

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1299

張力制御式模型支持装置の製作と性能

外立政隆・松下 洸・安藤泰勝
萱場重男・藤井謙司

1996年 7 月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

記号	1
1. まえがき	2
2. 錘バランス式模型支持装置	2
3. 動的風洞試験で要求される模型支持装置の機能	4
3.1 張力制御装置の基本的機能	4
3.2 予備試験	4
4. 開発した模型支持装置の機能と性能	7
4.1 装置の構成	7
4.2 制御回路	8
4.3 静特性	11
4.4 復元力及びダンピング力特性	12
4.5 動的特性	12
5. 風洞実験での使用例	13
6. まとめ	14
7. 参考文献	15

張力制御式模型支持装置の製作と性能

外 立 政 隆*¹ 松 下 洸*² 安 藤 泰 勝*³
萱 場 重 男*⁴ 藤 井 謙 司*¹

Construction and Performance of a Tension Controlled Model Suspension System in the Low Speed Wind Tunnel

Masataka HASHIDATE, Hiroshi MATSUSHITA, Yasukatsu ANDO,
Shigeo KAYABA and Kenji FUJII

ABSTRACT

A tension-controlled model suspension system was developed which is to be used in validation study of active control technology, giving a complete aircraft model a motion degree of freedom in the NAL Low-Speed Wind Tunnel. A torque motor on the tunnel ceiling suspends a model which moves along a rail vertically supported at the center of the wind tunnel test section. The system controls a cable tension constant against model motion in order to provide an aeroelastic similar model with motion similarity. Furthermore, this model makes it possible to give a restoring and a damping force arbitrarily by remote operation so that a model should fly around a center position without going out of the test section. The system was successfully used in the wind tunnel tests for gust load alleviation of a complete aircraft aeroelastic model, and its effective functions were verified. This report describes the structure, the performance, and the applications of the system.

Key Words: Wind tunnel test, Tension controlled model suspension system, Tension control, Active control technology

概 要

NAL大型低速風洞において、運動の自由度を与えた全機形態空力弾性模型の能動制御技術(Active Control Technology)の実証研究に使用するために、張力制御式模型支持装置を開発した。

本装置では、風洞測定部中央に鉛直に設置したレールに沿って摺動する模型を測定部天井に設置したトルクモータで吊り下げている。空力弾性相似模型に運動の相似性をもたせるために、本装置は模型の吊り線の張力を一定に制御する。さらに、模型が風洞測定部をはみ出すことなく、ほぼ中央付近で安定した運動をさせるために復元力とダンピング力を遠隔操作で任意に設定する機能も有している。本装置を、NAL大型低速風洞で実施した全機形態空力弾性模型の突風荷重軽減実験に使用し有効に作動することを確認した。この報告書は本装置の構成、機能、使用例について記述する。

記 号

平成 8 年 5 月 7 日受付 (received, May, 1996)	b	: 模型基準長 (m)
* 1 新型航空機研究グループ (Advanced Aircraft Research Group)	d	: ケーブル直径 (m)
* 2 特別研究官 (Director for Special Research)	f	: 周波数 (Hz)
* 3 元機体部 (Airframe Division, Retired)	F	: 加振力 (N)
* 4 空力性能部 (Aircraft Aerodynamics Division)	g	: 重力加速度 (m/s ²)
	I	: 電流 (A)

J	: 慣性モーメント (kgm ²)
k	: バネ常数 (N/m)
K	: 比例係数
K ₁	: 調節器比例ゲイン (A/Nm)
K ₂	: 調節器積分ゲイン (A/Nm)
K ₃	: 調節器微分ゲイン (A/Nm)
K _b	: 逆起電力定数 (V/rad/s)
K _D	: ダンピング係数 (N/m/s)
K _c	: ケーブルバネ常数 (N/m)
K _I	: 電流増幅ゲイン
K _t	: トルク定数 (Nm/A)
K _s	: 復元力係数 (N/m)
L	: ケーブル長 (m)
m	: 模型質量 (kg)
Pot	: ポテンシオメータ
R _D	: 巻き上げドラム半径 (m)
r _m	: モータ巻線抵抗 (Ω)
ri	: リレーの接点
Ri	: リレー
SP	: 周波数スペクトル
T	: ケーブル張力 (N)
T _B	: 釣合トルク (Nm)
u	: 風速 (m/s)
W	: 錘 (kg)
X	: 変位 (m)
θ	: 巻き上げドラム回転角 (rad/s)
τ	: 調節器微分時定数 (s)

1. まえがき

航空宇宙技術研究所では、航空機の効率と安全性の向上を目指す革新技术の一つとして、空力弾性系の能動制御技術 (Active Control Technology) の研究を進めている。この研究の第一段階では、高アスペクト比の片持弾性翼模型の突風荷重軽減実験とフラッタ抑制実験を行い、能動制御技術の有効性を実証した¹⁾²⁾³⁾。第二段階として、片持弾性翼を組み込んだ全機形態模型の突風荷重軽減実験に進み、上下動、縦揺れ動、偏揺れの3自由度を持たせた支柱式能動的支持装置を製作し、風洞実験を行った⁴⁾。

フラッタなどの空力弾性現象を実機と風洞模型で相似にするには、質量比 (慣性力と空気力の比) を等しくしなければならない。一方、実機と模型で相似な剛体運動状態を再現させる為には重力と空気力の比を等しくする必要がある。しかし、質量比及び重力と空気力の比の両方を満たすことは大変難しい。なぜなら、

$$\begin{aligned} \text{重力/空気力} &= (\text{慣性力/空気力}) \times (\text{重力/慣性力}) \\ &= (\text{質量比}) \times (g/(\mu^2/b)) \end{aligned} \quad (1)$$

となり、Froude numberの2乗の逆数である $g/(u^2/b)$ を

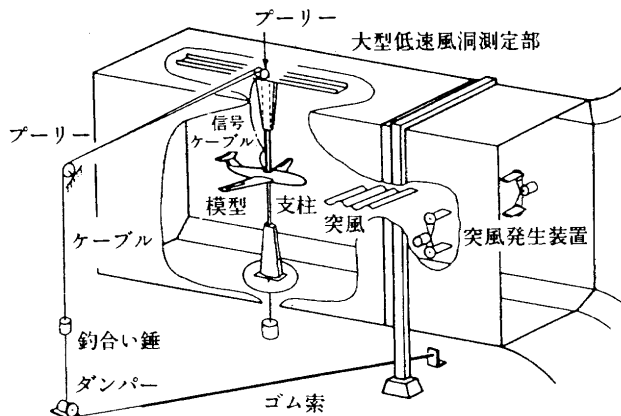


図1 錘バランス式模型支持装置

実機と模型で等しくしなければならず、風速と縮尺比の特別な組み合わせ以外には不可能である⁵⁾。従って、風洞内で飛行力学の相似性を与えつつ、空力弾性相似実験を実施することは極めて難しいことになる。一般的に高速風洞実験では空気力が過大になりがちであり、低速風洞実験では模型重量が過大になる。そこで低速域での模型実験では、揚力を補う何等かの力発生装置が必要となる。

当初、模型質量35.5kgに対して実験風速25m/sでの不足揚力分の150Nを補うために図1に示すケーブルを介して模型を吊り上げ、他端に釣り合い錘を下げる方式を採用した⁴⁾。しかし、種々の条件で実験を行う過程で模型が大きく運動したとき、模型を拘束する手段が無く、しばしば模型を破損させた。この経験から、モータ巻き上げ式の張力制御装置を開発する必要性が生じた。この報告は開発した張力制御式模型支持装置の機能、使用例を中心にまとめたものである。

2. 錘バランス式模型支持装置

風洞内で航空機模型に運動の自由度を持たせる動的実験法として、支柱式⁶⁾⁷⁾⁸⁾とケーブル式等⁹⁾がある。この実験では、運動モードの短周期モードが実現できれば十分であることと、当所で過去に実績があることを考慮して支柱式を採用した。

風洞内に設置した支柱式の概要を図1に示す⁴⁾。風洞測定部の中央に0.01mの丸棒をストラットで垂直に支持し、この丸棒に添って自由に上下動の出来る摺動軸受 (ベアリング入り) を設ける。摺動軸受は上下動、縦揺れ、偏揺れの3自由度が可能である。使用した模型の外形を図2に示す。主翼はアルミニウム合金製の弾性桁に片翼当たり14分割したバルサ材製の翼素で構成されている。胴体と尾翼はアルミニウム合金製の桁と姫小松材製のリブに航空ベニア製及びバルサ板製の外皮で軽量に製作されている。摺動軸受は模型中心に合わせて取り付けら

模型諸元

大きさ全長	4.02 m
翼幅	3.4 m
胴体直径	0.4 m
尾翼幅	1.08 m
尾翼高さ	0.947 m (胴体底面から)
質量	35.5 kg (一次試験時) 38.8 kg (改修後)
慣性モーメント (I_y 回り)	38.38 kg m ² (改修後)

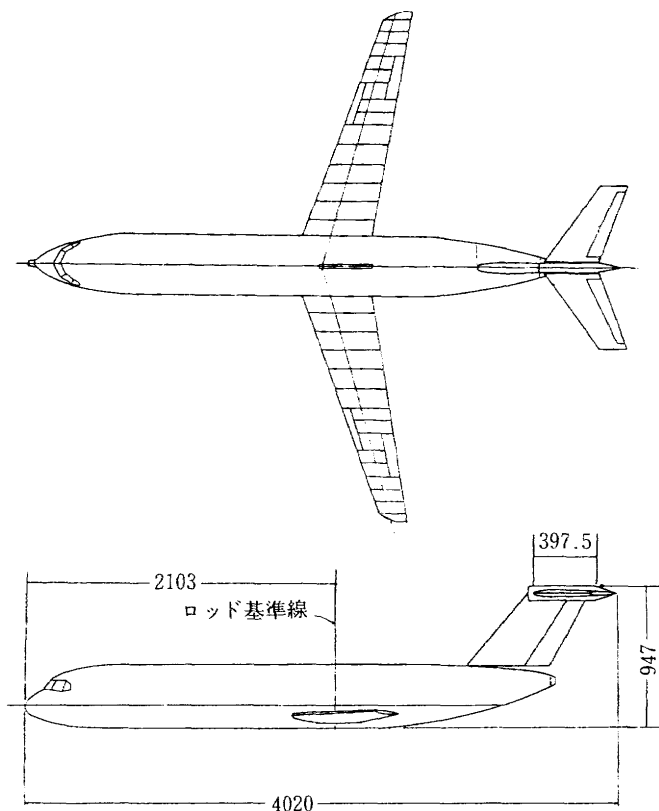
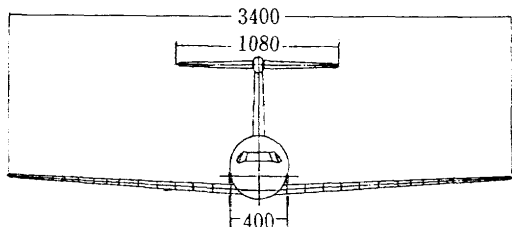


図2 突風荷重軽減試験用模型外形図(単位 mm)

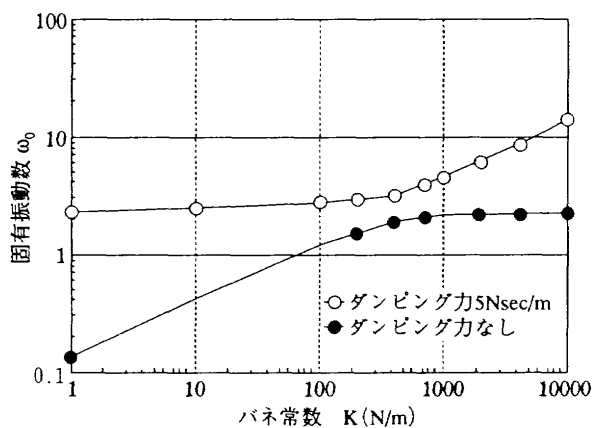
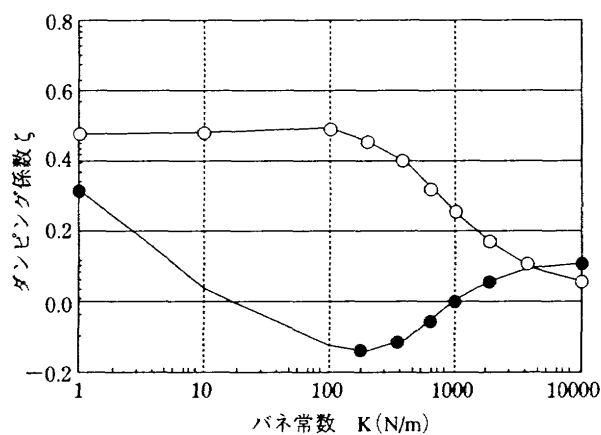
固有振動数対バネ常数
錘質量=15kg、ダンピング力=5Nsec/mダンピング係数対バネ常数
錘質量=15kg、ダンピング力=5Nsec/m

図3 バネで支持された模型の安定解析(文献4から引用)

れている。この支持方式は模型の高さに対して中立安定であるので模型位置が定まらない。そこで測定部上下方向の中心を模型の安定な平衡点とする為に錘の先にゴム索を取り付けて復元力を与える。この場合、図3に示す安定解析の結果、復元力の小さい範囲で模型の運動が不安定となる⁴⁾。しかし模型本来のモードに与える支持装置の影響を少なくする為には、模型が安定化するほど復

元力を大きくすることも出来ない。そこでケーブルに電磁ダンパを取り付け、ダンピング力を与えて安定化した。

錘バランス式模型支持装置を使った一次実験では一応模型の浮上に成功したが、この支持装置を使用してみると次のような問題が生じ、模型が大きく運動する時に、しばしば模型の一部を破損させた。

1) 電磁ダンパの力特性は速度に対して非線形である。

- 2) ダンピングを強くするとダンパのプーリとケーブル間で滑る(ダンパ機能がなくなる)。
- 3) 模型が振動を始めた時、模型を拘束させる機能が無い。
- 4) 復元力はゴム索の交換によって行うため、実験中に調節出来ない。

これらの問題を解決するために張力制御装置を開発することにした。

3. 動的風洞試験で要求される模型支持装置の機能

3.1 張力制御装置の基本的機能

空力弾性模型支持装置に要求される基本的機能は以下のようにまとめられる。

①張力一定制御機能

低速風洞実験では一般に模型重量に比べ揚力が不足し、不足揚力を外部から補わなければ模型を浮上させることが難しい。模型を風洞中心付近に浮上させ、3自由度の運動を可能にするには、如何なる運動状態にも関わらず常に一定の張力で釣り上げる機能が要求される。一次実験を終了し、改修した模型質量は38.3kgとなった。実験風速25m/sにおける不足揚力が約180Nとなるが、無風時において模型全重量を釣り上げる必要があるため、最大巻き上げ能力を500Nとした。

②復元力制御とダンピング制御機能

模型は基本的には自由運動が望ましい。しかし、限られた風洞内では僅かな姿勢変化(例えばエレベータを過度に変化させた時など)でも可動範囲を越えて運動し、模型を破損させてしまう。そこで模型が風洞中心付近で安定な平衡点を得るために復元力とダンピング力を与える機能が必要となる。

一般的に特性の明らかでない模型の動的実験では、模型の破損を防ぐために初期の段階で大きなダンピング力と復元力を与え、大まかな特性を把握した後、ダンピング力と復元力を徐々に緩めて、精度の高い実験に移行して行く手法が有効である。そのために復元力とダンピング力は風洞外から任意に調節可能であることが必要である。

③模型の運動拘束機能

実験は慎重に行われる。それでも予期せぬトラブル(例えばゲイン設定が不適当、制御回路の故障、模型の一部破損等)で模型が大きな運動を始めることがある。この様なとき、確実に運動を拘束出来る機能が必要である。

④模型巻き上げ機能

風洞実験が終了した後、次の実験準備のための模型の整備が必要となる。そのために模型を任意の位置に上下させる機能が必要となる。

以上の機能をまとめて表1に示す。

表1 張力制御式模型支持装置の機能と性能

巻き上げ速度	0~2m/s任意の速度に調整可能
巻き上げ長	0~3mの範囲で任意調整可能
制御張力	0~500Nで任意の値に調整可能
ダンピング力	0~500N/(m/s)で任意の値に調整可能
復元力	基準位置から0~3mの範囲で0~100Nmの任意の値に調整可能
作動制限機能	風洞中心から±1.0m以上の範囲でダンパー機能が働く
モータ停止機能	モータの回転限界を越えたとき、モータは励磁コイルを短絡させてブレーキ状態にさせる
動特性	ケーブル端に180Nの荷重を掛けた状態で遮断周波数10Hz以上
張力制御制度	設定値の±1%以内
トルク検出精度	最大設定値の±0.2%以下
操作機能	起動、停止、リセット、再起動、ダンピング力、復元力等の各種制御モードが遠隔操作で可能なこと。

3.2 予備試験

模型に働く空気力は模型姿勢角の変化により常に変動している。この変動に対して模型を釣り上げるケーブルの張力を常に一定に保つ装置を開発するのだが、開発に

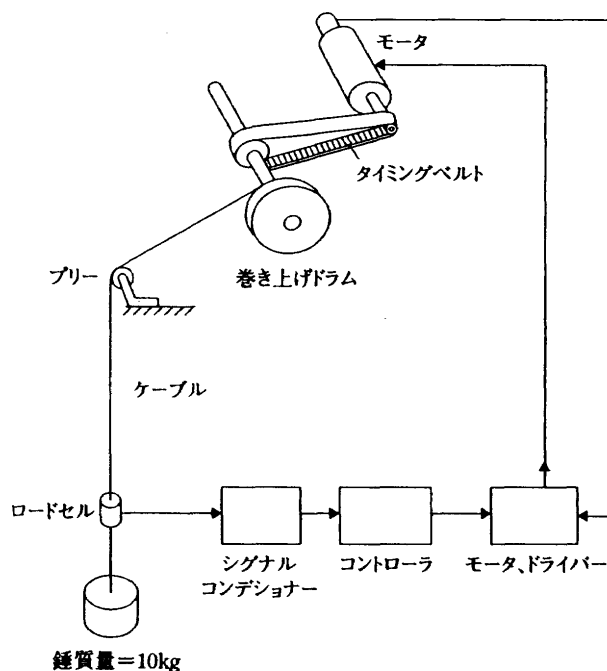


図4 予備試験装置

先だって基本的な問題点を抽出するために本装置を模擬できる5kwサーボモータを使って基本的構成要素を組み上げ予備試験を実施した。図4に装置の概要を示す。ケーブルの先端にロードセルを介して10kgの錘をかけた状態でロードセルのゼロ調整をとる。ロードセルの信号をPI(比例+積分)調節器(コントローラ)を介してモータドライバに入力する。調節器で適当なゲインと時定数を選ぶと質量10kgの錘が僅か0.1~0.2Nの力で滑らかに上下する(図5)。また,手で錘に僅かな力を加え1~5

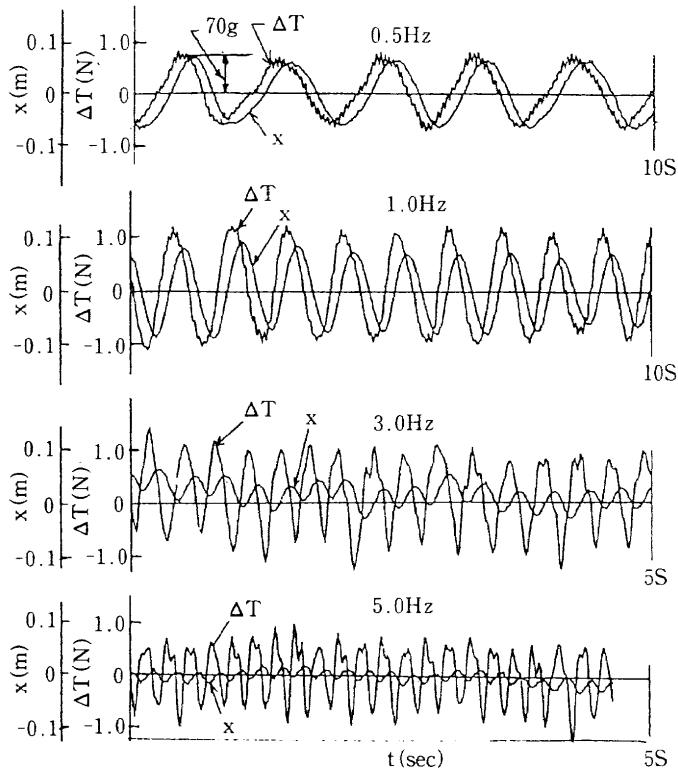


図5 予備試験結果の一例
錘質量10kgを動かす力と変位量

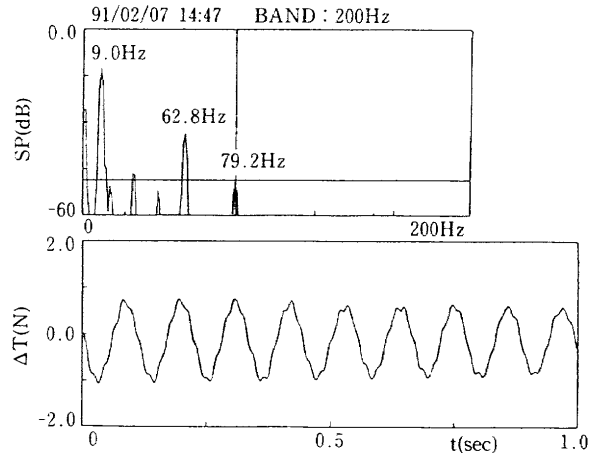


図7 ケーブルに水平方向の振動を与えた時の横振動特性
上段 周波数スペクトル, 下段 張力の振動波形
ケーブル長4m, 錘質量10kg

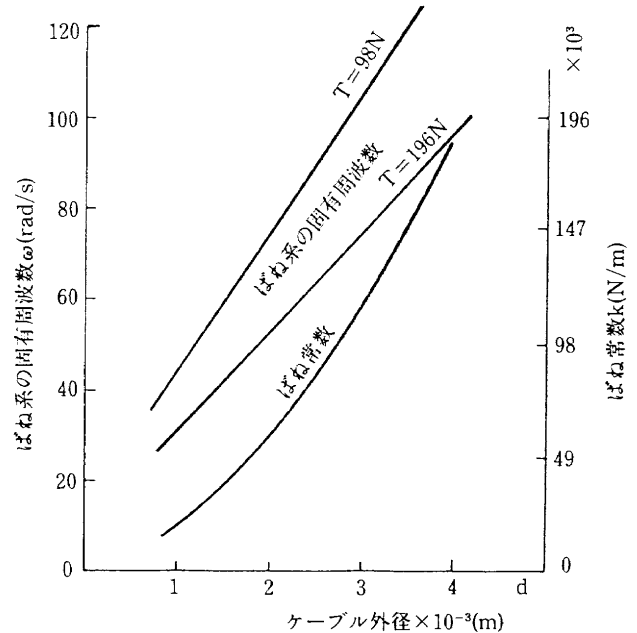


図8 ケーブル直径と振動数の関係

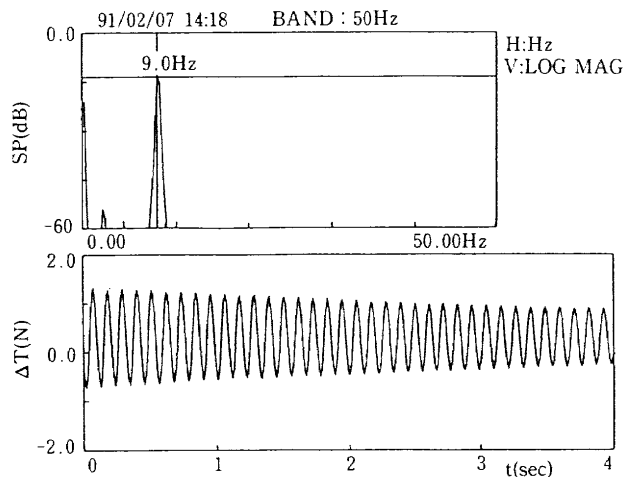


図6 ケーブルに垂直方向の振動を与えた時の縦振動特性
上段 周波数スペクトル, 下段 張力の振動波形
ケーブル長4m, 錘質量10kg

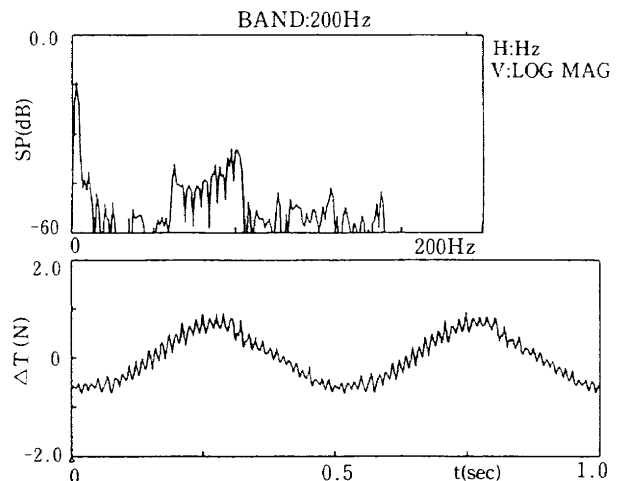


図9 図4の構成の振動特性

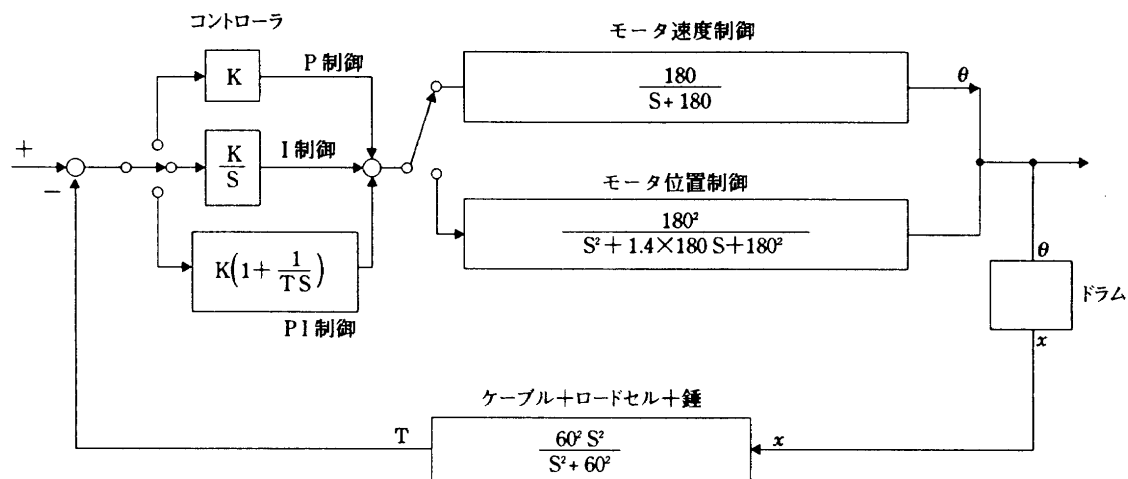


図10 図4の構成の制御系の伝達関数

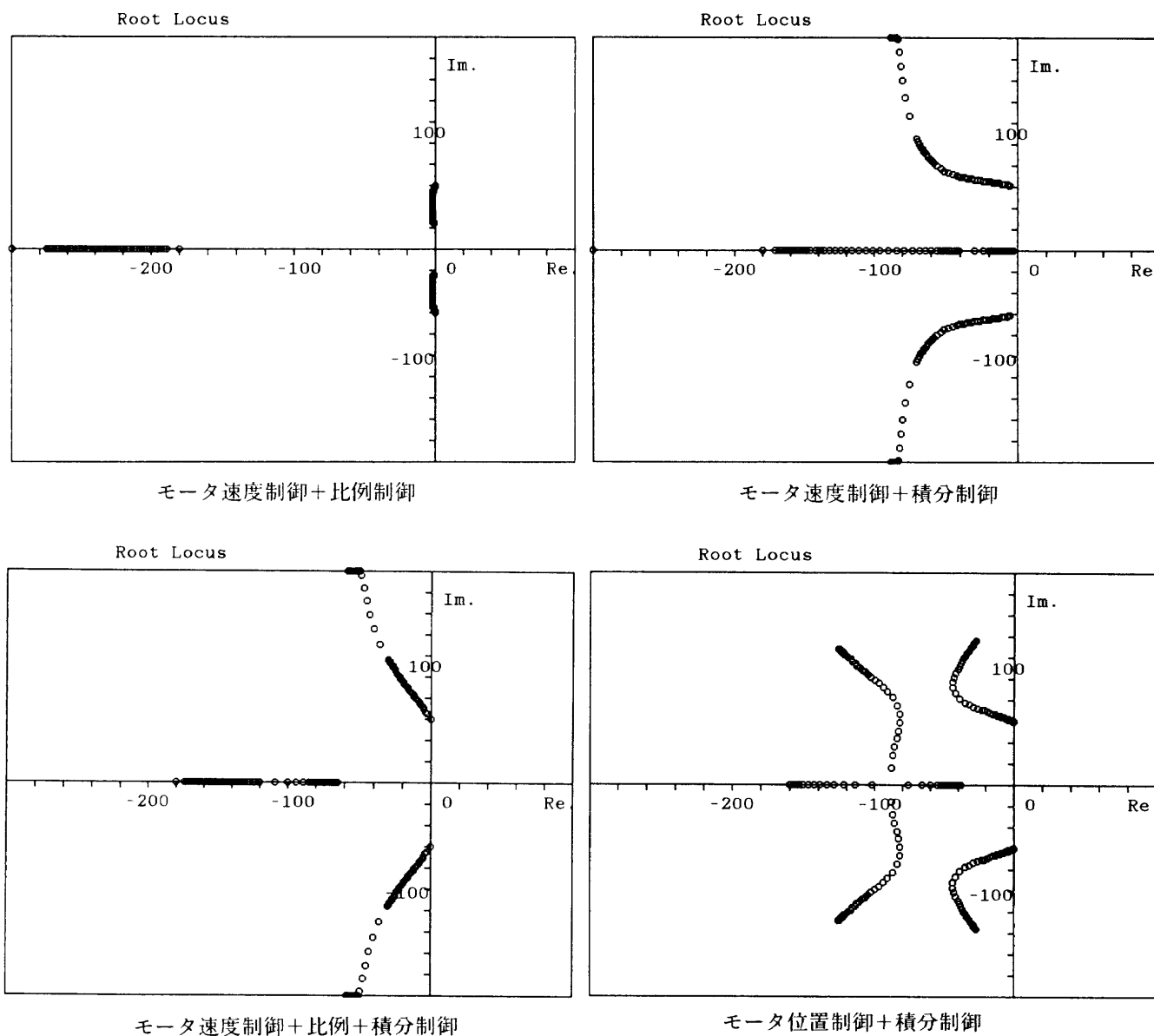


図11 図4の構成の閉ループ系の根軌跡

Hzの上下運動をさせることも可能である。原理的に張力制御が可能であることを確認した。この予備試験から判明した事項及び検討結果を次に示す。

①ケーブルのばね定数による振動が系の特性を支配する。

ケーブルの上端を固定し、他端に錘をかけケーブルを軸方向に振動を与えた時の縦振動特性(張力応答と周波数スペクトル)を図6に、このケーブルの中間を水平方向に振動させた時の振動特性を図7に示す。錘を増すとバネの縦振動数は減少し、ケーブルの横振動数は増加する。横の加振時には高調波成分が幾つも現れるが、ケーブルの縦の基本振動が卓越して現れる。

②ケーブル長を4mとしたときのケーブル直径(d)、錘(W)の各値に対する振動数の推定値を図8に示す。 $W=10\text{kg}$ (ケーブル1本あたり)で $L=4\text{m}$ 、 $d=1.5\times 10^{-3}\text{m}$ のとき振動周波数は9.0Hzとなり、試験値と良く一致する。

③ケーブル直径の太いほうが振動数は高くなるが、ケーブルに働く空気抵抗、剛性も共に比例して大きくなるので、必要強度とドラム巻き上げ性能の兼ね合いからケーブル直径は $1.5\times 10^{-3}\text{m}$ 程度が妥当である。

④ケーブルの巻き上げ系は単純な構成ほど良い。モータ、タイミングベルト、ケーブル、プーリを介した系のPI制御方式の振動特性を図9に示す。複雑な構成ほど種々の振動成分が混入してくる。

⑤モータ、ケーブル、ロードセルで構成する張力制御系の調節器には、PI制御が有効である。

図4に示す制御系でモータの高次数を省略した伝達関数ブロック図を図10に示す。ここでケーブル系は60rad/sの固有振動数のバネ系としている。各ブロックを組み合わせた閉ループ系の根軌跡を求め図11に示す。当然ながら比例制御だけでは系は振動し易く、安定領域は少ない。実用的な応答の得られる構成は、モータを速度制御型とし、調節器に積分機能を強めたPI制御が妥当であることが判った。

4. 開発した模型支持装置の機能と性能

4.1 装置の構成

予備試験の結果より、制御系の共振周波数を出来るだけ高め、摩擦力等の非線形性及び可動部の慣性質量を最小にするために、装置の構造は図12、13に示すようにモータにドラムを直結し、直接ケーブルを巻き上げる最も単純な構造とした^{10,12)}。

巻き上げ機構は直径 $1.5\times 10^{-3}\text{m}$ のより線ケーブル2本を模型支持支柱(ロッド)の前後に配置し、模型に取り付けた摺動軸受の内軸受A(図14参照)にロードセル(定格500N)を介して取り付ける。巻き上げ張力は2本のケーブルに取り付けたロードセルの出力を電氣的に加算して合計張力とした。

モータは、回転位置及び速度によるトルク変動の小さい方が望ましい。質量38.3kgの模型を、直径0.2mのドラムで秒速1.5mで巻き上げるのに必要なトルク及び回転数は37.2Nm, 15.0rad/sec(143.4rpm)となる。この仕様を満足するモータとして図13に示す新明和工業製のダイレクトドライブモータB36A-25を採用した。このモータはステータ部分のコイルに印加された3相交流電流によって作られる回転磁界に同期して、永久磁石を備えたロータが回転するACサーボモータである。このモータは従来型モータにくらべ、ロータの直径が大きく、薄型で重量比あたりのトルクが2倍、永久磁石の極数が26個でコギングトルクが1%以下、回転むらが0.1%以下で減速機を介さずに大きなトルクを発生させることができる特徴を有している。巻き取り装置の外観を写真1に示す。

模型支持装置の機構は図12に示す様に風洞の上下面から1.5mのストラットを出し、中心部に直径0.01mのロッド(クロムメッキ鋼棒, SCM435, 引張強さ $650\times 10^2\text{N/cm}^2$ 以上)を取り付け、このロッドの横方向荷重(模型の気流方向空気力)に耐えるためにロッド下端に200kgの重りを付加して、張力を与えている。

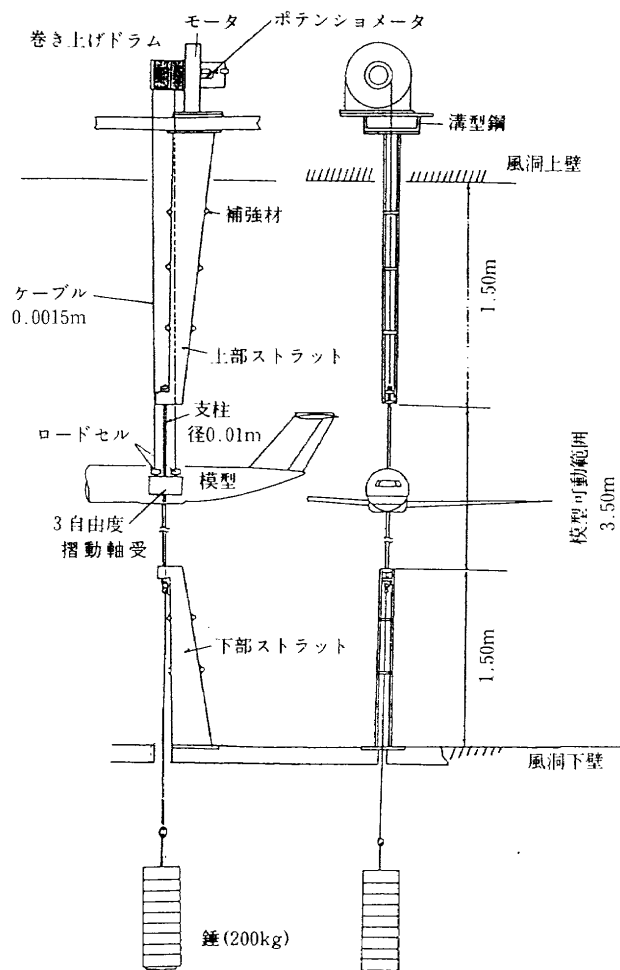


図12 開発した張力制御式模型支持装置の構成

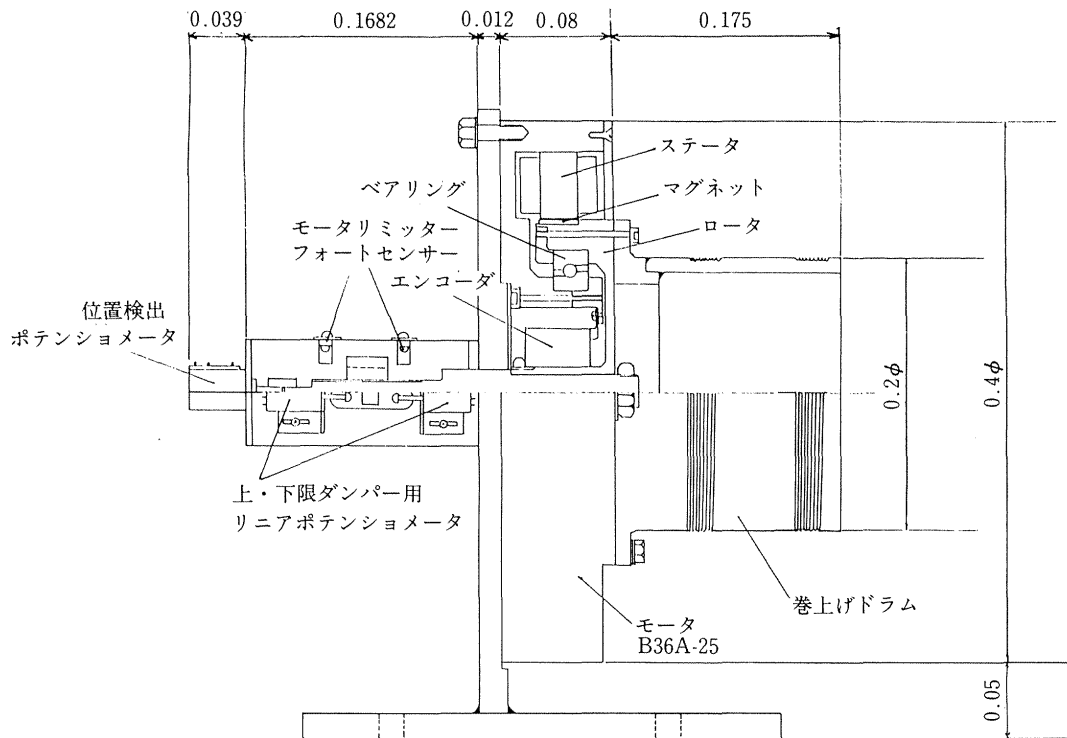


図13 モータと巻き上げ機構(単位 m)

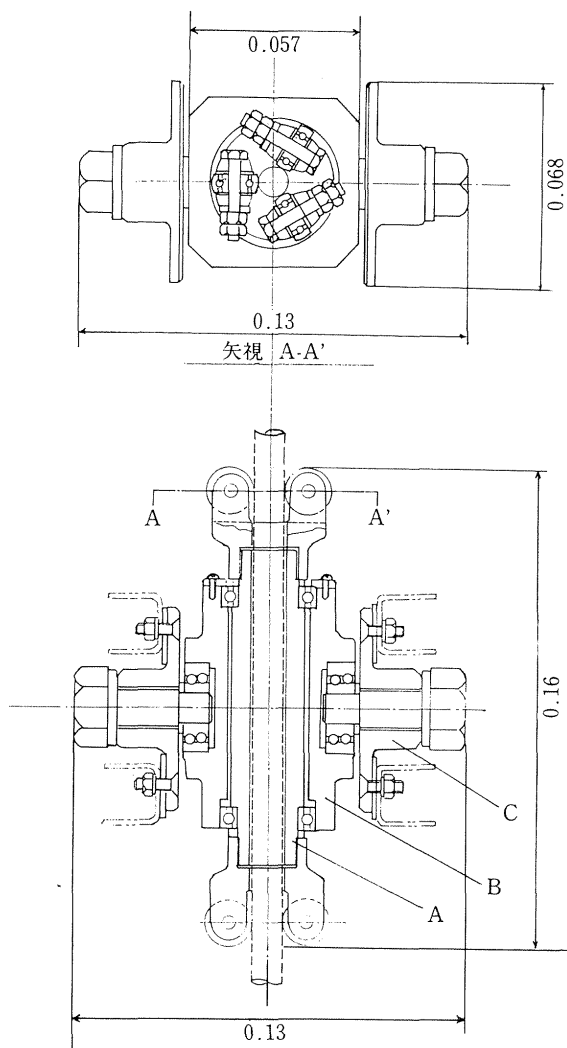


図14 摺動軸受の構造(単位 m)

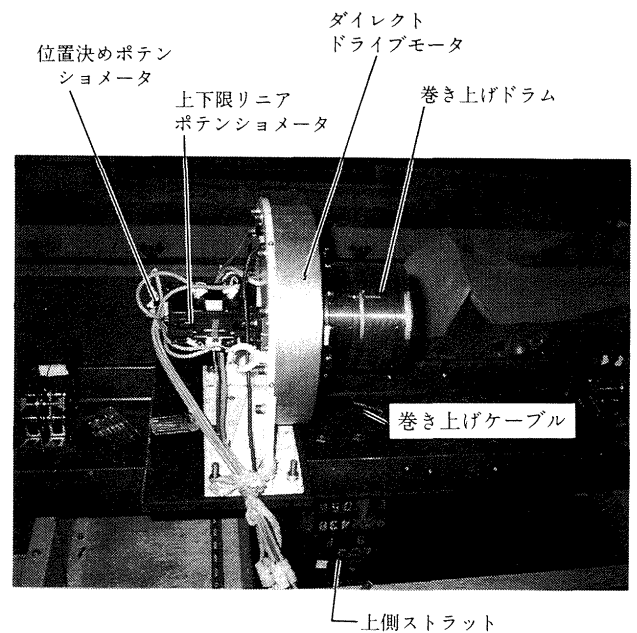


写真1 モータと巻き上げ機構

摺動軸受は図14に示す様にロッドを120度間隔で3方からローラで押さえ込んだ内軸Aとロッド間で上下動を与え、内軸Aと中軸Bの間で偏揺れ運動を与え、中軸Bと外軸受Cの間で縦揺れ運動を与えている。巻き上げケーブルは内軸受Aにロードセルを介して取り付けられている。

4.2 制御回路

張力制御回路のブロック図を図15に、その伝達関数ブロック図を図16に示す。前述4.1項で示した4つの機能を

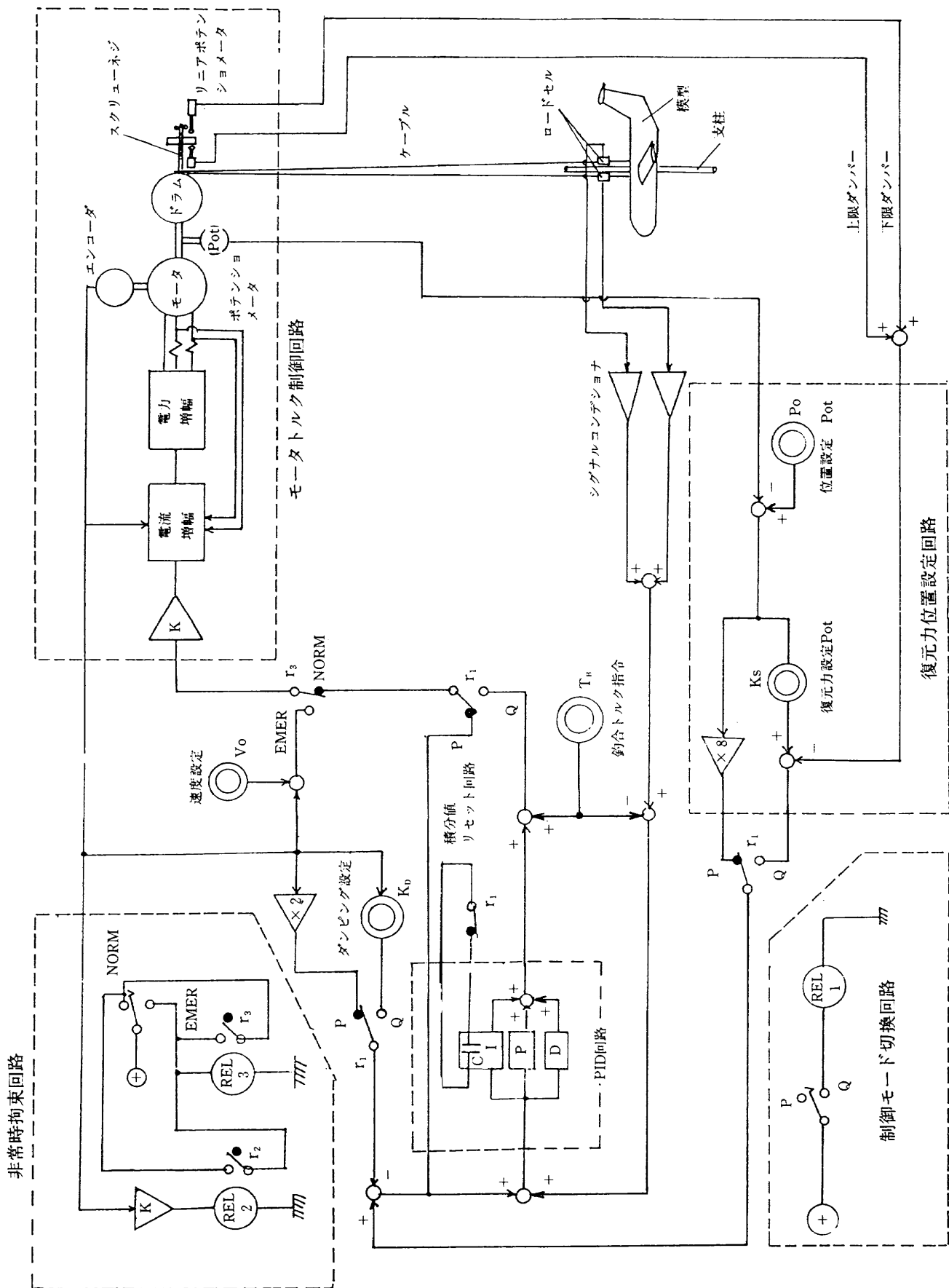
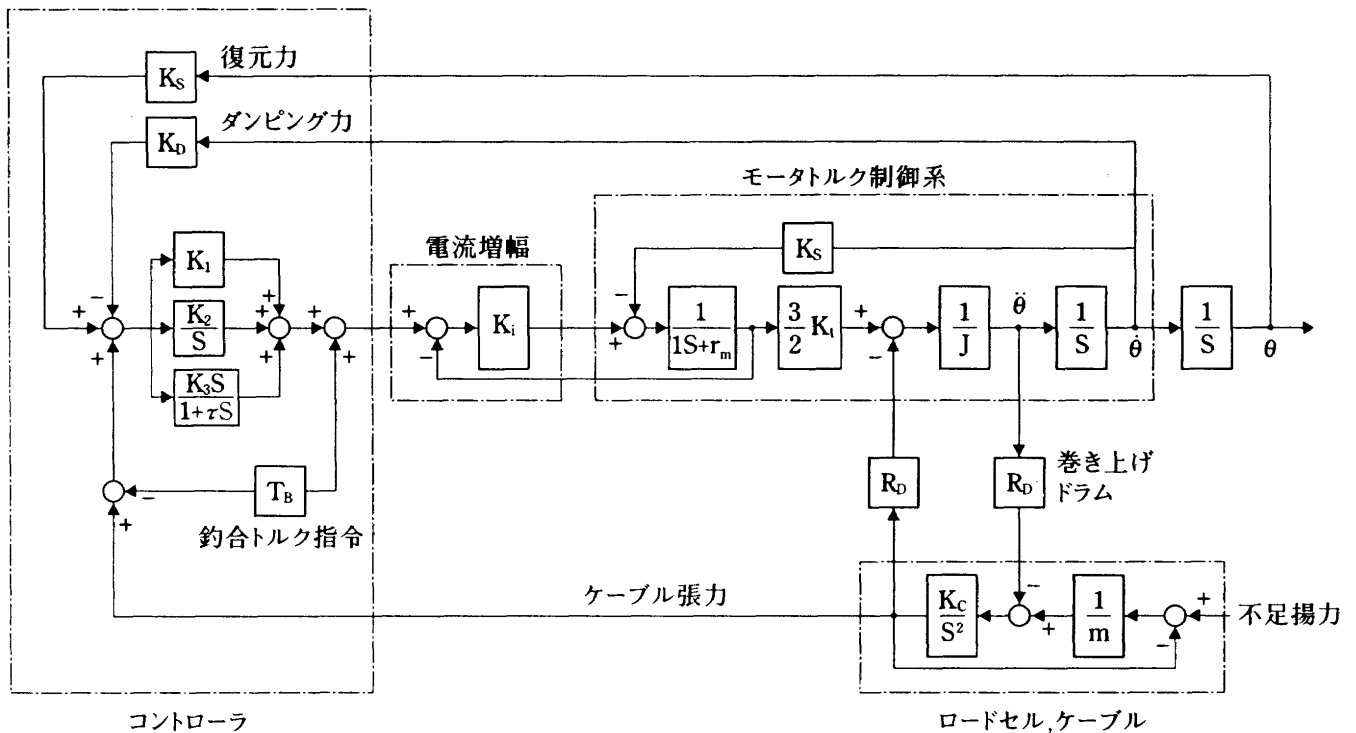


図15 張力制御回路



記号説明

K_1	: 比例ゲイン	10 A/kgm
K_2	: 積分ゲイン	150 A/kgm
K_3	: 微分ゲイン	0.1 A/kgm
τ	: 微分時定数	0.0033 S
T_B	: 釣合トルク指令	Nm
K_S	: 復元力係数	
K_D	: ダンピング係数	
K_I	: 電流増幅ゲイン	100 A/A

I	: 電流	A
r_m	: モータ巻線抵抗	7.7Ω
K_t	: トルク定数	8.13 Nm/A
K_b	: 逆起電力定数	7.97 v/rad/sec
m	: 錘り質量	18 kg
k_c	: ばね常数	200×10^3 N/m
R_D	: 巻き上げドラムの半径	0.1 m
θ	: 巻き上げドラムの回転角	rad/sec
J	: モータの慣性モーメント	0.213 kgm ²

図16 張力制御系の伝達関数

全て満足する回路が構成されている。

張力制御は2個のロードセルの出力を加算し、指令(釣り合い)トルクとの差をPID調節器に入れ、その出力をモータ系にトルク指令信号として入力する。

ダンピング制御は、モータエンコーダ信号をパルス電圧変換器(F/Vコンバータ)で速度に比例したアナログ電圧に変換し、ゲイン調節器を介してPID調節器の入力に加算する。つまり上昇速度の大きい時、巻き上げトルクを減じる方向に修正し、降下速度の大きい時は巻き上げトルクを増加させる方向に修正する。

復元力制御は、巻き上げドラムに連結したポテンシオメータで模型位置を検出し、位置設定ポテンシオメータとの差からの変位量を検出し、この信号をゲイン調節器を介してPID調節器の入力に加算する。基準点から上方では変位量に比例して巻き上げトルクを減少させ、下方では変位量に比例して巻き上げトルクを増加させる。

緊急時の拘束機能は、模型が設定速度以上になった時

リレーR3を作動させてPID調節器から切り離し、模型をその位置で停止させる(速度設定ポテンシオメータVoを常時0Vに設定しておく)。PID調節器から切り離した後、必要に応じて速度設定ポテンシオメータVoを操作し、任意の位置(通常は風洞中心位置)に移動させる。さらに二重の安全対策として、模型が可動範囲の上限、下限に近付くと、巻き上げドラムに連結したリニアポテンシオメータで強力な復元力に相当する電圧を発生させるダンパ機構も設けている。また、模型巻き上げ機能は制御モードをポジションモード(位置制御)に切り換え、位置設定ダイヤルの操作で模型を任意の位置に移動する。

調節器内に積分機能を持つフィードバック制御系の回路の切り替えには注意を要する。つまりモータ制御回路の入力点で切り替え時に電圧の段差が生じては模型が大きく振動してしまう。そのために図15に示すように釣り合いトルク指令電圧をPID調節器の入力点と出力点に加え、かつ切り替えリレーに同期して積分回路をリセットさせ

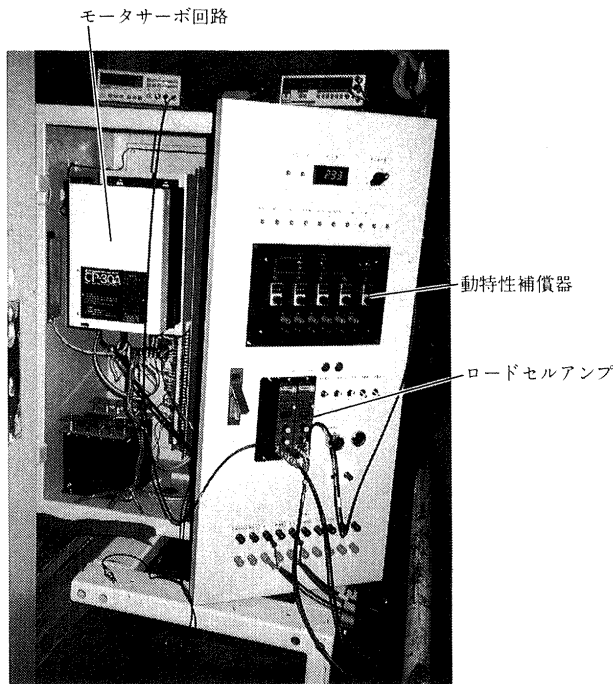


写真 2 調節器外観



写真 3 巻き上げ装置単体試験

表 2 制御方式

制 御 方 式	制 御 機 能
ポジション制御	模型の位置をフィードバックし、模型を任意の位置に移動させる制御機能
張 力 制 御	ケーブル張力を一定に制御する機能。このモードで復元力機能、ダンピング機能、ダンパー機能が作動する。
非常時拘束制御	速度の限界値を越えた時または非常停止信号を受けた時、模型をその位置で停止させる(速度をゼロとする)。

る回路を設けている。

大型低速風洞に取り付けた張力制御式模型支持装置を写真 1, 2 に示し、各種制御モードの機能をまとめて表 2 に示す。

4.3 静特性

大型低速風洞に設置する前に張力制御装置の単体性能試験を実施した。写真 3 に示すように高さ 3.5m の門型枠の上に巻き上げモータを取り付けそれから吊り下げたケーブルに不足揚力相当の錘を固定する。

この状態で次に図 15 のモータトルク制御回路の入力点 (r_3) でフィードバック系を切り離し、付加トルクに相当するトルク指令電圧をモータ制御系に与えると張力に釣り合った点で錘が浮き上がる。指令電圧をさらに増すと電圧に比例した速度で錘が上昇し、指令電圧を減らす

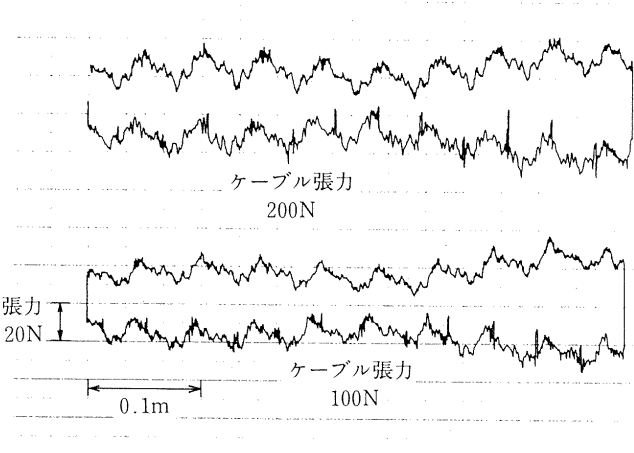


図17 開ループ時の張力変動

と降下する。錘を風洞中心付近に相当する位置に浮かせ、指令電圧を増減して錘を上下させ、この時のロードセル出力を図17に示す。静的張力変動は図に示すように約±10Nであった。この変動の原因はモータ軸摩擦及びロッドと摺動軸受の摩擦によるものと見ている。

次にフィードバックループを閉じ、張力制御モードで錘の位置を風洞中心相当位置から緩やかに変化させてロードセルで張力変動を計測した。その結果を図18に示す。100N, 200Nの釣り合い点での張力変動は約±1Nであり、仕様を満足する良好な特性を示している。図17に示す相当量の摩擦力が存在しても、トルクフィードバック制御が有効に働き、図18に示す性能が得られることが確

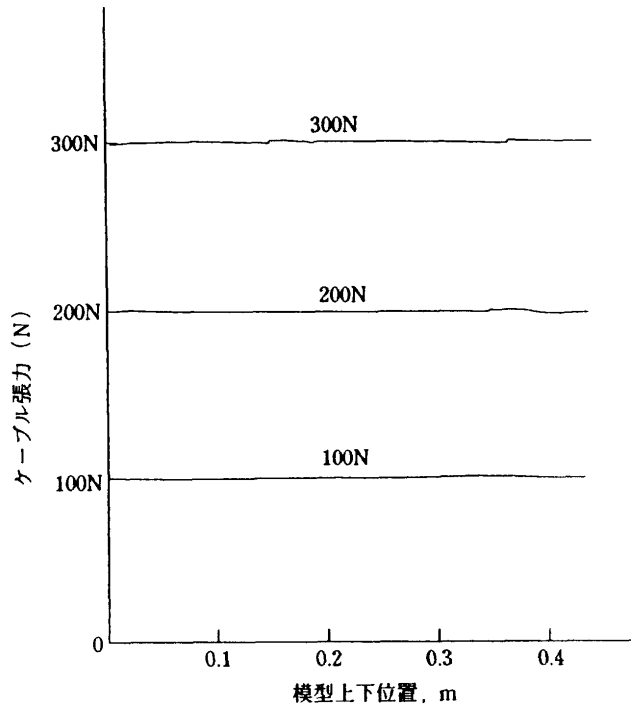


図18 閉ループ時の張力変動

認出来た。

4.4 復元力及びダンピング力特性

復元力は模型がある基準点から上方又は下方に変位したとき、模型を基準点に押し戻そうとする反力で、機械的にはスプリングで構成できる。この装置では、図15に示すように変位に比例したポテンショメータの出力電圧を、釣り合いトルク指令電圧から差し引く事に依って電氣的に作っている。図19に設定ゲインをパラメータとして、模型位置による復元力特性を示す。変位量に比例して復元力を発生させる機能が有効に作用している。

ダンピング力は速度に比例して減速させる力で、モータエンコーダのパルス信号を周波数/電圧変換器(F/V)を介して電圧に変換し、釣り合いトルク指令電圧から差し引く事に依って電氣的に作り出している。図20に設定

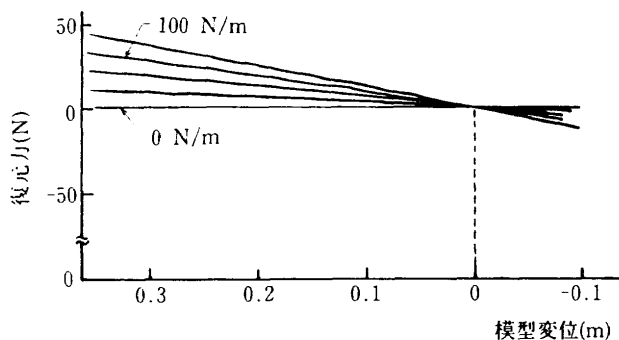


図19 復元力特性

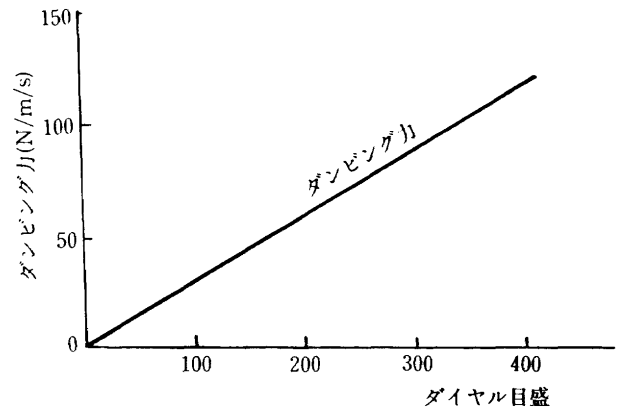


図20 ダンピング特性

目盛りに対するダンピング力特性を示す。これらの復元力、ダンピング力は、風洞の窓から模型の状態を監視しながら、ダイヤル一つで任意に設定することが可能になり、実験効率を向上させるために極めて効果的となる。

4.5 動的特性

図21に示す構成により周波数応答を試験した。張力一定制御系の微分方程式は次式で現せる。

$$m(\ddot{X} - R_D \cdot \ddot{\theta}) + K_C \cdot X - (mg - L) = F_1 \quad (1)$$

ここで m : 錘(模型)質量, θ : 巻き上げドラムの回転角, K_C : ケーブルバネ常数, X : ケーブルの伸び量, R_D : 巻き上げドラムの半径, g : 重力加速度, L : 揚力, F_1 : 加振力,

図21において、ケーブルにロードセル2を介して不足揚力相当(180N)の錘を付加し、加振機を切り放した状態で、ロードセル2、調節器(コントローラ)、ドライバ、モータ、ドラム、ケーブルでフィードバック系を構成し、

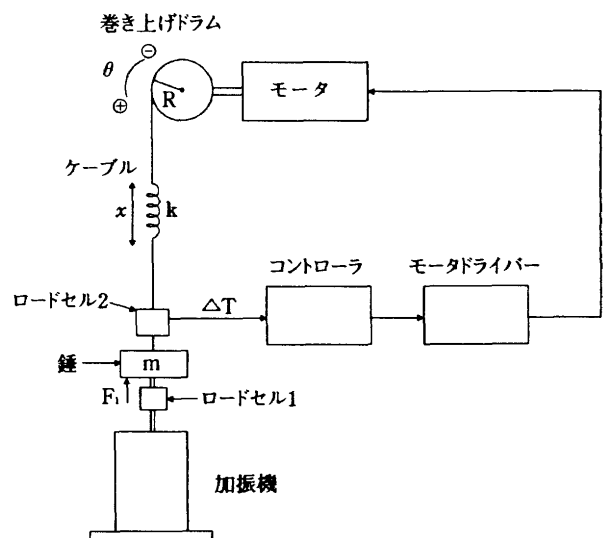


図21 動的試験装置

この系を錘が静止する釣合状態($mg-L=\Delta T=0$)に調整する。この状態で加振機を接続し、錘にパルス状の小さな力を付加すると錘が動き、バネが平衡点から崩れて、ケーブルが収縮し ΔT が変化する。 ΔT が変化するとモータは ΔT をゼロに近づける様に動く。つまり、ドラムがケーブルを巻き上げる方向に回転し、新たな平衡点に落ちつく。理想的な張力制御装置は、ケーブルの広い可動範囲で加振力に対し ΔT が無限に小さく、かつ瞬時に錘を移動できることが望ましい。しかし、現実にはケーブルや調節器、モータの遅れ、ロードセルの不感帯、回転軸の摩擦等の原因により理想通りに動かない。そこで製作した張力制御装置の動特性を調べた。

図21に示す系で加振周波数をパラメータとして加振力 F_1 と釣合状態からの変動張力 ΔT のゲインと位相遅れを求めた。その結果を図22に○印で示す。

図中の実線は図16の伝達関数をアナログコンピュータでシミュレートした結果である。

この系の大まかな特性を把握するためにモータの遅れを無視して F_1 を入力とし、 ΔT を出力とした時の閉ループ伝達関数を求めると次式となる。

$$G(s) = (6.95 \times 10^5 s) / (s^4 + 122s^3 + 9.58 \times 10^3 s^2 + 1.15 \times 10^5 s + 1.72 \times 10^6) \quad (2)$$

(2)式に示す様に分子に S 項が含まれているため、低い周波数域でのゲイン特性は右肩上がりの傾向になることが判る。シミュレーション値と実測値の違いは各構成機器の理論値と実際との誤差によるものと見ている。

さて、本装置の制御精度の設計目標は設定張力の $\pm 1\%$ とした。この制御精度 $\pm 1\%$ はゲイン値で -40dB に相当する。製作した装置では 0.5Hz から 20Hz の範囲で約 -30dB となった。この値を制御精度に換算すると 3.2% に相当する。この 3.2% は不足揚力 180N の設定に対し 5.4N の誤差を含むことになる。図18の静的試験結果の誤差約 2N (p-p) と合わせて妥当な結果であると見ている。

本模型の一次風洞実験では図1に示すバランス錘とゴ

ム索を用いたパッシブな支持装置を使って突風荷重軽減実験を実施したが、度々模型を破損し十分な成果が得られなかった。これに対し本支持装置は低周波数から 20Hz 付近までフラットなゲイン特性が得られ、 1Hz 付近で運動する短周期モードの全機突風荷重軽減実験に十分使用できることを確認した。

5. 風洞実験での使用例

平成2年6月に、本装置を使用して全機模型の突風荷重軽減実験を大型低速風洞で行った¹¹⁾(写真4)。

通常の実験手順を以下に示す。

- 1) 風洞起動前、模型は模型支持下部のストラットに乗せておく。

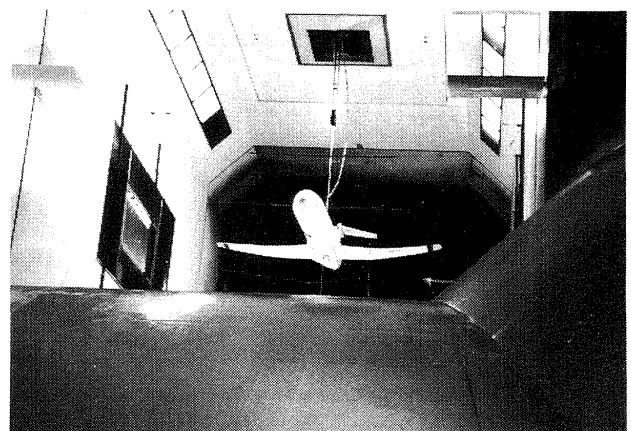


写真4 風洞内で浮上している模型

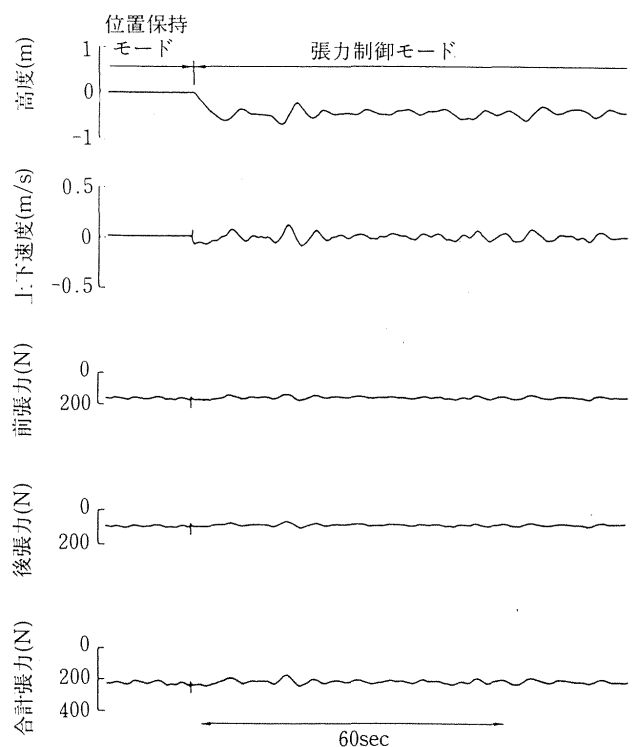


図23 本装置を用いて行った実験の一例
張力制御応答

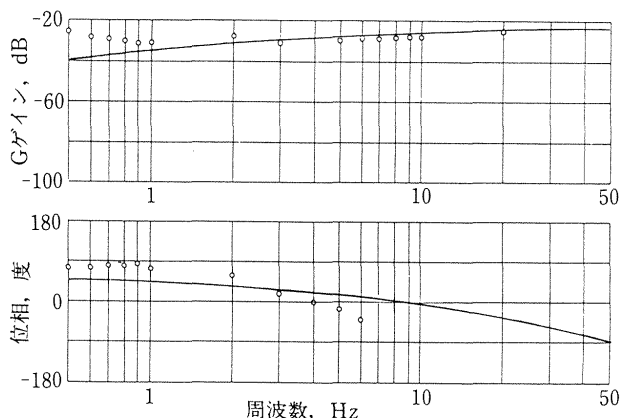


図22 動的試験結果

- 2) 制御装置の電源を投入し、各機器が正常に作動していることを確認してから、制御系を「ON」にする。
- 3) 模型を風洞中心付近にポジションモードで釣り上げる。
- 4) 風洞を起動し、風速が試験条件に整定したところで、模型エレベータを調整してトリムをとる。
- 5) 予め推定した不足揚力を、張力モードの張力設定器に設定し、制御系をポジションモードから張力モードに切り換える。この時、模型が上方向または下方向に変化するなら、エレベータでトリム微調整を行う。
- 6) 模型は重量から巻き上げ張力を差引いた値と揚力がバランスして縦揺れと偏揺れ方向に自由運動を始める。
- 7) この状態で、風洞の前方横壁に設置した突風発生ペーンを駆動して突風を発生させて模型に外乱を与え、一定の制御則に基づいて舵面を駆動し、運動特性を計測する。

図23は風速25m/sにおいて、模型が張力制御装置の作動に依って浮揚し、動的な運動をしている時の応答例である。模型の上下動に対して、復元力と、ダンピング力

が作用していること、また平均値として張力は一定に保持されていることが読み取れる。突風荷重軽減実験において、予め計算した最適と思われる制御定数に設定しても模型は予想通りに動いてくれないことがある。時には、予想を大幅に越える運動をする事もある。この様な時、非常拘束回路が作動して模型を瞬時に拘束し、ゆっくり安全な位置に移動させる。次に新たな制御定数を定めて実験を繰り返す。

図24は本装置を使ってようやく成功した突風荷重軽減実験で得られた翼の加速度、曲げ歪の応答例である。舵面制御「on」、「off」で1～6 Hzの範囲で突風荷重が軽減されていることが示されている。図24に示す翼の振動周波数は10Hz付近まで含まれているが、模型胴体の運動周波数は図23に示すように1 Hz以下であり、張力制御装置としては10Hz付近まで追従出来れば十分と見ている。

本装置は限られた風洞内で不安定な模型の運動特性の実験を安全に遂行でき、実験の効率向上、精度向上に極めて有効であることを確認した。

6. まとめ

風洞内で全機形態空力弾性模型の突風荷重軽減実験を

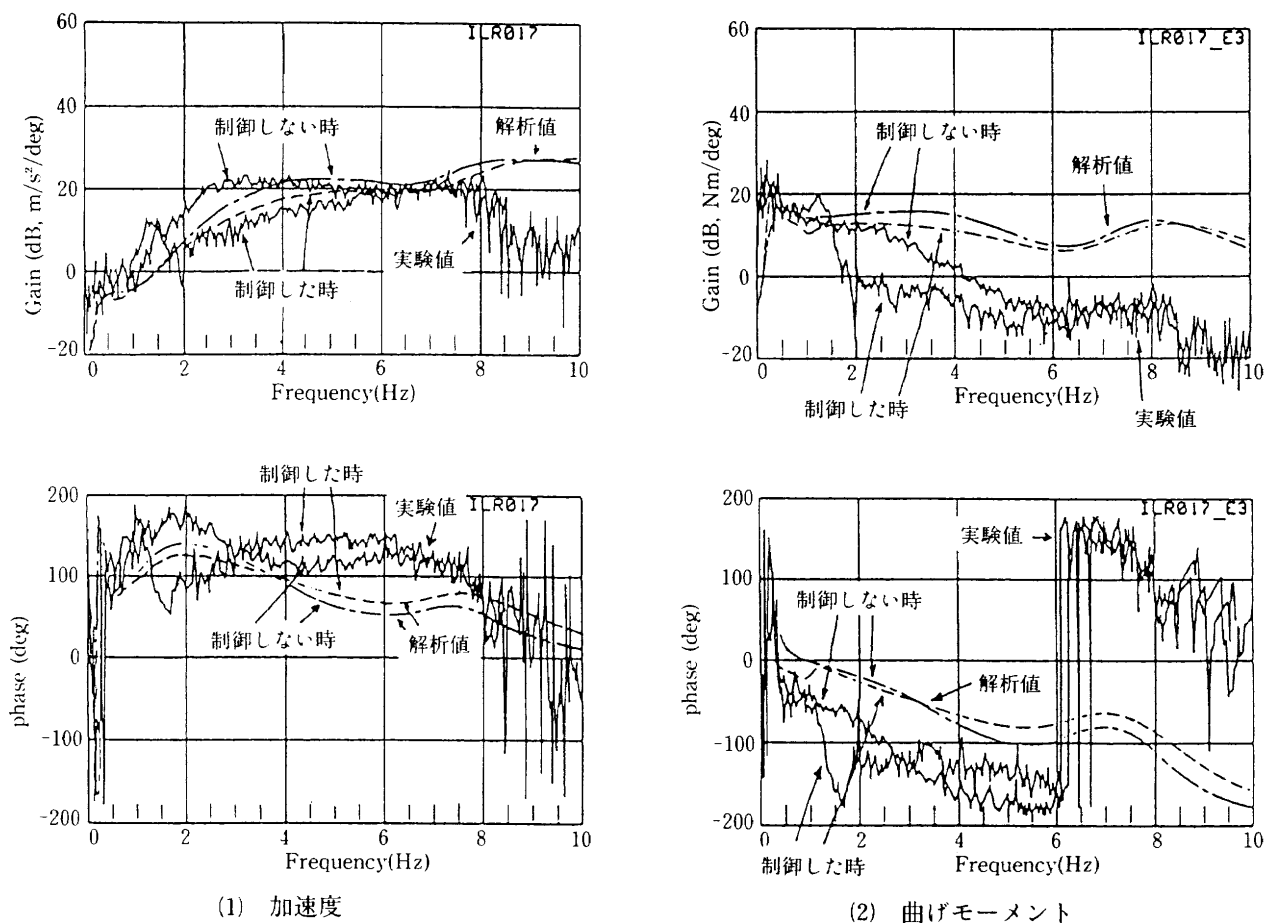


図24 本装置を用いて行った実験の一例
突風に対する弾性模型の周波数応答に一例

行うために、張力制御式模型支持装置を開発した。

本装置は、

- 1) 外力変動に対して常に張力一定の制御を精度良く行うことが出来る。
- 2) 風洞内実験で不可欠なダンピング力、復元力を任意に設定できる。
- 3) 空力弾性相似と剛体運動相似を容易に両立できる。
- 4) 模型に過度な運動パラメータを与えても、模型の安全は確保できる。

以上の性能が得られ、全機形態空力弾性模型の風洞実験に使用して、極めて有効であることを確認した。

本装置を開発するに当たって、新明和工業株式会社の竹内康郎氏、根岸英一氏、日野正志氏、若林武徳氏、国際技術開発株式会社の上野康男氏に多大なご協力、ご支援を戴いたことをここに感謝する。また当所ACT研究会の不断の討論がこの装置の開発を進める上に不可欠であった。

7. 参考文献

- 1) 航技研ACT研究会：“高アスペクト比翼の突風荷重軽減風洞実験と解析”，航技研TR-890，1985年11月
- 2) 航技研ACT研究会：“高アスペクト比翼のフラッタ制御実験(第1報)”，航技研TR-978，1988年6月
- 3) 航技研ACT研究会：“高アスペクト比翼のフラッタ制御実験(第2報)”，航技研TR-1070，1990年6月
- 4) 松下，上田，宮沢，安藤，菊池，萱場，鈴木，外立，藤井：“全機弾性模型の突風荷重軽減風試(第1報)”第27回飛行機シンポジウム，1989年10月
- 5) Bisplinghoff, R.L, et al: " AEROELASTICITY " Addison Wisley, Book PP 712-715.
- 6) 松下，西村：“突風風洞での突風応答予備実験(その2)”航技研TM-261，1974年8月
- 7) E. Berkeley Kinnaman: " Flutter Analysis of Complex Airplanes by Experimental Methods " Boeing Airplane Company, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol 19, Sep 1952
- 8) H. Subke, DiplIng: " Test Installations to Investigate the Dynamic Behaviour of Aircraft with Scaled Models in Wind Tunnels " Trans Inst MC Vol, No 3, Jul-Sep 1979.
- 9) Bennett, R. and Farmer, M.: " Wind Tunnel Technique for Determining Derivatives from Cable-Mounted Models " Journal of Aircraft Vol. 15, No.5 May 1978
- 10) 安藤，外立，松下，根岸，日野，若林：“風洞模型支持用張力制御サーボ装置”第27回飛行機シンポジウム，1989年10月
- 11) 松下，藤井，安藤，菊池，外立，萱場，鈴木，室田，野中，野口，宮沢，上田：“全機弾性模型の突風荷重軽減風試(第2報)，アクティブ支持装置を用いた動的風試”第28回飛行機シンポジウム，1990年11月
- 12) 外立，安藤，萱場，藤井，松下，竹内，根岸，日野，若林：“張力制御式模型支持装置の開発とそれを用いた突風荷重軽減風試”第46回風洞研究会議1991年5月

航空宇宙技術研究所報告1299号

平成 8 年 7 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7 - 44 - 1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北 1 - 7 - 8
