

熱映像による筑波山の温暖帯の測定*

小林 守**

要 旨

熱映像を用いて、筑波山の斜面の温暖帯 (thermal belt) を冬 (1978年1月28日) に測定した。その結果、早朝 (7時) の顕著な斜面の温暖帯を面的に詳細なパターンでとらえることができた。温暖帯は、南斜面から西斜面を経て北西斜面の中腹域に、海拔高度約 250m を中心に帯状に分布しており、山麓平地面との温度差は最大 6°C であった。この温暖帯の位置および分布パターンは南斜面の日最低気温分布との対応もよく、従来の知見とはほぼ一致している。

斜面の温暖帯をとらえるために熱映像は有用であることが明らかになった。ただし、厳密にとらえるには、射出率の補正・大気層の影響の補正を考慮する必要がある。

1. はじめに

筑波山中腹地帯は古くから温暖であり、みかん、柿などの果樹栽培に適していることが知られている (岩上, 1904)。従来、斜面の温暖帯の研究は、主に農業気象の立場から行なわれてきた (Yoshino, 1968, 1975)。平野のなかの孤立峰である筑波山では、放射冷却および冷気湖が原因して強い接地逆転層が生じるため、斜面の温暖帯が形成されやすく、海拔高度 100~400 m、とくに 200~300 m 付近に位置することが知られている (茨城県, 1955; 茨城県・水戸測候所, 1957; 郡司, 1958)。

さて、山地における日常業務としての気象資料は少なく、斜面の温暖帯の研究をするには特別観測をせざるを得ないのが現状である。しかし、従来の特別観測では、多大の労力がかかり、山地のため物理的に温度計の設置が不可能な場合さえあり、また、観測地点の代表性の問題などにより点のデータを面のデータに置き換えるのに多少の無理が伴うため、斜面の温暖帯の正確な分布を知るには難点がある。

そこで、本研究では、いくつかの問題点 (測定すべき対象物の射出率、センサーと対象物間に介在する大気層の影響など) はあるものの、同じセンサーによって短時間に広範囲の面的な温度情報を得ることのできるリモートセンシング技術 (熱映像) を用いることによって、筑

波山斜面の温暖帯の分布パターンを真に面的に知ることを用意した。熱映像の実際面への応用は温排水の拡散のパターンの調査など数多くなされているが、斜面の温暖帯への適用例はない。

なお、斜面の温暖帯は、従来どおり、山地斜面の接地気層 (高さ約 1.5 m) において最も気温の高い地域と考えるが、周知のとおり、熱映像による温度情報は地表面温度である。そこで、厳密には地表面温度を気温に変換して考えなければならないが、本研究では斜面の温暖帯のある程度の相対的な分布パターンが判明すればよいという考えから、気温と地表面温度とは近似的関係にあるものと仮定し、気温への変換を考慮せず論をすすめる。

2. 測定

2.1. 測定期日・時刻および気象状況

斜面の温暖帯、気温の逆転現象は冬季の晴れた静穏時に、しかも夜間に明瞭に発達しやすい。そこで、1978年1月28日の早朝7時 (ほぼ最低気温出現時) に測定した。また、比較のために、同日14時30分 (ほぼ最高気温出現時) にも測定した。

前日 (27日) は大陸性高気圧の張り出しによりほぼ全国的に快晴であり、当日 (28日) は北高型で東シナ海に低気圧が現われ、茨城地方では日中にはうす曇であった。筑波山での現地観測によれば、28日早朝7時20分頃までは雲量は0~1で、上層に雲が散在しているのみであり、かつ微風であったので、斜面の温暖帯の出現には好都合な気象条件下にあった。しかし、14時30分頃は西風が強く全天うすい上層の雲におおわれ、ときおりうす日のさす曇天であった。

* Thermal Scanner Measurement of Thermal Belt in Mt. Tsukuba.

** M. Kobayashi, 筑波大学.

—1979年1月29日受領—

—1979年2月3日受理—

2.2. 測定項目および測定方法

2.2.1. 熱映像資料

対象物表面の温度分布を映像の形で表示・記録するため、小形航空機に搭載した熱映像装置 IRA-301 (富士通製) により撮影高度5,000 ft (約1,500 m) で、日の出 (6時45分) 直後の7時と、日中の14時30分に測定した。この装置は、地表から放射される8~14 μm の波長域 (大気窓領域) の赤外線放射をライン・スキャン方式で走査検知し、飛行経路に沿った地表の温度パターンを連続記録する。温度分解能は0.1°C (300°K において) である。撮影地域は第1図(a)に示したとおりである。

また、同時搭載した赤外線放射温度計 ER-2002 型 (松下通信工業製) で撮影地域の中心軸の地表面温度を連続測定した。同器の感度は0.1°C、使用波長域は8.5~12 μm であり、測点スポットの大きさは視野角 2°, 高

度5,000 ft であるから、半径 26 m 程度である。

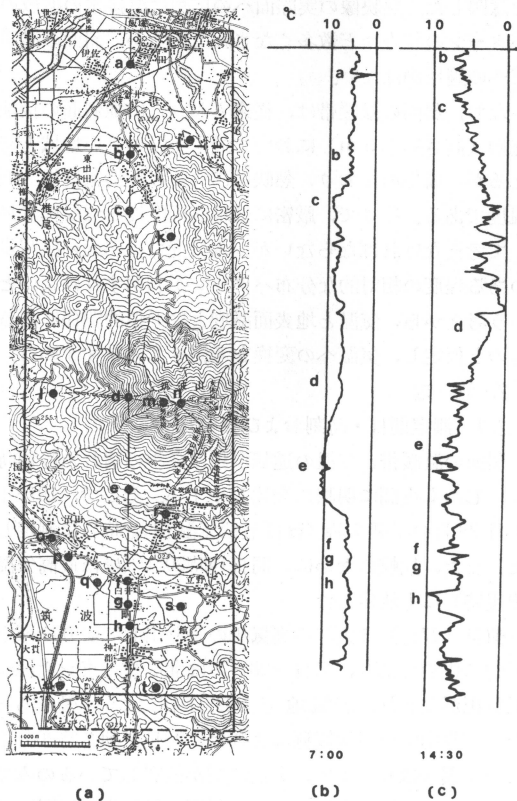
2.2.2. 日最低気温資料

熱映像による調査では、他のリモートセンシング調査と同様に現地調査を必要とする。今回は温暖帯の相対的な像が判明すればよいということで、地表面温度の測定は実施せず、ルサホード型最低温度計を26ヶ所 (第4図参照) に設置し、日最低気温の測定を筑波山南斜面において行なった。測定点の選定にあたっては、植生や集落の影響を直接受けないこと、および南斜面全面に分布するように配慮した。

3. 測定結果

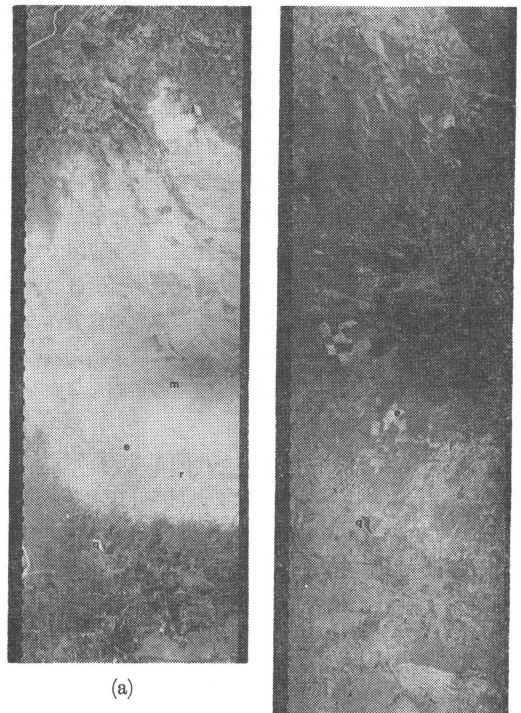
3.1. 熱映像の処理について

熱映像の目的は温度とその分布形を調査することにある。今回は分布形の把握に主眼をおいたため、測光的な処理を行なうに際し、映像濃度と温度との対応関係を数値的に求めることはしなかった。航空機測定により得られた熱映像写真 (ポジ) を第2図(a), (b) に示す。高温域は白く、低温域は黒いので、温度分布パターンを見るのに便利である。さらに、温度の分布形を鮮明に調べるため、映像濃度を等分割して色調で表示した。用いた装置

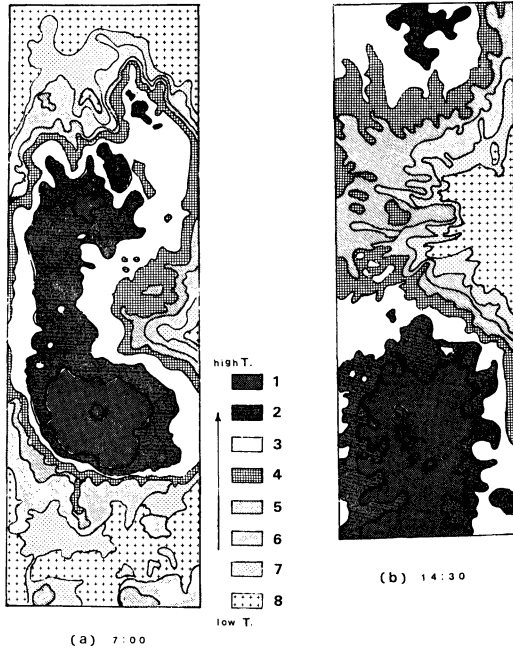


第1図 熱映像撮影地域(a)と放射温度(b), (c).

注) (a)一実線で7時、破線で14時30分の地域を示す。(b), (c)一測定時の最低温度を基準にし相対値で示す。



第2図 熱映像写真。(a) 7:00, (b) 14:30



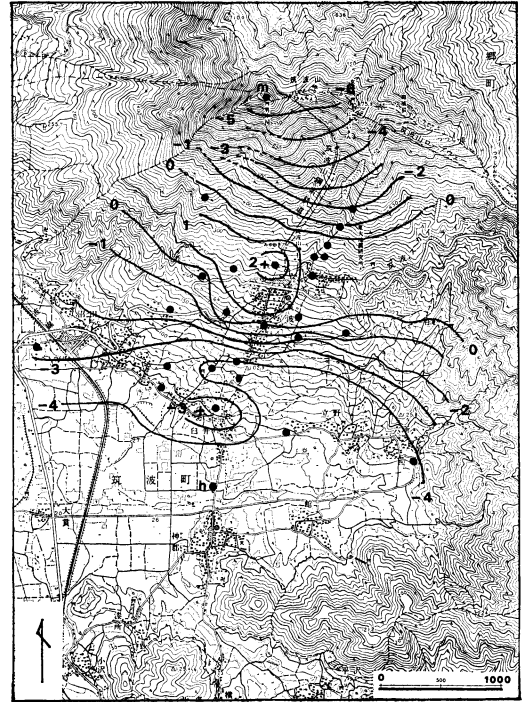
第3図 等濃度区分図。

はアナログ方式のカラーデータシステム1200B型（ナック社製）である。本装置は単一バンドの白黒写真の濃度を12段階に色別けして画像解析を行なうことができる。つまり、白黒濃度をカラーに置き換えて識別することが可能である。得られたデータカラー写真を等濃度区分図表示で第3図(a), (b)に示す。第3図(a), (b)は、それぞれ10段階でカラー表示した写真を8段階の濃度区分で示したもので、必ずしも等分割されてはいない。また、写真が示す詳細な点は省略して図示されている。

第1図(b), (c)は、第1図(a)の中央軸に沿う赤外放射温度を相対値で表示したものである。赤外放射温度計の走査経路は、熱映像のスポット濃度計での測定値と放射温度記録とを対応して決めた。なお、第1図(a)に示すように、走査経路に沿う8地点(a~h)、および、その他の特徴のある13地点(i~u)には符号をつけ説明の助けとしている。

3.2. 早朝（7時）の測定結果

第1図(b)によれば、一見して筑波山北麓（地点a, b）および南麓（f, g, h）は同程度に低温であり、山頂付近（d）もかなり低温であるが、一方、中腹斜面（c, e）で高温域が、すなわち斜面の温暖帯が出現している様子が判明しよう。その分布パターンは熱映像（第2図(a)）でもおおよそわかるが、等濃度区分図（第3図(a)）



第4図 筑波山南斜面の日最低気温分布（°C）（1978年1月28日）。

●：測定点

に明確に示されている。ここで、斜面の温暖帯を濃度区分1および2の地域（山麓平地とは約3°C以上の温度差のある地域に相当する）と定義すれば、温暖帯は南斜面から西斜面を経て、山頂・羽鳥・真壁を結ぶ北西斜面の中腹域に海拔高度約250mを中心に带状に分布していることが見事にとらえられている。その分布域は南ないし南西斜面で最も広く顕著であり（海拔約100~500m）、ついで、北西斜面（約150~400m）、西斜面（約250~400m）の順に顕著である。各斜面における最も温暖な地点と山麓平地との温度差は、南斜面で最も大きく約6°C、北西斜面で約4°Cであった。

第4図に筑波山南斜面の日最低気温分布を示す。温暖帯の中心は中腹（約250m）の筑波周辺に位置し、顕著な斜面の温暖帯が出現していることがみられる。熱映像で便宜的に決めた温暖帯は、日最低気温-2°C以上の地域とかなりよく重なる。また、南斜面における最も温暖な地点と山麓平地との温度差は、熱映像の結果では約6°Cであったが、これもよく一致していることがわかる。絶対値の比較は、熱映像の結果が表面温度であ

り、しかも射出率や大気層の影響を補正していないので無理である。ここでは、相対的な比較にとどめた。また、ここで得られた温暖帯の分布パターンおよび温暖の程度は、従来の研究結果と一致している。

さらに、詳細にみるといくつかの点が指摘できる。従来の結果よりも、温暖帯の分布形は複雑かつ詳細なパターンで表示できることが示された。これは、地表面温度が気温よりも複雑な分布形を示すことも一因ではあるが、従来の観測が少数の点的情報を無理に面的に表示しているため現実の分布形を粗にしかとらえていなかったものと考えられる。この点は熱映像の利点である。また、温度分布は海拔高度と被覆面の相違に相互に依存している。同じ被覆面でも位置する高度により温度が異なる。たとえば、集落（地点 r は f より高温）、畑地（地点 k, l は b や h より高温）はそのよい例であるが、これは高度に伴う温度差に起因している。同高度でも被覆面の違いにより温度が異なっている。たとえば、畑地（地点 e）は周辺の針葉樹林よりも低温となっている。これは、畑地の射出率が小さいことにもよるが、実際に畑地の温度も低いようである。この点については次節で考察する。また、池（地点 j, p, q）、工場（s）は周囲より高温、水田（g）と畑地（h）はほぼ同温であることが示されている。

3.3. 日中（14時30分）の測定結果

放射温度（第1図(c)）、熱映像（第2図(b)）、等濃度区分図（第3図(b)）に示されているように、山麓平地面の高温から山頂付近への低温へと温度は低減しており、温暖帯は出現していない。平地と山頂の温度差は約8°Cであった。日中には斜面の向き相違により日射の分布が一樣ではないので、山の微地形を反映した複雑な温度分布を示しており、また、南斜面と北斜面の温度分布パターンは非対称になっている。山地面の畑地（地点 e）、平地面の畑地（h）は周囲より高温、池（p, q）は周囲より低温である。これらのことは、早朝の測定結果とはまったく逆の状態を示していることがわかる。

4. 考察

斜面の温暖帯の位置および温暖の程度は、従来の研究結果とほぼ一致している。しかし、前節で示された結果が果たして実在するものか、ここで吟味する。赤外放射温度計および熱映像による地表面温度の測定には、二つの解決すべき問題点がある。すなわち、測定すべき対象物の射出率、および、センサーと対象物の間に介在する大気層による影響である。これらの問題を厳密に解くのは容易でないので、ここでは定性的な考察を加えるにと

どめる。

対象物の射出率が1の場合には、測定された放射温度は真の表面温度であるが、自然物体の射出率は通常1より小さいので、補正する必要がある。これに関しては、多くの研究例（たとえば、Buettner *et al.*, 1965; Fuchs *et al.*, 1966, 1968; Idso *et al.*, 1968; Bartholic *et al.*, 1972）がある。Fuchs *et al.* (1966) によれば、放射温度 (T_a) は次式で示される。

$$\sigma T_a^4 = \epsilon \sigma T^4 + (1 - \epsilon) B_s^*$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマンの定数、 T は対象物の真の表面温度、 ϵ は対象物の射出率、 B_s^* は周囲から対象物面への入放射エネルギー量である。この付近の冬季の晴天条件下では天空は低温であり、 $B_s^* = 200 \text{ w/m}^2$ ($= 0.287 \text{ ly/min}$) 程度と考えてよい。また、自然面での射出率のデータは少ないが、多くの作物や土壌では0.95~0.98程度である (Fuchs *et al.*, 1966 など)。今、 $T = 273.16^\circ \text{K}$ とすると、 $\epsilon = 0.95 \sim 0.98$ のとき、被覆面の射出率による影響は、たかだか 0.76°C と見積もられる。したがって、同高度での被覆状態が異なっても、通常の場合、放射温度が 1°C 以上の違いがあれば、表面温度は異なっていると言ってよい。たとえば、早朝の結果で示されているように筑波山中腹でみられた畑地（地点 e）と針葉樹林（荒木, 1978 によれば $\epsilon = 0.97$ ）との放射温度の差 (2°C) は、確かに表面温度の相違を示していることがわかる。

さらに、センサーと対象物の間に介在する大気層の影響を考慮する必要がある。対象物を海面とした研究例が多く (Lorenz, 1967; Gorodetskii *et al.*, 1967; Ogura *et al.*, 1969; 瀧本, 1974 など)、大気状態によって異なり、夏は $1.9 \sim 2.0^\circ \text{C/km}$ 、冬は $0.9 \sim 1.5^\circ \text{C/km}$ 程度の高度による放射温度の低下率が観測されている。また、陸上では海面よりやや大きく、特殊な砂漠での 5.7°C/km (Combs *et al.*, 1965) を除けば、野菜畑で 1.4°C/km (Combs *et al.*, 1965)、河川水面で 1.8°C/km 、葦原で 2.4°C/km (松田ら, 1977) 程度の値が得られている。そこで、乾燥した冬の大気条件下であることを考慮すれば、陸上では放射温度の高さによる低下率は、たかだか 2.4°C/km 程度と考えてもよからう。温暖帯の中心である筑波山中腹（約250 m）と山麓平地（約30 m）の比高差は約220 m であるが、この比高差が放射温度に与える効果は、たかだか 0.53°C と見積もられる。ところが、赤外放射温度による温暖帯の温暖の程度は最大 6°C である（第1図(b)）。したがって、対象物の射出率の相違、および、大気層の影響を考慮しても、十分に

斜面の温暖帯の実在は証明される。

なお、館野の係留気球による測定によれば、28日7時の地上気温は -2°C 、高度100mで約 3°C 、150mで約 4.2°C であり、約 6.2°C の温度逆転があった。また、筑波山麓(第1図(a)の地点h)でのパイバル観測によれば、6時30分では高度400mを境に風のシアーが認められ、殊に350m以下は 2m/s 以下の弱風であった。7時では、この 2m/s 以下の弱風域は高度200m以下に下がっている。これらのデータから、自由大気中では7時頃には接地逆転層の上面が高度150~200mにあったと考えられる。このとき、斜面の温暖帯の中心は比高約220mの位置にあり、これよりやや高い。自由大気中の逆転層と斜面の温暖帯の関連については、まだ十分解明されていない。

5. おわりに

測定結果は次のように要約される。

(1) 熱映像解析の結果、早朝(7時)には顕著な斜面の温暖帯を面的に詳細なパターンで見事とらえることができた。温暖帯は南斜面から西斜面を経て北西斜面の中腹域に、海拔高度約250mを中心に帯状に分布しており、山麓平地面との温度差は最大 6°C であった。

(2) この温暖帯の位置および分布パターンは、南斜面における日最低気温分布との対応もよく、従来の知見と一致していた。

(3) 日中(14時30分)の結果では、温度は高度に伴い低減しており、温暖帯は存在しなかった。

(4) なお、温度分布は海拔高度と被覆面の相違に依存しており、たとえば、同高度に位置する畑地と森林では温度が異なり、同じ畑地でも位置する高度により温度が異なることが示された。

(5) 以上の結果は、射出率の補正、大気層の補正を考慮しても定性的に言えるが、斜面の温暖帯は通常、気温について言われているのに対し、放射温度計・熱映像装置を用いて得られるのは表面の温度情報であるので、問題はなお残る。

今後、熱映像により斜面の温暖帯を厳密に定量的にとらえるには、正確なグラントルースを実施し、射出率・大気層の影響の正確な補正をふまえて地表面温度を算定し、さらに、地表面温度を気温に対応づける努力をする必要がある。

本稿を作成するに際し、筑波大学 吉野正敏教授、田宮兵衛講師、高層気象台観測第1課長 鈴木弥幸氏に貴重な資料を提供していただいた。測定にあたっては、アジア航測、および筑波大学地球科学・環境科学研究科の

院生諸氏にお世話になった。とくに、筑波大学 河村武教授、辰巳修三教授、安仁屋政武講師には終始お世話いただいた。記して謝意を表します。

文 献

- 荒木春視, 1978: 赤外線写真・赤外線映像の土質調査への応用, APA, 4, 89-96.
- Bartholic, J.F., L.N. Namken and C.L. Wiegand, 1972: Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and of crop canopies differing in water stress, Agron. J., 64, 603-608.
- Buettner, K.J.K. and C.D. Kern, 1965: The determination of infrared emissivities of terrestrial surfaces, J. Geophys. Res., 70, 1329-1337.
- Combs, A.C., H.K. Weickmann, C. Mader and A. Tebo, 1965: Application of infrared radiometers to meteorology, JAM, 4, 253-262.
- Fuchs, M. and C.B. Tanner, 1966: Infrared thermometry of vegetation, Agron. J., 58, 597-601.
- and ——, 1968: Surface temperature measurements of bare soils, JAM, 7, 303-305.
- 河本正隆, 1974: 熱映像, 写真測量, 13, 19-31.
- Gorodetskii, A.K., A.S. Gurvich and A.V. Migulin, 1967: The determination of the ground surface temperature from an aeroplane by measuring the outgoing radiation in the 8-12 micron band, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 3, 654-657, (English translation, 373-375).
- 郡司 助, 1958: 筑波山麓における気温の逆転について, 産業気象調査報告, 21, 89-91.
- 茨城県, 1955: 筑波山麓における果樹適応性調査, 科学技術研究報告, 1, 1-31.
- 茨城県・水戸測候所, 1956, 1957: 筑波山麓における果樹適応性調査, 昭和31年度報告および総合報告, 1-69.
- Idso, S.B. and R.D. Jackson, 1968: A note on the role of sky radiance in infrared thermometry, JAM, 7, 521-522.
- 岩上長作, 1904: 筑波山, 交通世界社, 42.
- Lorenz, D., 1967: Temperaturmessungen von Boden und Wasseroberflächen von Luftfahrzeugen aus, PAGEOPH, 67, 197-220.
- 松田博幸, 本山 満, 佐藤浩二, 成ヶ沢憲太郎, 1977: 地表対象物の分光放射輝度係数および放射温度の高度別観測結果, 写真測量とリモートセンシング, 16, 13-21.
- Ogura, Y., A. Takeda, R. Kimura, K. Taira and T. Nakai, 1969: Survey of sea surface temperature of the Tsushima warm current with seaborne and airborne radiation thermometers, J. Met. Soc. Japan, 47, 310-318.
- Yoshino, M.M., 1968: Problems in local and micro climatology in relation to agriculture in

Japan, Agroclimatological method, Proceedings of the reading Symposium, UNESCO, 269-280.

Yoshino, M.M., 1975: Climate in a small area, Univ. of Tokyo Press, 429-434.

第20期 第4回 常任理事会議事録

日時 昭和53年12月21日(木) 15.00~17.00
場所 気象庁予報部会議室
出席者 岸保, 小平, 内田, 植村, 河村, 関根, 新田, 松本, 増田, 山下.

報告

[庶務]

- 11月21日, 日中科学技術交流協会会長から, 学協会関係の国際会議および総会, シンポジウムに中国の科学者が参加できるかどうかの照会がきた(本日の議題とする).
- 12月1日, 昭和54年度日本気象学会春季大会の当番である気象庁観測部長から, 期日, シンポジウムの標題等について回答がきた(本日の議題とする).
- 12月2日, 昭和52年度に奨励金を受領された札幌管区の宮川和夫会員および永沢義副会員から, 「オホーツク海沿岸の気流調査」の研究報告書が提出された.
- 12月19日, 当学会東北支部長から, 日本気象学会昭和53年度秋季大会決算報告書が送られてきた.
- 12月19日, 当学会九州支部長から, 昭和54年度日本気象学会秋季大会会場等について通知がきた.
- 12月19日, 朝日新聞社から, 朝日学術奨励金候補者推薦依頼がきた(締切2月28日).

[天気]

- 年間の印刷頁数が780頁なので1ヵ月65頁になるように心掛けたい.
- 気象衛星の写真をモノクロで解説文つきで1月号から, カラー写真は4月号以降にのせたい.
- 夏季大学用普及講座は, 3, 4, 5月号に掲載したい.
- ニュース欄に国際的なものを検討してゆき早く会員に知らせるようにしたい.

[気象集誌]

- 再投稿の投稿規程については, 次回の編集委員会で検討したい.
- 最終号にインデックスをつけるようにしたい, 昔のものについては1980年頃実施の方向で検討したい.

[気象研究ノート]

1. 編集委員補充

測定, 特にリモートセンシングによる測定部門が弱体なので, 宮内正厚会員(気象研究所高層物理研究部)を編集委員に補充したい.

2. 出版予定

- 融雪なだれ特集 印刷中1~2月中出版予定
 - エエロゾル基礎編 原稿12月末入手予定
 - 集中豪雨論(仮題) 1979年3月原稿入手予定
 - 気候変動シンポジウム 同上
 - 天気解析 1979年3月原稿入手予定
 - レーダ気象 1979年8月原稿入手予定
 - エエロゾル応用編 1979年12月原稿入手予定
- (注)「放射」すでに予定を経過しているが著者の都合で出版予定はつかない.

[講演企画]

- 秋季大会予稿集にかなり乱丁のものがあつた.
- 気候変動シンポジウムで, 講演予定の大阪大学の川中直人先生が病気で欠席となりご迷惑をかけることとなった.
- 昭和54年度の春季大会シンポジウムは中層大気を取り上げたい. ア. MAPとは何か イ. 中層大気の組成 ウ. 力学.

議題

- 新しい賞の設置について 去る11月14日仙台での全国理事会で本件について討議したが, その後山本義一名誉会員から岸保理事長に次のとおり申し出があつた. 1) 新しい賞に基金を出したい. その際賞の名称を「山本賞」にしてほしい. 2) 賞金の額は学会賞, 藤原賞と同じく1件10万円にしてほしい. 3) 基金は, 藤原賞と同じ取り扱いにして利息で賞金を出すようにしてほしい. 以上の希望条件を受け入れ, 承認することとなった. なお, 最終決定前に理事長から全国理事にいきさつを述べ意見を聞くことになった. また, これに伴い新田担当理事から山本賞の選定規定(案), 同選考規定(内規・案)の説明があり一部修正のうえ了承された.