

# 強風時における風速変動のスペクトルについて

光田 寧・森 征洋

## ON THE SPECTRUM OF HORIZONTAL WIND SPEED FLUCTUATIONS IN HIGH WINDS

By *Yasushi MITSUTA* and *Masahiro MORI*

### Synopsis

Spectra of wind speed fluctuations in high winds over a wide range of frequency are studied using the records observed at Shionomisaki Wind Effect Laboratory at the height of 19 meters. Spectral density in the frequency range  $0.0005 < f < 0.005$  varies with  $-1/2$ nd power of frequency. This point is quite different from the expected spectrum in the previous studies. In the higher frequency range the normalized spectrum in high wind is similar to that observed in the neutral stability case in moderate winds.

### 1. 緒 言

強風時における風速変動の水平成分のスペクトルについて解析を行った。強風による構造物の振動を議論する上で風速変動のスペクトルを利用することが広く行われており<sup>1)</sup>、強風のスペクトルの形としてはDavenport<sup>2)3)</sup>の提案した次の式が現在多く利用されている。

$$\frac{S(n)}{\sigma_v} = \frac{2}{3} \frac{n/n_0}{\{1 + (n/n_0)^2\}^{4/3}} \dots\dots\dots(1)$$

但し  $S(n)$  はスペクトル密度、 $n$  は周波数、 $\sigma$  は風速変動の標準偏差である。この式は小倉<sup>4)</sup>、井上<sup>5)</sup>によって与えられたスペクトルの形と同じもので、それを具体的に利用できるように  $n_0$  の数値を与えたものである。高周波数域でスペクトル密度が周波数の  $-5/3$  乗に比例して減少することは理論的にも予測され、多くの実測結果によっても実証されていることであるが、低周波数におけるスペクトルの形については実測は少く、井上の提案した  $+1$  乗則も井上<sup>6)</sup> 自身が言っているように必ずしも充分な根拠のあるものではなく、実験的裏付けも無いものである。また energy peak の位置に関しても従来の強風のスペクトルの研究が高周波数側に着目して行ったものが多く、正確に決定された例は少ない。従って低周波数側のスペクトルの形については未だ不正確な点が多く実測による確認の必要が認められる。

ここでは潮岬において台風やその他の強風時に観測された風速変動の早送り記録のうち比較的長時間の記録から強風時の広い周波数域にわたるスペクトルを求め、検討を加えた。

### 2. 観測資料および解析方法

解析に用いた風の資料は潮岬風力実験所の測風塔(地上高 19 m)に取り付けた風車型風速計の早送り記録から得たものである。この早送り記録は人為的に作動させるものであり、ここで利用した12回の観測の観測日時、観測時間、平均風速などの特性は **Table 1** に示すとおりである。Run 4 は最も風の強い場合で平均風速は 38.2 m/s に達している。スペクトルの計算は記録を目で読み取り、電子計算機を用いて Tukey の方法によって行った。読み取り値は 0.8 ないし 2.0 秒毎に行い、最初はそのままの値の時系列でスペクトルの計算を行い、次に読み取り値を 4 個づつ平均して求めた新しい時系列を用いて計算して低周波数域の分解能を上げた。観測時間が充分長い観測例ではさらに同様な平滑化を行っている。しかしいずれの場合についてもたとえ資料数が多

Table 1 The observed values and the related quantities.

| Run No.                   | Date     | Start Time | Sampling Duration (min.) | Mean Wind Direction | Mean Wind Speed (m/s) | Standard Deviation $\sigma_V$ (m/sec) | Intensity of Turbulence | Energy Peak Wave Length (m) | $D = \frac{\sigma_V}{U_*}$ | Note         |
|---------------------------|----------|------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------|
| 1                         | 9/16/72  | 17:19      | 29                       | ESE                 | 27.6                  | 7.4                                   | 0.27                    | 493                         | 4.4                        | Typhoon 7220 |
| 2                         | 9/16/72  | 17:50      | 25                       | ESE                 | 25.7                  | 6.4                                   | 0.25                    | 428                         | 4.1                        | Typhoon 7220 |
| 3                         | 9/16/72  | 19:40      | 20                       | WNW                 | 34.6                  | 5.4                                   | 0.16                    | 407                         | 2.6                        | Typhoon 7220 |
| 4                         | 9/16/72  | 20:00      | 24                       | WNW                 | 38.2                  | 6.6                                   | 0.17                    | 382                         | 2.8                        | Typhoon 7220 |
| 5                         | 9/16/72  | 20:24      | 24                       | WNW                 | 33.8                  | 6.8                                   | 0.20                    | 225                         | 3.3                        | Typhoon 7220 |
| 6                         | 9/16/72  | 20:49      | 10                       | WNW                 | 31.7                  | 7.0                                   | 0.22                    | 288                         | 3.6                        | Typhoon 7220 |
| 7                         | 5/ 2/73  | 11:11      | 130                      | S                   | 19.3                  | 2.3                                   | 0.12                    | 483                         | 2.0                        |              |
| 8                         | 5/10/73  | 13:28      | 78                       | W                   | 11.8                  | 2.1                                   | 0.18                    | 203                         | 2.9                        |              |
| 9                         | 6/ 6/73  | 10:09      | 262                      | NE                  | 13.7                  | 2.7                                   | 0.20                    | 685                         | 3.2                        |              |
| 10                        | 6/11/73  | 19:30      | 280                      | NE                  | 14.0                  | 2.7                                   | 0.20                    | 467                         | 3.2                        |              |
| 11                        | 6/12/73  | 20:55      | 173                      | NE                  | 12.5                  | 2.4                                   | 0.19                    | 379                         | 3.1                        |              |
| 12                        | 10/16/73 | 22:00      | 117                      | NE                  | 11.2                  | 2.3                                   | 0.21                    | 340                         | 3.3                        |              |
| Mean (Standard Deviation) |          |            |                          |                     |                       |                                       | 0.19 (0.04)             | 398 (123)                   | 3.2 (0.06)                 |              |

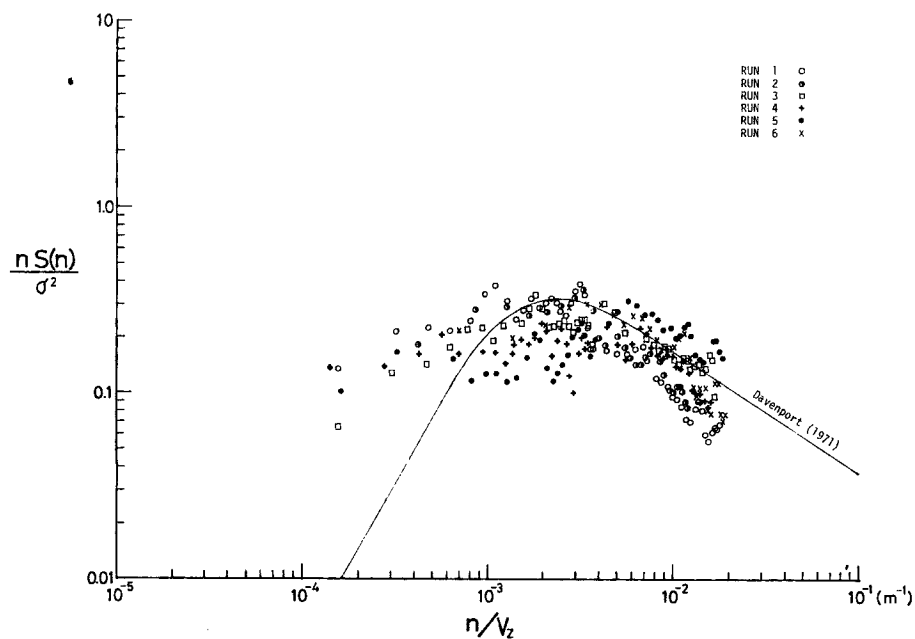


Fig. 1 Spectra of horizontal wind speed in high winds at Shionomisaki (Run 1–Run 6, Typhoon 7220).

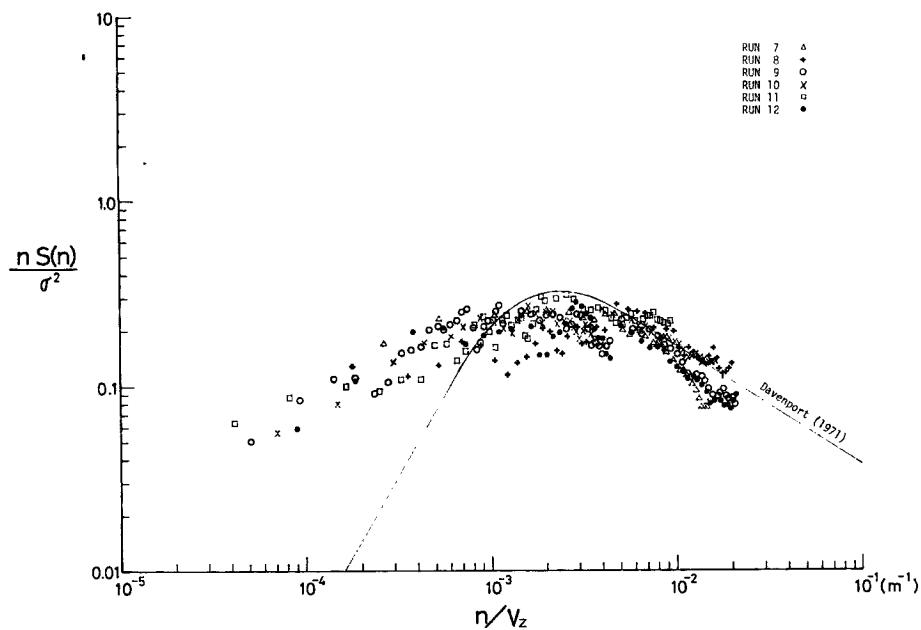


Fig. 2 Spectra of horizontal wind speed in high winds at Shionomisaki (Run 7–Run 12).

くても観測時間は分割せずに計算しており、また平滑化を行って資料の数が減いてもスペクトル計算の自由度が30以下になることはないようにした。

このようにして計算した強風時の風速変動のスペクトルは **Fig. 1** および **Fig. 2** に示すとおりである。ここに示したスペクトル密度はいずれも評価時間の短い場合(0.8ないし2.0秒)の風速の分散で正規化し、横軸は平均風速を用いて求めた波数  $n/v$  によって示した。1つの場合について2つないし3つのスペクトルが計算されるが、これらは重なった部分の中央点で接続した。2つの図のうち **Fig. 1** に示したのは台風7220の場合に得られたもので特に風が強い場合である。

これら2つの図に示された12の正規化スペクトルはいずれも良く似た形をしており、場合による差は小さい。このことはここで示したような風速 10m/s 以上の強風の場合には単純な正規化で状態を表現することができることを示しており、乱れの性質に相似性のあることが解る。この点、先に塩谷<sup>7)</sup>が指摘したように energy peak がはっきりと2つの山を示したり、また全く見られないような場合は見られなかった。

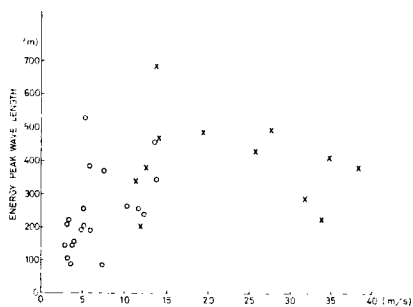
個々の場合についてスペクトルを平滑化して求めた energy peak の位置は **Table 1** に示すとおりであり、波長に換算した値の平均は 398m、標準偏差は 123m である。この値は先にこの場所の高さ 10m の測風塔において測定された<sup>8)</sup> 比較的風の弱い場合の風速変動のスペクトルから得られた energy peak の波長の平均値 200m に比べると2倍近くも大きい。観測高度の違いを考慮に入れてもこの差は大きいように思われる。前回の結果を含めて energy peak に対応する波長の平均風速による変化を図示したものが **Fig. 3** である。この図から見ると風速 10 m/s 程度以上の強風では系統的な差は見られないようで、風速の小さい所では波長は小さくなっている。この energy peak は接地気層においては気象安定度の函数であることが知られており、Kaimal 等<sup>9)</sup>は平地上の 6m ないし 23m の高さの比較的風の弱い場合の観測値を用い、中立安定時に peak の正規化周波数 ( $f = n z / v$ ) が 0.05 附近にあることを示した。この値はいくつかの観測結果をまとめた Bush and Panofsky<sup>10)</sup>の研究の結論と同じである。一方今回得られた強風時の平均値に対応する値は  $f_{\text{peak}} = 0.048$  となり、これらの結果とは良く一致している。また Berman<sup>11)</sup>は過去に得られた風速変動のスペクトルをまとめて調査した結果、中立大気中でこの energy peak の正規化周波数  $f_{\text{peak}}$  はさらに高さの函数になり次の式で示されることを示した。

$$f_{\text{peak}} = 0.005 Z^{0.75} \dots\dots\dots (2)$$

但し、ここで  $z$  は高さでメートル単位で示す。この関係式から今回の高さ 19 m での値を求めると 0.046 となる。これらのことから考えて強風時における状態は従来の接地層の研究において得られた比較的風の弱い場合の知識から中立の安定状態のものを用いればかなりよく表現されることが推定される。

Davenport は最初 (1) 式の応用においてその  $n_0$  値としてこの energy peak と対応する波長が高さに無関係に 700m に相当する  $n_0 = V_{10}/1200$  という値を採用していたが、その後 Berman の結果を利用して  $n_0 = V/346 Z^{0.25}$  という値を用いることを提案している。日本においては塩谷<sup>7)</sup>あるいは小野田<sup>12)</sup>による海岸における実験値が示されているが、いずれも大きな波長を示している。しかし、解析に用いた1回の観測の長さが短いのでその結果に対する信頼性は低い。

正規化に用いた短い評価時間の風速変動の標準偏差から求めた乱れの強さは **Table 1** に見られるとおりでその平均値は 0.19 である。この場所でも渦相関法によって測定した高さ 1.5m での抵抗係数  $C_D$  は 0.01 であり<sup>13)</sup> これを中立大気を仮定して高さ 19m における風速に対応するものに換算すると 0.004 となる。この値を用いる



**Fig. 3** Wave length of the energy peak as a function of mean wind speed (heights of observation being 10 m shown by circles and 19 m shown by crosses).

と摩擦速度  $V_*$  を次の関係で推定することができる。

$$V_* = C_D^{\frac{1}{2}} V \quad \dots\dots\dots (3)$$

従って風速変動の標準偏差と摩擦速度との比 ( $D=\sigma_u/V_*$ ) を今回の観測値について計算すると Table 1 の右端に示したような値となり、その平均値は3.2となる。この値は他の場合で得られた値<sup>14)</sup> 2.45 (Davenport) 2.9 (O' Neill), 2.5 (Australia), 2.1 (Brookhaven), 2.3 (Monin) に比してやや大きいが外挿した抵抗係数による摩擦速度の推定値の信頼度が低いので詳細に論じるのは危険である。

ここで求めた全てのスペクトルの正規化スペクトル密度を波数区間毎に平均して求めた強風時のスペクトルの一般形は Fig. 4 に示すとおりである。この平均スペクトルの最大値は約  $0.24(=nS(n)/\sigma^2)$  である。この値は(1)式に示した Davenport の式で与えられる値0.32よりは多少小さい。一方(3)式の関係を用いてこの値を摩擦速度を用いて正規化した値  $nS(n)/V_*^2$  に換算すると約2.4となる。この値は文字が米国の Bonneville 塩原において求めた値とほぼ一致するが Kaimal 等<sup>9)</sup> の求めた値1.0に比べるとずっと大きい。この値の大きさについても現在のところ知識は充分ではないのでさらに観測を必要とする。

平均スペクトルの peak の高周波数側の勾配は Fig. 4 にも見られるとおり  $-2/3$  であり、これはスペクトル密度が周波数の  $-5/3$  乗に比例するという従来から確立された知識と一致する。一方平均スペクトルの低周波数側の勾配を Fig. 4 から求めると0.51となる。このことはスペクトル密度が周波数の  $-0.49$  乗に比例していることを示しており、この値は Davenport の式で考えられている周波数に正比例するという考えとは全く逆に周波数の減少と共にスペクトル密度が増大している訳で、この領域でスペクトル密度が周波数に無関係になり変化しないと考えた日野<sup>15)</sup> の仮定とも異っている。これは井上などの行った従来の乱流の理論的な研究が低周波数変動の全くないような場の中での乱れを考えているのに反し、自然の風の場合はさらに低周波数の乱れが存在しており、それとの相関を無視することができないことに起因しているものと考えられる。この点についてはさらに研究が必要である。

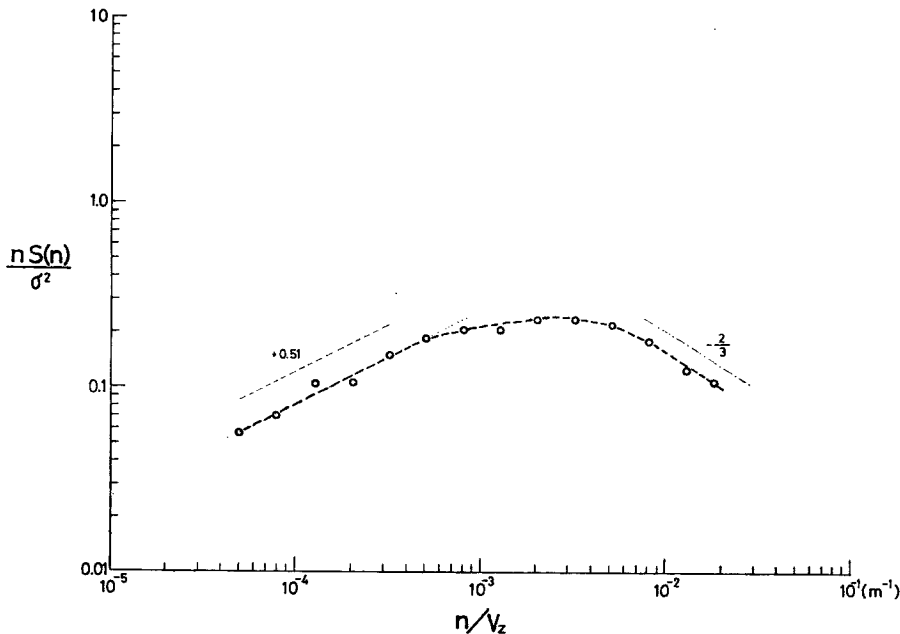


Fig. 4 Averaged universal spectrum of horizontal wind speed in high winds at Shionomisaki.

### 3. 結 語

強風時における広範囲にわたる風速変動のスペクトルの特性を潮岬風力実験所における高さ 19m で測定した資料を用いて解析して見た。スペクトルの低周波数側の形は今回特に正確に調べ得るように注意して見たが、風速変動のスペクトル密度は energy peak の低周波数側で周波数の  $-1/2$  乗に比例しており、より低周波数側の乱れの影響を無視することはできないことが明らかとなった。すなわち、ここで考えているような境界層内で生じる乱れすなわち Microturbulence はより低周波数側にある周期 1 日または数日の Mesoturbulence の高周波数側の勾配上に重なっているものであり、一様流上の乱れとは異った考えを採用しなければならない。この点を除けば、energy peak の位置あるいはそれより高周波数側の特性は平均風速 30m/s 程度の強風時においても風速変動のスペクトルは比較的風が弱い時に得られた接地気層中での過去の解析結果のうち大気安定度が中立な場合のものとはほぼ相似であり、実用的には低周波数側の不一致はそれほど大きな問題とはならないであろうから Davenport の提案した実験式を用いても大過ないであろう。

この研究を行うにあたって記録の読み取りをしていただいた河内伸治、結城儀子両氏に感謝したい。スペクトルの計算は京都大学防災研究所災害科学資料センターの電子計算機 FACOM 230-25 を用いて行った。

### 参 考 文 献

- 1) Sachs, P.: Wind forces in engineering, Pergamon Press, 1972, pp. 1-387.
- 2) Davenport, A. G.: The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 87, 1961, pp. 194-211.
- 3) Davenport, A. G.: The dependence of wind loads on meteorological parameters, Wind Effect on Buildings and Structures, 1971, pp. 19-82.
- 4) Ogura, Y.: The relation between the space- and time-correlation functions in a turbulent flow, Journ. Met. Soc. Japan, Vol. 31, 1953, pp. 355-369.
- 5) Inoue, E.: Structure of turbulence in the atmospheric surface layer, Proc. 6th Japan Nat. Congr. Appl. Mech., 1956, pp. 315-318.
- 6) 井上栄一: 風速と風圧, 天気, Vol. 20, 1973, pp. 146-148.
- 7) 塩谷正雄: 強風時における変動風速のパワースペクトル, 暴風時における突風の構造(中間報告その3), 日本大学理・工系習志野校舎物理教室, 1969, pp. 6-30.
- 8) 石崎澄雄・光田 寧・佐野雄二: 風速変動の長周期成分について(2), 京都大学防災研究所年報, 第12号A, 1969, pp. 227-235.
- 9) Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Cote: Spectral characteristics of surface-layer turbulence, Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 98, 1972, pp. 563-589.
- 10) Busch, N. E. and H. A. Panofsky: Recent spectra of atmospheric turbulence, Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 94, 1968, pp. 132-148.
- 11) Berman, S.: Estimating the longitudinal wind spectrum near the ground, Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 91, 1965, pp. 302-316.
- 12) 小野田 仁: 本州四国連絡架橋調査・気象調査(中間報告・その4), 1966.
- 13) Hanafusa, T.: Some aspects of turbulent fluxes near the ground, Contributions of Geophysical Institute, Kyoto University, No. 11, 1971, pp. 57-70.
- 14) Lumley, J. L., and H. A. Panofsky: The structure of atmospheric turbulence, Interscience Pub., 1964, p. 155.
- 15) 日野幹雄: 瞬間最大値と評価時間の関係一とくに突風率について, 土木学会論文集, 第117号, 1965, pp. 23-33.