

008

土研資料第1371号

Aero 37/ST. Section

土木研究所資料

耐風調査報告書 (VI-1977)



昭和53年3月

建設省土木研究所

構造橋梁部構造研究室

序

昭和 52 年度に実施した耐風調査の結果をとりまとめ、以下の項目について報告する。

- (1) 名港西大橋の耐風性調査
- (2) 長大吊橋の長期観測データ解析

昭和 53 年 3 月

構造研究室	室 長	成 田	信 之
	研究員	横 山	功 一
	研究員	佐 藤	弘 史
	室 員	野 村	一 夫
	室 員	湯 沢	聡
	室 員	神 寄	一 夫



目 次

1. 調 査 の 概 要	1
2. 名港西大橋耐風性調査	2
2-1 ま え が き	2
2-2 記 号	2
2-3 実 験 方 法	2
2-4 実 験 条 件	3
2-5 実 験 結 果	3
2-6 考 察	5
2-7 耐風性の検討	6
2-8 ま と め	7
3. 長大吊橋の長期観測データ解析	8
3-1 ま え が き	8
3-2 平戸大橋の概要	8
3-3 平戸大橋の耐風性調査	9
3-4 長期観測システム	9
3-5 観測データの解析	10
3-6 ま と め	11
4. お わ り に	12
参 考 文 献	12
表	13
図	25
写 真	52

1. 調査の概要

現在、東京湾、伊勢湾、大阪湾などでは湾岸道路の計画があり数多くの長大橋梁の建設が予定されている。吊橋、斜張橋などに代表される長大橋梁には耐風性の検討が不可欠であるが、外力としての自然風の特長およびこれを受けた際の構造物の応答にはまだ不確かな点が多く残されている。

本調査は長径間橋梁の建設の可能性を高めることと、より合理的な設計法の確立を計ることを目的として昭和47年度から実施されている。本年度実施したもののうち以下の項目について報告を行なう。

(1) 名港西大橋の耐風性調査

現在名港西大橋の設計案の1つとして2橋並列の箱型断面の斜張橋が考えられている。長大橋の耐風安定性で一般に問題になるのは自励振動と渦励振であるが、過去の斜張橋の実施例について調べると低風速における渦励振の発現が予測されることが多い。また本設計案は2橋並列であるため、上流側の橋により乱れた風が下流側の橋にあたり、下流側の橋に不規則な強制振動（パフエツティング）を発現させる可能性がある。そこで当研究室は名港西大橋設計案について、渦励振およびパフエツティングに関する耐風性を検討するためにばね支持模型を用いて風洞実験を実施した。その結果本設計案の補剛桁断面は自励振動に関しては十分な耐風性を有すること、また渦励振およびパフエツティングに関してはより詳細な検討が必要であることなどが明らかとなった。

(2) 長大吊橋の長期観測データ解析

実際に建設された長大橋梁について架設地点の風の特長および橋の応答特性を観測することは橋梁の耐風性にとって重要である。すなわちこの観測によりその橋梁に施された耐風設計の妥当性が確認されるとともに、今後の長大橋梁の設計に必要な資料を提供することになるからである。当研究室は今年度平戸大橋の長期観測に関して長崎県より技術指導の依頼を受けた。平戸大橋は中央径間長465.4mを有するわが国第2位の長大吊橋であり、当橋梁から得られる実測データは上述の意味で貴重な資料となると思われる。そこで当研究室は今年度得られた平戸大橋の長期観測データを用いて風の特長および応答の特性に関して解析を行なった。その結果今年度得られたデータは風速が10～19m/s程度で応答振幅は微小であったこと、平戸大橋の最低次の固有振動数は風洞実験時に実験条件として用いた値と比較すると鉛直たわみモードは両者一致しているのに対しねじれモードでは今回観測されたものの方が小さいこと、などが明らかとなった。

2. 名港西大橋耐風性調査

2-1. ま え が き

名港西大橋の設計案としては図 2.1.1 に示すような 2 橋並列の箱型断面の斜張橋が考えられている。本設計案のような長大斜張橋の建設にあたっては、耐風安定性の検討が不可欠である。耐風安定性で一般に問題にされるのは、自動振動と渦励振であるが、過去の斜張橋の実施例について見ると、低風速における渦励振の発現が予測されることが多い。また本設計案は 2 橋並列であるため、上流側の橋により乱れた風が下流側の橋にあたり、下流側の橋に不規則な強制振動（パフエッティング）を発生させる可能性がある。そこで、自動振動、渦励振およびパフエッティングに関する耐風性を検討するために、ばね支持模型を用いて風洞実験を行なった。実験方法、実験条件、実験結果、考察、耐風性の検討をとりまとめ、ここに報告する。

2-2. 記 号

A ; 倍振幅	Z ; 海面からの高度
B ; 代表長さ、および補剛桁断面の幅	α ; 迎角
D ; 補剛桁断面中央の厚さ	δ ; 対数減衰率 $\delta = \delta_s + \delta_a$
g ; 重力加速度	δ_a ; 空気力による対数減衰率
H ; 鉛直方向模型間隔	δ_s ; 構造物の対数減衰率
I ; 単位長さあたりの質量極慣性モーメント	ν ; 水平方向長さの補正係数
L ; 水平方向模型間隔	ρ ; 空気密度
l ; 模型の長さ	添 字
l_s ; スパン長	h ; たわみ振動
M ; 単位長さあたりの質量	θ ; ねじれ振動
N ; 固有振動数	p ; 原型
V ; 風速	m ; 模型
V_0 ; 高度 10 m での平均風速	

2-3. 実 験 方 法

実験は、建設省土木研究所の橋梁試験用風洞を用いて行なった。模型は二次元剛体模型を用い、8 本のコイルバネにより風洞内に支持し、風速、迎角を変化させ、そのときの模型の挙動を観測した。実験に用いた模型を図 2.1.2 に示す。2 橋並べた場合に起こるパフエッティングなどの現象を調べる際は、測定模型の上流あるいは下流に、測定模型と同様の幾何学的形状を有するダミー模型をピアノ線で固定し、実験を行なった。実験に用いる風は乱れのほとんどない一様流であり、風速の測定はマノメータを用いて行ない、模型の後方に生ずる乱れた流れについては熱線風速計を用いて測定した。模型の挙動は、2 台の光学式変位計により測定し、加算あるいは減算することにより、それぞれのたわみあるいはねじれ成分を求め、データレコーダまたはペンレコーダに記録した。質量に関する相似条件を満足させるためには、

あらかじめバネ定数を計測し、所要の固有振動数を計算し、おもりを調整してその固有振動数に一致させるという方法をとった。減衰率に関する相似条件を満足させるためには電磁ダンパーを用い、その抵抗値を変化させ所要の減衰率に設定した。

2-4. 実験条件

相似条件としては幾何学的形状を一致させることの他に、次の6つの無次元量を原型と模型とで一致させた。

$$M/\rho B^2, V/N_h B, \delta_{sh}, I/\rho B^4, V/N_\theta B, \delta_{s\theta} \quad (2.1, a \sim f)$$

幾何学的縮尺は、 $1/30$ と決めた。

原型の単位長さあたりの重量および単位長さあたりの重量極2次モーメントはそれぞれ

$$M_p \cdot g = 1015 \text{ kgw/mm}, I_p \cdot g = 1.65 \times 10^8 \text{ kgw} \cdot \text{mm}^2$$

であるので(2.1.a)および(2.1.d)より、模型重量および模型の重量極2次モーメントがそれぞれ次のように求まる。

$$M_m \cdot \ell \cdot g = 18.044 \text{ kgw}, I_m \cdot \ell \cdot g = 325926 \text{ kgw} \cdot \text{mm}^2$$

原型の固有振動数は最も次数の低いもので、

$$N_{ph} = 0.287 \text{ Hz}, N_{p\theta} = 1.61 \text{ Hz}$$

と計算により求められており、振動数比は、

$$N_{p\theta}/N_{ph} = 5.61 \text{ であるから、曲げとねじれの連成振動は起こらないとみてさしつかえないであろう。}$$

したがって今回の実験では両者を独立に扱い、振動数比は実橋に一致させなかった。模型の固有振動数は次の値とした。

$$N_{mh} = 1.93 \text{ Hz}, N_{m\theta} = 4.31 \text{ Hz}。$$

(2.1.b) および(2.1.e)より風速換算比は次のように求まる。

$$(V_p/V_m)_h = 4.46, (V_p/V_m)_\theta = 1.121$$

斜張橋に関する対数減衰率の実測値を表2.1に示す。

ここに示したように斜張橋の対数減衰率は0.0158~0.0559まで、かなりのばらつきがあるのがわかるが、今回の実験では、たわみ振動については、模型の倍振幅10mm(あるいは20mm)のとき、0.02, またねじれ振動については倍振幅2°のとき、0.02と設定した。

以上の実験条件を表2.2にまとめる。

2-5. 実験結果

実験は表2.3~表2.5に示す各ケースについて行なった。

これらの実験結果を整理して、次の図にまとめた。

a、自励振動(1橋単独の場合)

ねじれモード、風が桁の薄い方から厚い方へ
迎角(-5°~5°)
吹く場合(以下A方向と称す)

$$V-\delta \text{ 曲線 } (A=2^\circ) \quad \text{図 2.2}$$

$$V-\delta \text{ 曲線 } (A=4^\circ) \quad \text{図 2.3}$$

ねじれモード, 風が桁の厚い方から薄い方へ 迎角 $(-5^\circ \sim +5^\circ)$
吹く場合 (以下 B 方向と称す)

V- δ 曲線 ($A = 2^\circ$) 図 2.4

V- δ 曲線 ($A = 4^\circ$) 図 2.5

ねじれモード, B 方向 迎角 0° ,

振動数比 $(N_p/N_h)_m = 1.49$

V- δ 曲線 ($A = 2^\circ, A = 4^\circ$) 図 2.6, 図 2.7

たわみモード, 迎 角 0° ,

(他の迎角の場合も, V- δ 特性はかわらない)

V- δ 曲線 ($A = 10mm$, A 方向, B 方向)

図 2.8, 図 2.9

b. 渦 励 振 (1 橋単独の場合)

ねじれモード 迎 角 $(-5^\circ \sim +5^\circ)$

V- δ 曲線 ($A = 2^\circ$, A 方向, B 方向)

図 2.2, 図 2.4

ねじれモード 迎 角 $(-5^\circ \sim +5^\circ)$ B 方向

V- δ 曲線 ($A = 1^\circ, A = 2^\circ$) 図 2.10, 図 2.11

ねじれモードで, 限定振動が生じたもの

V-A 曲線 図 2.12

たわみモードの減衰後の乱れた動き

迎 角 0° , A 方向

V-A 曲線 図 2.16, 1 ピーク値

図 2.16, 2 標準偏差

c. 上流に模型がある場合の下流側模型の挙動

ねじれモード 迎 角 0° , $H = 0$

V-A 曲線 ($L = 1/2 B \sim 2 B$)

図 2.13, 1 ピーク値, 図 2.13, 2 標準偏差

ねじれモード $L = 2 B$ $H = 0$

V-A 曲線 (迎角 $-3^\circ \sim +3^\circ$) 図 2.17 ピーク値

たわみモード 迎 角 0° $H = 0$

V-A 曲線 ($L = 1/2 B \sim 2 B$)

図 2.14, 1 ピーク値, 図 2.14, 2 標準偏差

たわみモード 迎 角 0° , $L = 2 B$

V-A 曲線 ($H = 0 \sim 3/2 D$)

図 2.15, 1 ピーク値, 図 2.15, 2 標準偏差

たわみモード $H = 0$, $L = 2 B$

V-A 曲線 (迎角 $-3^\circ \sim +3^\circ$)

d. 下流に模型がある場合の上流側模型の挙動

ねじれモード $L = 2B$, $H = 0$, 迎角 0°

$V-\delta$ 曲線 ($A = 2^\circ$) 図 2. 18

たわみモード $L = 2B$, $H = 0$, 迎角 0°

$V-\delta$ 曲線 ($A = 10\text{ mm}$) 図 2. 19

e. 後流風速 $L = 1/2B \sim 2B$ 図 2. 20. 1 主流方向平均風速

図 2. 20. 2 主流方向標準偏差 図 2. 20. 3 主流方向変動率 図 2. 20. 4 鉛直方向標準偏差

2-6. 考 察

2-6-1. 自励振動について

ねじれモードの自励振動（フラッター）に関しては、図 2. 2～図 2. 5 に示すように迎角 $-5^\circ \sim +5^\circ$ の範囲で実橋風速 100 m/s の範囲まで安定である。本橋の設計風速が 54.5 m/sec 、（基本風速 37 m/sec 、高度による補正 $(38/10)^{1/6}$ 、水平長さによる補正 1.18 より、 $37 \times (38/10)^{1/6} \times 1.18 = 54.5\text{ m/s}$ ）であることを考えると十分な安定性を有していることがわかる。また本橋の振動数比とは異なる振動数比（ 1.49 ）で、2 自由度のフラッター試験を行ない、その結果を図 2. 6、図 2. 7 に示した。これによると振動数比 1.49 の場合実橋風速 220 m/sec 程度まで安定であることがわかる。

たわみモードの自励振動（ギャロッピング）に関しては、図 2. 8、図 2. 9 に示すように減衰は非常に大きく実橋風速 $40 \sim 50\text{ m/sec}$ 程度から、減衰を読みとるのが困難になってくる。それ以上の風速に関して対数減衰率が書かれていないのはそのためであり、 0° 以外の他の迎角についても同じ傾向を示した。したがってギャロッピングに関しても、迎角 $-5^\circ \sim +5^\circ$ の範囲で十分安定であると判断される。

2-6-2. 渦励振について

図 2. 2、図 2. 4 の $V-\delta$ 曲線からねじれモードの渦励振は実橋風速 20 m/sec 付近、および実橋風速 50 m/sec 付近で生ずることが予想される。この付近の風速の間隔を細かくとって、 $V-\delta$ 曲線を描いたのが図 2. 10、図 2. 11 であり、さらに発振したものについて風速と倍振幅の関係を示したものが、図 2. 12 である。風が桁の厚さの大きい方から小さい方へ吹く場合、渦励振は、迎角 -3° 、 -4° で発生し、風の方が逆の場合、渦励振は迎角 -5° で発生した。発生した最大の倍振幅は 0.9° であった。

たわみモードに関しては、ねじれモードにおいて見られるような振動数、振幅が一定の渦励振は見られなかったが、若干の不規則な振動が 1 橋単独の場合でも観測されたので、2 橋並列の場合のそれとあわせて図 2. 16 に示した。

2-6-3. パフエーティングについて

上流側に模型をピアノ線で固定し、下流側にばね支持模型をおき、自由振動の状態に達してから 2 分間の記録について、ピーク値（2 分間での最大倍振幅）、標準偏差を整理した。

ねじれモードについては、図 2. 13. 1 に示すように、最初実橋風速 30 m/sec 付近で渦励振とほぼ同じオーダのピーク値を生じ、風速をあげるにつれいったん倍振幅は減少し、徐々に増加していく。実橋風速 30 m/sec 付近でのピーク値と模型間隔との関係を見ると、 $L = 1/2B$ のときの値が最も小さい。また

迎角と実橋風速 30m/sec 付近でのピーク値と比較すると図 2. 17 に示されるように迎角 0° の値が最も大きい。

たわみモードについては、図 2. 14. 1 に見られるように模型間隔が小さいほどピーク値が大きいという傾向があり、図 2. 14. 2、および図 2. 16. 1、図 2. 16. 2 に見られるように模型間隔が、 $L = 2B$ 程度になると、1 橋単独の場合のものとピーク値あるいは標準偏差の値がほとんど同じであるといえる。模型の高さ方向の間隔とピーク値の関係については、図 2. 15. 1 に見られるように間隔が大きいほどピーク値は小さいという傾向があり迎角とピーク値、標準偏差の値の関係については、図 2. 16. 1、図 2. 16. 2 に見られるように迎角 + 3° の値が若干大きいといえる。

2-6-4 後流に模型をおいた場合の上流側模型の挙動について

後流に模型をおいたことによる影響を $V-\delta$ 曲線で、単独橋の場合と比較したのが図 2. 18 および図 2. 19 であり、とくに大きな変化は見られない。

2-6-5 模型後流の風速について

図 2. 20. 1 ~ 図 2. 20. 4 により、主流方向平均風速は模型に近いほど小さい、標準偏差および変動率は模型に近いほど大きい、鉛直方向標準偏差は $L = B$ 、 $L = 3/2B$ 付近が大きい、などのことがわかる。

2-7. 耐風性の検討

2-6-1 に述べたように、本設計案の自励振動に関する空力特性は迎角が $-5^\circ \sim +5^\circ$ の範囲で実橋風速 100m/sec までねじれおよびたわみモードに関して安定であるので、基本的には耐風性の優れた断面といえる。しかし解決しなければならない点も少なくない。以下に問題点を示す。

2-7-1 渦励振について

2-6-2 に示したように本橋は風速 20m/sec ~ 30m/sec において迎角 -3° 、 -4° (風が桁の厚い方から薄い方へ吹く場合) および迎角 -5° (風が桁の薄い方から厚い方へ吹く場合) の場合にねじれモードの渦励振の発生が予想される。この振動の倍振幅は、いちばん大きい場合に迎角 -5° において、0.9 度である。

対称 1 次モードで、最大ねじれ角 1° (片振幅) での応力計算によると、側径間で補剛桁が最大 595kg/cm²、ケーブルで最大 1490kg/cm² の応力が発生することであり、単純な比例計算を行えば、0.9 度の倍振幅では補剛桁 268kg/cm²、ケーブル 671kg/cm² の応力が発生することになる。

このようにケーブルに発生する応力は小さくなく、問題になると思われる。渦励振による疲労問題を解決する手順を図 2. 21 のフローチャートにそって説明すると次のようになる。

- ① 補剛桁にアタッチメントを取り付ける、などの方法を施し、渦励振振幅を小さくする。
- ② 三次元性を考慮して実橋の振動振幅を推定する。(上述の計算では三次元性を考慮していない。)
- ③ 詳細な応力計算を行なう。(上述の応力計算では、塔は固定であり、側径間と中央径間は独立に振動し、ケーブルにたるみはない、などの仮定をおいている)
- ④ ケーブルの疲労許容応力度について十分検討し、これを基準にして③で求めた応力度の安全性を判定する。
- ⑤ 応力度が安全と判断されるまで①~④をくり返す。

2-7-2 パフティングについて

2-6-3. に示したように、2橋の水平間隔とたわみ振動およびねじれ振動のピーク値との関係は、たわみの場合は間隔が大きい方がピーク値は小さくなり、ねじれの場合は実橋風速 30m/sec 付近では、間隔が $L=1/2B$ のものがピーク値が最小である。たわみ振動の場合のピーク値は設計風速付近で、 $L=2B$ の場合実橋倍振幅で約 8cm、 $L=1/2B$ で約 30cm であり、ねじれ振動の実橋風速 30m/sec 付近では、 $L=2B$ が倍振幅 0.45°、 $L=3/2B$ が 0.5°、 $L=B$ が、0.6°、 $L=1/2B$ が 0.25° である。

対称 1 次モードおよび逆対称 1 次モードでの最大たわみ片振幅が 10cm での応力計算によると、応力が最も大きいところで、補剛桁が 115kg/cm²、塔が 168kg/cm²、ケーブルが 290kg/cm² である。単純な比例計算を行なうと、 $L=1/2B$ で設計風速付近で、補剛桁 173kg/cm²、塔 252kg/cm²、ケーブル 435kg/cm²、 $L=2B$ でそれぞれ 46kg/cm²、67kg/cm²、116kg/cm² となる。

同様にねじれ振動について計算を行なうと、 $L=1/2B$ で、側径間補剛桁が、74kg/cm²、ケーブルが 186kg/cm²、 $L=2B$ でそれぞれ 134kg/cm²、335kg/cm² となる。単純に最大の応力が最小のものを最適とすれば、 $L=2B$ が最適な間隔ということになるが、以上の計算の根拠となる値が、不規則な 2 分間の振動における最大の倍振幅の値なので、ある程度の幅をもって扱わなければならないこと、2-7-1. の②、③に述べた実橋応力推定上の諸問題、たわみ振動については設計風速 54.5m/sec 付近を問題にしており、ねじれ振動については、30m/sec 付近を問題にしているのも、上記の応力度のあらわれる頻度が異なること、7-1 の①で述べた限定振動抑制のためのアタッチメントを取り付けることによりバフェットの特性の変化が考えられることなどを考えると 2 橋の水平間隔の決定にあたってはさらに詳細な検討が必要と考えられる。

$L=2B$ のたわみモードについては、高さの間隔を変化させ、振幅の大きさを比較し、間隔が大きいほど振幅が小さいという結論を得たが、上述のように $L=2B$ では設計風速 54.5m/sec 付近でのたわみ振動により発生する応力度が $H=0$ でも問題にならないほど小さいので、この場合は高さの間隔をつける必要はないと思われる。

2-7-3. 後流の橋が上流の橋におよぼす影響について

2-6-4. に述べたように、 $L=2B$ については、ほぼ単独の橋と同様に扱ってもよいと思われる。

2-8. ま と め

今回の実験および考察の内容をまとめる。

2-8-1. 名港西大橋設計案の耐風性を検討するためにばね支持模型およびダミー模型を用いて風洞実験を行ない、1 橋単独の場合の自励振動、渦励振、および 2 橋並列の場合のバフェッティング、などについて調査を行なった。

2-8-2. 実験の結果本設計案の補剛桁断面は、自励振動に対しては、十分な耐風性を有することがわかった。

2-8-3. しかしながら疲労問題で重要な渦励振、およびバフェッティングに関しては、防振対策などを含むより詳細な検討が必要であることがわかった。

3. 長大吊橋の長期観測データ解析

3-1. ま え が き

平戸大橋の耐風性調査は長崎県より委託を受けて昭和45年度より昭和50年度まで構造研究室が担当して実施した。内容としては設計風速調査、補剛桁架設時の耐風性調査などを含み、これらの成果は現地の設計、施工に反映された。

平戸大橋の全工事は昭和52年3月に竣工され同年4月より供用が開始され現在に至っているが、当研究室は昭和52年度平戸大橋の長期観測に関して長崎県より技術指導の依頼を受けた。現時点で関門橋に次ぐわが国第2位の中央径間を有する長大吊橋の風および応答に関する観測データを解析することは、当橋に関して施された耐風設計の妥当性を確認するのみならず、今後の長大吊橋の設計に重要な資料を提供することになる。

平戸大橋の概要、耐風性、長期観測システム、および観測結果をとりまとめここに報告する。

3-2. 平戸大橋の概要

平戸大橋は長崎県北部にある平戸島を九州本島と結ぶため長崎県営有料道路として架設された単径間補剛トラス吊橋である。その架設位置を図3.1に、一般図を図3.2に示しその概要を以下に示す。

有料道路名：平戸大橋有料道路

路線名：一般国道383号

事業主体：長崎県

工事区間：長崎県平戸市岩の上町～北松浦郡田平町

工事延長：966m（内橋梁665m）

橋格：1等橋（T、L-20）

道路の区分：第3種第2級

設計速度：60km/h

橋梁型式：単径間2ヒンジ補剛トラス吊橋

（中央径間465.4m）

支間割：58.700+38.550+465.400+34.350+34.700+33.370

橋梁巾員：10.700m

ケタ下高：朔望平均満潮面より30.000m

塔の高さ：7.8m（海面上8.8m）

ケーブルの直径：364mm

ワイヤーの本数：4,332本（ケーブル1本当たり）

使用鋼量：上部工約6,400t

コンクリート量：約40,000m³

アンカレイジコンクリート量：約16,000m³（1基当たり）

事業費：56億円

工期：8年（調査4年、工事4年）

3-3. 平戸大橋の耐風性調査

平戸大橋の耐風調査に関してはすでに報告されているが^{(1)~(4)}この内容をまとめて以下に示す。

耐風性調査の内容としては設計風速調査、補剛桁の耐風性調査、架設時設計風速調査、補剛桁架設時の耐風性調査に大別される。

設計風速調査では測候所における既存の統計資料により推定するという方法を採用、基本風速を41.7m/s、自励振動の限界風速を70.4m/sと定めた。この限界風速により設計案の耐風性を調査したが、「本州四国連絡橋耐風設計指針（1969）⁽⁵⁾」が「本州四国連絡橋耐風設計基準（1972）⁽⁶⁾」に改訂されるに伴い、自励振動の限界風速を62.9m/sと定め、これにより実施設計案の耐風性を検討した。

補剛桁の耐風性調査としては図3.3に示す設計案および実施設計案について行なった。

まずA案およびB案について検討し、十分な耐風安定性を有すると判断し、次により経済的な断面としてグレーチングを設けていないC案について検討し、C1案が十分な耐風性を有すると判断した。

その後C1案を基本とする最終案および実施設計案について検討を行ない、十分な耐風安定性を備えた実施設計案を得ることができた。なお実施設計案でフラッター試験を行なった時の実験条件を表3.1に示す。

架設時設計風速調査としては平戸測候所の過去30年間の記録を用い、1～3月、4～6月ごとの架設時設計風速を推定した。再現期間を仮に20年とすればこの時の設計風速は32.2m/sであり自励振動の限界風速は38.6m/s程度となった。

補剛桁架設時の耐風性調査としては、バネ支持模型実験および非定常空気力実験を実施した。その結果架設時期を1～6月に選べば耐風安定性は十分であり、床版と補剛トラスを一体として施工する案を採用しても耐風安定性を損なわないと結論された。

3-4. 長期観測システム

平戸大橋に設置された長期観測システムの概要を以下に紹介する。なお観測機器の構成は表3.2に、総合系統図は図3.4に、計測器の配置は図3.5に示した。また観測機器の受信部および記録部は平戸大橋管理事務所に設置されている。

3-4-1. 観測計器

a. 風向風速計（写真3.1, 3.2）

プロペラ型発電機式の風向風速計であり、風速の水平分布の測定を主な目的とし、中央径間1/2点より30m山平側の位置に設置されている。測定範囲は風速が0～60m/sまで、風向が北を0°として0～540°までであり、風向、風速ともこの範囲がデータレコーダへの出力0～1Vに対応している。データレコーダおよび風向風速記録器には風向・風速とも10分間の平均の値が記録される。

b. VFB加速度計（写真3.3, 3.4）

上下動2台および水平動1台を中央径間1/2点に配置している。周波数特性は0.1～100Hzであり、測定範囲は±0.1～±1000galであるが、増幅部では切換スイッチにより記録感度を20, 50, 100,

200, 500gal/Vのいずれかに設定できる。増幅部からの出力電圧は最大±1Vである。

3-4-2. データの記録

風向風速記録器は平均風向、風速を常時記録する。また強風時の振動、風向、風速、時刻は自動的にデータレコーダに記録される。すなわち予め設定した風速値より大きな平均風速が1秒以上続くと起動がかかり設定した記録時間だけデータレコーダが作動する。設定風速は0~60m/s, 記録時間は0~30分の間それぞれ設定可能である。また起動と起動の最小の時間間隔も0~2時間まで設定できる。

本システムに用いるデータレコーダは記録専用であるのでモニターとしては電磁オシログラフを用いている。またデータの解析のための校正信号(0V, 1V, 0V, -1V, 0V)は手で磁気テープの最初に記録している。磁気テープの内容は次のとおりである。

- 1 ch 加速度(水平動)
- 2 ch 加速度(上下動その1)
- 3 ch 加速度(上下動その2)
- 4 ch 風 向
- 5 ch 風 速
- 6 ch 時 刻(1分ごとに月, 日, 時, 分を記録)

受信部および記録部の写真を写真3.5および3.6に示す。

3-5. 観測データの解析

3-5-1. 解析方法

記録された磁気テープは当研究室で解析を行なった。まずペン書きレコーダに再生し、データとして正しく記録されているかを確認するとともにデータが記録された時刻をチェックする。その後当研究室のデータ処理装置でA/D変換を行ないアナログテープからデジタルテープを作成する。今回のA/D変換にあたってはサンプリングタイムを200msとし、解析にあたっては2000個のデータを1RUNとして用いた。

3-5-2. 解析内容

今回行なった解析は風速、風向、鉛直たわみ加速度、ねじれ加速度、横たわみ加速度に関する基本的統計量(平均, 標準偏差, 変動率, 最大, 最小)を求めること, および加速度に関してはパワースペクトルを求めることである。鉛直たわみ加速度(a_h)およびねじれ加速度(a_α)と2chの加速度(a_2)および3chの加速度(a_3)との関係は、ねじれ中心の水平位置を補剛桁断面の中心にあると仮定し次の関係を用いて求めた。

$$a_h = \frac{a_2 + a_3}{2} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$a_\alpha = \frac{a_2 - a_3}{B} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここにBは補剛桁の主構間隔である。他の量については各チャンネルからの出力をそのまま用いた。

3-5-3. 解析結果

解析結果を表3.3, 表3.4, 図3.6, 図3.7に示す。表3.3は風および応答の基本的統計量であり,

表 3.4 は平均風速と応答の関係であり、図 3.6 は加速度のパワースペクトルであり、また図 3.7 は平均風速と平均風向の関係を図に示したものである。風向・風速に関してはデータレコーダからの記録のほかに風向風速記録に収録されたものもあわせて示した。変位の標準偏差および振幅の推定にあたっては、振動をパワースペクトル解析によって得られる最低次の固有振動数をもった単弦振動と仮定した。

なおこれらの記録は設定風速 10 m/s (ただし、52年 6 月 30 日 21 時 27 分から 52 年 7 月 13 日の 1 時 42 分の間は設定風速 15 m/s)、記録時間 15 分記録繰り返し間隔 30 分をそれぞれ設定して得られたものである。また校正信号の記録ミスなどで一部の磁気テープは解析できなかった。

3-5-4. 考 察

図 3.7 によると今回解析した風の記録はほぼ橋軸直角方向のものが多く、風速範囲としては $8 \sim 19\text{ m/s}$ のものが記録されている。またデータレコーダに記録された風向・風速と、風向風速記録器に記録されたそれとでは値が異なり、これは現在原因を検討中である。なお表 3.3 に示した風速および風向の欄は平均風速および平均風向に対する統計量であるため、 σ 、 σ/M は普通の意味での変動分を示していることにはならない。

図 3.8 のパワースペクトルでは低次のピーク値に対応する周波数も示したが、これと表 3.1 に示した実験条件で用いた原型の振動数とは鉛直たわみモードではほぼ一致しているが、ねじれモードでの値が異なる。すなわち実験条件では 0.804 Hz であるのに、パワースペクトルのピーク値は 0.700 Hz である。完成系の風洞実験で得られた換算された発振風速および今回の観測により得られたねじれモードの最低時の固有振動数より実橋での発振風速を推定すると、自励振動の限界風速 62.9 m/s を迎角 1 度、2 度、3 度で $5 \sim 8\text{ m/s}$ 程度下回ることになる。

表 3.4 に平均風速と応答の大きさの関係を示したが、ねじれ応答は測定された風速範囲では高々 $4.4 \times 10^{-4}\text{ rad}$ (2.5×10^{-2} 度) の振幅であった。鉛直たわみ応答は測定された風速範囲で $0.7 \sim 2.1\text{ cm}$ の振幅であり、横たわみ応答は $1.8 \sim 7.3\text{ cm}$ の振幅である。なお風向が橋軸直角方向に近かったため、風速はそのままの形で表示した。ちなみに関門橋で得られた応答データ⁽⁷⁾では橋軸直角方向平均風速が $10 \sim 20\text{ m/s}$ で鉛直たわみ応答の振幅が $1.6 \sim 2.9\text{ cm}$ 、横たわみ応答の振幅が $2.0 \sim 3.0\text{ cm}$ である。

3-6. ま と め

今回の解析内容をまとめると次のようである。

- 3-6-1. 平戸大橋の長期観測システムから得られた風および応答の特性について解析を行なった。
- 3-6-2. 得られた風の記録は風向としてはほぼ橋軸直角方向に近く、風速範囲としては $10 \sim 19\text{ m/s}$ であった。
- 3-6-3. したがって耐風設計の結果として当然ながら振幅の大きな渦励振あるいは自励振動は記録されていない。
- 3-6-4. 応答のパワースペクトルより平戸大橋の固有振動数を推定したが、たわみモードの最低次の振動数は実験条件で用いた値とほぼ一致していたのに対し、ねじれモードの最低次の振動数は異なっていた。

4. お わ り に

今年度の調査を実施するにあたりお世話いただいた中部地方建設局名四国道工事事務所、長崎県土木部道路建設課、ならびに平戸大橋管理事務所の方々に心からお礼を申し上げる次第である。

参 考 文 献

1. 土木研究所構造研究室：平戸大橋基本調査（耐風調査），土木研究所資料第 650 号，1971， 3
2. 土木研究所構造研究室：平戸大橋設計施工調査（耐風調査），土木研究所資料第 750 号，1972， 3
3. 土木研究所構造研究室：平戸大橋設計施工調査（耐風調査），土木研究所資料第 844 号，1973， 3
4. 土木研究所構造研究室：平戸大橋設計施工調査・耐風性調査報告書，土木研究所資料第 1102 号，1975， 12
5. 土木学会：本州四国連絡橋耐風設計指針（1967），1967， 8
6. 土木学会：本州四国連絡橋耐風設計基準（1972），1972， 3
7. 土木研究所構造研究室：関門橋長期観測データ解析報告書（その 1），土木研究所資料第 1015 号，1975， 3

表-2.1 斜張橋補剛桁の対数減衰率（実測値）

橋 の 名	ス パ ン (m)	振 動 モード	固有振動数 (c/s)	対数減衰率
尾 道 大 橋	85.0+215.0+85.0	1-S-B	0.58	0.05
		1-AS-B	0.92	0.045
		1-S-T	1.66	0.035
		1-AS-T	2.94	0.03
荒 川 大 橋	60.3+160.0+60.3	1-S-B	0.75	0.024
		1-S-T	1.45	0.032
末 広 大 橋	110.0+250.0+110.0	1-S-B	0.472	0.0305
		1-AS-B	0.712	0.0183
		1-S-T	1.446	0.0158
		1-AS-T	2.888	0.0559

振動モードは 次数一対称(S) 一曲 げ(B)の順で表現した。
 逆対称(AS) ねじれ(T)

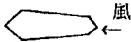
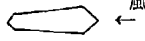
表-2.2 名港西大橋パネ支持実験条件

	実 橋	実 験 値
縮 尺		1/30
重 量	10.15 t/m	18.04 kgw/model
極慣性モーメント*	164.6 tm^2/m (16.80 tms^2/m)	3259260 $\text{gwc}m^2/\text{model}$ (3326 $\text{gws}^2\text{cm}^2/\text{model}$)
振 動 数 曲 げ	0.287	1.93
ね じ れ	1.61	4.31
構造減衰**曲 げ	0.0183 ~ 0.05	0.02
ね じ れ	0.0158 ~ 0.0559	0.02
風速倍率 曲 げ		4.46
ね じ れ		11.21

* 表に示したのは、重量極2次モーメントであり、質量極2次モーメントは()内に示した。

** 実橋の値は、表2.1に示した他の斜張橋の実測値によるものである。

表-2.3 1橋単独のバネ支持実験

モード	風のあたる向き	迎 角	実 験 整 理 番 号	
ね じ れ	A 方向 	- 5°	M-22	× M-39
		- 3°	M-21	× M-38
		0°	M-18	× M-37
		3°	M-19	× M-40
		5°	M-20	× M-41
ね じ れ	B 方向 	- 5°	M-04	× M-27
		- 4°		× M-28
		- 3°	M-03	× M-26
		- 2°		× M-29
		0°	M-02	× M-23 ○ M-30 ○ M-36
		3°	M-01	× M-24
		5°	M-05	× M-25
た わ み	A 方向 	- 5°	M-17	
		- 3°	M-16	
		0°	M-13	□ M-42
		3°	M-14	
		5°	M-15	
た わ み	B 方向 	- 5°	M-10	* M-35
		- 3°	M-09	* M-34
		0°	M-06, M-11	* M-31
		3°	M-07	* M-32
		5°	M-08, M-12	* M-33

注) ○; 実橋風速 0 ~ 230m/sec まで行なった。

×; 主として限定振動をさがす目的で行なった。

□; 減衰後の乱れた挙動に着目した。

*; 主として限定振動をさがす目的で行なった。

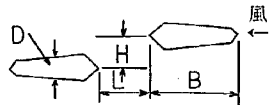
減衰率は倍振幅 10mm で 0.02 とした (他のたわみモードは 20mm で 0.02)

無印は通常のフラッター試験

表-2.4 2橋並列のバネ支持実験

モ ー ド	水平間隔(L)	鉛直間隔(H)	迎 角	実 験 整 理 番 号
ね じ れ	1/2B	0	0°	MM-02
	B	0	0°	MM-03
	3/2B	0	0°	MM-06
	2B	0	0°	MM-07 MM-20
	2B	0	-3°	MM-18
	2B	0	+3°	MM-19
	2B	0		
た わ み	1/2B	0	0°	MM-01
	B	0	0°	MM-04
	3/2B	0	0°	MM-05
	2B	0	0°	MM-08 °MM-09
	2B	1/2D	0°	MM-10
	2B	D	0°	MM-11
	2B	3/2D	0°	MM-12
	2B	0	-3°	MM-17
	2B	0	+3°	MM-16
	2B	0		
ね じ れ	2B	0	0°	×MM-13 *MM-14
た わ み	2B	0	0°	×MM-15

注) L, H, B, Dは次のように定義した。



B; 実橋 15m 模型 50cm
D; 実橋 2.5m 模型 8.3cm

対数減衰率は、たわみモードが倍振幅 10mm で 0.02 , ねじれモードが倍振幅 2° で 0.02 に設定した。

○印; ダンパーの抵抗を 0Ω, 8.3kΩ, ∞にかえて実験

×印; 上流側の模型をバネ支持にして, その挙動に着目

*印; 上流側の模型をバネ支持にして, その挙動に着目, とくに限定振動に着目した。

無印; 下流側の模型をバネ支持にして, その挙動に着目した。

表-2.5 模型後流風速の測定

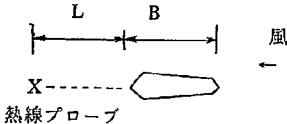
実 験 ケ ー ス		整 理 番 号
模型のない一様流の風速測定		W-01, W-06,
模型後流の風速測定  熱線プローブ	$L = 1/2 B$	W-02
	$L = B$	W-03
	$L = 3/2 B$	W-04
	$L = 2B$	W-05

表-3.1 平戸大橋実験条件

		原 型	所 要 値
縮 尺 率		-	1:37.59
重 量		t/m/bridge 11.026	g/model 12,485
回 転 慣 性		t·m·sec ² /m/bridge 33.495	kg·cm·sec ² /model 2,684
振 動 数	対 称 1 次 鉛直たわみ	Hz 0.314	Hz 1.99
	対 象 1 次 ね じ れ	Hz 0.804	Hz 5.09
振 動 数 比		2.56	2.56
構 造 減 衰			0.03
風 速 換 算 比			5.94
スプリング間隔			74.1cm

表-3.2 観測機器の構成

	名 称	数 量
1.	センサ部 VFB加速度計 (上下) " (水平) 風向, 風速発信部	2 台 1 台 1 台
2.	受 信 部 時 計 盤 増 幅 盤 監 視 盤 記録制御盤 電 源 盤 端 子 盤	1 架 1 台 1 台 1 台 1 台 1 台 1 台
3.	記 録 部 電磁オシログラフ 平均風向, 風速記録器 データレコーダ R 912	1 台 1 台 1 台
4.	予備品, 付属品	1 式

表-3.3.1

時 刻		中 央 径 間 1/2 風 観 測				中央径間 1/2 加速度		
		風 速(m/s)		風 向 (°)		鉛直たわみ (m/sec ²)	水平たわみ (m/sec ²)	ね じ れ (rad/sec ²)
52-6-29	17:14	1	9.4	9.5	191.0	172.5	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
		2	0.2		2.0		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	10.6		202.7		1.2	1.5
		5	8.8		182.7		-1.9	-1.5
52-6-29	20:07	1	10.2	10.3	183.9	162.5	—	—
		2	0.4		2.3		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	11.1		191.0		0.6	0.9
		5	9.4		176.3		-0.7	-0.9
52-6-29	20:37	1	10.2	10.5	188.3	171.0	—	—
		2	0.4		2.0		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	11.2		195.4		0.7	1.0
		5	9.4		181.2		-0.8	-1.1
52-6-29	21:07	1	11.0	10.7	188.9	171.0	—	—
		2	0.3		2.0		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	12.0		195.9		0.8	1.0
		5	10.3		183.2		-0.8	-0.9
52-6-29	21:37	1	11.6	10.8	190.0	171.0	—	—
		2	0.4		2.2		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	12.7		196.9		1.0	1.1
		5	10.5		183.2		-0.8	-1.1
52-6-29	22:07	1	11.4	10.8	187.4	168.8	—	—
		2	0.4		2.3		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	12.5		196.4		0.7	0.8
		5	10.3		179.8		-0.6	-0.9
52-6-29	22:37	1	12.2	11.5	186.9	169.5	—	—
		2	0.3		2.7		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	13.3		194.4		0.7	1.1
		5	11.2		179.3		-0.7	-1.2
52-6-29	23:07	1	12.6	11.0	191.2	168.8	—	—
		2	0.3		1.9		0.2	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	13.6		196.4		0.8	1.3
		5	11.8		185.1		-0.7	-1.1
52-6-29	23:37	1	13.2	12.4	194.5	172.5	—	—
		2	0.4		1.9		0.3	0.3
		3	0.0		0.0		—	—
		4	14.1		200.3		1.0	1.2
		5	12.5		188.6		-1.0	-1.2

- 1: Mean, 2: σ , 3: σ/M , 4: Max, 5: Minただし、加速度については1,3を除く。
 ○ 風向・風速の1列めはデータレコーダからの記録, 2列めは風向風速記録器によるもの, 3列めは平戸測候所での記録。

表-3.3.2

時 刻		中 央 径 間 1/2 風 観 測			中 央 径 間 1/2 加 速 度			
		風 速 (m/s)		風 向 (°)	鉛直たわみ (m/sec ²)	水平たわみ (m/sec ²)	ね じ れ (rad/sec ²)	
52-6-30	0 : 07	1	14.0	13.8 5.5	192.7 172.5 180	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
		2	0.3	(0:00)	1.8	0.3	0.2	0.4
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	14.8		199.8	1.3	0.8	1.3
		5	13.4		187.1	-1.0	-0.6	-1.2
52-6-30	0 : 37	1	12.1	11.6	190.1 168.0	—	—	—
		2	0.3		2.1	0.2	0.1	0.3
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	13.0		196.9	0.8	0.5	1.1
		5	11.4		184.1	-0.8	-0.5	-1.0
52-6-30	1 : 07	1	11.7	11.0	189.1 168.0	—	—	—
		2	0.2		2.0	0.2	0.1	0.3
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	12.7		195.9	0.9	0.7	0.9
		5	11.0		183.7	-0.8	-0.7	-0.9
52-6-30	1 : 37	1	11.1	10.4	185.5 165.0	—	—	—
		2	0.2		1.9	0.2	0.1	0.3
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	12.0		192.5	1.6	1.5	1.2
		5	10.3		179.7	-1.2	-0.7	-1.6
52-6-30	2 : 07	1	12.4	12.2	184.0 163.5	—	—	—
		2	0.5		2.3	0.3	0.2	0.3
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	13.6		190.5	0.8	0.6	1.0
		5	11.4		177.3	-0.9	-0.6	-1.0
52-6-30	2 : 45	1	12.6	12.0	183.4 170.0	—	—	—
		2	0.3		2.0	0.3	0.2	0.3
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	13.6		190.0	1.0	0.7	1.1
		5	11.9		176.3	1.0	-0.7	-1.1
52-6-30	3 : 15	1	12.4	11.8 5.3	184.4 168.8 157.5	—	—	—
		2	0.3	(3:00)	2.1	0.4	0.2	0.3
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	13.2		192.0	1.1	0.7	1.0
		5	11.7		178.3	-1.1	-0.8	-1.1
52-6-30	3 : 45	1	12.8	11.8	187.9 170.5	—	—	—
		2	0.6		3.2	0.3	0.2	0.3
		3	0.1		0.0	—	—	—
		4	14.2		176.4	1.0	0.8	1.2
		5	11.5		179.7	-1.1	-0.7	-1.0
52-6-30	21 : 27	1	15.2	11.5	201.8 165.0	—	—	—
		2	0.4		2.1	0.3	0.2	0.4
		3	0.0		0.0	—	—	—
		4	16.4		210.0	1.1	0.7	1.3
		5	14.3		195.5	-1.0	-1.0	-1.5

○ 1: Mean, 2: σ , 3: σ/M , 4: Max, 5: Min ただし、加速度については1,3を除く。

○ 風向・風速の1列めはデータレコーダからの記録, 2列めは風向風速記録器によるもの, 3列めは平戸測候所での記録。

表-3.3.3

時 刻		中 央 径 間 1/2 風 観 測			中央径間 1/2 加速度		
		風 速 (m/s)		風 向 (°)	鉛直たわみ (m/sec ²)	水平たわみ (m/sec ²)	ね じ れ (rad/sec ²)
52-7-1	0:02	1	16.0 14.5 4.4	207.2 172.5 150	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
		2	0.3 (0:00)	2.5	0.5	0.3	0.4
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	16.8	215.6	1.7	1.2	1.3
		5	15.2	200.4	-1.9	-0.8	-1.8
52-7-1	5:36	1	15.6 14.0	209.3 175.0	—	—	—
		2	0.3	3.1	0.3	0.2	0.4
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	16.4	218.0	1.1	0.8	1.2
		5	14.6	200.4	-1.2	-0.7	-1.4
52-7-12	19:24	1	12.7 13.8	176.3 168.5	—	—	—
		2	0.2	2.3	0.5	0.3	0.4
		3	0.1	0.0	—	—	—
		4	13.7	185.6	1.6	0.9	1.6
		5	11.9	169.9	-1.5	-0.8	-1.6
52-7-12	20:27	1	12.7 14.0	180.8 168.5	—	—	—
		2	0.4	2.1	0.5	0.2	0.4
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	13.9	187.1	1.7	1.2	1.7
		5	11.7	172.9	-1.6	-1.0	-1.5
52-7-12	21:02	1	13.2 13.5 5.5	180.7 165.0 180	—	—	—
		2	0.6 (21:00)	1.9	0.4	0.3	0.4
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	14.8	187.1	1.4	1.0	1.5
		5	11.9	174.8	-1.5	-1.1	-1.5
52-7-12	21:33	1	14.1 14.8	181.6 165.0	—	—	—
		2	0.8	2.4	0.4	0.3	0.5
		3	0.1	0.0	—	—	—
		4	15.7	188.6	1.6	1.2	1.6
		5	12.6	174.4	-2.0	-1.3	-1.6
52-7-12	22:07	1	14.0 15.8	178.0 165.0	—	—	—
		2	0.6	2.5	0.5	0.3	0.5
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	15.9	185.1	1.7	1.4	2.1
		5	12.8	170.4	-1.7	-2.1	-2.0
52-7-12	22:37	1	12.9 13.3	181.5 168.5	—	—	—
		2	0.6	3.7	0.4	0.2	0.4
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	14.3	192.5	1.5	0.9	1.4
		5	11.7	173.9	-1.3	-0.9	-1.6
52-7-12	23:45	1	13.1 13.7 5.5	184.2 170.0 150	—	—	—
		2	0.7 (24:00)	1.9	0.4	0.2	0.4
		3	0.1	0.0	—	—	—
		4	14.6	190.1	1.3	1.1	1.5
		5	11.7	178.8	-1.5	-0.9	-1.5

○ 1: Mean, 2: σ , 3: σ/M , 4: Max, 5: Minただし、加速度については1,3を除く。

○ 風向・風速の1列めはデータレコードからの記録, 2列めは風向風速記録器によるもの, 3列めは平戸測候所での記録。

表-3.3.4

時 刻		中 央 径 間 1/2 風 観 測			中 央 径 間 1/2 加 速 度		
		風 速 (m/s)		風 向 (°)	鉛直たわみ (m/sec ²)	水平たわみ (m/sec ²)	ね じ れ (rad/sec ²)
52-7-13	1 : 42	1	13.2 135	199.6 187.0	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
		2	0.5	2.3	0.3	0.2	0.3
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	14.6	207.2	1.1	0.7	1.1
		5	12.2	193.5	-1.1	-0.7	-1.2
52-8-8	5 : 54	1	11.6 136 57	172.7 172.5 150	—	—	—
		2	0.3 (6:00)	3.5	0.4	0.2	0.4
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	12.8	186.1	1.5	0.9	1.4
		5	10.7	158.7	-1.4	-1.7	-1.1
52-8-8	15 : 23	1	14.6 158 50	225.3 225.0 150	—	—	—
		2	1.2 (15:00)	3.8	0.6	0.4	0.6
		3	0.1	0.0	—	—	—
		4	16.8	234.7	2.3	2.1	2.4
		5	12.1	211.2	-2.3	-1.6	-2.6
52-8-22	6 : 54	1	9.0 122	381.7 382.5	—	—	—
		2	0.9	3.1	0.3	0.3	0.3
		3	0.1	1.0	—	—	—
		4	11.0	391.2	2.0	1.1	1.7
		5	7.3	372.6	-1.7	-1.9	-1.6
52-8-22	13 : 08	1	10.4 143 76	377.2 383.0 380	—	—	—
		2	0.4 (12:00)	2.3	0.5	0.3	0.4
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	11.7	387.3	1.3	1.3	1.2
		5	9.2	370.1	-1.4	-0.7	-1.3
52-8-22	13 : 42	1	9.5 128	379.7 383.0	—	—	—
		2	0.7	2.6	0.4	0.2	0.3
		3	0.1	0.0	—	—	—
		4	11.0	388.3	1.4	1.8	1.4
		5	7.4	370.1	-1.9	-1.5	-1.3
52-8-22	14 : 28	1	9.6 138	368.3 382.5	—	—	—
		2	0.6	3.3	0.4	0.3	0.4
		3	6.1	0.0	—	—	—
		4	4.4	378.9	2.1	1.5	1.8
		5	8.5	357.4	-1.5	-1.1	-1.7
52-12-29	4 : 34	1	13.9 95 51	379.1 385 158	—	—	—
		2	0.4 (3:00)	3.7	0.19	0.14	0.22
		3	0.0	0.0	—	—	—
		4	15.4	391.0	0.67	0.86	0.84
		5	12.5	369.2	-0.67	-0.60	-0.85
52-12-29	5 : 04	1	15.1 108	361.3 383	—	—	—
		2	0.8	4.3	0.25	0.17	0.24
		3	0.1	0.0	—	—	—
		4	18.0	376.3	1.12	0.82	1.14
		5	12.8	348.4	-0.98	-0.77	-0.91

○ 1 : Mean , 2 : σ , 3 : σ/M , 4 : Max , 5 : Min ただし、加速度については1,3を除く。

○ 風向・風速の1列めはデータレコードからの記録, 2列めは風向風速記録器によるもの, 3列目は平戸測候所での記録。

表-3.3.5

時 刻		中 央 径 間 1/2 風 観 測					中央径間 1/2 加速度		
		風 速 (m/s)			風 向 (°)		鉛直たわみ (m/sec ²)	水平たわみ (m/sec ²)	ね じ れ (rad/sec ²)
52-12-29	7:25	1	12.2	80 40	404.8	415 180	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
		2	1.5	(6:00)	4.7		0.21	0.22	0.30
		3	0.1		0.0		—	—	—
		4	15.3		419.4		1.19	1.68	2.74
		5	9.6		391.5		-1.34	-1.99	-1.95
52-12-30	11:53	1	16.6	11.6	168.2	169	—	—	—
		2	0.5		3.2		0.40	0.31	0.44
		3	0.0		0.0		—	—	—
		4	18.0		178.0		1.46	2.71	2.80
		5	15.4		158.7		-2.02	-2.77	-1.39
52-12-30	12:23	1	16.7	11.0 0.4	171.3	169 23	—	—	—
		2	0.5	(12:00)	2.2		0.32	0.27	0.38
		3	0.0		0.0		—	—	—
		4	18.0		179.5		1.95	1.58	2.01
		5	15.1		165.3		-1.81	-2.03	-1.88
52-12-30	16:01	1	17.2	10.4 0.1	184.1	173	—	—	—
		2	0.5	(15:00)	2.3		0.30	0.24	0.39
		3	0.1		0.0		—	—	—
		4	18.9		191.2		1.70	1.34	1.98
		5	16.1		177.5		-1.47	-1.97	-1.54
52-12-30	16:31	1	17.9	11.3	179.7	180	—	—	—
		2	0.4		2.2		0.41	0.38	0.49
		3	0.0		0.0		—	—	—
		4	19.6		186.6		3.03	2.26	2.02
		5	16.7		173.4		-3.30	-3.35	-2.38
52-12-30	17:01	1	17.2	10.0	179.1	172	—	—	—
		2	0.7		1.9		0.28	0.24	0.39
		3	0.0		0.0		—	—	—
		4	19.3		185.1		2.83	1.39	1.91
		5	15.4		173.4		-1.38	-1.68	-2.72
52-12-30	18:23	1	17.9	11.0 0.6	179.6	172 23	—	—	—
		2	0.3	(18:00)	2.1		0.33	0.21	0.36
		3	0.0		0.0		—	—	—
		4	19.1		186.1		1.86	1.34	2.07
		5	16.9		173.4		-1.69	-0.89	-1.77
52-12-30	18:58	1	18.6	12.0	172.9	164	—	—	—
		2	0.5		2.3		0.50	0.35	0.49
		3	0.0		0.0		—	—	—
		4	20.4		180.5		2.38	1.72	1.86
		5	17.3		165.3		-1.99	-1.19	-1.95
52-12-30	19:41	1	18.3	11.0	188.3	196	—	—	—
		2	0.4		3.6		0.27	0.37	0.36
		3	0.0		0.0		—	—	—
		4	19.9		199.3		1.90	2.91	1.43
		5	17.0		174.9		-2.59	-3.04	-1.62

○ 1: Mean, 2: σ , 3: σ/M , 4: Max, 5: Min ただし、加速度については1,3を除く。

○ 風向、風速の1列めは、データレコーダからの記録、2列めは風向風速記録器によるもの、3列目は平戸測候所での記録。

表-3.4.1 平均風速-中央径間 1/2 点加速度・変位
 <鉛直たわみ>

風速 (m/s)	応答	2 (cm/s ²)	3	4	5	6	加速度標準偏差
		0.5 0 (cm)	0.7 4	0.9 9	1. 2	1. 5	変位標準偏差
		0.7 1 (cm)	1. 1	1. 4	1. 7	2. 1	変位振幅推定値
データレコーダ							
9.1 ~ 10.0	1	1	2				
~ 11.0	3	1		1			
~ 12.0	4		2				
~ 13.0	4	3	2	2			
~ 14.0	1	3	2	1			
~ 15.0			1		1		
~ 16.0		3		1			
~ 17.0		2					
~ 18.0		1	1				
~ 19.0		1			1		
風向風速記録器							
8.1 ~ 9.0	1						
~ 10.0	3						
~ 11.0	10	2	1				
~ 12.0	2	3	4				
~ 13.0		3	1				
~ 14.0		3	5	2			
~ 15.0			1	2			
~ 16.0				1	1		

<数字は頻度を示す。>

$$\sigma_x = \frac{\sigma_a}{(2\pi f)^2}$$

$$A_x \equiv \sqrt{2} \sigma_x$$

ここに、 σ_x : 変位の標準偏差、 σ_a : 加速度の標準偏差

A_x : 変位の振幅、 f : 振動数ここでは 0.32 (Hz)

表-3.4.2 平均風速-中央径間 1/2 点加速度・変位
<ね じ れ>

風速 (m/s)	応答	2×10^{-3} (rad/s ²)	3	4	5	6	加速度標準偏差
		1.0×10^{-4} (rad)	1.6×10^{-4}	2.1×10^{-4}	2.6×10^{-4}	3.1×10^{-4}	変位標準偏差
		1.4×10^{-4} (rad)	2.3×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.7×10^{-4}	4.4×10^{-4}	変位振幅推定値
データレコーダ							
9.1 ~ 10.0			3	1			
~ 11.0			3	2			
~ 12.0			4	2			
~ 13.0			8	3			
~ 14.0	1		5	3	1		
~ 15.0					1	1	
~ 16.0	1			3			
~ 17.0				1			
~ 18.0				2	1		
~ 19.0				1	1		
風向風速記録器							
8.1 ~ 9.0	2		1				
~ 10.0				1			
~ 11.0	1		8	5			
~ 12.0			5	1	1		
~ 13.0			4		1		
~ 14.0			1	9			
~ 15.0				3			
~ 16.0					1	1	

<数字は頻度を示す。>

$$\sigma_x = \frac{\sigma_a}{(2\pi f)^2}$$

$$A_x = \sqrt{2} \sigma_x$$

ここに、 σ_x : 変位の標準偏差, σ_a : 加速度の標準偏差

A_x : 変位の振幅, f : 振動数ここでは 0.70 (Hz)

表-3.4.3 平均風速-中央径間 1/2 点加速度・変位
 <水平たわみ>

風速 (m/s)	応答	1 (cm/s ²)	2	3	4	加速度標準偏差
		1.3(cm)	2.6	3.9	5.2	変位標準偏差
		1.8(cm)	3.7	5.5	7.3	変位振幅推定値
データレコーダ						
9.1 ~ 10.0			2	2		
~ 11.0	2		2	1		
~ 12.0	3		2	1		
~ 13.0	1		10	1		
~ 14.0	1		3	2		
~ 15.0				1	1	
~ 16.0			3	1		
~ 17.0				1		
~ 18.0			2		1	
~ 19.0					2	
風向風速記録器						
8.1 ~ 9.0	1					
~ 10.0	1		2			
~ 11.0	5		6	1	1	
~ 12.0	1		5	1	2	
~ 13.0			3	1		
~ 14.0			7	3		
~ 15.0				3		
~ 16.0				1	1	

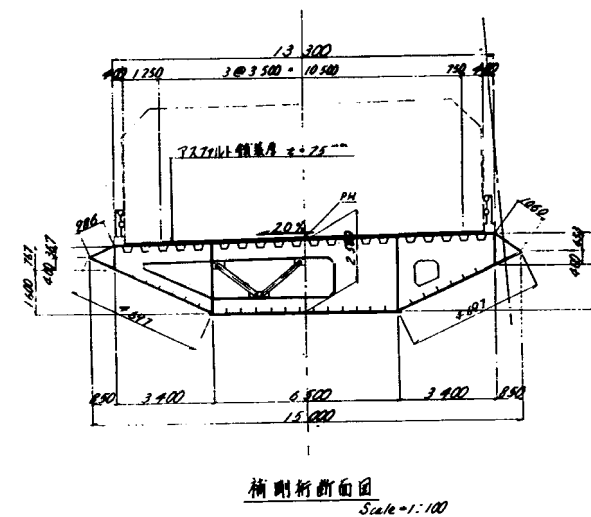
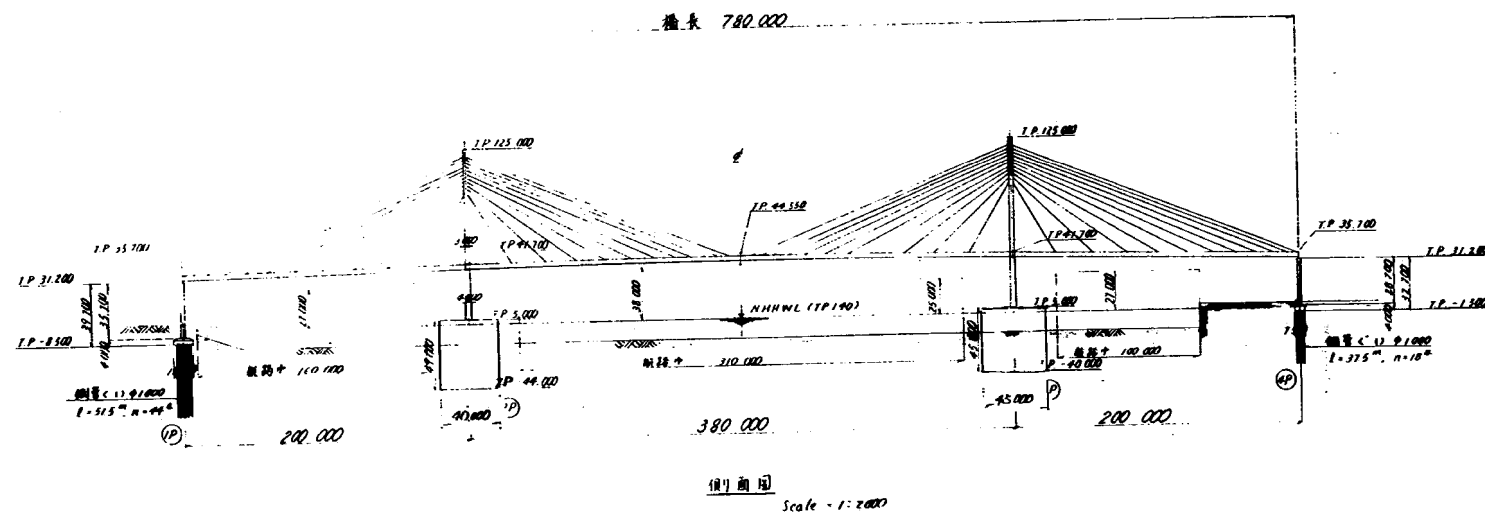
$$\sigma_x = \frac{\sigma_a}{(2\pi f)^2}$$

<数字は頻度を示す。>

$$A_x = \sqrt{2} \sigma_x$$

ここに、 σ_x 、変位の標準偏差、 σ_a ：加速度の標準偏差

A_x 、変位の振幅 f ：振動数ここでは0.14(Hz)



勾配	1:3.000%		1:3.000%		1:3.000%		1:3.000%	
計畫高	35.100		41.100		46.100		51.100	
面線	R=∞		R=∞		R=∞		R=∞	
地盤高	3.000		12.000		12.000		11.000	
透視距離	155.000		136.000		136.000		136.000	
車距離	14.000		14.000		14.000		14.000	
測点	1/P		2/P		3/P		4/P	

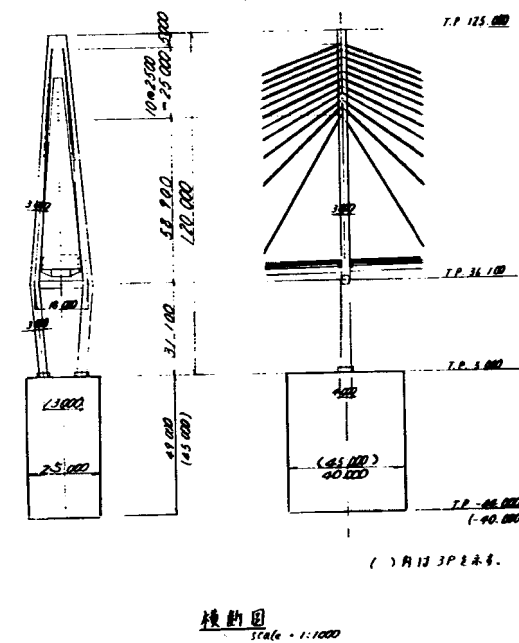
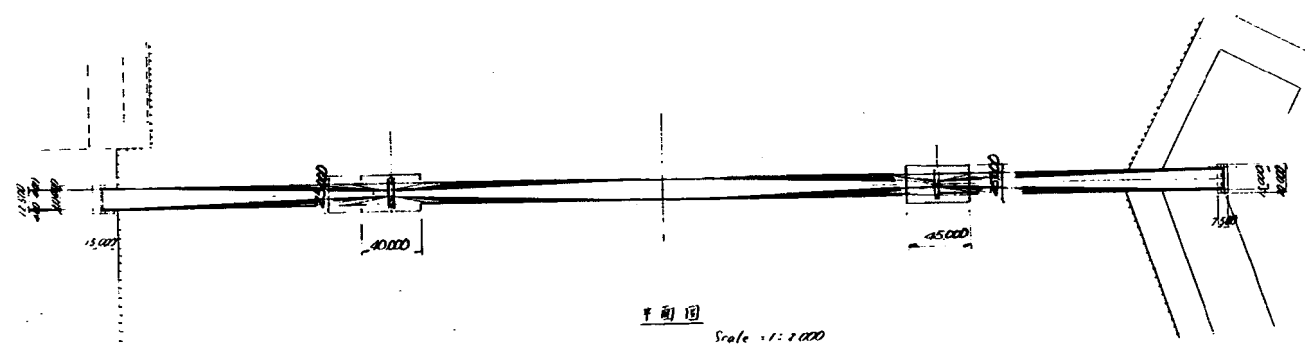


圖 2.1.1 名港西大橋斜張橋獨立 2 橋案一般圖

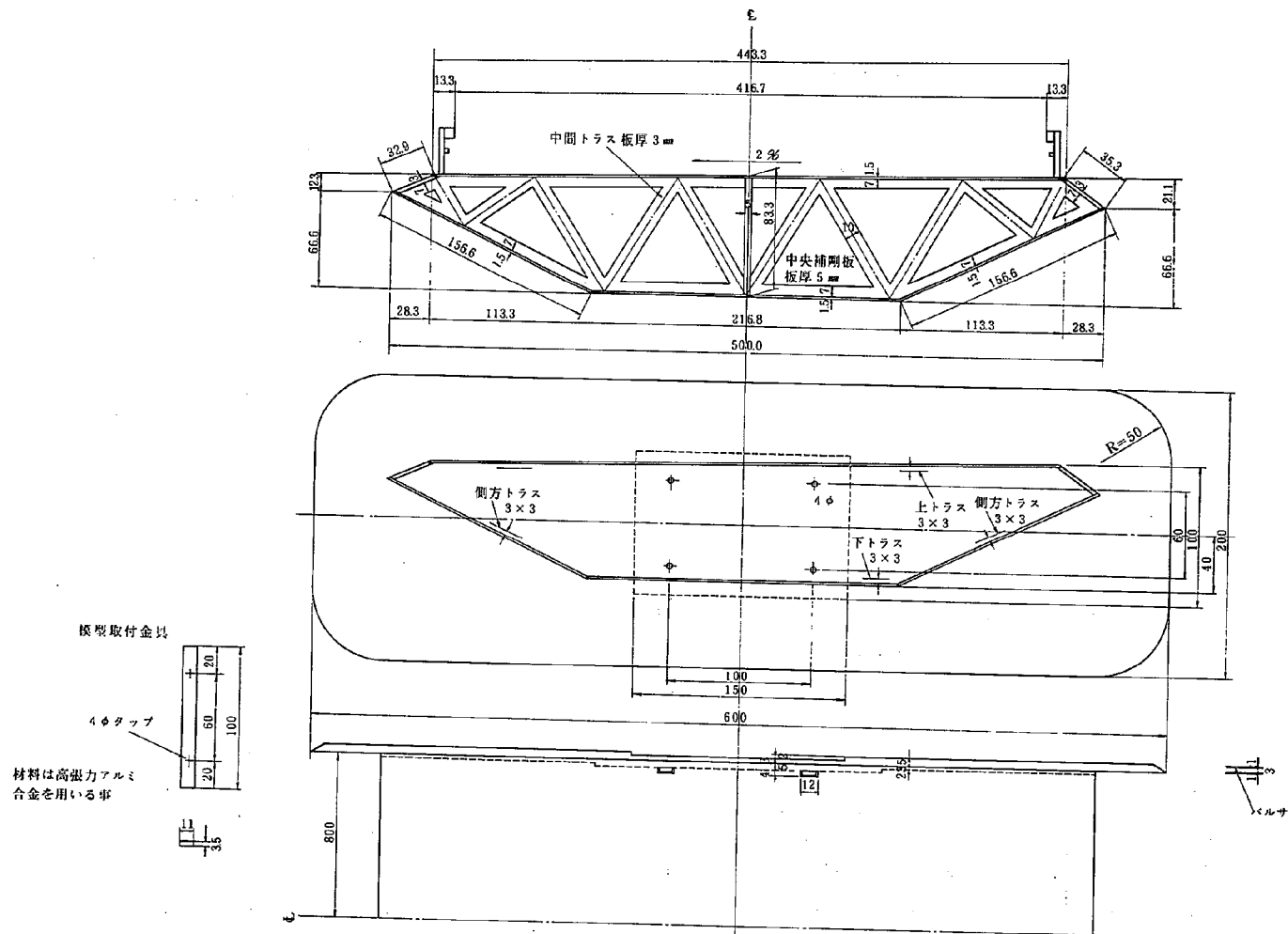
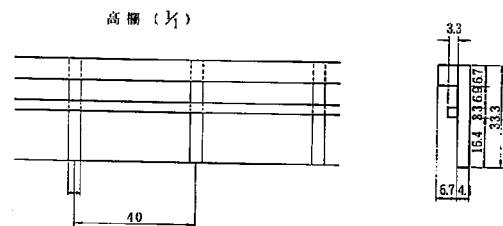
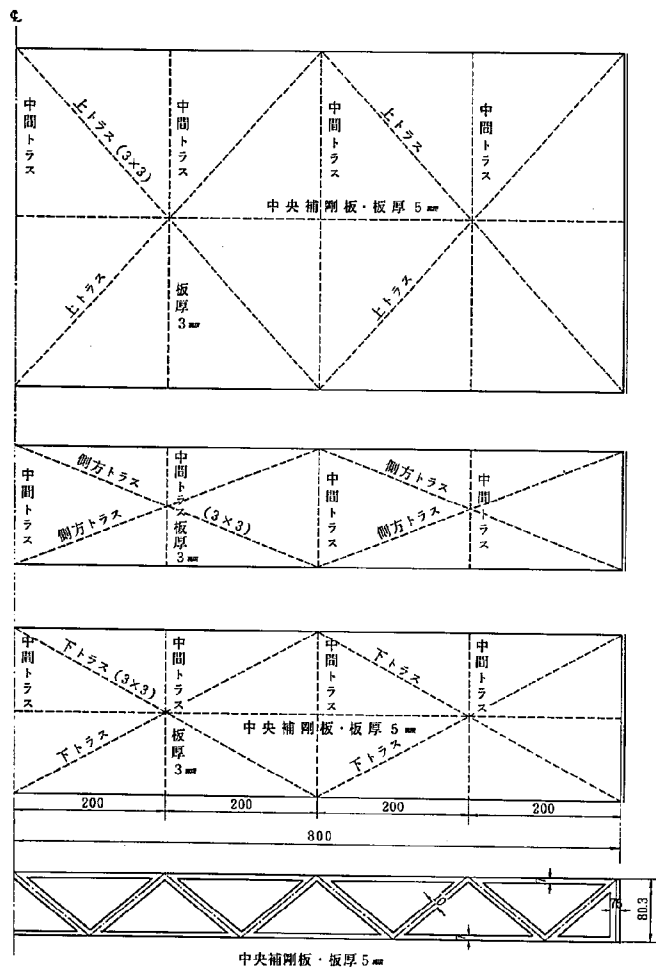


図 2.1.2-1 名港西大橋模型 縮尺 1/2

図名	名港西大橋模型図その1	製図年月日	52.3.10
縮尺	1/2	作成者	室長・成田, 担当・佐藤



- ・材料は、特記しているもの以外はヒノキを用いる事。
- ・中間トラス、中央補剛板は、1枚の板から作る事。
- ・模型取付金具4体、ネジ8もあわせて作成する事。

図名	名港西大橋模型図その2	製図年月日	52. 3. 10
縮尺	1/4 および 1/4	作成者	室長・成田, 担当・佐藤

図 2.1.2-2 名港西大橋模型 縮尺 1/4(1/1)

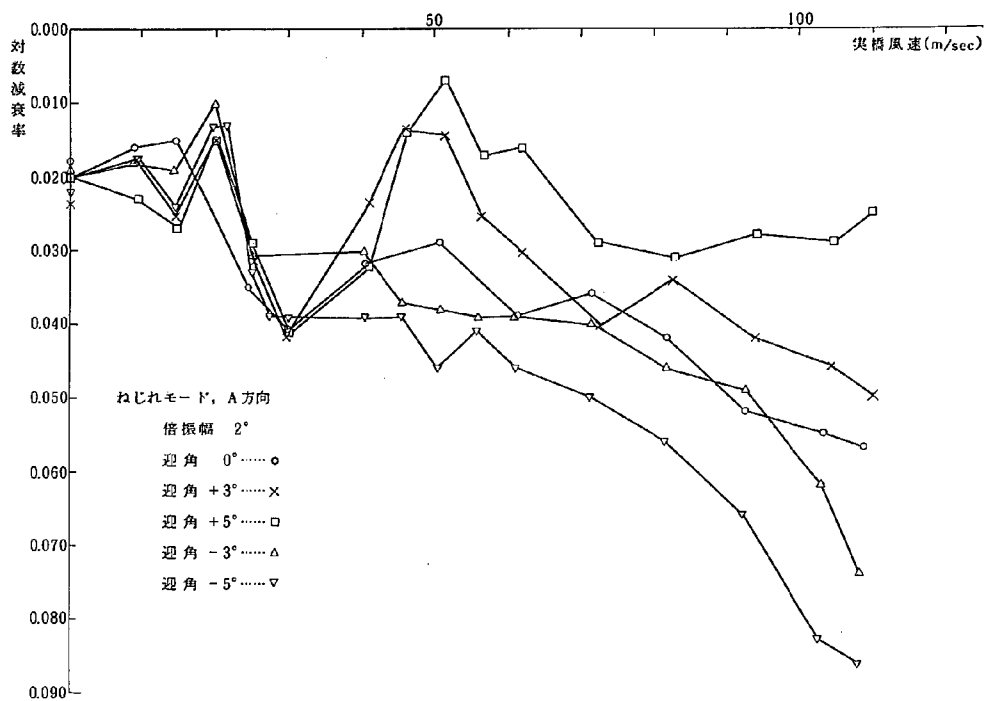


図2.2 V - δ 曲線

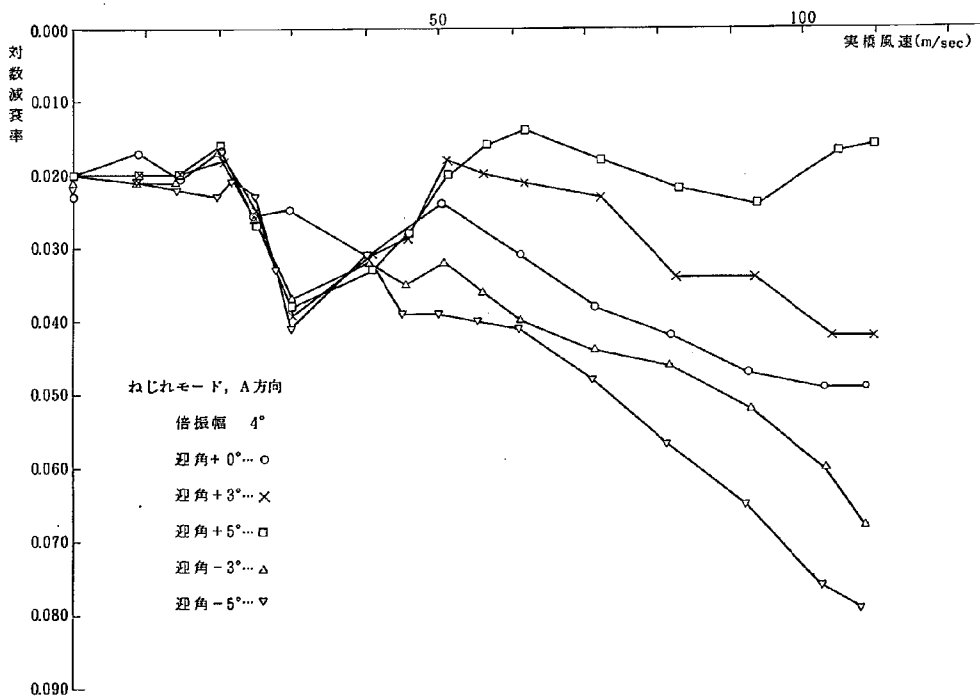


図2.3 V - δ 曲線

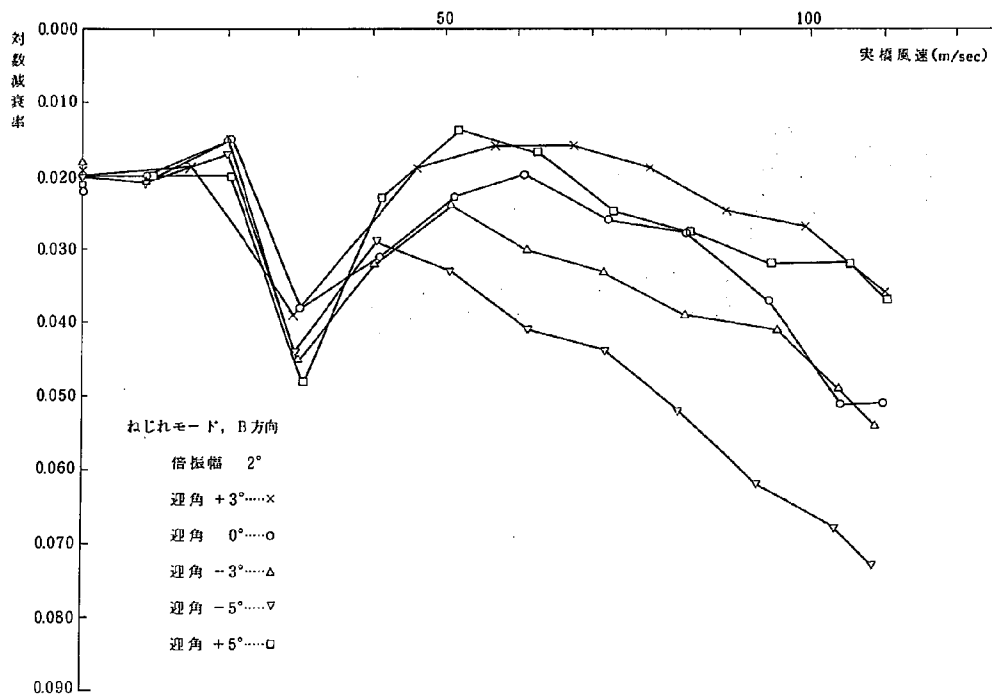


図 2.4 V - δ 曲線

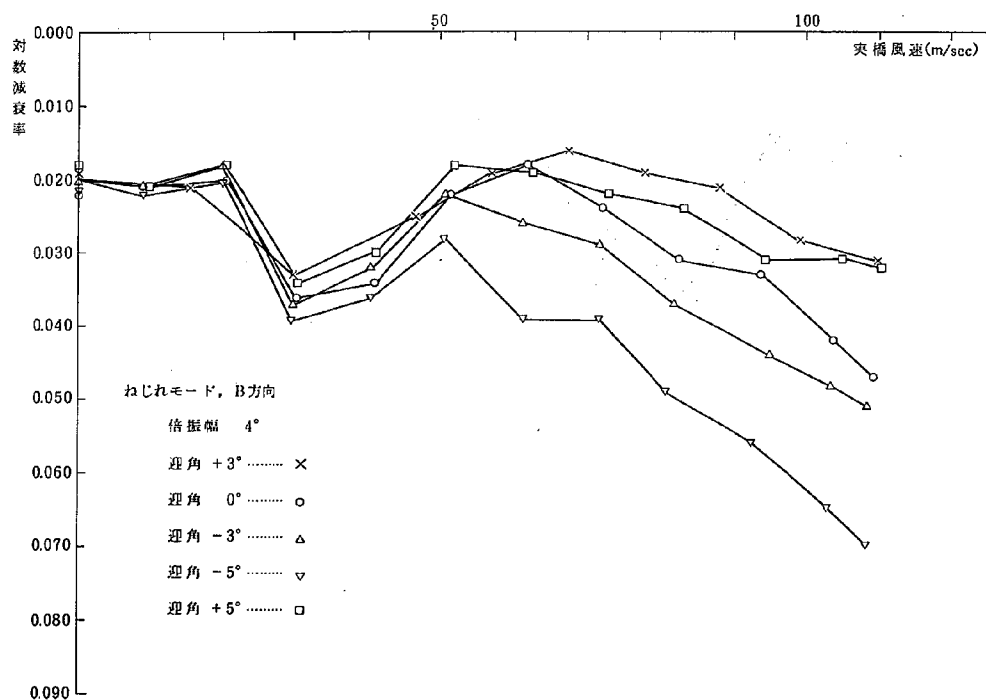


図 2.5 V - δ 曲線

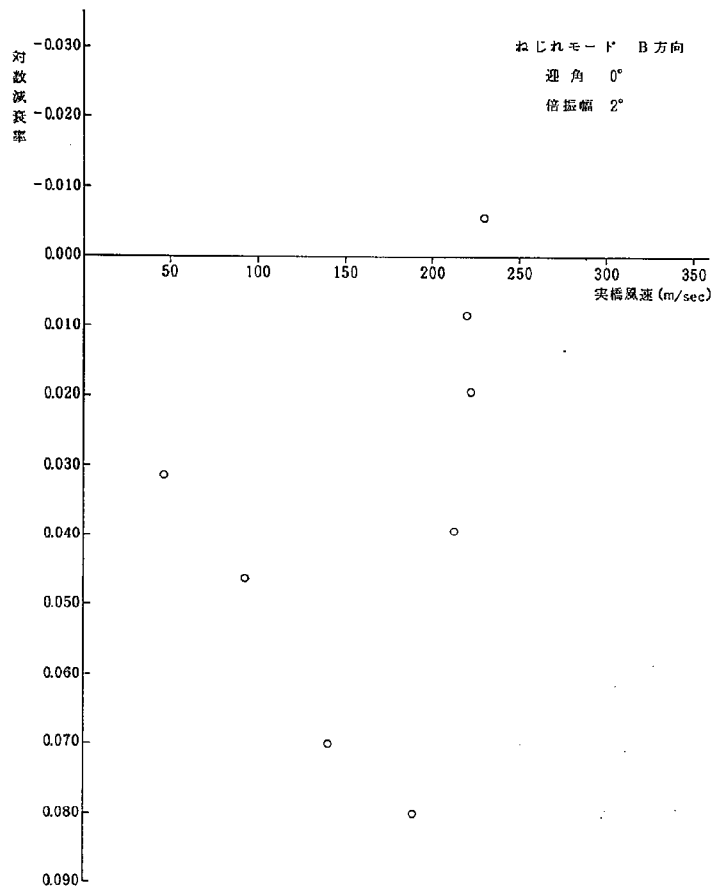


図 2.6 $V - \delta$ 曲線

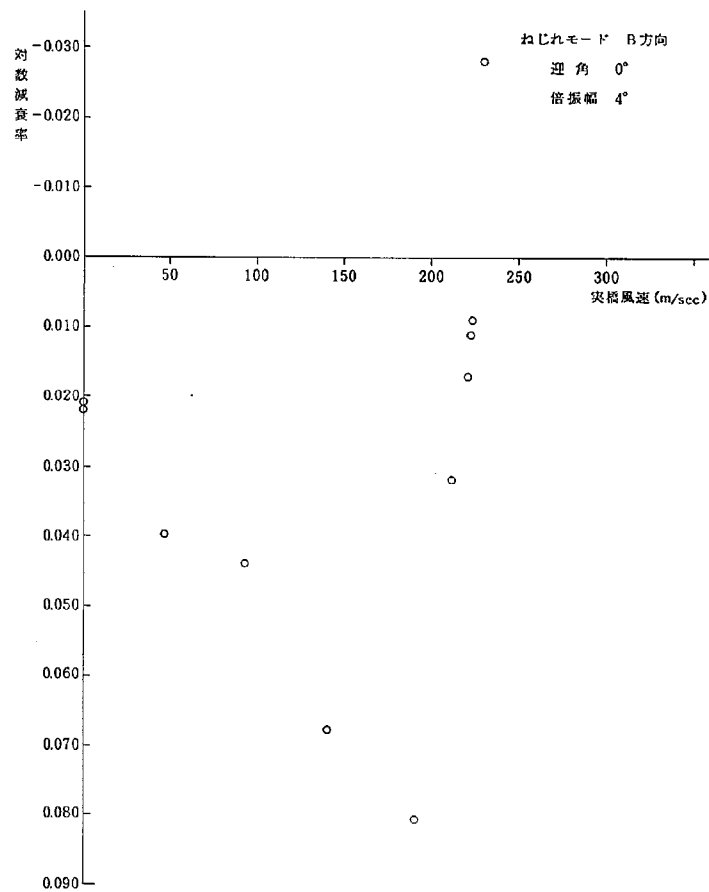


図 2.7 $V - \delta$ 曲線

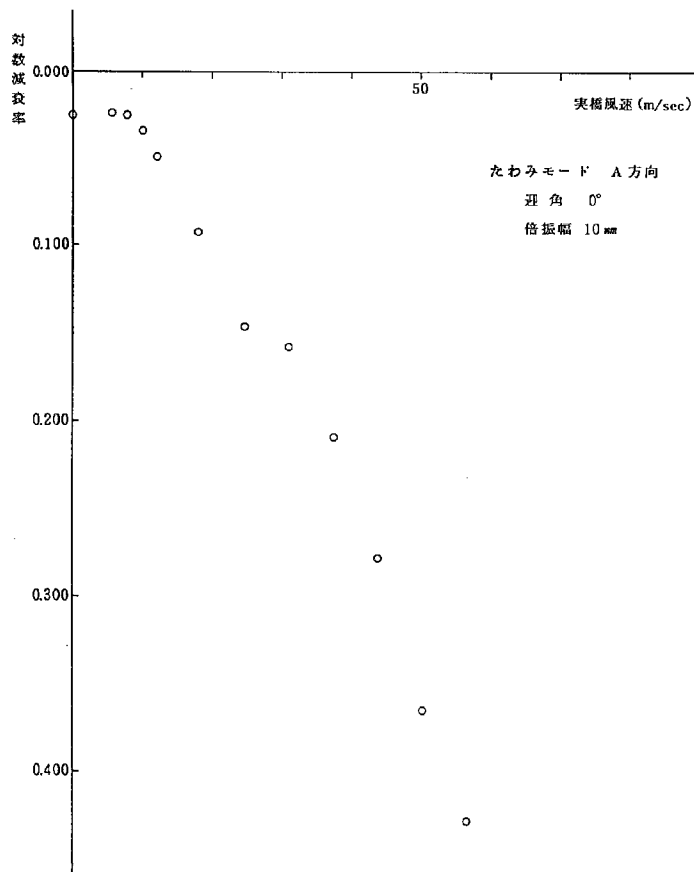


図 2.8 V - δ 曲線

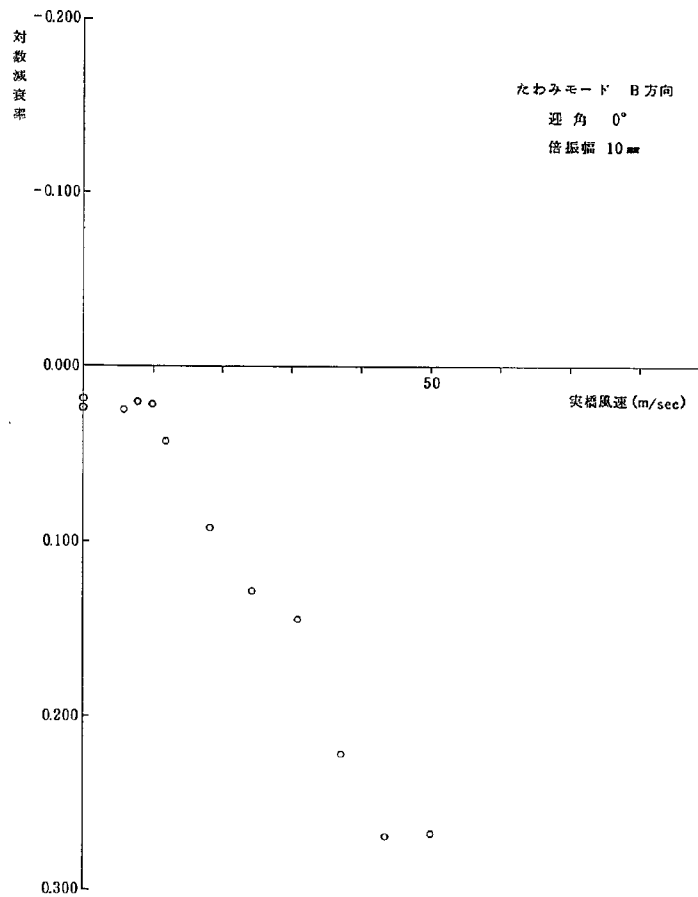


図 2.9 V - δ 曲線

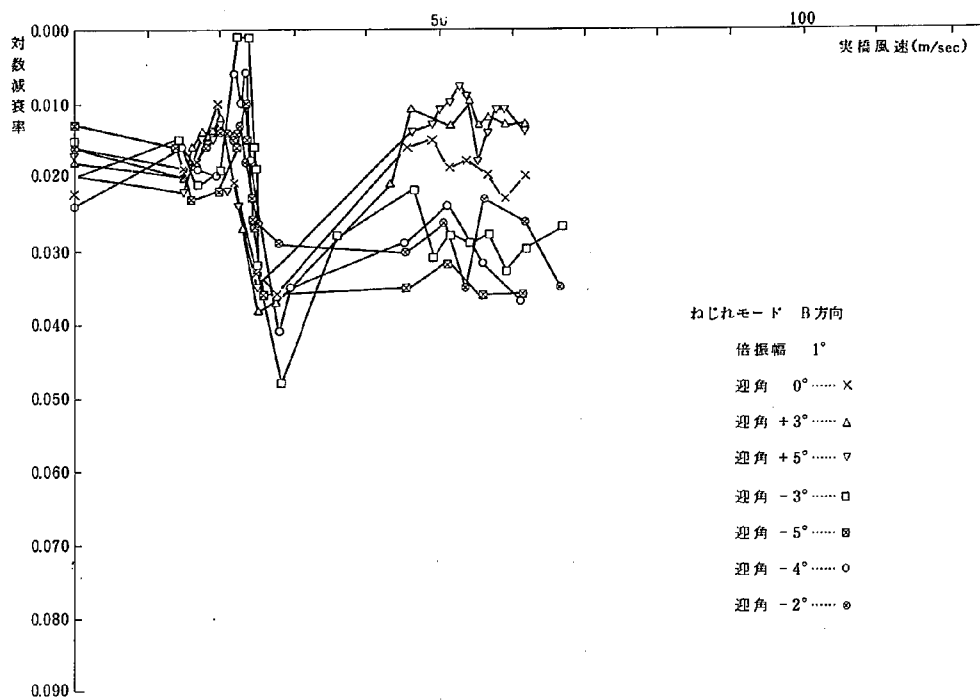


図2.10. V - δ 曲線

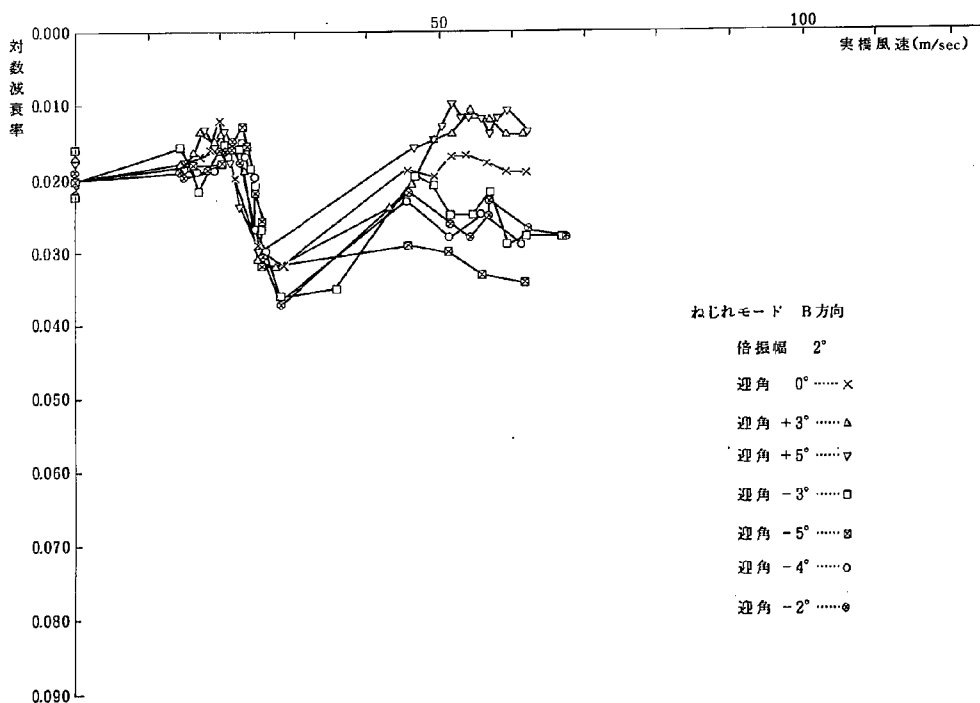


図2.11 V - δ 曲線

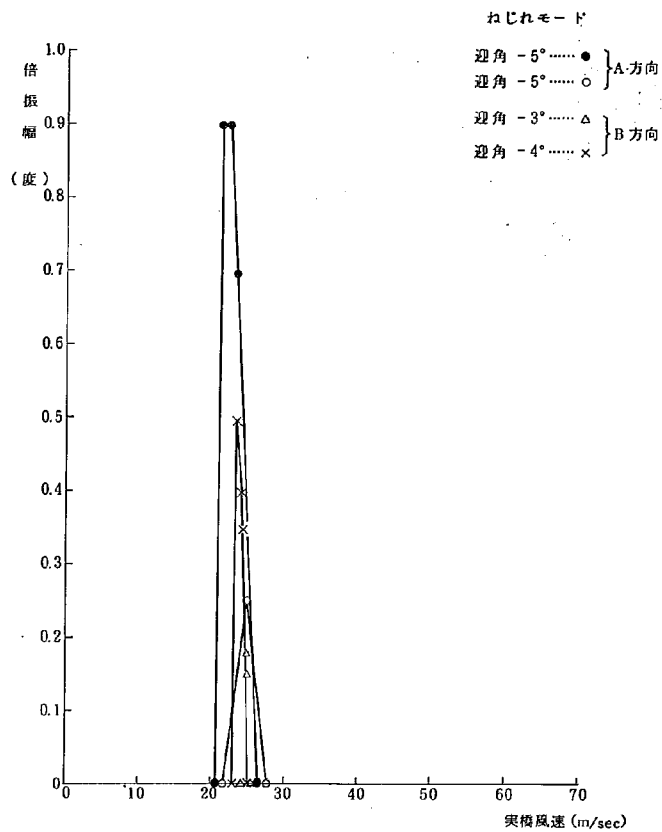


図2.12 V - A 曲線

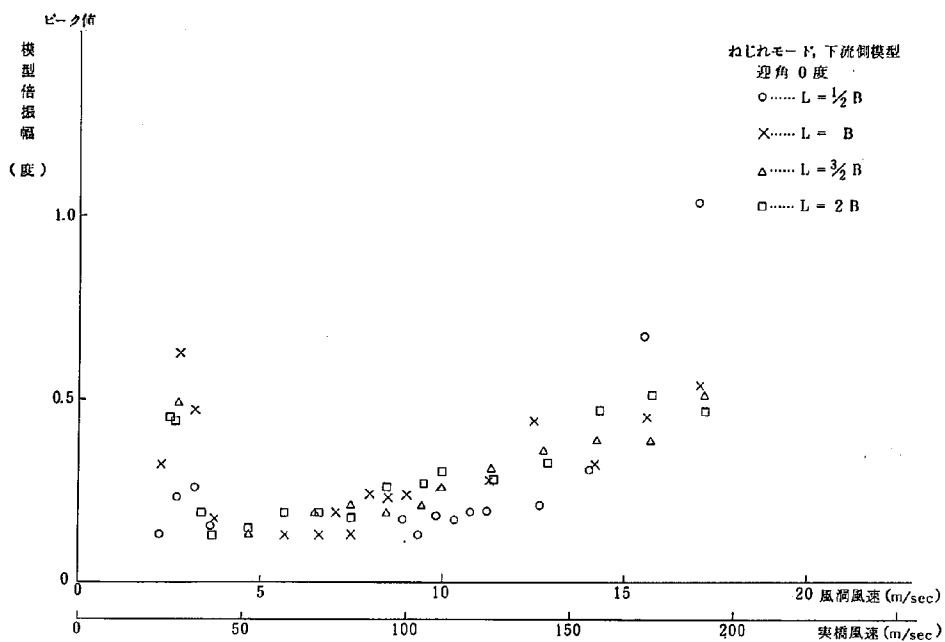


図 2.13.1 V - A 曲線

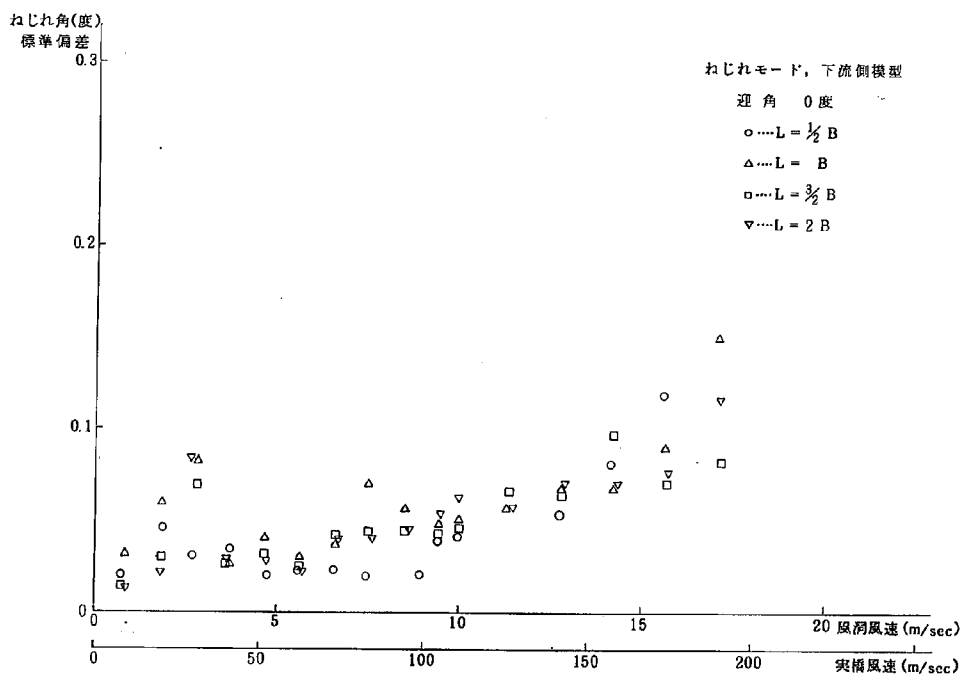


図 2.13.2 V - A 曲線

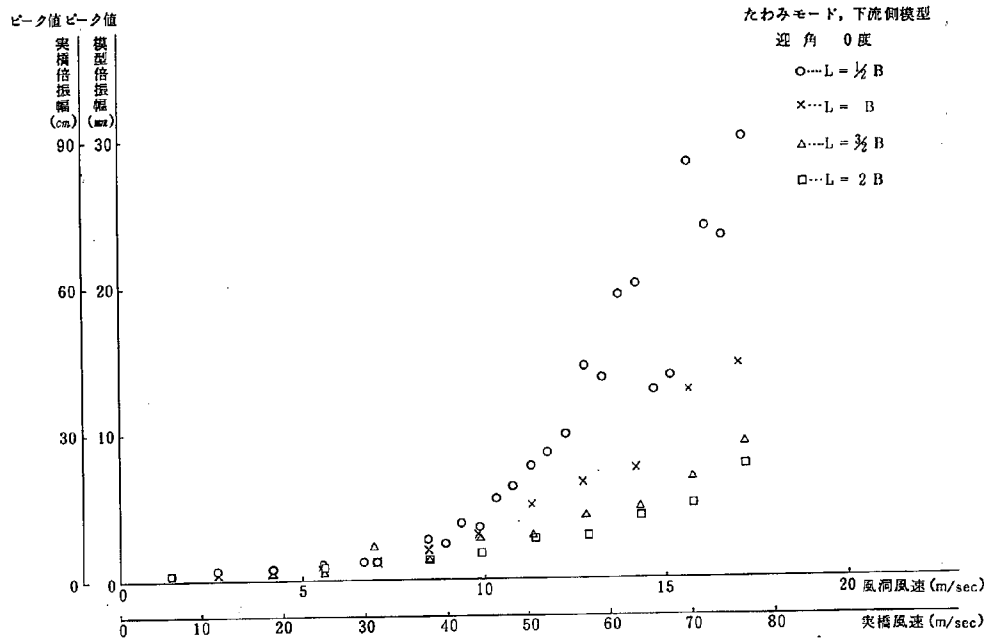


図 2.14.1 V - A 曲線

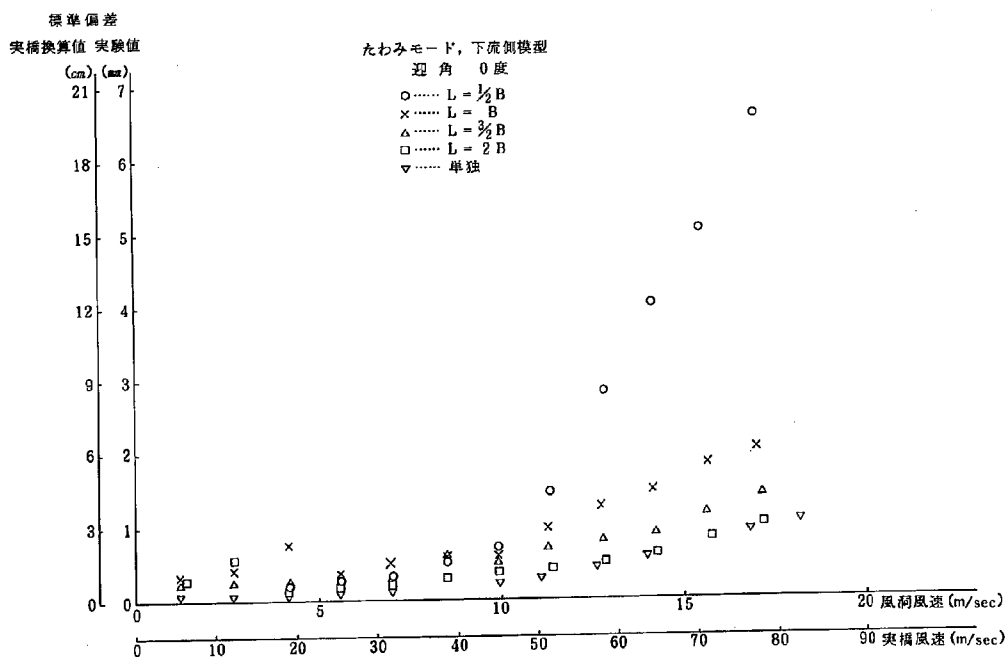


図 2.14.2 V - A 曲線

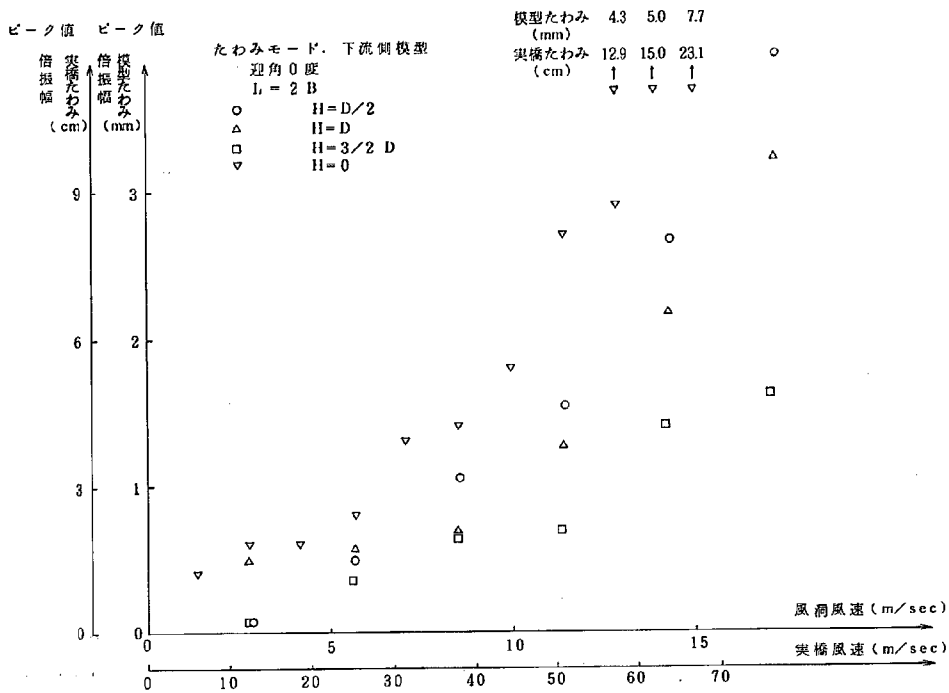


図 2.15.1 V - A 曲線

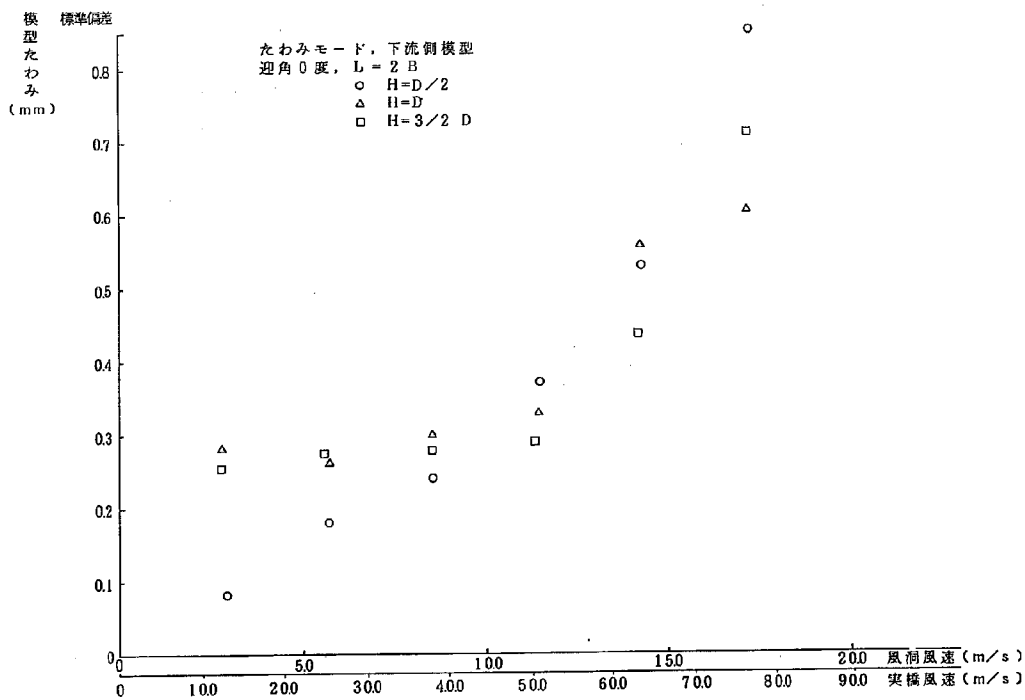


図 2.15.2 V - A 曲線

ピーク値 ピーク値

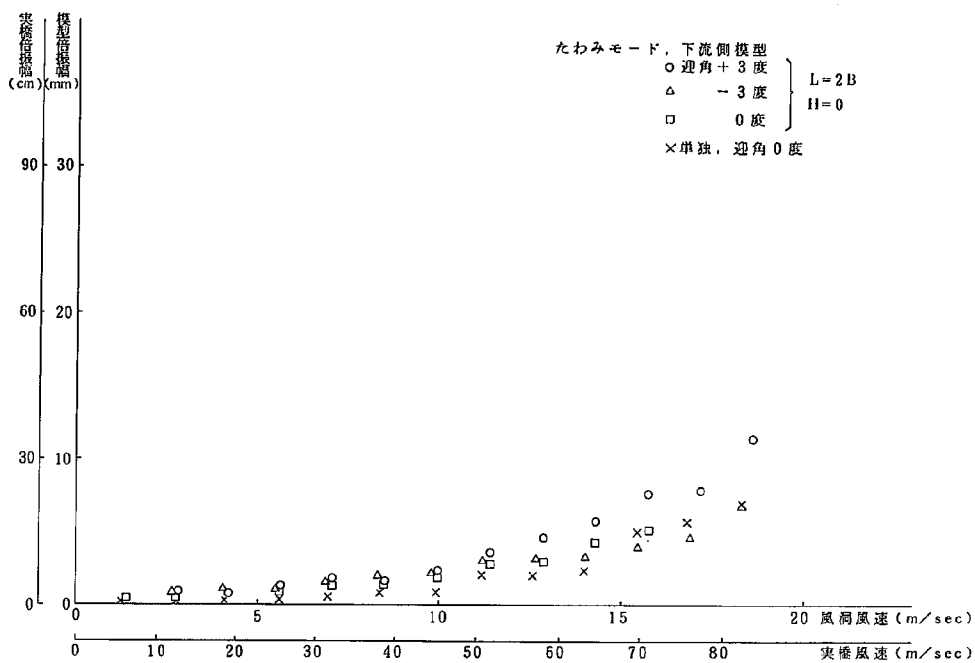


図 2.16.1 V - A 曲線

標準偏差

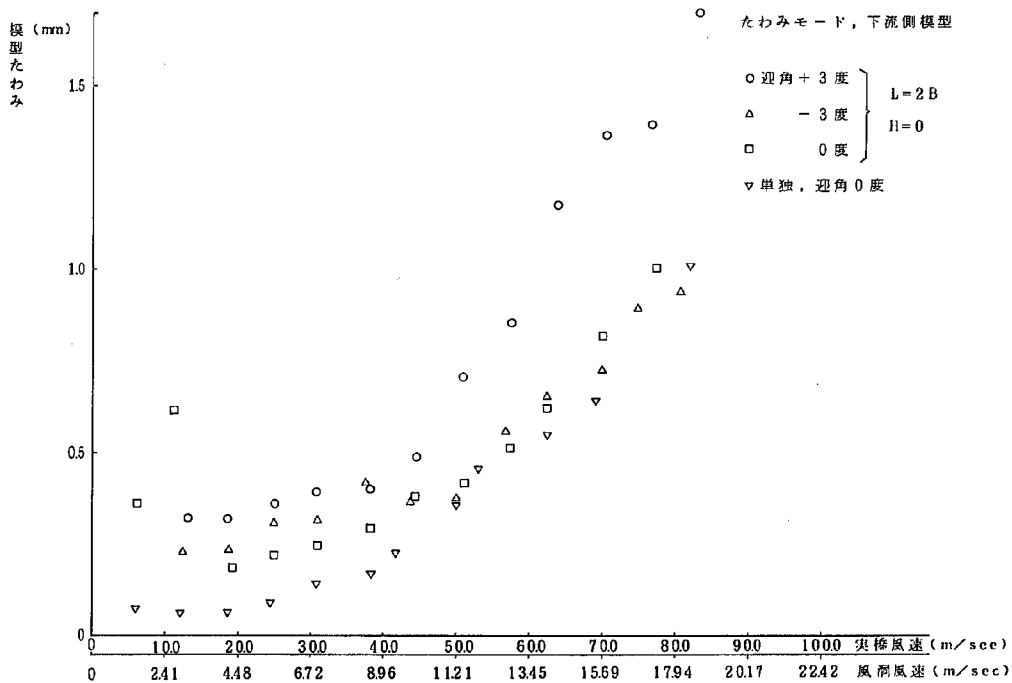


図 2.16.2 V - A 曲線

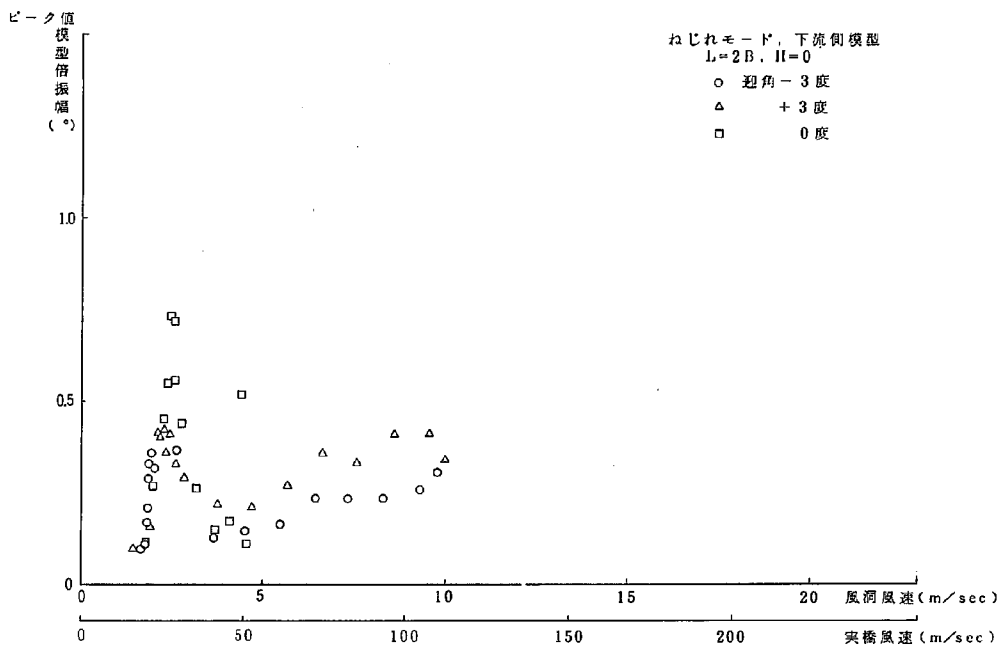


図 2.17 V - A 曲線

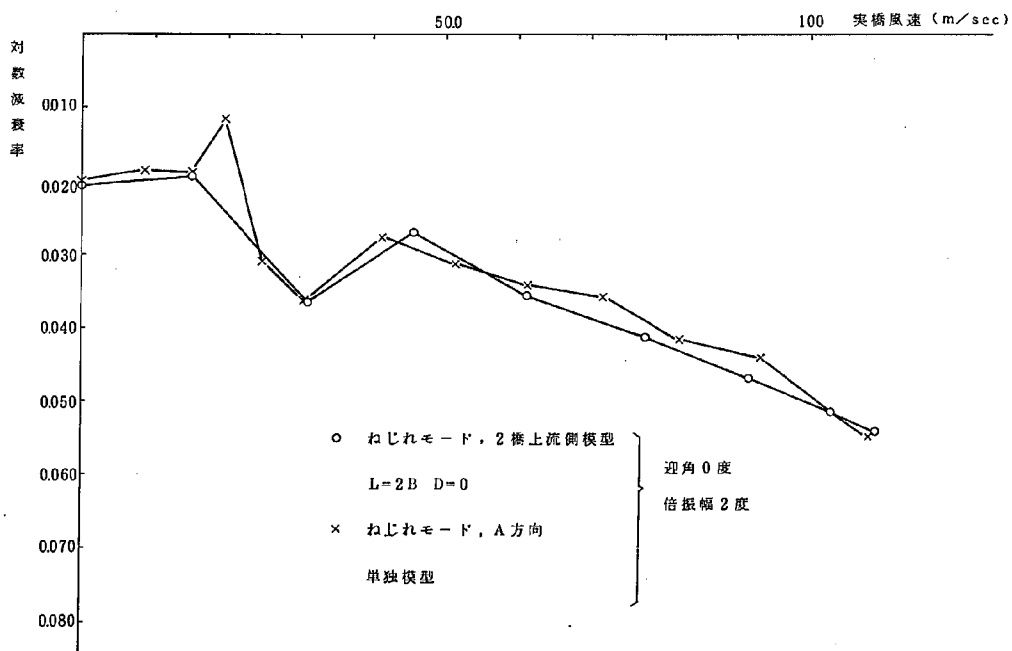


図 2.18 V - δ 曲線

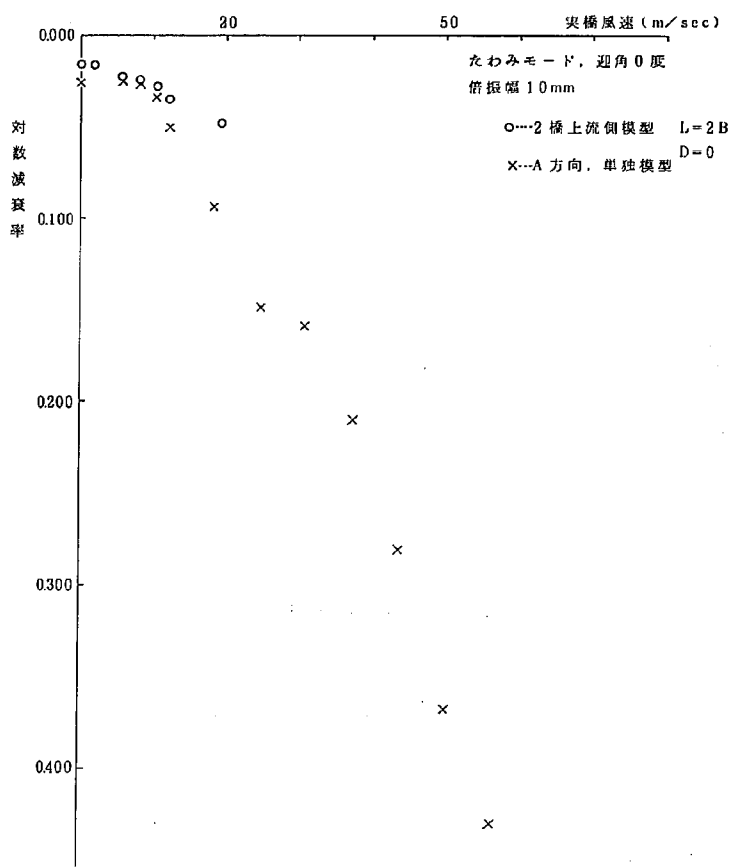


図 2.19. $V - \delta$ 曲線

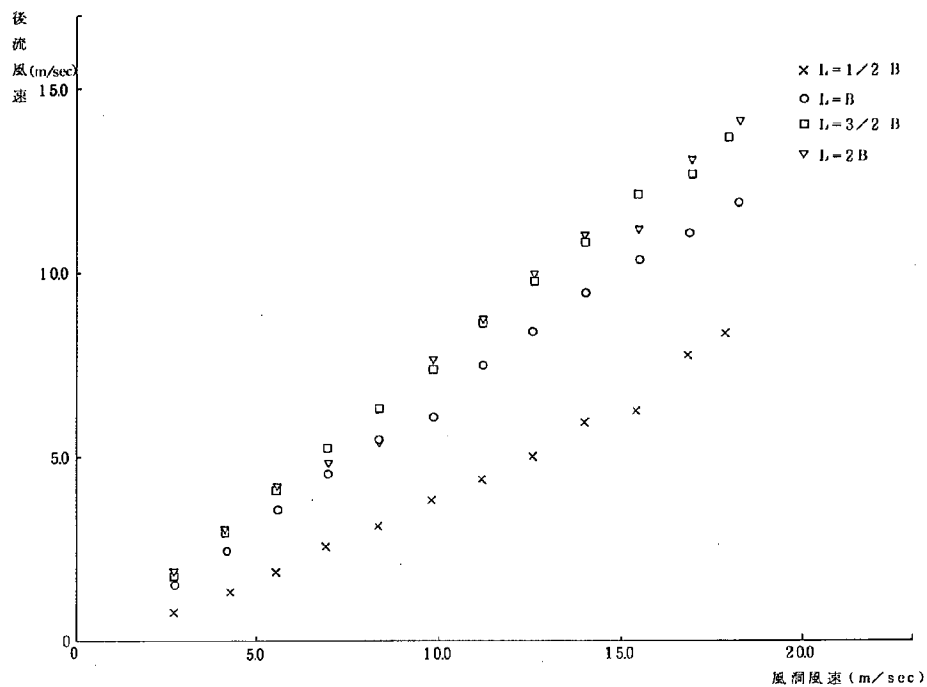


図 2.20.1 風洞風速—模型後流平均風速（主流方向）

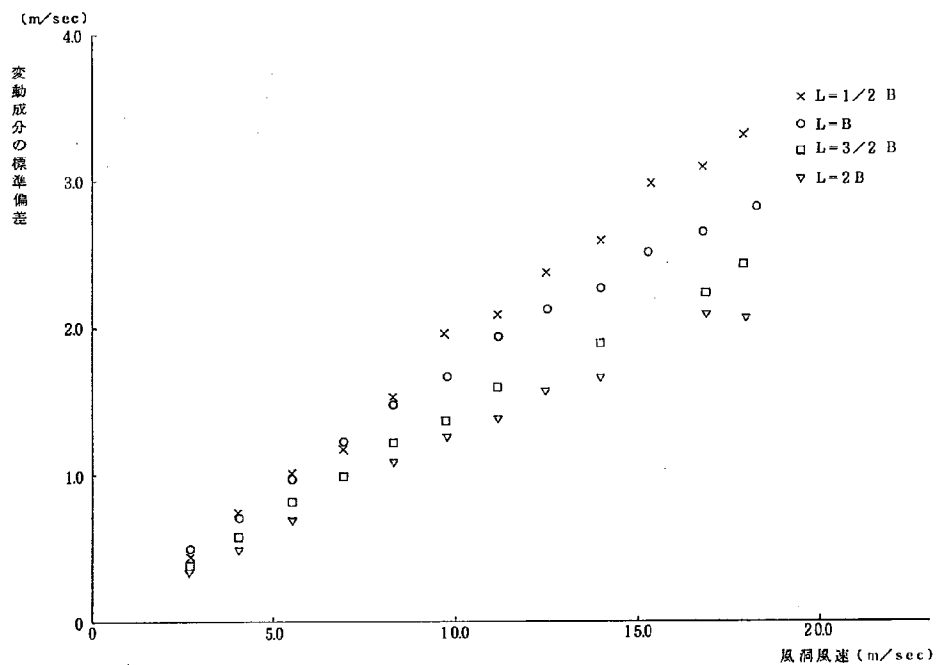


図 2.20.2 風洞風速—模型後流風速変動成分（主流方向）

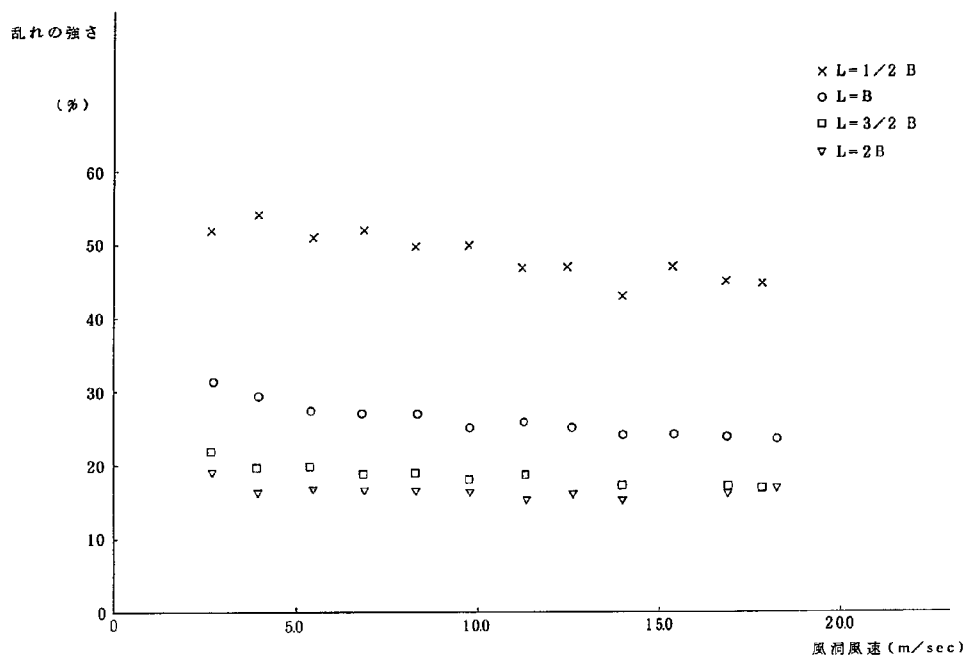


図 2.2.0.3 風洞風速一模型後流風速主流成分の乱れの強さ

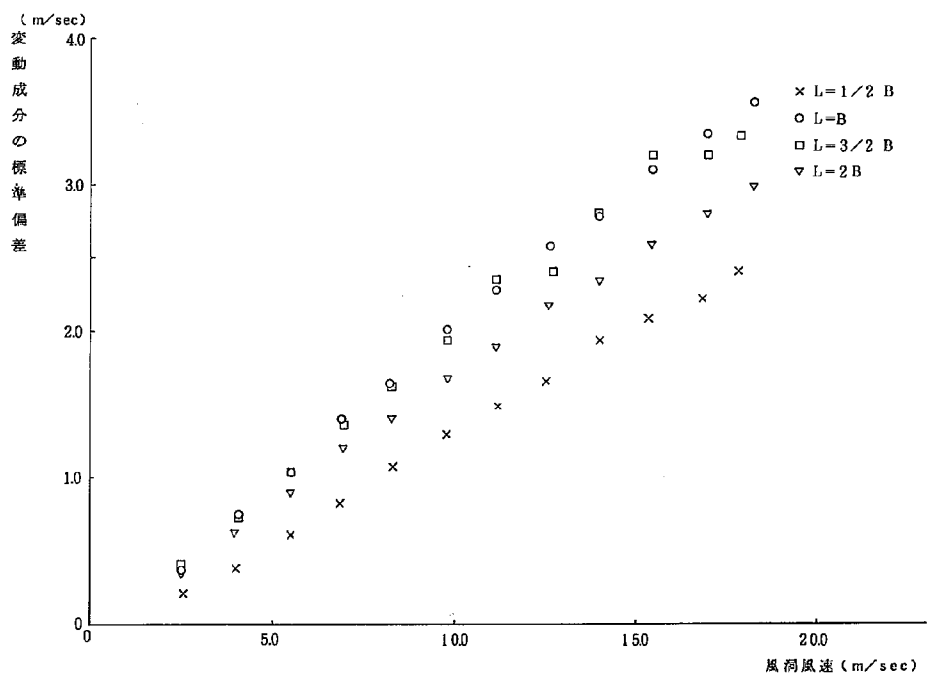


図 2.2.0.4 風洞風速一模型後流風速変動成分 (鉛直方向)

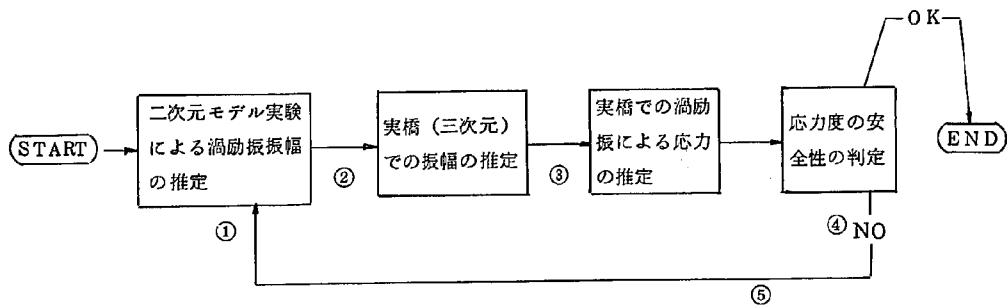


図 2.21 渦励振による疲労問題を扱うフローチャート

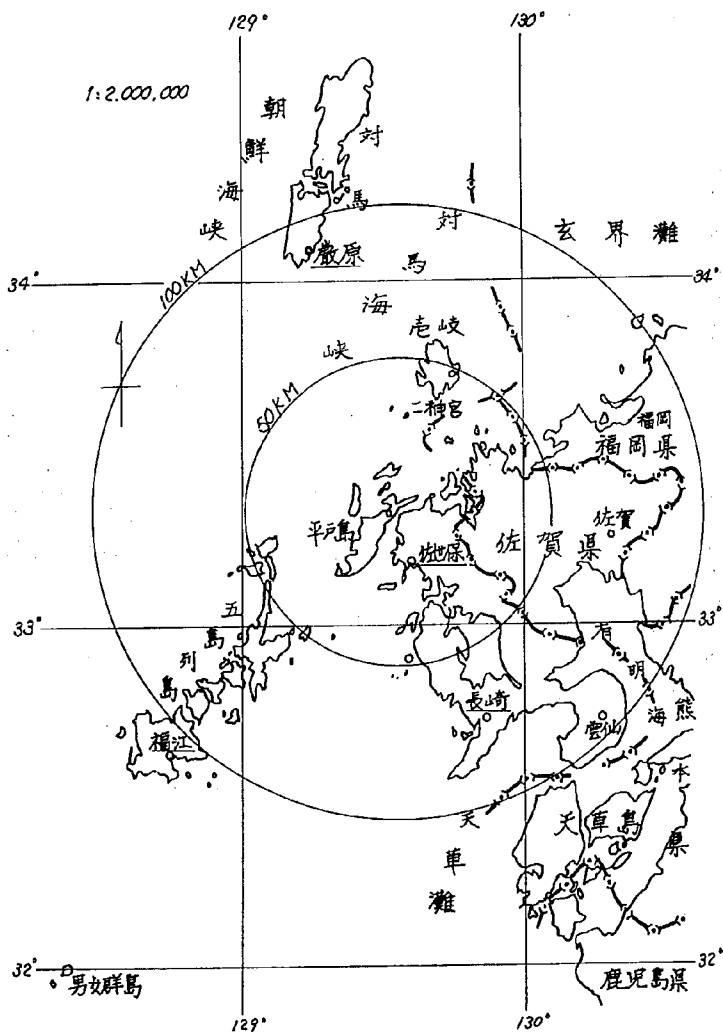
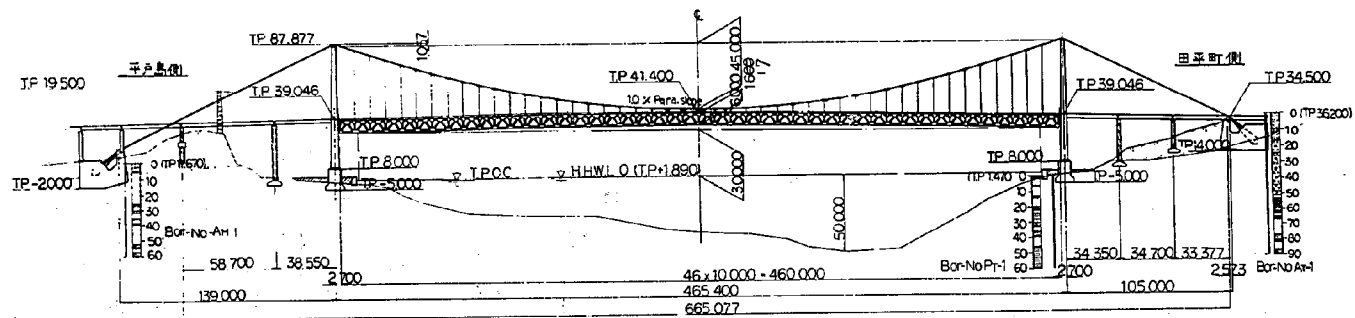


図 3.1 平戸大橋位置図

S-1:1500



断面图

 $\mu = 1:100$

一般部

支点上

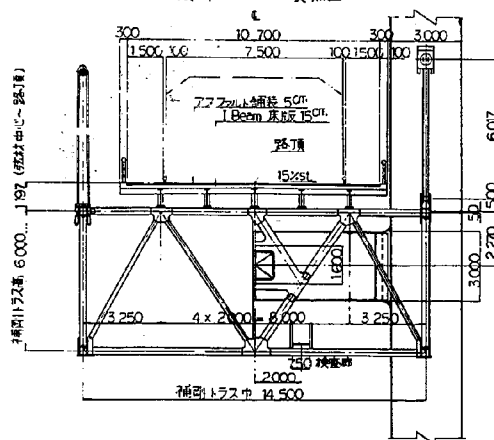


図3.2 平戸大橋一般図

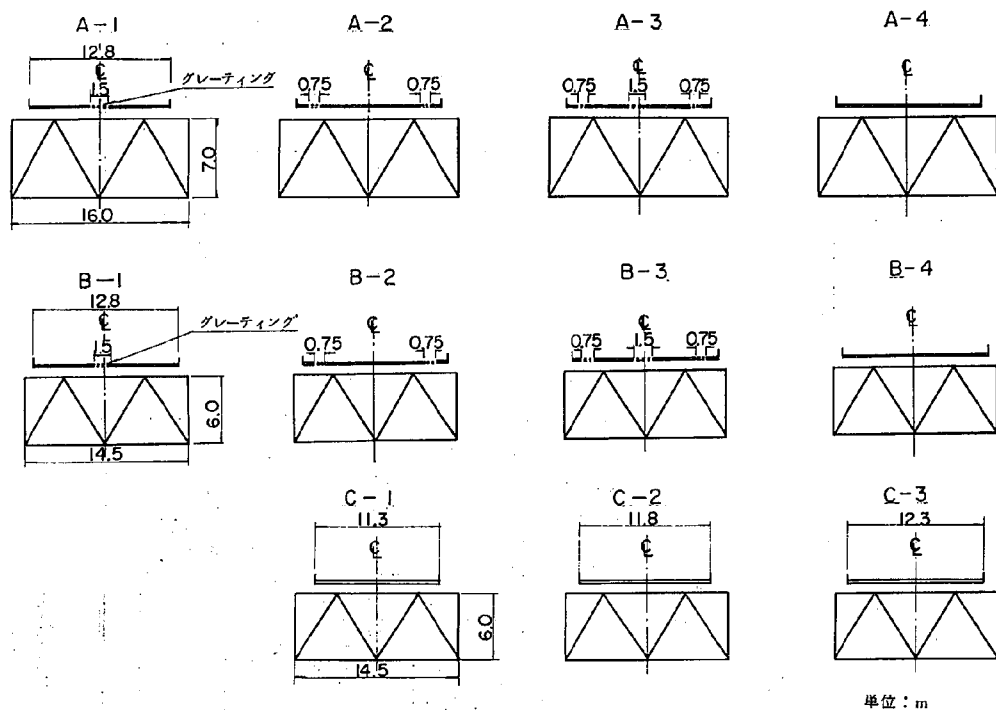


図3.3 模型の種類

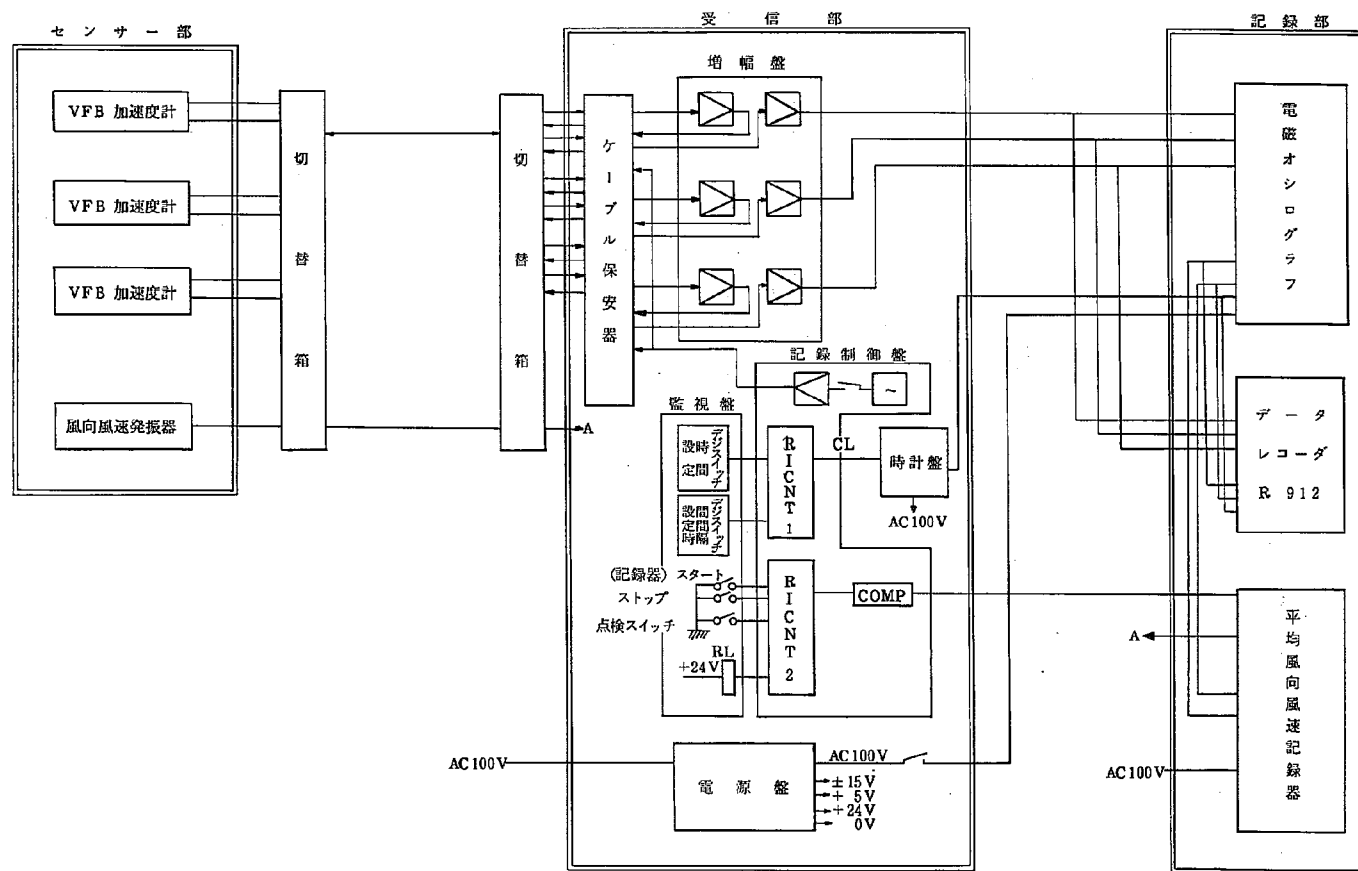


図 3.4 平戸大橋振動自動観測装置
総合系統図

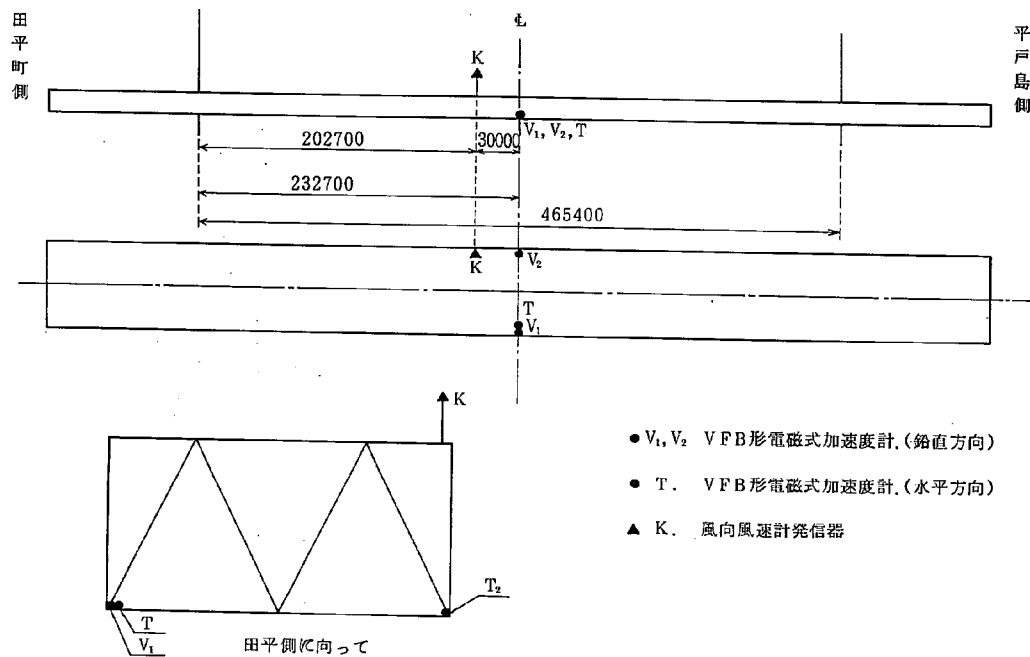


図 3.5 長期観測システム配置図

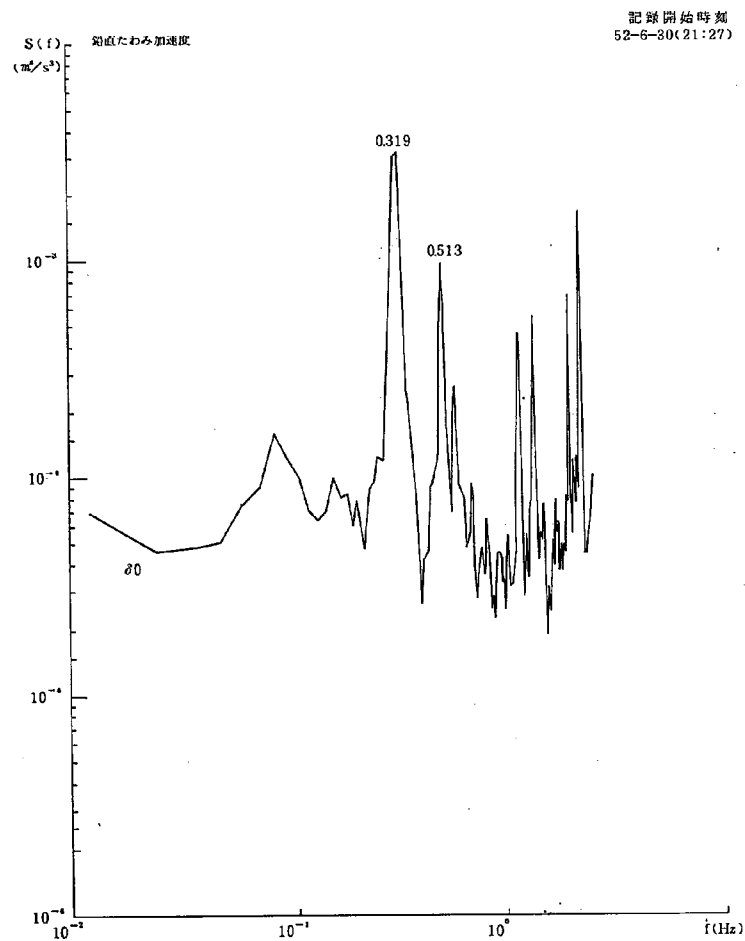


図 3.6.1 パワースペクトル

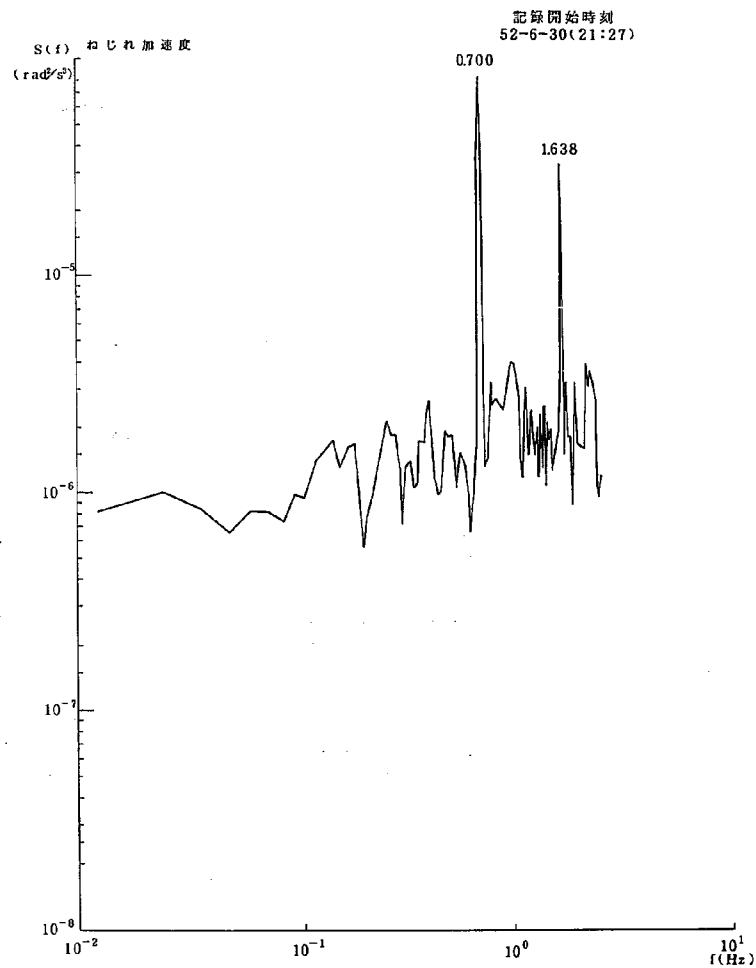


図 3.6.2 パワースペクトル

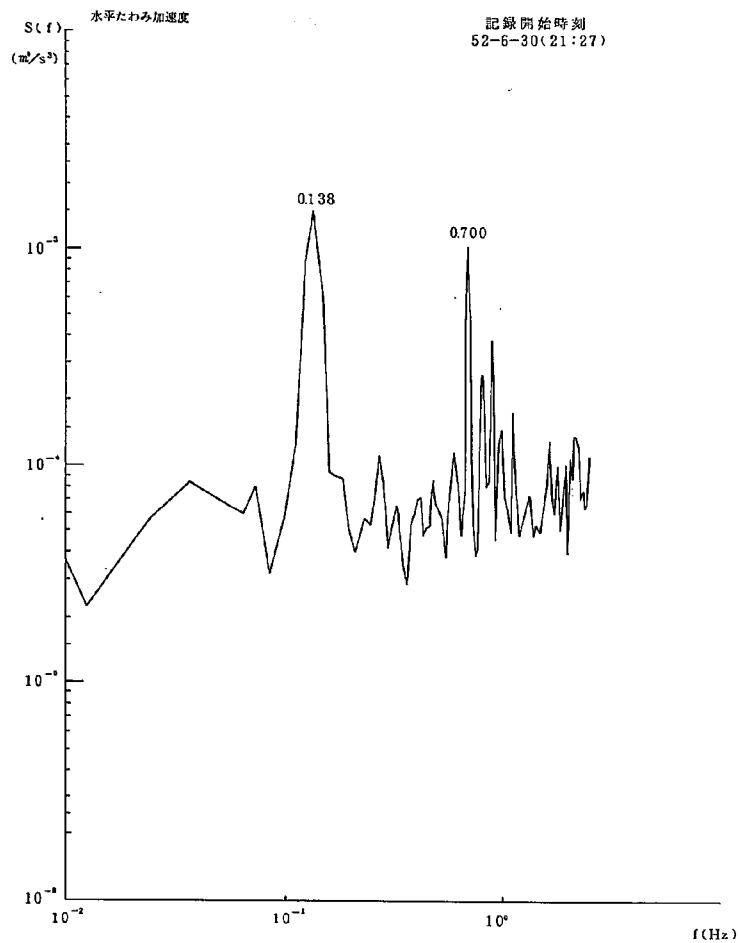


図 3.6.3 パワースペクトル

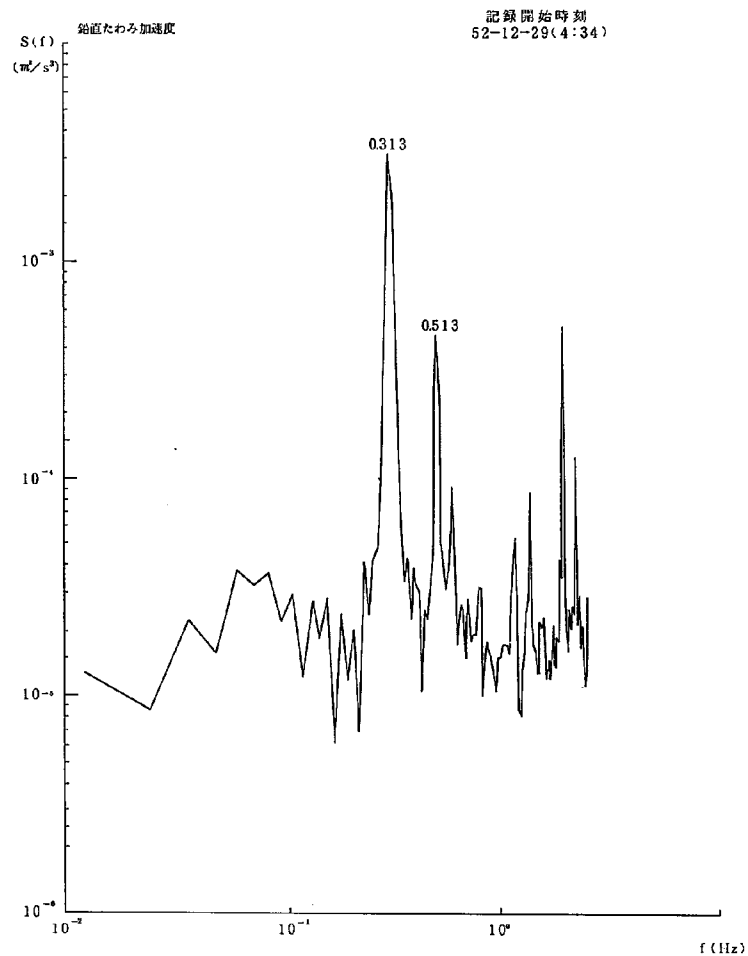


図 3.6.4 パワースペクトル

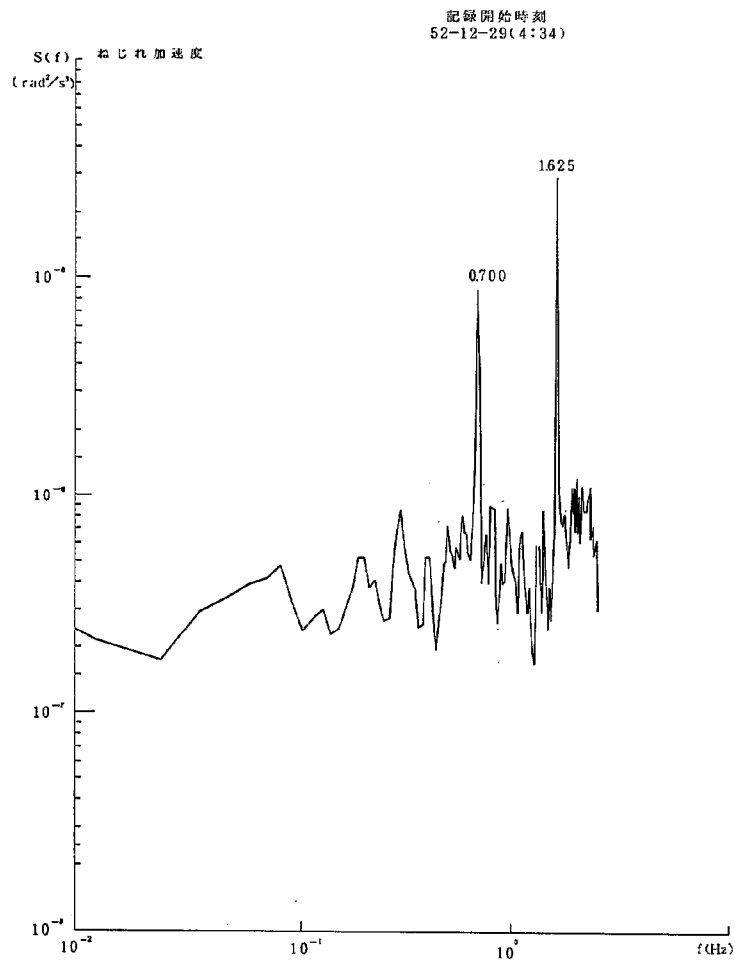


図 3.6.5 パワースペクトル

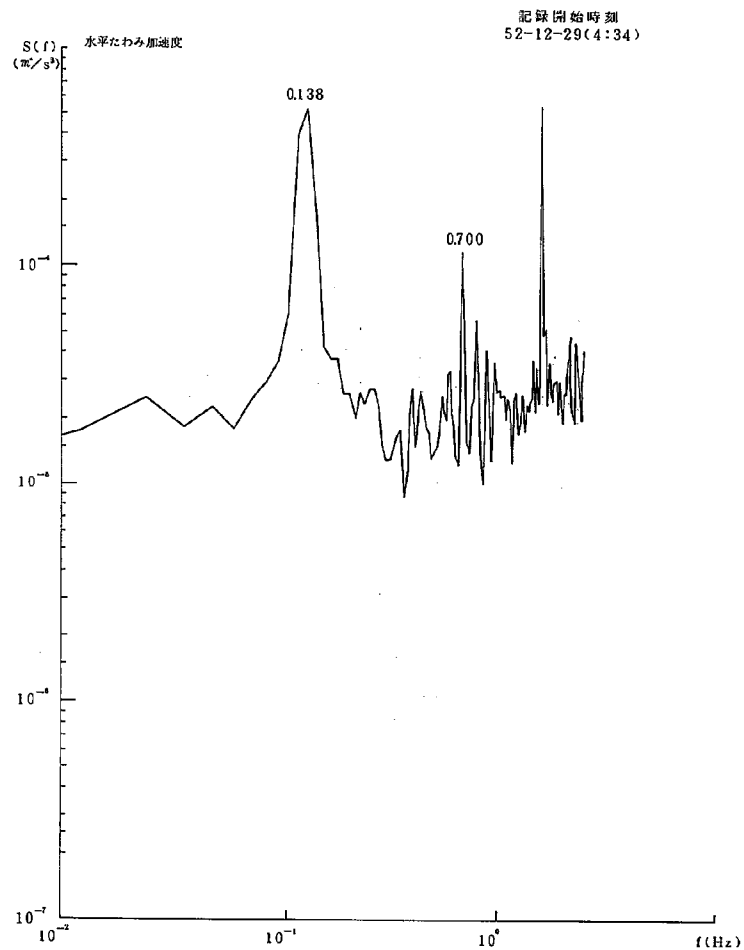


図 3.6.6 パワースペクトル

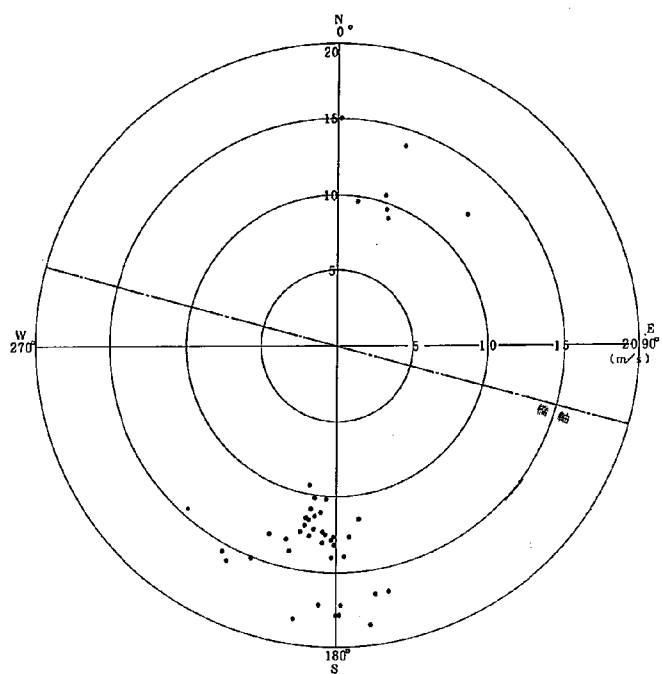


図 3.7.1 得られた風の記録 (データレコーダー)

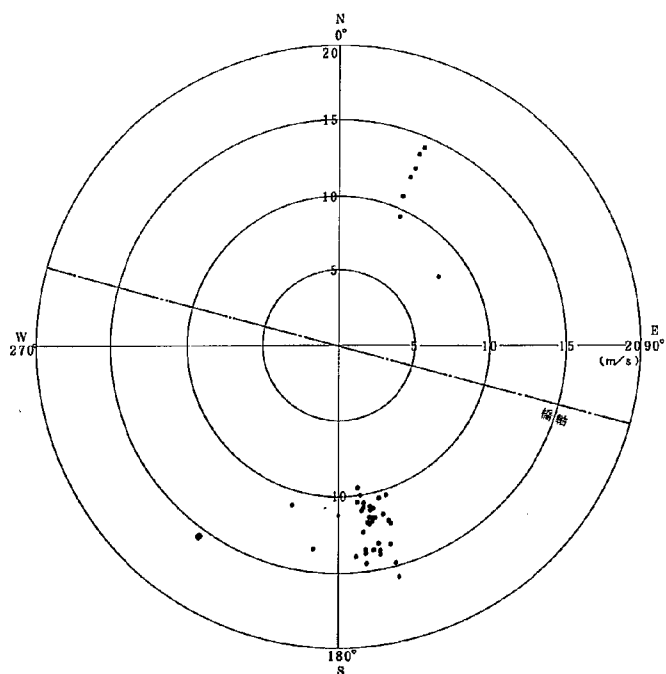


図 3.7.2 得られた風の記録 (風向風速記録器)



写真 1 風向風速計



写真 2 風向風速計

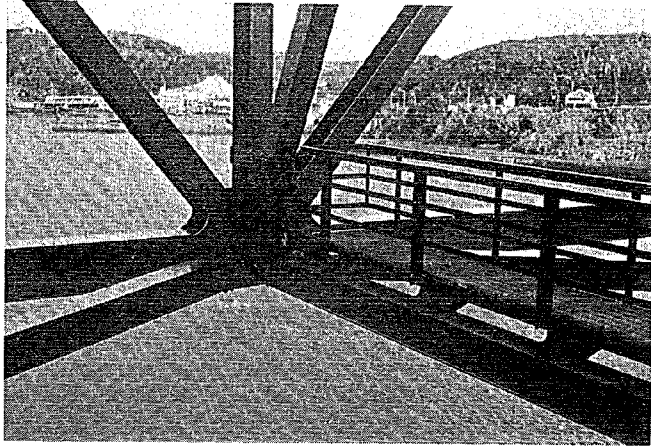


写真 3 V F B 加速度計

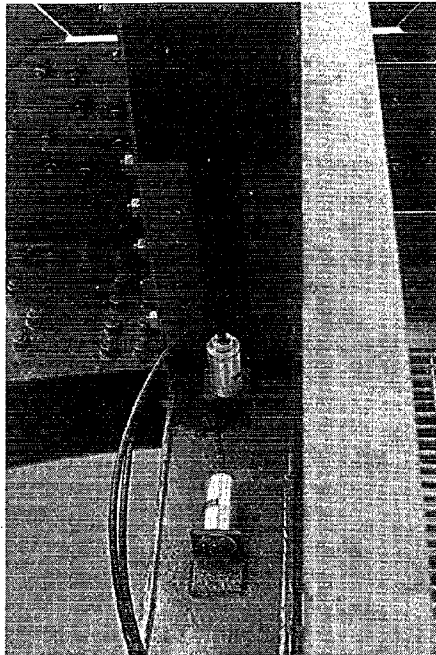


写真 4 V F B 加速度計



写真 5 受信部および記録部



写真 6 記録部