タンデム型熱線プローブによる角柱まわりの 非定常剥離流れの測定

九大応力研 溝田武人[○], 岡島 厚

Measurements of unsteady separated flows around rectangular prisms
using tandem type hot-wire probe

Taketo MIZOTA^{*}, Atsushi OKAJIMA^{*}

A new technique of tandem type hot-wire probe has been developed to measure the two-dimensional unsteady separated flows including backflow region around rectangular prisms at Reynolds numbers ranging from 10^4 to 10^5 . Measurements of time-averaged and unsteady velocity distributions are made for stationary and oscillating models. The time-averaged and unsteady streamlines around these models are presented and their correspondance to aerodynamic forces are also discussed.

1. まえがき

橋梁や建物等の土木・建築構造物のまわりの自然風による流れや、流れと構造物の相互作用である空力弾性的不安定振動の問題を探るために、これらの非流線型物体のまわりのような非定常逆流域を含む流れ場の一次元流速ベクトルを測定できるタンデム型熱線プローブを開発した。タンデム型熱線プローブはAsanuma¹⁾他の開発によるものですでにエンジン給油系統管内のような逆流を含む一次元非定常流速の測定に成功している。本研究ではこれを二次元非定常流れ場の流速ベクトルを測定する方法に発展させた²⁾。そして、本報告は一様流中³⁾にあって静止および一様流に垂直な方向に振動する⁴⁾種々の断面比を有する角柱まわりの時間平均的な流線および非定常流線を描き、流体力との関係を調べたものである。

2. 実験方法およびタンデム型熱線プローブ

実験は九州大学応用力学研究所のエッフェル型風洞を使用して行った。この風洞の測定部断面は高さ×幅×長さ=3m×0.7×2mであり、風洞気流の乱れ度は0.18%である。測定部内壁にはタンデム型熱線プローブを任意の位置にセットできる二次元トランス装置が設置してある。実験流速 U_0 は4~10m/secである。供試模型は高さ $H=150\text{mm}$ 、長さ $D\text{mm}$ の角柱で断面比 $D/H=0.1\sim2.0$ の範囲で D を変化させる。角柱のスパン長は約700mmで両端に円型端板を付けて背面圧力のスパン方向分布を一様にし、流れの二次元性の確保に努めた。タンデム型熱線

Fig.1 Directional sensitivity of the probe

^{*} Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University; Hakozaki Higashi-ku, Fukuoka, 812 Japan

プローブはFig.1に示すように平行線型の熱線プローブに 5μ のメッキタングステン線を二本平行にハンダ付けし, 熱線の間をゲージ接着剤(ポリエスチル系, 使用温度範囲 $-50^{\circ}\sim+180^{\circ}\text{C}$)を利用し 5μ 以下の薄い膜を張る。二本の熱線の各々の出力の差を求めて流速値に換算する。このプローブの z 軸まわりの方向特性はFig.1のようにほぼ $\cos$ 波型に等しいので, 例えば一様流の方向にプローブの x 軸を向ければ u 成分を検出できる。この熱線の応答時定数は, 静止空気中での電氣的な矩形波試験によると, 0.001sec 程度であり, 1辺 150mm の角柱後流の非定常渦による流速変動を測定するために充分短く, 大きく乱れた後流における時間平均的な流速も検出回路にフィルタを入れ精度良く求めることができる。振動角柱の振動振幅 A_H , 振動数 $F_H\text{Hz}$, 振動変位 $Y_H(t)=A_H \cdot \cos 2\pi F_H t$ とあれば, 角柱まわりの (X, Y) 点における流速の u, v 成分は $u(X, Y, t)=U_0(X, Y)+\hat{u} \cos(2\pi F_H t+\phi_u(X, Y))$, $v(X, Y, t)=V_0(X, Y)+\hat{v} \cos(2\pi F_H t+\phi_v(X, Y))$ と表わせる。ここで (U_0, V_0) は時間平均流速, $(\hat{u}, \hat{v})$ は非定常流速の F_H 成分の振幅, ϕ_u, ϕ_v は $\hat{u}, \hat{v}$ の位相である。 $Y_H(t)$ の $2\pi F_H t$ における流線の値は $\psi(X, Y, t)=\int_Y^Y u(X, Y, t) dY - \int_{X'}^{X'} v(X, Y, t) dX$ により求める。 (X', Y') は角柱表面の座標である。時間平均流線 ψ は, (U_0, V_0) から求める。後流中で $U_0=V_0=0$ となる位置 $X_{w.s.}$ を伴流よどみ点(wake stagnation point)とする。

3. 角柱まわりの時間平均流れ

Fig.2には $D/H=1.0$ 角柱まわりの時間平均流線 ψ を角柱の上半面について示す。前縁1で剥離した $\psi=0$ は $X_{w.s.} \approx 1.5$ 付近で閉じている。その内部に大きな循環流が形成されているが, 角柱背後からの逆流によって後縁4では上面に向け局所的に剥離領域が形成され, 後縁付近をさらに狭くしている。

そのため上面近くと背面近くには独立な2個の循環流が形成されている。角柱表面圧力は背面より上面の方がより低く, 上面の後縁4付近は部分的にさらに低圧となる。角柱断面比 D/H は $0.1 \sim 2.0$ の範囲で変え, 背圧係数 C_{pb} 又は抗力係数 C_D の変化をFig.3に示す。良く知られているように C_{pb} は $D/H \approx 0.62$ でカスア状に変化する⁵⁾。このとき, 伴流よどみ点も角柱に接近するが, 角柱前面から測った $X_{w.s.}$ も $D/H \approx 0.62$ でカスア状に接近し, 背面から測った $X_{w.s.}^*$ は $D/H \approx 0.72$ で最も近づき C_{pb} の変化との整合性はあまり良くない。

4. 静止角柱まわりの非定常流れ

一様流中に静止させた角柱まわりの非定常流速を角柱に加わる変動揚力との位相関係において測定し,

Fig.2 Streamline around model $D/H=1.0$, stationary

Fig.3 Wake stagnation points $X_{w.s.}$ of the model

流線を描いた。すなわち揚力 $L(t) = L_0 \cos 2\pi F_s t$ に対し、 $D/H=1.0$ 角柱の場合は Fig.4(a) $2\pi F_s t=0^\circ$ で上向き最大揚力の瞬間で、(b) $2\pi F_s t=30^\circ$ の瞬間の ψ である。Fig.5は $D/H=2.0$ 角柱の $2\pi F_s t=0^\circ$ の場合である。 F_s はカルマン渦の振動数とする。Fig.4(a) $\rightarrow$ (b) への流れの変化は角柱背面近くに循環流が停滞していることには変りないが (a) では前縁1から連続する流線 $\psi=0$ によってその循環流が取り囲まれて $\psi=0$ は背面で閉じている。30進めた (b) になると前縁2から連続する流線 $\psi=0$ が背面下側にせり出した循環流を取り囲んで背面で閉じている。(b) の瞬間では上

Fig.4(a) $2\pi F_s t=0^\circ$

Fig.4(b) $2\pi F_s t=30^\circ$

Fig.4 Unsteady streamline around model; $D/H=1.0$, stationary

Fig.5 Unsteady streamline; $D/H=2.0$ stationary, $2\pi F_s t=0^\circ$

Fig.6 Phase angle of separation of circulatory flow from models

面側で発達した渦が放出されていると考えられる。

D/H を変化させて、このような渦放出の位相角をまとめると Fig.6 のように、断面比 D/H の変化に対して直線的に変化する。Sarpkaya⁶⁾ によると円柱の場合には $\phi = -60^\circ$ である。さらに、 $D/H=1.0$ 角柱まわりの変動流速の振幅の R.M.S 値の等値線を Fig.7(a) 角柱 $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=10^\circ$ について示す。これらの結果はタンDEM型熱線プローブを Fig.1 の Z 軸まわりに回転させ、各 (X, Y) 位置における変動流速の振幅の最大値を抽出して得られる。特に X 軸上では V 成分が非常に大きく、 $\alpha=0^\circ$ では一様流の 70% にまで及ぶ。円柱に関する I 型プローブによる測定結果によると、中心線の両側に分離して最大になる所が現われるがこの $D/H=1.0$ 角柱はそれとは様相を異にしている。(b) $\alpha=10^\circ$ になると最大になる位置は大きく後退し、かつその R.M.S. 値は 70% から 55% へと減少する。(a), (b) とともに、点線は $\psi=0$ の流線を示す。そして角柱の上下表面近くでは剥離剪断層の平均的な位置と考えられる所²⁾、R.M.S. 値が大きくなっている。

Fig.7(a) Isopleth of R.M.S. values of unsteady velocity amplitude; $\alpha=0^\circ$

Fig.7(b) Isopleth of R.M.S. values of unsteady velocity amplitude; $\alpha=10^\circ$

5. 振動角柱まわりの流れ

一様流中で $Y_H(t) = A/H \cdot \cos 2\pi F_1 t$ のように振動中の $D/H = 1.0, 2.0$ 角柱まわりの非定常流線 ψ の 3 例を Fig. 8, 9, 10 に示す。熱線プローブも角柱と一緒に振動させているので ψ は角柱の振動座標から見た流線である。無次元流速は $V = U_\infty / F_1 H$ とする。Fig. 8, 9 は各々静止させた $D/H = 1.0, 2.0$ 角柱の後流に生ずる渦振動数 F_2 と共振動数 F_1 が等しい共振流速 V_{cr} での流れである。角柱後方は Fig. 4, 5 に比較して大きく波打っている。両図共、 $2\pi F_1 t = 120^\circ$ の瞬間の流線であり、揚力を直接測定した結果によると、この瞬間に上向き最大の揚力が作用している。非定常圧力の測定結果は、両図に共通して角柱背面の上で圧力が低く、上面ではさらに低圧を示す。そして角柱背後には、角柱の X 方向長さの半分程度の大まな循環流が形成されている。この循環流の存在によって背面上方と上面の圧力が低下し上への大きな揚力が発生している。この V_{cr} 付近では、わずかに V を変化させると、振動変位に対する循環流の発生の位相が急変するので揚力の位相が急変し、渦励振現象が発生する。Fig. 10 は、 $D/H = 2.0$ 角柱の共振流速 V_{cr} に対し $\frac{1}{2}V_{cr}$ における $2\pi F_1 t = 90^\circ$ の瞬間の流線であり、角柱は最大振動速度で中立点を下向きに移動中である。この時、角柱に対する流れの有効な迎角は $\alpha' = \tan^{-1}(Y_H/U_\infty) = \tan^{-1}(\frac{A}{H} \cdot \frac{1}{V}) \div 3^\circ$ の吹上げ角となるが、この迎角による準定常的な流れではなく、非定常性の増加により大きな位相遅れを呈している。揚力は上面での流れの再付着点以後の圧力回復が著しいため、この瞬間下向き最大の揚力が作用している。Fig. 9 の ψ と比較すると ψ の波長も短くなっている。

6. あとがき

タンデム型熱線プローブによる測定技術を発展させ、広い逆流域を伴う角柱まわりの二次元非定常剥離流れの測定を行い、主として流線を画いて流体力との対応関係を述べた。このような可視化技術は「流れの可視化ハンドブック」のまえがきにも述べられている、将来の発展として非定常流の定量的な計測方法、の一つの有効な手段と考える。

参考文献

- 1) Asanuma et al.; J.S.A.E., Vol. 76, 1970
- 2) 溝田; 土木学会論文報告集, 第278号, 1978年.
- 3) 溝田, 岡島; 土木学会論文報告集, 第312号, 1981年.
- 4) 溝田, 岡島; 同, 1982年(印刷中).
- 5) 中口他; 航空実験, 第18号, 1968年.
- 6) Sarpkaya; ASME, AM, Vol. 46, 1979.
- 7) Nakamura and Mizota; ASCE, EM, Vol. 101, 1975.