構 造 物 の フ ラ ッ タ *

On the Flutter of Buildings and Structures

中 村 泰 治 **
Yasuharu NAKAMURA

1. は し が き

空気力あるいは一般に流体力の連成によって生ずる弾性構造物の自動振動がフラッタである。構造物といえば範囲は広いが、ここでは主として地上構造物の風によるフラッタに話を限定する*。

近年、吊り橋、高層ビル等の土木建築構造物の長大化、軽量化の傾向、および溶接技術等の工法進歩にともない、これら構造物の可撓性の増大および構造減衰の低下の傾向が著しい。地上構造物は航空機ほどフレキシブルでもないが、上記の傾向が進めば航空機と同様にフラッタの発生が予想されるわけである。事実、1940年11月におけるアメリカ Tacoma Narrows 橋の風による崩壊はその不幸な例であった。

地上構造物の風による応答の特徴を列挙するとつぎのようになる。

1) はく離流であること。地上構造物の形はさまざままで非流線型であるので、まわりの流れはつねにはく離している。すなわち、フラッタははく離流フラッタである。

2) レイノルズ数が大きいこと。たとえば、強風時の鋼製煙突のレイノルズ数は、直径 5 m, 風速 20 m/s として $R=7 \times 10^6$ に達する。

3) 自然風の特徴が影響すること。地上風はスケールの大きい乱流境界層 (大気境界層ともいう、厚さ 500~1,000 m) 内の流れである。すなわち、高層ビル、長大吊り橋等の地上構造物はこの大気境界層に埋没しているので、平均風速は構造物の高さとともに増大し、また、風向 風速とも、時間的空間的に決して一様でなく、いわゆる息づきがある。

以上の特徴のため、構造物のフラッタについては航空機における非定常翼理論⁹⁾のようなまとまった理論はなく、われわれの知識はきわめて不完全な模型実験の結果に頼っているのが現状である。設計の立場からすれば、自然風に曝された構造物の動的挙動を求めることが最終的課題であるが、そのゴールははるか遠く、ここでは、主として一様気流中の風洞実験より推測される地上構造物の動的応答、とくにフラッタに焦

点を絞り解説することにしたい。なお、吊り橋の耐風性に関するすぐれた講座が数年前の本誌に掲載されている⁹⁾。本稿ではそれを参照しつつなるべく重複しない形で問題を取り扱ってみたい。

2. 付 加 空 気 力

弾性構造物に風が作用したときの応答を模式的にかけば第1図のようになる。構造物の変位にともなうて生ずる付加空気力の作用により動的循環現象が発散すれば、これがフラッタにはかならない。以下、この付加空気力について簡単に記す。

第1図 風による構造物の応答

いま、二次元構造物が速度 V の流れにおかれ、流れに直角方向に $y=y_0 e^{i\omega t}$ (下向き正) の振動を行なうとき、構造物の単位幅あたりに作用する付加揚力 (上向き正) を $F(y)$ とする。力を変位と速度に同相な二成分に分解すれば、

$$F(y) = F_y y + F_{\dot{y}} \dot{y} \quad (1)$$

とかける。 y , F_y , $F_{\dot{y}}$ をそれぞれ無次元化して、

$$\eta = \frac{y}{h}, \quad h_a = \frac{F_y}{\rho f^2 h^2}, \quad k_a = \frac{F_{\dot{y}}}{\rho f h^2} \quad (2)$$

とかく¹⁰⁾。ここに、 h は構造物の代表長、 f 振動数、 ρ は空気密度である。

空気力 h_a , k_a は構造物の形によるほか、無次元風速 $\bar{V} (= V/fh)$ 、振動振幅 η_0 およびレイノルズ数の関数である。いま、質量-ばね系について、自由振動法により空気力 h_a , k_a を求めると、

$$h_a = \frac{4\pi^2 m}{\rho h^2} \left(1 - \frac{f_0^2}{f^2} \right), \quad (3)$$

$$k_a = \frac{2m}{\rho h^2} \delta_a, \quad (4)$$

* 航空宇宙関係では、発射時のロケット等飛しょう体において、ここで述べるものと同じ風によるフラッタを経験することがあり関心をよんでいる⁷⁾。

* 昭和 47 年 12 月 28 日原稿受理

** 九州大学応用力学研究所

$$\delta_a = \delta - \delta_0 \quad (5)$$

となる。 m は単位幅あたりの構造物の質量、 f_0 、固有振動数、 δ 、流れにおける系の対数減衰率、 δ_0 は静止空気中の系の対数減衰率である。

$\delta_a < 0$ であれば、空気力は負減衰力となり運動を助長する方向に働く。風による構造物の振動では、質量比 $\rho h^2/2m$ が小さいので構造物の振動数はほとんど変化せず、多くの場合、 $f=f_0$ 、すなわち $h_a=0$ としてよい。

はく離流フラッタでは、振動空気力が振動振幅 η_0 に依存する場合が多い。一般に、揚力 $F(y)$ は周期関数であるが歪んでおり、(1)は近似的にその基本波成分を示しているにすぎない。また、安定なリミット・サイクルのほか、しばしば不安定なリミット・サイクルが現われるのははく離流フラッタの特徴である。 $\eta < \eta_0$ で $\delta < 0$ 、 $\eta \geq \eta_0$ で $\delta \geq 0$ であれば、 η_0 は安定なリミット・サイクルの振幅を示し、逆に $\eta < \eta_0$ で $\delta > 0$ 、 $\eta \geq \eta_0$ で $\delta \leq 0$ であれば、 η_0 は不安定なリミット・サイクルの振幅を示す。

3. うず励振

構造物は流線型でないで、流れの中におかれると境界層が表面ではがれ背後にカルマンうず列¹¹⁾が形成される。第2図に KÁRMÁN によって求められたうず配列の模式を示す。図中、 V_w はうずの流出速度である。うずが上下のはく離点より交互に放出される振動

第2図 構造物の背後に生ずるカルマンうず列

数を f とすれば、ストローハル数 $S = fD/V$ は構造物の形ならびにレイノルズ数により定まる定数である。レイノルズ数の影響がなければ、うずの放出振動数は風速に比例して増加する。

うず列は構造物に対して、振動数 f の変動揚力ならびに変動ピッチング・モーメント、振動数 $2f$ の変動抗力を作用する。うず振動数 f が、構造物の流れに直角方向の固有振動数に一致する風速を V_{cr} とすると、この風速付近で構造物は流れに直角方向の振動を励起される。同様に横振動あるいは流れ方向の振動も発生し得る。これらがうず励振にはかならない。流れ方向の振動は、固有振動数が $2f$ に近いとき生ずるものであるが、普通、変動抗力は変動揚力に比して一桁程度小さく、地上構造物では流れ方向のみの励振は稀である。

構造物断面の代表例として、第3図および第4図に、二次元矩形断面柱および円柱のストローハル数の

第3図 二次元矩形断面柱のストローハル数
 $R=2 \sim 6 \times 10^4$ (文献 12)

第4図 二次元円柱の抵抗係数とストローハル数
(文献 13)

測定結果を示す^{12), 13)}。前述のように、ストローハル数は、物体の形を与えると一般にレイノルズ数の関数となるが、多くの構造物でははく離点が鋭い角部に固定され、レイノルズ数の影響は比較的小さいと考えられている。しかし、円筒状構造物では滑らかな表面で境界層がはく離するので、ストローハル数はレイノルズ数により複雑な変化をする。とくに、 $R=3 \times 10^5$ 付近を境にしてはく離点における境界層が層流より乱流に遷移し、抵抗係数とかストローハル数は大きい変化を受ける。

さて、PARKINSON¹⁴⁾による二次元ばね支持円柱の

第5図 二次元ばね支持円柱のうず励振 (文献 14)

実験を例にとり、うず励振における構造物の応答とそれともなう流れの変化について説明したい。(第5図) 励振は、限界風速 $V_{cr}(=f_n d/S)$ にきわめて近いがそれより低い風速において、うなりをとまう小振幅振動ではじまる。その振動数は、円柱固有振動数 f_n と静止円柱に対するうず振動数 f_{v0} の近接した二つの振動数よりなる。

$V=V_{cr}$ をすぎると振動振幅は急激に大きくなるが、その最大振幅は $V=V_{cr}$ になく、この例では $V=1.3V_{cr}$ であった。さらに風速を上げると振幅は減りはじめ、 $V=1.7V_{cr}$ で励振は消えた。この間、円柱振動数 f_c はほぼ f_n に近い値をとる。定常振動の認められる上記風速域以外では、円柱は $f_c=f_{v0}$ の微小不規則振動(通常、 $\eta_0 \sim 0.01$ 以下)を呈するのみである。

一方、円柱振動中に後流の速度変動を熱線流速計で観察すれば、うず振動数 f_{v0} は静止時の振動数 f_{v0} に必ずしも等しくないことがわかる。励振の初期、すなわち、円柱振動振幅の小さいときは $f_{v0}=f_{v0}(<f_c)$ であるが、風速がまして円柱の振動振幅がますます急に $f_{v0}=f_c$ となる。すなわち、円柱の振動がうずの発生を制御するようになる。この現象は、うず振動数の円柱振動数への同期あるいは引き込み現象 (frequency locking) と呼ばれている。同期現象は最大応答を少し越えた風速まで続く。さらに風速を上げると、まだか

りの振幅で円柱が振動しているにもかかわらず、うず振動数 f_{v0} は突然、 f_{v0} にもどり (unlock), その後、静止円柱の場合と変わらない変化を示す。このように、円柱振動のうず発生制御はきわめて非線型である。また、円柱振動により、スパン方向における速度変動の相関が著しく増大することもうず励振の大きな特徴の一つである¹⁵⁾。これらの流れの変化については、強制振動円柱の場合により明瞭に認めることができる^{15)~17)}。

振動学的にいえば、カルマンうず列は一種の流体振動子 (fluid oscillator) である。うず列の流体振動子としての種々興味ある特性は、BISHOP¹⁸⁾ およびその後の多くの研究によって示された。たとえば第6図(a)および(b)は、加振円柱における振動揚力の測定結果¹⁹⁾ であるが、揚力の大きさは円柱振動振幅ならびに加振振動数によって変化する。また、揚力の円柱振動に対する位相は、加振振動数をかえて行くとほぼ 180° 急変する。流体振動子が“非線型”振動子であることの例証として、円柱振動に対する揚・抗力応答のヒステレシスや分数調波の現象を挙げることができる¹⁸⁾。

うず励振をカルマンうず列による構造物の強制振

(a) 揚力の大きさ

(b) 揚力の位相

第6図 加振円柱における振動揚力 (文献 19)

動, 言い換えると, 一種の共振現象として説明するのは古くからある一つの立場である²⁰⁾。しかし, 同期現象あるいは第6図(a)に示される実験事実等により, 振動源としてのうずが物体振動に制御されていることは明らかである。したがって, うず励振をうずによる構造物の強制振動とみることが難しく, 物体振動系に生ずる一種の自励振動とみなす方がより適切である。ただし通常のフラッタでは, 第1図に示すごとく振動空気力は付加空気力のみであり, 物体が静止するかぎり振動空気力は生じ得ない。これに対し, うず励振では静止中でもすでに振動空気力が作用することに特徴があるので, 単に第1図のような1自由度フラッタとして取り扱うことはできない。筆者は, 第7図のよう

第7図 物体-流体振動系の連成自励振動としてのうず励振 (文献 21)

に, うず励振を物体-流体振動系の連成自励振動であると考えている²¹⁾。ただし, 流体振動子を厳密に定式化することはきわめて難しく, 現在, いくつかの単純なモデルが提案されているにすぎない²²⁾。最近, 後流の Helmholtz 不安定に基づいた振動円柱の理論があり注目に値する²³⁾。

構造物の風による振動の中で, このうず励振はもっともしばしば経験されるところであり, 以前より知られていたけれども, 最近の構造物の多様化, 長大化の傾向とともにますます注目されるにいたった。その例は枚挙にいとまがないが, 代表的なものはやはり煙突の振動であろう。最近の鋼製煙突は直径 5 m, その高さは 150~250 m に達するものがある。何本かの煙突を束ねた集合型のものが振動を起こすことは稀であるが, 自立型の単独煙突の振動例は多い。第1表は振動する煙突の調査例である²⁴⁾。振動煙突のまわりの流れ

は, 振動の影響のほか, レイノルズ数 ($R=10^6 \sim 10^7$), 高さ-直径比, 先細比, 自然風の特性等が大きく影響すると考えられ, 現在なお十分な理解が得られているといい難い^{10), 25)}。

鋼製煙突の円筒殻の肉厚が薄いと, うずの放出により半径方向の振動が生ずることがある。これをオーバリング (ovaling)²⁶⁾とっている。オーバリングは, 煙突先端部の補強により簡単に止めることができる²⁶⁾。橋梁におけるうず励振も重要である。Tacoma Narrows 橋における直接の落橋原因は後述する振りフラッタと考えられるが, 破壊以前にしばしば観測された上下振動はうず励振と考えられる²⁷⁾。最近, 箱型断面をもつ斜長橋のうず励振が注目されている²⁸⁾。また, 橋梁吊材, 鉄塔の補剛材に最近パイプ材が用いられることが多いが, これら部材が 4~5 m/s の微風でうず励振を生じ, ガセット・プレートの疲労破壊を招いた事故例が報告されている²⁹⁾。なお, 風による地上構造物では稀であるが, 海洋構造物では流体力が大きいため, 流れ方向のうず励振が生ずることがあることを付記する^{30), 31)}。

振動を防止するには種々のダンパーを取り付けることが多いが, 煙突では先端部表面に螺旋状の鉢巻 (helical strakes) を施すことがしばしば有効である³²⁾。(第8図) また, 穴あき円筒の帽子を先端にかぶせたり (shrouded cylinder), 同じく先端に放射状のひれ (fin) を取り付けたりして同様な効果を得ることができる。ただし, 同時に抵抗が増加し転倒モーメントの増大をもたらすので注意が必要である。第9図は, 斜長橋において, 断面端部の成形によりはく離を弱め, うず励振を弱めるに成功した例である²⁸⁾。

4. ギャロッピング

冬季, 山中の高圧送電線に冰雪が付着し断面がいびつになると, 鉄塔間の送電線が風により長周期, 大振幅の振動を起こすことが珍しくない。通常, 流れに直角方向の振動が卓越する。これがギャロッピングである。以下に述べるように, ギャロッピングは構造物のある種の静的空力特性によって生ずるもので, 後者を知れば準定常理論を利用してこれを予知することがで

第1表 振動煙突の調査例 (文献 24)

Stack	Height $H(m)$	Diameter of the top $D(m)$	Maximum measured amplitude $\delta(cm)$	Measured frequency $f(sec^{-1})$	Wind velocity at the top $V(m/s)$	$2\delta/D$	S	R
Pittsburgh	95	2.6	76.0	0.55	7.6	0.58	0.19	1.3×10^6
姫路火力2期	76	3.5	45.0	1.00	13~18	0.26	0.19	4.3×10^6
千葉火力1期	90	4.368	25.0	0.68	22~25	0.16	0.12	7.5×10^6
Moss Landing	68	3.4	40.5	1.20	21.9	0.24	0.19	5.5×10^6
Contra Costa	61	3.3	7.6	0.71	13.4	0.046	0.18	2.9×10^6

第8図 Helical strakes による煙突のうず励振の防止例 (文献 10)

第9図 斜長橋におけるうず励振の防止 (文献 28)

きる。構造物のフラッタの中で、ギャロッピングは理論的に予測可能な唯一の例であるといえる。

第10図のように、風速 V の一様流におかれた二次元構造物が速度 $\dot{y}$ で流れに垂直に運動すると、構造物には相対迎角 $\tan \alpha = \dot{y}/V$ 、相対風速 V_{rel} の空気が作用する。簡単のため、振動の各瞬間において流れは相対迎角で与えられる定常流に等しいと仮定すると、 y 方向の空気力 $-F(y)$ (単位幅あたり、 $F(y)$ は上向き正) は、

$$F(y) = \frac{1}{2} \rho V^2 h C_{Fy} \sec^2 \alpha \quad (6)$$

で表わされる。 C_{Fy} は揚、抗力係数より、

$$C_{Fy} = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (7)$$

第10図 流れに直角に振動する構造物

と求めることができる。微小変位を仮定すれば、 $\alpha = \dot{y}/V$ 、 $C_L = dC_L/d\alpha \cdot \alpha$ として、

$$\begin{aligned} C_{Fy} &= \frac{dC_L}{d\alpha} \alpha + C_D \alpha \\ &= \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \frac{\dot{y}}{V} \end{aligned} \quad (8)$$

(8) で表わされる空気力は2節で述べた付加空気力であり、この場合、ダンピングとして構造物の運動を制御することになる。もし、

$$\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D < 0 \quad (9)$$

であれば、空気力は負減衰力となり運動を助長する。これがギャロッピングにほかならない。(9) は DEN HARTOG の基準と呼ばれている³³⁾。 $dC_L/d\alpha + C_D = -A_1$ とかき、構造物の対数減衰率を δ_0 、質量比を $n = \rho h^2/2m$ とすれば、

$$\bar{V}_0 = \frac{2\delta_0}{nA_1} \quad (10)$$

で微小振動における無次元発振風速が与えられる。

第11図は正方形断面柱の3分力特性であるが、 $\alpha = 0^\circ$ において負の揚力傾斜を有することに特徴がある。このため、 C_{Fy} を求めると $dC_{Fy}/d\alpha < 0$ となり(9)を満足する。すなわち、正方形断面柱はギャロッピングを生ずる可能性がある。負の揚力傾斜は角部における流れのはく離と再付着に関係している。少し正の迎角をつけた状態では、風上の角(図中1および2)におけるはく離流に異常が認められ、剪断層の曲率は角1よりも角2における方が大きい。このため、側面の圧力は下面の方が上面より低い。これが $dC_{Fy}/d\alpha < 0$ の原因であると考えられる。迎角が大きくなると、角3で流れの再付着を生じ、 $dC_{Fy}/d\alpha$ の符号が逆転する。このような特性は正方形断面に限らず、その他の矩形断面を含む多くの構造物断面にみられる。

さて、(8)においては簡単のため線型近似を行なったが、一般に、静特性より(6)の $C_{Fy} \sec^2 \alpha$ をまとめて $\tan \alpha = \dot{y}/V$ の巾級数で表せば、系の運動方程式は

第11図 正方形断面柱の3分力特性, $R=2 \times 10^4$

非線型ダンピングの作用する1自由度振動方程式となり, KRYLOV-BOGOLIUBOVの方法を用いて系の安定性あるいはリミット・サイクルの振幅等を求めることができる。詳細は文献(34), (35)を参照されたい。正方形断面柱に対する実験結果を第12図に示すが, 理論と実験との一致はきわめてよい。ただし, 第12図の実験では系の構造減衰がきわめて大きく, ギャロッピングの発生は無次元風速の大きい範囲に限られている。後述のように, 無次元風速が低くなると準定常理論は破綻する。

静特性 $C_F \gamma$ の形によりギャロッピングを分類すれば第13図のようになる。第13図(b)のように, 静特性に変曲点があれば不安定なリミット・サイクル(点

線)をもつ。ここで, (9)で示したDEN HARTOGの基準は, ギャロッピング発生の十分条件であるが必要条件ではないことをことわっておきたい。たとえば第13図(d)では微小振幅における系は安定であるが, 突風などの外乱により, 振動振幅が不安定なリミット・サイクルの振幅を越えると, 大振幅のギャロッピングに移行することがあり得るわけである。注目すべきは, 主流の乱れによって平均流が大きい影響をうけることである³⁵⁾。すなわち, 乱れにより再付着の促進等が行なわれ静特性 $C_F \gamma \sim \alpha$ が変化する場合がある。この場合でも, 乱れた気流中の静特性が実験的に求められさえすれば, 滑らかな流れの場合と同程度にギャロッピングを予測することができる。ただし, 乱れにより流れは必ずしも安定化せず, 滑らかな流れのとき第13図(d)であったものが, 乱れの存在により同図(a)に移行することもあるので注意を要する。

ところで, 準定常理論では, 振動の各瞬間に相対迎角に対応する定常流が実現されることを仮定している。この仮定は, 無次元風速の高い場合(ゆっくりした振動)に満足されるが, 風速が低くなると(早い振動)流れの遅れが効いてくるので必ずしも満足されなくなる。この限界を理論的に定めることは現在できない。しかし, 実験結果によれば, 準定常理論はかなり低い風速まで適用することができ, その限界はむしろ励振の限界風速 $\bar{V}_{cr}$ との関係によって定まるようである³⁶⁾。一例によれば, 線型準定常理論(8)が妥当する範囲は, ほぼ $\bar{V} > 2\bar{V}_{cr}$ であった³⁶⁾。減衰の小さい系では, 風速を上げるとまず励振が生じ, そのままギャロッピングに移行することが多い^{10), 37)}。

第12図 正方形断面柱のギャロッピング (文献 34)

第 14 図 静特性とギャロッピングの関係 (文献 37)

実例としては既に述べた送電線の振動がある³⁸⁾。ただし、振動の発生は必ずしも氷雪によらない。高圧送電線を何本かずつ振って束ねた結果、断面形状が凹凸になり、ギャロッピングに悩まされた例がある³⁹⁾。この場合、表面をテープで被覆し凹凸を除いて振動を止めることができた。建物、橋梁でも、静特性が不安定を示し発振の可能性をもつ場合があるが、未だその例を聞かない。将来、これら構造物の長大化の傾向がさらにすすめば、固有振動数の低下にともない発振風速が設計風速に近づいてくるであろう。また、構造減衰が大きく発振を生じていない場合でも、負減衰空気の存在により系の減衰係数が低下するので注意しなければならない。この結果、たとえば風の乱れ等による不規則振動の振動振幅がまし好しくない影響を与える。そのほか、ランガー橋吊り材ではギャロッピングと考えられる事故例が散見する²⁹⁾。

5. 振りフラッタ

Tacoma Narrows 橋の破壊は振りフラッタによるものと思われる。模型実験によれば、振りフラッタはほとんどすべての構造物に共通して発生し、しかも、多くの場合、風速の増大とともに振動振幅は急激にまじきわめて危険な現象である。それにもかかわらず、振りフラッタについては発生の機構も含めて多くのことが不明である。現在、その予知は風洞実験に頼る以外に今後重要な研究課題と考えられる。振りフラッタでは流れの遅れの効果が大きく、ギャロッピングと異なり準定常理論に頼ることができない。以下、それを簡単に説明したい⁴⁰⁾。

二次元構造物が流れの中である軸まわりに振り振動 $\theta(t)$ をしている場合を考えよう。準定常流を仮定すると、構造物に作用する空力モーメント $\bar{M}(\theta)$ は、構造物の現在の姿勢 θ 、ならびにその速度 $\dot{\theta}$ 、加速度

* ここでいう流れの遅れとは、主としてはく離流の対流効果による遅れを指し、振動翼理論における流出渦 (shed vortex) による遅れと同じものである。

θ , ...によって定まることになる。ゆっくりした単振動 $\theta = \theta_0 e^{i\omega t}$ を対象として $\dot{\theta}$ 以下の影響を無視すると,

$$\bar{M}(\theta) = \bar{M}_0 \dot{\theta} + \bar{M} \ddot{\theta} \quad (11)$$

とかける。しかし、流れの遅れ*を考慮するとモーメントは(11)で表わすことはできず、運動 θ と $\dot{\theta}$ に対してある周波数特性をもつであろう。これらをそれぞれ、 $C_\theta e^{i\varphi_\theta}$, $C_{\dot{\theta}} e^{i\varphi_{\dot{\theta}}}$ とすると、非定常流におけるモーメント $M(\theta)$ は,

$$\begin{aligned} M(\theta) &= M_0 \theta + M \dot{\theta} \\ &= C_\theta e^{i\varphi_\theta} \bar{M}_0 \theta + C_{\dot{\theta}} e^{i\varphi_{\dot{\theta}}} \bar{M} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。ゆっくりした振動では、 $C_\theta = C_{\dot{\theta}} = 1$, $|\varphi_\theta|$, $|\varphi_{\dot{\theta}}| \ll 1$ としてよいから、(12)の $M \dot{\theta}$ は

$$\omega M \dot{\theta} = \omega \bar{M} \dot{\theta} + \sin \varphi_\theta \bar{M}_0 \quad (13)$$

とかける。すなわち、非定常空力ダンピングには第1項の準定常流的成分のほか、第2項の流れの遅れによる成分が加わることになる。非定常はく離流の理論がないので、(13)の右辺第1項および第2項を独立に評価することはできないが、重要なことは、ゆっくりした振動においても第2項は無視できず、むしろ場合によっては、第2項が優勢とみられることである。この点、ギャロッピングと対照的である。ギャロッピングでは、(11)に対応して $\bar{F}(y) = \bar{F}_y y + \bar{F}_{\dot{y}} \dot{y}$ とかくと、 $\bar{F}_y = 0$, よって、流れの遅れは二次の効果しかもたらず、準定常理論がよい近似を与える。

第14図は、種々の矩形断面柱における振りフラッタの発生領域を示す³⁷⁾。図中、低速において狭い局部的発振を示すほか、振動はうず励振ではじまり、風速

第14図 種々の矩形断面柱の振りフラッタ発生領域 (文献 37)

第15図 Tacoma Narrows 橋全橋空力弾性模型による実験結果 (文献 27) 図中、たとえば 1-NV は一節点上下振動、1-NT は一節点振り振動をそれぞれ示す

の増加とともにそのまま振りフラッタに移行している場合が多い。この点、ギャロッピングと同様である。

第 15 図は Tacoma Narrows 橋の全橋空力弾性模型による実験結果を示す²⁷⁾。この結果は、落橋時の状況をきわめて忠実に再現したと信じられているが、振りモードの発散によって橋の破壊が生じたことがわかる。以来、このような大事故はないが、多くの構造物が振りフラッタの潜在的危険性をもつこと、ギャロッピングと全く同様である。その他、H 型断面をもつ橋梁吊り材の振りフラッタの例が見受けられるようである⁴¹⁾。

ところで、上述の振りフラッタは、はく離点が鋭い角に固定されている場合に生ずるフラッタであった。はく離点が構造物の滑らかな表面にある場合には、振動の 1 サイクル中に、はく離点の移動ないしははく離の発生と消失が生ずるので、流れの変化はさらに複雑になるであろう。この種のフラッタは翼の失速フラッタとして知られ、最近、ヘリコプタのロータ・ブレードの問題として研究されている。土木建築構造物ではマイクロ波の反射鏡、電波望遠鏡等に生じ得る²⁶⁾。第 16 図

第 16 図 パラボラ・アンテナの空力ピッチング・モーメント (文献 26)

はその模型実験の一例で、 $\alpha = 45^\circ$ 付近が失速角に相当し、 $\alpha > 45^\circ$ では、背面の流れは非はく離か、たとえばはく離しても部分的にはく離にとどまっている。振動模型のピッチング・モーメントは、 $\alpha = 45^\circ$ 付近で点線で示す大きいヒステリシスを呈する。このモーメントは明らかに負減衰モーメントである。ちなみに、人工衛星の追跡で有名なマンチェスター大学 Jodrell Bank 天文台の電波望遠鏡の建設に際しては、模型実験によりこのようなフラッタの可能性が予見され、巨大な油圧ダンパーが取り付けられた。

6. 連成フラッタ

これまで述べてきたフラッタは、いずれも本質的に曲げあるいは振りの 1 自由度フラッタであった。これに対して、多自由度間の空気力学的連成によって生ず

る連成フラッタがある。それは、変形を拘束して純曲げあるいは純振りにすれば振動は正減衰であるが、自由度間の連成を許してはじめて自励振動が生じ得るという意味である。航空機では連成フラッタが普通であり 1 自由度フラッタは稀であるが、構造物のフラッタにおいては逆であり、多くのフラッタは本来 1 自由度フラッタである。

しかし、1966 年に完成した Severn 橋 (イギリス) は従来のトラス補剛桁形式の吊り橋と異なり、橋床断面として翼型に似たスレンダーな箱型断面を採用するもので、建設費、維持費とも在来形式に比して格段の低下をみたという点で注目されている^{42), 43)}。Severn 橋の場合、水平に近い風 ($-5 < \alpha < +5^\circ$) に対しては、はく離はあっても局所的にとどまり、流れ全体は非はく離流であると考えられている。このような吊り橋の耐風安定性は曲げ-振れの連成フラッタによって支配される。部分模型を用いた風洞実験により非定常空気力が求められると、ストリップ理論を用いてフラッタ限界風速を計算することができる。最近の吊り橋ならびに斜長橋の橋床断面はこの種の形式が採用される傾向にある。この際、架設地点における風の特性の調査が肝要であって、橋床に対して迎角の大きい風が吹けば失速状態となり、既述のはく離流フラッタがより低速で発生する。

7. その他

二つ以上の構造物が近接する場合は流れの干渉が生じ、弧立構造物と異なる静的ならびに動的な不安定を生ずる。例えば、風上構造物の後流による風下構造物のパフティング (buffeting) およびうず励振などが挙げられる⁴³⁾。ただし、これらはいずれもフラッタではなく単なる強制振動と考えてよいであろう。

一般に、自然風下の構造物の応答を求めるには、架設地点の風の特性を知る必要がある。ここ数年来、長大構造物の建設を一つの契機として、そのような気象観測の資料が次第に蓄積されつつある¹⁾⁻⁴⁾。設計に際しては、まず、設計風速の適切な評価がなされるべきである⁴⁴⁾。それには、架設地点における年最大風速の統計資料、平均風速の鉛直分布、風の乱れの時間的空間的スケールならびに周辺地形による風のかたより等を考慮する必要がある。

設計風速が定められると、設計風速内でフラッタ等の危険な現象が生ずるか否か検討されることとなる。既述のように、一様気流中の風洞実験結果よりただちに実物の応答を推定することは難しく、実物の応答観測は貴重な資料となる^{45), 46)}。近年、自然風の風洞によるシミュレーションについていろいろな工夫が試み

られている^{47)~50)}。そのような装置を用いて自然風下の構造物の空力弾性的挙動の実験も一部で行なわれつつある⁵¹⁾。また、構造物模型も野外におき自然風による応答を観測する試み⁵²⁾、構造物の突風応答に関する研究^{53), 54)}などもある。各種構造物断面に対する非定常空気力の測定もわが国ではとくに盛んである^{55), 56)}。これらの研究については、紙面の都合上、詳細は割愛させていただきたい。

われわれの最終目標は、合理的な設計により構造物のフラッタを防止することにある。その方法としては、1) 剛性をます、2) 構造減衰をます、3) 構造物の外形を流体力学的見地より改良する、の三つが考えられる。最初の二つは実際になかなか実施し難く、まず努力すべきは3)の方法であろう。そのいくつかの例についてはすでに触れたが、とらわれない自由な発想をもってすれば、なお多くの道があろうと信ずる。

8. あとがき

以上、構造物のフラッタについて概観したが、材料の取捨選択のまずさ、筆者の思わぬ独断的見解などが多くあることを恐れている。この点、御寛容いただきたい。話が主として一樣気流中の風洞実験の結果に限られ、自然風中の構造物の挙動について述べるのが少なかったこともとくにお詫びする。この方面の知識はまだ十分に体系的であるといえず、他日、別な専門家による解説を希望するものである。なお、本州-四国連絡橋の工事に関連して、実橋の1/10スケールの比較的低い風速で不安定を生ずるような実験橋を建設し、実地観測と風洞実験とを同時に行なって従来のギャップを埋めようとする試みがある⁵⁷⁾。その成果には大いに期待すべきものがある。最後に、引用文献は筆者の手許にあるものに限られ、決して網羅したものではないことをおことわりしておきたい。

文 献

- 1) Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures, NPL, Teddington, Vol. I and II, H.M.S.O., London, 1965.
- 2) Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures, Toronto, Vol. I and II, University of Toronto, 1967.
- 3) Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures, Loughborough, Loughborough University of Technology, 1968.
- 4) Proc. Third Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Saikon-Shuppan, Co., Ltd., Tokyo, 1971.
- 5) Proc. Seminar on The Modern Design of Wind-sensitive Structures, Construction Industry Research and Information Association, London, 1971.
- 6) Lighthill, M.J. and Silverleaf, A.: A discussion on architectural aerodynamics, Phil. Trans. Roy. Soc., Lond., A 269, 1971.
- 7) Proc. on Meeting Ground Wind Load Problem in Relation to Launch Vehicles, NASA Langley Research Centre, 1966.
- 8) Bisplinghoff, R.L., Ashley, H. and Halfman, R.L.: Aeroelasticity, Addison-Wesley, Inc., Reading, Massachusetts, 1955.
- 9) 平井敦, 伊藤学, 岡内功: 吊橋の耐風性について, 日本航空学会誌, 第16巻, 168号, 1968.
- 10) Scruton, C.: On the wind-excited oscillations of stacks, towers and masts, 文献(1), Vol. II.
- 11) Milne-Thomson, L.M.: Theoretical Hydrodynamics, Macmillan and Co., Ltd., London, 1968.
- 12) 中口博, 橋本貴久裕, 武藤真理: 矩形断面の柱の抵抗力に関する一実験, 日本航空学会誌, 第16巻, 168号, 1968.
- 13) Morkovin, M.V.: Flow around circular cylinder - a kaleidoscope of challenging fluid phenomena, Proc. Symp. Fully Separated Flows, A.S.M.E., 1964.
- 14) Ferguson, N. and Parkinson, G.V.: Surface and wake flow phenomena of the vortex-excited oscillation of a circular cylinder, Trans. A.S.M.E., J. Engrg. for Industry, Nov., 1967.
- 15) Toebes, G.H.: The unsteady flow and wake near oscillating cylinder, Trans. A.S.M.E., J. Basic Engrg., Sept., 1969.
- 16) Koopman, G.H.: The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds number, J. Fluid Mech., Vol. 28, Part 3, 1967.
- 17) 種子田定俊, 本地弘之: 振動する円柱の後流渦, 九州大学応用力学研究所報, 第29号, 1968.
- 18) Bishop, R.E.D. and Hassan, A.Y.: The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, Proc. Roy. Soc., Lond., A 277, 1963.
- 19) Yano, T. and Takahara, S.: Study on unsteady aerodynamic forces acting on an oscillating cylinder, 文献(4).
- 20) Fung, Y.C.: Theory of Aeroelasticity, Dover Pub., Inc., New York, 1969.
- 21) Nakamura, Y.: Vortex excitation of a circular cylinder treated as a binary flutter, Rep. R.I. A.M., Kyushu Univ., Vol. XVII, No. 59, 1969.
- 22) Currie, I.G., Hartlen, R.T. and Martin, W.W.: The response of circular cylinders to vortex shedding, Proc. Symp. Flow-induced Structural Vibrations, Karlsruhe, August, 1972.
- 23) Shioiri, J.: Synchronization phenomenon in vortex shedding and its role in vortex induced oscillations of structures, 文献(4).
- 24) 石崎激雄, 川村純夫: 振動測定からみた鋼製煙突設計上の諸問題, 京大防災研究所年報, 第5号A, 1962.
- 25) Wootton, L.R.: The oscillations of large circular stacks in wind, Proc. Instn. Civ. Engrs., 43, 1969.
- 26) Wootton, L.R. and Scruton, C.: Aerodynamic stability, 文献(5).
- 27) Farquharson, F.B. et al.: Aerodynamic stability of suspension bridges with special reference to the Tacoma Narrows Bridge, Bull. Univ. Washington Engrg. Exp. Station, No. 116, 1949.
- 28) Wardlaw, R.L.: Some approaches for improving the aerodynamic stability of bridge road decks,

- 文献(4).
- 29) 成田信之: 風による橋梁部材の振動, 橋梁と基礎, 第5巻, 9月号, 1971.
 - 30) SAINSBURG, R. N. and KING, D.: The flow induced oscillations of marine structures, Proc. Instn. Civ. Engrs., 49, 1971.
 - 31) WOOTTON, L. R. et al.: Some aspects of the oscillations of full scale piles, Proc. Symp. Flow-induced Structural Vibrations, Karlsruhe, August, 1972.
 - 32) WALSH, D. E. J. and WOOTTON, L. R.: Preventing wind-induced oscillations of structures of circular sections, Proc. Instn. Civ. Engrs., 47, 1970.
 - 33) HARTOG, J. P. den: Mechanical Vibrations, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1956.
 - 34) PARKINSON, G. V.: Aeroelastic galloping in one degree of freedom, 文献(1), Vol. II.
 - 35) NOVAK, M.: Galloping oscillations of prismatic structures, J. Engrg. Mech. Div., Proc. A. S. C. E., Vol. 98, No. EM1, Feb., 1972.
 - 36) NAKAMURA, Y. and MIZOTA, T.: Galloping and vortex excitation of a rectangular block, Rep. R. I. A. M., Kyushu Univ., Vol. XIX, No. 64, 1972.
 - 37) OTSUKI, Y., WASHIZU, K. and others: Experiments on the aeroelastic instability of prismatic bars with rectangular sections, 文献(4).
 - 38) HOGG, A. D. and EDWARDS, A. T.: The status of the conductor galloping problem in Canada, 文献(1), Vol. II.
 - 39) RICHARDS, D. J. W.: Aerodynamic properties of the Severn crossing conductor, 文献(1), Vol. II.
 - 40) 中村泰治, 溝田武人: 矩形断面柱の振りフラッタについて, 土木学会論文報告集, 第216号, 1973.
 - 41) 吉村虎蔵, 吉村健, 水田洋司: H型断面の橋梁吊材の耐風安定に関する一実験, 熊本大学工学部研究報告, 第22巻, 第1号, 1973.
 - 42) WALSH, D. E. J. and RAYNER, D. V.: A further aerodynamic investigation for the proposed Severn suspension bridge, NPL/Aero/1010, 1962.
 - 43) WALSH, D. E. J.: The use of models to predict the oscillatory behaviour of suspension bridges in wind, 文献(1), Vol. II.
 - 44) 土木学会, 本州 - 四国連絡橋技術調査委員会: 本州 - 四国連絡橋技術調査報告書, 付属資料1——耐風設計指針(1967)および同解説, 1967.
 - 45) OKAUCHI, I., ITO, M. and OGURI, H.: Results of recent two measurements relevant to wind-induced vibrations of bridges, 文献(4).
 - 46) MUROTA, T. and ISHIZAKI, H.: Deformations and vibrations of some actual structures due to wind, 文献(4).
 - 47) DAVENPORT, A. G. and ISYUMOV, N.: The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading, 文献(2), Vol. I.
 - 48) CERMAK, J. E.: Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer, AIAA J., Vol. 9, No. 9, 1971.
 - 49) COUNIHAN, J.: An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Atmos. Environ., Vol. 3, 1969.
 - 50) CAMPBELL, G. S. and STANDEN, N. M.: Progress report II on simulation of earth's surface winds by artificially thickened wind tunnel boundary layers, National Aero. Establishment, Canada, LTR-LA-37, 1969.
 - 51) DAVENPORT, A. G., ISYUMOV, N. and MIYATA, T.: The experimental determination of the response of suspension bridges to turbulent wind, 文献(4).
 - 52) 立川正夫: 角柱の振動と変動風圧に関する自然風中の実験, 構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム論文集, 1972.
 - 53) KAWASHIMA, S. and FUJIMOTO, N.: An investigation of the sinusoidal gust loads, 文献(4).
 - 54) SHIRAIISHI, N.: An investigation on aerodynamic responses of plate-like structures in fluctuating gusts, 文献(4).
 - 55) 釜口展宏, 坂田弘: つり橋の耐風安定性に関する基礎研究, 日本航空学会誌, 第13巻, 133号, 1965.
 - 56) 田中宏, 伊藤学: 充腹構造物の自励振動における空気力の特性, 土木学会論文報告集, 第168号, 1969.
 - 57) 土木学会, 鋼構造委員会, 本州 - 四国連絡橋耐風研究小委員会: 本州 - 四国連絡橋・耐風に関する研究, 土木学会誌, Vol. 57-8, 1972.

空気力学と天文学の境界領域の話題*

Topics of Cosmic Gasdynamics

桜井健郎**・松田卓也**

Takeo SAKURAI and Takuya MATSUDA

はじめに

飛行機やロケットのまわりの気体の流れを論ずる空気力学と, 恒星や銀河を論ずる天文学は, 一見何の関係もないように思える。しかし, 遠くて近きは, 男女の仲だけではない。論より証拠, 手近な天文学の本を開

いて見よう。そこには, 恒星が気体の塊であることが, その恒星の飛ぶ空間が気体で充たされていることが述べられている。そして, 悠久不変そのものに見える星空が, 実は, 超新星の大爆発, 銀河の腕の作る衝撃波, 星間空間を超音速で飛ぶ星のソニック・ブームなどの空気力学的過程に彩られ, 時々刻々変化する動的な空間であることも述べられている。一時期空気力学者の血を湧かせた電磁流体力学の創始者は, 当時ストック

* 昭和48年4月11日原稿受理

** 京都大学工学部航空工学科