



Title	マイクロコンピュータを用いた雲や霧の含水量の連続測定システム
Author(s)	遠藤, 辰雄; 小西, 啓之; 若浜, 五郎
Citation	低温科学. 物理篇, 41, 117-128
Issue Date	1983-03-22
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18463
Type	bulletin (article)
File Information	41_p117-128.pdf



[Instructions for use](#)

マイクロコンピュータを用いた雲や霧の 含水量の連続測定システム*

遠藤辰雄

(低温科学研究所)

小西啓之

(北海道大学大学院 理学研究科)

若浜五郎

(低温科学研究所)

(昭和57年10月受理)

I. 緒 言

降雪をもたらす雲を量的に評価するためには、雲の内部の種々の物理量を直接測定することが必要である。それらの基礎的な要素として全含水量・雲水量・固体の含水量などが挙げられ、これらの正確な絶対値を測定することがまず第一に必要である。ここでは手はじめとして含水量を自動的に測定する方法を試験・開発することをとりあげ、はじめは実験室内の人工霧や野外の霧について試験し、やがて山岳の雲を対象とするものに発展させ、ついには航空機塔載型を製作することと、またこの種の測定器を正しく扱うための知識や技術を修得することを目的にして、この研究に着手した。これは、その予備的段階のものであるが二三の知見を得たので序報として報告する。

霧や雲の動態を論ずるとき、霧水量や雲水量の時空間変化を正確にとらえることが最も必要である。それにもかかわらず長時間の連続測定に耐え、しかもその値の信頼性の高いものは、いまだにないようである。個々の粒子をサンプルする方法として報告されているものに福富¹⁾や Kuroiwa²⁾の例がある。また最近では粒子の映像を光学的にとらえ、これを電気信号として処理する方法が進められている。これらは粒子の形状や粒径分布などの解析に役立つすぐれた方法である。しかし全含水量の精度については、サンプル断面積の小さいことなど今一つ問題がある。これを粒径分布の相対値を得ることに用い、一方で正確な全含水量を測定して、正しい粒径分布を見積る必要がある。ここでは、その点に着目して雲の含水量を得るために雲粒の加熱蒸散により求める方法をとってみたい。

この原理にもとづく研究として、これまでいくつかの試みがなされていたが、求める物理量は計算による二次的な量であるため、手間がかかり充分な量の試験が行なえない等が障となつて進展しなかつたようである。ここでは、それをマイクロコンピュータを導入することによ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2490号

って解決しようとするものである。

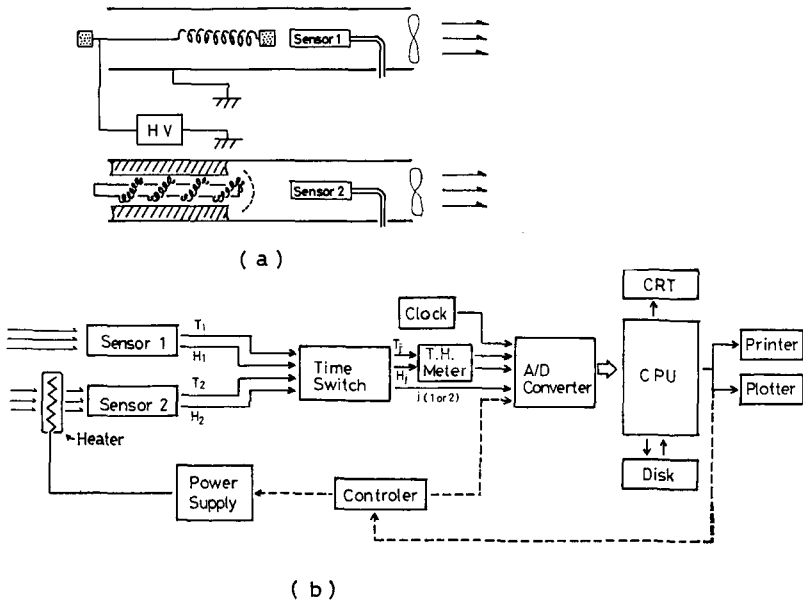
この原理による測定法は、すでに航空機で使用した実用例があり、 Ruskin³⁾ や Kyle⁴⁾ は湿度センサとしてレスポンスのよいライマンアルファ湿度計を用いている。またさらにサンプリング効率や加熱部を改良した Coulman ら⁵⁾ による全含水量の雲内での更正例も報告されている。これらは、いずれも Johnson-Williams プループと称して実用化されている熱線式雲粒測定器を基準にして比較されている。この方法の開発や試験に関する研究として Spyers-Duran⁶⁾ や King ら⁷⁾ および Merceret ら⁸⁾ による報告があり、粒径の小さいものの捕捉について問題はあるとしても、現在まで、かなり改良され、一応の実用性が確立されたものといえよう。

II. 方 法

霧や雲などの液相の含水量 (LWC) の測定に適用した原理は、次のとおりである。微水滴を含む空気を取りこみ、これを加熱し、水滴が蒸発してその空気の湿度が未飽和になるまで昇温し、その相対湿度と気温を測定して加熱前の元来の気温と相対湿度と比べて液相のみの含水量を求めることができる。

加熱前と加熱後の気温と相対湿度の値を夫々 (T_1, H_1) および (T_2, H_2) とすると、全含水量 (TWC) W_T と霧水量 (LWC) W_L は、夫々

$$W_T = \frac{M}{R} \frac{e_s(T_2) \cdot H_2}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \tag{1}$$



第1図 LWC TWC 測定システム

- (a) センサー部 センサー1は加熱前、センサー2は加熱後の気温、湿度を夫々測定する。
- (b) 測定システムブロックダイアグラム センサー1, 2で得られた測定値をA/Dコンバータで変換し、時刻ともにコンピュータに入力する。
破線部分は ヒーター電圧を自動的にコントロールするためのものである。

$$W_L = \frac{M}{R} \left(\frac{e_s(T_2) \cdot H_2}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} - \frac{e_s(T_1) \cdot H_1}{T_1} \right) \quad (2)$$

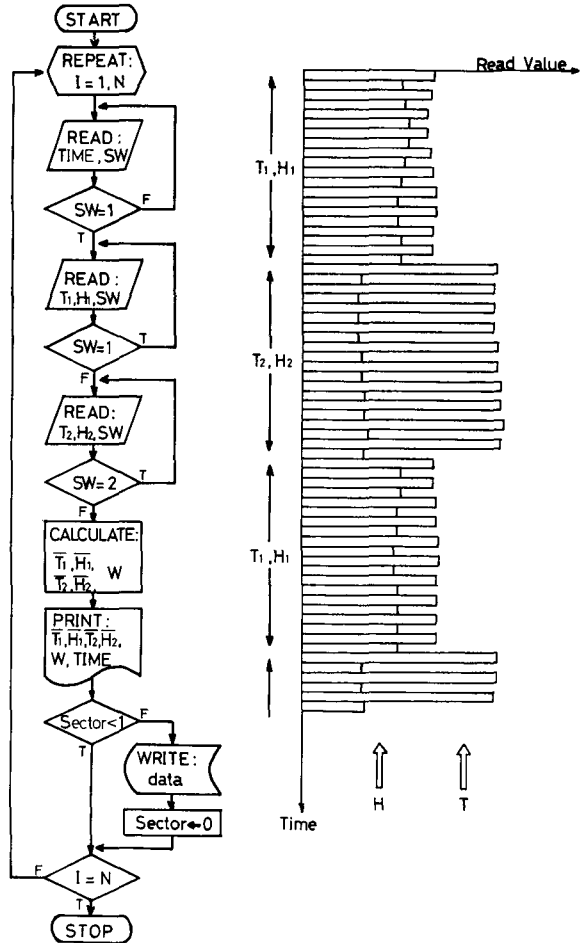
与えられる。ここで、 e は水蒸気圧、 $e_s(T)$ は温度 T における飽和水蒸気量である。 M は水の分子量、 R は気体定数であり、それらの間には $H \equiv e/e_s(T)$ および気体の状態方程式の $e = W_T \frac{R}{M} T$ の関係がある。

試験的につくった本システムは種々の問題点を見つけたす目的で意識的に不完全の要素の多いもので構成されている。第1図はこの測定システムを示すもので図の(a)と(b)は夫々測定部の原理図とそれを含むデータ処理システム全体のブロックダイアグラムである。二個のセンサーは(a)で示すように加熱前と加熱後に相当する管にとりつけられ、夫々並列におかれた。加熱前のところは、霧粒がくるのでこれが直接センサー1に付いてぬれるおそれがある。それをふせぐため、吉田ら⁹⁾による実験の原理にしたがって図のように高圧8000Vを金属細線に与えそこからの放電により発生するイオンを電場により霧粒に附着させ、その霧粒を接地された壁へおいやる方法をとった。これによって霧の周囲の湿度を測ることをねらった。

センサー2では加熱後の温度・湿度をはかるもので加熱部は300Wニクロム線を非吸水性のセラミックの二重管の内管に、らせん状に巻き、それ全体を石綿でささえた。そこで霧の蒸発した空気をよく混合するために金網のフィルターもとりつけられている。

温度と湿度のセンサーはCHINOのHN-P1を用いたが温度素子はポリマー薄膜フィルムの吸湿を電気容量変化でとらえている。応答時間は、90%変化に対し約1分である。温度素子は白金測温抵抗(100Ω)からなり、その外形は、第6図右上に示されるとおりである。

第1図(b)はシステム全体を示すもので、温度・湿度のメーターは1台にして、センサーを二つ使いそれを交互にタイムスイッチにて、約10秒毎に切りかえた。それと切換信号と時刻をA/D変換器を通してCPU本体へ入



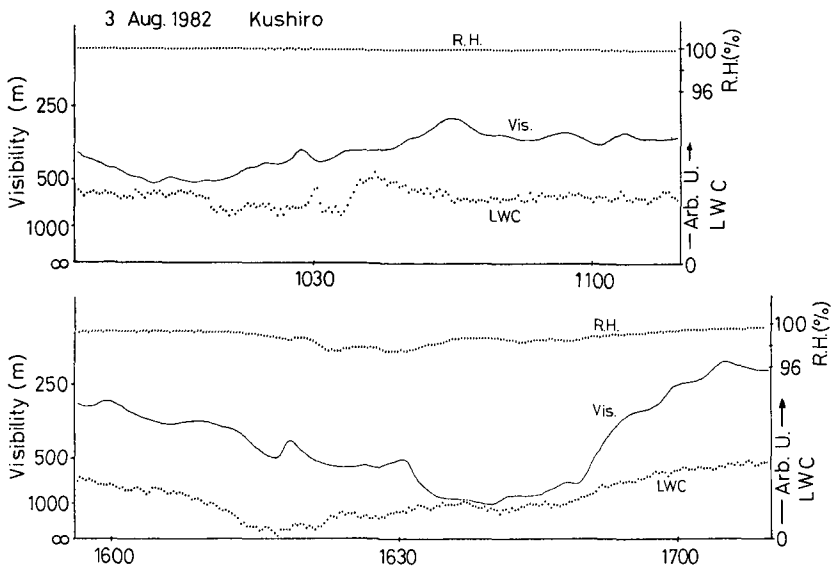
第2図 測定のプログラムとそのフローチャート
センサー1とセンサー2を1秒間隔でそれぞれ10秒間測定し、その平均値よりLWCを求め、プリンターに出力する。

力し前述の計算ののち、ディスクで記憶しながら、一方でプリンターと CRT でモニターした。その計算値は一定時間毎にプロッタで書かせることもできる。図の破線は、測定された気温の変化からフィードバックさせて、パルスモータにてヒータ電圧を自動制御し、 T_2 を一定となるようにして H_2 を求めるときに用いた。

第2図は、読みとりと計算および出力のプログラムを示すフローチャートであり、センサー1と2を交互に10秒間測定し、その平均値よりLWCを求めプリンターやディスクに出力している。センサーを切りかえるときの T と H の値は変動するので、その前後の値は使用しないようにしてある。また、データを1セクタ分蓄えた後にディスクに出力するようになっている。図の右は入力される T, H の実際の変化を示している。用いたマイクロコンピュータはABC-24である。これらを海霧の観測に用いて霧水量を求め、また室内試験では全含水量のみを求めた。

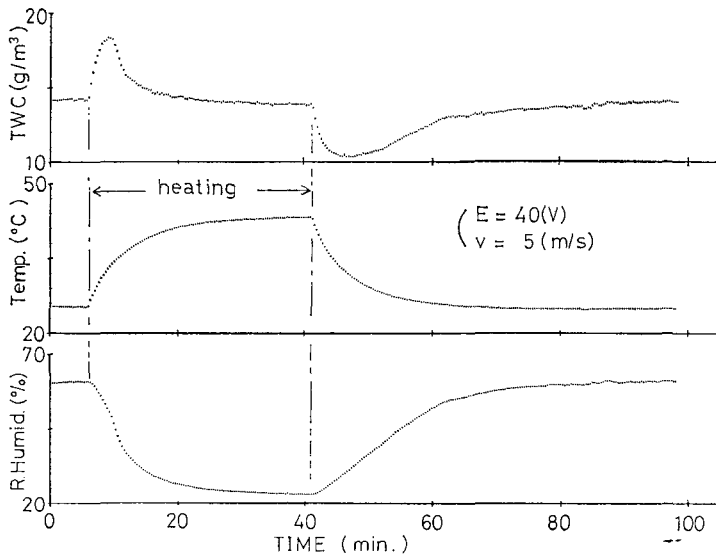
III. 結 果

第3図は、このシステムを試験的に野外で用いた例で、1982年7月から8月にかけて、北海道東部の釧路における海霧の観測を行なったときのものである。図の点線が霧水量(LWC)と相対湿度(R.H.)である。実線は50mはなれたところで観測した視程計の値であるが、細かい変動は示されていない。点線の点は約20秒毎のもので1982年8月3日10時30分ごろにLWCが大きく変動しているのがみられる。ここでは、これを3分ずらすと視程計の細かい傾向と合うことが多い。この時の値も相対湿度は100%まで至らず、センサーがぬれてしまっていないことがわかる。16時30分から16時50分までの間では、ほとんど晴れたようにみえるが視程計には700~800mとなっており、そのときの相対湿度は98%で、センサーはぬれることなくときどきわずかに変動しているのが見られる。これは静電式霧粒除去が効いていること



第3図 釧路の海霧における試験

を示している。これで霧中の湿度測定が可能で、この霧はいわゆる蒸発過程にある乾霧であったことを示している。しかし霧水量については、大きくみれば視程と同じ傾向がみられるが、細かくみると異なっているところが多い。また、加熱温度を変えると霧水量は急変し、ゼロ値で一定にならず変動が大きいこともわかった。そこで実験室でブランクテストを行なうためセンサー 2 の値のみから全含水量 (TWC) を計算して加熱部の特性を調べることにした。



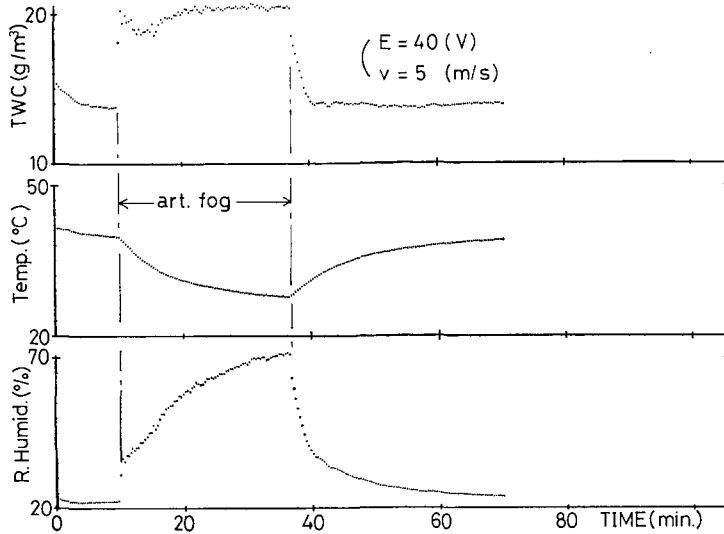
第4図 ブランクテスト

LWC 測定部のヒーターを ON, OFF にしたときの TWC, 温度, 湿度の時間変化 (ヒーター電圧 40 V, 管内風速: 5 m/s)

第4図はブランクテストとして湿度 60%, 気温 25°C において, 300 W (100 V) のヒーターに 40 V を与え, 管内風速を 5 m/s で加熱をはじめ 33 分後にヒーターの電源を切ったときの気温 T_2 , 湿度 H_2 と TWC (g/m^3) の変化を示したものである。充分時間がたつと加熱中にも元々の TWC にもどることがわかるが, 加熱開始と終了の直後に TWC の異常なたかまりや落ちこみが約 20 分ほど見られる。そのときの温度の曲線は指数関数的であるのに比べ, 湿度変化の方では昇温時には S 字型に変化し, また降温時にはやや直線性的の変化がみられる。 T_2 と H_2 のセンサーの時間的特性の差が現れている。

第5図は加熱中に超音波加湿器により人工的に発生させた霧を与えた例であり, TWC の立ち上がりは悪くないが, 霧の供給を止めても時定数 30~100 秒程の遅れがみられる。この第4図の昇温時と降温時の変動の原因を調べるため, センサー 2 の周囲の温度分布の変化を調べたのが第6図である。図の左側は加熱開始して昇温中のもの, 右側は加熱をやめて降温中のものである。右上には測定したセンサー 2 から 2 cm 風上の水平位置を示してある。昇温中は管の中心と壁側で最大で 0.6°C 低い温度が, 降温中は逆に, 最大で 0.2°C 高い温度が夫々示された。

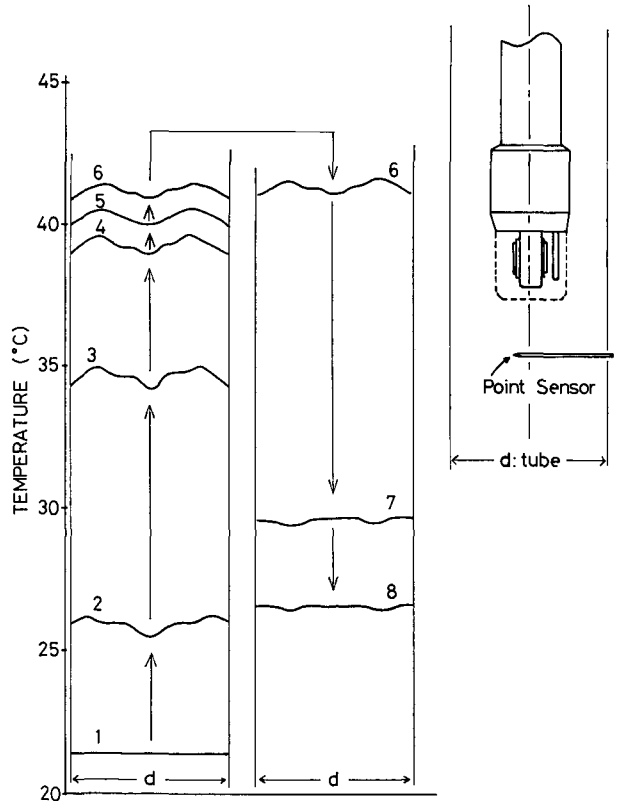
この結果を考えて, センサーの前の壁に断熱材を入れ, また, センサーのキャップをはず



第5図 人工霧を入れたときの全含水量，温度，湿度の時間変化

して，そこへ風がしぼられるようにした。この効果と T と H の計算する組み合わせを時定数の差を短くする方へずらしてみた効果の両方を比較したのが第7図である。(1) は改造前，(2) は改造後のものであるが，測定した気温を上から順に 0, 10, 20, 30 秒おくらせて，湿度の値と夫々対応させて計算した TWC の値である。図より加熱開始時のみかけの変動がこのずらしの効果により，小さくなるのがわかる。また，センサー近くの温度差をなくして時定数の差を小さくする効果も (1) と (2) を比べることからみとめられる。

さらにヒーター電圧とセンサー周辺の風速に対する測定部の特性を調べた。第8図は加熱して平衡におちついたときの TWC と加熱前の TWC の差 a についてその符号を調べたもので，上から順に $a < 0$, $a = 0$, $a > 0$ の例である。また図の h は加熱時間を示す。これらの関係をまと

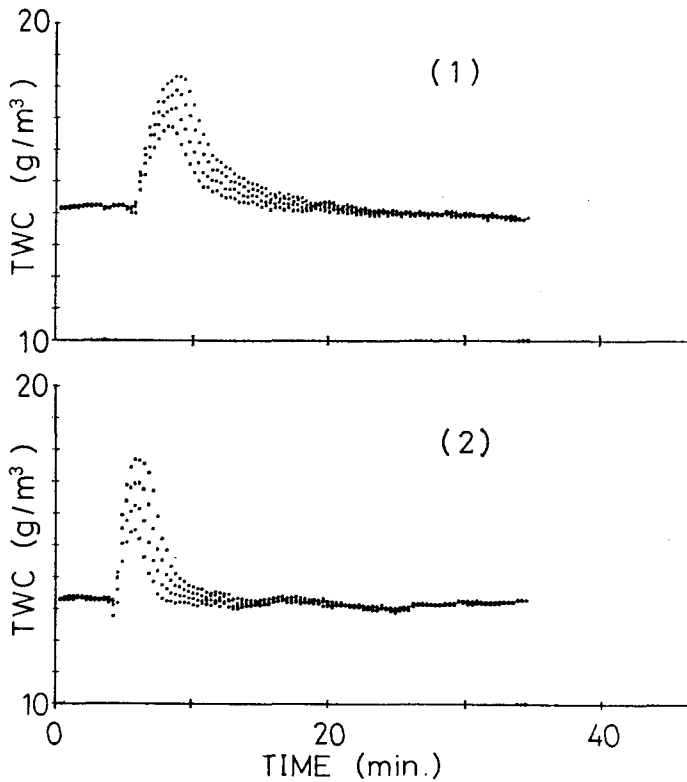


第6図 管内の温度分布の時間変化

左側： ヒーター ON の後の昇温時

右側： OFF の後の降温時

右上はそのセンサーの前 2 cm での温度の測定の位置を示す



第7図 ヒーター ON 直後の TWC の異常値

(1) 改造前 (2) 改造後 それぞれ、温度の測定時刻を湿度の測定時刻より、上から順に0, 10, 20, 30秒遅らせて計算している

めたものが第1表である。

第9図は人工霧を与えたときの値でほぼ同質、同量の霧を発生しているのここで

第1表 ブランクテストにおける測定部の特性

E (V)	V (m/s)	2.5	5	8.5~9
20		$a > 0$	$a > 0$	—
40		$a = 0$	$a < 0$	$a = 0$
60		—	$a > 0$	$a < 0$
80		—	—	$a > 0$

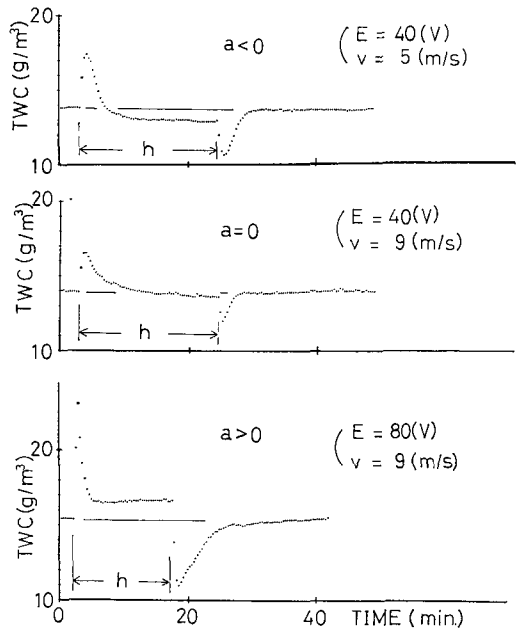
$a =$ 加熱中の TWC - その前後の非加熱時の TWC

第8図 ブランクテスト

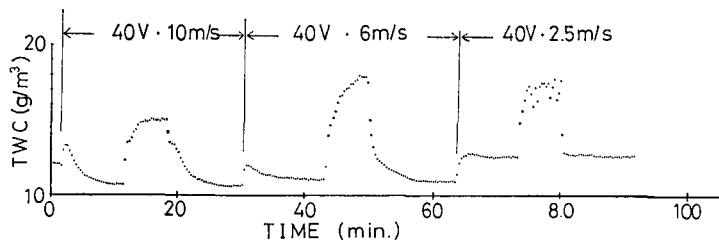
ヒーター電圧と管内風速を変えたときの TWC の時間変化

$a =$ (加熱中に示す TWC) - (非加熱中に示す TWC)

h : 加熱時間



は、通風の効果のみを比較することのできる典型例が示されている。10 m/s のときの値は他に比べて小さくなる傾向がある。しかし、さらに遅くなると値は変わらないが、ばらつきが大きくなる傾向がみられる。これらをまとめたのが第2表で TWC の平均値と変動を示す。

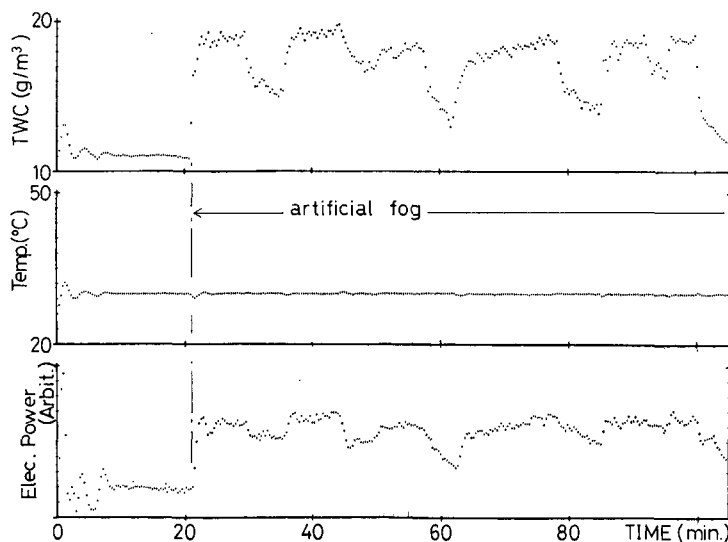


第9図 人工霧を与えたときの全含水量 (TWC) のヒーター電圧と管内風速に対する関係

第2表 人工霧を用いたときの測定部の特性

E (V)	V (m/s)			
		2.5	5	8.5~9
20		13.4 (2.5)	14.7 (1.4)	13.9 (0.4)
40		16.9 (2.0)	17.0 (2.0)	14.6 (0.9)
60		—	16.9 (0.5)	12.8 (0.9)
80		—	—	13.6 (0.8)

TWC (g/m³) の平均値 (変動値)



第10図 測定中の気温が一定になるようにしたときの TWC, 加熱温度, ヒーター電力の時間変化

第10図は第1図の破線で示すフィードバック機構により測定したものである。このときの気温が一定に保持されている様子は図の中段に示されるとおりである。人工霧は一定の濃度で与えられているが途中でその強さを分流させて落としてみた。この場合の TWC は温度が一

定という条件の下で湿度のみから求められている。ところでこのとき与えたヒーター電圧の二乗の値を示したのが図の下段のものである。このタテ軸は供給電力に当たり、その変化は上段に求められた TWC の変化と極めてよい一致を示していることがわかる。

IV. 考 察

この実験では相对湿度を示すように設計されたセンサーを使用した。その応答時間は平均 60 秒ほどであり、また、ヒステリシスがあり、さらに湿度の増加時と減少時における応答が夫々異なるものである。さらに感度が温度に依存することや、低湿度や 98% 以上での精度が悪いなど、この種のセンサーに一般的にみられる特徴のあるものを用いた。この研究の目的のための測器をつくるためのみならず、Ruskin³⁾ や Kyle⁴⁾ のようにレスポンスのよい湿度計を用いると好都合であることはいうまでもないが、それでは測定原理のもつ種々の特性を理解するには不都合である。

第 3 図の霧水量 (LWC) の値はピークのと看で約 $1.2 \text{ (g/m}^3\text{)}$ に及んでいることになっていたが、LWC の値はゼロの値が安定せず、しかもセンサー 1, 2 の器差に依存するところが大きいので今のところ補正を進める余地が残っているため、単位は任意とした。この計算方法と測定方法による限り、霧のないときの値はゼロをよぎる不安定なものになるので、霧の開始時や終了時を明確に記録するためには、 H_1 を用いず、 T_1 の飽和蒸気量で切の方が良いと考えられる。この問題については、新たに試験法を計画する必要がある。したがって、ここで主に扱う加熱部の特性に関する試験では、センサー 1, 2 の差をとらずにセンサー 2 のみから求められる全含水量 (TWC) で計算を行なった。

第 4 図ではブランクテストを行ったものが示されている。温度と相对湿度は互に保存の関係にあり、これらから計算される全含水量は一定でなければならない。ところが図のようにヒーターの ON, OFF の直後に TWC の異常値が算出されている。これは温度と湿度のセンサーの時定数が夫々約 10 秒と約 60 秒であるため、真値がこのように一方向へどんどん移動する過渡的な現象では、双方のずれは真値が一定になるまで常に残ったままつづくと考えられる。さらに、この場合の昇温と降温とでは、一方は電力による加熱により、他方は通風による冷却により、質的に異なる原因に依っているので、夫々管全体の温度変化にあたる緩和時間が異なっている。また図の下段にみられる湿度の記録では、この湿度素子の応答が時間的に変化し、はじめ遅いが、やがて速くなるような変曲点をもつものになっていることがわかり、これが異常値の原因の一つになっていると考えられる。この性質は第 5 図の加熱されて温度が一定になっているところへ一定の濃度の霧が与えられたときにもみられている。初期の温度変化の激しいところの TWC は、終りの温度の安定したときに比べ変動しているのはこのためと説明される。

加熱後の未飽和空気の温度と相对湿度との間には保存の関係があり、それは分子運動の規模で成り立つと考えられるので、加熱部以後の保温は特に行なわなかった。ところが管内気流で生ずるセンサーの周囲の定常的な温度差はセンサーの大きさによる位置の差に有意に効くことが問題になり、その部分の改良が行われ、その効果はみとめられた。

温度と湿度のセンサーの時定数の差を計算上補正することは、変化方向が一様なときのみ可能である。しかし一般的には誤差の原因になるものと考えられる。第7図ではその効果も示されると同時に図の(2)のように30秒もずらして計算すると下にはずれる点が出てくるなどの欠点もみられる。

さきのブランクテストでは、この他にヒータの発熱量と通風速度を種々に変えて行ってみた。第8図に示される a の変化傾向をまとめた第1表により次のことがわかる。風速が低いときにヒーター電圧を高くすると、温度は高い値で平衡になる。したがってそこでの湿度 H_2 はかなり低くなり、そこでの湿度センサーは追従しなくなり、みかけ上、高い値を読むことになる。したがって $a > 0$ となると考えられる。一方ヒーター電圧が低く風速の速いところでも、 $a > 0$ となる性質がある。したがって、この表にみるように $a \neq 0$ であるか、わずかながら $a < 0$ であるところに最適使用条件があるとみることができる。

第9図及び第2表の霧を与える試験では風速が速すぎるとTWCが低い値となってしまうことが示されている。これは完全に霧が蒸発しきらないで小さい霧粒がセンサーにも触れずに通過するためのロスと考えられる。このことはヒーター電圧の低い場合についても同様に考えられる。また風速の遅い2.5 m/sのものでは値にばらつきが多いのが目につく。これは混合が充分でないことと、センサーへの気流の接近にむらが生ずることなどが原因として考えられる。この装置とセンサーに関する限り以上の結果から、ヒーター電圧40 V、通風速度5 m/sの周辺で使用することが安定して測定できる条件ということができる。

温度と湿度のセンサーの時定数の差が計算誤差を与えるということを解決するためには、ヒーターを調節して温度を一定とし、湿度計の精度の温度依存性を含まない単純化されたTWCの値を求めることが考えられる。この調節は第1図の(b)の破線で示されるネガティブフィードバックを行なうことで、ほぼ完全に実行することができた。第10図はその結果である。一定の濃度の霧を与える途中で、その量を半減することをくりかえして比較してみた。中段の温度の変化では、はじめに少し大きな変化がみられるが、その後はほとんど一定になっているのがみとめられる。ここで求められた上段のTWCは温度依存性を含まない湿度の値に従っているので時定数は約60秒ほどのはずである。しかしどの場合でも霧の急減したとき、切れが悪く、おくれとなってみとめられる。これはサンプラーの空気とり入れ口の外側に付着した霧が乾かずに前の影響が残っていることが原因であると考えられる。

ところで、この温度一定の条件では、ニクロム線の温度もほぼ一定になっているはずであるから、その抵抗値もまた一定である。従ってそのとき温度一定にするため調節するヒーター電圧の変化分の二乗は発生する熱量の変化分に当り、これがすべて霧を蒸発させるために使われるものと一致すると考えられるので、結局、ヒーター電圧の変化分の二乗から求められる電力の変化分がTWCに比例することになる。図の上段と下段を比べると両者の変化の様子が酷似しているのが注目される。この原理を使えば湿度センサーは不要となり、湿度センサーがもつ種々の特性の問題から開放されることになる。これを実用化するためには外気温の変化を別の温度センサーでモニターし、その値をTWCの計算の中へ入れていく必要がある。さらに加熱部全体の熱容量をできるだけ小さくし、その直後で温度を計ることにより電力とTWCの変

換係数を安定させる等の工夫が必要である。この原理は Johnson-Williams の方式と似ているが、その発想と経過が異なるため、固有の特徴をもたせることができる。特に粒径の小さいものの捕捉については、この方法では、かなり改善されると考えられるので、新しい方式として、その効果が十分に期待される。

V. 結 論

従来やっかいとされて来た霧水量や雲水量の連続自動測定の方法が、一定の濃度の霧を持続して発生させることのできる超音波霧発生器を基準器として用い、その二次的物理量として求めなければならない計算の膨大な量をマイクロコンピュータで処理し、さらにその計測制御も行うことにより、この試験が容易に進められた。その結果以下のことがわかった。

(1) 霧水量計としてマイクロコンピュータを用いてリアルタイムの測定のできるシステムをつくることができ、それに伴ういくつかの問題点もみつかった。

(2) 温度と湿度のセンサーの時定数の差は計算される含水量の値をみかけ上乱す原因となることがわかった。

(3) 断熱はセンサーの前の一部分においてのみ必要であることがわかり、その点の改良も行った。

(4) この装置における安定使用条件としてヒーター電圧や通風速度などが定められた。

(5) ネガティブフィードバックにより霧がサンプルされても、温度を一定にすることができ、温度依存性を除いた湿度値のみから含水量を計算することが出来た。

(6) またこのときの消費電力の変化分から全含水量や霧水量が算出されることがわかった。これによると一般に問題の多い湿度計を一切使用しないで含水量を求めることができると考えられる。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、北海道大学名誉教授孫野長治先生ならびに同理学部菊地勝弘教授の方々から、夫々多大な御指導や御援助を誼った。そのことに対し著者らは心からの謝意を表す。またこの研究は文部省科学研究費補助金、一般研究(B)、課題番号 56460036 (代表者：遠藤辰雄) によって行なわれた。

文 献

- 1) 福富孝治・田畑忠司 1948 自記霧水量計の試作(第2報). 低温科学, **4**, 43-50.
- 2) Kuroiwa, D. and Kinoshita, S. 1953 A balloon fog meter and the vertical distribution of liquid water contents in lower atmosphere. Studies on Fog (T. Hori ed.), 187-204.
- 3) Ruskin, R. E. 1967 Measurements of water-ice budget changes at -5°C in AgI-seeded tropical cumulus. *J. Appl. Meteor.*, **6**, 72-81.
- 4) Kyle, T. G. 1975 The measurement of water content by an evaporator. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 327-332.
- 5) Coulman, C. E. and Parker, M. A. 1982 On the calibration and performance of an instrument for measuring total water mixing ratio in cloud. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 695-702.
- 6) Spyers-Duran, P. A. 1968 Comparative measurements of cloud liquid water using heated

- wire and cloud replicating devices. *J. Appl. Meteor.*, **7**, 674-678.
- 7) King, W. D., Parkin, D. A. and Handsworth, R. J. 1978 A hot-wire liquid water device having fully calculable response characteristics. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 1809-1813.
- 8) Merceret, F. J. and Schricker, T. L. 1975 A new hot-wire liquid cloud water meter. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 319-326.
- 9) 吉田順吾・高野玉吉・黒岩大助 1947 熱式及び電気式霧消散法の予備的研究. (中谷吉郎編: 千島, 北海道の霧の研究) 日本気象協会 (1981年復刻印刷), 東京 88-97.

Summary

Conventional methods will entail too much labor and time to be practical for continuous measurements of liquid water content in fog and clouds. The purpose of this investigation is to design and test a practical method based on the coupling of temperature and humidity sensors to a microcomputer, the principle being that they are obtainable from a difference between the vapor density of subsaturated air, which is produced from sampled air by means of heating and evaporating, and the saturation vapor density at the initial air temperature.

To eliminate a problem arising from a difference in response time of individual elements of the sensing component several tests were carried out in the laboratory by calculating the total water content instead of the liquid water content.

Furthermore, a field test was conducted for natural sea fog at a site on the Pacific Ocean side of the eastern Hokkaido.

Tested finally in the laboratory was a conventional method which allowed to avoid the sensor problem in deducing a liquid water content from a humidity value alone under constant temperature, using the negative feedback coupled to the microcomputer.