

風速変動の長周期成分について (2)

石 崎 潑 雄・光 田 寧・佐 野 雄 二

ON THE LONG PERIOD FLUCTUATION OF SURFACE WINDS (2)

By *Hatsuo* ISHIZAKI, *Yasushi* MITSUTA and *Yuji* SANO

Synopsis

Spectra of horizontal wind speed over wide range of frequency are studied. The energy peaks in the range from 2.5×10^{-3} to 2.5×10^{-1} cps, which are considered to correspond with the eddies caused by shearing stress in the planetary boundary layer, are analyzed for various cases and the peak frequencies are related with wind speed and stability in the planetary boundary layer. The results show that the averaged peak wave number is about $1/200(1/m)$ and that the peak wave number increases with increasing stability in the planetary boundary layer.

1. 序 論

著者等は第1報¹⁾において潮岬における地表風の変動の広い周波数帯にわたるスペクトル解析を行い、先に Van der Hoven²⁾ が米国における地上約 100 m の高さでの風の変動について見出したのとは似た形のスペクトルが得られる事を確認した。すなわちスペクトル上のエネルギーの山は synoptic な天気系の移動に関連した周期約 4 日、それにならぶ日変化に対応する周期 1 日のところ、ずっと高周波数側の周期約 1 分のところにあり、周期約 10 分から数時間の範囲にはエネルギーの谷 (energy gap) が存在するということが、地表および地上 100 m ぐらいの高さにおける共通な性質として見出された。

本報においては前回の研究を進めて、風速変動の広帯域にわたるスペクトルについて考察を行い、さらに地表面の摩擦がその主な原因となって生じているとみられる周期 1 分程度のエネルギーの山がどのような性質を持つか、特にその山の周波数が何によって決定されるかということについて調べてみた。以下にその結果について述べる。

2. 風速変動の広帯域スペクトル

先に述べたとおり Van der Hoven²⁾ は高さ 100 m ぐらい、すなわちいわゆる Planetary Boundary Layer 内での風の変動について解析し、一方著者等¹⁾はいわゆる anemometer level の風、すなわち Surface Boundary Layer 内での風の変動について調べたのであるが、それを対比させるため Fig. 1 にこの2つをならべて示した。すなわち中段が Van der Hoven のスペクトルであり、下段が著者等の得たものである。これらを比較してみると、周期 4 日ぐらいの山は高いところで大きく、他の日変化に対応するものおよび短周期の変動の方は低い地表近くの方が大きくなっている。そしてエネルギーの谷はほとんど同じ範囲にわたって存在している。この短周期の変動の方は従来の乱流の研究の結果等からして大気下層の摩擦によって生じた乱れによるものであると考えられている。そして最近の飛行機による高空の乱流測定の結果によれば、この周期のところには晴天乱流の存在する場合を除いて普通には乱れの山は存在しないとの結果が得られている。一方、Kolesnikova et al³⁾の研究によれば自由大気中の風の変化にははっきりとした 4 日周期の変動に対応するエネルギーの山が存在することが分る。従って、synoptic なスケールに対応する変動は大気の

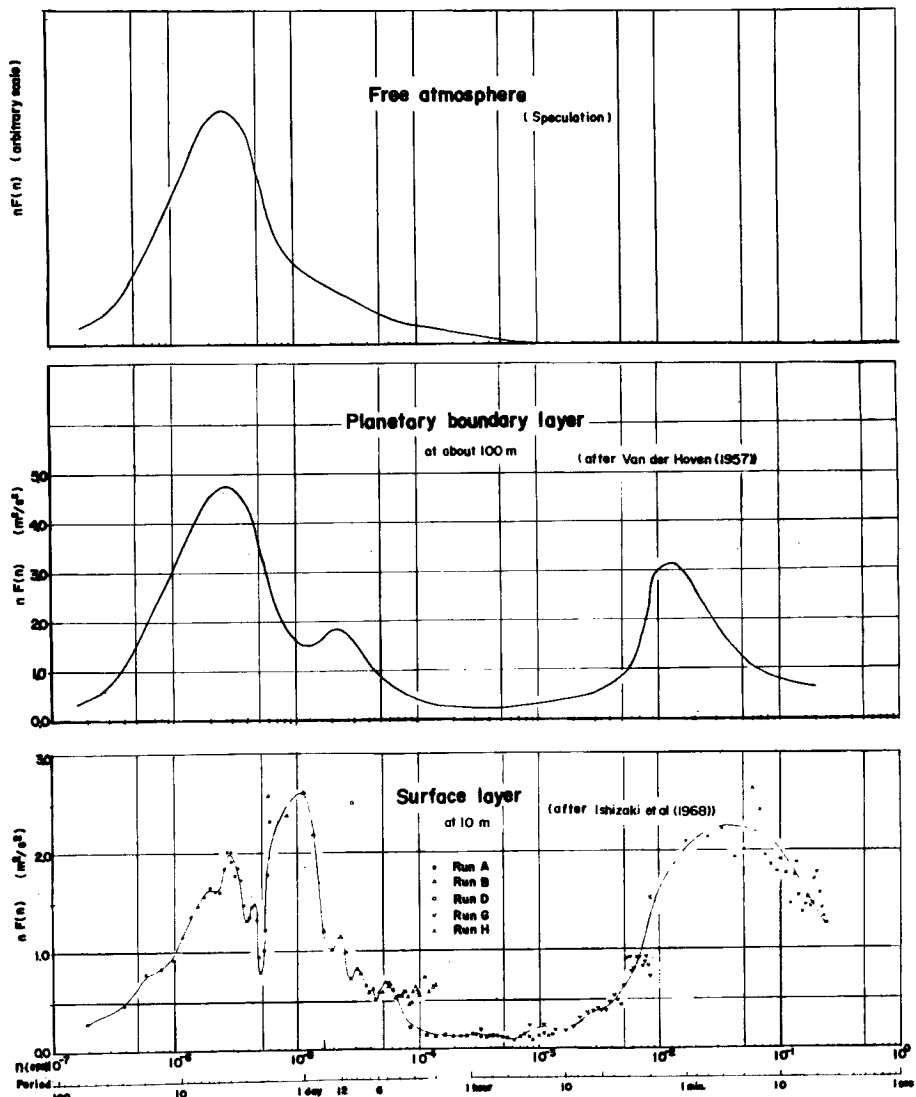


Fig. 1 Example of horizontal wind speed spectra at three different layers.

全層にわたって存在するものであり、1日周期と1分程度の周期の変動は大気下層の Planetary Boundary Layer 以下の気層に特徴的なものであると考えられる。これらのことから Fig. 1 の上段には自由大気中のスペクトルの推察値が示してある。

大気下層に特徴的な2つのエネルギーの山のうちで日変化に対応するものはその原因もはっきりしており、この周期に変動が現れることに疑問の余地はないが、1分程度の周期の変動はたとえその原因が地表摩擦によるものであるとしても、この周期にエネルギーの山が生じる理由はそれだけから決定されるものではない。この山に対応する周期がどのような物理的な条件によって決まるものであるかを明らかにすることは大気乱流の研究を進める上において大きな意味を持つものである。しかも Planetary Boundary Layer の

全層にわたってほぼ同じ形のスペクトルが得られるところから、これが地面に極く近い接地気層の性質によって支配されるものではなく、もっと深い Planetary Boundary Layer の全層にわたる物理的性質によって決定されるものではないかとの推測ができる。この点、接地気層の中の性質のみでこのエネルギーの山の性質を調べようとするのは不十分である。従って、この論文では rawin sonde の高層気象観測の結果とこのエネルギーの山の位置との対比を行うことにより、この山の性質について研究を進めることにした。

3. 観測資料および解析法

風速変動のスペクトルを求めるための観測資料は前回と同じく和歌山県潮岬にある防災研究所潮岬風力実験所の測風塔（高さ地上 10 m）に設置されたプロペラ式風速計の記録である。今回は高層気象観測との対比に重点を置いて行うことにしたため、潮岬測候所において高層気象観測の行われる時刻を中心とした 2 時間の間、自記紙速度を 60 mm/min の早廻しにして風速の記録を取った。そしてその結果は 2 秒毎に人が読み取りスペクトル計算の資料とした。

観測を行ったのは 1968 年 7 月 8 日から 15 日までの 1 日 4 回の高層強化観測が行われた WGI の期間と、台風 6807 号が接近した 8 月 10 日および 11 日および対比のため北よりの風が吹いていた 4 月 6 日の 3 日である。観測時の主な気象条件は Table 1 に示すとおりである。風が弱くプロペラ式風速計によっては十分な応答が得られないと思われる場合は解析の対象から除外してある。気象要素は接地気層に関するものと、高層観測による Planetary Boundary Layer に関するものとに分けて示してある。この表に示した安定度示数 (Stability Ratio) は次のように定義されるものである。

$$S.R. = \frac{4T}{\bar{U}^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで $4T$ は気層の 2 高度の間の温度差 (Surface Boundary Layer については (百葉箱の気温) - (地表面温度)、Planetary Boundary Layer については (900 mb 面の温位) - (百葉箱の温位)) であり、 $\bar{U}$ は気層の代表的な風速 (Surface Boundary Layer については測風塔上での風速、Planetary Boundary Layer については 900 mb 面の風速と測風塔上での風速との平均値) を示す。そしてこの安定度示数は、正の時気層は安定であり、負の時不安定である。表からも明らかなように、昼間の観測の多くは地表付近では不安定であっても Planetary Boundary Layer では安定になっており、不安定に近いのは Run S 68-022 の場合のみである。

読み取った風速の記録は京都大学の電子計算機 KDC-II によって Tukey⁴⁾ の方法によるスペクトルの計算を行った。解析した周波数の範囲は 2.5×10^{-3} cps から 2.5×10^{-1} cps までの間であり、計算に際してのずらしはほとんどの場合 100 で自由度は約 70 である。

4. 結果およびその考察

スペクトルを計算した結果およびその時の気象要素 (気温、風速、風向) の高さ方向の分布の代表的な例のいくつかを Fig. 2 に示す。この図からも明らかなようにエネルギーの山は場合によってかなり異なっている。全体を平滑化して考えた山の peak frequency に相当する所を矢印で示してあるが、一番上の場合のほぼ 0.1 cps から、一番下の例に見られるように解析の範囲よりも出てしまつて 2.5×10^{-3} cps 以下になっている場合まである。このようにして求めた各々の場合の peak frequency の値およびそれを地表での風速で換算した peak wave number が Table 1 の右側に示してある。また Table 1 には参考のために、前回の調査の際に得られた結果 (Run S 67-H および I) の資料をも同時に示してある。

この山の位置は Fig. 2 の例からも見られるとおり風速によってかなり異なっている。そこで各々の例について peak frequency と地表での風速との関係を図にしてみたものが Fig. 3 である。点にはかなりのばらつきはあるが大勢としては peak frequency は風速と共に直線的に増大していると考えることができそう

Table. 1 The observed values and the related quantities.

Run No.	Date	Start Time	Sampling Duration hr	Wea-ther	Surface Boundary Layer				Planetary Boundary Layer				Peak Frequency $\times 10^{-2}$ cps	Wave Number $\times 10^{-2}$ /m	
					Wind Direction (10 m)	Wind Speed (10 m) m/sec	$\Delta T^{(1)}$ °C	S.R. ⁽²⁾ $\times 10^{-1^{\circ}\text{C}}$ sec ² /m ²	$\partial u/\partial z^{(3)}$ (10 m)	$\Delta W.D.^{(4)}$ deg.	$\Delta U^{(5)}$ m/sec m/sec	$\Delta \theta^{(7)}$ °C			S.R. ⁽⁸⁾ $\times 10^{-1^{\circ}\text{C}}$ sec ² /m ²
S 68-406	4 : 6	13 : 58	0.9	☉	NNW	7.3	—	—	0.32	40	-8	6	—	8.5	1.16
S 68-001	7 : 8	67 : 30	1.9	●	NE	7.5	-2.1	-0.34	0.25	9	-1	9	6.5	2.0	0.27
002	8	13 : 30	2.0	☉	NE	5.1	-1.2	-0.46	0.29	93	3	5	3.5	2.5	0.49
003	8	19 : 30	2.0	☉	ENE	3.3	-0.3	-0.27	0.29	128	6	5	6.7	1.5	0.45
006	9	13 : 30	2.0	●	W	3.6	-1.8	-1.38	0.23	-16	-1	5	3.0	4.0	1.11
007	9	19 : 30	2.0	☉	W	3.2	0.5	0.49	0.44	-14	0	4	4.1	3.0	0.94
010	10	13 : 30	2.0	●	NE	5.1	-1.5	-0.58	0.29	-12	2	6	3.8	2.0	0.39
012	11	01 : 30	2.0	●	W	4.8	-1.6	-0.70	0.20	23	-1	5	4.6	2.5	0.52
014	11	13 : 30	2.0	●	NE	5.9	-1.0	-0.29	0.24	-48	-1	6	5.6	3.0	0.51
015	11	19 : 30	2.0	☉	NE	3.9	0.0	0.00	0.28	160	0	4	4.9	2.5	0.64
017	12	07 : 30	2.0	☉	NE	5.2	-1.8	-0.67	0.23	-41	-1	5	3.9	1.0	0.19
018	12	13 : 30	1.8	☉	ENE	5.7	-7.5	-2.31	0.26	63	-3	3	2.2	1.5	0.26
019	12	19 : 30	2.0	⊖	ENE	2.9	-2.1	-2.50	0.24	147	2	3	4.4	2.0	0.69
020	13	01 : 30	2.0	☉	NE	3.7	-0.3	-0.22	0.19	132	2	4	5.3	2.5	0.68
021	13	07 : 30	2.0	⊖	ENE	3.1	-2.9	-3.02	0.39	176	0	4	3.3	1.5	0.48
022	13	13 : 30	2.0	☉	SE	2.0	-11.8	-29.5	0.55	58	4	4	0.2	—*	—
S 68-701	8 : 10	21 : 36	2.0	●	NE	10.5	1.8	0.16	0.23	17	18	17	3.6	0.1	0.38
702	10	23 : 44	2.0	●	NE	11.6	0.8	0.06	0.24	—	—	—	—	4.5	0.39
703	11	03 : 15	2.0	●	NE	13.7	0.6	0.03	0.25	0	23	27	2.1	4.0	0.29
S 67 H	8 : 22	07 : 50	0.3	☉	—	12.2	—	—	0.24	—	—	—	—	5.0	0.41
I	22	09 : 50	0.5	☉	—	13.5	—	—	0.28	—	—	—	—	3.0	0.22

* The peak frequency is lower than 2.5×10^{-3} cps.

(1) Air temperature at 1.5 m height minus ground surface temperature.

(2) Stability ratio of surface boundary layer. When this value is negative, the air is unstable.

(3) Intensity of turbulence at 10 m in height.

(4) Wind direction at 900 mb surface minus wind direction at 10 m in height. (Wind direction is defined so that north is 0° and increases in clockwise sense.)

(5) Wind speed at 900 mb minus wind speed at 10 m in height.

(6) Mean wind speed of the planetary boundary layer.

(7) Potential temperature at 900 mb surface—potential temperature at 1.5 m height.

(8) Stability ratio of the planetary in boundary layer (900 mb-10 m), when this value is positive the air is stable.

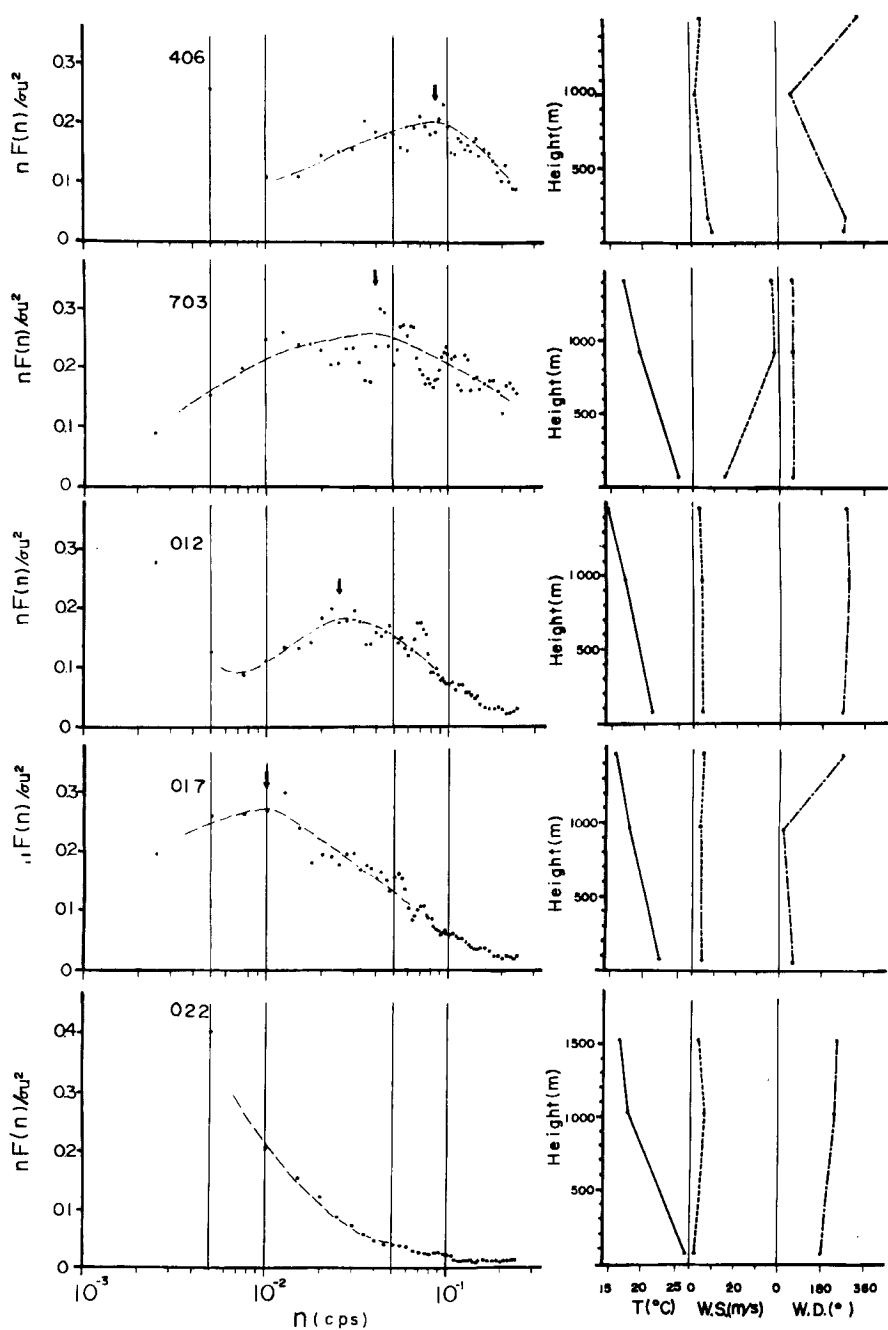


Fig. 2 Horizontal wind speed spectra and vertical profiles of the related parameters.

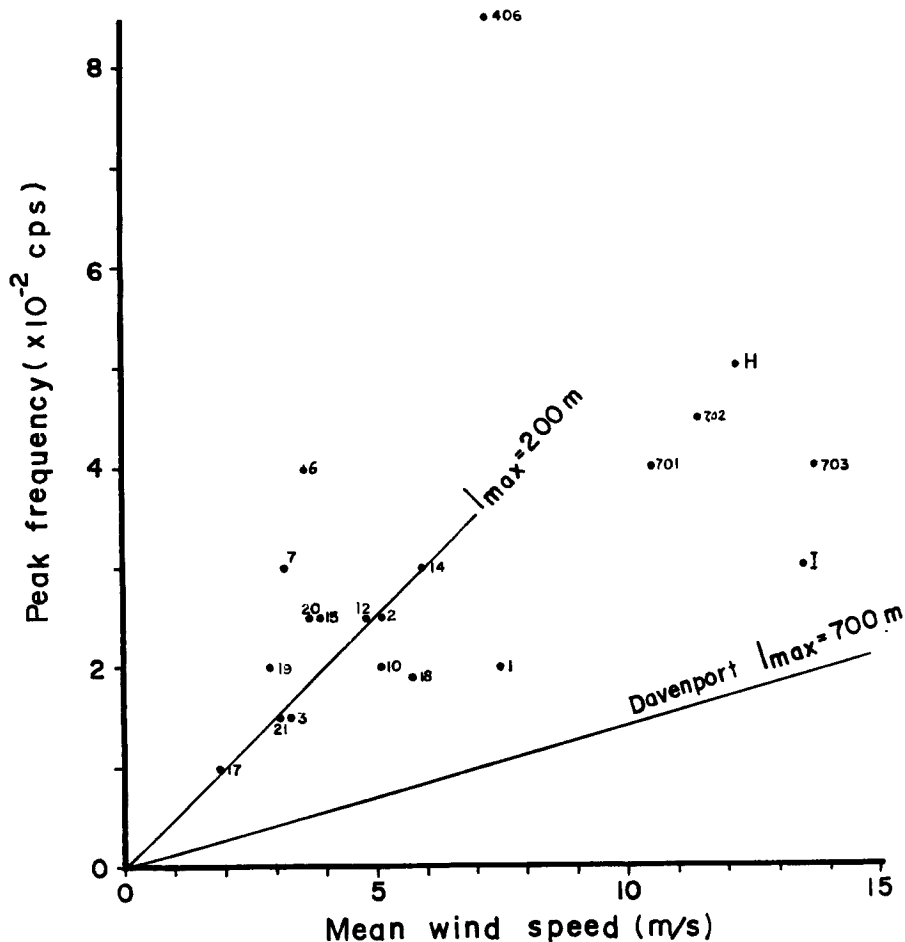


Fig. 3 Peak frequency as a function of mean wind speed at 10 m

である。このことはエネルギーの山に対応する波数が一定であることを意味しており、図中に近似的に引いた直線は波数 $1/200 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ すなわち波長 200 m に相当するものである。風の弱い部分ではかなり良くこの直線に各々の点が集まっているから、この場所では波長 200 m ぐらいのところにエネルギーの山があるとみてよさそうである。一方、風速が大きくなると点は低周波数側にずれるものが多くなる。先きに Davenport⁵⁾ は暴風時のみについて世界各地でいろいろな高さでの風速変動のスペクトルをまとめて、波長 700 m ぐらいのところに山のあるスペクトルを暴風時の代表的なスペクトルとして得ている。彼の結果は今回のものよりは山が低周波数側にあるようである。しかし点が風速の大きな方で下方にずれることからして風速が大きくなればこの山が低周波数側に移動する、すなわち対応する波長が長くなる傾向にあり、この関係をこの図のように直線で示すことができないのかもしれない。しかし、この点についてはさらに暴風時の記録が得られるのを待って調べるより他に方法がない。

また同じ風速においてもスペクトルの山はかなりちらばっており一定の値を示してはいない。その点の分布の様子からみて、これは大気の安定度の差によるものであると考えられる。そこで peak frequency を風

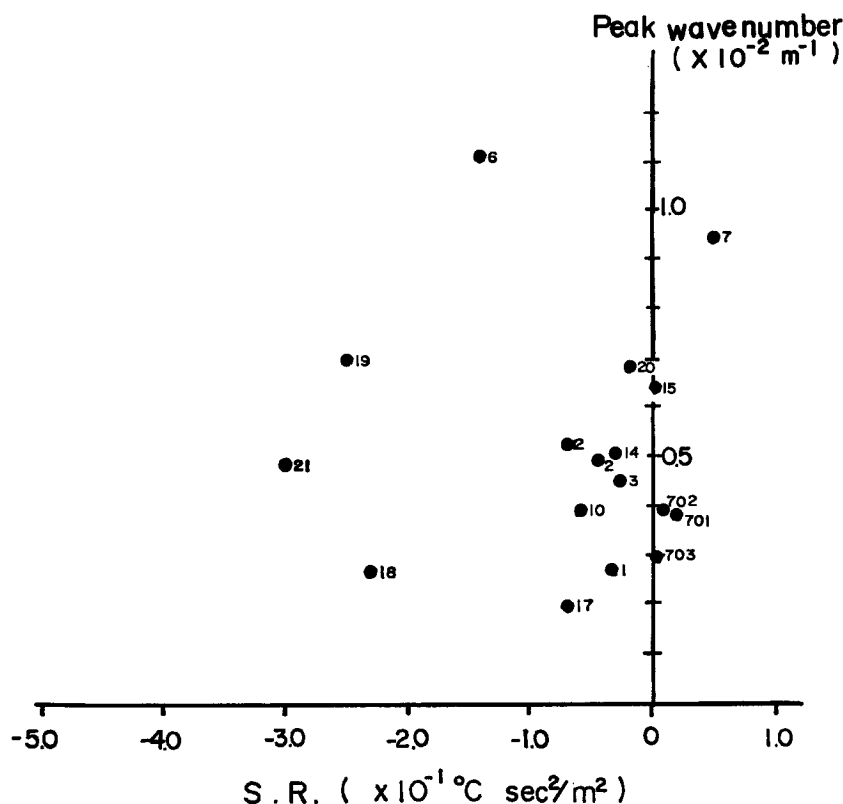


Fig. 4 Peak wave number as a function of stability ratio of surface layer.

速で割って求めた peak wave number の安定度による変化について調べてみた結果が Fig. 4 および Fig. 5 である。Fig. 4 は接地気層の安定度示数との関係を示したものであり Fig. 5 は Planetary Boundary Layer の安定度示数との関係を示したものである。このように2つに分けて示したのは、Table 1 から明らかなとおり両者は時に異なった傾向を示していることがあるからであり、概して接地気層の方が不安定度大きい。2つの図を比較してみるとどちらにも明確な関係を定めることは困難であるが、どちらかといえば Planetary Boundary Layer の安定度との間によりはっきりとした傾向がみられ、安定になると共に波数は大きく不安定側に近づくとも波数は小さくなるようである。先きに山のみられなかった Run S 68-022 は原点に近い場所に位置するはずであり、この傾向と一致する。図中の細線はこの傾向を示すものとして仮に引いてみたものである。

Zubkovski⁹⁾ は高度 4 m での風速の変動成分を研究し、このエネルギーの山と接地気層の安定度との関係ではその波数が中立時に最小で安定および不安定になるとそのいずれにおいても増大するという結果を得ているが、今回の接地気層の安定度による分類は必ずしもこれと一致しない。

このようにこのエネルギーの山の位置については、接地気層よりはより深い Planetary Boundary Layer の安定度がより大きく寄与しているようである。すなわちこのエネルギーの山は Planetary Boundary Layer 全層の物理的性質によって決定されていると考えるのが適当なようである。

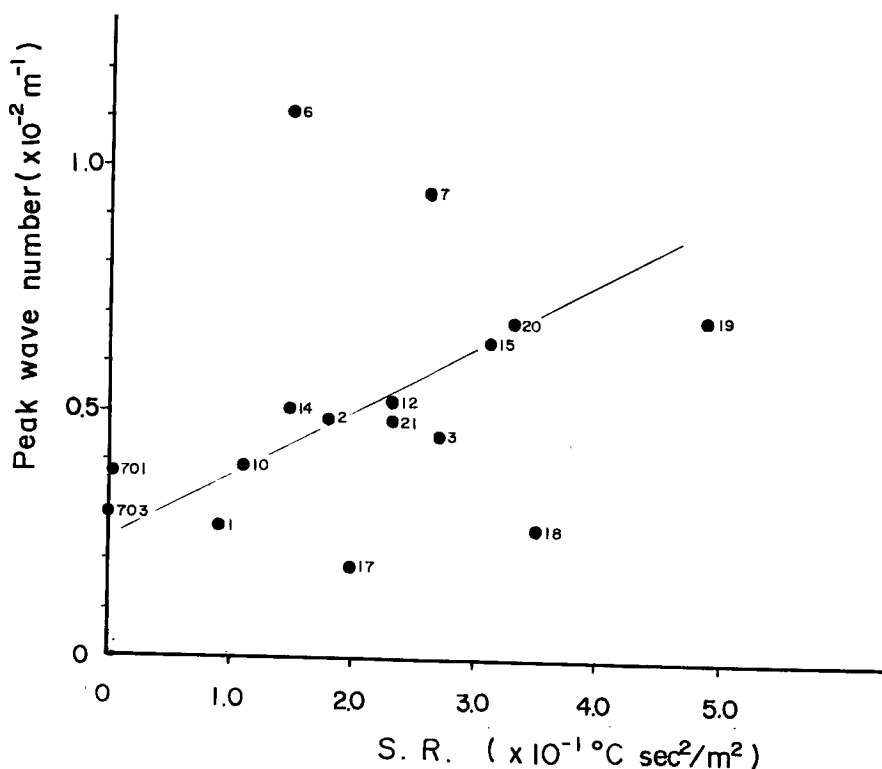


Fig. 5 Peak wave number as a function of stability ratio of planetary boundary layer.

5. 結 語

地表近くの風の変動の広帯域にわたるエネルギースペクトルについての解析を前回に引続いて行った。今回は、特に、地表摩擦に起因しているとみられる周期1分前後の山に着目し、その peak frequency が何によって決定されるかについて調べてみた。その結果 peak に対応する波数は平均的には $1/200 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ であるが、Planetary Boundary Layer の安定度によって変化し、安定になれば大きくなり、不安定側に近づけば小さくなる傾向があることが確認された。地表付近の風の乱れの energy の源は、このように Planetary Boundary Layer 全体の性質によって決定されるものではないかと推測できる。

謝 辞

この研究を行うにあたって記録の読み取りについて尾崎寿秀、河内伸治両氏の、電子計算機による計算については米谷俊彦氏の協力を得た。

参 考 文 献

- 1) 石崎澆雄, 光田 寧, 花房龍男: 風速変動の長周期成分について. 京都大学防災研究所年報, 第11号, A, 1968, pp. 489-497.
- 2) Van der Hoven, I.: Power spectrum of horizontal wind speed in the range from 0.00007 to 900 cycles per hour. J. Meteorol., Vol. 14, No. 2, 1957, pp. 160-164.

- 3) Kolesnikova, V. N. and Monin, A. M.,: Spectra of meteorological field fluctuations. *Izv. Atmospheric and Oceanic Phys. Ser.*, Vol. 1, No. 7, 1965, pp. 653-669. (Eng. Trans.)
- 4) Blackman, R. B. and Tukey, J. W.,: The measurement of power spectra. Dover, 1958.
- 5) Davenport, A. G.,: The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 87, 1961, pp. 194-211.
- 6) Zubkovskiy, S. L.: Frequency spectra pulsations of the horizontal component of wind velocity in the surface air layer. *Bull. (Izv.), Acad. Sci., Geophys. Ser.*, No. 10, 1962, pp. 887-891. (Eng. Trans.)