

土 木 研 究 所 資 料

都市内橋梁の風荷重に関する試験調査報告書

平成6年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © (1994) by P.W.R.I

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

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

都市内橋梁の風荷重に関する試験調査報告書

構造研究室 室 長 横山 功一^{*1}
室 長 佐藤 弘史
主任研究員 日下部毅明
研 究 員 東久保正徳^{*2}
研 究 員 松野 栄明
研 究 員 関谷 光昭

*1)現 (財)先端建設技術センター 先端建設技術研究所 研究第一部長

*2)現 近畿地方建設局兵庫国道工事事務所神戸維持出張所 技術係長

要 旨

従来、道路橋示方書の適用範囲においては、橋梁設計の際、風荷重が部材の支配的な要因となることは極めて希であった。しかしながら、近年では並列橋や遮音壁を有する橋梁の設計に対して、風荷重の占めるウェイトが大きくなり、より精度の良い風荷重の評価が求められている。そこで本調査では、平成3年度に並列橋の影響を評価するための3分力試験、平成4～5年度には、都市内における風荷重を評価するため、変動空気力試験を実施した。その結果、並列の効果については道路橋示方書・同解説に示されている補正は妥当性が高いことが確認された。また都市内のように気流の乱れスケールが小さい場合には気流の空間変動を考慮することにより、より精度の高い風荷重の推定が可能になることが明らかになった。

キーワード：都市内橋梁、並列橋、風荷重、変動空気力、気流の乱れ、空力アドミタンス

まえがき

従来、道路橋示方書の適用範囲においては、橋梁設計の際、風荷重が部材の支配的な要因となることは極めて希であった。しかしながら、近年では、都市内において高橋脚の並列橋が増加し、さらに騒音対策のために高い遮音壁が取り付けられるようになってきている。このため、設計に対する風荷重のウェイトが大きくなり、より精度の良い風荷重の評価が求められている。

このような背景のもと、土木研究所では平成3年度から5年度まで、道路事業調査費（大規模特殊計画調査）により「都市内橋梁の風荷重に関する試験調査」を実施した。平成3年度には、並列橋の効果を計測するため3分力試験を実施した。平成4～5年度においては、都市内に相当する乱流を発生させ、変動風速と変動空気力との伝達関数を示す、空力アドミッタンスを求めた。

本報告書は、以上の調査結果を取りまとめたものである。

目 次

まえがき

1. 調査の概要	1
2. 並列橋梁に作用する風荷重に関する研究	2
2. 1 研究目的	2
2. 2 研究方法	2
2. 3 実験結果	2
2. 4 考察	2
2. 4. 1 並列の効果に関する基本的な傾向	2
2. 4. 2 並列橋梁の風荷重に関する橋梁諸元の影響	3
2. 4. 3 道路橋示方書との比較	3
2. 4. 4 同一橋脚に支持される並列橋梁について	3
2. 5 並列の効果に関するまとめ	4
3. 遮音壁を有する橋桁の空気力計測	21
3. 1 調査の目的	21
3. 2. 空気力計測実験	22
3. 2. 1 実験方法	22
3. 2. 2 実験ケース	36
3. 2. 3 解析方法	37
3.2.3.1 伝達関数の定義	37
3.2.3.2 パワースペクトル法	37
3.2.3.3 クロススペクトル法	39
3. 3 計測および解析結果	40
3. 3. 1 気流計測結果	40
3. 3. 2 抗力係数	50
3. 3. 3 空力アドミッタンスの解析	52
3.3.3.1 ジョイントアクセプタンス	52
3.3.3.2 平板と都市内橋梁模型との比較	52
3.3.3.3 気流および遮音壁高さの影響	52
3. 4 設計基準との比較	61
3. 5 遮音壁を有する橋桁の空気力計測に関するまとめ	67
参考文献	68
付図	69

1. 調査の概要

本調査は、平成3年度から平成5年度にかけて行われたものである。平成3年度には抗力係数に対する並列橋の効果を確認するために、①「並列橋梁に作用する風荷重に関する研究」を行った。平成4、5年度には、都市内のような乱れ強さの大きい風環境下における変動空気力を把握するために、②「遮音壁を有する橋桁の空気力計測」を行った。

以下、その概要を示す。

①「並列橋梁に作用する風荷重に関する研究」

固定側の橋桁に対し、移動側の並列橋として橋桁を設置し、固定側の橋桁の定常空気力を計測した。空気力の計測は、固定側と移動側との位置関係を変化させると共に、桁幅、遮音壁高さ、迎角をパラメータとして変化させることによりそれらの影響を調査した。

②「遮音壁を有する橋桁の空気力計測」

遮音壁を有する橋桁に対し、変動風速に起因する抗力について調査するため乱流中における空気力を測定し、変動空気力と変動風速に対する伝達関数（空力アドミッタンス）を求めた。空気力を計測する際に発生させた気流は、ラフネスブロックおよびスパイアーによる乱れ強さの異なる2種類の乱流および、都市内地形のパラメータを一致させた都市内地形相当模型による3種類の気流である。また、辺長の異なる3種類の平板による基礎実験および都市内橋梁の模型縮尺、遮音壁高さをパラメータとして変化させた実験も行った。

2. 並列橋梁に作用する風荷重に関する研究

2. 1 研究目的

複数の橋梁が並列すると、橋桁には単独の場合とは異なった風荷重が作用する。この風荷重の評価方法は道路橋示方書、解説中に示されている。道路橋示方書の適用範囲において、一般に風荷重は部材の設計に支配的な要因とはなりがたく、実用上道路橋示方書に従うことによって、並列の効果は的確に評価されると考えられる。しかし、都市内では並列する高橋脚の高架橋が増加し、さらに高い遮音壁が橋梁に設けられることが多い。このため、風荷重が特定の部材ので支配的になる場合もあり、並列の効果に関してより精度の良い評価ができるようにデータを整備する必要が生じた。

本研究では並列の効果の評価において、道路橋示方書では無視されている橋桁の高さ及び幅の影響を考慮し、また桁間の相対位置についてより多様なケースを想定して、空気力の計測を実施した。本報告書では、この計測に基づき、精度の高い並列効果の推定に役立つデータを取りまとめた。

2. 2. 研究方法

実験は建設省土木研究所耐風工学実験施設の非定常空気力風洞を用いて実施した。非定常空気力風洞の主要諸元を図-2.1および表-2.1に示す。

研究は三分力試験によって、様々なパターンの並列橋に対して風荷重を計測し、これに基づいて一般的に並列の効果等を推定できるようにまとめたものである。

橋梁諸元を図-2.2に、実験に用いた橋桁の B/D を表-2.2にとりまとめる。ここで総幅 B および総高 D は道路橋示方書に従い図-2.3に示すように定義した。また水平距離および鉛直距離等の位置関係は、図-2.4に示すように定義した。

三分力試験は図-2.5に示すように、 $\pm 3^\circ$ 及び 0° の場合について計測した。抗力係数は構造軸を基準に求めた。なお三分力計は固定側模型のみに取り付けられている。本報告書ではこの実験方法に関連して、固定側と着目側および、移動側と非着目側が、それぞれほぼ同義で記述されている。

2. 3. 実験結果

実験結果を表-2.3および図-2.6に総括する。計測は異なる2風速(7.5m/sおよび15m/s)においてそれぞれ2回ずつ実施したが、風速の影響は無視しうる。そこで図-2.6においては風速が15m/sの場合の2回の計測の平均値を記入し、これを考察の基本データとすることとした。

2. 4. 考察

2. 4. 1 並列の効果に関する基本的な傾向

並列の効果に関しては道路橋示方書および道路橋耐風設計便覧に引用されている小松らの研究^{2, 1)}により、以下に示す傾向が確認されている。

①風上側の橋梁は風荷重が大きくなり、風下側の橋梁は風荷重が小さくなる。特に風下側の橋梁に関しては風向と逆向きの力が作用する場合がある。

②橋梁が鉛直方向に並列する場合、両者の風荷重は大きくなる場合がある。

以上の効果を本実験で確認するために、図-2.7に実験結果を取りまとめた。図-2.7.1は水平方向の

位置の影響を見たものであるが、橋梁が風上側にある場合、その水平距離が小さくなるにつれて、着目橋梁に作用する風荷重が小さくなっている。さらに迎角によっては風下側橋梁の風荷重は風向と逆向きとなり、風上側の橋梁は単独時よりも風荷重が大きくなっていることがわかる。

一方、高低差に関しては、図-2.7.2に示すとおり、着目橋梁が下流側に配置された場合を除き、抗力係数の増加が一部認められる。図-2.7.2(1)と(2)は着目側と非着目側橋梁が逆転した関係にあるから、水平距離が $0B^*$ の場合、並列する橋梁の両者が単独時よりも大きい風荷重を受けることがわかる。

本実験は並列する橋梁の諸元の多様性に関し、道路橋示方書を補足することを一つの目的としているが、上述のように、諸元が異なる場合でも、道路橋示方書に示された傾向と同様の傾向が認められることが明らかとなった。

2. 4. 2 並列橋梁の風荷重に対する橋梁諸元の影響

並列橋に作用する風荷重は、主に並列橋梁の幅員、幅員・桁高比 B/D によって変化することが予測される。以下にこれに関し考察する。

図-2.8は移動側橋梁の幅員の変化の影響を同一高度において示したものである。明らかな相違が認められるのは、水平距離が $-1B^*$ の場合である。この場合、下流側にある着目橋梁に風向と逆向きの力が作用しているが、移動側橋梁の総幅 $B=6m$ の場合のほうが、着目橋梁に作用する、風向に逆向きの力が大きい。この配置において移動側橋梁の計測は行わなかったが、下流側の負圧がより多く固定側橋梁に分担されたため、移動側橋梁の抗力係数比は、移動側橋梁が単独の時よりもかなり大きいと考えられる。また橋梁が鉛直に並列する場合も、移動側橋桁幅が $10m$ の場合に最大の増幅率が 1.17 であったのに対し、移動側橋桁幅が $6m$ の場合のそれは 1.25 となっており、移動側橋梁の幅が小さくなるほど、風荷重の増幅率が大きくなることがわかる（図-2.6.1および2.6.2の $(0B^*, +2D^*)$ の測定結果より計算）。

別の比較方法として、移動側と固定側（計測側）を入れ替えた場合を比較したものが図-2.9である。抗力係数の変化は移動側橋梁の幅が小さい方が若干大きくなる傾向が読みとれる。しかしその相違は、幅員がそれぞれ $6m$ と $15m$ の橋桁が並んだ場合よりも小さい。

次に、遮音壁の影響をとりまとめたのが、図-2.10である。これによると、全般的にほぼ例外なく、高い遮音壁ほど2.4.1に確認した傾向が強まると言える。

以上のように、並列による抗力係数は、設計で問題となるか否かは別問題として、幅員や遮音壁の有無等の影響を受けることが確認された。

2. 4. 3 道路橋示方書との比較

以上の結果を道路橋示方書・解説と比較する。なお本研究と道路橋示方書では鉛直距離の符号が逆になっている。

まず抗力係数が増加する場合については、今回の実験の範囲で、道路橋示方書の推奨値と同レベルではあっても、これを越える結果は認められなかった。また並列の補正が適用される範囲（ $S_h \leq 1.5B^*$ かつ $S_v \leq 2.5D^*$ ）で、概ね風上側橋梁の風荷重は増加し、その範囲外ではほぼ単独時と同程度となることが確認された。したがって、本実験によっても道路橋示方書の推奨値の妥当性が検証されたとと言える。ただし、風荷重の増幅率が 1.3 まで大きくなる場合は希であり、この意味で、風荷重が設計部材を大きく変えるような特殊なケースでは、これを見直す余地もある。

2. 4. 4 同一橋脚に支持される並列橋梁について

橋脚の設計にあたり、並列する橋梁が別個の橋脚に支持される場合、並列の影響は橋桁の設計と同

様に考慮できる。しかし並列する橋梁が同一の橋脚に支持される場合は、移動側橋梁と固定側橋梁に同時に作用する風荷重の総和を考慮すべきである。この風荷重の総和についてとりまとめたのが表-2.4である。これによると風荷重はほぼ3つの領域に分類できる。すなわちこの3つの分類では、単独橋としての風荷重を単純に足し合わせた場合に比べてそれぞれ、①橋桁が水平にほぼ接するように並列する場合は、風荷重はほぼ50%に、②高さが1 D程度異なっていて距離がある程度離れている場合は80%前後に、そして③水平距離が近く、高さが離れている場合は、100%から120%となる。道路橋示方書解説では、この値が80%, 115%, 125%, 130%の4段階に設定されるように、位置関係の分類がなされている。この値は特定の配置に対してはやや安全側の風荷重を与えることになるが、水平距離や鉛直距離をある範囲を持たせて係数を決める場合、本実験結果と比較しても妥当であると言える。

2. 5 並列の効果に関するまとめ

以下に本研究の成果をとりまとめる。

- (1) 道路橋示方書・解説に示されている並列の効果が確認された。
- (2) 総幅の小さい橋梁により大きな並列の影響が見られた。
- (3) 遮音壁が高いほど並列の影響が大きくなった。
- (4) 道路橋示方書の補正は本実験と照らしても妥当性が高いことが確認された。
- (5) 並列の補正にあたり、橋桁諸元の影響の度合いや、具体的な風荷重の補正値を明らかにするために有効なデータが得られた。

表-2.1 非定常空気力風洞主要諸元

風 洞 名		非定常空気力風洞
風洞形式		ゲッチンゲン
測 定 洞	幅	1,000mm
	高	2,000mm
	長	3,000mm
風路全長		55m
送 風 機	動翼直径	1,530mm
	有効全圧	40.0mmAq
	風 量	70.0m ³ /sec
	回 転 数	1,250.0rpm
	容 量	50.0kw
気 流	風 速	1.0~25.0m/sec
	乱 れ 率	0.5%

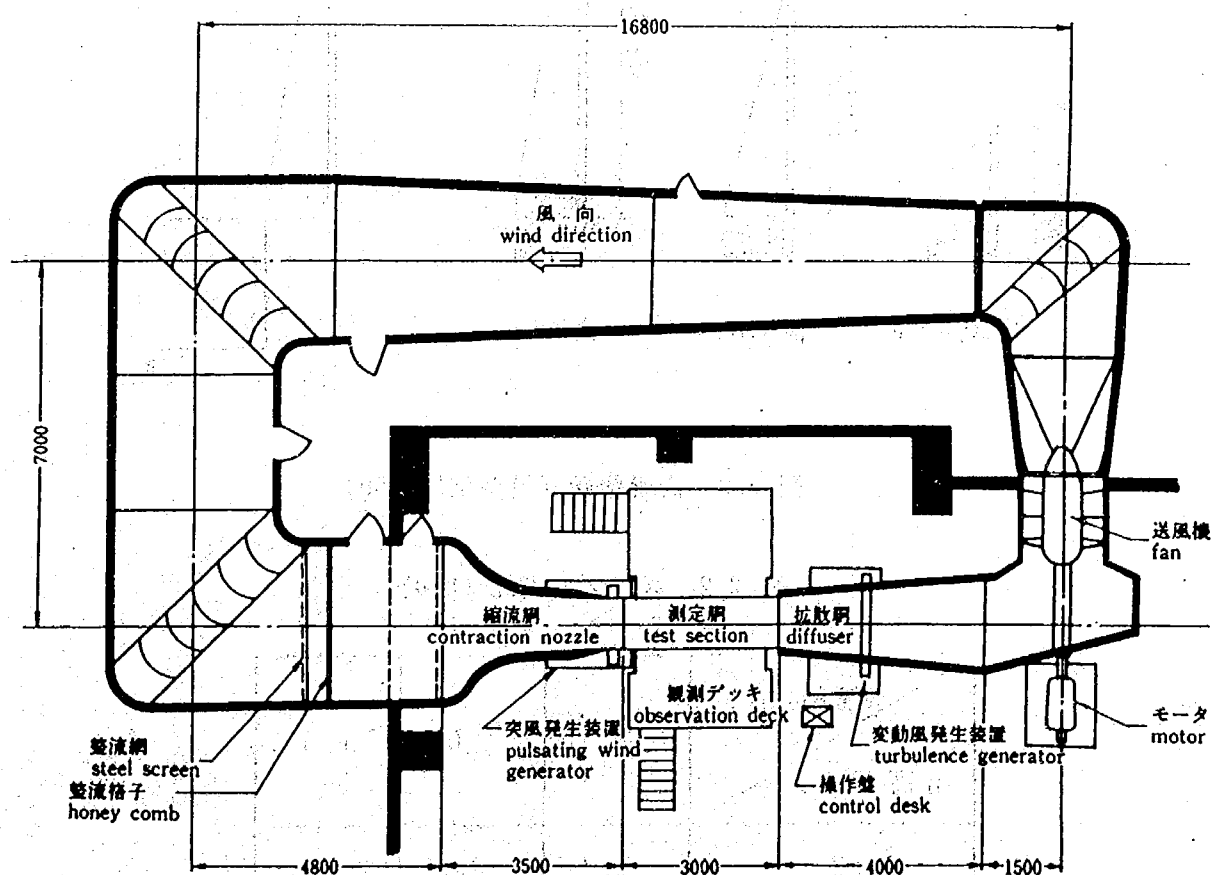
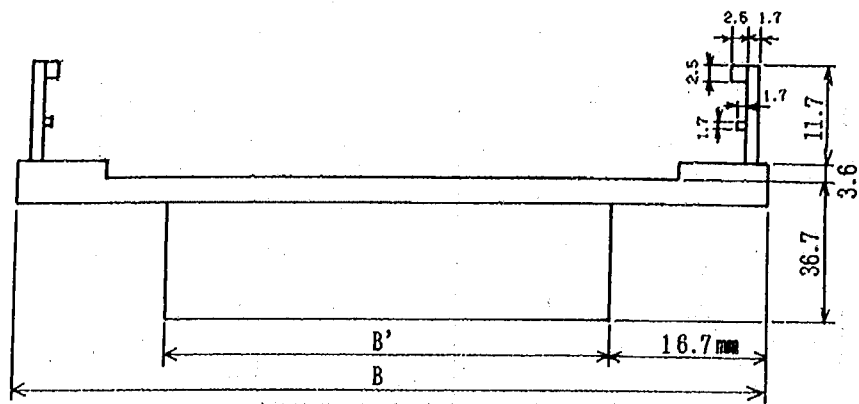


図-2.1 非定常空気力風洞平面図

基本断面 (高欄)



幅員(B)15m : 模型(B)250.1mm ・ (B') 216.7mm
 幅員(B)10m : 模型(B)166.7mm ・ (B') 133.3mm
 幅員(B) 6m : 模型(B)100.1mm ・ (B') 66.7mm

遮音壁断面

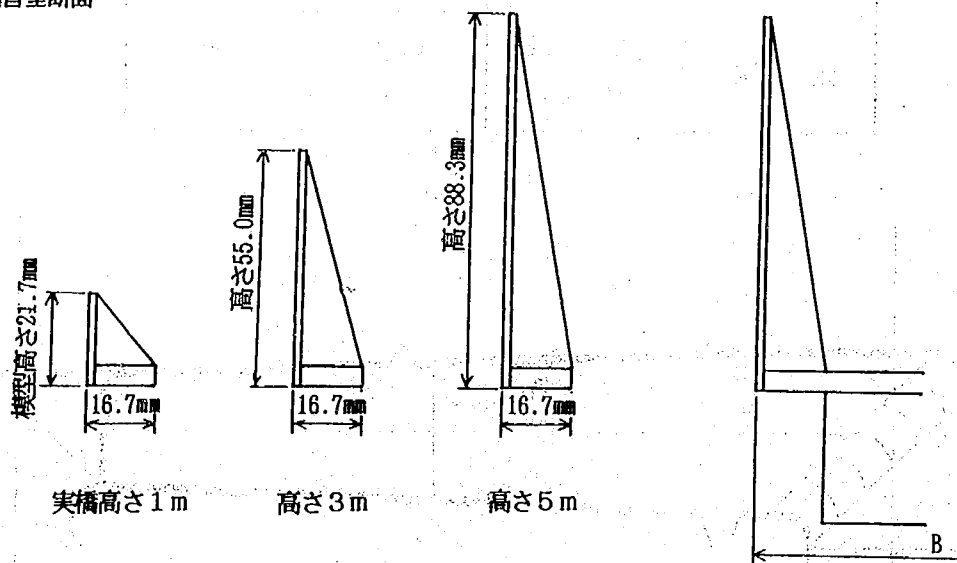


図-2.2 橋梁諸元 (模型縮尺1/60)

表-2.2 総幅／桁高比 (B/D)

総幅 B(m) \ 桁高 D(m)	6	10	15
2.82	2.1	3.5	5.3
3.42	—	2.9	—
5.42	—	1.8	2.8
7.42	—	1.3	2.0

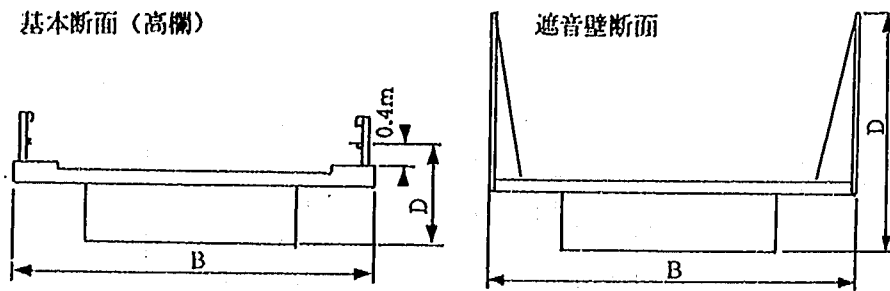


図-2.3 総幅(B)および総高(D)の定義

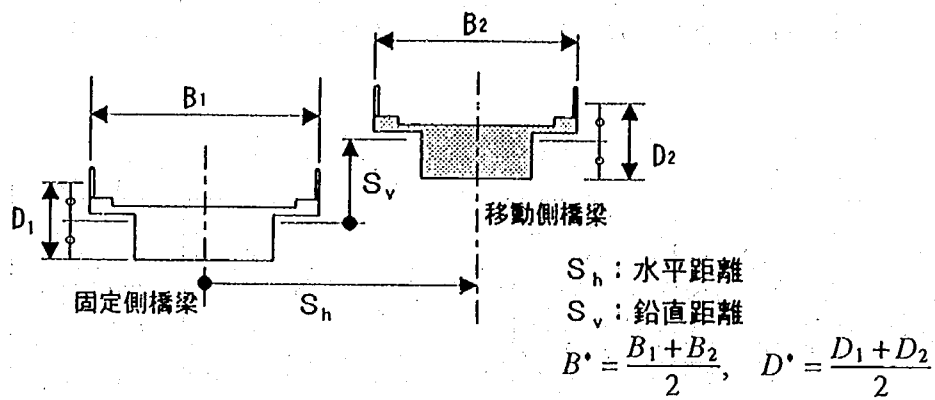


図-2.4 橋桁の位置関係の定義

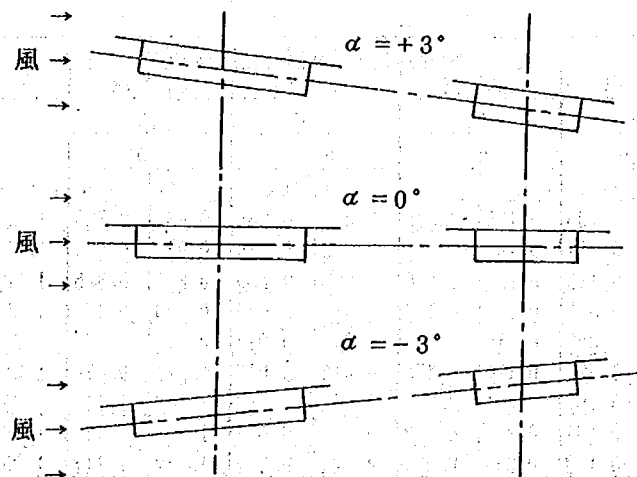


図-2.5 迎角設定状況

表-2.3.1 並列橋空気力係数測定結果(その1)

模型断面			基本断面 橋梁総幅B=15m(固定側), 10m(移動側)											
試験番号			CASE-1		CASE-2		CASE-3		CASE-4		CASE-5		CASE-6	
移動桁	X 方向	単独橋	-2B'		-2B'		-2B'		-2B'		-2B'		-2B'	
	Y 方向		0D'		+1D'		+2D'		-1D'		-2D'			
風洞風速			7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s
抗力係数 C_D	迎角0°	測定 1	1.291	1.258	0.497	0.582	0.620	0.623	1.182	1.168	1.041	1.013	1.324	1.291
		測定 2	1.273	1.258	0.496	0.575	0.620	0.614	1.157	1.166	1.041	1.025	1.309	1.299
		平均値	1.282	1.258	0.497	0.579	0.620	0.619	1.170	1.167	1.041	1.019	1.317	1.295
	迎角+3°	測定 1	1.320	1.311	0.563	0.587	1.109	1.128	1.238	1.248	0.606	0.620	1.160	1.120
		測定 2	1.314	1.311	0.563	0.587	1.112	1.130	1.266	1.246	0.574	0.620	1.137	1.121
		平均値	1.317	1.311	0.563	0.587	1.111	1.129	1.252	1.247	0.590	0.620	1.149	1.121
	迎角-3°	測定 1	1.483	1.450	0.760	0.764	0.359	0.373	0.859	0.822	1.243	1.229	1.368	1.362
		測定 2	1.462	1.450	0.788	0.764	0.355	0.373	0.847	0.813	1.220	1.226	1.394	1.357
		平均値	1.473	1.450	0.774	0.764	0.357	0.373	0.853	0.817	1.232	1.228	1.381	1.360

模型断面			基本断面 橋梁総幅B=15m(固定側), 10m(移動側)											
試験番号			CASE-7		CASE-8		CASE-9		CASE-10		CASE-11		CASE-12	
移動桁	X方向		-2.5B*		-1.5B*		-1.25B*		-1B*		-1B*		-1B*	
	Y方向		0D*		0D*		0D*		+2D*		+1.5D*		+1D*	
風洞風速			7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s
抗力係数 C_D	迎角0°	測定1	0.733	0.723	0.197	0.156	0.085	0.045	1.192	1.173	1.108	1.103	0.446	0.388
		測定2	0.765	0.724	0.198	0.157	0.085	0.045	1.197	1.180	1.108	1.095	0.445	0.396
		平均値	0.749	0.724	0.198	0.157	0.085	0.045	1.195	1.177	1.108	1.099	0.446	0.392
	迎角+3°	測定1	0.815	0.792	0.366	0.358	0.308	0.268	1.171	1.148	1.173	1.159	0.810	0.760
		測定2	0.786	0.786	0.358	0.357	0.331	0.268	1.187	1.156	1.175	1.162	0.785	0.768
		平均値	0.801	0.789	0.362	0.358	0.320	0.268	1.179	1.152	1.174	1.161	0.798	0.764
	迎角-3°	測定1	0.946	0.949	0.384	0.388	0.085	0.050	1.254	1.234	1.227	1.208	0.087	0.065
		測定2	0.950	0.954	0.386	0.389	0.082	0.058	1.248	1.239	1.234	1.220	0.072	0.065
		平均値	0.948	0.952	0.385	0.389	0.084	0.054	1.251	1.237	1.231	1.214	0.079	0.065

模型断面			基本断面 橋梁総幅B=15m(固定側), 10m(移動側)													
試験番号			CASE-13		CASE-14		CASE-15		CASE-16		CASE-17		CASE-18			
移動桁	X方向		-1B*		-1B*		-1B*		-1B*		-1B*		-2B*			
	Y方向		+0.5D*		0D*		-0.5D*		-1D*		-2D*		+1D*			
風洞風速			7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s		
抗力係数 C_D	迎角0°	測定1	0.143	0.106	-0.195	-0.225	0.298	0.235	0.833	0.825	1.298	1.269	1.258	1.229		
		測定2	0.144	0.114	-0.194	-0.226	0.292	0.235	0.836	0.824	1.264	1.256	1.286	1.224		
		平均値	0.144	0.110	-0.195	-0.226	0.295	0.235	0.835	0.825	1.281	1.263	1.272	1.227		
	迎角+3°	測定1	0.448	0.389	0.110	0.086	0.040	0.016	0.523	0.479	1.250	1.209	1.298	1.235		
		測定2	0.442	0.396	0.110	0.086	0.040	0.016	0.516	0.478	1.243	1.213	1.302	1.234		
		平均値	0.445	0.393	0.110	0.086	0.040	0.016	0.520	0.479	1.247	1.211	1.300	1.235		
	迎角-3°	測定1	-0.134	-0.192	-0.231	-0.278	0.608	0.586	1.142	1.118	1.351	1.363	1.497	1.450		
		測定2	-0.145	-0.184	-0.263	-0.273	0.574	0.587	1.161	1.116	1.364	1.361	1.461	1.465		
		平均値	-0.140	-0.188	-0.247	-0.276	0.591	0.587	1.152	1.117	1.358	1.362	1.479	1.458		

ここに、 $B' = \frac{B_1 + B_2}{2}$, $D' = \frac{D_1 + D_2}{2}$

表-2.3.2 並列橋空気力係数測定結果(その2)

模型断面			基本断面 橋梁総幅B=15m(固定側), 10m(移動側)											
試験番号			CASE-19		CASE-20		CASE-21		CASE-22		CASE-23		CASE-24	
移動桁	X方向		-2B'		+2B'		0B'		0B'		+1B'		+1B'	
	Y方向		0D'		-1D'		-2D'		+2D'		+2D'		+1D'	
風洞風速			7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s
抗力係数 C_D	迎角0°	測定1	1.246	1.218	1.251	1.202	1.482	1.453	1.584	1.470	1.650	1.514	1.430	1.368
		測定2	1.233	1.207	1.258	1.203	1.492	1.452	1.539	1.474	1.611	1.515	1.481	1.379
		平均値	1.240	1.213	1.255	1.203	1.487	1.453	1.562	1.472	1.631	1.515	1.456	1.374
	迎角+3°	測定1	1.326	1.237	1.265	1.240	1.528	1.475	1.531	1.471	1.383	1.305	1.246	1.192
		測定2	1.322	1.237	1.221	1.250	1.478	1.465	1.508	1.480	1.381	1.299	1.230	1.185
		平均値	1.324	1.237	1.243	1.245	1.503	1.470	1.520	1.478	1.382	1.302	1.238	1.189
	迎角-3°	測定1	1.439	1.437	1.415	1.397	1.500	1.467	1.620	1.583	1.755	1.710	1.571	1.575
		測定2	1.463	1.439	1.409	1.394	1.485	1.469	1.590	1.586	1.782	1.721	1.571	1.565
		平均値	1.451	1.438	1.412	1.396	1.493	1.468	1.605	1.585	1.769	1.716	1.571	1.570

模型断面			基本断面 B=15m(固), 10m(移)				基本断面 橋梁総幅B=15m(固定側), 6m(移動側)						遮音壁B=15m(固), 10m(移)	
遮音壁 高さ	固定側		—				—						5m	
	移動側		—				—						5m	
試験番号			CASE-25		CASE-26		CASE-27		CASE-28		CASE-29		CASE-30	
移動桁	X方向		+1B'		+1B'		-2B'		-1B'		-0B'		-1B'	
	Y方向		0D'		-1D'		0D'		0D'		+2D'		0D'	
風洞風速			7.5m/s 15m/s		7.5m/s 15m/s		7.5m/s 15m/s		7.5m/s 15m/s		7.5m/s 15m/s		7.5m/s 15m/s	
抗力係数 C _D	迎角0°	測定1	1.260	1.241	1.221	1.227	0.559	0.593	-0.390	-0.348	1.636	1.579	-0.464	-0.511
		測定2	1.268	1.241	1.234	1.226	0.562	0.603	-0.386	-0.338	1.636	1.577	-0.463	-0.509
		平均値	1.264	1.241	1.228	1.227	0.561	0.598	-0.388	-0.343	1.636	1.578	-0.464	-0.510
	迎角+3°	測定1	1.090	1.069	1.269	1.231	0.566	0.642	-0.190	-0.208	1.543	1.493	-0.500	-0.562
		測定2	1.044	1.055	1.244	1.225	0.555	0.646	-0.190	-0.217	1.515	1.498	-0.508	-0.561
		平均値	1.067	1.062	1.257	1.228	0.561	0.644	-0.190	-0.213	1.529	1.496	-0.504	-0.562
	迎角-3°	測定1	1.736	1.723	1.355	1.318	0.465	0.432	-0.164	-0.187	1.616	1.591	-0.354	-0.337
		測定2	1.736	1.707	1.373	1.312	0.463	0.438	-0.167	-0.195	1.616	1.578	-0.360	-0.335
		平均値	1.736	1.715	1.364	1.315	0.464	0.435	-0.166	-0.191	1.616	1.585	-0.357	-0.336

模型断面		遮音壁 橋梁総幅B=15m(固定側), 10m(移動側)								基本断面 B=10m(固), 15m(移)			
遮音壁 高さ	固定側	5m		5m		5m		5m		—			
	移動側	3m		1m		3m		5m		—			
試験番号		CASE-31		CASE-32		CASE-33		CASE-34		CASE-35		CASE-36	
移動桁	X方向	-1B*		-1B*		-2B*		+1B*		単独橋		-2B*	
	Y方向	0D*		0D*		0D*		0D*				0D*	
風洞風速		7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s
抗力係数 <													

$$\text{ここに、} B' = \frac{B_1 + B_2}{2}, \quad D' = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

表-2.3.3 並列橋空気力係数測定結果 (その3)

模型断面			基本断面 橋梁総幅B=10m(固定側), 15m(移動側)											
試験番号			CASE-37		CASE-38		CASE-39		CASE-40		CASE-41		CASE-42	
移動桁	X方向		-2B'		-2B'		-1B'		-1B'		-2B'		-2B'	
	Y方向		0D'		-1D'		+2D'		+1D'		0D'		0D'	
風洞風速			7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s
抗力係数 C _D	迎角0°	測定 1	0.703	0.711	1.056	1.045	1.256	1.252	0.465	0.450	-0.019	0.003	0.772	0.757
		測定 2	0.714	0.711	1.076	1.035	1.286	1.249	0.467	0.442	-0.050	-0.004	0.760	0.760
		平均値	0.708	0.711	1.066	1.040	1.271	1.251	0.466	0.446	-0.035	-0.001	0.766	0.759
	迎角+3°	測定 1	0.763	0.763	0.710	0.701	1.230	1.203	0.704	0.726	0.156	0.157	0.489	0.451
		測定 2	0.757	0.767	0.708	0.708	1.207	1.214	0.697	0.718	0.155	0.157	0.488	0.449
		平均値	0.760	0.765	0.709	0.704	1.219	1.209	0.700	0.722	0.156	0.157	0.489	0.450
	迎角-3°	測定 1	0.826	0.824	1.218	1.249	1.245	1.275	0.087	0.101	-0.246	-0.225	1.108	1.088
		測定 2	0.833	0.817	1.231	1.249	1.253	1.277	0.087	0.093	-0.267	-0.227	1.098	1.077
		平均値	0.829	0.821	1.225	1.249	1.249	1.276	0.087	0.097	-0.257	-0.226	1.103	1.083

模型断面			基本断面 橋梁総幅B=10m(固定側), 15m(移動側)											
試験番号			CASE-43		CASE-44		CASE-45		CASE-46		CASE-47		CASE-48	
移動桁	X方向		-1B'		0B'		0B'		+1B'		-2B'		-2B'	
	Y方向		-2D'		+2D'		-2D'		+2D'		0D'		0D'	
風洞風速			7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s
抗力係数 C _D	迎角0°	測定1	1.339	1.344	1.680	1.659	1.505	1.455	1.556	1.585	1.456	1.426	1.511	1.481
		測定2	1.352	1.336	1.666	1.651	1.444	1.457	1.610	1.581	1.436	1.432	1.543	1.479
		平均値	1.346	1.340	1.673	1.655	1.475	1.456	1.583	1.583	1.446	1.429	1.527	1.480
	迎角+3°	測定1	1.242	1.248	1.798	1.795	1.373	1.401	1.449	1.397	1.361	1.373	1.176	1.184
		測定2	1.235	1.251	1.826	1.794	1.365	1.374	1.419	1.394	1.363	1.378	1.185	1.189
		平均値	1.239	1.250	1.812	1.795	1.369	1.388	1.434	1.396	1.362	1.376	1.181	1.187
	迎角-3°	測定1	1.350	1.376	1.670	1.620	1.502	1.528	1.627	1.607	1.481	1.440	1.706	1.707
		測定2	1.386	1.384	1.612	1.628	1.478	1.533	1.654	1.604	1.469	1.459	1.748	1.703
		平均値	1.368	1.380	1.641	1.624	1.490	1.531	1.641	1.606	1.475	1.450	1.727	1.705

模型断面			基本断面 橋梁総幅B=10m(固定側), 15m(移動側)						遮音壁 橋梁総幅B=10m(固定側), 15m(移動側)					
遮音壁 高さ	固定側		—						5m			5m		
	移動側		—						3m			5m		
試験番号			CASE-49		CASE-50		CASE-51		CASE-52		CASE-53		CASE-54	
移動桁	X方向		+1B*		+2B*		+2B*		-2B*		-1B*		+1B*	
	Y方向		-1D*		+1D*		0D*		0D*		0D*		0D*	
風洞風速			7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s	7.5m/s	15m/s
抗力係数 C _D	迎角0°	測定1	1.262	1.284	1.373	1.347	1.320	1.369	0.133	0.130	-0.196	-0.204	1.587	1.572
		測定2	1.252	1.282	1.333	1.361	1.352	1.369	0.134	0.128	-0.207	-0.204	1.565	1.578
		平均値	1.257	1.283	1.353	1.354	1.336	1.369	0.134	0.129	-0.202	-0.204	1.576	1.575
	迎角+3°	測定1	1.189	1.219	1.323	1.284	1.294	1.277	0.207	0.195	-0.034	-0.084	1.654	1.668
		測定2	1.213	1.215	1.291	1.296	1.266	1.271	0.215	0.197	-0.045	-0.081	1.665	1.656
		平均値	1.201	1.217	1.307	1.290	1.280	1.274	0.211	0.196	-0.040	-0.083	1.660	1.662
	迎角-3°	測定1	1.282	1.306	1.527	1.516	1.523	1.488	0.361	0.345	-0.302	-0.255	1.501	1.515
		測定2	1.287	1.304	1.532	1.515	1.523	1.494	0.364	0.349	-0.288	-0.253	1.526	1.520
		平均値	1.285	1.305	1.530	1.516	1.523	1.491	0.363	0.347	-0.295	-0.254	1.514	1.518

$$\text{ここに、} B' = \frac{B_1 + B_2}{2}, \quad D' = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

固定・移動模型：基本断面（高欄）

固定模型幅員：10m

移動模型幅員：15m

$$B^* = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$D^* = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

抗力係数 (C_D)

上段：迎角 $+3^\circ$

中段：迎角 0°

下段：迎角 -3°

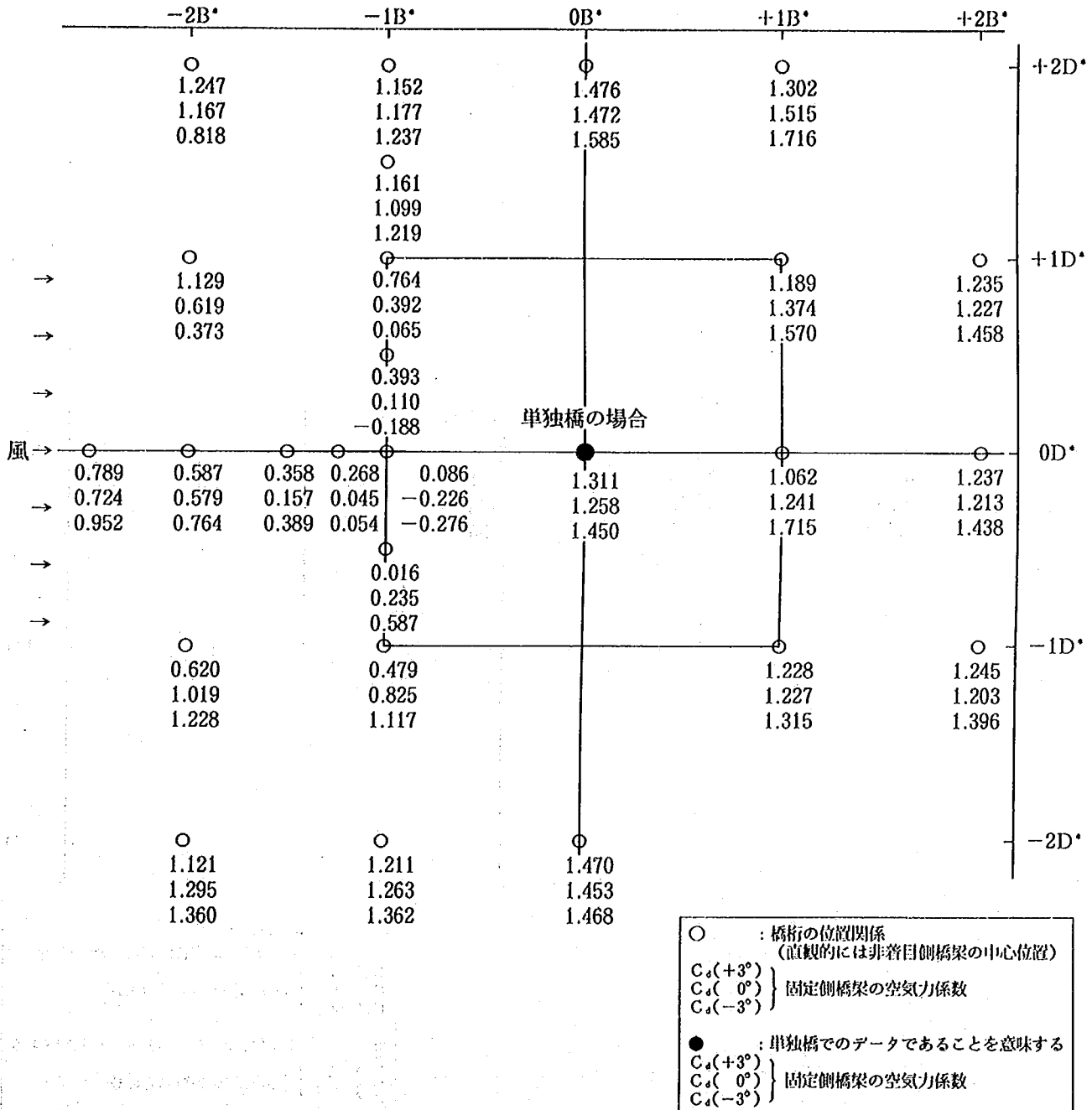


図-2.6.1 模型位置と抗力係数の関係 (風速15m/s)

固定・移動模型：基本断面（高欄）

固定模型幅員：15m

移動模型幅員：6m

$$B^* = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$D^* = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

抗力係数（ C_D ）

上段：迎角 $+3^\circ$

中段：迎角 0°

下段：迎角 -3°

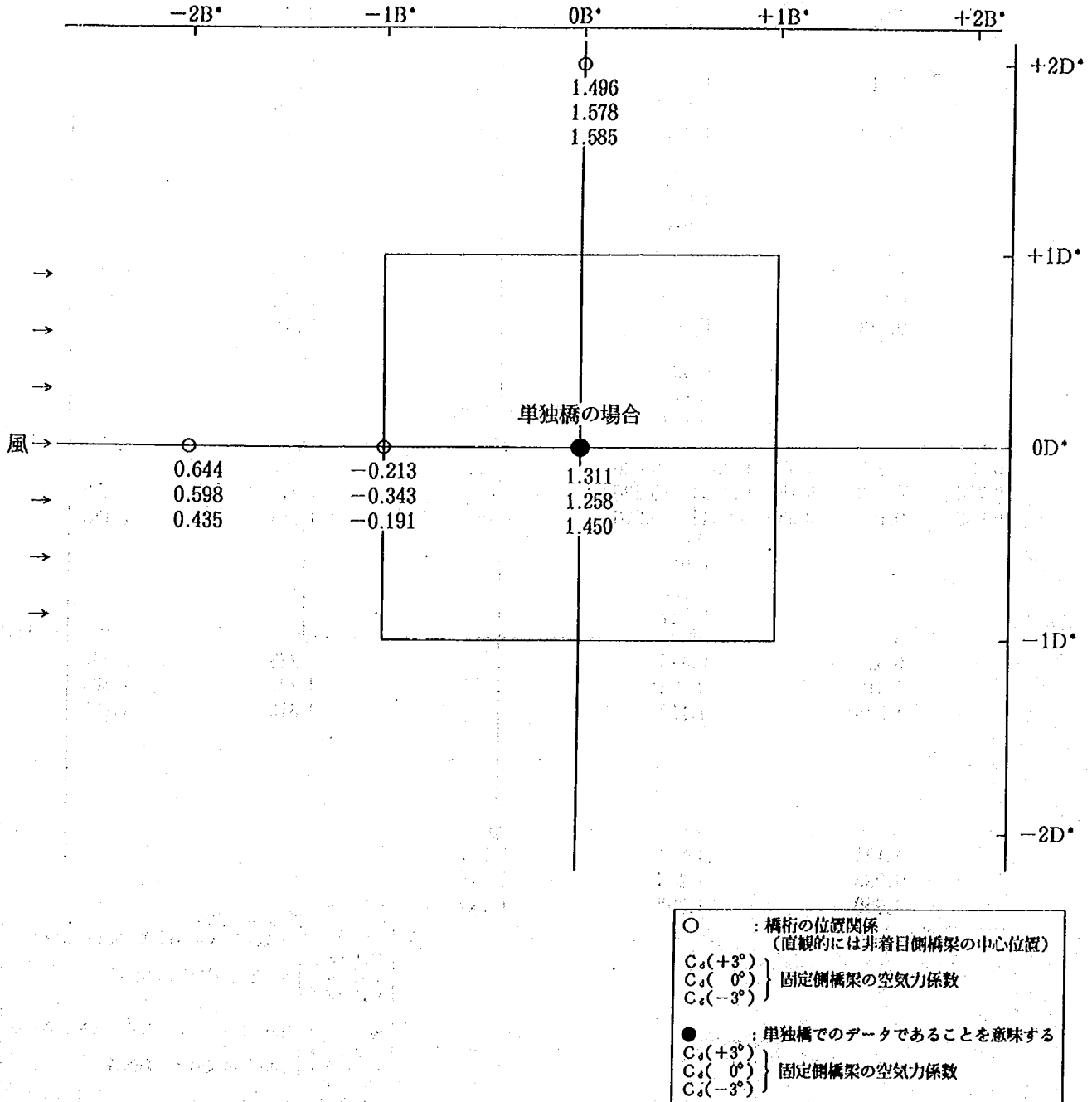


図-2.6.2 模型位置と抗力係数の関係（風速15m/s）

固定・移動模型：基本断面（高欄）

固定模型幅員：15m

移動模型幅員：10m

$$B^* = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

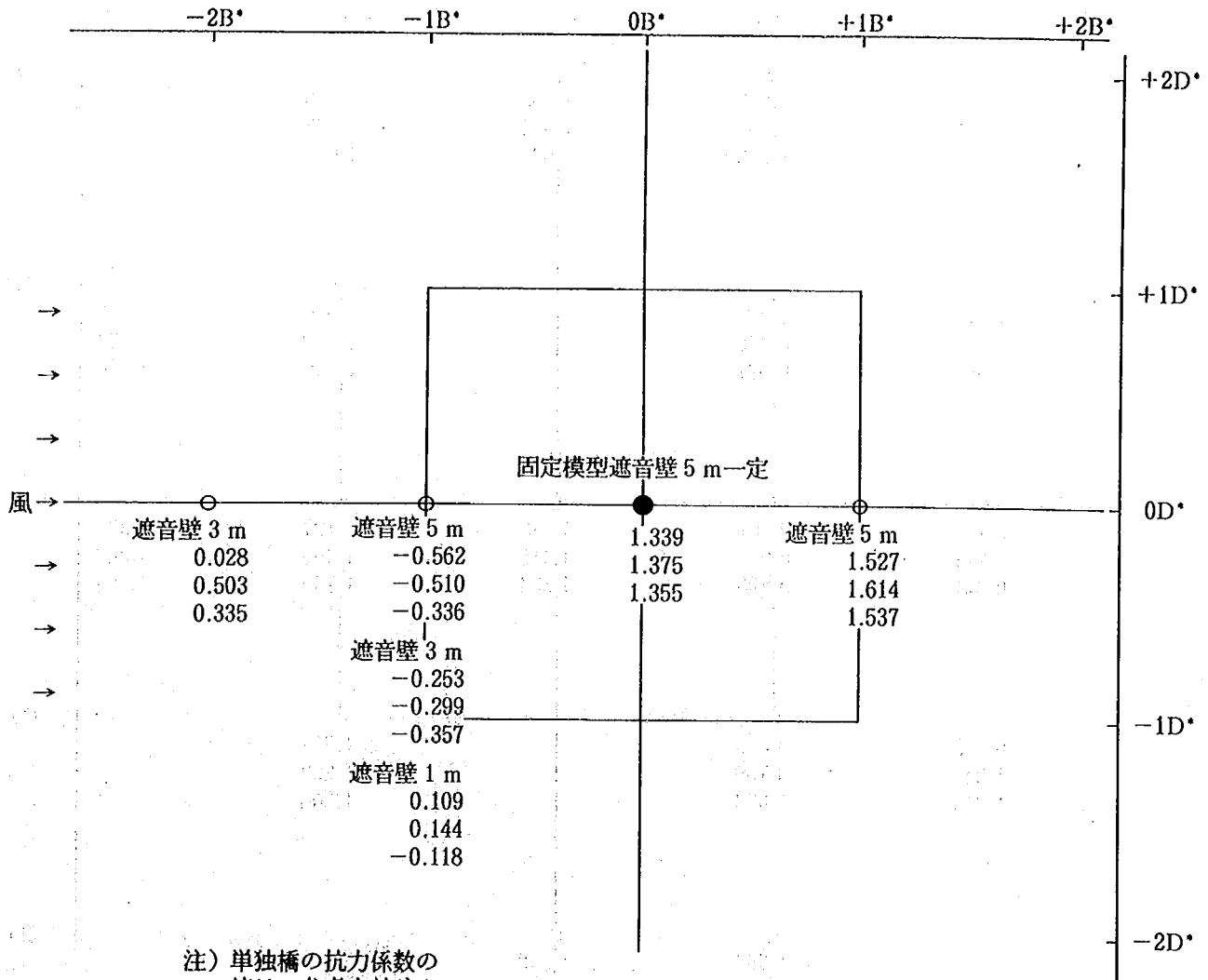
$$D^* = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

抗力係数 (C_D)

上段：迎角 $+3^\circ$

中段：迎角 0°

下段：迎角 -3°



注) 単独橋の抗力係数の値は、参考文献4)より引用した。

- : 橋桁の位置関係 (直観的には非着目側橋梁の中心位置)
- $C_d(+3^\circ)$
- $C_d(0^\circ)$
- $C_d(-3^\circ)$
- 固定側橋梁の空気力係数
- : 単独橋でのデータであることを意味する
- $C_d(+3^\circ)$
- $C_d(0^\circ)$
- $C_d(-3^\circ)$
- 固定側橋梁の空気力係数

図-2.6.3 模型位置と抗力係数の関係 (風速15m/s)

固定・移動模型：基本断面（高欄）

固定模型幅員：10m

移動模型幅員：15m

$$B^* = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$D^* = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

抗力係数 (C_D)

上段：迎角 $+3^\circ$

中段：迎角 0°

下段：迎角 -3°

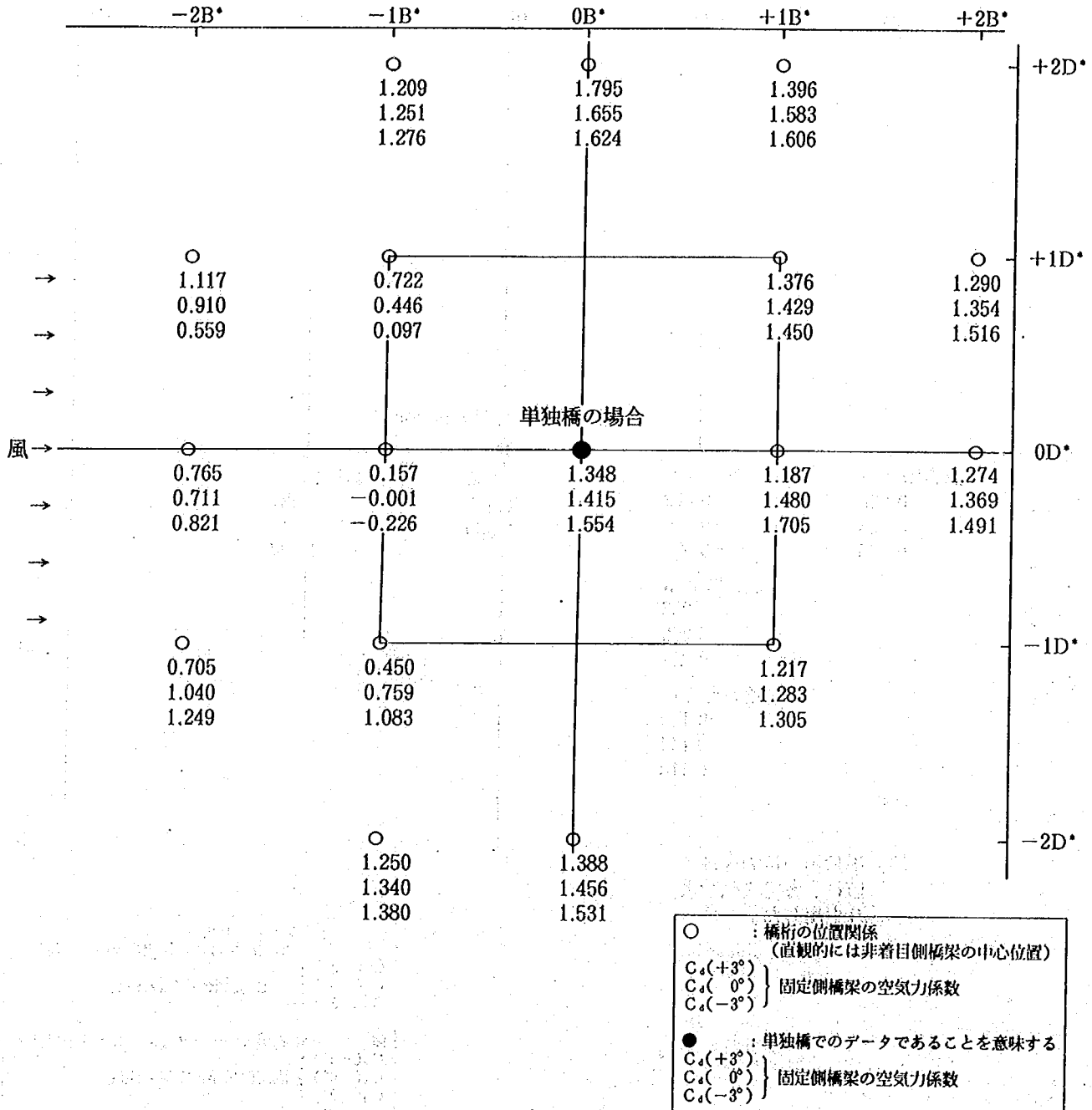


図-2.6.4 模型位置と抗力係数の関係 (風速15m/s)

固定・移動模型：基本断面（高欄）

固定模型幅員：10m

移動模型幅員：15m

$$B^* = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

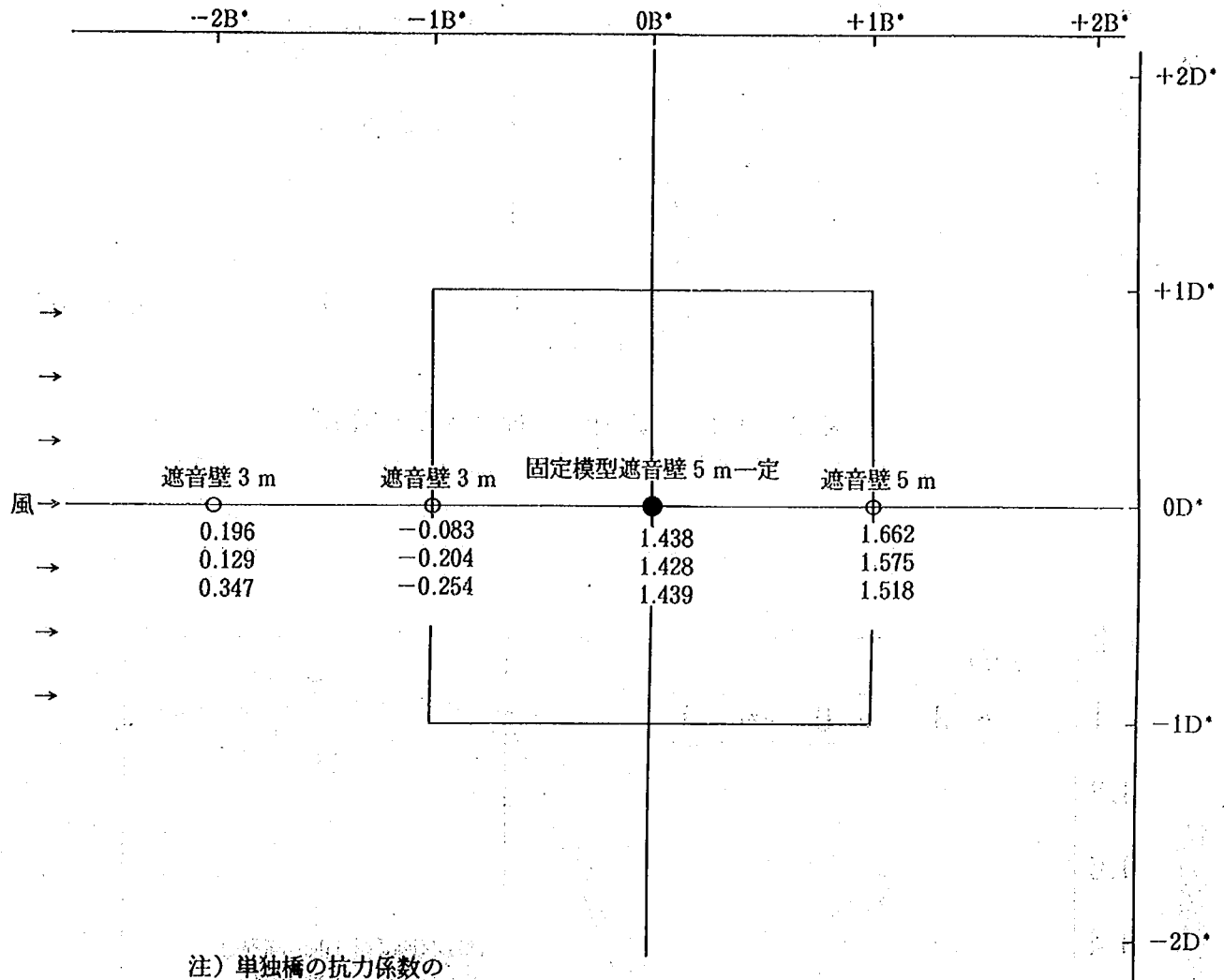
$$D^* = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

抗力係数（ C_D ）

上段：迎角 $+3^\circ$

中段：迎角 0°

下段：迎角 -3°



注) 単独橋の抗力係数の値は、参考文献4)より引用した。

- : 橋桁の位置関係
(直線的には非着目側橋梁の中心位置)
- $C_D(+3^\circ)$
 $C_D(0^\circ)$
 $C_D(-3^\circ)$ } 固定側橋梁の空気力係数
- : 単独橋でのデータであることを意味する
- $C_D(+3^\circ)$
 $C_D(0^\circ)$
 $C_D(-3^\circ)$ } 固定側橋梁の空気力係数

図-2.6.5 模型位置と抗力係数の関係（風速15m/s）

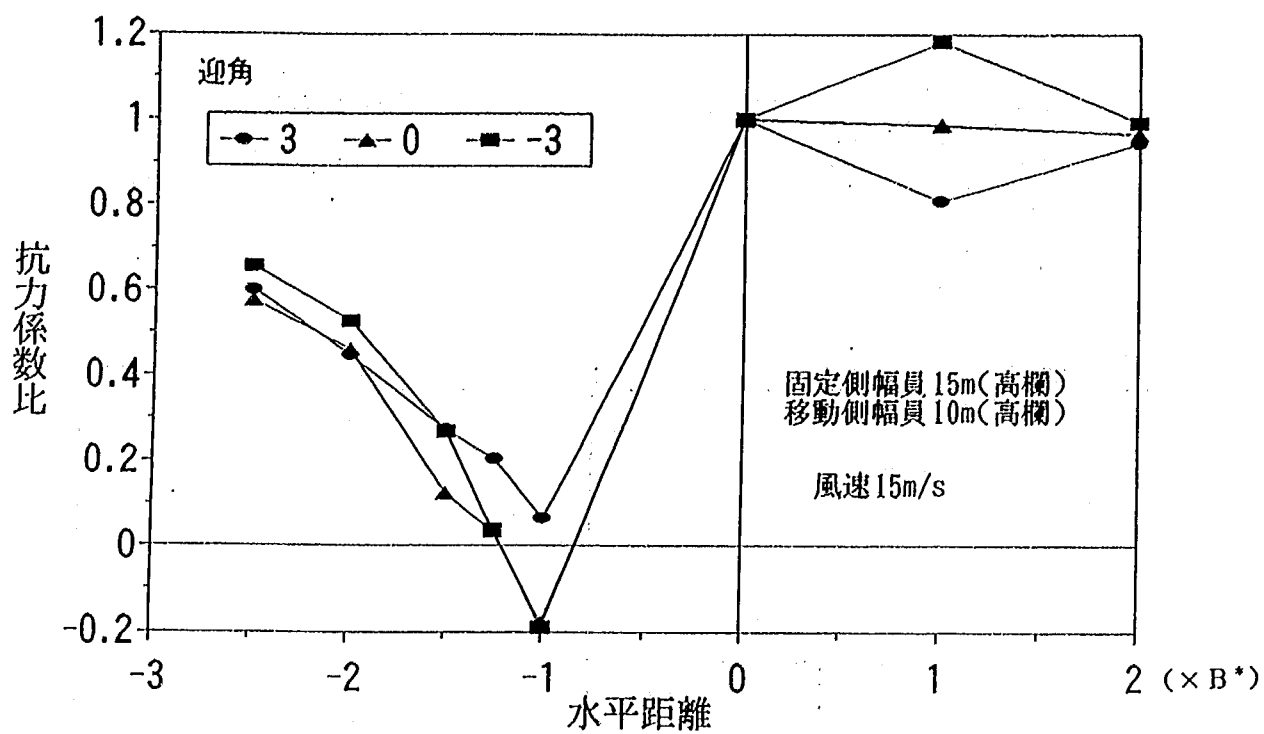


図-2.7.1(1) 水平距離と抗力係数比の関係

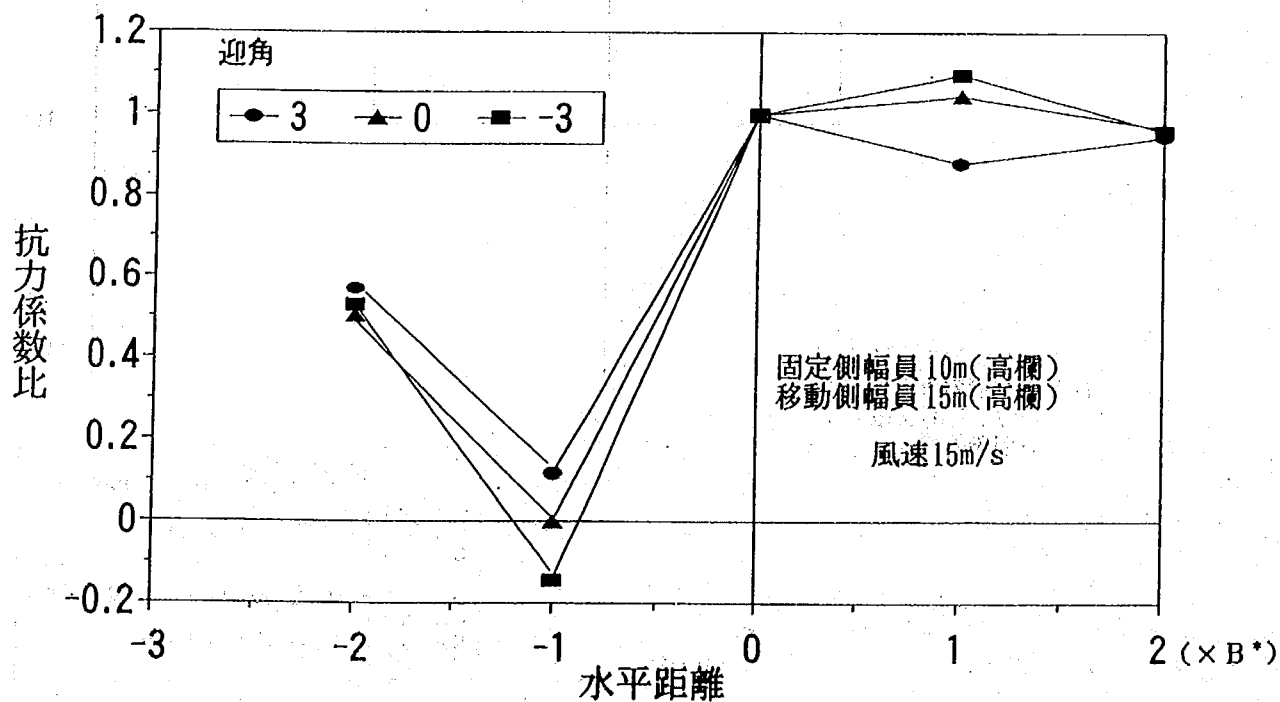


図-2.7.1(2) 水平距離と抗力係数比の関係

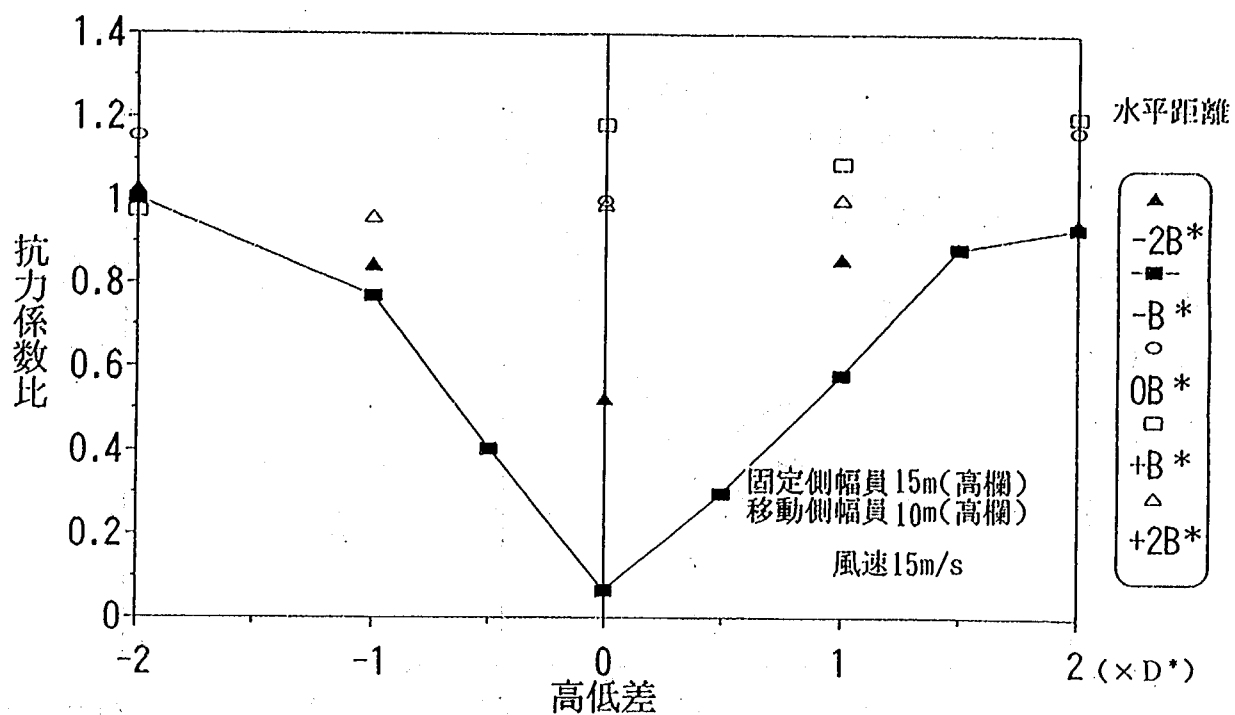


図-2.7.2(1) 高低差と抗力係数比の関係

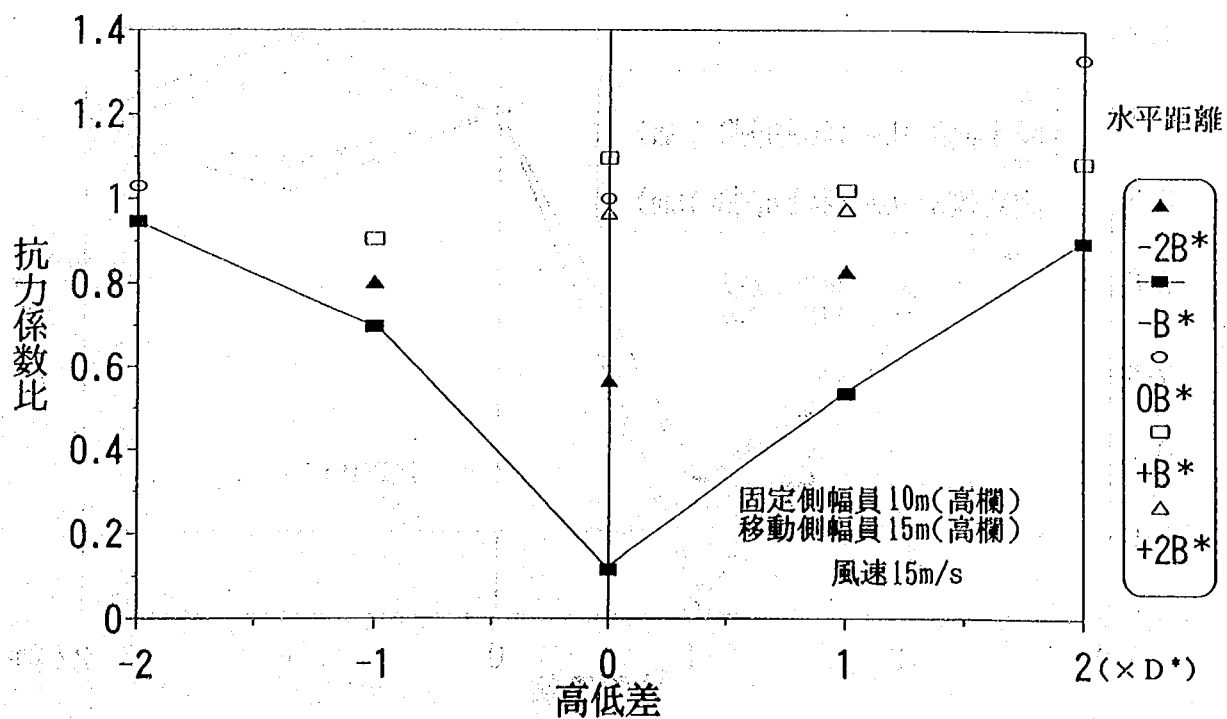


図-2.7.2(2) 高低差と抗力係数比の関係

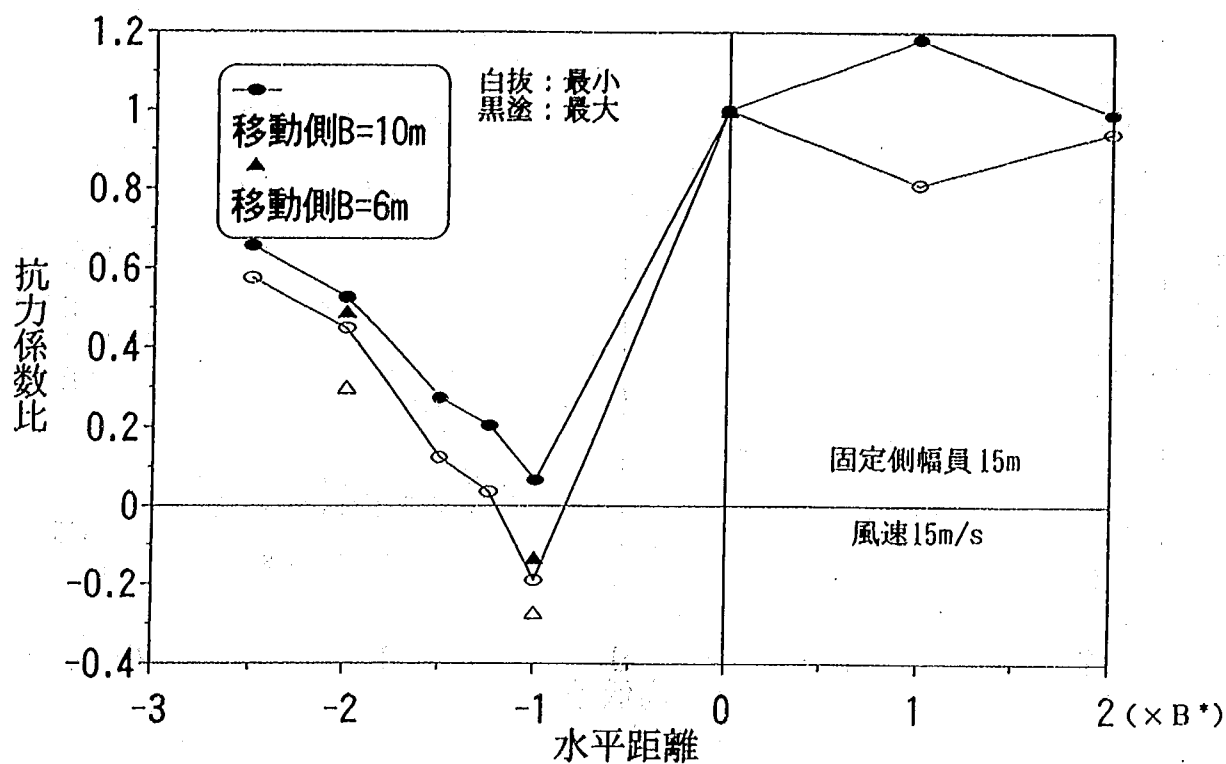


図-2.8 幅員と抗力係数比の関係

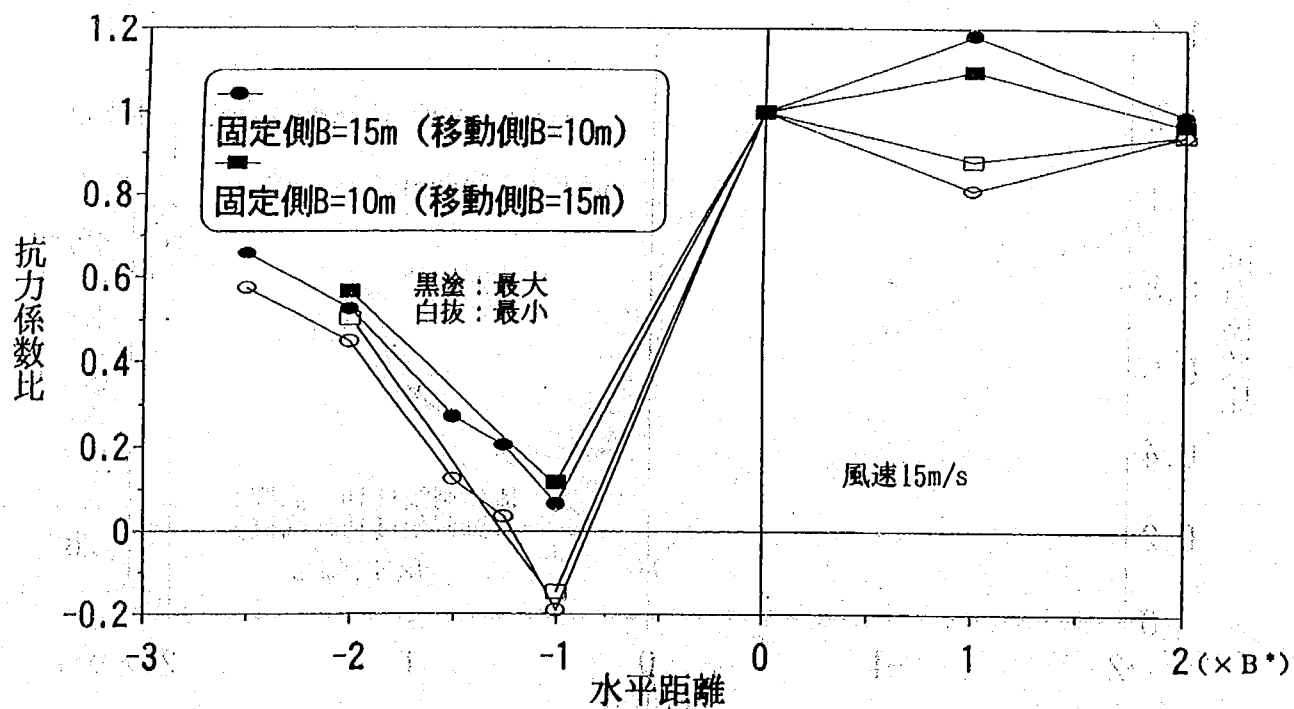


図-2.9.1 水平距離と抗力係数比の関係 (高欄)

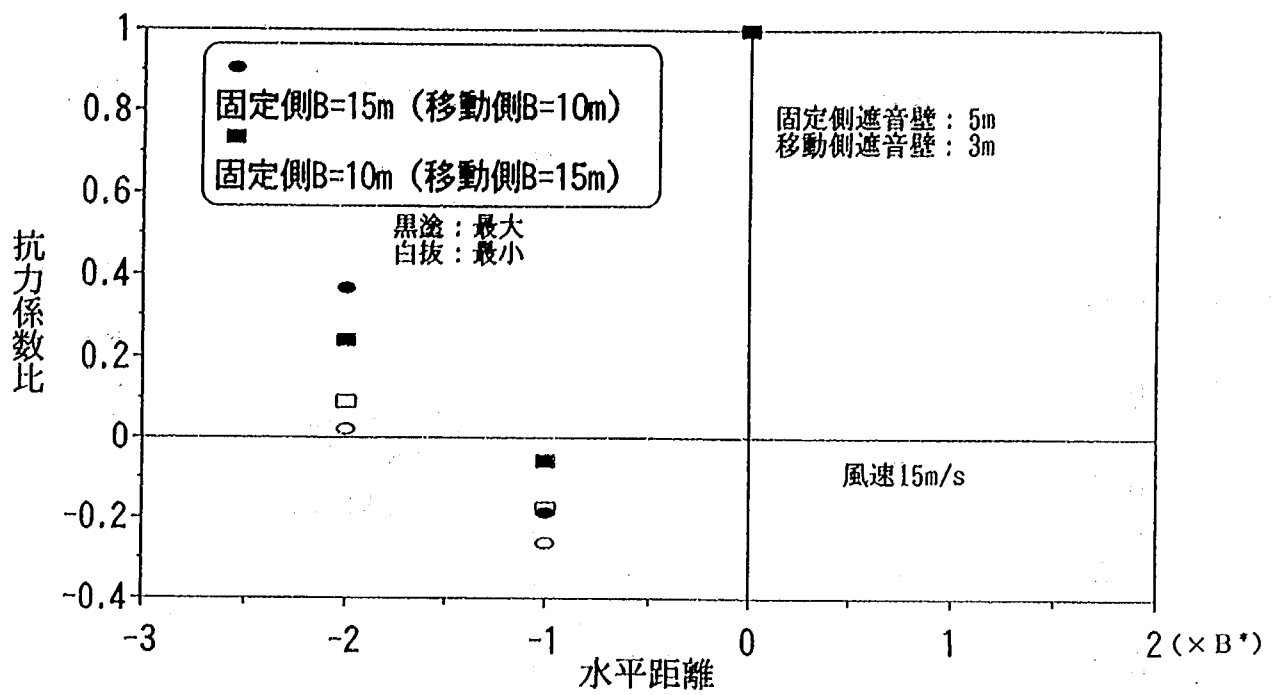


図-2.9.2 水平距離と抗力係数比の関係（遮音壁）

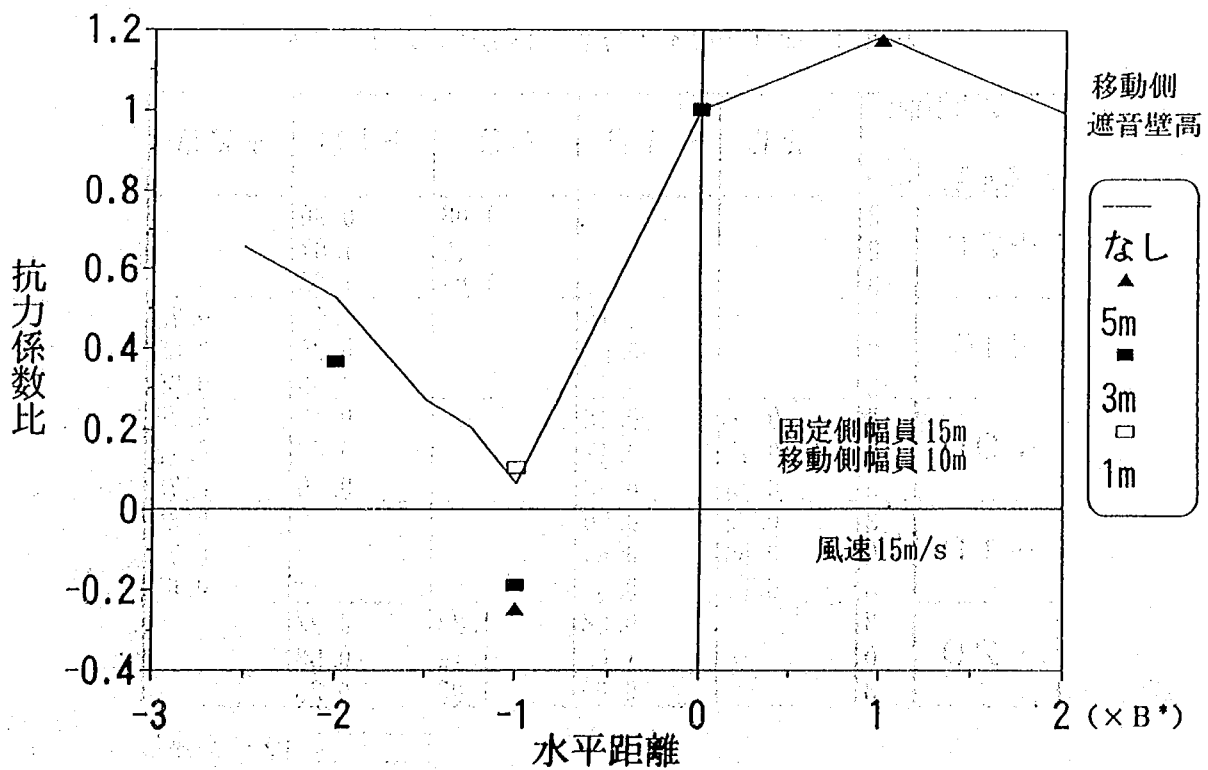


図-2.10.1 遮音壁高と抗力係数比の関係

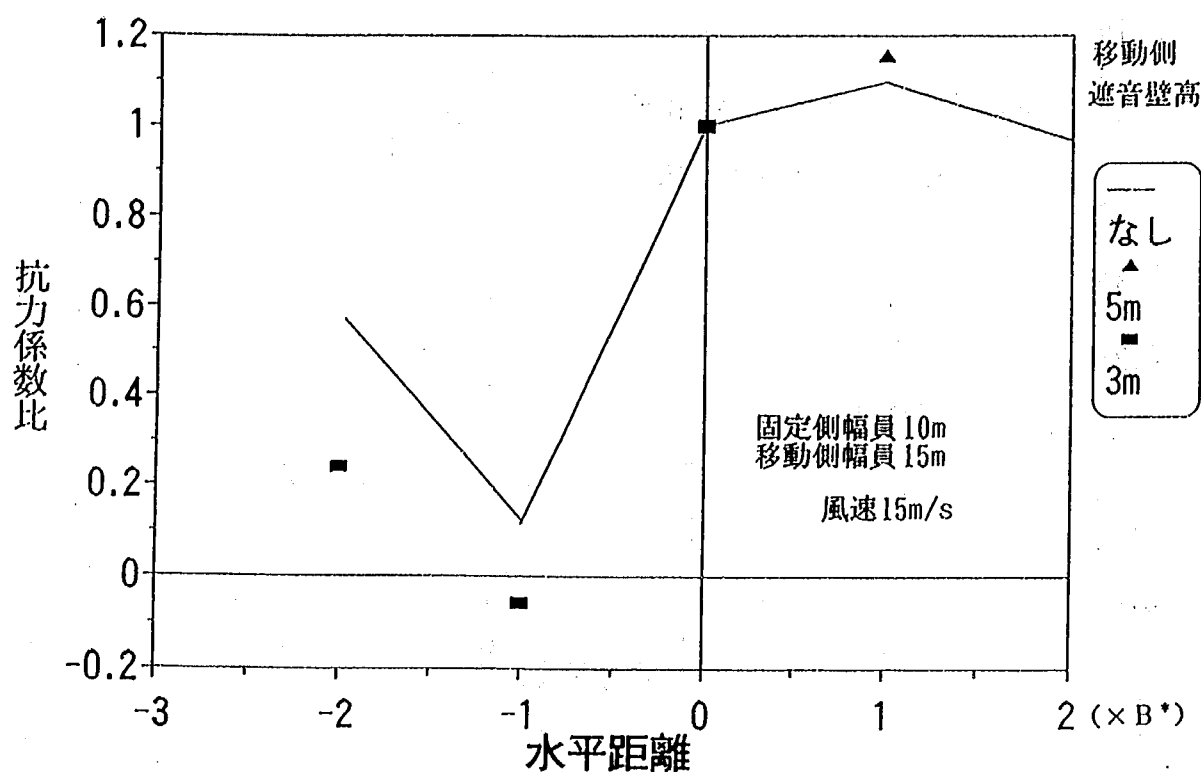


図-2.10.2 遮音壁高と抗力係数比の関係

表-2.4 並列橋梁を支持する橋脚に作用する風荷重

水平距離		-2B	-1B	0B	+1B	+2B
鉛直距離	迎角					
+2D	3			1.08	0.96	
	0			1.10	1.07	
	-3			1.04	1.03	
+1D	3		0.75		0.62	0.73
	0		0.63		0.80	0.85
	-3		0.46		0.88	0.90
+0D	3	0.70	0.48		0.46	0.75
	0	0.73	0.47		0.46	0.72
	-3	0.75	0.48		0.50	0.75
-1D	3	0.72	0.70			0.89
	0	0.89	0.84			0.79
	-3	0.91	0.85			0.65
-2D	3		0.98	1.23	0.92	
	0		1.05	1.16	0.93	
	-3		0.99	1.03	0.86	

データ無し

表中の数値は並列する2橋の抗力の和を、それぞれ単独時の抗力で除したものである。

+1D, -1B等は幅員15mの橋梁を基準とした幅員10mの橋梁の位置を表す。

3. 遮音壁を有する橋桁の空気力計測

3. 1 調査の目的

橋梁の風荷重では、橋梁断面に作用する3分力のうち、通常の場合は揚力と空力モーメントの影響が比較的小さいため抗力のみが考慮される。道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編(2.1.11)²⁾(以下[道示])では、橋軸に直角な水平方向の風による抗力を水平荷重として式(3.1.1),(3.1.2)により算出するとされている。

$$p = \frac{1}{2} \rho \cdot U_d^2 \cdot C_d \cdot G \quad \dots\dots\dots(3.1.1)$$

$$P = p \cdot A_n \quad \dots\dots\dots(3.1.2)$$

ここに、 p : 単位面積あたりの風荷重

ρ : 空気密度

U_d : 設計基準風速

C_d : 抗力係数

G : ガスト応答係数

P : 橋軸方向単位長さあたりの風荷重

A_n : 橋軸方向単位長さあたりの有効鉛直投影面積

上式に示されるガスト応答係数とは、変動風速に起因する変動抗力の効果を考慮するための補正係数である。つまり、自然風は時間的、空間的に風速が変動する乱流であり、平均風速に起因する抗力の他に、変動風速に起因する抗力が作用している。この変動的な抗力に起因する構造物の変形あるいは振動は、ガスト応答と呼ばれている。ガスト応答係数 G は、平均風速による応答と変動風速による応答とを合わせた最大応答と等価な応答を与えるように風荷重を補正する係数であり、式(3.1.3)により表される。

$$\text{ガスト応答係数 } G = \frac{\text{最大応答値}}{\text{平均抗力による応答値}} \quad \dots\dots\dots(3.1.3)$$

[道示]では、ガスト応答係数の設置にあたっては海上の風を想定し、1.9を標準的な値としている。また、道路橋耐風設計便覧³⁾(以下[便覧])によれば、「田園地帯、住宅地あるいは大都市では海上に比べ風の乱れ強さが強いのでガスト応答係数が大きくなるが、風速が海上に比べ低下することにより風荷重としては補い合うものと考えられた。」とされており、特に周囲に住宅が密集している場合は、遮音壁を有する橋梁については、風速の低減が大きいため、風荷重を0.8に低減できることが[道示]に示されている。しかしながら、住宅密集地における風環境は乱れが極めて大きく、また、近年橋脚の高層化、遮音壁の大規模化などにより、都市内橋梁の設計において風荷重の重要性が増大してきており、その適切な評価が必要とされている。

このため本試験では、都市内に相当する気流を発生させ、大規模な遮音壁を有する橋梁について空気力を測定し、変動抗力に対する変動風速の伝達関数である空力アドミッタンスを求め、これに及ぼす断面の影響、気流の影響を調査した。

3. 2 空気力計測実験

3. 2. 1 実験方法

実験は建設省土木研究所耐風工学実験施設内のフラッター風洞を用いて実施した。フラッター風洞の主要諸元は表-3. 2. 1および図-3. 2. 1に示す通りである。

空気力計測試験は、写真-3. 2. 1のように風洞内に固定した簡易装置にロードセルを設置し、さらに2つのロードセルで挟み込むように、橋桁の一部を模型化した2次元剛体模型を取り付け、空気力を計測した。

計測された空気力はA/D変換しパーソナルコンピュータに取り込み、FFTにより解析を行った。

使用模型は、平成3年度に行った「遮音壁を有する橋桁の風洞試験」⁴⁾で用いた断面を基準とした。この実験において用いられた模型断面の概要は以下の通りである。

- ・遮音壁の設置されるケースは都市内の高架部に多いと考え、最も一般的な形式である鉸桁橋や箱桁橋を想定した。
- ・支間長は鉸桁橋・橋桁橋の一般的な値として50mを想定し、腹板高比はプレートガーダーの一般的な値を参考にして1/22程度とし、腹板高を2.2mとした。
- ・張り出しは両側に1mずつとし、桁形状については、模型の単純化のため箱桁矩形の1BOXタイプとした。
- ・橋桁幅員は15mとし、遮音壁は5m、10mの2種類を用意した。
- ・模型縮尺は1/60、1/150、1/200の3種類を使用した(図-3. 2. 3)。
- ・比較のため、これらの模型に5mの遮音壁を設置した場合の、模型断面高さと同じ長さの幅を持つ平板3種類(図-3. 2. 2)についても実験を行った。

実験に使用した気流は、乱れ強さの異なる乱流1、乱流2および3種類の都市内地形相当模型(以下、地形模型)により発生させたものである。

乱流1は、模型設置位置 $z=40\text{cm}$ において $I_u=13\%$ の比較的乱れ強さの小さい気流であり、図-3. 2. 4に示す通り10cm角のラフネスブロックおよびスパイアーにより発生させたものである。

乱流2は、模型設置位置 $z=10\text{cm}$ において $I_u=19\%$ と比較的乱れ強さの大きい気流である。また、この気流の摩擦速度一定の範囲における粗度長 Z_0 は、縮尺1/150模型に対する実橋換算において $Z_0=0.6\text{m}$ であり、道路橋耐風設計便覧における地表粗度区分Ⅲ($Z_0=0.3\text{m}$)とⅣ($Z_0=1.0\text{m}$)の間にあたる。乱流2は、図-3. 2. 5に示す通り5cm角のラフネスブロックのみにより乱流を発生させている。

地形模型1は、高さの異なる3種類のブロックを用いて、豊島区の業務地区の値を参考とし、縮尺1/150で都市内地形パラメータ(ビル高度;15m、高度の標準偏差;5.3m、平面密度;53%)となるようにした。また、気流の等方性が確保されるように、高度のflatness(基準化された3次モーメント)が0となるようにブロックを配置した(図-3. 2. 6)。

さらに、街路の吹き抜けの効果を調査するために中央部分に間隔10cmおよび20cmの吹き抜けを設置した地形模型2、3においても実験を行った。吹き抜けの両側には街路を想定し、高さ15cmのブロックを配置した(図-3. 2. 7~3. 2. 9)。

また、後述するクロススペクトル法による解析の為に、空気力計測と同時に接近流の変動風速を計測した。計測のために熱線風速計を設置した位置を図-3. 2. 10に示す。

表-3.2.1 風洞の主要諸元

風 洞 名		フラッター風洞
風 洞 形 式		ゲッチングン型
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	242.0m ² /sec
	回 転 数	400.0rpm
気 流	容 量	250.0KW
	風 速	1.0~25.0m/sec
乱 れ 率		0.5%

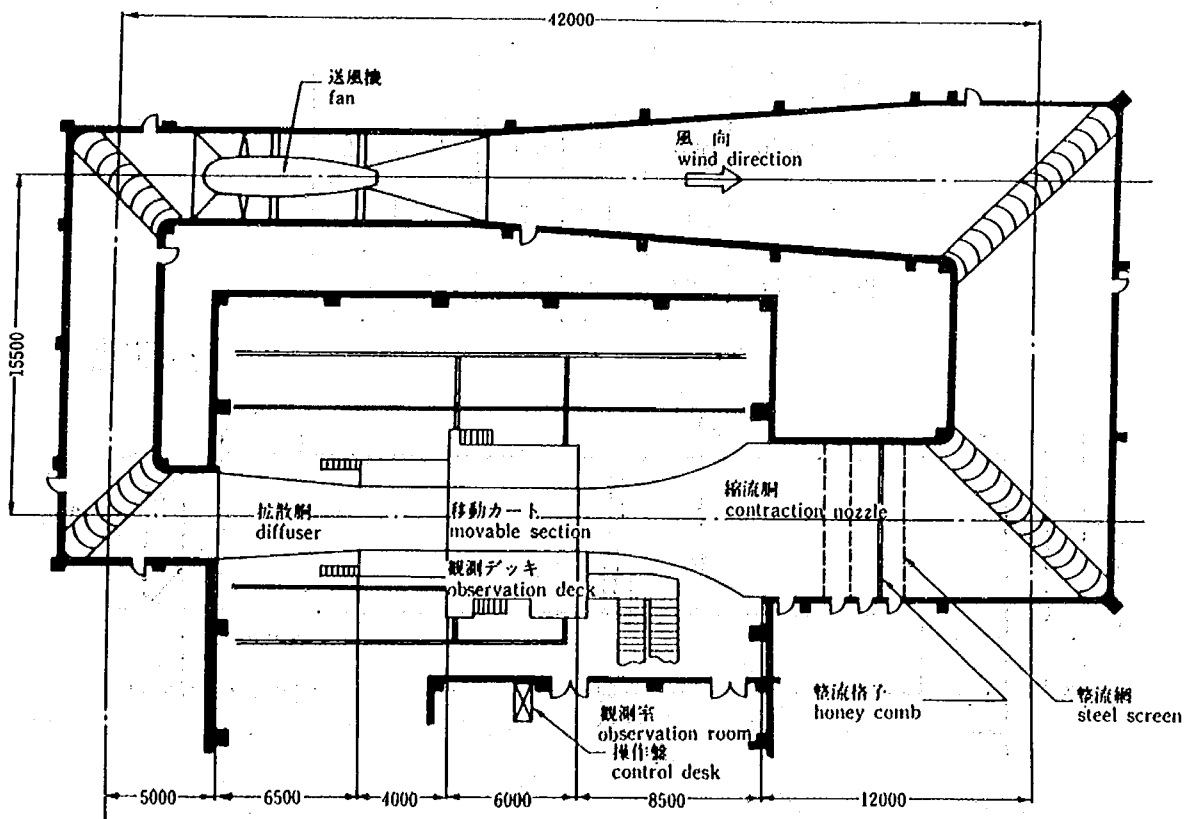


図-3.2.1 フラッター風洞平面図

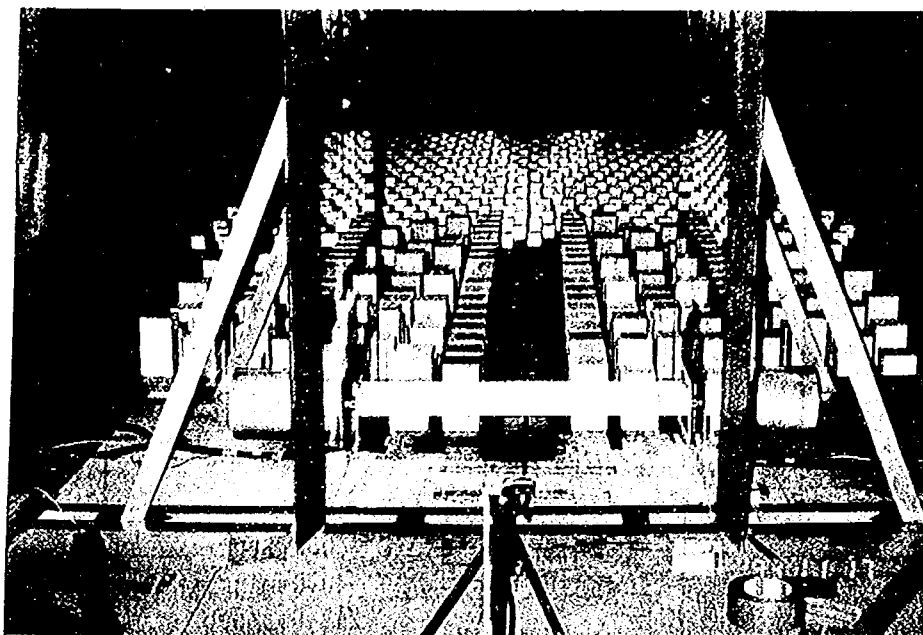


写真-3.2.1 空気力計測、模型設置状況

模型の主要部寸法（単位 mm）

模型名	①	②	③	④	⑤	⑥
平板 1	120	500	10	570	46	35
平板 2	48	500	10	570	46	35
平板 3	36	500	10	570	46	35

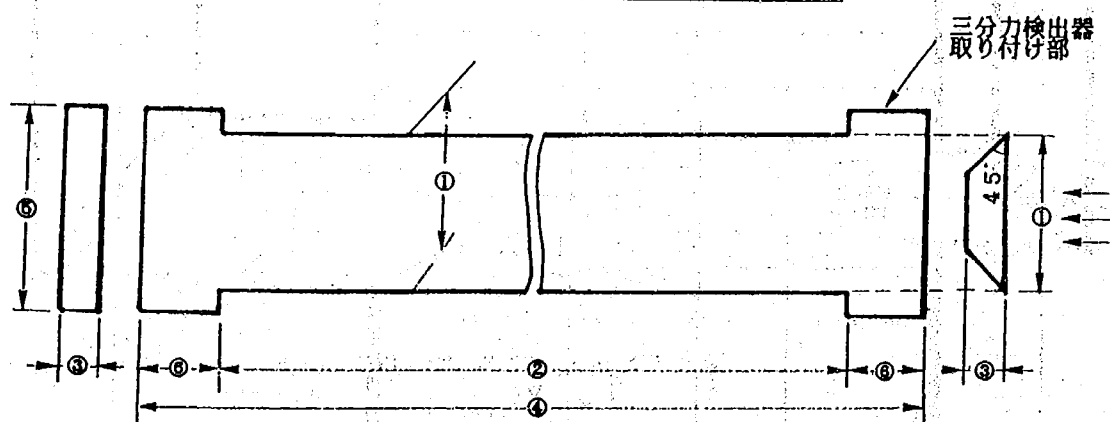


図-3.2.2 平板模型

縮尺模型の主要部寸法（単位 mm）

模型名	縮尺	遮音壁高さ	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	模型長
橋梁 1	1/60	実橋 5m	250.1	83.3	216.7	36.7	16.7	5.0	2.0	980.0
橋梁 2-5	1/150	実橋 5m	100.0	33.3	86.6	14.7	6.7	2.0	1.0	666.6
橋梁 2-10		実橋 10m		66.6						
橋梁 3	1/200	実橋 5m	75.0	25.0	65.0	11.0	5.0	1.5	1.0	500.0

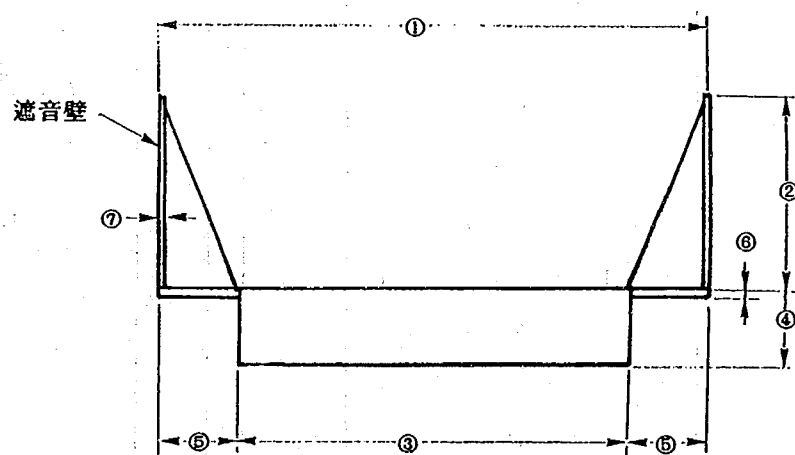


図-3.2.3 都市内橋梁模型

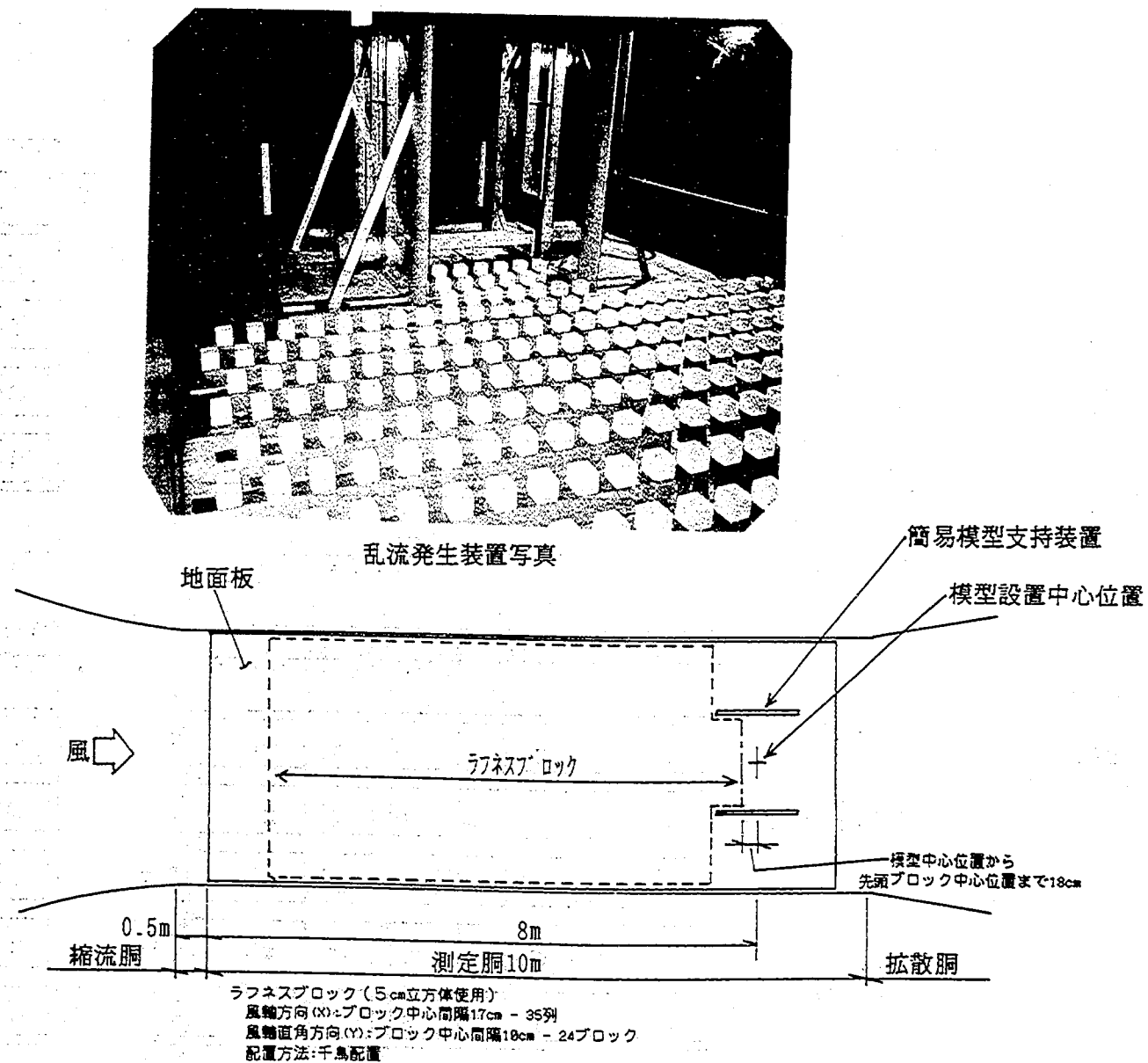


図-3.2.5 乱流発生装置平面図 (乱流2)

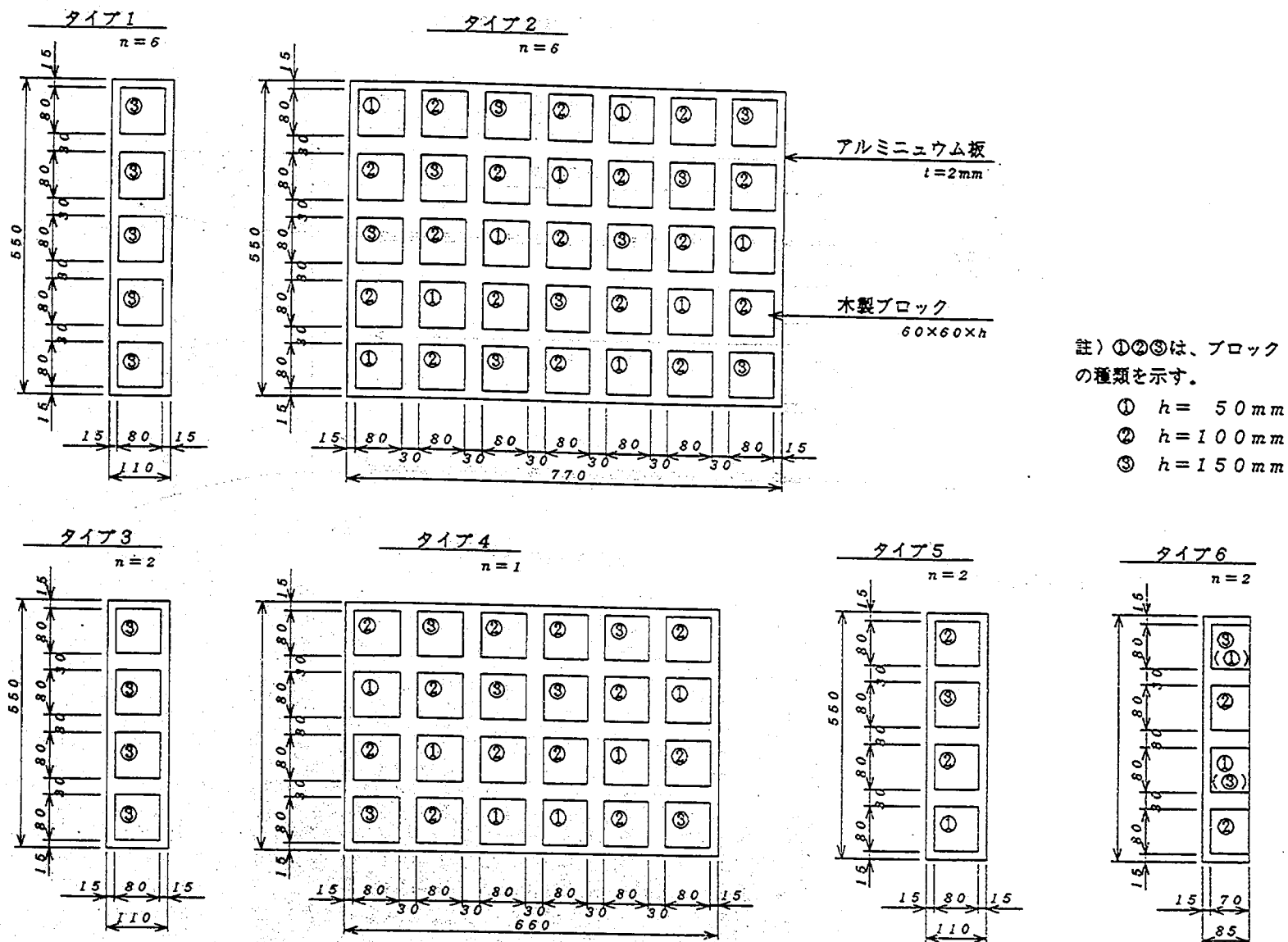
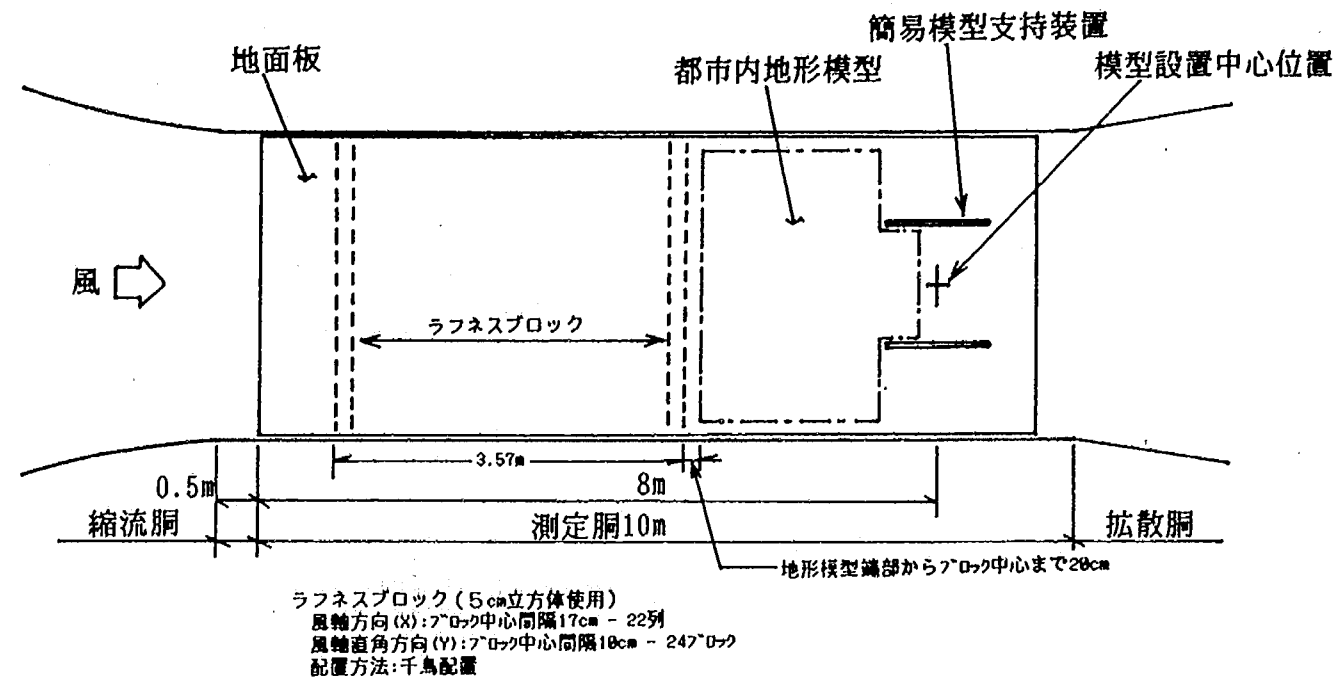
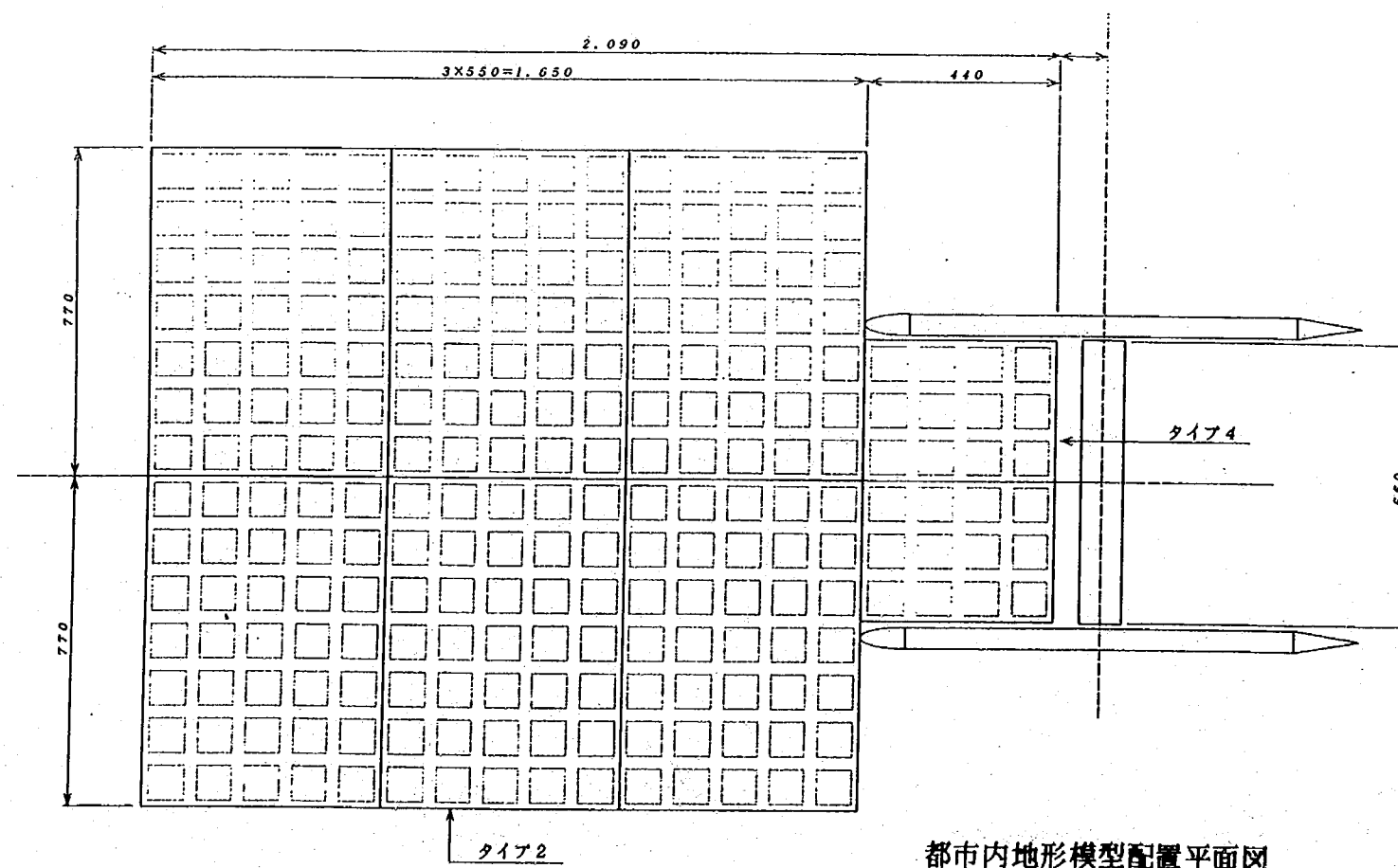


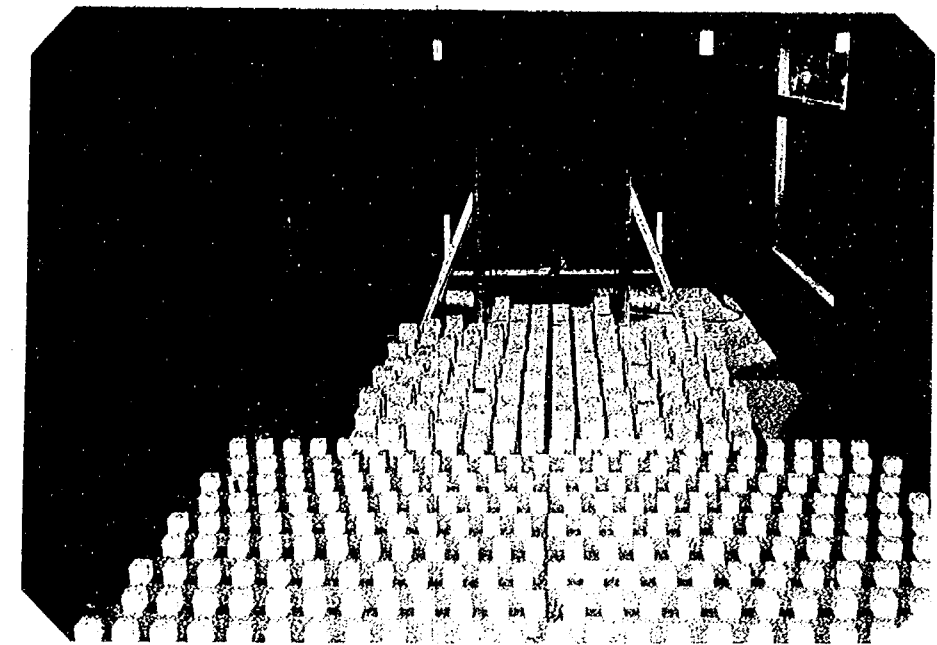
図-3.2.6 都市内地形相当模型のブロック配置



乱流発生装置配置平面図

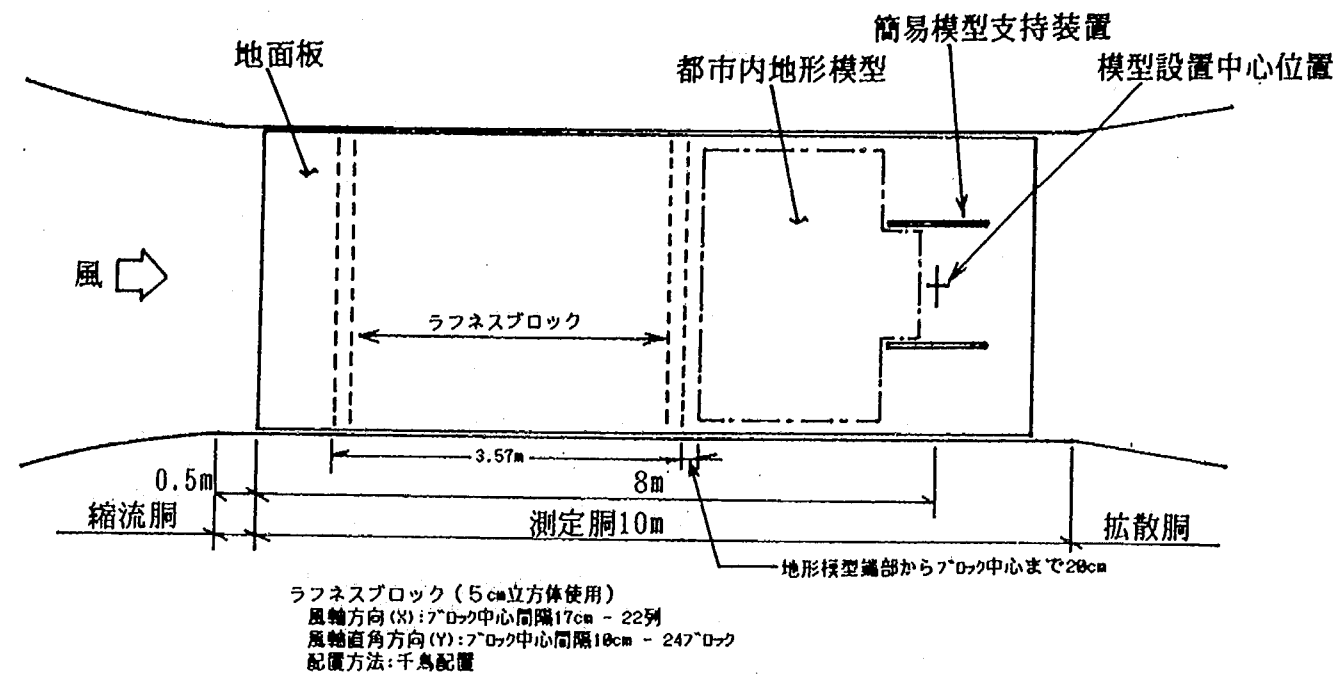


都市内地形模型配置平面図

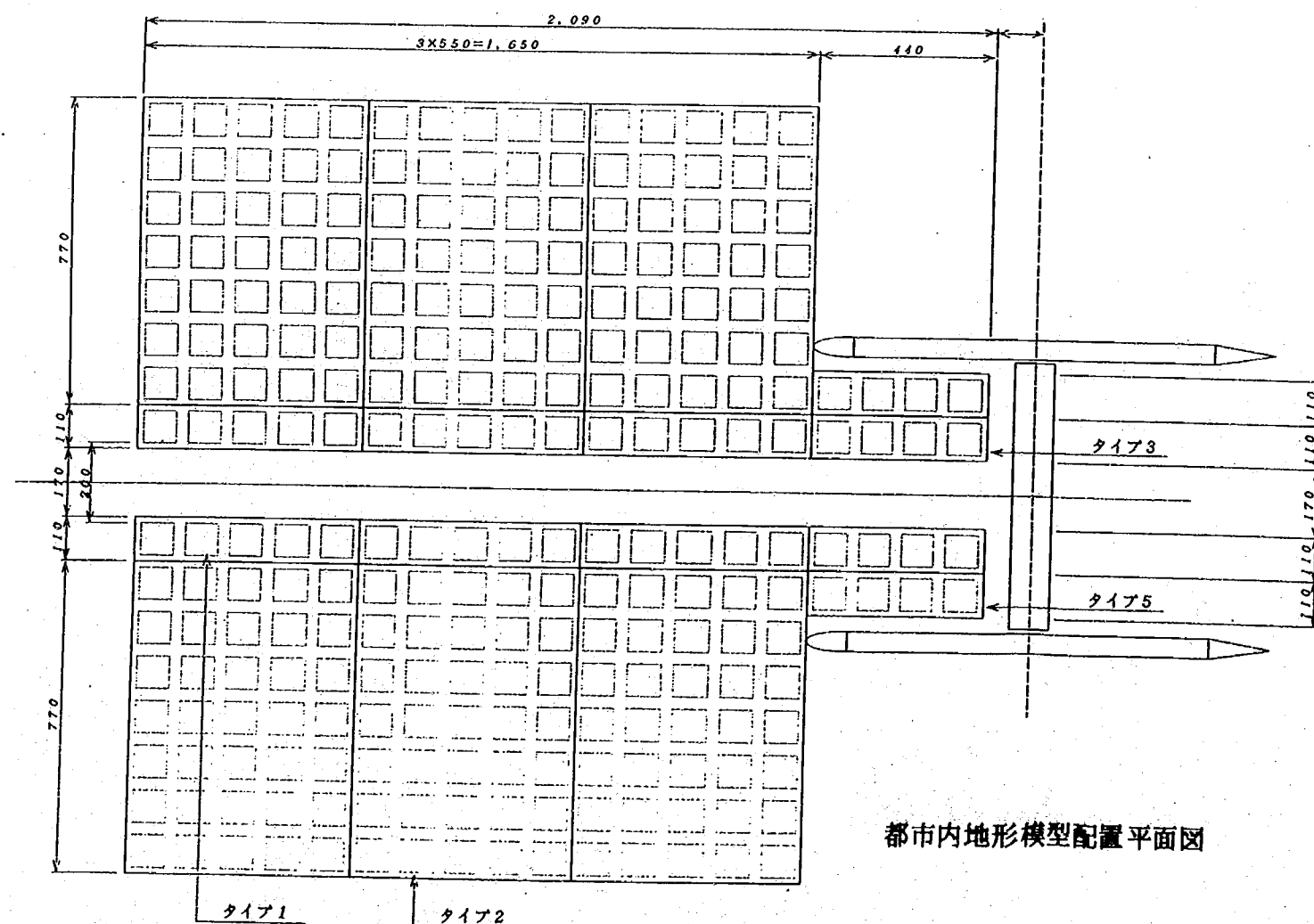


都市内地形模型写真

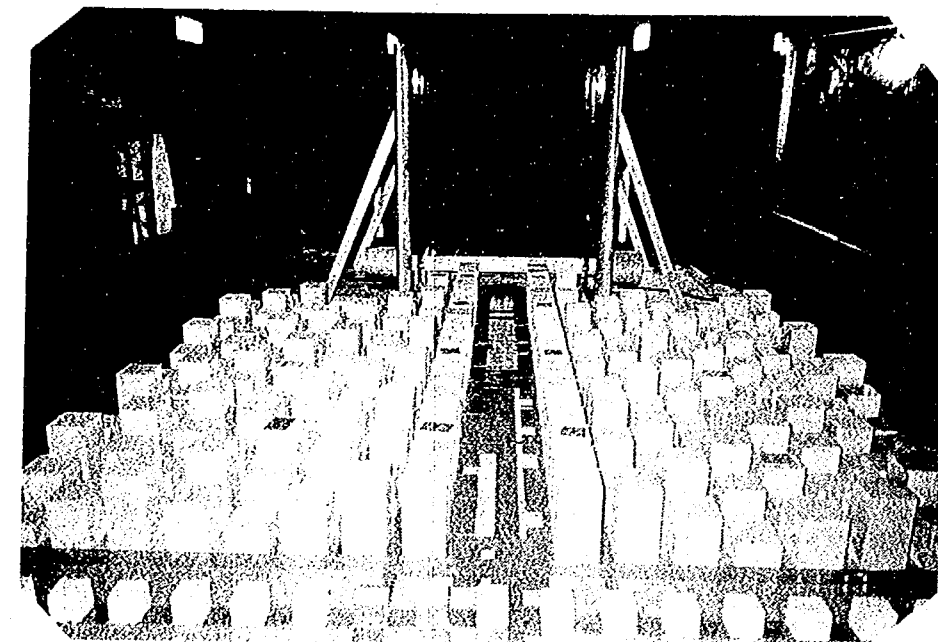
図-3.2.7 乱流発生装置平面図 (地形模型1、街路幅 0cm)



乱流発生装置配置平面図

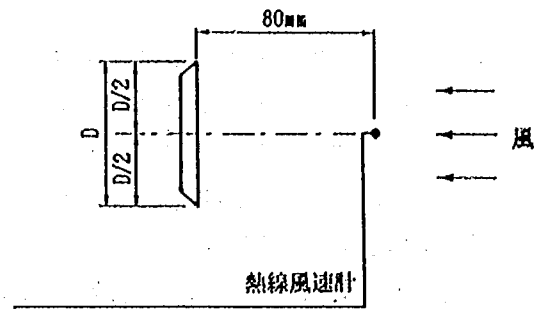


都市内地形模型配置平面図

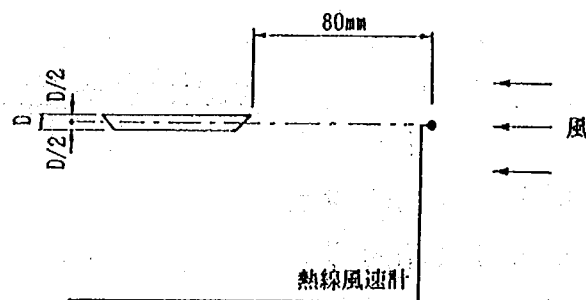


都市内地形模型写真

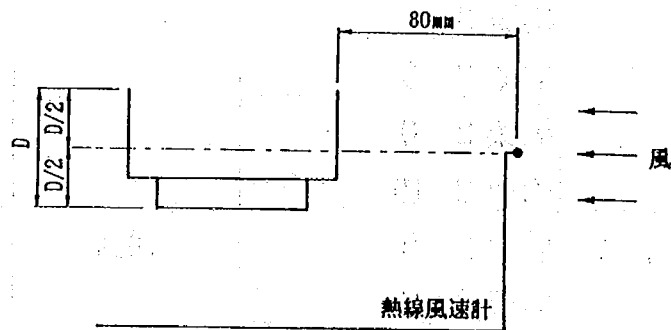
図-3.2.9 乱流発生装置平面図 (地形模型3、街路幅 20cm)



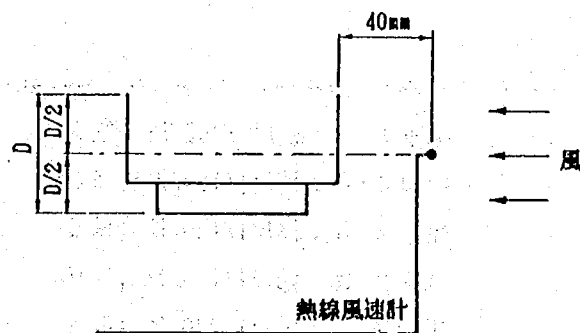
(1) ケース 1 ~ 3



(2) ケース 4



(3) ケース 5 ~ 12



(4) ケース 13 ~ 16

図-3.2.10 熱線風速形設置位置

3. 2. 2 実験ケース

実験ケースを表-3.2.2に示す。実験に設定されたパラメータは次の通りである。

- ① 3種類の投影面積の異なる平板模型による実験。(基礎実験、ケース 1~4)
- ② 3種類の縮尺の異なる模型による実験。(乱れスケールの影響、ケース 5~7)
- ③ 遮音壁高さの異なる模型による実験。(模型形状の影響、ケース 7~9, 10~12)
- ④ 乱れ強さの大きな気流による実験。(ケース 10~12)
- ⑤ 異なる街路幅の地形相当模型による実験。(街路の吹き抜け効果 ケース 14~16)

表-3.2.2 空気力計測実験ケース

ケース	気流	使用模型	模型位置高度	備考
1	乱流 1	平板 1 (鉛直設置)	40cm	基礎実験
2		平板 2 (鉛直設置)		
3		平板 3 (鉛直設置)		
4		平板 1 (水平設置)		
5		橋梁 1		模型縮尺
6		橋梁 3		
7		橋梁 2-5		遮音壁高さ
8		橋梁 2-0		
9		橋梁 2-10		
10	乱流 2	橋梁 2-5	10cm	都市内相当気流 及び、遮音壁高さ
11		橋梁 2-0		
12		橋梁 2-10		
13	地形 1	橋梁 2-5		吹き抜け効果計測
14	地形 2			
15	地形 3			

橋梁 1 : 縮尺 1/60, 遮音壁 5m

橋梁 2-0 : 縮尺 1/150, 遮音壁 0m

橋梁 2-5 : 縮尺 1/150, 遮音壁 5m

橋梁 2-10 : 縮尺 1/150, 遮音壁 10m

橋梁 3 : 縮尺 1/200, 遮音壁 5m

3. 2. 3 解析方法

3.2.3.1 伝達関数の定義

ここでいう空力アドミッタンスは、変動風速が変動空気力に伝達される場合の伝達関数を総称して呼ぶものであり、 $|X(f)|$ とする。このように空力アドミッタンスを考えると、構造物の応答と変動風速は空力アドミッタンスとメカニカルアドミッタンスを介して結合される。メカニカルアドミッタンスとは、構造物に帰属する関数で、変動空気力を構造物の応答に伝達する関数である。

本研究においては、空力アドミッタンスは単位長さあたりの量で定義する。しかしながら、実験において求められる空気力は剛体としての模型全体に作用するものであり、スパン方向の空間的変動の影響を補正しなければならない。ここで単位長さあたりの変動空気力を構造物全体に変換する伝達関数をジョイントアクセプタンス $|J(f)|$ と定義する。

空力アドミッタンスの計測方法には2つの手法が考えられる。すなわち、

①入力および出力におけるそれぞれのパワースペクトルの比によるもの（パワースペクトル法）および

②入力と出力のクロススペクトルと入力のパワースペクトルとの比によるもの（クロススペクトル法）

である。

以下これら2つの方法について説明を行う。

3.2.3.2 パワースペクトル法

単位長さ当たりの変動空気力と空力アドミッタンスの関係を次のように定義する。

$$\begin{aligned}\Delta \hat{D} &= 2\overline{D} \cdot \left\{ X_{Du} \frac{\hat{u}}{U} + X_{Dw} \frac{\hat{w}}{U} \right\} \\ \Delta \hat{L} &= \overline{L} \cdot \left\{ X_{Lu} \frac{\hat{u}}{U} + X_{Lw} \frac{\hat{w}}{U} \right\}\end{aligned} \quad \dots(3.2.1)$$

ここで、

$\Delta D, \Delta L, \Delta M$; 単位長さ当たりの変動抗力、揚力

X_{ij} ; j の変動による i の伝達関数（この絶対値を空力アドミッタンスと定義する）

$\overline{D} = \frac{1}{2} \rho U^2 A_n C_D$; 定常抗力,

$\overline{L} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \cdot dC_F/d\alpha$; 単位迎角変動当たりの変動揚力

A_n ; 模型の投影面積, B ; 模型幅, $\hat{\cdot}$; フーリエ変換

U ; 模型位置の主流方向平均風速 u, w ; 主流方向および鉛直方向の変動風速

(3.2.1)より両辺に共役をかけると、

$$\begin{aligned}\Delta \hat{D} \Delta \hat{D}^* &= \frac{4\overline{D}^2}{U^2} (X_{Du} X_{Du}^* \cdot \hat{u} \hat{u}^* + X_{Dw} X_{Dw}^* \cdot \hat{w} \hat{w}^* + X_{Du} X_{Dw}^* \cdot \hat{u} \hat{w}^* + X_{Dw} X_{Du}^* \cdot \hat{w} \hat{u}^*) \\ \Delta \hat{L} \Delta \hat{L}^* &= \frac{\overline{L}^2}{U^2} (X_{Lu} X_{Lu}^* \cdot \hat{u} \hat{u}^* + X_{Lw} X_{Lw}^* \cdot \hat{w} \hat{w}^* + X_{Lu} X_{Lw}^* \cdot \hat{u} \hat{w}^* + X_{Lw} X_{Lu}^* \cdot \hat{w} \hat{u}^*)\end{aligned} \quad \dots(3.2.2)$$

ここで、主流方向、鉛直方向気流のクロスタームを無視し抗力は主流方向変動風速のみにより生じ、

揚力は鉛直方向変動風速のみにより生ずると仮定すると、式(3.2.2)より次のように示すことができる。

$$\frac{S_{DD}}{(2\bar{D})^2} = |X_{Du}|^2 \frac{S_{uu}}{U^2} \quad \dots(3.2.3)$$

$$\frac{S_{LL}}{\bar{L}^2} = |X_{Lw}|^2 \frac{S_{ww}}{U^2}$$

模型全体に作用する変動空気力を添字Tを使用して表すと、単位長さあたりの変動空気力とは、ジョイントアクセプタンス $|J^P|$ を介して次のように示される。

$$\frac{S_{D_T D_T}(f)}{(2\bar{D}_T)^2} = |J^P|^2 \frac{S_{DD}(f)}{(2\bar{D})^2}, \quad \frac{S_{L_T L_T}(f)}{(2\bar{L}_T)^2} = |J^P|^2 \frac{S_{LL}(f)}{\bar{L}^2} \quad \dots(3.2.4)$$

但し、 $\bar{D}_T = \bar{D} \cdot \ell$, $\bar{L}_T = \bar{L} \cdot \ell$

ここで、ジョイントアクセプタンスは次のように示される。

$$|J^P|^2 = \frac{1}{\ell^2} \int_0^\ell \int_0^\ell \text{co-coh}(f, y_1, y_2) dy_1 dy_2 \quad \dots(3.2.5)$$

co-cohは、ディケイファクターおよび、乱れのスケールを用いて次のように表す。⁵⁾

$$\text{co-coh}(f, y_1, y_2) = \text{EXP} \left(-\frac{k\eta}{2\pi} \right) \quad \dots(3.2.6)$$

$$\text{但し、} \eta = \frac{|y_1 - y_2|}{L_s} \cdot 0.747 \sqrt{1 + 70.8 \left(\frac{f L_s}{U} \right)^2}$$

解析に用いる k および、 L_s はコ・コヒーレンスの実測データより求めた。

式(3.2.5)、(3.2.6)より、

$$|J^P|^2 = \frac{2}{r^2} (r - 1 + e^{-r}) \quad \dots(3.2.7)$$

$$\text{但し、} r = \frac{k\ell}{2\pi L_s} \cdot 0.747 \sqrt{1 + 70.8 \left(\frac{f L_s}{U} \right)^2}$$

従って、(3.2.2)、(3.2.4)より空力アドミッタンスは、パワースペクトル法を示すPを添字につけて次のように表される。

$$|X_{Du}^P| = \frac{1}{|J^P|} \cdot \left\{ \frac{S_{D_T D_T}(f) / (2\bar{D}_T)^2}{S_{uu}(f) / U^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots(3.2.8)$$

$$|X_{Lw}^P| = \frac{1}{|J^P|} \cdot \left\{ \frac{S_{L_T L_T}(f) / \bar{L}_T^2}{S_{ww}(f) / U^2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

3.2.3.3 クロス スペクトル法

式 (3.2.1) より、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\Delta \hat{D} \Delta \hat{u}^* &= \frac{2 \bar{D}}{U} (X_{Du} \cdot \hat{u} \hat{u}^* + X_{Dw} \cdot \hat{w} \hat{u}^*) \\ \Delta \hat{D} \Delta \hat{w}^* &= \frac{2 \bar{D}}{U} (X_{Du} \cdot \hat{u} \hat{w}^* + X_{Dw} \cdot \hat{w} \hat{w}^*) \\ \Delta \hat{L} \Delta \hat{u}^* &= \frac{\bar{L}}{U} (X_{Lu} \cdot \hat{u} \hat{u}^* + X_{Lw} \cdot \hat{w} \hat{u}^*) \\ \Delta \hat{L} \Delta \hat{w}^* &= \frac{\bar{L}}{U} (X_{Lu} \cdot \hat{u} \hat{w}^* + X_{Lw} \cdot \hat{w} \hat{w}^*)\end{aligned}\quad \dots(3.2.9)$$

これより、クロスタームを無視すると、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\frac{|S_{Du}(f)|}{2 \bar{D} U} &= |X_{Du}(f)| \frac{S_{uu}(f)}{U^2}, \quad \frac{|S_{Dw}(f)|}{2 \bar{D} W} = |X_{Dw}(f)| \frac{S_{ww}}{U^2} \\ \frac{|S_{Lu}(f)|}{\bar{L} U} &= |X_{Lu}(f)| \frac{S_{uu}(f)}{U^2}, \quad \frac{S_{Lw}(f)}{\bar{L} W} = |X_{Lw}(f)| \frac{S_{ww}}{U^2}\end{aligned}\quad \dots(3.2.10)$$

クロススペクトルについても式 (3.2.4) と同様に次のように表される。

$$\begin{aligned}\frac{|S_{DTu}(f)|}{2 \bar{D}_T U} &= |J^c(f)| \frac{S_{Du}(f)}{\bar{D} U}, \quad \frac{|S_{DTw}(f)|}{2 \bar{D}_T U} = |J^c(f)| \frac{S_{Dw}(f)}{\bar{D} U} \\ \frac{|S_{LTu}(f)|}{\bar{L}_T U} &= |J^c(f)| \frac{S_{Lu}(f)}{\bar{L} U}, \quad \frac{|S_{LTw}(f)|}{\bar{L}_T U} = |J^c(f)| \frac{S_{Lw}(f)}{\bar{L} U}\end{aligned}\quad \dots(3.2.11)$$

但し、(3.2.5) と同様に、 $|J^c|$ は次のように表される。

$$|J^c(y_1, f)| = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell \text{co-coh}(f, y_1, y_2) dy_2 \quad \dots(3.2.12)$$

(3.2.6) と同様に、 $\text{co-coh}(f, y_1, y_2)$ を近似する、さらに模型位置中央において気流計測を行ったため、 $y_1 = \frac{\ell}{2}$ を代入すると、

$$\left| J^c\left(\frac{\ell}{2}, f\right) \right| = \frac{2}{r^2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r}{2}\right) \right\} \quad \dots(3.2.13)$$

$$\text{但し、} \quad r = \frac{k \ell}{L_s} \quad 0.747 \sqrt{1 + 70.8 \left(\frac{f L_s}{U} \right)^2}$$

と表される。

従って式 (3.2.10), (3.2.11) より、空力アドミッタンスはクロススペクトル法を示す添字 c をつけて次のように表される。

$$\begin{aligned}|X_{Du}^c| &= \frac{1}{|J^c|} \frac{S_{DTu} / (2 \bar{D}_T U)}{S_{uu} / U^2}, \quad |X_{Dw}^c| = \frac{1}{|J^c|} \frac{S_{DTw} / 2 \bar{D}_T U}{S_{ww} / U^2} \\ |X_{Lu}^c| &= \frac{1}{|J^c|} \frac{S_{LTu} / (\bar{L}_T U)}{S_{uu} / U^2}, \quad |X_{Lw}^c| = \frac{1}{|J^c|} \frac{S_{LTw} / (\bar{L}_T U)}{S_{ww} / U^2}\end{aligned}\quad \dots(3.2.14)$$

3. 3 計測および解析結果

3. 3. 1 気流計測結果

模型設置位置における主流方向平均風速の水平分布を図-3.3.1、主流方向の乱れ強さの水平分布を図-3.3.2に示す。これより、乱流1、2においては平均風速および乱れ強さはほぼ一様に分布していると思われることができる。

都市内地形相当模型については、水平方向で変動が見られる。地形1（街路なし）は、中央で風速が低く、中央から100mmおよび300mm程度はなれた位置において風速が高い。また、乱れ強さについても100mmおよび300mm程度の位置において低いという同様の傾向が見られる。これは、地形模型のこの水平方向位置において高さ50mmの低いブロックが配置されていた為であると思われる（図-3.3.3、図-3.3.4）。

地形2、3についてはそれぞれ吹き抜けの中央部分において風速が高くなっている。また、地形2では100mm程度の位置、地形3では150mm程度の位置で最も風速が低くなっている（図-3.3.3）。

図-3.3.5、図-3.3.6に $\Delta y=0$ mにおける平均風速の鉛直分布を示す。地形1、2については、上空の平均風速と比べて模型位置における平均風速はかなり低い。

2体の熱線風速計を用いて、各乱流のy方向の相関 r_y を調べた結果が図-3.3.7、図-3.3.8である。図中には、指数形の近似式 $r_y = \exp(-\Delta y/L_s)$ もあわせて示してある。実測値との比較すると実測値では距離がある程度離れるとマイナスの相関を示す部分において近似式と離れている。そのため、正確に乱れスケールを特定することは難しいが、概ね乱流1は0.05m、乱流2は0.1mであることがわかる。地形模型については、街路のない地形1は概ね0.03mと読めるが、地形2、3に対しては街路の影響が相関にも現れているため特定するのは難しいが、おおよそ0.05m程度であると思われる（図-3.3.8）。また、地形模型については風速が最も低くなる吹き抜けの両側と模型中央部との間で、主流方向風速について高い負の相関が見られる。

次にコ・コヒーレンス関数co-cohにより変動風速の空間的変動を周波数別に調べた結果を図-3.3.9～図-3.3.13に示す。同図には、各気流に対し Δy の異なるco-cohを重ね合わせた結果を記入してある。また、同図には前項の式3.2.6において示された次式を近似値として重ね合わせている。

$$\text{co-coh}(f, \Delta y) = \exp\left(-\frac{k\eta}{2\pi}\right) \quad \text{但し、} \quad \eta = \frac{\Delta y}{L_s} \cdot 0.747 \sqrt{1 + 70.8 \left(\frac{f L_s}{U}\right)^2}$$

一般的にco-cohはDavenportの提案した

$$\text{co-coh}(f) = \exp\left(\frac{-kf\Delta y}{U}\right) \quad \dots(3.3.1)$$

を使用することが多い。この式は簡便なため、実用的ではあるが、周波数が低くなると相関が1に漸近するなど理論的に矛盾する。特に今回の実験のように乱れスケールが比較的小さい場合は理論式とのかい離が大きくなる。そのため、本調査ではco-cohを式3.2.6のように近似した。この式は如何なる Δy においても負相関にならないなどの問題点はあるものの、低周波数領域においてはDavenportのco-cohよりも近似の度合いは大きい。またESDUによれば、 L_s は周波数 f の関数となっているが、簡便のため図-3.3.9～図-3.3.13に示すように、式3.2.6を実験より求められたコ・コヒーレンスに近似させた値を用いた。

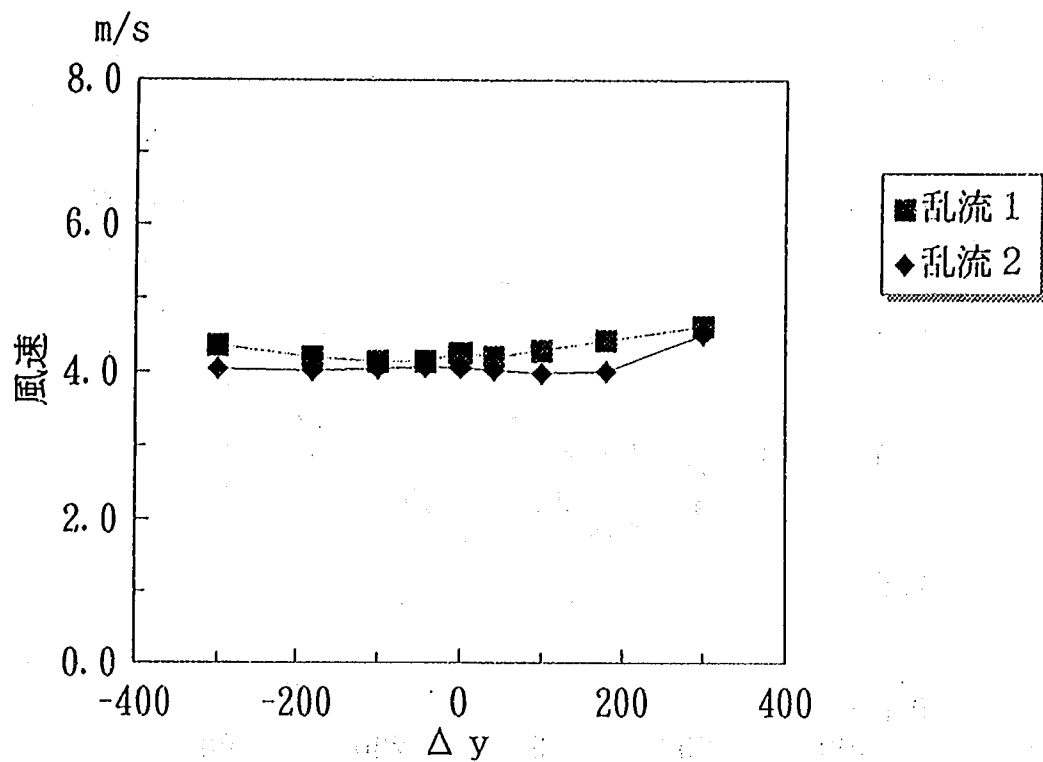


図-3.3.1 平均風速の水平分布（乱流 1、2）

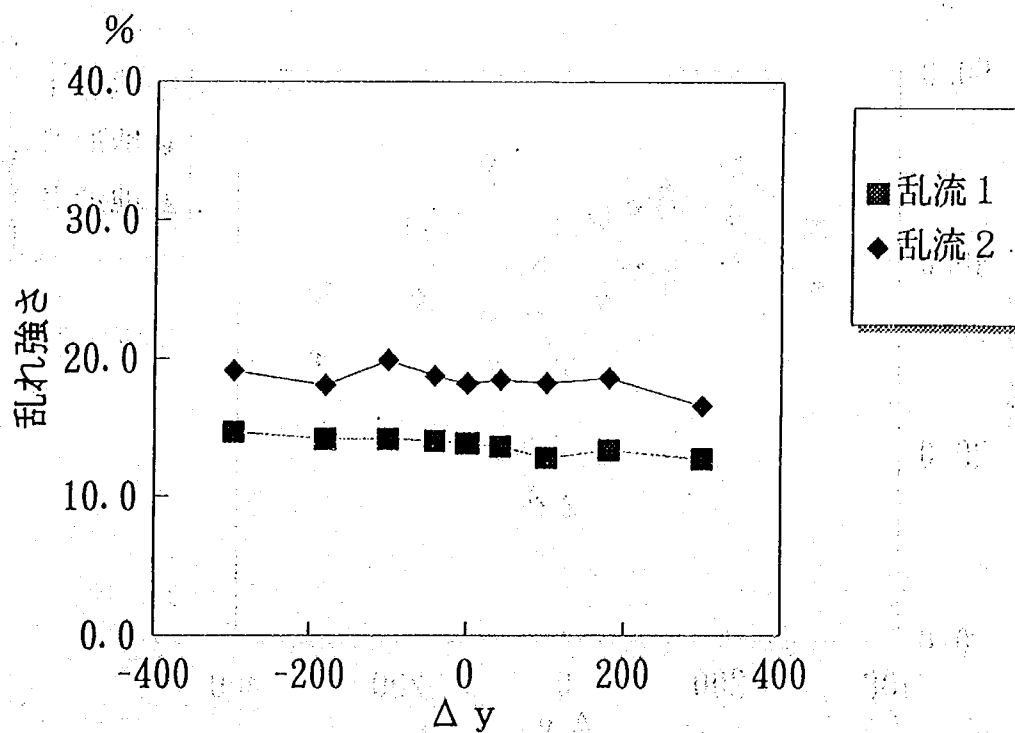


図-3.3.2 乱れ強さの水平分布（乱流 1、2）

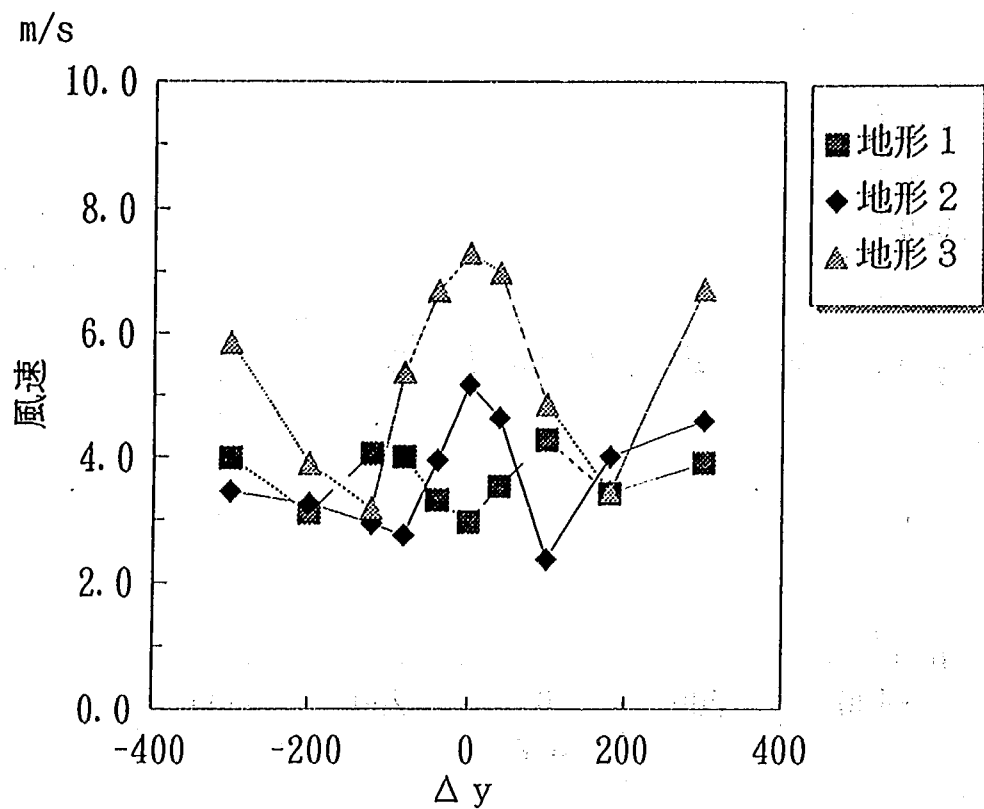


図-3.3.3 平均風速の水平分布 (地形 1 ~ 3)

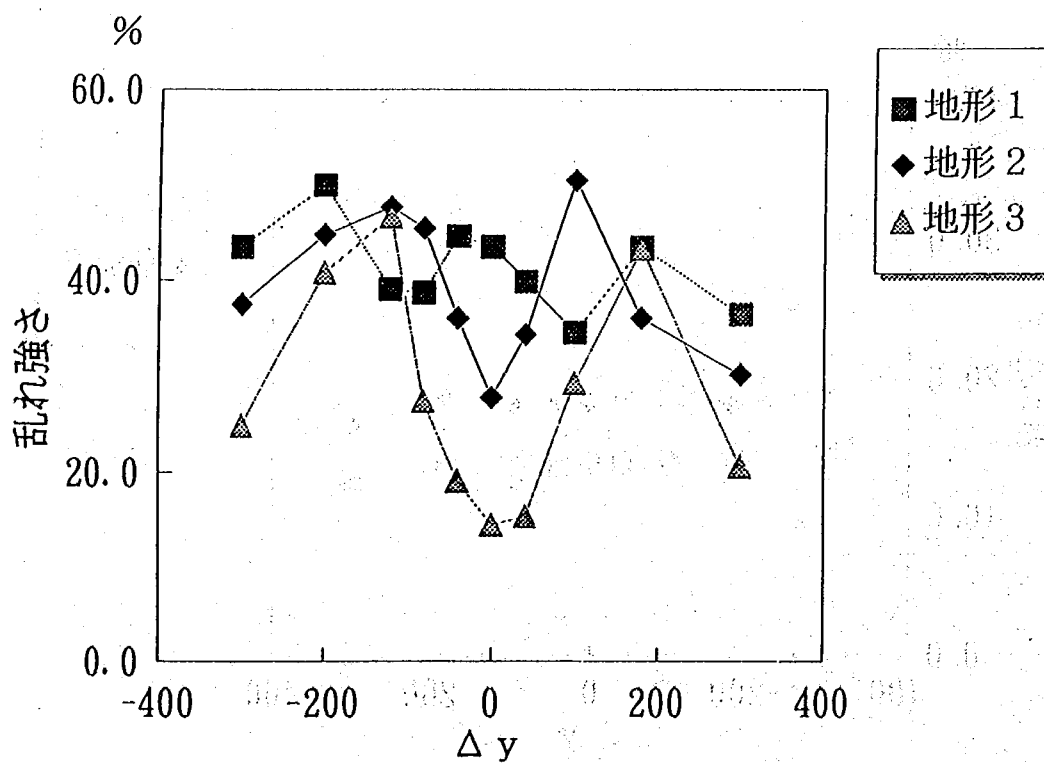


図-3.3.4 乱れ強さの水平分布 (地形 1 ~ 3)

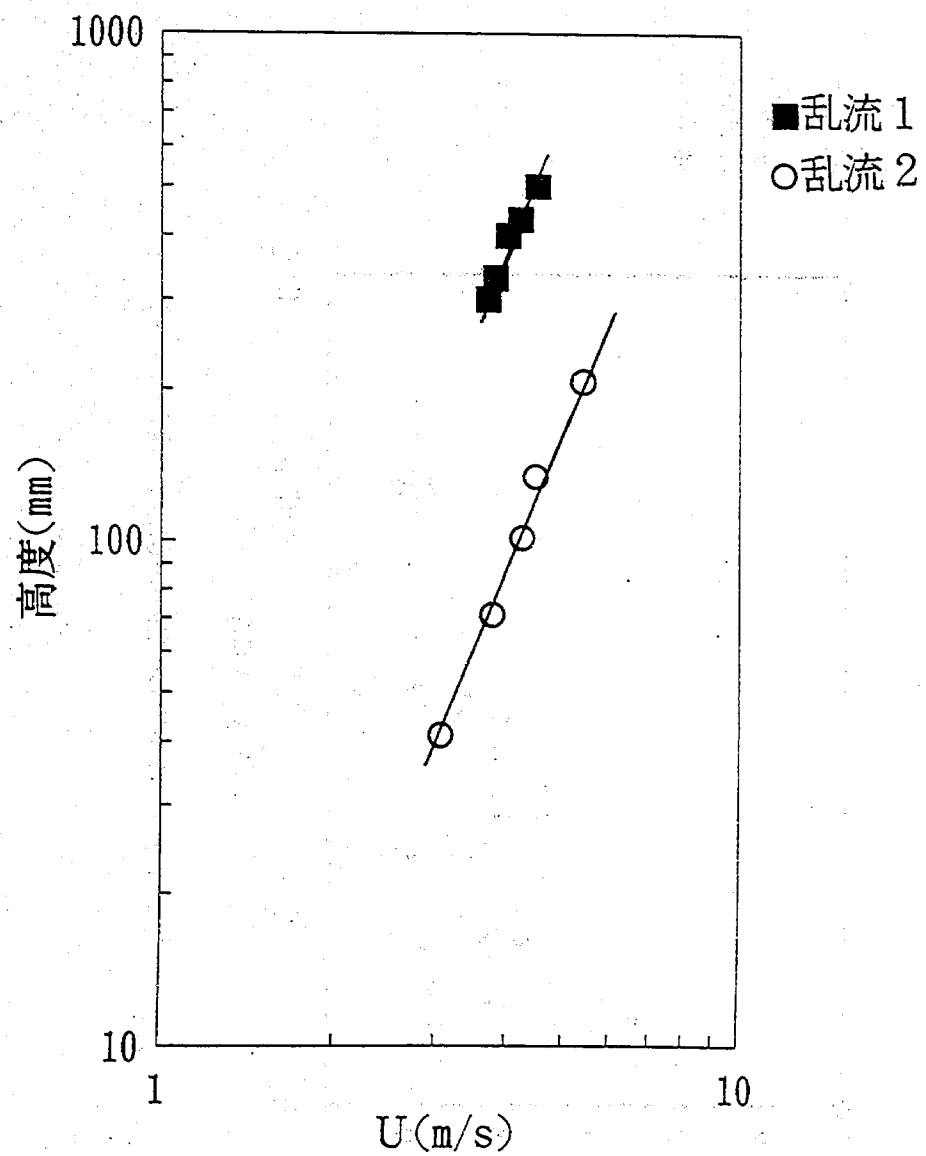


図-3.3.5 平均風速の鉛直分布 (乱流 1、2)

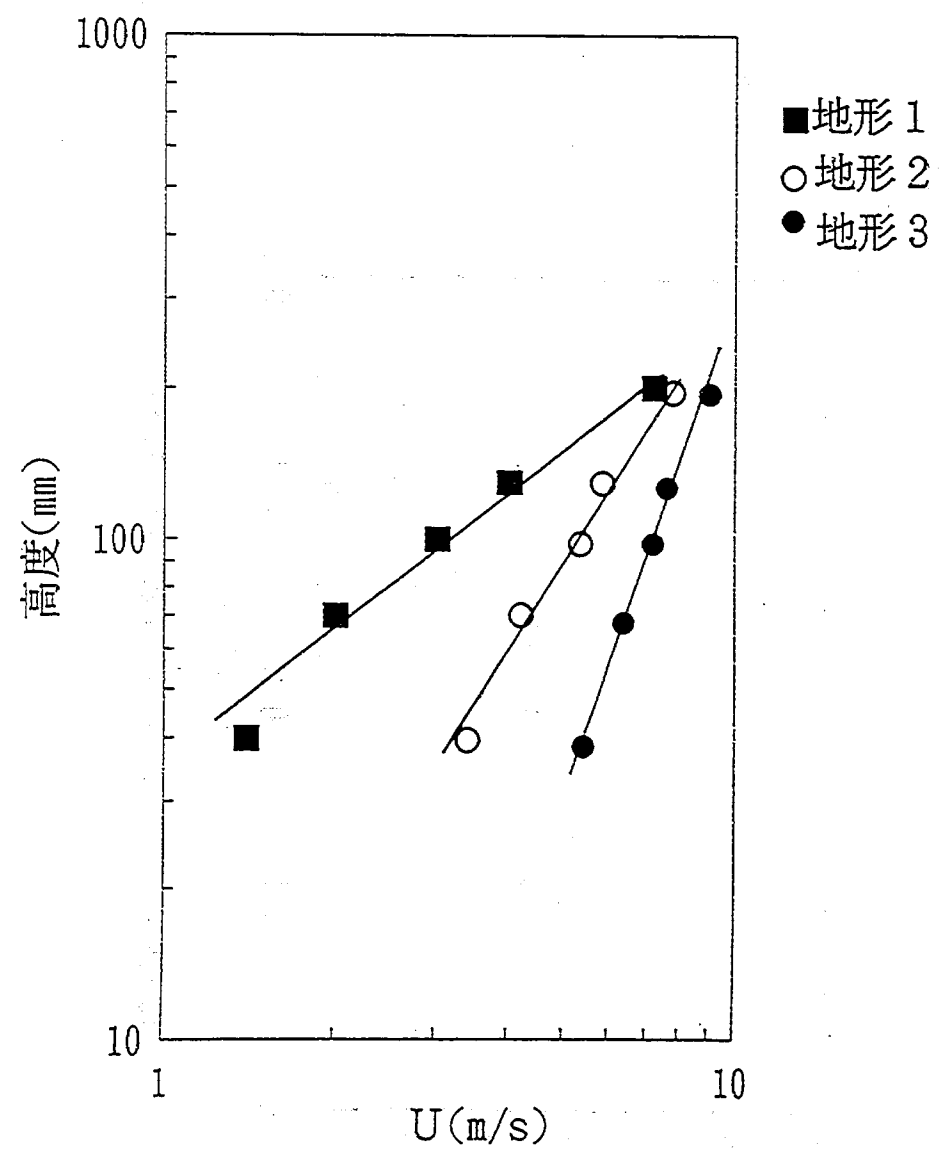


図-3.3.6 平均風速の鉛直分布 (地形 1 ~ 3)

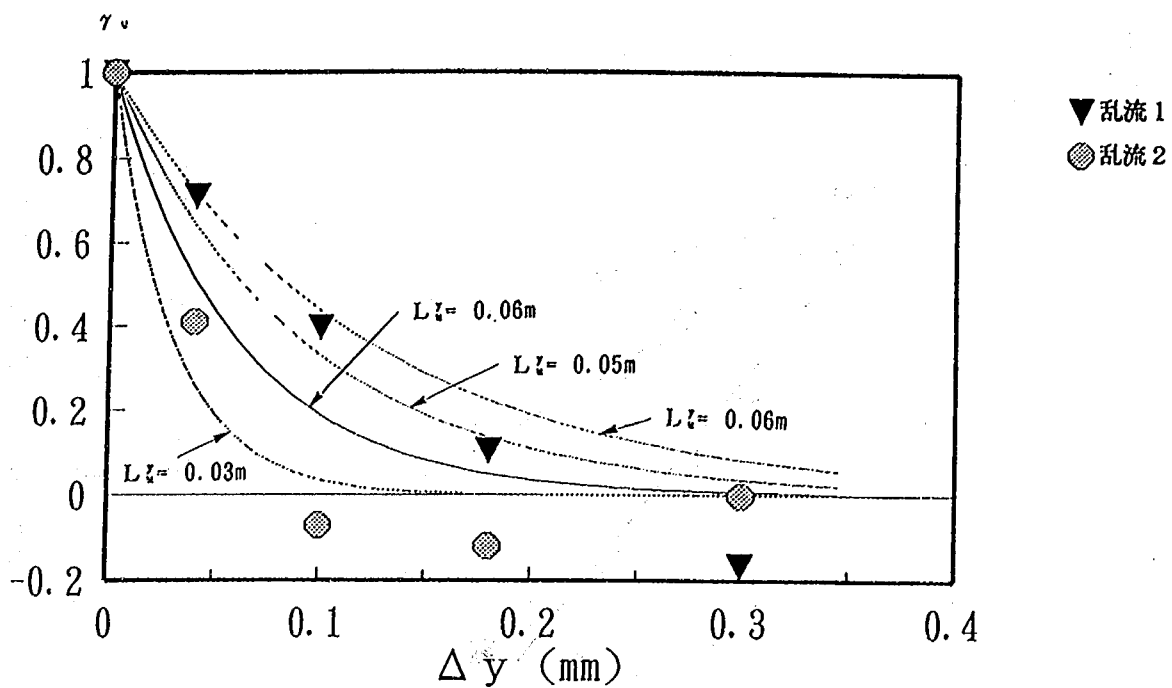


図-3.3.7 y方向主流u成分の空間相関係数（乱流1、2）

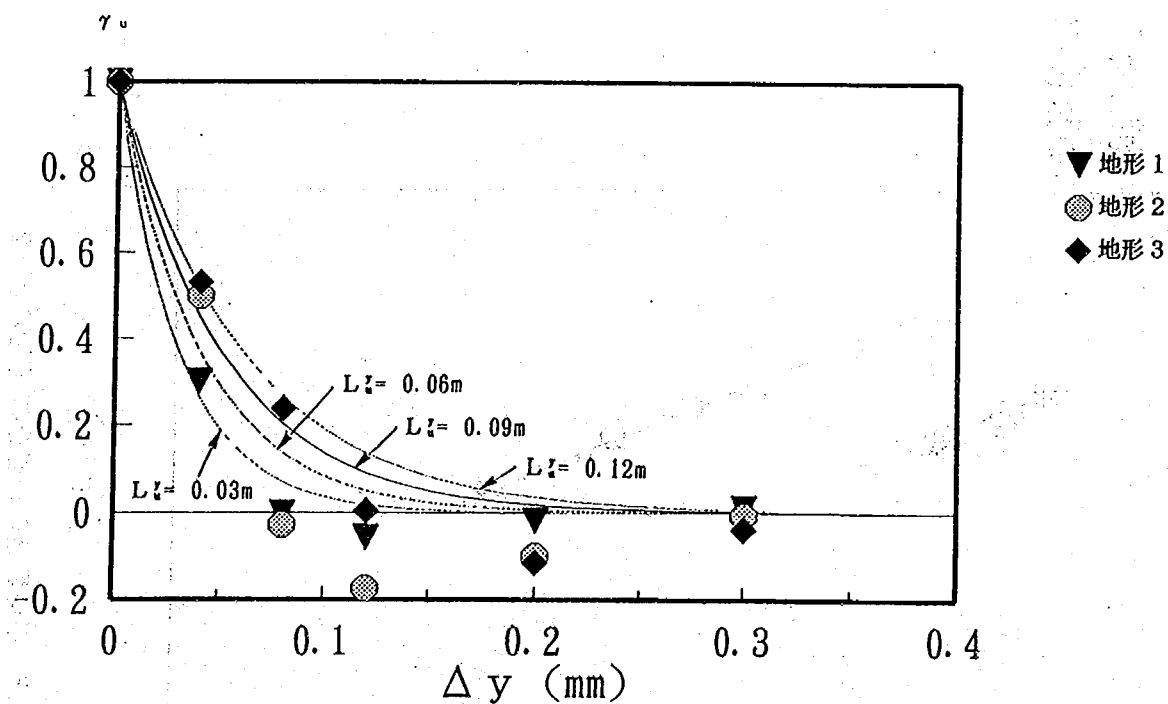


図-3.3.8 y方向主流u成分の空間相関係数（地形1～3）

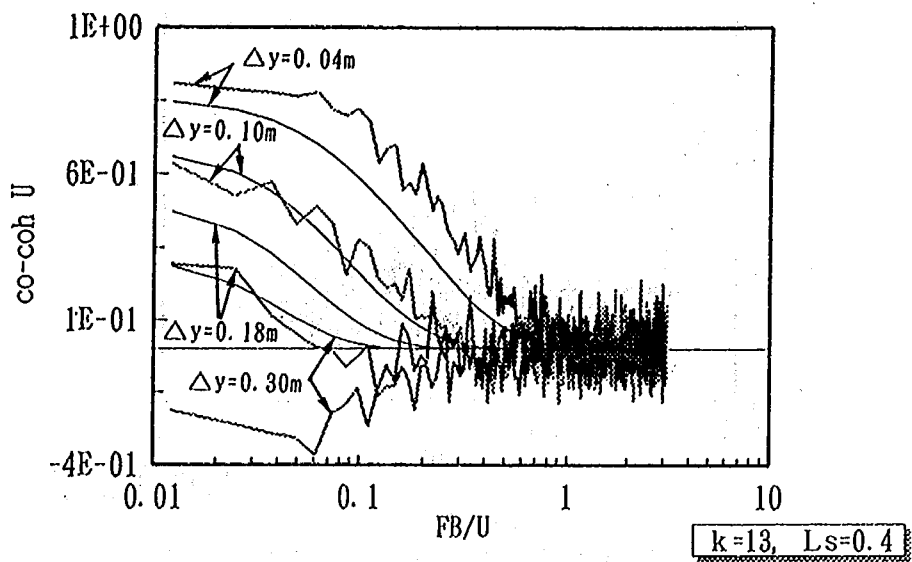


図-3.3.9 コ・コヒーレンス (乱流 1)

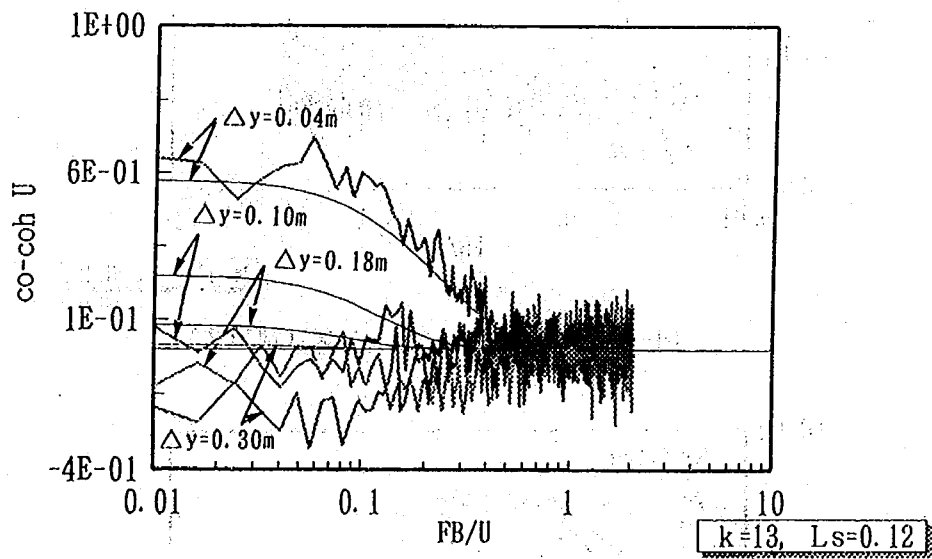


図-3.3.10 コ・コヒーレンス (乱流 2)

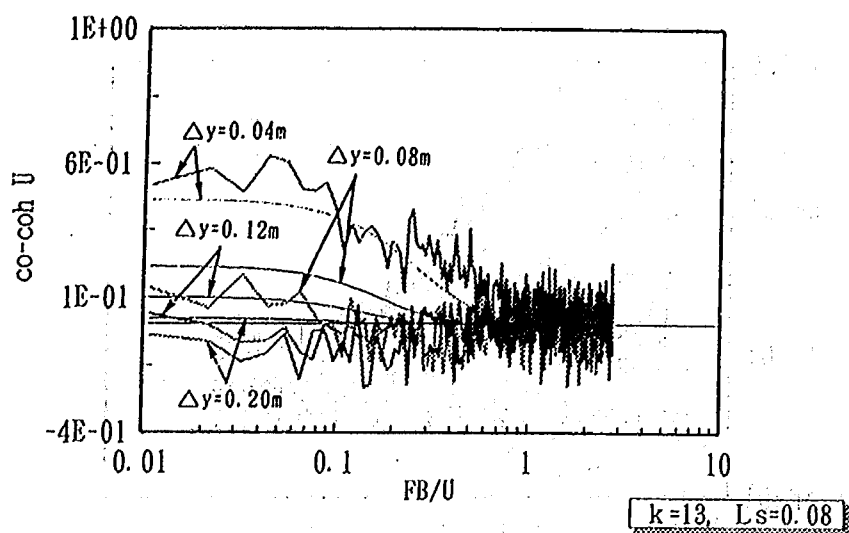


図-3.3.11 コ・コヒーレンス (地形1)

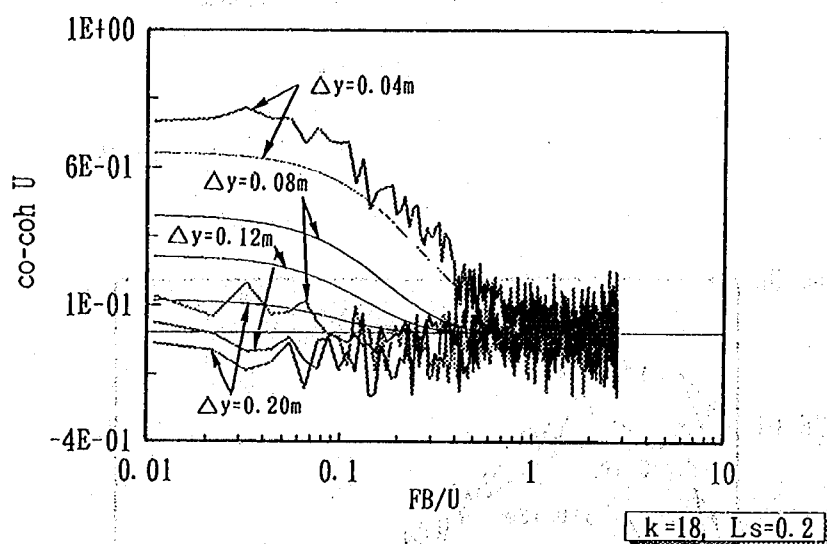


図-3.3.12 コ・コヒーレンス (地形2)

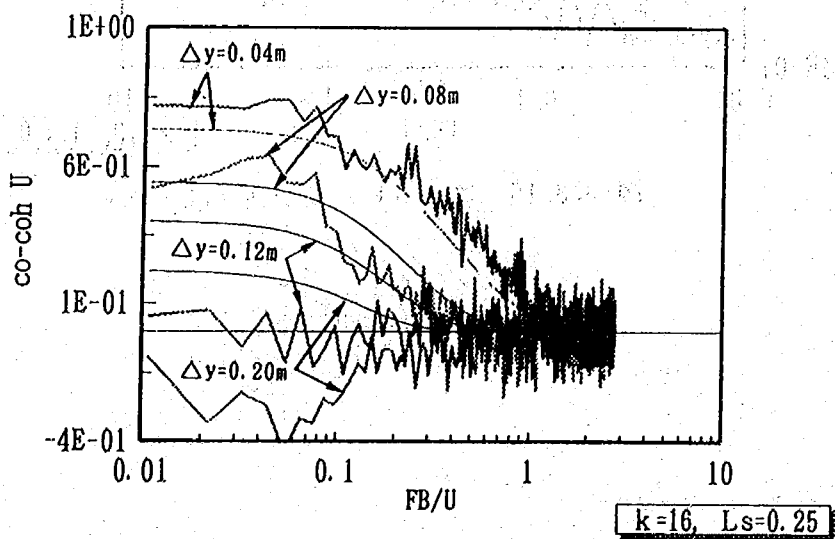


図-3.3.13 コ・コヒーレンス (地形3)

また、それぞれの気流のパワースペクトル(P. S. D. F)を図-3. 3. 14および図-3. 3. 15に示す。P. S. D. Fを無次元化するにあたっては、1/150模型の幅員 $B=0.1\text{m}$ を用いた。気流1、2の主流平均風速はスペクトルの計測位置($y=0\text{m}$)においてなるべく 4m/s に近づくようにし、地形相当模型実験については、地形1(街路なし)の状況における計測位置風速が 3m/s 程度になるようにした。地形2、3については風洞測定部上流端のピトー管風速が、地形1の場合と等しくなるようにして実験をおこなった。

図-3. 3. 14には、乱流1および2、図-3. 3. 15には、地形1～3を重ね合わせさらにESDU⁶⁾のカルマン型のP. S. D. Fも重ね合わせた。ESDUによれば自然風のP. S. D. Fは高度および粗度長に依存するとされている。図-3. 3. 14には、高度 $z=10\text{m}$ かつ粗度長 $Z_0=0.01\text{m}$ (平らな草原)および 0.1m (郊外)を重ね合わせた。また、図-3. 3. 15には $Z_0=1\text{m}, 2\text{m}$ のP. S. D. Fを重ね合わせた。ESDUによれば、都心部の粗度長は $1\text{m}(0.7\text{m}\sim 1.2\text{m})$ とされているが、Jackson⁷⁾によると都市中心では $Z_0=1\sim 4\text{m}$ とされている。

地形相当模型実験では、計測された気流は吹き抜けを通る風およびブロックの後流の影響下にあり、P. S. D. Fの形状も一般的なP. S. D. Fとは異なっている。

また、これらの図から、地形条件の変動風速のP. S. D. F.に与える一般的な傾向を読み取ることは難しいが、ビルの大きさや間隔が気流の乱れスケールや乱れ強さに極めて多大な影響を与えることは示されている。

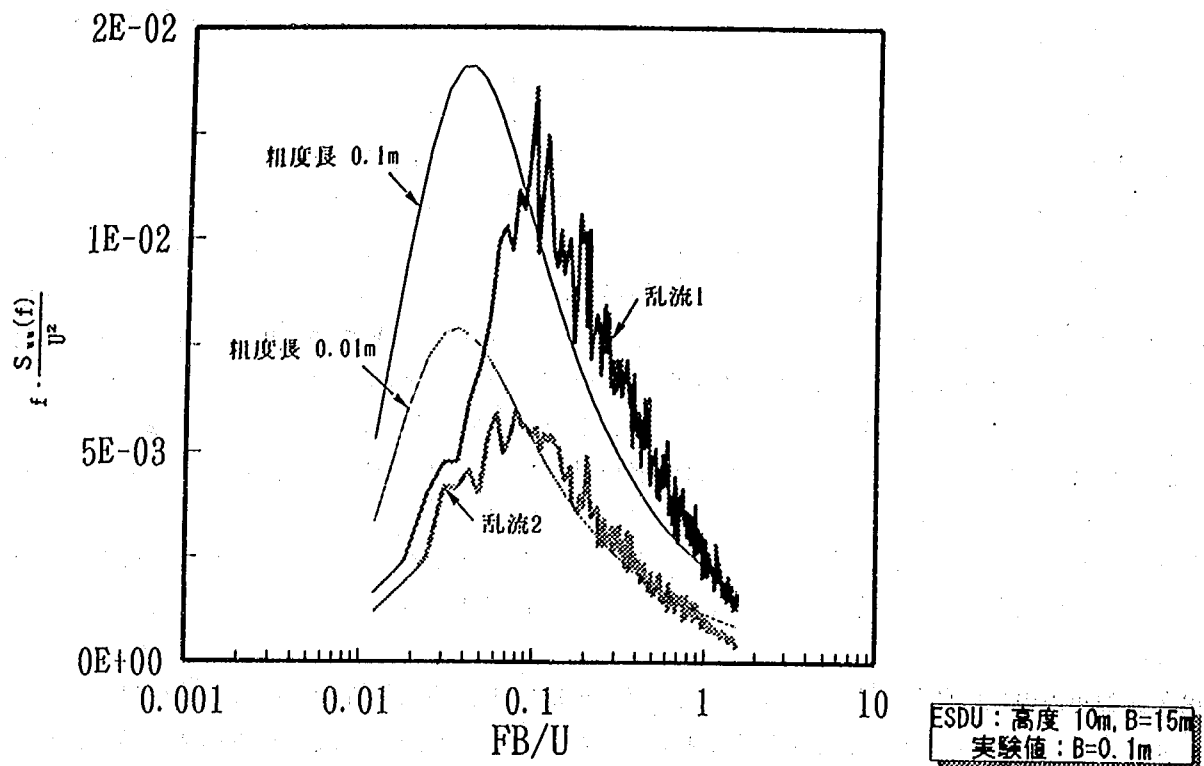
現在、都市内の比較的低い高度において乱流構造の解析を含めた気流計測を行った例はほとんど無い。従って、これらのデータを数多く収集することが重要であるが、気流の乱流構造が地形条件の影響を極めて受けやすいことを考慮すれば、数地点において地形模型による気流計測と現地観測を並行に進めながら、地形条件の乱流構造に与える影響を徐々に把握していくべきであると思われる。

表-3. 3. 1に乱れスケール L_x^* 、 L_y^* 、 L_z^* 、代表長 D 、代表長と乱れスケールの比 L_x^*/D を示す。乱れスケールは、実験より求められた値および、粗度長 1.0m 、高度 10m におけるESDUによる値を示す。

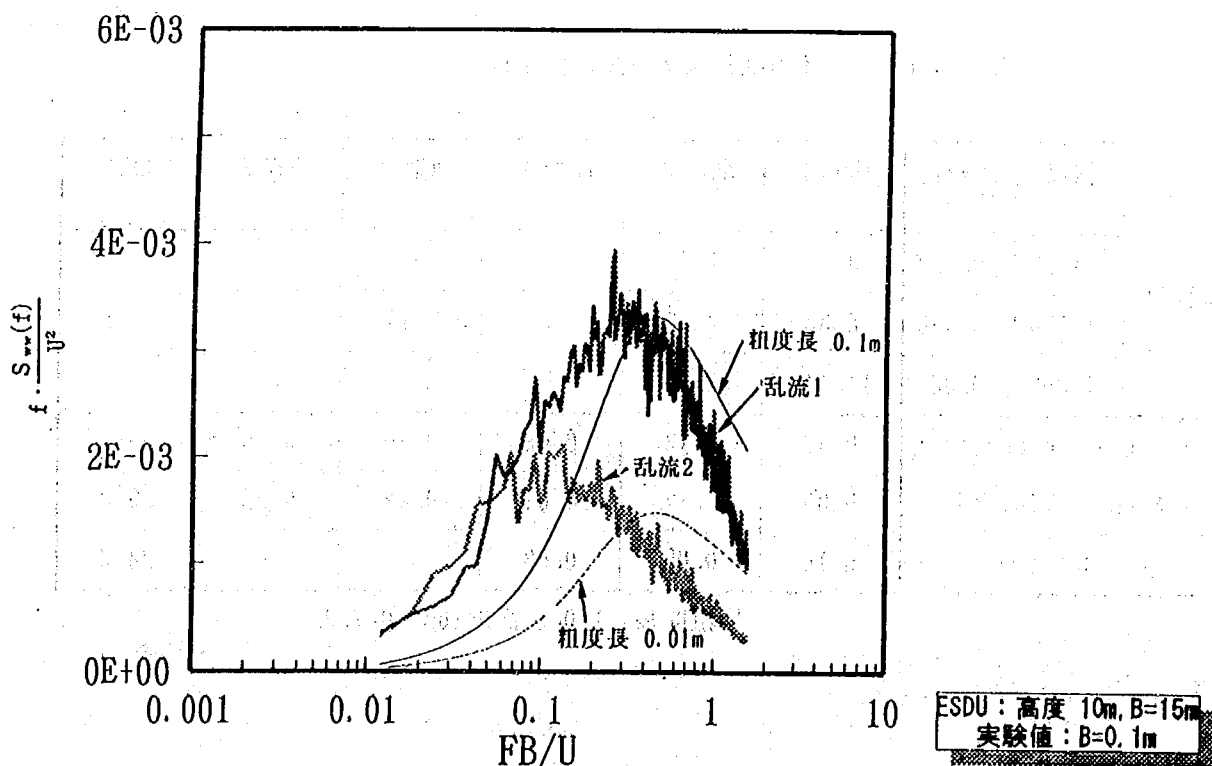
表-3. 3. 1 乱流の乱れスケールと代表長

	縮尺	代表長 D (m)	乱流 1	乱流 2	地形 1	地形 2	地形 3	ESDU ^{*)}
L_x^*/D	1/60	0.120	3.33	1.00	—	—	—	7.78
	1/150	0.048	8.33	2.50	1.67	4.17	5.21	
	1/200	0.036	11.11	3.33	—	—	—	
L_s (m) co-cohより			0.40	0.12	0.08	0.20	0.25	—
L_x^* (m) S(0)より			0.35	0.17	0.07	0.22	0.22	56.0
L_z^* (m)			0.10	0.05	0.03	—	—	24.0

^{*)} 粗度長 1.0m 、高度 10m $D=7.2\text{m}$

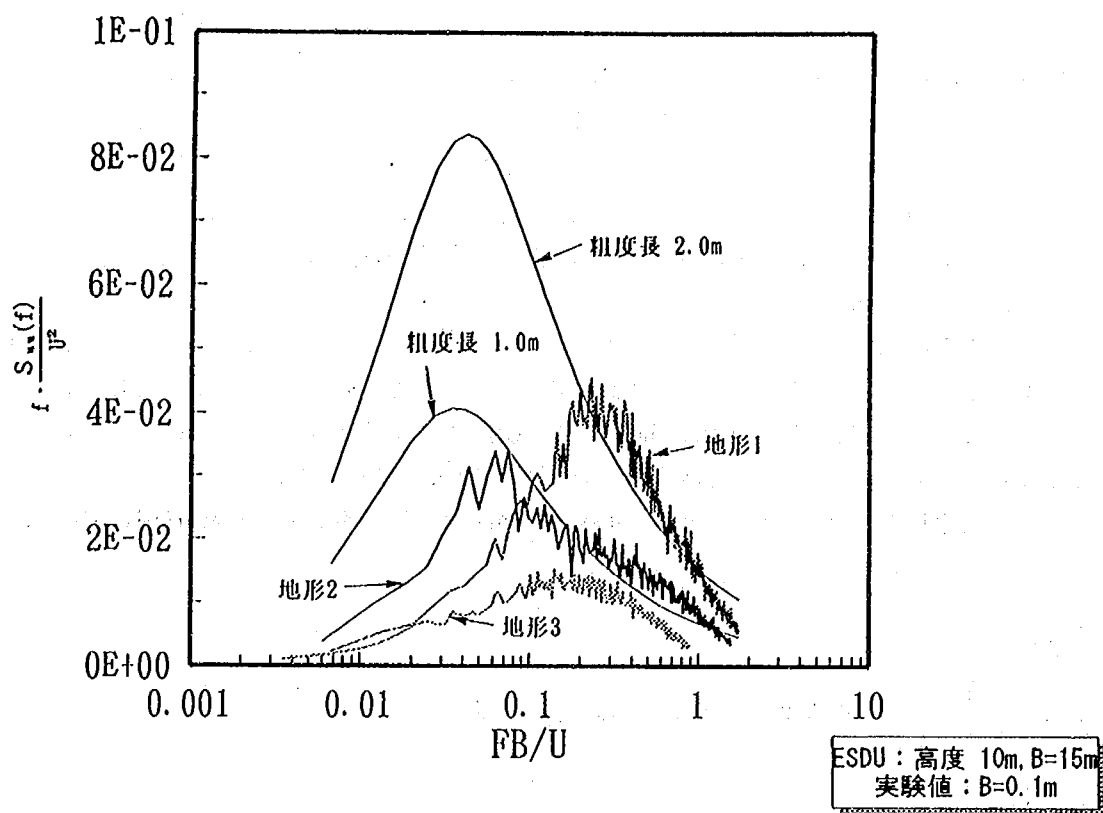


(1) 主流方向風速の P. S. D. F

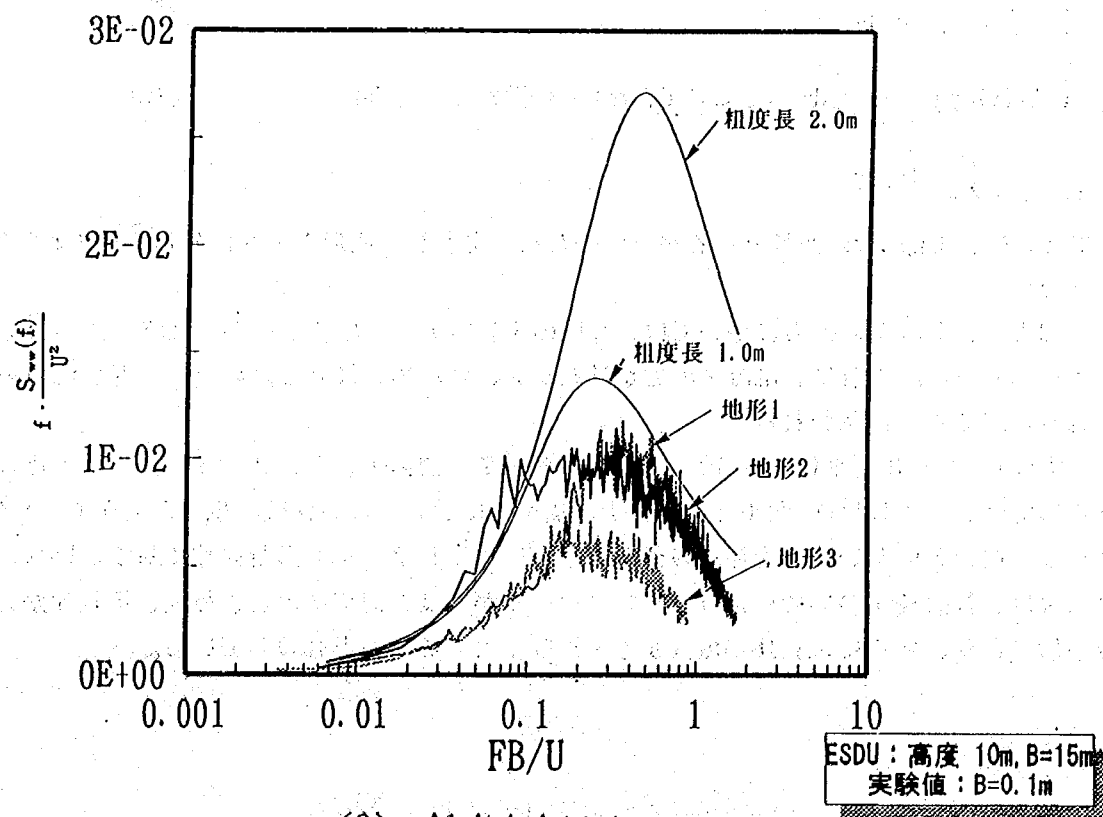


(2) 鉛直方向風速の P. S. D. F

図-3.3.14 変動風速の P. S. D. F (乱流 1、2)



(1) 主流方向風速のP. S. D. F



(2) 鉛直方向風速のP. S. D. F

図-3.3.15 変動風速のP. S. D. F (地形1～3)

3. 3. 2 抗力係数

定常抗力 $\bar{D}$ について、平成元年度の調査（遮音壁を有する橋梁の耐風性調査報告書⁴¹）において求められた結果と、今回の乱流中における抗力係数とを比較した結果が表-3. 3. 2である。但し、平板の抗力係数は求められていないため、耐風構造⁴¹より2.0を用いた。また、遮音壁が10mの模型の3分力試験も行われていないため、ほぼ同じ B/d を持つ、幅員6m、遮音壁3mの断面（0.86と0.81）より得られた値を用いた。なお、ここで示されている3分力試験からの抗力係数は、後述する空力アドミッタンスの解析に用いたものである。

抗力係数を求めるにあたって用いられた風速は、乱流1、2に対しては図-3. 3. 1より y 方向については一定と見なすことができるので、橋桁の有効高さの1/2で計測された値を用いた。但し、遮音壁10mの模型（ケース9、12）については、風速の鉛直分布より、橋桁に作用する平均風速と気流計測により求められた風速との差が大きくなるため、高さ方向の補正を次のように行った。

橋桁の下縁を鉛直座標 z の基準点にとる。有効高さ d に対し $z_1=kd$ の点に主流方向風速 U_1 が計測されたとすると平均風速 $\bar{U}$ は、

$$\begin{aligned}\bar{U} &= \frac{1}{d} \int_0^d U(z) dz \\ &= \frac{1}{d} \int_0^d U_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha dz \quad \text{ここで、}\alpha:\text{べき指数, } z_1:z_1=kd \quad \dots (3.3.2) \\ &= \frac{U_1}{k^\alpha (\alpha+1)}\end{aligned}$$

ケース9、12の $\bar{U}$ については、 $k=0.3$ 、 $\alpha=0.3$ として求めた。

また、地形1～3については、図-3. 3. 2に示されるとおり水平方向の変動が大きい。従って、前述の鉛直方向の補正に加えて水平方向の補正も次のように行った。

$$\begin{aligned}\bar{U} &= \frac{1}{d\ell} \int_0^\ell \int_0^d U(z, y) dz dy \\ &= \frac{1}{d\ell} \int_0^\ell U_1(y) dy \int_0^d \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha dz \quad \text{ここで、}\alpha:\text{べき指数, } z_1:z_1=kd \quad \dots (3.3.3) \\ &= \frac{1}{k^\alpha (\alpha+1) \ell} \int_0^\ell U_1(y) dy\end{aligned}$$

べき指数 α は、実際は y の関数となるが簡便のため一定とし、地形1～3に対しそれぞれ0.7、0.6、0.4を用いた。

表-3. 3. 2より、乱流1の抗力については、今回の実験結果とほぼ等しいが、乱流2についてはやや低く求められている。これは、乱流2の方が乱れが大きいため、後流幅が縮小し、剥離流の再付着が促進されるためであると思われる。⁸⁾

また、実験ケース1～3（平板1～3）、実験ケース5～7（橋梁1、3、2-5）について比較すると、スケールの対代表長比 L_s/D が小さい平板1、橋梁1において抗力係数の低下が大きく、 L_s/D が大きい平板3、橋梁3において抗力係数の低下が小さい。これは、正方形断面柱に対するLeeの考察⁸⁾——抗力係数は、背面負圧の影響により、乱れスケールが辺長と同程度のとき最大、辺長比が1.5倍ぐらいで最小値をとり、さらに辺長比が増大すると再び増大する——と合致している。

表-3.3.2 抗力係数と実験条件

実験ケース	風速 (m/s)	抗力係数		気流	使用模型
		3分力試験結果	今回の実験結果		
1	4.0	2.0 [㍊]	1.7	乱流 1	平板 1
2	4.0	2.0 [㍊]	1.8		平板 2
3	4.0	2.0 [㍊]	1.8		平板 3
5	4.0	1.4 [㍊]	1.3		橋梁 1
6	4.0	1.4 [㍊]	1.4		橋梁 3
7	4.0	1.4 [㍊]	1.3		橋梁2-5
8	4.0	1.2 [㍊]	1.2		橋梁2-0
9	4.3	1.4 [㍊]	1.4		橋梁2-10
10	4.0	1.4 [㍊]	1.2	乱流 2	橋梁2-5
11	4.0	1.2 [㍊]	1.0		橋梁2-0
12	4.3	1.4 [㍊]	1.2		橋梁2-10
13	4.7	1.4 [㍊]	1.1	地形 1	橋梁2-5
14	4.8	1.4 [㍊]	1.2	地形 2	
15	6.0	1.4 [㍊]	1.2	地形 3	

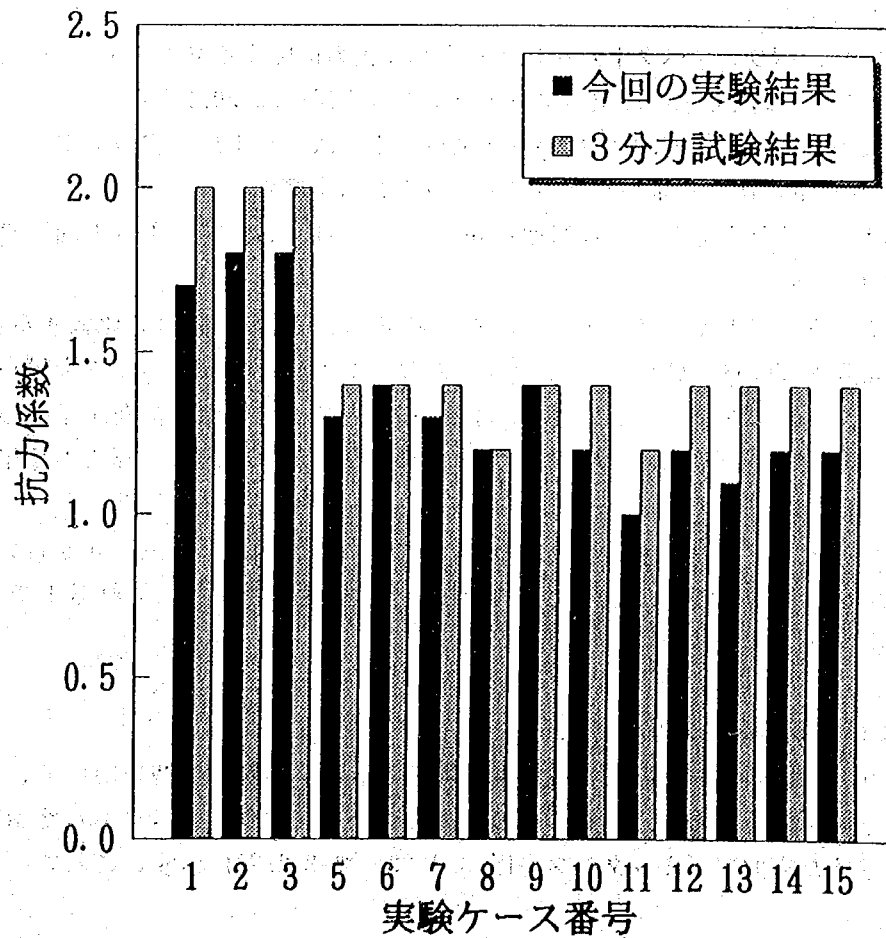


図-3.3.16 抗力係数の比較

3. 3. 3 空力アドミッタンスの解析

3.3.3.1 ジョイントアクセプタンス

3.2.2に示した2つの方法を用いて、空力アドミッタンスを求めた。

ジョイントアクセプタンスを求めるにあたって、式-3.2.6に代入する乱れスケールおよびディケイファクターは、式-3.2.6において示された $co-coh$ の近似式を用いた。求められたジョイントアクセプタンスを図-3.3.17、図-3.3.18に示す。

これを見ると、乱流2の方が乱れスケールが小さいため、低振動数領域で値が低くなっており、つまり変動風速が抗力に伝達しにくくなっていることがわかる。

付図に、基準化した抗力、揚力のP.S.D.F.および求められた空力アドミッタンスを示す。付図の空気力のP.S.D.F.に示されているように、直接計測された空気力のP.S.D.F.には空気力成分の他に高周波数において、模型および検出器の固有振動数による増幅効果、後流の渦などのノイズを含んでいる。付図に示した空力アドミッタンスはこれらの成分を全て含んだ空気力のP.S.D.F.およびこれに対するアドミッタンスを示したが、本項においては、模型および検出器の固有振動数における増幅成分については、メカニカルアドミッタンスを用いて補正し、さらにこれらの影響のおそれのある高周波成分は除去して示した。

3.3.3.2 平板と都市内橋梁模型との比較

基礎実験および、乱れスケールの影響を見るために、3種類スケール(1/60, 1/150, 1/200)の都市内橋梁模型および、代表長として、それぞれの模型と単位長さあたりの投影面積 A_n の異なる平板の関する空力アドミッタンスを求めた。

3種類の平板について、パワースペクトル法により求めた抗力に関する空力アドミッタンスを図-3.3.19、クロススペクトル法で求めた空力アドミッタンスを図-3.3.20に示す。

また、都市内模型については、図-3.3.22にパワースペクトル法より求めた空力アドミッタンス、図-3.3.21にクロススペクトル法より求めた空力アドミッタンスを示す。

これらの図の横軸は、単位長さあたりの投影面積 A_n (=代表長 D)および、主流方向の平均風速(4m/s)で無次元化してある。

パワースペクトル法の空力アドミッタンスについて、図-3.3.20と図-3.3.21を比較すると、都市内橋梁模型では、無次元振動数0.1付近でアドミッタンスが増大しているのに対し、平板模型ではそれほど増大してはいない。クロススペクトル法では、 $|X_{\theta w}|$ については同じ様な傾向を示すのに対し $|X_{\theta w}|$ では平板では振動数が高くなるにつれて低減する傾向があるのに対し、都市内橋梁模型では、比較的その傾向が見られない。

またこれらの図は乱れスケールの影響を見るために、横軸は代表長 D により無次元を行い、代表長の異なる模型による実験をかさね合わせたものだが、むしろ無次元化を行わない振動数上で重ね合わせの方が空力アドミッタンスの傾向は一致している。

3.3.3.3 気流および遮音壁高さの影響

実橋換算において5m、10mの遮音壁および遮音壁を取り外した3種類の模型を用いて、2種類の気流により空力アドミッタンスを求めた。それぞれの気流について、パワースペクトル法およびクロススペクトル法により求めた空力アドミッタンスを図-3.3.23~図-3.3.26に示す。これらの図の横軸は

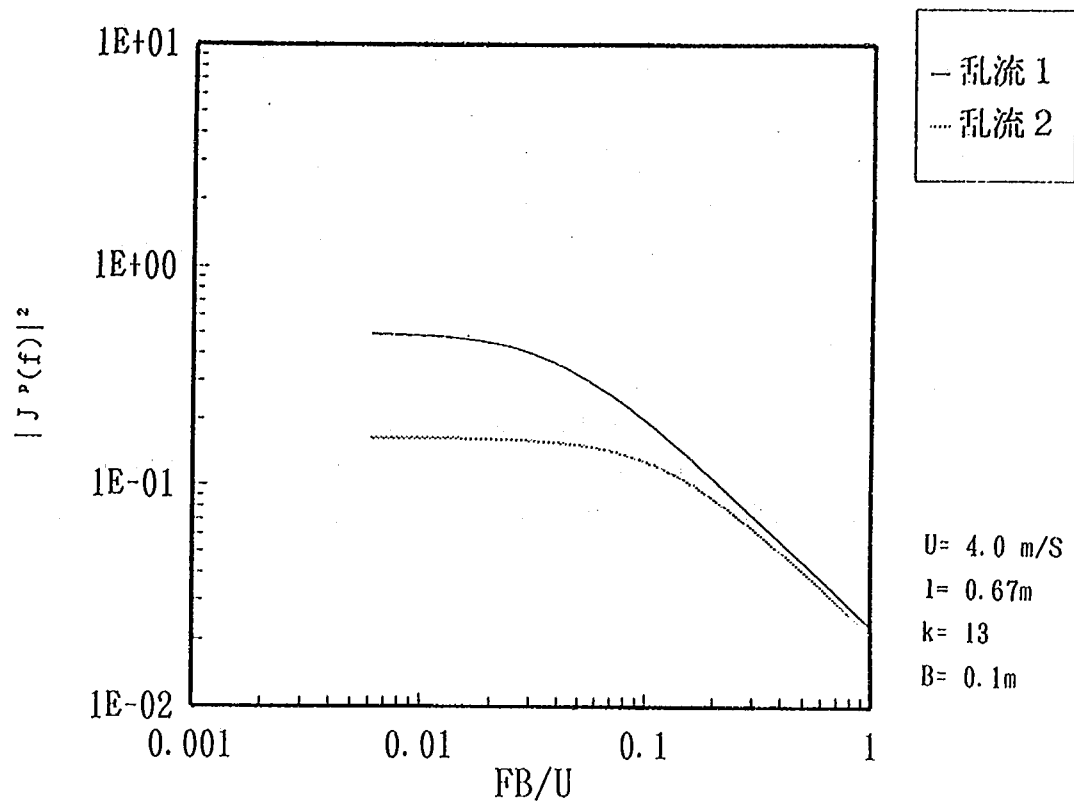


図-3.3.17 ジョイントアクセプタンス (パワースペクトル法)

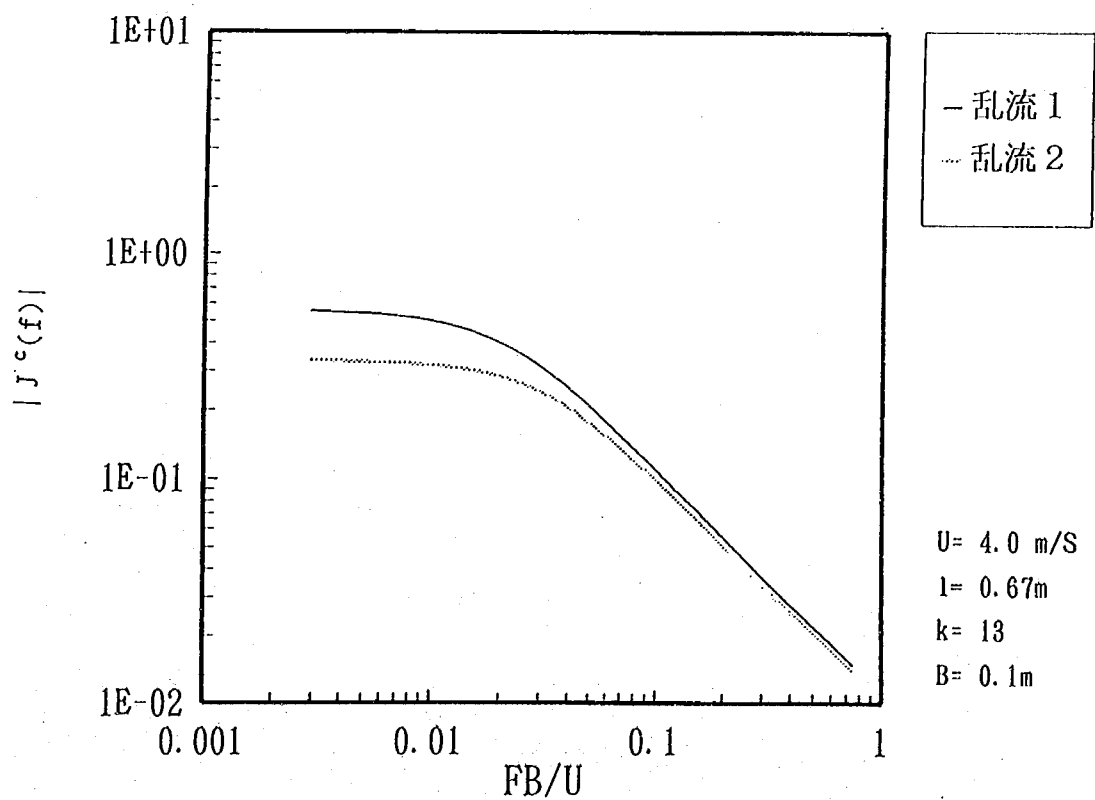
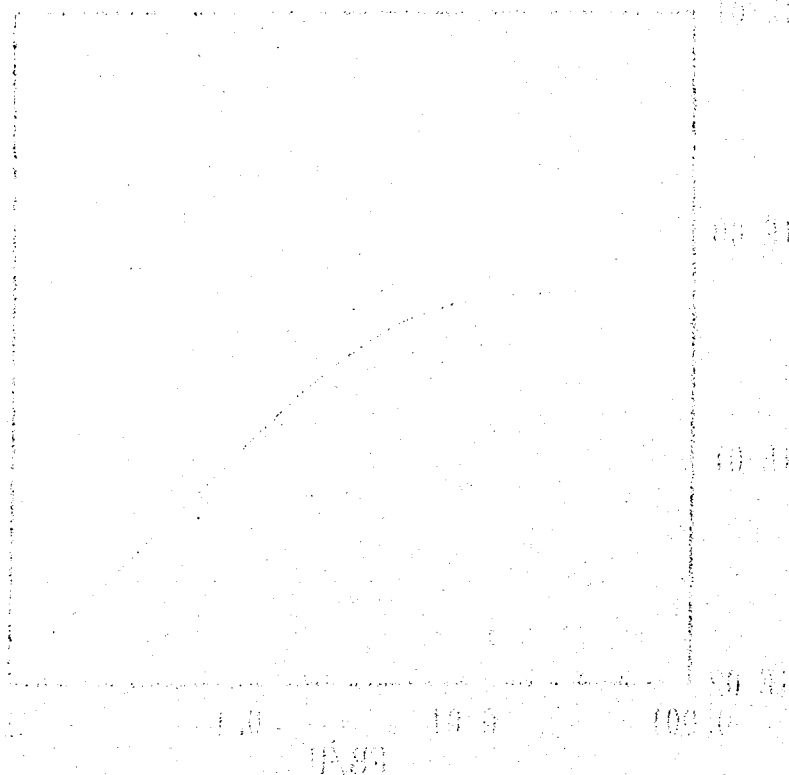


図-3.3.18 ジョイントアクセプタンス (クロススペクトル法)

模型幅Bにより無次元化してある。

乱流1、2について、パワースペクトル法とクロススペクトル法とを比較すると、クロススペクトル法の方が低い値となっている。これは、いずれの気流にも当てはまるが、乱流1よりもより乱れスケールの小さい乱流2において顕著であり、乱流2においては、熱線風速計位置と気流計測位置との気流の相関がより低くなるためと思われる。しかしながら、乱流1と乱流2について、パワースペクトル法による空力アドミッタンスを比較した場合においても乱流1の方がアドミッタンスは大きな値を示している。これは、①ジョイントアクセプタンスによる補正が不十分なため。②定常抗力に関する抗力係数が小さくなるため。という理由が考えられる。

遮音壁高さの影響については、乱流1、乱流2とも低振動数において、3種類の断面のうち、遮音壁高さ10mの空力アドミッタンスのみがやや大きくなっているが、平均抗力に今回の実測データを用いると低周波数においてはほぼ等しい値となる。また、 $fB/U=0.1$ 付近において空力アドミッタンスが大きくなっているが、これらの傾向は3種類の断面により微妙に異なっているのが読み取れる。



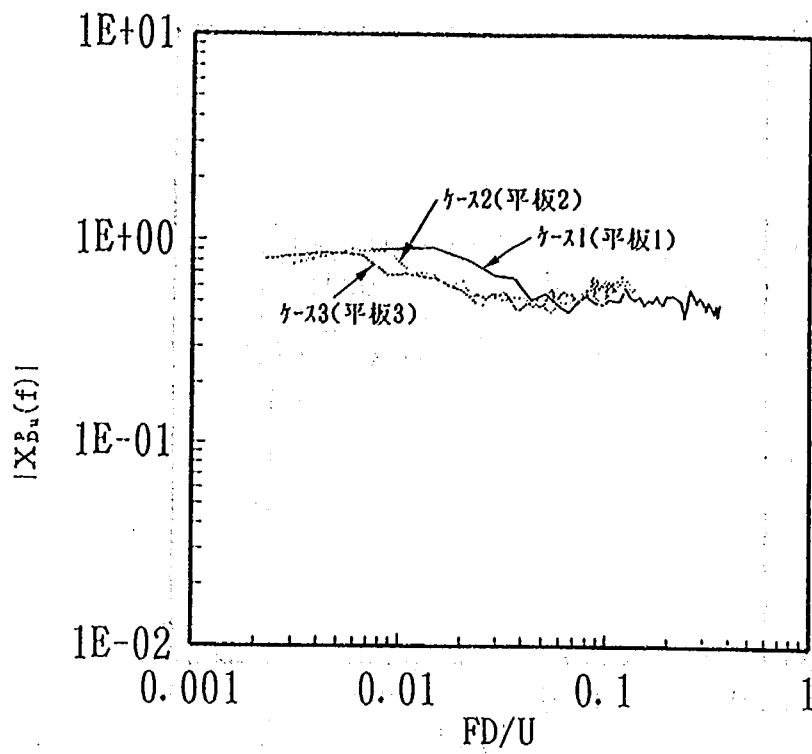


図-3.3.19 空力アドミッタンス (パワースペクトル法、乱流1、平板1~3)

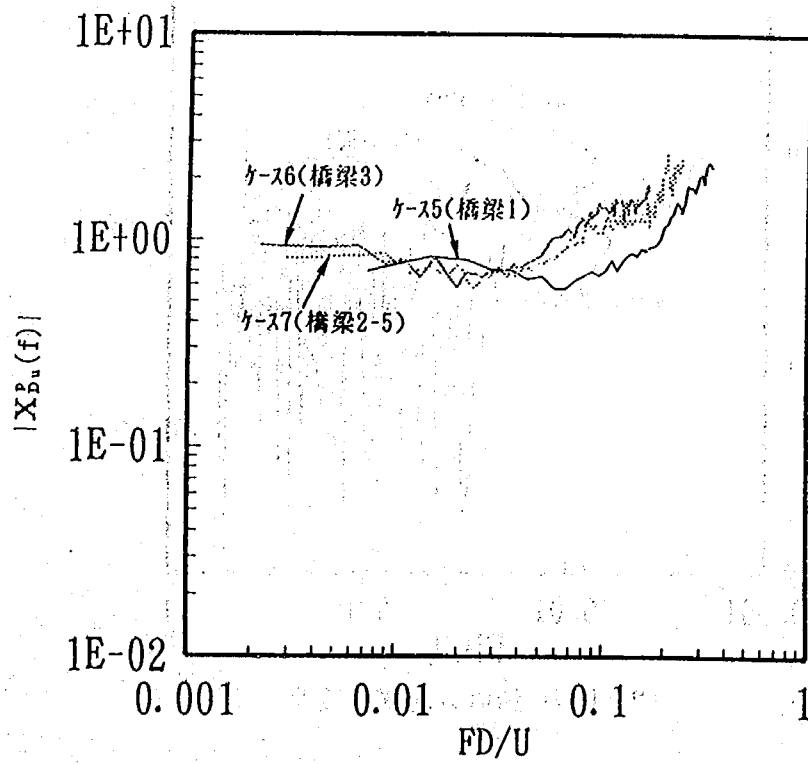
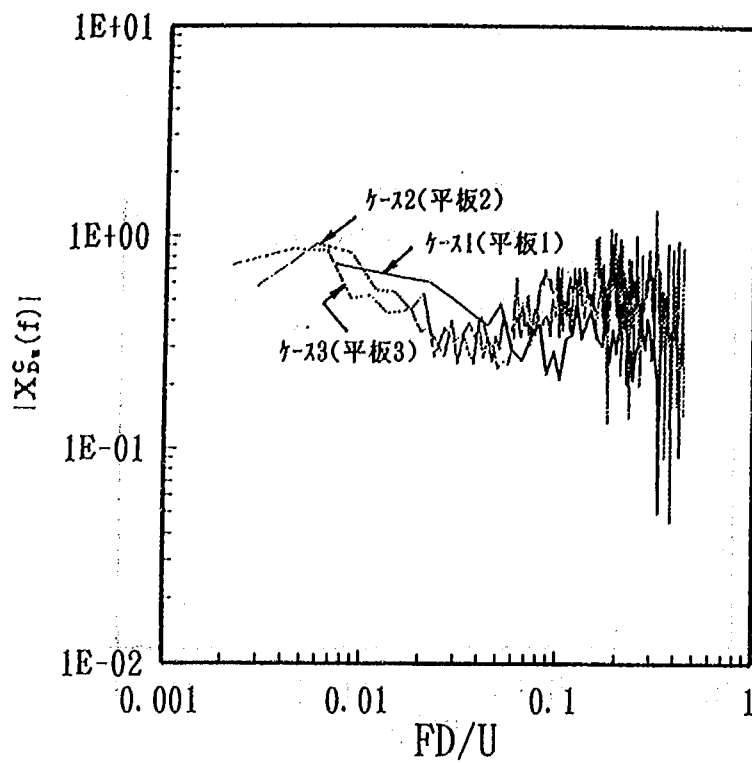
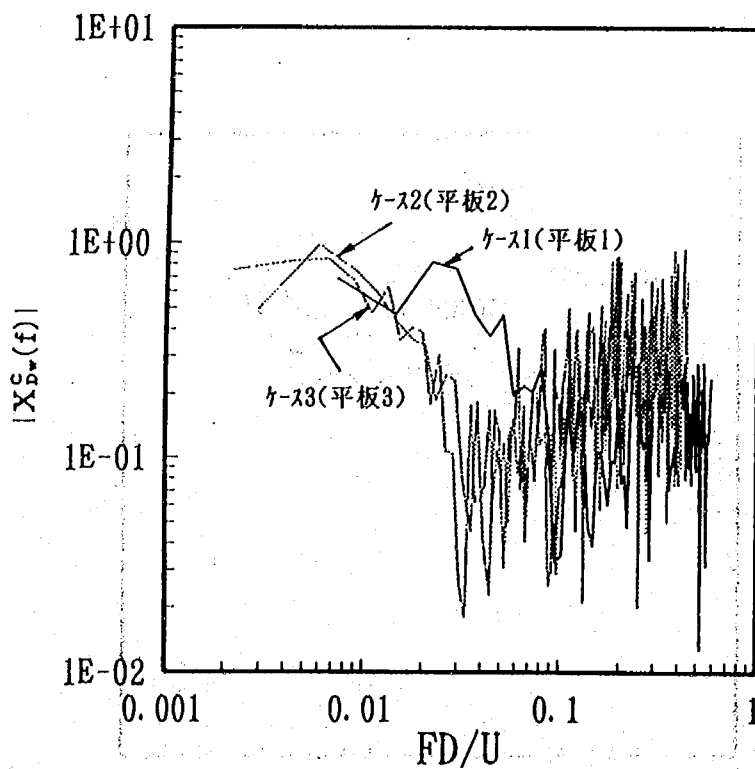


図-3.3.20 空力アドミッタンス (パワースペクトル法、乱流1、橋梁1、2-5、3)

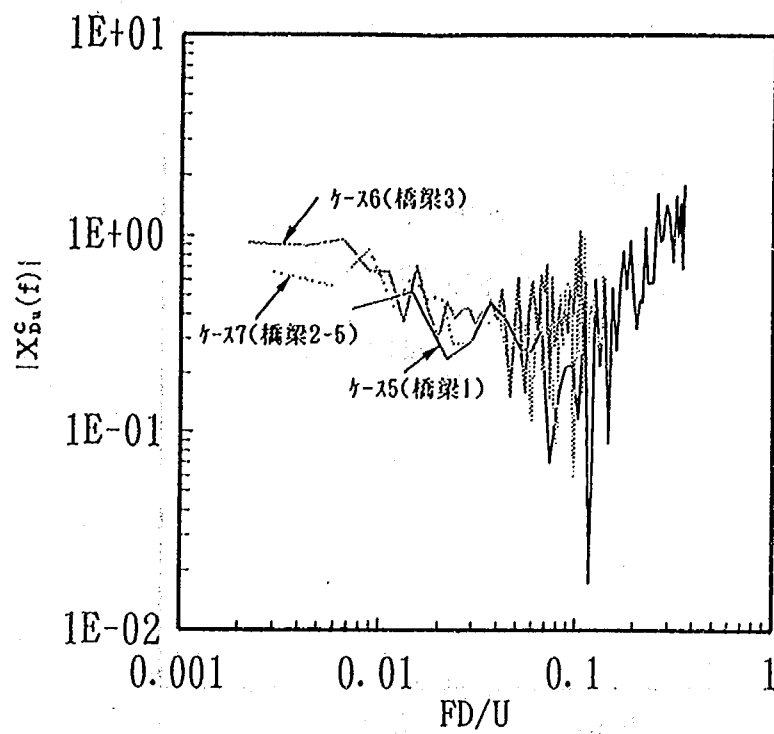


(1) 抗力-主流方向変動風速

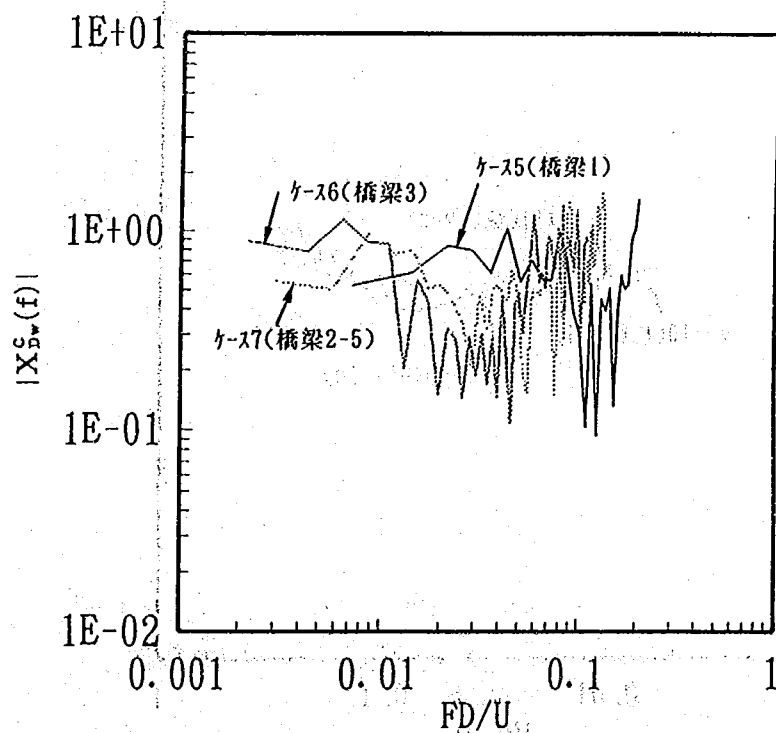


(2) 抗力-鉛直方向変動風速

図-3.3.21 空力アドミッタンス (クロススペクトル法、乱流1、平板1~3)



(1) 抗力-主流方向変動風速



(2) 抗力-鉛直方向変動風速

図-3.3.22 空力アドミッタンス (クロススペクトル法、乱流1、橋梁1、2-5、3)

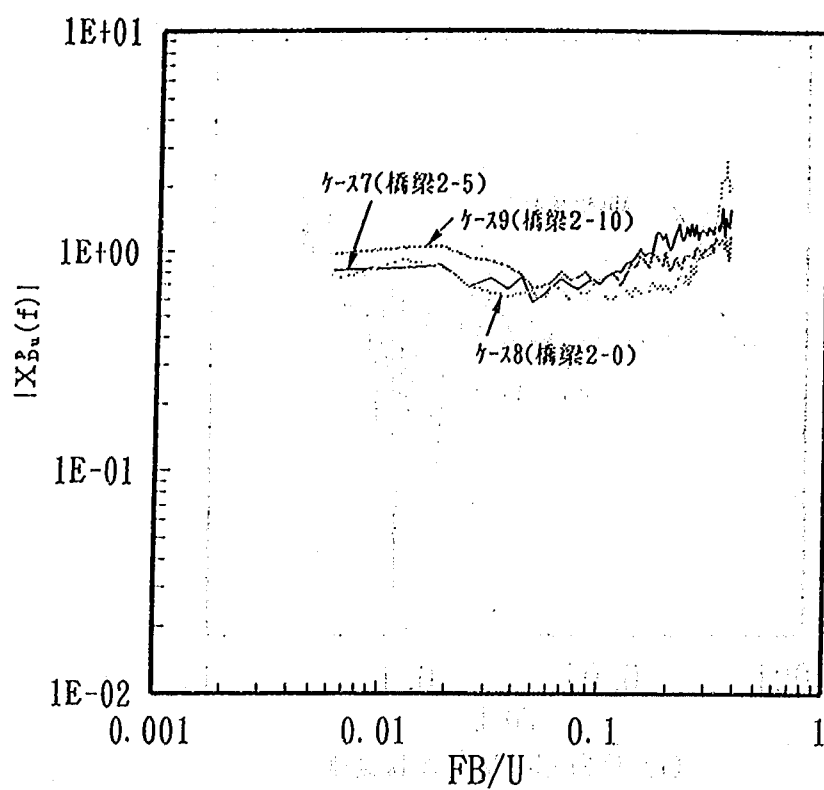


図-3.3.23 空力アドミッタンス (パワースペクトル法、乱流1、遮音壁高さ)

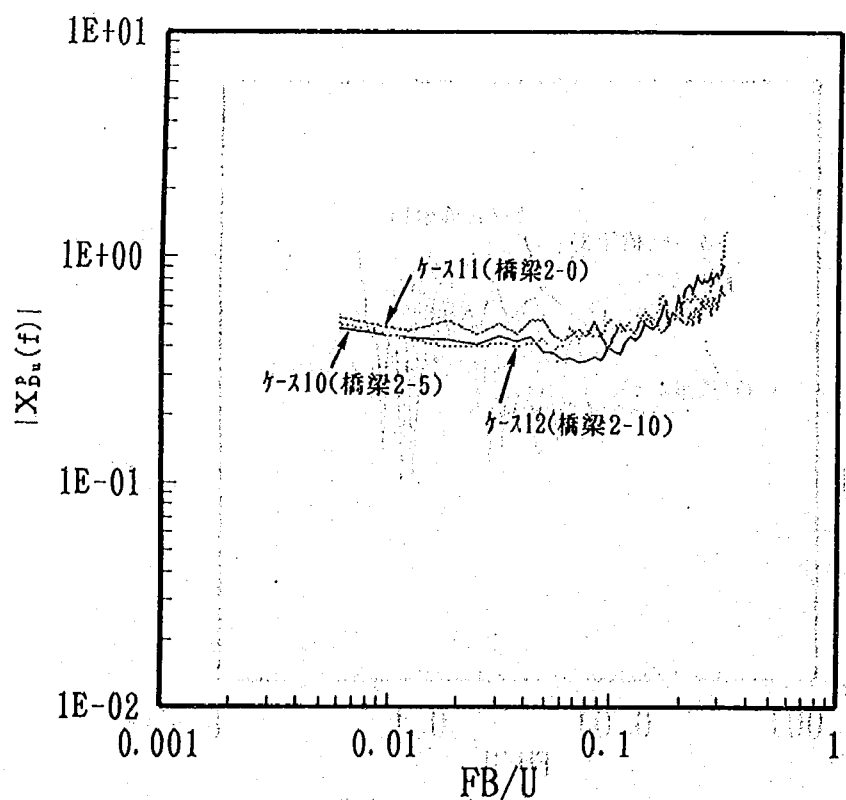
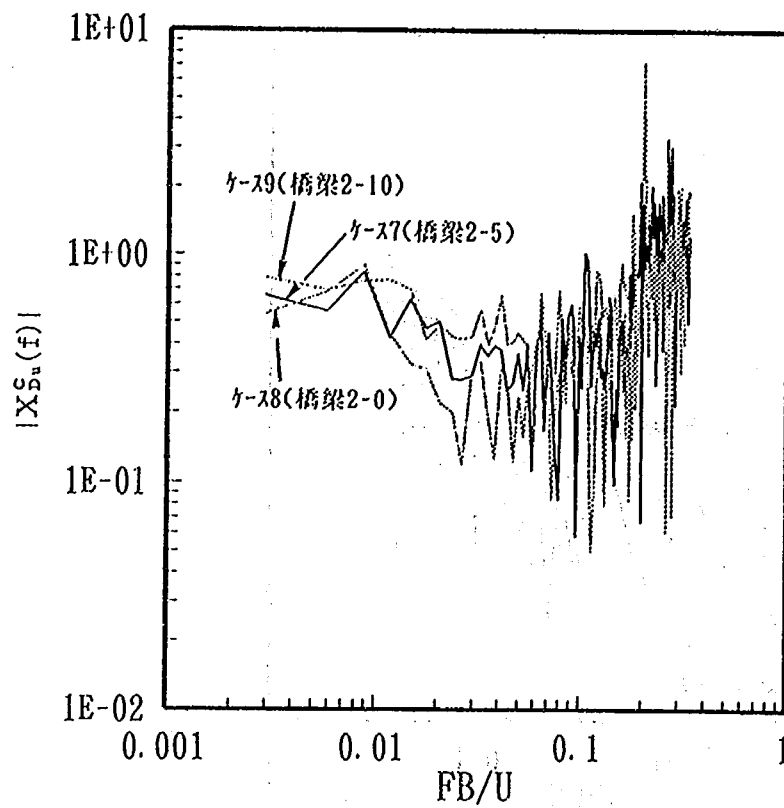
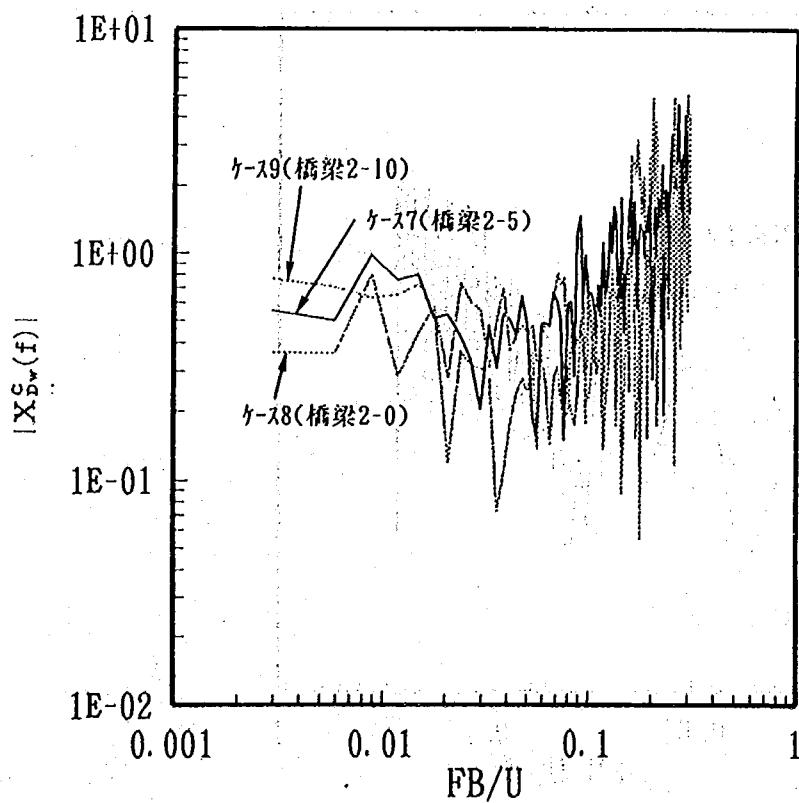


図-3.3.24 空力アドミッタンス (パワースペクトル法、乱流2、遮音壁高さ)

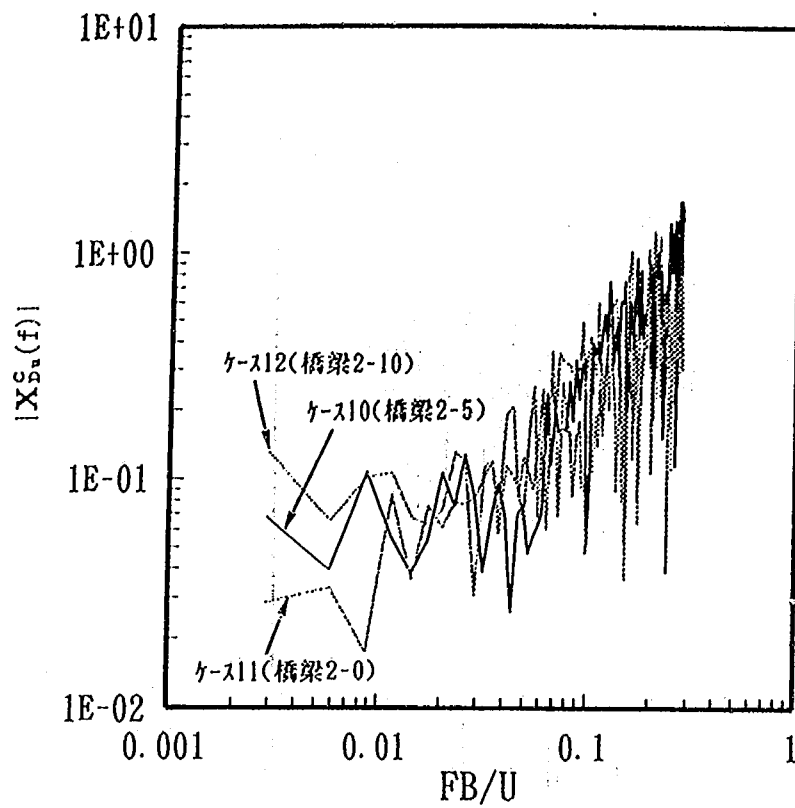


(1) 抗力-主流方向変動風速

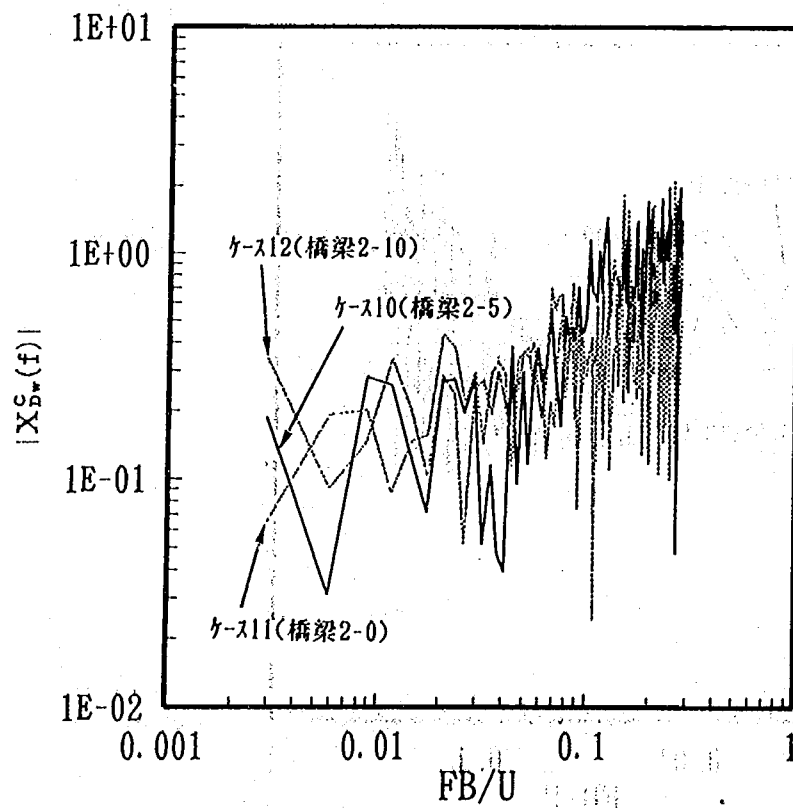


(2) 抗力-鉛直方向変動風速

図-3.3.25 空力アドミッタンス (クロススペクトル法、乱流1; 遮音壁高さ)



(1) 抗力-主流方向変動風速



(2) 抗力-鉛直方向変動風速

図-3.3.26 空力アドミッタンス(クロススペクトル法、乱流2;遮音壁高さ)

3. 4 設計基準との比較

橋梁全体に作用する変動抗力のP. S. D. Fは、式3. 2. 8より次のように表される。

$$\begin{aligned} f \frac{S_{DTDT}(f)}{(2D_T)^2} &= |J^P|^2 \cdot f \frac{S_{DD}(f)}{(2D)^2} \\ &= |J^P|^2 |X_{Du}|^2 \cdot f \frac{S_{uu}(f)}{U^2} \end{aligned} \quad \cdots(3.4.1)$$

今回の実験より求められた変動抗力のP. S. D. Fと、式3. 4. 1により、[便覧]で假定されている値を用いて求められる変動抗力のP. S. D. Fを比較して図-3. 4. 1および図-3. 4. 2に示す。計算では地表粗度区分IVにおける値を基本とし、 $Iu=0.29$ 、 $Lx=70m$ により変動風速のP. S. D. Fを求めた。

また、ジョイントアクセプタンス $|J^P|^2$ は、式3. 3. 1において示されるco-cohにより計算し、空力アドミッタンス $|X_{Du}|^2$ は、準定常理論による $|X_{Du}|^2=1.0$ を用いた。

実験により求められた変動抗力のP. S. D. Fを基準化するために用いられる定常抗力 $\overline{D_T}$ は次のように表される。

$$\overline{D_T} = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_d \cdot A_n \cdot l \quad \cdots(3.4.2)$$

ここで、抗力係数 C_d は[道示]に示されている基準値を用い、平均風速 $\bar{U}$ は、表-3. 3. 2の補正された値を用いた。

図-3. 4. 1には、乱流1において遮音壁高さを変化させた実験を重ね合わせた。この図によると、変動抗力のP. S. D. Fは遮音壁の低いケース8において最も大きく示される。これは、遮音壁の低いもののほど、定常抗力の算定の為に使用した抗力係数が基準値と近いと思われる(表3. 4. 1)。いずれにせよ変動抗力のP. S. D. Fは基準値の値を大幅に下回っている。

図-3. 4. 2には、橋梁2-5の模型を使用し、気流を変化させた場合について重ね合わせた。この図においても各気流における変動抗力のP. S. D. Fは基準値によるものを下回っている。また、地形模型1、2については、高周波数領域において基準値に近づいている。しかしながら、①地形模型1、2は、一般に設計で假定されている値と比較し、乱れスケールが小さいこと(図-3. 4. 3)、および②地形1、2は、べき指数が極めて大きいこと、実際の橋桁位置における平均風速は、一般に設計で假定されている風速と比べてかなり低減していることなどを考慮すると、現行の[道示]による風荷重は十分安全であると考えられる。

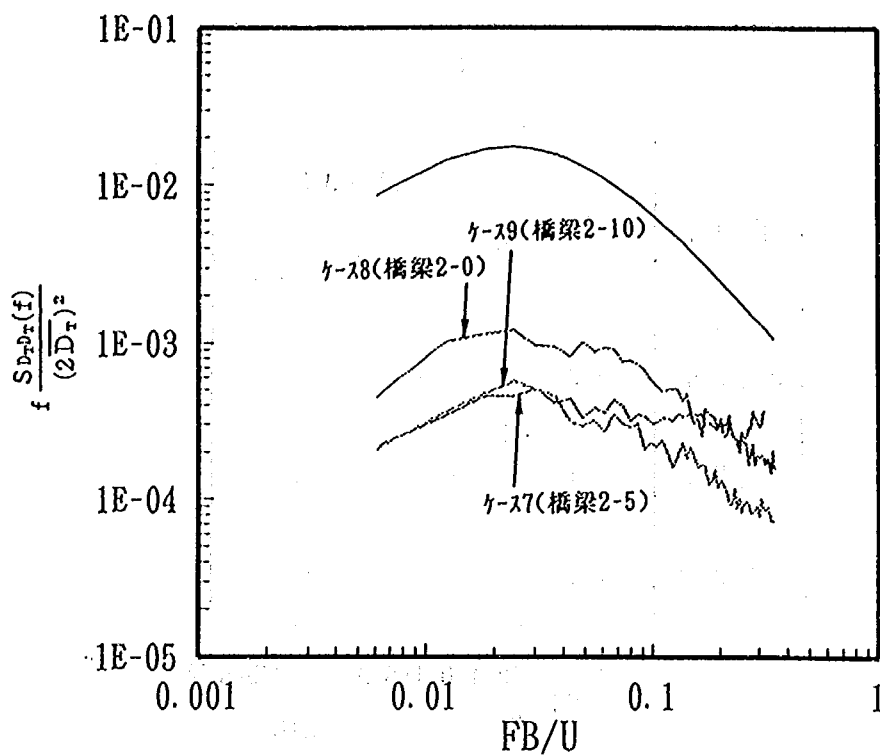
また、全てのケースについて、変動抗力のP. S. D. Fは基準を下回っているが、この理由は次のことが考えられる。①式3. 3. 1のco-cohは $f \rightarrow 0$ において1.0に漸近するため、ジョイントアクセプタンスが実験値より大きい。②抗力係数が実験値より大きい(表3. 4. 1)。③地形1、2以外は設計で考えている値より乱れ強さが小さい(図-3. 4. 3)。

①の事項に関連して、前項の空力アドミッタンスの解析においては、低周波数領域の精度を高くするために、式3. 3. 1のco-cohを用いずに式3. 2. 6を用いた(図-3. 3. 9～図-3. 3. 13)。これにより、乱流1の空力アドミッタンスは0.8～0.9と、準定常理論に基づく1.0に近い値が求められた。なお、乱流2については、0.6程度とやや小さい値となった(図-3. 3. 23, 図-3. 3. 24)が、これは、図-3. 3. 7に示されている通り、乱流2は比較的近い距離において気流の負相関が出る気流であり、式-3. 2. 6では負相関の影響は考慮されていないためであると思われる。

また、式3. 2. 6のco-cohは乱れスケールがパラメータとなっているが、わが国において、乱れスケールが計測された例は少ない。図-3. 4. 4にわが国において計測された乱れスケールおよび[便覧]の基準

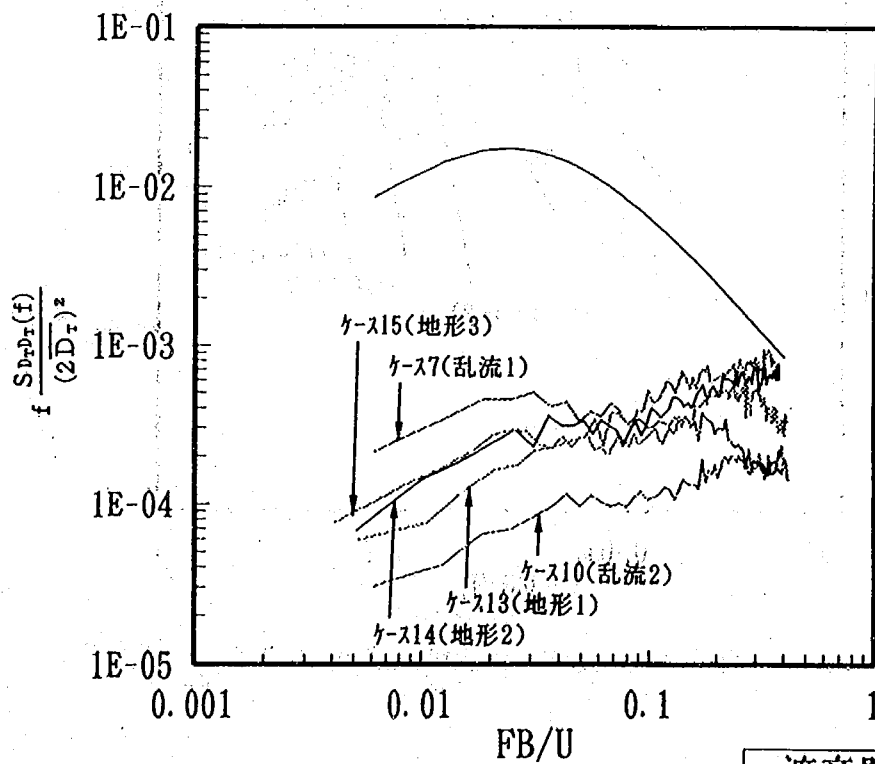
を示すと、計測場所、研究者によりかなり差がある。日本建築学会の建築物荷重指針・同解説²²⁾においても、乱れスケールは地表面の粗度に関係しているが、地表面粗度区分に分類するほど明確な差はないとされており、[便覧]と同様に高度のみで補正された乱れスケールが示されている。一方、地表面粗度により補正される推定式もESDUの基準、Counihanの式²³⁾など存在する。これらについて、粗度長4m、1m、0.1mおよび[便覧]に示されている値を重ね合わせ図-3.4.5に示す。これをみると、Counihanの式とESDUでは、大きく異なりCounihanの式の方が地表面粗度による影響を大きく見積もっている。図-3.4.6は、式3.2.6に基づき、乱れスケールを変化させた場合のジョイントアクセプタンスおよびDavenportのco-cohに基づくジョイントアクセプタンスを示したものである。

図-3.4.1、図-3.4.2および図-3.4.6から考察するに、現在の[道示]の風荷重は安全側に設定されていると思われる、ジョイントアクセプタンスの設定を精度よく行うことにより、今以上に合理的な風荷重を求めることが可能である。しかしながら、現在のところ都市内の風の空間変動特性については不明な点が多く、co-cohを精度よく設定することは困難である。今後はこれらのデータの蓄積に努め、より合理的な風荷重を設定していく必要がある。



乱流1、1/150模型

図-3.4.1 変動抗力のP.S.D.F(遮音壁高さ)



遮音壁5m、1/150模型

図-3.4.2 変動抗力のP.S.D.F(気流)

表-3.4.1 抗力係数の比較

模型名	B / D	抗力係数Cd	
		基準値 ^{*)}	実験値
橋梁2-0	5.9	1.5	1.2
橋梁2-5	2.1	1.9	1.3
橋梁2-10	1.2	2.0	1.4

$$*) \quad Cd = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & 1 \leq B/D < 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/D \end{cases}$$

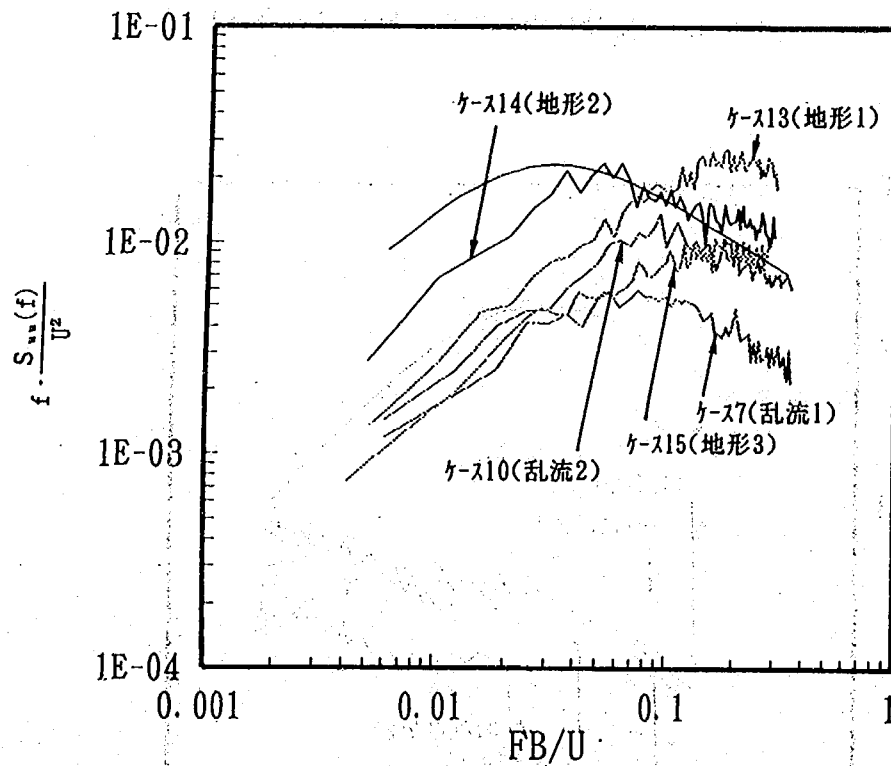


図-3.4.3 主流方向変動風速のP.S.D.F.

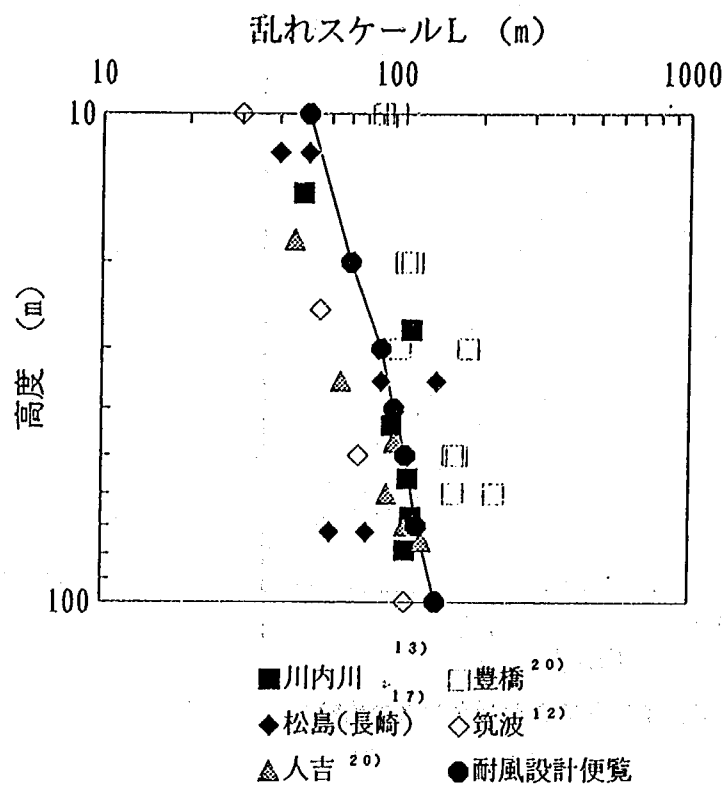


図-3.4.4 現地観測における主流方向乱れスケール

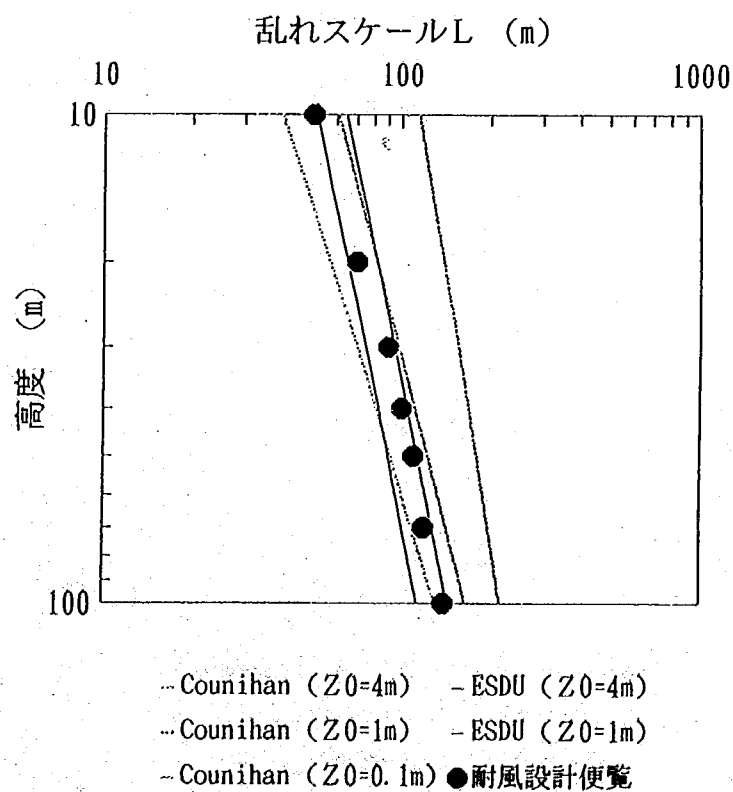
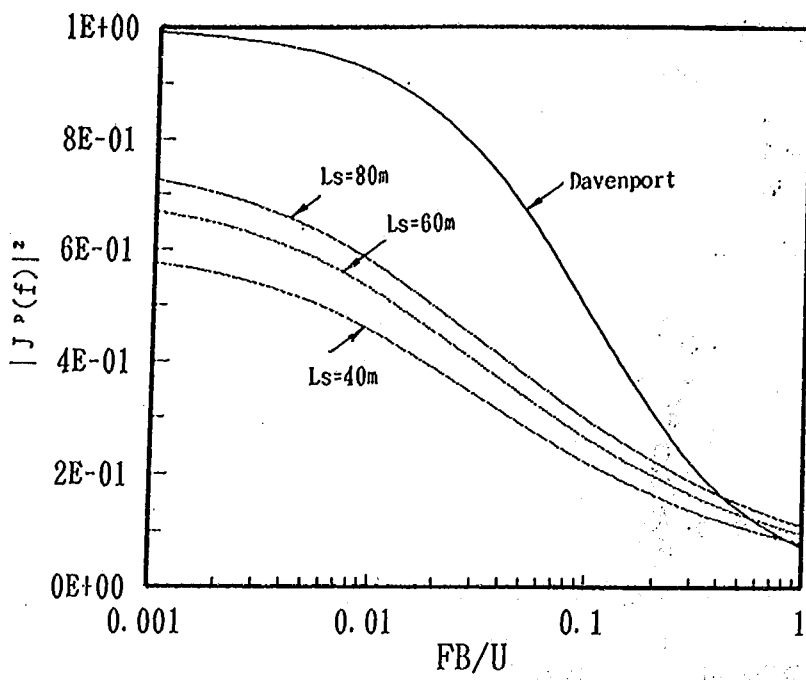


図-3.4.5 地表面粗度を考慮した近似式による主流方向乱れスケール



$l=50m, k=8$
 $U=30m/S$

図-3.4.6 ジョイントアクセプタンスの比較

3. 5 遮音壁を有する橋桁の空気力計測に関するまとめ

以下、本研究の成果をまとめる。

- (1)乱れの異なる気流を発生させ、変動空気力を計測した。その結果、乱流の空間特性によっては、乱れの増大が必ずしも橋桁に作用する変動空気力の増大に結びつくとは限らないことが明らかになった。
- (2)(1)に示される乱流の空間特性の影響は、より精度の良いジョイントアクセプタンスを設定することにより評価が可能となることが示された。
- (3)空力アドミッタンスは概ね準定常理論の値と一致した。これに及ぼす遮音壁高さの影響は、あまり大きくないことが明らかになった。
- (4)定常抗力については、気流の乱れにより抗力係数が低減することが示された。
- (5)現在の[道示]における風荷重はかなり安全側に設定されていることが示唆された。

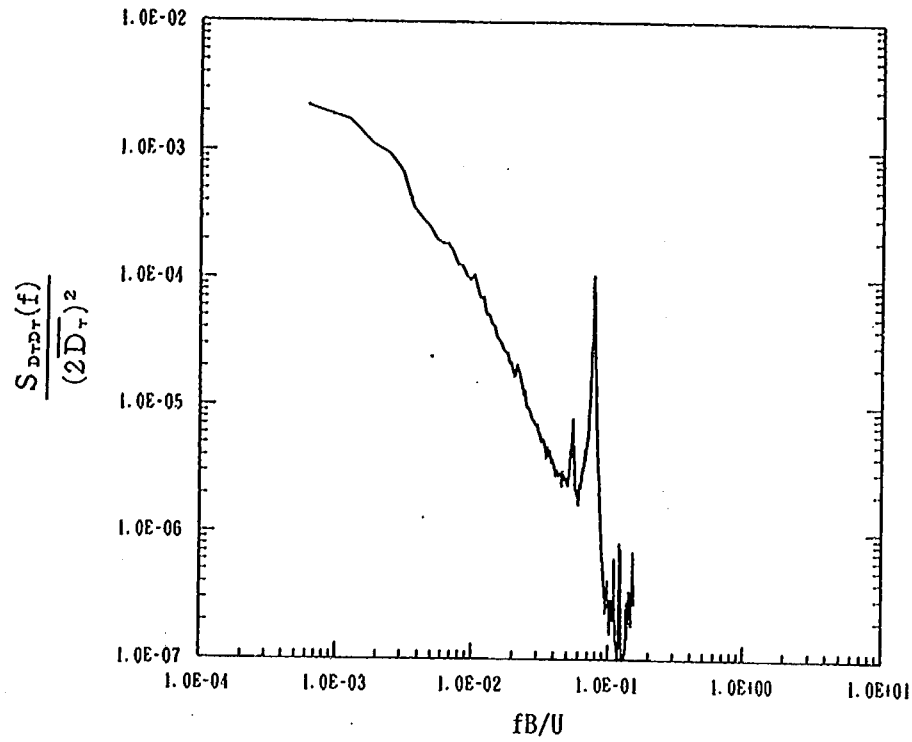
参考文献

- 1) 小松、田井戸、坂田；高架桁橋の風荷重に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 303号, 1980
- 2) 日本道路協会；同解説共通編、平成2年2月
- 3) 日本道路協会；道路橋耐風設計便覧, 平成3年7月
- 4) 建設省土木研究所；遮音壁を有する橋梁の耐風調査共同研究報告書, 共同研究報告書第53号, 平成3年3月
- 5) ESDU ; Engineering Science Data, Wind Engineering, Volume 1 Wind and turbulence data, Engineering Science Data Unit Ltd., 1982
- 6) 土木学会；本州四国連絡橋の耐風実験橋に関する調査研究報告書(その1), 本州四国連絡橋耐風研究小委員会, 昭和52年3月
- 7) Jackson, p. s. ; Aspects of surface wind behavior, Wind Engineering, 1.1-14. 1977
- 8) 岡内, 伊藤, 宮田；耐風構造, 1977
- 9) 塩谷；強風の性質-構造物の耐風設計に関連して-, 1981
- 10) 建設省土木研究所；自然風を考慮した橋の耐風性調査報告書, 構造研究室資料第9号, 昭和60年3月
- 11) 藤本他；風の影響に及ぼす地表面粗度ならびに地形の影響に関する基礎研究, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980
- 12) 花房他；筑波気象観測鉄塔で観測された強風について, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980
- 13) 前田他；強風時変動風速の空間構造に関する考察, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980
- 14) 内藤；発達した低気圧による海上風の特性, 第9回風工学シンポジウム論文集, 1986
- 15) 中村他；市街地における風観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造), 昭和60年
- 16) N.Kato他；Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44(1992)67-78
- 17) 村上他；市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第314号, 昭和57年
- 18) 中村他；西東京スカイツワーでの風・振動観測, 第12回風工学シンポジウム論文集, 1992
- 19) 又木他；千葉ポートタワーの風観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造I), 1990
- 20) 足立他；強風時における乱れのスケールおよび乱れ強さの鉛直方向分布特性について, 第8回風工学シンポジウム論文集, 1984
- 21) A.G.Davenport ; The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 87, pp. 194~211, 1961
- 22) 日本建築学会；建築物荷重指針・同解説, 1993年改定
- 23) Counihan, J. ; Adiabatic atmospheric boundary layers. A review and analyses of data from the period 1880-1972, Atmos. Environ., 9, 871-905, 1975

付 図

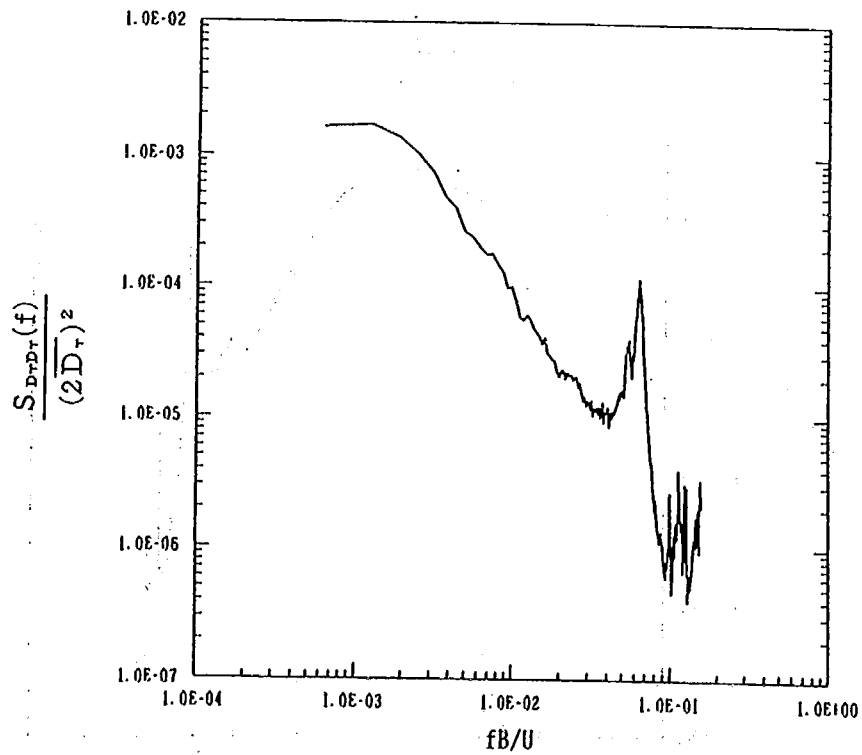
1. 空気力（抗力、揚力）のP.S.D.F
2. 空力アドミッタンス（パワースペクトル法）
3. 空力アドミッタンス（クロススペクトル法）

実験ケース 1



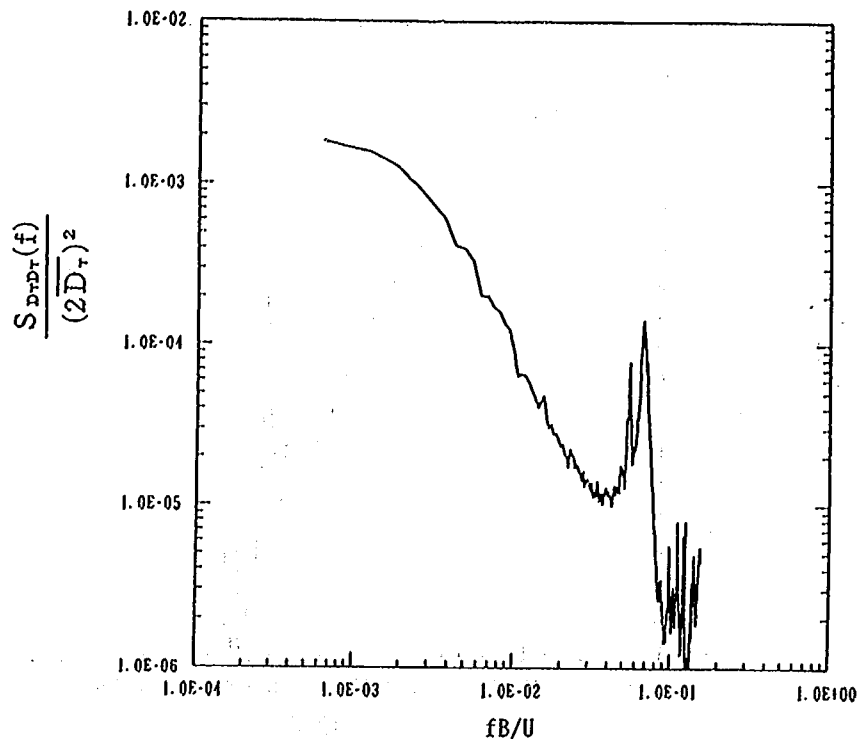
付図-1.1 抗力のパワースペクトル(乱流1, 平板1)

実験ケース 2



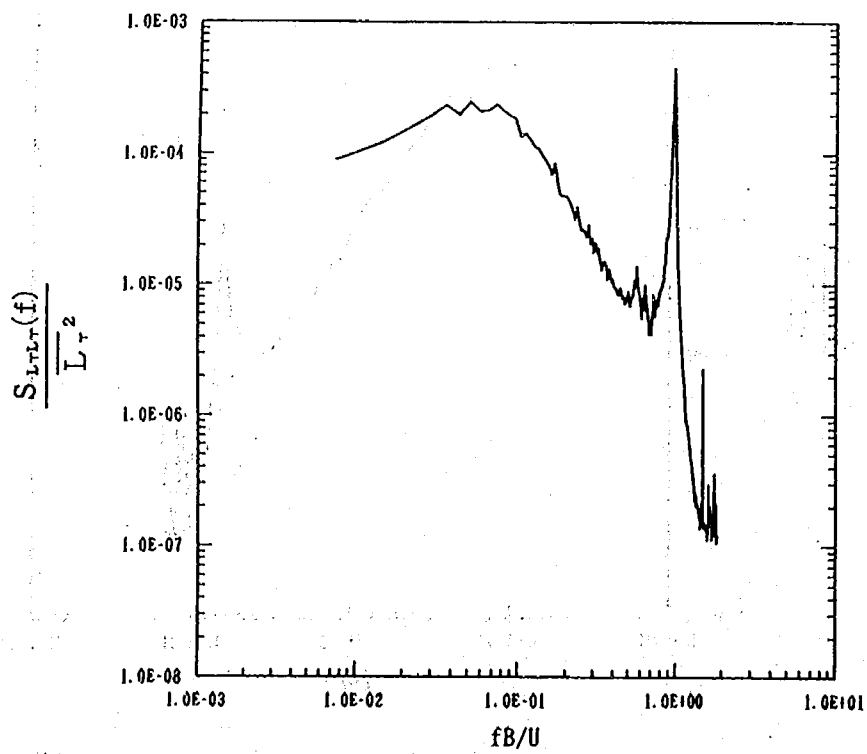
付図-1.2 抗力のパワースペクトル(乱流1, 平板2)

実験ケース 3



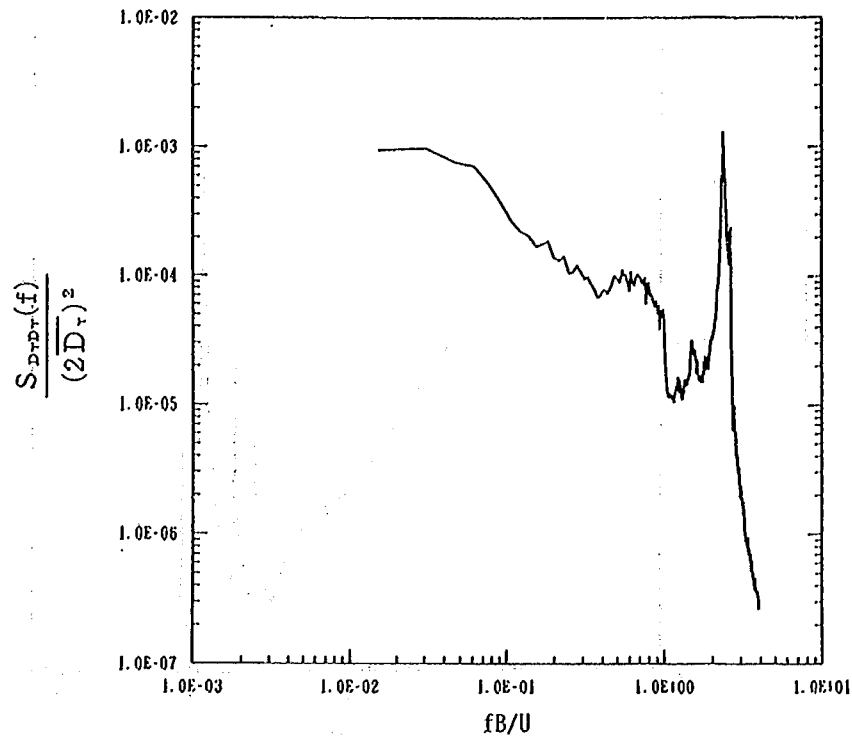
付図-1.3 抗力のパワースペクトル(乱流1, 平板3)

実験ケース 4



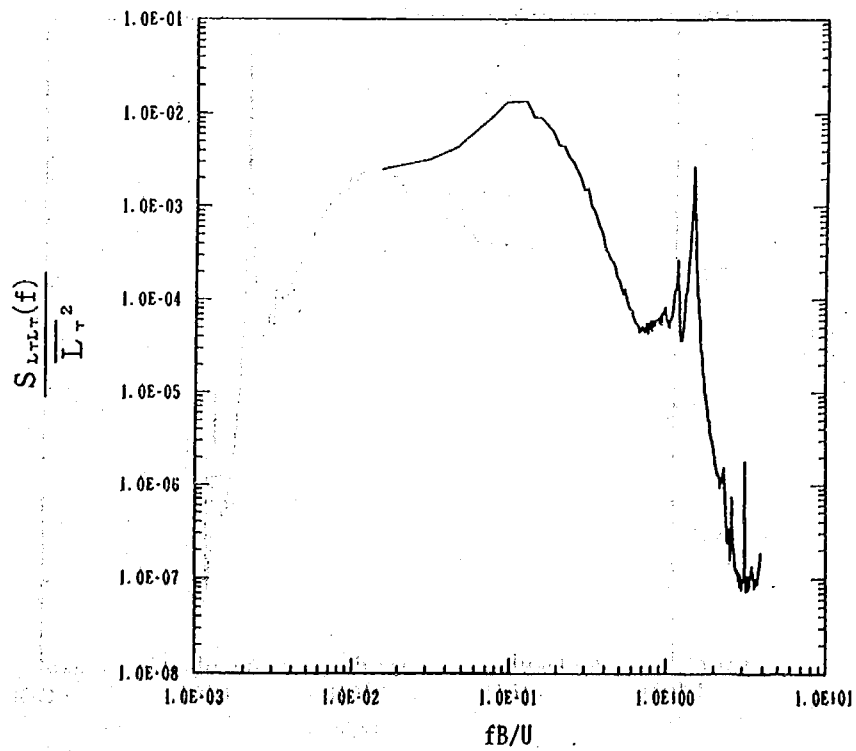
付図-1.4 揚力のパワースペクトル(乱流1, 平板1)

実験ケース 5



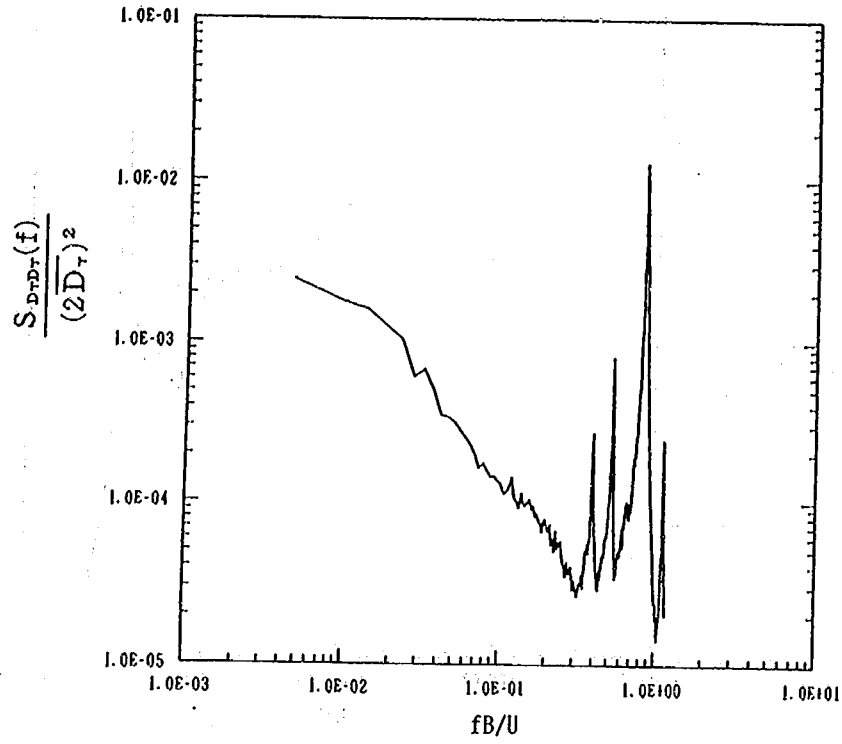
付図-1.5 抗力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁1)

実験ケース 5



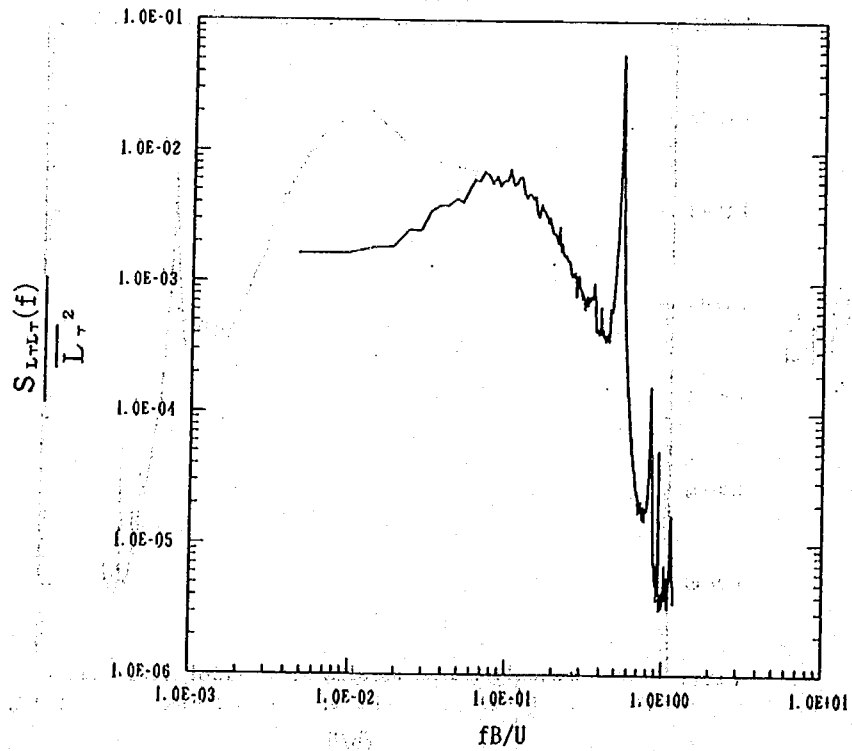
付図-1.6 揚力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁1)

実験ケース 6



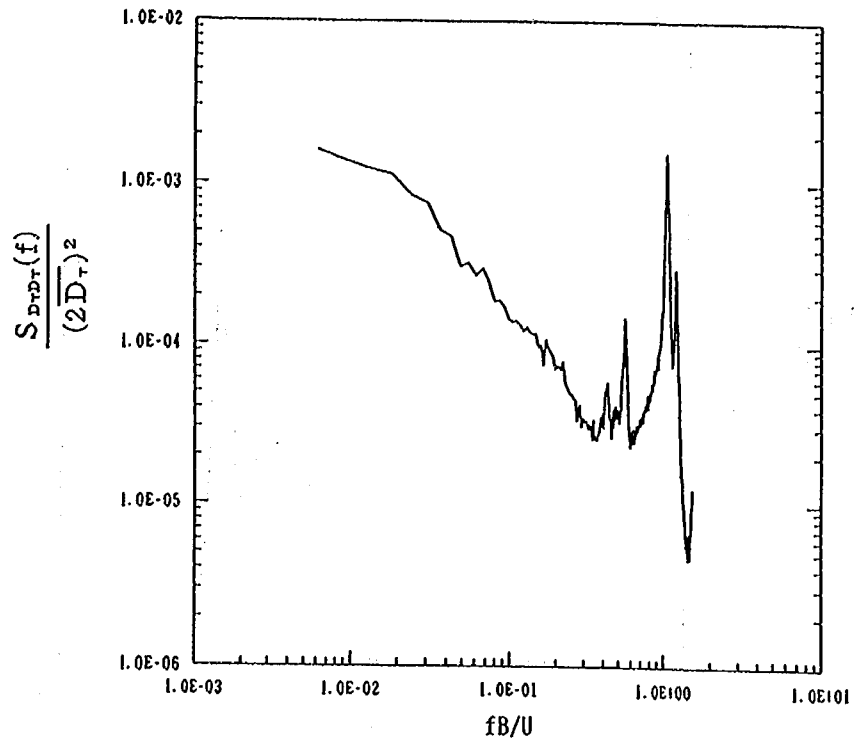
付図-1.7 抗力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁3)

実験ケース 6



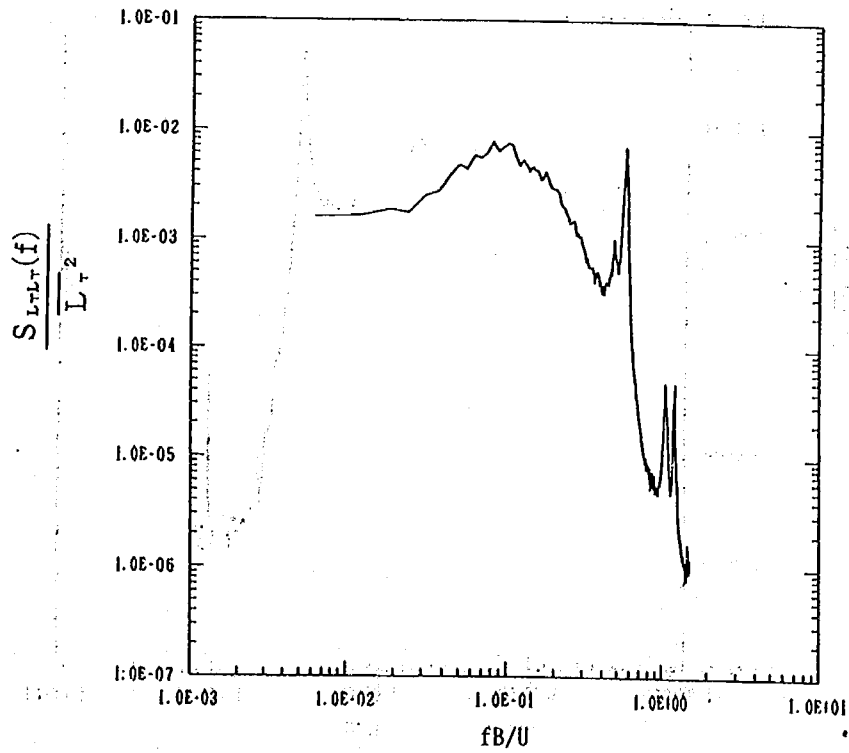
付図-1.8 揚力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁3)

実験ケース 7



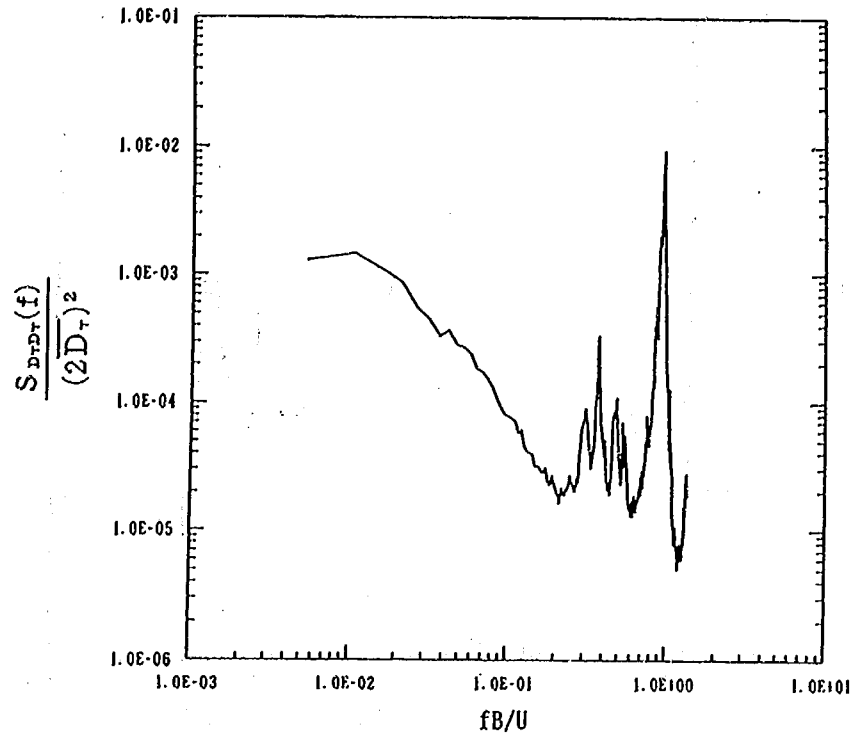
付図-1.9 抗力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁2-5)

実験ケース 7



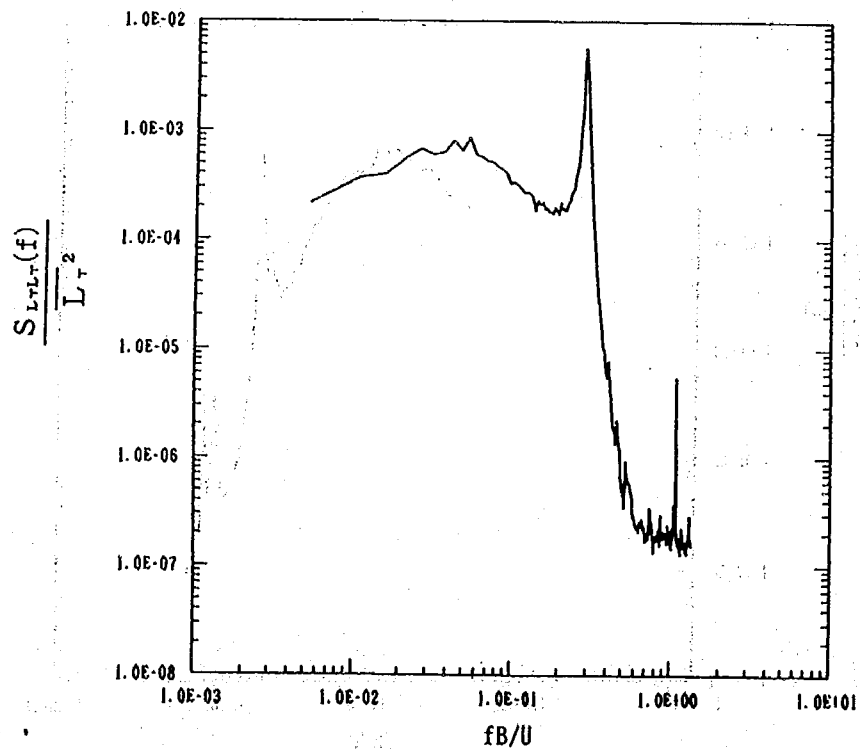
付図-1.10 揚力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁2-5)

実験ケース 8



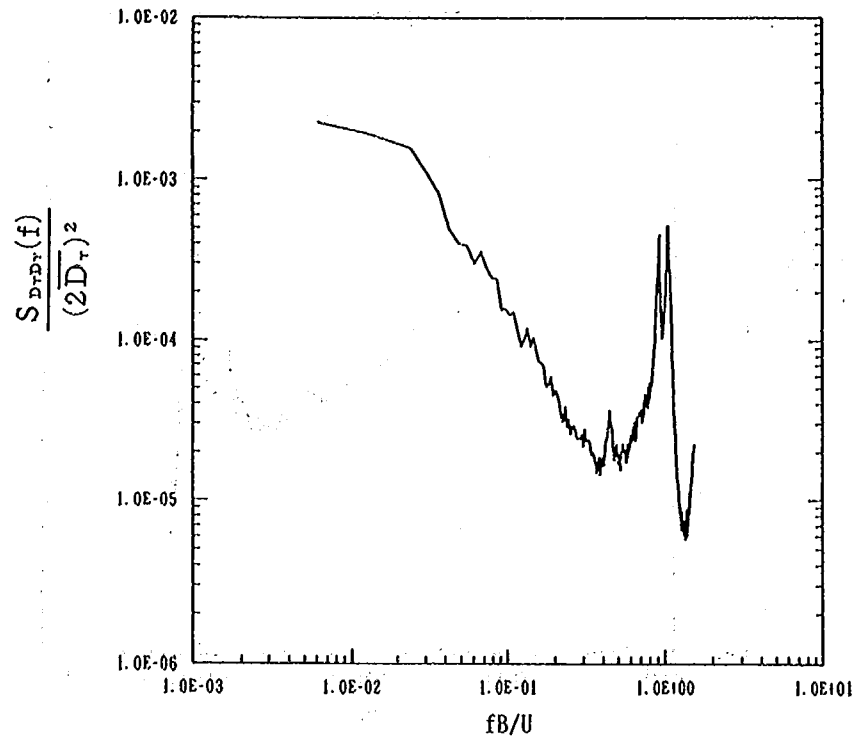
付図-1.11 抗力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁2-0)

実験ケース 8



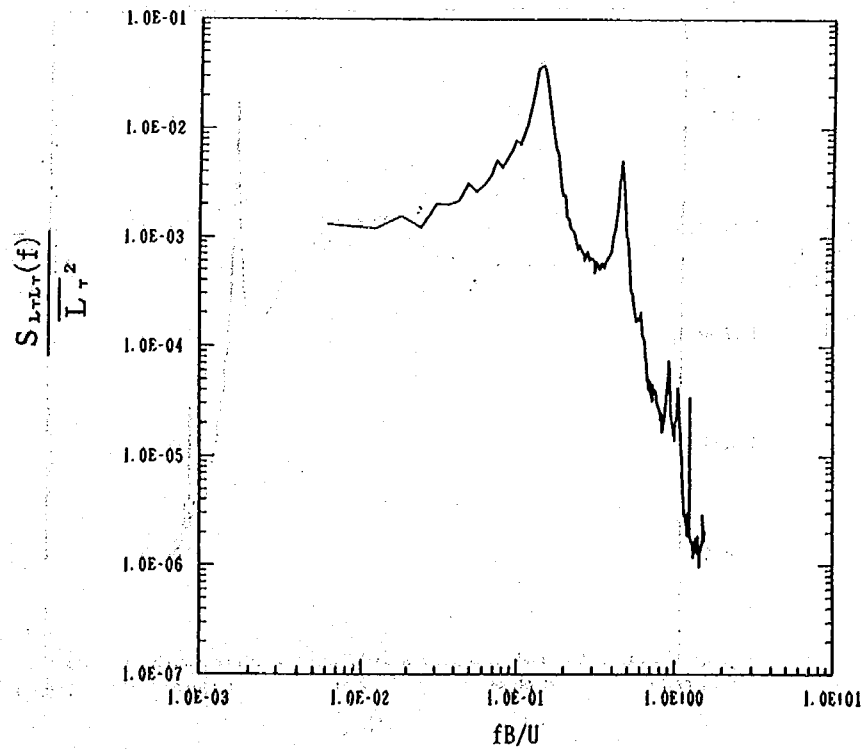
付図-1.12 揚力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁2-0)

実験ケース 9



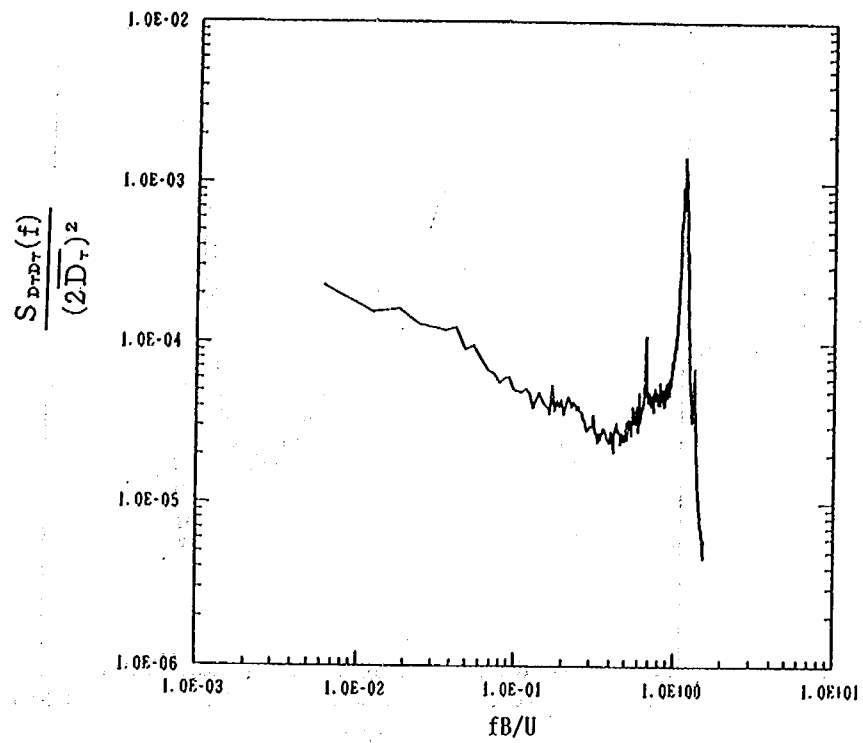
付図-1.13 抗力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁2-10)

実験ケース 9



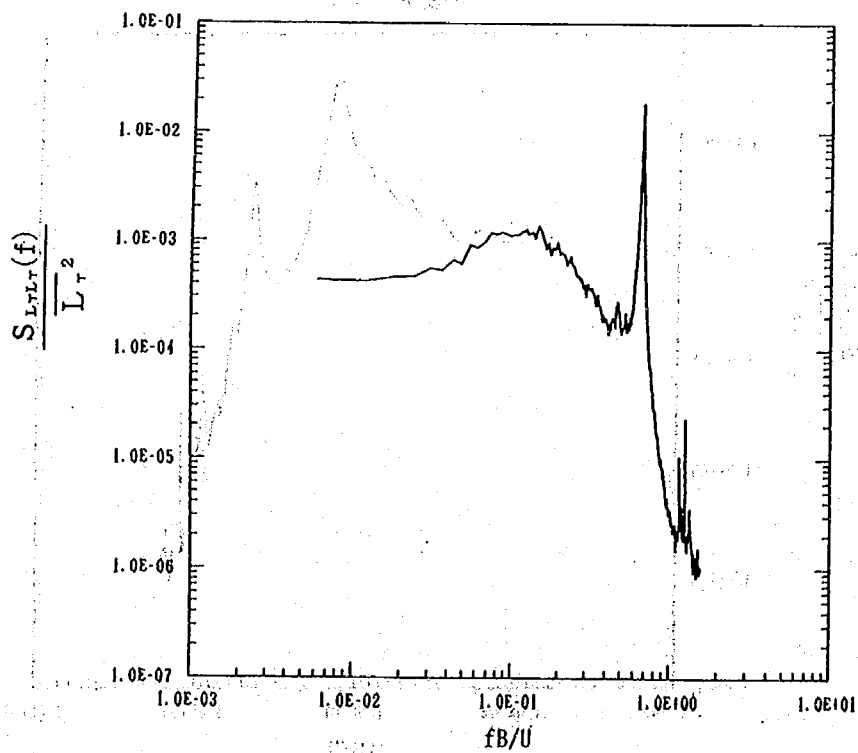
付図-1.14 揚力のパワースペクトル(乱流1, 橋梁2-10)

実験ケース 10



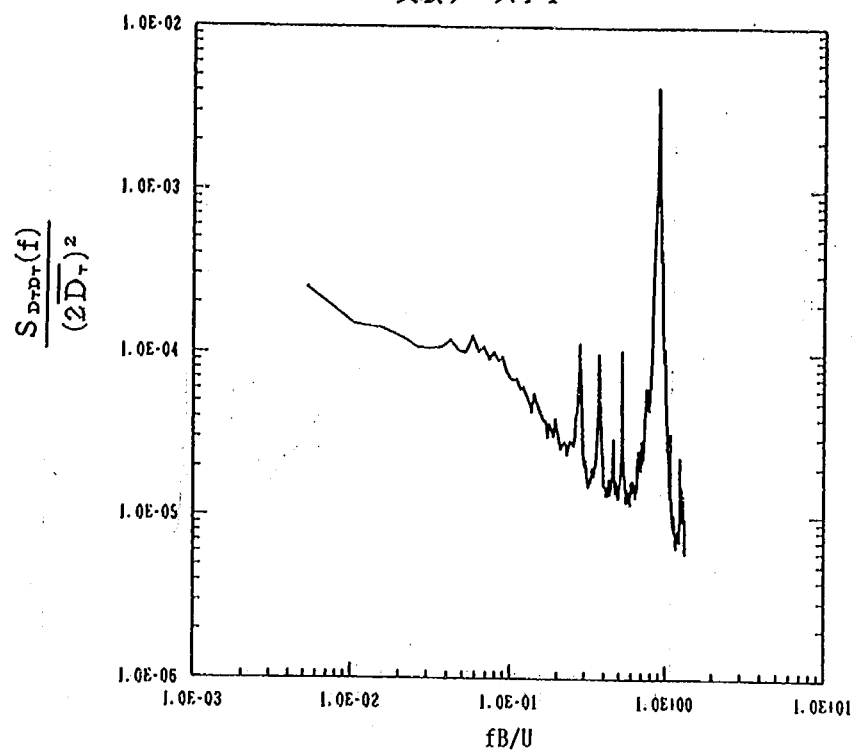
付図-1.15 抗力のパワースペクトル(乱流2, 橋梁2-5)

実験ケース 10



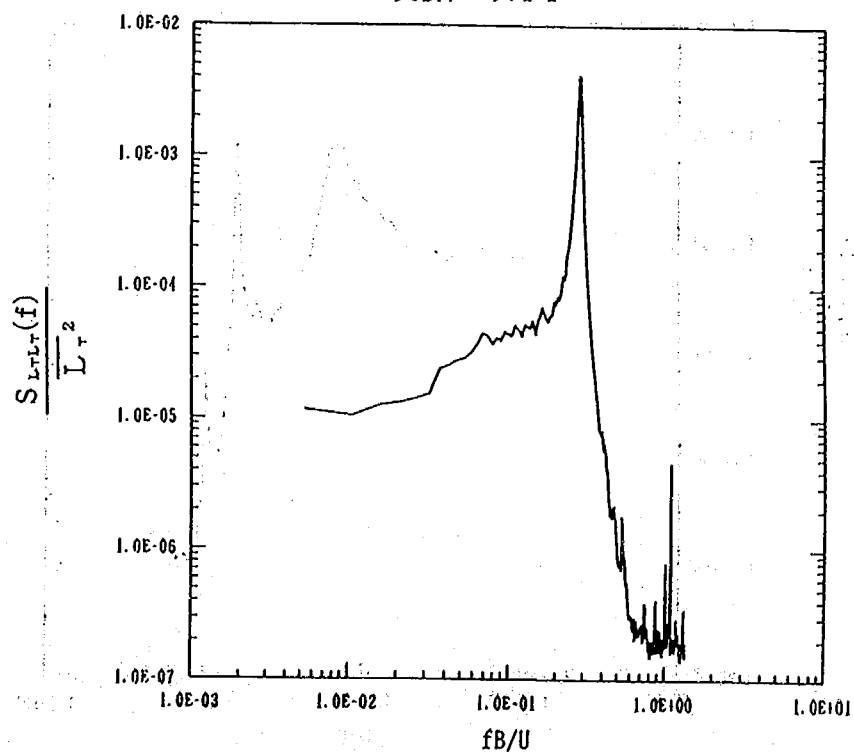
付図-1.16 揚力のパワースペクトル(乱流2, 橋梁2-5)

実験ケース 1 1



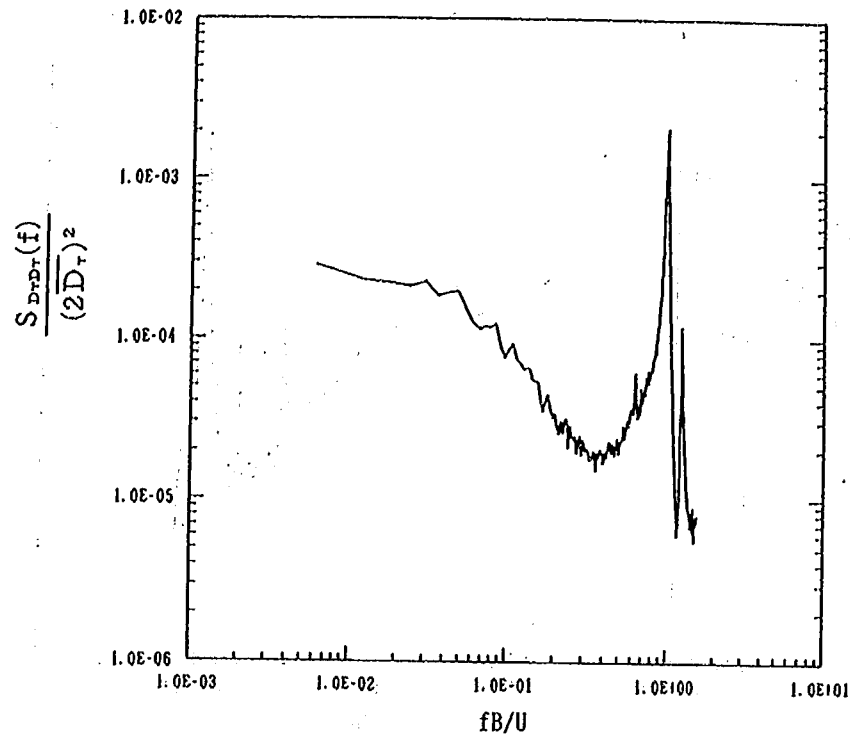
付図-1.17 抗力のパワースペクトル(乱流2, 橋梁2-0)

実験ケース 1 1



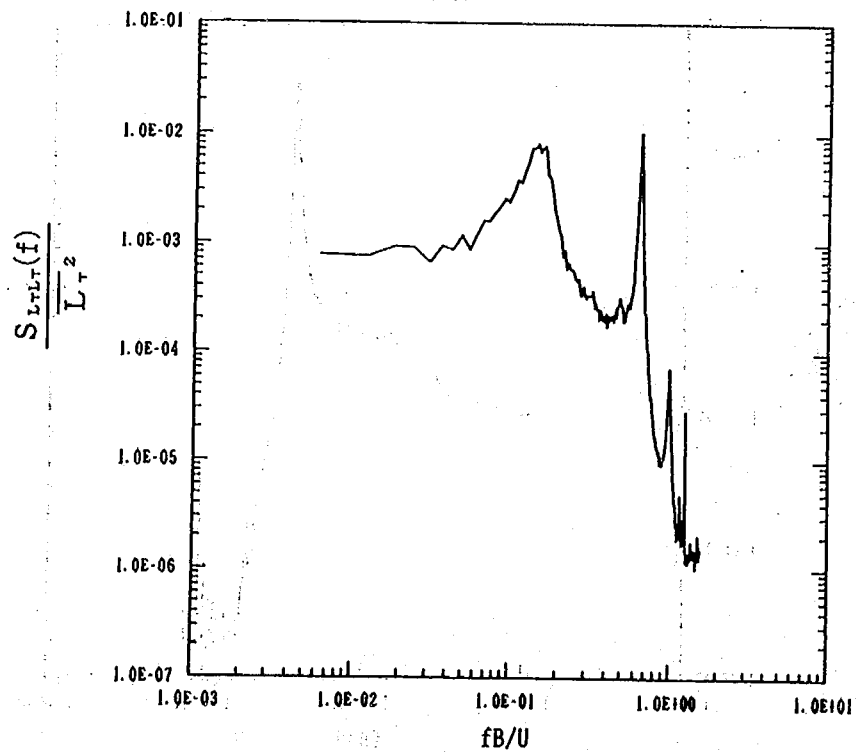
付図-1.18 揚力のパワースペクトル(乱流2, 橋梁2-0)

実験ケース 1 2



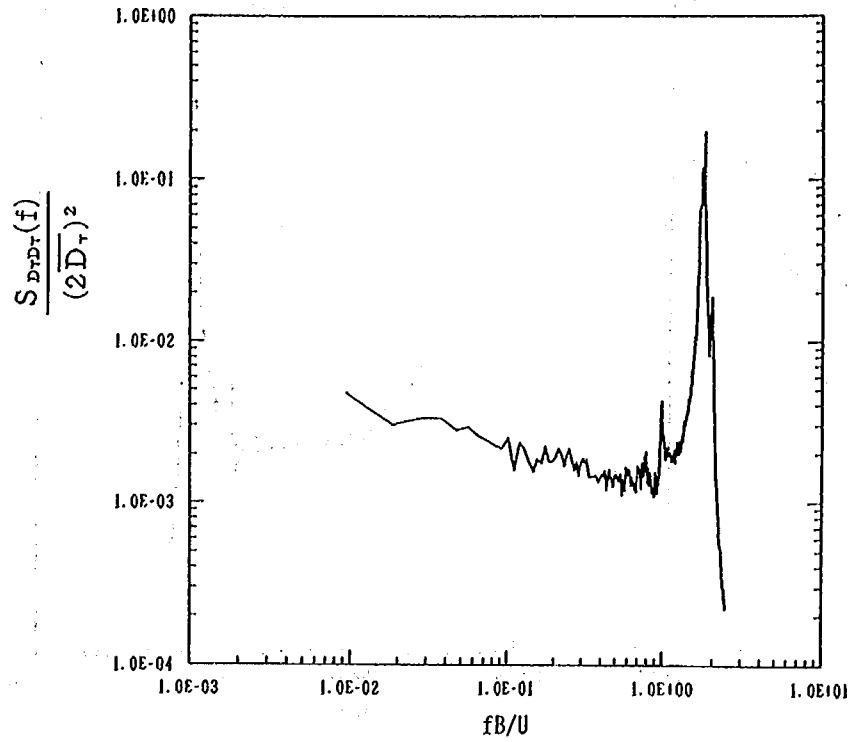
付図-1.19 抗力のパワースペクトル(乱流2, 橋梁2-10)

実験ケース 1 2



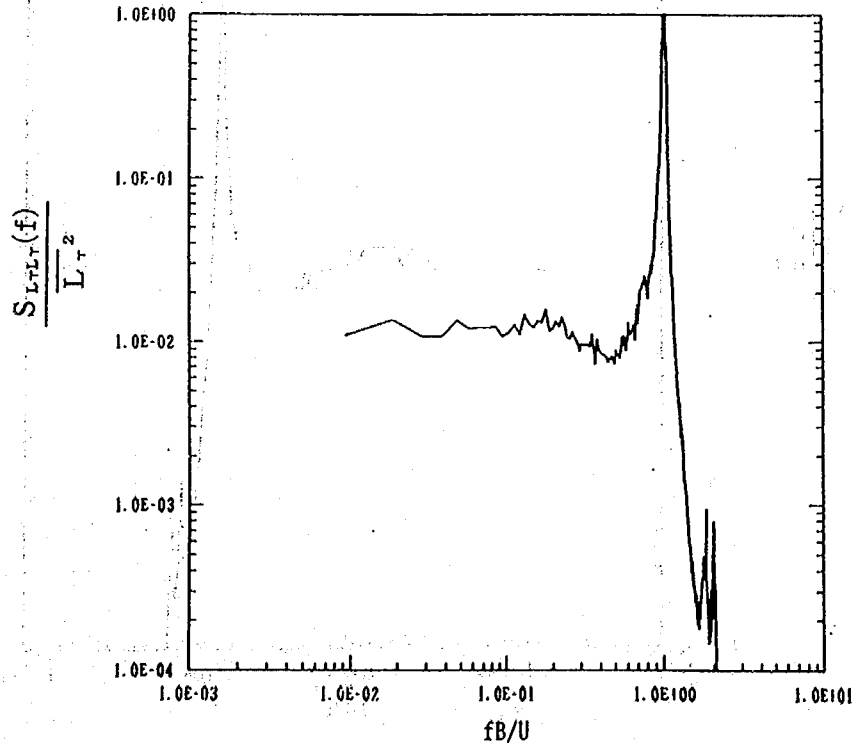
付図-1.20 揚力のパワースペクトル(乱流2, 橋梁2-10)

実験ケース13



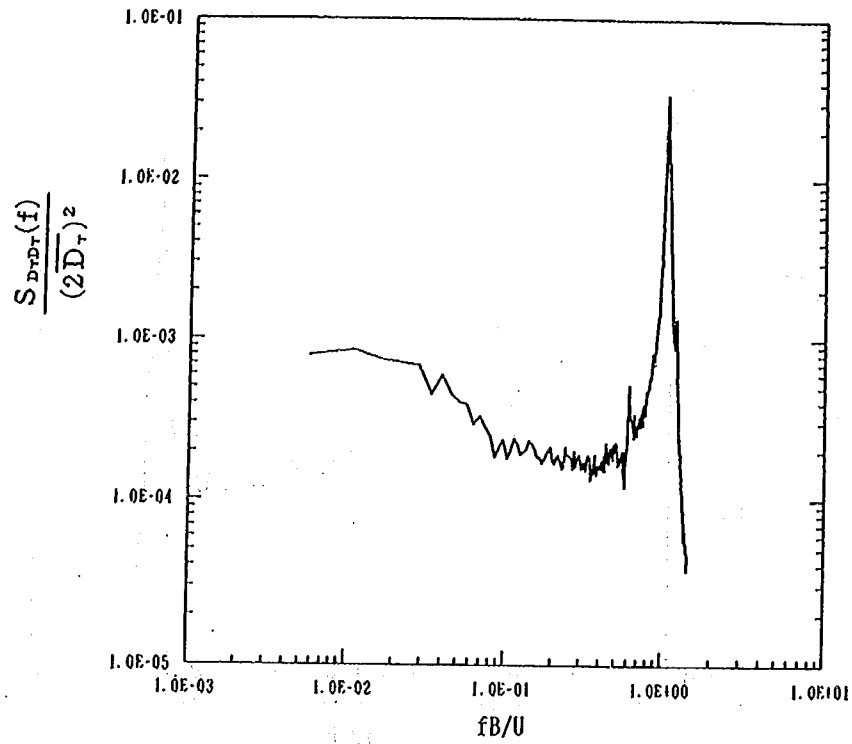
付図-1.21 抗力のパワースペクトル(地形1, 橋梁2-5)

実験ケース13



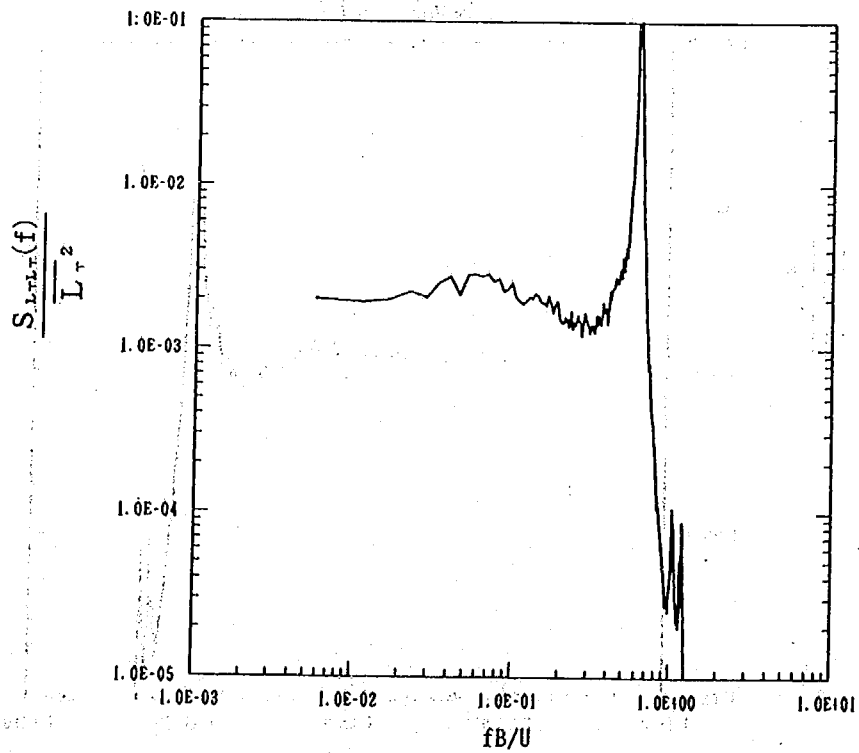
付図-1.22 揚力のパワースペクトル(地形1, 橋梁2-5)

実験ケース 1 4



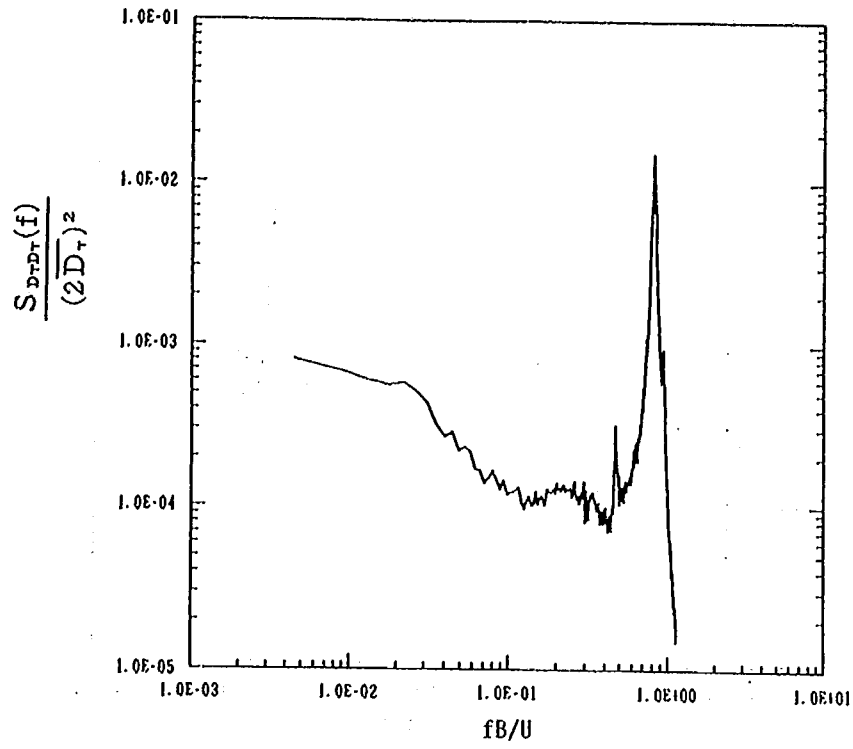
付図-1.23 抗力のパワースペクトル(地形2, 橋梁2-5)

実験ケース 1 4



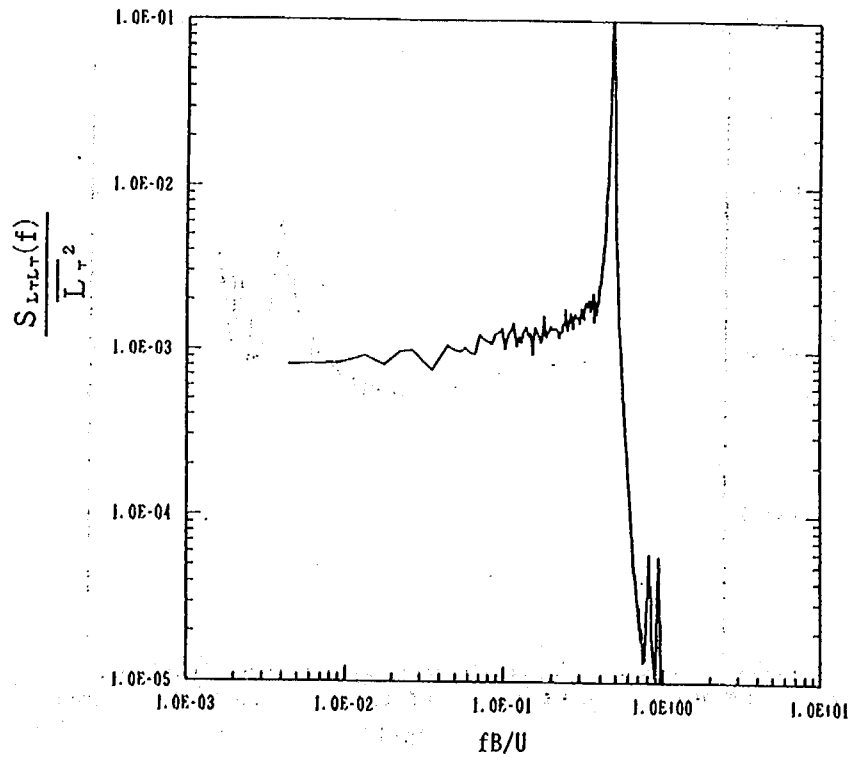
付図-1.24 揚力のパワースペクトル(地形2, 橋梁2-5)

実験ケース 15



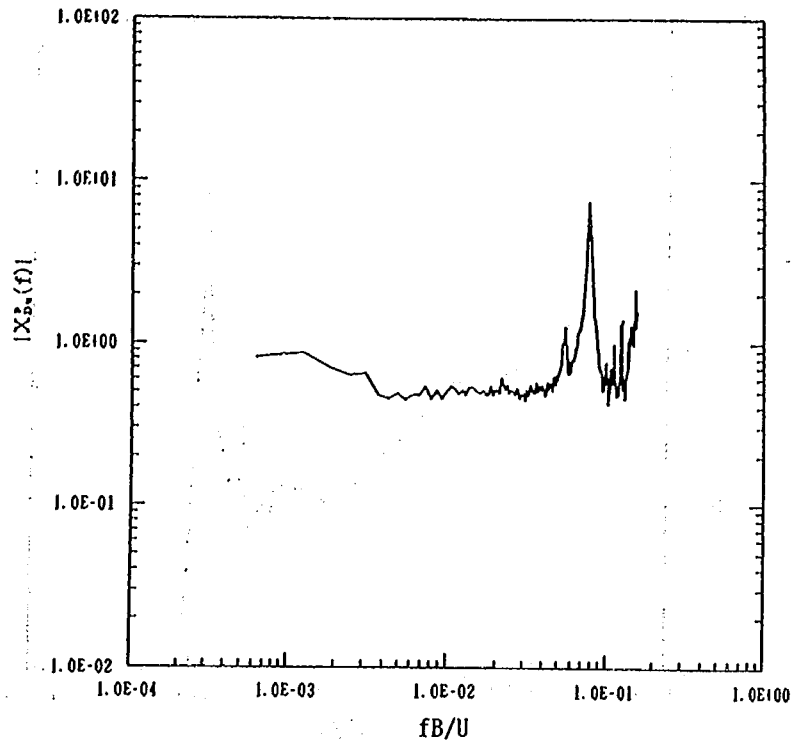
付図-1.25 抗力のパワースペクトル(地形3, 橋梁2-5)

実験ケース 15



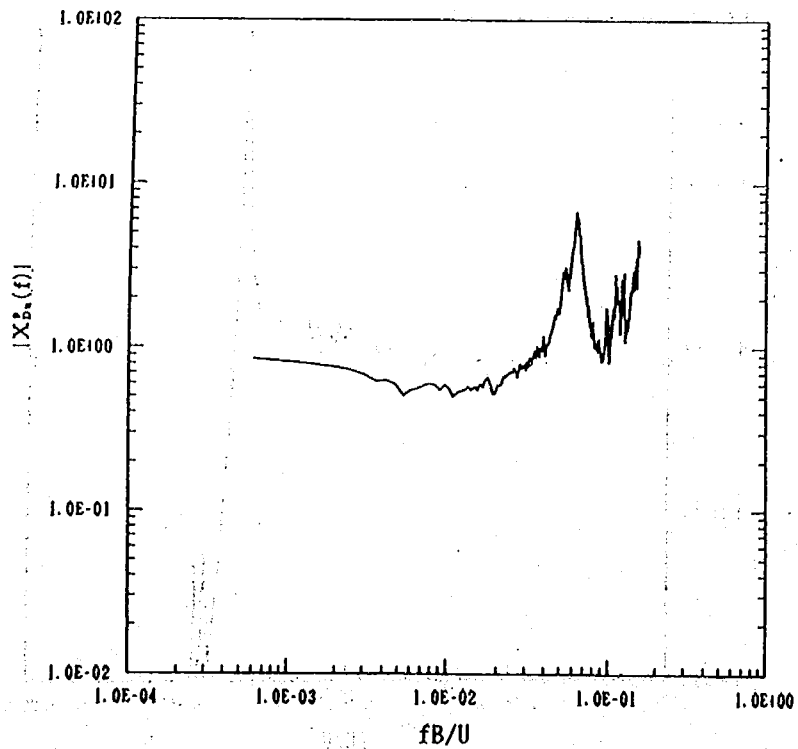
付図-1.26 揚力のパワースペクトル(地形3, 橋梁2-5)

実験ケース 1

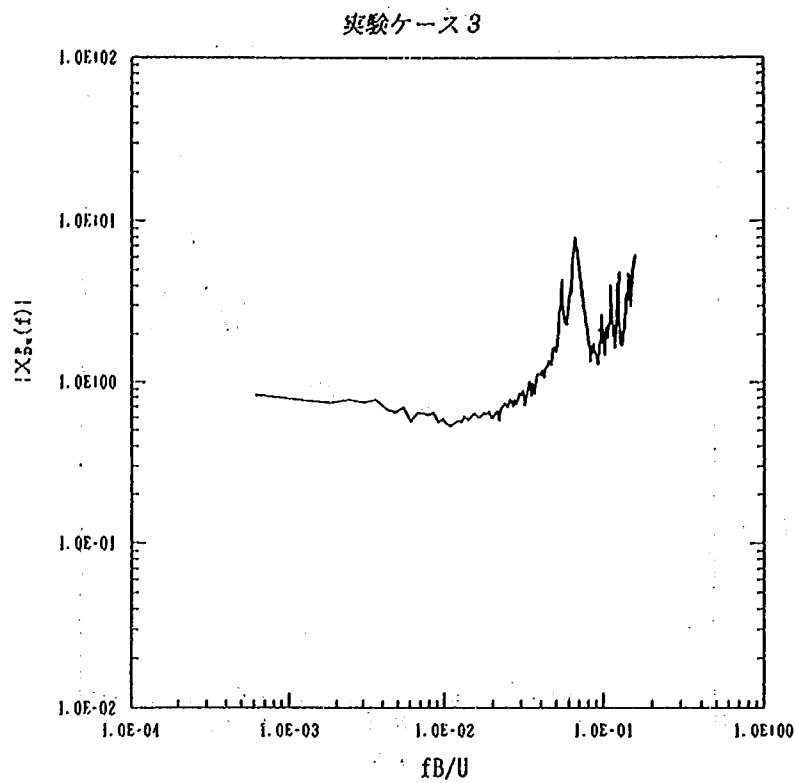


付図-2.1 抗力の空力アドミッタンス(ハワースペクトル法, 乱流1, 平板1)

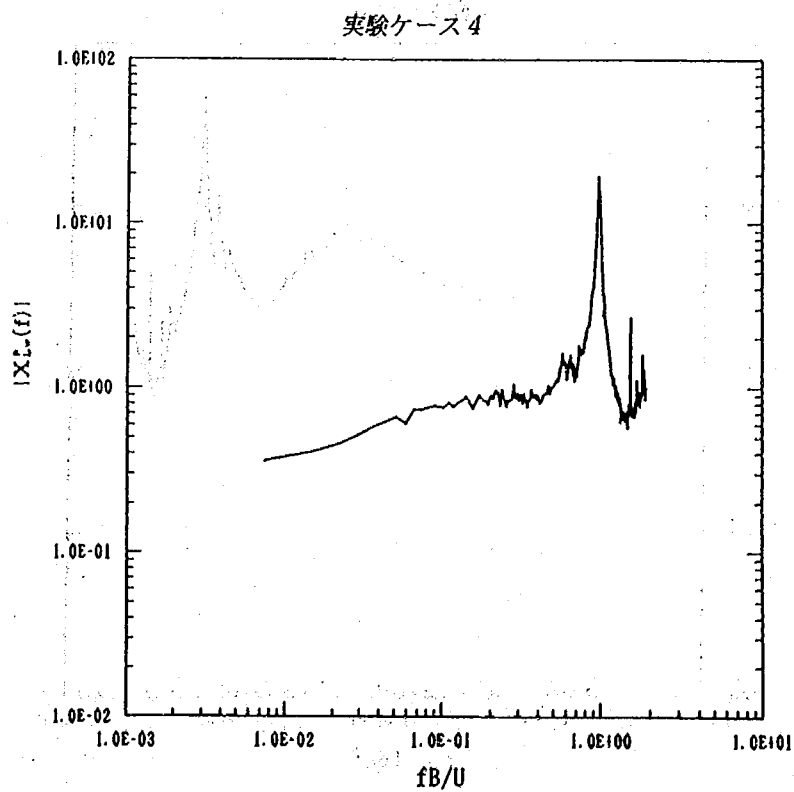
実験ケース 2



付図-2.2 抗力の空力アドミッタンス(ハワースペクトル法, 乱流1, 平板2)

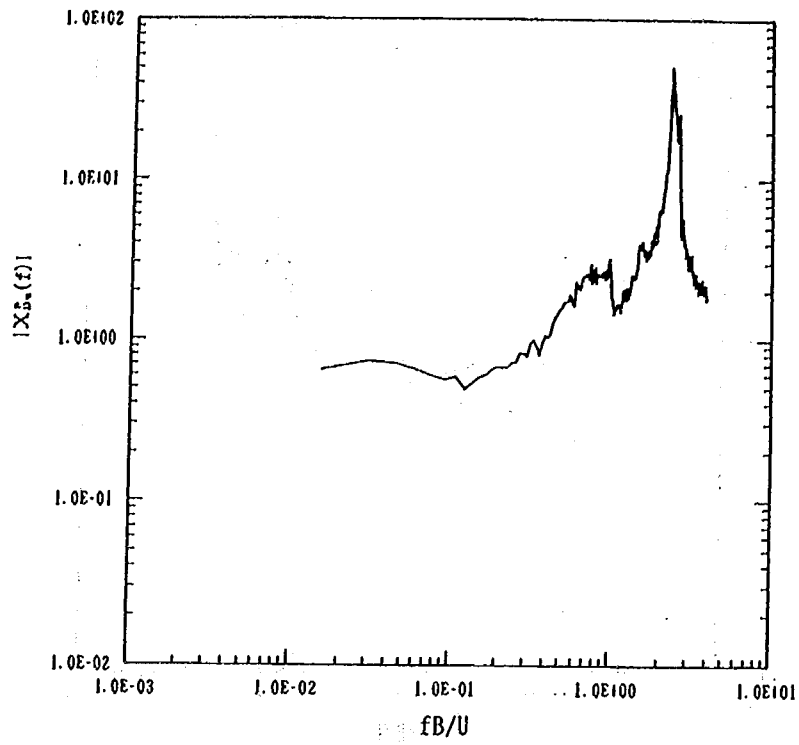


付図-2.3 抗力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 平板3)



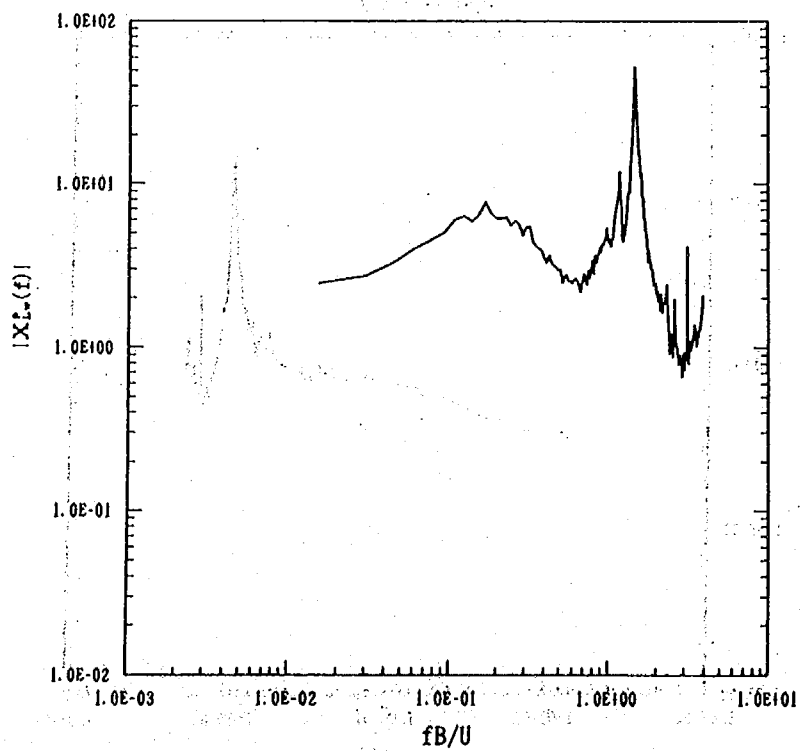
付図-2.4 揚力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 平板1)

実験ケース 5

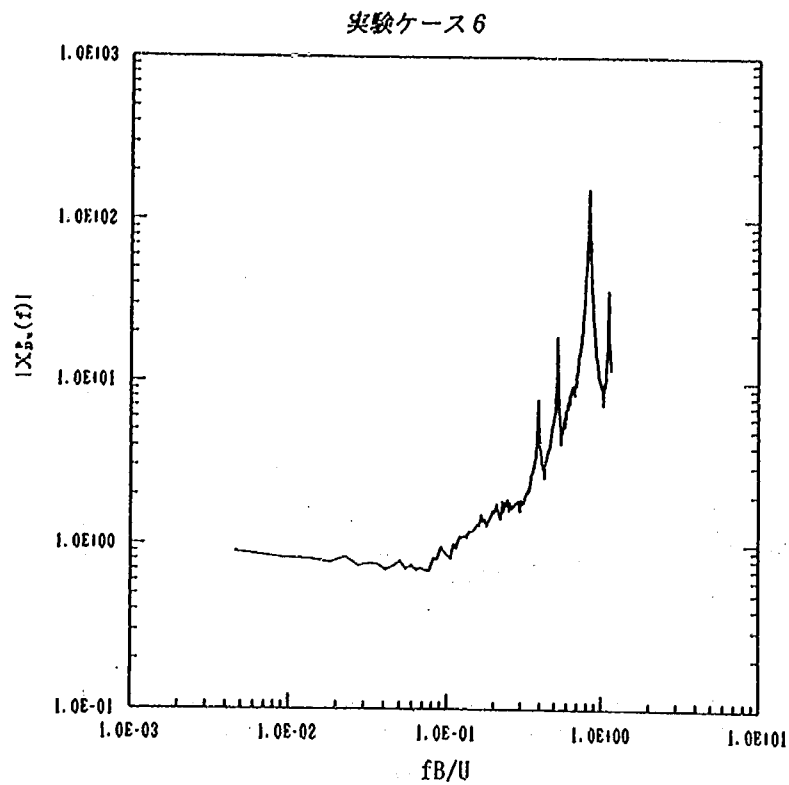


付図-2.5 抗力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁1)

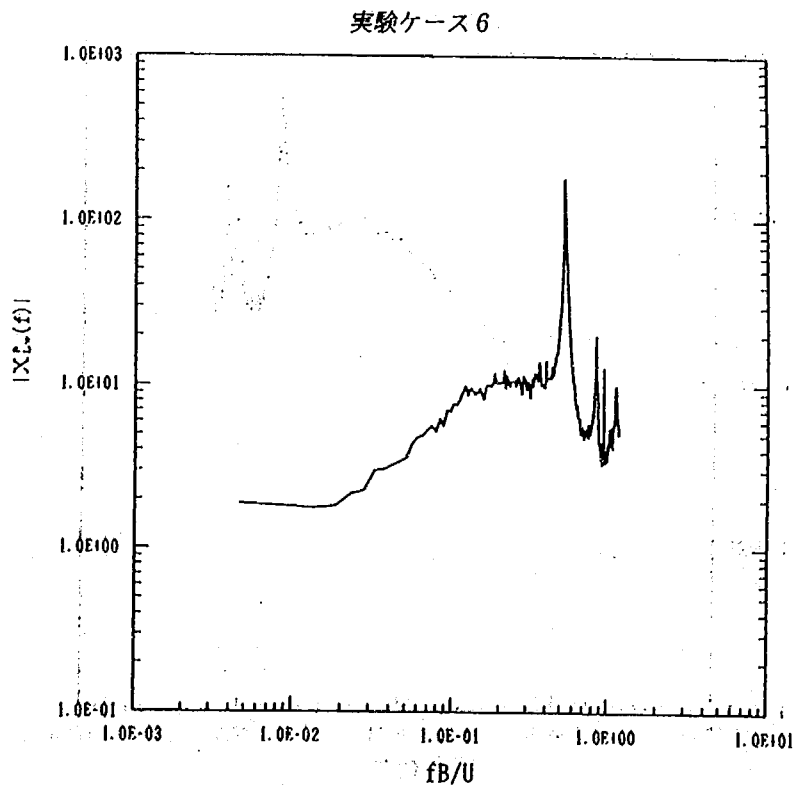
実験ケース 5



付図-2.6 揚力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁1)

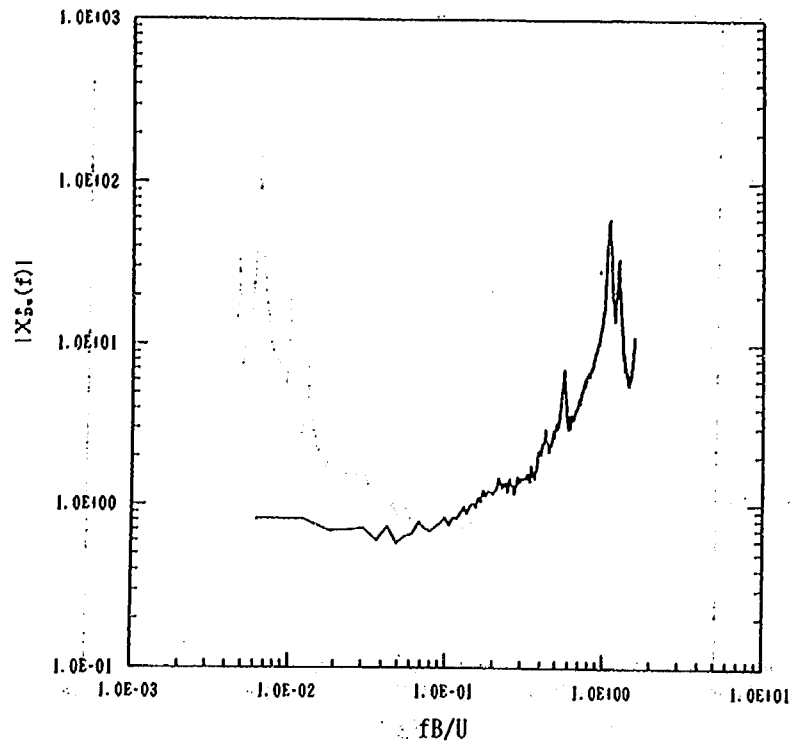


付図-2.7 抗力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁3)



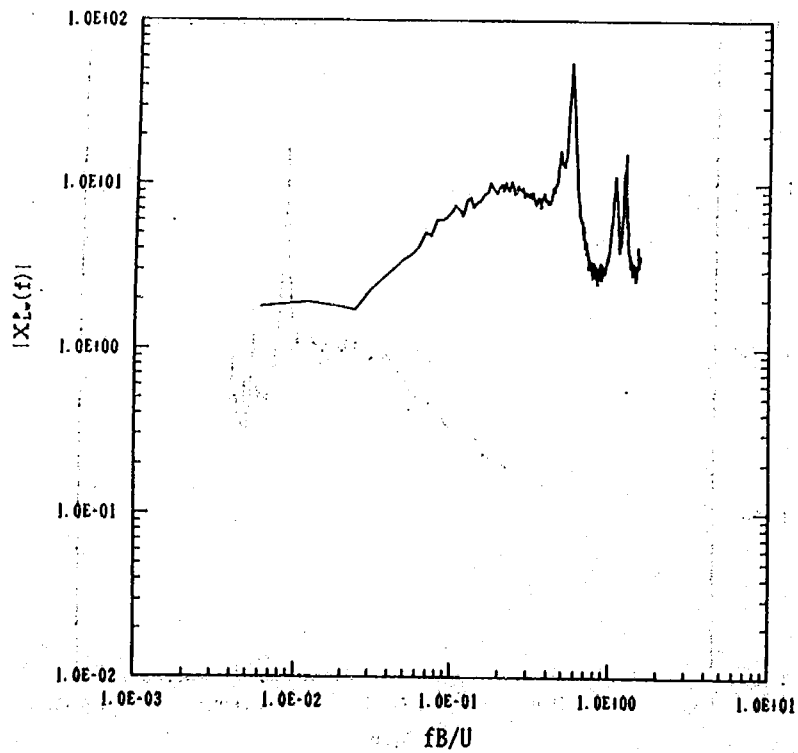
付図-2.8 揚力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁3)

実験ケース 7



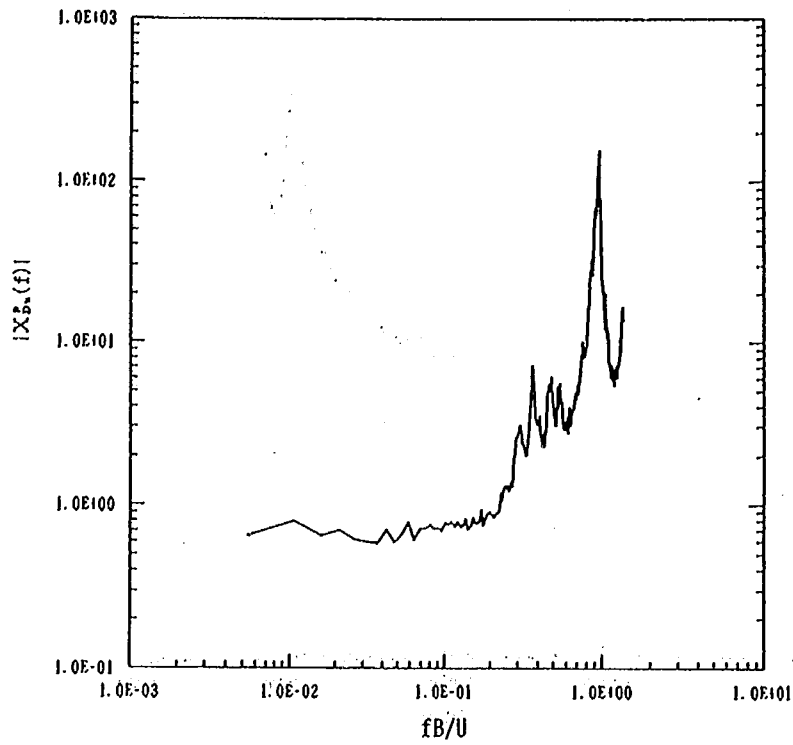
付図-2.9 抗力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁2-5)

実験ケース 7



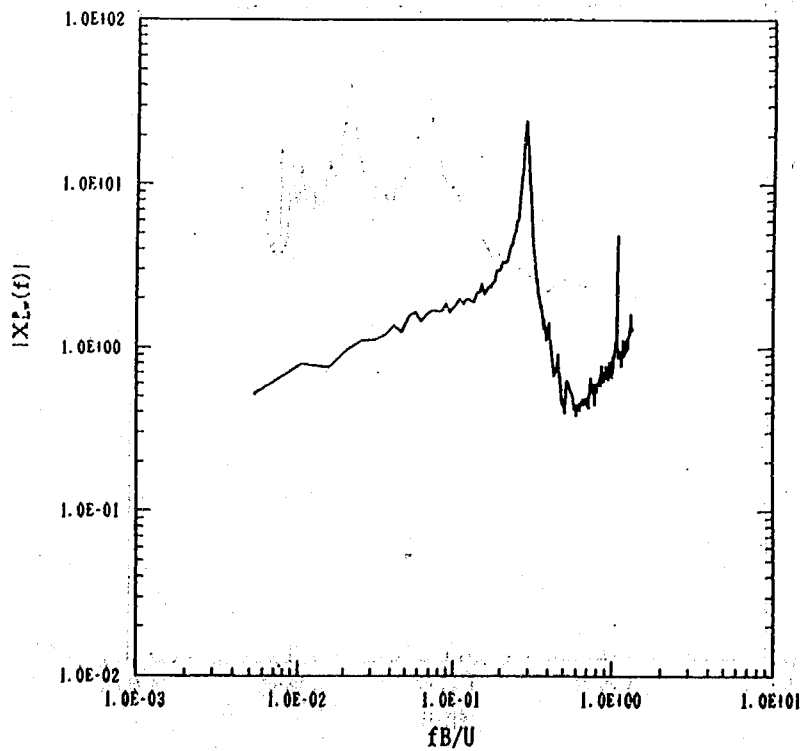
付図-2.10 揚力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁2-5)

実験ケース 8



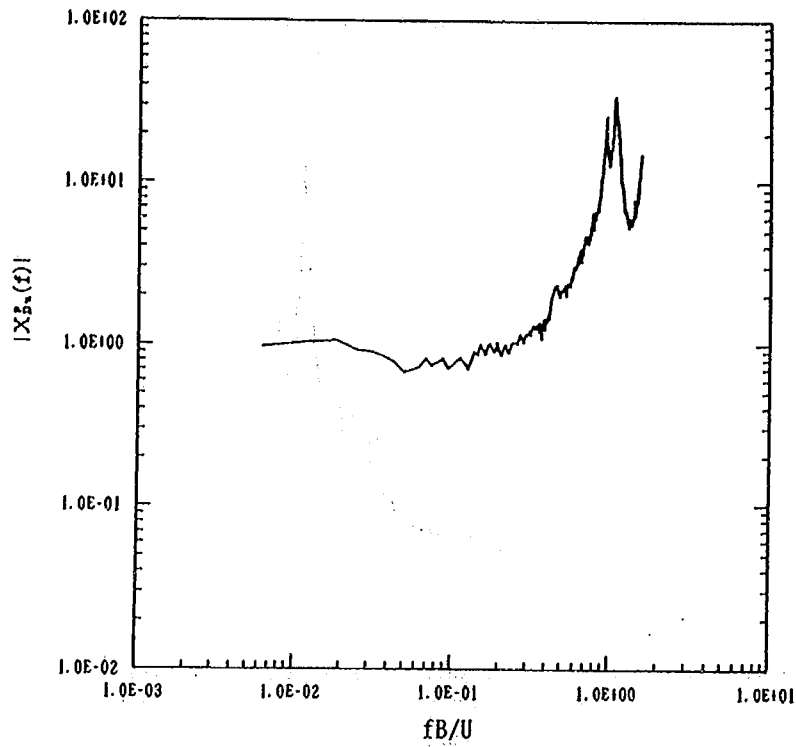
付図-2.11 抗力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁2-0)

実験ケース 8



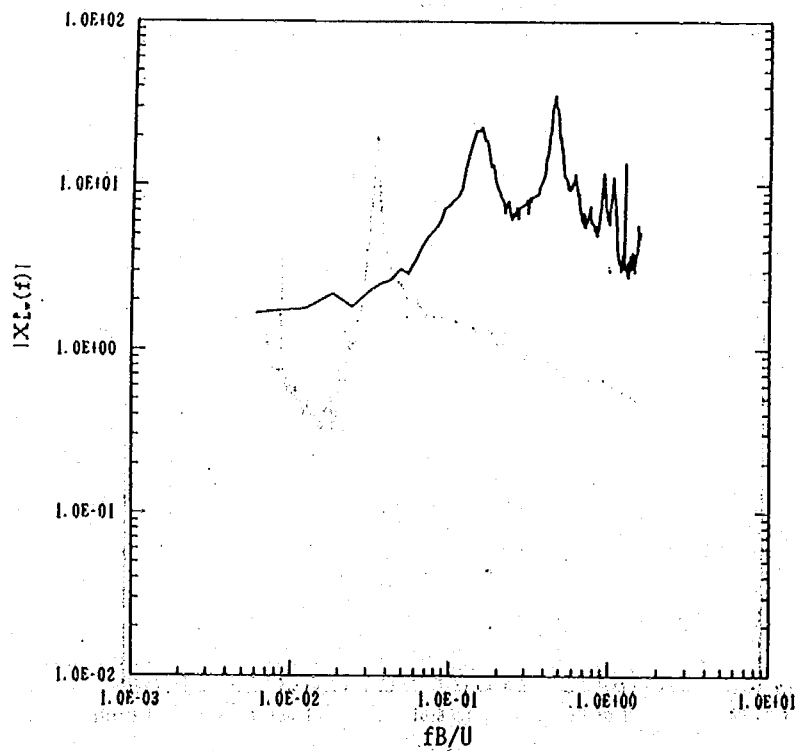
付図-2.12 揚力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流1, 橋梁2-0)

実験ケース 9

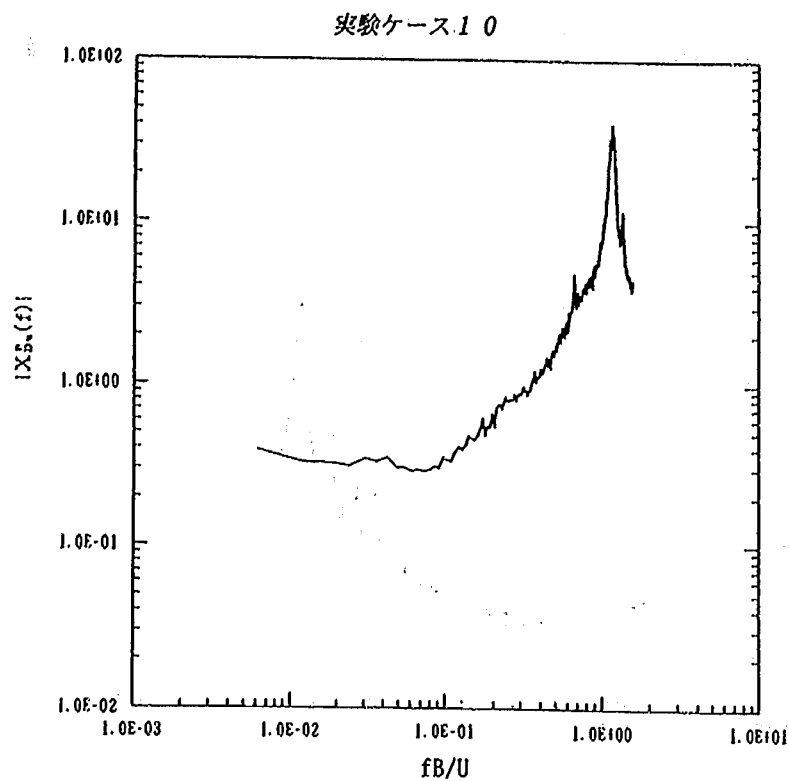


付図-2.13 抗力の空力アドミッタンス(ハースペクトル法, 乱流1, 橋梁2-10)

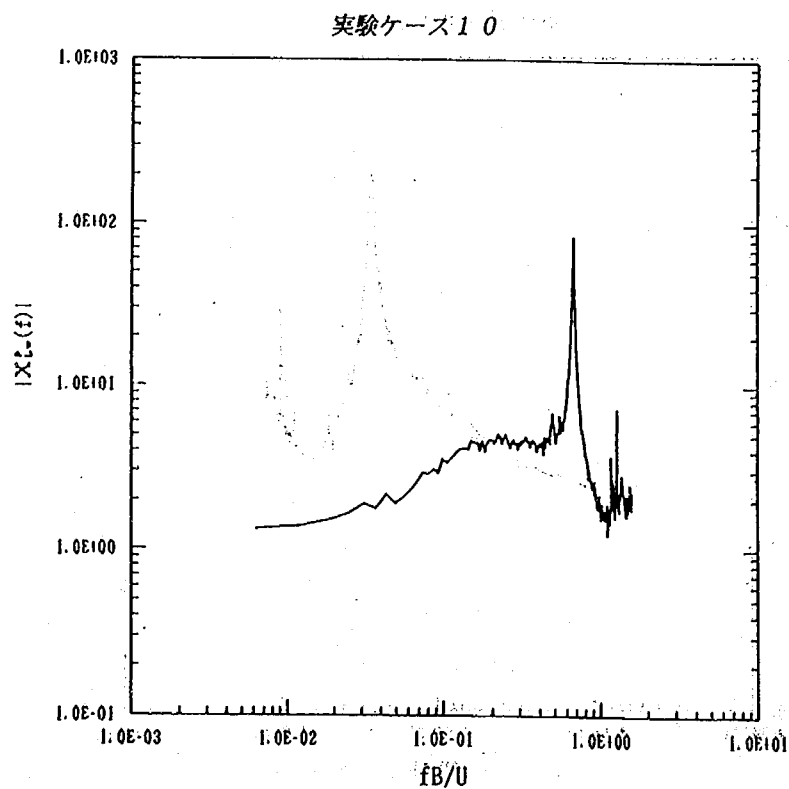
実験ケース 9



付図-2.14 揚力の空力アドミッタンス(ハースペクトル法, 乱流1, 橋梁2-10)

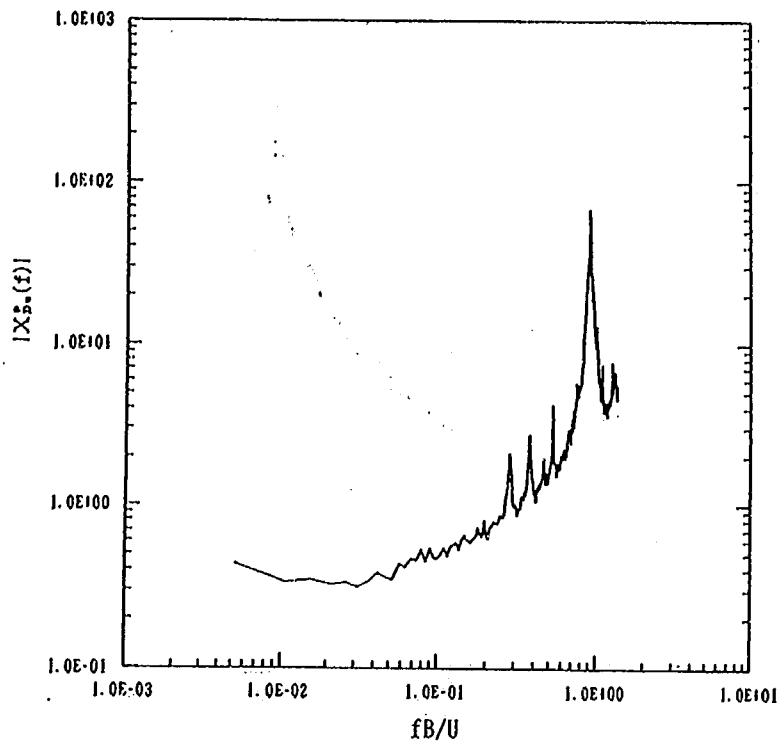


付図-2.15 抗力の空力アドミッタンス(ハーフスペクトル法, 乱流2, 橋梁2-5)



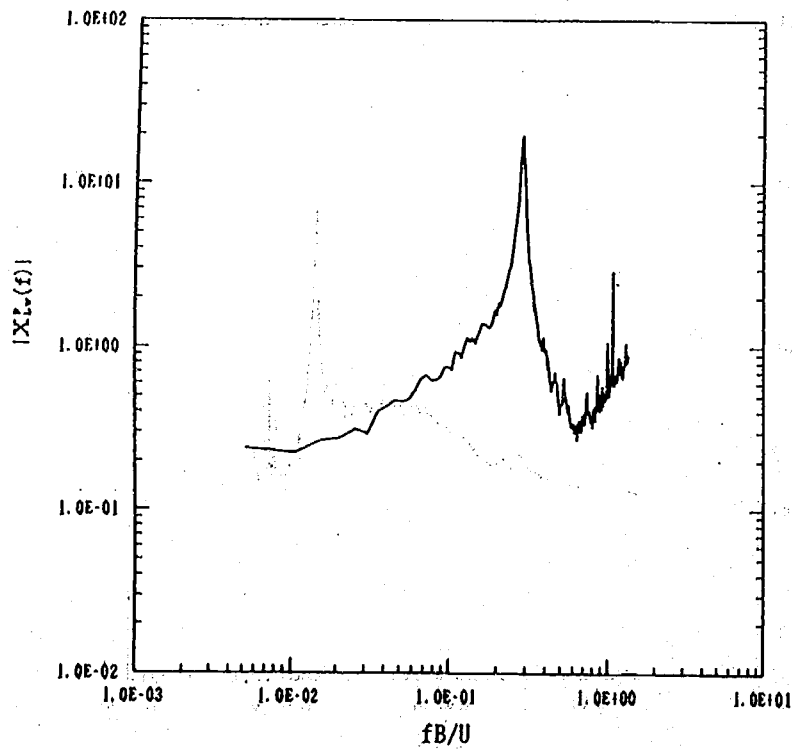
付図-2.16 揚力の空力アドミッタンス(ハーフスペクトル法, 乱流2, 橋梁2-5)

実験ケース 1 1



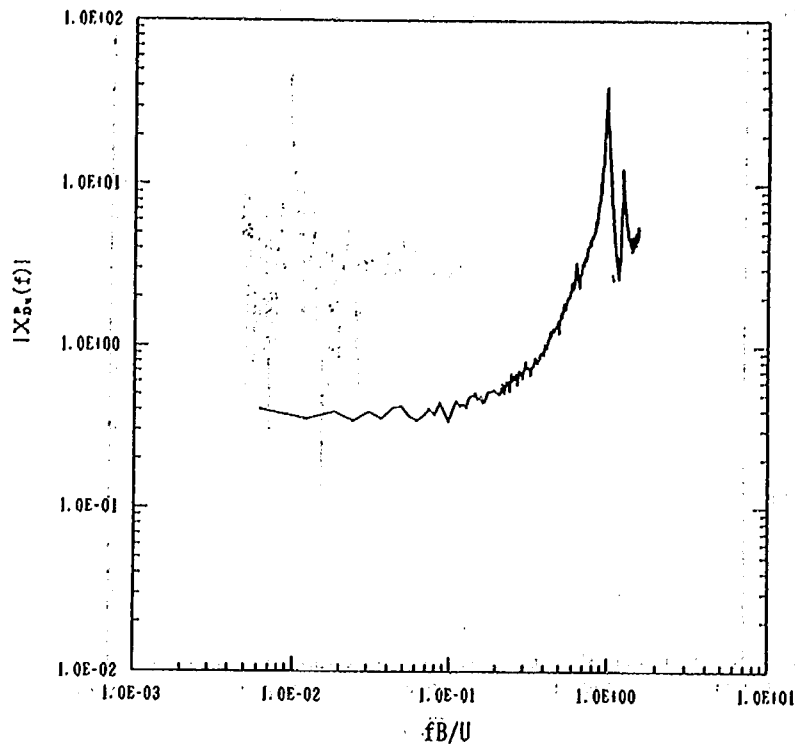
付図-2.17 抗力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流2, 橋梁2-0)

実験ケース 1 1



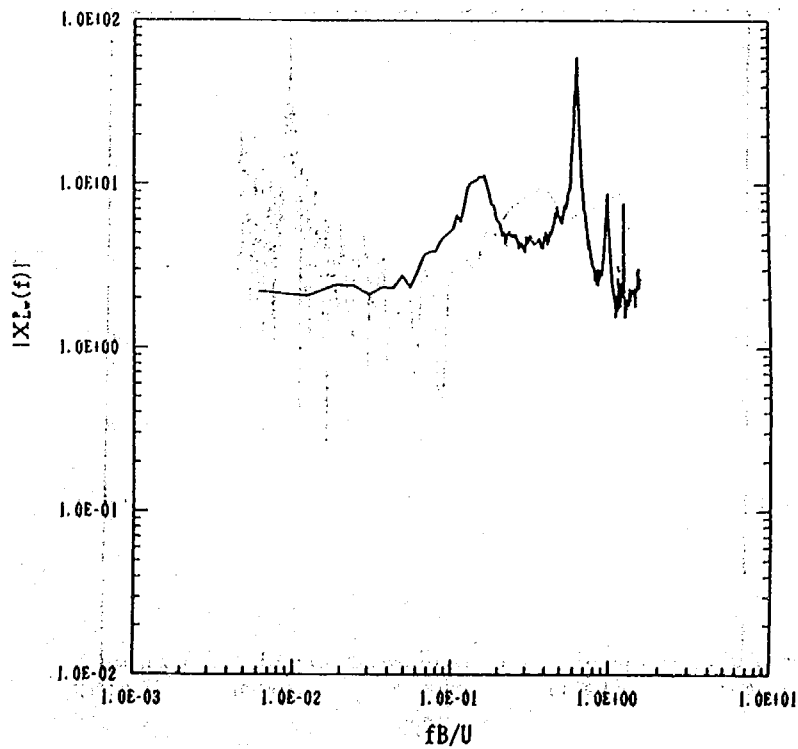
付図-2.18 揚力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流2, 橋梁2-0)

実験ケース 1 2

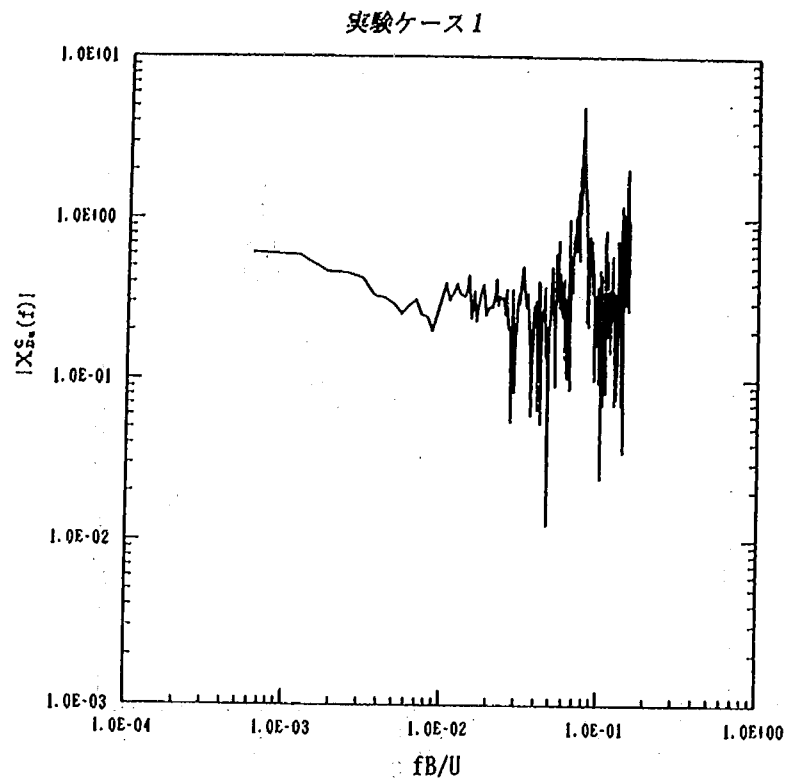


付図-2.19 抗力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流2, 橋梁2-10)

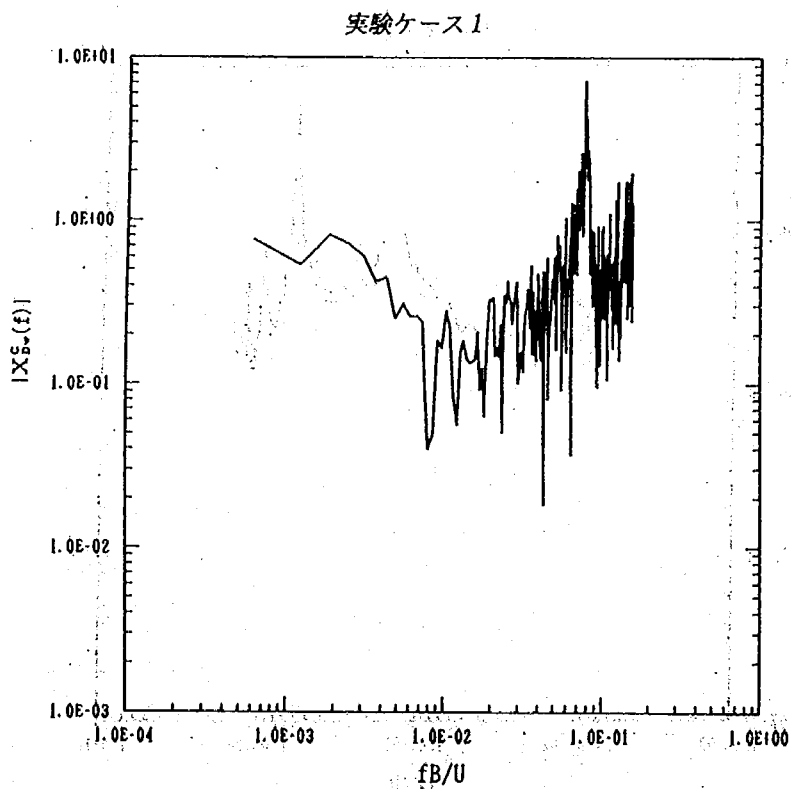
実験ケース 1 2



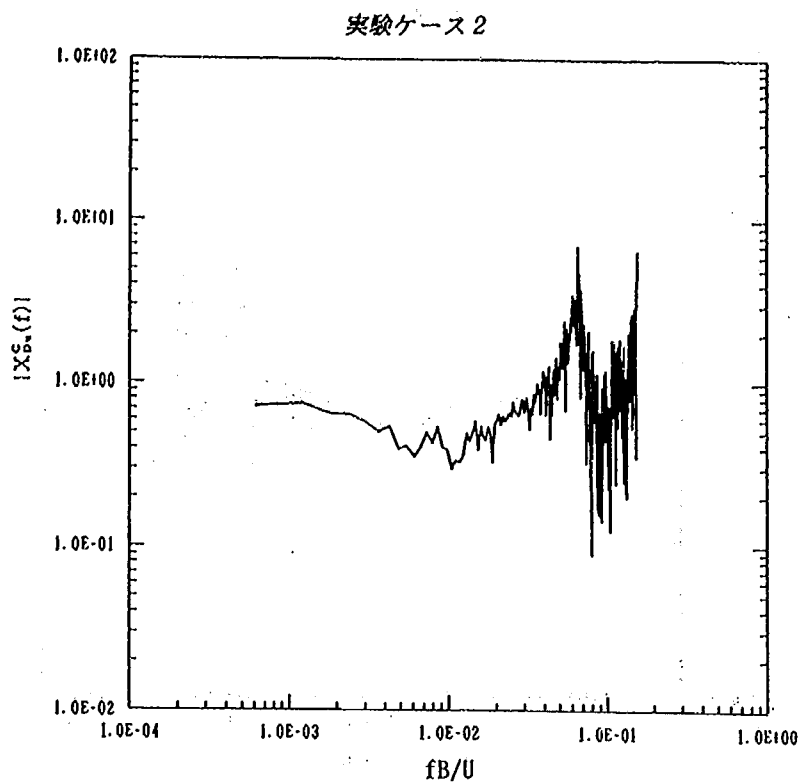
付図-2.20 揚力の空力アドミッタンス(パワースペクトル法, 乱流2, 橋梁2-10)



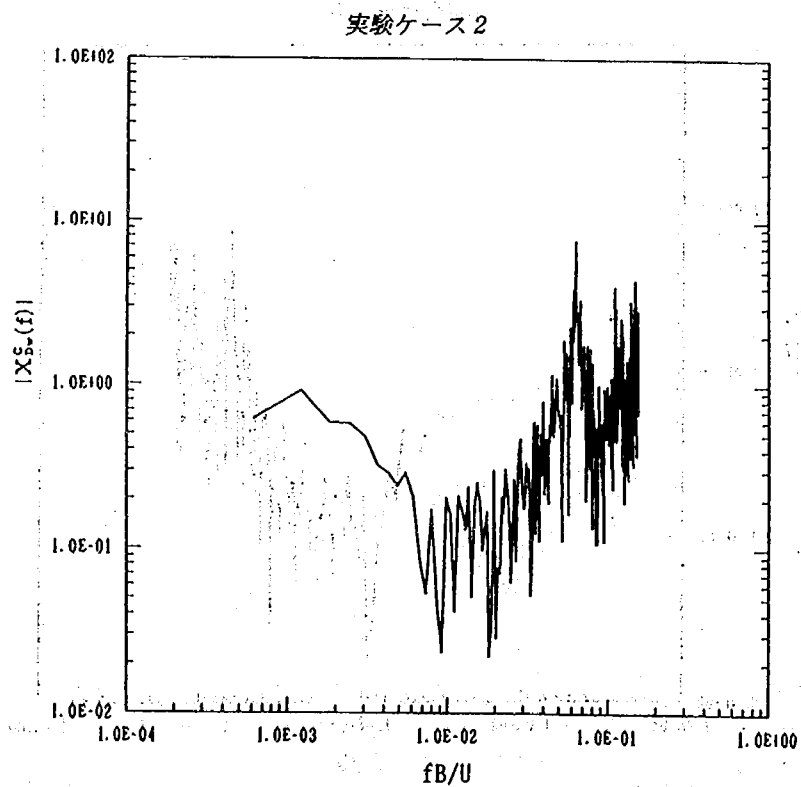
付図-3.1 抗力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 平板1)



付図-3.2 抗力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 平板1)

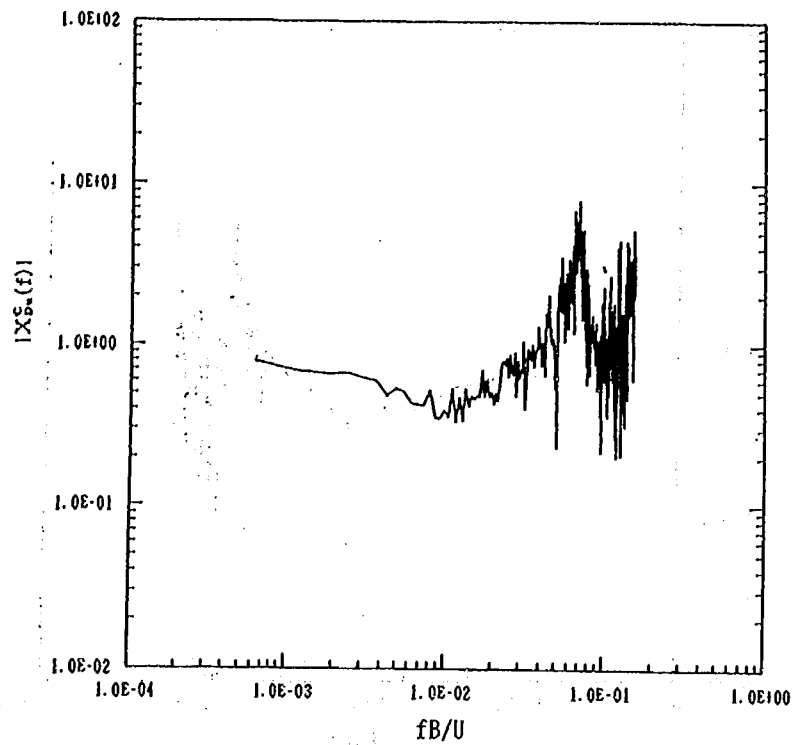


付図-3.3 抗力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロスヘクトル法, 乱流1, 平板2)



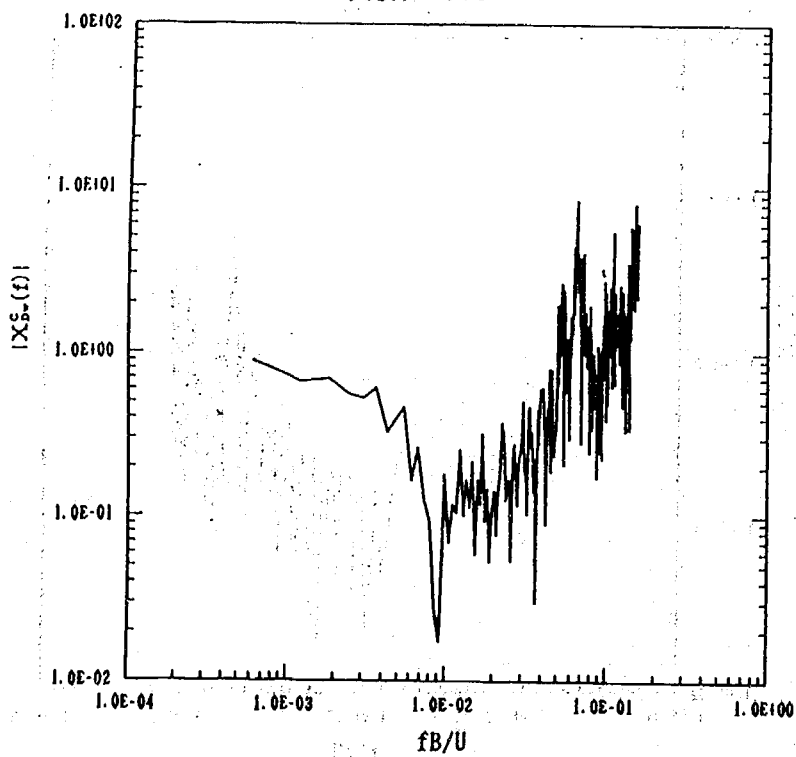
付図-3.4 抗力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロスヘクトル法, 乱流1, 平板2)

実験ケース3

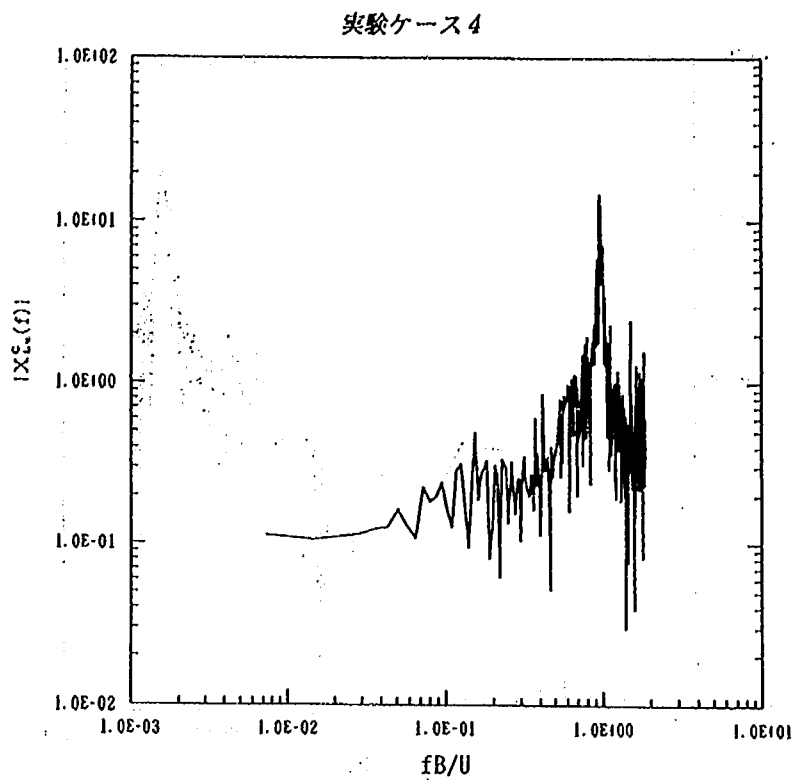


付図-3.5 抗力の空力ノミックス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 平板3)

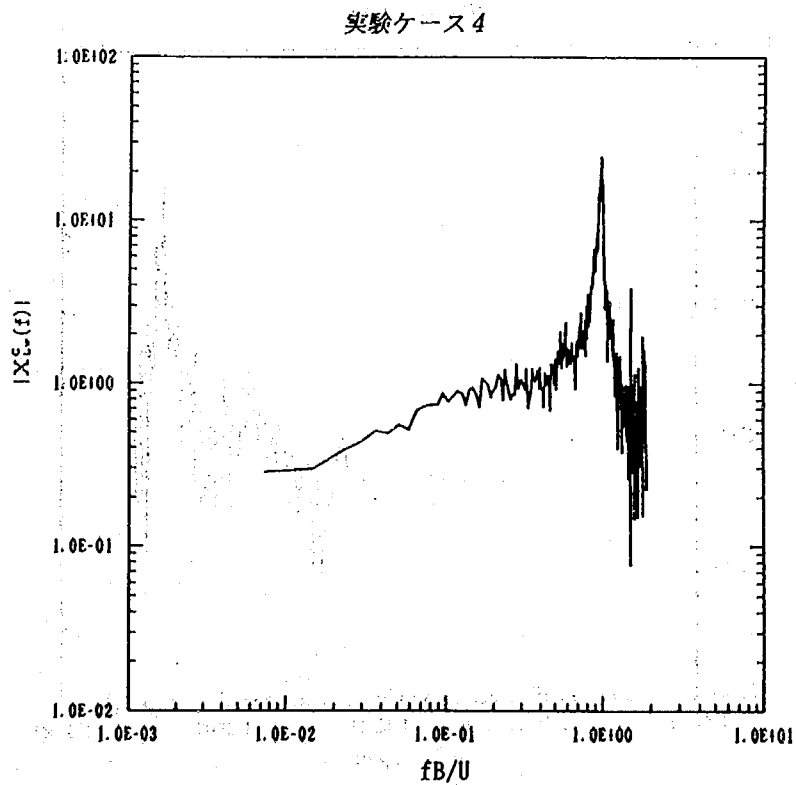
実験ケース3



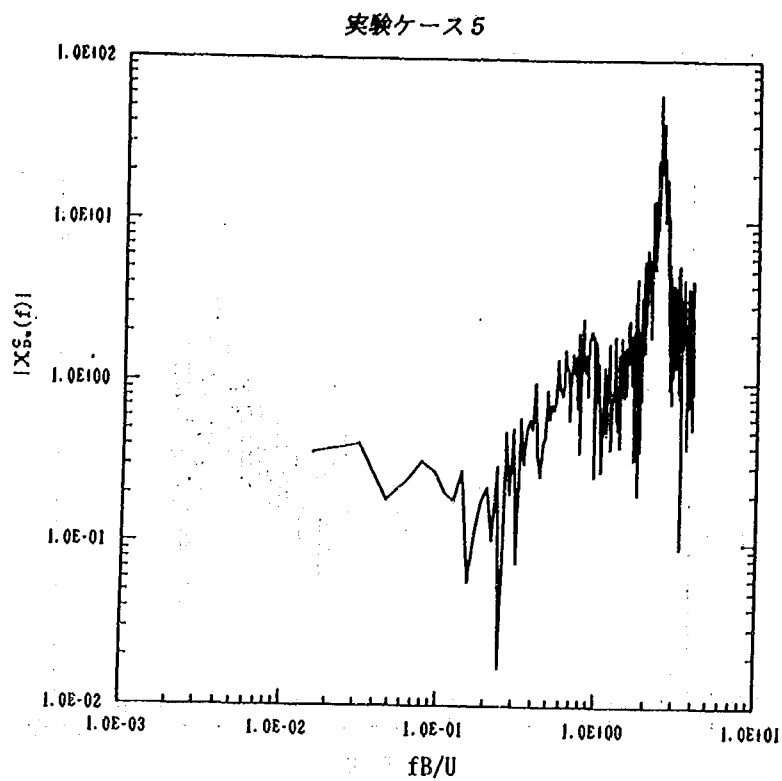
付図-3.6 抗力の空力ノミックス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 平板3)



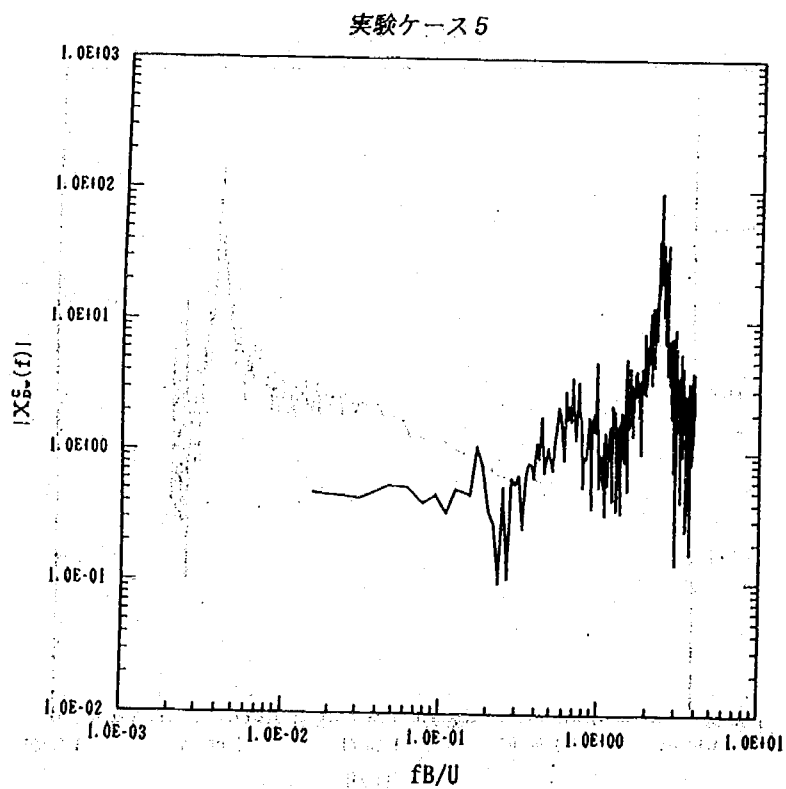
付図-3.7 揚力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 平板1)



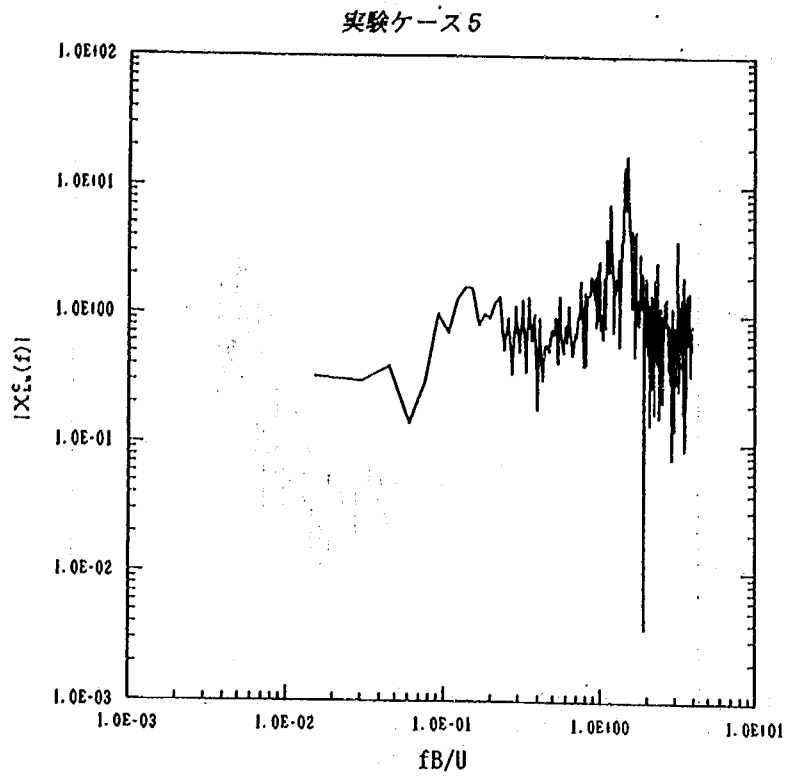
付図-3.8 揚力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 平板1)



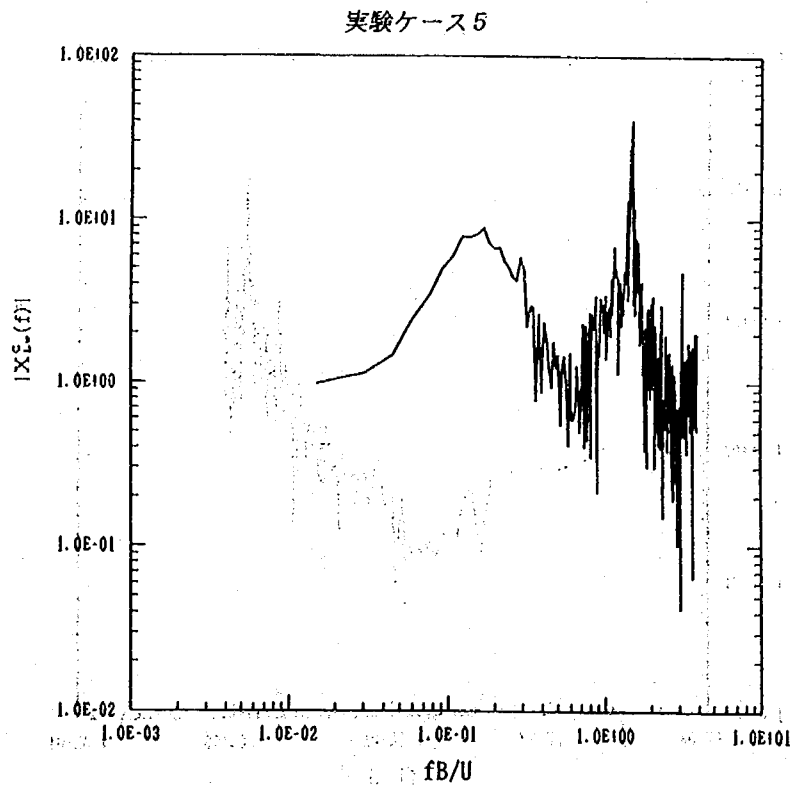
付図-3.9 抗力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁1)



付図-3.10 抗力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁1)

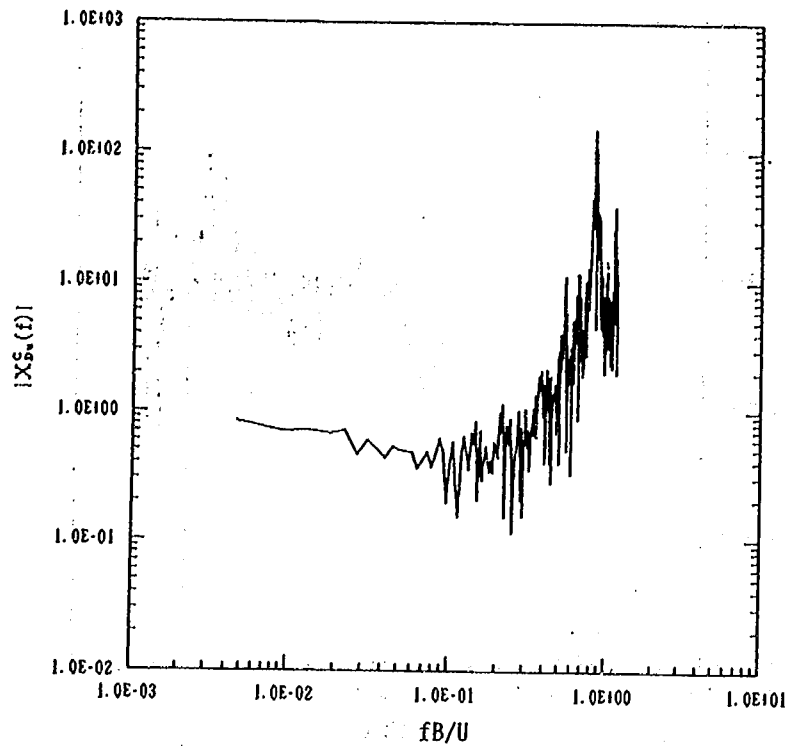


付図-3.11 揚力の空力フットミックス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁1)



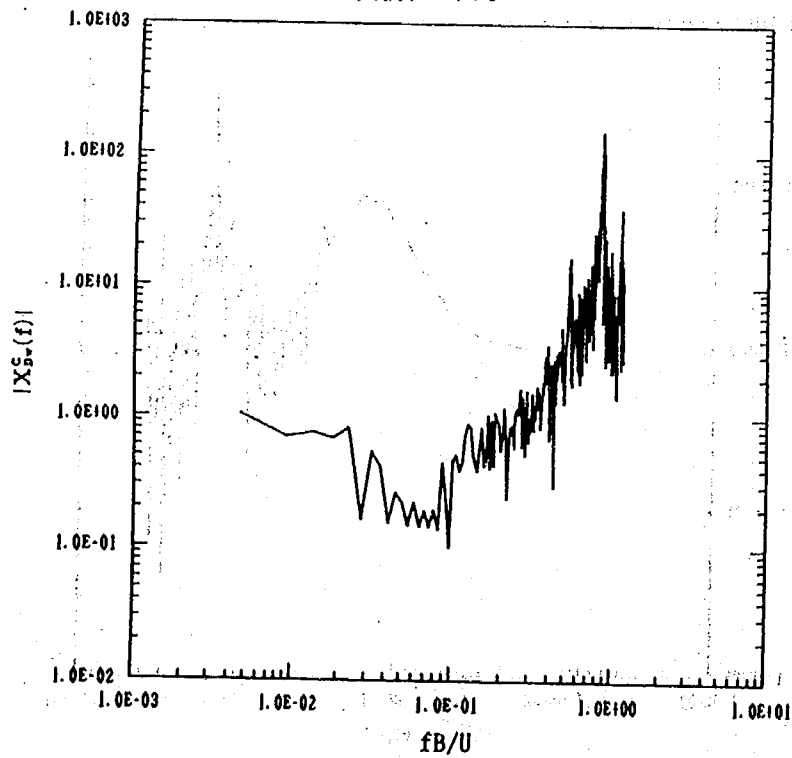
付図-3.12 揚力の空力フットミックス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁1)

実験ケース 6

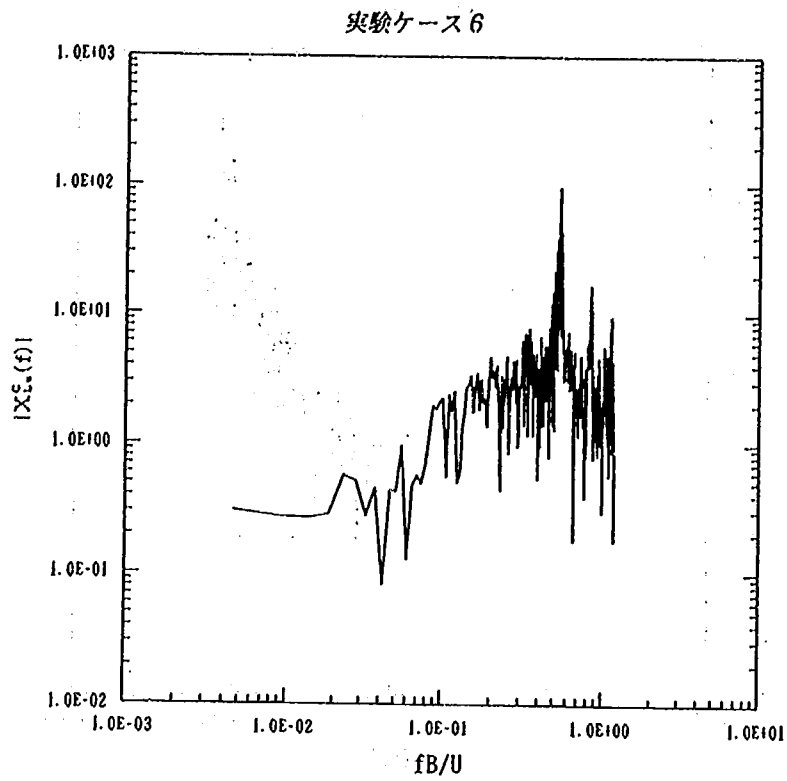


付図-3.13 抗力の空力ノミナクス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁3)

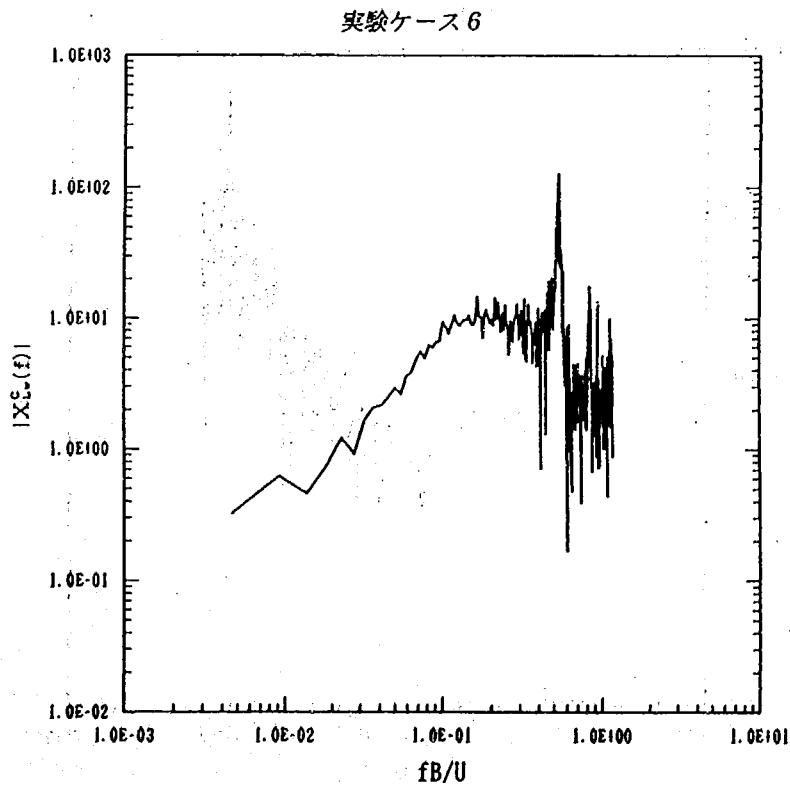
実験ケース 6



付図-3.14 抗力の空力ノミナクス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁3)

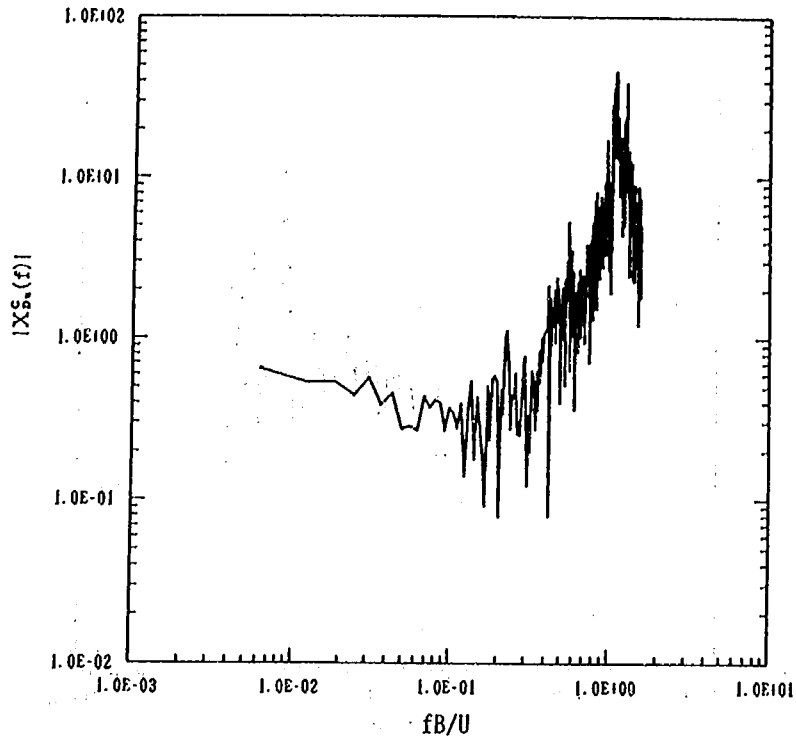


付図-3.15 揚力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁3)



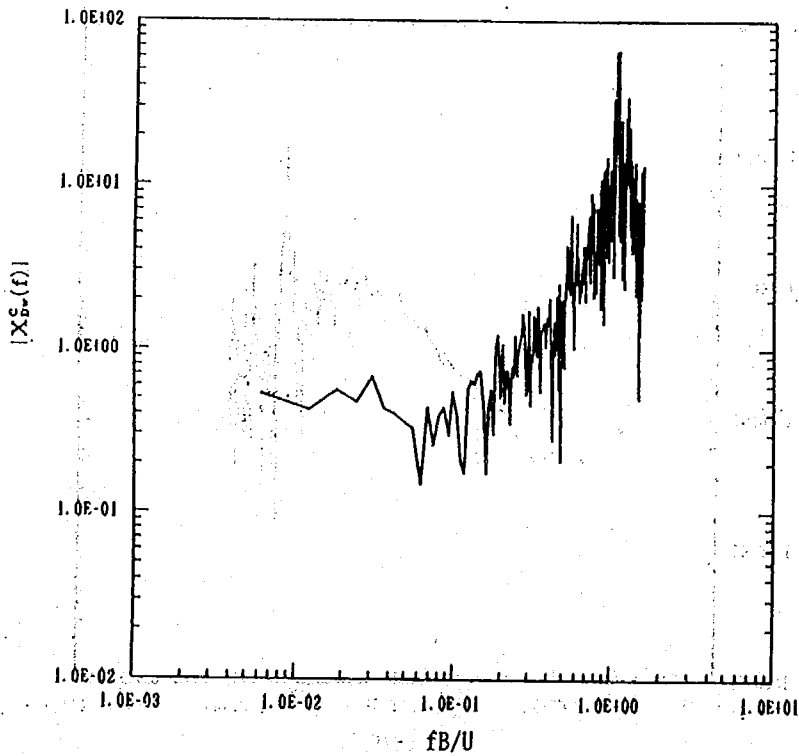
付図-3.16 揚力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁3)

実験ケース 7

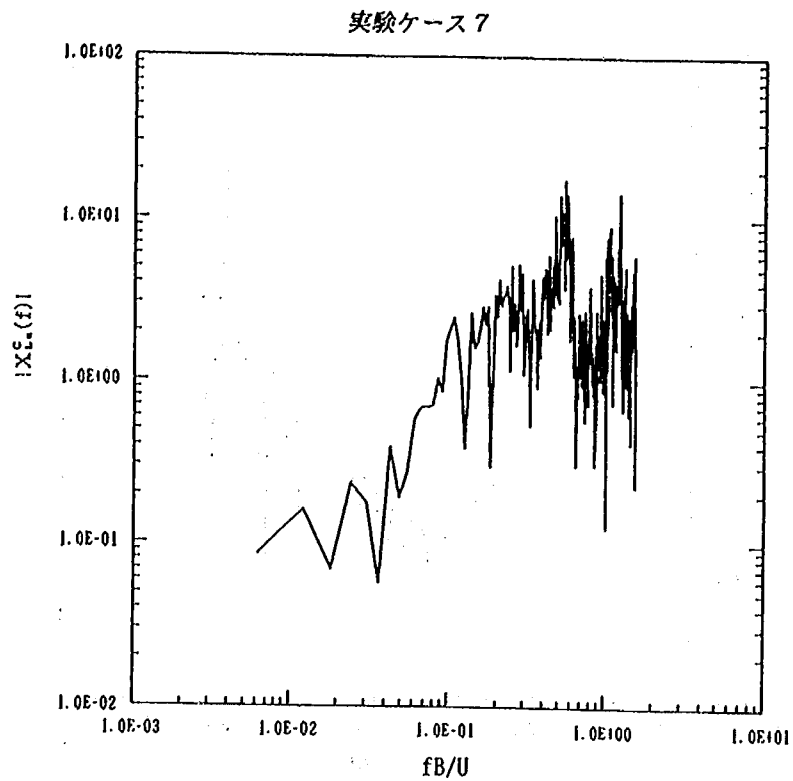


付図-3.17 抗力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-5)

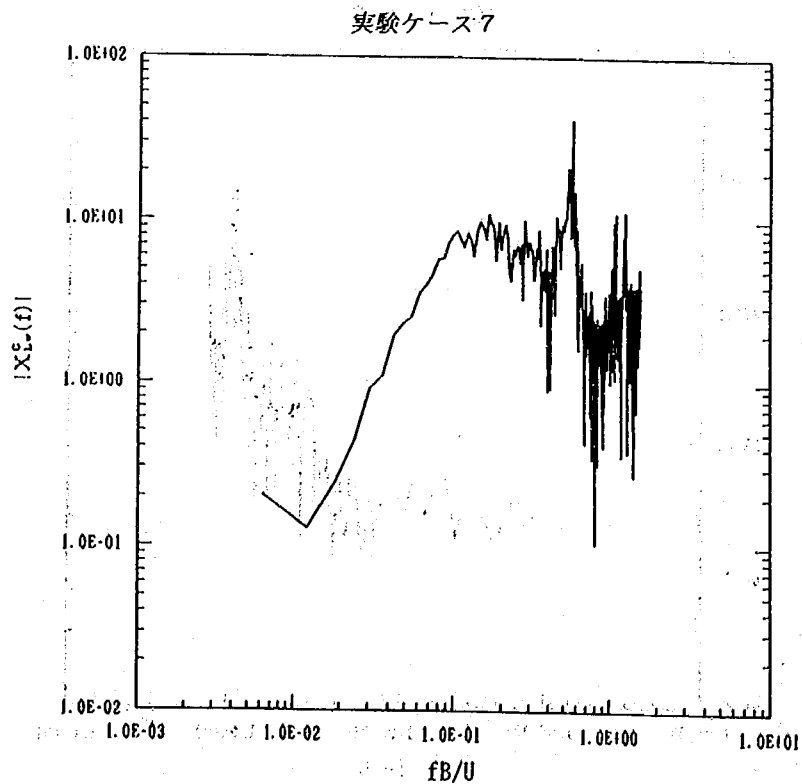
実験ケース 7



付図-3.18 抗力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-5)

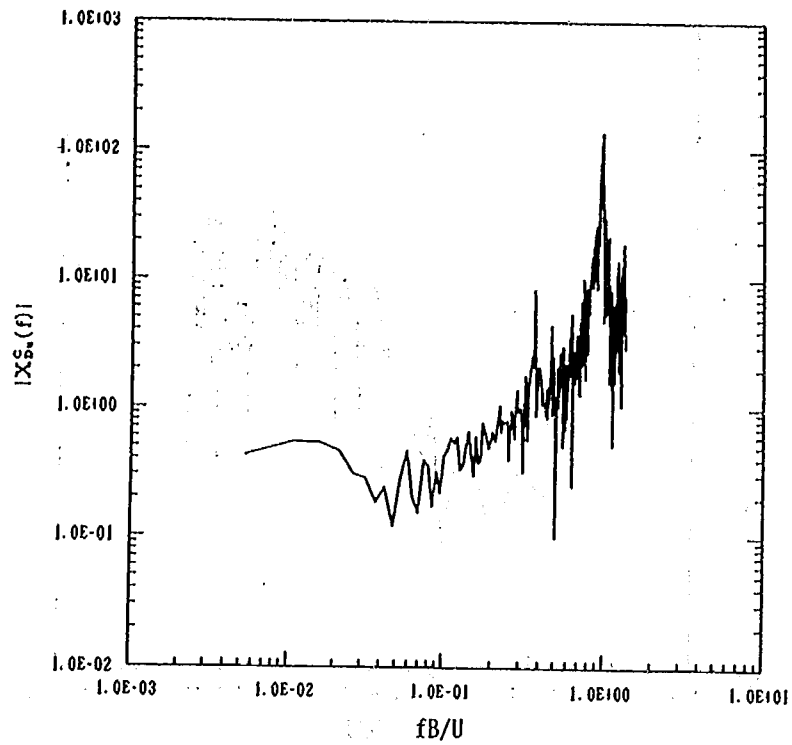


付図-3.19 揚力の空力フーリヤ変換[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-5)



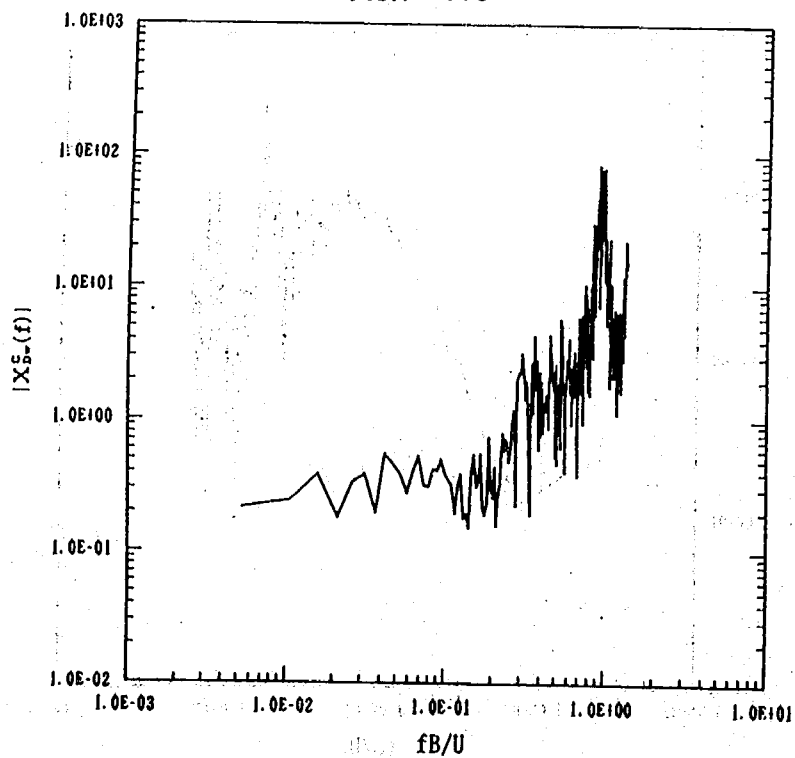
付図-3.20 揚力の空力フーリヤ変換[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-5)

実験ケース 8

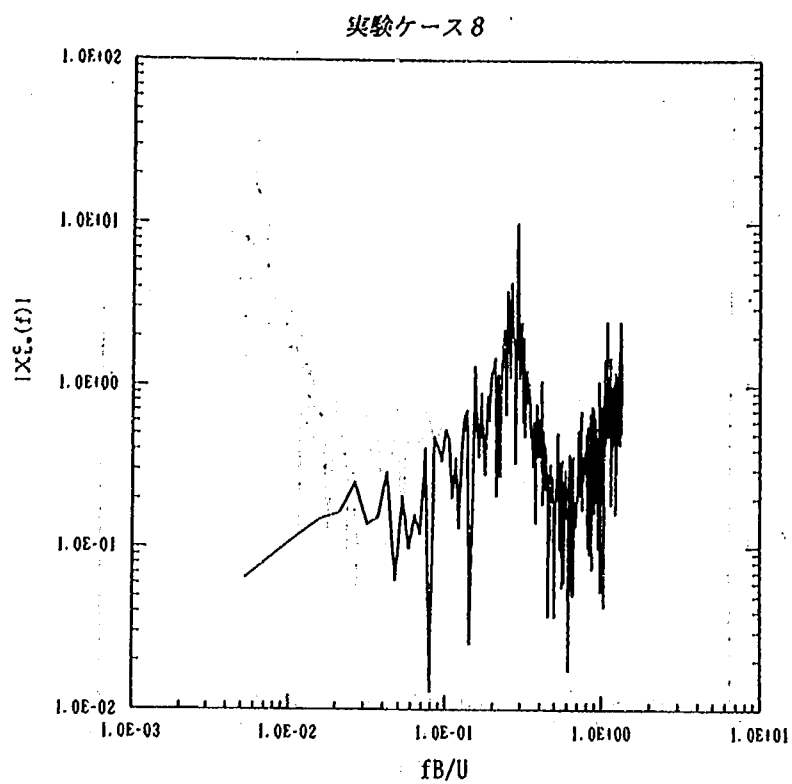


付図-3.21 抗力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-0)

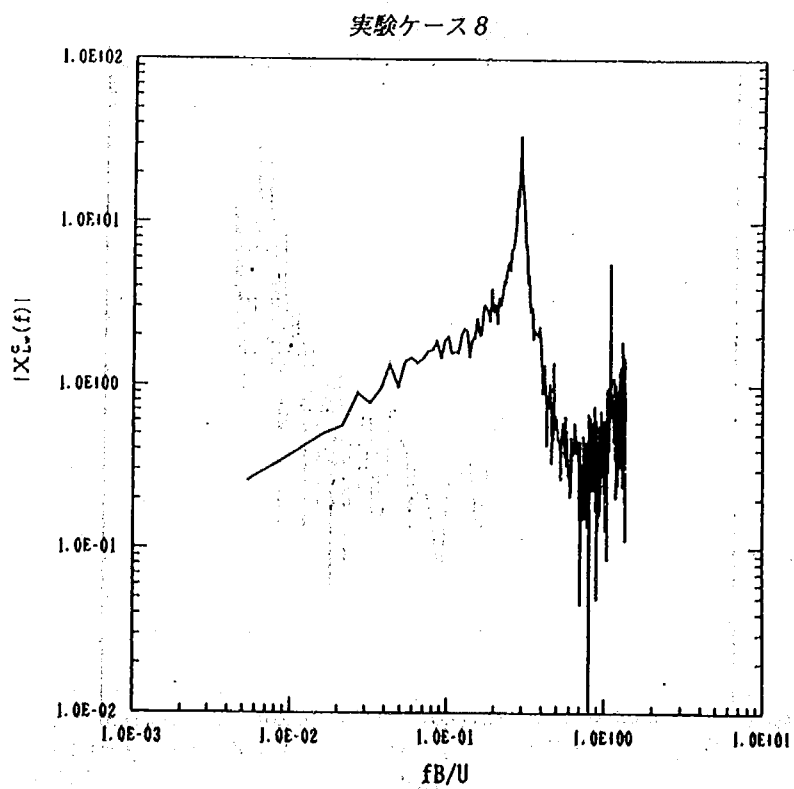
実験ケース 8



付図-3.22 抗力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-0)

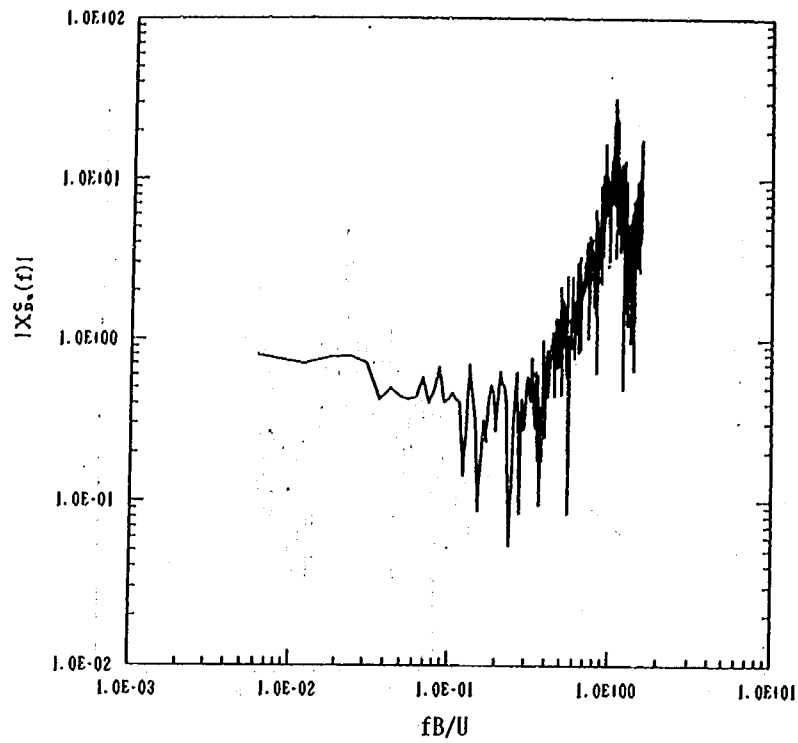


付図-3.23 揚力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-0)



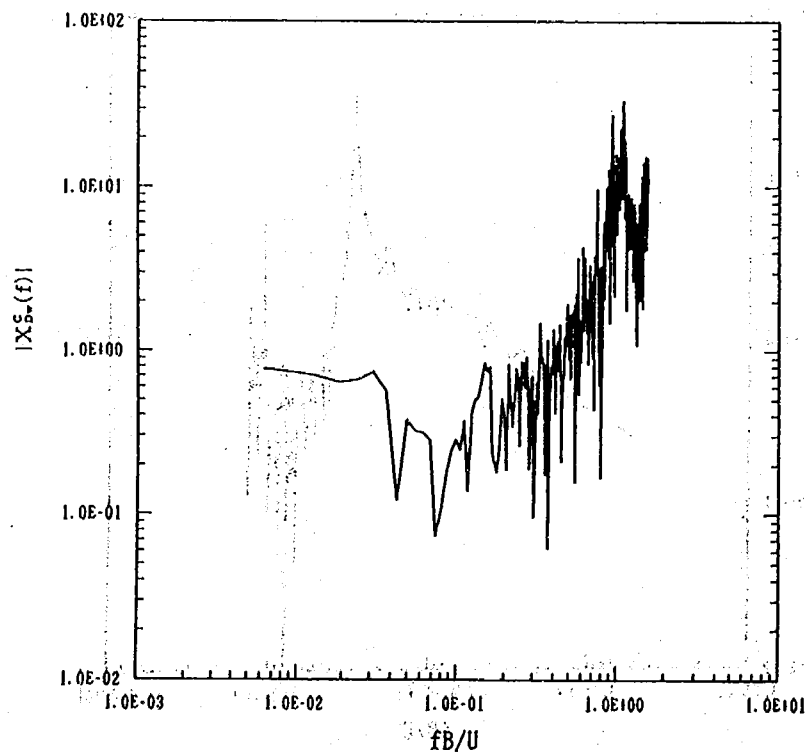
付図-3.24 揚力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-0)

実験ケース 9

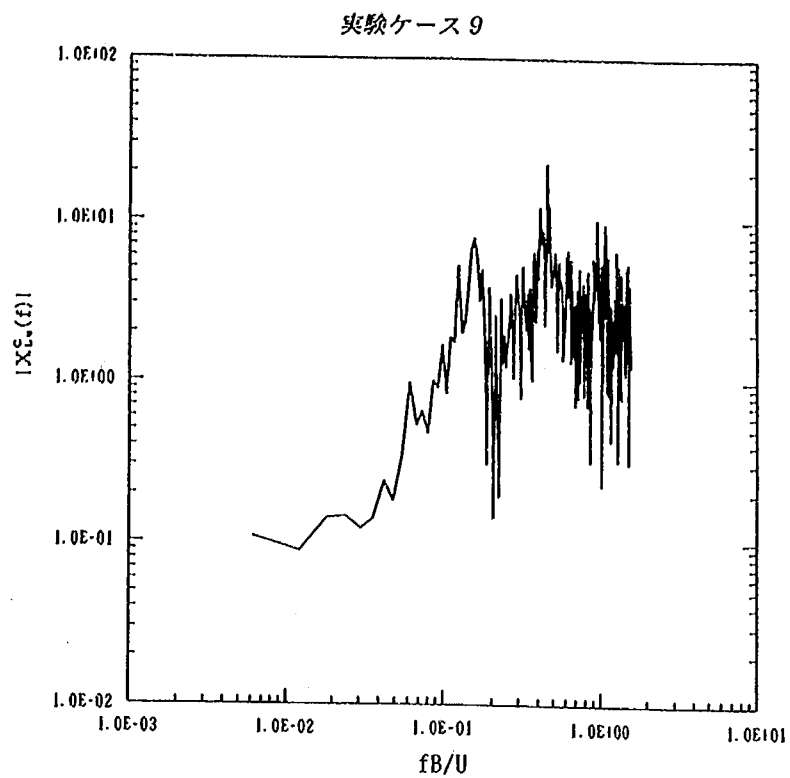


付図-3.25 抗力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロスパクトル法, 乱流1, 橋梁2-10)

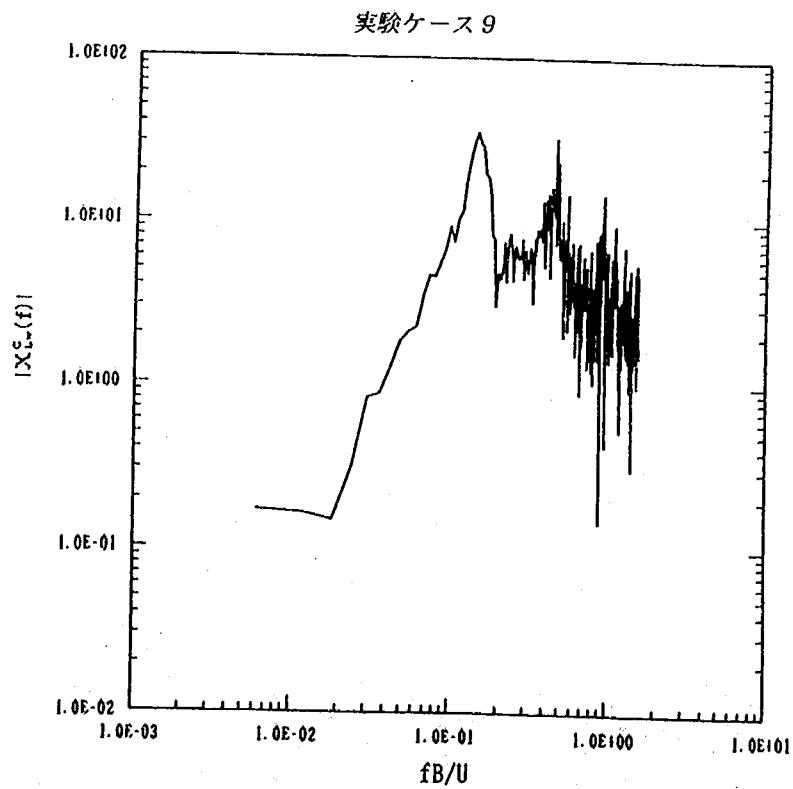
実験ケース 9



付図-3.26 抗力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロスパクトル法, 乱流1, 橋梁2-10)



付図-3.27 揚力の空力アドミタンス[主流方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-10)



付図-3.28 揚力の空力アドミタンス[鉛直方向風速](クロススペクトル法, 乱流1, 橋梁2-10)

都市内橋梁の風荷重に関する試
験調査報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第3266号
平成6年3月(1994)
建設省土木研究所

横山 功一, 佐藤 弘史
日下部毅明, 東久保正徳
松野 栄明, 関谷 光昭

要 旨

従来、道路橋示方書の適用範囲においては、橋梁設計の際、風荷重が部材の支配的な要因となることは極めて希であった。しかしながら、近年では並列橋や遮音壁を有する橋梁の設計に対して、風荷重の占めるウェイトが大きくなり、より精度の良い風荷重の評価が求められている。そこで本調査では、平成3年度に並列橋の影響を評価するための3分力試験、平成4～5年度には、都市内における風荷重を評価するため、変動空気力試験を実施した。その結果、並列の効果については道路橋示方書・同解説に示されている補正は妥当性が高いことが確認された。また都市内のように気流の乱れスケールが小さい場合には気流の空間変動を考慮することにより、より精度の高い風荷重の推定が可能になることが明らかになった。

キーワード：都市内橋梁、並列橋、風荷重、変動空気力、気流の乱れ、空力アドミッタンス

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい。

3 0 5 -

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

構造研究室 行

No. 3

No. 3

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3266号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印