

関門吊橋主塔の耐風性に関する実験報告

昭和44年5月

建設省土木研究所
構造研究室

目 次

序	1
実 験 対 象	2
第 I 部 部分・全体模型による空気力係数の測定	3
I-1 模型および実験方法	3
I-2 実験結果	4
I-3 考 察	4
第 II 部 全体模型による空力安定性の検討	6
II-1 模型および実験方法	6
II-2 実験結果	8
II-3 考 察	8
あ と が き	11
参 考 文 献	11
記 号 説 明	12
表	13~21
図	22~37
写 真	40~41
(附) 跳躍振動について	42

序

関門道路橋は日本道路公団の手により現在架設中の三径間単純補剛吊橋で、その規模は主径間712m、側径間178m、往復6車線である。本橋の耐風性の検討は設計の段階より土木研究所に委託され、風洞実験が実施されてきた。補剛形式についてはトラス補剛と箱桁補剛の2種に大別され実施された。而して風洞実験の結果および施工性等の現場条件を参照して種々検討の末、トラス補剛形式が採用された。

設計作業の進展と共に、架設段階での耐風性についても検討するよう求められ、主塔架設時の耐風性、吊足場の耐風性などの項目が追加された。

今回、主塔に関する耐風性調査の結果がまとまったので以下に報告する。内容は静的設計に採用した風荷重の妥耐性を検討する資料を得ることを目的とした。

(1) 部分・全体模型による空気力係数の測定
と、架設時の風に対する安定性および振動に対する対策を立案するための資料を得ることを目的とした。

(2) 全体模型による空力安定性の検討
の2部からなる。

昭和44年5月

構造研究室長

大久保 忠 良

構造研究室

成 田 信 之

実験対象

日本道路公団関門架橋工事事務所（以下では事務所と略す）より提示された主塔の原型は図-1の通りである。主塔頂のケーブルサドル、添接部材などの詳細は風洞実験を計画した時点では未だ決定していなかったので記入されていない。また、重量分布は実験の途中で変更があり、図-1の表の値に確定した。従って本報告書で用いられている固有振動数は図-1の剛性、質量分布について算出したものである。

主塔架設用の仮設備は受注業者によりそれぞれ異なった方式を使用するものと予想され、現在のところ不明である。そこで、今回の実験では事務所より提示された図-2のクリーパークレーンが使用されるものとし、架設途中においてはこのクリーパークレーンが頂部に設置された状態で実験を行った。クレーンの重量は事務所での仮定値200トンを用い、振動数の計算に際しては頂部に作用する集中荷重と考えた。

第 I 部 部分・全体模型による空気力係数の測定

I-1 模型および実験方法

構造物に作用する風荷重は部材各部でその値を異にする。風荷重を構造物に加えて静的設計計算をする場合、小規模な構造物の場合には一様分布と仮定してもよいが、吊橋主塔のように高さの高い構造物では風荷重の分布を考慮した方が合理的である。従って、図-1のような構造物の場合、厳密には空気力を測定しようとする有効部分 (active section) と空力的な補償のみをする補償部分 (dummy section) とからなる全体模型を製作し有効部分に作用する空気力を測定することによって各部の風荷重を算定する必要がある。

しかしながら、この方法によると模型の構造が複雑になり、また現有の風洞では作用空気力が小さいため計測技術の上からも困難を伴うので実現はむづかしい。吊橋主塔の場合、作用空気力は塔頂近くでは頂部からの気流の廻り込みのため3次元緩和効果があり、中間部では2次元な特性を示すことが予想される。頂部での気流のまわり込みがどの程度の縦横比 (塔高/塔幅) まで及ぶか不明であるため、今回の実験ではまわり込みの大きい塔頂部とその影響のない中間部について作用空気力を測定することとした。また、第 II 部の実験のために製作した全体模型についての空気力も計測することとした。従って模型は次の3種である。

模型 A : 塔頂部 34.2m 分の部分模型

模型 B : 塔中間部 29.5m 分の部分模型

模型 C : 全体模型

部分模型は檜材を用い縮尺 1/100 で製作した。使用した風洞天秤が 3 分力式 (抗力・第 1 揚力・第 2 揚力) のため気流直角方向の水平分力は計測できない。そのため、模型は気流軸の垂直面に対して左右対称でなければならず、従って、各模型は 2 体ずつ製作した。模型 A に対しては端板は片側のみ、また模型 B に対しては両側に取付けて端部の条件を満足するようにした。端板は円形とし、その直径は 700mm とした。部分模型の天秤への取付要領は図-3 の通りである。模型に対する気流の偏角は内側端板への模型の取付板を回転することにより変化させた。実験は次の条件の下で実施した。

	部分模型	全体模型
偏 角	0 ~ 90°, 5° 刻み	0, 90°
風 速	10, 15, 20 m/s	15, 20 m/s

部分模型についての計測値は次式によって整理した。

$$\begin{array}{l} \text{風} \\ \text{軸} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A} \\ C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot B \cdot \ell} \\ C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot B^2 \cdot \ell} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{塔} \\ \text{体} \\ \text{軸} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \bar{C}_D = \frac{\bar{D}}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A} \\ \bar{C}_L = \frac{\bar{L}}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot B \cdot \ell} \\ \bar{C}_M = C_M \end{array} \right.$$

但し、各記号は図-4および次式による。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{D} = D \cos \alpha + L \sin \alpha \\ \bar{L} = -D \sin \alpha + L \cos \alpha \\ \bar{M} = M \end{array} \right.$$

測定値に対して端板、吊線、天秤感度の補正を行なったが、模型による風洞測定部の閉塞効果の補正は行なわなかった。これは模型の占有面積が測定部の大きさに比べて無視できると考えたからである。

全体模型の詳細については第Ⅱ部に述べるが、全体模型を用いての空気力の測定は図-5のようにして行なったことのみを記しておく。

I-2 実験結果

部分模型についての実験結果を表1~4に、またこれを図示したものを図-6~11に掲げる。表中には参考のために風荷重の値も列挙しておいた。

全体模型についての実験結果は表-5に掲げた。表中の抗力係数は模型全体で一定であると仮定して得られた値である。

I-3 考 察

(1) 3分力係数について

得られた3分力係数は偏角と共に可成り激しい変動を示している。これは上流側塔柱とその背後の斜材、塔柱との干渉によるものと考えられる。単一部材の抗力係数についてはこれまで多くの研究者による実験結果が提出されており、その一例としてC. Scrutonの提案した係数を表-6に掲げておく。事務所より提示された原案の塔柱は幅/奥行の値が塔頂付近で1.3、塔基部付近で2.25となっている。これに対して実験値は塔頂部分で $C_D = 1.24$ 、塔中間部(幅/奥行=1.57)で $C_D = 2.52$ となった。模型Aの柱高/柱幅の値は約7.5であり、等辺角柱の場合には $2.0 \times 0.7 = 1.4$ という抗力係数値が与えられる。また幅/奥行が0.5の場合には $1.4 \times 0.7 = 0.98$ となる。背後の塔柱の寄与も当然考えられるが、実験値で見限る限りでは単柱の場合に近い。

(2) 風 荷 重

設計風荷重の検討に便利なように 3 分力係数は風軸の他に塔体軸に関してのものも与えておいた。更に 5.35m/s (設計風速) の風速に対する風荷重の推定値も表 - 3, 4 に掲げた。これにより橋軸方向並びに橋軸直角方向の風荷重が求められる。

設計に際しては風上側の塔柱による遮閉効果を考えずに一様に 1.8 の抗力係数を採用している。また、偏角をもった風に対してはそれぞれの成分の風荷重を合成して隅角部の応力を検算している。これらについては各偏角の風に対して橋軸方向および橋軸直角方向の分力を求め、これを用いて応力の検討をするのも一方法かと思う。

第Ⅱ部 全体模型による空力安定性の検討

Ⅱ-1 模型および実験方法

(1) 実験対象

図-1に示された主塔が架設中に風を受けてどのような挙動を示すかを調べるのが、この実験の目的である。今回の実験では次の3つの架設段階を想定して実験対象とした。

- 状態A：主塔の工事が終了し、独立塔となった状態、この状態ではケーブルは張られていない。
- 状態B：主塔の架設は終了したが、架設用のクリーパークレーンがまだ塔頂に設置されたままの状態。
- 状態C：主塔が高さ104.3m建設された状態。クレーンが頂部に搭載されている。

勿論、各状態において構造物は風力により曲げ振動あるいは捩れ振動を発生する可能性がある。従って、それらすべての現象が検討できるよう実験を行なうことが理想であるが、今回の実験では以下に述べる理由により最低次の橋軸方向の曲げ振動を対象とした。

(2) 模型と相似則

厳密に云えば上記の実験対象に対しては空力弾性模型を用いた実験を行なう必要がある。

その場合に要求される条件は外形の相似、質量、剛性および減衰性の分布の相似、ならびに下記の無次元量が原型と模型とで同じ値となることである。勿論、捩れ振動を対象とする場合には

$$\left\{ \begin{array}{ll} \delta_s & \text{構造減衰} \\ E/\rho V^2 & \text{弾性} \\ \sigma/\rho & \text{密度比} \\ gD/V^2 & \text{重力} \\ \rho VD/\mu & \text{レイノルズ数} \end{array} \right.$$

それに対する弾性、質量の相似の項を追加する必要がある。

ところで、模型の縮尺が小さい場合にこれらの条件を満足する模型を製作することは適当な材料の入手、製作精度、経費の面で難点が多い。特に最も困難なことは模型の固有振動数および構造減衰を自由に調節できないことである。一般に模型の構造減衰は原型のそれよりも大きくなるのが常であり、従って、危険側の実験を強いられることとなる。

主塔の風による振動は橋軸方向の最低次の曲げ振動が主体であることは類似の実験から判っている。高次の曲げ振動および捩れ振動は高風速時に発生するので架設段階ではあまり重要でないと考えられる。

以上に述べた理由から、今回の実験では橋軸方向の最低次曲げ振動のみを対象とし、模型は剛体として製作し、ばね支持するよう計画した。従って、振動変位は線型となる。

この場合の相似則を次に考えてみる。塔状構造物の場合、重力加速度の影響は無視できるので、対象となる物理量は次の7ケと考えてよからう。

$$\delta_s, V, N, D, I, \rho, \mu$$

これに次元解析を施せば、次の4ケの無次元パラメータが得られる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \delta_s & \text{構造減衰} \\ V/ND & \text{換算風速} \\ I/\rho D^5 & \text{慣性} \\ \rho VD/\mu & \text{レイノルズ数} \end{array} \right.$$

これらのうち、レイノルズ数の相似は今回使用した風洞では不可能であるが、角型部材(bluff-body)で構成されている構造物ではその影響が僅少であることが判明しているのので、これを無視する。従って、相似すべき無次元量は $\delta_s, V/ND, I/\rho D^5$ の3ケのみとなる。

模型はアルミニウムの型材を芯として組み立て、これに剛性をもたせ、アクリルフォーム(発泡倍率20)を貼付して外形を整えた。また、クリーパークレーンは檜材で組み立てた。模型の縮尺は風洞の規模より1/60とした。模型の図面を図-12に掲げる。

風速の相似は換算風速が原型と模型で等しいという条件から

$$\left(\frac{V}{ND}\right)_m = \left(\frac{V}{ND}\right)_p$$

$$\therefore V_p = V_m \left(\frac{N_p}{N_m}\right) \cdot \left(\frac{D_p}{D_m}\right) = 60 V_m \left(\frac{N_p}{N_m}\right)$$

として求められる。

原型の曲げ振動数はStodolaの簡略計算法を用いて次のように算出された。

原型の状態	A	B	C
固有振動数	0.305%	0.288	0.479

(3) 実験方法

模型は風洞測定部に倒立させて吊り、塔基部で自由に回転できるよう二重のピボットで支持した。模型を弾性支持するためのコイルスプリングは当初の計画では測定部の外側に設ける予定であったが適当なばね定数のものが得られなかったので止むを得ず、塔頂部近くに設けた。従って、スプリングは気流に曝されることになったが、その影響は僅少であると考えた。測定部の上部に模型の支持棒を貫通させ、これに電磁ダンパーを取りつけて減衰性を加減できるようにした。模型の風洞への取付要領を図-13に示す。風洞風に対する模型の姿勢は同図に示すように定義した。偏角は状態Aにおいては0~90°の間を5°刻んで、状態Bおよび状態Cにおいてはクレーンの影響を考慮して-90°~+90°の間を5°刻みでそれぞれ設定し、各偏角に対して風に対する安

定性を検討した。風速は 0 m/s より約 1.25 m/s までの範囲とした。この風速は原型で最大約 65 m/s までの風について実験したことを意味する。

振動の検出は塔柱の頂部に埋込んだ 2 ケの加速度計によって行なった。計測装置については図 - 14 を参照されたい。

II - 2 実験結果

実験の結果を表 - 7 にまとめた。それによると主塔は橋軸直角方向の風に最も敏感に反応し、偏角が増大すると共に最大振幅は減少し偏角 20° 以上では振動を発生しないことが理解されよう。表中に電磁ダンパーの効果についても記したが、これは振幅と減衰性の関係を調べるために行なったものであり、“初期”の項には付加減衰力を与えない場合の系の固有の減衰性と通風時の最大振幅を、また“最終”の項には付加減衰力を与えた時の系の減衰性と発生した最大振幅を表わす。この関係をより詳細に調べた例を図 - 15 に掲げる。

II - 3 考 察

(1) 振動の特性

上述したように関門吊橋の主塔は比較的低風速で可成りの振幅をもった振動が発生することが予想される。この振動の原因を調べるため、不安定性を示した偏角および風速において模型を固定し、塔頂より 50 cm 、 100 cm 、 150 cm の 3 層より流下する後流中に含まれる渦の周波数を計測した。測定は熱線風速計のプロープを下流側塔柱より約 10 cm 下流に設置し、水平方向にトランプスして最も安定した記録の得られる位置に固定して行なった。後流中における渦の卓越周期を求めるためには、実時間相関計を用いて熱線風速計の出力の自己相関 (autocorrelation) を計測することにより行なった。得られた記録の一例を図 - 16 に、また、これらの記録から求められた Stouhal 数を表 - 8 に示す。この場合、代表長として 1 塔柱の垂直投影幅を採った。これを既往のデータと対応させたものが図 - 17 である。結果は非常に良い精度で一致している。

次に第 1 部において述べた 3 分力係数のうち揚力係数について調べてみると塔中間部模型の場合には偏角約 20° 以内では係数は偏角に対して負の勾配を有していることが判る。これは橋軸直角方向より風が吹いた場合、容易に振動を起こす可能性のあることを示している。

以上を総合して関門吊橋主塔は橋軸直角方向またはこれに近い角度より風を受けた場合、渦による周期外力によっていわゆる風琴振動を誘起され、また、高風速においては跳躍振動を発生する可能性のあることが予想される。

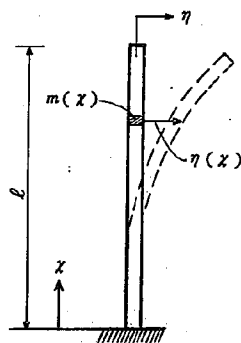
(2) 振動の抑制方法

実際に主塔がどの程度の振幅で振動するかを予想することは、構造物に作用する風の性質、構造物自身の振動減衰特性が未知であるので容易ではない。鋼製の塔の構造減衰は本州四国連絡橋

耐風設計指針によると対数減衰率で 0.02 を採用するよう規定されている。この値は多少小さすぎるように思われるが、いづれにしても独立塔の場合には振動は発生するものと覚悟しなければならない。而して、振動によって生ずる作業員の船酔い現象やこれに伴って生ずる事故を未然に防止するためには何らかの方法で振動振幅を低減する必要がある。このための手段としては次の 3 つが考えられる。

- (1) 一時的に塔体に付加物を取りつけ断面の形を変えて空気力を減少させる方法
(空気力の減少)
- (2) ステーなどを取りつけ、一時的に主塔の剛性を高める方法(剛度の増加)
- (3) 付加装置により減衰性を高める方法(減衰性の増加)

時間の制約上、ここでは(3)の場合についてのみ考えてみる。



左図において振動振幅を $\eta = \eta(x) \sin \omega t$ とおくと、系の運動エネルギーは

$$W = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l m(x) \cdot \eta(x)^2 \cos^2 \omega t dx$$

$$\therefore W_{\max} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l m(x) \cdot \eta(x)^2 dx$$

第 n サイクルに対しては

$$W_n = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l m(x) \eta_n(x)^2 dx$$

第 $(n+1)$ サイクルに対しては

$$W_{n+1} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l m(x) \eta_{n+1}(x)^2 dx$$

一方、対数減衰率は次式で定義されている。

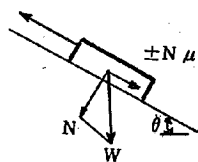
$$\delta = \log_e \frac{\eta_n(x)}{\eta_{n+1}(x)} \quad \therefore \eta_n(x) = \eta_{n+1}(x) e^{\delta}$$

この式を W_n の式に代入すると

$$e^{2\delta} = \frac{W_n}{W_{n+1}} = \frac{W_{n+1} + \Delta W}{W_{n+1}} = 1 + \frac{\Delta W}{W_{n+1}} = 1 + 2\delta + \frac{(2\delta)^2}{2} + \dots$$

$$\therefore \delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta W}{W_{n+1}} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta W}{W_n}$$

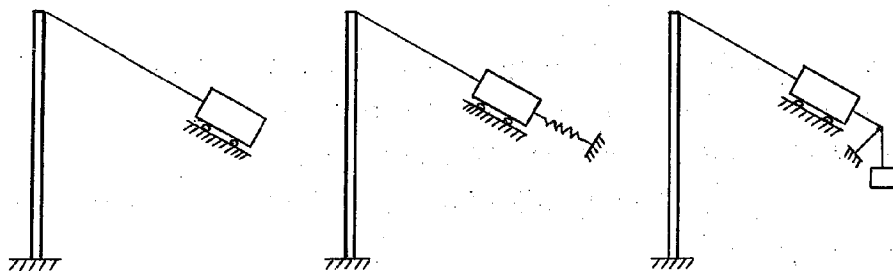
構造物の対数減衰率 δ が δ_1 のときの最大振幅を $\eta_1(l)$ とする。もしも構造物のもつ減衰率 δ_2 が δ_1 より小さければ $\delta_1 - \delta_2 = \Delta\delta$ に相当する付加減衰を与えなければ振幅は $\eta_1(l)$ にはならない。



$\Delta\delta$ に相当する付加減衰を左図のような Coulomb 摩擦によって与えてみる。この場合、1 サイクル当りの吸収エネルギーは $\Delta W = 4\eta_1(l)N\mu$ となるので、これを前頁の式に代入すると

$$N = \frac{\Delta\delta W_n}{2\eta_1(l)\mu}$$

として、荷重が求められる。ここで注意しなければならないのは付加減衰用の重錘は塔の運動に常に追従することが必要であり、従って重錘を下图のように傾斜した台に載せるか或いはばね、または均衡重錘で支持することが必要となろう。試算の結果では作業に支障のない程度の振幅に抑えるためには数トン乃至10数トンのコンクリートブロックが必要となる。



制振装置の例

あとがき

以上で本報告を終る。本実験は構造研究室の 倉繁蔵，奥繁実，檀浦満郎の諸君の協力によって実施されたものであることを付記して感謝に代えることとする。

参考文献

- (1) C. Scruton & C.W. Newberry
On the estimation of wind loads for building and structural design
Proc. ICE, June, 1963
- (2) R.H. Scanlan & R. Rosenbaum
Introduction to the study of aircraft vibration and flutter
Macmillan Company, 1951
- (3) D.R. Leonard
Human tolerance levels for bridge vibration
RRL Report No. 34
- (4) H. Nakaguchi et al.
An experimental study on aerodynamic drag of rectangular cylinders
Jour. of SASN, Jan., 1968
- (5) G.V. Parkinson
Aeroelastic galloping in one degree of freedom
Symposium at NPL in 1965
- (6) G.V. Parkinson, N.P.H. Books
On the aeroelastic instability of bluff cylinders
Trans. of ASME, June 1961
- (7) G.V. Parkinson, J.D. Smith
An aeroelastic oscillator with two stable limit cycles
Trans. of ASME, June 1962
- (8) G.V. Parkinson, J.D. Smith
The square prism as an aeroelastic non-linear-oscillator
Quart. Journ. Mech. and Applied Math. Vol. 17, Part 2, 1964
- (9) M. Novak
Aeroelastic galloping of prismatic bodies
Proc. of ASCE, Feb. 1968

説明記号

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
ρ	$\text{Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$	空 気 密 度
C_D, C_L, C_M	—	風軸で定義した抗力, 揚力, モーメント係数
$\overline{C_D}, \overline{C_L}, \overline{C_M}$	—	塔体軸で定義した抗力, 揚力, モーメント係数
B, ℓ, D	m	模型の幅, 高さ, 代表長
α	—	偏 角
δ_s	—	構造減衰 (対数減衰率で表示)
E	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2}$	弾 性 係 数
λ	$\text{Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$	材料の密度
μ	$\text{Kg} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-2}$	空気の粘性係数
V	$\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$	風 速
N, ω	sec^{-1}	振動数, 円振動数
I	$\text{Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}$	慣性モーメント
S_t	—	ストローハル数 ($= \frac{ND}{V}$)
m, p	—	模型, 原型を示すサフィックス
δ	—	対数減衰率

表 - 1 三分力係数 (風軸)

[主塔頂部]

偏角 (度)	抗力係数				揚力係数				空力モーメント係数			
	10 (m/s)	15	20	平均	10	15	20	平均	10	15	20	平均
0	1.23	1.25	1.24	1.24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.40	1.43	1.44	1.42	-0.023	-0.023	-0.023	-0.023	0.0139	0.0143	0.0146	0.0143
10	1.78	1.83	1.81	1.81	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	0.0168	0.0175	0.0179	0.0174
15	2.18	2.23	2.23	2.21	0.027	0.023	0.026	0.025	0.0146	0.0146	0.0143	0.0145
20	2.37	2.40	2.43	2.40	0.042	0.044	0.046	0.044	0.0241	0.0247	0.0254	0.0248
25	2.62	2.67	2.68	2.66	-0.003	-0.009	0.000	-0.004	0.0102	0.0182	0.0108	0.0131
30	2.90	2.94	2.95	2.93	-0.041	-0.040	-0.023	-0.035	-0.0015	-0.0006	0.0188	0.0056
35	3.21	3.35	3.28	3.28	-0.075	-0.046	-0.073	-0.065	-0.0080	-0.0068	-0.0059	-0.0069
40	3.98	3.68	3.68	3.78	-0.100	-0.099	-0.097	-0.099	-0.0168	-0.0143	-0.0135	-0.0149
45	3.81	3.96	3.94	3.90	-0.112	-0.113	-0.111	-0.112	-0.0227	-0.0205	-0.0199	-0.0210
50	4.05	4.03	4.07	4.05	-0.120	-0.120	-0.120	-0.120	-0.0263	-0.0260	-0.0229	-0.0251
55	3.88	3.88	3.88	3.88	-0.134	-0.130	-0.128	-0.131	-0.0270	-0.0260	-0.0245	-0.0258
60	3.78	3.90	3.91	3.86	-0.146	-0.147	-0.148	-0.147	-0.0270	-0.0263	-0.0256	-0.0263
65	3.91	3.99	4.01	3.97	-0.172	-0.171	-0.170	-0.171	-0.0256	-0.0250	-0.0265	-0.0257
70	4.10	4.17	4.14	4.14	-0.196	-0.196	-0.191	-0.194	-0.0249	-0.0244	-0.0232	-0.0242
75	4.14	4.21	4.22	4.19	-0.210	-0.208	-0.206	-0.208	-0.0212	-0.0201	-0.0176	-0.0196
80	4.52	4.57	4.54	4.54	-0.127	-0.122	-0.123	-0.124	-0.0168	-0.0143	-0.0137	-0.0149
85	4.63	4.74	4.77	4.72	-0.057	-0.055	-0.055	-0.056	-0.0110	-0.0088	-0.0079	-0.0092
90	4.79	4.79	4.79	4.79	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 - 2 三分力係数 (風軸)

〔主塔中間部〕

偏角 (度)	抗力係数				揚力係数				空力モーメント係数			
	10 (m/s)	15	20	平均	10	15	20	平均	10	15	20	平均
0	2.43	2.56	2.58	2.52	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	2.61	2.76	2.78	2.72	0.011	0.011	0.011	0.011	0.0017	0.0042	0.0043	0.0034
10	2.80	2.93	2.98	2.90	0.030	0.030	0.011	0.024	0.0119	0.0119	0.0109	0.0116
15	2.69	2.78	2.85	2.77	0.063	0.072	0.060	0.065	0.0230	0.0123	0.0219	0.0191
20	2.39	2.51	2.52	2.47	0.108	0.111	0.186	0.135	0.0367	0.0353	0.0360	0.0360
25	2.56	2.65	2.70	2.64	0.062	0.067	0.068	0.066	0.0205	0.0207	0.0213	0.0208
30	2.60	2.69	2.71	2.67	0.034	0.033	0.034	0.034	0.0051	0.0069	0.0072	0.0064
35	2.81	2.82	2.88	2.84	0.013	0.010	0.013	0.012	-0.0034	-0.0046	-0.0017	-0.0032
40	2.89	2.98	2.99	2.95	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.0094	-0.0100	-0.0083	-0.0092
45	3.00	3.04	3.09	3.04	-0.014	-0.013	-0.013	-0.013	-0.0145	-0.0142	-0.0143	-0.0143
50	2.98	3.11	3.15	3.08	-0.034	-0.028	-0.025	-0.029	-0.0068	-0.0119	-0.0134	-0.0107
55	3.61	3.71	3.46	3.59	-0.015	-0.006	-0.022	-0.014	-0.0094	0.0027	-0.0040	-0.0036
60	3.63	3.71	3.73	3.69	-0.018	-0.010	-0.011	-0.013	0.0043	0.0077	0.0074	0.0065
65	3.52	3.54	3.59	3.55	-0.047	-0.044	-0.044	-0.045	0.0009	0.0027	0.0021	0.0019
70	3.31	3.39	3.43	3.38	-0.098	-0.060	-0.099	-0.086	-0.0085	-0.0050	-0.0085	-0.0073
75	3.26	3.23	3.23	3.24	-0.159	-0.164	-0.144	-0.156	-0.0102	-0.0081	-0.0281	-0.0155
80	3.28	3.45	3.49	3.41	-0.105	-0.104	-0.102	-0.104	-0.0043	-0.0058	-0.0068	-0.0056
85	3.55	3.61	3.61	3.59	-0.046	-0.048	-0.046	-0.047	-0.0026	-0.0038	-0.0032	-0.0032
90	3.56	3.64	3.68	3.63	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 - 3 三分力係数 (塔体軸)

(主塔頂部)

風荷重 (塔体軸)

偏角 (度)	抗力係数 ($\bar{C}_D$)				揚力係数 ($\bar{C}_L$)				空力モーメント係数 ($\bar{C}_M$)				抗力 1)	揚力 2)	空力 モーメント
	10(m/s)	15	20	平均	10	15	20	平均	10	15	20	平均	(Kg/m)	(Kg/m)	(Kg·m/m)
0	1.23	1.25	1.23	1.24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	932	0	0
5	1.38	1.41	1.43	1.41	-0.039	-0.040	-0.040	-0.040	0.0139	0.0143	0.0146	0.0143	1,059	-234	2,735
10	1.74	1.79	1.76	1.76	-0.052	-0.054	-0.053	-0.053	0.0168	0.0175	0.0179	0.0174	1,322	-310	3,328
15	2.22	2.19	2.15	2.19	-0.052	-0.059	-0.078	-0.063	0.0146	0.0146	0.0143	0.0145	1,645	-369	2,774
20	2.33	2.36	2.39	2.36	-0.074	-0.074	-0.073	-0.074	0.0241	0.0247	0.0254	0.0248	1,773	-433	4,744
25	2.37	2.39	2.42	2.39	-0.157	-0.166	-0.158	-0.160	0.0102	0.0182	0.0108	0.0131	1,796	-936	2,506
30	2.02	2.66	2.51	2.40	-0.210	-0.262	-0.207	-0.226	-0.0015	-0.0006	0.0188	0.0056	1,803	-1,322	1,071
35	2.32	2.55	2.63	2.50	-0.319	-0.307	-0.321	-0.316	-0.0080	-0.0068	-0.0059	-0.0069	1,878	-1,849	-1,320
40	2.59	2.36	2.36	2.44	-0.435	-0.407	-0.404	-0.415	-0.0168	-0.0143	-0.0135	-0.0149	1,833	-2,428	-2,850
45	2.13	2.23	2.71	2.36	-0.457	-0.472	-0.468	-0.466	-0.0227	-0.0205	-0.0199	-0.0210	1,773	-2,726	-4,017
50	1.95	1.93	1.95	1.94	-0.512	-0.509	-0.523	-0.515	-0.0263	-0.0260	-0.0229	-0.0251	1,458	-3,013	-4,801
55	1.44	1.46	1.47	1.46	-0.522	-0.520	-0.517	-0.520	-0.0270	-0.0260	-0.0245	-0.0258	1,097	-3,042	-4,935
60	0.99	1.04	1.03	1.02	-0.532	-0.547	-0.547	-0.542	-0.0270	-0.0263	-0.0256	-0.0263	766	-3,171	-5,031
65	0.54	0.58	0.76	0.63	-0.569	-0.579	-0.630	-0.593	-0.0256	-0.0250	-0.0265	-0.0257	473	-3,469	-4,916
70	0.08	0.11	0.14	0.11	-0.606	-0.616	-0.609	-0.610	-0.0249	-0.0244	-0.0232	-0.0242	83	-3,568	-4,629
75	-0.37	-0.35	-0.33	-0.35	-0.614	-0.624	-0.623	-0.620	-0.0212	-0.0201	-0.0176	-0.0196	-263	-3,627	-3,749
80	-0.12	-0.06	-0.08	-0.09	-0.645	-0.652	-0.646	-0.648	-0.0168	-0.0143	-0.0137	-0.0149	-68	-3,791	-2,850
85	0.00	0.02	-0.02	0.00	-0.651	-0.667	-0.669	-0.662	-0.0110	-0.0088	-0.0079	-0.0092	0	-3,872	-1,760
90	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.671	-0.671	-0.658	-0.667	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0	-3,902	0

1) $\bar{D} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \bar{C}_D \cdot A$ において $\rho = 0.125 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$, $V = 53.5 \text{ m/s}$, $A = 42 \text{ m}^2/\text{m}$ として算出

2) $\bar{L} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \bar{C}_L \cdot B$ において $\rho = 0.125 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$, $V = 53.5 \text{ m/s}$, $B = 32.7 \text{ m}$ として算出

3) $\bar{M} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \bar{C}_M \cdot B^2$ において $\rho = 0.125 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$, $V = 53.5 \text{ m/s}$, $B = 32.7 \text{ m}$ として算出

表 - 4 三分力係数 (塔体軸)

(主塔中間部)

風荷重 (塔体軸)

偏 角 (度)	抗力係数 ($\overline{D_D}$)				揚力係数 ($\overline{C_L}$)				空力モーメント係数 ($\overline{C_M}$)				抗力 (Kg/m)	揚力 (Kg/m)	空力 モーメント (Kg·m/m)
	10(m/s)	15	20	平均	10	15	20	平均	10	15	20	平均			
0	2.43	2.56	2.58	2.52	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3,246	0	0
5	2.60	2.76	2.77	2.71	-0.023	-0.024	-0.025	-0.024	0.0017	0.0042	0.0043	0.0034	3,491	-140	650
10	2.80	2.91	2.94	2.88	-0.043	-0.047	-0.067	-0.052	0.0119	0.0119	0.0109	0.0116	3,709	-304	2,219
15	2.71	2.81	3.89	2.80	-0.043	-0.038	-0.052	-0.044	0.0230	0.0123	0.0219	0.0191	3,606	-257	3,654
20	2.49	2.61	2.44	2.51	-0.020	-0.024	-0.046	-0.030	0.0367	0.0353	0.0360	0.0360	3,233	-175	6,886
25	2.50	2.59	2.72	2.60	-0.105	-0.107	-0.109	-0.107	0.0205	0.0207	0.0213	0.0203	3,349	-626	3,883
30	2.37	2.44	2.46	2.42	-0.165	-0.172	-0.172	-0.170	0.0051	0.0069	0.0072	0.0064	3,147	-994	1,224
35	2.35	2.35	2.40	2.37	-0.230	-0.234	-0.236	-0.233	-0.0034	-0.0046	-0.0017	-0.0032	3,053	-1,363	612
40	2.20	2.27	2.28	2.25	-0.279	-0.287	-0.288	-0.285	-0.0094	-0.0100	-0.0083	-0.0092	2,898	-1,667	-1,760
45	2.06	2.09	2.12	2.09	-0.327	-0.330	-0.335	-0.331	-0.0145	-0.0142	-0.0143	-0.0143	2,692	-1,936	-2,735
50	1.74	1.85	1.89	1.83	-0.363	-0.374	-0.377	-0.371	-0.0068	-0.0119	-0.0134	-0.0107	2,357	-2,170	-2,047
55	1.99	2.09	1.86	1.98	-0.451	-0.457	-0.436	-0.448	-0.0094	0.0027	-0.0040	-0.0036	2,550	-2,621	689
60	1.71	1.80	1.80	1.77	-0.479	-0.485	-0.487	-0.484	0.0043	0.0077	0.0074	0.0065	2,280	-2,831	-1,243
65	1.25	1.23	1.25	1.24	-0.497	-0.462	-0.503	-0.487	0.0009	0.0027	0.0021	0.0019	1,597	-2,849	363
70	0.52	0.78	0.54	0.61	-0.498	-0.496	-0.546	-0.513	-0.0085	-0.0050	-0.0085	-0.0073	786	-3,001	-1,396
75	-0.18	0.22	-0.10	-0.02	-0.512	-0.509	-0.502	-0.508	-0.0102	-0.0081	-0.0281	-0.0155	-26	-2,972	-2,965
80	-0.12	-0.09	-0.07	-0.09	-0.501	-0.526	-0.531	-0.519	-0.0043	-0.0058	-0.0068	-0.0056	-116	-3,036	-1,071
85	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.533	-0.542	-0.541	-0.538	-0.0026	-0.0038	-0.0032	-0.0032	-13	-3,147	612
90	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.532	-0.544	-0.548	-0.541	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0	-3,165	0

1) $\overline{D} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \overline{C_D} A$ において $\rho = 0.125 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$, $V = 53.5 \text{ m/s}$, $A = 72 \text{ m}^2/\text{m}$ として算出

2) $\overline{L} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \overline{C_L} B$ において $\rho = 0.125 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$, $V = 53.5 \text{ m/s}$, $B = 32.7 \text{ m}$ として算出

3) $\overline{M} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot \overline{C_M} B^2$ において $\rho = 0.125 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{m}^{-4}$, $V = 53.5 \text{ m/s}$, $B = 32.7 \text{ m}$ として算出

表-5 全体模型の実験結果

偏 角	風 速	塔頂反力	抗力係数
0°	15 ^{m/s}	6.98 ^{Kg}	1.91
	20	12.40	1.93
90°	15	2.64	1.76
	20	4.66	1.77

表-6 角型材の抗力係数 (C.Scruton による)

形 状	抗力係数	修 正 係 数	
		高さ／幅	係 数
→ 	2.0	0 ~ 4	0.6
→ 	2.0	4 ~ 8	0.7
→ 	1.4	8 ~ 40	0.8
→ 	2.2	40 <	1.0

表 - 7 実 験 結 果

状態 A

偏 角 (度)	風 速 (m/s)	振 幅 (cm)	備 考																													
0	11.60	0	無風時 $\delta = 0.028$ $f = 3.45\%$ 風速換算比 5.31 振幅換算比 60 電磁ダンパーの効果																													
	11.79	28.2																														
	12.16	40.2																														
	13.03	48.6																														
	13.45	47.3																														
	13.56	42.6																														
	16.21	3.0																														
	18.29	0																														
5	12.50	1.8	<table><tr><th rowspan="2">偏 角</th><th colspan="2">初 期</th><th colspan="2">最 終</th></tr><tr><th>δ</th><th>振 幅</th><th>δ</th><th>振 幅</th></tr><tr><td>0</td><td>0.028</td><td>48.6^{cm}</td><td>0.135</td><td>8.0^{cm}</td></tr><tr><td>5</td><td>0.028</td><td>38.2</td><td>0.133</td><td>6.9</td></tr><tr><td>10</td><td>0.028</td><td>25.5</td><td>0.125</td><td>5.0</td></tr><tr><td>15</td><td>0.028</td><td>26.5</td><td>0.117</td><td>3.2</td></tr></table>	偏 角	初 期		最 終		δ	振 幅	δ	振 幅	0	0.028	48.6 ^{cm}	0.135	8.0 ^{cm}	5	0.028	38.2	0.133	6.9	10	0.028	25.5	0.125	5.0	15	0.028	26.5	0.117	3.2
	偏 角	初 期			最 終																											
		δ		振 幅	δ	振 幅																										
	0	0.028		48.6 ^{cm}	0.135	8.0 ^{cm}																										
	5	0.028		38.2	0.133	6.9																										
	10	0.028		25.5	0.125	5.0																										
	15	0.028		26.5	0.117	3.2																										
	13.29	28.7																														
13.45	35.4																															
13.82	41.3																															
14.57	43.2																															
14.92	36.0																															
15.45	26.4																															
16.40	2.4																															
16.77	0																															
10	13.05	0																														
	13.23	17.1																														
	13.75	29.7																														
	14.78	21.6																														
	14.90	17.1																														
	15.24	14.4																														
15	15.96	0																														
	11.08	7.5																														
	12.18	6.7																														
	13.09	10.3																														
	13.45	26.7																														
	13.90	29.7																														
	14.57	17.8																														
	16.00	0																														
20 ? 90	16.20	0																														
	振動せず																															

表-7 続き
状態B

偏 角 (度)	風 速 (m/s)	振 幅 (cm)	備 考																																												
0	11.97	0	無風時 $\delta = 0.027$ $f = 3.35\%$ 風速換算比 5.16 振幅換算比 60 電磁ダンパーの効果																																												
	12.33	19.8																																													
	12.84	22.5																																													
	14.75	33.1																																													
	13.31	38.0																																													
	13.82	41.2																																													
	15.06	18.7																																													
	15.63	1.3																																													
-5	11.97	1.5	<table><tr><th rowspan="2">偏 角</th><th colspan="2">初 期</th><th colspan="2">最 終</th></tr><tr><th>δ</th><th>振 幅</th><th>δ</th><th>振 幅</th></tr><tr><td>0</td><td>0.027</td><td>34.6^{cm}</td><td>0.151</td><td>3.7^{cm}</td></tr><tr><td>- 5</td><td>0.027</td><td>24.0</td><td>0.128</td><td>3.0</td></tr><tr><td>-10</td><td>0.027</td><td>20.4</td><td>0.133</td><td>2.4</td></tr><tr><td>-15</td><td>0.027</td><td>6.6</td><td>0.136</td><td>1.2</td></tr><tr><td>5</td><td>0.027</td><td>22.7</td><td>0.129</td><td>5.3</td></tr><tr><td>10</td><td>0.027</td><td>20.2</td><td>0.121</td><td>3.8</td></tr><tr><td>15</td><td>0.027</td><td>6.6</td><td>0.117</td><td>0.6</td></tr></table>	偏 角	初 期		最 終		δ	振 幅	δ	振 幅	0	0.027	34.6 ^{cm}	0.151	3.7 ^{cm}	- 5	0.027	24.0	0.128	3.0	-10	0.027	20.4	0.133	2.4	-15	0.027	6.6	0.136	1.2	5	0.027	22.7	0.129	5.3	10	0.027	20.2	0.121	3.8	15	0.027	6.6	0.117	0.6
	偏 角	初 期			最 終																																										
		δ		振 幅	δ	振 幅																																									
	0	0.027		34.6 ^{cm}	0.151	3.7 ^{cm}																																									
	- 5	0.027		24.0	0.128	3.0																																									
	-10	0.027		20.4	0.133	2.4																																									
	-15	0.027		6.6	0.136	1.2																																									
	5	0.027		22.7	0.129	5.3																																									
10	0.027	20.2		0.121	3.8																																										
15	0.027	6.6		0.117	0.6																																										
12.53	17.6																																														
12.84	24.5																																														
13.00	25.2																																														
13.51	29.0																																														
14.13	26.0																																														
14.60	23.7																																														
15.32	1.6																																														
-10	11.66	1.9																																													
	12.33	11.4																																													
	12.48	12.3																																													
	13.05	11.4																																													
	13.21	11.4																																													
	13.82	8.4																																													
	14.44	1.9																																													
	14.75	0																																													
-15	11.81	1.9																																													
	12.48	10.2																																													
	13.21	7.5																																													
	13.51	3.7																																													
	13.98	0																																													
5	11.97	0																																													
	12.84	13.2																																													
	13.46	22.8																																													
	14.29	22.8																																													
	14.55	14.1																																													
	15.11	1.7																																													
10	11.97	4.4																																													
	12.33	11.4																																													
	12.84	20.2																																													
	13.46	7.9																																													
	13.82	6.2																																													
	14.55	4.4																																													
	15.06	0																																													
15	11.81	0																																													
	12.85	0.1																																													
	12.53	0																																													
	13.00	0																																													
-20~-90° および 20~90°は振動せず																																															

表-7 続き

状態 C

偏 角 (度)	風 速 (m/s)	振 幅 (cm)	備 考
0	20.4	0	無風時 $\delta = 0.024$ $f = 3.62\%$ 風速換算比 7.94 振幅換算比 60 電磁ダンパーの効果
	20.9	16.2	
	22.3	22.6	
	22.5	51.0	
	22.8	51.0	
	23.0	54.6	
	23.2	54.2	
	23.7	54.0	
	26.0	35.4	
	27.4	0	
5	21.7	0	
	22.6	16.2	
	22.8	46.2	
	23.2	54.0	
	23.7	49.7	
	24.6	48.6	
	25.0	47.4	
	25.4	36.6	
	25.7	36.0	
	26.8	23.4	
27.0	0		
10	22.3	0	
	22.8	10.8	
	23.3	40.5	
	24.0	48.6	
	24.4	45.9	
	25.4	29.7	
	36.2	21.6	
26.5	0		
15	21.7	0	
	22.1	24.3	
	22.8	51.5	
	23.5	39.5	
	24.4	0	
20	19.9	0	
	20.4	8.1	
	20.6	10.8	
	20.9	10.8	
	22.3	2.7	
	22.8	0	
25 ~ 90° は振動せず			

偏 角	初 期		最 終	
	δ	振 幅	δ	振 幅
0	0.024	54.6 ^{cm}	0.085	0 ^{cm}
5	0.024	54.0	0.098	0
10	0.024	48.6	0.098	0
15	0.024	51.5	0.102	0
20	0.024	10.8	—	—

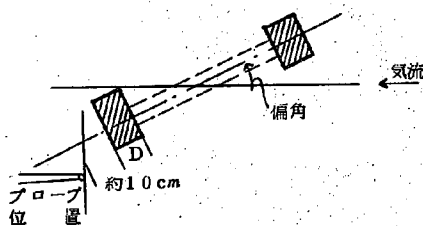
表 - 8 ストローハル数の実測値

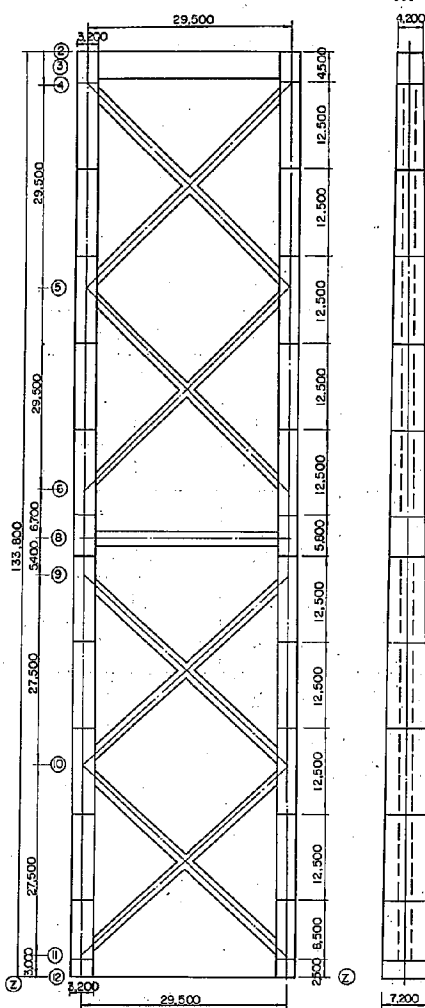
偏 角	測定位置	風 速	渦の卓越 振動数	基準幅	ストローハル数
0°	m 0.5	m/s 2.53	% 3.43	mm 81.2	0.110
	1.0	2.53	3.21	92.4	0.117
	1.5	2.53	2.87	103.6	0.118
5	0.5	2.87	3.86	85.4	0.115
	1.0	2.87	3.81	96.6	0.128
	1.5	2.87	3.51	107.7	0.132
10	0.5	2.70	3.76	89.1	0.124
	1.0	2.70	3.62	100.1	0.134
	1.5	2.70	3.51	111.1	0.144
15	0.5	2.56	4.04	92.1	0.145
	1.0	2.56	3.72	102.8	0.149
	1.5	2.56	3.57	113.7	0.159

(注) 基準幅は1塔柱の気流直角面への投影幅をとった。

測定位置は模型の塔頂よりの距離を表わす。

偏角は橋軸直角方向からの偏りを表わす。



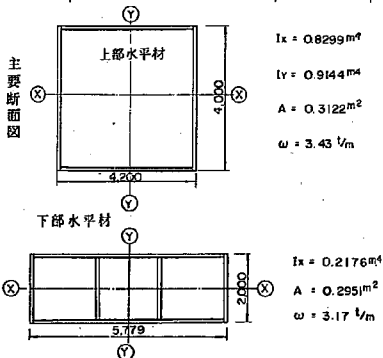
主塔一般図 $S = 1/500$ 

塔柱諸数值

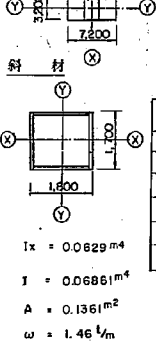
断面二次モーメント (mm ⁴)			断面積 (mm ²)
I _x	I _y	I _{xy}	F
1.80	1.08	0.764	
1.64	1.09	0.761	
1.68	1.09	0.771	
2.38	1.26	0.810	
3.05	1.38	0.880	
3.23	1.39	0.889	
3.38	1.40	0.896	
4.39	1.55	0.963	
5.31	1.65	1.000	
5.42	1.66	1.004	

重量分布 (1/m)
10.0
6.4
8.5

主要断面图



斜



部 材 名	部材の全重量	2-2軸に關する 慣性モーメント
上端水平材	63 t	1,094,000 cm ⁴
斜 材	324 "	1,706,000 "
下端水平材	73 "	147,000 "
塔 柱	2352 "	1,245,000 "
梯子	3 "	179,000 "
計	2842 "	1,557,500 "

図-1 主塔一般図および諸元

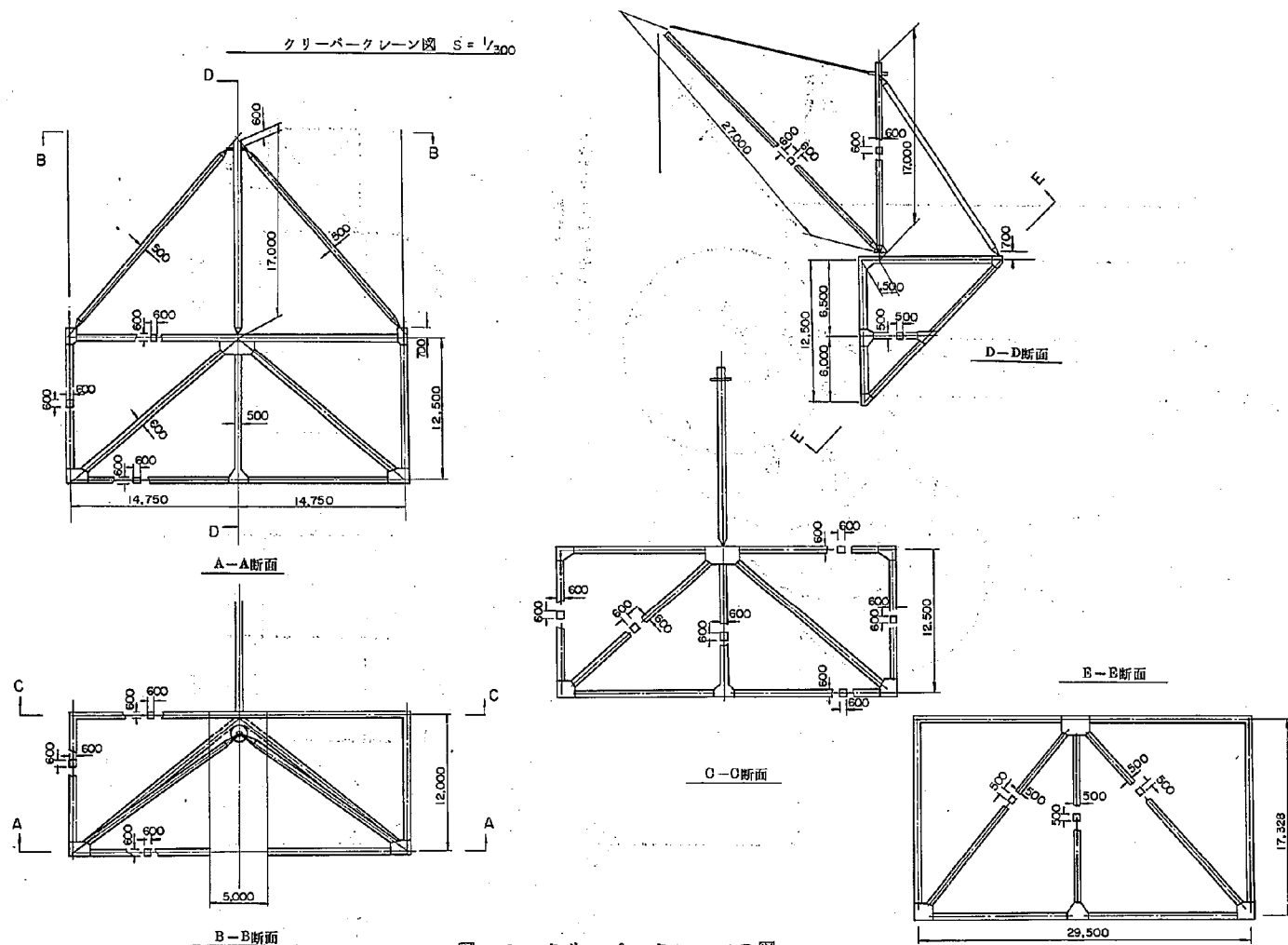


図-2 クレーンクレーンの図

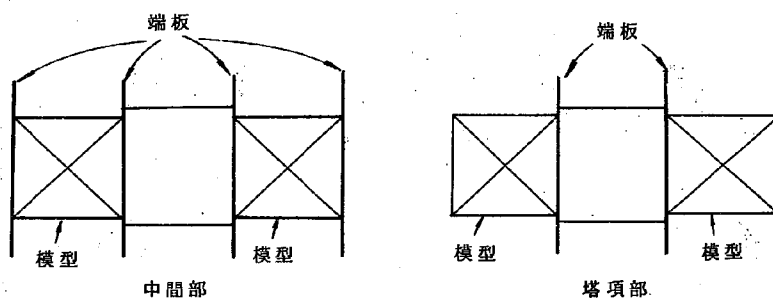
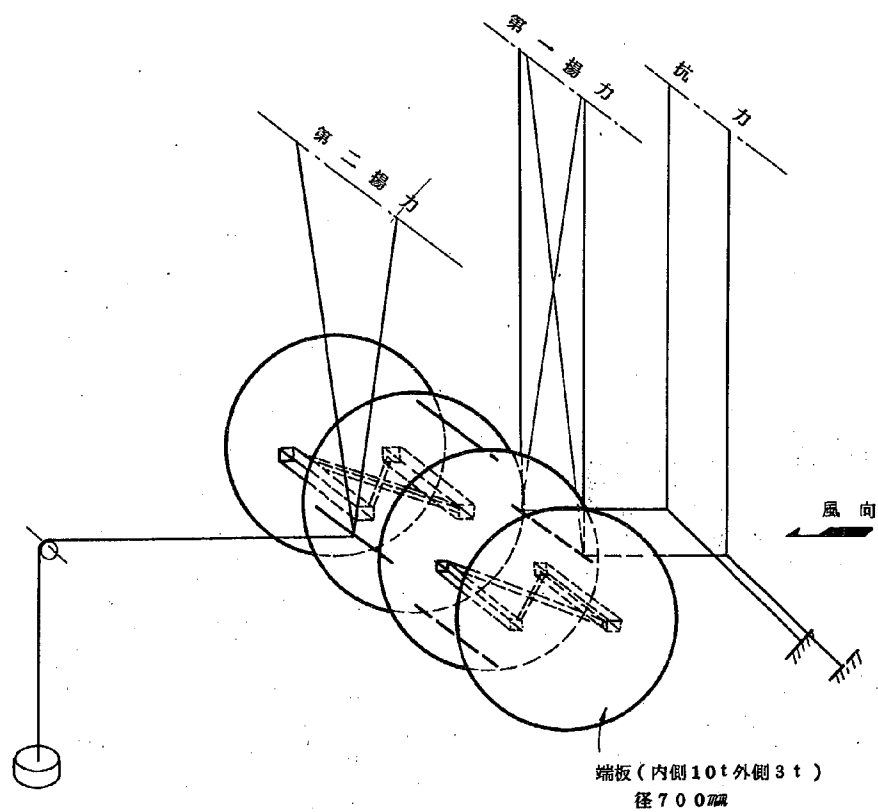


図-3 模型取付要領

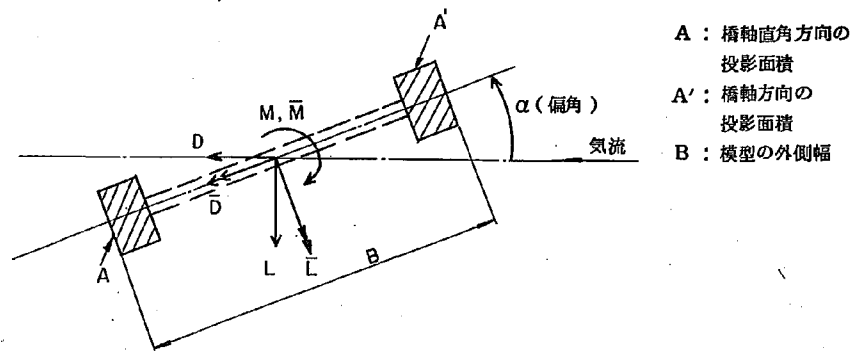


図-4 3分力の定義

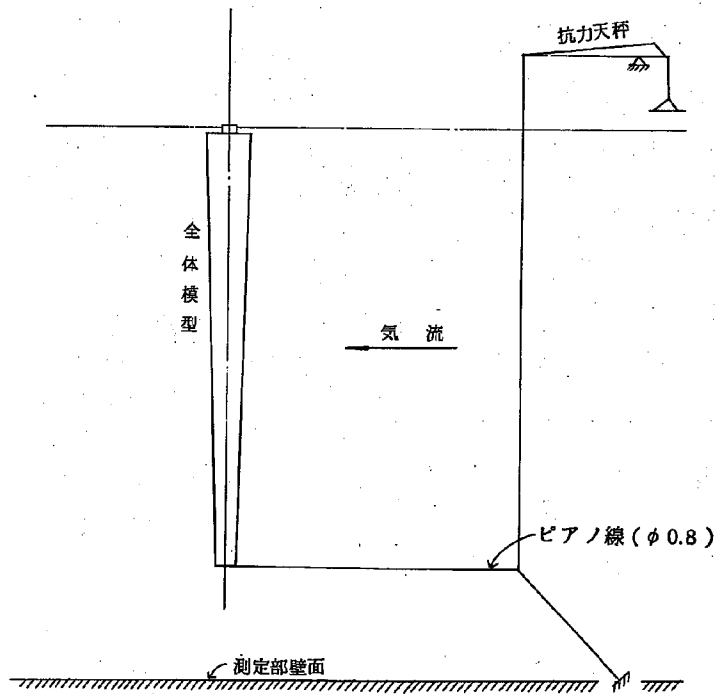


図-5 全体模型による抗力係数の測定

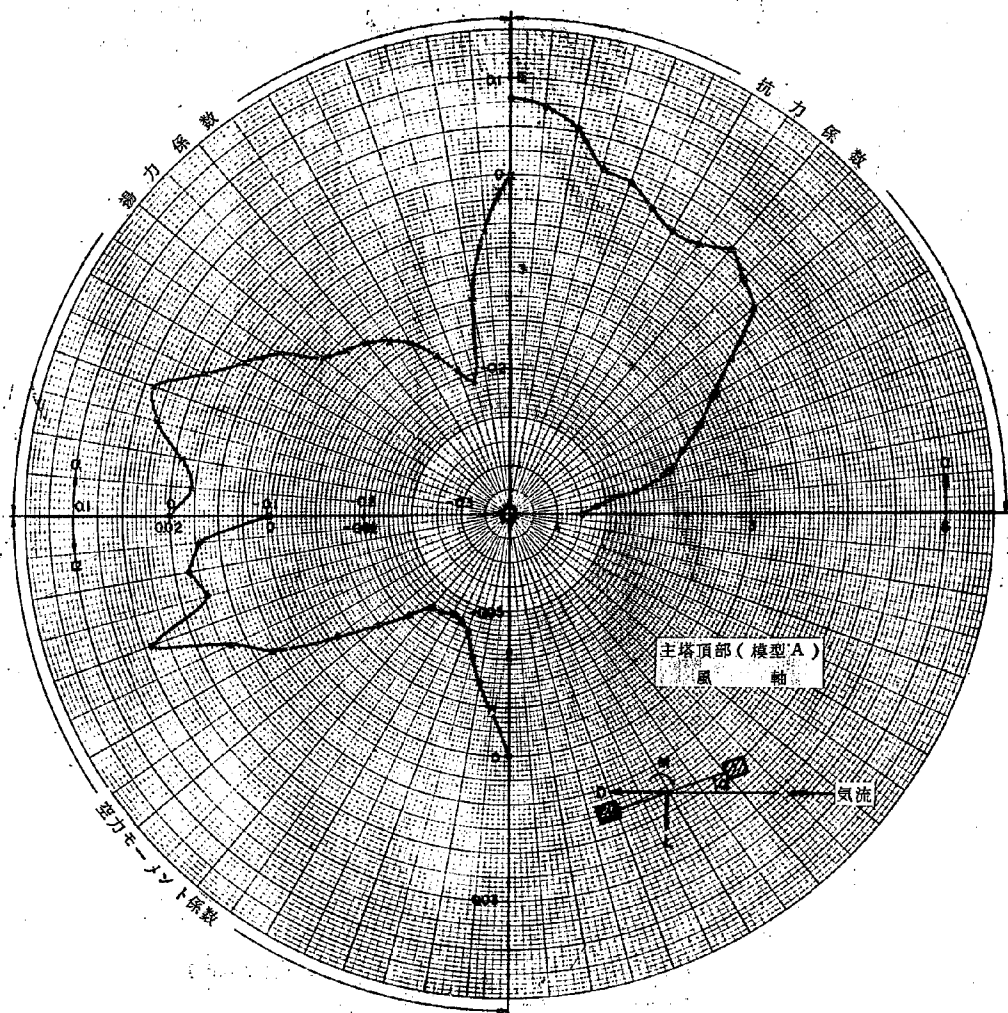


図-6

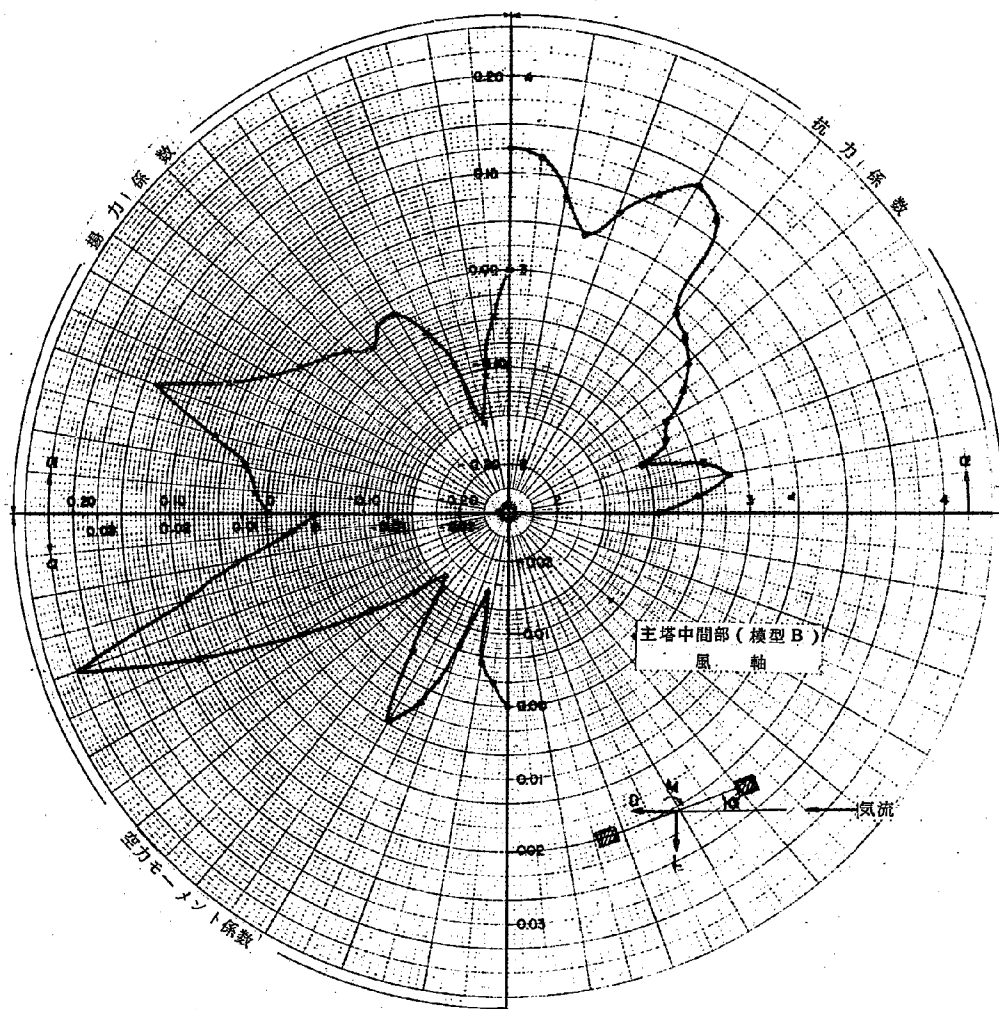


図-7

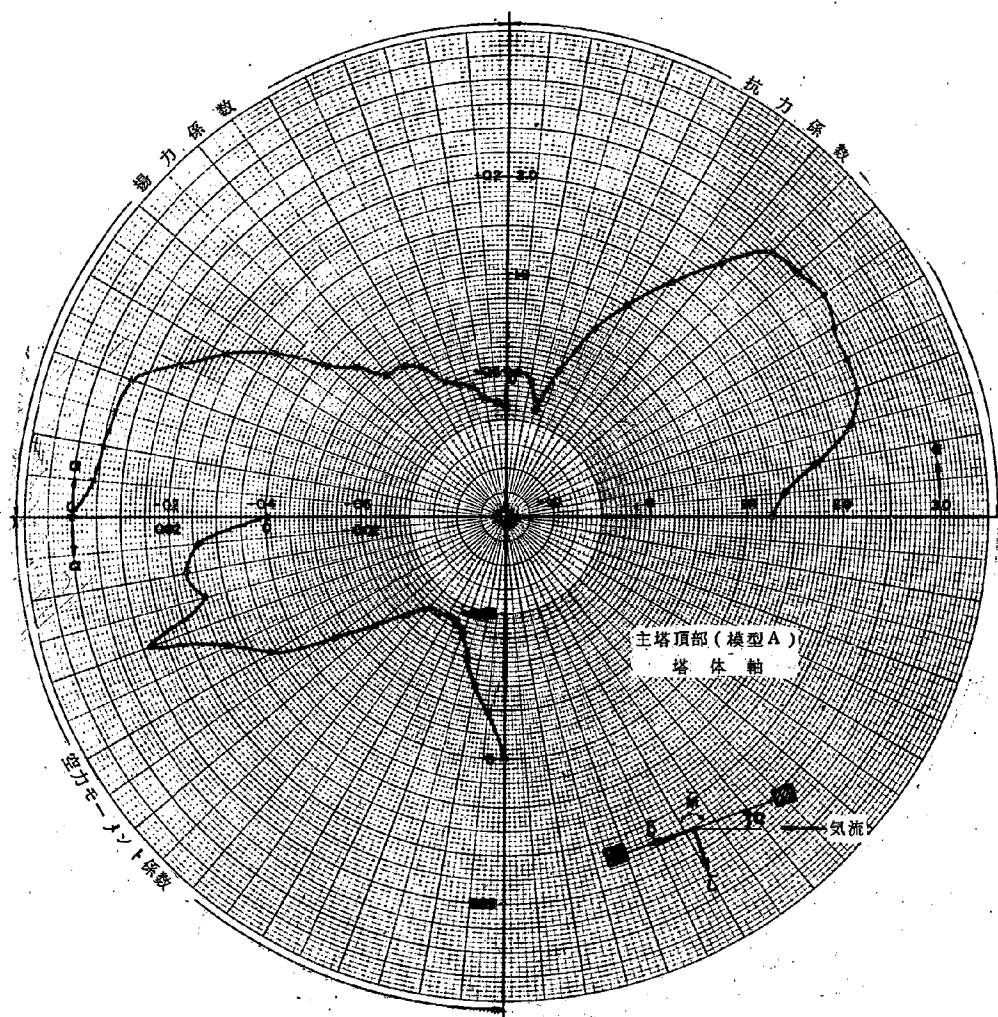


図-8

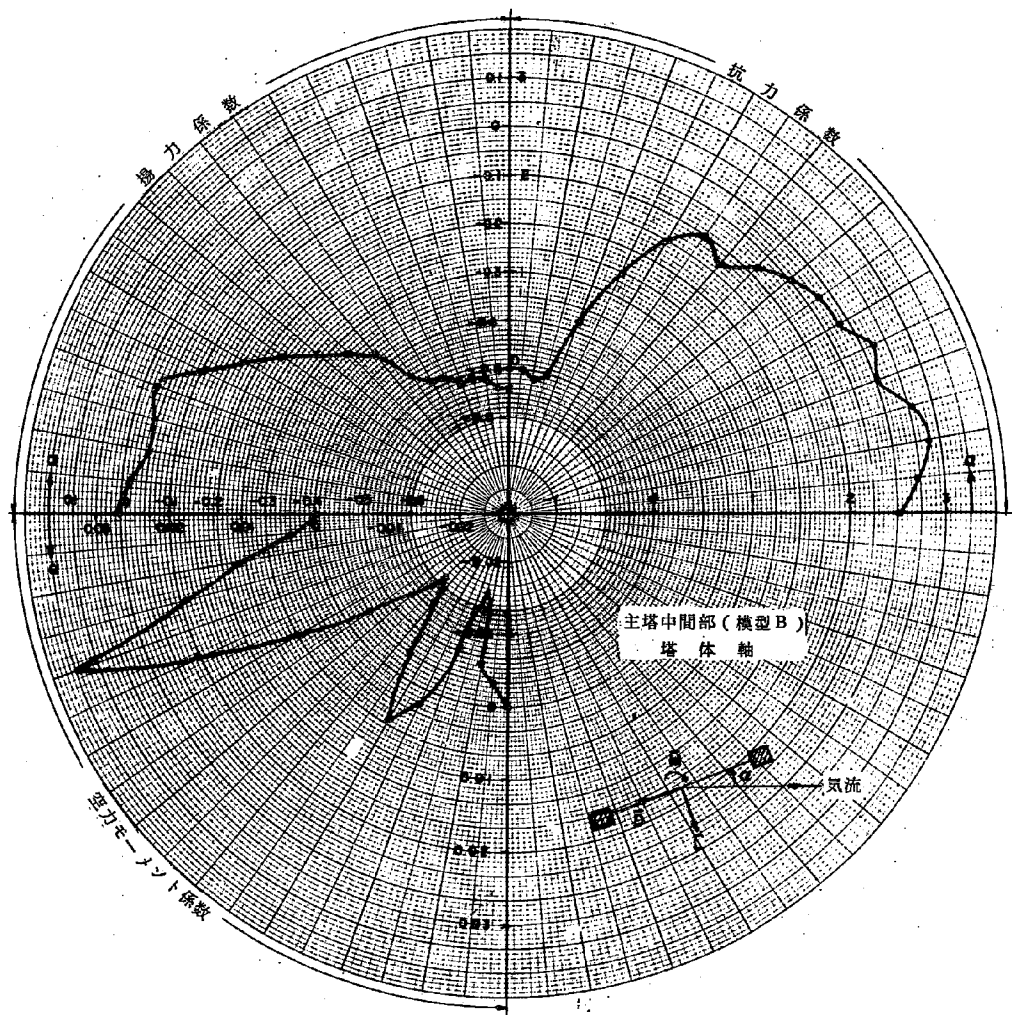


図-9

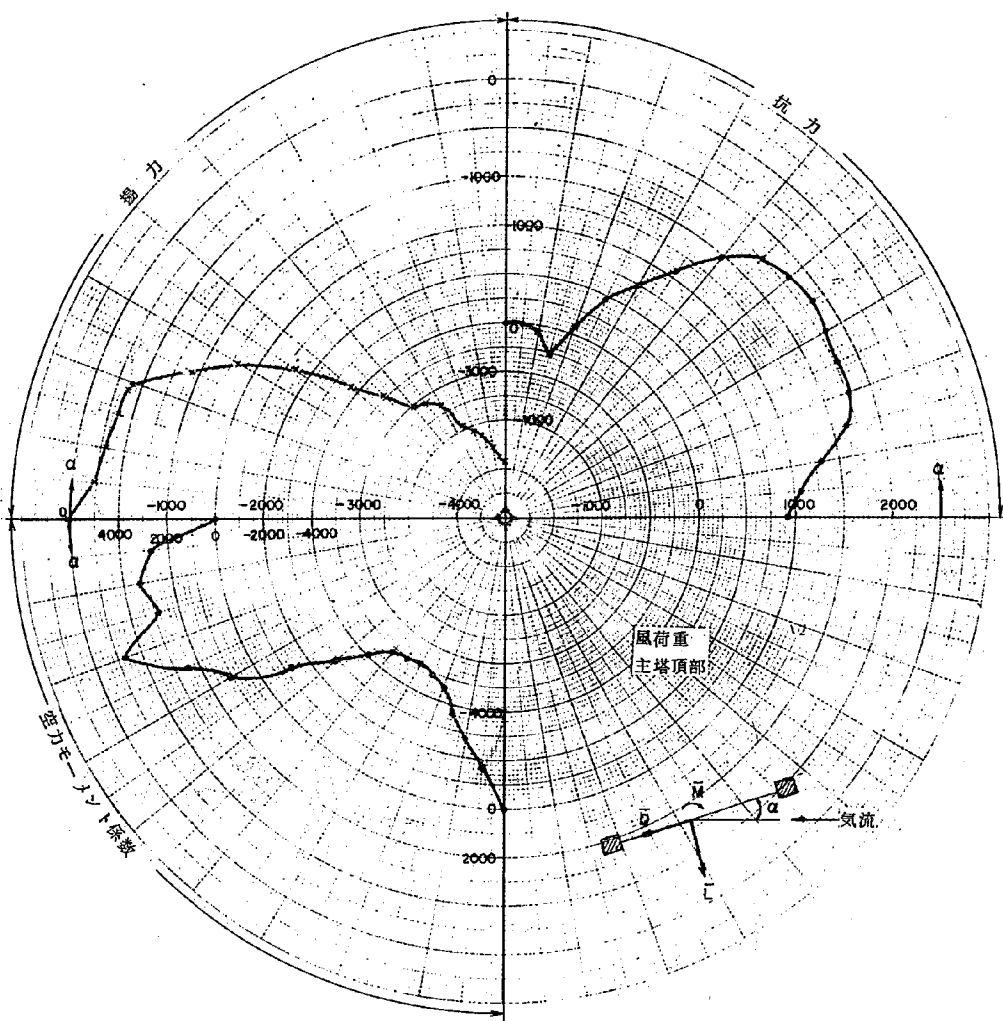


図-10

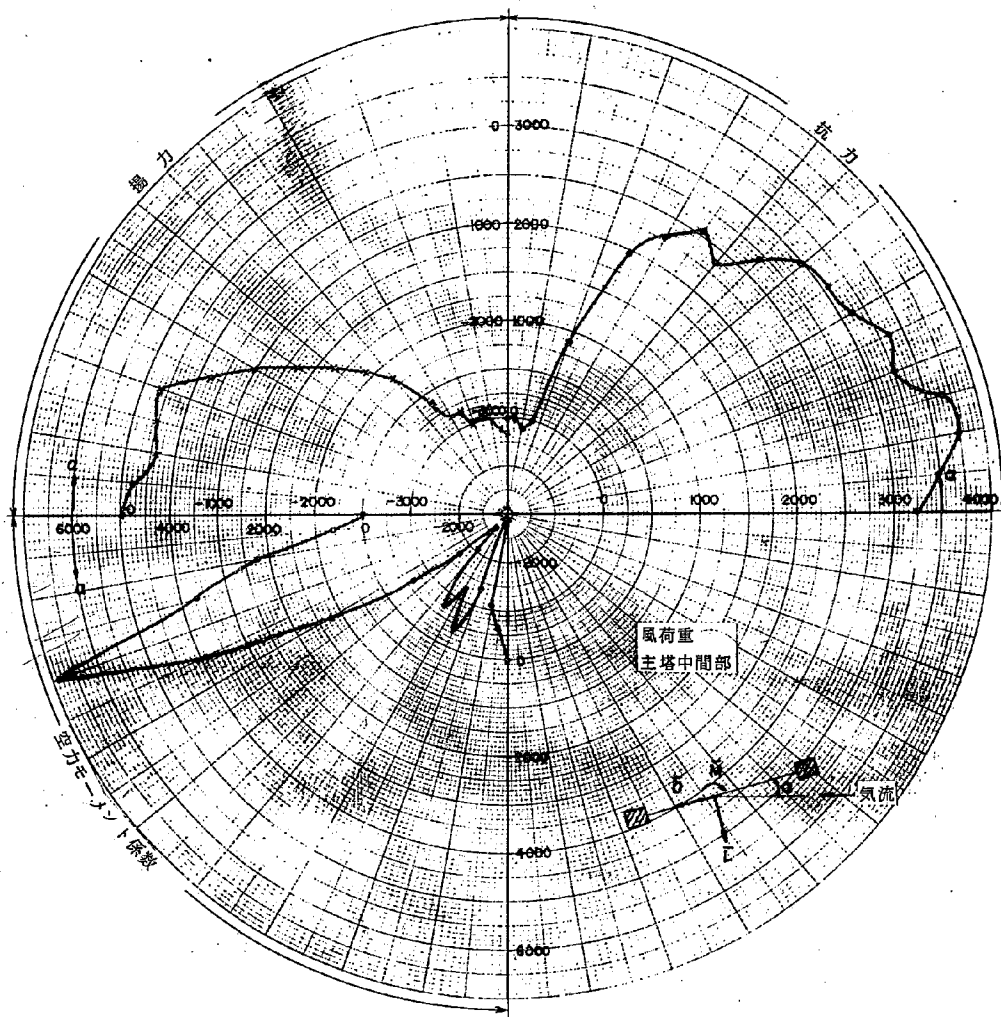
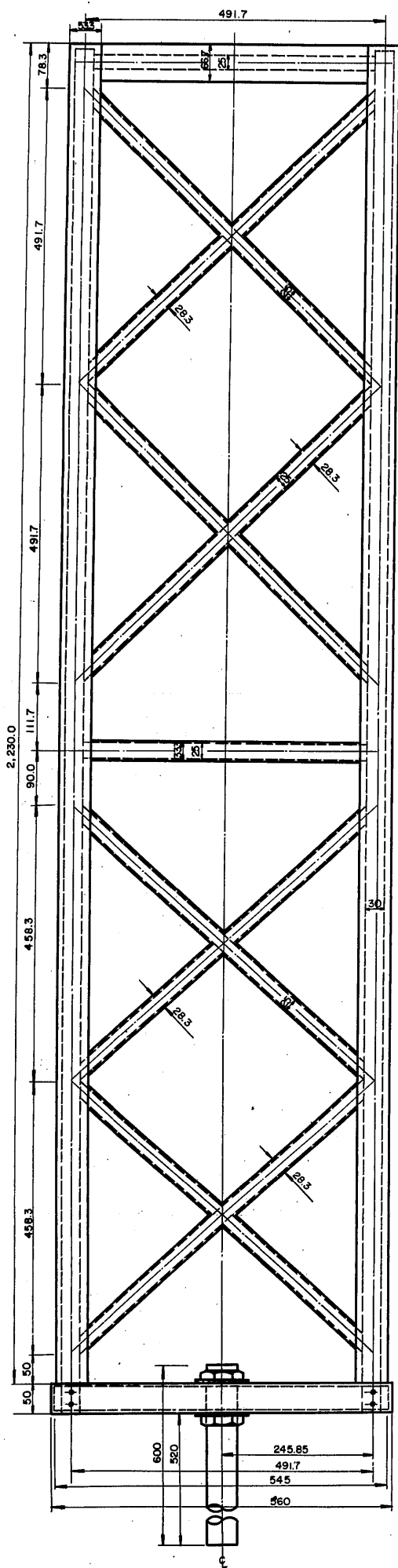
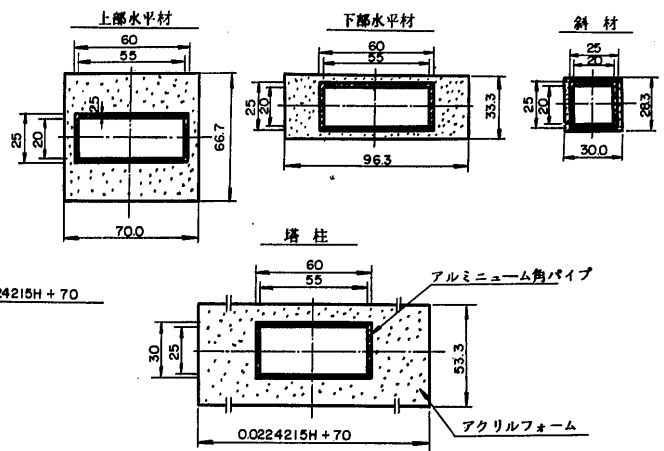


図-11

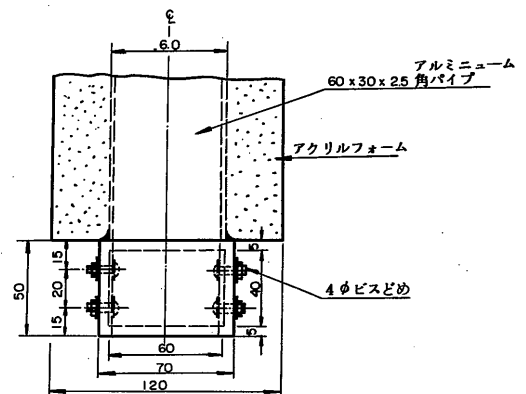
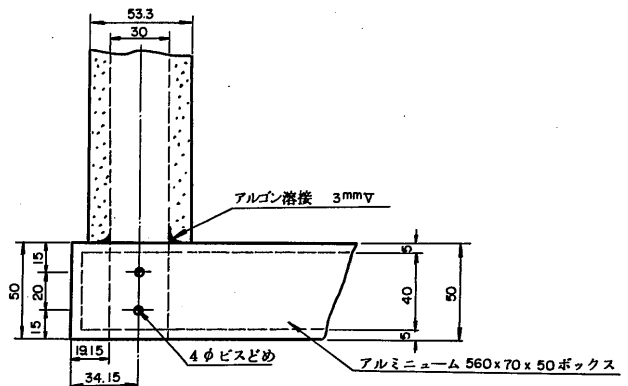
主塔一般図



主要断面図 $S = 1/2$



基塔部取付図 $S = 1/2$



- アルミニウム角パイプとパイプとの接合部はアルゴン溶接としノド厚2mm以上とし所用の強度が得られるようにする。
- アクリルフォームとアルミニウム角パイプとの接着は接着剤で接着する。
- その他不詳の点が生じた際は係員の指示に従う。

図-12 全体模型図面

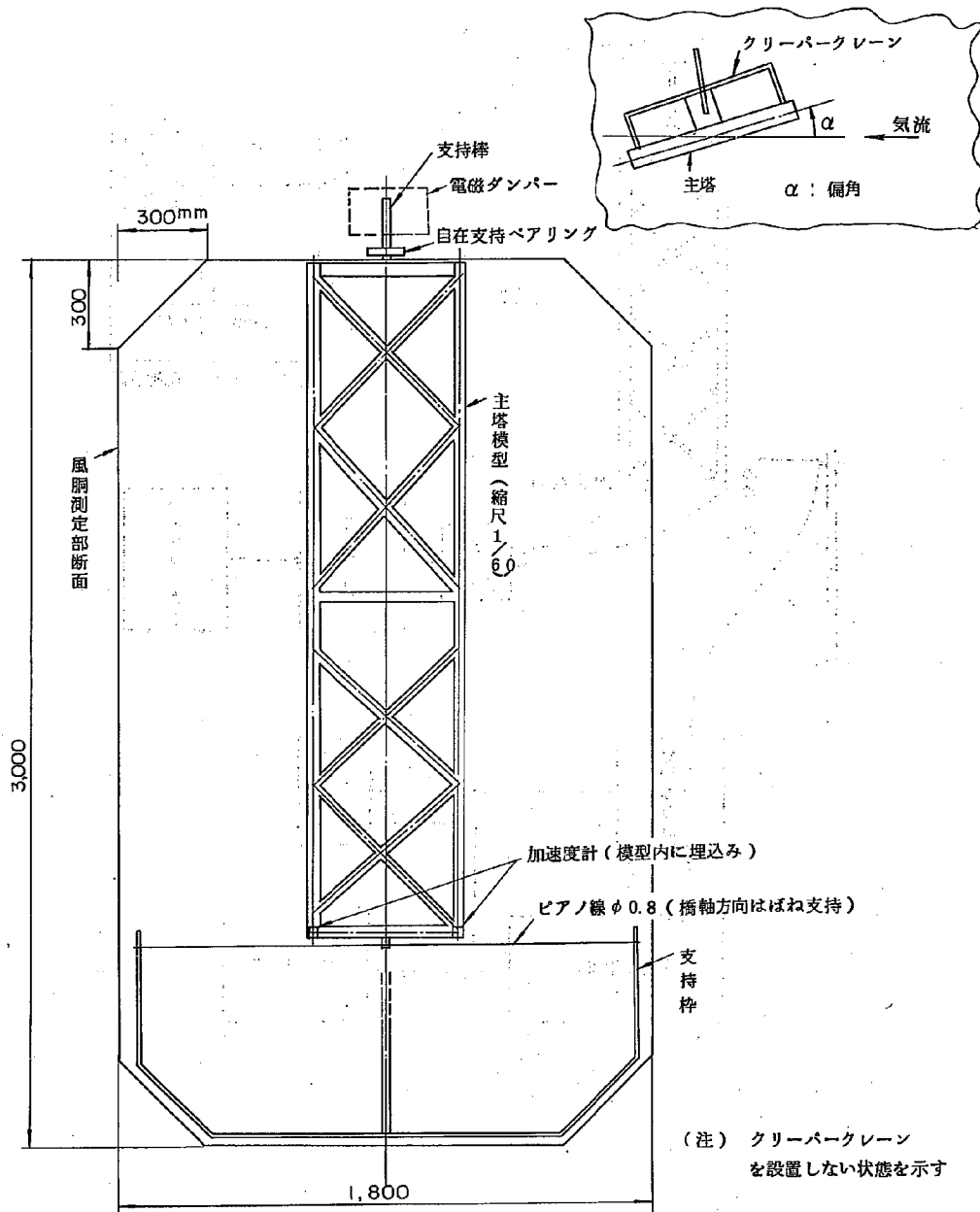


図-13 模型取付要領

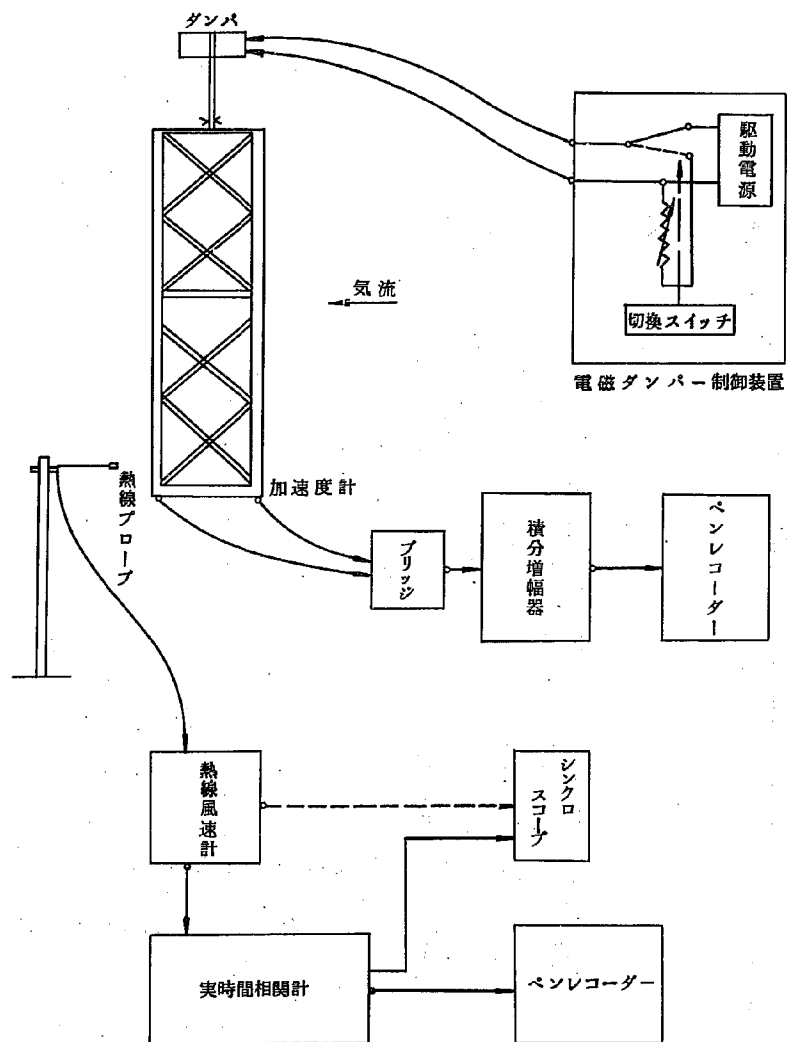
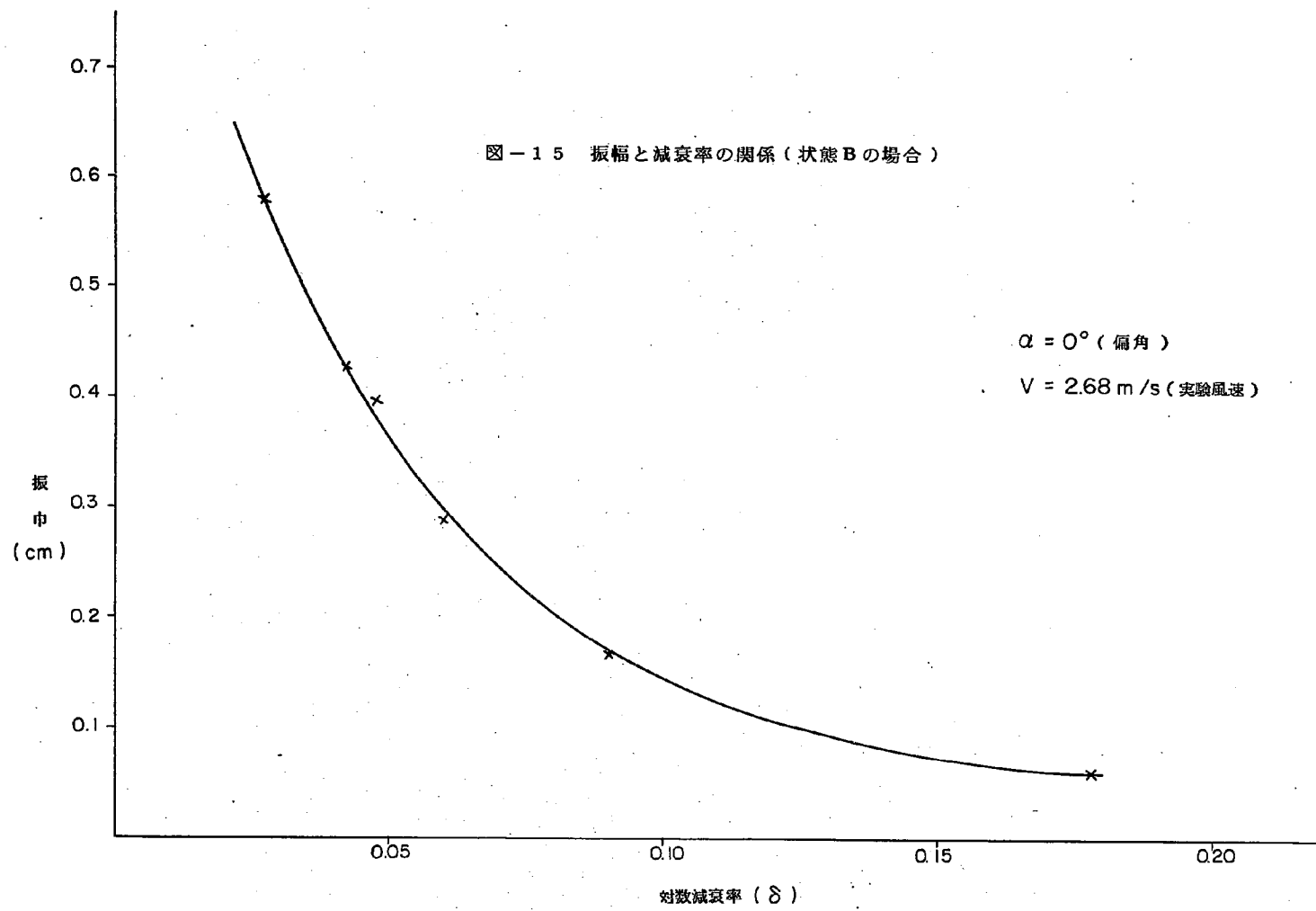


図-14 計測装置



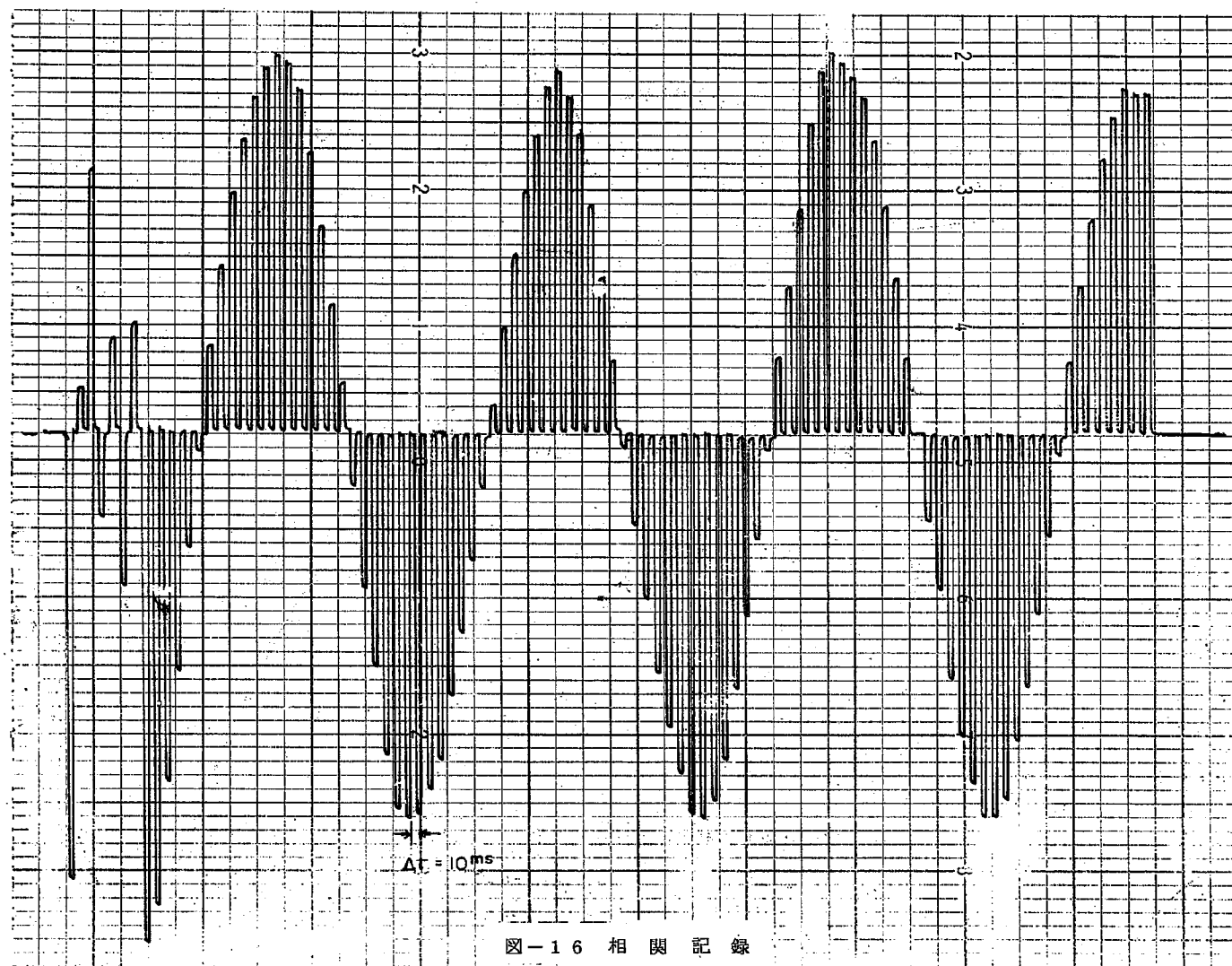


図-16 相関記録

矩形断面の抗力に関する一実験（中口 博・橋本貴久裕・武藤真理）

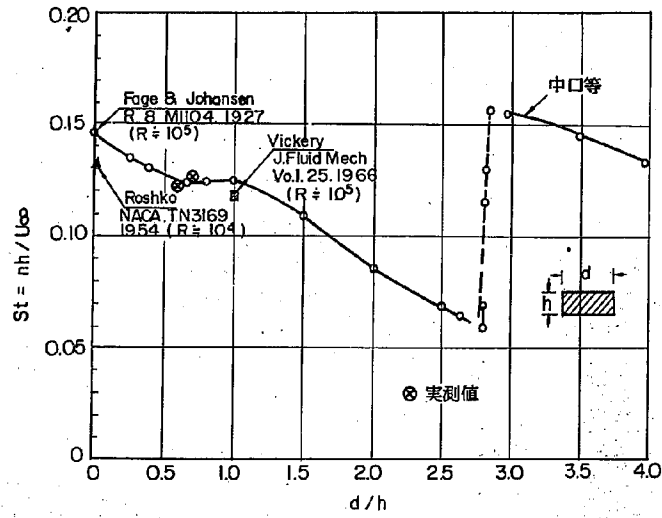


図-17 ストロール数の実測値

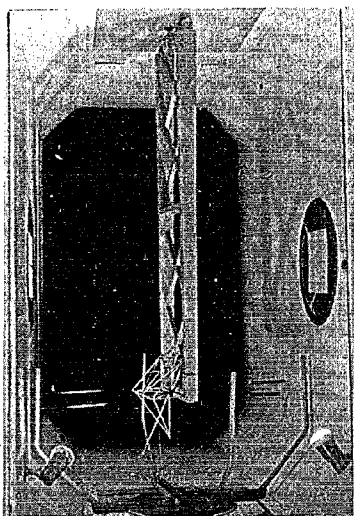


写真-1 主塔模型 (縮尺1/60)

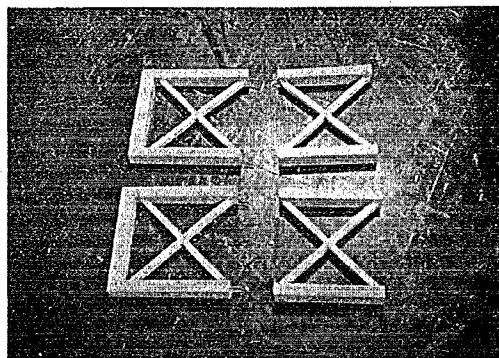


写真-2 部分模型 (縮尺1/100)

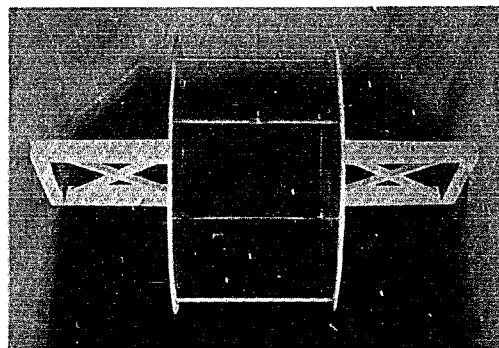


写真-3 空気力係数の測定
(模型A)

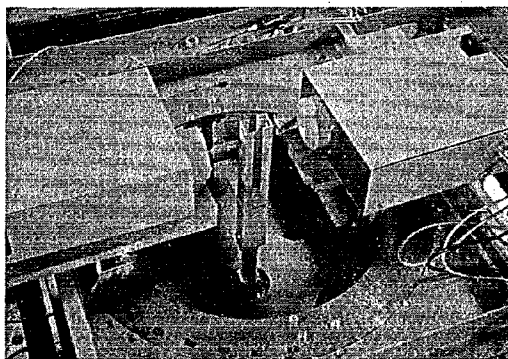


写真-4 電磁ダンパー装置

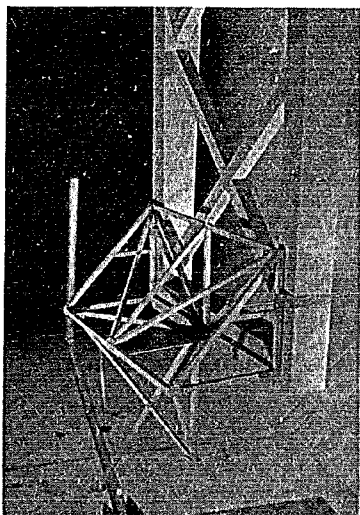


写真-5 クリーパークレーン

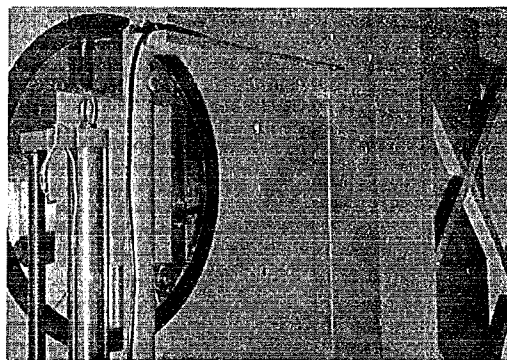


写真-6 後流渦の測定

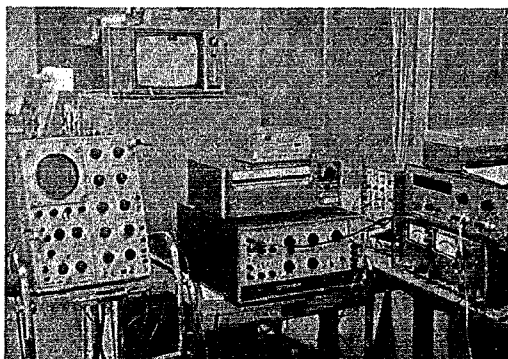
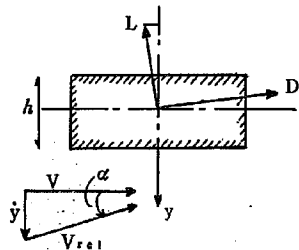


写真-7 実時間相関計

(附) 跳躍振動について

主塔には風琴振動のみで跳躍振動は観測されなかったが、得られた三分力曲線には揚力曲線に迎角 0° 附近で負勾配が見られる。そこで、この問題を考えてみる。



左図のようなモデルが気流中で上下動をしている場合、水平風に対する相対迎角は $\alpha = \arctan \frac{\dot{y}}{V}$

作用空気力は2次元的な抗力・揚力のみを考え、 $D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D \cdot \ell h$,

$L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L \cdot \ell h$ 。従って y 方向の力は

$$F_y = -(C_D \sin \alpha + C_L \cos \alpha) \frac{1}{2} \rho V^2 \sec^2 \alpha h \ell = C_{Fy} \frac{1}{2} \rho V^2 h \ell$$

$$\text{但し } C_{Fy} = -(C_L + C_D \tan \alpha) \sec \alpha$$

Parkinson, Novak は C_{Fy} を $\tan \alpha = \dot{y}/V$ の級数に展開して、運動方程式に代入し、これを Krylov-Bogoliubov の方法で解いている。主塔模型の場合の抗力・揚力曲線を上式の定義に従って書き換えると図一附のごとくなる。これについて

$$C_{Fy} = A_1 \tan \alpha + A_3 \tan^3 \alpha + A_5 \tan^5 \alpha + A_7 \tan^7 \alpha$$

として係数を求めると

$$A_1 = 1.634, A_3 = 34.081, A_5 = -797.21, A_7 = 3392.5$$

Den Hartog, のギャロッピングの条件は $V \geq V_0 = \frac{\beta \omega h}{n A_1}$ で示される。主塔の場合の諸定数は次の通りである。

$$\delta = 0.03 \quad \text{主塔の対数減衰率 (仮定値)}$$

$$\omega = 1.916 \text{ rad/sec} \quad \text{主塔完成時}$$

$$h = 5 \text{ m} \quad 4.2 \sim 7.2 \text{ m の中間値}$$

$$\rho = 0.125 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \text{ m}^{-4}$$

$$m = 2.167 \times 10^3 \text{ Kg} \cdot \text{sec}^2 \text{ m}^{-4}$$

$$\ell = 1 \text{ m}$$

これを上式に代入すると

$$V_0 = 77.7 \text{ m/s}$$

となる。

以上は塔中間部模型について求められたもので塔頂模型ではこのような特性は見られない。

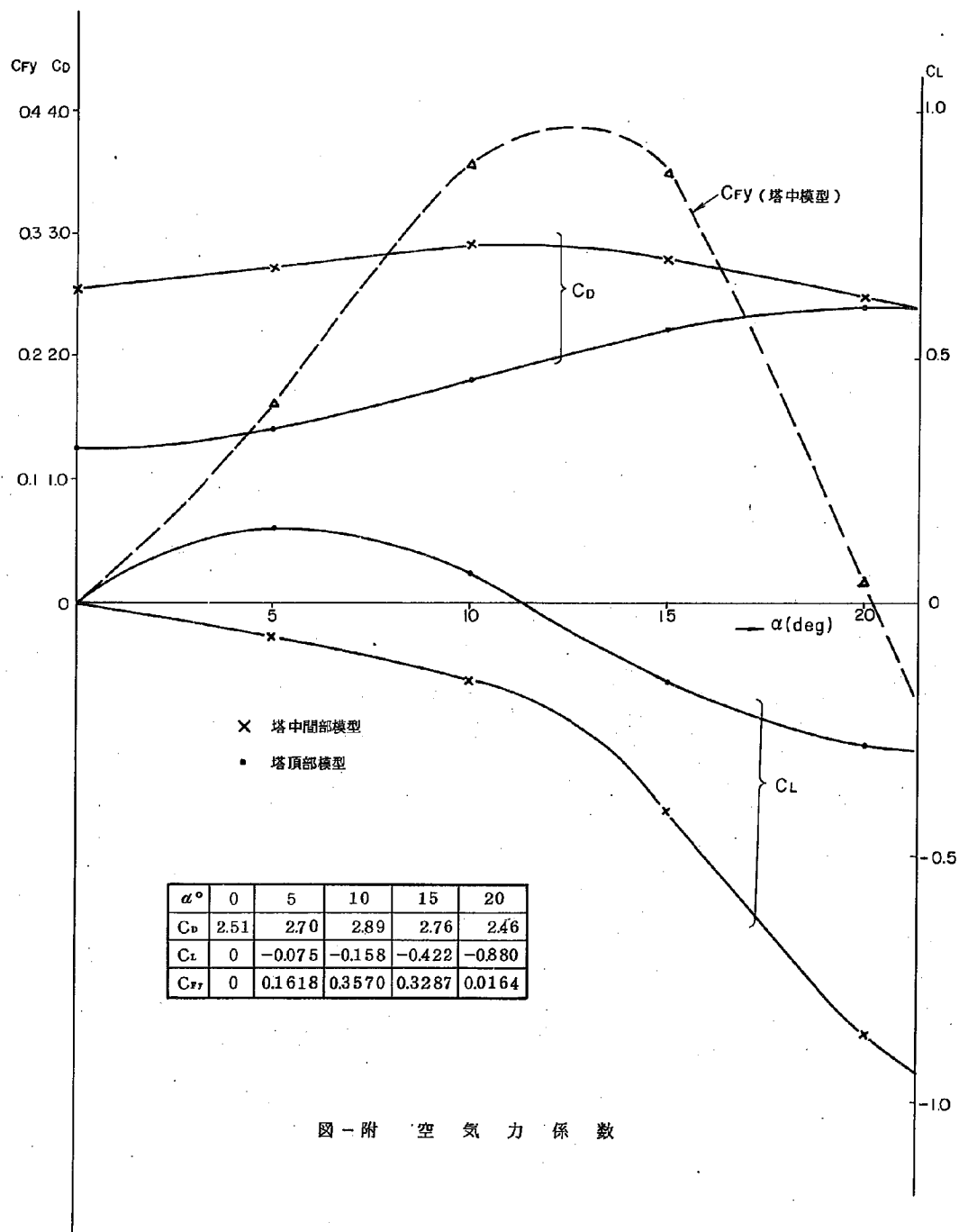


圖-附 空氣力係數