

九州大学応用力学研究所 正員 ○中村泰治

正員 溝田武人

1. まえがき

この研究は、二次元矩形柱を例にとり、構造物の揺りフラッタの発生機構を明らかにしようとするものである。今回は、断面比1:2および1:5の模型につき、揺り軸を種々かえた風洞実験を行ない、揺りフラッタにおよぼす揺り軸位置の影響を調べた。同時に流れの観察を行ない、フラッタ発生機構について若干の考察を加えた。

2.  $C_{Ma}$  による安定判別

揺りフラッタに関しては  $C_{Ma}$  による安定判別がある。すなわち、揺り軸まわりの定常モーメント勾配を  $C_{Ma}$  とすると、 $C_{Ma} < 0$  ならば発散、 $C_{Ma} > 0$  ならば減衰といわれる。Farguharson<sup>1)</sup> は、はく離点における有効迎角を用い、上記の判別に対して素朴な準定常的説明を与えた。彼の説明にはにわかには承服し難いものがあるが、一方、判別そのものは実験的に妥当である場合が多いということもこれまで漠然と認められているようである。本研究では  $C_{Ma}$  による安定判別の当否をまず検討する。実験結果を述べる前に、簡単な考察より得られる判別の適用限界を指摘しておく。それは次の2点である。1) 高風速(無次元)に限ること。2) 揺り軸位置が物体近傍に限ること。すなわち、実用上は発振風速を推定することが大切であるが、発振風速は多くうねとの共振風速付近であり<sup>2)</sup>、一般にこのような低風速では、うねを含め種々の二次的非常効果が大きくなり、 $C_{Ma}$  による判別は適用できない。低風速で発振し高風速で減衰する(またはその逆)例もある。<sup>3)</sup> 第2に、揺り軸を物体の前後面いづれでも遠く離すと、振動は並進運動に近くなり、振動の安定性は「ギャロッピング」の判別( $C_{L\alpha} + C_D$  の符号)により定まり、 $C_{Ma}$  の符号と無関係になる。

3. 揺りフラッタに対する揺り軸位置の影響

断面比1:2および1:5の矩形断面模型につき風洞実験を行ない、揺り軸位置を  $x_p = -1.5 \sim 2.5$  (前縁は  $x_p = -1$  および1)までかえ、空力揺りモーメントの減衰項  $k_a$  を自由振動法により測定する。別に測定した  $C_{Ma}$  と振動実験で求めた  $k_a$  とを比較し、判別の検討を行なう。 $k_a$  の値は、単位幅当りの空力モーメントを  $M$  とし次式で算出する。

$$M = M_0 \theta + M_0 \dot{\theta}$$

 $\rho$ : 空気密度

 $S$ : 対数減衰率

$$k_a = -\frac{M_0}{\rho f b^2} = \frac{2I}{\rho b^2} \delta_a$$

 $b$ : 半弦長

 $S_0$ : 静止空気中の対数減衰率

 $f$ : 振動数

$$\delta_a = \delta - \delta_0$$

 $I$ : 単位幅当りの慣性モーメント

使用した風洞は高さ×幅 = 3 m × 0.7 m。模型は合板製、弦長  $d$  はともに 0.15 m、高さ  $h$  がそれぞれ 0.075 m と 0.03 m、幅が 0.6 m、端板(直径 0.5 m および 0.25 m)付きである。模型は測定部中央で水平(迎角 0 度)に置かれ、両側壁外で十字板ばねと補助コイルばねで支持された。ばね系剛性の直線性は  $\pm 25^\circ$  の範囲で良好であった。揺り角は十字板ばねにストレン・ゲージをはり検出された。模

型の固有振動数は約  $f = 0.3 \sim 1.2 \text{ Hz}$ , 風速は約  $V = 1 \sim 10 \text{ m/s}$  ( $R = 0.1 \sim 1 \times 10^5$ ) であった。なお、振動発散の激しい場合には、電磁ダンパーを使用して発散率を制御した。その場合、静止空気中の振動減衰率  $\delta_0$  が、電磁ダンパーによる分だけ増すことは言うまでもない。

図1(a), (b)に1:2および1:5モデルの静的3分力特性を示す。矩形断面の空力特性は断面比  $b/d$  により異なる。前者は、迎角  $0^\circ$  で、前縁まはく離れた *shear layer* が上下面で再付着がない例である。後者は、*shear layer* が上下面で再付着し、はく離バブルの生じた典型型である。いずれも  $\alpha = 0^\circ$  付近で復元モーメントが発生する。図に示した  $x_p = 0$  のモーメント勾配を  $C_{M\alpha 0}$  とすれば、任意の軸位置  $x_p$  におけるモーメント勾配  $C_{M\alpha}$  は

$$C_{M\alpha} = C_{M\alpha 0} + (C_{L\alpha} + C_D) x_p / 2$$

により求められる。

図2にオシログラフの記録例、図3に、リミット・サイクルの振幅  $\theta_{max}$  の無次元風速  $\bar{V} (= \frac{V}{V_b})$  に対する変化を示す。はく離流フラッタの特徴として、安定なリミット・サイクル (●印) の他に不安定なリミット・サイクルが存在する場合がある。

図中、これを×印で示す。

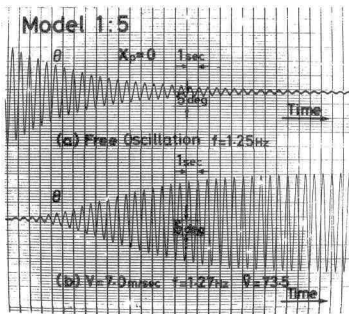


図2 オシログラフの記録

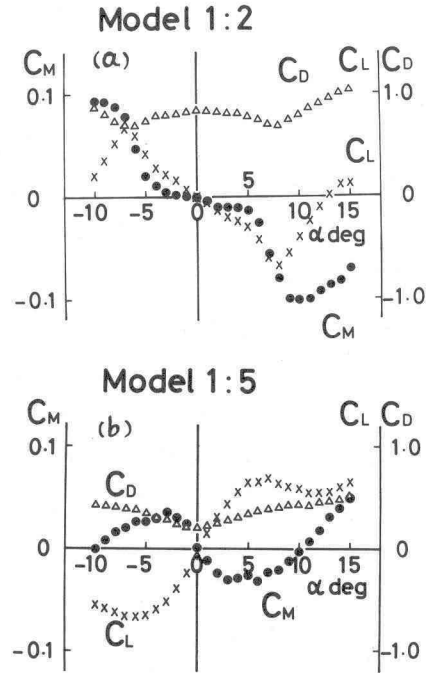


図1 3分力特性

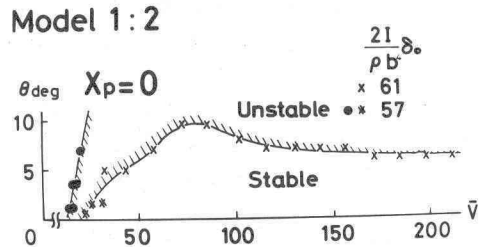
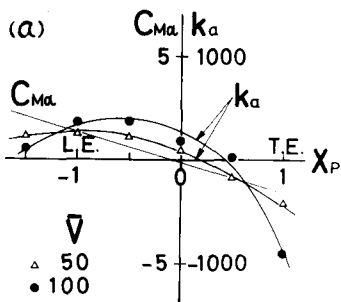


図3 リミット・サイクルの振幅

図4(a), (b)は、 $k_a$ の振り軸位置  $x_p$  に対する変化である。ただし、 $\bar{V}$ の値は充分大きく、 $\bar{V} = 50$ および  $100$  である。 $k_a$ の値は一般に振幅によって変化するが、図に示したものは振幅  $\pm 2^\circ$  における値である。微小振動を論ずるためには、この基準振幅はできるだけ小さい方が望ましい。しかし、測定精度上、これには限度がある。振幅  $2^\circ$  を選んだ理由は、 $\bar{V} = 50 \sim 100$  において、例外を除いて、 $2^\circ$  以下に不安定なリミット・サイクルがなかったことによる。すなわち、 $k_a > 0$  であれば振動は減衰するかもしくは  $2^\circ$  以下の安定なリミット・サイクルをもつ。また、 $k_a < 0$  であれば、振動は自然に発散し、安定なリミット・サイクルは  $2^\circ$  以上である。

Model 1:2



Model 1:5

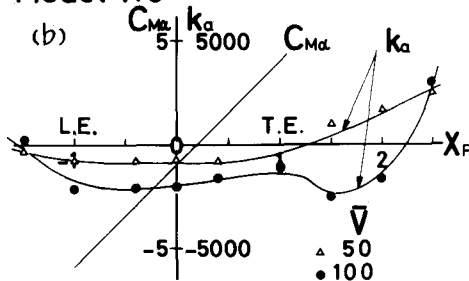


図4 操りフラッタに対する軸位置の影響

1:2断面の場合(図4(a)),  $k_a$ の操り軸位置に対する変化は $V=50$ でも $100$ でも傾向は変わらず放物型である。曲線は上方に凸であり, 前縁 $x_p=-1$ を含むある範囲 $\Delta$ のみ $k_a > 0$ である。 $|x_p| \gg 1$ となれば $k_a$ の値は負となり, 振動が発散する傾向がみえる。この傾向は, 操り軸の物体を離れると並進運動に近くなるという既述の予想と一致する。(1:2断面では負の揚力傾斜をもつために並進運動は不安定)一方, 1:5断面では(図4(b)), 実験したほとんどの軸位置で $k_a < 0$ であり, 振動は発散した。一般に,  $k_a$ の値に対する振幅の影響は,  $2^\circ$ 以下において, 1:2断面では比較的小さく, 1:5断面では大きい。このことは静特性図1(a), (b)とも対応する。図4(b)において,  $V=100$ ,  $x_p=1 \sim 2$ における $k_a$ の異常は,  $2^\circ$ 以下に不安定なリミット・サイクルをもつためらしく思われる。

いま, 物体近傍に操り軸がある場合に限り,  $C_{Ma}$ (図4(a), (b)に示す)の符号と振動の安定性との関係を調べると, 1:2断面の場合は一応傾向的に一致するが, 1:5断面については両者はほとんど相関がないことがわかる。このような結果から考え,  $C_{Ma}$ による操りフラッタの判別はあまり広い適用性をもたないといえる。

4. 操りフラッタの発生機構に関する一考察と流れの観察

翼の失速フラッタに関する研究は, ヘリコプターの問題に関連して最近活発であるが, 構造物の操りフラッタに関する研究は意外に少ない<sup>1), 4)-6)</sup>。これらの研究の多くは準定常近似によっている。

準定常近似

いま, 流れに平行に置かれた細長い物体が中央弦長を軸にして正弦運動をしているものとし, 物体の角速度 $\theta^\circ$ に基づく空力モーメントを求めるものとする。図5(a)で,  $\theta=0$ として流れに垂直な方向の運動速度 $v$ を考えると,  $v = -x\dot{\theta}$ となる。一方, 定常流でこの吹上げ速度をもつ物体を想定すれば, 図5(b)のように,  $\beta = -\frac{b\dot{\theta}}{v}$ をもつものが対応する。(ダイナミック・キャンバー)よって,  $\theta$ 運動を有する物体(図5(a))に作用する非定常空力モーメントは, 図5(b)の物体に作用する定常モーメントに等しいと仮定する。いわゆる準定常理論といわれるものはこれであり, おおむね図5(b)の定常モーメントの推定を指す。

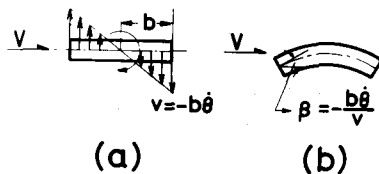


図5 キャンバー効果

流れの遅れ

さて, 操りのフラッタは果して, 前述の準定常理論でおおむね説明し得るものだろうか? 図4にお

いて、 $|\alpha_p| \gg 1$  の場合は、運動は事実上並進運動となり、確かに準定常理論によってこれを予測することができると。しかし、物体近傍に振り軸がある場合は必ずしもそうはならないであろう。

非定常流を考えると、上に述べたキャンバー効果の他、もう一つの重要な現象に注目する必要がある。それは対流効果に基づく流れの遅れである。すなわち、物体運動で生じたはく離流の変化は流れによって後方へ流される。そしてこのはく離流の変動が物体のまわりの流れに大きい影響をおよぼす。このため、物体のまわりの流れは、準定常理論で仮定されるものと異なり、その時々刻々が定常流と異なってくるのである。

流れの遅れと振りフラッタの発生

流れの遅れを無視すると振りフラッタの説明できない例として、 $\alpha_p = -1$ 、すなわち、前縁に振り軸がある場合を考察する。断面比1:5の場合を例にとる。 $\theta = 0$ ,  $\dot{\theta} > 0$  の状態を図6によって考える。準定常近似によれば、図6(b)が対応する。すなわち、キャンバー効果により、上面のバブルは拡大し、下面のバブルは縮小する。再付着点付近で強い圧力上昇があることを考慮

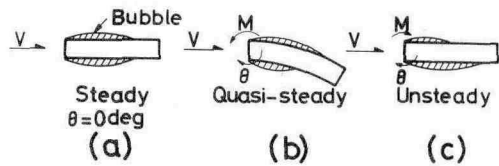


図6 準定常効果と流れの遅れ

すれば、前縁まわりに反時計まわりのモーメントが作用するであろう。振動物体ではこれは減衰モーメントの発生となる。図4(b)の実験結果によれば、 $\alpha_p = -1$  の振動は発散するもので、このことは明らかに矛盾である。一方、流れの遅れを考えると、図6(c)に示すパターンが期待され、したがって負減衰モーメントとなり、実験結果と一致する。1:2断面についても同様な推論が可能である。以上の推論を確かめるために、煙による流れの観察を行った。実験結果は図7

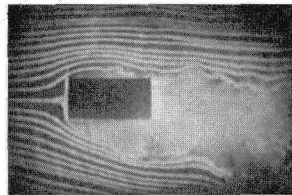


図7

前縁まわりに振動する1:2模型、 $\bar{V} = 40$ 、振幅 $10^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、時計まわり

のとく、流れは物体運動に対して遅れており、上記推論を支持するように見える。振りの1自由度フラッタにおいて流れの遅れが重要な役割りを演ずることは、翼の場合すでに教科書に記されている。はく離流においても同様な事情が生じているものと思われる。ただし、前縁以外に振り軸がある場合、例えば $\alpha_p = 0$  については今の議論はまだ不十分である。そのような場合、流れの遅れと準定常効果の両者をより定量的に考察する必要があるであろう。この点については今後の課題としている。

文献 1) Farquharson, F.B. Aerodynamic stability of suspension bridges, Part 1, 1943, p. 33  
 2) Otsuki, Y., Washizu, K. and others, Proc. 3rd Int. Sym. on Wind Effects on Buildings & Structures, Tokyo, 1972, p. 891 3) 中村, 溝田, 本講演会, I-81, 1972 4) Steinman, D.B, Trans. ASCE, Vol. 115, 1950 5) 宮田, 岡内, 土木学会論文報告集, 第173号, 1970 6) Wardlaw, R.L. Int. Sem. on Wind Effects on Buildings & Structures, Canada, Vol. I, 1967, p. 739  
 7) Bisplinghoff, R.L. and others, Aeroelasticity, 1955