

建築物に加わる風圧変動のスペクトルについて

石 崎 潑 雄・許 昌 九

SPECTRA OF WIND PRESSURE FLUCTUATIONS ON STRUCTURES

By *Hatsuo* ISHIZAKI and *Changgoo* HUH

Synopsis

The wind pressure fluctuations on structures are very complicated because wind is disturbed by structures and wind itself changes its direction and velocity, so it is not easy to know their nature clearly. In order to get information about the wind load on structures, wind pressure fluctuations on the walls and roofs of an actual house were measured, then the power spectrum of wind pressure fluctuations was computed from the test data. The measurements were carried out against the seasonal wind at Shionomizaki Wind Effect Laboratory of Kyoto Univ. on Jan. 23rd and Mar. 17th 1963. The Reference wind velocity was 5 m/sec to 18 m/sec at a point 10 m above ground level. There is an open field on the windward side of the house. The results show that the power spectra on the windward walls were similar to that of a reference wind having no peak value at any period of pressure fluctuations. On the other hand it will be noted that the peak values were observed in the case of pressure fluctuations on roofs or eaves at the period of 0.2 sec to 0.3 sec, which show that on roofs or eaves vortices break out periodically and that on pressure fluctuations they are affected more by the shape of house than by the turbulence of a natural wind. The period of 0.2 sec to 0.3 sec at which the power spectra take peak values, is expected to be shorter when the reference wind speed becomes faster.

1. ま え が き

構造物に作用する自然風による風圧力は、風速、風向等との変動により時間的に変動しており、また、その作用位置によっても異なるというように複雑な挙動を示しているため、その一般的な性質を明らかにすることは非常に困難である。そこで筆者らは構造物に作用する風圧力を測定し、その圧力変動のスペクトルを求めて、統計的な手法によるものではあるが、スペクトルのエネルギー分布から、風圧力の性質を探ろうと試みた。併せて構造物に作用する圧力変動は構造物全体の固有振動周期や、その部材の固有振動周期との関連においても重要な意義をもつから、この圧力変動のパワースペクトルは構造物に与える風荷重の取扱いに関して、有益な示唆を与えるものと考えられる。

なお、構造物に作用する風圧力は実物家屋の屋根面と壁面とにおいて得られた測定結果を用いた。

2. 風圧力の測定方法

風圧力の測定は、Fig. 1 (a), Fig. 1 (b)に示した、大きさの異なるA型家屋、B型家屋の2つについて行な

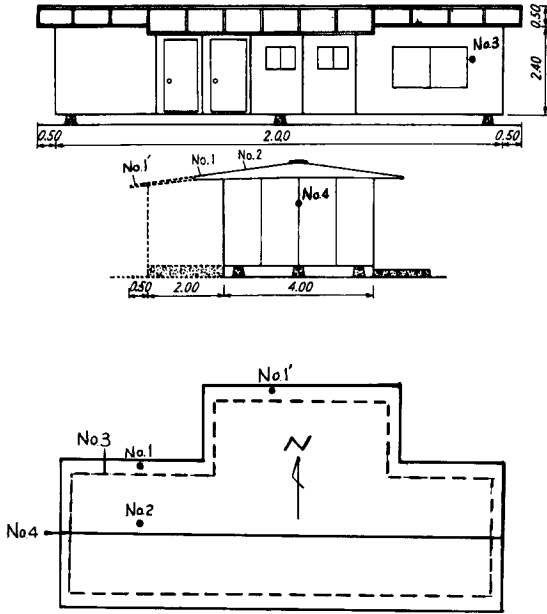


Fig. 1(a) The A-type house dimension and its position of the measurement points.

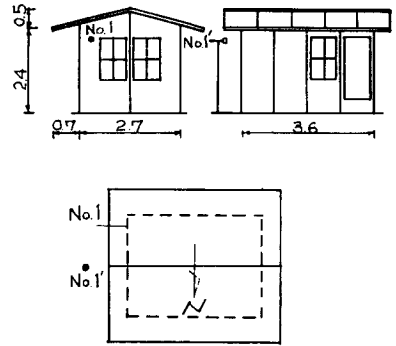


Fig. 1(b) The B-type house dimension and its position of the measurement point.

Table 1 Wind pressure measurements.

Case	Wind direction	Wind velocity	Measured points
1	N	10m/s~18m/s	Windward eaves and wall of A-type house.
2	NNW	10m/s~15m/s	Windward eaves and roof of A-type house.
3	N	10m/s~13m/s	Windward wall and the wall parallel to the wind of A-type house.
4	NW	5m/s~12m/s	Two points on north-side eaves of A-type house.
5	EEN	5m/s~ 8m/s	Windward wall of B-type house and a point 1.8 m above the ground near the wall.

った。ただし、B型家屋については、壁面の圧力のみを測定し、屋根面については測定しなかった。測定点および風向等については Fig. 1 を参照されたい。家屋表面の測定点には Photo. 2 に示したような 30 cm × 30 cm の風圧板を取付け、家屋表面のおうとつによる影響を出来るだけ除くことにした。この風圧板の表面に作用する風圧力をビニール管により、差動トランス型変位計を用いたビトー管型風圧計¹⁾に導き、2成分の風圧計によって、2測定点の圧力変動を電磁オツシログラフにより同時連続記録した。この風圧計の感部の固有振動数は 28 cps であり、その動特性から考えて変動振動数 10 cps 程度の範囲の動風圧なら追隨しうるものとする。Photo. 3, 4 に得られた風圧記録の一部を示す。

実験家屋は A, B 両型とも、軽量鉄骨々組に合成樹脂系のパネル壁体をもつ、プレハブの住宅である。Photo. 1 にその外観を示す。測定を行なったのは 1963年1月23日と、3月17日で季節風によるものである。測定場所は和歌山県串本町潮岬地内で、測定家屋の風上側は相当に広く開けている。測定時の風速は地上高 10 m の点におけるコーンセンペーンの瞬間風速 5 m/sec から 18 m/sec の範囲であった。2測定点同時測定の場合はつぎに示したとおりである。

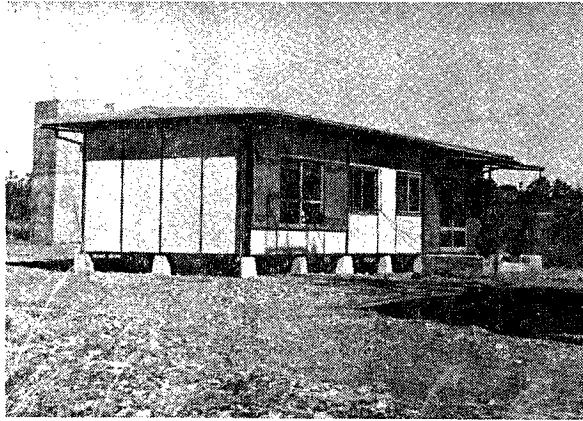


Photo. 1 View of A-type measured house.

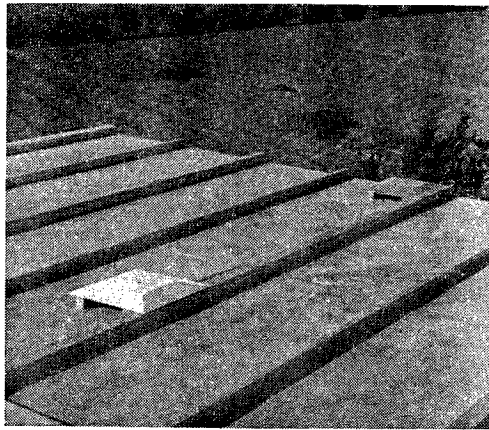


Photo. 2 View of the inlet plates of wind pressure on the roof.

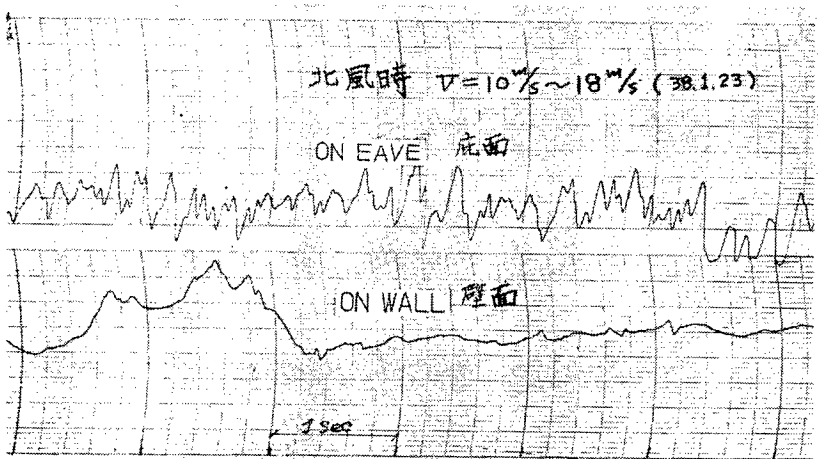


Photo. 3 The record of measurement of wind pressure fluctuations.

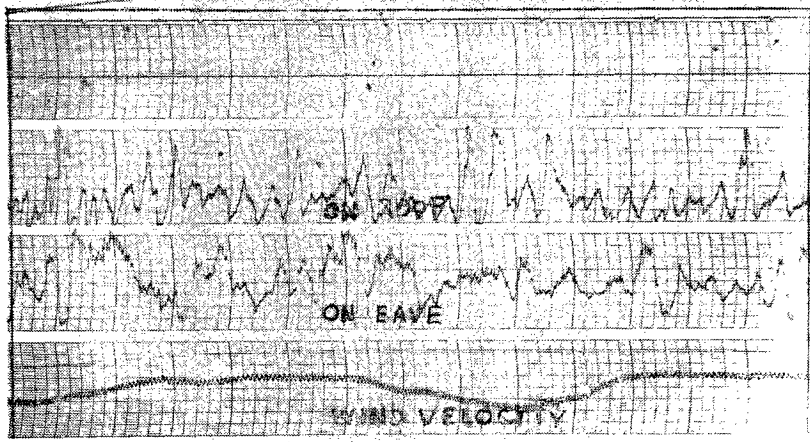


Photo. 4 The record of measurement of wind pressure fluctuations.

3. 変動風圧のパワースペクトルの計算結果

スペクトルの計算方法としては Tukey²⁾ の方法を採用した。スペクトルの計算にはこの他にも、いくつかの方法があるが、Tukey の方法を用いたのは、それらの方法より、スペクトル曲線の山や谷の有意性の検討に便利なためである。以下にその Tukey の方法について簡単に説明する。ある得られた測定記録を Δt 時間々隔に読取り、 n 個の測定値、 (x_1, x_2, \dots, x_n) を得、次式を用いて $m+1$ 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 変換によって求める。

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

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

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= 0.54 L_0 + 0.46 L_1 \\ U_h &= 0.54 L_h + 0.23(L_{h-1} + L_{h+1}) \\ U_m &= 0.54 L_m + 0.45 L_{m-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

ここで U_h は $\frac{(h-1)}{m} \frac{1}{2\Delta t}$ と $\frac{(h+1)}{m} \frac{1}{2\Delta t}$ の間の周波数範囲に含まれる power の合計の推定値を示すものである。ただし両端ではこの範囲は半分になり U_0 は 0 から $\frac{1}{m} \frac{1}{2\Delta t}$ まで、また U_m は $\frac{m-1}{m} \frac{1}{2\Delta t}$ から $\frac{1}{2\Delta t}$ までである。これらから明らかなように Δt によって分解出来る最高の周波数 $\frac{1}{2\Delta t}$ cps が決定され、 m によって分解能 (0 から $\frac{1}{2\Delta t}$ の間を m 等分したもの) が決定される。Tukey はこのように計算された power density は $0 < h < m$ の点では $2 \frac{n}{m} - 1.5$, $h=0$, $h=m$ の点では $\frac{n}{m} - 0.75$ の自由度をもつことになるから、この自由度の値を用いて、スペクトル曲線の山や谷の有意性の有無を検定している。すなわち 5% の危険度をもって、2つの power density の比が有意であるためには、その比が Table 2 に示

す比よりも、大きいか、または小さくなければならない。**Table 2** をみると明らかなように自由度の値によって、スペクトル曲線の山と谷が有意であるための山と谷の power density の値の比の大きさが異なることがわかる。従って精度の高いスペクトルを得るためには、自由度を高くすることが必要である。

つぎにスペクトル曲線の山が、ただ 1 つの周波数帯に出ているときはこの自由度は 1 に相当するものであり、**Table 2** からわかるようにこのような場合、そのスペクトルは、ほとんど意味をもたないことになるから、山や谷の存在が示されるようにするためには、少くとも、その周波数帯に 4 つ位の power density の推定値が入るようにすべきであろう。なお、これらの計算を行なうには非常に手数がかかり、電子計算機の助けを必要とする。

本論文に示すスペクトルは京都大学の KDC-1 電子計算機を用いて行ったものである。その結果を **Fig. 2** から

Fig. 11 に示した。このとき横軸に振動数を、縦軸に normalized power spectra density を、それぞれ対数で目盛って示した。本計算に用いた風圧変動値は、それぞれ、数分、連続した記録中の 30 秒間から読取ったものである。読取り時間々隔は風圧計の動特性を考慮して Δt は 0.05 sec とした。従って $n=600$ となり、 m は 25 としたから、解析出来る最大振動数は 10 cps、自由度は約 50 で、**Table 2** から、本例では 2 つの power density の値の比が、1.6 倍以上であれば、その計算値には有意の差があるものと考えてよい。つぎにこれらのスペクトル図において振動数が 0 の側、すなわち周期 ∞ のところに非常に高い山があるが、実際にはこのようなことはないものであり、それは乱れを 3 次元的に扱わないことによる計算の誤差である。従ってこのような振動数の小さいところまで分解するには補正を行なわねばならない。本計算ではその範囲については論議しない。

Table 2 Accurate to within 5% (After Blackman and Tukey²³)

Degree of freedom	Limit for ratio	
	Upper	Lower
1	161	0.0062
2	19	0.0526
4	6.39	0.156
6	4.28	0.234
8	3.44	0.291
10	2.98	0.336
15	2.40	0.417
20	2.12	0.472
30	1.84	0.543
50	1.60	0.625
100	1.39	0.719

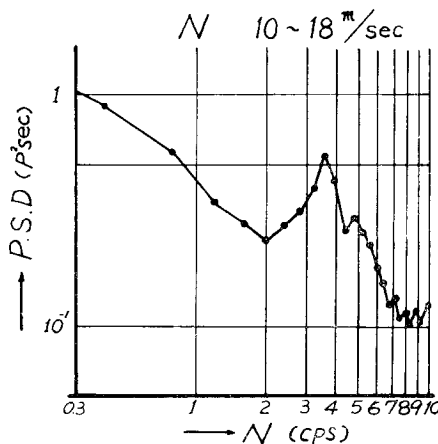


Fig. 2 Power spectrum on the windward eaves of A-type house.

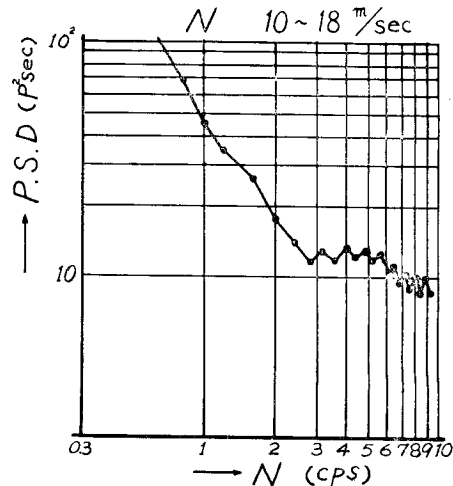


Fig. 3 Power spectrum on the windward wall of A-type house.

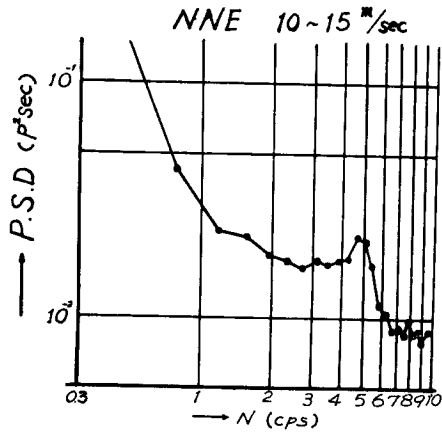


Fig. 4 Power spectrum on the windward eaves of A-type house.

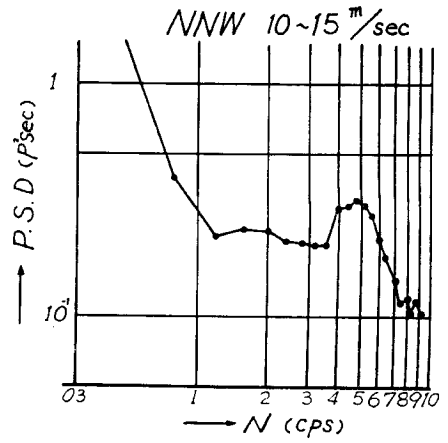


Fig. 5 Power spectrum on the windward roof of A-type house.

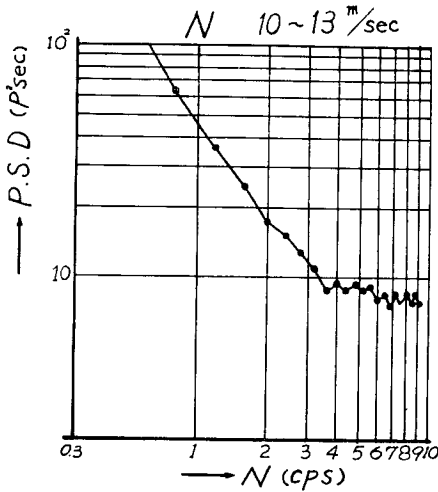


Fig. 6 Power spectrum on the windward wall of A-type house.

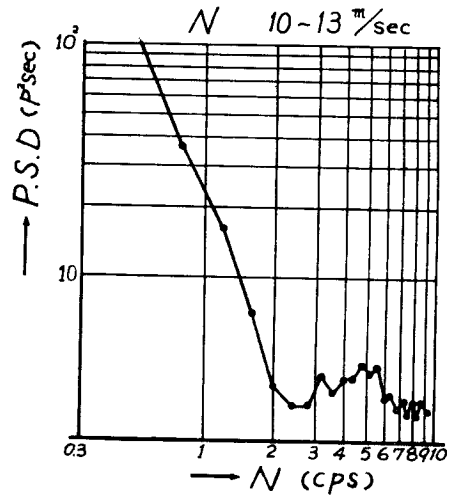


Fig. 7 Power spectrum on the wall parallel to the wind direction of A-type house.

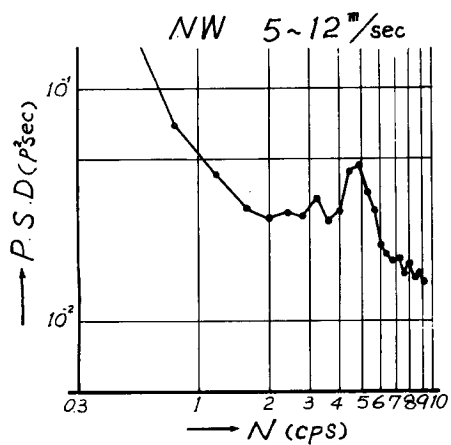


Fig. 8 Power spectrum on the northside eaves of A-type house. (measurement point No.1)

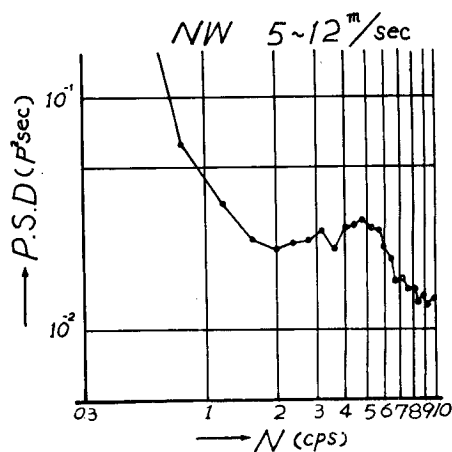


Fig. 9 Power spectrum on the northside eaves of A-type house. (measurement point No.1')

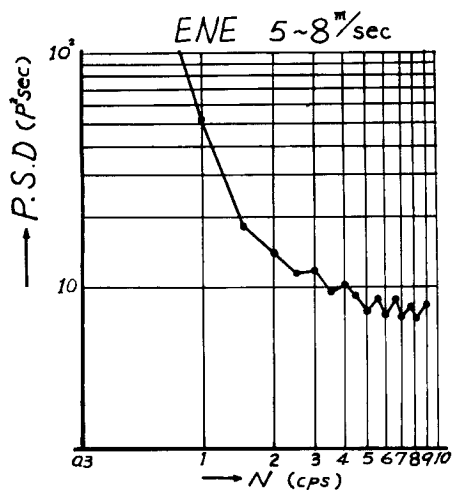


Fig. 10 Power spectrum on the windward wall of B-type house.

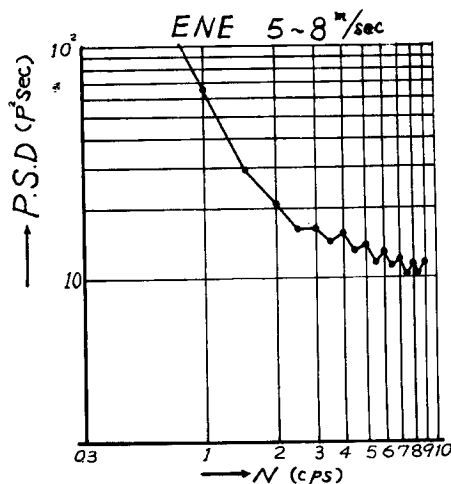


Fig. 11 Power spectrum on the free wind pressure measurement near the place of B-type house.

4. 計算結果についての考察

1) 風上側壁面のスペクトル

Fig. 3, Fig. 6, Fig. 11 に示す向風側面のスペクトルでは energy の集中している周波数帯は見当らず従って、有意な起伏の山や谷がない。このことは壁に作用した風圧の変動に卓越した周期のものがいないことを意味している。また、このとき、Fig. 3, Fig. 6 はA型家屋で、Fig. 11 はB型家屋についてのものであるが、それぞれの向風壁面の見付面積の比は5にもおよんでいるがそれぞれのスペクトルに特別な変化はない。

2) 風向に直角な壁面のスペクトル

A型家屋に北風が吹いているときの西側壁面に作用した吸引力のスペクトルを Fig. 7 に示したが、これには明らかに有意な山が、0.15 sec~0.3 sec の周期帯に見受けられて、従って周期 0.2 sec 附近に卓越した周期が存在することがわかる。このとき同時に測定した向風壁面の風圧力のスペクトルが Fig. 6 に示されているが、これには特に卓越した周期が見あたらないことから、この西側壁面の卓越周期は、家屋の隅角部から生じた渦によるものではないかと考えられる。すなわち、これは風自身のもつ乱れによるものではなく、構造物固有の形状から生じた乱れの影響を示しているものであろう。

3) 屋根面と軒先のスペクトル

Fig. 1 に軒先に作用した吸引力のスペクトルを示したが、これには 0.3 sec 周期のところの際だった energy 集中の山が見られる。このとき同時測定した向風壁面の風圧スペクトルには何の特徴もみられないにもかかわらず、建物の軒先部には周期的な強い乱れのあることを示している。これも明らかに構造物の形状によって生じた渦によるものと推定出来る。Fig. 4, Fig. 5 に軒先と屋根面とに作用する吸引力のスペクトルを示したがどちらにも 0.2 sec 周期のところピークがみられる。これも上述のように渦によるものと考えられる。またこのとき、軒先と屋根面に作用する吸引力の空間的な相関々係を求めて、Fig. 12 に示したが、その2点間には 0.3 sec の時間差をもつ相関のあることがわかる。これは軒先測定点に生じた乱れが屋根測定点に達する時間を示すものと考えてよい。この値は前に筆者³⁾らが風洞実験によって求めた一様な流れ中の乱れの移動速度の値とよく一致している。

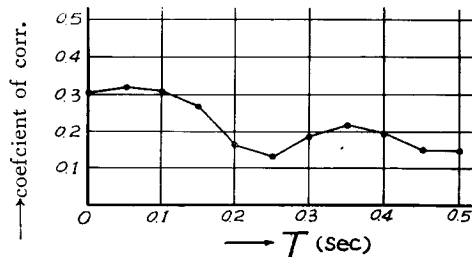


Fig. 12 Correlation of power spectra on windward eaves and roof of A-type house.

4) 向風壁面とその近くにある風向変動に追従する風圧計によるスペクトル

固定された壁面に作用する風圧変動のスペクトルとその近くに設置された風向変動に自由に追従出来る風圧計による風圧変動のスペクトルを Fig. 7, Fig. 8 に示したが、この両者のスペクトルの傾向は非常によく似ており、両者に余り差がないが、壁面のスペクトルが、高い振動数のところで、やや低い power density を示しているようである。

5. む す び

以上の結果から i) 風向に直角な壁面に、5 m/sec~18 m/sec 程度の風速範囲の風の作用では特に卓越

した周期をもつ風圧変動の作用は全体として認められず、0.1 sec~0.3 sec 周期の範囲では power density がほぼ一定か、周期の減少と共にやや減少の傾向を示している程度である。ii) 本実験家屋は屋根勾配が緩いため、屋根、軒先に著しい渦による負圧が生じており、本実験では 0.2 sec~0.35 sec の周期的な圧力が卓越して作用していることがわかる。風速が本実験の値より高くなると周期はもっと短くなり、0.1 sec 位の値をもつことも予想される。従って、これら屋根や軒先等には動的な考慮が重要であることを明らかにしている。なお、このとき軒先表面の吸引力は風圧係数にして、1.5~2.2 にもおよんでいることから、自然風自身のもつ乱れ以外に構造物の形状からくる乱れの影響の大きいことが示されている。

以上から構造物に作用する自然風による風圧力の動的作用は風上側垂直壁面を除いて、構造物の形状に支配される。当然のことながら、作用部分の位置により、その挙動を異にすることが、以上に求めた風圧変動のスペクトルから、うかがい知ることが出来る。従ってこれらから、構造物のそれらの位置に該当する構成部材の固有周期は変動風圧の卓越周期から離し、共振せしめないような考慮が必要である。

本論文では、残念ながら、低い風速時の結果しか示し得なかったが、今後、強風時の結果を求め比較してみたい。

参 考 文 献

- 1) Hatsuo ISHIZAKI and Yasushi MITSUTA; Observational Study of Turbulent Structure of High Winds, Bull. Disaster Prevention Research Institute, September 1966.
- 2) R.B. Blackman and J.W. Tukey; The Measurement of Power Spectra, Dover, 1959.
- 3) 石崎潑雄・許 昌九：負圧を受ける屋根面の風圧変動，日本建築学会論文報告集，第76号，昭和37年9月。