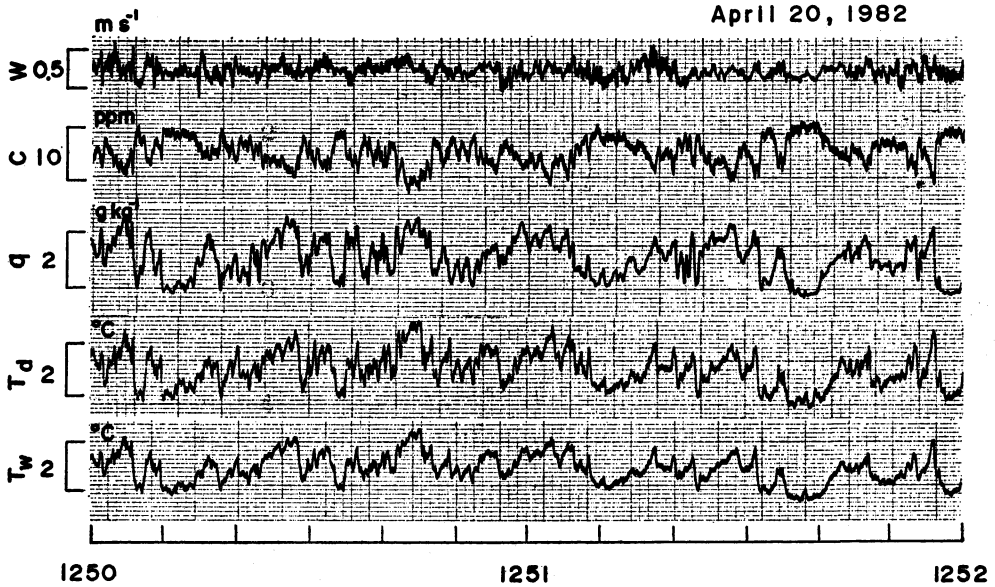
小麦群落上での不安定成層時における風の鉛直成分 (w)、二酸化炭素濃度 (c)、比湿 (q)、乾湿球温度 (T_d 、 T_w) の乱流変動の典型的なモニター記録を第11図に示す。まず第1に、 c の変化が q 、 T_d 、 T_w の変化と 180° 位相が異なっていることに気がつく。これは、小麦群落面が二酸化炭素の吸源として働き、顕熱や潜熱の湧源として働いていることによっている。また、 c の変化には短周期の乱流変動に加えて、20~30秒周期の鋸歯状型の変化が重ね合わさっているように見える。もちろん位相は 180° 異なるが、 q 、 T_d 、 T_w の記録にも鋸歯状型の変化が認められる。これは Kaimal・Businger (1970) によって研究された対流性のブルームの存在を示している。

第12図は4月20日12時45分から13時00分までの15分間

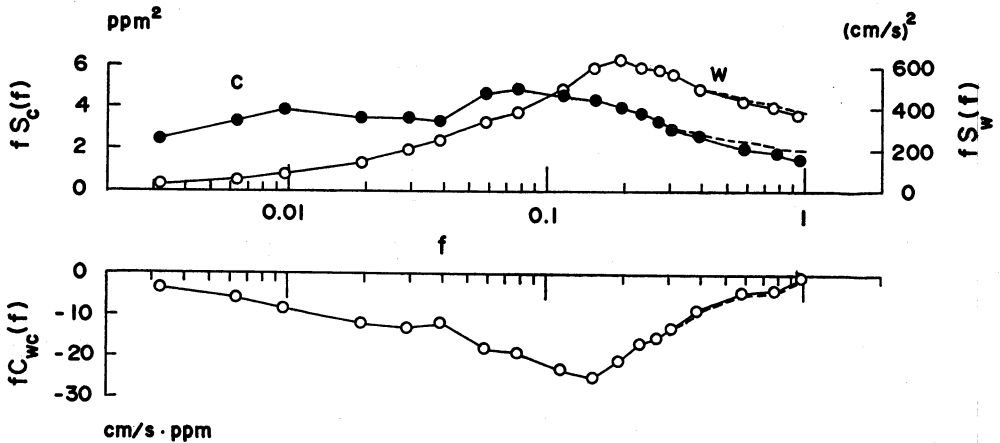
のデータを使って算出した w と c のパワースペクトルとコスペクトルを示している。横軸は無次元周波数 $f (= \frac{nz}{u})$ を対数表示している。ここで、 n は周波数 (Hz)、 z は測定高度 (m)、 u は風速 ($m s^{-1}$) である。 c のパワースペクトル $fSc(f)$ は $f=0.08$ あたりにピークをもち、 w のパワースペクトル $fSw(f)$ は $f=0.2$ あたりにピークをもっている。 $fSc(f)$ 、 $fSw(f)$ 曲線と横軸で囲まれた面積はそれぞれの分散 ($\overline{c'^2}$ 、 $\overline{w'^2}$) に比例している。二酸化炭素変動計と超音波風速計は 20 cm のスパンを有しているので高周波成分が空間的に平滑化されている。この平滑化による過小評価量はベクトル量の w については Kaimal *et al.* (1968) が与えた表を使って算出でき、スカラー量の c については Silverman (1968) が与えた表を使って算出することができる。 w と c についての平滑化の影響を補正した値を図中に点線で示した。 w 、 c 共に高周波領域で完全にゼロになっていないので補正項の大きさを必ずしも正確に示すことができないが過小評価量は w 、 c 成分共に 5% 程度であろう。

第12図の下部に示した w と c のコスペクトル $fC_{wc}(f)$ 曲線は $f_L=0.002$ 、 $f_H=1$ 程度であり、フラックスに最も寄与している周波数帯が $f=0.1\sim 0.2$ の領域であることを示している。図中に点線で示した曲線は空間平均による過小評価量を補正したものである。この場合、二酸化炭素のフラックス ($\overline{w'c'}$) の過小評価量は約 2% であった。

q 成分についても上と同じ議論が成り立つ。第13図に示した w と q のパワースペクトルとコスペクトルについて空間平均による過小評価量を求めてみた。その結果、 $\overline{q'^2}$ は 5% 程度、 $\overline{w'q'}$ は 3% 程度の過小評価になっ



第11図 小麦群落上での不安定時における記録例。w: 風の鉛直成分, c: 二酸化炭素濃度, q: 比湿, Td: 乾球温度, Tw: 湿球温度。



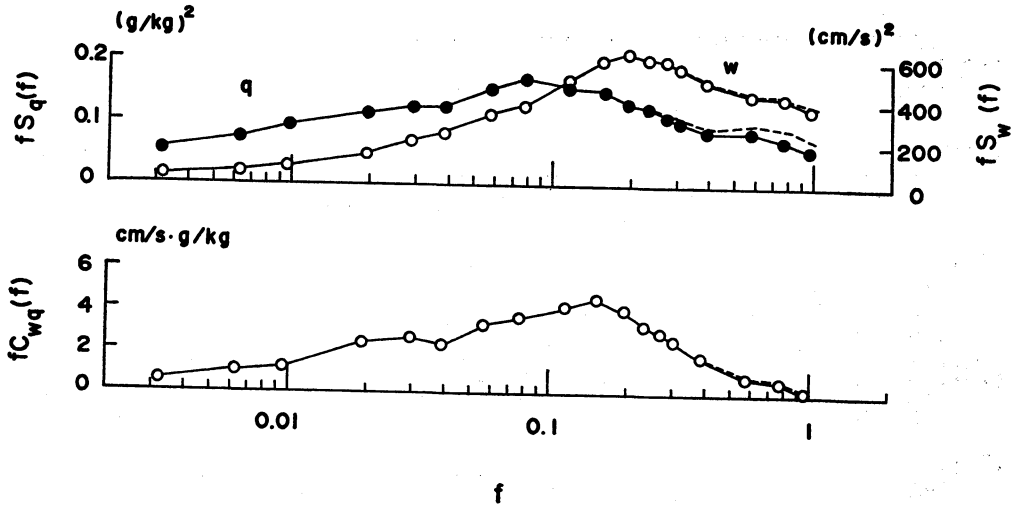
第12図 風の鉛直成分 (w) と二酸化炭素濃度 (c) のパワースペクトルとクロススペクトル。図中の点線は測定器のスパン長による空間平均を補正した値を示している。測定日: 1982年4月20日12時45分~13時00分。

$$\sigma_w = 44 \text{ cm s}^{-1}; \sigma_c = 4.7 \text{ ppm}; \overline{w'c'} = -72 \text{ cm s}^{-1} \cdot \text{ppm}$$

ていた。これらの誤差は実質的には無視できる大きさである。試作4号機を野外使用に供した場合の二酸化炭素濃度の変動特性測定例については既に報告した論文を参照されたい (Ohtaki, 1984a; 1984b; 1985; 1986)。

このようにして、試作4号機をもってほぼ所期の目的

に達することができたが、もう一段の改善をめざして1985年にアドバンスシステム(株)において試作5号機を作成した。4号機と異なる主な点は、(1)ドリフトを抑えるために2.3 μm と3.9 μm の2つの参照信号 $V_{2.3}$ と $V_{3.9}$ を使用して、 $V_{2.3}/V_{3.9}$ の値が一定となるよ



第13図 風の鉛直成分 (w) と比湿 (q) のパワースペクトルとクロススペクトル。図中の点線は測定器のスペクトル長による空間平均を補正した値を示している。測定日は第12図の場合と同じ。
 $\sigma_w = 44 \text{ cm s}^{-1}$; $\sigma_q = 0.82 \text{ g kg}^{-1}$; $w'q' = 13 \text{ cm s}^{-1} \cdot \text{g kg}^{-1}$.

う光源の電流を制御していること、(2) 光源をニクロム線から安定に作動するセラミックヒーターに変えたこと、(3) 干渉フィルターを固定しているチョッパーディスクを直流モーターで駆動させていること、(4) 電気処理系にデジタル演算方式を大幅に採用したこと、(5) 光源部と検出部の支柱パイプを利用して、光源部と検出部を共に空冷できるようにしたこと等である。このような改善によって感部がすっきりし、空気の流れを乱すことが少なくなった。変動計の性能を調べるために、開光路部をポリスチレンシートでカバーし、その中に 302 ppm の二酸化炭素の標準ガスを 0.51 min^{-1} の割合で流したときのノイズとドリフトを測定した。0.5 秒毎にサンプルした10分間の出力信号の標準偏差は約 0.3 ppm であり、2.5 時間あたりのドリフトは約 0.4 ppm であった。試作 4 号機に比べると、性能は 2 倍程度良くなっている。

4. おわりに

渦相関法によって二酸化炭素のフラックスを測定するための開光路を有する変動計の開発経緯を紹介した。

二酸化炭素変動計は開発されたばかりである。測定条件があまり変わらない 15 分とか 30 分の Run では二酸化炭素のフラックスの測定誤差は無視できるだろう。しかし、光源のエイジングの影響、 $4.3 \mu\text{m}$ 吸収帯の温度依存性の影響等解明すべき事項がたくさん残っている。今

後は上のような基本的な問題の追求はもちろん、二酸化炭素変動計を使っていろいろな状態における地表面上での二酸化炭素のフラックスの測定という実用面での研究にも力を注いでいきたい。

ここに至るまで多くの方々に直接、間接にお力添えをいただいた。とくに、高須謙一博士と井上栄一博士には終始この二酸化炭素変動計の開発に関心を寄せられて、励ましをいただいた。また、京都大学の光田寧教授、岡山大学の佐橋謙教授と米谷俊彦助教授には多くの御教示をいただいた。心から感謝します。二酸化炭素変動計が使用可能な測定器として製作されたのはリッサー応用光学の高井麗敬氏、海上電機の小堀泰宏氏、アドバンストシステムの徳永敬三郎氏の御尽力によるものである。記して感謝します。なお、5号機の試作は文部省科学研究費補助金(試験研究(1), No. 60840009)によって行われた。

文献

- Alvo, P., R.L. Desjardins, P.H. Schuepp and J.I. MacPherson, 1984: Aircraft measurements of CO_2 exchange over various ecosystems, *Boundary-Layer Meteorol.* **29**, 167-183.
 Anderson, D.E., S.B. Verma and N.J. Rosenberg, 1984: Eddy correlation measurements of CO_2 , latent heat and sensible heat fluxes over a crop surface, *Boundary-Layer Meteorol.* **29**, 263-272.

- Anderson D.E. and S.B. Verma, 1986: Carbon dioxide, water vapor and sensible heat exchanges of a grain sorghum canopy, *Boundary-Layer Meteorol.* **34**, 317-331.
- Brach, E.J., R.L. Desjardins, and G.T. StAmour, 1981: Open path CO₂ analyser, *J. Phys. E. Sci. Instrum.* **14**, 1415-1419.
- Burch, D.E., D.A. Gryvnak and D. Williams, 1962: Total absorbance of carbon dioxide in the infrared, *Applied Optics.* **1**, 759-765.
- Desjardins, R.L., E.J. Brach, P. Alvo and P.H. Schuepp, 1982: Aircraft monitoring of surface carbon dioxide exchange, *Science*, **216**, 733-735.
- Dyer, A.J., B.B. Hicks and K.M. King, 1967: The fluxatron-A revised approach to the measurement of eddy fluxes in the lower atmosphere, *J. Appl. Meteorol.* **6**, 408-413.
- Elagina, L.G. 1962: Optical device for measuring the turbulent pulsations of humidity, *Izvestiya, Geophys. Ser.* **1100-1107**.
- and A.I. Lazarev, 1984: Measurements of the frequency spectra of turbulent CO₂ fluctuations in the atmospheric surface layer, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **20**, 502-506.
- Huber, B. 1950: Registrierung des CO₂-Gefälles und Berechnung des CO₂-Stromes über Pflanzengesellschaften mittels Ultrarot-Absorptionsschreiber, *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* **63**, 52-63.
- Hutchinson, R.J. and T. Jarratt, 1971: Infrared gas analysis, F.A. Sowen (ed.) *Applications of infrared detectors*, Mullard Ltd. London, 129-142.
- Inoue, E. 1964: Turbulent fluctuations in atmospheric CO₂ concentration over the vegetated fields, Kozo Yoshida (ed.) *Studies on Oceanography*, Univ. Tokyo Press, 232-237.
- Inoue, E., N. Tani, K. Imai and S. Isobe, 1957: The aerodynamic measurement of photosynthesis over the wheat field, *J. Agric. Meteorol. (Japan)*, **13**, 121-125.
- Jones, E.P. and S.D. Smith, 1977: A first measurement of sea-air CO₂ flux by eddy correlation, *J. Geophys. Res.* **82**, 5990-5992.
- , T.V. Ward and H.H. Zwick, 1978: A fast response atmospheric CO₂ sensor for eddy correlation flux measurements, *Atmos. Environ.* **12**, 845-851.
- Kaimal, J.C. and J.A. Businger, 1970: Case studies of a convective plume and a dust devil, *J. Appl. Meteorol.* **9**, 612-620.
- , J.C. Wyngaard and D.A. Haugen, 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, *J. Agric. Sci.* **10**, 334-346.
- Mitsuta, Y. 1966: Sonic anemometer-thermometer for general use, *J. Meteorol. Soc. Japan.* **44**, 12-24.
- 光田 寧, 文字信貴, 佐橋 謙, 塚本 修, 米谷俊彦, 松井哲司, 大滝英治, 1986: 大気中の炭酸ガス濃度変動の国際比較観測, *天気*, **33**, 625-631.
- Miyake, M. and G. McBean, 1970: On the measurement of vertical humidity transport over land, *Boundary-Layer Meteorol.* **1**, 88-101.
- Monteith, J.L. 1962: Measurement and interpretation of carbon dioxide fluxes in the field, *Neth. J. Agric. Sci.* **10**, 334-346.
- Monteith, J.L. and G. Szeicz, 1960: The carbon-dioxide flux over a field of sugar beet, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **86**, 205-214.
- Ohtaki, E. 1980: Turbulent transport of carbon dioxide over a paddy field, *Boundary-Layer Meteorol.* **19**, 315-336.
- , 1984a: Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport, *Boundary-Layer Meteorol.* **29**, 85-107.
- , 1984b: The budget of carbon dioxide variance in the surface layer over vegetated fields, *Boundary-Layer Meteorol.* **29**, 251-261.
- , 1985: On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields, *Boundary-Layer Meteorol.* **32**, 25-37.
- , 1986: Measurements of carbon dioxide flux over a shallow coastal water, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **64**, 161-166.
- , and T. Matsui, 1982: Infrared device for simultaneous measurement of fluctuations of atmospheric carbon dioxide and water vapor, *Boundary-Layer Meteorol.* **24**, 109-119.
- , and T. Seo, 1972: 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.
- , and ———, 1976a: 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.
- , and ———, 1976b: 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.
- Seo, T and E. Ohtaki, 1976: Infrared device for measurement of carbon dioxide fluctuations under field conditions, III. Adaptation to infrared hygrometry, Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ. 16, 191-198.
- 瀬尾琢郎, 大滝英治, 1977: 炭酸ガス変動計の開発, 赤外線技術, 第2号, 14-20.
- Silverman, B.A., 1968: The effect of spatial averaging on spectrum estimation, J. Appl. Meteorol. 7, 168-172.
- Smith, S.D. and E.P. Jones, 1985: Evidence for wind-pumping of air-sea gas exchange based on direct measurements of CO₂ fluxes, J. Geophys. Res. 90, 869-875.
- 杉浦吉雄, 杉村行勇, 1978: 大気化学における最近の諸問題, 天気, 25, 783-805.
- Uchijima, Z. and T. Udagawa, 1978: Carbon dioxide environment and CO₂-transport above and within crop canopies-Measurements and Simulation, Monsi, M. and T. Saeki (ed.) *Ecophysiology of photosynthetic productivity*, Univ. Tokyo Press, 129-139.
- Yabuki, K., A. Ishibashi and C. Ko, 1968: Measurement of carbon dioxide flux over a paddy field by the aerodynamic method, Photosynthesis and Utilization of Solar Energy, JIBP/PP-Photosynthesis Level III, Experiments, 9-12.



大気二酸化炭素観測始まる

気象ロケット観測所(綾里)

昭和62年1月1日より, 岩手県綾里の気象ロケット観測所において, 大気二酸化炭素(CO₂)濃度の観測が開始される。これに向けて, 昨年11月28日に測定装置の設置が完了し, 試験観測が続けられている。

気候問題と関連して, CO₂等のいわゆる温室効果を持つ気体成分に対する関心は, 近年急速に高まっている。

一昨年10月, オーストリアのフィルラッハにおいて UNEP, WMO, ICSU の共催で「大気微量成分の気候変動における役割の評価に関する国際会議」が開かれたが, 会議のまとめとして, 大気微量成分の研究が重要かつ緊急の課題であることが認識され, 各国政府に対して

それらの観測及び研究を強力に助成するよう勧告がなされた。このフィルラッハ会議の結論は, 昨年6月の WMO 執行理事会でも支持された。

綾里で行う CO₂ 観測は, WMO の BAPMoN (大気バックグラウンド汚染監視網) の一環として気象庁が初めて手掛けるものである。現在, BAPMoN の CO₂ 観測所は, 世界に13カ所あるが, アジア・西太平洋地域にはこれまで観測点がなく, その意味からも綾里での観測は世界的に期待が大きい。

(気象庁ニュースより)