

土 木 研 究 所 資 料

箱桁橋の空力特性調査報告書

昭和61年 6 月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © 1986 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

箱桁橋の空力特性調査報告書

構造研究室室長 横 山 功 一
(前)研 究 員 中 神 陽 一*
神 寄 一 夫
福 田 誠
(前)部外研究員 福 富 孝 泰**

要 旨

箱桁橋の空力応答特性を把握し、耐風設計の資料とするために、典型的な断面形を数種選び、剛性棒を用いた単径間弾性模型に対する風洞実験を実施した。実験条件としては、質量・構造減衰・気流条件を変化させ、空力特性に及ぼすこれらの要因の影響度を調査した。

キーワード：箱桁橋，耐風設計，渦励振，ギャロッピング，パフエティング。

* (現) 建設省道路局地方道課市町村道室係長

** (現) 住友重機械工業株式会社(船舶海洋鉄構本部橋梁部設計課)

ま え が き

橋梁の風による動的な振動に対する耐風設計は、吊橋、斜張橋といった吊り材を用いたたわみ易い構造形式を有する橋梁を対象として行われるのが一般的であった。しかしながら近年の架橋技術、製作技術、設計技術等の進歩により桁橋も長スパン化の傾向をみせており、既に斜張橋クラスのスパン長を持つ桁橋が出現している。

桁橋の中で特に長スパン化が顕著なのは、鋼箱桁橋である。現在我が国で最長のスパンを持つのは第二摩耶橋で、最大支間 210 m を有する。また 250 m の中央支間長をもつ箱桁橋も計画されており、一世代前の斜張橋にはほぼ匹敵する規模となっている。このような情勢から長大スパンを有する箱桁橋について風による振動の発現が懸念されるようになってきた。

箱桁橋の断面は一般に桁高が高く空力特性の面では斜張橋に比べ劣っている。しかも固有振動数が同程度のスパンを有する斜張橋とはほぼ等しいことから、風洞実験結果からは、風速 20 m/s 程度で大振幅の渦励振が現われ、設計風速以下の領域で自励振動で、破壊的な現象であるギャロッピングが現われるとの結果が得られ、制振対策に苦慮する例が多いようである。

しかし、今までの箱桁橋の耐風性の照査は乱れのほとんどない一様気流中の風洞実験によって行われており、架橋地点付近で吹く自然風に含まれる乱れの効果を必ずしも十分反映させたものとは言えない。一般に箱桁橋のような断面では一様気流中で渦励振やギャロッピングが発現するが、乱れた気流中では渦励振の振幅は小さくなったりまたは消滅したり、そしてギャロッピングはパフエーティングに変わってくることが知られている。したがって耐風設計を行うにあたっては自然風中に含まれる乱れの影響を考慮する必要があると言えよう。

以上のような観点から、今回は箱桁橋の典型的な断面形を数種選び、質量および構造減衰を変えて一様流中および乱流中での応答を測定し、箱桁橋の耐風設計の為の有用な資料の収集を目的とした調査を実施した。

以下とりまとめて報告する。

昭和 61 年 6 月

目 次

1. 序 説	1
1.1 調査の目的	1
1.2 現在までの調査	1
1.3 調査の概要	4
2. 2次元模型実験	5
2.1 概 要	5
2.2 実験方法および実験条件	5
2.3 実験ケース	5
2.4 実験結果	6
3. 3次元模型実験	27
3.1 概 要	27
3.2 実験方法	27
3.3 実験条件	27
3.4 乱流特性	29
3.5 3次元弾性模型の設計	31
3.6 実験ケース	31
3.7 実験結果	32
4. 考 察	69
4.1 2次元模型実験結果	69
4.2 3次元弾性模型実験結果	69
4.2.1 桁断面の耐風性の基本的な特性	69
4.2.2 乱流中における対風特性	71
4.2.3 パフティング振幅の推定	73
4.3 2次元実験と3次元実験の比較	73
5. ま と め	90
参 考 文 献	92
付 属 資 料	93

1. 序 説

1.1 調査の目的

現在、箱桁橋の耐風設計を行なう場合、一様流中での2次元部分模型を用いた風洞実験から耐風性を評価し、然るべき断面形状や制振対策の選定を行なっている。斜張橋や吊橋では耐風性を向上させるために、桁高を低くする事が行なわれるが、箱桁橋に対してはそのような対策は難しい。桁高の高い断面は一般に空力特性が劣り、大振幅の渦励振や破壊的な現象であるギャロッピングが発現しやすい傾向にある。しかしながら、このような傾向は乱流中では異なったものとなり、自然風の中に含まれる乱れを考慮することは重要なことであると考えられる。風洞内に人工的に発生させた気流の乱れを用いて実施した乱流中の実験結果によると、箱桁橋のような断面では乱れの影響は大きく、振動を抑制する効果がある。すなわち、渦励振の振幅は減少し、ギャロッピングは緩やかに振動が発達するバフティングに転じる例が多い。したがって乱流の影響を考慮するか否かで箱桁橋の耐風性の評価は随分と違ったものとなると考えられる。

現在までの乱流中での実験はあくまでも一様流中での実験を補うための参考実験として扱われる場合が多く、使用される乱流も必ずしも架橋地点で予想される乱流の特性を相似させたものではないようである。しかしながらその影響度を考慮すると、実際の自然風の特性を相似させた乱流中での実験が望まれるところである。

また、対風応答には橋の質量および構造減衰も影響が大きいので、実験により影響度を明らかにする項目も追加した。

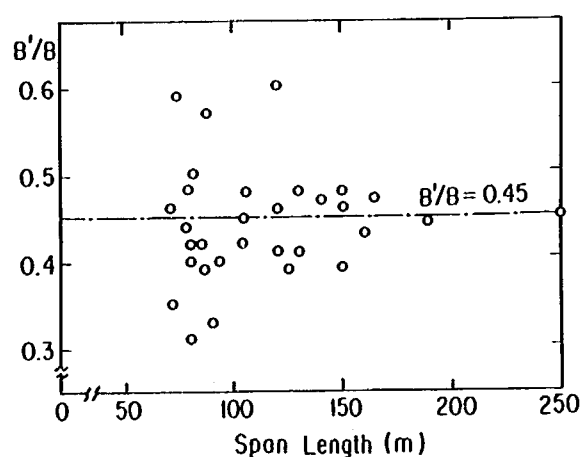


図- 1.1 スパン長と B'/B

1.2 現在までの調査

構造研究室では昭和58年度より箱桁橋の空気力特性調査を開始している。一様流中の2次元部分模型を用いたバネ支持模型実験、非定常空気力実験を行い、ギャロッピングの基本的な特性についてとりまとめを行なっている。以下にその概要を紹介する。

(1) 昭和58年度の調査

(a) 実験方法と実験条件

箱桁橋は、一般にウェブが水平面に対し直角であり、断面の幾何的特性は、全幅・桁幅・桁高の

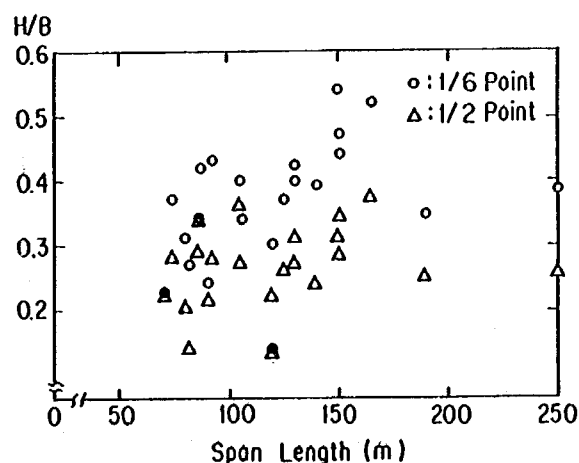


図- 1.2 スパン長と H/B

3パラメータによって表わされる。全幅・桁幅・桁高をそれぞれ $B \cdot B' \cdot H$ で表わし、実際の箱桁橋における桁幅比 B'/B および桁高比 H/B について調査し図-1.1, 図-1.2 に示した。図-1.1 によるとスパン長が増加するに伴い, B'/B は 0.4 から 0.5 の間に納まってくるようである。また, 図-1.2 を見ると H/B は 0.2 から 0.6 程度にバラついていることが判る。そこで本研究の対象として $B'/B = 0.45$, $H/B = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ の 5 断面を採用することとした。使用した風洞模型の断面を図-1.3 に示した。中央分離帯は設けていないが, 横断勾配を 2% としている。風洞実験は, 強制加振法による非定常空気の測定であるが, 箱桁橋では, 一般にねじれの固有振動数がたわみの固有振動数に比べかなり高いため, ここではたわみモードのみに着目することとした。また迎角は全ての断面に対し 0 度とした。加振振幅は片振幅で全幅の $1/100$ とし, 風速は無次元風速で約 12 までとした。

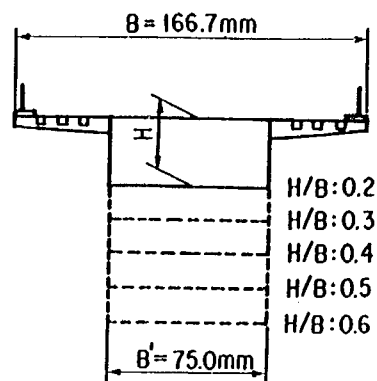


図-1.3 風洞模型図

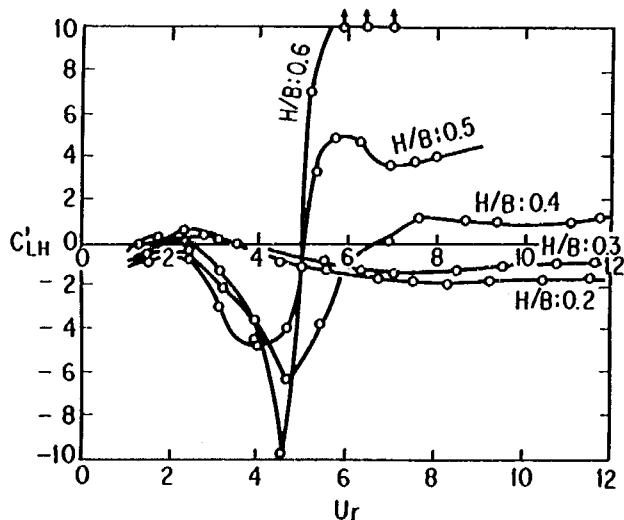


図-1.4 無次元風速 - C_{LH} 曲線

(b) 耐風安定性の評価法

振動速度と同位相のたわみ揚力係数 C_{LH}^I は式(1)のように示される。

$$C_{LH}^I = 2 m \eta_0 \omega_0^2 (\delta_0 - \delta) / \rho U^2 B \pi \quad (1)$$

ここに, m ; 質量, ω_0 ; 固有円振動数, ρ ; 空気密度, U ; 風速, B ; 代表長さ, δ_0 ; 構造減衰, δ ; 減衰

式(1)を次のように変形する。

$$\frac{m \delta}{\rho B^2} = \frac{m \delta_0}{\rho B^2} - \frac{1}{2} \left[\frac{U}{\omega_0 B} \right]^2 C_{LH}^I \frac{\pi}{\eta_0 / B} \quad (2)$$

耐風安定性は, 左辺の δ の正負によって判断される。右辺の第一項は各橋梁に対し一意的に定まるパラメータであるから, 実験によって第二項を求めればよい。

(c) 研究結果

たわみ揚力係数 C_{LH}^I を求め, 加振振幅と無次元風速から式(2)の右辺の第二項を求め図-1.4 に示した。なお, この項を一括して, C_{LH}^I とした。図

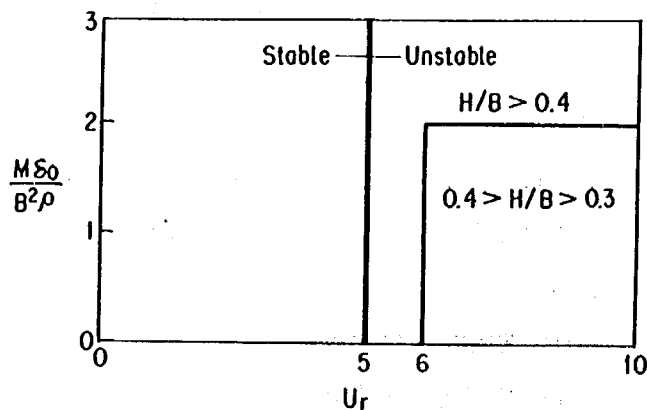


図-1.5 箱桁橋のギャロッピング特性 (模式図)

— 1.4 の中の縦軸に、式(2)の左辺の値をとると、 C'_{LH} の曲線がこの値を超える領域では片振幅が全幅の $1/100$ 以上の振幅でたわみ振動が発現することになる。図-1.5 に図-1.4 で示した実験結果を模式的に示した。 H/B が 0.3 から 0.4 の範囲では、ギャロッピングが発生するかどうか微妙であるため、安全側をとり $H/B = 0.4$ の曲線をもってこの領域をカバーするものとした。同様に $H/B = 0.4$ から 0.5 の領域も $H/B = 0.5$ の曲線によってカバーした。図-1.5 によると、 $H/B < 0.3$ の場合は、ギャロッピングは発現しない。 $0.4 > H/B > 0.3$ の場合は、 $m\delta_0/\rho B^2$ が 2 以下の場合に限り $U_r = 6$ からギャロッピングが発振する。 $H/B > 0.4$ では $m\delta_0/\rho B^2$ によらず $U_r = 5$ でギャロッピングが発振することになる。

(2) 昭和59年度の調査

(a) 実験方法と実験条件

1 箱桁と 2 箱桁について、迎角の影響も考慮して、ギャロッピング発現風速について検討を行なった。

1 BOX 断面, 2 BOX 断面

それぞれの断面の概形ならびに全幅、桁高の定義法について図-1.6 に示した。

箱桁橋の桁高と全幅の比

H/B は 1 BOX の箱桁橋で

およそ 0.2 ~ 0.6 程度, 2

BOX の箱桁橋で 0.2 ~ 0.5 程度である。

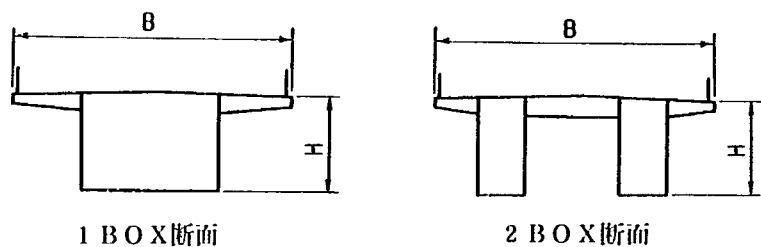


図-1.6 箱桁橋断面概要

箱桁橋ではねじれ剛性がたわみ剛性に比べ高くなるため、たわみ振動が耐風安定性上問題となる。本研究ではこのような事情からたわみ振動にのみ着目することとし、その中でも崩壊的なたわみ振動であるギャロッピングについて検討することとした。

(b) 研究結果

桁高比 H/B とギャロッピング発振無次元風速 V_r ($V/NB : V$; 風速, N ; たわみの固有振動数) との関係を実験によって、1 BOX 箱桁橋について図-1.7 に、2 BOX 箱桁橋について図-1.8 にそれぞれとりまとめた。これによって以下の事項が明らかになった。

- (1) 1 BOX, 2 BOX とともに桁高比が 0.2 以下の扁平な断面ではギャロッピングは発現しない。
- (2) 桁高比が大きいほどギャロッピング発振風速は低下するが概ね無次元風速 4.5 に漸近するようになる。
- (3) 迎角によってギャロッピング発振風速はかなり変動する。迎角が大きくなるにつれて発振風速は一樣に増加する。
- (4) ギャロッピング発振風速にはスクルトン数 ($m\delta/\rho B^2$) はほとんど影響を及ぼさない。

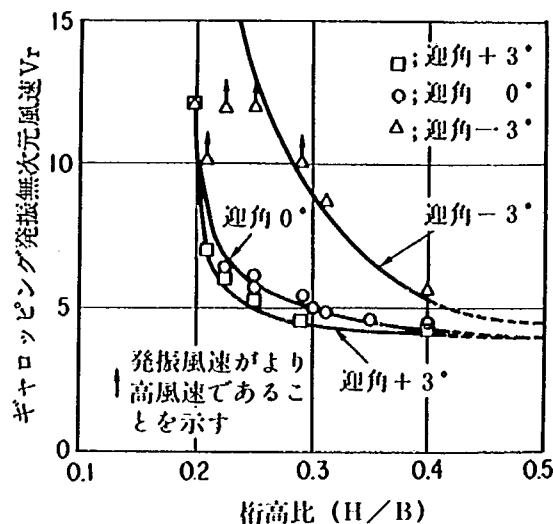
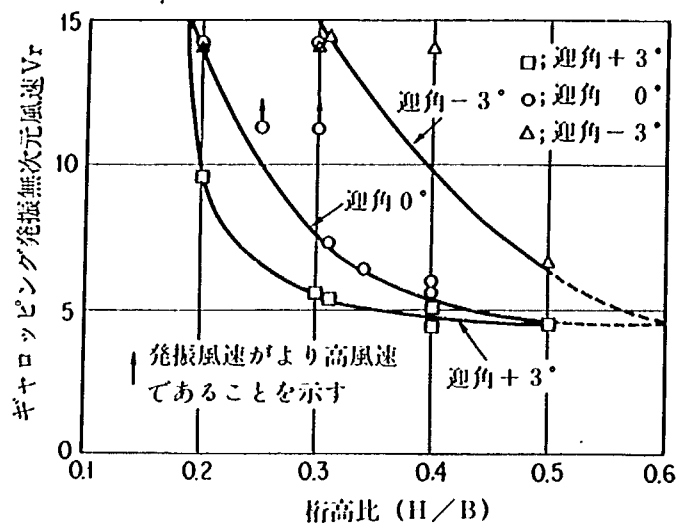


図- 1.7 1 BOX 箱桁橋のギャロッピング特性

図- 1.8 2 BOX 箱桁橋のギャロッピング特性

1.3 本調査の概要

以上のような状況を踏まえ、本調査では主として箱桁橋の基本的特性を調査した2次元模型実験と、3次元実験により乱流の影響、質量、減衰パラメータの影響について検討した。以下に概要をとりまとめた。

- (1) 対象とした箱桁橋は1箱桁とし、2次元模型では $H/B = 0.2 \sim 0.5$ (4種)、3次元模型では $H/B = 0.25 \sim 0.5$ (5種)と変化させ、渦励振とギャロッピング、パフティングについて測定した。
- (2) 風洞内で発生させることのできる乱流の乱れのスケールは風洞の規模の制限からあまり大きなものはできない。この点を考慮して模型の幅員を10cm程度(実橋で20m幅員の1/200の模型に相当する)とした。このため2次元模型実験を行なうには模型が小さくなり過ぎて製作・実験が困難となるので、本調査ではタウト・ストリップ・モデルと同じ考え方で、ピアノ線を剛性棒に置き換えた単径間弾性模型を用いることとした。
- (3) 乱れの強さは周囲の地表条件によって変化するので、架橋地点付近の地表条件を考慮した評価ができるよう乱れ強さが異なった3種の乱流中で実験を行なった。
- (4) 2次元模型実験と3次元模型実験の応答を比較し、3次元性の影響について調査した。
- (5) 気流の特性と共に、構造減衰や重量といった要素も耐風性に大きな影響を及ぼす。このため、本調査では質量、構造減衰をそれぞれ3通りに変化させ、結果をスクルトン数(S_c 数= $m\delta/\rho B^2$)で整理した。

2. 2次元模型実験

2.1 概 要

一様流中での箱桁断面の基本的な特性を把握するためのバネ支持模型実験を実施した。模型は桁高比 H/B と迎角 α の影響を調べるために、 $H/B = 0.2 \sim 0.5$ (4種類)、 $\alpha = 0, \pm 3^\circ$ (3種類) に変化した。実験は S_c 数をできる限り小さくして振動が発現しやすい条件とし、結果は $V \sim A \sim \delta$ 曲線で表示し、自由振動法による非定常空気力係数の算定も行なった。

2.2 実験方法および実験条件

実験は建設省土木研究所耐風工学実験施設内の非定常空気力風洞を用いて実施した。非定常空気力風洞の主要諸元を表-2.1に示す。模型は2次元剛体模型を用い、6本のコイルバネにより風洞内にたわみおよびねじれ2自由度に支持し、風速、迎角を変化させて、各ケース毎に模型の挙動を観測した。使用した気流は乱れのほとんどない一様気流であり、風速の測定はピトー管およびマノメータを用いて行なった。模型の挙動は光学式変位計を用いて測定し、データレコーダおよびペン書きレコーダに記録した。実験の概要を図-2.1に、実験に使用した模型を図-2.2に示す。

一般にバネ支持模型実験では幾何学的形状を相似させる他に、いくつかの無次元パラメータを相似させる必要がある。箱桁橋では通常ねじれ固有振動が問題となることはないので、たわみモードのみに着目し、次の3つの無次元量を実橋と模型で一致させる必要がある。

$$M/\rho B^2, V/NB, \delta$$

ここに、 M ：単位長さ当りの質量

ρ ：空気密度

B ：構造物の代表長さ

V ：風速

N ：鉛直たわみ固有振動数

δ ：無風時における鉛直たわみ対数減衰率

しかしながら、今回の実験は断面の基本的な特性を求める事を目的としており、実橋があるわけではない。渦励振やギャロッピング等の振動現象が発現しやすいように、模型の質量および減衰はできる限り小さくなるようにした。実験条件としては、質量パラメータ $m/\rho B^2$ と減衰パラメータを掛け合せた S_c 数 ($m\delta/\rho B^2$) と、無次元風速 V/NB とで整理することができる。

2.3 実験ケース

実験は桁高比 H/B と迎角 α を変化させた12ケースについて行なった。実験ケースを実験条件とあわせて表-2.2に示す。

2.4 実験結果

風洞実験の結果得られた対風応答特性を図－2.3.1～12に示す。横軸は無次元風速 V/NB (V : 風速, N : 鉛直たわみ固有振動数, B : 幅員) であり, 縦軸は無次元振幅 η/B (η : 振幅, B : 幅員) である。

図－2.4.1～3に迎角毎の応答特性をまとめた。また, 実験ケースを示した表－2.2に結果の概略を併記した。

表－2.1 非定常空気力風洞主要諸元

風 洞 形 式				単回路還流式	
主 要 寸 法	測 定 胴	幅 (mm)		1,000	
		高 (mm)		2,000	
		長 (mm)		3,000	
	縮 流 胴	入 口 (mm×mm)		3,000 × 5,000	
出 口 (mm×mm)		1,000 × 2,000			
縮 流 比		7.50			
風 路 全 長 (mm)				55,000	
送 風 機	形 式			固定ピッチ動翼軸流式	
	動 翼 直 径 (mm)			1,500	
	有 効 全 圧 (mm A g)			40.0	
	風 量 (m ³ /s)			70.0	
	回 転 数 (r p m)			1,250.0	
	容 量 (kW)			50.0	
気 流	最 大 風 速 (m/s)			30.0	
	乱 れ 率 (%)			0.5 %以下	
付 属 計 測 機 器 等				三分力天秤 フラッタ模型支持装置 非定常空気力測定装置 突風発生装置 脈動発生装置 データ処理装置	

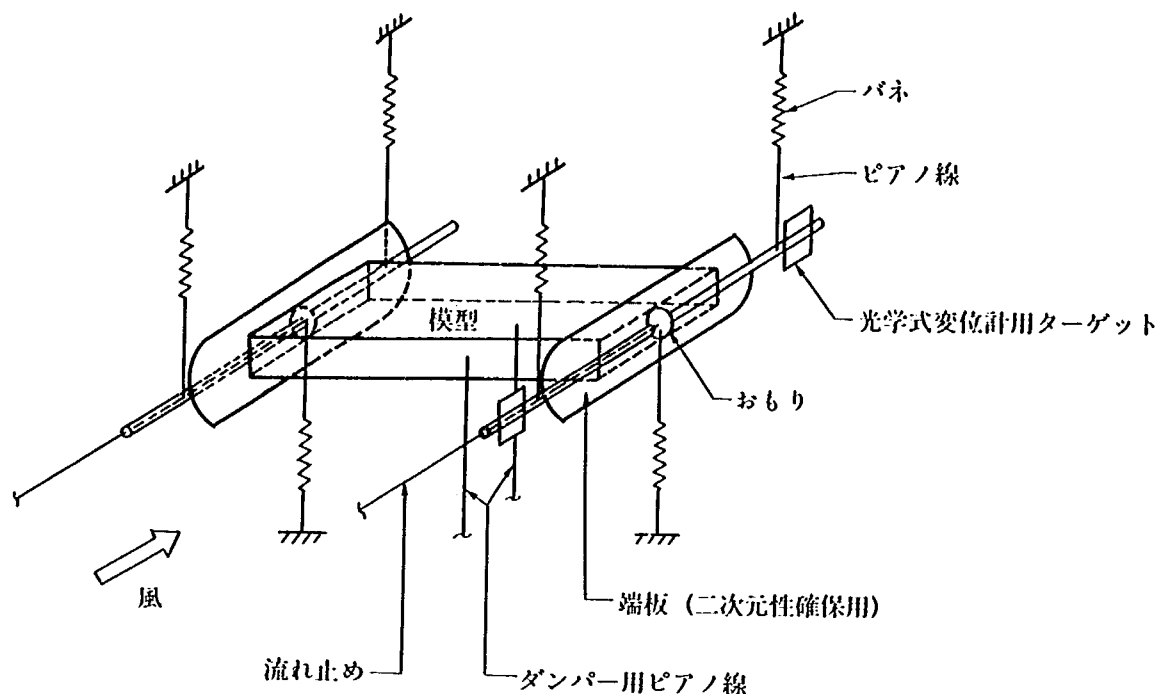
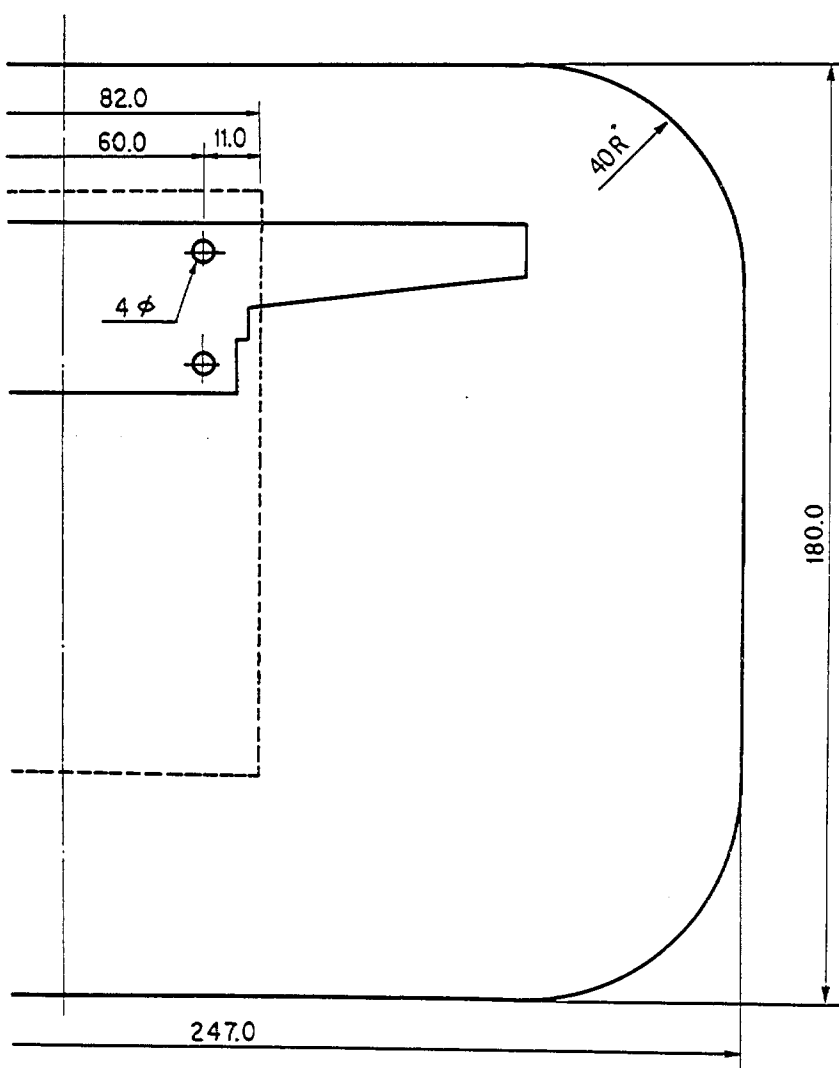
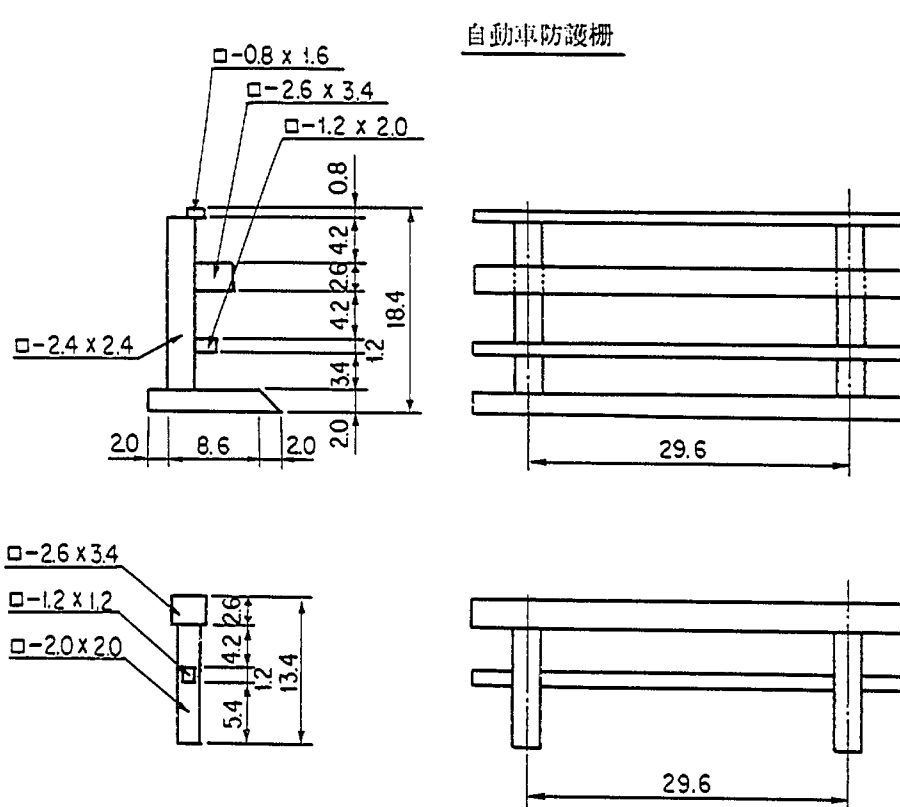
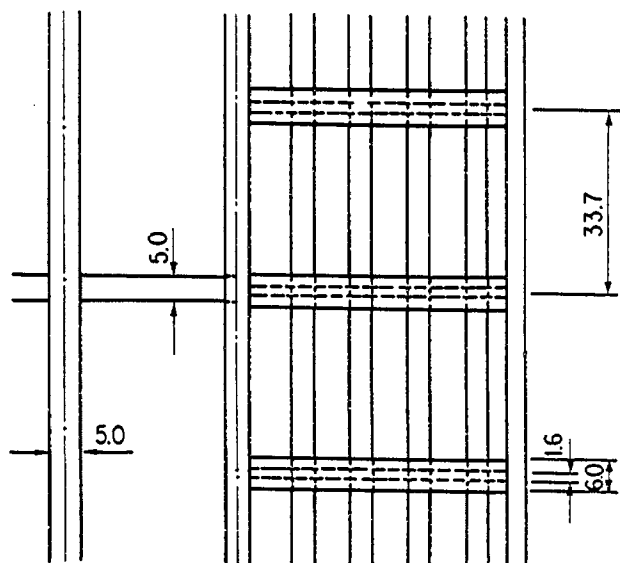
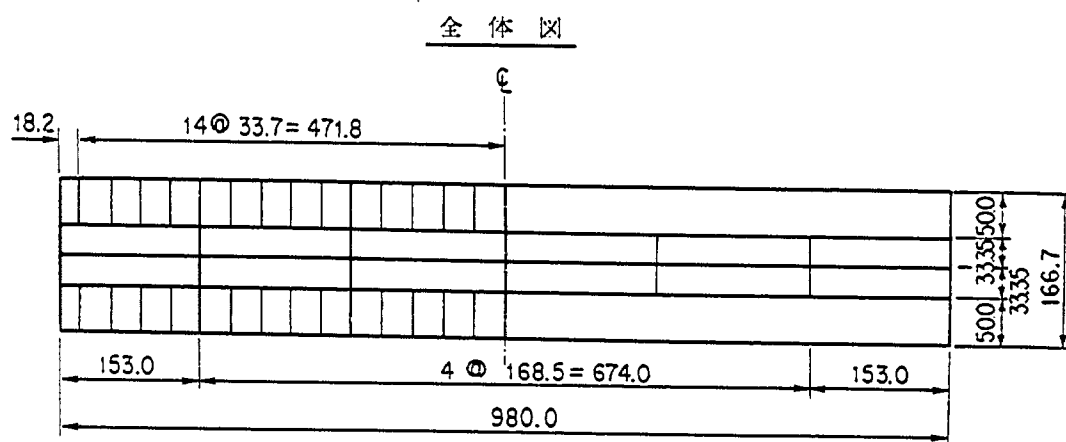
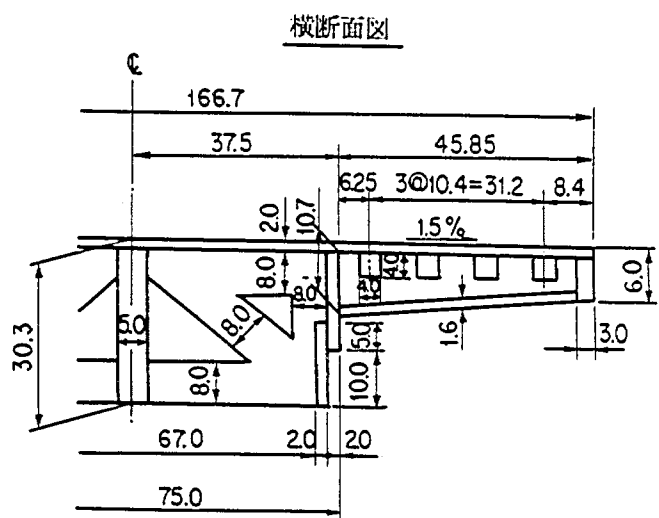


図- 2.1 2次元部分模型実験概要

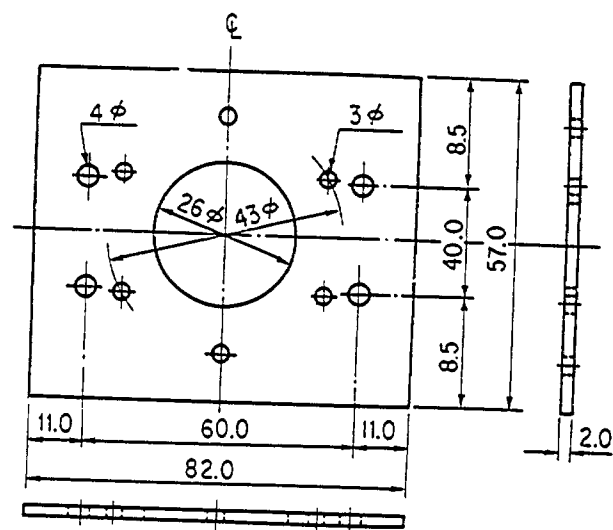
表- 2.2 実験条件, 実験ケースおよび実験結果

実験 番号	模型幅 (mm)	桁高 (mm)	桁高比 (H/B)	迎角 (DEG)	質 量 (kg)	振動数 (Hz)	構造減衰 (δ)	スクル トン数 (Sc数)	渦 励 振		ギャロップ グ発現風速 (V/NB)
									発現風速 (V/NB)	振 幅 (η/B)	
1	167.0	33.4	0.20	0	2.66	3.08	0.0127	1.01	1.34	0.007	—
2				3	2.66	3.08	0.0116	0.92	1.70	0.019	9.5
3				-3	2.66	3.08	0.0127	1.01	—	—	—
4		50.1	0.30	0	2.71	3.06	0.0115	0.93	2.38	0.010	—
5				3	2.71	3.06	0.0118	0.96	2.35	0.026	5.5
6				-3	2.71	3.06	0.0121	0.98	2.50	0.006	—
7		66.8	0.40	0	2.76	3.03	0.0126	1.04	3.43	0.004	5.8
8				3	2.76	3.03	0.0137	1.13	—	—	4.8
9				-3	2.76	3.03	0.0125	1.03	3.23	0.021	—
10		83.5	0.50	0	2.79	3.01	0.0139	1.16	—	—	4.8
11				3	2.79	3.01	0.0118	0.98	—	—	4.8
12				-3	2.79	3.01	0.0125	1.04	—	—	6.7

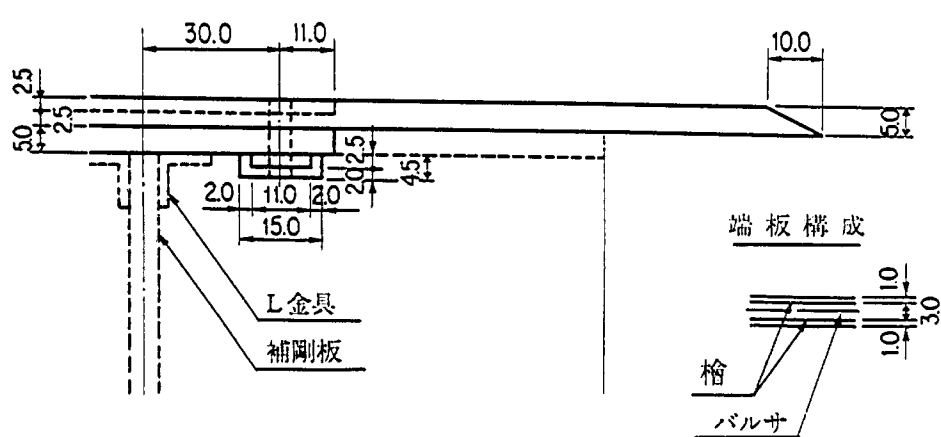
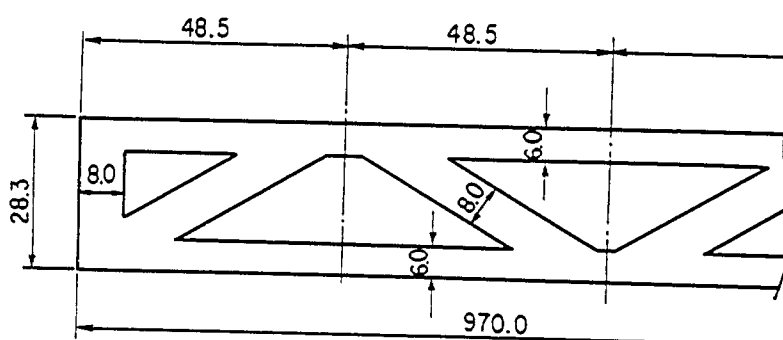
渦励振の発振風速およびギャロッピングの発現風速は無次元風速 V/NB (V ; 風速, N ; 鉛直たわみ振動数, B ; 模型幅) で示し, 振幅は無次元振幅 η/B (η ; 振幅, B ; 模型幅) で示す。
—印は発現しなかったことを示す。



取付端板



補剛板



端板構成

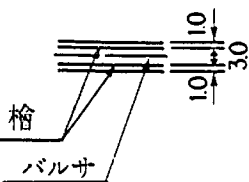


図-2.2.1 模型図(その1)

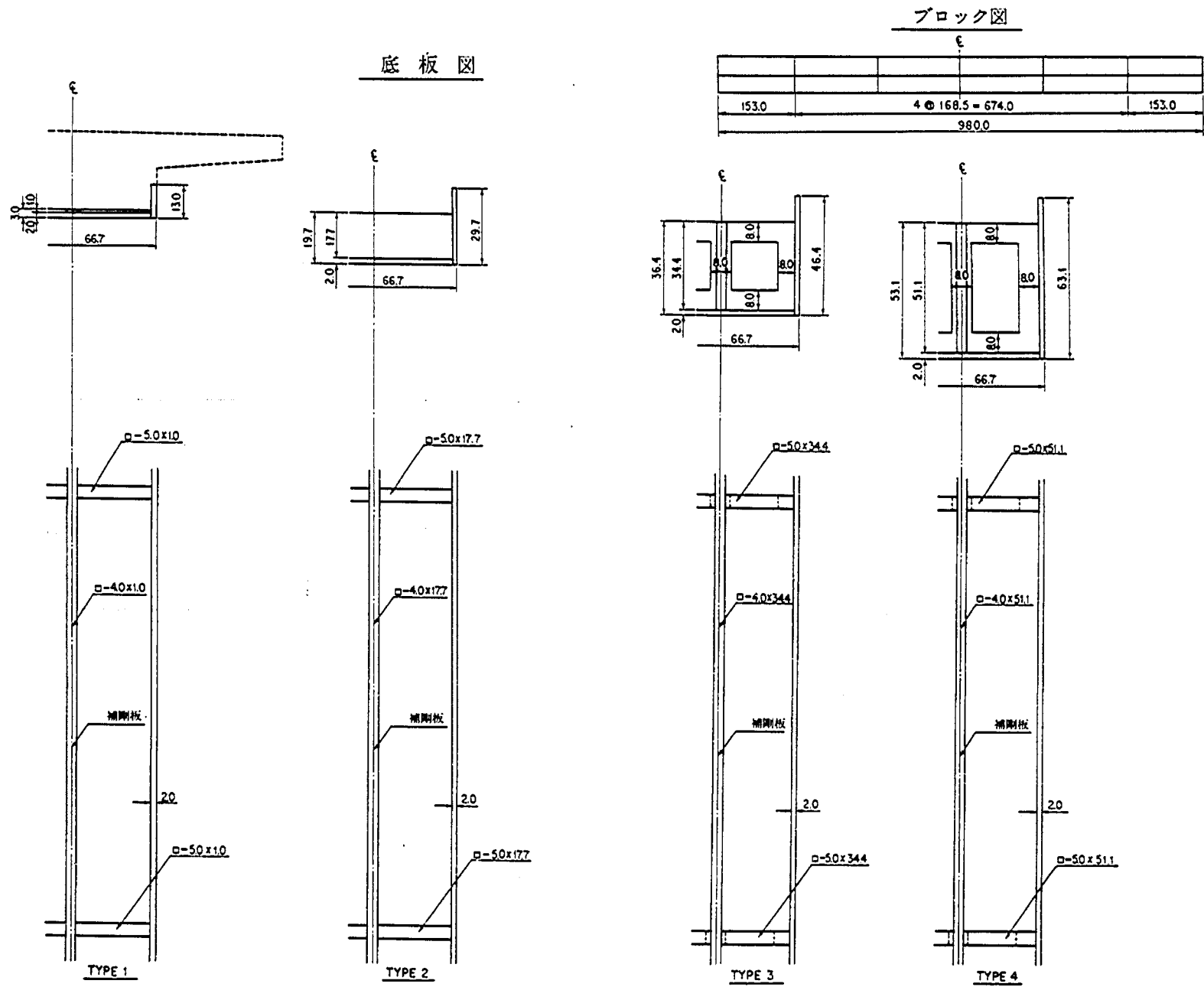


図-2.2.2 模型図 (その2)

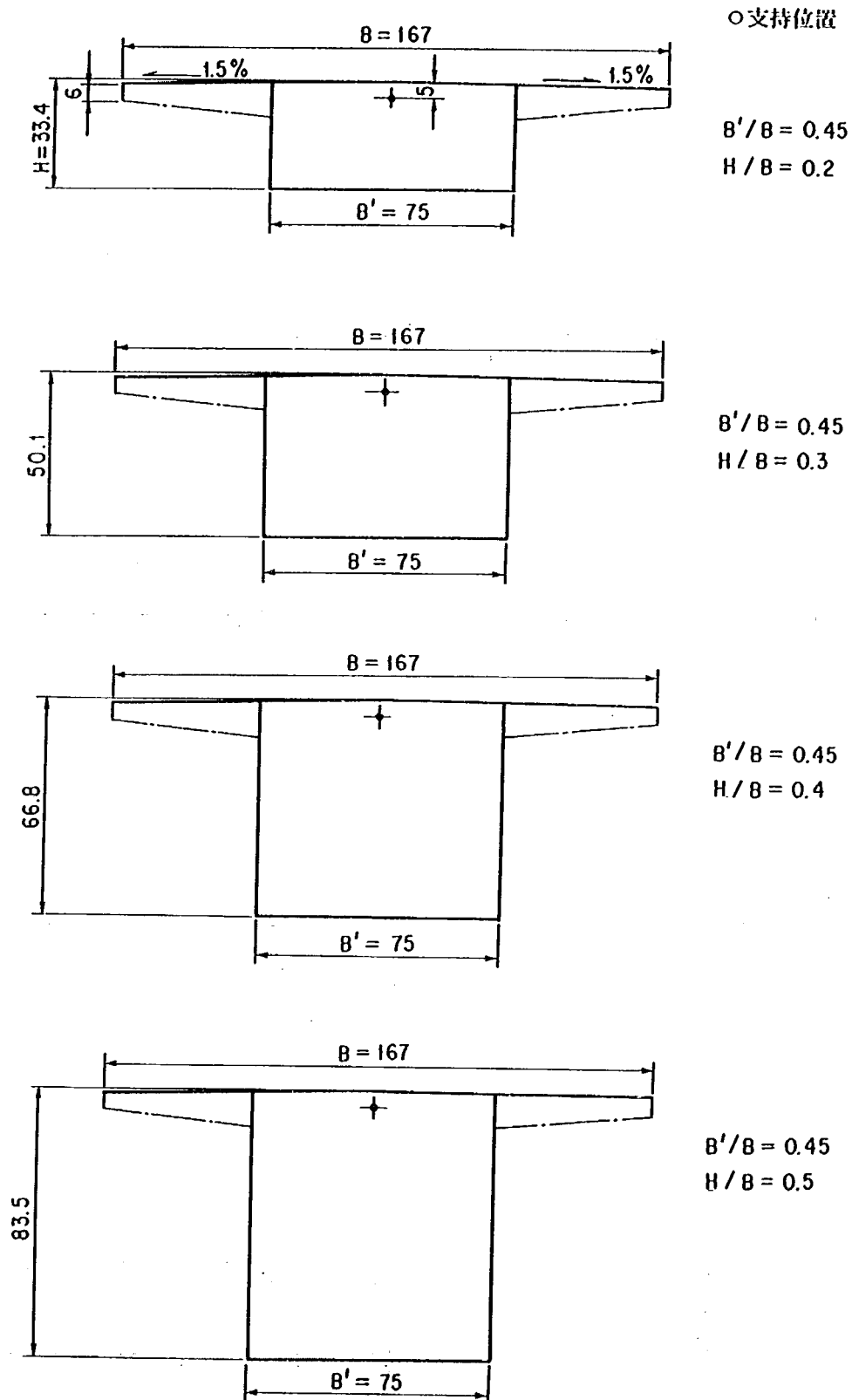
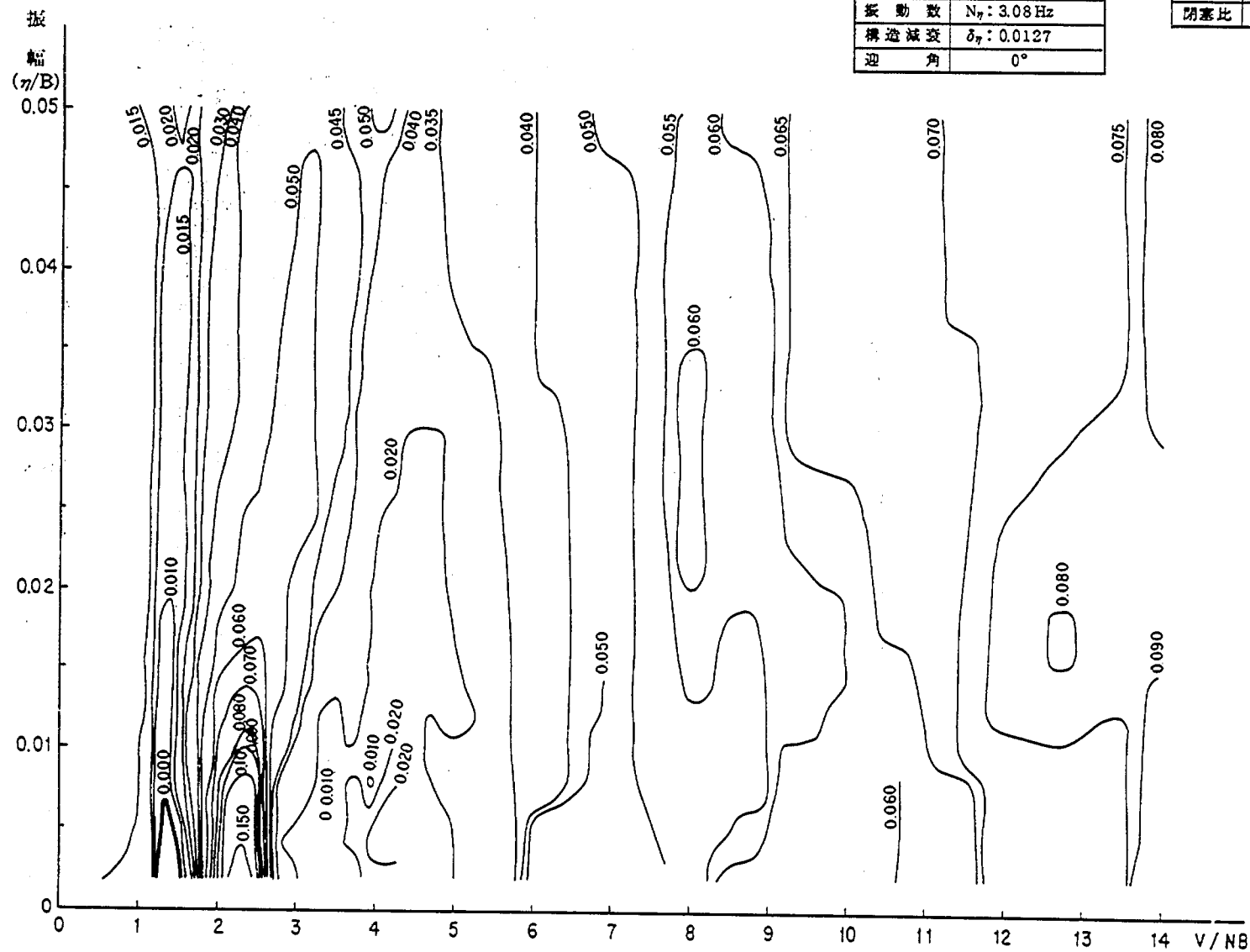


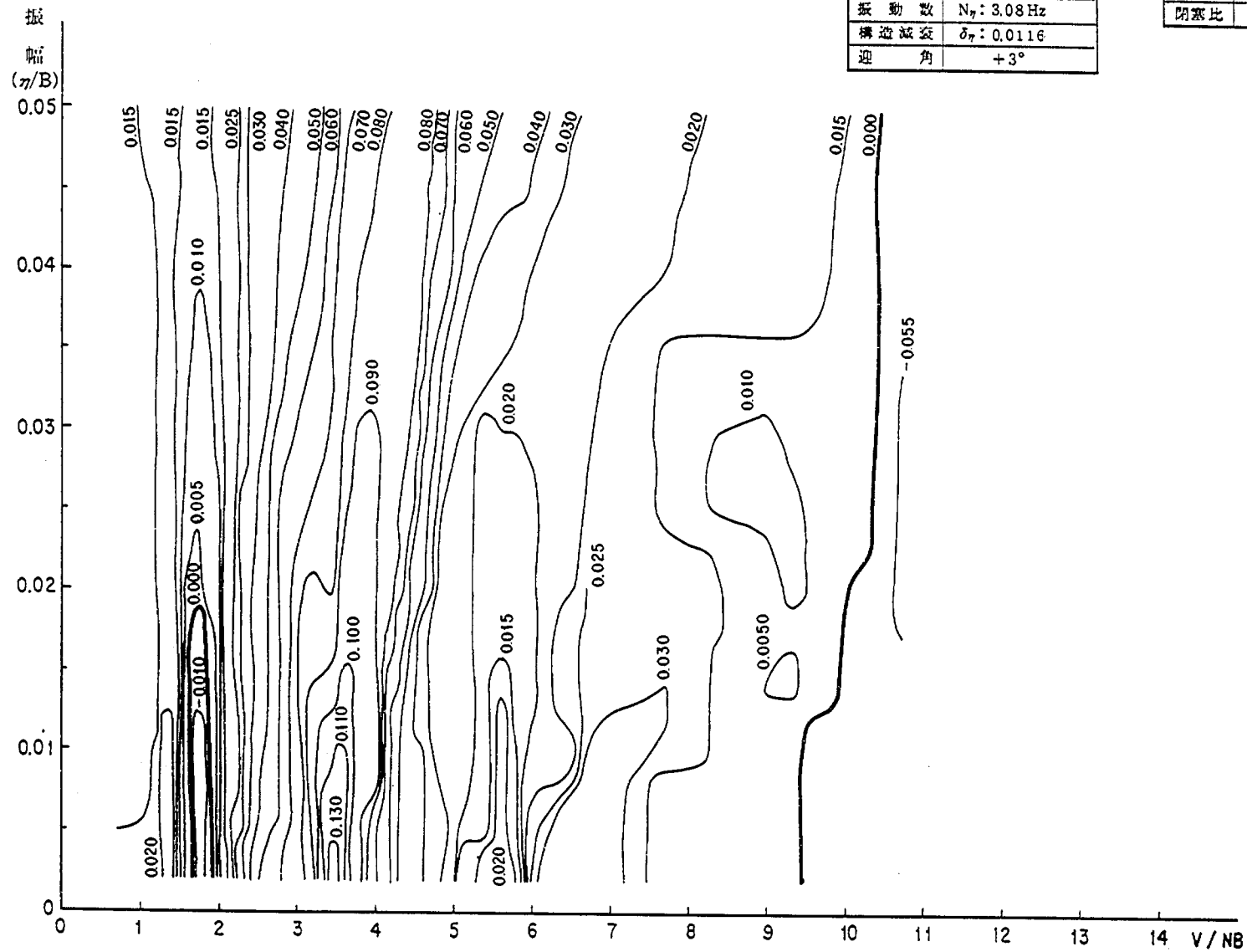
图-2.2.3 箱桁桥1BOX模型断面



試驗條件	
模型名	箱桁橋 1 Box
桁高比	0.2
質量	2.66 kgf/model
振動數	$N_T: 3.08 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_T: 0.0127$
迎角	0°

模型主要寸法	
弦長	16.7 cm
模型厚	3.34 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

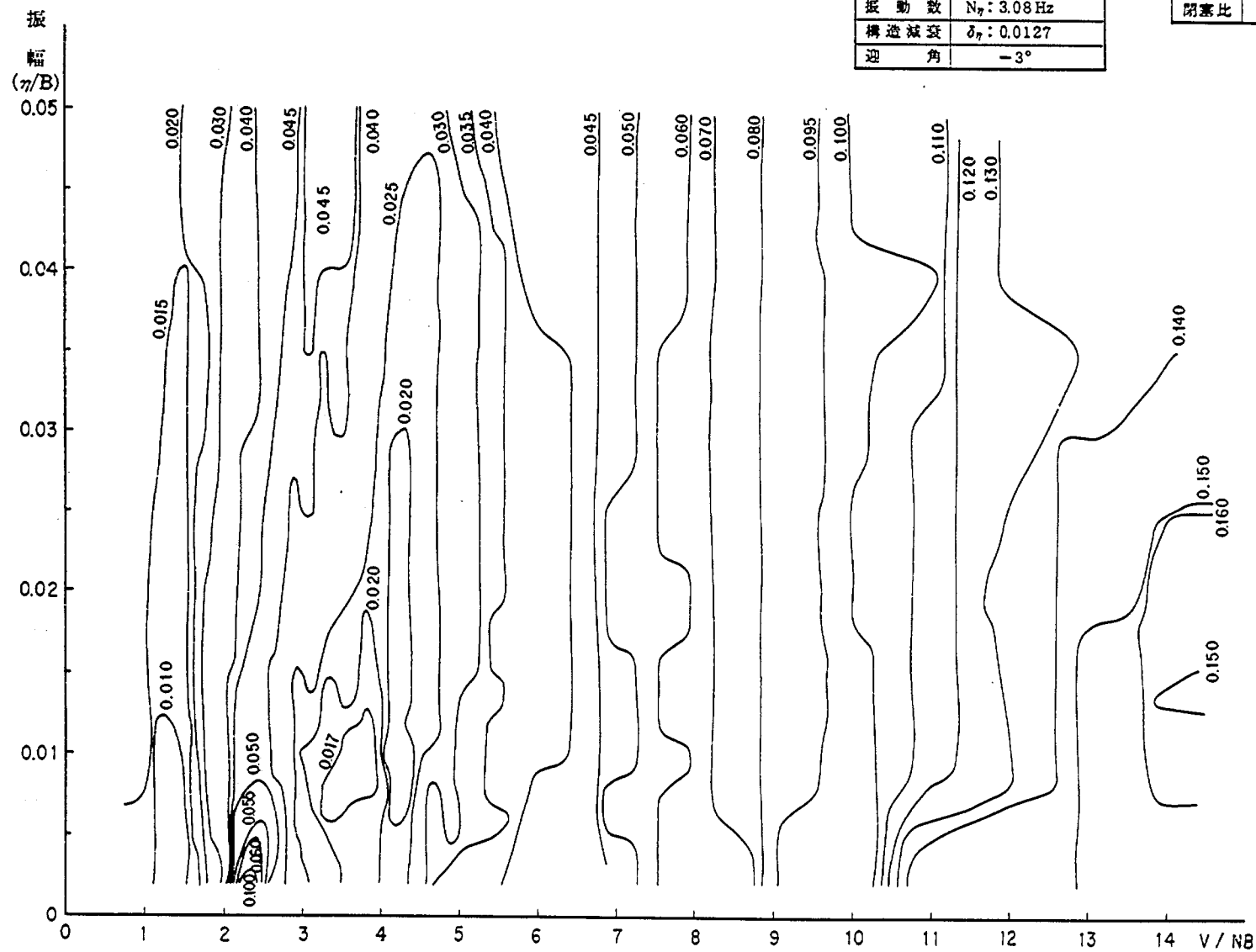
圖-2.3.1 風速 - 振幅 - 減衰曲線



試驗條件	
模型名	箱桁橋1 Box
桁高比	0.2
質量	2.66 kgf/model
振動數	$N_T: 3.08 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_T: 0.0116$
迎角	$+3^\circ$

模型主要尺寸	
弦長	16.7 cm
模型厚	3.34 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

圖-2.3.2 風速 - 振幅 - 減衰曲線



試驗條件	
模型名	箱桁樑1 Box
桁高比	0.2
質量	2.66 kgf/model
振動數	$N_T: 3.08 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_T: 0.0127$
迎角	-3°

模型主要寸法	
弦長	16.7 cm
模型厚	3.34 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

圖-2.3.3 風速 - 振幅 - 減衰曲線

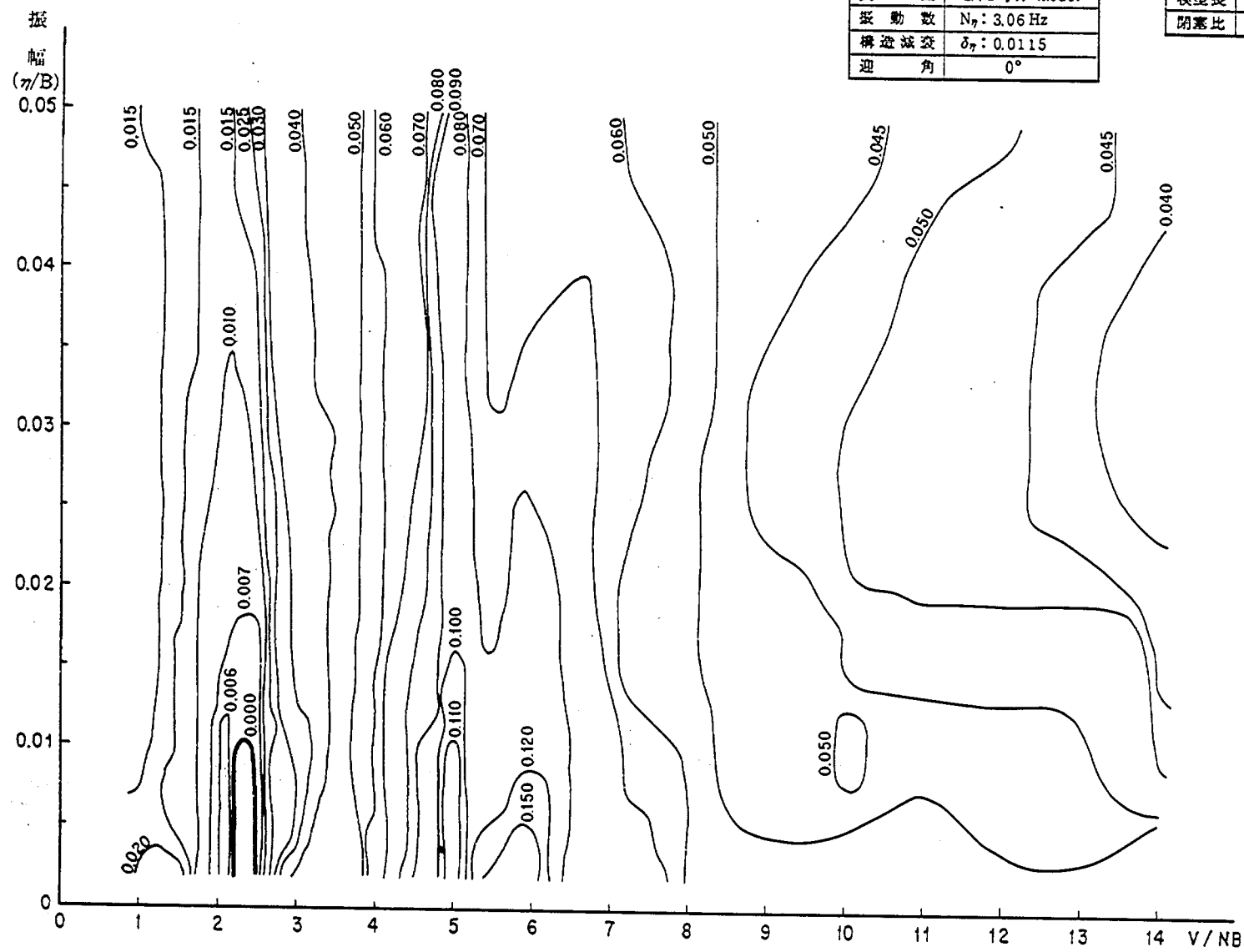
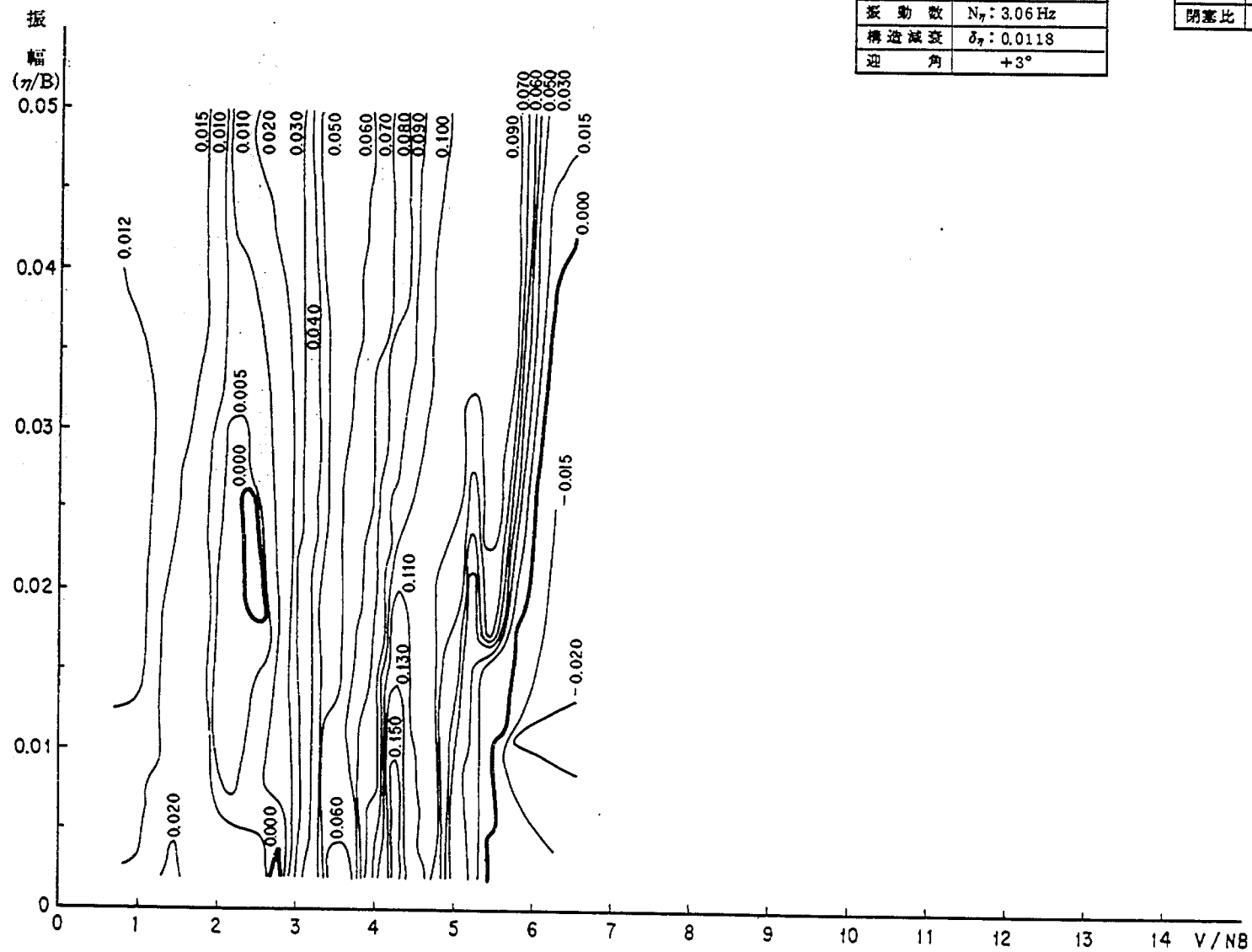


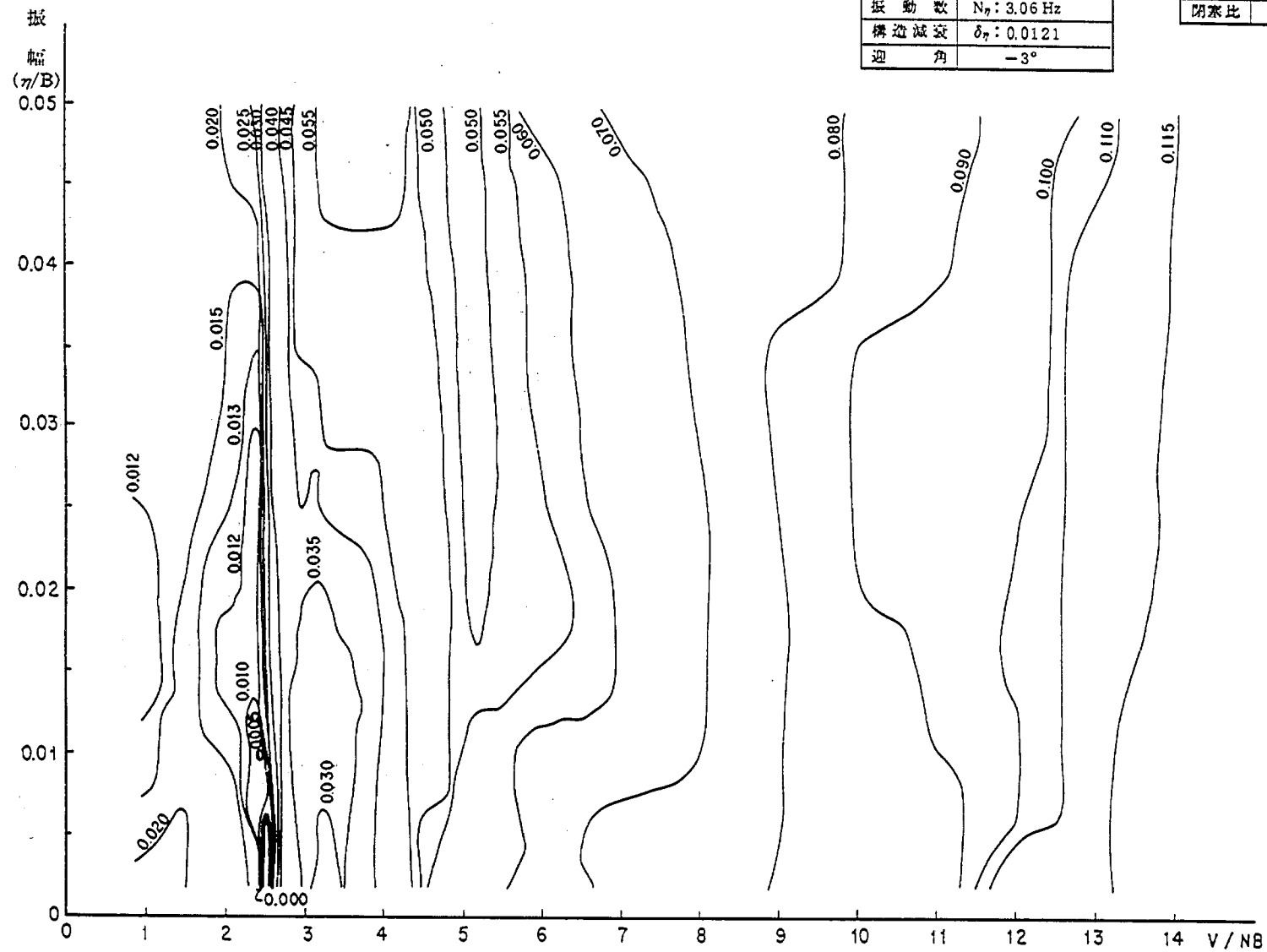
圖-2.3.4 風速 - 振幅 - 減衰曲線



試驗條件	
模型名	箱桁橋 1 Box
桁高比	0.3
質量	2.71 kgf/model
振動數	$N_T: 3.06 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_T: 0.0118$
迎角	$+3^\circ$

模型主要寸法	
弦長	16.7 cm
模型厚	5.01 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

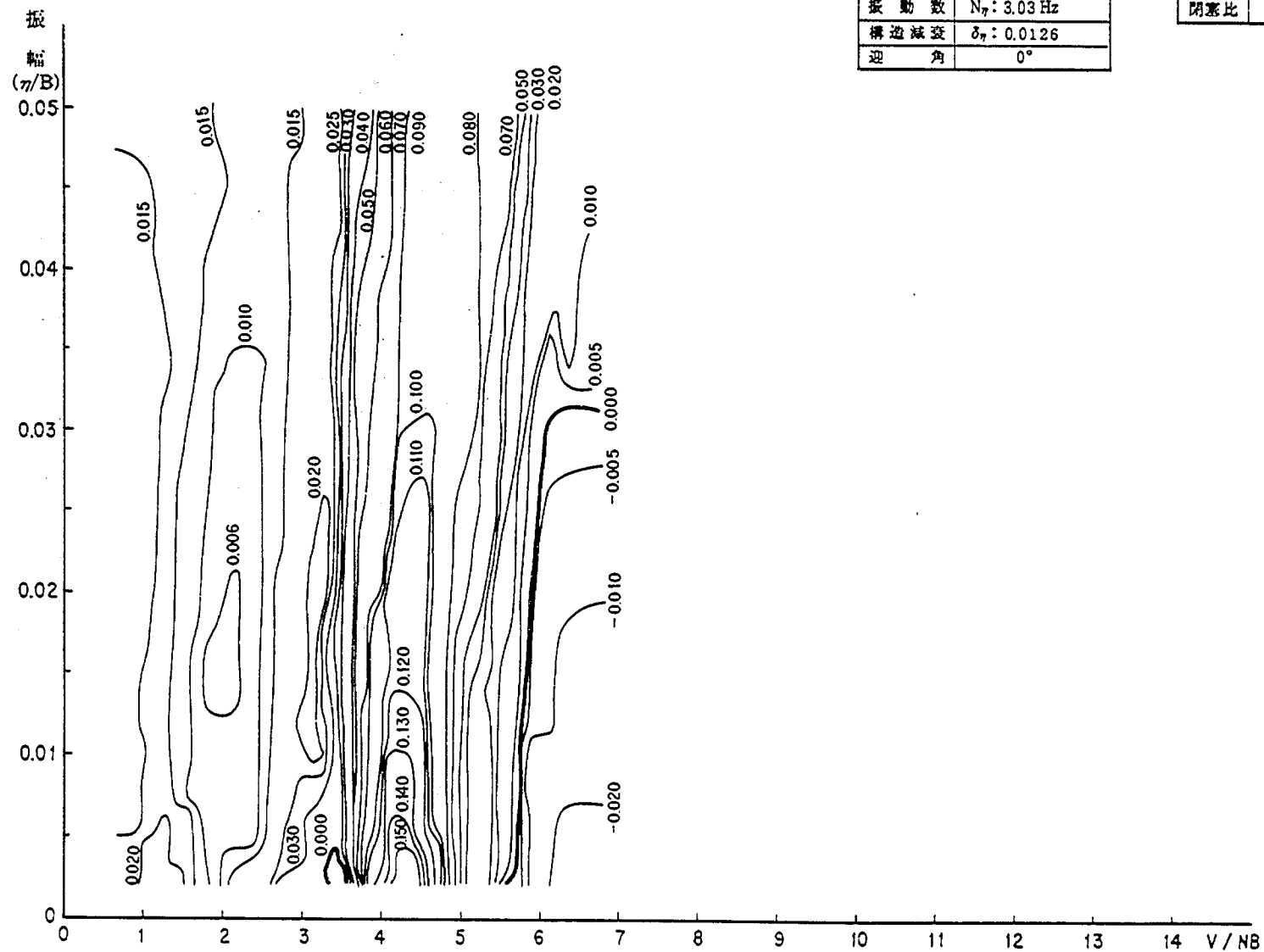
圖 - 2.3.5 風速 - 振幅 - 減衰曲線



試驗條件	
模 型 名	箱桁橋 1 Box
桁 高 比	0.3
質 量	2.71 kgf/model
振 動 數	$N_T: 3.06 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_T: 0.0121$
迎 角	-3°

模型主要寸法	
弦 長	16.7 cm
模型厚	5.01 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

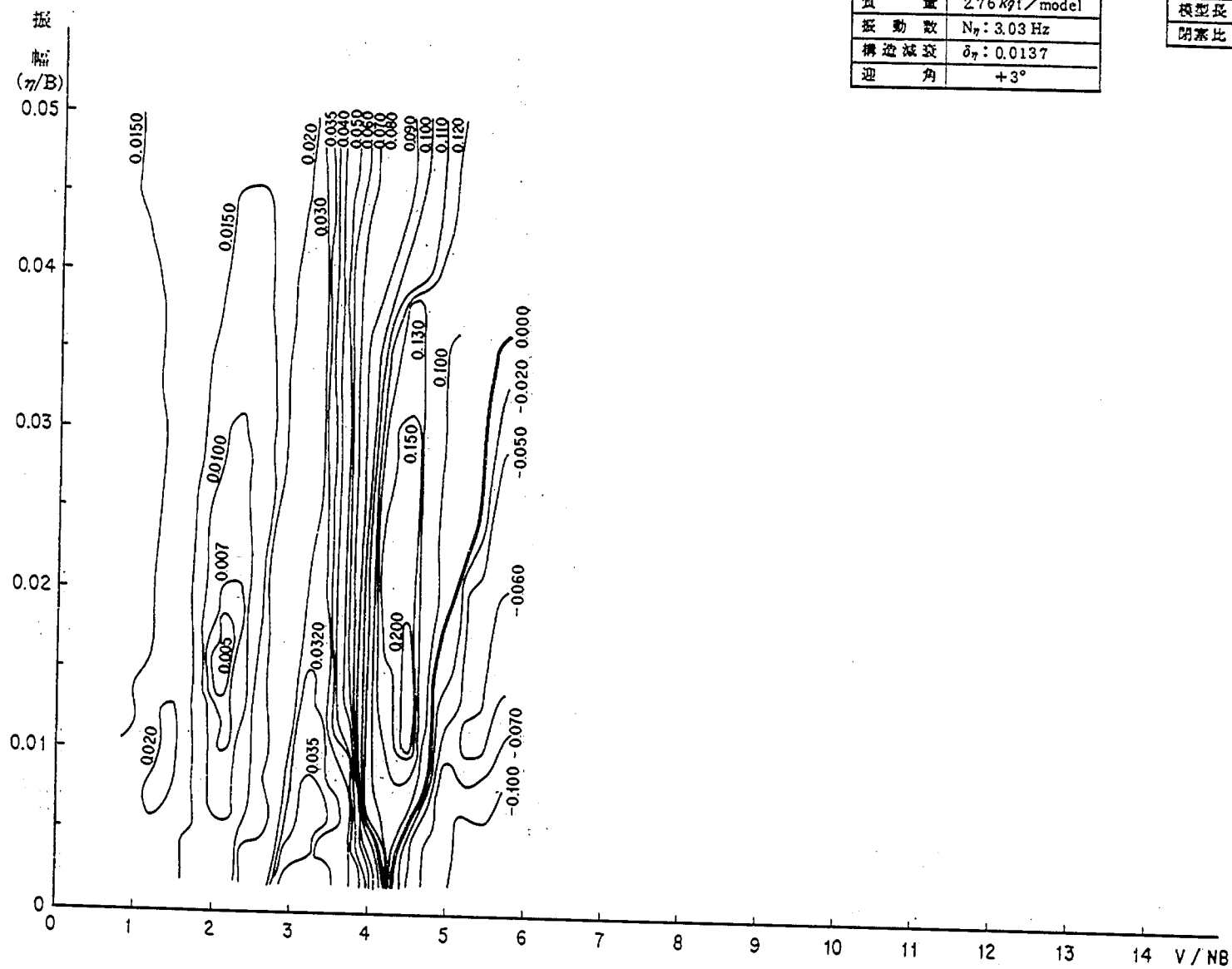
圖—2.3.6 風速—振幅—減衰曲線



試驗條件	
模 型 名	箱桁樑1 Box
桁 高 比	0.4
質 量	2.76 kgf/model
振 動 數	$N_T: 3.03 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_T: 0.0126$
迎 角	0°

模型主要寸法	
弦 長	16.7 cm
模型厚	6.68 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

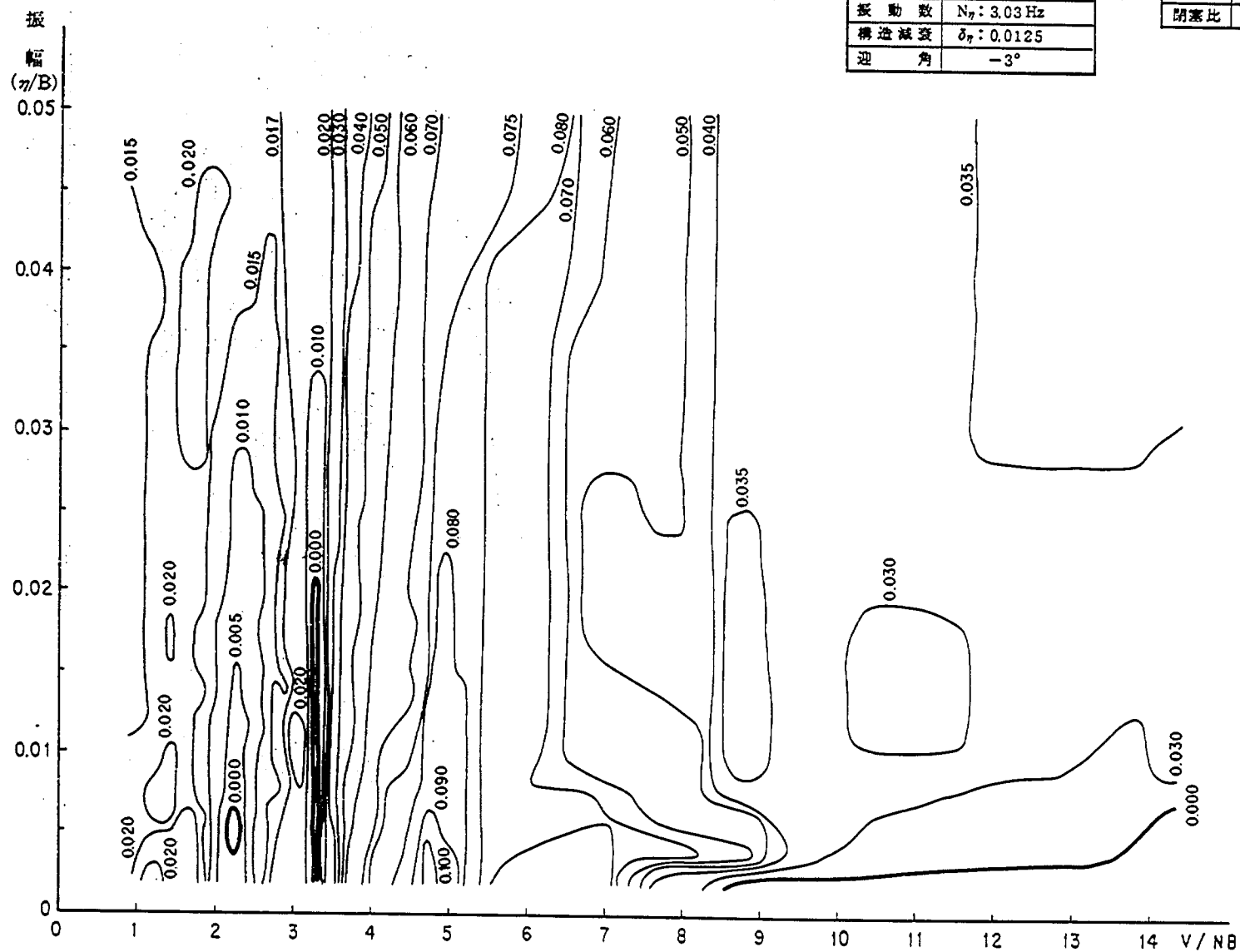
圖—2.3.7 風速—振幅—減衰曲線



試驗條件	
模型名	箱桁橋 1 Box
桁高比	0.4
質量	2.76 kgf/model
振動數	$N_f: 3.03 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_f: 0.0137$
迎角	$+3^\circ$

模型主要寸法	
弦長	16.7 cm
模型厚	6.68 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

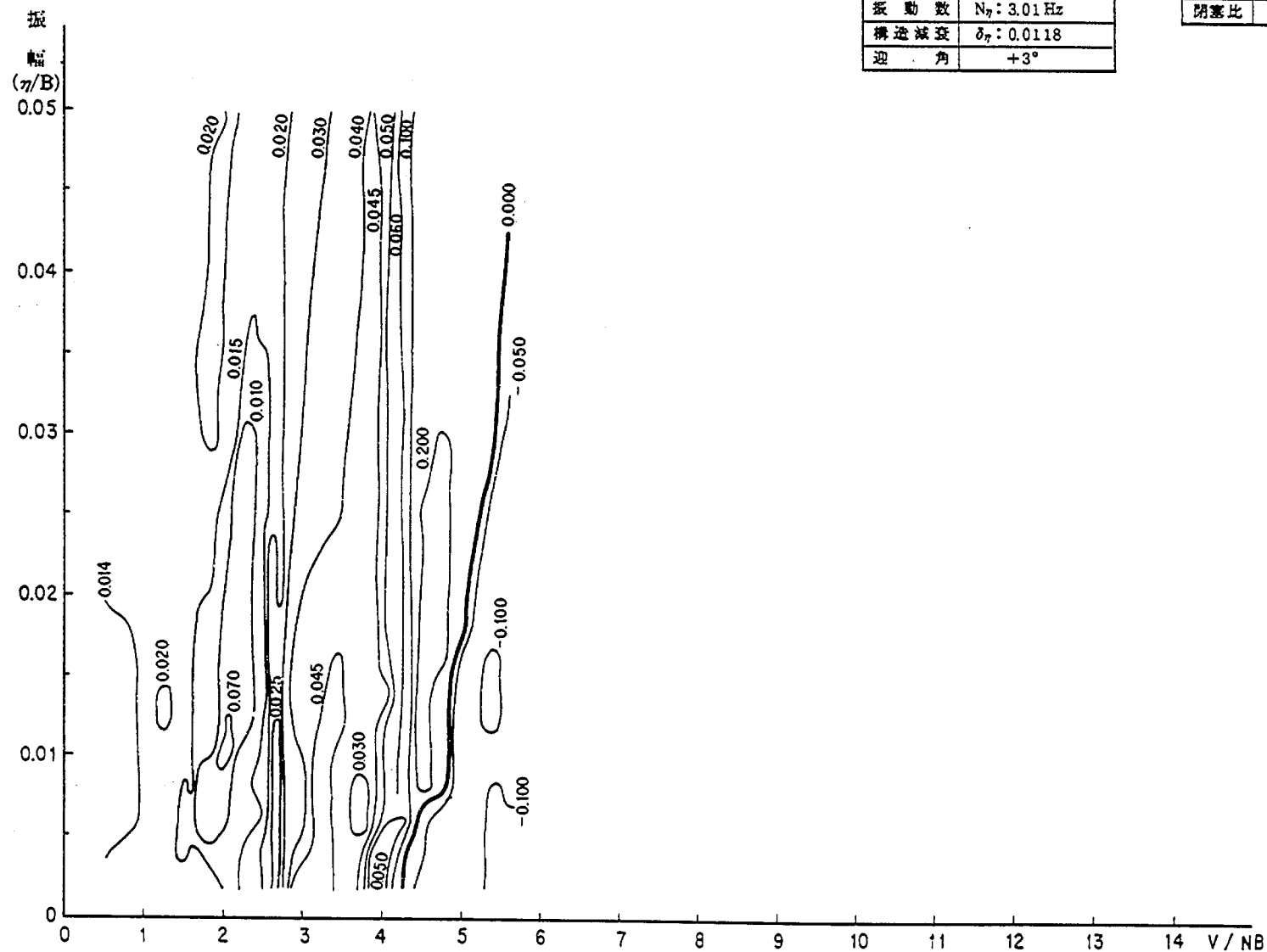
圖-2.3.8 風速 - 振幅 - 減衰曲線



試驗條件	
模型名	箱桁橋 1 Box
桁高比	0.4
質量	2.76 kgf/model
振動數	N_{η} : 3.03 Hz
構造減衰	δ_{η} : 0.0125
迎角	-3°

模型主要寸法	
弦長	16.7 cm
模型厚	6.68 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

圖 - 2.3.9 風速 - 振幅 - 減衰曲線



試驗條件	
模型名	箱桁橋 1 Box
桁高比	0.5
質量	2.79 kpf/model
振動數	$N_\eta: 3.01 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_\eta: 0.0118$
迎角	$+3^\circ$

模型主要寸法	
弦長	16.7 cm
模型厚	8.35 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

圖 - 2.3.11 風速 - 振幅 - 減衰曲線

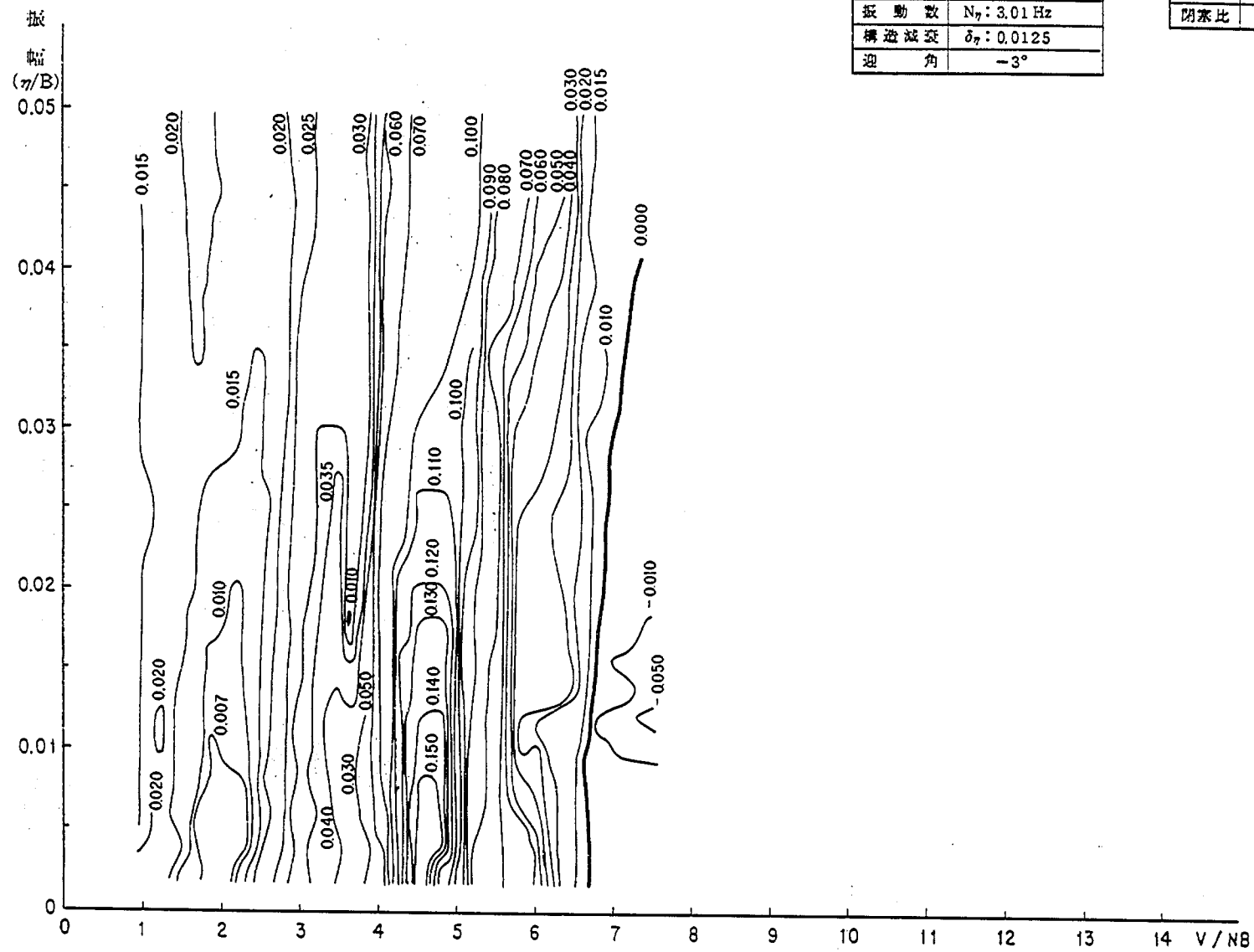


圖 - 2.3.12 風速 - 振幅 - 減衰曲線

試驗條件	
模 型 名	箱桁橋 1 Box
桁 高 比	0.5
質 量	2.79 kgf/model
振 動 數	$N_T: 3.01 \text{ Hz}$
構造減衰	$\delta_T: 0.0125$
迎 角	-3°

模型主要寸法	
弦 長	16.7 cm
模型厚	8.35 cm
模型長	98 cm
閉塞比	

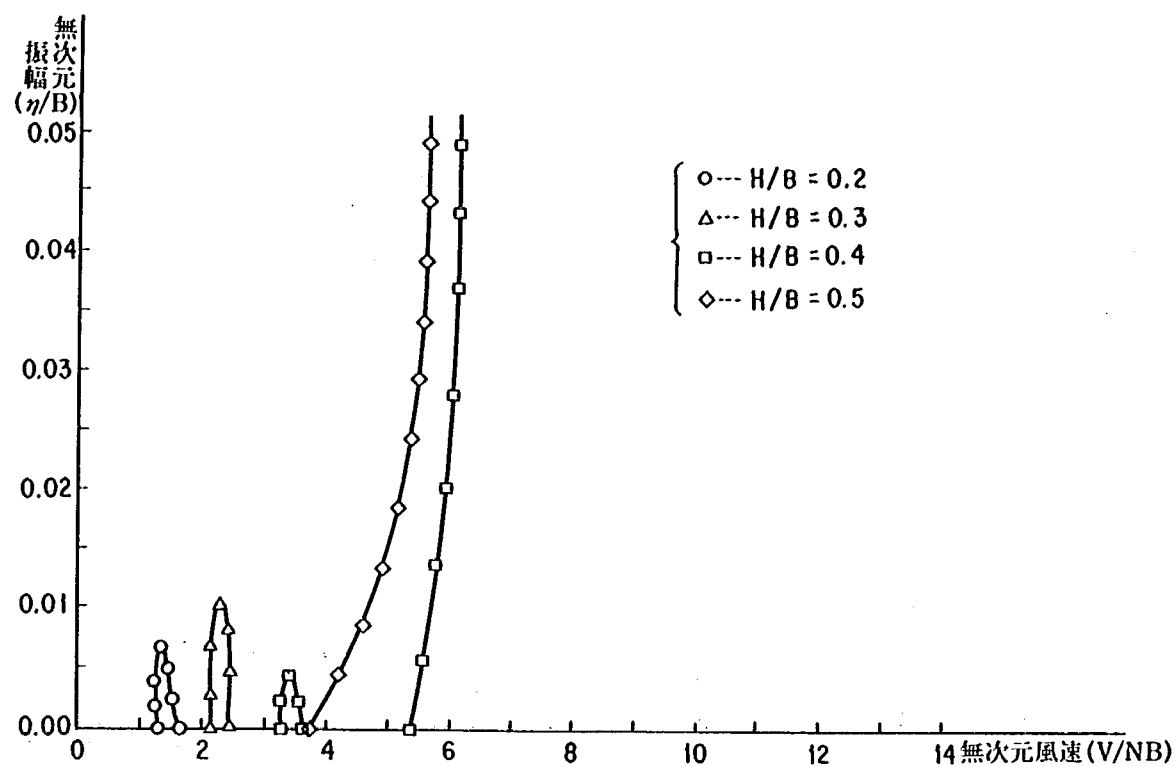


圖 - 2.4.1 振幅 - 風速曲線 (迎角 0°)

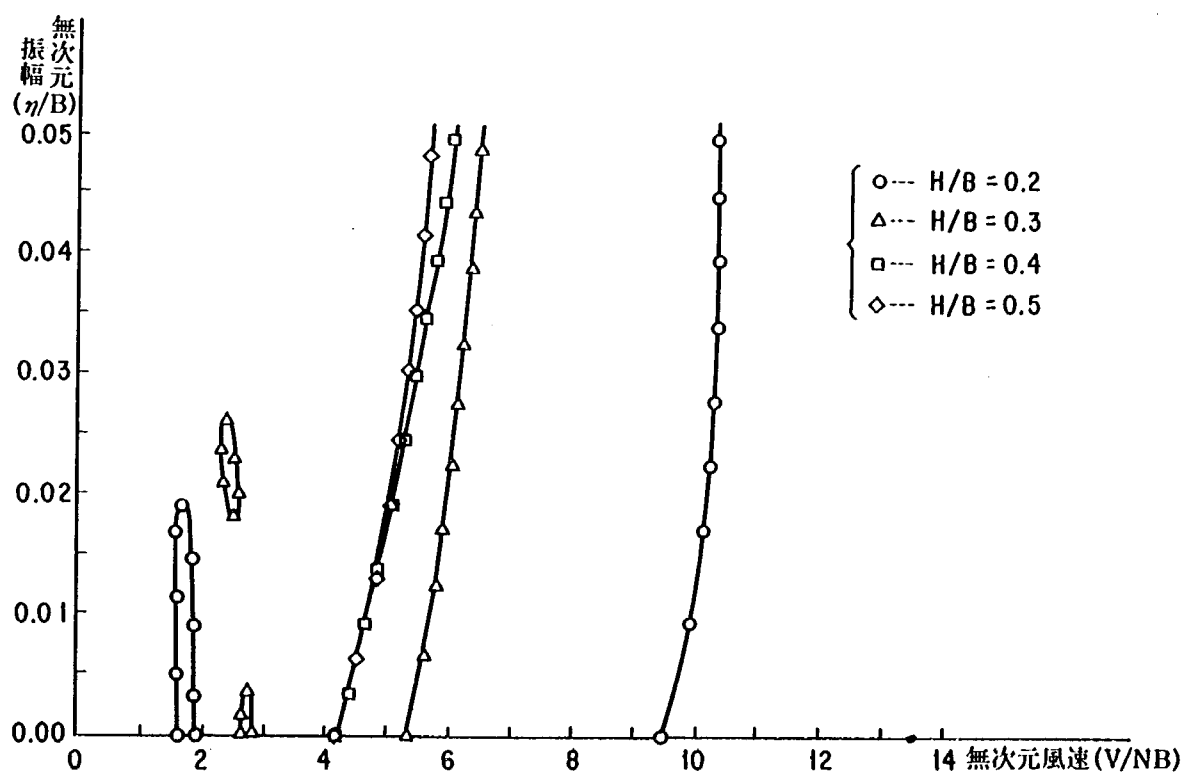


圖 - 2.4.2 振幅 - 風速曲線 (迎角 $+3^\circ$)

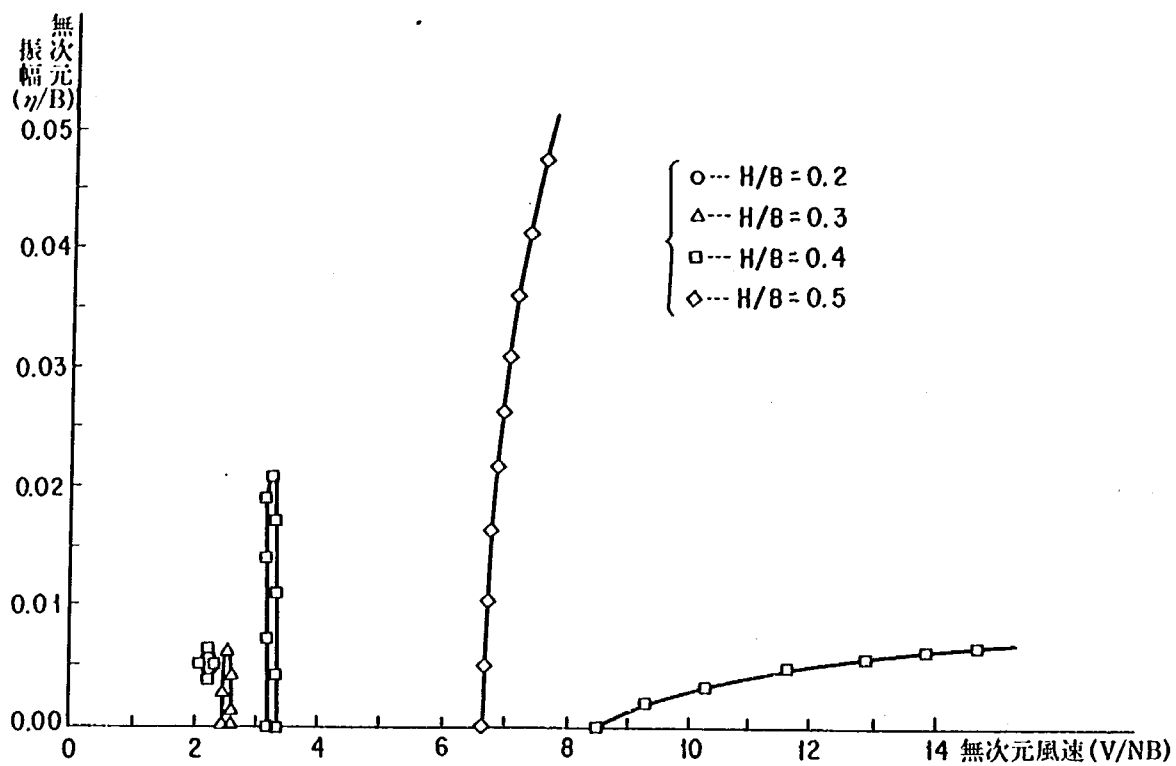


圖 - 2.4.3 振幅 - 風速曲線 (迎角 - 3°)

3. 3次元弾性模型実験

3.1 概 要

風洞模型実験による空気力特性調査は、通常一様気流中において2次元剛体模型を用いたバネ支持模型実験あるいは非定常空気力実験によって行なわれるが、これらの方法では自然風の乱流の影響や構造物の三次元性の影響が考慮されないため、実構造物の応答を正しく評価しているとは言い難い。このためには3次元弾性模型を用いた乱流中での実験が必要になるが、簡便な方法としてタウト・ストリップ・モデルを用いた風洞実験法がある。ここでは、タウト・ストリップ・モデルと同様なものとして、タウトモデルのピアノ線を剛性棒に置き換えた3次元単径間弾性模型を用いた風洞実験を行なった。この実験の特長としては、(1)乱流特性のうち重要なパラメータである乱れのスケールを実橋と模型とで相似しやすい、(2)箱桁橋は通常ねじり剛性が高く、たわみ振動のみに着目すればよく、箱桁断面のため剛性棒を収納するスペースがあり、模型製作が容易であることが挙げられよう。

実験は、設計へ反映するための資料を作成するため、いろいろな実橋をカバーするように模型の各諸元（桁高、重量、構造減衰、迎角）および乱流特性を数ケースずつ設定し、パラメトリックなデータの収集により、自励振動、渦励振およびバフティングの定量的な傾向を把握した。

3.2 実験方法

実験は建設省土木研究所耐風工学実験施設のフラッター風洞を用いて実施した。風洞諸元を表-3.1に示す。模型は、幅員100mmであり、実橋幅員約20m（四車線）を想定すると縮尺は約1/200である。また模型は、橋軸方向に15個に分割されたセグメントおよびその中に配置した2本のアルミニウム製の剛性棒により構成された弾性3次元模型である。実験に使用した模型諸元を図-3.1.1～2に示す。この模型の桁高を5ケース、重量、構造減衰および迎角をそれぞれ3ケースずつ設定し、各ケース毎に模型の挙動を測定した。使用した気流は乱れのほとんどない一様気流および模型の上流側に配置したスパーアイア、人工芝およびブロックによって発生させた3種類の乱流気流である。風速の測定はピトー管とマノメータおよび熱線風速計を用いて行なった。模型の挙動は模型の中央1/2点および1/4点に取り付けた豆電球の変位を光学式変位計により測定し、データレコーダおよびペン書きレコーダに記録した。

3.3 実験条件

箱桁橋では、ねじれの固有振動数がたわみの固有振動数に比べてかなり高いため、本調査ではたわみ振動のみに着目することとした。一般に模型が実橋と相似であるために満たすべき条件は、実験が鉛直たわみモードのみに着目すること、また、模型の製作を容易にすることを考慮し、次の3つの無次元量を実橋と模型とで一致させることである。

$$m/\rho B^2, V/N\eta B, \delta\eta$$

ここで、 m ；単位長さ当りの橋桁質量

表-3.1 フラッター風洞主要諸元

風 洞 形 式				単回路還流式
主 要 寸 法	測定 胴	幅 (mm)		2,500
		高 (mm)		4,000
		長 (mm)		10,000,
送 風 機	縮流 胴	入 口 (mm×mm)		7,000 × 8,500
		出 口 (mm×mm)		2,500 × 4,000
		縮 流 比		5.95
風 路 全 長	風 路 全 長 (mm)			115,000
	形 式			固定ピッチ動翼軸流式
	直 径 (mm)			4,000
機	有 効 全 量 (m ³ /s)	風 量 (m ³ /s)	回 轉 数 (r. p. m)	40.0
				247.0
				400.0
氣 流	最 大 風 速 (m/s)	最 大 風 速 (m/s)	最 大 風 速 (m/s)	250.0
				25.0
				0.5%以下

表-3.2 実橋橋桁重量

		橋 名	桁 高 H (m)	桁 幅 B' (m)	橋梁幅員 B (m)	B' / B	H / B	死荷重		模型重量 (kg/m)	想定し た縮尺
								(t/m)	(t/m ²)		
鋼 橋	箱 桁	千本橋大橋	3.0 ~ 6.0	4.2	10.65	0.39	0.28 ~ 0.56	8.516	0.800	0.751	1/106.5
		広島大橋	3.7 ~ 6.3	4.5	9.525	0.53	0.39 ~ 0.66	5.760	0.605	0.635	1/95.25
		片上湾大橋	3.0 ~ 7.0	4.5	9.3	0.48	0.32 ~ 0.75	5.07	0.545	0.586	1/93
		八戸大橋	4.0 ~ 6.0	5.0	10.75	0.47	0.37 ~ 0.56	8.014	0.745	0.693	1/107.5
		京浜大橋	3.5 ~ 5.0	5.5	11.35	0.48	0.31 ~ 0.44	9.433	0.831	0.732	1/113.5
		日和大橋	3.0 ~ 5.0	4.5	11.4	0.39	0.26 ~ 0.44	7.51	0.659	0.578	1/114
		門崎高架橋 (3径間)	4.5	8.0	18.25	0.44	0.25	10.900	0.597	0.327	1/182.5
		〃 (4径間)	4.5 ~ 8.2	8.0	18.25	〃	0.25 ~ 0.45	14.580	0.799	0.439	1/182.5
P C 橋	箱斜 桁張 橋	新丹波大橋			10.75			23.60	2.195	1.098	1/200
		白屋橋			8.20			24.10	2.940	1.470	1/200

ρ ; 空気密度

B ; 橋桁の代表長

V ; 風速

$N\eta$; 鉛直たわみの固有振動数

$\delta\eta$; 無風時における鉛直たわみの構造減衰

本実験では、明確な実橋があるわけではない。いろいろな実橋をカバーするような諸元を選んで模型を製作した。上記の相似条件のうち橋桁質量 (m) と構造減衰 ($\delta\eta$) がそれぞれ 3 ケースずつ異なる仮想橋を想定し、この仮想橋と模型とで 3 つの無次元量を一致させた。

模型重量は、表 - 3. 2 に示す実橋データを基に、以下の 3 種類設定した。

$m_1 \cdots \cdots 400 \text{ g/m}$ (鋼橋を想定)

$m_2 \cdots \cdots 800 \text{ g/m}$ (")

$m_3 \cdots \cdots 1200 \text{ g/m}$ (P C 橋を想定)

また、構造減衰に関する相似条件はオイルダンパーを使用し、減衰率を以下の 3 種類に設定することとした。

$\delta_1 \cdots \cdots 0.02$

$\delta_2 \cdots \cdots 0.04$

$\delta_3 \cdots \cdots 0.06$

3. 4 乱流の特性

橋梁の対風応答は、気流中の乱れの存在の有無によって大きく違ってくる。従ってより高い確度で橋梁の耐風性を評価しようとするならば、架橋地点の風の特性とほぼ相似した乱流を風洞内にて発生させ、その気流中で実験を行なうのが望ましい。

乱流の発生方法には、格子を用いる方法、スパイアーを用いる方法、床面にブロック・人工芝といった粗いものを敷設する方法とがある。本調査では、3 種類の異なった乱流気流を想定し、スパイアーを用いる方法、スパイアーと人工芝を併用する方法およびスパイアーとブロックを併用する方法を採用した。スパイアー、人工芝およびブロックの形状および風洞での敷設方法を図 - 3. 2. 1 ~ 3 に示す。本実験に使用したフラッター風洞には、一辺が約 40 cm の隅切りがあり、ブロックや人工芝を設置する幅がかなりの制約を受けるため、図 - 3. 3 に示したように、新たに床板を設けブロック敷設幅を風洞幅と一致するように工夫した。ブロックの材質は発泡スチロールで、形状は一辺が 100 mm の立方体である。乱流の特性を自然風と相似させるには、風洞内の気流の乱れのスケール、乱れ強さ、風速のパワースペクトルが自然風と相似していなければならない。そこで、模型実験を実施する前に熱線風速計による気流計測を行ない気流特性を把握し、架設地点の自然風との相似性について以下に検討した。

(1) 乱れ強さ

乱れ強さは次式で表示される。

$$I_u = \sigma_u / U \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

$$I_w = \sigma_w / U \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

ここに、 I_u 、 I_w ；それぞれ水平および鉛直方向の乱れ強さ

σ_u 、 σ_w ；それぞれ水平および鉛直方向の変動風速の標準偏差

U ；平均風速

一般に乱流境界層内では、乱れ強さは高度の増加に伴い減少する。今回の実験では、模型設置高度を床から15cmと定めた。上記3種類の境界層乱流気流測定結果を表-3.3に示す。実測データ¹⁾によると、高度およそ30m付近における乱れ強さと地表条件との関係は表-3.4のようになる。表-3.4から判断すると、スパイアーのみのケースは、静かな開けた海上の自然風に相当し、スパイアーと人工芝を併用するケースでは、開けた土地、草原、スパイアーとブロックを併用するケースでは、郊外あるいは農地にそれぞれ相当していることが言える。

(2) 乱れのスケール

乱れのスケールは、以下に示す方法により求めた²⁾。

$$L_x^u = U \cdot S_u(0) / 4 \sigma_u^2 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$L_x^w = U \cdot S_w(0) / 4 \sigma_w^2 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、 L_x^u ；主流方向の乱れのスケール

L_x^w ；鉛直方向の乱れのスケール

$S_u(0)$ ；周波数0における風の主流方向のパワースペクトル密度関数

$S_w(0)$ ；周波数0における風の鉛直方向のパワースペクトル密度関数

σ_u ；主流方向変動風速の標準偏差

σ_w ；鉛直方向変動風速の標準偏差

U ；平均風速

図-3.4.1～6に風速のパワースペクトル密度関数図を示す。このパワースペクトル密度関数図において $S(f)$ が $f=0$ 付近で横軸に平行になるところの値をもって $S(0)$ とし、これから式(2.1)、(2.2)によって乱れのスケールを求めた。表-3.5に乱れのスケールを示す。同表には実測データ¹⁾による乱れのスケールも列記した。

表-3.5の結果をみると、風洞風は、自然風に比較して L_x^u で20～45%程度小さく、 L_x^w では逆に大きな値となっていることが判る。

(3) 風速のパワースペクトル

図-3.5.1～2に風洞内に発生させた乱流Ⅰ～Ⅲと実測データ¹⁾のパワースペクトル密度関数を示す。 u 成分の風洞風は、実測データに比べ、やや高周波側にずれるようである。 w 成分の風洞風は、実測データと比較的よく一致している。

(4) 風洞風速と設定回転数の関係

乱流中の実験では、予め模型のない状態で風洞送風機回転数と模型位置での主流方向平均風速との関

係を熱線風速計により求めておき、送風機回転数により風速を設定した。この関係を図-3.6に示す。同図中には一様気流中での関係もあわせて示しており、また、各設定回転数での乱れ強さも示している。

3.5 三次元弾性模型の設計

重量、固有振動数、構造減衰等の相似条件を満たすように3次元弾性模型は設計するが、今回の実験では、剛性を橋軸方向に一樣な剛性を持つ剛性棒によって調整した関係上、高次の振動モード形状についてまで着目した実験を行なうのは困難であった。そこで主として問題となる鉛直たわみ1次モードについてのみ着目し模型の設計を行なった。剛性棒は、図-3.7に示すフローに従って決定され、図-3.8に示す断面とした。

実橋の振動モード形は、正弦曲線になると仮定し、風洞実験に先だち、加速度計を模型に取り付け振動モードの検証を行なった。測点は、中央1/2点を基準測定点と定め、各セグメントにおける加速度を基準測定点での加速度で除したものから求めた。図-3.9に正弦曲線の計算結果と模型での測定値を示した。これによると、理論値と測定値はよく一致していることが判る。したがって、鉛直たわみ1次モードの渦励振、バフエティング、ギャロッピングに対して振動モードの精度は十分保持されているものと判断できる。

模型の支持台への支持状態は、図-3.1.1に示すように板バネを介して取り付けられており、振動モードの検証からも、支持方法が特に問題の無いものであることが判断できる。

3.6 実験ケース

実験は気流、桁高、重量、構造減衰、迎角を変えて行なった。今回行なった実験ケースを表-3.6.1~3に示す。本調査では、従来のように乱れのほとんどない一様流中での実験に加え、架設地点の自然風と相似した気流の中で実験を行ない乱れの影響を考慮した橋桁の応答を求めることを目的としている。従って、実験に使用する気流は一様流および3.4で述べた3種類の乱流を使用することとする。

箱桁橋は、一般に桁断面が長方形であり、断面の幾何的特性は、全幅・桁幅・桁高の3パラメータによって表わされる。全幅・桁幅・桁高をそれぞれ、 B 、 B' 、 H で表わし、実際の箱桁橋における桁幅比 B'/B および桁高比 H/B について調査した結果をみると、スパン長が増加するに伴い、 B'/B は0.4から0.5の間に納まってくる。このため本調査は、 $B'/B = 0.45$ とした。桁高比については、実橋データおよび過去の風洞実験との整合性を合わすうえで、 $H/B = 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5$ の5ケース設定した。使用した風洞模型の断面を、図-3.1.1~2に示した。模型重量、構造減衰については、3.3の通り実橋データを基に、模型重量は、400, 800, 1200 g/m、構造減衰は、0.02, 0.04, 0.06のそれぞれ3種類設定することとした。これにより設定されるスクルトン数 ($m \delta / \rho B^2$) を表-3.7に示した。迎角については、一様流中の実験においては+3°, 0°, -3°と3段階に変化させ、一方、乱流中の実験では、0°の場合についてのみ実験を行なった。

3.7 実験結果

風洞実験の結果得られた各ケースにおける自励振動特性，渦励振特性およびパフティング振幅を表－3.8にまとめた。渦励振については，無次元風速で2.0以上の範囲で発現したものと，それ以下の範囲で発現したものに区別し，それぞれの最大振幅，それに最大振幅時の無次元風速を併せて整理した。ギャロッピングについては発振風速を無次元風速で示した。パフティングについては無次元風速で4.0および8.0における無次元振幅を記した。一様流実験においては，渦励振，ギャロッピングおよびパフティングについてまとめ，乱流実験においては，渦励振，パフティングについてまとめた。

また，風速と振幅の関係図を付録として収録したが，桁高比，気流条件毎にとりまとめ図－3.10.1.～9に整理した。更に，参考として代表的な応答波形を図－3.11.1～6に示した。

表-3.3 境界層乱流気流測定結果 (乱れ強さ)

		U (m/s)	σ_u (m/s)	I_u (%)	σ_w (m/s)	I_w (%)
乱 流 I	スパイアー +ブロック	2.88	0.59	20.3	0.37	13.0
乱 流 II	スパイアー +人工芝	4.17	0.48	11.4	0.31	7.4
乱 流 III	スパイアー	4.04	0.31	7.7	0.21	5.3

表-3.4 乱れ強さと地表条件の関係 (ESDUによる)

水平方向乱れ強さ I_u (%)	鉛直方向乱れ強さ I_w (%)	地 表 条 件
25.0	18.0	都 市
20.0	12.0	郊外あるいは農地
12.0	6.0	開けた土地, 草原, 雪面上
8.5	4.0	静かな開けた海上

表-3.5 境界層乱流気流測定結果 (乱れのスケール)

		U (m/s)	L_x^u (m)	L_x^u (m) ESDUより	L_x^w (m)	L_x^w (m) ESDUより
乱 流 I	スパイアー +ブロック	2.88	0.36	0.45	0.13	0.05
乱 流 II	スパイアー +人工芝	4.17	0.35	0.55	0.22	0.05
乱 流 III	スパイアー	4.04	0.34	0.64	0.15	0.05

表-3.6.3 実験ケース (実験番号)

No.	整理番号	H/B					m			δ			α			実験の有無
		0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	m_1	m_2	m_3	δ_1	δ_2	δ_3	0°	$+3^\circ$	-3°	
1	A-1111	○					○			○			○	○	○	○
2	-1112	○					○			○			○	○	○	○
3	-1113	○					○			○			○	○	○	○
4	-1121	○					○			○			○	○	○	○
5	-1122	○					○			○			○	○	○	○
6	-1123	○					○			○			○	○	○	○
7	-1131	○					○			○			○	○	○	○
8	-1132	○					○			○			○	○	○	○
9	-1133	○					○			○			○	○	○	○
10	-1211	○					○			○			○	○	○	○
11	-1212	○					○			○			○	○	○	○
12	-1213	○					○			○			○	○	○	○
13	-1311	○					○			○			○	○	○	○
14	-1312	○					○			○			○	○	○	○
15	-1313	○					○			○			○	○	○	○
16	A-2111	○					○			○			○	○	○	○
17	-2112	○					○			○			○	○	○	○
18	-2113	○					○			○			○	○	○	○
19	-2121	○					○			○			○	○	○	○
20	-2122	○					○			○			○	○	○	○
21	-2123	○					○			○			○	○	○	○
22	-2131	○					○			○			○	○	○	○
23	-2132	○					○			○			○	○	○	○
24	-2133	○					○			○			○	○	○	○
25	-2211	○					○			○			○	○	○	○
26	-2212	○					○			○			○	○	○	○
27	-2213	○					○			○			○	○	○	○
28	-2221	○					○			○			○	○	○	○
29	-2222	○					○			○			○	○	○	○
30	-2223	○					○			○			○	○	○	○
31	-2231	○					○			○			○	○	○	○
32	-2232	○					○			○			○	○	○	○
33	-2233	○					○			○			○	○	○	○
34	-2311	○					○			○			○	○	○	○
35	-2312	○					○			○			○	○	○	○
36	-2313	○					○			○			○	○	○	○
37	-2321	○					○			○			○	○	○	○
38	-2322	○					○			○			○	○	○	○
39	-2323	○					○			○			○	○	○	○
40	-2331	○					○			○			○	○	○	○
41	-2332	○					○			○			○	○	○	○
42	-2333	○					○			○			○	○	○	○
43	-4121	○					○			○			○	○	○	○
44	-4122	○					○			○			○	○	○	○
45	-4123	○					○			○			○	○	○	○
46	-4131	○					○			○			○	○	○	○
47	-4132	○					○			○			○	○	○	○
48	-4133	○					○			○			○	○	○	○
49	-4211	○					○			○			○	○	○	○
50	-4212	○					○			○			○	○	○	○
51	-4213	○					○			○			○	○	○	○
52	-4221	○					○			○			○	○	○	○
53	-4222	○					○			○			○	○	○	○
54	-4223	○					○			○			○	○	○	○
55	-4231	○					○			○			○	○	○	○
56	-4232	○					○			○			○	○	○	○
57	-4233	○					○			○			○	○	○	○
58	-4311	○					○			○			○	○	○	○
59	-4312	○					○			○			○	○	○	○
60	-4313	○					○			○			○	○	○	○
61	-4321	○					○			○			○	○	○	○
62	-4322	○					○			○			○	○	○	○
63	-4323	○					○			○			○	○	○	○
64	-4331	○					○			○			○	○	○	○
65	-4332	○					○			○			○	○	○	○
66	-4333	○					○			○			○	○	○	○
67	-5121	○					○			○			○	○	○	○
68	-5122	○					○			○			○	○	○	○
69	-5123	○					○			○			○	○	○	○

No.	整理番号	H / B					m			δ			α			実験の有無
		0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	m_1	m_2	m_3	δ_1	δ_2	δ_3	0°	$+3^\circ$	-3°	
28 29 30	A-3111 -3112 -3113			○ ○			○ ○			○ ○			○ ○	○ ○		○ ○
31	-3121 -3122 -3123			○ ○			○ ○			○ ○			○ ○	○ ○		○ ○
32	-3131 -3132 -3133			○ ○			○ ○				○ ○		○ ○	○ ○		○ ○
33	-3211 -3212 -3213			○ ○			○ ○		○ ○				○ ○	○ ○		○ ○
34	-3221 -3222 -3223			○ ○			○ ○			○ ○			○ ○	○ ○		○ ○
35	-3231 -3232 -3233			○ ○			○ ○				○ ○		○ ○	○ ○		○ ○
36	-3311 -3312 -3313			○ ○				○ ○	○ ○				○ ○	○ ○		○ ○
37	-3321 -3322 -3323			○ ○				○ ○	○ ○				○ ○	○ ○		○ ○
38 39	-3331 -3332 -3333			○ ○				○ ○			○ ○		○ ○	○ ○		○ ○
40 41 42	A-4111 -4112 -4113				○ ○		○ ○			○ ○			○ ○	○ ○		○ ○
43 44	-4121 -4122 -4123				○ ○		○ ○			○ ○			○ ○	○ ○		○ ○
45	-4131 -4132 -4133				○ ○		○ ○				○ ○		○ ○	○ ○		○ ○
46	-4211 -4212 -4213				○ ○		○ ○		○ ○				○ ○	○ ○		○ ○
47 48	-4221 -4222 -4223				○ ○		○ ○			○ ○			○ ○	○ ○		○ ○
49 50	-4231 -4232 -4233				○ ○		○ ○				○ ○		○ ○	○ ○		○ ○
51	-4311 -4312 -4313				○ ○			○ ○	○ ○				○ ○	○ ○		○ ○
52	-4321 -4322 -4323				○ ○			○ ○		○ ○			○ ○	○ ○		○ ○
53 54	-4331 -4332 -4333				○ ○			○ ○			○ ○		○ ○	○ ○		○ ○

表-3.6.1 実験ケース (一様流)

No	整理番号	乱流			H/B					m			δ			実験の有無
		I	II	III	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	m ₁	m ₂	m ₃	δ_1	δ_2	δ_3	
70	B1-1111	○			○					○			○	○	○	○
71	-1121	○			○					○			○	○	○	○
72	-1131	○			○					○			○	○	○	○
73	-1221	○			○					○			○	○	○	○
74	-1231	○			○					○			○	○	○	○
75	-1331	○			○					○			○	○	○	○
76	-2111	○			○					○			○	○	○	○
77	-2121	○			○					○			○	○	○	○
78	-2131	○			○					○			○	○	○	○
79	-2221	○			○					○			○	○	○	○
80	-2231	○			○					○			○	○	○	○
81	-2331	○			○					○			○	○	○	○
82	-3111	○			○					○			○	○	○	○
83	-3121	○			○					○			○	○	○	○
84	-3131	○			○					○			○	○	○	○
85	-3221	○			○					○			○	○	○	○
86	-3231	○			○					○			○	○	○	○
87	-3331	○			○					○			○	○	○	○
88	-4111	○			○					○			○	○	○	○
89	-4121	○			○					○			○	○	○	○
90	-4131	○			○					○			○	○	○	○
91	-4221	○			○					○			○	○	○	○
92	-4231	○			○					○			○	○	○	○
93	-4331	○			○					○			○	○	○	○
94	-5111	○			○					○			○	○	○	○
95	-5121	○			○					○			○	○	○	○
96	-5131	○			○					○			○	○	○	○
97	-5221	○			○					○			○	○	○	○
98	-5231	○			○					○			○	○	○	○
99	-5331	○			○					○			○	○	○	○
100	-1111	○			○					○			○	○	○	○
101	-1121	○			○					○			○	○	○	○
102	-1131	○			○					○			○	○	○	○
103	-1221	○			○					○			○	○	○	○
104	-1231	○			○					○			○	○	○	○
105	-1331	○			○					○			○	○	○	○
106	-2111	○			○					○			○	○	○	○
107	-2121	○			○					○			○	○	○	○
108	-2131	○			○					○			○	○	○	○
109	-2221	○			○					○			○	○	○	○
110	-2231	○			○					○			○	○	○	○
111	-2331	○			○					○			○	○	○	○
112	-3111	○			○					○			○	○	○	○
113	-3121	○			○					○			○	○	○	○
114	-3131	○			○					○			○	○	○	○
115	-3221	○			○					○			○	○	○	○
116	-3231	○			○					○			○	○	○	○
117	-3331	○			○					○			○	○	○	○
118	-4111	○			○					○			○	○	○	○
119	-4121	○			○					○			○	○	○	○
120	-4131	○			○					○			○	○	○	○
121	-4221	○			○					○			○	○	○	○
122	-4231	○			○					○			○	○	○	○
123	-4331	○			○					○			○	○	○	○
124	-5111	○			○					○			○	○	○	○
125	-5121	○			○					○			○	○	○	○
126	-5131	○			○					○			○	○	○	○
127	-5221	○			○					○			○	○	○	○
128	-5231	○			○					○			○	○	○	○
129	-5331	○			○					○			○	○	○	○
130	-1111	○			○					○			○	○	○	○
131	-1121	○			○					○			○	○	○	○
132	-1131	○			○					○			○	○	○	○
133	-1221	○			○					○			○	○	○	○
134	-1231	○			○					○			○	○	○	○
135	-1331	○			○					○			○	○	○	○
136	-2111	○			○					○			○	○	○	○
137	-2121	○			○					○			○	○	○	○
138	-2131	○			○					○			○	○	○	○
139	-2221	○			○					○			○	○	○	○
140	-2231	○			○					○			○	○	○	○
141	-2331	○			○					○			○	○	○	○
142	-3111	○			○					○			○	○	○	○
143	-3121	○			○					○			○	○	○	○
144	-3131	○			○					○			○	○	○	○
145	-3221	○			○					○			○	○	○	○
146	-3231	○			○					○			○	○	○	○
147	-3331	○			○					○			○	○	○	○
148	-4111	○			○					○			○	○	○	○
149	-4121	○			○					○			○	○	○	○
150	-4131	○			○					○			○	○	○	○
151	-4221	○			○					○			○	○	○	○
152	-4231	○			○					○			○	○	○	○
153	-4331	○			○					○			○	○	○	○
154	-5111	○			○					○			○	○	○	○
155	-5121	○			○					○			○	○	○	○
156	-5131	○			○					○			○	○	○	○
157	-5221	○			○					○			○	○	○	○
158	-5231	○			○					○			○	○	○	○
159	-5331	○			○					○			○	○	○	○

表-3.6.2 実験ケース (乱流) ($\alpha = 0^\circ$)

1) 気流 (符号) A 一様流 B 乱流 B 1 乱流 I B 2 乱流 II B 3 乱流 III	3) m (実験番号 3 桁目) 1 m₁ (400 g/m) 2 m₂ (800 ") 3 m₃ (1200 ")	5) 迎角 (実験番号 1 桁目) 1 $\alpha = 0^\circ$ 2 $\alpha = +3^\circ$ 3 $\alpha = -3^\circ$
2) H/B (実験番号 4 桁目) 1 0.25 2 0.30 3 0.35 4 0.40 5 0.50	4) δ (実験番号 2 桁目) 1 δ_1 (0.02) 2 δ_2 (0.04) 3 δ_3 (0.06)	(例) A - 1 2 1 1 符号 ↑

表-3.7 スクルトン数設定値

	$\delta_1 = 0.02$	$\delta_2 = 0.04$	$\delta_3 = 0.06$
$m_1 = 400 \text{ g/m}$	0.65	1.31	1.96
$m_2 = 800 \text{ ''}$	1.31	2.61	3.92
$m_3 = 1200 \text{ ''}$	1.91	3.92	5.88

表-3.8.1 3次元模型実験結果

実験番号	気流	桁高比 H/B	重量 (kg/m)	構造減衰 δ	迎角 (DEG)	渦励振 *1) 〔上段: 発現風速領域 下段: 最大振幅 *2)〕		ギャロップ びんぐ発現風速 *1), *3)	パフティング 〔上段: 最大振幅 *2) 下段: 等価振幅 *4)〕		備考
						低風速域	高風速域		無次元風速 4.0	無次元風速 8.0	
A-1111	一様流	0.25	0.400	0.0201	0	1.47 0.014	—	—	0.002	0.005	
-1121	"	"	"	0.0404	"	1.73 0.007	—	—	0.001	0.004	
-1131	"	"	"	0.0578	"	1.90 0.005	—	—	0.001	0.003	
-1211	"	"	0.800	0.0204	"	1.64 0.007	—	—	0.001	0.003	
-1221	"	"	"	0.0388	"	1.88 0.004	—	—	0.001	0.002	
-1231	"	"	"	0.0594	"	1.86 0.002	—	—	0.001	0.002	
-1311	"	"	1.200	0.0209	"	1.83 0.003	—	—	0.001	0.002	
-1321	"	"	"	0.0371	"	—	—	—	0.001	0.001	
-1331	"	"	"	0.0597	"	—	—	—	0.000	0.001	
A-2111	"	0.30	0.400	0.0185	"	—	2.39 0.023	6.7	—	—	
-2121	"	"	"	0.0401	"	—	2.39 0.008	7.2	—	—	
-2131	"	"	"	0.0607	"	—	2.41 0.004	7.2	—	—	
-2211	"	"	0.800	0.0195	"	—	2.72 0.002	—	0.002	0.004	
-2221	"	"	"	0.0399	"	—	2.82 0.002	—	0.002	0.009	
-2231	"	"	"	0.0615	"	—	2.72 0.001	—	0.001	0.002	
-2311	"	"	1.200	0.0205	"	—	2.59 0.002	—	0.001	0.002	
-2321	"	"	"	0.0382	"	—	2.49 0.002	—	0.001	0.002	
-2331	"	"	"	0.0594	"	—	2.56 0.001	—	0.001	0.002	
A-3111	"	0.35	0.400	0.0195	"	1.81 0.013	2.42 0.008	7.3	—	—	
-3121	"	"	"	0.0407	"	1.67 0.005	2.56 0.005	8.2	—	—	
-3131	"	"	"	0.0593	"	—	2.58 0.005	8.7	—	—	
-3211	"	"	0.800	0.0198	"	—	2.58 0.007	8.8	—	—	
-3221	"	"	"	0.0406	"	—	2.70 0.004	11.2	—	—	
-3231	"	"	"	0.0600	"	—	2.66 0.003	11.3	—	—	
-3311	"	"	1.200	0.0204	"	—	2.74 0.004	10.9	—	—	
-3321	"	"	"	0.0412	"	—	2.74 0.003	12.8	—	—	
-3331	"	"	"	0.0607	"	—	2.72 0.002	13.0	—	—	
A-4111	"	0.40	0.400	0.0204	0	1.64 0.011	2.84 0.006	5.5	—	—	
-4121	"	"	"	0.0372	0	1.53 0.005	2.84 0.007	6.0	—	—	

表- 3.8.2 3次元模型実験結果

実験番号	気流	桁高比 H/B	重量 (kgf/m)	構造 減衰 δ	迎角 (DEG)	渦励振 ^{*1)} 〔上段: 発現風速領域 下段: 最大振幅 ^{*2)} 〕		ギャロップ 発現風速 ^{*1), *3)}	パフティング 〔上段: 最大振幅 下段: 等価振幅 ^{*4)} 〕		備考
						低風速域	高風速域		無次元風速 4.0	無次元風速 8.0	
A-4131	一様流	0.40	0.400	0.0590	0	1.65 0.001	2.76 0.006	6.2	-	-	
-4211	"	"	0.800	0.0203	"	-	2.30 0.006	7.0	-	-	
-4221	"	"	"	0.0418	"	-	2.71 0.005	9.4	-	-	
-4231	"	"	"	0.0617	"	-	2.53 0.004	10.3	-	-	
-4311	"	"	1.200	0.0193	"	-	2.55 0.005	7.0	-	-	
-4321	"	"	"	0.0392	"	-	2.46 0.004	11.5	-	-	
-4331	"	"	"	0.0597	"	-	2.74 0.003	12.2	-	-	
A-5111	"	0.50	0.400	0.0223	"	1.48 0.014	-	3.4	-	-	
-5121	"	"	"	0.0407	"	1.35 0.002	-	3.7	-	-	
-5131	"	"	"	0.0599	"	1.43 0.001	-	3.9	-	-	
-5211	"	"	0.800	0.0205	"	1.25 0.003	-	3.6	-	-	
-5221	"	"	"	0.0403	"	-	-	4.8	-	-	
-5231	"	"	"	0.0591	"	-	3.39 0.005	9.1	-	-	
-5311	"	"	1.200	0.0197	"	-	3.32 0.007	4.7	-	-	
-5321	"	"	"	0.0397	"	-	3.11 0.007	9.0	-	-	
-5331	"	"	"	0.0589	"	-	3.24 0.006	12.0	-	-	
A-1112	"	0.25	0.400	0.0196	+3	1.63 0.023	-	5.0	-	-	
1113	"	"	"	0.0205	-3	1.68 0.010	-	-	0.001	0.003	
A-1122	"	"	"	0.0410	+3	1.90 0.010	-	5.4	-	-	
-1222	"	"	0.800	0.0387	+3	1.93 0.003	-	7.2	-	-	
-1232	"	"	"	0.0588	+3	1.85 0.001	-	-	0.002	0.008	
-1332	"	"	1.200	0.0604	+3	-	-	-	0.002	0.005	
A-2112	"	0.30	0.400	0.0191	+3	-	2.22 0.038	4.4	-	-	
-2113	"	"	"	0.0186	-3	-	2.31 0.016	-	0.000	0.002	
(-2122)	"	"	"		+3						
(-2222)	"	"	0.800		+3						
(-2232)	"	"	"		+3						
-2332	"	"	1.200	0.0592	+3	-	2.67 0.001	-	0.002	0.005	
A-3112	"	0.35	0.400	0.0195	+3	1.75 0.015	2.57 0.006	4.0	-	-	

表- 3. 8. 3 3次元模型実験結果

実験番号	気 流	桁高比 H/B	重 量 (kg/m)	構 造 減 衰 δ	迎角 (DEG)	渦 励 振 *1)		ギャロップ ピング発 現風速 *1), *3)	パフティング		備 考
						〔上段:発現風速領域 下段:最大振幅*2)〕			〔上段:最大振幅 下段:等価振幅*4)〕		
						低風速域	高風速域		無次元風速 4.0	無次元風速 8.0	
-3113	一様流	0.35	0.400	0.0197	- 3	-	2.30 0.014	-	0.002	0.004	
(-3122)	"	"	"		+ 3						
(-3222)	"	"	0.800		+ 3						
(-3232)	"	"	"		+ 3						
-3332	"	"	1.200	0.0614	+ 3	-	2.92 0.002	12.4	-	-	
A-4112	"	0.40	0.400	0.0208	+ 3	1.53 0.014	-	3.3	-	-	
-4113	"	"	"	0.0209	- 3	1.62 0.004	2.68 0.015	-	0.002	0.005	
-4122	"	"	"	0.0407	+ 3	-	2.96 0.008	3.4	-	-	
-4222	"	"	0.800	0.0401	+ 3	-	3.00 0.005	3.8	-	-	
-4232	"	"	"	0.0613	+ 3	-	3.13 0.004	6.5	-	-	
-4332	"	"	1.200	0.0595	+ 3	-	3.10 0.004	11.5	-	-	
A-5112	"	0.50	0.400	0.0197	+ 3	-	-	3.2	-	-	
-5113	"	"	"	0.0201	- 3	1.42 0.010	3.28 0.004	6.4	-	-	
-5122	"	"	"	0.0386	+ 3	-	-	3.3	-	-	
-5222	"	"	0.800	0.0396	+ 3	-	-	3.4	-	-	
-5232	"	"	"	0.0593	+ 3	-	-	3.4	-	-	
-5332	"	"	1.200	0.0592	+ 3	-	4.00 0.038	9.8	-	-	

注) *1) 発現風速は、無次元風速 (V/NB) とする。

*2) 最大振幅は、無次元振幅 (η/B) とする。

*3) ギャロップ発現風速は、振れ角 1° を基準と考え、これと同じ振幅となるたわみ振動無次元振幅で 0.0087 の時の風速を発現風速とする。

*4) パフティング振幅は、測定時間内で観測された最大振幅と振動の変動成分を考慮した等価振幅によって表わした。測定時間はおよそ 1 分である。等価振幅は変位の標準偏差を $\sqrt{2}$ 倍したものであり、実効値の等しい正弦波の振幅を表わす。

等価振幅の定義式を示す。 $\bar{y} = \sqrt{2} \left(\int_0^T y^2(t) dt / T \right)^{1/2}$

$\bar{y}$: 等価振幅 $y(t)$: 変位, T : 測定時間

表- 3.8.4 3次元模型実験結果

実験番号	気 流	桁高比 H/B	重 量 (kg/m)	構 造 衰 減 δ	迎角 (DEG)	渦 励 振 *1)		ギャロップ びんぐ発 現風速 *1), *3)	パフエーティング 〔上段: 最大振幅 下段: 等価振幅 *4)〕		備 考	
						〔上段: 発現風速領域 下段: 最大振幅 *2)〕	低風速域		高風速域	無次元風速 4.0		無次元風速 8.0
B1-1111	乱流(I)	0.25	0.400	0.02	0	-	-	-	0.014 0.005	0.045 0.015		
-1121	"	"	"	0.04	"	-	-	-	0.013 0.005	0.045 0.016		
-1221	"	"	0.800	"	"	-	-	-	0.008 0.002	0.027 0.010		
-1231	"	"	"	0.06	"	-	-	-	0.007 0.001	0.023 0.010		
-1331	"	"	1.200	"	"	-	-	-	0.005 0.000	0.018 0.006		
-2111	"	0.30	0.400	0.02	"	-	2.60 0.010	-	0.015 0.006	0.055 0.022		
-2121	"	"	"	0.04	"	-	-	-	0.013 0.006	0.050 0.019		
-2221	"	"	0.800	"	"	-	-	-	0.008 0.003	0.034 0.015		
-2231	"	"	"	0.06	"	-	-	-	0.007 0.001	0.023 0.008		
-2331	"	"	1.200	"	"	-	-	-	0.004 0.001	0.017 0.008		
-3111	"	0.35	0.400	0.02	"	-	-	-	0.014 0.005	0.053 0.020		
-3121	"	"	"	0.04	"	-	-	-	0.013 0.002	0.053 0.020		
-3221	"	"	0.800	"	"	-	-	-	0.009 0.001	0.029 0.010		
-3231	"	"	"	0.06	"	-	-	-	0.006 0.001	0.027 0.008		
-3331	"	"	1.200	"	"	-	-	-	0.006 0.001	0.023 0.007		
-4111	"	0.40	0.400	0.02	"	-	-	-	0.017 0.005	0.074 0.025		
-4121	"	"	"	0.04	"	-	-	-	0.017 0.004	0.059 0.017		
-4221	"	"	0.800	"	"	-	-	-	0.010 0.002	0.033 0.013		
-4231	"	"	"	0.06	"	-	-	-	0.010 0.002	0.034 0.013		
-4331	"	"	1.200	"	"	-	-	-	0.006 0.001	0.022 0.007		
-5111	"	0.50	0.400	0.02	"	-	-	-	0.019 0.007	0.069 0.025		
-5121	"	"	"	0.04	"	-	-	-	0.018 0.005	0.066 0.025		
-5221	"	"	0.800	"	"	-	-	-	0.011 0.002	0.038 0.014		
-5231	"	"	"	0.06	"	-	-	-	0.010 0.002	0.037 0.012		
-5331	"	"	1.200	"	"	-	-	-	0.007 0.002	0.024 0.009		
B2-1111	乱流(III)	0.25	0.400	0.02	"	-	-	-	0.007 0.001	0.026 0.007		
-1121	"	"	"	0.04	"	-	-	-	0.006 0.001	0.024 0.006		
-1221	"	"	0.800	"	"	-	-	-	0.004 0.001	0.014 0.004		
-1231	"	"	"	0.06	"	-	-	-	0.003 0.000	0.013 0.003		
-1331	"	"	1.200	"	"	-	-	-	0.002 0.000	0.010 0.002		

表- 3.8.5 3次元模型実験結果

実験番号	気 流	桁高比 H/B	重 量 (kgf/m)	構 造 減 衰 δ	迎角 (DEG)	渦 励 振 *1)		ギャロップ びんぐ発 現風速 *1), *3)	バフエティング 〔上段：最大振幅 下段：等価振幅 *4)〕		備 考
						〔上段：発現風速領域 下段：最大振幅 *2)〕	低風速域 高風速域		無次元風速 4.0	無次元風速 8.0	
B2-2111	乱流(Ⅲ)	0.30	0.400	0.02	0	—	2.71 0.007	—	0.009 0.002	0.033 0.009	
-2121	〃	〃	〃	0.04	〃	—	—	—	0.008 0.001	0.028 0.009	
-2221	〃	〃	0.800	〃	〃	—	—	—	0.004 0.000	0.017 0.005	
-2231	〃	〃	〃	0.06	〃	—	—	—	0.004 0.000	0.016 0.005	
-2331	〃	〃	1.200	〃	〃	—	—	—	0.003 0.000	0.011 0.001	
-3111	〃	0.35	0.400	0.02	〃	—	2.73 0.008	—	0.009 0.001	0.032 0.010	
-3121	〃	〃	〃	0.04	〃	—	—	—	0.009 0.001	0.032 0.011	
-3221	〃	〃	0.800	〃	〃	—	—	—	0.006 0.001	0.018 0.007	
-3231	〃	〃	〃	0.06	〃	—	—	—	0.006 0.001	0.016 0.005	
-3331	〃	〃	1.200	〃	〃	—	—	—	0.004 0.000	0.012 0.004	
-4111	〃	0.40	0.400	0.02	〃	—	—	—	0.011 0.003	0.042 0.017	
-4121	〃	〃	〃	0.04	〃	—	—	—	0.010 0.002	0.040 0.013	
-4221	〃	〃	0.800	〃	〃	—	—	—	0.006 0.001	0.022 0.009	
-4231	〃	〃	〃	0.06	〃	—	—	—	0.006 0.001	0.021 0.008	
-4331	〃	〃	1.200	〃	〃	—	—	—	0.004 0.000	0.013 0.002	
-5111	〃	0.50	0.400	0.02	〃	—	—	—	0.012 0.002	0.050 0.020	
-5121	〃	〃	〃	0.04	〃	—	—	—	0.010 0.001	0.046 0.017	
-5221	〃	〃	0.800	〃	〃	—	—	—	0.006 0.000	0.026 0.009	
-5231	〃	〃	〃	0.06	〃	—	—	—	0.006 0.000	0.026 0.007	
-5331	〃	〃	1.200	〃	〃	—	—	—	0.004 0.000	0.015 0.004	
B3-1111	乱流(Ⅳ)	0.25	0.400	0.02	〃	—	2.02 0.011	—	0.006 0.001	0.021 0.007	
-1121	〃	〃	〃	0.04	〃	—	2.07 0.005	—	0.007 0.003	0.020 0.010	
-1221	〃	〃	0.800	〃	〃	—	—	—	0.004 0.000	0.012 0.005	
-1231	〃	〃	〃	0.06	〃	—	—	—	0.003 0.000	0.010 0.002	
-1331	〃	〃	1.200	〃	〃	—	—	—	0.002 0.000	0.008 0.002	
-2111	〃	0.30	0.400	0.02	〃	—	2.41 0.014	—	0.007 0.002	0.023 0.010	
-2121	〃	〃	〃	0.04	〃	—	2.61 0.005	—	0.005 0.001	0.018 0.009	
-2221	〃	〃	0.800	〃	〃	—	—	—	0.004 0.001	0.014 0.005	
-2231	〃	〃	〃	0.06	〃	—	—	—	0.005 0.001	0.013 0.005	
-2331	〃	〃	1.200	〃	〃	—	—	—	0.003 0.001	0.010 0.003	

表-3.8.6 3次元模型実験結果

実験番号	気 流	桁高比 H/B	重 量 (kgf/m)	構 造 衰 減 δ	迎角 (DEG)	渦 励 振 *1)		ギャロッ ピング発 現風速 *1), *3)	パフティング		備 考
						〔上段:発現風速領域 下段:最大振幅 *2)〕			〔上段:最大振幅 下段:等価振幅 *4)〕		
						低風速域	高風速域		無次元風速 4.0	無次元風速 8.0	
B3-3111	乱流(III)	0.35	0.400	0.02	0	—	2.89 0.009	—	0.008 0.002	0.029 0.012	
-3121	"	"	"	0.04	"	—	2.95 0.007	—	0.007 0.001	0.024 0.010	
-3221	"	"	0.800	"	"	—	—	—	0.004 0.001	0.014 0.006	
-3231	"	"	"	0.06	"	—	—	—	0.004 0.000	0.014 0.005	
-3331	"	"	1.200	"	"	—	—	—	0.003 0.000	0.009 0.003	
-4111	"	0.40	0.400	0.02	"	—	—	—	0.009 0.002	0.059 0.026	
-4121	"	"	"	0.04	"	—	—	—	0.009 0.001	0.045 0.017	
-4221	"	"	0.800	"	"	—	—	—	0.005 0.001	0.021 0.006	
-4231	"	"	"	0.06	"	—	—	—	0.005 0.001	0.017 0.006	
-4331	"	"	1.200	"	"	—	—	—	0.004 0.001	0.014 0.003	
-5111	"	0.50	0.400	0.02	"	—	—	—	0.011 0.002	0.036 0.010	
-5121	"	"	"	0.04	"	—	—	—	0.010 0.002	0.027 0.009	
-5221	"	"	0.800	"	"	—	—	—	0.005 0.000	0.016 0.003	
-5231	"	"	"	0.06	"	—	—	—	0.004 0.000		
-5331	"	"	1.200	"	"	—	—	—	0.003 0.000		

注) *1) 発現風速は、無次元風速 (V/NB) とする。

*2) 最大振幅は、無次元振幅 (η/B) とする。

*3) ギャロッピング発現風速は、捩れ角 1° を基準と考え、これと同じ振幅となるたわみ振動無次元振幅で 0.0087 の時の風速を発現風速とする。

*4) パフティング振幅は、測定時間内で観測された最大振幅と振動の変動成分を考慮した等価振幅によって表わした。測定時間はおよそ 1 分である。等価振幅は変位の標準偏差を $\sqrt{2}$ 倍したものであり、実効値の等しい正弦波の振幅を表わす。

等価振幅の定義式を示す。 $\bar{y} = \sqrt{2} \left\{ \int_0^T y^2(t) dt / T \right\}^{1/2}$

$\bar{y}$: 等価振幅 $y(t)$: 変位, T : 測定時間

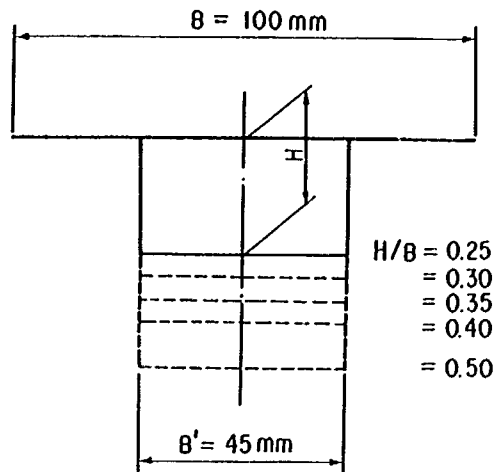


図 - 3.1.2 風洞模型の断面

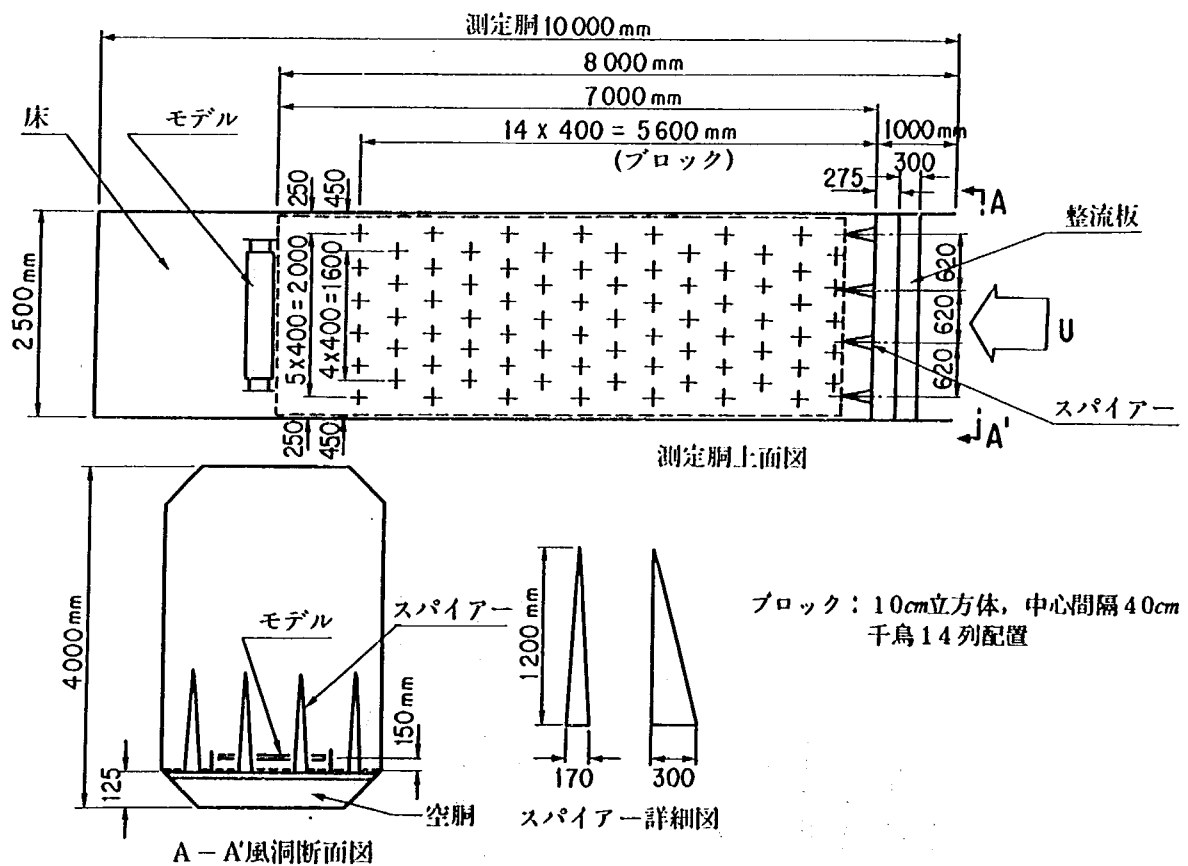
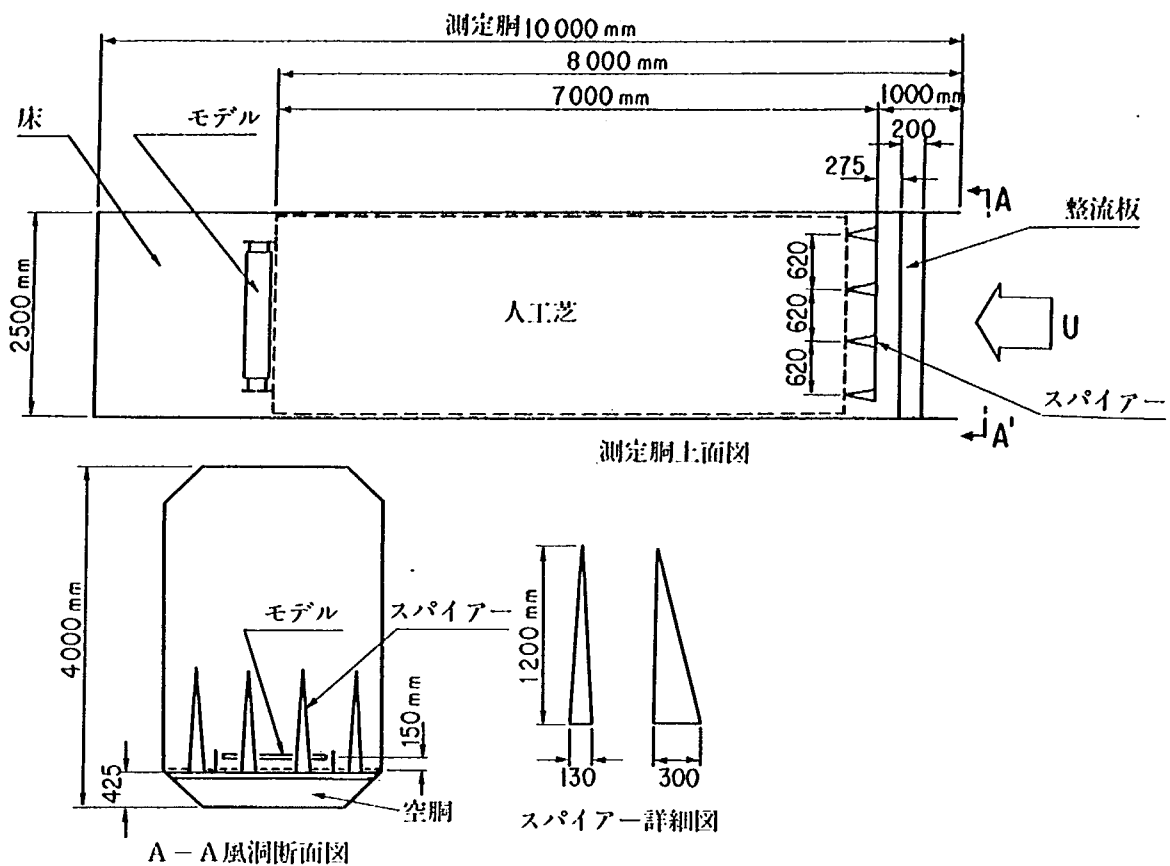
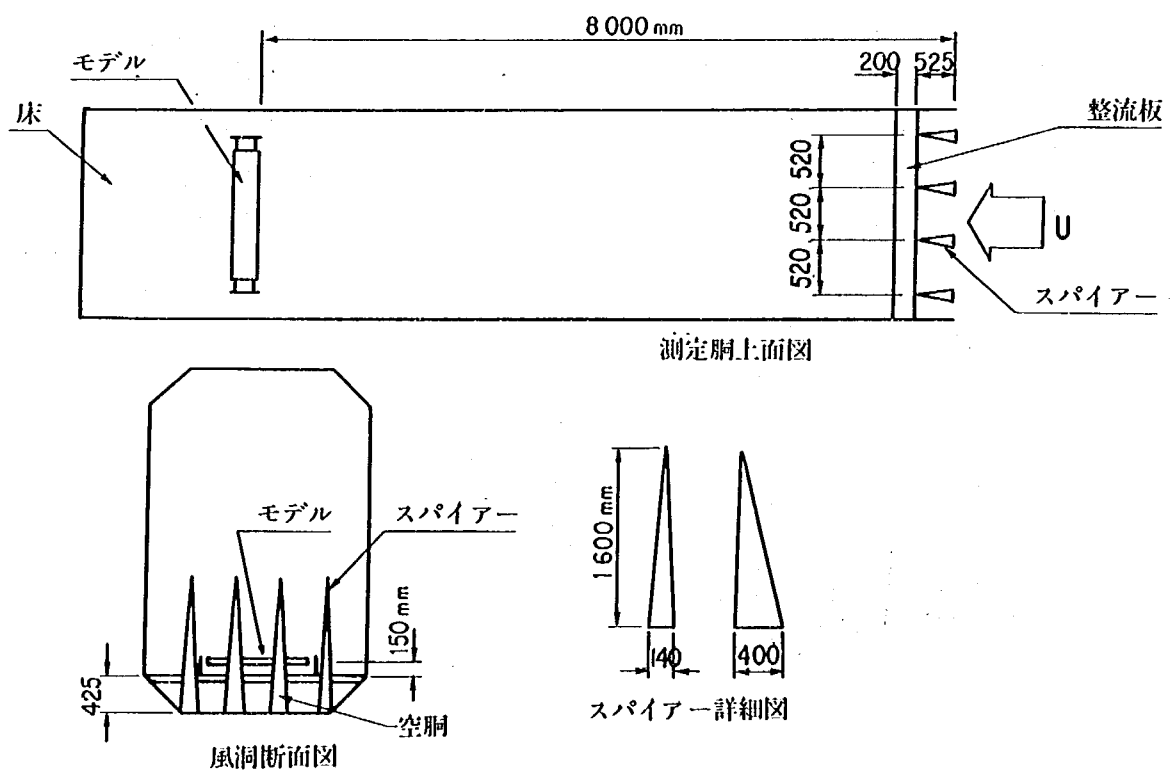


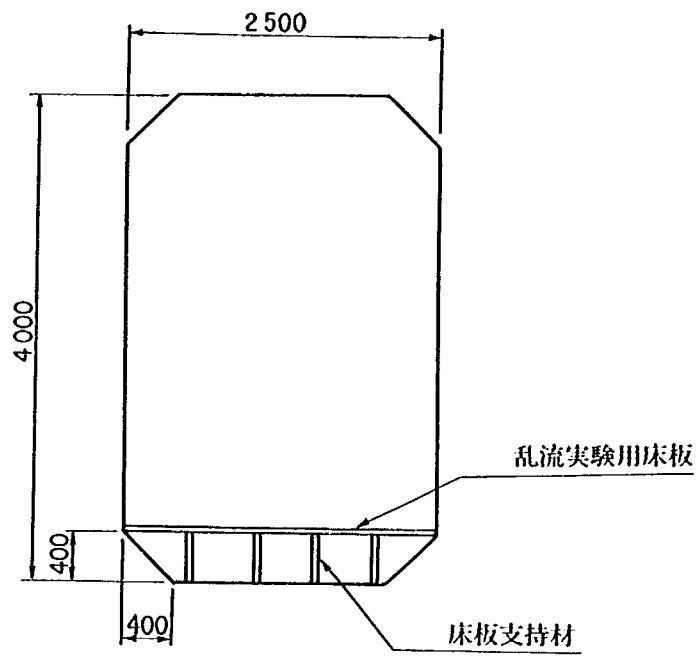
図 - 3.2.1 境界層乱流実験（乱流 I）・風洞構造



図－3.2.2 境界層乱流実験（乱流Ⅱ）・風洞構造



図－3.2.3 境界層乱流実験（乱流Ⅲ）・風洞構造



図－ 3.3 乱流発生時風洞断面

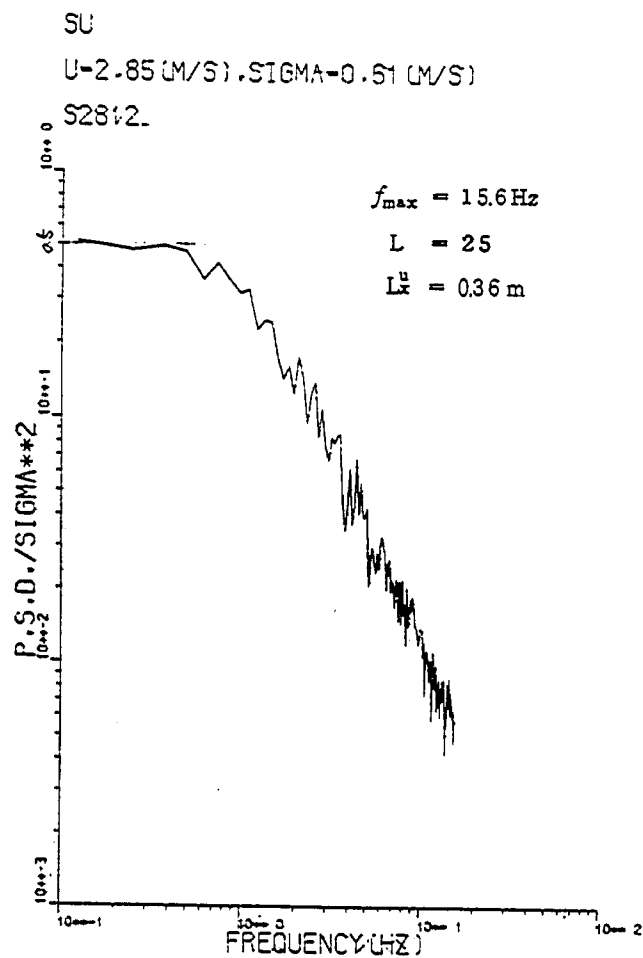


図-3.4.1 乱流Ⅰのパワースペクトル
密度関数 (u 方向)

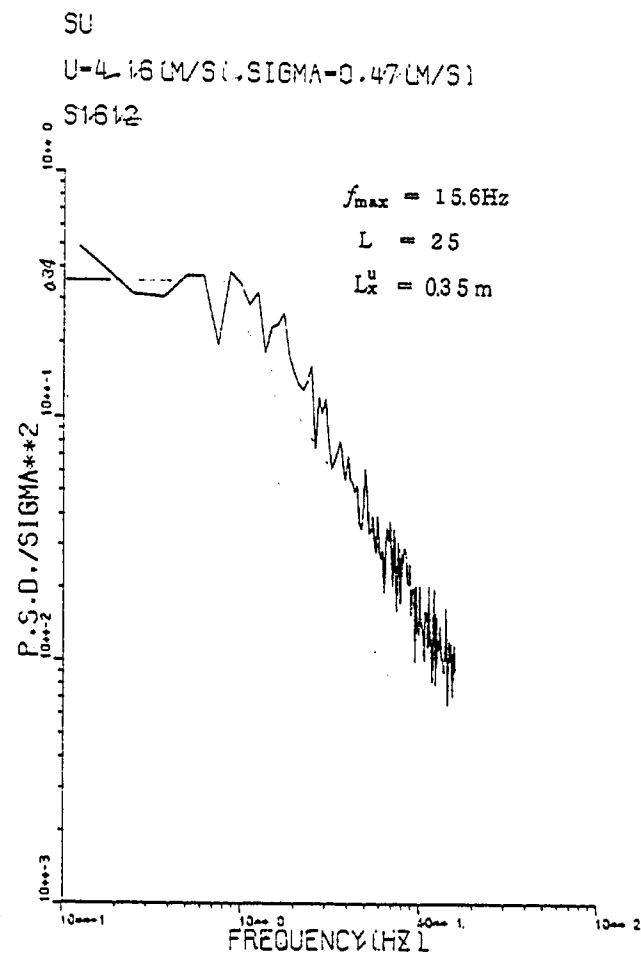


図-3.4.2 乱流Ⅱのパワースペクトル
密度関数 (u 方向)

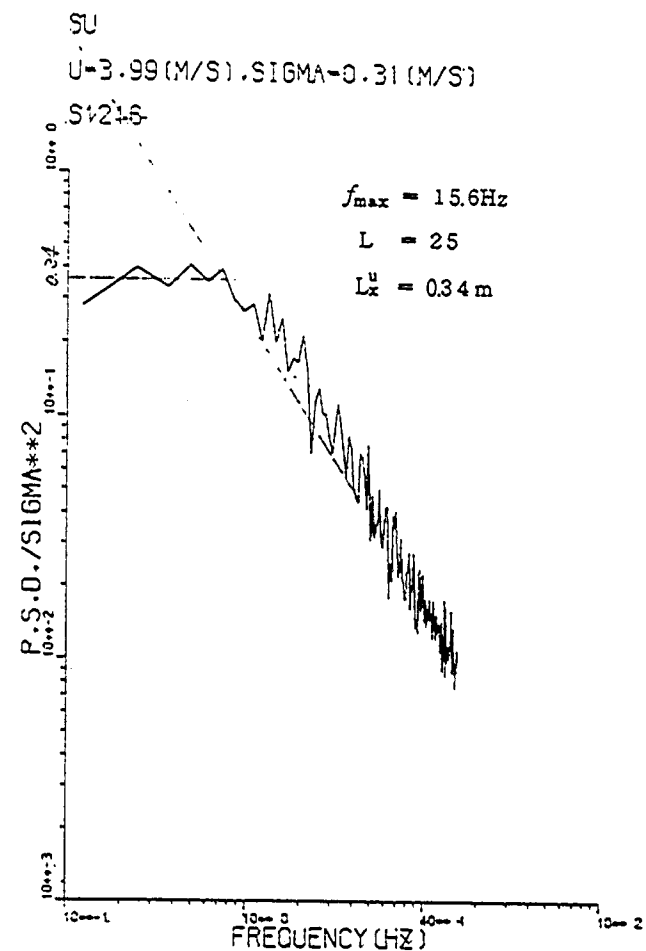


図-3.4.3 乱流Ⅲのパワースペクトル
密度関数 (u 方向)

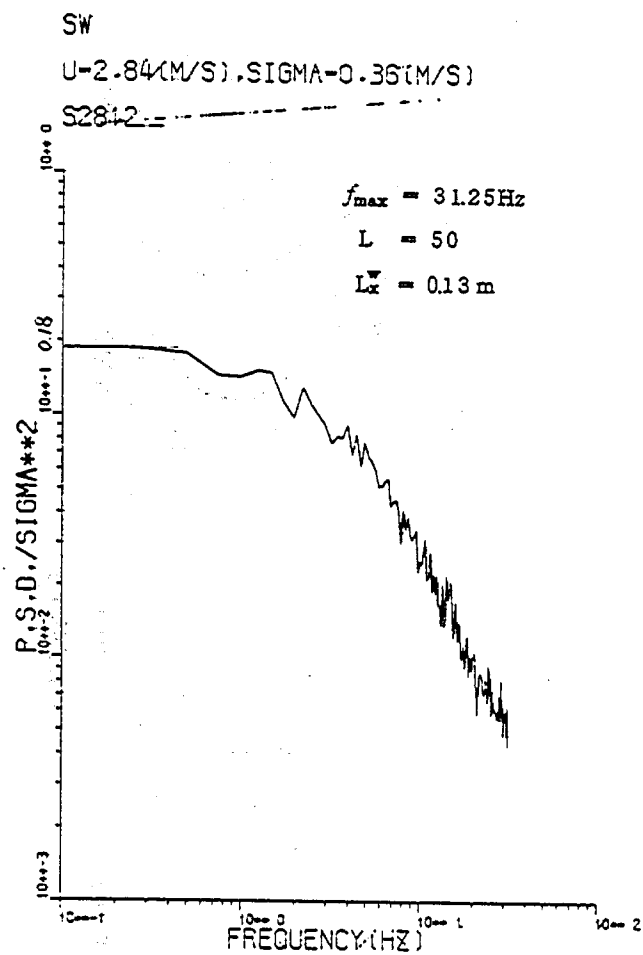


図-3.4.4 乱流Ⅰのポワースペクトル
密度関数 (w 方向)

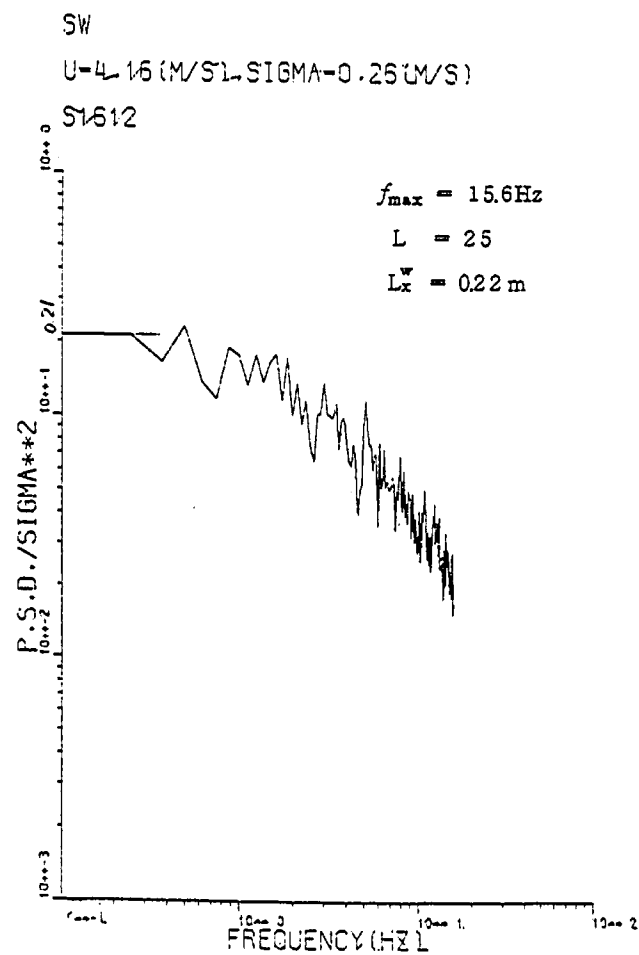


図-3.4.5 乱流Ⅱのポワースペクトル
密度関数 (w 方向)

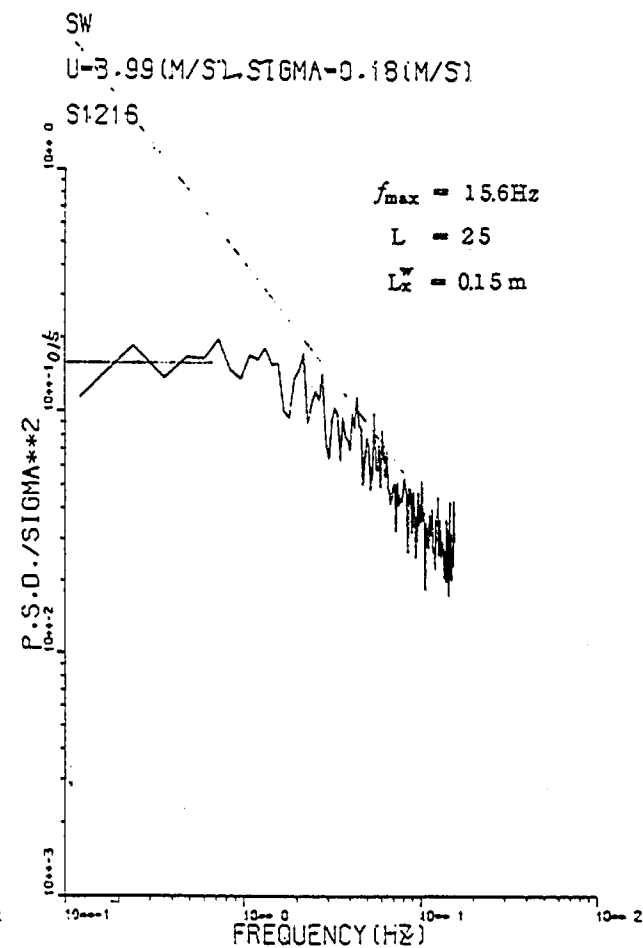


図-3.4.6 乱流Ⅲのポワースペクトル
密度関数 (w 方向)

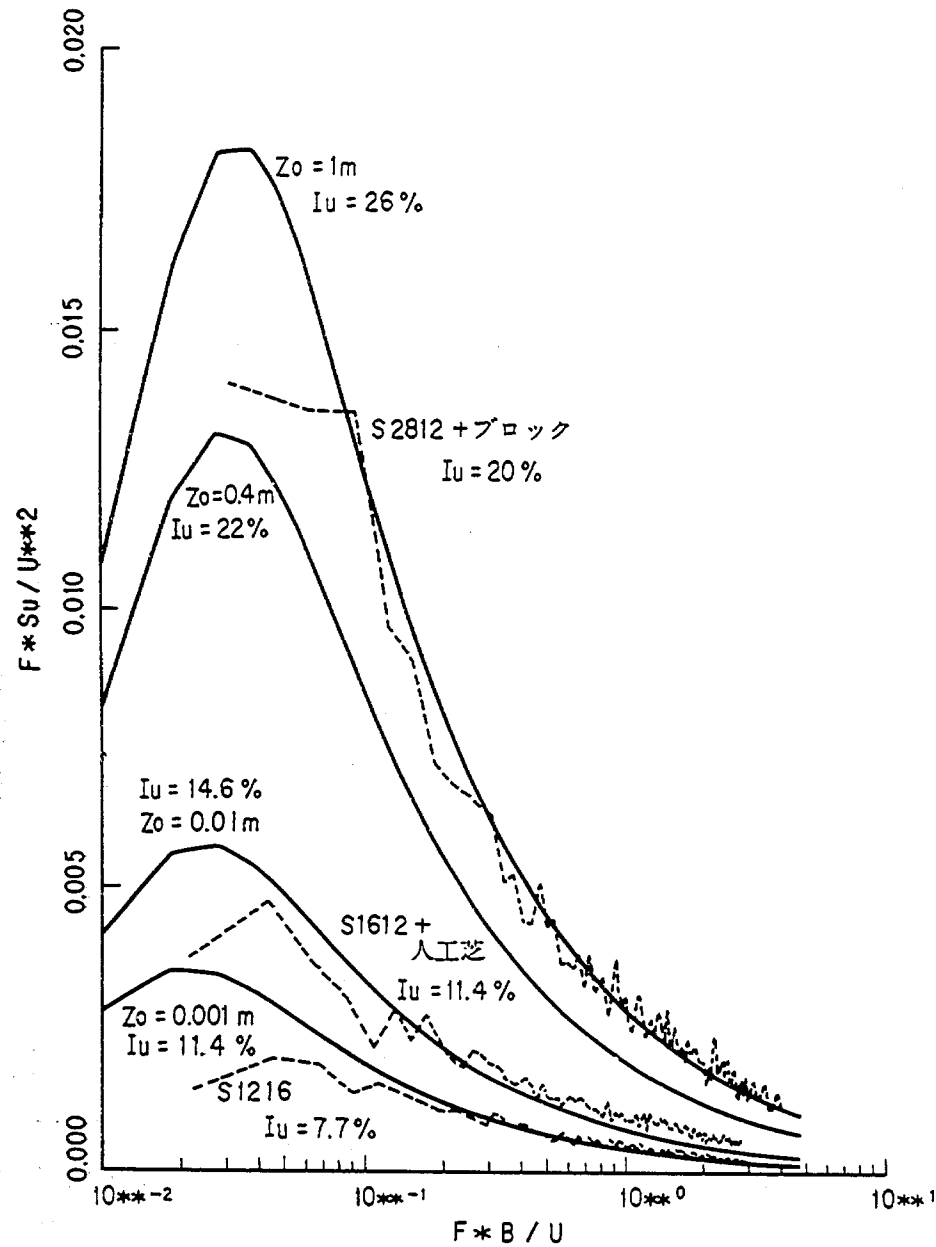


図-3.5.1 乱流のパワースペクトル密度関数 (u 方向)

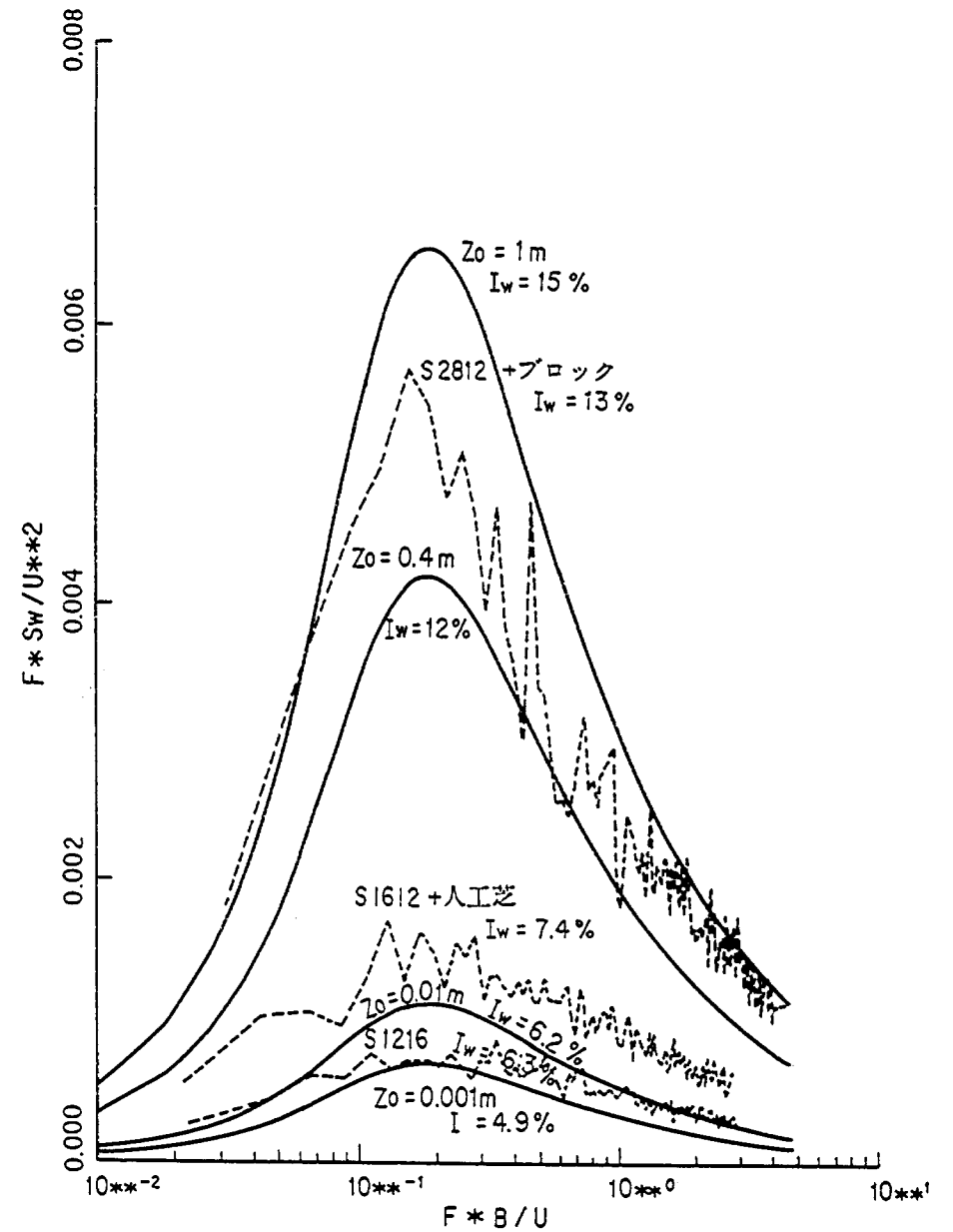


図-3.5.2 乱流のパワースペクトル密度関数 (w 方向)

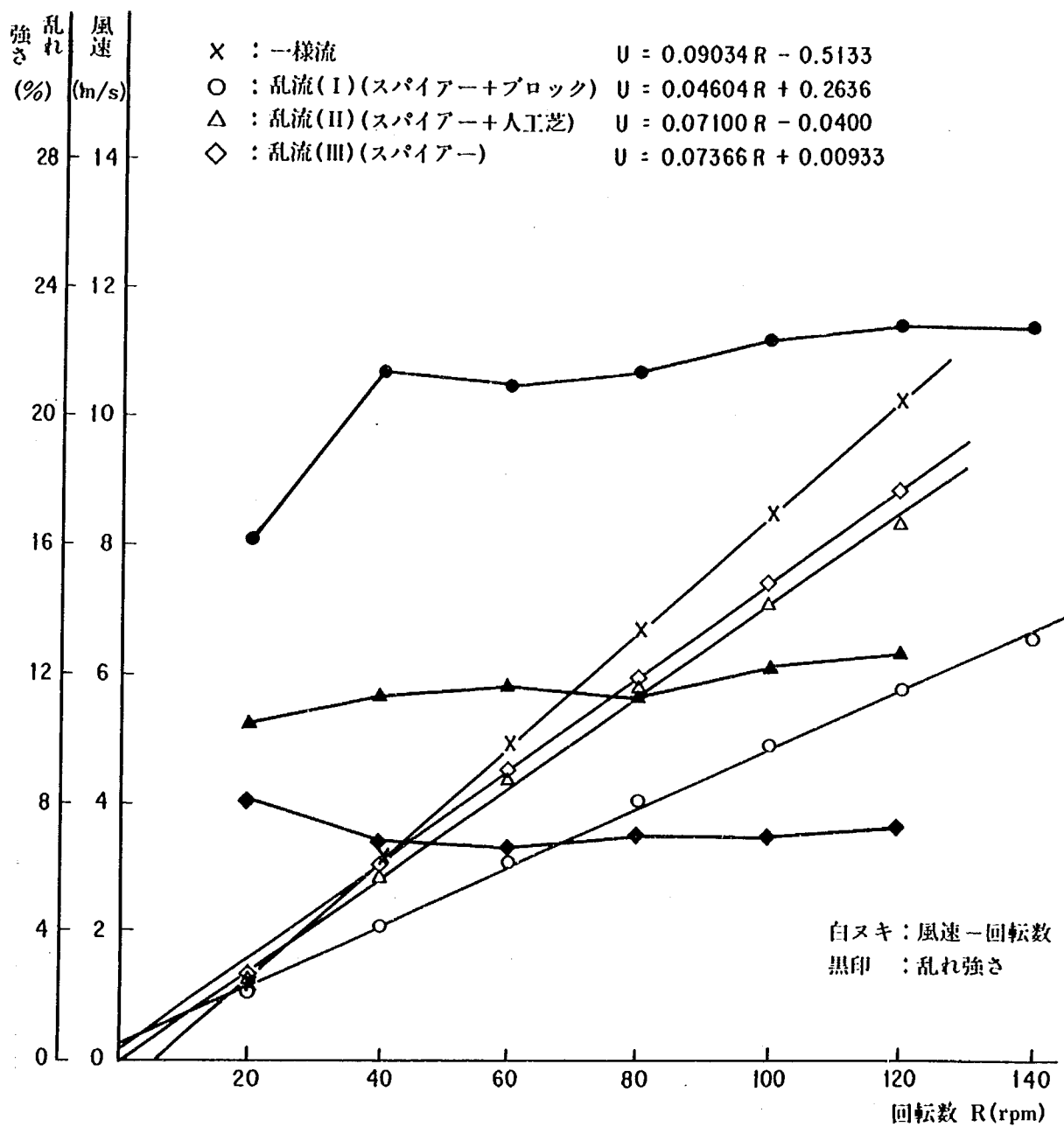


図-3.6 風洞送風機回転数と平均風速との関係

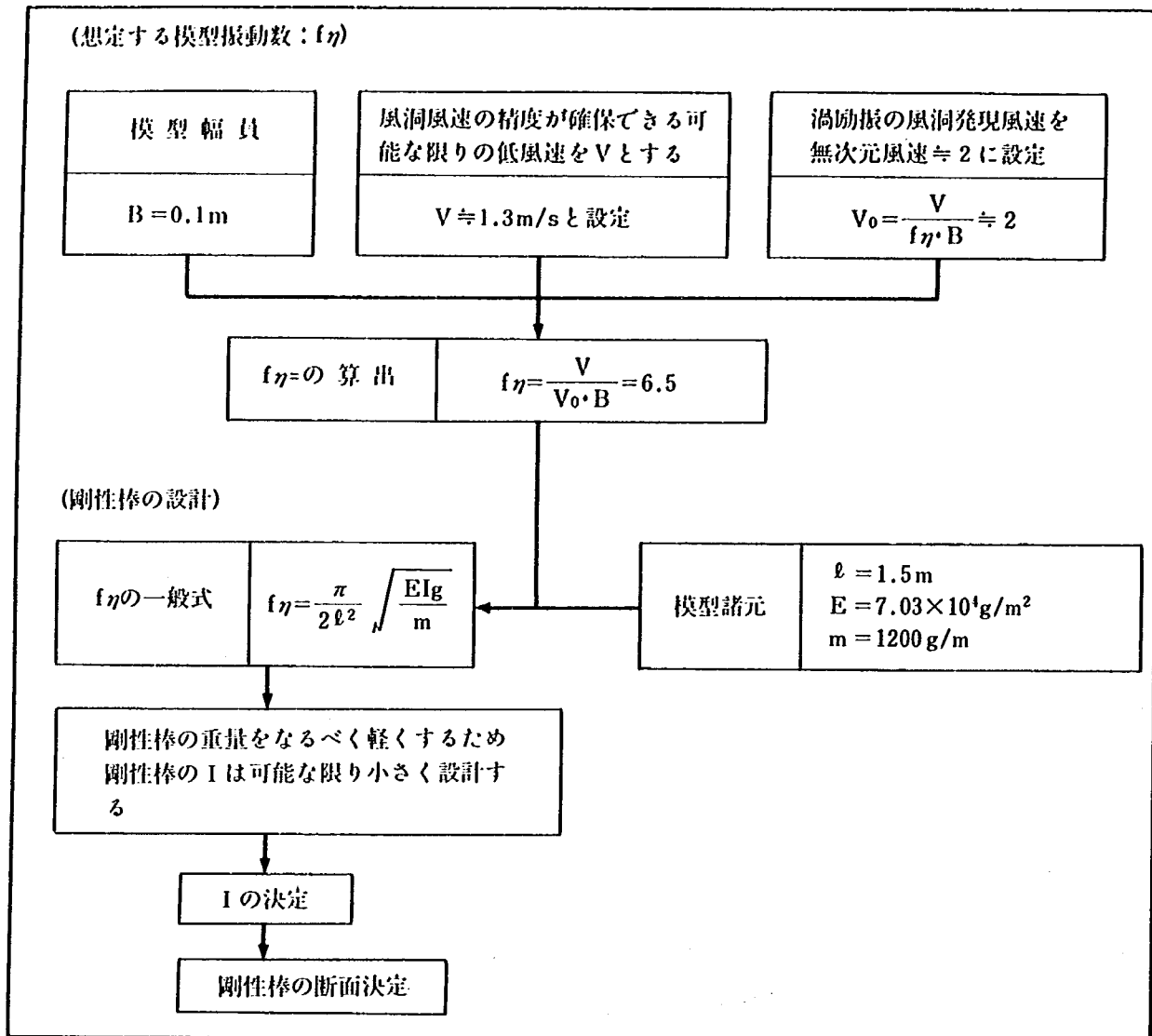


図- 3.7 剛性棒の設計フロー

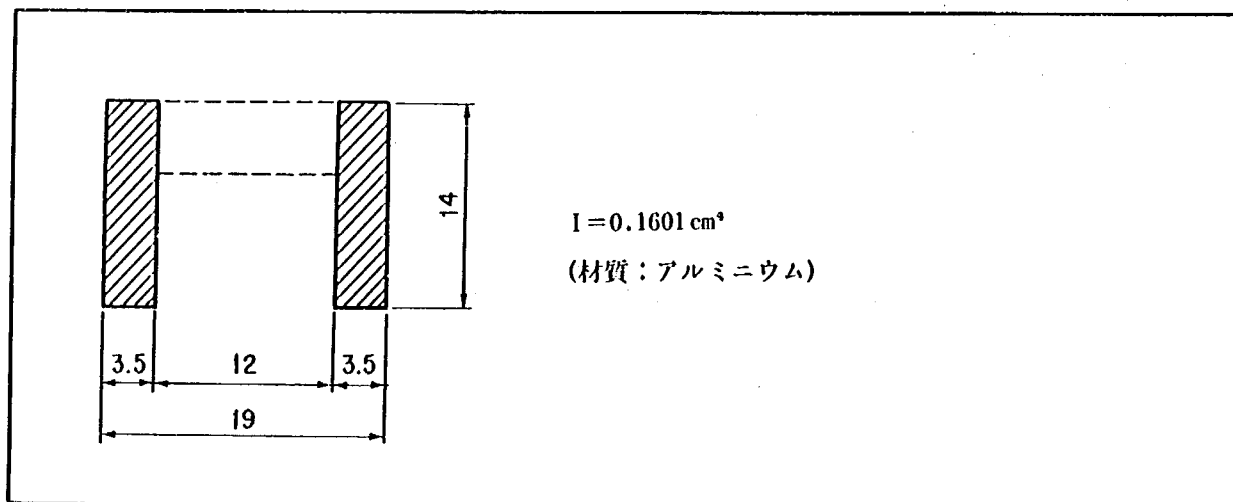
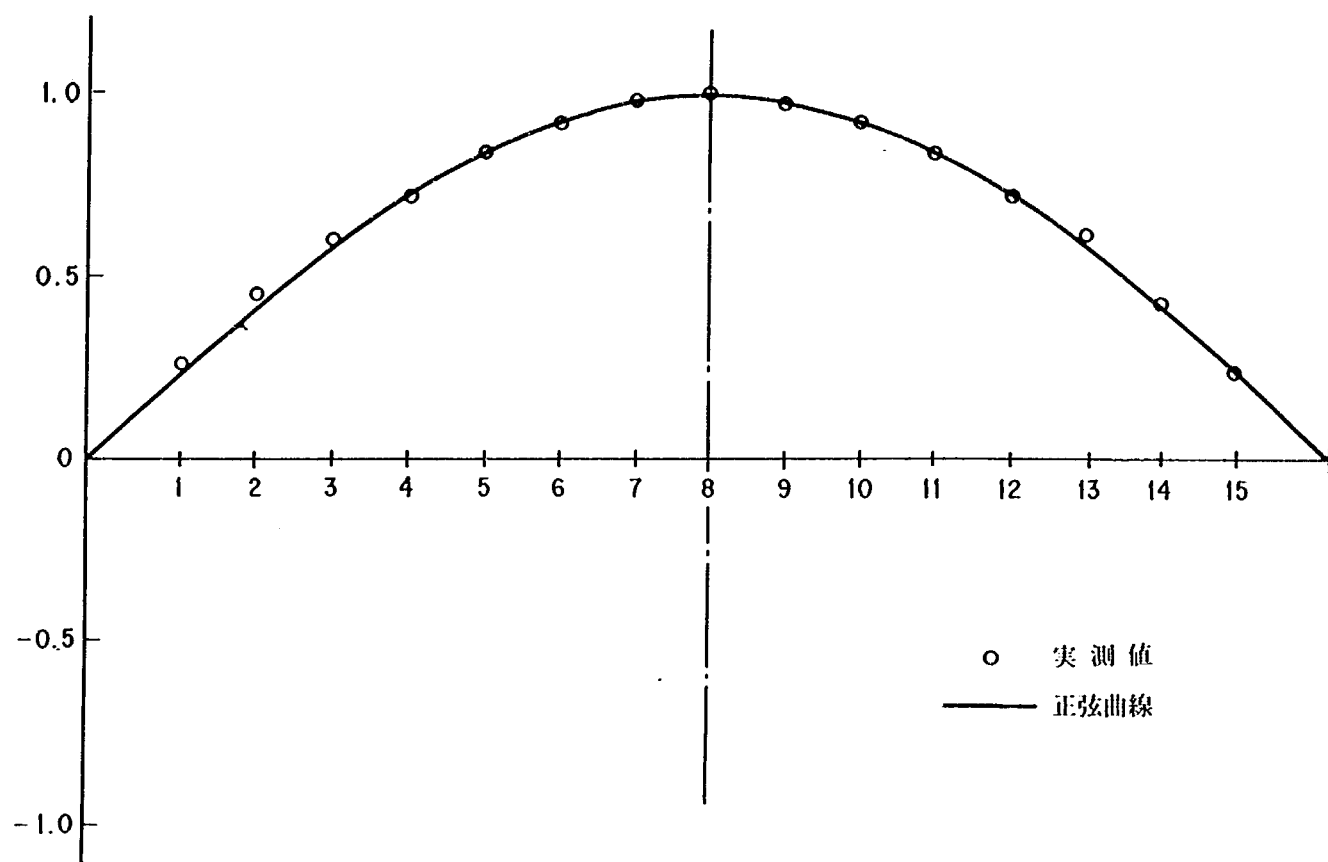


図- 3.8 剛性棒断面



測点	実測値	正弦曲線	備考
1	0.26	0.236	
2	0.45	0.415	
3	0.60	0.580	
4	0.72	0.724	
5	0.84	0.841	
6	0.92	0.928	
7	0.98	0.982	
8	1.00	1.000	
9	0.97	0.982	
10	0.92	0.928	
11	0.84	0.841	
12	0.72	0.724	
13	0.61	0.580	
14	0.43	0.415	
15	0.24	0.236	

図-3.9 鉛直たわみ1次モード

图-3.10.1 风速-振幅关系图

桁高比 (0.25) $\alpha=(0^\circ)$

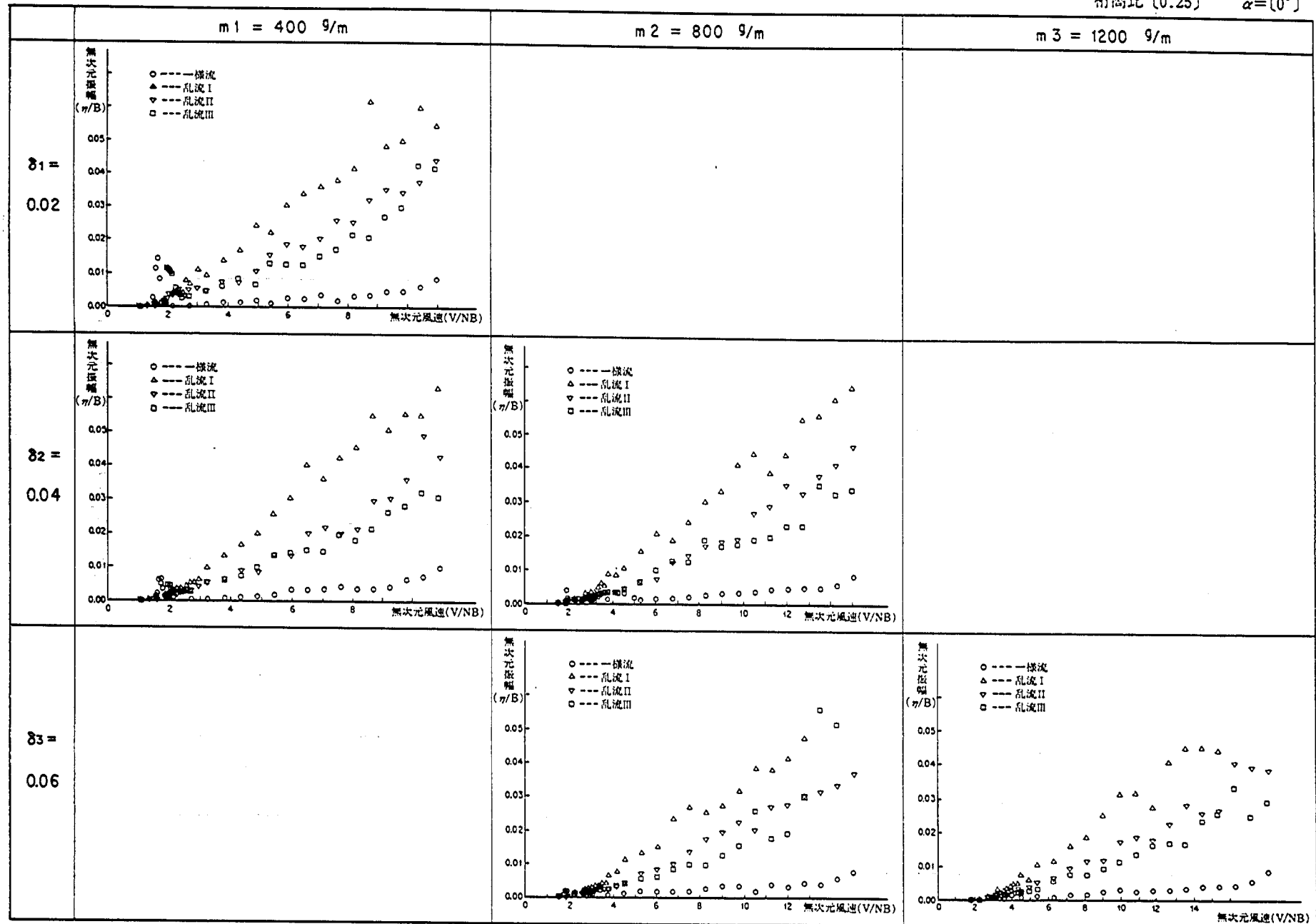


圖-3.10.2 風速 - 振幅關係圖

荷高比 [0.30] $\alpha = [0^\circ]$

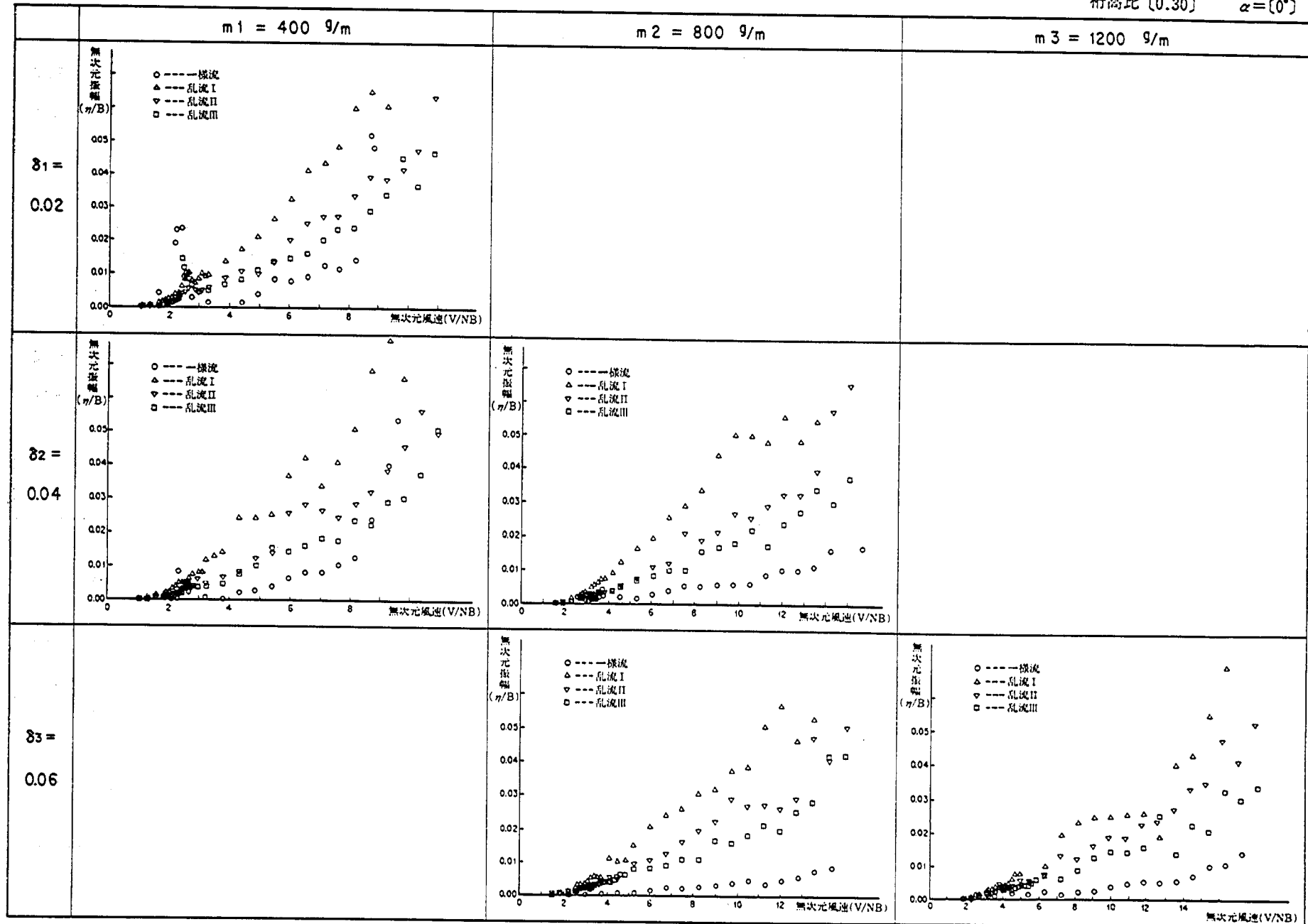


图-3.10.3 风速-振幅关系图

桁高比 [0.35] $\alpha = [0^\circ]$

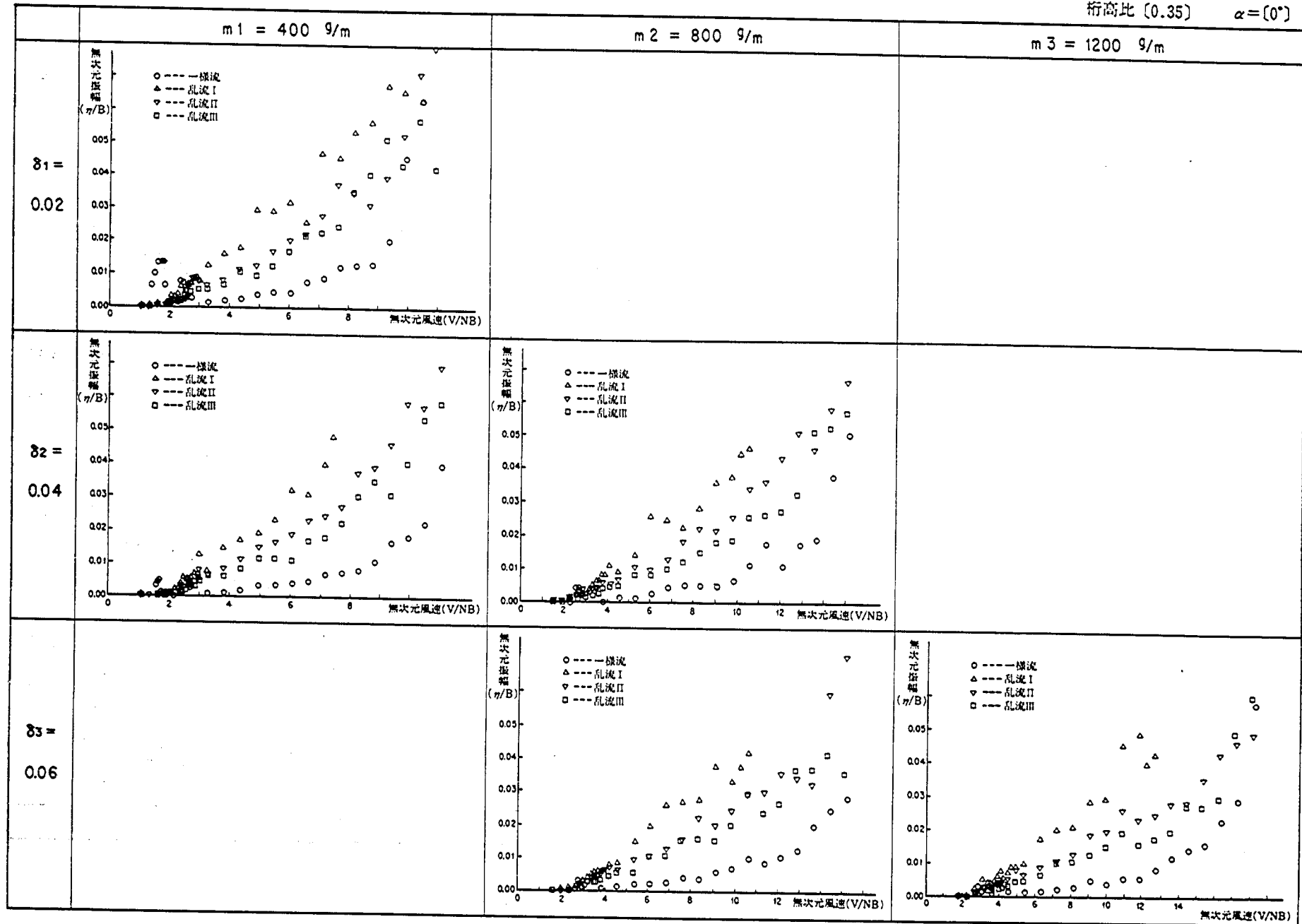


图-3.10.4 风速-振幅关系图

桁高比 [0.40] $\alpha = [0^\circ]$

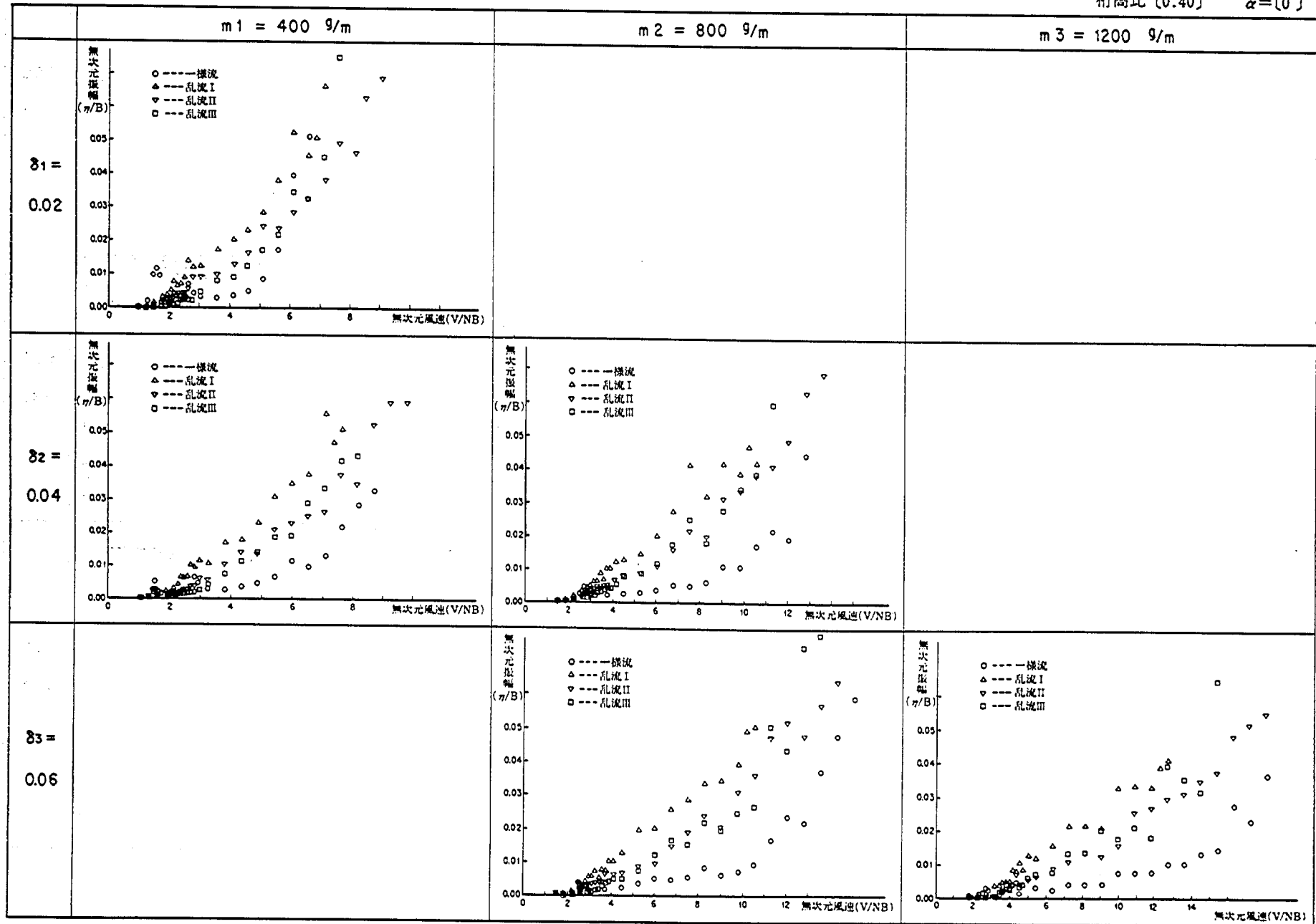


圖-3.10.5 風速 - 振幅關係圖

桁高比 [0.50] $\alpha = [0^\circ]$

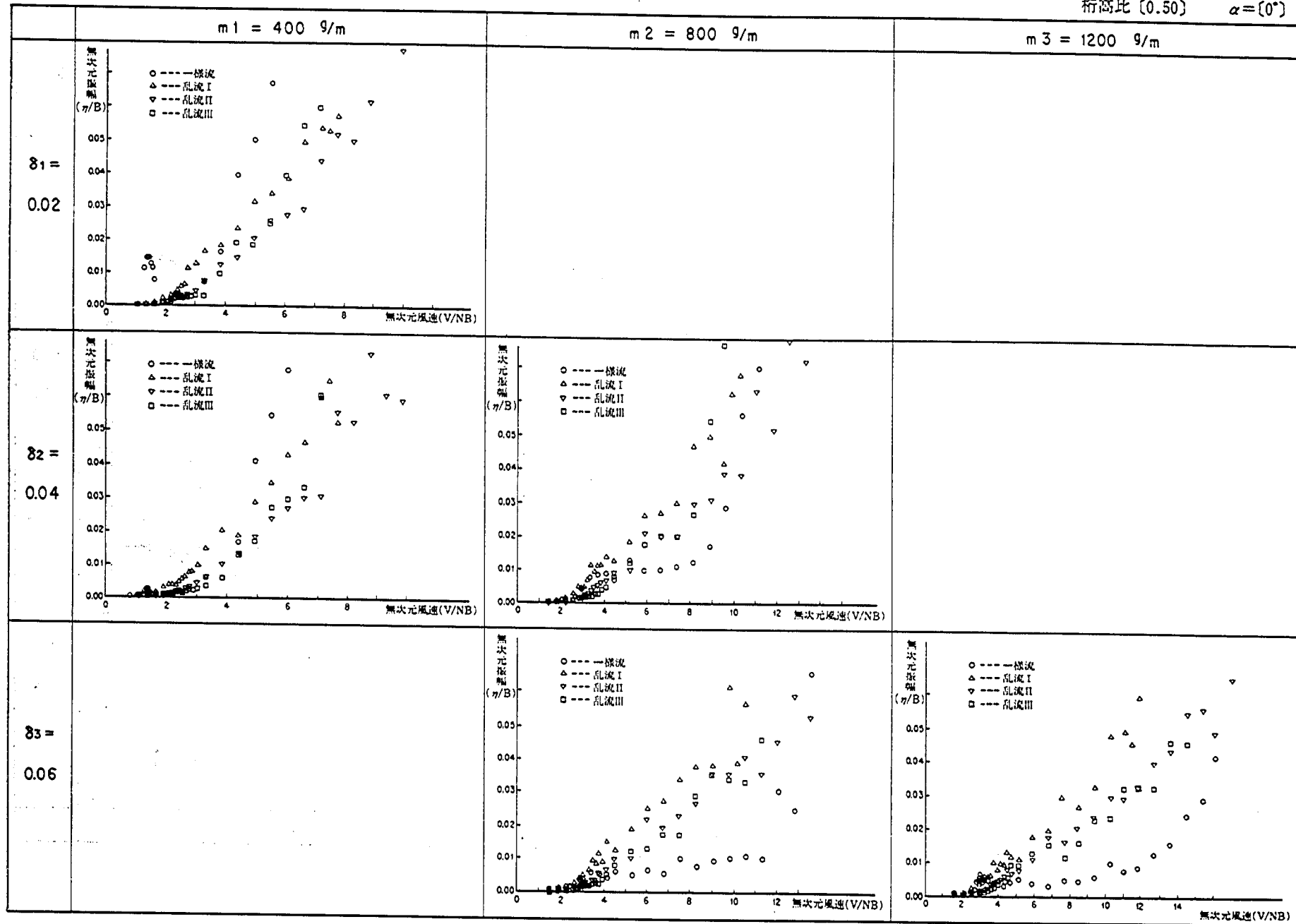


図-3.10.6 風速 - 振幅関係図

気流〔一様流〕 $\alpha = 0^\circ$

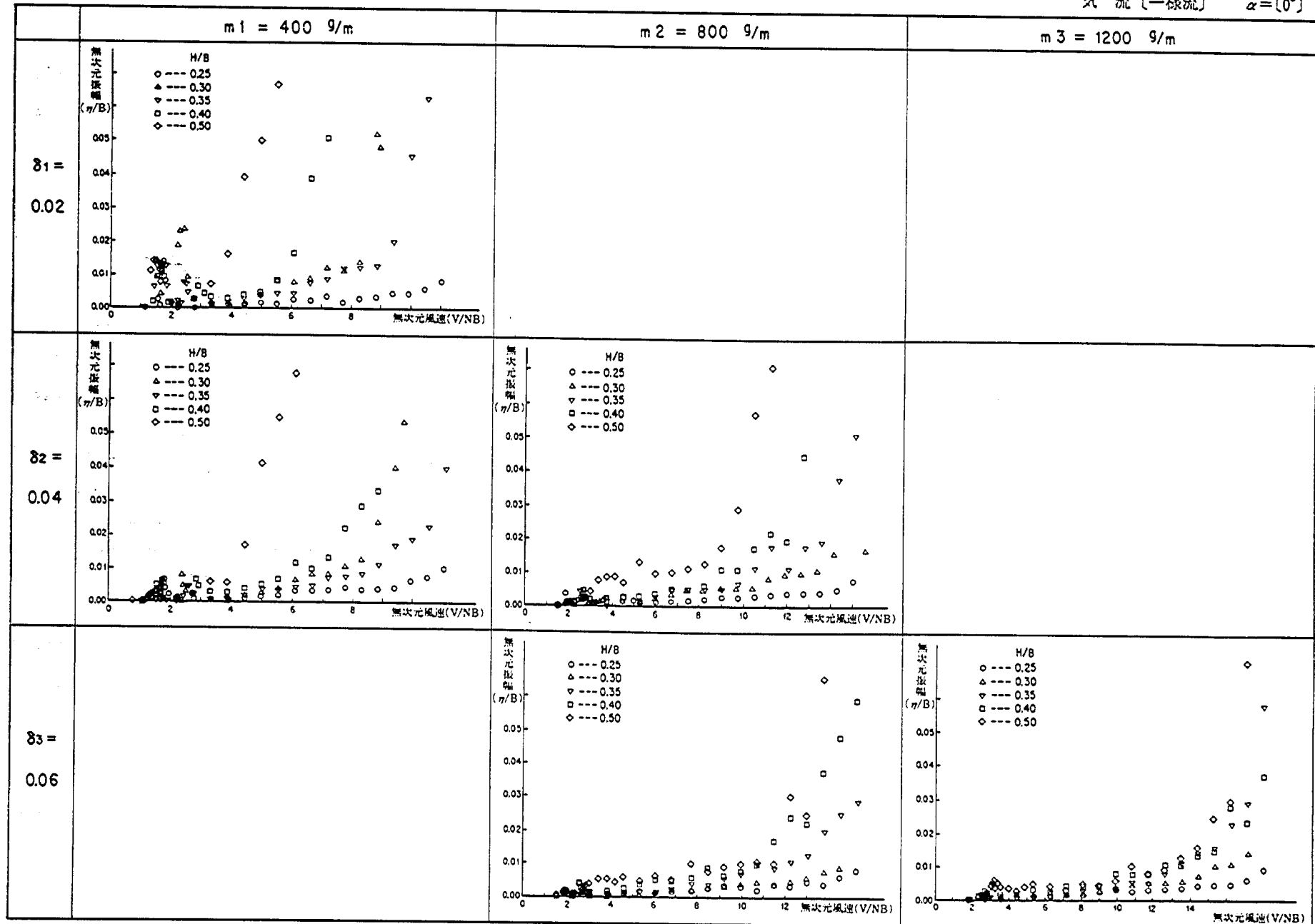


図-3.10.7 風速 - 振幅関係図

気流〔乱流I〕 $\alpha = [0^\circ]$

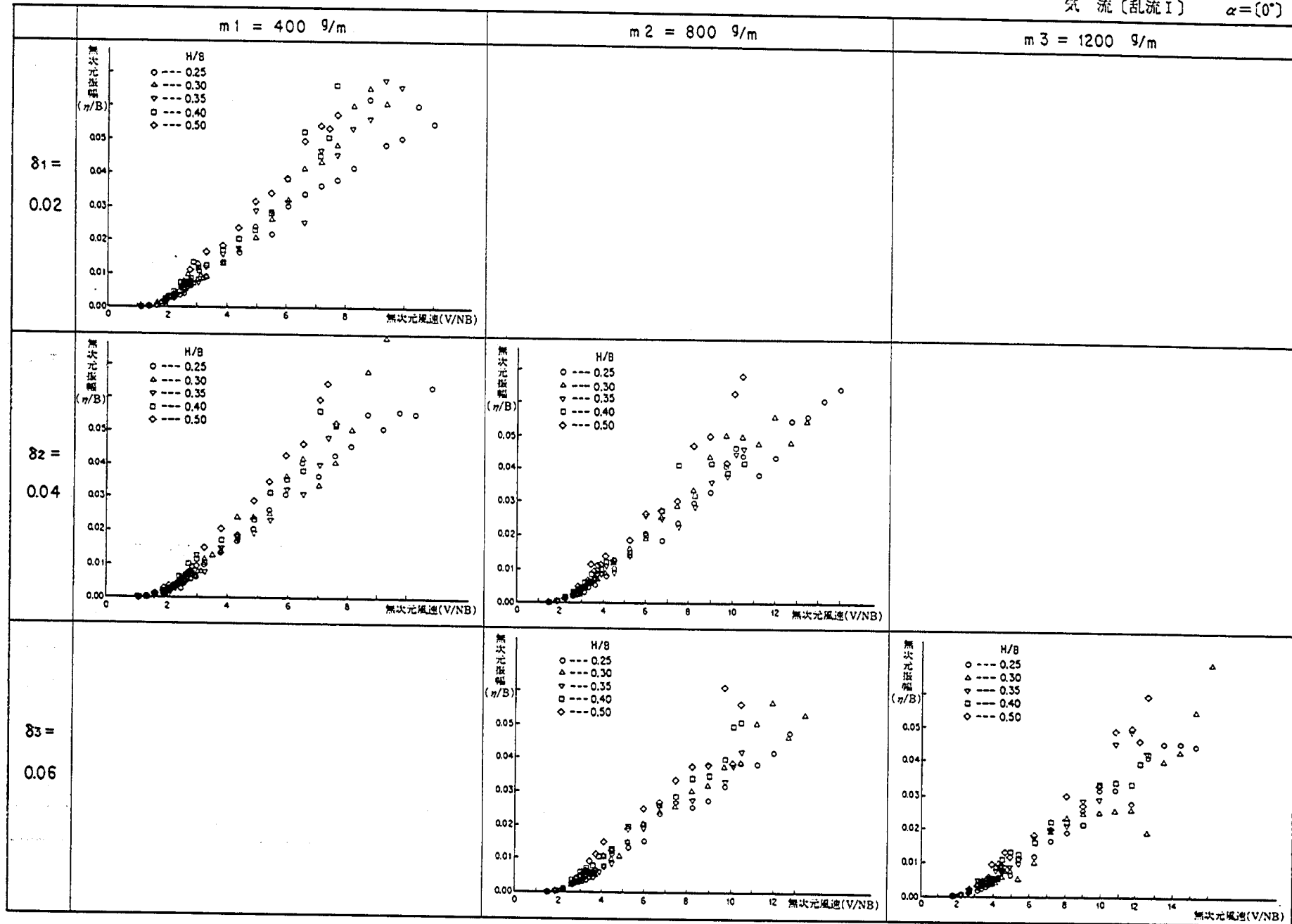


図-3.10.8 風速 - 振幅関係図

気流〔乱流Ⅱ〕 $\alpha = [0^\circ]$

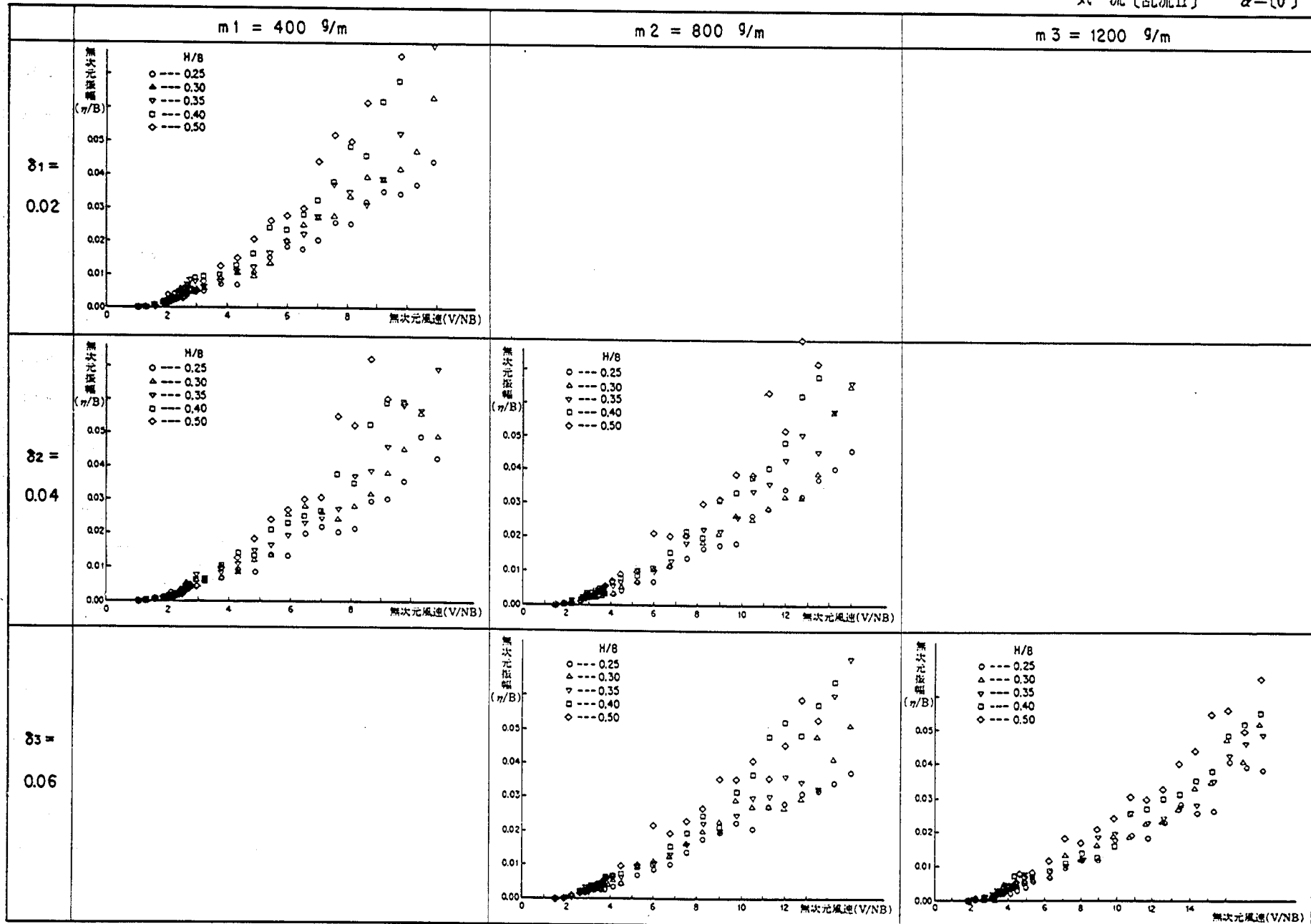
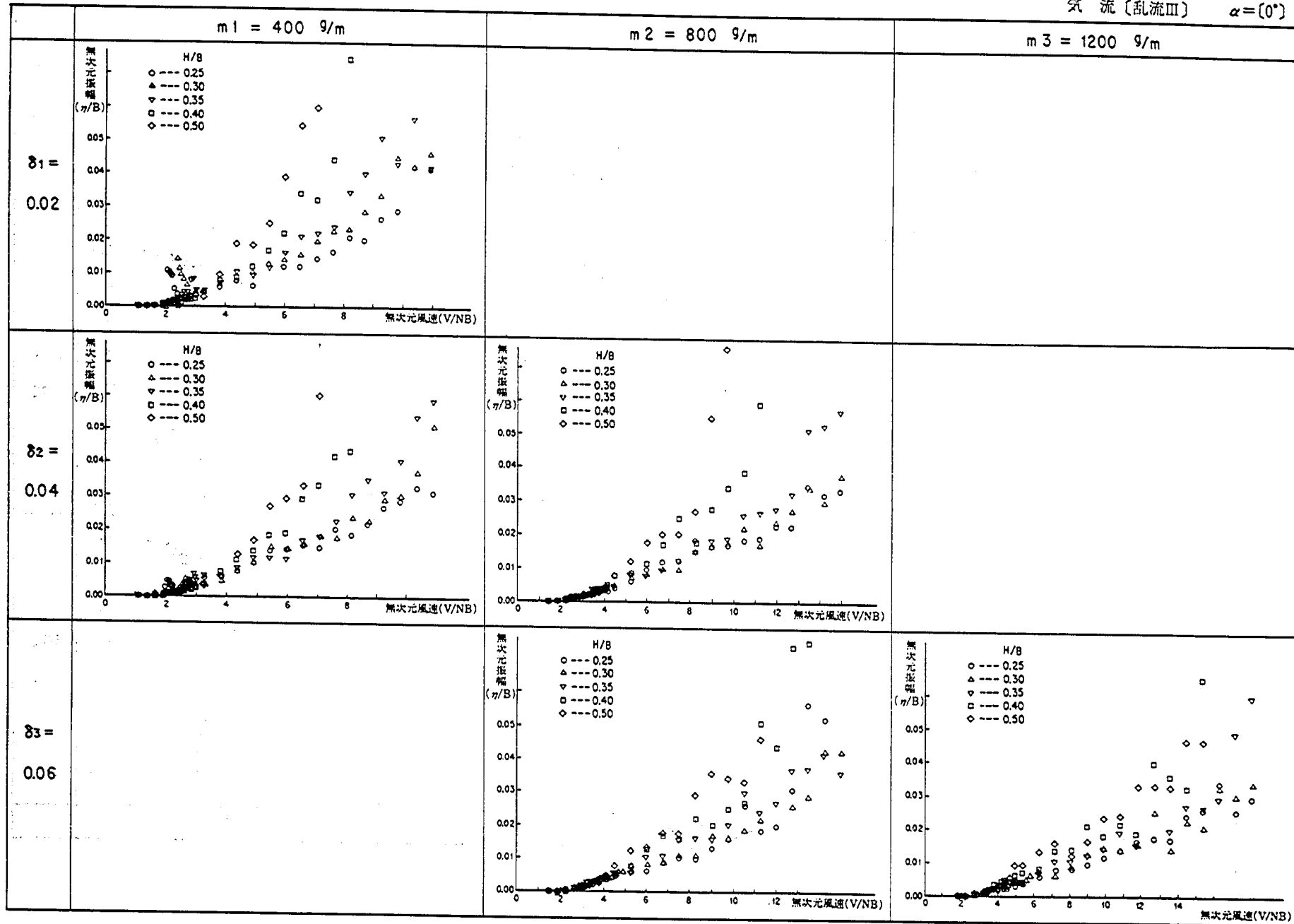


図-3.10.9 風速 - 振幅関係図

気流〔乱流Ⅲ〕 $\alpha = (0^\circ)$



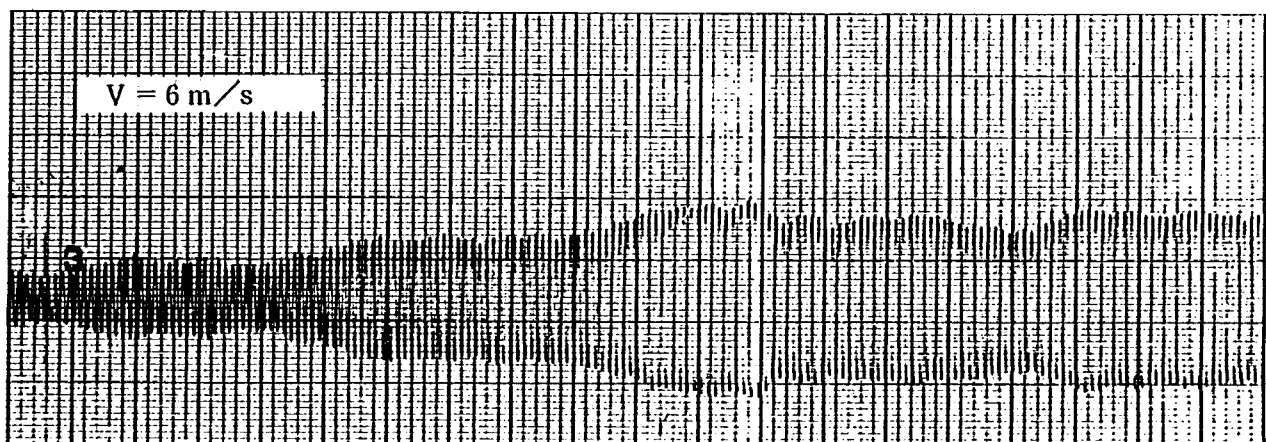
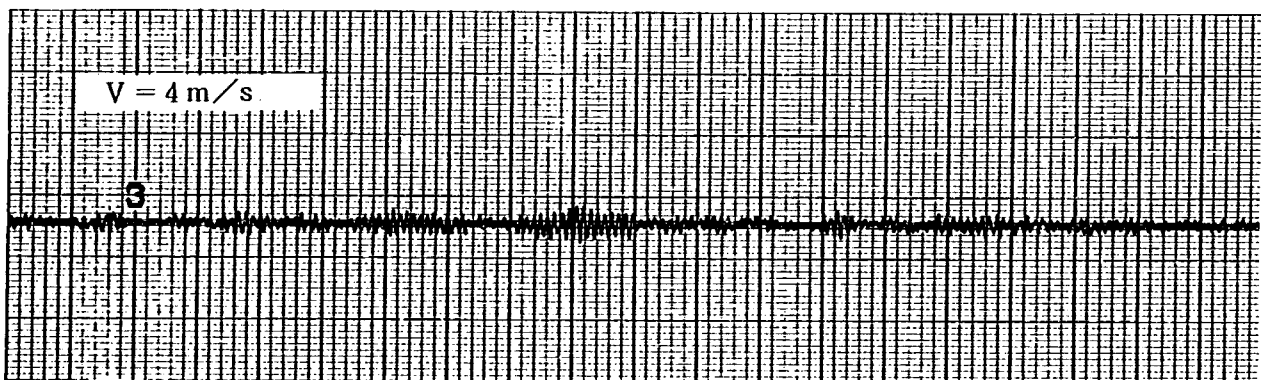
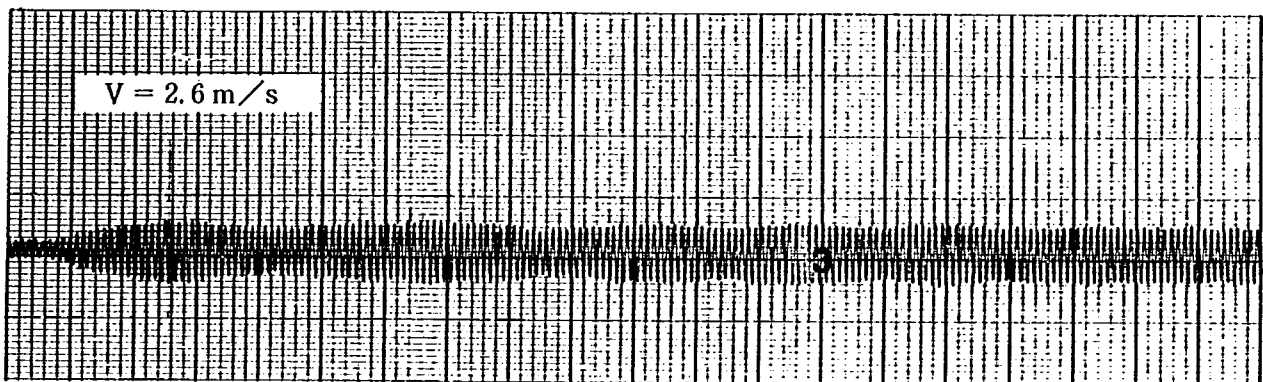
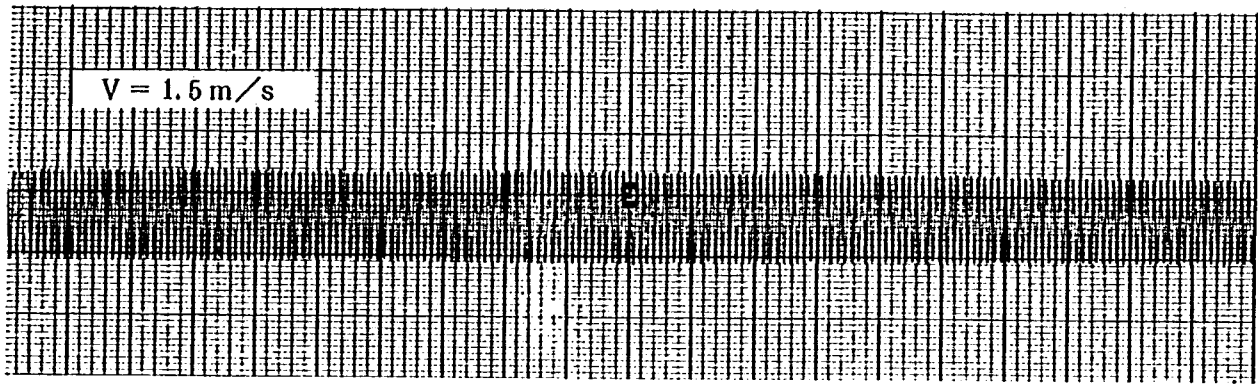


図-3.11.1 3次元模型応答波形（一様流・実験ケースA 4111）
 （桁高比 $H/B = 0.4$, m_1 , δ_1 , $\alpha = 0^\circ$ ）

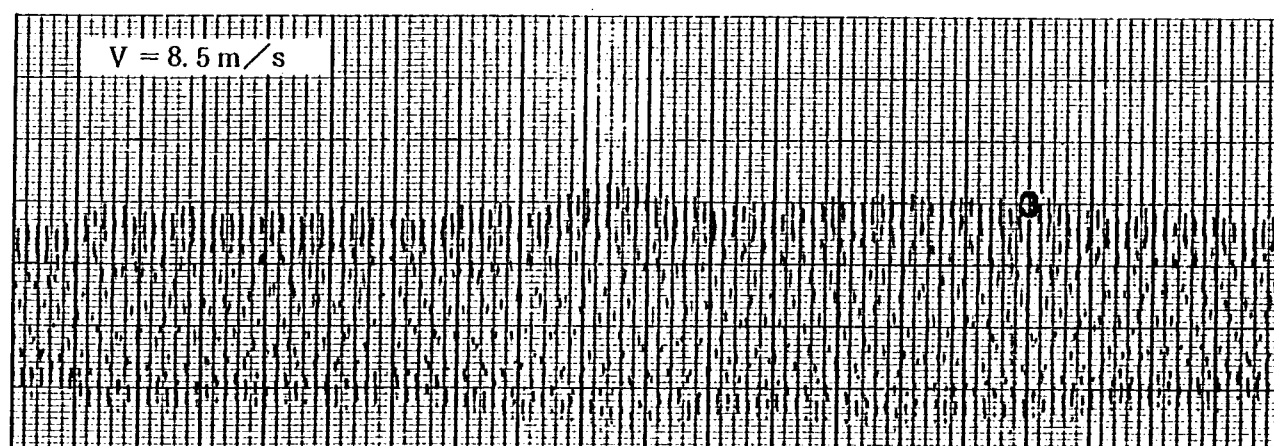
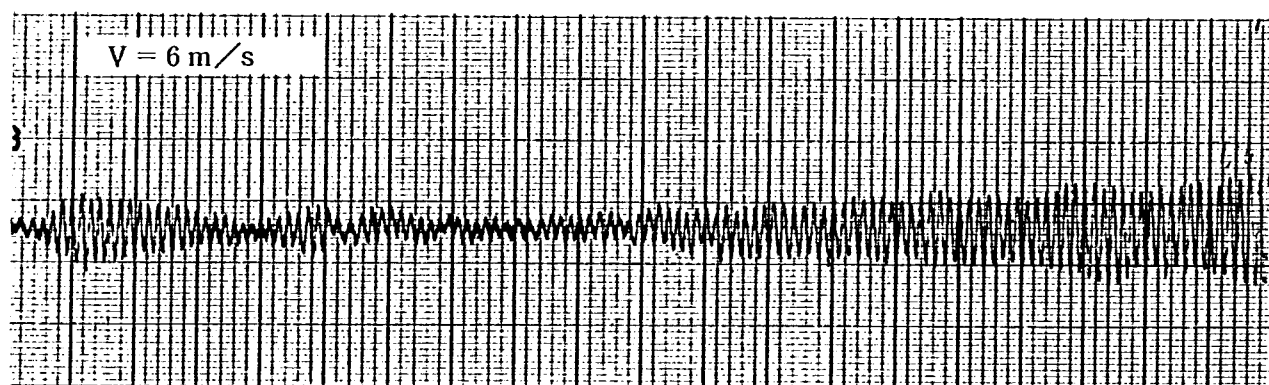
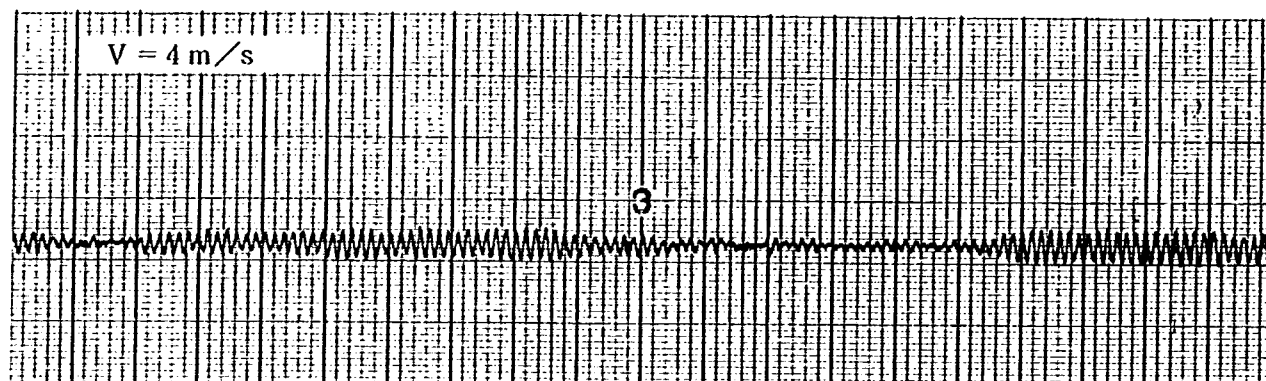
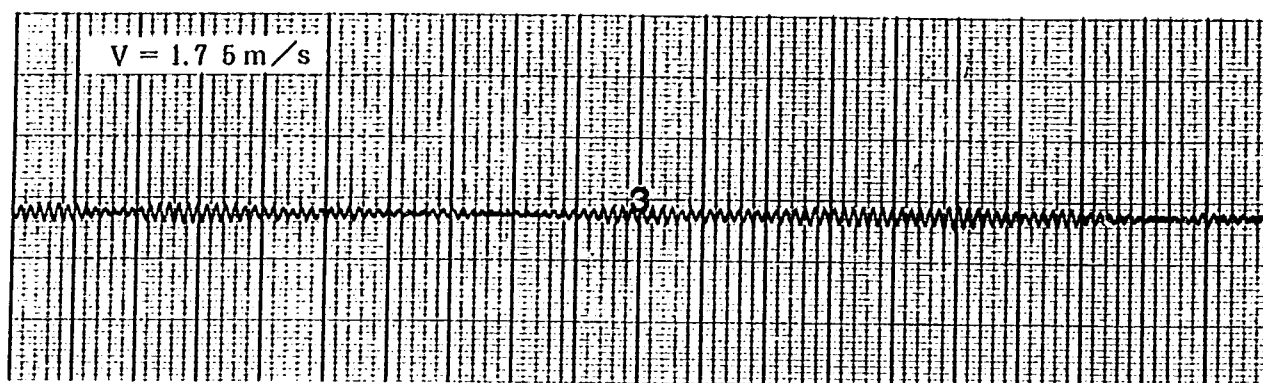


図- 3.11.2 3次元模型応答波形 (一様流・実験ケースA 4221)
(桁高比 $H/B = 0.4$, m_2 , δ_2 , $\alpha = 0^\circ$)

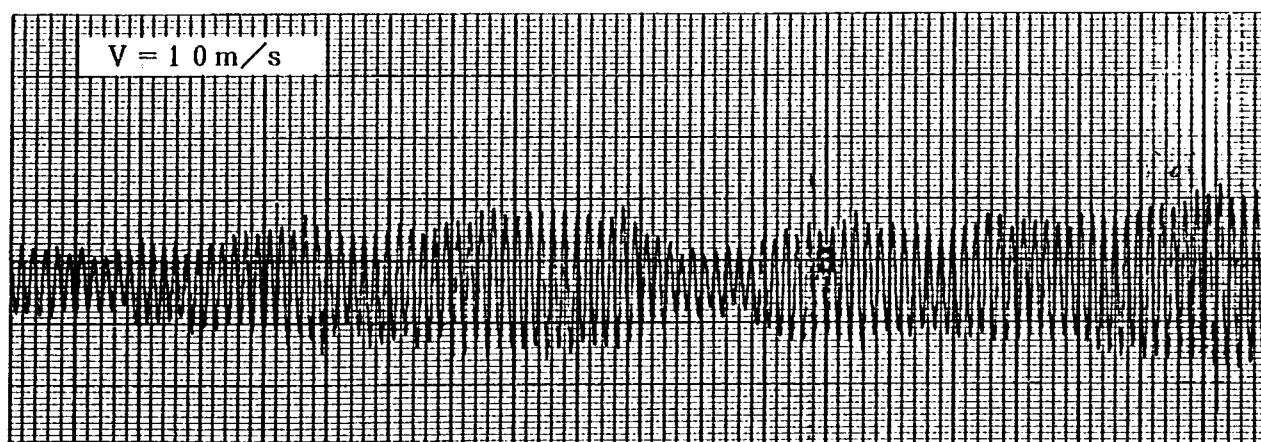
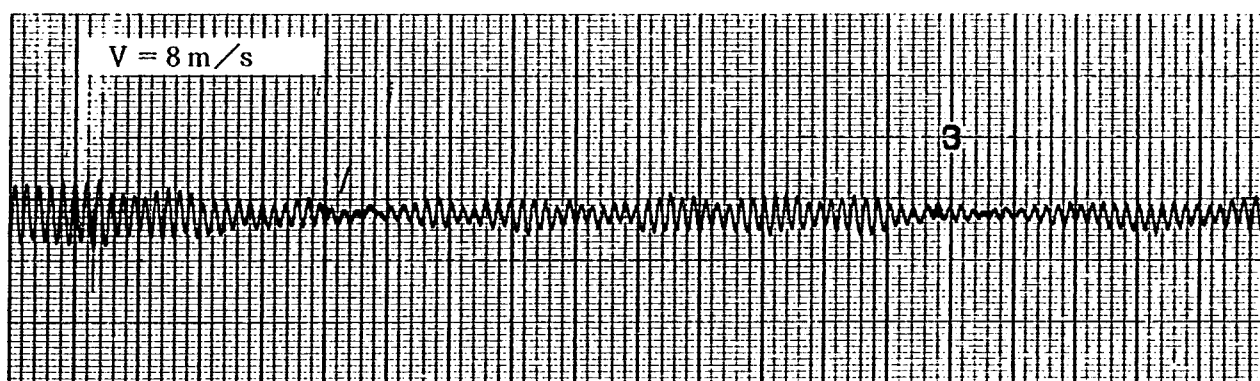
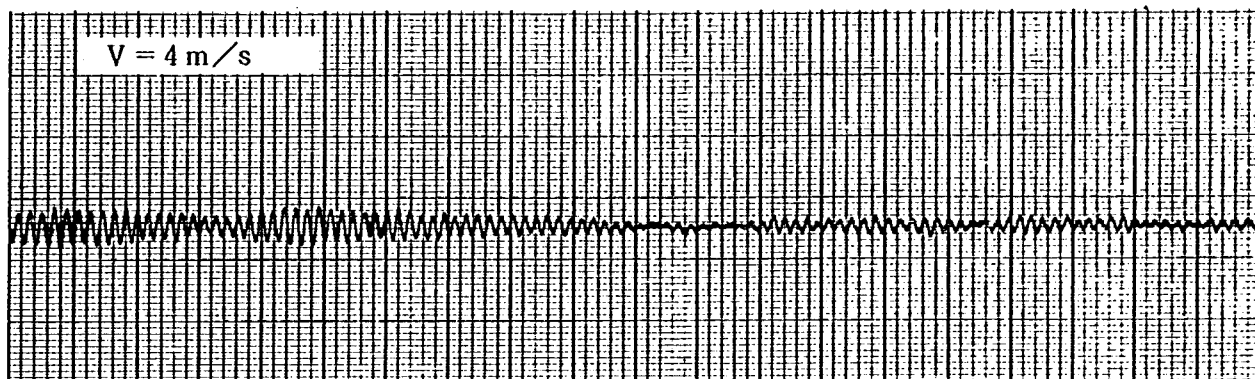
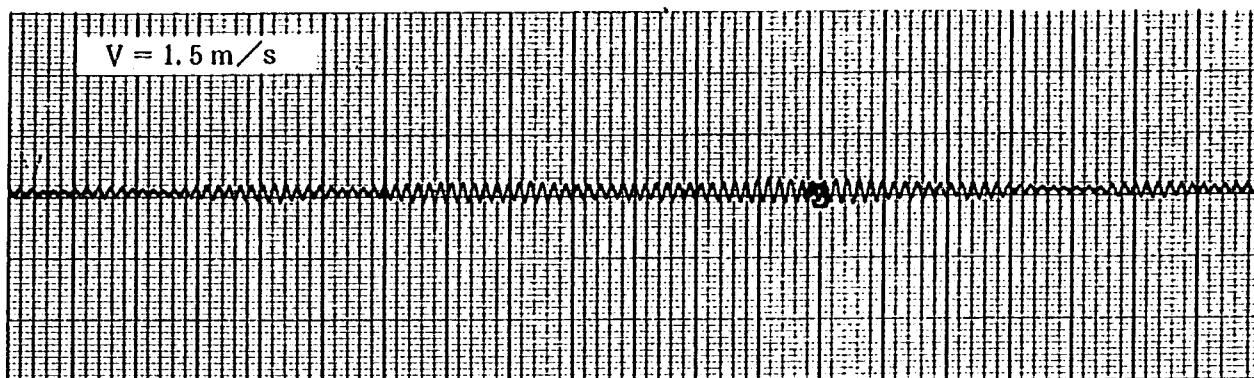


図-3.11.3 3次元模型応答波形(一様流・実験ケースA 4331)
(桁高比 $H/B = 0.4$, m_3 , δ_3 , $\alpha = 0^\circ$)

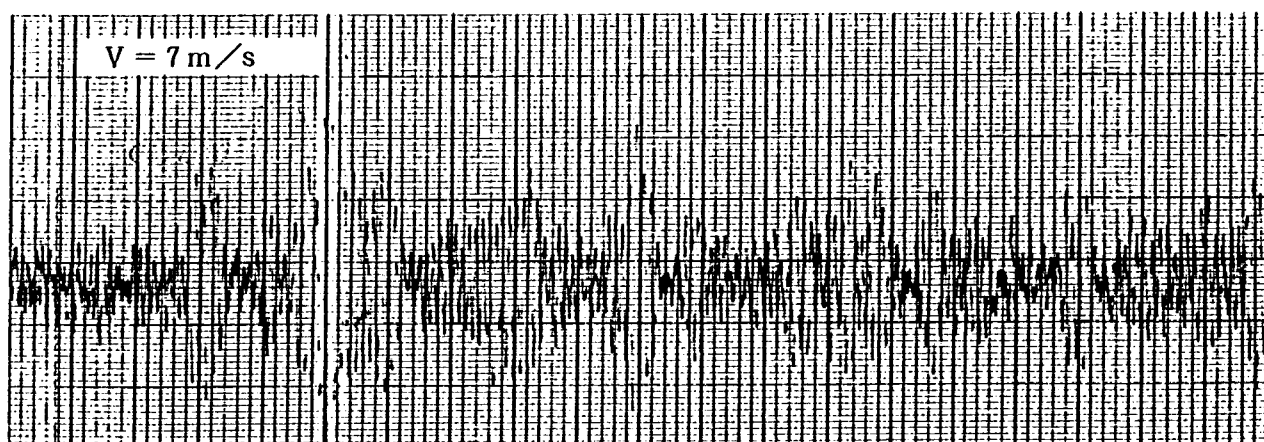
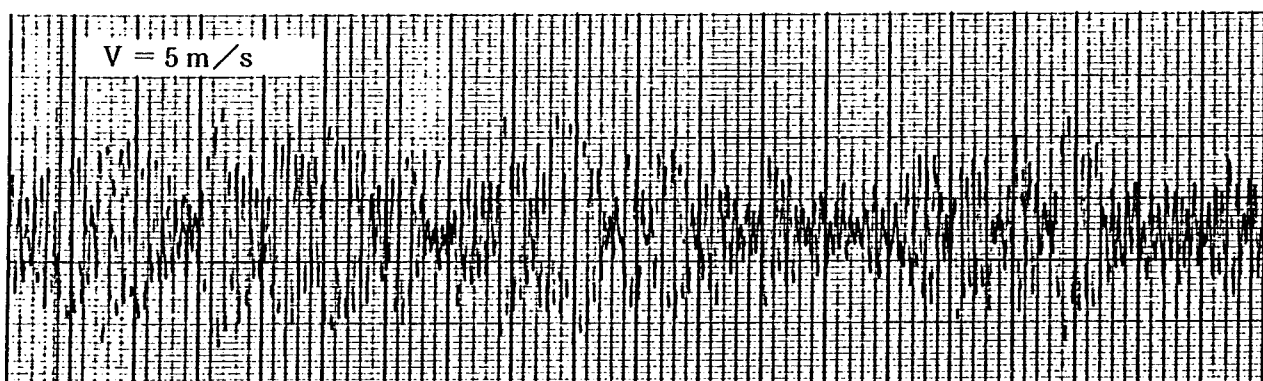
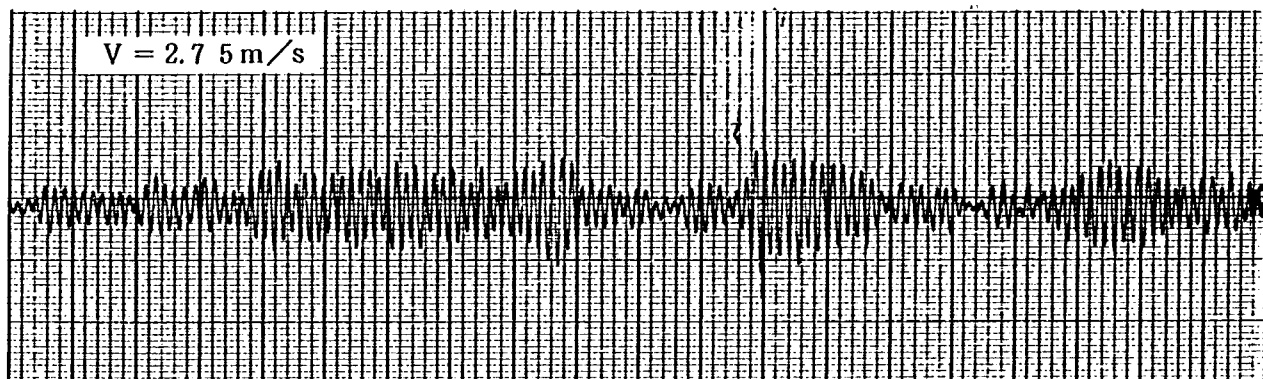


図-3.11.4 3次元模型応答波形 (乱流 I・実験ケース B1-4111)
(桁高比 $H/B = 0.4$, m_1 , δ_1 , $\alpha = 0^\circ$)

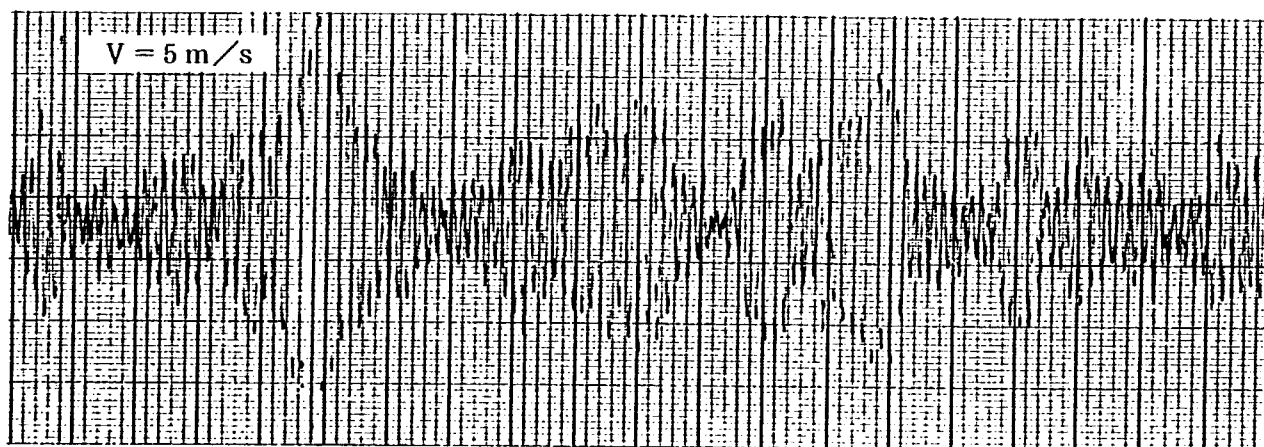
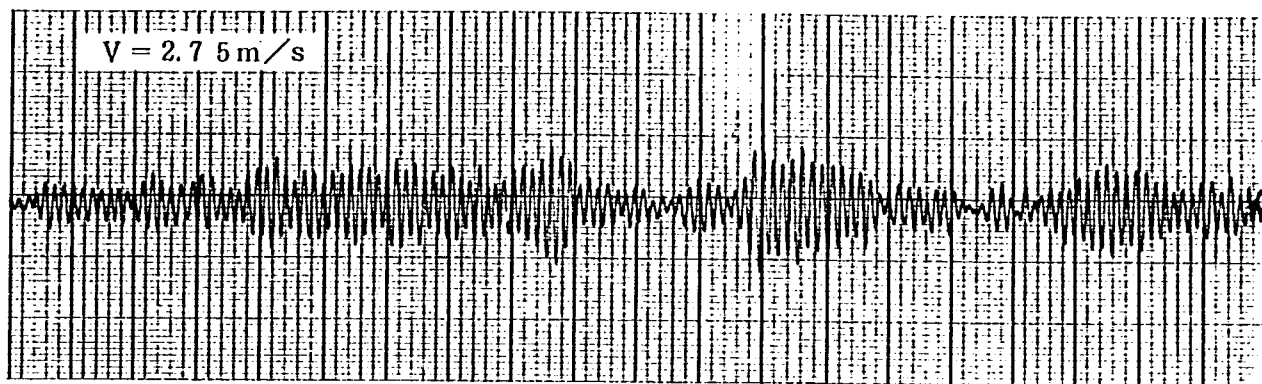
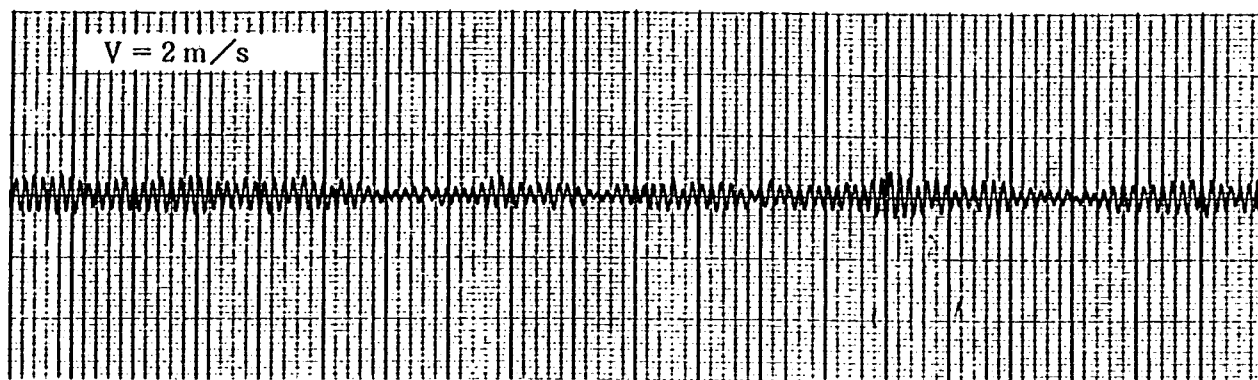


図-3.11.5 3次元模型応答波形(乱流Ⅰ・実験ケースB1-4221)
(桁高比 $H/B = 0.4$, m_2 , δ_2 , $\alpha = 0^\circ$)

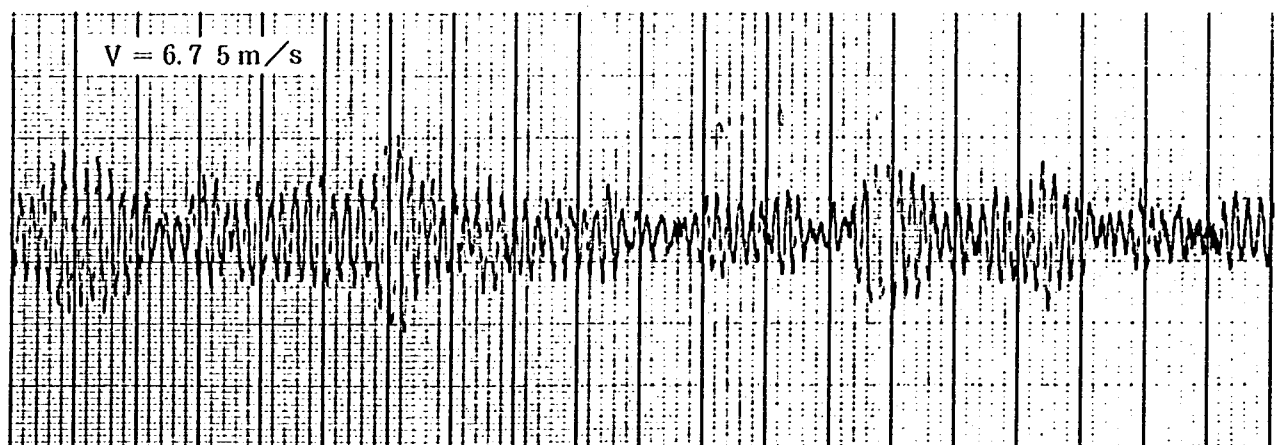
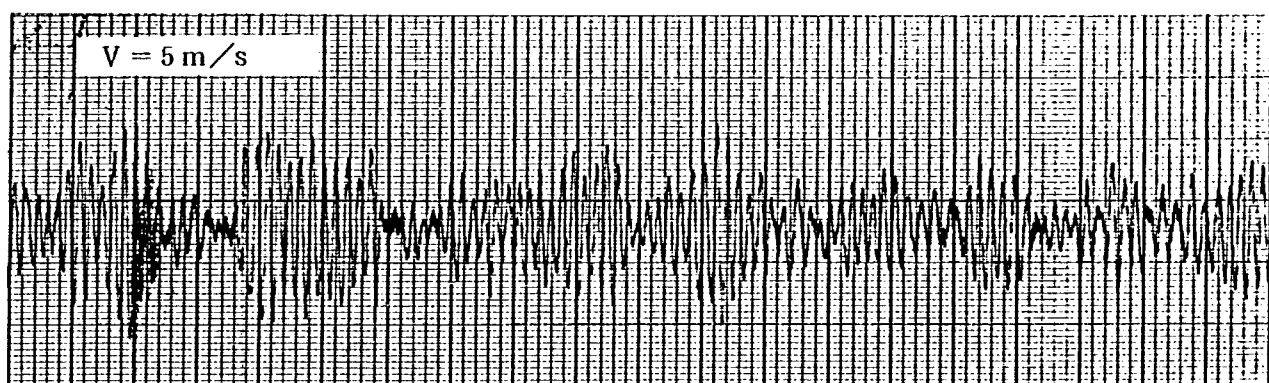
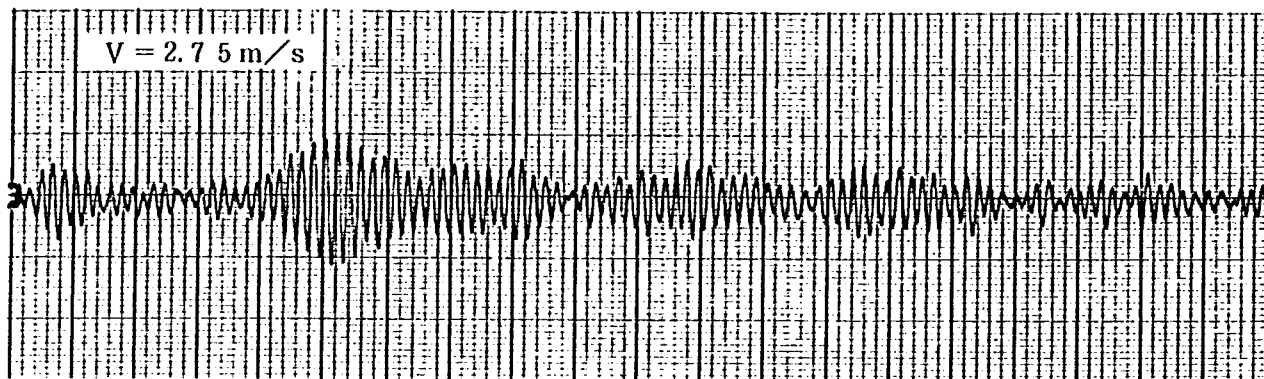
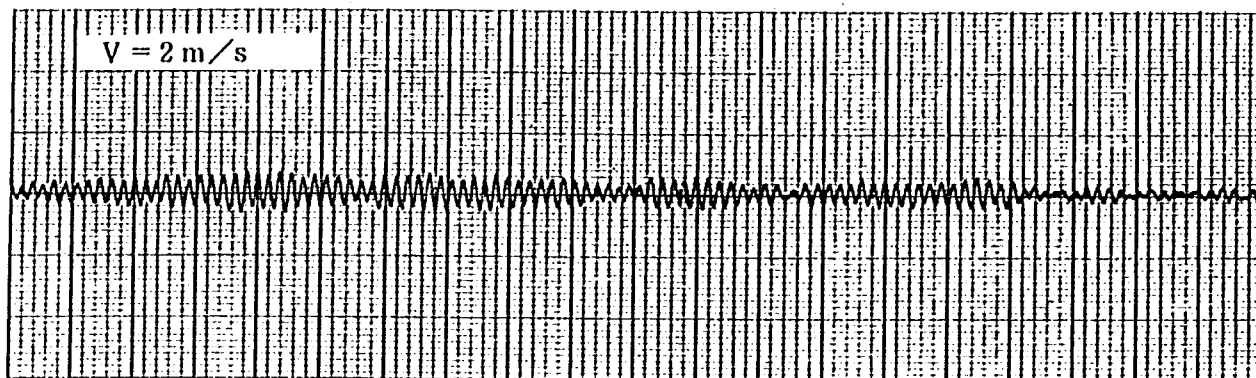


図-3.11.6, 3次元模型応答波形 (乱流 I・実験ケース B1-4331)
(桁高比 $H/B = 0.4$, m_3 , δ_3 , $\alpha = 0^\circ$)

4. 考 察

4.1 2次元模型実験結果

(1) 桁高比の影響

桁高を変えた実験結果より、渦励振の発生風速範囲と、ギャロッピングの発現風速を読みとり桁高比との関係を図-4.1に示した。

一般に桁高比 H/B が大きくなると、ギャロッピングが低風速で発生する傾向にある。迎角 α によってギャロッピングの発現風速は変わるが、この実験の範囲では $\alpha = 0^\circ, -3^\circ$ では $H/B \geq 0.4$ でギャロッピングが発生し、 $H/B \leq 0.3$ では発生しない。 $\alpha = 3^\circ$ の場合には $H/B = 0.2 \sim 0.5$ の全てのケースでギャロッピングが発生する。

一方、渦励振の発現風速は桁高比 H/B と共に高くなるという結果が得られた。従来の実験結果より渦励振の発現風速は桁高比にそれほど影響されるとも考えられず、いくつかの発現風速領域があり低い風速領域が観測されなかった虞れもある。 $H/B = 0.5$ のケースでは渦励振は発生していない。図-4.1から、渦励振の発現風速とギャロッピングの発現風速が重なってしまっているようにも見える。

図-4.2には渦励振々幅の桁高比、迎角との関係を示した。迎角によって異なるが、桁高比 $H/B = 0.3 \sim 0.4$ の場合に振幅が最大になるという結果が得られた。

(2) 迎角の影響

同じく図-4.1と4.2から迎角の影響を求めることができる。渦励振の発現風速に関しては迎角の影響はほとんどみられないが、ギャロッピングに関しては、 $+3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ の順に発現風速が低下する。一方渦励振の振幅は $+3^\circ$ と 0° が同様な傾向を示すのに対し、 -3° はやや異なった傾向となる。

4.2 3次元弾性模型実験結果

4.2.1 桁断面の基本的な対風特性

一様流中における3次元模型実験から桁断面の基本的な対風応答性を求めた。以下にその結果を示す。

(1) 渦励振特性

渦励振については、発生する風速が設計風速に比べて極端に低い風速であることから、最大振幅を与える風速と最大振幅値が評価の対象となる。実験結果により、各パラメータによる影響を調べた。

1) スクルトン数の影響

スクルトン数 ($m\delta/\rho B^2$) と渦励振の最大無次元振幅 (η/B) との関係を図-4.3に示した。迎角は 0° について検討した。図-4.3から以下の事項が明らかになった。

イ) 全体的な傾向としては、スクルトン数が増す程、渦励振の最大振幅値は下降していく。

ロ) スクルトン数が1.0以上になると、最大無次元振幅は、0.01以下になることが判る。

2) 渦励振の発現風速

桁高比 (H/B) と渦励振振幅の最大となる無次元発現風速 (V/NB) との関係を図-4.4に示し

た。迎角は 0° 、 $\pm 3^\circ$ について検討した。図-4.4 から以下の事項が明らかになった。

- イ) 渦励振の発現風速は、無次元風速で 2.0 以下の範囲で発現したもの（低風速域の発現ピーク値）と、無次元風速で 2.0 以上の範囲で発現したもの（高風速域の発現ピーク値）とに区別できる。
- ロ) 低風速域の発現風速は、桁高比が増す程、下降する傾向にある。逆に、高風速域の発現風速は、桁高比が増す程、上昇する傾向にあることが判る。

3) 2つの渦励振

低風速域の発現ピーク値をもつ渦励振と高風速域の発現ピーク値をもつ渦励振の、スクルトン数と無次元振幅との関係をそれぞれ図-4.5.1～2 に示した。同図から以下の事項が明らかになった。

- イ) 低風速域の発現ピーク値の振幅は、桁高比が増す程、小さくなる傾向にある。
- ロ) 高風速域の発現ピーク値の振幅は、スクルトン数が 2.0 以下の範囲において、桁高比が増す程、小さくなる傾向にある。スクルトン数が 2.0 以上の範囲においては逆に、桁高比が増す程、大きくなる傾向にある。

4) 迎角の影響

図-4.6.1～2 に低風速領域、高風速領域別に迎角の渦励振振幅をとりまとめた。

- イ) 全体的な傾向としては、スクルトン数が 2.0 以上になると、迎角の影響はほとんど認められなくなることが判る。
- ロ) 低風速領域の渦励振最大振幅は迎角が正になると振幅は増加し、迎角が負になると振幅は減少する傾向が確認された。
- ハ) 高風速領域の渦励振最大振幅は、桁高比が 0.30 は、低風速領域の渦励振最大振幅と同様の傾向を示すが、桁高比が 0.35、0.4、0.5 は逆に迎角が正になると振幅は減少し、迎角が負になると振幅は増加することが認められた。

(2) ギャロッピング、バフエティングの特性

ギャロッピングについては、発振風速と発振振幅の増加の程度が問題になるが、本調査のギャロッピングの発振風速は、フラッターの評価が捩れ角 1° を基準にしているのに準じて、模型の捩れ角 1° に対応するたわみ振幅（無次元振幅で 0.0087）を発振風速とした。

バフエティングについても、振幅の大きさとその増加の程度が評価の対象となるが、これは乱流の影響を考慮し振幅の大きさを判断することが不可欠であり、後の 4.2.2 (2) で詳細に検討する。

実験結果による、各パラメータの影響をとりまとめると次のとおりである。

1) スクルトン数の影響

スクルトン数と応答無次元振幅との関係を図-4.7.1～2 に示した。図-4.7.1 は無次元風速 4.0 の場合であり、図-4.7.2 は無次元風速 8.0 の場合である。迎角は 0° について検討した。これらの図から以下の事項が明らかになった。

- イ) 全体的な傾向としては、スクルトン数が増す程、また、桁高比が小さくなるに従い、発振振幅は下降していく。

ロ) 無次元風速 4.0 において、桁高比 0.25～0.4 の場合、発散振動の傾向はほとんど認められない。
桁高比 0.5 の場合、発振振幅は急激に増加する傾向が認められ、スクルトン数 3.0 以下ではギャロッピングの発振が予想される。

ハ) 無次元風速 8.0 において、桁高比 0.5 の場合スクルトン数 4.0 以下で、桁高比 0.4～0.3 の場合スクルトン数 2.5 以下で、ギャロッピングの発振が予想される。

2) ギャロッピング発現の有無

調査した、全データについて、ギャロッピング発現風速を以下のとおり予想した。

ギャロッピング発現風速 (V/NB) とスクルトン数との関係を図-4.8 に示した。また図-4.9 に図-4.8 で示した実験結果を迎角毎に模式的に示した。迎角は 0° , $\pm 3^\circ$ について検討した。同図から以下の事項が予測される。

イ) 迎角 0° の場合

- ・ 桁高比が 0.25 の場合は、ギャロッピングは発現しない。
- ・ 桁高比が 0.25～0.3 の場合は、スクルトン数が 2.5 以上およびスクルトン数が 2.5 以下、無次元風速 6.5 以下でギャロッピングは発現しない。
- ・ 桁高比が 0.3～0.4 の場合は、スクルトン数が 2.5 以下、無次元風速 5.5 以下でギャロッピングは発現しない。スクルトン数が 2.5 から 6.0 では、ギャロッピングの発現しない無次元風速は、5.5 から 10.0 へと移行していく。
- ・ 桁高比が 0.4～0.5 の場合は、スクルトン数が 2.5 以下、無次元風速 3.5 以下でギャロッピングは発現しない。スクルトン数が 2.5 から 6.0 では、ギャロッピングの発現しない無次元風速は、3.5 から 10.0 へと移行していく。

ロ) 迎角 $+3^\circ$ の場合

- ・ 桁高比が 0.25～0.4 の場合は、スクルトン数が 2.5 以下、無次元風速 3.5 以下でギャロッピングは発現しない。スクルトン数が 2.5 から 6.0 では、ギャロッピングの発現しない無次元風速は、3.5 から 10.0 へと移行していく。
- ・ 桁高比が 0.5 の場合は、無次元風速 3.5 以下でギャロッピングは発現しない。

ハ) 迎角 -3° の場合

- ・ 桁高比が 0.25～0.4 の場合は、ギャロッピングは発現しない。
- ・ 桁高比が 0.5 の場合は、スクルトン数が 1.5 以下、無次元風速 6.0 以下でギャロッピングは発現しない。

4.2.2 乱流中における対風特性

乱流中における 3 次元模型実験から桁断面の対風応答特性を求めた。

(1) 渦励振特性

乱流中における、渦励振の最大振幅と発現風速について検討を行なった。乱流中の実験結果から、各パラメータに与える影響をまとめると次のとおりである。

1) スクルトン数及び桁高比への影響

スクルトン数と無次元振幅との関係を図-4.10に示した。迎角は 0° について検討した。図から以下の事項が明らかになった。

- イ) スクルトン数が2.0以上になると、一樣流中でみられた渦励振は、乱流Ⅰ（乱れ強さ20%）、乱流Ⅱ（乱れ強さ11%）、乱流Ⅲ（乱れ強さ7%）の全てのケースで、完全に抑制された。また、スクルトン数が1.31の場合、渦励振の発現は乱れの小さい乱流Ⅲについてのみ認められ、乱流Ⅰ、Ⅱについては発現は完全に抑制された。このことから、スクルトン数が2.0以上になると、スクルトン数の増大による渦励振応答値の低減率は、乱流中の方が一樣流中よりも大きくなる傾向があることが判る。また、全体的な傾向として、この傾向は、乱れ強さが増すと共に、顕著になることが判る。
- ロ) 桁高比が0.4、0.5の場合、一樣流中では渦励振が発現したが、乱流Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの全てのケースで、渦励振の発現は完全に抑制された。また、桁高比が0.25、0.3、0.35の場合で、一樣流中の発現値がわずかであるケースは、渦励振が完全に抑制されることが認められた。この傾向は、乱れ強さが増すと共に、顕著になることが判る。

2) 渦励振の発現風速

桁高比と無次元発現風速との関係を図-4.11に示した。迎角は 0° について検討した。同図から以下の事項が明らかになった。

- イ) 全体的な傾向として、乱流中の方が一樣流中に比べ、発現風速は若干高くなる傾向にある。
- ロ) イ)の傾向は、乱流の乱れ強さによる一定の傾向は示さない。

(2) バフティングの特性

乱流中での、高風速の応答振幅を概ねバフティングと想定し、振幅の大きさとその増加の程度について図-4.12にとりまとめた。

実験結果による、各パラメータの影響をとりまとめると次のとおりである。

1) スクルトン数及び桁高比への影響

- イ) 全体的な傾向としては、スクルトン数が増す程、応答振幅は下降していく。この傾向は、スクルトン数2.5以上から急激に現れることが予想される。
- ロ) また、桁高比が小さくなるに従い、振幅は小さくなることが判る。乱れ強さが比較的小さい乱流Ⅲの場合は、桁高比0.25、0.3、0.35の応答振幅はほぼ同じ傾向を示すが、乱れ強さが大きくなるに従い、桁高比0.25、0.3、0.35の応答振幅は、桁高比0.4、0.5の応答振幅へと近づいていく傾向が予想される。

2) 乱れ強さによる応答振幅の影響

- イ) 全体的な傾向としては、乱れ強さが増す程、応答振幅は大きくなる傾向がある。
- ロ) イ)の傾向を示さないケースを下記にまとめた。これらのケースは、振幅の様子から、ギャロッピングと予想される。

(乱 流)	(桁高比)	(スクルトン数)
乱流Ⅲ	0.4	2.0 以下
〃	0.5	3.0 以下

ハ) ロ) の場合に、適合するケースについて、ギャロッピング発現風速とスクルトン数の関係を図-4.13に示した。図-4.14に乱流中のギャロッピングの発現風速を模式的に示した。

4.2.3 バフティング振幅の推定

乱流実験結果から、実橋におけるバフティング応答振幅の大きさを推定する推定表の作成を行う。いま、バフティングの振幅を次式で定義する。

$$(\eta/B) = C (\bar{V}/NB)^2 \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに、 η/B ; 無次元振幅

$\bar{V}/NB$; 無次元風速

実験結果を基に、式(4.1)から求められたC値を表-4.1に示す。図-4.15.1~3は、乱流Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの桁高比によるC値を示したもので、縦軸はC値($(\eta/B)/(\bar{V}/NB)^2$)、横軸はスクルトン数である。

以上の、フローチャートを図-4.16に示した。

4.3 2次元実験と3次元実験の比較

桁高比が0.3, 0.4, 0.5の実験ケースについて一様気流中における2次元模型実験と3次元模型実験の比較を行なった。ただし、両実験は独立に行なわれたもので、高欄、地覆、耳桁などの形状は同一ではなく、 Sc 数も異なっている。

図-4.17.1~3に迎角を 0° , $\pm 3^\circ$ に変えた場合の両者の応答を対比して示した。

ギャロッピングの発現性状は $H/B = 0.4, 0.5$ のケースでは同一の傾向を示し、特に $\alpha = 0^\circ, 3^\circ$ では2次元模型実験の発現風速がやや高めになっているがほぼ一致していると見てよい。一方、 $H/B = 0.3$ のケースは、 $\alpha = 3^\circ$ では同一の傾向を示したが、 $\alpha = 0^\circ, -3^\circ$ では3次元実験で発現、2次元実験で発現せずと異なった結果となった。

また、渦励振の発生に関しては、 $H/B = 0.4$ の $\alpha = 3^\circ$ および $H/B = 0.5$ の $\alpha = 0^\circ, -3^\circ$ で3次元実験では渦励振が発現するが、2次元実験では発現しないという結果となっている。一方両実験で発生した時の渦励振最大振幅発現風速は $H/B = 0.3$ ではほぼ一致しているが、 $H/B = 0.4$ ではズレが生じている。渦励振振幅は $H/B = 0.4$ で $\alpha = -3^\circ$ のケースを除き、3次元実験の方が大きめの結果となっている。

今回の比較は実験条件が必ずしも同一となっていないので厳密な検討はできない。2次元実験と3次元実験の比較は重要な課題であり、厳密な比較ができるように今後検討していかなければならない。

表-4.1 パフエティング振幅推定のためのC値

乱流 (I)

($\times 10^{-4}$)

Sc 数	重量 (kgf/m)	構成減衰 (δ)	桁高比 (H/B)				
			0.25	0.30	0.35	0.40	0.50
0.65	0.400	0.02	8.4	8.9	8.2	10.1	11.8
1.31	"	0.04	8.3	9.1	8.5	10.8	11.8
2.61	0.800	"	4.5	5.3	4.7	5.5	6.9
3.92	"	0.06	4.2	4.8	4.4	6.1	6.0
5.88	1.200	"	3.1	2.8	3.5	3.8	4.2

乱流 (II)

($\times 10^{-4}$)

Sc 数	重量 (kgf/m)	構成減衰 (δ)	桁高比 (H/B)				
			0.25	0.30	0.35	0.40	0.50
0.65	0.400	0.02	4.2	5.2	5.5	6.8	8.2
1.31	"	0.04	3.9	4.7	5.4	6.0	7.3
2.61	0.800	"	2.3	2.6	3.1	3.5	4.2
3.92	"	0.06	2.2	3.0	3.0	3.5	3.9
5.88	1.200	"	1.8	2.0	2.1	2.4	2.6

乱流 (III)

($\times 10^{-4}$)

Sc 数	重量 (kgf/m)	構造減衰 (δ)	桁高比 (H/B)				
			0.25	0.30	0.35	0.40	0.50
0.65	0.400	0.02	3.3	4.1	4.6	—	—
1.31	"	0.04	3.3	3.9	4.0	—	—
2.61	0.800	"	2.2	2.0	2.2	3.3	—
3.92	"	0.06	2.0	1.9	2.5	3.1	3.7
5.88	1.200	"	1.2	1.5	1.7	2.1	2.1

(注) $(\eta/B) = C (V/NB)^2$

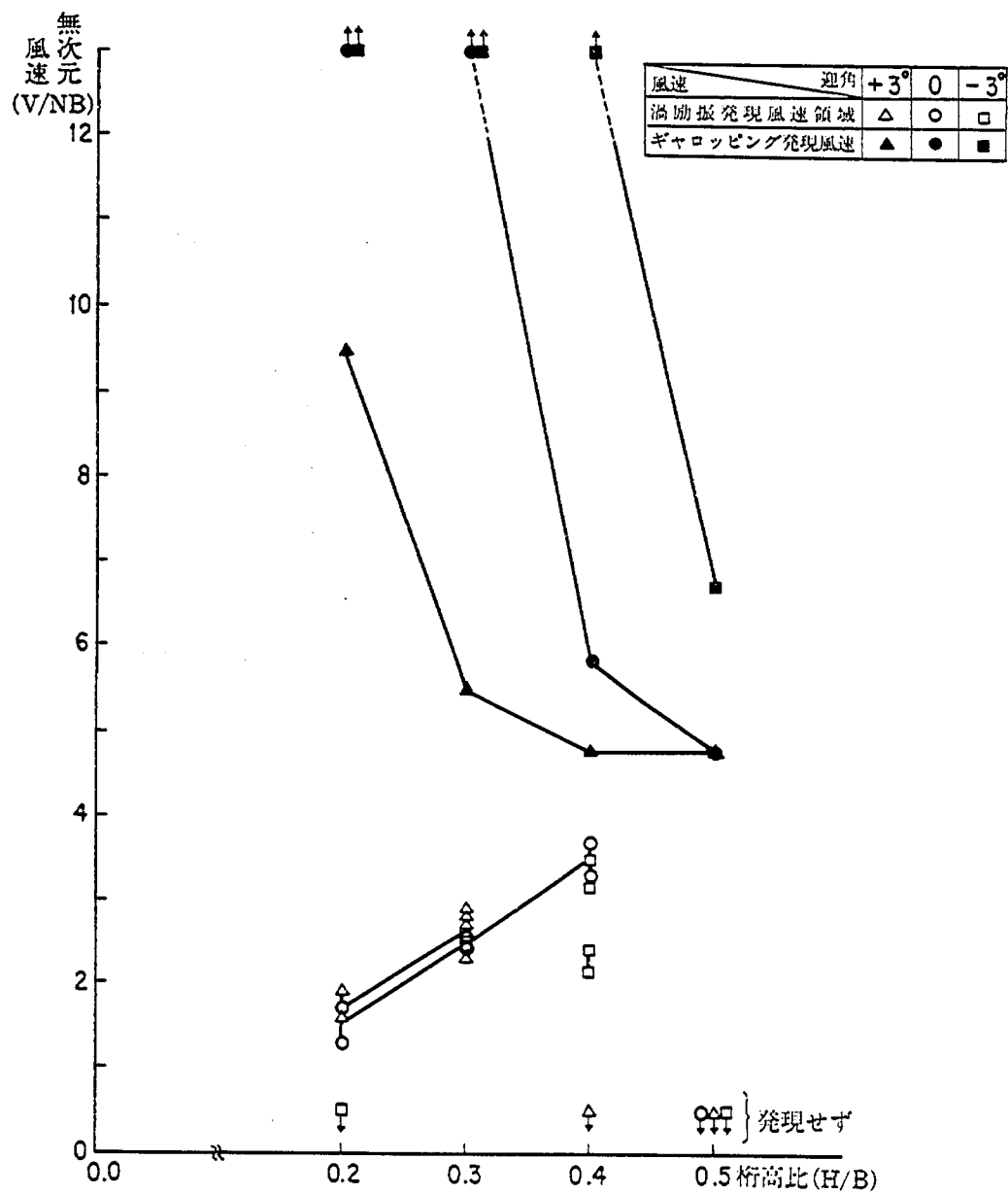


図-4.1 桁高比と渦励振・ギャロッピングの発現風速の関係 (2次元実験)

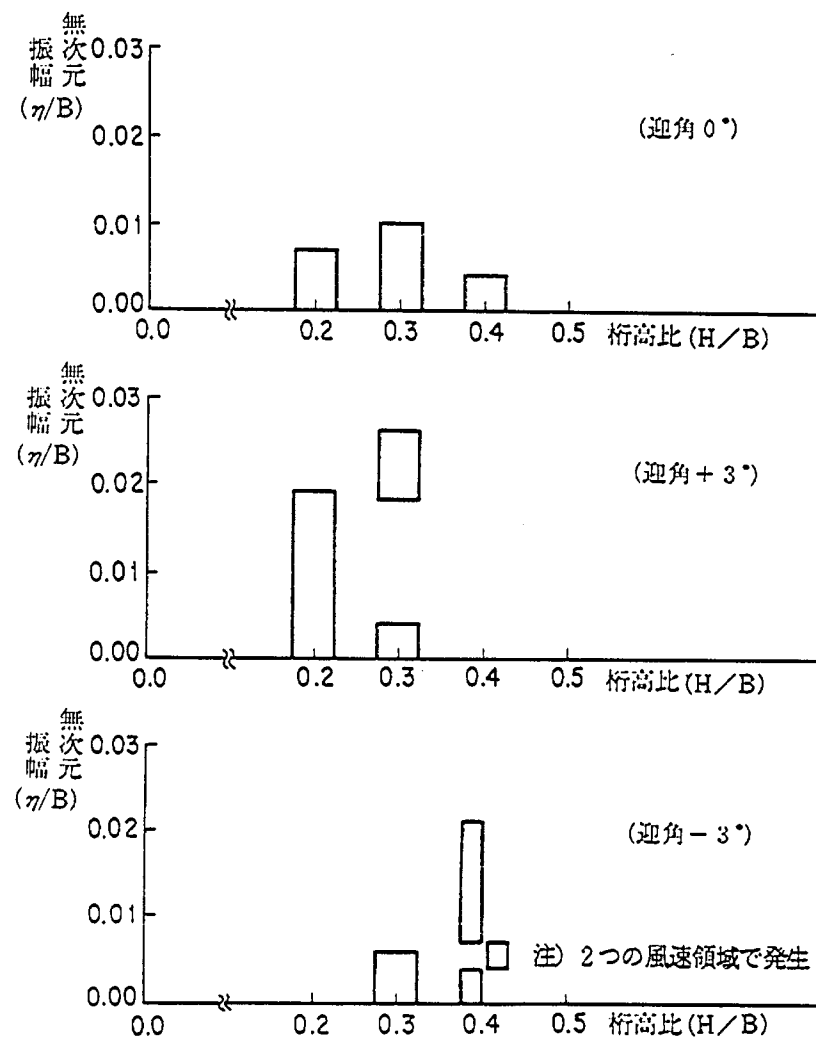


図-4.2 桁高比と渦励振振幅の関係 (2次元実験)

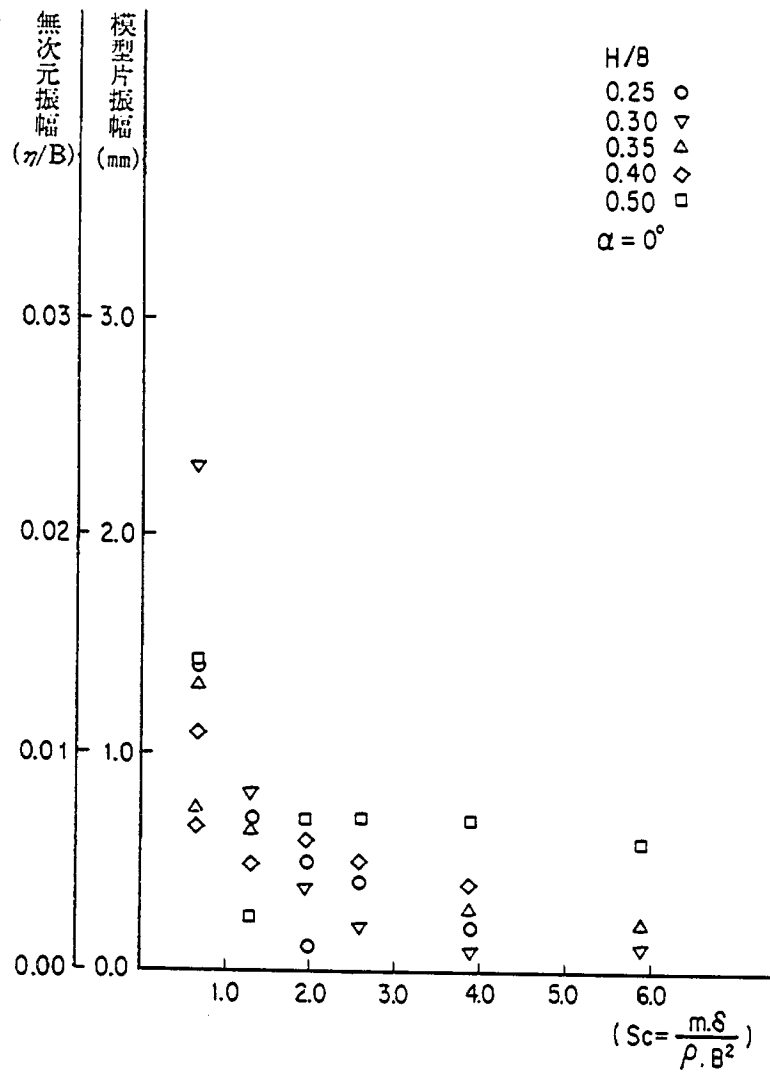


図-4.3 渦励振の最大振幅 (3次元実験, 一樣流)

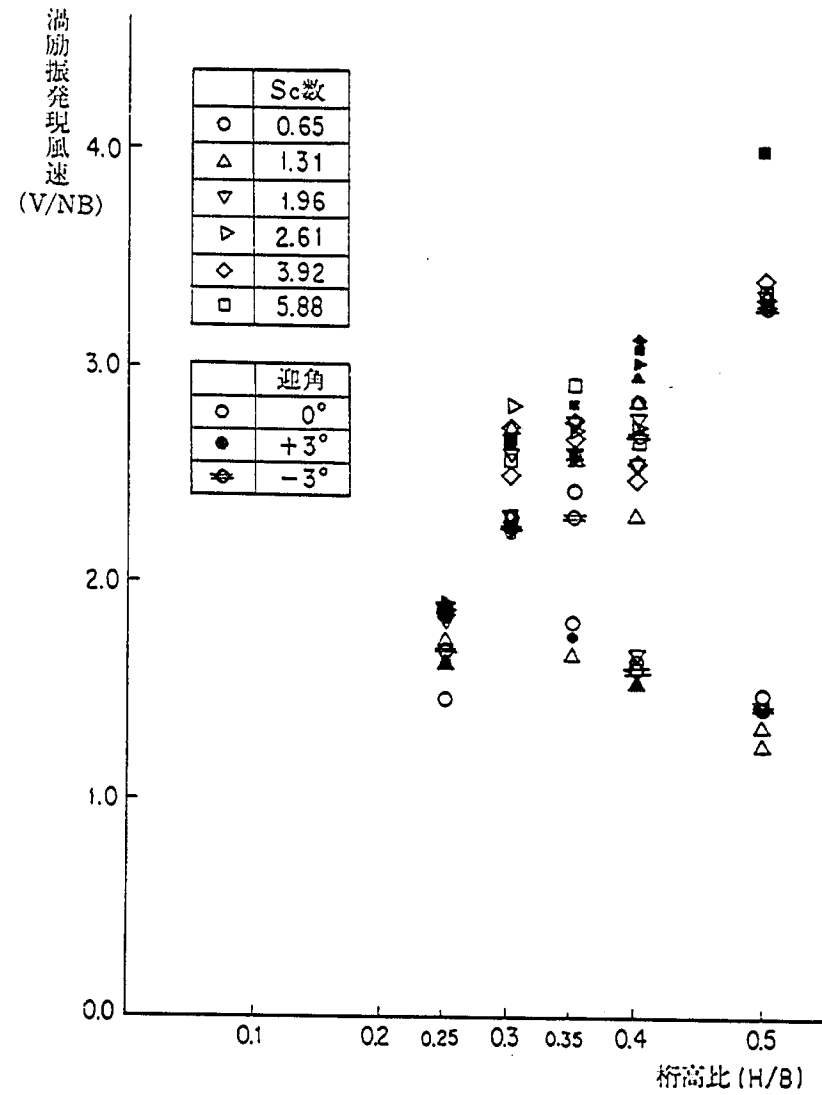
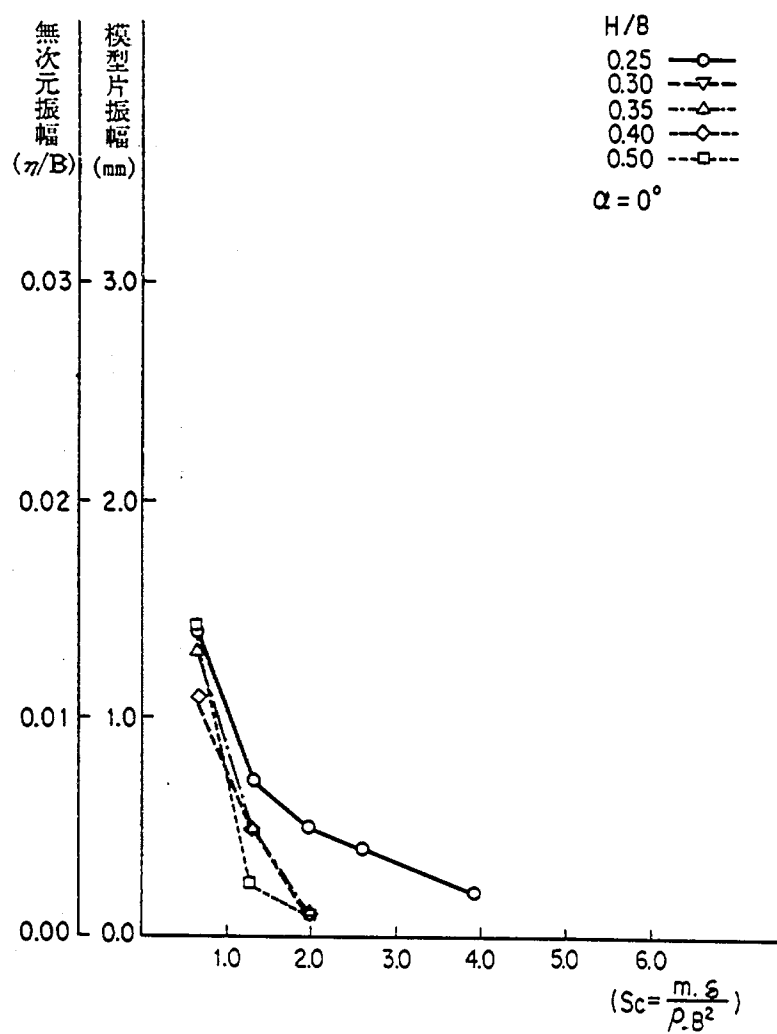
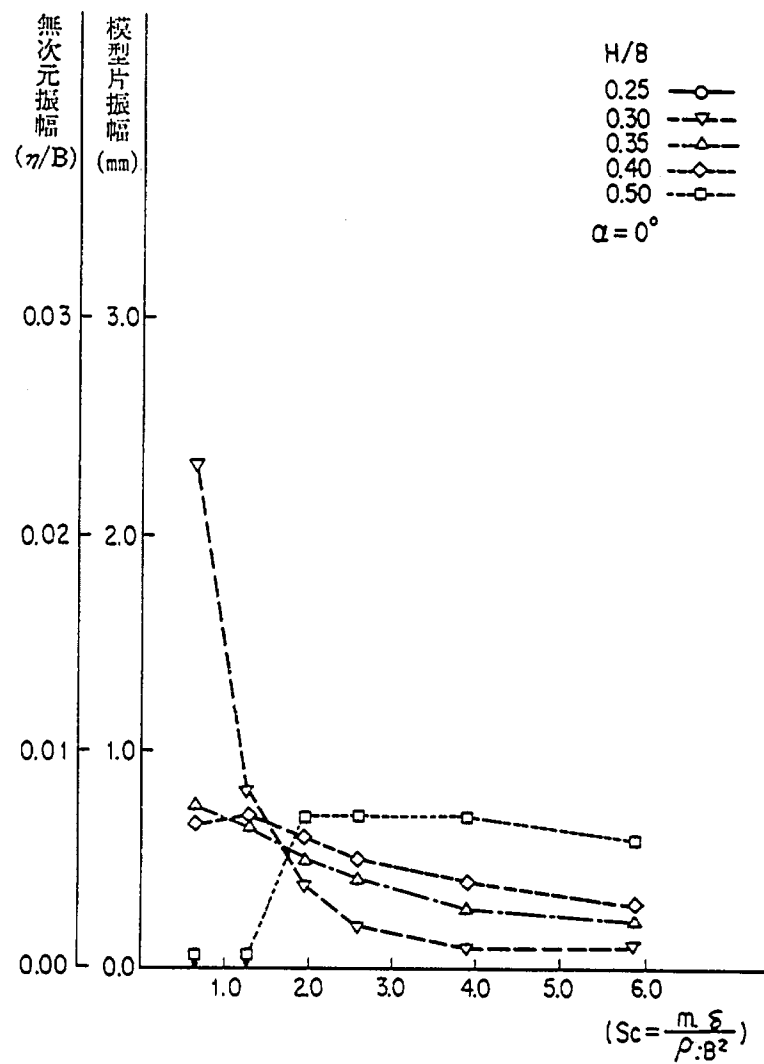


図-4.4 渦励振発現風速 (3次元実験, 一樣流)



図－ 4. 5. 1 低風速域の渦励振の最大振幅（3次元実験）



図－ 4. 5. 2 高風速域の渦励振の最大振幅（3次元実験）

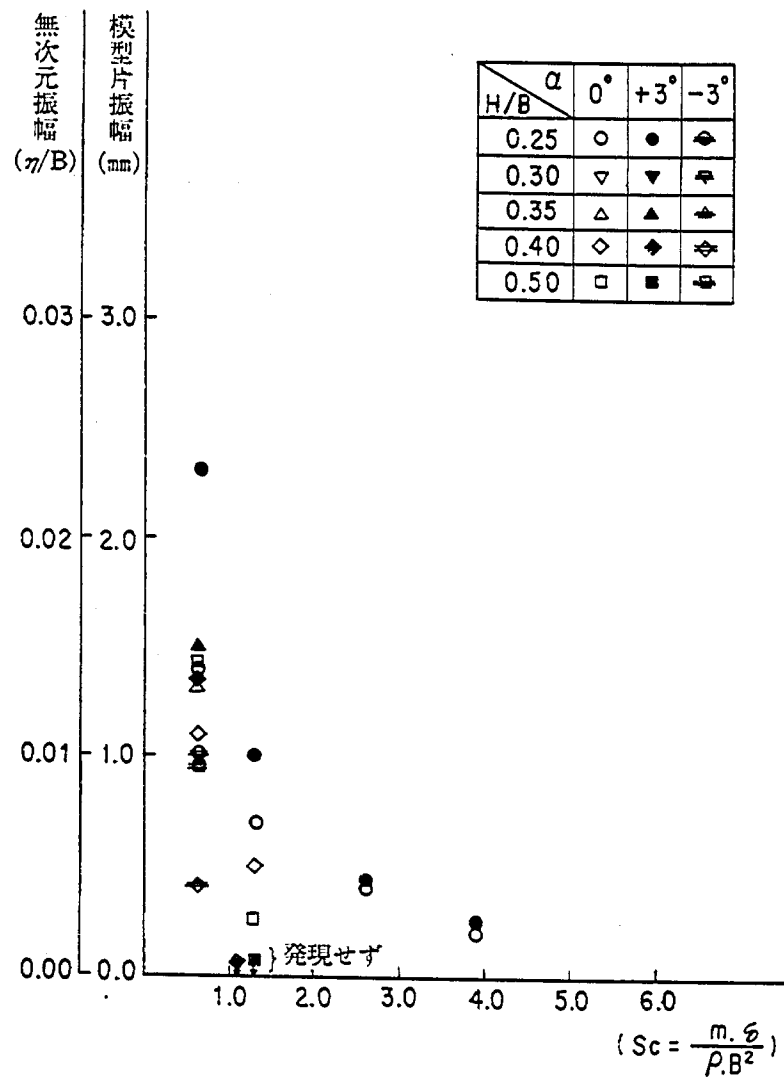


図-4.6.1 低風速域の渦励振振幅

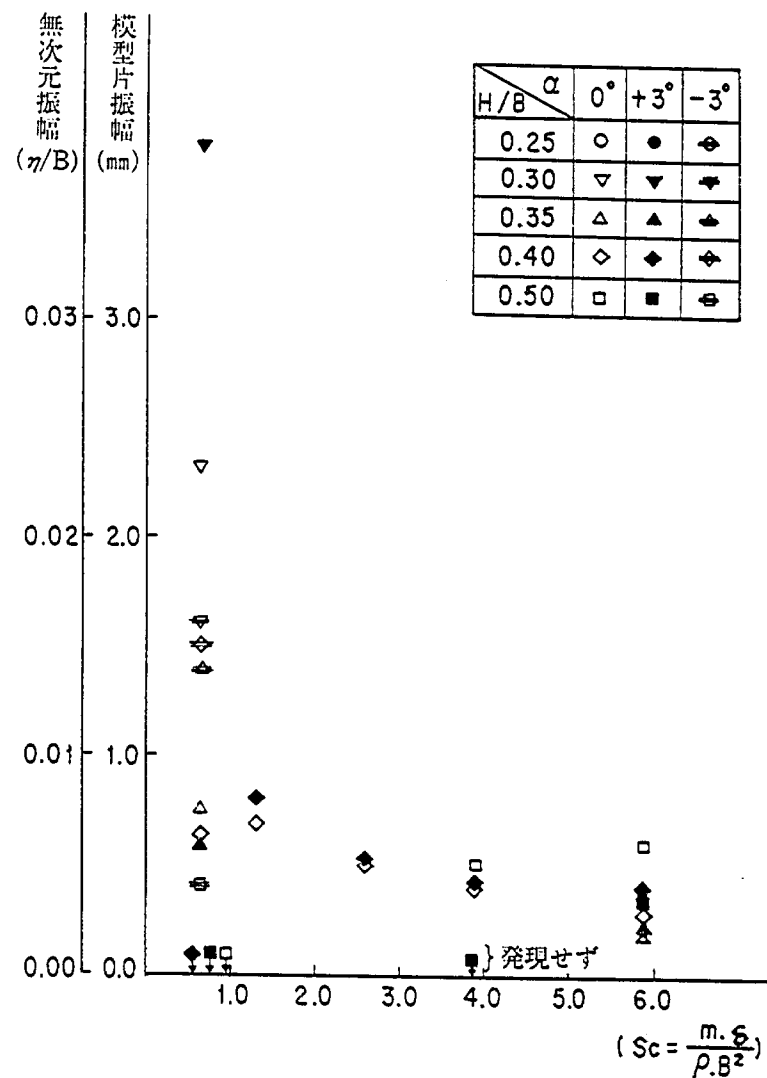


図-4.6.2 高風速域の渦励振振幅

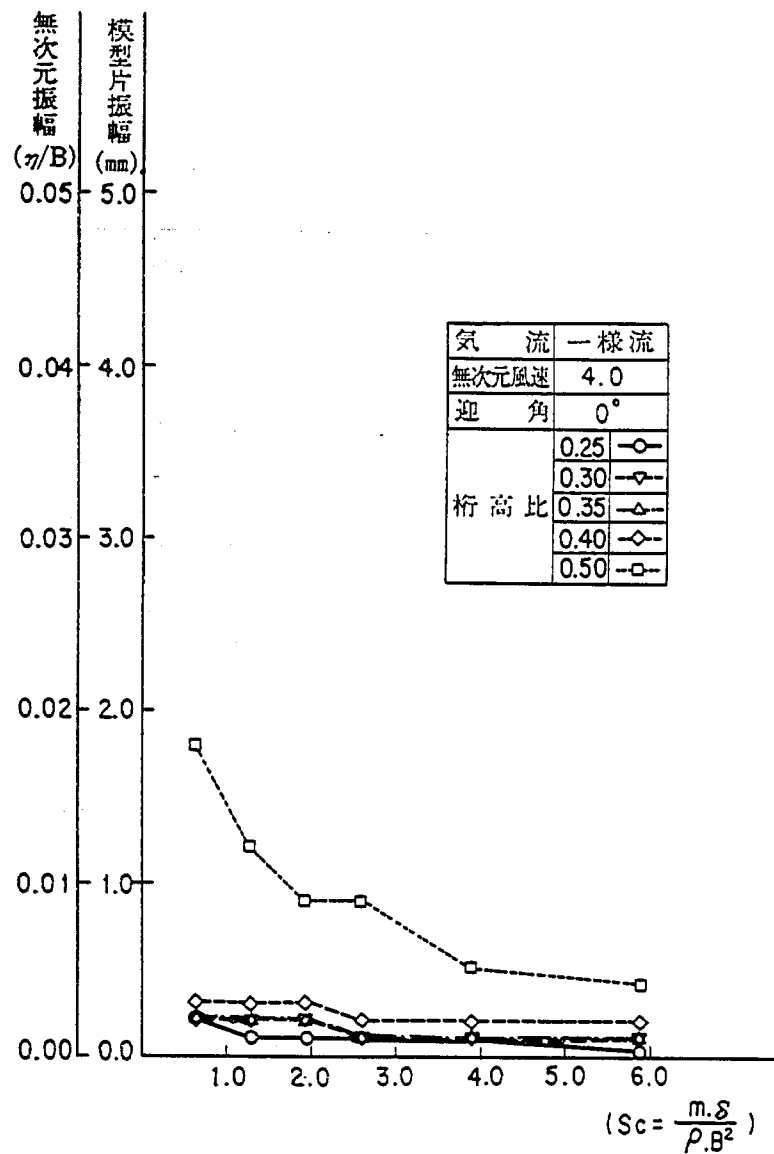


図-4.7.1 ギャロッピングまたはバフェティング応答
(3次元実験, $V_r = 4$)

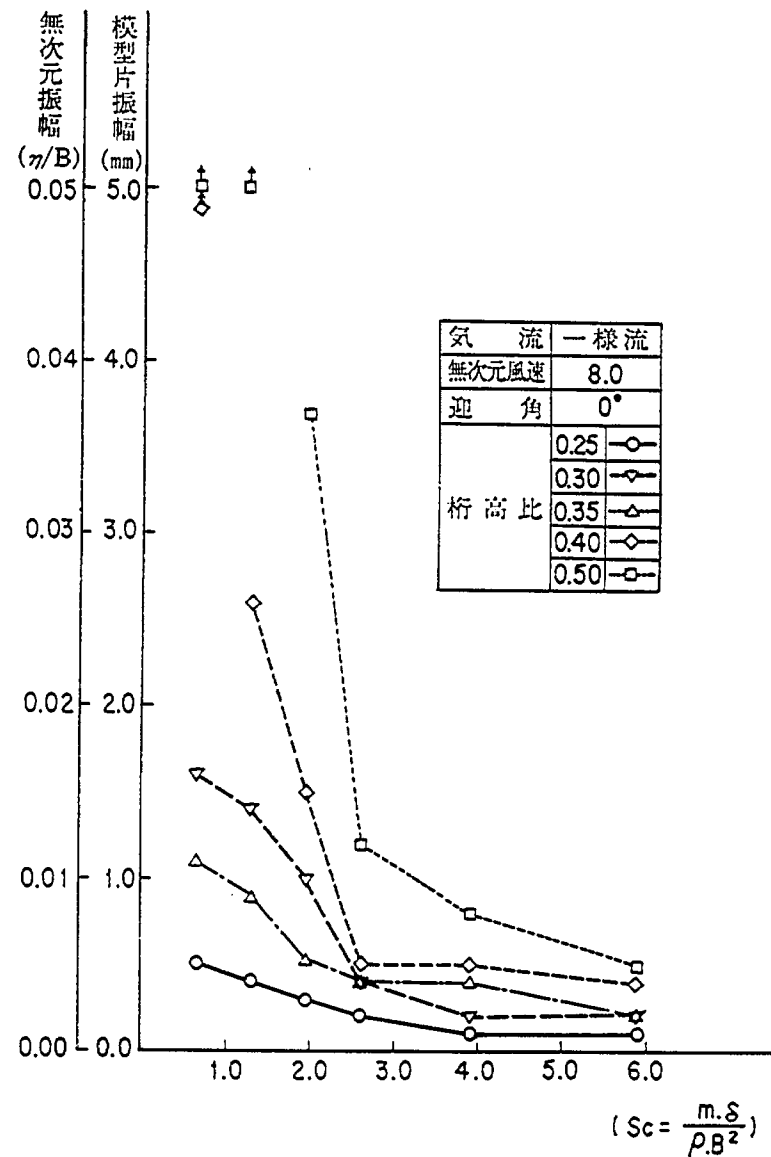


図-4.7.2 ギャロッピングまたはバフェティング応答
(3次元実験, $V_r = 8$)

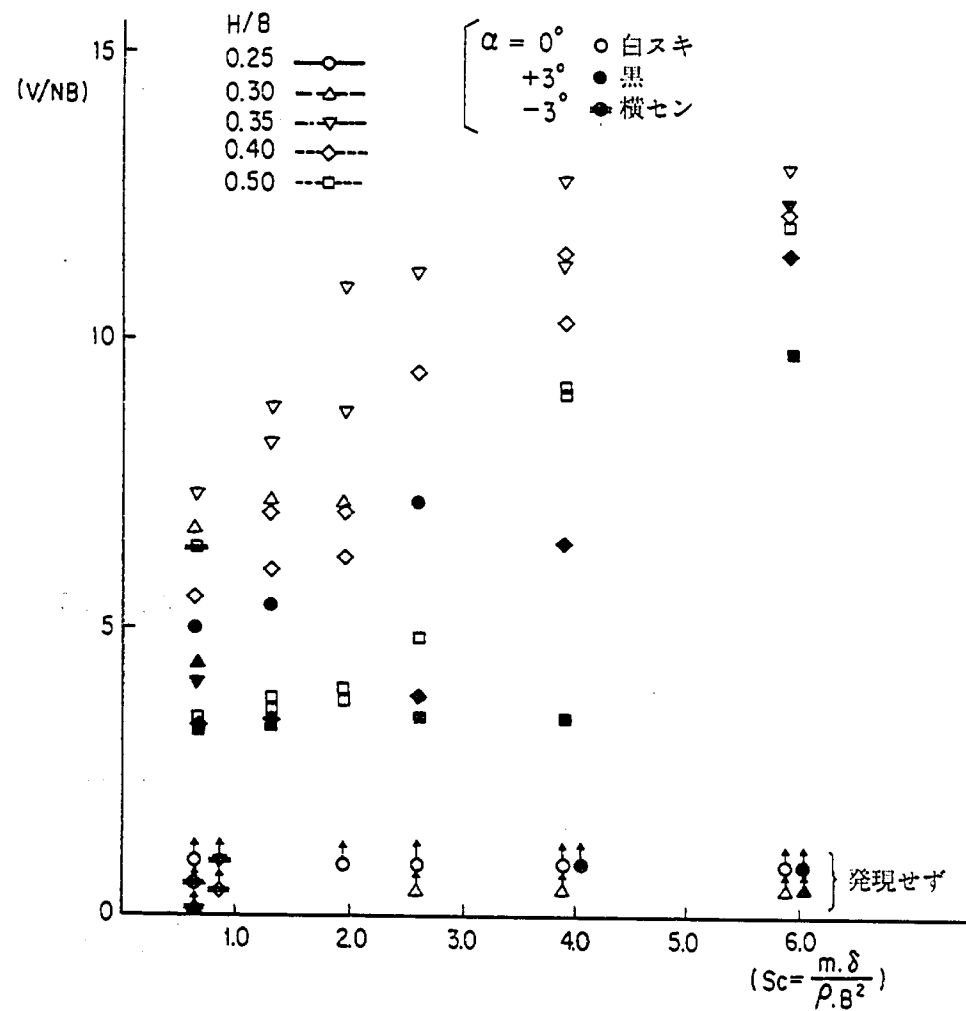


図-4.8 ギャロッピング発現風速

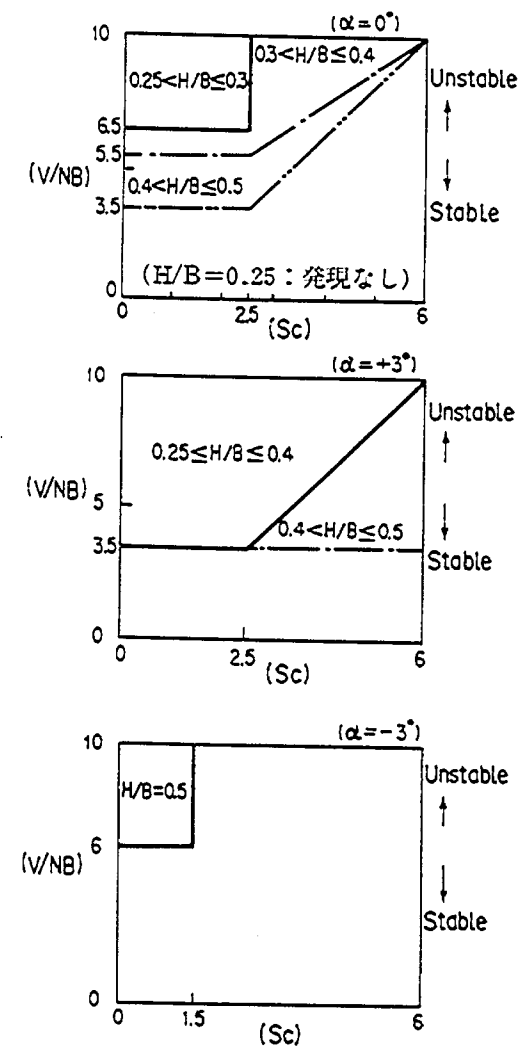


図-4.9 ギャロッピング発現風速模式図

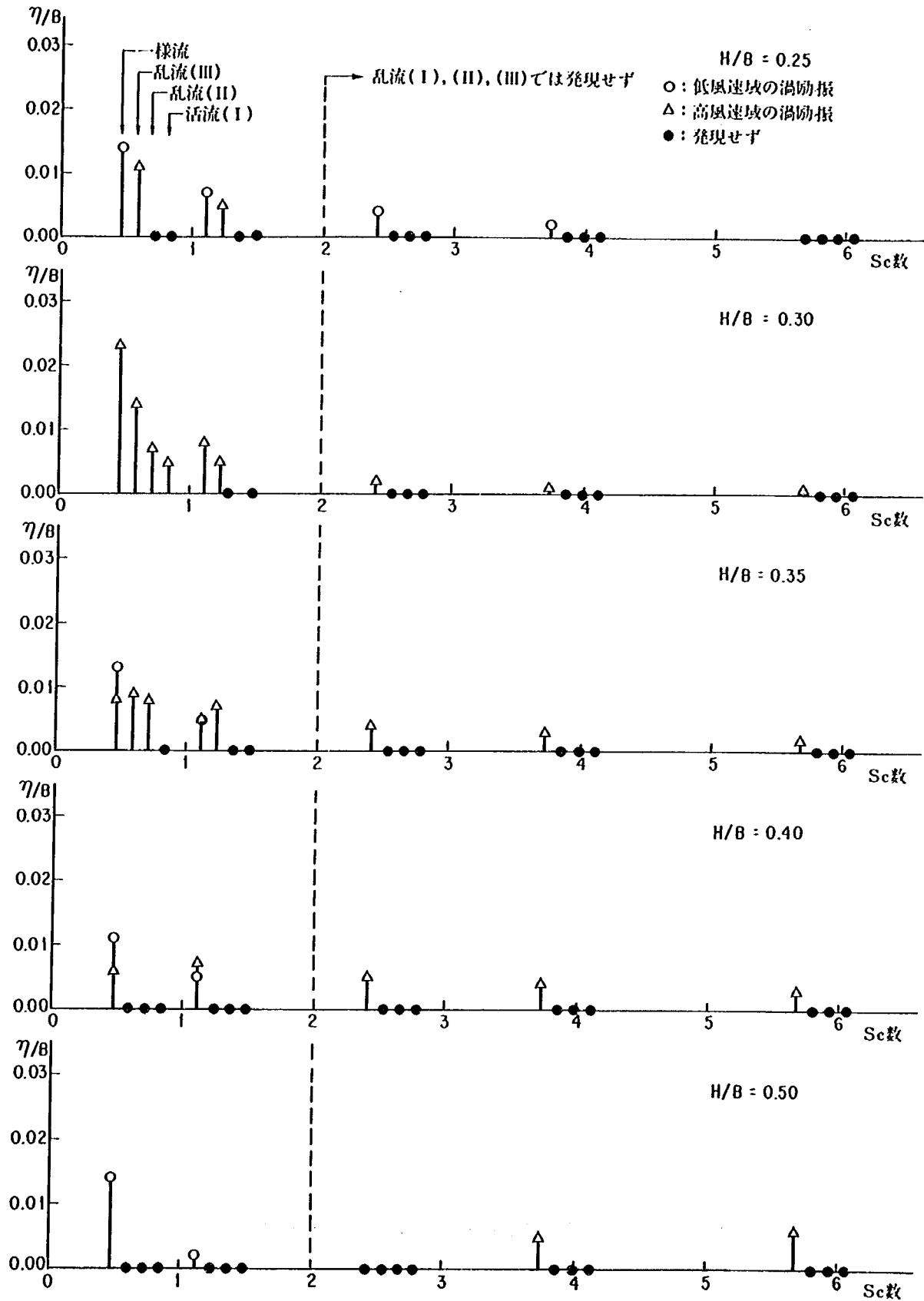


図-4.10 Sc数と乱流の渦励振への影響

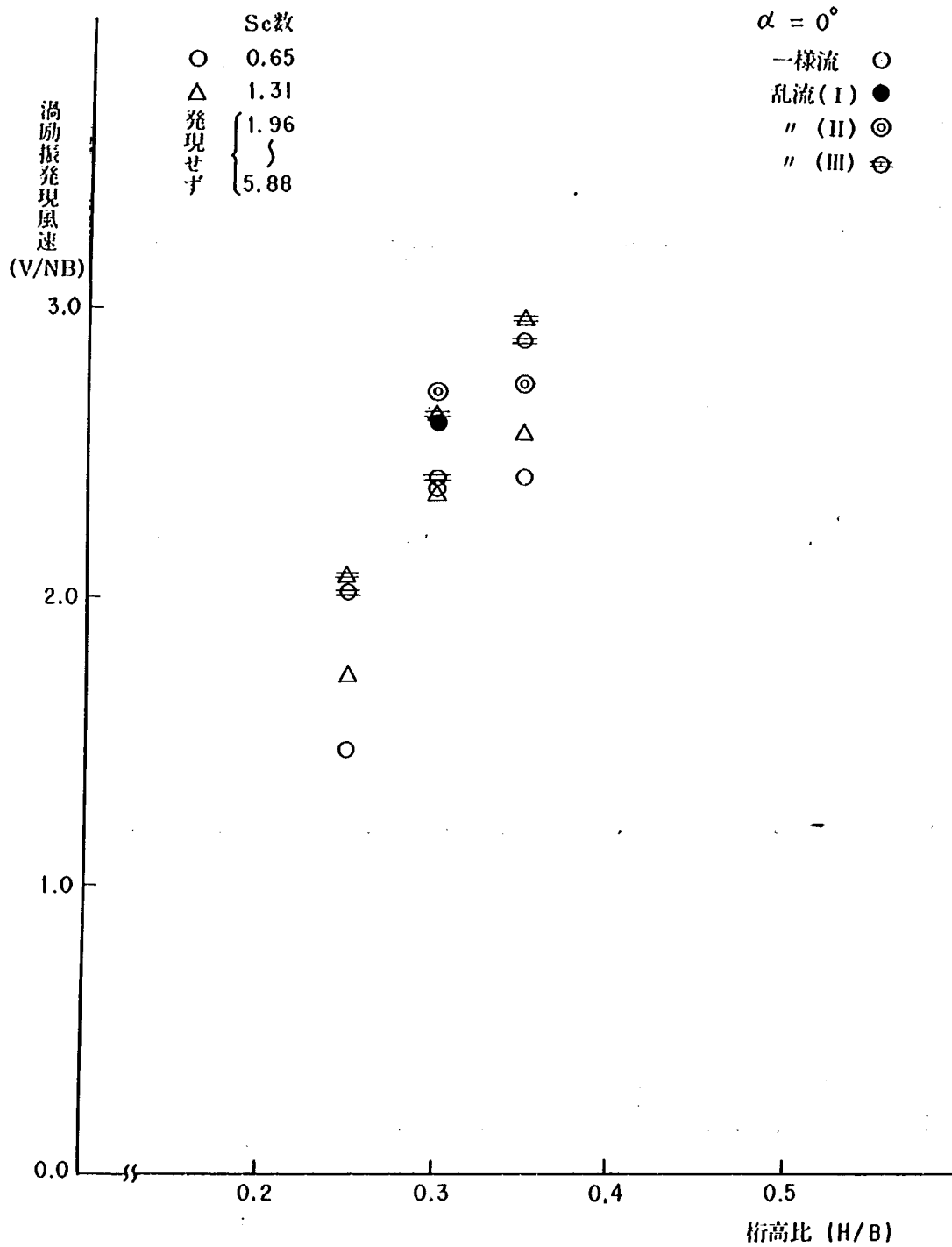


図-4.11 渦励振の発現風速 (3次元実験, 乱流中)

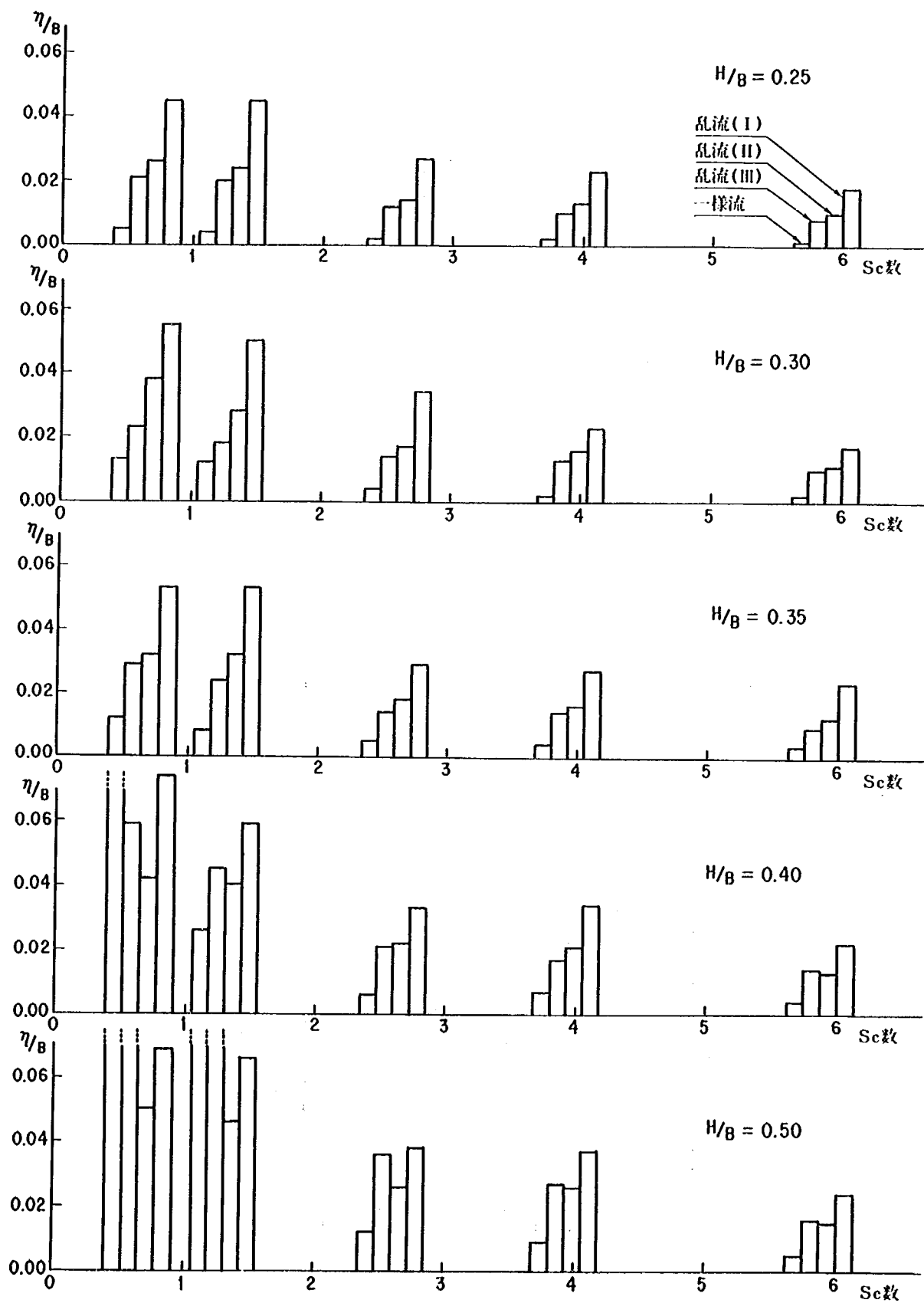


図-4.12 Sc 数と乱流のギャロッピングおよびバフェティングへの影響 ($V/NB=8$ の場合)

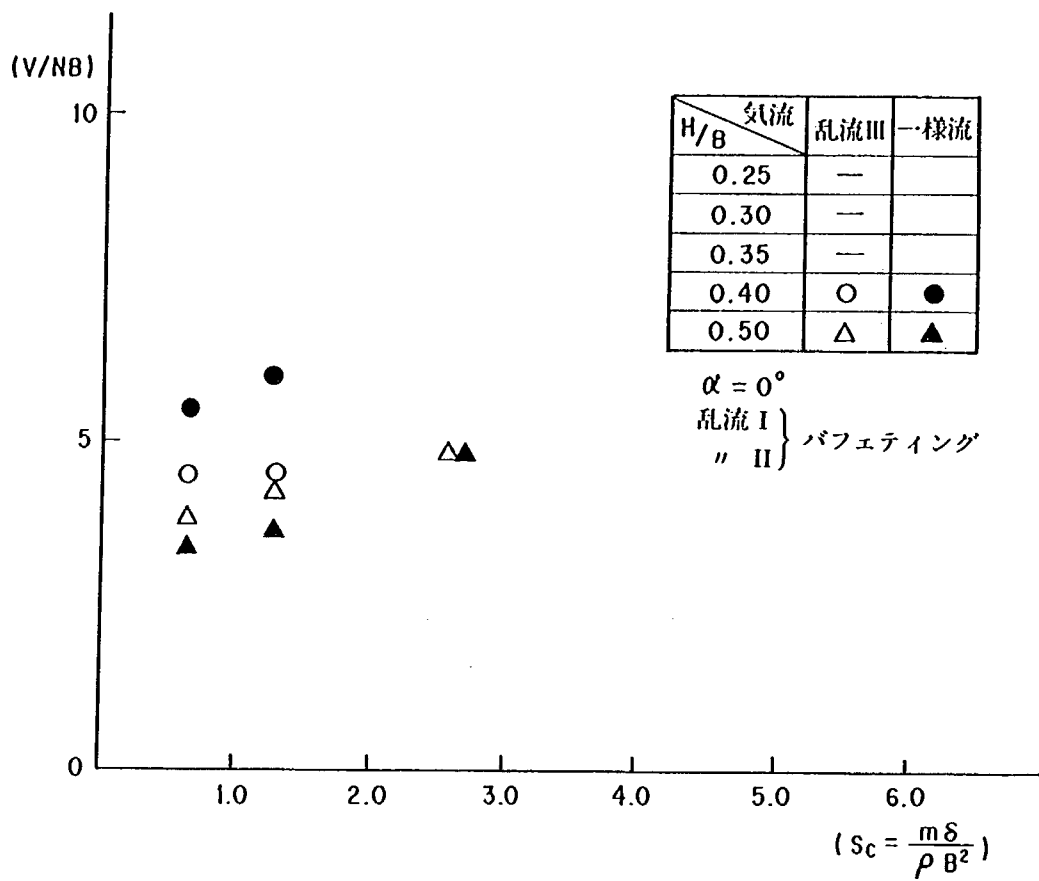


図- 4.13 ギャロッピング発現風速 (一様流, 乱流)

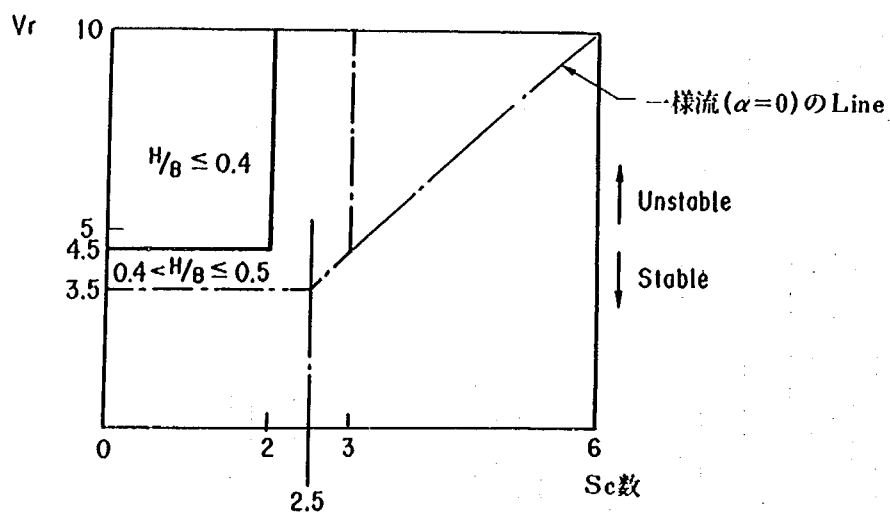


図- 4.14 乱流中のギャロッピング発現風速 (模式図)

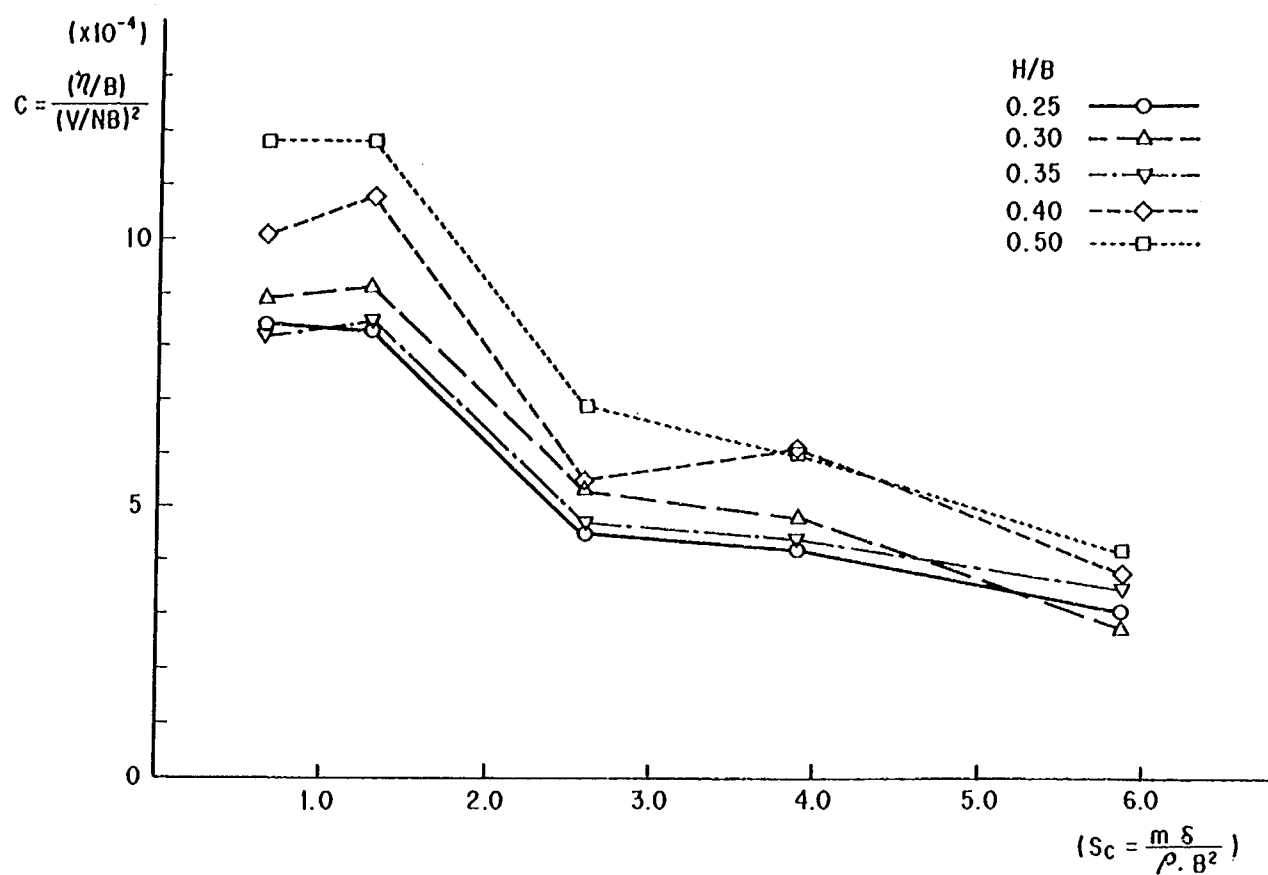


図-4.15.1 バフティングのC値(乱流Ⅰ)

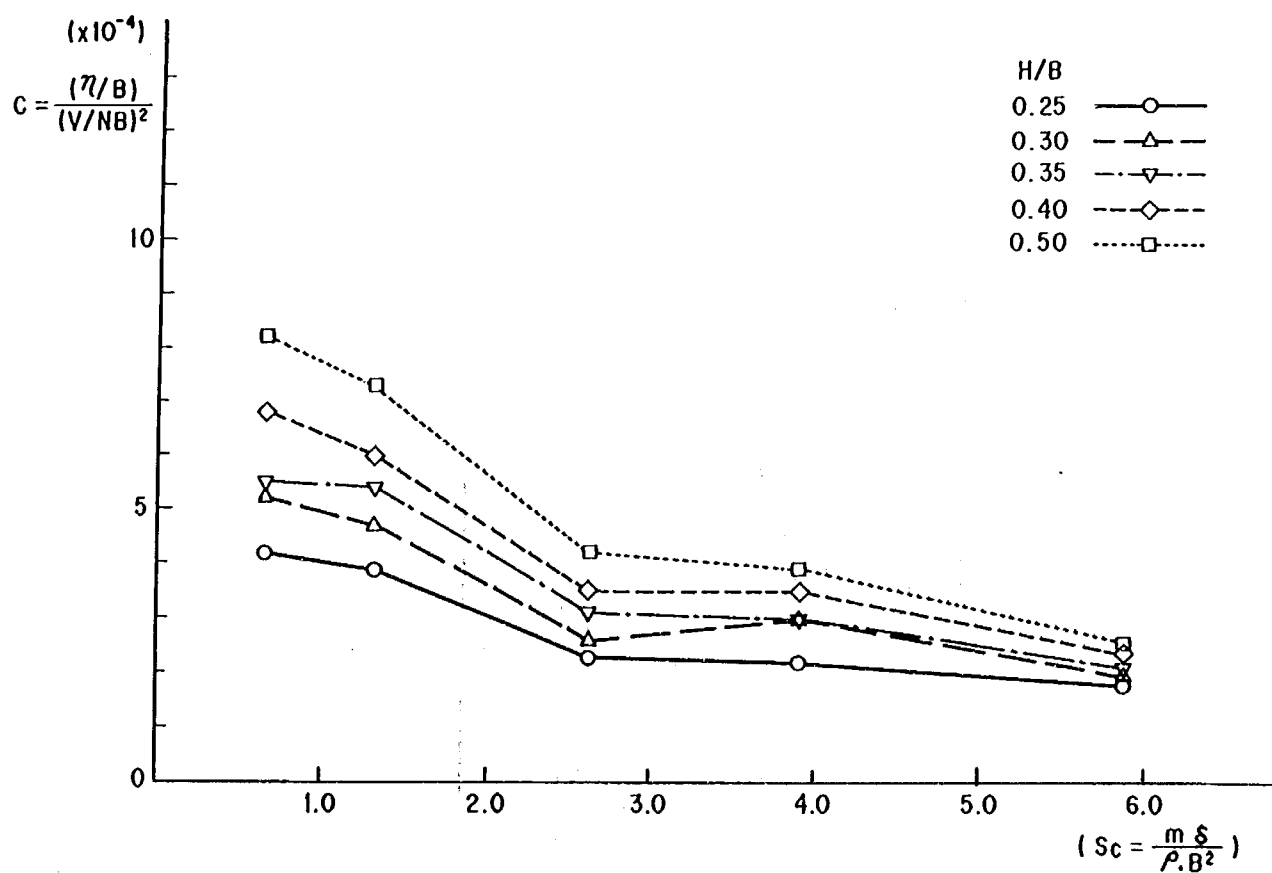


図-4.15.2 バフティングのC値(乱流Ⅱ)

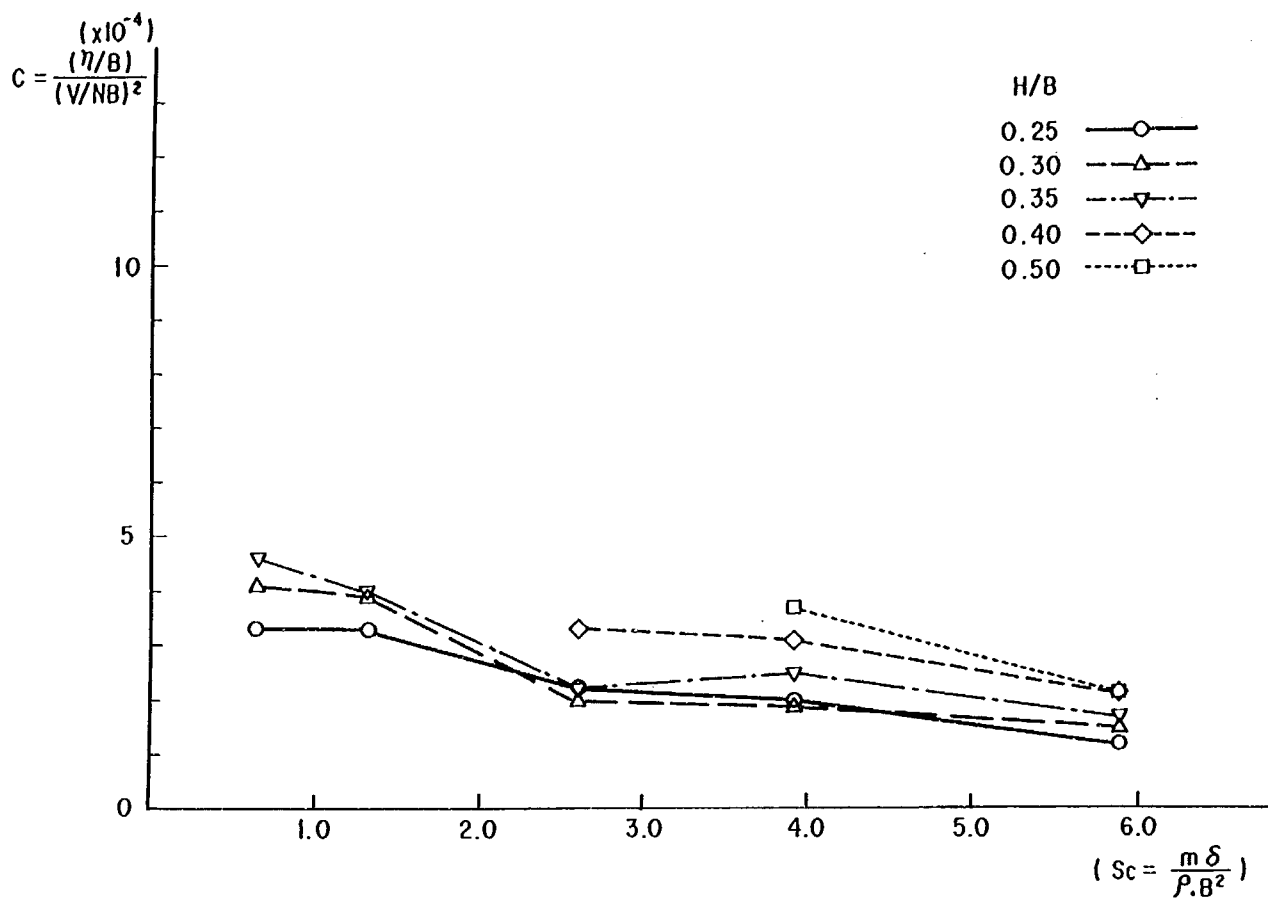


図-15.3 バフェティングのC値(乱流Ⅲ)

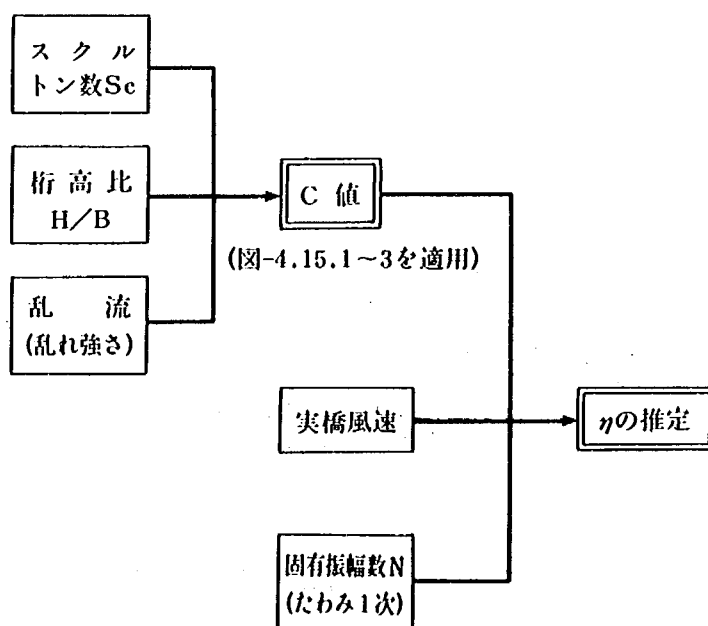


図-4.16 バフェティングの推定

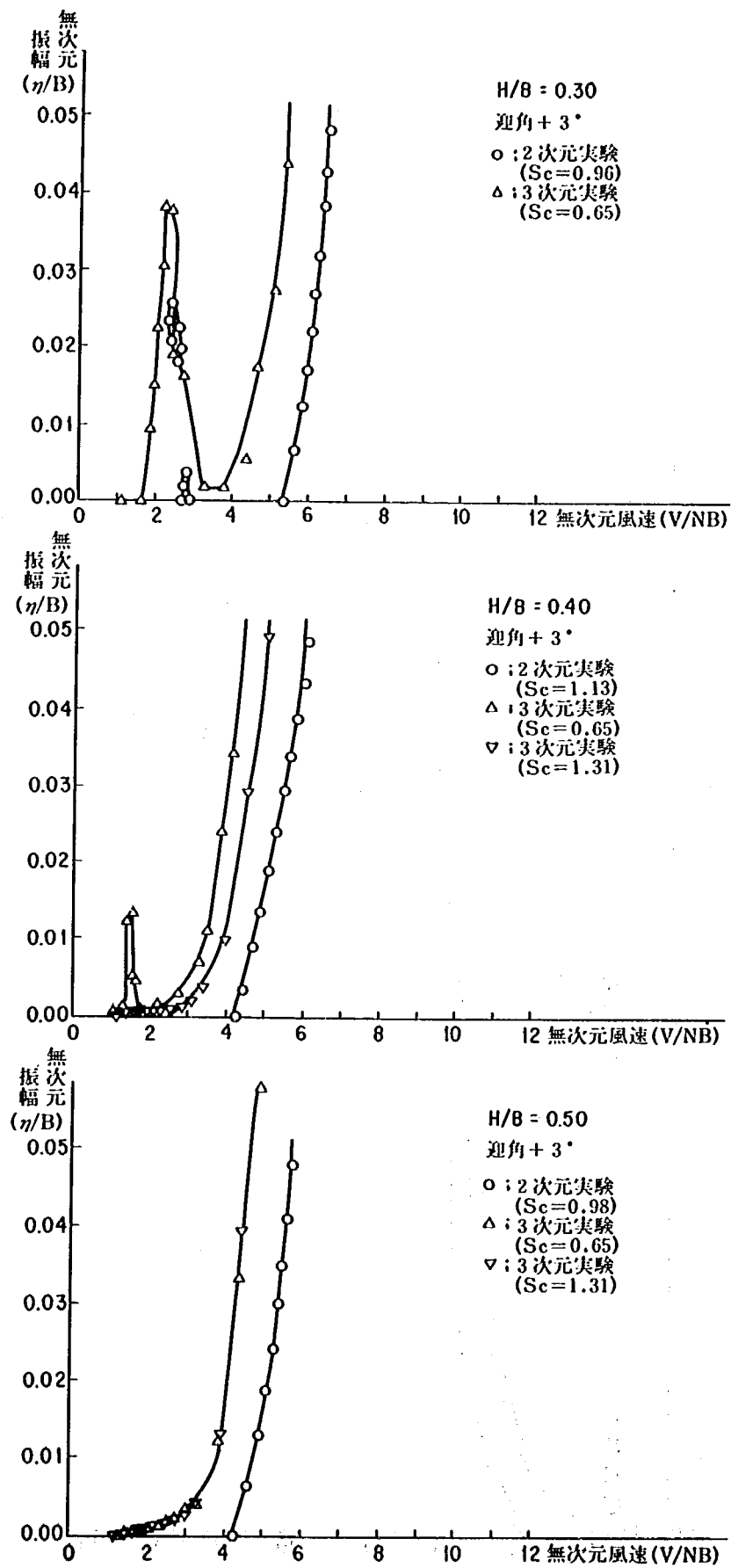


図-4.17.1 応答の比較

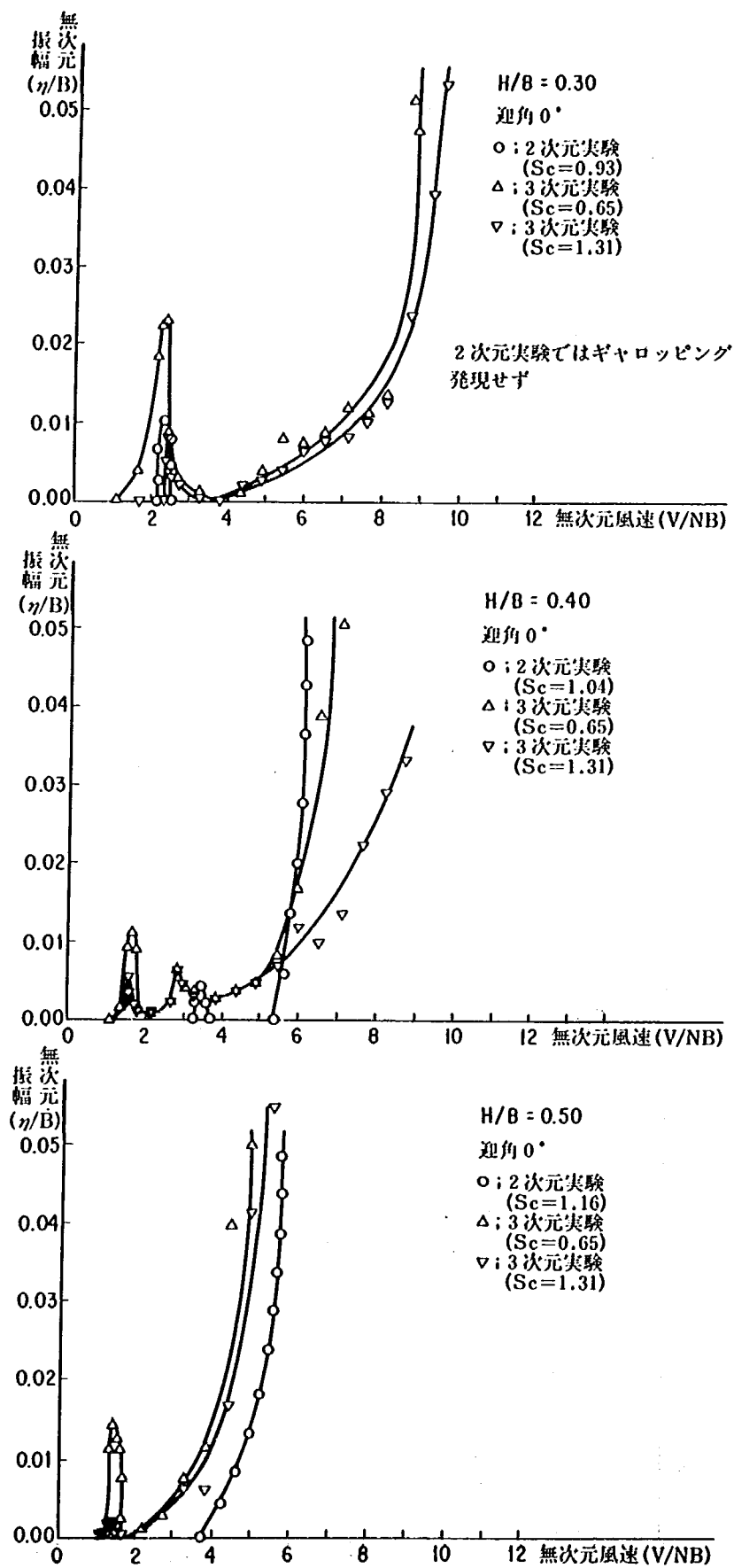


図-4.17.2 応答の比較

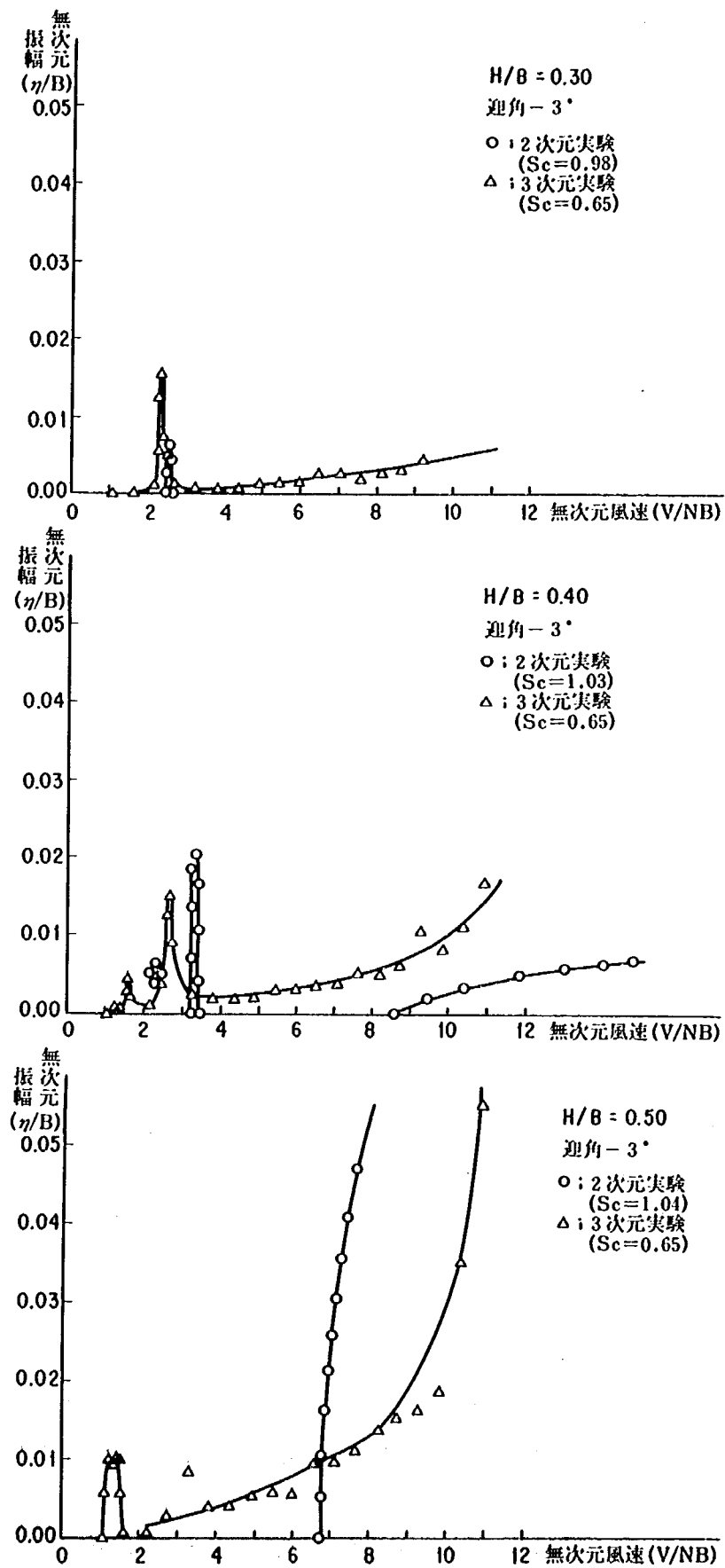


図-4.17.3 応答の比較

5. ま と め

箱桁橋の一樣気流中および乱流中における基本的な対風応答特性を把握し、耐風設計の資料とするための、箱桁断面の2次元模型実験と3次元模型実験を実施した。

その結果を以下にとりまとめた。

- (1) 桁高比を $H/B = 0.2 \sim 0.5$ 、迎角を $\alpha = 3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ に変えた一樣気流中の2次元バネ支持模型実験を実施した。その結果、低風速領域で渦励振、高風速領域でギャロッピングが発現した。ギャロッピングの発現風速は、桁高比 H/B が大きくなるほど、また迎角が吹きあげになるほど低下する。一方、渦励振の発現風速は迎角に影響を受けず、桁高比 H/B が大きくなるほど高くなる傾向を示した。渦励振の振幅は、迎角、桁高比が影響を及ぼし一定の傾向を示していない。
- (2) 乱流の影響を把握することを主目的として3次元弾性単径間模型実験を実施した。実験では気流条件（一樣流と乱流3種類）、質量、構造減衰（各3種類）、桁高比（ $H/B = 0.25 \sim 0.5$ の5種類）、迎角（ $\pm 3^\circ, 0^\circ$ の3種類）の条件を変えてそれぞれの影響度を調べた。

(a) スクルトン数の影響

質量および構造減衰の影響はスクルトン数（ $m\delta/\rho B^2$ ）で代表して示される。スクルトン数が増加すると、一般に渦励振振幅は低減し、ギャロッピングの発現風速は高くなった。従って、耐風設計においては構造減衰を正しく見積ることが非常に重要であること、鋼橋と比較してPC橋は同一断面を有するならば低風速領域で発現する渦励振に対して質量効果が大きいことが分る。

(b) 迎角の影響

渦励振は低風速域と高風速域とでは性質がやや異なり、迎角に対しても異なった特性を示した。またギャロッピングの発現風速は正の迎角の方が一般に低いので、耐風設計としてとりまとめる際には迎角範囲の設定が重要となる。

(c) 桁高比の影響

桁高比 H/B が大きくなるほど、一般にギャロッピングの発現風速は低下する。渦励振振幅は低風速域および S_c 数が2以下の高風速域では桁高比の増加と共に低下し、 S_c 数が2以上の高風速域では逆に桁高比が増加するほど振幅は大きくなる結果となった。

(d) 乱流の影響

気流が乱れのほとんどない一樣流と乱流とでは箱桁橋の応答はドラスティックな変化を示す。すなわち、一樣流中で渦励振、ギャロッピングの発現がみられたものが、乱流中では不規則振動であるパフティングが主たる振動になる。したがって、箱桁橋の耐風設計においては乱流の影響を考慮する必要がある。

- (3) 3次元実験結果を、箱桁橋の耐風設計の資料となるように設計条件（質量、構造減衰、気流）を与えると応答が求められるような形で示した。箱桁橋の耐風設計では渦励振、ギャロッピングばかりでなく、パフティングが主たる問題になると考えられ、応答を求めるフローを示した。

(4) 2次元実験と3次元実験との比較を行なったが、実験条件が同一でないこともあり厳密な検討は行なっていない。今後の重要な課題であると考えられる。

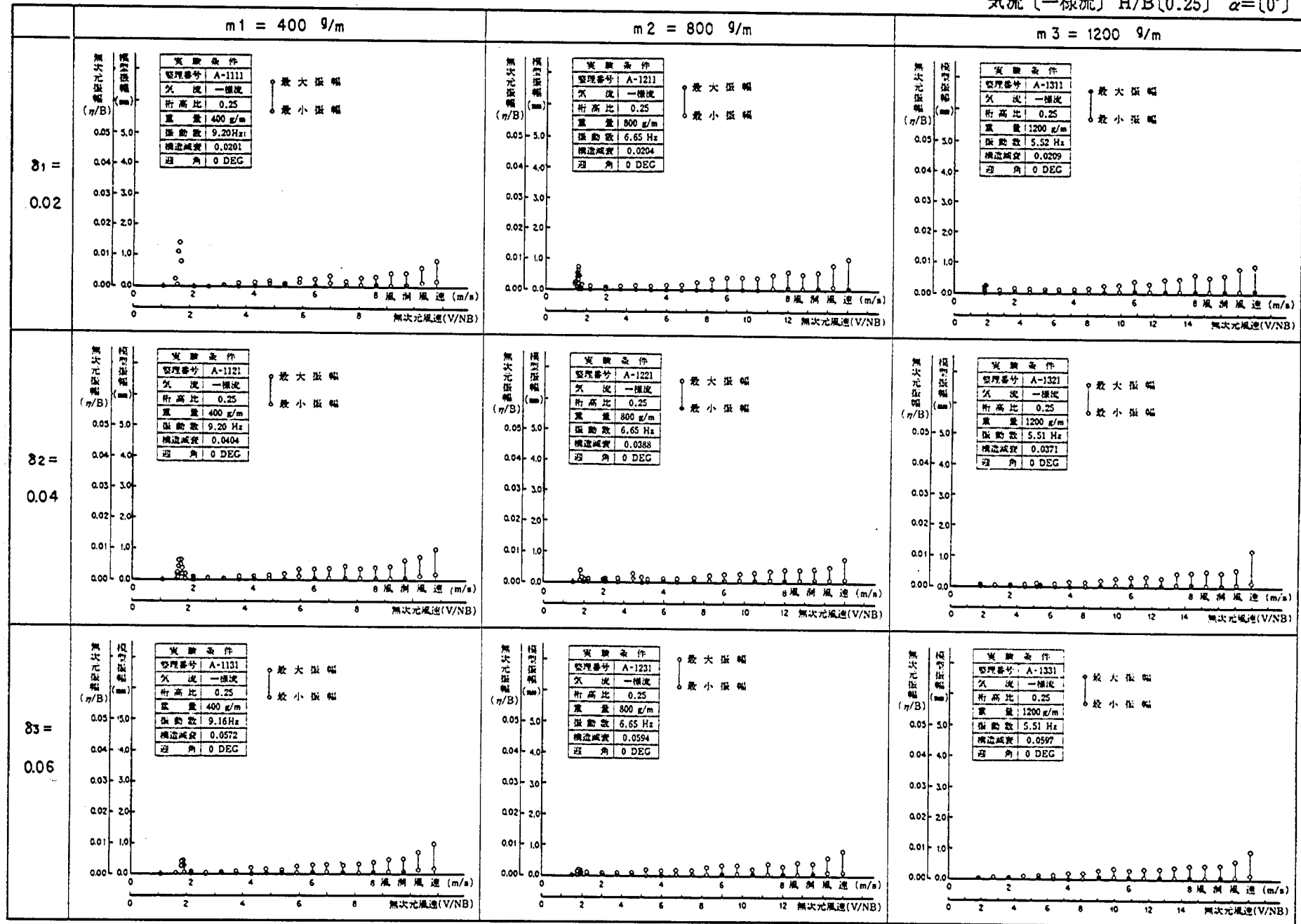
参 考 文 献

1. E S D U : Engineering Science Data , Wind Engineering , Vol.1 Wind and turbulence data , Engineering Science Data Unit Ltd., 1982.
2. 岡内 功, 伊藤 学, 宮田利雄 ; 耐風構造, 丸善株式会社, 1977.

付 属 資 料

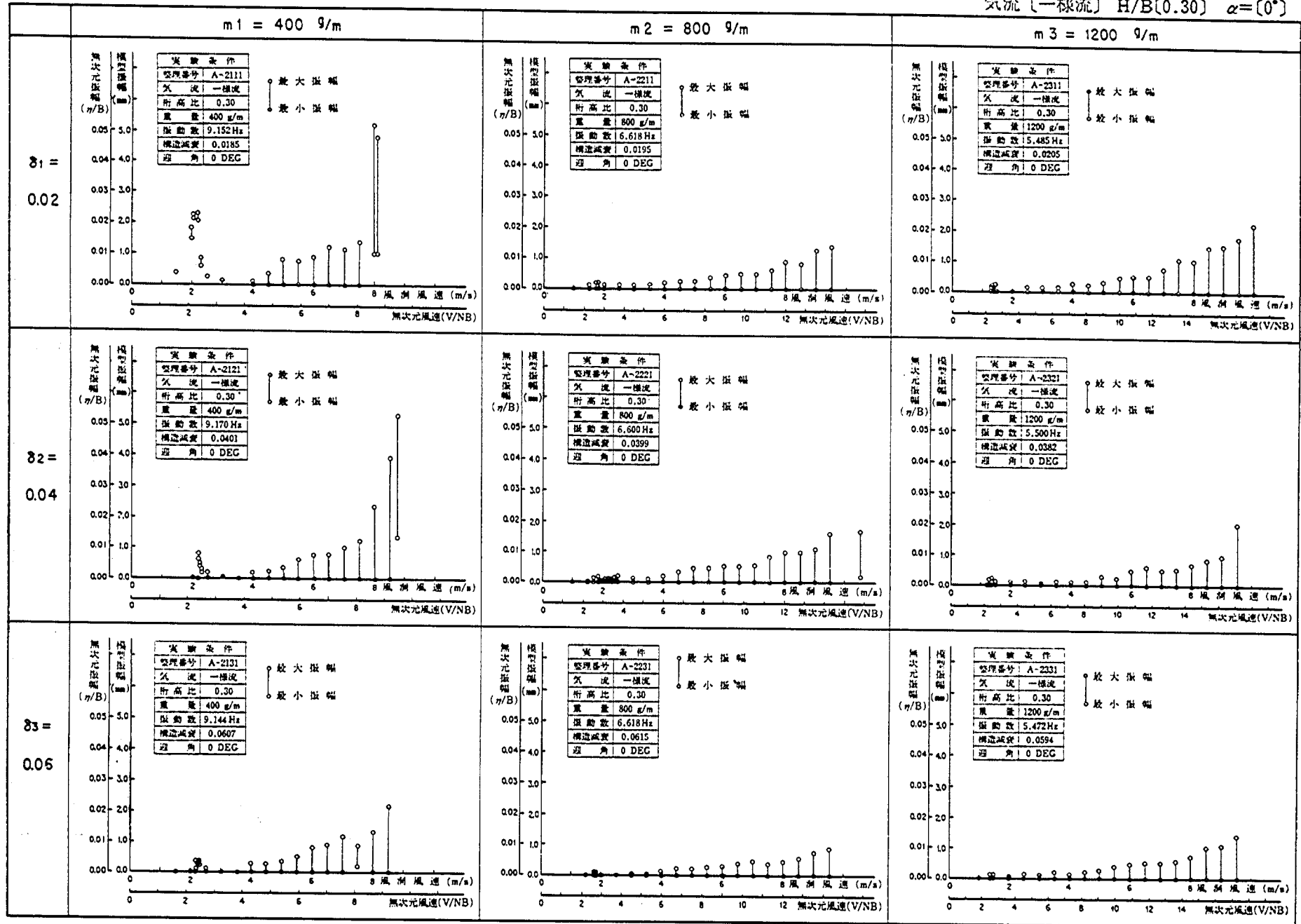
付図-1.1 風速-振幅関係図

気流〔一様流〕 $H/B[0.25]$ $\alpha=[0^\circ]$



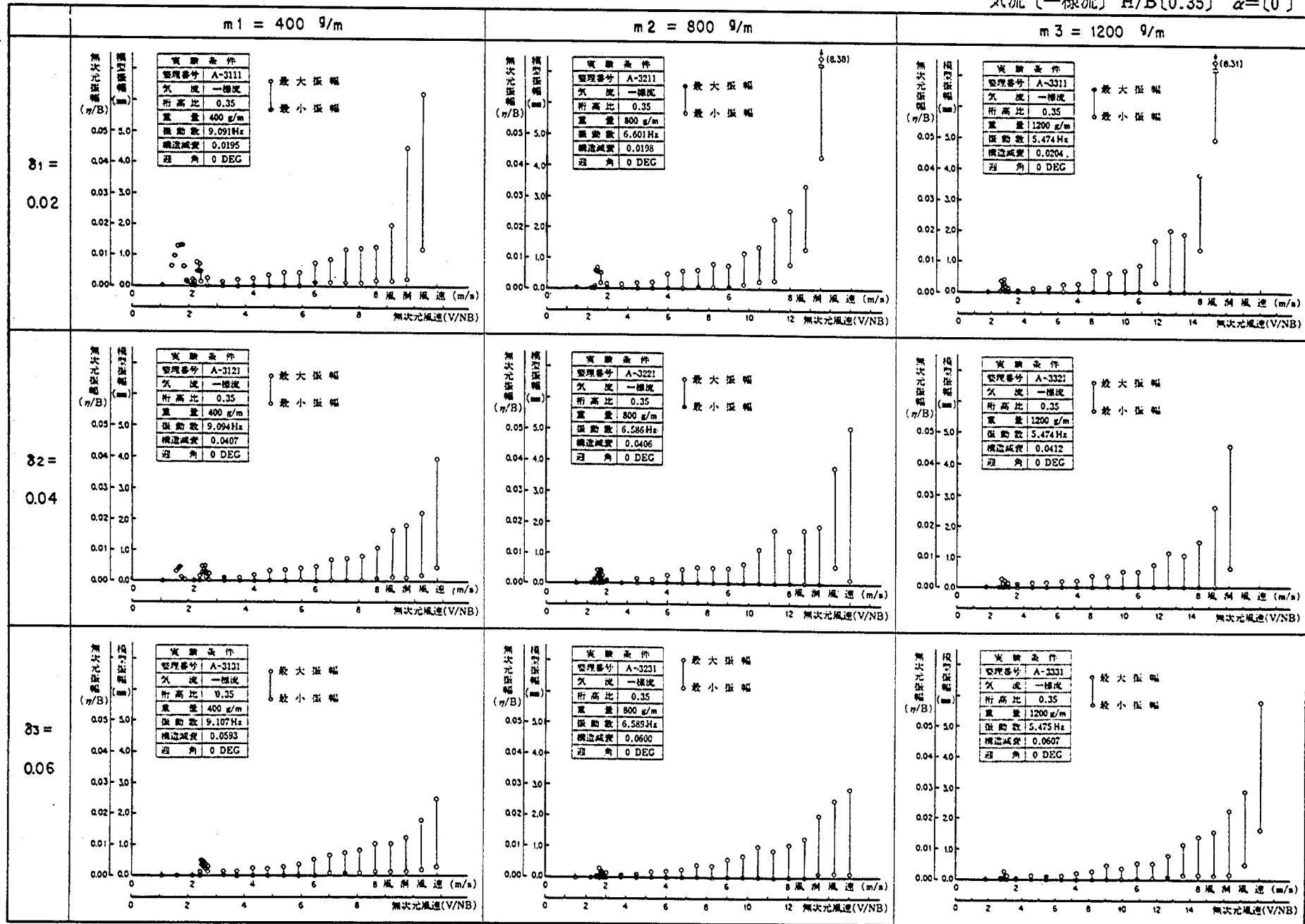
付圖-1.2 風速-振幅關係圖

氣流〔一樣流〕 $H/B(0.30)$ $\alpha=[0^\circ]$



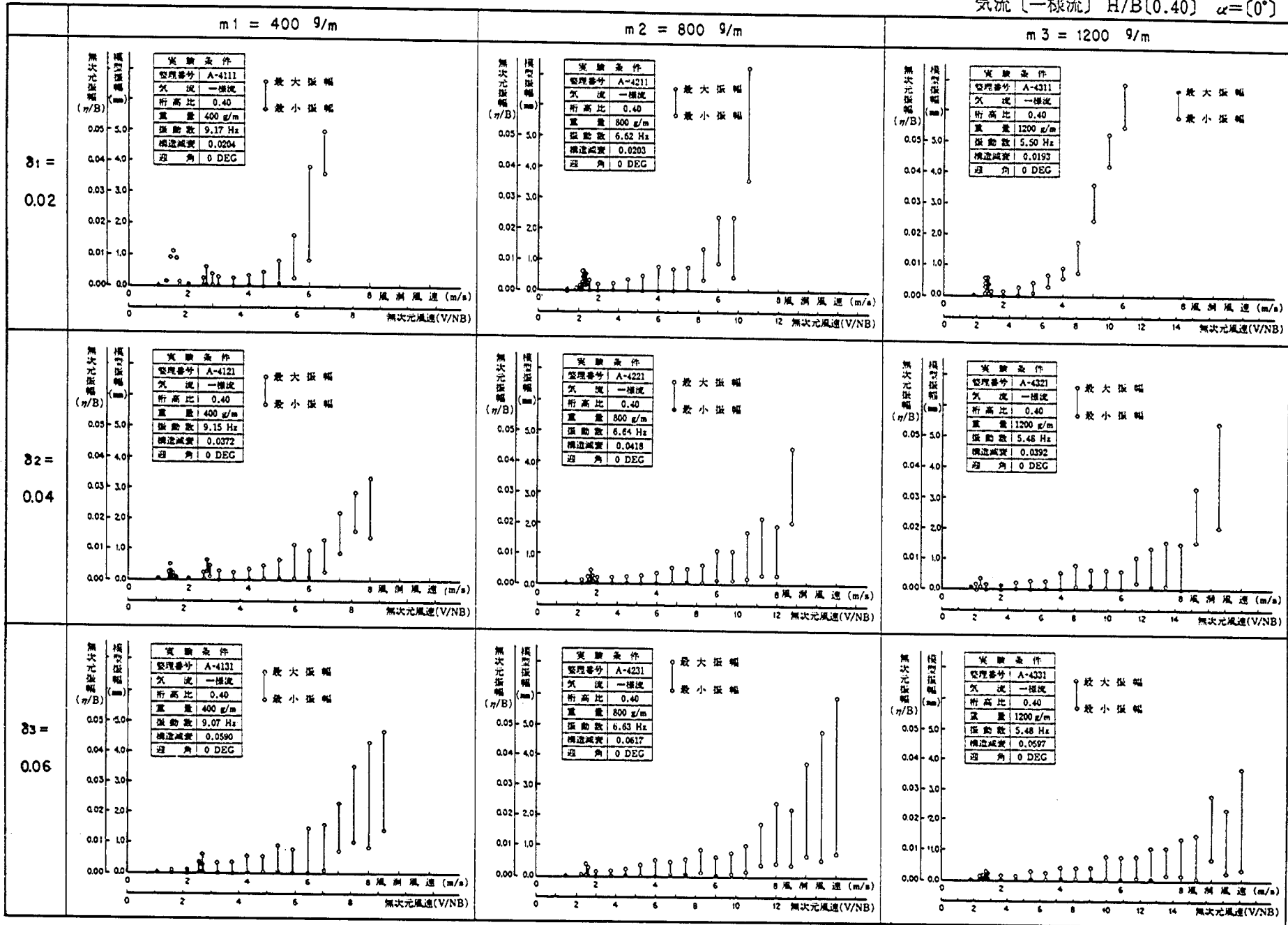
付図-1.3 風速-振幅関係図

気流〔一様流〕 $H/B[0.35]$ $\alpha=[0^\circ]$



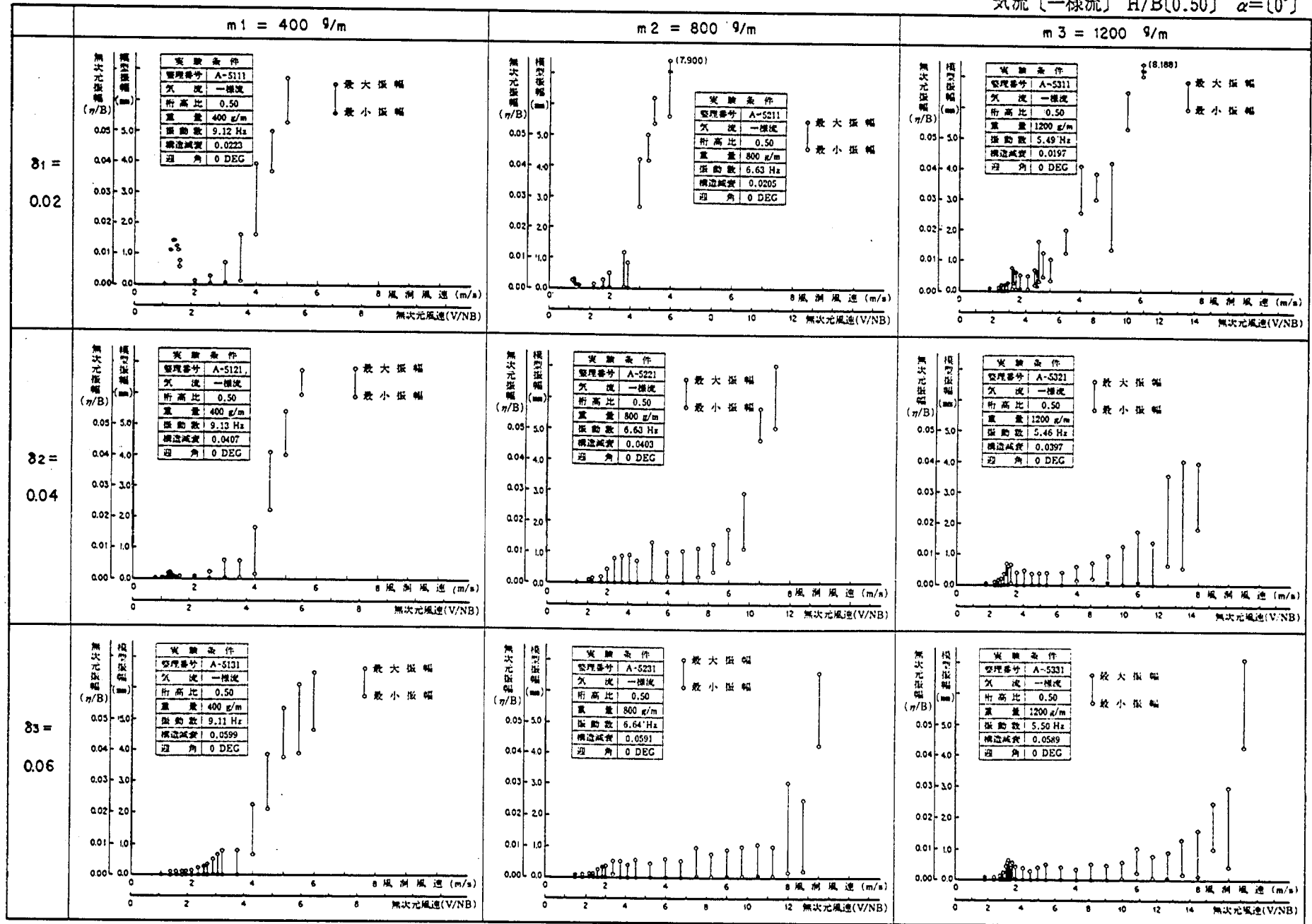
付圖-1.4 風速-振幅關係圖

氣流〔一樣流〕 H/B〔0.40〕 $\alpha=〔0^\circ〕$



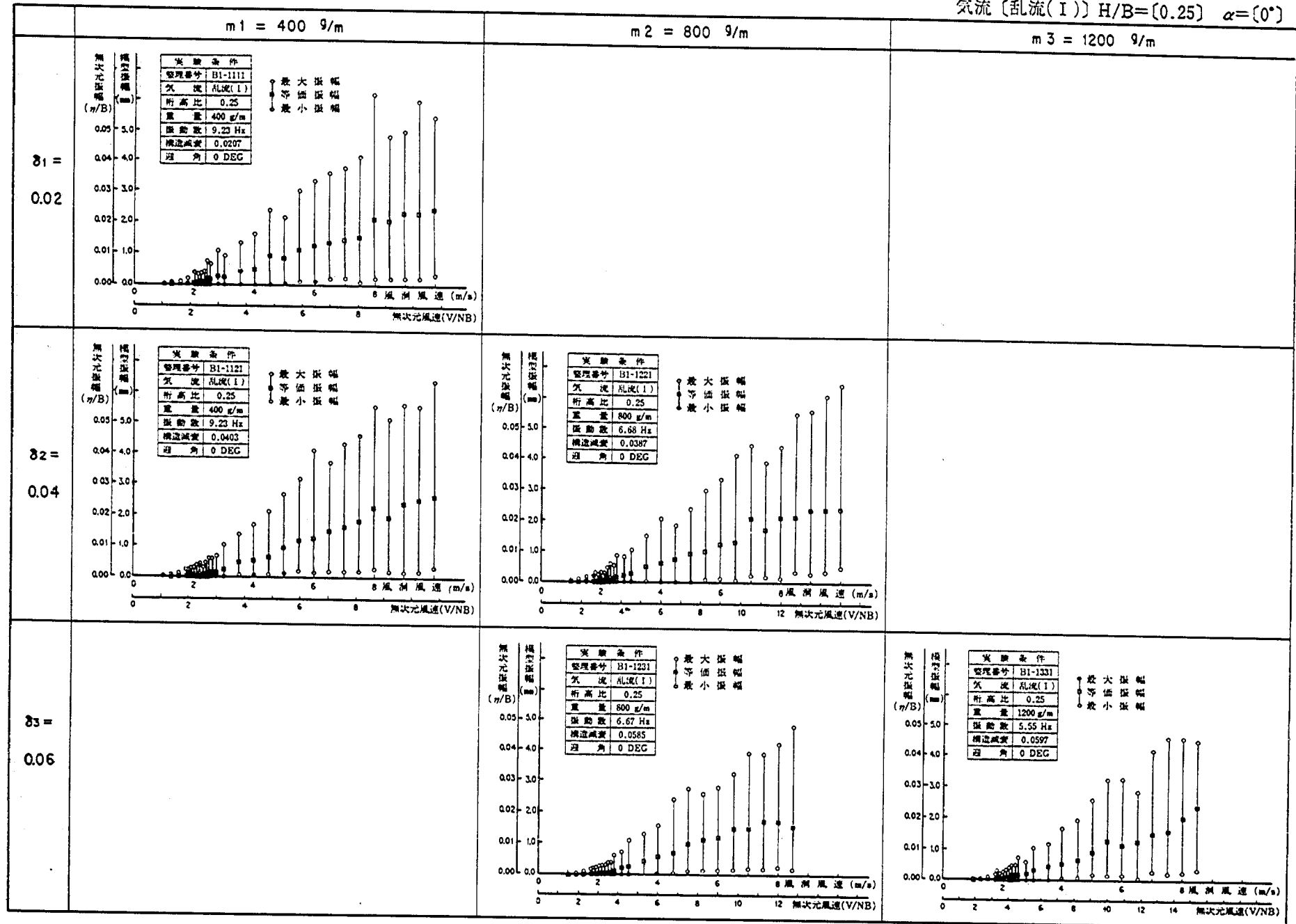
付図-1.5 風速-振幅関係図

気流〔一樣流〕 $H/B[0.50]$ $\alpha=[0^\circ]$



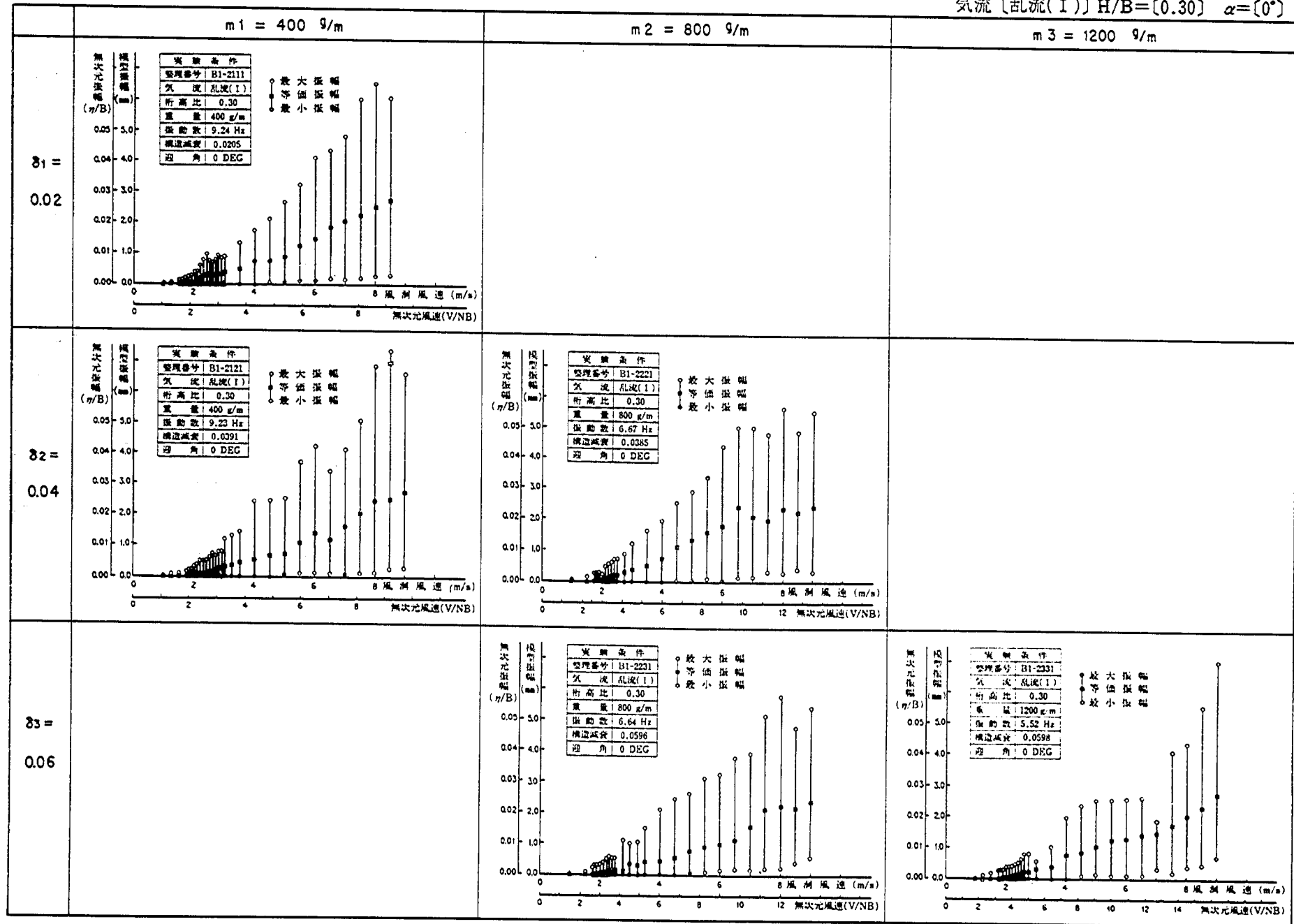
付図-1.6 風速-振幅関係図

気流〔乱流(I)〕 $H/B=[0.25]$ $\alpha=[0^\circ]$



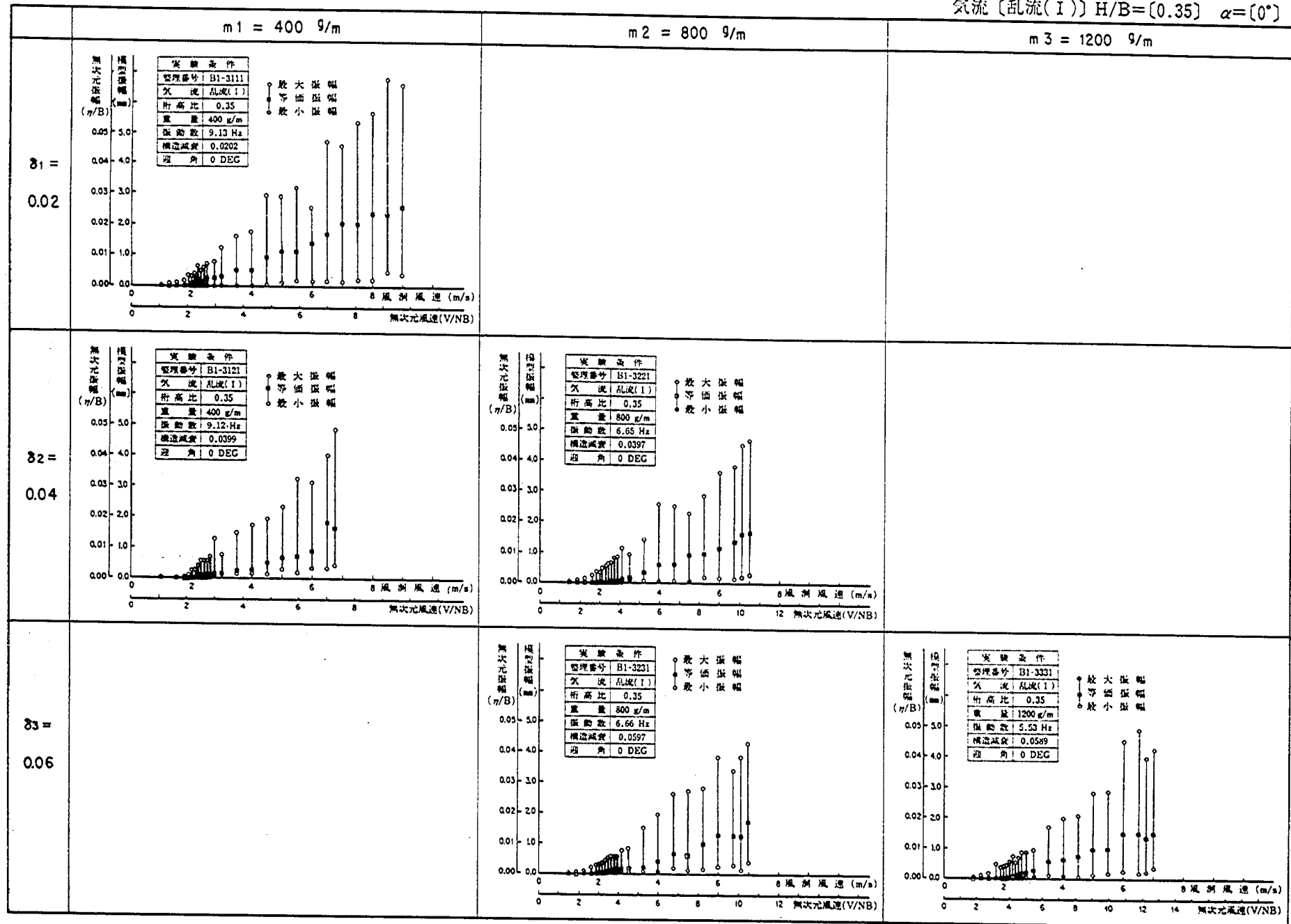
付図-1.7 風速-振幅關係圖

気流〔乱流(I)〕 $H/B=[0.30]$ $\alpha=[0^\circ]$



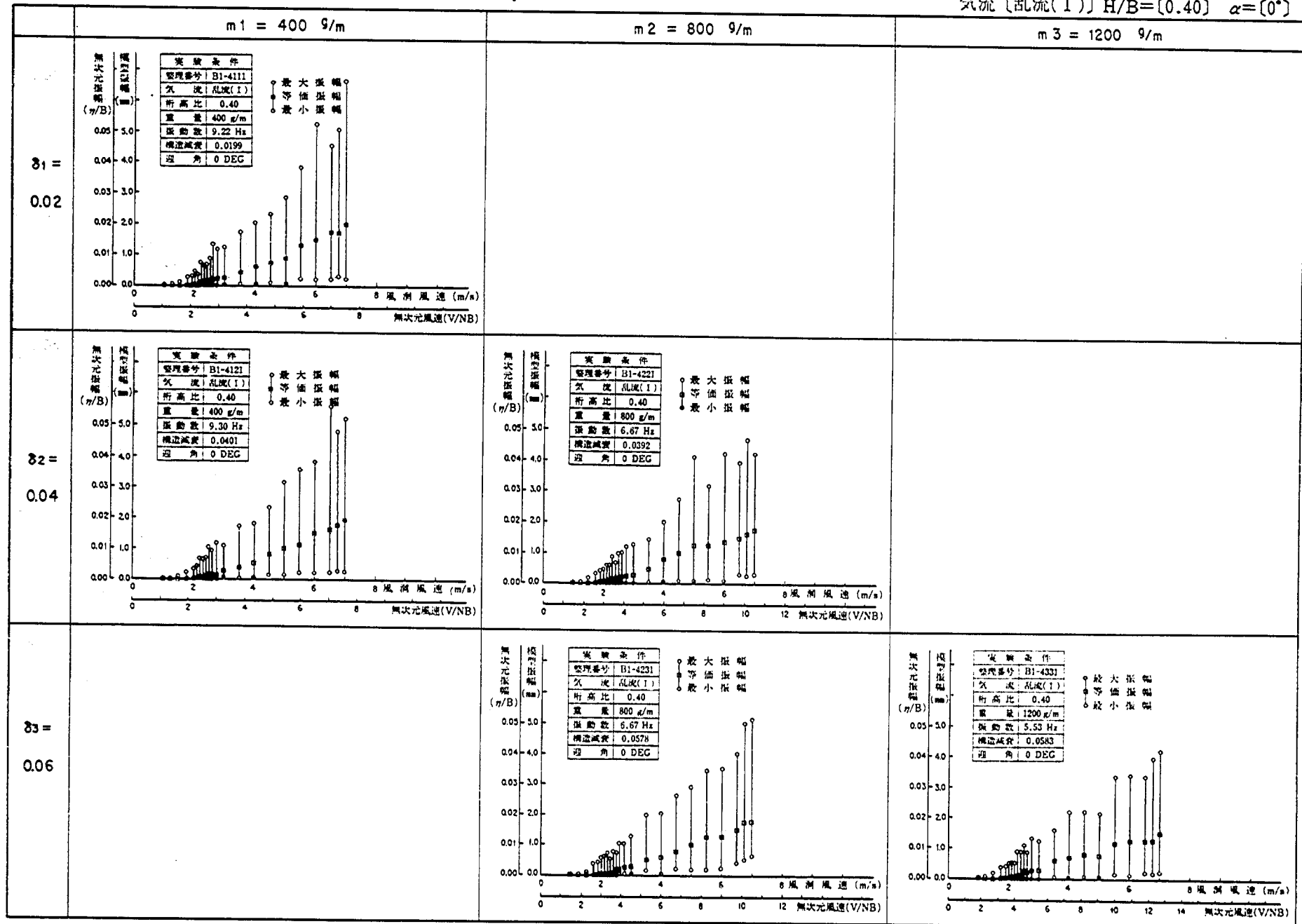
付図-1.8 風速-振幅関係図

気流〔乱流(I)〕 $H/B=[0.35]$ $\alpha=[0^\circ]$



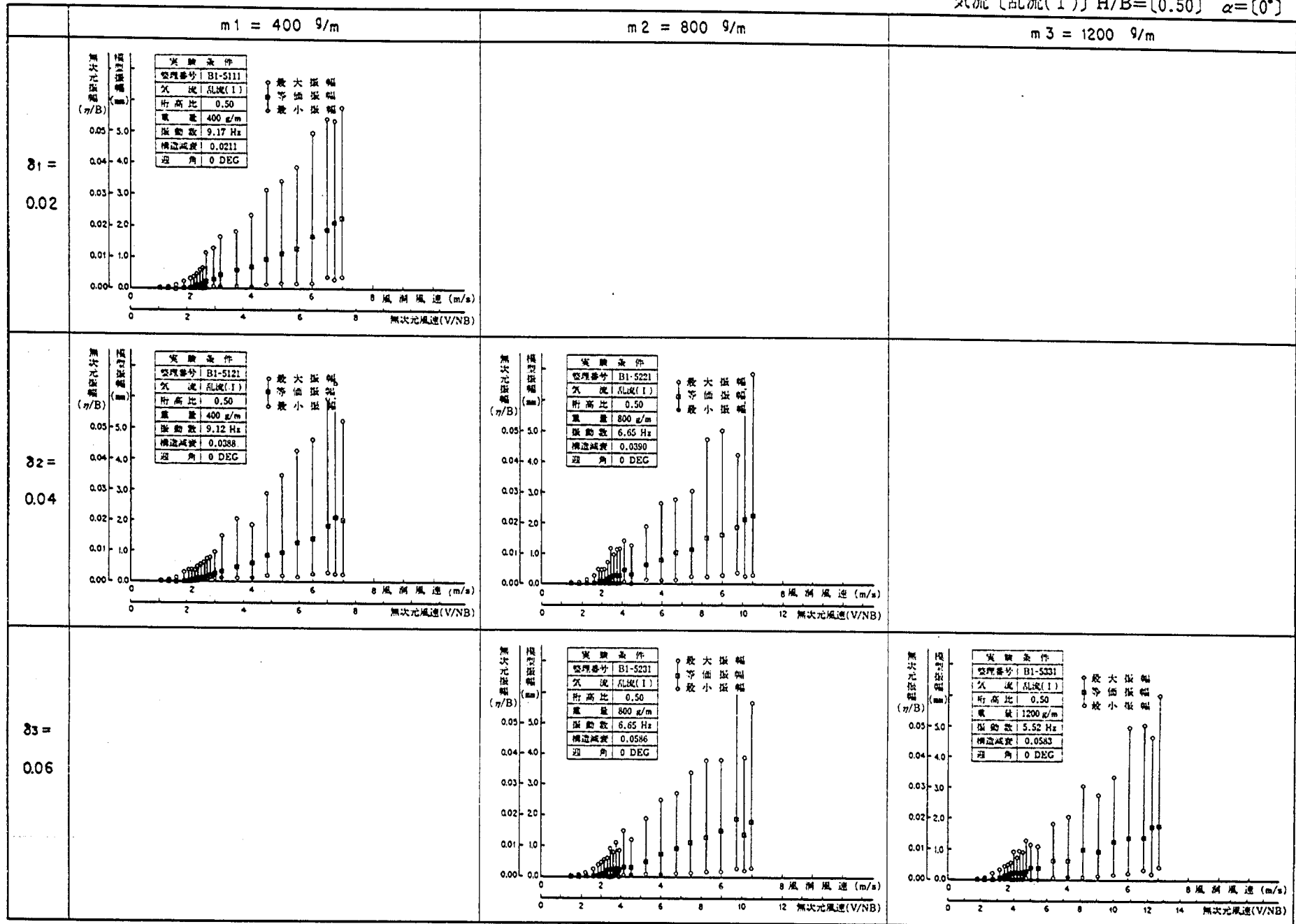
付図-1.9 風速-振幅関係図

気流〔乱流(I)〕 $H/B=[0.40]$ $\alpha=[0^\circ]$



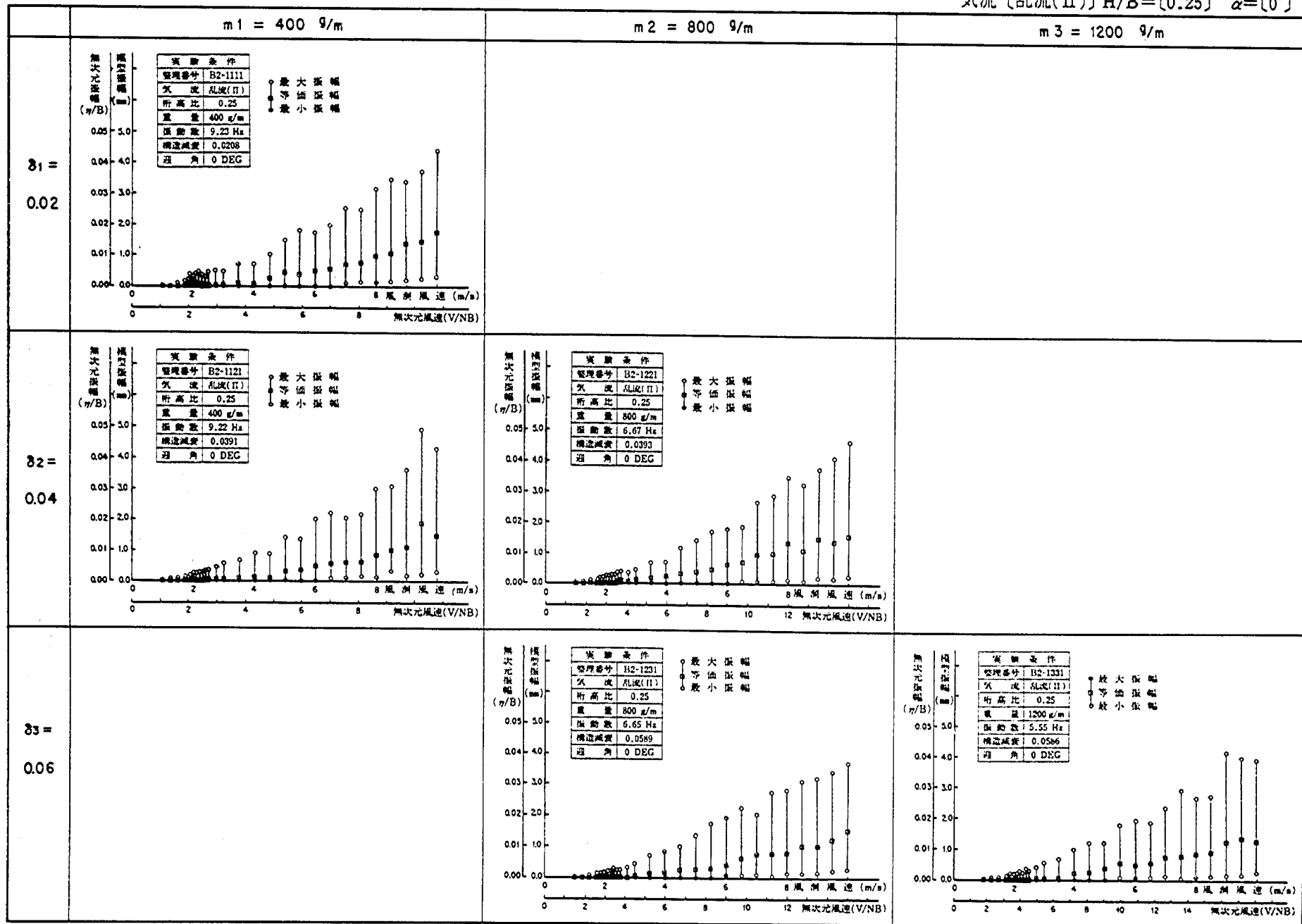
付図-1.10 風速 - 振幅関係図

気流〔乱流(I)〕 $H/B=[0.50]$ $\alpha=[0^\circ]$



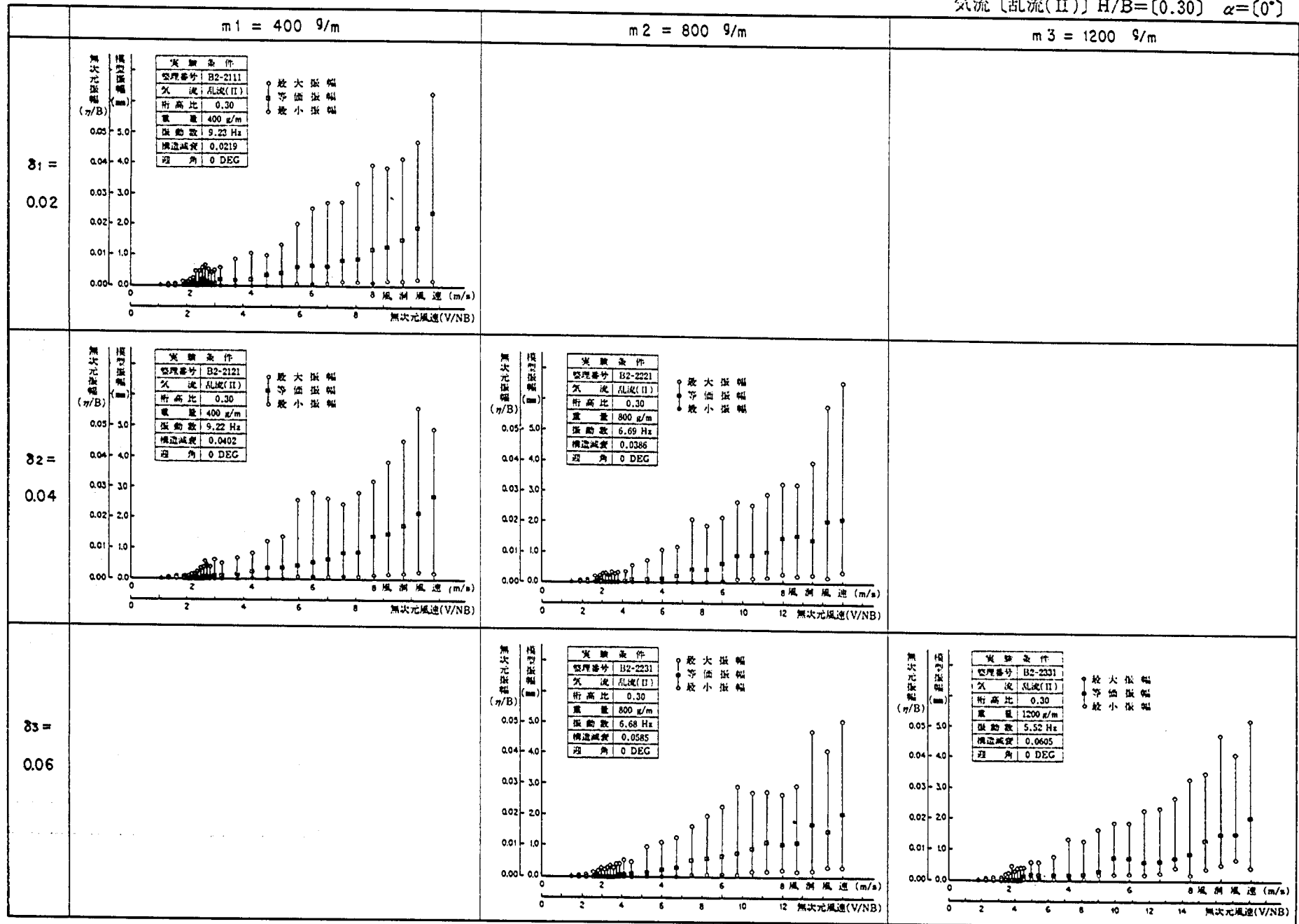
付図-1.11 風速 - 振幅関係図

気流〔乱流(Ⅱ)〕 $H/B=[0.25]$ $\alpha=[0^\circ]$



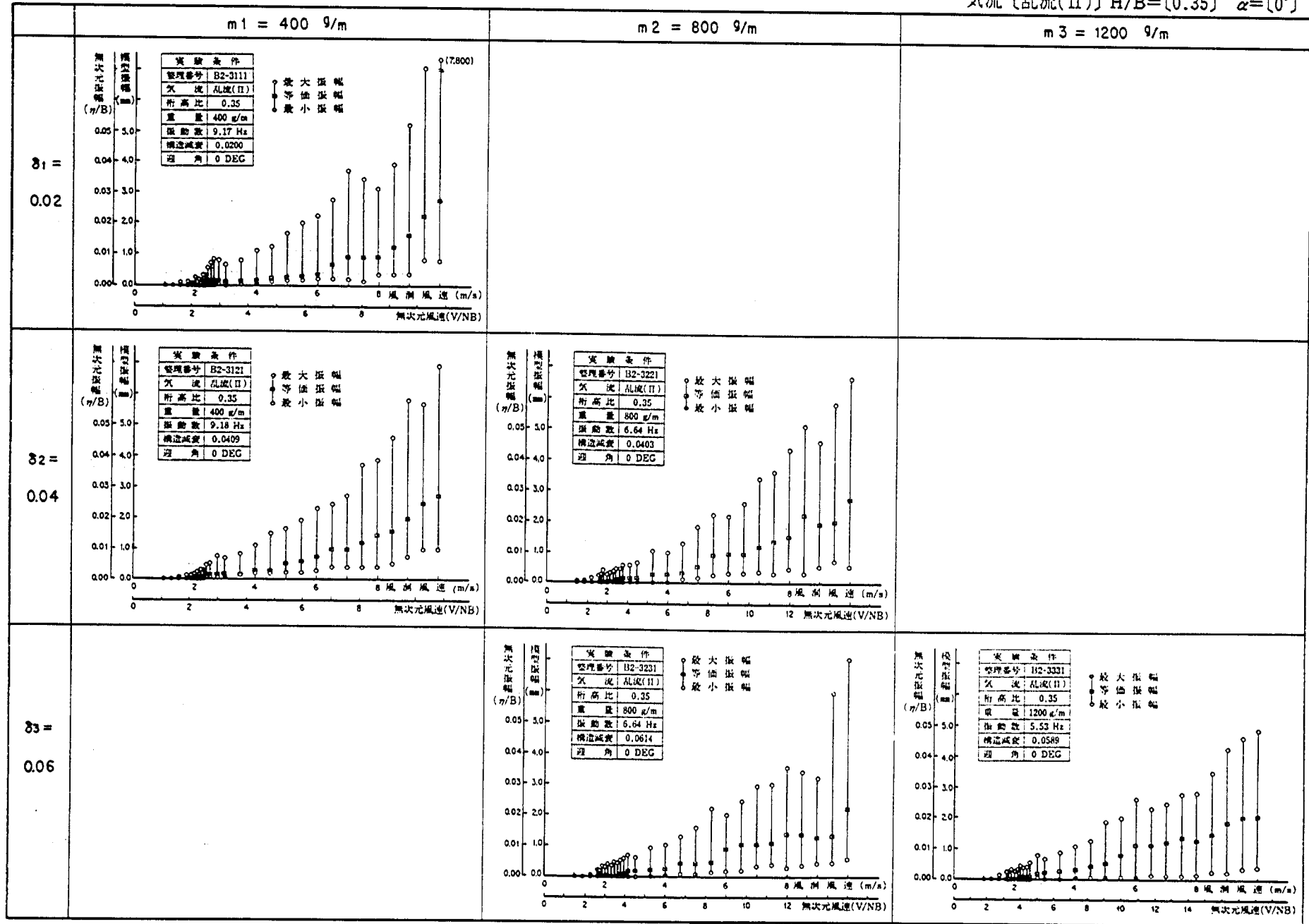
付図-1.12 風速-振幅関係図

気流〔乱流(II)〕 $H/B=[0.30]$ $\alpha=[0^\circ]$



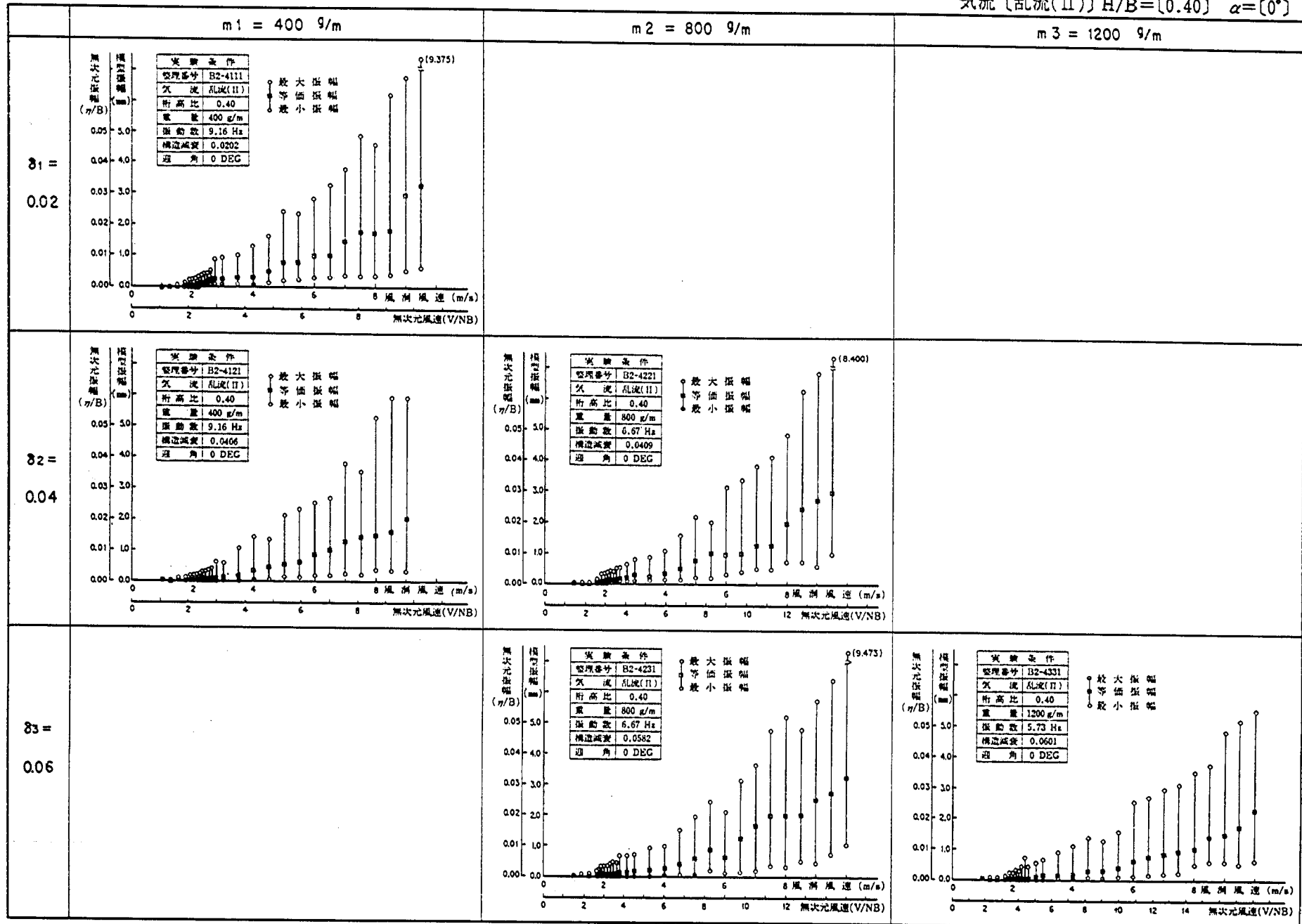
付図-1.13 風速-振幅関係図

気流〔乱流(II)〕 $H/B=[0.35]$ $\alpha=[0^\circ]$



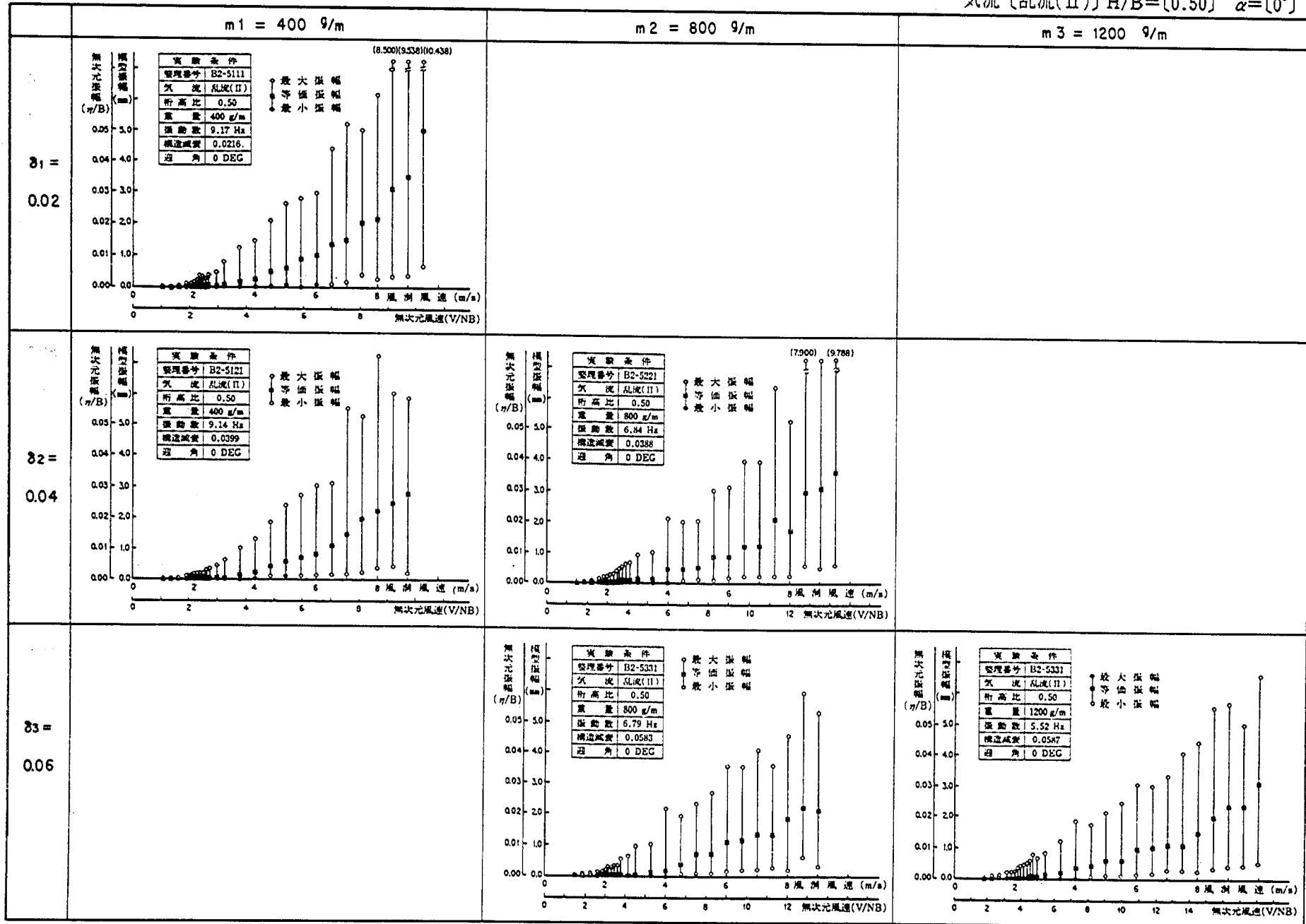
付図-1.14 風速-振幅関係図

気流〔乱流(II)〕 $H/B=[0.40]$ $\alpha=[0^\circ]$



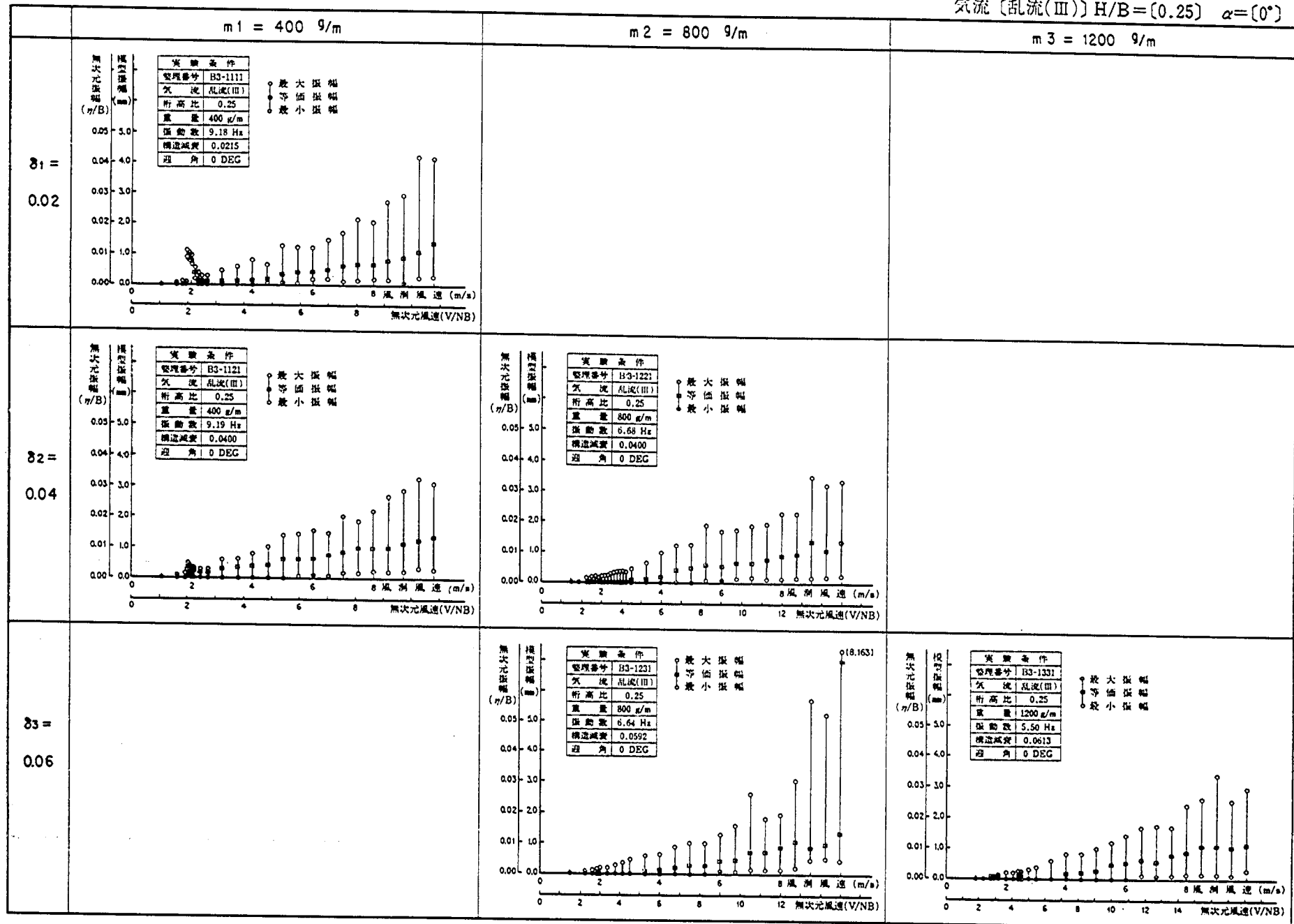
付図-1.15 風速 - 振幅関係図

気流〔乱流(Ⅱ)〕 $H/B=[0.50]$ $\alpha=[0^\circ]$



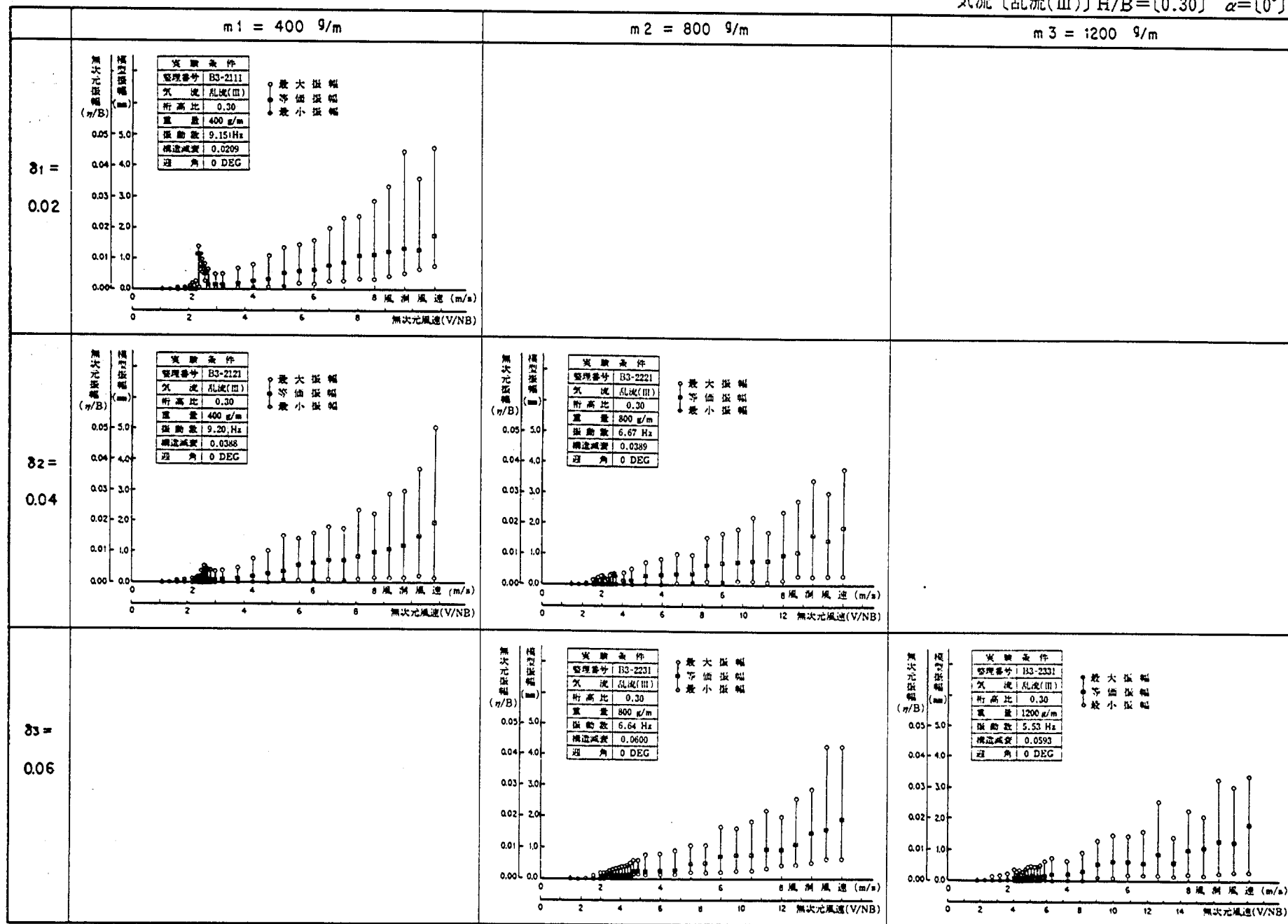
付図-1.16 風速 - 振幅關係圖

気流〔乱流(Ⅲ)〕 $H/B=[0.25]$ $\alpha=[0^\circ]$



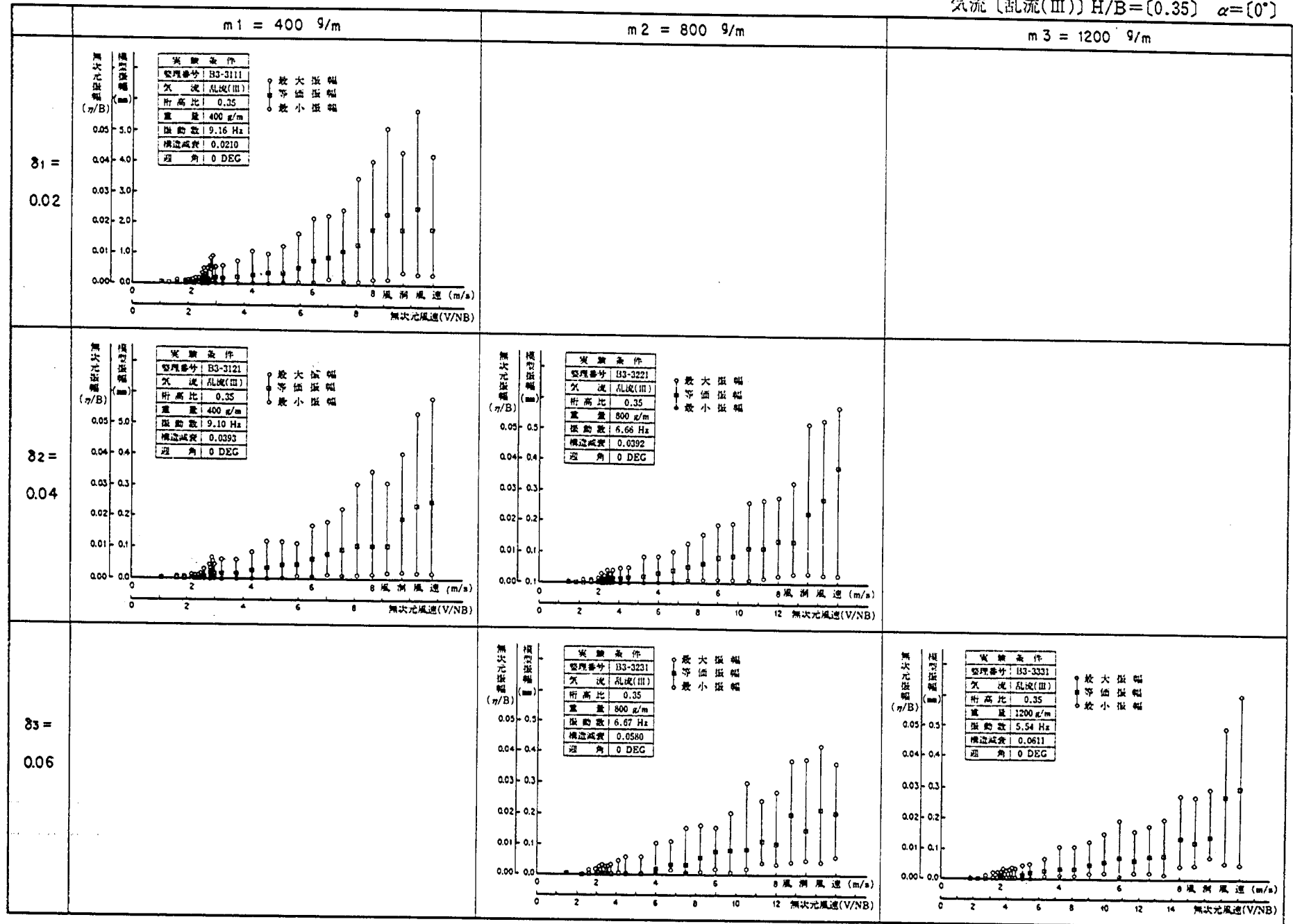
付図-1.17 風速 - 振幅関係図

気流〔乱流(Ⅲ)〕 $H/B=[0.30]$ $\alpha=[0^\circ]$



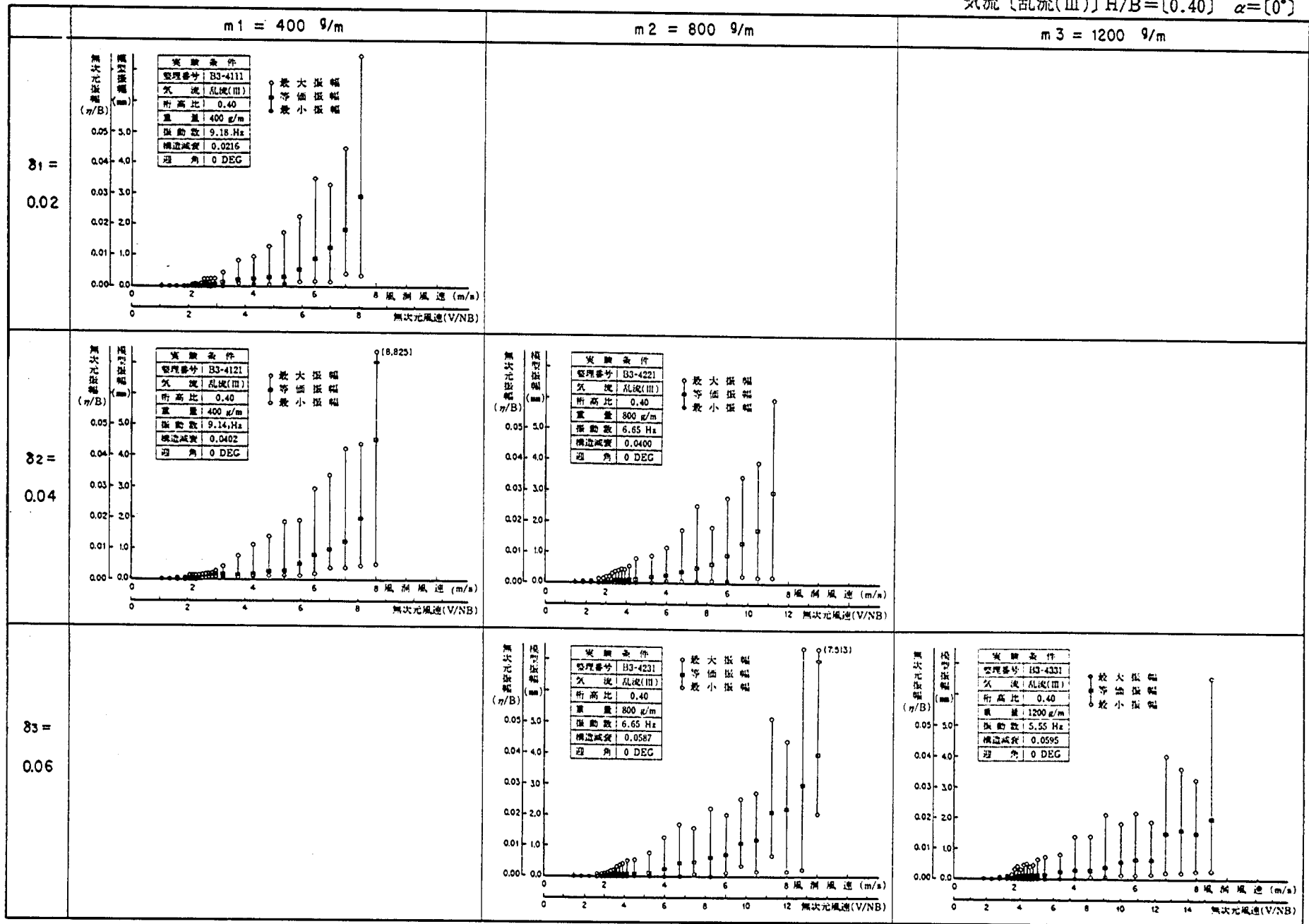
付図-1.18 風速 - 振幅 関係 図

気流 [乱流(Ⅲ)] $H/B=[0.35]$ $\alpha=[0^\circ]$



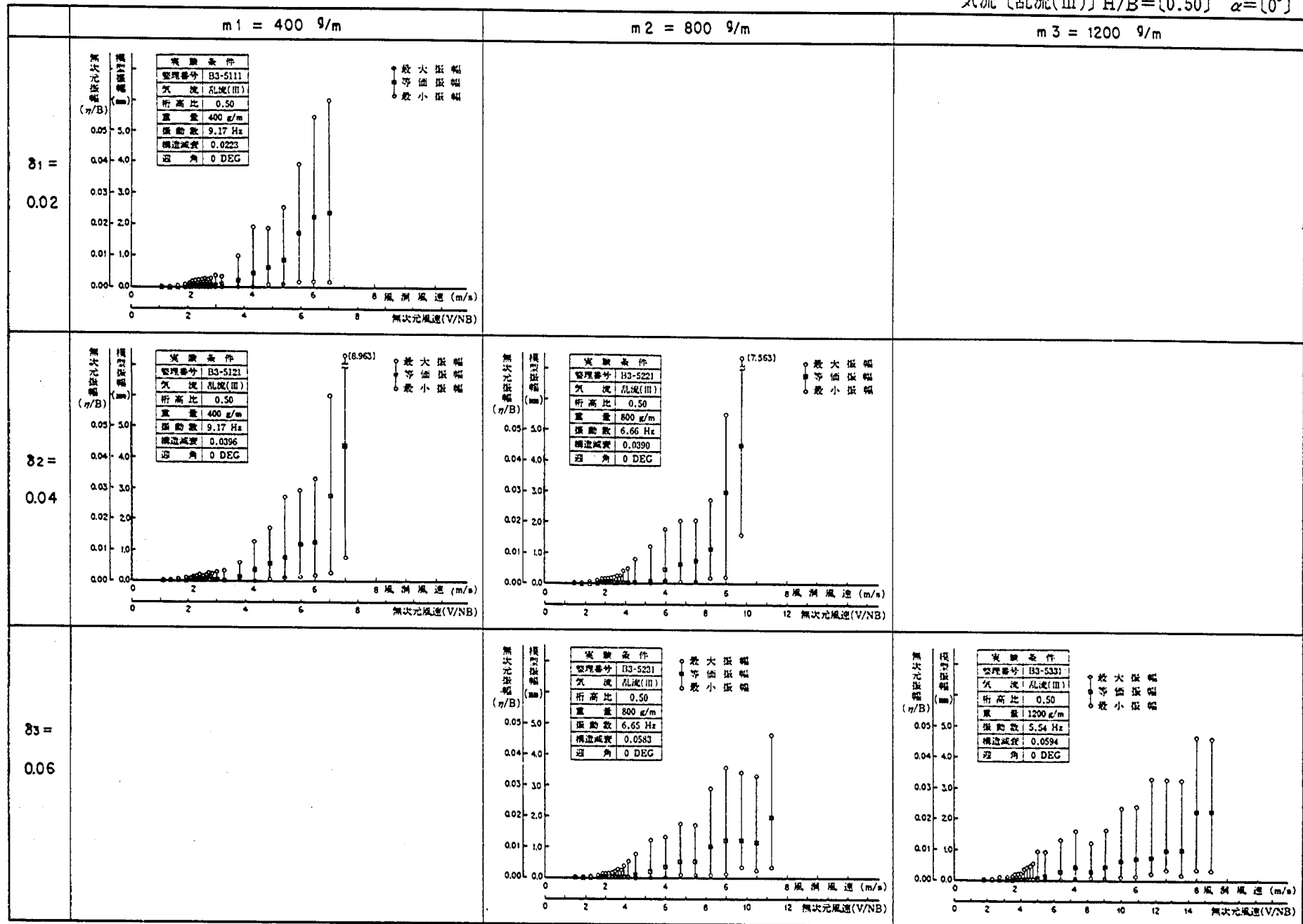
付図-1.19 風速-振幅関係図

気流〔乱流(Ⅲ)〕 $H/B=[0.40]$ $\alpha=[0^\circ]$



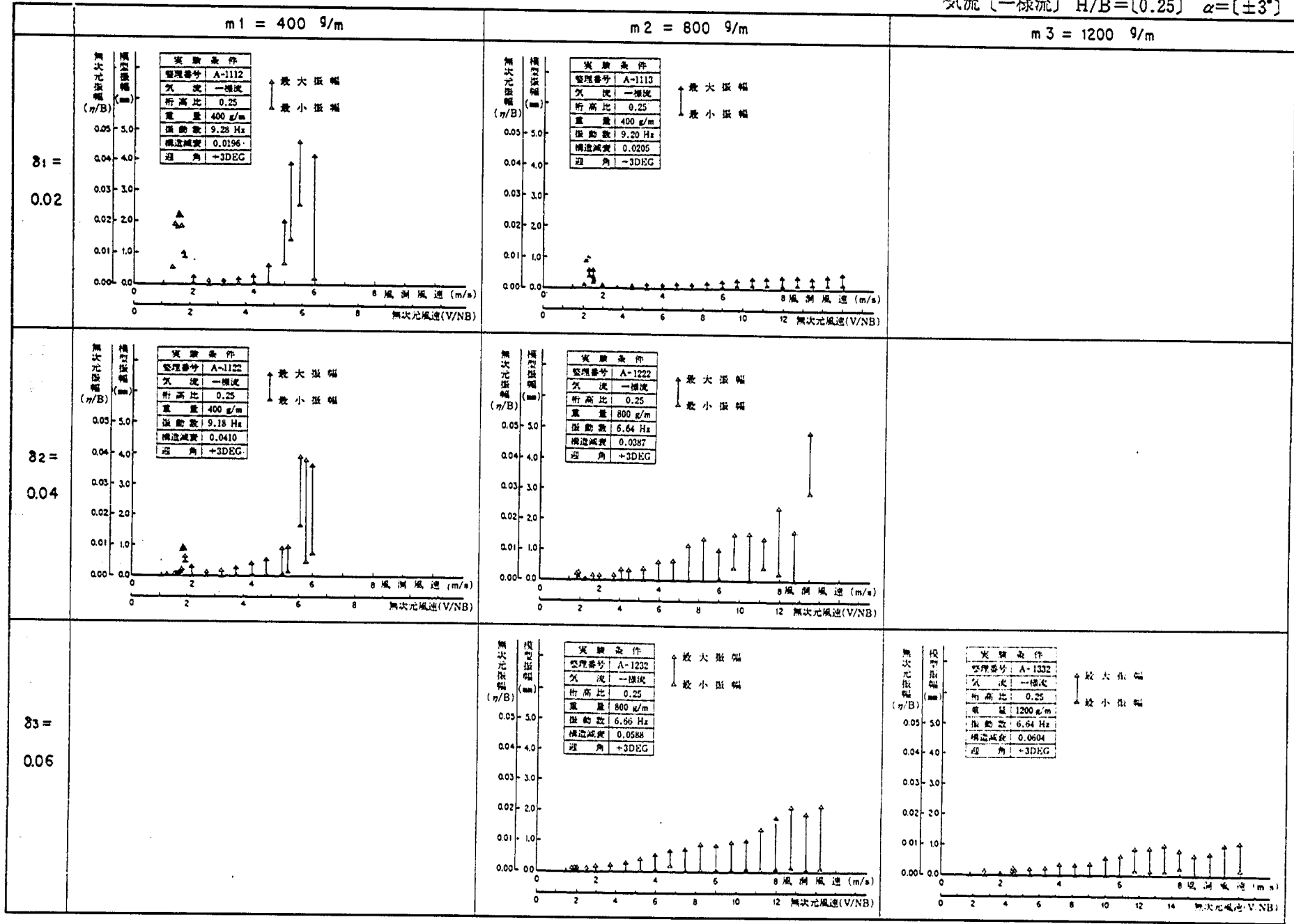
付図-1.20 風速-振幅関係図

気流〔乱流(Ⅲ)〕 $H/B=[0.50]$ $\alpha=[0^\circ]$



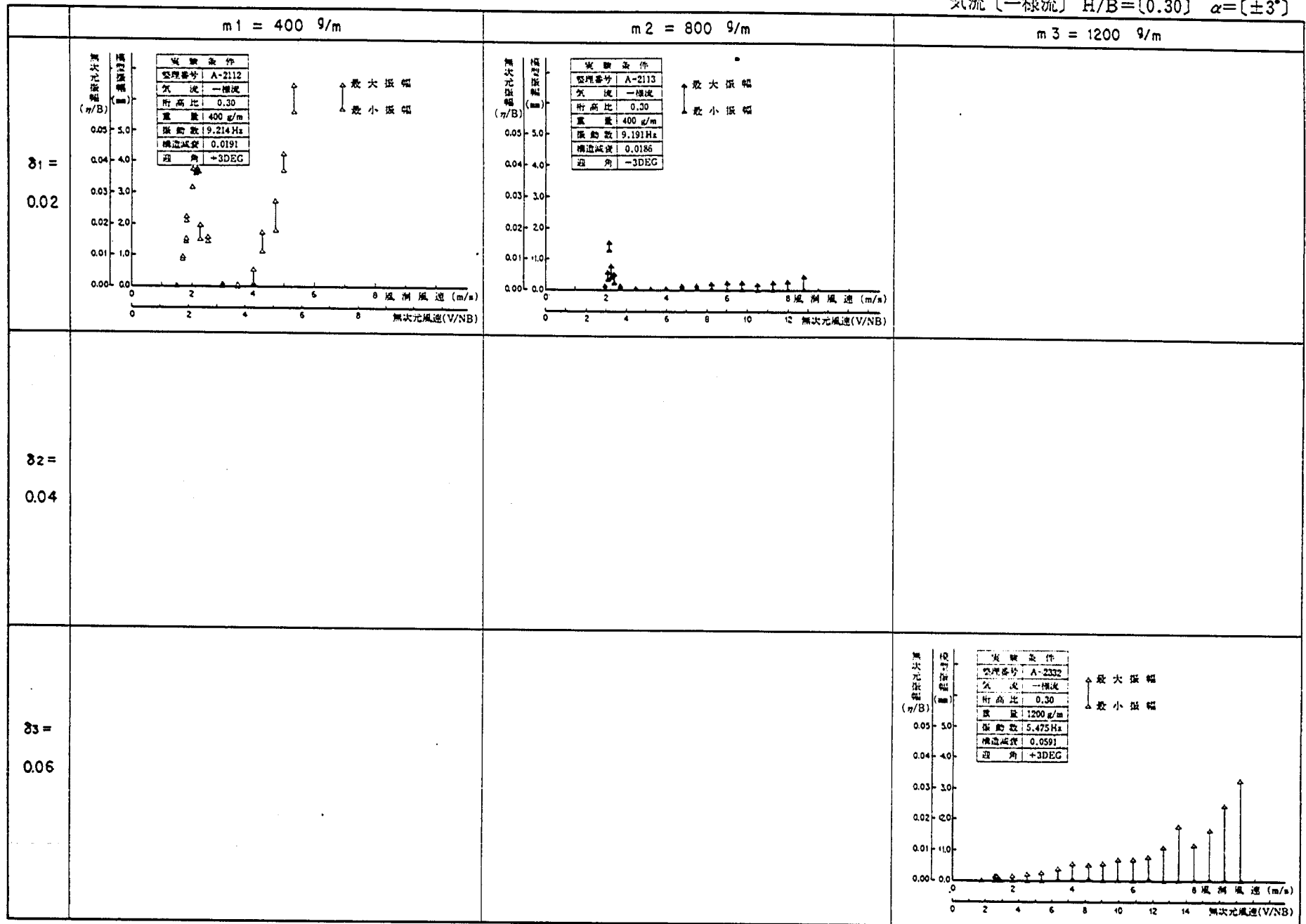
付図-1.21 風速-振幅関係図

気流〔一樣流〕 $H/B=[0.25]$ $\alpha=[\pm 3^\circ]$



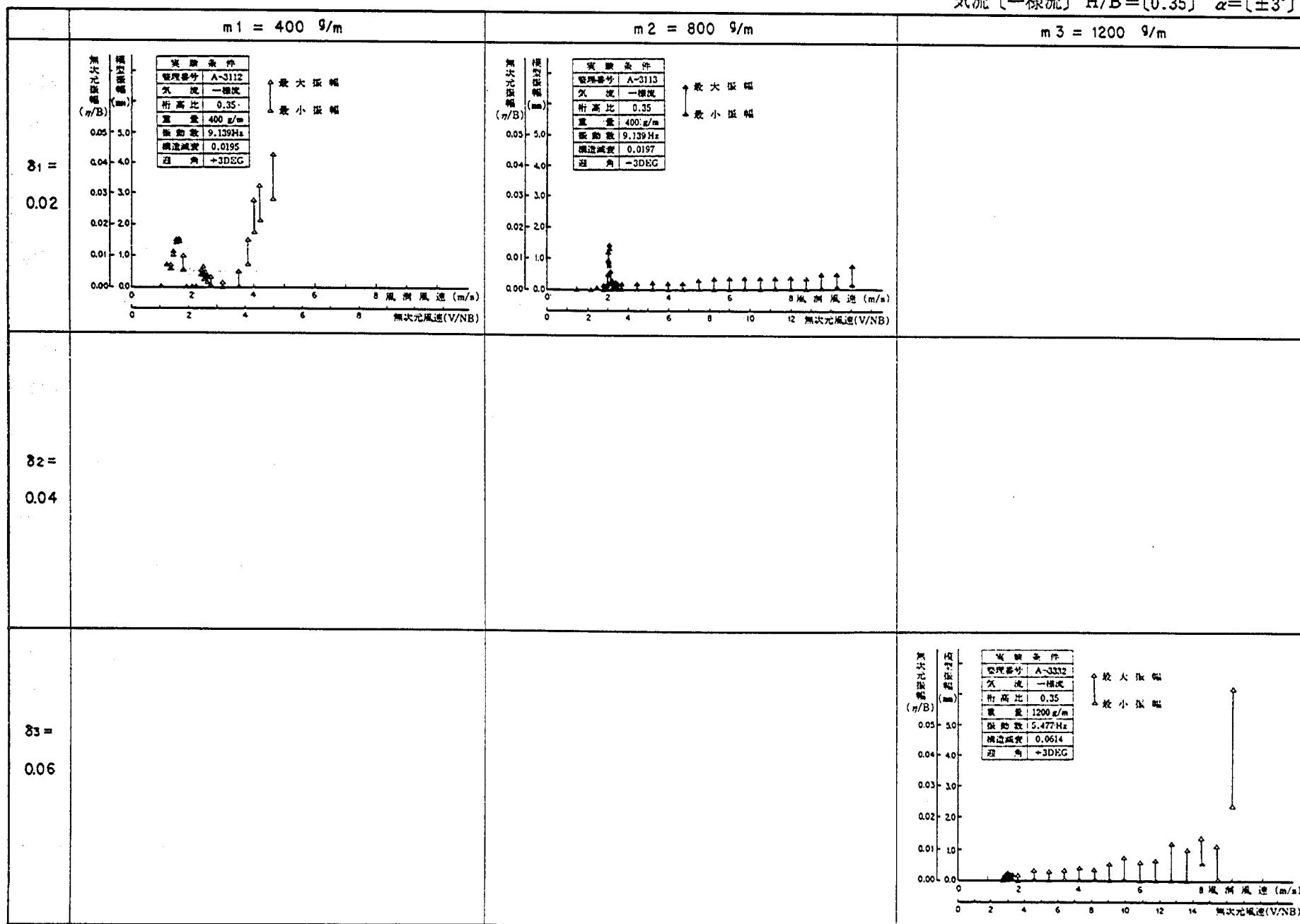
付図-1.22 風速 - 振幅関係図

気流〔一様流〕 $H/B=[0.30]$ $\alpha=[\pm 3^\circ]$



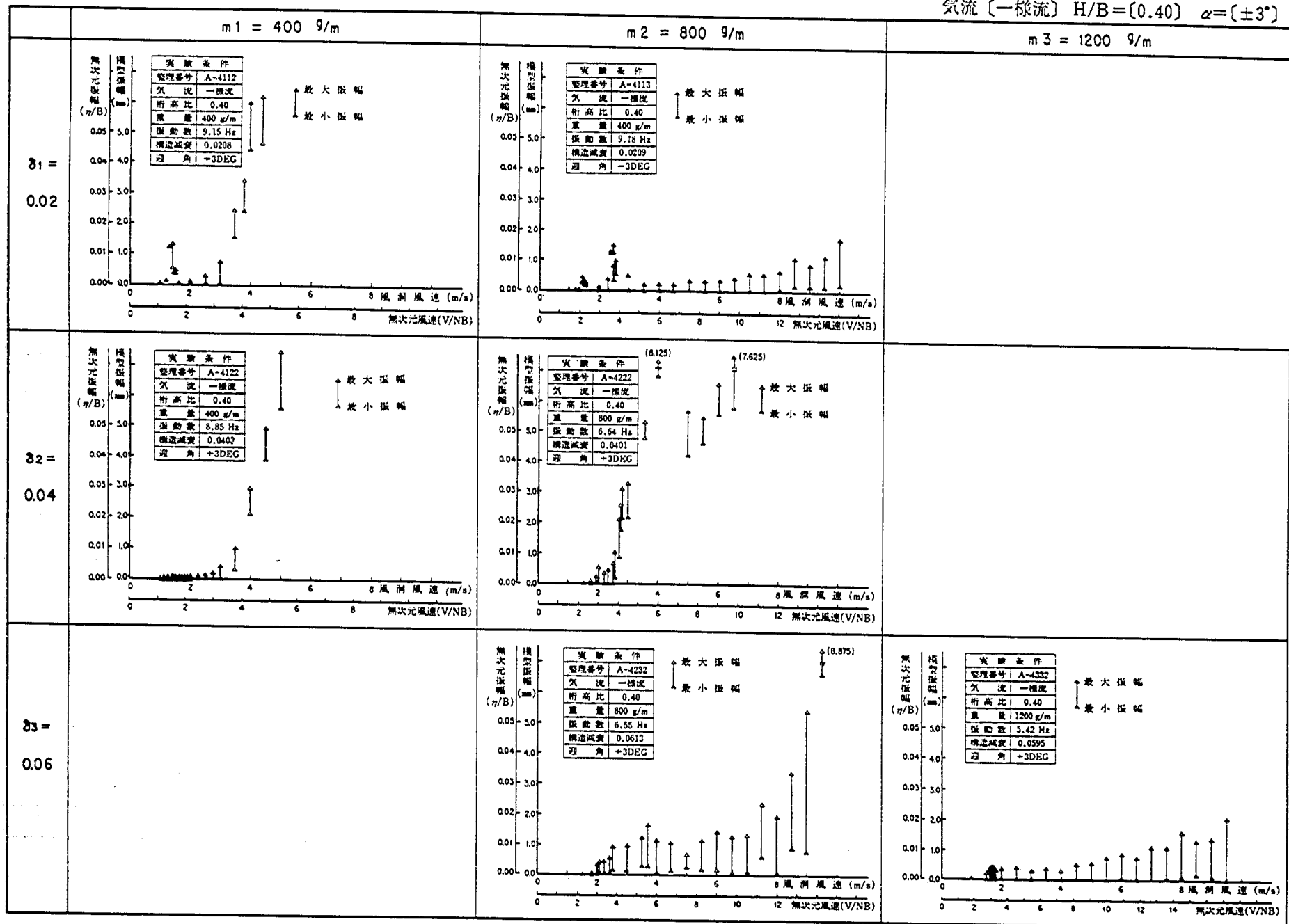
付図-1.23 風速 - 振幅關係圖

気流〔一樣流〕 $H/B = (0.35)$ $\alpha = (\pm 3^\circ)$



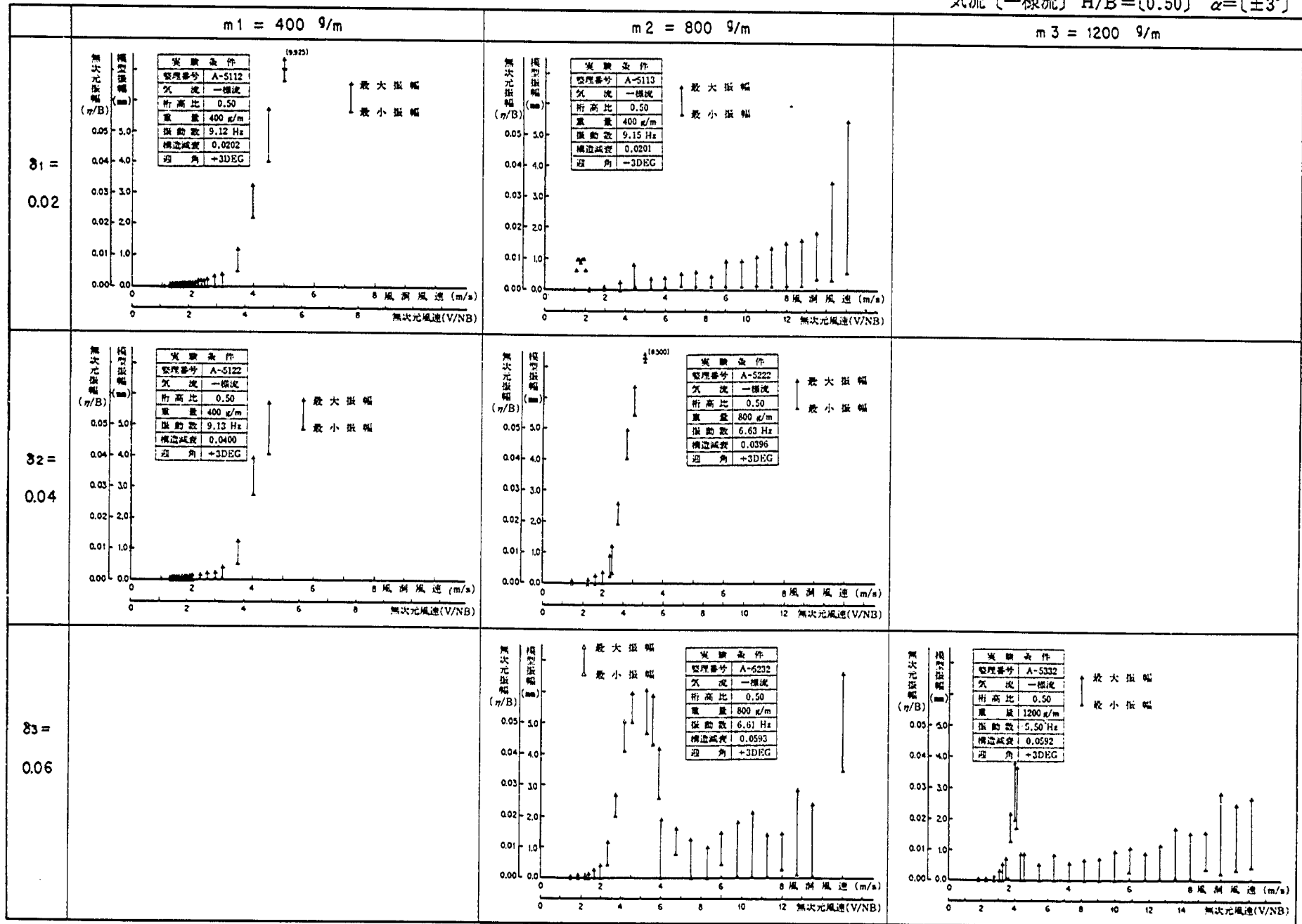
付圖-1.24 風速 - 振幅關係圖

氣流〔一様流〕 $H/B=[0.40]$ $\alpha=[\pm 3^\circ]$



付図-1.25 風速-振幅関係図

気流〔一様流〕 $H/B=[0.50]$ $\alpha=[\pm 3^\circ]$



箱桁橋の空力特性調査報告書

ISSN 0386-5878

土研資料第2390号

昭和61年6月(1986.6)

横山功一, 中神陽一
神崎一夫, 福田誠
福富孝泰

要旨 箱桁橋の空力応答特性を把握し、耐風設計の資料とするために、典型的な断面形を数種選り、剛性棒を用いた単径間弾性模型を用いた風洞実験を実施した。実験条件としては、質量・構造減衰・気流条件を変化させ、空力特性に及ぼすこれらの要因の影響度を調査した。

キーワード：箱桁橋，耐風設計，渦励振，ギャロッピング，バフエティング



郵便はがき

四十円切手
をはって
さい

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

構造研究室 御中

No. 7

No. 7

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2390号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印