

# 砂糖溶液の電気抵抗を利用した氷晶核の計数法\*

迫 田 優 一\*\*

## 要旨

砂糖溶液を用いる氷晶核数測定装置において、肉眼によらず氷晶核数を計数する方法を考案した。砂糖溶液の相変化（凍結）に伴う局所的な電気抵抗の変化を利用した。シャーレ内の砂糖溶液に氷晶が形成された時点で、シャーレをレコード円盤の様に回転し、砂糖溶液表面を交流電圧をかけた細い電極によりレコード針のように掃引し、電極が氷晶上を通過する際の交流電圧の変動をテープレコーダーに記録して計数することができた。この方法はテレメータリングに利用することができると思われる。

## 1. 序 論

### a. 従来の氷晶核濃度の測定法

氷晶核とは、空气中に存在する微粒子で、低温で水蒸気が過飽和となった場合に、それ自身を核として氷晶を発生させる能力のあるもののことである。大気中の氷晶核濃度を測定するには、それがあまりにも微少、微量であるために、顕微鏡を用いるという様な直接的な方法をルーチン観測に採用することは容易でない。この目的のためには、適当に過冷却で適当に過飽和である条件を作って、実際に氷晶核として働かせ、その結果発生した小さな氷晶を適当な方法で視認して、その存在濃度を測定する方法をとる。

ここで、この研究で参考にした Bigg (1957) による砂糖溶液を用いる氷晶核濃度測定法について簡単に述べる。この装置は、試料空気を冷却する円筒部と、検出用砂糖溶液を含む検出部とに大別される。円筒部は三重の筒になっていて、その各々のすき間にはエチレングリコールと水の混合物が入っており、ドライアイスの小塊で冷却される。この円筒部で冷却された試料空気中に氷晶核が存在していると、その核を中心にして小さな氷晶ができ、その下にある検出部に落下する。この小さな氷晶は、過冷却状態の砂糖溶液中で成長し、適当な時間の後に肉眼で計数できる大きさとなる。この検出部では、氷晶を適当な速さで成長させるために、水 100 g に対して蔗糖 120 g を溶かした検出用砂糖溶液を  $-12^{\circ}\text{C}$  に保

っている。この冷却には、砂糖溶液を入れたシャーレの下に融解しつつあるエチレングリコールと水の混合物を、金属板を経て接触させる方法をとっている。

### b. テレメータリングの必要性

Bigg (1957) によると、大気中の氷晶核濃度の観測値と他の気象要素との比較の結果、核の起源にはいくらかの種類が存在することが考えられ、また、核濃度と絹雲の発生との間に正の相関が存在するという。また、Bowen (1953) は核の源を流星塵に求め、絹雲の発生と暦上の日付との関連について述べた。

この様な状況の下で核の源をさぐり、その移動を知るには、多くの地点での多くの観測が必要であり、また、絹雲発生との関係をうらづけるには、核濃度の垂直分布を調べる必要がある。この研究では、高層での核濃度分布測定をテレメータリングすることを念頭に置いて、砂糖溶液法で得られた氷晶の個数をいかにして自動的に計数するかという問題に対して、一つの試みを行なったものである。

## 2. 本研究の測定法

### a. 氷晶計数の原理

砂糖溶液内に氷晶ができた時にそれを計数する方法として、まず、肉眼に替るものとして、例えば、TV カメラを用いることなどが考えられるが、実用上は不適當である。そこで、はじめは、砂糖溶液を小さな区分(cell)に分割して各区分毎に氷晶による凍結の有無を判別し、全体の氷晶数を推定する方法を考えた。しかし、実験によると氷晶以外に起因する凍結が多く、また、凍結区画数から氷晶数への推定の幅があまり狭くないことがわかり、この方法を中止し、次の方法を試みることにした。

\* Ice nuclei counter utilizing electric resistance of saccharose solution

\*\* Y. Sakoda: 高知地方気象台  
—1974年4月1日受理—

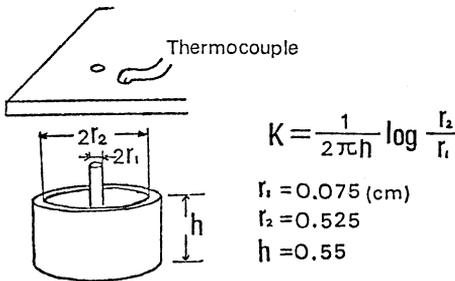
まず、砂糖溶液法によって、測定用低温槽内のシャーレの砂糖溶液表面に氷晶核による氷晶を作る。このシャーレの底は金属板で作り、これを片方の電極とする。次に、溶液の表面をもう一方の電極である金属針で触れた場合を考える。この場合、針先を半球とみなして半径を  $r$  とし、両極間の電気抵抗を  $R$  とすると、

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} (\Omega)$$

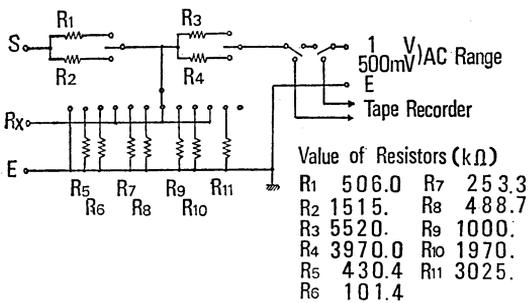
である。ここで  $\rho$  は溶液の比抵抗であって、これが、溶液の相の違い（液体か凍結した固体か）によって変化するならば、 $R$  を測定することによって、針が触れているのは液体なのか固体（氷晶）なのかを決定できるであろう。また、シャーレと針先をちょうどレコード針のようにして全液面を走査すれば、液面における氷晶分布がわかり、これを計数することが可能であろうと考えた。

b. 砂糖溶液の比抵抗

上で述べた原理では、砂糖溶液の相変化におけるその比抵抗の変化が必要である。そこでこれを実験で求めてみた。



第1図 砂糖溶液の比抵抗測定のための容器。材質：銅



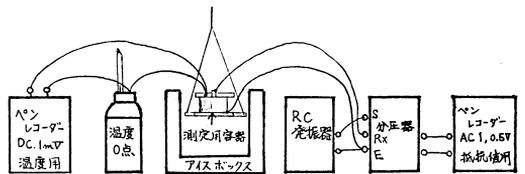
第2図 抵抗測定用分圧器。S-E間：RC発振器， $R_x$ -E間：未知抵抗

まず、100gの水に対して120gの蔗糖を溶かした溶液に、水に対して0.01~1.0%の塩化ナトリウムを溶かして試料とする。ここでNaClを溶かすのは、砂糖溶液だけでは非電解質なので比抵抗が非常に大きく、電解質の不純物が混入した場合に、その影響が大きいことが予想されるためである。この被測定液は、第1図の容器に入れ、熱電対をつけた蓋をして冷却する。温度はこの熱電対を用いて直流ペンレコーダに記録した電圧から求める。両極間の抵抗を測定するには、電圧をかけるが直流では分極を起こして都合が悪いため交流を用いる。ここでは第2図の様な分圧器を製作して抵抗値を電圧として記録し、ミニコンピューターで計算して作った換算表で抵抗値に直した。この分圧器は一種のブリッジとなっている。全体の測定装置の構成を第3図に示す。

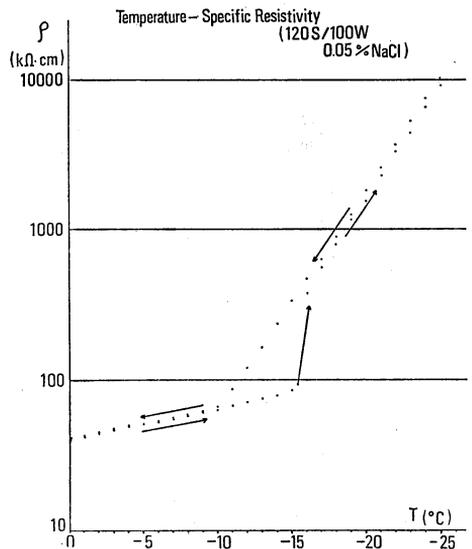
以上の様にして求めた抵抗値を  $R_x$  とすると、

$$\rho = \frac{R_x}{k}$$

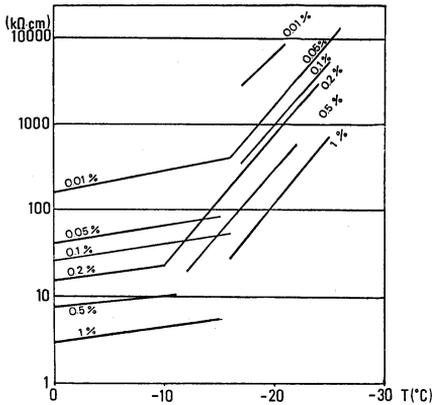
である。 $k$  は用いた容器の定数（セルコンスタント）で



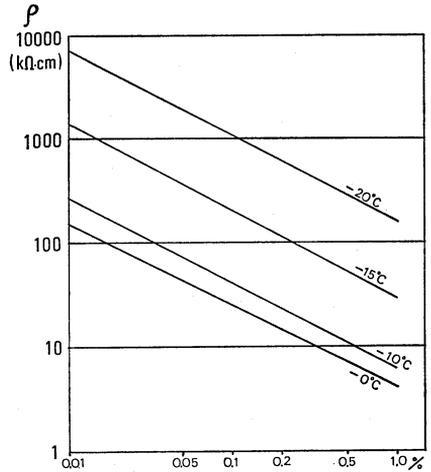
第3図 温度—比抵抗測定の装置構成



第4図 砂糖溶液の温度—比抵抗特性の例（蔗糖120g，水100gからなる水溶液）



第5図 砂糖溶液の温度—比抵抗特性. 冷却時の測定値より最小二乗法で求めた. 数字は添加した NaCl の濃度を示す



第6図 添加した NaCl の濃度と砂糖溶液の比抵抗との関係. 横軸は NaCl 濃度, 縦軸は砂糖溶液の比抵抗

ある. 第1図内に示す計算式により, また,  $\rho$  の明らかな標準溶液を用いた実験によると, 使用した容器について, セルコンスタントの値は, それぞれ

計算:  $k=0.56$ , 実測:  $k=0.603$

となった. ここでは実験で求めた値を採用して  $\rho$  を求めることにした.

第4図に NaCl 0.05% を添加した砂糖溶液の比抵抗の測定結果を示す. 温度を矢印の向きに変えていくと, 0°C より -15°C までは液体であったが, ここで凍結し, 比抵抗は矢印のように階段的に増加する. さらに温度を -26°C まで下げ, ここで反転して上昇させ 0°C にもどした. このように温度と比抵抗の対数とを軸とするグラフでは, 液体と固体の各々に一本の直線のあることがわかる. この2本の直線の交点は凝固点を示し, 冷却過程の -10°C ~ -15°C の直線部分が過冷却状態の比抵抗を示している.

これと同様のグラフを NaCl の種々の濃度にわたって第5図に示す. このグラフの直線は, 冷却時における比抵抗の対数について同一の相内で最小二乗法によって最適直線として定めたものである.

比抵抗の NaCl 濃度による変化は, 横軸に濃度の対数をとった両対数のグラフでだいたい直線となる. これを第6図に示す.

3. 測定装置

2-a で述べた氷晶核濃度測定 の原理に基づいて, 測定装置を試作してみた. その構造を第7図に示す.

a. センサー及び掃引法

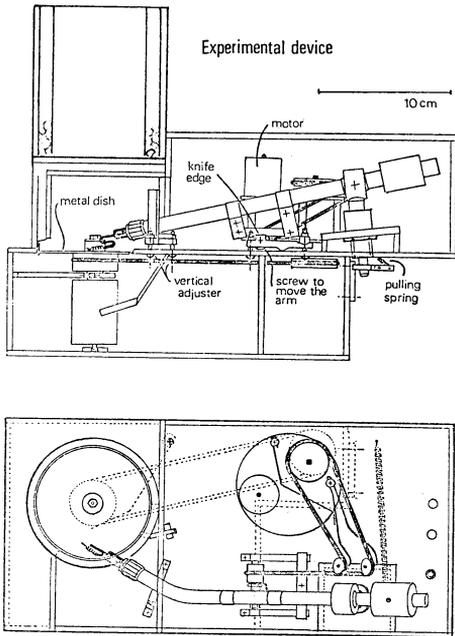
センサー部は, 半径 42.5mm, 厚さ 2.0mm の真鍮板を底とする試料皿と, その中の砂糖溶液の表面を掃引する金属針とで成っている.

試料皿は, その下面が冷却液に接触するように回転軸の最上部にナットで取りつけられる. また試料皿のふちの一か所に凸部を作り, 試料皿の一回転につき一回, 針側の電極と短絡するようにして, 記録紙上に位相信号として負方向のパルスが現れるようにした.

金属針は, アームの先端にとりつけられた銅の針金の台に直径 0.07mm のコンスタンタン線をコイル状に巻いてハンダ付けし, その先端が液の表面に軽く触れるようにする. 針先の弾性定数は 0.0009g/mm 程で, 液面に及ぼす力は約 1mg となる. また先端に氷晶が発生しないようにするため, 液面には小さな角度で触れるようにする.

掃引部の目的は, 試料皿を回転させ, かつ, 針を保持しているアームを皿の内側へ振らせることである.

その構造は直流小型モーターを歯車で減速し, ベルトによって試料皿を約30回/分で回転させ, 同時に他のベルトでアームを約1回/分で振らせる. アームの駆動は, 低速で回転しているボルトにナイフエッジをつけたアームを乗せ, これをボルトの谷の移動に従って動かせる方法による. また, アームが内側まで来ると, カムとコイルスプリングの働きで外側まで復帰する. この時, 針は液面より離れるので,  $R=\infty$  となり, 記録解読の際



第7図 試作した測定装置. 左上の円筒部分で氷晶が発生し, metal dish 内の砂糖溶液中で成長する.

に掃引終了の目印となる.

アームの上下の調節はすべりやすいように上面にガラス棒をつけたスライダーによる. そのため, アームの重さは全てこのスライダーが受け, 先端の針にかかる力は針先自身の弾性力のみとなる. なお, ここで, アームが水平より下向きになっているのは, 試料皿の回転に伴う液面の変形(ゆるやかな回転放物面状の凹面)に針の動きを近付けるためである.

**b. 冷却法**

この装置には冷却部が二か所ある. 一つは氷晶核を活性化させ, 氷晶を作るために試料空気を冷却するもので, 円筒形であって試料皿の真上に位置する. その外側はアクリル筒で直径 10cm, 肉厚 5 mm であり, 内側は銅板でできた円筒である. 銅の円筒内の体積 500ml の空間に試料空気が入る. アクリル筒と銅筒の間のすき間は 15mm であって, ここにエチレングリコールと水の混合物を入れて冷却する. その温度は  $-30^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$  であって, ドライアイスの小塊の投入および自然昇温によって調節する.

もう一つの冷却部は, 氷晶を成長させる試料皿を冷却させるもので, 試料皿の下に位置し, 容積は約 2.4l である. ここにもエチレングリコールと水の混合物を入

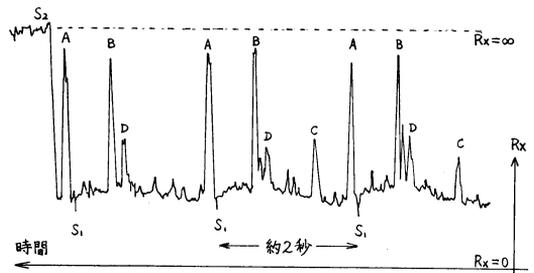
れ,  $-15^{\circ}\text{C} \sim -11^{\circ}\text{C}$  となるように冷蔵庫内のさらに低温の同液との交換および自然昇温で調節する.

**c. 信号記録法**

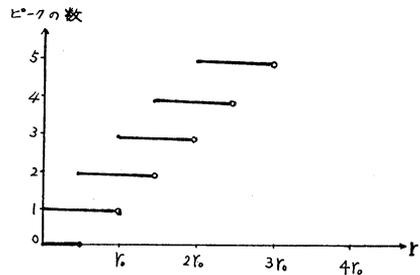
先に比抵抗の測定の項で述べた分圧器を試料皿—金属針間に接続し, この間の抵抗値を交流電圧に変換する. この信号を交流用ペンレコーダーに入力すれば抵抗値が記録できるわけであるが, この場合, 直接にペンレコーダーに入力したのではペンの追従が遅いために正確な記録ができない. そのため, この信号をテープレコーダーで高速録音, 低速再生によって16倍ないし64倍に時間を引き伸ばしてからペンレコーダーに記録させる. ペンレコーダーの入力は性能の関係で 30Hz 以上でなくてはならないので, 発振器の出力は (64 倍のとき) 約 2 kHz 以上となる.

**d. 信号の解読法**

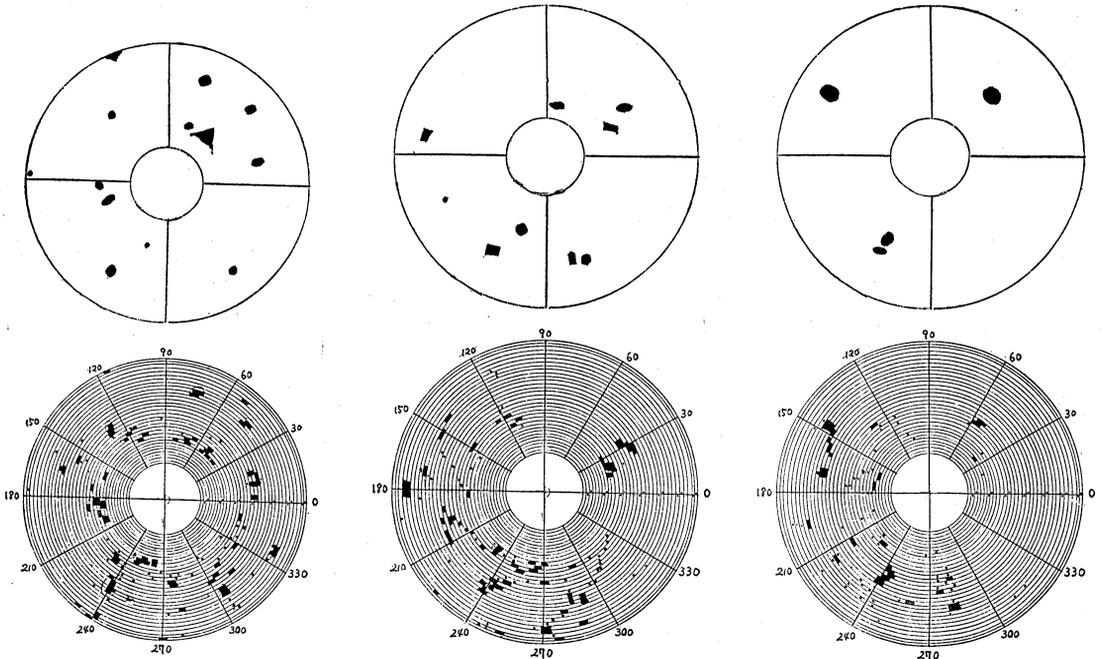
上の方法で得られた, 時間対抵抗値のグラフの例を第8図に示す. このようなグラフは次の様に扱われる. まず, 記録内の位相信号より試料皿の回転周期に対する記録紙上の長さを求める. 次に記録紙上でこの長さだけ離



第8図 測定記録の例. 同一符号をつけたピークは, ちょうど一周期だけずれているので, 同一の氷晶によるものである.  $S_1$  は位相信号.  $S_2$  は走査の終了を示す  $R_x = \infty$  の値 (針が液面から離れたとき) である.  $S_2$  上の凸凹はテープの不均一等に起因するノイズと思われる.



第9図 検出されたピーク数と氷晶の半径との関係



(a) 1974年1月25日15時40分  
試料空気温度 $-14^{\circ}\text{C}$ , 溶  
液温度 $-11.0^{\circ}\text{C}$ , 場所:  
気象大学校内

(b) 1974年1月25日15時50分,  
試料空気温度 $-13.5^{\circ}\text{C}$ , 溶  
液温度 $-11.2^{\circ}\text{C}$ , 場所: 気  
象大学校内

(c) 1974年1月25日16時09分,  
試料空気温度 $-13.2^{\circ}\text{C}$ , 溶  
液温度 $-12.2^{\circ}\text{C}$ , 場所: 気  
象大学校内

第10図 測定結果例. 上は写真より氷晶の分布をスケッチしたもの. 下はこの測定装置による記録から手作業で試料皿内の抵抗値のピークの場所を再現したもの.

れた時点にある抵抗値のピークに着目する. 大きい氷晶は針が何回も掃引するので数回のピークが回転周期ごとに現れる. 小さい氷晶は針が一回だけ掃引する. 更に小さい氷晶は, 針の走路の間であって計測されないことになる. このピークの数とその原因となった氷晶の半径との関係は第9図のようになると考えられる. ここで $r$ は氷晶の半径,  $r_0$ は針の走査のピッチである.  $x$ 個のピークで検出された氷晶の個数を $f(x)$ とし, 記録紙上で読みとれた $x$ の最大値を $n$ とすると, 全体の氷晶数 $X$ は,

$$X = \sum_{x=0}^n f(x)$$

となるが,  $f(0)$ の値は観測できない. これは, 氷晶は存在したが直径が小さかったためにピークとして表われなかったものの数であり, 掃引の幅を縮小することによって少なくすることができるものである. 本装置を用いた観測例においては, 個数そのものに重さを置かず, 観測

時の写真記録との全体的な一致に注意した.

また, 全く別の信号解読の方法として, テープレコーダーからの信号によって, 位相信号に同期して信号の振幅変化を輝度変化で表示できる装置があれば, 簡単に試料皿内の状態を再現できると思われるが, 後述の観測例では, これと同じ事を手作業で行なった.

#### 4. 本装置による観測例

1974年1月下旬から2月にかけて, 本装置による観測を行なった. 装置の働きはだいたい予期したものが得られた. このうちの数例を第10図に示す. 図の下部は本装置の記録から試料皿内の氷晶分布を再現したもの, 上部は実験時の写真で確認できる氷晶をスケッチしたものである. 手作業による誤差や, 写真の不鮮明などによる見落としを考慮すると, 上下の図の間にはよい対応があり, この装置による計数は信頼できるものになり得ると思われる.

#### 5. 測定上の問題点と吟味

上の測定を行なうにあたって現れた問題点は次の様で

ある。

(1) 針先が少しの力で曲がってしまうことがあり測定のためにアームの駆動部やスライダーを調節しなければ、針先が液面から離れてしまうことがある。

(2) 試料皿内の砂糖溶液の深さが浅いと、氷晶が成長して底まで達することがあり、そのとき氷晶の上面が液面より高く空中にせり上り、その表面に露がおりて液体化して針による検出ができなくなる。

(3) 逆に砂糖溶液の深さが深いと、試料皿の回転に伴って液面がゆれ動き、針先の走査が不正確になる。

(4) 液面のゆれ動きを防ぐために溶液内に枠に張って広げたガーゼを沈めてみたら、この目的は達せられたが、溶液の冷却が悪くなったようで、氷晶の発生が少なくなった。

これらの点に対する対策としては、(1)については、針の材質を吟味し、適当な加工を行なうこと、(2)～(4)については、砂糖溶液の濃度を上げ、温度を下げ粘性を増したり、また、試料皿を回転させる方法から、皿を固定して針の方を動かす方法に換えることなど

によって解決できるであろう。また、ゾンデとするには冷却器が重すぎるので、上空での低い気温を利用する様な工夫が必要となろう。

## 6. むすび

この研究は気象大学校で昭和48年度卒業研究として行なわれたものである。ご指導いただいた、駒林誠教授に深く感謝致します。また、実験装置の製作について、便宜を計っていただいた、木下肇助教授はじめ、いろいろとご指導いただいた先生方に感謝します。

## 文 献

- Bigg, E.K. 1957: A new technique for ice-forming nuclei in aerosols. *Tellus* **3**, 394-400.  
Bowen, E.G. 1953: The influence of meteoritic dust on rainfall. *Aust. J. Phys.* **6**, 490-497.  
Bowen, E.G. 1956: The relation between rainfall and meteor showers. *J. Meteor.* **13**, 142-151.  
Mason, B.J. 1971: *The Physics of Cloud* (2nd ed.). Oxford University Press, 174-

## 第18期 第2回 理事会議事録

日 時 昭和49年11月6日(水) 19.00~20.45

場 所 福岡市 はかた会館

出席者 磯野, 小平, 浅井, 大井, 奥田, 神山, 河村,  
北川, 二宮, 丸山, 川村, 孫野, 田中, 伊藤,  
中島, 窪田, 山元, 坂上, 沢田, 各理事  
藤田監事

臨席者 長田九州支部常任理事

### 報 告

[庶 務]

1. 気象庁から、気象百年史の委託販売について申し入れがあり細部について打合せ中
2. 気象庁から100年記念論文集の発行依頼があったが財政面でリスクをおかさない範囲で実施できるよう検討している。

[浅井理事] GARP 2nd Objective について

7月末に JOC 主催の国際集会有り、人間環境、気候変動の問題を GARP の 2nd Objective と考え、どの点を推進していくべきか検討が行なわれた。

[理 事 長] 台風の人工制御に関する Informal Meeting を本日開催した経過報告があった。

### 議 題

#### 1. 会費値上げについて

会計理事より資料により物価上昇率15%, 20%, 25%, の場合について、0%, 7%, 12%, の値上げが必要なことの説明があった。

多くの意見が出されたが主なるものは、

- (1) 事業計画の縮少は考えないか。
- (2) 会員の減少を生じないようスムーズに行なう必要がある、2年連続はさけた方がよい。
- (3) 事情をよく理解できるようなPRが必要である。
- (4) 会員にアンケートをとったらどうか。更に常任理事会で検討する。

#### 2. ノート担当委員の追加

青木忠生(東北大, 理学部) 会員追加を承認

#### 3. 東レ科学技術助成候補者推薦について

杉村行男(気研地球化学研究部)の「大気-海洋における炭酸ガスの交換について」を推薦する。

承認事項 新入会員前田実ほか7名の入会承認