

通風式乾湿計の実験的研究*

地 迫 良 一**

要 旨

世界気象機関の測器観測法委員会で決議された湿度測定作業部会の報告に従って、新型の通風式乾湿計 (Reference Psychrometer) を試作した。主に放射の影響を調べながら、アスマン乾湿計との比較をした。

両素子への直射日光を除いては、測器の Radiation Shield の効果によって、放射の影響はほとんど生じないことがわかった。

1. まえがき

長年、測器観測法委員会は異なった場所で異なった測器を用いて得られた湿度測定の結果が、真の湿度を示すかどうかを調査してきた。

湿度測定作業部会は、適当に設計された乾湿計は湿球温度が 0°C 以上の領域については優秀な準器となるという結論を得た。そして新型の測器の規格を提示した。

作業部会は規格を最終化すべく、いろいろ検討を加え、オーストラリアの NSL (National Standards Laboratory, Sydney) 等では乾湿計係数を決定する実験を行っている。

筆者は作業部会の報告書に従って測器を試作し、実験室や露場での実験を通じて測器の性能を調べた。

2. 測器の規格及び説明

測器の主な構成は第1図に示すとおりである。外側の面はアルミニウムの薄膜を塗布し、内側の面は黒く塗装された厚さ 0.5mm のステンレス板から成り、Outer shield と Inner shield の二重構造で、主に三部分に分けられる。Outer shield は直射日光を受けた場合、最高で 3°C 昇温するが、Inner shield の昇温は 0.01°C 以下であり、両 shield 間の熱的結合は非常に低いと見積られている。

Psychrometer section は計測部分である。Extension section は感温部分に一樣に空気が当るようにするとともに、Psychrometer section を他の部分から熱的に (伝

導及び放射) 隔離する部分である。Reduction section は Outer shield の断面を適当な大きさに絞り、簡単な補助装置で監視される程度に、通風速度を増加させる。

通風は Reduction section の端に連結された吸引機によってなされる。

Inner shield の内側の黒い面と Septum の両面の黒い面は、一次反射による外来の放射を吸収する。Outer shield と Inner shield の間に入る外来の放射は、Outer shield の内側の黒い面上で主に吸収される。

Inner shield は不導体によって Psychrometer section と Extension section とを接合され、両 section の熱伝導は断たれる。また、乾球と湿球の素子が Inner shield を貫く部分は、疎水性の熱隔離物質から成るはめ輪によって素子と shield の熱伝導が断たれる。

通風速度の測定のため、Reduction section 内に小さいピトー管が取り付けられ、圧力計に接続される。通風速度は $1,000\text{mb}$ 、 20°C を基準に $4.5 \pm 0.9\text{m/s}$ である。

乾球と湿球用の素子は、厚さ 0.10mm 、外径 4.5mm のステンレス管で、乾球素子はステンレスの反射面のまま使用される。湿球素子は Inner shield 内にあるすべての部分を被覆され、その外径は $4.5 \pm 0.3\text{mm}$ である。長さ $30 \sim 35\text{mm}$ の真ちゅう管に固定された熱電対が、両素子のステンレス管の中央にそう入される。湿球被覆には、毛細管現象によって水つぼから連続的に水分が供給される。両素子が水平にして使用される場合は、水つぼの水面は湿球素子から $5 \sim 20\text{mm}$ 低い位置である。

気温の変化によって Inner shield の Psychrometer section が変温するが、この時定数は約 20 秒と見積られ

* An Experimental Study on the Reference Psychrometer

** R. Tisako 宇都宮地方気象台

—1972年5月20日受理, 1972年8月7日改稿受理—

ている。また両素子の時定数は約20秒と見積られている。

3. 試作品について

(1) 構造

Shield は要所を直径 2mm のビスとナットで止めた。各部分の熱絶縁物質として、アクリル樹脂を加工して用いた。Inner shield は後の四隅からアクリル樹脂を伸介として幅 5mm のステンレス板を出し、Reduction section の中部に固定した。素子として直径 4mm, 厚さ 0.1mm のステンレス管を使用した。感温部には銅・コンスタントンの熱電対を用いた。湿球被覆にはガーゼを用い、Outer shield の下側にプラスチック容器 (28×28×80mm) を取り付け、水つぼとした。Outer shield と Inner shield の外面はステンレスの反射面のままとし、内面は黒く塗装した。

(2) 素子の時定数の決定

ステンレス管の中央に直接に熱電対をそう入したものを乾球素子とした。一方、長さ 32mm の真ちゅう管に

熱電対をそう入したものをステンレス管の中央にそう入し、ステンレス管の外面をガーゼで包んで湿らせて湿球素子とした。それぞれの素子に約 3°C の温度変化を与えて 3.6m/s の風を当て、定温になるまで卓上記録計に記録させた。その結果、乾球と湿球素子の時定数としてそれぞれ12.4秒と12.1秒を得た。

(3) 温度目盛の検定

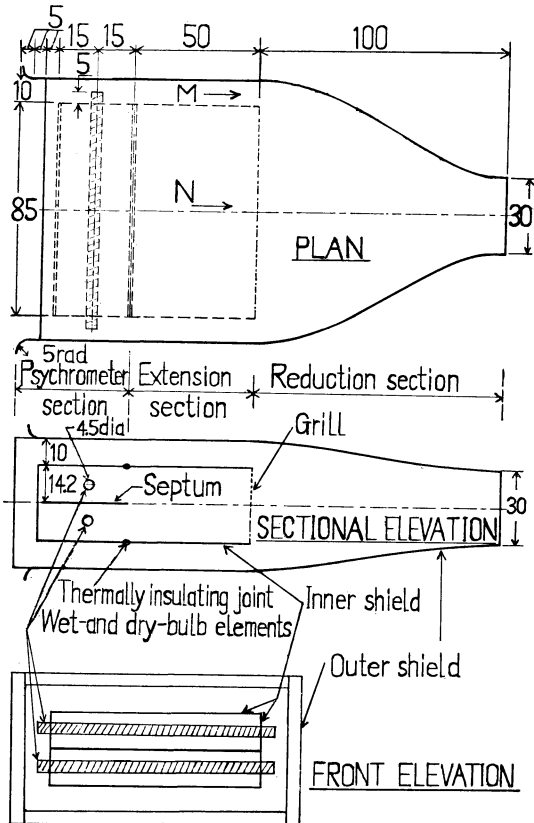
卓上記録計と高感度電流電圧計を用いて、両素子の起電力を測定した。物理定数表の銅・コンスタントンの起電力表を基準にして、記録紙の読みを温度に換算する表を作り、以後は記録紙の読みと換算表から温度を知ることにした。

(4) 通風速度の測定

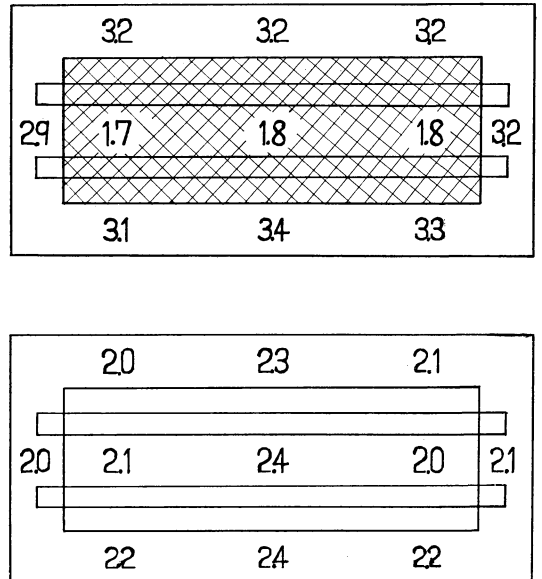
測器の通風速度を測定するために、測定部分の長さ 40mm の小型のピトー管を購入し、その検定を行なった。ピトー管を気象大学の風洞内に設置し、メチルアルコールを注入した傾斜マンオメーターを用いて、次式から風速を算出した。

$$v = \sqrt{\frac{2g\rho h}{\gamma}}$$

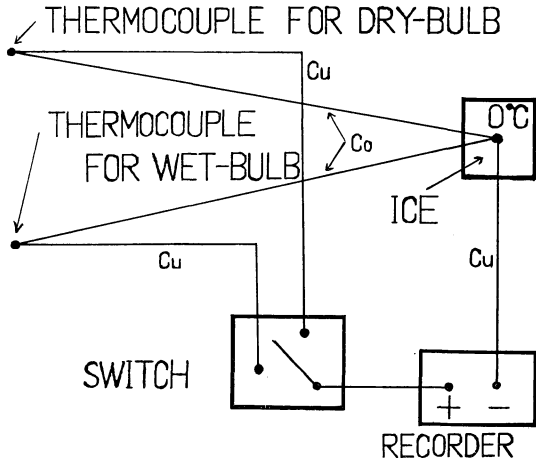
ここで g は重力加速度、 γ は空気密度である。 ρ と h はそれぞれマンオメーターの液の比重及び液面の高さである。 v は風速である。 h と v の関係をグラフにし、以後このグラフとピトー管及びマンオメーターを用いて、通風



第1図 測器の主な構成



第2図 格子の有無による通風速度の相違



第3図 熱電対の配線図

速度を得た。規格によると第1図のMとNでの通風速度を等しくするために、Inner shieldの後面に格子を付けることになっている。Inner shieldの後面に格子間隔0.3mmのステンレス網を付けて測定した結果が第2図の上である。網の後方の平均風速(第1図のNに相等)は1.8m/s, Outer shieldとInner shieldとのすき間での平均風速(第1図のMに相当)は3.2m/sであり、網のために風速が弱められている。

一方、網のない場合は第2図の下のようになり、通風速度は平均して一様である。従って格子を付ける必要はないと判断され、以後の観測は格子を付けずに行った。これまで使用した吸引機より強力なものを使用し、両素子の部分での通風速度として3.5m/sを得た。これは規格の最低通風速度3.6m/sにほぼ相等する。規格ではピトー管をReduction section内に取り付け、通風速度を一定に保つように監視することが望ましいとしている。しかし、通風速度は3.5m/sと見なし、ピトー管は取り付けずに観測に用いた。

(5) 測定法

熱電対の接続法は第3図のとおりである。両素子から出たコンスタンタン線を氷の入った保温器に入れて0点とした。銅線は切換スイッチへ接続した。切換スイッチは3秒毎に自動的に断続するようにし、乾球温度と湿球温度を交互に測定できるようにした。記録計は一本ペンであるが、このようにして両素子の温度を継続して記録できる。

従って記録紙の記録は、右端が乾球温度、左端が湿球温度を示し、ペンの往復した幅が両素子の温度差を示す

ことになる。

4. 乾湿計係数について

乾湿計係数(A)は

$$e_w - Ue_t = Ap(t - t_w)$$

または

$$e_w - e = Ap(t - t_w)$$

によって定義される。Uは分数で表現された相対湿度である。e_wとe_tはそれぞれ湿球温度t_wと乾球温度tにおける純水の飽和水蒸気圧である。eは測定する気体の水蒸気圧である。pは気圧である。

通常の大さの湿球と、3m/s以上の通風速度に対して、Aの値はほとんど変わらない。3~4m/sの通風速度について決定されたAの値の多くは、6.67×10⁻⁴°C⁻¹の±2%の範囲である。

Aの理論値は次のColburnの式で与えられる。

$$A = \frac{\lambda}{CDL_w} (1 - X_w) \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{1/3}$$

λは気体のthermal conductivity, Cは気体のtotal molar density, Dは水蒸気と気体とのmutual diffusivityである。L_wは湿球温度における蒸発のlatent heat, X_wは蒸気のsaturation mole fractionである。PrとScはそれぞれPrandtl numberとSchmidt numberである。

上式で与えられたAの値は、0°Cから20°Cの常温で5.8×10⁻⁴°C⁻¹である。

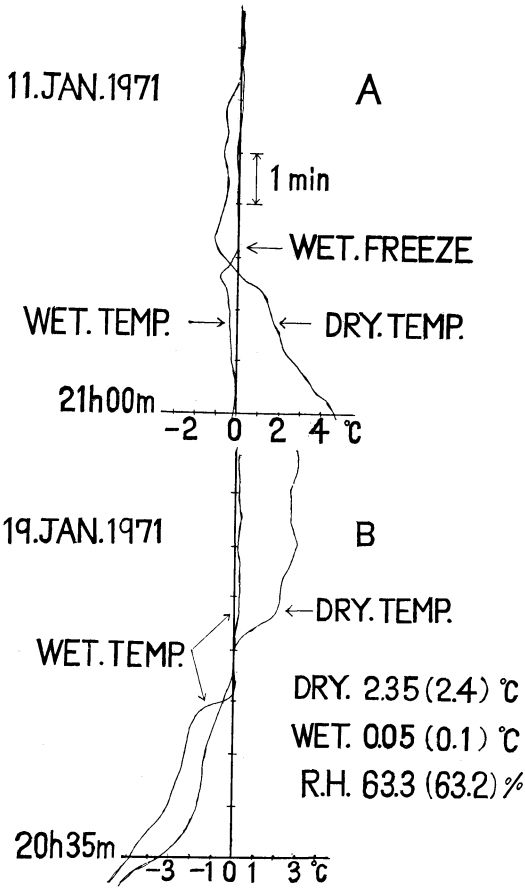
実験値と理論値との違いの原因として、放射による熱輸送(radiative heat transfer)が考えられ、Wylieがいろいろ実験したが未決の問題である。

Ap=αとし、1,000mbの大気圧でのαの値を見ると、ロンドン気象庁では十分換気された条件の下で0.6666mb/degが用いられ、Sprungはアスマン乾湿計に対して0.6623mb/degを与えた。これらの値は6.67×10⁻⁴°Cとほとんど違わない。以下の湿度算出には、Aの値として6.67×10⁻⁴°Cを用いた。

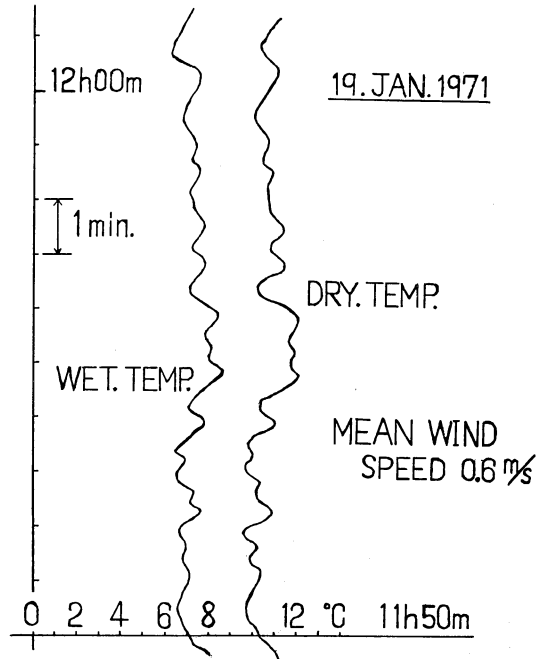
5. 露場での使用

三脚の上に測器を固定し、地上1.5mの高さで観測した。またアスマン乾湿計も同時に使用した。百葉箱内には日巻の自記湿度計と自記温度計を置き、湿度と気温の変化傾向を見る参考にした。気圧の観測にはアネロイド気圧計を用いた。

通風開始後、記録計の温度記録が落ちついてから数分毎に数回記録を読み取り、その平均値をとった。またアスマン乾湿計の読み取りも記録計の読み取り時刻に対応



第4図 低温での観測例



第5図 晴天の日中での観測例

して行ない、その平均値をとった。

熱電対を使用した試作測器では 0.05°C まで温度を読む。アスマン乾湿計は 0.2°C まで認める。平均値はそれぞれ 0.01°C 及び 0.1°C まで算出し、比較した。

(1) 観測例

第4図A及びBは、快晴無風で夜間の放射冷却が激しい時の例である。第4図Aの例では、通風開始後2分間で湿球温度が一時的に下がり、その後上昇して湿球布が氷結し、ほとんど 0°C を保ち続けた。一方、乾球温度は湿球温度が最低となった頃 0°C 以下になり、その後約4分間氷点下を保った後 0°C に近づき、やがて湿球温度を上まわってほとんど 0°C を保ち続けた。

両素子の温度が一定になるまで通風開始後約6分間を要している。このような状態では湿度が100%近いのか、湿球の氷結のため高い湿度に見えるのか判別しにくい。第4図Bの例は、測器を露場の芝の上に放置して夜

間放射による過冷却状態にした後、1.5m の高さで通風を行なったものである。

通風開始後約4分で、湿球温度が乾球温度より早く 0°C に達した。その後乾球温度が湿球温度を上回り、通風開始後約6分で両素子の温度が落ち着いてから後、5分間の平均値から図のような値を得た。ただし DRY と WET はそれぞれ乾球温度と湿球温度を示し、RH は相対湿度を示す。またかっこ内の値は、アスマン乾湿計による値を示す。

第5図は快晴の日中の記録である。自記温度計の記録では、細かい変動をしながら気温が上昇する過程である。

測器の近くに携帯用風向風速計を設置し、風向風速を観測しながら卓上記録計の記録の変動を観察した。すると両素子の気温が上昇して記録紙上で山となっている部分は、すべて風の吹き出しに対応していた。このことは測器を風上に向けても風下に向けても同様であった。なお風速は平均 0.6m/s の微風であった。

このような気温の変動の原因として、太陽放射により地面から水分が蒸発し、それらを含んだ空気塊が風で運ばれて素子が反応したことが考えられる。

このような記録の場合、アスマン乾湿計との時定数の

違いもあり、平均値をとっても両測器の測定値には差が生じる。

他に、雨天の日の高い湿度の記録も得た。その場合、数 m/s の微風があったが、両素子の温度の記録はほとんど平行状態で変化がなかった。また両測器での測定値も良い近似を示した。

(2) 両素子への直射日光の影響

第1表は、両素子に直射日光を当てて測器を使用した場合と、通常の観測状態との相違を示したものである。

直射日光が素子に当たることにより、その温度は約 1°C 上昇し、相対湿度としては約 1% の減少を生じた。これは1月の観測例であるが、日射の強い夏期においてはさらに直射日光による影響は大きいと思われる。

しかしこの測器は上下、左右にその設置角度を変えることにより、素子への直射日光は避けることができる。

(3) アスマン乾湿計との比較

湿度の低い場合から高い場合までを含む露場での観測

第1表 素子への直射日光の影響

乾球温度 °C	湿球温度 °C	相対湿度 %
9.90+0.90 9.00	5.30+0.65 4.65	47.3-1.1 48.4
12.90+0.60 12.30	6.05+0.40 5.65	32.2-0.3 32.5
10.40+1.00 9.40	5.65+0.75 4.90	46.7-0.8 47.5

各欄の上下の値はそれぞれ、素子が直射日光を受けた後と受ける前の各一回の測定値を示す。また上段の正負の符号のついた数値は、直射日光によって生じた各値の増減を示す。

第2表 試作乾湿計とアスマン乾湿計との比較

乾球温度 °C						湿球温度 °C						相対湿度 %
1	2	3	4	5	平均	1	2	3	4	5	平均	
7.50	7.50	7.75	7.40	6.70	7.37	2.85	2.60	2.70	2.65	2.15	2.59	40.1+3.9
8.0	7.8	8.0	7.8	7.4	7.8	2.8	2.4	2.8	2.6	2.4	2.6	36.2
4.40	4.60	4.80	4.90	5.40	4.82	2.25	2.35	2.50	2.50	2.85	2.49	66.5+1.0
4.2	4.6	4.8	5.0	5.4	4.8	2.0	2.4	2.4	2.4	2.6	2.4	65.5
1.90	1.95	1.90	1.90	1.90	1.91	1.80	1.80	1.75	1.75	1.75	1.77	85.5+6.0
2.2	2.2	2.0	2.2	2.0	2.1	2.0	2.0	1.8	2.0	1.8	1.9	79.5

各欄の上下の値はそれぞれ、試作乾湿計とアスマン乾湿計による測定値を示す。相対湿度は各温度の平均値から算出し、アスマン乾湿計との差を符号で示した。

を通して、アスマン乾湿計と比較した結果を第2表に示す。変動の多い記録を除いて、全体的に両測器による値は近似している。

6. 放射と風による影響の風洞実験

測器を風洞内に設置して 250W の赤外線ランプを照射し、その距離や角度を変える一方、風向や風速を変化させて、それらによる影響を調べた。

無風状態の場合、正面からの照射以外はほとんど影響が生じなかった。正面から照射した場合、両素子の温度は極端に上昇しても、通風開始後その温度は急激に下がり、約2分後には定常な温度になった。従って通常の観測では、通風開始後3分で十分観測可能である。

一方、風による影響を調べるために、風洞を働かせると、赤外線ランプを使用中に温まった空気が風洞内を循環するようになり、温度の記録は非常にゆるやかな勾配の直線をなす。従ってランプの操作による影響は、その温度上昇直線からは見だせなかった。風向による温度の変化も、ほとんど区別がつかなかった。厳密には、恒温室内で吹き抜け式の風洞を用いないと、放射の影響の調査はむづかしいだろうが、以上の結果からステンレスの反射面は放射に対する影響を除去できると言える。

7. あとがき

通風式乾湿計は主に 0°C から 50°C の範囲を測定対象としており、湿球温度が 0°C 以下の場合の測定の問題が残っている。湿球の被覆に適当な物質を用いることも一方法であろう。

氷点下では乾球と湿球の温度差が10分位の精度では十分でない。熱電対を用いたこの測器では 0.05°C の精度が得られる。湿球被覆が氷結する前後における乾球と湿球素子の温度差を精密に測定する実験を重ねれば、水と

水に対する乾湿計係数の関係も決定されるだろう。

最後に、指導助言をいただいた小林寿太郎名古屋地方気象台長（前気象大学校教授）、並に荒井哲男気象大学校助教授に感謝します。

文 献

- 1) 飯田修一他編集, 1968: 物理定数表, 朝倉書店,
- 2) 押田勇雄, 1950: 蒸発・乾燥, 河出書房.

- 3) 木谷要一, 1948: 湿度測定法, 共立出版.
- 4) 沢田正三, 1970: 温度と熱 1~64, 実験物理学講座12巻, 共立出版.
- 5) 佐貫亦男, 1956: 地上気象器械 93~125, 共立出版.
- 6) 正野重方他編集, 1969: 気象ポケットブック, 共立出版.
- 7) R.G. Wylie, 1968: WMO final report of the working group on hygrometry (Resolution 4, CIMO-IV).

第 17 期第回 1 理事会議事録

日 時 昭和47年7月24日（月） 17.00~19.00

場 所 気象庁観測部会議室

出席者 礒野, 山本, 孫野, 佐々木, 駒林, 北川, 大井, 小平, 川村, 伊藤, 神山, 岸保, 河村, 窪田, 小林, 二宮, 丸山各理事
木村, 藤田各監事

列席者 中村庶務委員

議 題

1. 礒野理事が理事長に選任され, 理事長代理には小平理事が指名された.
2. 礒野, 北川, 小平, 神山, 大井, 川村, 駒林, 伊藤, 窪田, 河村, 中山, 二宮, 丸山の各理事が常任理事に選任された.
3. 常任理事の事務分担.
庶務担当: 小平理事, 副 中山理事
会計担当: 川村理事, 副 伊藤理事
気象集誌担当: 二宮理事, 副 小平理事
天気担当: 河村理事, 副 中山理事
気研ノート担当: 伊藤理事, 副 丸山理事
講演企画担当: 窪田理事, 副 二宮理事
国際学术交流担当: 北川理事, 副 神山理事
各賞推薦担当: 学会賞 } 駒林理事, 副 北川理事
藤原賞 }
奨励金 } 北川理事, 副 川村理事
他学会 }
地物研連, 学会連合担当: 神山理事
外国文献集担当: 大井理事
長期計画担当: 駒林理事, 副 丸山理事
学術会議担当: 神山理事
4. 吉武, 北岡, 伊藤 (博), 斉藤, 日下部, 高橋,

今井, 神原の8名に評議員就任をお願いすることとなった.

5. 第9回自然災害科学総合シンポジウム開催の後援をすることになった.
6. 日本アイソトープ協会からの第10回理工学における同位元素研究発表会共同主催者に参加し運営委員として矢野直会員を選出した.
7. 前期理事会よりの引継事項について
 - (1) 文部省編「学術用語集気象学編」の出版権設定について
 - (2) 沖縄支部設置の指導について
沖縄支部から送られてきた支部規約を審議し承認した.
 - (3) 正野記念論文集の売り捌き
 - (4) 学術交流を図ること
 - (5) 長期計画について理事会としての対処
 - (6) 気象集誌のレベルアップを図ること
 - (7) 賛助会員の獲得を図ること
 - (8) 夏期大学講座は継続すること
- (3)項以下については今後の理事会において検討する.
8. その他
 - (1) ベトナムにおける人工降雨作戦に関し種々のニュースがある. 気象学が関係している問題でわれわれも無関心ではいられないが, 学会で取上げるについても多くの問題があるので, 次回に北川理事より詳細な報告を受けることとした.
 - (2) 前期理事, 監事で退任された方々に対し, 記念品を贈呈することを承認した.
新入会員 安成哲三外35名の入会を承認.