

# 風の中のはためき

佐藤 浩、斎藤博之助、中村 宏 （ながれ研究集団）

## Flags in the Wind

SATO Hiroshi, SAITO Hironosuke and NAKAMURA Hiroshi

Institute of Flow Research, Tokyo, Japan

### ABSTRACT

Experiments were carried out on the motion of flying flags in a wind tunnel. The motion was observed by both motion and still cameras. The velocity fluctuation was measured by a hot-wire anemometer. It is clear that the motion is classified in two kinds. One is the oscillation of flags as a whole. The other is the wavy motion on the surface. The former is proved to be similar to the motion of a single pendulum. One wavy motion is originated by the flapping motion of flag tail. The other wave comes out from the upper end of the pole. The diameter of pole has a small effect on the wavy motions.

Key Words: Soft material in wind,

#### 0. はしがき

流れの中に置かれた物体として流れ学で扱われるのは、ほとんどが力による変形の無い固体です。しかし世の中には弾性体でも、塑性体でもない、軟らかい物体が存在しています。その周りの流れを扱うのが軟体流れ学です。軟体は大変形によって流れに大きな影響を及ぼします。我々は旗に目を付けました。風の中の旗の運動は乱雑です。それは風が大抵の場合は乱流になっているからでしょう。しかし風の中に乱れが無かったとしても、旗の運動は乱れます。そして乱雑な中に秩序があり得るといふ、私たちに喜ばすような構造になっています。従来の研究としては種子田定俊さんの仕事があります。種子田さんは垂直風洞の中で、色々な材質の旗の振動を写真撮影によって詳しく調べました。

旗の運動を2種類に分けることが出来ます。その第1は旗の全体としての動きです。すなわち大規模な運動です。第2は旗の面内の波です。これは小規模波動と呼ばれます。これらを別々に調べるために、水平な軸を持つ硬い旗、水平な竿の軟らかい旗、垂直な竿の軟らかい旗の実験を行いました。

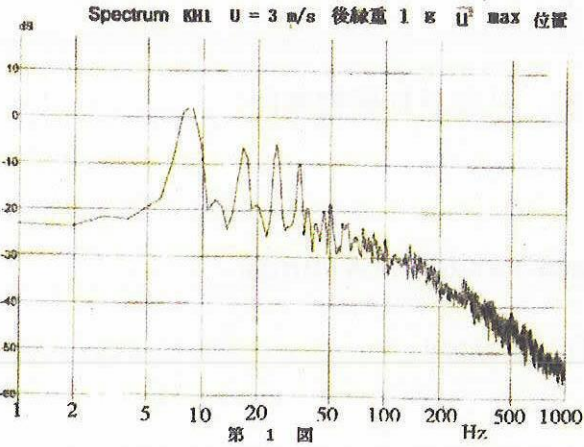
#### 1. 硬い旗

旗の大規模運動だけを見るために硬い旗を準備しました。硬いというのは出来るだけ旗面内の波打ちの少ない材料、例えば紙です。紙は普

通の旗に使われる布に比べると、曲げの剛性が大きいのです。それが旗面の小規模運動を抑制します。水平な竿から垂直にぶら下げられた四角な紙の旗に垂直に風を吹かすと、それは揚力によって、水平になろうとします。このとき旗が重いと、大きな迎え角で釣り合ってしまうので、水平になることが出来ません。そこで軽く強い紙を探ることになります。我々の場合は薄葉の和紙が適当でした。風速を上げててもこの旗は全体としては振動しません。振動をさせるために、後縁に重りを付けることにしました。この重りの作用は旗全体が上がってきたときに下面の高圧と、上面の低圧で、カンパーがつくので、揚力が増えるという利点を持っています。それと同時に、慣性力が増えて、振動しやすくなります。

硬い旗は 材質：青色和紙薄様 厚さ：50  
ミクロン 寸法：20cm x 20cm  
質量：2g 後縁質量：0.5, 1, 1.5, 2g  
竿：直径 3mm です。

旗の後縁のすぐ下流では20-30%という強い変動が見られます。風速が上がると周波数が上がります。風速に無関係に特徴的なのは変動の波形の、上が尖り、下には高周波の変動があることです。これは後縁の重りの運動に関係しているのでしょうか。風速4m/sの時の変動のスペクトルが第1図です。9Hzあたりの基本基本周波数の成分と、その高調波が見えます。



基本周波数は風速とほぼ直線の関係になっています。

ここで簡単な力学を試みます。硬い旗を薄い剛体と考えると、旗が下にたれると上向きの揚力を受け、水平の中立点を過ぎて跳ね上がると、下向きの揚力を受けるのです。この運動は非常に単純で、重力による単振子と同じです。旗の

$$M \cdot l_m \cdot l \cdot \ddot{\alpha} = C_L \cdot (1/2) \rho U^2 \cdot A \cdot l_a \quad (1)$$

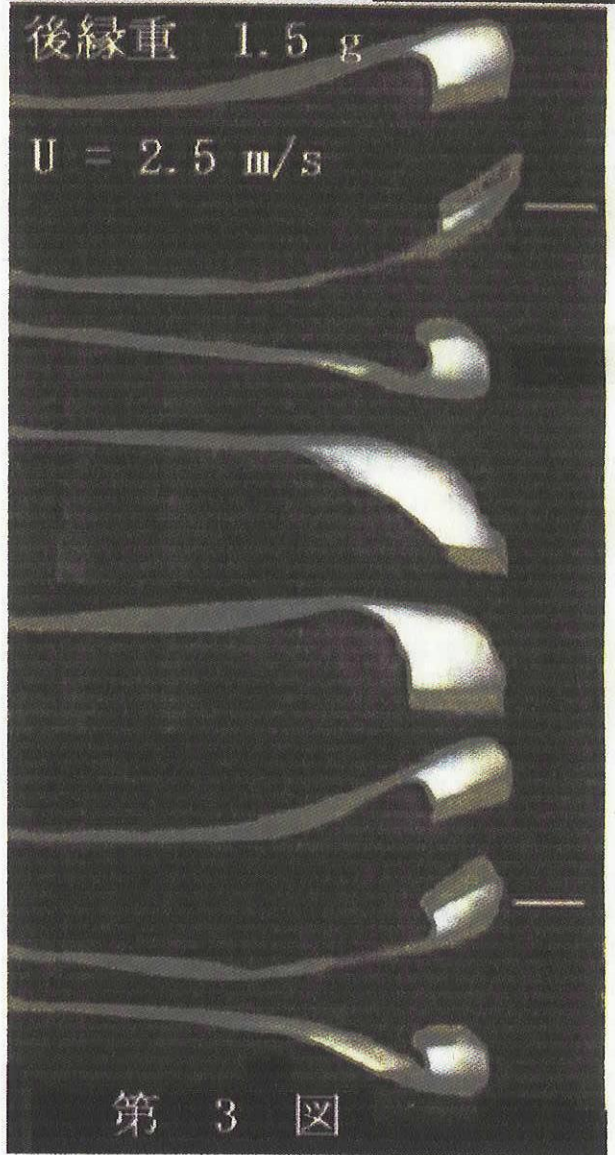
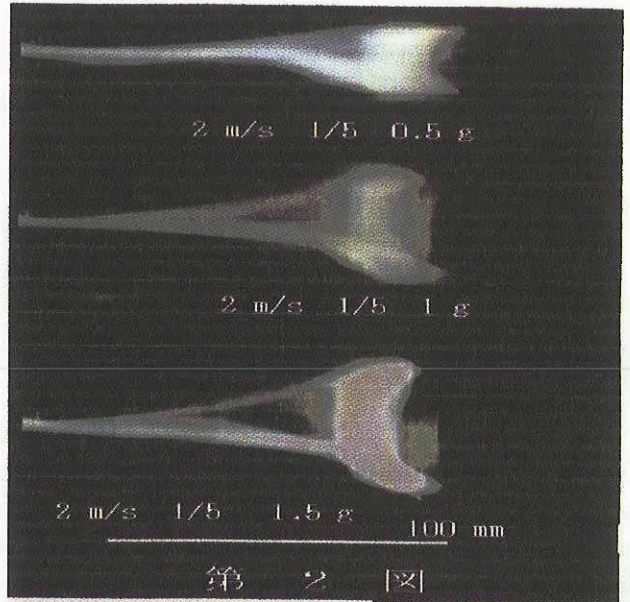
$$l_a / l : \text{揚力着力点} \quad (2)$$

$$l_m / l : \text{重心位置} \quad (3)$$

$$C_L = k \cdot \alpha \quad (4)$$

$$f \propto \frac{U}{\sqrt{M/A \cdot l}}$$

迎角の変化は、ほぼ(1)のような式になります。旗の質量による重力は流体力に比べて無視出来ます。揚力係数が迎角に比例すると仮定すると、振動の周波数は風速に比例し、面密度と弦長、すなわち旗の長さとの積の平方根に逆比例します。(2)(3)(4)に程々の値を入れると、基本周波数の実験結果とほぼ一致します。写真を見ましょう。第2図は横から撮った長い時間露出した静画です。振幅は後縁の重さが重くなるほど大きくなります。第3図は動画をコマどりにして並べたもので、絵と絵の間の時間間隔は1/30秒です。1周期の間に5つのコマが写っています。全体の大規模な平板振動の他に後縁は可成り奔放に行ったり、来たりしています。これは小規模運動の一つで、いわゆるむち打ちとか、投げ紐といわれる現象で、旗の本体は揚力で抑えられていても、端の方は慣性



で烈しく動くのです。この動きに伴う2次元の波が旗の面に現れます。

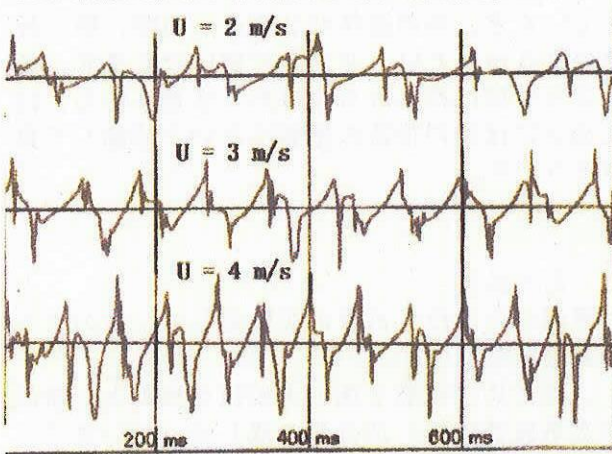
### 2. 水平竿

硬い旗の次は軟らかい旗です。材料としては。出来るだけ面密度の小さい、化繊の布が選ばれました。力の関係を単純にするために竿が水平で、重力と揚力が平行になるようにしました。この旗は軟らかいので、面内に波が立ちます。実験された旗の諸元は 材料：薄手化学繊維 寸法：20 cm x 20 cm 質量：2 g 竿：直径2 mmの丸棒

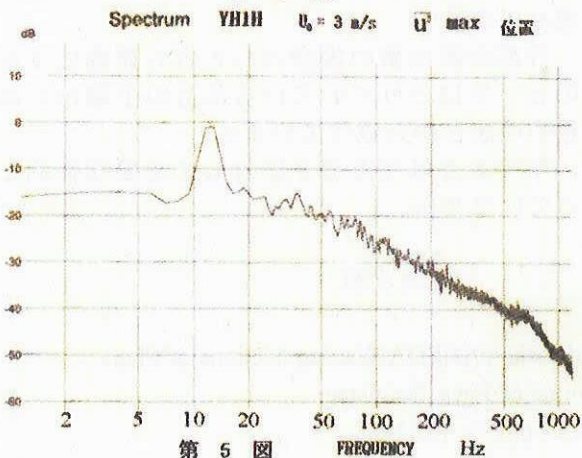
一樣な流れの中に置かれた軟らかい旗は自分で振動を始めます。硬い旗の実験の単振動に似たような振動が観察されました。軟らかい布では、この運動に伴って、流れの中に速度変動が作られ、旗全体に振動が広がります。すなわち強い非線形です。

旗のすぐ後ろには20%を超えるような強い速度変動がほぼ一様に分布しています。第4図は変動の波形です。硬い旗とは少し違う、不規則さの増えた波形です。

第5図は旗の下流で、変動の強さが最大になる点でのスペクトルです。基本周波数がはっきりと見えますが、硬い旗のような見事な高調波群はありません。旗の表面には後縁部分を除いては寸度の小さい波は立っていません。



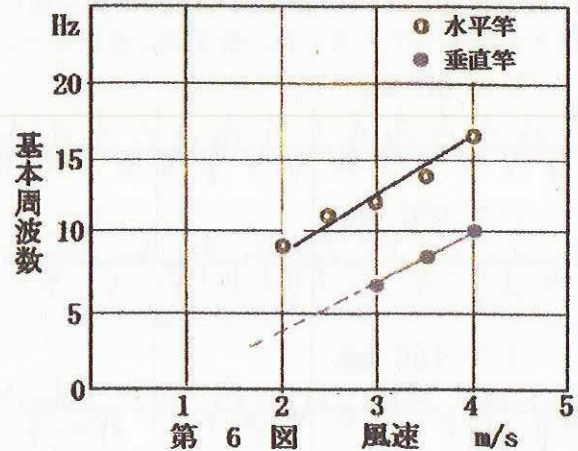
第4図



第5図

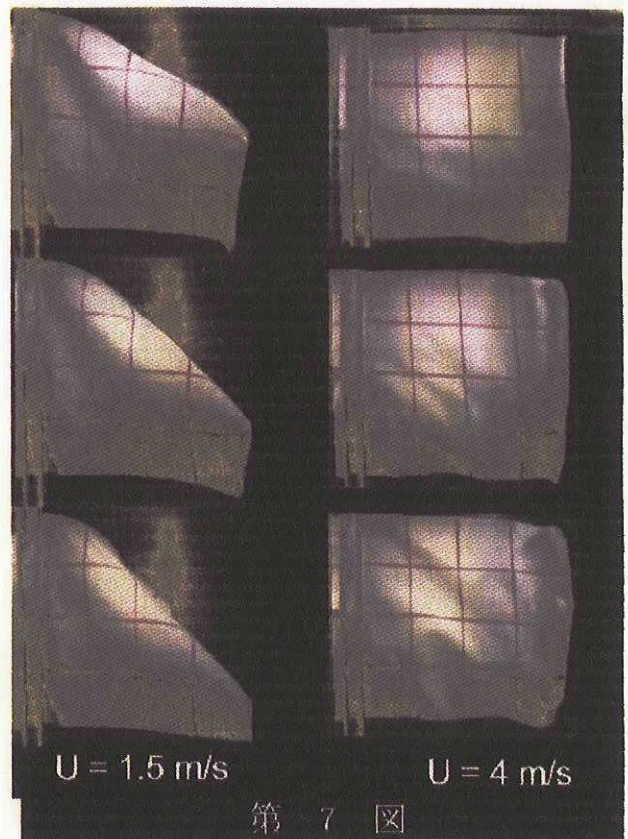
### 3. 垂直竿

実際のな垂直な竿を持つ旗の実験に移ります。旗の諸元は前節と同じです。風速を上げていくと、旗はゆらゆらを始めますが、しかし平たい板のようにはならないで、つぼめたままで揺れています。この場合でも旗の下流には強い速度変動が現れますが、スペクトルには尖った峯は



現れません。

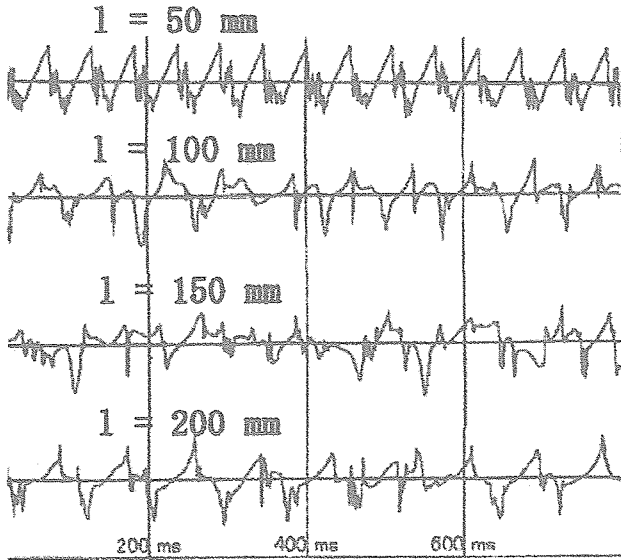
第6図は水平な竿と垂直な竿の基本周波数を比べたものです。同じ形の旗でも、垂直な方が基本周波数が小さいのです。その理由はやはり重力と流体力とは直角にかかっているせいでしょうが、詳しいことは分かりません。



第7図

第7図は横からのコマどり写真です。限界風速の下と上で、はためきの模様が違っていることがはっきりと見えます。もう一つ注目すべき点は4 m/sのとき、左上から右下へ向けて波頭が走っていることです。これは旗面の波の主要成分のように見えます。これは恐らく旗に流れに直角に重力が働くからでしょう。

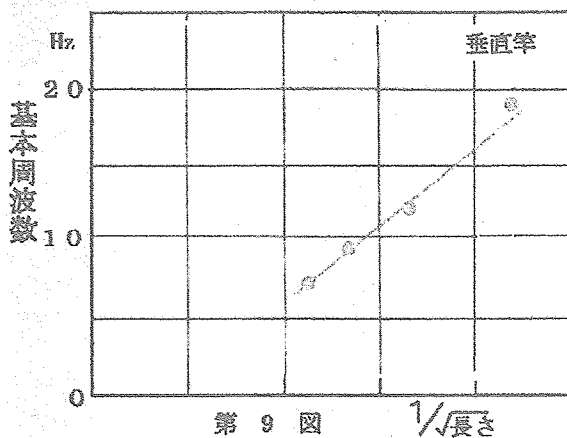
はためきと長さの関係を調べる為に旗を切って段々と短くしてみました。第5図は波形です。



第8図

基本周波数を長さに対してとったのが第9図です。周波数が長さの平方根の逆数に比例しているようですが、外挿してもゼロを切るようには見えません。旗が長くなるとまた垂直重力の影響が現れるのかも知れません。

旗の表面にできる小規模な波については、画像から見ると、上の方の旗と竿との交点から出る波が卓越しています。



第9図

旗に加わる流体力は時間的に変動し、非常に小さくなる瞬間があります。このとき旗は下方に垂れようとして、波を作るのでしょう。

#### 4. 太い竿

旗の振動について竿が何かの役割を演じるのではないかという疑問があります。今までの竿は直径が2 mmとか3 mmとかの細いものでした。旗の振動が竿の下流に出来る渦列に影響されるかもしれません。しかし当たってみると、竿が可成り太くないと下流の渦が振動に寄与しそうにはありません。先ず直径が2.3 mmという竿を使って実験しました。竿は垂直です。すぐに目に付くのは風速が小さいときには単振動的なはためきがないことです。例えば風速が2 m/sの時には、はためいてはいて、旗の下流には強い速度変動があります。スペクトルを見ると、連続スペクトルです。風速が3 m/sを越えると、単振動的になります。これも細い竿の場合と同じです。こうしてみると竿の太さはさほど重要な因子ではないようです。

ここで流体屋を誘惑するのは、竿から出る後流の渦列が旗の運動に関連するのではないかという問題です。この実験条件では渦列の周波数は、はためきのそれよりもずっと高いので、両方が一致するには竿の直径を大きくして、渦列の周波数を下げ、旗の長さを短くして、はためきの周波数を上げるほかありません。考えを進めていくと、竿の直径が2.3 mmの時、旗の長さは25 mmという非常識な値になります。このような旗は作られる事はありませんから、はためきには竿の後流の影響はないと結論して良さそうです。

#### 5. あとがき

風洞の中でははためきの実験をして、次のような結論を得ました。

1. はためきは旗全体の大規模な振動と、旗面を走る波長の短い進行波で成り立っています。
2. 大規模振動は旗に働く揚力による、単振動で理解出来ます。
3. 表面の波は旗の後縁のむち打ち運動によるものと、竿にとりついている部分の上端から出る斜めの波とから成っています。
4. 竿の太さははためきに対して主要な役割を持っていません。

#### 参考文献

Sadatoshi TANEDA: Waving Motions of Flags  
Journal of Phys. Soc. Japan  
vol.24 p392 - 401, 1968