

# 研究展望

## 風による建造物の振動

### WIND-INDUCED VIBRATIONS OF STRUCTURES

伊藤 学\*

By Manabu ITO

#### 1. 風と建造物のかかわり

地震、降雨、気温の変化などと同様に、風はこれまで絶えず地球上に存在してきた自然現象であり、これが建造物に振動を引き起こす原因として問題となるのは、とりも直さず工学の進歩に伴うものであるという皮肉な見方もできる。かの有名な旧タコマ・ナロウズ橋の落橋や戦後における下路アーチ橋吊材の疲労損傷もその証左といえよう。すなわち、材料、工法、設計手法の進歩に伴って建造物が長大化、軽量化、多様化すれば、それだけ新たな問題が発生し、あるいは問題となる建造物が増える。

ともかくも、タコマ・ナロウズ橋の崩壊を契機に建造物の耐風安定性、ことに空気力学的安定性に関する研究は格段に進展し、あのような劇的な事故は再発していない。しかしまだすべての問題が解決されたわけではない。これまでの適用範囲を超えた、あるいは新しい形式のフレキシブルな建造物が出現することであろうし、一方では現在の耐風設計が安全側に過ぎているのではないかという議論もある。現に、在来とさして変わらない規模の鋼箱桁橋やみるからに剛なPC斜張橋でも、風洞模型実験あるいは計算によると振動しそうなので対策を施さねばという例を最近では耳にする。ことが起こってからでは遅いということで、あらゆる要因を安全側にとればそのような結論に落ち着いてしまうのかもしれないが、そのために経済性、機能、外観を不当に損ない、場合によっては実現可能な計画を放棄せざるを得ないのであれば問題である。研究の成果を現場にいかんにか反映させるか、工学的判断の必要性和合わせて考えさせら

れる現実である。

風によって建造物に引き起こされる現象は、表—1にみるように、きわめて多岐にわたるのが特徴である<sup>1)</sup>。一般の剛な建造物であれば静的風圧（風荷重）のみを問題とすればよいが、きわめてフレキシブルな建造物になると、これらのほとんどすべての現象が検討の対象になる。しかもこの場合、静的風圧による変形・応力と風の乱れによるバフェティングなどのように同じ風速のもとで複数の現象が共存したり、渦励振とフラッタなどのように現象によって発生する風速域が異なったりする。もちろん、理論的にはある風速である現象が発生するとしても、その風速が現実には起こり得ない風速であれば工学的には問題としなくてよいことはいうまでもない。

ここで表—1 および本論の記述に関連して断っておかなくてはならないのは用語についてである。いわゆる空力弾性学は航空工学の分野で発展してきた歴史をもっているが、近年他の工学分野でも取り上げられるに及び、専門家の間でも用語の不統一が若干の混乱を招いている。たとえば表—1の中のバフェティングは後述のようにそもそもは今より狭い意味で使われていた。渦励振は vortex excitation のほか wake excitation とよぶ人もあり、連成フラッタは古典的フラッタ、曲げねじりフラッタともよばれる。ねじりフラッタは現在では失速フラッタと同一視してはいないが、ねじりギャロピングなるいい方もされている。発生機構の関連性から、流れ直角方向のギャロピングとこのねじれフラッタを剝離流フラッタと総称することもある。さらに文献2)には stall hysteresis なる現象も挙げられており、失速フラッタと共通するところもあるようであるが、われわれの間では一般的用語とはなっていない。そもそもフラッタなる用

\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科  
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

表一 構造物に及ぼす風の作用の分類

現象			原因となる空気力	
静的	静的風圧(風力)による変形(応力),変位		時間平均的空気力	
	静的不安定現象	ダイバージェンス 横倒れ座屈		
動的	気流の乱れによる不規則振動(パフティング, ガスト応答)		限定振幅振動	自然風,あるいは風上側構造物の後流の中の風速変動に伴う空気力
	動的不安定現象	渦励振		
		ギャロピング ねじれフラッタ 連成フラッタ(古典的フラッタ)	1自由度 2自由度	発散振幅振動

語の範囲が必ずしも一定しておらず、航空工学における古典的フラッタに限るべしとする意見から、渦励振を含め流れの中で発生する構造物の自励振動として、すべての空力不安定現象を包括するものまで、そのスペクトルはかなり広い。ともかく本論では、表一の分類によることとする。

構造物に及ぼす風の作用に関する国際会議(現在の国際風工学会議)は1963年以来これまでに6回を数えるが、その開催国はイギリス(2回)、カナダ、日本、アメリカ、オーストラリアである。これはとりも直さず、この分野の研究が活発で、熱心な研究者層を擁する国々であり、当然のことながら、強風に曝され、しかも近代的構造物が多い国々でもある。これに次いで、次回開催国の西ドイツのほか、フランスやスカンジナビア諸国を挙げることができよう。

研究の内容からみると、初期のフラッタを中心とした吊橋などの空力弾性問題が海外ではいつとき下火となり、1970年代にかけてはガスト応答を主体とする、建築物を対象とした研究が量的には多数を占めたが、ひとりわが国のみは、本州四国連絡架橋の具体化などから、一貫して橋の耐風性に関する研究は途絶えることがなかった。近年英語圏諸国では、長径間斜張橋の計画が活発化するに及び、bridge aerodynamicsの研究が再び目立ちはじめ、昨1984年バンクーバーにおける国際構造工学会(IABSE)第12回大会の構造物に及ぼす風の作用のセッションでは、ほとんどの発表が橋梁を対象とするものであった。

一方、近年、構造物まわりの流体の数値解析の研究が進展をみているが、いまだ適用は限られている。したがって、非流線形の土木・建築構造物に及ぼす風の作用の研究およびそれらの耐風設計は風洞実験によるところが大きい。この風洞実験設備に関する限り、わが国は質量ともに諸外国に抜き出ている。

いうまでもなく風は空気の流れである。したがって風

と構造物のかかわりを論ずるとき、気象学、流体力学、構造工学の知識を併せ動員しなければならない。すなわち、すぐれて学際的な課題といえることができる。しかしここでは、耐風設計という応用面の観点を省いたことと、著者の専門柄、構造工学の立場から主眼をおくことを断っておきたい。また、風による構造物の振動だけをとっても、これまでにいくつかの研究展望がなされているが<sup>2)~3)</sup>、われわれの学会では十数年前に解説<sup>4)</sup>が登載されて以来のことであるので、専門の方々にはすでによく知られた内容とな

ることを承知のうえで、基本事項に関する全般的な展望を試みることにする。

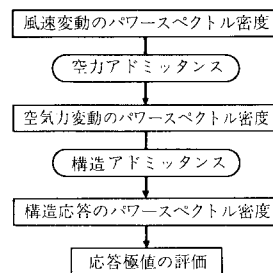
## 2. 気流の乱れによる不規則強制振動

風工学では気流の乱れによる構造物の強制不規則振動をパフティング(buffeting)あるいはガスト応答(gust response)とよんでいる。パフティングは元来航空機の主翼やエンジンの後流の乱れによる尾翼の振動を指していたが、現在われわれの分野では風上側構造物の後流の乱れによる風下側構造物の振動はもちろん、接近流、すなわち自然風の風速変動に起因するものを包括している。

自然風の乱れによるガスト応答は1960年代に発表されたDavenport<sup>5)</sup>の一連の研究によって一躍注目を浴びた。その基本的考え方は図一1の流れに沿うものであるが、長大かつフレキシブルな構造物では、風速の時間的変動による動的増幅効果と、風速の空間的変動に基づく荷重低減効果とを併せ考慮しなければならない。水平方向に細長い橋梁のガスト応答解析を例にとれば、前者についてはこれまで

- (a) 主風向方向変動風速による水平横たわみ振動
- (b) 主風向方向変動風速  $u$  ならびに鉛直方向変動風速成分  $w$  による鉛直たわみ振動

が研究の主たる対象であった。このうち、まず最初に取り



図一1 ガスト応答解析の流れ

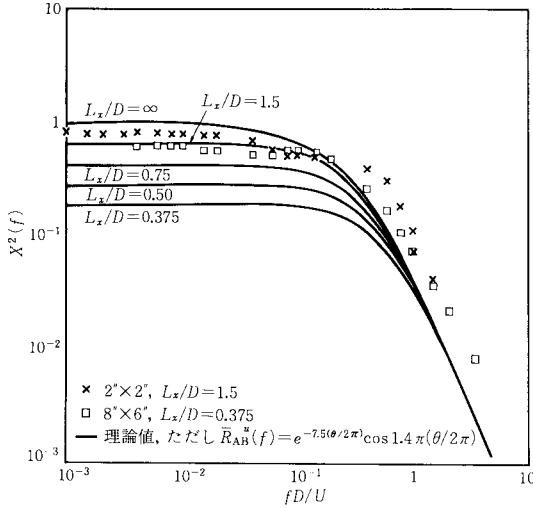
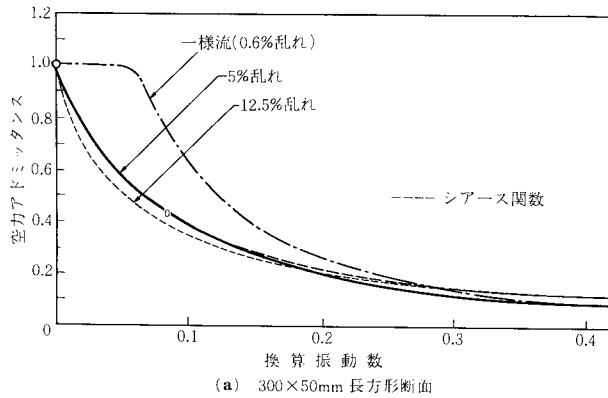
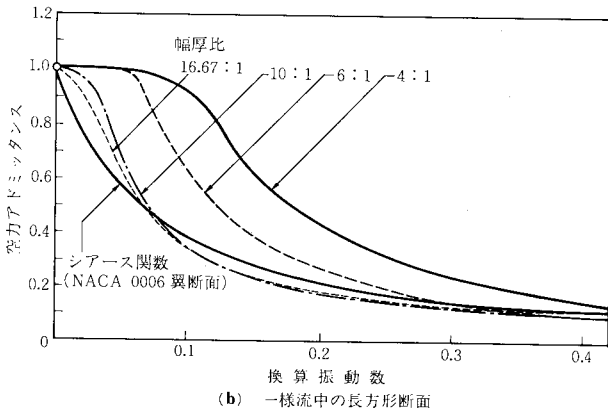


図-2 流れに直角に置かれた正方形板の変動抗力の空力アドミッタンス  $|X(f)|^2$  の理論値 (Bearman, 1971)

り上げられ、いわゆるガス応答係数の形で多くの設計基準にも反映されてきたのは (a) の作用である。



(a) 300×50mm 長方形断面



(b) 一様流中の長方形断面

図-3 長方形断面 (幅  $b$  × 高さ  $d$ ) の変動揚力の空力アドミッタンス測定値 (Jancauskas, 1983)

(b) の変動揚力についても、(a) の変動抗力を評価する場合と同様に、変動風速成分は平均風速に比し小さいとしたりして準定常アプローチをとり、風速変動と空力変動とは一種の伝達関数である空力アドミッタンス  $|X_L(f)|^2$  を介して下記のように関係づけている。ただし、 $u, w$  のクロススペクトル密度関数の影響は小さいとして無視している。

$$u \text{ 成分} \rightarrow L^u = \frac{1}{2} \rho \bar{U} b C_L$$

$$\text{パワースペクトル密度関数}$$

$$\rightarrow S_L^u(f) = 4 |X_L^u(f)|^2 \frac{\bar{L}^2}{U^2} S_w(f) \dots \dots (1 \cdot a)$$

$$w \text{ 成分} \rightarrow L^w = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 b \frac{w}{U} \left( \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right)$$

$$\text{パワースペクトル密度関数}$$

$$\rightarrow S_L^w(f) = |X_L^w(f)|^2 \left[ \frac{1}{C_L} \left( \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \right]^2 \frac{\bar{L}^2}{U^2} S_w(f) \dots \dots (1 \cdot b)$$

ここに、 $\rho$  : 空気密度、 $b$  : 断面幅、 $\bar{U}$  : 平均風速、 $\bar{L}$  : 平均揚力、 $\alpha$  : 迎角、 $C_D$  : 抗力係数、 $C_L$  : 揚力係数、そして  $S_u(f), S_w(f)$  は変動風速  $u, w$  のパワースペクトル密度である。上の式 (1・a) は (a) における風向方向変動抗力と全く同様の性格のもの、式 (1・b) における空力は後節 4. (1) でふれるギャロピングの準定常解析における同じ論拠によるものである。

変動抗力における空力アドミッタンスについては Vickery<sup>6)</sup>、Bearman<sup>7)</sup> (たとえば図-2) などによる理論式、経験式が出発点となっているが、変動揚力に関しては、以前から航空工学の分野で行われてきた薄翼の鉛直ガストに対する応答の理論的研究が参考とされている。たとえば変動抗力の解析と似た手順を踏む式 (1・a) におけるアドミッタンスに対する解析解としては、二次元流を前提とする Horlock 関数がある。一方、式 (1・b) に関連しては、やはり薄翼に階段関数的 (sharp-edged) 鉛直ガストが作用する場合の Küssner 関数、階段的迎角変化に伴うインディシャル揚力からの Wagner 関数などの適用も検討されたが、調和的に変動する鉛直ガストを対象とした Sears 関数が引用されることが多い<sup>8)</sup>。Jancauskas<sup>9)</sup> は幅  $b$ 、高さ  $d$  なる長方形断面について図-3の結果を得ており、断面のアスペクト比  $d/b$  が増すにつれ

Sears 関数から離れていくのは当然としても、接近流に乱れがある場合、アスペクト比が減少したことに相当する効果がみられることに着目したい。これは別の場でも指摘されているように<sup>10)</sup>、乱れの存在が剥離流の物体への再付着を促進し、見掛けの形状変化をもたらすことを意味している。なお、これら揚力の空力アドミッタンスは次章 3. で述べる剥離渦に起因する変動揚力が問題にならない場合のものであることは断っておかなければならない。

ガスト応答解析の原理そのものはうなずけるにしても、実際の建造物の挙動を精度よく予測し得るかどうかについてはまだ多くの議論がある。分散振幅振動とは異なり、実物での観測 (full scale measurement) が可能であるので、高層建築や吊形式橋梁<sup>11), 12)</sup>での実測も報告され、まずまずの結果を得ているとされている。しかし、対象とする具体的建造物の空力アドミッタンス、構造減衰などの評価もさることながら、入力となる自然風の特異性自体、正確に把握することが容易でなく、関連する多くのパラメーターの数値をどう選ぶかによって結果にかなりの影響をもたらすことが示されている<sup>13)</sup>。

### 3. 渦 励 振

#### (1) 発生機構と応答の評価

いわゆる流体力学的にぶい形状の物体が流れの中に置かれると、せん断境界層が表面ではがれ後流中に交番渦が発生し、物体に周期的外力が作用すること、この渦の発生周波数  $f_s$  は物体の断面形状とレイノルズ数に固有なストローハル数  $S_t = f_s d / U$  より定まること、そして共振流速付近では渦の発生周波数が物体の固有振動数に引き込まれる同期 (lock-in) 現象が存在することが以前より知られている。ここに、 $d$  は物体断面の代表寸法、 $U$  は流速である。現に、煙突、細長い構造部材、照明ポール、充腹断面独立塔などが円形断面あるいは比較的ずんぐりした角形断面を有する場合にしばしばこの渦励振現象がみられ、疲労破損や機能障害をきたすことがあるため、これまでも多くの研究成果や実測結果が報告されてきた。

ところで、その発生風速域が限られていること、振幅が構造減衰にほぼ反比例することから、渦励振は周期的外力による建造物の共振現象と考えられ、それならば通常の強制振動のように、たとえば 1 自由度系の場合

$$m\ddot{y} + c_s\dot{y} + ky = \frac{1}{2}\rho U^2 C_{La} \sin 2\pi f_s t \dots\dots\dots (2)$$

なる運動方程式を解けばよいことになる。ここに、 $m$  は質量、 $c_s$  は構造減衰係数、 $k$  はばね定数である。ところが現実には、動的空気力係数  $C_{La}$  が物体の運動に規制される自励的性格をもつこと、また同期現象である

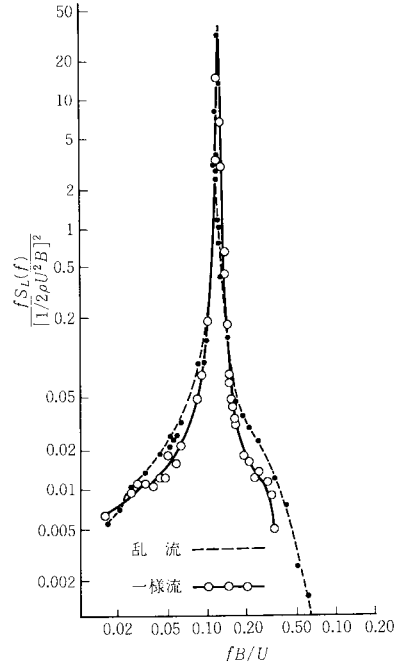


図-4 流れに正対して置かれた正方形断面柱の揚力変動スペクトル (Vickery, 1966)

ことから察しられるように非線形特性を有すること、そして一様流の中においてさえ、空気力のパワースペクトルは有限な周波数域をもち (図-4)<sup>14)</sup>、しかも流れに直角方向には渦の非相関性があるため、励振力がランダム変量的性格をもつことが解析を難しくしている。このことから、式 (2) によるとしても動的空気力係数を rms 変動値の形で表わすことが多い。ちなみに、自励的要素、非線形性は断面の形状に左右されるといわれており、これは後述の発振機構とも関連があると考えられる。なお白石・松本<sup>15)</sup>によれば、スクルートン数<sup>(註1)</sup> ( $S_c$ ) や断面形状による差異はあるが、橋梁に採用される箱桁断面では、渦励振の応答は励振開始風速の 1.2~1.5 倍程度の風速において最大となる。

変動揚力係数  $C_{La}$  は断面形状、レイノルズ数、スクルートン数のほか、前述のように振動変位にも影響される。風ではなく水による振動を対象としているが、円柱に対する  $C_{La}$  の振幅依存性を示す例を図-5 に示す<sup>16)</sup>。類似の傾向はイギリスで行われた扁平な 2 箱桁橋桁の渦励振検討の際にも報告されている<sup>2)</sup>。

#### (2) 渦励振のモデル化

いったん物体が振動すると、その周りの流れが影響を

注 1) 質量  $m$  または極慣性モーメント  $\theta$  と構造減衰  $\delta_s$  の効果をひとまとめにした無次元パラメーター  $2M\delta_s/\rho d^2$  または  $2\theta\delta_s/\rho b^2 d^2$  をスクルートン (Scruton) 数とよんでいる。

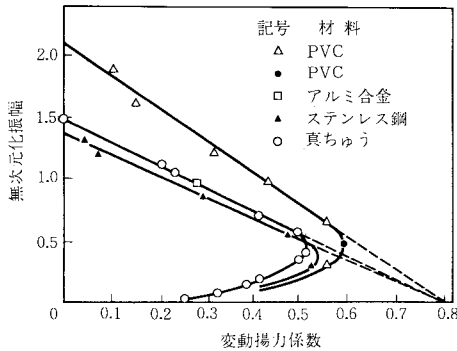


図-5 円柱の渦励振振幅と変動揚力係数  $C_{Ld}$  (King, 1977)

受け、静止物体におけるとは異なる非定常流体力が作用して構造系と流体系との連成運動を招くという立場から、非線形な流体振動子 (fluid oscillator) を用いた数学モデルが何人かの研究者により提案された。すなわち、流れに直角方向の渦励振の場合

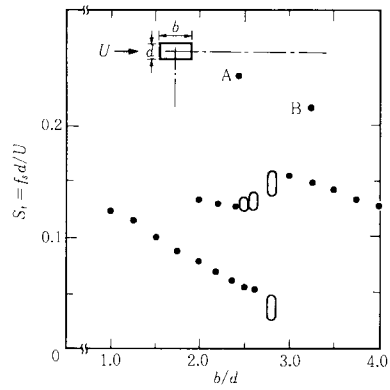
$$\left. \begin{aligned} \text{構造系: } m\ddot{y} + c_s\dot{y} + ky &= \frac{1}{2} \rho U^2 d C_{Ld} \\ \text{流体系: } \ddot{C}_{Ld} + f(\dot{C}_{Ld})\dot{C}_{Ld} + (2\pi f_s)^2 C_{Ld} &= F(\dot{y}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

において、第2式の左辺の非線形減衰項と右辺の物体運動の作用とが実験結果などから定められれば、連立微分方程式としてこれを解けばよい。こうなると、単なる強制振動ではなく、むしろ一種の連成フラッタ (4.(3) 参照) ともいえる。

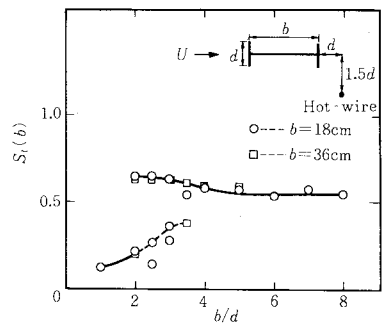
さらに式(3)から、共振風速に近づくと非定常空気力の振動数応答成分が物体の運動に対し急激な位相変化を生じることが示唆され、このことにより、第1式右辺の空気力項は構造系に負減衰効果をもたらす。すなわち、物体振動に対する渦の線形共振効果が大きい。渦励振におけるこの急激な空気力の位相変化は円柱<sup>17)</sup>や正方形断面柱<sup>18)</sup>などにおいて実験的に検証されている。解析的には中村<sup>19)</sup>、田村<sup>20)</sup>らが Birkhoff の死水域振動子を用い、上述のような2自由度フラッタ系について考察を加えている。

(3) 再び発生機構について

上述の流体振動子に基づく定式化は流体力学に根ざしたというよりは振動学の立場からの解析的発想に基づく取扱いであるが、近年、流れの可視化実験などの結果から、渦励振の発生機構に新たな知見が得られてきた。これは、渦励振とみられるある限られた風速域での限定振幅振動が物体後流に発生するカルマン渦の周波数に対応する共振風速よりも低い風速でもみられること、および長方形断面では、図-6(a)<sup>21)</sup>に示すように、アスペクト比によっては2種の渦周波数が存在するという事実とも関連がある。



(a) 長方形断面(驚津ほか)



(b) H形断面(中村)

図-6 ストロールハル数:  $St$

まず小林ら<sup>22)</sup>は比較的偏平な長方形断面の前縁から剝離する渦に着目して、これによる流れ直角方向の振動を前縁剝離渦励振とよび、後流渦による励振と区別した。その後、中村<sup>23)</sup>はH形断面の渦励振が後流側にスプリッタ板を挿入しても消滅しないことに着目し、断面前後縁間に発生するせん断層による、いわゆるエッジ・トーンに起因する渦励振が前述の低風速における励振であること、ストロールハル数の定義に用いる断面寸法としては従来断面高  $d$  より弦長 (断面幅)  $b$  をとるのが適当と考えられること [図-6(b)] を主張している。

これらのことは、白石・松本<sup>15)</sup>が種々の充腹断面に対する既往の風向直角方向渦励振実験結果を整理した図-7からもうかがえる。すなわち、図中最も多くの点が集まっている直線が前縁剝離渦励振の発現風速、その下の方の実験値はカルマン渦と密接な関係をもつもので、 $b/d$  の小さい断面は完全剝離型、 $b/d$  の大きい偏平な断面はせん断層付着型に属するとしている。

(4) 渦励振モード

渦励振は流れに直角方向の振動 (cross-flow oscillation) が最も顕著であるが、流れの方向 (along-flow oscillation) あるいは in-line oscillation) やねじれの振動も発生する。それらの発生風速はそれぞれの振動を生

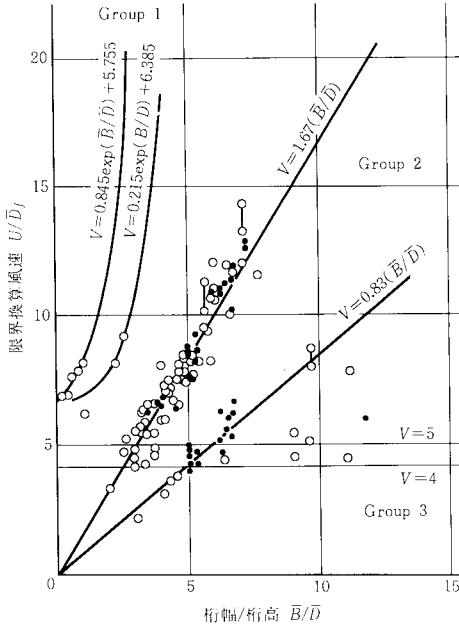


図-7 橋桁の渦励振発生風速 (白石・松本)

じさせる剥離渦の周波数に対応する。海洋構造物で問題になることのある in-line 振動<sup>16)</sup>は風のもとではあまり聞かないが、風によるねじれ渦励振は風洞模型実験でもしばしばみられる。流れに直角方向の振動との比較について、宮田・山田<sup>10)</sup>は1:2長方形断面で乱れの影響が全く異なること、白石・松本<sup>24)</sup>は各種箱形断面橋桁を対象とした模型実験に基づき、振動発現風速域や空力的に不安定となる断面が異なることから、曲げとねじりの渦励振機構の差異を指摘しており、前項の発生機構と関連して興味ある点である。

4. 発散振幅振動

(1) ギャロピング

流れに直角方向の1自由度自励振動であって、正方形に近い断面や Den Hartog の書<sup>25)</sup>でよく知られる雪氷の垂れ下がった電線などにみられる。図-8にみるように、物体が何らかの原因で上下方向に振動するとき、それにより見掛けの迎角  $\alpha$  を生じ、その結果、 $\alpha \approx \dot{y}/U \ll 1$  と

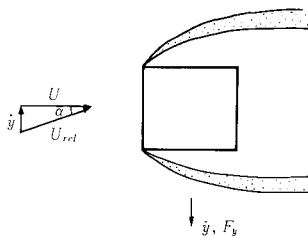


図-8 ギャロピング

仮定できれば、運動方向の空気力は近似的に

$$F_y(\dot{y}) = -\frac{\rho}{2} U_{rel}^2 d \cdot C_{Fy}(\alpha) \approx -\frac{\rho}{2} U d \frac{dC_{Fy}}{d\alpha} \dot{y} \dots (4)$$

となる。すなわち、この運動に伴う非定常空気力は運動速度に比例し、符号を変えれば空力的減衰力となる。これを  $c_a \dot{y}$ 、構造減衰力を  $c_s \dot{y}$  とするとき、もし

$$c_s + c_a < 0 \dots (5)$$

ならば、全体としての減衰は負になり振動は発散する。

なお、式(4)の非定常空気力係数  $C_{Fy}$  は、もし物体静止時の抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  を準用できるとすれば、これも近似的に

$$\frac{dC_{Fy}}{d\alpha} \approx \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \dots (6)$$

で与えられる。これがいわゆる Den Hartog の規範の一般的表現である。Parkinson ら<sup>26)</sup>は式(4)の  $C_{Fy}(\alpha)$  を  $\alpha \approx \dot{y}/U$  の有限多項式で近似することにより、この準定常アプローチをギャロピングの非線形解析に展開し、ギャロピング応答の評価を可能とした。図-9はその後 Novak<sup>27)</sup>が長方形断面柱に対してこの手法を適用した結果である。アスペクト比によって、すなわち  $C_{Fy}(\alpha)$  曲線の形状によって、ギャロピングがソフト型、ハード型に分かれ、気流の乱れの存在がこれまた断面形状によって異なる影響を与えることがわかる。

当然のことながら、運動の各瞬間における静的空気力を用いる準定常アプローチはゆっくりした運動、すなわ

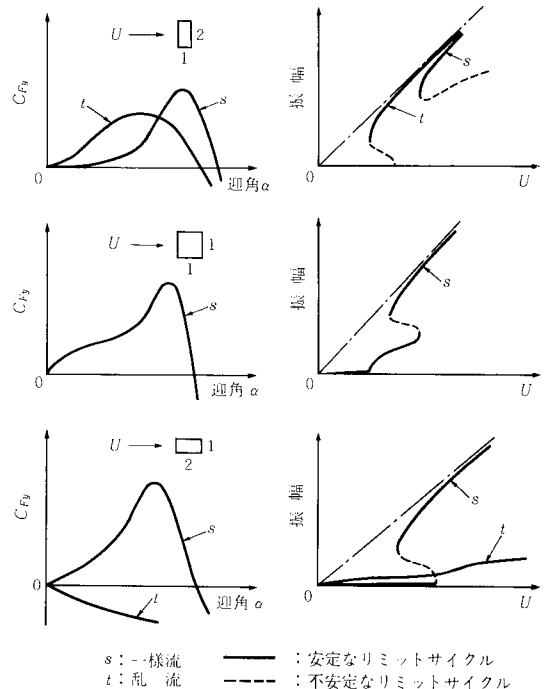


図-9 長方形断面のギャロピングの準定常解析結果 (Novak)

ち換算風速  $U_r = U/fd$  が大きい場合にのみ当てはまるが、もともとギャロピングは比較的高風速で剛性の低い構造物に生じるので、その適用範囲は意外に広い。しかしもちろん限界のあることは図-10の非定常空気力係数測定結果<sup>21)</sup>にもみられるとおりで、この範囲を超えるところでは、円振動数を  $\omega$  として、

$$C_{Fs}(U_r) = R_e[(C_{LR} + iC_{LI}) \exp(i\omega t)] \dots \dots \dots (7)$$

なる一般的表现(次項(2)で詳述)を用い、空気力係数  $C_{LR}$ ,  $C_{LI}$  を風洞内での模型振動実験により測定することとなる。上記の適用限界はストローハル共振風速の2, 3倍のところではないかといわれている<sup>28)</sup>。これ以下の換算風速域で準定常理論が有効でなくなるのは、物体の運動に対する流れの遅れ効果(fluid memory effect)、すなわち運動の時刻歴の影響と、後流渦の発生による変動空気力が無視し得なくなる場合である。

ところで、渦励振とギャロピングは、流れに直角方向の構造物の固有振動数のもとでの空力弾性振動である点では共通しており、ギャロピング発生風速  $U_{cr}$  が渦励振発生風速  $U_0$  に近付き、あるいはそれより低いと、これら2つの現象が相互作用を呈することが指摘されている<sup>29)</sup>。たとえば  $U_{cr} < U_0$  であると、風速を上げていった場合に、 $U_{cr}$  ではなく、 $U_0$  より少し低い風速で振動が

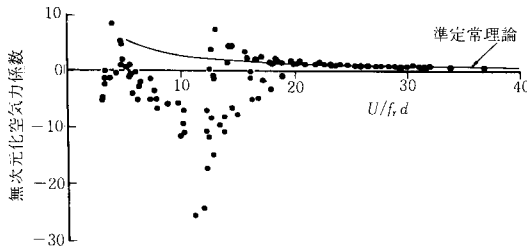


図-10 非定常揚力速度成分の実測値と準定常理論の比較 (大築・鷲津・大屋)

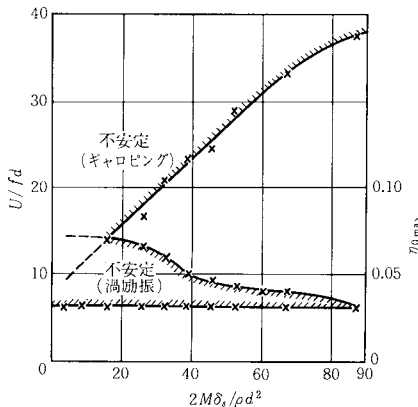


図-11 流れに正対した正方形断面柱の空力安定性 (Scruton, 1963)

発生し始め、さらに風速を増加させると、振動はやむことなく振幅は増大し、高風速(すなわち大振幅)に至って、準定常理論より予測されたギャロピング応答曲線に比較的好くのってくる。このことは、スクルートン数をパラメーターとして両現象の発生領域を示した図-11<sup>30)</sup>からも察しられる。

ギャロピングの発生機構は、物体の運動に伴って前縁からの流れの剥離が非対称となり、その結果、物体表面圧力の総和として運動方向の力が生じるためであると説明される。ある程度運動速度が大きくなると相対迎角の増大により、剥離した流線が物体の片側側面で再付着するため、上述の力はこんどは減少する。したがって、一定風速のもとでは応答振幅にある限界が存在することは図-9にみるとおりである。後で述べるように、気流の乱れの影響もこの剥離流再付着の変化と関係づけられる。

(2) ねじれフラッタ

剥離流による散放振幅的不安定振動であること、これが直接非定常空気力の負減衰効果に起因すること、1自由度振動で、構造物の固有振動数とほぼ等しい振動数で起こることなど、モードの違いこそあれ、ねじれフラッタはギャロピングと共通の特性がある。ただ、ねじれフラッタ現象においては、前項(1)でふれた流れの遅れ効果が常に重要な鍵をにぎり<sup>31)</sup>、同様に静的モーメント係数が迎角に対し負勾配をもつことが現象の発生の可能性を示唆するにもかかわらず、ギャロピングの場合におけるような準定常アプローチは有効でない。

ねじれフラッタの発生は剥離せん断層の物体側面下流縁における再付着と関連がある。したがって、気流に沿って置かれた長方形断面では、扁平ではあるが平板にあまり近くない  $b/d = 2.5 \sim 5.5$  程度のものにこのねじれフラッタは発生し、平板翼に近い断面ではある程度以上の迎角がついた場合に生じる(失速フラッタとなる)。逆に  $b/d$  がもっと小さい断面では、ねじれ振幅がある程度以上になった場合(すなわちハード・フラッタ型)にこの現象が発現する可能性が生じる。また従来の実験結果より、トラス補剛吊橋でフラッタが起るとすれば、このねじれ振動が支配的な場合の多いことを念頭に置きたい。

準定常理論が適用できないとすれば、

$$\varphi(t) = R_e[\theta_0 \exp(i\omega t)] \dots \dots \dots (8)$$

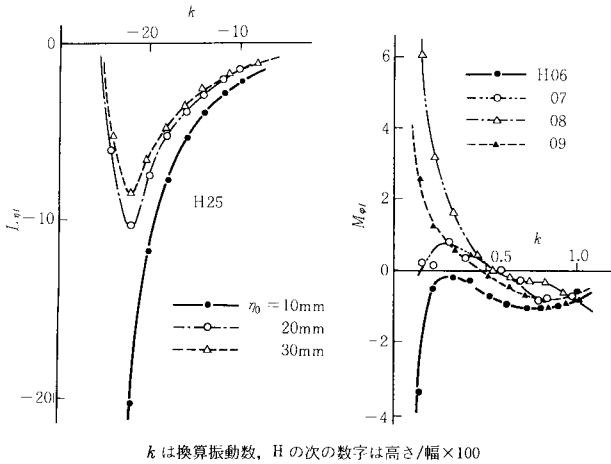
なるねじれ運動に伴って生ずる非定常空力モーメントを

$$M_{\varphi}(t) = R_e\left[\frac{1}{2} \rho U^2 d^2 C_{M\varphi}(U_r) \cdot \exp(i\omega t)\right] \dots \dots \dots (9)$$

とし、一般に変位と空気力の間に位相差のあることから

$$C_{M\varphi} = C_{M\varphi R} + iC_{M\varphi I} \dots \dots \dots (10)$$

という一般的表现を用いる。ここに  $-C_{M\varphi I}$  が空力減衰



図一12 H形断面柱の速度成分非定常空気力係数 (田中・伊藤)

効果を示す。物体のねじれ（回転）に伴う揚力成分  $L_{\phi}$  ( $t$ ) についても同様な表現が定義できる。

これらの非定常空気力係数は非流線形断面や橋桁のように複雑な形状の断面については風洞実験から求めるほかなく、これまでも長方形、H形などの基本形状<sup>32)</sup>、各種の橋桁断面<sup>33)</sup>に対する実測結果が報告されている。図一12にみるように、非定常空気力係数は換算風速（またはその逆数である換算振動数  $k$ ）の関数で、しかも一般に振幅に関して非線形である。この特性を利用して、フラッタ応答の数値解析を行うことができる<sup>34), 35)</sup>。

非流線形断面構造のねじれフラッタが空力モーメントの履歴現象、すなわち顕著な流れの遅れ効果に支配されることから、インディシャル応答<sup>36)</sup>を用いた時間領域におけるねじれフラッタ発生機構の考察<sup>37)</sup>が行われている。 $\tau = Ut/d$  を無次元化時間とし、物体の単位ステップねじれ変位による空力モーメント応答をインディシャル空力モーメント応答  $\Phi_{M\phi}(\tau)$  と定義する。流れの遅れ効果のため、 $\Phi_{M\phi}(\tau)$  が定常空気力係数  $C_{M\phi}(\infty)$  に対応する  $\Phi_{M\phi}(\infty)$  に漸近するにはある時間を要する。線形系では周波数応答が衝撃応答  $d\Phi_{M\phi}/d\tau$  のフーリエ変換で与えられることを利用して空力減衰係数が求められ、その結果、ねじれフラッタ発生の可能性がインディシャル空力モーメント応答と関係づけられるというものである。流れ学的には、突然の迎角変化（ねじれ変位）に応じて物体の上流側縁端から剝離バブルが形成、放出され、時間とともに成長しながら物体に沿って下流側に移行するという事実と対応する。このことは、物体表面における圧力分布の変化とも符合することが実験的にも確かめられている。

(3) 連成フラッタ

連成フラッタはねじれと風向直角方向の曲げが連成し

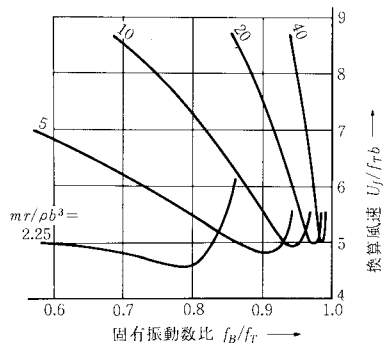
た自励振動であって、翼に起こる現象として古くから航空工学の分野で研究されてきた。古典的フラッタ (classical flutter) とよばれており、われわれの分野ではきわめて扁平な流線形箱桁断面などで問題になる。平板翼についての図一13の計算例<sup>3)</sup>にみるように、曲げとねじれの固有振動数が接近している場合に発生しやすく、その限界風速には質量パラメーターが大きく影響するが、構造減衰にはほとんど左右されない。図中の質量パラメーターは質量と極慣性モーメントとを1つの無次元量にまとめたものである。

連成フラッタが前2項の1自由度剝離流フラッタと大きく異なる点は、純曲げあるいは純ねじりの1自由度のもとではそれぞれの空力減衰は正であるが、自由度間の連成を許してはじめて自励振動が生じることにある。いま構造減衰を省略して、曲げ、ねじれ2自由度の二次元流中における運動を考えると、

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & \Theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_y & 0 \\ 0 & k_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_y & L_{\phi} \\ M_y & M_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_y & L_{\phi} \\ M_y & M_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \phi \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(11)$$

ここで2自由度の間に、ある位相差をもって右辺第2項の空力剛性項の作用があるとき、第1項の空力減衰項自体が負減衰作用をもたなくても不安定振動が起こる。たとえば<sup>1)</sup>、この位相差が90°のとき、支配的な相関剛性力  $L_{\phi}\phi$  は  $\dot{y}$  と同位相になり、曲げ運動を支配し得ようになる。すなわちフラッタ解析においては位相差が重要な役割をもっている。

式 (11) で  $y, \phi$  が円振動数  $\omega$  なる調和振動を行うとして、その固有値を求める過程でフラッタ発現風速とその際の振動数が得られる。式 (11) の空気力係数がこれら両者を含む換算風速  $U_r$  の関数だからである。この



図一13 平板翼の連成フラッタ発現換算風速 (Wyatt & Scruton)



ときの振動数は系の曲げ、ねじれの固有振動数の中間の値となる。この解析では曲げ、ねじれの振幅比は求まるが、振幅自体は定まらない。森光ら<sup>34)</sup>は以前、非定常空気が振幅に関して非線形であることを利用して、連成振動時にも応答曲線を得ることの可能性を示唆したことはあるが、連成フラッタはいったん発生すれば急激に振幅の発達する現象で、しかもかなり高風速で起こるので、普通限界風速の評価のみを問題としている。

ところで、このフラッタ限界風速を求めること自体、空気が換算風速の複雑な関数であるため、さほど容易ではなく、いろいろな解法が工夫され、あるいは近似式が提案されている。たとえば、振動する平板翼については Theodorsen 関数を含む理論空気が求められており、これからフラッタ風速が計算できるのであるが、Selberg<sup>38)</sup>はその近似式を与えただけで、非流線形断面については補正係数をこれに乘じることとし、別に Klöppel ら<sup>39)</sup>も同様な補正係数の適用を提案している。しかしこれらの簡便法は設計当初でのめやすを与えるに過ぎないとみるべきである<sup>(注2)</sup>。

5. 気流の乱れの空力不安定現象への影響

前2章では主として一様気流中における空力不安定現象について述べた。一様気流での挙動が現象解明の基礎であり、これまでの研究もそのような立場で行われてきたのであるが、われわれが対象とする建造物は接地境界層の中にあり、したがって乱れた気流である自然風を受ける。気流の乱れが前述の各種現象にどのような影響を与えるかについても、ここ数十年の間に多くの研究がなされてきた。結論からいえば、接近流が乱れを含む場合、剥離せん断層の巻込みが強まり、したがって物体下流側部分 (after-body) への剥離流の再付着が促進される。さらに乱れによる励振を高める一方で、にぶい断面の場合、規則的な渦の発生を乱し、長大な建造物においては長手方向の渦の空間相関を減じる。

この結果、最も基本的な長方形断面を例にとれば、次のような影響がみられる<sup>(10), (27), (40)</sup> (図-9, 14 参照)。d/b の大きい、すなわち気流の乱れのもとでも剥離層の再付着がみられない断面では、乱れの存在は渦励振やギャロピングに影響しないか、むしろ活発化させる。ねじれフラッタが発生する断面においても、d/b があまり小さくない場合には小振幅域で発振を遅らせる傾向はみられるものの、大振幅域ではほとんど影響がないようである。これに対して、after-body の長い、d/b の小さい断面では、渦励振、フラッタともに乱れの存在は励

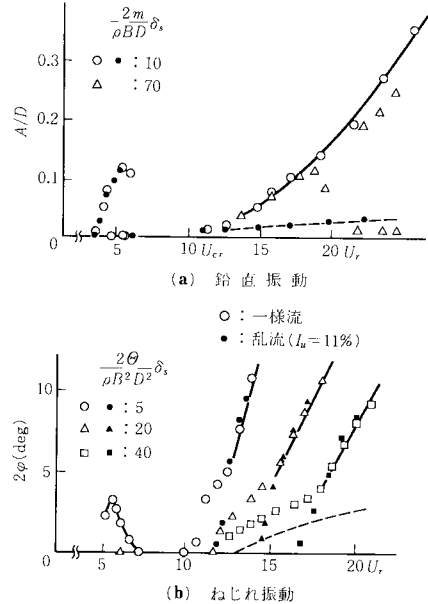
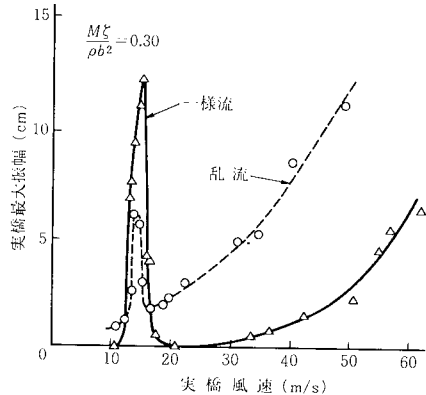


図-14 1:2長方形断面柱の風による振動 (宮田・山田)

振を抑制する。この傾向は乱れの強さ、スケールの増大およびスクリーン数の増加によって促進される<sup>(41)</sup>。以上のことは圧力分布の測定結果からも裏付けられ、静的空気に及ぼす効果とも符合する。連成フラッタさえも乱流中では消滅したという例<sup>(42)</sup>も報告されている。

つまるところ、気流の乱れは空力弾性振動を抑制することが多いが、それは断面形状により、あるいは現象のタイプにより事情が異なる。他方、図-15にみるように、気流の乱れがガスト応答をもたらすことは2. で述べたとおりで、とかく空力不安定現象に対し安定な断面ほどガスト応答が顕著になる傾向のあることは橋梁の設計などで頭を悩ませられる問題となっている。



(乱流の乱れの強さ: 10%, 乱れのスケール: 1/100, 模型縮尺: 1/60)

図-15 Palmerston 橋洞模型実験結果 (Irwin)

注2) このほか、中村 (J. Sound & Vibration, 57(4), 1978) は平板翼を含め、扁平なにぶい断面のフラッタ限界風速推定の近似式を与えている。

乱れた気流のもとでの構造物の動的応答解析に際しては、構造物の振動に伴う非定常空気力と気流の乱れによる変動空気力とを分離して扱い、場合によっては前者は一樣流中における値を用いている。しかし非定常空気力も気流の乱れの影響を受けるはずである。Scanlanら<sup>43)</sup>はその影響はきわめて小さいとしているが、最近の中村・吉村<sup>44)</sup>や佐藤<sup>45)</sup>の実験によればかなりの影響がみられており、このことは上述の応答の変化からもうかがえる。

いずれにせよ、乱れのスケールの効果を含めて、風速の時間的、空間的変動が風に対する構造物の応答にどのような影響を与えるかはいまだ今後の研究にまつべき点が多い。また、このような乱れの影響は近年注目されはじめてきた近接構造物との相互作用を考えるうえでも重要である。

## 6. む す び

風と構造物とのかわりから生じるさまざまな問題の中で、基本的な断面をもつ構造物の振動現象に関する研究の展望を試みたが、展望というよりいささか解説的な内容となってしまったことをお詫びしたい。この種の問題は第二次大戦前からの航空工学の分野における空力弾性学の成果に基づく部分もあるが、非流線形断面構造を対象とした研究のほとんどはここ20年余の間に急速な発展を遂げてきたものである。

まだ歴史も浅く、しかも学際的な問題であるために、用語の定義、現象の発生機構をはじめとしてさまざまな議論があり、かつまた実験に頼るところが多く、定説なるものを断定的に述べるのははばかれるところも少なくない。このような状況のもとで文献を網羅することはことさら避けたので、たぶん筆者の独断と偏見があるやもしれないことはお許しいただきたい。

ここで取り上げた多くの研究も、究極的には、機能を満足する構造物を安全に、しかも経済的に設計することに役立てようとするものである。工学に身を置く者としては、そのような設計とのかかわりについても触れてみたかったが、紙面の都合で適わなかった。複雑な性格をもつ自然風を相手とするとなると、まだまだ解決すべき課題が残されているのが実情であって、一般の構造工学関係者にも、この点を理解していただければ幸いである。

本稿について、九州大学応用力学研究所 中村泰治教授からご意見をいただいたことに対し、謝意を表する。

## 参 考 文 献

- Ito, M. and Nakamura, Y. : Aerodynamic stability of structures in wind, IABSE Surveys, S-20/82, 1982.
- Wyatt, T.A. and Scruton, C. : A brief survey of the aerodynamic stability problems of bridges, Bridge Aerodynamics, ICE, 1981.
- Scanlan, R.H. : Wind effects on long-span bridges, ASCE Spec. Conf. Metal Bridges, 1974.
- 田中 宏 : 吊橋の耐風設計について, 土木学会誌, 55巻2号, 1970.
- たとえば Davenport, A.G. : Buffeting of a suspension bridge by storm winds, Proc. ASCE, Vol.88, ST 3, 1962.
- Vickery, B.J. : Load fluctuations in turbulent flow, Proc. ASCE, EM 1, 1968.
- Bearman, P.W. : An investigations of the forces on flat plates normal to a turbulent flow, J. Fluid Mech., Vol.46, Part 1, 1971.
- これらについては岡内 功・伊藤 学・宮田利雄 : 「耐風構造」3.5参照, 丸善, 1977.
- E. D. Jancuskas : Monash University 提出 Ph.D. 学位論文, 1983.
- 宮田利雄・山田 均 : 橋桁のフラッターと風の乱れ, 橋梁と基礎, 16巻, 11号, 1982.
- “Bridge Aerodynamics”, ICE, 1981に収録されている Erskine 橋 (J.S. Hay), Ewijk 橋 (A.J. Persoon), 末広大橋 (成田信之・佐藤弘史) の実測報告.
- Proc. 5th Int'l. Conf. Wind Engineering, Pergamon Press, 1980における Bronx-Whitestone 橋 (A.G. Davenport, N. Isyumov, H. Rothman, H. Tanaka) および 関門, 末広両橋 (T. Okubo, N. Narita, K. Yokoyama, H. Sato) の実測報告.
- Kanda, J. : Reliability of gust response prediction considering height dependent turbulence parameters, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.14, 1983.
- Vickery, B.J. : Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent flow, J. Fluid Mech., Vol.25, 1966.
- 白石成人・松本 勝 : 充腹構造断面の渦励振応答特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 322号, 1982.
- King, R. : A review of vortex shedding research and its application, Ocean Engineering, Vol.4, 1977.
- 笠口展宏・田中博喜・高原 茂・松井友二 : 振動円柱の非定常空気力に関する研究, 第1回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集, 1970.
- Otsuki, Y., Washizu, K., Tomizawa, H. and Ohya, A. : A note on the aeroelastic instability of a prismatic bar with square section, J. Sound and Vibration, Vol.34, No.2, 1974.
- 中村泰治 : 二自由度フラッタとしての円柱の渦励振, 第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集, 1978.
- Tamura, Y. and Matui, G. : Wake-oscillator model of vortex-induced oscillation of circular cylinder, Proc. 5th Int'l. Conf. Wind Engineering, 1979.
- Washizu, K., Ohya, A., Otsuki, Y. and Fujii, K. : Aeroelastic instability of rectangular cylinders in a heaving mode, J. Sound and Vibration, Vol.59, No.2, 1978.
- Komatsu, S. and Kobayashi, H. : Vortex-induced oscil-

- lation of bluff cylinders, *J. Wind Eng'g. and Indust. Aerodyn.*, Vol. 6, 1980.
- 23) 中村泰治・中島正道・渡辺公彦：扁平な構造断面柱の渦励振一曲げ振動一，九州大学応力研所報，59号，1983.
- 24) Shiraishi, N. and Matsumoto, M. : On classification of vortex-induced oscillation and its application for bridge structures, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodyn.*, Vol. 14, 1983.
- 25) Den Hartog, J.P. : "Mechanical Vibrations" , McGraw-Hill, 1956 (邦訳あり).
- 26) Parkinson, G.V. : Aeroelastic galloping in one-degree of freedom, *Proc. Int'l. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures*, Her Majesty's Stationary Office, 1963.
- 27) Novak, M. : Galloping oscillations of prismatic structures, *Proc. ASCE*, Vol. 98, EM 1, 1972.
- 28) Nakamura, Y. and Mizota, T. : Unsteady lifts and wakes of oscillating rectangular prisms, *Proc. ASCE*, Vol. 101, EM 6, 1975.
- 29) Wawzonek, M.A. and Parkinson, G.V. : Combined effects of galloping instability and vortex resonance, *Proc. 5th Int'l. Conf. Wind Engineering*, 1979.
- 30) Scruton, C. : On the wind-excited oscillations of stacks, towers and masts, *Proc. Int'l. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures*, Her Majesty's Stationary Office, 1963.
- 31) Nakamura, Y. : On the aerodynamic mechanism of torsional flutter of bluff structures, *J. Sound and Vibration*, Vol. 67, No. 2, 1979.
- 32) 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，168号，1969.
- 33) Scanlan, R.H. and Tomko, J.J. : Airfoil and bridge deck flutter derivatives, *Proc. ASCE*, Vol. 97, EM 6, 1976.
- 34) 森光康夫・伊藤 学・宮田利雄：空気力の非線形性を考慮した構造物の空力弾性振動，土木学会論文報告集，219号，1973.
- 35) 久保喜延・伊藤 学・宮田利雄：風による吊橋の多自由度非線形応答に関する研究，土木学会論文報告集，252号，1976.
- 36) Scanlan, R.H. et al. : Indicical aerodynamic functions for bridge decks, *Proc. ASCE*, Vol. 100, EM 4, 1974.
- 37) Yoshimura, T. and Nakamura, Y. : On the indicial aerodynamic moment response of bridge deck sections, *Proc. 5th Int'l. Conf. Wind Engineering*, 1979.
- 38) Selberg, A. : Oscillation and aerodynamic stability of suspension bridges, *ACTA Polytech. Scandinavica*, Ci 13, 1961.
- 39) Klöppel, K. et al. : Teilmodellversuche zur Beurteilung des Aerodynamischen Verhaltens von Brücken, *Der Stahlbau*, 1964.
- 40) 中村泰治：風による構造物の振動発生機構，文部省自然災害特別研究研究成果 No. A-59-1「柔構造物の強風災害防止のための設計規範に関する研究」(代表：伊藤 学)，1984.
- 41) 宮崎正男・宮田利雄：乱流中の角柱の空力応答特性と乱れのスケール効果，第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集，1978.
- 42) Davenport, A.G. and King, J.P.C. : Dynamic wind forces on long span bridges, Final Report, 12th Congress of IABSE, 1984.
- 43) Scanlan, R.H. and Lin, W.H. : Effects of turbulence on bridge flutter derivatives, *Proc. ASCE*, Vol. 104, EM 4, 1978.
- 44) Nakamura, Y. and Yoshimura, T. : Flutter and vortex excitation of rectangular prisms in pure torsion in smooth and turbulent flows, *J. Sound and Vibration*, Vol. 84, No. 3, 1982.
- 45) 佐藤弘史：Master thesis at the University of Western Ontario, 1982.

(1985. 7. 18・受付)