



関門橋の耐風性に関する調査
(箱桁補剛吊橋 - I)

昭和44年3月

建設省土木研究所構造研究室

序

本報告書は、日本道路公団の委託により実施した関門道路吊橋の設計案についての風洞実験の結果をとりまとめたものである。トラス補剛吊橋に関しての実験結果はすでに報告されており¹⁾、本報告書は箱桁を補剛構とした形式の設計案についてのものである。

提出された4案について、三分力係数の測定実験および部分模型による空気力学的安定性の確認実験を実施した。

その結果、4案とも実験時には比較的低風速で不安定振動（限定振動）を生ずることが確認された。しかし、実橋の減衰性が対数減衰率で0.04程度を期待できるならば、不安定振動の振幅は微小になるか或いは消滅することが予想され、実用断面として採用しうる十分の可能性があることが判明した。

実験は原設計案の他に流線の形状を改良するために取り付けた導流翼（fairing）を有する断面についても実施され、導流翼は耐風性を向上させるために有益であることも判明した。流線型箱桁の場合はレイノルズ数効果が生ずるが、これについての詳細は次回に報告の予定である。

昭和44年3月

構造研究室長 大久保 忠 良

構造研究室 成 田 信 之

目 次

序

1. は じ め に	1
2. 原設計案およびその振動特性	2
3. 風 洞 実 験	3
3.1 相 似 条 件	3
3.1.1. 3 分力係数の測定	3
3.1.2. ばね支持部分模型実験	4
3.2 模 型	6
3.3 架設装置ならびに計測装置	7
3.3.1. 3 分力測定	7
3.3.2. ばね支持部分模型実験	8
4. 実 験 結 果	9
4.1 3 分力係数	9
4.2 ばね支持部分模型実験	9
5. 考 察	10
5.1 3 分力係数について	10
5.2 ばね支持部分模型実験	11
6. 結 論	12
7. あ と が き	13
8. 参 考 文 献	13
9. 記 号 説 明	14
10. 表	15
11. 図	17
12. 写 真	83

1. はじめに

交通量の推定によれば昭和47年には関門道路トンネルの交通量は容量の限度21,500台/日を越える。第2の関門連絡施設として橋梁およびトンネルの両案が提出され、事業費その他の得失を検討した結果、第2関門道路としては海峡部に吊橋型式の橋梁(支間割178+712+178m)²⁾を架設することと決定した。

我が国における本格的長大吊橋架設の歴史は昭和38年に竣工した若戸大橋(中央支間367m)によって開かれたが、爾来、本州・四国連絡橋の架設という世界的規模の計画はあるものの、実現されたものはない。関門道路吊橋架設の意義は大きいと言えよう。

さて、毎年台風、季節風による被害を蒙っている我が国において長大支間吊橋を架設しようとする場合、設計ならびに施工に際して最も大きな要素のひとつと考えられるのは強風に対する構造物の安全性である。

第2関門道路橋の耐風安定性に関する調査は日本道路公団の委託により、昭和42年度より当研究室において実施されている。吊橋の耐風性は吊構造部の形状によって大きく支配されるが、初期にはトラス補剛吊橋として設計が進められ、風洞実験もこの案について検討が進められた。

その後、箱桁を補剛構とする比較設計案が提出され、42年度末および43年度前半を費やして、その耐風性の検討が行なわれた。

従来、長大支間吊橋にプレートガーダー乃至箱桁を補剛構として使用することは耐風性上不利であるといわれ、実用に供される機会は殆んどなかった。このような傾向は旧タコマ橋の落橋事故以来守られて来ていたが、極く最近では、主としてヨーロッパの新しい吊橋では、破られて来ているようである。セバン道路橋(英国)、リトルベルト橋(デンマーク国)などにその例を見ることが出来る。

箱桁補剛吊橋が経済的にも維持保守の面からも、また美観の点からもトラス補剛吊橋に比べて優れていることは論を俟たないが、耐風性の面からは架設時の問題を始めとして多くの解明されなければならない問題が残されている。

とは言え、上記の2橋はこれらの問題を克服して架設に踏み切られたものである。撓度理論の過度の適用に走りすぎて耐風安定性を欠く断面となった旧タコマ橋とは本質的に違う橋梁であることに意を払うべきである。

今回の実験の結果については以下に順を追って述べるが、結果を総合して言えることは箱桁を有する吊橋は関門道路橋として十分の耐風安定性をもちうるということである。

2. 原設計案およびその振動特性

日本道路公団より提示された設計案は図一1および2に示す4種類である。それぞれの原型の特徴を列挙すれば次のようである。

原型—A：箱桁吊構造部の最初の案である。幅員構成は、道路構造令の高速道路B級の規定に従い、緩速道1車線、高速道2車線の合計3車線より $3 \times 3.5 = 10.5\text{ m}$ の幅員で構成されている。車線の両側には各 0.5 m の側帯が設けられ、外側は 0.5 m 幅の検査廊に、また内側は 1.0 m の中央分離帯に接している。検査廊のさらに外側 2.75 m の区間は吊材の取付けおよび箱桁の形状を流線型に整えるために設けられている。中央分離帯および検査廊部の地覆高は 0.2 m である。またここに設けられるガードケーブルの柱高は 0.5 m である。検査廊の外側には高さ 0.9 m の鉛直柱式の高欄が設けられている。箱桁の下面の中央部 2.11 m の区間は5%の2次放物線で凸面になっており、その外側 5.0 m は滑らかな曲線で結ばれている。箱桁下面を凸面としたのは、迎角 0° 付近で負の揚力（下向き）を生じさせ、耐風性を向上させることを期待したものである。

原型—B：構造断面を曲線で構成することは工場製作に困難を伴ない、製作費が嵩むという欠点がある。この模型は、この点を考慮して断面を折れ線で結んだものである。道路部の構成は模型—Aと同じである。気流の剝離の様子は模型—Aとは異なることが予想される。

原型—C：原型—AおよびBでは桁高は最大 3.2 m となっており、両外側に向って漸減しているが、この原型では中央部 2.4 m の間は一律に 3 m となっている。これは原型—Aの比較案として設計されたもので、気流の剝離点と角部に固定しようという試みである。

原型—D：本原型では原型—Aに比べて中央分離帯の幅が 1.5 m に、また高欄外側幅が 3.25 m に拡げられている。下面は2次と4次の放物線で近似されている。最大桁高 3.2 m は変っていない。また中央分離帯および検査廊にはガードケーブルは設けない構造と

なっている。

原型の主要諸元を表一1に掲げる。原型Bについては設計計算が行なわれていないので原型Aの諸元を用いることとする。また原型C 1は原型Cの両外側に導流翼を取りつけたもので実験ではその重量を無視した。さらに、原型D 1は原型の減衰性を大きくしたものである。

以上の原型について振動特性を計算した結果を表一2に掲げる。計算式はRayleigh-Ritzの方法によった。振動型としては不安定振動の生ずる可能性のある対称1次の鉛直撓み振動および捩れ振動を実験対象とした。算出された固有振動数はトラス補剛の場合より大きく耐風性上有利となっていることを注意しておく。また同表中の模型に関する諸数値については後述する。

3. 風 洞 実 験

実験は千葉支所構造研究室に所属する「橋梁試験用風洞」を用い、主として以下の2種類について行なった。

1) 三分力係数の測定

2) ばね支持模型を用いた空気力学的不安定振動の測定その他に、後流中の気流の乱れも計測したが報告をするまでには至っていない。これは各模型が比較的低風速で示した限定振動の原因を追求するために実施したものである。

以下に相似条件、模型、および実験装置の順を追って説明する。なお本風洞の規模ならびに気流特性に関してはすでに他に述べられているのでここでは省略する。³⁾

3.1 相 似 条 件

3.1.1 3分力係数の測定

物体の流れの中に置くと、その物体には3つの軸の方向の力と、その軸のまわりのモーメントが作用する。しかし吊構造部の場合には構造物に作用する力およびモーメントは2次的に考えているため、図一3に示す抗力、揚力、モーメントの3つの成分のみが対象となり、これらを空気力学的3分力と名付ける。空力的3分力は構造物の幾何的形狀、気流に対する迎角、Reynolds数などの影響を受けて変化する。

空力的3分力の測定を行なう際の相似条件はこれらの影響因子を原型と模型とで等しくする必要がある。構造物の幾何的形狀は模型の縮尺率をあまり大きくしなければ、可成り細部にまで相似できて問題はない。ところがReynolds数は次式で定義される様に、もしもReynolds数を相似させて、

$$R. 数 = \frac{VB}{\nu}$$

実験を行なおうとすれば、幾何学的縮尺率と風速の縮尺率は逆比となる。このような条件の下で実験を行なうことは今回使用した風洞では不可能である。従来角ばった部材では流線型の部材の場合とは異なってReynolds数の影響はないといわれ無視されてきている。しかしながら今回の箱桁設計案では従来のものと異なり箱桁面断面の一部が曲線で形作られているため、その影響が生ずることが懸念される。これらの問題を検討するため、今回の実験では測定風速を数種類に変えて空力三分力を測定した。

3.1.2 ばね支持部分模型実験

模型実験の結果から原型の挙動を推定できるためには、原型と模型で生ずる現象が共通の物理方程式を満足するものとして、相似側から要求される諸量を定め、これらを満足させて実験を行なう必要がある。

さて吊橋の風による振動という物理現象に関する物理量として、ここで、 σ , E , δ_s , ρ , ν , V , g , B の8個を取り上げる。これについて、次元解析を施すならば次の5つの無次元量が原型と模型で等しい値とならねばならぬことが要求される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma / \rho \\ E / \rho V^2 \\ \delta_s \\ g B / V^2 \\ V B / \nu \end{array} \right.$$

上の無次元量を慣性および剛性を用いて書き変えると、

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\rho} / \rho B^4, I_z / \rho B^2, \text{ etc} \\ S_x / \rho V^2 B^2, S_z / \rho V^2, \text{ etc} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{ss}, \delta_{zs} \\ g B / V^2 \\ V B / \nu \end{array} \right.$$

全橋模型の場合には $g B / V^2$ の無次元量を相似させるため、これより風速の縮尺率が決定されたが、ばね支持部分模型の場合は模型がばねで支持されるため、重力加速度の影響はない。即ちこの無次元量は相似条件には不必要となる。

上の条件のうち S_s, S_z を同じ次元をもった $N_s^2 I_s, N_z^2 I_z$ で置換すると

$$\frac{S_s}{\rho V^2 B^2} = \left(\frac{N_s B}{V} \right)^2 \cdot \frac{I_s}{\rho B^4} \quad \text{および} \quad \frac{S_z}{\rho V^2} = \left(\frac{N_z B}{V} \right)^2 \cdot \frac{I_z}{\rho B^2}$$

となる。

従って、ばね支持部分模型実験の場合の相似側は厳密には、次のようにまとめられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} I_s / \rho B^4, I_z / \rho B^2, \text{ etc} \\ V / N_s B, V / N_z B, \text{ etc} \\ S_{ss}, S_{zs}, \text{ etc} \\ V B / \nu \end{array} \right.$$

これより風速と振動数のうち何れかは任意に選び得ることが判る。

ところで風洞実験に用いる軽量で剛性の高い模型を製作することは困難なことが多い。このような場合の相似条件について C. Scruton が考察を行なっているのでこれを以下に紹介しよう⁴⁾。

通常の吊橋が風によって振動する場合、連成振動は生じない。またその振動数は固有振動数に等しいものと見做せる。

以上の2点に着目する。まず捩れ振動について考えてみる。その運動方程式は次のように書ける。

$$I_\theta \ddot{\theta} + K_\theta \dot{\theta} + e_\theta \theta = M_\theta$$

ここで M_θ は複素表示をすれば

$$M_\theta = \rho B^2 V^2 \theta_0 \{ f(V_r) + i g(V_r) \} e^{2\pi N t i}$$

と書ける。但し、 f, g 共に V_r のみの函数とする。

そこで、その解を $\theta = \theta_0 e^{2\pi N t i}$ とおき、 M_θ を代入すれば次式が得られる。

$$\rho B^2 V^2 f(V_r) = -4\pi^2 N^2 I_r + e_r$$

$$\rho B^2 V^2 g(V_r) = 2\pi N K_r$$

上式に $V_r = V/NB$, $N_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e_r}{I_r}}$ を代入すれば

$$\begin{cases} V_r^2 f(V_r) = \frac{I_r}{\rho B^4 N^2} - \frac{4\pi^2 I_r}{\rho B^4} = \frac{4\pi^2 I_r}{\rho B^4} \left(\frac{N_r^2}{N^2} - 1 \right) \\ V_r^2 g(V_r) = \frac{2\pi K_r}{\rho B^4 N_r} \end{cases}$$

もしも $N = N_r$ ならば第1式は無視出来る。第2式について $\delta_r = \frac{K_r}{2 I_r N_r}$ の関係を用いると

$$V_r^2 g(V_r) = \frac{4\pi I_r \delta_r}{\rho B^4}$$

となる。即ち、上の条件のもとでは $I_r \delta_r / \rho B^4$ が相似条件となる。同様な考えから、撓み振動については $I_z \delta_z / \rho B^2$ を求めることが出来る。従って、この場合の相似条件は

$$\begin{cases} \frac{I_r \delta_r}{\rho B^4}, \quad \frac{I_z \delta_z}{\rho B^2}, \quad \text{etc} \\ \frac{V}{N_r B}, \quad \frac{V}{N_z B}, \quad \text{etc} \end{cases}$$

と簡単にまとめられる。幾何学的相似に必要なことは勿論である。以上の記述では VB/ν 、即ち Reynolds 数の相似について言及していない。それは橋梁断面のように無骨な構造の場合には気流剥離点が固定され、Reynolds 数の影響はないものとして従来の実験においては無視されてきたためである。

しかし、今回のような流線型断面においては、その影響が懸念される。本報告ではそれを無視しているが、すでにこれを検討するための実験も計画されており次回に報告の予定である。

3.2 模 型

これまで述べたように、幾何学的形状および慣性を相似させるためには風洞模型は可能な限り大きいもの即ち縮尺率の小さなものが望ましい。一方、風洞測定部の大きさから自ずから制限がある。今回使用した風洞では測定部壁の影響を無視できる程度にするためには模型の最大幅(航空機翼の弦長に相当する)を60cm程度とすることが必要である。そのためA, B, Cの3案は縮尺率は1/50とし、D案では1/55とした。模型の全長は160cm(D案のみ159cm)で、縦横比(aspect ratio)は約2.6であった。気流の2次元性を保つための端板は模型には取りつけず、約3mmの間隙をお

きそのすぐ外側に固定端板を設けた。模型材料には本体に上質の檜材およびパルサ材を使用し、高欄など一部には銅線を用了。模型は3分力測定およびばね支持部分模型実験に共用した。そのため天秤吊線取付用フックは模型に固定し、ばね支持実験の場合にはその部分をテープで覆い気流に悪影響を与えないよう考慮した。模型はA, B, C, Dの4案について製作し、C案には導流翼も製作した。

模型の重量、慣性モーメントは表-2に示す通りである。

3.3 実験装置:

3.3.1 3分力測定

模型に作用する空気力学的3分力は風洞測定部上方に設けられている3分力天秤を用いて測定した。模型架設の原理図を図-4に掲げる。重錘 $W_1 \sim W_4$ は気流によって模型が動揺するのを防ぐために取り付けられる釣合重錘であり、気流外に置かれ、またそれ自身は水槽に浸漬してある。気流に対する模型の迎角は第二揚力天秤を上下することにより変えられる。このようにして吊られた模型に作用する空気力は次式で定義する3分力係数として無次元表示する。

抗力係数

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A \cdot \ell}$$

揚力係数

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot B \cdot \ell}$$

空力モーメント係数

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot B^2 \cdot \ell}$$

但し

$$D : \alpha (D_1 - D_0) - D_s$$

$$L : L_I + L_{II}$$

$$M : L_I r_1 \cos \varphi - L_{II} r_2 \cos \varphi + D r_1 \sin \varphi$$

$$L_I : L_1 - L_{10}, \quad L_{II} = L_2 - L_{20}$$

α : 修正係数

D_1 : 通風時の抗力読取值

D_0 : 無風時の抗力読取值

D_s : 吊線等の実効値

L_I : 第1揚力実効値

L_{II} : 第2揚力実効値

r_1, r_2 : 腕長

L_1 : 通風時の第1揚力読取值

L_{10} : 無風時の第1揚力読取值

L₂ : 通風時の第2揚力読取值

L₂₀ : 無風時の第2揚力読取值

風速の測定は測定部に設置したピトー静圧管(φ10mm JIS) およびベッツ(Betz)型マノメーターを用いて行なった。その際空気密度および風速は次式より算出された。

$$\rho = 0.13186 \times \frac{273}{273 + t} \times \frac{H - 0.378h}{760} \quad (\text{kg sec}^2 \cdot \text{m}^{-4})$$

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (\text{m/s})$$

測定は迎角 $-15^\circ \sim +15^\circ$ の範囲で1度刻みで実施した。また風速は数種類変えて計測した。各係数の算出には千葉支所内に新設されたFACOM 270-30電子計算機を使用した。

上式で定義される3分力係数は図-3の風軸(XY座標)に対するもので、設計軸(X'Y'座標)に対する空気力は次式で求められることを蛇足ながら付け加えておく。

$$\begin{pmatrix} D' \\ L' \\ M' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D \\ L \\ M \end{pmatrix}$$

3.3.2 ばね支持部分模型実験

(a) 模型の支持方法

模型が上下振動および回転振動を独立に、または連成して行ない得るよう合計8本のコイルスプリングで支持した。模型が気流によって吹き流されないように回転腕の中心には横流れ防止用のピアノ線を取りつけ、また模型の橋軸方向の動揺を防ぐためにもピアノ線を取り付けた。更に、模型に対する風の初期迎角を与えるためには、模型のみを回転中心のまわりに回転させた。これは支持系全体を回転させるとスプリングが傾き、振動中にスプリングが横方向に振動することを懸念したためであった。迎角は $-10^\circ \sim +10^\circ$ の間を 2.5° 刻みとした。このようにして支持した系の固有減衰係数は原型で想定されるものよりも小さい。そのため、模型にはピアノ線を介して附加減衰装置(写真-2参照)を取り付けた。本装置は模型に初期振動を与える加振機としても使われた。

端板は模型には取りつけず、固定した隔壁との間隙を可能な限り小さくすることとで代用した。これは端板による重量の増大を嫌ったためである。模型の支持機

構については図-5を参照されたい。

(b) 検出方法

模型の振動は可変インダクタンス型の加速度計を、回転中心から等しい位置に設置し、それぞれの出力の和および差を2回積分し、回転変位動および上下変位動に分離してペンオシログラフに記録した。

4. 実験結果

4.1 3分力係数

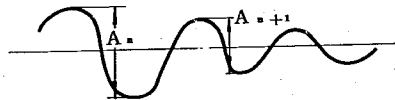
得られた3分力係数と迎角の関係を図-6以下に示す。流線型補剛桁の場合には係数値にReynolds数の影響を考えられるので測定風速を4~5種に変化させて観測した。

高風速において小さな迎角範囲についてのみしか測定を行なわなかったのは大迎角においては気流の剥離のため模型に不規則外力が働らき測定精度が低下するからである。

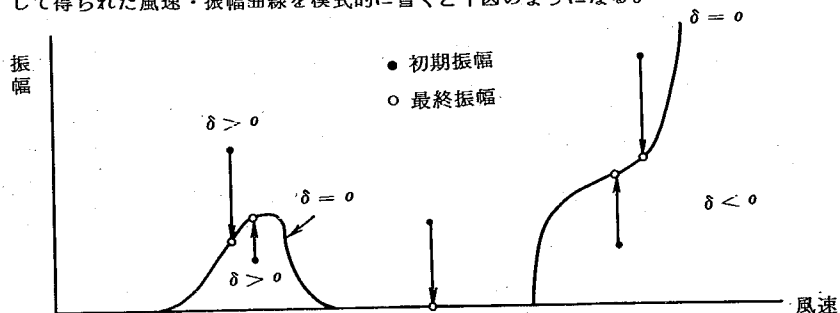
4.2 ばね支持部分模型

人為的に模型に加えられた振動がどのように成長あるいは減少していくかを各支持方法、各迎角、各風速について記録した。振動の消長は対数減衰率によって表示した。対数減衰率の定義は次式による。

$$\delta = \log. \frac{A_n}{A_{n+1}}$$



但し A_n は第 n 番目の全振幅を、また A_{n+1} は第 $n+1$ 番目の振幅を表わす。即ち対数減衰率 $\delta > 0$ のときは振幅が時間と共に減少することを意味し、 $\delta < 0$ は増大することを示す。対数減衰率は振幅および風速の影響を受ける。そこで実験結果は対数減衰率をパラメーターとして風速と振幅の関係を表示することとした。このようにして得られた風速・振幅曲線を模式的に書くと下図のようになる。



$\delta < 0$ の領域は不安定領域を示し、この領域で擾乱が与えられると振動は $\delta = 0$ に相当する振動まで成長する。逆に $\delta > 0$ の領域は安定領域を示し、この領域で与えられた擾乱は $\delta = 0$ に相当する振動まで減少する。

ここで求められる δ は模型および支持系の有する構造減衰 (δ_{ms}) と風による空気力学的減衰 (δ_a) の和と考えてよい。従って実橋で想定される構造減衰 (δ_{ps}) と $\delta - \delta_{ps}$ の差があり、実橋での風速と振幅の関係は対数減衰率がそれだけ移行した曲線にそって変動するものと考えてよからう。求められた風速-振幅曲線を図-7 以下に示す。

また低風速領域でみられた限定振動を抑制するために試験的に模型 C に fairing をとりつけて行なった実験の結果を図-8 に掲げる。

5. 考 察

5.1 3 分力係数

5.1.1 流線型断面の場合

模型 A および D のような流線型断面の場合 3 分力係数に対する Reynolds 数の効果があることはすでに指摘したが、実験結果にも明らかにその様子が読みとれる。即ち抗力係数、モーメント係数にはそれ程の効果は見られないが、揚力係数は測定風速の増大につれて係数値が減少する傾向がある。このような傾向は模型 B においても大迎角時に見られる。これは風速と共に模型の周辺の流況が変わることを示しており次の 2 つの現象が主体になっていると考えられる。

1) 気流剥離点の移転

2) 剥離した流れの模型表面への再付着

今回の実験では Reynolds 数は $(4 \sim 10) \times 10^5$ 程度であり原型でのそれは $(1 \sim 10) \times 10^7$ 程度である。風洞実験から原型での 3 分力係数を求めるには原型で想定される流況を模型で再現しなければならない。図-6.5 および図-6.6 はこのための一つの試みを示すもので模型 D の下側に円型断面の棒を貼り付けてこの点で強制剥離を行なわせ、これが 3 分力係数におよぼす効果を見たものである。それによると棒を取り付けることにより影響範囲は正の迎角の側に移動するが、相変わらずこの影響は残っており流線型断面の場合の 3 分力係数の値を求めるには、なお検討の余地のあることを示している。この問題については次回に詳しく報告する予定である。

5.1.2 角型断面の場合

上に述べた Reynolds 数の効果は模型 C では見られない。即ち測定結果は直接原型に適用できると考えられる。3 分力係数の特性は平板の特性に似ており、 $\alpha = 8^\circ$ および $+6^\circ$ で失速していることがわかる。模型 C の場合には従来の実験方法が静的にもまた、動的問題にもそのまま適用できるものと考えられる。

5.2 ばね支持部分模型

5.2.1 風速と振幅の関係

図一 7 によると箱げた断面の場合には不安定振動が生ずる領域が明らかに 2 つに分類されることが判る。即ち、比較的低風速で限定振動（風速の増加と共に振幅が漸増するが一定風速を越えると振幅が漸減し消滅する振動）を生ずる領域、および、高風速で発散振動（風速の増加と共に振動が漸増しついには発散する振動）を生ずる領域の 2 者である。前者は後流中の渦によるいわゆる風琴振動に、また、後者は失速フラッターによるものと考えられる。限定振動のうちには捩れ振動の他に上下振動も観測された。

5.2.2 振動振幅と減衰効果

風速—振幅曲線を用いて、実橋の振動振幅および限界風速を推定する一般的な方法は 4.2 において述べたが、今回の模型で見られた限定振動は振幅が小さく、その領域での減衰係数の分布が求めにくい。そこで模型 C および D に対して実橋で想定される $\delta = 0.04$ 程度の減衰を与えて実験した。その結果、限定振動の振幅には大きな影響が見られ、減衰性 $\delta = 0.015$ 程度では迎角 $\alpha = 7.5^\circ$ および 10° で見られた限定振動が $\delta = 0.04$ では消滅した。しかしすでに述べたように模型 D は Reynolds 数の影響がある断面であるためにこの実験結果より D 案が耐風性上問題がないと判断することは早計であろう。模型 C は Reynolds 数の影響を受けない断面と考えられており、この模型が低風速で示した限定振動は $\delta = 0.04$ 程度で消滅することが上記の場合から予想される。

5.2.3 迎角と限界風速の関係

理解の便を計るため迎角と限界風速の関係を図一 9 に示した。長大吊橋の耐風性を考える場合、どの範囲の迎角を考慮するかは十分に検討する必要があるが、現在のところ、これに関しての資料は極めて少ない。

本州四国連絡橋の耐風設計指針においては設計風速が 50m/s を越える場合には $-5^\circ < \alpha < +5^\circ$ の迎角を考慮するよう規定されている。また、不安定振動現象

は設計風速の1.2倍以下の風速で起ってはならないと規定されており、関門橋の場合設計風速は 53.5 m/s であるので 64.3 m/s が限界風速となる。図-9にはこの限界領域を示しており、この領域を侵してはならない。一方、気象研究所で実施した架橋地点の地形模型を用いた風洞実験の結果ではその値は、 $-10^\circ < \alpha < +2^\circ$ の範囲になっている⁷⁾。この実験では迎角の測定精度は $\pm 2^\circ$ といわれているので正の迎角（吹き上げ角度）としては 4° までを考慮すれば十分であろう。

5.2.4 導流翼の効果

気流の剝離を抑制する装置として導流翼を模型Cにとりつけてその影響を調べた結果を図-8に示す。これによると導流翼は大迎角の場合にも可成り有効に働かし、 -10° を除いて低風速時の限定振動を抑止できることが判る。実験時の減衰が $\delta = 0.025$ であったことを考えるならば $\delta \doteq 0.04$ 程度であれば限定振動は $-10^\circ \sim +10^\circ$ の範囲の全ての迎角に対して消滅することが予想される。但し、導流翼の形状、寸法、位置については交通上からも十分に検討される必要があろう。

6. 結 論

以上の実験データおよび討議の結果次のような結論が導ける。

- (1) 提案された4案のうちA、DについてはReynolds数の効果が考えられ、今回の実験結果より、それら設計案の耐風性について結論を導くことは出来ず、今後の調査が必要となろう。
- (2) B、C案については比較低風速で限定振動を発生するが、発散振動を生ずる風速は何れも可成り高い。限定振動の振幅は実橋が $\delta = 0.04$ 程度の減衰性を有するものとすれば極端に小さくなるか或いは消滅することが期待される。
- (3) 限定振動を抑止するために設けるfairingは可成りの効果が期待されるが、fairing自身の形状にも研究の余地が残されている。

7. あとがき

本実験には構造研究室員の協力があつた。心より感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 第二関門道路橋耐風調査報告書

土木研究所資料 昭和43年3月

- 2) 第二関門道路の計画

豊田栄一, 樽井常忠

- 3) 英国NPLにおける一連の風洞実験に関するレポート

- 4) 吊橋に関する国際会議提出レポート

- 5) 橋梁試験用風洞の特性について

土木研究所報 第128

- 6) An Experimental Investigation of the Aerodynamic Stability of
Suspension Bridges. Pre. Pub. IABSE, 1948.,

by C. Scruton

- 7) 架橋気象調査風洞実験報告 気象研究所

記 号 説 明

本報告で使われている記号は特に断わらない限りここで定義するものによっている。

記 号	単 位	内 容
σ	$\text{Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$	材 料 の 密 度
ρ	$\text{Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$	空 気 密 度
E	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2}$	弾 性 係 数
V	$\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$	風 速
δ_s	—	構造減衰 (対数減衰率で表示)
g	$\text{m} \cdot \text{sec}^{-2}$	重 力 加 速 度
B	m	代 表 長
ν	$\text{m}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$	空 気 の 動 粘 性 係 数
I	$\text{Kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2$	回 転 慣 性
S	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$	剛 性
N	Sec^{-1}	振 動 数

表 - 1 原型の諸元

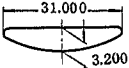
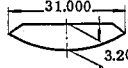
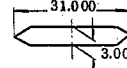
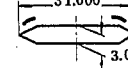
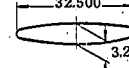
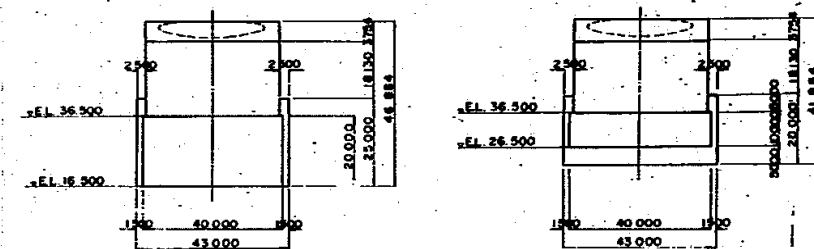
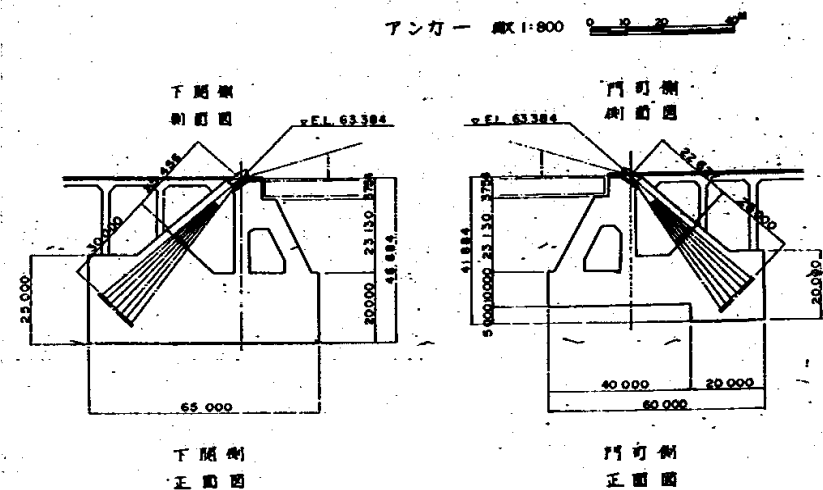
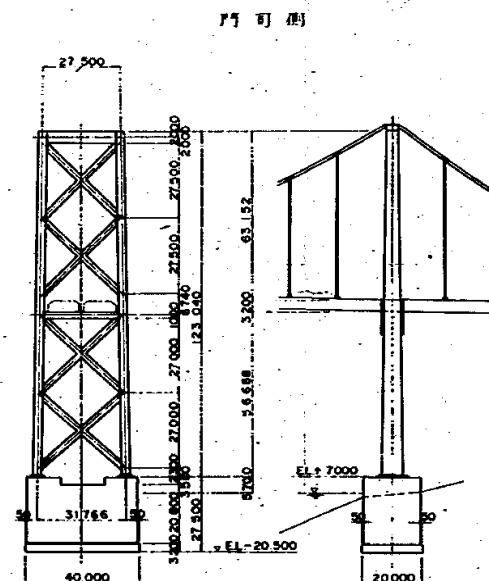
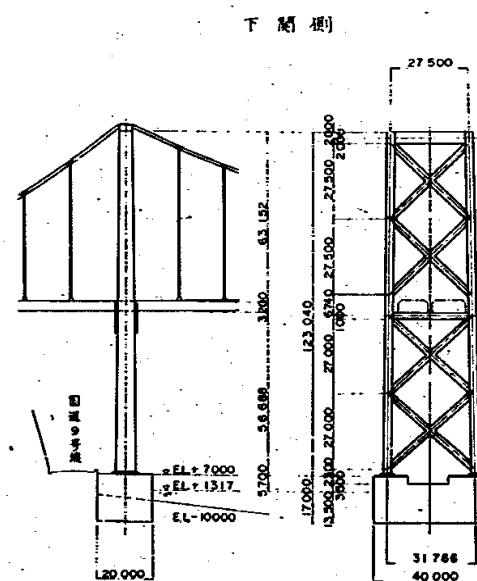
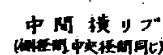
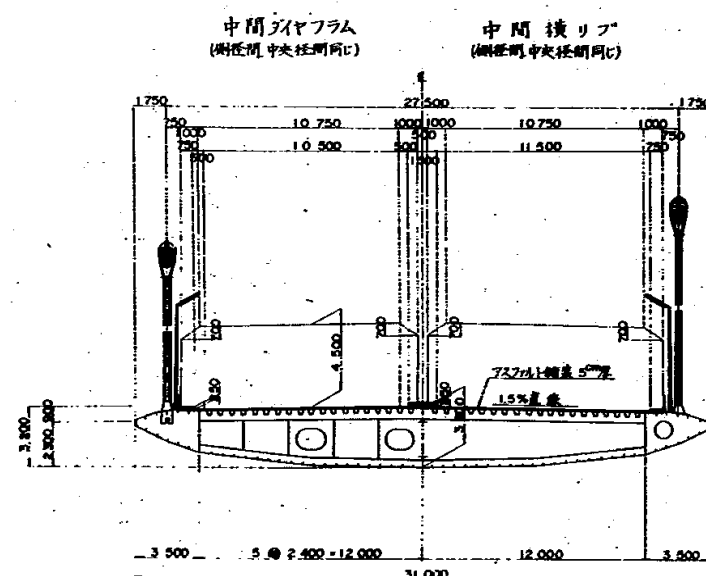
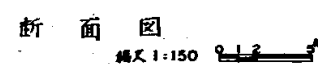
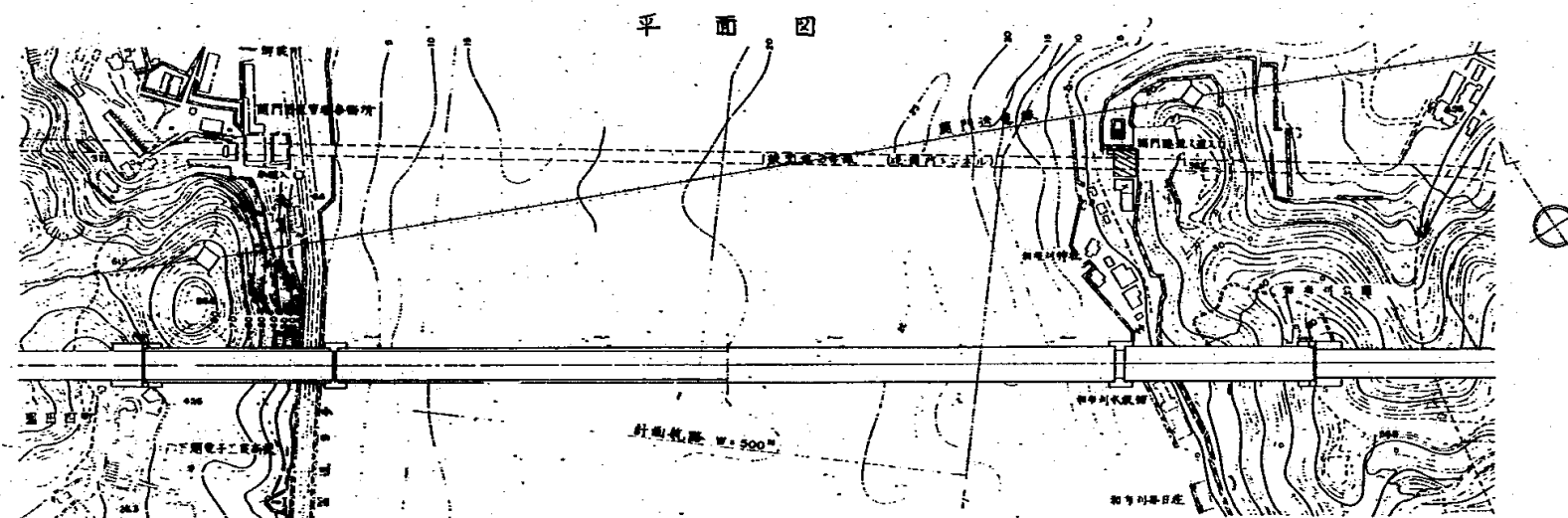
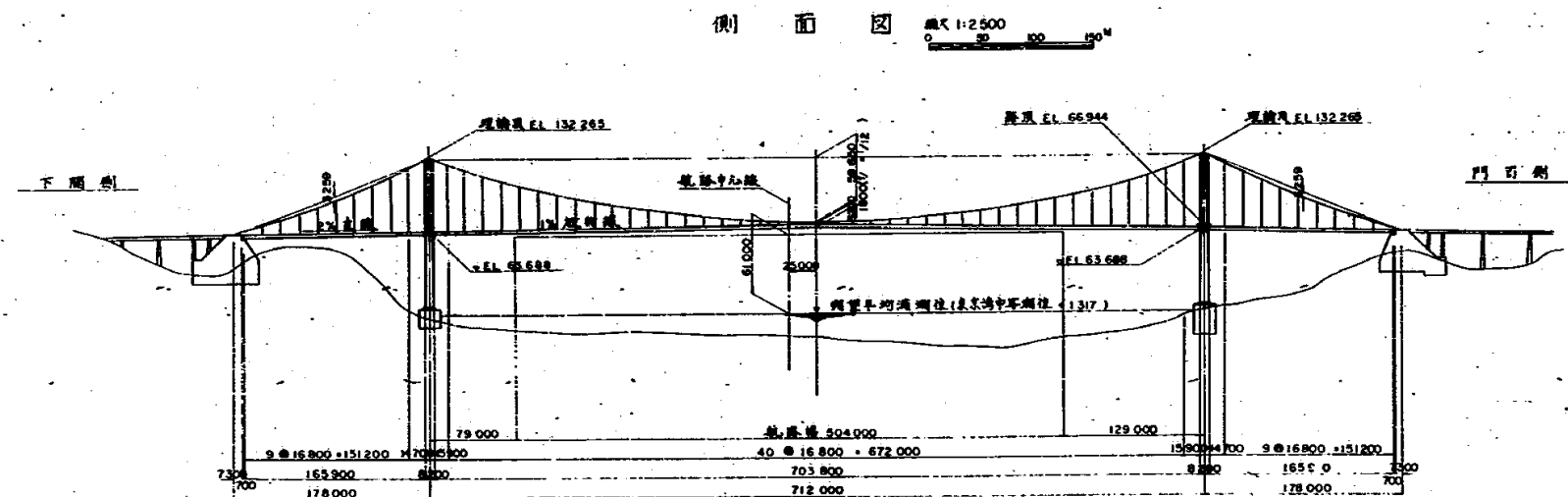
原 型	A	B	C	C1	D	D1
主 支 間 (m)	7 0 3.8 0 0					
側 支 間 (m)	1 6 5.9 0 0					
主支間垂距 (m)	5 8.6 5 0					
主ケーブル間隔 (m)	27.500	27.500	27.500	27.500	29.000	29.000
断 面 形 状						同 左
主ケーブル断面積 (m^2/B_r)	0.418	0.418	0.418	0.418	0.433	0.433
重 量 (t/m/b_r)	補剛桁その他	11.442	11.442	11.980	12.492	12.492
	ケ ー ブ ル	3.737	3.737	3.737	3.799	3.799
	ハ ン ガ ー	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126
	合 計	15.305	15.305	15.843	16.417	16.417
主ケーブル水平張力 (t/b_r)	16,157	16,157	16,725	16,725	17,018	17,018
主ケーブル弾性係数 (t/m^2)	2.0×10^7					
断面 2次モーメント (I_x) (m^4)	1.4595	1.4595	1.5616	1.5616	1.4949	1.4949
断面 2次モーメント (I_y) (m^4)	66.180	66.180	65.672	65.672	74.856	74.856
重心位置 (y_u, y_l) (m)	(1.129; 2.071)	(1.129; 2.071)	(1.232; 1.768)	(1.232; 1.768)	(1.132; 2.068)	(1.132; 2.068)
慣性モーメント ($\text{Kg} \cdot \text{cm}^2/\text{m}$)	530.970×10^7	530.970×10^7	527.784×10^7	527.784×10^7	599.355×10^7	599.355×10^7
セン断中心 (e_u, e_l) (m)	(1.129; 2.071)	(1.129; 2.071)	(1.232; 1.768)	(1.232; 1.768)	(1.201; 1.999)	(1.201; 1.999)
捩 れ 剛 性 ($\text{t} \cdot \text{m}^2$)	3.894×10^7	3.894×10^7	4.439×10^7	4.439×10^7	4.108×10^7	4.108×10^7
曲げ捩れ剛性 ($\text{t} \cdot \text{m}^4$)	4.384×10^8	4.384×10^8	9.789×10^8	9.789×10^8	5.751×10^8	5.751×10^8
ケーブル長 (m)	1,289.722					
摘 要		設計計算が行われていない。 原型Aの諸元を用いる。		導流翼の影響は無視。 原型Cの諸元を用いる。		原型Dの減衰性を大きくしたもの。 他の諸元は原型Dに同じ。

表 - 2 実 験 条 件

設 計 案			A	B	C	C 1	D	D 1	
原 型	死 荷 重		t/m/B _r	15.305	15.305	15.843	15.843	16.417	16.417
	慣性モーメント(含ケーブル)		tm ² /m	1,261.3	1,261.3	1,261.3	1,261.3	1,527.6	1,527.6
	振動数	鉛直撓み(対称1次)	%	0.204	0.204	0.215	0.215	0.204	0.204
		撓 れ(対称1次)	%	0.662	0.662	0.700	0.700	0.719	0.719
	振 動 数 比		—	3.24	3.24	3.25	3.25	3.52	3.52
模 型	死 荷 重		Kg	9.32	9.20	10.07	10.34	9.04	9.28
	慣 性 モ ー メ ン ト		Kg・cm ²	3.720	5.095	4.624	4.877	4.235	4.356
	振動数	鉛 直 撓 み	%	1.52	1.53	1.46	1.44	1.54	1.52
		撓 れ	%	4.56	4.51	4.70	4.64	4.98	4.91
	振 動 数 比		—	3.01	2.96	3.22	3.22	3.23	3.23
	縮 率			1/50	1/50	1/50	1/50	1/55	1/55
換算比	鉛 直 撓 み 振 動		V _p /V _m	6.72	6.67	7.37	7.46	7.29	7.38
	撓 れ 振 動		V _p /V _m	7.25	7.35	7.45	7.54	7.94	8.05
	備 考			付加減衰のない場合 δ _a ≐0.01, δ _b ≐0.025					



橋の等級 1等橋 A3級
荷重
活荷重

鋼床版 - 中央縦トラス	TL - 20 号
補助用 鋼 桁 - ケーブル	QB12 1/2 号
ハンガー - 中間横桁	TL - 20 号

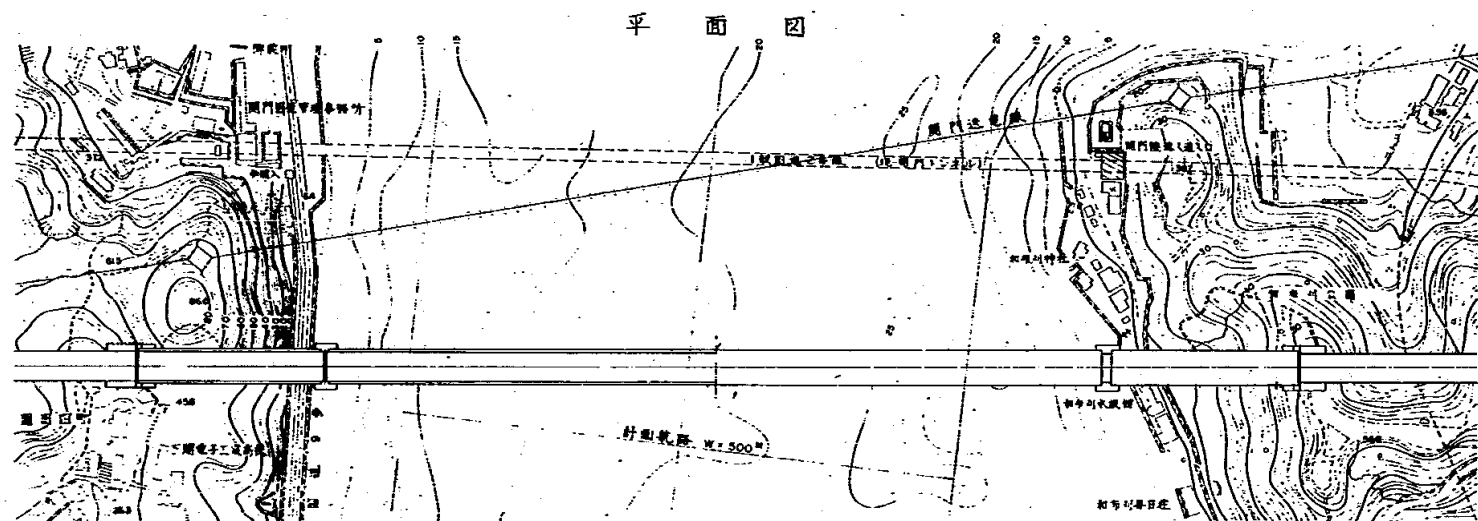
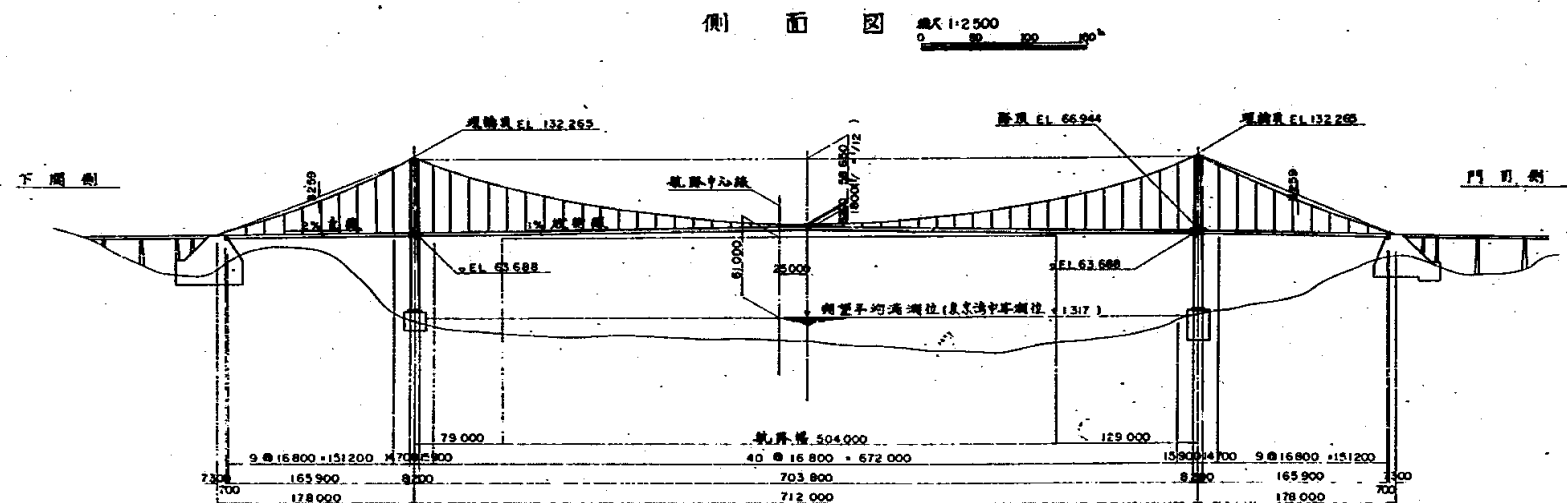
温度変化：
温度変化の範囲 $-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$
実験時の温度 $+20^{\circ}\text{C}$

	市橋直太郎	ケー・アル	バン・ガー
橋本直方角 街	296 町	154 町	106 町

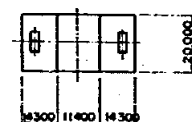
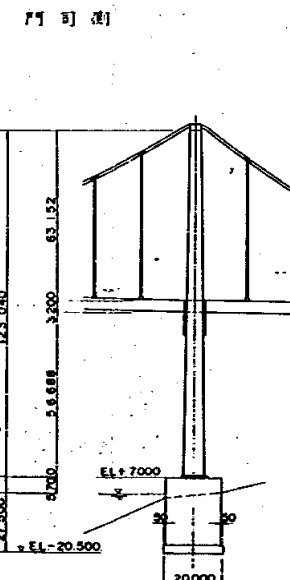
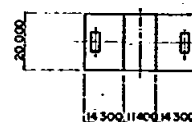
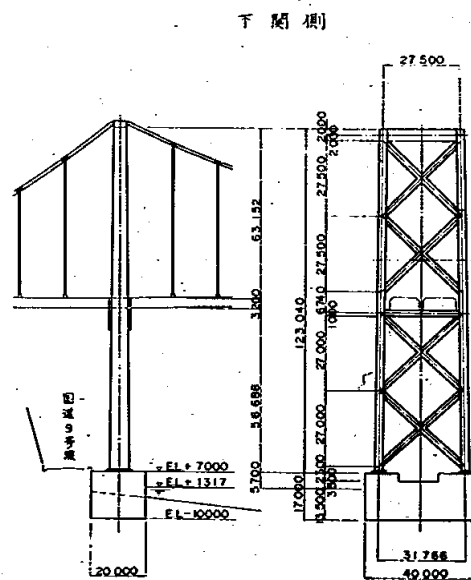
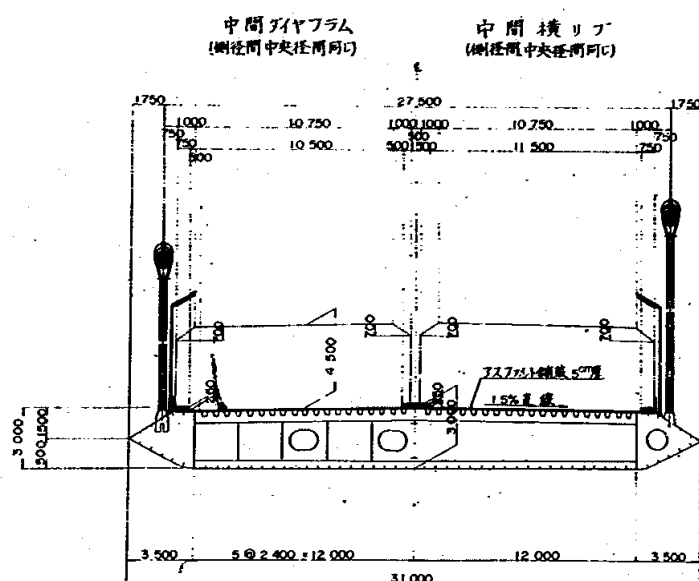
支持地盤の水平震度	0.150
傾斜震度	0.075

TYPE-B

工事名	第二西門道路
圖面名	構造概要図
図面番号	全 7 巻之中 1 号
縮 尺	1:2500, 1:1000
作成年月	昭和 43 年 3 月 10 日
設 計 所	日本建設コンサルタント
出 版 所	日本道路公団技術研究所



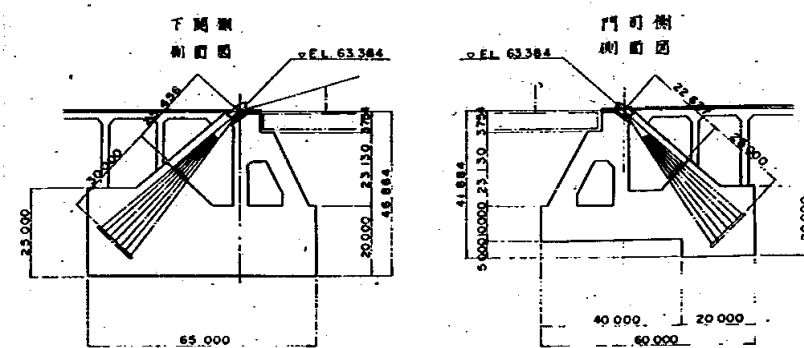
断面図 縮尺 1:150



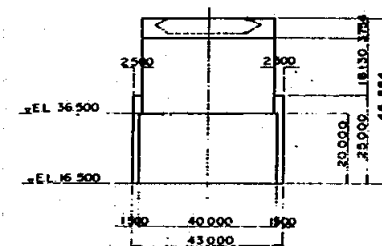
注)

- (1) 水深は建設省第百九号建設局令昭和38年10月水深測量法に付いたものと各断面は東京湾中津洲に於てある。
- (2) 平面図は国土院院光計測士会本図「昭和35年〜昭和38年」間に測量されたものである。
- (3) 下関側の位置は 1:2,500 の地図によるものである。

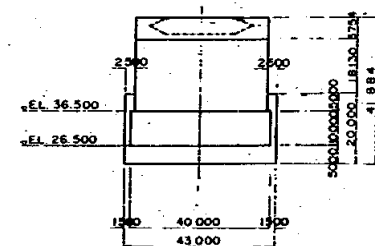
アンカー 縮尺 1:800



下関側 正面図



門司側 正面図



設計条件

橋の等級 1等橋 A3級

荷重

活荷重

鋼床版・中央梁トラス	TL-20+
橋脚・橋台・ケーブル	Q812 5m/本線
ハンガー・中間横リブ	TL-20+

※ 衝撃を考慮する。

温度変化:

温度変化の範囲 $-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$

架設時の温度 $+20^{\circ}\text{C}$

風荷重(無風荷重時中央径間)

	市橋梁部	ケーブル	ハンガー
橋脚梁角方向	586 $\frac{\text{kg}}{\text{m}}$	154 $\frac{\text{kg}}{\text{m}}$	106 $\frac{\text{kg}}{\text{m}}$

地震

支持地盤の水平変位	0.150
鉛直変位	0.075

TYPE-C

工事名	第二橋脚工事
図面名	構造概略図
図面番号	全 7 図 2 中 4 号
縮尺	1:2500 1:1000
作成日	昭和43年3月10日
設計所	日本建設コンサルタント
監理	日本建設コンサルタント
施工	日本建設コンサルタント
日本道路公団福岡支社	

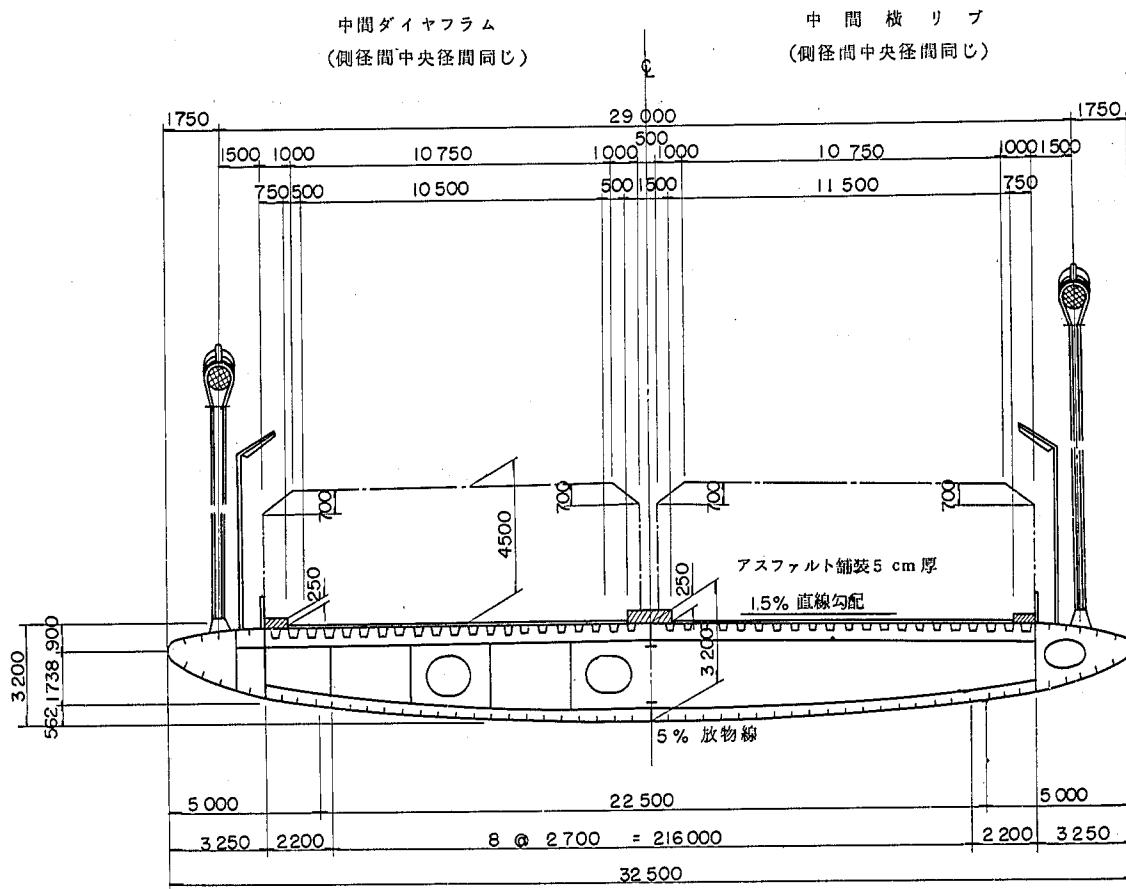
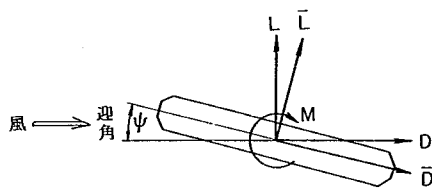


図-2 吊構造断面図 (原型-D)



M : モーメント
 L : 風軸揚力
 D : " 抗力
 $\bar{L}$: 橋体軸揚力
 $\bar{D}$: " 抗力

図-3

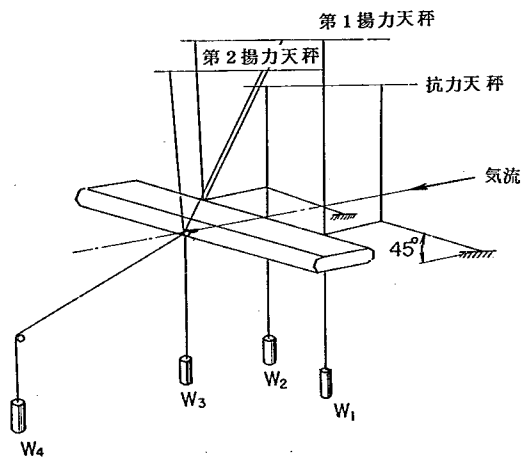


図-4

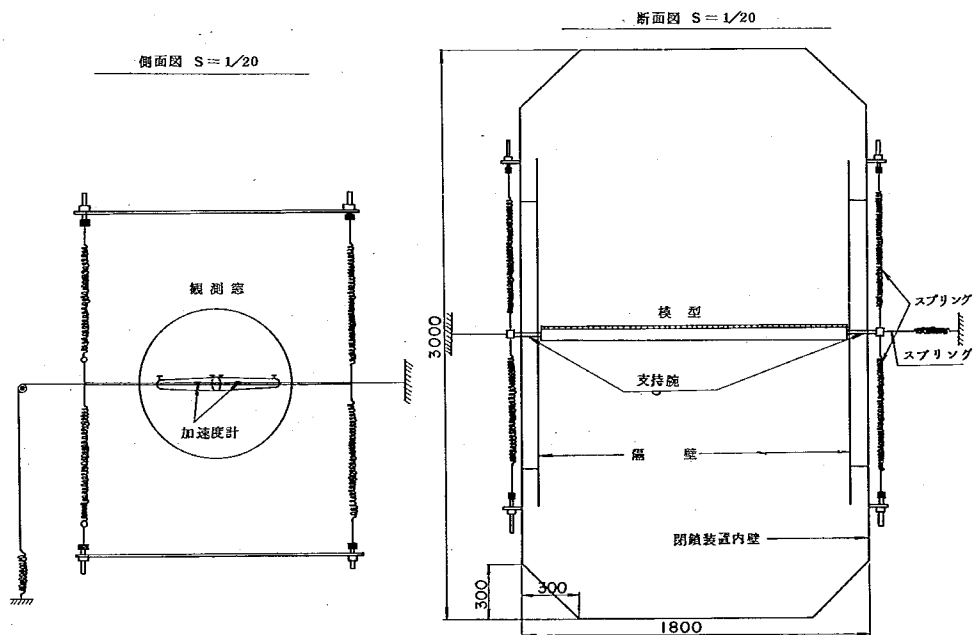
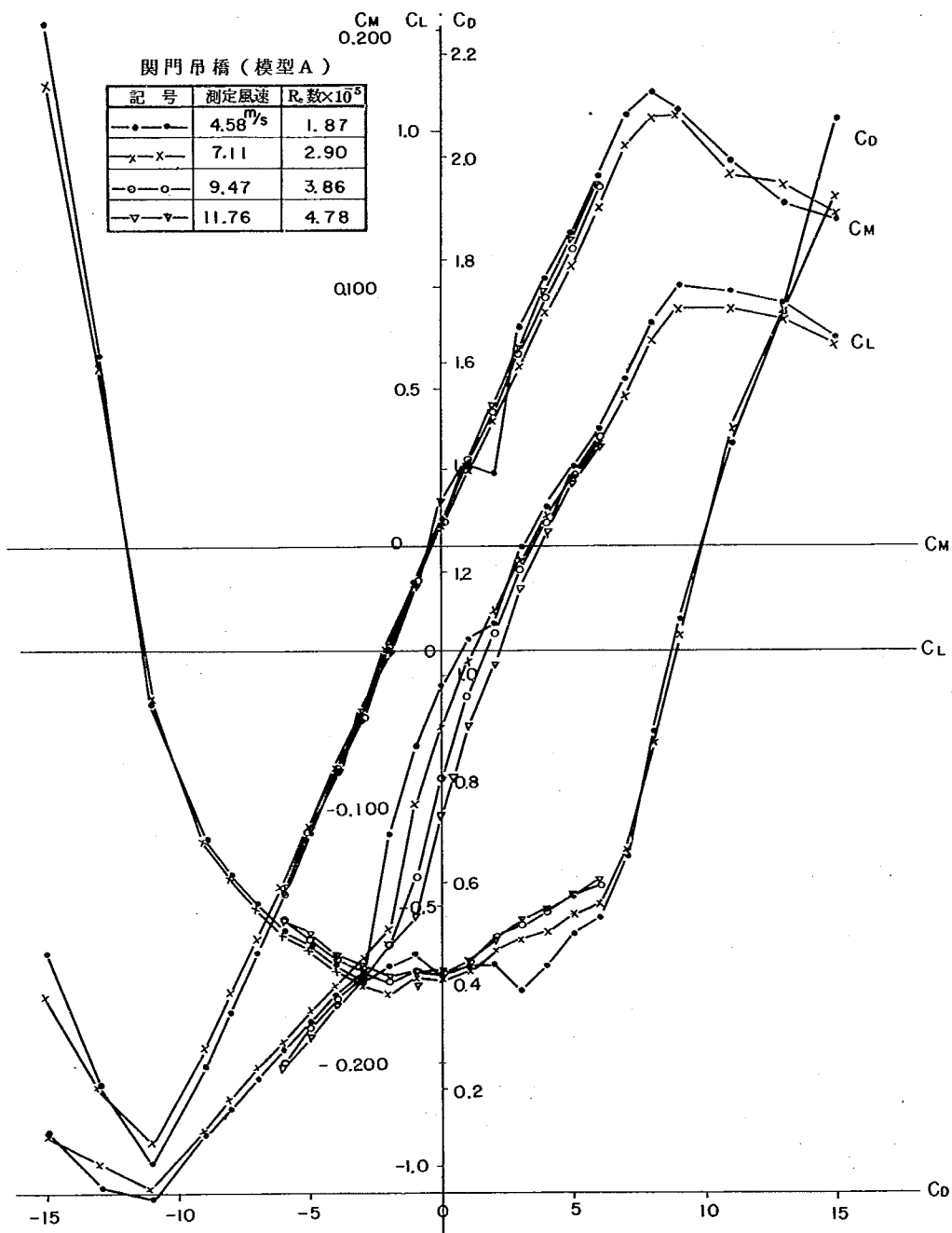
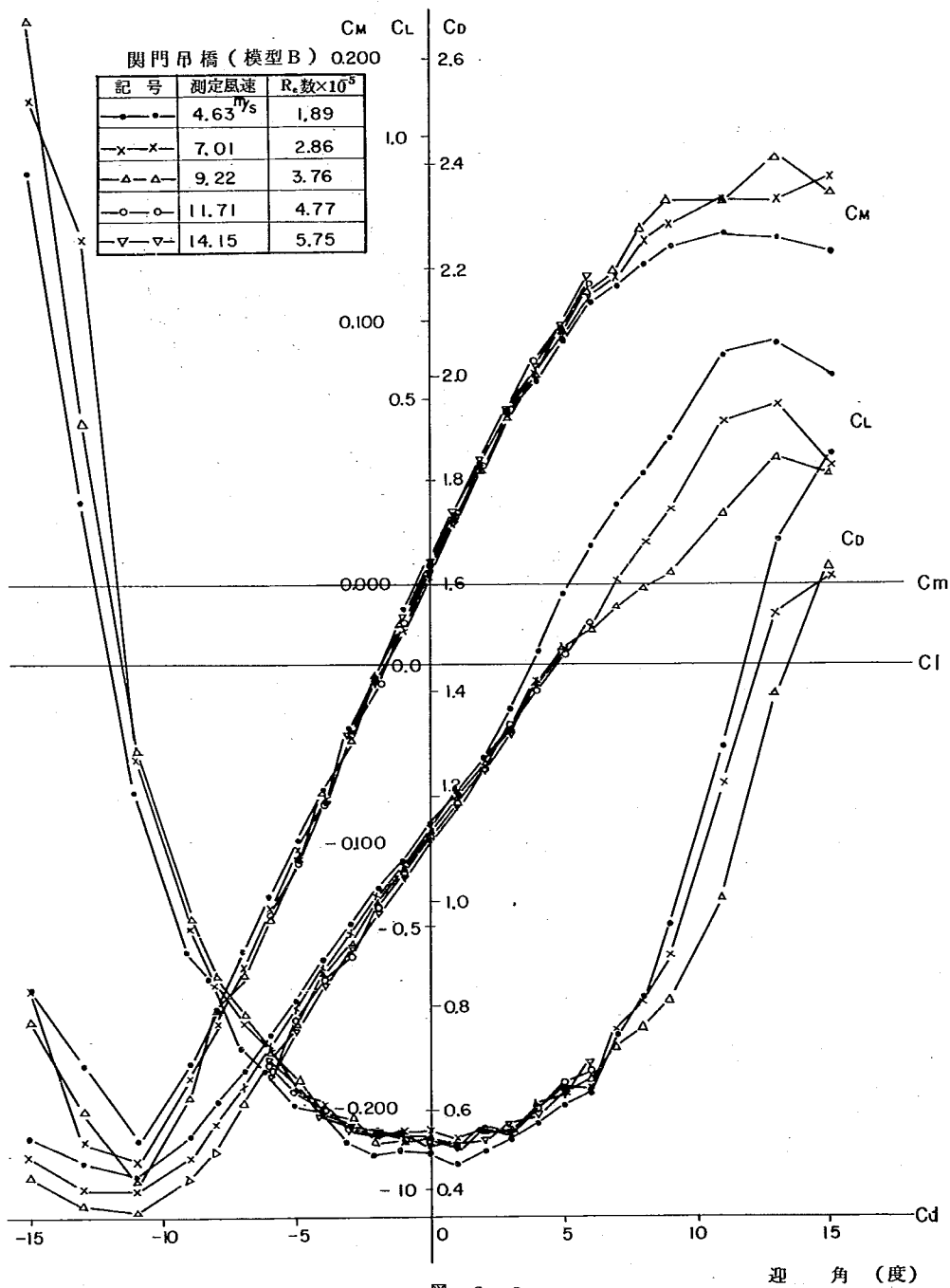


図-5 模型支持機構



図—6—1



図—6—2

関門吊橋（模型C）

記号	測定風速 m/s	$R_e \times 10^{-5}$
—●—●—	4.48	1.83
—x—x—	6.86	2.79
—△—△—	9.34	3.81
—○—○—	11.72	4.78
—▽—▽—	11.40	5.87

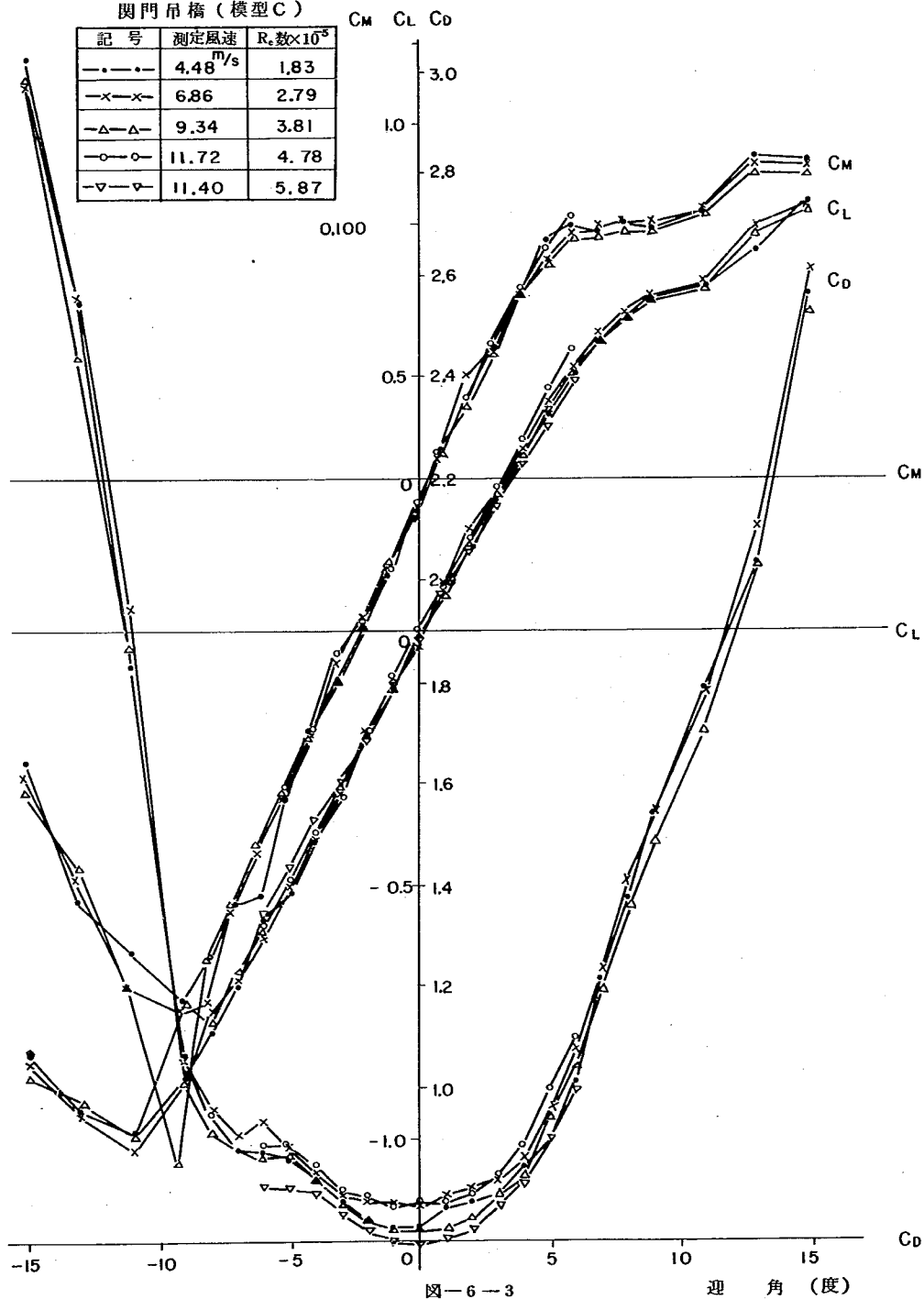
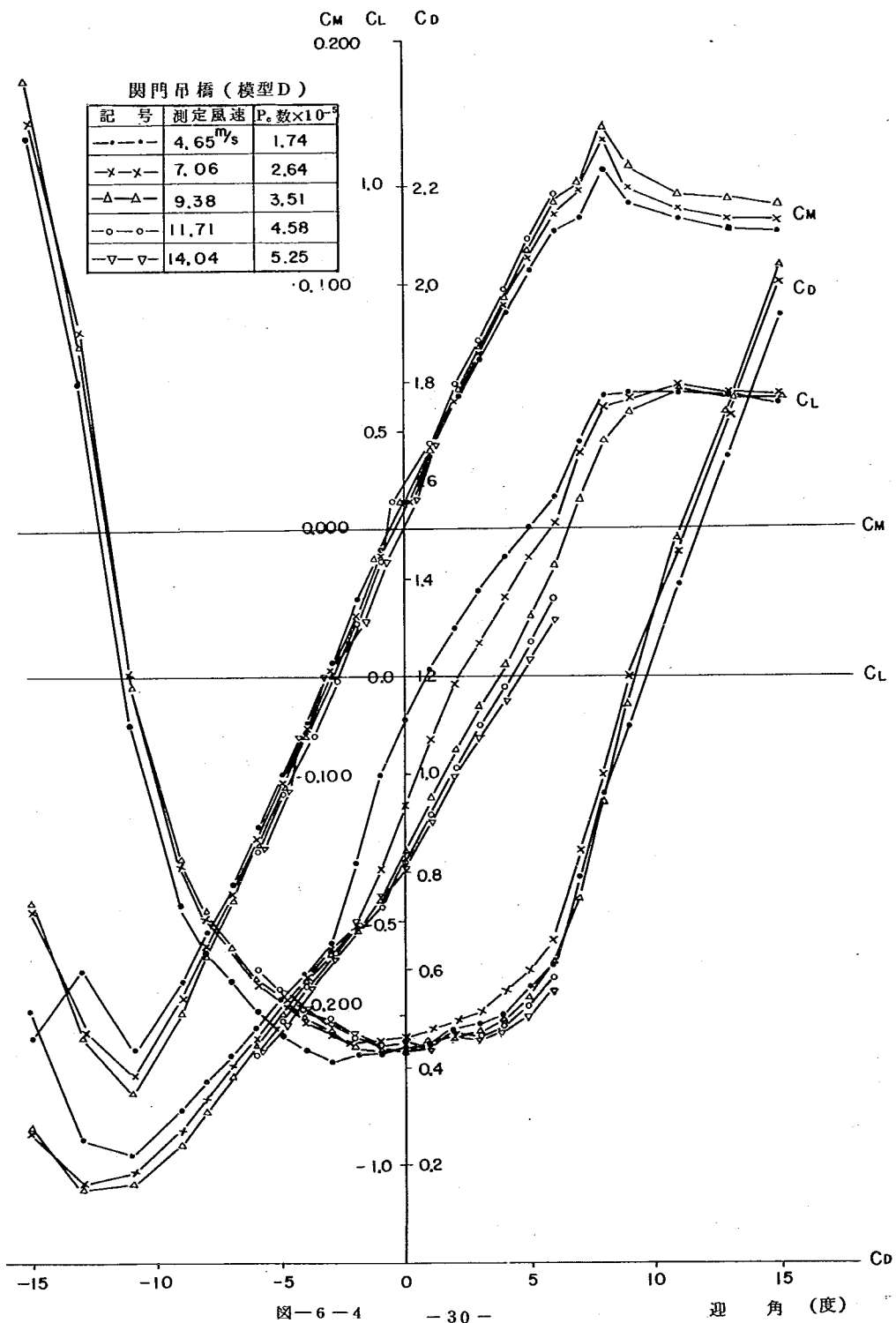


図-6-3



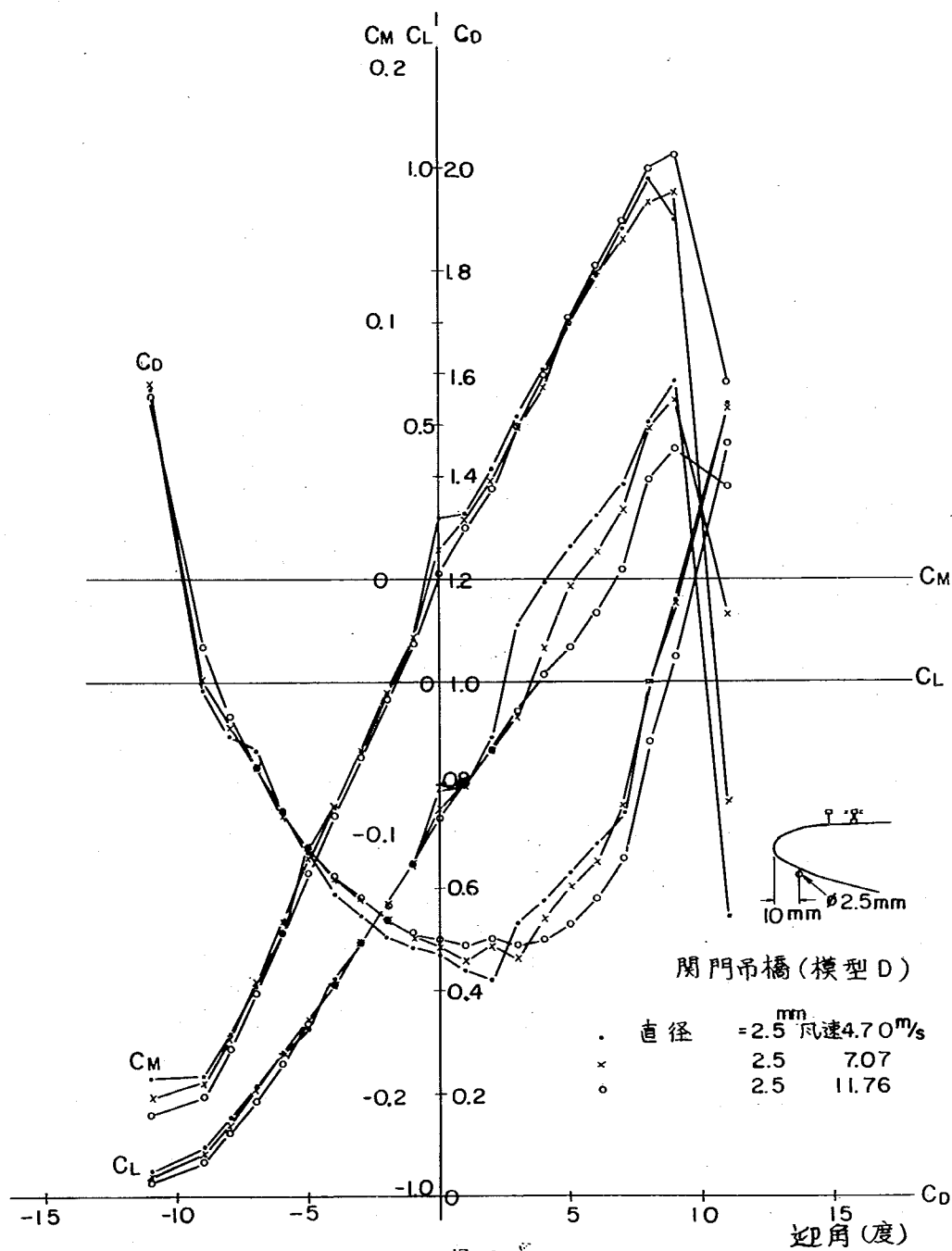


图-6-5

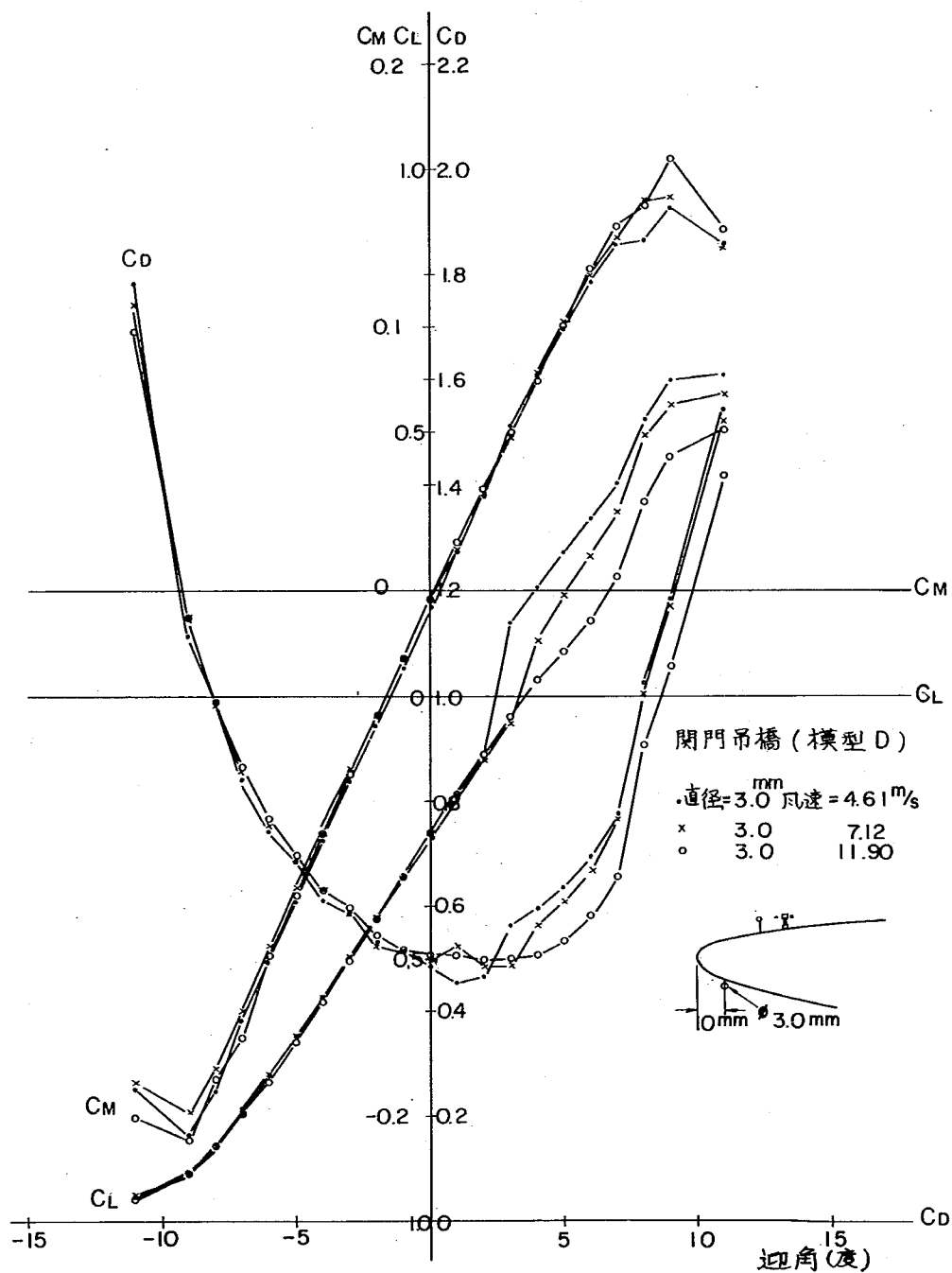
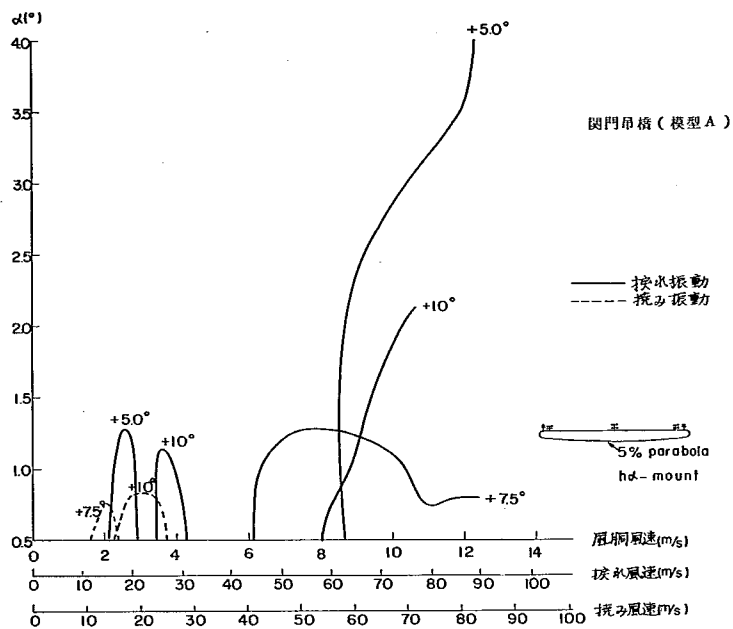
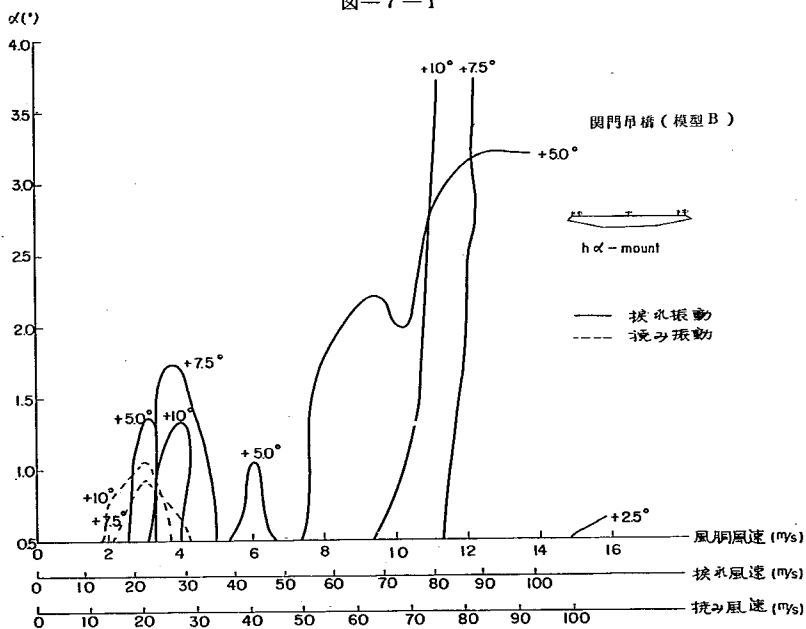


図-6-6



圖—7—1



圖—7—2

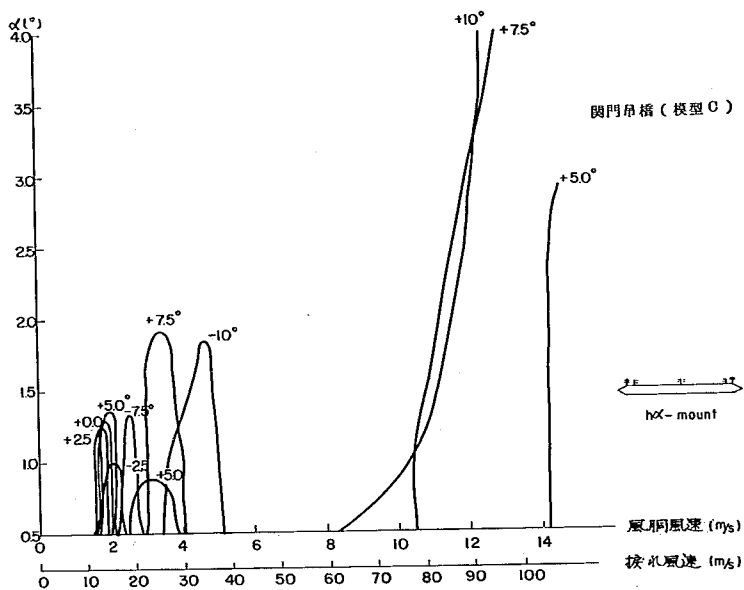


圖-7-3

閘門吊橋 (模型 G)

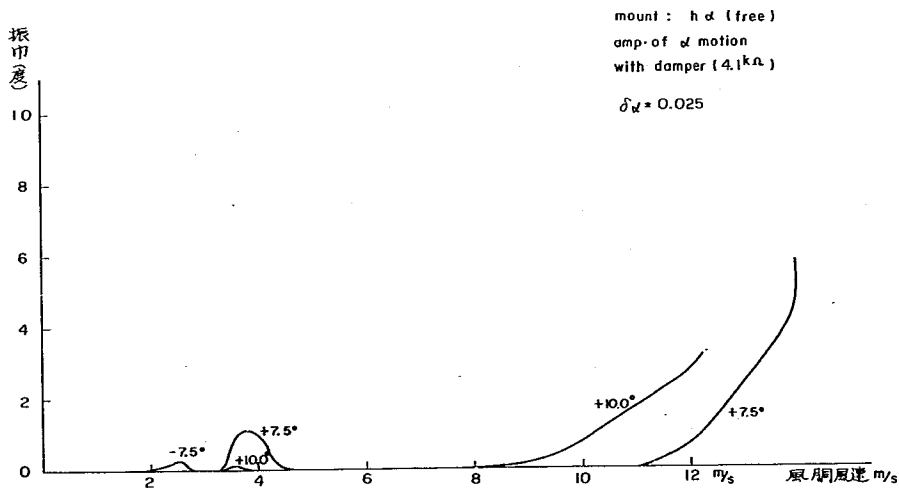
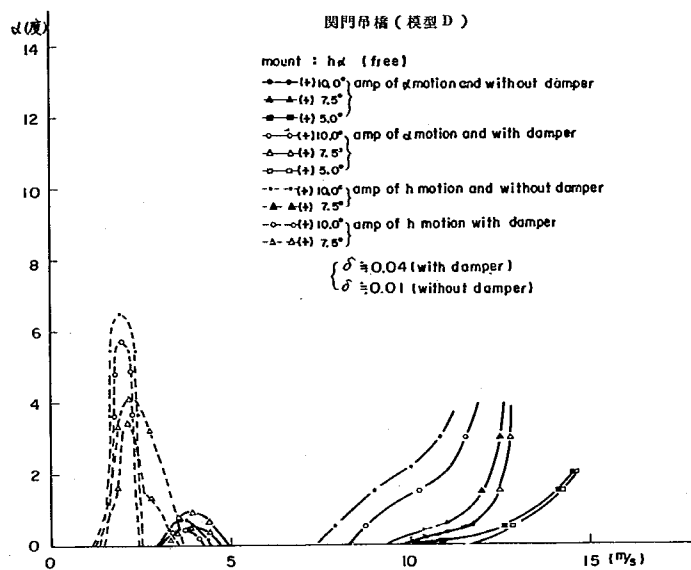


圖-7-4



図— 7 — 5

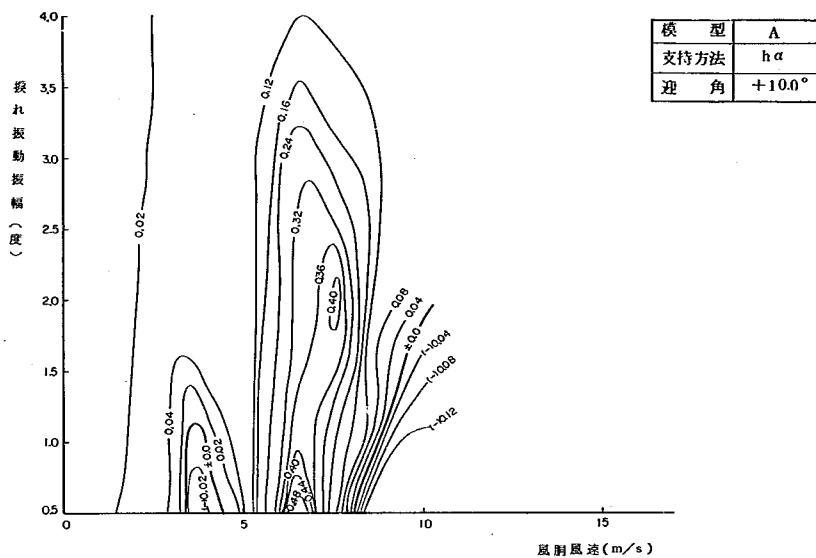


図-7-6

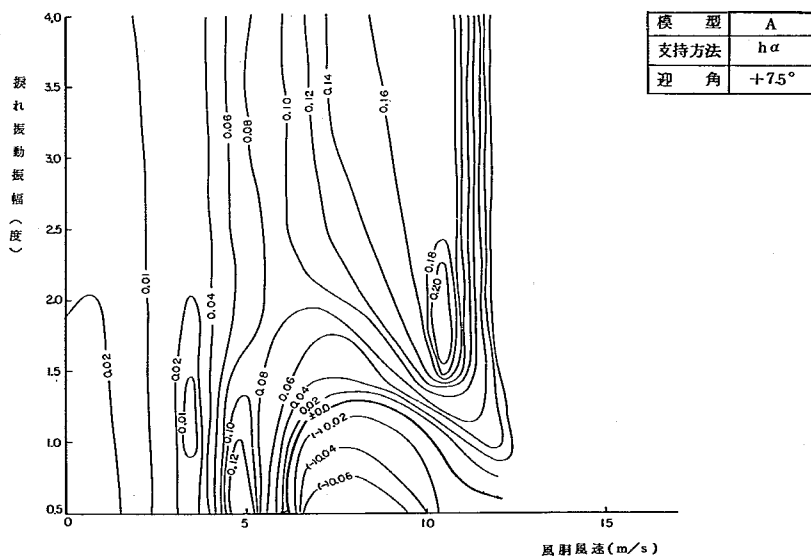


図-7-7

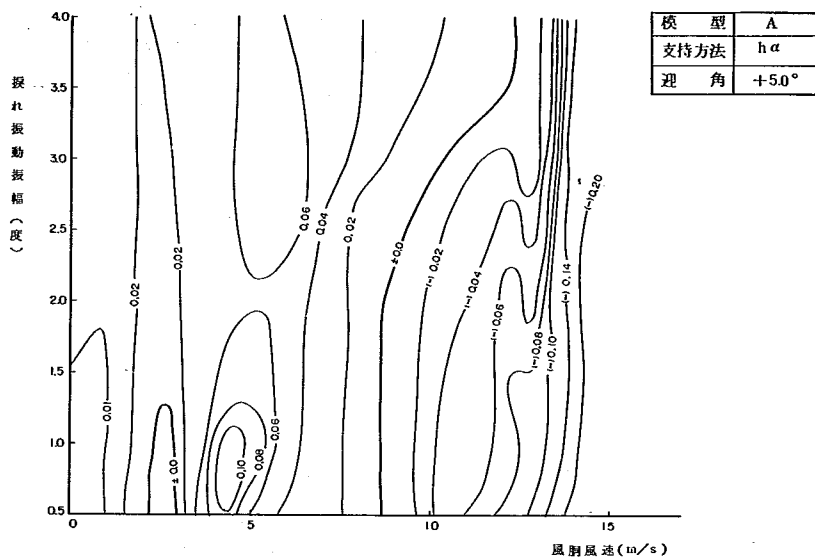


図-7-8

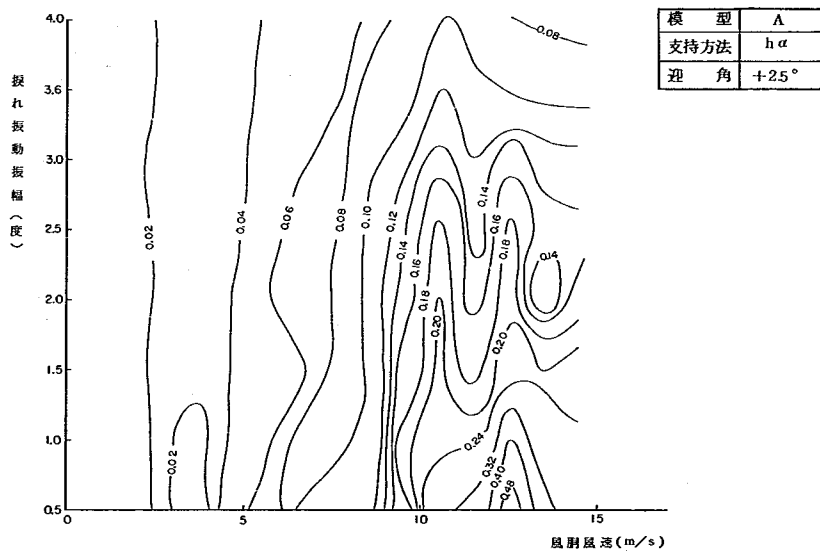


図-7-9

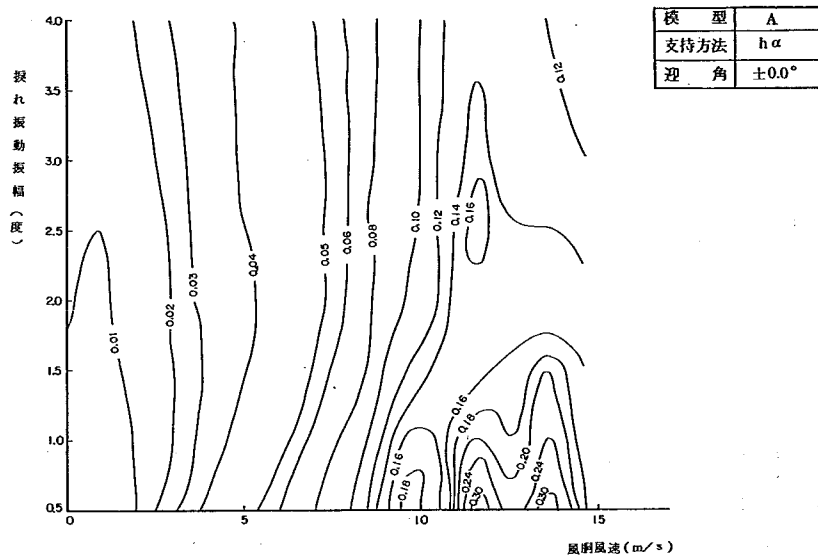


図-7-10

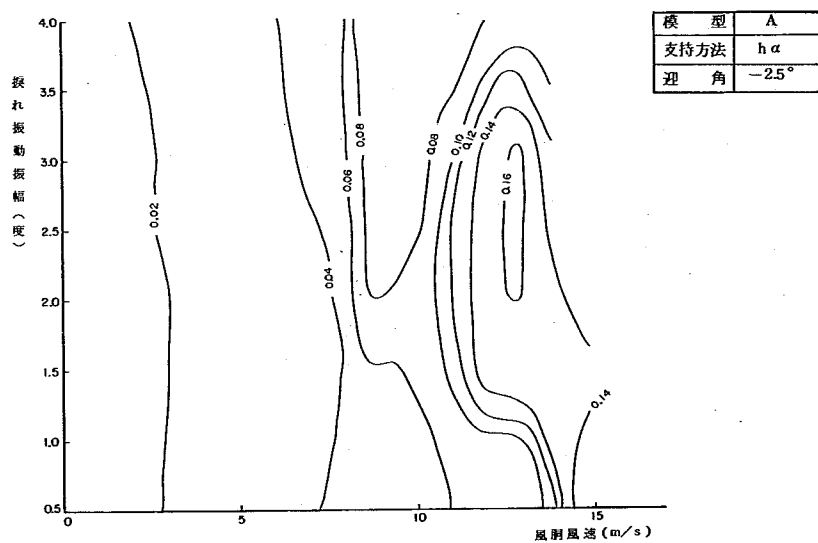


図-7-11

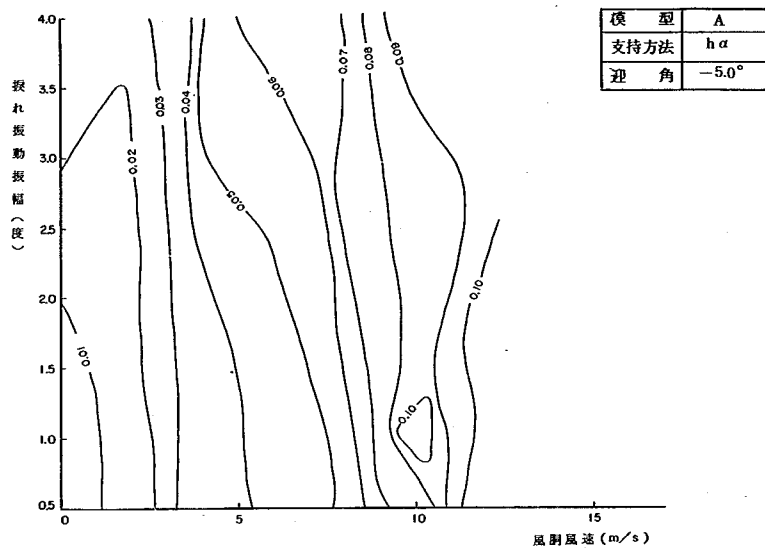


図-7-12

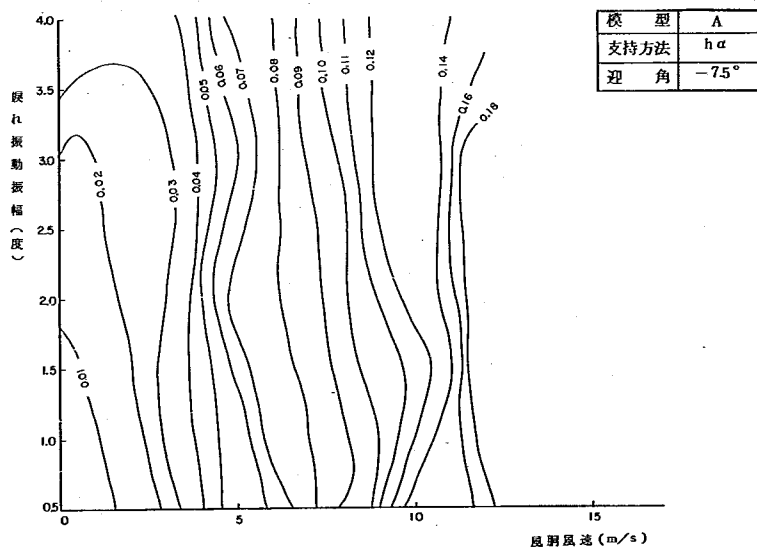


図-7-13

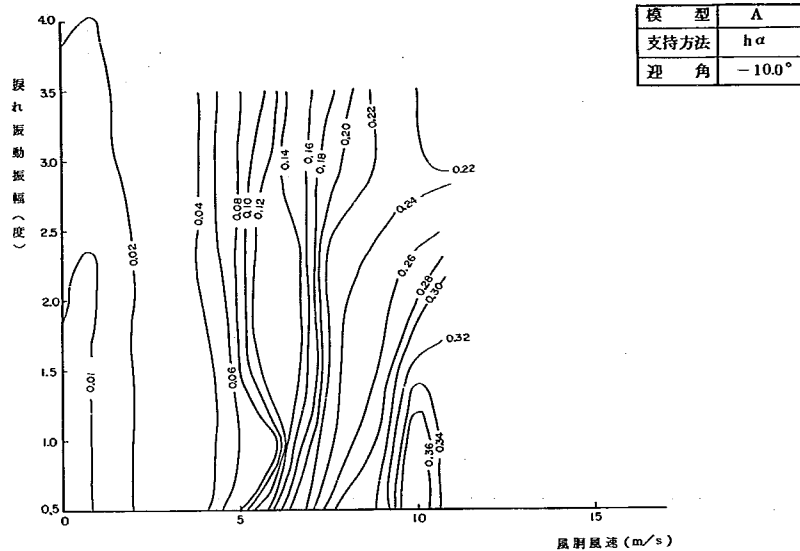


図-7-14

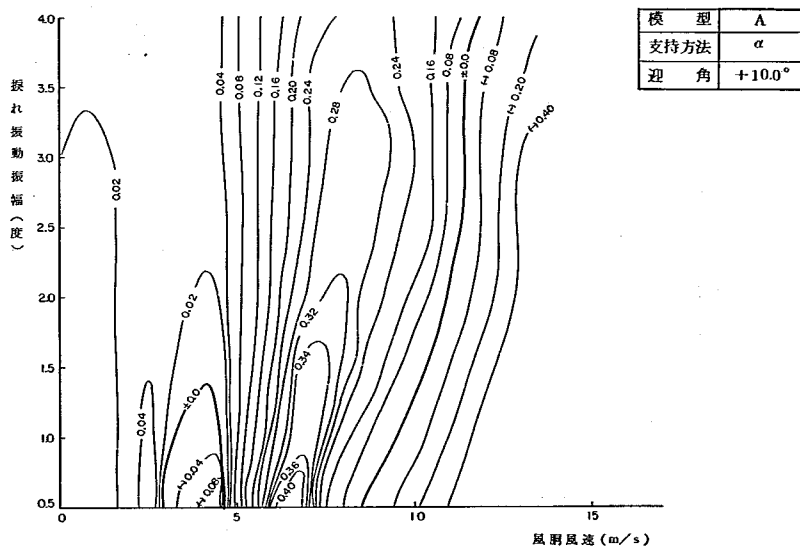
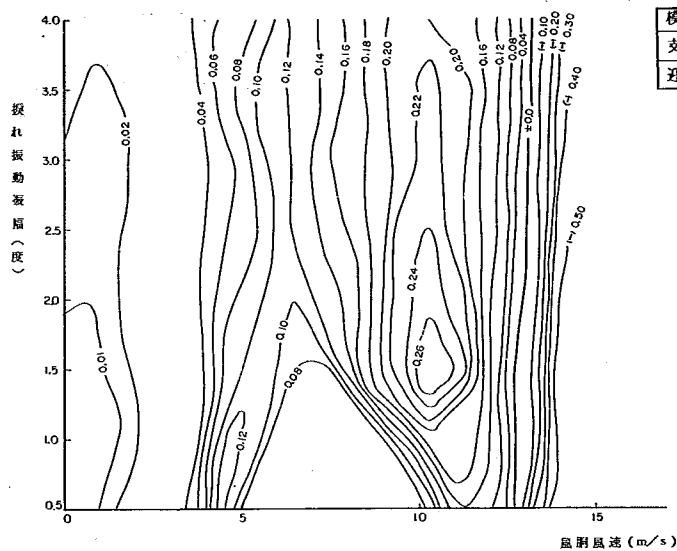
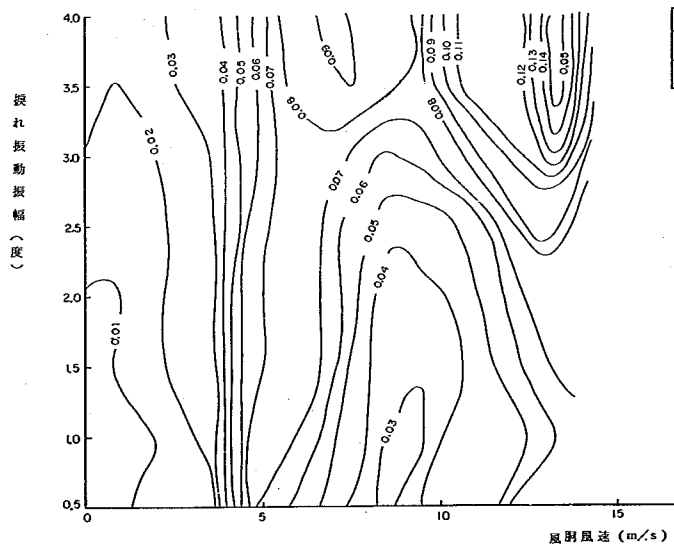


図-7-15



模 型	A
支持方法	α
迎 角	$+7.5^\circ$

図-7-16



模 型	A
支持方法	α
迎 角	$+5.0^\circ$

図-7-17

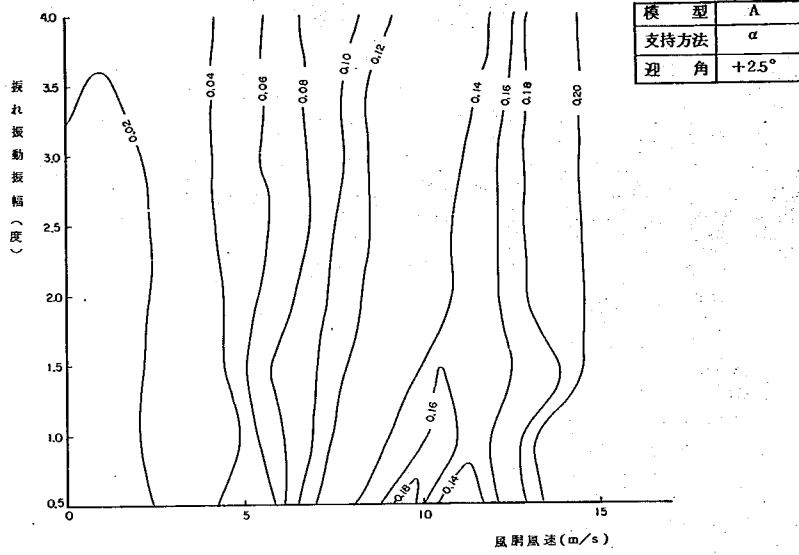


図-7-18

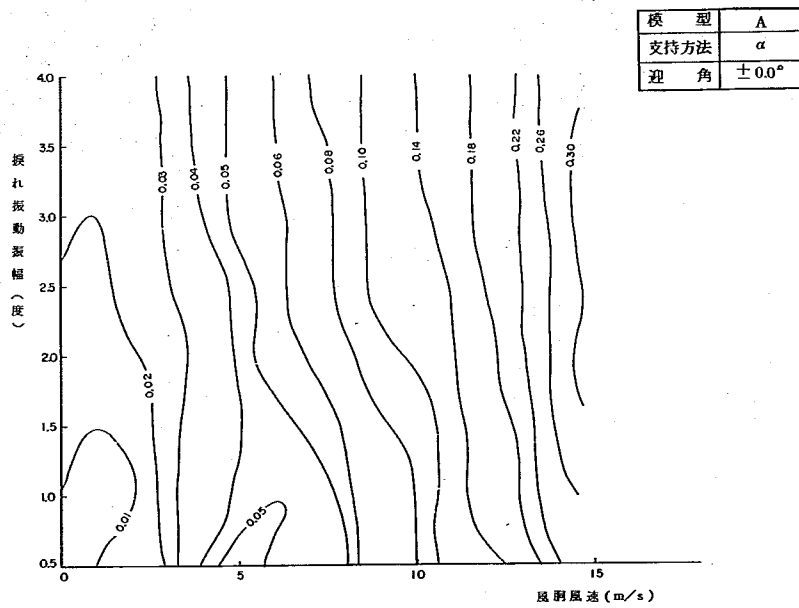
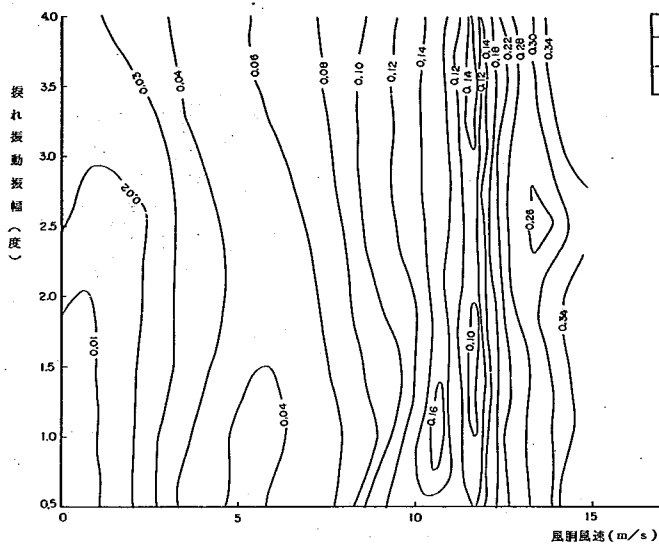
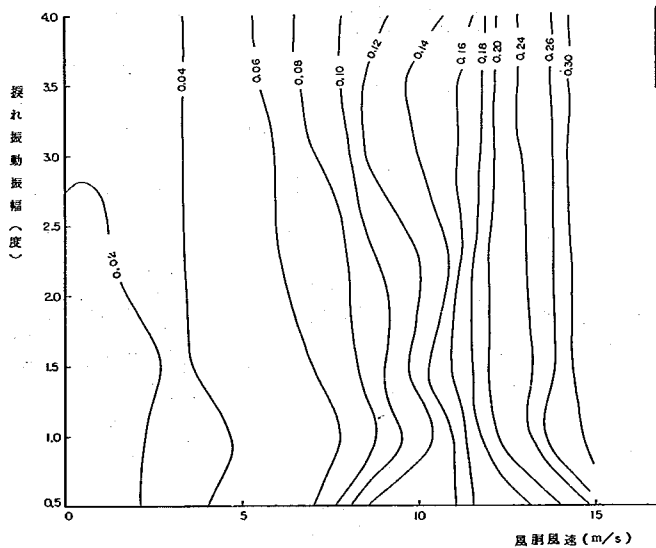


図-7-19



模 型	A
支持方法	α
迎 角	-25°

図-7-20



模 型	A
支持方法	α
迎 角	-5.0°

図-7-21

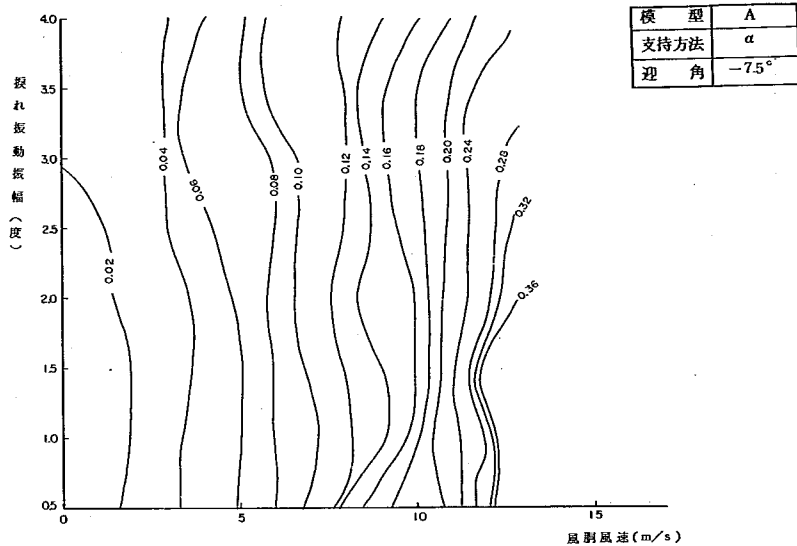


図-7-22

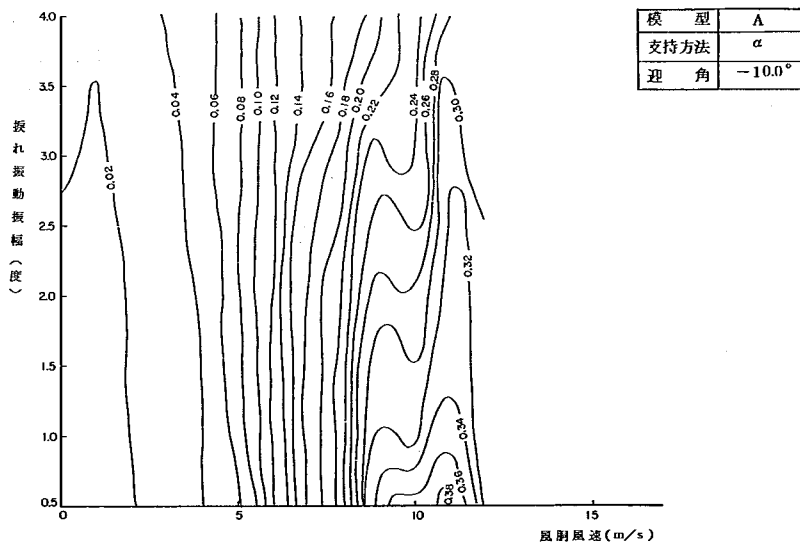
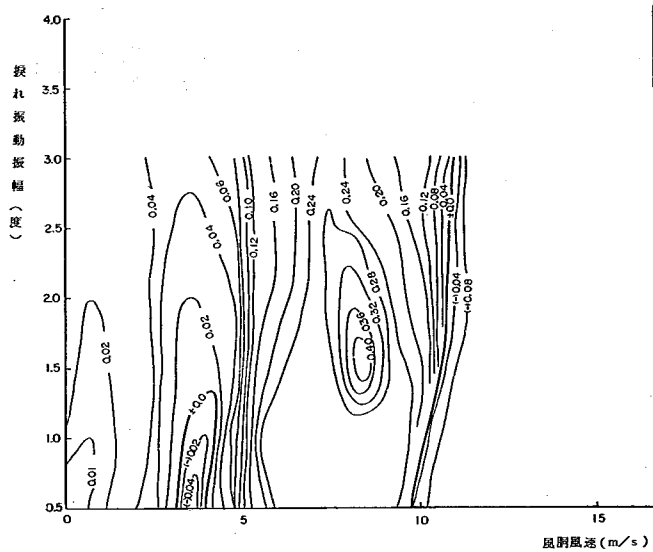
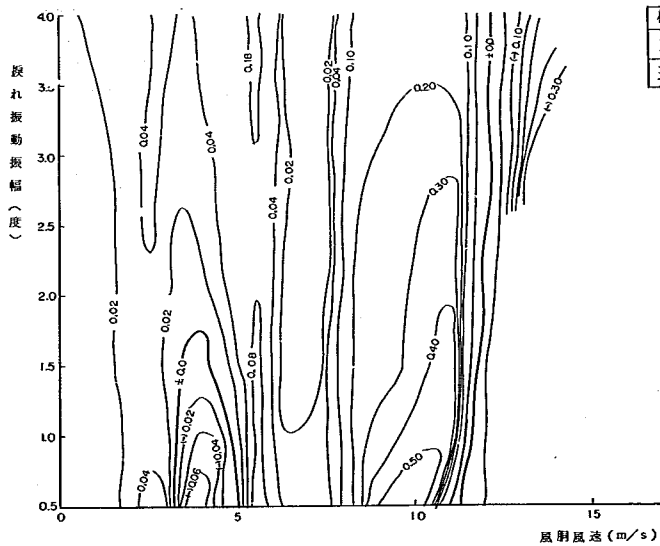


図-7-23



模 型	B
支持方法	h α
迎 角	+10.0°

図-7-24



模 型	B
支持方法	h α
迎 角	+75°

図-7-25

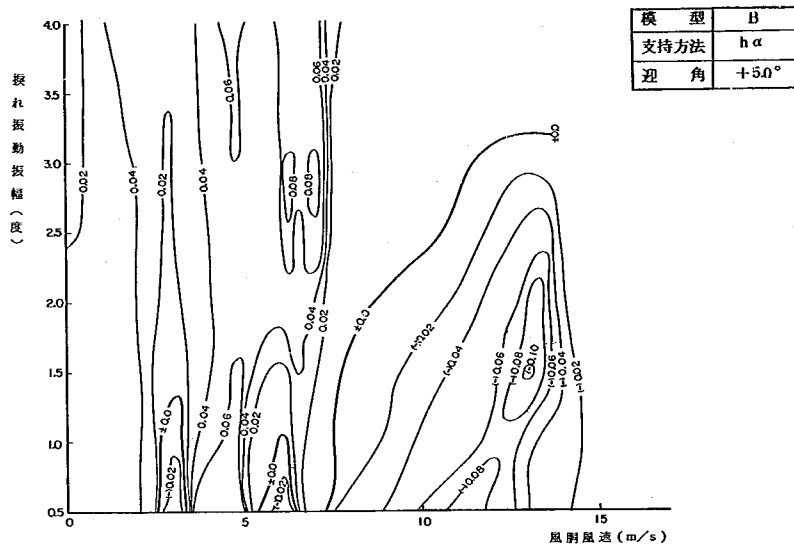


図-7-26

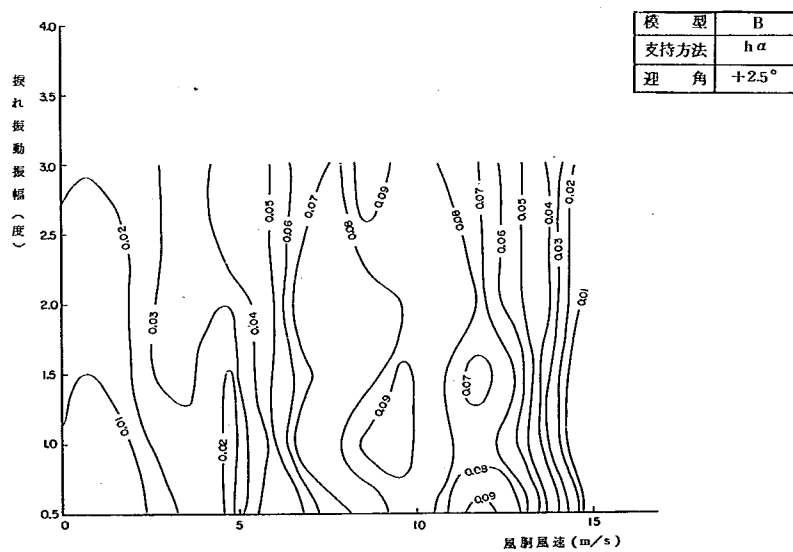


図-7-27



図-7-28

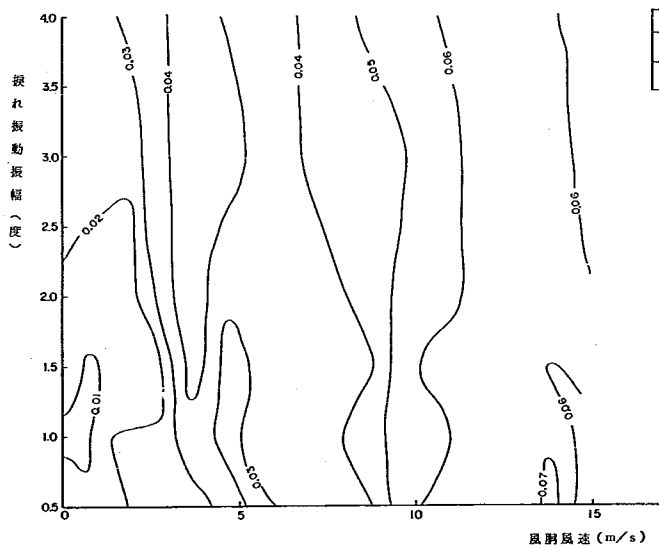


図-7-29

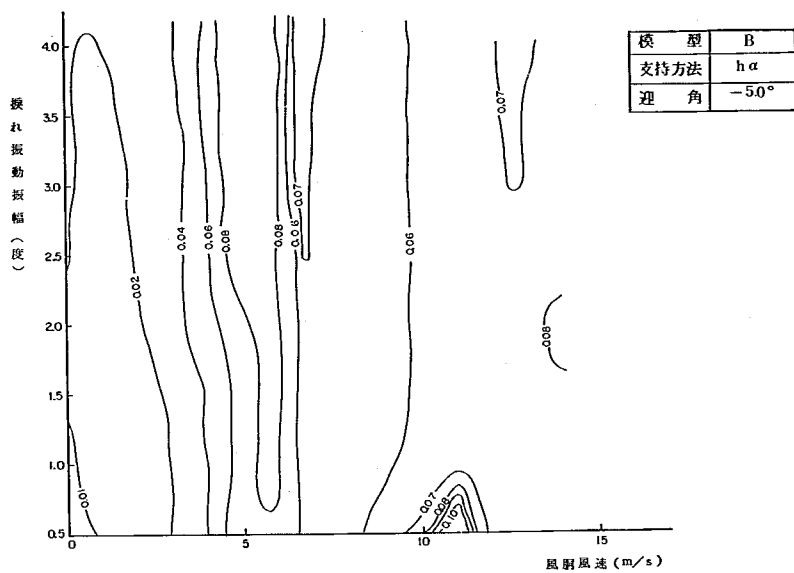


図-7-30

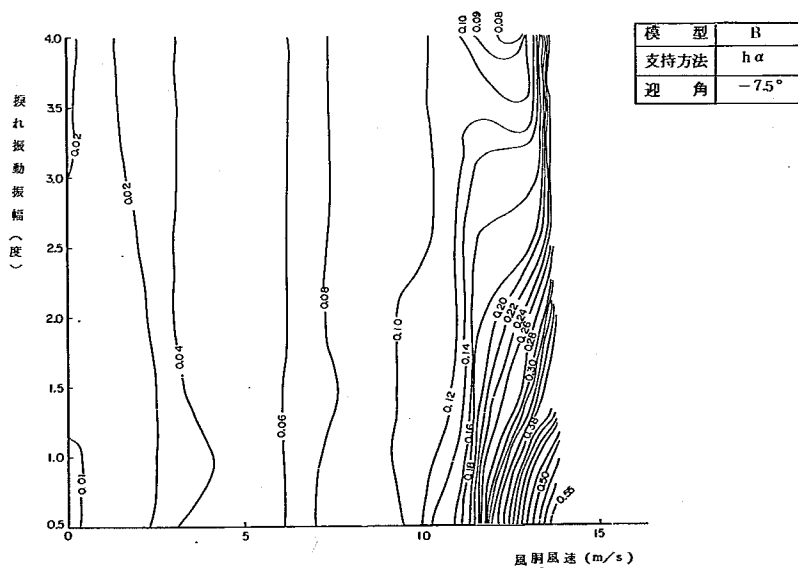
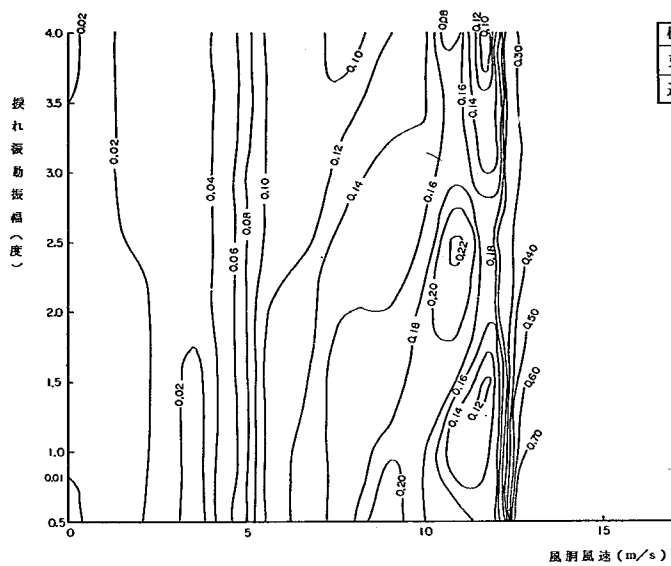
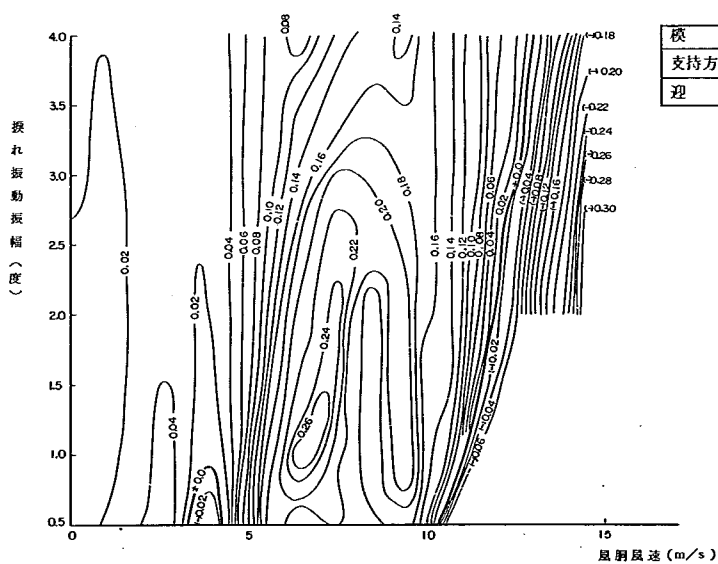


図-7-31



模 型	B
支持方法	$h\alpha$
迎 角	-100°

図-7-32



模 型	B
支持方法	α
迎 角	$+10^\circ$

図-7-33

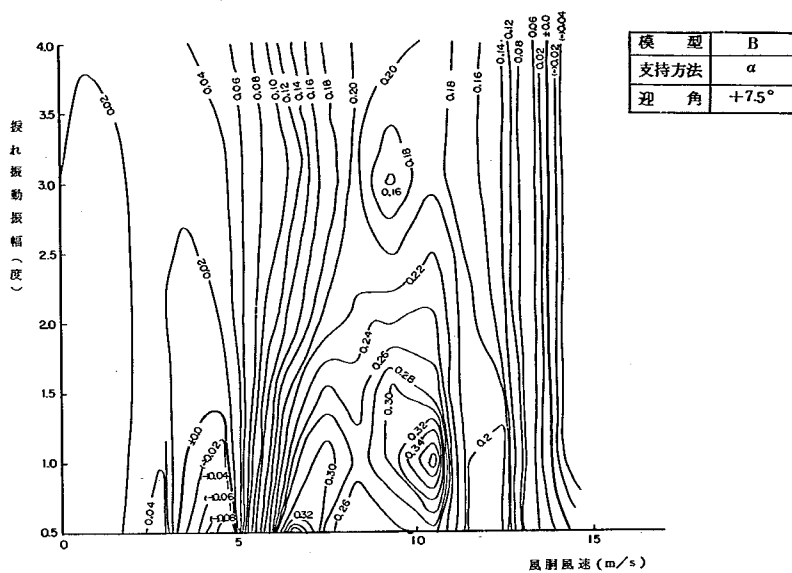


図-7-34

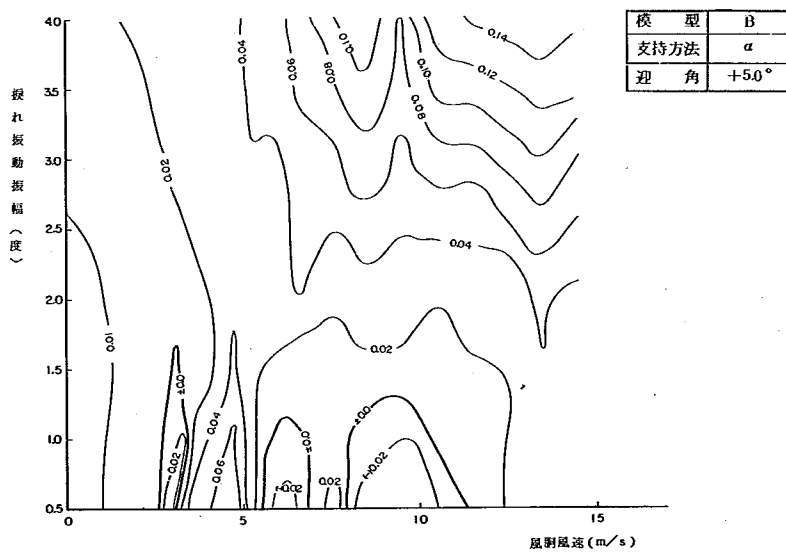


図-7-35

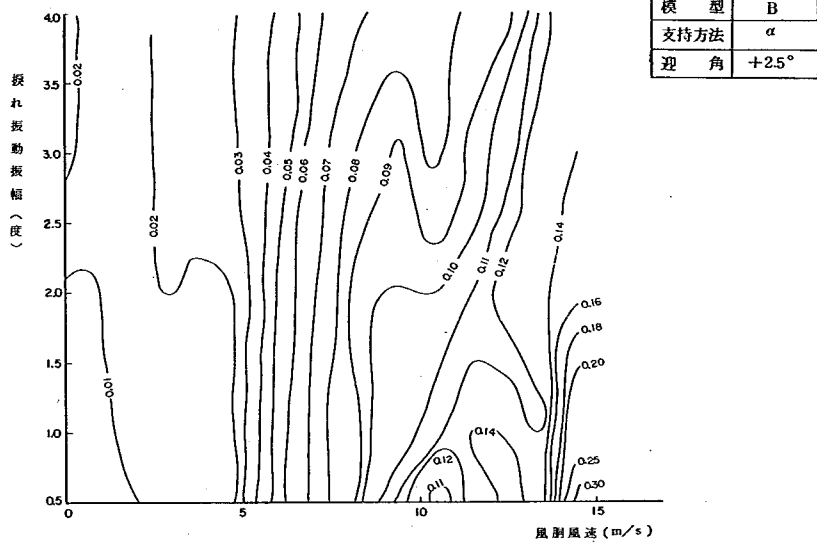


図-7-36

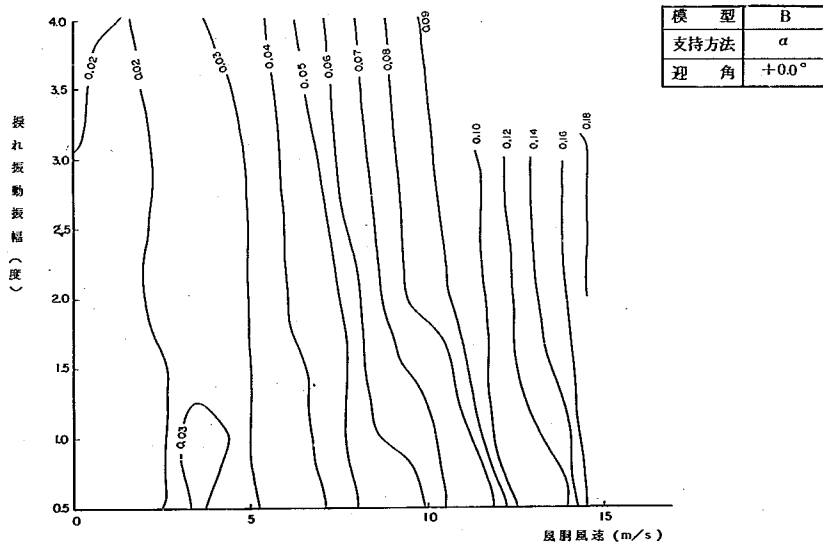


図-7-37

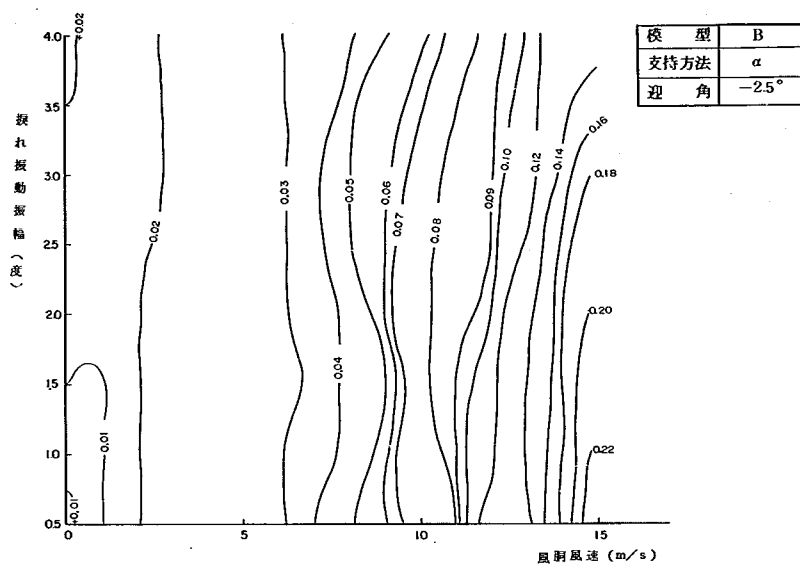


図-7-38

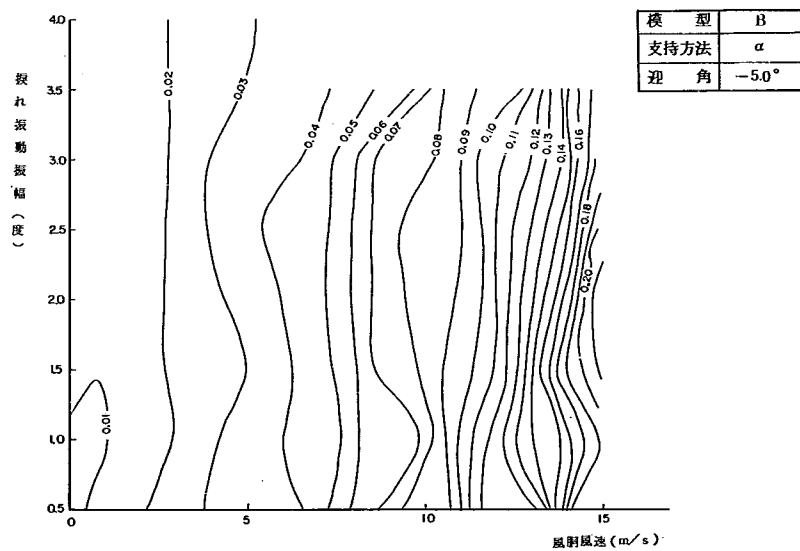


図-7-39

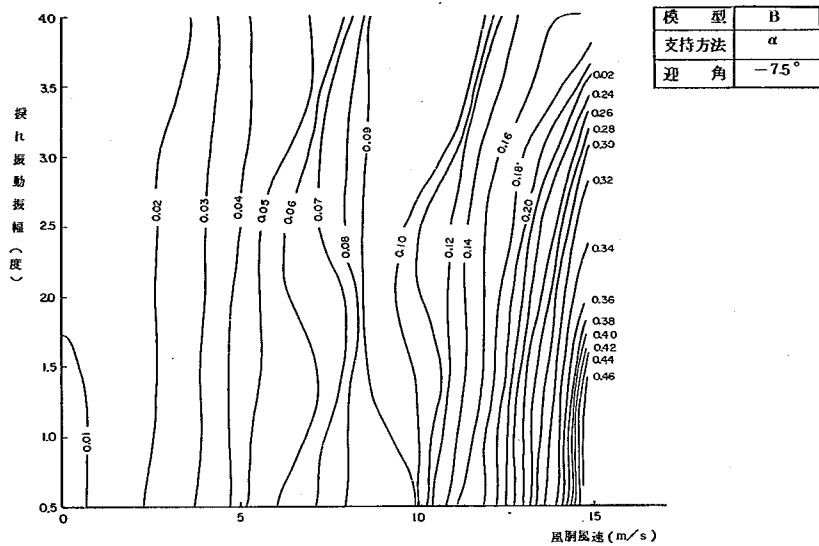


图-7-40

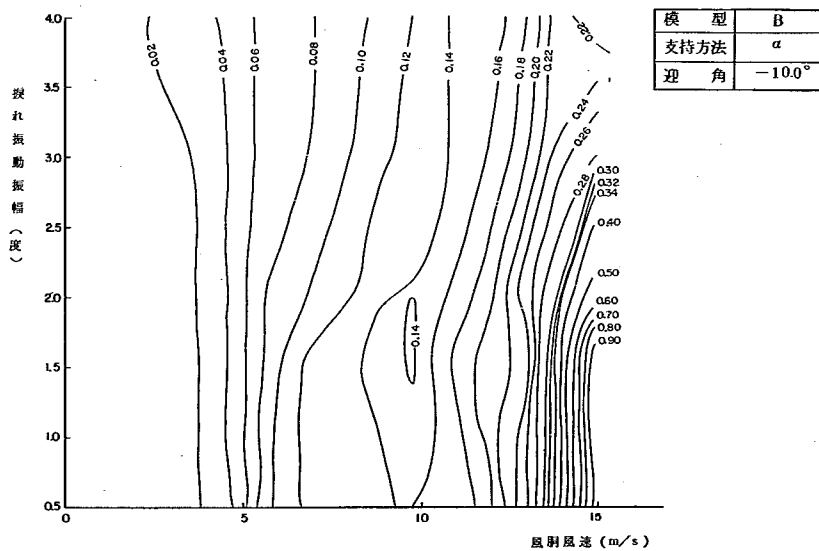
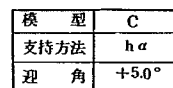


图-7-41



- 55 -

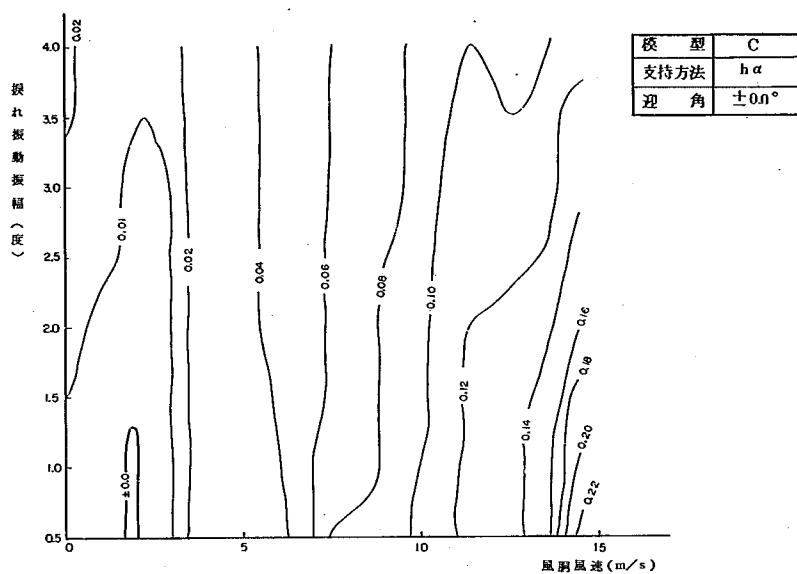


図-7-46

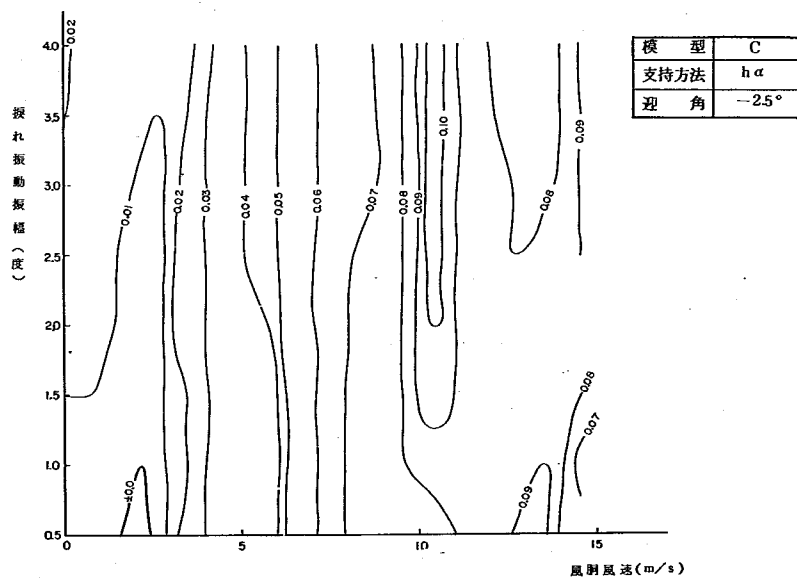


図-7-47

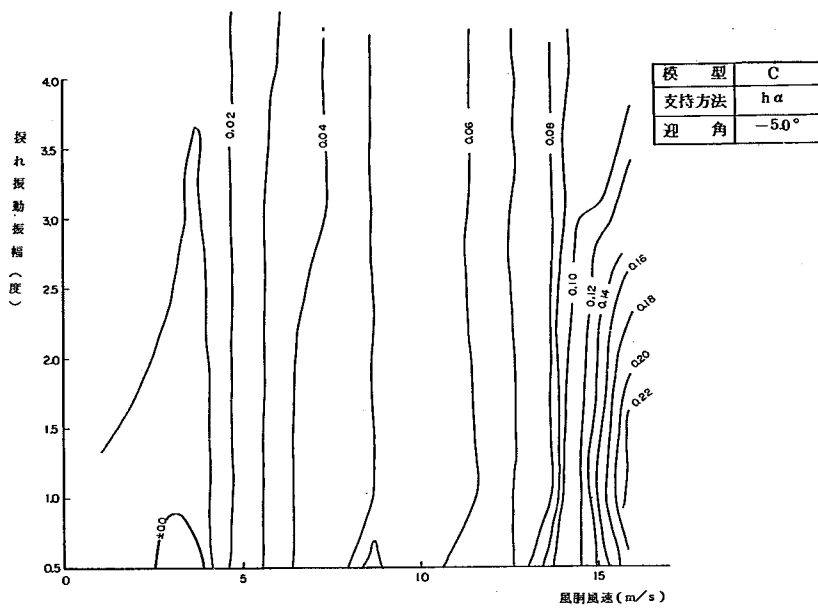


図-7-48

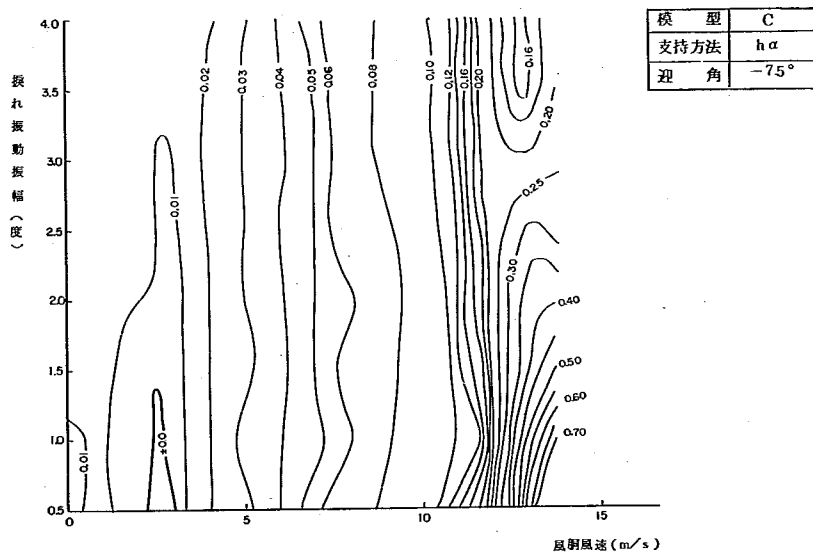


図-7-49

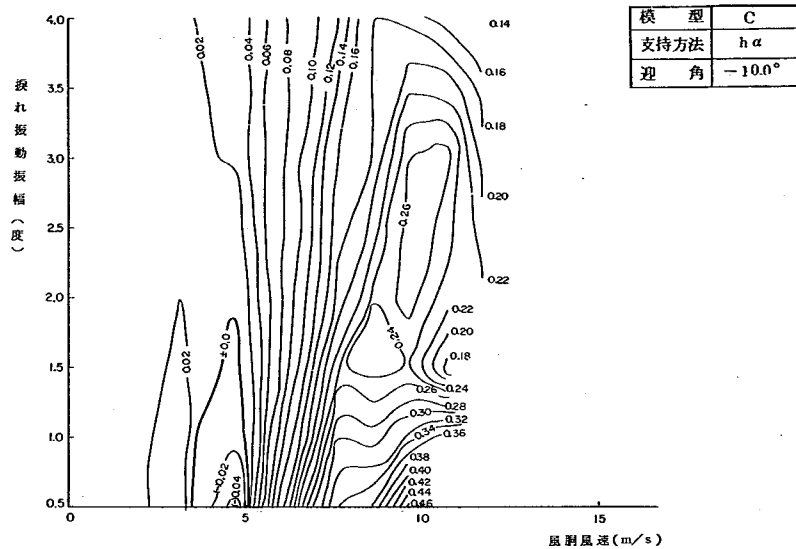


図-7-50

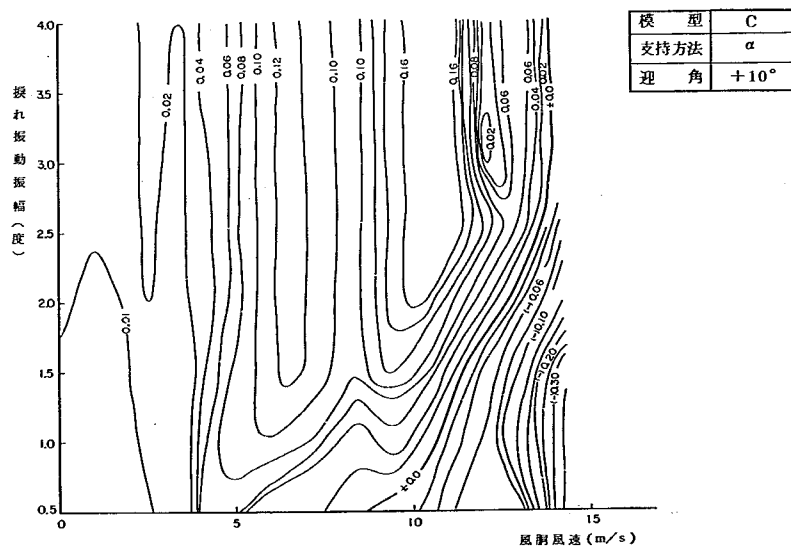
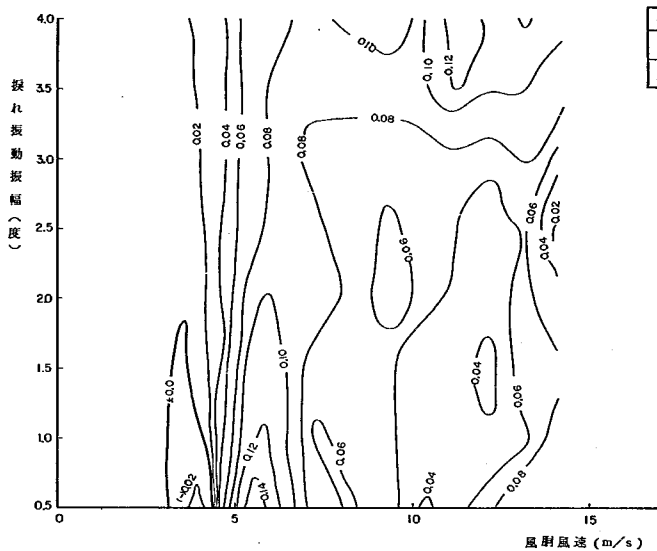
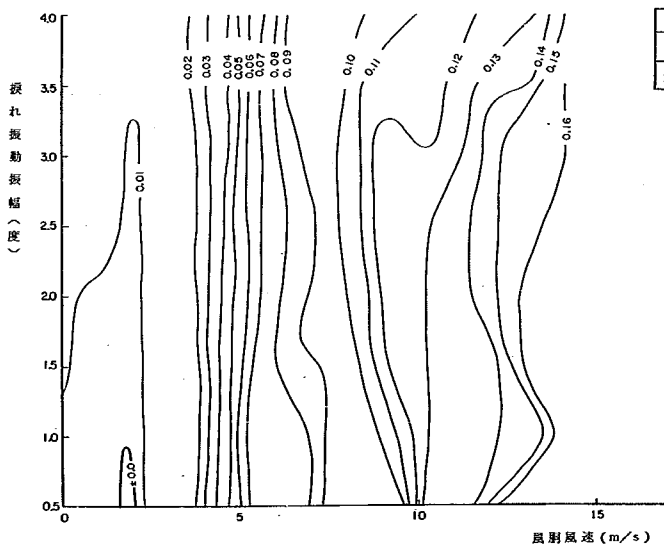


図-7-51



模 型	C
支持方法	α
迎 角	+7.5°

図-7-52



模 型	C
支持方法	α
迎 角	+5.0°

図-7-53

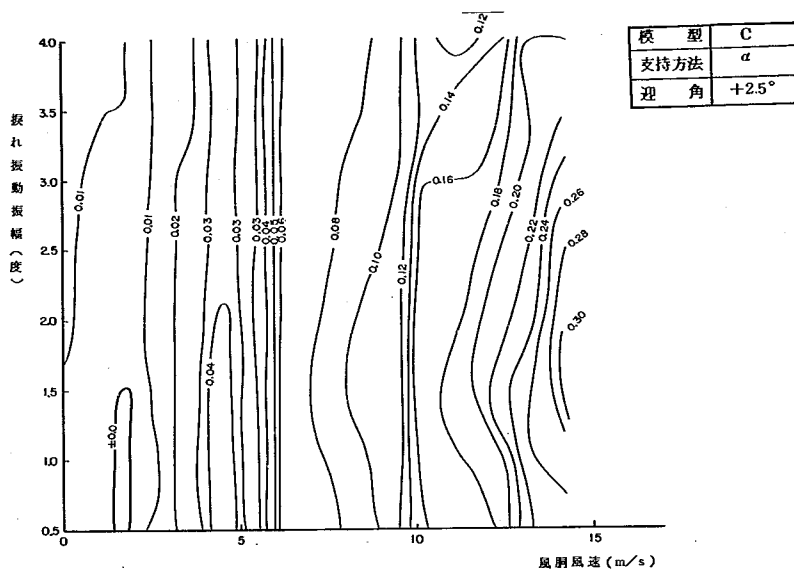


図-7-54

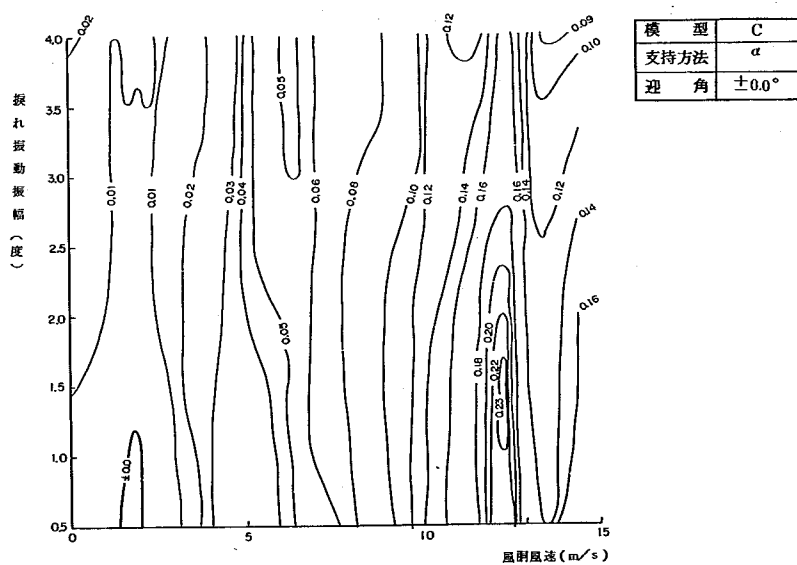
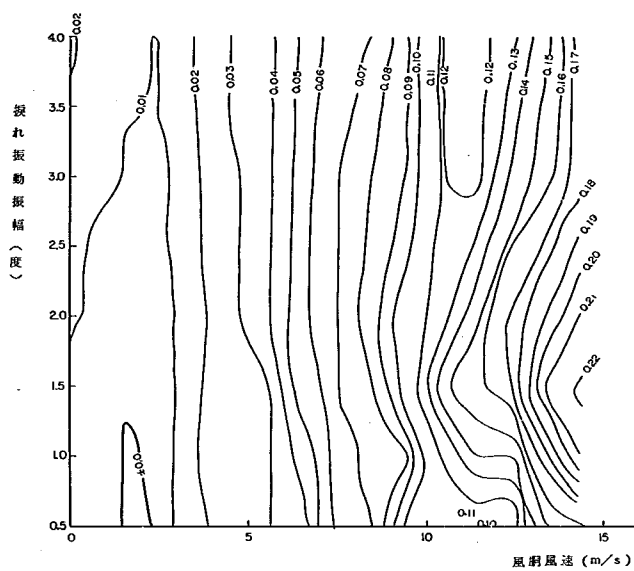
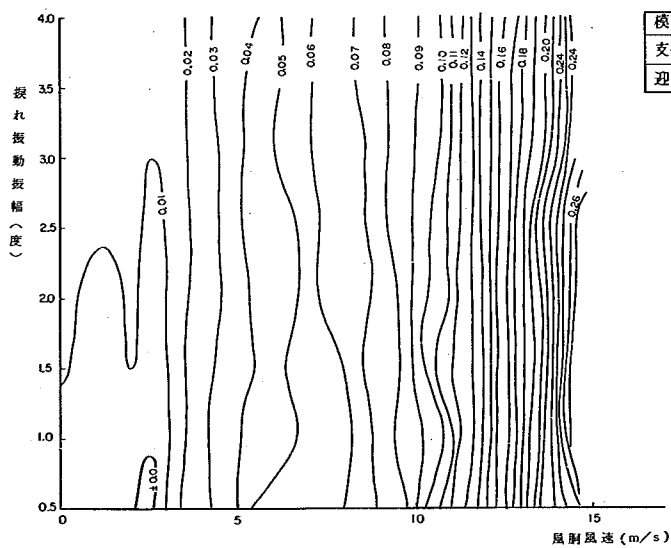


図-7-55



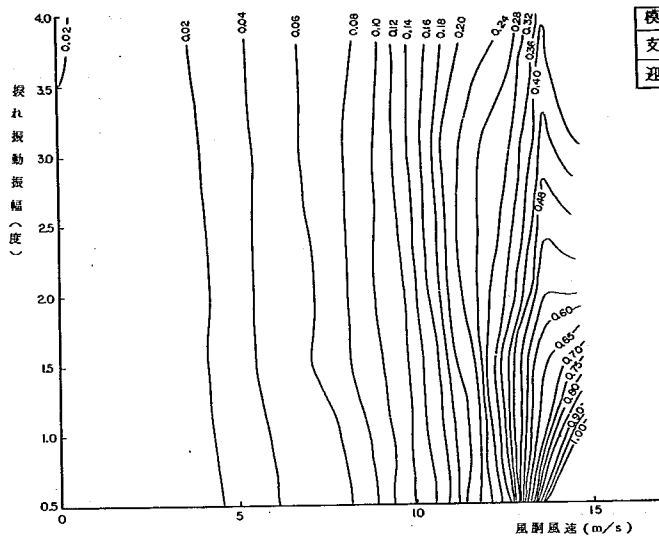
模 型	C
支持方法	α
迎 角	-2.5°

図-7-56



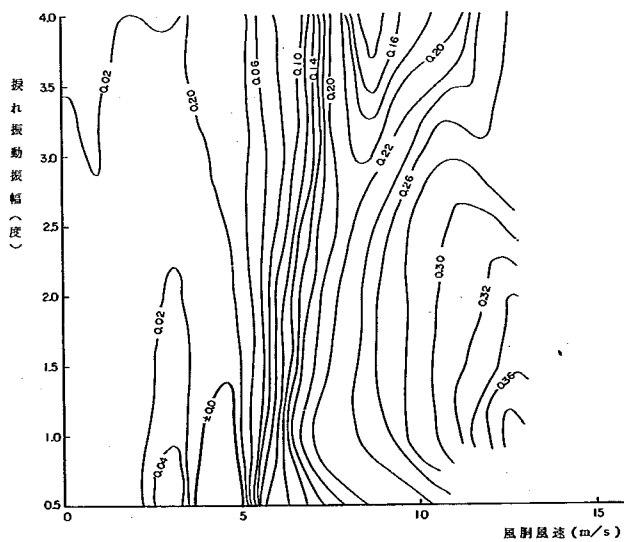
模 型	C
支持方法	α
迎 角	-5.0°

図-7-57



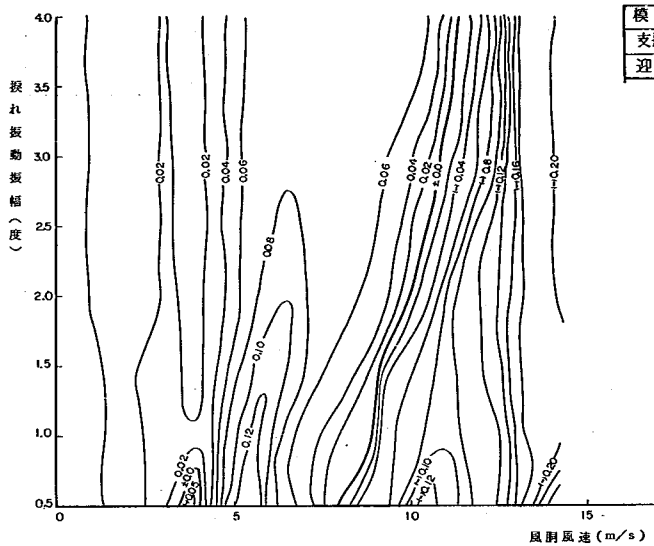
模 型	C
支持方法	α
迎 角	-7.5°

図-7-58



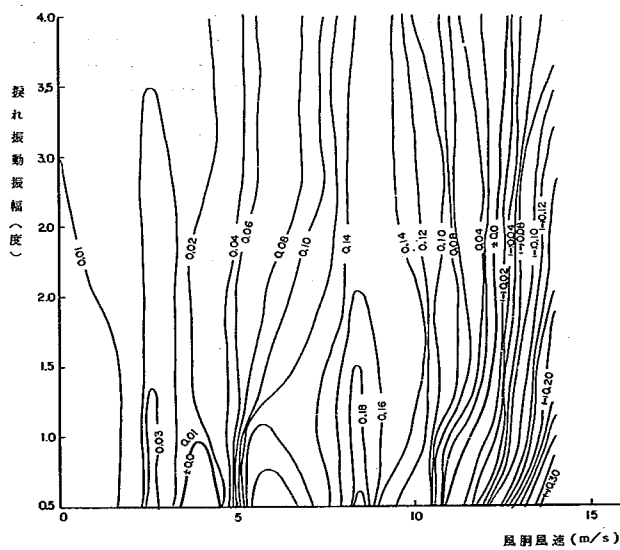
模 型	C
支持方法	α
迎 角	-10.0°

図-7-59



模 型	D
支持方法	h α
迎 角	+10.0°

図-7-60



模 型	D
支持方法	h α
迎 角	+7.5°

図-7-61

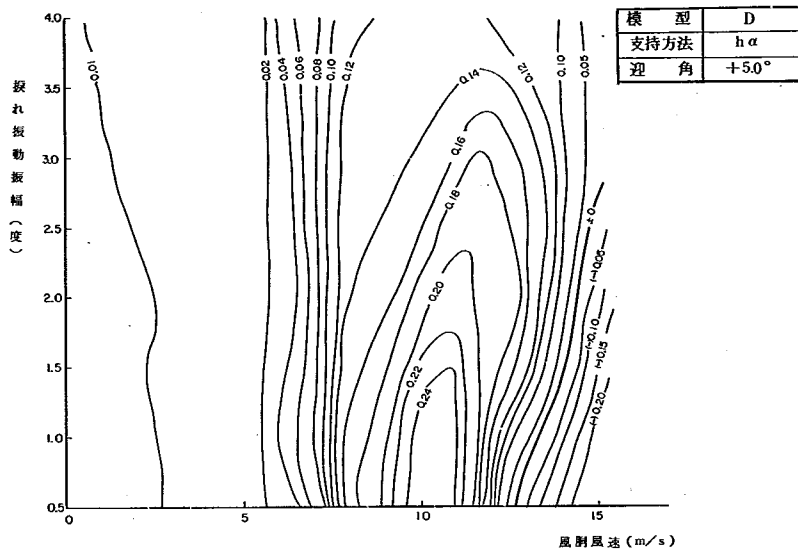


図-7-62

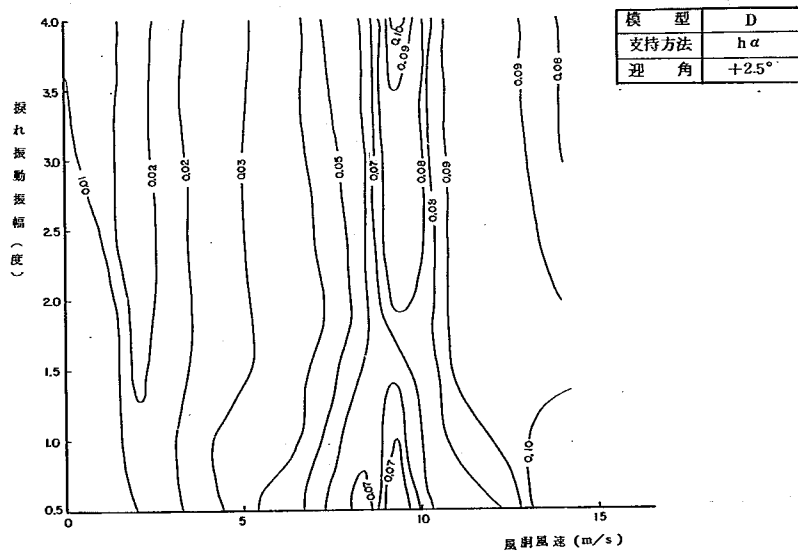


図-7-63

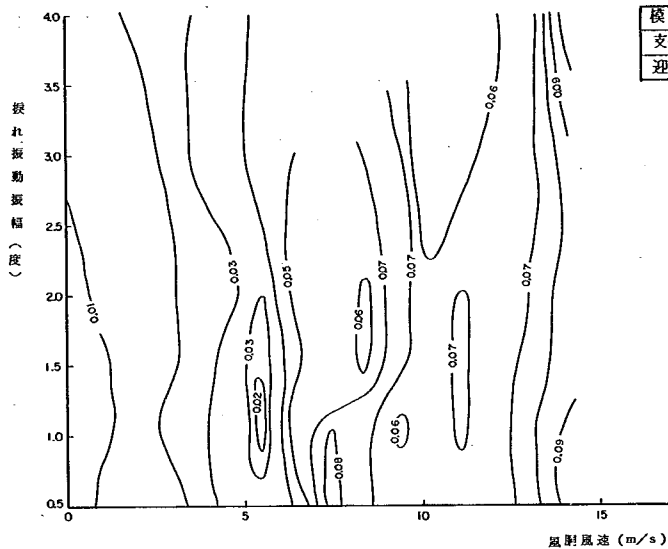


図-7-64

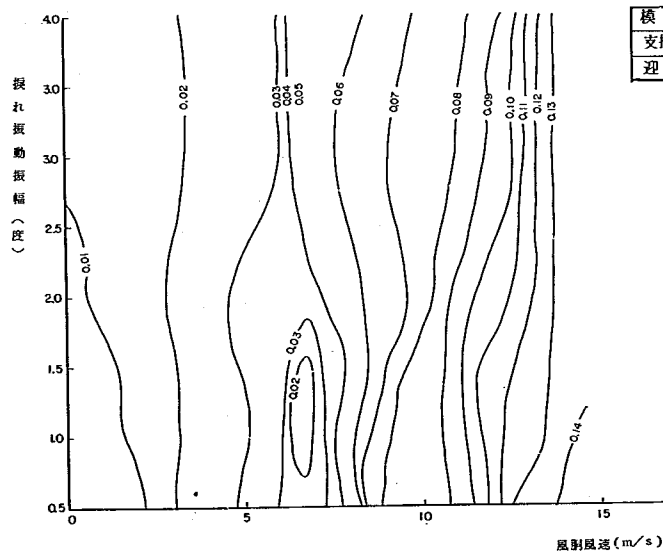


図-7-65

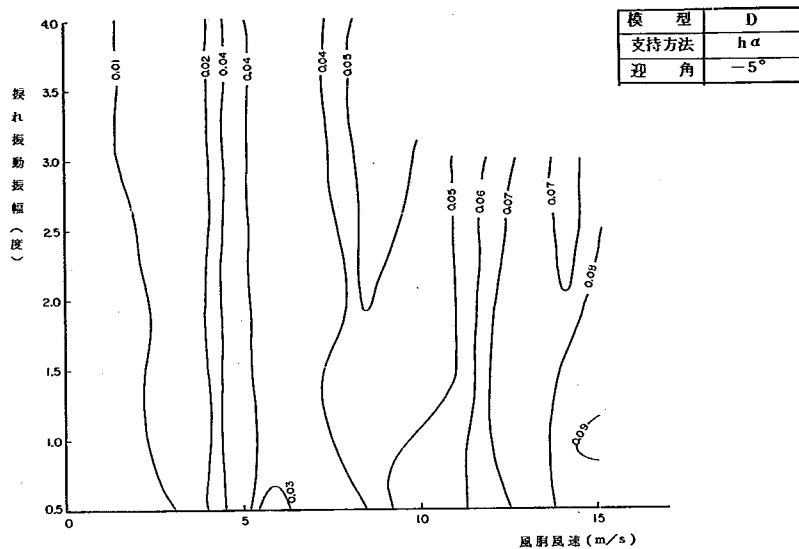


図-7-66

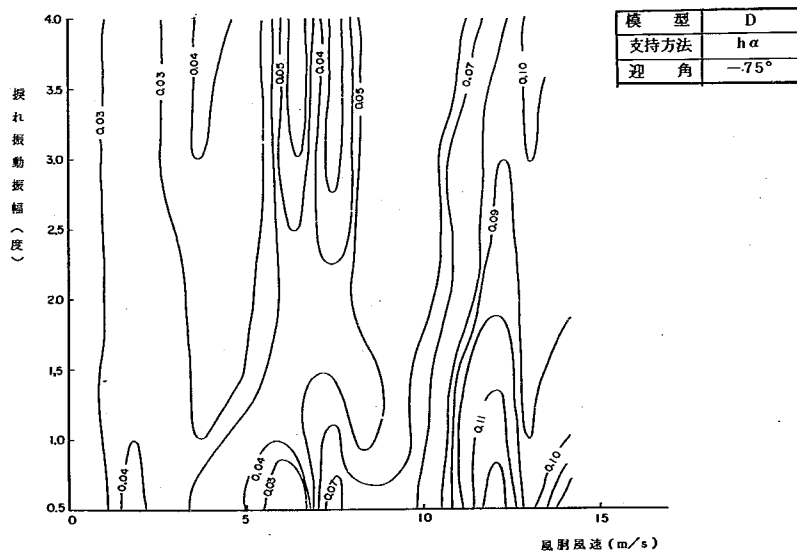
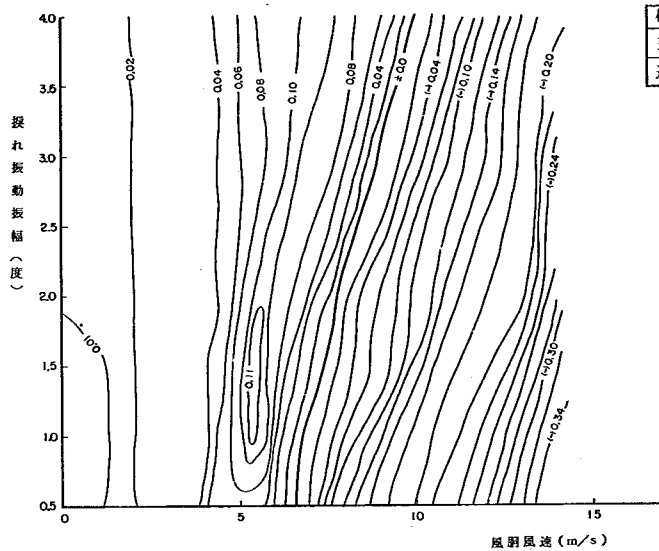
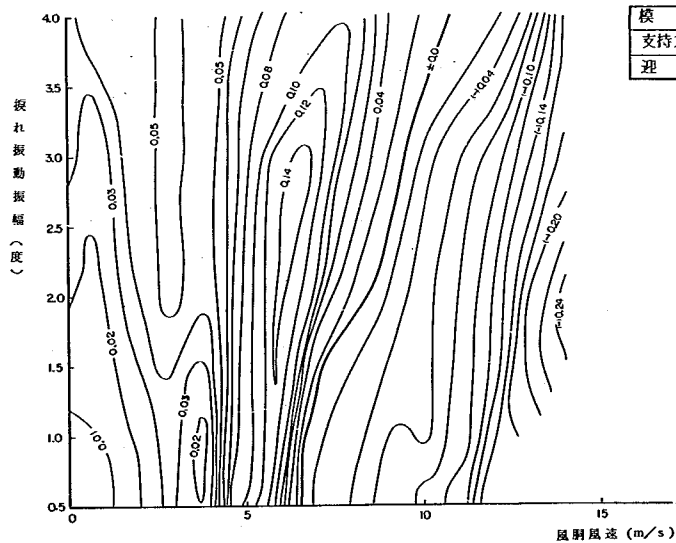


図-7-67



模 型	D
支持方法	h α
迎 角	-10.0°

図-7-68



模 型	D
支持方法	α
迎 角	+10°

図-7-69

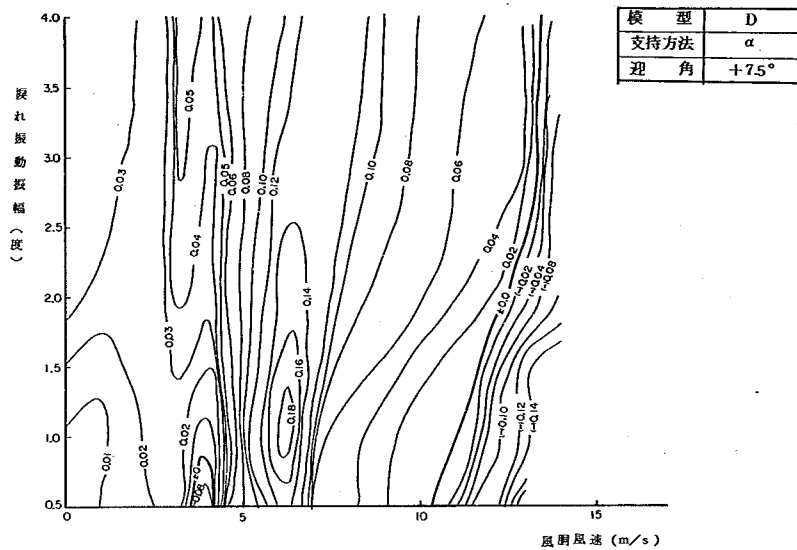


图-7-70

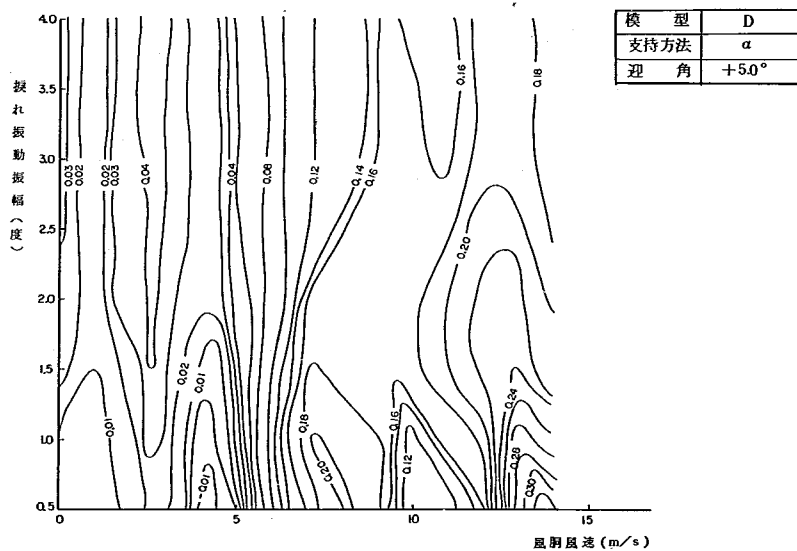


图-7-71

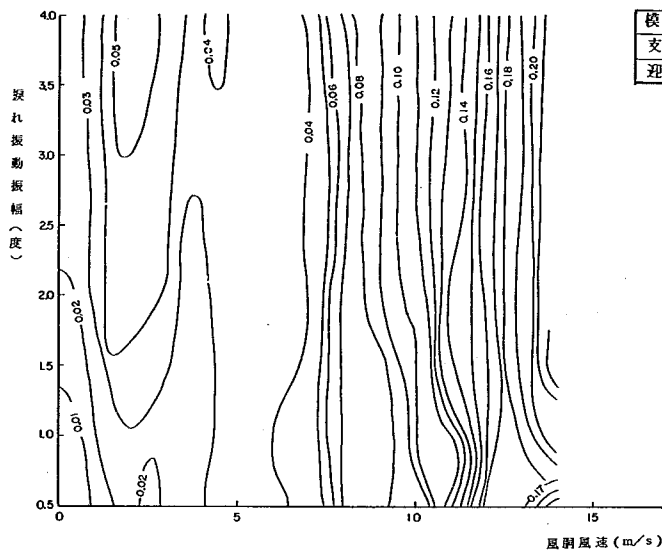


図-7-72

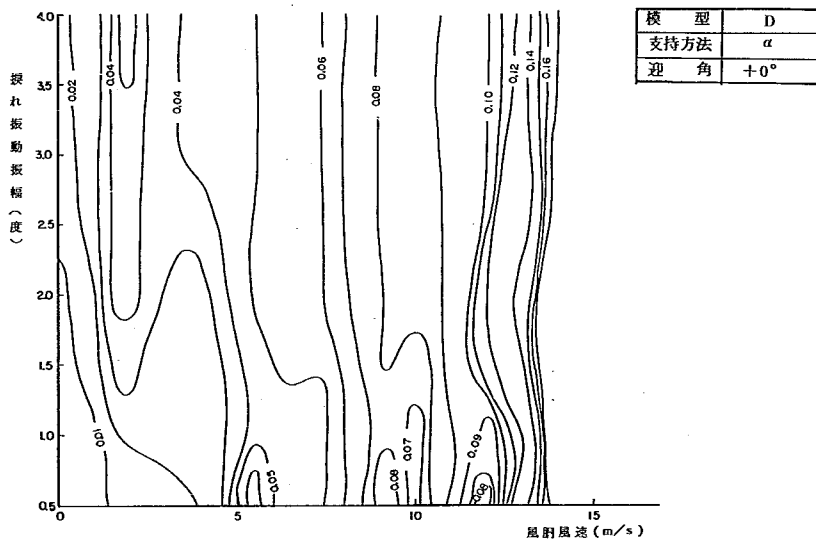


図-7-73

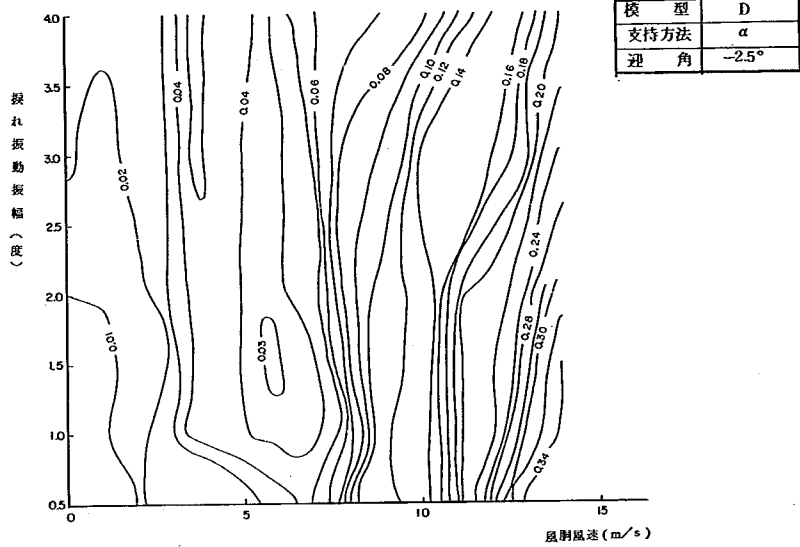


図-7-74

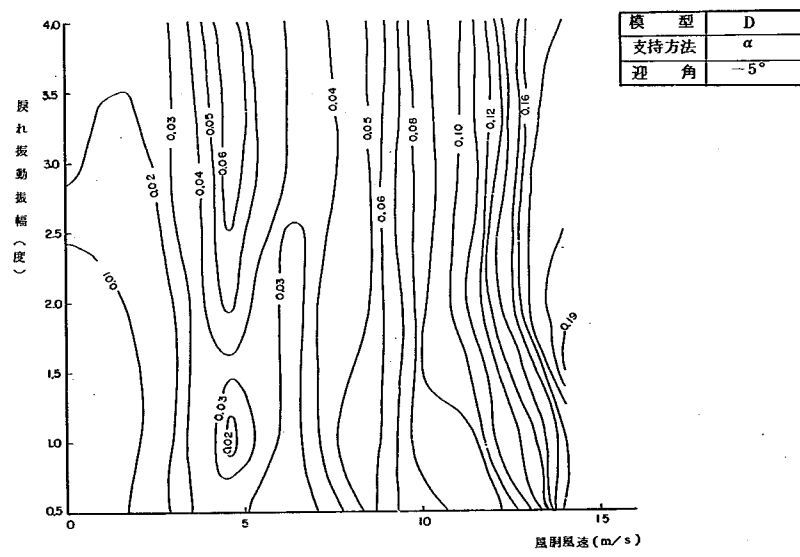


図-7-75

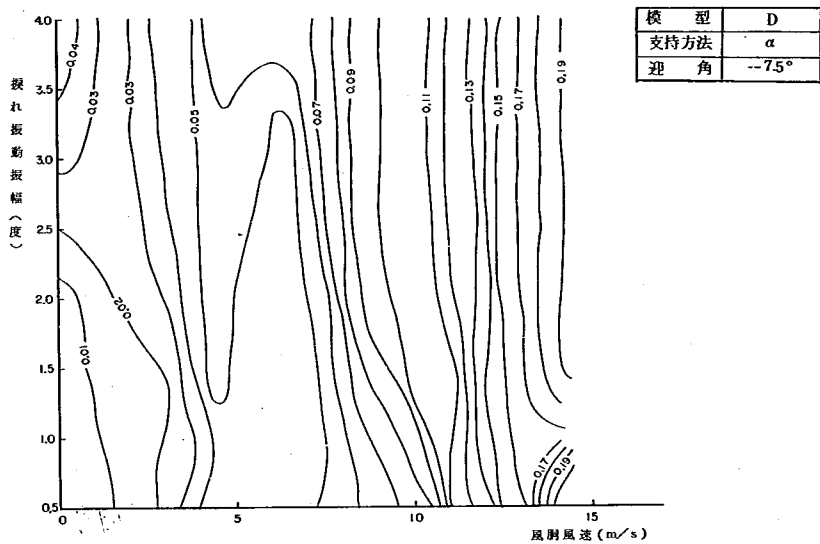


図-7-76

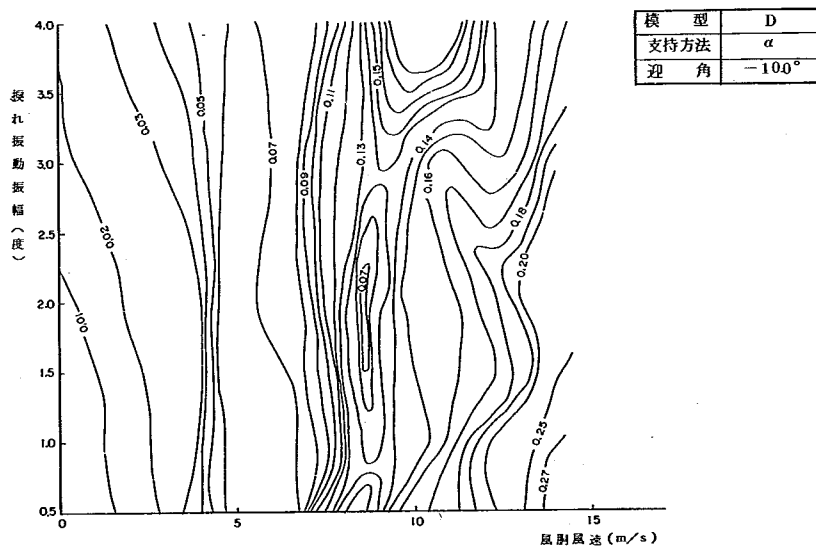


図-7-77

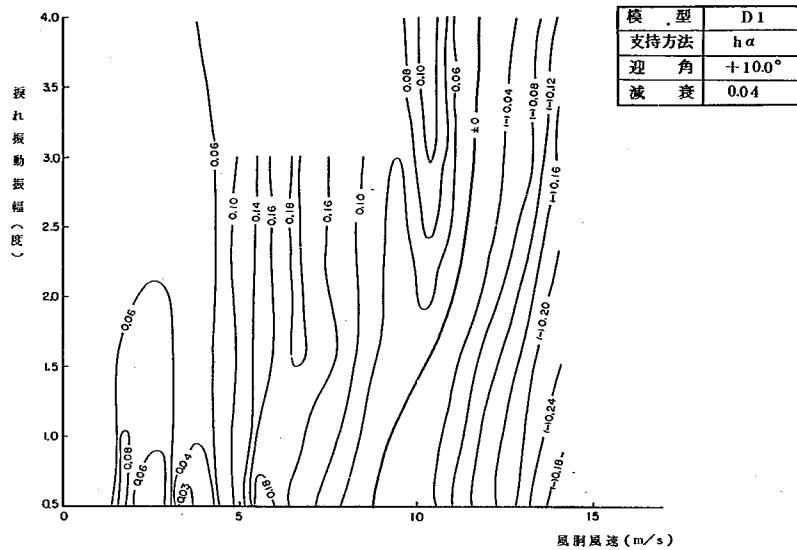


図-7-78

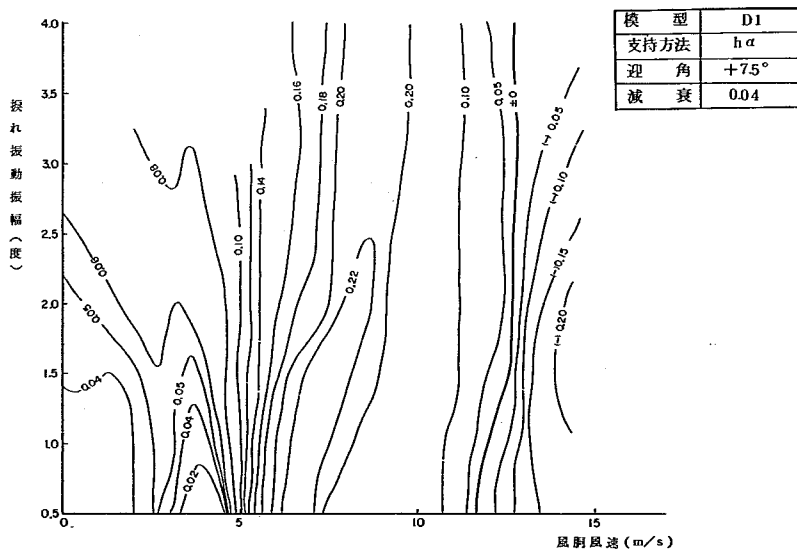
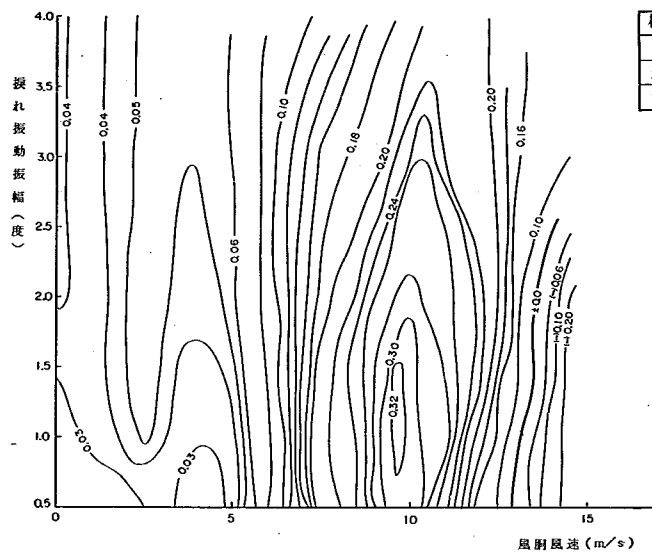
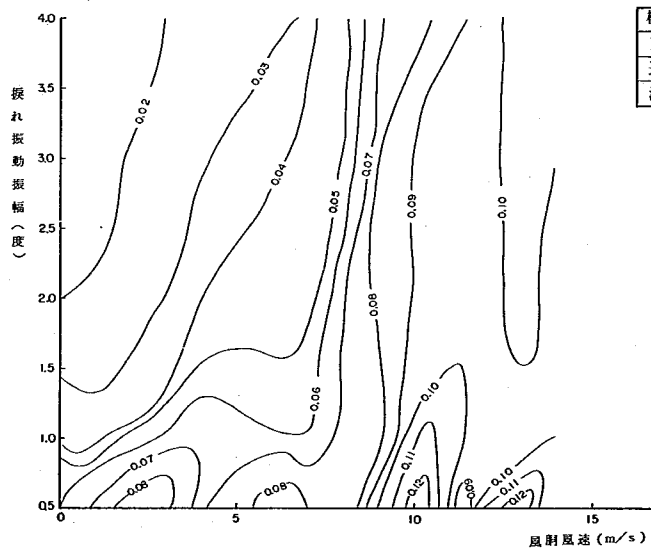


図-7-79



模 型	D1
支持方法	$h\alpha$
迎 角	$+5^\circ$
減 衰	0.04

図-7-80



模 型	D1
支持方法	$h\alpha$
迎 角	$+2.5^\circ$
減 衰	0.04

図-7-81

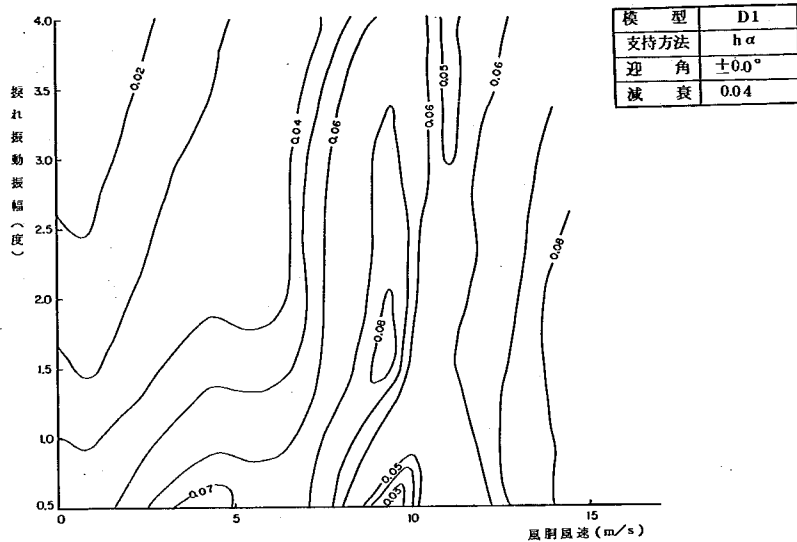


図-7-82

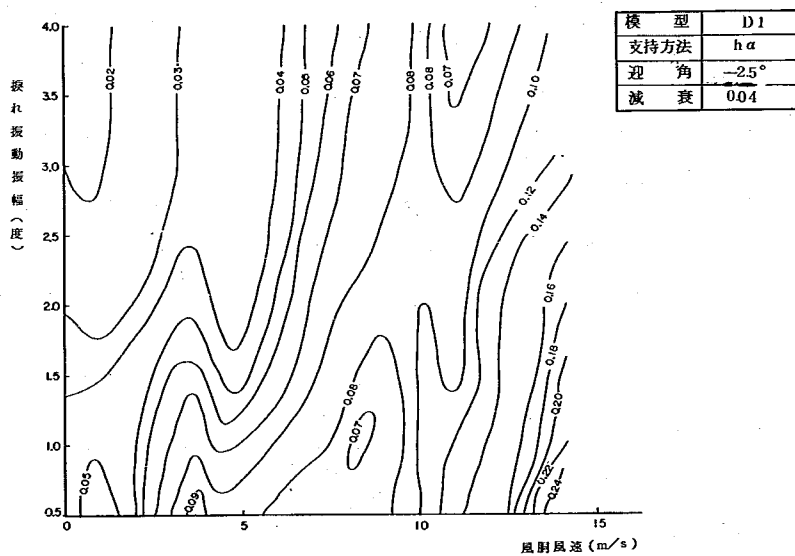


図-7-83

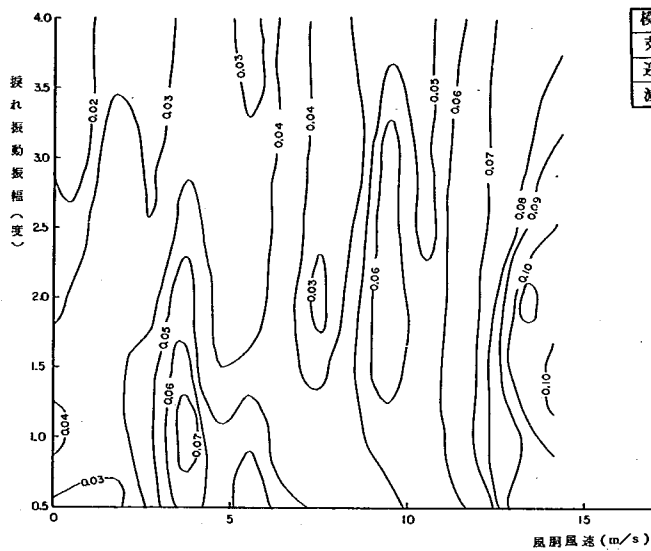


図-7-84

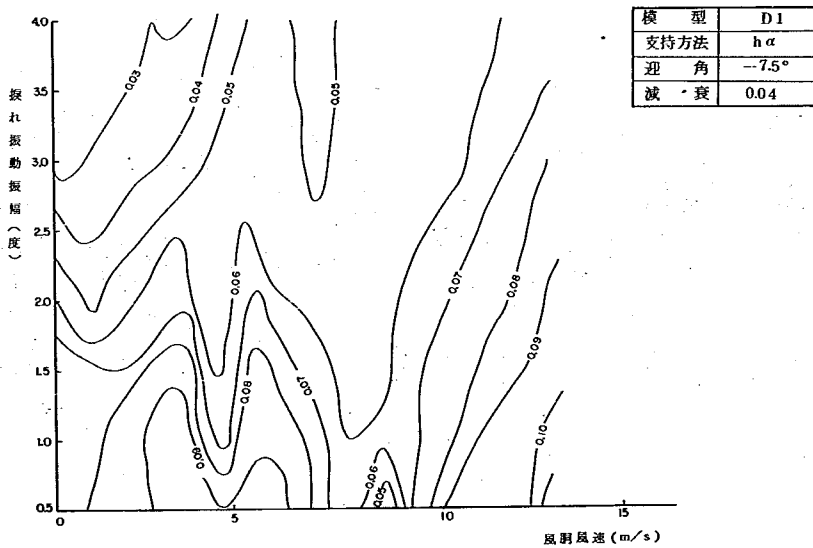


図-7-85

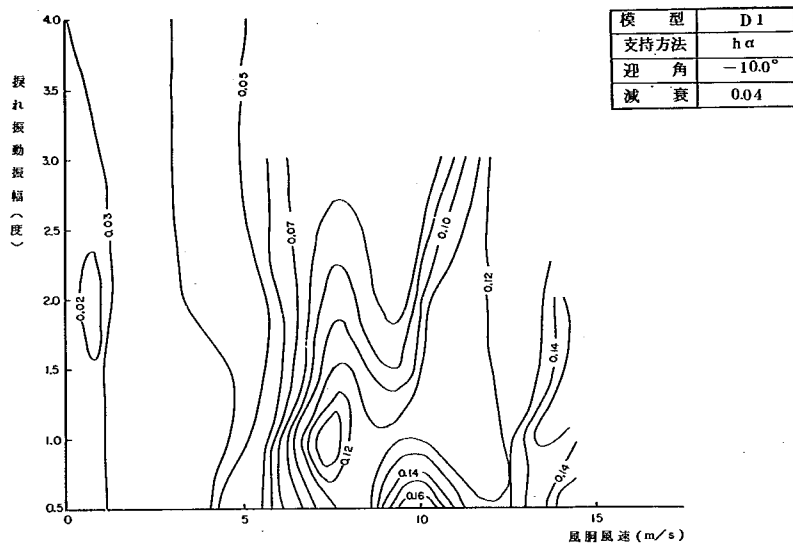


図-7-86

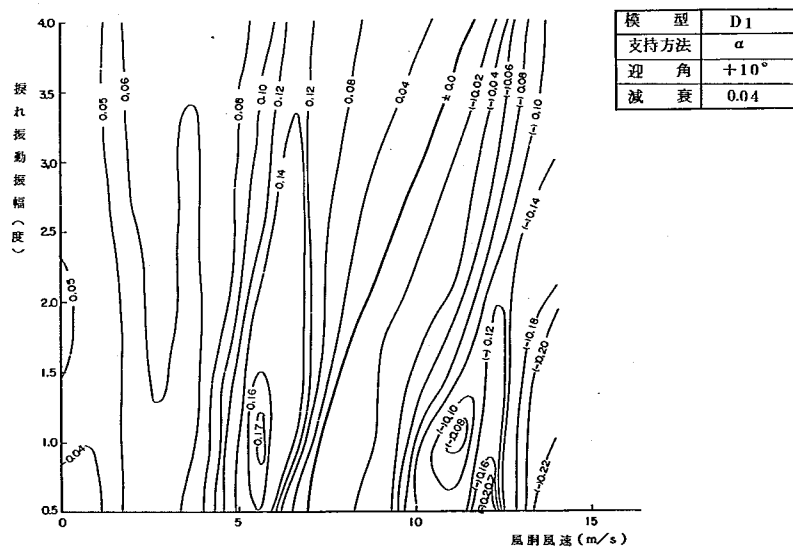
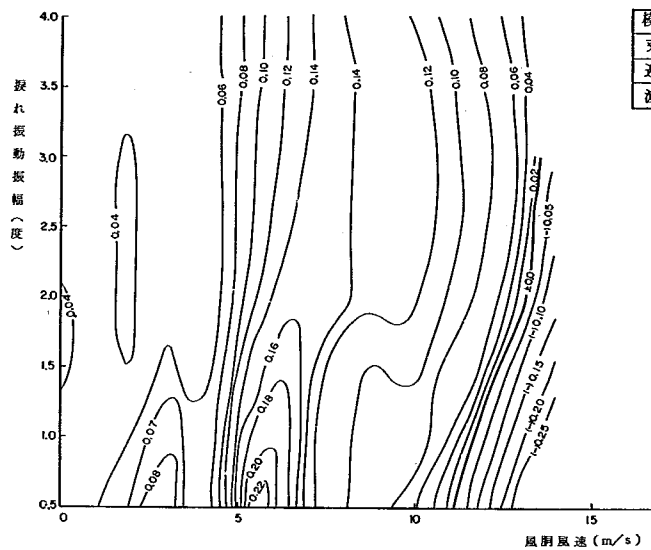
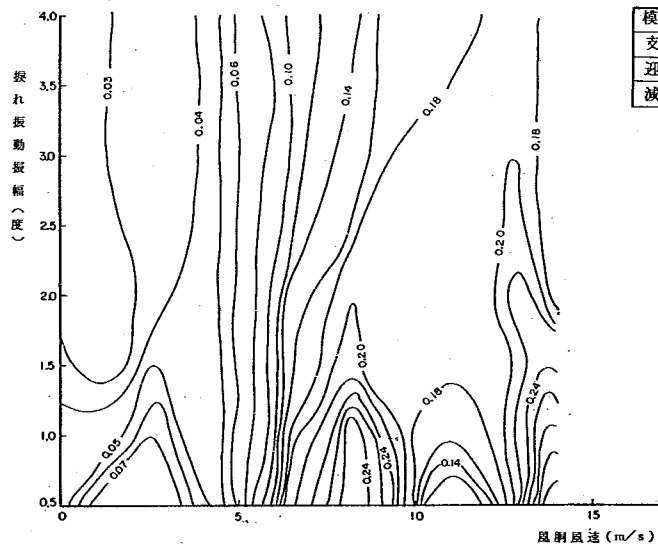


図-7-87



模 型	D1
支持方法	h a
迎 角	+7.5°
減 衰	0.04

図-7-88



模 型	D1
支持方法	a
迎 角	+5.0°
減 衰	0.04

図-7-89

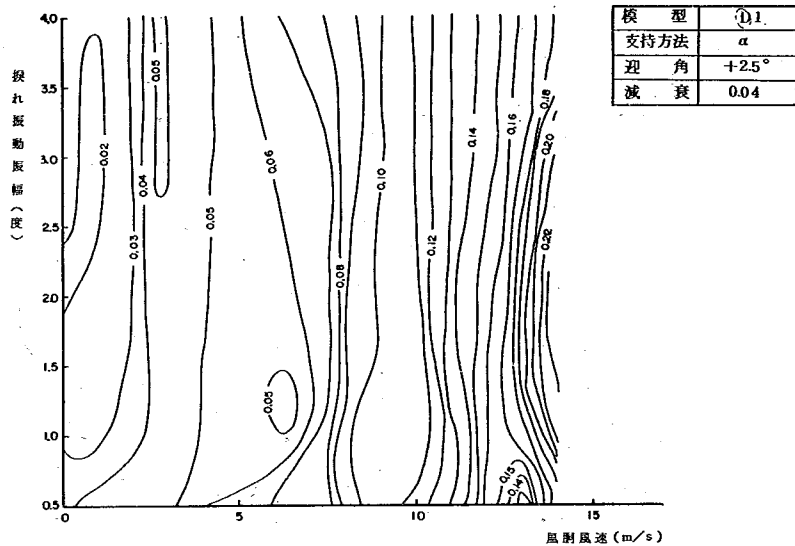


図-7-90

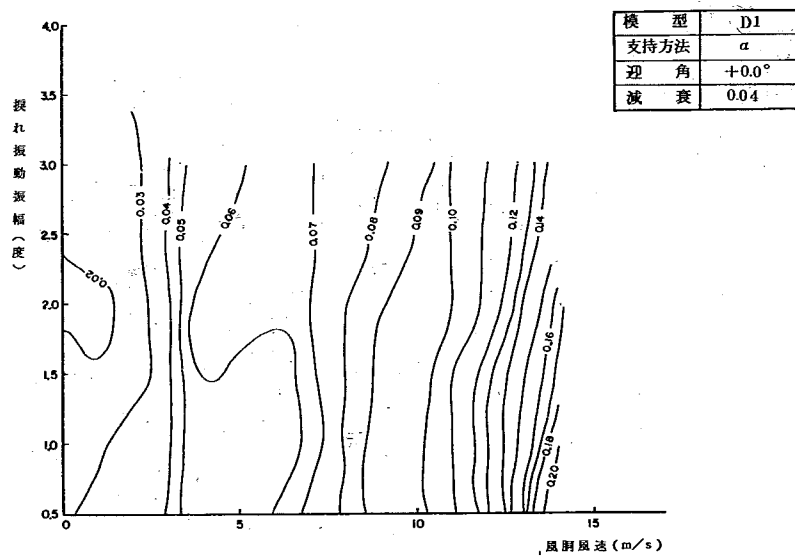


図-7-91

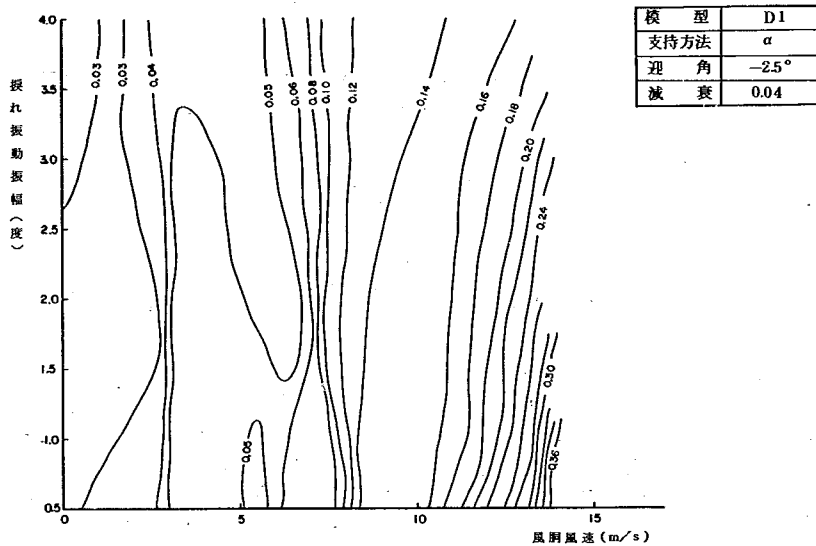
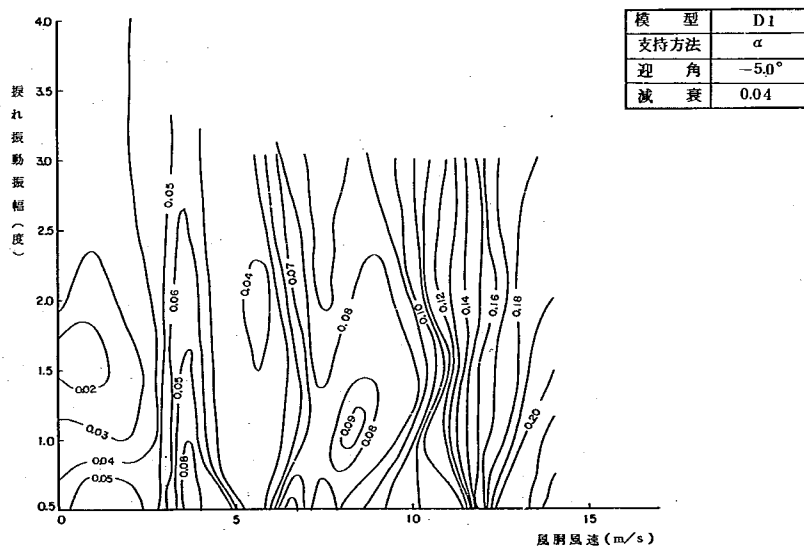


図-7-92



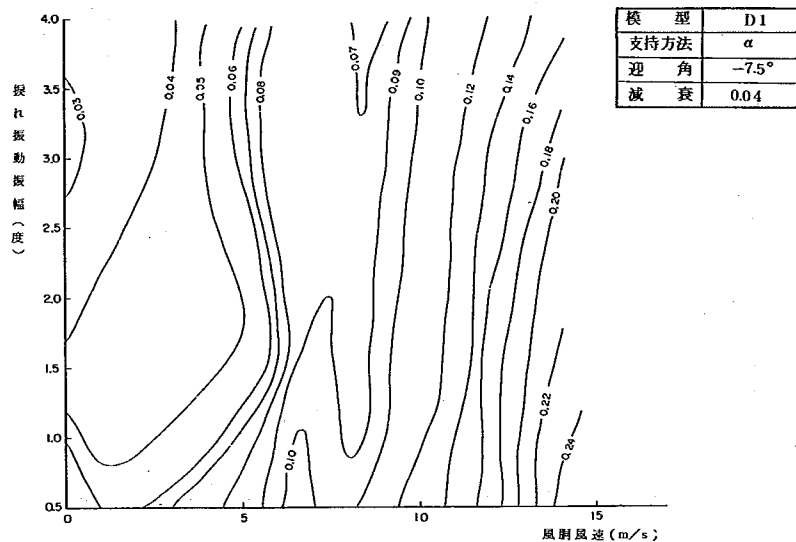


図-7-94

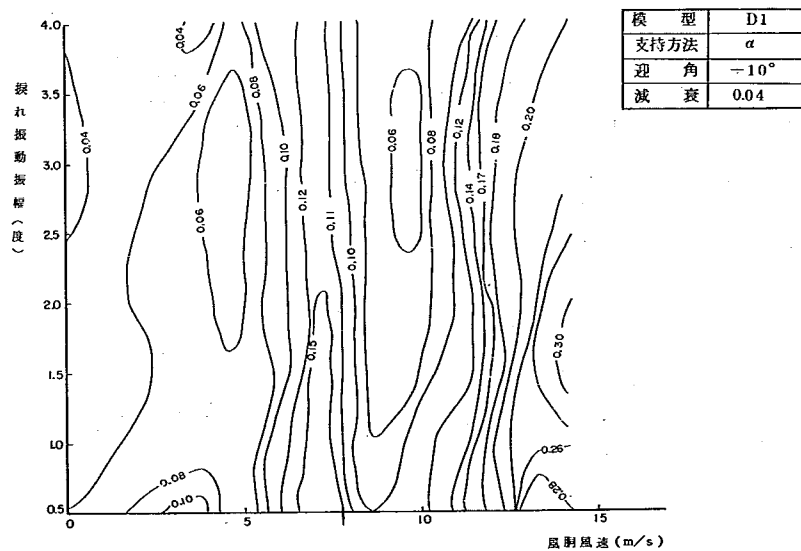


図-7-95

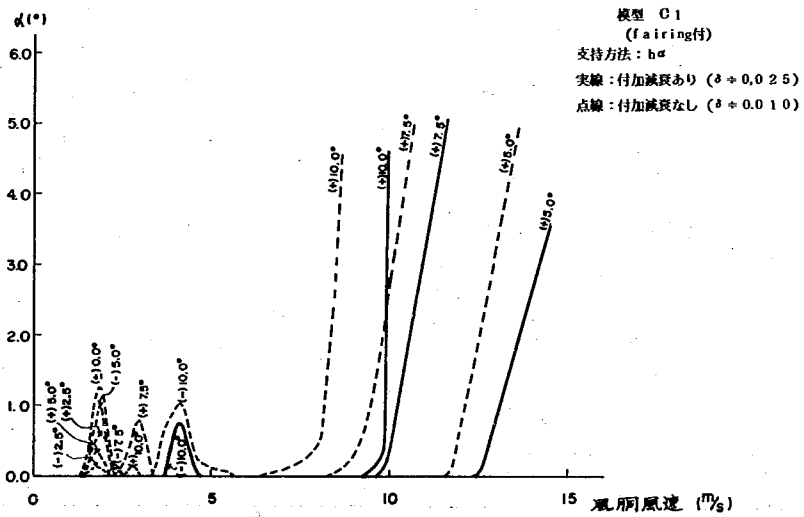


図-8

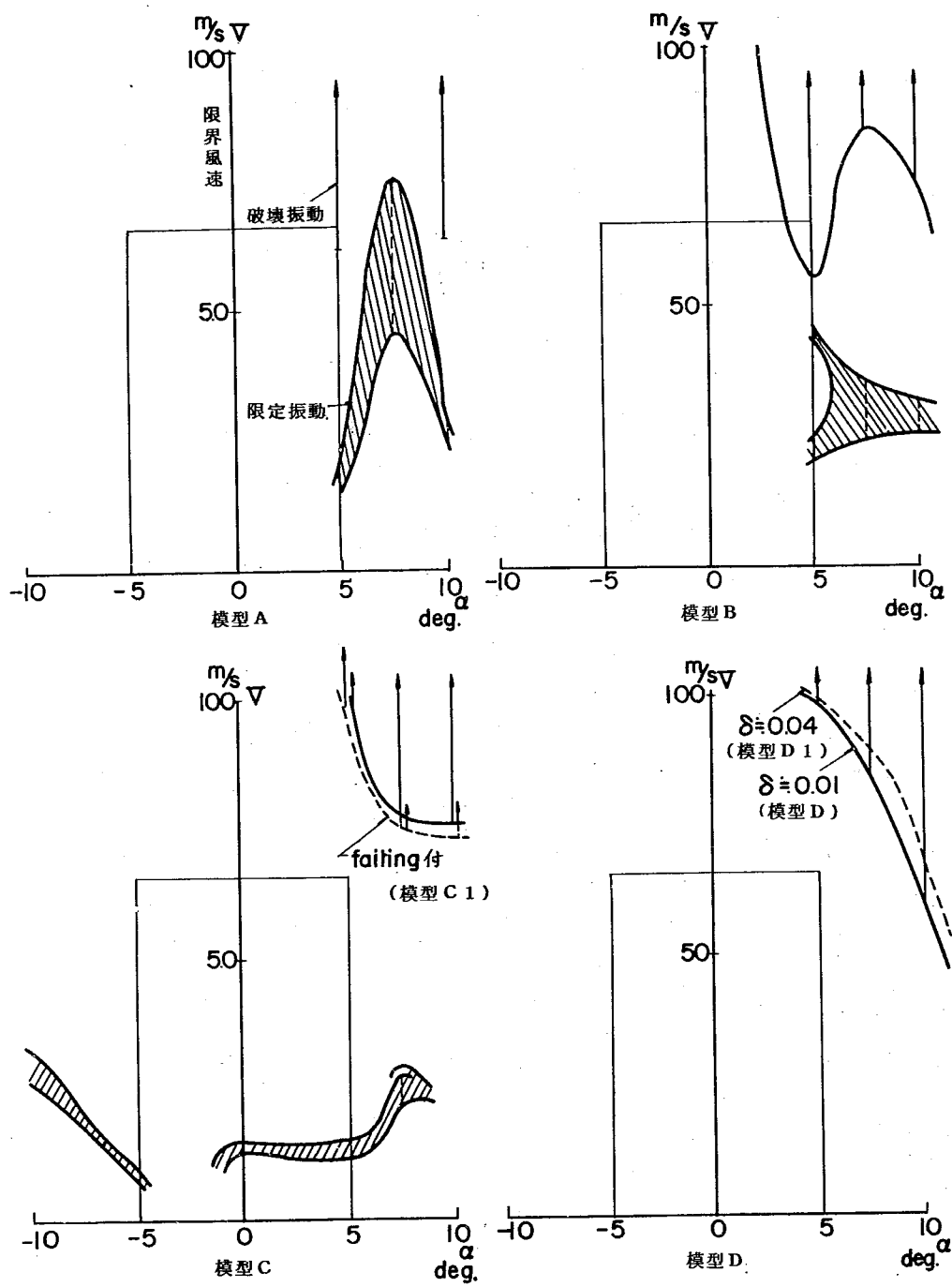
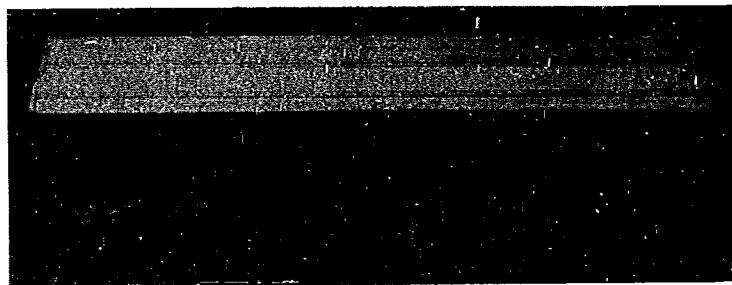
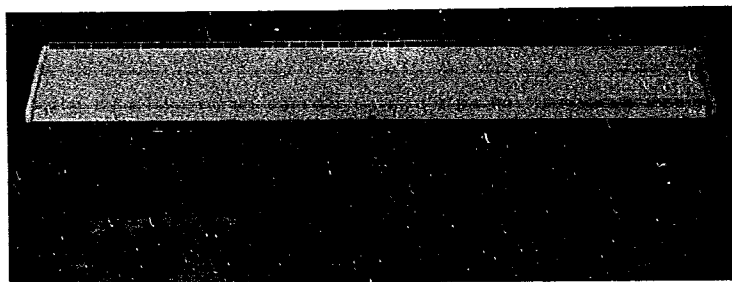


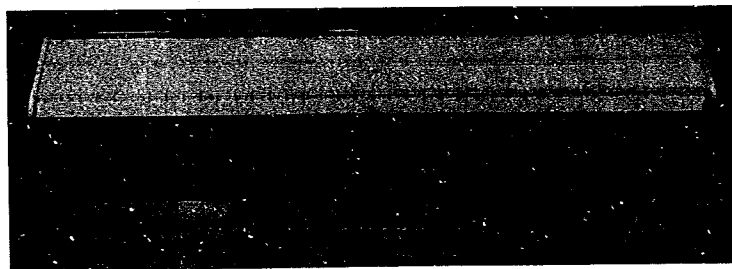
图-9



写真一 1 - 1 模型 A



写真一 1 - 2 模型 B



写真一 1 - 3 模型 C

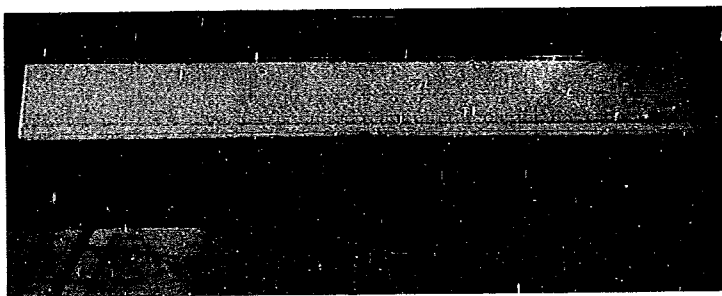


写真-1-4 模型D

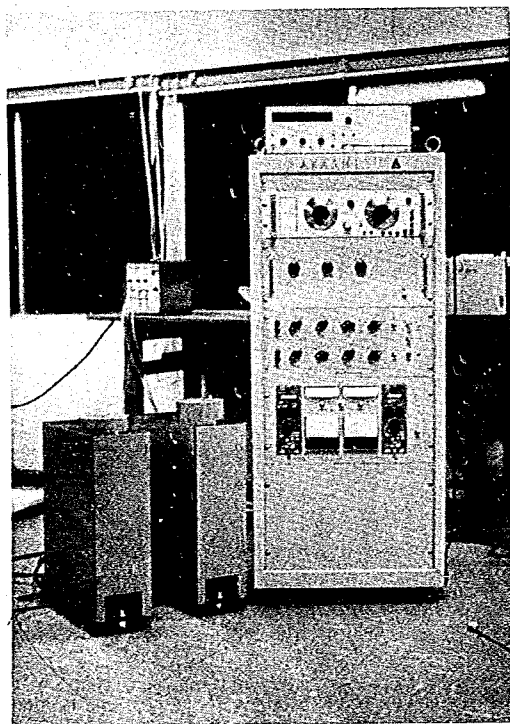


写真 2