

# 大気境界層における温度拡散係数の季節変化について\*

藤谷 徳之助\*\*

## 要旨

気象研究所の気象観測鉄塔の6高度(10, 25, 50, 100, 150, 200 m)における気温の時刻別平均値を用いて、Taylor (1917)と同様の方法で大気境界層下部の鉛直温度拡散係数の値や季節変化の傾向、さらには高度分布の様子を調べた。

得られた拡散係数の値は  $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$  の範囲にあり、夏季に大きく冬季に小さくなるという明瞭な季節変化を示している。この季節変化は下層の方が顕著に認められる。また、拡散係数は高さ方向に増加する傾向にあり、特に冬季にその傾向が著しい。

大気境界層下部は夏季には対流活動が盛んで充分混合されるのに対し、冬季には接地逆転層が発達することによって上下方向の混合が抑えられるため、このような拡散係数の変化の傾向が現れたものと考えられる。

今回得られた結果を Taylor (1917) の結果と比較すると、季節変化の傾向は一致しているが、今回の結果では下層の方が季節変化が顕著に認められており、Taylor の結果とは逆の傾向になっている。また、拡散係数の値そのものも今回の方がやや小さくなっている。

Taylor の結果が都市域で得られているのに対して、今回は田園地帯で得られており、両者の粗度の違いから今回の場合安定度の影響が下層でより強く現れているため、このような違いが生じたものと考えられる。

## 1. はじめに

大気境界層中における乱流拡散係数、特に鉛直方向の乱流拡散係数の値や高度分布の形を知ることは、大気境界層の構造を明らかにしたり、汚染質の拡散の実態を知る上で重要なばかりでなく、大気境界層や局地風の数値実験、さらには大気大循環の数値実験を行う上でも重要である。

接地境界層中における拡散係数の値については、これまでに多くの観測結果があり比較的詳しく調べられている。しかし接地層より上部の拡散係数については観測結果が少なく、あまり解明されていないのが現状である。

これまでに得られている結果の多くは、パイロットバルーンによる上層風の観測、係留気球や航空機による乱流観測から求められたものである。Lettau (1950) は“Leipzig Wind Profile”のデータを解析して拡散係数を求めており、Clarke (1970) も風速の鉛直分布の解析から安定度別に拡散係数を求めている。一方、Gamo *et al.* (1976) は航空機を用いた大気乱流の観測から、拡散係数の鉛直分布を求めている。これらの結果はいずれも限られた観測期間のデータから求められたものであり、長期間にわたる拡散係数の値や変化の様子について調べたものではない。しかし、数値実験を行う場合などには、長期間の平均的な拡散係数の値や鉛直分布が必要となってくる。このような観点からの研究はわずかに Taylor (1917) や Best (1935) などがあるのみで、Best の解析も高さ 20 m 以下の接地層に限られている。

Taylor (1917) はパリのエッフェル塔および気象局に

\* Seasonal variations of thermal diffusivity in the atmospheric boundary layer.

\*\* Tokunosuke Fujitani, 気象研究所物理気象研究部.

——1983年8月19日受領——

——1983年10月24日受理——

おける1890年から1894年までの毎時の気温の資料を解析して、鉛直方向の温度拡散係数 (thermal diffusivity) を月別に求めている。彼の用いた解析方法は、大気境界層を地表面を境界とする半無限固体と考え、そこでの熱伝導方程式の解を用いて拡散係数を求めるというものである。したがって、得られた拡散係数は解析している2つの高度の間の平均的なものである。しかも気温の月平均値を用いていることから、時間的に平均化された大気境界層の構造に対応しているものと考えられる。

筑波研究学園都市に設置されている気象研究所の気象観測鉄塔 (高さ 213 m) では、6 高度 (10, 25, 50, 100, 150, 200 m) で気温の連続観測を実施している。したがって、Taylor (1917) と同様の方法で温度拡散係数を求めることができる。Taylor はエッフェル塔で得られた資料を用いているので、得られた結果は都市域を代表しているものと考えられる。一方、気象研究所の観測鉄塔は田園地帯に位置しているため、ここで得られる結果は、建物などの影響の少ない地域を代表しているものと思われる。

この論文では1978年から1980年までの3カ年にわたって得られた気温の観測資料を用いて、Taylor (1917) と同様の方法で求めた拡散係数の性質について述べる。解析にあたっては精度を向上させるために、Taylor のように気温の日変化の範囲 (daily range) を用いずにフーリエ解析を行って日周期成分を抽出し、これを用いて拡散係数を求めた。さらに、今回の観測では高さ方向に密に観測しているので、拡散係数の高度分布についても算定することができた。

## 2. 観測の概要

気象観測鉄塔で実施している観測については花房他 (1979) に詳しく述べられているので、ここでは気温の観測についてのみその概略を述べる。

気温測定用の感部としては、JIS 規格 (0.3 級) の白金抵抗体を用いている。感部はステンレス製の通風シェルター内に設置されており、7 m/s 以上の風速で通風されている。測定方式は3線ブリッジ法で、測定範囲は  $-20 \sim +40^{\circ}\text{C}$  で精度は  $0.3^{\circ}\text{C}$  である。抵抗値の変化は各観測高度に設置されている変換器によって電圧に変換され、観測室までケーブルで伝送される。観測値は1時間ごとに A/D 変換され、カセット磁気テープに記録される。

気象観測鉄塔には頂部の 213 m を除いて各観測高度

には、 $120^{\circ}$  ずつの間隔で3本の観測用支柱が設置されている。気温測定用感部はこのうちの2本 (S 方向と NE 方向) の支柱の、塔体から 5.5 m 離れたところに設置されている。両方向のいずれのデータも記録されているが、今回の解析にはこの地点の主風向である NE 側の測定値を使用している。

用いたデータは1978年1月から1980年12月までの3カ年に得られた毎時の観測値で、これから各月ごとに時刻別の月平均気温を求めて解析に使用した。なお、解析に用いた月平均値については、気象研究所から気象観測用鉄塔観測資料第1号 (1982) として出版されている。

## 3. 解析方法

今回の解析に用いた方法は Taylor (1917) が用いたものほとんど同じで、半無限固体中の熱伝導方程式の解を用いている。

高さ  $z$  を横切って流れる熱フラックスは  $-K_H cp \rho \frac{\partial \theta}{\partial z}$  で表わされる。ここで  $K_H$  は温度拡散係数、 $cp$  は空気の定圧比熱、 $\rho$  は空気の密度、 $\theta$  は温位である。大気境界層を対象としているので密度  $\rho$  は一定、 $\theta = T + \Gamma z$  (ただし  $T$  は高さ  $z$  での気温、 $\Gamma$  は乾燥断熱減率) となり次式が成立する。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_H \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \right] \quad (1)$$

ここで  $K_H$  が高さによらず一定であるとすると、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_H \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

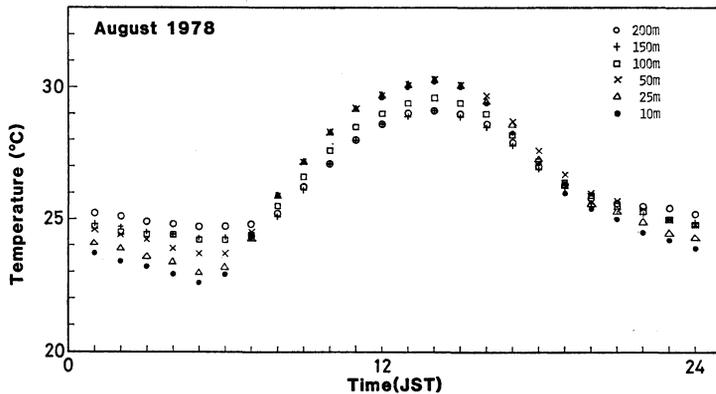
となる。半無限固体の場合には、この熱伝導方程式の解は簡単に求められており、境界条件として表面温度が  $A \cos \omega t$  の形で変化する場合の解は次のようになる (Carslaw・Jaeger, 1959)。

$$T(z) = A \exp \left( -\sqrt{\frac{\omega}{2 K_H}} z \right) \cos (\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2 K_H}} z) \quad (3)$$

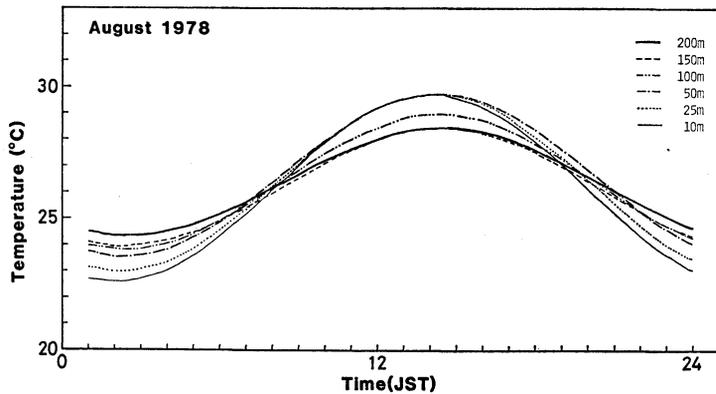
ただしこの解は、時間が充分に経過して温度分布が完全に周期的になり、最初の温度分布の影響が消えた場合の定常的周期解である。

2つの高度  $z_1$  と  $z_2$  における温度変化の振幅をそれぞれ  $R_1$ ,  $R_2$  とすると、両者の比は、

$$\frac{R_2}{R_1} = \exp \left[ -\sqrt{\frac{\omega}{2 K_H}} (z_2 - z_1) \right] \quad (4)$$



第1図 気象観測鉄塔で得られた月平均気温の日変化。



第2図 月平均気温の1日周期成分の高度変化。

となる。また、2高度における位相を  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  とすると、両者の差は、

$$\phi_2 - \phi_1 = -\sqrt{\frac{\omega}{2K_H}} (z_2 - z_1) \quad (5)$$

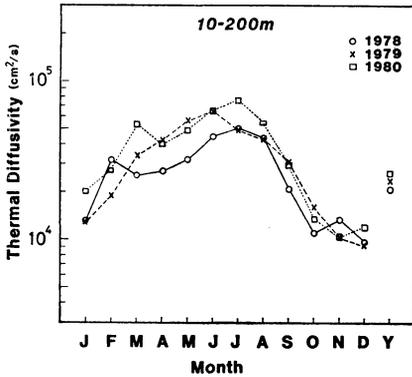
となる。したがって大気境界層を地表面を境界とする半無限固体と考えると、気温変化の高度分布から(4)あるいは(5)式を用いることによって、鉛直方向の温度拡散係数を求めることができる。

Taylor (1917) はこの方法をエッフェル塔と気象局で得られた時刻別の月平均気温のデータに適用して、拡散係数を求めている。彼は月別に求めた気温の時刻別平均値の日変化の曲線がほぼ sin 曲線で近似できることから、日変化の範囲 (daily range) を最大振幅とみなして(4)式から拡散係数を求めている。

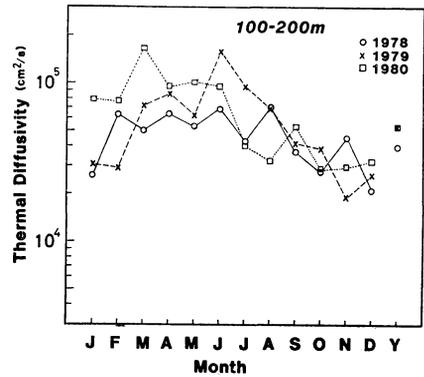
今回の解析では、第1図に示すようなデータに直接

sin 曲線をあてはめて最大振幅を求めたのでは不正確になるので、このデータをフーリエ解析して1日周期成分の振幅を求めこれから拡散係数を求めた。フーリエ解析を行ったもう一つの理由は、この方法では半無限固体の境界での温度変化を  $A \cos \omega t$  と仮定しているが、実際の地表面温度の変化の様子は必ずしも  $A \cos \omega t$  で表現することはできない。したがって気温のデータをフーリエ解析するということは地表面温度の日変化成分に対応する気温の変化を抽出していることになり、より解析の前提に近くなっている。

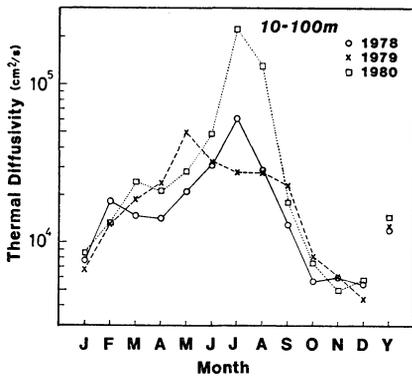
第2図に第1図のデータをフーリエ解析した結果を示してある。これを見ると高度間の位相差はあまり大きくないので、今回の解析では(4)式を用いて拡散係数を求めている。



第3図 10 m と 200 m の気温の日変化の振幅から求めた温度拡散係数.



第5図 100 m と 200 m の気温の日変化の振幅から求めた温度拡散係数.



第4図 10 m と 100 m の気温の日変化の振幅から求めた温度拡散係数.

#### 4. 解析結果および考察

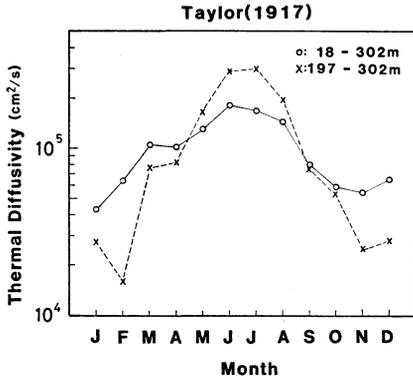
気象観測鉄塔の6高度での気温の測定値を用いて(4)式から拡散係数を求める場合、二つの高度の選び方には任意性がある。ここで用いた解析方法では  $K_H$  は高さ方向に一定としているので、得られた  $K_H$  の値は2高度の間の平均的な値を示しているものと考えられる。第2図の日変化の様子をみると、200 m と 150 m の日変化の様子が比較的似ており、また 10, 25, 50 m の日変化の様子も比較的似ている。一方、100 m での日変化は両者の中間的な様子を示している。大気境界層の特徴をつかむためにここでは二つの高度として、① 10 m と 200 m、② 10 m と 100 m、③ 100 m と 200 m、の3組を用いた。①は大気境界層下部全体、②は接地層、③は接地層より上の層、にそれぞれ対応しているものと考えられる。これら3組について1978~1980年の3カ年の月別

に  $K_H$  を求めた結果を第3~5図に示してある。各図の右端のYというところに示してある  $K_H$  の値は、時刻別に求めた年平均気温の日変化から求めた拡散係数の値である。

第3図に示すように 10 m と 200 m の2高度の資料から求めた拡散係数の値は年によってあまり変化せず、夏季には大きく冬季には小さくなる傾向を示している。第4図には 10 m と 100 m の2高度の資料から求めた拡散係数の値を示してある。第3図とはほぼ同じ変化の様子を示しているが、夏季と冬季の拡散係数の値の相違は第3図に比較して大きくなっている。値そのものも第3図に比較して小さくなっており、特に冬季に小さくなっている。

なお、第4図を見ると1980年7月と8月の拡散係数の値が他の年に比較して大きくなっている。これは100 m での気温の日変化の振幅が、10 m の日変化の振幅と大差がないためにこのような結果になったものと考えられる。高層気象台の観測によると、1980年の夏季は冷夏で、月平均気温は他の年に比較して最大  $5^{\circ}\text{C}$  低下しており、2ヶ月の日照時間の合計も他の年がそれぞれ471.4時間(1978)、298.2時間(1979)となっているのに比較して、195.8時間と非常に少なくなっている。日照時間が少ないと顕著な日変化を示す日が少なくなり、その結果として1日周期の振幅は小さくなる。2つの高度の振幅比から拡散係数を求めるこの方法ではその精度が低下し、結果的に拡散係数が大きく出ているものと考えられる。

第5図には 100 m と 200 m の2高度の資料から求めた拡散係数の値を示してある。第3、4図に比較して

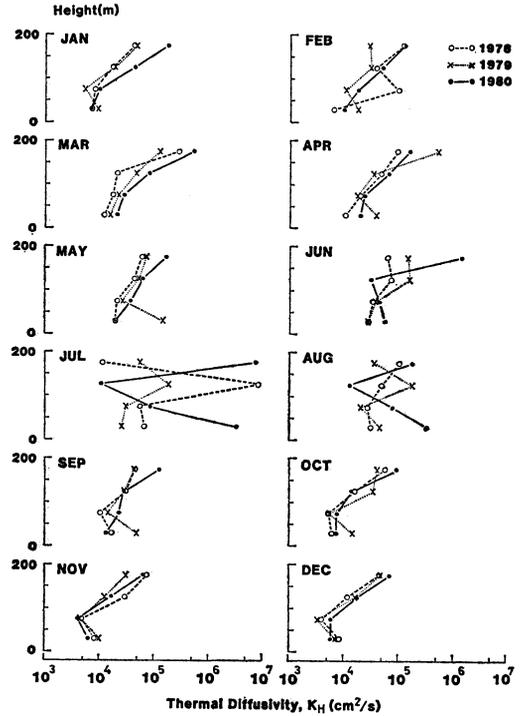


第6図 Taylor (1917) の第2表をもとにして作った温度拡散係数の月変化.

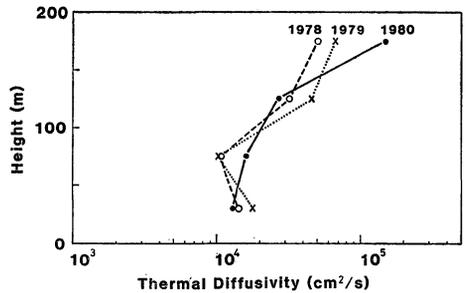
特徴的なことは顕著な季節変化が認められないということであり、拡散係数の値は年間を通じてほぼ前の二つの場合の夏季の値と同程度である。

これらの図から明らかなように、大気境界層下部の鉛直温度拡散係数は明確な季節変化を示しており、夏季には大きく冬季には小さくなっている。季節変化は下層ほど著しく上層ではあまり顕著ではない。拡散係数の値は10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> cm<sup>2</sup>/sの範囲にあり、これまでに得られている値と大差ない。また夏季における値は、10 m と 200 m、10 m と 100 m、100 m と 200 m の3つの組み合わせのいずれの場合もほぼ同じであるが、冬季の場合は10 m と 100 m の組み合わせから求めた方が、100 m と 200 m の組み合わせから求めたものより小さくなっており、10 m と 200 m の組み合わせから求めたものは両者の中間の値を示している。このことから夏季には対流活動が活発で 200 m 以下の層は十分に混合されていると考えられるが、冬季には接地逆転層が生成されるために、下層での拡散係数の値が小さくなっているものと考えられる。

第6図に Taylor (1917) の第2表を図にしたものを示すが、これと今回得た結果とを比較すると、拡散係数の値そのものは今回の結果の方がやや小さめではあるが、夏季に大きくなり冬季に小さくなるという変化の傾向は一致している。しかし、Taylor の場合 18 m と 302 m の高度の資料を用いて求めた拡散係数より、197 m と 302 m の2高度から求めた拡散係数の方がより大きな季節変化を示しており、今回得られた結果と逆の傾向を示している。Taylor は低層における季節変化が小さい原因として、低層の乱流は主に地表面の粗度によって生



第7図 月別に求めた温度拡散係数の高度分布.



第8図 年平均気温から求めた温度拡散係数の高度分布.

じ、あまり安定度の影響を受けないことをあげている。さらに得られた値も田園地帯で得られた値に比較して大きいと述べている。このことから Taylor の得た結果は都市域での値を示しているものと考えられる。一方気象研究所の観測鉄塔は田園地帯にあり、地表面の粗度もあまり大きくないので安定度の影響を強く受けているものと思われる。安定度の影響は地表面近くの方が大きいので、今回得られたように下層の方に季節変化が顕著に現

れたものと考えられる。

拡散係数の高度分布をもう少し詳しくみるために、高度差 50 m の 2 つの高度の気温から拡散係数を求めた。組み合わせは、200 m と 150 m, 150 m と 100 m, 100 m と 50 m, 50 m と 10 m (この組み合わせのみ 40 m) の 4 種類である。月別に求めた拡散係数の高度分布を第 7 図に示してある。6~8 月の夏季を除いて、各月ごとの拡散係数の鉛直分布の形は、年による差はほとんどなく高さと共に増加する傾向を示しており、特に冬季には増加の割合が大きくなっている。これは冬季の接地逆転層などの影響で下層での拡散係数の値が小さいためであると考えられる。第 8 図には年平均気温の日変化から求めた拡散係数の高度分布を示してある。この場合も拡散係数は高さ方向に増加しているが、第 7 図でも月によっては認められた最下層で拡散係数が高さ方向にはほぼ一定、あるいはわずかに減少する傾向が認められる。この原因についてははっきりしたことは分からない。

## 6. おわりに

気象研究所の気象観測鉄塔の 6 高度 (10, 25, 50, 100, 150, 200 m) で観測された 1978 年から 1980 年までの 3 カ年の気温の時刻別月平均値を用いて、Taylor (1917) と同様の方法で鉛直方向の温度拡散係数を求めた。ただし今回の解析ではフーリエ解析を行って 1 日周期成分を抽出し、この振幅を用いて拡散係数を求めている。得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 拡散係数の値は  $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$  の範囲にあり、特に 10 m と 200 m および 10 m と 100 m の気温から求めた拡散係数は、夏季に大きく冬季に小さくなるという明瞭な季節変化を示している。しかし、100 m と 200 m の気温から求めた拡散係数は明確な季節変化は示していない。

(2) 拡散係数の値は、夏季には 3 つの層 (10 m と 200 m, 10 m と 100 m, 100 m と 200 m) の間で大きな相違は認められないが、冬季では下層ほど小さくなっている。

(3) 拡散係数の高度分布の形は、夏季以外は年による変化は少なく高さ方向に増加する傾向にあり、特に冬季にはその傾向が著しい。

(4) Taylor (1917) の結果と比較すると、季節変化の傾向は一致しているが、今回の結果では下層の方が季節変化が顕著に認められ、Taylor の結果と逆になっている。また、拡散係数の値そのものも今回の結果の方が少し小

さくなっている。

以上のことから、大気境界層下部では夏季には対流活動が盛んで充分混合されるのに対し、冬季には接地逆転層が発達することによって上下方向の混合が抑えられるため、このような季節変化や高度分布が現れているものと考えられる。さらに Taylor (1917) の場合には観測データが都市域で得られているのに対し、今回の場合は観測が田園地帯で行われている。したがって、都市域では粗度が大きく下層では安定度の影響が小さいのに対し、田園地帯では粗度が小さいため下層で安定度の影響が大きくなる。このことが今回の結果と Taylor の結果との差違の原因となっているのではないかと考えられる。

これらのことから今回得られた結果は、田園地帯における拡散係数の性質を示しているものと考えられる。

今後の課題としては、毎日の観測値を用いて拡散係数を求め、これらの値と今回求めた月平均値との関係を明らかにすることや、係留気球・低層ゾンデ・ラジオゾンデの資料を用いて、より高い場所での拡散係数の振る舞いをみることなどがある。

## 謝 辞

気象観測用鉄塔観測資料第 1 号の発行の責任者として、観測資料の整理にあられた、気象研究所気象衛星研究部第 4 研究室の伴野 登 前室長に深く感謝致します。

## 文 献

- Best, A.C., 1935: Transfer of heat and momentum in the lowest layers of the atmosphere, *Geophys. Mem.*, 65, 66 pp.
- Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger, 1959: *Conduction of heat in solids*, 2nd ed., Oxford Univ. Press, 50-91.
- Clarke, R.H., 1970: Observational studies in the atmospheric boundary layer, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 96, 91-114.
- Gamo, M., O. Yokoyama, S. Yamamoto and Y. Mitsuta, 1976: Structure of the atmospheric boundary layer derived from airborne measurements of energy dissipation rate, *J. Met. Soc. Japan*, 54, 241-258.
- Lettau, H., 1950: A reexamination of the "Leipzig Wind Profile" considering some relations between wind and turbulence in the friction layer, *Tellus*, 2, 125-129.
- Taylor, G.I., 1917: Phenomena connected with

turbulence in the lower atmosphere, Proc. Roy. Soc., A94, 137-155.

花房龍男・藤谷徳之助・伴野 登・魚津 博, 1979:

筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設, 気象研究所技術報告, 第3号, 50 pp.

高橋浩一郎 監修

## 日本気象総覧(上下2巻)

東洋経済新報社, 1983, 上巻  
1064頁, 下巻1060頁, 上下  
1組195,000円



紺色の立派な箱にはいった上下2巻の気象観測のデータを纏めた本が発行された。全体では2100ページを越える分厚い本である。紙面の大きさはA4判, ほとんど数字で埋まっているから, それを含む情報は膨大な量である。ここで内容を紹介しよう。

上巻には, 地上気象観測資料を主体に全気象官署について気象要素別月別値, および主な気象要素の月別の極値と順位が書かれている。その統計期間は, 前者に対しては昭和26年(1951)から昭和57年(1982)までとなっており, 後者では観測開始から昭和57年までである。なお前者については特定の20官署の主要な気象要素に対し明治20年(1887)から昭和57年までを扱っている。そのほか, 特定官署を含む多くの官署について, 気象要素別の半月別値, 日平年値(非平滑値), 月平年値が掲載されている。なお上巻の最後には, 観測開始から昭和57年までの主な気象要素の全国順位表がのせてある。

東京管区気象台を例にとって示そう。東京は上記特定官署の一つであり, 月別値として平均気圧・平均気温・日照時間・降水量については明治20年から, 日最高気温の平均・平均相対湿度・平均風速など12項目については昭和26年からの値が示されている。ついで半月別値として平均気温・降水量(昭和42~57年)の値がある。また日平年値として平均気温・日照時間・降水量(昭和26~55年)の値, それに月平年値として標準偏差や解説用階級区分を併記した気温・相対湿度・降水量など(同じ期間)の値が記載されている。最後に, 月平均気温の高い値, 日最高気温など12項目について, 観測開始から昭和57年までの極値と順位が示されている。

下巻では, 地域気象観測システム(いわゆるアメダス)等と高層気象観測の統計値が主となっている。アメダスについては688か所の観測所の平均気温・平均風速・最多風向・日照時間・降水量・日最大降水量の月別値, それにアメダス以前の観測を主とした883か所の日最深積雪の年間最大値と起日の表が下巻のほぼ7割を占めている。

る。

ついで16気象官署の高層気象観測値について記されている。地上, 850, 700, 500, 300, 150(mb)の主要指定気圧面における平均気温・最低気温・平均湿度・平均風速・平均風向, それに平均高度が月別に示されている。これらは21時のレーウィンゾンデ観測値であり, 昭和31年から昭和55年までを5か年ごとに平均した値で表されている。

さらに, 66官署における全天日射量の月平均値(昭和42~57年)が掲載されている。また「天候ダイヤグラム」は全国主要20官署について, 昭和26年から昭和57年までの32年間の毎日の天気を記号で表したものである。そして最後に生物季節の平年値が示されている。

下巻には, これまで述べてきた各種の統計表のほかに解説編がある。第1部の気象・気候の基礎は, 監修の高橋先生はじめ編集委員の内田・朝倉・河村の諸氏が執筆している。第2部の日本各地の気候は現場のベテランがそれぞれ担当の地方の特徴を書いたものであり, 第3部の参考資料には, 統計の接続性と測器等の変遷, 気象災害年表, 文献などの記述がある。

こうして上下2巻を見てくると, 通常一般に使用する気象統計はほとんど含まれているように思われる。各種の印刷刊行物などを探す苦勞は, これで大いに軽減されるであろう。この種の統計資料の問題点は, その出典が明確に記述されているかどうかである。この本では, やや煩雑と思えるほど出典が脚注などに記されている。また, この種の書物のように, ほとんど統計数値ばかりで成り立っているような場合, 言うまでもなくその数値が正確であることが肝心である。校正には万全を期したであろうが, 誤りの皆無ということは至難のわざである。本書購入者に後日, 正誤表を送付するよう配慮されているのは, 当然とはいえ行き届いた処置といえよう。

この印刷物の下巻の解説編は170ページ余り, 執筆者は気象・気候の分野の第一人者であるので, この方面の手引き, あるいは教科書としても活用されるであろう。

総合的にいえば, これは随分立派な刊行物であり広い分野で利用されるべきものである。ただ, その量の膨大であること, 高価であることから, なかなか個人所有とまでには行かないのではなからうか。

(竹内清秀)