551.551.2；624.04

風速と風圧*

井上栄一**

要旨

いわゆる Davenport の式

$$Fu(n)=\frac{2}{3}\frac{n}{(1+n^2)^{4/3}}$$

という風速変動のスペクトルが Davenport より以前に日本で発表されていたことを指摘するとともに，風圧変動のスペクトルが

$$F_p(n)=\frac{20}{9}\frac{n^3}{(1+n^2)^{8/3}}$$

になることをあらためてのべた．

最小乱子よりも小さなスケールでの変動を考察し，Euler 的には－3乗則にしたがい，Lagrange 的には－2乗則にしたがうことを示した．

1. 序　　言

このごろ風と構造物との関係についての問題についての会合が多いようである．1971年の東京での国際会議や1972年の国内会合をはじめ，最近半年ほど滞在したアメリカでもよくこの問題についてのはなしをきいた．

構造物にあたる風の話となるとそれは当然それにあたる風の力のことであり，それは風による圧力のことになる．そして当然風の乱れがからんでくる．

ところが構造物をあいてにしている建築屋さんが案外に風の乱れについてよく考えていないような気がしてならないのでこの一文を書く気になった．

あるいはこれも年寄りの老いのくりごとの一つかもしれない．

2. Davenport の式

風速の変動についてのスペクトルを

$$F_u(n)=\frac{2}{3}\frac{n}{(1+n^2)^{4/3}} \qquad (1)$$

という式で書いたものが建築屋にはよく使われ，それが Davenport (1961) の式とよばれている．

この式は振動数の小さいところでは $F_u(n)$ が n に比例し，n が大きくなると $F_u(n)$ が $n^{-5/3}$ に比例するといういつもの－5/3乗則をあらわすことになる．

だれがこれを Davenport の式といい出したのかはしらないが，この式は実は私や小倉さんが Davenport の論文よりも前に日本で発表していた（たとえば Ogura 1953，井上1955および Inoue 1956をみてほしい)．

n が大きいときに－5/3乗則になるということはいわゆる Kolmogoroff の相似則であり，その領域ではエネルギー逸散率 ε が n に無関係であるということである．n の小さいときに＋1乗則になるのはなぜか？Davenport (1961) の論文にははっきりとは書いてないけれども私は20年も前にそれを書いたつもりである (Inoue 1952)．つまりその領域では ε を一定とみなすかわりに拡散係数 K＝乱子スケール Λ×乱子速度 V を一定と仮定しただけのことである．

1971年に Kolmogoroff が東京へきたおりになぜ n の中間領域で ε を一定という仮説をたてたのかときいたら，「それは30年も前のことでありもう忘れてしまった」という返事であった．n の小さい領域でなぜ K を一定として＋1乗則を出したのかきかれたら，私も「20年も前のことなので忘れてしまった」と答えるよりほかはない．

n の小さい所で＋1乗則にのり，n の大きい所で－5/3乗則にのるような内挿式が（1）式にほかならない．

私たちの書いた論文が Davenport の目に入らなかったとしてもしょうがないが，日本の建築屋までが（1）式を Davenport の式とよぶのに私はいささか不満である．それと同じ式は Davenport の論文よりも前に日本で発表されていたのに日本の建築屋が不勉強であったためにそのことに気がつかなかったと思われるからである．ちなみに Davenport には私たちの古い論文が送られてあるので，彼が日本における研究を知らないはずは

* Wind Velocity vs. Wind Pressure

** E. Inoue 農業技術研究所気象科

――1972年12月23日受理――

ない．

（1）式のスペクトルは Euler 的なものであるが，それを Lagrange 的にすると

$$F(N)=\frac{2}{\pi}\frac{1}{1+N^2} \qquad (2)$$

となり，それから Lagrange 相関係数 $R(\xi)$ が

$$R(\xi)=exp\left(-\frac{\xi_0}{\xi}\right) \qquad (3)$$

となることは比較的によくしられている（Inoue 1952, Ogura 1953, Monin and Yaglom 1965 および Tennekes and Lumley 1972).

3. 風速と風圧

風速 u の2乗つまり u^2 が風圧 q となるから Kolmogoroff の $-5/3$ 乗則の領域では風圧変動のスペクトルが $-7/3$ 乗にのるということがすぐに出てくる．そして風速変動の $+1$ 乗則領域では風圧変動のスペクトルは $+3$ 乗に比例することとなり，その内挿式として Euler 的には

$$F_p(n)=\frac{20}{9}\frac{n^3}{(+n^2)^{8/3}} \qquad (4)$$

となる（Inoue and Imai 1955).

建築屋がこれに気づいたのはつい最近のことであるらしい．国際会合で Standen et al. (1971) の話をきいて彼の結果がたしかに $-7/3$ 乗則にのっているから理由はなんだときいたら判らないという情けない答をきいてがっかりしたものであるが，その1年あとの国内会議では（4）式がでているのをみてうれしく思った（松井および永井，1972, 松井その他，1972).

4. Kolmogoroff 以後

乱れの中間領域における Kolmogoroff の $-5/3$ 乗則はあまりにも有名であるが，それ以前（n の小さい所）の $+1$ 乗則はあまり知られていないし，n がもっと大きくなったそれ以後のこともあまり考えられていない．

Kolmogoroff 以後とはつまり彼のいう最小乱子からあとの話である．最小乱子の大きさが

$$\Lambda_\infty\sim\nu^{3/4}\ \varepsilon^{-1/4} \qquad (5)$$

であり，その乱子速度が

$$V_\infty\sim\nu^{1/4}\ \varepsilon^{1/4} \qquad (6)$$

で与えられることはよく知られている．ここに ν は動粘性係数を意味する．

Λ_∞ より小さいスケールの変動についてのスペクトルはどうなのか？ これはいまだにわかっていない．-7 乗則を出した人（Heisenberg 1948）もいるし，-3 乗則を出した男（井上，1950）もいる．この領域では「べき」数が連続的に変るからそれを1つにしようとしたって無理だという話もきいている．

しかし私はまたあえて20年以上もまえに持ちだした -3 乗則についてのべてみたい．というのは Tennekes and Lumley (1972) の本に変な図がのっているからである．

彼らは私の出した Lagrange スペクトルの（2）式を採用してくれてはいるが，それ以後がいけない．つまり Kolmogoroff 領域以後での Lagrange スペクトルを垂直線で示している．$F(N)$ が $N^{-\infty}$ で表わされるとでもいうのであろうか？

私が Kolmogoroff 以後の領域で -3 乗則をもち出したのは

$$V\Lambda\sim\nu \qquad (7)$$

$$V^3/\Lambda\sim\varepsilon \qquad (8)$$

を仮定して

$$V^2\sim\nu^2\Lambda^{-2} \qquad (9)$$

としたから

$$F_u(n)\sim n^{-3} \qquad (10)$$

となっただけのことである．しかしこれは Euler 的なものであることに注意してほしい．

圧力変動とすれば

$$F_p(n)\sim n^{-5} \qquad (11)$$

となるであろうがこれは建築屋さんにはあまり関係あるまい．

（7）と（8）の2つからその領域での変動の寿命時間 τ は

$$\tau\sim V^2/\varepsilon\sim\Lambda^2/\nu \qquad (12)$$

となり

$$V^2\sim\varepsilon\tau\sim\varepsilon N^{-1} \qquad (13)$$

から Lagrange 的スペクトルとして

$$F(N)\sim N^{-2} \qquad (14)$$

が得られる．つまり Kolmogoroff 領域と同じ -2 乗則である．これは Tennekes and Lumley の図とは全くちがう．

-3 乗則の（10）式に近い測定結果は近ごろ見られるようになった（Plate and Arya 1969 および Hall and Pao 1969).

5. 結　　論

建築屋さんの話をきいていると時々彼らがいわゆる Davenport の式を風速変動のスペクトルとしたり風圧変動のスペクトルと考えたりしているのに気がついた．

それを注意してあげたいと思って書いたばかりである．

気をつけてほしいものである．

文　献

1) Davenport, A. G., 1961: The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., **87**, 194-211.
2) Hall, J. M. and Y. H. Pao, 1969: Spectra of internal waves and turbulence in stratified fluids, Radio Science, **4**, 1321-132.
3) Heisenberg, W., 1948: Zur statistischen Theorie der Tubulenz, Zeitschr. Phys., **124**, 628-657.
4) 井上栄一，1950：乱れの最小乱子について，理工研報告，**4**，194-200.
5) Inoue, E., 1952: On the Lagrangian correlation coefficient for turbulent diffusion and its application to atmospheric diffusion phenomena, Geophys. Res. Pap. no. **19**, 397-413.
6) 井上栄一，1955：穂波の研究２．穂波スペクトルと穂ゆれスペクトル，農業気象，**11**，87-90.
7) Inoue, E., 1956: Structure of turbulence in the atmospheric surface layer. Proc. 6 th Japan Nat. Congr. Appl. Mech., 315-318.
8) Inoue, E. and K. Imai, 1955: Eulerian correlation of the atmospheric pressure fluctuations of medium scales, 気象集誌，**33**, 169-173.
9) 松井源吾および永井亮一，1972：風圧設計式の一提案，構造物の耐風性に関する第２回シンポジウム論文集，東京。73-79.
10) 松井源吾，永井亮一，田村幸雄および樋口久吾，1972：高層建築に作用する動風圧について，同上，217-223.
11) Monin, A. S. and A. M. Yaglom, 1965: Statistikaya Gidromekhanika, vol 1, Moscow, 639, pp.
12. Ogura, Y., 1953: The relation between the space- and time-correlation functions in a turbulent flow, 気象集誌，**31**，355-369.
13) Standen, N. M., W. A. Dalgliesh and R. J. Templin, 1971: A wind tunnel and full-scale study of turbulent wind pressures on a tall building, Proc. Wind Effects on Buildings and Structure, Tokyo, 199-209.
14) Tennekes, H. and J. L. Lumley, A first course in turbulence, MIT Press, 293 pp.