

長大橋の制振方法

Anti-Vibration Methods for Long Span Bridges

Hiroshi TANAKA

田中 洋



風による振動現象 (Wind Vibrations)

- 振動現象の分類
- 振動現象の設計への対処法

制振方法の分類

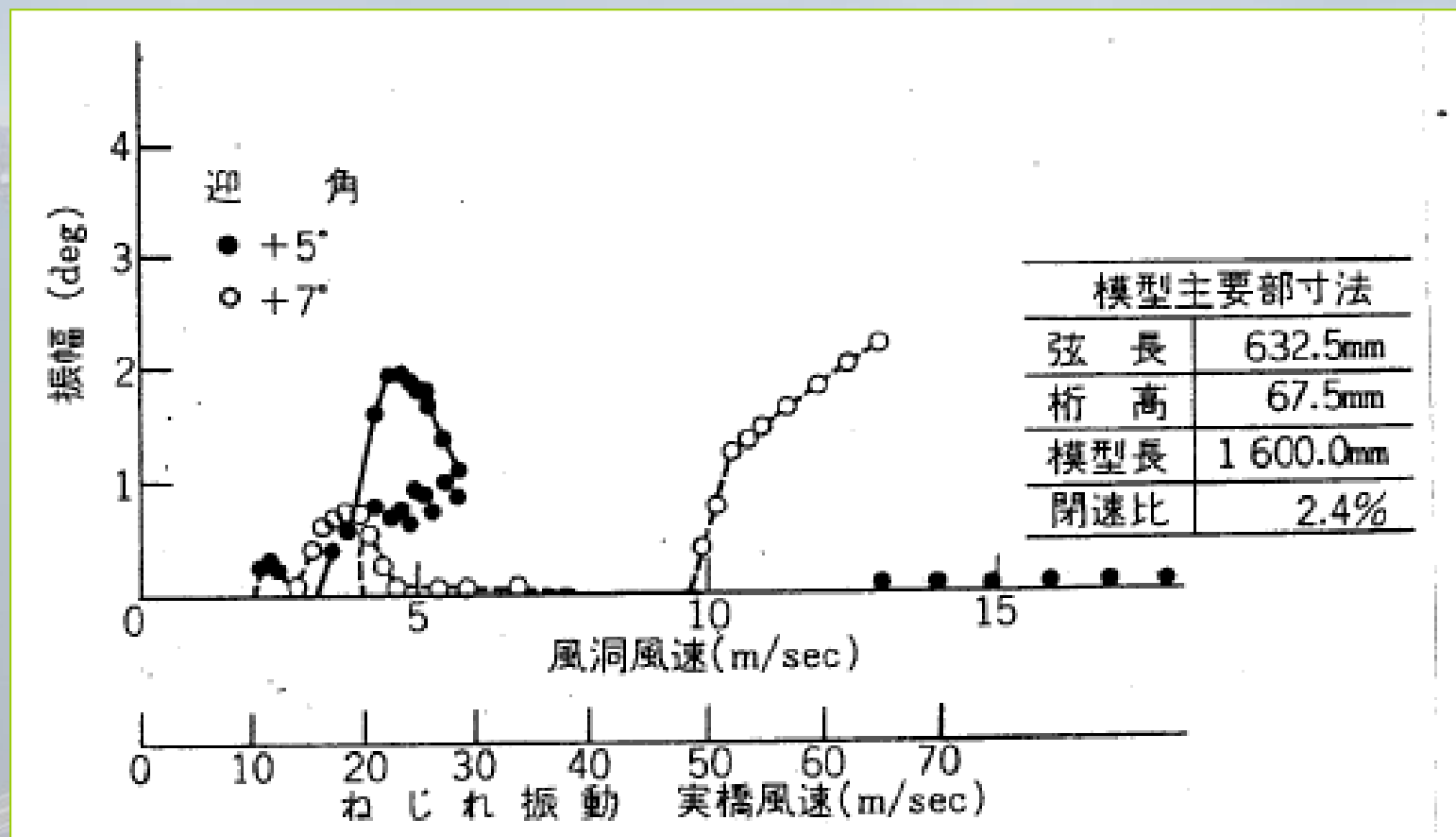
▶ 形状変化法

- 振動は、橋梁断面周りの流体流れの形態で振動が 起こる。
- よって、振動を止めるには流体流れの形態を変化させることが対策となる。

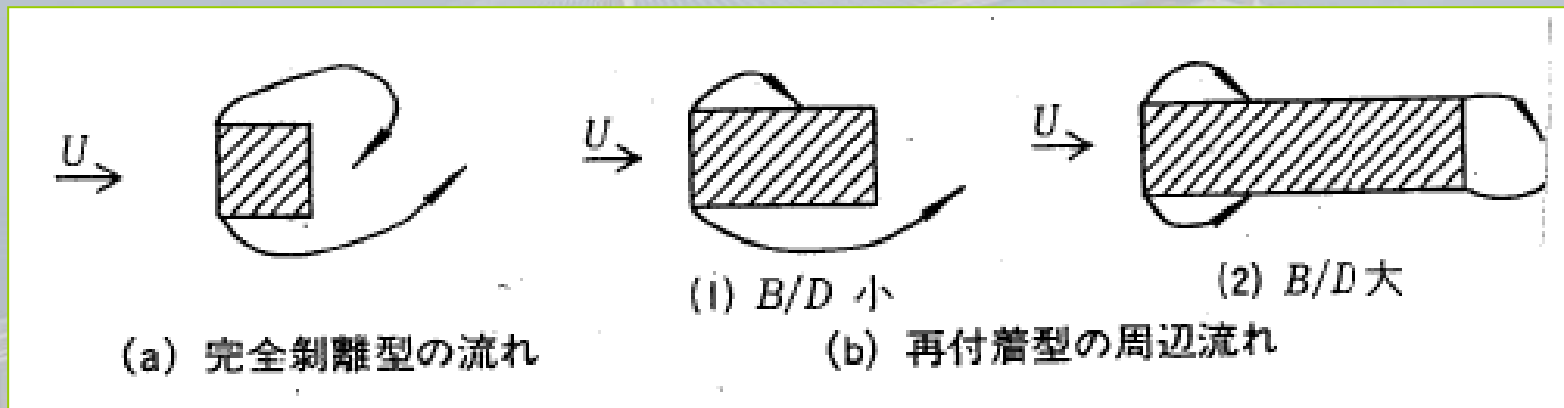
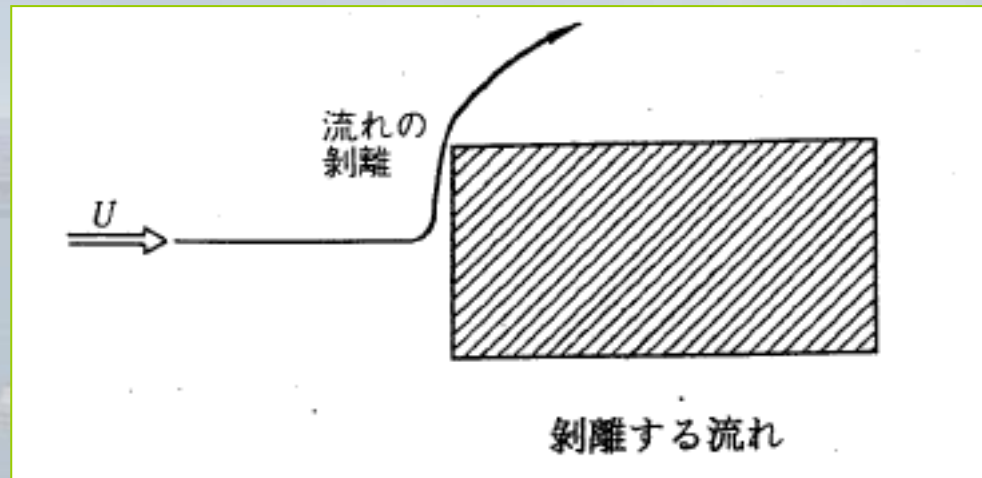
▶ 制振装置設置法

- Passive Damper
- Active Damper

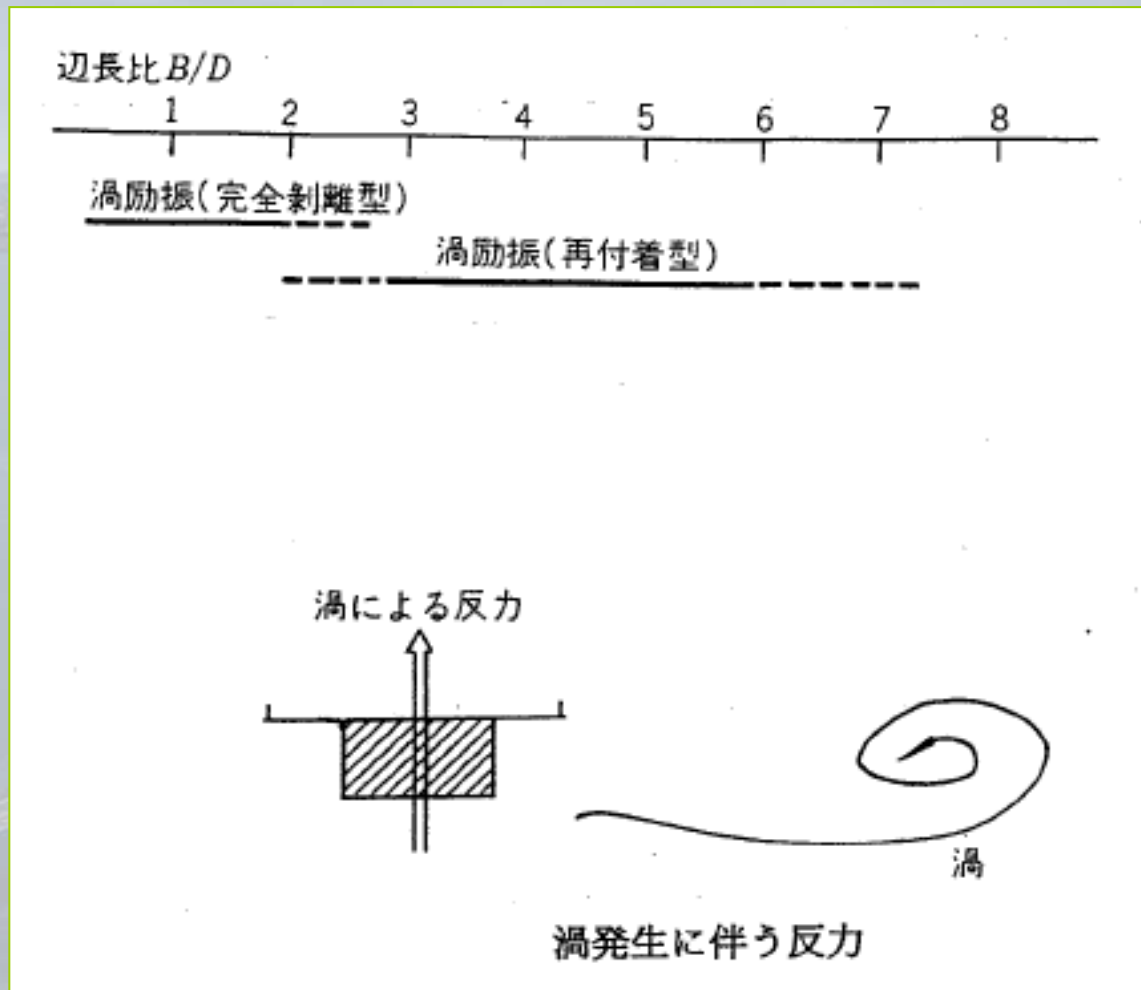
ある橋桁の「振幅—風速曲線」



振動は流れの剥離が原因



渦励振の原因



ギャロッピングの原因

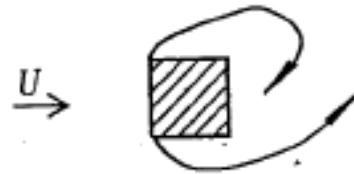
辺長比 B/D

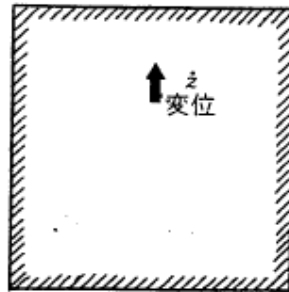
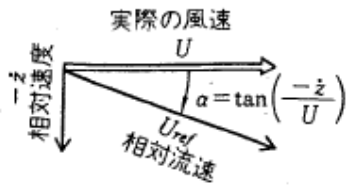


渦励振(完全剥離型)

渦励振(再付着型)

ギャロッピング



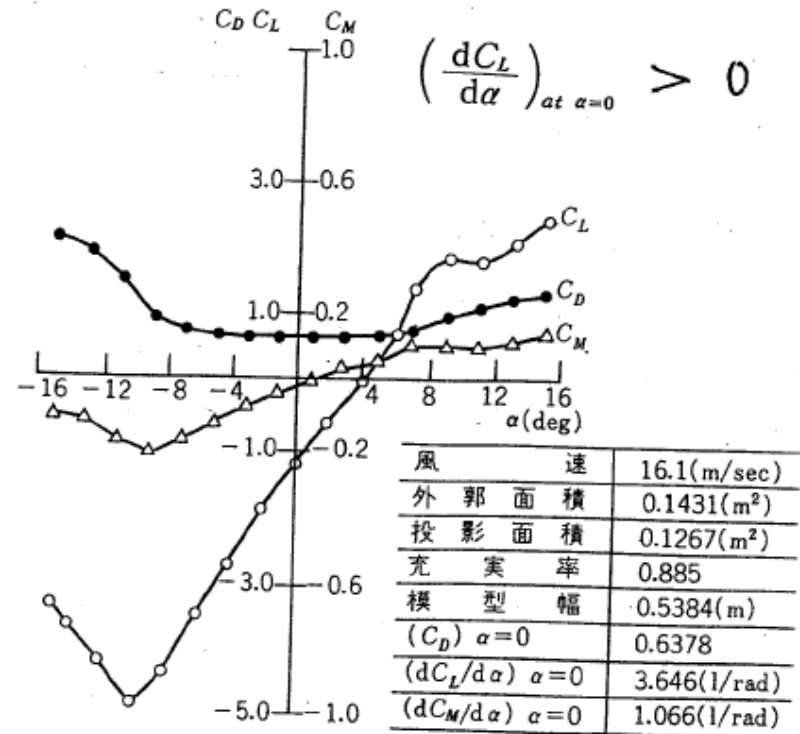


$$L \doteq P_{L,0} + \left(P_{D,0} + \frac{dP_L}{d\alpha} \Big|_{\alpha=0} \right) \alpha$$

$$\doteq P_{L,0} + \left(P_{D,0} + \frac{dP_L}{d\alpha} \Big|_{\alpha=0} \right) \left(-\frac{\dot{z}}{U} \right)$$

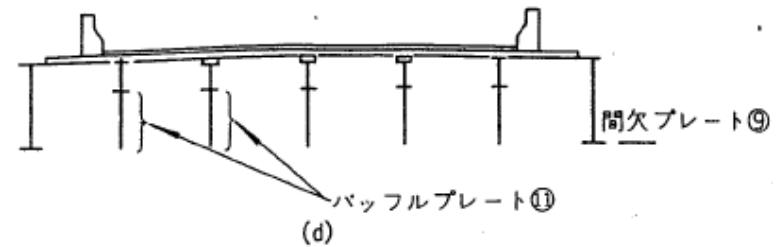
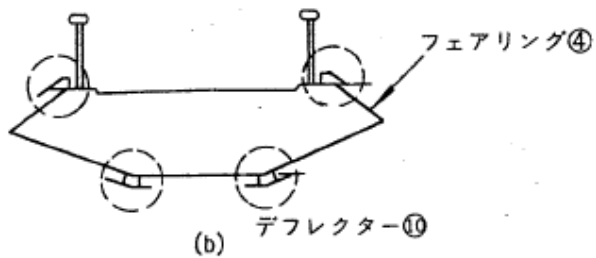
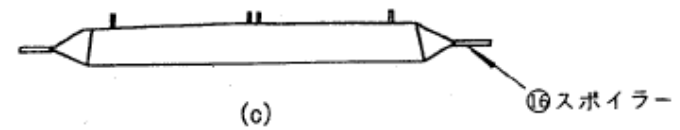
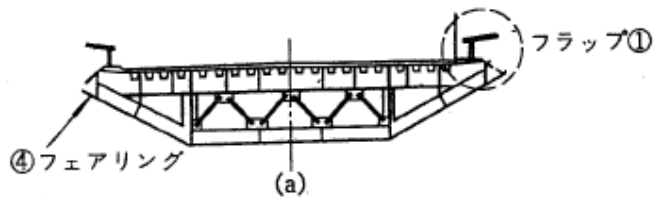
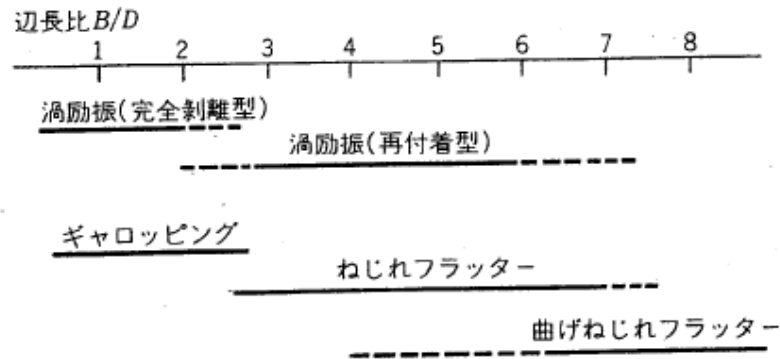
$$P_{D,0} + \frac{dP_L}{d\alpha} \Big|_{\alpha=0} > 0$$

$$P_{D,0} + \frac{dP_L}{d\alpha} \Big|_{\alpha=0} > 0$$

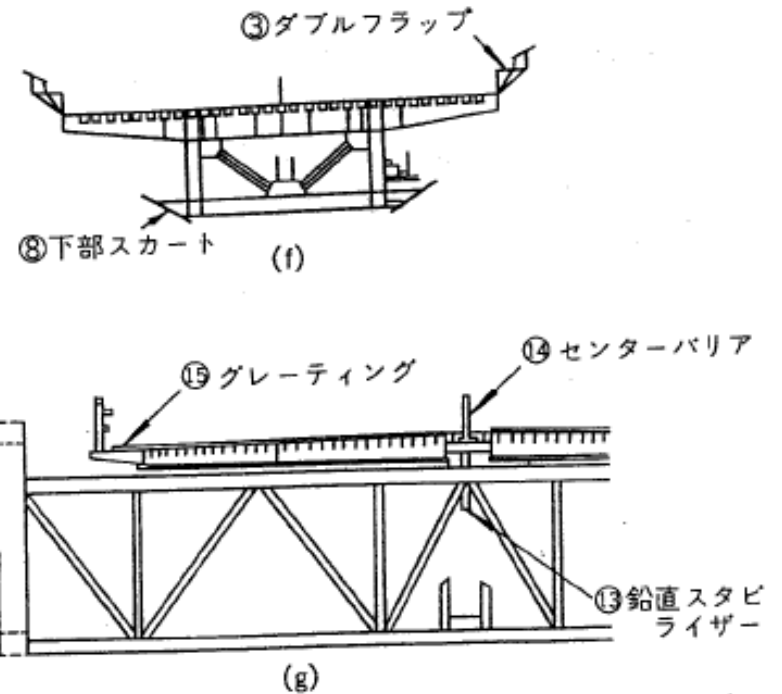
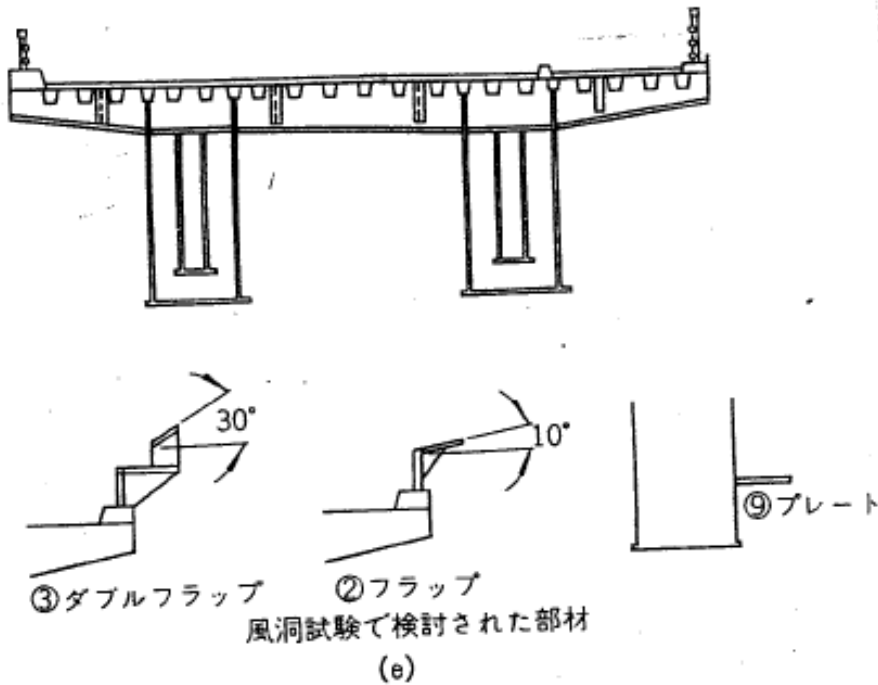


ある橋桁の三分力曲線

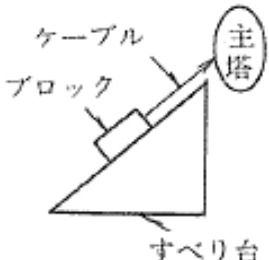
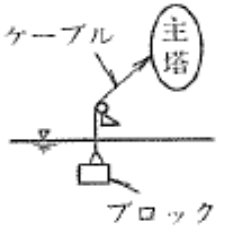
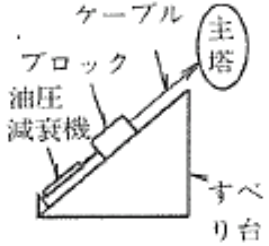

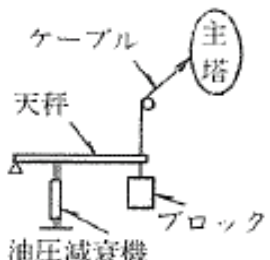
制振対策(1)



制振対策(2)



つり橋主塔の制振装置

	① スライディングブロック方式	② 水中ブロック方式	スライディングブロックと油圧減衰機の併用方式	④ 油圧減衰機方式	⑤ 油圧減衰機に天秤を組合せる方式
制振法	 <p>ケーブル ブロック 主塔 すべり台</p> <p>ブロックとすべり台の間のクーロン摩擦により、減衰性を振動系に付加する。</p> <p>〔施工例〕 フォースロード橋 関門橋 平戸大橋 因島大橋(3P)</p>	 <p>ケーブル 主塔 ブロック</p> <p>水の粘性抵抗により、減衰性を振動系に付加する。</p> <p>〔施工例〕 南海大橋</p>	 <p>ケーブル 主塔 ブロック 油圧減衰機 すべり台</p> <p>ブロックとすべり台の間のクーロン摩擦および、油の粘性抵抗により、減衰性を振動系に付加する。</p>	 <p>ケーブル 主塔 油圧減衰機 ブロック</p> <p>油の粘性抵抗により、減衰性を振動系に付加する。</p> <p>〔施工例〕 因島大橋(2P)</p>	 <p>ケーブル 主塔 天秤 油圧減衰機 ブロック</p> <p>油の粘性抵抗により、減衰性を振動系に付加する。</p> <p>ブロックの振幅は天秤によって縮小され、油圧減衰機の振幅となる。</p>

北備讚瀬戸大橋主塔制振装置(Passive Damper)



Active Damper



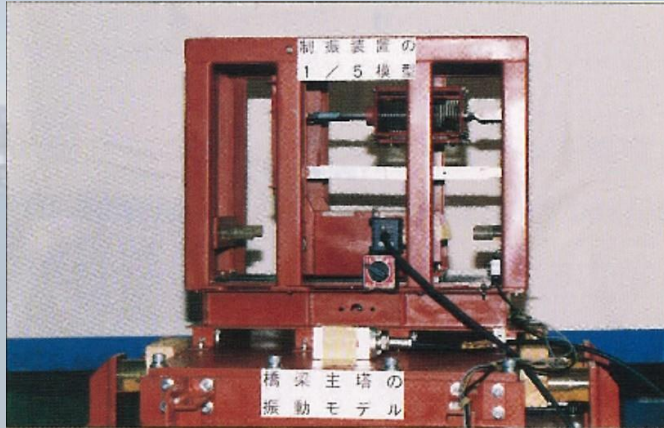
Characteristics of Fuzzy Control

▶ 特徴

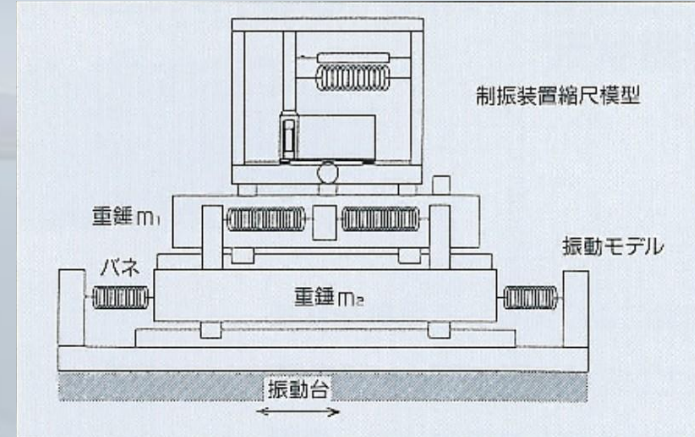
- 1) 低振動数から高振動数まで、幅広い範囲で制振が可能です。
- 2) ファジィ制御を用いているため、制振対象の形状変化、振動特性変化によらず、安定に制振効果があります。
- 3) 振動状態を監視し、小さな振動や突発的な振動には休止し、継続的な有害振動時のみに動き、無駄なエネルギー消費を防ぎます。
- 4) 停電時にはパッシブ型に切り替わり、制振性能を維持するタイプと、非常用発電機により、常時アクティブ型として作動するタイプがあります。
- 5) パソコンの画面上で簡単に操作が出来ます。また、作動状況を確認することも出来ます。

模型試験

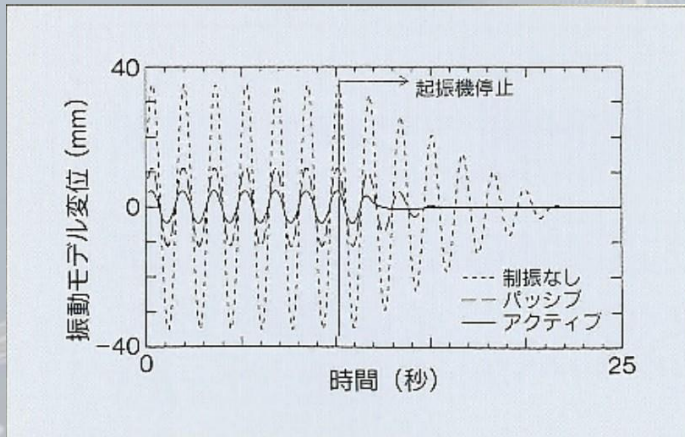
- 縮尺1/5模型による制振の効果の検証試験を行い、非制振時に比べ振幅を約1/5に低減し、パッシブに比べても2倍の制振効果があることを確認しました。



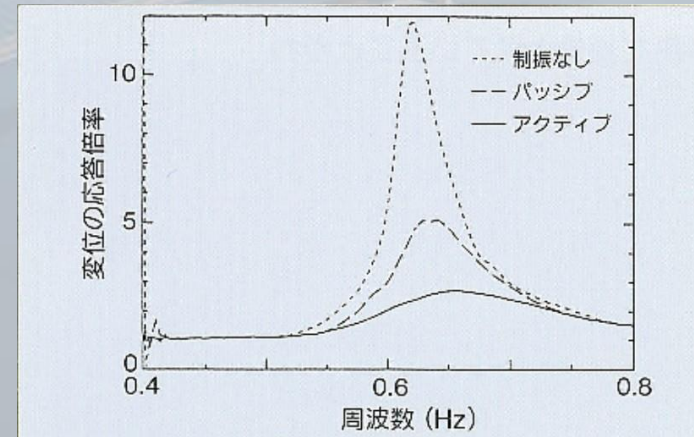
▶ 縮尺 1/5 模型



▶ 実験装置モデル図



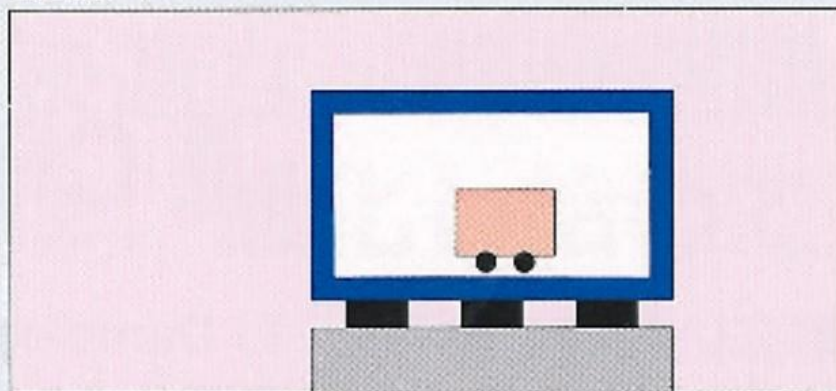
▶ 自重振動波形の比較



▶ 周波数特性の比較

ファジィ塔頂制振装置システム

装置 No. : 1



<イベント情報>

07/06/95 21:29 自動制御開始

ファイル使用率: 62%

切替

プリント

システム設定

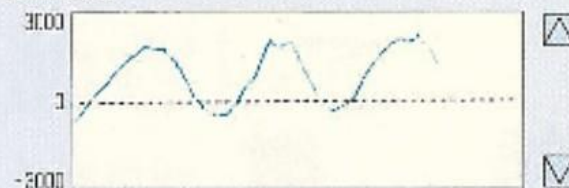
ファジィ設定

自動開始

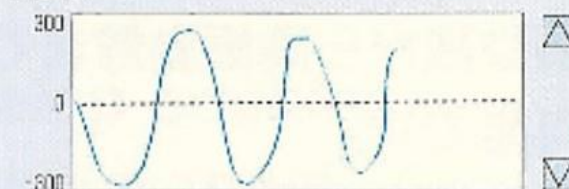
自動停止

終了

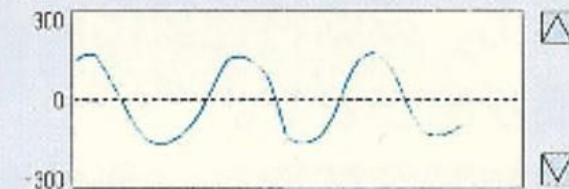
塔加速度



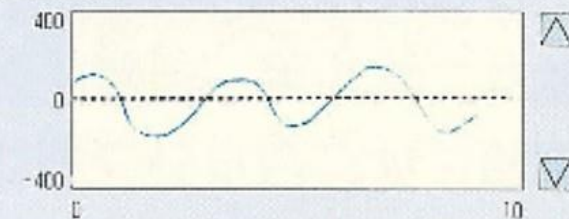
塔速度



塔変位



重錘変位

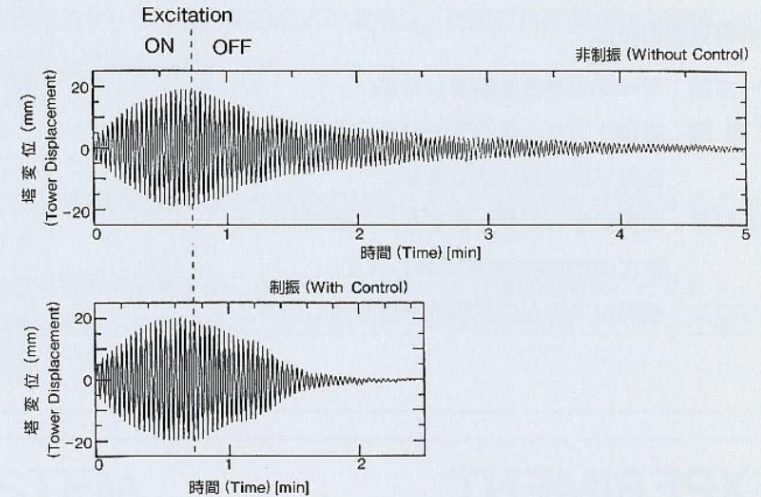


制振効果と作動状況

▶ 制振効果 (damping effect)

- 実端に搭載後、加振実験を行い制振効果を確認。大きな減衰効果によって、制振時は図のように振動継続時間を大幅に低減できることがわかりました。

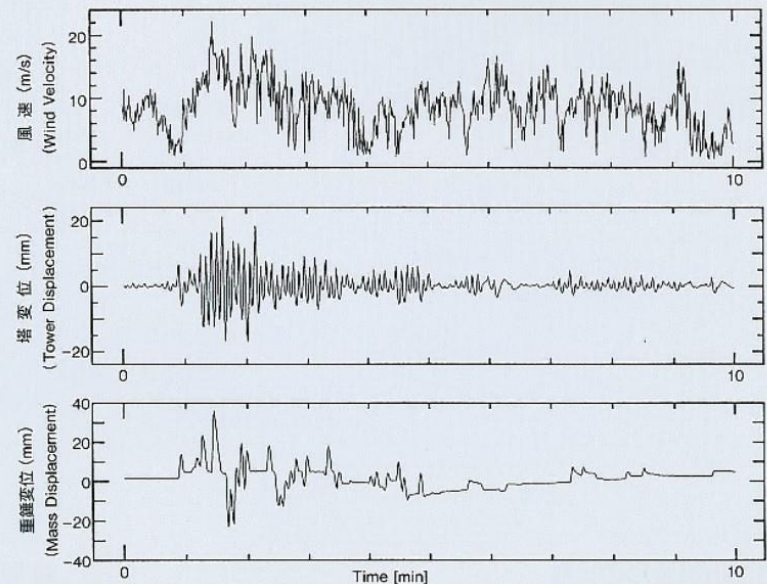
非制振/制振時の減衰波形の比較 ◀



▶ 作動状況 (field measurement)

- 季節風により発生した振動を低減させている実測データの一例です。渦励振やガスと応答により、振幅が増大すると、制振装置が作動し、塔振幅を減少させていることがわかります。

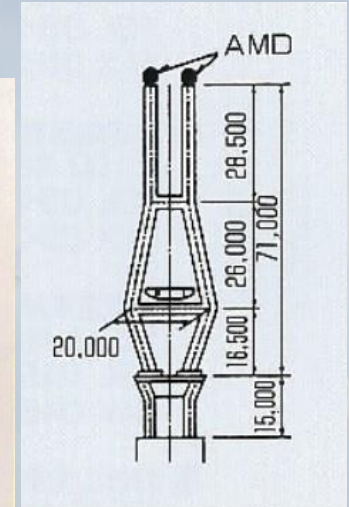
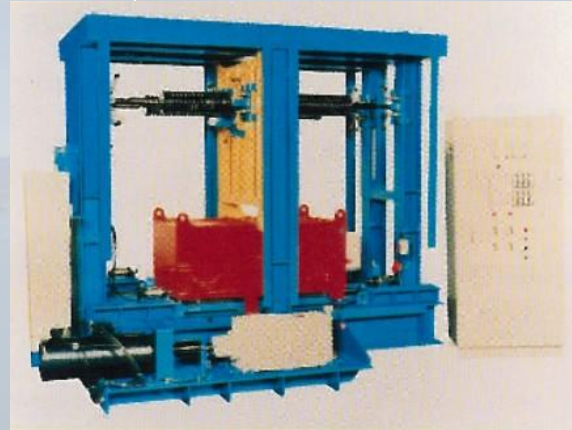
風による塔振動を低減させている実測データの一例 ◀



結果

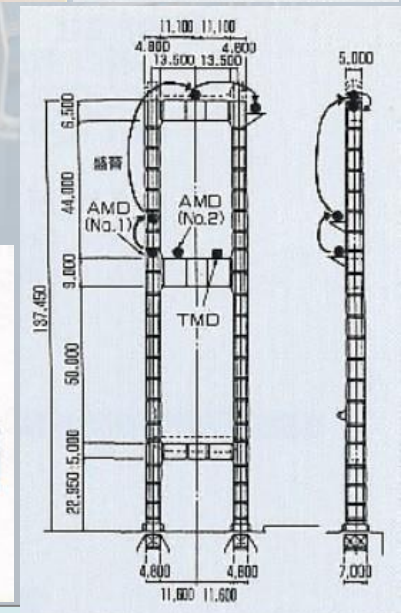
▶ 中島大橋制振装置(アクティブ・パッシブ併用型)

- 基本寸法 : 2.5×2.2×2.195m
- 総重量 : 7.0tf
- 重錘重量 : 3.5tf
- 振動数範囲 : 0.2~1.9Hz (アクティブ型)
0.2~0.5Hz (パッシブ型)
- 重錘最大振幅 : 0.4m
- Arm 長さ : 1.475m
- マータ : AC サーボ 5.5kW



▶ 来島大橋 6P 主塔用制振装置(アクティブ型)

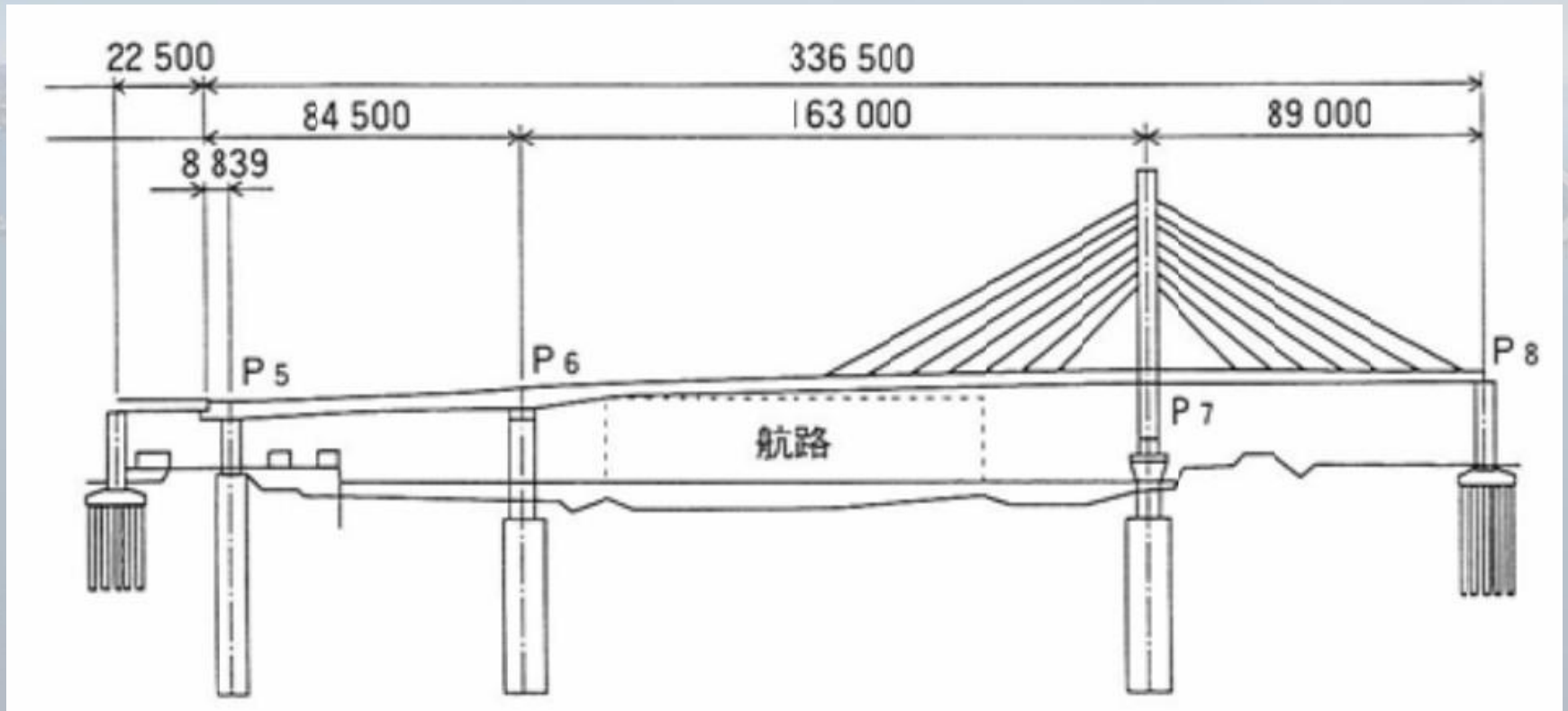
- 基本寸法 : 3.63×1.84×2.4m
- 総重量 : 18tf
- 重錘重量 : 10tf
- 振動数範囲 : 0.2~1.5Hz
- 重錘振幅 : 0.4m
- モータ : AC サーボ 30kW



中島新橋架設用制振裝置

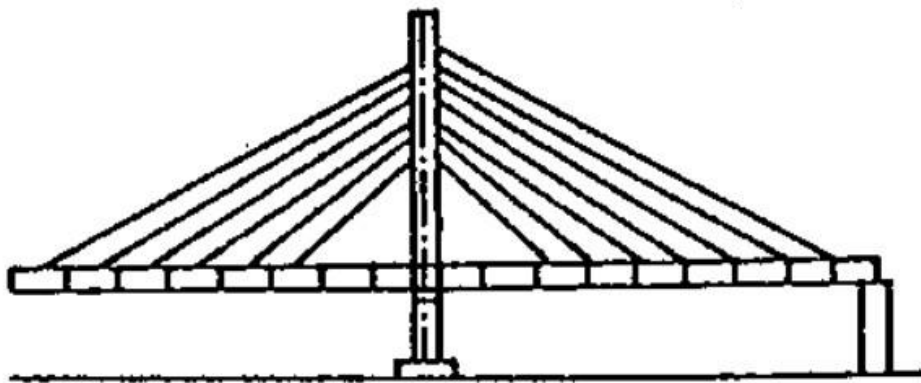


中島新橋の概要

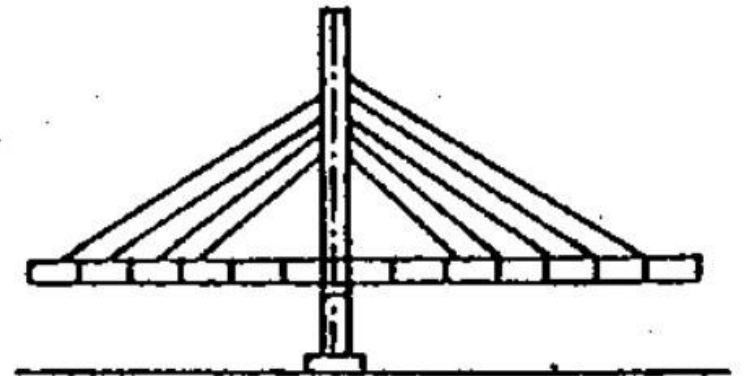


風洞試験対象架設系

架設系 1



架設系 2



中島新橋の緒元

▶ 主要緒元

- 形式：2径間連続斜張橋
- 支間割：76.661m + 163.0m + 89.0m
- 塔高：71m
- 鋼重：4138t (塔: 590t)

▶ 架設工法

- バランシング架設(斜張橋部)

風洞試験結果

	塔単独時(面外振動)		架設系 2	架設系 1
	1次モード	2次モード	1次モード	2次モード
固有振動数 [HZ]	0.494	1.865	0.207	0.639
対数減衰率	0.01	0.01	0.02	0.02
許容加速度(塔頂) [Gal]	50 (作業時)	300 (休止時)	-	-
許容振幅(塔頂) [m]	0.052	0.022	0.145	0.145
最大振幅(塔頂) [m]	1.500	0.170	0.606	0.082
許容振幅(桁端) [m]	-	-	0.177	0.177
最大振幅(桁端) [m]	-	-	0.740	0.100
制振対策	必要	必要	必要	必要

許容振幅(制振条件)

▶ 塔单独時

- 風速 16m/s 以下 → 塔頂最大振幅 = 0.052m 以下
- 風速 16m/s 以上 → 塔頂最大振幅 = 0.022m 以下

▶ 架設系 2

- 風速 38m/s → 主桁先端最大振幅 = 0.177m 以下

制振が必要な架設系

▶ 塔単独時

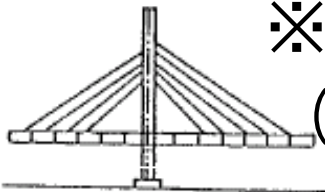
- 風速 10m/s → 塔面外 1次の渦励振
: 塔頂最大振幅 = 1.50m
- 風速 20m/s → 塔面外 2次の渦励振
: 塔頂最大振幅 = 0.17m

▶ 架設系 2

- 風速 38m/s → 桁たわみ 1次バフエティング振動
: 主桁先端最大振幅 = 0.74m

※ 架設系 2 : 主桁張出し長さ最大時
(側径間 8P 到達直前)

架設系 2



制振装置の仕様

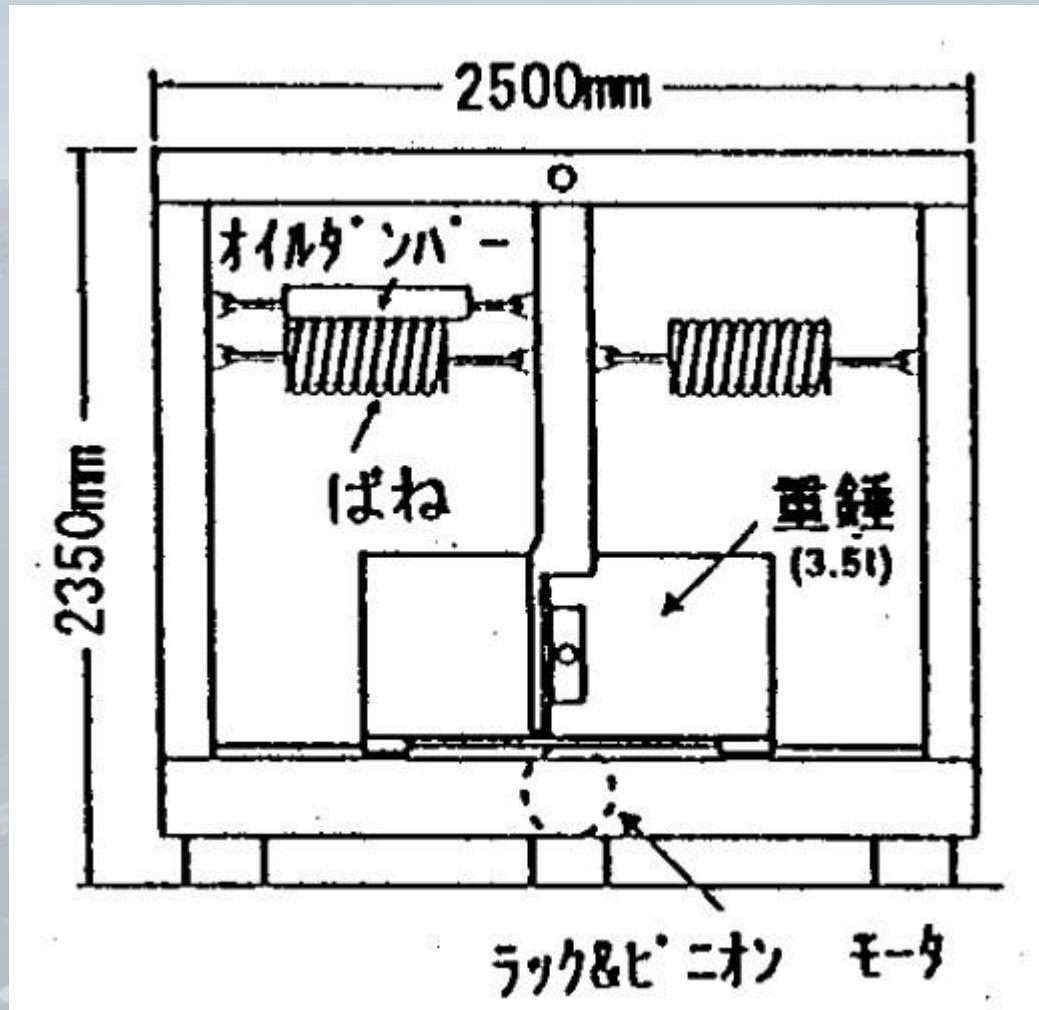
▶ 特徴

- アクティブパッシブ併用型 → 常時：AMD, 非常時：TMD
- ファジィ制御 → 制振対象の形状と振動特性の変化によらず制振効果が安定
- TMDの振動数の調整が可能 → アームのばねの取り付け位置を変化させて調整

▶ 仕様

- 寸法：幅 2.5 × 高さ 2.35 × 奥行 2.195m
- 総重量：7.0t (重錘重量 = 3.5t)
- 振動数範囲：ADM 0.2~1.9Hz, TMD 0.2~0.5Hz
- 重錘重量：0.4m
- モータ：AC サーボ 5.5kW

制振装置の構造図





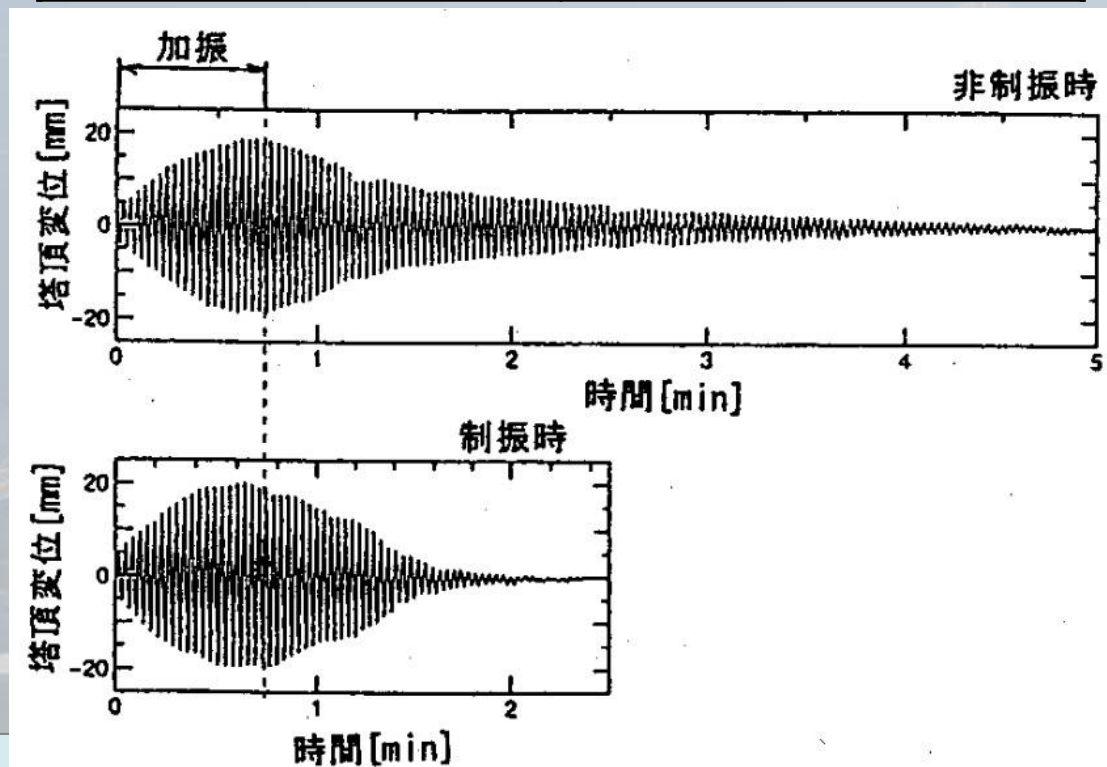
主塔頂点での設置状況



非制振/制振の減衰波形の比較

非制振/制振時の対数減衰率

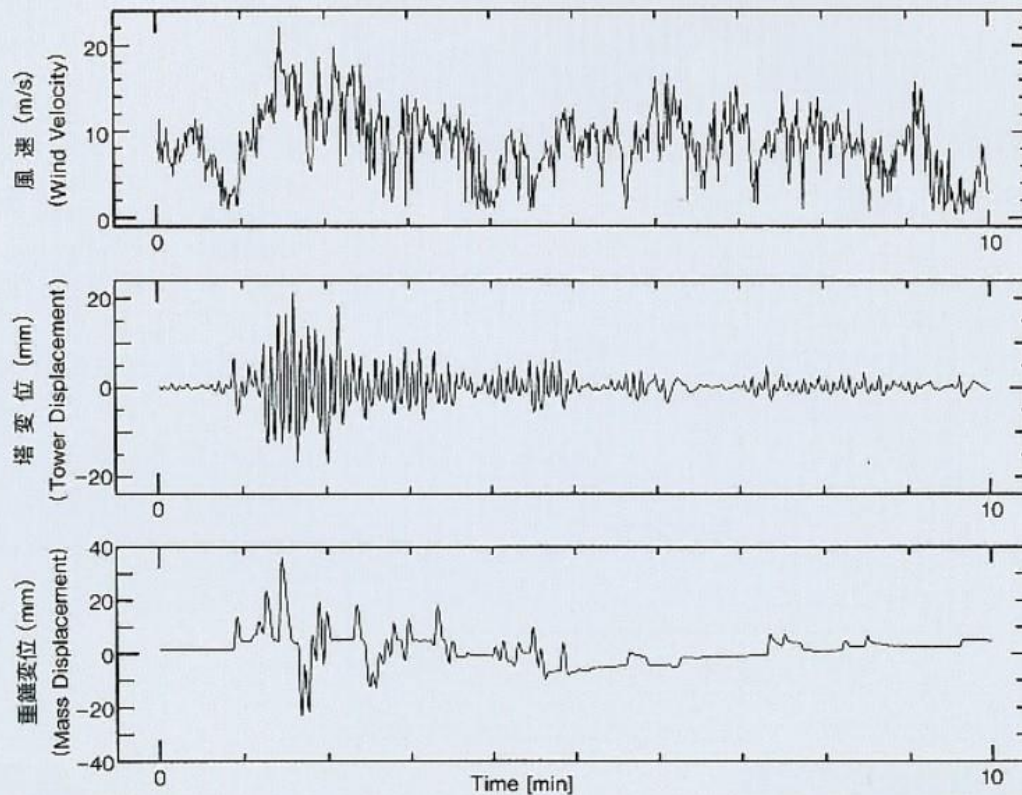
状態	対数減衰率
非制振動(構造減衰)	0.031
制振	0.119
付加減衰	0.088



風による塔振動を低減させている実測データの一例

Field measurement data for vibrations caused by wind force.

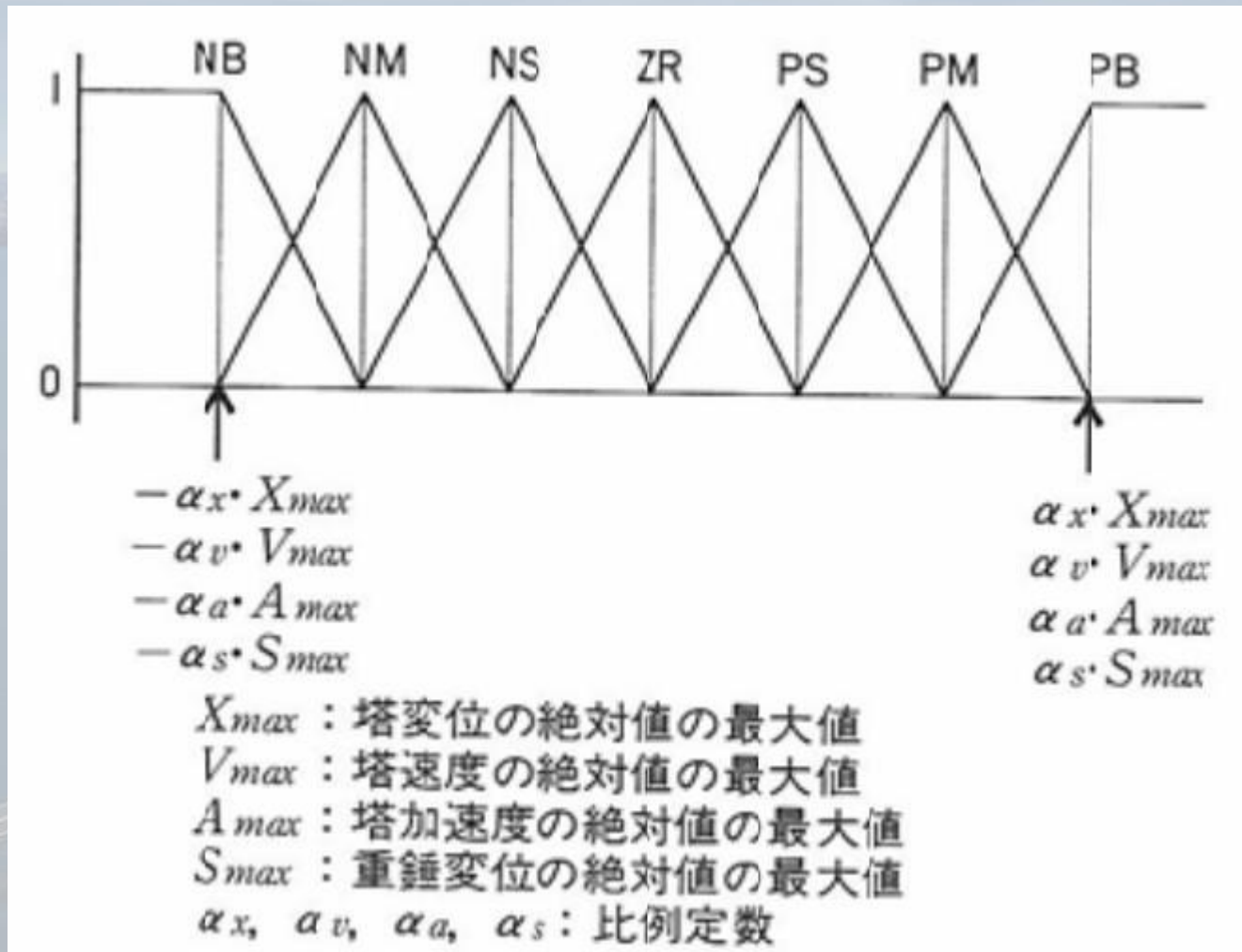
- 季節風により発生した振動を低減させている実測データの一例です。渦励振やガスと応答により、振幅が増大すると、制振装置が作動し、塔振幅を減少させていることがわかります。



Fuzzy Active Control Theory

- 架設に伴って変化する固有振動数・等価質量などのパラメータに柔軟に対応できる
- 現場での微調整が易しい制御システム
- 簡単な数式なので故障が少ない

前件部のMembership Function



塔速度に関するルール

							V
NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	
PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB	

V : 塔速度

NB = Negative Big

NS = Negative Small

PS = Positive Small

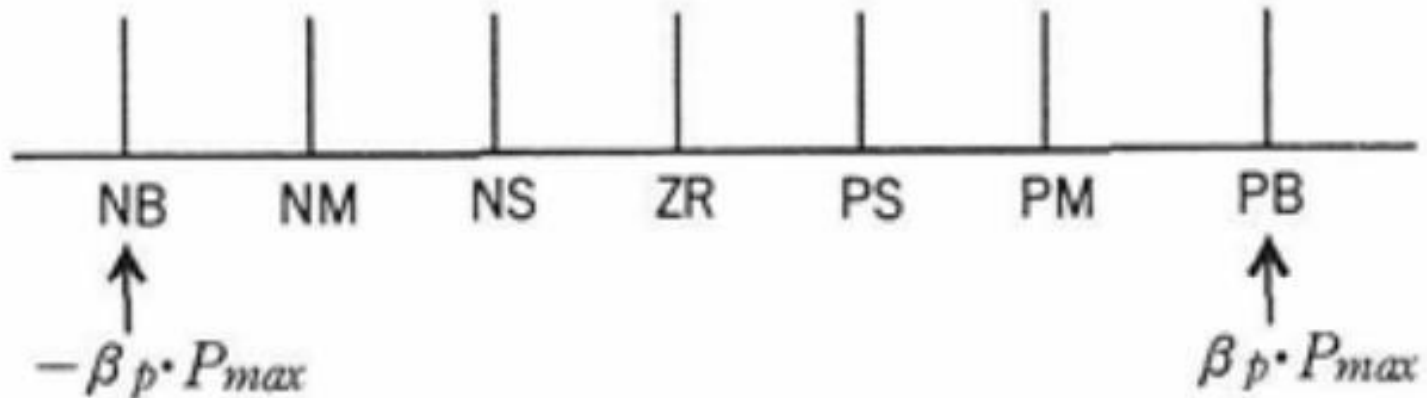
PB = Positive Big

NM = Negative Medium

ZR = Zero

PM = Positive Medium

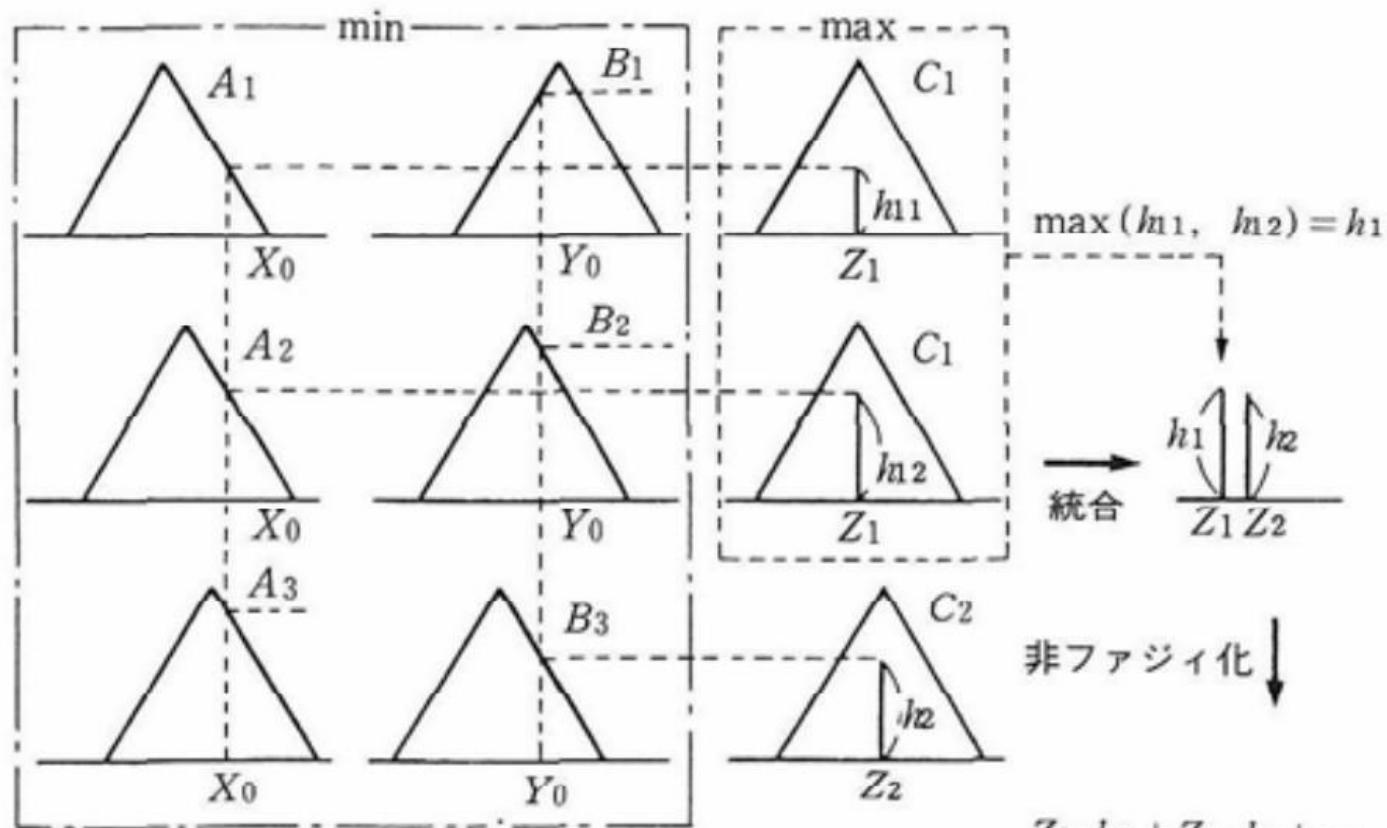
後件部のMembership Function



P_{max} : 制御力の絶対値の最大値

β_p : 比例定数

Min-Max 高さ法 (Defuzzification)



(ファジィ制御ルール)

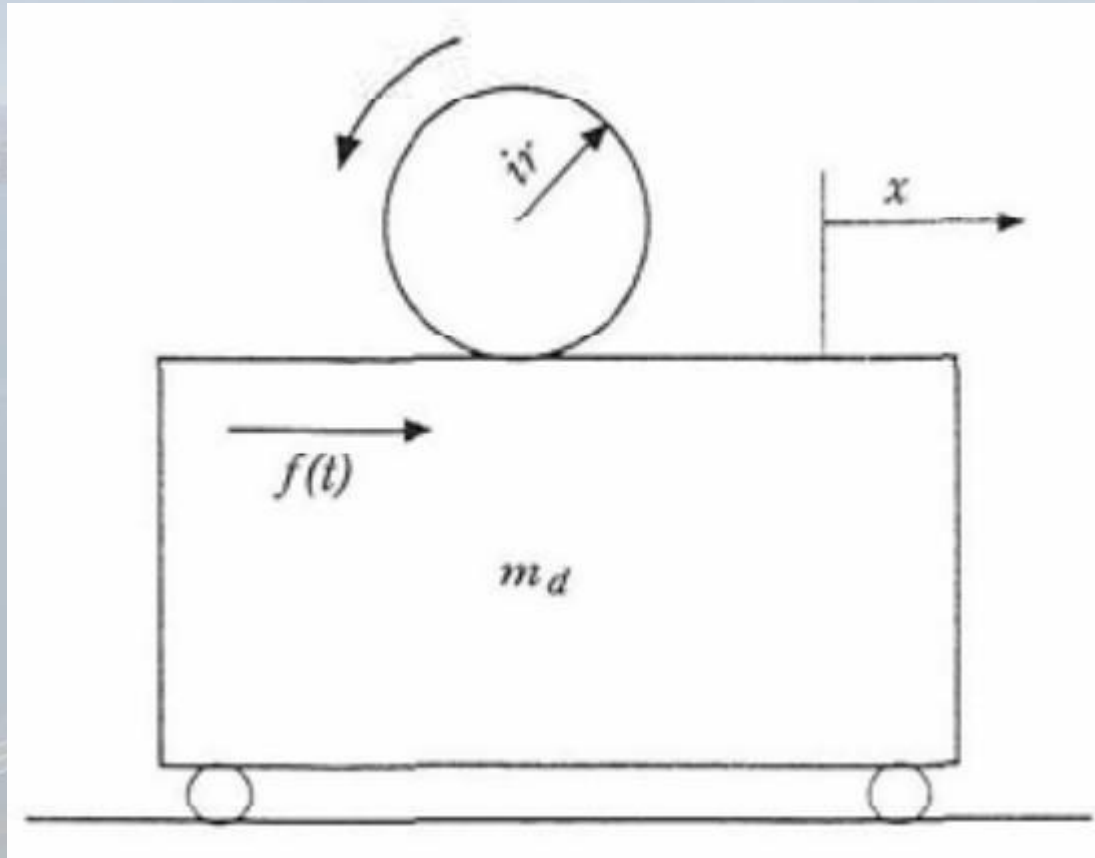
IF $X_0=A_1$ AND $Y_0=B_1$ THEN $Z_0=C_1$

IF $X_0=A_2$ AND $Y_0=B_2$ THEN $Z_0=C_1$

IF $X_0=A_3$ AND $Y_0=B_3$ THEN $Z_0=C_2$

$$Z_0 = \frac{Z_1 \cdot h_1 + Z_2 \cdot h_2 + \dots}{h_1 + h_2 + \dots}$$

Theoretical Model of AMD



5個のパラメータによる定式化

- 重錘重量 : md
- 重錘振幅 : b
- モータートルク : $Tmax$
- 装置台数 : N
- 配置 : 塔の位置

許容振幅 a_a と最大振幅 a_{max} の関係

$$\alpha_a = \left(\frac{\delta_s}{\delta_s + \Delta\delta} \right)^\beta a_{max} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 δ_s ：塔構造減衰

$\Delta\delta$ ：制振装置による付加減衰

β ：風洞実験により求まるSc-A図での振幅推定式で得られる

- 重錘振幅 b は重錘重量 m_d と設置位置のモード値により(2)式のように表されるので、重錘振幅、重錘重量、設置位置、台数の関係は(3)式のように示される。

$$b = \frac{M\Delta\delta}{\pi m_d \phi_a} a_\alpha \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 M : 塔等価重量、
 m_d : 重錘重量

$$b = \frac{M a_{max}}{N \pi m_d \phi_a} \Delta\delta \left(\frac{\delta_s}{\delta_s + \Delta\delta} \right)^\beta \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 N : 装置台数

運動方程式 (1)

$$m_d(\ddot{X} + \ddot{x}) = f(t) \dots\dots\dots(4)$$

ここに, X : 塔変位

x : 重錘変位

$f(t)$: モータ発生力

$$T_c = irm_d(-a_a\omega^2 \cos \omega t - b\omega^2 \sin \omega t) \dots\dots\dots(5)$$

ここに, i : 減速比

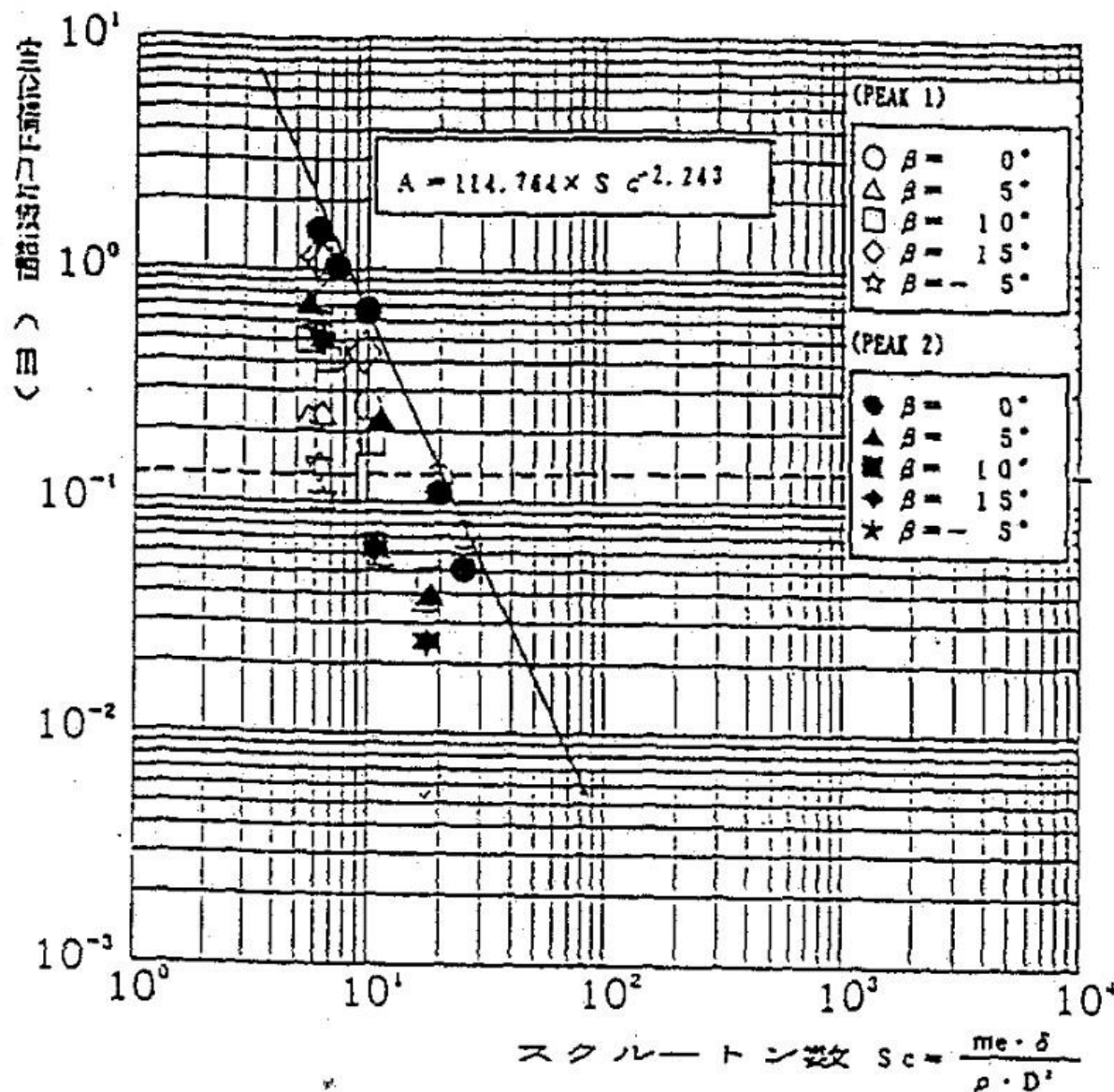
r : ピニオン半径

運動方程式 (2)

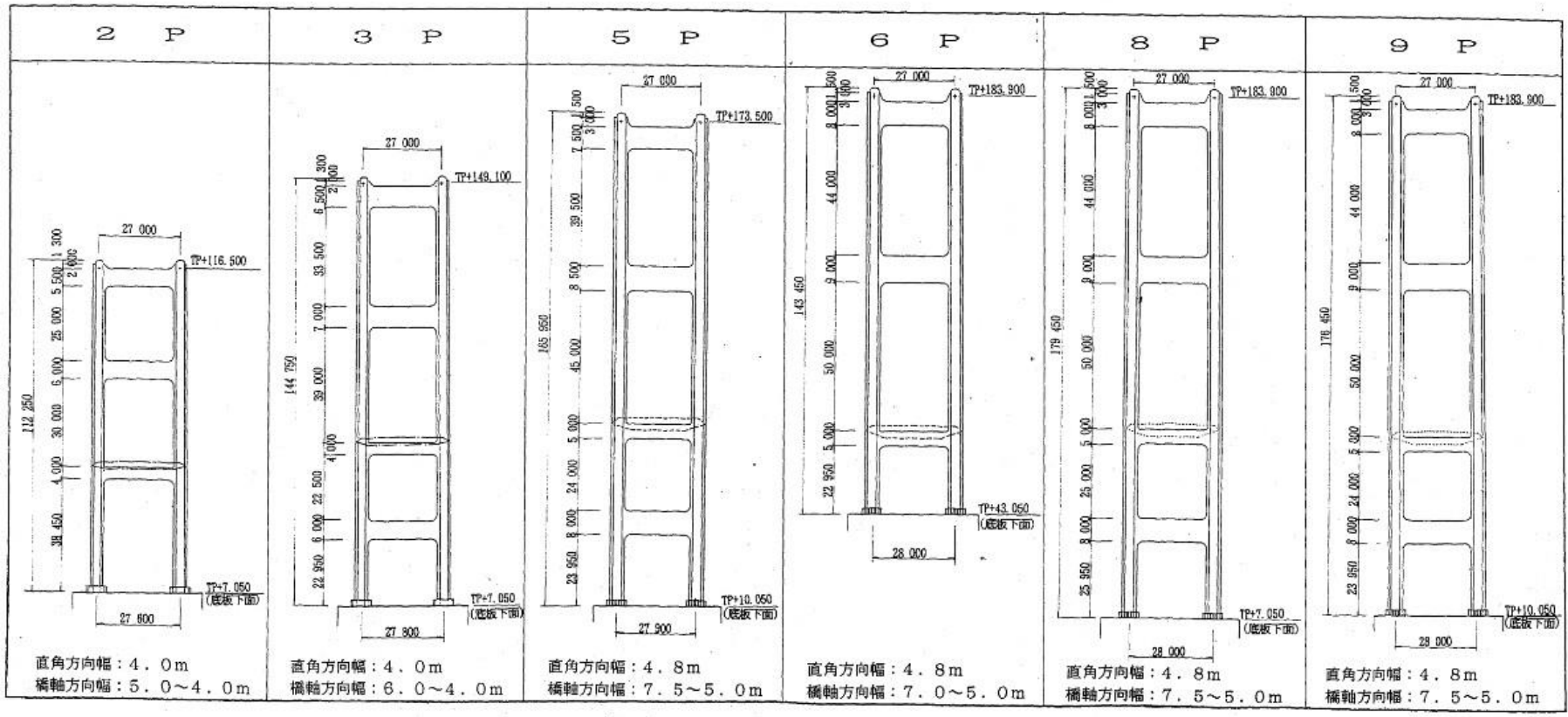
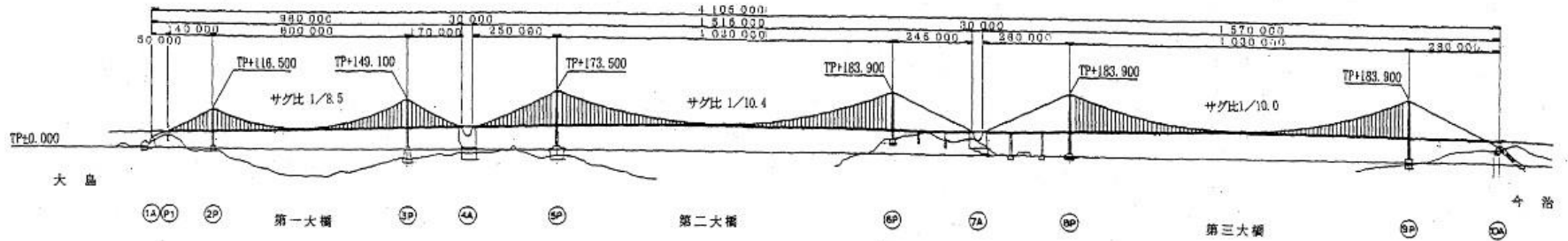
- また、これにモータ軸換算慣性モーメント $I_m (= I_r + m_d(ir)^2$,
ここに I_r : ロータイナーシャ)によるモータトルク T_i を加えて、挙動に
必要な最大モータトルク T_{max} は(6)式のようになる。

$$\begin{aligned} T_{max} &= |T_c + T_i| \\ &= m_d ir \omega^2 \sqrt{a_a^2 + \left\{ 1 + \frac{I_m}{m_d (ir)^2} \right\}^2 b^2} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

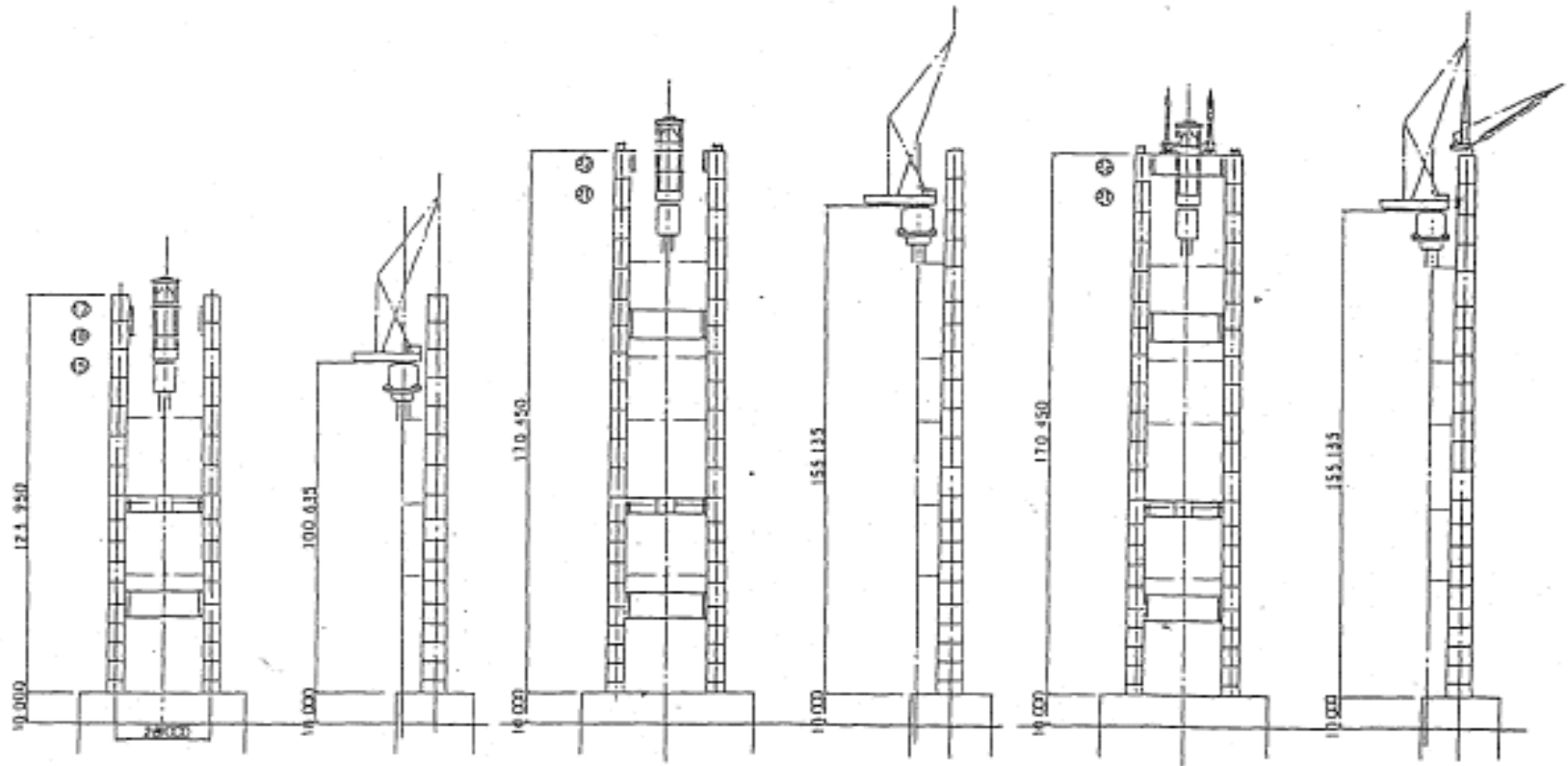
$\beta = 2.243$ (ねじれ1次モード風洞試験結果)



来島大橋主塔の制振対策



風洞試験対象の架設STEP

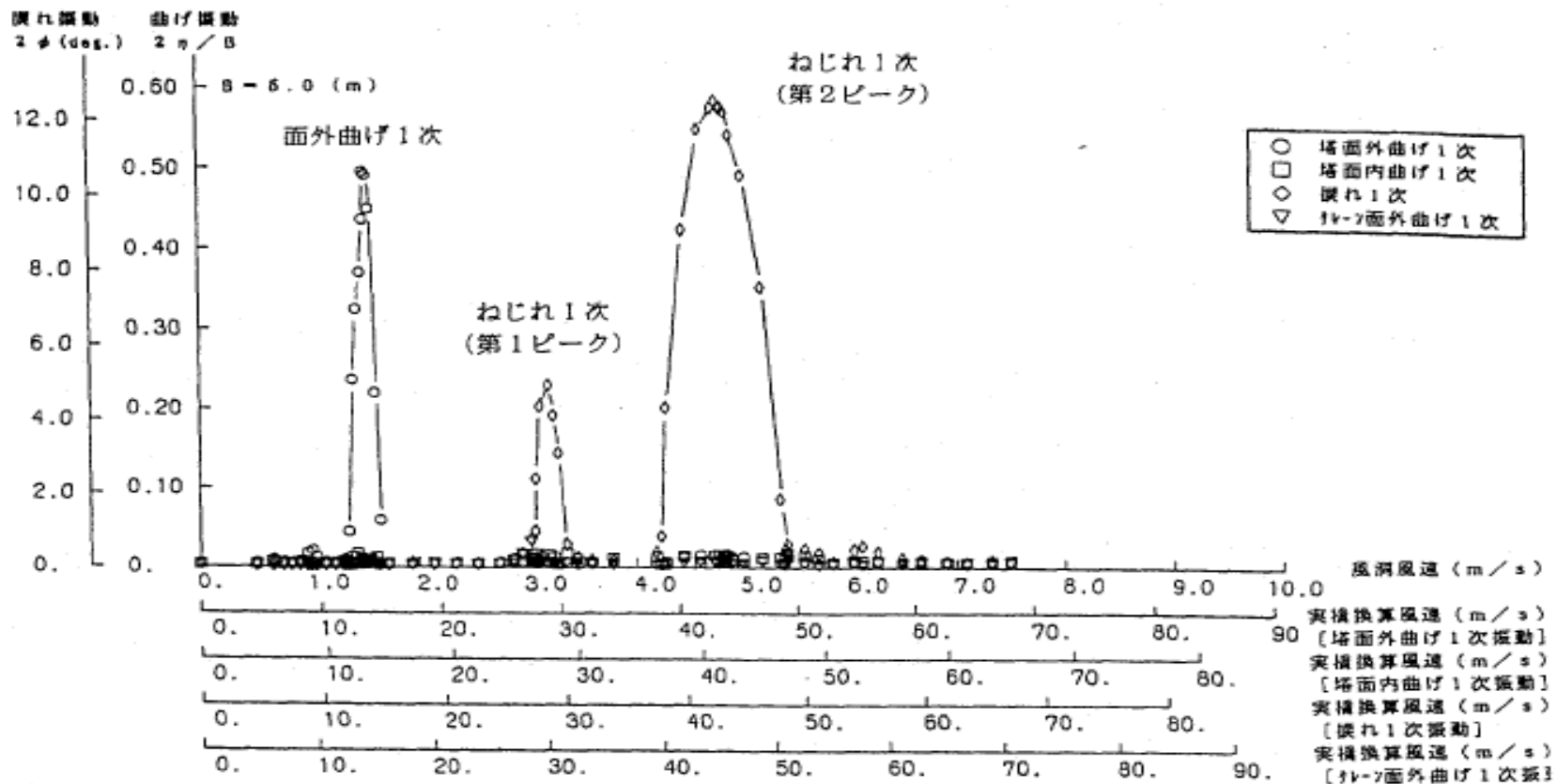


(a) CASE-1
【中間水平材架設直前】

(b) CASE-2
【塔頂水平材架設直前】

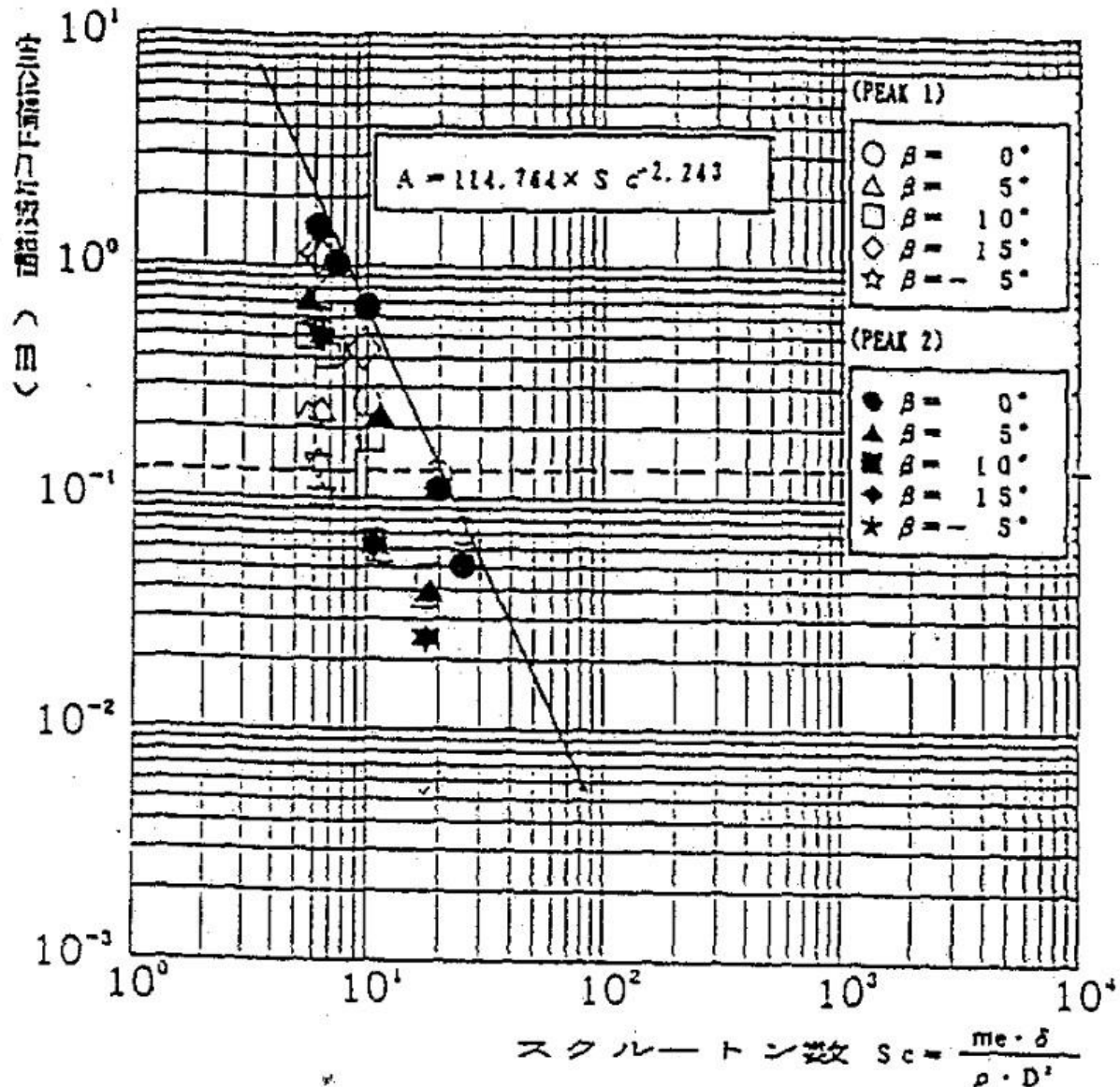
(c) CASE-3
【塔独立完成状態、タワー・クレーン有り】

風洞試験結果 CASE-1

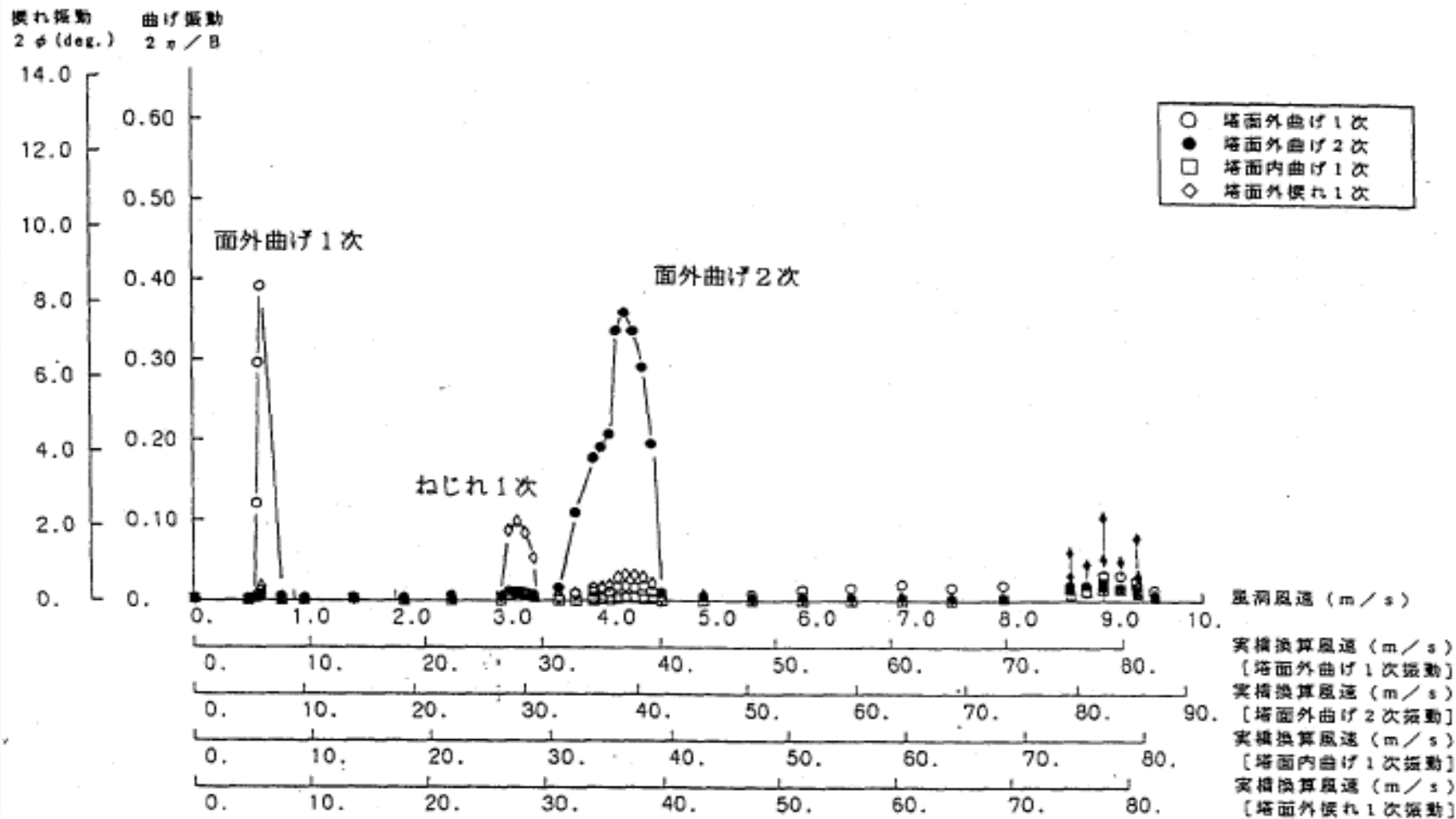


(1) CASE-1 ($\beta = 0^\circ$)

CASE-1 ねじれ1次 $\beta = -2.243$

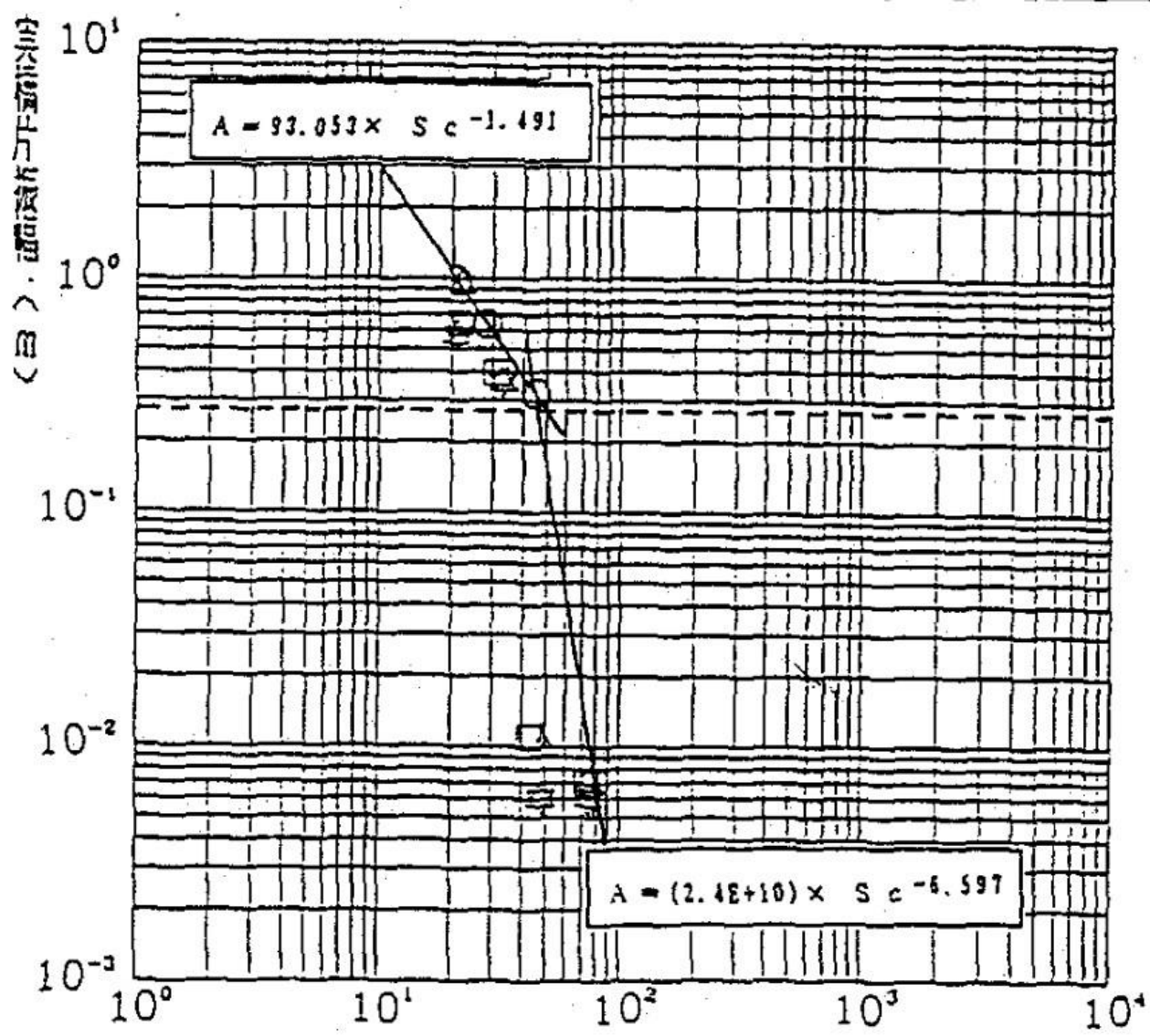


風洞試験結果 CASE-3



(3) CASE-3 ($\beta=0^\circ$)

面外1次 $\beta = -3.491$



主塔の制振装置比較

	主塔	ハード型式	制御方式(予定)	ハードの使用実績		制御方式の実績	
				実験	実橋	実験	実橋
M Z	2P	バネ付き直動型振子	最適レギュレータ制御	H6.4~12月に予定	無	H6.4~12月に予定	無
KHI	3P	直動型アクティブ	H ∞ 制御	済	名港中央大橋西塔(予定)	済	名港中央大橋西塔(予定)
NKK	5P	振子型1軸	DVFB制御 及び H ∞ 制御	済	白鳥大橋(4t×2台)	済	DVFBは白鳥大橋で実施 H ∞ 制御は白鳥大橋で実証 試験実施済
H Z	6P	重錘直動型1軸	ファジィ制御	済 (実機1/5モデル)	中島大橋(予定)	済 (実機1/5モデル)	中島大橋(予定)
SHI	8P	回転振子型1軸 ハイブリッド方式	DVFB制御	済	無	済 (模型実験)	鶴見航路橋主塔(10t)
IHI	9P	V字型1軸 ハイブリッド方式	H ∞ 制御	済	白鳥大橋主塔(9t) 新宿パークタワー(110t)	H ∞ 制御は2月中旬に予定	左記の他 東京港連絡橋主塔(2t) 光が丘ビル(22t) クイミングクレーン(10t) 他

結論

- 中島新橋及び来島大橋は制振装置の設置によって、事故を防ぐことが出来た
- 制振装置は高価ではあるが事故を防げれば安い
- 制御理論は、日進月歩なので研究継続が常に必要である

An aerial photograph of a long, multi-lane cable-stayed bridge spanning a wide body of water. The bridge features several tall, white, A-frame pylons supporting the deck with numerous stay cables. The water is a deep blue, and a few white ferries are visible. In the background, a city with buildings and a coastline is visible under a clear blue sky with light clouds. The text "Thank You Very Much !!" is overlaid in the center in a colorful, stylized font.

Thank You Very Much !!