保存用

共同研究報告書
整理番号第108号

斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その2)

平成6年9月

建設省土木研究所構造橋梁部
石川島播磨重工株式会社
株式会社大林組
川崎重工業株式会社
住友建設株式会社
株式会社長大
日本鋼管株式会社
日立造船株式会社
三菱重工業株式会社
財団法人土木研究センター
株式会社エスイー
鹿島建設株式会社
清水建設株式会社
住友重機械工業株式会社
飛島建設株式会社
株式会社ピー・エス
三井造船株式会社

Copyright ©1994 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, 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，土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書

整理番号 第108号

斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その2)

平成6年9月

建設省土木研究所構造橋梁部
構造研究室長 佐藤弘史
石川島播磨重工株式会社
技術研究所環境エネルギー開発部次長 樋上琇一
株式会社 大林組
技術研究所構造第一研究室
主任研究員 大内一
川崎重工業株式会社
橋梁技術総括部 技術部部長 小川一志
住友建設株式会社
技術研究所 主任研究員 中井裕司
株式会社 長大
長大橋事業部事業部長 柴木定昭
日本鋼管株式会社
基盤技術研究所 都市工学研究部
主幹 藤澤伸光
日立造船株式会社
鉄構・建機事業本部
橋梁設計部部長代理 田中洋
三菱重工業株式会社
長崎研究所流体・伝熱研究室主務 斉藤通
財団法人 土木研究センター
理事 小林茂敏
株式会社 エスイー
工務部部長代理 及川孝一
鹿島建設株式会社
技術研究所第一研究部次長 竹田哲夫
清水建設株式会社
土木本部 技術第一部PCグループ 大野浩
住友重機械工業株式会社
橋梁鉄構事業部技術室課長 宮崎正男
飛島建設株式会社
技術本部 土木技術開発部主任 岡本浩
株式会社 ピー・エス
土木技術部主任研究員 久保明英
三井造船株式会社
鉄構建設事業部 技術部課長 井上浩男

要　旨

本報告書は斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究の平成５年度の成果を報告するものである。本年度はウェークギャロッピングの特性を明らかにするための研究および新しい制振装置の開発とその効果に関する基礎的な実験が実施された。前者に関しては，新しく実施された多くの風洞実験結果を示し，ウェークギャロッピングの発現状況を考察した。本研究によってウェークギャロッピングの性状とケーブル間隔の関係、構造減衰および気流の乱れ等との関係が明らかになった。後者に関しては，主に減衰付加型スペーサおよび空力的対策に関し，実験および解析による効果の検討の成果をとりまとめた。

キーワード：斜張橋，ケーブル，ウェークギャロッピング，制振装置，風洞実験

目　　次

1．まえがき …… 1

2．研究体制 …… 2

2.1　共同研究参加企業と研究担当者 …… 2

2.2　研究分担 …… 5

3．研究体制 …… 6

3.1　本年度の研究成果の概要 …… 6

3.2　ウェークギャロッピングの特性予測に対する研究 …… 8

3.2.1　概　要 …… 8

3.2.2　ケーブル間隔と迎角の影響（その１）……10

3.2.3　ケーブル間隔と迎角の影響（その２）……39

3.2.4　高レイノルズ数における空力特性 ……45

3.2.5　振動の自由度および気流特性の影響 ……52

3.2.6　偏角の影響 ……80

3.3　制振手法の合理化に関する研究 ……90

3.4　新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その１）…… 159

3.5　新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その２）…… 188

3.5.1　概　要 …… 188

3.5.2　構造力学的制振対策（その１）…… 188

3.5.3　構造力学的制振対策（その２）…… 217

3.6　空力的制振手法の開発に関する研究 …… 218

3.6.1　概　要 …… 218

3.6.2　空力的制振対策（その１）…… 219

3.6.3　空力的制振対策（その２）…… 267

3.7　数値解析による制振効果の評価に関する研究 …… 274

付録－１　　中間報告会議事録 …… 289

付録－２　　並列ケーブル斜張橋実績表 …… 308

第1章　まえがき

近年，斜張橋は構造計算技術の発達に伴い，その優れた構造性を評価できるようになってきたことの加え，その景観上の人気を受け，建設件数が増加し，さらに長径間化する傾向にある。また，斜張橋の桁には，従来鋼桁が主として用いられてきたが，ＰＣ桁を用いた斜張橋の建設事例も増えてきている。このような中，荷重の増加，施工性への配慮から，２本以上のケーブルを並列配置した斜張橋の建設が多くなってきた。

これらの並列ケーブルにおいては，ウェークギャロッピングが問題となっている。これは，低風速から広い風速範囲で発生する振動現象であるが，その特性及び発生原因は明らかになっていない。そこで，平成４年度より斜張橋の並列ケーブルに発生するウェークギャロッピングの特性の把握と，制振装置の開発およびその設計法の明確化を目的として共同研究を開始した。

本報告書は，平成５年度の研究成果をとりまとめたものである。平成５年度はウェークギャロッピングの特性を明らかにするための風洞実験が多数実施され，また新しい制振装置の開発とその効果に関する基礎的な実験が実施された。

第２章　研究体制

2.1　共同研究参加企業と研究担当者

表－2.1に参加企業とそれぞれの研究担当者を示す。

表－2.1　参加企業と研究担当者

団体・企業名		研究担当者
建設省土木研究所	構造橋梁部長	横山功一
	構造橋梁部構造研究室長	佐藤弘史
	構造橋梁部構造研究室主任研究員	鳥海隆一
	構造橋梁部構造研究室主任研究員	日下部毅明
(財)土木研究センター	専務理事	柳田　力
	理事	小林茂敏
	企画調査部部長	鷹取　勲
	専門調査役	近藤伸治
石川島播磨重工株式会社	技術研究所環境エネルギー開発部次長	樋上綉一
	橋梁事業部管理部課長	木本公平
	橋梁事業部設計部課長	吉永俊一郎
	技術研究所環境エネルギー開発部	上島秀作
株式会社エスイー	取締役技術開発部長	鈴木昭好
	技術開発部部長	大橋　渡
	技術開発部課長代理	木部　洋
	工務部部長代理	及川孝一
株式会社大林組	技術研究所土木第五研究室長	後藤洋三
	技術研究所流体研究室長	伊藤雅保
	技術研究所構造第二研究室主任研究員	鈴木哲夫
	技術研究所構造第一研究室主任研究員	大内　一
	土木技術本部設計第二部課長	安部　要
	技術研究所流体研究室副主任研究員	野村敏雄
	技術研究所流体研究室	藤原章博
	技術研究所土木第五研究室	樋口俊一
鹿島建設株式会社	土木設計本部第２設計部次長	和田信秀
	土木設計本部第２設計部	佐野演秀
	技術研究所第１研究部次長	竹田哲夫
	技術研究所第１研究部第２研究室	向　弘晴
川崎重工業株式会社	橋梁技術総括部技術部部長	小川一志

	橋梁技術総括部技術部係長	斉藤敏雄
	橋梁技術総括部技術部係長	下土居秀樹
	橋梁技術総括部技術部	野上千秋
清水建設株式会社	土木本部技術第一部副部長	渡辺泰充
	土木本部技術第一部ＰＣグループ	大野　浩
	技術研究所環境技術研究部	若原敏裕
住友建設株式会社	土木設計部第二設計課課長	近藤真一
	技術研究所主任研究員	中井裕司
	横浜支店工事部	春日昭夫
	土木設計部第二設計課主任	中村收志
	土木設計部第二設計課	平　喜彦
	技術研究所	松元香保里
住友重機械工業株式会社	橋梁鉄構事業部技術室課長	宮崎正男
	技術本部総合技術研究所熱流体グループ	斉藤善昭
	橋梁鉄構事業部技術室課長代理	中村　幸
	技術本部総合技術研究所材料構造グループ	加藤宏之
株式会社長大	長大橋事業部事業部長	柴田定昭
	長大橋事業部副技師長	大月　哲
	長大橋第２部主任技師	山崎康嗣
	長大橋第１部グループマネージャー	上野武志
	長大橋第２部グループマネージャー	山崎武文
	長大橋第１部	嶌原　直
飛島建設株式会社	技術本部土木技術開発部長	猪俣　正
	技術本部土木技術開発部課長	本多　新
	技術本部土木技術開発部主任	岡本　浩
	技術本部土木技術開発部主任	武藤正人
	技術本部土木技術開発部	石川　朗
日本鋼管株式会社	基盤技術研究所都市工学研究部主幹	藤澤伸光
	同　　耐風構造チーム主査	武田勝昭
	同　　耐風構造チーム	村上琢哉
	橋梁建設部長大橋室	小泉幹男
株式会社ピー・エス	土木技術部主任研究員	久保明英
	土木技術部主任技師	河村直彦
	開発技術部	赤嶺文繁
日立造船株式会社	鉄構・建機事業本部橋梁設計部部長	中垣亮二
	鉄構・建機事業本部企画部部長	植田利夫
	鉄構・建機事業本部橋梁設計部部長代理	田中　洋
	鉄構・建機事業本部橋梁設計部	三河克己
	技術研究所構造・流体技術研究センター主任研究員	砂田博幸

	技術研究所構造・流体技術研究センター	山口映二
三井造船株式会社	鉄構建設事業部技術部課長	井上浩男
	鉄構建設事業部技術部	大森龍一郎
	鉄構建設事業部技術部	森島弘吉
	鉄構建設事業部技術部	林　健一
	鉄構建設事業部技術部	赤瀬雅之
三菱重工業株式会社	広島製作所鉄構部橋梁設計課課長	逸見雄人
	広島製作所鉄構部橋梁設計課主任	増田伊知郎
	長崎研究所流体・伝熱研究室主務	斉藤　通
	長崎研究所流体・伝熱研究室主任	本田明弘
	長崎研究所流体・伝熱研究室	平井滋登
	広島研究所鉄構・土木研究室主務	佐々木伸幸

2.2 研究分担

研究の実施に先立ち，研究内容を表－2.2のようにブレークダウンして，それぞれ幹事担当者を定めた。

表－2.2 研 究 分 担

グループ名	研究分担の内容	幹　事	担当企業
A	実橋におけるウェークギャロッピングの特性予測のデータの充実	①三井造船 ②ＩＨＩ ③三菱重工	ＩＨＩ　ＮＫＫ 川崎重工　日立造船 住友重機械　三井造船 長大　三菱重工 （８社）
B	連結およびスペーサーによる制振手法の合理化の研究	鹿島	鹿島 エスイー（２社）
C－1	新しい構造力学的制振装置の開発（減衰向上機能付きスペーサーの開発）	住友建設	大林組　飛島建設 清水建設　ピーエス 住友建設　（５社）
C－2	新しい構造力学的制振装置の開発（連結材等の減衰付加に関する研究）	①ＮＫＫ ②長大 ③川崎重工	ＩＨＩ　長大 川崎重工　（３社）
D	空力的制振手法の開発	①日立造船 ②住友重機 ③長大	住友重機械 日立造船　（２社）

①②③は年度を示す。

第３章　研究体制

3.1　本年度の研究成果の概要

3.1.1　総括

平成５年度は主に，平成４年度に計画したウェークギャロッピングの特性に関する風洞実験，新しい制振対策の開発と実験を実施した。研究成果は平成６年度の作業を待たねばならないものもあるが，本年度の成果として以下があげられる。

①ウェークギャロッピングの特性と，これに影響を与える諸要因の関連が具体的に捉えられるようになった。これによって制振装置の開発のために重要なデータが充実した。

②構造力学式制振対策に関しては数種の制振機能付きスペーサーが提案され，数値シミュレーションあるいは実験により効果が検討された。

③空力的に効果が認められる制振対策が発案された。

以下に，上記三項目に関し本年度の成果の概略をまとめる。

3.1.2　ウェークギャロッピングの特性

(1)　発現風速

振動数に依存せず，構造減衰が0.01以下では風速2m/s～3m/sの範囲で発現することが多かった。構造減衰を増加させると発現風速が向上する傾向が認められ，構造減衰を 0.1程度に増大させると，発現風速は8m/s程度まで向上することがわかった。また超臨界領域では，一般に振動が発現しずらくなる可能性が指摘された。

(2)　振幅

高風速下（22m/s)で，鉛直振動で2.0D程度，水平振動では1.5D程度の振幅まで発生することがわかった。

(3)　振動が発現するケーブル間隔

振動が顕著に発現するケーブル間隔は 1.5D～６Dであった。ケーブル間隔が４Dの場合は振幅は，２Dの場合に比べ半減しており，間隔がある程度広くなると振幅は小さくなってゆく可能性もみとめられた。

(4)　振動の特性

ケーブル間隔の影響で振動の特性は複雑に変化した。多くの場合，低風速でハード型の振動が見られた。

(5) 水平偏角の影響

タウト模型実験では偏角15° 及び30° で振動が少なくとも振幅1Dの水平方向振動に移行した。このことから，振動は広い範囲で鉛直あるいは水平方向に発生すると考えられた。

(6) 迎角の影響

迎角がおおきくなると，振動はソフト型となる事が多いが，バフェティング的な振動に遷移したり，振幅が小さくなったりする傾向が認められる。

(7) 気流の影響

ケーブル間隔が6D以上の場合に，乱流によって振動が抑えられた。しかし，それ以下の間隔では振動低減は認められなかった。

(8) 自由度について

上流側ケーブルが拘束された方が下流側ケーブルの振幅が大きくなること，下流側ケーブルの振動方向が拘束された場合に振動の状態が変わること等がわかった。

3.1.3 構造力学的制振装置

数値シミュレーションによって減衰機能付きスペーサーの効果が，装置配置個数・位置および各々の装置の特性をパラメータとして検討された。一方，模型実験によって，新たに開発された制振装置の特性が調査され，0.03～0.1程度の構造減衰を付加しうることが明らかとなった。

さらに，スペーサーによって拘束された並列ケーブルの対風応答挙動が風洞実験によって研究された。

3.1.4 空力的制振装置

有効な方法として，有孔外筒，円形突起，空気抜きつき縦リブ突起，螺旋リブ突起およびVストライプ等が考案された。これらの手法の有効性は部分模型実験により確認され，ウェークギャロッピングを完全に抑えることが明らかとなった。

3.2 ウェークギャロッピングの特性予測に対する研究

3.2.1 概要

(1) 研究の目的

本研究では実橋におけるウェークギャロッピングの特性を予測するためのデータの充実を研究の目的とした。具体的には参加各機関で風洞実験を分担し，様々な条件の下でウェークギャロッピングの原因となる空気力を測定し，現象の解明と有効な制振対策の開発を目指した。また，実橋ケーブルのウェークギャロッピングの応答振幅や制振装置の効果を予測するための基礎的なデータの蓄積を図った。

(2) 研究の方法

並列ケーブルのウェークギャロッピング応答には，幾何学的パラメータ，構造的パラメータ，気流の特性など，多くの因子が影響すると考えられたので，全体計画を立案する際に参加各機関からの提案をベースに実橋ケーブル諸元と実験条件との整合性や極端な研究項目の重複などを調整した。その結果影響因子として以下のものに的を絞って研究を進めることとした。

① 迎角　α　（或いはケーブル鉛直間隔　Sv）
　ケーブル水平間隔　Sh
② 水平偏角　β
③ 乱流特性　主として乱流強度　Iu
④ 振動自由度

参加各機関は各々の提案をベースに，上記のいずれかの因子グループに重点を置いた実験を実施した。具体的な研究実施項目とその実施機関は次の通りである。

ケーブル間距離と迎角の影響（その１）	三井造船（株）
ケーブル間距離と迎角の影響（その２）	住友重機械工業（株）
高レイノルズ数における空力特性	三菱重工業（株）
振動の自由度および気流特性の影響	日本鋼管（株）
偏角の影響	石川島播磨重工業（株）

(3) 研究成果の概要

1) ケーブル間距離の影響

振動の発生は二次元実験結果によれば２Ｄ～６Ｄ程度の範囲である。タウトストリップモデルによる実験結果では８Ｄでも振動の発生が認められているが，スクルートン数は二次元実験の約1/4程度であった。二次元実験ではケーブル間距離３Ｄ以下ではハード型のギャロッピングが，４Ｄ以上ではソフト型の応答

が観測されている。また，タウト実験でもウェークギャロッピング発生風速域で不安定なリミットサイクルの存在が確認されたことから，振動特性としてハード型の場合もありうると認識していた方がよいようである。

2) ケーブル径，振動数の影響

ケーブル径を変化させると同一条件でも振動の発生に相違が認められた。また，同一径の場合でも振動数を変化させると振動応答が相違した。振動数を高くすると発生する空気力は小さくなり，応答振幅は低下するか，または，まったく振動の発生が抑制されるようである。

3) レイノルズ数影響

概ね超臨界域での振動の発生は認められないようである。

4) 乱流影響

乱れ強さの増加はギャロッピングを安定化させる傾向ではあるが，乱れの強さが8％でかつケーブル間隔が6D以上の場合にのみ制振効果が確認されている。6D以下の場合には過大な期待は出来ないようである。

(4) 今後の課題

ウェークギャロッピングに影響する因子に着目して，その振動特性を明らかにすることを目的とした実験を各機関で実施した。実験結果からは応答特性は極めて複雑であり，今後とも系統的な風洞実験の継続が望まれるところではある。しかしながら，大摑みではあるが特性は明らかになってきており，今後は実橋における振動振幅の予測や制振対策の効果の確認のためのデータ蓄積，或いは最適ケーブル配置といったことに主眼を置いた研究の継続が必要である。

3.2.2 ケーブル間隔と迎角の影響（その１）

(1) 研究概要

斜張橋並列ケーブルのケーブル間隔とその迎角がウェークギャロッピングにおよぼす影響を下流側ケーブルの耐風応答特性の面から明らかにすることを目的とした。このため，ケーブル間隔と迎角について系統的な調査を実施してウェークギャロッピングの発現する領域を把握する必要がある。

そこで，本研究では上・下流のケーブル間隔とその迎角を，ケーブルの水平間隔S_Hと垂直間隔S_Vに置き換え－ケーブル径をDとすると－水平間隔S_H＝２D～６D，垂直間隔S_V＝０～２Dの範囲で風洞試験を実施した。このほかにも，ケーブル径，構造減衰，振動数の影響についても調査を実施した。

(2) 試験方法

１）試験内容

２本のケーブル間の距離と迎角αがウェークギャロッピングにおよぼす影響を調べるため，風路内に固定された上流側ケーブルから所定の間隔；

① ケーブル中心軸間の水平間隔：S_H

② ケーブル中心軸間の垂直間隔：S_V

離れた下流側ケーブル模型についてたわみ１自由度のばね支持試験を実施した。

ケーブル模型の配置を図-3.2.2.1に，諸元を表-3.2.2.1に示す。

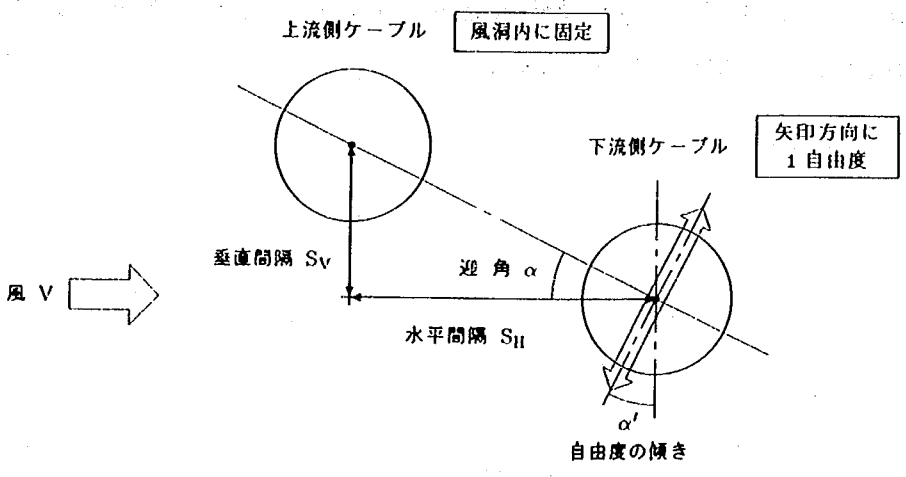


図-3.2.2.1 ケーブル模型の配置

表-3.2.2.1 ケーブル模型の諸元

項　　目		50 φ		100 φ	
		計 画 値	実 験 値	計 画 値	実 験 値
ケーブル径	D (m)	0.05	0.05	0.10	0.10
スパン長	L (m)	1.59	1.59	1.59	1.59
重　　量	W (kgf/m)	5	5.04	10	9.74
スクルートン数	$Sc=\frac{2m\delta}{\rho D^2}$	33	31,63	33	9,30,31

ばね支持試験は，下流側のケーブル模型をばね支持試験装置に吊るし，一様流中におけるその振動応答を自由振動法により計測した。振動応答変位の計測には光学式非接触変位計，あるいはレーザー変位計を使用した。模型の初期加振および必要な減衰の付加には電磁加振減衰装置を用いた。上流側と下流側のケーブル間隔S_HとS_Vは，上流側のケーブル模型を移動させて調節した。

振動の自由度方向α'は下流側ケーブルの支持系を回転させることで調節した。しかし，装置等の関係により支持系の回転が制限され，S_Vが大きな場合，迎角αと合わせることが出来なかった。このため，自由度の方向α'は0°から20°の間で調節した。

2）風洞装置

試験に使用した風洞施設は，三井造船株式会社昭島研究所「構造物用低速風洞」である。風洞の測定部は高さ3m×幅2mの矩形断面で，長さ20mである。これを閉鎖型で使用した。また，風速範囲は0～20m／sである。表-3.2.2.2に主要目を，図-3.2.2.2に概観図を示す。

表-3.2.2.2　風洞装置主要目

項　　目	主　　要　　項　　目
名　　称	構造物用低速風洞
型　　式	水平回流閉鎖型（開放型も可）
測定部寸法	3 m 高 × 2 m 幅 × 20 m 長　（上流側 5m が可動カート）
風速範囲	0.3 m/s ～ 20 m/s　（開放型では，0.5 m/s ～ 30 m/s）
乱れ強さ	0.1 % 以下　（閉鎖型）
風速分布	± 0.2 % 以下　（　〃　）
静圧勾配	1.9 % 以下　（　〃　）
付属設備	放風扉・吸込扉・昇降作業台・補助ダクト・ベルマウス　ほか
付属装置	ばね支持試験装置・静的空気力測定装置（六分力天秤） 非定常空気力測定装置・トラバース装置・電磁加振減衰装置 ターンテーブル装置・変動風発生装置・データ処理装置　ほか

3）使用模型

ケーブルの模型は二次元剛体部分模型とし，直径50 mmと100 mmの2種類のアルミ製円柱パイプを使用した。ばね支持試験装置および電磁加振減衰装置の許容変位量の都合により直径50 mmの模型を基本とした。上流側のケーブル模型は，持具を介して風路内の固定端板に直接固定し，下流側のケーブル模型には，二次元性の確保のため模型端板を取り付けた。模型端板は直径250 mmである（図-3.2.2.3，4）。

4）試験ケース

試験実施ケースおよび試験条件の一覧を表-3.2.2.3に示す。

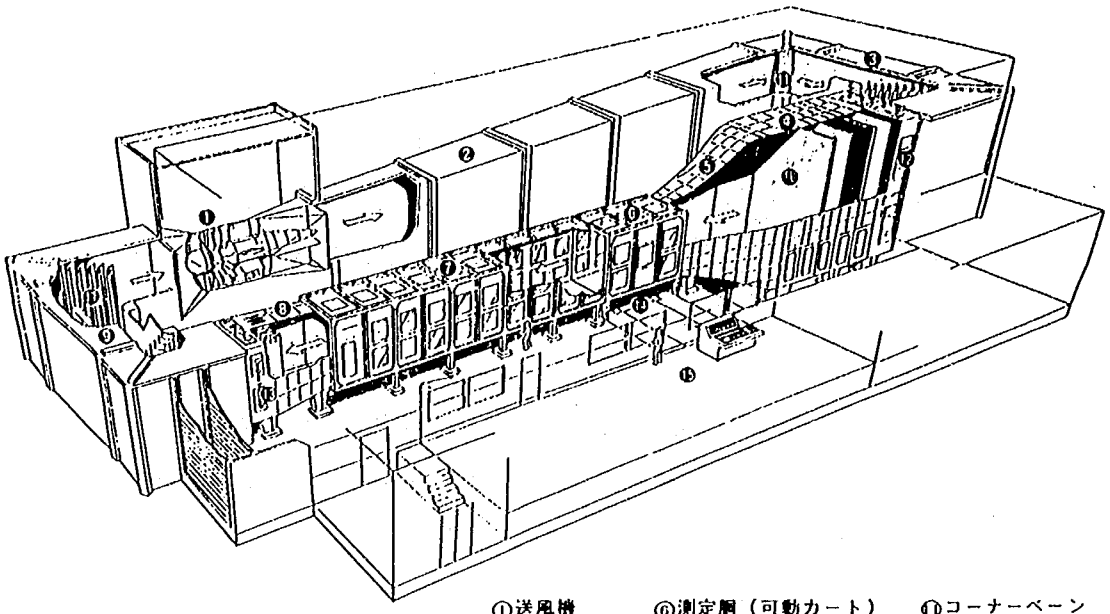


図-3.2.2.2　風洞装置概観図

表-3.2.2.3　試験ケース一覧

試験番号 No.	ケーブル径 D [mm]	ケーブル間距離 S_H	ケーブル間距離 S_V	迎角と自由度の傾き α [deg.]	迎角と自由度の傾き α' [deg.]	たわみ振動数 N_η [Hz]	対数減衰率 δ_η	空気密度 ρ [kg·s²/m⁴]	Sc数 $\frac{2m\delta}{\rho D^2}$
1	50	2D	0	0	0	1.16	0.0093	0.122	31
2	50	3D	0	0	0	1.16	0.0093	0.125	31
3	50	4D	0	0	0	1.16	0.0093	0.124	31
4	50	5D	0	0	0	1.16	0.0093	0.124	31
5	50	6D	0	0	0	1.16	0.0093	0.123	31
6	50	2D	D	26.6	20.0	1.16	0.0093	0.122	31
7	50	3D	D	18.4	18.5	1.16	0.0093	0.123	31
8	50	3D	D	18.4	0	1.16	0.0093	0.123	31
9	50	4D	D	14.0	14.0	1.16	0.0093	0.125	31
10	50	2D	2D	45.0	20.0	1.16	0.0093	0.124	31
11	50	3D	2D	33.7	0	1.16	0.0093	0.124	31
12	50	4D	0	0	0	1.16	0.0195	0.127	63
13	100	3D	0	0	0	2.13	0.0191	0.125	30
14	100	4D	0	0	0	2.13	0.0191	0.124	31
15	100	4D	0	0	0	1.19	0.0057	0.124	9

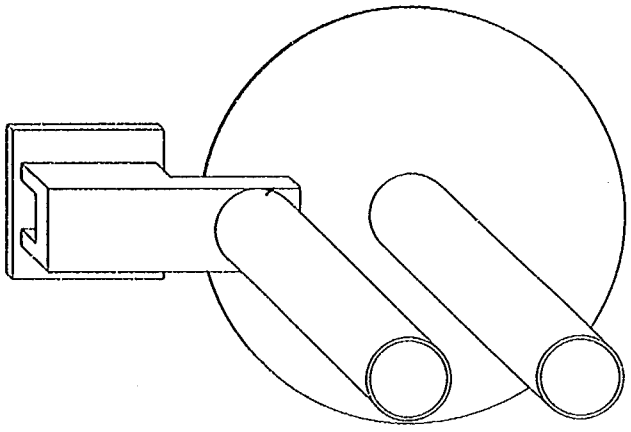


図-3.2.2.3　50φケーブル模型の端部処理

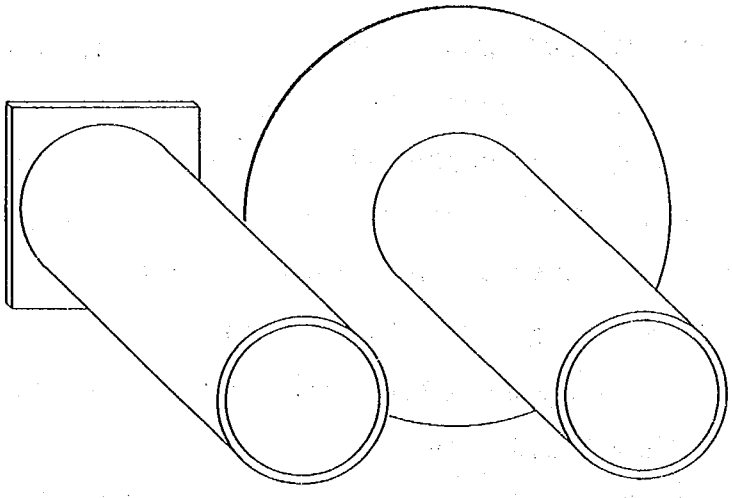


図-3.2.2.4　100φケーブル模型の端部処理

(3) 試験結果

風洞試験結果は，風速と振幅の関係：Ｖ－Ａ図として整理した。なお，風速と振幅および減衰率の関係：Ｖ－Ａ－δ図，および，風速と非定常空気力係数の関係での整理は次年度におこなう予定である。

全試験ケースについて，風速と振幅の関係：Ｖ－Ａ図を，図-3.2.2.16 ～ 30 に示す。ここで，ばね支持試験装置および電磁加振減衰装置の都合により最大許容振幅を 30 mmとしたため，50φケーブルではたわみ振幅η／Ｄ＝ 0.6以上を，100φケーブルではη／Ｄ＝ 0.3 以上を発散振動として取り扱い，図中に↑印で示した。

1) ケーブル間距離S_H，S_Vの影響

図-3.2.2.5に 50φケーブルの応答特性をまとめて示す。

① $S_V=0$のとき

S_H ＝２Ｄ～６Ｄで，ウェイクギャロッピングと思われる振動が発生した。ギャロッピング発現時の換算風速Ｖｒ＝ 40 ～ 60 とほぼ一定であった。しかし，応答特性は間隔S_Hによって変化する。

S_H＝２Ｄおよび６Ｄでは，不安定なリミットサイクルをもつハード型の応答を示す。とくに，S_H＝２Ｄの場合，換算風速Ｖｒ＝ 40 ～ 170のほかに，330 付近にも分岐が存在する（図-3.2.2.16）。

S_H＝４Ｄ～６Ｄではソフト型の応答を示す。S_H＝４Ｄの場合は典型的なソフト型を示すが（図-3.2.18），S_H＝５Ｄの場合は，S_H＝２Ｄと同様に，高換算風速域；換算風速Ｖｒ＝350付近に分岐が存在する（図-3.2.2.19)。S_H＝６Ｄの場合には換算風速Ｖｒ＝200以上ではバフェティングとみられる振動になり，平均応答振幅が減少し，ビート幅は増大する（図-3.2.2.20）。

② $S_V\neq0$のとき

（S_H，S_V）＝（２Ｄ，Ｄ）の場合はハード型の応答を示す（図-3.2.2.21）。

（S_H，S_V）＝（３Ｄ，Ｄ）の場合では，振動自由度方向α′により応答特性が異なる。この自由度の傾きα′の相違による下流側ケーブルの平均応答振幅の比較を図-3.2.2.6に示す。α′＝0°の場合は，換算風速Ｖｒ＝ 190 付近に分岐が存在しているものの，ソフト型の応答を示すのに対し（図-3.2.2.23），α′＝ 18.5 °の場合，換算風速Ｖｒ＝ 100～ 160ではハード型的な応答を，Ｖｒ＝ 170以上ではバフェティングと思われる影響を強く受けている（図-3.2.2.22）。

（S_H，S_V）＝（４Ｄ，Ｄ）および（２Ｄ，２Ｄ），（３Ｄ，２Ｄ）の場合，バフェティングとみられる振動だけが生じた（図-3.2.2.24 ～ 26）。

このため，これ以上の間隔S_H，S_Vではウェークギャロッピングが発現しないものとして試験を実施しなかった。

2) スクルートン数Ｓｃの影響

（S_H，S_V）＝（４Ｄ，０）で構造減衰δを付加することによりスクルートン数Ｓｃを 31 から 63 へ，２倍にした。このときの下流側ケーブルの平均応答振幅の比較を図-3.2.2.7に示す。応答特性そのものには変化はなく，構造減衰δを付加したことによりケーブルの平均応答振幅は小さくなっている。しかし，

逆にビート幅は大きくなっている（図-3.2.2.18, 27）。

3) レイノルズ数Ｒｅの影響

ケーブル径の影響を確認するため 50φケーブルのほかに，100φケーブルでも試験を実施した。100φケーブルの応答特性を図-3.2.2.8にまとめて示す。

（S_H, S_V）＝（３Ｄ，０）における 50φおよび100φの下流側ケーブルの平均応答振幅の比較を図-3.2.2.9～10に示す。100φでは，50φのときのスクルートン数Ｓｃに合わせて試験をおこなったが，バフェティングとみられる振動が生じるだけでギャロッピングは発現しなかった。ケーブル径Ｄが50φから100φへ，振動数Ｎも１Hzから２Hzへ変えたため換算風速範囲は 50φの１／４の 90 までとなった。50φケーブルの場合，換算風速Ｖｒ＝ 90 付近でハード型の応答を示すこと，さらに 100φケーブルの場合，電時加振減衰装置の最大加振振幅がη／Ｄ＝ 0.3であることから，分岐－50φでは 0.2で分岐－までケーブルを加振しきれなかった可能性もある。

このため，さらに（S_H, S_V）＝（４Ｄ，０）でも比較を行った（図-3.2.2.11,12）。（S_H, S_V）＝（３Ｄ，０）の場合と同じ条件で実験を行ったが，50φではソフト型の応答を示すのに対し 100φではギャロッピングが発現しなかった。さらに，振動数Ｎを50φと同じ１Hzに戻し，スクルートン数Ｓｃを31から９へ，１／３にしても応答特性に変化はなかった。

4) ケーブル振動数の振幅依存特性

50φケーブル；（S_H, S_V）＝（２Ｄ，０）のとき，風洞風速Ｖ＝20.28m/sにおいてほぼ定常な状態で振動していた下流側ケーブルが，突然，大きな振幅で速く振動するようになった。さらに，その後，ケーブルの振動はたわみ振動からローリング振動に変化した。このときの振幅と振動数の関係を 図-3.2.2.13 に，ケーブルのたわみ振動およびローリング振動の諸元を表-3.2.2.6に示す。

表-3.2.2.6　たわみとローリングの振動諸元の比較

項　　目	たわみ振動	ローリング振動
固有振動数　N	1.16 Hz	1.63 Hz
構造減衰率　δ	0.0093	0.33

図-3.2.2.13 より，たわみ振動の振幅の上昇とともに振動数が 1.2Hzから 1.6Hzへと上昇している。とくに，振幅η／Ｄ＝ 0.225～ 0.250でたわみの振動数は 1.2Hzから 1.5Hzへ急激に上昇－ジャンプ－している。この一連の振動数の上昇の結果，ローリング振動数に一致するようになり，ケーブルの振動がたわみからローリングへと変化したのである。

この振動数がジャンプする傾向は風洞風速Ｖ＝ 20.28 m/s以下においてもみられる（図-3.2.2.13）。しかし，風洞風速が下がると振動数のジャンプの割合も減少している（図-3.2.2.15）。

以下，ほかのケースについて，この振動数の振幅依存特性の有無をみてみる。

① $S_V = 0$のとき

$S_H = 3D$の場合，$S_H = 2D$の場合と同様に，ある振幅を境にして振動数がジャンプし，風速に依存してそのジャンプの割合が変化する。しかし，境界となる振幅η/Dは，$S_H = 2D$での 0.225～0.250から，$S_H = 3D$では 0.300～ 0.350へと変化している。$S_H \geqq 4D$の場合では，同一風速内での振動数のジャンプはみられない。

② $S_V \neq 0$のとき

ソフト型のウェークギャロッピングが発現した（S_H, S_V）＝（3D, D）；$\alpha' = 0°$の場合，図-3.2.2.14 の振幅と振動数の関係から同一風速内での振動数のジャンプはみられず，振動数はほぼ一定の値となっている。しかし，任意の基準振幅における風速と振動数の関係は，図-3.2.2.15より，$S_V = 0$の場合とは逆に風速の増加にともない振動数が減少してゆく。

この傾向は，ハード型のギャロッピングが発現した（S_H, S_V）＝（3D, D）；$\alpha' = 18.5°$および（S_H, S_V）＝（3D, D）の場合においても同様であった。

以上より，SH＝2D～3Dの範囲ではケーブルの振動数に振幅依存性が存在している。

さらに，境界となる振幅とケーブル間隔S_Hの関係をみてみると，

・$S_H = 2D$の場合

$$\frac{\eta}{S_H} = \frac{0.225 \sim 0.250}{2} \fallingdotseq 0.12$$

・$S_H = 3D$の場合

$$\frac{\eta}{S_H} = \frac{0.300 \sim 0.350}{3} \fallingdotseq 0.11$$

となり，η/S_H が同じ値となる。この値は，上流側ケーブルと下流側ケーブルの相対迎角α'になおすと，$\alpha' = 6° \sim 7°$に相当する。つまり，ケーブルの相対迎角α'が6°より小さい振幅域と7°より大きな振幅域では，ケーブルの振動数が大きく変化する。

(4) まとめ及び今後の課題

1) 50φケーブルでのウェークギャロッピングの発現領域は，$S_V=0$のとき$S_H \leqq 6D$，$S_V=D$のとき$S_H \leqq 3D$（図-3.2.2.5 中の○印のところ）である。ケーブル間隔S_H，S_Vが増大するにしたがいウェークギャロッピングの発現は抑制され，バフェティングの影響を強く受ける。

2) 振動の自由度の方向 α' を変えると下流側ケーブルの応答特性は変化する。自由度の与え方に留る必要があると思われるが，$\alpha'=0°$ と18.5° の比較だけであるため，3.2.2 では，詳しい議論が不可能である。このα' の影響については「3.2.3 ケーブル間隔と迎角の影響（その2）」で系統的に検討される予定である。

3) 構造減衰δを大きくすると振動の応答振幅ηは減少する。

4) 50φから 100φにケーブル径が変わるとウェークギャロッピングは発現しなかった。ただし，100φケーブルでは2ヶ所で，計3ケースの試験をおこなっただけである。このため，ケーブル径の影響についてさらに調べる必要がある。

5) ケーブル水平間隔$S_H=2D\sim3D$では，ケーブル振動数に振幅依存性がある。とくに，上・下流ケーブルの相対迎角αが6°～7°を境にして振動状態が大きく変化する。これには，下流側ケーブルに作用する定常揚力特性が密接に関連しているのではないかと考えられる。この件について，可能ならば次年度に検討をおこなう予定である。

参考文献

1) 白土博通 :複数構造物の空気力学的挙動に関する研究，博士論文，京都大学，1988年.

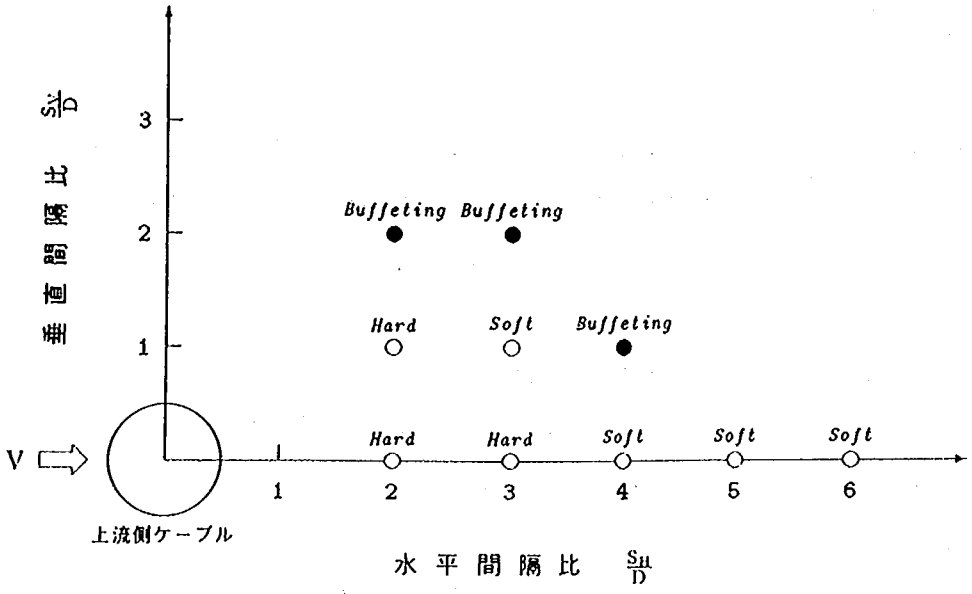


図-3.2.2.5　50 ϕケーブルの応答特性

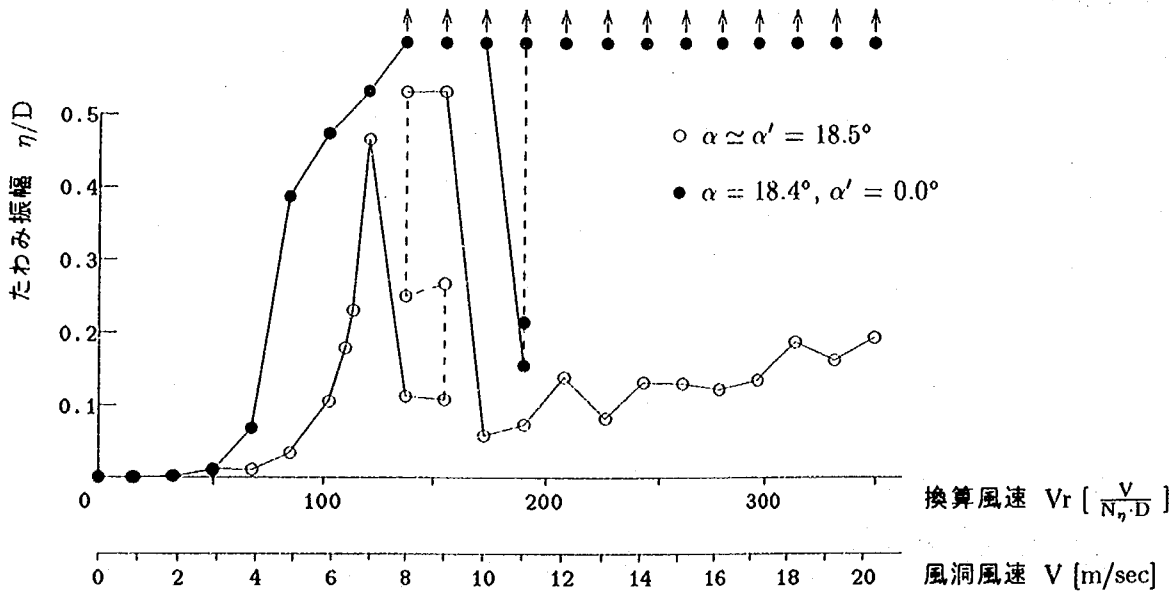


図-3.2.2.6　自由度の傾きα'による応答の比較；（S_H, S_V）＝（3D, D）

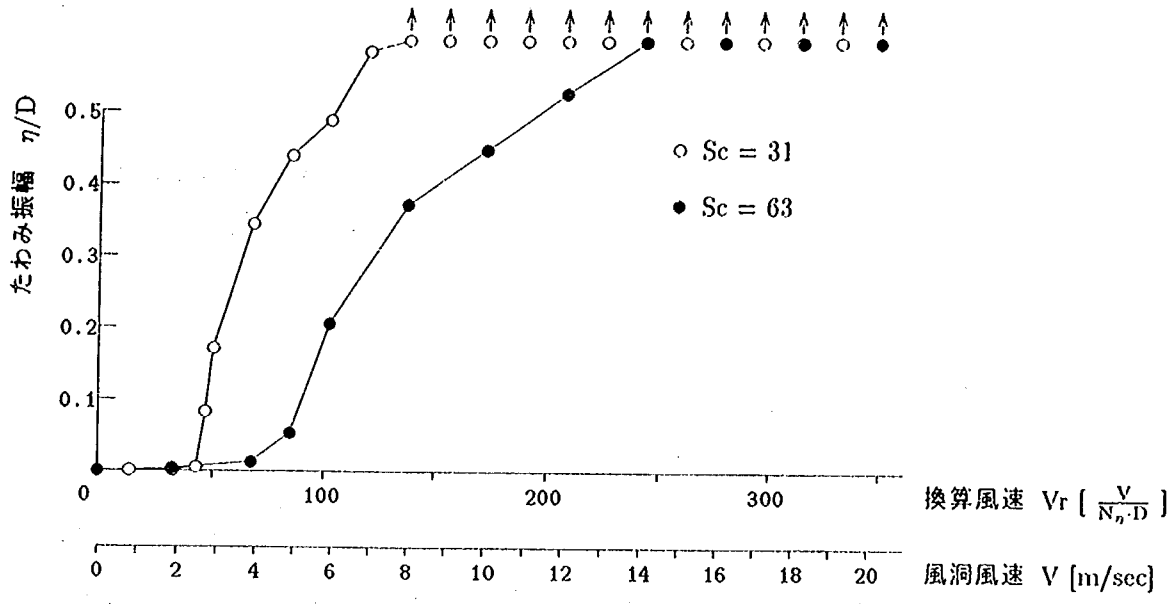


図-3.2.2.7　スクルートン数Ｓｃによる応答の比較；（S_H, S_V）＝（4Ｄ，0）

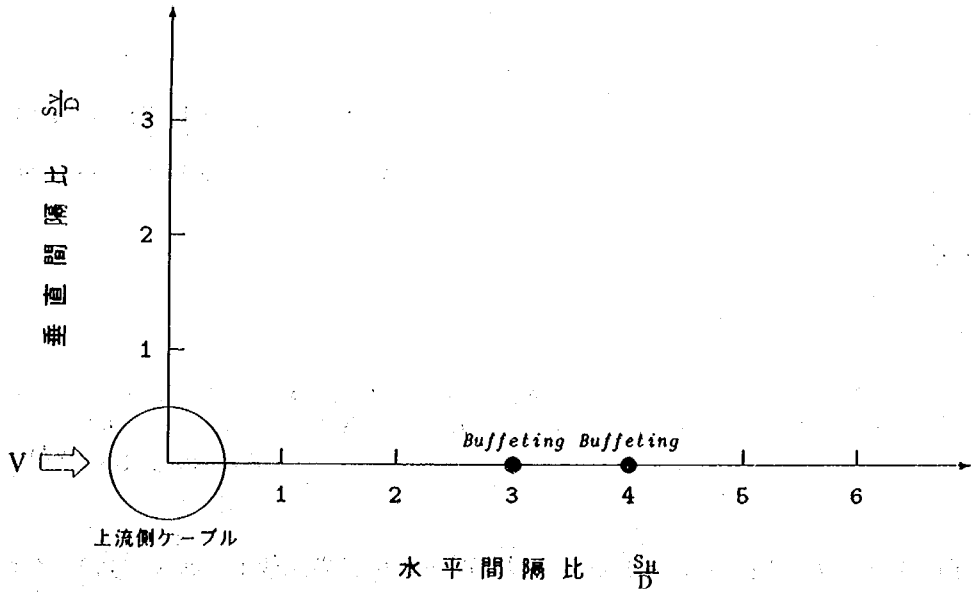


図-3.2.2.8　100 φケーブルの応答特性

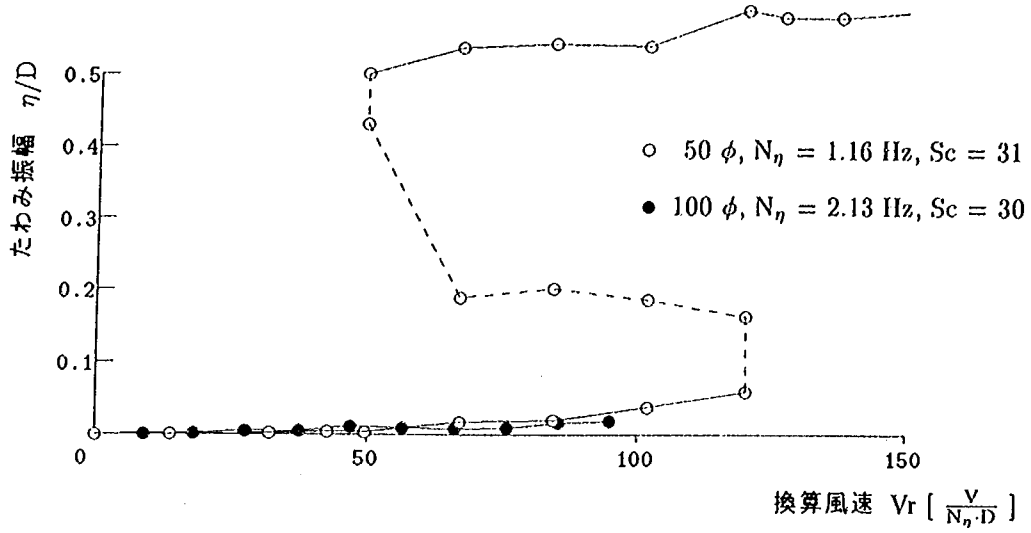


図-3.2.2.9　換算風速Ｖｒと 50 φおよび 100φの応答の比較；（S_H, S_V）＝（３Ｄ，０）

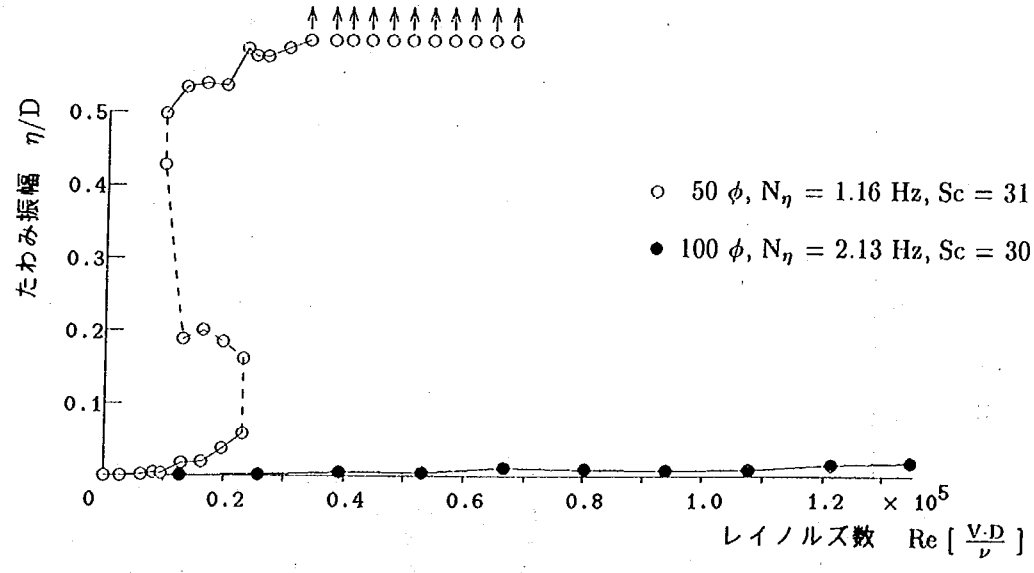


図-3.2.2.10　レイノルズ数Ｒｅと 50 φおよび 100φの応答の比較；（S_H, S_V）＝（３Ｄ，０）

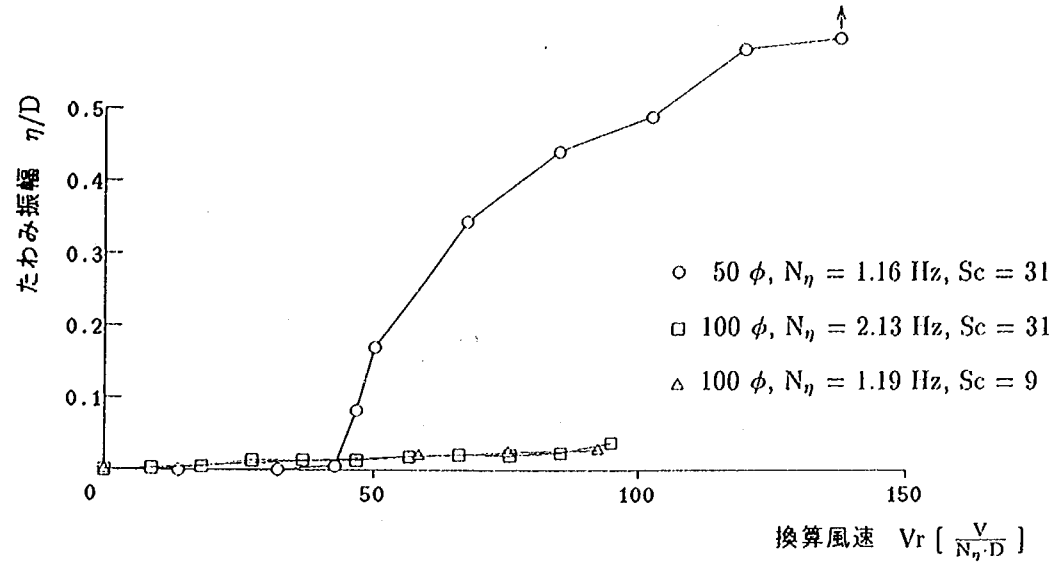


図-3.2.2.11 換算風速Ｖｒと 50 φおよび 100φの応答の比較；（S_H, S_V）＝（４Ｄ，０）

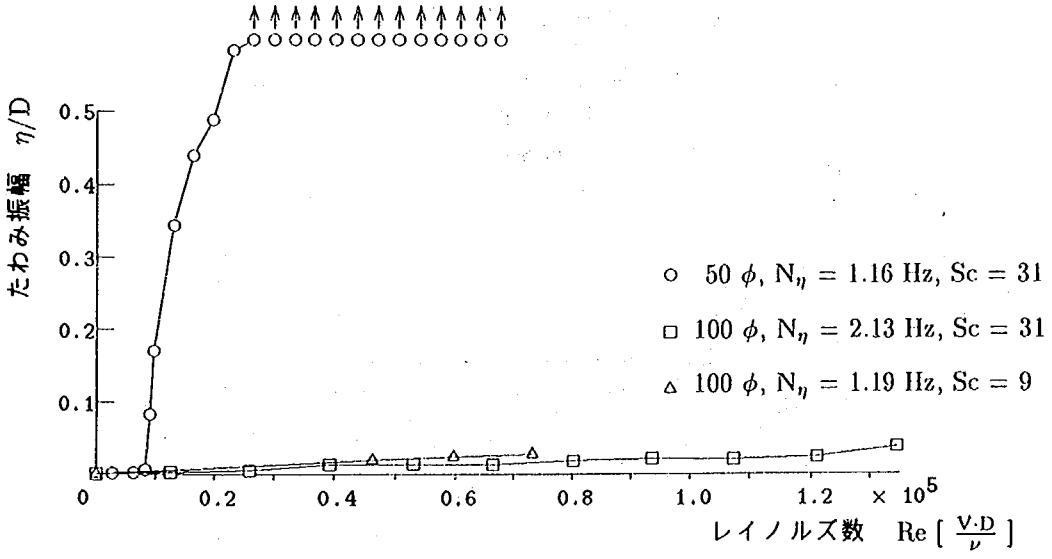


図-3.2.2.12 レイノルズ数Ｒｅと 50 φおよび 100φの応答の比較；（S_H, S_V）＝（４Ｄ，０）

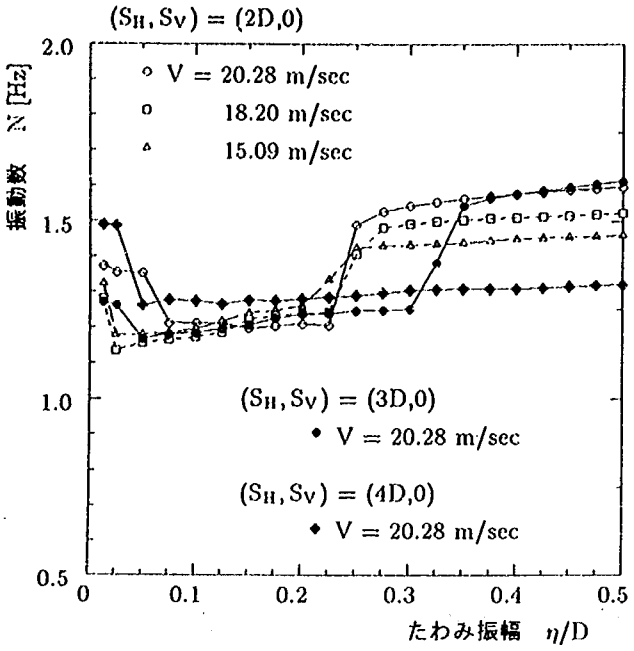


図-3.2.2.13 振幅と振動数の関係；$S_V = 0$

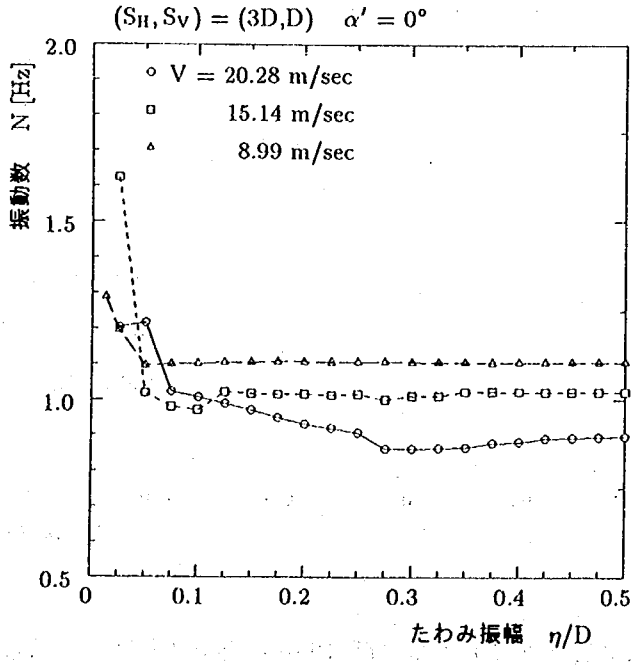


図-3.2.2.14 振幅と振動数の関係；$S_V \neq 0$

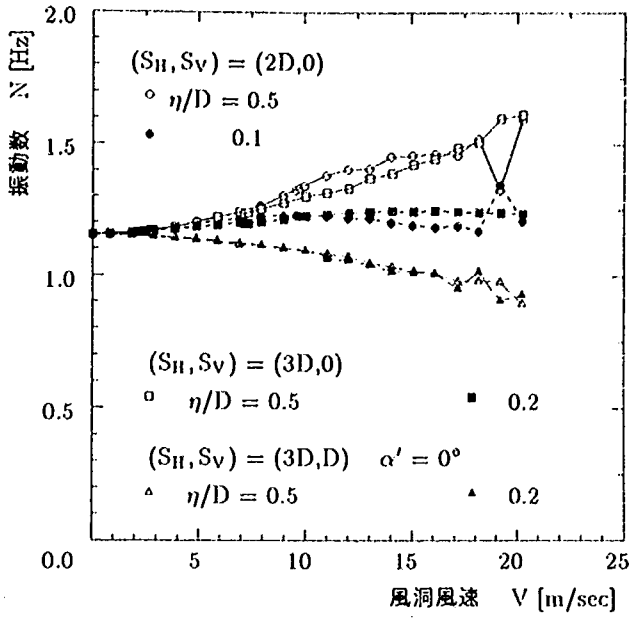


図-3.2.2.15　風速と振動数の関係

試　験　条　件	
ケーブル径	D = 50 ϕ
重　　量	5.04 kgf/m
振　動　数	N_η : 1.16 Hz
構造減衰	δ_η : 0.0093
空気密度	0.1215 kg·s^2/m^4

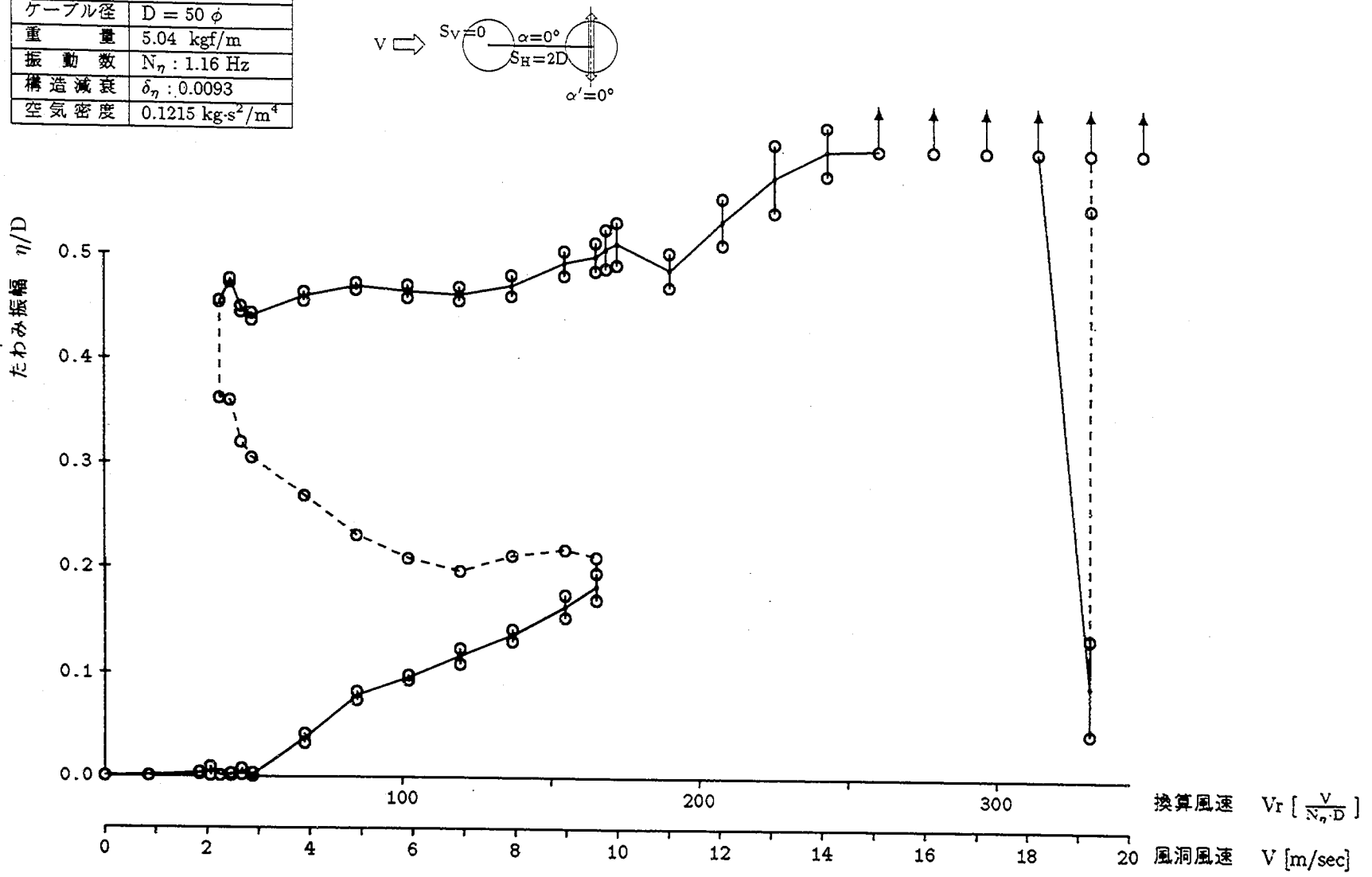


図-3.2.2.16 （S_H. S_V）＝（2D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号1

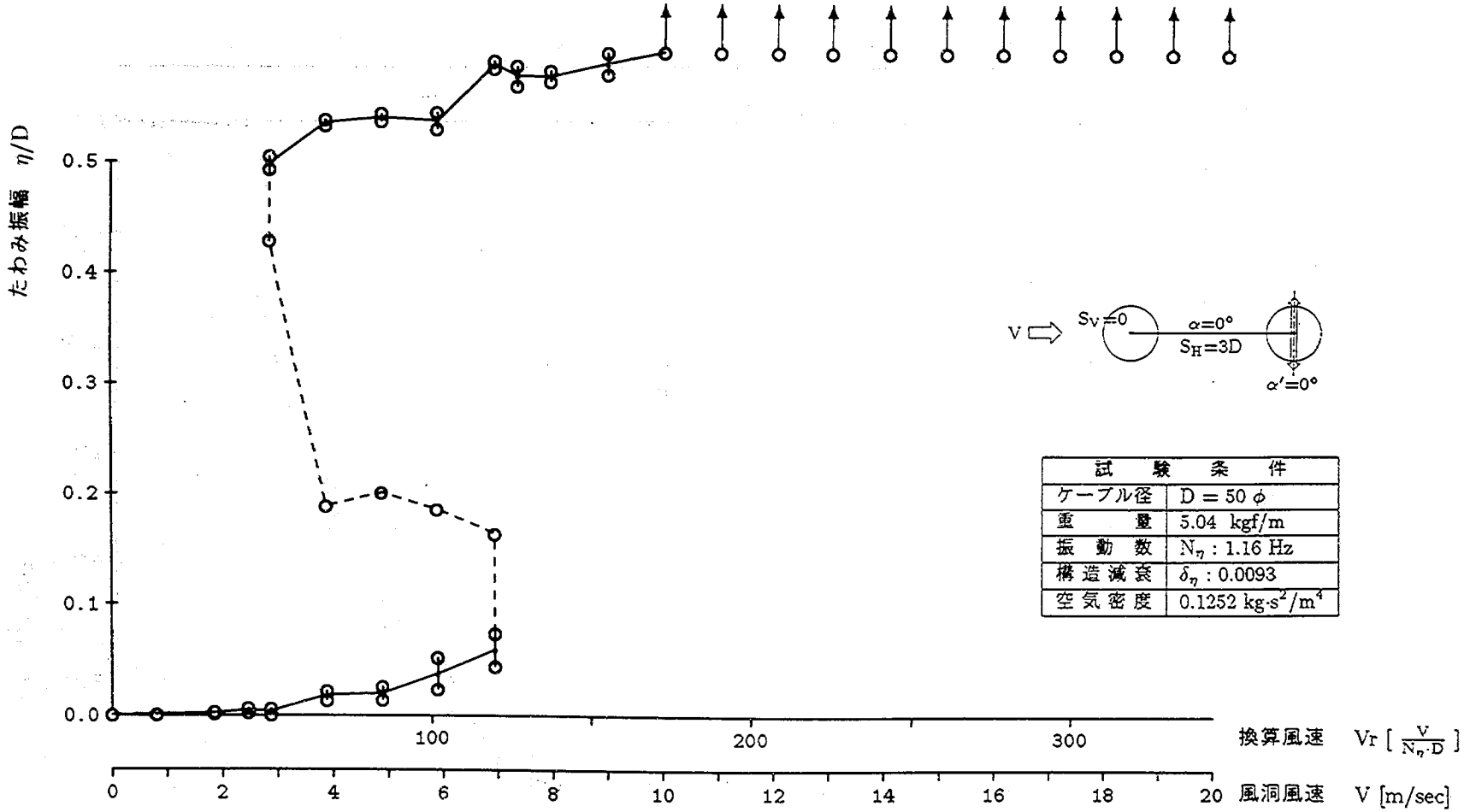


図-3.2.2.17 （S_H, S_V）＝（3D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号2

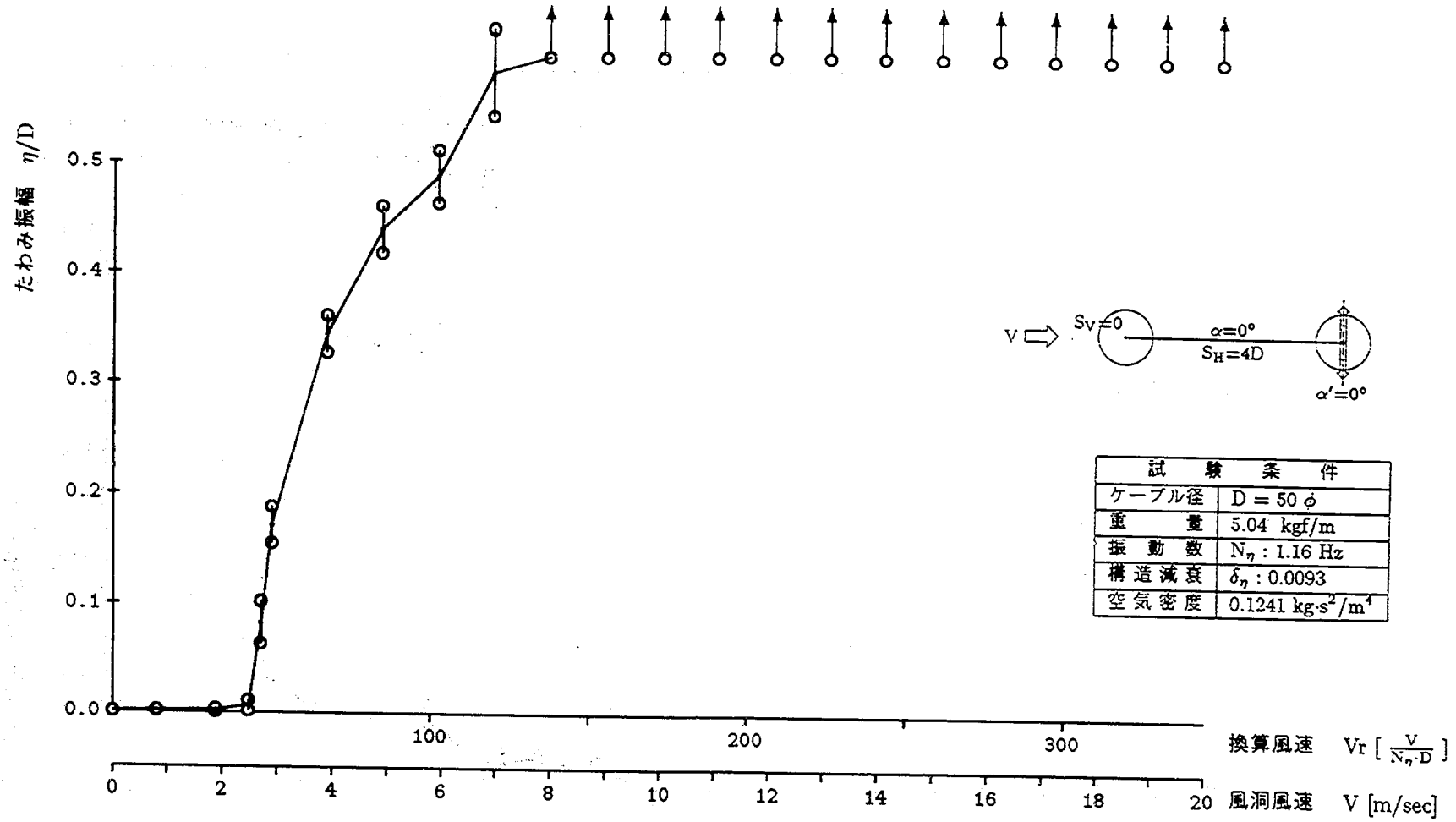


図-3.2.2.18 （S_H, S_V）＝（4D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号3

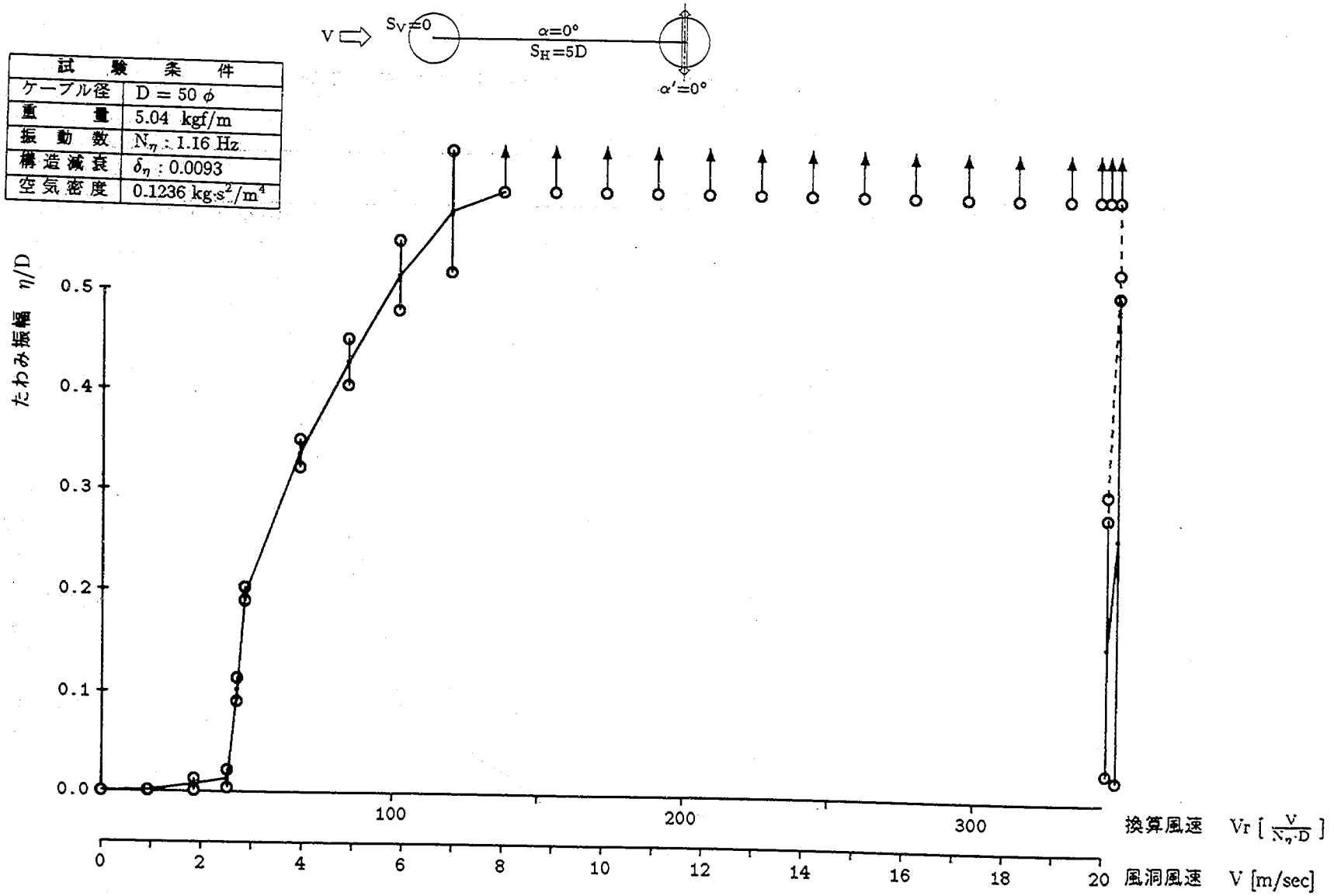


図-3.2.2.19 （S_H. S_V）＝（5D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号4

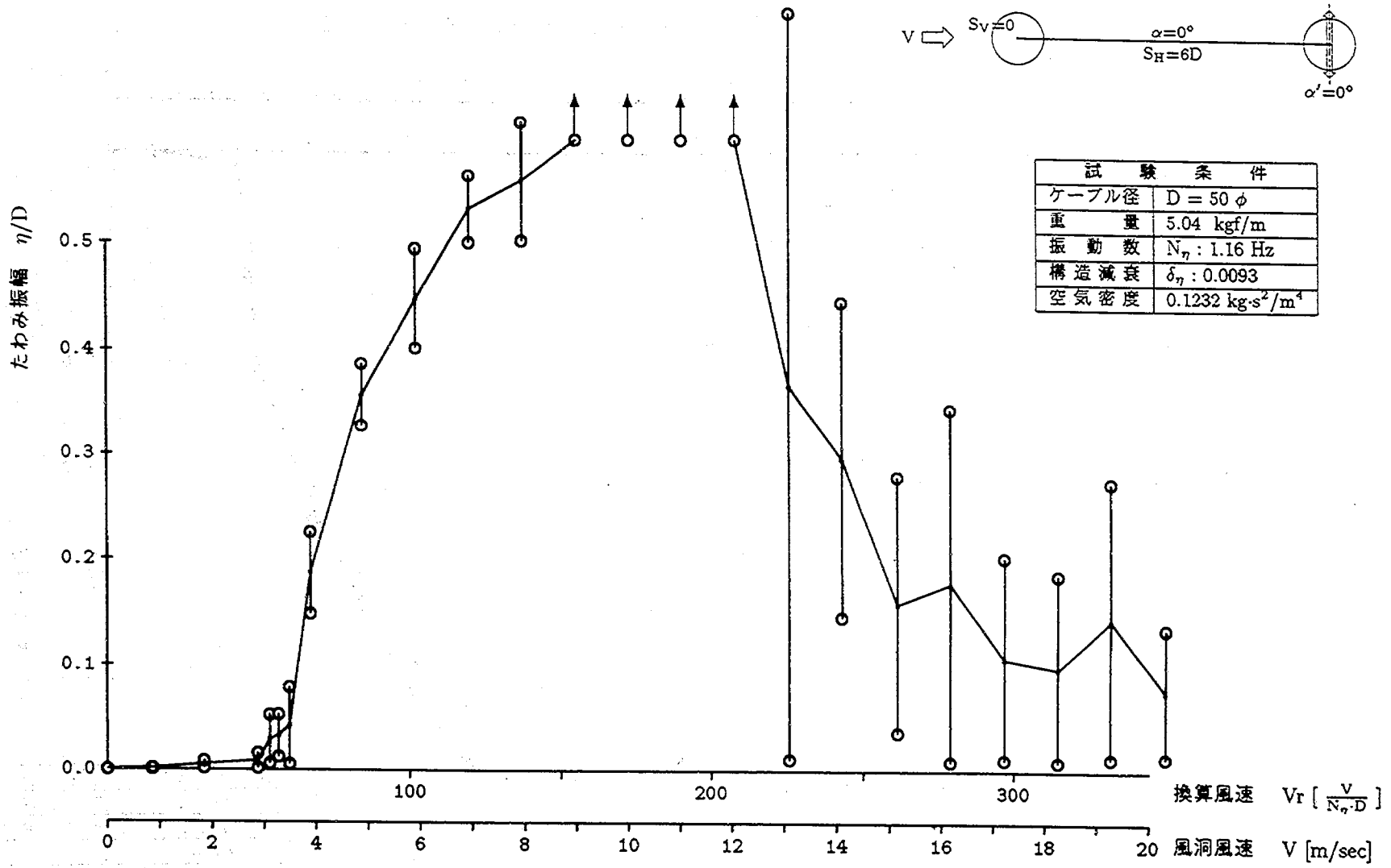


図-3.2.2.20 （S_H. S_V）＝（6D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号5

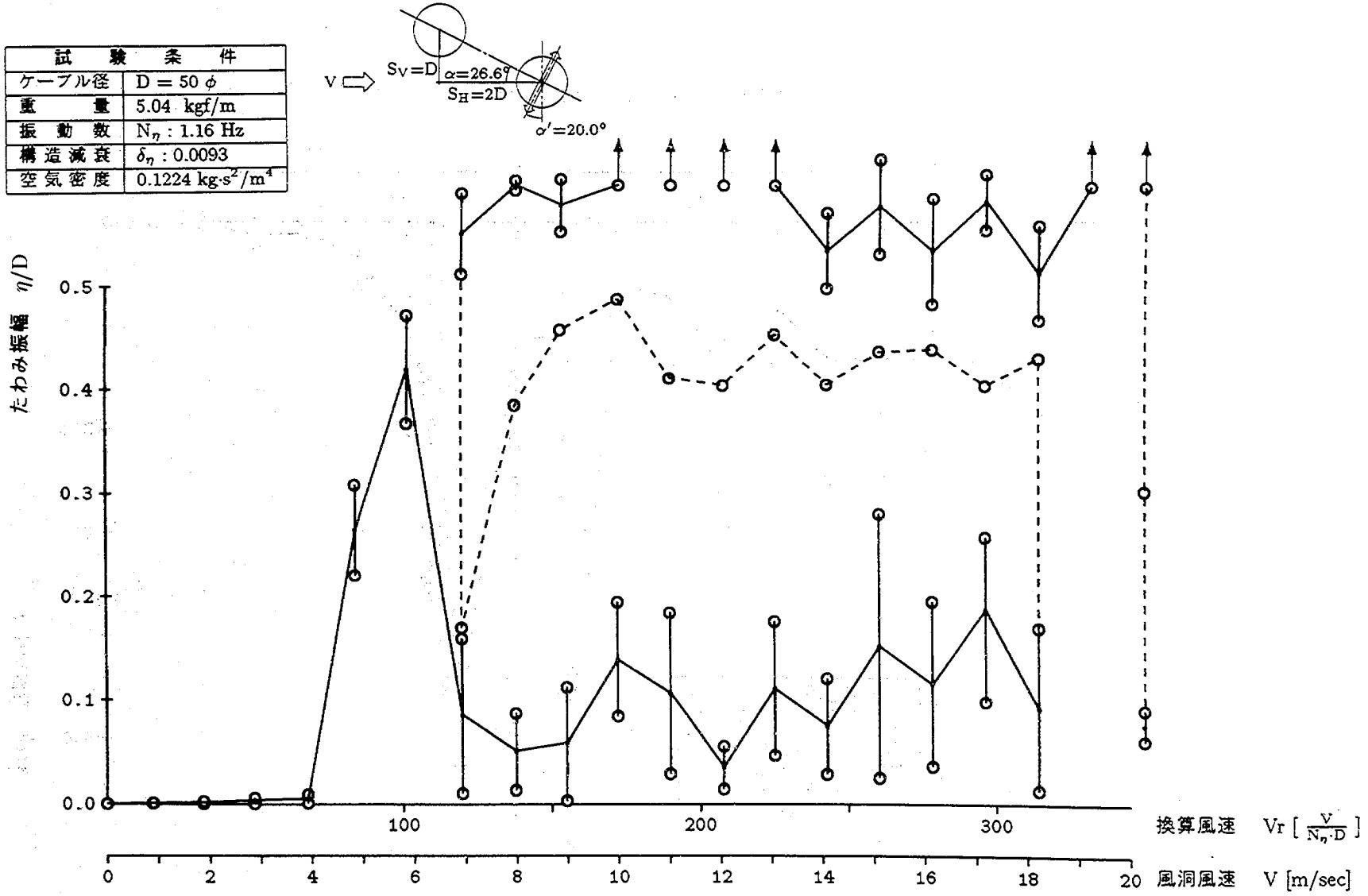


図-3.2.2.21 （S_H, S_V）＝（2D, D）での風速と振幅の関係；試験番号6

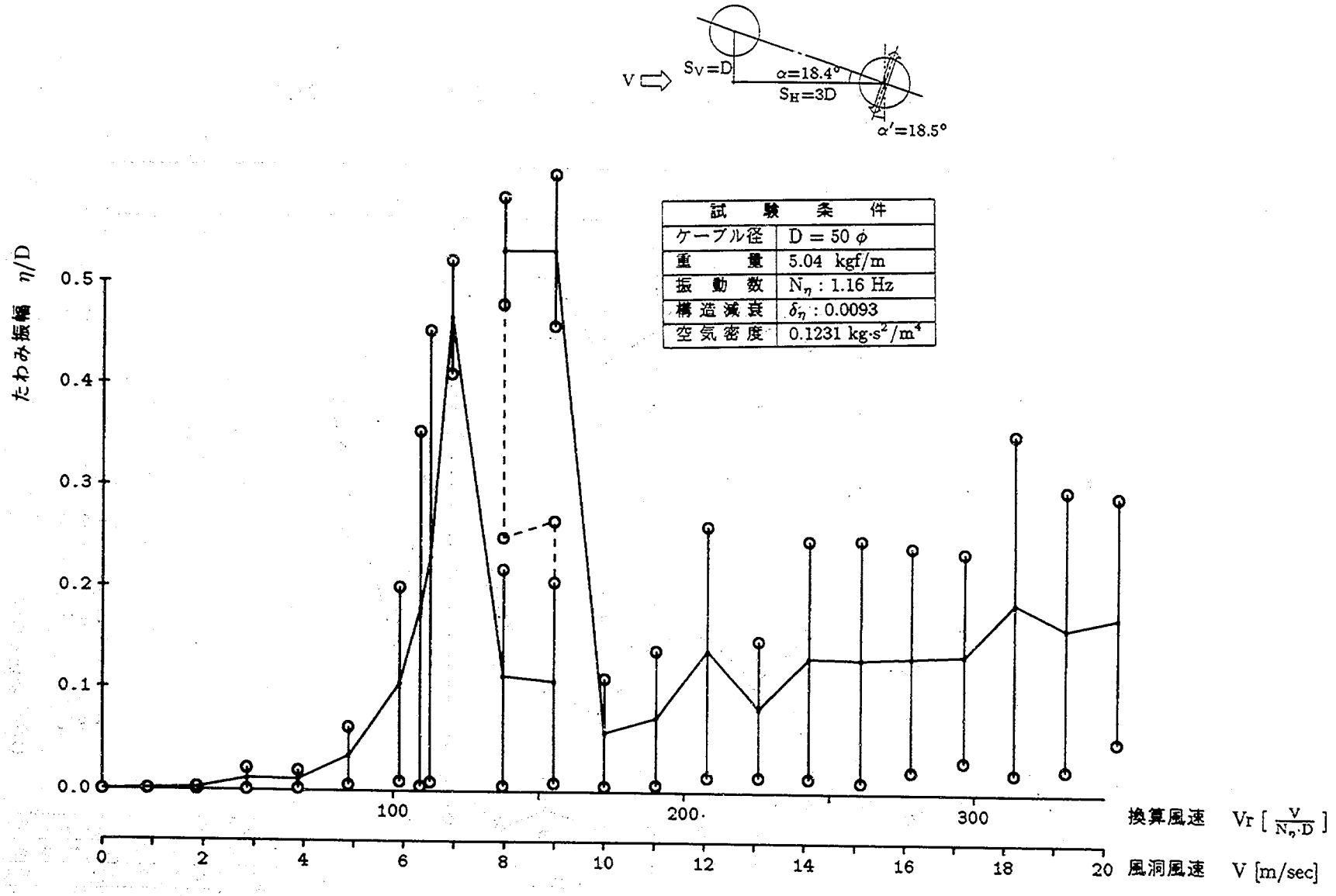


図-3.2.2.22 （S_H. S_V）＝（3D, D）での風速と振幅の関係；試験番号7

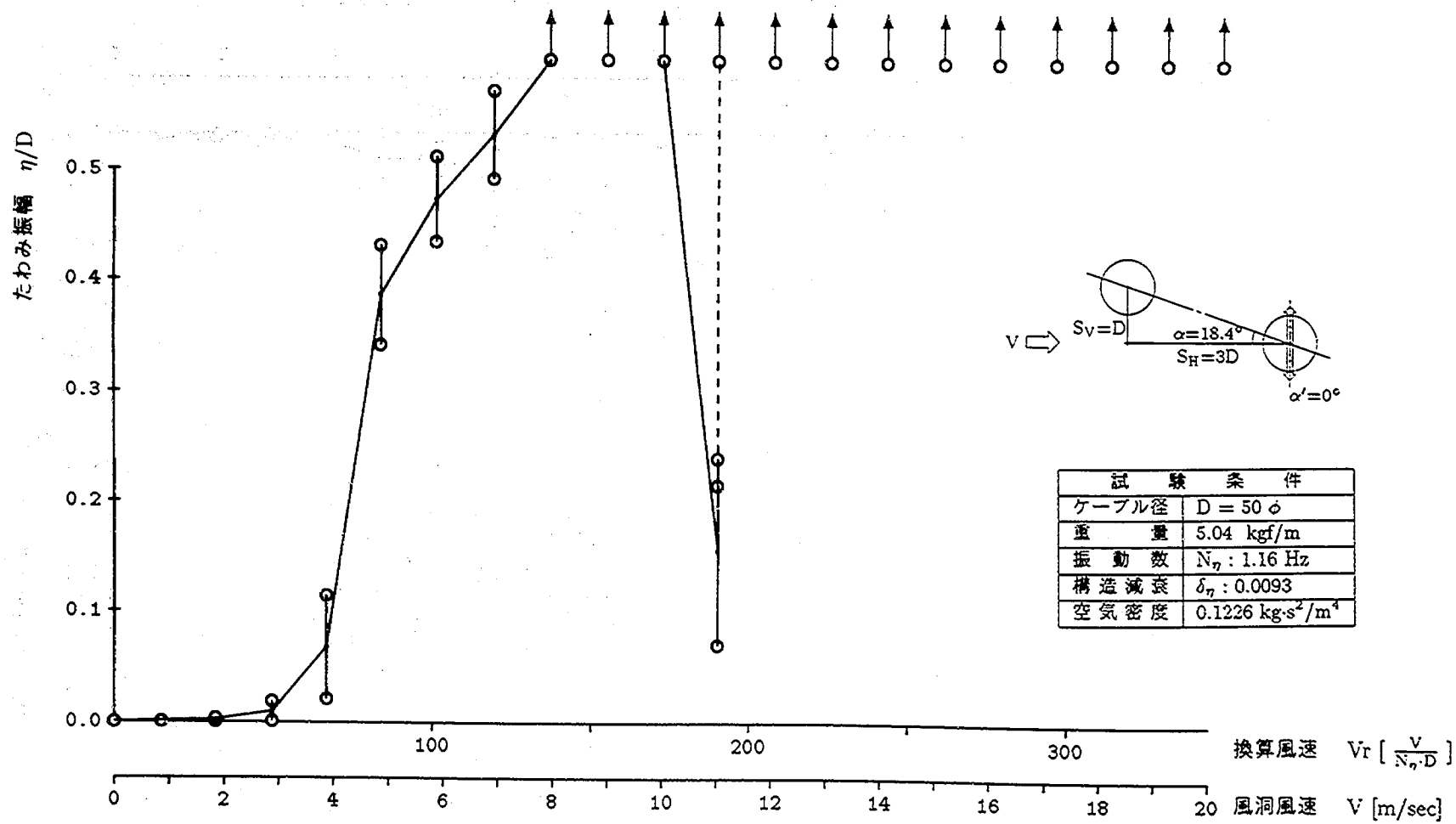


図-3.2.2.23 （S_H, S_V）＝（3D, D）での風速と振幅の関係；試験番号8

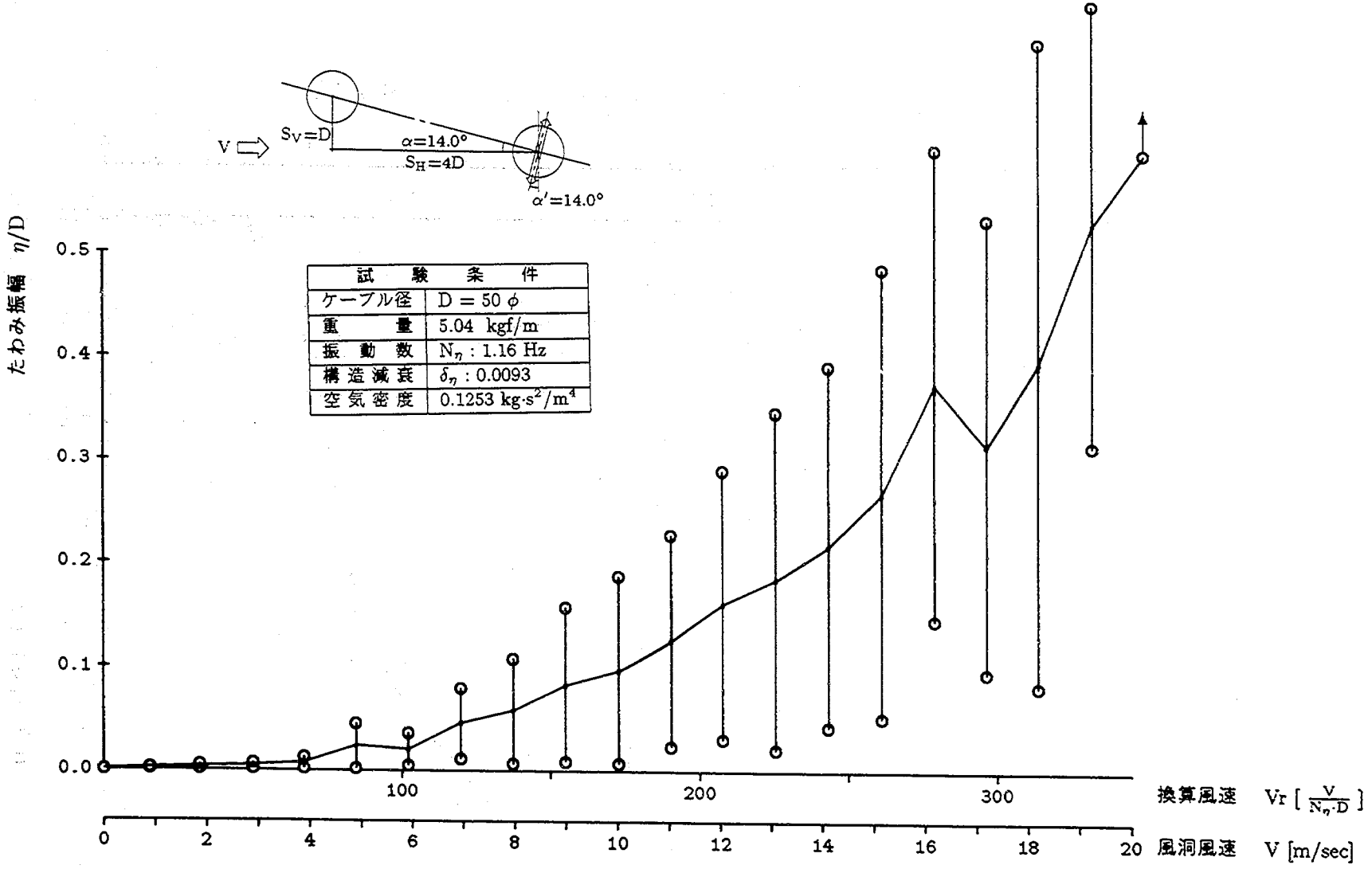
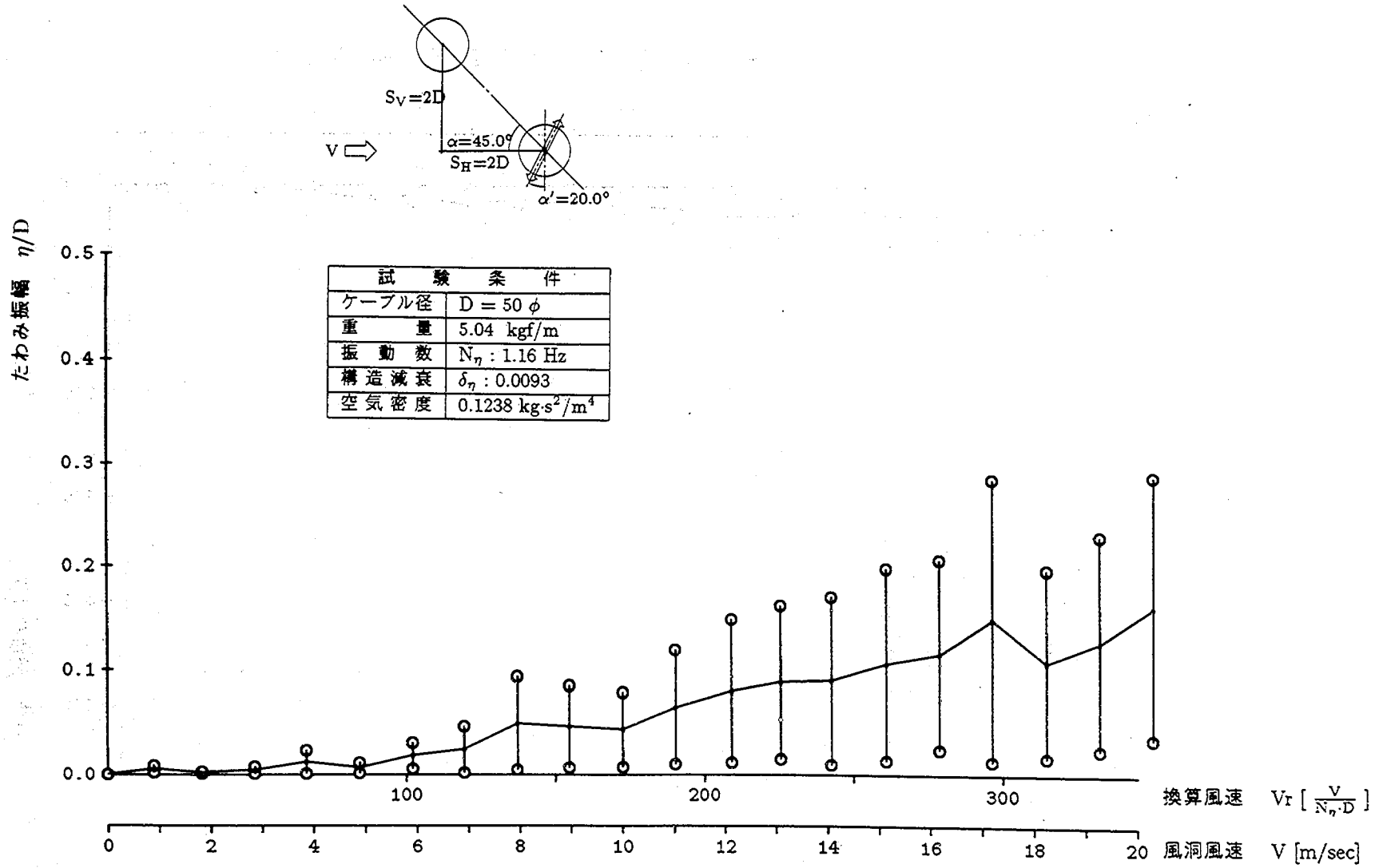
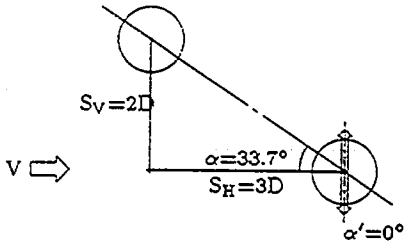


図-3.2.2.24 （S_H. S_V）＝（4D, D）での風速と振幅の関係；試験番号 9



試験条件	
ケーブル径	D = 50 φ
重量	5.04 kgf/m
振動数	N_η : 1.16 Hz
構造減衰	δ_η : 0.0093
空気密度	0.1238 kg·s²/m⁴

図-3.2.2.25 （S_H, S_V）＝（2D, 2D）での風速と振幅の関係；試験番号10



試　験　条　件	
ケーブル径	D = 50 φ
重　　量	5.04 kgf/m
振 動 数	N_η : 1.16 Hz
構造減衰	δ_η : 0.0093
空気密度	0.1235 kg·s²/m⁴

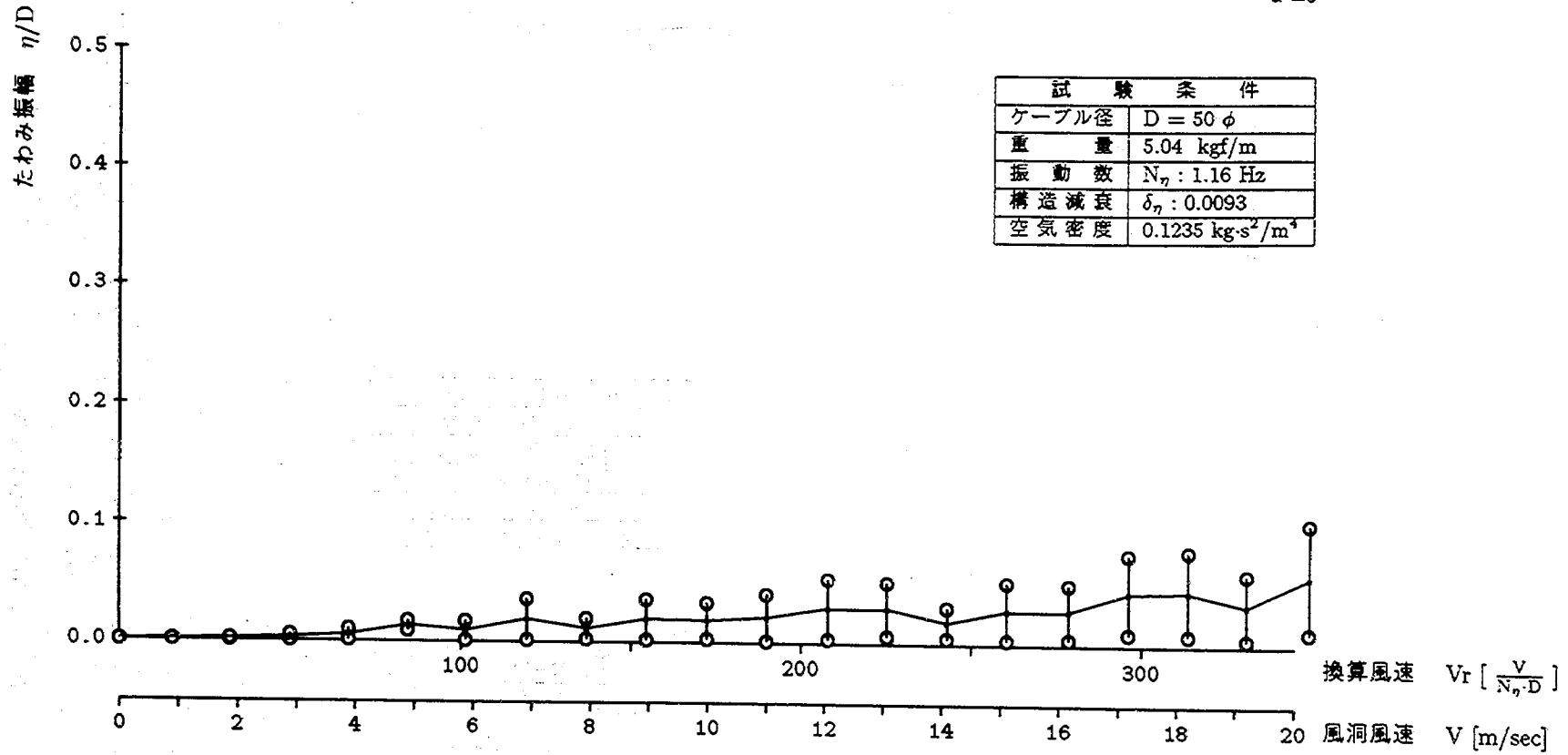


図-3.2.2.26 （S_H, S_V）＝（3D, 2D）での風速と振幅の関係；試験番号11

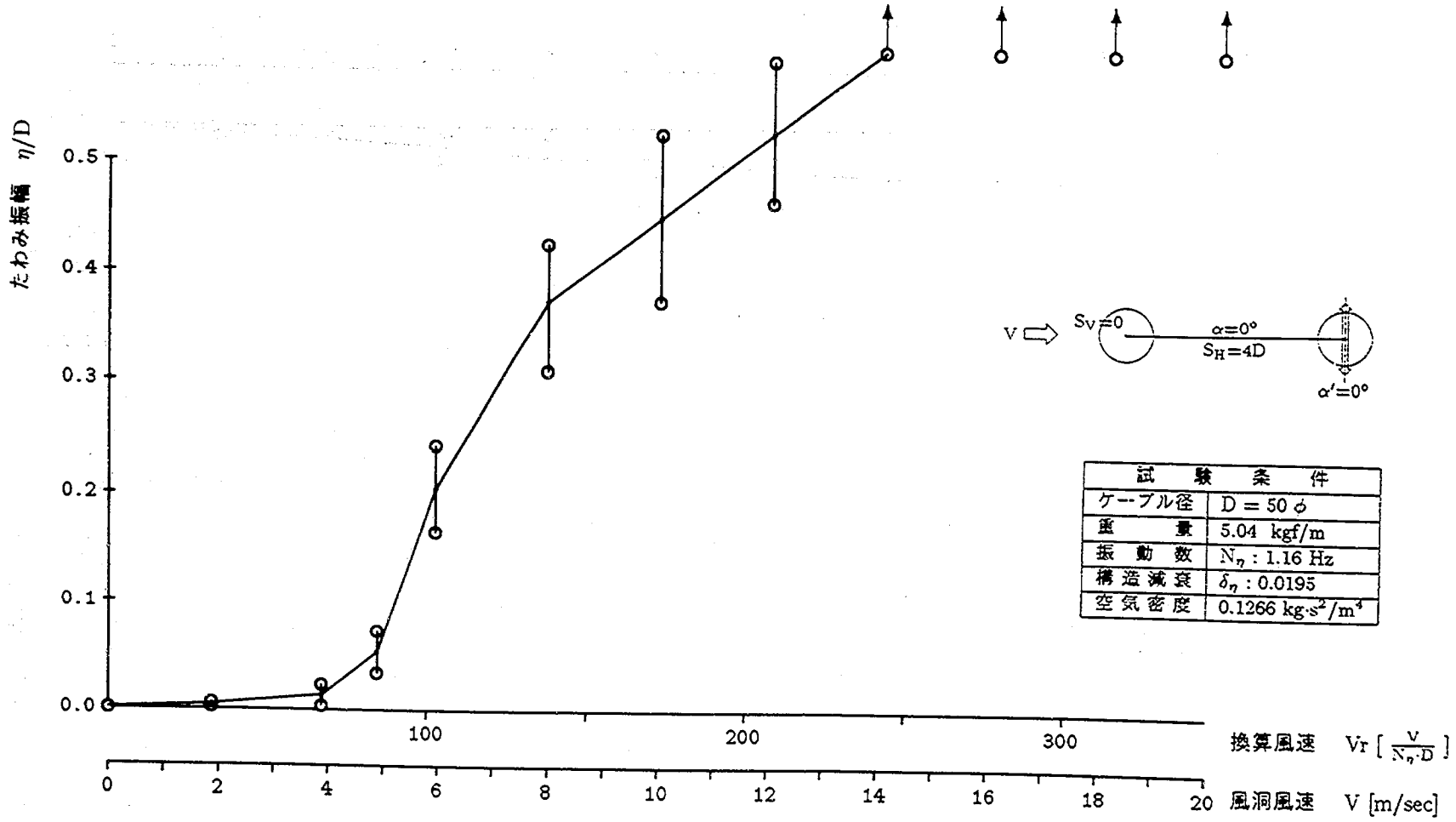
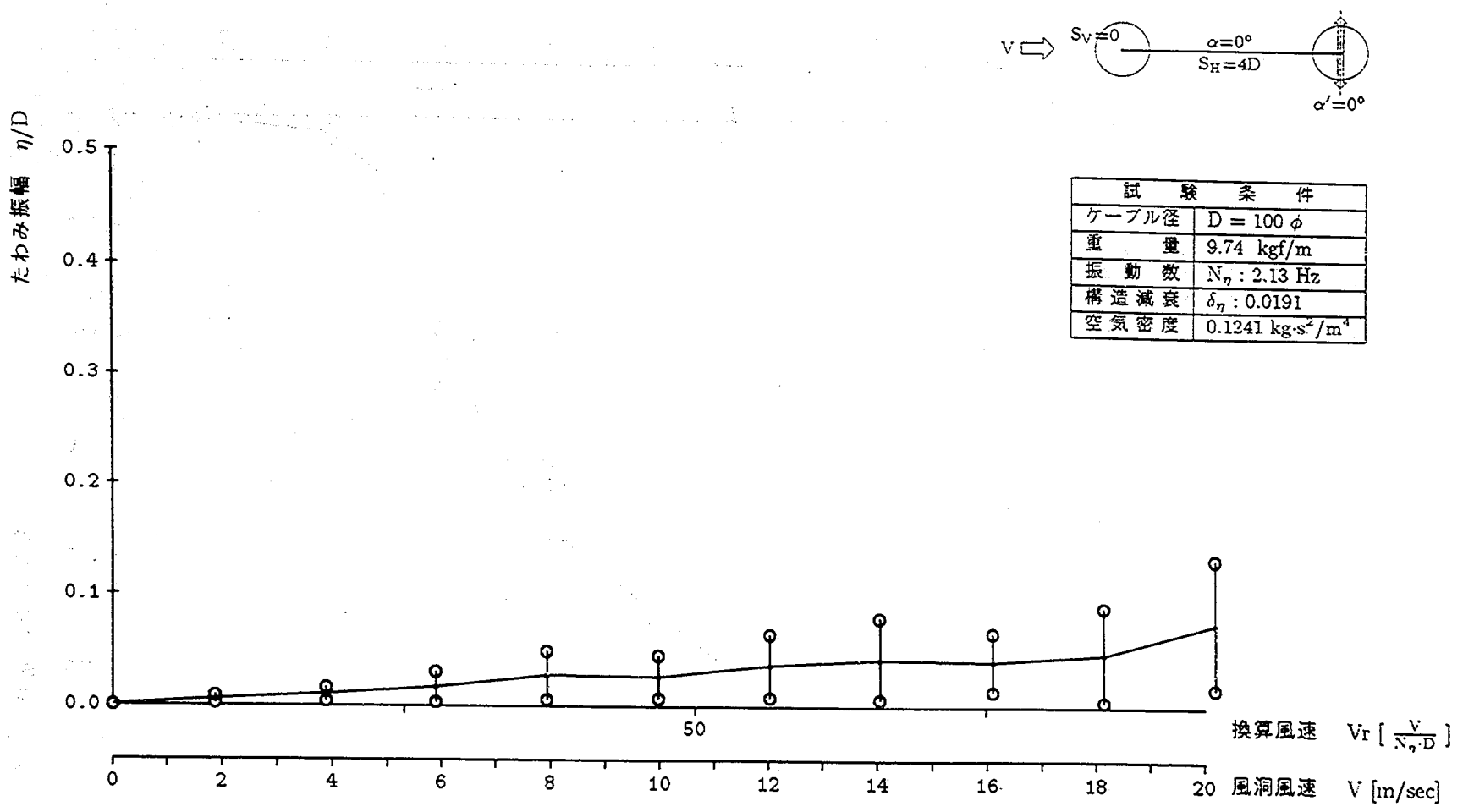


図-3.2.2.27 （S_H, S_V）＝（4 D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号12



試験条件	
ケーブル径	D = 100 φ
重量	9.74 kgf/m
振動数	N_η : 2.13 Hz
構造減衰	δ_η : 0.0191
空気密度	0.1241 kg·s²/m⁴

図-3.2.2.28 （S_H. S_V）＝（3D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号13

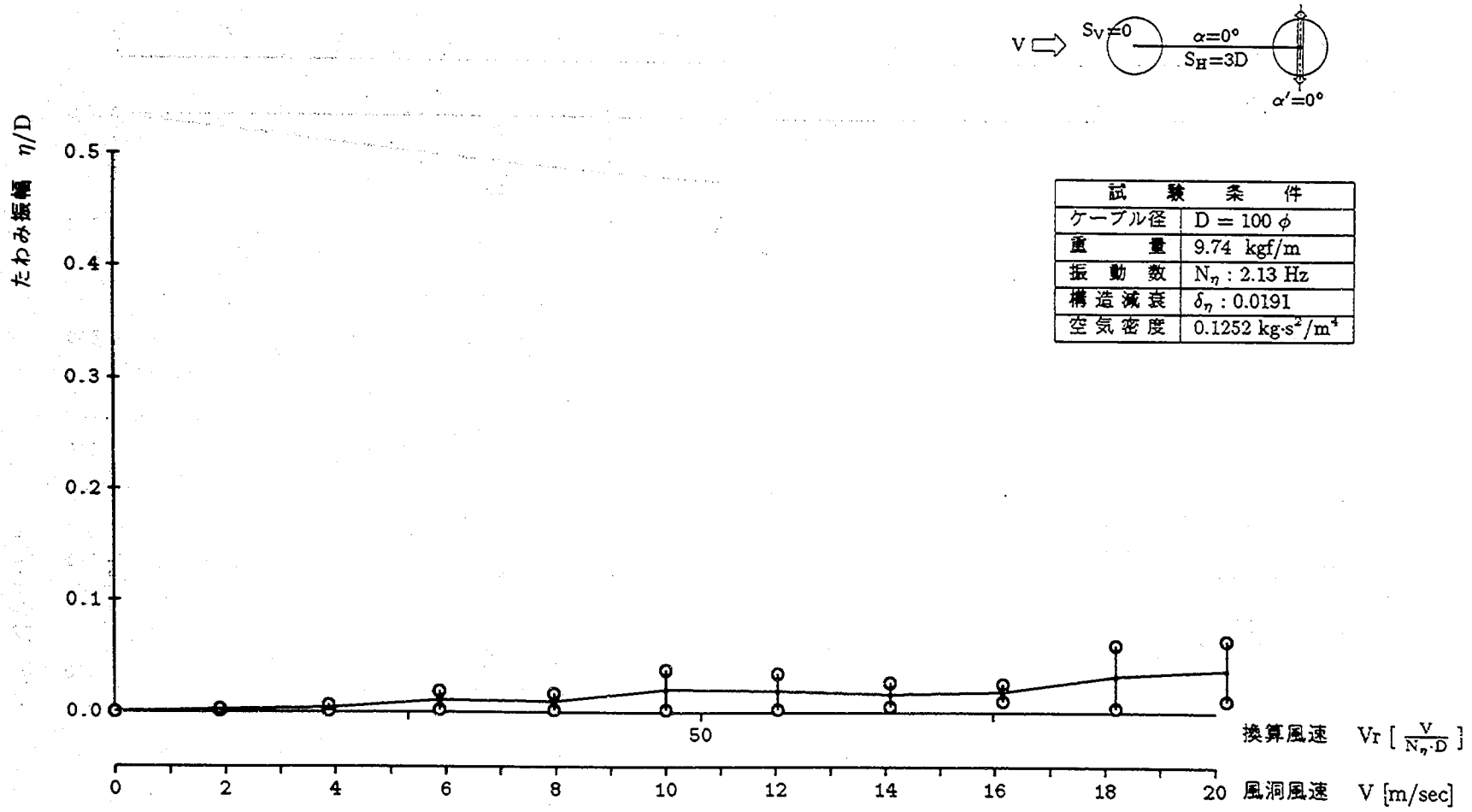
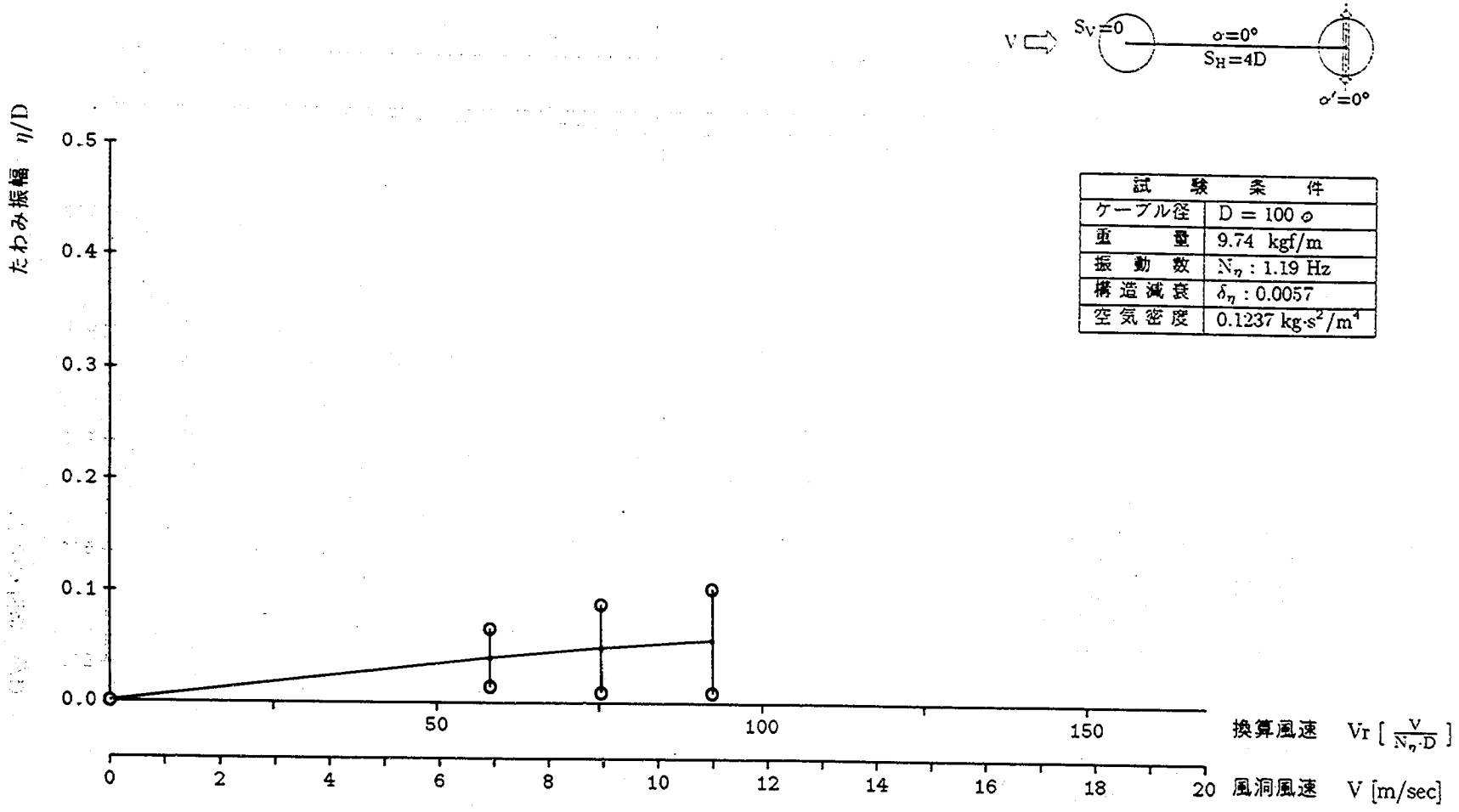


図-3.2.2.29 （S_H. S_V）＝（4D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号14



試験条件	
ケーブル径	D = 100 φ
重量	9.74 kgf/m
振動数	N_η : 1.19 Hz
構造減衰	δ_η : 0.0057
空気密度	0.1237 kg·s²/m⁴

図-3.2.2.30 （S_H, S_V）＝（4D, 0）での風速と振幅の関係；試験番号15

3.2.3 ケーブル間隔と迎角の影響（その２）

(1) 研究の目的

ウェークギャロッピングの発生に関与するパラメータのうち，ケーブル相互の間隔やレイノルズ数と無次元風速の影響，あるいはスクルートン数影響についての基本的な試験は（その１）で実施された。ここでは，振動の自由度によって応答特性や発生機構に差があることが予想されことから，ケーブル相互の水平及び鉛直間隔や振動の自由度を変化させ，応答特性の面からこれらを明かにすることを目的とした。また，振動の発生メカニズムを明らかにする目的で流れの可視化や流速分布，さらには定常，非定常空気力及び圧力の測定を実施する。基本的なパラメータとしてのレイノルズ数やスクルートン数，あるいは乱流の効果についても，（その１）を補完する目的で応答特性の確認の際に明かにする。

(2) 研究の方法

試験に使用する風洞施設としては，住友重機械工業株式会社平塚研究所所属の構造物用回流風洞及びエッフェル風洞を用いた。

主たる実験としては，振動特性把握のための二次元ばね支持試験，振動発生メカニズムの検討のための空気力測定試験，圧力分布測定試験，流れの可視化試験及び流速分布測定試験を実施する。ウェークギャロッピングに関する二次元ばね支持試験では，下流側のみに鉛直方向の自由度を与える方法が一般的である。本研究では自由度とその方向角に着目し，上，下流のケーブル双方に風軸とある角度を持たせた自由度を与えた場合について，自由度の与え方や設定角度の影響について比較するとともに，現象の特性評価，振動の分類が主たる目的である。

定常・非定常空気力測定では，後流中に置かれた下流側ケーブルに作用する三分力及び非定常空気力を測定する。一方，定常・非定常圧力分布測定では，空気力の形成過程を明らかにする目的で，上下流のケーブル表面の圧力を評価する。流れの可視化・流速分布測定は，物体周辺の流れの場の変化と空気力の形成との因果関係を評価する目的で実施する。

1) 二次元ばね支持試験

①使用風洞　幅１．５m，高さ２m，長さ１５m

風速範囲　　０～２５m／s

②基本実験条件

ケーブル径	D＝50mm, 100mm
模型長さ	L＝1080mm
振動数	f＝1.16～3.62Hz
風速範囲	V＝０～２０m／s
無次元風速範囲	Ur＝０～３５０

レイノルズ数範囲　Re＝0～1．3×10^5

スクルートン数　　Sc＝3～30

スクルートン数の設定はダンピングの調整にて実施する

③実験パラメータ

使用気流　　一様流

水平間隔　　SH＝3D，3．5D，4D，6D，10D

鉛直間隔　　SV＝0

自由度　　TEST1：上流　固定

下流　θ＝0°

④測定

光学式変位計により上下流の模型変位を計測

(3)　実験結果と考察

ケーブル模型はアクリル製の中空パイプを使用し，端部には気流の二次元性を保つために端板を配置した。後述する空力対策模型との関係から，無対策のケーブル模型をここではノーマルケーブルと称する。表-3.2.3.1～表-3.2.3.3に実験条件を示す。

実験は前節の（その1）との比較実験を中心に3Dから10Dまでケーブル間距離を変化させ，下流側のケーブルの応答挙動を観測した。この時，上流側ケーブルの自由度は拘束した。結果を図-3.2.3.2に示す。垂直間隔ゼロでケーブルを並列配置した場合，無次元風速Ur＝50付近よりウェークギャロッピングの発生が認められる。ケーブル間距離SH＝3で応答はハード型を示しているが，SH＝4では風速の上昇と共になめらかに振幅が増加するソフト型となっている。さらに，ケーブル間距離を大きくとるとウェークギャロッピング振動の発生は抑制され，SH＝10では不安定振動の発生は認められない。これら振動に認められる特徴の多くは，角柱のギャロッピングに特徴的なものである。

ケーブル間距離の比較的小さな領域におけるウェークギャロッピングは，当然のことながらレイノルズ数影響を強く受けることが予想される。そこで，振動数及びケーブル径を変化させた場合の応答を観測した。結果を図-3.2.3.3及び図-3.2.3.4にそれぞれ示す。応答系の固有振動数を1．2Hzから2．6Hz，3．6Hzと変化させた場合，1．2Hzで発生していたウェークギャロッピングは，他の2つの振動数では強制加振しても全くその発生が認められない。もともとSH＝4の領域では発生する応答はソフトフラッタでもあることから，これら応答にみられる変化は振動数の相違にもとづくものと考えられる。

一方，ハードフラッタの生じている領域でケーブルの径を変化させたところ，応答はソフト型になるとともに，その発生風速を検討したところ，無次元風速よりも風洞風速の方が現象をうまく説明できることが示された。

これらの実験結果は，いずれの場合も現象の発生が設定条件に極めて敏感であることを示している。

表-3.2.3.1　実験条件表Sh変化（ケーブル径　D＝0.05m）

ケーブルタイプ	ノ　ー　マ　ル			
Sh，Sv	3D，0	4D，0	6D，0	10D，0
重　量　W（Kgf/m）	5.00	5.01	5.06	5.02
振動数　f　（Hz）	1.16	1.16	1.16	1.16
対数減衰率　δ	0.00954	0.00927	0.00921	0.00958
ｽｸﾙｰﾄﾝ数　Sc	30.067	28.899	29.172	30.262

表-3.2.3.2　実験条件表Sh変化（ケーブル径　D＝0.10m）

ケーブルタイプ	ノ　ー　マ　ル	
Sh，Sv	3D，0	4D，0
重　量　W（Kgf/m）	5.04	5.06
振動数　f　（Hz）	1.16	1.16
対数減衰率　δ	0.00398	0.00921
ｽｸﾙｰﾄﾝ数　Sc	3.100	7.387

表-3.2.3.3　実験条件表Sh変化（ケーブル径　D＝0.05m）

ケーブルタイプ	ノ　ー　マ　ル		
Sh，Sv	4D，0	4D，0	4D，0
重　量　W（Kgf/m）	5.01	5.06	2.62
振動数　f　（Hz）	1.16	2.64	3.62
対数減衰率　δ	0.00927	0.00980	0.01286
ｽｸﾙｰﾄﾝ数　Sc	29.286	30.984	20.751

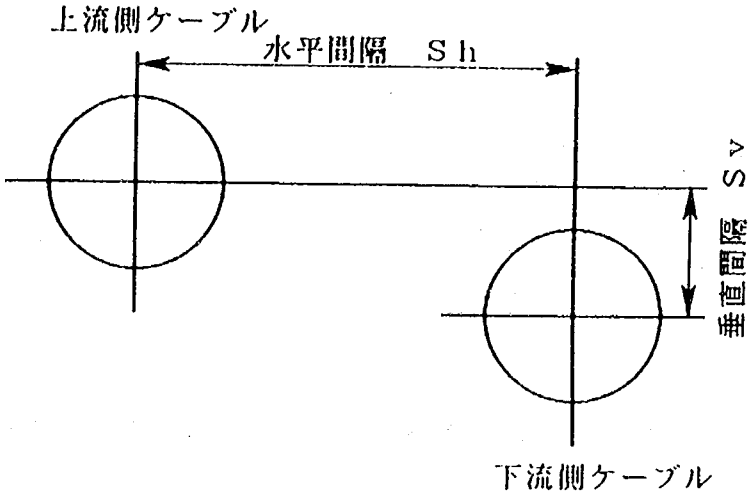


図-3.2.3.1　ケーブル模型の配置

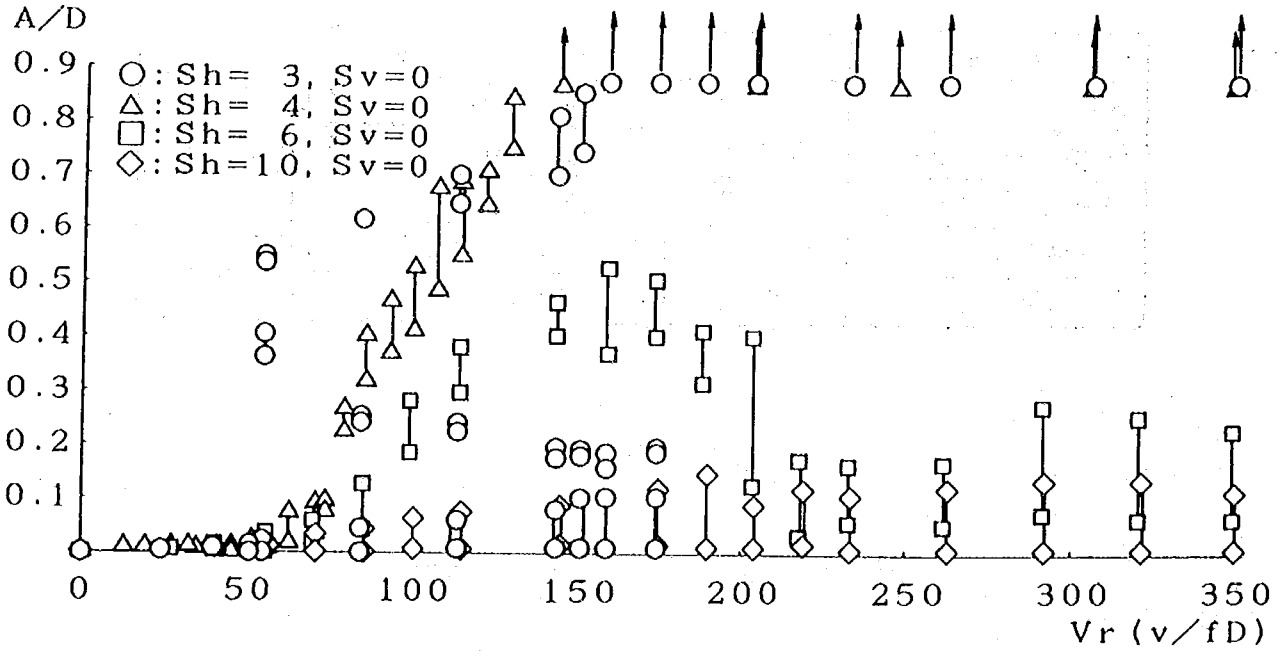


図-3.2.3.2　ケーブル間距離の違いによる振動応答比較（ノーマルケーブル　φ５０）

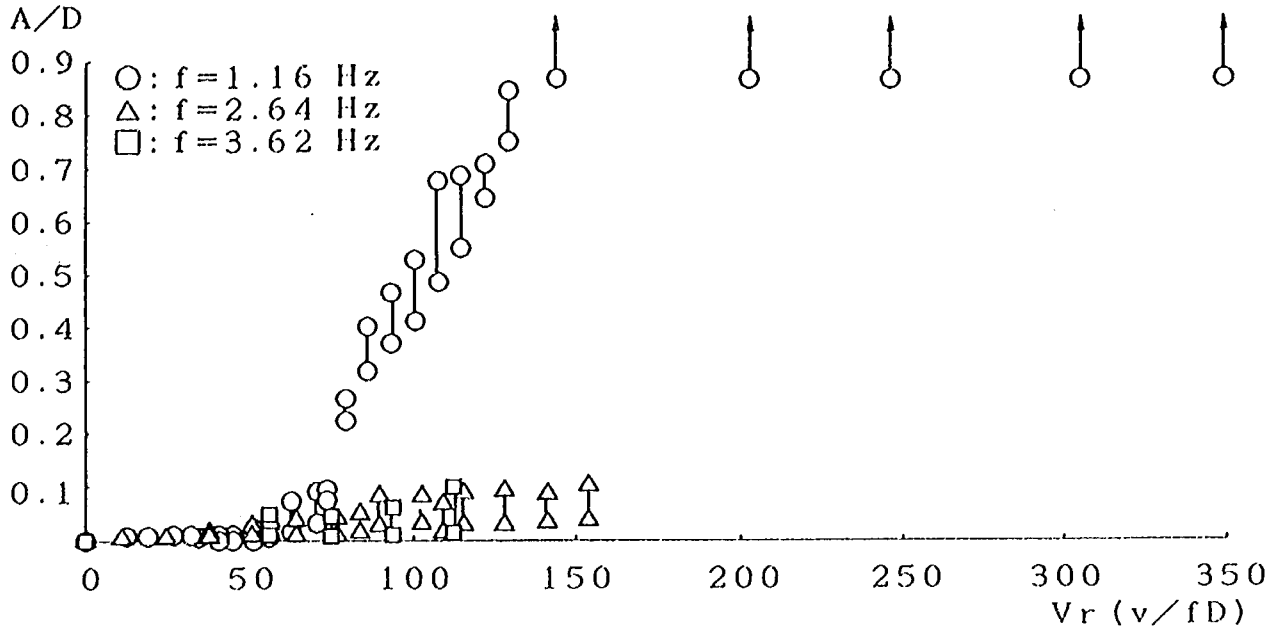


図-3.2.3.3 振動数変化と応答（ノーマルケーブル φ50 Sh=4, SV=0）

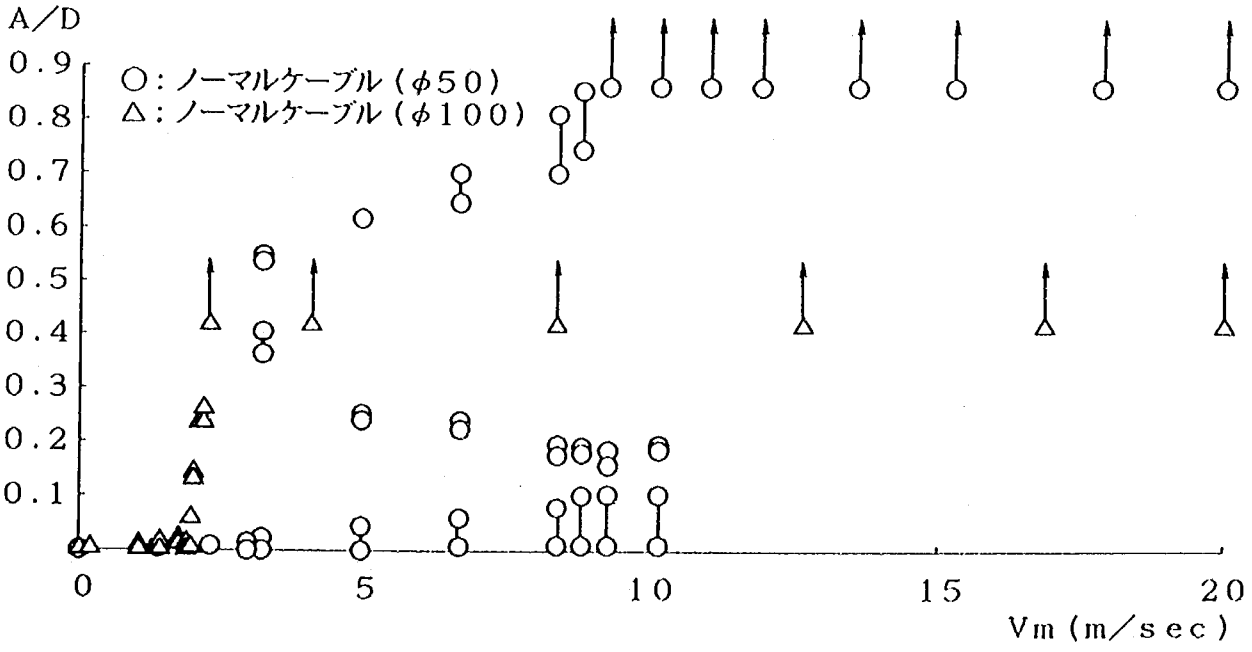


図-3.2.3.4 ケーブル径の違いによる振動応答（Sh=3, SV=0）

従って，今回の実験成果だけで結論することには無理があり，今後さまざまな角度から実権成果を積み重ねていくことが必要であると考える。

(4) 今後の課題

応答観測結果から得られた新しい知見を含め，振動の自由度が与える影響評価，振動発生メカニズムの解明の為に，自由度と設定角度を変化させた二次元バネ支持試験，空気力測定試験，圧力測定試験，流れの可視化試験及び流速分布測定試験を実施する予定である。

3.2.4 高レイノルズ数における空力特性

(1) 目的

斜張橋並列ケーブルの後流側ケーブルに発生するウェイクギャロッピングの応答特性を予測するために必要な実物と同じ高レイノルズ数状態の並列ケーブルに作用する非定常空気力を計測する。なお本研究では下図に示すように，現在データが不足している部分（○印の所）の試験を行い，系統的な特性を把握する。

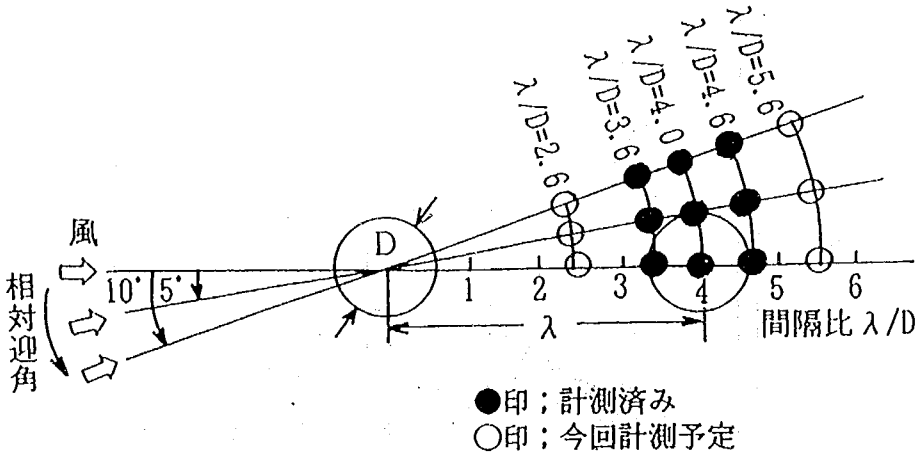


図-3.2.4.1 本研究における対象範囲

(2) 方法

風洞は，三菱重工業㈱長崎研究所の大型汎用風洞を使用した。

実験では，実物の３倍の拡大ＰＥ管ケーブル模型２体を風路内に直列に（前流側は固定，後流側は非定常空気力試験装置に）設置し，以上のように支持された模型に風を吹かせ，後流側ケーブルを強制的に加振し，ケーブルに作用する非定常空気力を計測した。

表-3.2.4.1に試験条件を，図-3.2.4.2に試験概要を示す。

表-3.2.4.1 試験条件

項　　目	実橋想定値(1)	拡大模型
縮　　尺	1/1	3/1
直　　径	160mm	約480mm
振　動　数	約1.0Hz	約0.1Hz
風速倍率	1.0倍	3.0倍
対象風速	0～75m/s	0～25m/s
対象レイノルズ数	$0\sim8\times10^5$	$0\sim8\times10^5$

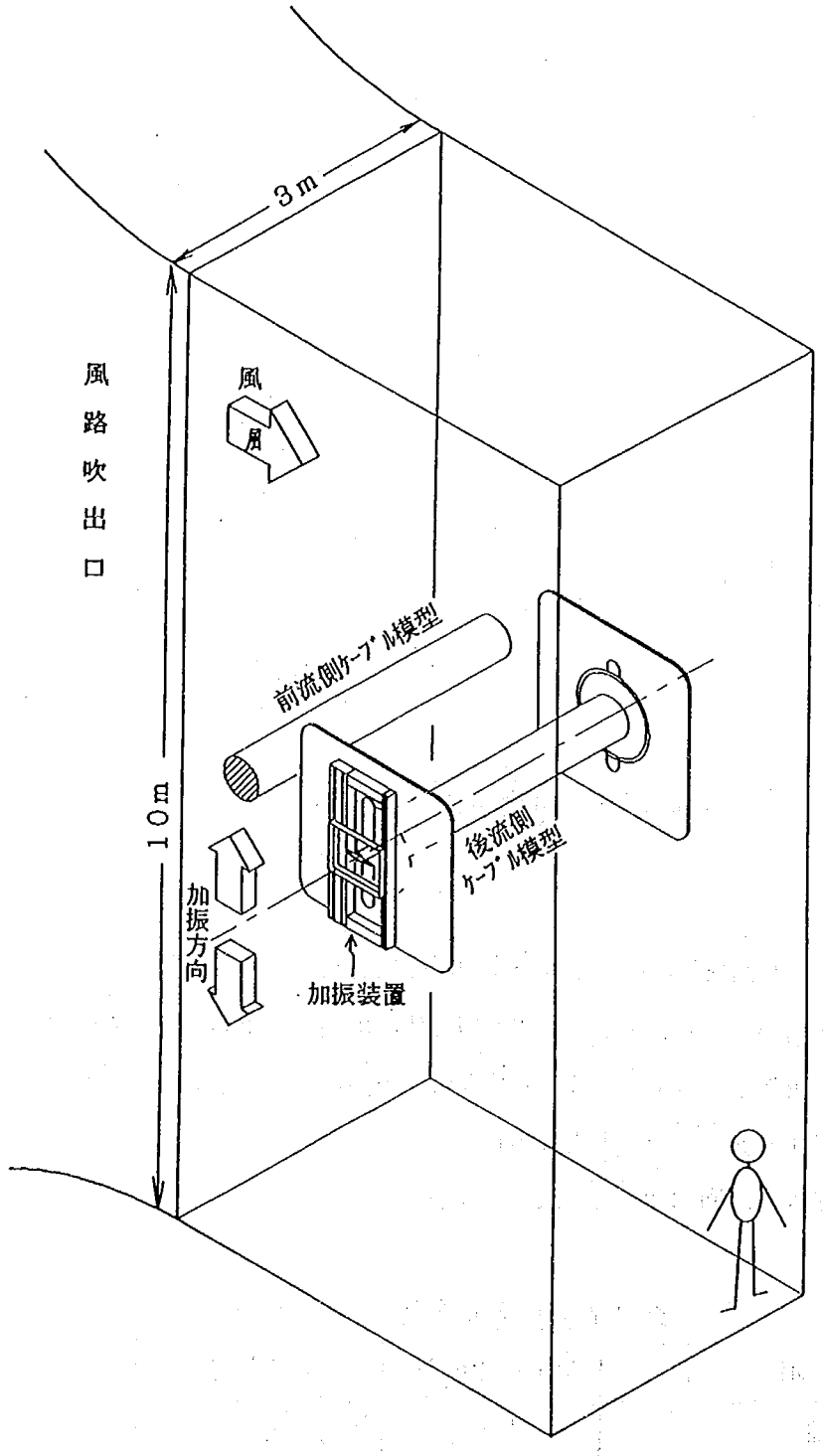


図-3.2.4.2　非定常空気力試験概要図

(3) 試験ケース

表-3.2.4.2に示す試験ケースを実施した。

表-3.2.4.2 試験ケース

模型縮尺	ケーブル間隔 λ／D	相対迎角	加振振動数	試験ケース
3/1	2.6	0#	0.11Hz	
		5#		
		10#	0.11Hz	
	3.6	10#	0.2Hz	4ケース
	5.6	0# 5#	0.11Hz	
		10#	0.11Hz	
			0.2Hz	4ケース

計　8ケース

(4) 試験結果

図-3.2.4.3には今回実施した非定常空気力試験結果を文献1の結果と併せて示す。図-3.2.4.3のａ）は実験にて求めた非定常空力から空力減衰を算出し(2)項の表-3.2.4.1の試験条件に示す文献1で想定した実橋ケーブルと同じ諸元のケーブルを対象に求めた風速－振幅－減衰曲線である。また表-3.2.4.3には片振幅がケーブル直径及びケーブル直径の１０％の場合の風速－減衰曲線を示す。

図-3.2.4.3及び表-3.2.4.3より分かるように，全般的にウェイクギャロッピング振動は実風換算風速１０m／ｓ辺りから発生し一旦発散的な様相を呈するが，風速３０m／ｓ弱を越えると振動は弱められ発生しにくくなる傾向にある。一般的に円柱の場合，レイノルズ数が 2×10^5 を境に亜臨界レイノルズ数から超臨界レイノルズ数に変わると断面周りの流れが急変し空力特性が変化すると言われているが，上記風速３０m／ｓ弱なる風速はおおよそ上記の臨界レイノルズ数に一致しており，本空力特性変化もレイノルズ数の影響と考えられる。したがって，実橋のケーブルも臨界レイノルズ数を越えるような風速では，振動は発生しにくくなる可能性があるものと考えられる。

次に迎角に対しては，図-3.2.4.3のｂ）より分かるように全般的に水平な風より若干傾いた風が作用し

た時の方が振動が発生し易い傾向にある。またその発生領域は亜臨界レイノルズ数領域の方が超臨界レイノルズ数よりも広く，斜張橋の並列ケーブルとして一般的なケーブル間隔（λ／D＝2．5～5．5）ではすべてウェイクギャロッピング振動が発生することが予測される。

表-3.2.4.4には加振振動数を変えたときの非定常空気力試験結果を示す。表-3.2.4.4より分かるように振動数を変化させてもウェイクギャロッピング振動の発生する風速領域はほとんど変わらず，空力減衰の絶対値が振動数が高まるにつれて小さくなり安定化することが明らかとなった。したがって，ウェイクギャロッピング振動についてはその応答特性を無次元振動数で整理することができない可能性があるものと思われる。

（文献１）　斎藤，『構造基本断面の空力特性（その３）／７．２次元・２円柱－Ｒｅ数効果』，日本風工学会会誌第３９号，１９８９年。

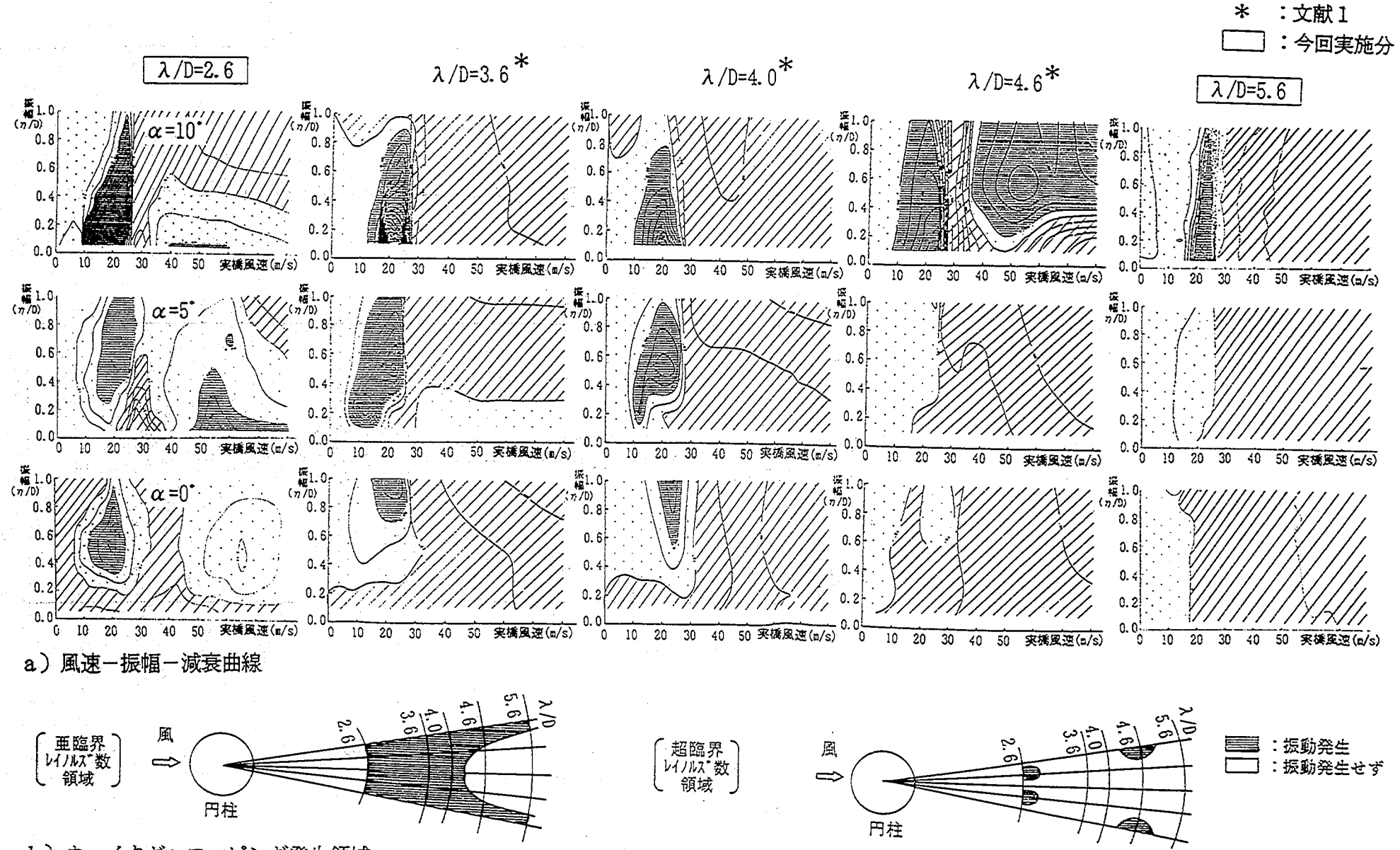
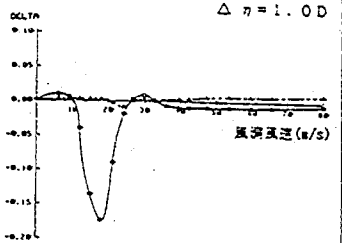
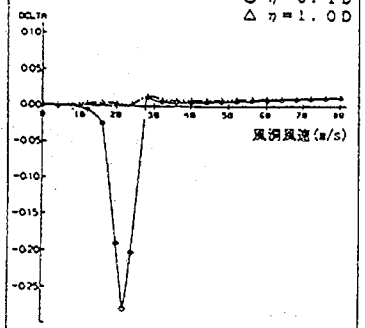
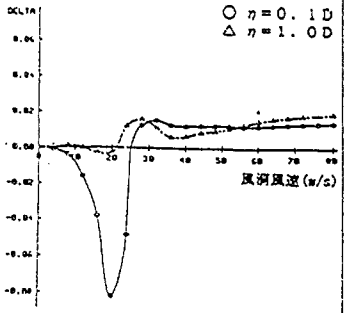
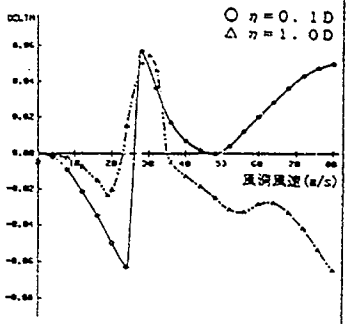
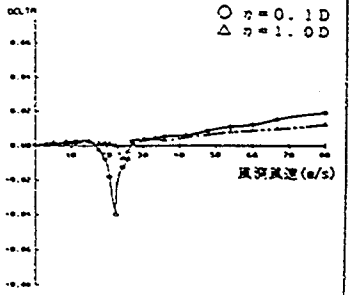
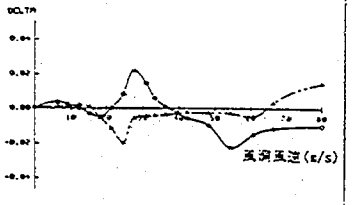
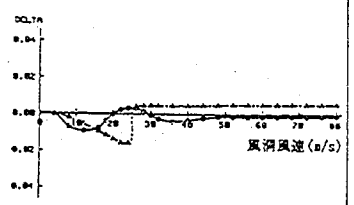
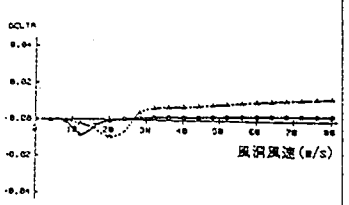
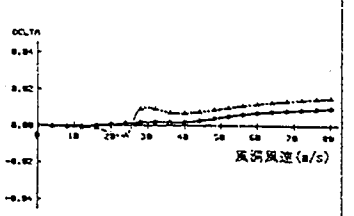
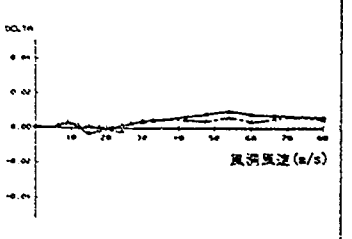
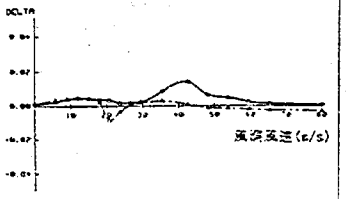
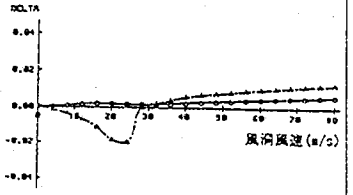
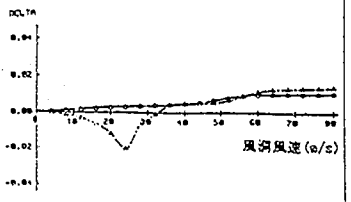
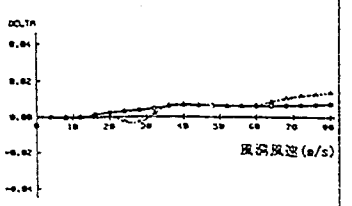
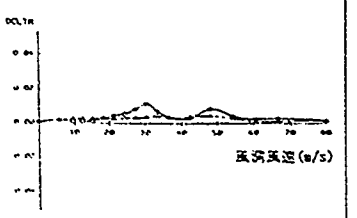


図-3.2.4.3 ウェイクギャロッピングの応答特性概要（レイノルズ数効果）

表-3.2.4.3 風速－減衰曲線

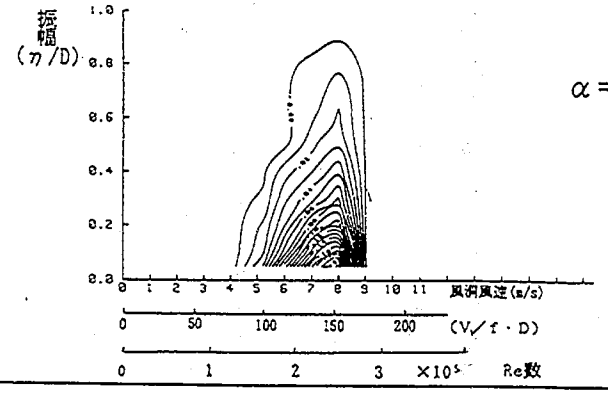
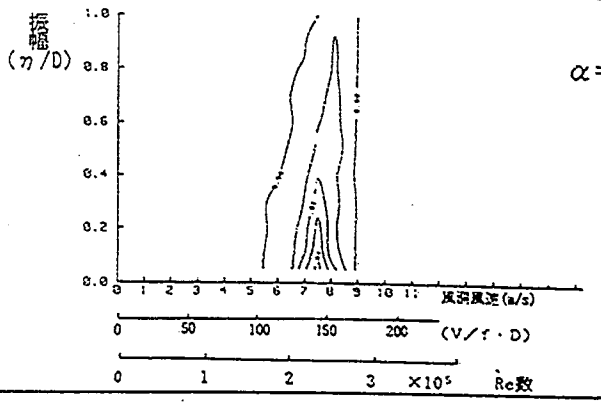
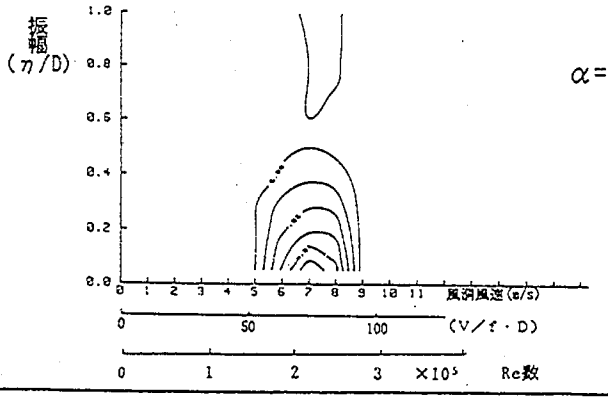
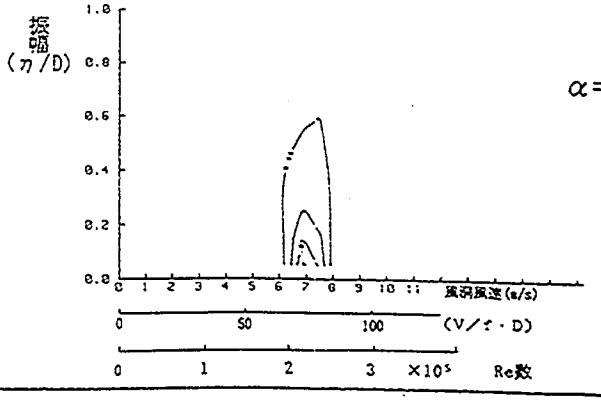
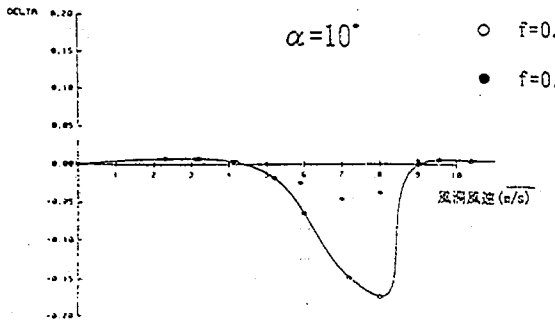
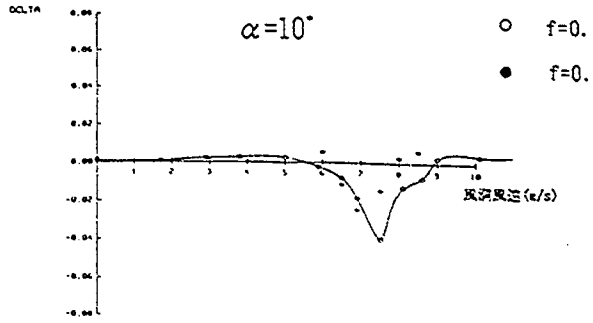
D=0.474m

ケーブル間隔 / 相対迎角	λ／D＝2.6	λ／D＝3.6*	λ／D＝4.0*	λ／D＝4.6*	λ／D＝5.6
10°					
5°					
0°					

各図：○ η＝0.1D　△ η＝1.0D　DELTA　風洞風速(m/s)

＊印：文献1　　▨ 今回実施分

表-3.2.4.4　対振動数特性

振動数 ＼ ケーブル間隔	λ／D＝3．6	λ／D＝5．6
f=0.11(Hz) 風速ー振幅ー減衰曲線		
f=0.20(Hz) 風速ー振幅ー減衰曲線		
風速ー減衰曲線		

3.2.5 振動の自由度および気流特性の影響

(1) 実験概要

ウェークギャロッピングは，並列ケーブルという複雑な振動特性を持つ構造に発生する現象であり，そのメカニズムを解明するためには，様々な視点からの実験・研究が必要と思われる。本項では，ウェークギャロッピングに及ぼす振動特性および気流特性の影響を把握することを目的として行なったタウトストリップ実験の結果を報告する。タウトストリップ模型を採用した理由は次の通りである。

① 実ケーブルと同様に，鉛直方向だけでなく流れ方向の自由度を持ち，両者の連成による振れ回り現象なども再現可能であること。

② 最低次モードだけでなく，高次モードの振動も発生するから，これらの間の空力的干渉などに関する知見も得られること。

③ タウトワイアの張力を変化させることによって，振動数を変化させた実験が容易なこと。

④ 模型が小さいため，相対的に大きなスケールの乱流での実験が可能なこと。

(2) 供試模型と実験方法

1) 模型の構造と諸元

緊張したステンレス縒り線に，バルサ製の外径材を付したタウトストリップ模型とした。模型の諸元を表-3.2.5.1に示す。

2) 基本実験条件

若干の予備実験の結果，計画値（平成4年度報告書参照）を達成することが困難と判断された項目については，実現可能な値に変更した。結果的に実現された主要な実験条件は次の通りである。

基本振動数　　5 Hz

風速　　0．5～約7 m/s前後

低張力では，振子的な運動が卓越して弦振動とならないため，基本振動数を5 Hzとした。このため，無次元風速は0～約40程度と，計画値よりも低風速での実験となった。500m程度の鋼斜張橋のケーブルを想定した場合，実橋換算風速は約3～7 m/s程度である。

構造減衰　　上流側ケーブル　　$\delta = 0.016$

下流側ケーブル　　$\delta = 0.020$

上記の値は模型固有のものであり，減衰器等による減衰は付加していない。

スクルートン数　　$Sc = \dfrac{2m\delta}{\rho D^2} = \dfrac{2\times 0.3108\times 0.018}{0.125\times 0.035^2\times 9.8} = 7.46$

この値は実橋想定値（長大鋼斜張橋）の約1／10程度であり，振動し易い条件での実験となっている。

レイノルズ数　　$Re = \dfrac{VD}{\nu} = \dfrac{7.0\times 0.035}{1.46\times 10^{-5}} = 1.7\times 10^4$

表-3.2.5.1　模型の構造諸元

芯線	直　径		1.2　mm
	標準重量		7.36　g/m
外径材	直　径		35　mm
	ブロック長		100　mm
	ブロック重量	平均	30.34　g
		標準偏差	0.36　g
	ブロック数		24　個
スパン			2.5　m
合計単位重量			310.8　g/m

3）　実験パラメータ

①　基本実験

基本的な実験としてケーブル間隔を5段階，気流の乱れ強度を3段階に変化させ，合計5×3＝15ケースの実験を行った。

ケーブル中心間隔　　2，4，6，8Dおよび単独ケーブル

ただし，Dはケーブル直径

気流条件　　一様流

格子乱流Ⅰ　　I_u＝5.1%，L_x^u＝7.3cm

格子乱流Ⅱ　　I_u＝8.3%，L_x^u＝5.3cm

気流の迎え角および水平偏角は，いずれも0°の場合だけに限定した。

②　運動の自由度に関する実験

2，3の実験の結果から，実施の意義が乏しいと判断された実験を省略し，結果的に次の5ケースの実験を実施した。なお，この実験では，気流は一様流，ケーブル中心間隔は4Dに限定した。

実験1　　上下流ケーブルとも振動数を6.4Hzに設定

実験2　　上下流ケーブルとも振動数を8.0Hzに設定

実験3　　上流側の振動数を7Hz，下流側の振動数を5Hzに設定

実験4　　上下流ケーブルの相対水平変位を拘束（連結），振動数は上下流とも5Hz

実験5　　上流側ケーブルの鉛直変位を拘束，振動数は上下流とも5Hz

4） 実験方法

模型が軽いため加振減衰器等によって振動特性が微妙に変化すること，および応答振幅が極めて大きく，これに対応できる機器が見当たらなかったことから，加振器による加振は行わず，原則として送風時の自由振動応答を測定した。ただし，一部，不安定なリミットサイクルが存在するように思われたケースでは，手動で加振して応答を確認している。

応答の測定は光学式変位計によった。高次モードの振動の発生が予測されたので，ターゲットはスパン中央からずらし（9．5／24L点），得られた変位波形のフーリエ・スペクトルから各モード毎の振幅を求めた後，正弦的モードを仮定してモードの腹の位置での振幅に換算した。また，1次振動のみ，上流側と下流側の振動の位相も測定した。

以上のように，本実験では，風速と応答振幅の関係に着目してウェーク・ギャロッピングの現象的な特徴を把握することに焦点を絞り，当初計画の非定常空気力への変換は他の実験に譲ることとした。

写真-3.2.5.1に風洞内にセットされたタウトストリップ模型を示す。

(3) 実験結果

1） 並列ケーブルの対風応答の一般的特徴

図-3.2.5.1～8に一様流中の応答を，図-3.2.5.9～16に乱れ強度5％の乱流中の応答を，図-3.2.5.17～24に乱れ強度8％の乱流中の応答を，上流側ケーブルの応答と下流側ケーブルの応答に分けて示す。また，比較のために，図-3.2.5.25 ～27に3種類の気流中での単独ケーブルの応答を示す。いずれの図においても，横軸は風洞風速，縦軸はケーブル直径で無次元化した応答振幅である。

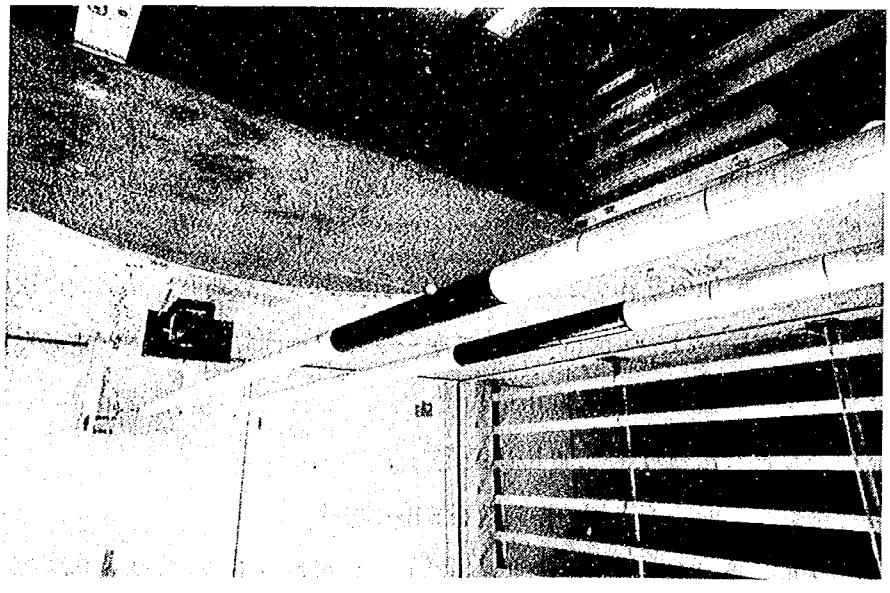


写真-3.2.5.1 タウトストリップ模型

一様流中の単独ケーブルには（図-3.2.5.25），１次，２次などの各固有振動数に対応して典型的な渦励振応答が生じる。１次および２次振動のピークを与える風速は約１および２m/ｓである。これからストローハル数を求めるとＳ＝０．１７５となり，一般に円柱のストローハル数として知られている値０．２より若干小さい。一方，３次，４次振動では共振風速が若干低くなる傾向があり，たとえば４次振動が最大となる風速約３．５m/sと固有振動数２０Hzからストローハル数を求めると，Ｓ＝０．２が得られる。無次元共振風速がこのように変化する理由としては，大振幅の振動に伴う平均張力の増加（振動数の増加），およびレイノルズ数の影響が考えられるが，詳細は明かでない。これらの，応答の定性的特徴は，乱流中でも変わらない（図-3.2.5.26～27）。

並列ケーブルの典型的な例として，主としてケーブル間隔２Ｄの場合の一様流中の応答（図-3.2.5.1，2）について考察する。低風速から徐々に風速を増加させると，まず，風速１m/s付近に１次の固有振動数に対応する応答のピークが生じる。単独ケーブルの応答との比較から，このピークはカルマン渦と密接な関係があるものと推測されるが，図からも明らかなように，応答には並列ケーブル特有の現象が明確に現れている。すなわち，ピークより低風速側では，上下流ケーブルの振動は同相であり，振幅は風速とともに単調に増加しているのに対して，ピークより高風速側では両ケーブルの振動が逆相に変化するとともに，振幅は激減する。風速が1.2m/s前後からは２次振動が卓越するようになる。風速２m/s前後の下流側の応答には，１次振動と同様な応答の段差が認められる。これは，単独ケーブルの２次の渦励振に対応するものであろう。並列ケーブルの場合，これより高風速の２．５m/s付近で，単独ケーブルには見られなかった極めて大振幅の２次振動が発生することが特徴的である。複数ケーブルが近接して配置されているため単独円柱の後流渦とは異なった周期の渦の発生や，ウェークギャロッピング的な不安定性などが振動の原因として考えられるが，詳細なメカニズムは不明である。これより高風速では，３次，４次などの高次モードでの限定的振動が次々と発生するが，応答のピークは単独ケーブルの場合のように明確ではない。おそらく，２次振動で典型的に現れたような複数の振動メカニズムに対応する応答が複雑に重なって現れているためと思われる。

これらの限定的な振動とは別に，風速４m/s 前後から１次モードで上下流ケーブルが逆相となる振動が成長する。この振動が，いわゆるウェークギャロッピングと考えられる。上述の限定的振動では，一般に下流側ケーブルの振幅の方が若干大きいものの，その差はさほど大きくないのに対して，ウェークギャロッピングでは，明らかに下流側ケーブルの振動が卓越する。また，ウェークギャロッピングが発生している状態において，これとは独立に，限定的振動が生じていることも注目すべき現象と云えよう。ケーブル間隔２Ｄではさほど顕著ではないが，間隔４Ｄおよび６Ｄではギャロッピング発生域のほぼ全風速にわたって渦励振と同程度の振幅の振動が生じている。これは，ガスト応答的な振動と考えられるが，このように振動数の異なった振動が同時に生じても不安定性が失われないことは，ギャロッピングのメカニズムを考察するうえで重要な事実と思われる。

2）　ケーブル間隔と気流乱れの影響

ウェークギャロッピングに及ぼすケーブル間隔および気流乱れの影響を調べるために，下流側ケーブルの１次モードの応答に着目し，間隔をパラメータとしてプロットした結果が図-3.2.5.28 ～30，乱れ強度をパラメータにプロットした結果が図-3.2.5.31 ～34である。これらの図から，実験した範囲内では，ケーブル間隔が広くなるほど，また乱れ強度が増すほど，ギャロッピングの不安定性は減少するものと云える。一様流中では，間隔が８Ｄとなってもギャロッピングが発生しており，ギャロッピング対策としてケーブル間隔を広げる方法は，一般的には，あまり現実的とは思われない。ただし，乱れ強度が大きい場合はケーブル間隔増加による安定化傾向が顕著であり，乱れ強度８％では，ケーブル間隔を６Ｄ以上とすればギャロッピングは発生しない。従って，周辺地形などの影響で大きい乱れ強度が期待できる場合は，ケーブル間隔を広げる設計法も可能ではないかと思われる。

3）　運動の自由度などの影響

上下流ケーブルの固有振動数を同時に変化させた実験１，２の結果を図-3.2.5.35 ～38に示す。図-3.2.5.35 ～37に示した上流側ケーブルの応答から，振動数の変化に伴って渦励振のピーク風速が変化していることが明らかであり，これらの限定振動に関しては応答が特定の無次元風速で生じるという従来の知見に従った結果となっている。一方，図-3.2.5.36 ～38の下流側ケーブルの応答に関して云えば，ギャロッピング発振風速は振動数の変化に見合うほど変化しているとは思われない。図-3.2.5.44 は，振動数を変えた場合の下流側ケーブルの逆相１次振動を重ねてプロットしたものである。振動数が高い場合，渦励振とギャロッピングが近接することもあって若干曖昧なところもあるが，少なくとも振動数が８Hzの場合のギャロッピング発振風速が，５Hzの場合の発振風速，すなわち約４m/sの１．６倍＝６．４m/sまで上昇していないことは明らかである。

図-3.2.5.39 ～40は実験３の結果である。上流側と下流側の渦励振のピークは，各々の固有振動数に応じて異なった風速で発生しており，言わば，固有振動数の異なる独立な２本のケーブルにも似た応答を示している。しかしながら，驚くべきことに，風速約４m/s 付近から，これまでに示した他のケースと同様な下流側ケーブルの大振幅の１次モードの振動，すなわちウェークギャロッピングの発生が認められる。

以上から，ウェークギャロッピングは，従来から知られている多くの空力振動と異なって無次元風速には依存しない現象，言い替えれば特定の流れパターンの流下に起因しない現象である可能性があること，その不安定性は上下流両ケーブルの他の原因による振動の干渉を受けない独立性の高いものであることなどが推論されよう。図-3.2.5.41 ～43は実験４，５の結果を示したものであるが，上流側ケーブルの運動や両ケーブルの相対水平変位がウェークギャロッピングにほとんど影響を及ぼさないことが明らかであり，ウェークギャロッピングの不安定性が微妙な構造特性の変化の影響をほとんど受けないという意味では，これまでに述べたところと同様な特性を示していると云えよう。

(4) 結論

本節で述べたタウトストリップ実験から得られた主要な結論は次の通りである。

① ケーブル間隔の増加は，ウェークギャロッピングを安定化する傾向にある。

② 乱れ強度の増加は，ウェークギャロッピングを安定化する傾向にある。

③ ケーブル間隔増加だけでウェークギャロッピングに対処する方法は，乱れ強度が小さい場合は現実的ではないが，大きな乱れ強度が期待できる場合には，検討に値する。

④ ウェークギャロッピングは無次元風速に依存しない現象である可能性がある。

⑤ ウェークギャロッピングの発生には，上下流ケーブルが逆相で振動することは必要条件ではない。

また，上下流ケーブルの他の原因による振動とウェークギャロッピングの空力的干渉もほとんどなく，ウェークギャロッピングの不安定性は極めて独立性の高いものである。

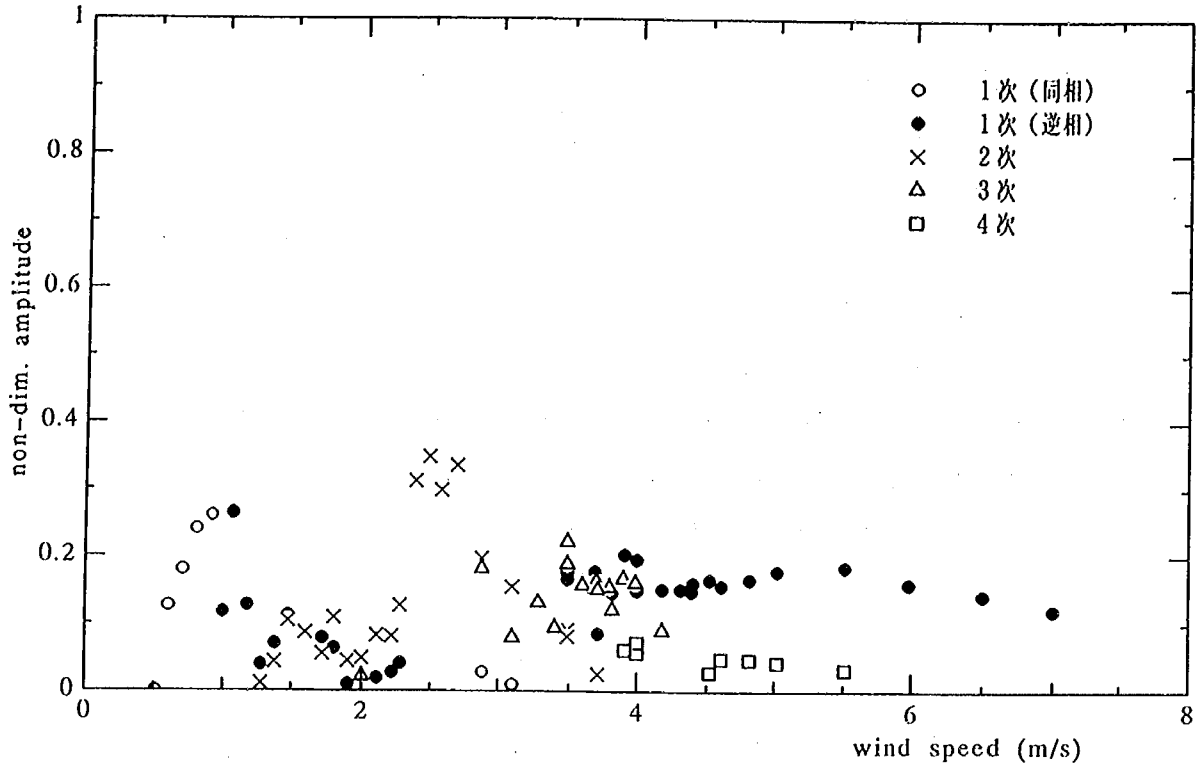


図-3.2.5.1　上流側ケーブルの応答

（間隔＝２Ｄ，一様流，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

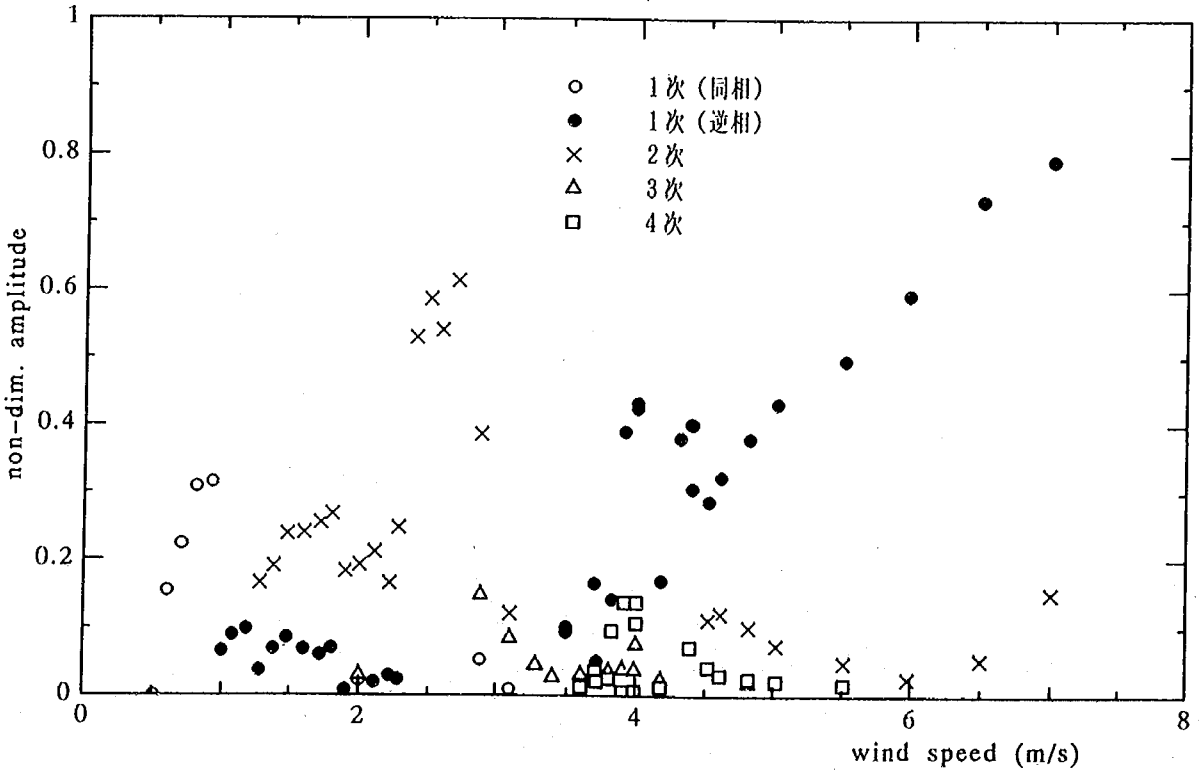


図-3.2.5.2　下流側ケーブルの応答

（間隔＝２Ｄ，一様流，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

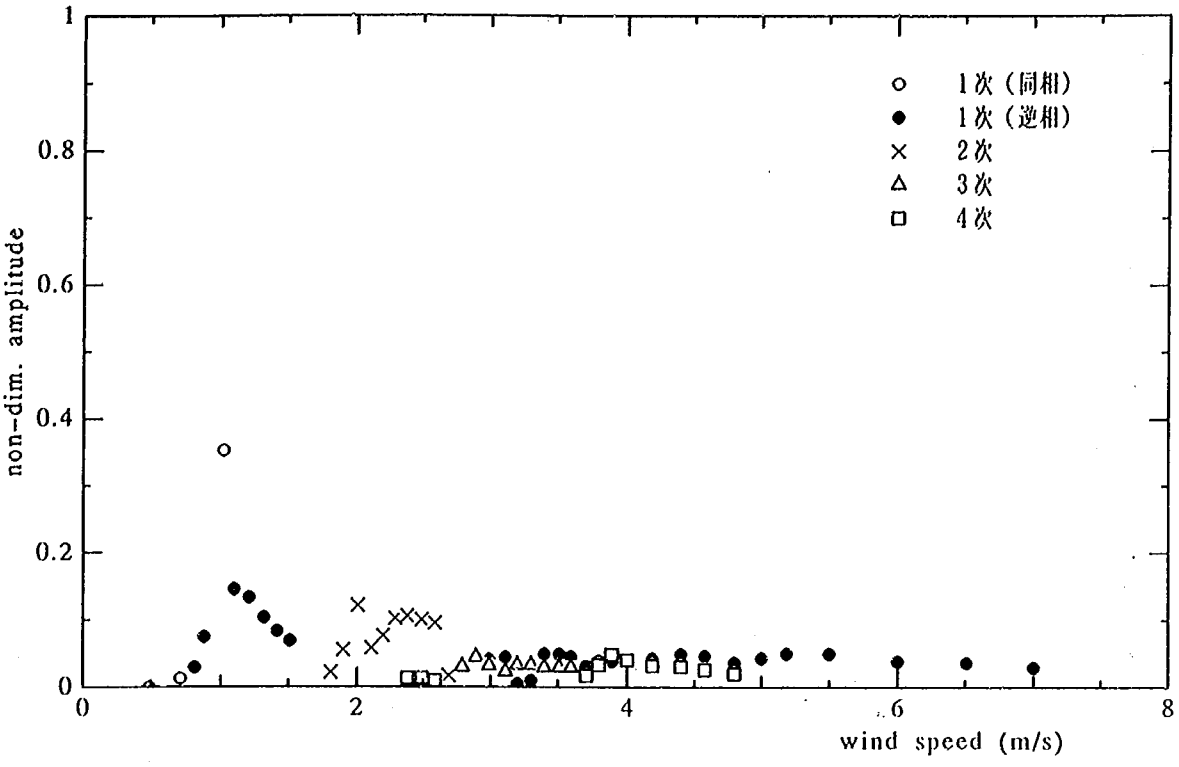


図-3.2.5.3　上流側ケーブルの応答

（間隔＝４Ｄ，一様流，ｆ１＝５．０Ｈｚ，ｆ２＝５．０Ｈｚ）

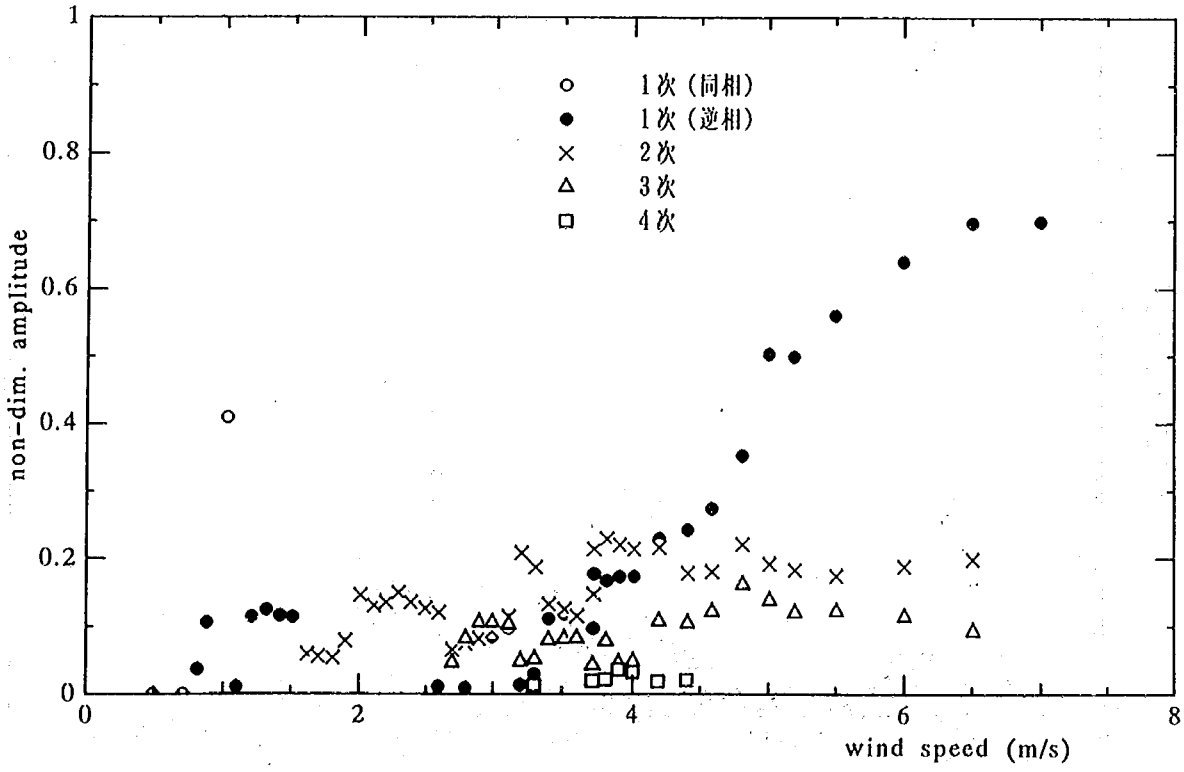


図-3.2.5.4　下流側ケーブルの応答

（間隔＝４Ｄ，一様流，ｆ１＝５．０Ｈｚ，ｆ２＝５．０Ｈｚ）

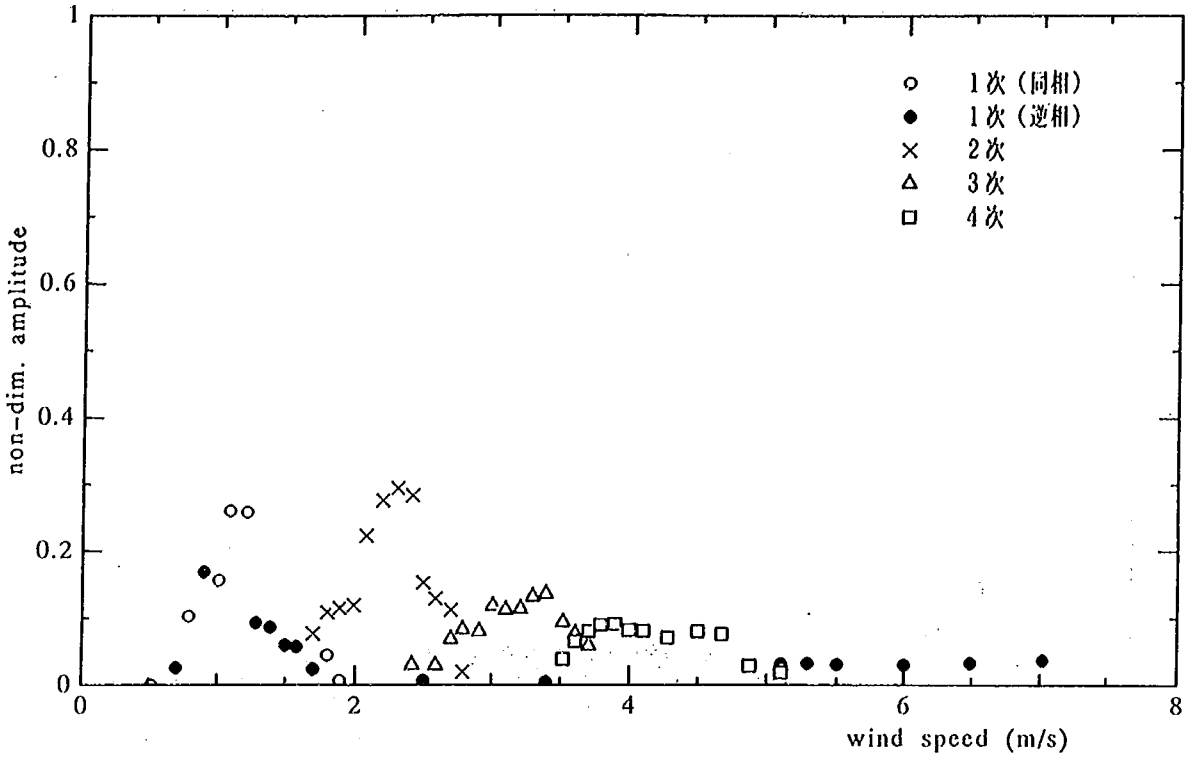


図-3.2.5.5　上流側ケーブルの応答

（間隔＝６Ｄ，一様流，ｆ１＝５．０Hz，ｆ２＝５．０Hz）

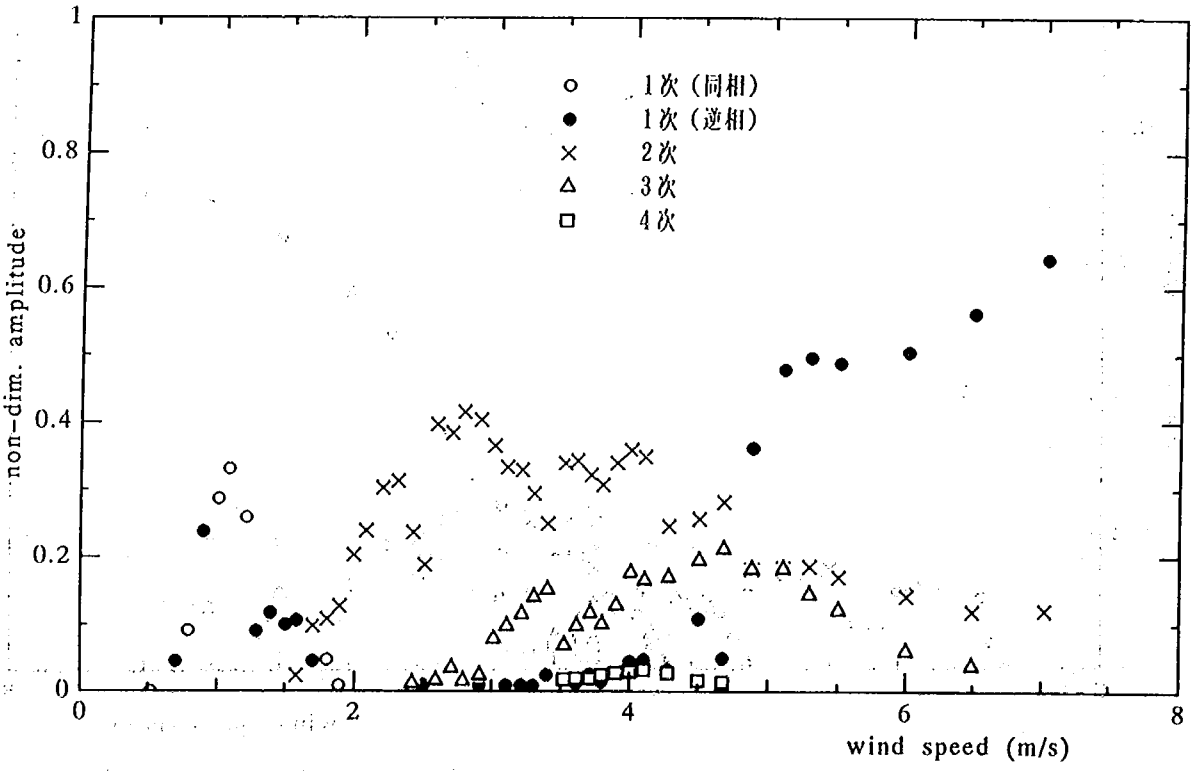


図-3.2.5.6　下流側ケーブルの応答

（間隔＝６Ｄ，一様流，ｆ１＝５．０Hz，ｆ２＝５．０Hz）

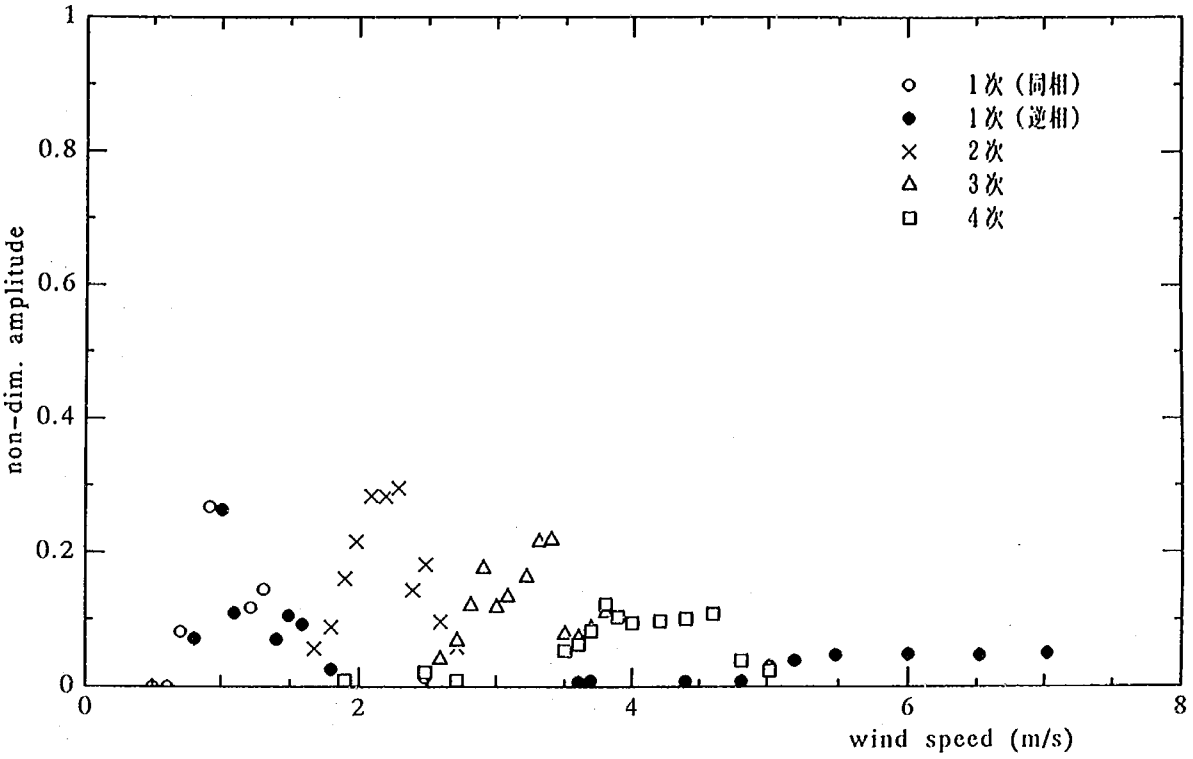


図-3.2.5.7　上流側ケーブルの応答

（間隔＝８Ｄ，一様流，ｆ１＝５．０Hz，ｆ２＝５．０Hz）

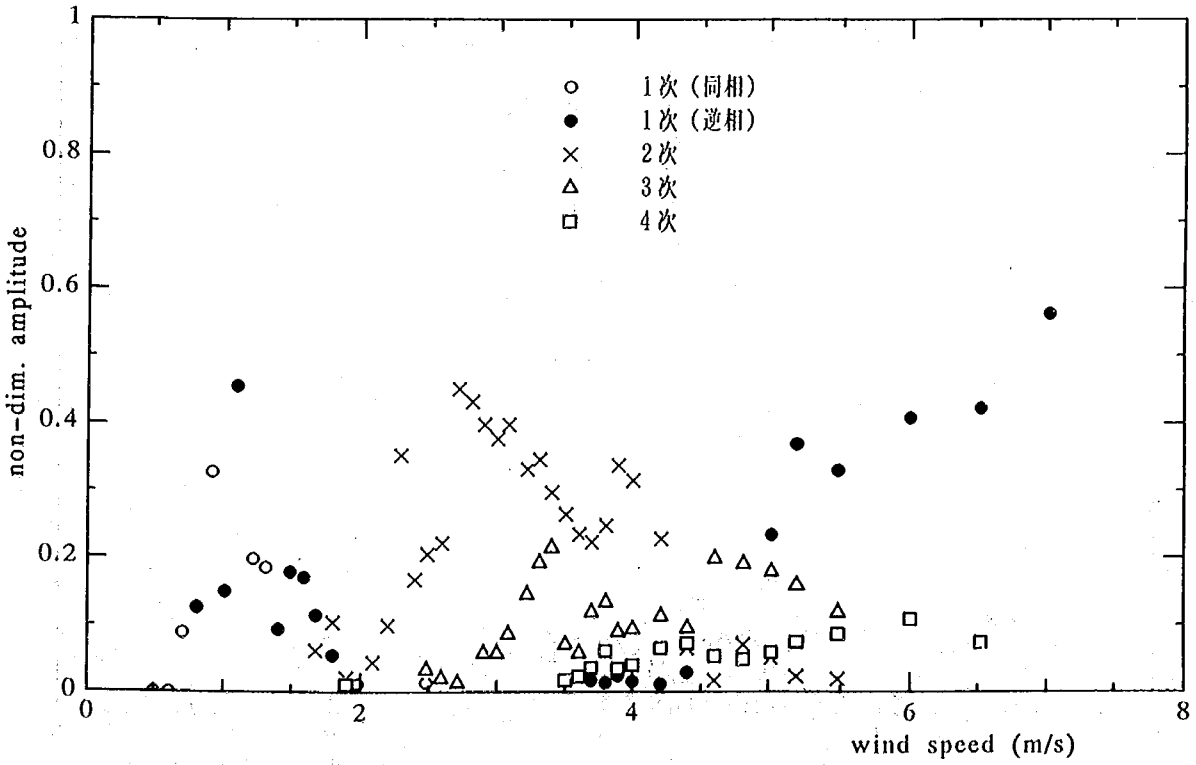


図-3.2.5.8　下流側ケーブルの応答

（間隔＝８Ｄ，一様流，ｆ１＝５．０Hz，ｆ２＝５．０Hz）

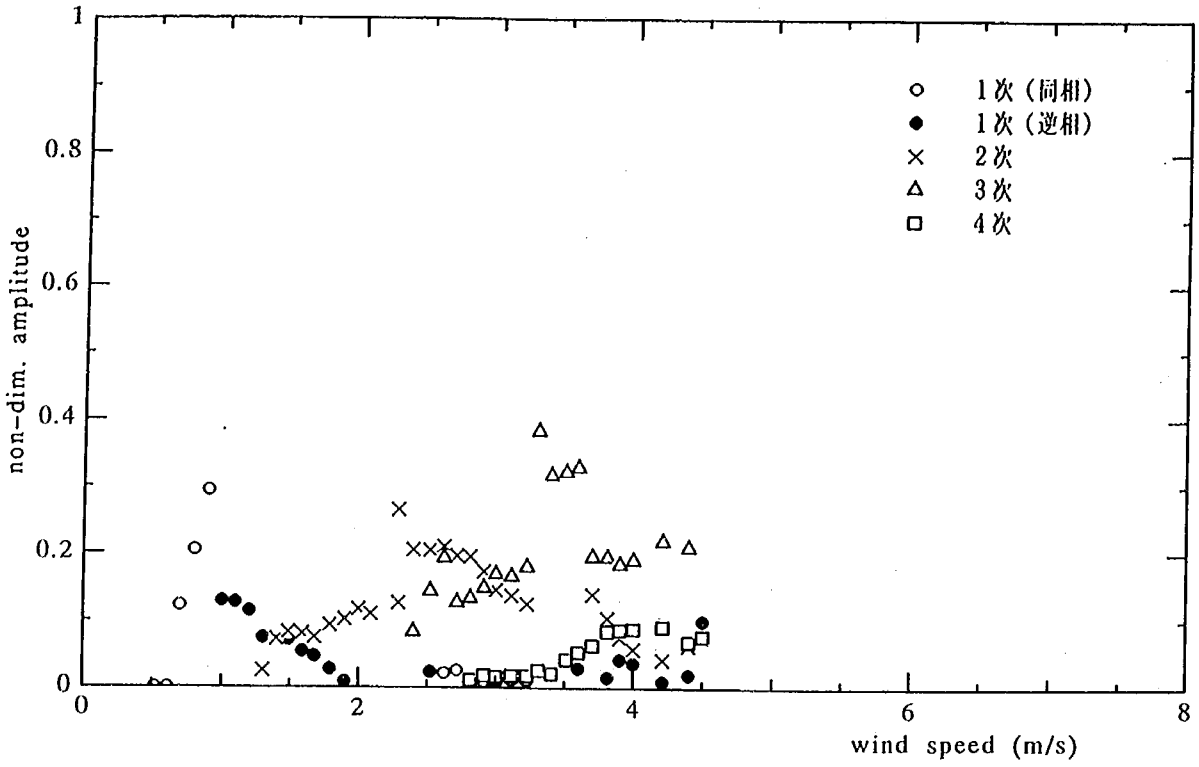


図-3.2.5.9　上流側ケーブルの応答

（間隔＝２Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

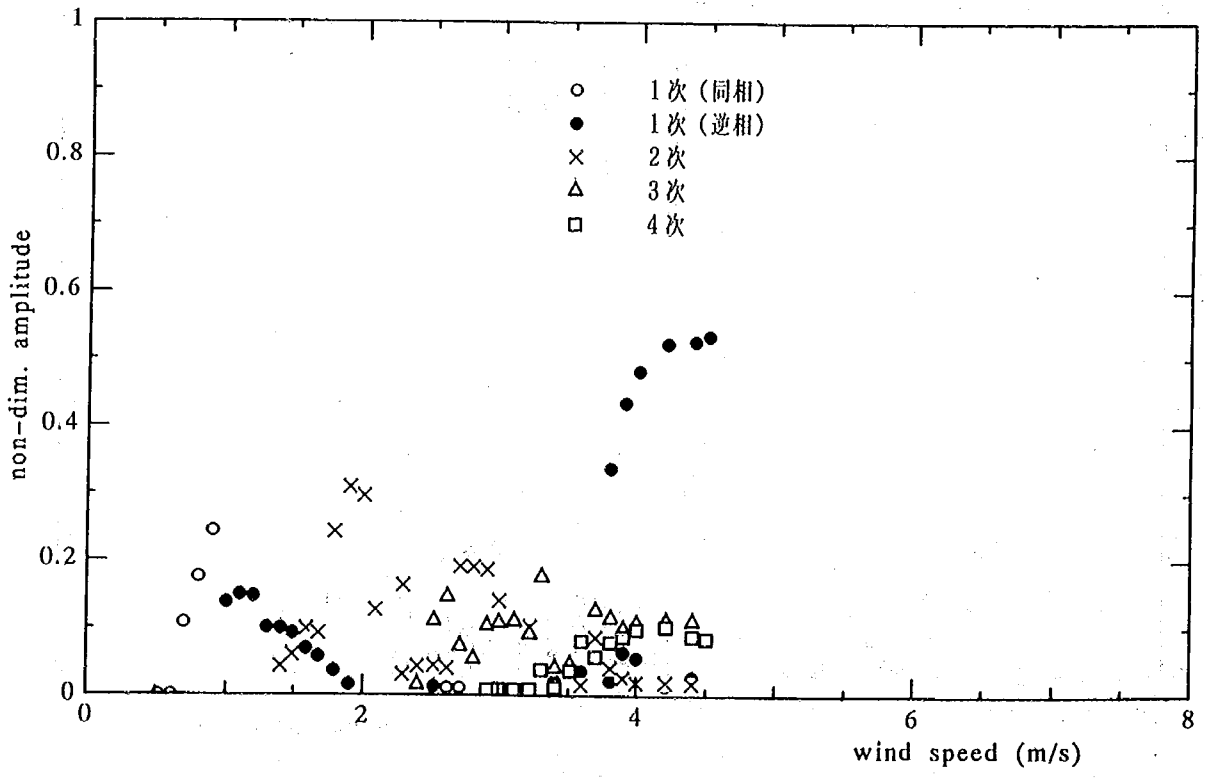


図-3.2.5.10　下流側ケーブルの応答

（間隔＝２Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

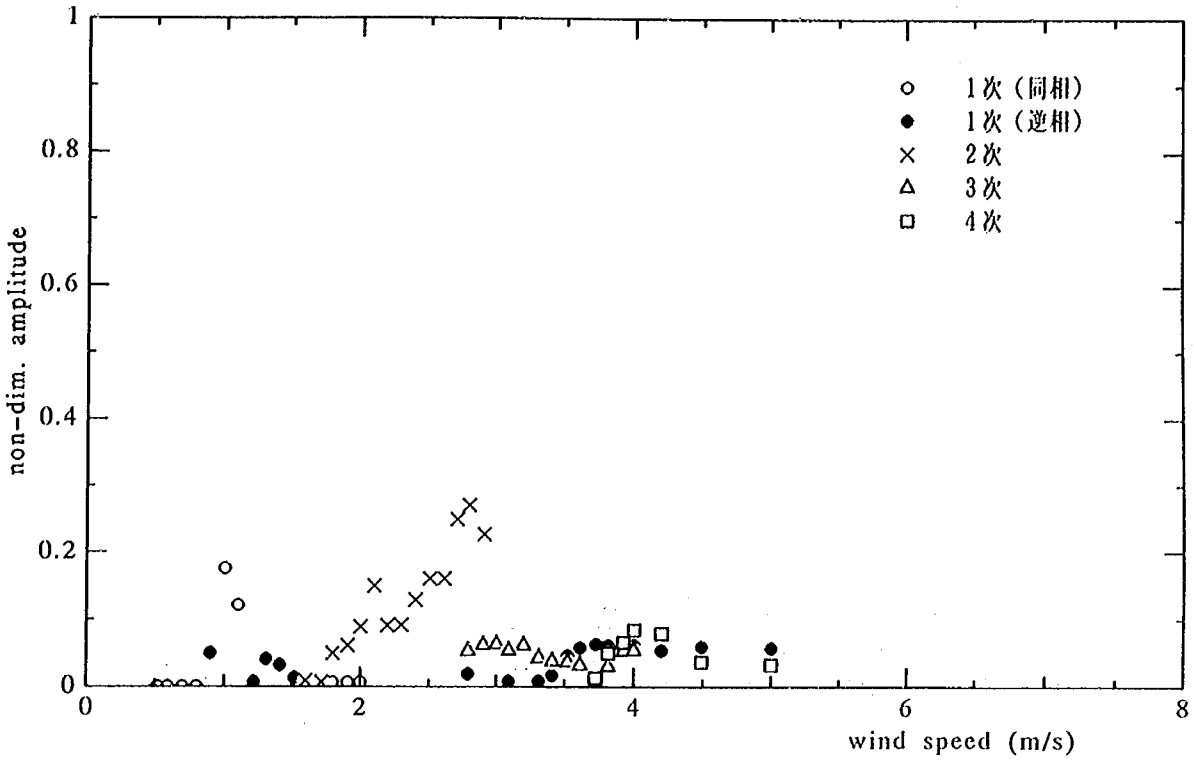


図-3.2.5.11　上流側ケーブルの応答

（間隔＝４Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Ｈｚ，　ｆ２＝５．０Ｈｚ）

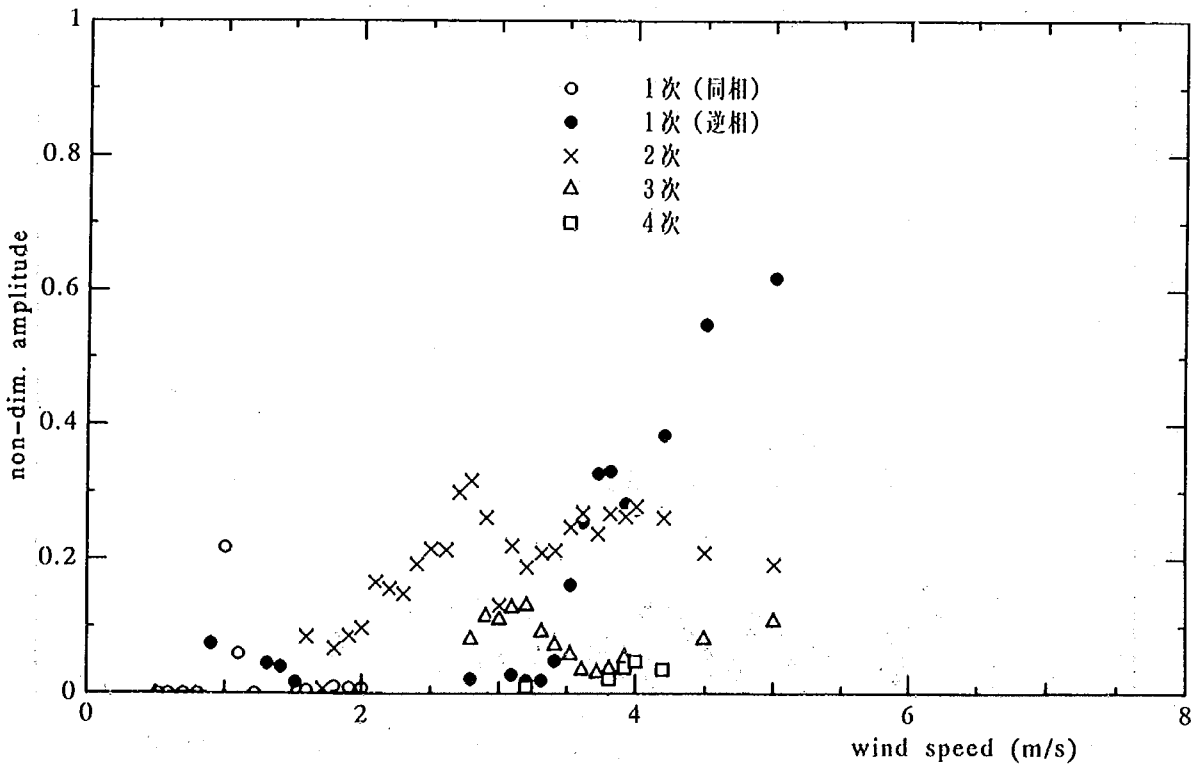


図-3.2.5.12　下流側ケーブルの応答

（間隔＝４Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Ｈｚ，　ｆ２＝５．０Ｈｚ）

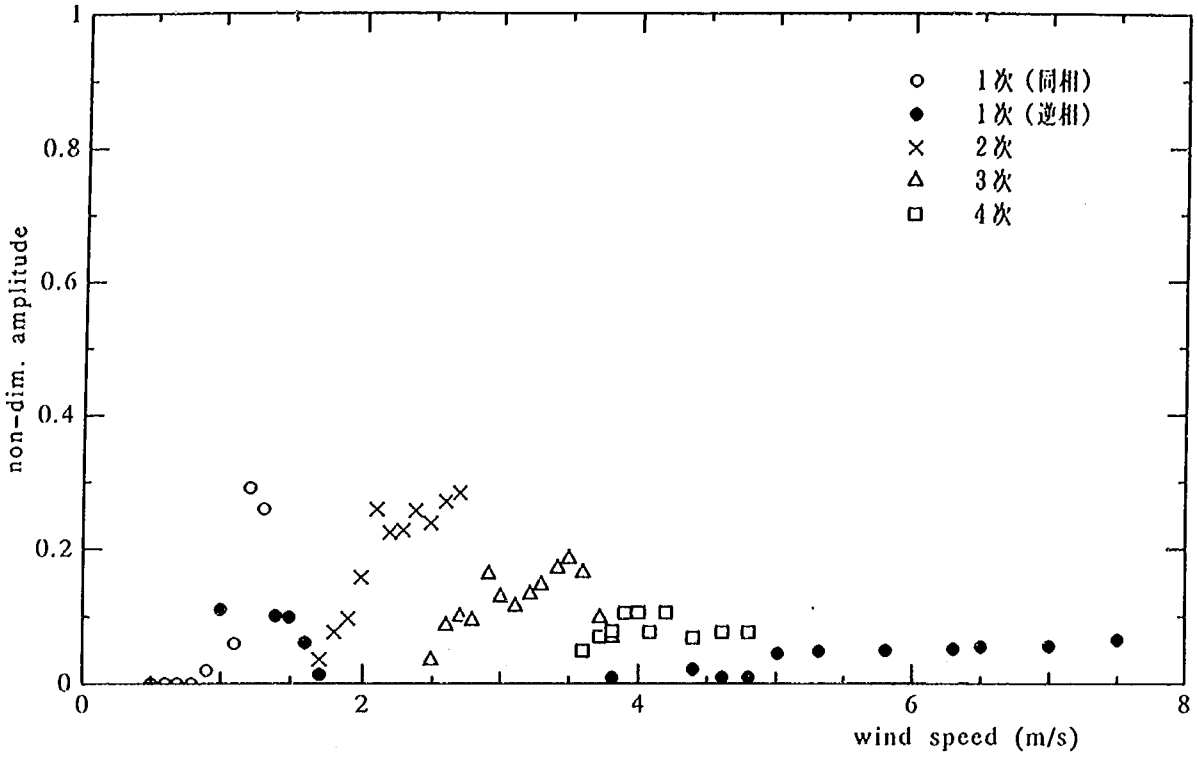


図-3.2.5.13　上流側ケーブルの応答

（間隔＝６Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

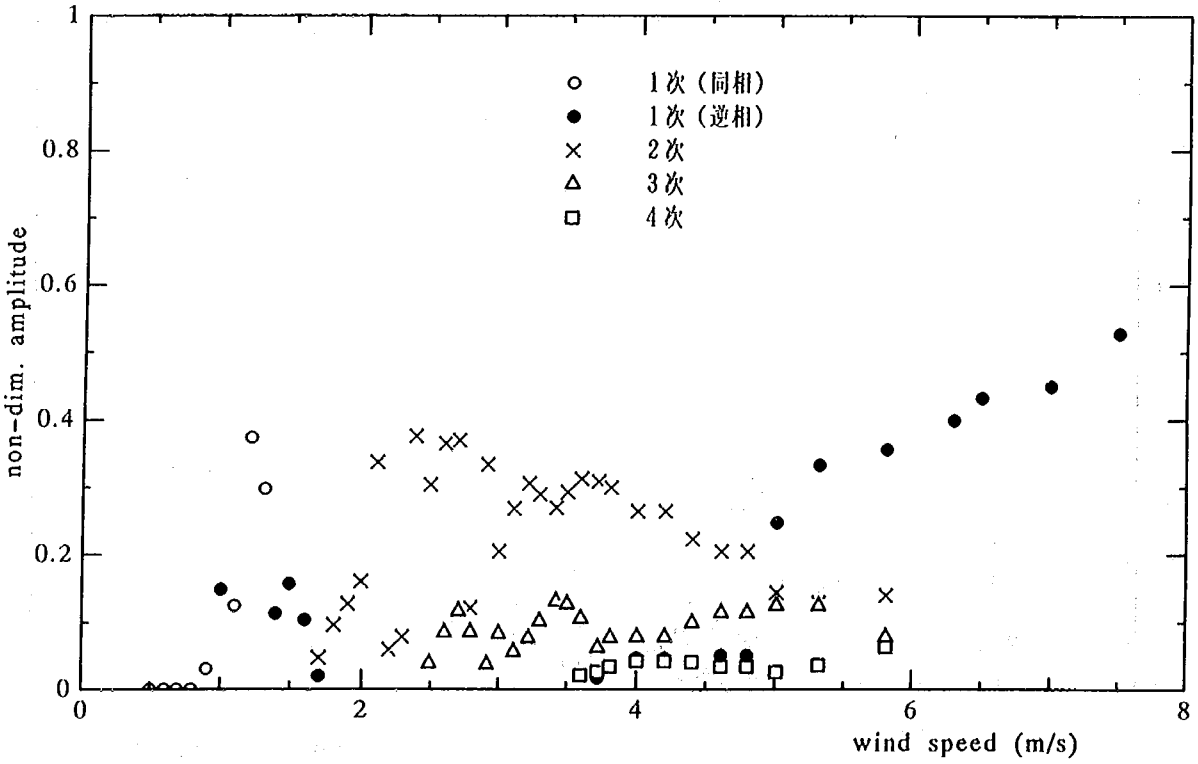


図-3.2.5.14　下流側ケーブルの応答

（間隔＝６Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

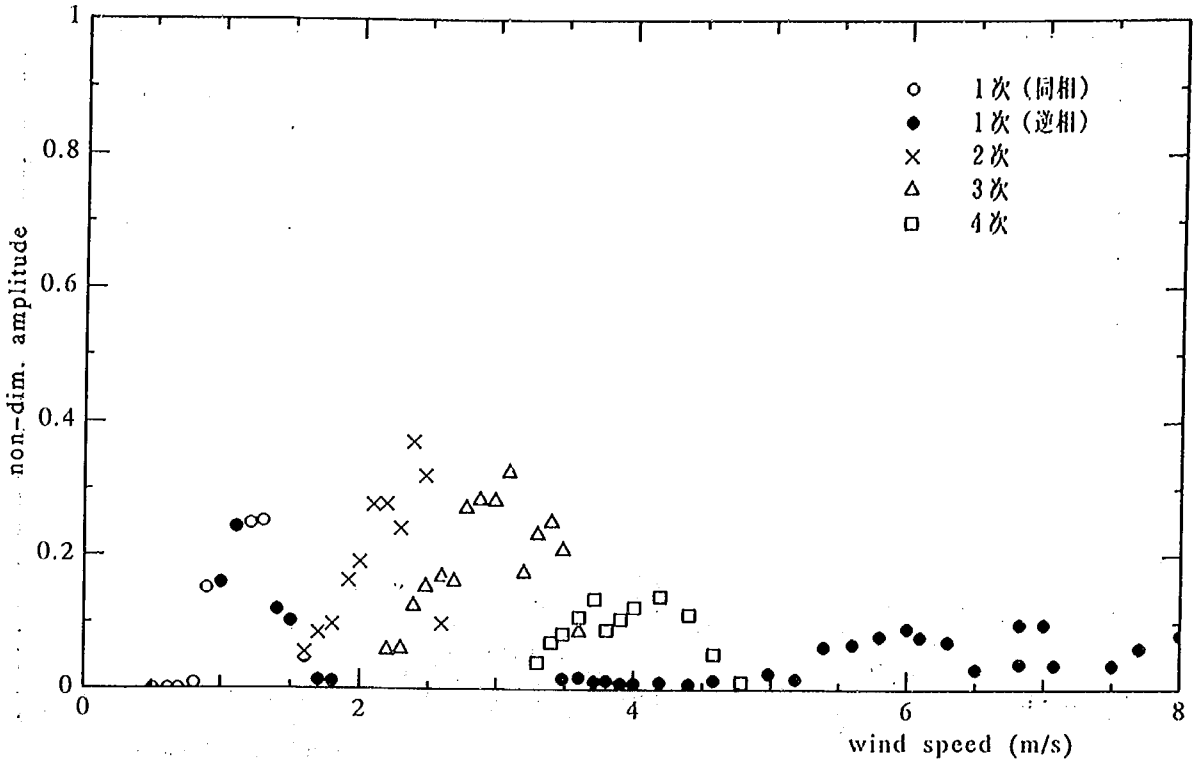


図-3.2.5.15　上流側ケーブルの応答

（間隔＝８Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Ｈｚ，　ｆ２＝５．０Ｈｚ）

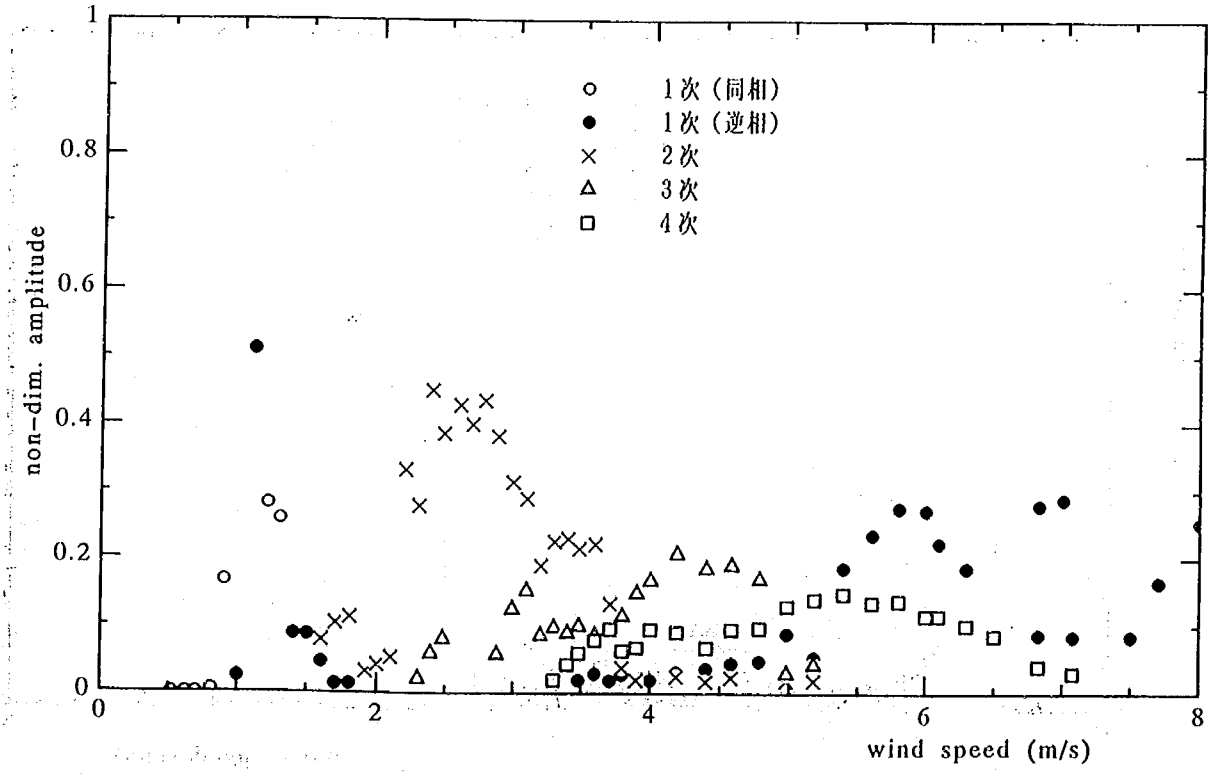


図-3.2.5.16　下流側ケーブルの応答

（間隔＝８Ｄ，乱流５％，　ｆ１＝５．０Ｈｚ，　ｆ２＝５．０Ｈｚ）

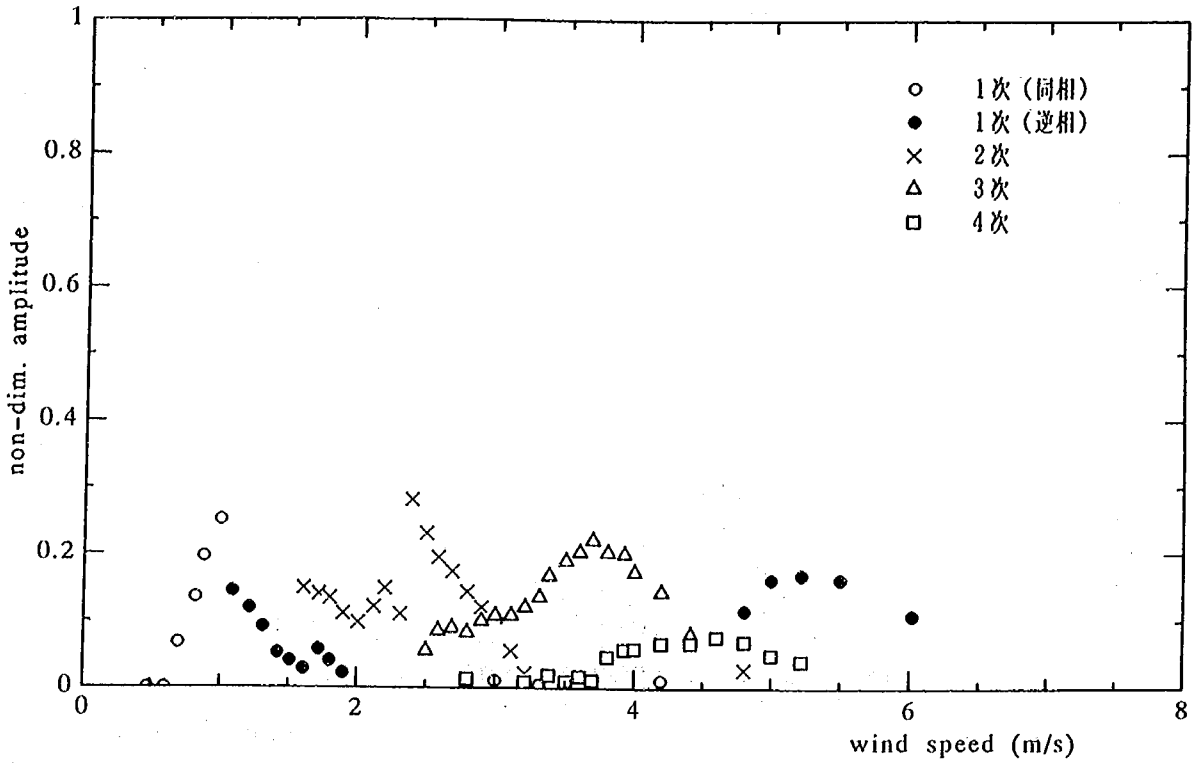


図-3.2.5.17　上流側ケーブルの応答

（間隔＝２Ｄ，乱流８％，ｆ１＝５．０Hz，ｆ２＝５．０Hz）

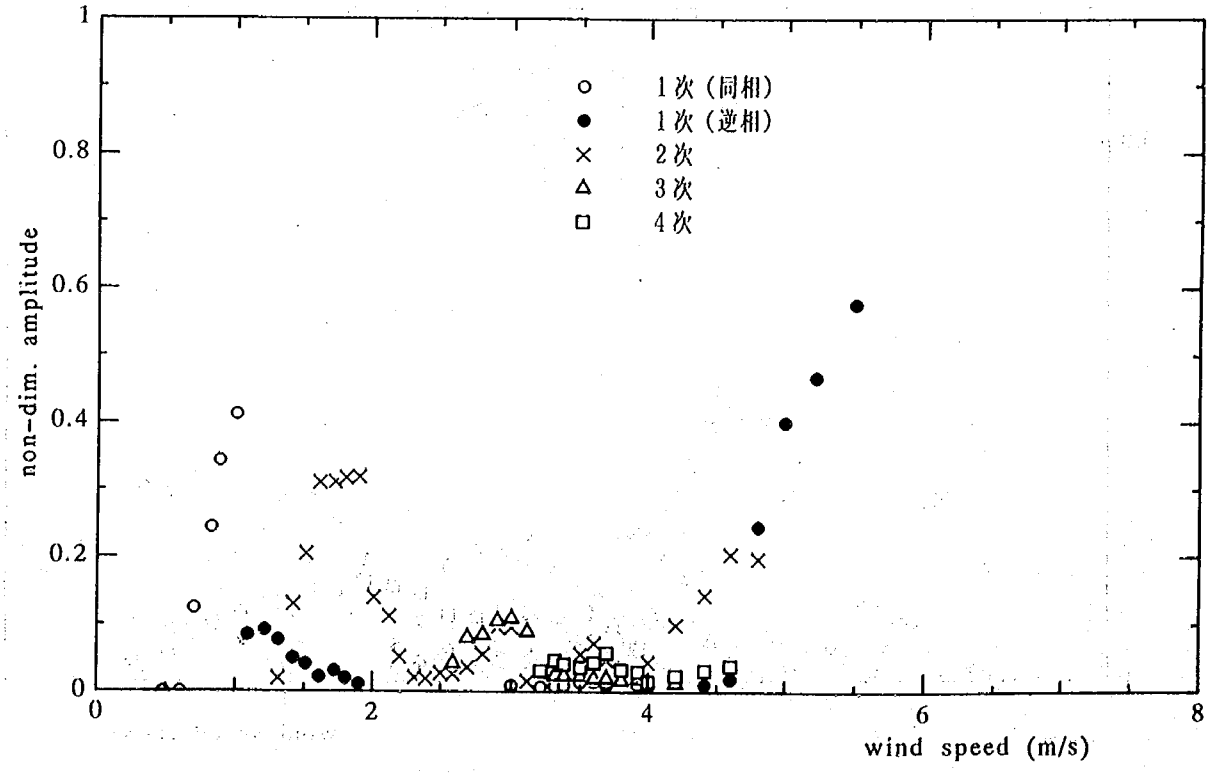


図-3.2.5.18　下流側ケーブルの応答

（間隔＝２Ｄ，乱流８％，ｆ１＝５．０Hz，ｆ２＝５．０Hz）

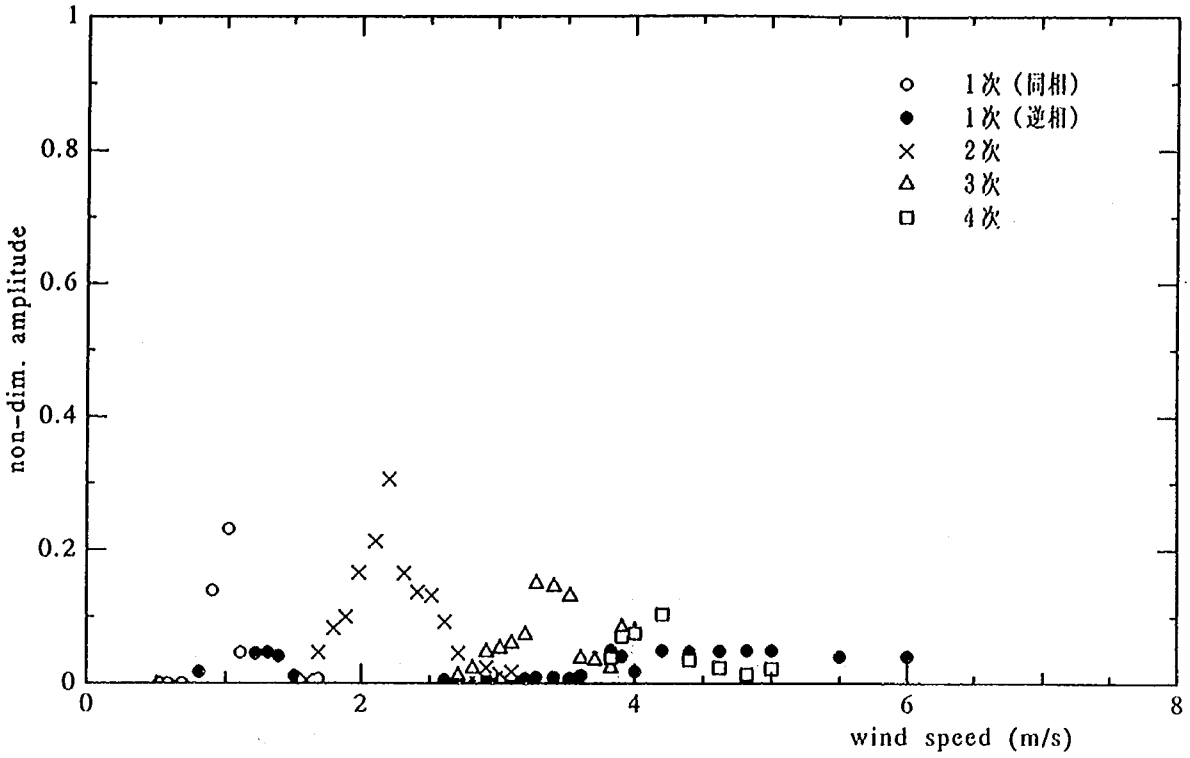


図-3.2.5.19　上流側ケーブルの応答

（間隔＝4D，乱流8%，f1＝5.0Hz，f2＝5.0Hz）

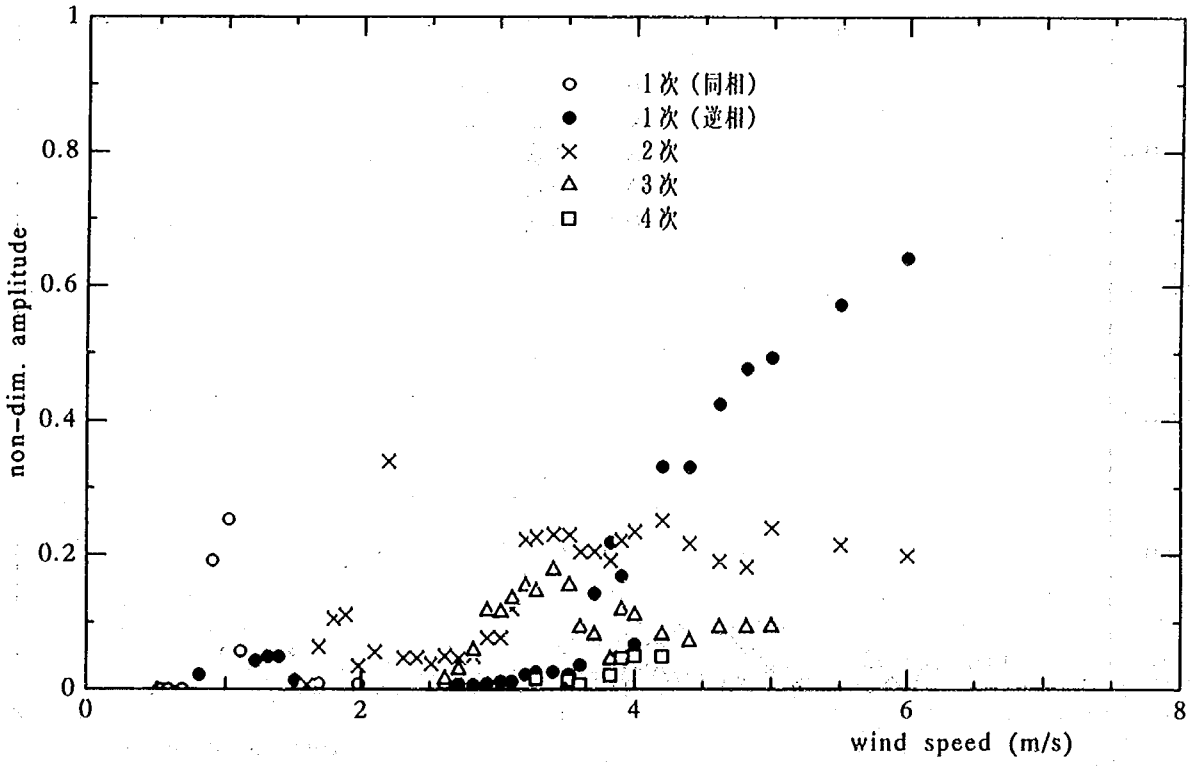


図-3.2.5.20　下流側ケーブルの応答

（間隔＝4D，乱流8%，f1＝5.0Hz，f2＝5.0Hz）

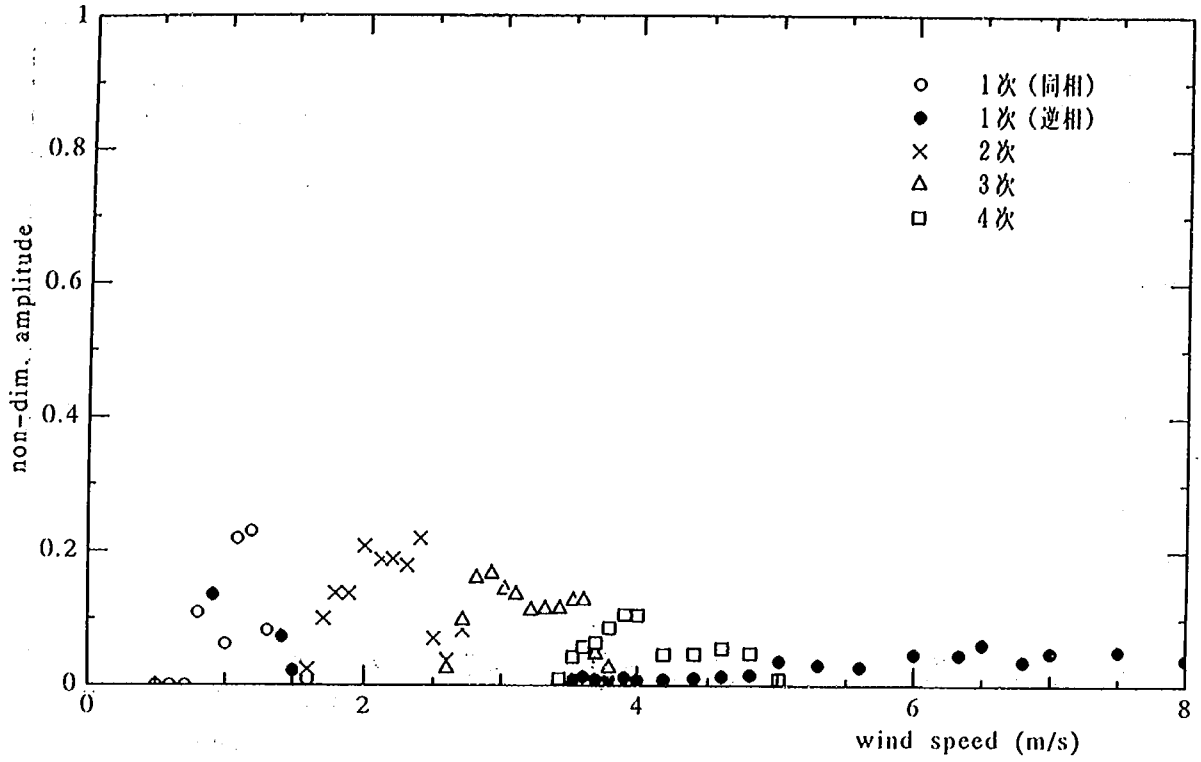


図-3.2.5.21　上流側ケーブルの応答

（間隔＝6D，乱流8%，f1＝5.0Hz，f2＝5.0Hz）

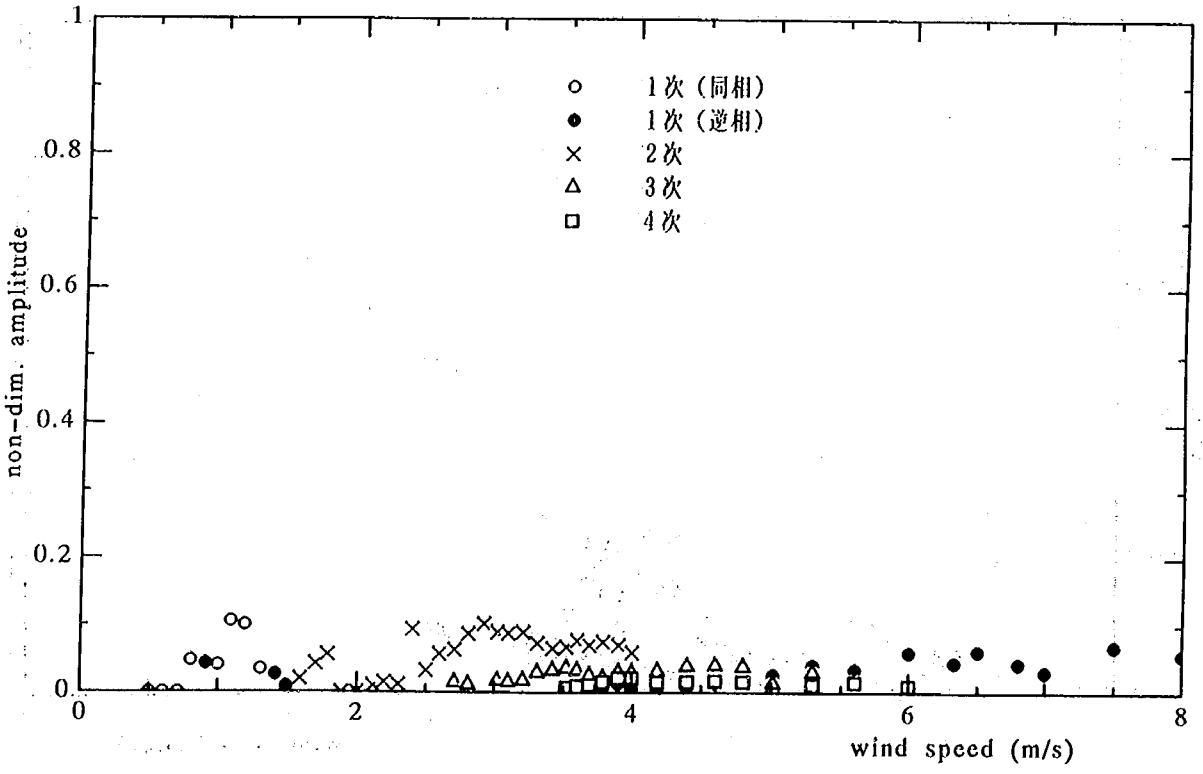


図-3.2.5.22　下流側ケーブルの応答

（間隔＝6D，乱流8%，f1＝5.0Hz，f2＝5.0Hz）

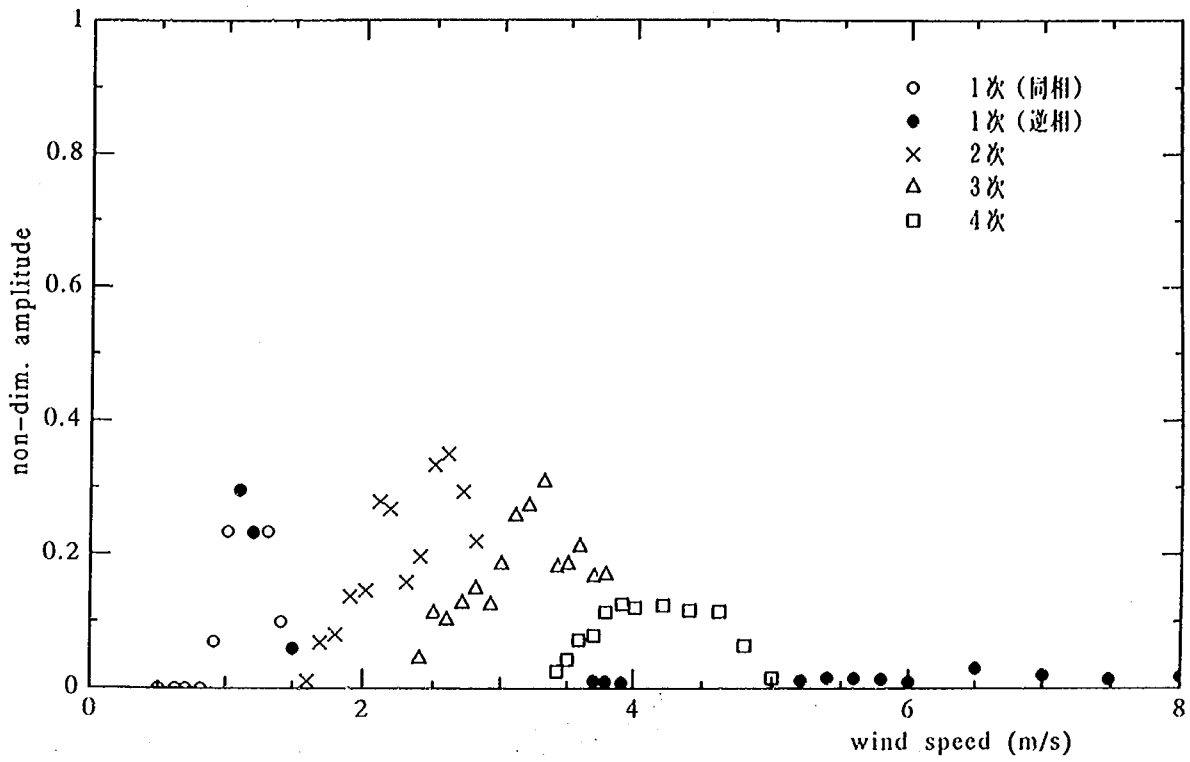


図-3.2.5.23　上流側ケーブルの応答

（間隔＝８Ｄ，乱流８％，ｆ１＝５．０Ｈｚ，ｆ２＝５．０Ｈｚ）

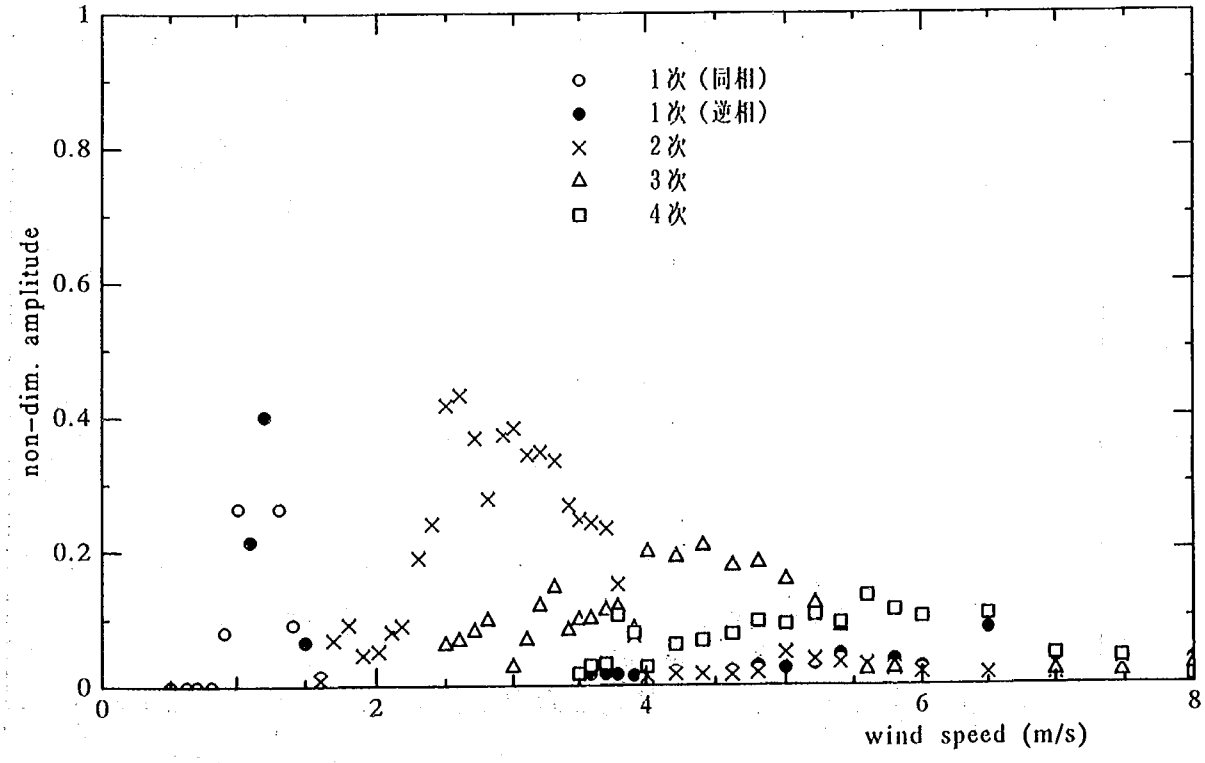


図-3.2.5.24　下流側ケーブルの応答

（間隔＝８Ｄ，乱流８％，ｆ１＝５．０Ｈｚ，ｆ２＝５．０Ｈｚ）

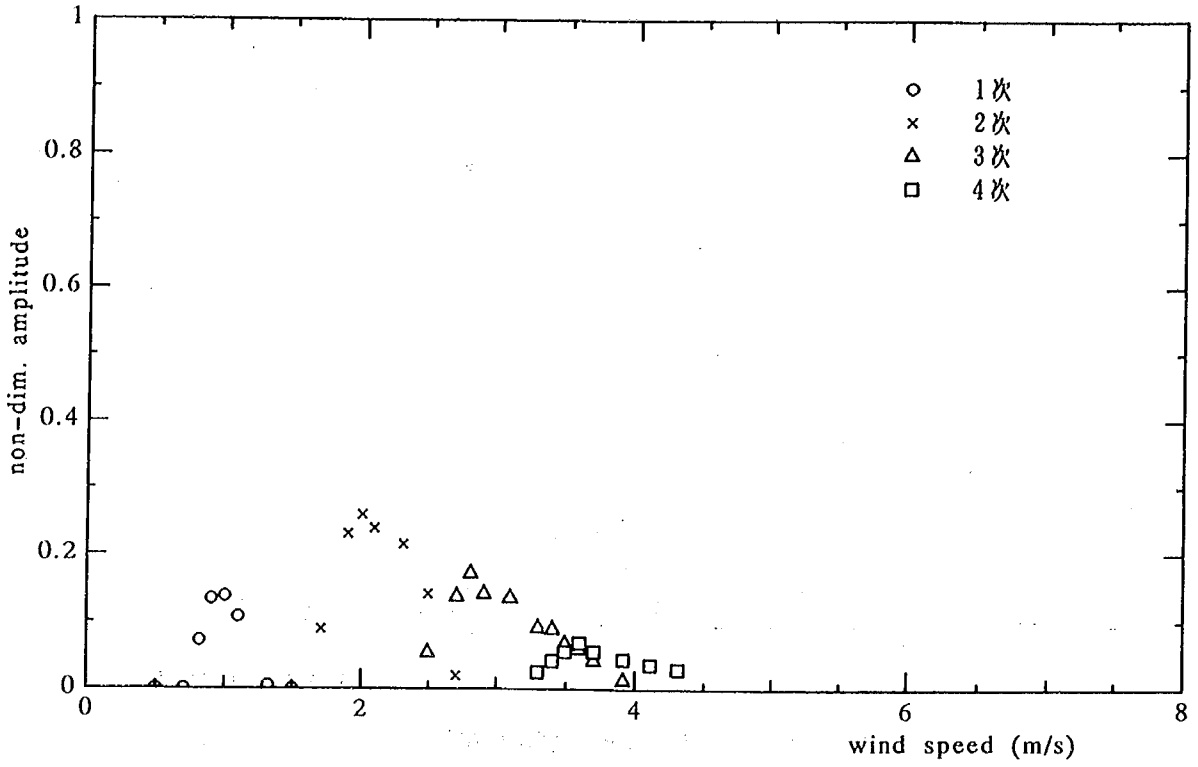


図-3.2.5.25　単独ケーブルの応答

（一様流，f 1＝5．0Hz）

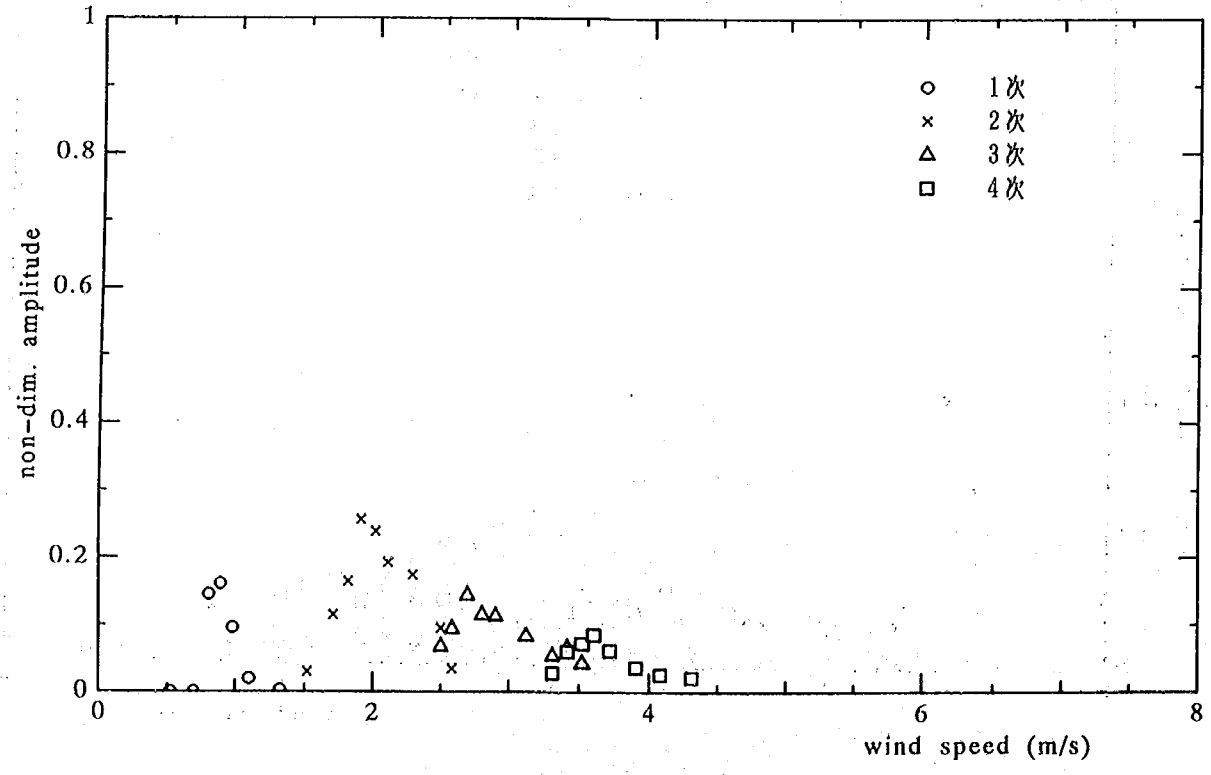


図-3.2.5.26　単独ケーブルの応答

（乱流５％，f 1＝5．0Hz）

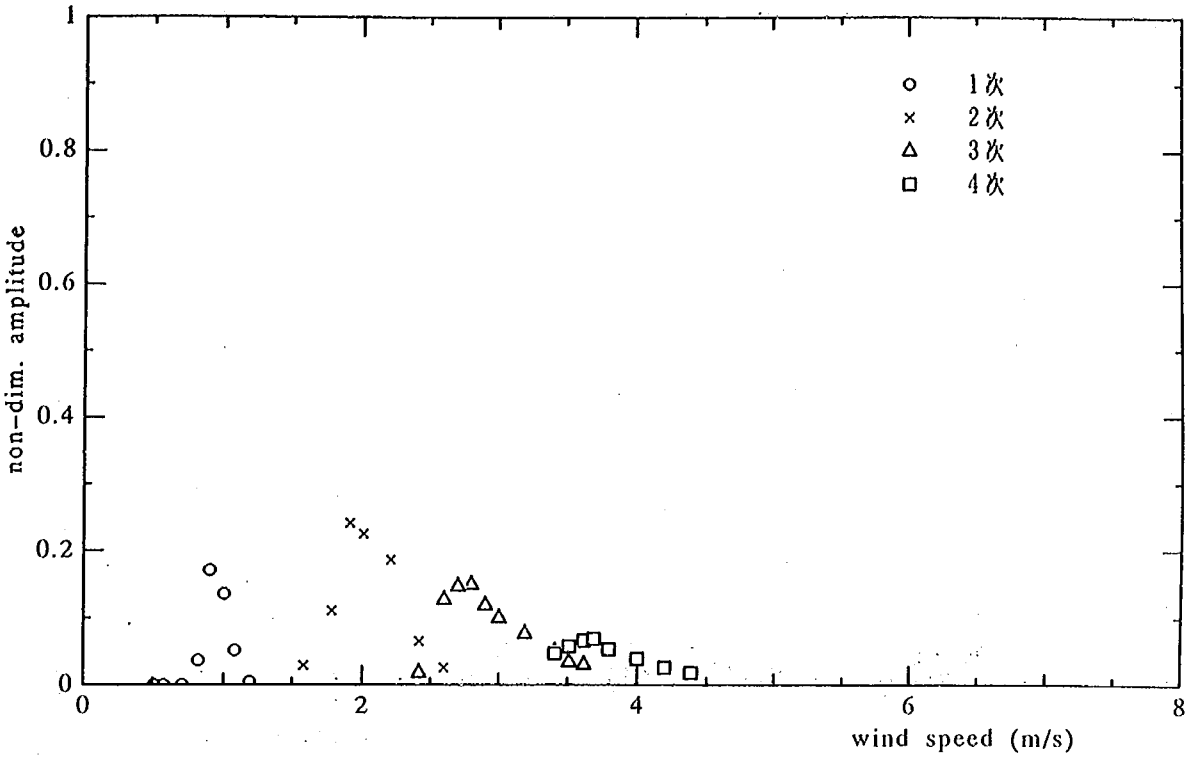


図-3.2.5.27　単独ケーブルの応答

（乱流8％，f 1＝5．0Hz）

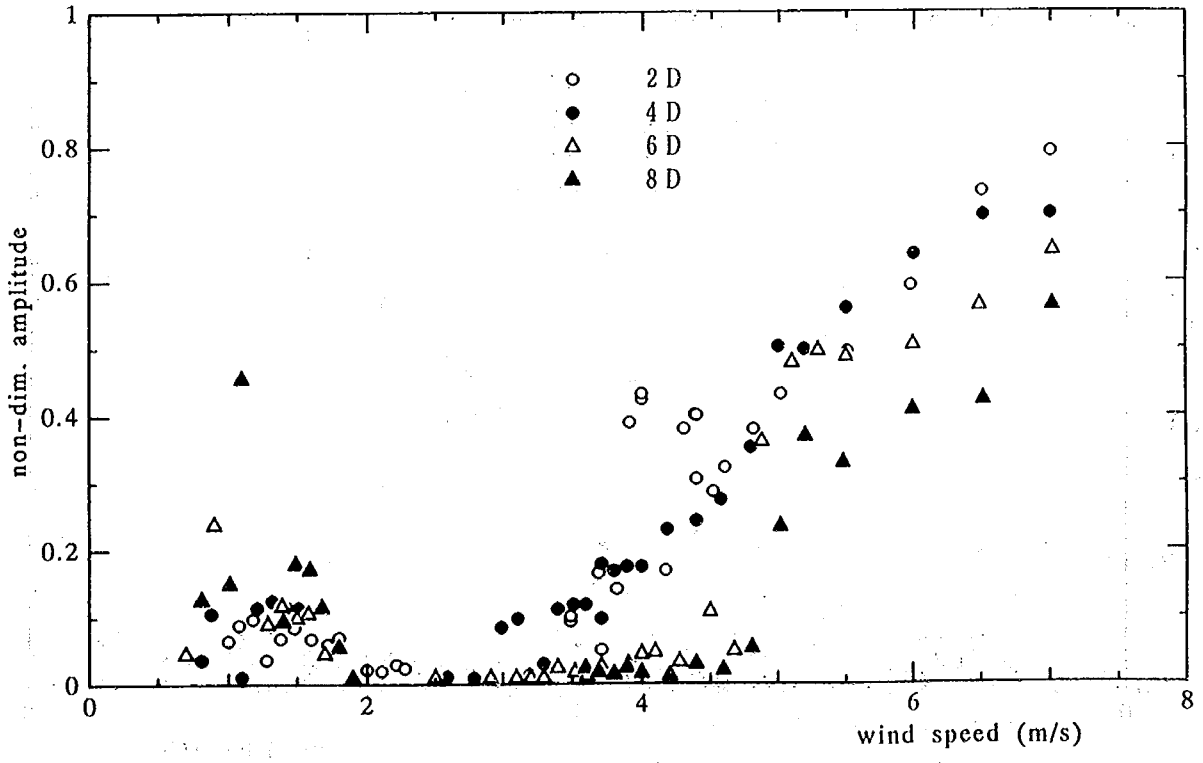


図-3.2.5.28　下流側ケーブル応答に対するケーブル間隔の影響

（一様流，f 1＝5．0Hz，f 2＝5．0Hz）

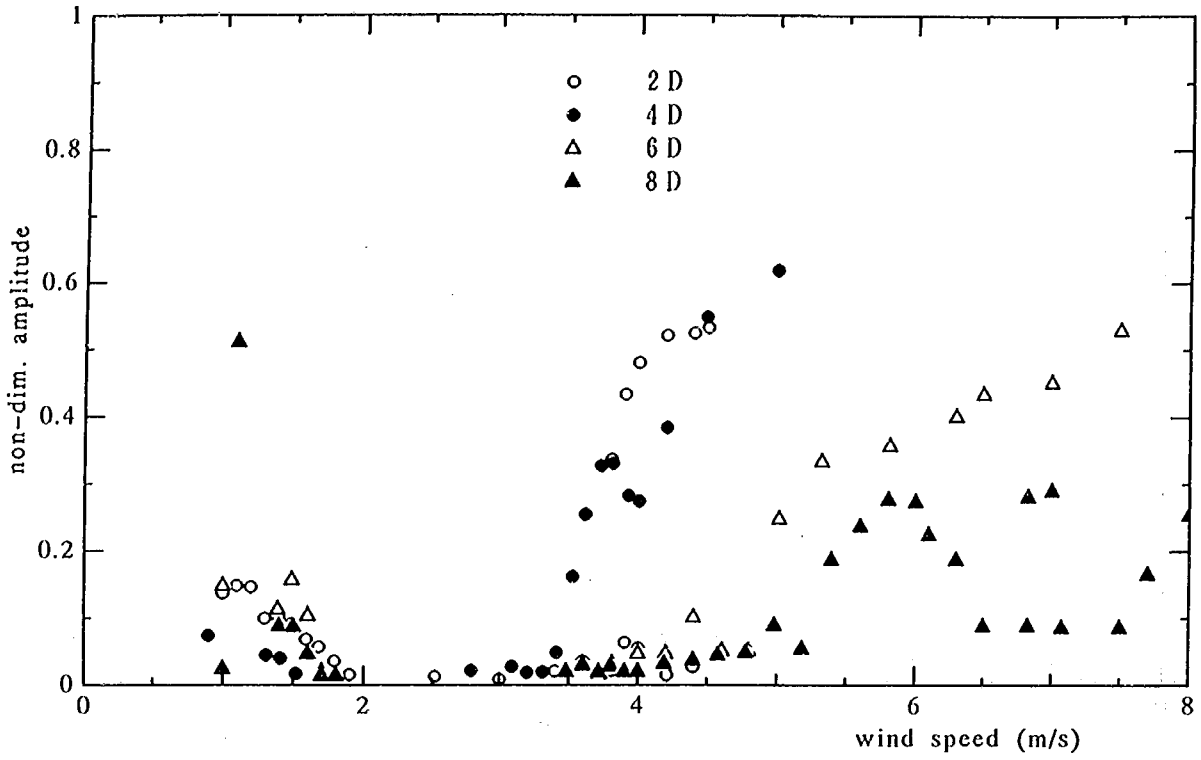


図-3.2.5.29　下流側ケーブル応答に対するケーブル間隔の影響

（乱流５％，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

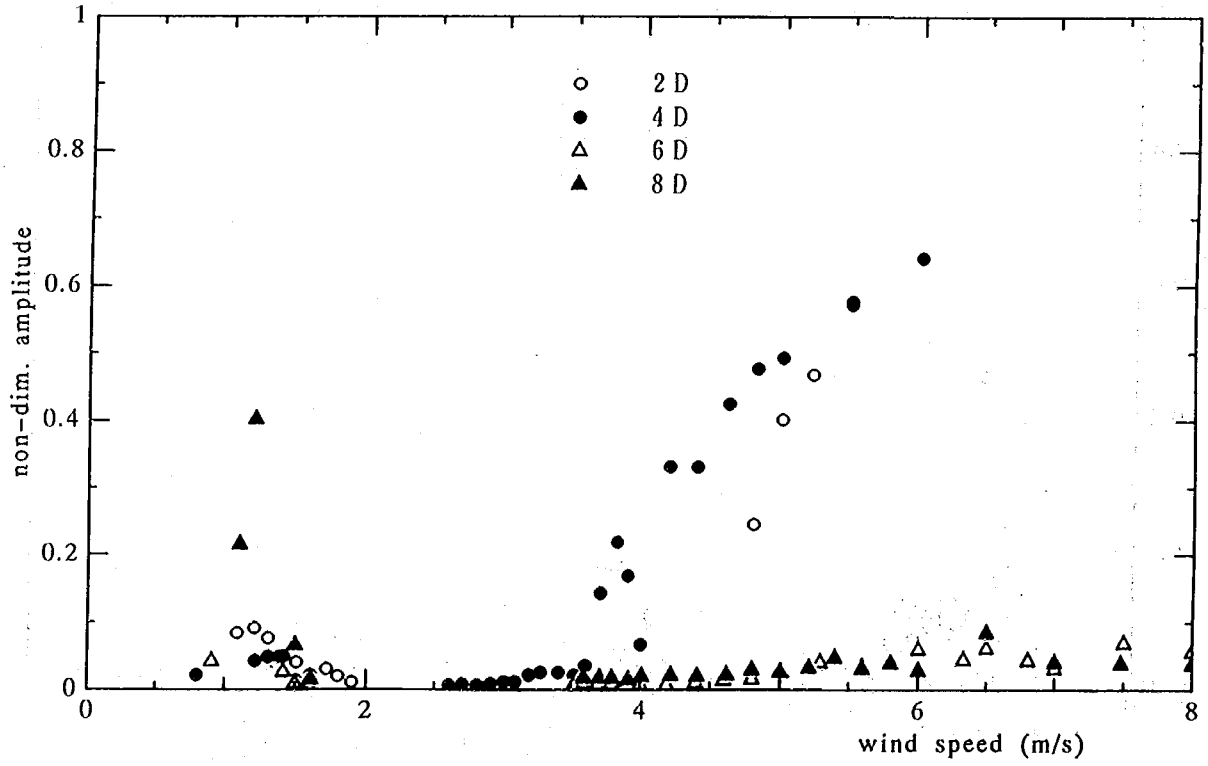


図-3.2.5.30　下流側ケーブル応答に対するケーブル間隔の影響

（乱流８％，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

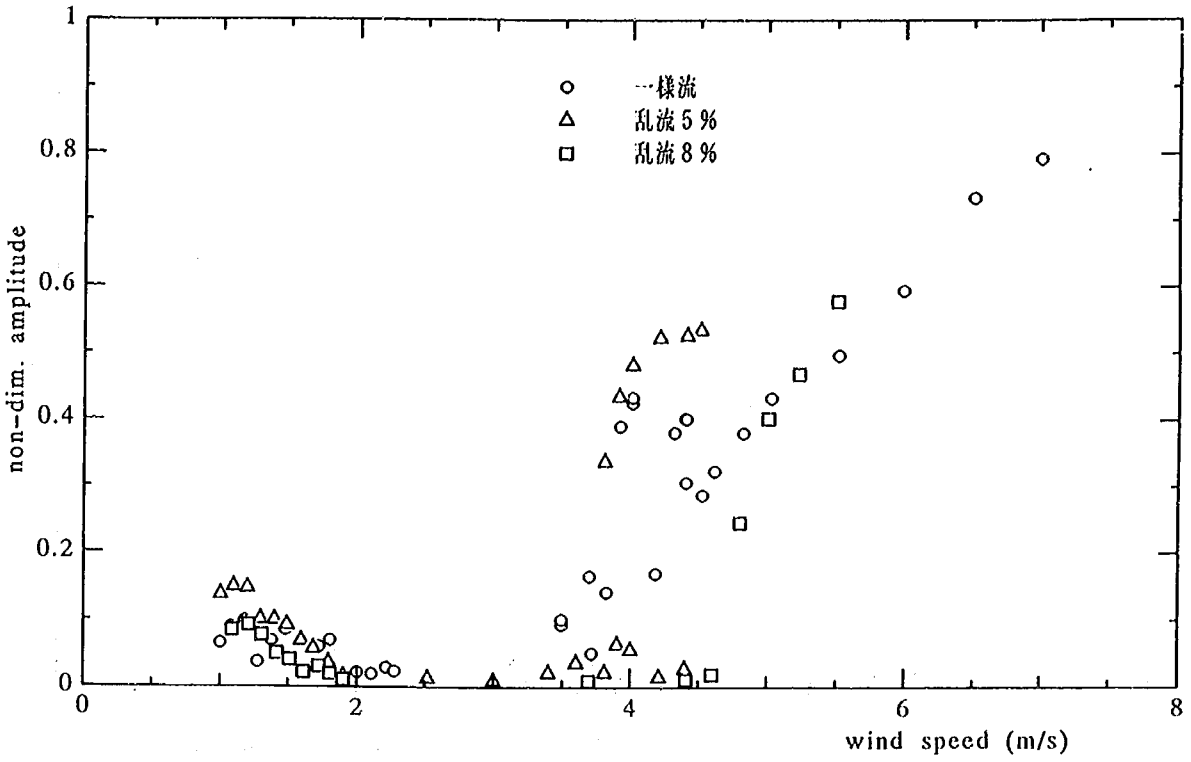


図-3.2.5.31　下流側ケーブル応答に対する乱流強度の影響

（間隔＝２Ｄ，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

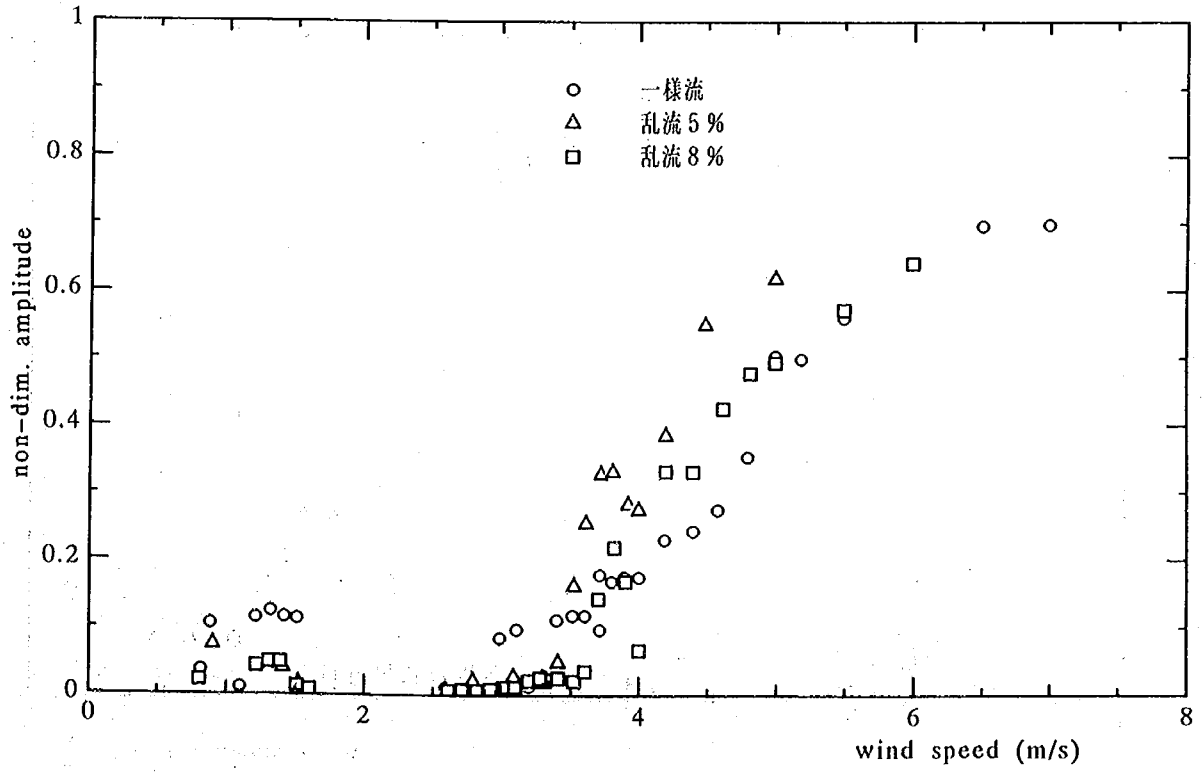


図-3.2.5.32　下流側ケーブル応答に対する乱流強度の影響

（間隔＝４Ｄ，　ｆ１＝５．０Hz，　ｆ２＝５．０Hz）

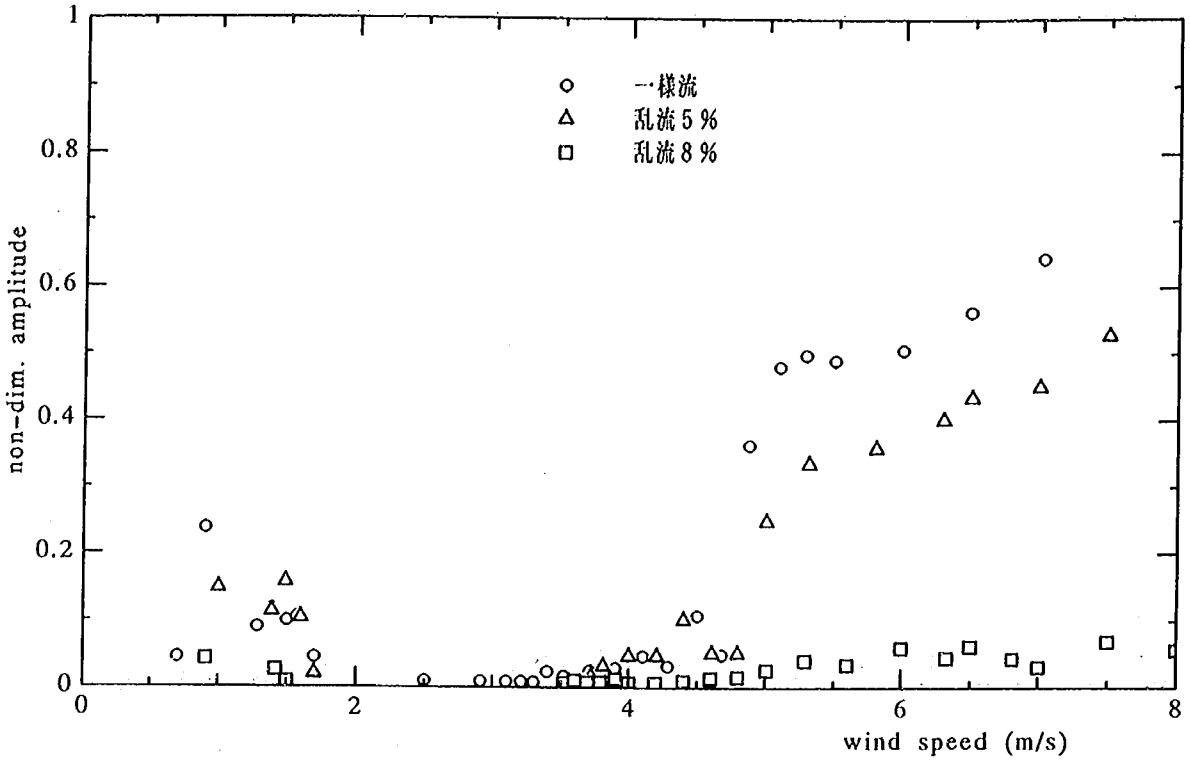


図-3.2.5.33　下流側ケーブル応答に対する乱流強度の影響

（間隔＝6D，　f 1＝5．0Hz，　f 2＝5．0Hz）

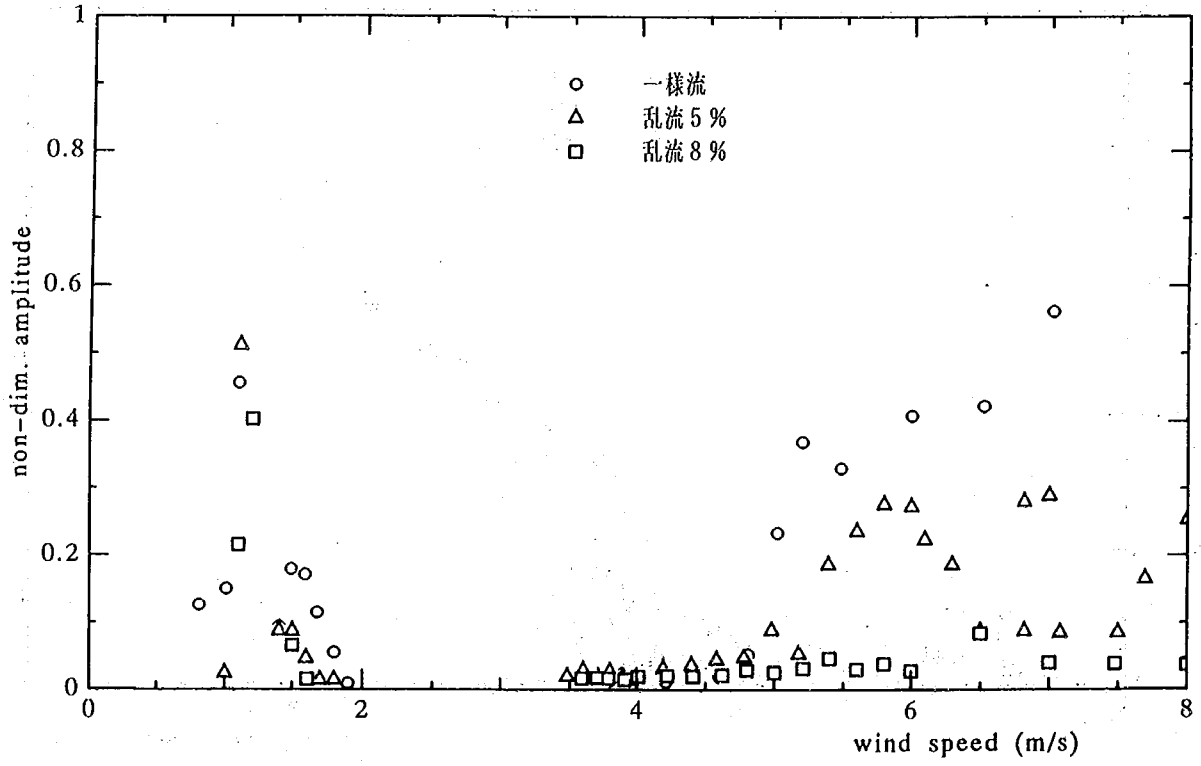


図-3.2.5.34　下流側ケーブル応答に対する乱流強度の影響

（間隔＝8D，　f 1＝5．0Hz，　f 2＝5．0Hz）

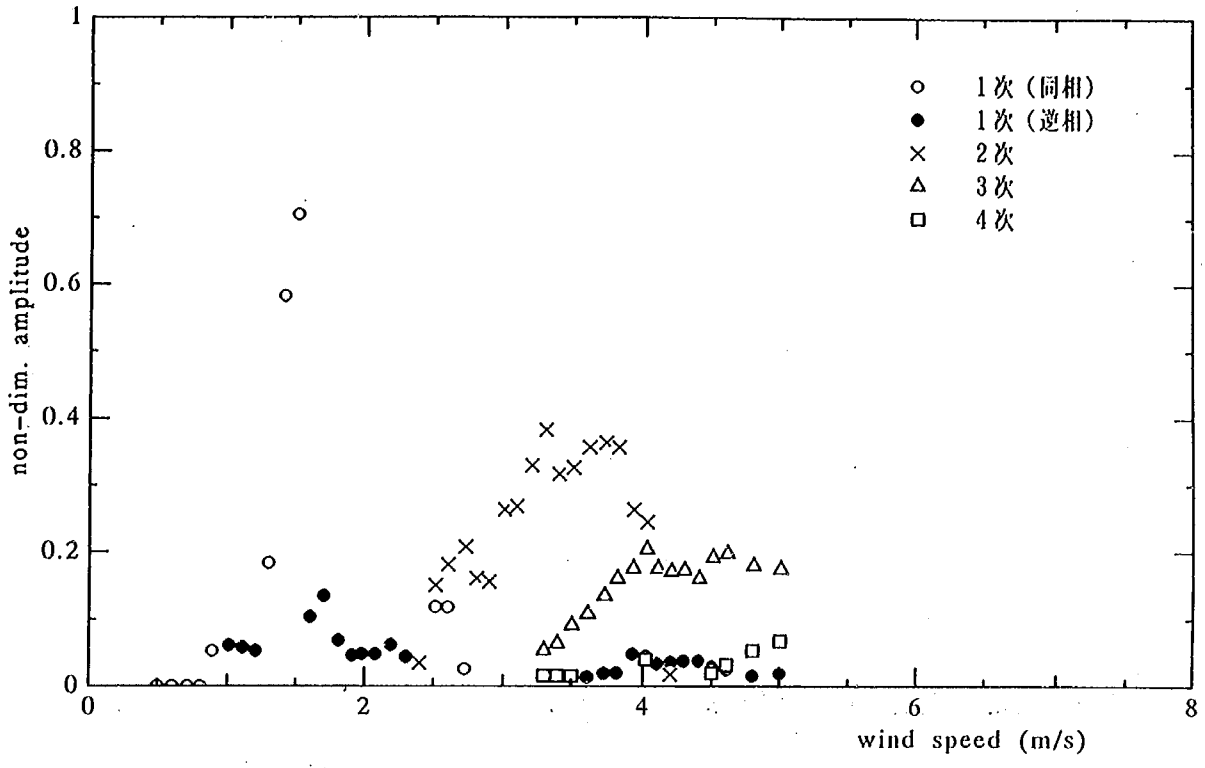


図-3.2.5.35　上流側ケーブル応答

（間隔＝４Ｄ，一様流，　ｆ１＝６．５Ｈｚ，　ｆ２＝６．５Ｈｚ）

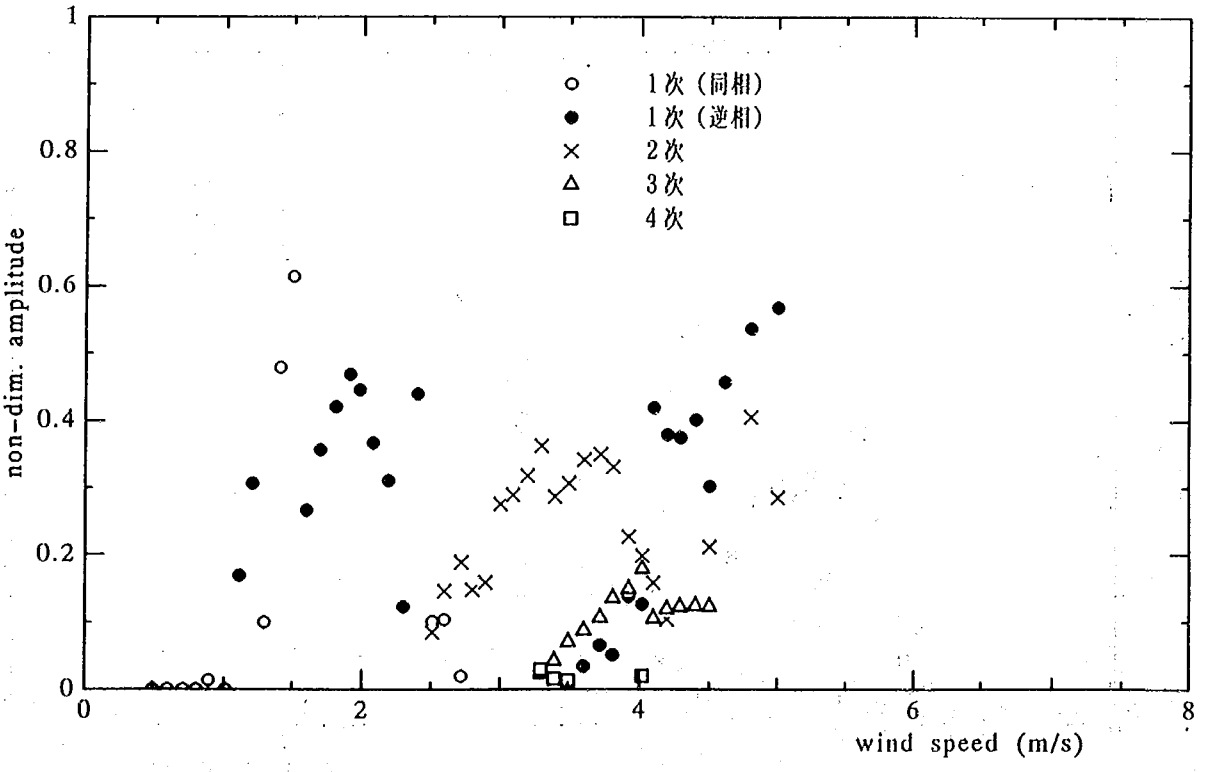


図-3.2.5.36　下流側ケーブル応答

（間隔＝４Ｄ，一様流，　ｆ１＝６．５Ｈｚ，　ｆ２＝６．５Ｈｚ）

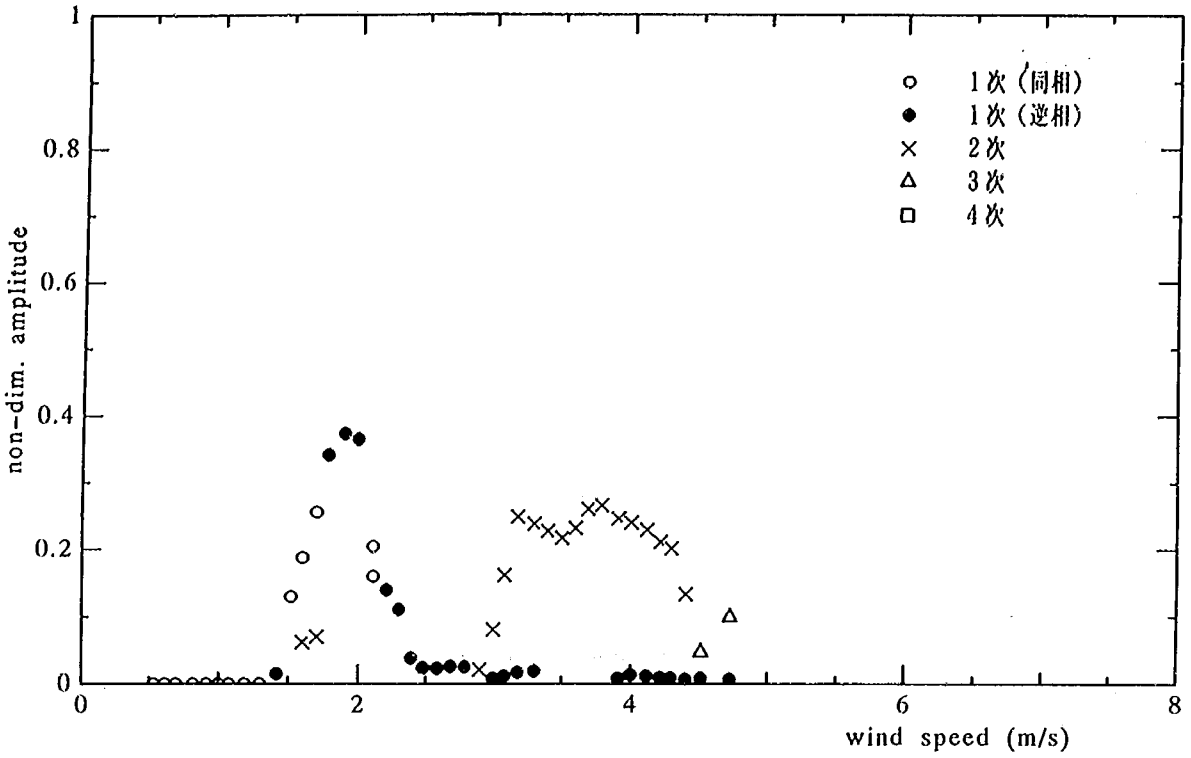


図-3.2.5.37　上流側ケーブル応答

（間隔＝4D，一様流，f1＝8.0Hz，f2＝8.0Hz）

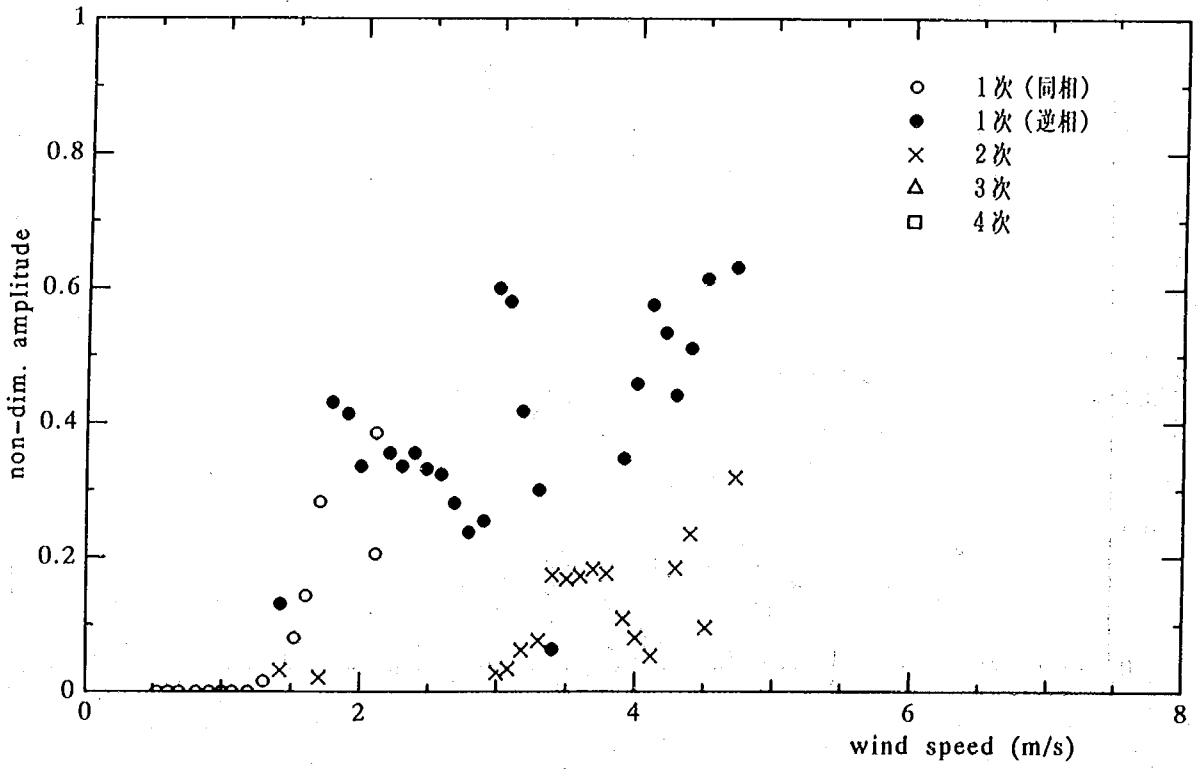


図-3.2.5.38　下流側ケーブル応答

（間隔＝4D，一様流，f1＝8.0Hz，f2＝8.0Hz）

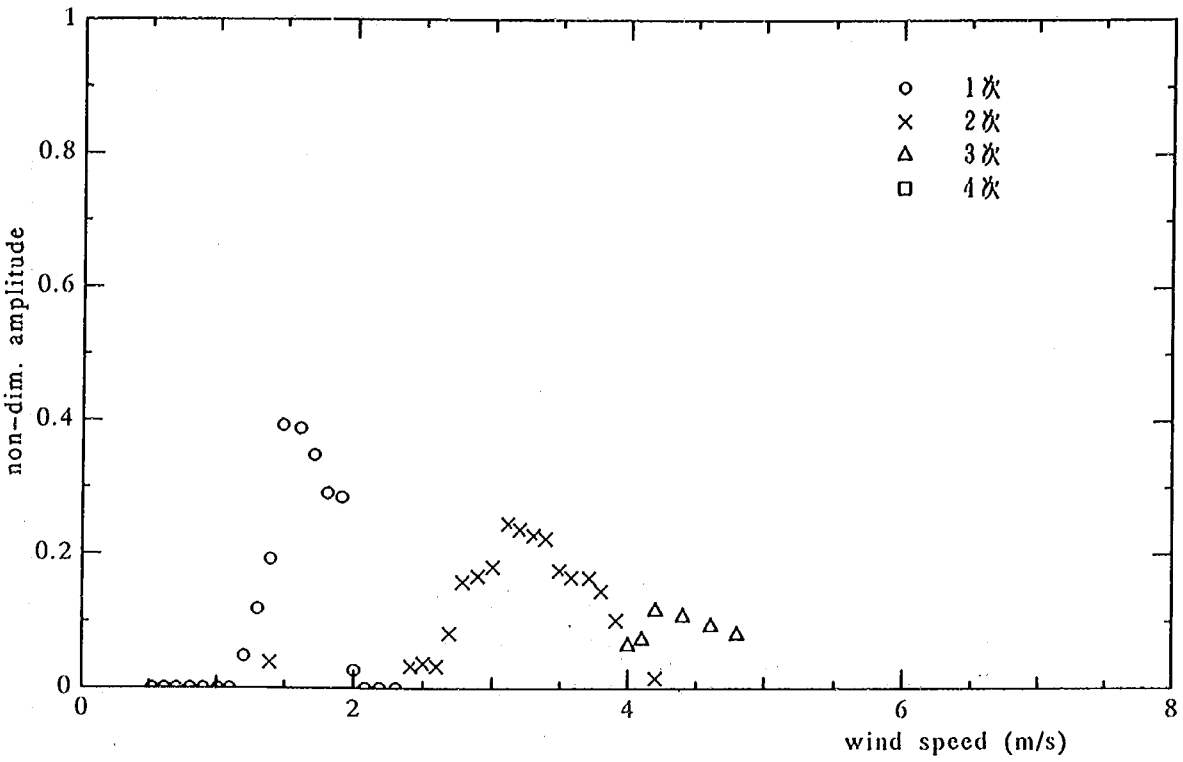


図-3.2.5.39　上流側ケーブル応答

（間隔＝４Ｄ，一様流，　ｆ１＝７．０Ｈｚ，　ｆ２＝５．０Ｈｚ）

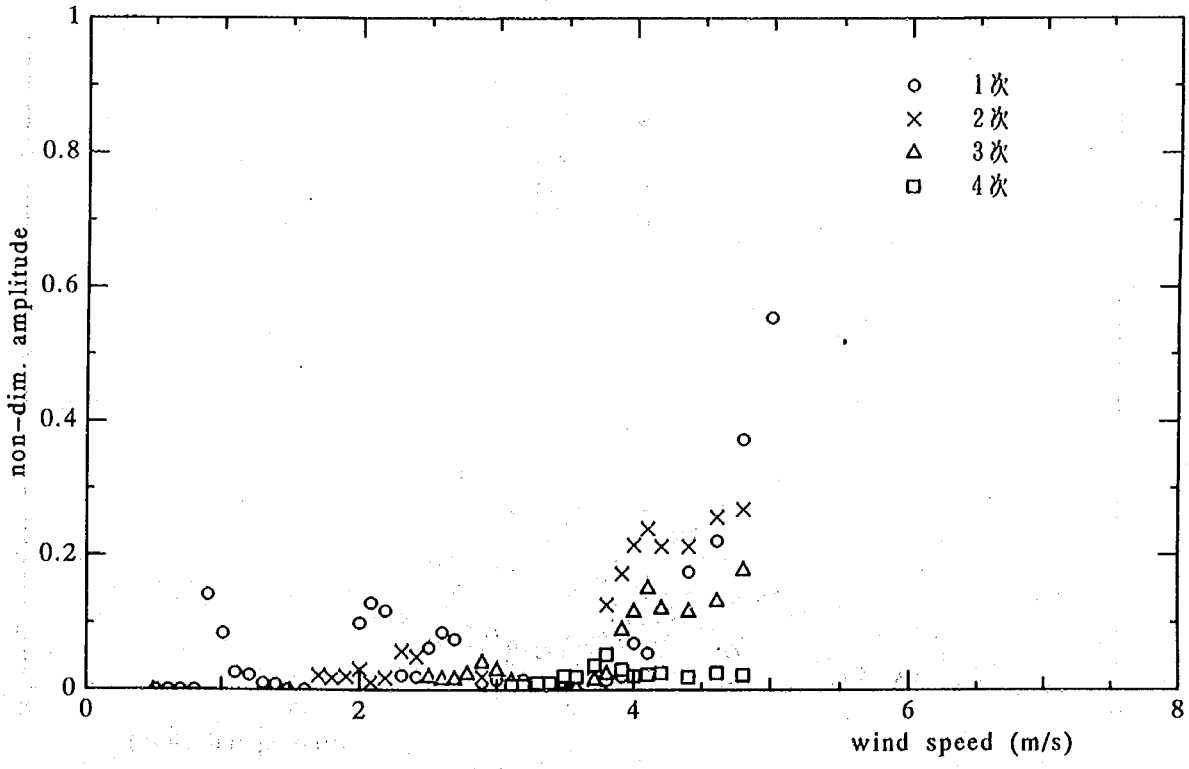


図-3.2.5.40　下流側ケーブル応答

（間隔＝４Ｄ，一様流，　ｆ１＝７．０Ｈｚ，　ｆ２＝５．０Ｈｚ）

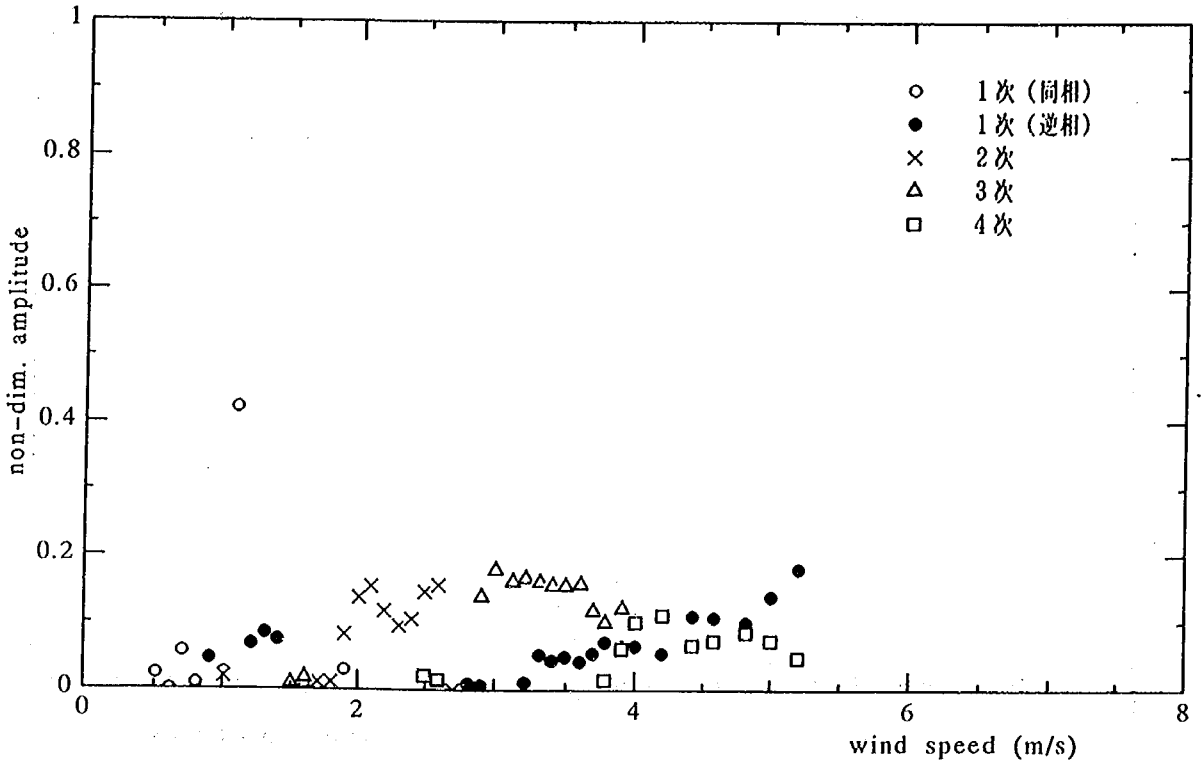


図-3.2.5.41　上流側ケーブル応答

（間隔＝4D，一様流，f1＝5.0Hz，f2＝5.0Hz，水平間隔拘束）

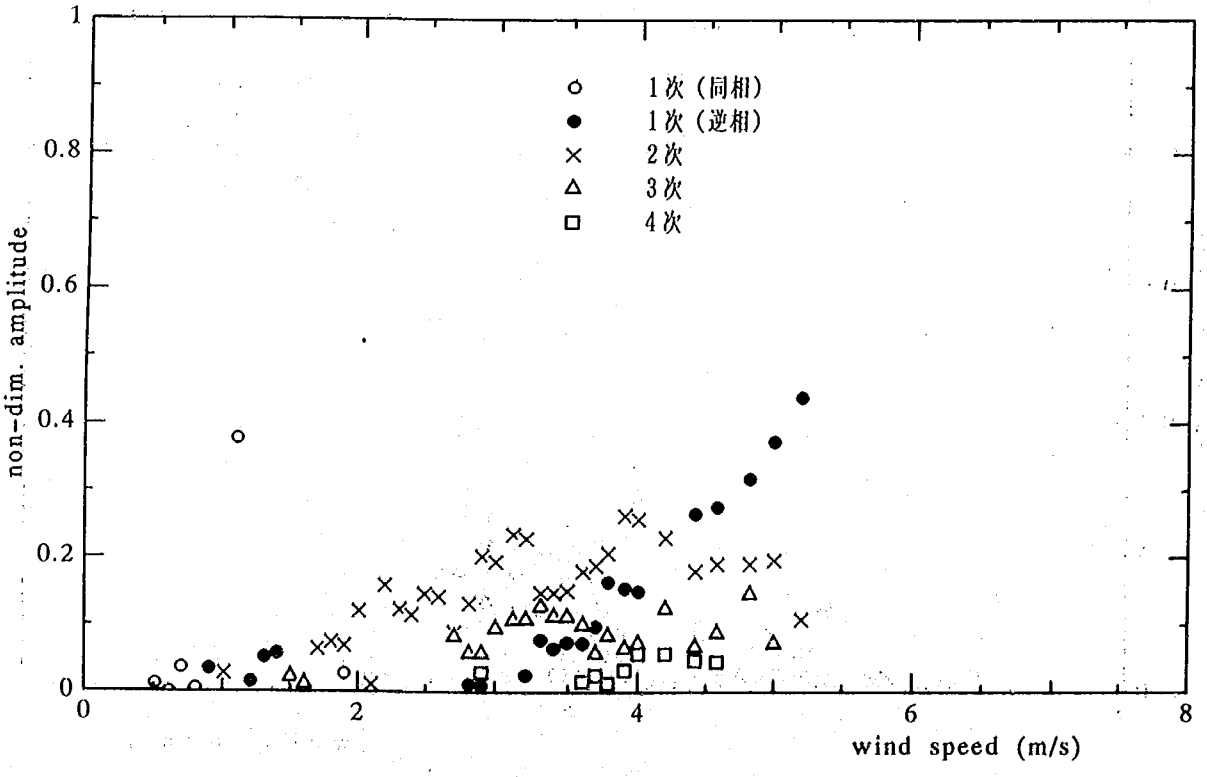


図-3.2.5.42　下流側ケーブル応答

（間隔＝4D，一様流，f1＝7.0Hz，f2＝5.0Hz，水平間隔拘束）

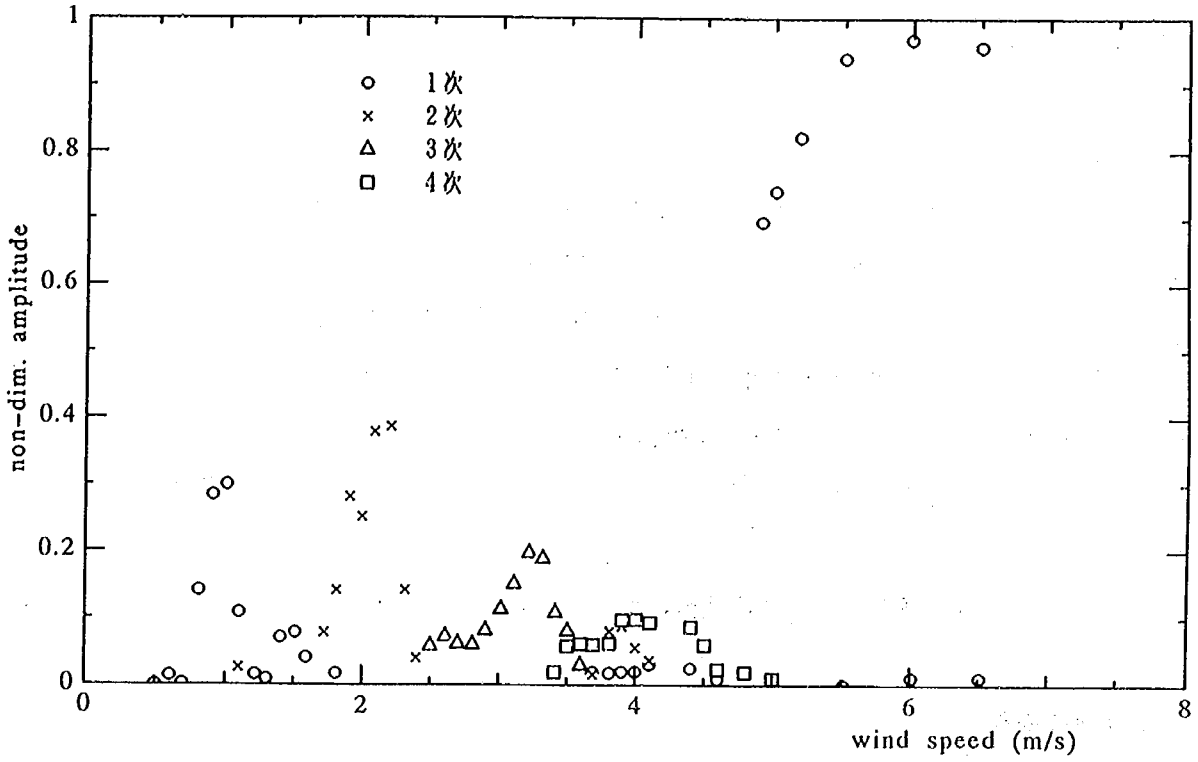


図-3.2.5.43　下流側ケーブル応答

（間隔＝４Ｄ，一様流，上流側拘束，ｆ１＝５．０Hz，）

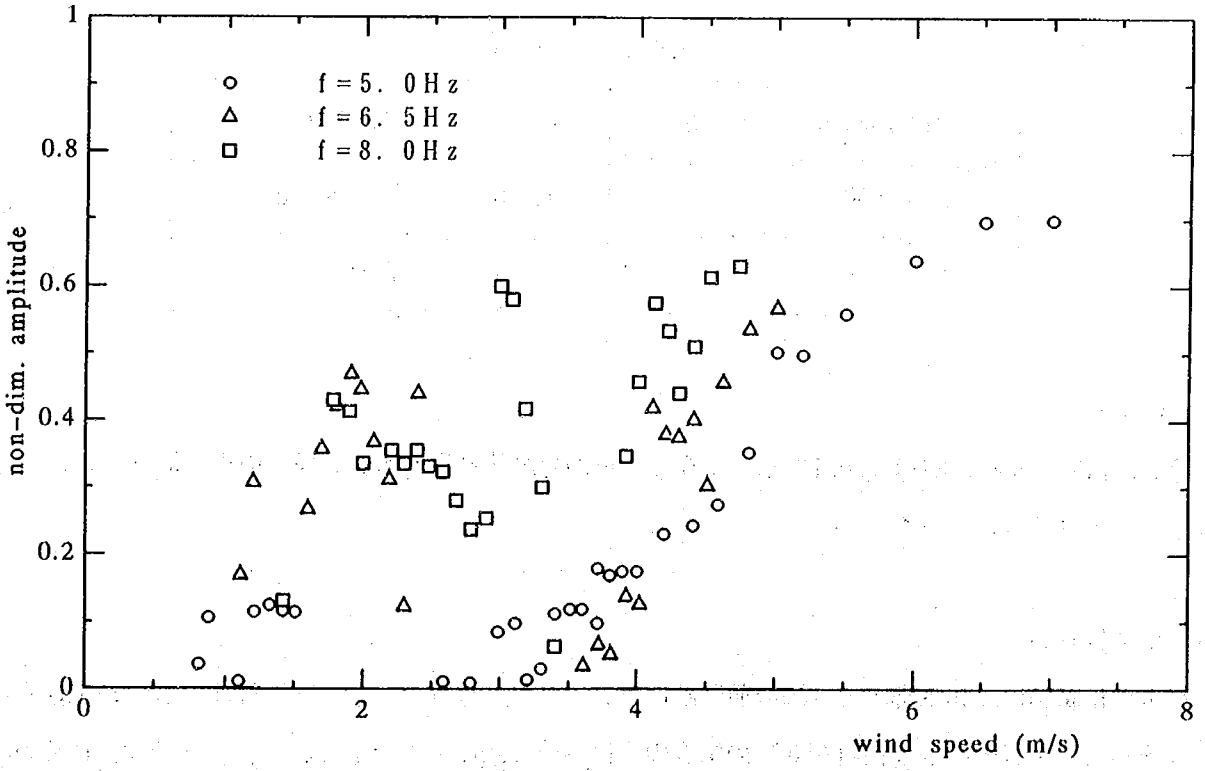


図-3.2.5.44　下流側ケーブル応答に対する振動数の影響

（間隔＝４Ｄ，一様流）

3.2.6 偏角の影響

(1) 試験概要

並列ケーブルのウェークギャロッピングに及ぼす風の水平偏角の影響を明らかにする目的で模型試験を実施している。風洞試験では並列ケーブルの２次元模型を用いて，模型中心における非定常圧力の計測を行った。これより，ケーブルに作用する非定常空気力を算定し比較を行った。

本年度は，最初に応答特性の概略を把握する目的でバネ支持試験を実施した。さらにこの結果を踏まえて非定常圧力試験を実施した。非定常圧力試験では，加振振幅が過小であったことなどの原因でウェークギャロッピングに対する水平偏角の影響について言及するに足る有効なデータを採取することができなかった。

ここでは，本年度に実施したバネ支持試験および非定常圧力試験の経緯および結果について述べる。

(2) 風洞試験要領

1)使用風洞

試験を行った風洞設備は石川島播磨重工業㈱の構造物安定性風洞である。その主要な仕様を表-3.2.6.1に示す。

表-3.2.6.1 風洞設備

測定部断面（幅×高さ）	１．５ × ２．５ｍ
風速範囲	０．５ ～ ２０ｍ／ｓ
型　　式	エッフェル型

2)使用模型

試験に用いた模型は図-3.2.6.1に示すような３種類の剛体模型である。尚，中央断面周りには24点の圧力測定孔が設けられている。

3)バネ支持試験

バネ支持試験は，非定常圧力計測の前段階にウェークギャロッピングの応答特性の概略を把握する目的で実施した。本試験は水平偏角が０°の場合のみについて試験を実施している。表-3.2.6.2にその試験条件を示す。なお，本試験では図-3.2.6.2に示すように上流側ケーブルを固定し，下流側ケーブルのみを鉛直１自由度系にバネ支持している。

表-3.2.6.2　試験条件

ケーブル径	D	200 mm
ケーブル間隔	S_h	2D，4D，6D
迎　角	α	0，10 deg.
水平偏角	β	0 deg.
振動数	f	1.10 Hz
風洞風速	V	0 ～ 15 m/s
ﾚｲﾉﾙｽﾞ数	R_e	0 ～ 2.0×10^5
無次元化風速	Vr	0 ～ 68
風洞閉塞率		8 %

S_h＝2D，α＝10deg.のケーブル配置については試験を実施していない。

4)非定常圧力計測試験

本試験では強制振動法を採用し，上流側のケーブルは固定，下流側のケーブルのみ鉛直方向に正弦的な強制変位を与え，非定常圧力の計測を行った。試験条件を表-3.2.6.3に示す。

表-3.2.6.3　試験条件

ケーブル径	D	200 mm
ケーブル間隔	S_h	2D，4D，6D
迎　角	α	0，10 deg.
水平偏角	β	0，30 deg.
振動数	f	1.0 Hz
加振振幅		0.25D
風洞風速	V	0 ～ 18 m/s
ﾚｲﾉﾙｽﾞ数	R_e	0 ～ 2.5×10^5
無次元化風速	Vr	0 ～ 90
風洞閉塞率		8 %

(3) 風洞試験結果

1)バネ支持試験結果

バネ支持試験は水平偏角$\beta = 0$ deg.のモデルで試験を行ったが，図-3.2.6.3に示すようにケーブル間隔$S_h = 4D$，迎角$\alpha = 10$deg.の状態においてのみ振動が発生し，それ以外のケースでは発散的な振動は発生しなかった。

$S_h = 4D$，$\alpha = 10$deg.における応答減衰，その生波形を図-3.2.6.4および図-3.2.6.5にそれぞれ示す。図に示した生波形は，同じ条件のもとで数回測定したものであり，発振状況の不規則性を示すものである。以上の条件で得られた振動の応答減衰は再現性がなく，ばらつきが大きいことが特徴である。

2)非定常圧力測定試験結果

計測した非定常圧力は断面周りに積分を施し非定常空気力とした。さらに，最終的には準定常的な空気力の表現に基づき，以下のように非定常空気力係数を定義し整理を行った。

$$L(t) = -\frac{1}{2}\rho D V^2 (C_{LR} + i C_{LI}) \frac{\eta_0}{D} e^{i\omega t}$$

ここで，
- $L(t)$: 非定常揚力
- C_{LR}, C_{LI} : 非定常空気力係数
- ρ : 空気密度
- D : ケーブル径
- V : 平均風速
- η_0 : 鉛直振幅
- ω : 角振動数

図-3.2.6.6に風速 vs. C_{LI}を示す。今回の計測結果からはギャロッピング空気力と見られるものは確認されず，その水平偏角の影響も明確にすることはできなかった。しかし，図よりケーブル間隔が大きくなる従って水平偏角の空気力へ及ぼす影響が小さくなっていく傾向が確認できる。

(4) 追加試験の予定

風洞試験で並列ケーブルの下流側ケーブル周りの非定常圧力の計測を行い，ウェークギャロッピングに及ぼす水平偏角の影響を評価することを試みた。しかし，加振無次元振幅（η/D）が小さいことなどの影響でこれらを評価するまでには至らなかった。今後，ケーブル径を小さくし（100mm），今回と同様の内容の非定常圧力の計測を予定している。

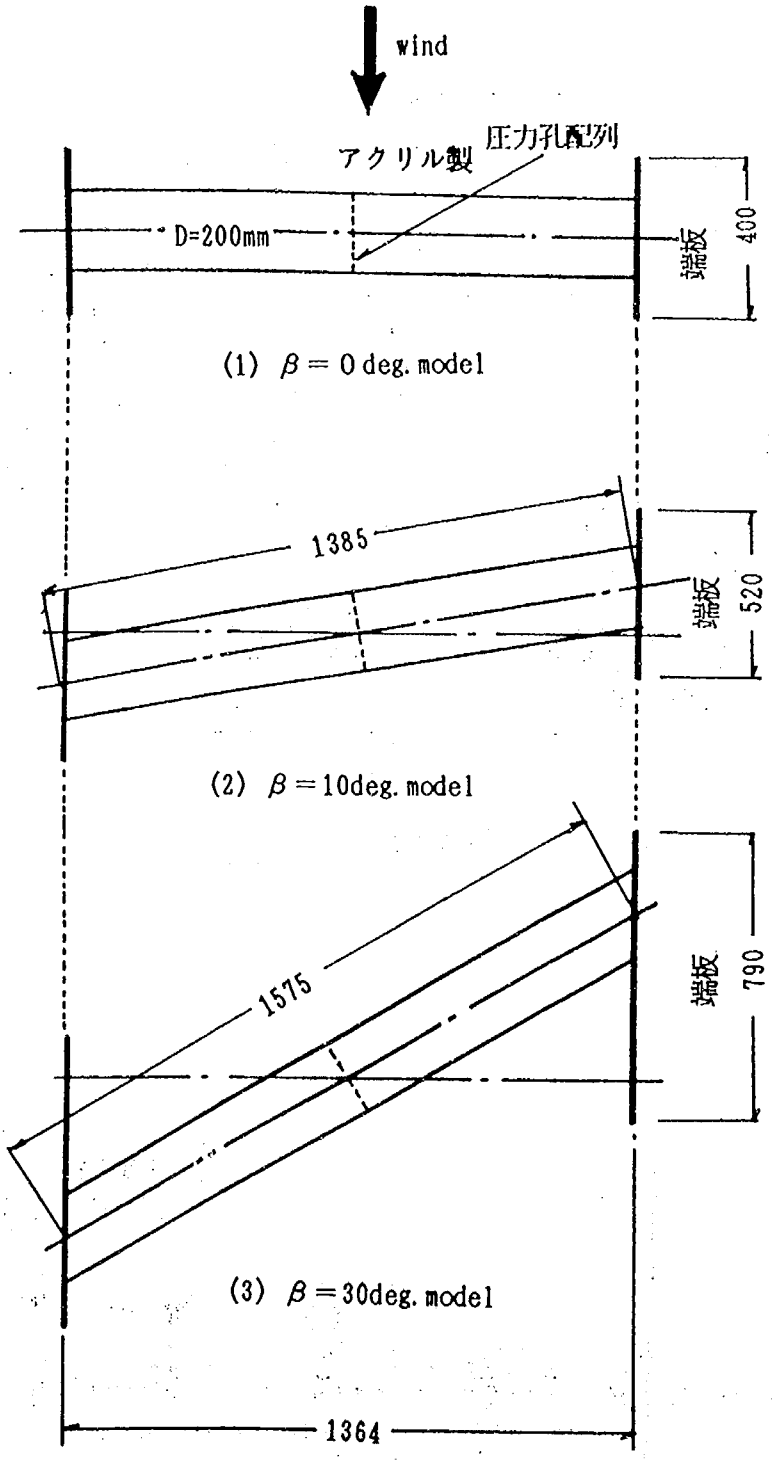

wind
アクリル製
圧力孔配列
D=200mm
端板
400
(1) β = 0 deg. model
1385
端板
520
(2) β = 10deg. model
1575
端板
790
(3) β = 30deg. model
1364

図-3.2.6.1　試験模型

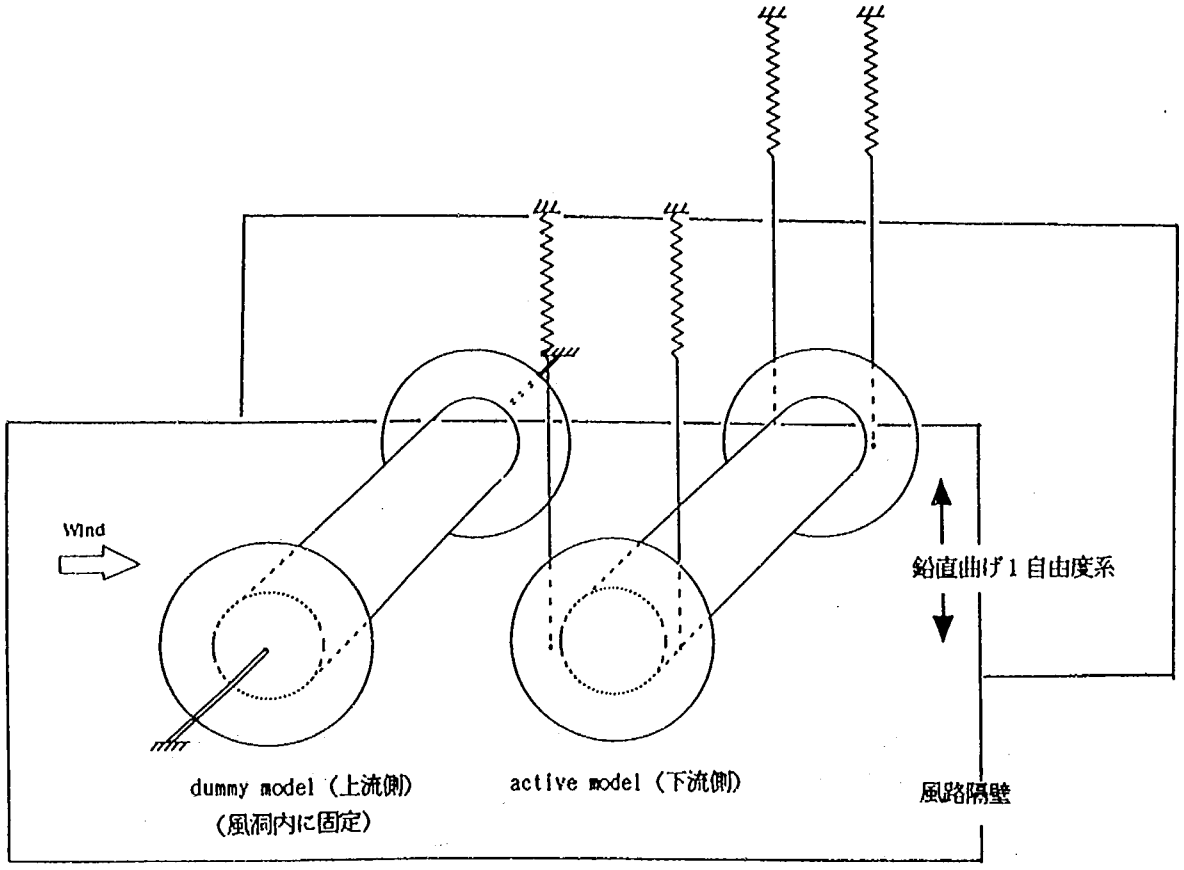


図-3.2.6.2　バネ支持系

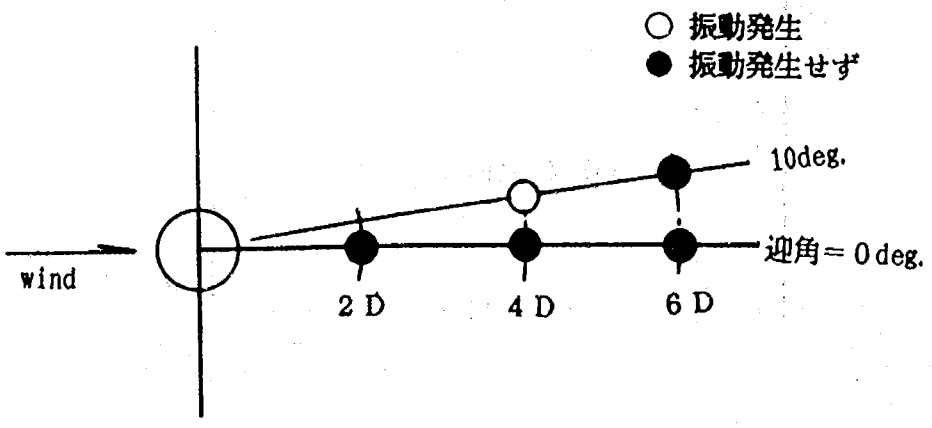
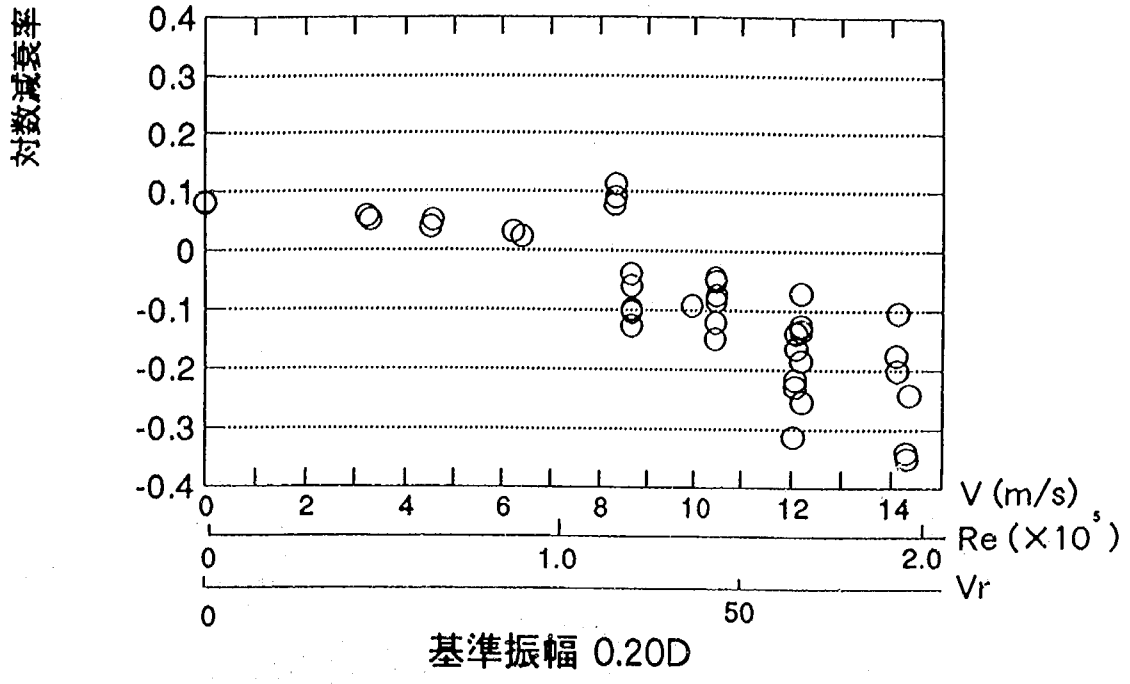


図-3.2.6.3　バネ支持試験結果

ケーブル径	200 ㎜
ケーブル間隔	4 D
仰　角	10 deg.
無風時対数減衰	0.08
振動数	1.1 Hz
模型重量	9.52 kg/m



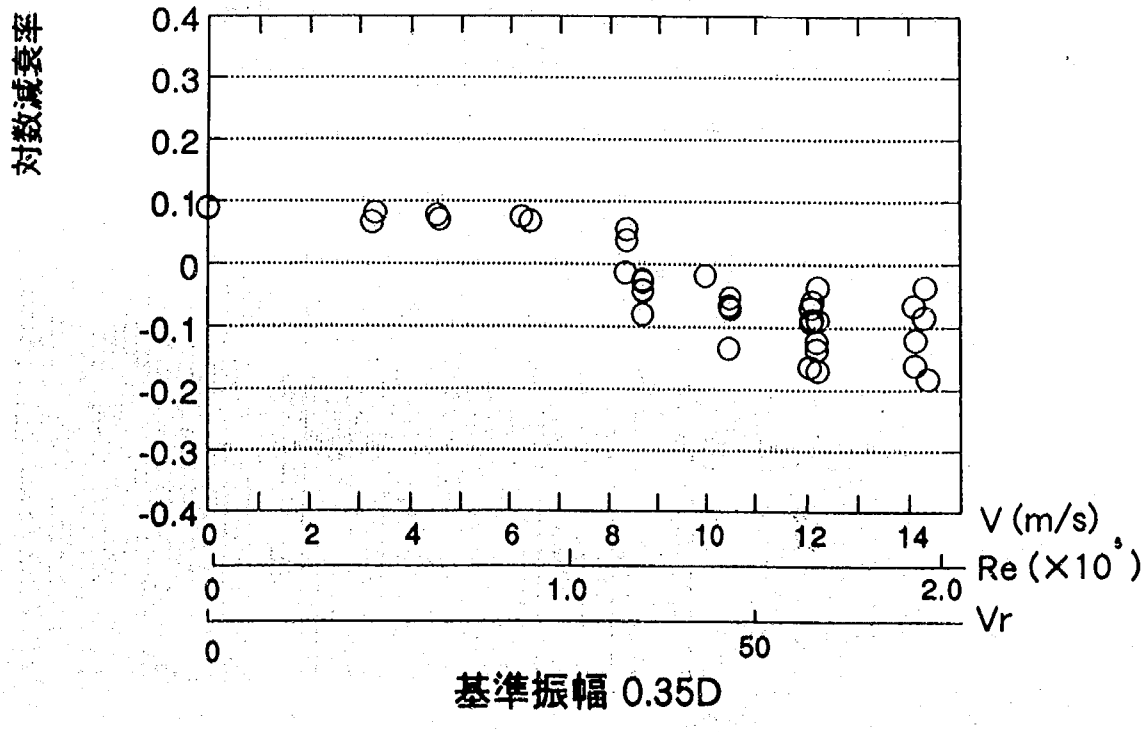


図-3.2.6.4　風速－応答減衰

ケーブル径	200 ㎜
ケーブル間隔	4 D
仰　角	10 deg.
無風時対数減衰	0.08
振動数	1.1 Hz
模型重量	9.52 kg/m

$V_r = 55$（風洞風速 12m/s）

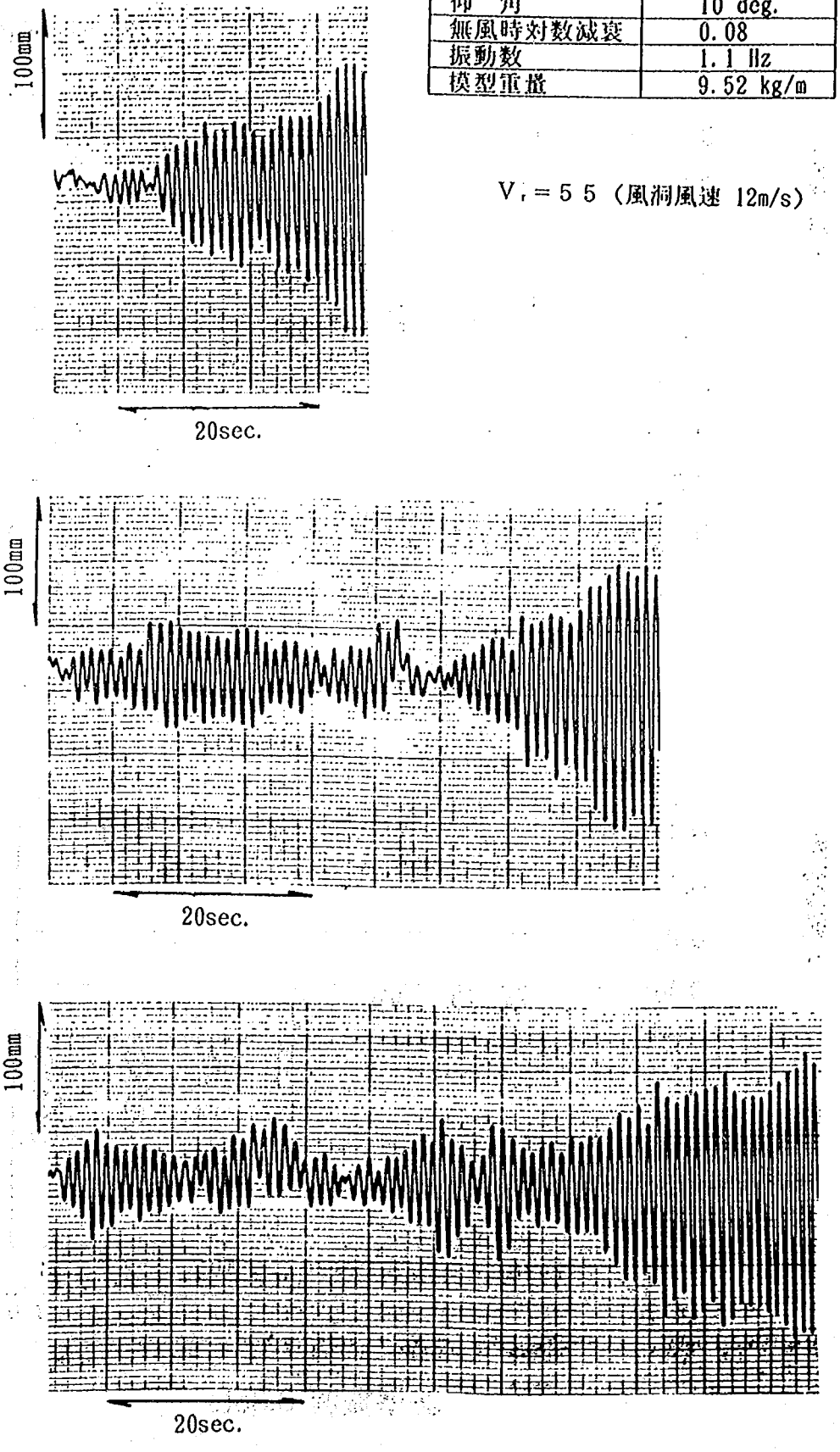
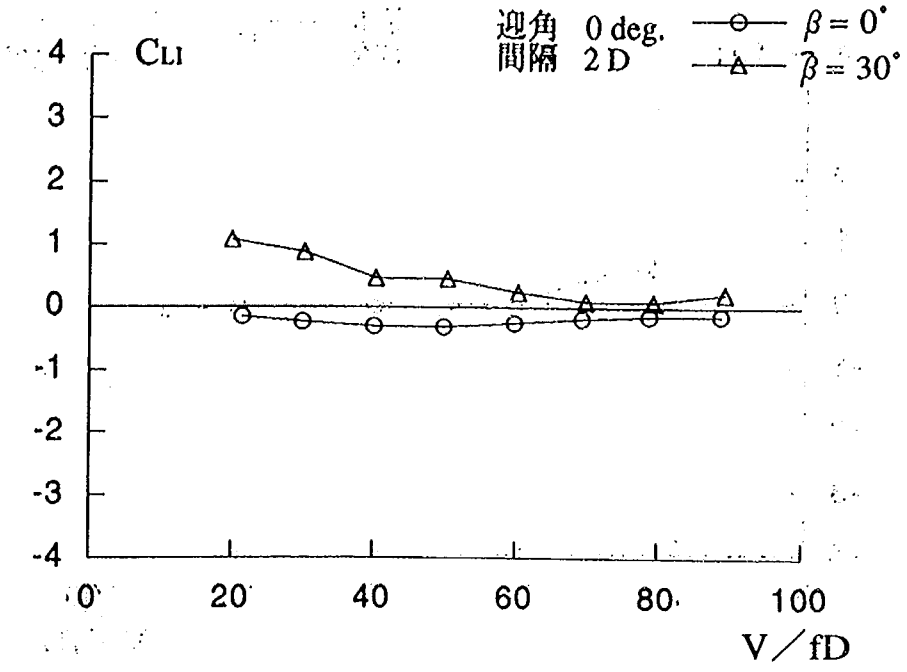
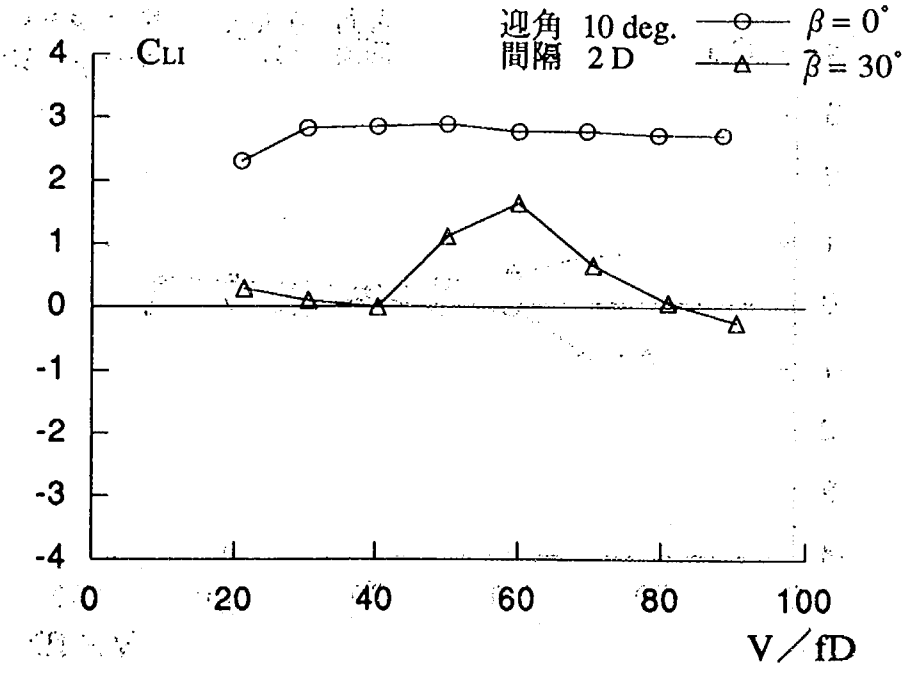


図-3.2.6.5　生波形

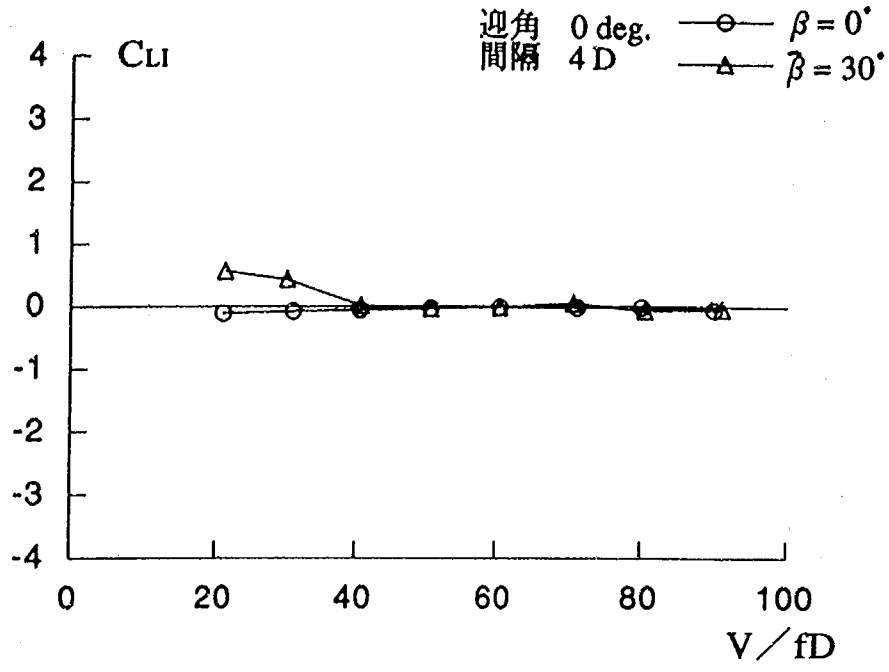


(a) α = 0 deg., S_h = 2 D

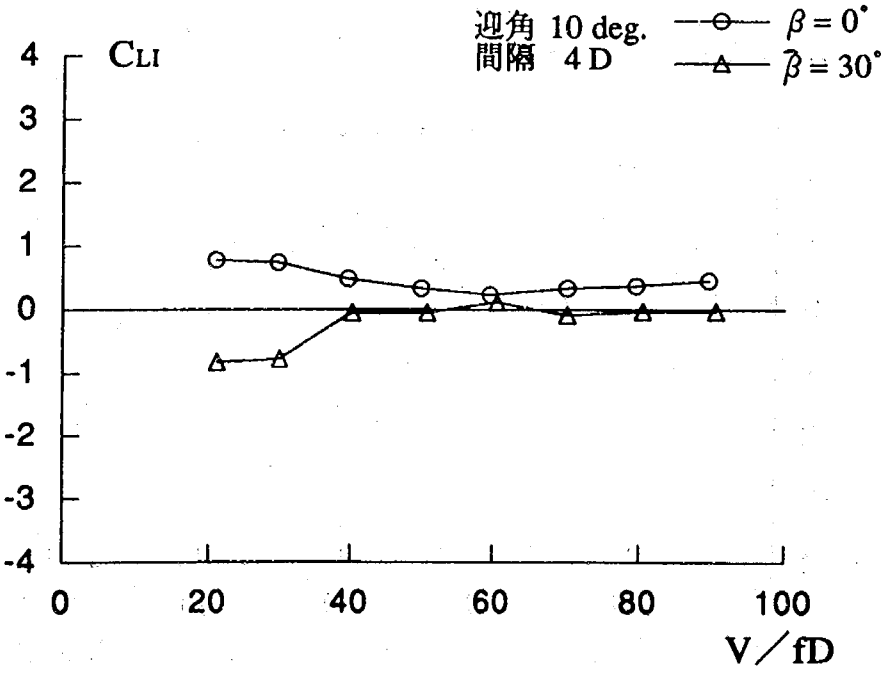


(b) α = 10deg., S_h = 2 D

図-3.2.6.6 非定常空気力係数 C_{LI}

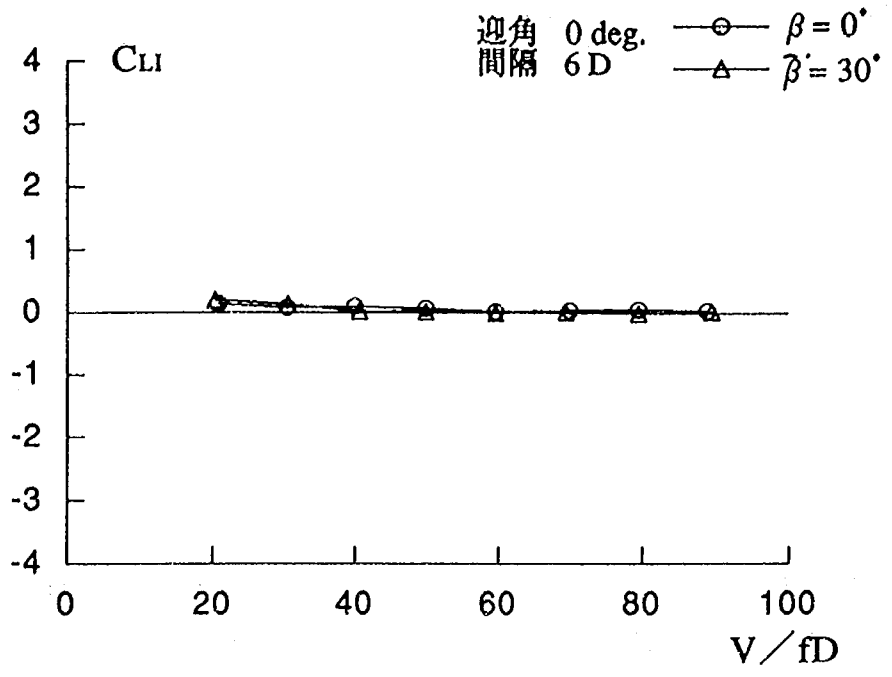


(c) α = 0 deg. , S_h = 4 D

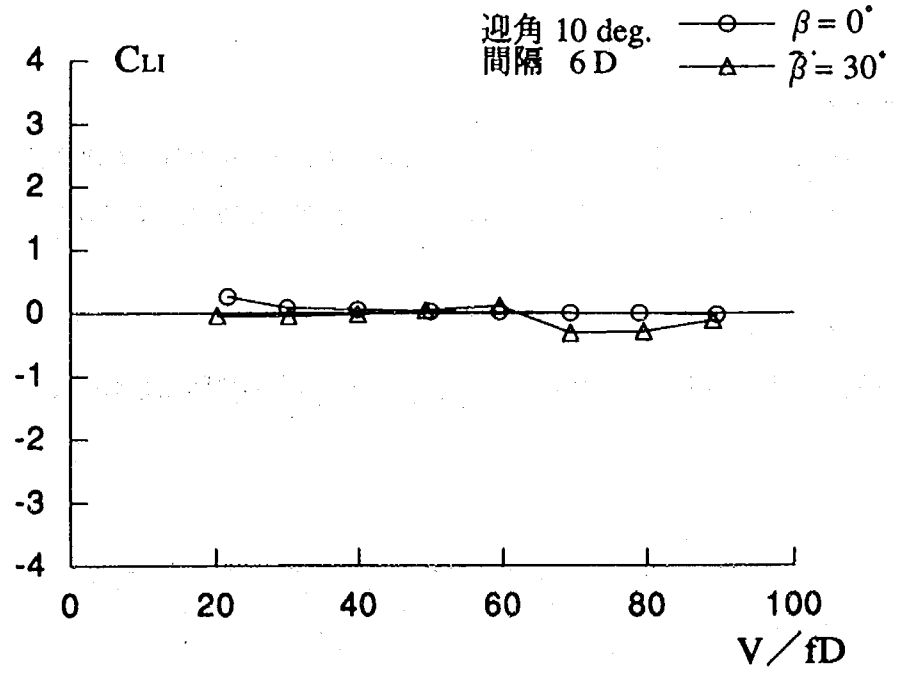


(d) α = 10deg. , S_h = 4 D

図-3.2.6.6 非定常空気力係数 C_{LI}



(e) α = 0 deg. , S_h = 6 D



(f) α = 10deg. , S_h = 6 D

図-3.2.6.6 非定常空気力係数 C_{LI}

3．3　制振手法の合理化に関する研究

3.3.1　実験目的

本実験では，(1) に示す様々な制振対策の効果について調査し，ウエイクギャロッピングに有効な制振対策を調べた。

(1)　調査項目

1)　スペーサーの効果

ワイヤーを付けずに，スペーサーだけを用いた場合について，スペーサーの間隔とウェークギャロッピングの発現風速及び最大振幅の関係を求めた。

2)　ワイヤーの効果

スペーサーとワイヤーを用いて，ワイヤーの連結方法の違い，他ケーブルの剛性・重量の影響，ワイヤー端部にダンパーを取り付けた場合の影響等について，ウェークギャロッピングの発現風速及び最大振幅の比較を行った。

3)　ダンパーの効果

スペーサーやワイヤーを取付けずに，ケーブル端部にダンパーを取付けた場合について，ケーブル系の減衰定数（ダンパーの減衰係数）とウェークギャロッピングの発現風速及び最大振幅の関係を求めた。

4)　新しい制振対策の効果

ケーブル間隔を拡大・縮小した場合の発現風速とケーブル間隔の関係を調べた。

(2) 検討方針

1) 検討フロー

本研究を進めるに当っては，図-3.3.1に示す検討フローに従って行うことを計画した。また，その時の基本的な考え方を以下に示す。

① 実験は，ケーブルの振動モードを考慮するために，全体弾性模型を用いて行った。

② ワイヤーの効果を調べる場合，他のケーブルの拘束効果を表わす必要があるので，ケーブルの段数は4段とした。また，実橋では，通常10段前後のケーブルが配置されているので，模型の4段目（最下段）のケーブルは，4段目以降のケーブル全体のたわみ及びねじれ剛性と同等の効果を表わせるようなものとした。

③ ワイヤーの効果を調べるに当っては，数値解析で平行型ワイヤーの場合とクロス型ワイヤーの場合の剛性比較を行い，両タイプについて実験を行った。

④ 前記の全体弾性模型の場合，縮尺率などの関係からケーブルの径は実物より小さくなるので，ウェイクギャロッピングの特徴をふまえた実験とはなっても，風による作用外力が実物と異なるので，空気力を直接に実橋のケーブルに適用するのは問題がある。そこで，弾性模型の作用外力と実物の作用外力の違いを把握し，前記の制振対策の効果を実橋レベルで評価できるように，弾性模型と同じ径のケーブルと実物と同じ径のケーブルについて，部分剛体模型を用いた風洞実験を行うことを計画した。

しかし，本共同研究で同様の実験が多数なされていることから，それらの実験結果をみてから部分剛体模型実験を行うかどうか判断することとした。

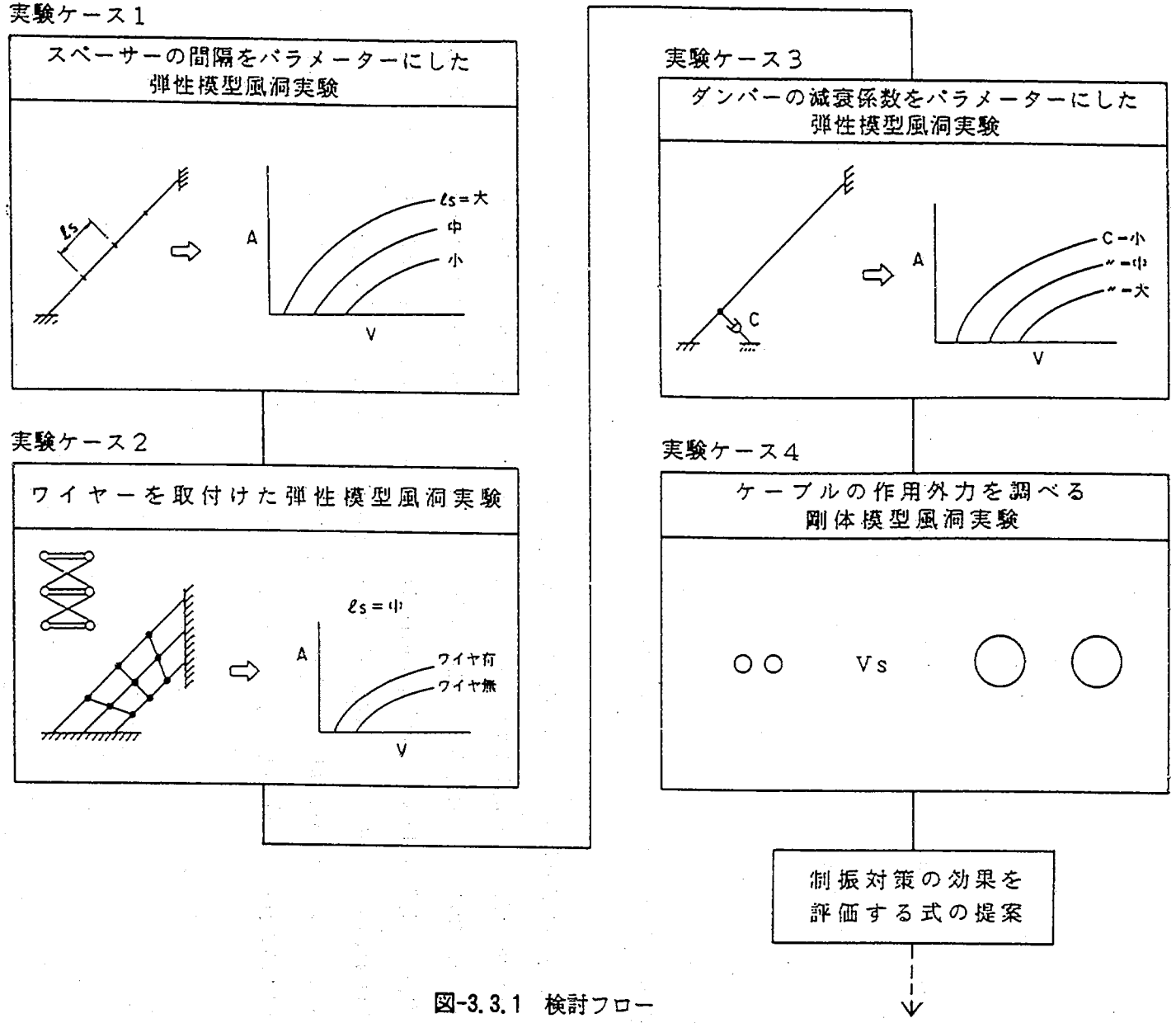

実験ケース１
スペーサーの間隔をパラメーターにした
弾性模型風洞実験
ℓs
A
ℓs＝大
中
小
V
実験ケース２
ワイヤーを取付けた弾性模型風洞実験
ℓs＝中
A
ワイヤ有
ワイヤ無
V
実験ケース３
ダンパーの減衰係数をパラメーターにした
弾性模型風洞実験
C
A
C－小
〃－中
〃－大
V
実験ケース４
ケーブルの作用外力を調べる
剛体模型風洞実験
Vs
制振対策の効果を
評価する式の提案

図-3.3.1　検討フロー

3.3.2 実験方法

(1) 実験場所と風洞

実験に用いた風洞の主要諸元を表-3.3.1に，平面図を図-3.3.2に示す。

実験場所……建設省土木研究所耐風工学実験施設

(2) 実験条件と模型諸元

おもな実験条件及び模型諸元を表-3.3.2に示す。

1)実験条件

弾性模型実験ではウェークギャロッピング振動そのものの特性を調べるのではなく，ウェークギャロッピングに対する制振対策の効果を調べることを主目的とするために，既往の実験例を参考にして，できるだけウェークギャロッピングが顕著に発生する条件下で実験を行うようにした。

2)全体弾性模型

全体弾性模型の全体構造を図-3.3.3～3.3.4 に，詳細構造を図-3.3.5～3.3.8 に示す。対象とした実ケーブルはポリエチレン被覆されたケーブル径75mm，ケーブル長100m級実橋ケーブルで，ケーブル径と長さの比ができるだけ実橋に近づくように，風洞内においてケーブル長をできるだけ長くとった。上3段のケーブルは，振動モード，ケーブルのたわみ性を考慮するために剛性材として直径2mmのステンレス鋼（より線ワイヤー）を芯にした。またレイノルズ数を実橋ケーブルと同じ亜臨海領域とするために，より線ワイヤーの周りには直径20mmのアクリル円柱を取り付けた。ただしアクリル円柱は，ケーブルの剛性には寄与させないためにセグメントとした。そして，スペーサーを7個取り付けサブスパンが最小スパン(720mm) となった時，そのサブスパンに生じた振動の1次モード形状が表せるように，セグメントの長さはサブスパン長の1/6 の 120mmとした。質量パラメータを合わせるため，アクリル円柱内に取り付けた鉛片で質量を調節した。また，ケーブル端部はケーブルの張力を調整できる構造とした。4段目のケーブルは，実橋の4段目以降の多数のケーブルのたわみ及びねじれ剛性を表わすような構造とした。

表-3.3.1　風洞の主要諸元

風洞名		フラッター風洞
風洞形式		ゲッチンゲン型
測定胴	幅	2,500mm
	高	4,000mm
	長	10,000mm
風路全長		115m
送風機	動翼直径	4,000mm
	有効全圧	40.0mmAq
	風量	242.0m³/sec
	回転数	400.0rpm
	容量	250.0KW
気流	風速	1.0～25.0m/sec
	乱れ率	0.5%

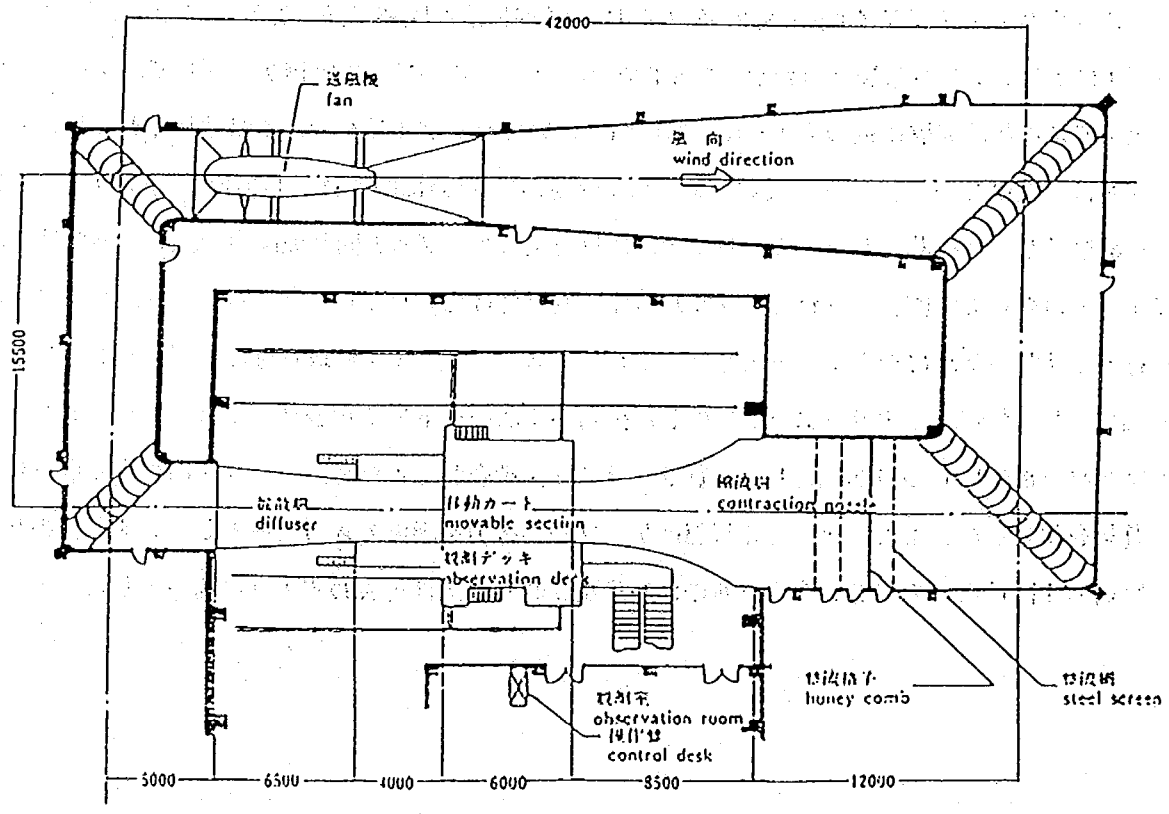


図-3.3.2　フラッター風洞平面図

表-3.3.2　全体弾性模型諸元と実験条件

項　　目	条　　件	備　　考
水平偏角	0° すなわちケーブルに直角入射	
ケーブル間　　隔	ケーブル径の3倍（3D）	
風速	一様流	
風洞速度　　(m/s)	0～22	実橋風速0～44 (m/sec)
ケーブル径　　(mm)	20	想定実橋　75．5
ケーブル長　　(m)	4．212	想定実橋　100
単位長重量　　(kgf/m)	0．775	
たわみ1次振動数　(Hz)	3．2	
レイノルズ数*　　$\times 10^4$	1．46	実橋22．7

レイノルズ数は次式を用いて求めた

$$Re = VD/\nu$$

$$\nu = 1.46 \times 10^{-5} m^2/sec$$

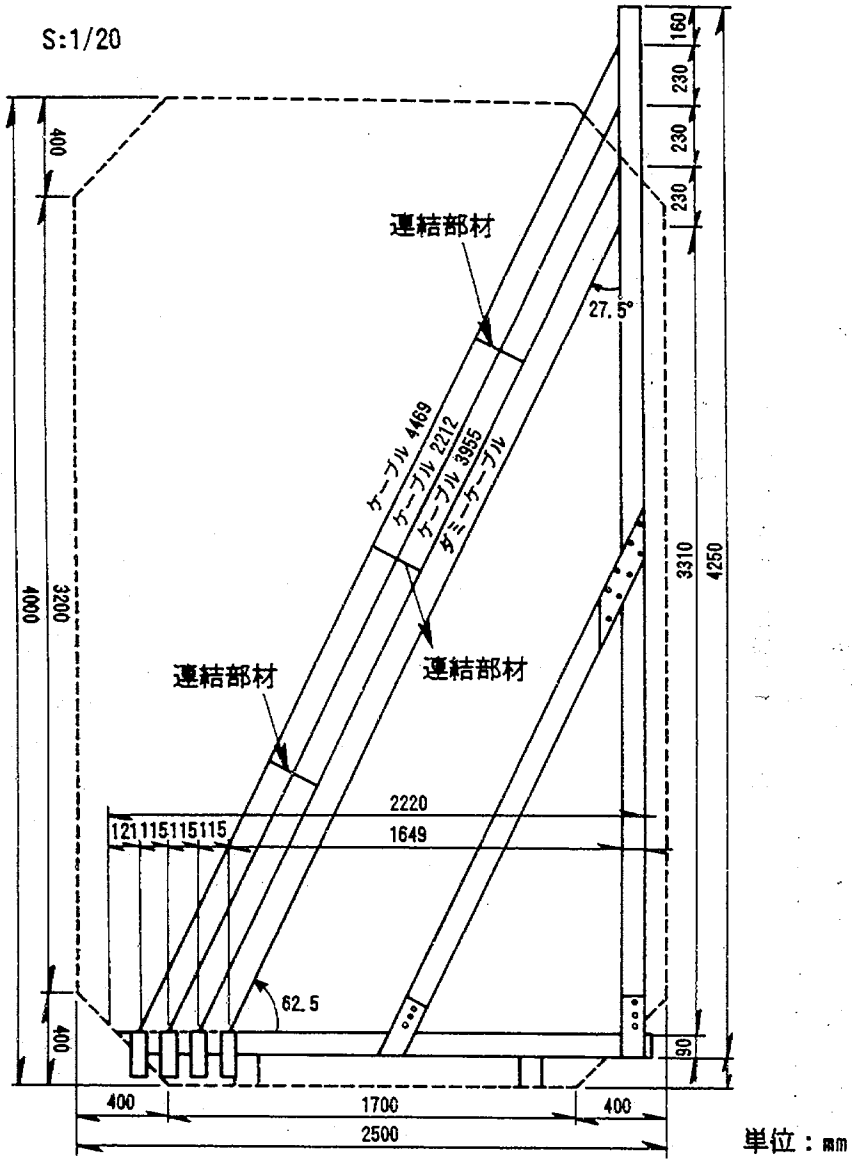


図-3.3.3　風洞断面とケーブル模型

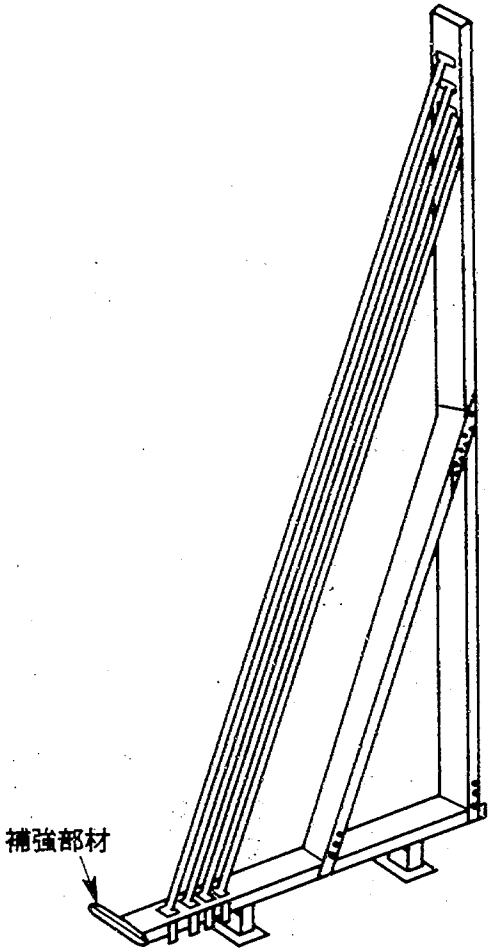
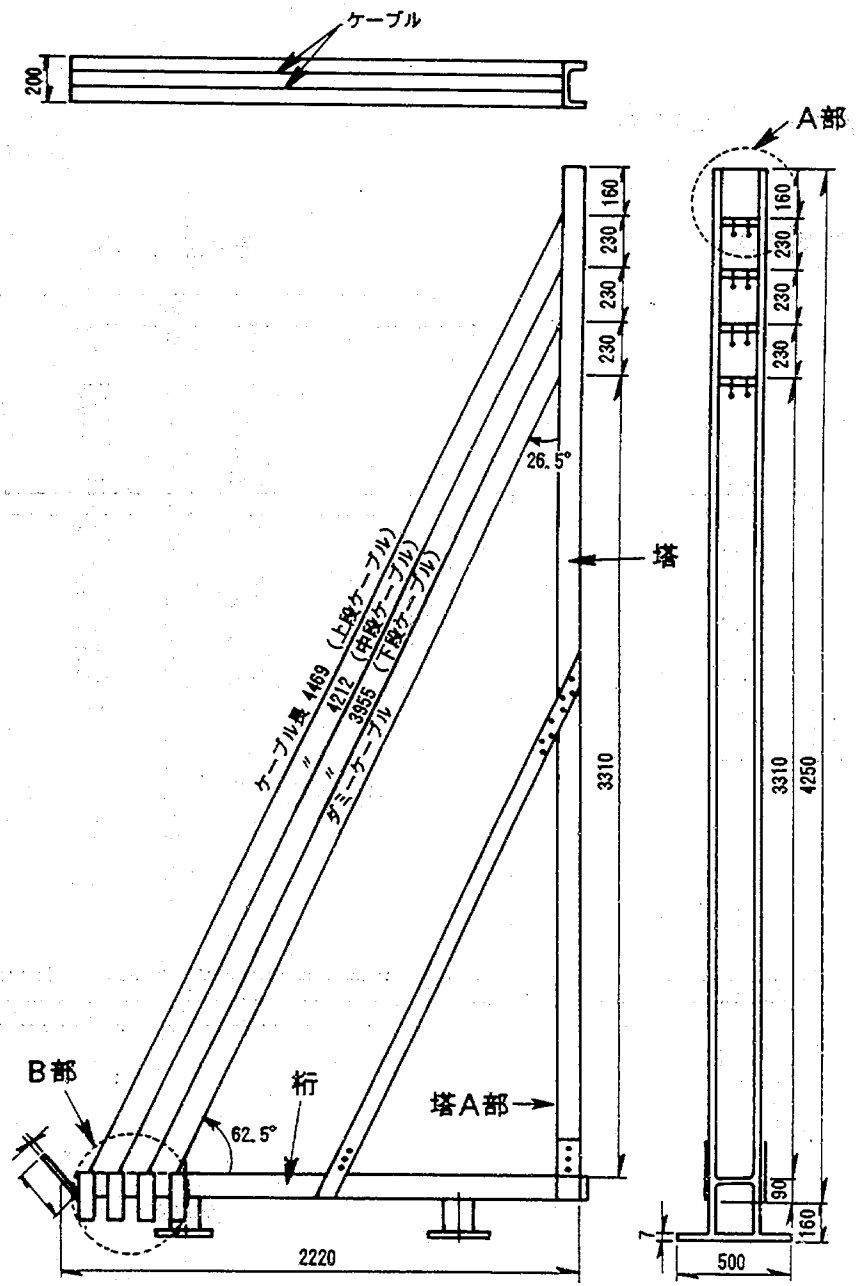
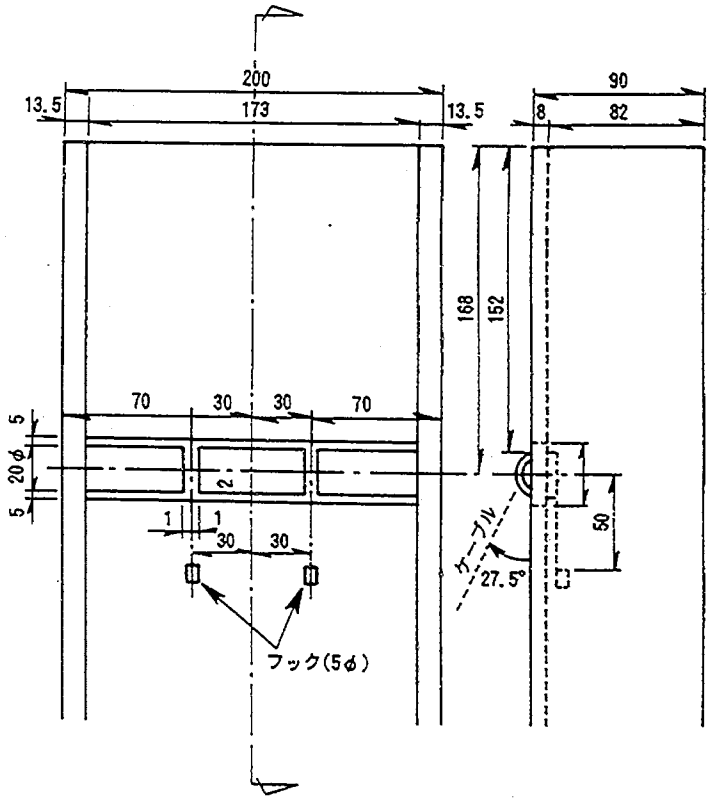


図-3.3.4　全体模型全体図

S:1/20



S:1/1.5

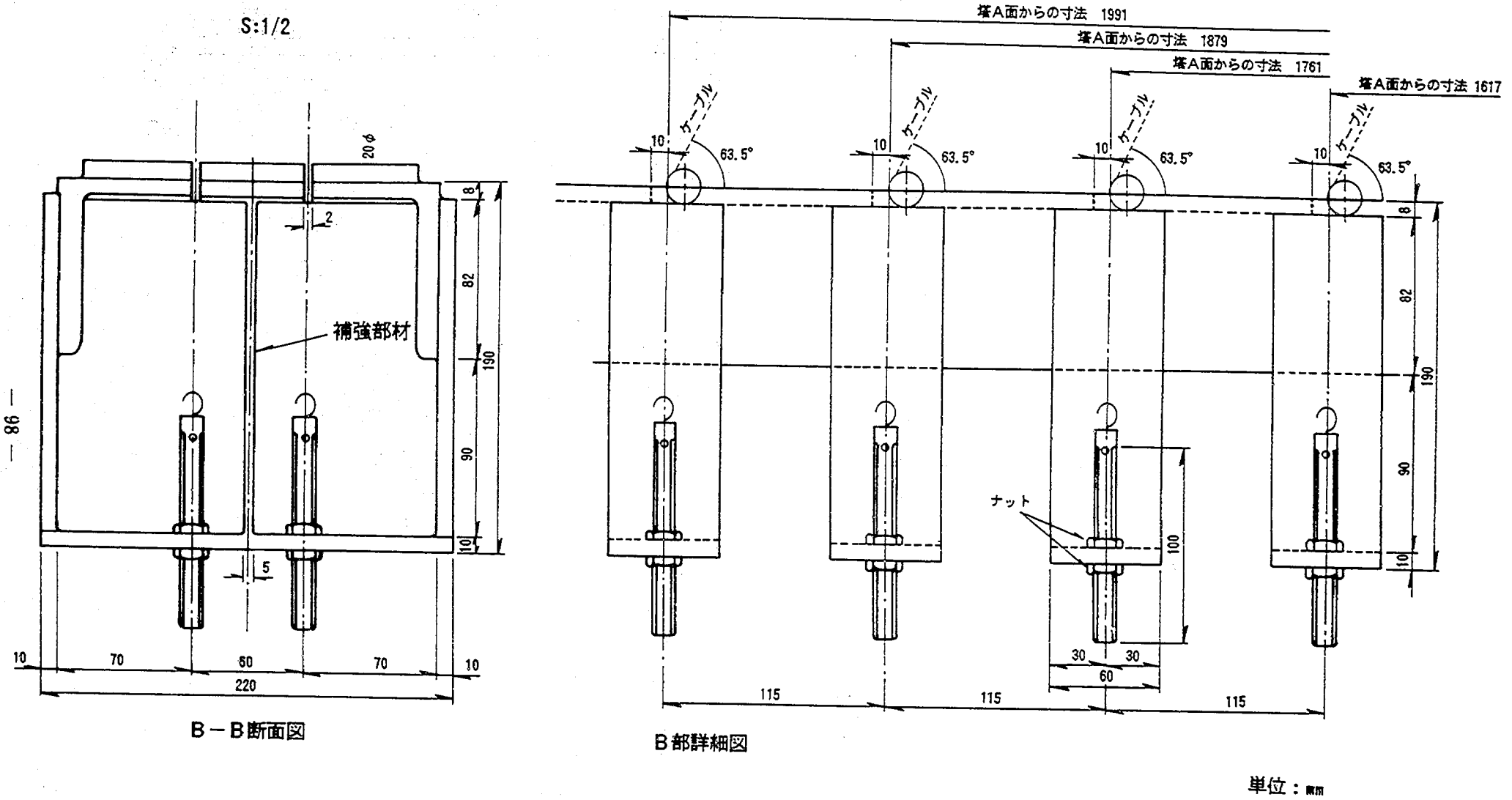


A部詳細図

模型治具

単位：mm

図-3.3.5



図－3.3.6　ケーブルの碇着

S:1/15

ケーブル	全長 (m)	支点間長 (m)	セグメント数	セグメント重量	製作本数
上　段	5,469	4,469	35×2＝70	93gr／セグメント	2
中　段	5,212	4,212	34×2＝68		2
下　段	4,955	3,755	31×2＝62		2

1．連絡部材は、ヨリ線ワイヤーに固定し、各ケーブルに対して直角に取付ける。
2．ケーブル両端のむすびは現地合せ。

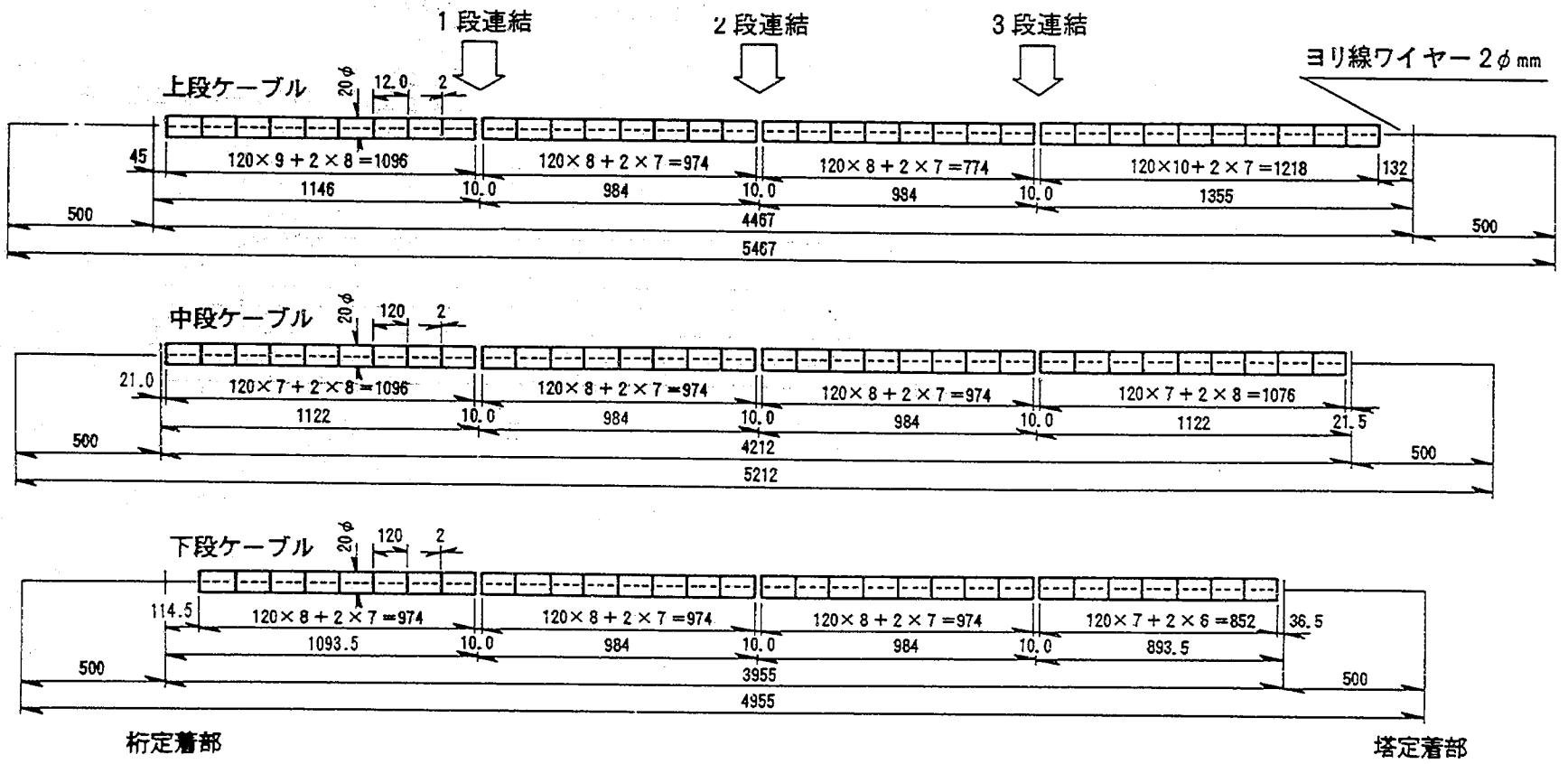
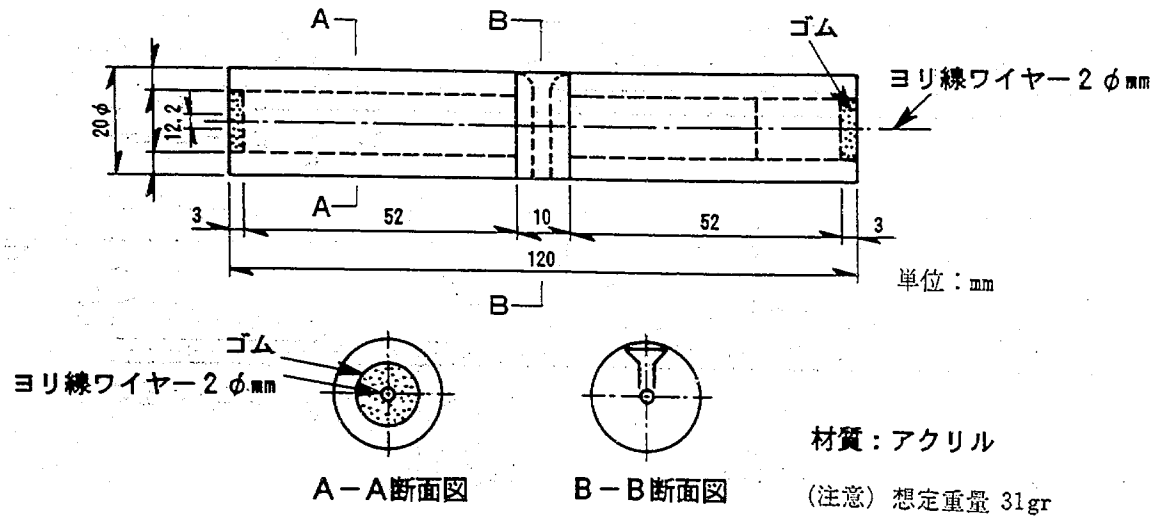


図-3.3.7　ケーブル模型

単位：mm

S:1/1



材質：アクリル

（注意）想定重量 31gr

ケーブル径（実桁）75.5φmm

（模型）20.0φmm

$n = \frac{75.5}{20.0} = 3.775$

$w = 11.05(\mathrm{kgf/m}) \times \left(\frac{1}{3.775}\right)^2$

$= 0.775\,\mathrm{kgf/m}$

$= 775\,\mathrm{grf/m}$

$= 7.75\,\mathrm{grf/cm}$

セグメント重量 $= 7.75 \times 12\mathrm{cm} = 93\mathrm{gr}$

図-3.3.8　質量調整材詳細

(3) 実験ケース

全体弾性模型実験

全体弾性模型を用いた実験ケースを表-3.3.3に示す。

実験は初期撹乱として僅かに加振させるが，0発振や加振減衰の実験は実施しなかった。また空気力の測定も行わなかった。

各実験ケースにおける目的と内容を以下に示す。

1) シングルケーブルの挙動

目的：シングルケーブルの挙動を調査する

内容：ケーブル1本だけを設置した時の風速と応答の関係を計測した

2) 無対策ケーブルの挙動

目的：空気力の評価のために無対策時の挙動を調査する。

内容：3段のケーブル全てについて風速と応答の関係を計測した。

3) スペーサーの制振効果及び連結効果

目的：スペーサー及び連結の効果を明らかにする。

内容：中段ケーブルに着目し，スペーサー設置時の対風応答特性を調べた。

4) スペーサーとワイヤーでケーブル同士を連結

現在実橋で実際に用いられている制振ワイヤーの効果を風洞実験で確認するとともに，制振ワイヤーでケーブル同士を連結するときの連結方法の違いや，連結することによって剛性や重量などの他ケーブルの影響がどの程度かを調べた。またどの程度の減衰を付加させると振動モードが全体1次モードからサブスパンへ移行するかについても調べた

①連結方法の影響

目的：平行連結，クロス連結，ワイヤーの張力の有無などワイヤーの連結方法による違いを調査する

内容：それぞれの場合について風速と応答の関係，発現風速を調べた

②剛性の影響

目的：他ケーブルの剛性の影響を調べる

内容：4段目のステイケーブルの張力を変え発現風速を調べた。

③重量の影響

目的：他ケーブルの重量の影響について調べる

内容：ステイケーブルに重量を付加させ発現風速を調べた。

④ダンパーの影響

目的：ワイヤーに減衰を付加させた場合の影響について調べる

内容：ワイヤーに電磁ダンパーや高減衰ゴム等で減衰を付加させたときの発現風速を調べた。

5) 構造減衰の影響

目的：固有モード解析と実験における減衰の付加効果の関係，減衰が付加された場合の対風応答挙動と，無対策時の空気力から推定される挙動との関係を調査する。

内容：２種類の構造減衰に関し主に対風応答を計測した。

ダンパーを取付ける位置は，考慮する振動次数の各モードに対して，複素固有値解析で求めた最適解 X_0 の０．５～１．５の範囲とした。

6) 振動数の影響

内容：無次元風速が一定かどうか調べる

内容：ケーブルの張力を変え振動数と発現風速の関係を調べた。着目ケーブルは下段ケーブルとした。

7) 新しい制振装置の効果

目的：スペーサー等によるケーブル間隔変化の影響について調べる。

内容：ケーブル間隔を変化させ，ケーブル間隔と発現風速の関係について調べた。着目ケーブルは中段ケーブルとした。

表-3.3.3　全体弾性模型を用いた実験ケース

CASE		対数減衰率	1次振動数 (Hz)	備考 (括弧内のケーブルは実験に用いたケーブルを示す)
全体弾性模型	1	0.002	3.3	シングルケーブル (中段ケーブル)
	2	0.003	3.,3.2,3.4	制振対策なし：振動数は左から順に上中下段
	3 a	0.003	3.2	ｽﾍﾟｰｻｰ1 (中段ケーブル)
	3 b	0.003	3.3	ｽﾍﾟｰｻｰ3 (中段ケーブル)
	3 c	0.003	3.4	ｽﾍﾟｰｻｰ7 (中段ケーブル)
	4 a	———	3.2	クロス連結張力有り
	4 b	0.049	3.5	平行連結　張力有り
	4 c	0.054	3.3	平行連結　張力無し
	4 d	0.014	9.6～14.6	平行連結　ワイヤーを架台に固定：減衰・振動数はｻﾌｽﾊﾟﾝ
	4 f	0.0073	————	平行連結　ワイヤー端部にダンパー設置
	4 g	———	————	平行連結　ステイ張力290kgf
	4 h	———	3.2	平行連結　ステイに付加重量 5.3kgf
	4 i	———	4.5	平行連結　ステイに付加重量 9.8kgf
	5 a	0.035	3.3	ﾀﾞﾝﾊﾟｰ；無風時減衰計測 (中段ケーブル)
	5 b	0.076	3.3	ﾀﾞﾝﾊﾟｰ (中段ケーブル)
	5 c	0.120	3.3	ﾀﾞﾝﾊﾟｰ (中段ケーブル)
	6 a	0.0021	3.4	ケーブル張力 58(kg) (下段ケーブル)
	6 b	0.0017	4.5	ケーブル張力113(kg) (下段ケーブル)
	6 c	———	5.5	ケーブル張力150(kg) (下段ケーブル)
	6 d	0.0014	6.3	ケーブル張力199(kg) (下段ケーブル)
	6 e	0.0016	4.4	ケーブル張力108(kg) (中段ケーブル)
	7 a	0.0021	3.4	ケーブル間隔 1.0D (中段ケーブル)
	7 b	0.0024	3.3～3.4	ケーブル間隔 1.1D (中段ケーブル)
	7 c	———	————	ケーブル間隔 1.5D (中段ケーブル)
	7 d	0.1006	3.45	ケーブル間隔 2.0D (中段ケーブル)
	7 e	0.0022	3.2	ケーブル間隔 4.0D (中段ケーブル)
	7 f	0.0019	3.2	ケーブル間隔 5.0D ピアノ線で拡張 (中段ケーブル)
	7 g	0.0025	3.2	ケーブル間隔 5.0D スペーサーで拡張 (中段ケーブル)
	7 h	0.0020	3.2	ケーブル間隔 6.0D ピアノ線で拡張 (中段ケーブル)
	7 i	0.0016	3.2～3.4	ケーブル間隔 6.0D スペーサーで拡張 (中段ケーブル)

(4) 実験手順

実験は構造特性調査，無風時構造減衰の計測，対風応答特性の計測，無風時構造減衰の計測の手順で計測した。

1) 構造特性調査

構造特性調査は実験前に行い，1～3次（特にサブスパン振動が生じる場合にはサブスパン振動の1～2次まで）の固有振動数，振動モードを測定した。

2) 対風応答

対風応答は風速を徐々に増加させ，振動が自然発生しその後増加していく様子を計測する。

3.3.3 実験結果

(1) シングルケーブルの挙動

並列ケーブルの実験を行う前に基礎データとして中段ケーブル単体の挙動を計測した。

図-3.3.9に風速と応答の関係を示す。渦励振の生じる領域については拡大図を別途示した。

微小振幅ではあるが，風速の増加につれて鉛直・水平ともに不規則振動が大きくなっている。同一風速の振幅について，鉛直方向と水平方向を比較すると，水平方向が2倍程度大きかった。

(2) 無対策ケーブルの挙動

制振対策の効果を比較する基礎となるデータとして無対策時のケーブルの挙動を測定した。

図-3.3.10～3.3.15に上中下段それぞれの上流側と下流側の風速と応答の関係を示す。

上流側ケーブルは，上中下段ともに風速増加につれて鉛直・水平ともに不規則な振動が大きくなっている。同じ風速の振幅について水平方向と鉛直方向を比較すると水平方向が大きかった。この現象はシングルケーブルの場合と同様であるが，振幅の絶対値はシングルケーブルの場合より大きかった。

一方，下流側ケーブルには低風速で上流側より振幅の大きい渦励振が鉛直方向に発生した。その後ある風速で鉛直方向の振動が発生し，振幅が 0.3D程度まで急激に増加しその後，緩やかに増加した。水平方向に振動が発生したときの振幅は鉛直方向の約1/3 の0.1D程度で，その後鉛直方向振動と同様に0.5D程度までは緩やかに増加するがその後急激に増加し，鉛直方向振動振幅よりも大きくなり上流側ケーブルに衝突しそうになるほど大きくなった。

図-3.3.16に風洞風速2.9, 11.5, 20.5(m/s)の時の下流側のケーブルの軌道を示す。

振動はどの風速でも上側が風下側，下側が風上側に傾いた楕円軌道を示している。また風速15m/s までは水平方向の振幅が小さく偏平な楕円軌道を示している。風速20m/s では軌道が丸く，水平方向の振幅が大きくなった。

(3) スペーサーの連結

図-3.3.17にスペーサー取付位置を示す。スペーサーは1，3，7段をそれぞれ等間隔になるように設置した。ただし各段のケーブルの影響を除くために上下段は取り外して行った。

図-3.3.18にスペーサーの段数の違いによる風速と応答の関係を示した。

スペーサーが一段の場合はスペーサー部を節とする二次振動，3段，7段の時は一次振動が生じた。対策無しと比べると，水平方向振幅はスペーサーを取り付けることにより振幅が小さくなっているが，鉛直方向振幅は逆に大きくなった。上流列のケーブルを中心として後流列のケーブルが回転するような振動がみられた。

図-3.3.19はスペーサー連結個数と発現風速の関係を示した。

連結個数を多くすると発現風速が高くなる傾向はみられるものの，２倍程度にしかならず，あまり効果は期待できないと思われる。

(4) スペーサーと連結ワイヤーでケーブル同士を連結

1) 連結方法の影響

ケーブルとステイケーブルをスペーサーと連結ワイヤーでクロスに連結した場合と平行に連結した場合の連結方法の違いによる影響を調べた。平行に連結した場合については，連結ワイヤーの張力の有無についても比較した。

図-3.3.20にスペーサーと連結ワイヤーの取付状況を示す。

図-3.3.21は連結ワイヤーをクロスに取り付けたときの中段ケーブル下流側の風速と応答の関係を示す。

図-3.3.22は連結ワイヤーを平行に取り付けたときの中段ケーブル下流側の風速と応答の関係を示す。

図-3.3.23は連結ワイヤーを平行に取り付けたときの中段ケーブル下流列の風速と応答の関係を示す。ただしこのケースのみ，連結ワイヤーの張力をゼロにした。

それぞれの制振対策の効果を比較するため，図中には無対策時の挙動も示した。

クロス連結した場合，無対策時と比べると鉛直・水平方向ともに発現風速における振幅の急な上昇はみられず振幅が抑えられているが，逆に20m/s 程度では無対策時よりも大きくなっている。

平行連結した場合，鉛直方向の挙動はクロス連結と同様であるが，水平方向は無対策時の振幅よりも抑えられている。

さらに平行連結で張力をゼロにした場合，発現風速が無対策時の２倍程度に上昇した。これは張力が有る場合は連結ワイヤーがバネとして働くのに対して，張力がゼロの場合は連結ワイヤーが伸びる方向に対して拘束力が働くが縮小する方向ではワイヤーがたるむため力が作用せず，これが減衰力として働くためであると思われる。

図-3.3.24に連結ワイヤーの連結方法と発現風速の関係を示す。

連結ワイヤーが平行連結で張力ゼロの場合が発現風速が最も大きいが，この場合連結ワイヤーに衝撃的な力がかかり連結ワイヤーに損傷が生じると思われるので注意を要する。

2) 剛性の影響

他ケーブルの剛性の影響について調べた。ケーブルとステイケーブルを連結ワイヤーとスペーサーで連結し，ステイケーブル張力を上流側，下流側とも30kgfとケーブル張力の約６倍にあたる 290kgfの２種類変化させた。さらにステイケーブルと架台を連結ワイヤーで連結したケースについても調べた。

図-3.3.25に連結ワイヤーを架台に固定した場合のケーブルのサブスパンの振動数を示した。

図-3.3.26 ～3.3.28は連結ワイヤーを架台に取り付けたときの風速と応答の関係を示す。ただし，振幅は連結部材取付位置 3/4点と下部架台定着点間のサブスパン振動振幅を示した。また，架台拘束の効果を

みるため，無対策時の挙動も示した。

下段ケーブルのサブスパン振動が最も大きく最大片振幅が１Ｄで無対策時の約1/2 程度生じている。サブスパンはケーブル長の約1/4 であるため，幾何学的には曲げ角が無対策時の２倍程度になる。

図-3.3.29に張力を変化させたときと架台固定を行ったときの発現風速の比較図を示す。

張力30kgf，290kgfの場合全体１次モードの振動が生じた。架台に取り付けた場合は全体１次モードの振動は生じないがサブスパン振動が生じた。

3)　付加重量の影響

他ケーブルの付加重量の影響について調べた。

図-3.3.30に付加重量の取付要領を示す。

ケーブルとステイケーブルをスペーサーと連結ワイヤー（平行）で連結し，さらに上流列と下流列のステイケーブルに付加質量を取り付けた。付加質量はステイケーブル 1/4点，1/2点，3/4点にケーブル重量の２本分，３本分にあたる5.34kgfと9.84kgfの重量をそれぞれ３等分して取り付けた。

図-3.3.31に付加重量と発現風速の関係を示す。

付加質量5.34kgf のときは，上中下段の上下流列ケーブルに鉛直と水平一次振動が発生した。サブスパン振動は風洞風速内では発現しなかった。逆に付加質量9.84kgf のときは鉛直水平ともに全体一次モード振動は発現しなかったが，サブスパン振動が発現した。また全体１次モード振動，サブスパン振動に関わらず発現風速はほとんど変化しなかった。

4)　ダンパーの影響

①電磁ダンパー

ケーブルとステイケーブルをスペーサーと連結ワイヤーで連結し，下流列のステイケーブルの中央に電磁ダンパーで減衰を付加させた。

図-3.3.32に減衰と風洞風速の関係を示す。

風速を増加させるとV=5m/s程度でケーブルの中央点を腹とする全体１次モードで振動が発現し，その後減衰を付加させ波線部の減衰まで付加したときダンパー取付部を節とする２次モード（サブスパン振動）にモードが変化した。また，V=15m/s 程度までは風速の増加とともにモード移行に要する減衰の値は増加するが，逆に V=15m/s以後は低くなった。これは風速が 15m/s程度までは風速の増加にともない２次振動が発生しにくくなるが，15m/s 以降は逆に風速の増加にともない２次振動が発生し易くなることを示している。

このような現象が発生したのは，本ケーブルのサグがサグ比0.00172(δ/L) と大きく１次モードと２次モードの振動数が近くなるサグ比であり，２次モードも１次モードと同様に発生し易くなっているためであると思われる。

②高減衰ゴムダンパー

ケーブルとステイケーブルをスペーサーと連結ワイヤーで連結し，下流列のステイケーブルに高減衰ゴムダンパーを取り付けた。

高減衰ゴムダンパーの構造を図-3.3.33 ～3.3.34に示す。等価粘性減衰係数及び等価剛性を表-3.3.4に示す。

表-3.3.4　等価粘性減衰係数と等価剛性

	K kg/mm	C kg/(mm/s)
A	20	0.636
B	10	0.318
C	5	0.159

取付位置は，ステイケーブルの 1/4, 1/2点の２カ所とした。

表-3.3.33に有風時の実験結果のまとめを示す。

下流列の上中下段には，全体１次モード振動は発現せず高減衰ゴム取付部を節とするサブスパン振動が発生した。また，サブスパン振動の発現風速は無対策時の発現風速とほとんど変わらなかった。これは取り付けた高減衰ゴムの剛性を5kgf/mm と小さく設定したにも関わらず，高減衰ゴムの剛性がケーブル振動を拘束し，節となるには十分であったことを示している。

(5)　構造減衰の影響

構造減衰の影響を調べるために下流側ケーブルの下端から49cmの位置に電磁ダンパーを設置して，減衰を付加させて実験を行った。他段ケーブルの影響を避けるために，実験は中段ケーブルを取り外して行った。

構造減衰は対数減衰率で0.035, 0.076, 0.120 の３種類に設定した。

図-3.3.35～3.3.36に風速と応答の関係を示す。

減衰を付加させると発現風速は上昇するが，振動発生直後の振幅は無対策時と変わらずその後の風速増加にともなう振幅増加も無対策時と変わらなかった。

図-3.3.37～3.3.38に発現風速と減衰の関係を示した。

減衰の増加とともに発現風速は増加するが，その増加の割合は減衰の増加とともに徐々に減少した。

美観等を考慮すると，ダンパー取付位置の制約から実橋で実際に付加することが出来る減衰は対数減衰率でδ=0.1程度である。このことを考慮して，本実験でδ=0.12 付加させた場合，発現風速は無対策時の3倍程度増加する事がわかった。

図-3.3.39にダンパー無しの場合と同様に楕円軌道を描いていることがわかる。

(6) 振動数の影響

無次元振動数が変化したときのウエイクギャロッピング発現風速の推移を調べるために，ケーブル張力を変化させて実験を行った。実験は他段ケーブルの影響を避けるために，他段ケーブルを取り外して行った。実験は主に下段について行った。

図-3.3.40にケーブル振動数と発現風速の関係を整理した。

図-3.3.41に中段ケーブルの風速と応答の関係を示す。

発現風速は振動数に対して変化せず，逆に発現風速は無次元風速で変化した。

f<3Hzについては，サグが大きくなり風を吹かせると水平方向の静的変位が大きくなり，2次モードの振動が発現したため実験を中止した。

(7) 新しい制振装置の効果

新しい制振対策として考えたケーブル間隔を変化させる方法の実験時のケーブル固定方法については，

図-3.3.42 ～3.3.44に示した。本ケースも，他段ケーブルの影響を避けるために，実験は他段ケーブルを取り外して行った。

ケーブル間隔が 2.0D以下の場合は軟鋼線により固定した。4D以上の場合はケーブル間にスペーサーをいれて間隔を保持した。また2本のケーブルが連成することを避けるためケーブル間隔が5D以上の場合についてはピアノ線により上流側のケーブルを拡張する方法も行った。

①ケーブル間隔1.0D～2.0D

図-3.3.45～3.3.46にケーブル間隔 1.0Dの時の風速と応答の関係を示す。

ケーブル間隔 1.0Dは2本のケーブルを密着させた場合であるが，この場合のみギャロッピングが発生している。

図-3.3.47にケーブル間隔 1.1Dの時の風速と応答の関係を示す。

ケーブル間隔1.1Dはケーブル径の10%の隙間をあけた状態であり，風洞風速内で振動は発生していない。

図-3.3.48～3.3.49にケーブル間隔 2.0Dの時の風速と応答の関係を示す。

この時はケーブル間隔 3.0Dの場合と同様，低風速でウエイクギャロッピングが発生しているが，スペーサーにより振幅は拘束され小さくなっている。

②ケーブル間隔4.0D～6.0D

図-3.3.50にケーブル間隔をスペーサーで4.0Dに拡張した場合の風速と応答の関係を示す。

図-3.3.51にケーブル間隔をスペーサーで5.0Dに拡張した場合の風速と応答の関係を示す。

図-3.3.52にケーブル間隔をピアノ線で5.0Dに拡張した場合の風速と応答の関係を示す。

図-3.3.53にケーブル間隔をピアノ線で6.0Dに拡張した場合の風速と応答の関係を示す。

ケーブル間隔をスペーサーで拡張した場合はピアノ線で拡張した場合と比べて，上流側ケーブルの振幅の方が下流側より大きくなる。

図-3.3.54にケーブル間隔と発現風速の関係を示す。

ケーブル間隔が1.1D～1.5Dの場合，風洞内ではウエイクギャロッピングは発現しなかった。

ケーブル間隔が2.0D～4.0Dの場合，発現風速が低く，低風速でウエイクギャロッピングが発生した。

ケーブル間隔が5.0D～6.0Dの場合，発現風速はスペーサーで拡大した場合の方が低くなった。ケーブル間隔が５Ｄよりも６Ｄの場合の方がより低くなる。これは，スペーサーによって拡張した場合は上流側と下流側が連成し，ねじれに対して不安定な構造となったため生じたと思われる。

ケーブル間隔が 6.0Dの場合，上流側と下流側のが連成しないようにピアノ線で拡張した場合には風洞風速内ではウエイクギャロッピングが発現しなかった。

3.3.4 まとめ

本実験では，ケーブル径75㎜程度の細径のケーブルを対象にして，３次元弾性模型を用いて制振対策の効果について比較した。

本実験において明らかになったそれぞれの制振対策の効果についてまとめると以下のようになる。

(1) スペーサーの効果

本実験のようなケーブル間隔が３Ｄの場合，スペーサーを取り付けることによって２倍程度の発現風速の上昇はみられるものの，制振効果は期待できないと思われる

(2) スペーサーと連結ワイヤーの効果

大振幅の振動は抑えることが出来るため，制振効果があると思われる。

しかし，サブスパン振動が全体１次モードとほぼ同じ風速で発現する。サブスパン振動は振幅は小さいがスパンが短いためケーブルの曲げ角度が大きく，疲労を検討する必要がある。改良案として，制振ワイヤーの取付間隔を小さくすることが考えられるが，サブスパンの間隔が空力的に設定できない。また，改良案としてサブスパンの間にスペーサーを取り付ける方法も考えられるが，サブスパンの間隔と同様にスペーサーの間隔も設定できない等の問題点がある。

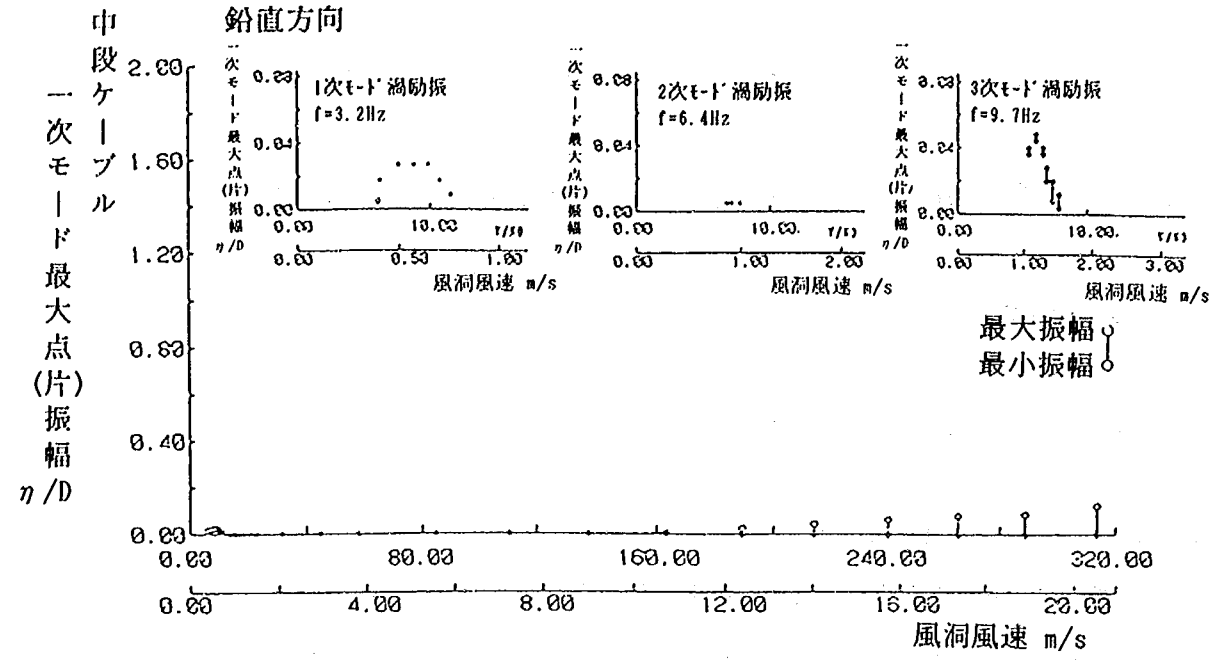
(3) ダンパーの効果

本実験のようなケーブル間隔が３Ｄの場合，制振効果は期待できないと思われる。

これは実橋で実際に付加できる減衰δ=0.12 を付加しても，発現風速が無対策時の発現風速の３倍（風洞風速9m/s）程度であったためである。

(4) ケーブル間隔調整の効果

ケーブル間隔を１.１D～1.5D，6.0D以上にすれば風洞風速内で振動が発生しないため，この範囲ケーブル間隔を縮小・拡大すれば，制振効果が期待できると思われる。ただし，ケーブル間隔を拡大する場合，２本のケーブルが連成してねじれに対して不安定な構造とならないように気をつける必要がある。



シングルケーブルのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：中段ケーブル

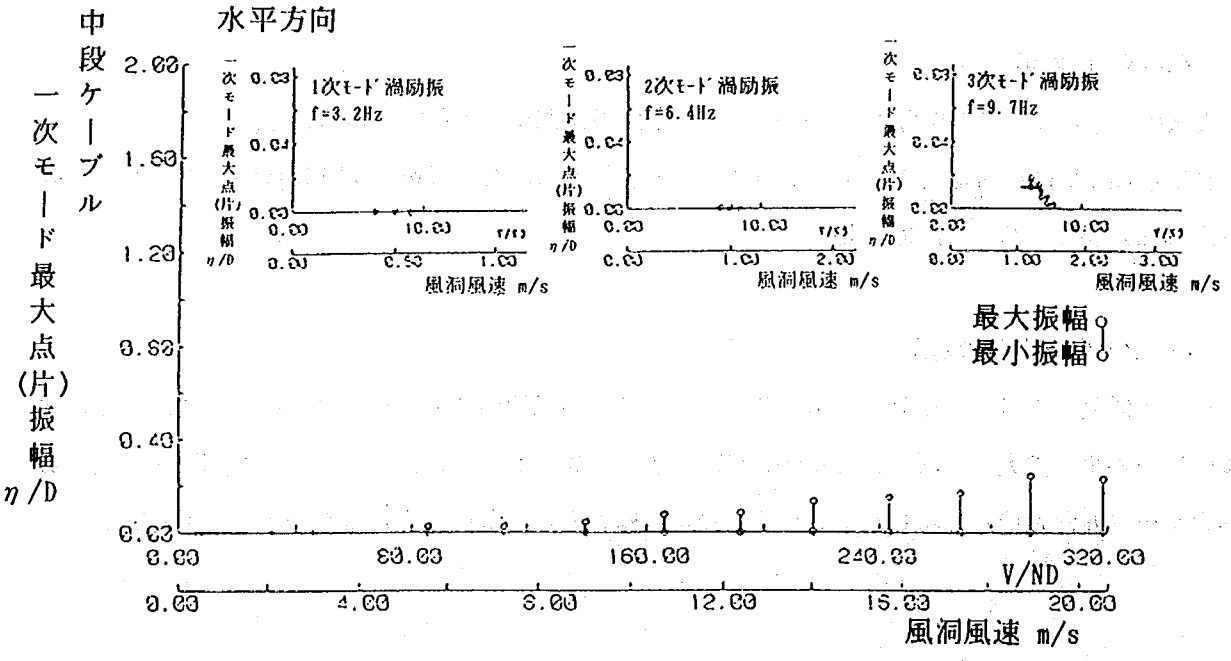
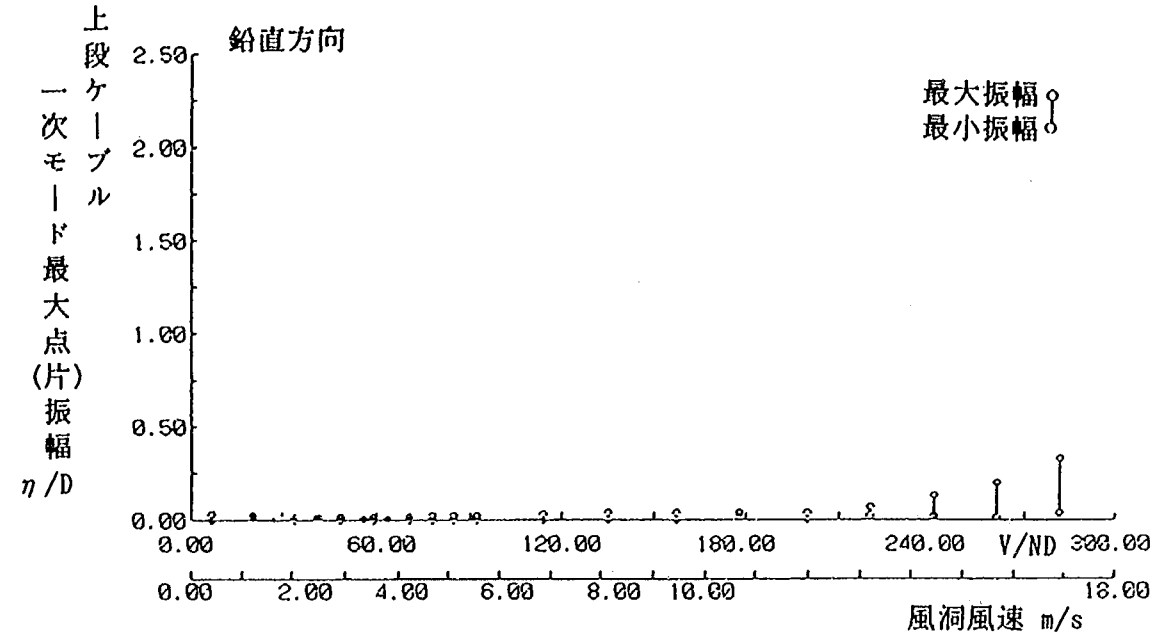


図-3.3.9　シングルケーブルのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：中段ケーブル



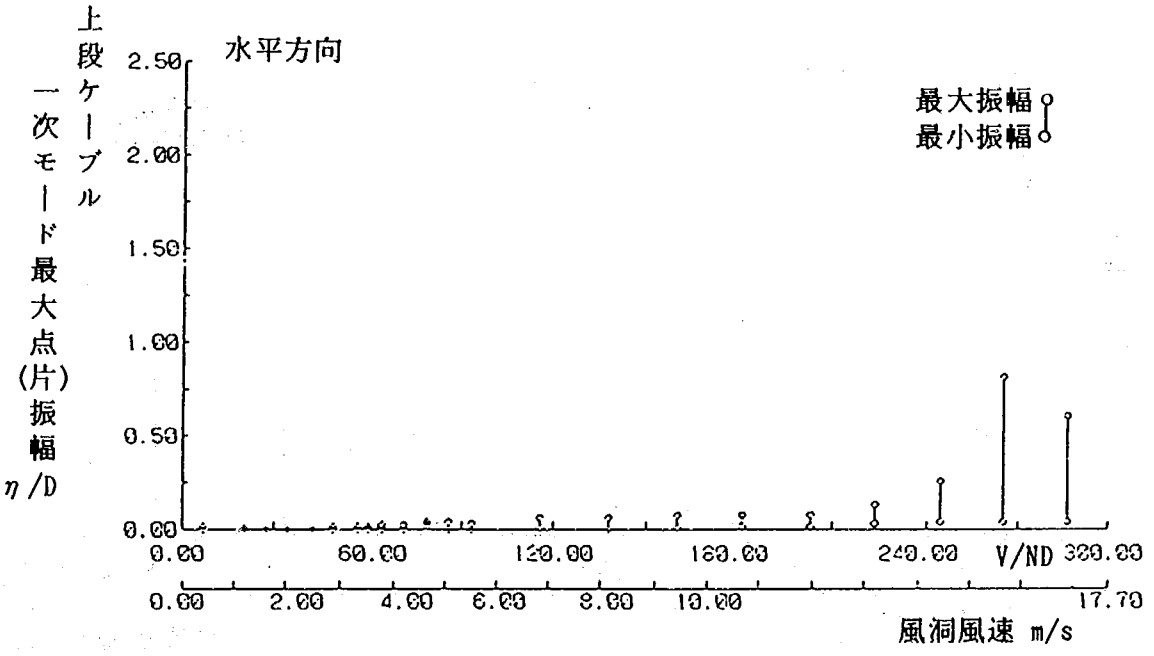
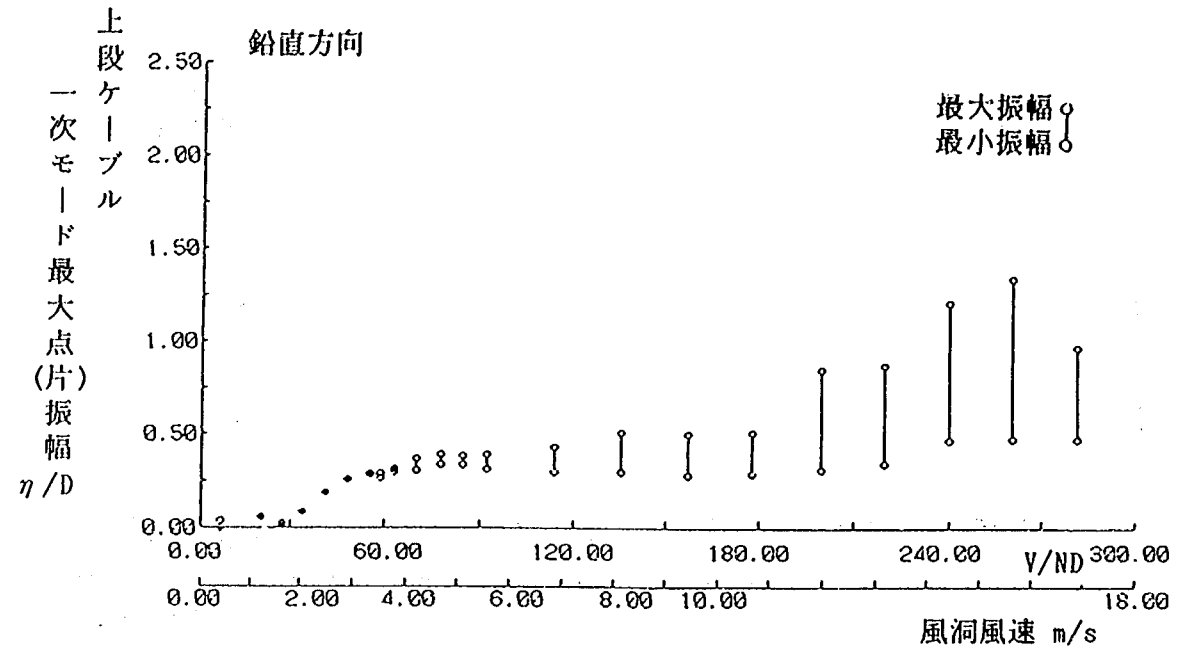


図-3.3.10 制振対策なしのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上流列，上段ケーブル



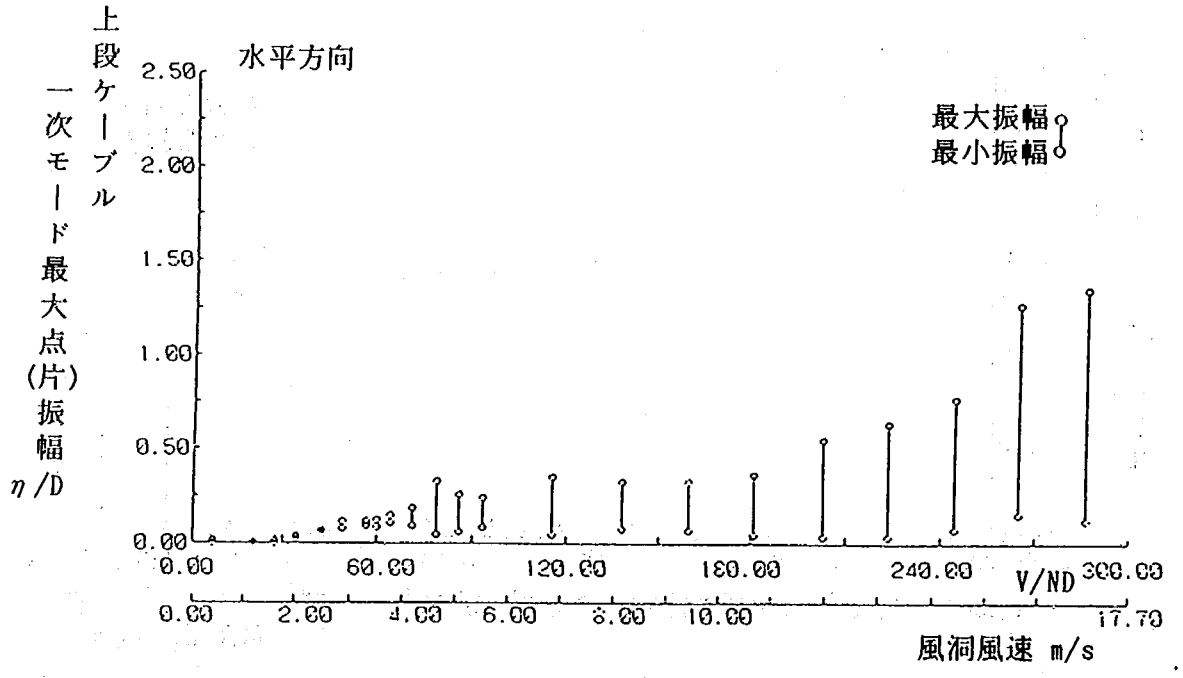
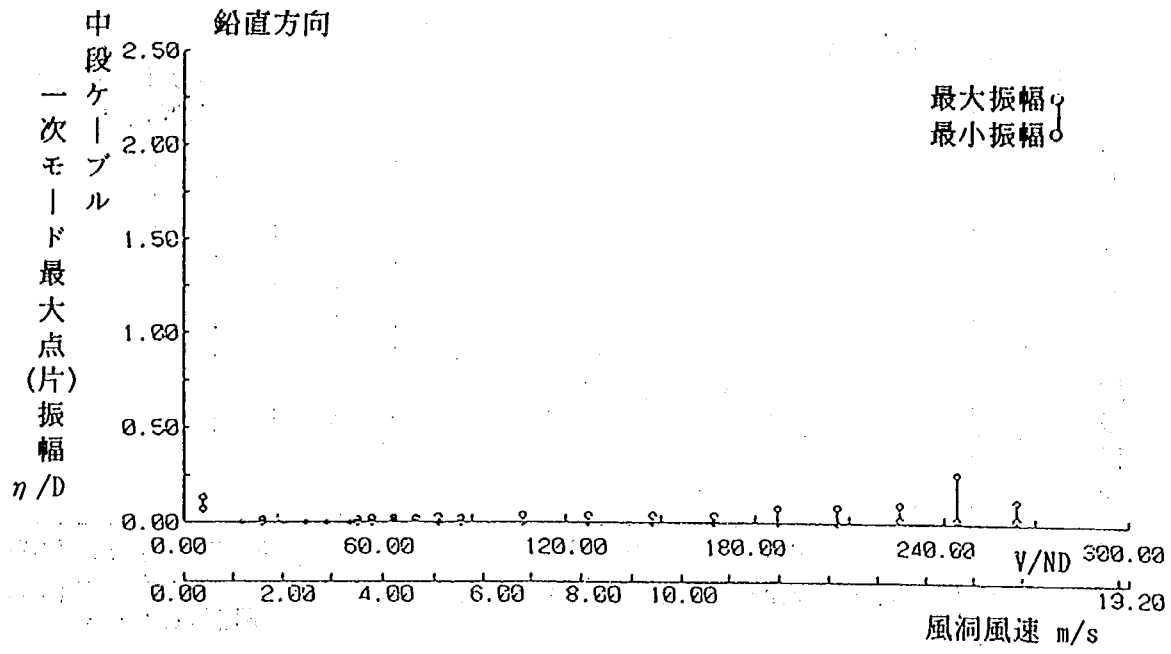


図-3.3.11 制振対策なしのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，上段ケーブル



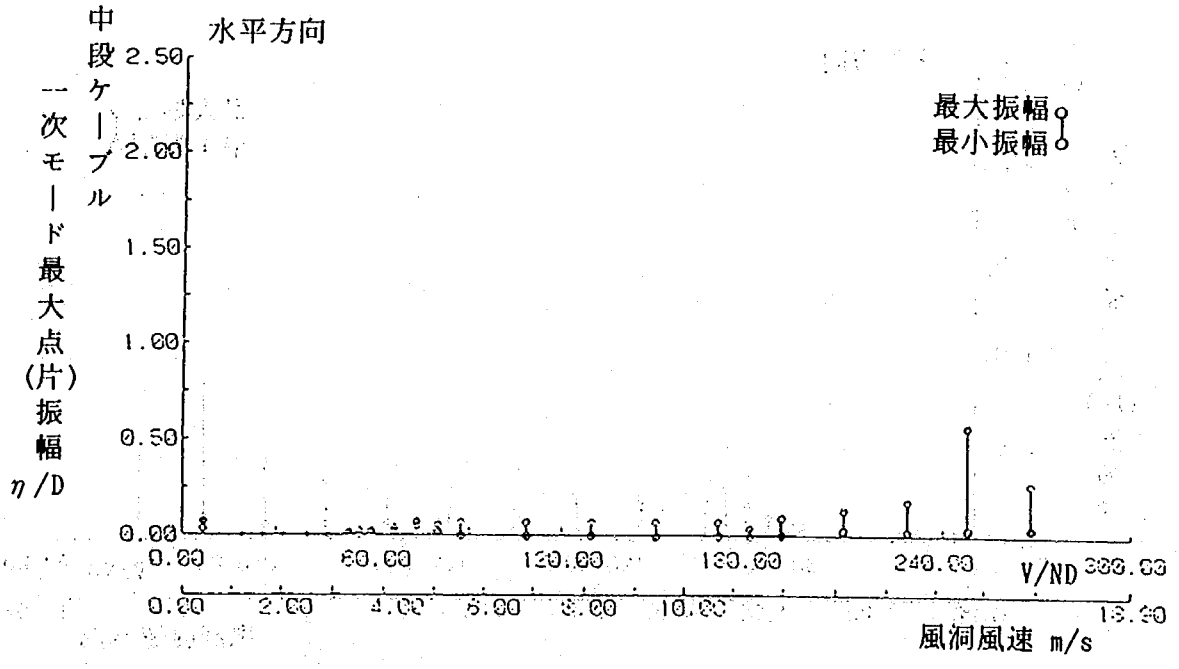
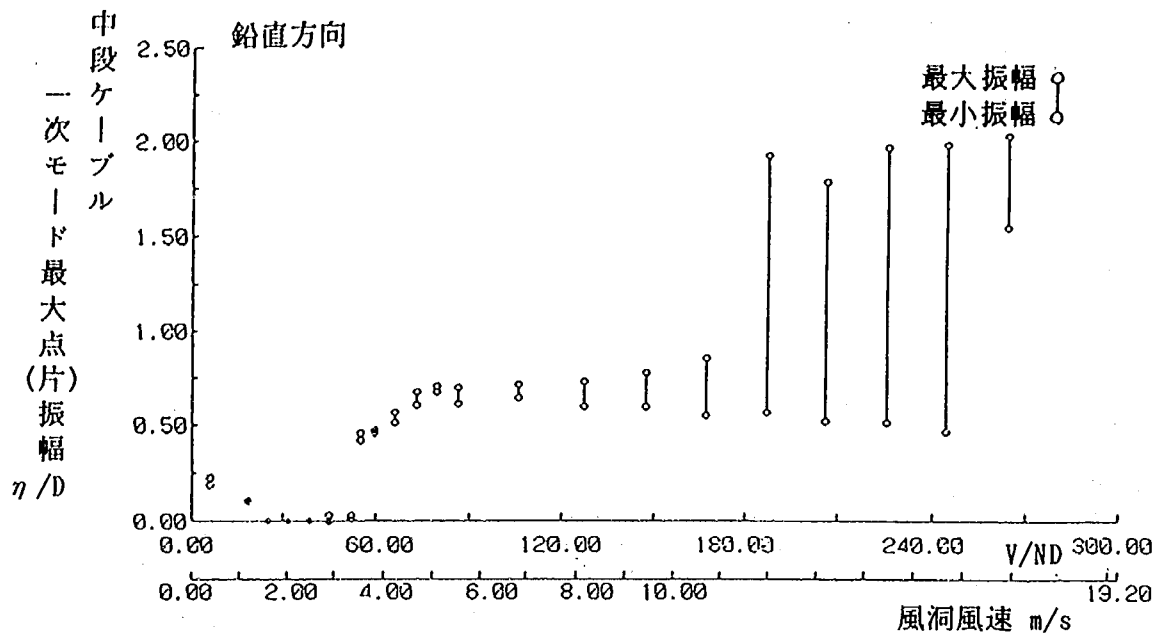


図-3.3.12　制振対策なしのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上流列，中段ケーブル



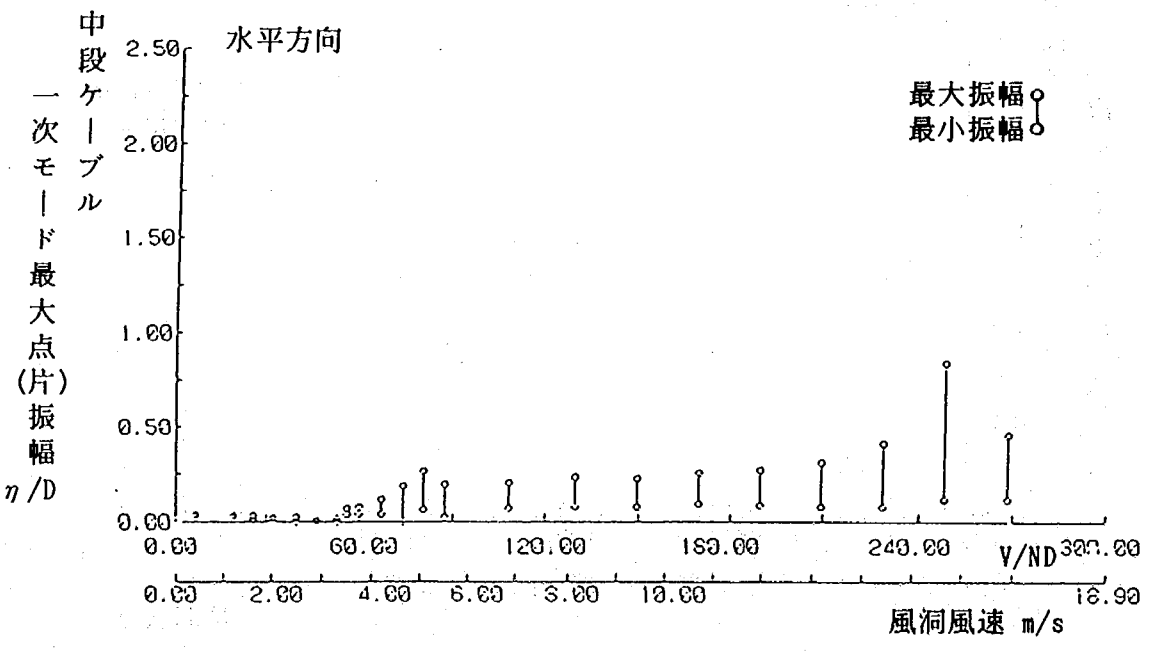
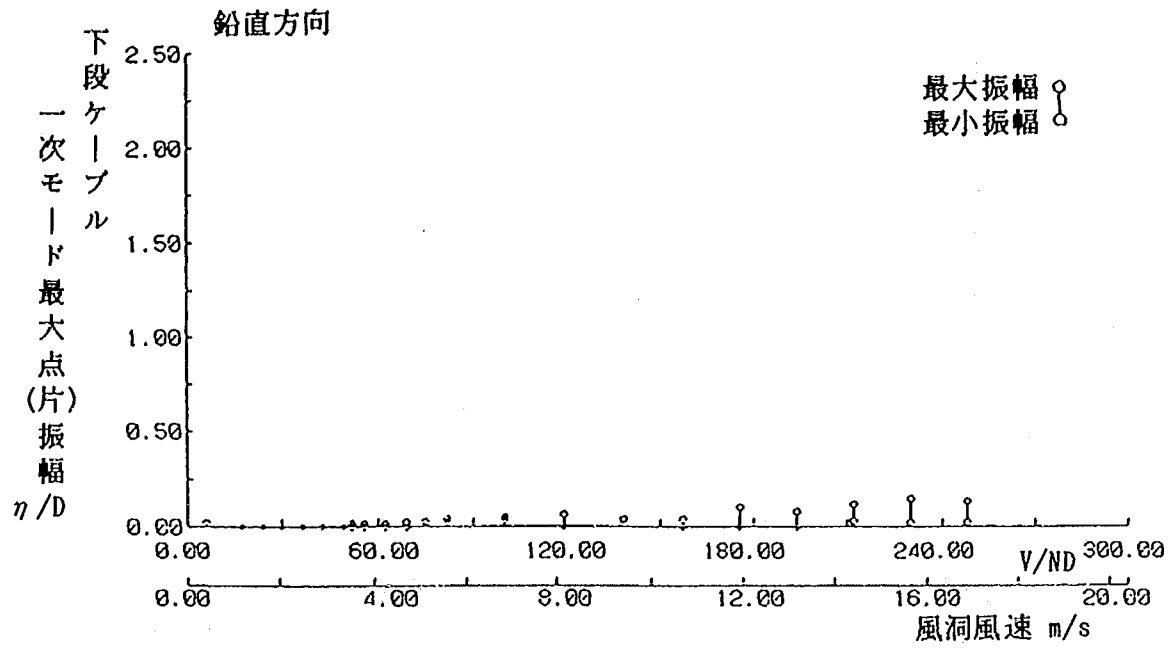


図-3.3.13　制振対策なしのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



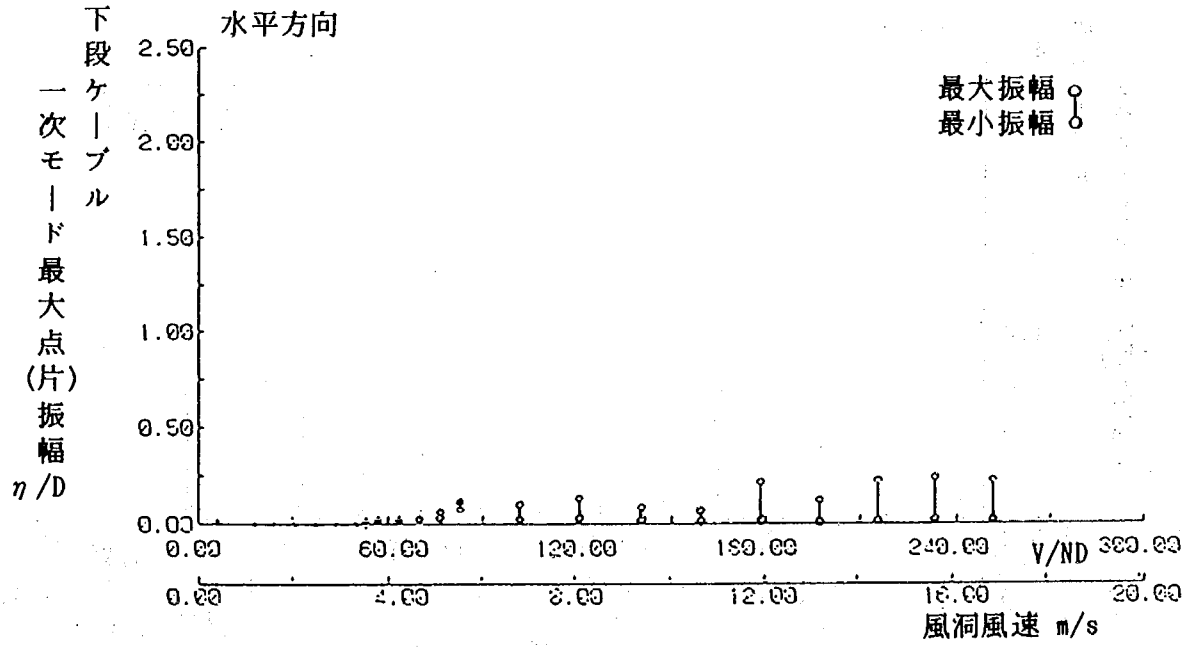
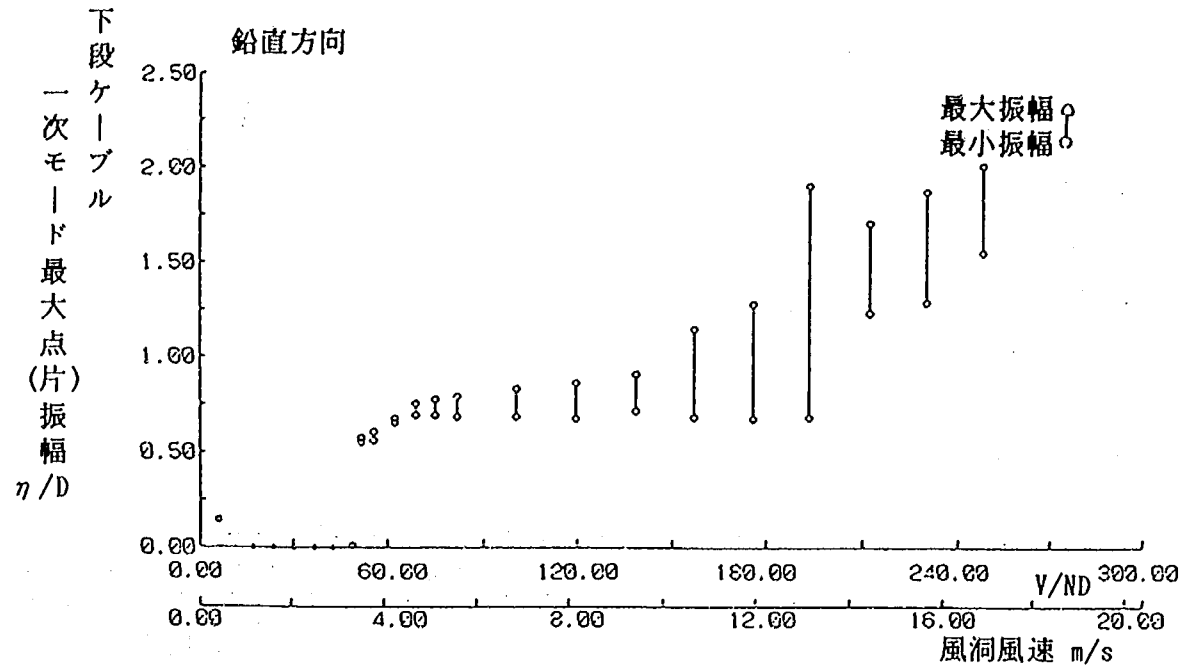


図-3.3.14　制振対策なしのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上流列，下段ケーブル



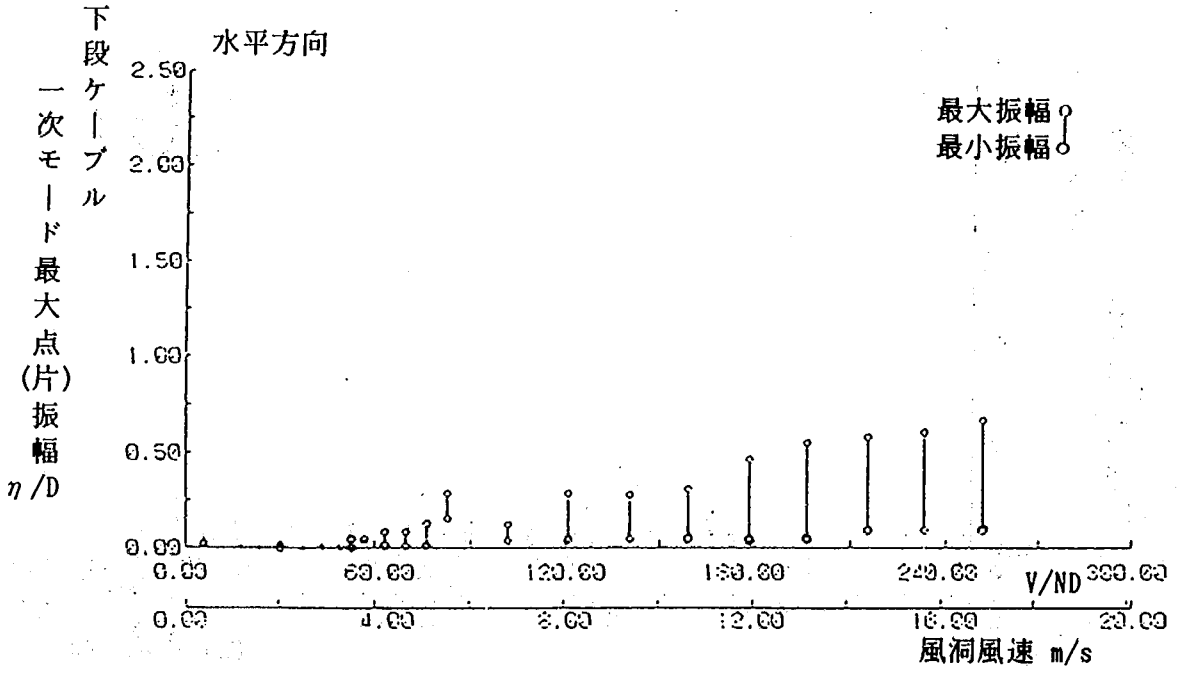


図-3.3.15 制振対策なしのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，下段ケーブル

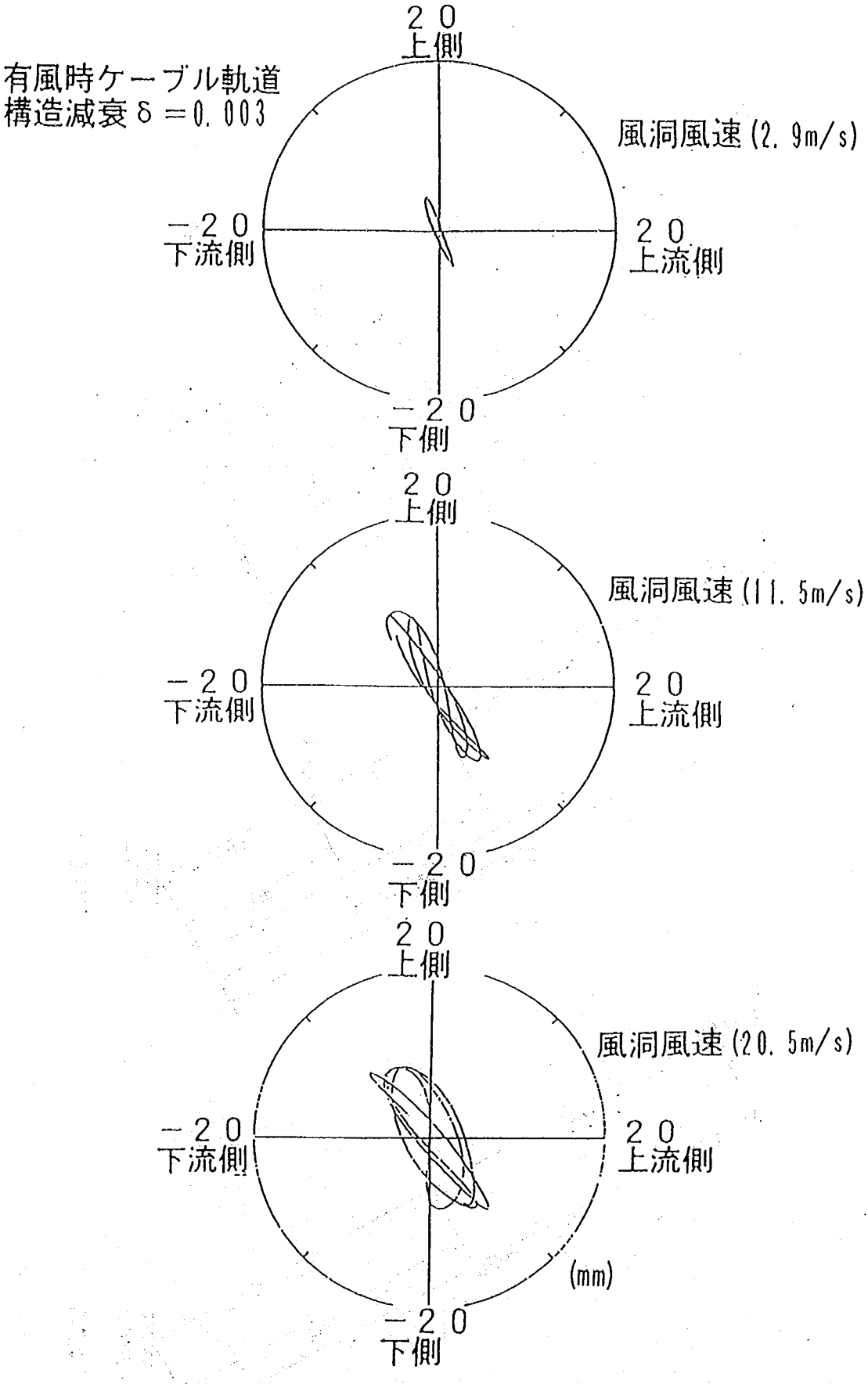


図-3.3.16　無対策時ケーブル軌道（下流側　δ＝0.003）

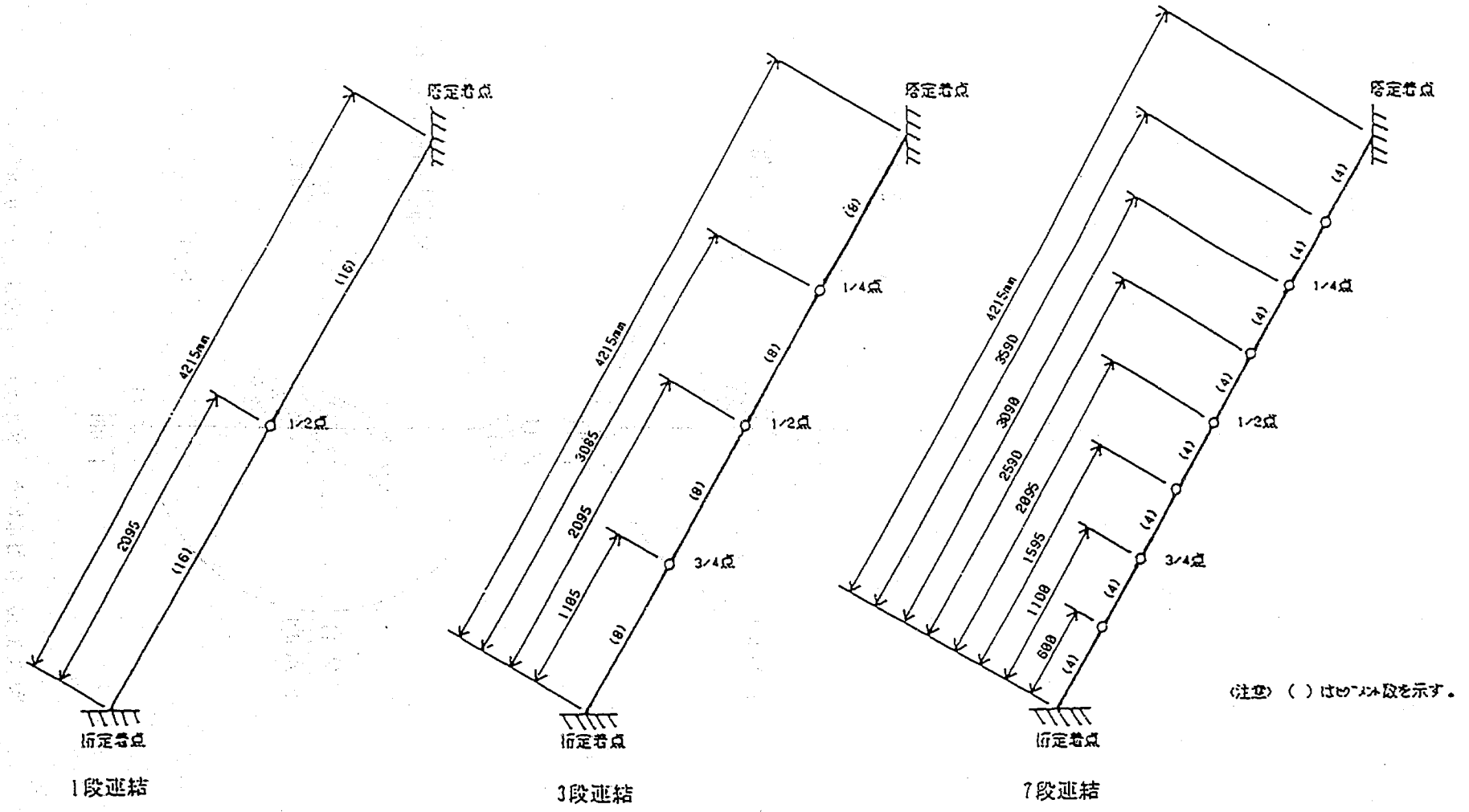
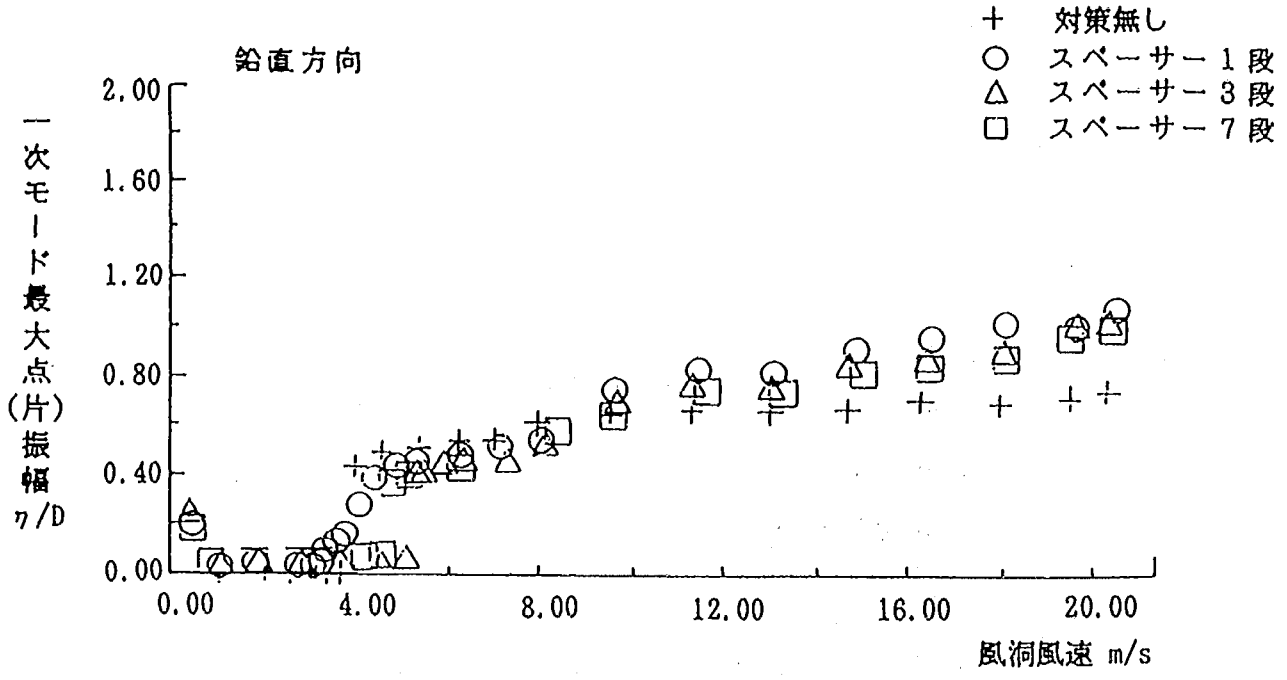


図-3.3.17　スペンサー取り付け位置とセグメント数



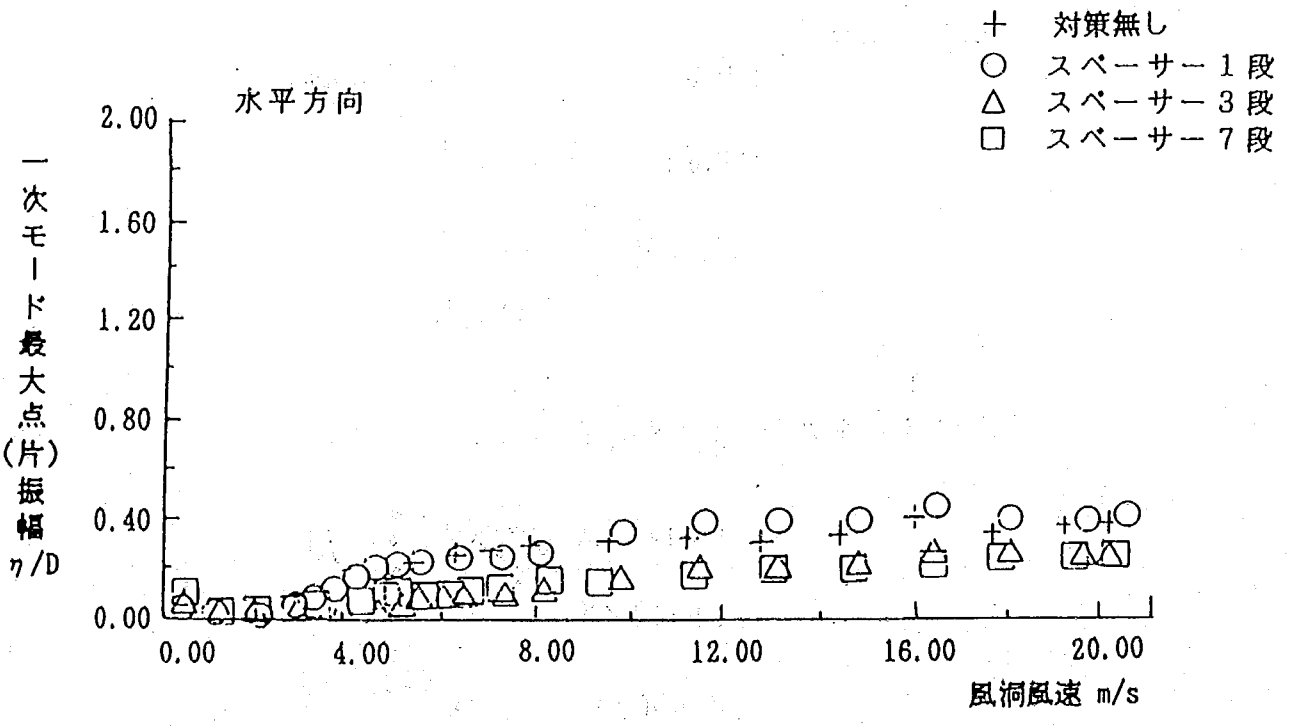


図-3.3.18 風速と応答の関係

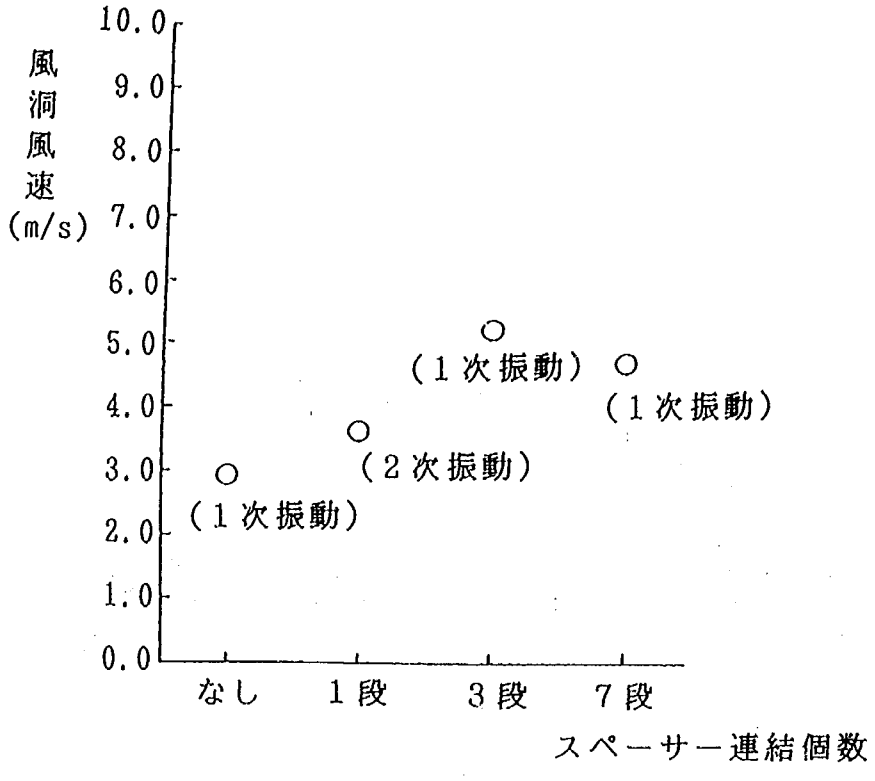


図-3.3.19　スペンサー連結個数と振動発現風速

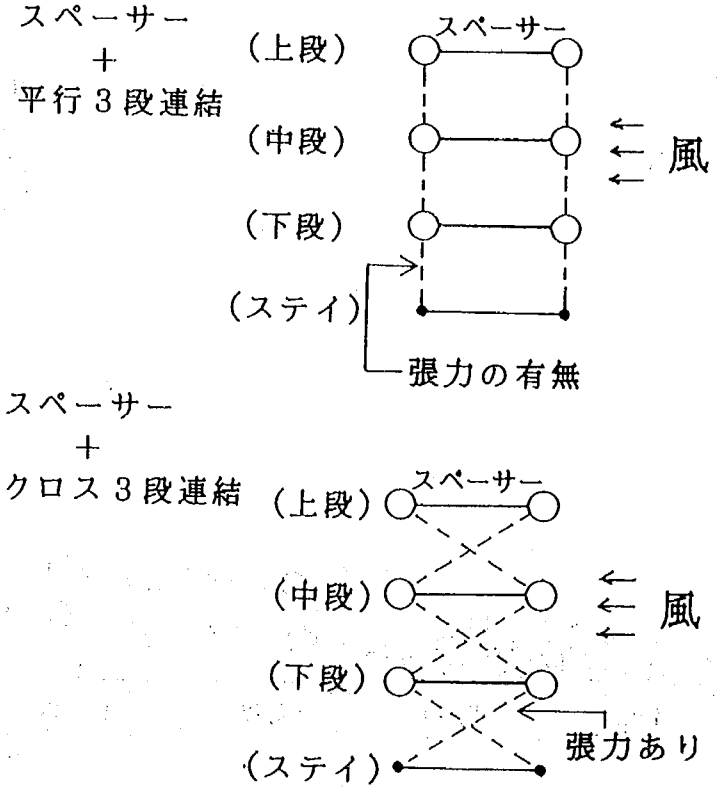
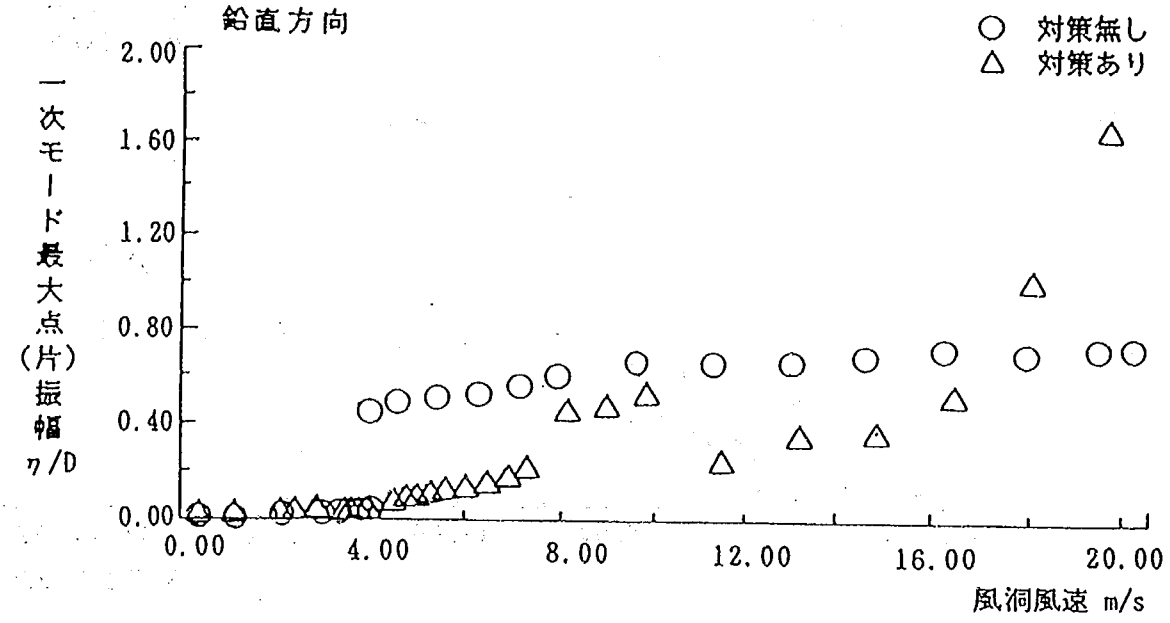


図-3.3.20　制振ワイヤーの連結方法



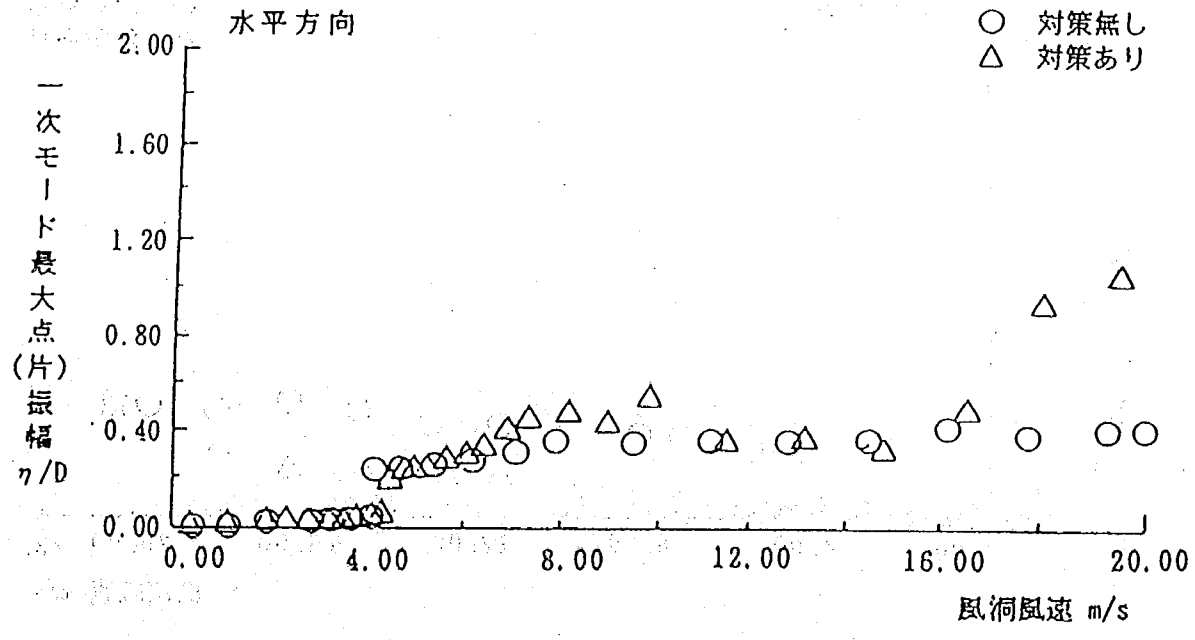
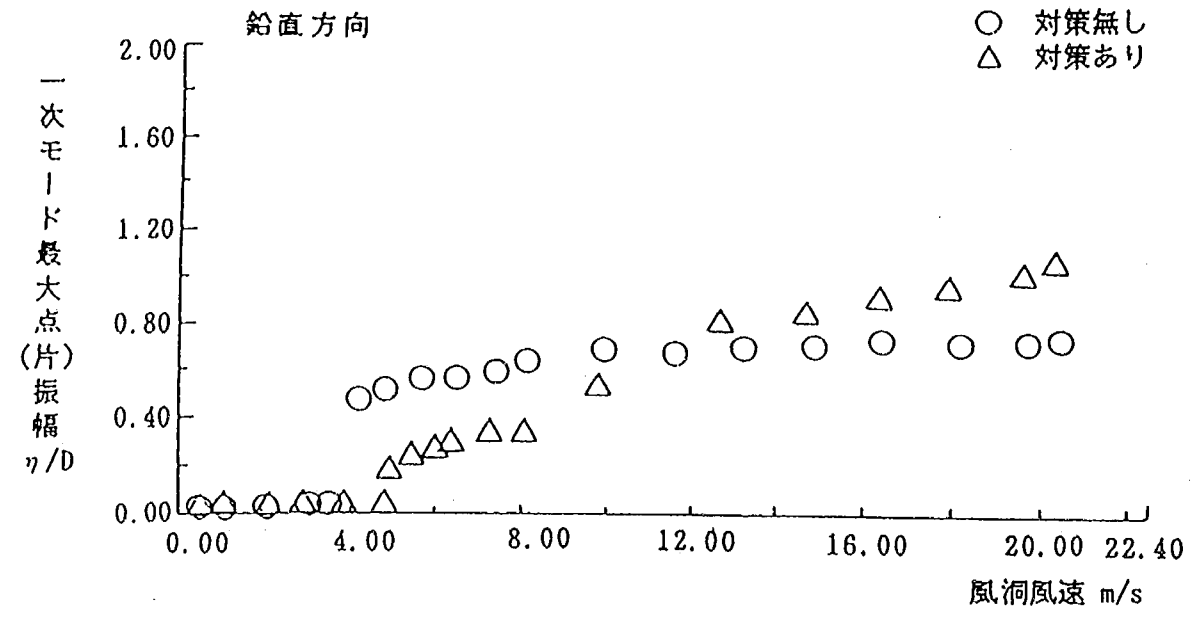


図-3.3.21 制振対策なしのときとスペーサーとワイヤー（クロス，張力あり）を3段に取り付けたときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



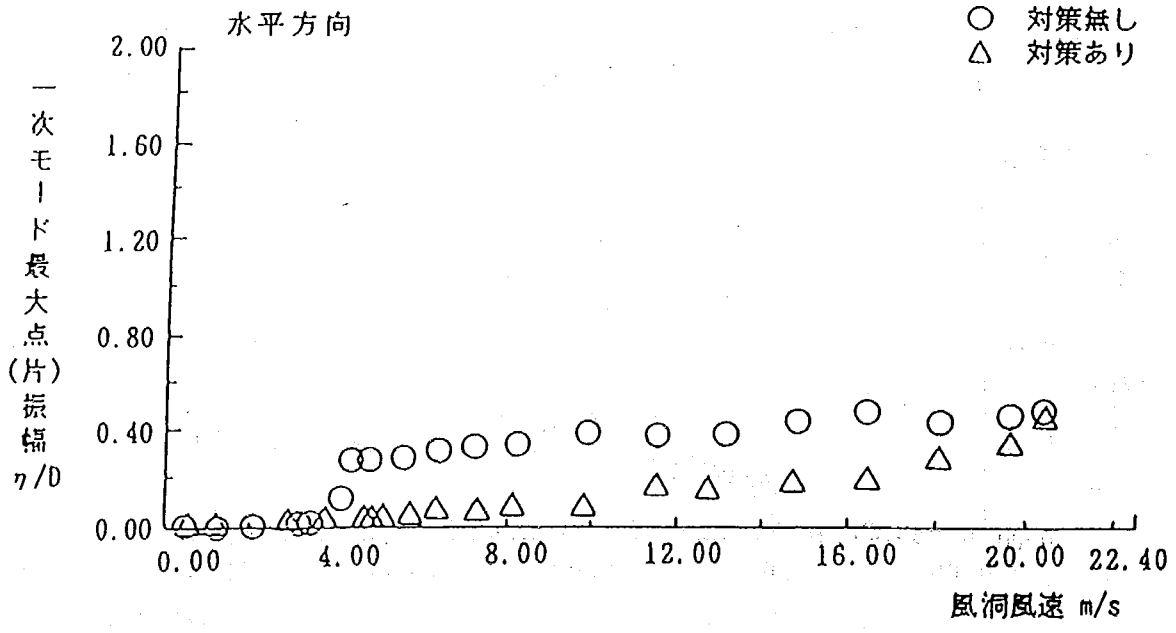
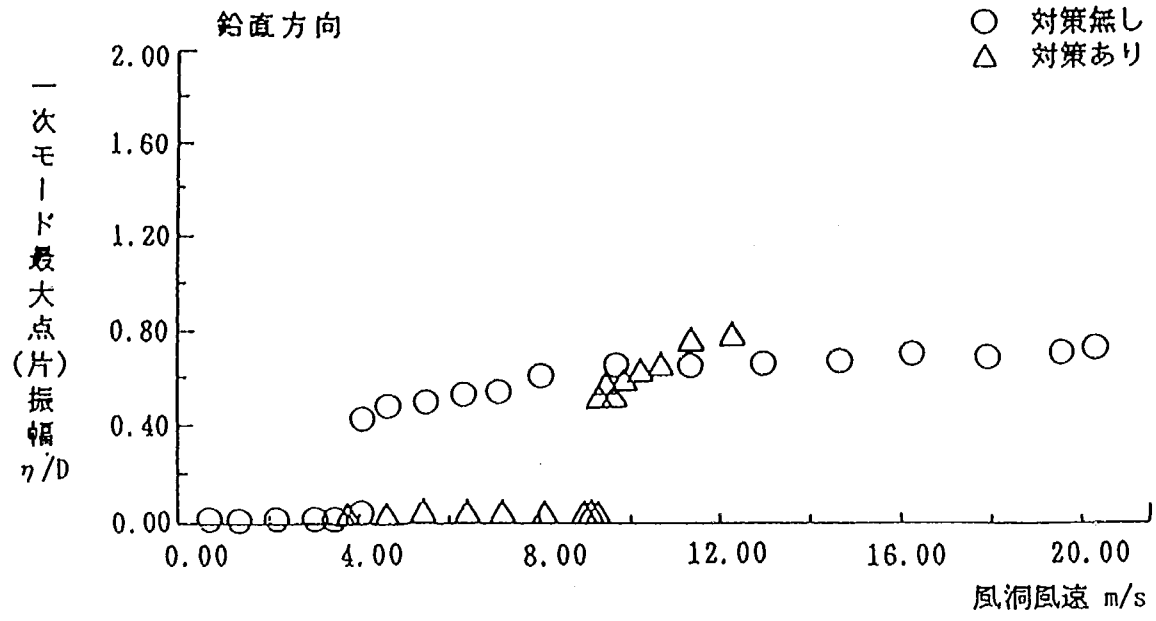


図-3.3.22 制振対策なしのときとスペーサーとワイヤー（平行，張力あり）を3段に取り付けたときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



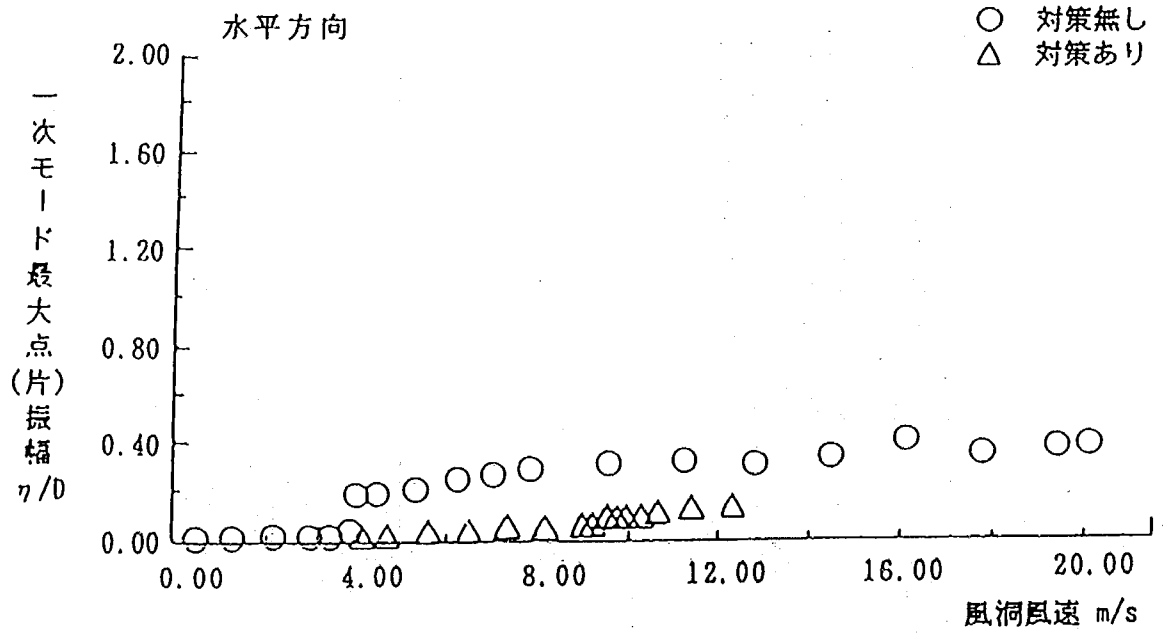


図-3.3.23 制振対策なしのときとスペーサーとワイヤー（平行，張力なし）を3段に取り付けたときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル

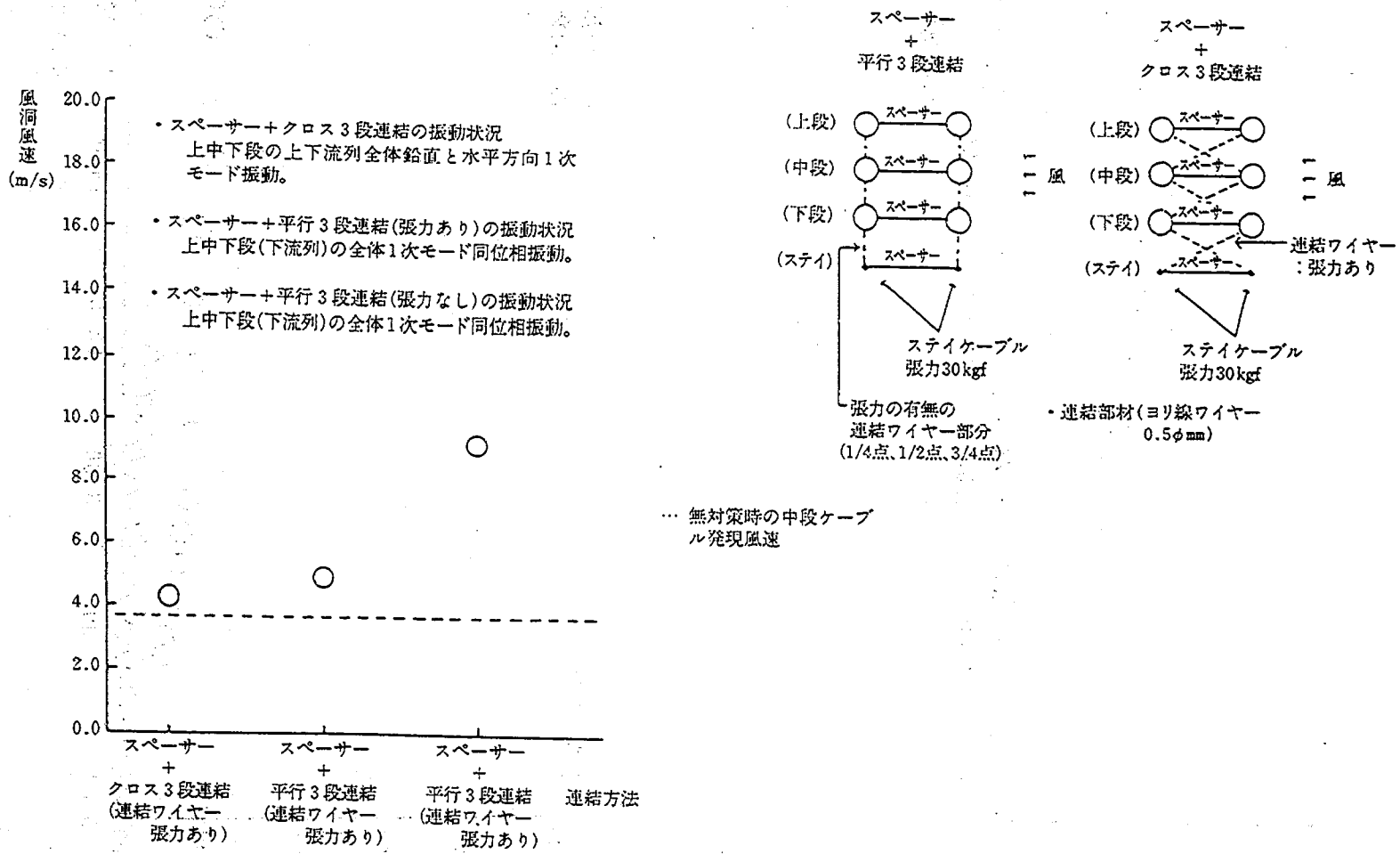
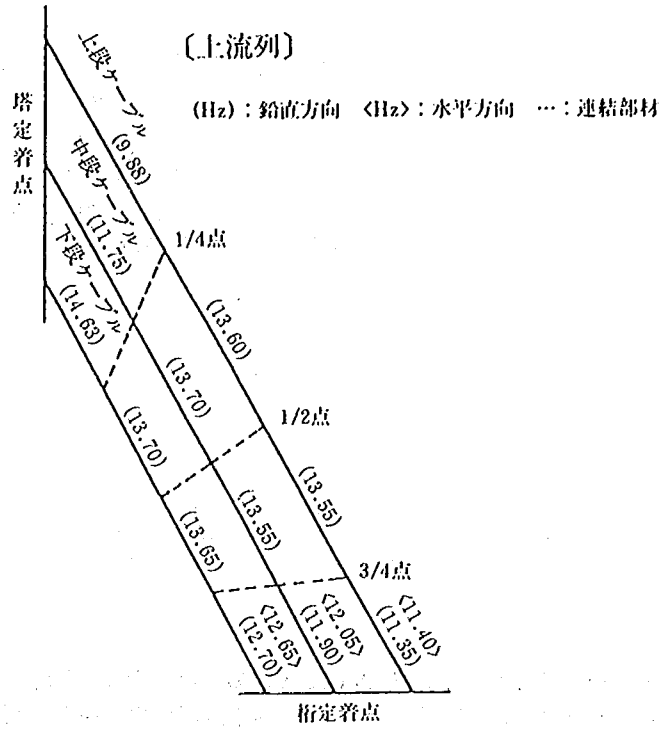


図-3.3.24　制振ワイヤーの連結方法による発現風速の比較



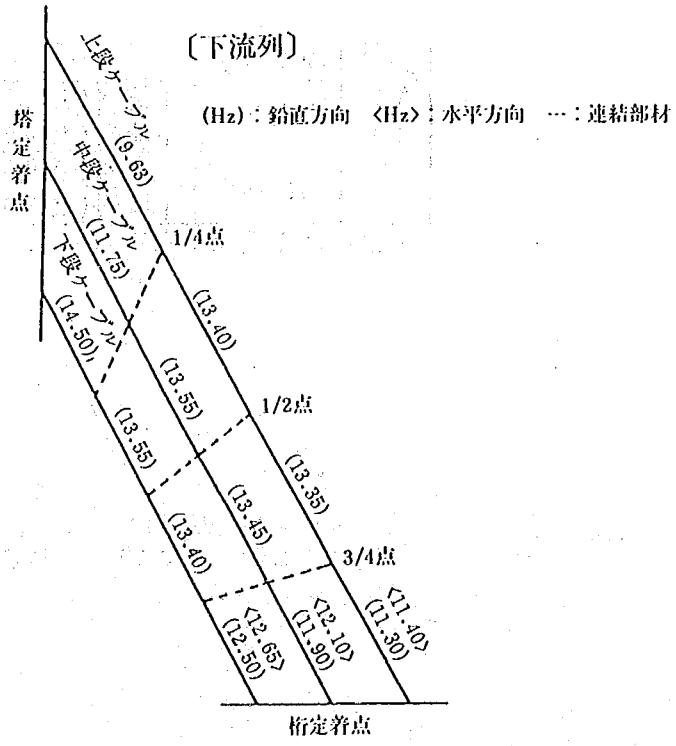
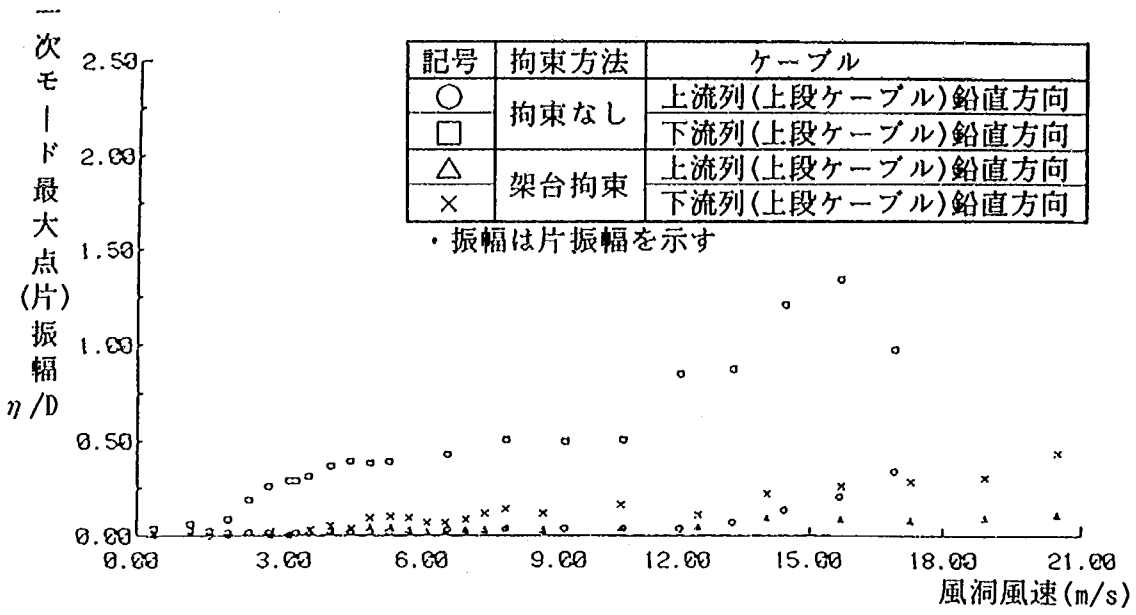


図-3.3.25　連結したときの各ケーブルスパンの振動数

注）実験ケース：スペーサー＋平行３段連結＋架台固定



(注意)架台拘束したときは、ｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ(一次ﾓｰﾄﾞ)振動が発生しており、図中のｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ振動は連結部材取付位置3/4点と桁定着点間の距離を示す。

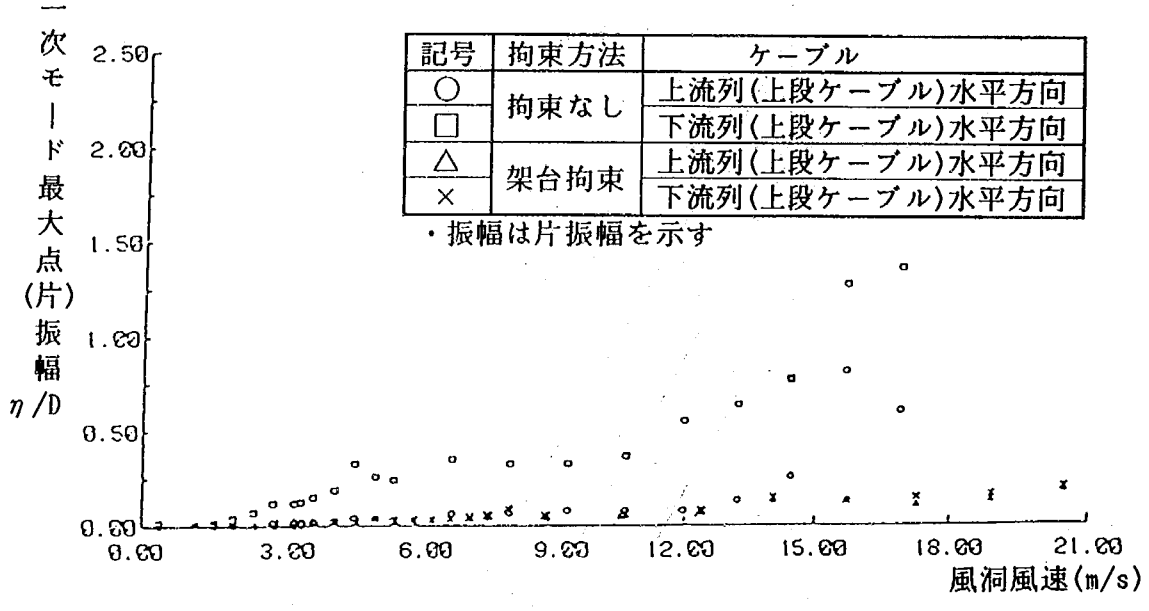
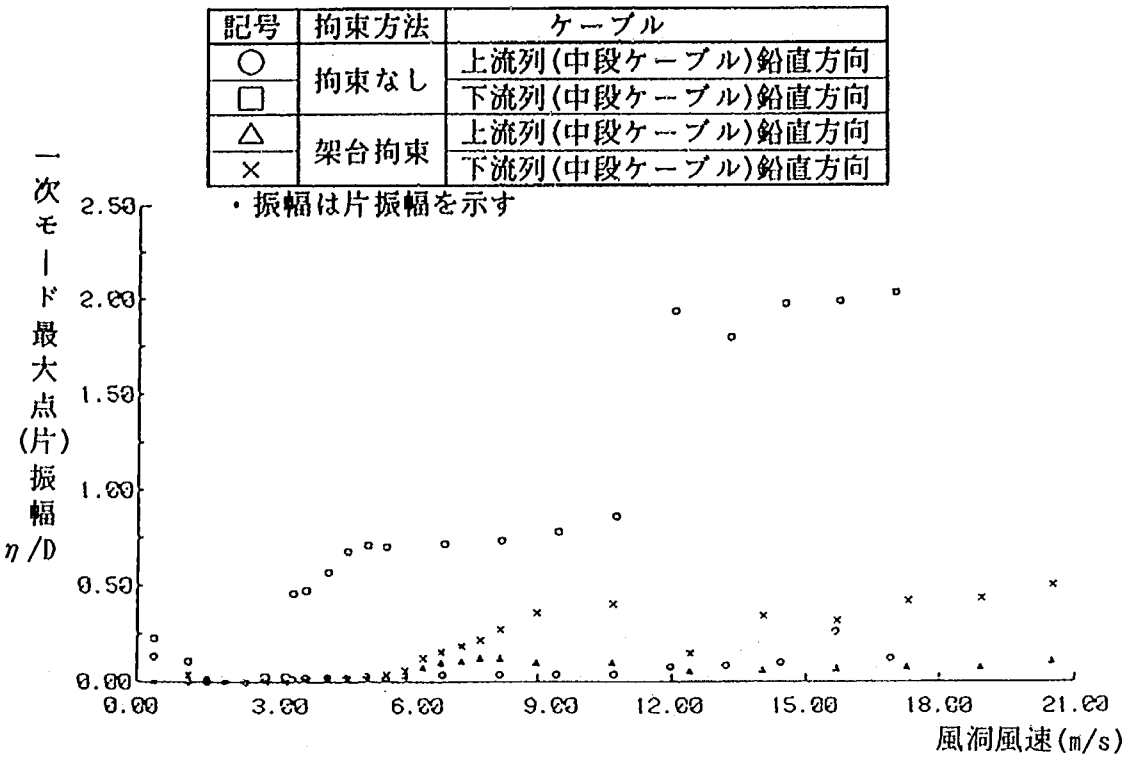


図-3.3.26 制振対策なしのときと3段スペーサーをワイヤー（平行）で架台に拘束したときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上段ケーブル



(注意)架台拘束したときは、ｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ(一次ﾓｰﾄﾞ)振動が発生しており、図中のｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ振動は連結部材取付位置3/4点と桁定着点間の距離を示す。

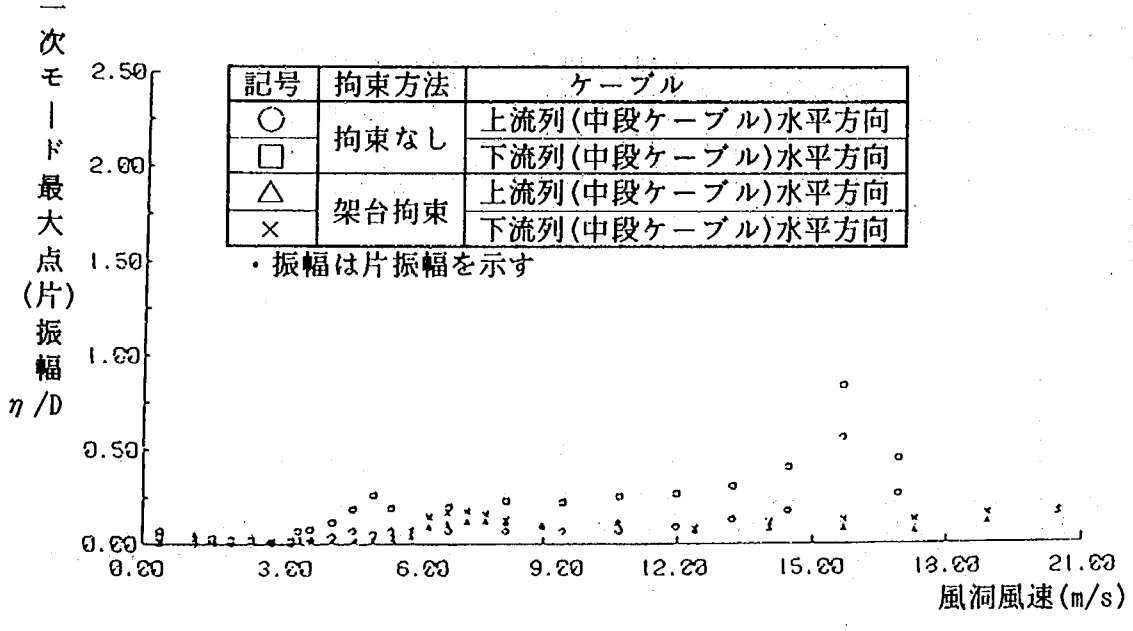
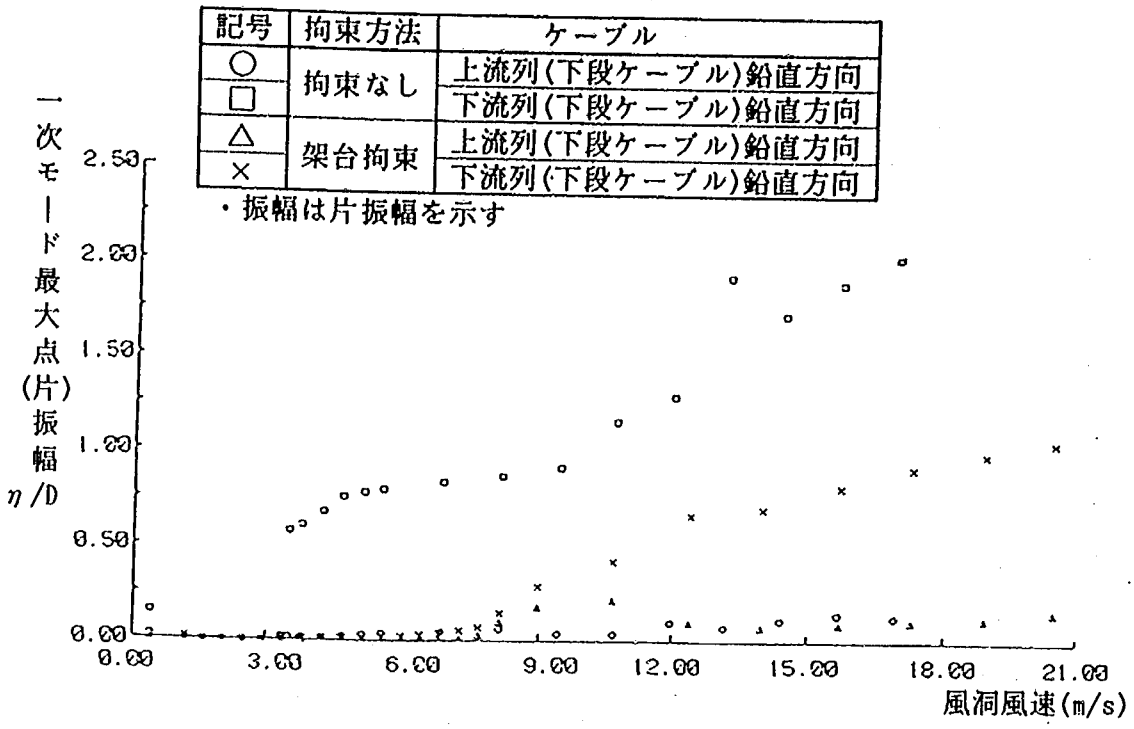


図-3.3.27　制振対策なしのときと3段スペーサーをワイヤー（平行）で架台に拘束したときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：中段ケーブル



(注意)架台拘束したときは、ｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ(一次ﾓｰﾄﾞ)振動が発生しており、図中のｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ振動は連結部材取付位置3/4点と桁定着点間の距離を示す。

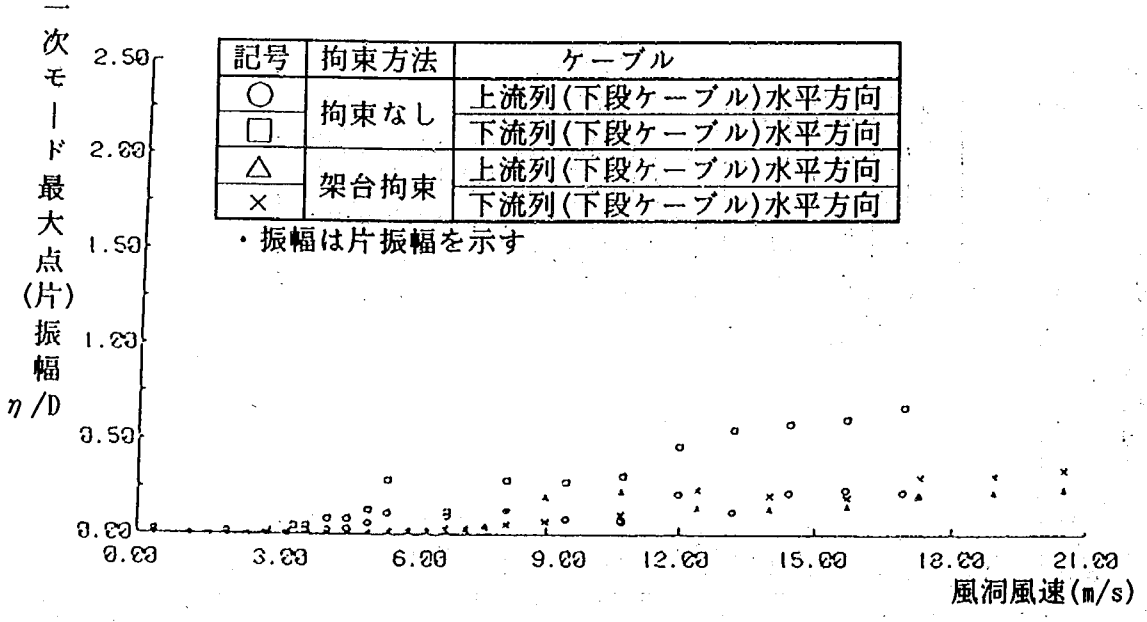


図-3.3.28 制振対策なしのときと3段スペーサーをワイヤー（平行）で架台に拘束したときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下段ケーブル

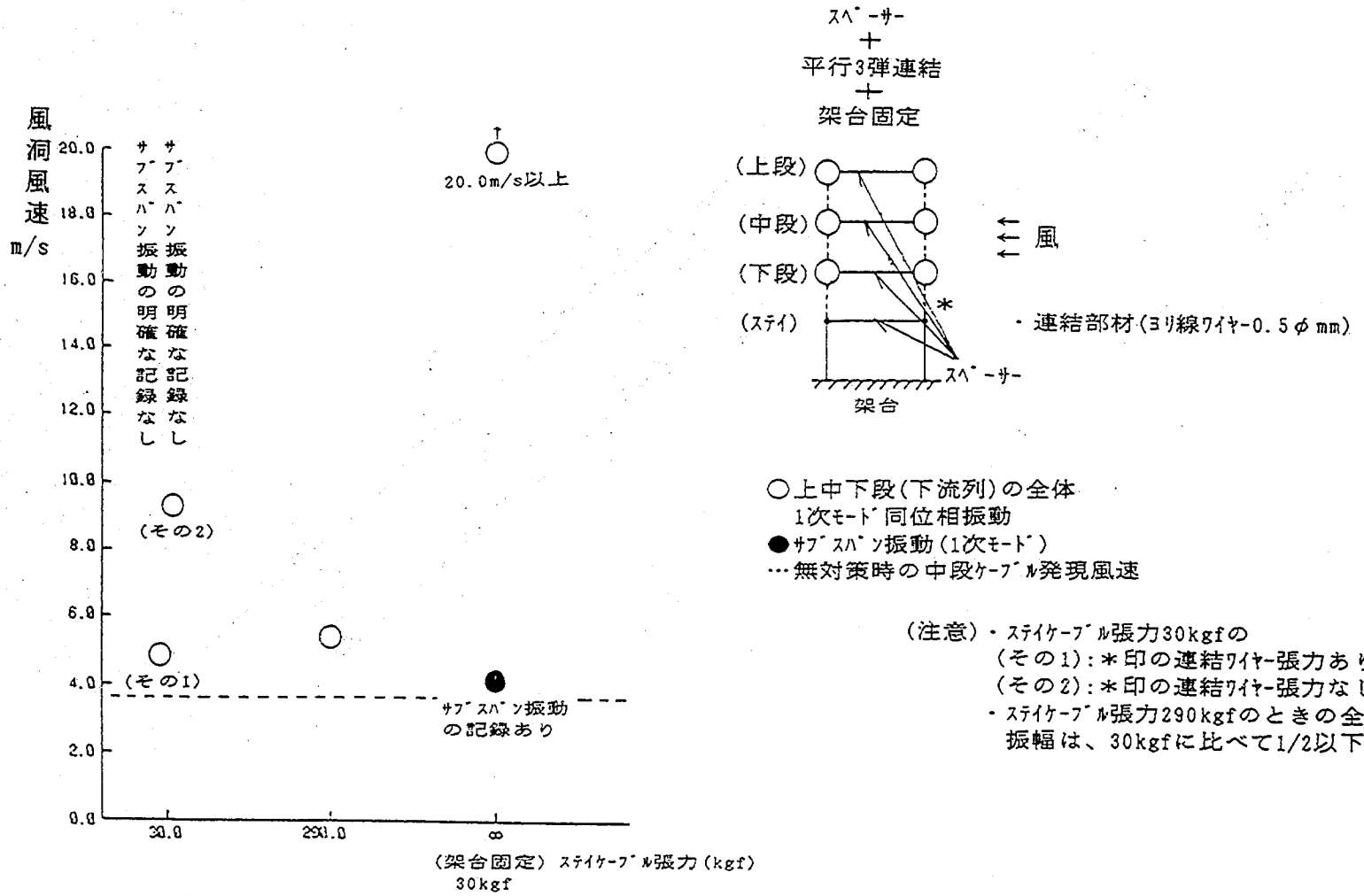


図-3.3.29　ステイケーブルの剛性の影響

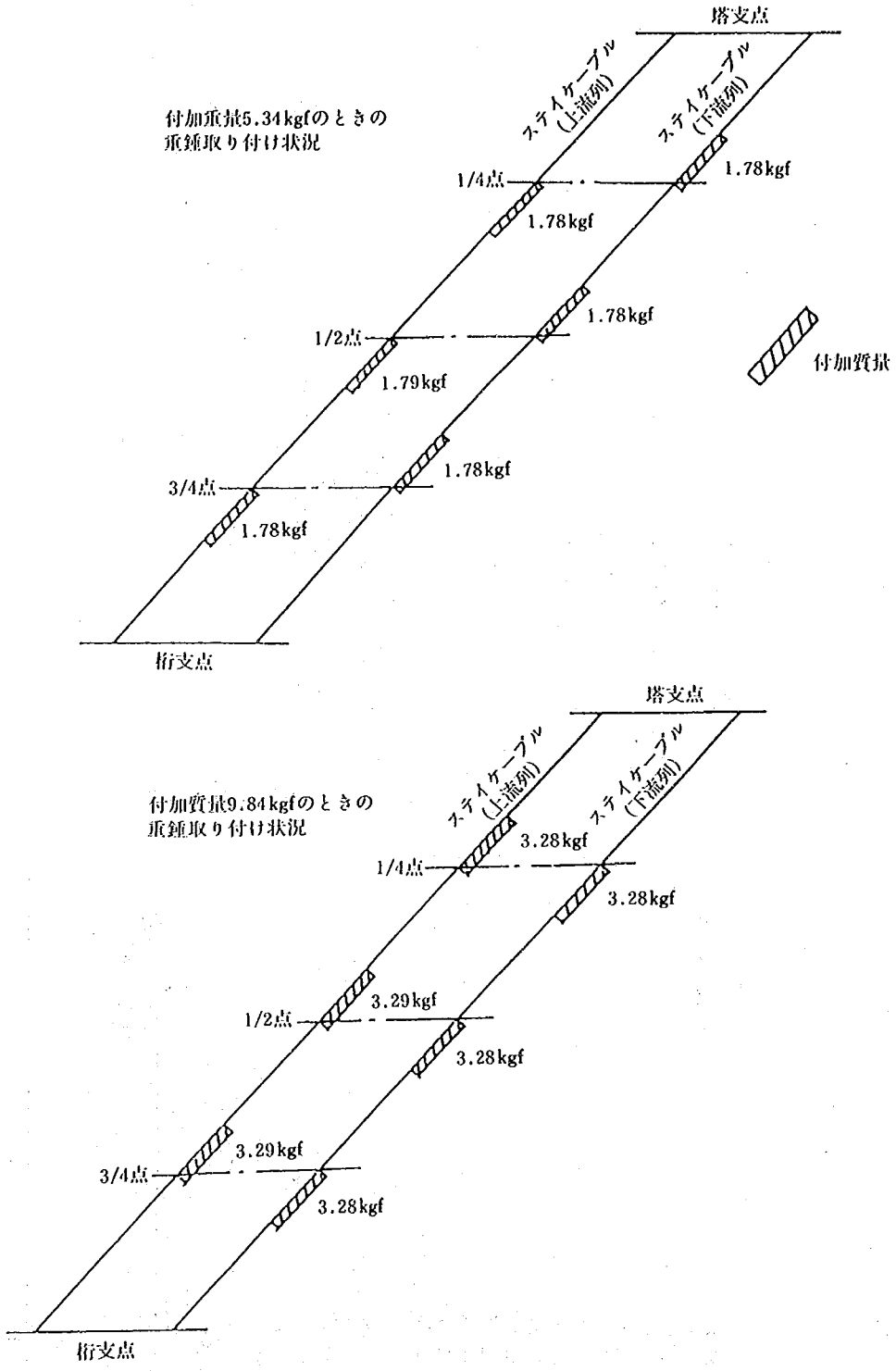


図-3.3.30　ステイケーブルの付加質量の取り付け状況

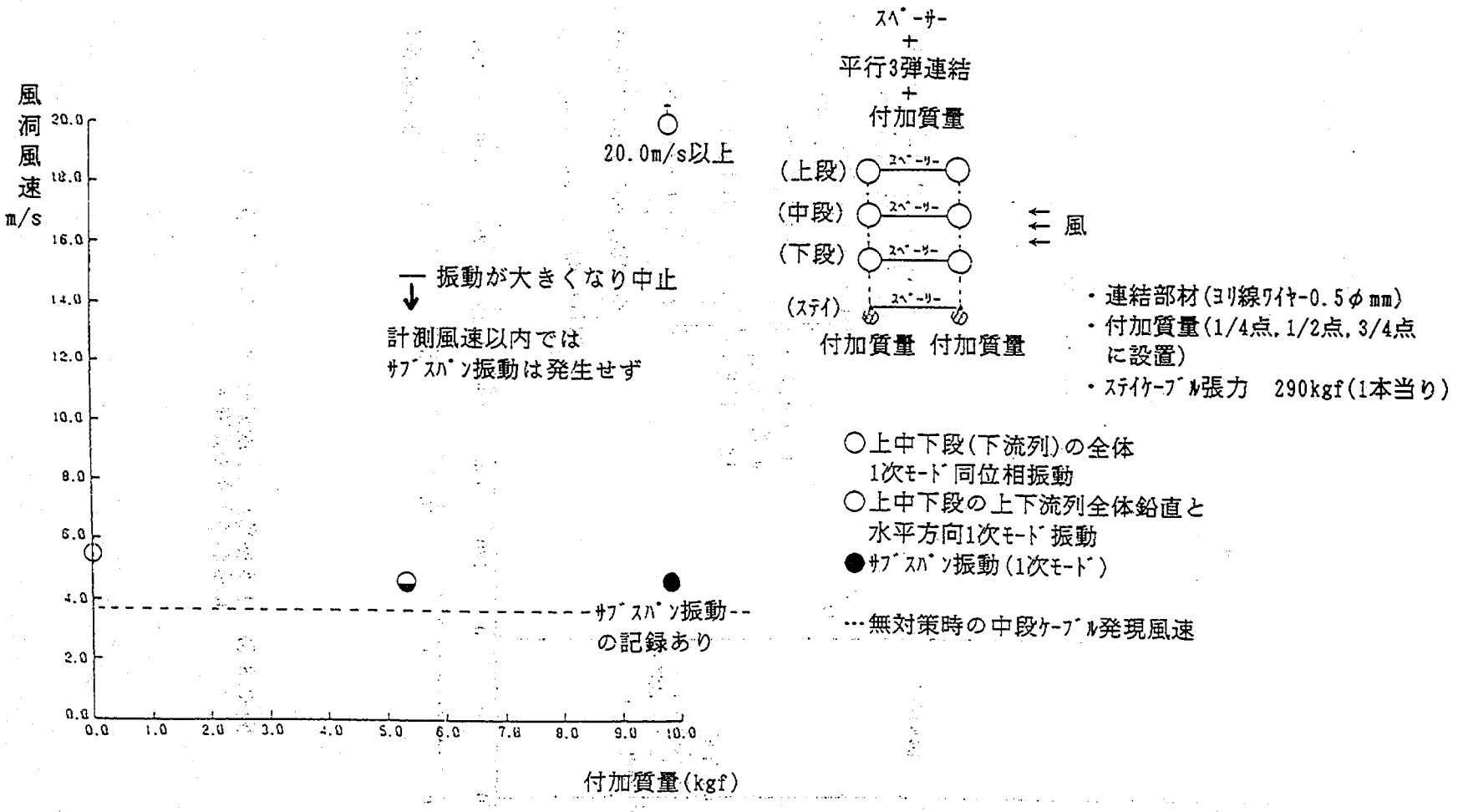


図-3.3.31 付加質量と振動発現風速

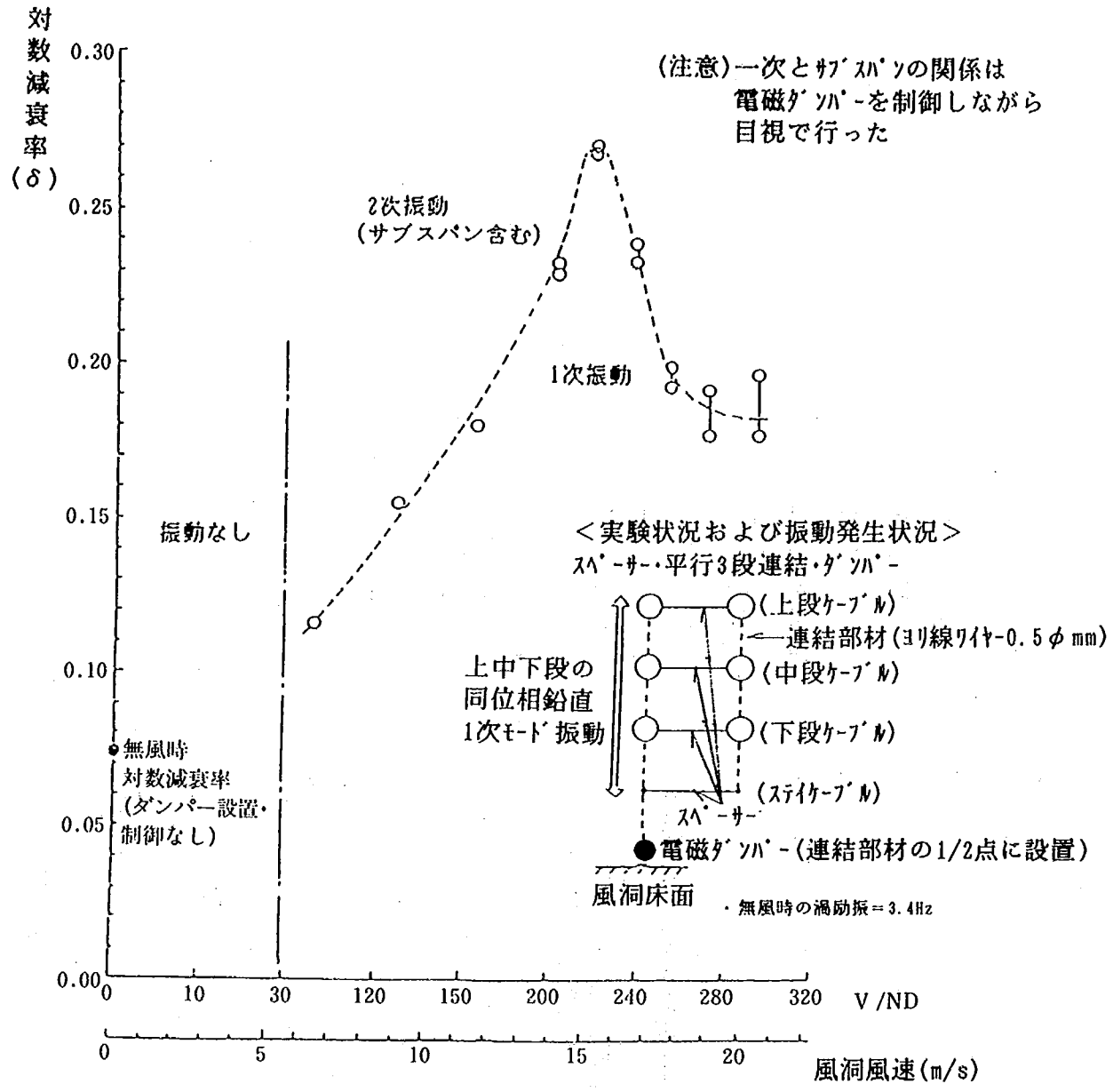
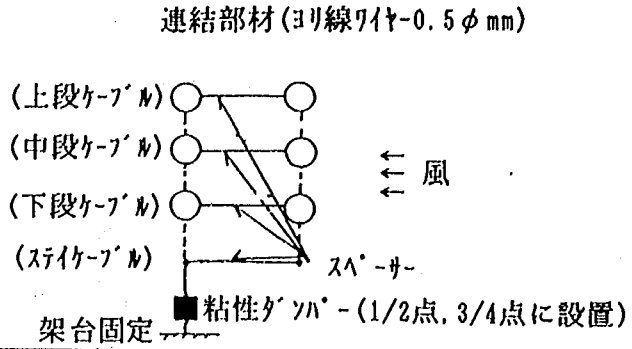


図-3.3.32　1次振動から2次振動（サブスパンを含む）
に変わるときの減衰率

粘性ダンパーの効果



添加物		粘性ダンパー		
ビデオ撮影		あり (ビデオテープ(粘性ダンパー))		
無風時の振動数		計測不可能		
無風時の減衰率		大 (下流列の上中下段の全体1次振動(上流列は拘束・目視による))		
ケーブルの張力	上段	58.1 kgf (1本当たり)		
	中段	58.8 kgf (1本当たり)		
	下段	58.5 kgf (1本当たり)		
	スティ	290 kgf (1本当り)		
振動状況		下流列の上中下段の全体1次振動	サブスパン振動	備考

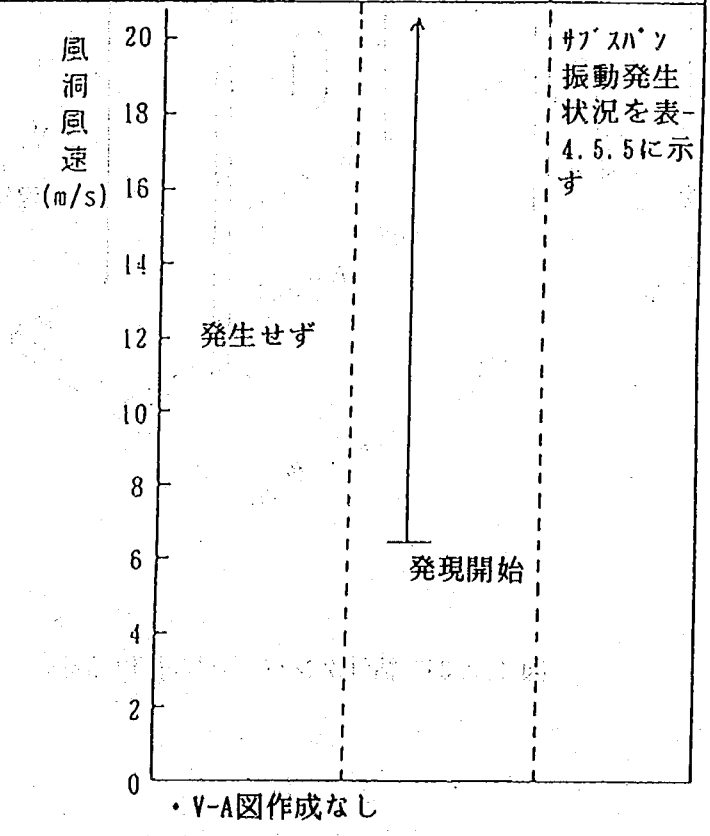


図-3.3.33 粘性ダンパーの効果

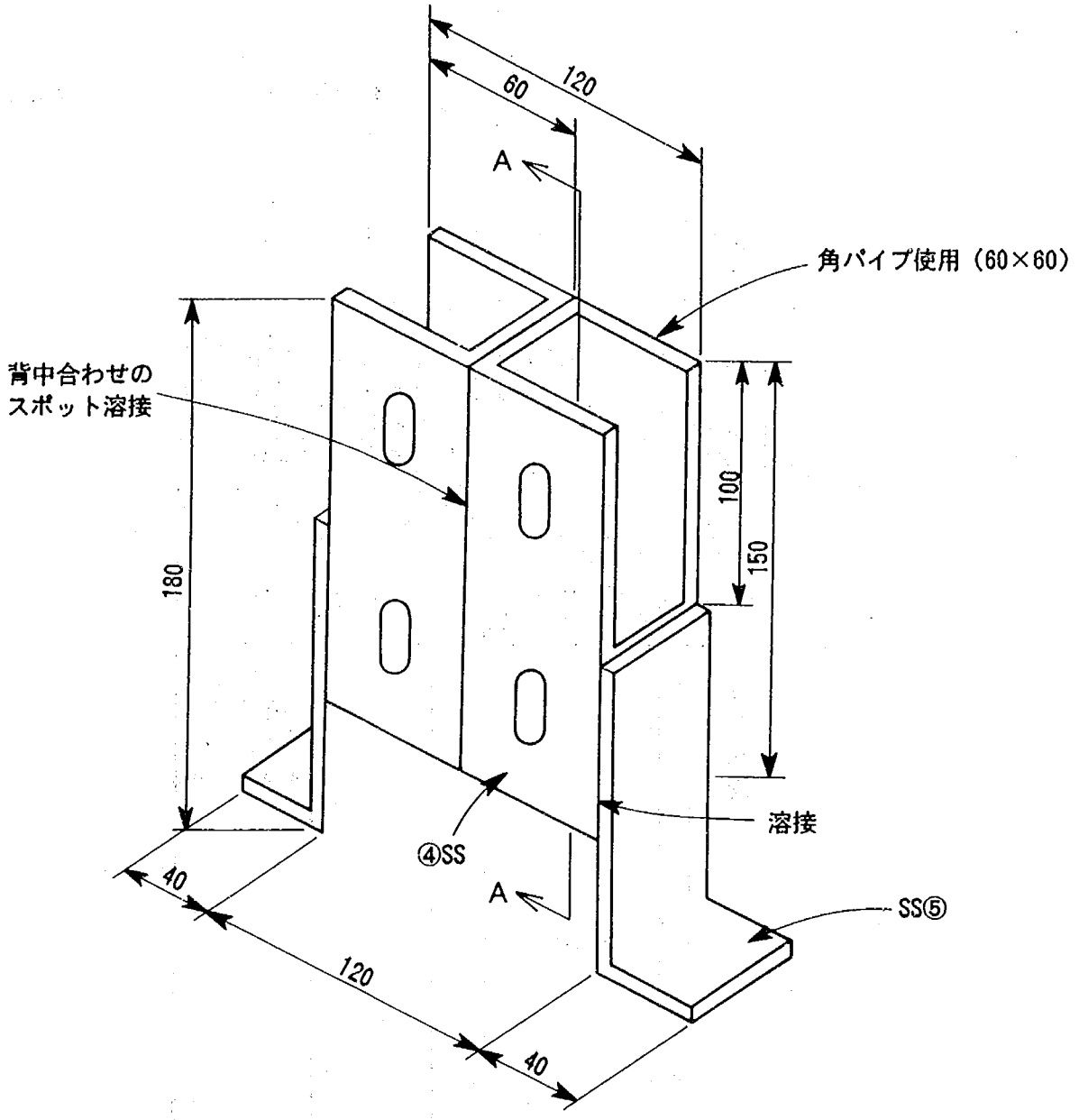


図-3.3.34　粘性ダンパー取り付け治具

A－A　断面図

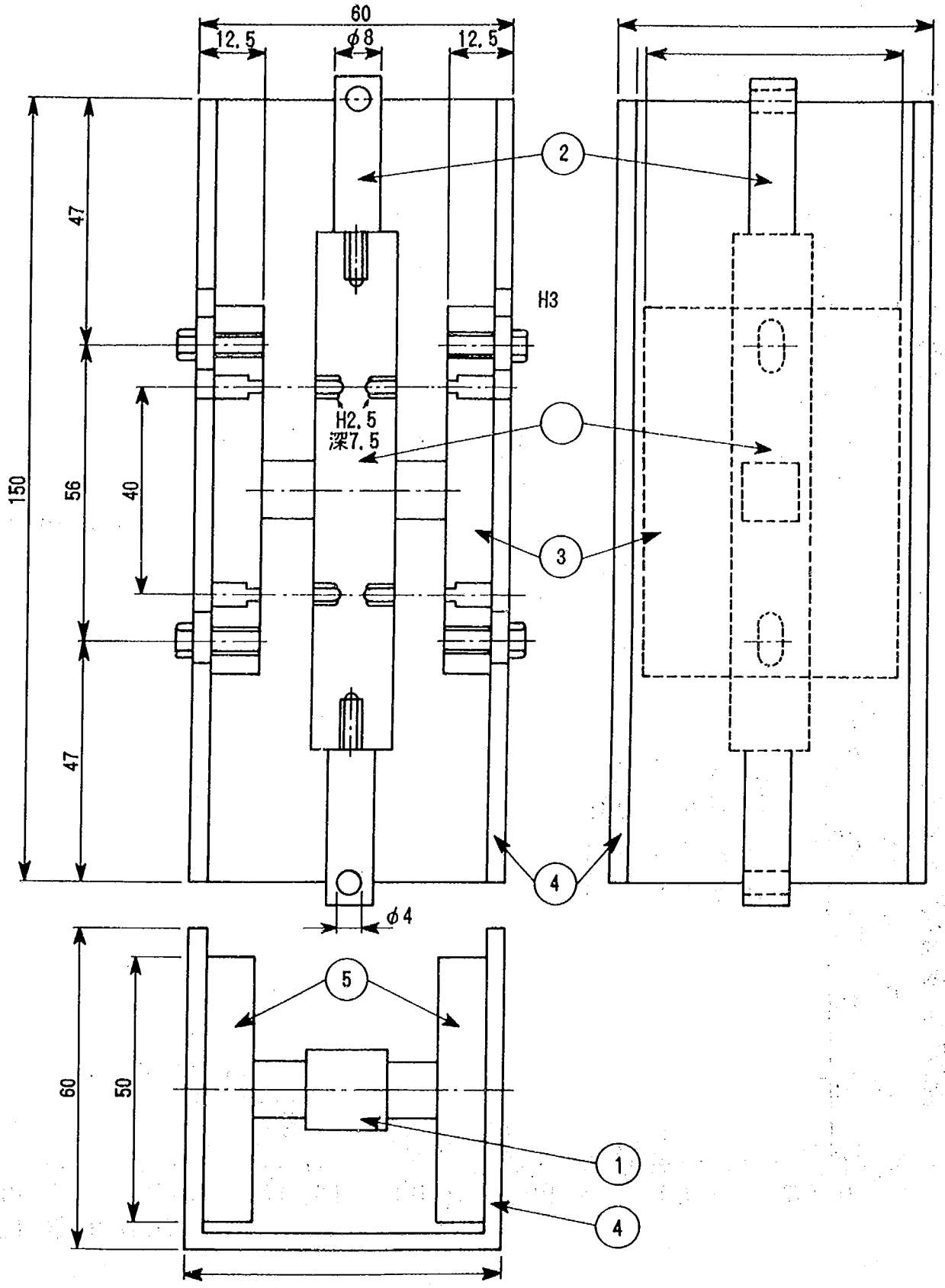
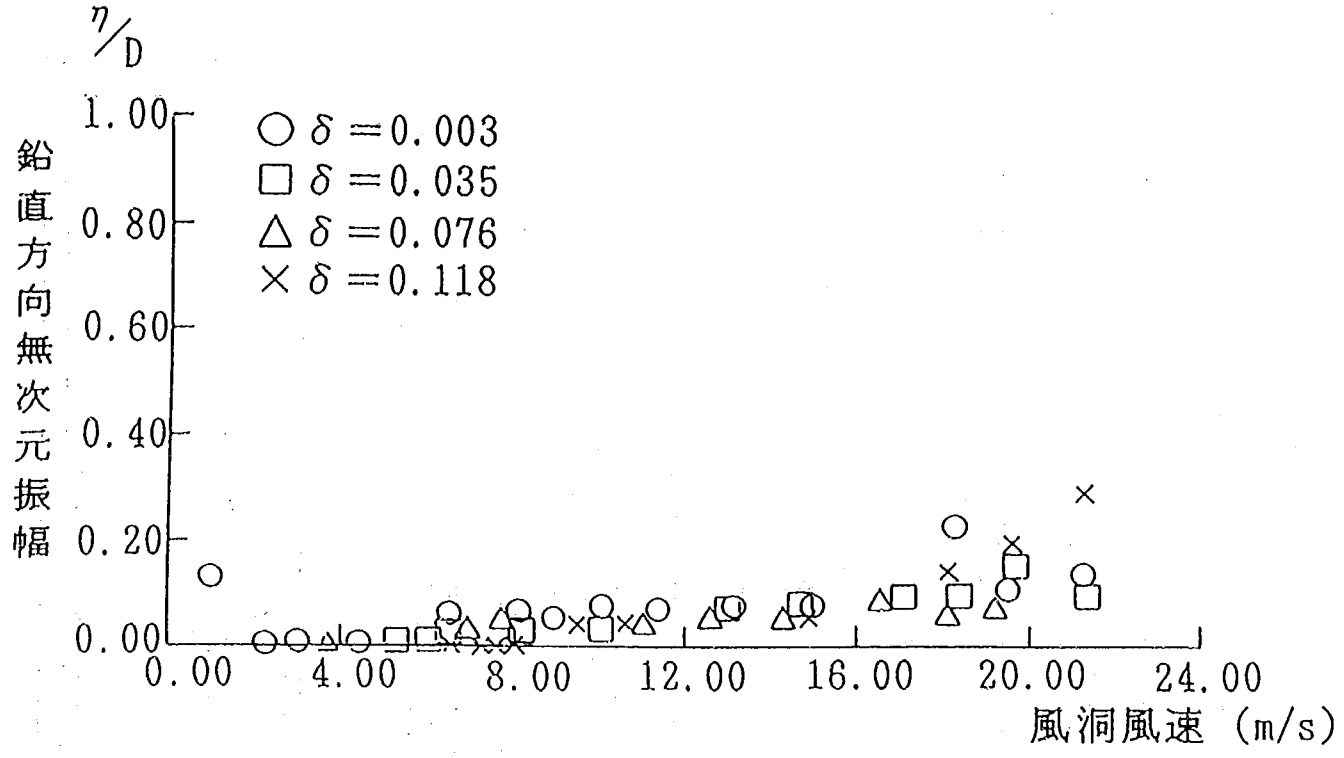


図-3.3.35　粘性ダンパー機構図



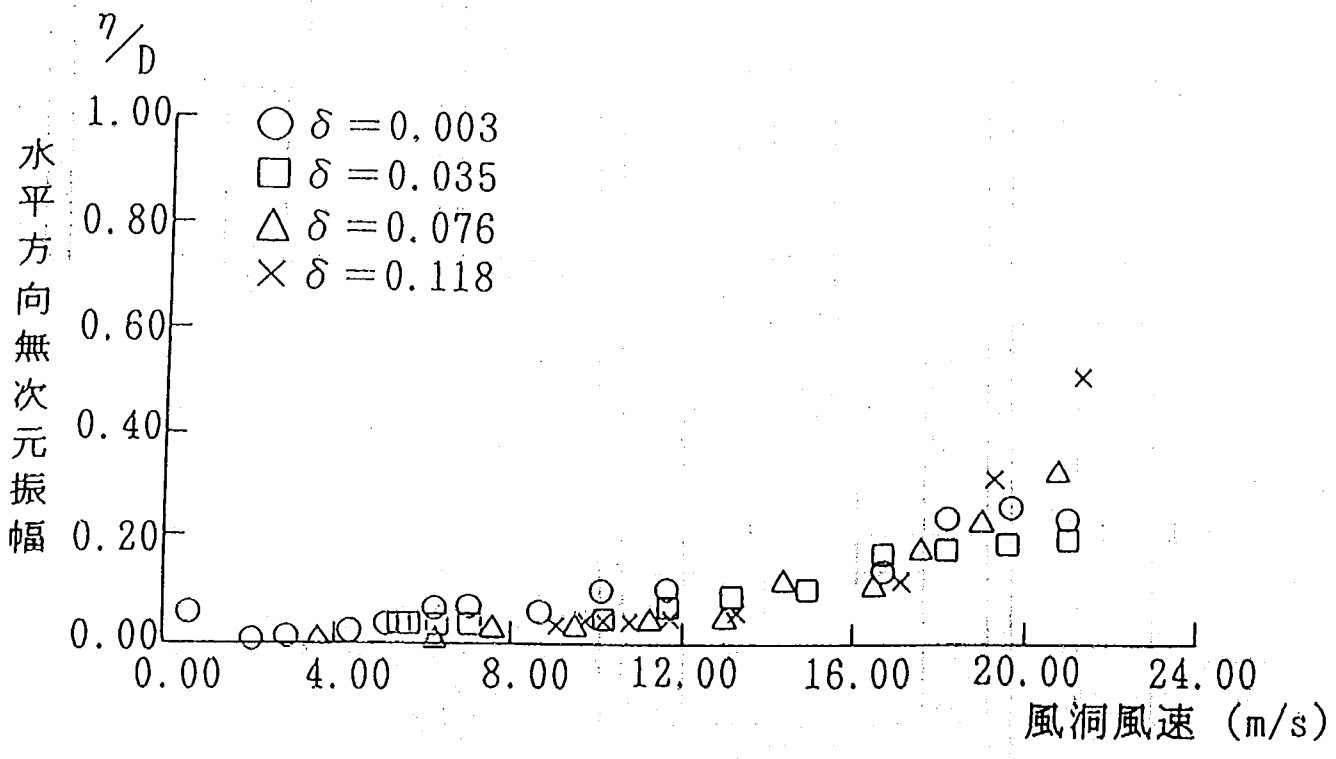
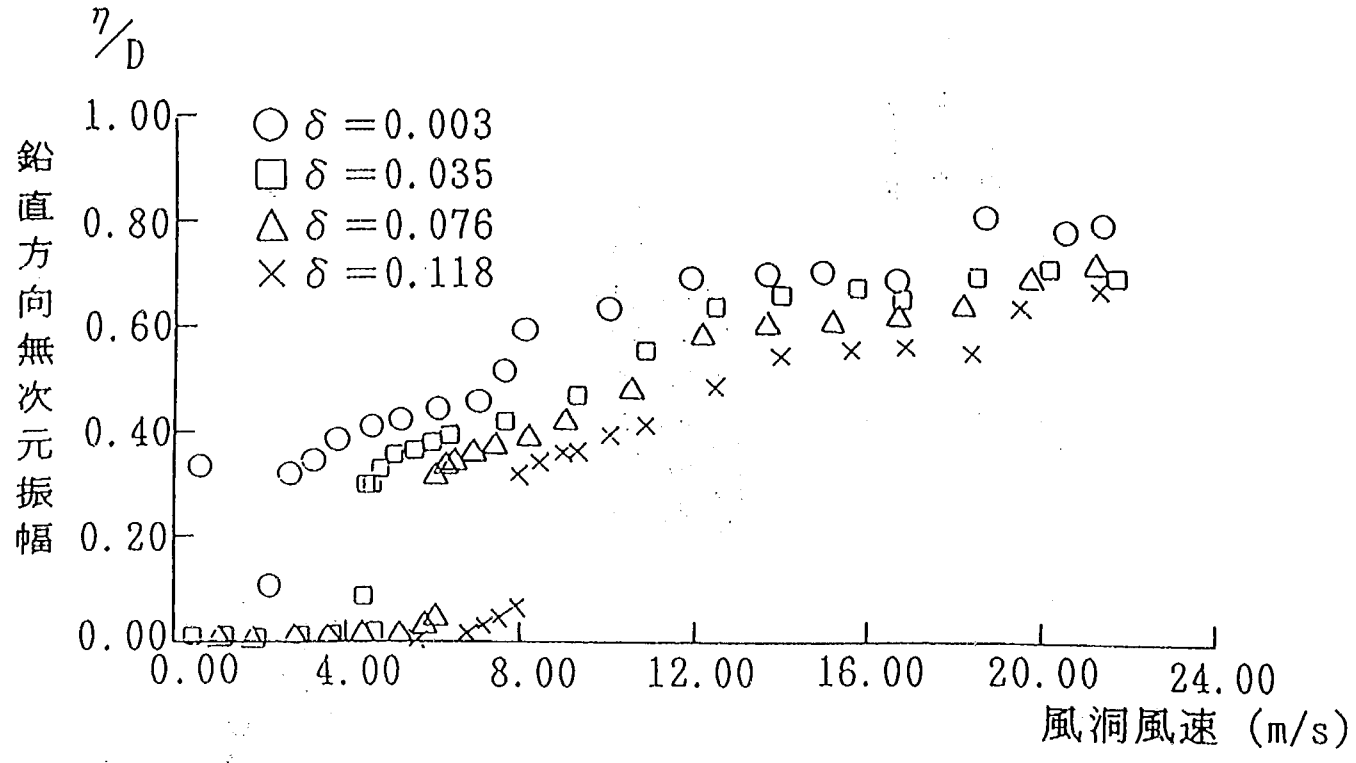


図-3.3.36　風洞風速と上流側ケーブルの応答の関係



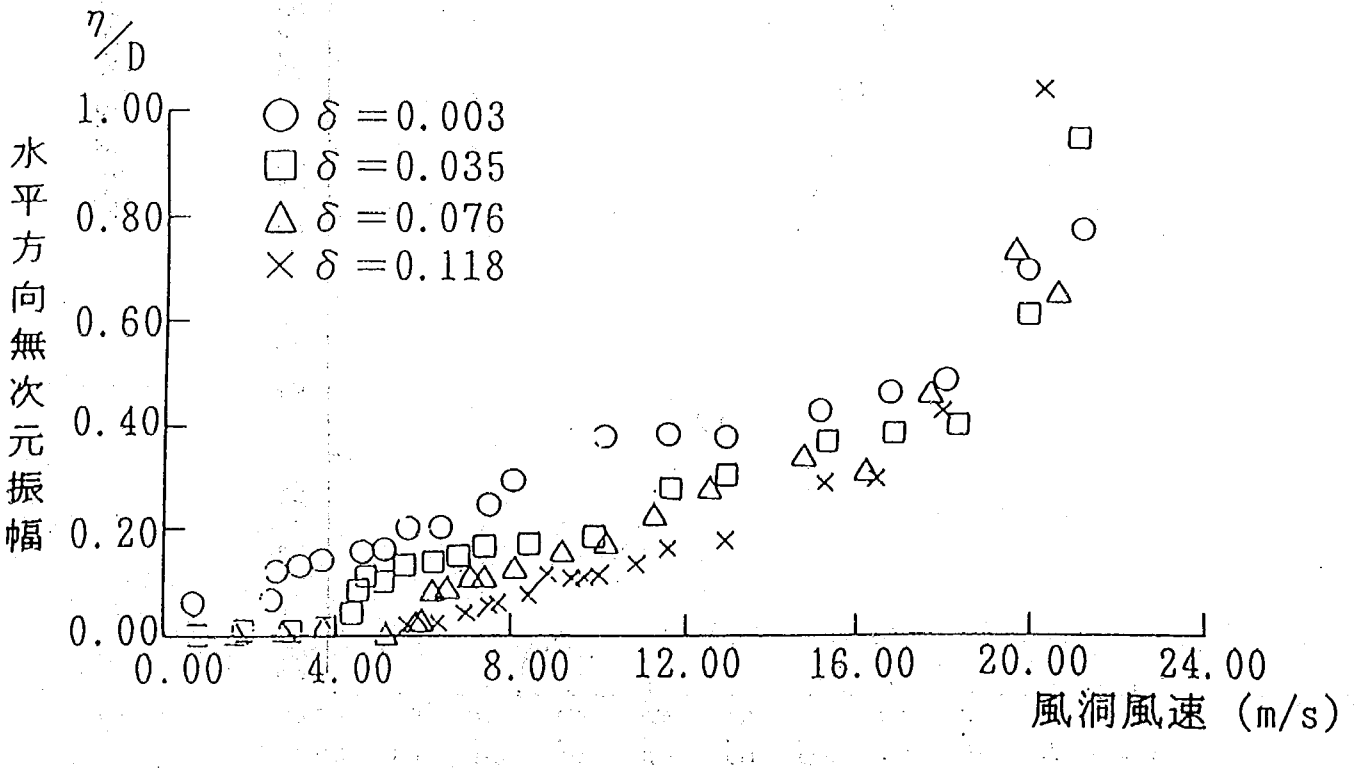


図-3.3.37　風洞風速と下流側ケーブルの応答の関係

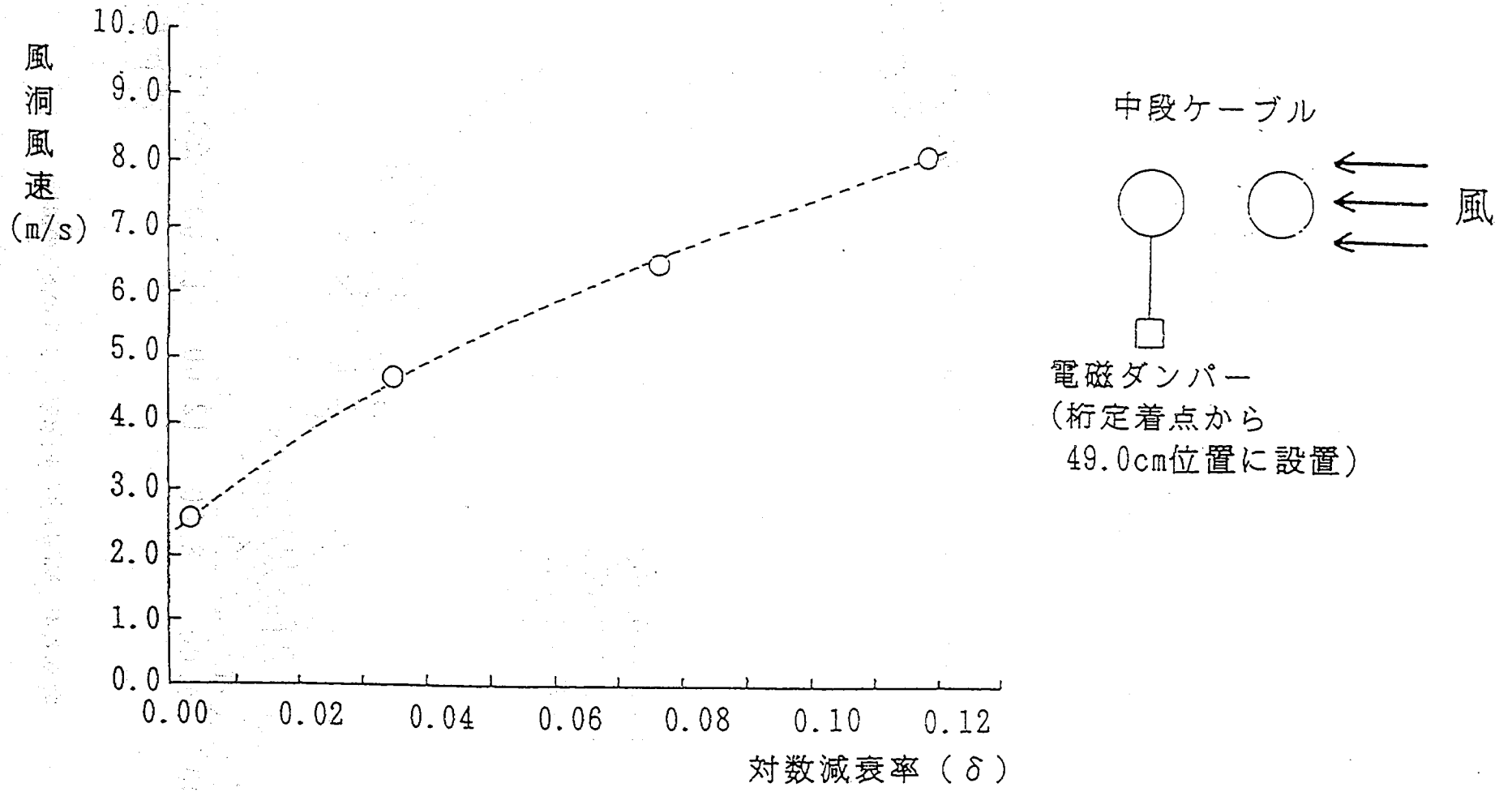


図-3.3.38　構造減衰と振動発現風速

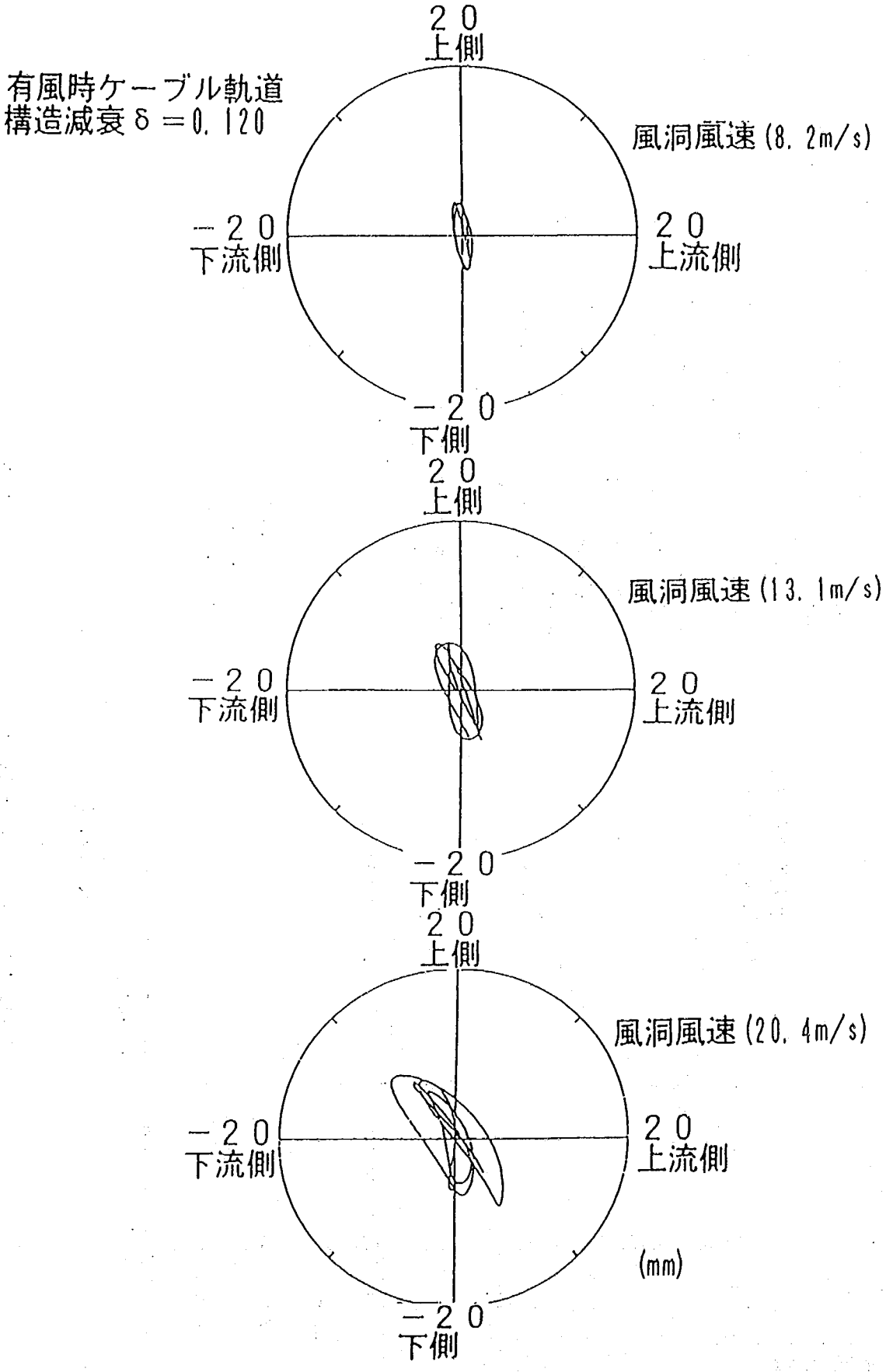
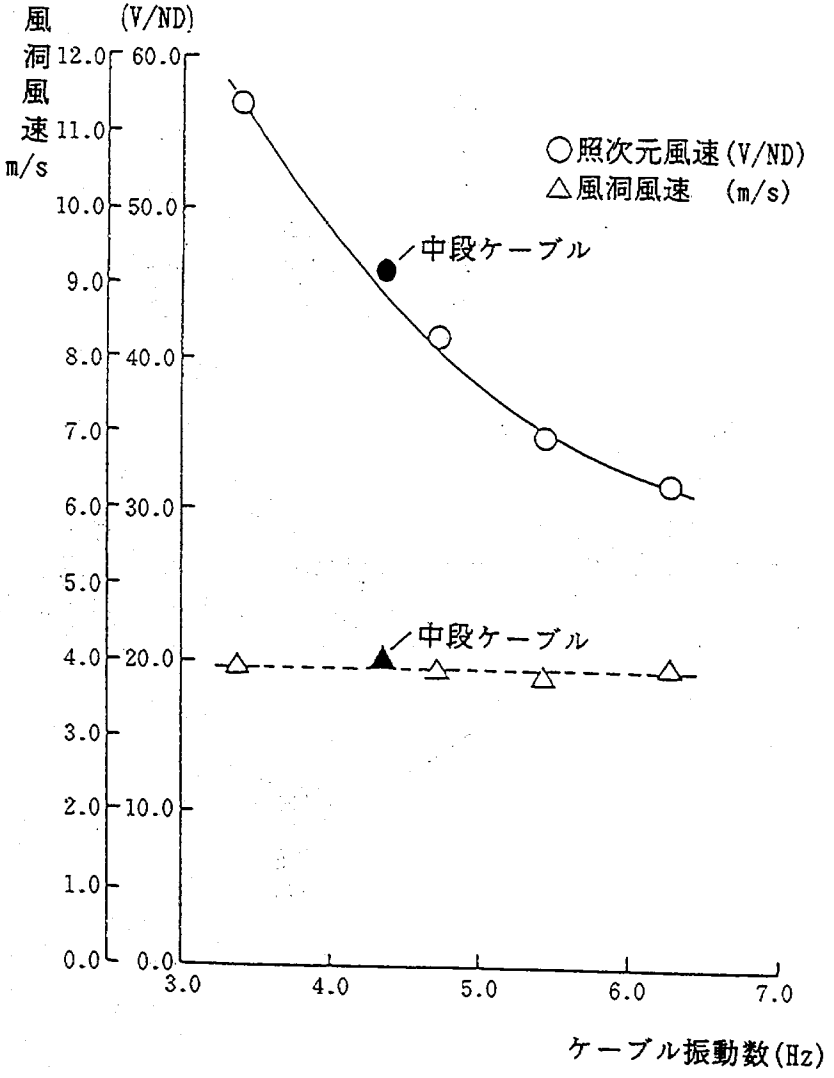


図-3.3.39　ケーブル軌道（下流側 δ＝0.12）



各振動数のときの対数減衰率および張力

ｹｰﾌﾞﾙ	ｹｰﾌﾞﾙ間隔	振動数(Hz)	張力(kgf)	対数減衰率	備考
下段	3.00	3.38	59	0.0021	V-A図作成なし
		4.73	113	0.0017	V-A図作成なし
		5.45	150	計測せず	V-A図作成なし
		6.28	199	0.0014	V-A図作成なし
中段		4.35	108	0.0016	V-A図作成なし

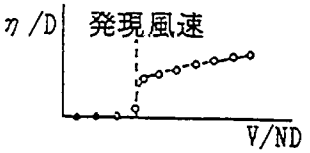
・下流列ｹｰﾌﾞﾙの挙動

振動が発生したときの振幅(鉛直方向)は、風速と共に徐々に増加し、風洞風速20m/sにおいて振動数による差異は見られずη/D=1程度であった。

・上流列ｹｰﾌﾞﾙの挙動

下流列ｹｰﾌﾞﾙの振動による共振もほとんどなく風洞風速20m/sまで静止安定していた。

・下流列ｹｰﾌﾞﾙの発現風速の定義



・ｹｰﾌﾞﾙの架設状況

実験を行ったときは上下段およびｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙは、取り外して行った。

図-3.3.40 ケーブルの振動数とウェークギャスッピング発現風速
注）測定ケーブル：下流列，下段ケーブル

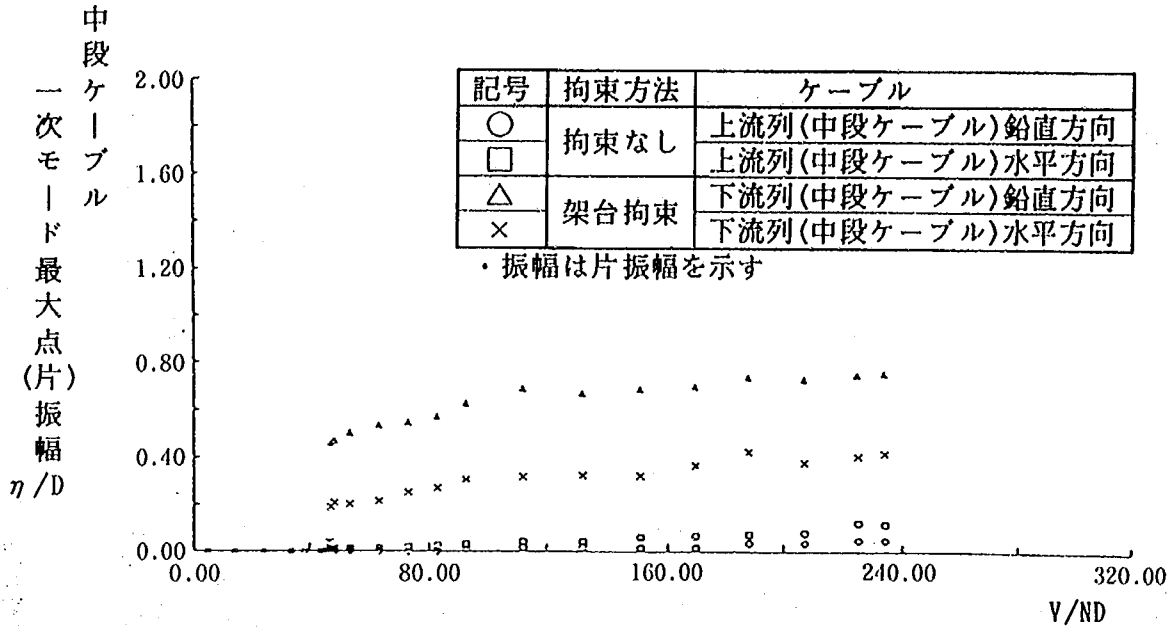
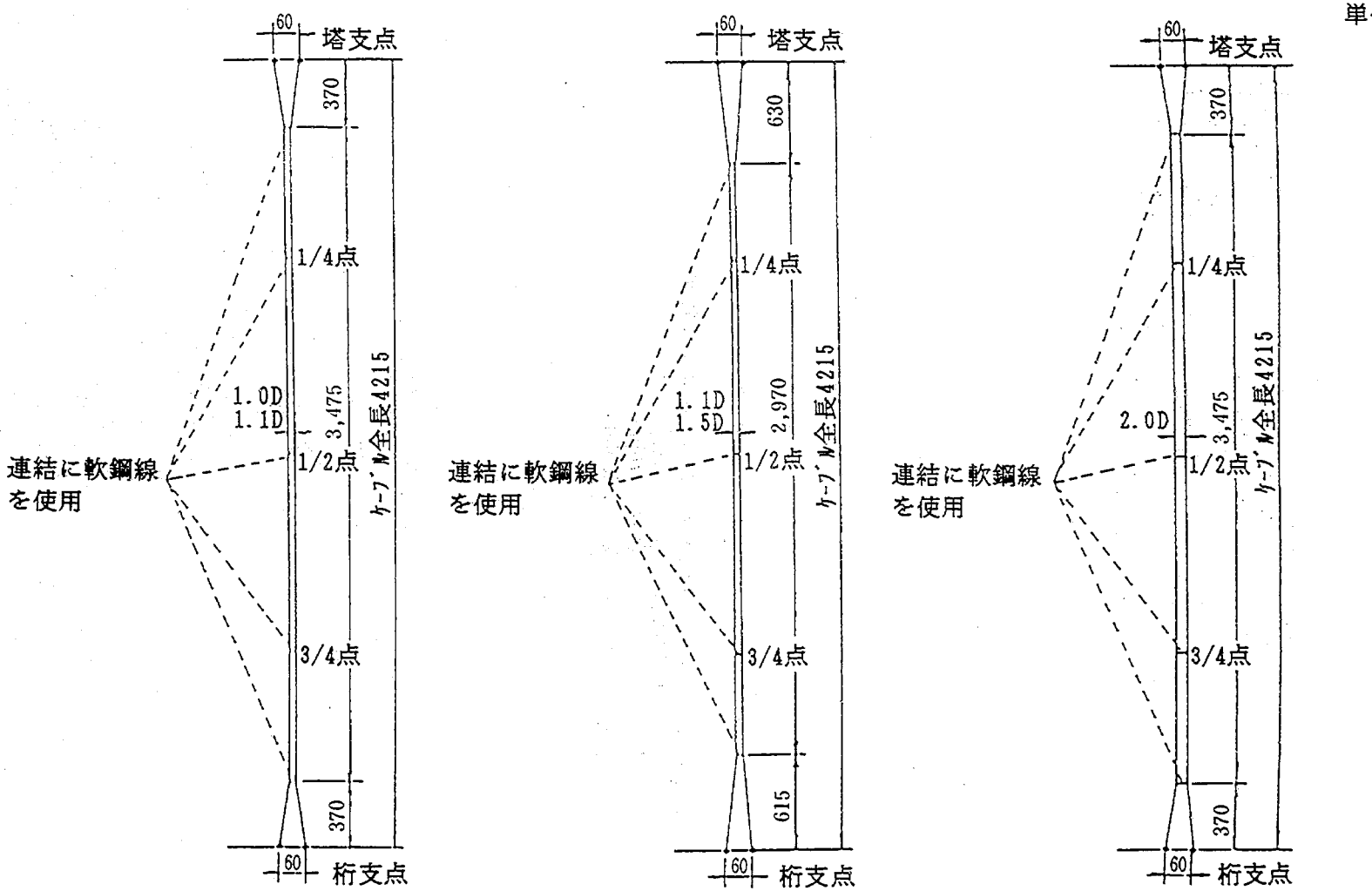


図-3.3.41 振動数を変化させたときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：中段ケーブル
ケーブル張力：110Kgf
振　動　数　：4.35Hz

単位：mm



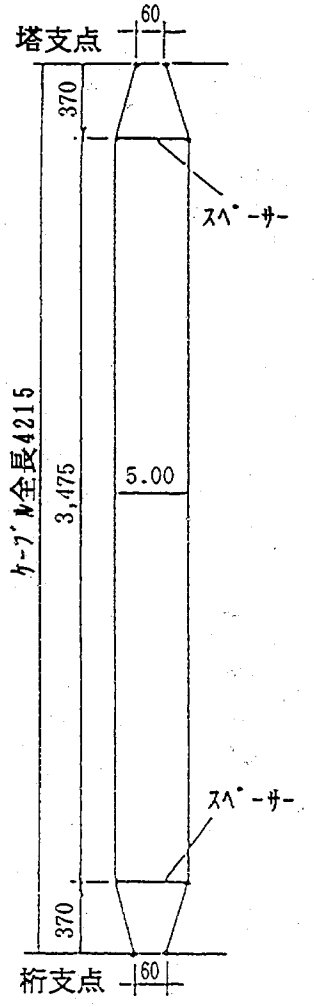
＊1　ケーブル間隔1.0D,1.1D
にしたときの詳細図

＊2　ケーブル間隔1.1D,1.5D
にしたときの詳細図

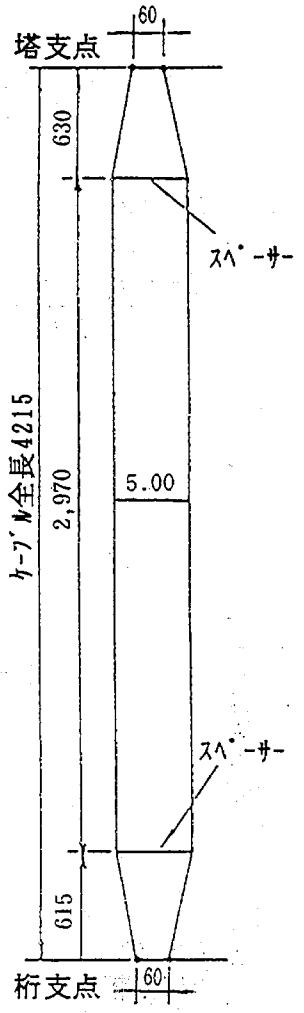
＊3　ケーブル間隔2.0D
にしたときの詳細図

図-3.3.42　ケーブル間隔設定図（その１）

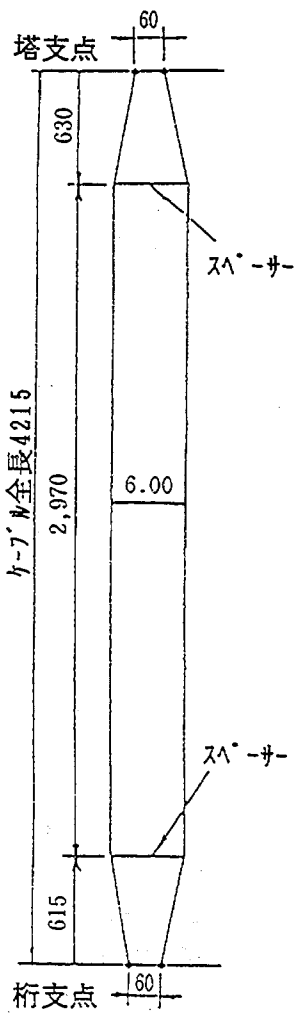
単位：mm



＊6　ケーブル間隔5.0D(スペーサー使用)にしたときの詳細図

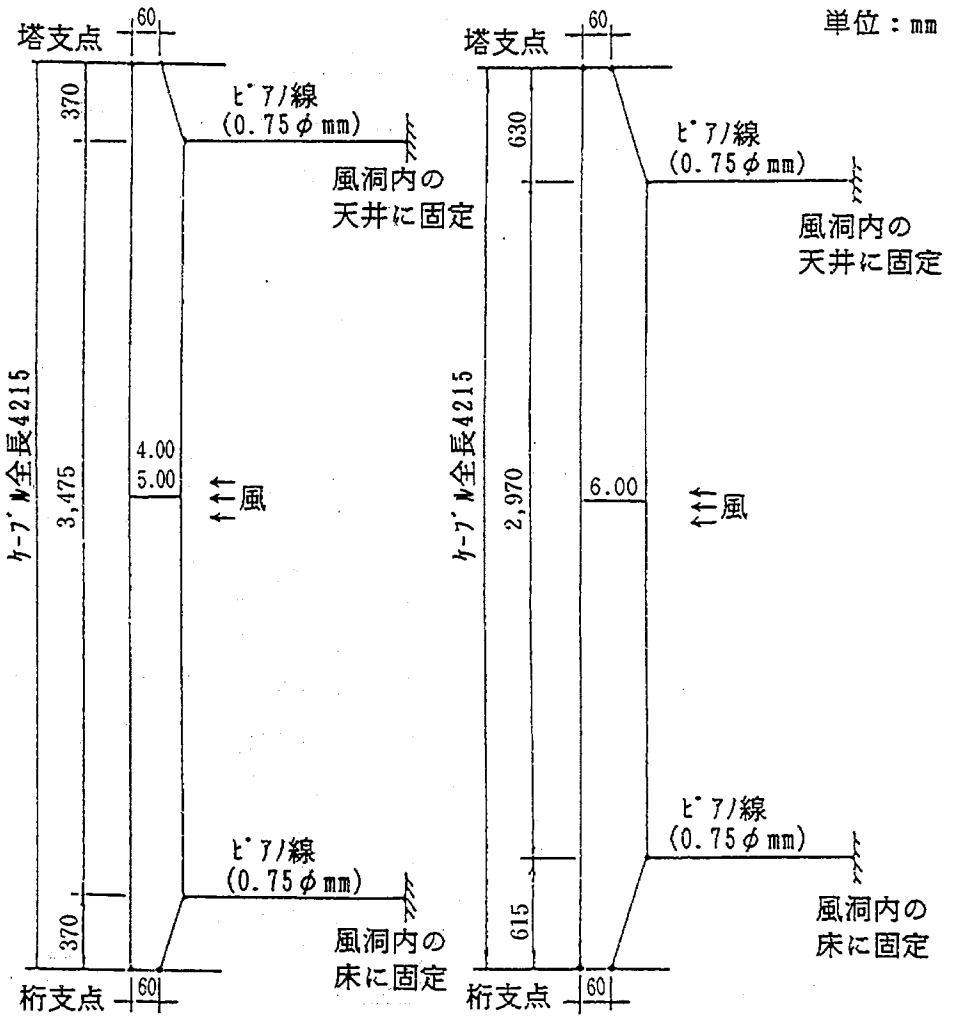


＊7　ケーブル間隔5.0D(スペーサー使用)にしたときの詳細図



＊8　ケーブル間隔6.0D(スペーサー使用)にしたときの詳細図

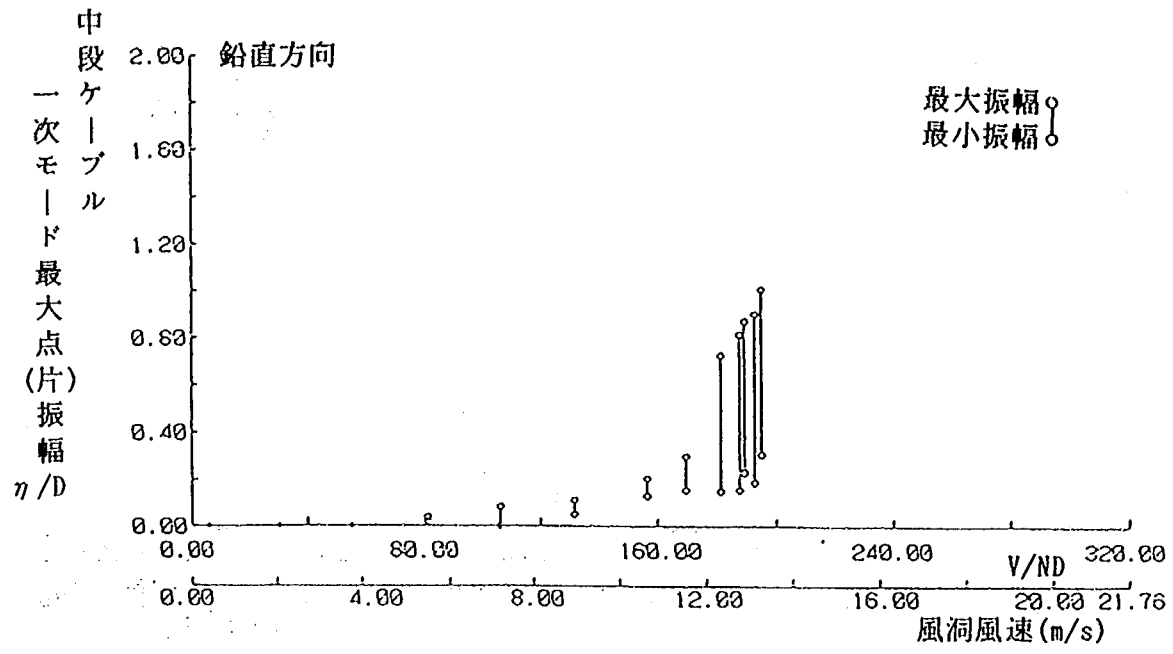
図-3.3.43　ケーブル間隔設定図（その２）



＊4　ケーブル間隔4.0D, 5.0D
にしたときの詳細図

＊5　ケーブル間隔6.0D
にしたときの詳細図

図-3.3.44　ケーブル間隔設定図（その3）



ケーブル間隔1.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上流列，中段ケーブル

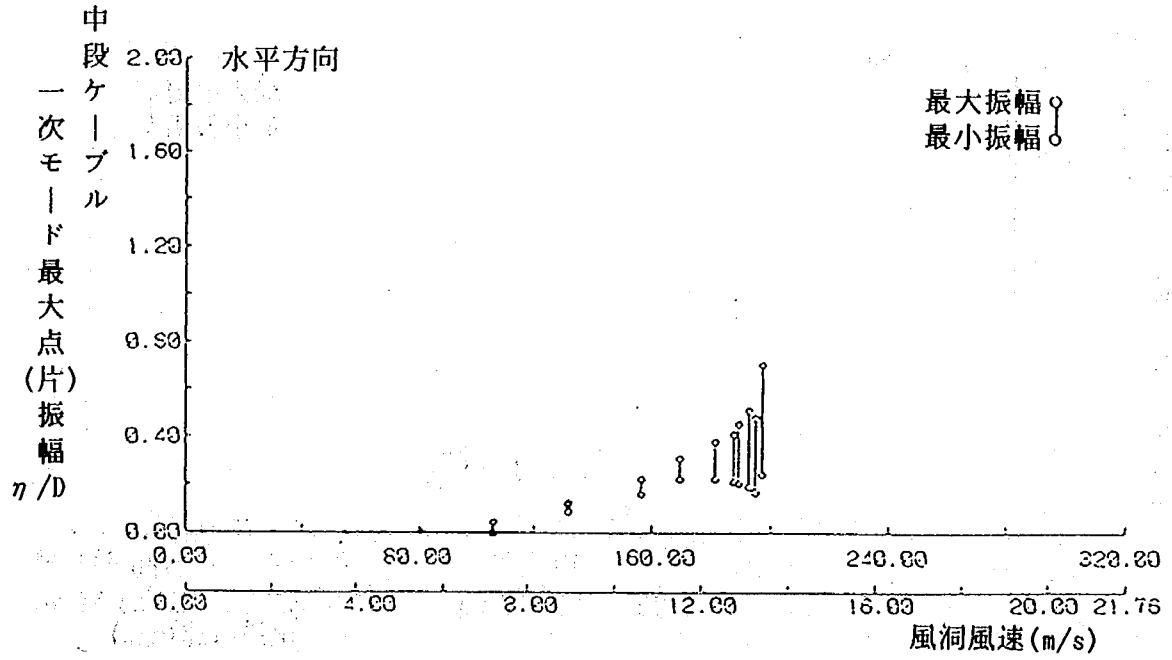
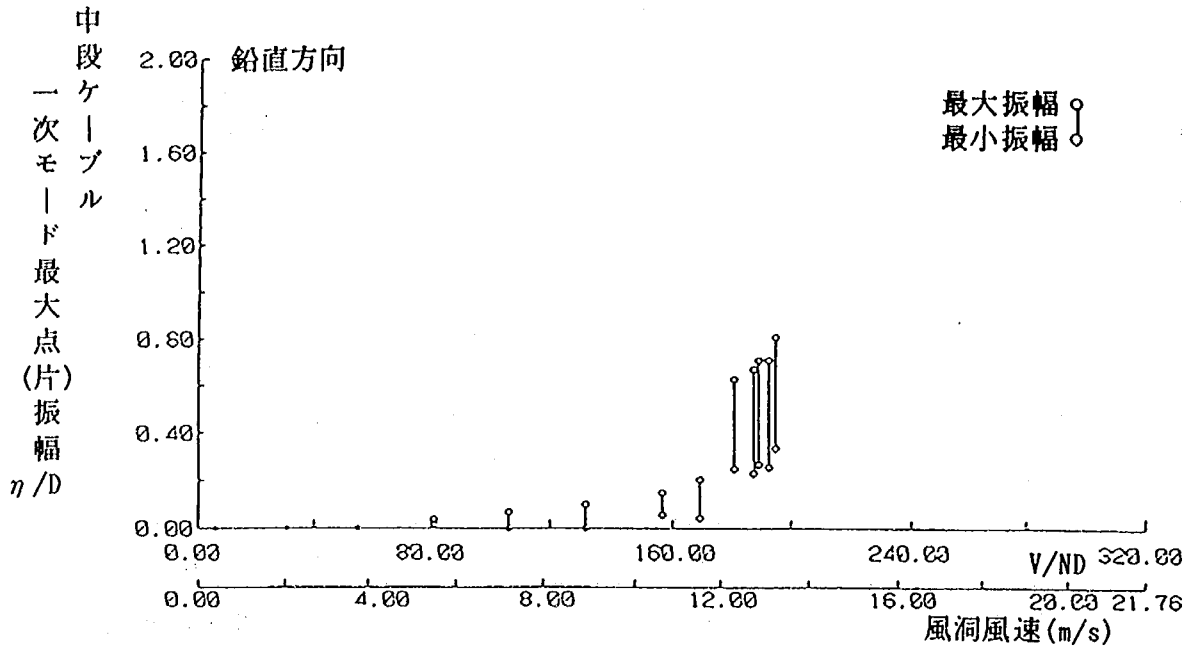


図-3.3.45　ケーブル間隔1.0Dのとき風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上流列，中段ケーブル



ケーブル間隔1.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル

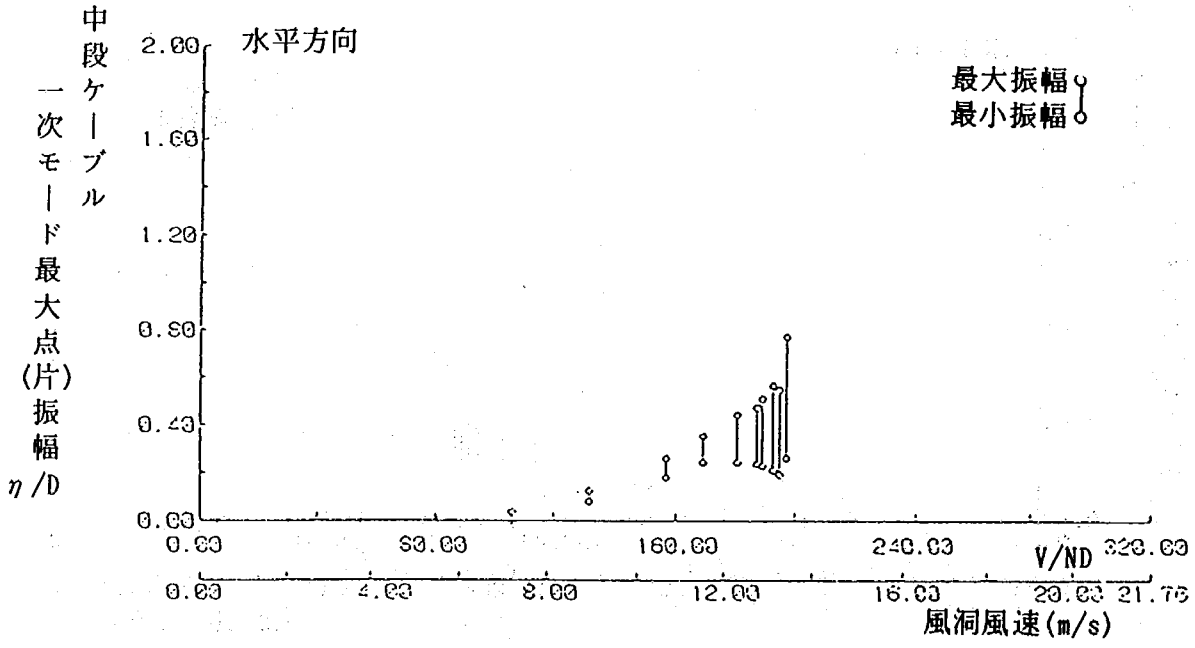
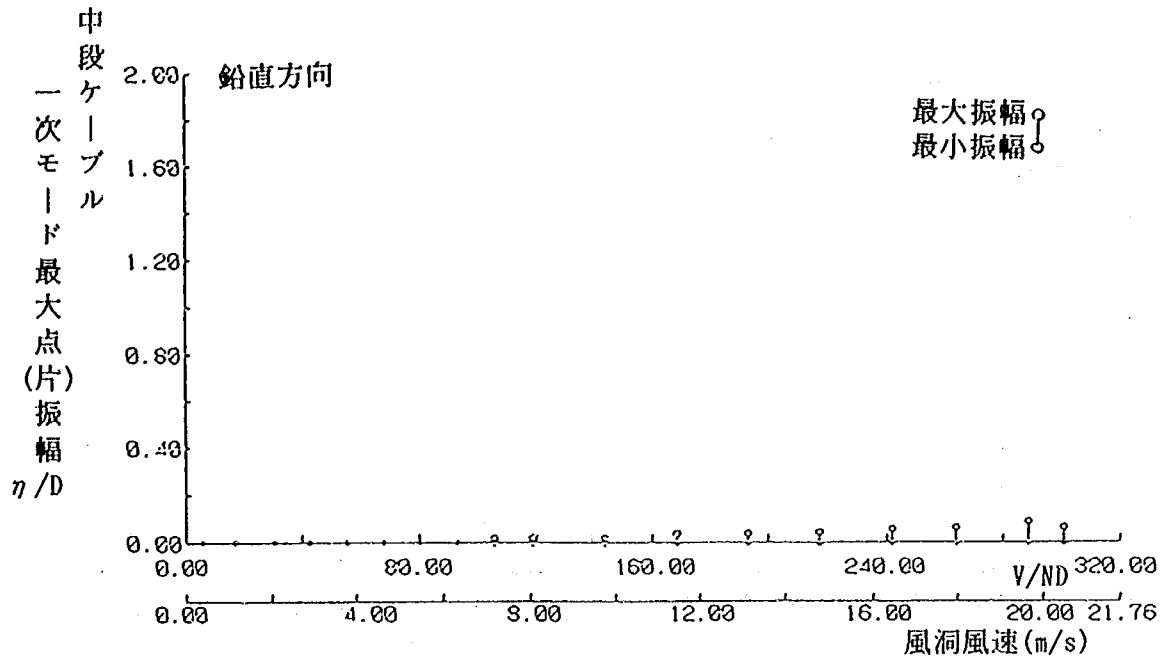


図-3.3.46　ケーブル間隔1.0Dのとき風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



ケーブル間隔1.1Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル

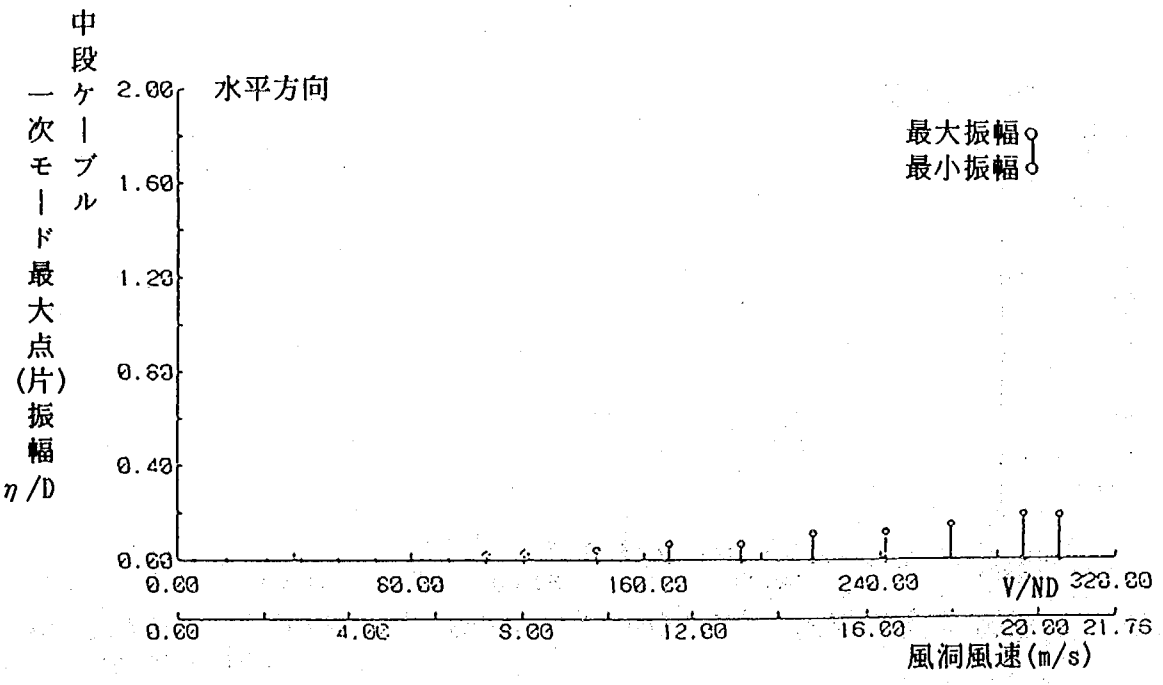
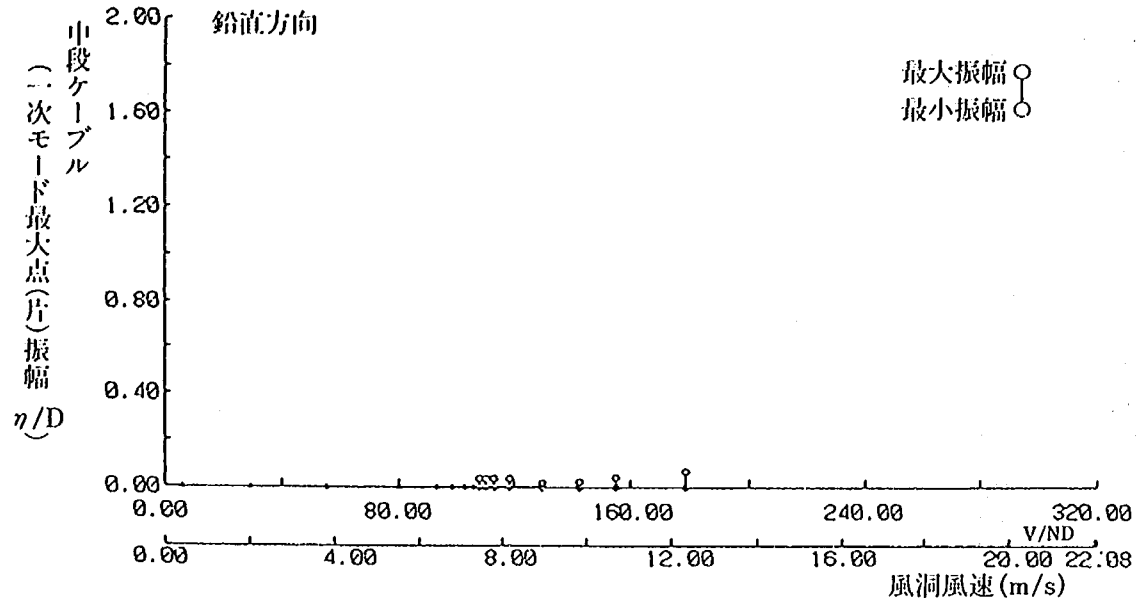


図-3.3.47　ケーブル間隔1.1Dのとき風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



ケーブル間隔2.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上流列、中段ケーブル

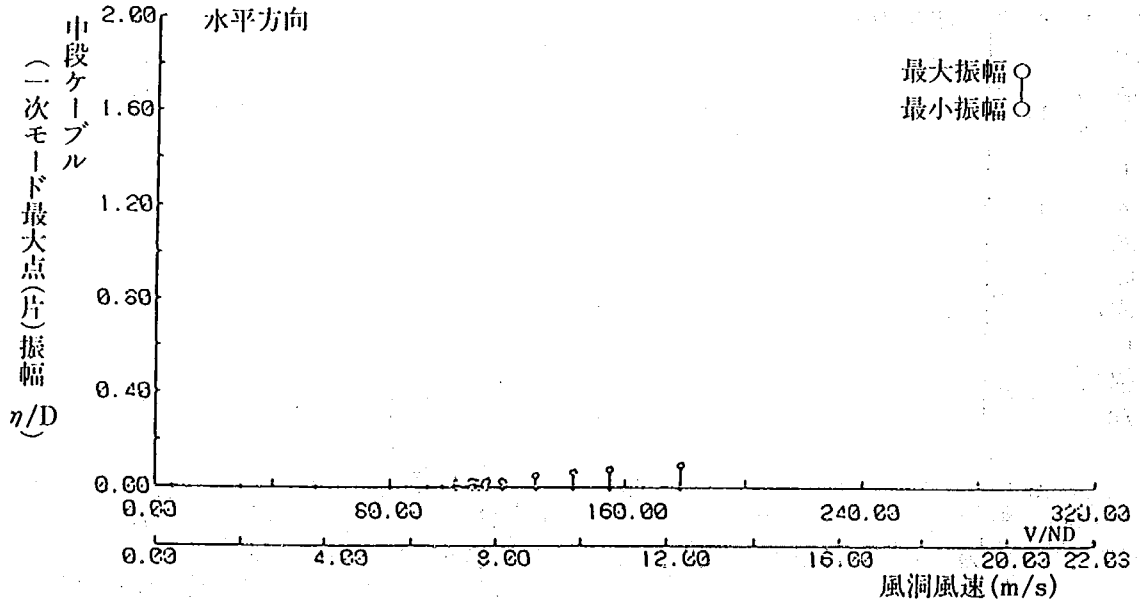
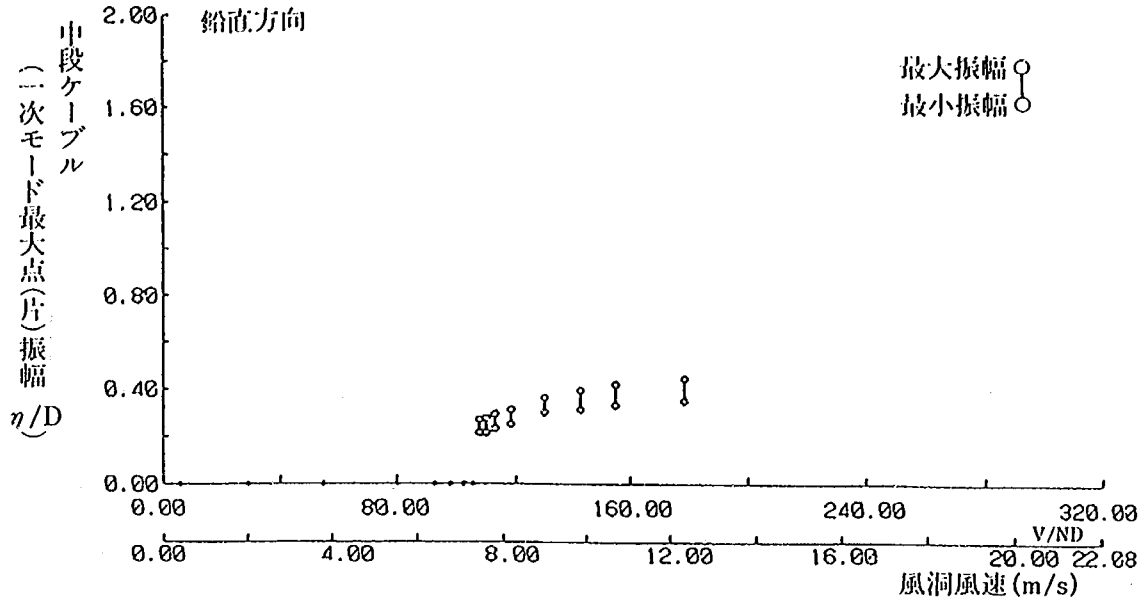


図-3.3.48　ケーブル間隔2.0Dのとき風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：上流列，中段ケーブル



ケーブル間隔2.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル

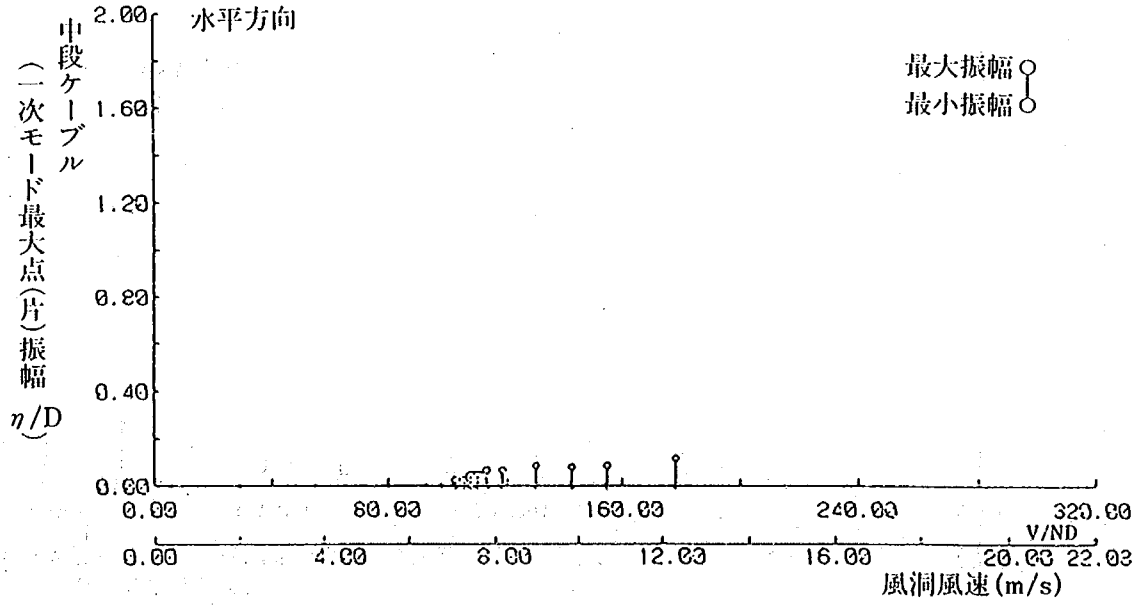
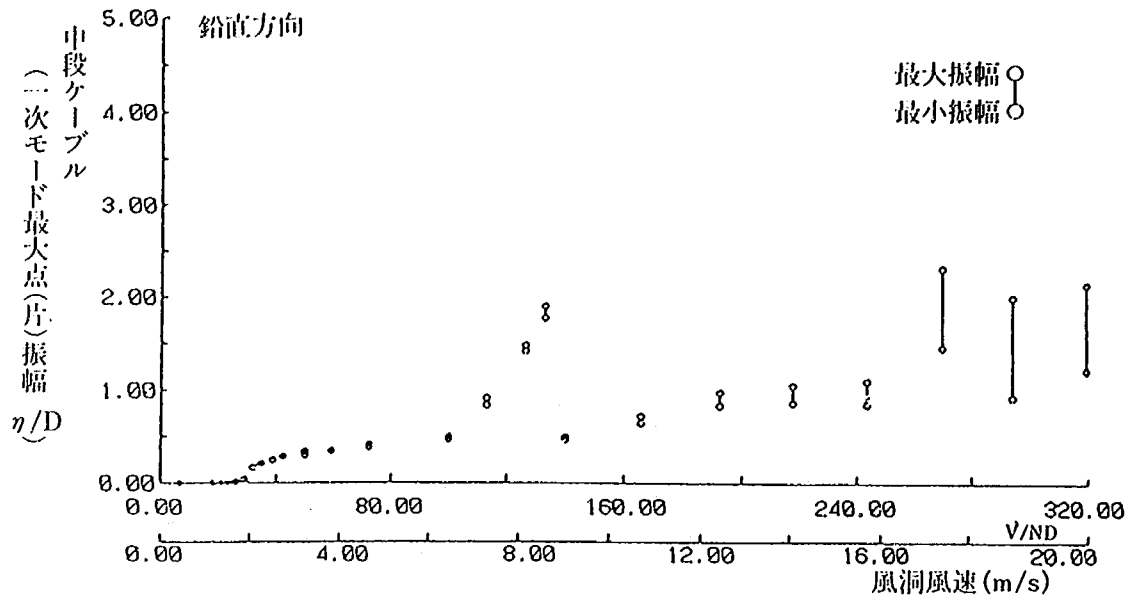


図-3.3.49　ケーブル間隔2.0Dのとき風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



ケーブル間隔4.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル

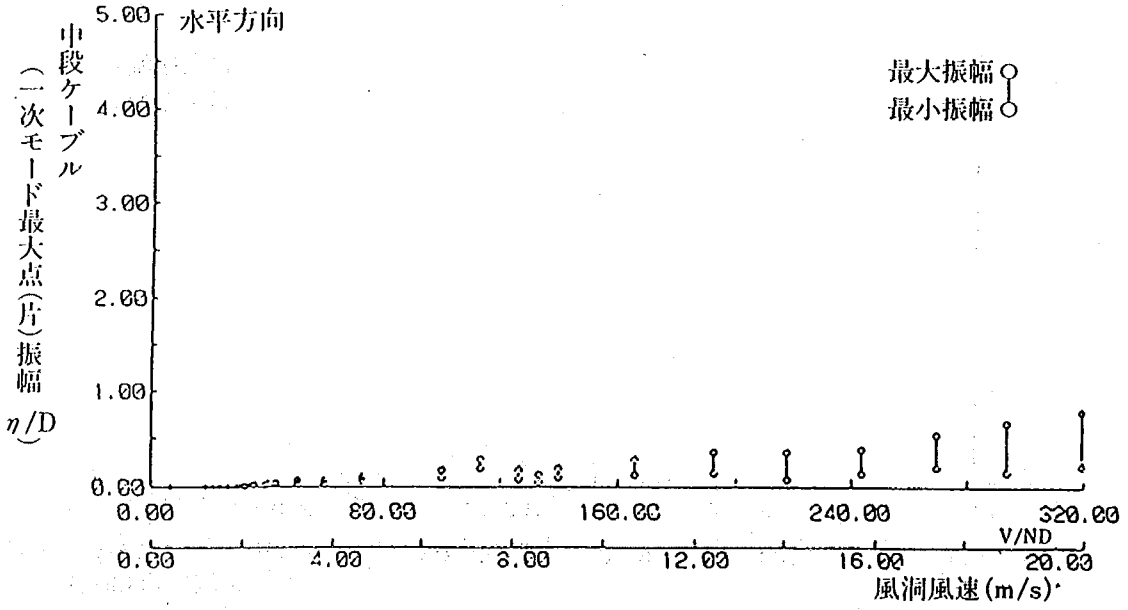
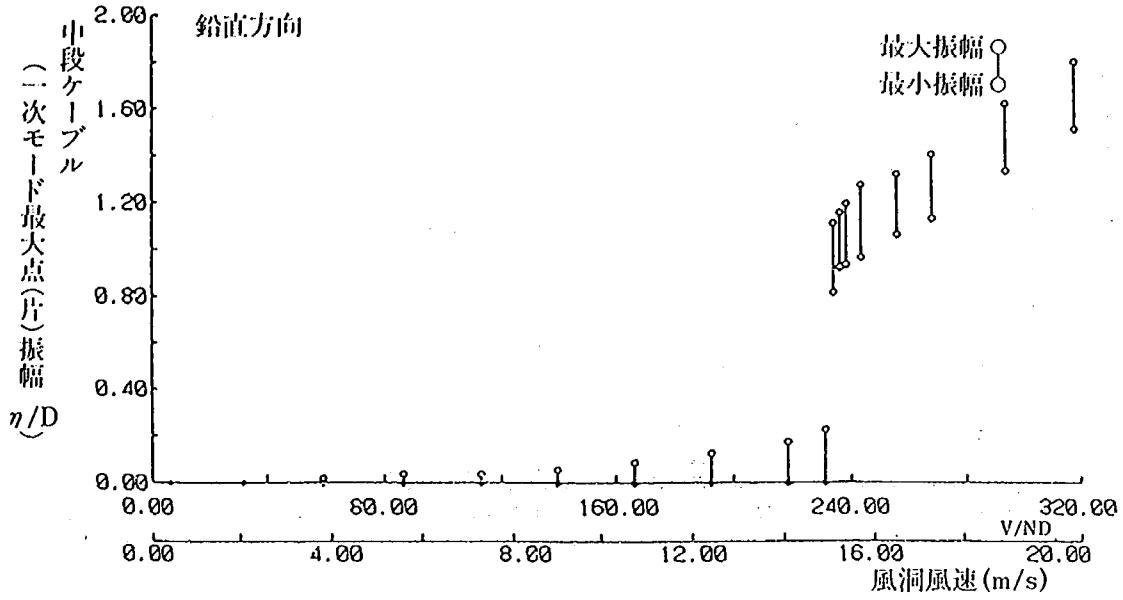


図-3.3.50　ケーブル間隔4.0Dのとき風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



ケーブル間隔5.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列、中段ケーブル

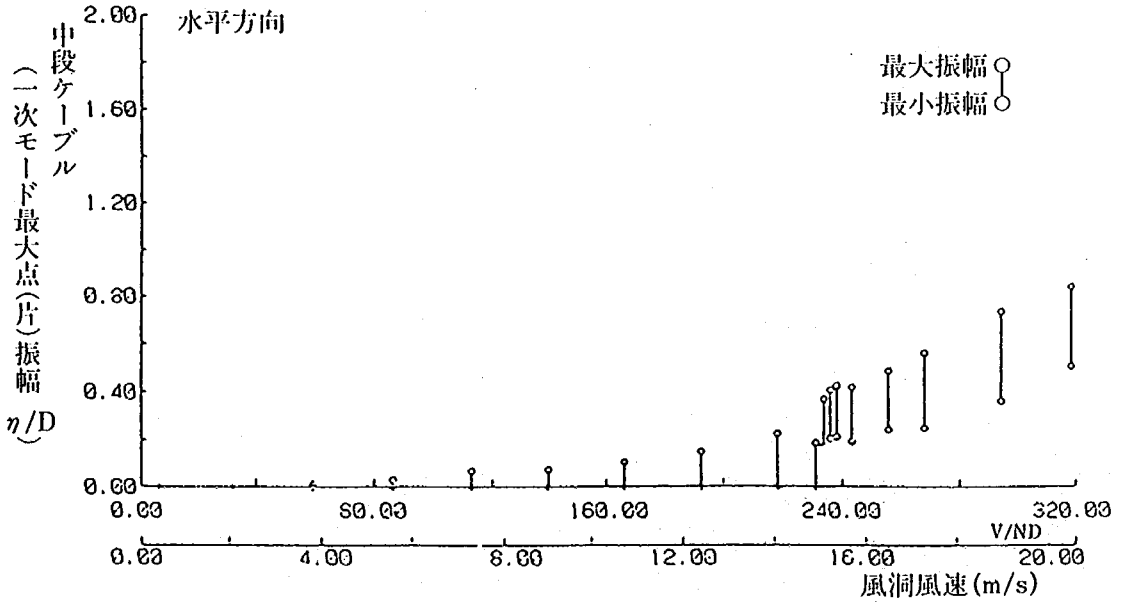


図-3.3.51　ケーブル間隔5.0Dのとき風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル

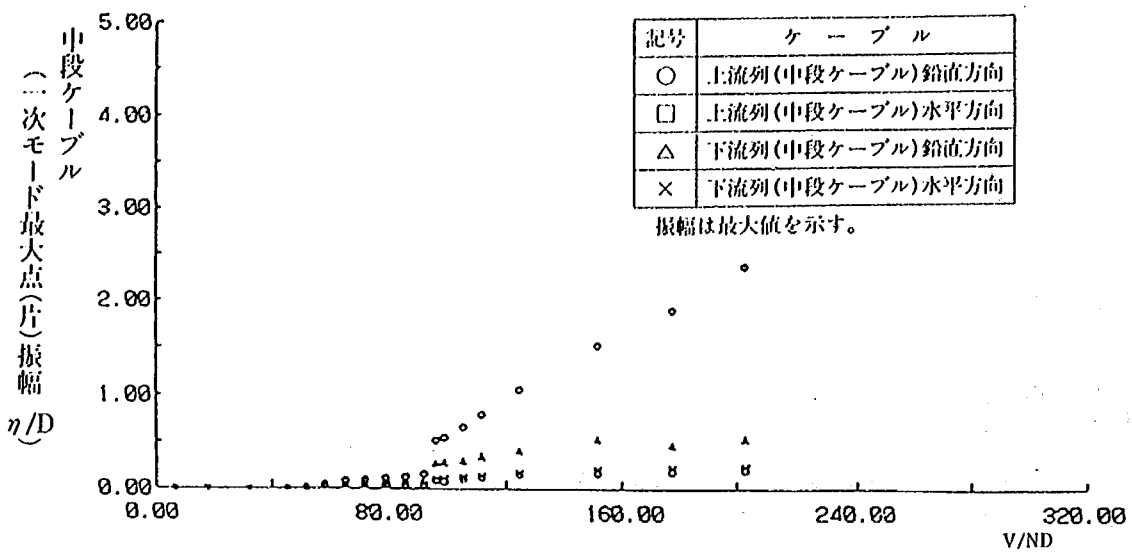
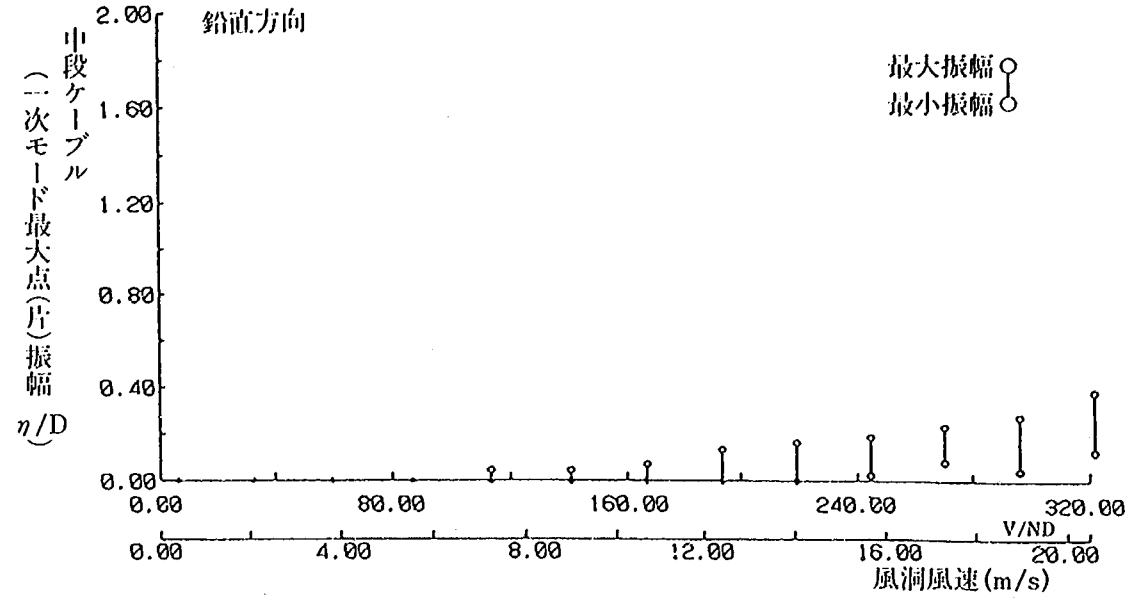


図-3.3.52　ケーブル間隔5.0D（スペーサー使用）のときの
風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：中段ケーブル



ケーブル間隔6.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル

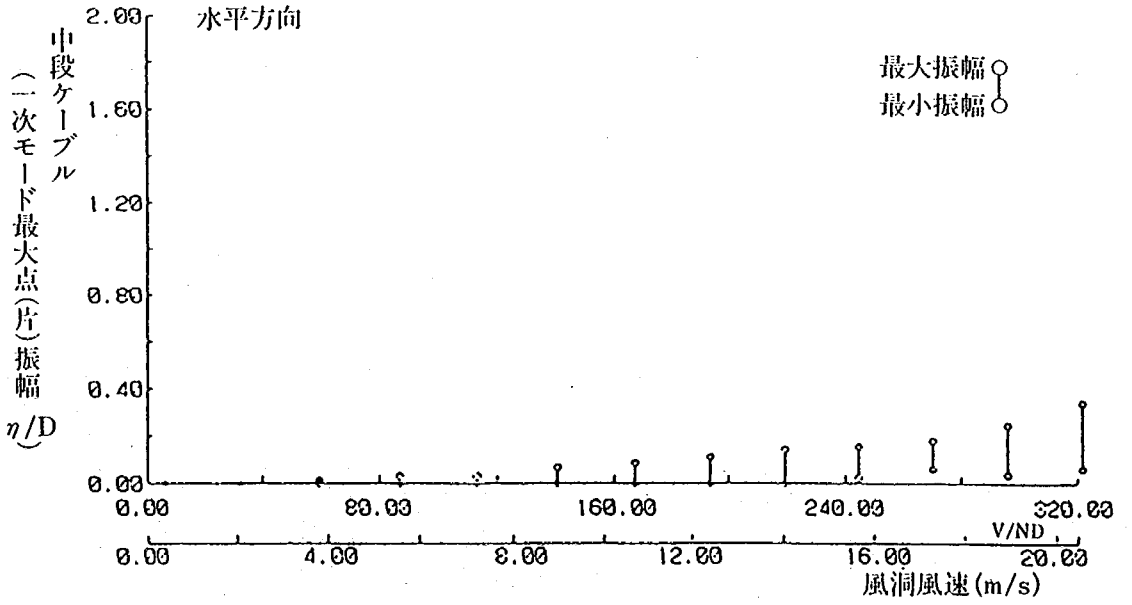
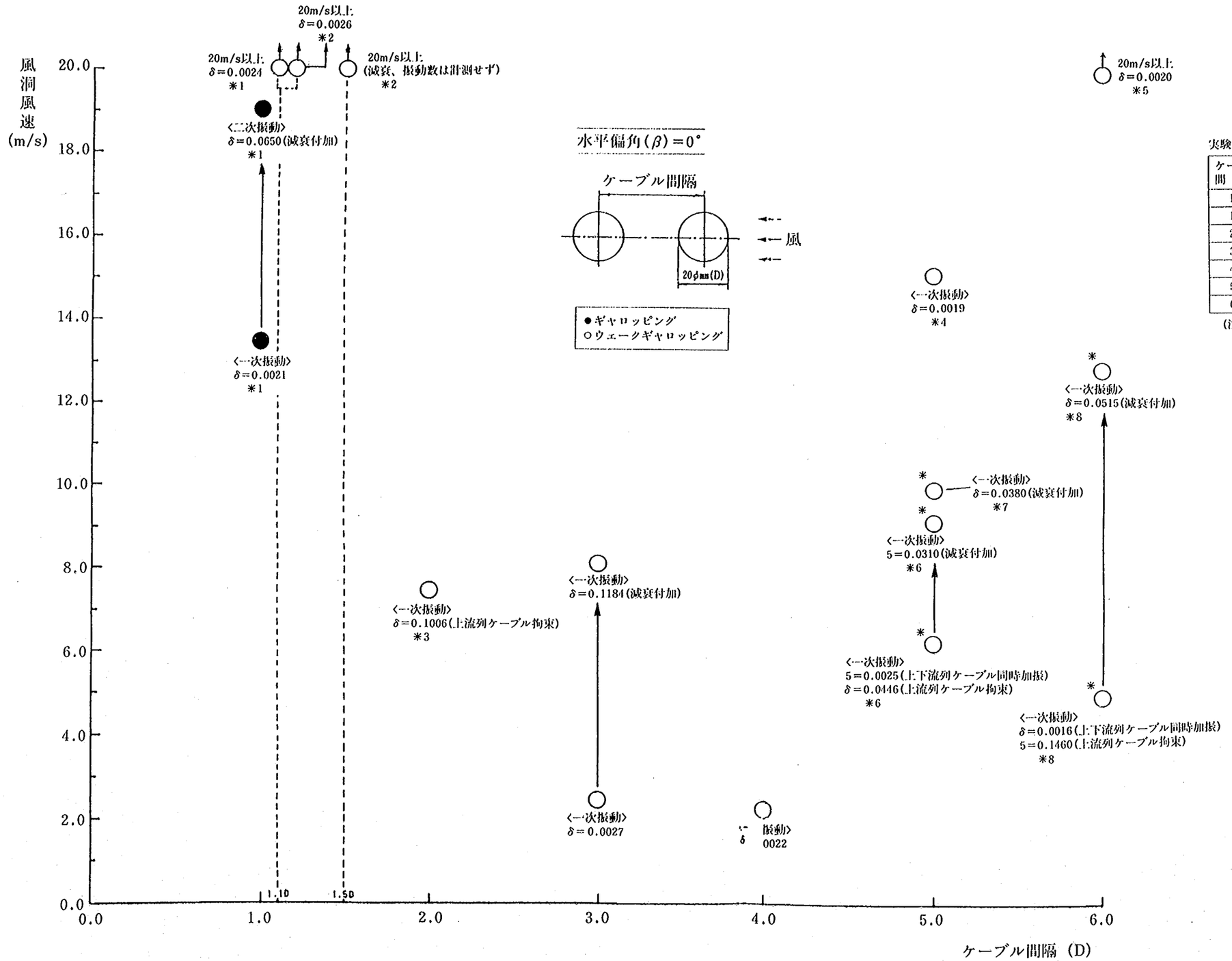


図-3.3.53　ケーブル間隔6.0Dのときの風速－振幅曲線
注）測定ケーブル：下流列，中段ケーブル



実験を行ったときの無風時のケーブル張力および振動数

ケーブル間隔	単独ケーブル 張力(kgf)	単独ケーブル 振動数(Hz)	ケーブル間隔条件下の振動数(Hz)
1.0	58.6 ～60.5	3.20 ～3.25	3.4
1.1			3.3～3.4
2.0			3.5
3.0			3.3
4.0			3.2
5.0			3.2
6.0			3.2～3.4

(注意) 振動数は1次モードを示す。

1. 構造減衰(δ)は無風時の下流列ケーブルの鉛直1次振動を示す。減衰を求めたときの条件を以下に示す。
   - 1.0D、1.1D：上下流列ケーブルを連結して上下流列ケーブルを同時加振。
   - 2.0D：上下流列ケーブルを連結して上流列ケーブルを拘束。
   - 3.0D～6.0D：※はスペーサーを用い上下流列ケーブルを連結した。その他はスペーサーなどで連結を行っていない下流列ケーブル単独の減衰。
2. ケーブル間隔2.0Dは振動発現の再現生がないため加振機により初期振動を与えた。
3. ※1～※9は実験を行ったときのケーブル状況図と対応する。
4. 減衰付加したときの減衰率(δ)は3Dを除き上下流列ケーブルを同時加振して求めた。
5. 実験は上段、下段ケーブルが架設してない状態で行った。

図-3.3.54　ケーブル間隔を変化させたときの実験結果のまとめ

3.4 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その１）

3.4.1 概　要

(1) 研究の目的

斜張橋に並列配置されたケーブルに生じるウェークギャロッピングに対して，主に減衰機能を備えたスペーサーを設置することによる制振手法を開発すること，および，これを用いて耐風制振設計を行う手法を確立することを目的とする。

(2) 研究の方法

本年度は，予備的な数値シミュレーションと小型模型実験を行い，減衰機能付きスペーサーを設置した並列ケーブルの振動特性を把握した。平成６年度は，部分模型を用いた風洞実験と，その成果により実物大のスペーサーの性能試験を予定している。なお，C-１グループの研究分担は次のようになっている。数値シミュレーションは清水建設（株）をリーダーとし，減衰機能付きスペーサーの装置の考案はグループ各社とし，風洞実験は（株）大林組をリーダーとし，スペーサーの性能試験は住友建設（株）をリーダーとして行う。

(3) 本年度の研究の成果

1) 数値シミュレーション結果（3.4.2節）

代表的な並列ケーブルについて，減衰機能付きスペーサーの配置個数，減衰機能付きスペーサーの特性が，並列ケーブルの対数減衰率に与える影響をパラメトリックに解析した。ケーブルの諸元は，長さ 100 m，単位重量16.6kg/m，張力124tf である。数値シミュレーションで得られた主な知見は以下のとおりである。

①減衰機能付きスペーサーのバネ定数は，100tf/m以下が望ましい。

②減衰機能付きスペーサーの減衰係数は，0～5tf･s/mが望ましい。

③ケーブルのねじり剛性は，減衰機能付きスペーサーの減衰効果に大きな影響を与える。

2) 小型模型実験結果

小型模型実験は，高減衰ゴムを用いたスペーサーと摩擦型減衰機能付きスペーサーの２タイプについて行った。高減衰ゴムを用いたスペーサーを利用した実験は，住友建設（株）が3.4.3節で，飛島建設（株）が3.4.4節で，（株）ピー・エスが3.4.5節で担当した。摩擦型減衰機能付きスペーサーを利用した実験は，（株）大林組が3.4.6節で担当した。小型模型実験で得られた主な知見は以下のとおりである。

①並列ケーブルの振動実験では，各ケーブルの初期条件により減衰は大きく異なる。

②並列ケーブルの振動実験では，振動エネルギーより対数減衰率を推定する方法が有効である。

③高減衰ゴムを用いた減衰機能付きスペーサーを利用した実験において，付加された対数減衰率は0.03～0.1であった。

3.4.2 スペーサーの配置方法に関する検討

(1) 目的

スペーサー型制振装置は，ケーブル振動の腹になる部分に取付けるのが効果的である。しかし，ケーブル振動はひとつのモードだけではなく，いくつものモードが起こりうる。そこで，1組の並列ケーブルに複数個のスペーサー型制振装置を設置することが考えられるが，その場合，配置個数や設置位置が問題となる。また，個々のスペーサー型制振装置の減衰特性や剛性をどの程度にするかも問題となる。

ここでは，上記のことを考え，代表的なケーブルについて，配置個数，設置位置，スペーサー型制振装置の特性が，並列ケーブルの対数減衰率に与える影響をパラメトリックに解析し，スペーサー型制振装置を使用する際の設計資料を作成する。

(2) 複素固有値解析（その1）

1) 解析モデル

表－3.4.2.1 に示す並列ケーブルについて，スペーサー型制振装置の特性（減衰係数，バネ定数）を変化させて複素固有値解析を行い，付加される対数減衰率を計算した。スペーサー型制振装置の設置個数および位置は図－3.4.2.1 の3ケースを考え，ケーブルは曲げ剛性の小さい梁要素としてモデル化し，初期張力から剛性を計算した。

表-3.4.2.1 ケーブルの諸元

長さ	100.0 m
単位長さ当りの重量	16.64 kgf/m
張力	124.0 tf

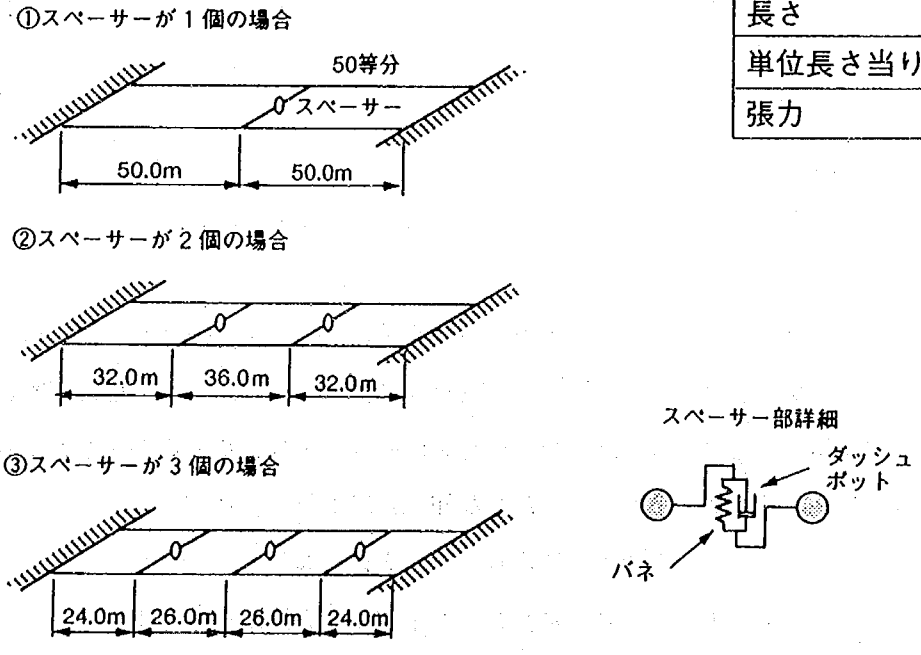


図-3.4.2.1 解析モデル

2) バネ定数をパラメータとした解析

スペーサー型制振装置の減衰係数を15tf・s/mで一定とし，バネ定数をパラメータとした解析を行った。得られたバネ定数と並列ケーブルの対数減衰率との関係を図-3.4.2.2～図-3.4.2.4に示す。

これらの図より，スペーサー型制振装置の個数がいずれの場合も，

①スペーサー型制振装置のバネ定数が小さいほど，並列ケーブルの対数減衰率が大きくなること

②バネ定数が100tf/m以下であれば，付加される減衰効果に有意な差がみられないこと

がわかった。

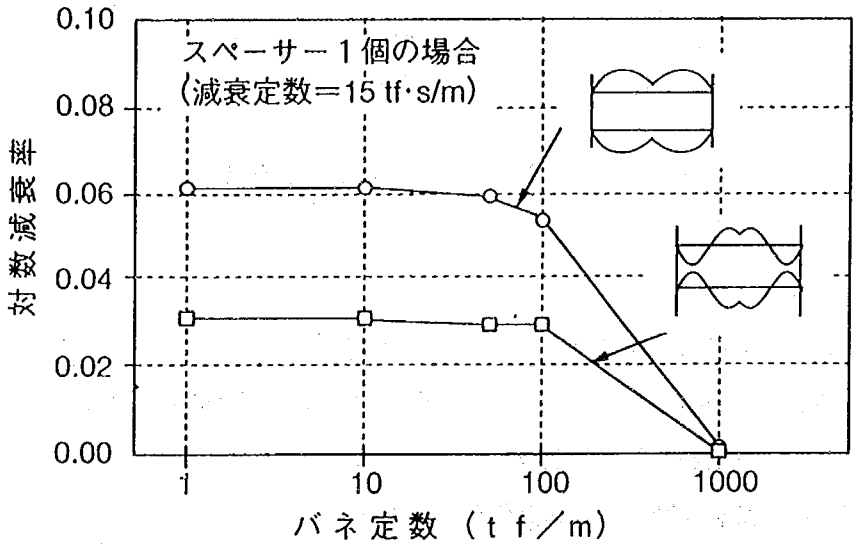


図-3.4.2.2　バネ定数をパラメータとした解析（1）

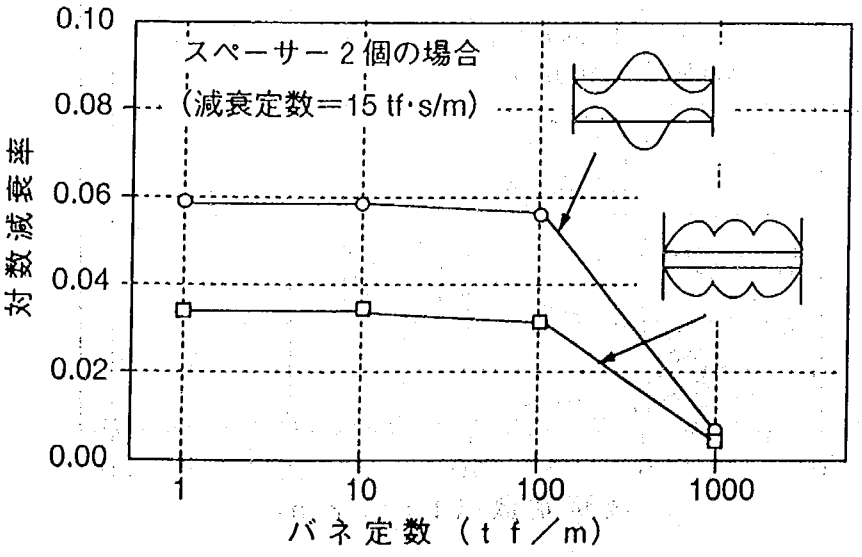


図-3.4.2.3　バネ定数をパラメータとした解析（2）

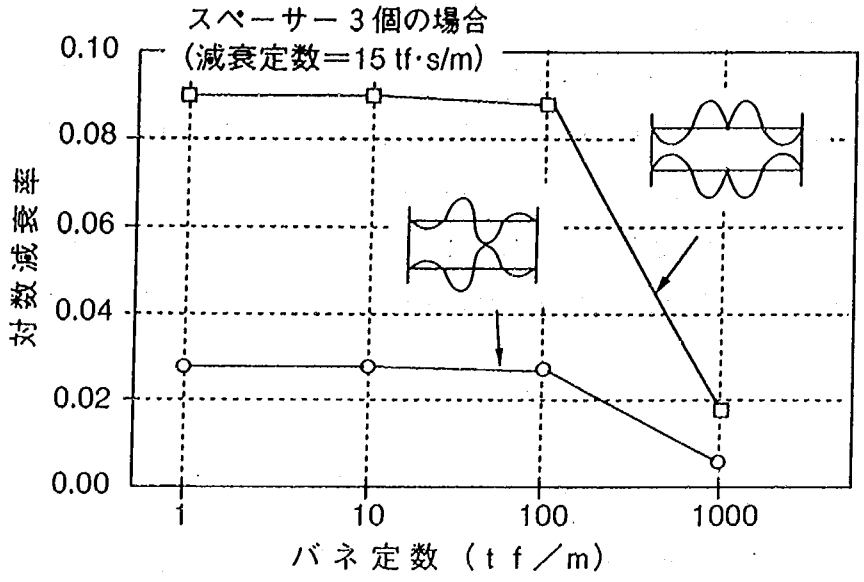


図-3.4.2.4　バネ定数をパラメータとした解析（３）

3）減衰係数をパラメータとした解析

スペーサー型制振装置のバネ定数を10tf/mで一定とし，減衰係数をパラメータとした解析を行った。得られた減衰係数と並列ケーブルの対数減衰率との関係を図-3.4.2.5～図-3.4.2.7に示す。

これらの図より，スペーサー型制振装置の個数がいずれの場合も，

①スペーサー型制振装置の減衰係数には，最適値があること

②本解析の条件では，減衰係数の最適値は0～5tf･s/mの範囲にあること

がわかった。

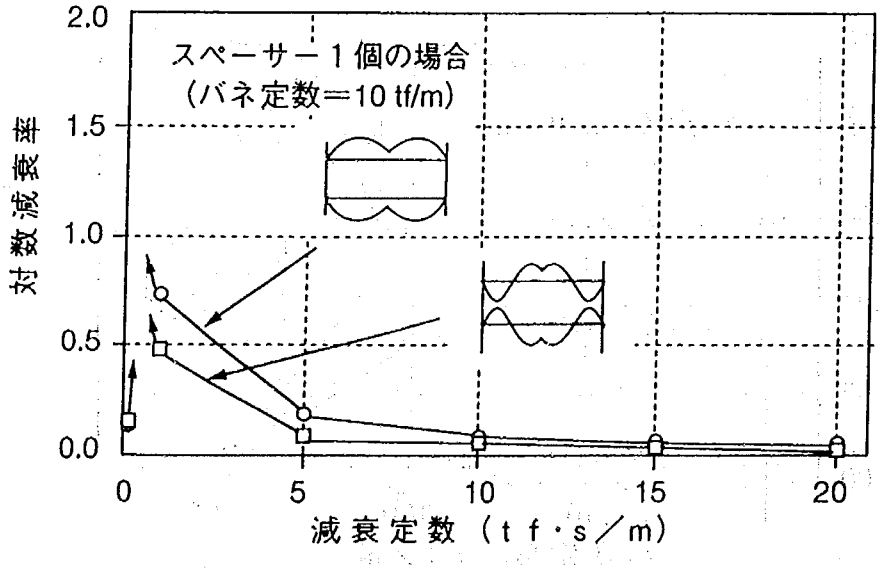


図-3.4.2.5　減衰定数をパラメータとした解析（１）

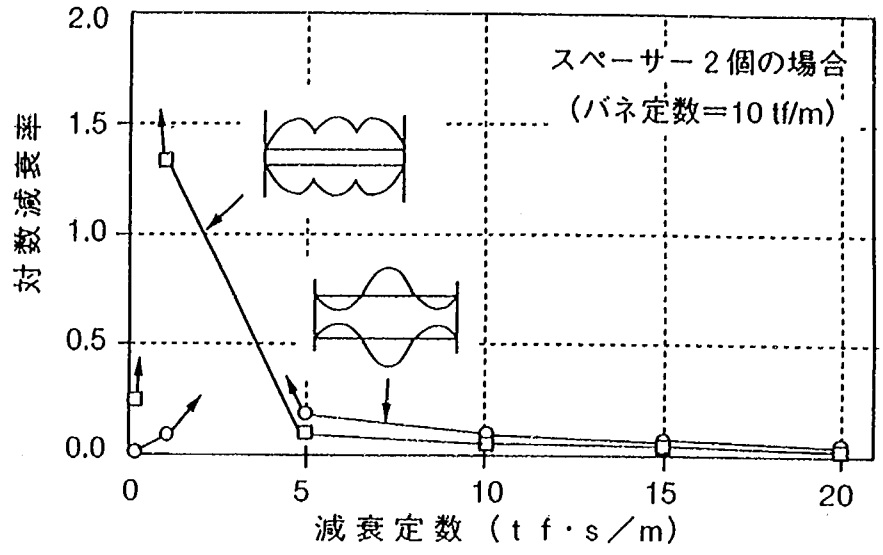


図-3.4.2.6　減衰定数をパラメータとした解析（２）

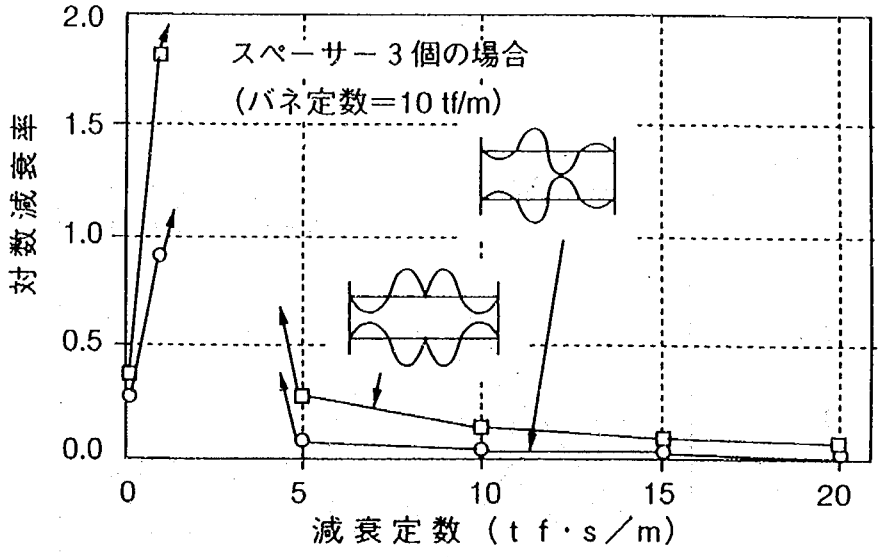


図-3.4.2.7　減衰定数をパラメータとした解析（３）

(3)　複素固有値解析（その２）

1）解析モデル

(1) 複素固有値解析（その１）においては，ケーブルのねじりを固定して解析を行ったが，実際にはケーブルのねじり剛性は小さく，ねじり変形を無視することはできない。ここでは，スペーサー型制振装置と直列に追加バネを設置することによってケーブルのねじりを考慮した図-3.4.2.8に示す解析モデルを用いて複素固有値解析を行った。なお，ケーブルの諸元は表-3.4.2.1と同様である。

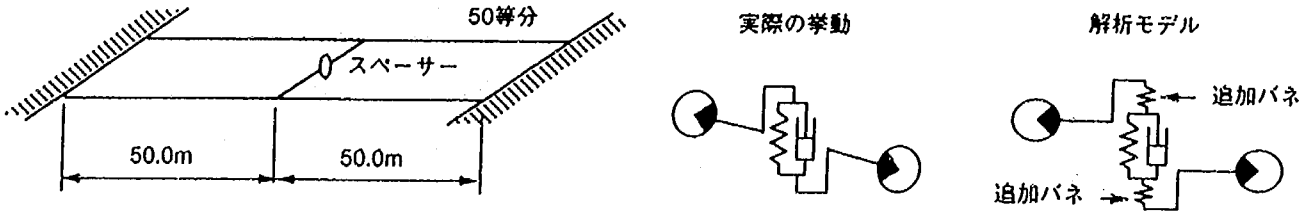


図-3.4.2.8　解析モデル

2）追加バネの定数（ケーブルのねじり剛性）をパラメータとした解析

スペーサー型制振装置のバネ定数を10tf/m，減衰係数を1tf・s/mで一定とし，追加バネの定数をパラメータとした解析を行った。得られた追加バネの定数と並列ケーブルの対数減衰率との関係を図-3.4.2.9に示す。

この図より，ケーブルのねじりの影響を考慮した場合，スペーサー型制振装置の減衰効果がかなり低下するものと考えられる。

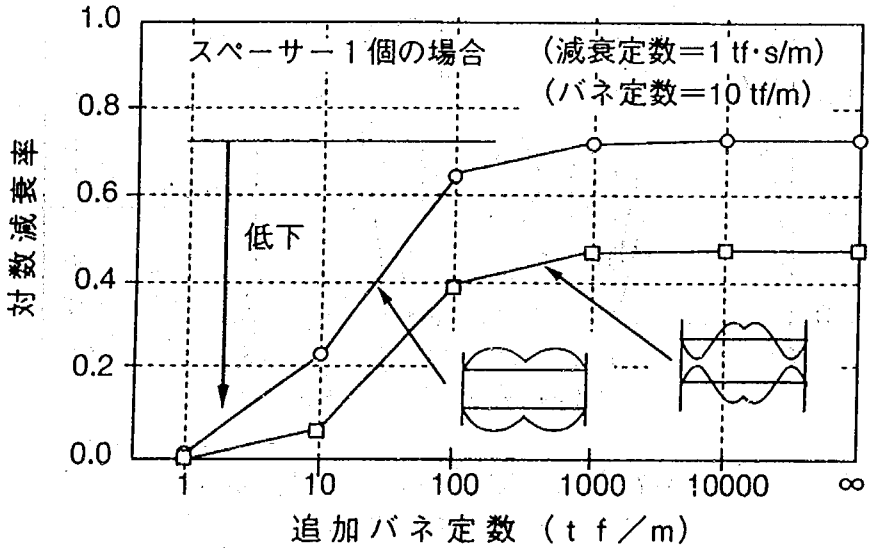


図-3.4.2.9　ねじり剛性をパラメータとした解析

3.4.3 高減衰ゴムを用いたスペーサー（その１）

ウェイクギャロッピング等の励振力の強い空力振動に対する制振効果の向上を考え，並列配置されたケーブル間に減衰向上機能として高減衰ゴムダンパーを内蔵したスペーサーを提案し，性能確認のための模型実験を行った。

(1) 模型実験の概要

並列ケーブルの縮小模型を図-3.4.3.1に示す。スペーサーにはケーブル固定部に回転自由度を与えるベアリングを設けた高減衰ゴム（写真-3.4.3.1）を用いた。加振力は加振側ケーブルのスパン中央に与えた強制変位（10～20mm程度）を瞬時に解放することで与えた。表-3.4.3.1にケーブルの諸元を，表-3.4.3.2に実験パラメータを示す。

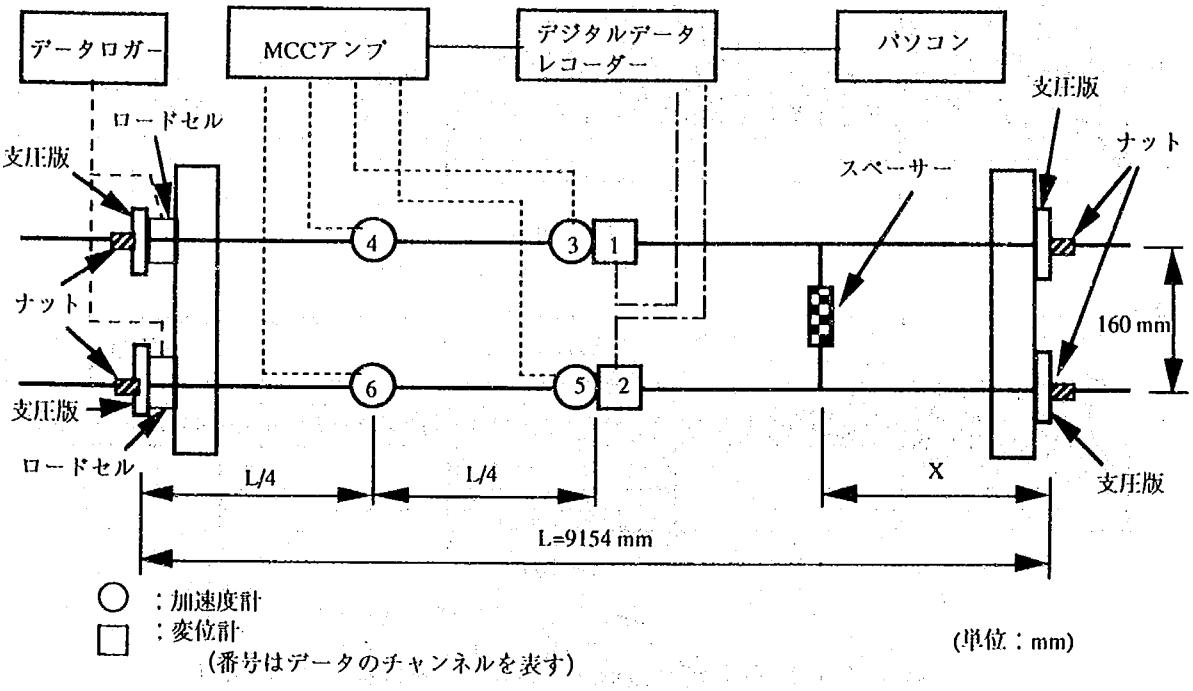


図-3.4.3.1 模型実験装置図

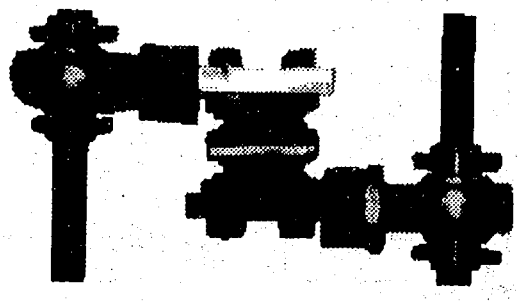


写真-3.4.3.1 スペーサー概観図

表-3.4.3.1 ケーブル諸元

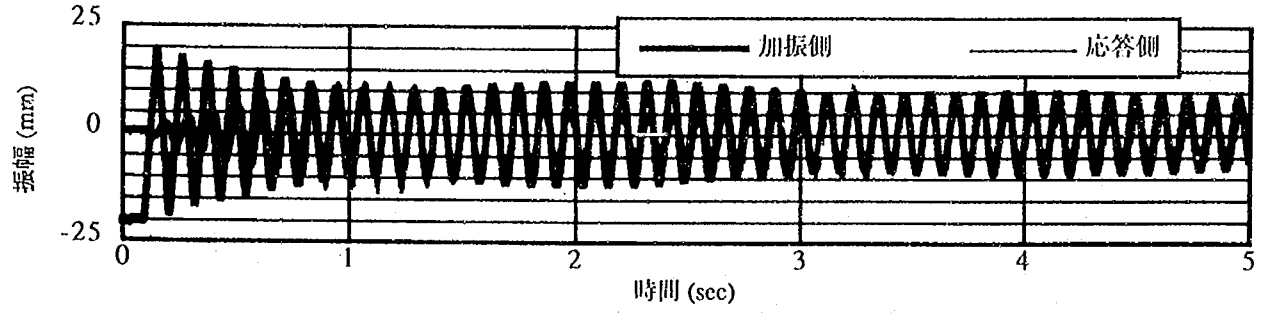
使用鋼材	PC鋼棒D種1号 ϕ 13.0
ケーブル長 L	9154 mm
ケーブル間隔	160 mm
直径	12.92mm
断面積	132.7 mm^2
単位長さ質量	1.04 kg/m
ヤング率	194400 N/mm^2

表-3.4.3.2 実験パラメータ

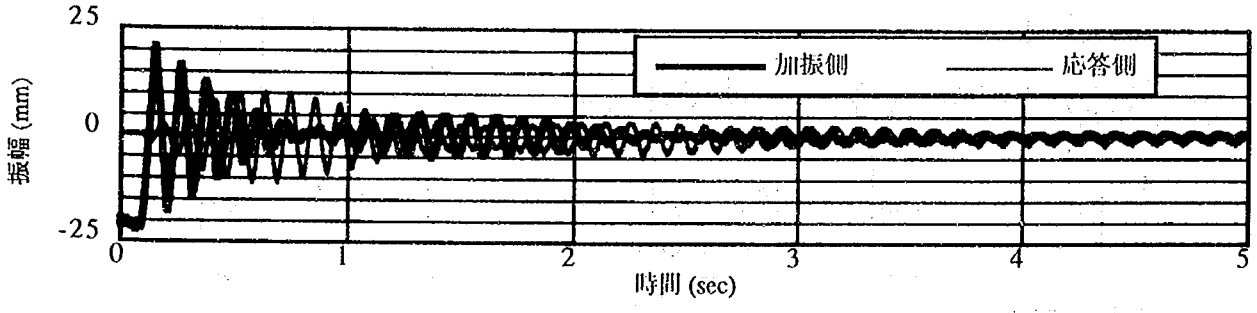
ダンパーの有無	高減衰ゴムダンパー			ゴムと同重量の鋼板を用いたダミーダンパー		
ケーブル張力 (tf)	11.94		9.03	6.07		3.04
スペーサーの取付位置 X	10/20L	9/20L	8/20L	7/20L	6/20L	5/20L

(2) 実験結果

表-3.4.3.3に実験結果を示す。図-4.3.3.2は張力3tf，スペーサー取付位置スパン中央におけるダミーダンパー（C17）および高減衰ゴムダンパー（C18）の場合の時刻歴波形である。スペーサーに高減衰ゴムを用いることで対数減衰率が向上することが理解できる。ダミーダンパーは高減衰ゴムによる減衰効果を付与しない場合であるから，このケースから得られる対数減衰率はモデルの構造減衰に相当し，δ= 0.02程度の値が得られた。一方，高減衰ゴムダンパーを用いた場合 δ=0.13程度の対数減衰率が得られ，構造減衰を除いた付加減衰は約0.10となった。また，図-3.4.3.3は高減衰ゴムダンパーを用いた場合の内部エネルギーの時刻歴である。高減衰ゴムの粘性減衰によって2.5秒間で約2.0Nm減少し，内部エネルギーはほぼゼロとなっている。



（a） ダミーダンパー（C17）



（b） 高減衰ゴムダンパー（C18）

図-3.4.3.2 時時刻歴波形（張力3tf，取付位置スパン中央）

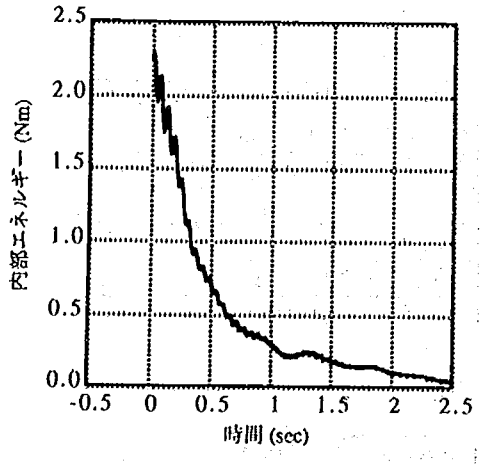


図-3.4.3.3 内部エネルギーの時刻歴（C18）

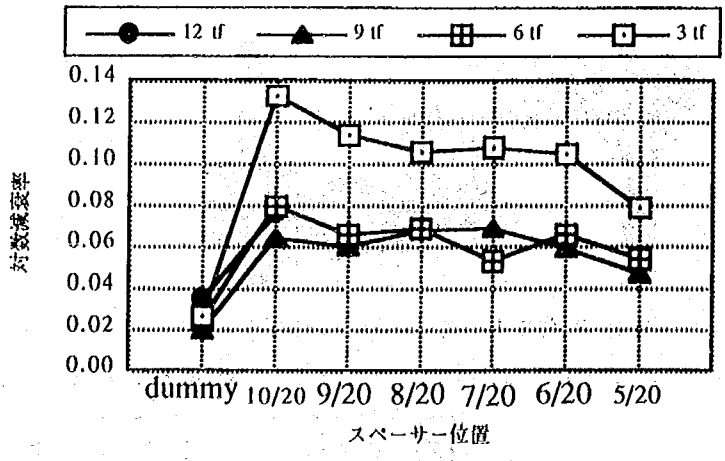


図-3.4.3.4 スペーサーの取付位置と対数減衰率

表-3.4.3.3　実験結果

ケース	張力T (tf)	取付位置X	固有1次振動数 f_1 (Hz)	対数減衰率δ		付加減衰		ダンパーの有無
				0.0-0.5 sec	0.0-2.5 sec	0.0-0.5 sec	0.0-2.5 sec	
C01	11.94	10/20 L	17.58	0.035	0.017			ダミー
C02	11.94	10/20 L	17.80	0.076	0.069	0.041	0.052	高減衰ゴム
C03	9.03	10/20 L	15.38	0.020	0.013			ダミー
C04	9.03	10/20 L	16.11	0.064	0.038	0.044	0.025	高減衰ゴム
C05	9.03	9/20 L	16.11	0.060	0.047	0.040	0.034	高減衰ゴム
C06	9.03	8/20 L	16.11	0.068	0.039	0.048	0.026	高減衰ゴム
C07	9.03	7/20 L	16.11	0.069	0.057	0.049	0.044	高減衰ゴム
C08	9.03	6/20 L	16.11	0.059	0.052	0.039	0.039	高減衰ゴム
C09	9.03	5/20 L	16.11	0.047	0.062	0.027	0.049	高減衰ゴム
C10	6.07	10/20 L	12.70	0.025	0.014			ダミー
C11	6.07	10/20 L	13.18	0.080	0.028	0.055	0.014	高減衰ゴム
C12	6.07	9/20 L	13.18	0.066	0.018	0.041	0.004	高減衰ゴム
C13	6.07	8/20 L	13.43	0.069	0.018	0.044	0.004	高減衰ゴム
C14	6.07	7/20 L	13.43	0.053	0.015	0.028	0.001	高減衰ゴム
C15	6.07	6/20 L	13.43	0.066	0.014	0.041	0.0	高減衰ゴム
C16	6.07	5/20 L	13.43	0.054	0.017	0.029	0.003	高減衰ゴム
C17	3.04	10/20 L	9.03	0.027	0.014			ダミー
C18	3.04	10/20 L	9.52	0.133	0.070	0.106	0.056	高減衰ゴム
C19	3.04	9/20 L	9.52	0.114	0.041	0.087	0.027	高減衰ゴム
C20	3.04	8/20 L	9.52	0.106	0.047	0.079	0.033	高減衰ゴム
C21	3.04	7/20 L	9.52	0.108	0.040	0.081	0.026	高減衰ゴム
C22	3.04	6/20 L	9.52	0.105	0.046	0.078	0.032	高減衰ゴム
C23	3.04	5/20 L	9.52	0.079	0.056	0.052	0.042	高減衰ゴム

また，図-3.4.3.4はスペーサーの取付位置による対数減衰率の変化（0.0～0.5 sec）である。取付位置をスパン中央とした場合に最も大きな減衰効果が得られた。今回実験データの処理において，スパン中央が振動の腹となる1次および2次モードのみを対象として減衰効果を評価したためと思われる。

(3) 解析方法

実験結果と比較・検討をするために，模型実験モデルを想定して直接時間積分並びに複素固有値解析を行った。

解析モデル（図-3.4.3.5）は各ケーブルを1質点とし，各質点をケーブル曲げ剛性相当のばねで支持し，その間をスペーサー（ばねと粘性減衰）で連結した2質点系である。自由度は加振方向，即ちZ方向のみとした。なお，構造減衰は実験結果に基づきδ=0.012とし，直接時間積分では系全体に対してRayleigh減衰で考慮し，複素固有値解析ではビーム要素に対して構造減衰を考慮した。

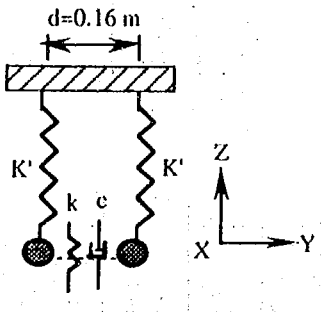


図-3.4.3.5　解析モデル

弦の振動をエネルギー原理から見ると，ケーブルの長さをL，張力をN，単位長さ当りの質量をρAとすれば，振動エネルギーEは運動エネルギーUとポテンシャルエネルギーTの和として式-3.4.3.1で表わせる[1]。式-3.4.3.1は一般的な形であり，これを1次モードについてだけ考えれば式-3.4.3.2が得られる。さらに，式-3.4.3.3より質点の質量M'およびばね定数K'が与えられる。

$$E = T + U = \frac{\rho A}{2}\int_0^l \dot{w}(x,t)^2 dx + \frac{N}{2}\int_0^l \left(\frac{\delta w}{\delta x}\right)^2 dx \quad \cdots\cdots(3.4.3.1)$$

$$= \frac{\rho A l}{4}\dot{w}\left(x = l/2, t\right)^2 + \frac{N\pi^2}{4} w\left(x = l/2, t\right)^2 \quad \cdots\cdots(3.4.3.2)$$

$$= \frac{M'}{2}\dot{\Delta}(t)^2 + \frac{K'}{2}\Delta(t)^2 \quad \cdots\cdots(3.4.3.3)$$

また，スペーサー部分，即ち高減衰ゴムのばね定数k1および粘性係数c1はゴムのせん断弾性係数G，内部摩擦係数γ，受圧面積A，ゴム厚tG，固有円振動数ωが与えられれば，式-3.4.3.4で求めることができる[2)]。

$$k_1 = \frac{GA}{{}_tG}, \qquad c_1 = \frac{1}{\omega} \times \frac{4\gamma}{4+\gamma^2} \times k_1 \quad \cdots\cdots(3.4.3.4)$$

解析では実験における高減衰ゴムの変位ΔGと2質点の相対変位Δを考慮するため，式-3.4.3.5によった。

$$k = \frac{\Delta^G}{\Delta} k_1, \qquad c = \frac{\Delta^G}{\Delta} c_1 \quad \cdots\cdots(3.4.3.5)$$

式-3.4.3.2または式-3.4.3.3より求めた振動エネルギーを式-3.4.3.6で回帰すれば，αは初期エネルギーであり，βはfを固有振動数とすれば対数減衰率δと式-3.4.3.7の関係を持つ。

$$E(t) = \alpha e^{-\beta t} \quad \cdots\cdots(3.4.3.6)$$

$$\delta = \frac{\beta}{2f} \quad \cdots\cdots(3.4.3.7)$$

以上より，表-3.4.3.4に示す値を用いて解析を行った。

表-3.4.3.4　材料物性値

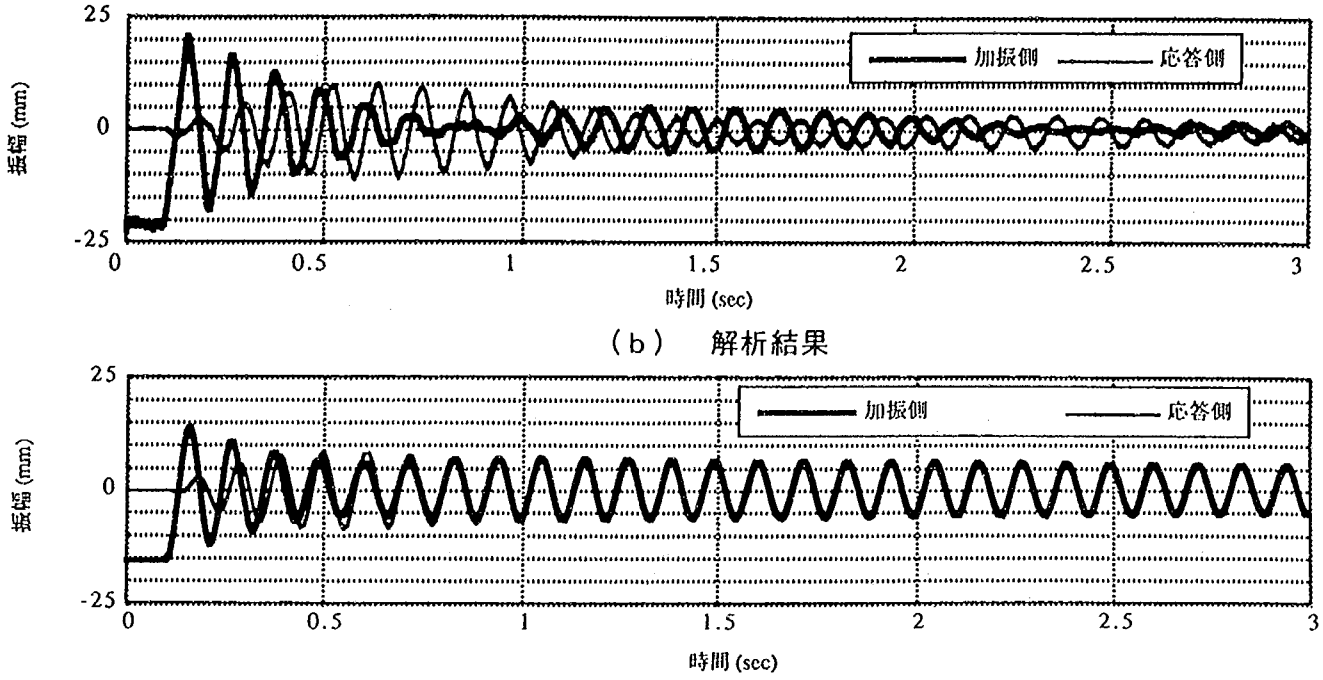
ケース	張力 T (tf)	取付位置 X	質点の質量 M' (Kg)	支持要素	高減衰ゴム	
				ばね定数 K' (N/m)	ばね定数 k (N/m)	粘性係数 c (Ns/m)
C02	11.94	10/20 L	4.76	6.3073E4	8.91E2	4.27
C04	9.03	10/20 L	4.76	4.7709E4	1.097E3	6.07
C11	6.07	10/20 L	4.76	3.2076E4	1.295E3	8.74
C18	3.04	10/20 L	4.76	1.6065E4	1.853E3	17.69

表-3.4.3.5　実験および解析結果

ケース	張力 T (tf)	取付位置 X	実験					解析					
			高減衰ゴム			ダミー		固有1次振動数 f_1 (Hz)	固有2次振動数 f_2 (Hz)	直接時間積分		複素固有値解析	
			固有1次振動数 f_1 (Hz)	対数減衰率 δ		対数減衰率 δ				対数減衰率 δ		対数減衰率 δ	
				0-0.5 sec	0-2.5 sec	0-0.5 sec	0-2.5 sec			0-0.5 sec	0-2.5 sec	1次	2次
C02	11.94	10/20L	17.80	0.076	0.069	0.017	0.035	18.3	18.6	0.018	0.005	0.037	0.085
C04	9.03	10/20L	16.11	0.064	0.038	0.020	0.013	15.9	16.3	0.040	0.019	0.038	0.114
C11	6.07	10/20L	13.18	0.080	0.028	0.025	0.014	13.1	13.6	0.048	0.012	0.038	0.171
C18	3.04	10/20L	9.52	0.133	0.070	0.027	0.014	9.3	10.2	0.093	0.019	0.038	0.393

(4) 実験と解析の比較

実験・解析結果を表-3.4.3.5に，ケースC18 の時刻歴波形を図-3.4.3.6に示す。時刻歴波形波形において実験の波形は連成振動を有し，位相差の乱れが認められる。一方，解析の波形はπ/2の初期位相差から2次モードが消滅し，1次モードの同期運動に収束していく。実験・解析結果の差異はこれに起因する。



（b） 解析結果

（a） 実験結果

図-3.4.3.6 時刻歴波形（ケースC18）

図-3.4.3.7に内部エネルギーの時刻歴を，実験値と直接時間積分による解析値を比較して示す。内部エネルギーの時刻歴における変曲点は同期運動に収束した時間である。解析値における変曲点までは実験値と解析値はより整合性を有している。

図-3.4.3.8は張力による対数減衰率の変化における実験値と解析値の比較である。同一のスペーサーを用いた場合，張力により対数減衰率は変化する。従って，ケーブルの張力によりスペーサーに用いる高減衰ゴムの諸力学的特性を最適化する必要がある。また，直接時間積分と複素固有値解析の結果には定量的に大きな違いが見られた。

今回解析において，式-3.4.3.5に基づき高減衰ゴムのばね定数と粘性係数を評価した。しかし，実験における高減衰ゴムの挙動は，純粋なせん断変形だけでなくねじれ変形なども含んでおり，解析におけるこれらの物性値の評価方法が今後の検討課題である。

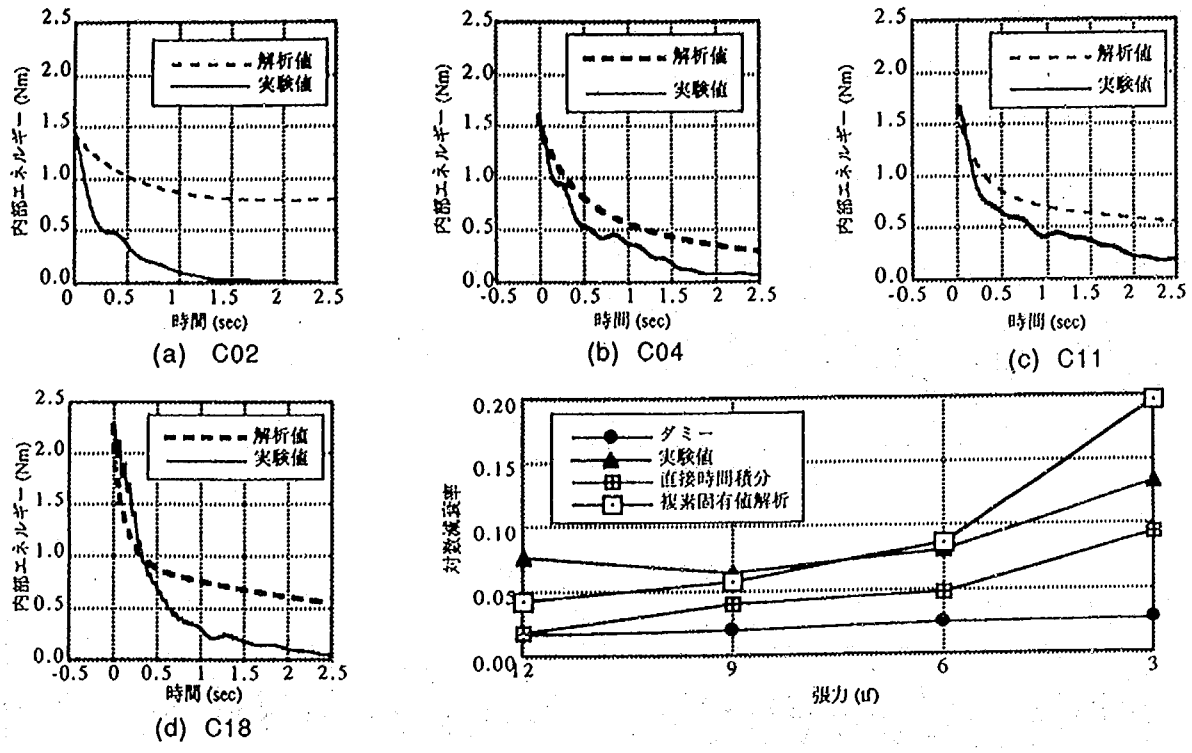


図-3.4.3.7　解析と実験の比較

図-3.4.3.8　張力と対数減衰率

(5) まとめ

本実験並びに解析の範囲内で，次の知見を得た。

①実験より，スペーサーに高減衰ゴムを用いることで系全体の対数減衰率は向上し，対数減衰率にして最大0.10程度の付加減衰が得られることが確認された。

②並列ケーブルを質点モデルに置き換え直接時間積分を行うことによって，並列ケーブルの1次，2次モードの振動特性を評価できる。

【参考文献】

1)西岡：構造振動解析，培風館，1987年4月

2)春日：高減衰ゴムを用いたケーブル制振用ダンパーに関する研究，土木学会第46回年次学術講演会

3.4.4 高減衰ゴムを用いたスペーサー（その２）

(1) 実験の目的

斜張橋の並列配置されたケーブルに生じるウェイクギャロッピングに対して，減衰機能を備えたスペーサーを設置することによる制振手法を開発することを目的として，高減衰ゴムを用いたスペーサーを考案し，これについてのスペーサーの性能実験を行った。

(2) 新しい減衰向上機能付きスペーサーの構造概要

この減衰向上機能は，ケーブル両端の構造をピン構造とすることにより，後流側ケーブルに生じた鉛直方向振動（ウェイクギャロッピングによる振動）により生じた両ケーブルの相対距離の変化をスペーサー軸方向の変形とする構造になっており，スペーサー内に設置された減衰ゴムのせん断変形に置き換えて減衰を付加しようとするものである。

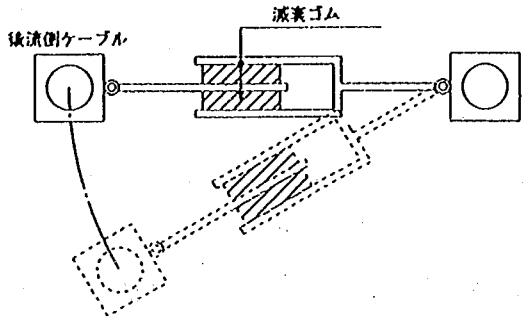


図-3.4.4.1 スペーサーの構造概要

(3) 実験概要

1) 実験方法

反力床上に設置した固定装置間に張り渡した２本の並列ケーブルに対して，ケーブル間あるいは１本のケーブルと固定治具間に取り付けたスペーサーにより減衰を付加する。

ケーブルは，スペーサーの取り付けが比較的容易に行えるもの（ＳＥＥＥ－Ｆ７０Ｔ）とし，実験棟の制約からケーブルの自由長は１９．４（m），ケーブルに導入した張力はサグが影響しないよう１０（ｔｆ）とした。また，ケーブル間の間隔およびケーブルと固定治具間の間隔は，いずれも３６０（ｍｍ）とした。実験方法の概要を以下に示す。

表-3.4.4.1 ケーブル諸元

種　　類	SEEE F70T(7S9.5B)
長　　さ	19,400(mm)(自由長部)
単位重量	3.65(kgf/m)
断面積	383.9(mm²)
ヤング係数	1.9?10⁶(kgf/cm²)
引張荷重	70.0(tf)
導入緊張力	10(tf)

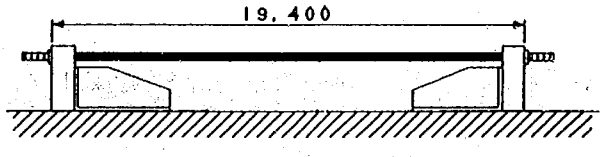


図-3.4.4.2 実験方法（側面図）

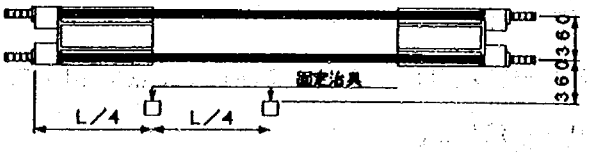


図-3.4.4.3 実験方法（平面図）

2) スペーサーの配置方法と個数

スペーサーの配置方法は，ケーブル間配置とケーブルと固定装置間配置の２種類とし，配置位置はケーブル長の１／２点と１／４点の２カ所である。以下にスペーサー配置と個数を示す。

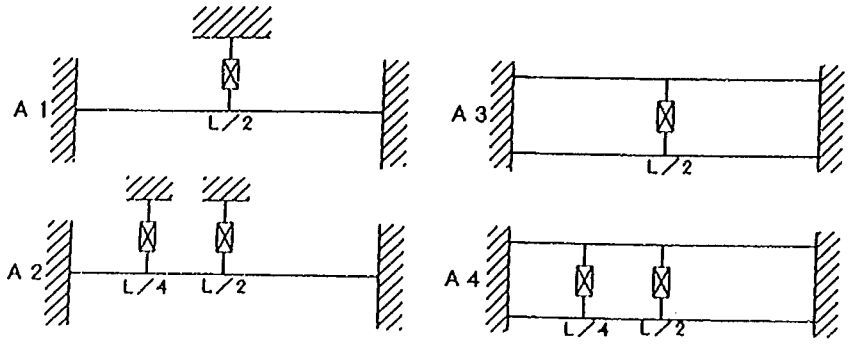


図-3.4.4.4　スペーサー配置方法

3) 実験パラメーター

実験に用いたゴムの種類は，通常の高減衰ゴム（ＫＬと称する）とこれよりも減衰性能が大きいゴム（ＥＬと称する）の２種類である。スペーサーの配置方法は前述の（Ａ１）～（Ａ４）の４通りの配置として，減衰量に直接関わるゴムのせん断面積A_0は，１．０～４９．０（ｃｍ²）までの６通りとした。

また，比較のためにケーブル単体および減衰ゴムのかわりに鉄板プレートを用いたものついても実験を行った。

なお，スペーサー内に配置されたゴムは全てのケースで２層構造であり，各層の厚さは全て１（ｃｍ）である。右表に実験のパラメーターと水準の一覧を示す。

表-3.4.4.2　実験のパラメーターと水準

パラメーター	水　　準	備　　考
試験モデル	配置方法(A1, A2, A3, A4)	図-3.4.4.4参照
減衰材料の種類	ＥＬ，ＫＬ	
減衰量の大きさ	せん断面積　A_0= 1.00(cm²)	ゴムの層数２層
	せん断面積　A_0= 4.00(cm²)	層厚各１．０ｃｍ
	せん断面積　A_0=10.25(cm²)	
	せん断面積　A_0=20.25(cm²)	
	せん断面積　A_0=30.25(cm²)	
	せん断面積　A_0=49.00(cm²)	

4) 加振方法

当初，片側ケーブルに一定変位を強制的に与え，機械的に急激に解放する方法を用いたが，計測された波形記録において高次のノイズの影響が大きいため，人力により片側ケーブルを適当な振幅になるまで加振して，その後自由振動させた。

5) 測　　定

各ケーブルのＬ／２点，及びＬ／４点において，それぞれｘ，ｙ方向に加速度計を計８個設置して，加速度を記録した。

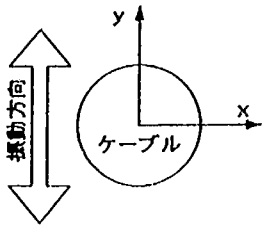


図-3.4.4.5　加速度計の設置方向

(4)　実験結果

1) 時刻歴波形

図-3.4.4.6に実験より得られた加速度波形の例を示す。同図(b)に見られるように，２本ケーブルの場合には振動がケーブル間を往復する現象が生じている。

図-3.4.4.7にこれらの波形のフーリエスペクトルを示す。これより，１次固有振動数は３．９Hz付近であり，１次以降の高次の奇数次モード成分も多く含まれていることがわかる。

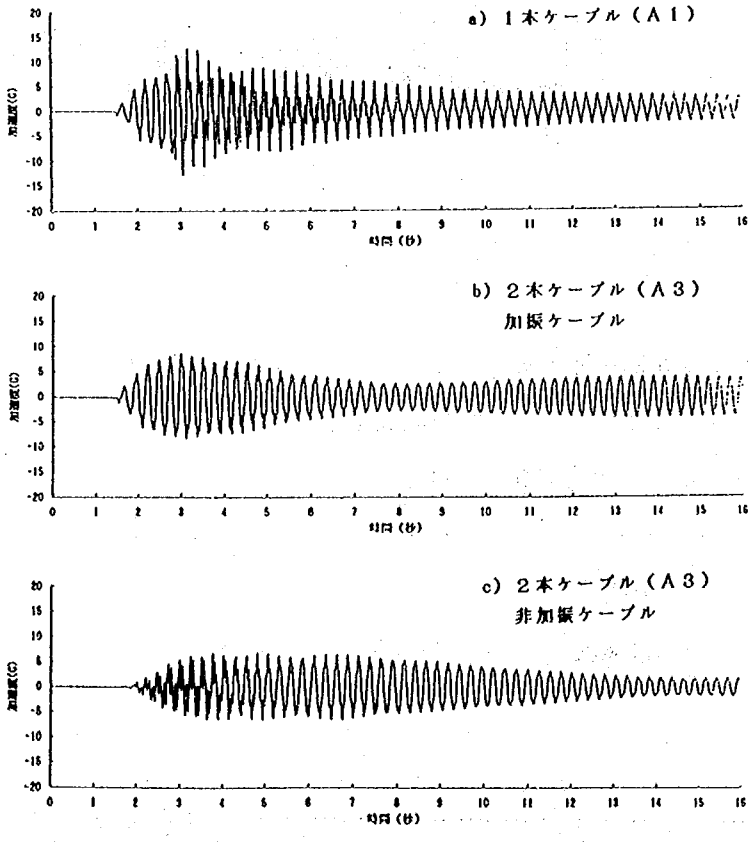


図-3.4.4.6　実験による加速度波形例

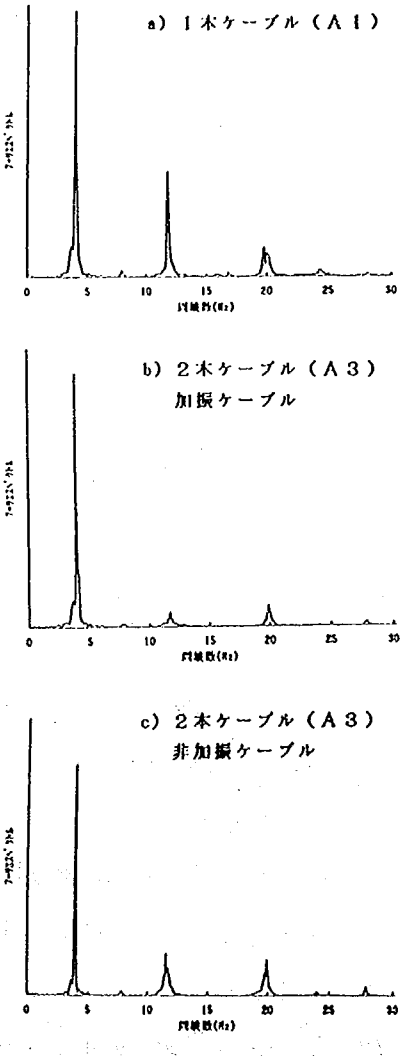


図-3.4.4.7　加速度フーリエスペクトル例

2) 対数減衰率

対数減衰率の求め方を以下に示す。

①1本ケーブルの場合（A1，A2）

1本ケーブルの場合には，実験結果の加速度波形を変位波形に変換した後，対数減衰率を求めた。この変位波形への変換は次に示す手順で行った。

なお，ここでバンドパスフィルターによって2Hz～6Hzの周波数成分のみを抽出したのは1次モード成分のみを抜き出すためである。図-3.4.4.9に，対数減衰率を求めた例を示す。

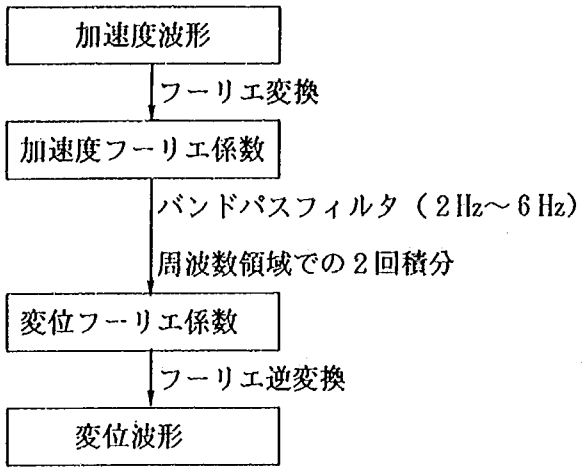


図-3.4.4.8　変位波形への変換手順

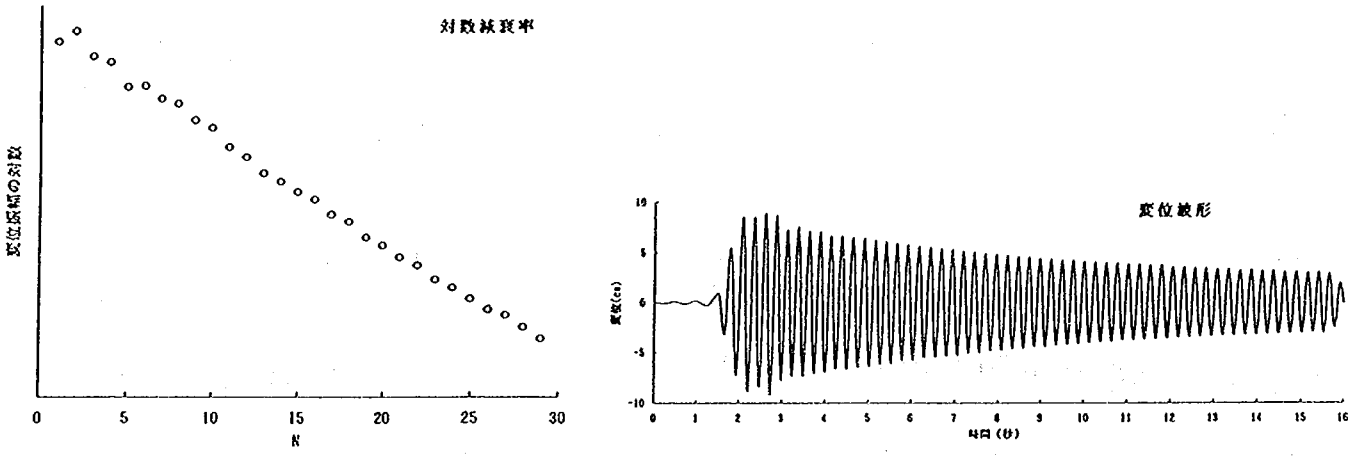


図-3.4.4.9　1本ケーブルの場合の対数減衰率を求めた例

②2本ケーブルの場合（A3，A4）

2本ケーブルの場合には，振動が2本のケーブル間を往復するので，1本ケーブルと同様の手法は使えない。この場合には以下に説明するように，エネルギーを用いて対数減衰率を求めた。

ある振動モードを考えた時，その振動エネルギーは次式で計算される。

$$E=\frac{1}{2}ku^2+\frac{1}{2}mv^2 \quad \cdots\cdots (3.4.4.1)$$

ここに，E:エネルギー　　u:変位

k:振動モードの一般化剛性　　v:速度

m:振動モードの一般化質量

両辺をkで除して，

$$E'=\frac{2E}{k}=u^2+\frac{m}{k}v^2=u^2+\frac{v^2}{\omega^2} \quad \cdots\cdots (3.4.4.2)$$

ここで，$\omega=\sqrt{k/m}$ は振動モードの固有円振動数である。いま，２本のケーブルの振動特性は同じ（すなわちkが同じ）であるので，全エネルギーはそれぞれのケーブルについて求めたE'の和で評価できる。

１サイクルの間に失われるエネルギー指標をΔE'とすると，対数減衰率は次式で計算される。

$$\delta=\frac{ln\Delta E'}{2} \quad \cdots\cdots (3.4.4.3)$$

図-3.4.4.10に，対数減衰率を求めた例を示す。

表-3.4.4.3及び図-3.4.4.11に各実験ケースの対数減衰率を示す。

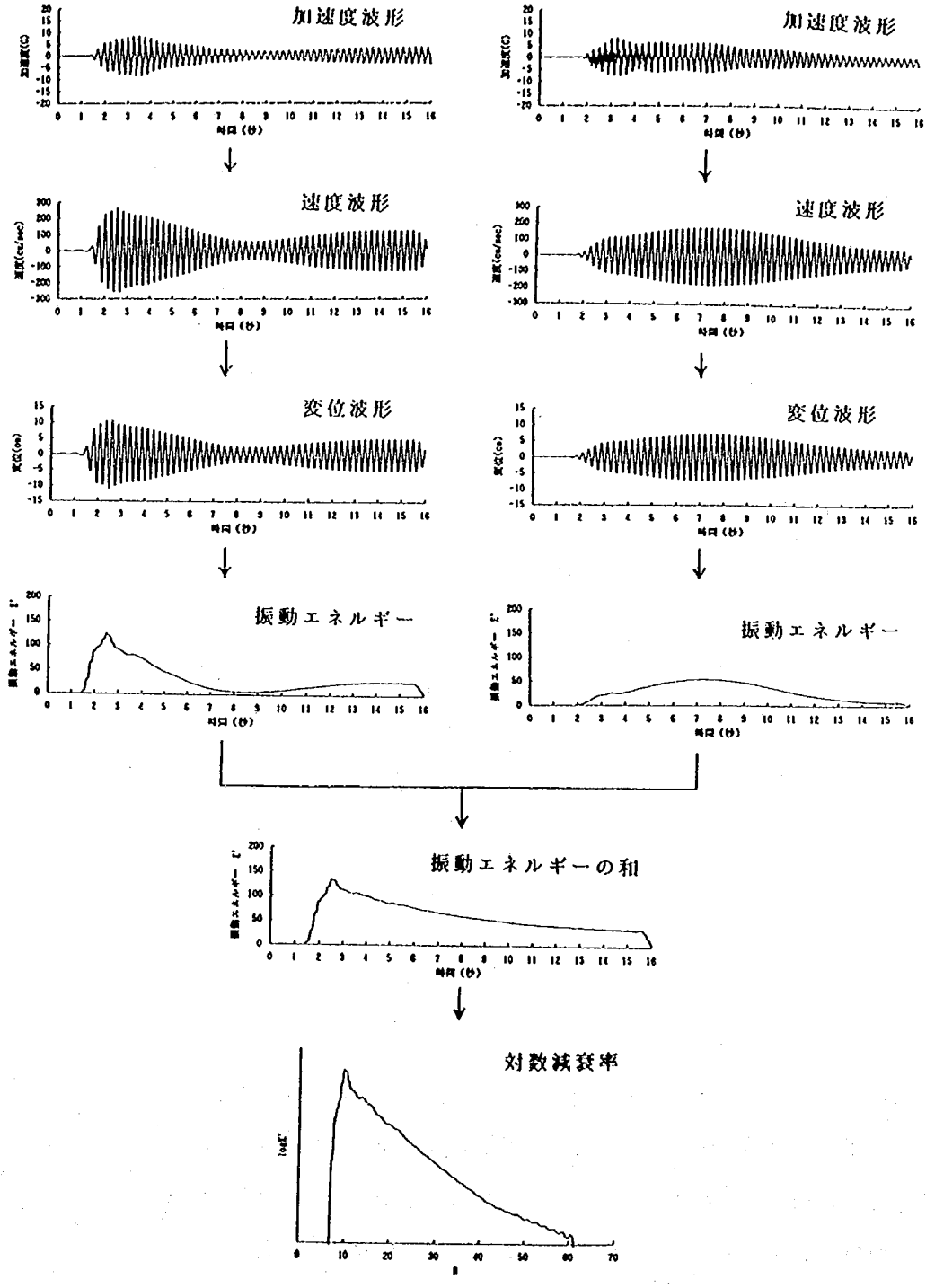


図-3.4.4.10　２本ケーブルの場合の対数減衰率を求めた例

表-3.4.4.3　実験結果（対数減衰率）

実験ケース	ゴム種類	ゴム面積	対数減衰率 δ				備考
			A1	A2	A3	A4	
CABLE1	―――	―――	0.0144	―――	―――	―――	ケーブル1
CABLE2	―――	―――	0.0145	―――	―――	―――	ケーブル2
RGD	―――	―――	0.0133	0.0720	0.0162	0.0237	鉄板
ELC1	EL型	A=1.0cm^2	―――	―――	―――	―――	ゴム破断
ELC2	〃	A=4.0cm^2	0.0344	0.0585	0.0416	0.0553	
ELC3	〃	A=10.25cm^2	0.0887	0.0959	0.0353	0.0380	
ELC4	〃	A=20.25cm^2	0.0279	0.0828	0.0317	0.0264	
ELC5	〃	A=30.25cm^2	0.0239	0.0896	0.0234	0.0276	
ELC6	〃	A=49.0cm^2	0.0155	0.0908	0.0204	0.0276	
KLC1	KL型	A=1.0cm^2	―――	―――	―――	―――	ゴム破断
KLC2	〃	A=4.0cm^2	0.0629	0.0794	0.0434	0.0522	
KLC3	〃	A=10.25cm^2	0.0229	0.0726	0.0381	0.0235	
KLC4	〃	A=20.25cm^2	0.0142	0.0759	0.0349	0.0268	
KLC5	〃	A=30.25cm^2	0.0125	0.0830	0.0184	0.0266	
KLC6	〃	A=49.0cm^2	0.0136	0.0748	0.0186	0.0261	

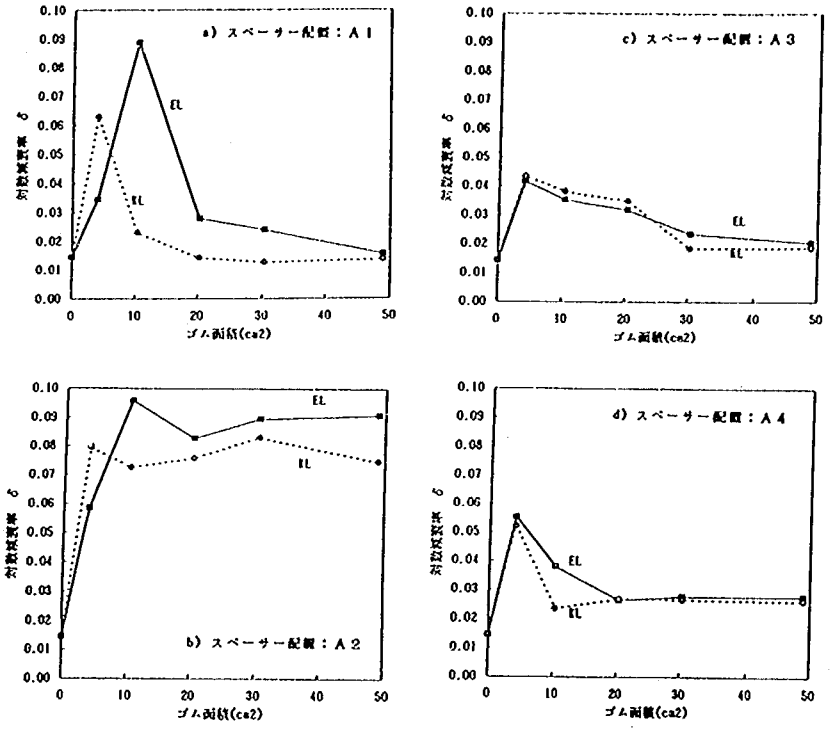
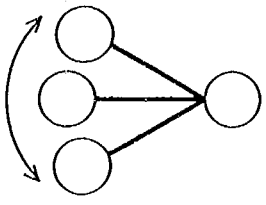


図-3.4.4.11　実験結果（対数減衰率）

3）考察

高減衰ゴムを用いたスペーサーによる制振効果はあまり見られなかった。減衰付与は，1本ケーブルでスペーサーの1端を不動点に固定した場合で最大 0.074であり，並列ケーブルにスペーサーをとりつけた場合で最大 0.027であった。これは，右図のようなスペーサーの高減衰ゴムに変形を生じないような振動が生じたためと考えられる。



3.4.5 高減衰ゴムを用いたスペーサ(3)

(1) 試験の概要

試験に用いたスペーサを写真-3.4.5.1に示す。本減衰スペーサは並列ケーブル間に渡された高減衰ゴム板が，曲げ変形する時生じるエネルギー損失により，ケーブルを制振しようとするものである。ゴム板の曲げ変形はせん断変形ほど大きい抵抗とならないため，並列ケーブル全体系の振動性状を大きく変えない。従って，本減衰スペーサ単体で付与される減衰効果を用いて所要の減衰を得るための必要個数及び配置を推定することが容易と思われる。

平成5年度は高減衰ゴム板の曲げ変形型スペーサ単体の減衰効果の測定，減衰効果と振動振幅の関係の測定試験を行った。

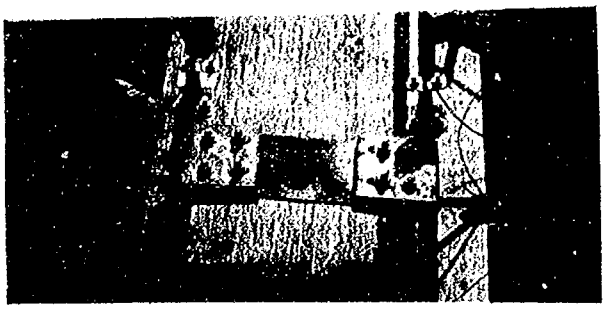


写真-3.4.5.1 高減衰ゴム板スペーサー

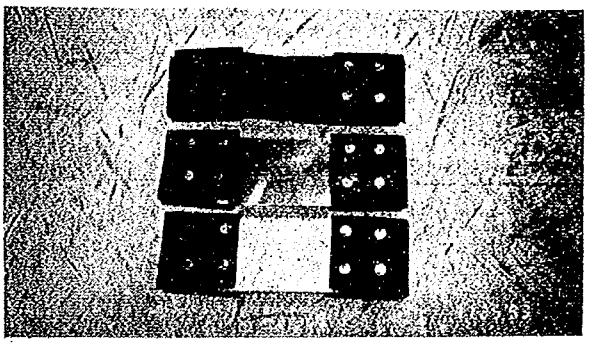


写真-3.4.5.2 高減衰ゴム，鋼バネ，3D複合材料

(2) 試験方法

1)減衰スペーサ種類

(a) 材質

試験に用いたスペーサの形状を図-3.4.5.1に示す。次の3種類の版を装着して試験を行った。試験に用いた3種類の板を写真-3.4.5.2に示す。

弾性スペーサ 1→ 弾性バネ(鋼)

減衰スペーサ 2→ 高減衰ゴム

減衰スペーサ 3→ 3D複合材料

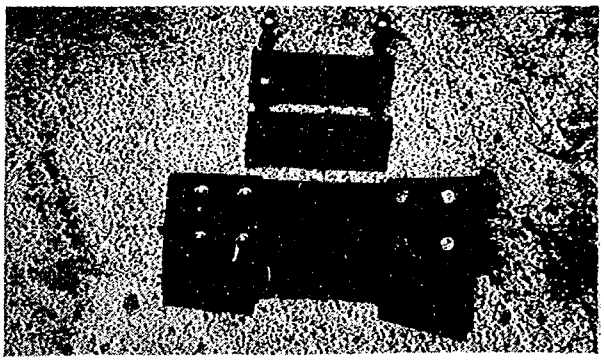


写真-3.4.5.3 曲げ強制タイプスペーサー

(b) 曲げ強制タイプ減衰スペーサ

高減衰ゴムの中央に曲げを拘束する重りを装着した曲げ強制タイプ減衰スペーサを用いて試験を行った。曲げ強制タイプ減衰スペーサを写真-3.4.5.3 に，試験状況を写真-3.4.5.4に示す。重りの全重量は 1,918 gw先端の重りの重量 990 gw，腕の長さは 80cmである。

減衰スペーサ 4→ 高減衰ゴム +重り

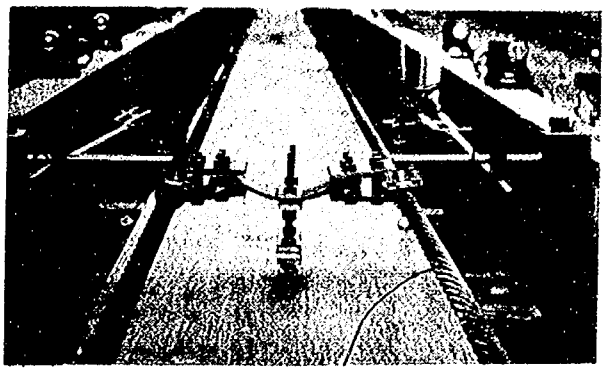


写真-3.4.5.4 曲げ強制タイプスペーサー

2)試験手順

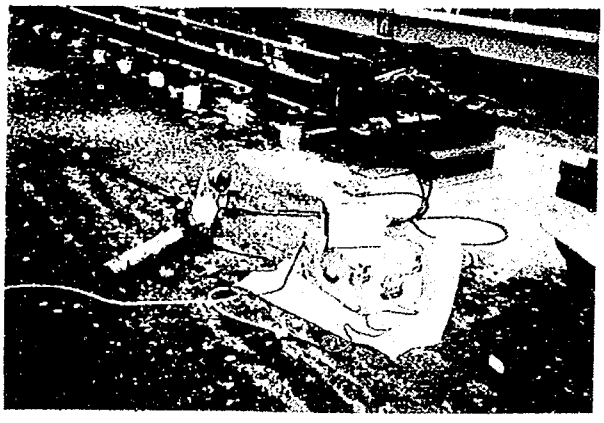


写真-3.4.5.5 緊張状況

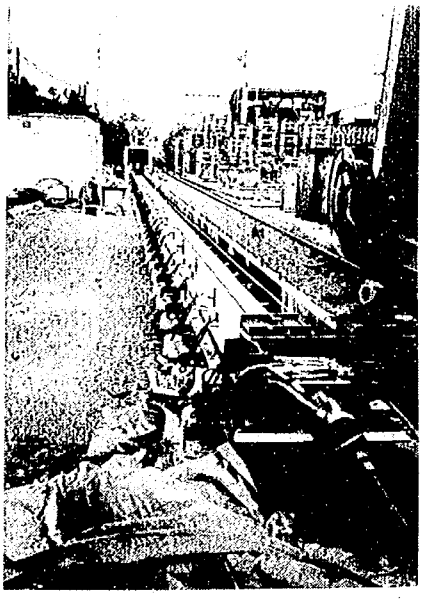


写真-3.4.5.6 ストランド架設状況

①シングルストランド(1T21.8)2本を50mアバットに張る。張力約 T =8,000kgfで緊張する。ストランド架設状況を写真-3.4.5.5に，緊張状況を写真-3.4.5.6に示す。

②シングルストランド1本を1次モードで振動させ加速度，変位を計測する。圧電型加速度計，レーザー変位計を写真-3.4.5.7に，試験状況を写真-3.4.5.8に示す。

③減衰スペーサを並列ストランド中央に取付け，並列ストランドの一方を拘束し，他方を1次のモードで振動させる。

④減衰スペーサを並列ストランド中央に取付け，

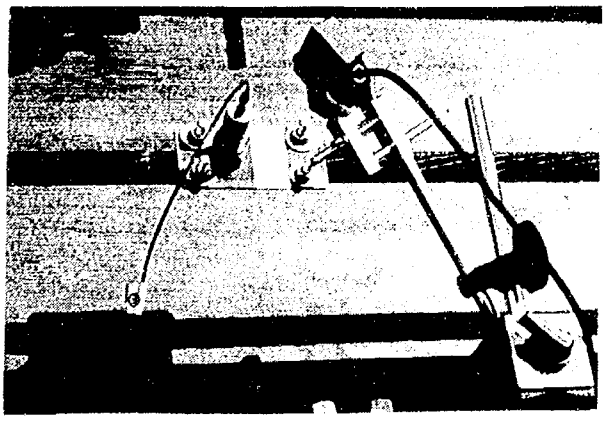


写真-3.4.5.7 加速度計，レーザー変位計

一方を１次のモードで振動させる。

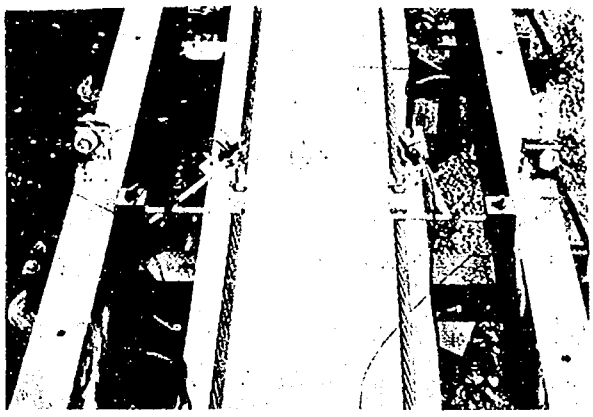


写真-3.4.5.8　試験状況

(3)　試験結果

高減衰ゴム(減衰スペーサ 2)及び高減衰ゴムに重りを装着した(減衰スペーサ 4)の振動試験で観測した代表変位波形と減衰定数を図-3.4.5.2に示す。なお，１周期隔てた変位データ群のフーリエスペクトル値の比から減衰定数を計算した。

減衰スペーサー性能試験概要

ケーブル　:SWPR19 1T21.8

(w = 2.482 kg/m , l = 50.0m)

スペーサー1 : 弾性バネ(鋼板)

スペーサー2 : 高減衰ゴム

スペーサー3 : 3D複合材料

スペーサー4 : 曲げ強制タイプ

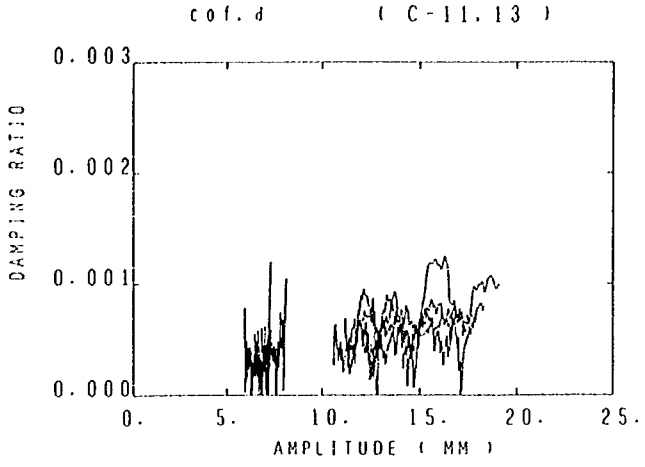


図-3.4.5.3　シングルストランドの減衰定数

(4)　まとめ

(a) フーリエスペクトル値の比から計算した減衰定数

１周期(0.57秒)隔てた変位データ群のフーリエスペクトル値の比から減衰定数を計算した。計算に用いたデータ数は 1024個で，18番目～20番目の3スペクトル値の合計の比から減衰定数を計算した。なお，19番目のスペクトルがピークでスペクトル間隔は 0.0977ＨＺである。

図-3.4.5.3にシングルストランドの変位波形を用いて，振幅比から計算した減衰定数を示す。２法により計算した減衰定数はほぼ一致している。

(b) 板形状減衰スペーサー(スペーサー1～スペーサー3)

図-3.4.5.2に振動試験で得られた代表変位波形と減衰定数を示す。シングルストランドの減衰定数に較べ高減衰ゴム（片側固定）の減衰定数は大きく，スペーサーの減衰機能が確認された。なお，当該スペーサーは剛性抵抗が小さいため，系の固有周期を大きく変えない。1024個のデータを用いたＦＦＴ解析では１次の固有周期は同じで，0.5686秒であった。また，加振側シングルストランドの減衰定数と非加振側

シングルストランドの減衰定数とで傾向が異なっていた。

(c) 曲げ強制タイプスペーサー(スペーサー4)

当該スペーサーは剛性抵抗が小さいため，系の固有周期を大きく変えない。1024個のデータを用いたFFT解析では1次の固有周期は同じで，0.5686秒であった。また，加振側シングルストランドの減衰定数と非加振側シングルストランドの減衰定数はほぼ同じ傾向を示した。曲げ強制の効果により加振側シングルストランドと非加振側シングルストランドの振動が均一化されている。

波形にうねりがあり，2以上の振動周期が混ざっていることがうかがえる。減衰の評価法を現在検討中である。当該スペーサーの減衰性能把握に必要な追加実験を計画中である。

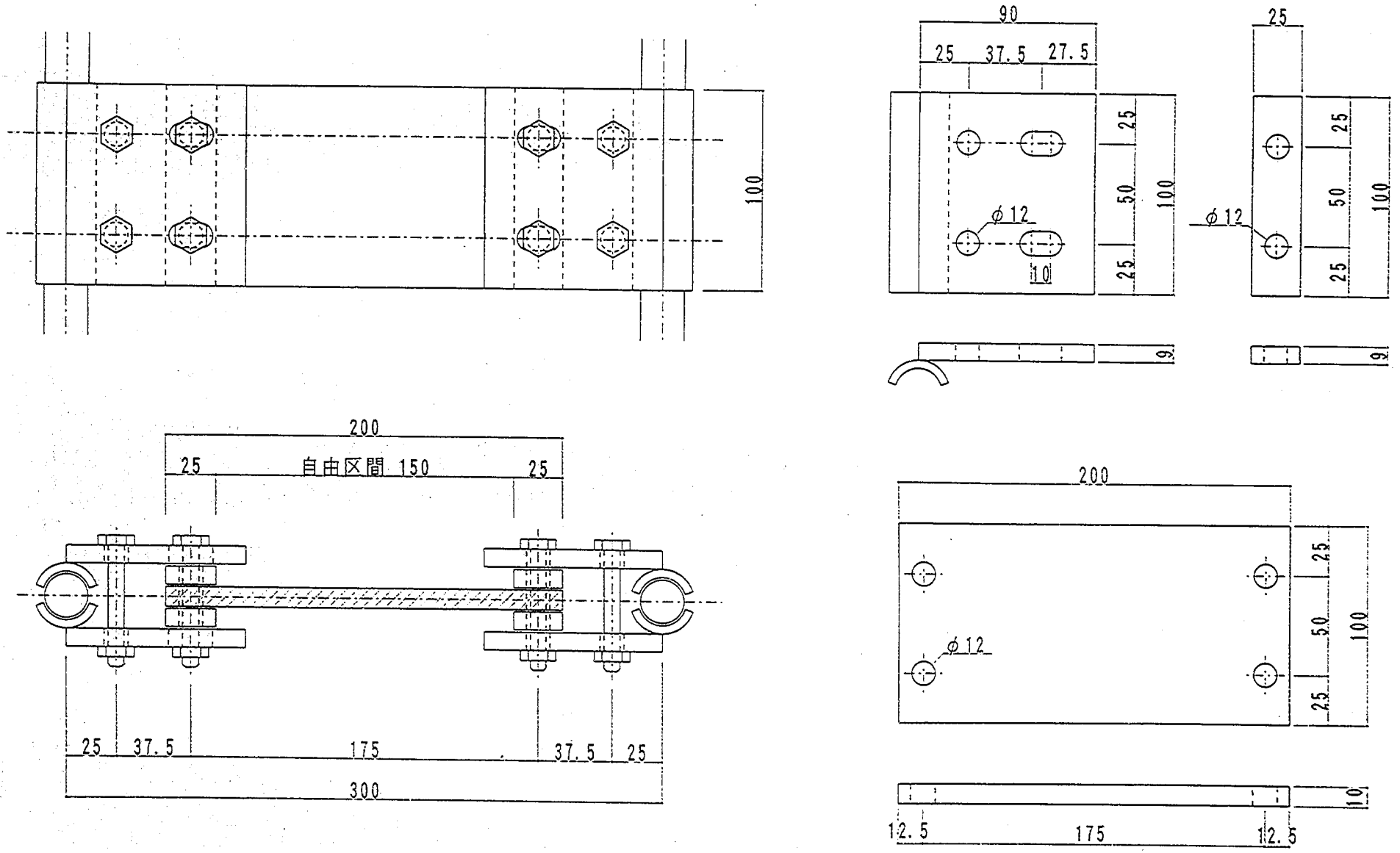


図-3.4.5.1　スペーサー形状

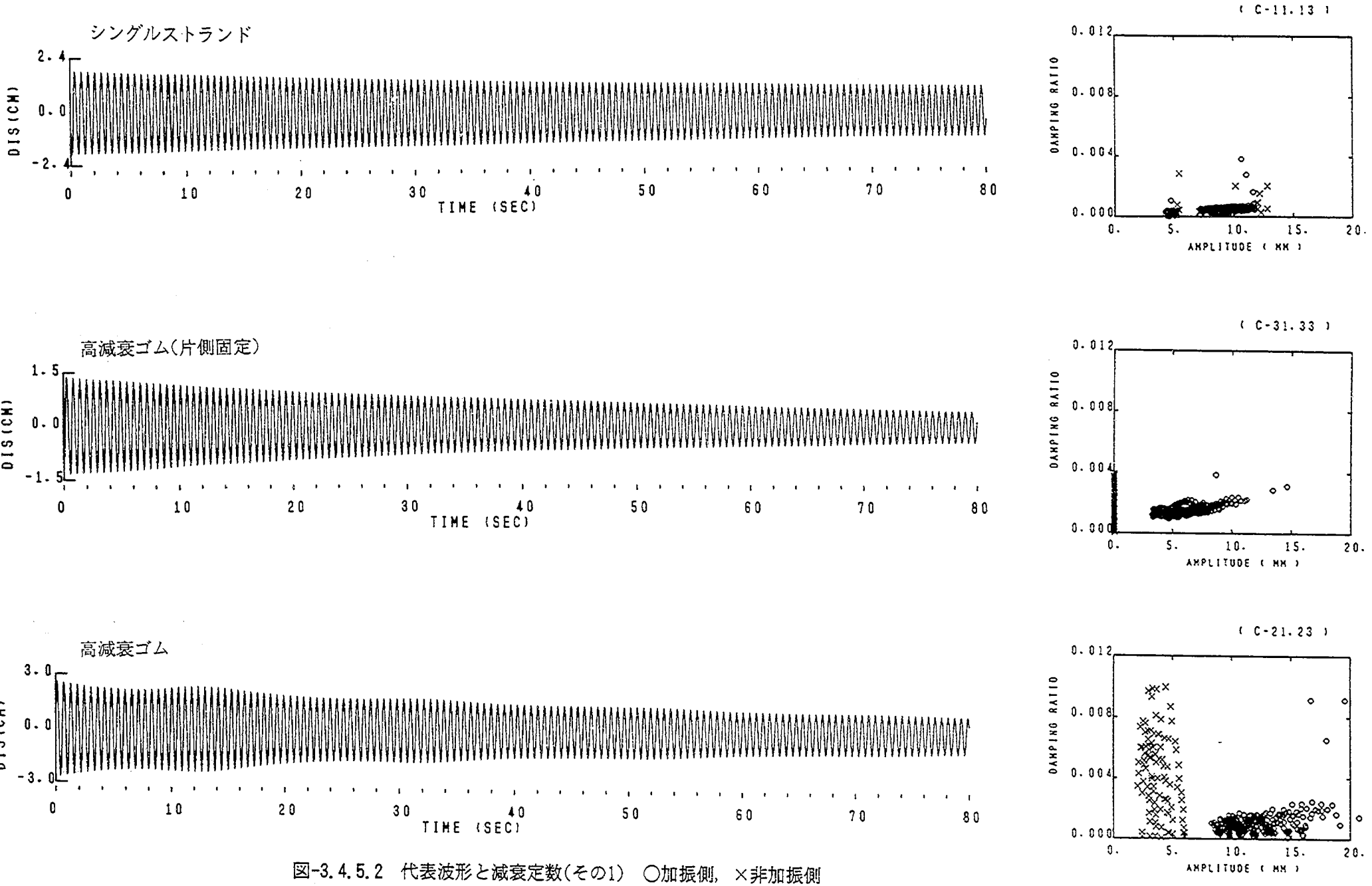
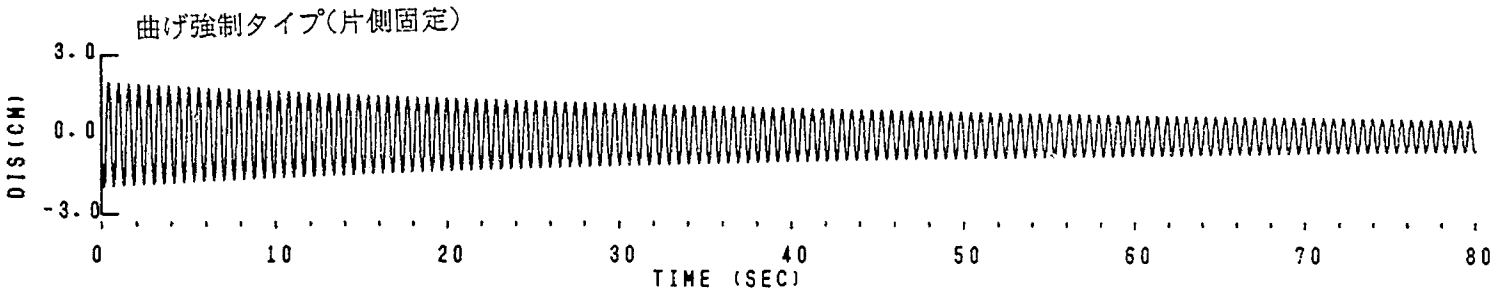
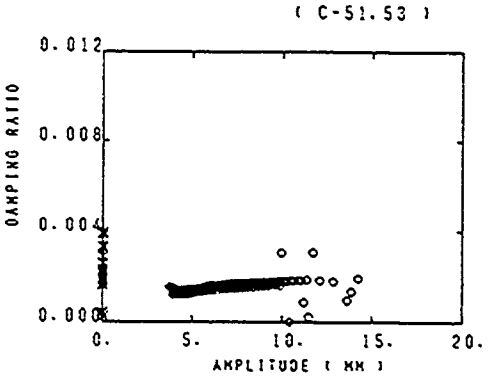
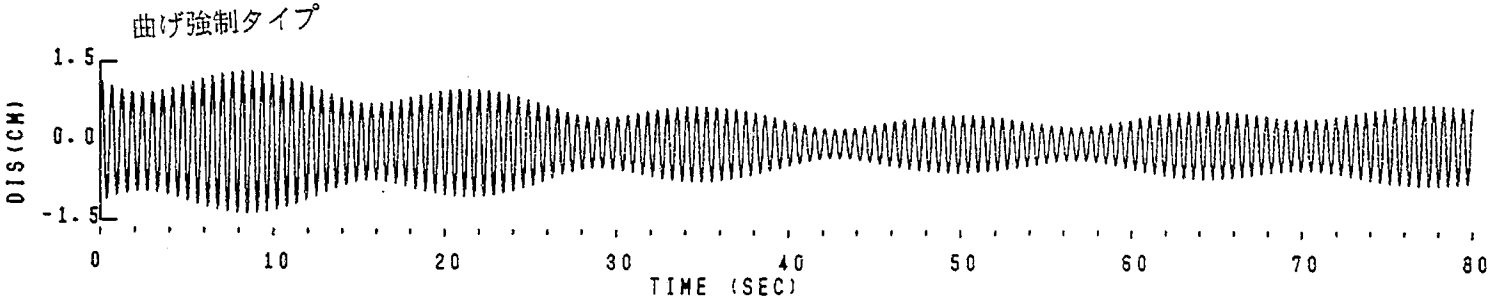


図-3.4.5.2　代表波形と減衰定数(その1)　○加振側，×非加振側







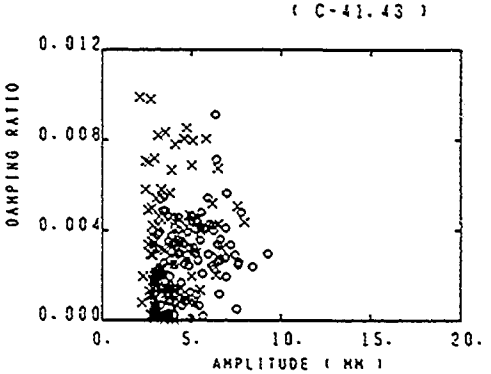
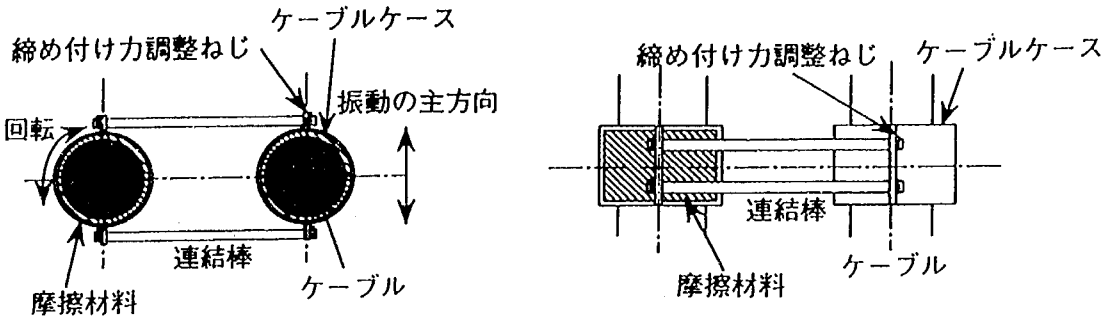


図-3.4.5.2　代表波形と減衰定数(その2)　○加振側，×非加振側

3.4.6 摩擦型減衰機能付きスペーサー

(1) 装置の概要

本項では固体摩擦のエネルギー散逸による減衰を利用したスペーサー型ケーブル制振装置を提案し，その動作原理を示すとともに，性能確認のために行った模型実験について述べる。図-3.4.6.1に摩擦型減衰機能付きスペーサーの概要を示す。この装置はケーブル表面に取り付けた摩擦材料とケーブルケース間のすべりを許容し，上下流ケーブルの鉛直相対変位を摩擦材料とケーブルケース間の回転変位に変換して（図-3.4.6.2）摩擦減衰を得るものである。本装置は減衰力の発生機構が明らかであり，減衰力の調整も容易で（図-3.4.6.3）装置の構造がシンプルになるが，履歴減衰であるので減衰定数は等価減衰定数で評価され，振幅に依存する。



(a)断面図　　(b)平面図

図-3.4.6.1 摩擦型減衰機能付きスペーサー

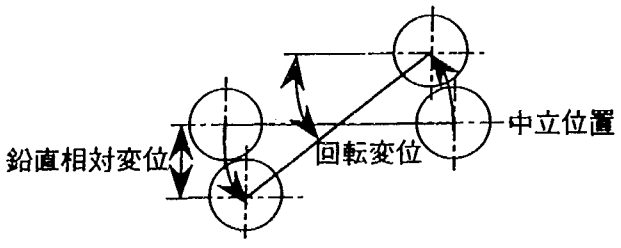


図-3.4.6.2 変位の変換メカニズム

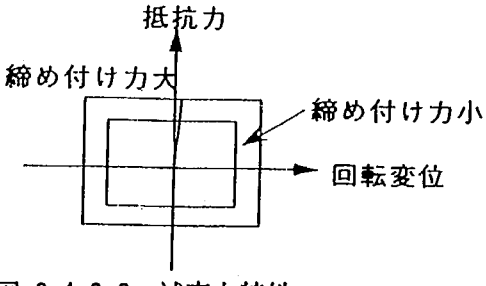


図-3.4.6.3 減衰力特性

(2) 装置の設計

1)装置の等価減衰

考え方を簡単にするために，ケーブルを1自由度にモデル化する。摩擦減衰を持つ1自由度系の強制振動方程式は，

$$m\ddot{y} \pm F + ky = P_0 \cos \omega t \quad \cdots\cdots (4.3.6.1)$$

である。ここで，F :減衰力（摩擦力），ω_n : 角振動数，Δ :装置の振幅

このとき等価減衰定数 c_e は

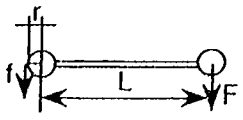
$$c_e = \frac{4F}{\pi \omega_n \Delta} \quad \cdots\cdots (4.3.6.2)$$

であらわされる。

2) 減衰力の算定

① 装置の力の釣り合い

スペーサーの減衰装置の抵抗力 f と減衰力Fには以下のような関係がある。



FL = fr

L：ケーブル間隔　r：ケーブル半径

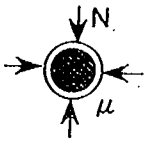
F：ケーブルに作用する力

f：減衰装置によって得られる抵抗力

図-3.4.6.4　装置の力の釣り合い

② 装置の抵抗力

スペーサーの減衰装置の抵抗力は以下のモデルで算定する。



$f = \mu NA$

μ：減衰材の動摩擦係数

N：締め付け応力

A：減衰装置の表面積

図-3.4.6.5　減衰装置の抵抗力

(3) 制振装置の性能試験

提案した減衰機能付きスペーサーの動作及び性能を確認するための模型実験を行った。

1) 実験装置

写真-3.4.6.1にスペーサーの性能試験に用いた実験装置を示す。この装置は上・下流ケーブルをそれぞれ鉛直1自由度でモデル化したバネ吊り型の並列ケーブルを構成し，両ケーブル間に摩擦型減衰機能付きスペーサーモデルを設置したものである。ケーブル模型並びにスペーサーの諸元は 表-3.4.6.1，表-3.4.6.2 に示す。

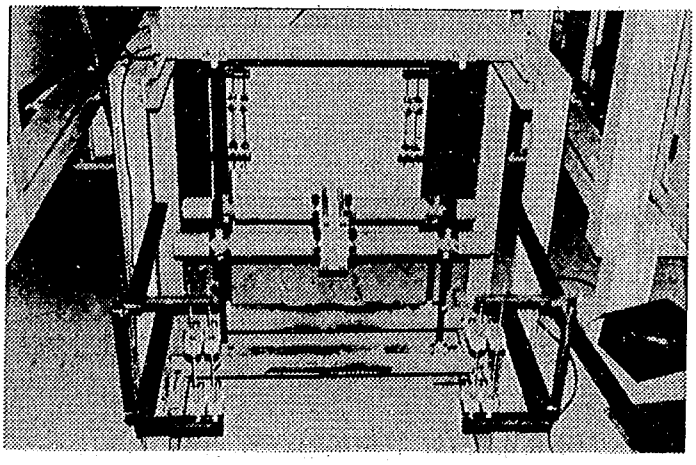


写真-3.4.6.1　実験装置

表-3.4.6.1　並列ケーブル模型実験装置

ケーブル外径	100 mm
ケーブル間隔	300 mm
ケーブル重量	10 kgf
固有振動数	1.42 Hz
構造減衰	δ =0.01

表-3.4.6.2　スペーサー模型

外径	124 mm
幅	100 mm
重量	2.0kgf

2) 減衰係数の設定

実験に先立ち，実験模型のモード減衰とスペーサーの減衰係数の関係を複素固有値解析により求め，実験での定数設定の参考資料にした。図-3.4.6.6に解析モデルを，図-3.4.6.7に解析結果を示す。

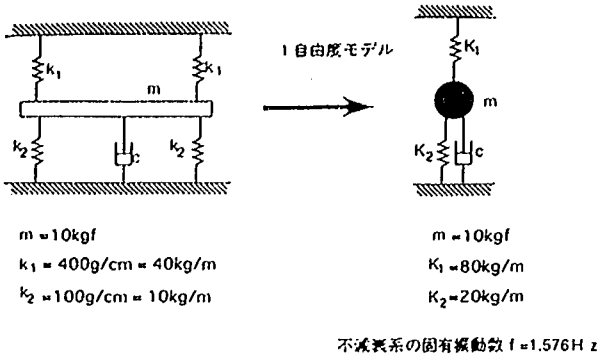


図-3.4.6.6 実験模型のモデル化

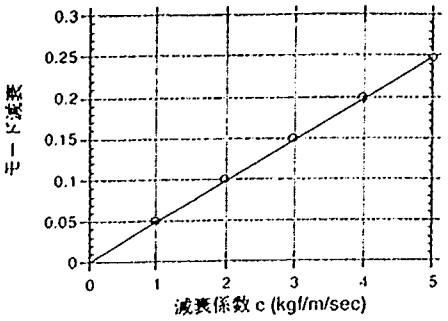


図-3.4.6.7 模型のモード減衰とスペーサーの減衰係数

3) 実験結果

図-3.4.6.8は2本のケーブルに初期条件として，t=0; $x_1=l_0$, $x_2=l_0$ を与えて自由振動させた場合の自由振動波形である。この場合スペサーに相対変形が生じないのでケーブルが単体で自由振動する場合と同じである。図-3.4.6.9は図-3.4.6.8の波形より得られる対数減衰率でケーブルモデル自体の構造減衰に相当し，実験範囲で約0.01になるように設定した。

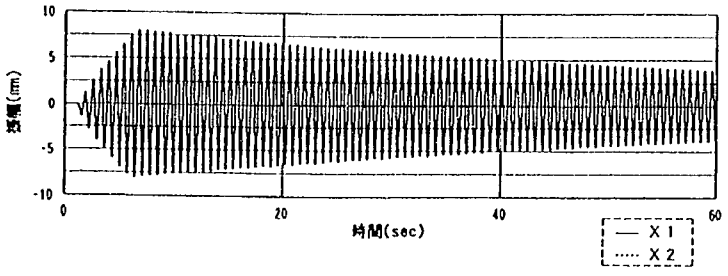


図-3.4.6.8 自由振動波形（t=0; $x_1=l_0, x_2=l_0$）

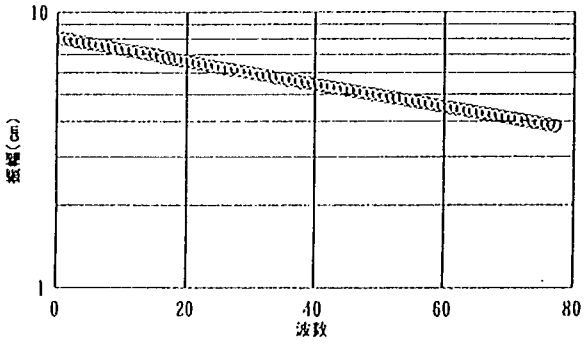


図-3.4.6.9 模型の対数減衰率

図-3.4.6.10および図-3.4.6.11は，初期条件として t=0; $x_1=l_0, x_2=0$, t=0; $x_1=l_0, x_2=-l_0$ を与えた場合である。これらは過渡的な逆相振動を経ていずれも同相振動に収束しているが，与えられた初期条件によって残留振動振幅は異なっている。このことからスペーサーは逆相振動の制御には効果を示すが，残留する同相振動振幅は初期条件に依存していることがうかがえる。

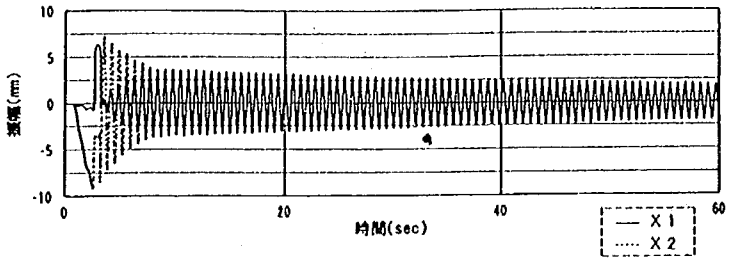


図-3.4.6.10自由振動波形（t=0; $x_1=l_0, x_2=0$）

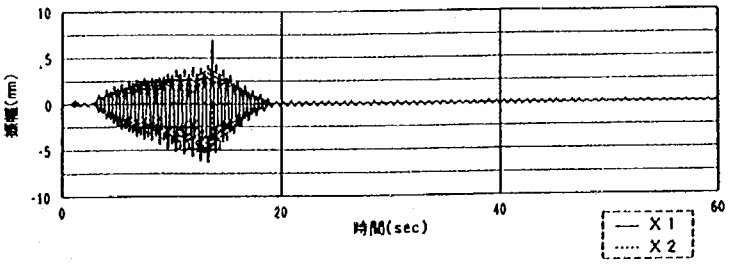


図-3.4.6.11 自由振動波形（t=0; $x_1=l_0, x_2=-l_0$）

4) 模型実験結果についての解析的検討

模型実験における並列ケーブル－スペーサー系の振動特性についてさらに詳しく理解するために，それぞれのケーブルを1自由度の質点でモデル化して応答性状を検討した。図-3.4.6.12 に解析モデルを示す。この系の振動には，並進モード（同相モード）とねじれモード（逆相モード）の2つの振動モードが存在する。ウエイクギャロッピング発生時の外力については明らかでない点が多いため，ここではこの2自由度系の自由振動について議論する。自由振動時の運動方程式を書けば，

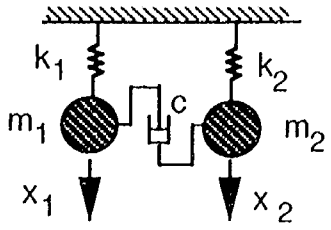


図-3.4.6.12　応答解析モデル

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + k_1x_1 = -c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ m_2\ddot{x}_2 + k_2x_2 = -c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \end{cases} \quad \cdots\cdots(4.3.6.3)$$

である。この連立微分方程式の解は解析的に求められ，$m_1 = m_2$，$k_1 = k_2$とすると，

$$\begin{cases} x_1 = x_P + x_M \\ x_2 = x_P - x_M \end{cases} \quad \cdots\cdots(4.3.6.4)$$

である。ここで，

$$x_P = A_P\cos\omega t + B_P\sin\omega t \quad \cdots\cdots(4.3.6.5)$$

A_P, B_P：定数、$\omega^2 = k/m$　　定常振動成分

$$x_M = e^{-2\lambda t}(A_M\cos\omega^* t + B_M\sin\omega^* t) \quad \cdots\cdots(4.3.6.6)$$

A_M, B_M：定数、$\omega^{*2} = \omega^2 - 4\lambda$，$\lambda = c/2m$　　減衰振動成分

従って，この系の応答は初期条件によって決まる。図-3.4.6.13 に時間t=0において$x_1 = l_0$なる初期条件の自由振動波形を，図-3.4.6.14 にt=0において$x_1 = l_0$, $x_2 = -l_0$なる初期条件（ねじりモードのみの初期条件）の自由振動波形を示した。図-3.4.6.13 では定常振動成分が残留しているが，図-3.4.6.14 では完全に減衰し消滅している。これは，減衰機構が振動のねじりモード（逆相モード）のみに有効であることを示している。また，これらの解析結果は実験結果（図-3.4.6.10，図-3.4.6.11）とも定性的によく一致しており，本項で提案した減衰機能付きスペーサーの減衰性能が理論的に裏付けられた。

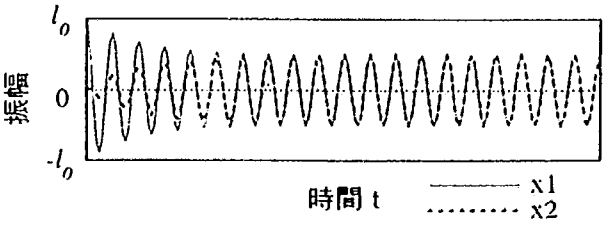


図-3.4.6.13　自由振動波形（t=0; $x_1 = l_0, x_2 = 0$）

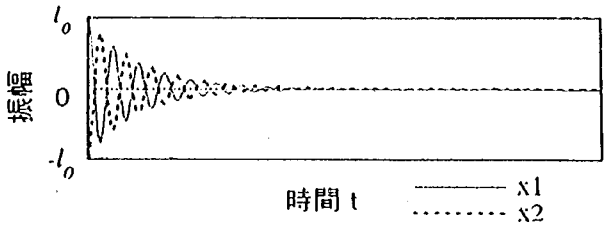


図-3.4.6.14　自由振動波形（t=0; $x_1 = l_0, x_2 = -l_0$）

3.5 新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究（その２）

3.5.1. 概　要

斜張橋並列ケーブルにおける耐風制振対策として，新しい構造力学的制振装置を開発することを目的として検討を行った。構造力学的制振装置として，ケーブル配置変化案，連結案，付加質量案，ＴＭＤ案ならびにスペーサと制振装置の組み合わせなどの案が考えられるが，その中から選定した幾つかの案に対して検討を加えることとした。研究では，制振装置の具体的検討に先だって，§３．２「ウェイクギャロッピングの特性予測に対する研究」と関連して，並列ケーブルの空力特性を風洞試験により把握することを試みた。また，風洞試験と平行して，スペーサ付き並列ケーブルの振動解析を実施し，並列ケーブルの振動特性に及ぼすスペーサの拘束効果について解析的に調査した。これらの活動を踏まえて，今後，構造力学的制振装置の具体的検討に入っていけるものと考えている。

3.5.2. 構造力学的制振対策（その１）

(1) 研究概要

本研究は，斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策の開発に関して，スペーサと制振装置との併用案（構造力学的制振対策その１）の検討を行うことを目的としている。本年度はその第１ステップとして，スペーサにより連結された並列ケーブルの空力特性を風洞試験により調査した。風洞試験では，並列ケーブル（上流側ケーブルと下流側ケーブルの組み）を相似した２次元剛体模型を風洞気流中にバネ支持した状態で，並列ケーブルの振動試験を実施し耐風応答を計測した。風洞気流は乱れの微小な一様流とし，風向は並列ケーブルの耐風性に最も厳しいと思われる橋軸直角方向を対象とした。ケーブル間隔は，２Ｄ，３Ｄ，４Ｄ（Ｄ：ケーブル径）の３ケースを考えた。

風洞試験と平行して，スペーサ付き並列ケーブルの振動解析を実施し，スペーサによるケーブル拘束の影響を検討した。ケーブルの振動解析では，通常無視されているケーブルの曲げ剛性とねじれ剛性も考慮した。

以上の検討結果を踏まえて，斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策に関する考察を加えた。

(2) 並列ケーブル風洞試験

1) 試験方法

本風洞試験では，並列ケーブルを相似した２次元剛体模型を振動試験装置に支持して，並列ケーブルの耐風安定性を調査した。並列ケーブルを構成する２本の剛なケーブル模型は両端を端板により剛結されており，その動きはスペーサにより剛結合された並列ケーブルの動きに対応したものである。対象とする実橋ケーブルは瀬戸大橋（岩黒島橋）クラスとし，模型縮尺は１／２程度を想定した。

試験実施に当たっては，風洞風速をある風速に設定してから電磁式減衰機により模型を強制加振した後，自由減衰させ，模型の応答（振動変位）を計測した。模型の加振（倍）振幅はねじれ加振モードのとき１５°，曲げ加振モードのとき６５ｍｍ（２η／Ｄ =0.81，η：曲げ加振振幅，Ｄ：ケーブル径　80mm）とした。模型の振動変位の計測に２台の光学式変位計を用いることにより，模型の振動変位は曲げ変位とねじれ変位に分離して記録した。試験は順次風速を変えて行ない，耐風性を調査する風洞風速の範囲は０～２５m/sとした。試験条件の内，ケーブル間隔（２Ｄ，３Ｄ，４Ｄ），振動自由度（曲げねじれ２自由度，曲げ１自由度，ねじれ１自由度），曲げねじれ振動数比（1.0，1.1），および構造減衰については試験パラメータとして適宜選択した。

2)　使用風洞

本風洞試験は当社所有の構造物用風洞を用いて実施した。本風洞は，測定部寸法“幅2.5m×高さ3.0m×長さ20m”の回流式ゲッチンゲン型風洞であり，風速は，0.2m/sec～25m/secまでの範囲で設定が可能である。その全体図を図-3.5.2.1に，また，本風洞の基本要目と気流特性を表-3.5.2.1，表-3.5.2.2に示す。

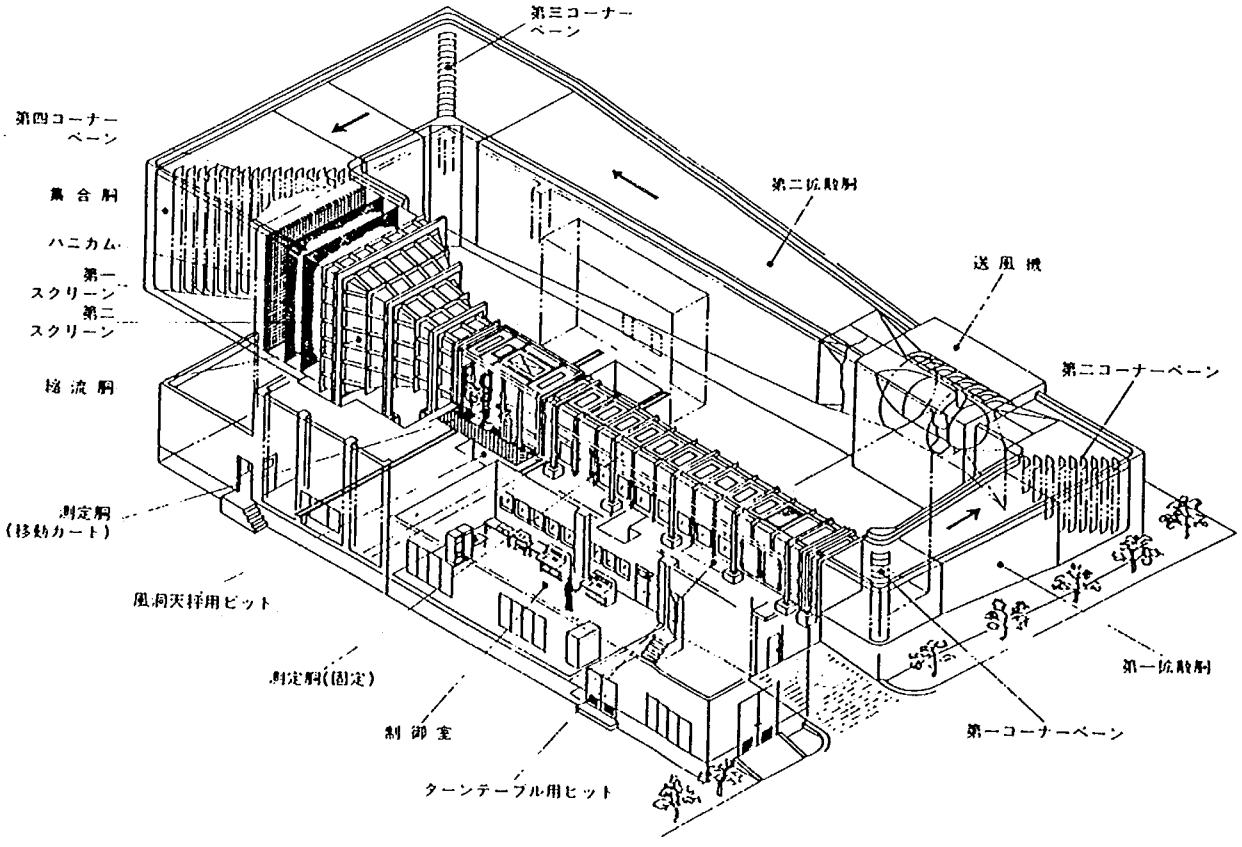


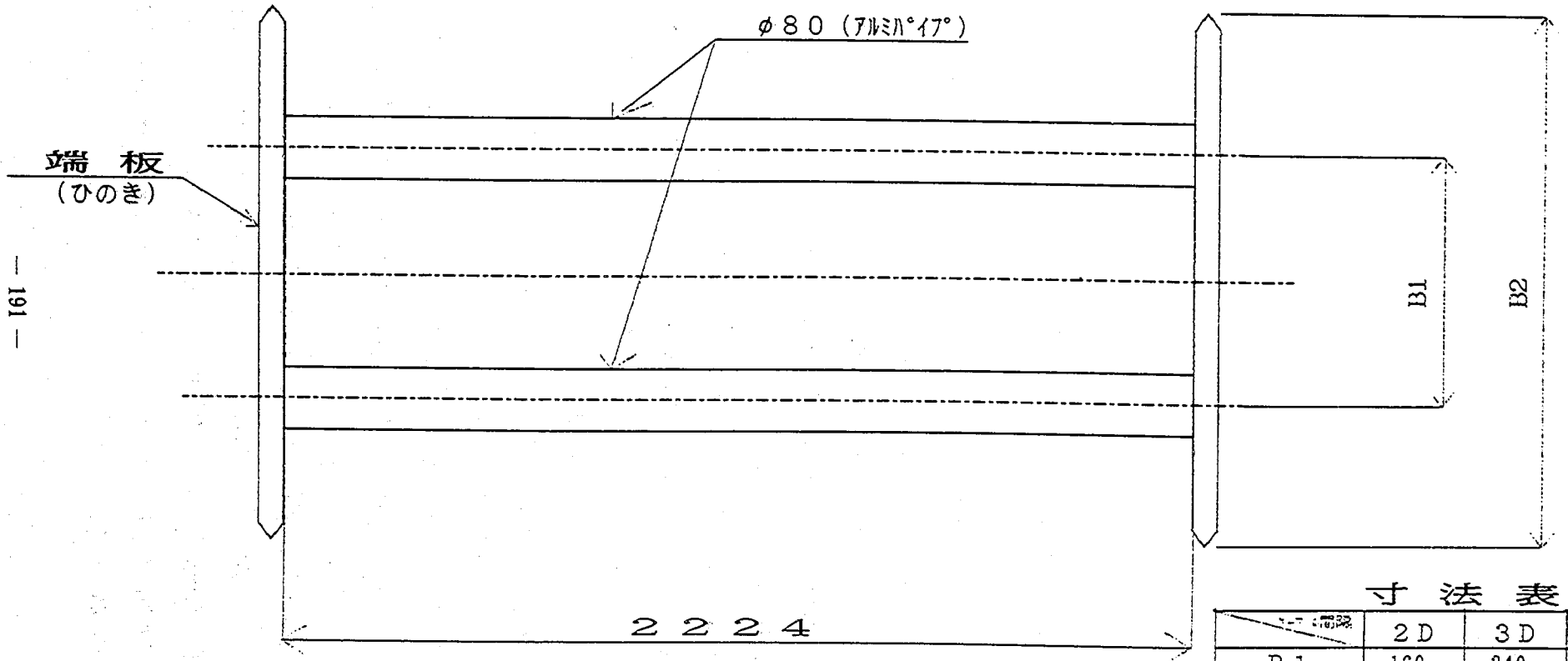
図-3.5.2.1　構造物用風洞全体図

表-3.5.2.1　風洞基本要目

風洞形式		水平単路回流式
測定部	断面寸法	高さ 3.0 m×幅 2.5 m
	長さ	移動カート：6 m，固定測定洞：14 m
風速	最大風速	25 m/sec
	制御法	0.2 ～ 25 m/sec　送風機回転数制御
絞り比		5.2
風路全長		107 m
送風機	形式	後置静翼単段軸流式
	口径	3600 mm
	最高風量	190 m^3/sec
	最高風圧	80 mmAq
	最高回転数	450 rpm
	電動機出力	200 Kw
	制御方式	サイリスタレオナード方式

表-3.5.2.2　風洞の気流特性

	風洞の性能	本四風洞試験要領(1980)に定められている基準値
風速分布	± 0.3 %	± 1 % 以内
風速の乱れ強さ	0.2 %	1 % 以内
静圧勾配	0.6 %/m	5 %/m以内



寸　法　表

	２Ｄ	３Ｄ	４Ｄ
Ｂ１	160	240	320
Ｂ２	400	560	560

図-3.5.2.2　模型図面

3) 風洞模型

斜張橋並列ケーブル模型は，瀬戸大橋（岩黒島橋）クラスのケーブルを想定した２次元剛体模型とし，２本のケーブル模型で構成される縮尺１／２の部分模型とした（図-3.5.2.2参照）。模型はケーブル間隔を２Ｄ，３Ｄ，４Ｄ（ケーブル径）と変えて試験を行うことが出来るような構造とした。２次元模型では気流の２次元性を確保することが重要であり，その目的のために模型の端部には十分な大きさの端板を取り付けた。

4) 試験条件

斜張橋並列ケーブル風洞試験の試験条件を表-3.5.2.3に示す。

5) 試験ケース

斜張橋並列ケーブル風洞試験の試験ケースを表-3.5.2.4に示す。

(3) 風洞試験結果

1) ケーブル間隔４Ｄの場合

風洞試験結果は風速と応答の関係（Ｖ－Ａ図），風速と対数減衰率の関係（Ｖ－δ図）として整理した。風速と応答の関係（Ｖ－Ａ図）は図-3.5.2.3と図-3.5.2.4に示されるように並列ケーブル模型の曲げとねじれの振動数比を0.99から1.13に変えてみても，その影響による耐風応答の変化は実験データのばらつきの範囲内に入っている。また，並列ケーブル模型の振動自由度を曲げねじれ２自由度から曲げ１自由度（図-3.5.2.5）またはねじれ１自由度（図-3.5.2.6）に変えても，対応する振動モード（曲げ振動，ねじれ振動）の応答振幅はほとんど変化しない。これらのことから，今回の試験範囲では，並列ケーブル（ケーブル間隔４Ｄ）の応答振幅に及ぼす連成振動の影響は微少であると考えられる。ただし，曲げ１自由度では換算風速（Ｖ／ＮηＤ）＝６において渦励振とみられる限定振動の発生が認められる。

振動自由度によって耐風応答特性が受ける影響を，曲げねじれ２自由度とねじれ１自由度の場合に関して対数減衰率の面から調べたのが，図-3.5.2.15と図-3.5.2.16である。どちらのケースも換算風速（Ｖ／ＮθＤ）が５０近傍まで対数減衰率は減少（負の空力減衰が作用）し，その後，風速とともに対数減衰率は増加（正の空力減衰が作用）している。ただし，ねじれ１自由度のときの方が，曲げねじれ２自由度のときに比べて対数減衰率（空力減衰）の増加の割合が大きく，振動自由度による影響が現れている。

基準倍振幅１°における並列ケーブルのねじれ対数減衰率は，図-3.5.2.15と図-3.5.2.16にみられるように，高風速側において風速とともに増加し，耐風安定性が良くなっている。他方，耐風応答振幅は，図-3.5.2.4と図-3.5.2.6に示されるように，風速とともに増加して，耐風安定性が悪くなっている。図-3.5.2.6の図中に，換算風速(Ｖ／ＮθＤ)＝１６５のときの波数と応答振幅の関係を示すが，加振された並列ケーブル模型は，自由振動しながら振幅０近くまで一度減衰する。対数減衰率は減衰振動の中で計算される。並列ケーブルは，その後，バフェティングとみられる振動を繰り返しており，図-3.5.2.6の最大応答振幅はその中で観測される。

表-3.5.2.3 試験条件

試験条件	単位	実橋ケーブル諸元	模型ケーブル諸元 ケーブル間隔		
			2 D	3 D	4 D
ケーブル径（D）	m	0.16	0.08	0.08	0.08
模型縮尺		1	1／2	1／2	1／2
模型長（l）	m	----------	2.224	2.224	2.224
模型重量（W）	kgf/m/2本	138.0*1	12.8*1	12.8*1	12.8*1
極慣性モーメント（I_θ）	kgf·m·s²/m/2本	2D： 0.360	0.024	-----	-----
		3D： 0.811	-----	0.056	-----
		4D： 1.44	-----	-----	0.101
曲げ振動数（N_n）	Hz	0.6	1.30	1.30	1.30
ねじれ振動数（N_θ）	Hz	0.6	1.44	1.49	1.28/1.47
振動数比（N_θ/N_n）		1.0	1.10	1.14	0.99/1.13
曲げ構造減衰（δ_n）		0.01	0.0098	0.0097 0.0194 0.0403	0.0094
ねじれ構造減衰（δ_θ）		0.01	0.0103	0.0108 0.0205 0.0404	0.0108
質量減衰パラメータ（$W\delta_n/2\rho g D^2$）		22.0	8.03	7.98 15.8 32.8	8.06
質量減衰パラメータ（$I_\theta\delta_\theta/2\rho D^4$）		2D： 22.0	24.2	----	----
		3D： 49.5	----	59.4 112 220	----
		4D： 87.9	----	----	112
空気密度（ρ）	kgf·s²/m⁴	0.125	0.125	0.125	0.119

注記

1． ＊1印はケーブル2本分の重量を示す。

表-3.5.2.4 試験ケース一覧表

ケース番号	ケーブル間隔	振動自由度	振動数比 N_θ/N_n	構造減衰 δ	迎角 α	参照図面	
1	4 D	曲げ．ねじれ	1.0	0.01	0°	図3.1	*
2	4 D	曲げ．ねじれ	1.1	0.01	0°	図3.2	*
3	4 D	曲げ	--------	0.01	0°	図3.3	*
4	4 D	ねじれ	--------	0.01	0°	図3.4	*
5	3 D	曲げ．ねじれ	1.1	0.01	0°	図3.5	
6	3 D	曲げ	--------	0.01	0°	図3.6	*
7	3 D	ねじれ	--------	0.01	0°	図3.7	
8	3 D	曲げ．ねじれ	1.1	0.02	0°	図3.8	
9	3 D	曲げ．ねじれ	1.1	0.04	0°	図3.9	
10	2 D	曲げ．ねじれ	1.1	0.01	0°	図3.10	
11	2 D	曲げ	--------	0.01	0°	図3.11	
12	2 D	ねじれ	--------	0.01	0°	図3.12	

2) ケーブル間隔３Ｄの場合

ケーブル間隔３Ｄの場合の風速と応答の関係（Ｖ－Ａ図）を，図-3.5.2.7～図-3.5.2.11 に示す。曲げ１自由度のとき，換算風速（Ｖ／Ｎηｄ）＝７において曲げ渦励振が発生し，換算風速が２２０を越えると，ギャロッピングと思われる振動が発生する（図-3.5.2.8）。ねじれ１自由度のときは，換算風速（Ｖ／ＮθＤ）＝６０以上の風速範囲でハード型の不安定なねじれ定常振動が発生するのが特徴的である（図-3.5.2.9）。曲げねじれ２自由度のとき，換算風速（Ｖ／Ｎηｄ）＝５において曲げ渦励振が発生し，換算風速（Ｖ／ＮθＤ）＝６０以上の風速範囲で不安定なねじれ定常振動が発生する。これらの現象は，曲げ１自由度またはねじれ１自由度のときの耐風応答特性と同様である。しかし，曲げねじれ２自由度の場合，換算風速１６０を越えると大振幅の曲げ発散振動（ギャロッピング）が急激に発現する（図－3.5.2.7）。

以上は構造減衰$\delta\eta=\delta\theta=0.01$のときであるが，構造減衰0.02になると，換算風速（Ｖ／ＮθＤ）＝６０以上の風速範囲でみられた不安定なねじれ定常振動は姿を消す。このときも，低風速域での曲げ渦励振および高風速域での曲げ発散振動の発生は認められる。高風速域での曲げ発散振動は，曲げ振動の発達が早いため，ねじれ振動の不安定な定常振幅を把握することはできていない（図-3.5.2.10)。さらに，構造減衰が0.04になると，低風速域での曲げ渦励振は消えるが，高風速域での曲げ発散振動の発現風速は構造減衰が0.02のときとほとんど変わらない換算風速（Ｖ／Ｎηｄ）約２００のままとなっている（図-3.5.2.11）。

3) ケーブル間隔２Ｄの場合

ケーブル間隔２Ｄの場合の風速と応答の関係(Ｖ－Ａ図)を，図-3.5.2.12～図-3.5.2.14に示す。曲げ１自由度のとき，換算風速（Ｖ／Ｎηｄ）＝６０を越えるとギャロッピングが発生する（図-3.5.2.13）。ねじれ１自由度のとき，換算風速（Ｖ／ＮθＤ）＝２０以上でねじれ発散振動が発生するが，換算風速約１００以上の風速範囲において小振幅の安定なねじれ定常振動と大振幅の不安定なねじれ定常振動に別れる（図-3.5.2.14 ）。曲げねじれ２自由度のときも，ねじれ１自由度と同様に換算風速（Ｖ／ＮθＤ）＝２０においてねじれ発散振動が発生し，換算風速約１００以上において不安定なねじれ定常振動が発現する。曲げ振動に関しては，換算風速（Ｖ／Ｎηｄ）＝６０を越えるとギャロッピング発生の兆候がみられるが，ねじれ振動の発散が早いため，十分に発達していない（図-3.5.2.12）。

(4) 並列ケーブル振動解析

本研究ではスペーサにより剛結合された並列ケーブルを対象としており，並列ケーブルの動きが，スペーサによってどう影響を受けるのか明らかにしておく必要がある。ここでは，特に，スペーサとケーブルとの結合条件とスペーサの配置形式に着目してスペーサによるケーブル結合効果を調査した。

1) 振動解析条件

振動解析モデルを図-3.5.2.17に示し，振動解析条件を表-3.5.2.5～表-3.5.2.7に示す。

2) 振動解析結果

① スペーサとケーブルの結合条件の影響

スペーサと並列ケーブル間の結合条件が，並列ケーブルの振動特性に及ぼす影響を調査した。スペーサは等間隔に3個配置した。スペーサと並列ケーブルとの結合点におけるスペーサの拘束条件としてⅠ．6自由度固定，Ⅱ．ケーブル軸回りの回転のみ解放 の各ケースについて振動解析を行った結果を表-3.5.2.8に示す。表中，ケーブル軸回りの回転を解放したケースでは，面外逆位相モード（ねじれ振動）の振動モードおよび振動数が，面外同位相モード（曲げ振動）の値と同一となっている。面外同位相モードはスペーサ設置の影響を受けないモードであることから，換言すると，ケーブル軸回りの回転を解放するとスペーサによるケーブル振動の拘束効果は（微小振動の範囲では）無くなることになる。6自由度固定のケースでは，面外逆位相モードの振動数（1次，2次）が，ケーブル軸回りの回転を解放したケースにおける振動数の約2倍となっていて，スペーサによるケーブル結合効果が認められる。

② スペーサの配置形式の影響

スペーサの配置形式として，スペーサ個数とスペーサ配置の規則性に着目して，スペーサが並列ケーブルの振動特性に及ぼす影響を調査した。検討対象のスペーサ個数は1，3，5の3ケースとした（表-3.5.2.9）。全般的な傾向として，スペーサ個数が増えると，面外逆位相モード（ねじれ振動）の振動数は高くなる。その傾向は低次振動のとき程顕著に認められる。スペーサの設置位置が，スペーサ無しケーブルにおける振動モードの節に当たるときは当然のことながらスペーサのケーブル結合効果は無くなる。

以上の解析ではスペーサの配置は等間隔であったが，不等間隔にした場合の影響を表-3.5.2.10に示す。スペーサ間隔は6：4：5：6：4：5とした。この場合，高次振動において不等間隔によるケーブル振動モードへの影響がより顕著に現れている。

③ 付加重量の影響

ケーブル質量のアンバランスが面外同位相モード（曲げ振動）のモード形状に及ぼす影響を試みに調べた。検討対象とした並列ケーブルでは，スペーサ3個を等間隔配置し，付加重量20Kgfを各スペーサとケーブルの結合点からケーブル面内直角方向に3D（D：ケーブル径 160mm）だけ外側に離した位置に配置した。付加重量3個の総重量は60Kgf（ケーブル重量 23.2tf／2本の0.26%）である。計算結果を表-3.5.2.11に示すが，この程度の付加重量では振動モードにほとんど影響を与えない。

(5) 並列ケーブル制振対策

並列ケーブル制振対策に関して，本研究で得られた知見を以下に列記する。

1) スペーサ連結後の並列ケーブルの振動モードの影響

スペーサ連結後の並列ケーブルの振動モードが，曲げ1自由度またはねじれ1自由度のときと，曲げねじれ2自由度のときとで，曲げ振動またはねじれ振動に対応して発現する空力現象に大きな差は認められない。すなわち，並列ケーブルの耐風対策において，曲げねじれの連成を便宜的に無視して，曲げ1自由

度とねじれ1自由度とに対して個別に耐風安定化を図ることが有る程度できるものと考えられる。

2) ケーブル間隔の影響

スペーサ付き並列ケーブルのケーブル間隔が，2D→3D→4D と広がるにつれて，発散振動の発現風速は高くなり，その意味での耐風性は良くなっている。例えば，ケーブル間隔4Dになると，試験風速と加振振幅の範囲内で発散振動は発現していない。

3) 構造減衰の影響

ケーブル間隔3Dの場合について構造減衰による耐風安定化効果を調査した。風洞試験では，ケーブル供試体の質量パラメータを実橋ケーブル値の約1/2.8 としたため，風洞試験における構造減衰の値を 2.8 倍するとき，風洞試験と実橋におけるケーブル質量減衰パラメータが一致する。スペーサ付き並列ケーブル風洞試験で構造減衰 δ=0.04（実橋換算の構造減衰 δ_p=0.014）とするとき，曲げ渦励振と不安定なねじれ定常振動は制振される。曲げ発散振動の発現風速も構造減衰の増加とともに高くなるが，試験風速の範囲内で発現している（δ=0.04 のとき発現風速は換算風速約200）。

4) スペーサとケーブルの結合条件

スペーサと並列ケーブルとの結合条件で，ケーブル軸回りの回転を解放するとスペーサによるケーブル振動の拘束効果はなくなり，拘束すると面外逆位相モード（ねじれ振動）の振動数が約1．5～2倍と高くなる。ねじれ振動数が高くなることは，それだけ（振動数の2乗に比例して）ねじれ剛性が高くなっていることになるが，このことは，ケーブル軸回りの固定部に大きなセン断力が作用することを意味する。したがって，図-3.5.2.18 に示すように，ケーブルとスペーサ取付部の間に高減衰ゴムを挟む構造を工夫すれば，ねじれ振動に対する構造減衰の増加，さらには，ねじれ空力振動の安定化を図ることが可能ではないかと思われる。

5) スペーサの配置数

スペーサを等間隔配置する場合，制振対象とするケーブル振動の最高次数よりスペーサの個数を1個以上多くすれば，スペーサ配置によって面外逆位相モード（ねじれ振動）の振動数を高めることができる。例えば，ケーブル振動の制振対象次数が2次のとき，スペーサ数は3個とすれば良い。この場合，スペーサ数を4個以上に増やしてもねじれ振動数への効果はあまり変わらない。

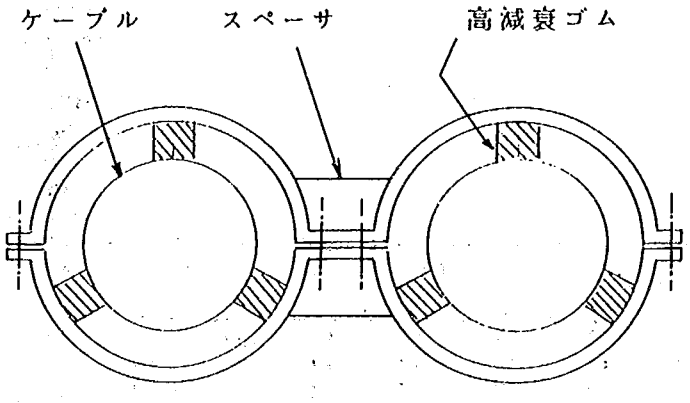
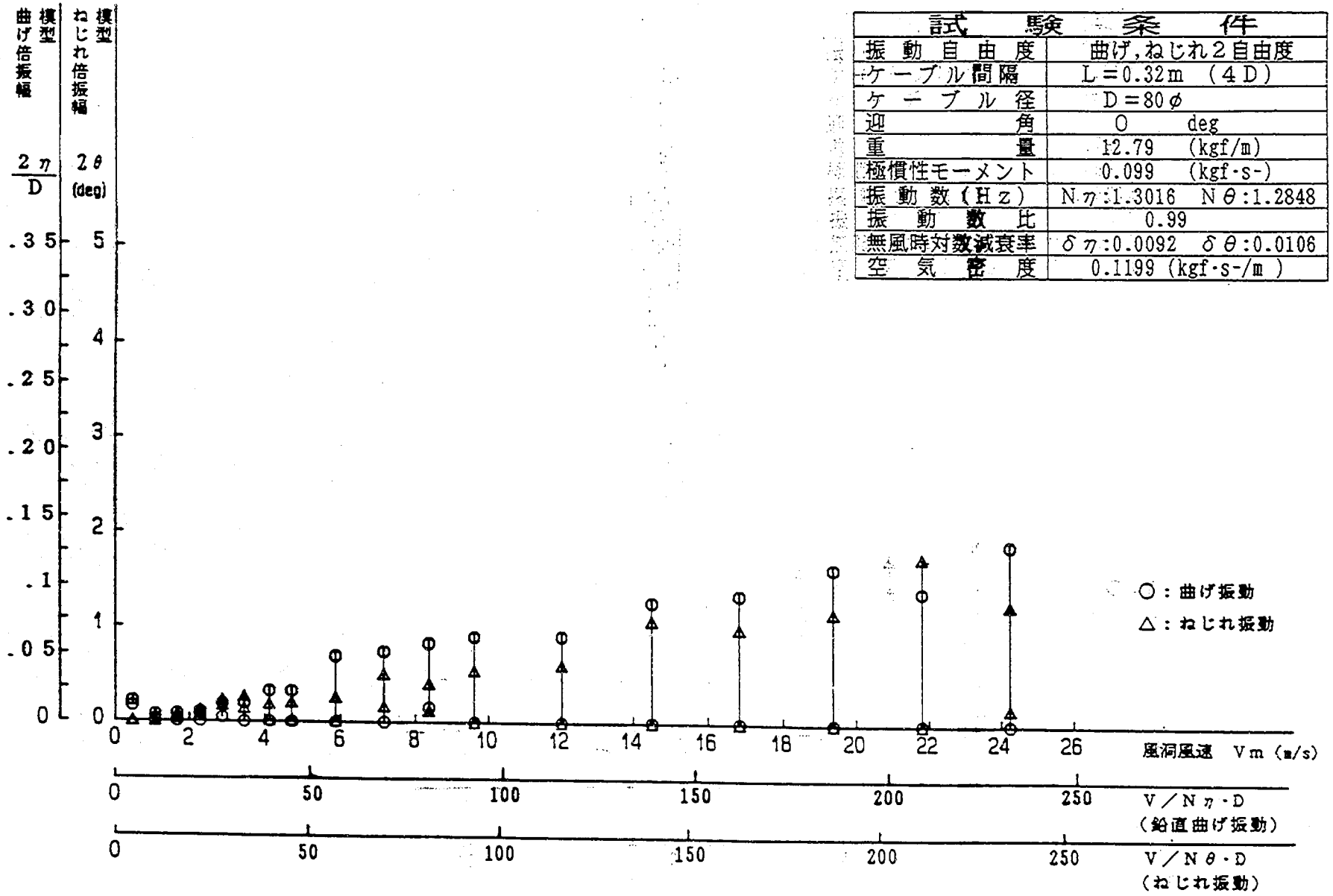


図-3.5.2.18 高減衰ゴムによるケーブル制振装置



試験条件	
振動自由度	曲げ,ねじれ2自由度
ケーブル間隔	L＝0.32m (4D)
ケーブル径	D＝80φ
迎角	0 deg
重量	12.79 (kgf/m)
極慣性モーメント	0.099 (kgf·s-)
振動数(Hz)	Nη:1.3016 Nθ:1.2848
振動数比	0.99
無風時対数減衰率	δη:0.0092 δθ:0.0106
空気密度	0.1199 (kgf·s-/m)

図-3.5.2.3 並列ケーブル（ケーブル間隔4D，曲げねじれ2自由度）の風速と応答の関係 [CASE 1]

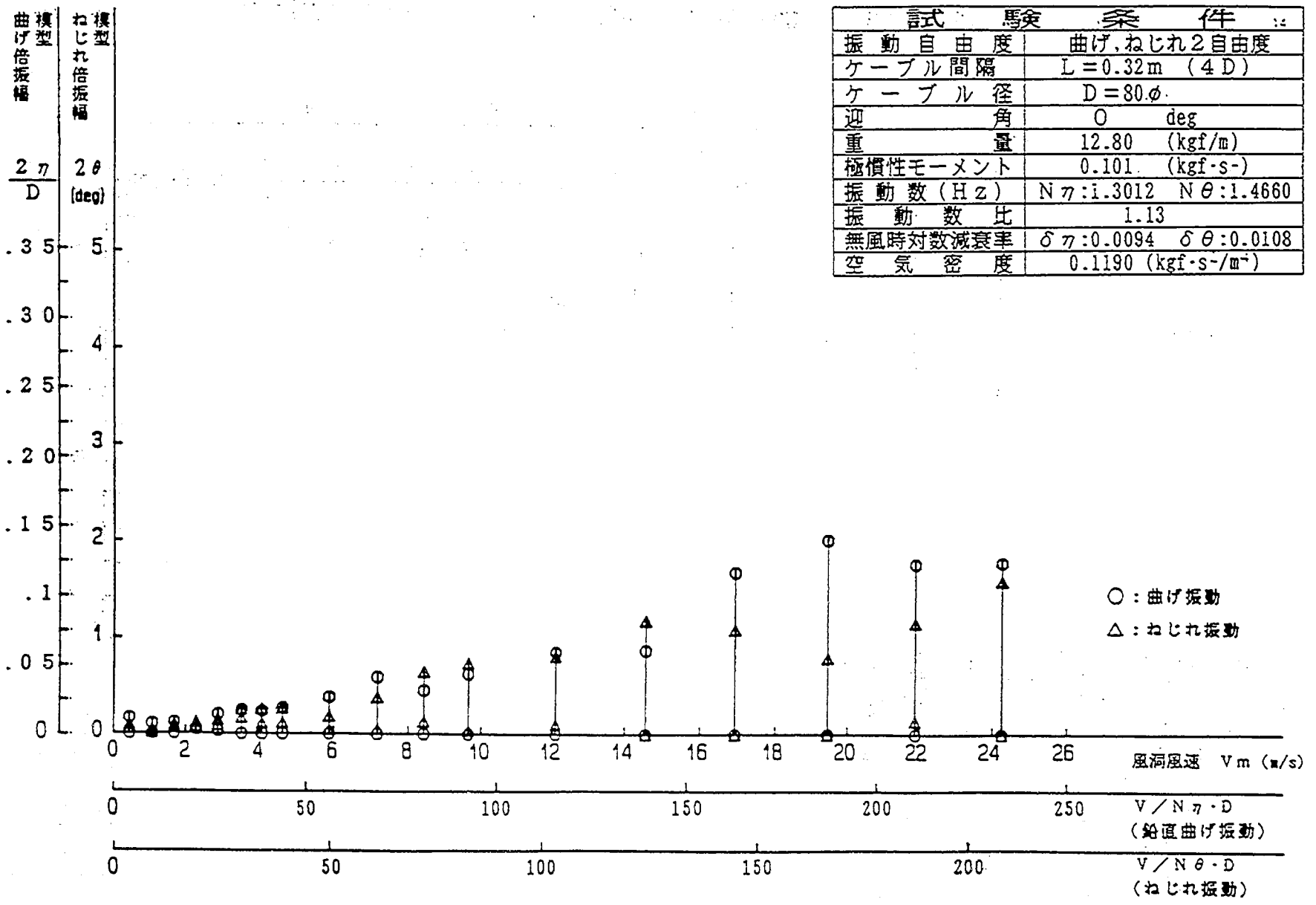


図-3.5.2.4 並列ケーブル（ケーブル間隔４D，曲げねじれ２自由度）の風速と応答の関係 [CASE 2]

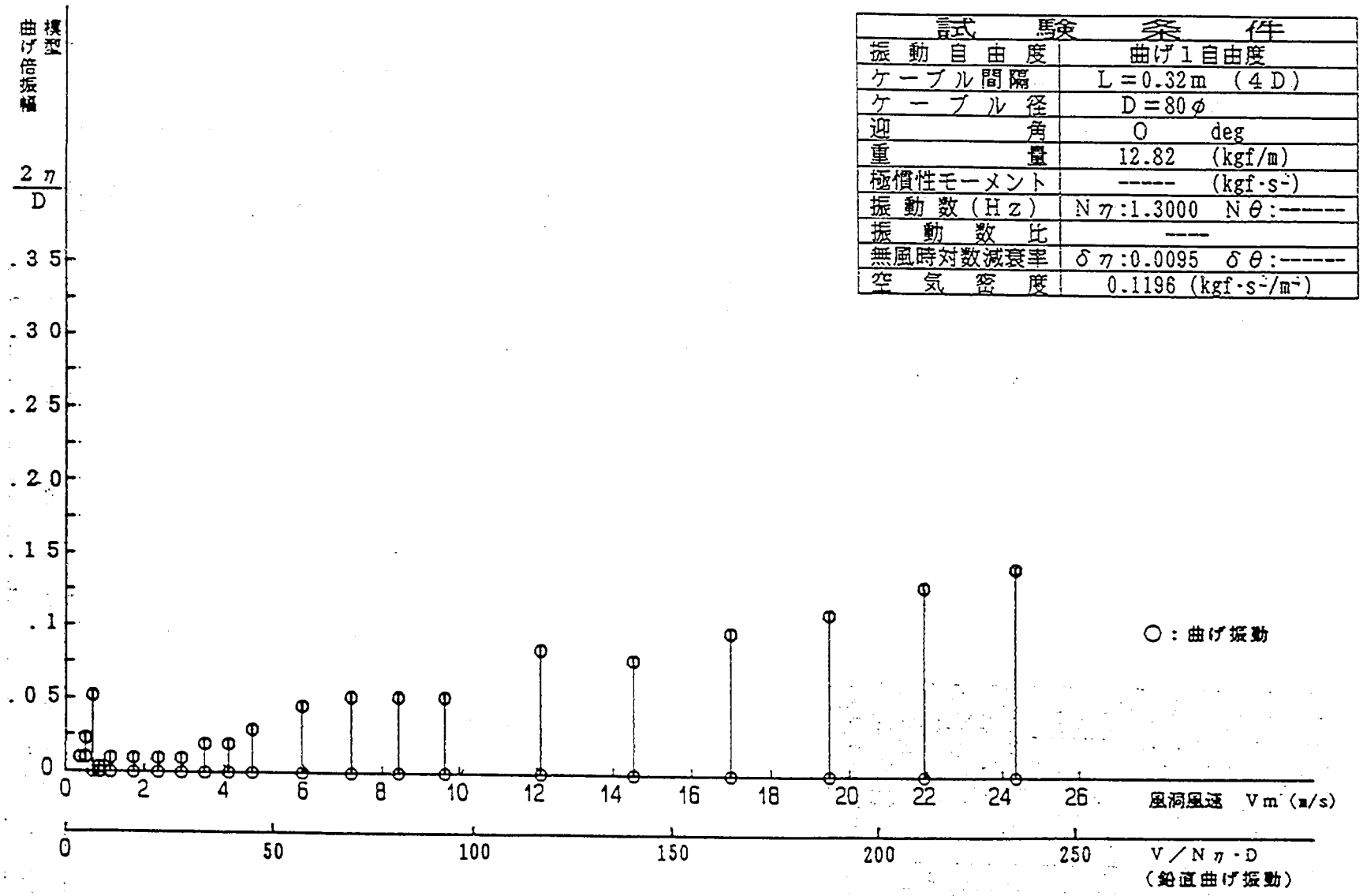
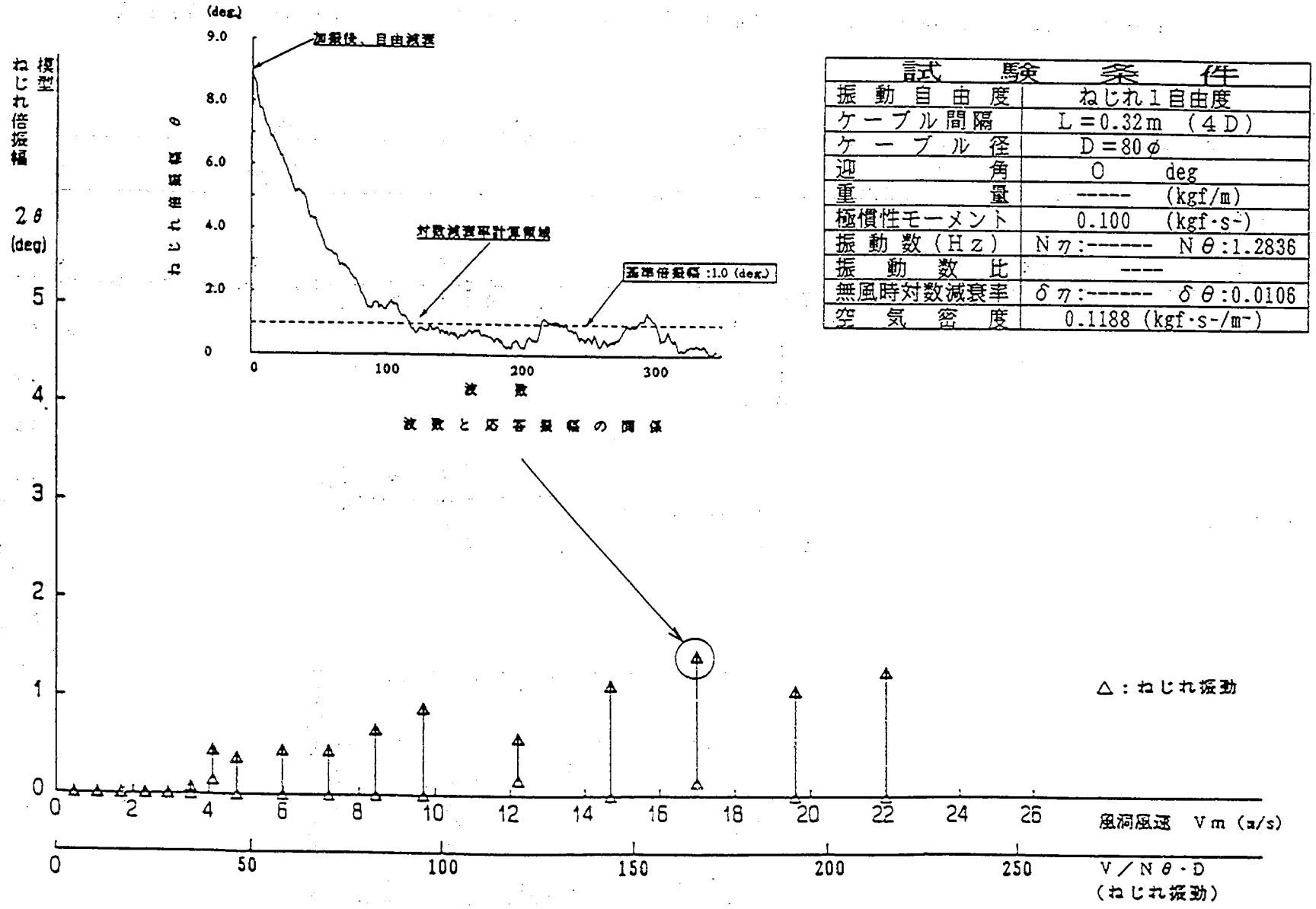


図-3.5.2.5　並列ケーブル（ケーブル間隔４Ｄ，曲げ１自由度）の風速と応答の関係　[CASE 3]



試験条件	
振動自由度	ねじれ1自由度
ケーブル間隔	L＝0.32m （4D）
ケーブル径	D＝80φ
迎角	0 deg
重量	----- (kgf/m)
極慣性モーメント	0.100 (kgf·s²)
振動数（Hz）	Nη:------ Nθ:1.2836
振動数比	----
無風時対数減衰率	δη:------ δθ:0.0106
空気密度	0.1188 (kgf·s²/m⁴)

図-3.5.2.6 並列ケーブル（ケーブル間隔4D，ねじれ1自由度）の風速と応答の関係 [CASE 4]

試験条件	
振動自由度	曲げ，ねじれ２自由度
ケーブル間隔	L＝0.24m （３D）
ケーブル径	D＝80φ
迎角	0 deg
重量	12.82 (kgf/m)
極慣性モーメント	0.056 (kgf·s-)
振動数（Hz）	Nη:1.3000 Nθ:1.4875
振動数比	1.14
無風時対数減衰率	δη:0.0097 δθ:0.0108
空気密度	0.1242 (kgf·s-/m⁻)

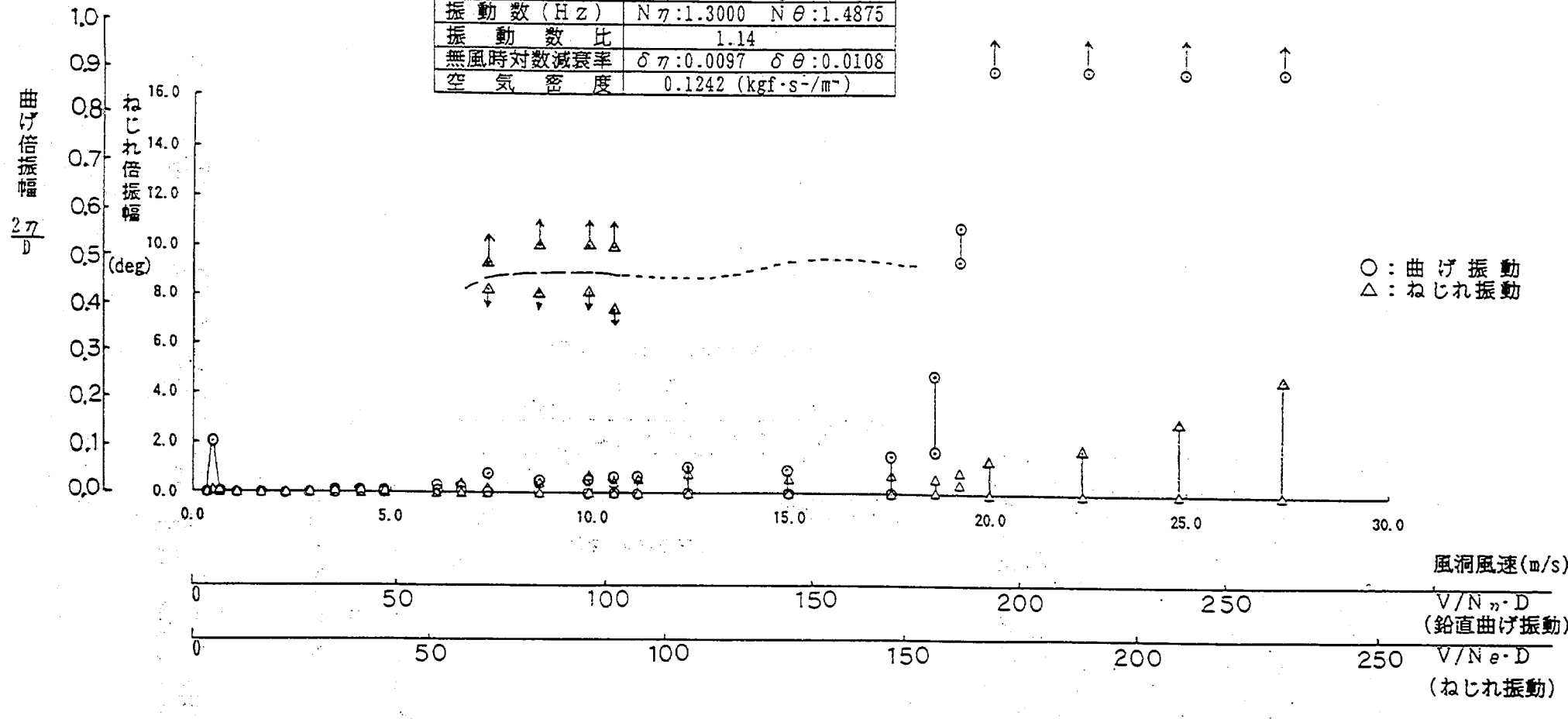


図-3.5.2.7 並列ケーブル（ケーブル間隔３D，曲げねじれ２自由度，$\sigma=0.01$）の風速と応答の関係 [CASE 5]

試験条件	
振動自由度	曲げ1自由度
ケーブル間隔	L=0.24m (3D)
ケーブル径	D=80φ
迎角	0 deg
重量	12.81 (kgf/m)
極慣性モーメント	----- (kgf·s-)
振動数(Hz)	Nη:1.3008 Nθ:------
振動数比	----
無風時対数減衰率	δη:0.0098 δθ:------
空気密度	0.1241 (kgf·s²/m⁴)

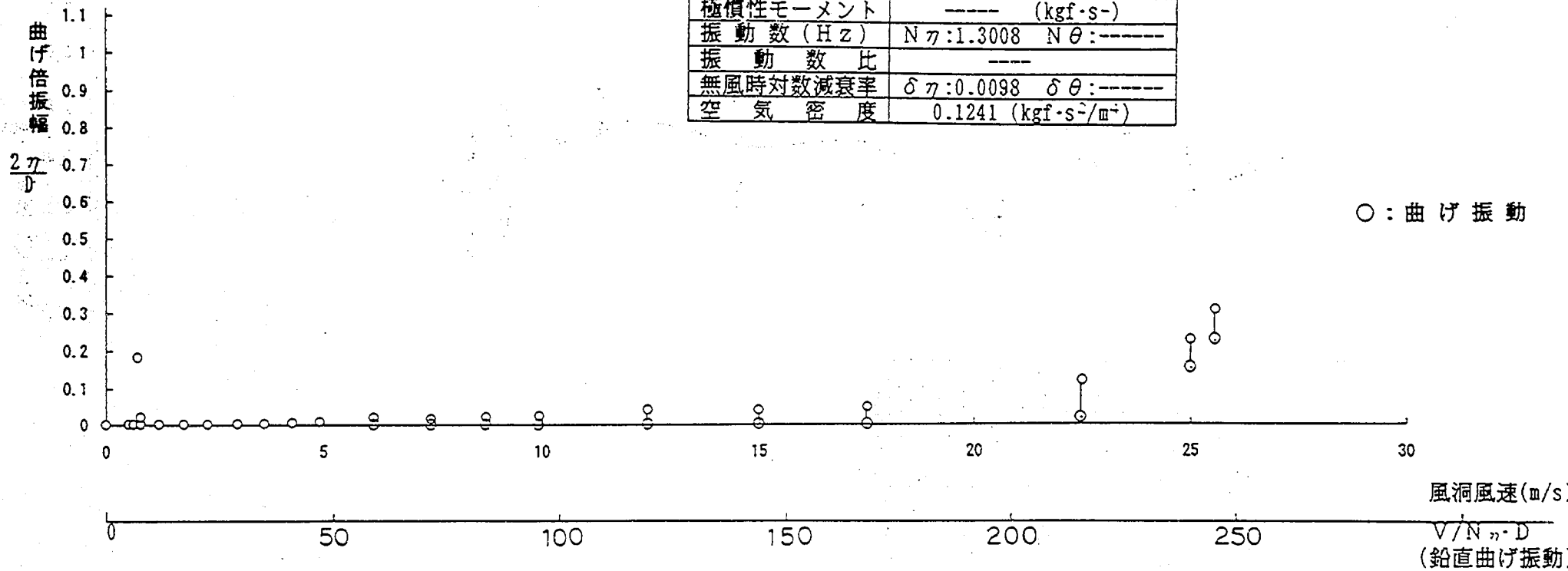


図-3.5.2.8 並列ケーブル（ケーブル間隔3D，曲げ1自由度）の風速と応答の関係 [CASE 6]

試　　験　　条　　件	
振動自由度	ねじれ１自由度
ケーブル間隔	L＝0.24m　（３D）
ケーブル径	D＝80φ
迎角	0　deg
重量	-----　(kgf/m)
極慣性モーメント	0.056　(kgf･s-)
振動数（Hz）	Nη:------　Nθ:1.4825
振動数比	----
無風時対数減衰率	δη:------　δθ:0.0097
空気密度	0.1245 (kgf･s-/m⁴)

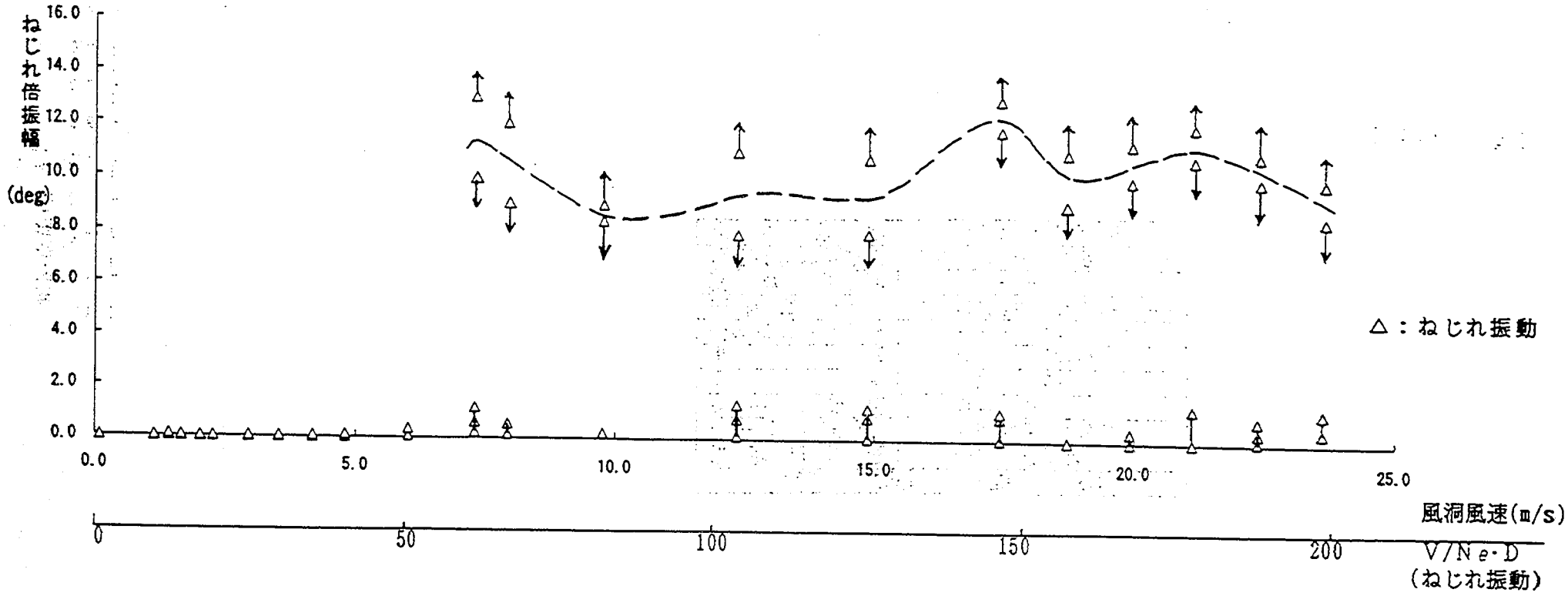


図-3.5.2.9　並列ケーブル（ケーブル間隔３D，曲げねじれ１自由度）の風速と応答の関係　[CASE 7]

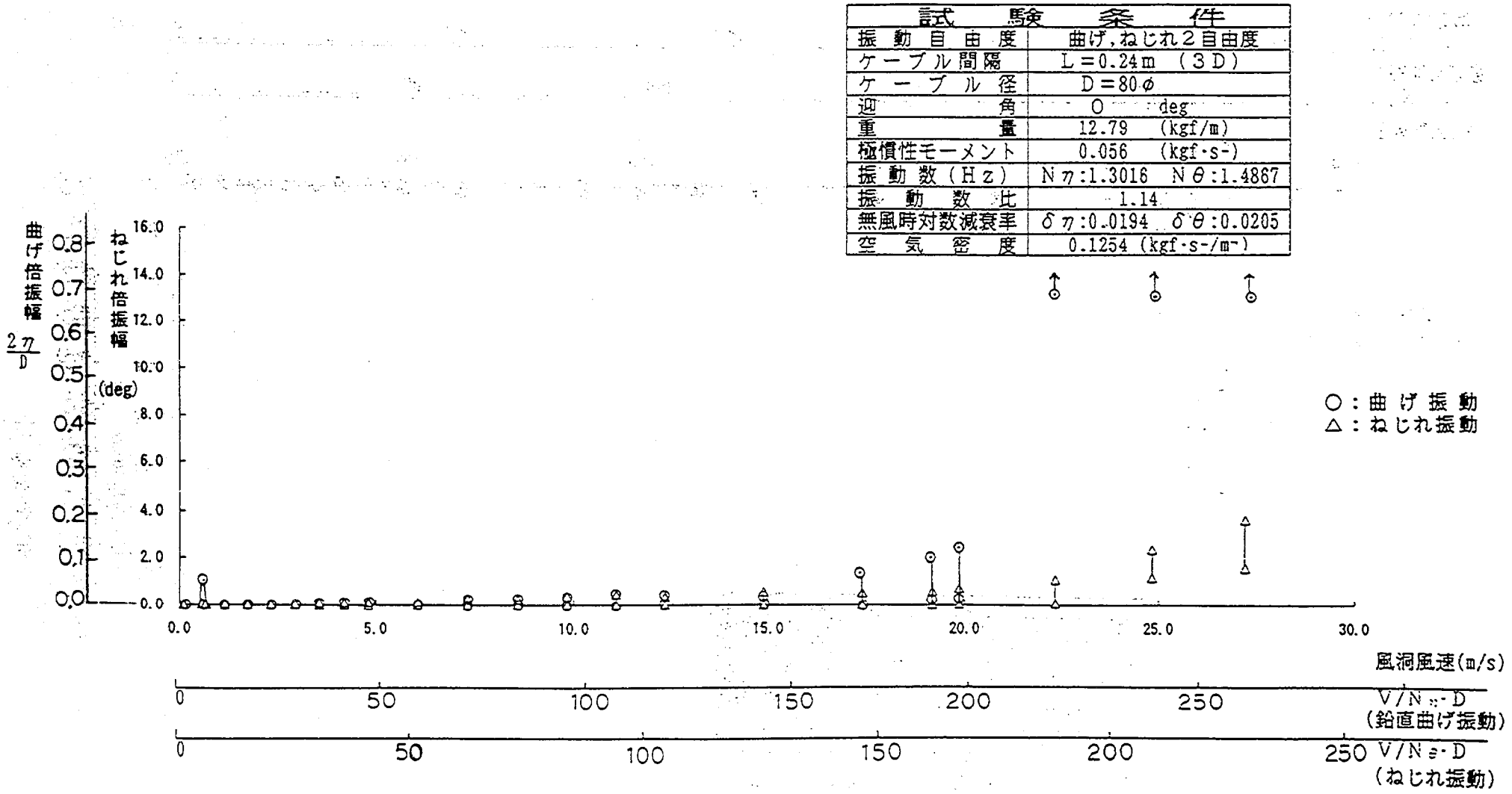


図-3.5.2.10 並列ケーブル（ケーブル間隔３Ｄ，曲げねじれ２自由度，$\sigma=0.02$）の風速と応答の関係 [CASE 8]

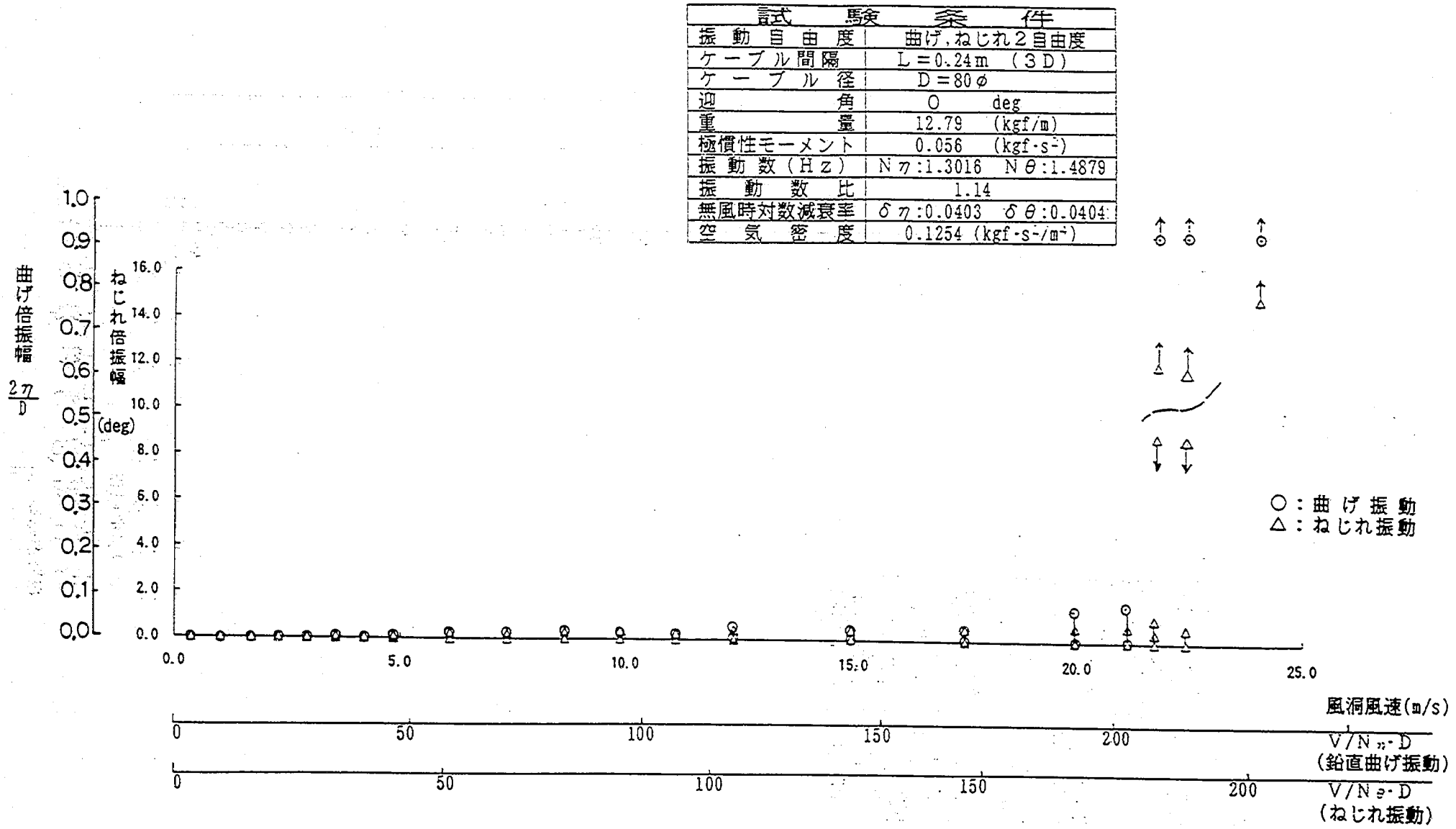


図-3.5.2.11 並列ケーブル（ケーブル間隔３Ｄ，曲げねじれ２自由度，$\sigma=0.04$）の風速と応答の関係 [CASE 9]

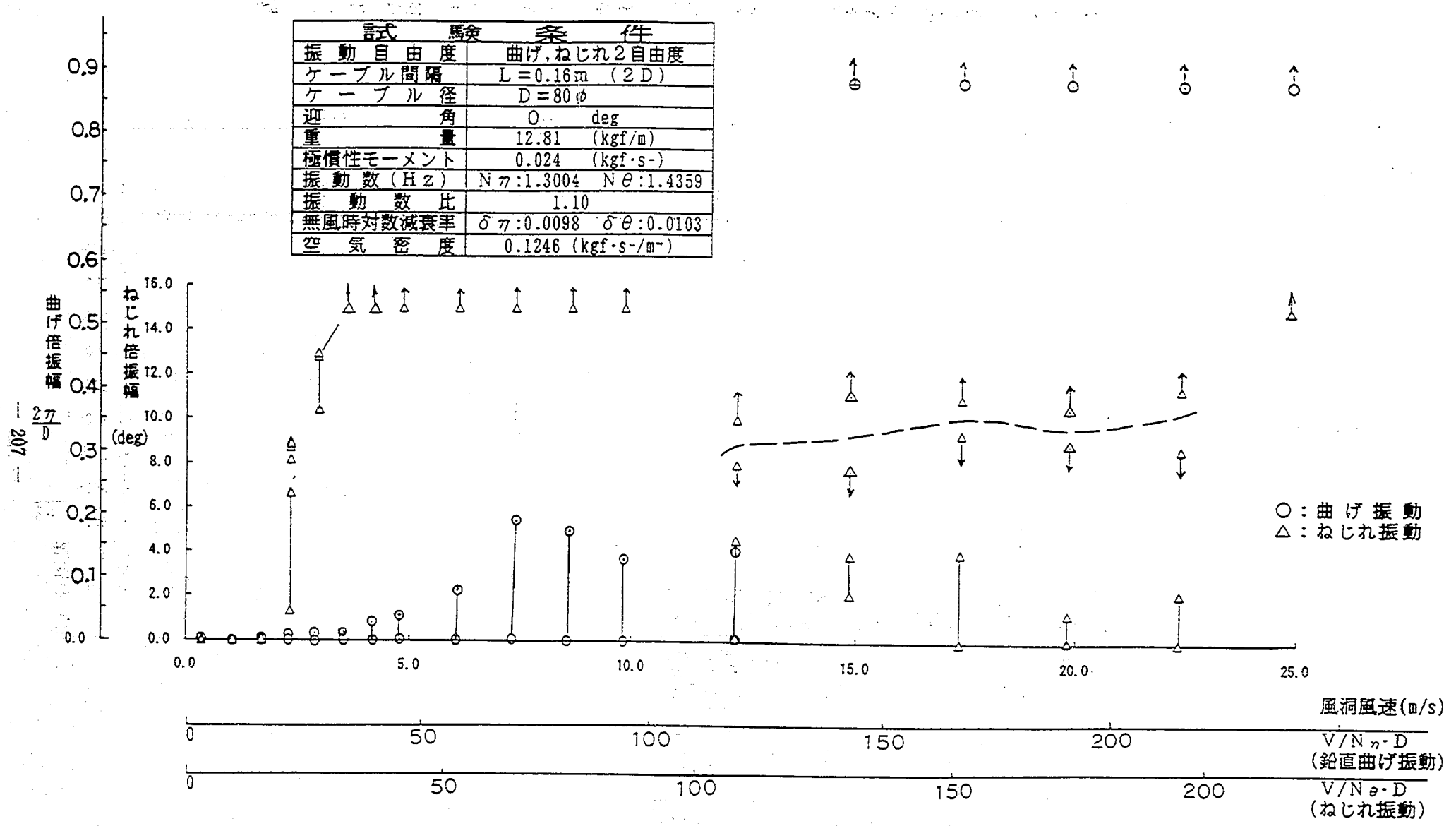


図-3.5.2.12 並列ケーブル（ケーブル間隔２Ｄ，曲げねじれ２自由度）の風速と応答の関係 [CASE 10]

試　　験　　条　　件	
振動自由度	曲げ１自由度
ケーブル間隔	L＝0.16m　（２D）
ケーブル径	D＝80φ
迎角	0　deg
重量	12.82　(kgf/m)
極慣性モーメント	-----　(kgf･s-)
振動数（Hz）	Nη:1.3000　Nθ:------
振動数比	----
無風時対数減衰率	δη:0.0098　δθ:------
空気密度	0.1246 (kgf･s-/m⁻)

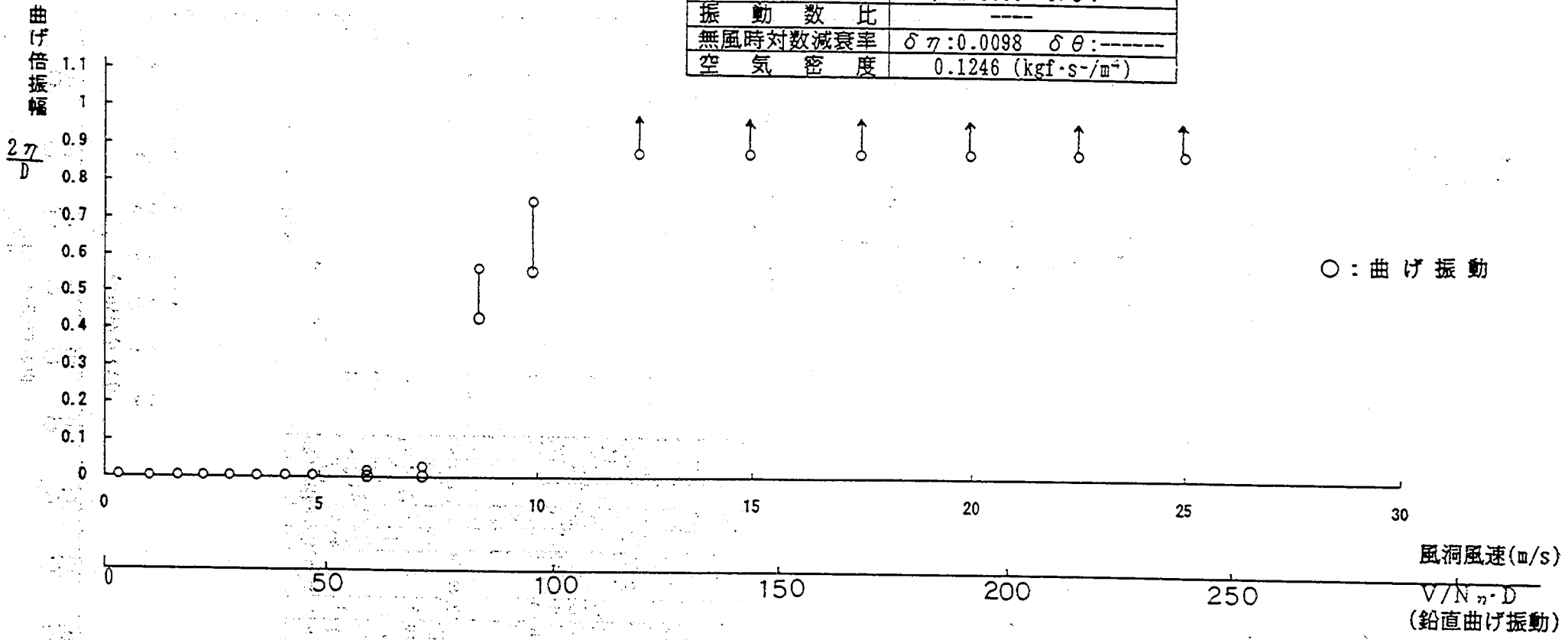


図-3.5.2.13　並列ケーブル（ケーブル間隔２D，曲げ１自由度）の風速と応答の関係　[CASE 11]

試験条件	
振動自由度	ねじれ1自由度
ケーブル間隔	L＝0.16m （2D）
ケーブル径	D＝80φ
迎角	0. deg
重量	----- (kgf/m)
極慣性モーメント	0.024 (kgf·s²)
振動数（Hz）	Nη:------ Nθ:1.4379
振動数比	----
無風時対数減衰率	δη:------ δθ:0.0105
空気密度	0.1231 (kgf·s²/m⁴)

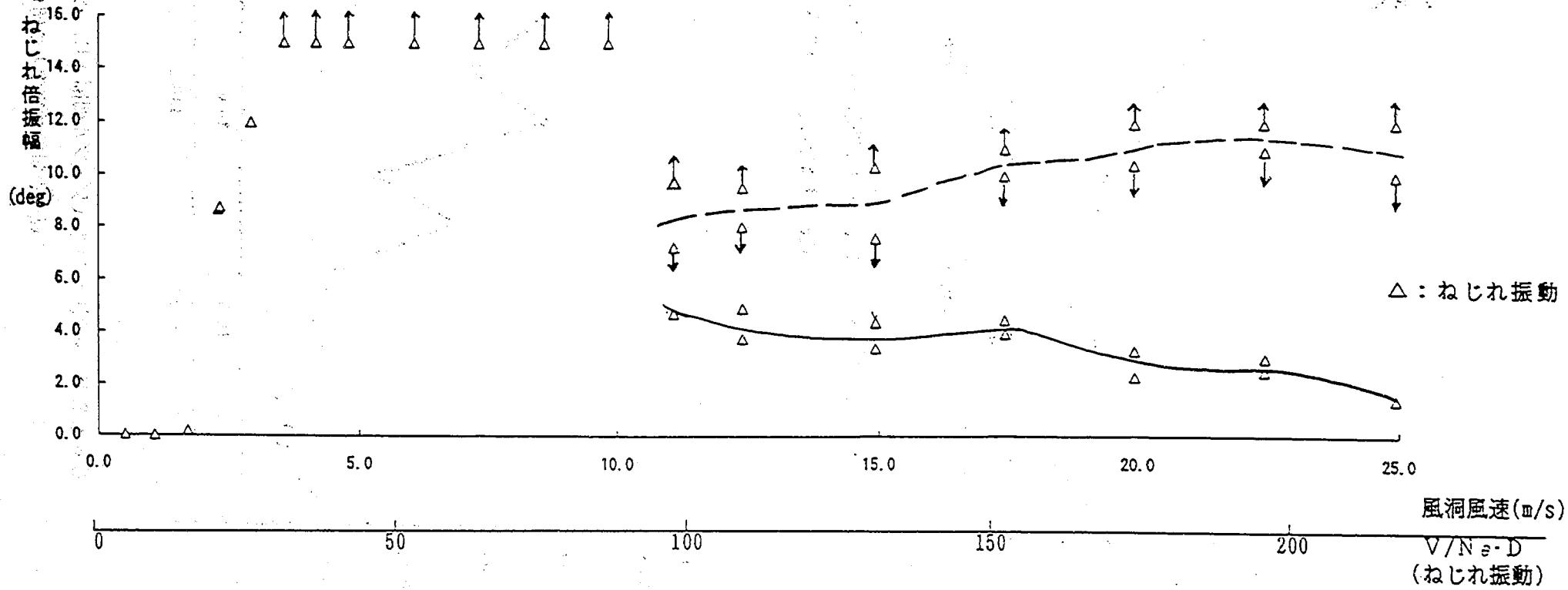


図-3.5.2.14 並列ケーブル（ケーブル間隔２Ｄ，ねじれ１自由度）の風速と応答の関係 [CASE 12]

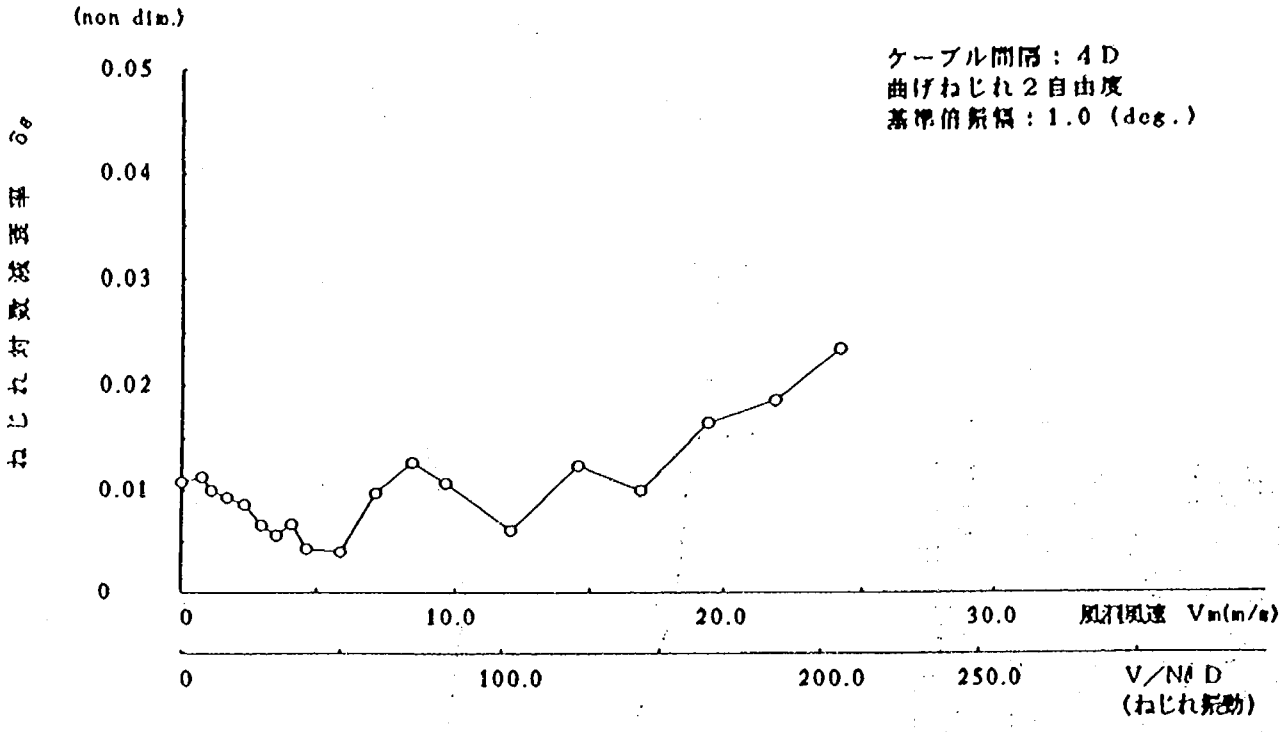


図-3.5.2.15　並列ケーブル（ケーブル間隔４Ｄ，曲げねじれ２自由度）の
風速と対数減衰率との関係［CASE 2］

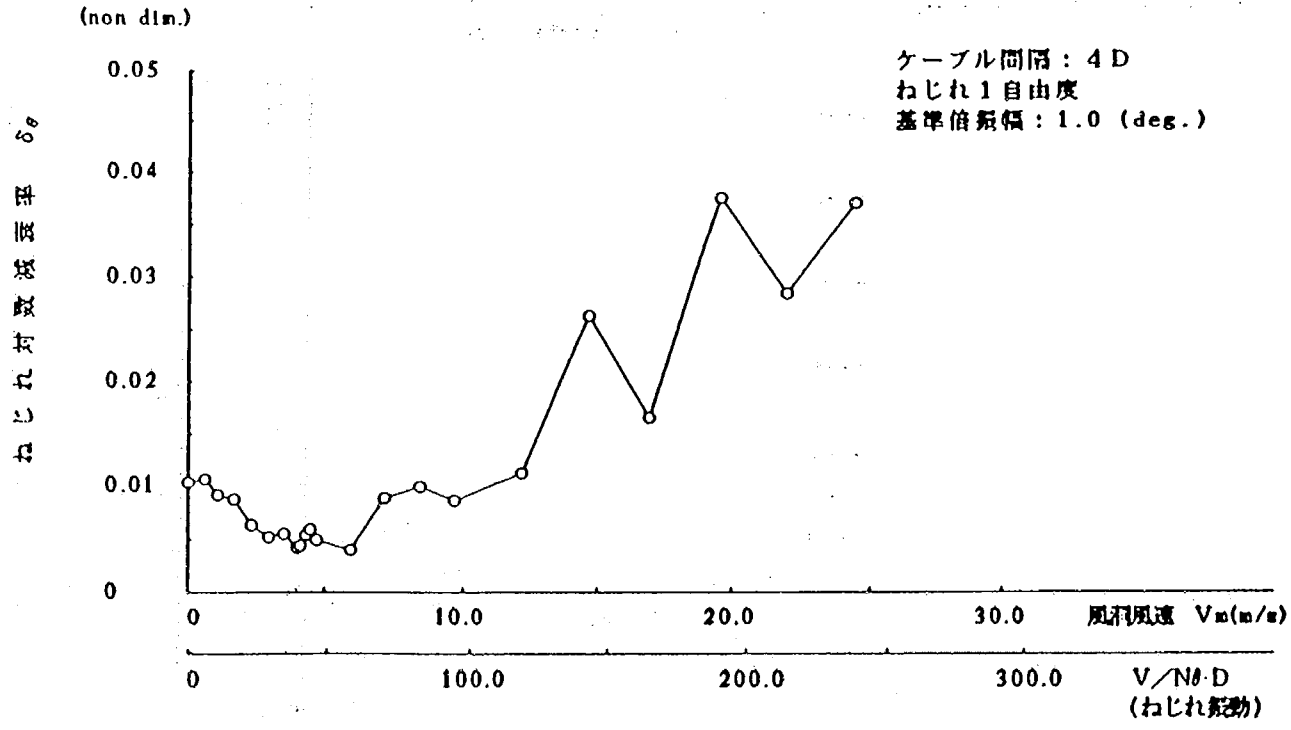


図-3.5.2.16　並列ケーブル（ケーブル間隔４Ｄ，ねじれ１自由度）の
風速と対数減衰率との関係［CASE 4］

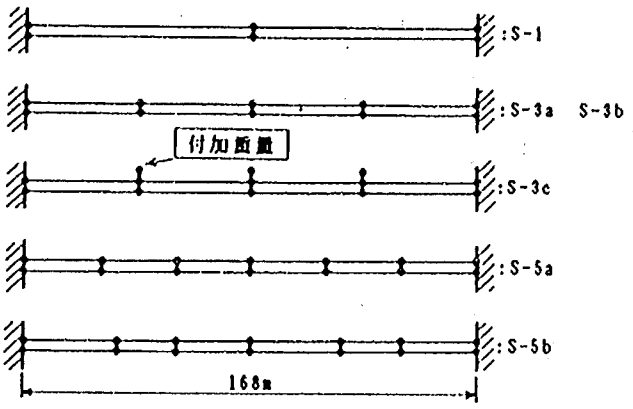


図-3.5.2.17　振動解析モデル

表-3.5.2.5　解析モデルの振動諸元（ケーブル）

項　目	諸　元
ケーブル長	168　　m
ケーブル間隔	0.48　m　(3D)
ケーブル重量	69　　Kgf/m
ケーブル張力	268　　tf/ｹｰﾌﾞﾙ
ケーブル断面積	0.0201 m^2
断面２次ﾓｰﾒﾝﾄ	4.826×10^{-6} m^4 (*1)
ねじり定数	9.651×10^{-6} m^4
ヤング率	2.01×10^{7} tf/m^2
ポアソン比	0.30

表-3.5.2.6　解析モデルの振動諸元（スペーサ）

項　目	諸　元
スペーサ断面積	9.60×10^{-4} m^2
断面２次ﾓｰﾒﾝﾄ	
強軸まわり	2.048×10^{-6} m^4
弱軸まわり	2.880×10^{-9} m^4
ねじり定数	1.125×10^{-8} m^4
ヤング率	2.10×10^{7} tf/m^2
ポアソン比	0.30

表-3.5.2.7　解析モデルにおけるスペーサの配置

解析ケース	スペーサの個　数	スペーサの配　置	スペーサの結合条件	付加重量
S－1	1	等ピッチ	6成分全拘束	無し
S－3a	3	等ピッチ	6成分全拘束	無し
S－3b	3	等ピッチ	軸まわり回転	無し
S－3c	3	等ピッチ	6成分全拘束	20Kgf × 3
S－5a	5	等ピッチ	6成分全拘束	無し
S－5b	5	不等ピッチ(*2)	6成分全拘束	無し

(*1)ケーブルの断面２次モーメントおよびねじり定数は、充実断面の１５％を導入するものとする。

［参考文献］坂本・北條・江口・矢野；　斜張橋用プレ防食型ケーブルの二次応力および曲げ疲労強度に関する検討，土木学会論文集，Ｎｏ．４４６／１１９

(*2)スペーサの配置間隔は、ケーブル軸方向に、6：4：5：6：4：5　とする。

表-3.5.2.8　スペーサー拘束条件の違いによる面外逆位相（ねじれ）モードの比較

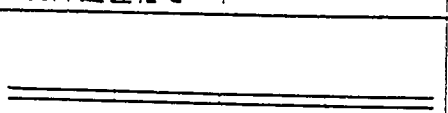
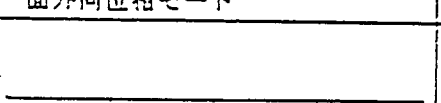
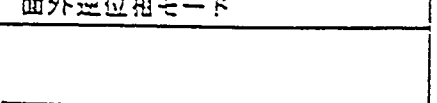
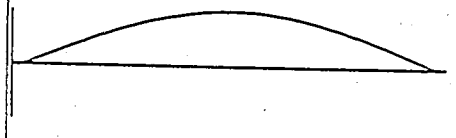
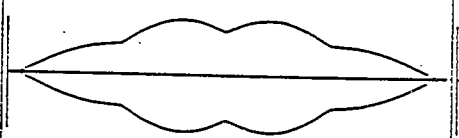
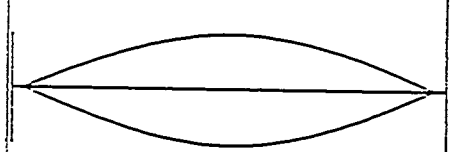
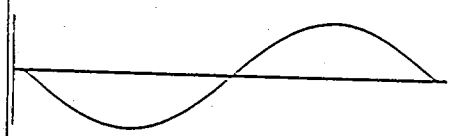
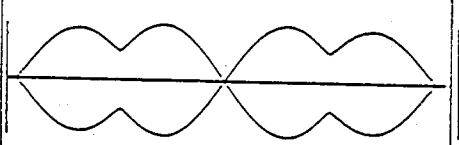
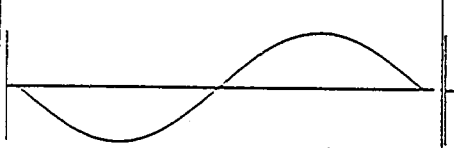
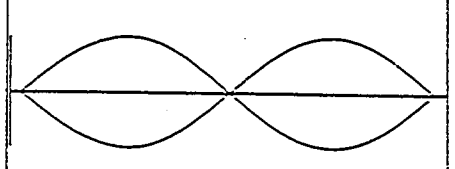
	等間隔３スペーサー配置			
	拘束条件：６自由度固定		拘束条件：ケーブル軸回りの回転のみ解放	
着目モード	面外同位相モード	面外逆位相モード	面外同位相モード	面外逆位相モード
スペーサー配置図				
				
振動数	f= 0.6048 (Hz)	f= 1.2779 (Hz)	f= 6.0480 (Hz)	f= 6.0491 (Hz)
				
振動数	f= 1.2098 (Hz)	f= 2.0324 (Hz)	f= 1.2098 (Hz)	f= 1.2100 (Hz)

表-3.5.2.9　スペーサー配置形式の違いによる面外逆位相（ねじれ）モードの比較

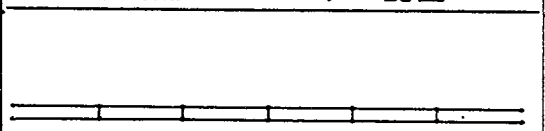
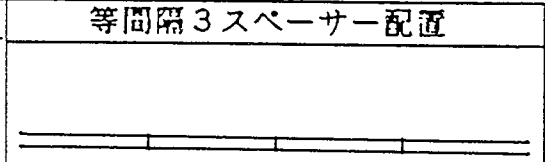
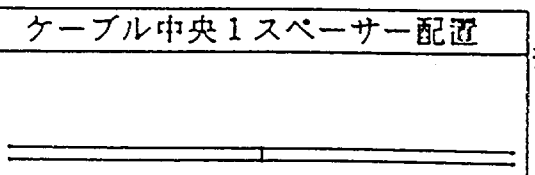
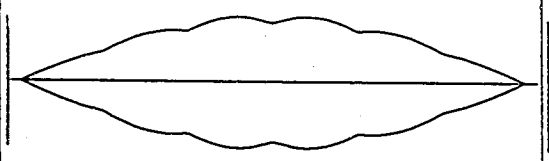
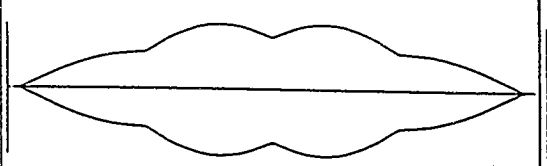
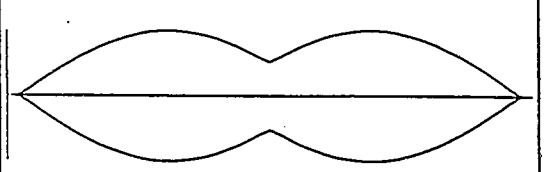
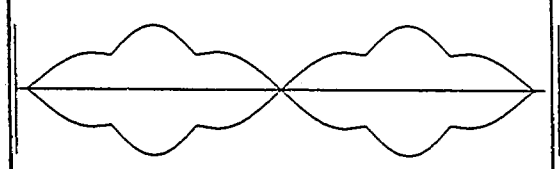
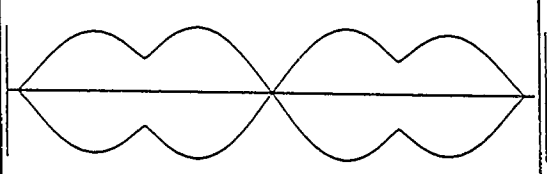
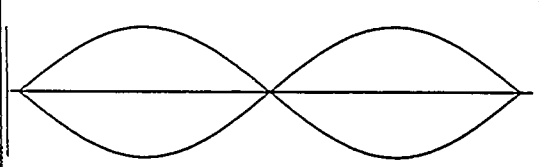
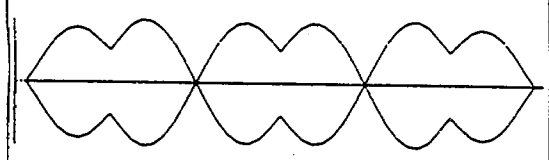
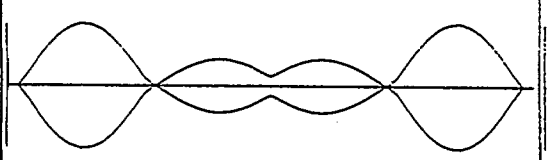
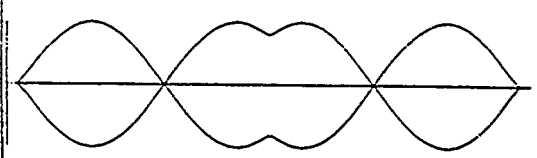
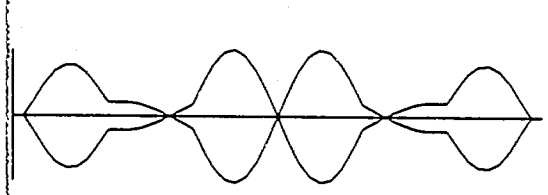
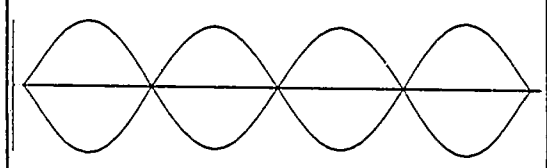
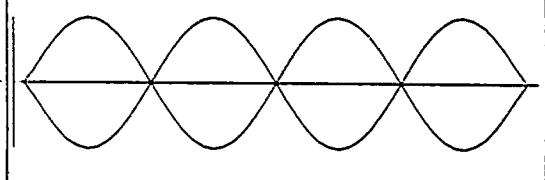
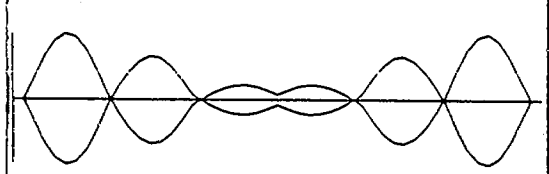
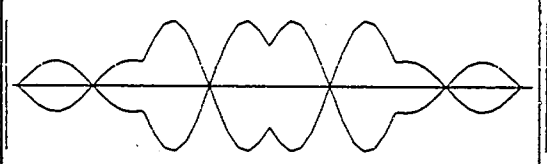
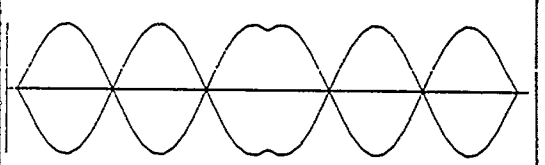
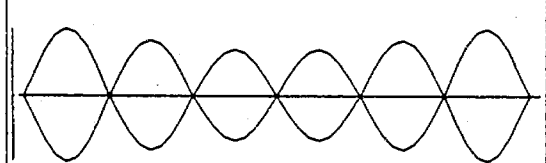
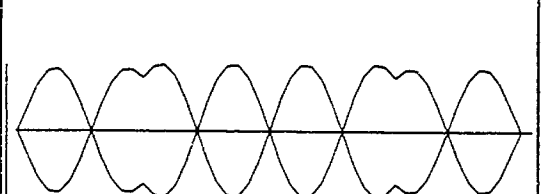
	等間隔５スペーサー配置	等間隔３スペーサー配置	ケーブル中央１スペーサー配置	スペーサ無しの振動数
スペーサー配置図				
スペーサー拘束条件	６自由度固定	６自由度固定	６自由度固定	
				
振動数	f= 1.3498 (Hz)	f= 1.2779 (Hz)	f= 1.0114 (Hz)	f=0.6049 (Hz)
				
振動数	f= 2.3978 (Hz)	f= 2.0324 (Hz)	f= 1.2102 (Hz)	f=1.2102 (Hz)
				
振動数	f= 3.0631 (Hz)	f= 2.3560 (Hz)	f= 2.0880 (Hz)	f=1.8155 (Hz)
				
振動数	f= 3.4303 (Hz)	f= 2.4227 (Hz)	f= 2.4219 (Hz)	f=2.4219 (Hz)
				
振動数	f= 3.6157 (Hz)	f= 4.1002 (Hz)	f= 3.2231 (Hz)	f=3.0282 (Hz)
			-	
振動数	f= 3.6423 (Hz)	f= 4.1906 (Hz)	f= - (Hz)	f=3.6363 (Hz)

表-3.5.2.10　スペーサー配置間隔の違いによる面外逆位相（ねじれ）モードの比較

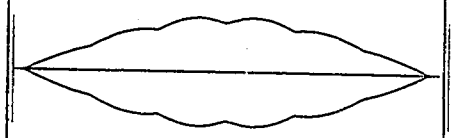
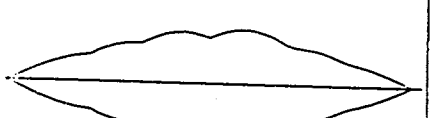
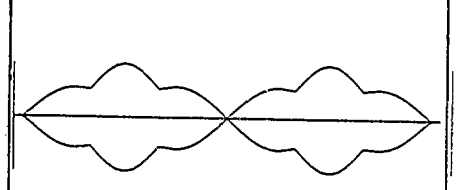
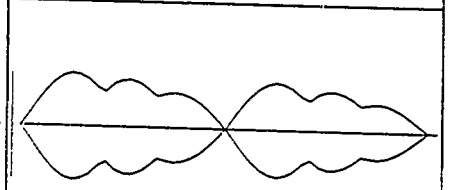
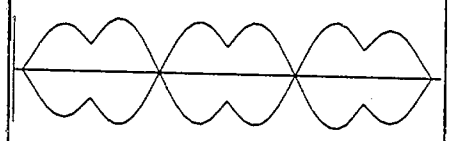
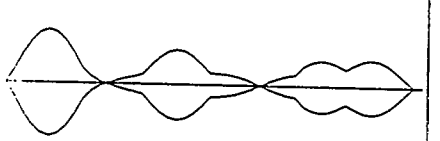
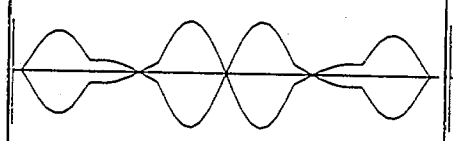
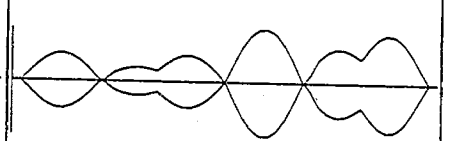
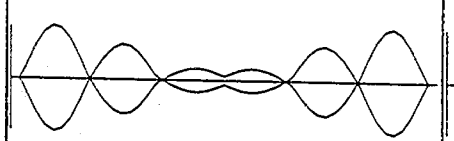
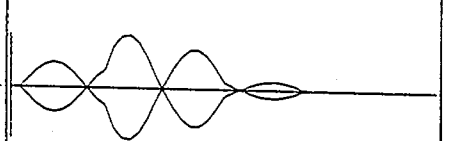
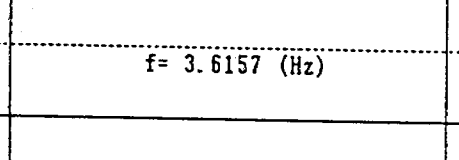
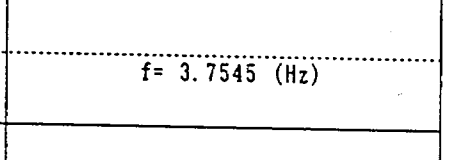
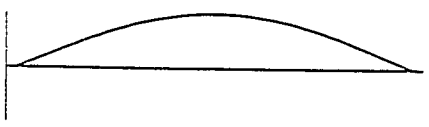
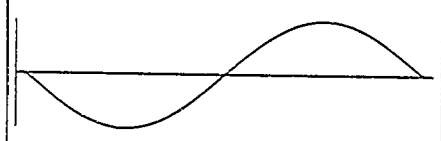
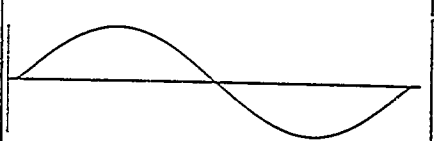
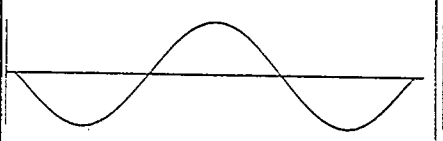
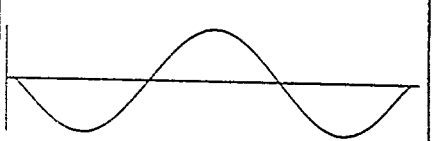
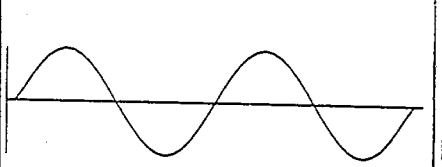
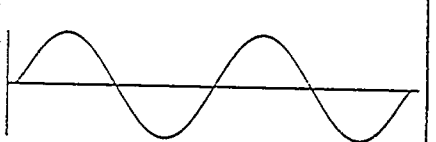
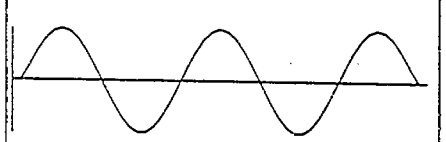
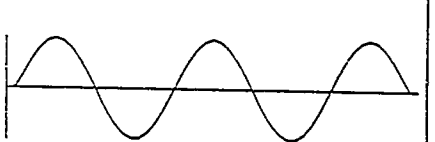
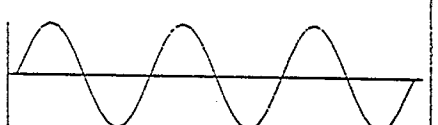
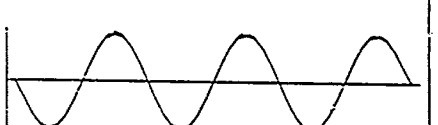
	等間隔５スペーサー配置	不等間隔５スペーサー配置
スペーサー配置図		6 : 4 : 5 : 6 : 4 : 5
スペーサー拘束条件	６自由度固定	６自由度固定
		
振動数	f= 1.3498 (Hz)	f= 1.3441 (Hz)
		
振動数	f= 2.3978 (Hz)	f= 2.3998 (Hz)
		
振動数	f= 3.0631 (Hz)	f= 2.9633 (Hz)
		
振動数	f= 3.4303 (Hz)	f= 3.1624 (Hz)
		
振動数	f= 3.6157 (Hz)	f= 3.7545 (Hz)
		
振動数	f= 3.6423 (Hz)	f= 3.8471 (Hz)

表-3.5.2.11　付加重量の有無による面外同位相（曲げ）モードの比較

	等間隔３スペーサー配置	
	付加重量無し	付加重量有り
スペーサー配置図		付加重量 偏心量：片側ケーブルより480mm（ケーブル間隔と等長） 重量　：１箇所あたり20kgf
スペーサー拘束条件	６自由度固定	６自由度固定
		
振動数	f= 0.6048 (Hz)	f= 0.6038 (Hz)
		
振動数	f= 1.2098 (Hz)	f= 1.2077 (Hz)
		
振動数	f= 1.8151 (Hz)	f= 1.8119 (Hz)
		
振動数	f= 2.4219 (Hz)	f= 2.4219 (Hz)
		
振動数	f= 3.0277 (Hz)	f= 3.0224 (Hz)
		
振動数	f= 3.6350 (Hz)	f= 3.6282 (Hz)
		
振動数	f= 4.2432 (Hz)	f= 4.2316 (Hz)

3.5.3 構造力学的制振対策（その２）

(1) 検討方針

並列ケーブルのウェークギャロッピング制振対策として，構造力学的対策を１案以上取り上げ（平成４年度報告書）風洞試験によりその効果を調べるものとする。

(2) 工程と風洞試験

風洞試験については部分模型によるバネ支持試験を行うものとし，振動振幅により制振効果を評価する。詳細な試験内容はＡグループの試験結果を考慮し再検討を行うものとする。

表-3.5.3.1 工　程

	平成６年上期	平成６年下期
机上検討，試験計画	――――	
風洞試験	――	――
データ整理，まとめ		――

表-3.5.3.2 試験条件

ケーブル径	D	100 mm
ケーブル間隔	S_h	２D～６D
迎　角	α	0 deg.
水平偏角	β	0 deg.
振動数	f	1.0 Hz
風洞風速	V	0 ～ 18 m/s
ﾚｲﾉﾙｽﾞ数	R_e	0 ～ 1.2×10^5
無次元化風速	Vr	0 ～ 90

3.6 空力的制振手法の開発に関する研究

3.6.1 概 要

(1) 研究の目的

本研究では実橋におけるウェークギャロッピングの振動問題について，ケーブル表面に粗度を与えることによる空気力学的な制振効果を検討する。また，風洞実験により制振対策の効果の確認と制振メカニズムの解明を目的とした。

(2) 研究の方法

これまで，並列ケーブルのウェークギャロッピング制振対策としては，ケーブル間の連結，スペーサ連結，オイルダンパー，ゴムダンパー等を設ける構造動力学的な方法が実施されてきた。これに対して本研究では各社の固有技術を活かしながら，ケーブル表面に粗度を与えることで制振を図ることとした。
ケーブル表面粗度については参加各機関からの提案をベースとし，実橋ケーブルの重要パラメータとしての無次元風速，レイノルズ数等について実験条件の整合性に配慮した。

参加各機関は各々の提案をベースに，上記のいずれかの因子グループに重点を置いた実験を実施した。

具体的な研究実施項目とその実施機関は次の通りである。

空気力学的制振対策（その１）	日立造船（株）
空気力学的制振対策（その２）	住友重機械工業（株）

(3) 研究成果の概要

不安定振動の発生は二次元試験結果によれば，ケーブル水平間隔２Ｄ～６Ｄ程度の範囲となっている。本研究における空力対策では間隔３Ｄ及び４Ｄについて風洞試験が実施された。円形の突起及び窪み，スリット突起，螺旋突起については，間隔３Ｄで，また，ストライプ法では間隔３Ｄ及び４Ｄについてバネ支持試験が実施され，応答特性から制振効果が把握された。いずれの場合にも制振効果は確認されてはいるが，高風速域での制振性能や応答の自由度の影響等について，さらに詳細に確認する必要があると考えられる。

振動の発生メカニズムと制振機構については，後流中の流速分布測定や定常三分力測定結果から準定常的に検討が加えられ，ギャロッピングと見なした場合に，ひとつの可能性が存在することが確認できた。

(4) 今後の課題

表面粗度の付与による並列ケーブルの空力制振対策についての風洞試験結果から，空気力学的制振対策の有効性が確認された。しかしながら，得られた新しい知見を含め，振動の自由度が与える影響の評価，

振動発生メカニズムの解明の為に，ケーブルの相対的位置関係，振動自由度，スクルートン数等々を変化させた二次元バネ支持試験の実施が必要と考えられる。また，レイノルズ数の影響を評価するための試験，定常・非定常空気力測定試験及び圧力測定試験，あるいは流れの可視化試験や流速分布測定試験等々を実施する予定である。

3.6.2 空力的制振対策（その１）

(1) 研究目的

斜張橋ケーブルのウェークギャロッピングに関する制振対策には，ダンパーなどの機械的な装置を用いる方法やケーブルの表面形状を工夫する方法などがある。本研究は，ケーブル表面形状の変更により制振効果を期待する「空力的制振対策」に着目したもので，風洞試験によって制振効果の確認を行うものである。

(2) 研究概要

対象とするケーブルは並列２本ケーブルとし，上下１自由度支持の単純な２次元バネ支持試験法によって，ケーブル表面状態の違いによるウェークギャロッピング抑制効果を調査する。また，空力的制振効果を検討する資料を得る目的で，後流場の測定および静的空気力の測定などの基礎試験を行う。

1) 使用風洞

表-3.6.2.1(a),(b)に風洞性能の概要を，図-3.6.2.1(a),(b)に風洞全体図を示す。本風洞は，全橋模型試験等を対象とする３次元モード及び部分模型等を対象とする２次元モードとしての使用が可能であるが，今回の実験では２次元モードとして使用した。また，測定部風路は閉鎖型とした。この場合の測定部主要目は以下の通りである。

形　式　　：　ゲッチンゲン式
測定部寸法：　幅　　２ m
　　高さ　３ m
　　長さ　７ m
最大風速　：　２５ m/s

2) 供試模型

内径80mm，模型長1,800mmのアルミ製剛体模型(2体)をベースとし，これにネオプレンゴム，リノタイルなどで形成した外形材を巻き付けて供試体を作製した。表面形状は以下に示す５種類を対象とした。供試体の外径は100mm （A，B型）および102mm（C，D，E型）である。

A型…… 滑面

B型…… 円形孔（空気抜き付き）

C型…… 円形突起

D型…… 縦リブ突起（空気抜き付き）

E型…… 螺旋リブ突起

図-3.6.2.2に模型概要を示す。

(3) 試験方法

図-3.6.2.3に試験のレイアウト概要，図-3.6.2.4に部分模型試験（バネ支持試験）の概要を示す。図-3.6.2.3に示すように，バネ支持試験は，3次元風路内に設置された2次元風路を用いて行った。

1) バネ支持試験

① 模型支持方法

図-3.6.2.4に示すように，ケーブル模型は風路中心部にてケーブル軸が風軸と直角水平となるようにばね支持した。気流および模型支持条件は以下のとおりである。（図-3.6.2.5参照）

1) 模型間隔 :L/d = 3 (L:模型間隔，d:模型外径)

2) 気流 :一様流

3) 気流偏角 :90#（ケーブル軸直角）

4) 迎角 :0#

5) 模型自由度:上下1自由度

② 計測要領

模型の動的応答の測定は，図-3.6.2.4に示すように模型1体当り変位計2台を設置して行った。

2) 静的空気力測定

上流側・下流側各模型に作用する静的空気力（三分力）を測定し，三分力空気力係数を求めた。

① 測定ケース

模型A，B，Cを対象とした。

② 測定要領

空気力の検出: ストラット・フォースバランス式天秤

風速 : 7.5m/s, 15m/s

測定迎角 : 0#～15#（2#ピッチで測定）

気流 : 一様流

3) 後流測定

上流側模型を拘束した状態で，下流側模型位置（下流側模型は撤去している）における風速を鉛直方向にトラバース測定した。

① 測定ケース

模型A，B，Cを対象とした。

② 測定ポイント

図-3.6.2.6に示す18点を測定の対象とした。

③ 後流の検出

熱線流速計（X プローブ）を用いた。

(4) 試験結果と考察

1) バネ支持試験

i) 試験条件

表-3.6.2.2に試験条件を示す。表中の模型名「B'」は，模型Bの円孔部の気流抜けをテープで閉塞したケース(円形窪み）であり，補足的に実施した。図-3.6.2.7に模型Bと模型B'の違いを示す。表示のようにSc（スクルートン数）は3.5～4.2の範囲である。

ii) 風速と応答の関係

図-3.6.2.8～図-3.6.2.13 に風速と振幅の関係を示す。図では，横軸：無次元風速Ur（Ur= U /fd)，縦軸：無次元振幅（A/d）で整理している。

① 渦励振

図から明かなように各ケースとも渦励振の発生が見られ，ピークとなる風速はUr=5.5～7付近である。渦励振振幅は，一般に上流側模型より下流側模型が大きい傾向である。表-3.6.2.3に渦励振のピークに関する風速と振幅の数値データを示す。

渦励振における上流側模型と下流側模型の振動波形の一例を図-3.6.2.14(1)に示す。図は模型Aに関する渦励振ピーク時のデータである。下流側模型の振幅は上流側の約1.3倍で位相は 140#程度遅れていることがわかる。

図-3.6.2.8～図-3.6.2.13より，渦励振の発生開始風速はUr=4～5付近であり，またこの付近での，Re数は，ほぼ 1.5×10^4である。図-3.6.2.15に滑面円柱のRe数と1/St（ストローハル数の逆数すなわちUr）の関係を示すが，図よりRe数1.5×10^4付近での1/Stは5程度であり，前述のバネ支持試験で確認され渦励振開始風速のUrと対応することがわかる。

下流側ケーブルについては，全ての模型で限定振動（渦励振）の発生が認められた。上流側ケーブルについては，表面形状を変化させると滑面ケーブル（模型A）よりも渦励振振幅が低下する。とくに，螺旋リブを取り付けた模型Eでは，渦励振の発生が完全に抑制されることがわかった。

② ウェーク・ギャロッピング

図-3.6.2.8に示すように，模型A（滑面ケーブル）の場合にはUr≒20付近からウェーク・ギャロッピング発生が認められる。図示のように，ここで確認されたウェーク・ギャロッピングはハードフラッタ的な

応答特性を示している。図-3.6.2.14(2)にUr≒22におけるギャロッピングの波形例を示す。図では，初期振幅約40mmで発振，初期振幅約35mmでは減衰となる状況を示している。

参考までに，図-3.6.2.16 にSc≒3.3の条件で行われた滑面並列円柱（L/D=3）の下流側円柱の応答図を示す[1]。この試験は，Sc数や模型のアスペクト比などが本研究と若干異なっているが，応答特性は図-3.6.2.8とほぼ一致していることがわかる。

図-3.6.2.8～図-3.6.2.12 に空力対策断面の結果が示されているが，模型B～Eのすべてについて，滑面の場合に見られたウェーク・ギャロッピング発生は認められなかった。ただ，参考までに行った模型B'（図-3.6. 2.13）については，Ur≒42付近でウェーク・ギャロッピングの発生が見られた。

2) 静的空気力測定試験

i) 概要

並列した2本のケーブルが，ケーブル軸直角方向の風を受けた場合に作用する上流側および下流側各ケーブルの平均静的空気力を，三分力天秤により測定した。対象とした風速は7.5m/s，15m/s の2風速でありこの場合のRe数は，(5～6.7)×10^5の範囲となる。測定迎角は -15#～+15#まで2#ピッチ（0#付近については1#ピッチ）とした。

三分力天秤は1台であるため，たとえば上流側ケーブルの空気力を測定する場合は，上流側ケーブル（アクティブ模型と呼ぶ）を天秤に接続し，下流側ケーブル（ダミー模型と呼ぶ）は所定の迎角の位置に固定することになる。空気力は風軸方向成分を対象とした。

模型は，バネ支持試験で使用したものと同一である。

ii) 空気力係数

測定は各2回実施したが，それらの平均値より空気力および空気力係数を求めた。付属資料（1）に測定結果の数値データを示す。三分力のうち空力モーメントは微小な値であるたるため，揚力（L）および抗力（D）のみを示した。

図-3.6.2.17～図-3.6.2.19に上流側ケーブルの空気力係数を示す。

各模型とも，迎角 15#までの範囲では揚力係数C_Lは微小である。抗力係数C_Dの変化は，模型Bで滑らかであるが，模型A，Cでは迎角に対し僅かな変動が見られる。迎角 0#でのC_D値は各模型で大きな差はないが，下記のように模型Bの値が幾分小さく，この場合にウェークの幅が小さくなっていること示している。

模型名	C_D値	備　考
A	0.85	風速15m/s での値
B	0.76	
C	0.79	

図-3.6.2.20～図-3.6.2.22に下流側ケーブルの空気力係数を示す。

抗力係数

① 各模型とも，迎角0#付近のC_Dは下表に示すように極めて小さな値となっている。

模型名	C_D値	備　考
A	0.054	風速15m/s での値
B	0.059	
C	0.086	

② 各模型とも，迎角の増加と共にC_Dは大きくなる傾向である。

揚力係数

① 迎角～C_L傾向を見ると，模型B，Cはほぼ同様の変化パターンを示している。迎角 7#～9#付近でピークを迎え，その後Bの場合はなだらかに減少，Cの場合は小さなピークを越えたあと，ゆるやかに増加する。

② 模型Aではこれらの傾向とは異なり極めて特徴的な傾向が認められる。すなわち，迎角7#までの範囲では，C_Lは迎角と共に急激に増大するが，その後急激な減少傾向をたどり，迎角14#付近で再び増加傾向に転じる。

③ 模型Aの場合に7#～14#付近の迎角範囲でC_Lが迎角に対して負勾配となっているが，この特性がウェーク・ギャロッピングの発生と何らかの関連があるものと推察される。

以上のような静的空気力の特性は，表面状態の異なるケーブル断面回りの流れパターンと，並列２本ケーブルの空間配置に伴う断面回りの流れとの相互干渉による複雑な流れ場に起因すると思われる。このような，２ケーブル周辺の流れ場とケーブルに作用する静的空気力の発生メカニズムについては，流れの可視化・ケーブル断面回りの圧力分布測定等の基礎的なデータを得た段階で今後明かになると思われる。

3) 後流測定試験

i) 平均風速の鉛直方向分布

図-3.6.2.23 は接近流の風速$U_0 \fallingdotseq$ 9 m/sとして測定した下流側模型位置での平均風速の鉛直方向分布である。図は，横軸をV_0との比率で表した平均風速，縦軸を下流側模型の中心を原点とした鉛直方向距離として表示されている。

図より模型AとCは，ほぼ同様の風速分布となっているが，模型Bは鉛直距離±60mm以内での風速値が著しく低下し，模型A，Cの場合の約65%となっている。これは，模型Bでは円孔での気流の吸込み効果により，ウェークの幅が低下すると同時に模型中心付近での風速の欠損が大きくなったものと思われる。

ii) 乱れ強さの鉛直方向分布

図-3.6.2.24は，平均風速の測定と同時に行った乱れ強さ（Iu:主流方向，Iw:鉛直方向）の測定結果である。図より，並列橋ケーブルの下流側ケーブルーにおける風速の乱れ強さについて次のような分布特性

を読みとることができる。

① 乱れ強さ（Iu, Iw とも）が 10%以下となる領域（ケーブル中心レベルから高さ方向に測った距離）は，模型Bの場合約 100mmで最も小さく，模型C，模型Aの順に大きくなる。すなわち，模型Bが最もウェーク幅が小さく，模型C，Aの順にウェーク幅が大きくなっていることを示している。

② Iw のケーブル中心レベル付近での値は，模型Cの場合にやや大きいが，分布形状は各模型ともほぼ同一である。

③ Iuの分布形状は，ケーブル中心レベル付近で各模型により大きな差が見られる。模型Bでは，Iwと同様の分布形状であるが，A，Cでは中心レベル付近での乱れ強さが著しく低下する傾向が認められる。

以上の結果は，ケーブル表面に隙間を有する模型Bと，隙間を持たない模型A，Cとのウェーク内乱れ特性の差を端的に示すものである。

iii） 後流のスペクトル特性

図-3.6.2.6に示した◎の測点，すなわち下流側ケーブル中心レベルより上方60mm(測点P1）および100mm（測点P2）での測定データより，主流および鉛直方向変動風速のパワースペクトルを以下の条件で求めた。

データ数　　:4096個

サンプリング周波数　:200Hz

各模型とも上記２測点で，各々２風速（渦励振風速およびギャロッピング風速）を対象とした。スペクトルの計算結果を付属資料（２）に示す。

各スペクトル図とも卓越ピークが認められる。図より卓越周波数（f）を読みとり，無次元周波数 fD/U（D:ケーブル直径，U:測定風速）で整理して表-3.6.2.4に示す。表には，スペクトル計算の対象としたデータから求めた乱れ強さの値も併記した。

付属資料の図より，スペクトルの形状は模型間で大きな差異は認められない。ただ，詳細に見ると，模型Bの卓越周波数が（対象とした測点では）幾分高い傾向である。

表-3.6.2.4に示すように，卓越周波数の平均値（無次元）は 0.24 である。すなわち無次元風速は約４で，図-3.6.2.8～図-3.6.2.10 に示す限定振動の発現風速とほぼ一致しており，この現象が渦励振であることがわかる。

表中に示した乱れ強さの値は，風速の増加および測点の高さとともに低下する傾向であるが，模型間で大きな差は見られない。しいて言えば，模型Bの場合に測点P2の乱れ強さが 12～14%とかなり小さくなっている点が挙げられる。

以上，後流のスペクトルからは渦励振を示唆するデータが示されたものの，ウェーク・ギャロッピングを説明する資料は得られなかった。

4） ウェーク・ギャロッピングの発生メカニズムについて

下流側ケーブルのウェーク・ギャロッピングの発生は，２ケーブル間の流れと上流側ケーブル後流の流速空間分布に依存すると考えられている[1]。また，ウェーク・ギャロッピングの発生条件として，①2

ケーブルの間隔がある範囲以下であり，上流側ケーブルからの剝離渦が下流側ケーブルを包み込む状態で明確な渦が形成されず，平均表面圧力分布が平滑化された状態となること②上流側ケーブルの振動的後流変動が生じることとされている[2]。

矩形断面などの単独物体でのギャロッピングについては，いわゆる準定常理論により，現象の発現可能性や発現風速がある程度予測できる。この場合，揚力係数勾配が負となることがギャロッピング発現の目安となる。並列２ケーブルの場合には，上述のように下流側ケーブルの相対的一関係が重要な要素となっており，単純な準定常理論の適用はできないとされている。

ところで，図-3.6.2.20 ～図-3.6.2.22 に示された静的空気力係数のC_Lを見ると，模型ＡのC_L曲線がＢ，Ｃに比べて大きな差異が認められる。すなわち，模型ＡのC_Lは迎角7#～13#の範囲で負勾配となっており，この点が他の模型の場合と大きく異なる。以下では，準定常的な観点で模型Ａについて若干の検討を行う。

いま，振幅 a（無次元振幅 a/D）振動数 fで下流側模型が上下振動した場合を考え，ケーブル中心間隔 Lと振幅 aで決まる最大相対迎角をα_1，振幅 aでの最大速度（$2\pi fa$）と風速 U（無次元風速U/fD）で決まる最大相対迎角をα_2 とする。

a/D=0.5，U/fD=20 ，L=3D（D=0.1m）の場合についてα_1，α_2 を求めると次のようになる。

$$\alpha_1=\tan^{-1}(a/L)\fallingdotseq 9.5°$$

$$\alpha_2=\tan^{-1}(2\pi fa/U_w)\fallingdotseq 11°$$

ただし，Uwは下流側ケーブルに作用する風速であり，図-3.6.2.22より 0.8*Uとした。

上記α_1，α_2 より，下流側ケーブルが鉛直下方に a変位する間に，相対迎角は9.5° ～11° の間を変化することになる。前述のように，模型ＡのC_L曲線は迎角7° ～13° の範囲では負勾配であることから，相対迎角がこの範囲に入るためウェーク・ギャロプが誘発される可能性が考えられる。

(5) まとめ

斜張橋ケーブルのウェーク・ギャロッピング現象に対する空力的制振対策について，二次元模型を用いたバネ支持試験によって調査した。対象としたケーブルは直径 D=100mmの並列２本ケーブルで，中心間隔はL/D=3とした。空力的制振対策としては，ケーブル表面状態を5種類変化さることとした。得られた結果を以下に要約する。

模型Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄ，Ｅ，Ｂ' に対するバネ支持試験

（１）滑面ケーブルでは，無次元風速 Ur=20付近からハード・フラッタ的にウェーク・ギャロッピングが発生する。

（２）上流側ケーブルの渦励振については，螺旋リブを施した模型Ｅが最も有効である。下流側ケーブルについては，全ての模型で限定振動の発生が認められる。

（３）対策案の内，模型Ｂ'を除く4案については全てウェーク・ギャロッピングの抑制が可能である。

模型A，B，Cに対する基礎試験

（1）模型Aの揚力係数C_Lは，他の2模型に比べて特徴的である。すなわち，迎角7°～13°の範囲で顕著な負勾配となる。

（2）模型Bでは，ウェークの幅が他の模型より小さい。また，模型Bでは，下流側ケーブル中心軸レベル付近の平均風速の変化が他より大きい。これらは，ケーブル表面の吸い込み流れの効果が現れているものと思われる。

（3）下流側ケーブル中心軸付近の乱れ強さについて：I_wのパターンは各模型ともほぼ同様であるが，I_uのパターンが，模型A，Cと模型Bで異なる。前者では，ケーブル軸中心レベル付近で低下するが，後者では低下せず，I_uと同様のパターンとなる。

この特性もケーブル表面の吸い込み流れの影響と考えられる。

（4）後流のスペクトルには各ケースとも卓越周波数が認められた。卓越周波数から求めた無次元風速より渦励振が確認された。

（5）模型Aの下流側ケーブルに対する相対迎角より，静的揚力係数 C_Lの負勾配がウェーク・ギャロッピングの発生に関係する可能性が指摘された。

参考文献

[1] 白土博通：複数構造物の空気力学的挙動に関する研究，京都大学博士論文，昭和63年8月

[2] 久保喜延，前田　博：直列円柱のウェイク・ギャロッピング発生機構に関する考察，土木学会年次学術講演会　I-320，平成5年9月

表-3.6.2.1(a)　風洞性能概略

試験形態	型　式	測定部風路	測定部寸法 BxHxL (m)	風速範囲 (m)	送風機 駆動台数	気　流
3次元 モード	ｹﾞｯﾁﾝｹﾞﾝ ｴｯﾌｪﾙ	閉鎖型	8x3x20	0.3～15	4台	①一様流 ②境界層乱流
2次元 モード	ｹﾞｯﾁﾝｹﾞﾝ ｴｯﾌｪﾙ	閉鎖型	2x3x7	0.5～25	2台	①一様流 ②乱流発生装置による乱流 ③格子乱流
		開放型	2x3x5			

3次元モード測定部壁面の勾配

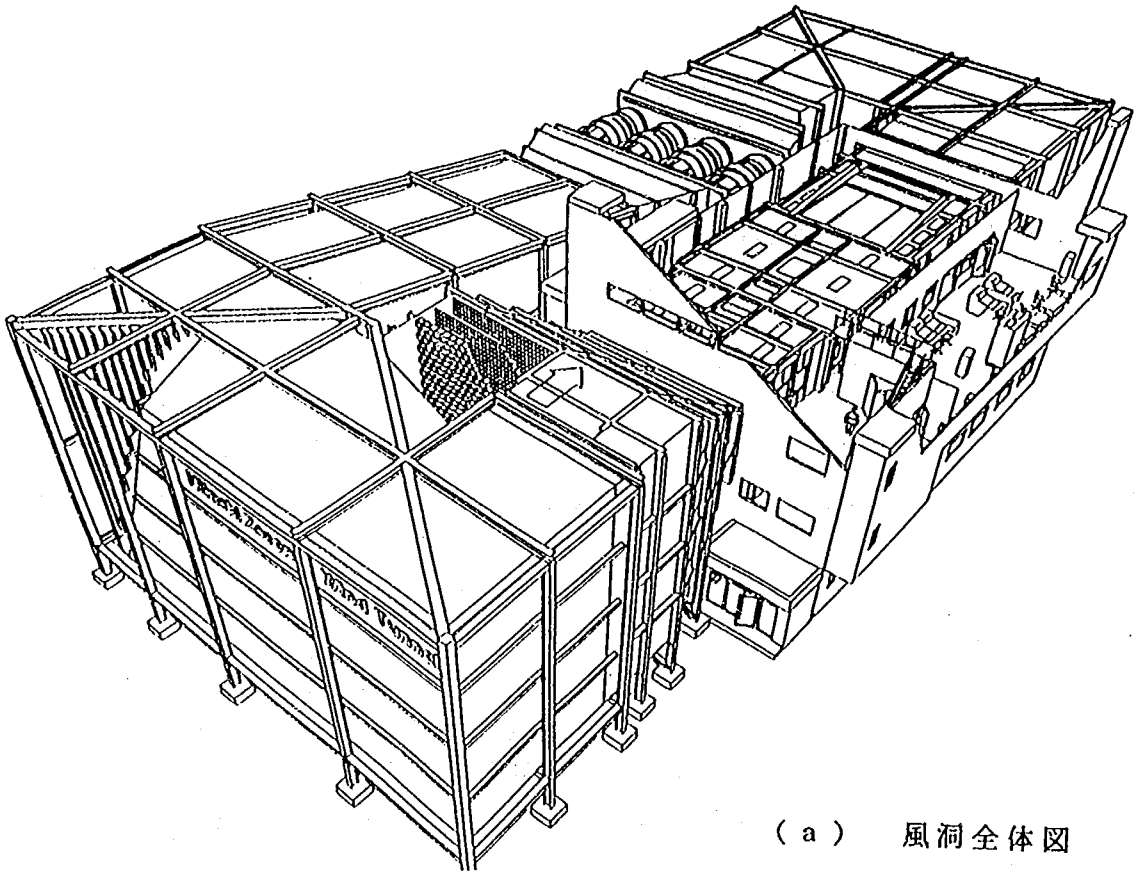
両面：4／1000、上面：7／1000、底面：水平

絞り比

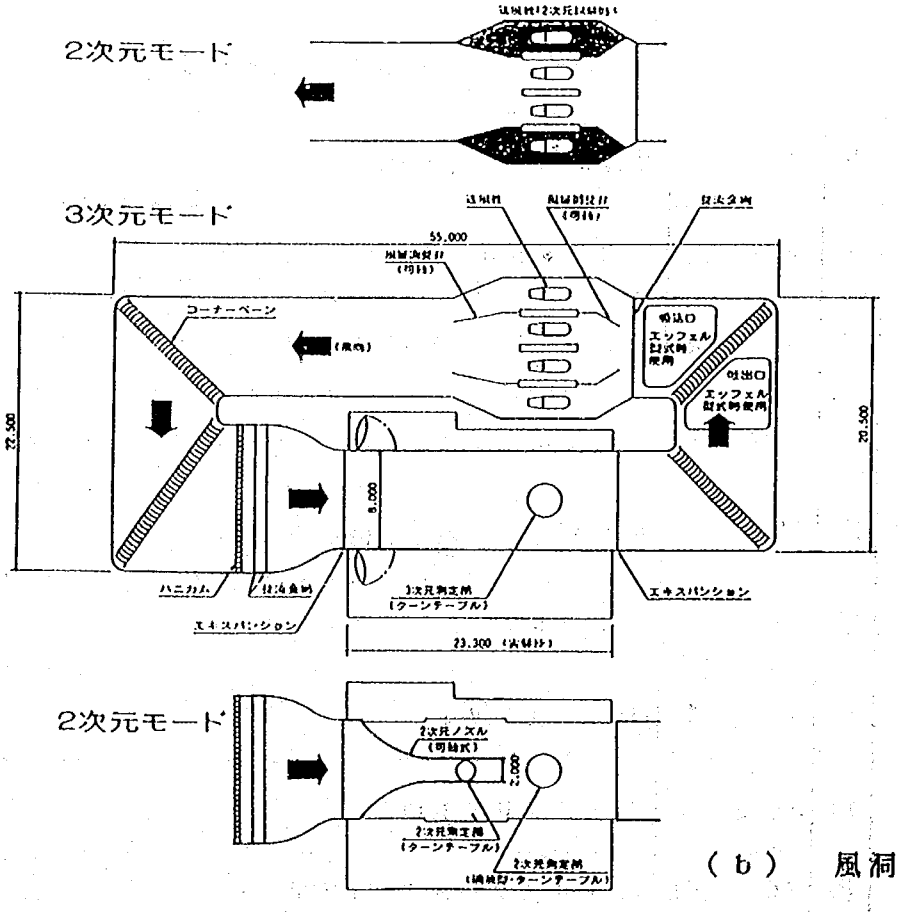
2次元：24．0、3次元：6．0

表-3.6.2.1(b)　送風機・電動機性能

主送風機	型　式	後置静翼1段軸流れ送風機
	翼車径	2240mm（ケーシング内径）
	風　量	90m³／s（3次元）、75m³／s（2次元）
	有効風圧	50mmAq（3次元）、138mmAq（2次元）
駆動電動機	型　式	開放管通風室内吐き出し他力通風型
	出　力	150kw
	電　圧	DC440v
	回転数	9～900rpm
	制　御	サイリスタレオナード方式



（ａ）　風洞全体図

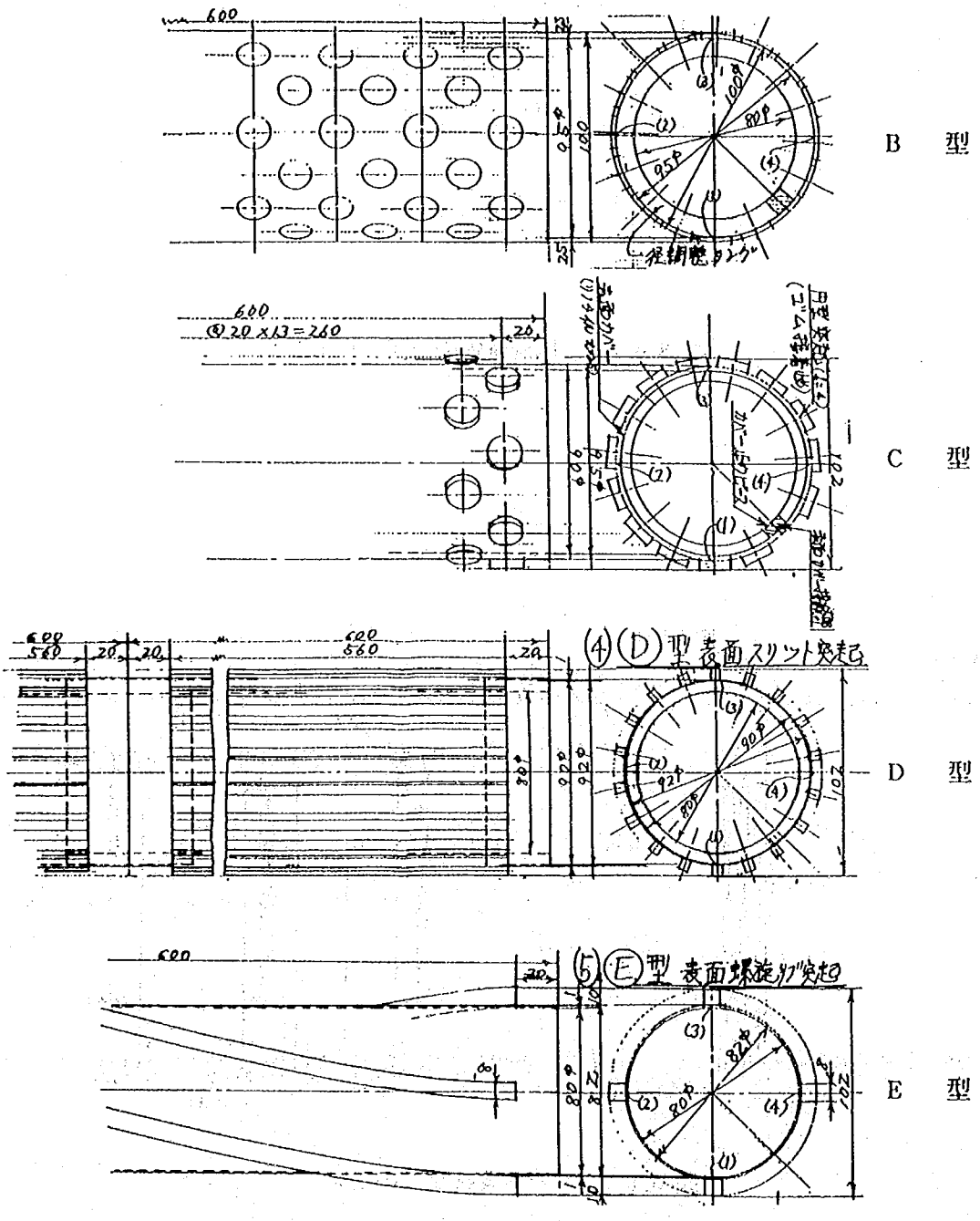


（ｂ）　風洞モード図

図-3.6.2.1　風洞装置概要

滑　面　　（外径　１００ｍｍ）

A　型



B　型

C　型

D　型

E　型

図-3.6.2.2　模型表面状態

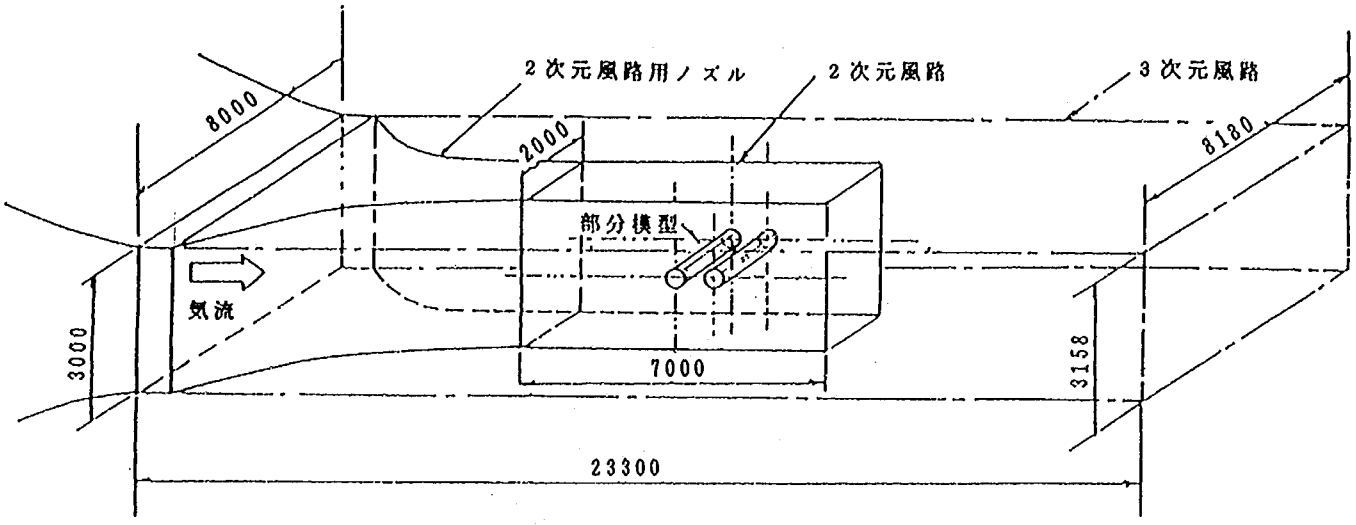


図-3.6.2.3　風洞試験のレイアウト概要

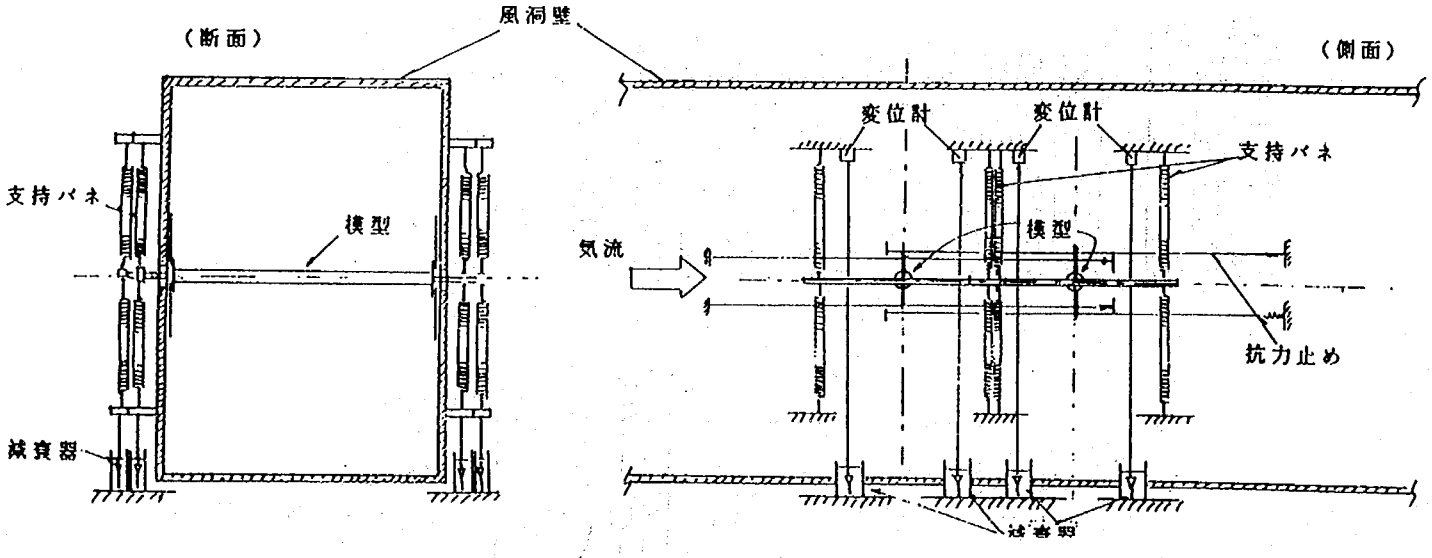
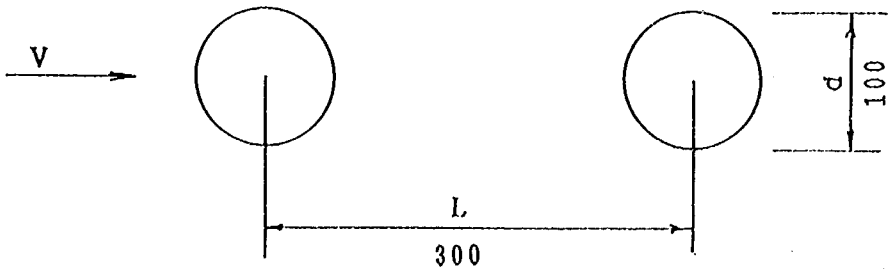


図-3.6.2.4　バネ支持試験の概要



L ／ d ＝ 3

図-3.6.2.5　模型概要

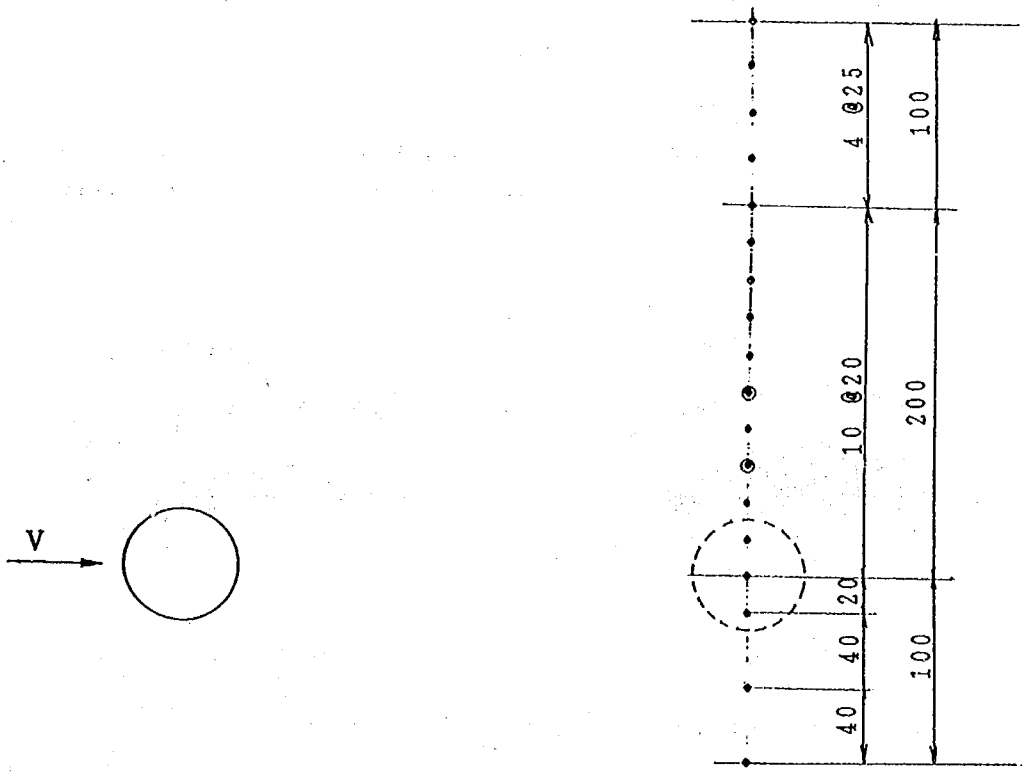
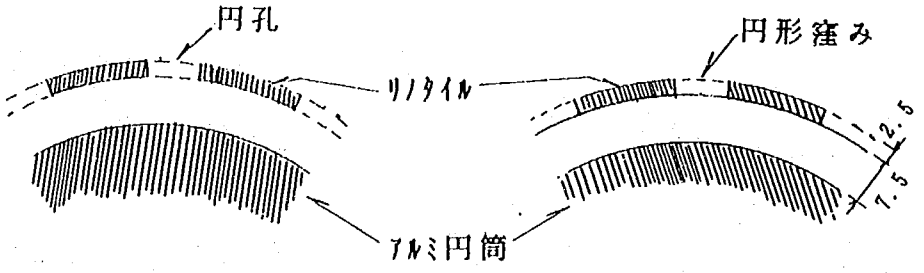


図-3.6.2.6　後流測定点

表-3.6.2.2　ばね支持試験条件

模型名		m (kgf・S²・m⁻²)	f (Hz)	δ	Sc
A	上流側	0.504	2.85	0.0091	3.82
	下流側	0.514	2.85	0.0095	4.06
B	上流側	0.504	2.86	0.0084	3.52
	下流側	0.514	2.86	0.0093	3.98
C	上流側	0.504	2.84	0.0098	4.11
	下流側	0.514	2.85	0.0091	3.89
D	上流側	0.504	2.88	0.0092	3.86
	下流側	0.514	2.87	0.0091	3.89
E	上流側	0.504	2.87	0.0095	3.98
	下流側	0.514	2.87	0.0097	4.15
B'	上流側	0.504	2.85	0.0093	3.90
	下流側	0.514	2.86	0.0092	3.93

m：単位質量
f：振動数
δ：対数減衰率　　（規準振動ｄ／２００で評価：ｄ外径）
Sc：スクルートン数（Ｓｃ＝ｍδ／ρｄ²：ρ空気密度）



模型　B　　模型　B'

図-3.6.2.7　模型Ｂと模型Ｂ'の違い

模型A

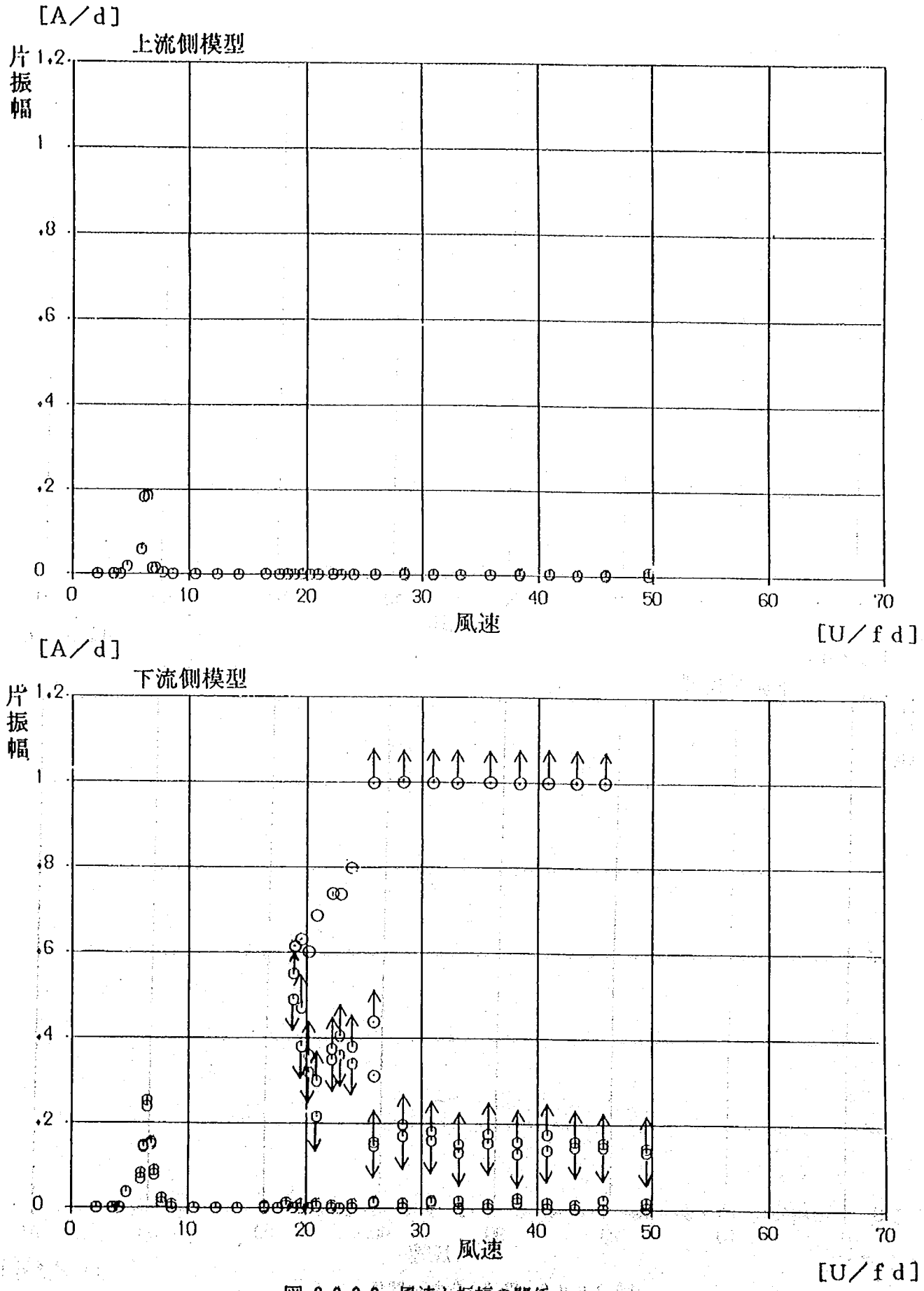
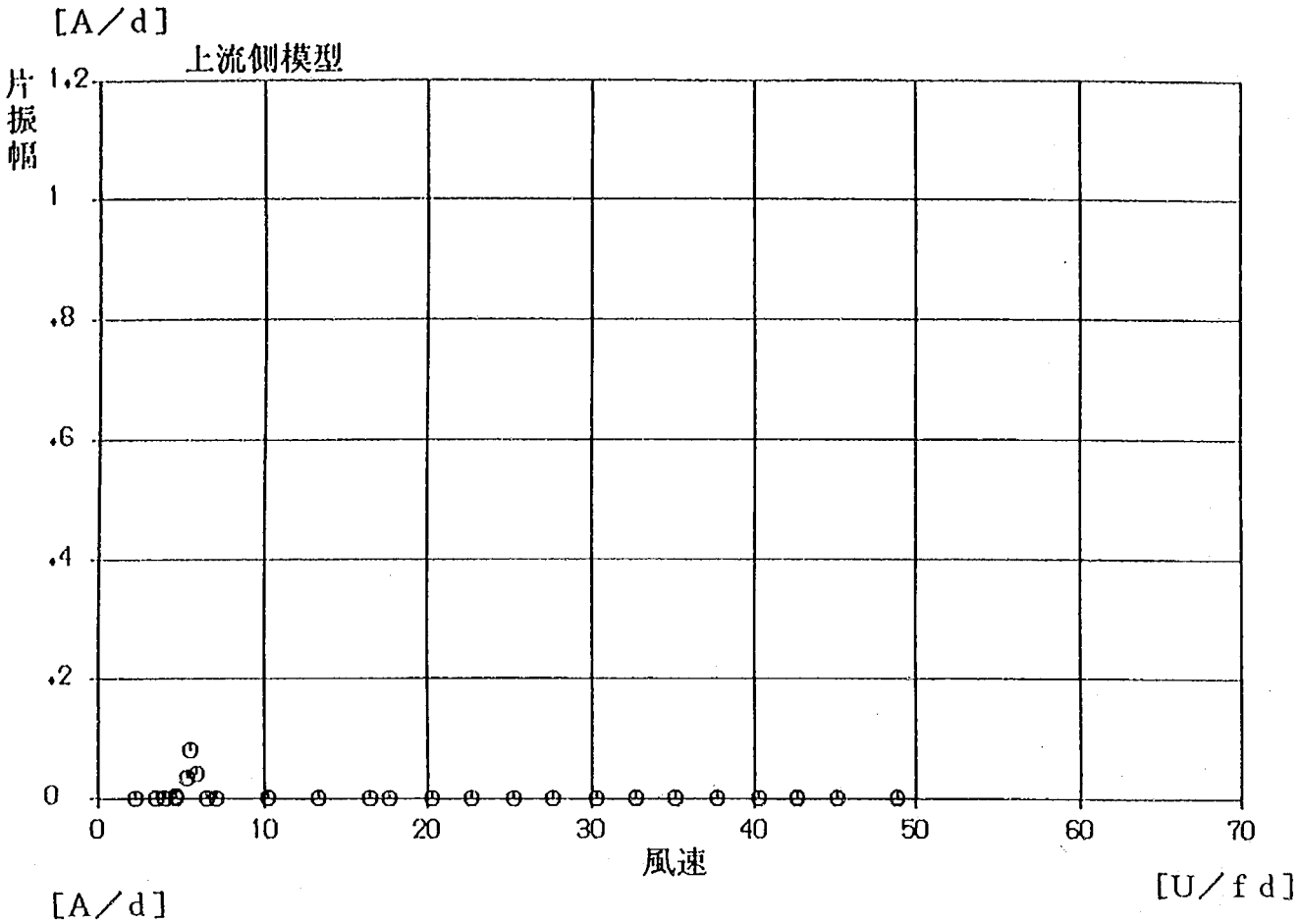


図-3.6.2.8　風速と振幅の関係

模型B



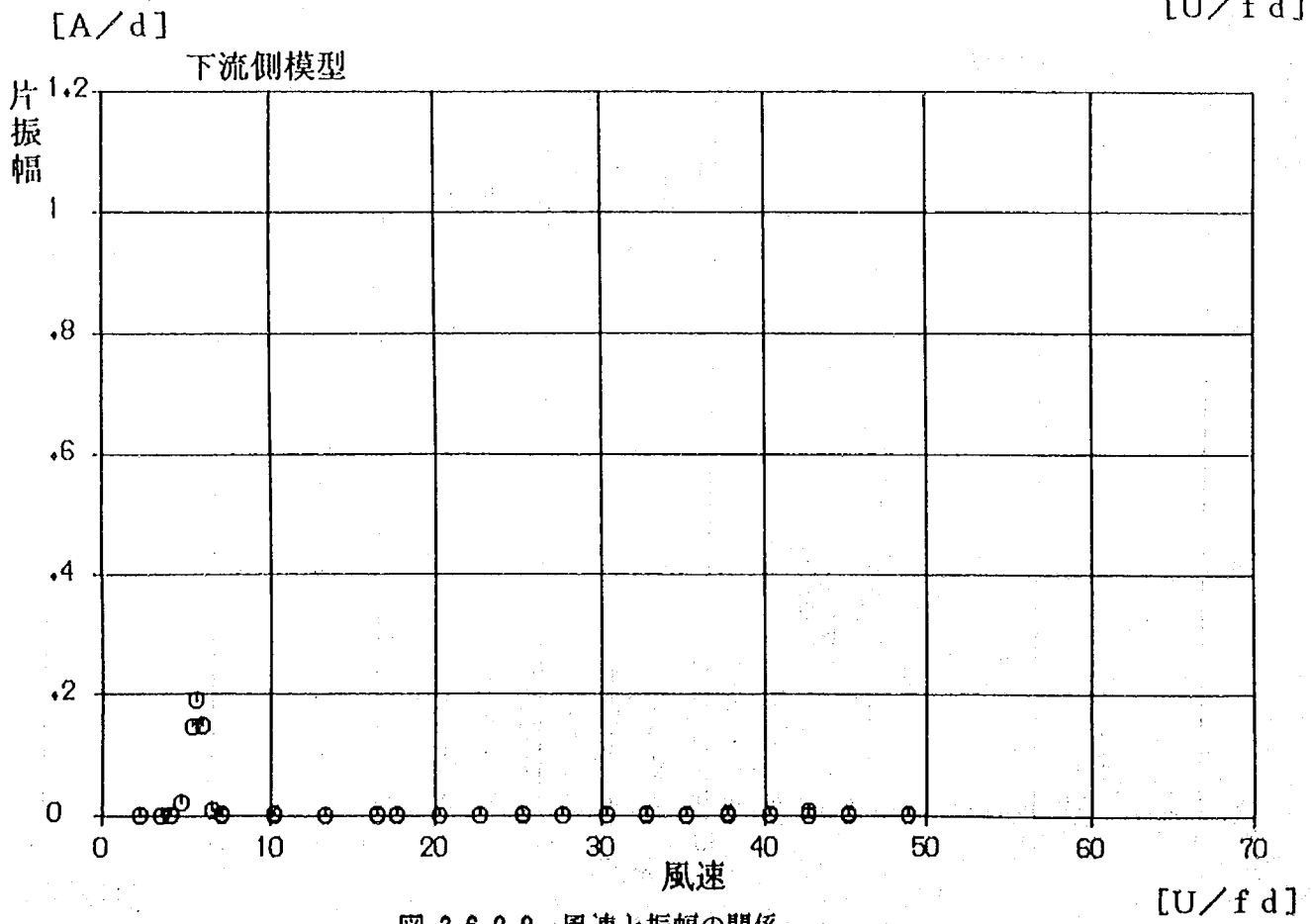


図-3.6.2.9　風速と振幅の関係

模型C

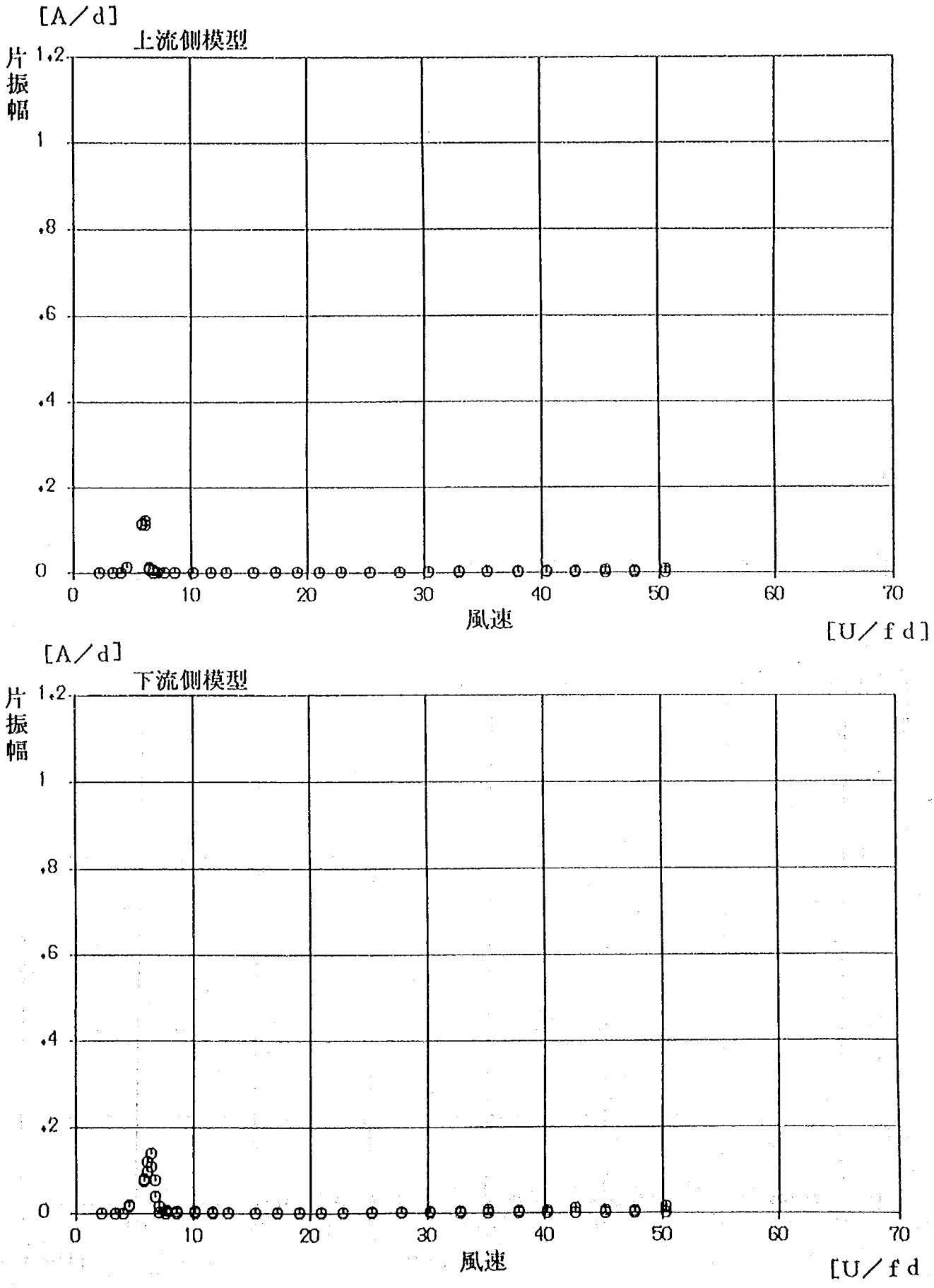


図-3.6.2.10　風速と振幅の関係

模型D

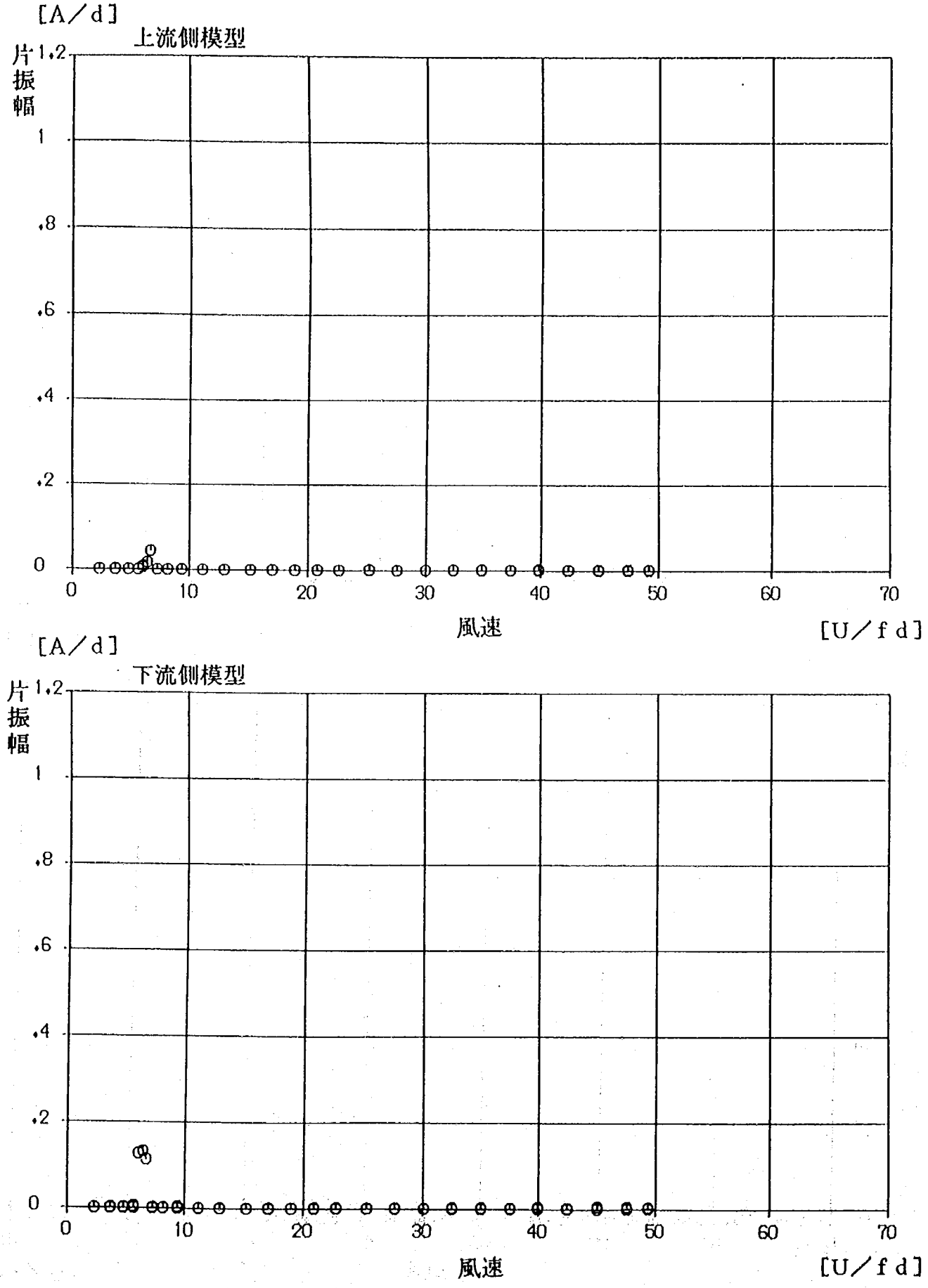
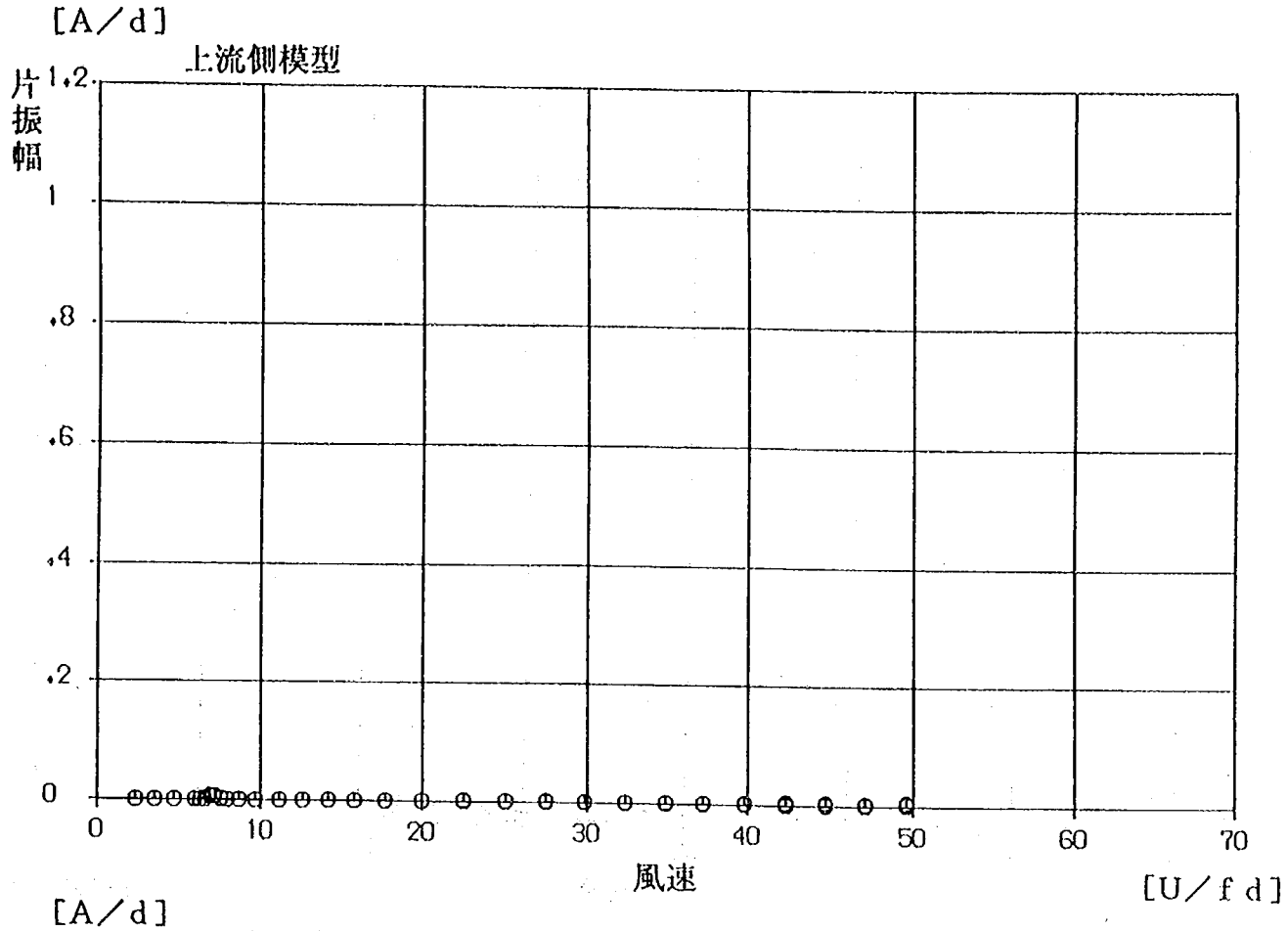


図-3.6.2.11　風速と振幅の関係

模型E



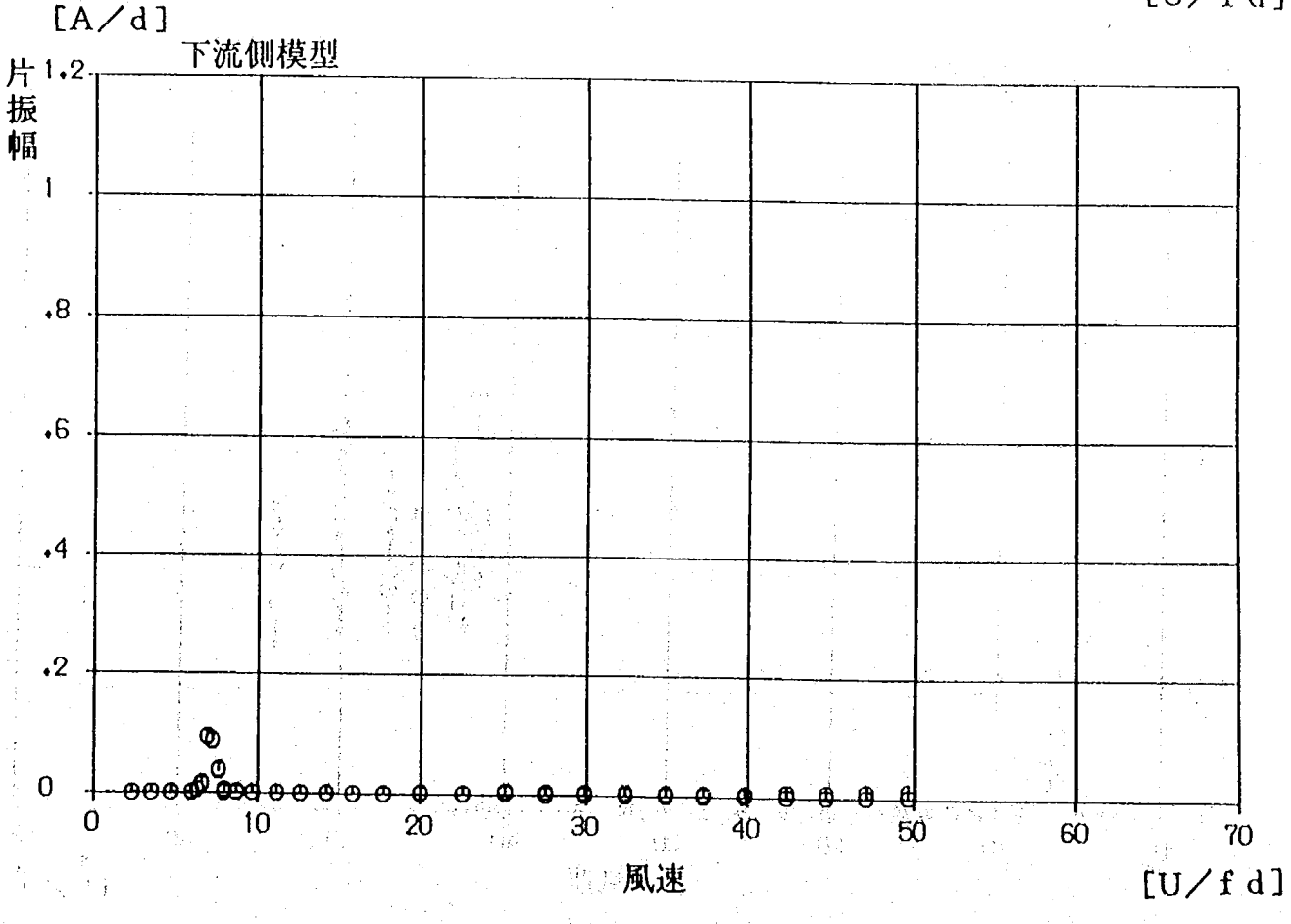


図-3.6.2.12　風速と振幅の関係

模型B'

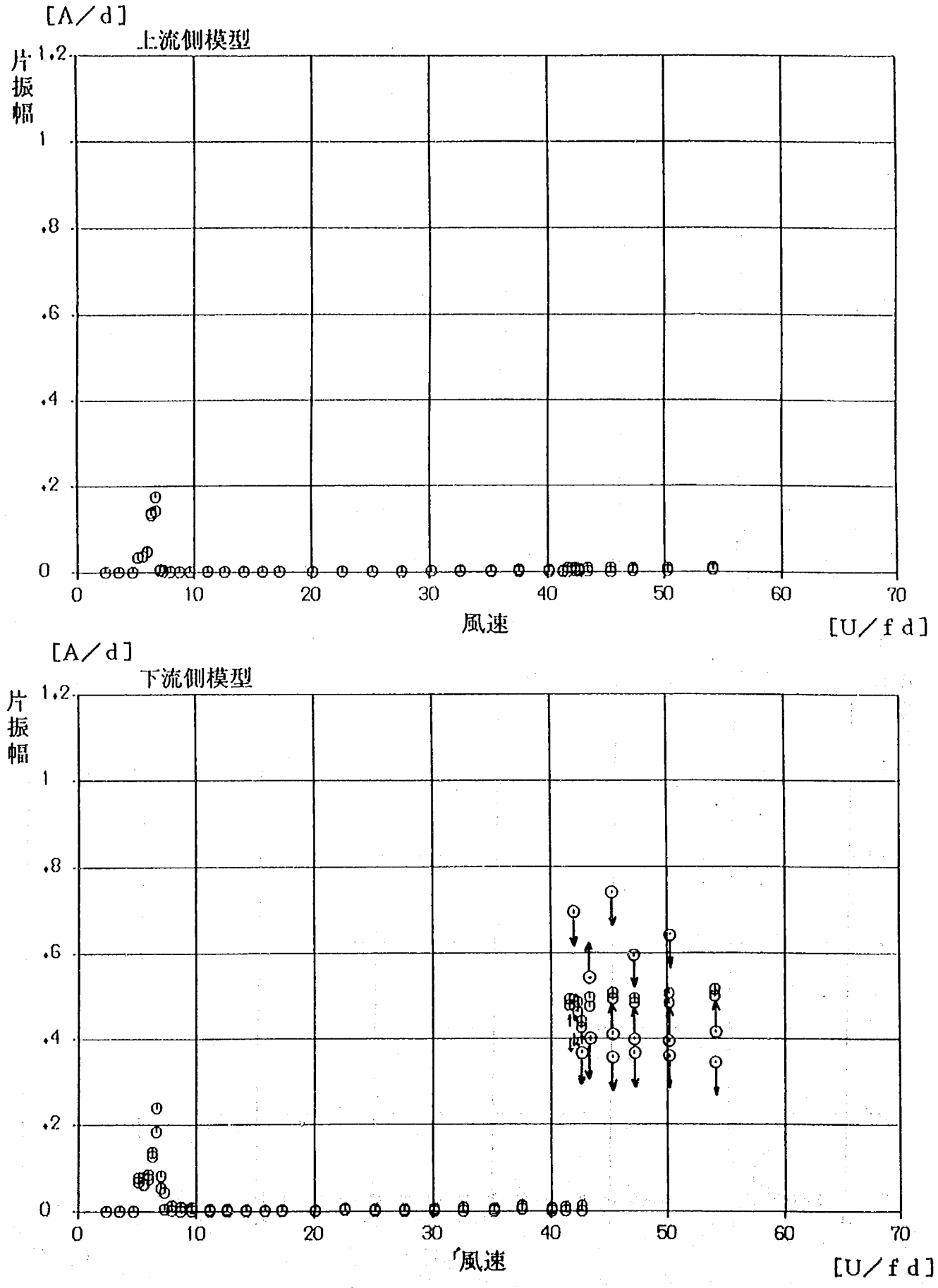


図-3.6.2.13　風速と振幅の関係

表-3.6.2.3　渦励振　振幅と風速

模型名		A(mm)	A／d	U_p (m/s)	$\bar{U}_r$ (U_p/fD)
A	上流側	18.9	0.189	1.85	6.49
	下流側	25.3	0.253	1.85	6.49
B	上流側	8.1	0.081	1.58	5.52
	下流側	19.0	0.190	1.58	5.52
C	上流側	12.3	0.123	1.76	6.20
	下流側	14.0	0.140	1.85	6.49
D	上流側	4.4	0.044	1.92	6.67
	下流側	13.3	0.133	1.84	6.41
E	上流側	0.7	0.007	1.99	6.93
	下流側	9.5	0.095	1.99	6.93
B'	上流側	17.5	0.175	1.89	6.63
	下流側	23.9	0.239	1.89	6.61

A：渦励振ピーク振幅
d：ケーブル模型外径
U_p：渦励振ピーク風速
f：振動数

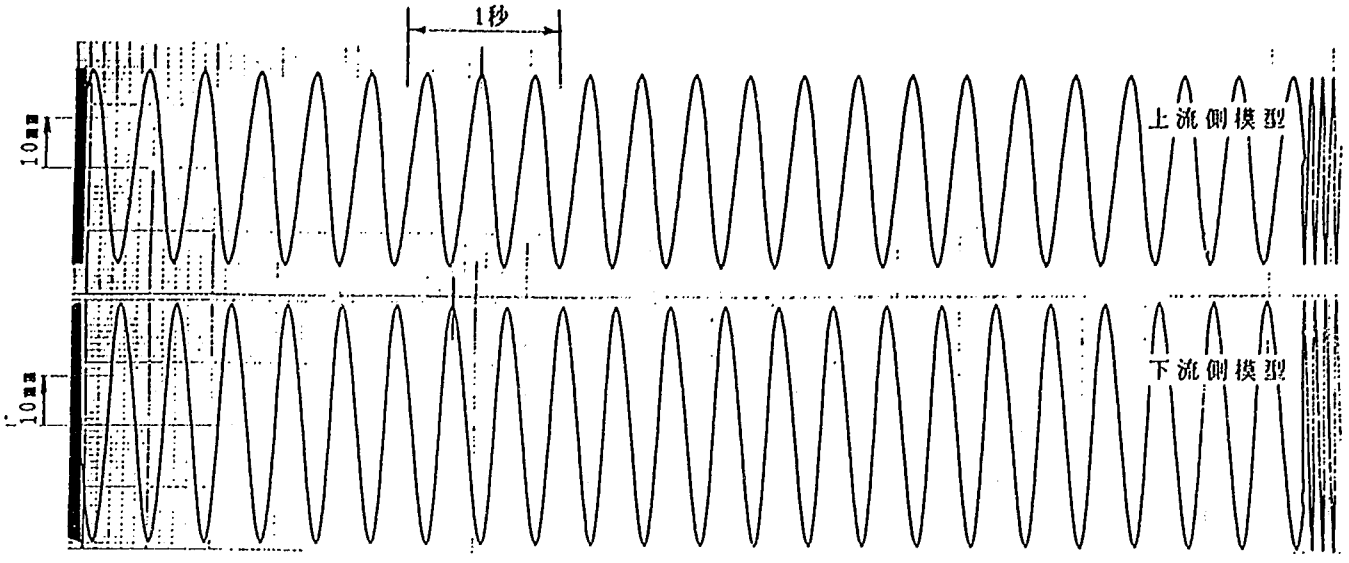


図-3.6.2.14(1)　測定波形例［渦励振時］　　模型A：　$U_r=6.5$

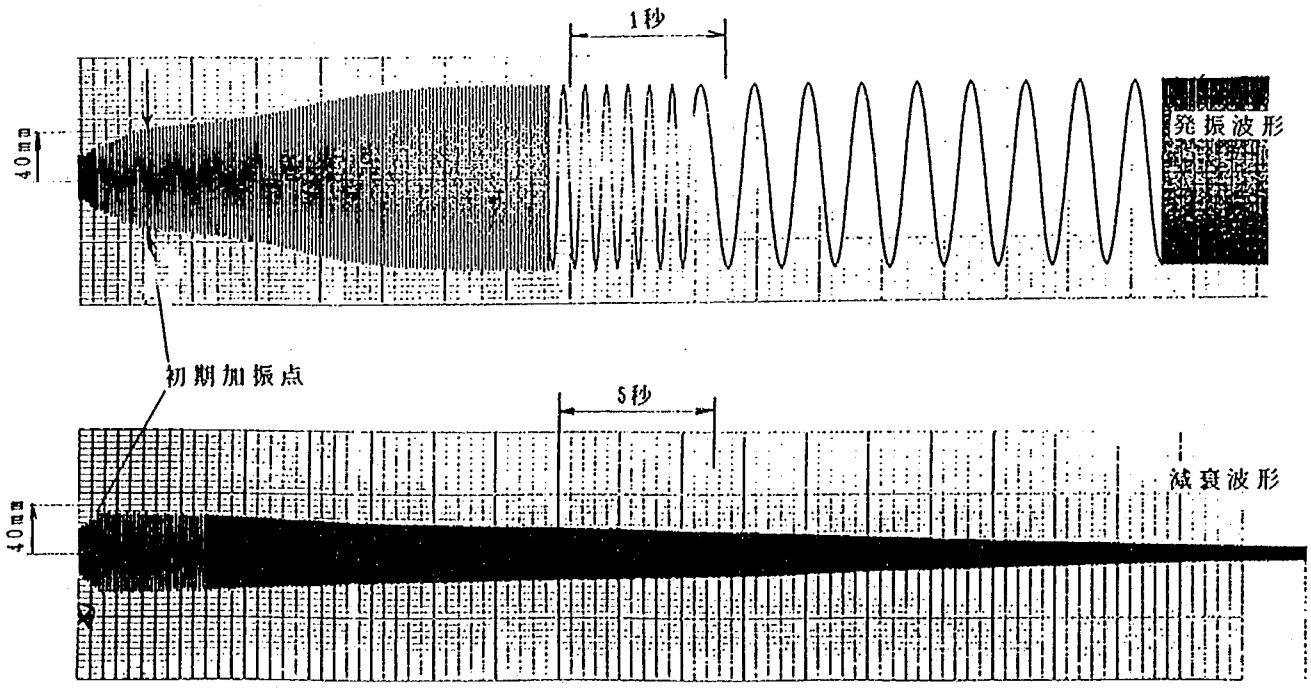


図-3.6.2.14(2)　測定波形例［ギャロッピング時］　　模型A：　$U_r=22.2$

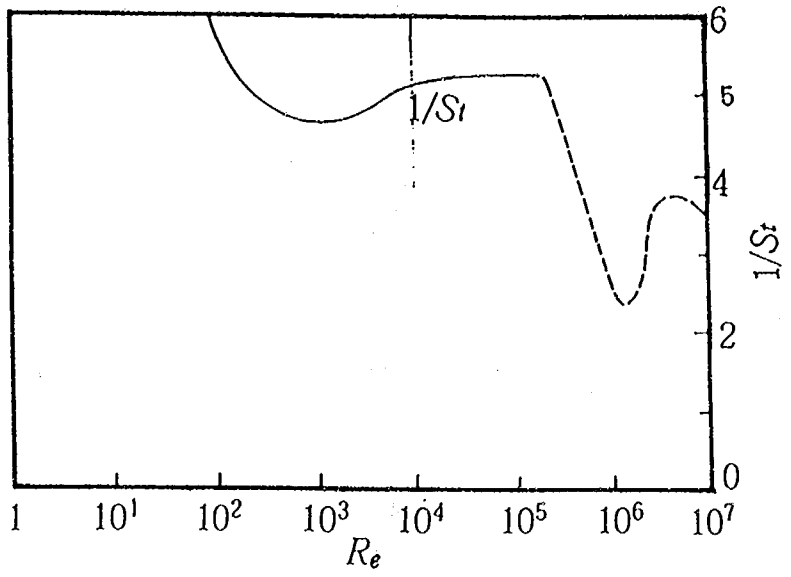


図-3.6.2.15　円柱のストローハル数（St）のレイノルズ数（Re）による変化［1］

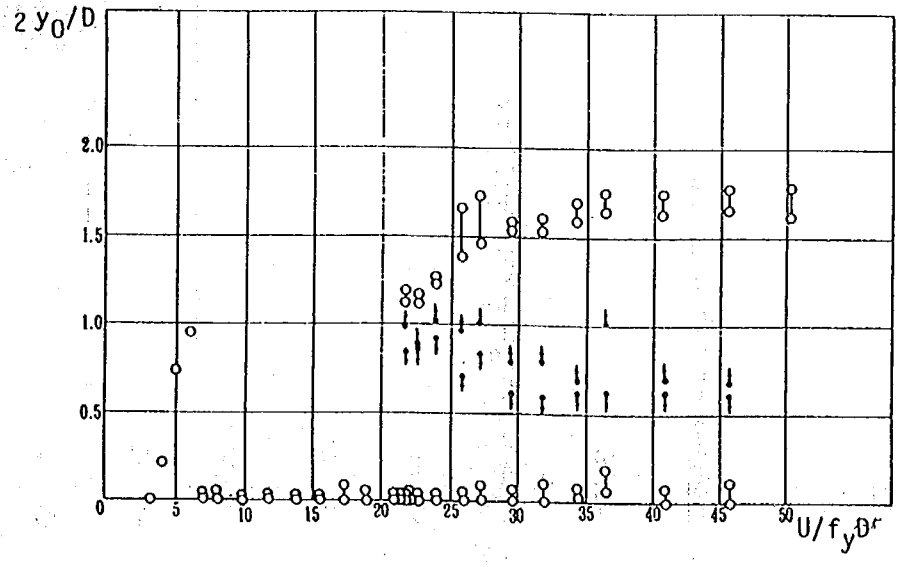


図-3.6.2.16　下流側円柱の振動応答特性［2］

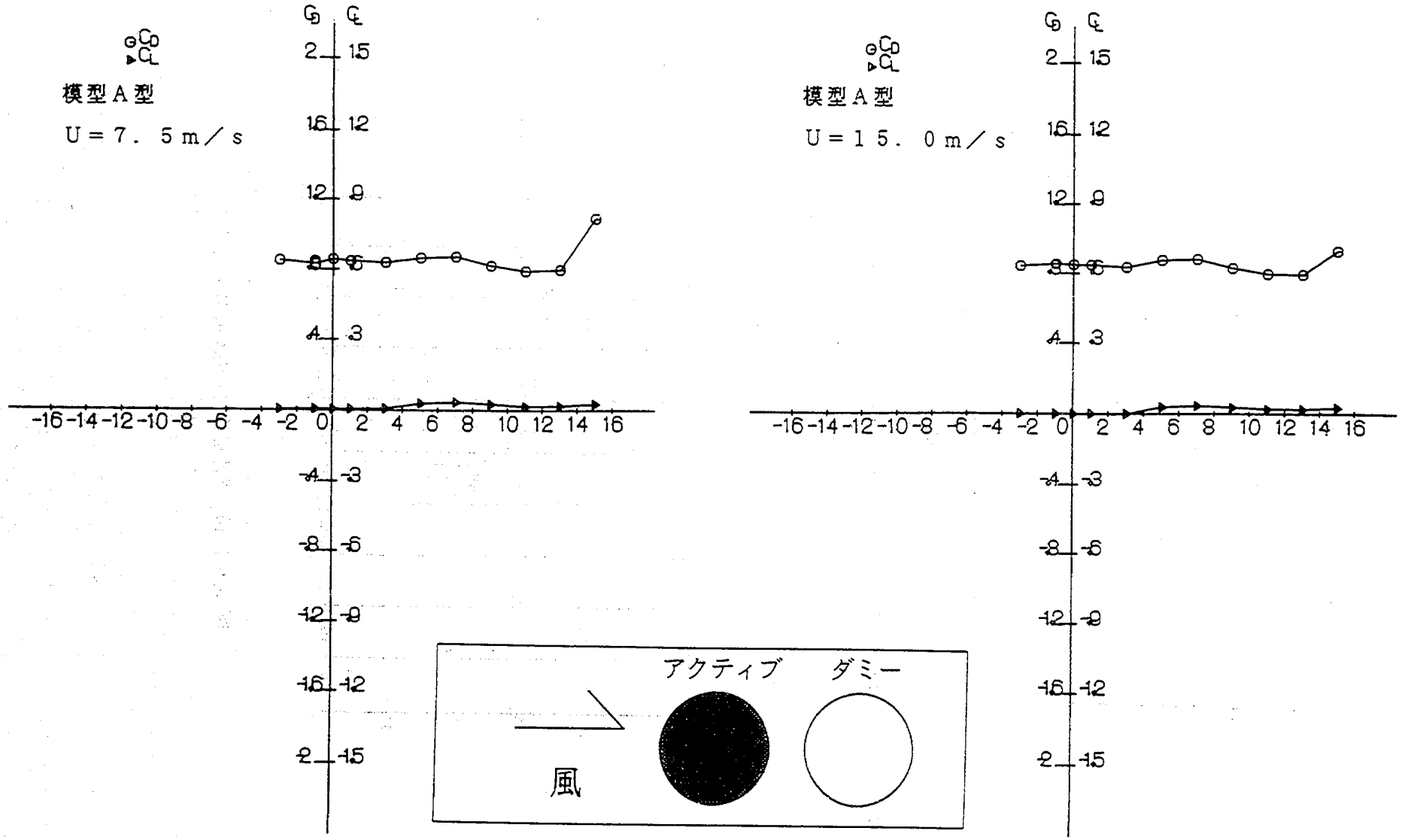


図-3.6.2.17　静的空気力係数

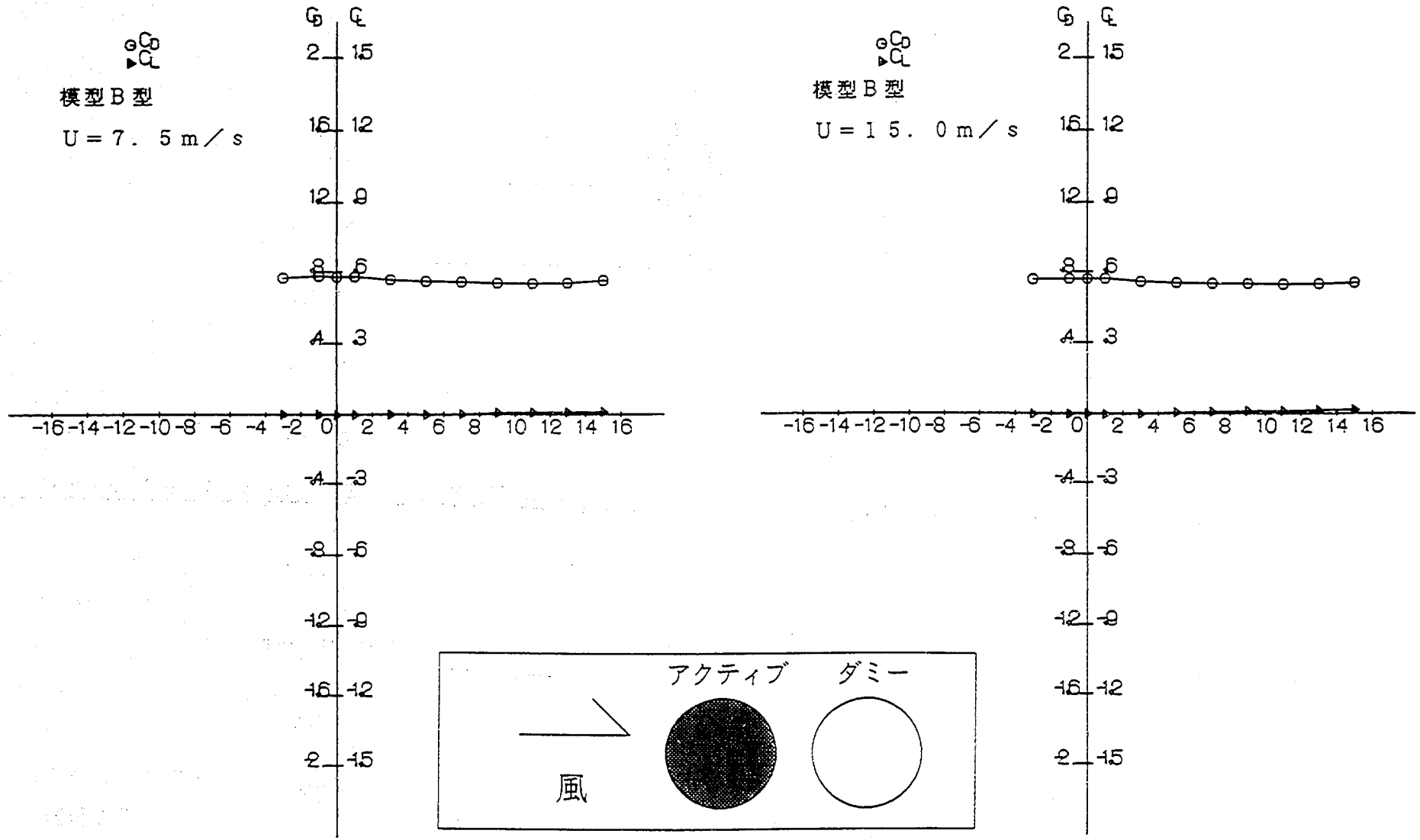


図-3.6.2.18　静的空気力係数

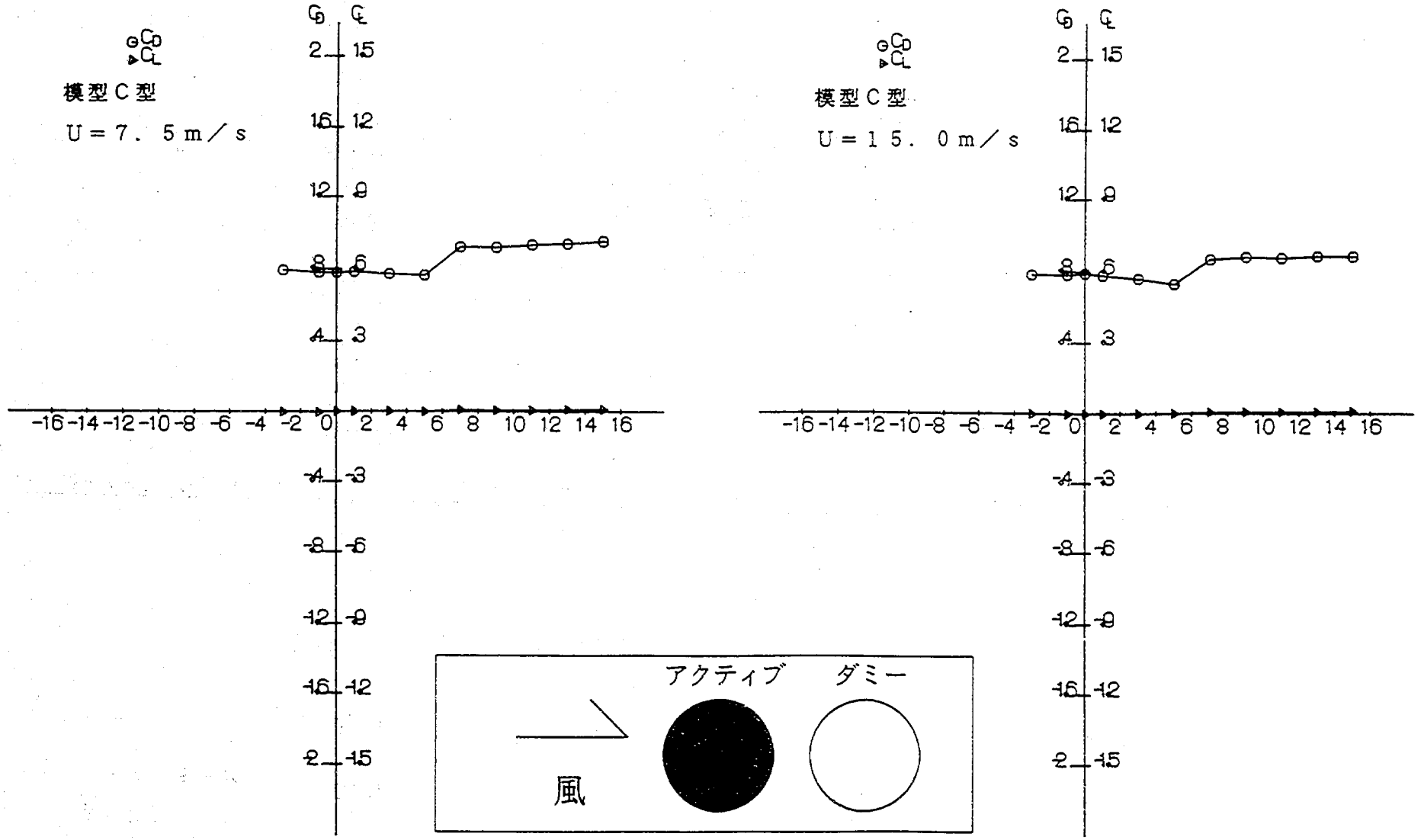


図-3.6.2.19　静的空気力係数

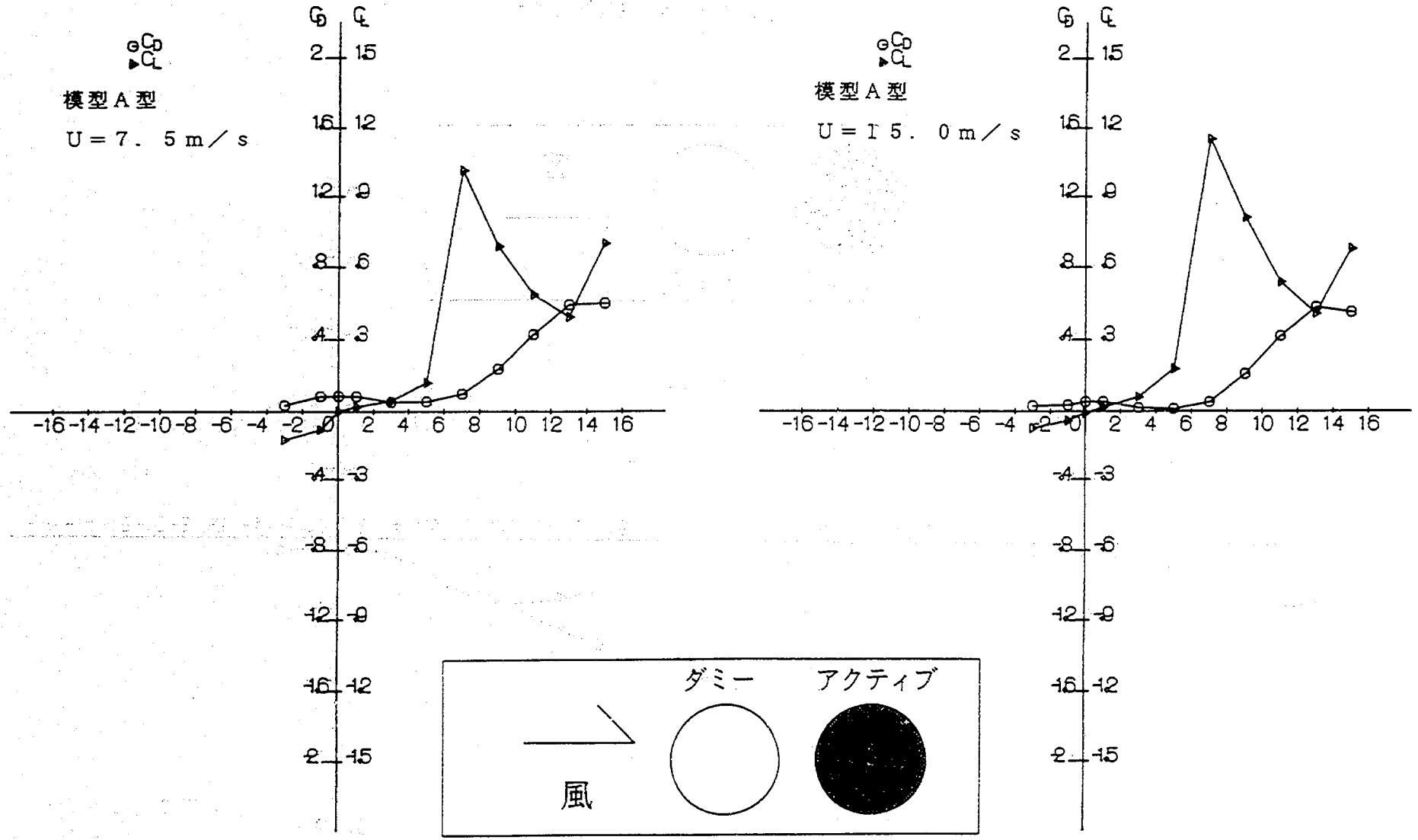


図-3.6.2.20 静的空気力係数

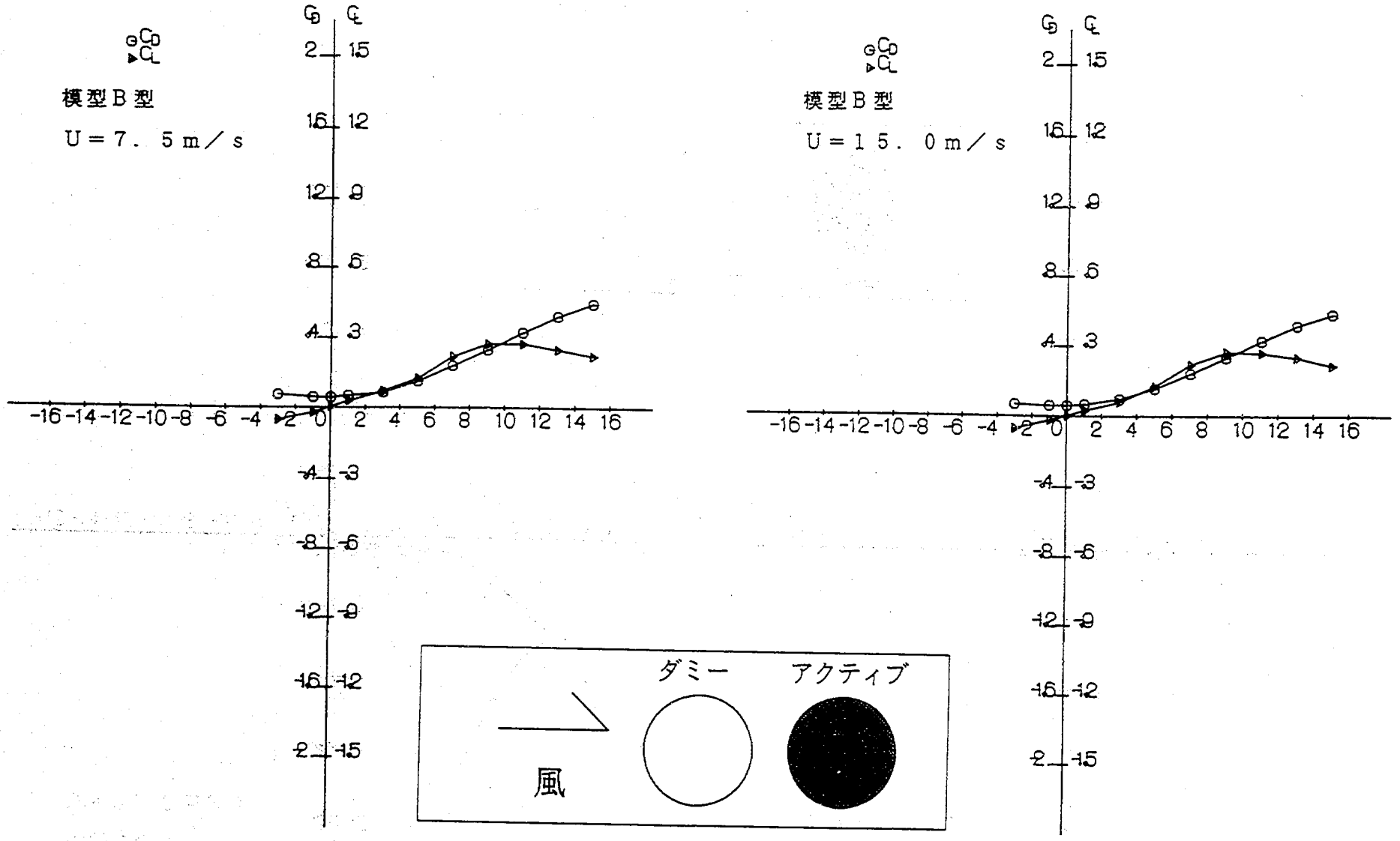


図-3.6.2.21　静的空気力係数

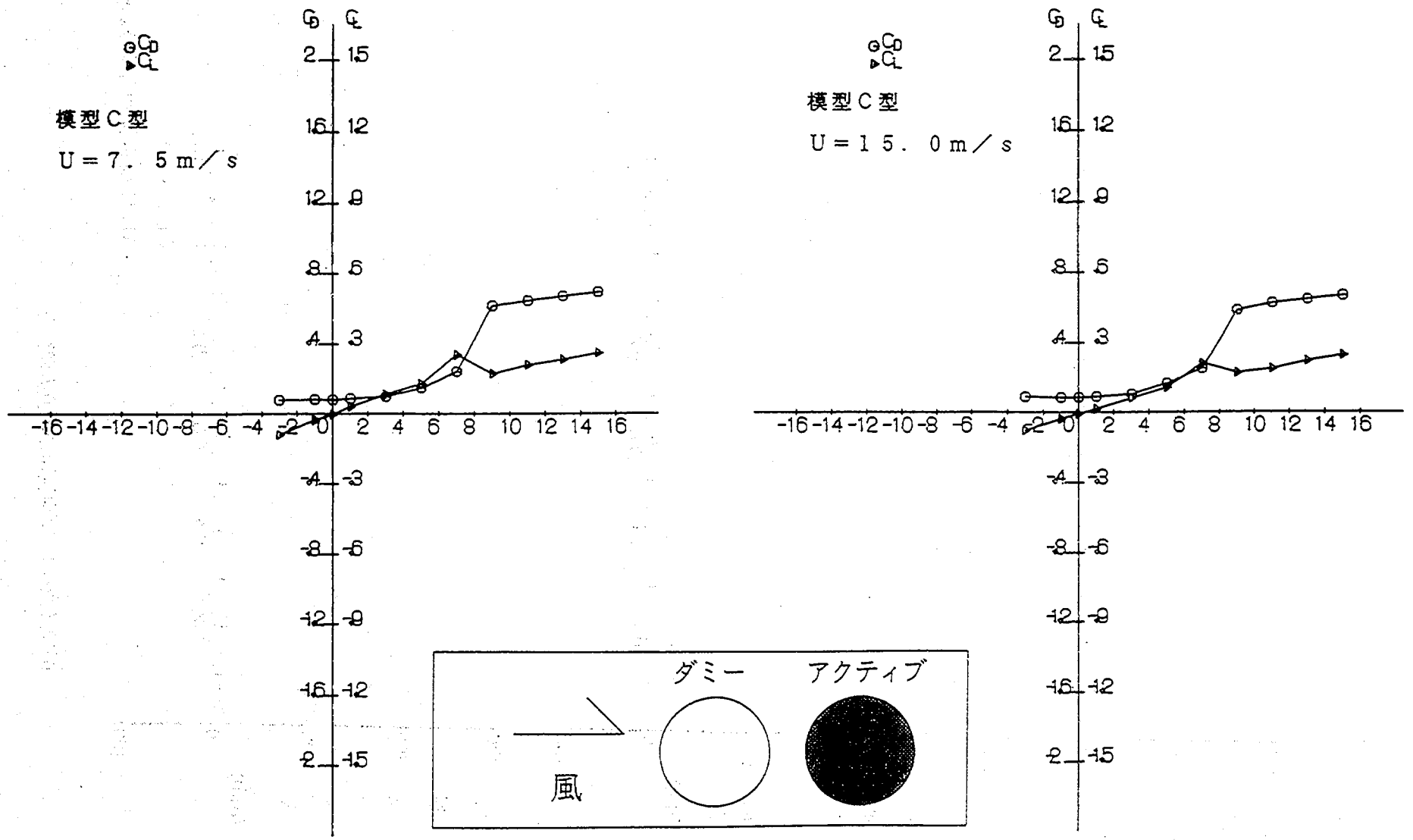


図-3.6.2.22　静的空気力係数

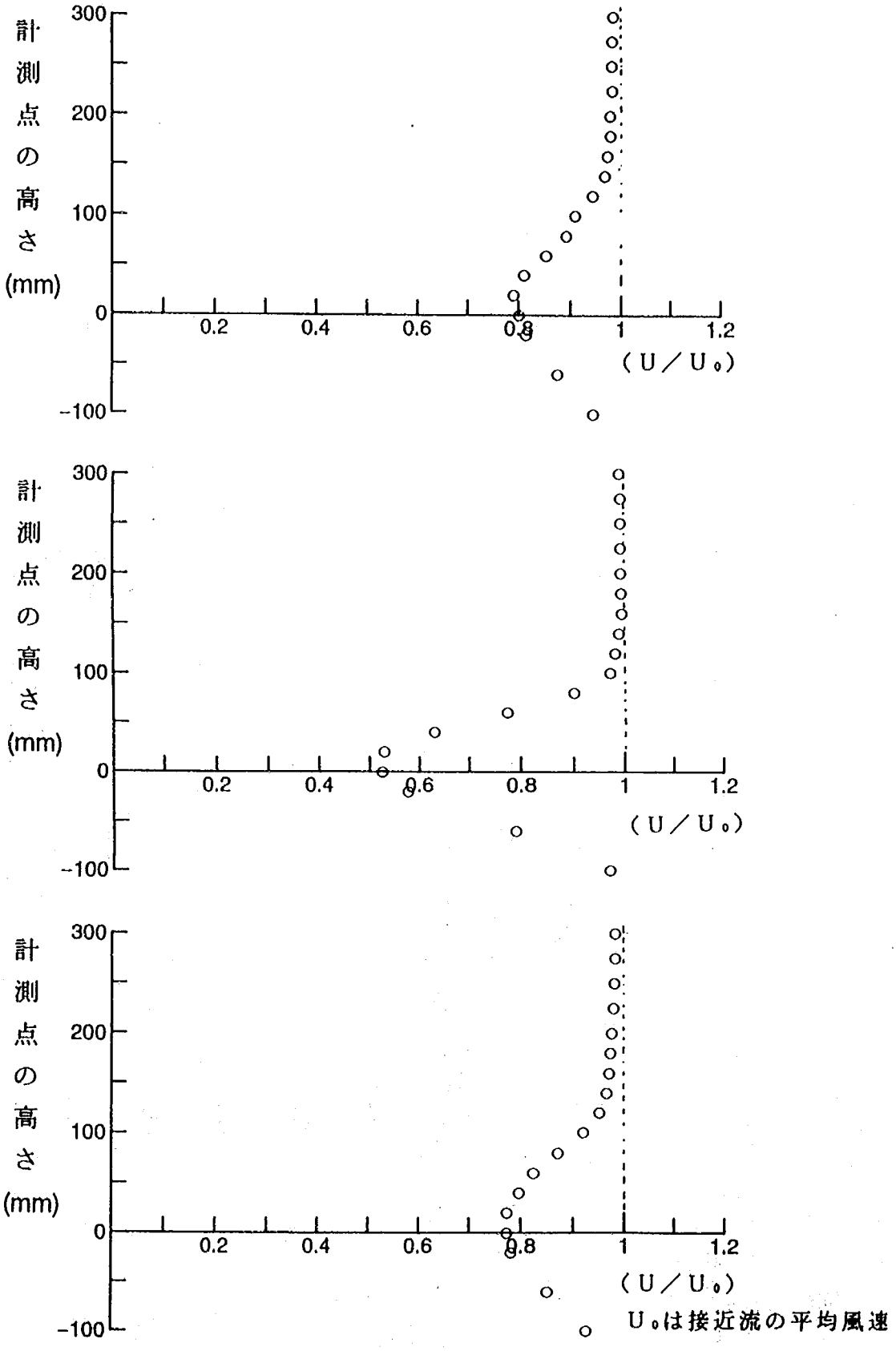


図-3.6.2.23　平均風速の鉛直方向分布

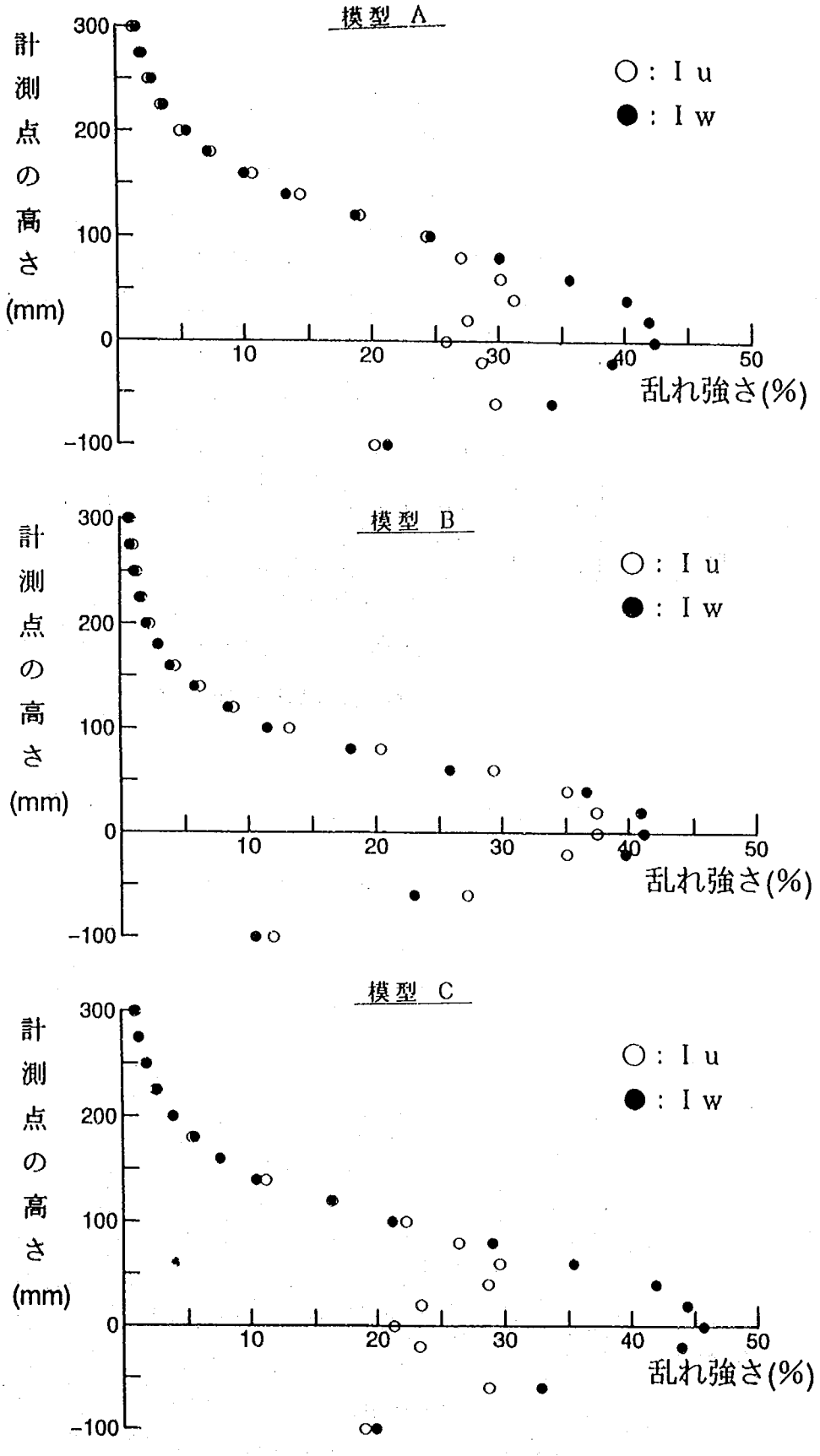


図-3.6.2.24　乱れ強さの鉛直方向分布

表-3.6.2.4　後流の卓越周波数および乱れ強さ

模型名	測　点	P 1				P 2			
	風速(約 m/s)	1.8		9		1.8		9	
		fD/U	I (%)	fD/U	I (%)	fD/U	I (%)	fD/U	I (%)
A	主　流	0.253	32	0.216	29	0.228	25	0.203	24
	鉛　直	〃	38	〃	36	〃	23	0.202	25
B	主　流	0.316	36	0.277	29	0.238	24	0.213	14
	鉛　直	〃	40	〃	27	〃	20	〃	12
C	主　流	0.253	33	0.254	29	0.224	27	0.228	21
	鉛　直	〃	40	〃	36	〃	25	〃	22

I：乱れ強さ

fD/U = 0.252(風速1.8m/sでの平均値)

(無次元風速:U/Df≒4)

付属資料（１）

静的空気力数値データ

（3.6.2　空力的制振対策（その１））

付表１　静的空気力数値データ〔模型Ａ〕

7.5m/s
U=7.395m/s　　Q=3.415mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	0.002084	0.523329
-1.00	0.002770	0.512652
0.00	0.002861	0.528035
1.00	0.003456	0.521608
3.00	0.003890	0.515298
5.00	0.017579	0.531536
7.00	0.021153	0.535936
9.00	0.015855	0.504038
11.00	0.009875	0.484955
13.00	0.011360	0.489835
15.00	0.016144	0.672947

15m/s
U=14.79m/s　　Q=13.644mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	0.002139	2.070110
-1.00	-0.001820	2.099950
0.00	0.003114	2.088740
1.00	0.002171	2.083610
3.00	0.000052	2.048460
5.00	0.067150	2.147750
7.00	0.081973	2.158780
9.00	0.063565	2.034210
11.00	0.048558	1.953560
13.00	0.047410	1.944310
15.00	0.062439	2.280130

U=7.395m/s　　Q=3.415mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	0.003390	0.851357
-1.00	0.004506	0.833987
0.00	0.004655	0.859012
1.00	0.005622	0.848557
3.00	0.006328	0.838292
5.00	0.028598	0.864708
7.00	0.034411	0.871866
9.00	0.025794	0.819974
11.00	0.016065	0.788929
13.00	0.018480	0.796869
15.00	0.026264	1.094760

U=14.79m/s　　Q=13.644mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	0.000871	0.842905
-1.00	-0.000741	0.855056
0.00	0.001268	0.850494
1.00	0.000884	0.848401
3.00	0.000021	0.834089
5.00	0.027342	0.874518
7.00	0.033378	0.879010
9.00	0.025883	0.828287
11.00	0.019772	0.795450
13.00	0.019304	0.791682
15.00	0.025424	0.928421

上流側模型

付表 2　静的空気力数値データ〔模型Ａ〕

7.5m/s
U=7.52m/s　　Q=3.371mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.074394	0.019739
-1.00	-0.046299	0.050833
0.00	0.001305	0.051905
1.00	0.012594	0.050358
3.00	0.025970	0.029089
5.00	0.073107	0.032329
7.00	0.612680	0.058645
9.00	0.419327	0.143977
11.00	0.295968	0.261227
13.00	0.239836	0.358174
15.00	0.424230	0.362687

15m/s
U=15.04m/s　　Q=13.514mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.172745	0.074527
-1.00	-0.093112	0.087396
0.00	-0.017244	0.131044
1.00	0.040847	0.129264
3.00	0.146366	0.047145
5.00	0.434691	0.030845
7.00	2.801670	0.123579
9.00	1.980500	0.511946
11.00	1.313710	1.027150
13.00	1.001840	1.414350
15.00	1.652950	1.348420

U=7.52m/s　　Q=3.371mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.122605	0.032531
-1.00	-0.076302	0.083776
0.00	0.002150	0.085541
1.00	0.020756	0.082993
3.00	0.042800	0.047940
5.00	0.120483	0.053279
7.00	1.009720	0.096649
9.00	0.691070	0.237281
11.00	0.487768	0.430514
13.00	0.395260	0.590286
15.00	0.699150	0.597723

U=15.04m/s　　Q=13.514mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.071015	0.030638
-1.00	-0.038278	0.035928
0.00	-0.007089	0.053872
1.00	0.016792	0.053140
3.00	0.060170	0.019381
5.00	0.178700	0.012680
7.00	1.151760	0.050803
9.00	0.814177	0.210459
11.00	0.540062	0.422258
13.00	0.411852	0.581434
15.00	0.679523	0.554331

下 流 側 模 型

付表 3　静的空気力数値データ〔模型 B〕

7.5m/s
U=7.345m/s　　Q=3.409mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.001131	0.469874
-1.00	-0.001255	0.476165
0.00	-0.002249	0.472612
1.00	-0.001513	0.473226
3.00	-0.001177	0.462961
5.00	-0.001796	0.457240
7.00	0.000803	0.455725
9.00	0.003970	0.451738
11.00	0.005048	0.450165
13.00	0.005238	0.451971
15.00	0.006808	0.460411

15m/s
U=14.73m/s　　Q=13.595mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.008628	1.848360
-1.00	-0.007598	1.857390
0.00	-0.007319	1.858200
1.00	-0.010018	1.861130
3.00	-0.006852	1.819360
5.00	0.009465	1.801630
7.00	0.017372	1.792680
9.00	0.025252	1.789800
11.00	0.024180	1.780140
13.00	0.032632	1.786210
15.00	0.035611	1.802430

U=7.345m/s　　Q=3.409mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.001843	0.765742
-1.00	-0.002046	0.775993
0.00	-0.003665	0.770203
1.00	-0.002466	0.771203
3.00	-0.001918	0.754474
5.00	-0.002927	0.745151
7.00	0.001308	0.742682
9.00	0.006469	0.736186
11.00	0.008226	0.733622
13.00	0.008537	0.736564
15.00	0.011095	0.750319

U=14.73m/s　　Q=13.595mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.003526	0.755326
-1.00	-0.003105	0.759018
0.00	-0.002991	0.759346
1.00	-0.004094	0.760545
3.00	-0.002800	0.743474
5.00	0.003868	0.736232
7.00	0.007099	0.732571
9.00	0.010319	0.731395
11.00	0.009881	0.727448
13.00	0.013335	0.729931
15.00	0.014552	0.736556

上 流 側 模 型

付表 4　静的空気力数値データ〔模型 B〕

7.5m/s
U=7.58m/s　　Q=3.402mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.032856	0.044413
-1.00	-0.013642	0.035175
0.00	0.002637	0.034625
1.00	0.017143	0.041490
3.00	0.042230	0.051185
5.00	0.075582	0.090827
7.00	0.133996	0.145619
9.00	0.167151	0.201495
11.00	0.166873	0.262160
13.00	0.151581	0.319168
15.00	0.135093	0.363287

15m/s
U=15.085m/s　　Q=13.545mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.131009	0.163875
-1.00	-0.045249	0.148104
0.00	0.004169	0.144860
1.00	0.057262	0.161245
3.00	0.147919	0.236813
5.00	0.307371	0.379092
7.00	0.534482	0.586896
9.00	0.665684	0.809611
11.00	0.657212	1.044660
13.00	0.607844	1.256120
15.00	0.522325	1.413640

U=7.58m/s　　Q=3.402mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.053655	0.072528
-1.00	-0.022278	0.057442
0.00	0.004306	0.056544
1.00	0.027996	0.067754
3.00	0.068963	0.083587
5.00	0.123427	0.148322
7.00	0.218819	0.237800
9.00	0.272962	0.329047
11.00	0.272509	0.428114
13.00	0.247536	0.521210
15.00	0.220610	0.593258

U=15.085m/s　　Q=13.545mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.053734	0.067214
-1.00	-0.018559	0.060746
0.00	0.001710	0.059415
1.00	0.023486	0.066135
3.00	0.060670	0.097130
5.00	0.126070	0.155487
7.00	0.219221	0.240719
9.00	0.273034	0.332066
11.00	0.269559	0.428473
13.00	0.249310	0.515203
15.00	0.214235	0.579813

下流側模型

付表5　静的空気力数値データ〔模型C〕

7.5m/s
U=7.42m/s　　Q=3.432mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.001769	0.489912
-1.00	-0.002401	0.482135
0.00	-0.000426	0.481381
1.00	-0.000200	0.484329
3.00	-0.000424	0.477161
5.00	-0.001266	0.472656
7.00	0.004763	0.570778
9.00	0.003662	0.568435
11.00	0.003481	0.577370
13.00	0.005669	0.581421
15.00	0.006073	0.590189

15m/s
U=14.83m/s　　Q=13.702mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.005453	1.928640
-1.00	-0.007722	1.927400
0.00	-0.006487	1.950680
1.00	-0.005983	1.926180
3.00	-0.005273	1.884370
5.00	-0.001709	1.817140
7.00	0.017171	2.159800
9.00	0.018870	2.190380
11.00	0.020688	2.177730
13.00	0.022039	2.199080
15.00	0.024506	2.193480

U=7.42m/s　　Q=3.432mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.002864	0.793046
-1.00	-0.003886	0.780457
0.00	-0.000690	0.779235
1.00	-0.000323	0.784008
3.00	-0.000687	0.772405
5.00	-0.002050	0.765113
7.00	0.007710	0.923947
9.00	0.005928	0.920155
11.00	0.005635	0.934619
13.00	0.009176	0.941177
15.00	0.009831	0.955370

U=14.83m/s　　Q=13.702mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.002211	0.781977
-1.00	-0.003131	0.781474
0.00	-0.002630	0.790915
1.00	-0.002426	0.780981
3.00	-0.002138	0.764030
5.00	-0.000693	0.736768
7.00	0.006962	0.875705
9.00	0.007651	0.888101
11.00	0.008388	0.882971
13.00	0.008936	0.891628
15.00	0.009936	0.889361

上流側模型

付表 6　静的空気力数値データ〔模型C〕

7.5m/s
U=7.78m/s　　Q=3.488mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.055792	0.048261
-1.00	-0.016774	0.050796
0.00	-0.002132	0.049213
1.00	0.018477	0.053071
3.00	0.050537	0.059900
5.00	0.080318	0.091968
7.00	0.159862	0.152198
9.00	0.108716	0.383666
11.00	0.132073	0.402707
13.00	0.146617	0.419968
15.00	0.164787	0.434299

15m/s
U=15.42m/s　　Q=13.849mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	L(kg)	D(kg)
-3.00	-0.191476	0.217177
-1.00	-0.070073	0.207116
0.00	-0.016944	0.213215
1.00	0.033880	0.221535
3.00	0.150419	0.254910
5.00	0.261769	0.415455
7.00	0.528310	0.629268
9.00	0.423415	1.443970
11.00	0.467947	1.547410
13.00	0.553672	1.600520
15.00	0.616820	1.656610

U=7.78m/s　　Q=3.488mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.088864	0.076868
-1.00	-0.026717	0.080906
0.00	-0.003396	0.078384
1.00	0.029429	0.084530
3.00	0.080494	0.095407
5.00	0.127927	0.146483
7.00	0.254622	0.242415
9.00	0.173159	0.611089
11.00	0.210361	0.641417
13.00	0.233526	0.668910
15.00	0.262467	0.691736

U=15.42m/s　　Q=13.849mmAq
AL=0.18m^2　　AD=0.18m^2

DEG(°)	CL	CD
-3.00	-0.076811	0.087121
-1.00	-0.028110	0.083085
0.00	-0.006797	0.085532
1.00	0.013591	0.088869
3.00	0.060341	0.102258
5.00	0.105009	0.166661
7.00	0.211933	0.252432
9.00	0.169854	0.579251
11.00	0.187718	0.620748
13.00	0.222107	0.642051
15.00	0.247439	0.664551

下 流 側 模 型

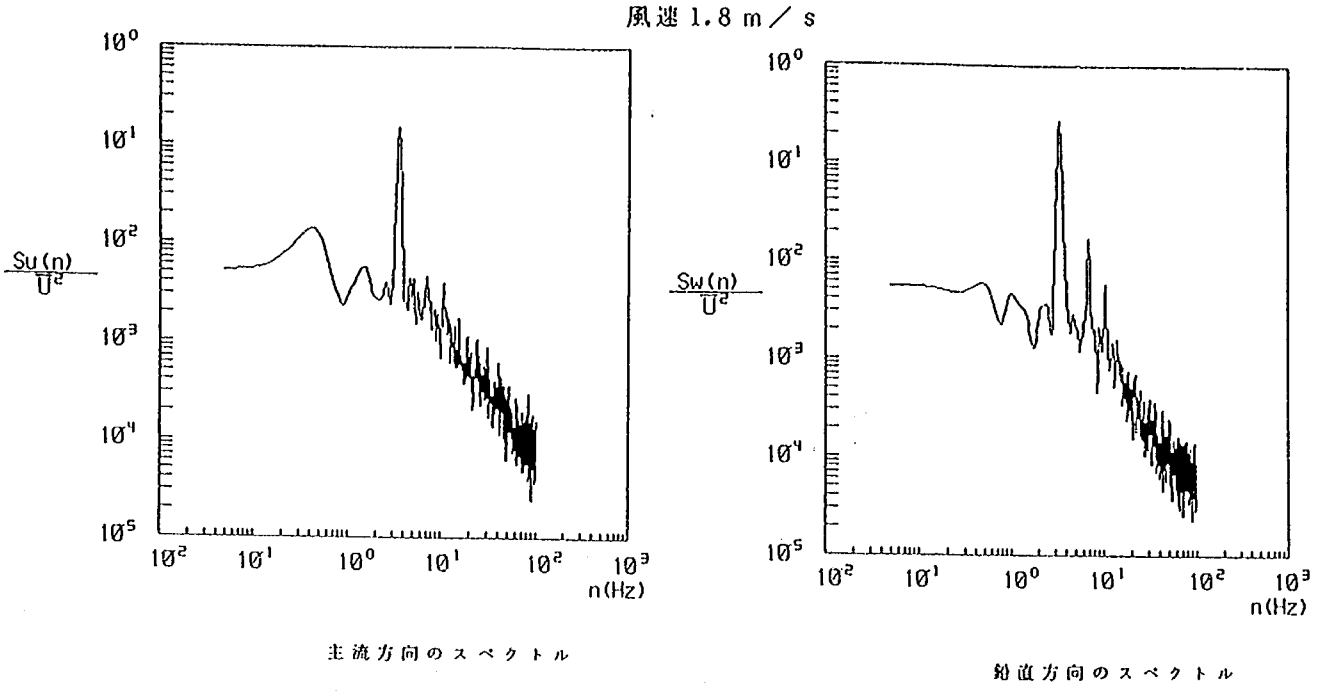
付属資料（２）

後流のパワースペクトル

（3.6.2　空力的制振対策（その１））

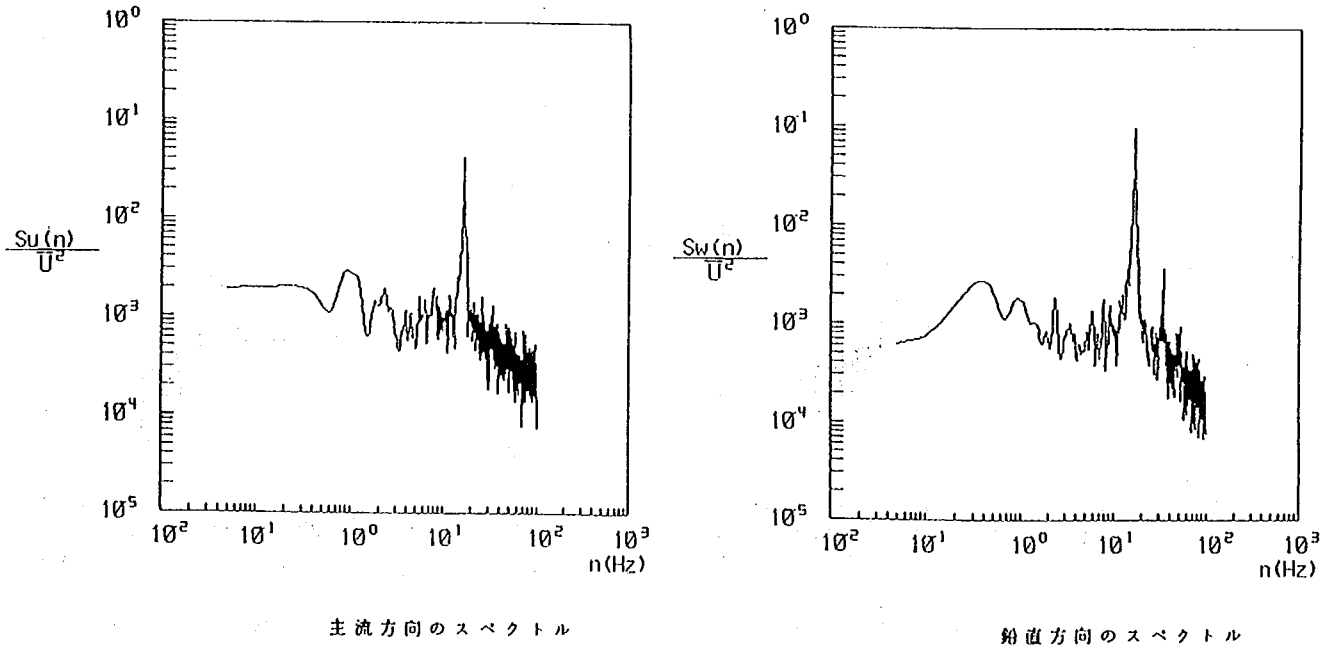
測定点Ｐ１

風速 1.8 m／s



主流方向のスペクトル　　鉛直方向のスペクトル

風速　9 m／s

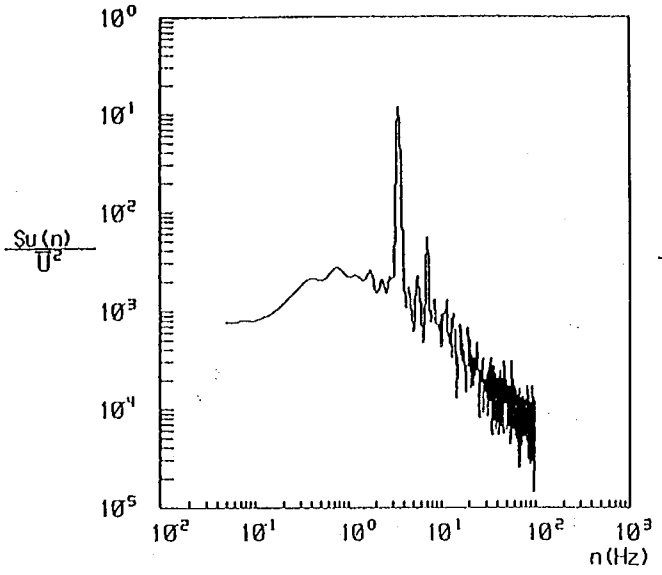


主流方向のスペクトル　　鉛直方向のスペクトル

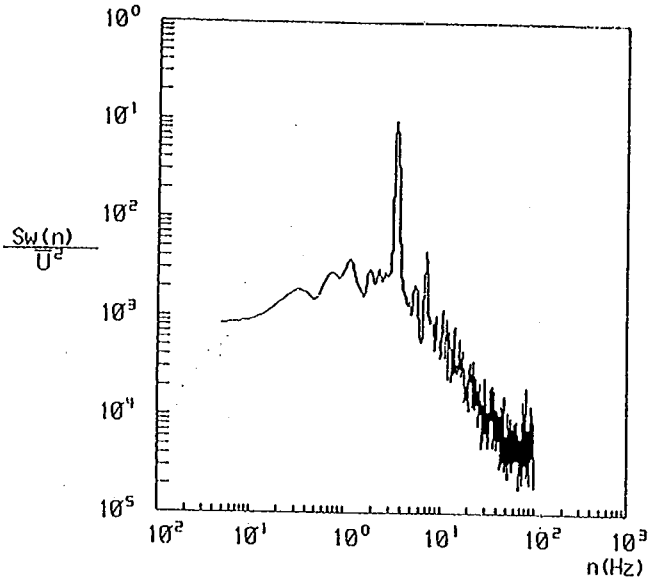
付図１　後流のパワースペクトル［模型Ａ］

測定点Ｐ２

風速 1･8 m／s

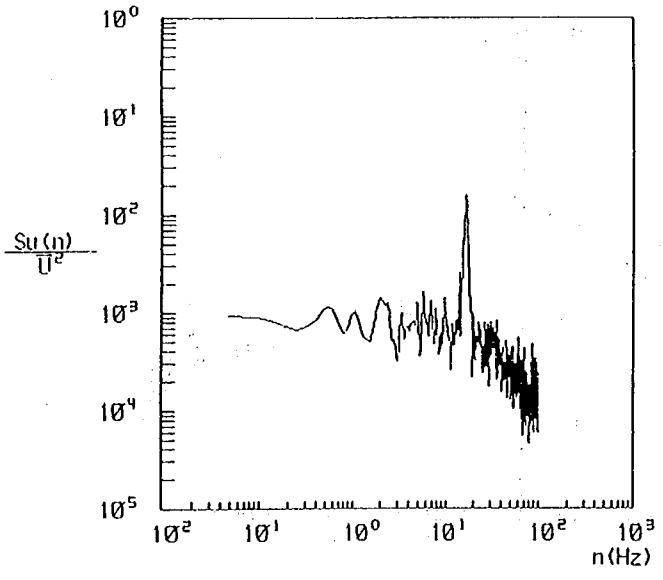


主流方向のスペクトル

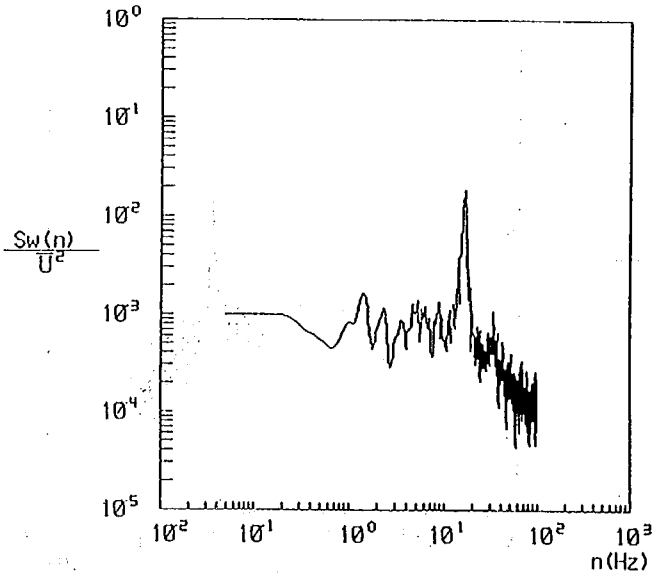


鉛直方向のスペクトル

風速　9 m／s



主流方向のスペクトル

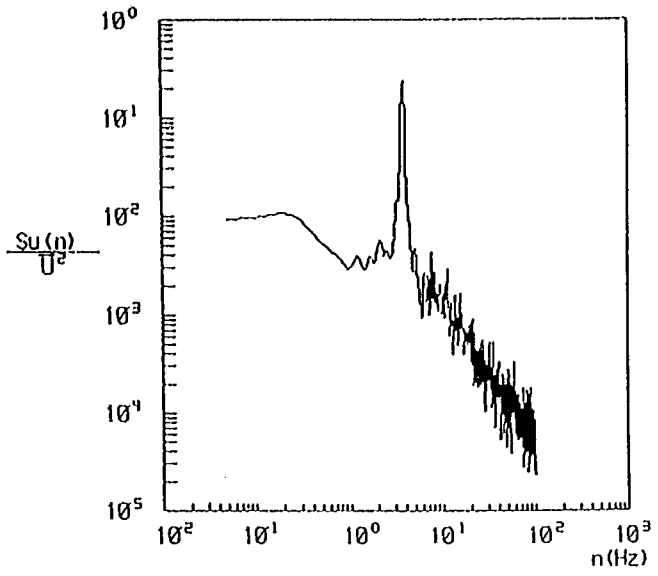


鉛直方向のスペクトル

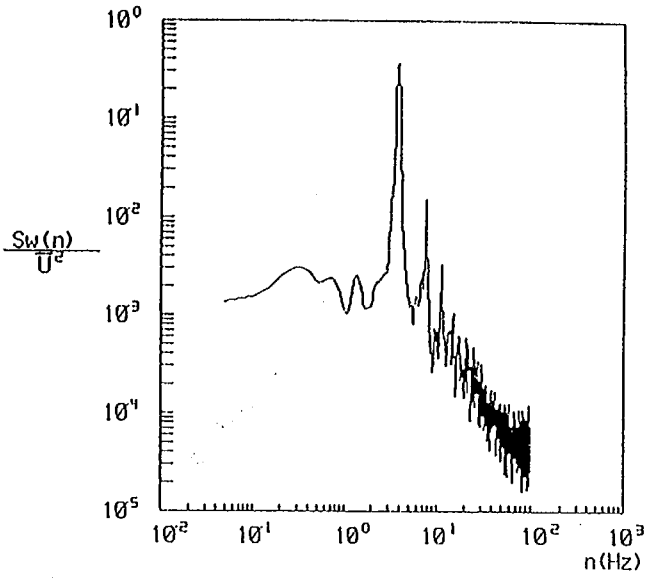
付図２　後流のパワースペクトル［模型Ａ］

測定点 P 1

風速 1.8 m／s

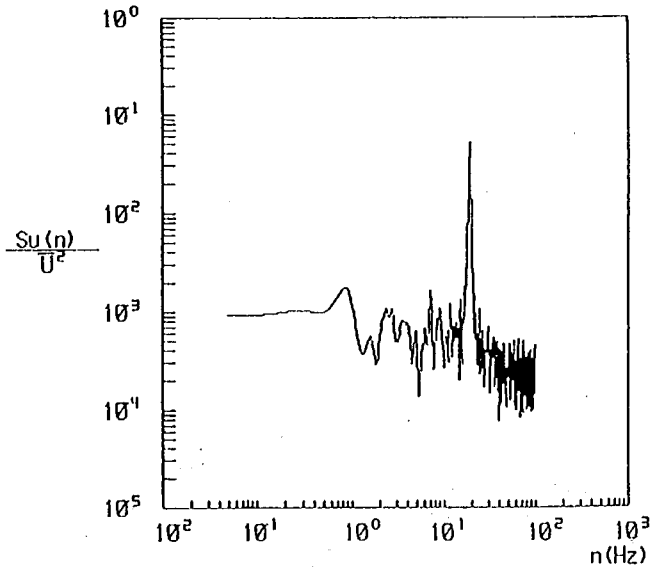


主流方向のスペクトル

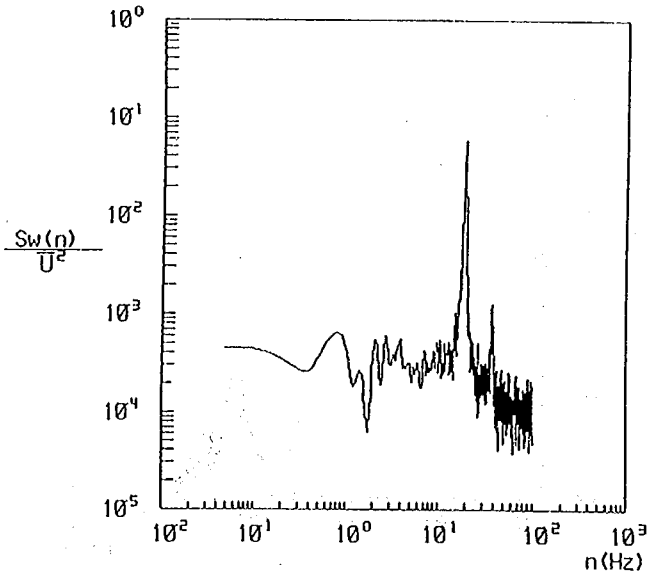


鉛直方向のスペクトル

風速 9 m／s



主流方向のスペクトル

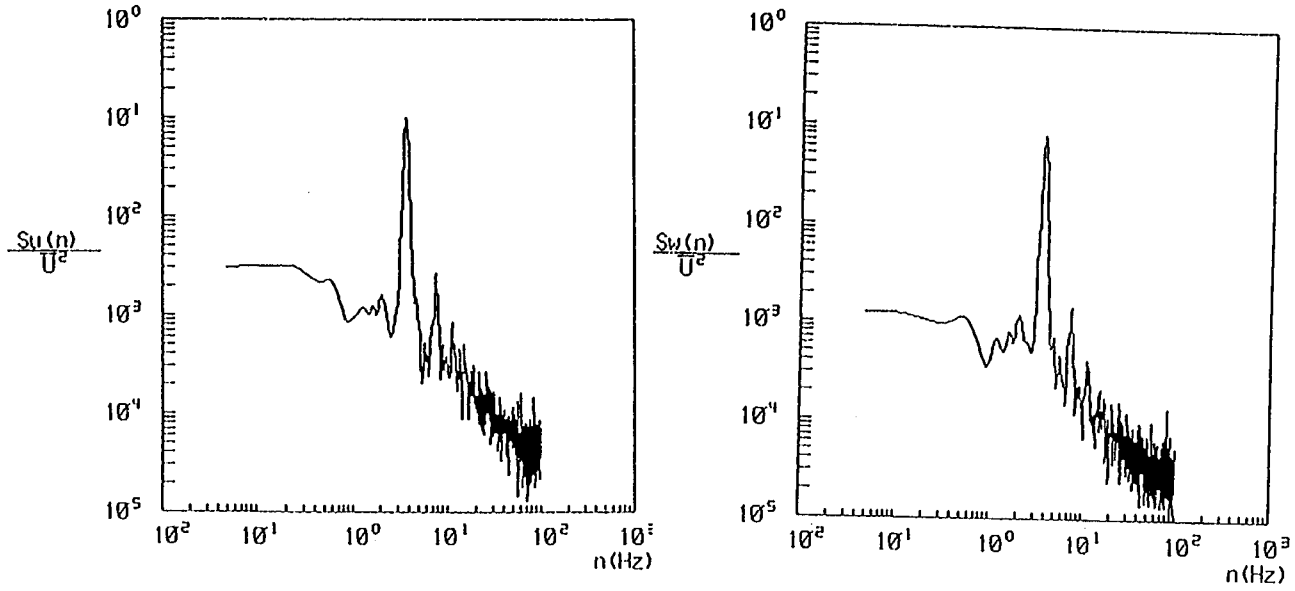


鉛直方向のスペクトル

付図3　後流のパワースペクトル［模型B］

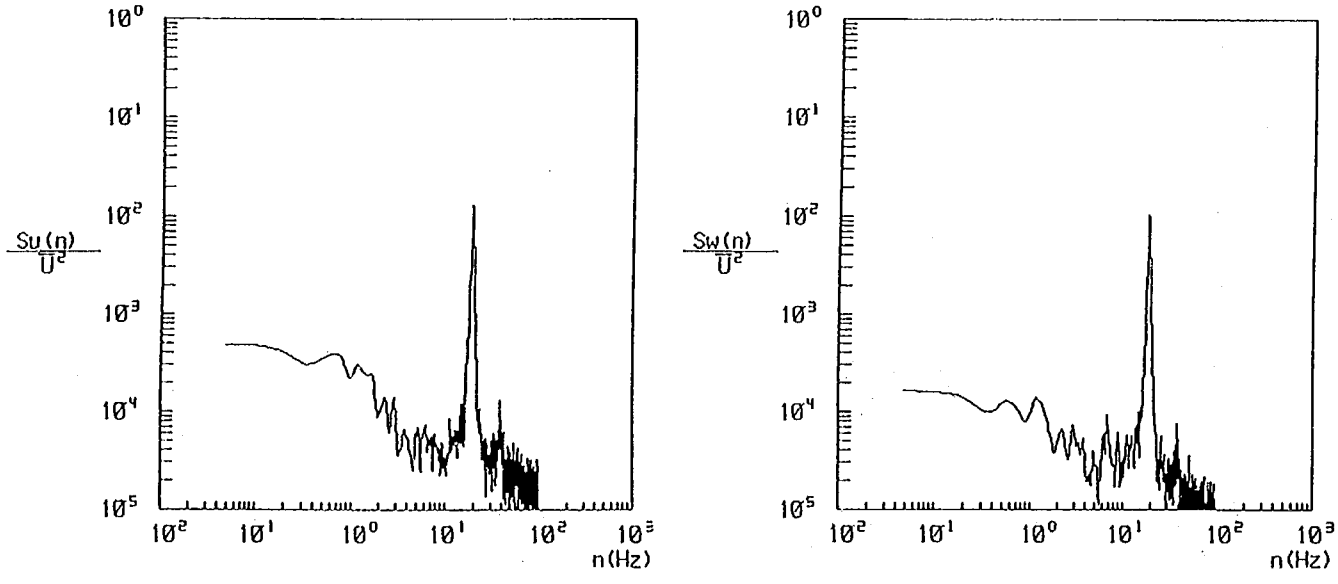
測定点Ｐ２

風速 1.8 m／s



主流方向のスペクトル　　鉛直方向のスペクトル

風速　9 m／s

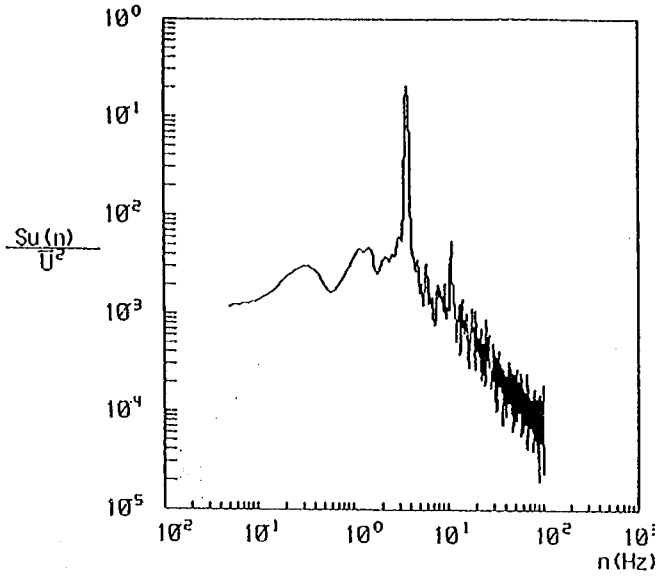


主流方向のスペクトル　　鉛直方向のスペクトル

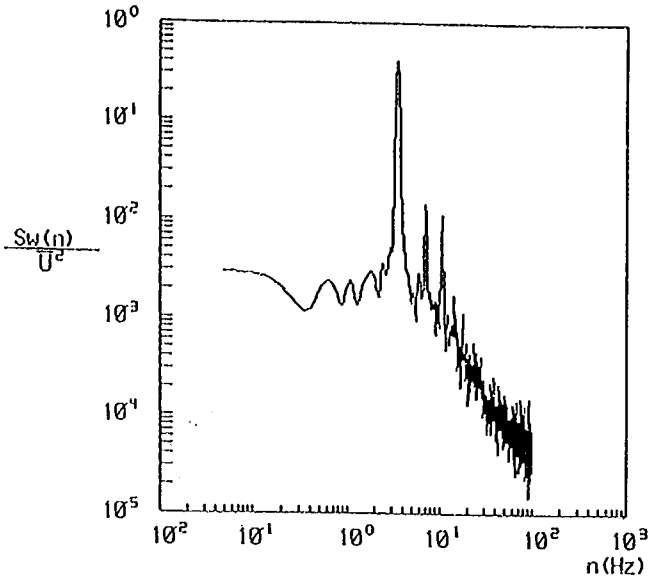
付図４　後流のパワースペクトル［模型Ｂ］

測定点Ｐ１

風速 1.8 m／s

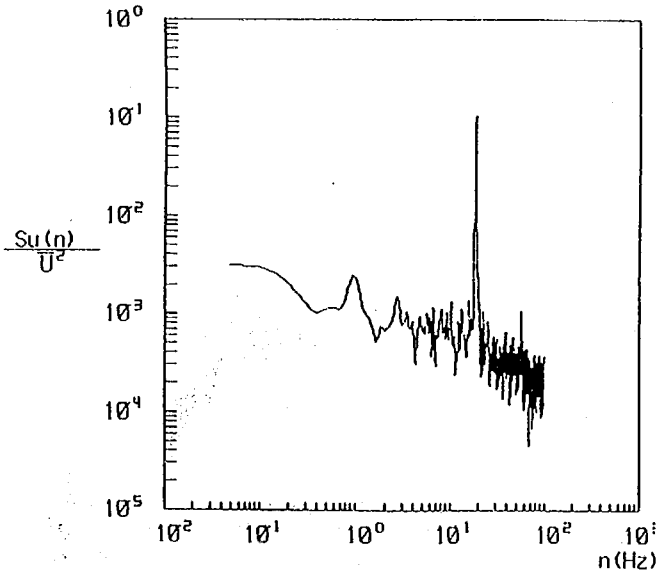


主流方向のスペクトル

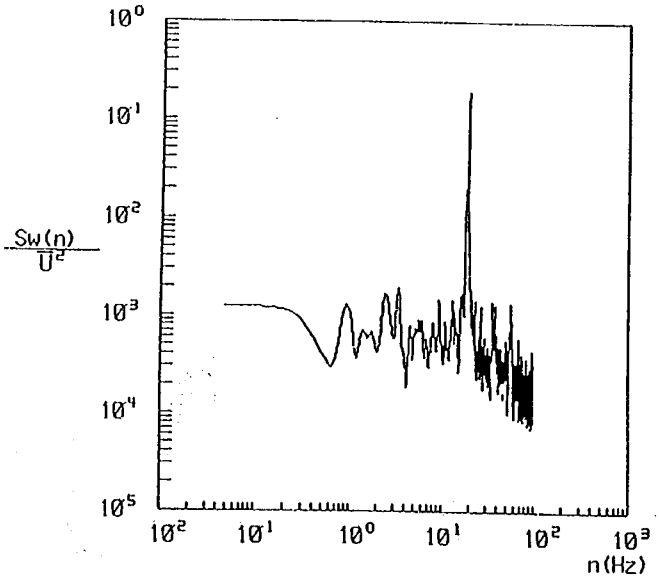


鉛直方向のスペクトル

風速　9 m／s



主流方向のスペクトル

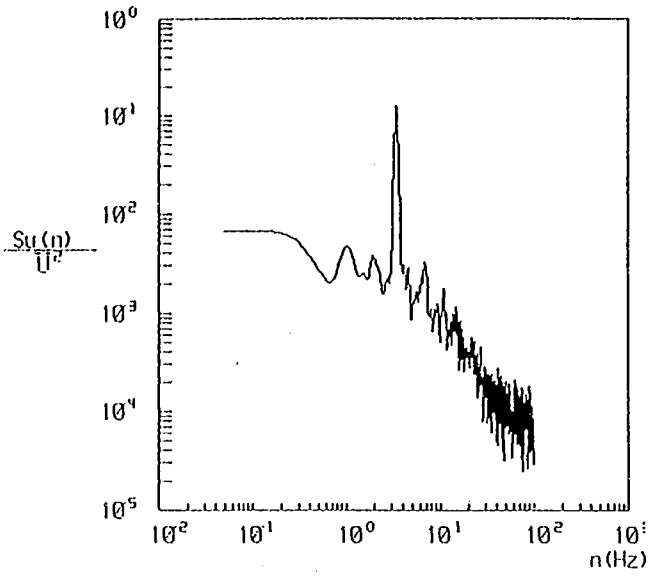


鉛直方向のスペクトル

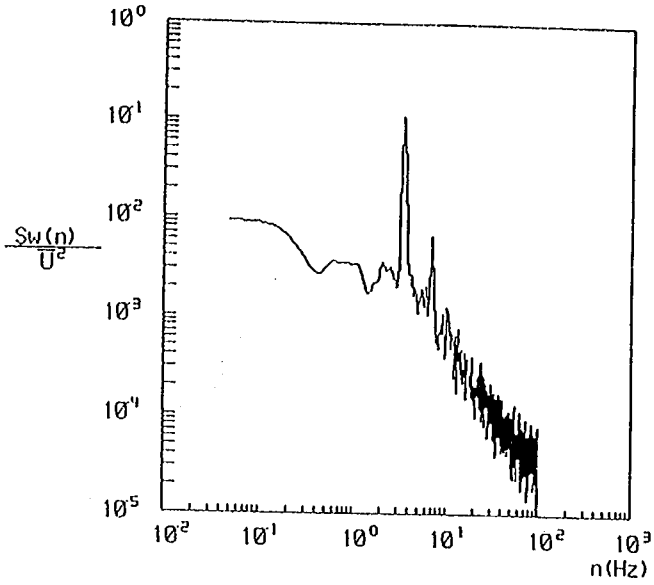
付図５　後流のパワースペクトル［模型Ｃ］

測定点 P 2

風速 1.8 m／s

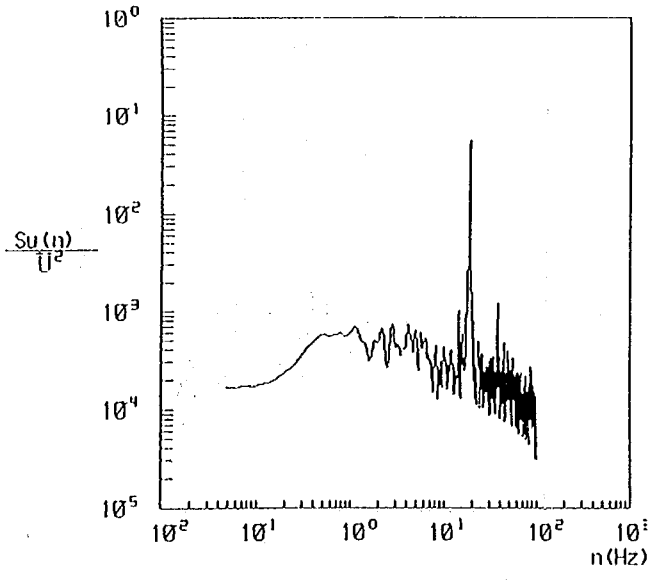


主流方向のスペクトル

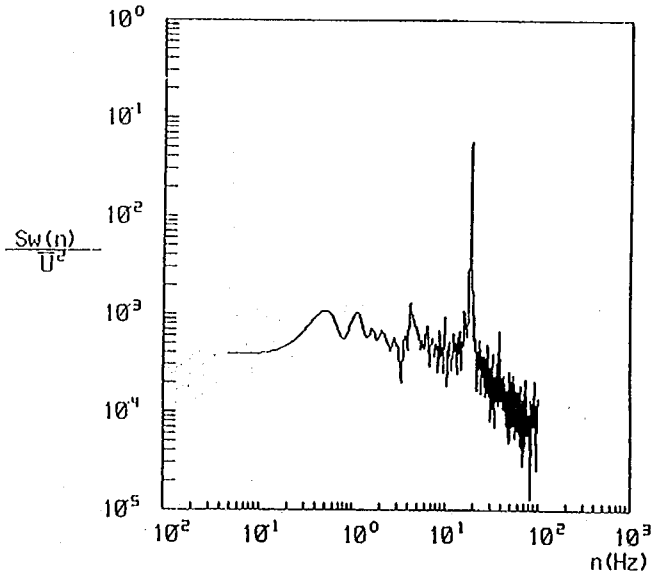


鉛直方向のスペクトル

風速 9 m／s



主流方向のスペクトル



鉛直方向のスペクトル

付図6　後流のパワースペクトル［模型C］

3.6.3 空気力学的制振対策（その２）

(1) 研究の目的

ウェークギャロッピングの発生に関与するパラメータのうち，ケーブル相互の間隔や振動の自由度については，応答特性や発生機構に及ぼす効果は 3.2で実施された。ここでは，レインバイブレーションに対して制振効果が認められたストライプ方式の空気力学的対策をウェークギャロッピングに適用し，その制振効果を確認することを目的とする。

ストライプ方式の空気力学的対策とは，ケーブルの表面にU字型の溝をストライプ状につけ，表面粗度効果によりみかけのレイノルズ数を増加させ，後流を縮退させることで制振しようとするものである。

(2) 研究の方法

試験に使用する風洞施設としては，住友重機械工業株式会社平塚研究所所属の構造物用回流風洞を用いた。主たる実験としては，振動特性把握のための二次元ばね支持試験を実施した。これら試験におけるパラメータの設置は3.2.3の振動応答特性とその発生機構の風洞試験結果を参照して決定した。

1)二次元ばね支持試験

①使用風洞　幅 1.5m，高さ２m，長さ１５m

風速範囲　　０～２５m／s

②基本実験条件

ケーブル径	D＝50mm, 100mm
模型長さ	L＝1080mm
振動数	f ＝1.16～3.62Hz
風速範囲	V＝０～２０m／S
無次元風速範囲	Ur＝０～３５０
レイノルズ数範囲	Re＝０～1.3 ×１０^5
スクルートン数	Sc＝２～３０

スクルートン数の設定はダンピングの調整にて実施する

③実験パラメータ

使用気流	一様流
水平間隔	SH＝３D，3.5D，４D
鉛直間隔	SV＝０
自由度	TEST1:上流　固定
	下流　θ＝０°
	TEST2:上流　自由

下流　$\theta = 0°$

④測定

光学式変位計により上下流の模型変位を計測

(3) 実験結果と考察

ケーブル模型はアクリル製の中空パイプを使用し，端部には気流の二次元性を保つために端板を配置した。空力対策模型には図-3.6.3.1に示すような表面加工を施してある。一方，無対策のケーブル模型をここではノーマルケーブルと称する。表-3.6.3.1～表-3.6.3.3に実験条件を示す。また，写真-3.6.3.1及び写真-3.6.3.2に実験の様子と空気力学的制振対策模型を示す。

実験は3.3の（その２）の結果を参考に，３Ｄと４Ｄを中心にケーブル間距離を変化させ，下流側のケーブルの応答挙動を観測した。この時，上流側ケーブルの自由度は拘束した場合と自由度をもたせた場合とを比較した。

空力対策の効果をSh ＝４の場合について図-3.6.3.3及び図-3.6.3.4に示す。垂直間隔はゼロである。無次元風速Ur ＝５０付近よりノーマルケーブルではウェークギャロッピングの発生が認められるが，ストライプ方式のケーブルでは振動の発生は認められない。しかしながら，ケーブル間距離Sh ＝３の場合にはストライプケーブルの応答は高風速域でハード型のフラッタが発生することを示している。

以上の観測結果は上流側のケーブルの自由度を拘束した場合である。自由度を許した場合には，結果は図-3.6.3.6に示すようになり，ウェークギャロッピング振動の発生は抑制され，不安定振動の発生はまったく認められない。

これらの実験結果は，いずれの場合も現象の発生が設定条件に極めて敏感であることを示している。従って，今回の実験成果だけで結論することには無理があり，今後さまざまな角度から実権成果を積み重ねていくことが必要であると考える。

(4) 今後の課題

応答観測結果から得られた新しい知見を含め，振動の自由度が与える影響評価，振動発生メカニズムの解明の為に，自由度と設定角度を変化させた二次元バネ支持試験，空気力測定試験，圧力測定試験，流れの可視化試験及び流速分布測定試験等々を実施する予定である。

表-3.6.3.1　実験条件表　Sh変化（ケーブル径　D＝0．05m）

ケーブルタイプ	ス　ト　ラ　イ　プ		
Sh，Sv	3D，0	3.5D，0	4D，0
重　量　W（Kgf/m）	5.00	4.99	4.94
振動数　f　（Hz）	1.16	1.16	1.17
対数減衰率　δ	0.00904	0.00974	0.00945
ｽｸﾙｰﾄﾝ数　Sc	28.300	30.107	28.891

表-3.6.3.2　実験条件表　Sh変化（ケーブル径　D＝0．01m）

ケーブルタイプ	ス　ト　ラ　イ　プ		
Sh，Sv	3D，0	3.5D，0	4D，0
重　量　W（Kgf/m）	5.02	5.00	4.94
振動数　f　（Hz）	1.17	1.16	1.17
対数減衰率　δ	0.00380	0.00904	0.00945
ｽｸﾙｰﾄﾝ数　Sc	2.979	6.999	7.400

表-3.6.3.3　実験条件表　上下流柱1自由度（ケーブル径　D＝0．10m）

ケーブルタイプ	ストライプ		ストライプ	
Sh，Sv	3D，0	3D，0	3D，0	3D，0
重　量　W（Kgf/m）	4.10	5.04	4.10	5.04
振動数　f　（Hz）	1.17	1.16	1.17	1.16
対数減衰率　δ	0.03933	0.03677	0.00410	0.00330
ｽｸﾙｰﾄﾝ数　Sc	24.931	28.653	2.599	2.571

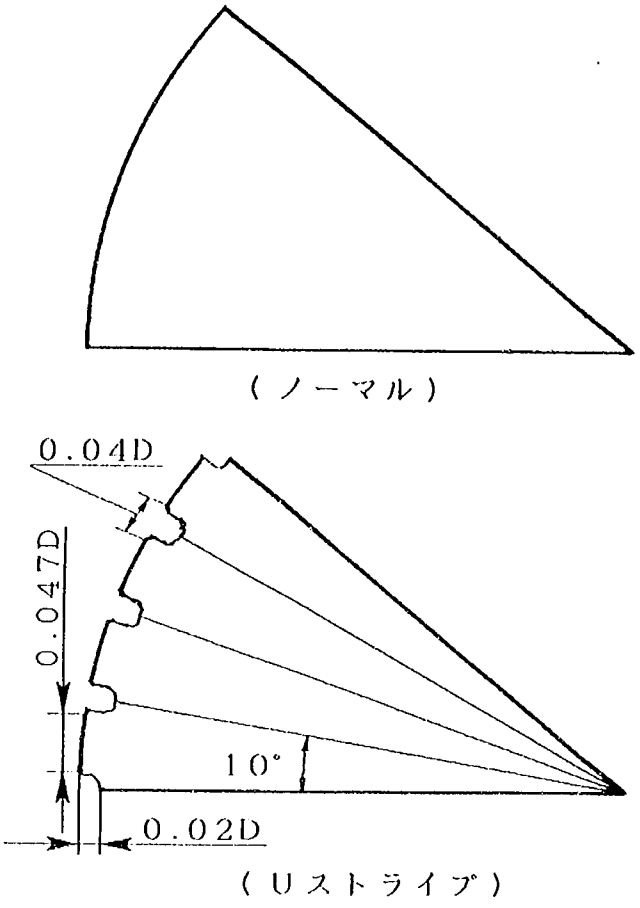


図-3.6.3.1　実験模型

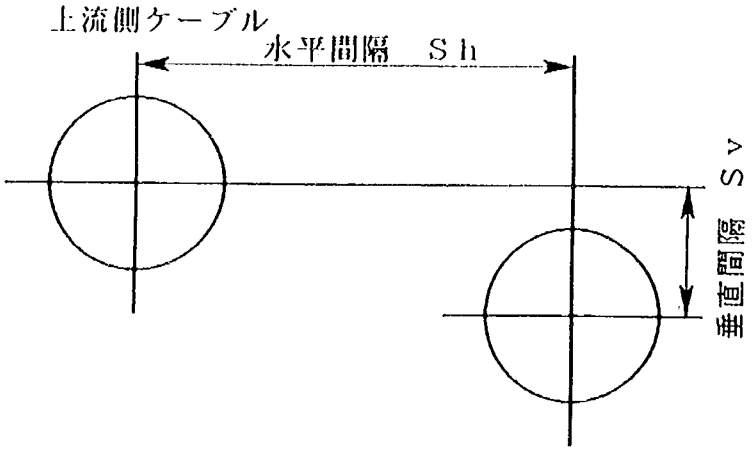


図-3.6.3.2　ケーブル模型の配置

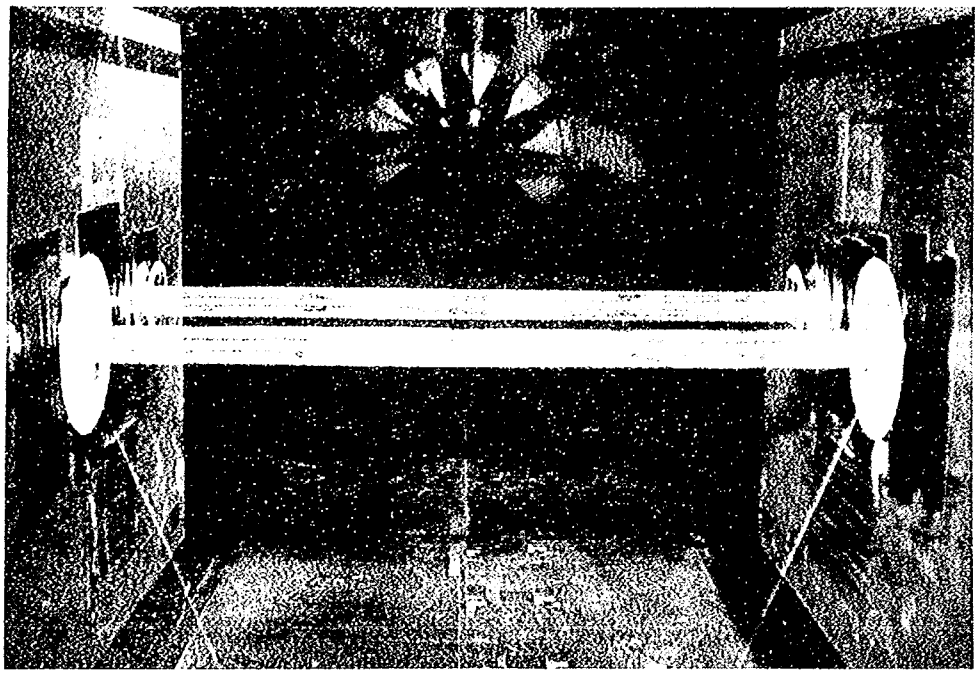


写真3.6.3.1　上流固定バネ支持試験

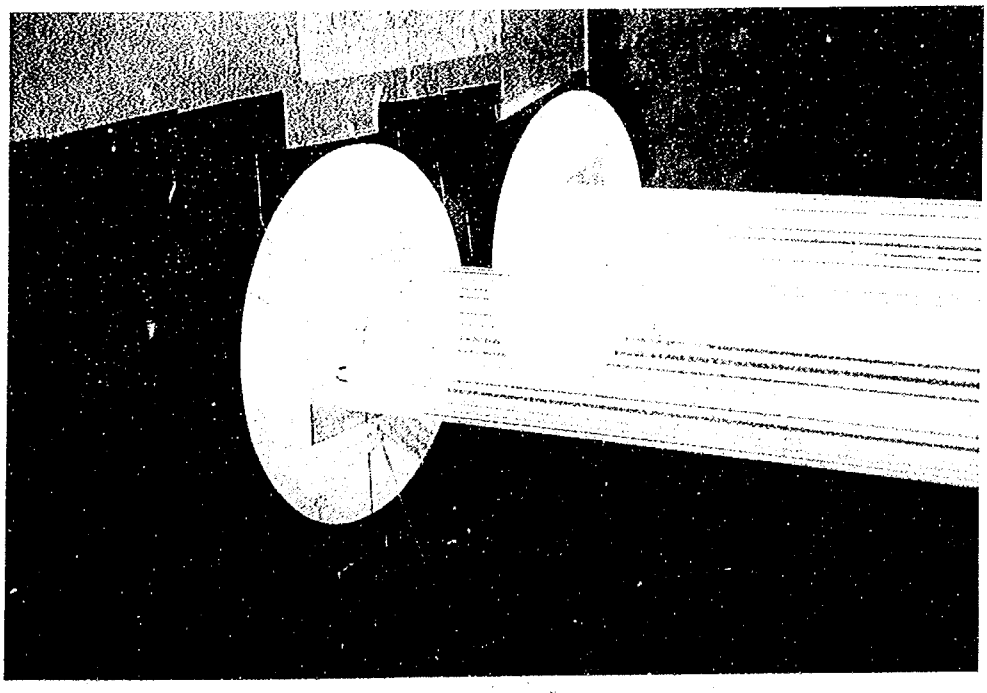


写真3.6.3.2　Uストライプ模型

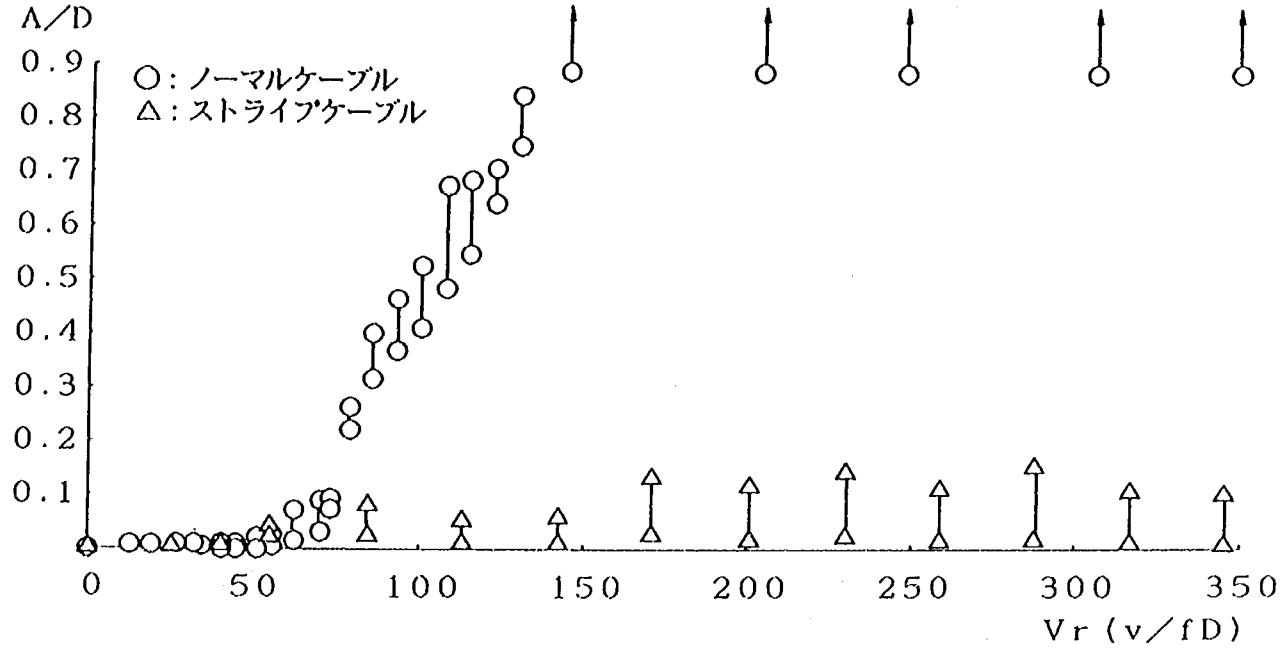


図-3.6.3.3　断面変化と振動応答（φ５０　Sh＝４，SV＝０）

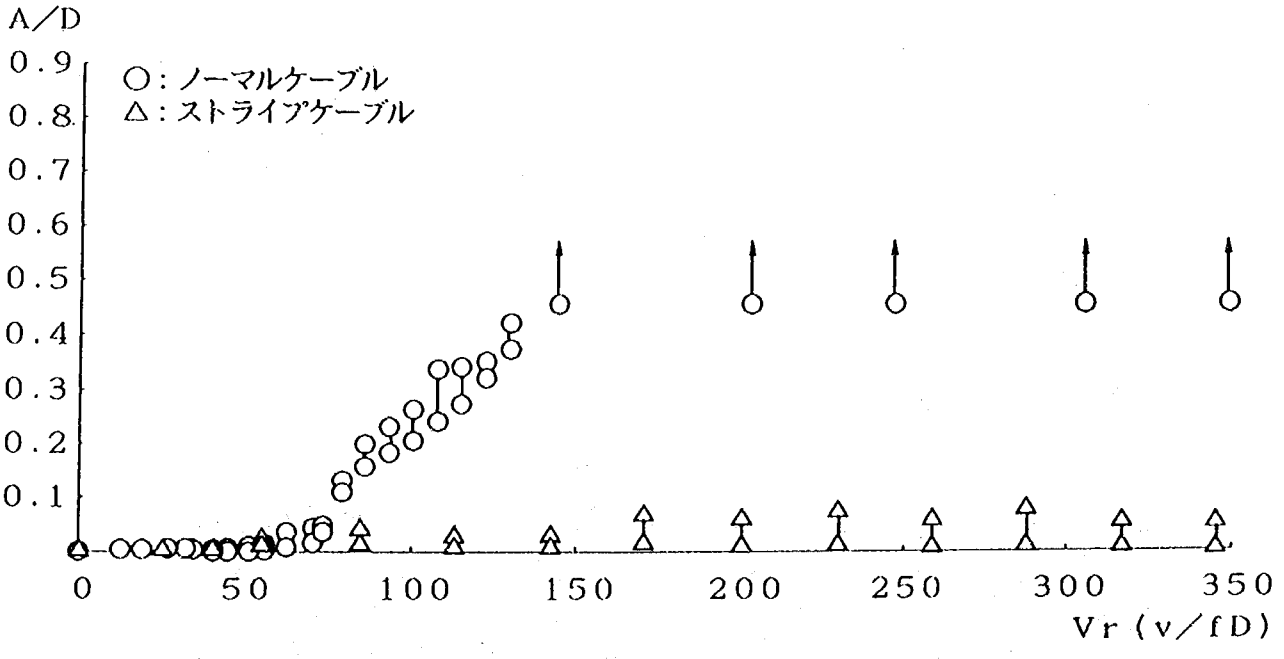


図-3.6.3.4　断面変化と振動応答（φ１００　Sh＝４，SV＝０）

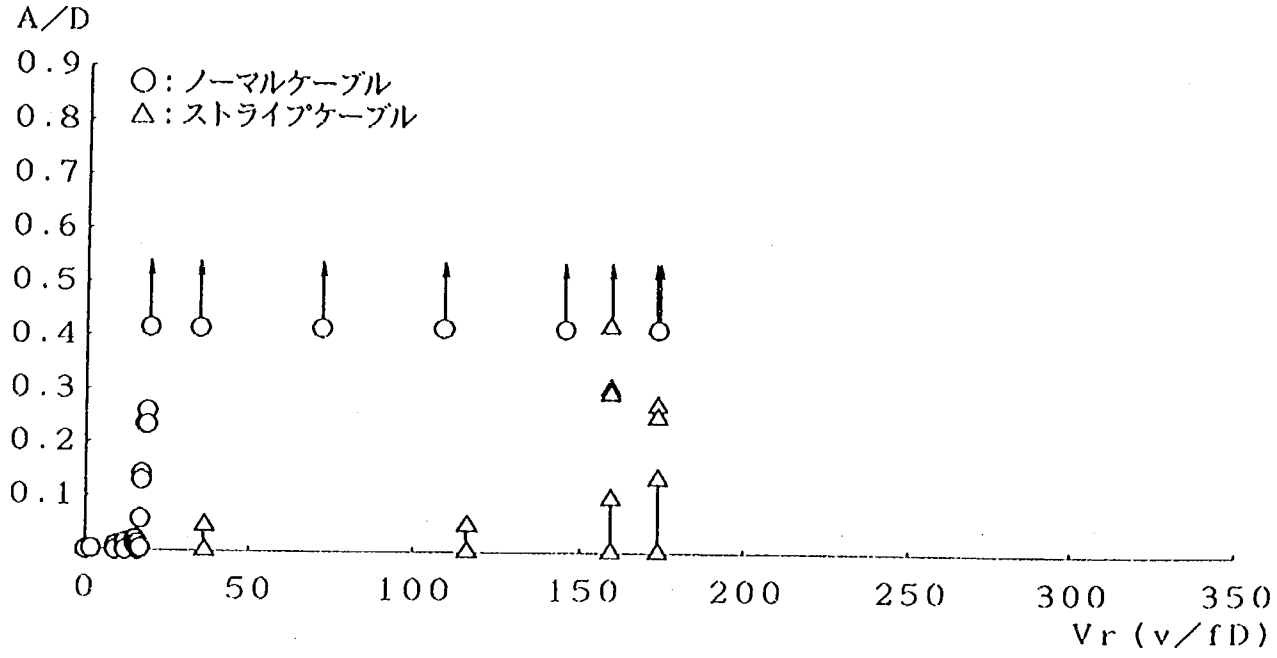


図-3.6.3.5　断面変化と振動応答（φ１００　Sh＝３，SV＝０）

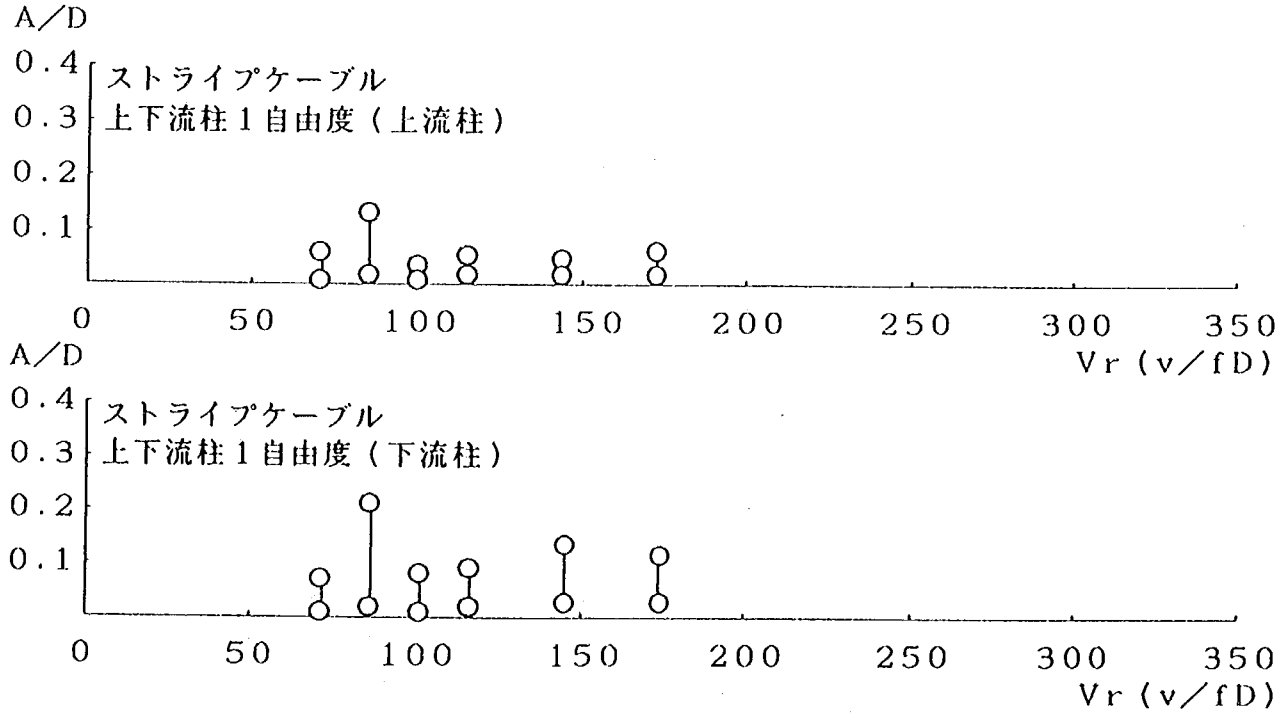


図-3.6.3.6　自由度の違いによる振動応答（φ１００　Sh＝３，SV＝０）

3.7 数値解析による制振効果の評価に関する研究

(1) 研究の目的

ウェークギャロッピングに対する機械的制振装置には，通常，ケーブルの相互連結，スペーサー連結，せん断ダンパー，高減衰ゴム等が用いられている。これらの制振装置のうち，後者のせん断ダンパーおよび高減衰ゴムについては取り付け位置と付加減衰の関係に関する幾つかの研究成果が報告されているが，前者の相互連結およびスペーサー連結装置に対しては，取付け位置と制振効果の関係について系統的に整理されたものは少ない。本研究では，スペーサー連結およびスペーサーと相互連結装置の組合せによる制振機構について，取付け位置とその制振効果の関係をパラメトリックに解析整理することにより，同制振装置を適用する場合の基礎資料を得ることを目的とする。なお，スペーサー連結については，別途 3.4で減衰機構に着目した詳細な研究がなされていることから，ここではスペーサーと相互連結材の組合せに主眼を置き，その前段階の概略的な特性について解析するものとする。

本年度の研究は，スペーサーと相互連結材の組合せによる制振機構についての検討の前段階としてのスペーサー連結装置の制振機構について解析整理を行った。

(2) 研究内容

スペーサー連結の取付け位置とその制振効果の関係は，複素固有値解析による各次モードの対数減衰率および正弦波外力作用時の過渡応答により評価する。解析モデルは図-3.7.1に示すように両端固定の並列ケーブルとし，制振対策前と減衰機構なしスペーサ，減衰機構ありスペーサ（減衰係数 2.50tfs/m）の取付け位置を変化させた効果を検討する。

なお，ケーブルおよび減衰機構なしスペーサの減衰係数については，1次モードの対数減衰率が0.01となるように設定する。また，過渡応答の算出は，風下側ケーブルが風上側ケーブルの固有振動に基づく周期外力を受けると仮定し，風下側ケーブルの中央に与えるものとする（図-3.7.2参照）。

また，片側のケーブル張力を変動させたケースについても同様の解析を行う。

基本ケースの構造諸元をまとめたものを表-3.7.1に示す。表-3.7.2(1)～(3)に解析ケースを示す。

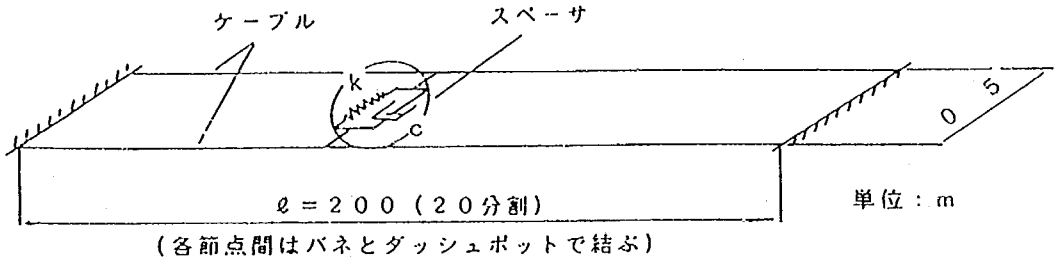


図-3.7.1 スペーサ連結の解析モデル

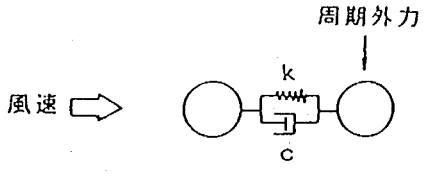


図-3.7.2 外力モデル

表-3.7.1 構造諸元

項　　目	諸　元　値
ケーブル長 (m)	２００．０
単位重量(tf/m)	０．１１０
導入張力 (tf)	５００．０
断　面　積 (m^2)	０．０１４
減衰係数 (tfs/m)	２．５０
バネ定数(tf/m)	１．００
張力変動 (%)	１０．００

表-3.7.2(1) 解析ケース（基本）

ケース	制振装置 条件	取付位置 0.1ℓ	0.2ℓ	0.3ℓ	0.4ℓ	0.5ℓ
1	無対策					
2	減衰機構なしスペーサ		○			
3						○
4	減衰機構ありスペーサ		○			
5						○
6	無対策					
7	減衰機構なしスペーサ		○			
8						○
9	減衰機構ありスペーサ		○			
10						○

ℓ：ケーブル長，ケース6～10：片側のケーブル張力を変動

表-3.7.2(2) 解析ケース（片側のケーブル張力を変動させたケース）

ケース	制振装置 条件	取付位置 0.1ℓ	0.2ℓ	0.3ℓ	0.4ℓ	0.5ℓ
6	無対策					
7	減衰機構なしスペーサ		○			
8						○
9	減衰機構ありスペーサ		○			
10						○

ℓ：ケーブル長，ケース6～10：片側のケーブル張力を変動
スペーサーの減衰係数2.5tfS/m，片側のケーブル張力の変動は2%，10%，20%の3ケースを考えた

表-3.7.2(3) 解析ケース（スペーサーの減衰係数を変化させたケース）

ケース	制振装置 条件	取付位置 0.1ℓ	0.2ℓ	0.3ℓ	0.4ℓ	0.5ℓ
1	無対策					
4	減衰機構ありスペーサ		○			
5						○
6	無対策					
9	減衰機構ありスペーサ		○			
10						○

ℓ：ケーブル長，ケース6～10:片側のケーブル張力を変動
片側のケーブル張力の変動は10%で減衰係数は1.0，1.5，2.5tfS/mの3ケースを考えた

(3) 研究結果

基本ケースの複素固有値解析より得られた1次モードの対数減衰率を表-3.7.3に示す。

解析結果より以下の様なことが言える。

・両ケーブル同位相で振動する場合，両ケーブルの張力が同じであると，スペーサーの減衰の有無にかかわらず対数減衰率は設定した0.01となり，スペーサーの減衰機構については確認できない。

・両ケーブル逆位相で振動する場合には，スペーサーに減衰機構がついているときに対数減衰率が大きくなり減衰機構が作用していることが確認できた。

・片側のケーブル張力を変動させた場合でも，スペーサーに減衰機構がついていな場合には対数減衰率は上昇しない。両ケーブルが同位相で振動する場合には，0.2ℓの位置にスペーサーを設置したケースのほうが 0.5ℓの位置に設置したケースよりも対数減衰率は上昇した。両ケーブルが逆位相で振動する場合には，スペーサーの取付け位置による影響は逆の傾向を示す。

図-3.7.3に各ケースの両ケーブルが同位相で振動した場合の対数減衰率の変化を示す。

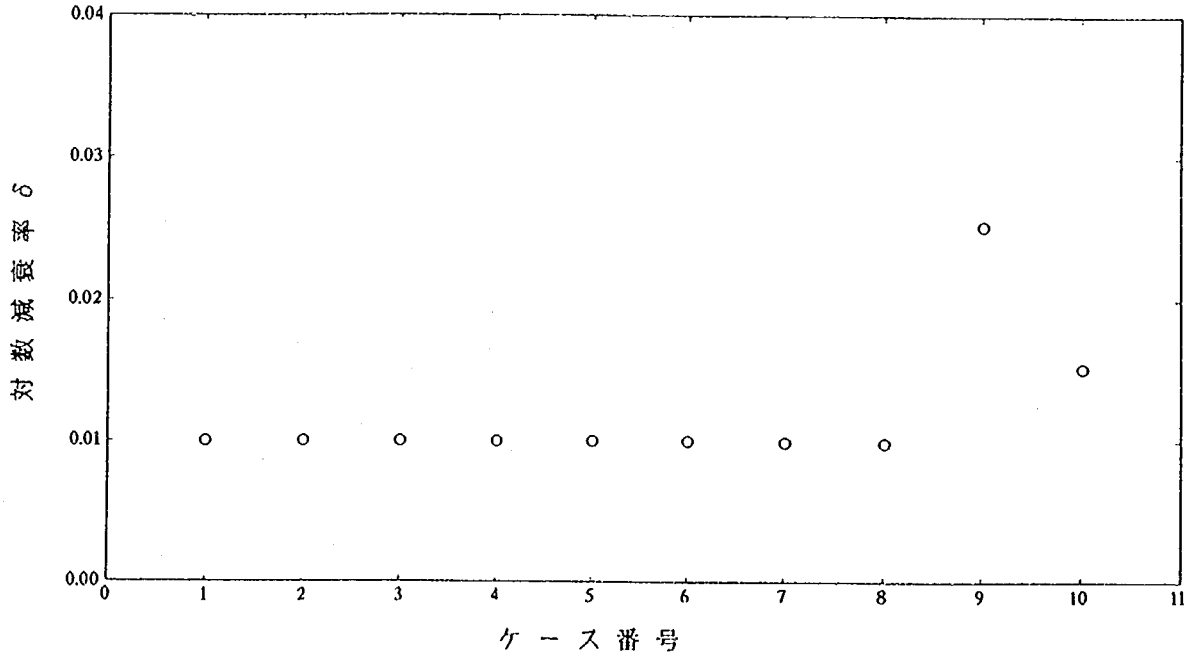


図-3.7.3 複素固有値解析より得られた対数減衰率δ
(両ケーブル同位相振動・スペーサーバネ定数 1.0tf/m)

表-3.7.3　複素固有値解析より得られた1次モードの振動数と対数減衰率
（スペーサーバネ定数　1.0tf/m）

	振動数（Hz）	対数減衰率δ	備　　考
CASE 1	0.52710	0.01000	加振側ケーブル
	0.52710	0.01000	応答側ケーブル
CASE 2	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.54053	0.00979	両ケーブル逆位相
CASE 3	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.56674	0.00936	両ケーブル逆位相
CASE 4	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.60103	0.75264	両ケーブル逆位相
CASE 5	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.55826	16.12999	両ケーブル逆位相
CASE 6	0.52710	0.01000	加振側ケーブル
	0.55283	0.00953	応答側ケーブル
CASE 7	0.53224	0.00991	加振側ケーブル
	0.56086	0.00942	応答側ケーブル
CASE 8	0.53635	0.00983	加振側ケーブル
	0.58243	0.00910	応答側ケーブル
CASE 9	0.53899	0.02522	両ケーブル同位相
	0.61455	0.74249	両ケーブル逆位相
CASE 10	0.53991	0.01513	両ケーブル同位相
	0.78696	5.32834	両ケーブル逆位相

表-3.7.4　複素固有値解析より得られた1次モードの振動数と対数減衰率
（スペーサーバネ定数　10.0tf/m）

	振動数（Hz）	対数減衰率δ	備　　考
CASE 1	0.52710	0.01000	加振側ケーブル
	0.52710	0.01000	応答側ケーブル
CASE 2	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.59882	0.01008	両ケーブル逆位相
CASE 3	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.76839	0.00940	両ケーブル逆位相
CASE 4	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.61159	0.28146	両ケーブル逆位相
CASE 5	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.83492	1.22698	両ケーブル逆位相
CASE 6	0.52710	0.01000	加振側ケーブル
	0.55283	0.00953	応答側ケーブル
CASE 7	0.53807	0.00983	両ケーブル同位相（加振側）
	0.61359	0.00976	両ケーブル逆位相（応答側）
CASE 8	0.53957	0.00977	両ケーブル同位相
	0.78075	0.00909	両ケーブル逆位相
CASE 9	0.53851	0.01615	両ケーブル同位相（加振側）
	0.62651	0.28219	両ケーブル逆位相（応答側）
CASE 10	0.53974	0.01204	両ケーブル同位相
	0.84774	1.25842	両ケーブル逆位相

表-3.7.5　複素固有値解析より得られた1次モードの振動数と対数減衰率
（スペーサーバネ定数　10000.0tf/m）

	振動数（Hz）	対数減衰率δ	備　　考
CASE 1	0.52710	0.01000	加振側ケーブル
	0.52710	0.01000	応答側ケーブル
CASE 2	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.65839	0.01249	両ケーブル逆位相(ｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ振動)
CASE 3	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	1.05044	0.01991	両ケーブル逆位相
CASE 4	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	0.65839	0.01249	両ケーブル逆位相(ｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ振動)
CASE 5	0.52710	0.01000	両ケーブル同位相
	1.05044	0.01991	両ケーブル逆位相
CASE 6	0.52710	0.01000	加振側ケーブル
	0.55283	0.00953	応答側ケーブル
CASE 7	0.53917	0.00981	両ケーブル同位相
	0.67489	0.01217	両ケーブル逆位相(ｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ振動)
CASE 8	0.53997	0.00977	両ケーブル同位相
	1.07481	0.01951	両ケーブル逆位相
CASE 9	0.53917	0.00981	両ケーブル同位相
	0.67489	0.01217	両ケーブル逆位相(ｻﾌﾞｽﾊﾟﾝ振動)
CASE 10	0.53997	0.00977	両ケーブル同位相
	1.07481	0.01951	両ケーブル逆位相

表-3.7.4, 表-3.7.5にスペーサーのバネ定数を変化させた場合の結果を示す。スペーサーのバネ定数を変化させた場合でも傾向的にはスペーサーのバネ定数が 1.0tf/mの結果と同じである。スペーサーのバネの変化は対数減衰率の大小に関係してくる。スペーサーのバネ定数を大きくした場合に対数減衰率が小さくなる。

図-3.7.4にケース９，ケース10のスペーサーのバネ定数の変化による対数減衰率の変化を示す。

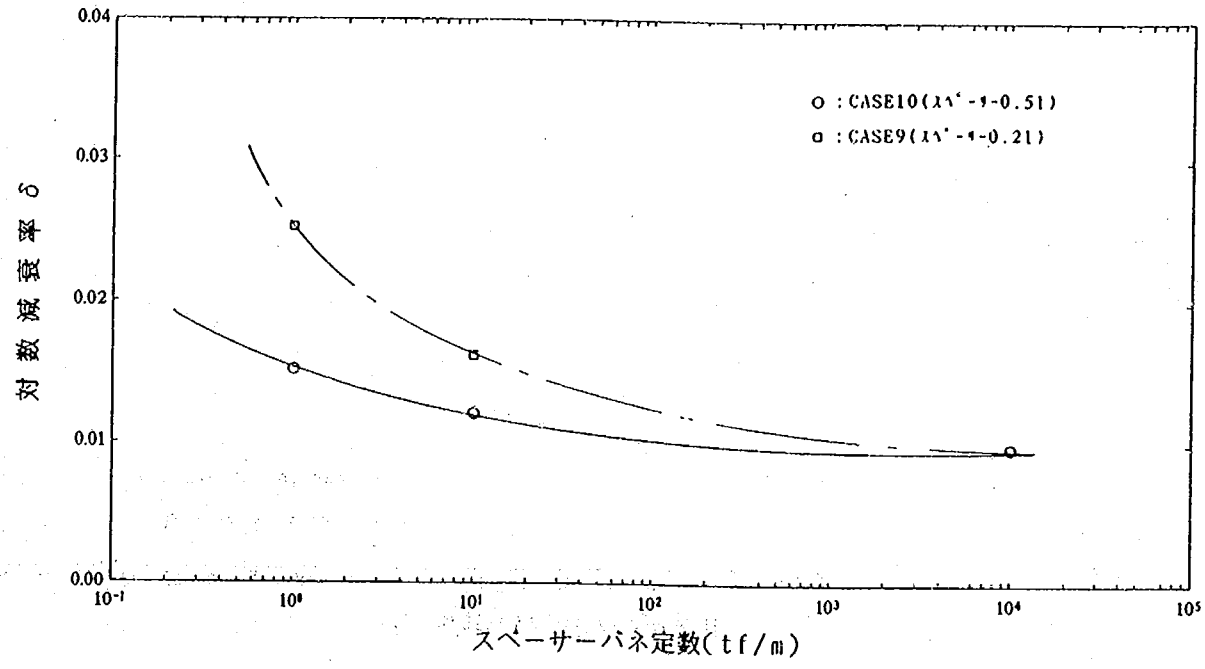


図-3.7.4　複素固有値解析より得られた対数減衰率δ
（スペーサーのバネ定数を変化させた場合・両ケーブル同位相振動）

表-3.7.6に片側ケーブルの張力を変動させたケースについての結果を示す。スペーサーに減衰機構がない場合には対数減衰率には変化がみられない。スペーサーに減衰機構がある場合には，張力変動が大きいほど両ケーブルが同位相で振動した場合に対数減衰率が大きくなる。スペーサーの取付け位置に関しては，両ケーブルが同位相で振動する場合には，0.2ℓ，両ケーブルが逆位相で振動する場合には 0.5ℓ の取付け位置が対数減衰率が大きくなるようである。

図-3.7.5にケース９，ケース10の片側ケーブルの張力変動による対数減衰率の変化を示す。

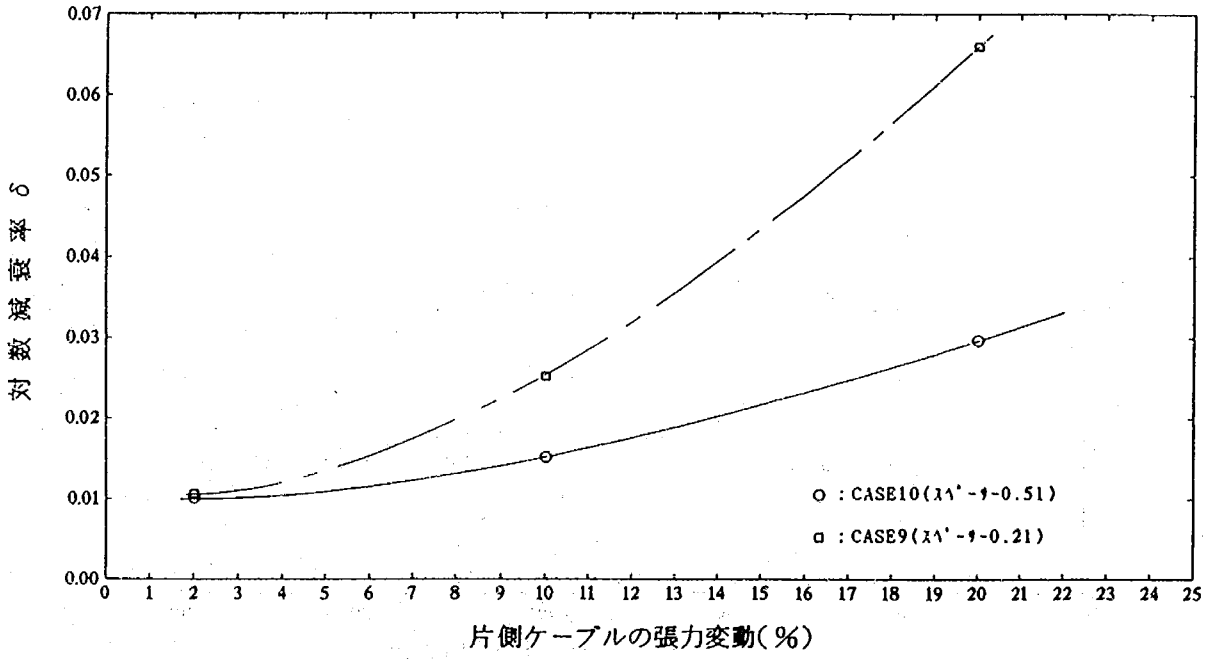


図-3.7.5　複素固有値解析より得られた対数減衰率δ
（片側ケーブルの張力を変動させた場合・両ケーブル同位相振動）

表-3.7.6(1)　片側ケーブルの張力を変動した場合の
複素固有値解析より得られた1次モードの対数減衰率
（スペーサーバネ定数　1.0tf/m，減衰係数　2.5tf・s/m）

	張力変動２%	張力変動10%	張力変動20%	備　　考
CASE 6	0.01000	0.01000	0.01000	
	0.00990	0.00953	0.00913	
CASE 7	0.00996	0.00991	0.00990	
	0.00973	0.00942	0.00912	
CASE 8	0.00995	0.00983	0.00976	
	0.00931	0.00910	0.00879	
CASE 9	0.01061	0.02522	0.06600	
	0.82831	0.74249	0.70255	
CASE 10	0.01018	0.01513	0.02969	
	12.61280	5.32834	5.44361	

表-3.7.6(2)　片側ケーブルの張力を変動した場合の
複素固有値解析より得られた1次モードの振動数
（スペーサーバネ定数　1.0tf/m，減衰係数　2.5tf・s/m）

	張力変動２%	張力変動10%	張力変動20%	備　　考
CASE 6	0.52710	0.52710	0.52710	
	0.53235	0.55283	0.57741	
CASE 7	0.52924	0.53224	0.53305	
	0.54358	0.56086	0.58440	
CASE 8	0.52956	0.53635	0.54045	
	0.56936	0.58243	0.60221	
CASE 9	0.52968	0.53899	0.54834	
	0.60363	0.61455	0.62945	
CASE 10	0.52972	0.53991	0.55205	
	0.69191	0.78696	0.72564	

表-3.7.7にスペーサーの減衰係数を変化させたケースについての結果を示す。スペーサーに減衰係数を変化させても，両ケーブルの張力が同じで両ケーブルが同位相で振動する場合には，対数減衰率に変化は生じない。両ケーブルの張力が同じで，両ケーブルが逆位相で振動した場合，スペーサーの減衰係数が大きいほうが対数減衰率が大きい。片側ケーブルの張力を変動させた場合には，両ケーブルが同位相で振動した場合には減衰係数が小さいほうが対数減衰率が大きく，両ケーブルが逆位相で振動する場合には減衰係数が大きいほうが対数減衰率が大きくなる。

図-3.7.6にケース9，ケース10のスペーサーの減衰係数を変化による対数減衰率の変化を示す。

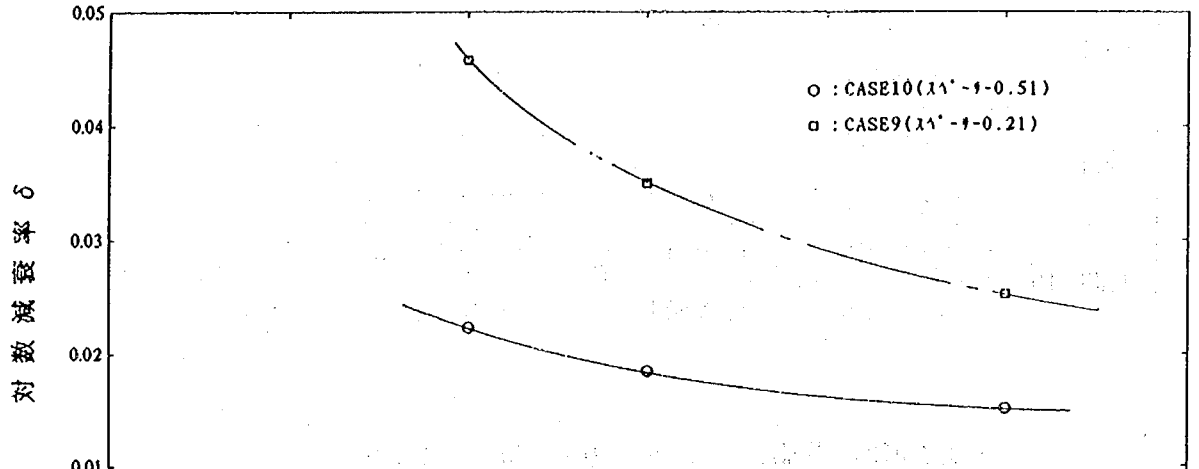


図-3.7.6　複素固有値解析より得られた対数減衰率δ
（スペーサーの減衰係数を変化させた場合・両ケーブル同位相振動）

表-3.7.7(1)　スペーサーの減衰係数を変化させた場合の
複素固有値解析より得られた1次モードの対数減衰率
（スペーサーバネ定数　1.0tf/m, 張力変動　10%）

	減衰係数 1.0tf・s/m	減衰係数 1.5tf・s/m	減衰係数 2.5tf・s/m	備　　考
CASE 1	0.01000	0.01000	0.01000	
	0.01000	0.01000	0.01000	
CASE 4	0.01000	0.01000	0.01000	
	0.46680	0.64274	0.75264	
CASE 5	0.01000	0.01000	0.01000	
	1.53126	2.45850	16.12999	
CASE 6	0.01000	0.01000	0.01000	
	0.00953	0.00953	0.00953	
CASE 9	0.04581	0.03503	0.02522	
	0.42453	0.61155	0.74249	
CASE 10	0.02235	0.01852	0.01513	
	1.48964	2.39604	5.32834	

表-3.7.7(2)　スペーサーの減衰係数を変化させた場合の
複素固有値解析より得られた1次モードの振動数
（スペーサーバネ定数　1.0tf/m, 張力変動　10%）

	減衰係数 1.0tf・s/m	減衰係数 1.5tf・s/m	減衰係数 2.5tf・s/m	備　　考
CASE 1	0.52710	0.52710	0.52710	
	0.52710	0.52710	0.52710	
CASE 4	0.52710	0.52710	0.52710	
	0.55074	0.56406	0.60103	
CASE 5	0.52710	0.52710	0.52710	
	0.57068	0.57799	0.55826	
CASE 6	0.52710	0.52710	0.52710	
	0.55826	0.55826	0.55826	
CASE 9	0.53797	0.53865	0.53899	
	0.56521	0.57768	0.61455	
CASE 10	0.53964	0.53982	0.53991	
	0.58284	0.58942	0.78696	

表-3.7.8に複素固有値解析より得られた対数減衰率と過渡応答より得られた対数減衰率の比較を示す。複素固有値解析より得られた対数減衰率と過渡応答より得られた対数減衰率はほぼ同じである。スペーサーを0.5ℓに取付けた場合の過渡応答の波形を図-3.7.7(1),(2)に示す。過渡応答は1次の振動数で10周期加振しその後自由振動させた後の自由減衰を波形より算出した。

スペーサーに減衰機構がない場合には，振動波形はうねりを生じるが，減衰機構がある場合には振動波形はきれいな自由減衰波形を示す。これは，スペーサーの減衰機構により，両ケーブルが逆位相で振動するモードが応答に寄与しなくなるためである。

表-3.7.8　過渡応答より得られた対数減衰率と複素固有値解析より得られた対数減衰率の比較（スペーサーバネ定数　1.0tf/m）

	加　振　側	応　答　側	複素固有値解析の対数減衰率
CASE　1	0.01003	－	0.01000
CASE　2	0.00870	0.01009	0.01000
CASE　3	0.01014	0.00981	0.01000
CASE　4	0.01003	0.01001	0.01000
CASE　5	0.01004	0.00999	0.01000
CASE　6	0.01003	－	0.01000
CASE　7	0.00996	0.00983	0.00993
CASE　8	0.00966	0.00983	0.00983
CASE　9	0.02525	0.02521	0.02522
CASE 10	0.01516	0.01514	0.01514

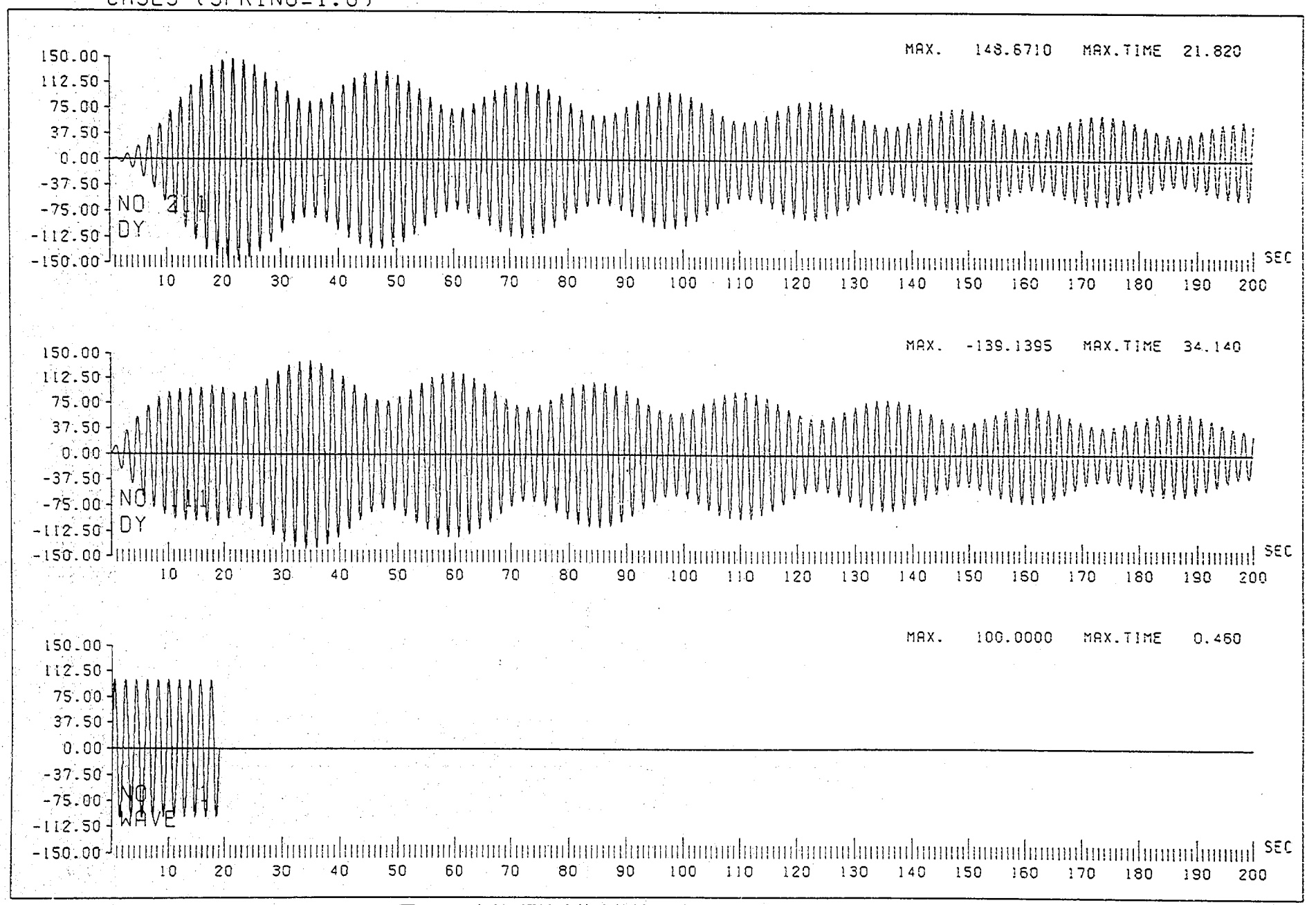


図-3.7.7(1) 過渡応答応答波形（スペーサー0.5L・減衰機構なし）

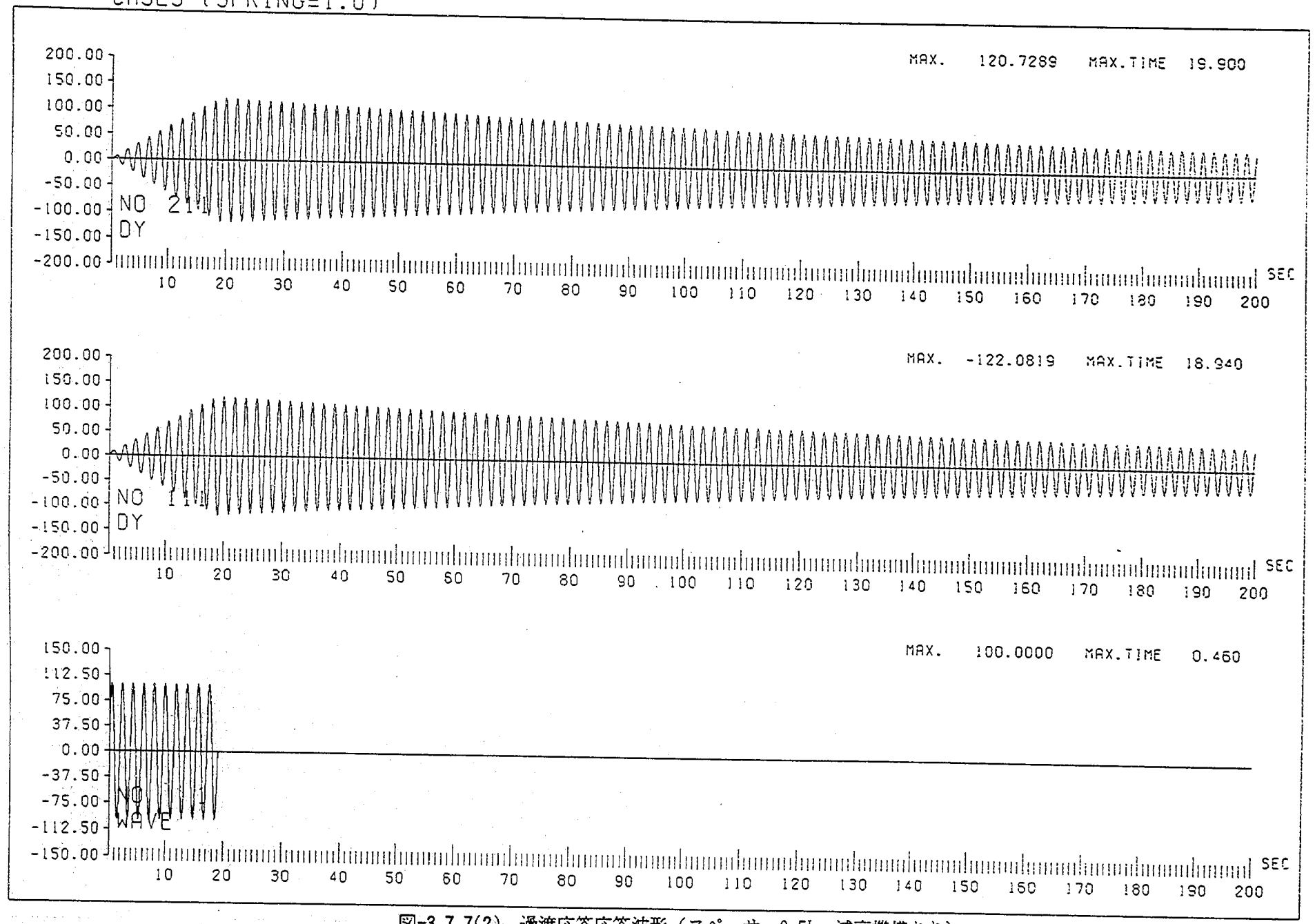


図-3.7.7(2) 過渡応答応答波形（スペーサー0.5L・減衰機構あり）

付録－1　　中間報告会議事録　目次

研　究　項　目	担当	第1回 93.11.4	第2回 94.2.24	第3回 94.5.13
1ウェークギャロッピングの特性予測に関する研究				
1．1ケーブル間距離と仰角の影響その1	三井造船	○	○	
1．2高レイノルズ数における空力特性	三菱重工		○	
1．3振動の自由度および気流特性の影響	NKK	○		○
1．4編角の影響	IHI		○	○
2制振手法の合理化に関する研究	Bグループ	○		
3新しい減衰向上機能付きスペーサーの開発に関する研究	C1グループ		○	○
4新しい構造力学的制振装置の開発に関する研究				
4．1構造力学的制振対策その1 スペーサーとTMDとの併用案	川崎重工	○	○	
5空力学的制振手法の開発に関する研究				
5．1空力的制振対策その1	日立造船	○	○	
5．2空力的制振対策その2	住友重機械		○	
6数値解析による制振効果の評価に関する研究	長大	○	○	

1．発表テーマ	第1回中間報告会 ケーブル間隔とその仰角の影響について　（その1）
2．発表者	三井造船株式会社　林　健一

3．討議内容

SH＝2D，SV=0の場合，高風域でローリング振動が発生した件に付いて。

Q.1　振動モードが高次に移行しただけではないのか？

A.1　それほど単純ではないと思える。振幅がたわみ振動のまま突然大きくなり，それにつれて振動数も上昇してローリング振動数に一致し，それからローリング振動に移行している。ちなみに，たわみ振動の減衰率が　0.01に対してローリング振動時の減衰率は 0.3程度．振動しにくい方へ，振り切るような形で振動が発生している。

Q.2　やはり2次の振動という事では？　一旦起こりだすと厄介である。

A.2　可能であれば，この件について，再試験を含めた検討を行いたい。

コメント；ローリング振動はともかく，高風域で一旦振幅が小さくなるのは面白い。

1．発表テーマ	第２回中間報告会 ケーブル間隔と仰角の影響について　（その１）
2．発表者	三井造船株式会社　　林健一

3．討議内容

Q.1　振幅に従って振動数が変化する時の応答波形は綺麗な正弦波であったのか？
汚かったのであれば測定誤差ではないのか？

A.1　小振幅の時は綺麗な波形であったが，大振幅になるとビートがのった波形となな った。しかし，SH=2D，SV=0では，最終的にローリング（固有振動数1.6HZ）が発生しており，たわみの固有振動数 1.1HZ であるので，振動数が増加するという傾向は明かである。

Q.2　振動数の変化に付いて？　固有振動数は？

A.2　小振幅時に振動数が一旦固有振動数より大きくなるのは，計測を始める時に，模型の拘束を解除した際の擾乱のためでる。

Q.3　50φと100φの違いの原因は？

A.3　100φでは振動数および減衰率を変えて試験を行った。今のところは，レイノルズ数，閉塞率，スパン長とケーブル径の比などの影響ではないか？
住友重機も同様の試験を行っているので，その結果も参考にしたい。

1．発表テーマ	第２会中間報告会 高レイノルズ数における空力特性
2．発表者	三菱重工業株式会社　本田　明弘

3．討議内容

Q.1　計測はIMAGINARYPART のほか，REAL PART は行っていないのか？

A.1　IMAGINARYPART のみの計測としている。

Q.2　全体的な傾向として，中心間隔が離れるにつれて，安定化するのではないか？

A.2　仰角10度のデーターは，これと逆方向であり，一般的な傾向として認識するのは難しい。

1．発表テーマ	第1回中間報告会（第2回はない） 振動の自由度および気流特性の影響
2．発表者	日本鋼管株式会社　藤沢伸光

3．討議内容

Q.1　ギャロッピング領域でも同相振動が観測されたか？

A.1　逆相だけである。各モードとも卓越振動数に於ける上下流ケーブルの位相差から，同相，逆相の判断をしているので，同じモードで両方の振動が同時に観測される事は有り得ない。

Q.2　両ケーブルの振動数を変えた実験での応答はビートをうつような形か？

A.2　上流側は7 HZ，下流側は5 HZ を基本振動として，各々独立に振動している。5 HZ の振動と7 HZ の振動の干渉によるビードは見られない。ただし，各ケーブルについて見れば，次数の異なった振動が同時に発生するため，必ずしも単一正弦波で振動しているとは限らない。

Q.3　振動数を変化させた影響は渦励振には現れているのか？

A.3　現れている。渦励振に関しては通常の無次元風速の概念で理解して良い。

Q.4　両ケーブルを繋ぎ，かつ両ケーブルの振動数を変えた場合はどうなるか？

A.4　そのような条件での実験は実施していない。

Q.5　主流方向成分がある場合，ケーブル軸に直角な平面内での運動の軌跡は楕円か？

A.5　鉛直成分と主流方向成分の位相差は0°あるいは180°に近い場合が多かった。従って，軌跡は楕円というより，どちらかと言えば斜めの直線に近いようである。

Q.6　2次モードでのギャロピングは観測されたか？

A.6　今回の実験の範囲内では2次のギャロピングは観測されなかった。

追記　Q.2に対して，当日はビートを打つような波形と答えた記憶がありますが，データーを見たところ誤りでしたので，上記のように修正いたします。

1．発表テーマ	第2回中間報告会 ウェークギャロッピングに及ぼす水平偏角の影響
2．発表者	石川島播磨重工業株式会社上島秀作

3．討議内容

Q.1　模型には端板が設けられていて，軸方向流が端部で遮断された状態での試験か？

A.1　その通りです。

Q.2　実験結果より，現象にはリミットサイクルが存在するように思えるが，このあたりが非定常圧力の測定等により探れないか？

A.2　今回の報告では，バネ支持のみ，それも風軸に直角方向のケーブル配置のみの結果である。非定常圧力計測を行うかどうかを含めた今後の方針については，もう一度改めて考えさせて頂きたい。

1．発表テーマ	第３回中間報告会 ウェークギャロッピングに及ぼす水平偏角の影響
2．発表者	石川島播磨重工業株式会社上島秀作

3．討議内容

Q.1　実験結果から，水平偏角の影響が評価できたか？

A.1　今回の結果では，ギャロッピング空気力が計測できなかったが，主要因は加振振幅相対的に小さかったことと思われる。従って，現象に及ぼす影響については言及できなかった。

Q.2　鉛直方向のみならず，水平方向の振動や水平方向の空気力も重要と思われるがどうか？

A.2　水平方向に加振することは考えていないが，鉛直振動時に発生する水平空気力の計測は実施する予定である。

1．発表テーマ	第1回中間報告会 制振手法の合理化に関する研究
2．発表者	B1グループ，鹿島建設株式会社　向弘晴

3．討議内容

Q.1　発現風速時の振幅はいくらか？

A.1　発現風速は大振幅振動の発生時で，その振幅は片振幅で 0.3D程度。（Dはケーブル径）

Q.2　スペーサー段数増加（3段→7段）時に発現風速が低下するのはなぜか？

A.2　低下しているのではなく一定になったと思われる。

Q.3　実験時に加振を行ったか？リミットサイクルの存在する可能性が高いのでは？

A.3　本実験は制振効果の比較を行うのが目的のため，行っていない。

Q.4　ステーケーブルの意味は？

A.4　構造上のダミー部材である。

Q.5　スペーサーの拘束条件は？

A.5　ピン結合である。

Q.6　上，中，下段を連結した場合の応答は？

A.6　連結部材を架台固定した場合。質量を9 kgf 程度付加した場合には，結合点間の振動サブスパン振動が発生し，その他のケースでは定着点間の振動全体モード振動が発生した。

1．発表テーマ	第２回中間報告会（第１回はない） 新しい減衰向上機能付きスペーサーの開発に関する研究
2．発表者	Ｃ１グループ。　清水建設，大野浩。住友建設，中井裕司。

3．討議内容

Q.1　平行ケーブル実験は，変位加振で行われたのか？　また，振動時のモードは複数存在したか？それとも単一モードの振動であったか？

A.1　実験は強制変位加振にて行った。その場合の振動状態は，ほとんどケーブルの１次モードで振動していた。

Q.2　実験値から求める減衰の評価方法について，２つのケーブルの減衰曲線の和，もしくわ差を考えることにより，実験から求められた減衰曲線中のビート波形は取り除く事ができ，単一モードの減衰曲線になるのでは？

A.2　和については行なってみたが，両者の差に付いては考えていなかった。ビートを起こしてもエネルギー的には減衰しているものと思われる。

Q.3　実験値と複素固有値解析の結果の比較は行っているのか？また，両者の対応はどうであったか？

A.3　実験値の方が解析値に比べて　1/10～1/30　程度小さな値となる。

Q.4　２本のケーブルが両者の中心を軸とする剛体回転振動を行った場合は，制振装置の効果があるか？

A.4　２本のケーブル間は，弾性結合されているため剛体的には振動せず，両者の間に相対的な変位を生ずるものと考えているため，制振装置の効果はそれなりにあるものと考えている。また，剛体回転振動成分に付いては，ＴＭＤを付加することにより多少なりともこの成分の振動を減ずる事ができると考えている。

Q.5　実験から求められた減衰曲線のビートは，ＴＤＭの場合のような状況が考えられるが，もし，そうであったら，チューニングのような事は可能なのか？

A.5　ケーブルの導入張力を変化させることによりチューニングできると考えている

Q.6 解析モデルにおいて，捩れの自由度を考慮した場合，その剛性はどの程度に設定したか？

A.6 ケーブルの直径に等しい鋼棒の剛性を用いた。実際のケーブルの場合はもう少し小さい値を考える必要があると思われる。

Q.7 ケーブル自体の減衰は解析モデル中にどのように考慮したか？

A.7 減衰はまったく考慮していない。

Q.8 高減衰ゴムの形状係数の求め方は？

A.8 ゴムメーカー提供の履歴ループから決定した。形状係数に対して減衰係数 Cとバネ定数 kは同時に決まる。

Q.9 スペーサーの配置は対称配置を考えているのか？

A.9 基本的にはそのように考えている。

Q.10 前側のケーブルを支点とした円弧振動モードで振動した場合は効果がないのでは？

A.10 もし完全にそのような振動モードで振動した場合，スペーサーに相対変位が生じないため減衰項が現れない。しかし実際にはスペーサーは弾性を持っているため，実際には水平相対変位が生じ，多少なりとも効果があるものと考えるている。（A.4と関連）

1．発表テーマ	第３回中間報告会 摩擦型減衰機能を有するスペーサーについて
2．発表者	Ｃ１グループ。　大林組　樋口　俊一。

3．討議内容

解析について

Q.1　減衰機能付きスペーサーの減衰定数を変えて数値解析を行ってみたか？

A.1　行った。減衰定数を大きくした場合，逆相成分の減衰に要する時間は短くなるが，残留する同相成分の振幅は変わらない。また，これは解析解として与えられたものと一致する。

同相振動が残留する問題について

Q.2　逆相振動だけではなく，同相振動も制振すべきではないか？

A.2　Ｃ１グループでは研究対象を減衰機能付きスペーサーに絞っており，原理的には，この種の装置で減衰させることのできない同相成分が問題となる場合は，桁端ダンパーのような従来の方法と組み合せて使用する必要があると考える。

予定している風洞実験について

Q.3　既に，川重で風洞実験を行われている。大林組での風洞実験の必要性は？

A.3　川重での実験は減衰機能のないスペーサーでケーブルを拘束した場合に該当する。開発中の減衰機能付きスペーサーでは非線形の減衰力が与えられるため，振動性状はスペーサーのみと異なると予想される。従ってこのような励振力の下で，減衰機能付きのスペーサーの逆相振動に対する制振機能が有効であること，同相振動を著しく助長しないことなどを，実験により確認する必要があると考えている。

1．発表テーマ	第1回中間報告会 構造力学的制振対策その1……スペーサーとTDMとの併用案
2．発表者	川崎重工業株式会社　小川一志

3．討議内容

Q.1　実験では並列ケーブルの振動自由度を気流直角方向振動（鉛直たわみ）と捩れ振動に拘束しているが，下流側ケーブルの気流方向振動が振動発生の重要な要因であるとの報告が約20年ほど前になされている。今回の実験で風によるケーブル振動が安定化しているのは，下流側ケーブルの気流方向振動を拘束していることに起因していないか？

A.1　並列ケーブルの風洞実験に於いて，下流側ケーブルの気流方向振動を拘束することは通常なされており，特に問題があるとは思われない。本研究の前に発表のあった三井造船の実験でも橋軸直角方向の風に対して下流側ケーブルの気流方向振動を拘束しているが，風による顕著な振動が発生している。

Q.2　実験では捩れ倍振幅10°までの加振の範囲で，ケーブルの耐風安定性を調べているが，並列ケーブル間の相対変位に換算すると 0,35 D となる。タウトストリップモデルでの実験によると大振幅（1,0 D 程度）の加振で空力振動が発生した例も見られるため，もう少し加振振幅を大きくしたらどうか？

A.2　バネ支持実験装置の制約から加振できる振幅には限度がある。今回の実験結果では，指摘されているように大振幅での加振による空力振動を見逃している可能性がある。

Q.3　今回の実験に用いたケーブル供試模型の動きのように，並列ケーブルを構成する2本のケーブルの動きを拘束するには，スペーサーをかなり密に配置する必要があるのではないか？

A.3　スペーサーの設置数が多くなる可能性はある。今後，ケーブルの曲げ剛性と捩れ剛性も考慮したスペーサー付きケーブルの振動解析を実施して，スペーサーの拘束効果を調べる予定である。

次頁に続く

Q.4　ケーブル供試模型の回転中心を並列ケーブルの中心にしているが，上流側ケーブルに回転中心を移してみる必要はないのか？

A.4　並列ケーブル（２本ケーブル）の重心とせん断中心は並列ケーブルの中心にあることから，スペーサー付きケーブルの捩れ振動モードの回転中心は並列ケーブルの中心と一致する。また，振動自由度として鉛直たわみと捩れを許しているため，風の作用による回転中心の移動は，ケーブル供試模型において再現されている。

1．発表テーマ	第2回中間発表会 構造力学的制振対策その1……スペーサーとTMDとの併用案
2．発表者	川崎重工業株式会社　小川一志

3．討議内容

Q.1　ケーブル振動解析におけるケーブル捩り定数（充実断面の 15%）の仮定は妥当か？

A.1　この仮定はケーブル断面2次モーメントの低減率に準じたものである。今後，実ケーブルでの捩り定数の測定が望まれる。

Q.2　ケーブルスペーサーの減衰機構（高減衰ゴムを使用）は既に提案されている減衰機能付きスペーサーと似ていないか？

A.2　外観はよくにている。ただし，既に提案されている減衰機能付きスペーサーではケーブル間の距離の変化に対して減衰力を作用させる考え方となっているが，本スペーサーではケーブルとスペーサー間の回転に対して減衰力を作用させる考え方を採っている。

Q.3　サブスパン振動に対する制振はどのように考えているか？

A.3　スペーサーの配置によって，サブスパン振動のモード形状はかなりいびつになっている。その分，ケーブルとスペーサーの間には大きな拘束力が働いており，その力をうまく減衰力に結び付ける事ができれば，構造減衰の増加により振動そのものを制振できる事になる。ただし，スペーサー部での減衰の量がケーブル制振に十分かどうかは今後調べていく必要がある。

Q.4　並列ケーブルの風洞実験において，上流側ケーブルを固定して下流側ケーブルを上下振動させた場合と，上下流ケーブルを剛結して捩れ振動させた場合の試験結果の違いは回転中心の違いによると考えて良いのか？

A.4　回転中心の違いによるというよりも，上流側ケーブルが固定であるか，運動しているかによって，上流側ケーブル回りの境界層の挙動（剥離渦）が異なる事による可能性が高いと思われる。

Q.5　曲げ振動と捩れ振動が同時に発現している時の，両者の振動はどうなっているか？

A.5　一般的には曲げ振動と捩れ振動が共に混在している。捩れ発散振動が発現する場合には捩れ振動数は風速と共に低下して，曲げ振動数に近付く。

1．発表テーマ	第1回中間報告会 空気力学的振動対策（その1）
2．発表者	日立造船株式会社　三河克己

3．討議内容

Q.1　2次元バネ支持実験で，上流側，下流側のバネ支持条件は？

A.1　上流側，下流側を上下1自由度で独立バネ支持を行っている。

Q.2　空気抜けがある模型は2種類あるが，テープで閉塞した実験は1種類としたのはなぜか？

A.2　空気抜けの効果を確認するためのもので補足的な実験とした。

Q.3　空力振動対策を施した模型の応答実験で，ギャロッピングが抑制されているが，不安定な現象が隠れているのでは？

A.3　ギャロッピング発現風速域で，加振を行ったが，完全に減衰した。

1．発表テーマ	第２回中間報告会 空気力学的振動対策（その１）
2．発表者	日立造船株式会社　三河克己

3．討議内容

Q.1　空気抜きがある模型Ｂ型は，実際ウェークが狭くなっているのか？

A.1　後流場の乱れの強さの鉛直分布を見ると模型Ｂ型は，他と比べ同じ計測高さにおいて低い値を示している事から，ウェークが狭くなっている事が解る。

Q.2　単独円柱の場合，約　CD=1,2だが，実験結果を見ると低くなっているのは並列の影響か？

A.2　ご指摘の通り，仰角の小さいい範囲では，下流の影響により抗力係数が小さくなっている。模型Ａ型の上流側モデルの抗力係数を見ると，仰角　α= 13° 付近で急激に CD=1,2 近傍まで上昇する傾向がみられる。これは上流側モデルによって生ずるウェークから後流側モデルが外れ，その影響を受けず，単独円柱の場合と同様な現象が現れているのだと考えられる。

Q.3　ウェークギャロッピングは，準定常的な見方で結論付けられるのか？

A.3　今後相対仰角を考慮した検討をおこない，はたして$dCL/d\alpha<0$となる範囲でウェークギャロッピングが発生しているのか検討する必要がある。

1．発表テーマ	第２回中間報告会 空力的制振対策（その２）
2．発表者	住友重機械工業株式会社　宮崎正男

3．討議内容

Q.1　中間報告の中のＳＣ数が間違っているのではないか？

A.1　ご指摘の通りである。表作成のコピー段階でミスをしているが，実験は所定の値で実施しているので本年度報告で訂正したい。

Q.2　振動応答波形はどうであったか？

A.2　応答振幅が小さい場合にはオーバーシュート，アンダーシュートを繰り返す，いわゆるＢＯＸ断面の加励振からギャロッピングに至る領域での振動に類似した振動が発生していた。風速が充分高く，応答振幅も大きく発散している領域では，発散していく波形にはビート現象は認められない。

Q.3　応答観測ではもう少し大振幅での加振が必要になるのでは？

A.3　装置の都合上，今回は大振幅での加振が困難であった。今後の実験では順次解決してゆきたい。

Q.4　制振対策の実施で制振できたものに付いては，加振してみたか？

A.4　勿論大振幅加振し耐風安定性を確認している。

1．発表テーマ	第1回中間報告会 数値解析による制振効果の評価に関する研究
2．発表者	株式会社長大　上野武志

3．討議内容

Q.1　スペーサーモデルのせん断バネ定数，減衰定数はどのくらいか？

A.1　バネ定数に付いては，軸力およびせん断力に対して 1､000､000tf／m を想定して試計算を行っている。また，減衰常数に付いては軸力にたいして 2,5tfs／m とし，せん断力に対しては無視している。

これらの定数に関しては，現在試計算の段階であり，今後パラメトリックに検討する予定である。

なお，通常の複素固有値解析では，重根は求まらず，重根を求めるためには特殊な解析方法を使用する必要がある。

Q.2　せん断力に対する減衰を無視したのは，なにか意図があるのか？

A.2　別に意図がある訳ではない。初期ケースとして無視した場合を行い，今後考慮したケースを検討する予定である。

1．発表テーマ	第２回中間報告会 数値解析による制振効果の評価に関する研究
2．発表者	株式会社長大　上野武志

3．討議内容

Q.1　スペーサーのバネ定数を一定としているがバネ定数を変化させて見ないのか？

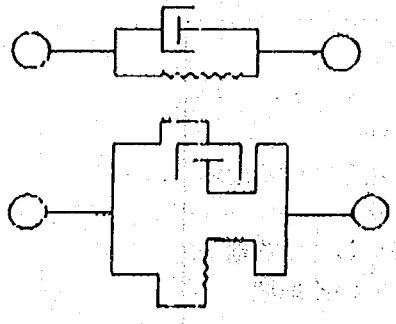
A.1　バネ定数を変化させたケースに対しても検討するつもりである。

Q.2　平行ケーブルを 10tf ／m 位のバネで繋ぎ加振した場合には，加振側ケーブルと応答側ケーブルはビートを打って振動するはずだが？

A.2　ビートを打つのは，ケーブルの剛性とスペーサーの剛性の関係であるので，10 tf／m のバネではビートは打たない。

Q.3　バネは伸びに対してきくのか？

A.3　バネは伸びに対してもききます。バネの表示が悪く下図のような表示方法をすべきであった。



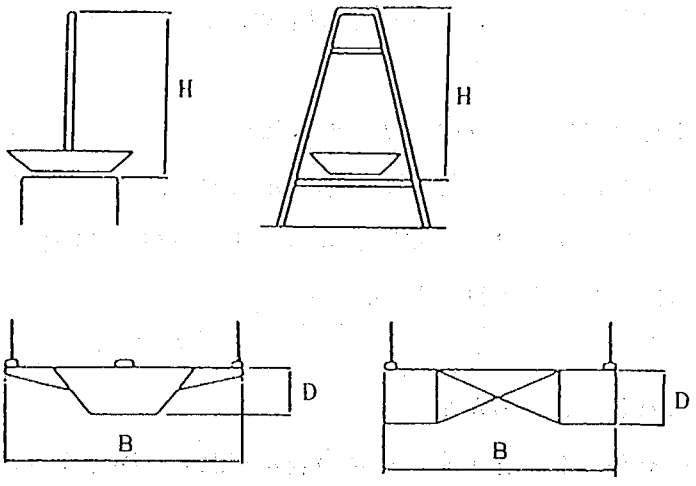
伸びとせん断の両方に対してきく。

付録２．並列ケーブル斜張橋実績表

並列ケーブルを有する国内の斜張橋の諸元についてまとめたものを，表－付録 2.2(1)～(2)に示す。なお，本共同研究の研究目的より，ケーブルに着目して諸元をまとめた。

表中の諸元は，以下に示す条件によって整理した。

・塔高H，幅員B，桁高Dは下図の値を用いた。



・表面被覆形状はケーブル表面の被覆材とともに表面形状を（１）なめらか，（２）ざらざら，（３）でこぼことして右肩添字で示した。

・振動現象についてはレインバイブレーションをＲＶ，ウェークギャロッピングをＷＧと略した。

・地表条件については下表の分類によった。

表－付録2.1　地形条件の分類

分類Ⅰ	海上，海岸
分類Ⅱ	農地，田園，開けた土地 樹木や低層建築物が散在している地域
分類Ⅲ	樹木や低層建築物が密集している地域 中高層建築物が散在している地域 なだらかな丘陵地
分類Ⅳ	中高層建築物が密集している地域 起伏の大きい丘陵地

表-付録2.2.1　並列ケーブルを有する国内斜張橋の諸元（その１）

橋梁名 （完成年）	所在地 （担当機関）	橋　　長（m） 支間割（m） 桁下空間（m）	主塔形式 斜材形式 主桁形式	塔高H（m） 幅員B（m） 桁高D（m）	斜材材料 表面被覆形状	斜材径（mm） 斜材長（m）	斜材重量(kg/m) 斜材張力（t）	斜材振動の有無 （斜材制振対策）
尾道大橋 （1968）	広島県 （本四公団）	386.45 85+215+85 38.068	鋼製逆U型 放射型２面２段 鋼床版２主桁	H＝39.3 B＝10.8 D＝ 3.2	ＬＣＲ（D型） ﾌﾀﾙ酸樹脂塗料(1)	φ54‖4～φ70‖4 並列４本 55～92	17.0～28.4 333～534	有（施工時） WG ４本相互固定
かもめ大橋 （1975）	大阪府 （大阪市）	440 100+240+100	鋼製独立１本柱 ファン１面10段 逆台形鋼箱桁	H＝50.0 B＝20.5 D＝ 3.1	ＰＰＷＳ 2‖114～4 ‖271 ＦＲＰ樹脂(2)	φ67‖2～φ99‖2 並列２本 48～104	17.5～41.7 113～269	有(供用開始後) WG 無
六甲大橋 （1977）	兵庫県 （神戸市）	400 90+220+90 KP16.0	鋼製Ｈ型 ファン２面５段 トラス（複床）	H＝56.5 B＝24.1 D＝ 7.95	ＰＰＷＳ 5‖217 FRP管被覆(1)	φ106‖2 並列２本 53～103	34 215	有（施工後） ギャロッピング 相互連結方式
合掌大橋 （1979）	富山県 （建設省）	440 144+46+144	鋼製門型 ファン２面３段 鋼床版２箱桁	H＝50.0 B＝10.5 D＝ 2.056	ＬＣＲ(D60,D70, E80) 亜鉛メッキ(1)	φ60‖4～φ80‖4 並列４本 77～142	84.4～151.2 93～169	無 無
櫃石島橋 （1988）	香川県 （本四公団）	790 185+420+185	鋼製Ｈ型 ファン２面11段 トラス（複床）	H＝114.44 B＝ 28.5 D＝ 14.97	ＨｉＡｍ 139～277φ5 ＰＥ被覆(1)	φ147‖2～ φ187‖2並列２本 70～192	57.5～105.5 649～1363	有（施工時） WG，ＲＶ 相互連結方式
岩黒島橋 （1988）	香川県 （本四公団）	790 185+420+185 43.759	鋼製Ｈ型 ファン２面11段 トラス（複床）	H＝114.44 B＝ 28.5 D＝ 14.97	ＨｉＡｍ 139～277φ5 ＰＥ被覆(1)	φ147‖2～ φ187‖2並列２本 71～192	54.3～101.2 651～1361	有（施工時） WG，ＲＶ 相互連結方式
志摩丸山橋 （1989）	三重県 （三重県）	228 113.4+113.4 12.0	ＲＣ製準Ａ型 ハーブ２面10段 逆台形ＰＣ箱桁	H＝47.0 B＝11.5 D＝ 2.0	ＳＥＥＥ F310PH‖3 ＰＥ被覆(1)	φ82‖3 並列3本 16～112	16.6 275～329	有（施工時） WG 3本相互固定
呼子大橋 （1989）	佐賀県 （佐賀県）	494.2 121+250+121	ＲＣ製門型 準ﾊｰﾌﾞ２面17段 逆台形ＰＣ箱桁	H＝62.6 B＝10.9 D＝ 2.2	ＳＥＥＥ　「2 F270PH*2,F360PH* ＰＥ被覆(1)	φ75.5‖2～ φ83.5‖2 並列 16～136　2本	13.4～17.6 51～98	有（施工時） WG 相互連結方式

表-付録2.2.1　並列ケーブルを有する国内斜張橋の諸元（その２）

橋梁名 （完成年）	橋梁形式	地表条件	振動数(Hz) たわみ ねじれ	参　考　文　献
尾道大橋 （1968）	３径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅰ（海上）	0.58 1.66	土木学会「橋1968～1969」 田村周平ほか：尾道大橋の設計について，橋梁 Vol.4No.6(1968) 渡辺武弘ほか：尾道大橋の架設について，橋梁 Vol.4No.8(1968)
かもめ大橋 （1975）	３径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅰ	0.401 1.250	大塚昭夫：かもめ大橋，橋梁と基礎 Vol.16No.8(1981) 石岡ほか：かもめ大橋，三菱重工技報 Vol.14No.3(1977) 加藤ほか：南港南埠頭連絡橋の設計と施工，第12回日本道路会議論文集(1975)
六甲大橋 （1977）	３径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅰ（海上）	0.83 2.04	小松定夫ほか：六甲大橋（トラス型式斜張橋）の現地振動実験， 橋梁と基礎 Vol.13No.5(1979) 増川博ほか：六甲大橋の設計と施工，橋梁 Vol.13No.11(1977)
合掌大橋 （1979）	２径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅳ（起伏の 大きい丘陵地）		倉島収ほか：新滝橋（合掌大橋）の施工，橋梁と基礎 Vol.13No.6(1979) 倉島収ほか：２径間非連続桁斜張橋の構造特性と実橋試験，橋梁と基礎 Vol.15No.1(1981) 倉島収ほか：一般国道156号線新滝橋（合掌大橋）の設計・施工，橋梁 Vol.15No.1(1979)
櫃石島橋 （1988）	３径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅰ（海上）	0.43 0.96	鳥海隆一：櫃石島橋，橋梁と基礎 Vol.19No.8(1985) 櫃石島橋（岩黒島高架橋を含む），橋梁と基礎 Vol.22No.8(1988) 太田亨ほか：櫃石島橋，岩黒島橋の施工状況（概要），橋梁 Vol.22No.1(1986)
岩黒島橋 （1988）	３径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅰ（海上）	0.43 1.058	鳥海隆一：岩黒島橋，橋梁と基礎 Vol.19No.8(1985) 岩黒島橋（岩黒島高架橋を含む），橋梁と基礎 Vol.22No.8(1988) 馬場ほか：岩黒島橋・櫃石島橋ケーブル制振装置，本四技報 Vol.12 No.47(1988)
志摩丸山橋 （1989）	２径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅰ（海上）		加藤ほか：布施田浦橋(仮称)の計画と施工，橋梁 1988.2 堀田ほか：布施田浦橋(仮称)の計画と設計，橋梁と基礎 Vol.22 1988.6 加藤ほか：布施田浦橋(仮称)の施工，橋梁と基礎 Vol.23 1989.1
呼子大橋 （1989）	３径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅰ（海上）	0.362 3.230	久我尚弘ほか：呼子大橋（ＰＣ斜張橋）の設計，橋梁と基礎 Vol.21No.7(1987) 片渕弘晃ほか：呼子大橋（ＰＣ斜張橋）の計画，橋梁 Vol.22No.11(1986) 片渕弘晃ほか：呼子大橋（ＰＣ斜張橋）の設計，橋梁 Vol.22No.12(1986)

表-付録2.2.2　並列ケーブルを有する国内斜張橋の諸元（その１）

橋梁名 （完成年）	所在地 （担当機関）	橋　　長（m） 支間割（m） 桁下空間（m）	主塔形式 斜材形式 主桁形式	塔高H（m） 幅員B（m） 桁高D（m）	斜材材料 表面被覆形状	斜材径（mm） 斜材長（m）	斜材重量(kg/m) 斜材張力（t）	斜材振動の有無 （斜材制振対策）
横浜港横断橋 （1989）	神奈川県 （首都公団）	860 200+460+200	鋼製H型 ファン２面11段 トラス（複床）	H＝126.0 B＝ 28.0 D＝ 12.0	ＮＥＷ-ＰＷＳ 199～421φ7 ＰＥ被覆(1)	φ122‖2～ φ175‖2並列２本 75～221	70.9～131.7 263～501	有（施工時） 渦励振（観測中 スペースダンパ
幸魂大橋 （1991）	埼玉県 （建設省）	681.2 190+190 19.3	独立１本柱 ファン１面７段 鋼逆台形３室	H＝80.0 B＝27.4 D＝ 3.2	NEW-PWS, HiAm 253～397φ7 ＰＥ被覆(1)	φ140～175 並列2本 54.4～199.7	81.5～127.8 328～556	有（仮設途中） ＷＧ せん断ダンパー
青　森 ベイブリッジ （1992）	青森県 （青森県）	498 128+240+128 青森港湾17.8	ＲＣ逆Ｙ型 ﾌｧﾝ1面2列10段 ＰＣ３室箱桁	H=81.6 B=25 D= 3.5	フレシネーH 61H～73Hφ15.2 ＦＲＰ管被覆(1)	φ212 並列2本 49～133	128 686～1,186	有（施工時） 渦励振，ＲＶ 粘性ｾﾝ断型ﾀﾞﾝﾊ
碓氷橋 （1992）	群馬県 （道路公団）	222 110.2+110.2	ＳＲＣ製逆Ｙ型 ファン１面９段 ３室箱桁	H=63.5 B=21.4 D= 2.5	ＮＥＷ－ＰＷＳ 163～241φ7 ＰＥ被覆(1)	φ113～φ139 並列2本 45.2～118.7	51.3～76.4 352～512	有（施工時） ガスト振動 粘性ｾﾝ断型ﾀﾞﾝﾊ
松川浦大橋 （1994予定）	福島県 （福島県）	286.6 70.7+145+70.7 16.47	ＲＣ製Ｈ型 準ﾊｰﾌ２面11段 逆台形ＰＣ箱桁	H=37.0 B=12.95 D= 2.0	SEEE.F160PH,F230 PH,F270PH,F310PH *各2 ＰＥ被覆(1)	φ61.6‖2～ φ82.0‖2 並列2 18.388～80.408	9.78～16.64 52.75～102.25	有（施工時） 渦励振，RV，WG 粘性ｾﾝ断型ﾀﾞﾝﾊ
秩父公園橋 （1994）	埼玉県 （埼玉県）	391.85 195+195 37.0	ＲＣ製Ｈ型 ファン2面30段 逆台形ＰＣ箱桁	H=85.0 B=19 D= 2.8	SEEE.F270PH,F360 PH,F500PH*各2 ＰＥ被覆(1)	φ75.5*2～φ96 *2 並列2本 41.9～207.8	13.4～24.6 74～175	有（施工時） ＷＧ 相互連結
新渡橋 （1995予定）	佐賀県 （佐賀県）	189.8 93.75+93.75	ＲＣ製Ｈ型 準ﾊｰﾌ2面15段 PRCｴｯｼﾞｶﾞｰﾀﾞ	H=42 B=12.55 D= 1.2	SEEE.F230PH,F270 PH,310PH*各2 ＰＥ被覆(1)	φ74.0*2～φ82 .0 並列2本 15.2～101.3	12.77～16.64 38～81	無 ＷＧ 相互連結方式
伊唐島大橋 （1997予定）	鹿児島県 （鹿児島県）	588.2(43.1+120 +260+120+43.1) 19.95	ＲＣ準Ｈ型 準ﾊｰﾌ2面16段 逆台形PC-2箱桁	H=62.27 B=11 D= 2	ＳＥＥＥ ＰＥ被覆(1)	φ75.5‖2～ φ96.0‖2 並列2 14.4～140.6	13.4～24.6 214～426	

表-付録2.2.2　並列ケーブルを有する国内斜張橋の諸元（その２）

橋梁名 （完成年）	橋梁形式	地表条件	振動数(Hz) たわみ ねじれ	参　考　文　献
横浜港横断橋 （1989）	３径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅰ（海岸）	0.49～1.58	小森和男：横浜港横断橋，橋梁と基礎 Vol.19No.8(1985)
幸魂大橋 （1991）	２径間連続 鋼斜張橋	分類Ⅱ	0.41 1.39	橋梁 1988.2
青　森 ベイブリッジ （1992）	３径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅰ（海岸）	0.35 0.87	石橋忠義ほか：ＰＣ斜張橋・青森大橋（仮称）の設計，橋梁 Vol.23 No.3～6(1987) 石橋忠義ほか：青森大橋（仮称）の下部工，橋梁と基礎 Vol.22 No.4(1988) 石橋忠義ほか：青森大橋の設計概要と斜材定着部実験ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄ Vol.30 No.4(1988)
碓氷橋 （1992）	２径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅳ	0.44 2.56	城戸正行ほか：碓氷橋（ＰＣ斜張橋）の設計について，ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄ Vol.33No.6 大谷祥三ほか：碓氷橋（ＰＣ斜張橋）の計画と設計概要，橋梁(1992) 大谷祥三ほか：碓氷橋（ＰＣ斜張橋）上部工の設計（上），橋梁と基礎(1992)
松川浦大橋 （1994予定）	３径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅰ（海上）	0.552 2.024	高野勝昭ほか：松川浦大橋の設計・施工，ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄ技術協会　第3回ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ論文集 高野勝昭ほか：松川浦大橋の計画・設計概要，橋梁 Vol.26No.10(1990)　(1992) 斉藤和弘ほか：松川浦大橋の計画概要，建設ふくしま，No.99(1990)
秩父公園橋 （1994）	２径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅱ （河川上）	0.315 1.594	嶋田ほか：秩父公園橋の設計・計画の概要，橋梁と基礎 Vol.24 1990.9 嶋田ほか：秩父公園橋の設計，橋梁と基礎 Vol.25 1991.10 小池久ほか：秩父公園橋(仮称)の設計と施工，PC技術協会第3回ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ論文集 1992
新渡橋 （1995予定）	２径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅱ （河川上）	0.86 1.635	田中巌ほか：新渡橋(PRC斜張橋)の設計・施工，ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄ技術協会第３回ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ論文集 (1992) 井上福雄ほか：新渡橋下部工施工について，農業土木学会九州支部講演会論文集(1992)
伊唐島大橋 （1997予定）	３径間連続 ＰＣ斜張橋	分類Ⅰ（海上）	0.286 1.37	高田治ほか：伊唐島大橋（仮称）の計画，設計（概要），橋梁 Vol.27 No.1(1991) 元山勝ほか：伊唐島架橋の計画，橋梁と基礎 Vol.26 No.1(1992)

斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書（その2）

共同研究報告書
第108号平成6年9月

建設省土木研究所構造研究室

要旨

本報告書は斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究の平成5年度の成果を報告するものである。本年度はウェークギャロッピングの特性を明らかにするための研究および新しい制振装置の開発とその効果に関する基礎的な実験が実施された。前者に関しては，新しく実施された多くの風洞実験結果を示し，ウェークギャロッピングの発現状況を考察した。本研究によってウェークギャロッピングの性状とケーブル間隔の関係，構造減衰および気流の乱れ等との関係が明らかになった。後者に関しては，主に減衰付加型スペーサおよび空力的対策に関し，実験および解析による効果の検討の成果をとりまとめた。

キーワード：斜張橋，ケーブル，ウェークギャロッピング，制振装置，風洞実験

郵便はがき

五十円切手をはって下さい。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所

構造橋梁部構造研究室

行

No.

No.

配布先氏名

配布先住所

共同研究報告書第108号　　部

上記のとおり受領しました。

所　属（住所）

氏　名　　印