

風による煙突の振動に関する風洞実験

石 崎 潑 雄・川 村 純 夫

WIND TUNNEL TESTS ON THE VIBRATIONS OF STACKS INDUCED BY WIND

by Dr. Eng. Hatsuo ISHIZAKI and Sumio KAWAMURA

Synopsis

Steel stacks are always vibrating under moderate wind, but the reason why these vibrations are induced by the wind has not yet been clarified. To study this problem, the vibrations of moving cylinders and the wind pressure variations against them in a wind tunnel are considered by the model experiments.

1. ま え が き

実際の煙突は自然風をうけて絶えず振動している¹⁾。しかしながら煙突のような運動する円柱が空気の流れの場におかれた場合、どうして振動を生ずるかについては不明の点が多い。よつて煙突に加わる外力の変動と筒体の振動との関係を主として明らかにするために、運動し得るようにした部分模型について風洞実験を行なつた。

また比較のため静止した模型に対する外力の変動の測定も行なつた。本論文は、以上の実験結果とそれに基づいて、一様な風をうけて振動している円柱に加わる外力の変動と振動との関係につき考察を加えたものである。

2. 供試模型および取付けバネ

使用した風洞の吹出し口が内径 1 m の正八角形断面であるのと最大風速が 60 m/s までのために、使用する円筒の最大径は 30 cm 位まで可能と思われる。またバネで支持した場合の固有振動数と静止模型の場合に発生するといわれている Kármán 渦の発生振動数とが一致するいわゆる共振風速を考慮して供試体の寸法を Table 1 に示したような 2 種類とした。

Table 1 Dimensions of the models

Specimen	Outer diameter ϕ (cm)	Length L (cm)	Thickness t (mm)	Weight W (kg)
No. 1	10	50	2	1.030
No. 2	20	50	2	2.090

また長さは、風洞径と取付けの便宜上、同一とし 50cm に定めた。また比重 2.87 のジュラルミン製とする。共振風速を No. 1 については 10 m/s, No. 2 については 20 m/s とし、振動系の固有振動数を測定

計器の振動特性から 20 c/s と定めてバネ定数 k (上下, 横方向について片側に 2 ケずつ計 4 ケのバネで支持するものとする: Fig. 1 参照) を求めると Table 2 のようになる。

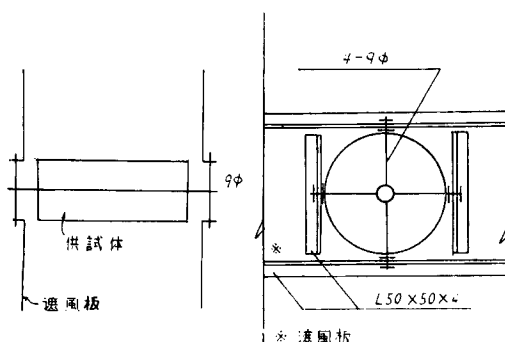


Table 2 Vibrational properties of the system

Specimen	Wind velocity at resonance, (m/s)	Natural frequency, (c/s)	Spring constant k (kg/cm)
No. 1	10	20	4.13
No. 2	20	20	8.40

Fig. 1 Test section of wind tunnel with fixed model in place

これより, 取付けバネに関しては取付けを考えてコイル径 D を 2 cm とし, 鋼線径 d を仮定し巻数 n を下式より求めた。

$$n = \frac{Gd^4}{8kD^3}$$

ここに

D : コイル径 (cm)

G : せん断弾性係数 (gr/cm²)

d : 鋼線径 (cm)

k : バネ定数 (gr/cm)

取付けバネの寸法を Table 3 に示す。

Table 3 Springs used for supporting the models

Specimen	Spring constant k (kg/cm)	Average diameter of coils D (cm)	Diameter of spring wire d (cm)	Number of coils n
Spring S 1	4.13	2	0.27	16
Spring S 2	8.40	2	0.30	13

3. 測定種目および測定方法

3.1. 静止模型: 模型の心棒 (シンチエウ製 ϕ 6 mm) を直径 9 mm の鉄筋に固定し, その鉄筋を模型の両端に設けた 80 cm 角の遮風板に固定する。詳細は Fig. 1 に示す。外力変動の測定には, 模型中央断面内に 4 mm 径の小孔をあけて, ビニール管を挿入し, その先をゴム管で外部に導き, 風圧計に接続してオシログラフによって記録を得た。

3.2. 運動模型: Fig. 2 に示すように模型に固定した心棒を両端でバネで支え, 外力の変動および, 風と直角方向, 風方向筒体の振動を求めた。外力の変動の測定は静止模型と同様に行ない, 筒体の振動の測定

には、 $\square$ 字型の磷青銅板にストレイン・ゲージをはつたものを用いて遮風板に設けた補剛材と心棒との間のひずみ変化を動ひずみ計で風圧変化と同時に記録した。Photo 1 は模型 No. 2 をバネで支えた状態で、振動計の概略を示したものである。

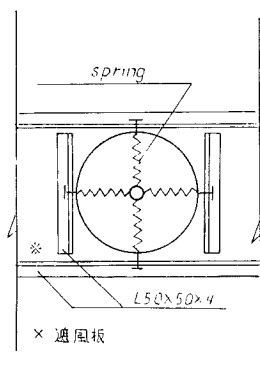


Fig. 2 Test section of wind tunnel with moving model in place

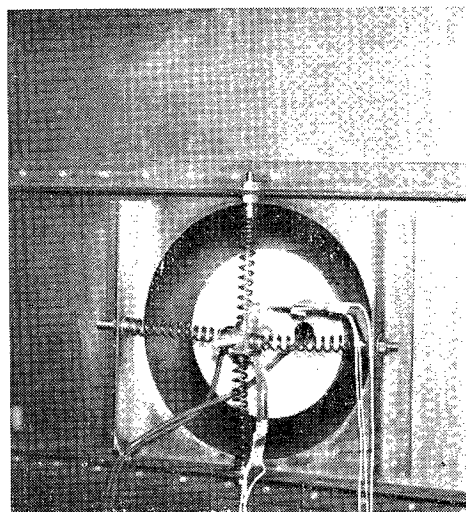


Photo 1 The model No. 2 supported by springs

4. 測定結果

4.1. 静止模型：静止模型については、風直角方向上方、風方向背面の変動の周期を測定した。結果を Table 4 に示す。

Table 4 Measured periods of wind pressure variations of the models fixed in the stream (sec)

Direction to wind stream Specimen		Wind velocity (m/sec)						
		4	8	12	16	20	24	28
No. 1	Parallel	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.12
No. 1	Normal	0.09	0.06	0.05	0.06	0.02	0.03	0.06
No. 2	Parallel	0.06	0.07	0.10	0.09	0.06	0.06	0.07
No. 2	Normal	0.14	0.08	0.06	0.06	0.05	0.05	0.03

この場合の Reynolds 数は $\left(\text{空気の動粘性係数 } \nu = 0.05 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \text{ として} \right)$

$2.66 \times 10^8 \sim 1.86 \times 10^5$ (模型 No. 1)

 $5.32 \times 10^4 \sim 3.72 \times 10^6$ (模型 No. 2)

である。

4.2. 運動模型：風圧変動の周期と筒体の振動との同時測定を行なった。以下その大要を Table 5, Table 6 に示す。

Table 5-1 Measured periods of wind pressure variations of the models supported by springs in the stream (sec)

Wind velocity (m/s)			4	6	8	10	12	16	20	22	24	28
Specimen	Spring	Direction to stream										
No. 1	S 1	Parallel	0.019	—	0.019	—	0.05	0.05	0.064	—	0.04	—
	S 1	Normal	0.11	—	0.26	—	0.44	0.26	0.26	—	0.28	—
No. 1	S 2	Parallel	0.022	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	—	—
	S 2	Normal	0.44	0.26	0.24	0.38	0.18	0.28	0.20	0.08	—	—
No. 2	S 1	Parallel	0.05	—	0.04	—	0.05	0.05	0.10	—	0.06	—
	S 1	Normal	0.06	—	0.11	—	0.19	0.10	0.10	—	0.09	—
No. 2	S 2	Parallel	0.015	—	0.01	—	0.019	0.04	0.06	0.05	0.06	0.06
	S 2	Normal	0.06	—	0.12	—	0.05	0.17	0.07	0.05	0.06	0.06

Table 5-2 Measured periods of vibrations of cylinders of the models supported by springs in the stream (sec)

Wind velocity (m/s)			4	6	8	10	12	16	20	22	24	28
Specimen	Spring	Direction to stream										
No. 1	S 1	Parallel	0.09	—	0.07	—	0.09	0.07	0.05	—	0.08	—
No. 1	S 1	Normal	0.20	—	0.10	—	0.06	0.11	0.09	—	0.07	—
No. 1	S 2	Parallel	0.04	0.09	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	—	—
No. 1	S 2	Normal	0.08	0.06	0.06	0.04	0.14	0.18	0.20	0.02	—	—

No. 2	S 1	Parallel	0.16	—	0.14	—	0.22	0.22	0.22	—	0.24	—
No. 2	S 1	Normal	0.10	—	0.11	—	0.05	0.10	0.09	—	0.09	—
No. 2	S 2	Parallel	0.12	—	0.23	—	0.28	0.23	0.20	0.19	0.20	0.26
No. 2	S 2	Normal	0.08	—	0.08	—	0.09	0.10	0.13	0.14	0.17	0.11

Table 6 Measured amplitudes of cylinders of the models supported by springs
in the stream (10^{-1}mm)

Wind velocity (m/s)			4	8	12	16	20	22	24	26	28
Specimen	Spring	Direction to stream									
No. 1	S 1	Parallel	7	5	9	20	20	—	36	—	—
	S 1	Normal	15	30	47	50	74	—	65	—	—
No. 1	S 2	Parallel	4	6	10	19	32	—	29	—	—
	S 2	Normal	9	20	32	30	41	—	36	—	—
No. 2	S 1	Parallel	6	11	19	19	48	—	—	—	—
	S 1	Normal	7	20	19	35	57	—	—	—	—
No. 2	S 2	Parallel	6	5	7	10	19	17	37	43	36
	S 2	Normal	6	7	15	20	43	47	80	66	55

5. 測定結果に対する考察

5.1. 静止模型：静止模型の場合について、風速と圧力変動の周期を Table 4 に示したが、これらのうち風直角方向の圧力変動周期を Fig. 3 に示す。またこの場合、測定範囲の Reynolds 数では一応発生する渦の周期を下式で表わすことができるといわれている²⁾。

$$T_v = \frac{D}{SV} \dots\dots\dots(1)$$

ここに

T_v : 渦の発生周期 (s/c)

D : 筒体直径 (m)

V : 風速 (m/s)

S : Strouhal 数

また $S=0.198 (1-19.7R)$ なる関係がある²⁾。

ここに

 R : Reynolds 数

よつていま測定域での Reynolds 数を考慮して、模型 No. 1 の場合 $S=0.19$ 、模型 No. 2 の場合 $S=0.20$ として T_v を求めると Table 7 のようになる。

Table 7 Calculated periods of pressure variations due to Kármán vortices behind the models (sec)

Specimen	Wind velocity m/s	4	8	12	16	20	24	28	R Number	S Number
No. 1	$T_v (S)$	0.131	0.065	0.044	0.033	0.026	0.022	0.019	2.7×10^4 $\sim 1.9 \times 10^5$	0.19
No. 2	$T_v (S)$	0.250	0.125	0.083	0.063	0.050	0.042	0.036	6.4×10^4 $\sim 3.8 \times 10^5$	0.20

静止模型の場合について風向に直角な方向の圧力変動の周期と上表の値とを Fig. 3 および Fig. 4 に示す。これらの図からもわかるように $\phi=10$ cm, $\phi=20$ cm のいずれの場合も円筒が空間に固定されているとき Reynolds 数が $3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^5$ 程度の範囲においては、円筒まわりの風直角方向の圧力変動の周期はおおよそいわゆる Kármán 渦の発生周期に近いといつてもよいであろう。

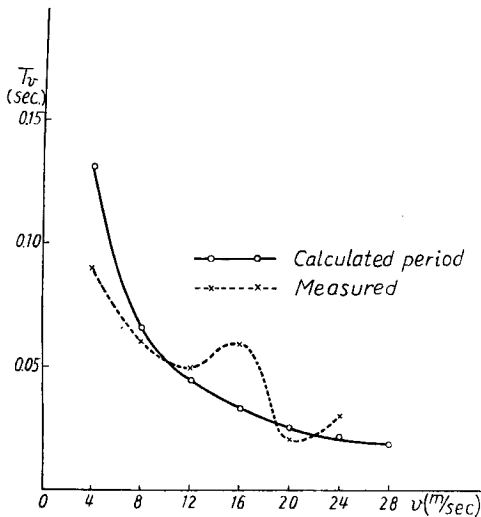


Fig. 3 Calculated and measured periods of wind pressure variations behind the fixed model No. 1

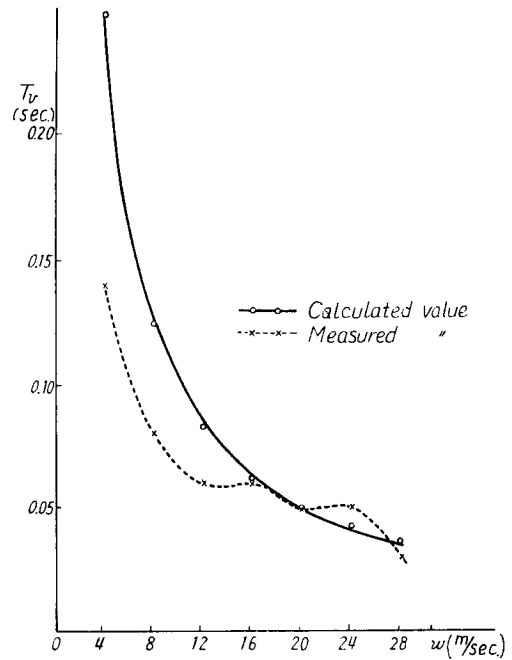


Fig. 4 Calculated and measured periods of wind pressure variations behind the fixed model No. 2

5.2. 運動模型：運動模型については、風方向、風直角方向の筒体の振動およびそれら2方向の圧力変動の振動数を測定した。結果は Table 5.1 および 5.2 に示した通りである。この場合風速と振巾との関係を図示すると Fig. 5 および Fig. 6 のようになる。これらの図からもわかるように振巾は風直角方向が風方向に比して一般に大きいので主として風直角方向の振動について考察を進める。

また、筒体の直角方向の振動数と風速との関係を Fig. 7, Fig. 8 に示し、風速と直角方向の圧力変動との関係を図示すると Fig. 9, Fig. 10 のようになる。

一般に筒体の振動、風圧変動ともに、運動模型の場合にはきわめて複雑であり、今回の測定のみではその状態を知り得ない面も多いが以上の図および表により知られることをまとめてみるとつぎのようなことがいえる。

(1) 運動模型の場合筒体の振動周期は一部でいわれているように固有周期でもなく、また風向に直角な方向の風圧の変動周期とも一致していない。すなわち筒体の固有振動と外力の変動との中間にあるものと考えられる。

(2) 風圧の変動周期は静止模型の場合と異なりいわゆる Kármán 渦の周期とは相当異なる。すなわち風圧変動の振動数は Fig. 9, Fig. 10 からわかるように、低速域では Kármán 渦の振動数に近い領域にあるが、さらに風速の増加したところではほぼ一定になる傾向があるように思われる。

(3) 風直角方向の振巾には、いずれの場合にも極大値が存在する。しかも二つ、あるいはそれ以上存在するようであり、最初の極大値は第2のそれに比較しては振巾も小さく、かつその場合の風圧変動の振動数はほぼ Kármán 渦の振動数に近い。しかし第2の極大値は、振巾も大

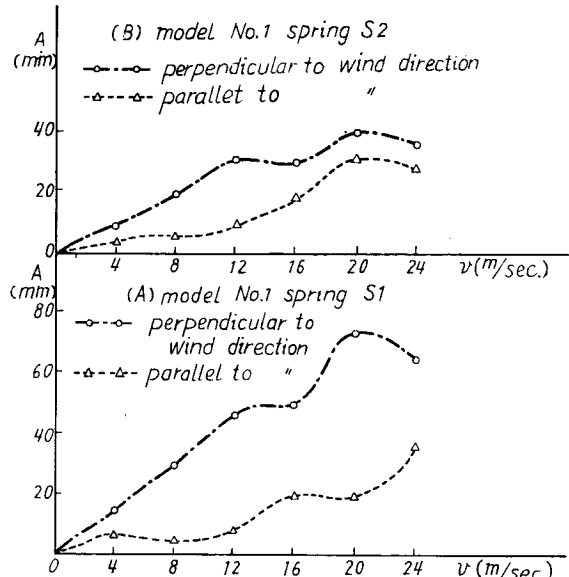


Fig. 5 The relation between the wind velocities and the amplitudes of the model No. 1 supported by springs in the stream

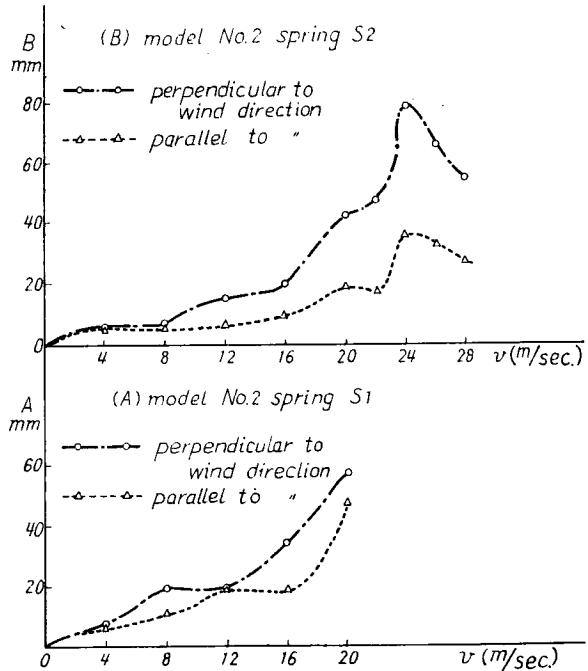


Fig. 6 The relation between the wind velocities and the amplitudes of the model No. 2 supported by springs in the stream

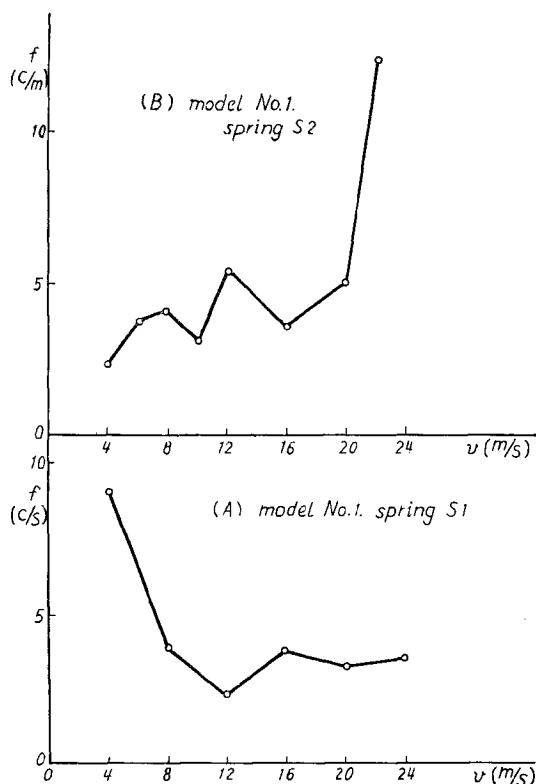


Fig. 7 The relation between the wind velocities and the frequencies of the model No. 1 supported by springs in the stream

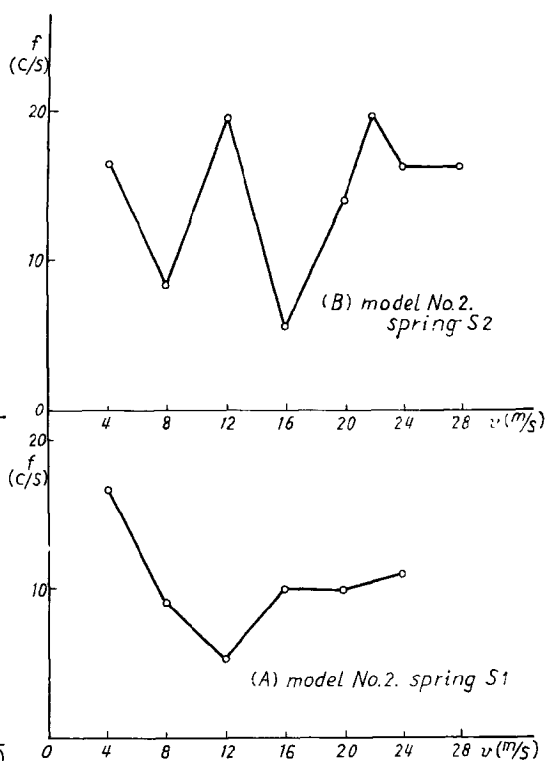


Fig. 8 The relation between the wind velocities and the frequencies of the model No. 2 supported by springs in the stream

きく、かつその場合の風圧の振動数は Kármán 渦の発生振動数とは異なる。この場合極大値が二つ以上存在するということは J. Penzien の部分模型実験の結果とも一致する³⁾。

6. む す び

1. 静止模型の場合の風圧変動周期はおおよそ Kármán 渦の発生周期に近い。
 2. 運動模型の場合、風向に直角な方向の外力の成分である風圧変動の振動数は、低速の場合には Kármán 渦の発生振動数に近い。しかしさらに風速が増した場合には振動数は Kármán 渦の発生振動数からはなれるがほぼ一定したようになる。もつと進んで風速が増すと再び風圧変動の振動数が Kármán 渦の発生振動数に近づくようである。
 3. 運動模型の場合の風直角方向、振巾と風速との関係では、二つあるいはそれ以上の極値が存在するようである。第1の極大では風圧変動は Kármán 渦の発生振動に近いが、第2の場合は、振巾も大きく、風圧変動も Kármán 渦の発生振動数からはなれる。すなわち、運動模型の場合は、静止模型と同じように Kármán 渦も発生するが、ある風速域で振巾が大きくなると、筒体の運動が渦の発生をも規制して風圧変動の振動数が風速に関係なく一定の値に近くなるものと思われる。
- 風方向の筒体の振動、風圧変動についても一応測定したが模型の取付け方の不備などのために風向、風

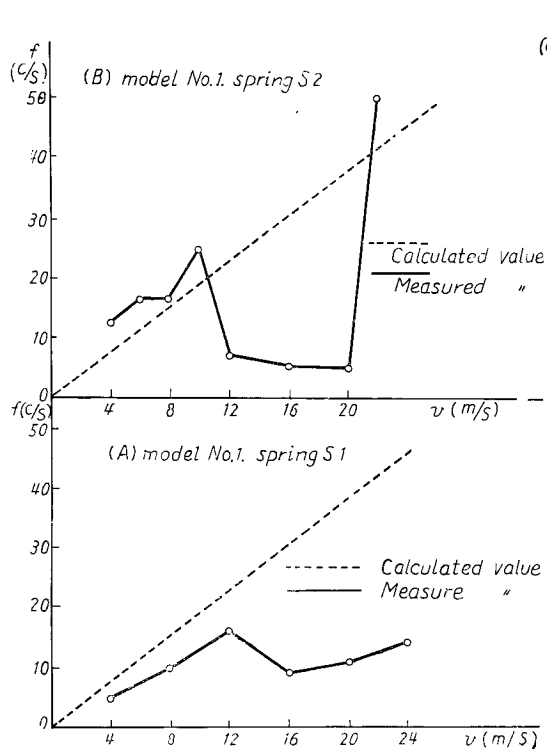


Fig. 9 The relation between the wind velocities and the frequencies of wind pressure variations of the model No. 1 supported by springs in the stream

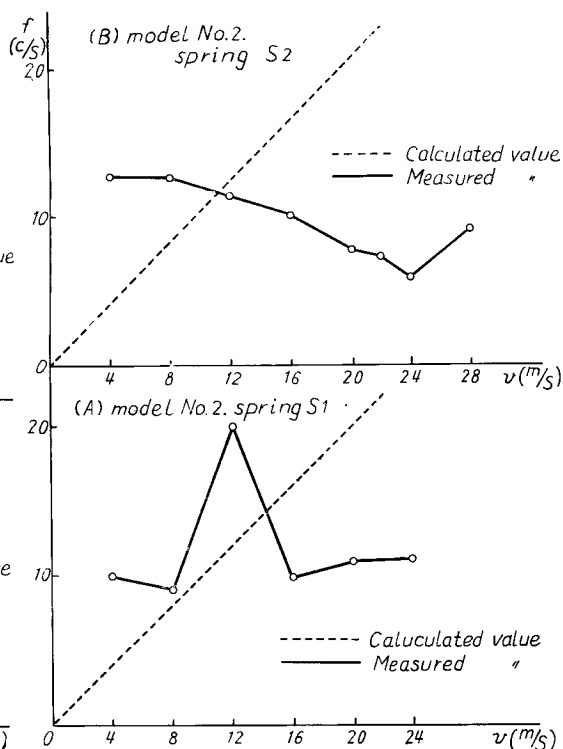


Fig. 10 The relation between the wind velocities and the frequencies of wind pressure variations of the model No. 2 supported by springs in the stream

向に直角な方向の系の固有振動数が異なつたりしたためか、理解し難い複雑なものとなつてしまつた。今後バネの取付け方などを改良して2次元の性状を研究したいと考える。また一般に取付け部の不完全のため、運動模型については風速は 30 m/s 以下の測定に終つてしまつたが、この点も改良して広い風速域について、種々の剛さの系についてさらに説明するつもりである。

参 考 文 献

- 1.1) 石崎潑雄, 川村純夫: 鋼製煙突の振動測定について: 京都大学防災研究所年報, 第3号, 昭和34年12月, 87~93頁.
- 1.2) 石崎潑雄, 川村純夫: 風による煙突の振動性状について: 日本建築学会論文報告集, 第66号, 昭和35年10月, 261~264頁.
- 2) Coldstein, S.: "Modern Developments in Fluid Dynamics", Vol. II, 1957 pp. 570.
- 3) Penzien, J.: "Wind Induced Vibration of Cylindrical Structures", A.S.C.E., Eng. Mech. Div., Jan. 1957. pp. 1141,