

異常天候の研究（第1報）

山元龍三郎・岩嶋 樹也・星合 誠

STUDIES ON EXCEPTIONAL WEATHER (I)

By Ryozaaburo YAMAMOTO, Tatsuya IWASHIMA and Makoto HOSHIAI

Synopsis

Some results of preliminary studies of the exceptional weather are presented. Global mean surface air temperature data are analysed, firstly, by using the interpolation method of cubic spline under tension, and secondly, the optimum interpolation method. Finally, OMEGA CLIMATOLOGY is proposed, with some preliminary results of analysis.

1. 緒 言

台風や集中豪雨に比べると、1か月以上にわたる夏の異常低温やかんばつ等の異常天候は、現象そのものは激しくはないが、農業生産等の社会活動に対して著しい影響を与え、被害も甚大である。そのために、古くから多くの研究が行なわれ、また気象庁の予報官も異常天候の予測法の確立に努力している。しかし、異常天候は極めて複雑なメカニズムの結果として発現しているものであり、その実態把握すら充分になされていないのが現状である。異常天候は局地的現象ではなく、地球全体ないし半球規模のメカニズムの結果として理解すべき多くの証拠がある。対流圏・成層圏における気候資料が、最近集積され、また気象衛星資料も多年にわたって蓄積されて来たので、異常天候の実態把握に必要な観測資料が、従前とは比較にならない位充実して来た。1970年代はじめ、サハラ砂漠の南縁で大かんばつが起こって地球の気候が異常になりつつあるのではないかと心配が流布されたり、また1976年から1977年にかけての冬季に米国中部で異常低温が発現して氷河期に近づいているのではないかと懸念さえ生じているかに見受けられる。このような状況は、異常天候の実態把握とその予測法の確立のための研究の重要性・緊急性を示すものである。

2. 異常天候のスケール

わが国に大きい被害を与える異常天候の1つは北日本の夏季の低温である。Fig. 1は、根室における6月、7月および8月の3か月平均地上気温の年々の推移を、93年間にわたって示したものである。93年の全期間の平均値は13.8°Cであり、既往最低は1913年の11.3°C、第2位は1954年の11.4°Cである。北半球の気象観測網がかなり充実して、月平均気温の年平均偏差の世界的分布を調べる事が出来るようになったのは1950年以降である。Fig. 2は、1954年7月における月平均気温の年平均偏差の分布を示している。わが国附近の低温の他に、シベリア西部・カナダ南東部および南西部でも2°C程度の低温が認められるが、他方、東ヨーロッパでは年より4°Cも高温であり、シベリア東部でも2°C位の高温域が存在する。このように、ある地域で年平均偏差が負である時、他の所では正偏差が発現するというのが通常である。Fig. 3は、根室、オホーツク(59°22'N, 143°12'E)およびベルホヤンスク(67°33'N, 133°23'E)での7月の月平均気温の年々の推移を示している。根室の1941年、1945年および1954年の低温が目される。オホーツクでは前の2年については、根室と同様に低温となっているが、1954年については、ほぼ年値に近い気温である。一方、ベルホヤンスクでは、1941年と1954年には、根室とは逆に、年より高温となっていて、1945年には年値に近い値

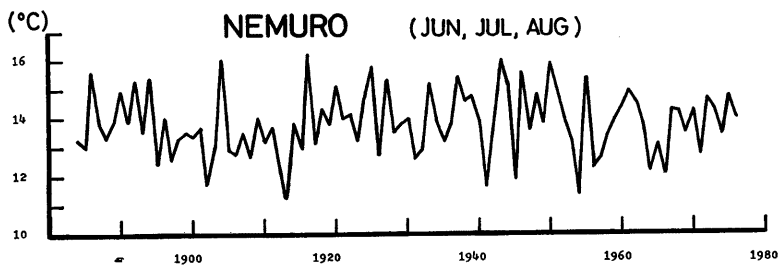


Fig. 1. 3-month mean of surface air temperature of June, July and August at Nemuro ($43^{\circ}20'N$, $145^{\circ}35'E$).

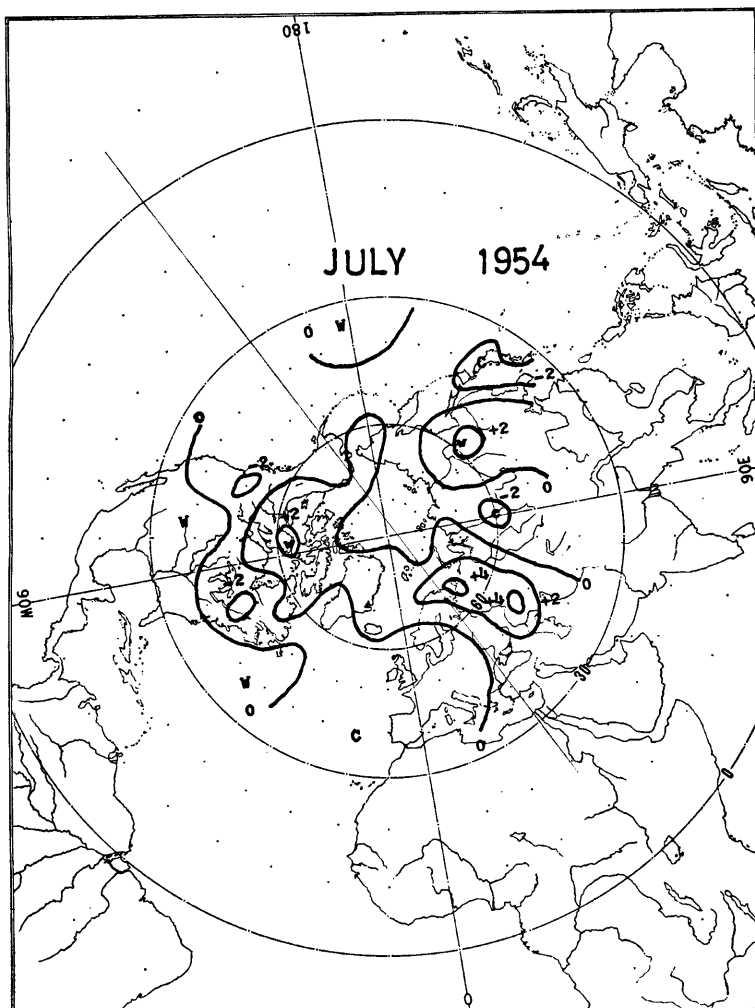


Fig. 2. Anomaly of monthly mean surface air temperature in July 1954 in unit of degree Centigrade.

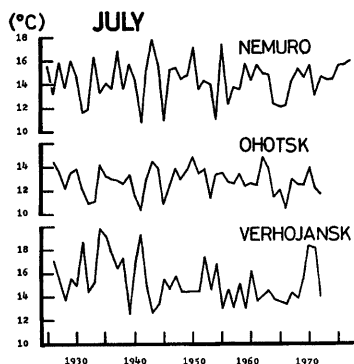


Fig. 3. Monthly mean surface air temperature of July at Nemuro (43°20'N, 145°35'E), Ohotsk (59°22'N, 143°12'E) and Verhojansk (67°33'N, 133°23'E).

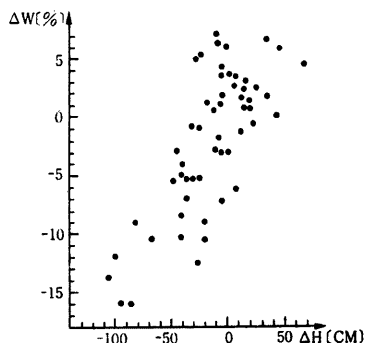


Fig. 4. Relationship between change of level of Caspian Sea (ΔH) and that of wheat yield in the United States of America (ΔW), after Budyko¹⁾.

が現われている。このように、異常低温はある地域内で発現するが、少し離れた所では逆に平年より高温になる事もあり、それらの間の対応は一定せず、時によって異なる。

Fig. 4 は、米国の小麦生産額の相対変化 (ΔW) とカスピ海の水位変化 (ΔH) の関係を示したもので、両者の間の相関係数は0.74である。この図は、Budyko¹⁾ の最近の論文から再録したものである。米国の穀倉地帯の降水量が少なく小麦の生産が減少した年においては、カスピ海の流域の降水量が平年以下でカスピ海の水位が低下している事が示されている。すなわち、10,000km 以上も離れた米国と東ヨーロッパの降水量の変化に、統計的に密接な関係がある事が判る。

以上述べた事から明らかなように、異常天候は広域の現象の結果として理解すべきものである。そのため、今迄も、北半球天気図などを用いて広域にわたる調査研究がなされて来た。天気図は、大気運動の概況を知るためには極めて有用なものである。天気図で示される大気運動は、一般に地衡風近似という条件の制約を受けた近似的なものであって、降水などを支配する大気の鉛直運動を、これから直接求める事が出来ない。これに対して、上層風の実測データを用いると、特別の仮定なしで鉛直運動を求める事が可能である。この研究では、世界の気候の実測データを収集し、解析を行なって異常天候の実態を把握しようとした。

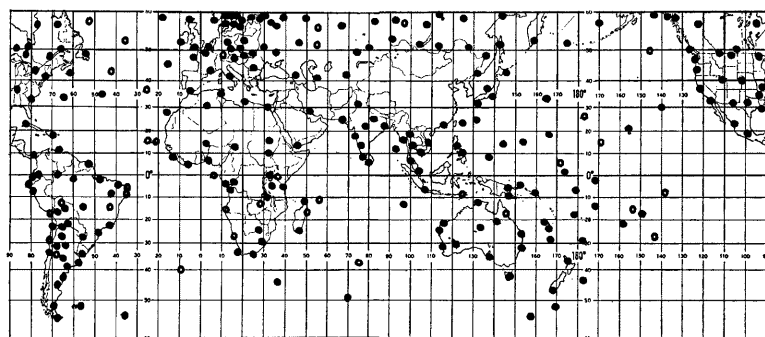
3. 全球平均気温の推移

異常低温の発現など、地上気温の広域パターンの把握が今まで試みられて来た。しかし、海洋上や極地方では観測点が少ないので、特別の工夫をしなければ、半球全体の平均気温の推移は勿論の事、広域の温度パターンの把握も出来ない。Willett²⁾ や Mitchell³⁾ は、世界の気象観測所を緯度帯別に区分し、ある緯度帯内に含まれる観測所の気温の単純な平均をその緯度帯の平均気温と仮定して、南北西半球および全球平均気温を求めた。しかし、観測所が温度パターンに関係して配置されたものではないので、彼らの解析方法の妥当性には問題があって、その改良が望まれていた。筆者ら^{4), 5)} は、今世紀半ば頃から世界の気象観測網がかなり充実して来た事、および2次元平面内に不規則に分布している地点の値を客観的に内挿する方法が開発されて来た事に着目して、月平均地上気温の平年偏差の全球的パターンを求める事にした。

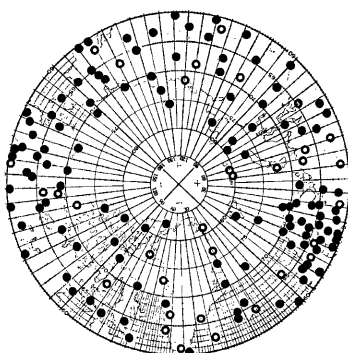
1951年1月から1975年12月までの25年間にわたって、全世界の431カ所の月平均地上気温の資料を収集し、各観測所毎に各月の25年平均気温を求めて、それからの偏差を各年について計算した。このような月平均気

温の平年偏差を, cubic spline under tension⁴⁾ という客観解析法により内挿して, 緯度および経度 5° 毎の格子点の値を算定した。平年偏差を用いたので, 観測所の海拔高度の差異による影響は, かなり軽減されている。Figs. 5a, 5b, 5c は観測所の配置を示したもので, 黒丸は 1951 年 1 月以降資料のある観測所を示しており, 白丸は 1957 年 1 月からの資料がある所である。

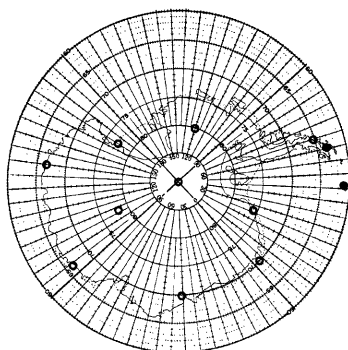
緯度円に沿う格子点の値の平均から帯状(緯度円に沿う)平均値が容易に得られる。これらの帯状平均値を, 緯度円の長さを考慮して極から赤道まで積分すると, 半球平均気温が算定出来る。南半球では, 1951 年頃は未だ観測網の充実があまり進んでいなかったのて, 1957 年 1 月以降についてのみ解析する事とした。解析結果を Fig. 6 に示す。ここでは, 推移の概略を示すために, 36 カ月の移動平均をほどこしてある。25 年間に, 0.2°C 程度の変化があった事が判るが, 1963 年以降の低温が北半球で顕著である。しかし極く最近では, 北半球の低温はおさまって, 平年値になって来た。南半球では, 特に極地方での昇温が 1970 年代のはじめに注目されていたが⁷⁾, 半球平均温度は極大を経て, 最近, 低下傾向にある事が判る。全球平均気温は, 1963 年頃から平年以下になっているが, これは, 1963 年 3 月におこったバリ島のアグン火山の大噴火により



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Network of monthly mean surface air temperature. Dot shows the station with available data since January 1951, and circle the station without the data from January 1951 to December 1956.

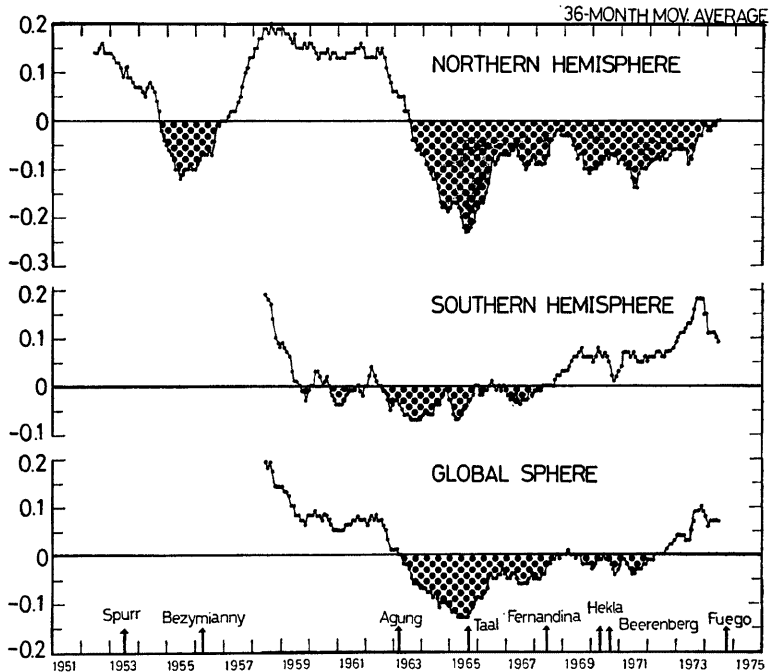


Fig. 6. 36-month running mean of surface air temperature anomaly averaged over Northern Hemisphere, Southern Hemisphere and the whole globe. Arrow shows great eruption of volcano which ejected large amount of dust into the stratosphere.

成層圏に吹き上げられた噴煙が日射を妨げたためだと考えられる。Fig. 6 では、成層圏にまで多量の噴煙を吹き上げた火山噴火を矢印で示してあるが、これらの中でも上述のアグン火山の噴火は最も大規模なものであった⁸⁾。全球平均気温は、最近では、アグン噴火の前の値にほぼ回復した事が認められる。

4. 世界気候資料の客観解析

南北両半球および全球平均気温を求めた筆者らの上述の研究は、Willett や Mitchell の解析方法に比べると格段の精度を持つといえる。しかし、解析誤差が果してどの程度かを指示する事は容易でない。それゆえ、今まで開発されてきた客観解析法を検討して、異常天候の研究に有用なものを選択する事にした。ここで取り上げる事にしたのは、最適内挿法である。気象学における数値天気予報の初期状態を設定するために、主としてソ連で、最適内挿法が用いられて来た⁹⁾。その際、気象資料は、観測値そのもので、いわば瞬間値である。この研究では主に1ヵ月平均値の解析にこの方法を用いるのである。

今、 n 個の観測所から成る観測網を考える。それらの観測所での観測値を $\hat{f}_i (i=1, 2, \dots, n)$ とする。これには観測誤差 ε_i が含まれているので、真の値を f_i とすると、

$$\hat{f}_i = f_i + \varepsilon_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad \dots \dots \dots (1)$$

$\hat{f}_i (i=1, 2, \dots, n)$ の値から、観測点のない地点での値 f_0 を内挿により求めるために、

$$f_0' = \sum_{i=1}^n (f_i' + \varepsilon_i) P_i + I_0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

と仮定する。ここで f'_i, f'_0 は f_i, f_0 のそれぞれ平均値からの偏差であり、 I_0 は内挿誤差である。 P_i は重みである。内挿の平均自乗誤差 ϵ は

$$\epsilon = \overline{I_0^2} = \left[\sum_{i=1}^n (f_i + \epsilon_i) P_i - f'_0 \right]^2 \quad (3)$$

観測誤差 ϵ_i は f'_i とは関係をもたない、また他の観測点での誤差とも関係しないと仮定する。ここで、一は平均を意味する。

$$\epsilon_i \cdot f'_i = 0 \quad (4)$$

$$\overline{\epsilon_i \epsilon_j} = \begin{cases} 0 & (i \neq j) \\ \sigma_{\epsilon_i}^2 & (i = j) \end{cases} \quad (5)$$

ここで $\sigma_{\epsilon_i}^2$ は観測の平均自乗誤差である。

(3) 式で与えられた誤差の自乗平均 ϵ を最小にするように重み $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ を決定する。そのために、

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial P_i} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

これは

$$\sum_{j=1}^n \hat{f}'_i \hat{f}'_j P_j + \sigma_{\epsilon_i}^2 P_i = \overline{\hat{f}'_i f'_0} \quad (7)$$

と書ける。ここで $\hat{f}'_i \equiv \hat{f}_i - \bar{f}_i$ である。この時の内挿誤差の自乗平均を E で表わすと、

$$E = \sigma_0^2 - \sum \hat{f}'_i f'_0 P_i \quad (8)$$

ここで $\sigma_0^2 \equiv \overline{f_0'^2}$ である。分散が場所によって異ならないと仮定すると $\sigma^2 \equiv \sigma_0^2 \equiv \overline{f_i'^2}$ 。また観測誤差も場所によらないと仮定すると、 $\sigma_{\epsilon_i}^2 \equiv \sigma_{\epsilon_i}^2$ 、(7) 式は

$$\sum_{j=1}^n \mu_{ij} P_j + \lambda^2 P_i = \mu_{0i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

となり、(8) 式は

$$E = \sigma^2 \left[1 - \sum_{i=1}^n \mu_{0i} P_i \right] \quad (10)$$

となる。ここで、 $\lambda^2 \equiv \sigma_{\epsilon}^2 / \sigma^2$ 、 $\mu_{ij} \equiv \overline{\hat{f}'_i \hat{f}'_j} / \sigma^2$ 。 μ_{0i} は観測点 i と内挿すべき地点での値の相関係数である。

この μ_{0i} は、 μ_{ij} の空間分布を決定すれば、観測点 i と内挿地点との相対距離により定める事が出来る。

かくして、最適内挿法により、観測点の存在しない海上などの地点の平年偏差 f'_0 を求めるのは、先ず(9)式により重み $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ を決定し、これらの P_i を用いて、(2) 式により f'_0 を求めるのである。その時の誤差 E は (10) 式で与えられる。(9) 式の中の μ_{ij} は、観測点 i と j の間の相関係数であるから、観測資料から容易に求め得る。 μ_{0i} の算定は上述した。分散 σ^2 も容易に算定出来、誤差 σ_{ϵ}^2 の決定は次の様に行う。誤差を含む観測値 $\hat{f}'_i$ に関する構造関数 $\hat{\beta}$ は

$$\hat{\beta}_{ij} = (\hat{f}'_i - \hat{f}'_j)^2 = \beta_{ij} + \sigma_{\epsilon_i}^2 + \sigma_{\epsilon_j}^2 = \beta_{ij} + 2\sigma_{\epsilon}^2 \quad (11)$$

ここで、観測誤差は場所によらないという仮定を導入している。また β_{ij} は観測誤差を含まない時の構造関数である。われわれの取り上げている気候要素は、空間的に連続であるから、 $i \rightarrow j$ に対して $\beta_{ij} \rightarrow 0$ と考えてよい。それ故、

$$\lim_{j \rightarrow i} \hat{\beta}_{ij} = 2\sigma_{\epsilon}^2 \quad (12)$$

これにより、観測誤差の自乗平均 σ_{ϵ}^2 を、観測資料から算定出来る。なお、この σ_{ϵ}^2 には観測誤差の他に、局地的乱れによるノイズも包含される可能性がある。

このような最適内挿法を、前節で述べた世界の月平均地上気温資料に適用した結果の 1 例を Fig. 7 に示す。内挿により求めた格子点の平年偏差気温の緯度円に沿う平均を 12 カ月移動平均したものを、30°N、40°N および 50°N について、1951 年から 1975 年までの 25 年間にわたって示している。太い実線が計算した値であり、細い実線により誤差の範囲を示している。Cubic spline under tension により求めたものと同様に、高緯度

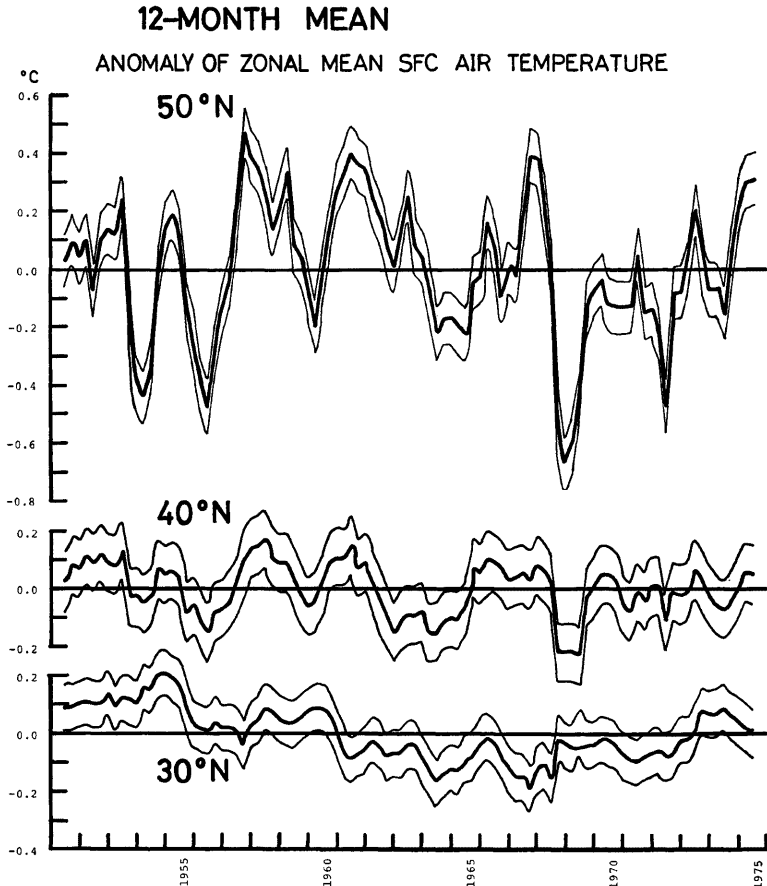


Fig. 7. 12-month running mean of zonal mean surface air temperature anomaly obtained by optimum interpolation at 30°N, 40°N and 50°N. Thick curve shows the computed value and thin curve the range of error.

の方が変動が大きいが、変動の緯度別対応は一意的なものでない事が明白である。このように、計算誤差を指示して、異常低温などの解析をしたものは、今まで発表された事がないので、この方法による研究によって、異常低温の実態の定量的把握が進むものと期待される。

5. オメガ気候学

大気鉛直運動は、水平運動に比べて、その速度が極めて小さいが、降水などに対して、非常に重要な役割を演じている事には疑問がない。しかし、大規模な垂直運動場の直接観測が殆ど不可能であるので、間接的算定法が提案されて来た。それらは、次の3つに分類出来る。すなわち、熱・渦度・質量の釣合いに關す

るものである。前2者の例として、熱力学的方法やオメガ方程式による方法が挙げられるが、いずれも、非断熱効果を算定する必要がある、この非断熱効果もその観測が容易でない、これらの方法による垂直運動の算定は、特に慎重に行なわなければ、信頼のおける値を得る事が出来ない。最後の方法は、質量保存則(連続方程式)に基づくもので、運動学的方法と呼ばれ、

$$\omega = \omega_0 - \int_{p_0}^{p_1} \text{div}_H V dp \dots\dots\dots (13)$$

で与えられる。ここで ω (オメガ)は、鉛直座標として気圧 p を用いる時に、鉛直運動を表わすものとして導入されたもので $\omega \equiv dp/dt$ である。 V は水平速度であり、 div_H は水平発散を表わす。この方法では、 $p=p_0$ たとえば下部成層圏で鉛直運動が無視出来る程度だという($\omega_0=0$)仮定を設定すると、実測風から水平速度発散を求め、それを積分する事で、鉛直速度 ω を求める事が出来る。 ω の算定に関する既存の方法のうちで、最も直接的なものとして、今まで多くの研究者がこの方法による ω の算定を試みた。しかし、実測風の観測誤差が、通常数 m/s 程度あり、水平発散は一般に 10^{-6}sec^{-1} 程度であるので、1,000km離れた地点の実測風観測資料から水平発散を算定しようとする、誤差が卓越して水平発散が求められない。そのために、誤差を小さくする平滑化などの工夫が行なわれて来たが、充分成功していない。

この研究では、多数回の観測値の平均をとると、観測誤差の影響が減少する事に着目して、時間平均風速場から異常天候の発現に関連して気候学オメガの算定を試みる事とした。実測風の1回毎の観測誤差が数 m/s であっても、30回の平均をとると、平均値の誤差は $1/\sqrt{30}$ になるということから、時間平均オメガの算定が高精度で行なえるであろう。

700 mb の実測風を東西成分(U)と南北成分(V)とに分け、前節で述べた構造関数を用いる方法でそれぞれの観測誤差を求めた。その結果を、Fig. 8 に示す。わが国およびその周辺の17カ所(Fig. 9)での、1961年12月1日から1962年2月28日まで90日間の09時のレーウィン観測資料を用いた。1回、3回平均、5回平均、10回平均について、それぞれの観測誤差を U と V に対して示してある。更に、1962年から1976年までの15年間の1月の平均値および1961年から15年間の12月、1月、2月の3カ月平均値に対する結果を、

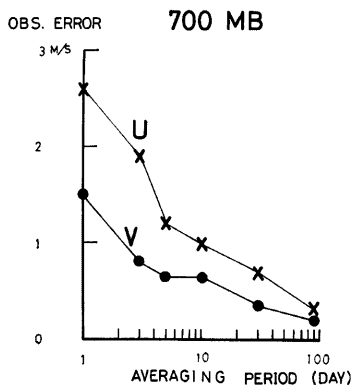


Fig. 8. Observational error of wind components and of their time mean at 700 mb level derived from the structure functions.

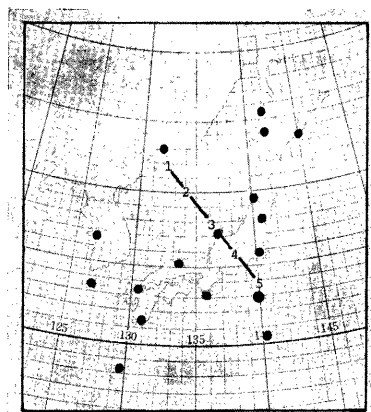


Fig. 9. Station network, the observational wind data of which are used in computation of the vertical velocity. The vertical velocity distribution in the cross-section along the line 1-5 is given in Fig. 10.

それぞれ30日、90日として示してある。平均日数の増加と共に、誤差が減少している事が明らかである。1回毎の観測誤差は、1.5m/s ないし 2.6m/s であるが、月平均値に対しては、それぞれ 0.3m/s, 0.7m/s 位に減少している。水平発散を計算する時、多数カ所の観測所から成る観測網を用いるので、誤差は更に小さくなり、信頼のおけるオメガの算定が可能となる。このような計算の1例として、Fig. 9 の1～5で示した直線に沿う垂直断面内での1月の15年平均値の分布を Fig. 10 に示す。日本海上で $25 \times 10^{-6} \text{mb/s}$ ($\approx 0.3 \text{mm/s}$) 程度の弱い上昇気流があり、本州の脊梁山脈の南東側（卓越風の風下側）では、 $50 \times 10^{-6} \text{mb/s}$ 程度の下降気流がみとめられる。冬季日本海の水面から上気へ著しい熱の補給がある事が知られているが、この加熱作用が上昇気流をもたらす事は、理論的に予期される。また、冬のわが国では北西の季節風が卓越していて、日本の山脈の南東側の風下で下降気流となる事が期待される。したがって、Fig. 10 の結果は、納得出来るものだといえる。このような手法により、各年各月のオメガを算定すれば、異常天候の今まで知られていなかった特性を明らかに出来るものと期待されよう。

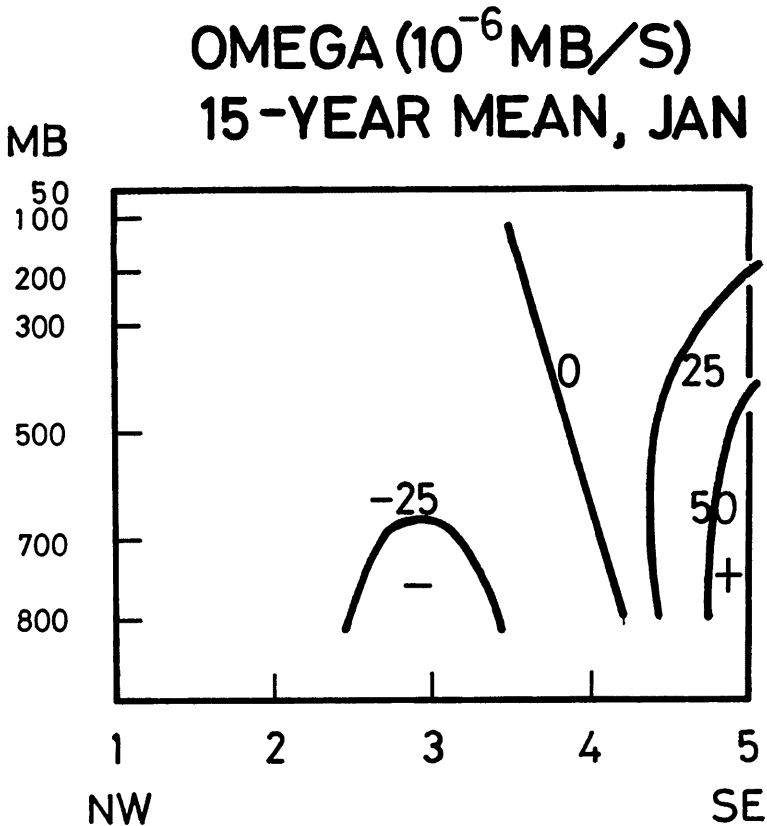


Fig. 10. Vertical cross-section of 15-year mean of vertical velocity in January along the line 1-5 in Fig. 9. Unit is $10^{-6} \text{mb/sec} = 0.01 \text{mm/sec}$.

6. 結 語

異常天候の実態を、広域の気候資料の新しい方法を用いた解析により解明する見通しを得た。特に、全半球平均気温の年々の推移を、計算精度を確認して、研究するのは、今まででなされていなかったものである。このような研究は、米国のカリフォルニア大学・コロンビア大学・海洋大気庁および西ドイツの研究者と共に進めており、2年毎に、全球的気候条件をまとめる事になっている。その第1報¹⁰⁾は昨年に発表されている。オメガ気候学は、筆者のうちの1人が始めて提案したものであり¹¹⁾、その発展は、特にかんばつの実態把握の有力な武器となるであろう。

謝 辞

この研究をすすめるに当り、「文部省科学研究費自然災害特別研究」の研究費を使用した。図の作製などにおいて福山智恵夫人の協力を得たので、ここに記して謝意を表す。計算の一部は、愛知学院大学の計算機センターの計算機を用いて行なった。

参 考 文 献

- 1) Budyko, M. I.: On Present-day Climatic Changes, *Tellus*, Vol. 29, 1977, pp. 193-204.
- 2) Willett, H. C.: Temperature Trends of the Past Century, *Cent. Proc. Roy. Met. Soc., London*, 1950, pp. 195-260.
- 3) Mitchell, J. M. Jr.: Recent Secular Changes of Global Temperature. *Ann. New York Acad. Sci.*, Vol. 95, 1961, pp. 235-250.
- 4) Yamamoto, R., T. Iwashima and M. Hoshiai: Change of the Surface Air Temperature Averaged over the Northern Hemisphere and Large Volcanic Eruptions during the Year 1951-1972, *J. Met. Soc. Japan*, Vol. 53, 1975, pp. 482-485.
- 5) Yamamoto, R., M. Hoshiai and T. Iwashima: Change of Surface Air Temperature Averaged Globally during the Years 1957-1972, *Arch. Met. Geophys. Biokl. Ser. B*, Vol. 25, 1977, pp. 105-115.
- 6) Cline, A. K.: Curve Fitting Using Splines under Tension, *Atmospheric Technology*, NCAR, No. 3, 1973, pp. 60-65.
- 7) Damon, P. E. and S. M. Kunen: Global Cooling?, *Science*, Vol. 193, 1976, pp. 447-453.
- 8) 山元龍三郎: 火山噴火と気候変化, *天気*, 第25巻, 第2号, 1978, pp. 81-102
- 9) Gandin, L. S.: Objective Analysis of Meteorological Fields, *IPST, Jerusalem*, 1965, pp. 242.
- 10) Kukla, G. J., J. K. Angell, J. Korshover, H. Dronia, M. Hoshiai, J. Namias, M. Rodewald, R. Yamamoto and T. Iwashima: New Data on Climatic Trends. *Nature*, Vol. 270, No. 5638, 1977, pp. 573-580.
- 11) 山元龍三郎: オメガ気象学(序論), *日本気象学会, 1977年秋季大会講演予稿集*, 1977年, p. 159.