

箱型建物模型の風洞実験（第2報）

—強制振動法による空気力の測定—

富 沢 治 利
 鷲 津 久 一 郎
 (東京大学)
 大 屋 昭 男
 (東京大学)
 大 築 志 夫

§ 1. 緒 言

著者等は前報告¹⁾において、自由振動法による箱型模型の風洞実験について報告した。この報告はその続編である。

フラッタ模型実験法には大別して二つあり、一つは自由振動法であり、一つは強制振動法である。自由振動法は模型や実験装置等が割合簡単であって、その模型の空気弾性的特性の概略をつかむのには適しているが、風速・振幅・振動数の幅広い範囲にわたって模型に作用する空気力を知り、フラッタ現象の機構を解明しようとすれば強制振動法によらざるを得ない。

本実験は正方形断面の矩形柱の2次元模型を、一様流中で上下に強制振動させて、模型に作用する空気力を測定したものであって、東京大学工学部土木工学科に設置されているエッフェル型空気弾性試験用風洞を用いて、昭和46年10月16日より昭和46年10月30日までの期間実施した。なお実験のレイノルズ数範囲は $(0.26 \sim 1.24) \times 10^5$ であった。

§ 2. 風 洞

東京大学工学部土木工学科所属のエッフェル型空気弾性試験用風洞およびそれを使用しての実験方法については参考文献²⁾にその概要のべられているが、われわれの実験の立場からここに若干の補足説明をしたい。この風洞の概観は図-1および写真-1に示すとおりであり、その諸元は下記のとおりである。

風速範囲	1 ~ 30 m/s 連続
測定部寸法	高さ 1.8m 幅 0.7m
送風機	軸流送風機 1基 動翼 2枚 静翼19枚
駆動電動機	超分巻誘導電動機 (出力19kw)

非定常空気力を測定するための加振装置の諸元は下記

のとおりである。

振幅	上下振動 2 ~ 100mm (12設定点)
	回転振動 4 ~ 40度 (4度間隔 10設定点)
振動数	1 ~ 24Hz
駆動電動機	三相E C電動機 (出力11kw)

§ 3. 模 型

本実験に使用する模型に要求される性質は次のように考えられる。風洞の流れの中に設定して空気力を測定する模型をアクティブモデルと呼び、風洞外の流れのない所に設定してアクティブモデルに働く力のうちの慣性力成分のみを検出するための模型をダミーモデルと呼ぶことにすると、この2種の模型を同時に加振して慣性力を相殺し、空気力のみを取りだすのであるから、空気力に比較して慣性力が桁はずれに大きくては結果として得られる空気力の精度が期待できない。したがって空気力を大きく、慣性力を小さくすることが前提である。

まず空気力の絶対量を大きくするためには (1)模型寸

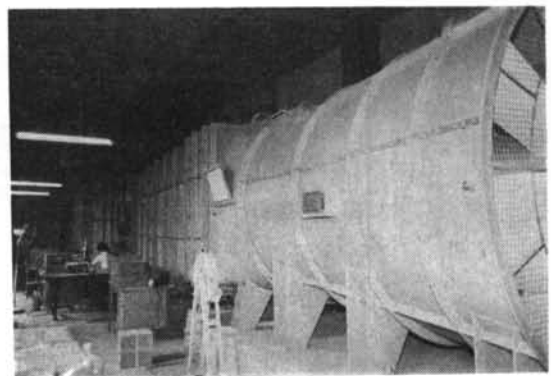


写真-1 風洞全景

度を大きくすること (2)実験風速を高くすることが考えられるが、(1)については、模型を大きくすると重量増加によって慣性力が増えてしまうので、材料の選定、設計、工作法等によって重量増加を最小限におさえる必要がある。(2)については、加振装置の振動数範囲は前記のとおり 1~24Hz であるが、このうち精度よく計測できるのは 3~6 Hz 程度である。こうして加振振動数 f_m の範囲が定まってしまうと、加振時の無次元振動数、

$$S_m = \frac{f_m \cdot d}{V}$$

をある範囲に保つために風速 V をあまり高くすることはできない。ここに d は模型の代表的寸法である。

次に慣性力を小さくするためには、重量を軽くすればよいのであるが、このために模型寸法を小さくすることは空気が小さくなるためによくなく、前述の S_m をある範囲に保つために d をあまり小さくすることはできない。

また、加振するためには模型に十分な強度と剛性が必要であり、その最低次の固有振動数が加振振動数と充分はなれていて、しかもその振動の減衰のよいことが要求される。

風洞中の模型まわりの流れの 2 次元性は模型の端末条件によって変化するとみられる。本実験に使用した支持機構は模型と風洞内壁との間に 15mm 程度の隙間が生じてしまうので、流れがこの隙間に流れこんで 2 次元性を損うことのないように、模型両端に整流用の端板を取りつける必要がある。

本実験に使用した模型は、以上の条件に従って東京大学の橋梁研究室で考案された形式であって、その構造は次のとおりである。

模型は写真-2 に示すような正方形断面をもつ矩形柱であって、その寸度は高さ 150mm、幅 150mm、長さ 660mm である。

模型の本体は、発泡スチロールの板材を組合せたもので、その上を表面の保護と仕上げの意味でポリエチレンの薄膜で包み、これだけでは全体の剛性と四辺の強度が不足なので、補強材としてアルミの L 型材 (6mm × 6mm $t=1$ mm) を四辺に配したものである。写真で見るとおりその両端には整流用の円板がとりつけられているが、その厚さは 4.5mm であってパルサ板材の 3 枚合板である。その直径は 300mm であって、これは模型の代表的な寸度すなわち一辺長 150mm の 2.0 倍である。この端板には模型

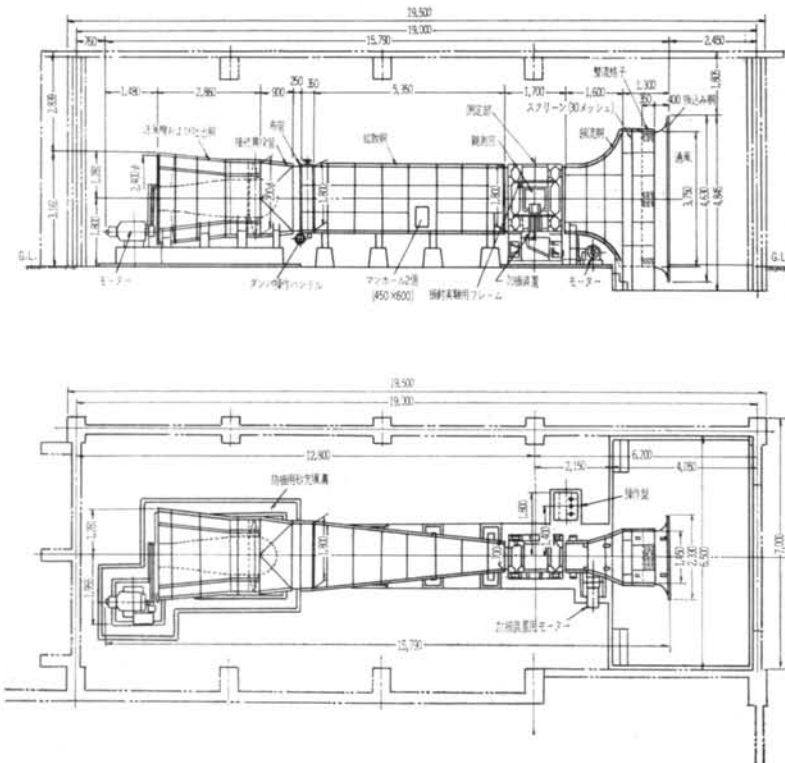


図-1 空力弾性試験用風洞

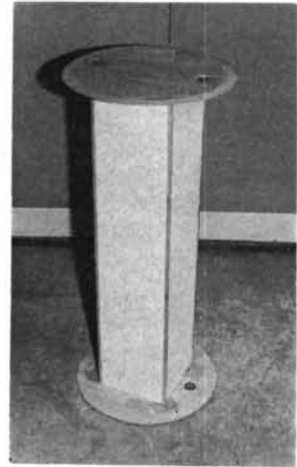


写真-2 模型

取付アームに連結するためにボールベアリングが各2個装着されていて、その位置は実験時の設定迎角に応じて取付位置を変化させることができる。この端板の整流効果によって、本実験の場合は、端部隙間の吸込みもほとんど防止され、よく2元性を保つことが確認された。模型重量はボールベアリングを含み、アクティブモデル、ダミーモデル共、約770グラムであった。

§ 4. 加振機構

本実験で使用した模型の加振機構を写真-3に、その概略図を図-2～4に示した。

加振の原動機は三相E Cモータ（出力11kw）であって電子回路によって速度制御する方式の電動機である。模型重量、加振振幅、振動数等の変化に応じて、場合によってはモータ出力が余って回転ムラを生ずる可能性があるので負荷調整のために、フライホイールに加えて電磁ブレーキが装着されている。この制御方式により振動数の変化範囲は1~24Hzとなっているが、測定装置等の精度上の要求から、本実験の加振振動数は3~6 Hzとしたことは前記のとおりである。

加振振幅は電動機の出力軸にとりつけた偏心板の偏心量を変化させて可変とする。用意されている偏心量は2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100mmの12種類であるが、実験に使用した振幅はこのうち2, 5, 10, 15, 20mmの5種類である。

偏心板以降の加振機構は図-2に示すとおりである。

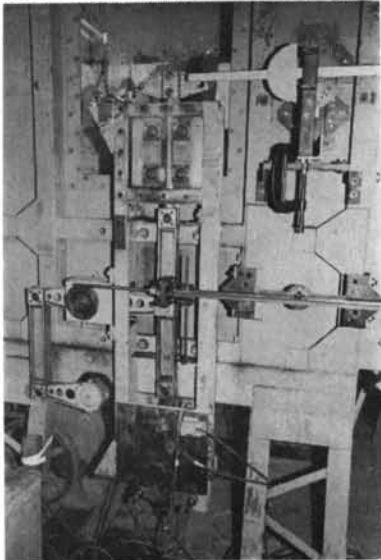


写真-3 加振装置

すなわち、偏心板にとりつけたクランク棒によって回転運動を往復運動に変換して片振れ軸、振れ腕等のリンク機構により上下直線運動になおし、模型取付けアームを介して、アクティブモデル、ダミーモデルを同時に加振する。

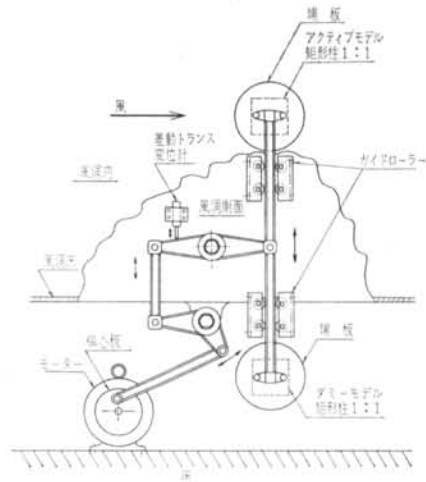


図-2 曲げ（上下）加振装置略図

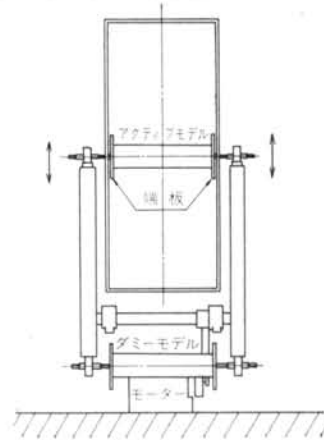


図-3 非定常空気力測定部断面図

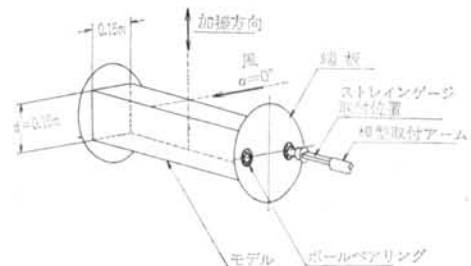


図-4 模型支持部

§ 5. 計測装置

模型に働く力は支持アームに張ったストレンゲージにより検出する。アクティブモデル、ダミーモデル共4本のアームで模型を支えているが各アームに表裏各1枚のストレンゲージ（各模型について8枚ずつ合計16枚）を張ってこの出力を検出する。

アクティブモデルから検出された出力は空気力と慣性力が加算されたものであり、空気力のみを知るためには慣性力を差引かなければならない。ダミーモデルに働く力は静止空気によって受ける力を無視すれば、慣性力のみとみなされるから、アクティブモデルの出力からダミーモデルの出力を差引くことにより空気力のみが得られる筈である。

この方式に従って計測装置の構成は次のようになっている。

ストレンゲージは2枚を直列に接続したものを1単位として、通常の4ゲージ法による接続により、1モデルにつき8枚のゲージからの出力を検出するようになっている。ゲージの出力はブリッジボックスを経てストレンアンプに入り、ここでアクティブモデルとダミーモデルの慣性力を等値に設定して引算回路に入れて空気力のみをとりだす。この空気力の高周波ノイズ成分をローパスフィルタによって取り除き、ペン書きオシロ、データレコーダに記録する。

模型の振動変位量を検出するのは、リンク機構の一部に差動トランスをとりつけて、この出力を直流アンプで適当に校正された値に増幅して空気力と同様な記録装置に記録する。

実験時の風速は模型の前下方に設定したピトー管により動圧と静圧の差を検出し、ベッツ型マノメータで読んで風速に換算する。以上の測定装置をブロック線図にまとめると図-5のようになる。



図-5 非正常空気力測定のブロック線図

§ 6. 実験方法—空気力の測定

加振振動数と実験風速との関係は、無次元振動数 S_m をパラメータにしてあらわすと図-5のようになる。

正方形断面の矩形柱の Strouhal 数,

$$S_a = \frac{f_a \cdot d}{V} \quad (f_a \text{ は後流中の渦の振動数})$$

は大略0.125附近と推定されるから、いわゆる lock-in の現象の起る附近を観測するためには、無次元振動数 $S_m = 0.125$ の近辺を実験点に選ぶ必要がある。したがって加振振動数 f_m が決まると実験風速範囲は図-6によって大略決定できる。実験風速の決定に当っては、時間的、経済的に実験ケースの数に制限が加えられるため、共振風速近辺の実験点を密にし、これから離れるにつれて粗になるように考慮した。

適当な偏心量をもつ偏心板をとりつけることにより、加振振幅を決定したのち、アクティブモデルの出力を校正し、振動を拘束した状態で風洞を運転して空気力を測定する。このデータを解析することによって、この模型の Strouhal 数を知ることができる。

本実験装置の加振振動数を制御する機構は、時間を経過するにつれて、当初設定した振動数よりも漸次上昇して行く傾向をもっている。したがって実験時の加振振動数は大略の値を設定しておいて、正確な値は記録されたデータからケースごとに読みとることにした。

データレコーダに記録するデータの長さは、周波数解析を行なう際に対象とする周波数範囲、特にその最低周波数によって決まるが、今回の実験では1ケース正味120秒の記録を行なった。そのデータの典型的な例を図-7～図-10に示す。これらの図は振動数 $f_m \approx 4$ Hz,

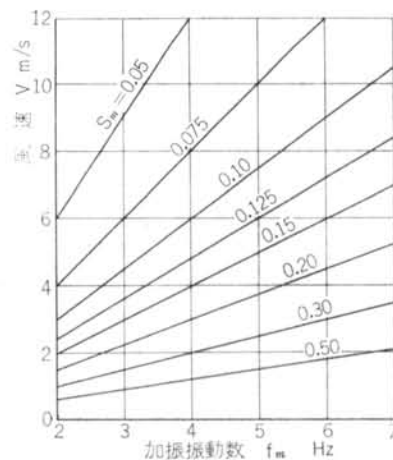


図-6 無次元振動数 S_m と風速

加振振幅 $h_0=20\text{mm}$ の場合であって、測定時の風速は図中に示されているとおりである。図の横軸は時間軸であり、縦軸は上の図が揚力 $L(t)$ 、下の図が上下の振幅 $h(t)$ である。ここに $h(t)$ 、 $L(t)$ は図-11に示すように、上向きを正とする。ちなみにこのケースにおける共振風速は大略 4.8m/sec 附近である。共振風速付近での $L(t)$ には唸り (beat) がおこっているのがよくわかる。

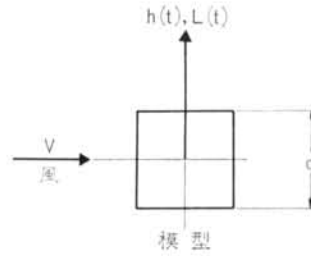


図-11 変位 $h(t)$ と揚力 $L(t)$ の正方向



図-7 $h_0=20\text{mm}$ $f_m \doteq 4\text{Hz}$ $V=4.55\text{m/s}$

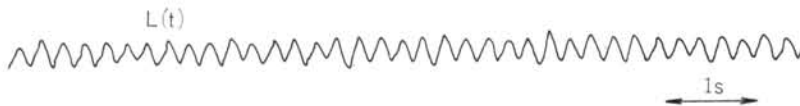


図-8 $h_0=20\text{mm}$ $f_m \doteq 4\text{Hz}$ $V=5.45\text{m/s}$



図-9 $h_0=20\text{mm}$ $f_m \doteq 4\text{Hz}$ $V=6.58\text{m/s}$



図-10 $h_0=20\text{mm}$ $f_m \doteq 4\text{Hz}$ $V=8.30\text{m/s}$

§ 5. 実験結果の解析 (その1)

上述のように迎角 0° で一様流中におかれた正方形断面柱を毎秒 f_m 回の速さで,

$$h(t) = h_0 \cos \omega_m t \quad \dots(1)$$

のように上下動の強制振動をさせたときの揚力 $L(t)$ を測定し、つぎにその解析に移る。ここに、 $\omega_m = 2\pi f_m$ である。 $L(t)$ は一般に変動し、不規則であるが、その主要成分は、加振振動数 ω_m と同周期のいわゆる周波数応答成分 L_m と、Strouhal 成分 L_a である。前者を、

$$L_m(t) = L_0 \cos(\omega_m t + \beta) \quad \dots(2)$$

と書くことにする。解析のときには、

$$L_m(t) = a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t \quad \dots(3)$$

とおき、加振周期を $T_m = 2\pi/\omega_m$ とするとき $T = 30T_m$ に選んで、

$$a_m = \frac{1}{T} \int_{-T}^T L(t) \cos \omega_m t \, dt \quad \dots(4) \text{ a}$$

$$b_m = \frac{1}{T} \int_{-T}^T L(t) \sin \omega_m t \, dt \quad \dots(4) \text{ b}$$

によって、 a_m 、 b_m を決定し、

$$L_0 = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \quad \dots(5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(-\frac{b_m}{a_m} \right) \quad \dots(6)$$

によって L_0 と β を決定した。注1)

なお記述の便宜上、

$$L(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 d \ell C_L \quad \dots(7)$$

$$L_m(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 d \ell C_{Lm} \quad \dots(8)$$

によって無次元揚力係数 C_L 、 C_{Lm} を導入しておく。また $Re[\]$ によって複素数の実部をあらわすことにすれば式(1)、(2)は、

$$h = Re[h_0 e^{i\omega_m t}] \quad \dots(9)$$

$$L_m = Re[L_0 e^{i(\omega_m t + \beta)}] \quad \dots(10)$$

と書ける。また、

$$L_R = L_0 \cos \beta, \quad L_I = L_0 \sin \beta \quad \dots(11)$$

とおいて式(10)を、

$$L_m = Re[(L_R + iL_I) e^{i\omega_m t}] \quad \dots(12)$$

注1) 解析に際してのデータの読みとりピッチは $dt = 0.01$ sec であり、データの読みとり長さは加振振動周期の60倍、すなわち $f_m = 4$ Hz であれば約15秒となる。したがって $f_m = 4$ Hz の解析に使用したデータ数は約1500個となる。

あるいは C_{Lm} を用いて、

$$C_{Lm} = Re[(C_{LmR} + iC_{LmI}) e^{i\omega_m t}] \quad \dots(13)$$

とあらわす方法もしばしば便利である。

最後に参考文献3)、4)に従って、 $L_m(t)$ 以外の揚力部分をあらわすために次のような量 σ を導入する。

$$\sigma^2 = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \{C_L(t) - C_{Lm}(t)\}^2 dt \quad \dots(14)$$

以上の関係式より求めたものを図-12~17に示す。これらの実験においては、加振振動数は $f_m \doteq 4$ Hz でほぼ一定であり、風速は $V = 3.0 \sim 8.0$ m/s、振幅は、 $h_0 = 2, 5, 10, 15, 20$ mm で実施した。図-12の縦軸は C_{Lm} の絶

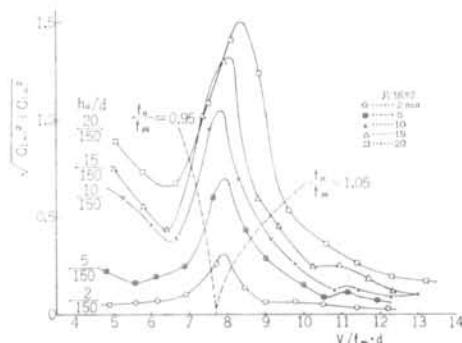


図-12 揚力の絶対値

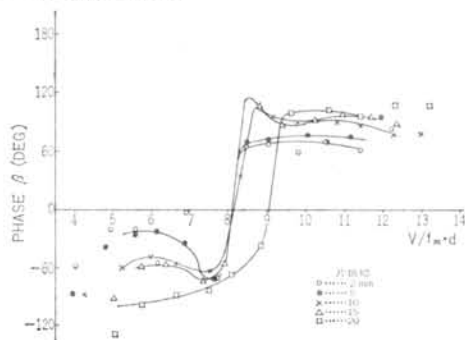


図-13 揚力と変位の位相差

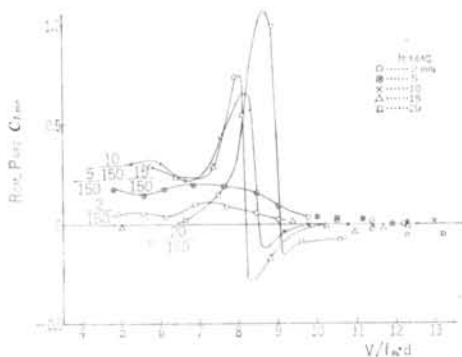


図-14 揚力の Real Part

対値, すなわち $\sqrt{C_{LmR}^2 + C_{LmI}^2}$ であり, 図-13のそれは位相 β である. また図-14, 図-15は C_{Lm} の実部と虚部を示している. 横軸はいずれの図も無次元風速 V/fmd であって, さきに定義した S_m の逆数である.

図-12から C_L の絶対値は, h_0 の大きさによって多少の差異はあるが大體 $V/fmd=8.0$, すなわち $S_m=0.125$ 附近でピークを示し, この附近が共振風速であると考えられる. 図-13および図-15は, 位相 β および C_{Lm} の虚部 C_{LmI} が共振風速附近で符号を変じ, これ以下の風速では負, これ以上の風速では正となることを示している. このことは, 正方形断面柱でおこる弾性不安定現象

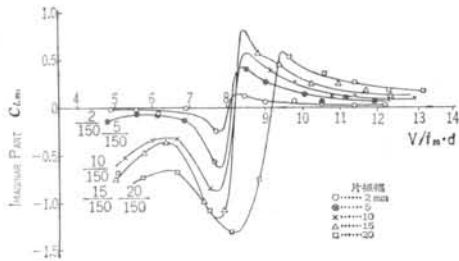


図-15 揚力の Imaginary Part

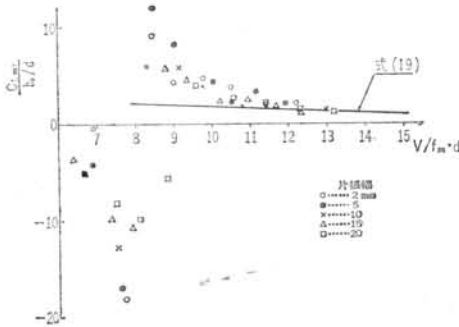


図-16 揚力の Imaginary Part と変位の比

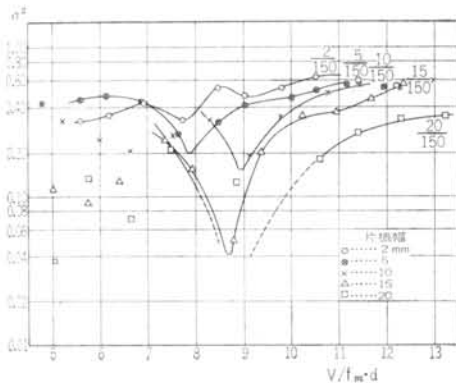


図-17 σ^2 特性

が, 共振風速における単なる Vortex-excited-oscillation ではなく, 共振風速以上では $C_{LmI} > 0$, すなわち negative damping の空気力の作用するフラッタ現象であることを明示しているものと考えてよからう.⁵⁾

共振風速以上の風速における $C_{LmI} > 0$ の特性は, 参考文献6)にも述べられているように, この正方形断面の,

$$\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D < 0 \quad \dots(15)$$

という特性とも関連があるが, たとえ式(15)の特性が成立していても, 共振風速以下では negative damping にならないのは何故かなど, 後流中に吐き出される渦の運動まで含めた非定常空気力学による解明にまつべき問題が多い.

ここで図-15の結果と準定常空気力学理論から得られる結果とを比較したい. 参考文献6)の自励振動理論に用いられている準定常空気力は,

$$L_m = -\frac{1}{2}\rho V^2 d \ell \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \frac{h}{V} \\ = \frac{1}{2}\rho V^2 d \ell \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \frac{2\pi f_m h_0}{V} \sin \omega_m t \quad \dots(16)$$

であるから, 式(13)と式(16)とから,

$$C_{LmI} = -\frac{2\pi f_m h_0}{V} \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \quad \dots(17)$$

したがって,

$$\frac{C_{LmI}}{(h_0/d)} = -2\pi \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \frac{f_m d}{V} \quad \dots(18)$$

が得られる. この結果と図-15を比較するために, まず図-15から図-16を作成する. 縦軸は $C_{LmI}/(h_0/d)$ であり横軸は V/fmd である. 他方, 2次元正方形断面の $\alpha=0^\circ$ における $(dC_L/d\alpha) + C_D$ を参考文献7)から求めると,

$$\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D = -2.6$$

であるので, 式(18)は,

$$\frac{C_{LmI}}{(h_0/d)} = 17.0 \frac{f_m d}{V} \quad \dots(19)$$

となる. 式(19)も図-16に併記した. 予想どおり V/fmd が大となるにつれて, 逆に言えば, 無次元振動数 $f_m d/V$ が小となるにつれて, $C_{LmI}/(h_0/d)$ 特性は準定常理論に近づいてゆく傾向を示す. なおこの点に関しては参考文献8)を参照されたい.

図-15を用いると構造減衰のフラッタに及ぼす影響を求めることができる. いまフラッタ模型の質量を M , 曲げ剛性を K_h , 曲げ変位を h , 構造減衰係数を g_h とする

と、フラッタの運動方程式は

$$M\ddot{h} + K_h h(1 + i g_h) = \frac{1}{2} \rho V^2 d \ell (C_{LmR} + i C_{LmI}) e^{i \omega_m t} \quad (20)$$

となる。これに $h(t) = h_0 e^{i \omega_m t}$ を代入して、実数部と虚数部をそれぞれ相等しいとおけば、

$$\omega_m^2 = \omega_h^2 - \frac{1}{2} \frac{\rho V^2 d \ell}{M h_0} C_{LmI} \quad \dots (21)$$

$$K_h h_0 g_h = \frac{1}{2} \rho V^2 d \ell C_{LmI} \quad \dots (22)$$

が得られる。ここに $\omega_h^2 = K_h / M$ である。式(21), (22)を多少変形すると次のようになる。

$$\left(\frac{f_m d}{V}\right)^2 = \left(\frac{f_h d}{V}\right)^2 - \frac{1}{4 \pi^2} \left(\frac{\rho d^2 \ell}{2M}\right) \frac{C_{LmR}}{h_0/d} \quad \dots (23)$$

$$C_{LmI} = 4 \pi \left(\frac{2M}{\rho d^2 \ell} \delta_s\right) \left(\frac{f_h d}{V}\right)^2 \frac{h_0}{d} \quad \dots (24)$$

ここに $f_h = \omega_h / 2\pi$ であり、 δ_s は対数減衰率で、 g_h が小さい場合には g_h と次の関係がある。

$$\delta_s = \pi g_h \quad \dots (25)$$

いま $2(M/\rho d^2 \ell)$, $2(M/\rho d^2 \ell) \delta_s$ および (h_0/d) の値を指定すると、式(23)と(24)から $f_m d/V$ と $f_h d/V$ が求められ、従ってフラッタ速度 V とフラッタ振動数 f_m が定まる。通常 $f_m \approx f_h$ である。このようにして構造減衰がフラッタ特性に及ぼす影響を計算することができるのであるが、この結果については次の論文で報告したい。(注2)

最後に図-17は σ^2 特性であって、かなり実験点が散っているが、大体傾向はうかがい知ることができる。なお本実験全体を通じ、風速の小さいところでの実験の精度はあまりよくないことを付記する。

§ 6. 実験結果の解析 (その2)

次に $L(t)$ のパワースペクトル解析を行なって注3) 卓越するエネルギー成分をもつ周波数が風速とともにどのように変化するかを調べた。パワースペクトル解析の結果を付図-1~付図-6に示す。

これらの図中に00-00-0320等とあるのは h_0-f_m-V を示し、その単位はmm, Hz, $\times 10^{-2}$ m/secである。たとえば02-04-0320とあれば、 $h_0 = 2$ mm, $f_m = 4$ Hz, $V =$

注2) 本論文の内容は参考文献(11)に英文で発表されているが、その中には構造減衰のフラッタ特性に及ぼす影響も計算され、その結果が示されている。(なお参考文献(11)では Strouhal 成分をあらわすのに本論文のように下添字 a でなくて、下添字 s を用いていることを付記する。(例: f_a ではなく f_s)

3.20 m/secであることを示す。またこれらの図では、一番高いピーク値が1になるように正規化してあることに留意していただきたい。これらの図より次のような特性が観測される。

(1) $h_0 = 0$, 2 mmの場合

Strouhal 数成分 f_a のみが唯一のピークであり、周波数応答成分は観測されない。

(2) $h_0 = 5$ mmの場合

周波数応答成分 f_m があらわれ卓越したピークは2個となる。lock-in 現象のおこっていることが観測される。lock-in 領域をのぞけば f_a 成分の方が f_m よりもかなり大である。

(3) $h_0 = 10, 15, 20$ mmの場合

当然のことながら h_0 の増加につれ f_m 成分は大となる。大体の傾向としては lock-in 領域以下の風速では f_m 成分が大であるが、lock-in 領域をこえるにつれ次第に f_a 成分の方が大となる。

以上をグラフにまとめたものが図-18~23である。いずれも横軸は風速 V (m/sec), 縦軸は卓越したピークの周波数 (Hz) である。

図-24, 図-25, 図-26はこれらの結果を別の方式でまとめたものであって、図-24の横軸は無次元風速 $V/f_m d$ であり、縦軸は加振振動数 f_m と Strouhal 数振動数 f_a との比である。 h_0 によって lock-in 領域のひろがるさまがよくわかる。図-25の横軸は $V/f_m d$, 縦軸は h_0 で、lock-in 領域のおこる大体の範囲を示している。図-26の横軸は無次元風速 $V/f_m d$ であり、縦軸は Strouhal 数成分の PSD の値と f_m 成分の PSD の値との比、すなわち $(PS)_a / (PS)_m$ である。

注3) パワースペクトラムの計算に際してのデータの読みとりピッチは $\Delta t = 0.01$ sec であって、データ数は2048個である。したがってデータを読みとる長さは加振振動数に関係なく上記のデータ数によって決まり20.48秒である。計算に使用したプログラムは参考文献(9)に示されている Fast Fourier Transform の方法にもとづいてこれに改良を加えた広瀬道孝氏・伊藤哲次氏の作成になるものであって、使用計算機は IBM-360/75 である。

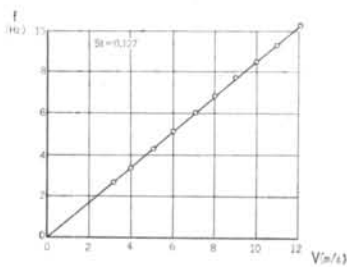


図-18 $h_0 = 0$ mm

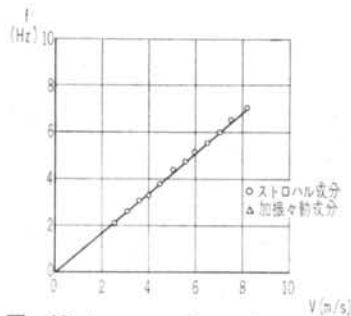


図-19 $h_0 = 2$ mm $f_m \doteq 4$ Hz

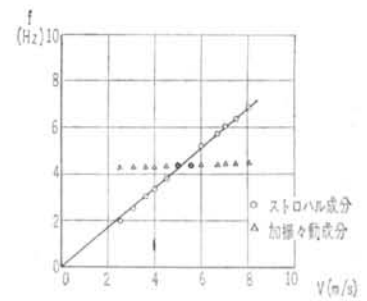


図-20 $h_0 = 5$ mm $f_m \doteq 4$ Hz

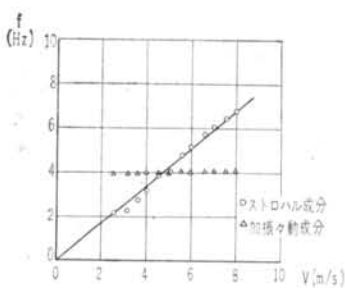


図-21 $h_0 \doteq 10$ mm $f_m \doteq 4$ Hz

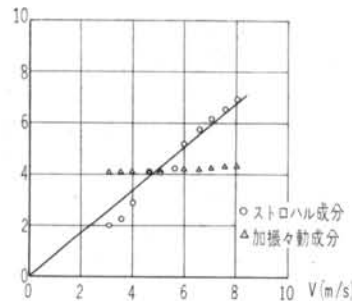


図-22 $h_0 = 15$ mm $f_m \doteq 4$ Hz

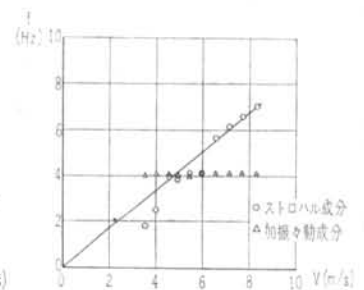


図-23 $h_0 = 20$ mm $f_m \doteq 4$ Hz

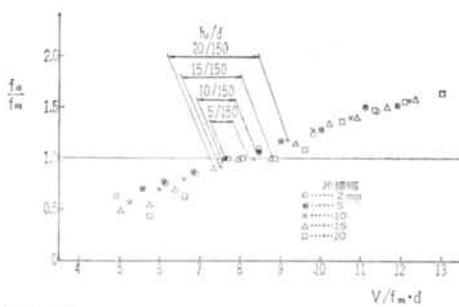


図-24 f_a/f_m 対 $V/f_m \cdot d$

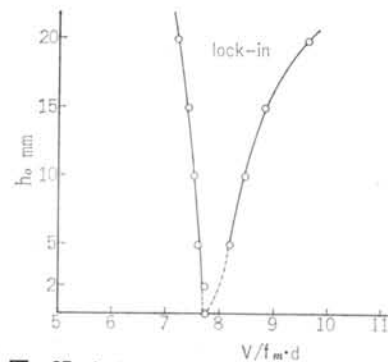


図-25 lock-in 領域

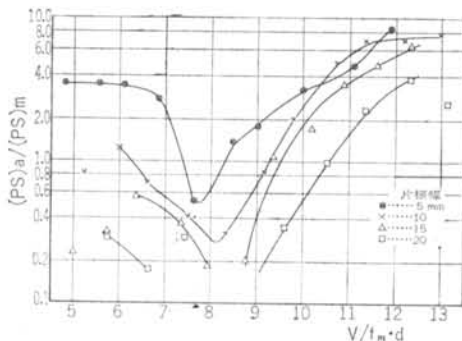


図-26 Strouhal 成分と加振成分のパワー比

§ 7. むすび

本実験は建築構造物にしばしば用いられる正方形断面の空力弾性特性解明のため、一様気流中で2次元模型に強制振動を与え、その非定常空力を測定し解析したもので、得られた結果は次のように要約される。

- (1) いわゆる共振風速附近およびその前後の風速において、振動している正方形断面に作用している揚力の非定常特性がかなりあきらかになった。
- (2) パワースペクトル解析により、この非定常揚力の2主要成分は Strouhal 成分と周波数応答成分であることがわかった。

- (3) 周波数応答成分は共振風速以上では負減衰となる。さきに参考文献1)において、正方形断面の空力弾性的不安定振動について報告したが、これは単なる渦励振振動 (Vortex excited oscillation) ではなく、いわゆる自励振動であることが確かめられた。
- (4) いわゆる lock-in 領域も観測された。
- (5) 揚力中に含まれる加振振動数成分 f_m と Strouhal 数成分 f_a との割合も、パワースペクトル解析により明らかとなった。

このようになりに多くのことが明らかになったが、本文中にも述べたように、振動する正方形断面に作用する空気力の機構の本質的解明にはまだ多くの問題点が残っている。なおこの実験で得られた空気力は、模型に作用する空気力からダミーモデルに作用する空気力を差引いたものであるが、ダミーモデルに作用する空気力の検討も今後の課題の一つである。

著者等は先に水槽実験により、本実験と同様の実験を行なった。¹⁰⁾ 本実験結果は水槽実験結果とほぼ同様な傾向を示している。水槽実験結果との比較については、次の機会に報告したい。

参考文献2), 3), 4)は物体に作用する非定常空気を強制振動法によって測定することを取扱った代表的論文であって、本実験はこれらの文献により示唆をうけたものであることを付記する。

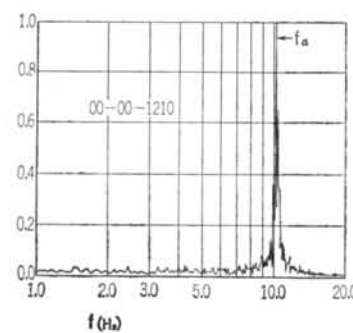
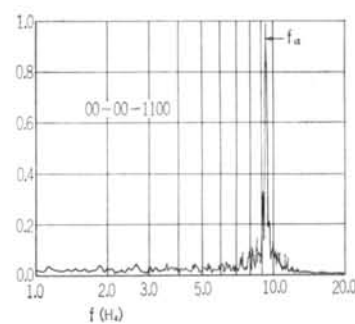
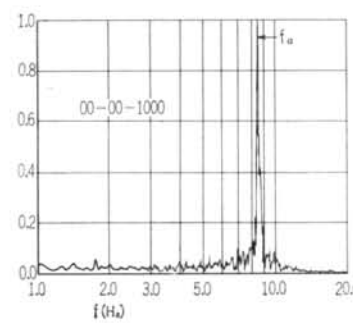
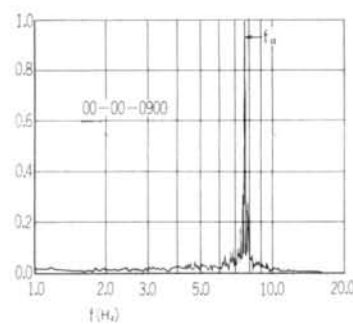
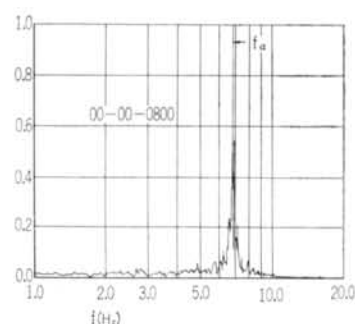
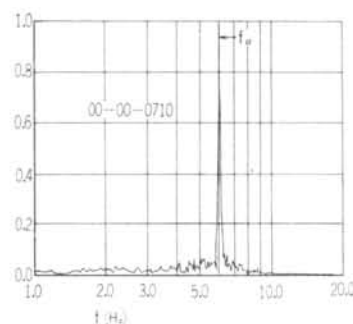
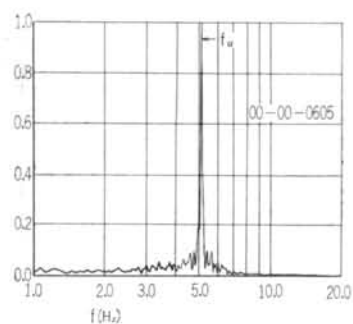
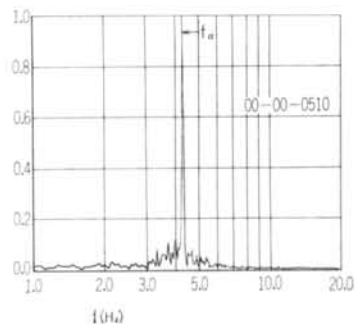
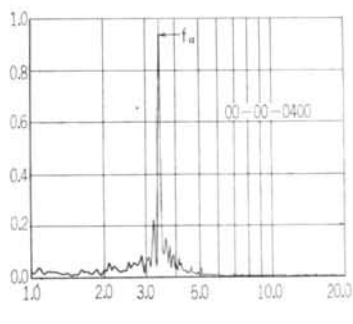
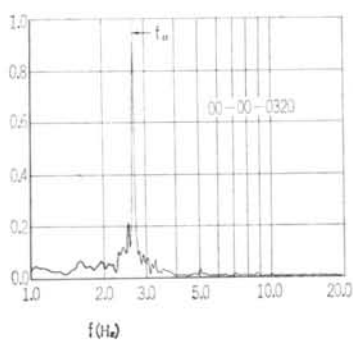
§ 8. 謝 辞

本実験は東京大学工学部土木工学科所属のエッフェル型空力弾性試験風洞を借用して行なったもので、風洞や実験設備はもとより、同学科橋梁研究室で開発された模型製作のノウハウまで利用させていただいたことをまづもって記し、同研究室を主宰される伊藤学教授、および同研究室の宮田利雄講師と田中宏助手に深甚の謝意を表す。また実験実施に当っては、大学院学生森光康夫氏および小栗英和助手の援助をうけたことに対し謝意を表す。

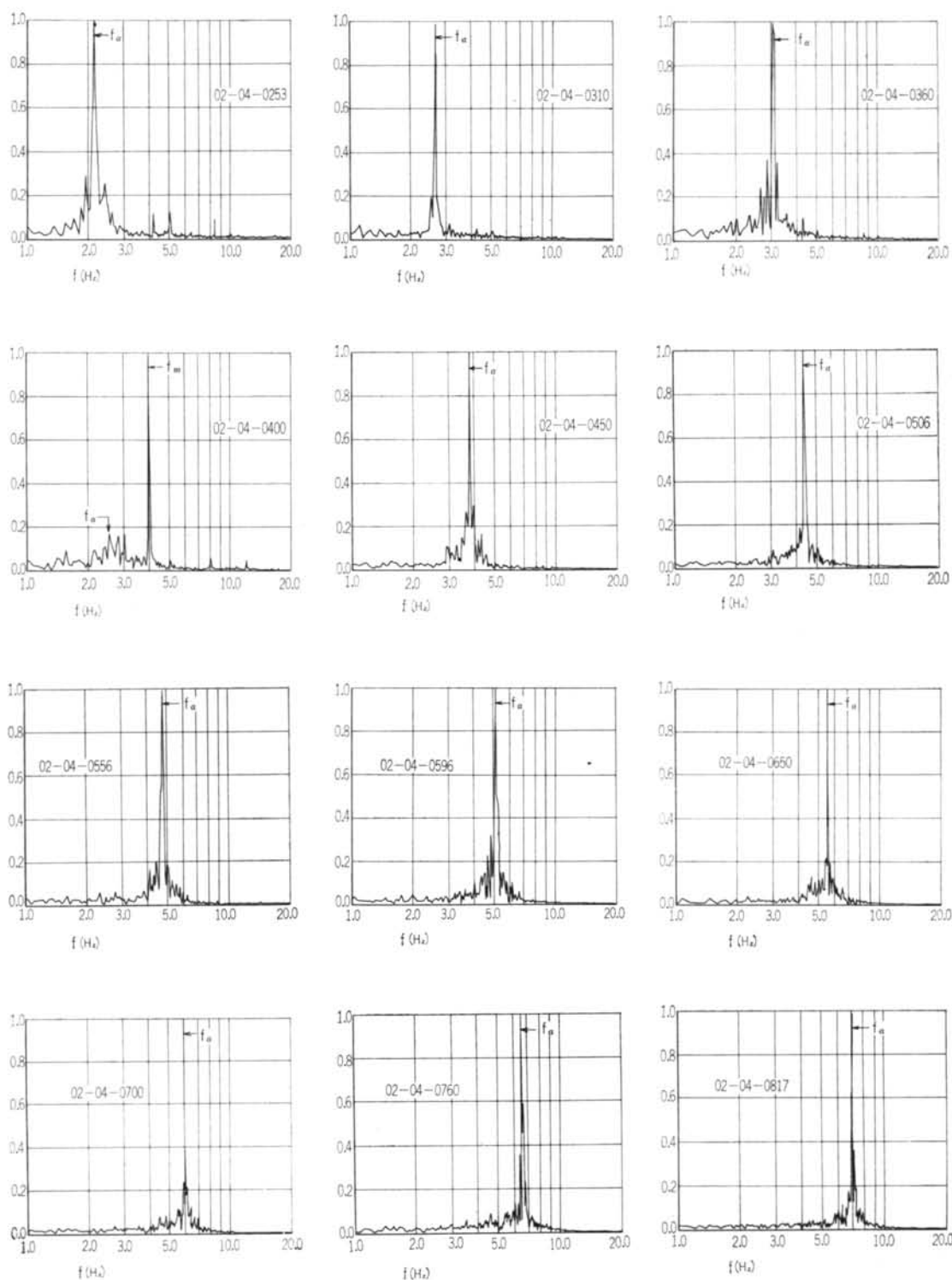
実験データの解析に際しては藤井邦雄氏、広瀬道孝氏、伊藤哲次氏、保田育子氏の協力を受けた。併せて謝意を表す。

<参考文献>

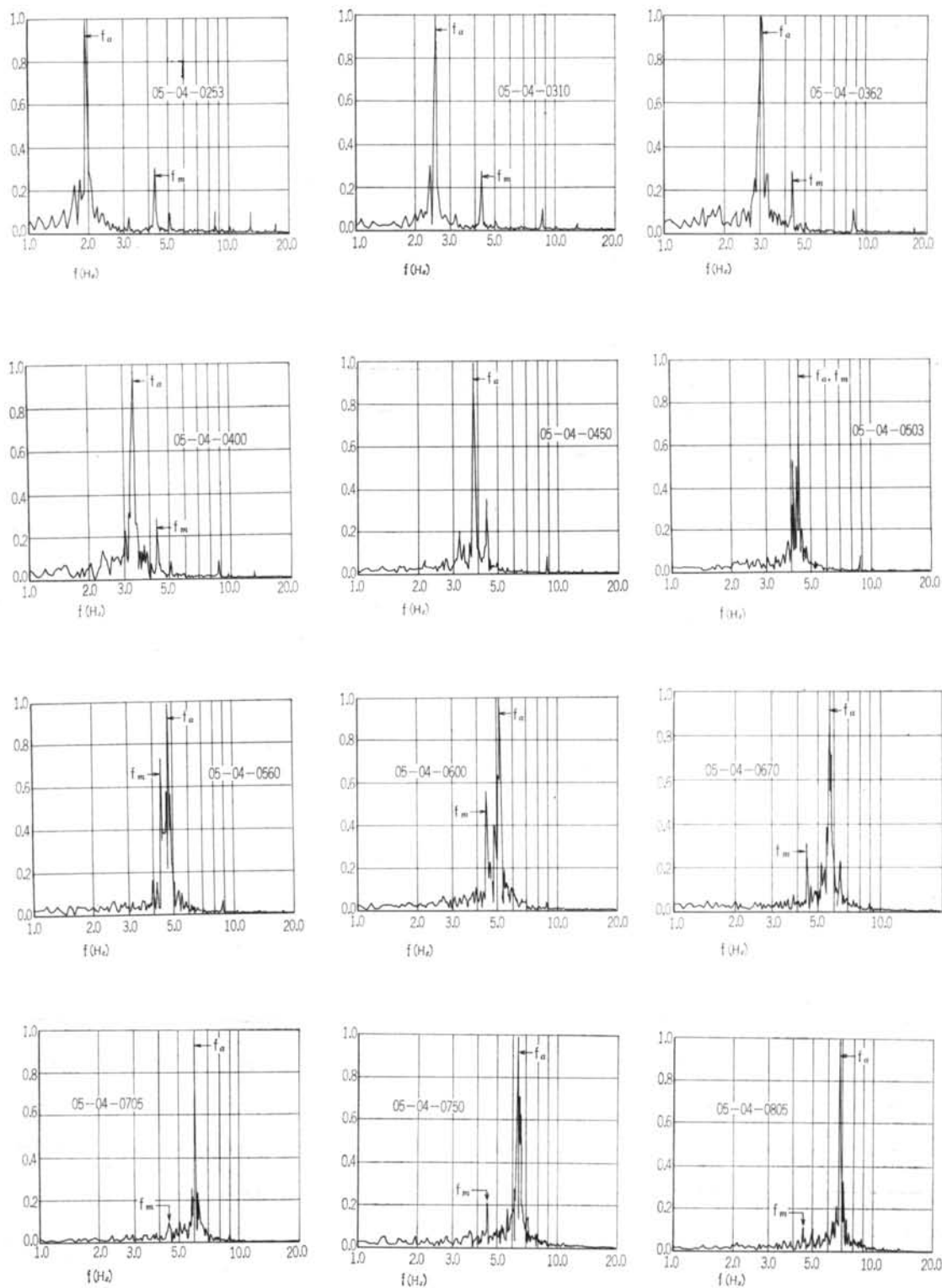
- 1) 藤井邦雄・大屋昭男・富沢治利・鷺津久一郎・大築志夫：“箱型建物模型の風洞実験” 清水建設研究所報 第18号，昭和46年10月，pp.109—142
- 2) 田中宏・伊藤学：“充腹構造物の自励振動における空気力の特性” 土木学会論文報告集 第168号，1969年8月 pp.15—24
- 3) 釜口展宏・田中博喜・高原茂・松井友二：“振動円柱の非定常空気に関する研究” 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集 (1970)，電気学会・土木学会・日本気象学会・日本建築学会・日本鋼構造協会，pp.153—159
- 4) T. Yano and S. Takahara：“Study on Unsteady Aerodynamic Forces Acting on an Oscillating Cylinder” Presented to the International Conference on Wind Effects on Building and Structures, Tokyo, September 6—11, 1971. pp. 737—746
- 5) 鷺津久一郎：“空力弾性学” 共立出版 p.39
- 6) P. J. Den Hartog：“Mechanics' Vibrations” McGraw-Hill
- 7) G. V. Parkinson and N. P. H. Brooks：“On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders” Transactions of ASME, Vol. 83, 1961, pp. 252—258.
- 8) Y. Nakamura and T. Mizota：“Galopping and Vortex Excitation of a Rectangular Block” Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. XIX, No. 64, 1972, pp.225—236.
- 9) William T. Cochran and others：“What is the Fast Fourier Transform?” IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, Vol. Au—15, No. 2, June 1967, pp.45—55
- 10) 大築志夫・鷺津久一郎・富沢治利・吉田光治・藤井邦雄・伊藤哲次：“矩形柱フラッタ” 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集 (1970)，電気学会・土木学会・日本気象学会・日本建築学会・日本鋼構造協会 pp. 185—189.
- 11) Y. Otsuki, K. Washizu, H. Tomizawa and A. Ohya：“Experiments on Unsteady Aerodynamic Lift Acting on a Sinusoidally Oscillating Prismatic Model With Square Section” Journal of Sound and Vibration



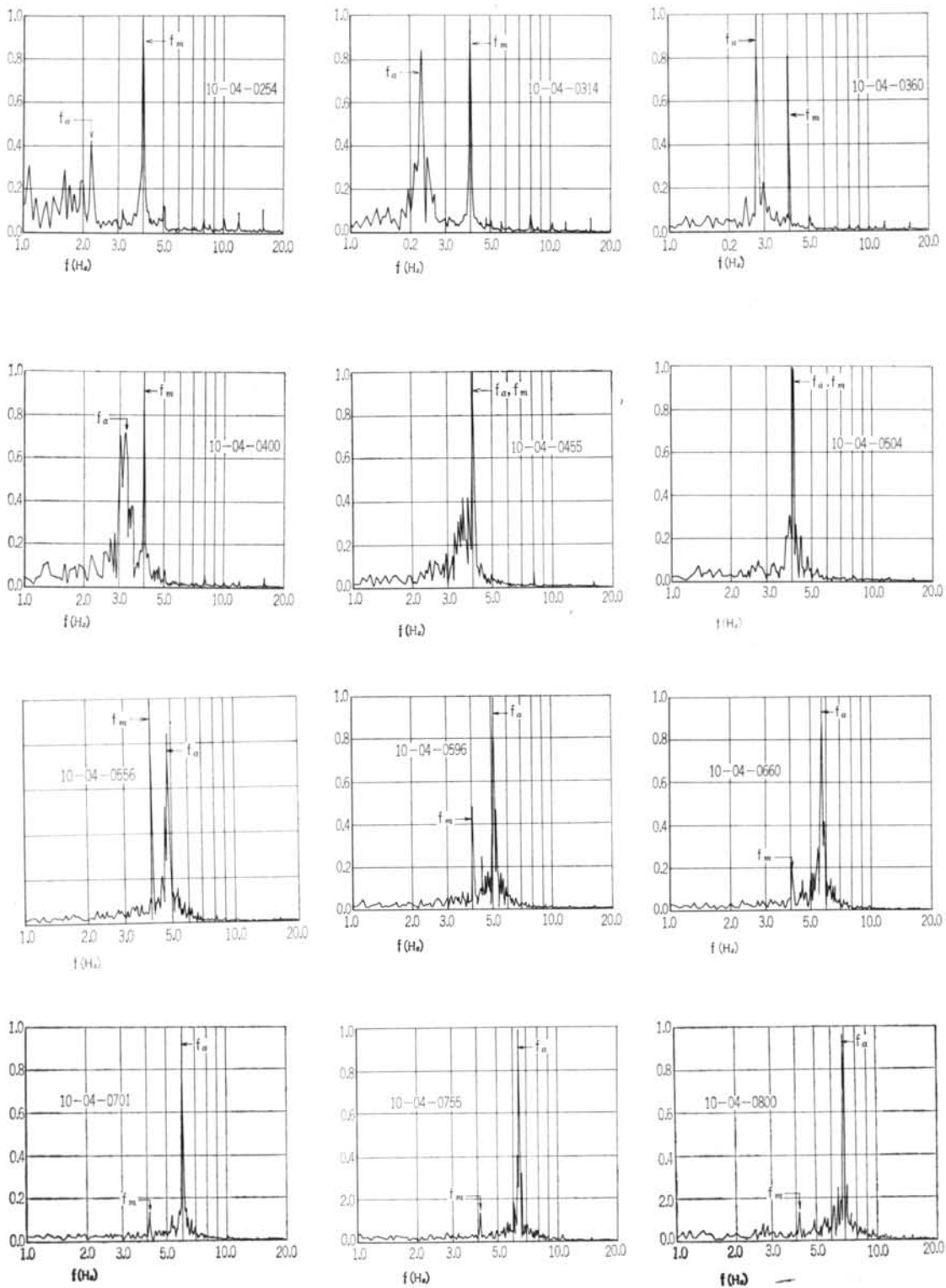
付図—1 揚力のパワースペクトラム



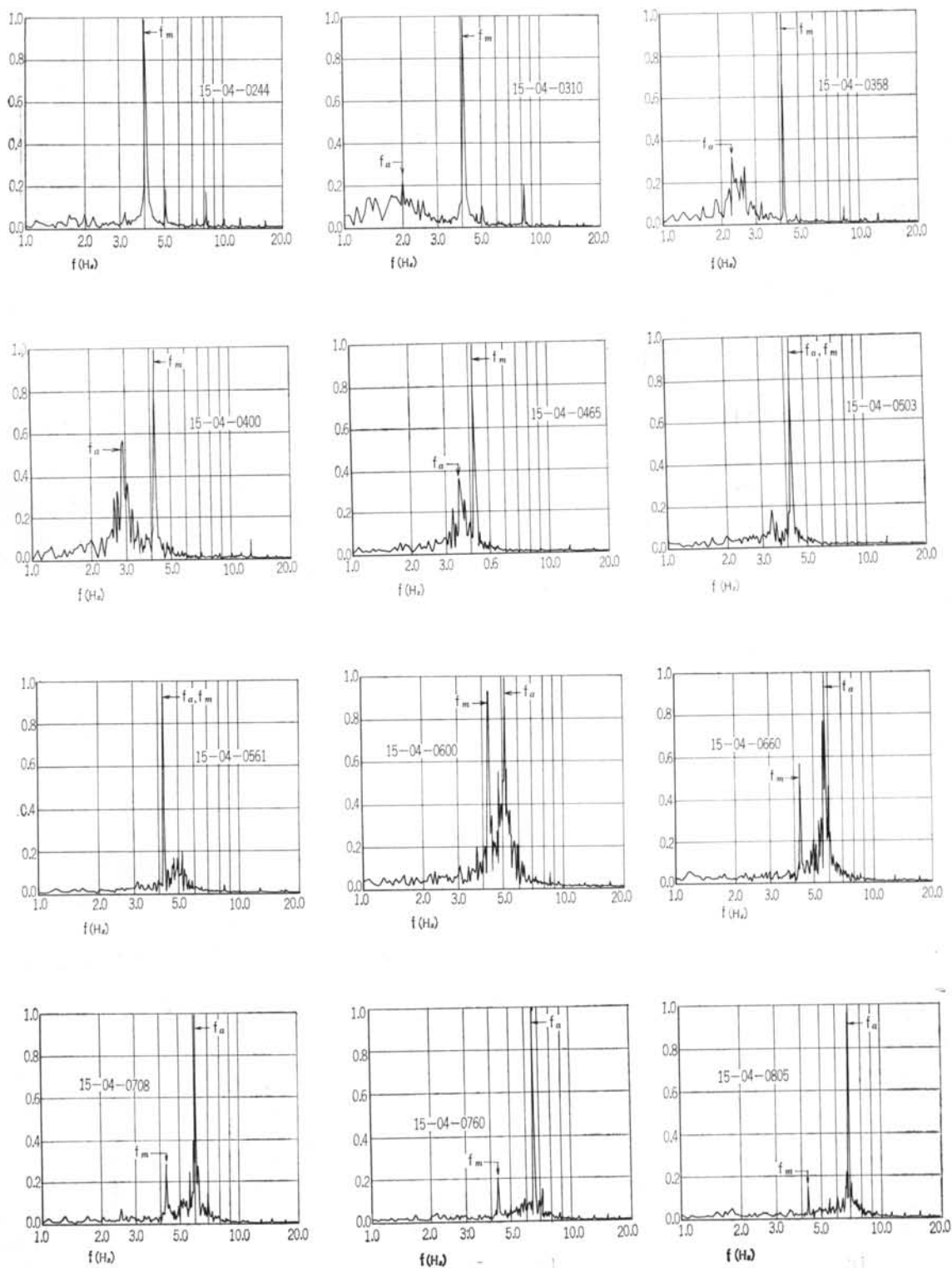
付図-2 揚力のパワースペクトラム



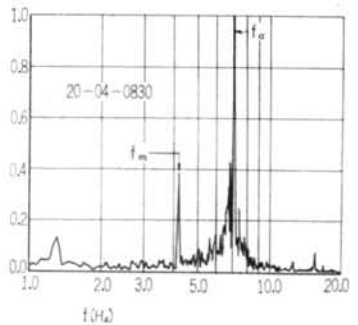
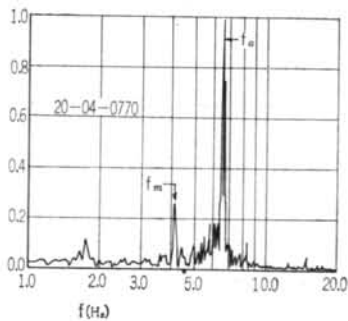
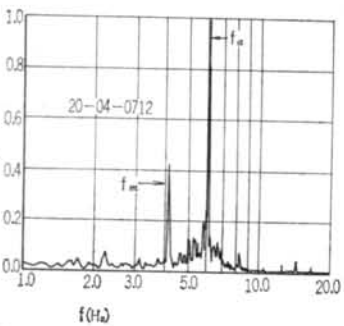
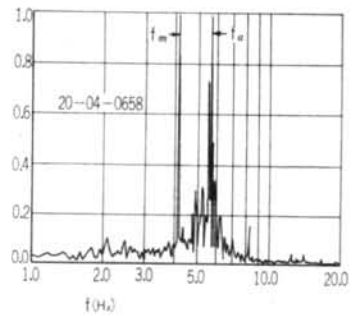
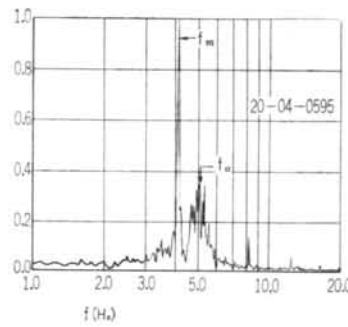
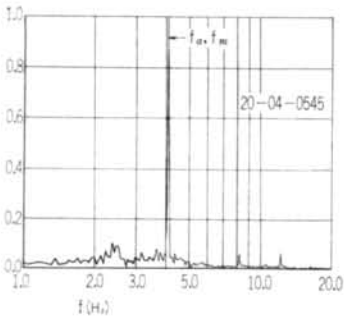
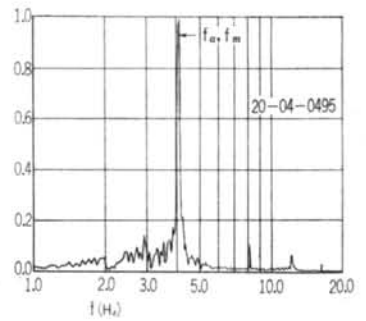
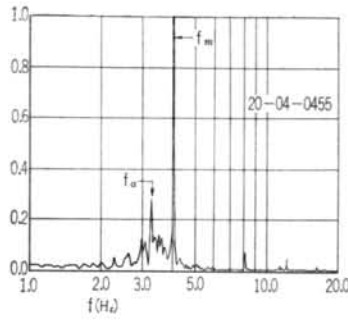
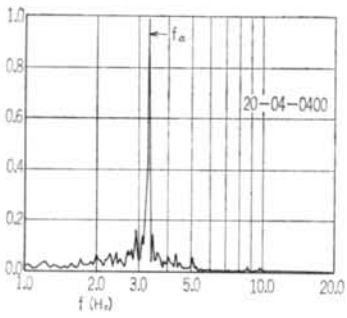
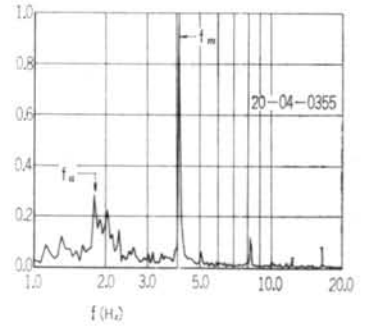
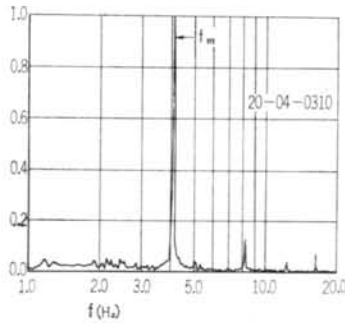
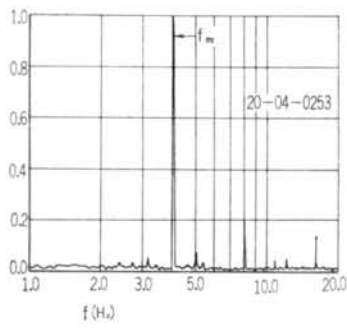
付図-3 揚力のパワースペクトラム



付図-4 振力のパワースペクトラム



付図一五 揚力のパワースペクトラム



付図一六 揚力のパワースペクトラム

前報告「箱型建物模型の風洞実験」に対する訂正

藤井 邦雄

鷲津 久一郎
(東京大学)

清水建設研究所報第18号に掲載された「箱型建物模型の風洞実験」と題する著者等の報告のなかに、コンピュータのプログラムミスに起因する誤りが発見されたのでお詫びとともに以下のように訂正したい。

訂正1 : 122, 123, 124 頁を以下の 56, 57, 58 頁とさしかえる。

訂正2 : 112 頁 § 5. 後流中の Strouhal 数特性 と題する節の13行目以下、すなわち「図中●, ○とあるのはA測定点で……」を次のように訂正する。

「図中○, ●とあるのはそれぞれ一番卓越したピークと、つぎに卓越したピークに対応する実測値を示した。この図から次のことがわかる。

- (1) Strouhal 数特性は $c/d = 2 \sim 3$ の間で不連続的に変化するように見える。
- (2) 1つの c/d に対して2つの S_t が観測される場合がある。
- (3) $c/d = 2.5$ の場合には、殆どパワーの等しい2つの Strouhal 数が観測されるが Strouhal 数の大きい方の振動数は幅をもっていて、明瞭には定めにくい。

これだけの準備をしてから、いよいよ空力弾性実験にうつった。」

訂正3 : 115 頁 § 7. 曲げ1自由度の実験 と題する

節の最後の4行、すなわち、

「曲げ振動に関する限り、……外観を程するものであった。」

を削除する。

訂正4 : 次の図の一番左側の縦軸についている共振風速の記号◆のうち、以下のものを削除する。

125頁	図-54	下側の1個
126頁	図-58	下側の2個
127頁	図-62	下側の1個
	図-65	下側の1個
129頁	図-71	下側の1個
130頁	図-74	1番上の1個と1番下の1個
131頁	図-78	下側の1個
133頁	図-84	下側の1個
134頁	図-88	下側の2個
135頁	図-92	下側の1個
136頁	図-97	下側の1個
138頁	図-104	1番下の1個
139頁	図-108	1番上の1個と1番下の1個
140頁	図-115	1番上の1個と1番下の1個

このような誤りをおかしたのは、パワースペクトル密度を計算する際用いたプログラムにミスがあったのを発見できなかったためであって、コンピュータで得られた結果を鵜呑みにすることの危険性を痛感した。将来の自戒としたい。

2. 風速変動のパワースペクトル分析結果
 (a) 模型 1:1.5 (1) 測定点A

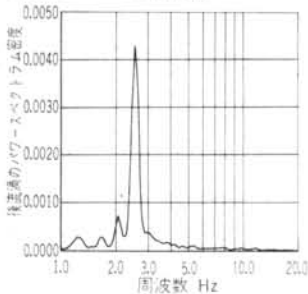


図-25 風速 2.56m/s

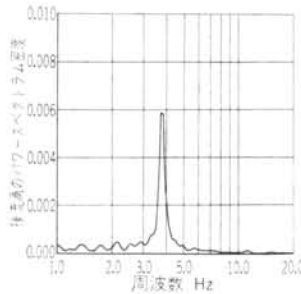


図-26 風速 3.79m/s

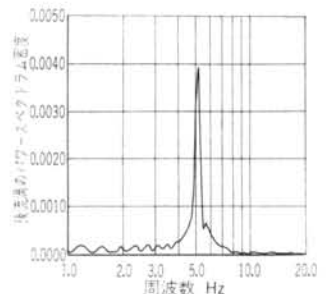


図-27 風速 5.10m/s

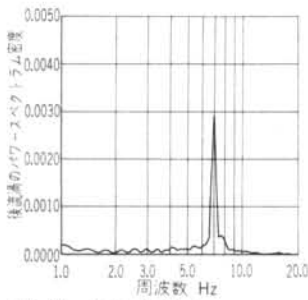


図-28 風速 6.88m/s

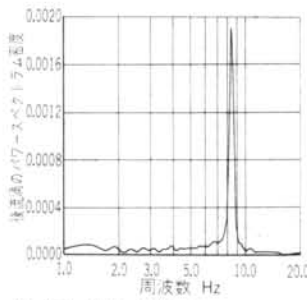


図-29 風速 8.22m/s

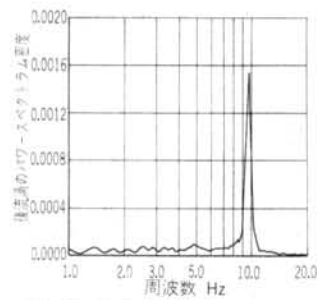


図-30 風速 9.45m/s

(2) 測定点B

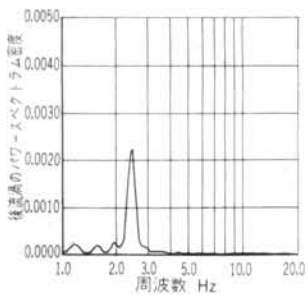


図-31 風速 2.50m/s

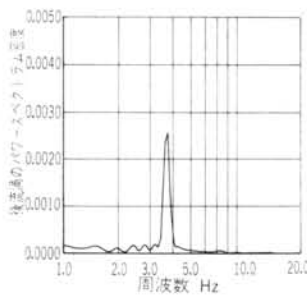


図-32 風速 3.73m/s

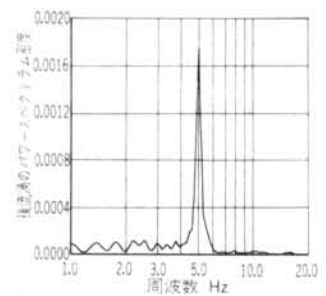


図-33 風速 4.98m/s

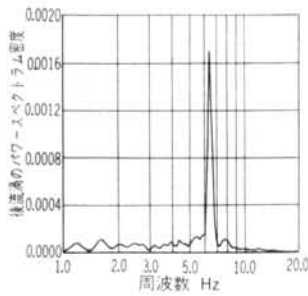


図-34 風速 6.36m/s

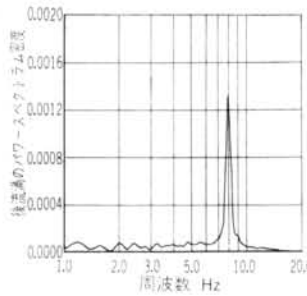


図-35 風速 7.83m/s

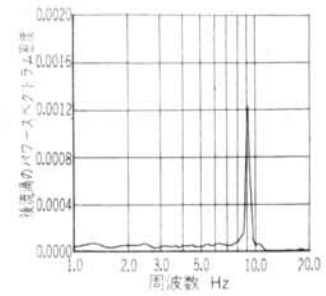


図-36 風速 9.02m/s

(b) 模型 1 : 4.0 (1) 測定点 A

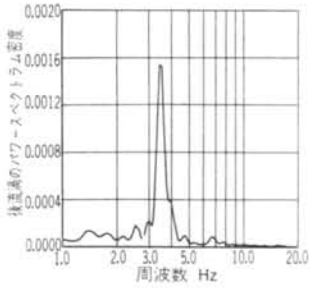


図-37 風速 2.70m/s

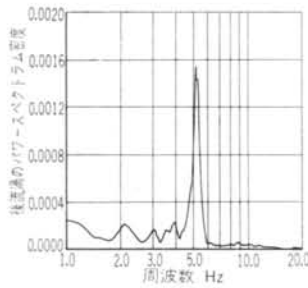


図-38 風速 4.01m/s

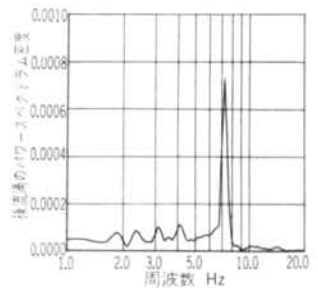


図-39 風速 5.82m/s

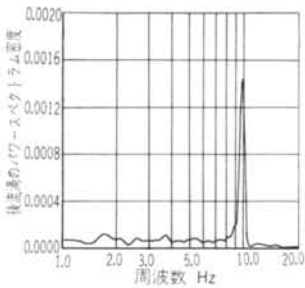


図-40 風速 7.50m/s

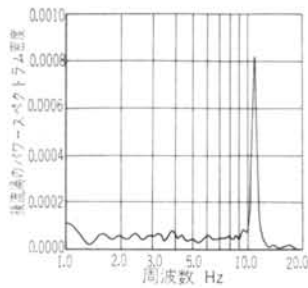


図-41 風速 8.66m/s

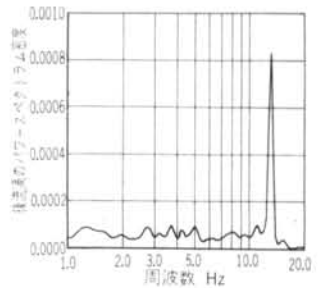


図-42 風速 10.20m/s

(2) 測定点 B

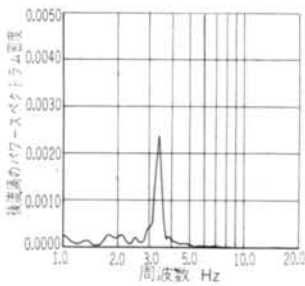


図-43 風速 2.70m/s

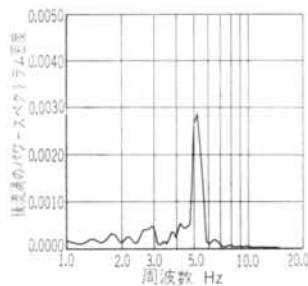


図-44 風速 4.05m/s

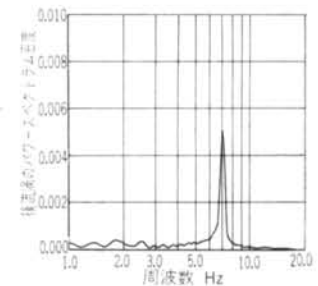


図-45 風速 5.44m/s

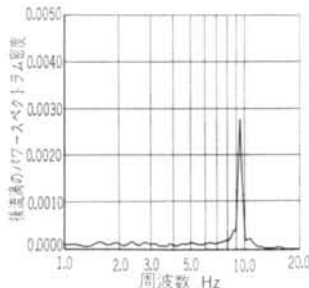


図-46 風速 7.40m/s

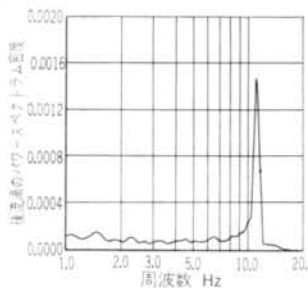


図-47 風速 8.62m/s

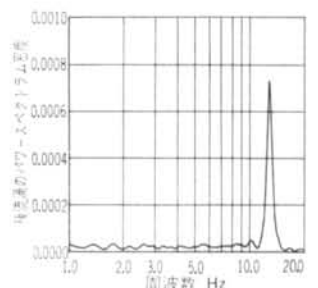


図-48 風速 9.90m/s

3. ストローハル数のよみとり例

(a) 模型 1:1.5 (1)測定点A

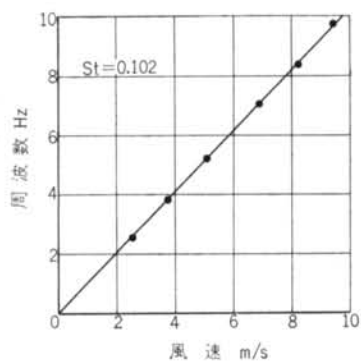


図-49

(b) 模型 1:4.0 (1)測定点A

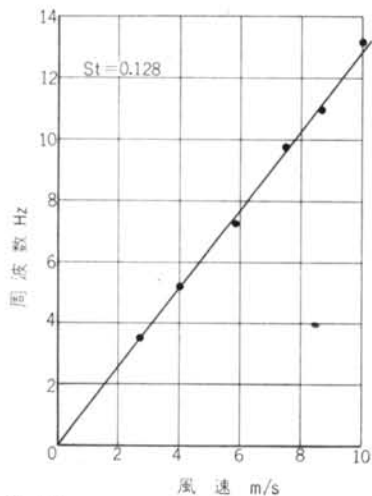


図-51

4. 後流中のストローハル数特性

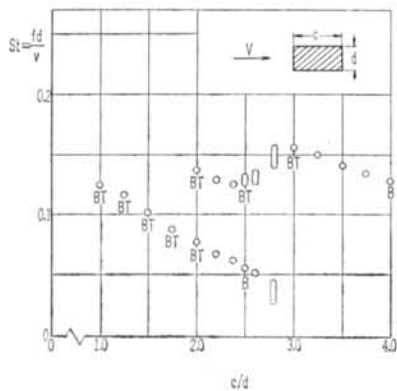


図-53 $St = fd/v \sim c/d$ 曲線

(2)測定点B

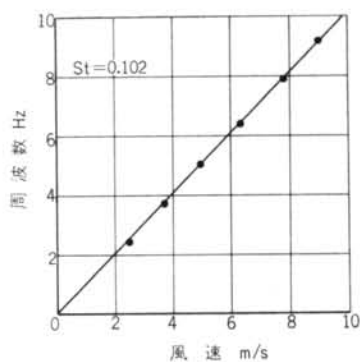


図-50

(2)測定点B

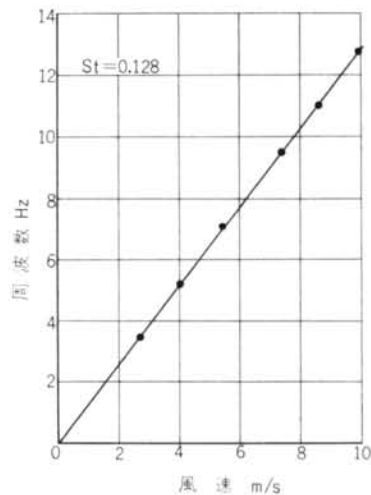


図-52