

強風時における乱れのスペクトルについて

光 田 寧

SPECTRUM OF GUSTINESS IN HIGH WIND

by Yasushi MITSUTA

Synopsis

Spectra of gustiness in high wind are very important knowledge for the design of buildings or other constructions, but we don't have enough observational data for study now. In this paper, results of a study of spectra of gustiness observed on Tokyo Tower in high wind are shown. Observation heights are 20, 66, 106 and 253 m and the records of 5 cases (10 min. in length for each), whose averaged wind speed at 253 m is about 33 m/sec, are used for spectral analysis in Tukey method. Results show with one exception that power spectral density decreases in proportion to the $-3/4$ th power of frequency without any significant peak at every height. But one case (Run No. 2) shows significant power peaks at heigher levels. This situation may have some relations with cold front passage. But at lower levels, the spectrum for each run resembles each other throughout cases.

1. 緒 言

風の構造物に及ぼす影響を明らかにすることは、その設計などに際して極めて重要なことである。しかし自然界における風は非常に複雑な変動をするから、風の作用を考える際には、外力としての風圧力を単純化して構造物に対してかなり長い間一様に作用するものとするか、継続時間の極く短い撃力として働くものとするか、あるいは周期的に変動する力として働くものとするかのいずれかの立場を構造物の性状あるいは状況に応じて取り考察を進めようとしているのが現状である。始めの2つの考えは従来から行なわれていたものであり、最初の場合には最大平均風速を、第2の場合には最大瞬間風速を用いて考察を進めるのが普通である。

最後の考え方は近年航空機の飛行中の震動の問題に関連して詳しい研究が始められるようになったものであつて、変動する風の中での構造物の応答に関する研究と共に自然の乱れの構造に関する研究が始められるようになった。乱れの構造を一般的に示すためには乱れのスペクトルについて考えるのが便利であり、しかも有効な手段である。風の乱れのスペクトルについては乱流理論の立場から既に研究が行なわれており、理論的な立場からもスペクトルの型が導かれている。しかし計測器の問題もあつて災害を生ぜしめるような暴風時の乱れの様子については現在のところあまり調べられていない。

幸い最近、電源開発 K. K. の御好意によつて同社が行なつた東京タワーにおける伊勢湾台風通過時の暴風の観測記録を入手することが出来たので、その記録から風速変動のパワースペクトラムを計算して見た。以下にその結果について報告する。*

* 本文の内容の1部は日本気象学会昭和37年秋季大会で発表したものである。¹⁾

2. 観測方法および観測結果

観測に用いられたのは東京タワーに取り付けられた気象庁型3杯発電式風速計で、西側の支柱の20, 66, 106 及び 253 m の高度に約 3 m の腕を出し、その先端に取り付けられている。記録は一か所に集めて行なわれ、各々の記録器の自記紙送り速度は 1800 mm/hr である。矢島²⁾は気象庁型3杯風速計の変動する風速に対する追従性について研究したが、その結果によれば一定風速の上にその風速の 1/2 の振巾を持つ正弦的な変動成分が重畳しているような状態の中におかれた風速計の示す最大風速は Table 1 のようになる。この結果には記録装置の遅れは風速計自身のそれに比して充分小さいものとして無視されているが、こ

Table 1 Response of the J. M. A. 3-cup Anemometer to changing wind speed (After Yajima (2))

Mean Wind Speed V_0 m/sec	True Max. Wind Speed $V_0 + \frac{1}{2}V_0\sin\pi/2$ m/sec	Observed Max. Wind Speed m/sec		
		Period		
		4sec	10sec	21sec
5	7.5	6.2	7.0	7.4
10	15.0	13.5	14.8	15.0
20	30.0	29.1	30.0	30.0
30	45.0	45.0	45.0	45.0
40	60.0	60.0	60.0	60.0

れは数秒以上の変動周期の場合には明らかに問題とならない。また変動成分がこれより小さい時には当然誤差は小さくなる。この表から見ると風速 20 m/sec 程度以上で 4 秒程度以上の同期の変動を問題とする場合には風速計の遅れは問題としなくて良いと考えて良いであろう。

観測は1959年9月26日の夜半に行なわれたが、この時、台風は中心気圧 970 mb 前後を示しつつ岐阜県から新潟県をへて日本海に抜けつつあった。そしてこの間に東京管区气象台においては 15 m/sec 前後の南寄りの強風が吹いていた。観測の結果は10分間ずつ5回にわたって記録が得られている。各々の観測の行なわれた時刻と各高度での平均風速及び 2 秒毎に評価した風速の標準偏差は Table 2 のとおりである。

Table 2 Results of the observation

Run No.	1		2		3		4		5	
Date	Sept. 26		Sept. 26		Sept. 26		Sept. 27		Sept. 27	
Time	21 ^h 20 ^m ~21 ^h 30 ^m		22 ^h 20 ^m ~22 ^h 30 ^m		23 ^h 00 ^m ~23 ^h 10 ^m		00 ^h 50 ^m ~01 ^h 00 ^m		01 ^h 50 ^m ~02 ^h 00 ^m	
Height m	V_{mean}	S. D.	V_{mean}	S. D.	V_{mean}	S. D.	V_{mean}	S. D.	V_{mean}	S. D.
253	31.9	2.93	33.8	4.30	34.5	2.18	34.3	3.46	32.5	3.34
106	25.2	2.57	25.6	1.96	25.5	2.47	23.5	2.59	21.8	3.20
66	21.7	2.91	23.3	2.65	23.1	2.85	21.7	3.00	20.5	3.30
20	16.0	2.08	16.8	2.50	16.4	2.62	16.9	2.93	16.2	3.14

これらの観測を通じて風向はいずれも風速計が塔の風下側に入るような向きではなかつたと推定される。しかし、斜め風上側にある支柱又は斜材によつて乱れに何らかの影響が与えられなかつたということは断定し難い点多少問題があるが、ここではこれらの記録をそのまま用いることとする。

平均風速の高さによる変化の様子を図示したものが Fig. 1 である。この図では高度 253 m での風速を

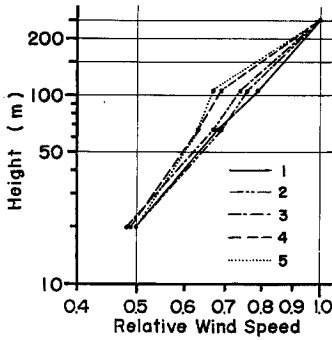


Fig. 1 Variation of mean wind speed with height. Wind speeds are plotted as relative wind speeds to 253m wind speeds (See Table 2)

基準にして相対的な風速の分布を求め、対数目盛によつて記入されている。27日になつてからの観測は多少中間の高度で風速が弱く出ている。これは風向が時間と共にSからSSWに移つて行つた結果、周囲の地形あるいは塔自体の影響の仕方が変わつたためによるものではないかとも思われる。しかし、Moses³⁾の風速の観測値に及ぼす塔の影響に関する実験結果などよりみてこの程度の角度では平均風速に及ぼす後者の影響は少ないと考えられるから風向の変化に伴つて風上側の地上の影響が変わつたものと見ても良いであろう。Run Nos.1~3の観測結果は図上ではほぼ一直線上に並ぶ、これは一般に用いられている次のような実験式でその分布を示すことが出来ることを意味する。

$$U = U_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^p$$

この場合、この3つの場合の平均値から決定した p の値は $0.24 (=1/4.2)$ となる。この値は森林あるいは起伏の多少ある他の場所の上空で観測された 0.25 前後という値と一致している。この観測は市街地の中で行なわれた訳であるが風速分布から見て他の起伏の多少ある場所の上空とほぼ同じ状態にあると見て良いであろう。

記録の読み取りはなるべく短周期の変動まで解析を行なうために、読み取りの技術及び風速計の動特性から許される限界として 2 sec という間隔を選定し、その間隔で各記録から風速を読み取つた。

3. パワースペクトルの計算法

スペクトルの計算については従来からいくつかの方法があるが、ここではこの種の問題を取り扱う場合の標準的な方法となりつつある Tukey (1949)⁴⁾の方法を用いることとした。これはこの方法によると従来の自己相関から求める方法などでは出来なかつたスペクトルの計算結果の上の山や谷の有意性に関する検討が可能であり、結果の考察あるいは観測の計画の作成にあつて非常に有利であるところからこの方法によつたものである。Tukey はその後さらに種々の補正を考慮に入れた一般的な方法を提案している (1958)⁵⁾が、ここでは計算の都合もあつてそこまでは考えないことにした。

Tukey の方法は次のようなものである。 $dt \text{ sec}$ 間隔で評価された N 個の観測値(x_1, x_2, \dots, x_N)からまず次のような $m+1$ 個の serial product (R_p) を計算する。

$$R_p = \frac{x_1 x_{p+1} + x_2 x_{p+2} + \dots + x_{N-p} x_N}{N-p} \dots \dots \dots (1)$$

この R_p から line power (L_h) を次のような cosine 変換によつて求め、

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \frac{1}{2m} (R_0 + R_m) + \frac{1}{m} \sum_1^{m-1} R_p \\ \dots \dots \dots \\ L_h &= \frac{1}{m} R_0 + \frac{2}{m} \sum_{p=1}^{m-1} R_p \cos \frac{ph\pi}{m} + \frac{1}{m} R_m \cosh h\pi \quad 0 < h < m \\ \dots \dots \dots \\ L_m &= \frac{1}{2m} (R_0 + (-1)^m R_m) + \frac{1}{m} \sum_1^{m-1} (-1)^p R_p \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

これを次のように移動平均して (unnormalized) power spectrum を得る。

4. 計算結果およびその検討

先述のとおり10分毎の記録から2秒毎に読み取った風速の値 ($N=300$) から上述のプログラムを用いてパワースペクトラムを計算した。解析出来る最大の周波数は $1/4$ cps であり、 m の値としては 20 を用い

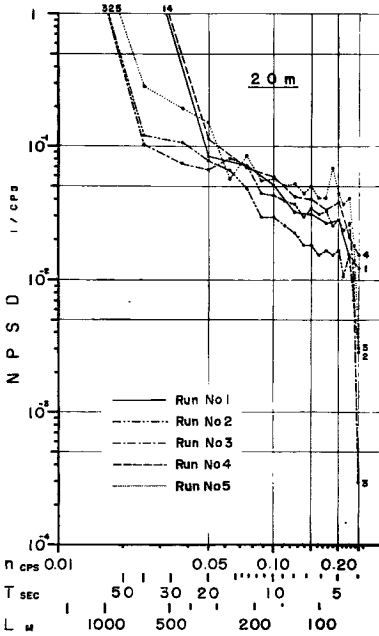


Fig. 2 Normalized power spectra at 20m

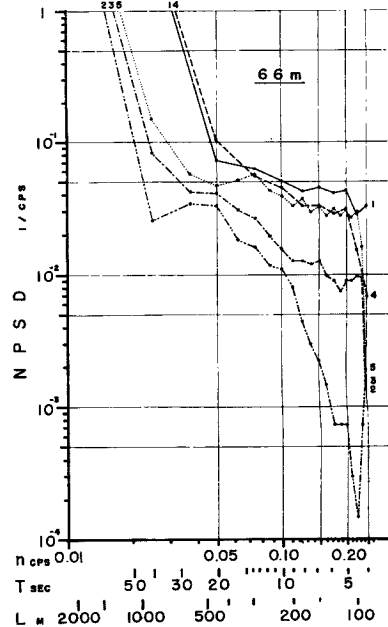


Fig. 3 Normalized power spectra at 66m

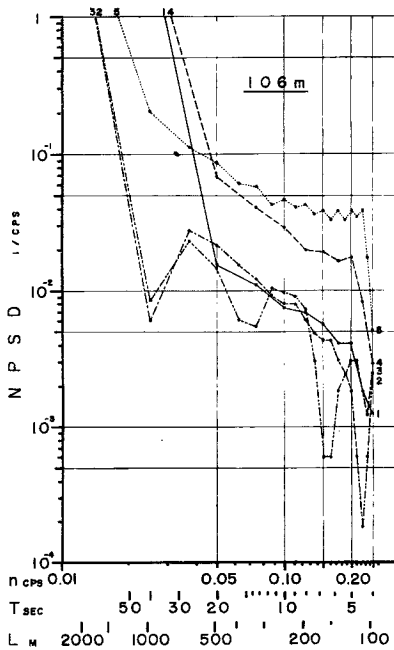


Fig. 4 Normalized power spectra at 106m

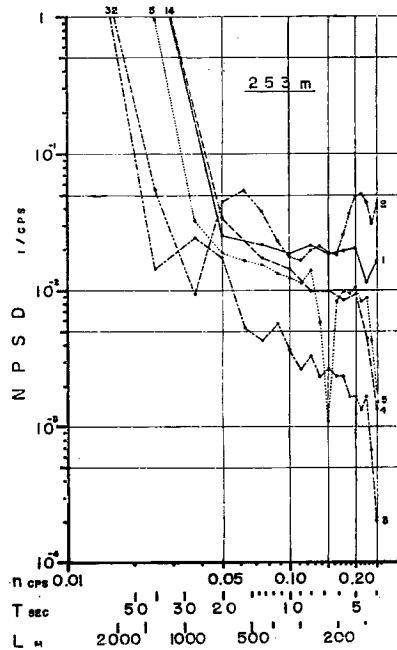


Fig. 5 Normalized power spectra at 253m

ることとした。すなわち 1/80 cps 毎の power density の値が得られることになる。但し Run No. 1 および 4 については計算時間の都合で $m=10$ とした。得られた結果は Figs. 2~5 に示すとおりである。

これらの図は各高度毎に 5 つの計算結果をまとめたものであり、横軸は周波数を対数によつて目盛つてあるが、下段に参考のために 5 つの場合を通じての平均風速に基づいて計算した波長が記入してある。また縦軸は normalized power spectral density を対数で目盛つたものである。なおこの dimension は $1/f$ すなわち 1/cps で、その値は次のようにして計算したものである。ここで \bar{V} は平均風速である。

$$NPSD = U_h \times \frac{1}{\Delta f} \times \frac{1}{\bar{V}^2}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{但し } \Delta f &= \frac{h+1}{m} \frac{1}{2\Delta t} - \frac{h-1}{m} \frac{1}{2\Delta t} = \frac{1}{m\Delta t} & 0 < h < m \\ &= \frac{1}{2m\Delta t} & h = 0, m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

これらの power density に対する自由度は 29 ($M=20$) 又は 59 ($M=10$) であつて、Table 3 の結果よりその値の比がほぼ 2 倍あれば 2 つの power density の計算値には有意な差があるものと考えて良いことになる。

これらの図を見てまず第 1 に気付くことは周波数 0 の側の端のところに異常に高い山が生じていることであるが、これは Tukey 自身後に指摘しているとおり^{*)} この計算においては平均値に対する補正が行なわれていないことによる誤差である。従つて周波数の小さいところまで分解するためにはそのための補正*を行なわねばならないが、ここでは低周波の端についてはあまり問題にしないことにする。また場合によつて高周波の側の端において非常に小さい値が表われていることがあるが、これも計算上の何らかの誤差のため生じたものであると思われる。しかし先きに述べたとおりこのような 1 つの値のみからなる谷は自由度が 1 であり、周囲に比してその値が 1/100 以下でなければ有意とはいえないから無意味なものとして無視しても良いであろう。

上述のような両端の特異な点を除いてみても同じ高度の観測から得られた計算結果にかなりのばらつきが見られる。しかし大勢としては周波数の増加と共に power density はほぼ同じような傾向で減少していることには間違いない。Fig. 2 に示された高さ 20 m でのスペクトルは個々の場合の差が各高度を通じて一番少なく、いずれもほぼ同じ値を取り、どこにも有意と判定しうる起伏はない。66 m でのスペクトルは Fig. 3 に示されているが、図からも明らかなように Run No. 2 だけが他と非常に異なつた形を示しているが、残りの 4 例には有意な起伏はなく、20 m 高度の場合と大差のない傾向を示している。No. 2 のスペクトルは他の例よりも power density の変化の割合が大きく高周波側の端（周期 4 秒）のところまで有意とみてもよさそうな山を形成している。Fig. 4 に示された 106 m でのスペクトルは power density の大きなものと小さなものとの 2 種類のグループに分けうるような傾向を示し、Run No. 4 及び 5 は 1 つ下の 66 m でのスペクトルとほぼ同じ傾向を示しているが、Nos. 1~3 はこれらに比していずれも power density が小さく、しかも周波数と共に急速に減少している。このように No. 4 及び 5 が他と異なつているのは Fig. 1 の平均風速の分布の上でも見られることであり、26 日夜半を境として何らかの状況の差があるのではないかと思われるが、塔自体の影響か、風の性質の方が風向の変化によつて変つたのかははつきりしない。また Run No. 2 はこの高度でも他とは異なつた変化を示し、他では有意な起伏は見られないのにこの時にだけ有意な起伏が見られ、周期 4.0、5.2 及び 10.0 秒のところには山が現われている。253 m で

* 補正法については、Tukey の提案によれば個々の観測値の全観測値の算術平均からの差を用いるか、さらに正確には R_p のかわりに

$$R_p = \frac{x_1 x_{p+1} + \dots + x_{N-p} x_N}{N-p} - \frac{x_1 + \dots + x_{N-p}}{N-p} \cdot \frac{x_{p+1} + \dots + x_N}{N-p}$$

を用いる。

のスペクトルは Fig. 5 に示されているが、この高度では各々の場合のばらつきが大きい。しかし No. 4 および 5 が特に他と異なつた値を示しているということはない。No. 5 のスペクトルには周期 6.7 秒のところ谷が出ているが、これは 1 つの値のみの谷であるので有意とはいえない。しかし一方 No. 2 のスペクトルには明らかに 4.7 sec と 16 sec のところに有意とみられる山があり、しかも平均的に必ずしも density が周波数と共に減少しているとは見られない点で他とは異なつている。

全体として見ると低い高度では観測時を通じて同じような値を示し、しかも変化の傾向も似ているが、高いところではばらつきが大きくなり変化の傾向にもかなりの開きがある。しかし Run No. 2 を除いて他の場合には有意であるとみられる山や谷はない。すなわち energy の集中した周波数帯は認められない。No. 2 を除いた 4 例を平均した各高度でのスペクトルを Fig. 6 に示す。各々多少の起伏はあるが、平滑化してみると周期 20 ないし 4 秒 (周波数 1/20 ~ 1/4 cps) ぐらいの間では変化の様子はほぼ直線で近似できる。これは density ($\varphi(n)$) と周波数 (n) との関係が次のような実験式で示される変化をすることを意味する。

$$\varphi(n) \propto n^{-h} \dots\dots\dots (5)$$

このことは今までに他で行なわれた観測の結果、あるいは乱流理論から導き出される結果と一致する。Fig. 6 から求めた指数 h の値は各高度共その値はほぼ同じで約 3/4 という値になる。この値は乱流理論から予測される 5/3 よりはずつと小さいが、他の観測例においてもこの値は 0 から 2 までの間に広く分布しているのが実状のようである。

スペクトルの形が同じ場合には各々の power density の値は任意の風速評価時間の風速に対する intensity of turbulence ($I_s = \sigma_s / U_{mean}$) の自乗に比例することになる。2 秒間毎に読み取つた風速の intensity of turbulence の高度分布はこの 4 例の平均値について Fig. 7 のようになる。

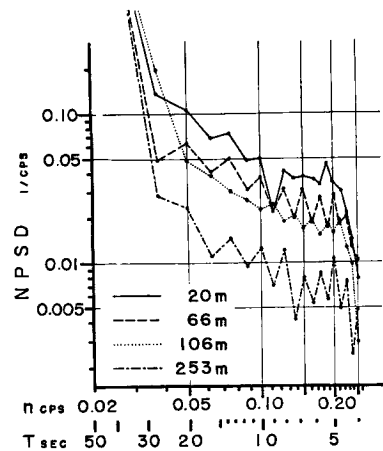


Fig. 6 Averaged normalized power spectra

Panofsky あるいは Davenport⁹⁾ はさらに一般的なスペクトルの形に関する実験式を提案しているが、この例では周波数範囲も狭く個々の場合の偏差も大きいのでそれらの式に対する適合性について論じることは困難である。

今回の観測の結果を通じて Run No. 2 は各高度で特異な分布を示していることは既に述べたとおりで、この場合には 100 m 以上の所では明らかに energy の集中があるとみられる周波数帯の存在が見られる。このことはこの時刻だけ、塔そのものの影響で特異な変動が発生したと考えるか、上空に何か特異な変動があつたと考えるかのいずれかであつて、偶然計算上の誤差でこのような形が現われたとは考え難い。風向は次第に SSE より SSW に変わりつつある途中であり、前後の時刻と比して塔に対する風向が特別な状態にあつたと考え難い。従つてこの原因はむしろ後者の気象条件の方にあると考える方が適當であると思われる。東京管区气象台での観測では明らかな現象は見られないのであるが、天気図上からはこの時刻前後に弱い寒冷前線がこの付近を通過しているように判断されるし、東京で 23 時頃雷光を観測していることからこの異常は前線通過と何らかの関係を持つているように見え、興味ある問題ではあるが今のところはずきりしない。

このように上空においてはその様子がかなり異なつているのに地表近くでは全観測を通じて同じような乱れの様相を示している。このことは地表近くでは wind shear あるいは地表面の状態が乱れを支配する主要な要因となつていることは明らかであるが、今の場合 100 m を越すような高い所では地表付近とは異なる

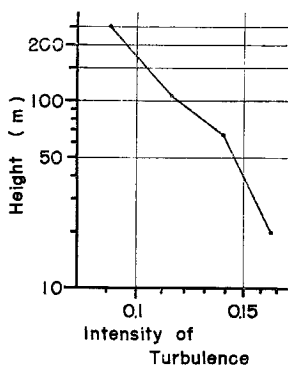


Fig. 7 Variation of intensity of turbulence for 2 sec wind speed with height

の高度で明らかに有意と見られる power density の山の存在が認められ、乱れの様子が著しく他と異なっていた。これは高いところでは地表近くとは異なつた立場から乱れの問題を考えなくてはならないことを暗示している。なおこの場合の平均風速はほぼ高さの 1/4 乗に比例して変化しているが、都市上空の風速分布を代表するものであろう。

おわりに、終始この研究を御指導下さり、また記録の入手にも御尽力頂いた石崎潑雄教授および貴重な観測記録を利用させて頂いた電源開発株式会社に深く謝意を表するとともに、電子計算機の programing に御協力頂いた教養部平野勇および電子計算機による計算の際手伝つて頂いた草壁秀子の両氏に感謝する次第である。

付 録

Tukey の方法による観測計画法

第 3 節に示した power density の有意性に関する検定法は、逆に有意な結果を得るための観測計画のために応用することが出来る。有用だと思われる結果を列挙すると次のようになる。

- 1) 測定値の評価時間間隔 (Δt) は、分解出来る最小周期の半分である、
- 2) ずらし数 (m) は分解能を決定するが、2つの周期 (t' と t'') を分解するために必要な m は少なくとも次の値が必要である、

$$\frac{2}{m} = \frac{\Delta t}{t'} - \frac{\Delta t}{t''}$$

従つて、

$$m = \frac{2t't''}{\Delta t(t'' - t')}$$

ただし山が鋭い時には m はこの 2 倍をとる方が良い。

- 3) 自由度 (F) は得られた結果の信頼性を示すものであるが (たとえば山と谷の比が 3 倍ある時、その山が 5% の危険度を持つて有意であると言うためには $F=10$ でなくてはならない (Table 3 参照))、目的の自由度 (F) を得るためには測定値の総数 N は次の値だけとらなくてはならない。

$$N = \frac{m}{2} \left(F + \frac{3}{2} \right)$$

従つて $N\Delta t$ だけの時間観測をしなければならないことになる。

参 考 文 献

- 1) 光田寧：強風時における乱れのスペクトラムについて、日本気象学会昭和37年秋季大会講演予稿

集, 昭37, pp.37—38.

- 2) 矢島幸雄: 変動する風速時における風速計の応答, 研究時報, 12巻12号, 昭35, pp. 882—886.
- 3) Moses, H. and Daubek, H.G. : Errors in Wind Measurements Associated with Tower-Mounted Anemometers, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 42, No. 3, 1961, pp. 190—194.
- 4) Tukey, J.W. : The Sampling Theory of Power Spectrum Estimates, Symposium on Application of Autocorrelation Analysis to Physical Problems, (unpublished), 1949.
- 5) Blackman, R.B. and J. W. Tukey : The Measurement of Power Spectra, Dover, 1959.
- 6) Tukey, J. W. : Added Comments to [4], (unpublished), 1956.
- 7) Cramer, H.E. : Use of Power Spectra and Scales of Turbulence in Estimating Wind Loads, Meteor. Monograph, Vol. 4, No. 22, 1960, pp. 12—18.
- 8) Davenport, A.G. : [The Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in High Winds, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 87, 1961, pp. 194—211.