

紫外線湿度計による湿度変動の測定*

藤 谷 徳之助**

要旨

Lyman- α 湿度計を用いて、海洋上で湿度変動の測定を行ない、熱電対乾湿計と比較した。その結果、少なくとも 1 Hz 程度の湿度変動にまで追従していることが明らかとなった。しかし、絶対値の測定には問題があり、熱電対乾湿計などと併用して、湿度変動の高周波数成分の測定に用いれば有効であると考えられる。

1. はじめに

大気境界層中におけるエネルギーの交換過程を明らかにするためには、顕熱のみならず、水蒸気の鉛直乱流輸送量を正確に把握する必要がある。海洋上の接水境界層中では、熱エネルギーの大部分が潜熱の形で運ばれていることから、このことは特に重要である。鉛直乱流輸送量を正確に測定する方法としては、いわゆる渦相関法が最も適しており、特に超音波流速計の開発によって、風の鉛直成分が正確に測定できるようになって以来、この方法は乱流輸送量測定のための標準的な方法となってきた。しかし、この方法で水蒸気輸送量を測定するためには、水蒸気量の変動を正確に測定する必要があり、信頼性が高く応答速度の速い湿度計の開発が望まれている。この要求を満たすために、アメリカにおいて紫外線を用いた湿度計 (Lyman- α humidimeter) が開発され (Randall *et al.*, 1965), BOMEX や GATE において使用されるようになってきている。日本ではこれ迄使用されていなかったが、今回 MONEX/FGGE の一環として行なわれた白鳳丸の研究航海において、この Lyman- α 湿度計を使用する機会を得たので、測器の概要や熱電対乾湿計との比較観測の結果について述べる。さらに、この測器の乱流計測器としての使用の是非についても検討する。

2. 従来の湿度計について

従来から、渦相関法で水蒸気輸送量を算定するに際して多く用いられている測器は、細い素線を用いた熱電対

乾湿計である。この測器は高い信頼性を持っており、経年変化も少ないが、感部の熱容量を余り小さくできないため、水蒸気量の高周波数の変動を測定することはできない。Sano・Mitsuta (1968) によれば、直径 120 μm の銅-コンスタンタン熱電対を用いた場合、風速 5 m/sec、気温 20°C で約 1 Hz までの変動に应答する。海洋上の接水境界層で得られた、鉛直風速と水蒸気量 (比湿) のコスペクトルの例は少ないが、例えば Phelps・Pond (1971) の結果をみると、無次元周波数で 0.5 付近にピークがみられる。仮に、風速を 5 m/sec、測定高度を 10 m とすると、ピーク周波数は 0.25 Hz となり、上に述べた程度の応答特性があれば、渦相関法で水蒸気輸送量を算定するに際して、余り問題にならないものと考えられる。しかし、Taylor (1965) が指適しているように、乾湿球温度計の時定数を適当に選択しないと、得られた結果に誤差が生じる原因となる。この問題に関して塚本・光田 (1979) が、乾湿計の動特性を考慮して時々刻々の比湿のデータを補正する方法を試みているが、完全なものとはなっていない。このため、赤外線あるいは紫外線の水蒸気による吸収を用いた、応答速度の速い湿度計が、各国で開発されつつある。ソ連、日本、オーストラリアなどでは赤外線湿度計が開発され、接地境界層における湿度変動の測定に用いられている (Elagina, 1962; Chen・Mitsuta, 1967; Hyson・Hicks, 1975)。日本およびソ連の測器は、水蒸気によって吸収を受ける波長と吸収を受けない波長の両方を用いて、水蒸気量の変動値のみならず、絶対値も測定しようとしているものである。一方、オーストラリアの測器は、単一の波長を用いて変動値のみを測定するものである。いずれの場合も感部の寸法が大きく、光源と受光部あるいは反射部との距離は、ソ連の場合で 75 cm (現在は 20 cm)、日本の場合で 40 cm (現在は 35 cm)、オーストラリアの場合で

* Measurement of humidity fluctuations with a Lyman- α humidimeter.

** Tokunosuke Fujitani, 気象研究所物理気象研究部
—1980年4月22日受領—
—1980年7月15日受理—

20あるいは40 cm となっている。測定部の光学的距離が比較的長い場合、高周波数の変動を測定することはできず、日本の場合で10 Hz、オーストラリアの場合で6 Hz、ソ連の場合で数 Hz となっている。しかし、熱電対乾湿度計に比較して周波数特性は大幅に改善されている。赤外線湿度計を使用する場合に最も問題となる点は、赤外線を用いているため感部が背景光（太陽光）の影響を強く受けることである。これについては現在迄のところ解決方法は余りなく、日除などを設置しているのみである。

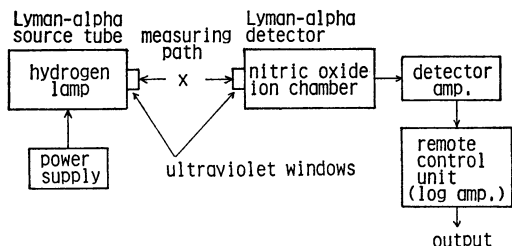
一方、Lyman- α 湿度計はアメリカにおいて開発され、当初は飛行機観測に用いられていたが、小型軽量であることから最近では乱流観測に使用されており、BOMEX や GATE においては船上でも使用されている。Lyman- α 湿度計の場合光学距離を数 cm 以下にすることができ、湿度変動の高周波数成分を測定することが可能である。また地上付近には太陽放射のうち近紫外線のみが到達するため、遠紫外線を用いている Lyman- α 湿度計の場合は、赤外線湿度計で問題となった背景光による誤差（雑音）を避けることができる。Lyman- α 湿度計はこのような長所を持っているが、光源に放電管を用いているために経年変化が生じる。従って、水蒸気量の絶対値の測定には多少の不安は残るが、これは絶対値を測定する測器を併用すれば解決できるものと考えられる。

3. Lyman- α 湿度計の原理

Lyman- α 湿度計は、水素を封入した放電管から射出された紫外線（Lyman- α 線、波長 1215.6 Å）の、水蒸気による吸収を利用して測定を行うものである。Lambert-Beer の法則によって、この場合の入射光と透過光の関係は次のように書ける。

$$I = I_0 e^{-k \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) x} \quad (1)$$

ここで、 I_0 は入射光の強度、 I は透過光の強度、 k は水蒸気の吸収係数、 ρ は水蒸気の密度、 ρ_0 は標準状態（normal state, 0°C, 1 気圧）での水蒸気の密度、 x は光路長である。しかし、この関係は入射光が単一波長の平行光線で、吸収が水蒸気だけによる場合に成立するものであり、実際には種々の補正が必要となる。例えば、入射光には水素分子による放射も含まれており、また必ずしも平行光線とはなっていない。吸収気体も水蒸気以外に O_2 , O_3 などがあるが、 O_2 の吸収係数は 0.3 cm^{-1}



第1図 Lyman- α 湿度計のブロックダイアグラム

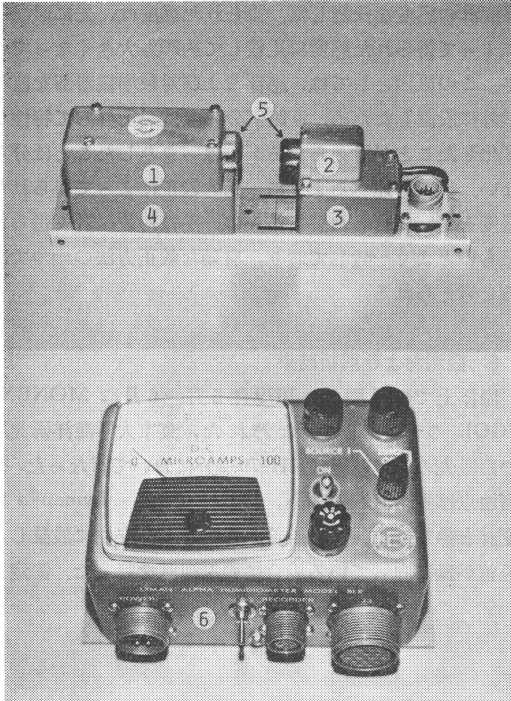
と水蒸気の吸収係数 387 cm^{-1} に比較して、非常に小さくなっている。 O_3 の吸収係数は 640 cm^{-1} と大きい、地上付近の O_3 の濃度は 50 ppb 以下であるから、今回のような地上付近の測定では問題とならない。しかし、個々の要因について補正を行うことには困難が伴うので、実際の測定に際しては基準となる湿度計と比較を行うことによって、測定系全体の感度を決定する必要がある。

4. Lyman- α 湿度計 (Model-BLR) の概要

今回の測定に用いた Lyman- α 湿度計は、Electromagnetic Research Corp., 製の Model-BLR である。湿度計のブロックダイアグラムを第1図に、外観を第2図に示す。光源には水素ガスを封入した放電管を使用しており、通常の使用状態（電源電流 0.5 mA 程度）では 200 時間以上の寿命があるとされている。検出器としては酸化窒素ガス (NO) を封入した電離箱を用いている。光源と検出器に使用されている窓 (window) は、透過率の点からはフッ化リチウム (LiF) が最良であるが、水に非常に溶けやすいという欠点を持っているため、今回のものではフッ化マグネシウム (MgF_2) が用いられている。測定路の長さは、検出器をスライドさせることによって調整できるようになっている。今回のように海洋上で水蒸気量が多い場合には、測定路の長さが短かくても吸収が大きく、十分な出力が得られる。また、(1) 式の関係のままでは、出力と水蒸気量の関係が指数関数で表現されるため、水蒸気量の多い部分で感度が低下し、データ処理にも不便であるため、Model-BLR では対数増幅器を用いて、出力と水蒸気量の関係が直線で表現されるようになっている。Model-BLR の仕様を第1表に示してある。

5. Lyman- α 湿度計の校正

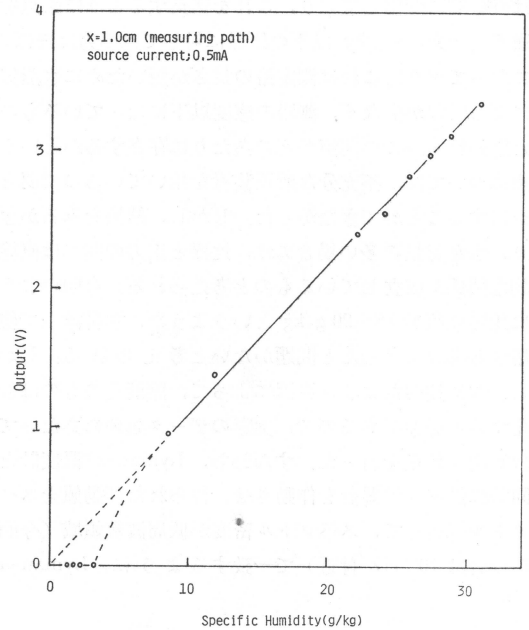
Lyman- α 湿度計を使用する場合、放電管の特性の変



第2図 Lyman- α 湿度計の外観(1: 光源(hydrogen lamp), 2: 検出器(nitric oxide ion chamber), 3: 増幅器, 4: 電源, 5: フッ化マグネシウムの窓, 6: リモートコントロールボックス (対数増幅器を含む))

第1表 Lyman- α 湿度計 (Model-BLR) の仕様

項 目	仕 様
所要電源	24~32 VDC, 0.1 A max
出力	0~5 V
対数増幅器	直線性; $\pm 1\%$ 使用温度; $-20 \sim +60^\circ\text{C}$ 温度特性; $0.1\%/^\circ\text{C}$ ($0 \sim 40^\circ\text{C}$) 周波数特性; 1 kHz
使用温度	感部; $-55 \sim +55^\circ\text{C}$ コントロールユニット; $-20 \sim +60^\circ\text{C}$
重 量	約 2 kg (ケーブルを含む)
大 き さ	感部; $4 \times 24 \times 8 \text{ cm}$ コントロールユニット; $12 \times 17 \times 9 \text{ cm}$



第3図 較正結果の一例

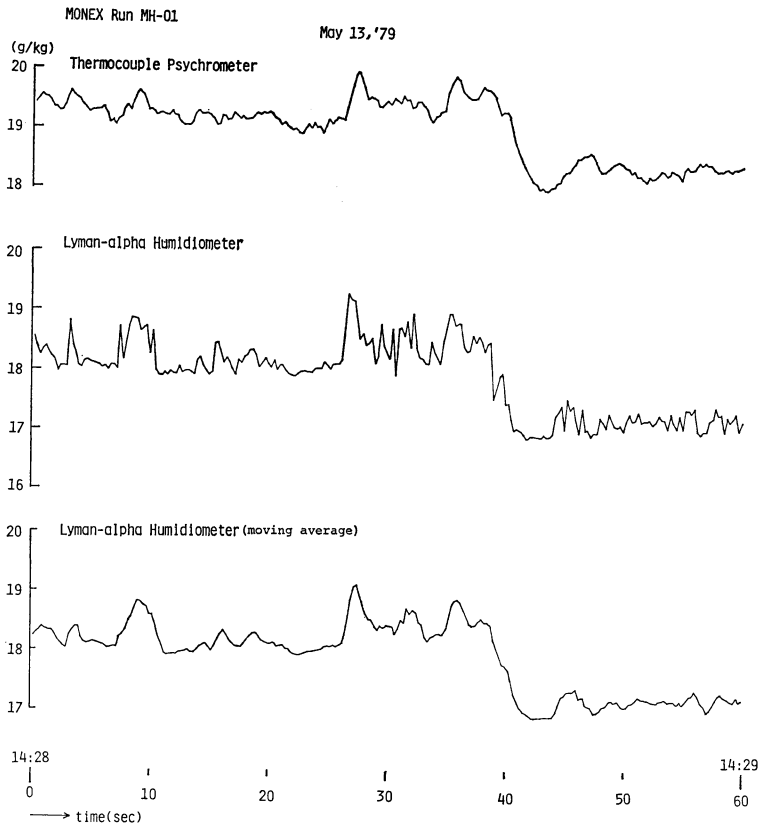
化や、回路部分を屋外に設置することによって生じる温度特性などによって、湿度計の出力にはドリフトが生じる可能性がある。このため、水蒸気量の絶対値を測定することには困難が伴う。今回の測定に際しても、水蒸気量の変動成分のみを測定することに目的を限定し、絶対値については、直径 $100 \mu\text{m}$ の銅-コンスタンタン熱電対を用いた乾湿計で測定している。しかし、Lyman- α 湿度計の感度や零点をチェックしておく必要があるので、現場での測定に先立って、簡単な方法で較正を行なった。較正には恒湿槽が使用できなかったため、恒温槽を用いて以下に示すような方法で行った。すなわち恒温槽内の温度を一定に保ちながら、槽内の空気をトラップを通してポンプで吸引することによって除湿し、槽内が完全に乾燥した時点で吸引を止め、トラップ内の水分を蒸発させることによって、槽内の水蒸気量を変化させた。槽内の水蒸気量の測定にはアスマン通風乾湿計を用いた。湿度計の零点については、測定路内にウレタンフォームに穴をあけたものを挿入し、これに高純度空気を流してチェックを行った。較正結果の一例を第3図に示してある。これは槽内の温度を 40°C に保った場合で、測定路の長さは 1 cm 、電源電流は 0.5 mA である。横軸は比湿 (g/kg)、縦軸は対数増幅器を通した湿度計の出力である。 9 g/kg 以上の比湿に対して湿度計の出力

は直線的に変化しており、これを延長するとほぼ原点を通る。一方、4 g/kg 以下の比湿に対しては出力はほぼ0になっており、これは測定路の長さが短いために水蒸気による吸収が少なく、測器の感度以下になっているものと思われる。この閾値がどのあたりに存在するかという点については、不十分な校正装置を用いているので明らかにすることができなかった。しかし、結果をみるかぎり、水蒸気量の多い場合には、比湿と出力の間には直線的な関係が成立しているものと考えられる。今回のように比湿の値が 18~20 g/kg というような、熱帯洋上で使用する場合には殆んど問題がないと考えられる。しかし、先に述べたような原因によって、感度そのものは変化する可能性があるため、実際のデータ処理にあたっては動的な校正を行った。すなわち、Lyman- α 湿度計と同時に熱電対乾湿計を作動させ、得られた変動値をスペクトル解析して、スペクトル密度が低周波数領域（今回の場合は 10^{-2} Hz 付近）で一致するように、Lyman- α

湿度計の感度を決定した。得られた感度は、先に恒温槽によって得られた感度に比較して約20%大きくなっている。この原因としては、感部および対数増幅器部を直接屋外に設置したため、回路部分の温度が上昇して特性が変化したことが考えられるが、はっきりしたことは分らない。後でも述べるように、動的校正によって得られた感度を用いて行った解析結果は、熱電対乾湿計で得られたものとよく一致しており、有効な校正方法の一つであると考えられる。

6. 観測および解析結果

海洋上での観測は、1979年5月~6月に MONEX/FGGE の一環として行なわれた、東京大学海洋研究所の白鳳丸の研究航海 (KH-79-2) において行なった。観測地点は熱帯海域の 2°N, 140°E である。Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計を船首から突き出た支柱に設置し、船首が風に向っている場合のみ観測を行った。測定高



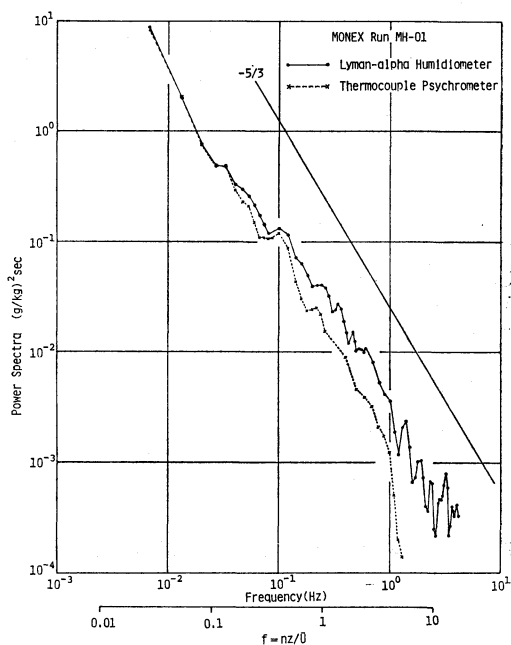
第4図 Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計で得られた記録の一例

度は海面上約 15 m である。観測に先立って、高純度乾燥空気による零点のチェックを行ったが、較正時と比較して全く変化がみられなかった。測器からの信号はデータレコーダによってアナログテープに記録し、研究室に持ち帰って解析した。データは 0.0125 秒あるいは 0.25 秒のサンプリングで A/D 変換し、このデータを計算機によって処理した。

今回解析したデータは、5 月 13 日の 14 時 20 分から 14 時 40 分の間に得られたものであり、期間中の気象状況は、前部マスト上(海面上約 23 m)で、平均風速は約 2.5 m/sec, 気温は 28.5°C, 比湿は 18.6 g/kg であった。第 4 図に Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計で得られた水蒸気変動の様子を、比較して示してある。図は解析したデータのうち、特に水蒸気変動の大きい部分について示したもので、0.25 秒毎のデータを 1 分間にわたって示してある。図の上段は、直径 100 μ m の銅-コンスタンタン熱電対乾湿計で得られた比湿の値である。比湿の計算に際しては、Tabata (1973) の簡便式を用いて飽和水蒸気圧の計算を行った。中段の図は、Lyman- α 湿度計で得られた比湿の変動を示している。両者を比較してみると、絶対値については多少異なっているが、変動の傾向はほぼ同じであり、Lyman- α 湿度計の方が高周波数の変動にまで追従していることが分る。Sano・Mitsuta (1968) の計算や、スペクトル解析の結果から、今回使用した熱電対乾湿計は、約 0.5 Hz 程度の変動にまで追従するものと考えられるので、Lyman- α 湿度計のデータに遮断周波数 0.5 Hz に相当する数値フィルター(移動平均)を施した。その結果を下段に示してある。移動平均操作を施された Lyman- α 湿度計の値は、上段に示した熱電対乾湿計で得られた値と殆んど同じ変化の様子を示しており、変動のピークの位置についても差は認められない。これら 3 種類のデータについて、10 分間ずつの標準偏差、相関係数を求めた結果を第 2 表に示してある。14:20~14:30 については、この部分のデータを用いて動的較正を行なった関係上、三者の標準偏差の値はよく一致している。14:30~14:40 については、三者の差は 10% 以内になっている。一方、相関係数はいずれの場合も 0.8~0.9 という高い値を示しており、特に移動平均操作を行なった方が高い値を示している。次に、いくつかの周波数帯に分割して行なった、スペクトル解析の結果を第 5 図に示してある。実線は Lyman- α 湿度計で、点線は熱電対乾湿計で得られた湿度変動のスペクトルである。0.2 Hz 付近までは両者のスペクトルの形は

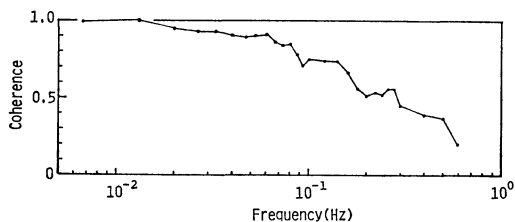
第 2 表 Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計の比較結果

	14:20~14:30		14:30~14:40	
	標準偏差	熱電対乾湿計に対する相関係数	標準偏差	熱電対乾湿計に対する相関係数
熱電対乾湿計	0.357		0.262	
Lyman- α 湿度計	0.360	0.87	0.291	0.79
Lyman- α 湿度計(移動平均操作)	0.356	0.89	0.280	0.84

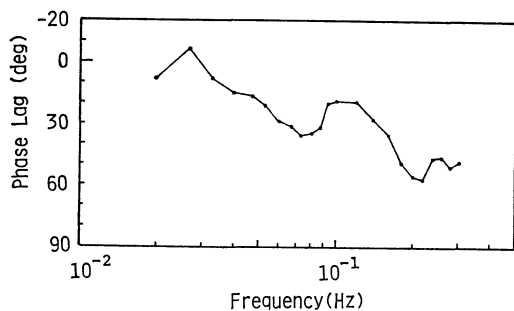
第 5 図 Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計で得られたスペクトルの一例

ほぼ同じであるが、これより高周波数側では、両者のスペクトル密度に差があり、Lyman- α 湿度計の方が大きくなっている。しかし、いずれもほぼ $-5/3$ 乗則に近い形でスペクトル密度が減少している。1 Hz 付近からは熱電対乾湿計で得られたスペクトル密度は急激に減少しており、これは測器の追従性の悪さを反映しているものと思われる。Lyman- α 湿度計で得られたスペクトルは、約 2 Hz まで $-5/3$ 乗則に従ってスペクトル密度が減少している。無次元周波数でみると、ほぼ 0.5 以上の範囲で $-5/3$ 乗則が成立している。海洋上の接水境界層中で、湿度変動を高周波数まで測定した例は少ないが、例えば BOMEX で得られた結果 (Phelps・Pond, 1971)

をみると、無次元周波数で1以上の範囲で $-5/3$ 乗則が成立している。第6図aには Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計で得られた湿度変動のコヒーレンスを示してある。0.1 Hz 付近まではコヒーレンスは0.8以上の高い値を示しているが、これより高い周波数では徐々に相関



第6図a Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計のコヒーレンス



第6図b Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計の位相差

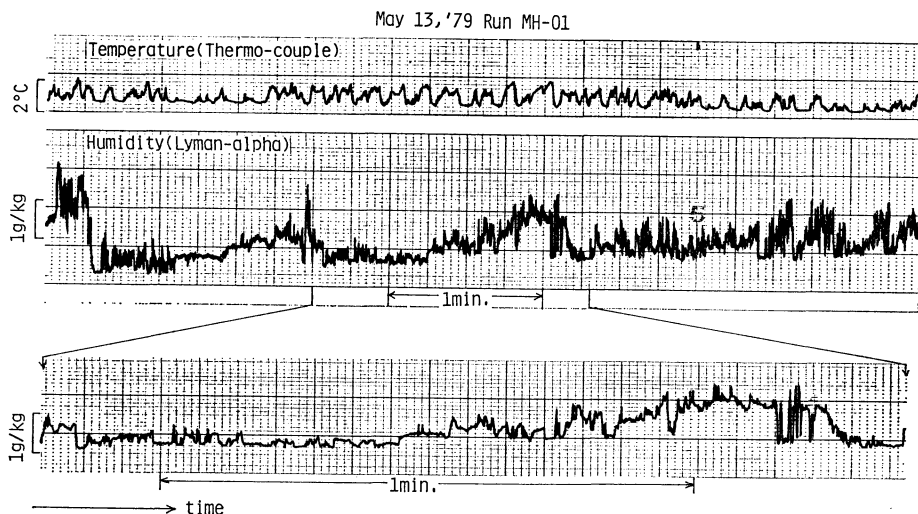
が悪くなり、0.5 Hz 付近では0.4程度になっている。第6図bには Lyman- α 湿度計と熱電対乾湿計で得られた湿度変動の位相差を示してある。0.1 Hz 付近までは、ほぼ 40° 以内になっている。第7図には、Lyman- α 湿度計によって得られた、海洋上の湿度変動の記録の一例を示してある。BOMEX などの観測で得られたものと同様の、湿度変動の ramp structure がみられる。Lyman- α 湿度計を用いることによって、このような湿度変動の微細な構造を観測することができた。

7. おわりに

最近各国で多く用いられている Lyman- α 湿度計を用いて、海洋上で湿度変動の測定を行ない、熱電対乾湿計と比較した。その結果、Lyman- α 湿度計は少なくとも1 Hz 程度の湿度変動にまで追従していることが明らかとなった。また、海洋上の接水境界層に特徴的な湿度変動も測定することができた。しかし、湿度の絶対値の測定には色々と問題があり、較正方法の改善や、他の準器との比較を行う必要があることが明らかとなった。今後、熱電対乾湿計などと併用して、湿度変動の高周波数成分の測定に用いれば有効であると考えられる。

謝辞

終りに、白鳳丸の研究航海に参加するに当って、色々と便宜を計って頂いた、東京大学海洋研究所の浅井富雄教授に深く感謝いたします。また、白鳳丸船上での観測に協力して頂いた京都大学防災研究所の塚本修氏、原稿



第7図 Lyman- α 湿度計で得られた、海洋上の湿度変動の記録の一例

をまとめるにあたって有益な御助言を頂いた気象研究所の花房龍男氏に感謝いたします。

文 献

- Chen, H.S. and Y. Mitsuta, 1967 : An infrared absorption hygrometer and its application to the study of water vapor flux near the ground, Special Contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ., 7, 83-94.
- Elagina, L.G., 1962 : Optical device for measuring the turbulent pulsations of humidity, Izv., Geophys. Ser., 8, 1100-1107.
- Hyson, P. and B.B. Hicks, 1975 : A single-beam infrared hygrometer for evaporation measurement, J. Appl. Met., 14, 301-307.
- Phelps, G.T. and S. Pond, 1971 : Spectra of temperature and humidity fluctuations and of the fluxes of moisture and sensible heat in the ma-

rine boundary layer, J. Atmos. Sci., 28, 918-928.

Randall, D.L., T.E. Hanley and O.K. Larison, 1965 : The NRL Lyman-alpha humidityrometer, Humidity and Moisture, 1, Reinhold Pub. Co., 444-454.

Sano, Y. and Y. Mitsuta, 1968 : Dynamic response of the hygrometer using thermocouple psychrometer, Special Contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ., 8, 61-70.

Tabata, S., 1973 : A simple but accurate formula for the saturation vapor pressure over liquid water, J. Appl. Met., 12, 1410-1411.

Taylor, R. J., 1965 : The response of a psychrometer to fluctuations in vapor pressure, Humidity and Moisture, 1, Reinhold Pub. Co., 76-82.

塚本 修, 光田 寧, 1979 : 赤外線湿度計と熱電対乾湿計の比較観測について, 京都大学防災研究所年報, 22, 429-436.

気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
第17回自然災害科学総合シンポジウム	昭和55年10月20日～21日		名古屋大学農学部
昭和55年日本気象学会秋季大会	昭和55年10月29日～31日	日本気象学会	京都教育文化センター
第6回リモートセンシングシンポジウム	昭和55年11月18日～19日	計測自動制御学会	国立教育会館
第6回風工学シンポジウム	昭和55年11月27日～28日		日本学術会議講堂
第18回粉体に関する討論会	昭和55年11月27日～29日		豊橋技術科学大学大講堂
気候変動シンポジウム	昭和55年12月8日		日本学術会議大会議室
第27回風に関するシンポジウム	昭和55年12月9日		気象研究所講堂
第3回MONEX研究会	昭和55年12月9日～10日	GARP委員会	東大海洋研究所
IAMAP Third Scientific Assembly	1981年8月17日～28日		西独ハンブルグ市