

風速変動の長周期成分について

石崎 潑雄・光田 寧・花房 龍男

ON THE LONG PERIOD FLUCTUATION OF SURFACE WINDS

Hatsuo ISHIZAKI, Yasushi MITSUTA and Tatsuo HANAFUSA

Synopsis

A power-spectrum analysis of horizontal wind speed is made over a wide range from about 10^{-7} cps to 2.5×10^{-1} cps by piecing together various portions of the spectrum. There appear to be three major eddy energy peaks in the spectrum; one peak occurs at a period of 4 days, second peak occurs at a period about 1 day and the third one occurs near a period of 1 min.

Between the later two peaks, there is a broad spectral gap. The power spectral density decreases in proportion to the $-5/3$ th power of frequency between 10^{-5} cps (the period is about 1 day) and 10^{-4} cps (the period is about 3 hours) as well as in the frequency range higher than 10^{-1} cps.

1. 序 論

風速を測定する測器の開発が進み、数サイクルぐらいの変動なら簡単に解析が行なわれるようになり、短周期変動の風のスペクトラム解析は、比較的多く研究されているのに対し、長周期変動についての研究はあまり行なわれていないのが現状である。風のエネルギーのスペクトル的な分布を広い範囲にわたって把握するために、広い周波数帯にわたって風のスペクトル解析を行った。

同様な問題について、先に Van der Hoven¹⁾ は高度約 100 m での風のスペクトラムを約 10^{-7} cps から 2.5×10^{-10} cps の広い周波数帯にわたって、Tukey の方法によって解析し、次の様な結論を得ている。「大気最下層の風の垂直成分のスペクトラムにおいて total variance に最も貢献する乱れは、ほとんど $10 \sim 100$ c/hour の周波数帯内に存在するのに対し、風の水平成分のスペクトラムについては $nF(n) - \log n$ chart 上で、2つの主なエネルギーの山が存在し、そのうちの1つは、約4日ぐらいの周期の所に存在し、他の1つは約1分ぐらいの周期の所に存在する。そしてこれら2つの山の間では $1 \sim 10$ c/hour の周波数帯に中心を持つスペクトラム密度の非常に小さい領域が存在する。」また Bushnell and Huss²⁾ は、風速の評価時間をいろいろと変化させることによる風速の variance の変化を計算する簡便法によって風の水平成分のパワースペクトラムを 10^{-7} cps から 1 cps の周波数帯にわたって解析し、この周波数帯内では、風の水平成分のパワースペクトラム density は、周波数の -1.4 乗で良く近似され、特に顕著な山や谷の存在は見あたらないと報告している。しかし、このどちらの結果が一般的なものかは今日のところ明かでない。また、この二人によって解析された資料はいずれも測定高度が 100 m 内外であり、その結果は地表面のごく近くでの風の性質とはかなり異なっているものと考えられる。この研究では、地面近くの地上約 10 m の高さでの風速の変動のスペクトラムについて考察した。この高さはわれわれの日常生活に直接関係の深いものであり、普通地上観測の基準高度として採用されているため長期間にわたる資料が入しやすい利点もある。

約 10^{-7} cps から 2.5×10^{-1} cps の広い周波数帯にわたって、スペクトラム解析を行った。

2. 解析方法

スペクトラムの計算を行う場合には次のような2つの方法が考えられる。1つは Bushnell and Huss が行なったように、風速の評価時間をいろいろ変化させることによる風速変動の variance からスペクトラムを計算する簡便法であり、他の方法は、普通に行なわれている自己相関係数から求めるものである。前者は後者に比較して広い周波数帯にわたる計算が簡単であるが、精度が落ちる欠点があるのでこの研究では後者に従った。広い周波数帯にわたるスペクトラムを算出する場合、長期間にわたる大きな資料をはじめから1度に解析してスペクトラムを計算するのが理想的であるが、現実の問題としては計算量が多くなりすぎて不可能である。従って考察する周波数帯を適当に分割し、その各々のスペクトラムを各々独立に計算した後、1つにまとめる方法を用いざるを得なかった。そのためにスペクトラムを継ぎ合わせることに多少の問題は残るが、個々のスペクトラム解析での高周波数側での aliasing³⁾、低周波数側のスペクトラムの分解能の不足をカバーするように、なるべくスペクトラムが overlap するように心がけた。スペクトラムの計算は Tukey の方法によったが、この方法によれば、資料の評価時間 (averaging time) の2倍の周期から [averaging time $\times 2 \times \text{lag}$ の数] の周期までのスペクトラムの計算が可能であり、自由度によってそのスペクトラムの有意性を検討できるという利点がある。なお、すべての計算は京都大学の KDC-II 電子計算機を使用して行なった。

3. 解析結果とその考察

この研究でスペクトラム解析に使用した水平風速の資料は、和歌山県西牟婁郡串本町潮岬にある京都大学防災研究所附属潮岬風力実験所（以下実験所と呼ぶ）の観測塔上（地上約 10 m）に設置されている光進ベーンによる平均風速及び瞬間風速の資料と実験所の北東約 1 km にある潮岬測候所（以下測候所と呼ぶ）の三杯風速計（地上高度約 14 m）による毎時風速及び日平均風速の資料である。Fig. 1 に実験所及び測候所の相対位置を示す。海拔高度は実験所が約 60 m、測候所は約 75 m である。Table 1 には、日時、個々の観測高度、の資料の評価時間、解析した周波数帯、解析をした際の lag（ずらし）の数、スペクトラムの自由度、平均風速及び風速の標準偏差等が記されている。Table 1 の平均風速の下の（ ）内の数字は風速の標準偏差である。

Table 1 Portions of horizontal wind speed spectra and related quantities.

Run No.	Date and time	Height (m)	Averaging time	Frequency range (cps)	Number of lags	Degree of freedom	Mean wind speed (m/s)
A	1/1/65—8/2/67	14	1 day	1.94×10^{-7} — 5.78×10^{-6}	30	65	4.9 (2.0)
B	1/1/65—5/10/65	14	1 hour	2.78×10^{-6} — 8.35×10^{-5}	50	123	4.8 (2.9)
C	5/15/65—5/27/65	10	6 min.	3.5×10^{-5} — 1.4×10^{-3}	40	146	3.7 (2.3)
D	9/22/65—9/30/65	10	6 min.	2.8×10^{-5} — 1.4×10^{-3}	50	90	4.9 (2.3)
E	6/4/66—6/13/66	10	6 min.	2.8×10^{-5} — 1.4×10^{-3}	50	90	3.9 (2.4)
F	11/21/66—12/1/66	10	6 min.	2.8×10^{-5} — 1.4×10^{-3}	50	90	4.6 (2.7)
G	1140, 9/13/67 —0500, 9/14/67	10	1 min.	2.8×10^{-4} — 8.3×10^{-3}	30	71	9.8 (2.1)
H	0752, 8/22/67 —0812, 8/22/67	10	2 sec.	8.3×10^{-3} — 2.5×10^{-1}	30	57	12.2 (2.9)
I	0950, 8/22/67 —1022, 8/22/67	10	2 sec.	6.2×10^{-3} — 2.5×10^{-1}	40	53	13.5 (3.8)

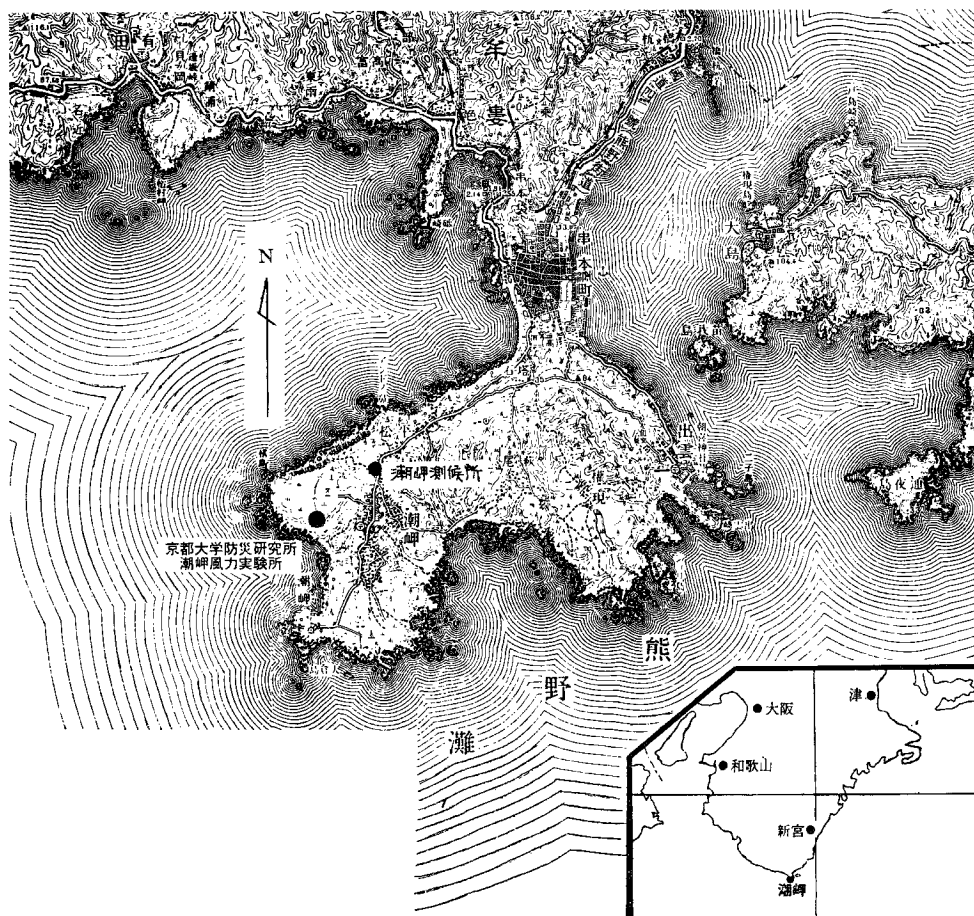


Fig. 1 The location of observational station.

Fig. 2 から Fig. 6 までは風の水平成分のパワースペクトラムを示したもので、横軸は周波数 n と周期を対数で目盛り、縦軸は normalized power spectral density $F(n)$ に周波数 n を乗じた $nF(n)$ が直線的な目盛で記入されている。Fig. 2 は測候所の日平均風速の約 2 年半分の資料から求めたもので約 2.9×10^{-6} cps (周期約 4 日) のところに大きなエネルギーの山が見られる。これは Van der Hoven がアメリカ合衆国東部で高さ約 100 m の高度での資料から計算をした結果にも出ている。またこのような 4 日周期の変動は他の気象要素のスペクトラムの解析結果にも見出されており、Griffith et al³⁾ がアメリカ合衆国東部の日平均気温を使用した温度のスペクトラム、Estoque⁴⁾ がアメリカ合衆国南東部の 850 mb 高度での日々のラジオゾンデの観測資料を使用して求めた meridional heat flow のスペクトラムおよび Gossard⁵⁾ のアメリカ合衆国西部での地表の気圧のスペクトラムなどにもほぼ 4 日周期に相当する山が見られる。これは中緯度でのシノプティックなスケールの weather system (高低気圧) の通過に関係するものと考えられている。

Fig. 3 は測候所の毎時平均風速を使用して求めたものである。1 日周期およびわずかではあるが、半日、1/4 日周期の山が認められる。Van der Hoven の結果では、このような周期に対応する山は顕著ではないが、彼は地上約 100 m で風の変動の解析を行っており、この高度では比較的風の日変化の影響が少ないの

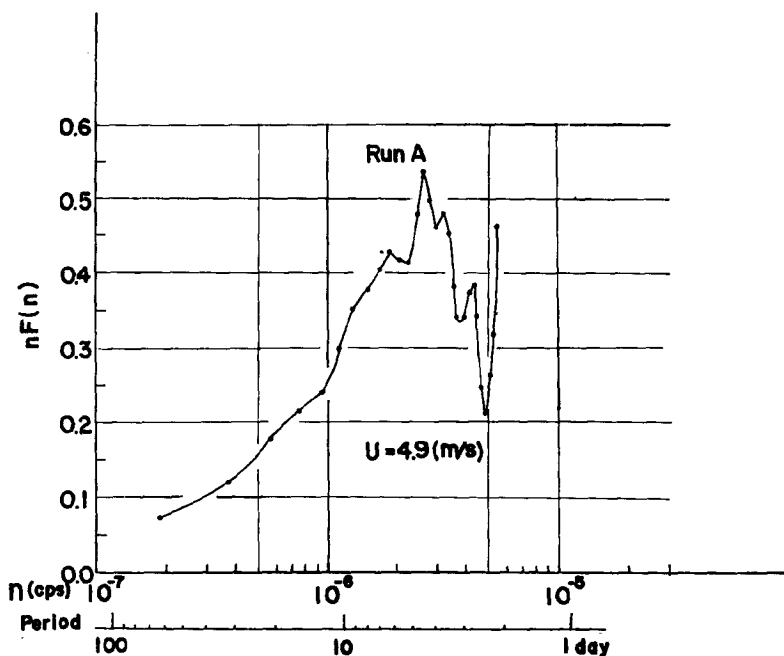


Fig. 2 Horizontal wind speed spectrum at Shionomisaki Meteorological Station at 14 m height during period from January 1, 1965 to August 2, 1967.

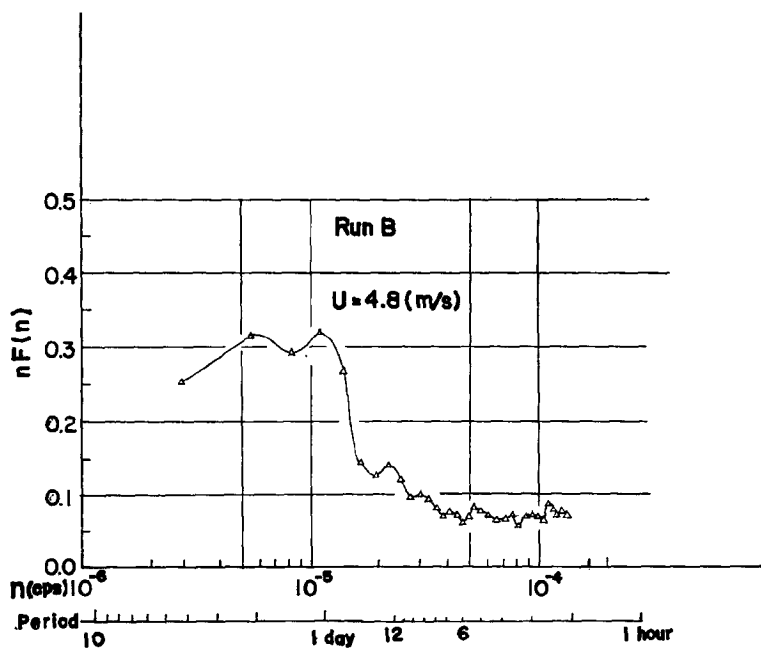


Fig. 3 Horizontal wind speed spectrum at Shionomisaki Meteorological Station at 14 m height during period from January 1, 1965 to May 10, 1965.

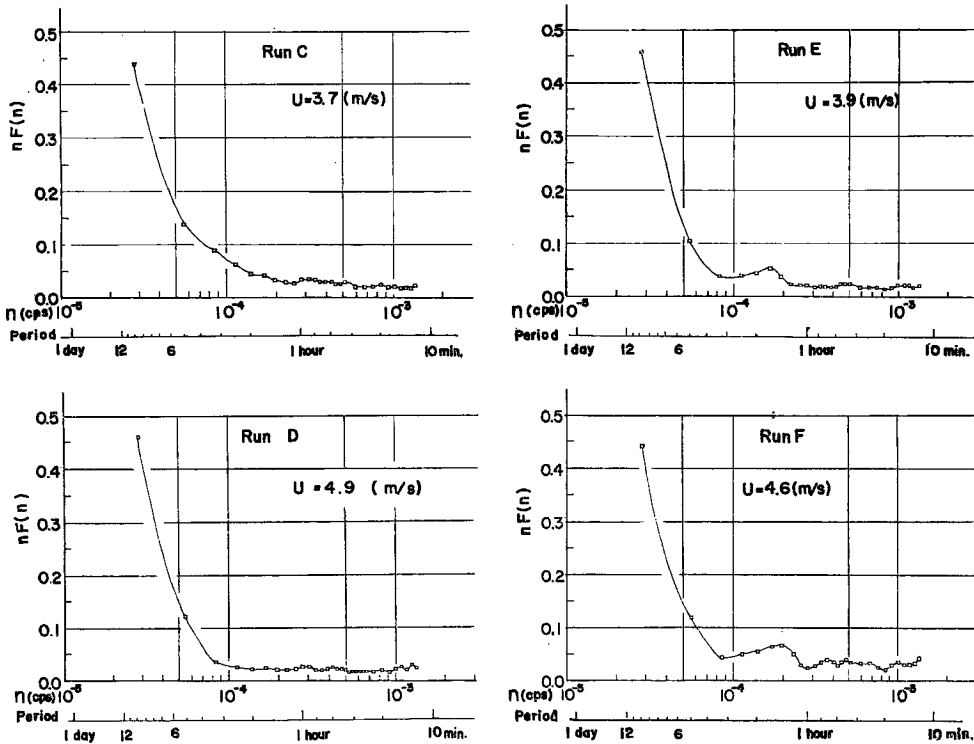


Fig. 4 Horizontal wind speed spectra at Shionomisaki Wind Effect Laboratory at about 10m height.

に反し、地面近くの高度は風の日変化がはっきりと生じるためにこのような差になったものと考えられる。また5～6時間の周期のところにわずかにエネルギーの増大が見うけられるが、これは観測場所が海岸のすぐ近くであったため、海陸風の変化に対応する山とも考えられる。

Fig. 4 は実験所での光進ベーンによる6分間平均風速の資料を季節別に4例解析したものである。4例とも解析した周波数の低周波数側にエネルギーの増大が見うけられる。ただし Run E, Run F. のスペクトラムには約 2×10^{-4} cps (周期約100分) ぐらいのところにわずかの山が見受けられるが、自由度より考えて有意な山とは考えられない。なお解析した各々の Run の気象状態は次のとおりである。

春：Run C, 前半移動性高気圧におおわれ後半は天気が悪くづれている。

夏：Run E, 気圧の谷が6月4, 5日および9, 10日ごろ通過し, 11日には天気が1時回復し, 12日からまた天気は下り坂となる。

秋：Run D, 9月25日ごろ台風26号の影響を受け少し風速が強くなるが, 後半は移動性高気圧におおわれ, 天気が回復している。

冬：Run F, この期間中北西の季節風が卓越していた。

この4例からわかるように季節の変化によるスペクトラムの形の差はほとんど見受けられない。この周波数帯を Van der Hoven は夏の季節の分しか解析していないが、このように季節による差が認められないので、ある季節だけで代表することも可能であると考えられる。

Fig. 5 および Fig. 6 は実験所の光進ベーンで強風時に得られた資料を解析したものである。Fig. 6 は光進ベーンの早廻し記録 (6 cm/min) を2秒毎に読み取ったもので、考察した周波数の両端でエネルギー

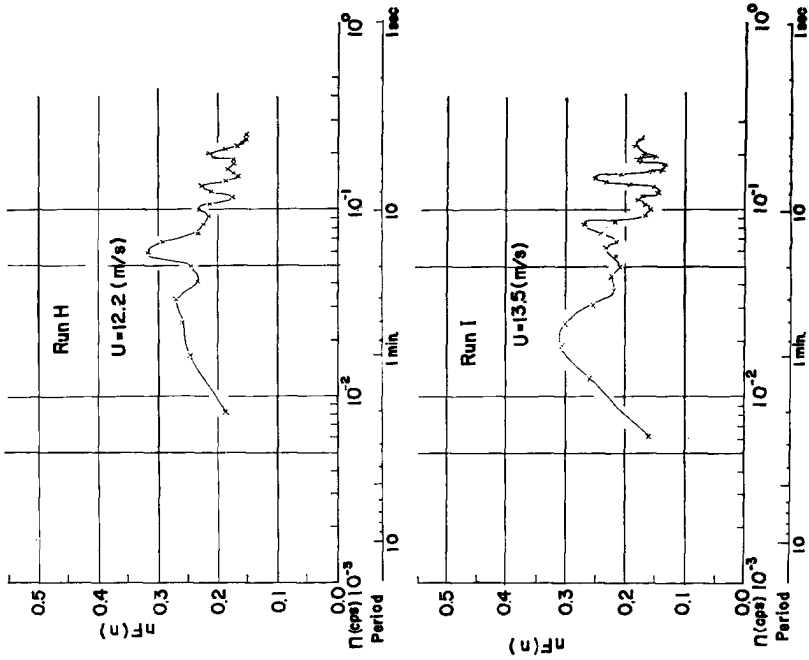


Fig. 6 Horizontal wind speed spectra at Shionomisaki Wind Effect Laboratory at about 10m height.

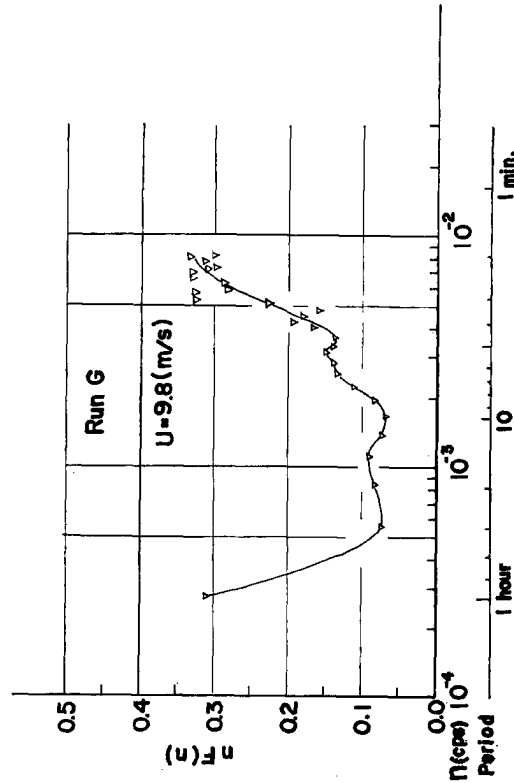


Fig. 5 Horizontal wind speed spectrum at Shionomisaki Wind Effect Laboratory at about 10 m height.

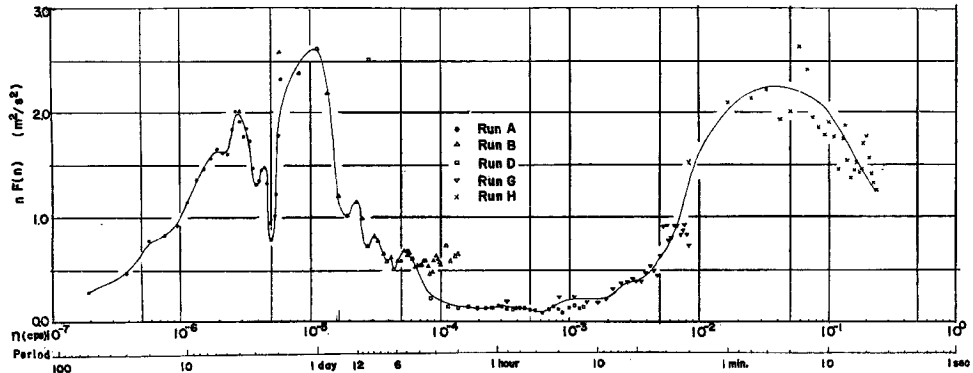


Fig. 7 Horizontal wind speed spectrum.

一の増大が見うけられ、Fig. 6 では約 6×10^{-2} cps (Run H), 2×10^{-2} cps (Run I) のところにエネルギーの山が存在しているが、平滑化して見れば Run H も Run I も約 30 sec ~ 1 分位の周期のところにエネルギーの集中があるものと考えられる。

Fig. 5 の高周波数側でのエネルギーの増大および Fig. 6 のエネルギーの山は、地面近くの乱れの変動によるエネルギーの山と考えられる。

Fig. 2 から Fig. 6 までにプロットした $nF(n)$ にそのスペクトラムを解析した際の variance を乗じたものを縦軸、周波数 n と周期を横軸にとってプロットしたのが Fig. 7 である。なお Run C ~ Run F はスペクトラムの形がほとんど同じなため、Run D のみ、また Run H および Run I もスムーズすればほとんどスペクトラムの形が類似しているため、Run H のみをプロットした。大体の形は Van der Hoven が高度約 100 m で得た風のスペクトラムとほぼ一致するが、この解析結果では、風の日変化が彼のものよりは顕著に現われており、高低気圧の移動によるエネルギーの山よりも大きいぐらいである。風の日変化の様相の典型的な 1 例は、Fig. 8 に示されるようなものであるが、大気最下層では、高度 100 m 内外が最も風の日変化の影響が少なく、高度 10 m 内外は高度 100 m 内外に比較すれば、はるかに風の日変化の影響が

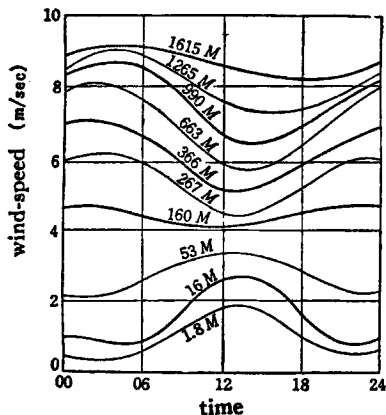


Fig. 8 Mean diurnal variation of wind speed (at Oak Ridge, U.S.A.).

大きいと考えられるから、Van der Hoven の結果との差ができたものと考えられる。 10^{-4} cps 近傍で Δ 印のスペクトラムの値が増大する傾向が見うけられるが、これはスペクトラム解析の際の「aliasing」の影響と思われる計算上の誤差である。高周波数側で (10^{-2} cps 以上) エネルギーが大きい、これは風速が大きい時のみのスペクトラムを計算したこともあり、普通状態のスペクトラムを計算すれば、このエネルギーの山の高さはいく分減少し山の位置も多少移動するかも知れないと考えられる。Van der Hoven は高低気圧の通過に伴う約 4 日周期の山と地表付近の乱れの変動によるエネルギーの山との間にスペクトラムの値の非常に小さい領域が存在する事を認めているが、今回の解析結果では、1 日周期のエネルギーの山が 4 日周期のそれよりも卓越したので、スペクトラムの値の小さい領域は幾分短縮されたが、依然としてはっきりと認められる。このことは微細気象学分野において、風速等の平均値を決定す

る困難さを幾分和らげる役割を果していると同時に、この領域内では、風の変動の原因となるものが存在していないことを示しているものと考えられる。

このスペクトラムの値の小さい領域の存在について Kolennikova et al⁵⁾ が定性的な説明を試みているが未だ完全とはいえない。

各々のスペクトラムの spectral density $F(n)$ を縦軸に、周波数 n と周期を横軸にプロットしたのが Fig. 9 である。 10^{-5} cps と 10^{-4} cps の間の周波数帯と高周波数側 (10^{-1} cps 以上) で $n^{-5/3}$ 乗則が成立しているのが見うけられる。高周波数側については inertia subrange で $n^{-5/3}$ 乗則が成立することが理論及び実験から確かめられているが、大きなスケールの 10^{-5} cps $\sim 10^{-4}$ cps の領域でも高周波領域と類似した mecha

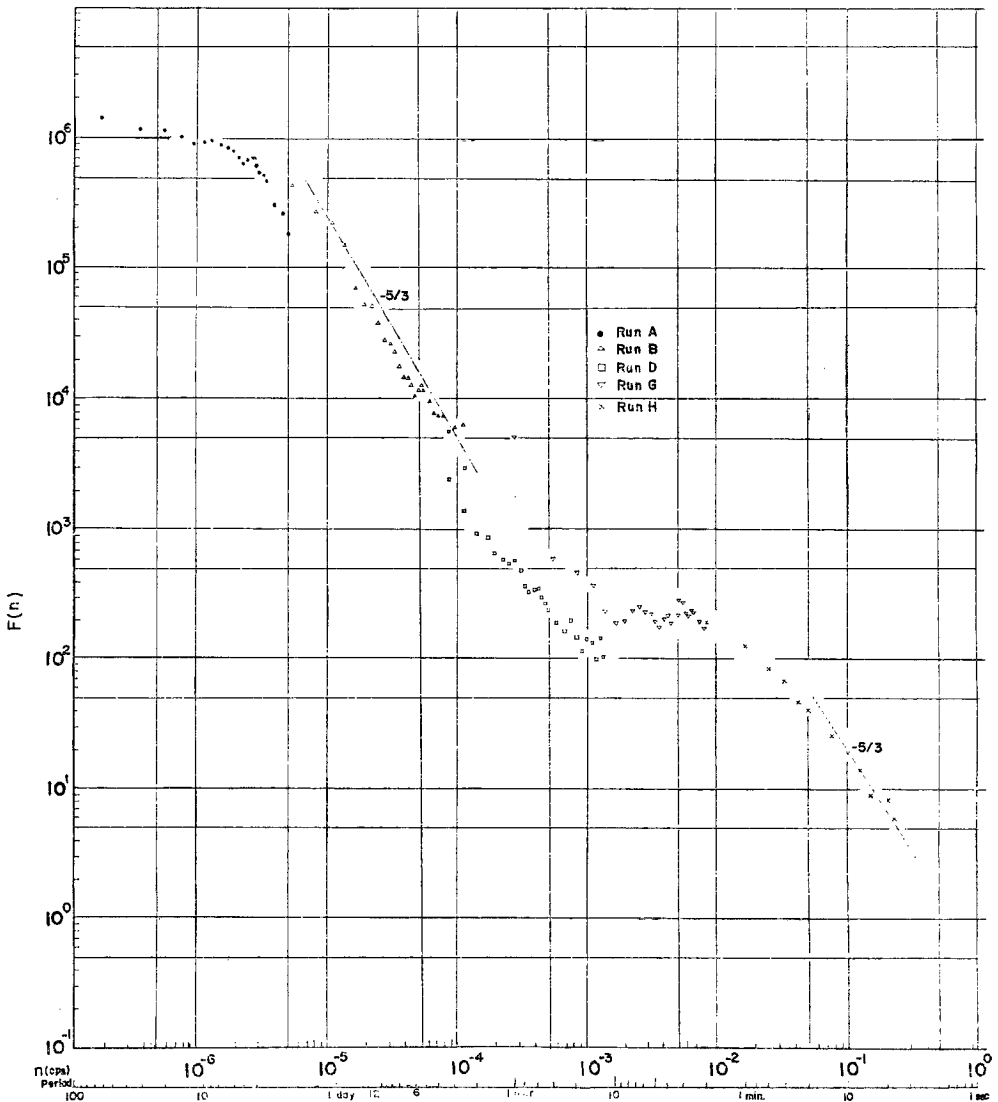


Fig. 9 Power spectrum of horizontal wind speed.

nism でエネルギーの伝達が行なわれているのではないと思われる。Bushnell and Huss の結果には、エネルギーの山とか谷の存在は見あたらないが、風速の評価時間を変化させることによる風速の variance の変化によってスペクトラムを計算する簡便法では分解力があまり良くないので、スペクトラムの詳細な形を議論するには不十分であると思われる。

4. 結 語

高度約 10 m での風の水平成分のパワースペクトラムを約 10^{-7} cps から 2.5×10^{-1} cps の広い周波数帯にわたって解析し、3つの主なエネルギーの山が存在することを確認した。すなわち高低気圧の移動に関連する約 4 日周期、風の日変化による 1 日周期、および地表付近の乱れの変動による約 1 分周期である。半日周期および海陸風の影響によるエネルギーの山もわずかに認められた。この一日周期と地表付近の乱れの変動によるエネルギーの約 1 分周期との間には広い領域にわたってスペクトラム密度の非常に小さい領域の存在が見うけられ、Van der Hoven の結果と一致した。 10^{-5} cps $\sim 10^{-4}$ cps の領域での spectral density $F(n)$ が n の $-5/3$ 乗で減少していくのが見られ 10^{-1} cps 以上の高周波数側の inertia subrange 内での mechanism と類似した mechanism でエネルギーの伝達が行なわれているのではないと思われる。

終りに、気象観測資料を利用させていただいた潮岬測候所所長斎藤氏及び電子計算機による計算を手伝っていただいた京都大学大学院米谷俊彦氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Van der Hoven, I., : Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. J. Meteorol., Vol. 14, No. 2, 1957, pp.160—164.
- 2) Bushnell, R. H. & P. O. Huss., : A power spectrum of surface winds. J. Meteorol., Vol. 15, No. 2, 1958, pp.180—183.
- 3) Griffith, H. L., et al., : Power spectrum analysis over large ranges of frequency. J. Meteorol., Vol. 13, No. 3, 1956, pp.279—282.
- 4) Estoque, M. A., : The spectrum of large scale turbulent transfer of momentum and heat. Tellus, Vol. 7, No. 2, 1955, pp.177—185.
- 5) Gossard, E. E., : Spectra of atmospheric scalars. J. Geophys. Res., Vol. 65, No. 10, 1960, pp.3339—3351.
- 6) Kolennikova, V. N., et al., : Spectra of meteorological field fluctuations. Izv. Atmospheric and Oceanic Phys. Ser., Vol. 1, No.7, 1965, pp.653—669. (Eng. Trans.)