

湿球温度計に付着する塩分の影響*

佐 橋 謙**

要 旨

海岸あるいは船舶上などで、乾湿計を用いて濃度測定を行なう場合、湿球面上に塩分が付着し、湿球を湿らせているのが、いわゆる純水ではなく何らかの溶液になっている可能性がある。この時の誤差の定量的な評価を試み、上述のような環境での測定時における、ガーゼ交換の頻度の基準を与えようとした。

海岸に設置した湿球面に付着した塩分濃度を種々の期間について実測し、設置期間と付着する塩分濃度との関係を実験的に定め、さらに、種々の濃度を持つ溶液を湿らせた時の、水蒸気圧評価に及ぼす影響も実験的に検討し、ガーゼ交換の基準を示した。たとえば、絶対誤差を 0.2 mb 以下におさえようとするれば、1 週間毎の交換が必要であるし、それが 1 mb 以下でよければ、5 週間は交換しなくて良いという結果が得られた。

1. はじめに

最近、大気境界層特に海面と空気との間の相互作用が論じられる機会が多くなり、それに伴い、海洋上での境界層観測が、今まで以上に充実して実施され、その観測の精度の向上も、従来以上に要求されるようになってきた。

このような観測で測定される気象要素は数多いが、その中でも空気中の水蒸気量は、海面から大気中への潜熱輸送を考える時に、第一義的に重要な地位を占める量であり、その測定にはできる限りの精度を保つような努力が要求される。

水蒸気量の測定には、最近種々の方式が開発され（たとえば文字・水間、1976）、それぞれ特色を持っている。いっぽう、いわゆる乾湿計は、その歴史の古さにもかかわらず、現在でもある意味では標準的なものとして使用され、平均値の測定にも、また変動量の測定にも巾広く用いられている（たとえば佐橋他、1977）。

乾湿計は周知の通り、湿球温度計を使用する。したがって、特に上述のような海洋上の、または海面近くでの観測においては、湿球部の、湿ったガーゼの上に、吸湿

性の海塩核などが付着することが当然考えられる。つまり、湿球をぬらしているのは、もはや純水ではなく、ある種の溶液になっているということであり、しかも、この溶液はどんどん濃縮されてくると考えねばならない。なぜなら、湿球面から純水だけが蒸発していき、湿球をぬらしている水の中にとけ込む塩分だけは、つぎつぎと際限なく付着し、あとに残ると考えられるからである。

いっぽう、純水に対する飽和蒸気圧と、溶液に対するそれとが違うのであるから、いわゆるスプルングの公式によって水蒸気量を算出する限り、一定限度の誤差を生じる筈である。

このようなことについて、どの程度の誤差を含むかについての論議は殆どなされていない。わずかに、中村玉樹（1918）が湿球に供給する水が不純な場合について若干の実験をしているが、定量的な論議はしていないし、「地上気象観測法」（1971）にも、「……塩風の吹く海岸地帯などではたびたび（ガーゼを）取り替える必要がある」というどちらかといえばあいまいな表現をとっている。

このような問題を解決するため、筆者は実験的な考察を行ない、湿球のガーゼ交換頻度について一定の基準を得ることができたので、以下に報告する。

2. 理論的な誤差の評価

乾湿計を使用して、空気中の水蒸気圧 e_p を求めるには、良く知られているように、次のようないわゆるスプ

* An effect of the salts deposited on a wet-bulb thermometer.

** K. Sahashi, 岡山大学教育学部

—1977年9月12日受領—

—1977年12月1日受理—

ルングの公式が使用される。

$$e_p = E_p (\theta_w) - \frac{1}{2} A (\theta_d - \theta_w) \dots\dots(1)$$

ここで、 θ_d 、 θ_w はそれぞれ乾球温度と湿球温度、 E_p (θ_w) は純水の温度が θ_w である時のその表面の飽和蒸気圧、 A は乾湿計常数と呼ばれているものである。

ここで、もし湿球を湿らせる水が純水でなく、ある種の溶液になった時、その表面の飽和蒸気圧は当然純水の時のそれとは違はずだから、湿球温度も違ってくる筈である。その湿球温度を θ_{ws} としよう。この時、その湿球温度に対するその溶液の飽和水蒸気圧を $E_s (\theta_{ws})$ とすると、(1) 式に対応するものとして、次のような表現で、その時の空気中の水蒸気圧 e_s が求められることは、乾湿計公式導出の過程から考えて、容易に推定できる。

$$e_s = E_s (\theta_{ws}) - \frac{1}{2} A (\theta_d - \theta_{ws}) \dots\dots(2)$$

ここで、 A の値が多少変わることは考えられるが、それを無視すれば、湿球が塩分などによって汚染された場合にでも、(2) 式によって空気中の水蒸気量を求められることになる。さらに、(2) 式の右辺第1項は、もし溶液が海水のようなものであることが判っていれば、良く知られた次の式 (Sverdrup, 1952) によって、塩分濃度が判れば求めることができる。

$$E_s (\theta) = (1 - kS) E_p (\theta) \dots\dots(3)$$

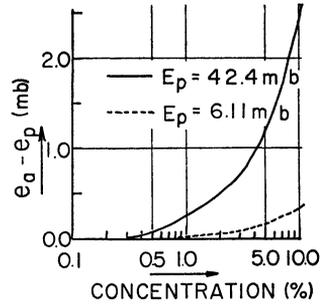
ここで、 k は常数 (5.37×10^{-4})、 S は salinity (‰) である。

したがって、もし、(2) 式によって水蒸気圧を測定しようとするれば、湿球温度の測定と同時に、その時の湿球面の溶液中の塩分濃度の測定も行なう必要が起ってくるし、さらには、その濃度に応じた飽和蒸気圧表を別々に作っておいて、濃度が違うごとに、別の表を参照しながら、水蒸気圧の算定を行なわねばならないことになり、ルーチン作業において、また、膨大な資料を扱うような場合、非常に面倒である。

このような面倒を避けるためには、(2) 式の使用を放棄し、近似的に、

$$e_a = E_p (\theta_{ws}) - \frac{1}{2} A (\theta_d - \theta_{ws}) \dots\dots(4)$$

とすることが考えられる。つまり、乾湿計公式の右辺第1項として溶液の飽和蒸気圧でなく、純水に対する飽和蒸気圧をとるのである。事実、現在普通にとられているのは、この方法であり、別段の考慮もなく(2)式の右



第1図 (5) 式によって計算した、純水による水蒸気圧測定値 (e_p) と海水成分を持つ溶液によるそれ (e_a) との差。

辺と(4)式の右辺とが等しい、つまり、 $e_a = e_s$ または、 $e_a = e_p$ とされているのである。

しかし、正確には当然 $e_a \neq e_p$ であり、その違い、すなわち誤差の大きさは、湿球上に付着した塩分濃度の関数であろうし、濃度が高いほど、誤差は大きくなるであろう。ここで筆者が検討しようとするのは、一般に、測定の目的によって許される誤差の大きさは決まってくるから、その限界に達するまでに、湿球のガーゼを取り替えてしまうことにすれば(4)式を使用しても不都合ではない、その限界に達するまでの期間をはっきり決めようということである。

この時の誤差の大きさは、 $e_p = e_s$ とすれば、(1) ~ (4) 式より、

$$e_a - e_p = kS E_p (\theta_{ws}) \dots\dots(5)$$

となる。たとえば、この問題による誤差の大きさを 0.2 mb にとどめようとするならば、 E_p は日本付近でなら安全側に見積もって 30°C に対する飽和蒸気圧をとればよからうから、 $E_p = 42.4$ mb、 k として前述の値を使用すると、 S つまり濃度は約 0.9% と計算される。このような誤差の大きさと濃度との関係は、(5) 式を図に示した第1図によってより良く表現される。ここで、縦軸には、純水による測定値と溶液(この場合海水と同じ)による測定値との差を、横軸にはその溶液の濃度をとっている。また、同図には参考のために湿球温度が 0°C の場合も記入されている。図によれば、湿球温度が高いほど誤差は大きくなり、湿球温度が 30°C で塩分濃度が 5% になれば誤差は 1.2 mb に、濃度が 10% にもなれば誤差も 2 倍に達することが示される。

さらに、この図から、誤差をたとえば 1 mb 以下にしようとするれば、塩分濃度が 4% に達した時にガーゼを交換すれば良いことが判かる。そこで、適当な限界濃度に

まで達するのに、どれくらいの期間がかかるかを、何らかの方法で決められれば我々の現在の目的は達せられる。

もっとも、その時に(5)式の正当性を検討しておく必要がある。なぜなら、(5)式は前にも述べた通り、(4)式中の A の値が、純水が湿球面にあるものとした時の値と同じであるという仮定があり、さらに、(3)式が成立するという仮定も使用しており、前述の通り、海水と必ずしも同じではないものの溶液の場合にもそれが成立するかどうか問題であるからである。筆者は、この問題に対しては、海岸に湿球温度計を設置した時、どのような組成の溶液がその湿球面上に形成されるかを実測で求め、その溶液濃度を人工的に種々に変えて湿球をしめらせ、その結果により検討することにした。

3. 湿球温度計に付着する塩分濃度の実測

前節で述べたように、湿球面上の純水が、ある一定濃度の溶液となるのに必要な期間を決めるためには、海洋上、または、海岸に湿球温度計を設置して、ある決まった期間毎に、その湿球部のガーゼに付着した塩分濃度を測定すればよい。そこで、次に述べるような模擬湿球温度計を作製して海岸に設置し、一定期間毎にガーゼを回収してそのための試料を得ることにした。

(1) 模擬湿球温度計の作製

上述の目的のためには、湿球温度そのものの測定は必要でなく、実際に使用される湿球温度計と同じように取り付けられた湿ったガーゼが試料として回収できれば十分である。そこで、水銀温度計を湿球温度計として使用することを想定し、次の諸点に留意して模擬湿球温度計を作製した。

(a) できるだけ長期間自動的に湿球部に給水できること。

(b) ガーゼ回収の回数を短期間でできるだけ多くとれるようにすること。

(c) ガーゼ回収および取り付け作業に際して、ガーゼに手を触れずにできること。

(a)は、この測定は元来、比較的長期にわたらねばならない性格のものであり、その際の労力を少なくするために考慮したもので、テスト結果では、30日間無給水でガーゼに水を供給できることが確認された。(b)はもちろん測定能率を高めるためであり、(c)は汚染された手による付加的な付着物を避けるためである。

模擬湿球部は、外径7mmのガラス管の端から15mmの長さまでガーゼを一重に巻いたもので、これを普通

の乾湿計の場合と同じように通風筒の中に格納した。1個の通風筒の中に3本の模擬湿球部を取り付けたが、その状態で、通風速度は5.5m/sであった。このような模擬湿球部を合計12本、つまり通風筒の数としては4本作成した。

(2) 模擬湿球温度計の設置と試料の採集

上に述べたような模擬湿球温度計を、瀬戸内海の飛島の海岸に設置した。飛島は、周囲約5kmの小さな島で、本土側からも四国側からも10km以上離れている。この島の北東隅に、干汐時に東北東に向けて約400mほど突出する砂州があり、その砂州の一部に砂面上4mの鉄柱を立て、そこに砂面から3mおよび1mの高さに模擬湿球温度計を6本づつ設置した。

設置場所としてこのような場所を選んだのは、このような場所であれば、時刻および四季を問わず、いつも海上を10km以上吹走してきた風を受けることになり、塩分付着に有利であろうと考えられ、そのことは、この種の誤差評価として安全側をとることになると考えたからに他ならない。

通風用モータの電源は、そこから約100m離れた笠岡市立飛島中学校職員住宅から供給を受けた。

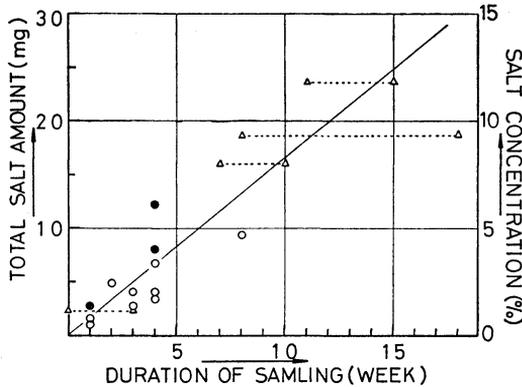
湿球部のガーゼの交換は、あらかじめ定めた計画表に従って、短いものは交換1週間後に、もっとも長いものは交換18週間後に行なった。この作業は、1973年5月12日から同年12月29日までの間継続された。途中、給水の欠陥や、風波による浸水事故があったため、考察に使用できる試料は全部で16例であった。

(3) 塩分量の測定とその結果

回収したガーゼは、実験室に持ち帰り、ビーカー中の純水の中でよく洗い、付着塩分を浸出させ、濃度測定のための資料とした。これを標準的な炎光分析と、原子吸光分析の手法によって分析し、濃度を求めた。

分析に当たっては、これらの付着物は、海水にその起源をおくものが多いであろうと考え、カリウム、ナトリウム、マグネシウムそれにカルシウムの元素を定量し、陰イオンはすべてクロールであるとした。4元素のうち、前二者については炎光分析で、後二者については原子吸光分析によった。このような方法によって、各資料毎に、上記4元素の含有量が求められるので、各元素について塩素がそれぞれ対応した量だけ結合しているとして合計すると、各資料中の塩分総重量が求められる。

この結果を、横軸に模擬湿球部へのガーゼ取り付け後、回収までの期間、縦軸に検出された塩分総重量をと



第2図 湿球ガーゼの取り付け期間と、その間に附着した塩分量との関係。

○は3m高度、●は1m高度にそれぞれ設置したもの、△は取り付け期間が点線で示した区間中のどこまでか、特定できないもの。右上がりの斜線は、測定値をできるだけ良く通るように引いた直線。

ってプロットすると、第2図のようになった。ここで、白丸は3m高度に設置したもの、黒丸は1m高度のものである。1m高度のものが少ないのは、明らかに波をかぶったと思われるものを除外したからである。また、三角印は3m高度に設置したもののうち給水のトラブルにより、採集期間の明瞭でないものである。すなわち、塩分が湿球部に附着するのは、その面が湿っていることが大きな条件と考え、湿球部のガーゼが乾いた状態は、採集期間と見なさないのである。具体的には、第2図の一番上の三角印について言えば、設置後11週目に点検した時には、確実に給水されていたのに、15週目に回収した時には乾燥状態であったことを意味し、11週目から15週目の間のどこかで給水が止まったことを意味している。このような試料も使用しないと、長期間の例が得られないので、あえてこのような方法で表示した。

ところで、第2図の縦軸は、前述の通り塩分総量で示してあるが、これは湿球部に附着する純水の量が判れば容易に濃度に換算できる。我々の場合、模擬湿球部に附着する水量を実験的に求めたところ、多少のばらつきはあったが、200 mg と評価された。そこで、濃度を純水中の塩分重量として百分率によって示すことにして記入したのが、第2図右側の縦軸の値である。

第2図によると、予想通り設置期間が長いほど附着塩分量は多くなり、その関係はほぼ直線と見て良いようである。

第1表 湿球に附着した塩分の成分比（カリウムを1として）。

元 素	飛鳥での資料	AMTEX '74での資料	飛鳥付近の海水
Na	15.0	7.0	29.3
K	1.0	1.0	1.0
Ca	5.1	4.3	1.2
Mg	2.8	0.8	4.5
資料数	16	1	1

さらに、1m高度と3m高度のものとを比べると、前者の方が附着量が多いようであるが、資料が少ないので明瞭ではない。

以上の論議は、湿球部に附着した塩分の総量についてであって、どのような元素が、どのような割合いで含まれているかについては全く触れていない。ガーゼに附着した塩分の組成については、第2節で述べた通り、(5)式が正当に使用し得るかどうかの判断にも必要であるので、それについて述べよう。

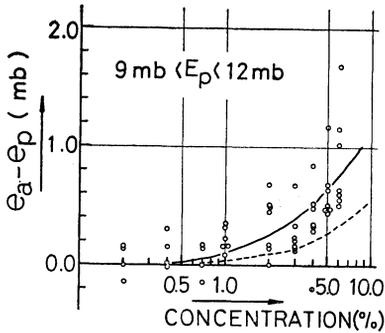
分析結果を各元素別に平均し、カリウムを基準として他の元素の成分比を第1表に示す。この表中には、参考のため、AMTEX '74の時、沖縄、多良間島の海岸で筆者等の行なった観測の際に使用した湿球のガーゼから得られた試料についての分析結果(Sahashi, 1974)と、飛鳥付近で採取した海水の分析結果も付記する。これによれば、1973年に瀬戸内海の飛鳥で得た湿球ガーゼの試料と、1974年に沖縄で得たそれとの結果は比較的似ているが、海水の成分比とは大分違っているようである。

4. 汚染された湿球が水蒸気圧測定結果に及ぼす影響

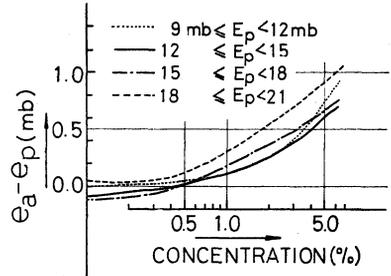
前節の終わりで述べたように、湿球部に附着する塩分の成分比は、海水のそれとは相当違っており、そのことは、第2節で述べた誤差の評価の式として(5)式を使用することの正當さが疑われることになる。

そこで、海水でなく、第1表に示したような実測された成分比をもち、かつ濃度の違う溶液を数種類作り、それによって湿球をしめらせ、純水でしめらせた湿球温度計と比較して、第1図との差異を実験的に検討した。

結果の一部を第3図に示す。図の縦軸、横軸は第1図と同じである。図に示したのは、得られた資料のうち、溶液による湿球温度に対する飽和水蒸気圧が9 mb から12 mb の間のもののみであり、図中の点線は $E_p = 10.5$ mb とした時の(5)式による値である。見られる通り、(5)式による海水の成分比をもつ溶液に比べ、実際に



第3図 純水による水蒸気圧測定値 (e_p) と、溶液によるそれ (e_a) との差の実験値 (その1)。
実線は、実験値をできるだけ良く通るように引いたもの、点線は、 $E_p = 10.5 \text{ mb}$ として(5)式で計算したもの。



第4図 純水による水蒸気圧測定値 (e_p) と、溶液によるそれ (e_a) との差の実験値 (その2)。
第3図と同じ実験を、 E_p の他の範囲についても行った結果。

第2表 誤差の大きさと、それに達するまでの期間。

誤差の大きさ (mb)	それに達するまでの期間 (週) (左欄の誤差以下におさえるために必要なガーゼ取り替え頻度, 週間/回)
0.2	1
0.4	2
0.6	3
0.8	4
1.0	5
1.5	7
2.0	10

湿球に付着した成分比をもつ溶液の方が同じ濃度であっても誤差が大きくなるように見える。図に記入した実線は、実験で得られた結果である白丸をできるだけ良く通るように引いたものであるが、これと先ほどの点線とを比べると、縦軸の値、すなわち誤差が2倍ほども前者の方が大きいようである。したがって、この限りにおいては、(5)式は正当な誤差評価の基準となし得ないように見受けられる。

いっぽう、第3図に示した以外の実験結果をまとめると、第4図のようになり、 E_p すなわち飽和蒸気圧が高い場合にも、誤差がそんなには大きくなることを示している。つまり、第3図では理論値(点線)と実験値(実線)との差は大きい、湿球温度が高くなればその差が小さくなり、実際に起こり得る誤差を考える際には、第1図の実線を基準と考えれば、すべての起こり得る湿球温度に対して安全側に見積もることになると見て良いことになる。したがって、この意味において、現在の目的に対しては(3)および(5)式は正当に適用し得ると考えて良さそうである。

5. 湿球用ガーゼの取り替え期間について

前節で述べたことにより、第2節の終わりに述べた(5)式に対する疑点は、一応解決されたことになる。そこで、第2図に戻って、この図を使用して、一定濃度に達するのに要する時間を推定することにしよう。

第3節(3)で述べた通り、第2図に示した測定値は、ほぼ直線と見なし得る。図に記入した原点を通る右上がりの直線が、測定値をもっとも良く通るように引いたも

のである。

この直線を使用し、第2図の右側の縦軸と、横軸とを参照すれば、湿球面の溶液(もとは純水)がある濃度に達するのに必要な期間が求められる。たとえば、5%の濃度に達するには6週間が必要である、という工合である。

このことと、第1図の実線とを比べると、その期間だけ経過したら、水蒸気圧の評価にどれだけの誤差が出るかを知ることができる。上述の例では、6週間たてば、1.2 mb の過大評価になるということである。

いっぽう、逆に、許される誤差の限界を先に決めれば、その限界に達するまでの湿球設置後の期間、言い換えれば、湿球のガーゼ取り替えが必要な期間が決まることになる。たとえば、0.5 mb の誤差を許すとすれば、2週間はガーゼを取り替えなくてすむということである。

第2表に、誤差の大きさと、第1図と第2図とから得られるその誤差に達するまでの期間を示す。

6. 結 語

湿球を覆うガーゼが、塩分で汚染されるような環境で乾湿計を使用する際、何日目毎にガーゼを取り替えれば、評価される水蒸気圧が一定の誤差の範囲内におさまるかを、実験的に検討した。

誤差の大きさを1mbまで認めれば、約1ヶ月は交換せずすむし、それを0.5mb程度にとどめようとすれば2週間半毎に、もしそれを0.2mb程度にしようとするれば、毎週交換する必要があることが示された。

湿球部に付着する塩分組成は、海水のそれとは大分違うが、瀬戸内海でも、沖縄でもあまり変わらないことが判った。

謝 辞

最後に、塩分分析につき御指導頂き、装置の使用を許可された、岡山大学教育学部沼野忠之助教授に厚く御礼申し上げる。試料採取に便宜を供与された、当時飛島中学校校長坂本市松氏、採取と分析に尽力された現琴浦中学校教諭蓬正夫氏にそれぞれ謝意を表する。

文 献

- 気象庁, 1971: 地上気象観測法, 日本気象協会, 64.
 文字信貴, 水間満郎, 1976: 風・温度・湿度及び乱流輸送量の測定, 気象研究ノート, 130, 28~31.
 中村玉樹, 1918: 湿球寒暖計に使用する水の不純なるがために其示度に及ぼす影響に就て, 気象集誌, 37, 26~30.
 Sahashi, K., 1974: Salt Amount Detected from the Gauze on the Wet-bulb Employed in the AMTEX '74, Scientific Report of the Third Study Conference, AMTEX Rep., No. 6, 78~81.
 佐橋 謙, 花房竜男, 文字信貴, 塚本 修, 光田 寧, 1977: 乱流計測器の国際比較観測 (I) —— ITCE '76 ——, 1977年度日本気象学会春季大会演講予稿集, 161.
 Sverdrup, H.U., M.W. Johnson and R.H. Fleming, 1952: The Oceans, Prentice Hall, Inc., NY, 115.



読売新聞解説部編

異常気象と食糧危機のすべて

国際商業出版, 1977, B 6版, 279頁, 950円。

食糧危機が叫ばれ、ビアフラで餓死者が出たという話を聞いても、我々多くの者はまだ他人事としか受けとめていない。米国民が一週に一度ハンバーガーを節約すると、1200万トンの穀物が節約でき飢えに苦しむインドやバングラディッシュの不足を埋められると言われるが、動物性の食糧を生産するには凡そ10倍の穀物を必要とするからであろう。現在の食糧需給の状況は急速に変化しつつある。ソ連のような大きな人口を持つ国がその生活程度を向上してゆくことは、世界の人口の増加以上に食糧を必要とする。1972年の寒波で、ソ連は大量の小麦を米国から輸入せざるを得なくなったように、気象異常

は食糧をたちまちにして不足の危険に転じ得ることが分かってきた。

気象学者の間で地球の気象異常に警鐘を鳴らす人が増えている。もし、異常気象が続きそれが通常の気象になったら、地球はとても現在の人口を養ってゆけないだろう。自国で十分食糧をまかなえる国はよいが、特に日本のように大量の食糧を輸入に頼っている国では早急に対策を立てる必要がある。中国では食糧の自給体制を達成すべく建設を進めているが、国土の割に小さい耕地面積から食糧の増産には限度があり、8億の人口を養うためには増産と共に人口の抑制を徹底して実施している。

日本の食糧も、家畜の餌までを含めて考えると約60%の人口を賄う程度であり、開発途上国の人口爆発が世界的食糧需給に及ぼす影響を考えわが国の食糧政策も十分考えねばならない。

日本は先進国中最も自給率が低く、このままでゆくと、静止人口になるまでに今後3000万人以上は増加する人口をどうやって賄うかは大問題である。

(小平信彦)