

箱型建物模型の風洞実験

藤井 邦雄 鷺津 久一郎
(東京大学)
大屋 昭男 大築 志夫
(東京大学)
富沢 治利
(東京大学)

§ 1. 緒言

地上の建物は空中を飛ぶ飛行機や水面を航行する船のような流線型でなく、いわゆる bluff body であるものが多いが、このような物体が風にさらされるときにはそのまわりの流れは剥離流となり、時間とともに変動する後流を伴うのが普通である。そして建物は弾性体であるために、ある風速範囲で vortex-excited oscillation あるいは Aeolian oscillation とよばれるカルマン渦による励振や、フラッタとよばれる自励振動等のいわゆる空力弾性現象 (aeroelastic phenomena) がおこることがある。後者の典型的な例は、1940年に発生した Tacoma Narrows 橋の事故であろう。

この報告の著者の一人である大築は、最近建物が高層化しその固有振動数が低下する傾向にあること、および部材の結合様式が変化し溶接が多く用いられるようになったため、構造減衰 (structural damping) が低下する傾向にあることから、吊橋や煙突などと同様、建物の場合にもその空力弾性特性が問題となるであろうことを予見し、1965年以降一連の風洞実験を実施してきた^{1),2),3)}。そして建物の場合にも、その固有振動数や構造減衰が十分低いと空力弾性的現象がおこることを確認した。

このような建物の空力弾性現象に影響をおよぼす重要な因子としては、建物の3次元形状、固有振動数、固有モード、構造減衰、Reynolds数^{注1)}、密度比^{注2)}等があげられるが、この報告では問題を矩形断面の2次元問題に限り、その曲げの自由度もしくは振り自由度の振動の空力弾性特性についての実験結果について述べる。この実験では矩形断面形状固有の空気力学的特性をしらべることを目的とし、そのため振動系の構造減衰はできるだ

注1) VL/ν ; ここに V は一般流速、 L は建物の代表的寸法、 ν は空気動粘性係数である。

注2) $W/\rho L^3$ 、あるいは $I/\rho L^3$; ここに W, I は建物の重量あるいは慣性能率、 ρ は空気密度、 L は建物の代表的寸法である。

け小さくするよう工夫した。

本実験は東京大学工学部航空学科に設置されている 1.5メートル風洞を用いて、昭和45年12月14日より昭和46年2月13日までの期間行った。なお実験の Reynolds 数範囲は $(0.2 \sim 3.3) \times 10^5$ であった。

§ 2. 2次元風洞

実験に使用した風洞はゲッチンゲン型であるが、この風洞は本来3次元的な模型の実験に用いられるものであるので、本実験ではこの測定部の空間に以下のような2次元風洞をはめこんで、できるだけきれいな2次元流を作り、その中に模型を設定して2次元実験を行なった。

2次元風洞の完全に組立てられた状態での寸法は、高さ2315mm、長さ1800mm、幅604mm、重量は約150kgであり、測定部の内寸法は高さ1500mm、長さ1800mm、幅500mmである。(図-A)

2次元風洞の構成は、測定部分の4枚の側板と、これを風洞吹出口の高さに支持する支持台とにわけられる。

支持台は50mm×50mm厚さ4mmの鉄のアンクル材を溶接したもので、その高さは風洞吹出口の高さによってきめられ、約755mmである。

側板は上下の2枚と左右の2枚で各板は支持台に使用したのと同種のアンクル材を介してボルト締めして組立

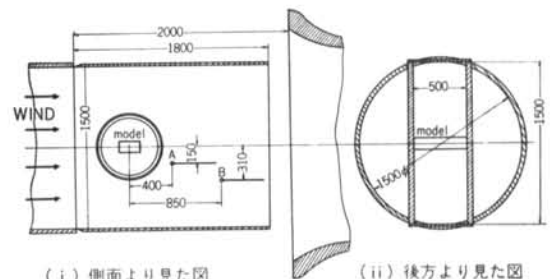


図-A 2次元風洞

てる。上下面板は厚さ15mmのベニヤ板で作り、特に上面板にはピート管取付用の穴があけてある。

左右側板は45mm角のツガ材を縦横各5本ずつ組合せて骨組を作り、この内面に当たる側に厚さ6mmのベニヤ板を張って整形したもので、その一部に模型組込用の500mm径の穴があけてあるが、その周囲は厚さ15mmのベニヤ板と厚さ5mmの鉄板とで補強してある。

測定部の風上側の端部は、測定部に無用の渦を生じないようにナイフエッジに整形した。測定部の幅は自然状態で500mmであるが、気候による木材の狂い、模型の製作誤差、実験の目的による幅の変更等に対処するために±8mm程度の範囲で調節することが可能となっている。

写真-1に示すのは1.5m風洞内に設置した2次元風洞と実験に使用した計測器群である。ただし、この写真においては風洞の気流は右から左に流れ、図-1Aとは逆であることを断っておきたい。

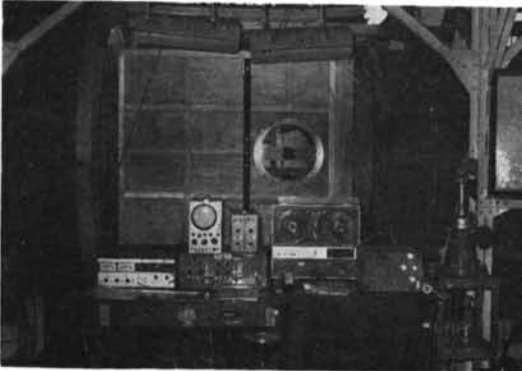


写真-1

§ 3. 模型

模型は図-1Bに示すような矩形断面をもつ直方体であって、その寸法を $c \times d \times l$ (単位mm)であらわすことにする。 $c \times d$ 面が一般流の速度ベクトル V を含む面であり、 l 辺はそれに直角である。この論文では c の代りにしばしば $2b$ という記号を用いる。すなわち $b = c/2$

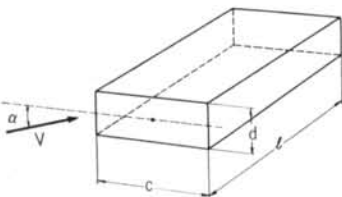


図-1B 模型

である。模型は実験計画に従って、下記の8種類を製作した。

1:1.0 模型	100×100×500
1:1.25模型	125×100×500
1:1.5 模型	150×100×500
1:1.75模型	175×100×500
1:2.0 模型	200×100×500
1:2.5 模型	250×100×500
1:3.0 模型	300×100×500
1:4.0 模型	400×100×500

すなわち $d=100\text{mm}$ 、 $l=500\text{mm}$ は8個の模型とも同一に選んだ。それで、例えば $d=100\text{mm}$ 、 $c=200\text{mm}$ であれば、 $d:c=1:2.0$ であるから、これを1:2.0模型とよぶことにした。この8個の模型を積重ねた状態で撮影した写真を写真-2に示す。

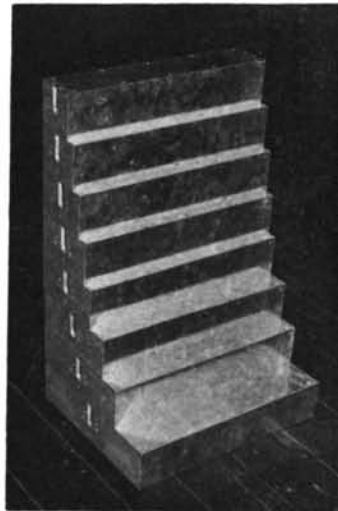


写真-2

後流渦の測定に用いる場合は、模型は固定されているのでその重量は殆んど問題にならないが、曲げや振りのフラッタ実験の場合には模型の重量はできるだけ軽いことが望ましい。さらにいえば曲げの実験の場合には、寸法の異なる模型の間になるべく重量差の小さいことが、また振りの実験の場合には寸法の異なる模型の間になるべく振り軸まわりの慣性率の差の小さいことが望ましい。さらに激しい運動をする模型であるから十分剛性が高くなければならない。また、ひんぱんに行なわれる模型交換の為に、簡単に分解、交換、組立ができるように最小限の止めネジで結合するものとした。しかも繰り返し使用の為に木ネジの類の使用は避けたい。これらの条件を全て満足することはできないが、なるべく目的に添うように、模型は以下のように製作した。

模型の各面のうち、風にさらされる4面は厚さ1mmのアルミ板を使用し、風洞側板に接する2面($c \times d$ 面)

は厚さ10mmのラワン材を加工して、この板材を20mm×20mm、厚さ2mmのアルミのアンクル材で結合する。さらに模型の中心軸を肉厚2mm、外径20mmの鉄パイプのシャフトで結合し、このシャフトが側板上に組立てられた支持金具に固定されるようになっている。こうしてできた骨組に、前記の外板(1mm厚アルミ板)を皿小ネジで結合した。この結果、1:4.0模型(c=400mm, d=100mm, l=500mm)のような大型の模型の場合にも、剛性不足に悩まされることはなかった。

模型は後流渦測定、曲げフラッタ実験、振りフラッタ実験の各場合とも共通であって、各実験目的に合うようにするには、中心のシャフトを各実験装置に合うものに交換すればよいようになっている^{注3)}。なお、この模型の慣性特性は表-1のとおりである。同表のρは地上における空気密度であって標準状態で0.125(kg・sec²/m⁴)である。

c/d	重量* W(kg)	W/ρd ³	慣性能率* I _θ (kg・m・sec ²)	I _θ /ρd ⁵
1.0	2.94	2.36×10 ⁴	0.495×10 ⁻³	3.96×10 ²
1.25	3.04	2.43	0.629	5.03
1.5	3.12	2.50	0.795	6.36
1.75	3.22	2.57	1.01	8.04
2.0	3.30	2.64	1.24	9.92
2.5	3.49	2.79	2.07	16.6
3.0	3.68	2.94	2.95	23.6
4.0	4.07	3.26	5.46	43.7

* この重量、慣性能率は模型単体のものではなく、振動数とバネ剛性とから逆算したものであって、模型支持部その他の同時に振動する部分を含む有効重量、有効慣性能率である

表-1 模型の慣性特性

§ 4. 後流中の風速変動の測定

この実験では、まず風洞中に模型を迎角 $\alpha=0^\circ$ に固定し、その後流中の風速変動を熱線風速計で計測した。ここに迎角 α とは図-1Bに示すようにC辺とVとのなす角である。したがって $\alpha=0^\circ$ とはc辺がVに平行すなわちd辺がVに垂直に流れの中におかれた状態である。このような実験の目的は後流中の風速変動を測定することに

注3) 2次元流実現のためにはc×dの両面に端板をつける方がよかったかも知れないが、われわれの実験ではそのような端板は用いなかった。しかし模型と風洞側面との隙間はできるだけ小さくするよう努力した。

より、固定されている模型に作用する空気力変動特性を間接的ではあるが推定しようとするのである。

この風速変動を測定するために5ミクロン径のタングステン線を用いた熱線風速計を使用した。熱線風速計のプロープの位置を模型の後方の種々の位置においてその波形を観測し、最も良好な波形の得られる位置を探した結果、その位置は模型の後方に中心から大体 $\pm 20^\circ$ の線上の近辺であることが確認されたので、本実験ではそのうち比較的模型に近い点Aと遠い点Bの2点を選んで測定点とした(図-1A-(i)参照)。また模型を交換しても模型の中心位置は変わらないので測定点A、Bは各模型について同一位置とした。なお測定点を模型の後下方の線上に選んだのは、後上方の位置であると、平均風速測定のために模型上前方に設置したピトー管(約20mm径)から発生する後流渦が、測定結果にノイズとして入ってくるので、これを避けるためである。風洞吹出口より見た模型、熱線プロープ、ピトー管を写真-3に示した。

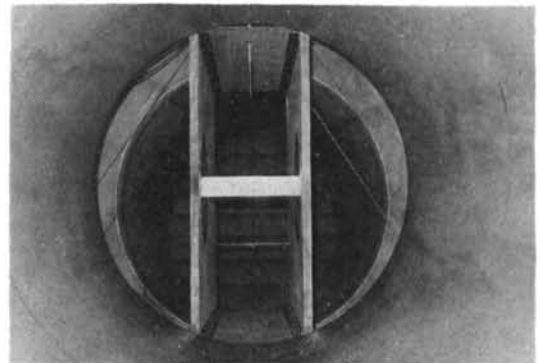
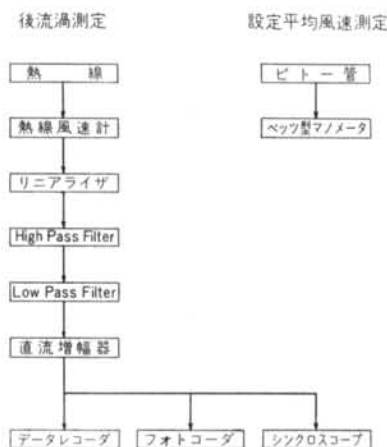


写真-3

さて熱線風速計のプロープで得られた出力は、熱線風速計とそれに組込まれたリニアライザを経て直線化されたHigh Pass Filterを通してその直流成分を切捨てて変動風速部分だけを取り出し、さらにLow Pass Filterを通して高周波部分のノイズを切捨てる。こうしてきれいな形になった出力を直流増幅器により増幅してデータレコーダとフォトコーダに記録した。また入力 of 過小、過大となるのを防止するために、シンクロスコープ上に出力を視覚化して監視できるようにした。

設定した一様流の平均風速は模型上前方に設置したピトー管によって得られる圧力差をベッツ型マノメータで読みとり風速に換算した。以上をブロック線図にまとめると図-1Cのようになる。このようにして熱線風速計で得られた後流風速変動特性の実測例を、この論文末尾の図-1~図-24に示す。



図一C 後流風速変動測定のプロック線図

§ 5. 後流中の Strouhal 数特性

このようにして計測された、後流中の速度変動のパワースペクトル密度 (power spectral density) をデジタル計算機を用いて計算した。その代表的例を末尾の図—25~図—48に示す。

次に、このような図から Strouhal 数を求めるのであるが、そのためにはパワースペクトル密度のピーク値に対応する周波数 f を各図からよみとる。そして1枚のグラフに縦軸に f 、横軸に V をとってプロットし、それらの実験点を重ねる直線の傾斜から Strouhal 数 $St = fd/v$ (f は Hz 、 d は m 、 V は m/sec) を求めるのである。その代表的な例を末尾の図—49~図—52に示す。

このようにして求めた St を縦軸に、模型の寸法比 c/d を横軸にとってプロットしたのが末尾図—53である。図中●、○とあるのはA測定点で測定したもので、それぞれ一番卓越したピークと、つぎに卓越しているピークに対応する実測値を示している。これに対し□、[]とあるのはB測定点で測定したもので、それぞれ一番卓越したピークと、つぎに卓越しているピークに対応する実測値を示している。この図から次のようなことがわかる。

- (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) 一つの c/d に対し、2つもしくはそれ以上の St が観測された。
- (3) 一つの c/d に対し I, II, IIIの曲線の St の比は $1 : 2 : 3$ である。
- (4) 一つの c/d に対し I*, II* の曲線の St の比は

$1 : 2$ である。

- (5) $c/d = 4$ の場合には3個の St が観測され、その比は大体 $1 : 2 : 4$ である。なおまた、 $c/d = 4$ の一番低い St は曲線IIの延長上にあるように見える。

これだけの準備をしてからいよいよ空力弾性特性の実験にうつった。

§ 6. フラッタの実験装置

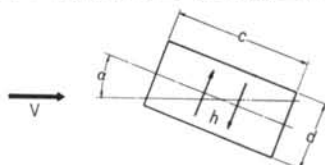
フラッタの実験は、曲げ1自由度、振り1自由度の各場合について行なった。実験は可能な限り模型の振動の減衰率を低くおさえるため、曲げ1自由度の場合は板バネとコイルバネを組合せた支持方法を、振り1自由度の場合はいわゆるクロススプリングとコイルバネを組合せた支持方法を採用した。このような支持方法により他の方法、例えばボール軸受などを用いる場合避けることのできない摩擦による減衰がなくなり、減衰については各バネの構造減衰と空気力による減衰のみを考えれば良いことになる。

6.1 曲げ1自由度の実験装置

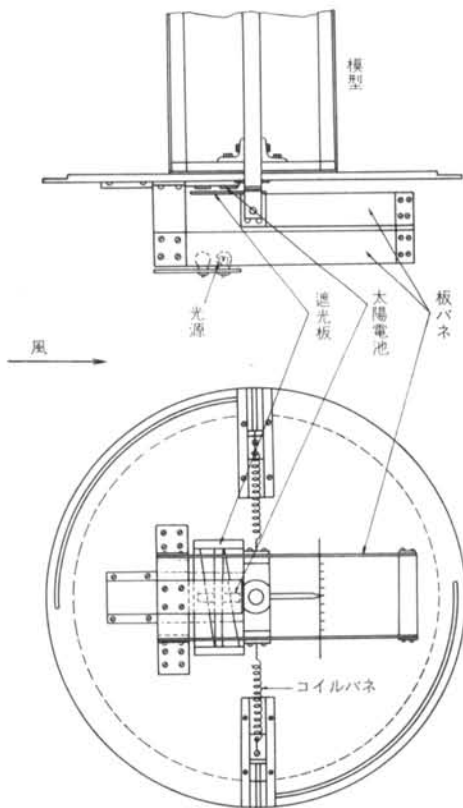
模型を上下振動のみ行なわせるように支持した場合の実験を曲げ1自由度の実験と呼ぶ(図—D参照)。この場合の実験装置の支持は主として板バネを用い、模型変更の際の重量変化による上下位置の修正のためにコイルバネを用いる。

板バネ一對を用いる支持方法では模型の上下方向の振動と同時に、前後方向の振動を生ずることが避けられない。これを防ぐには板バネの長さを充分大きくすればよいが、本実験では500mm径の円板上に装置をおさめる必要があるのであまり長くすることは不可能である。このため、曲げに用いた実験装置は図—Eでみる通り、板バネを途中でおり返したような形のものを作り、前後方向の振動を最小限におさえるようにした。板バネとコイルバネの関係と側板への取付状況を写真—4、板バネと光源、遮光板等を写真—5に示した。

板バネは幅40mm、厚さ1mmと1.6mmの2種類を用いた。コイルバネは巻径20mm、線径1.6mmである。



図一D 曲げ1自由度の実験

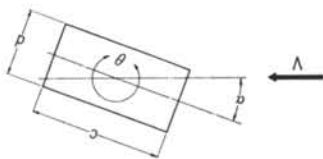


図一E 曲げ1自由度の実験装置

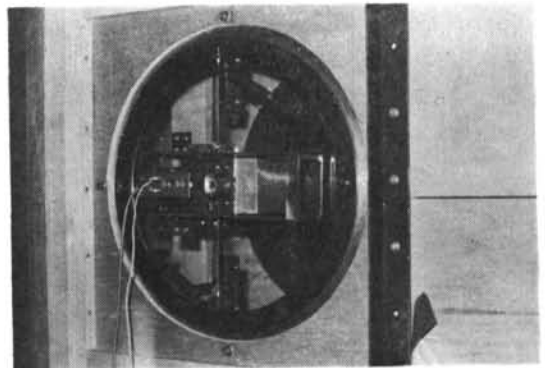
6.2 振り1自由度の実験装置

模型を前後、上下方向に固定し、振り振動のみを行なうように支持した場合を振り1自由度の実験と呼ぶ(図一F参照)。この場合の実験装置の支持は、図一Gに示すとおり、主としてクロススプリングを用い、補助的に剛性を変えるためにコイルバネを用いた(写真一6)。クロススプリングと光源、遮光板、太陽電池等の関係を写真一7に示した。

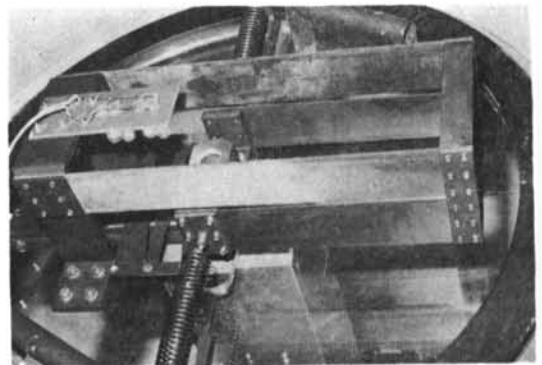
本装置の長所は前述の通り摩擦による減衰を排除できることであるが、短所として振りの回転中心が振り角によって多少変動することがある。しかしその変動は非常に小さく、本実験の場合は無視できる程度であった。



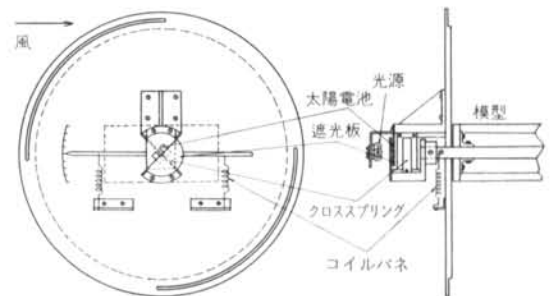
図一F 振り1自由度の実験



写真一4



写真一5



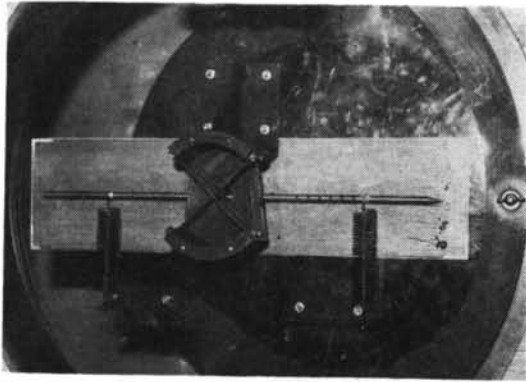
図一G 振り1自由度の実験装置

クロススプリングの板厚は1mmであり、コイルバネは巻径20mm、線径1.6mmであり、模型の慣性能率により、これを脱着あるいは取付位置を変えた。

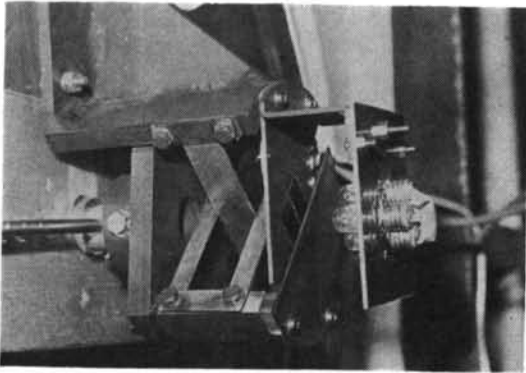
6.3 迎角変化と剛性変更

模型の迎角は、実験開始時に正確に迎角 $\alpha = 0^\circ$ を設定しておけば、あとは支持部分の円板を左右同時に回転して簡単に変更できるように、支持部円板の外周に回転角度の目盛を $\pm 90^\circ$ の範囲できざんでおいた。

また曲げ振りの各場合とも、支持装置の剛性の大きな変更は主スプリング(曲げの場合は板バネ、振りの場合



写真一六



写真一七

はクロススプリング)の板厚を変えることで行う。そのために主スプリングは曲げ振りとも、板厚1.0mm, 1.6mm, 2.0mmの3種類を用意したが、結局2.0mmの厚さのパネは全体的に支持部分の強度とのバランスがとれないことから使用しなかった。

6.4 変位置測定

曲げフラッタの場合は上下の変位置量、振りフラッタの場合は回転角度を検出する装置は、光と光電変換素子を組合せたもので、このために検出装置にも摩擦による抵抗は生じないようにしている。検出装置に使用する光源は外部の光を避けるためにカバーされた装置の内部に組込まれている白熱豆電球(12V 2W×4個)から得る。

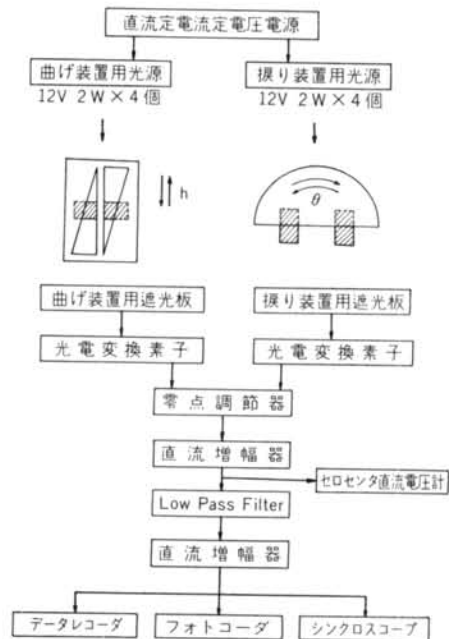
光電変換素子としては太陽電池を用いている。太陽電池の周波数特性は非常に良く、かなり高い周波数の光の変動に対しても敏感に応答するので、その電源に交流を使用するとその点滅を検出してしまふ。そのため電源としては、よく整流されたリップルの小さな直流電源が必要であり、本実験では定電流定電圧方式の直流電源を用いている。

検出装置は曲げ、振りとも同様な原理にもとづき、両

装置とも各々2枚の太陽電池を用いている。光源と太陽電池の間に振りの場合には半円形の遮光板、曲げの場合には長三角形のスリットを2つ組合せた遮光板を入れて、この遮光板を模型に固定し、模型と同時に振動するようにする。太陽電池を2枚用いるのは、最初設定する際に2枚の太陽電池の各々の半分が遮光板によって遮光されている状態になるようにして、この状態を変位0とし、変位に従って一方の太陽電池の受光面積が増加し、一方のそれが減少するようにしておくこと、2枚の太陽電池に発生する電流の差分を取り出すことによって出力を大きくすることができ、出力の直線性を向上させ、その零点を正確に定めることが容易になるからである。

このようにして変位置量に応じた電流変化が得られるが、これを零点調節器を通してドリフトを除き、Low Pass Filterに入れる。ここで直流電源のリップル分による高周波成分その他の高い周波数のノイズを除いてきれいな形になった出力を直流増幅器により増幅し、データレコーダ、フォトコーダ等の記録器に記録する。さらに変位置量が過大になって、模型や支持装置などが破壊されるのを防ぐため出力の一部をシンクロスコープに導いてその波形を監視した。

以上をブロック線図にまとめると、図一Hのようになる。



図一H 変位置測定のプロック線図

§ 7. 曲げ1自由度の実験

模型を2次元風洞内に図—Dのような曲げ(あるいは上下動)の自由振動ができるようにバネを用いて設置する。同図の h は曲げの振幅をあらわす。バネ剛性としては模型に適当な曲げの固有振動数 $\omega_h(\text{rad/sec})$ を与えるように次の2種類を選んだ。

$$3.3 \times 10^3, 7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}$$

この振動系の減衰係数 ζ を静止空気中で測定した。その値は $h \approx 5 \text{ mm}$ 付近で

$$c/d=1, \omega_h=32.5 \text{ rad/sec のとき } \zeta=0.0011$$

$$c/d=1, \omega_h=51.6 \text{ rad/sec のとき } \zeta=0.0027$$

であった注4)。

模型を速度 V の一般流のなかに迎角 α でおき、最初に小変位を与えてから手を放し、その後の振動の時間的経過 $h(t)$ を計測し、安定なリミットサイクルと不安定なリミットサイクルの存在を調べた。文献1)ではこの場合各振幅での ζ をも読みとったが($\zeta > 0$ 安定, $\zeta = 0$ リミットサイクル, $\zeta < 0$ 不安定), このようにすれば同文献にも述べているように、人工的に付加される構造減衰の効果を見るのに便利であるが、労力と時間と費用の見地から今回の実験では ζ のよみとりまでは行なわなかった。

このようにして得られた実験例を末尾図—54~図—82に示す。いずれも縦軸は無次元風速 $V/b\omega_h$ もしくは $V/d\omega_h$ であり、横軸はリミットサイクルの振幅 h であって、実線は振動数の低い方の一連の実験結果における安定なリミットサイクルを、一点鎖線は振動数の高い方の一連の実験結果における安定なリミットサイクルをあらわす。

これらの図を見ると、どの模型も迎角 α が増加するにつれて不安定領域が急激に減少することがわかる。このことは一つにはわれわれの実験では h 運動が図—Dに示すように d 辺に平行な方向に制限されているためでもあらう。

このような図をあつめて縦軸に無次元風速 $V/b\omega_h$ をとり、斜横軸に α をとり、それを各模型の c/d に対し画いたのが図—83である。ここに V は振動がはじまる風速(発振風速)もしくは止む風速(終息風速)である。図中斜線を施した部分が曲げ振動の不安定領域である。

さて再び図—54~図—82に立戻って、これらのうち $\alpha=0^\circ$ の場合の図を見ると、縦軸に◆の記号がつけあ

注4) ここにいう減衰係数 ζ は対数減衰率 δ と

$\delta=2\pi c/\sqrt{1-c^2}$ という関係にある。この振動系の真空中での ζ は主として構造減衰から成るものと考えられる。 ζ の値は振幅の関数である。

るが、これは図—53の Strouhal 数から求めたいわゆる共振風速(resonance speed)である。すなわち、共振風速 V_{res} は

$$St = \frac{fd}{V}$$

より

$$V_{res} = \frac{f_n d}{St} = \frac{\omega_h d}{2\pi St}$$

のように求められる速度で、後流中の風速変動のサイクルと ω_h とが一致する速度である。これらの図から曲げの振動はしばしば共振風速の付近で発振することがわかる。

このように $\alpha=0^\circ$ の場合について確かめた限りでは、後流中の Strouhal 数は曲げの発振風速と密接な関係にあることがわかった。それでわれわれの実験で曲げの発振風速と密接な関係があると思われる Strouhal 数には末尾図—53中に“B”という添字をつけた。曲げ振動に関する限り、曲線 I でおこる振動ははげしく、これに対し他の曲線でおこる振動はそれ程はげしくなく vortex-excited oscillation のような外観を呈するものであった。

§ 8. 振りの1自由度実験

振りの実験では模型を2次元風洞内に図—Fのように振りの自由振動ができるようにバネを用いて設置する。同図の θ は振りの振幅をあらわす。バネ剛性としては模型に適当な振りの固有振動数 $\omega_\theta(\text{rad/sec})$ を与えるように次の2種類を選んだ。

$$1.08, 1.40 \text{ kg-m/rad}$$

この振動系の減衰係数 ζ を静止空気中で測定した。その値は $\theta \approx 2^\circ$ 付近で

$$c/d=1, \omega_\theta=46.7 \text{ rad/sec のとき } \zeta=0.0015$$

であった。

模型を速度 V の一般流のなかに迎角 α でおき、最初に小さい振り角を与えてから手を放し、その後の振動の時間的経過 $\theta(t)$ を計測し、安定なリミットサイクルと不安定なリミットサイクルの存在をしらべた。このようにして得られた実験例を末尾図—84~図—121に示す。いずれも縦軸は無次元風速 $V/b\omega_\theta$ もしくは $V/d\omega_\theta$ であり、横軸はリミットサイクルの振幅 θ であって、実線は安定なリミットサイクルを、破線は不安定なリミットサイクルをあらわす。

これらの図をみると、どの模型も α の増加につれて不安定領域が減少する傾向にあることがわかる。このよう

な図をあつめて縦軸に無次元風速 V/bw_0 をとり、斜横軸に α をとり、それを各模型の c/d に対し画いたのが末尾図—122 である。ここに V は発振風速もしくは終息風速である。図中斜線を施した部分が振り振動の不安定領域である。

再び図—84～図—121 に立戻り、このなかで $\alpha = 0^\circ$ の場合の図を見ると縦軸に◆の記号があるのは共振風速をあらわすこと曲げの場合と同様である。それで振りの発振風速と密接な関係があると思われる Strouhal 数には末尾図—53 中に“T”という添字をつけた。

§ 9. 発振風速と共振風速

以上、曲げの1自由度振動および振りの1自由度振動における発振風速と共振風速との関連性についてのべたがこのような振動のリミットサイクル特性が、Strouhal 数によって与えられる周期をもつ流体力による単純な vortex-excited oscillation とは考えられないことは、その $V/bw_0 \sim h$ あるいは $V/bw_0 \sim \theta$ 曲線が通常の周期的外力による強制振動曲線とは異なることから理解されよう。すなわち、このような振動を誘発する原動力の一つが vortex excitation であることは確かであるが、一旦振動がはじまると、その振動に引きづられて振動物体まわりの流れの pattern が変化し、これがまた物体に作用する空気力に影響を及ぼすという feed back を生じ、自励振動化しているのである。“振動円柱の非定常空気力に関する研究”と題する文献4)には“カルマン渦による振動は自励振動的傾向が強い。しかし一般の自励振動とは違って、ある振幅以上になると空気力と振動変位とは制御しあって自制振動ともよぶべき振動機構である”と述べられているが、このことは矩形柱の場合にも同様であろう。

もちろん末尾の図のなかには vortex-excited oscillation の典型ともいいたいような、周期外力による強制振動曲線に似たものがあるが、共振風速付近で発振した振動が共振風速をはるかに超えた高い速度まで続くような曲線は、完全な自励振動すなわちフラッタであろう。

この実験で取扱っているような空力弾性現象には、構造減衰が重要な影響をもつことはよく知られている^{6), 6), 7), 8), 9)}。著者の一人である藤井も電磁ダンパーを用いて構造減衰の値を変化させて、その曲げもしくは振りの空力弾性振動に及ぼす影響を実験している。この報告の実験では構造減衰を極力小さくしているため、vortex-excited oscillation から直ちに本格的な自励振動すなわちフラッタに入ってしまった場合が多いが、振動系に適当な大きさの構造減衰を与え、vortex-excited oscillation とフラッタとを分離することは可能であろう。

この実験はいわゆる自由振動法によったが、最近では強制振動法による非定常空気力の研究もさかんに行なわれている。その結果、例えば文献3), 4)にあるように共振風速付近の Lock-in 現象や、振動空気力のなかに含まれる加振振動数成分と Strouhal 数成分の混在の具合が定量的に明らかにされてきた。

したがって構造減衰の影響の研究と強制加振法による研究とを併用することによって、本実験で取扱った空力弾性現象の機構はかなり明確になるものと思われる。

§ 10. むすび

この実験では矩形断面をもつ2次元建物模型の曲げ1自由度および振り1自由度の振動の空力弾性特性を系統的にしらべ、矩形断面形状 c/d および迎角 α の影響を明らかにした。ひきつづき構造減衰の影響の研究および強制振動法による研究を計画中である。

建物のような bluff body の空力弾性現象にはまだ不明な個所が多く、今後の研究にまたねばならない。本報告にのべたような基礎的研究を実際の建物の設計に応用するには、緒言にのべたようないくつかの重要な因子の総合的な研究が必要であろう。このような因子のうち Reynolds 数の影響に関しては、著者等が文献10), 11) で報告した日立のエレベータ研究塔の強風下の観測結果は、今後の研究をすすめてゆく上で非常に有用であると考えられる。

<参考文献>

- 1) 大築志夫・鷺津久一郎：“箱型建物模型のフラッター風洞実験” 鋼構造物の耐風設計講習会テキスト No.8 日本鋼構造協会 昭和42年2月15日—2月17日
- 2) Y. Otsuki and K. Washizu: “Flutter Experiments on Prismatic Bars of Rectangular Sections” Proceedings of the Sixteenth Japan National Congress for Applied Mechanics, 1966. pp. 211—214

- 3) 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：“矩形柱のフラッター” 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集(1970) 土木学会他4学協会, 185頁—189頁
- 4) 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力に関する研究” 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集(1970) 土木学会他4学協会, 153頁—160頁
- 5) C. Scruton and A. R. Flint：“Wind-excited Oscillations of Structures” Paper No. 6758, Proceedings of the Institute for Civil Engineers, April 1964. pp. 673—702
- 6) G. V. Parkinson and N. P. H. Brooks：“On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders” Transactions of the AMSE. June 1961. pp. 252—258
- 7) V. J. Modi and J. E. Slater：“On the Aeroelastic Instability of a Structural Angle” JSME 1967 Semi-International Symposium, September 1967, Tokyo.
- 8) 伊藤学・田中宏：“風の渦による橋げたの振動” 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集(1970) 土木学会他4学協会, 213頁—220頁
- 9) 山口富夫・白木万博・梅村直・松井友二：“カルマン渦による円柱の振動について” 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集(1970) 土木学会他4学協会, 145頁—152頁
- 10) 藤井邦雄・伊藤哲次：“風による日立エレベータ研究塔の振動性状について(第1報)” 清水建設研究所報 Vol. 15, 1970年4月 29頁—39頁
- 11) Y. Otsuki, K. Washizu, K. Fujii, T. Ito, H. Tomizawa and M. Yoshida：“Wind Excited Oscillation of a Tower of Nearly Square Cross Section” Proceedings of the Third International Conference on Wind Effects of Buildings and Structures, September 1971.

箱型建物模型の風洞実験：データ集

1. 後流風速変動の波形 (a) 模型 1:1.5 (1) 測定点A

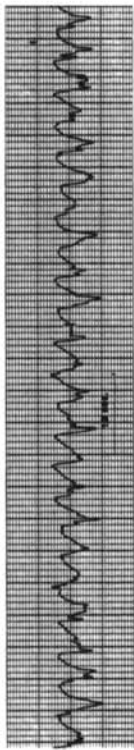


図-1 風速 2.56m/s

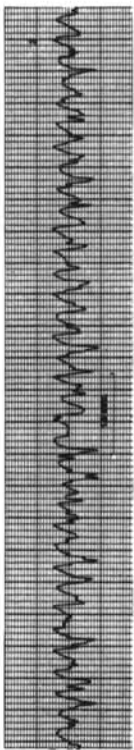


図-2 風速 3.79m/s

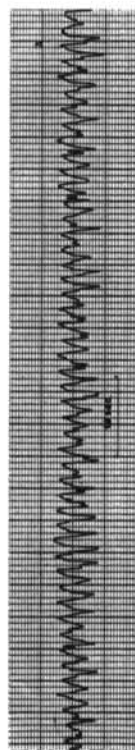


図-3 風速 5.10m/s



図-4 風速 6.88m/s

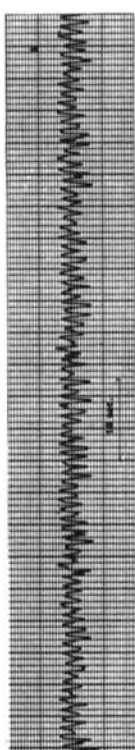


図-5 風速 8.22m/s

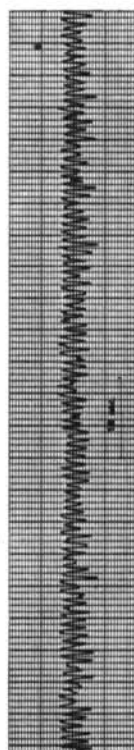


図-6 風速 9.45m/s

(2) 測定点B

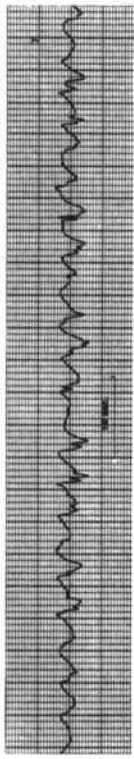


図-7 風速 2.50m/s

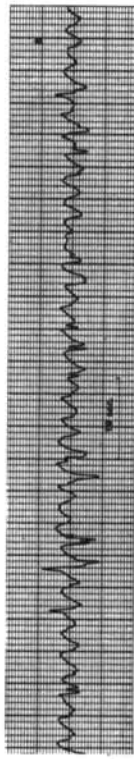


図-8 風速 3.73m/s

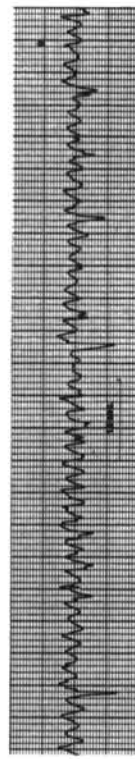


図-9 風速 4.98m/s

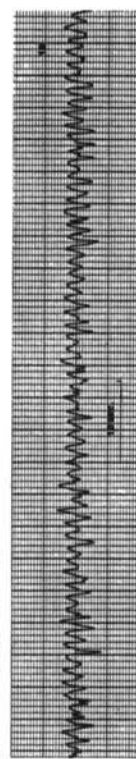


図-10 風速 6.36m/s



図-11 風速 7.83m/s

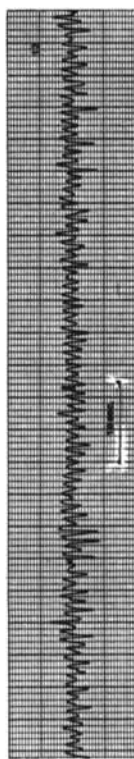
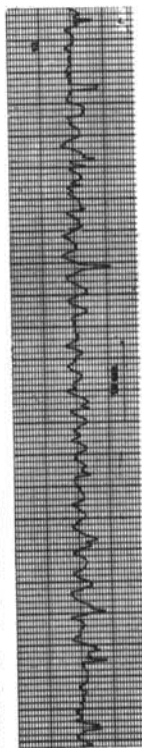
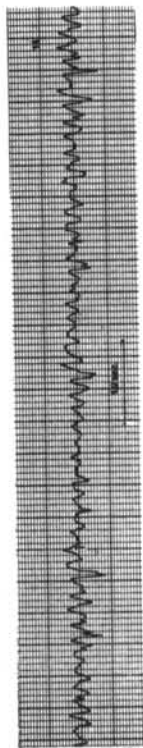


図-12 風速 9.02m/s

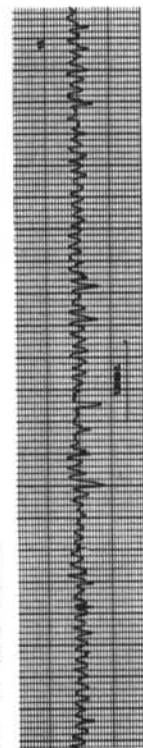
(b)模型 1:4.0 (1)测定点A



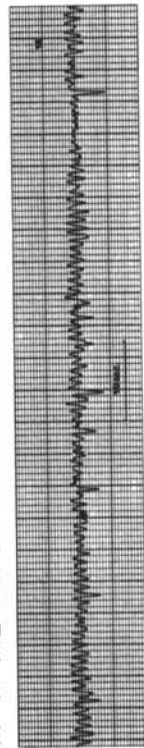
图—13 风速 2.70m/s



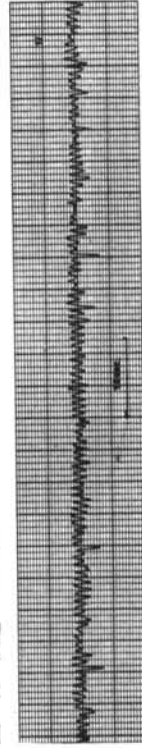
图—14 风速 4.01m/s



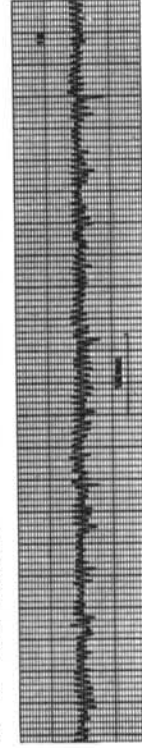
图—15 风速 5.82m/s



图—16 风速 7.50m/s

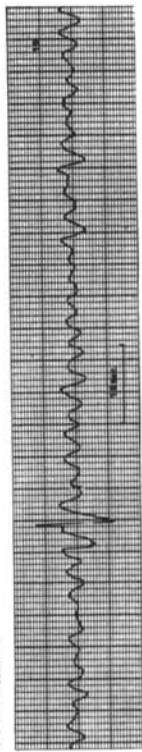


图—17 风速 8.66m/s

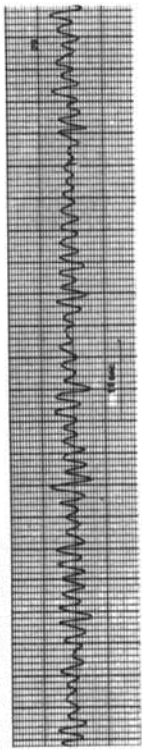


图—18 风速 10.20m/s

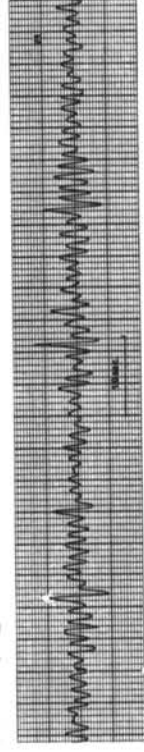
(2)测定点B



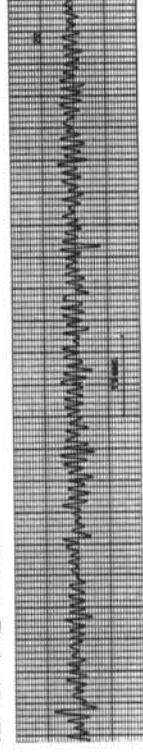
图—19 风速 2.70m/s



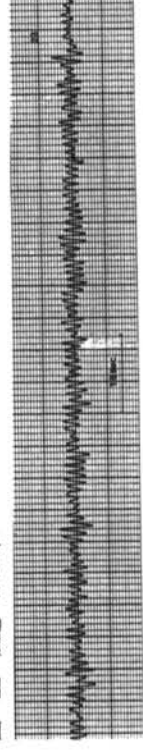
图—20 风速 4.05m/s



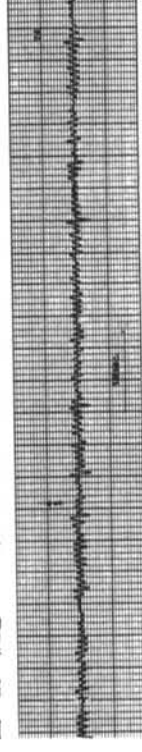
图—21 风速 5.44m/s



图—22 风速 7.40m/s



图—23 风速 8.62m/s



图—24 风速 9.90m/s

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

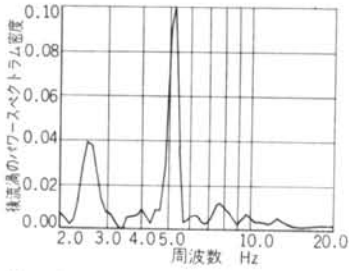


図-25 風速 2.56m/s

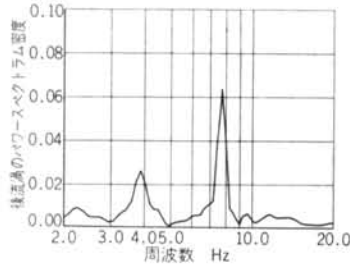


図-26 風速 3.79m/s

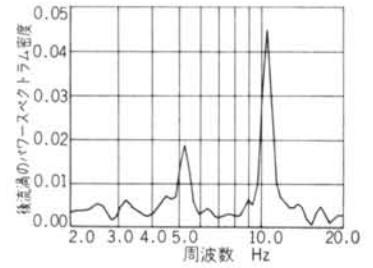


図-27 風速 5.10m/s

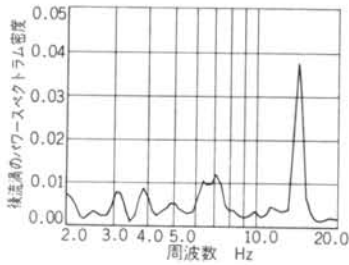


図-28 風速 6.88m/s

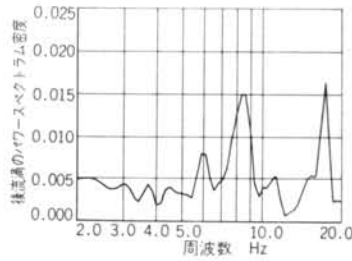


図-29 風速 8.22m/s

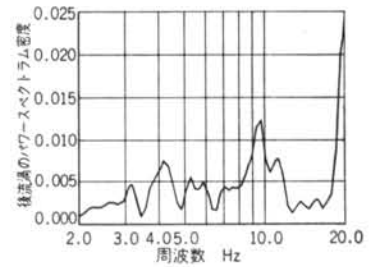


図-30 風速 9.45m/s

(2)測定点B

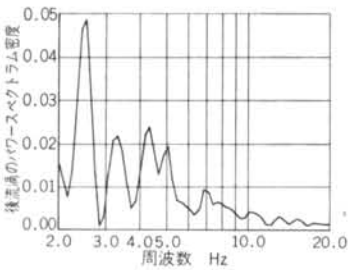


図-31 風速 2.50m/s

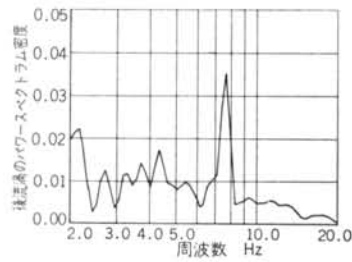


図-32 風速 3.73m/s

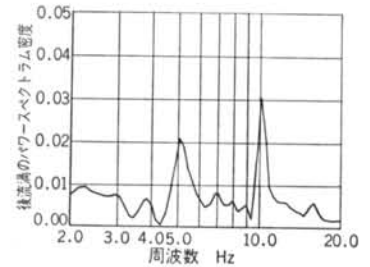


図-33 風速 4.98m/s

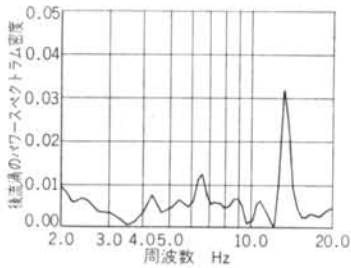


図-34 風速 6.36m/s

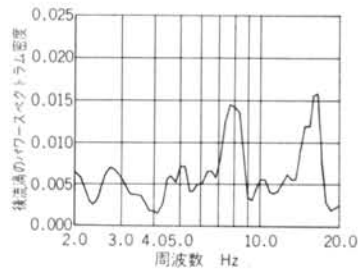


図-35 風速 7.83m/s

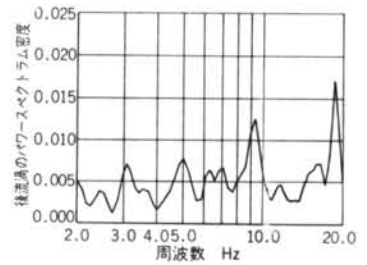


図-36 風速 9.02m/s

(b) 模型 1:4.0 (1)測定点A

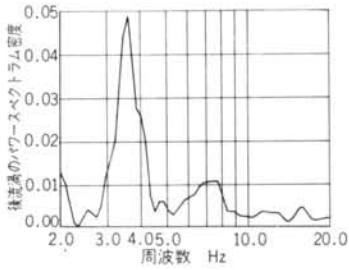


図-37 風速 2.70m/s

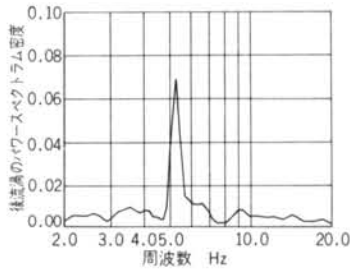


図-38 風速 4.01m/s

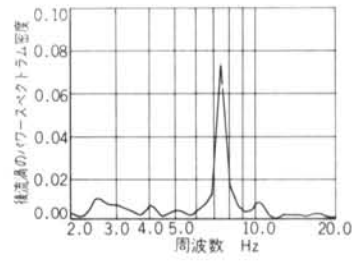


図-39 風速 5.82m/s

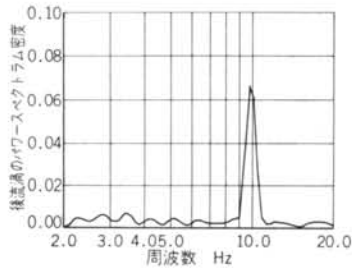


図-40 風速 7.50m/s

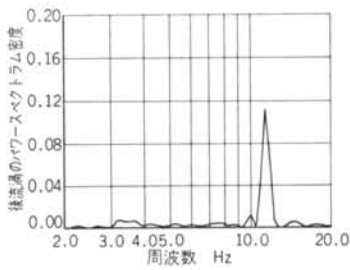


図-41 風速 8.66m/s

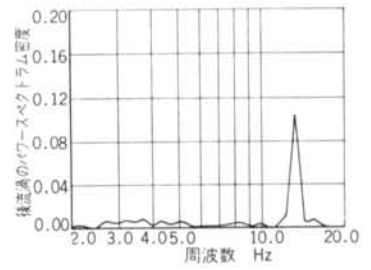


図-42 風速 10.20m/s

(2)測定点B

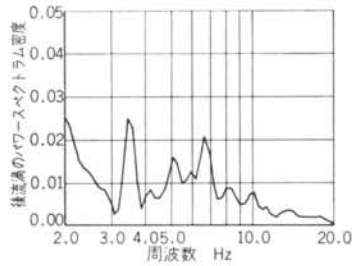


図-43 風速 2.70m/s

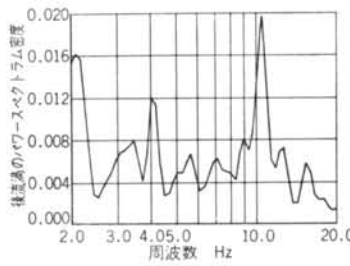


図-44 風速 4.05m/s

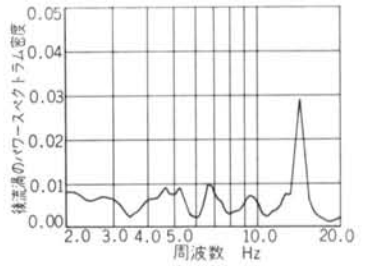


図-45 風速 5.44m/s

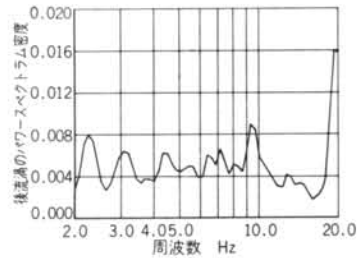


図-46 風速 7.40m/s

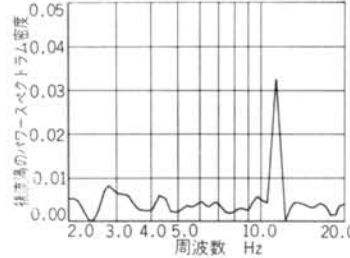


図-47 風速 8.62m/s

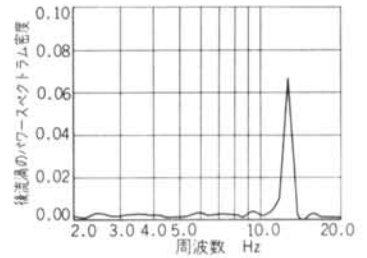


図-48 風速 9.90m/s

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

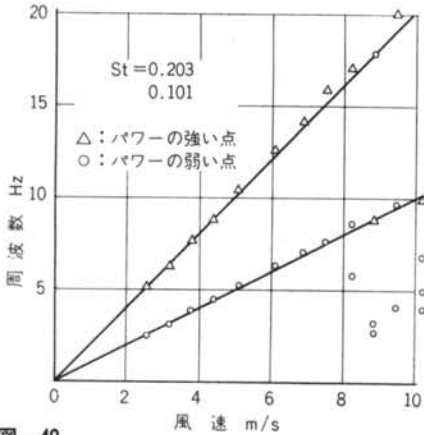


図-49

(b) 模型 1:4.0 (1)測定点A

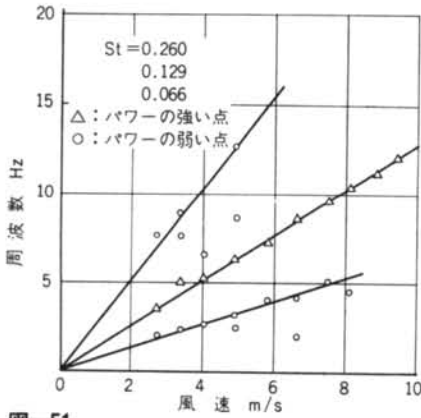


図-51

(2)測定点B

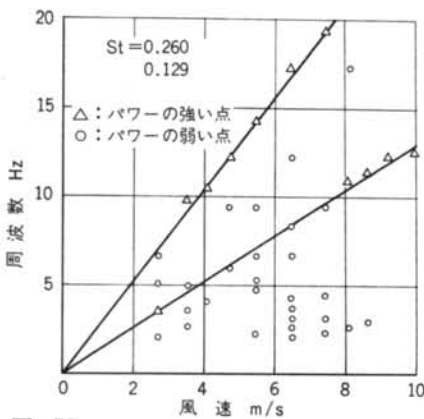


図-52

(2)測定点B

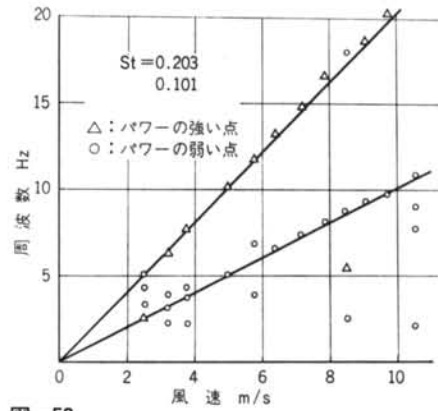


図-50

4. 後流中のストローハル数特性

$$St = \frac{fd}{V}$$

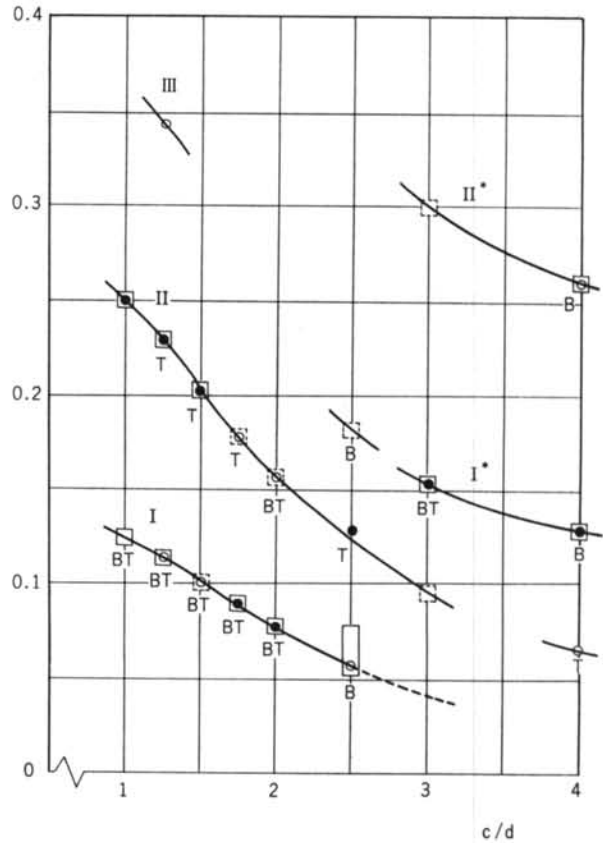


図-53 $St=fd/v \sim c/d$ 曲線

5. 曲げ1自由度実験

(a) 模型 1:1

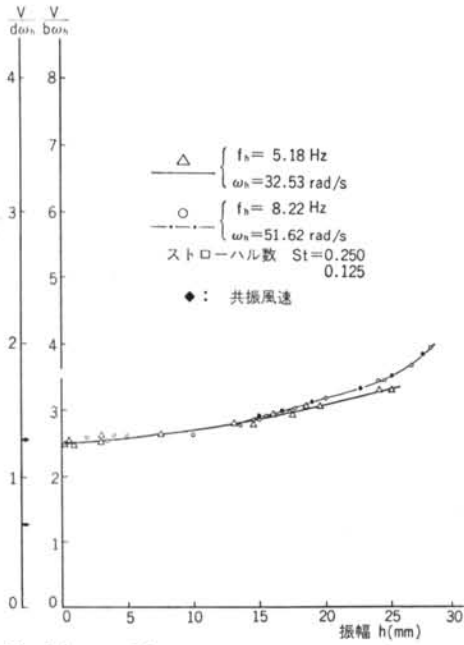


図-54 $\alpha = 0^\circ$

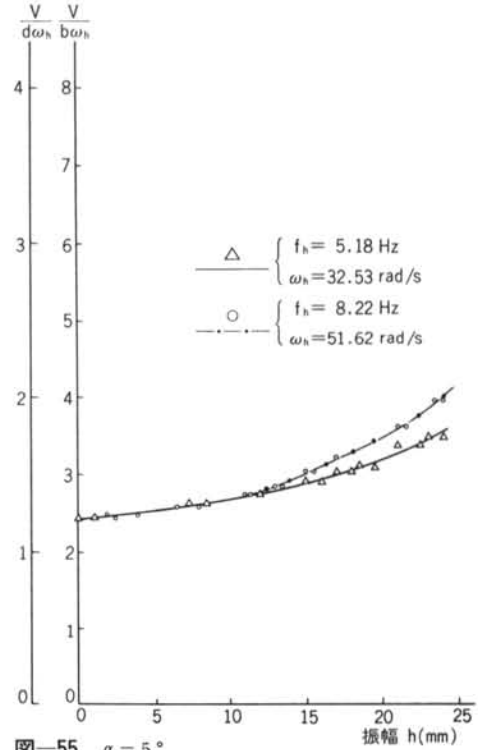


図-55 $\alpha = 5^\circ$

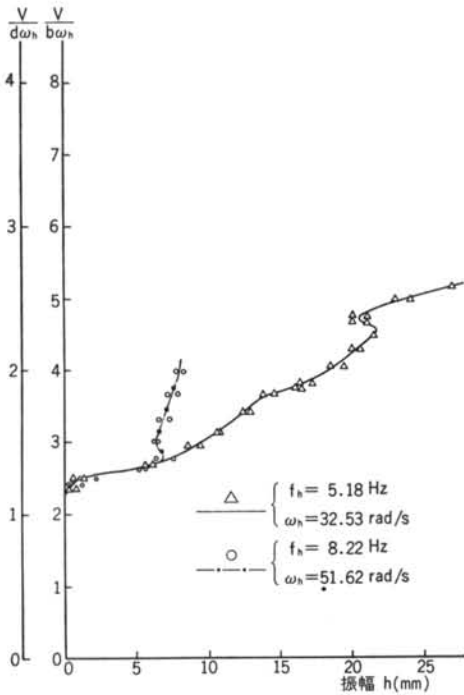


図-56 $\alpha = 10^\circ$

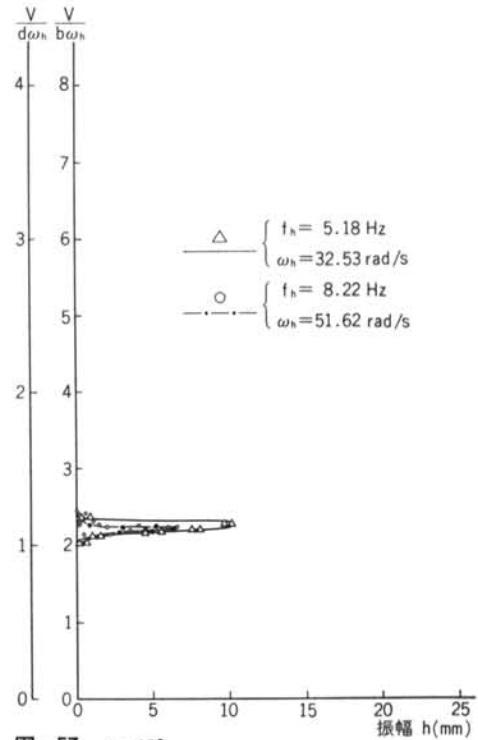


図-57 $\alpha = 15^\circ$

(b) 模型 1 : 1.25

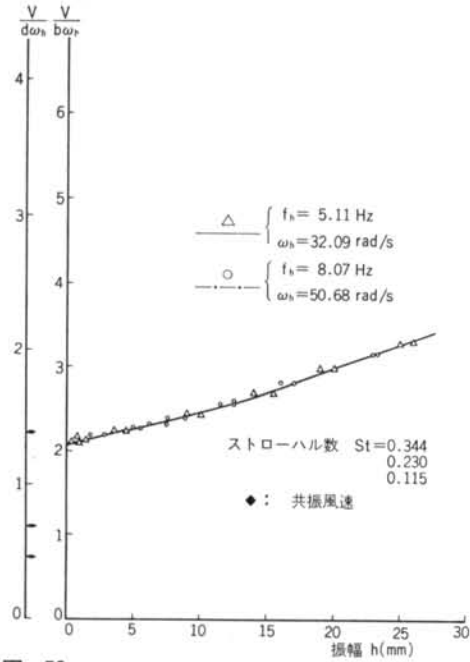


図-58 $\alpha = 0^\circ$

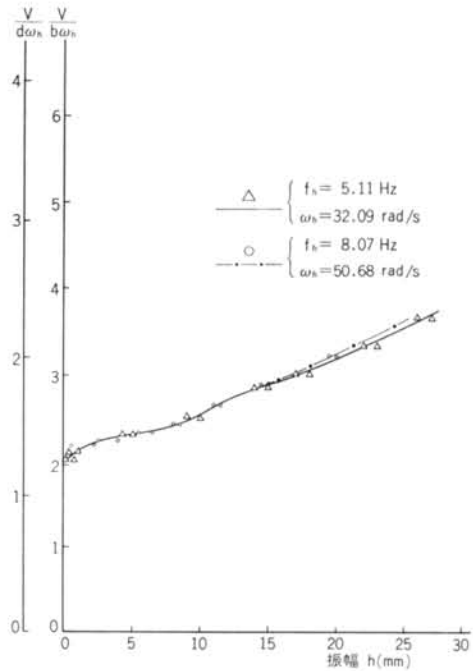


図-59 $\alpha = 5^\circ$

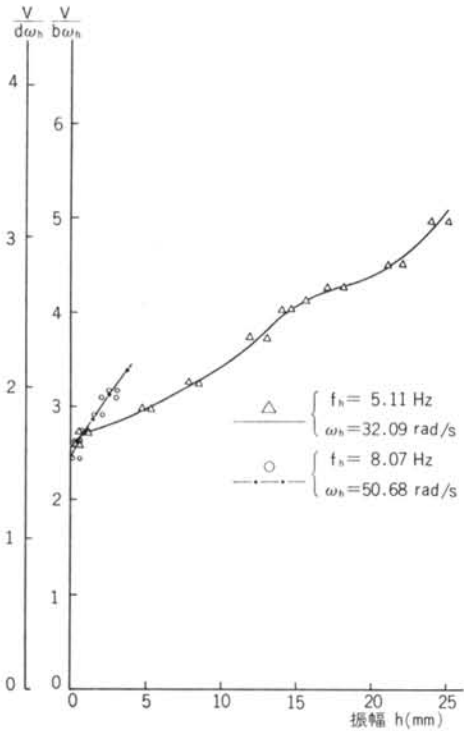


図-60 $\alpha = 10^\circ$

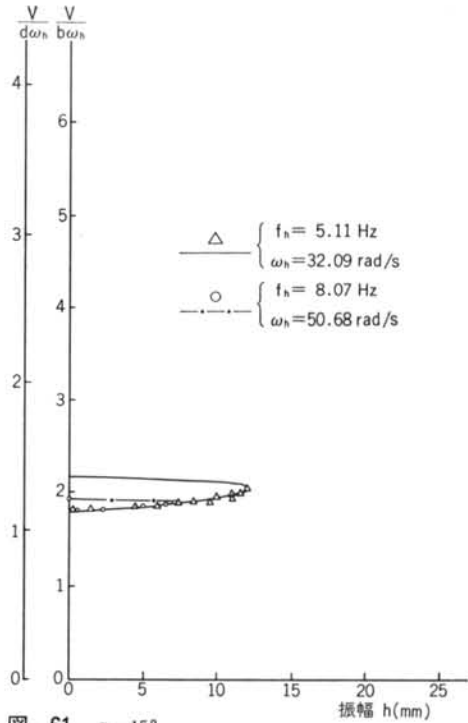


図-61 $\alpha = 15^\circ$

(c) 模型 1 : 1.50

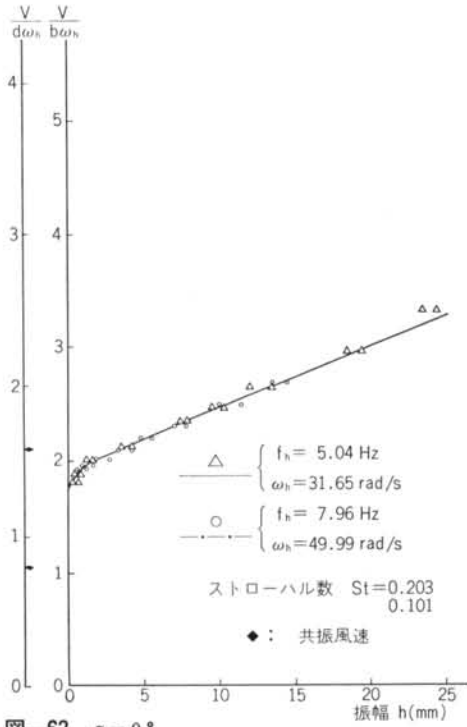


図-62 $\alpha = 0^\circ$

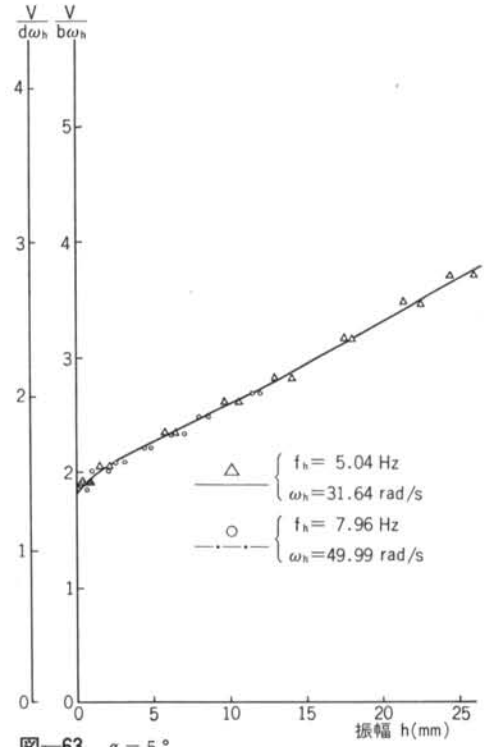


図-63 $\alpha = 5^\circ$

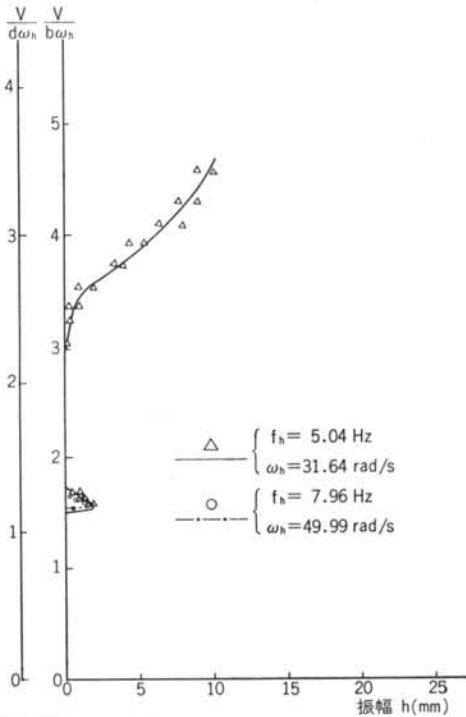


図-64 $\alpha = 10^\circ$

(d) 模型 1 : 1.75

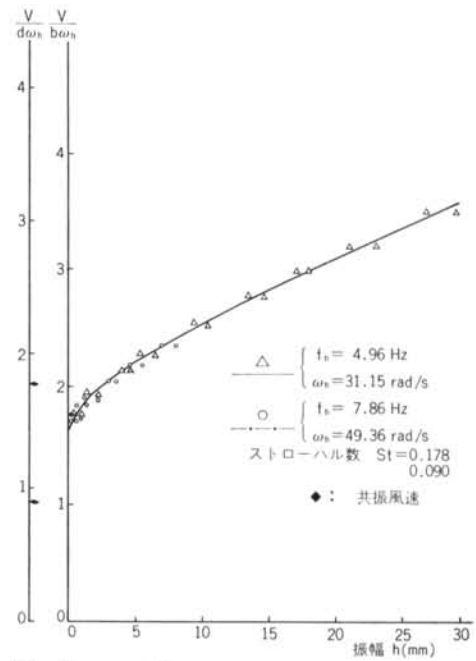


図-65 $\alpha = 0^\circ$

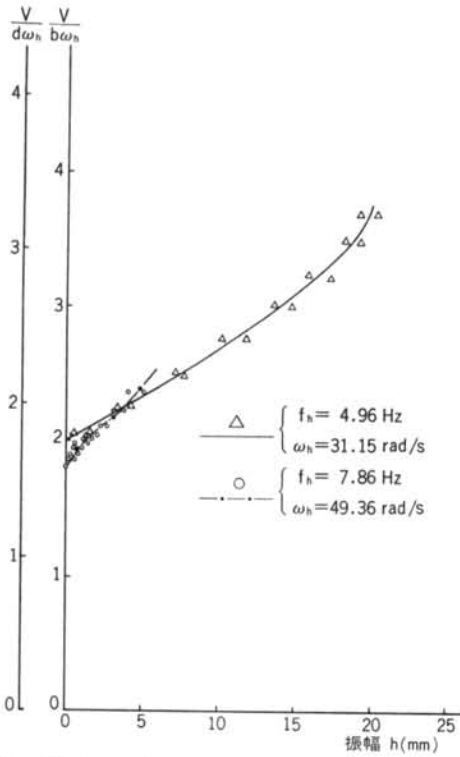


図-66 $\alpha = 5^\circ$

(e) 模型 1:2.0

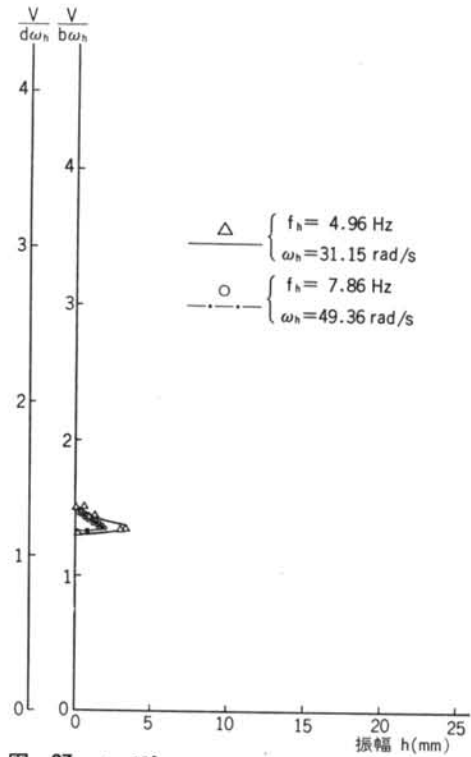


図-67 $\alpha = 10^\circ$

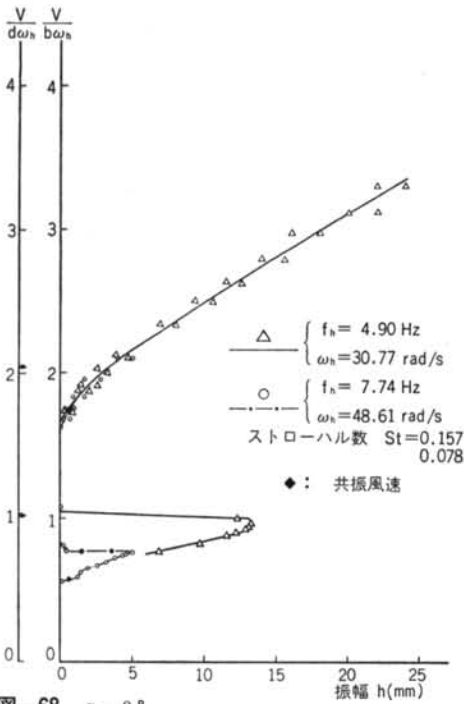


図-68 $\alpha = 0^\circ$

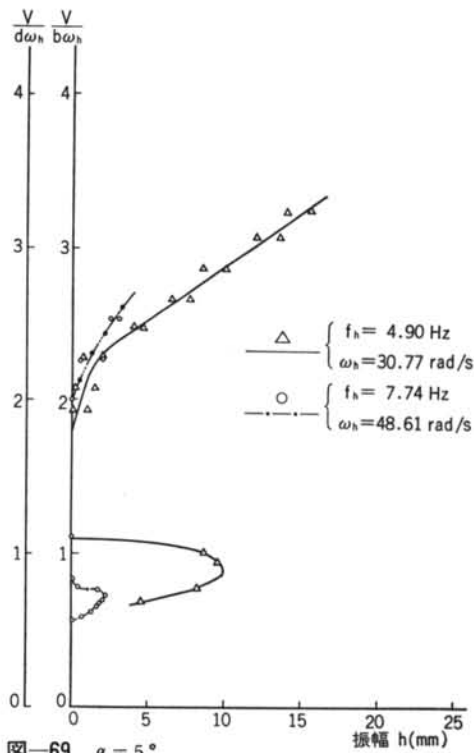


図-69 $\alpha = 5^\circ$

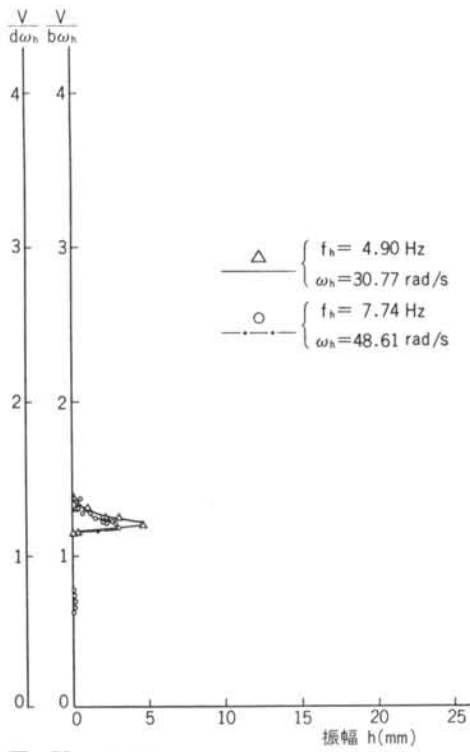


図-70 $\alpha = 10^\circ$

(f) 模型 1:2.5

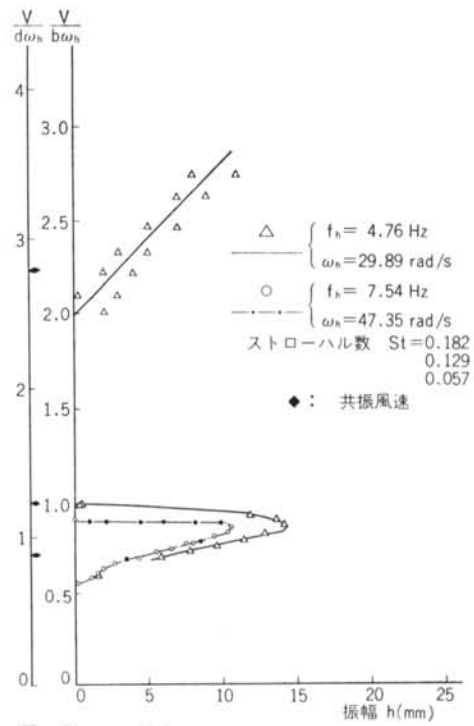


図-71 $\alpha = 0^\circ$

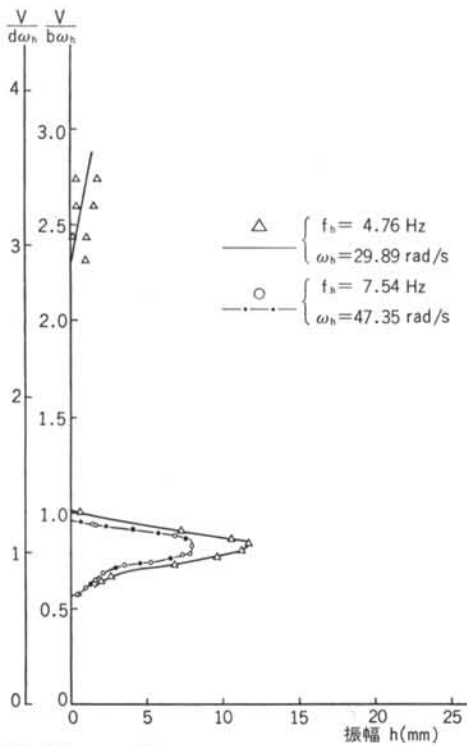


図-72 $\alpha = 5^\circ$

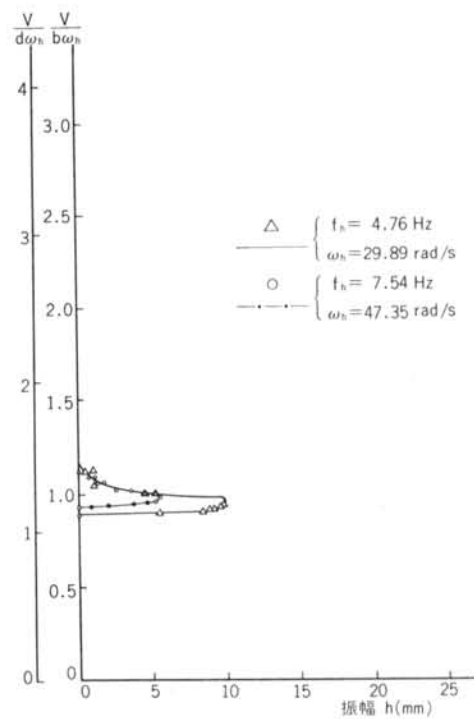


図-73 $\alpha = 10^\circ$

(B) 模型 1:3.0

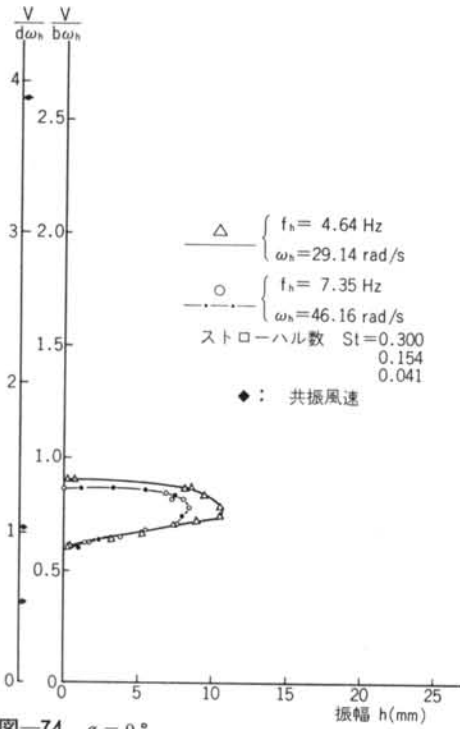


図-74 $\alpha = 0^\circ$

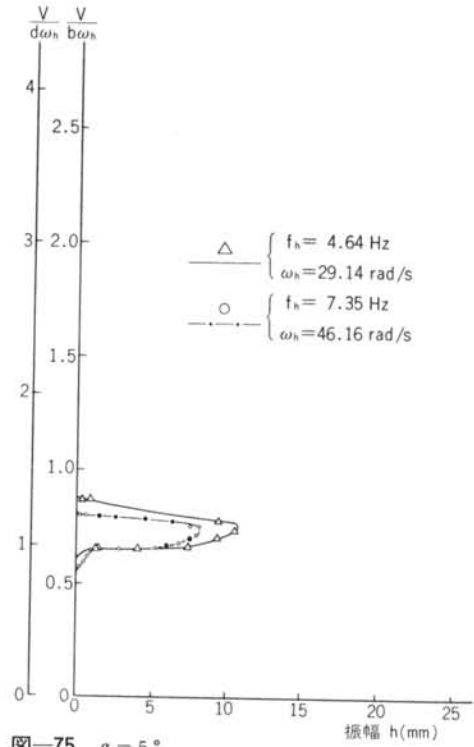


図-75 $\alpha = 5^\circ$

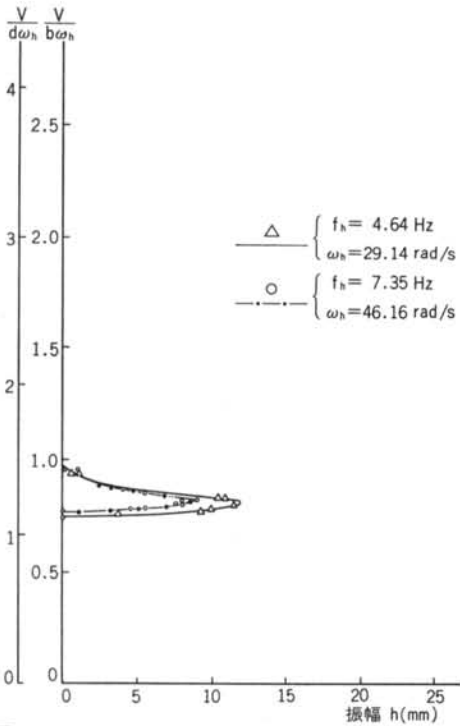


図-76 $\alpha = 10^\circ$

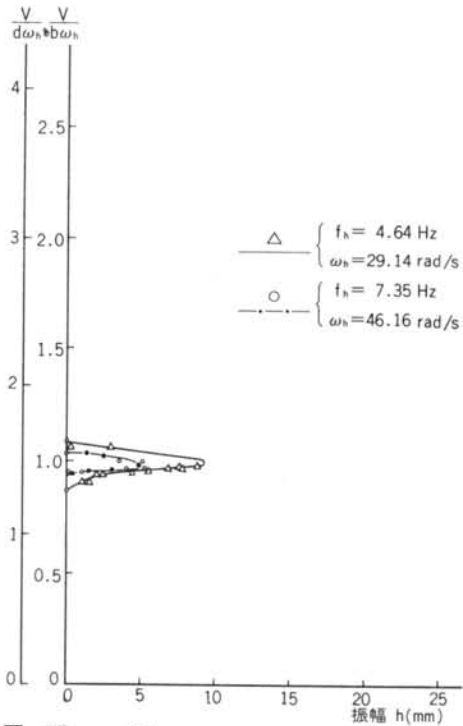


図-77 $\alpha = 15^\circ$

(h) 模型 1:4.0

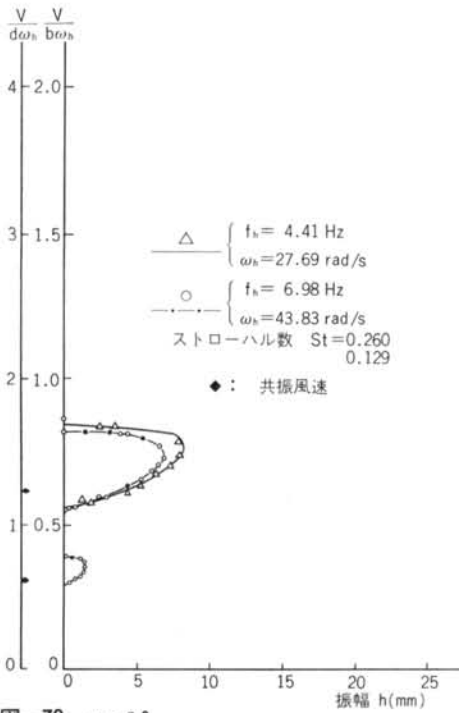


図-78 $\alpha = 0^\circ$

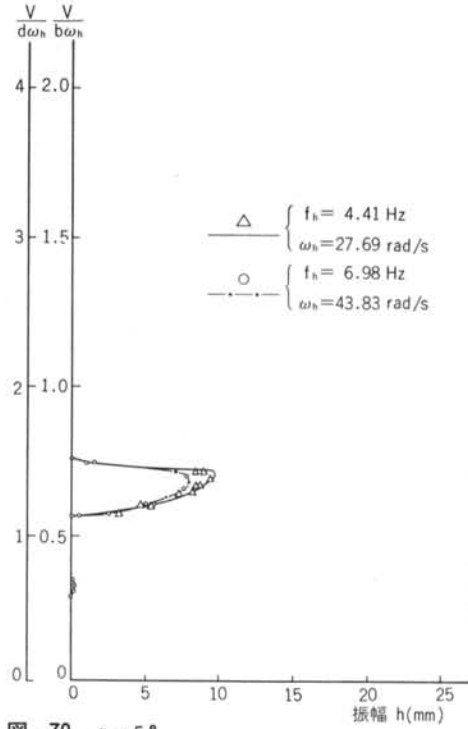


図-79 $\alpha = 5^\circ$

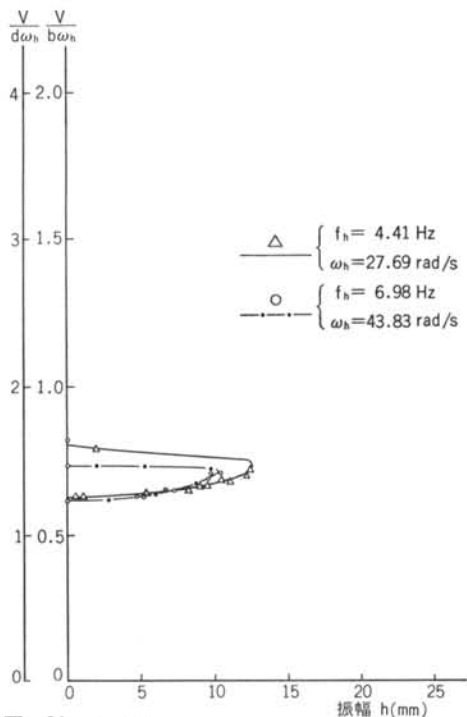


図-80 $\alpha = 10^\circ$

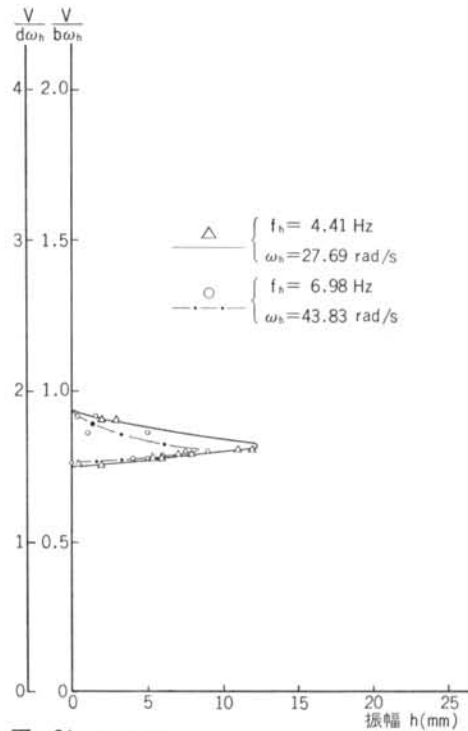


図-81 $\alpha = 15^\circ$

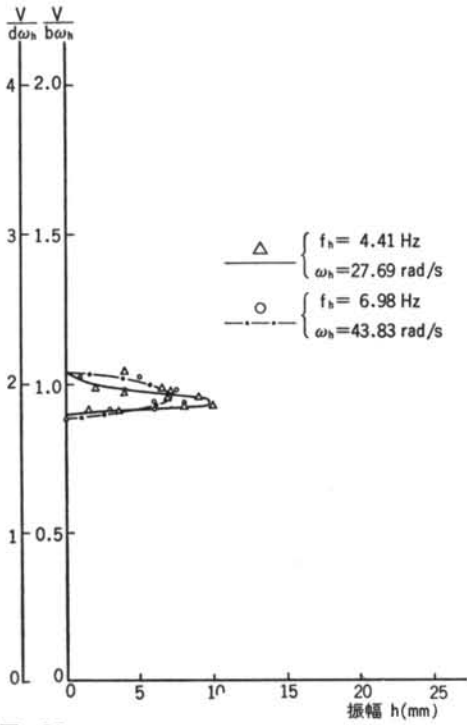


図-82 $\alpha = 20^\circ$

6. 曲げ1自由度実験のまとめ ($V/b\omega_h \sim \alpha$) $\sim c/d$

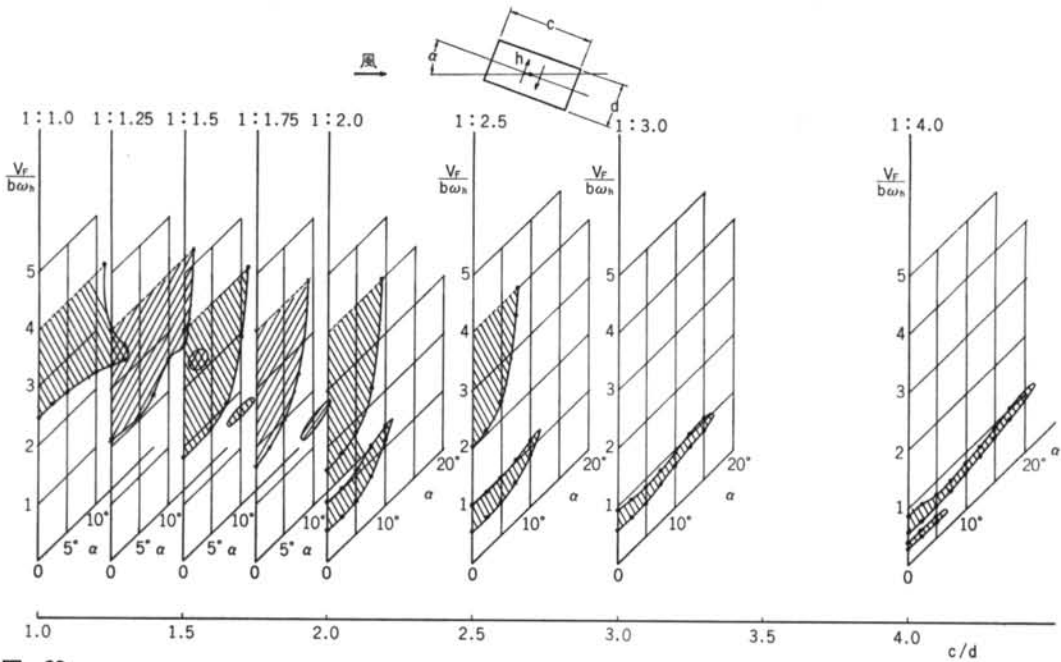


図-83

7. 振り1自由度実験

(a) 模型 1:1

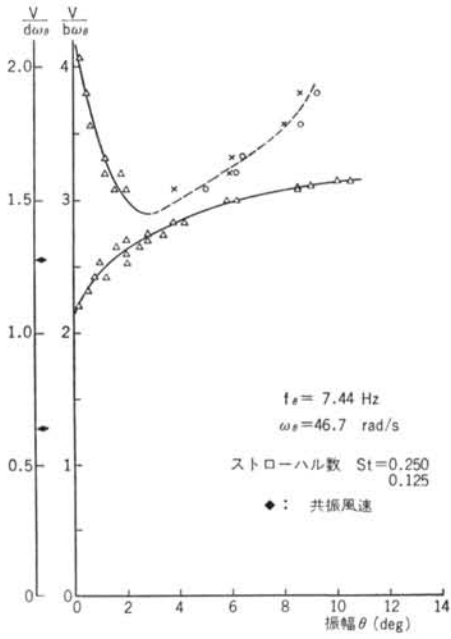


図-84 $\alpha = 0^{\circ}$

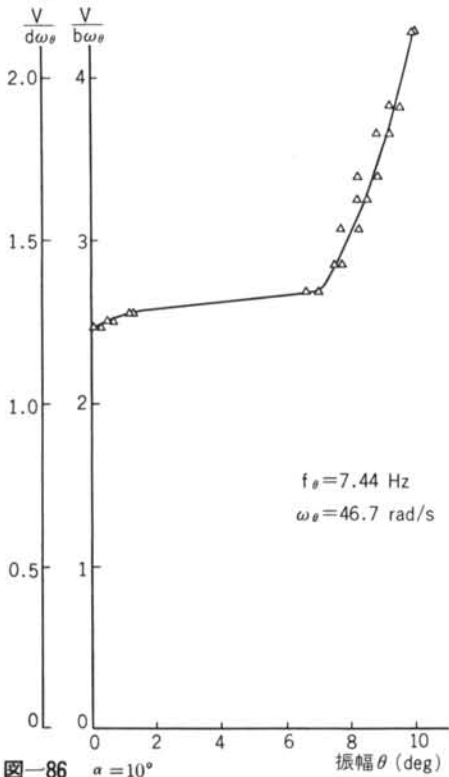


図-86 $\alpha = 10^{\circ}$

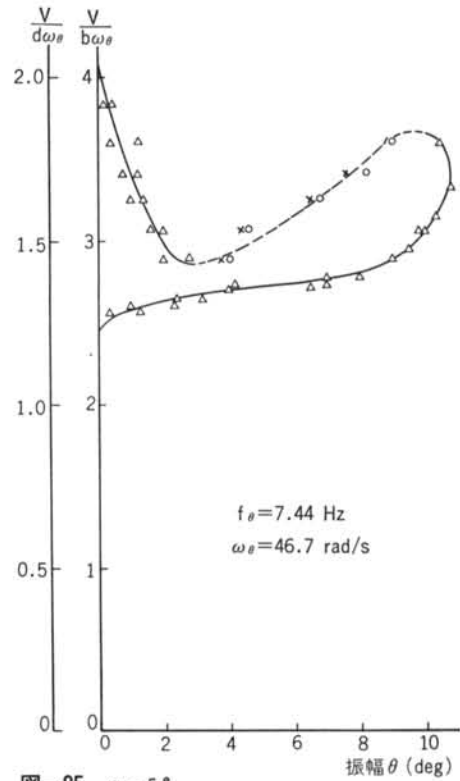


図-85 $\alpha = 5^{\circ}$

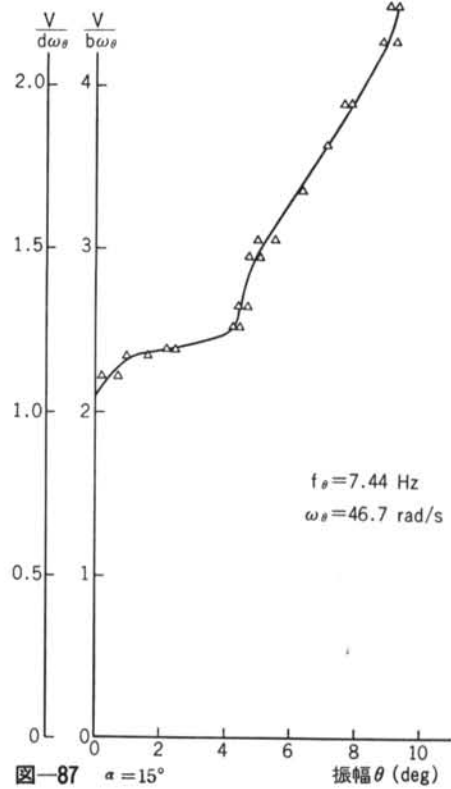


図-87 $\alpha = 15^{\circ}$

(b) 模型 1:1.25

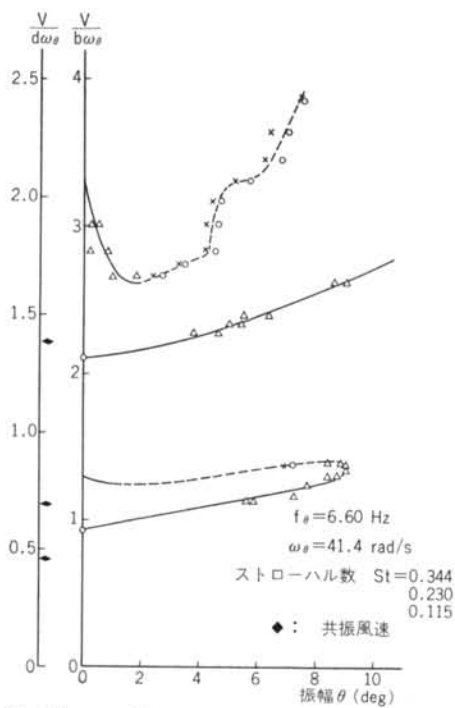


図-88 $\alpha = 0^\circ$

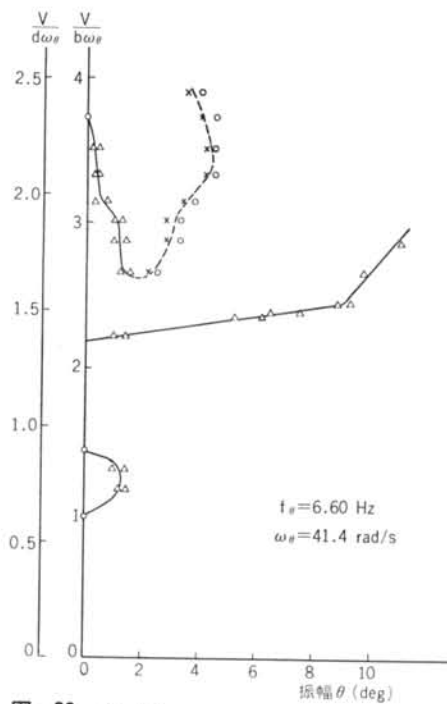


図-89 $\alpha = 5^\circ$

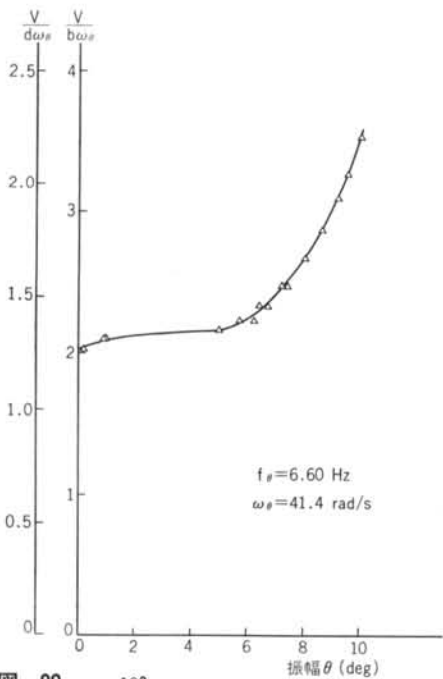


図-90 $\alpha = 10^\circ$

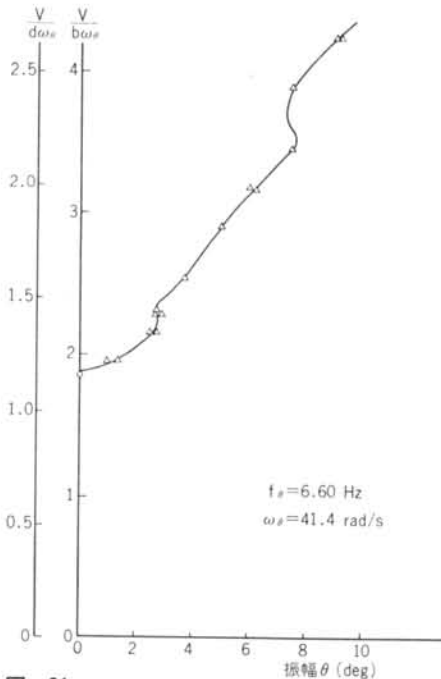


図-91 $\alpha = 15^\circ$

(c) 模型 1:1.5

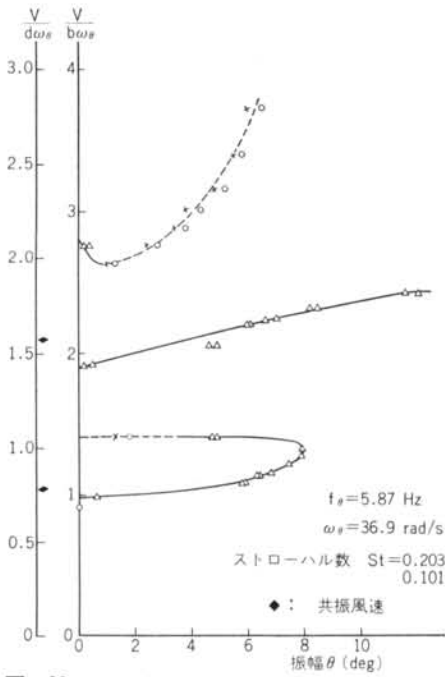


図-92 $\alpha = 0^\circ$

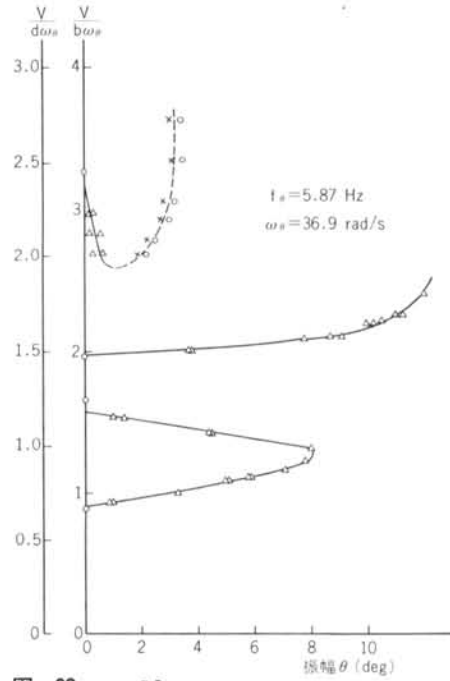


図-93 $\alpha = 5^\circ$

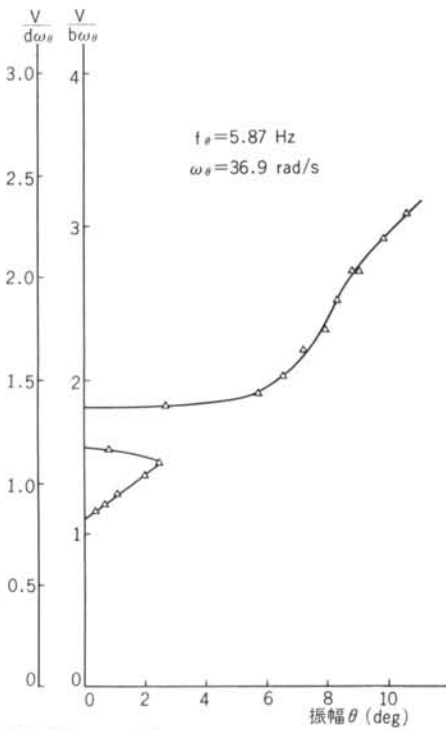


図-94 $\alpha = 10^\circ$

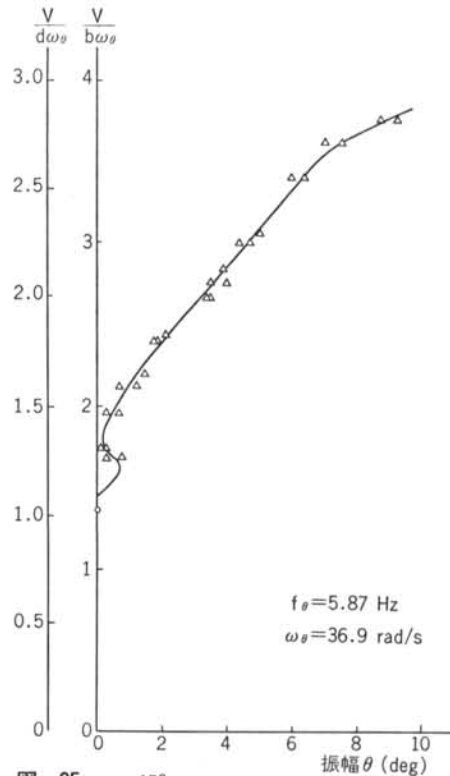


図-95 $\alpha = 15^\circ$

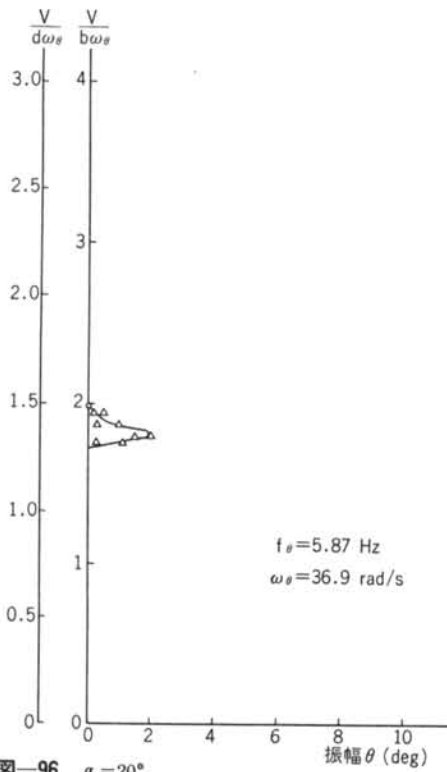


図-96 $\alpha = 20^{\circ}$

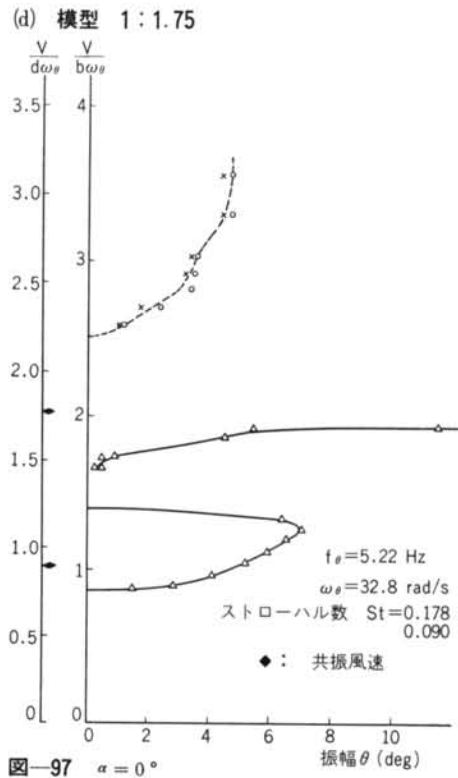


図-97 $\alpha = 0^{\circ}$

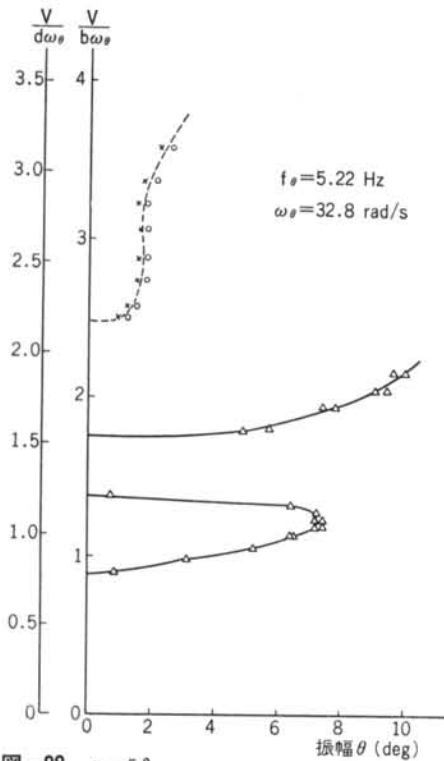


図-98 $\alpha = 5^{\circ}$

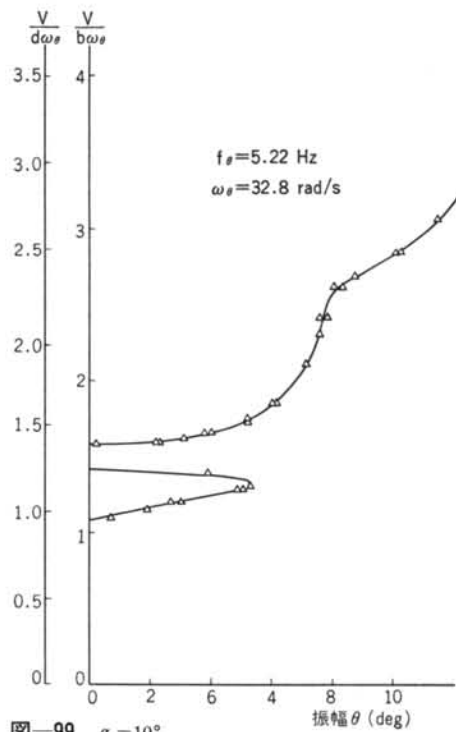


図-99 $\alpha = 10^{\circ}$

(e) 模型 1:2.0

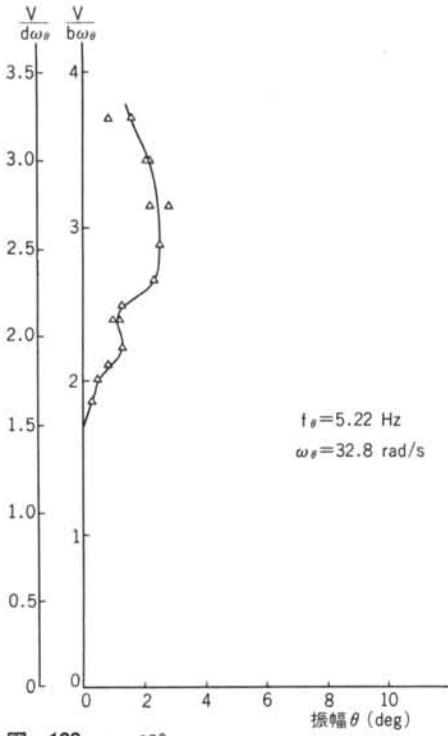


図-100 $\alpha = 15^{\circ}$

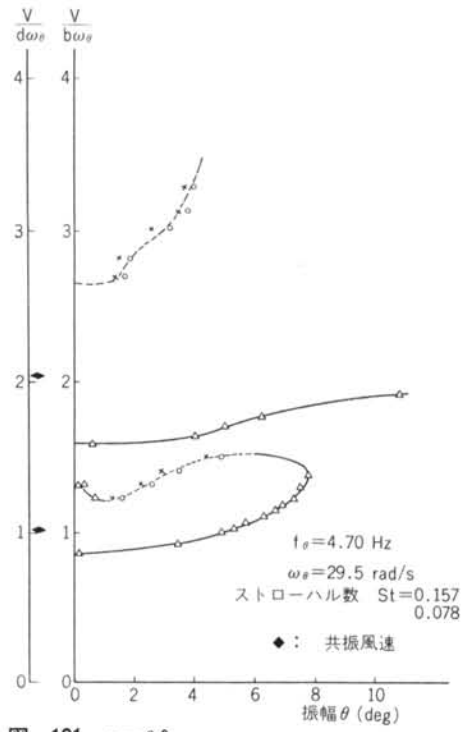


図-101 $\alpha = 0^{\circ}$

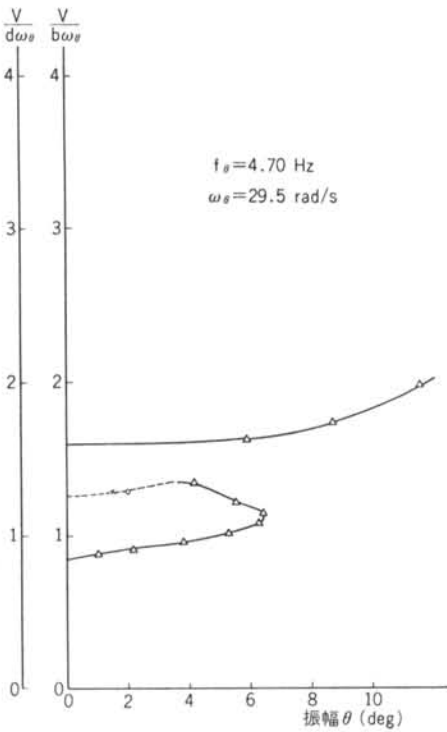


図-102 $\alpha = 5^{\circ}$

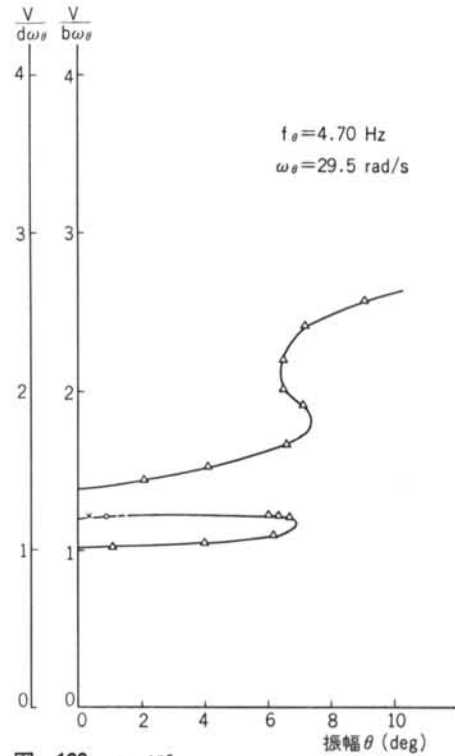
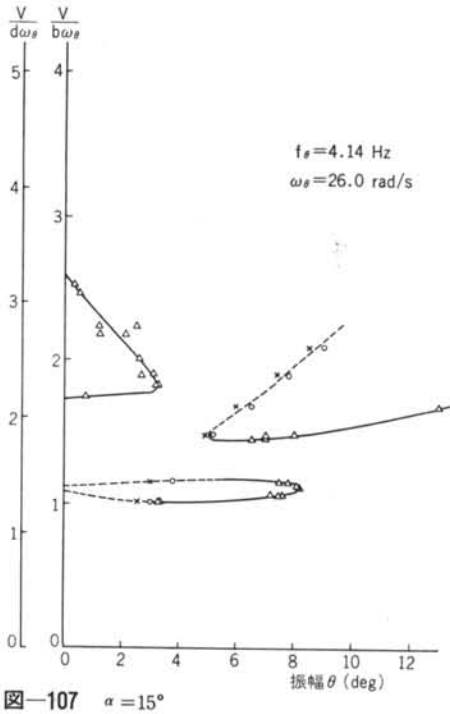
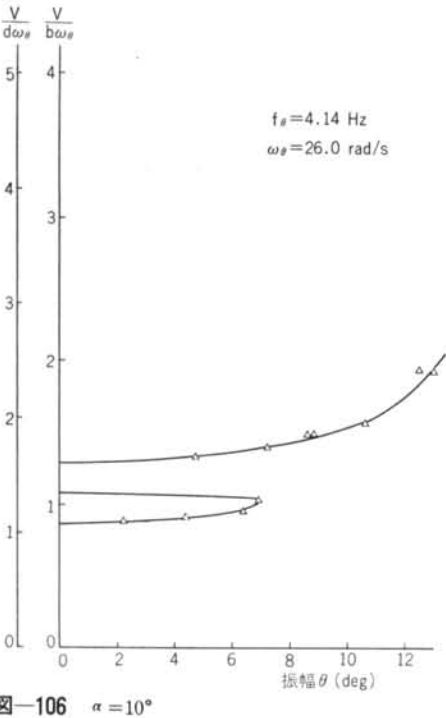
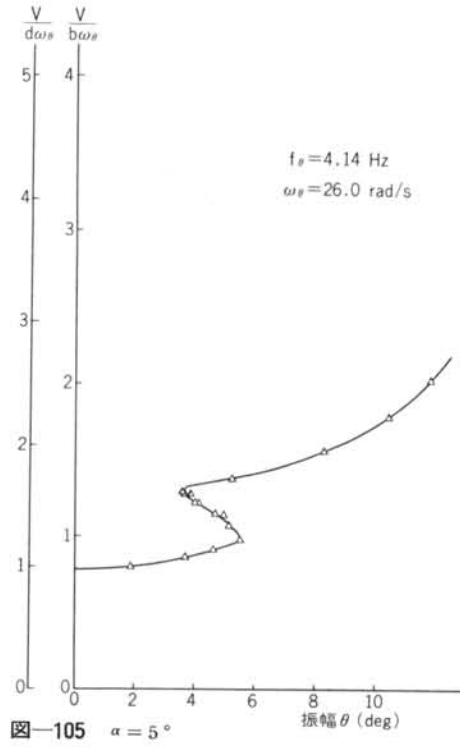
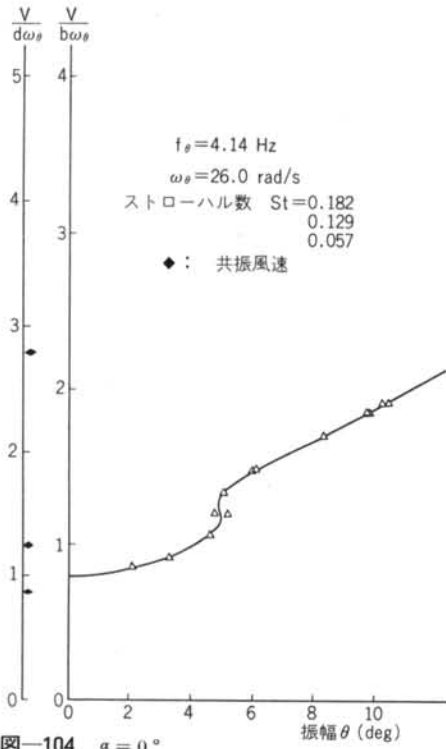


図-103 $\alpha = 10^{\circ}$

(f) 模型 1:2.5



(g) 模型 1:3.0

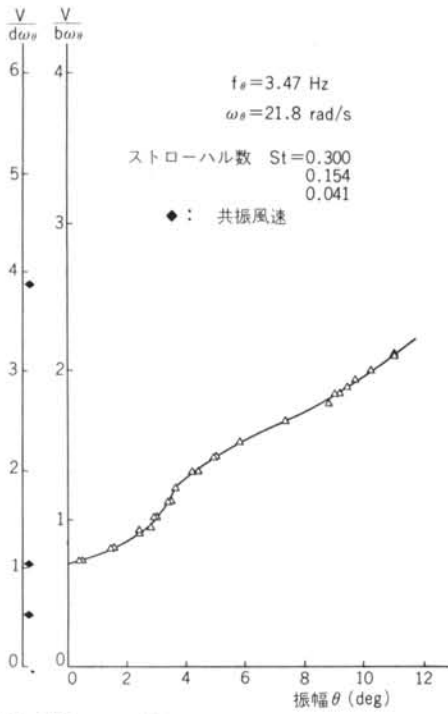


図-108 $\alpha = 0^\circ$

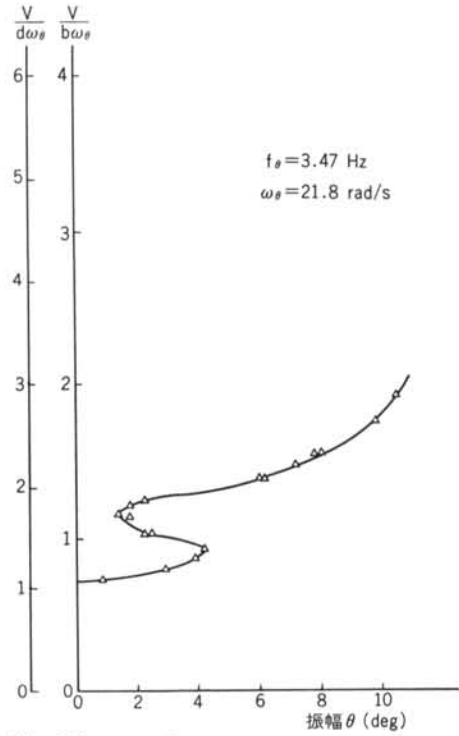


図-109 $\alpha = 5^\circ$

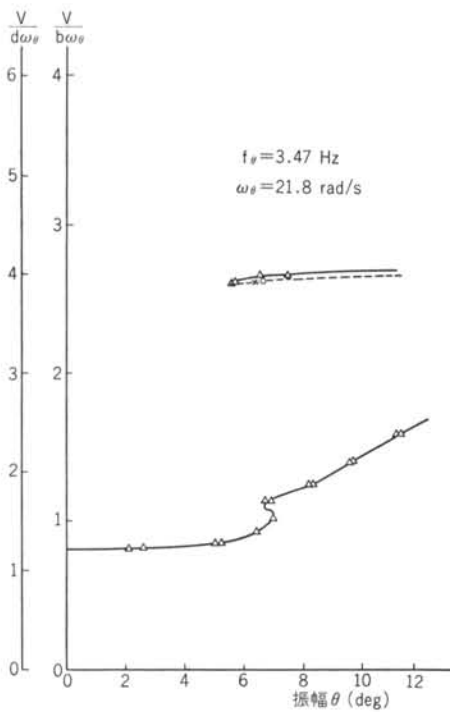


図-110 $\alpha = 10^\circ$

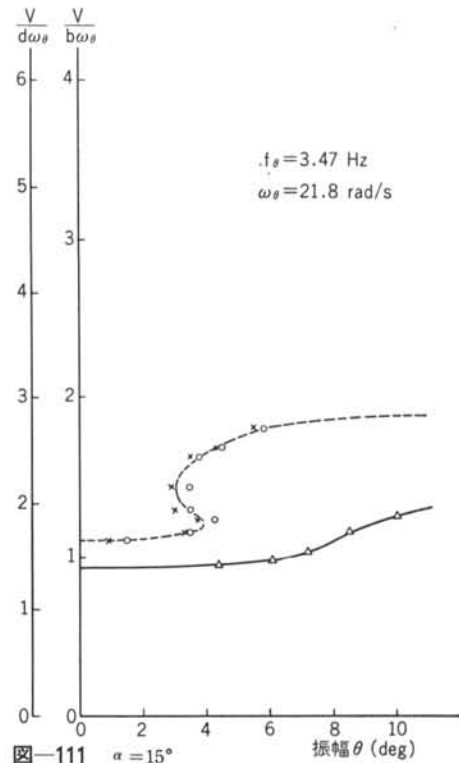


図-111 $\alpha = 15^\circ$

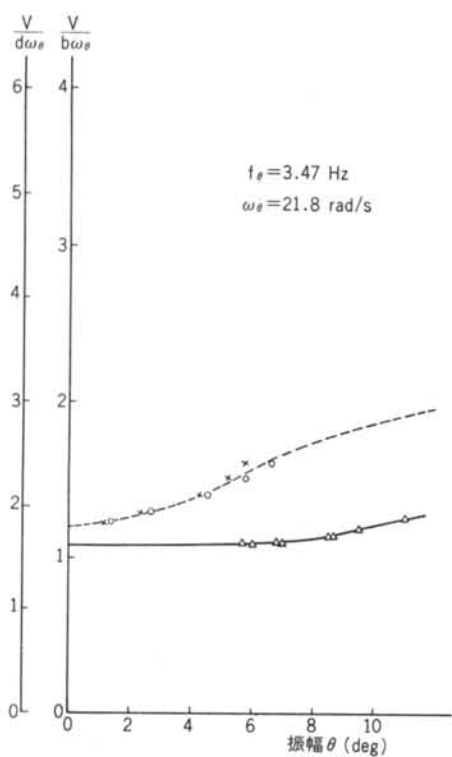


図-112 $\alpha = 20^\circ$

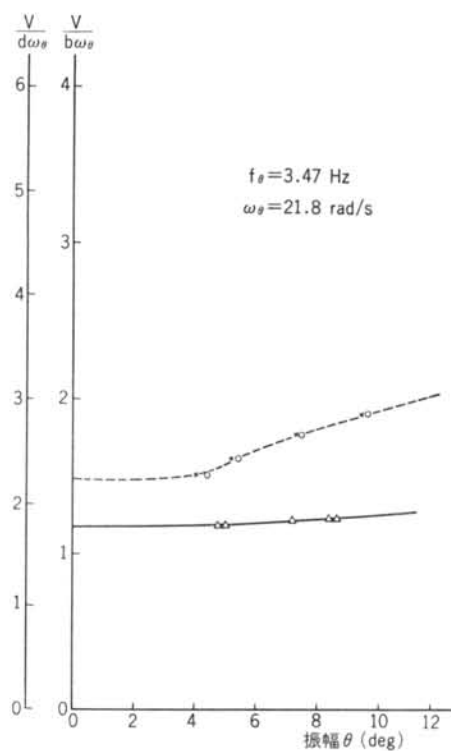


図-113 $\alpha = 25^\circ$

(h) 模型 1 : 4.0

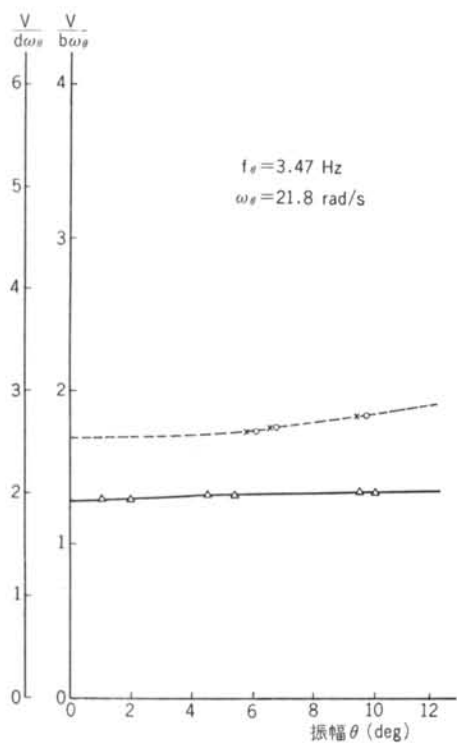


図-114 $\alpha = 30^\circ$

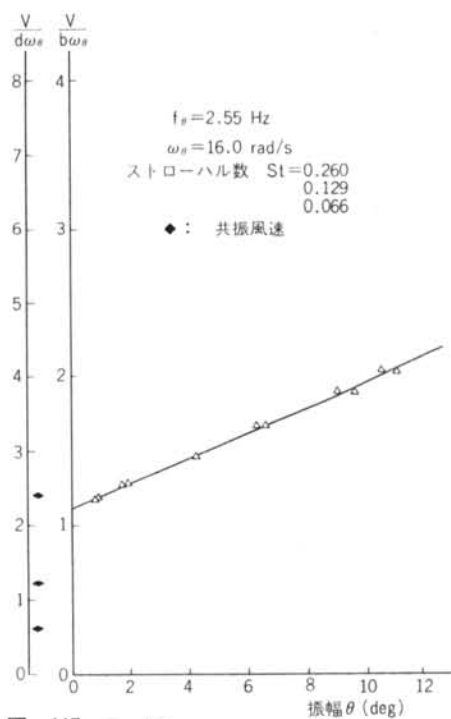


図-115 $\alpha = 0^\circ$

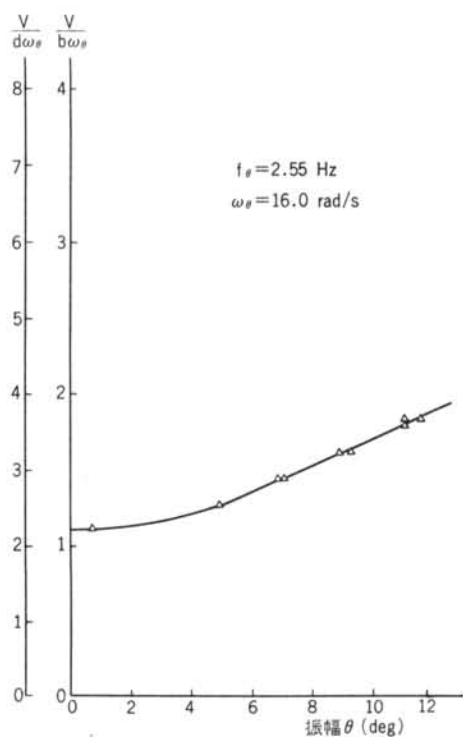


图-116 $\alpha = 5^{\circ}$

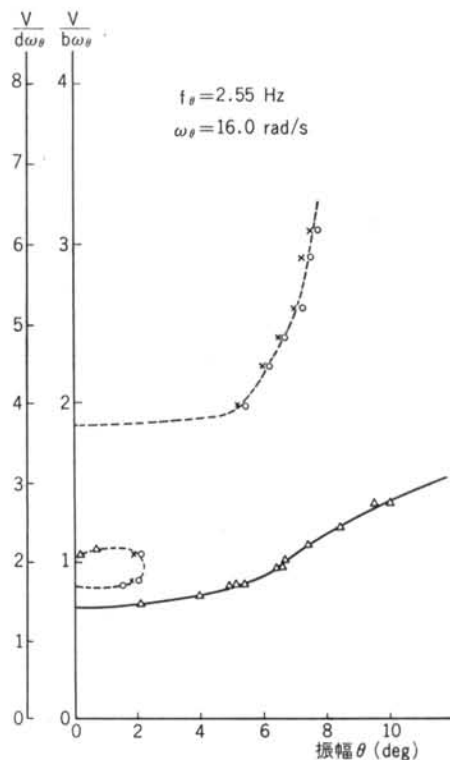


图-117 $\alpha = 10^{\circ}$

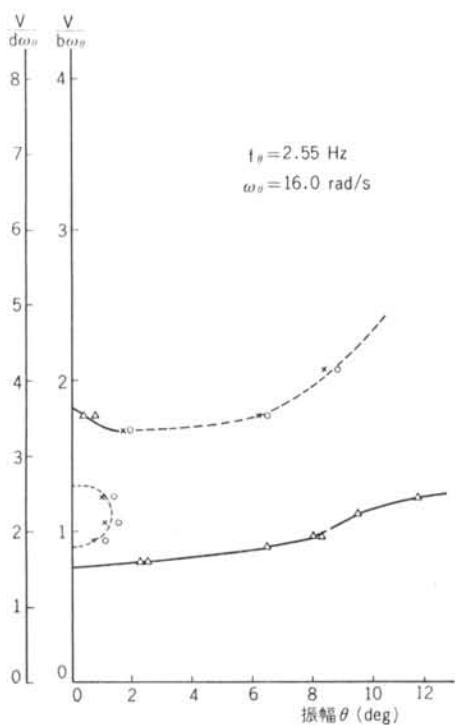


图-118 $\alpha = 15^{\circ}$

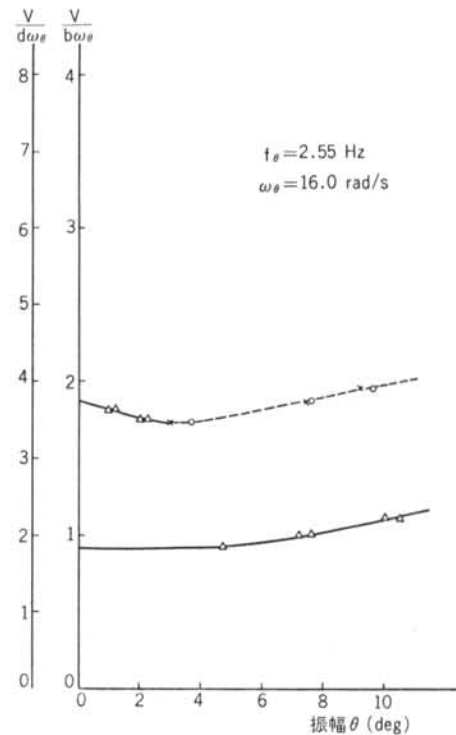


图-119 $\alpha = 20^{\circ}$

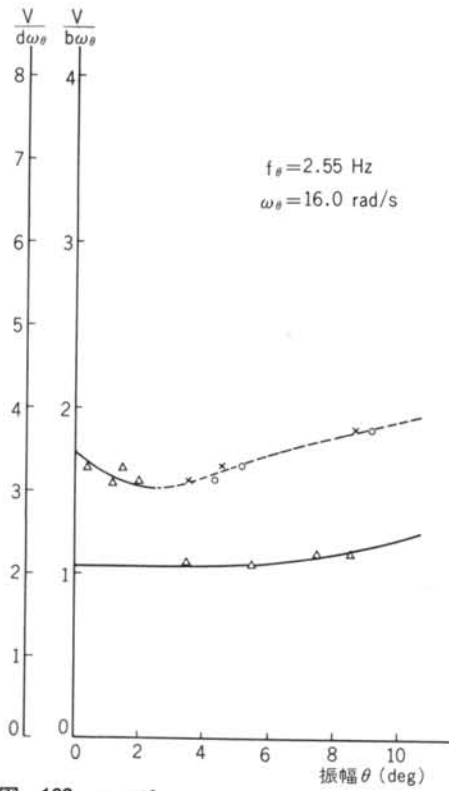


図-120 $\alpha = 25^\circ$

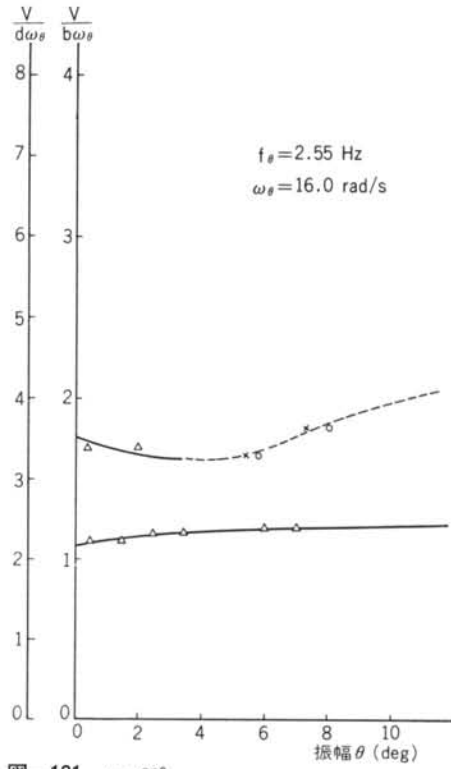


図-121 $\alpha = 30^\circ$

8. 振り1自由度実験のまとめ ($V/b\omega\theta \sim \alpha$) $\sim c/d$

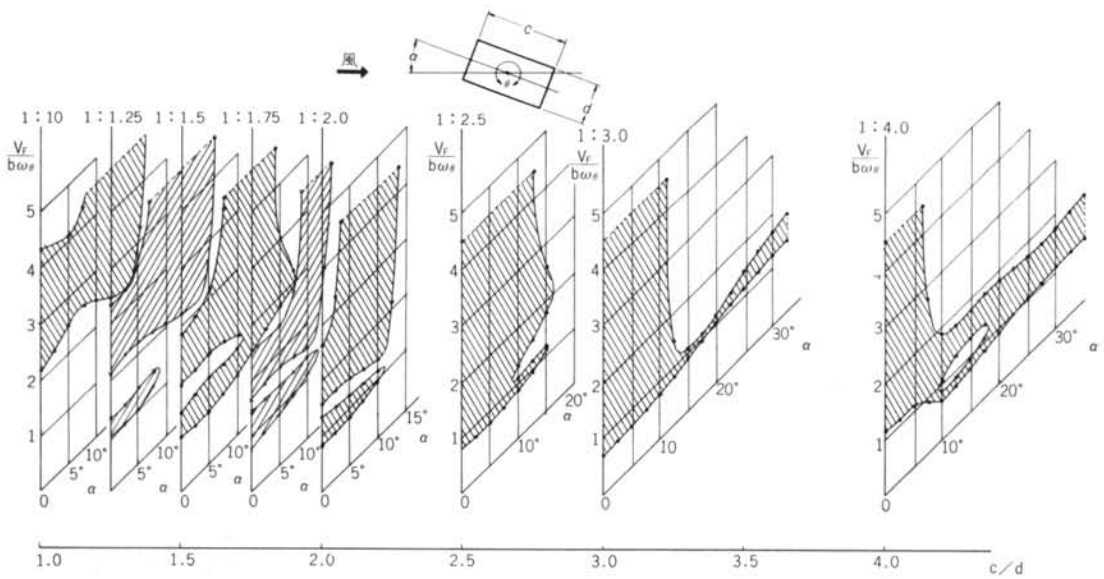


図-122