

# 微小変動流体力測定装置の試作

Improvement of the Strain-Gauge Balance for Unsteady and Minute Aerodynamic Forces

佐賀 徹雄\*・小林 敏雄\*・瀬川 茂樹\*

Tetsuo SAGA, Toshio KOBAYASHI and Shigeki SEGAWA

## 1. ま え が き

最近、構造物の大型化や車輛の高速化等に伴ってこれらの物体に作用する非定常な空気力への関心が高まっており、風洞を用いた多くの模型試験が行われている。

これらの模型試験においては模型の前面投影面積と風洞測定部断面積の比を小さくする必要があり模型の大きさは制約をうける<sup>1,2)</sup>一方、模型がうける流体力は通常模型の前面投影面積に比例する。したがって、小型の風洞での実験では模型に作用する流体力はかなり小さなものとなる。従来からこの種の変動する小さな流体力を測定する方法として、板ばねの曲げによるひずみを電気信号に変えて検出する方法が多く用いられている。しかし、この方法ではばねの剛性と得られる感度とは相反する関係にあり、小さな流体力を測定するためにはばねの剛性を下げざるを得ない。このときばねの固有振動数は低くなり変動する流体力の振動数と分離できなくなること、あるいはたわみ量の増加により振動の減衰が悪くなることなどのために得られた結果の信頼性が低下する。

本報では変動する流れの中の物体に作用する非定常な微小流体力に関する信頼性の高い資料を得るために、ばね部に工夫を加え、従来の方法よりも高い固有振動数を持ち、力とひずみの関係における直線性の優れた変動流体力測定装置を開発することを目的としている。

## 2. 変動流体力測定装置

### 2.1 実験装置

図1に試作した流体力測定装置の原理図を示す。本装置の特徴は模型支持ばねとひずみ検出ばね(以下、それぞれをばね①、ばね②とよぶ。各記号の添字1,2はばね①、ばね②を示す)とを並列に使用し、模型に作用する流体力の大部分をばね①で釣合せ、ひずみの検出をばね②で行うことにある。この装置では模型に作用する流体力の大きさや変動周期に応じてばね①、ばね②の材質・形状・寸法(厚さ、幅、長さ)を適当に組合せることにより必要な感度と固有振動数を選ぶことができる。本装置の概略図と写真を図2に示す。ばね①は2個の同一形

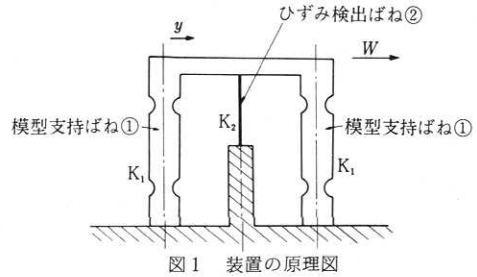


図1 装置の原理図

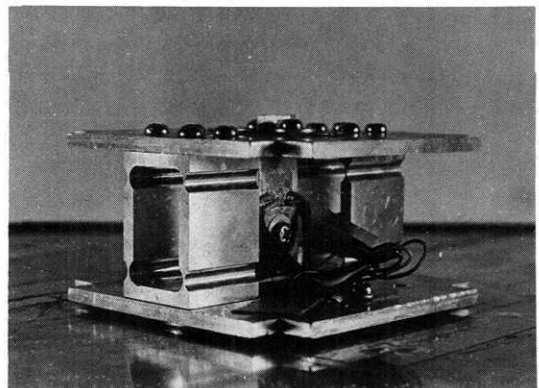
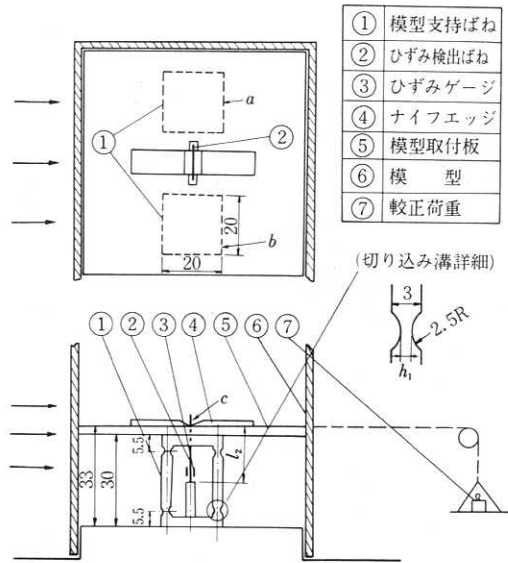


図2 流体力検出装置

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

表1 供試ばねの諸元 単位(mm)

ばね	材質	形状	幅b	長さl	厚さh
模型支持ばね① (ばね1個の寸法)	ジュラルミン	矩形柱 (切り込み溝つき)	20	30	0.4 0.5 0.6 0.7
ひずみ検出ばね②	燐青銅	矩形薄板	12.5	10~18 まで変化	0.2

状のばねa, bより構成され, a, bは下部で固定され上部で模型取付板⑤によって連結されている。ばね②は変位方向がばね①と同一方向になるようにa, bの中間に設置される。ばね②の下部は固定され, 上部は模型取付板⑤のナイフエッジ部④で支持される。ばね②の剛性をばね①に比べ十分低くなるように選ぶと模型に作用する流体力はほとんどばね①の変位で支えることになる。本装置ではばね②のまげによるひずみをばね下部の表裏両側に2枚ずつ貼った合計4枚の抵抗線式ひずみゲージからの電気信号として検出する。

表1に本装置で用いたばねの諸元を示す。ばね①は図2に示すように矩形柱の上下2ヶ所に切り込み溝が切られており, この切り込み溝の深さによればねの厚さ $h_1$ を変えばね定数 $K_1$ を変化させている。ばね②はばね①に比べ剛性を低くする必要があり, 燐青銅の薄板を用いる。また, 固定端近くに片面に2枚の抵抗線式ひずみゲージを貼るためその幅 $b_2$ を広くしている。

2.2 性能試験の方法

本装置の性能を調べるために静的試験および動的試験を行った。静的試験では図2に示すように模型取付板上面に校正荷重⑦を静かに加え, ばね①の厚さ $h_1$ およびばね②の長さ $l_2$ の感度 $\epsilon_2/w$ に与える影響を調べている。また非接触型変位計(AEC-2525-05)を用いてばね①の変位量 $y$ やばね①, ②の振動の振動数, 減衰率を測定している。なお, 予備実験として図2の模型取付板(一辺74mmの正方形)の上の任意の位置に荷重を加え, モーメントによる誤差を調べている。ナイフエッジ④の作用点Cまわりに3.7 kg・cmのモーメントを加えてもひずみの変化は認められず, 支持ばね①の切り込み溝の存在がモーメントの影響をうけ難い構造にしていることが確か

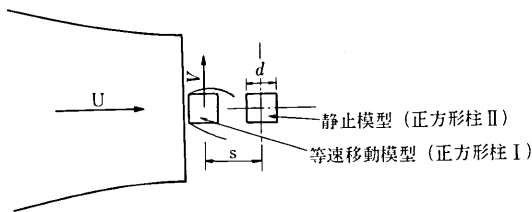


図3 動的試験の概略図

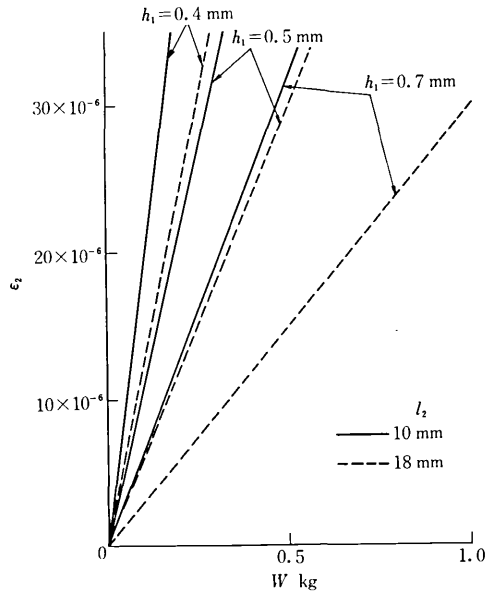


図4 流体力測定装置の静的試験

められる。

動的な試験では図3に示すように, 本装置に正方形柱(一辺80mm 高さ180mm 重量100g)を取りつけて一様流れの中に置き, その上流側を流れと直角方向に物体を移動させることによって変動流体力を作用させ,  $h_1$ の相違の変動抗力に及ぼす影響の有無を調べている。

3. 性能試験結果と考察

図4に $h_1, l_2$ を変化させたときのひずみと荷重の関係を示す。本報では数百グラムという微小変動流体力を想定しているため, 性能試験は主として荷重1kg以下の範囲で行われた。この範囲ではひずみと荷重はよい直線性を保っている。また一例として $h_1 = 0.4 \text{ mm}, l_2 = 10 \text{ mm}$ で約7kgの荷重を加えたが直線性は維持されている。本装置の最小目盛は0.5gである。

3.1 感度 $\epsilon_2/W$ に及ぼす $h_1$ および $l_2$ の影響

図1に示すように模型支持ばね①のばね定数を各支柱について $K_1$ , ひずみ検出ばね②のばね定数を $K_2$ とすると荷重作用時の荷重 $W$ と変位 $y$ との関係は

$$W = (4K_1 + K_2)y \tag{1}$$

となる。一方ばね②について $y$ とひずみ $\epsilon_2$ との関係を求めると, 片持ち梁の先端に荷重が作用する場合に相当するので断面係数を $Z$ , 縦弾性係数を $E$ とすると

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= W_2 l_2 / E_2 Z_2 \\ &= (3h_2 / 2l_2^2)y \end{aligned} \tag{2}$$

となる。したがって装置の感度 $\epsilon_2/W$ は式(1), (2)より

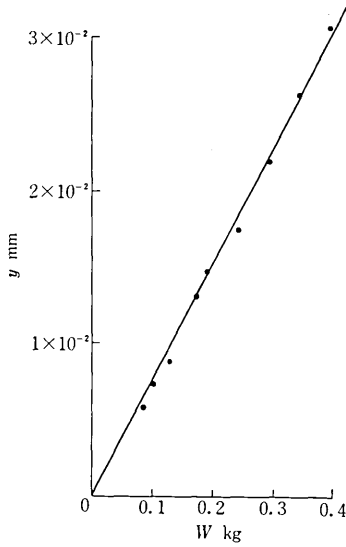


図5 ばね①の荷重と変位 y の関係

$$\epsilon_2/W = 3h_2/(2l_2^2(4K_1+K_2)) \quad (3)$$

いま  $K_2$  が  $K_1$  に比較して十分小さいとすると

$$\epsilon_2/W = 3h_2/(8l_2^2 K_1) \quad (3')$$

となる。感度は  $h_2$  に比例し  $l_2^2$  および  $K_1$  に反比例する。図2の詳細部に示すように切り込み溝をもつばね①のばね定数  $K_1$  を理論的に求めることは困難であるので、ここでは切り込み部の最小断面形状を有する板ばねで置き換える。板ばねのばね定数は

$$K = Ebh^3/4l^3 \quad (4)$$

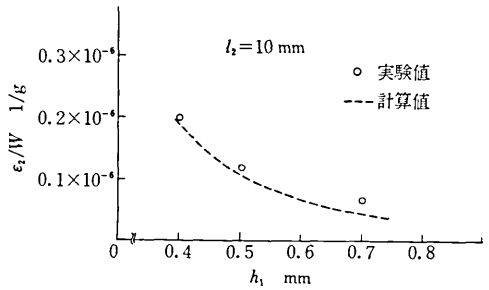
で表わされるようにばねの厚さ  $h$  の3乗に比例するのでここでも  $K_1$  が  $h_1^3$  に比例すると仮定すると

$$K_1/K_1^* = (h_1/h_1^*)^3 \quad (5)$$

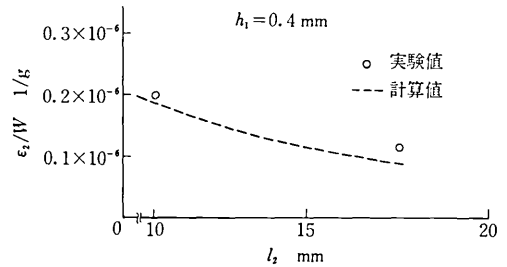
ここに  $K_1^*$  は厚さ  $h_1^*$  の場合のばね①のばね定数である。この  $K_1^*$  を荷重-変位の関係から定める。図5に  $h_1^*$  として 0.4 mm の厚さを選んだときの非接触型変位計で測定した  $y$  と  $W$  との関係を示す。  $W$  と  $y$  との関係は式(1)で表わされるが、ここではばね②は取付けられていないので  $4K_1 = W/y$  となる。したがって図5より  $K_1^* = 32.4$  kg/cm が得られる。一方式(4)を用いて  $K_2$  を計算すると  $l_2 = 20$  mm のとき  $K_2 = 0.306$  kg/cm となり  $K_1^*$  に比べて十分小さな値となっている。この  $K_1^*$  を用いると感度  $\epsilon_2/W$  は式(3'), (5)より

$$\epsilon_2/W = (3h_2/8l_2^2)(h_1^*/h_1)^3(1/K_1^*) \quad (6)$$

式(6)による計算結果と較正試験結果を図6に示す。図6(a)は  $\epsilon_2/W$  と  $h_1$  との関係、(b)は  $\epsilon_2/W$  と  $l_2$  との関係を示したもので、計算結果と試験結果は同じ傾向をもつことがわかる。図は切り込み溝をもつばね①を等価の板ばねとみなせることを示している。



(a) ばね①の厚さ  $h_1$  と感度  $\epsilon_2/W$



(b) ばね②の長さ  $l_2$  と感度  $\epsilon_2/W$

図6 感度に及ぼす  $h_1, l_2$  の影響

### 3.2 装置の固有振動数

本装置を試作する際に想定した変動流体力の振動数は数 Hz から数十 Hz である。流体力測定装置の固有振動数はこの振動数より十分高い値となるよう設計する必要がある。装置の固有振動数  $f$  は支持ばね①をばね定数  $K_1$  の板ばねとみなすと

$$f = (1/2\pi)\sqrt{(4K_1+K_2)/m} \sim (1/2\pi)\sqrt{4K_1/m} \quad (7)$$

で表わされる。ここに  $m$  は支持ばね①の先端の集中荷重で本装置の場合 49.8 g である。  $K_1$  として  $h_1^* = 0.4$  mm の場合の値  $K_1^* = 32.4$  kg/cm を用いると  $f^* = 255$  Hz となる。非接触型変位計の信号による固有振動数の実測値は 261 Hz で計算値と実測値とはよく一致している。このことから切り込み溝をもつばね①を等価の薄板ばねとみなせることが確かめられる。式(5), (7)より

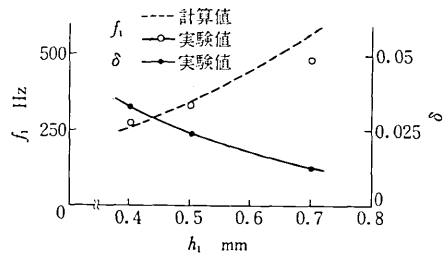


図7 固有振動数と対数減衰率 ( $l_2 = 10$  mm)

研究速報

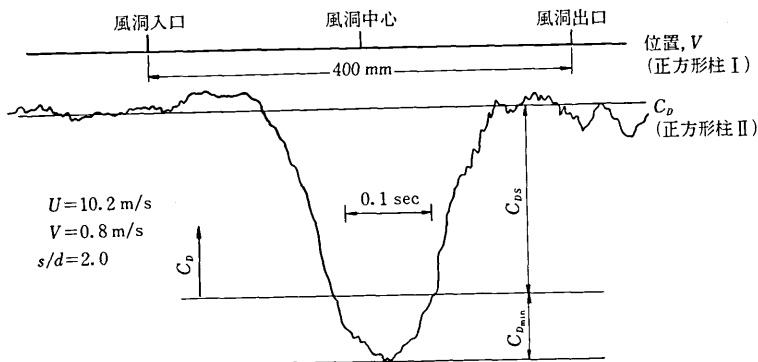


図8 正方形柱(II)の抗力係数 ( $d = 80 \text{ mm}$ , アスペクト比 2.25)

$$f = (\sqrt{2\pi}) \sqrt{(4/m) K_1^* (h_1/h_1^*)^{\frac{3}{2}}} = f^* (h_1/h_1^*)^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

式(8)による計算結果と非接触型変位計の信号の周波数分析による振動数の実測結果とを図7に示す。図より本装置の固有振動数は式(7)を用いて推定できることがわかる。図には本装置の自由振動の対数減衰率 $\delta$ の測定値を併記してある。 $\delta$ は $h_1$ の増加に伴い減少する。

3.3 動的試験結果

図3に示すように速度 $U$ の一樣流中に一辺 $d$ の正方形柱IIを置き、その上流側を別の正方形柱Iを流れと直角に等速度で移動させ、正方形柱IIの抗力係数 $C_D = D / \{ (1/2) \rho U^2 d \}$ を本装置を用いて計測した。 $C_D$ の一例を図8に示す。流体力測定装置の固有振動数が変動流体力の周波数を大きく上まわっており、変動する $C_D$ が精度よく測定できることが示されている。表2に $h_1$ を変化させたときの $C_{Dmax} - C_{Dmin}$ の10回の測定値の平均値、標準偏差を示す。表より $h_1$ の相違が $C_D$ に影響を与えないことがわかる。

4. ま と め

変動する微小流体力を測定するためにばね部に工夫を

表2 動的試験結果 (正方形柱 $d = 80 \text{ mm}$ , アスペクト比2.25)  
 $U = 10.2 \text{ m/s}$ ,  $V = 0.8 \text{ m/s}$ ,  $s/d = 2.0$   
 $l_2 = 10 \text{ mm}$

$h_1$	$C_{Dmax} - C_{Dmin}$	
	平均値	標準偏差
0.4	1.923	0.032
0.5	1.972	0.048
0.6	1.959	0.039
0.7	2.002	0.035

に加え、従来の同種の装置よりも固有振動数の高い、減衰の速い測定装置を考案した。また、この装置の感度および固有振動数の推定の方法を検討し、性能試験によって確かめた。本装置の原理および構造の応用によって非常流体力の信頼性の高い測定が期待される。

(1978年11月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 谷・小橋・佐藤, 流体力学実験法, (1977), 岩波書店
- 2) A・Pope, Wind-Tunnel Testing, (1954), Wiley.

正 誤 表 (1月号)

頁	段	行	種 別	正	誤																
1		↓17	本 文	計測技術開発センター	環境計測技術センター																
39	右		図 6	縦軸の数値をそれぞれ $\frac{1}{10}$ にする。																	
"	右	↓17~21	本 文	文章を削除する。																	
40	左		図 7	$I_p = 6 \text{ A} (\times 10)$	$I_p = 6 \text{ A}$																
"	右	↓12	本 文	13.0	130																
64	中央		図6(b) (図の表中) の凡例表	<table border="1"> <tr><td><math>V_f</math></td><td>0</td></tr> <tr><td>(%)</td><td>1.0</td></tr> <tr><td></td><td>1.5</td></tr> <tr><td></td><td>2.0</td></tr> </table>	$V_f$	0	(%)	1.0		1.5		2.0	<table border="1"> <tr><td><math>V_f</math></td><td>2.0</td></tr> <tr><td>(%)</td><td>1.5</td></tr> <tr><td></td><td>1.0</td></tr> <tr><td></td><td>0</td></tr> </table>	$V_f$	2.0	(%)	1.5		1.0		0
$V_f$	0																				
(%)	1.0																				
	1.5																				
	2.0																				
$V_f$	2.0																				
(%)	1.5																				
	1.0																				
	0																				