

ISSN 0452-2982

UDC 533.6.07:

681.3.02

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-666

産業用ロボットを用いた風洞模型支持システム

藤田 敏美 ・ 岩崎 昭人 ・ 藤枝 郭俊

重見 仁 ・ 中安 英彦 ・ 匂坂 雅一

1994年6月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	2
2. 模型支持システムの設計構想	2
3. 模型支持システムの構成	2
3.1 産業用ロボットの概要	4
3.2 ロボット制御装置の概要	5
3.2.1 ロボットのマニュアル操作	5
3.2.2 ロボットのリピート操作	7
4. AS システム	10
4.1 AS 概要	10
4.2 AS システム状態	10
5. ロボットの風洞内設置	10
5.1 ロボットの風防設計	10
6. 風洞模型の取り付け	12
6.1 ツール寸法の登録	13
6.2 ベース座標の登録	13
7. ロボット機能試験	14
7.1 模型姿勢角度の設定精度	15
7.2 模型移動の設定精度	15
7.3 負荷によるロボットアームの変位	16
7.4 ロボットアームの振動	17
7.5 ロボット支持による気流への影響	17
8. ロボットを用いた風洞試験方法	19
8.1 一般的な風洞試験方法	19
8.2 地面効果試験方法	19
9. 模型支持方式の相違による空力データの比較	20
9.1 風洞模型	21
9.2 模型支持	21
9.3 風洞試験結果	22
10. ま と め	22
11. 参考文献	22

産業用ロボットを用いた風洞模型支持システム*

藤田 敏 美^{*1} 岩 崎 昭 人^{*1} 藤 枝 郭 俊^{*1}
重 見 仁^{*1} 中 安 英 彦^{*2} 匂 坂 雅 一^{*2}

Model Support System Using an Industrial Robot in Low-speed Wind Tunnel*

Toshimi FUJITA^{*1}, Akihito IWASAKI^{*1}
Hirotooshi FUJIEDA^{*1}, Masashi SHIGEMI^{*1}
Hidehiko NAKAYASU^{*2}, Masakazu SAGISAKA^{*2}

ABSTRACT

To support the test model and provide a means of changing the attitude and the position, a test on the use of an industrial robot was performed in the NAL gust wind tunnel.

For the model support system using a robot, the functional tests were made and aerodynamic characteristics tests at a low-speed wind and ground effect tests were conducted using the 8.9% scale model of HOPE ALFLEX (Automatic Landing Flight Experiment) Vehicle. The obtained data were compared with the results from the same model supported by the sting of a conventional type.

This report mainly describes the functional performance of the model support system using the robot and the influence of the robot's arm on the wind flow. The results indicated that the present model support system is very useful to move the model quickly in various directions in the wind tunnel. It was also suggested that the present model support system can be used for dynamic wind tunnel tests and can be recognized as one of the advanced technologies relating to wind tunnel tests.

Key Words : Low-speed wind Tunnel, model support system, Robot, Ground effect

概 要

航空宇宙技術研究所の突風風洞では、HOPE 開発のための一翼を担う小型自動着陸実験機 (ALFLEX : Automatic Landing Flight Experiment) の着陸時空力特性を把握するための地面効果試験を実施した。しかし、地面効果試験において従来の風洞の模型支持方式では、風洞模型を着陸時の姿勢と速度に準じて上下方向に制御することは不可能である。

我々は、新たな風洞模型支持装置として産業用ロボットの機構と機能に着目し、これを用いた風洞模型支持システムと風洞試験方法を開発した。

本システムでは、風洞模型を要求に応じて迎角、横滑り角、回転角を持った姿勢を設定できる他、指定した位置へ迅速に移動させることができる。

* 平成 6 年 5 月 10 日受付 (received 10 May 1994)

*1 新型航空機研究グループ (Advanced Aircraft Research Group)

*2 宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan)

本システムを用いた ALFLEX の風洞試験では、従来の低速風洞試験と共に地面効果試験が効率的に実施されただけでなく、最近注目されている動的試験データの取得が可能になるなど、新しい展開の風洞試験方法の可能性を示すことができた。

1. ま え が き

航空宇宙技術研究所では宇宙開発事業団との共同研究で、HOPE (H-II ロケット打ち上げ型有翼回収機) 開発のための研究が進められている。

その一翼を担う小型自動着陸実験機 (ALFLEX) は、平成 7 年度の飛行試験実施を目指して実験機の開発を含めた基本設計が進められている。当所調布飛行場分室の突風風洞では、小型自動着陸実験機の風洞模型を用いて、高速かつ急角度で地表に接近し着陸する場合、空力特性に影響を与える地面効果を知るための試験を実施した。

一般に地面効果試験では、航空機模型と地面板との相対的な距離を逐次変化させて、模型に働く空気力を測定する。しかし、当所の各風洞を含め一般の風洞の模型支持方式は、風洞模型を後方から風軸方向に突き出した支柱によって支持するスティング方式と、模型を下から支柱で支持するストラット方式であるため、模型の位置を変え得る範囲は非常にかぎられている。このため、模型と地面板との距離を変えるためには大型の地面板の方を動かさなければならず、非常に手間の掛かる作業であった。さらに最近では、機体が地面に接近する時の非定常な運動が地面効果に及ぼす影響の重要性が指摘されている。風洞内でこの現象を再現するためには、模型を地面板に近づけつつ動的な測定を行わなければならない。しかし、このような動的測定を行うには従来の模型支持方式では不可能である。

我々は地面効果試験を実施するにあたり、風洞模型の着陸時の姿勢と動きを制御する手段として、工業界の各方面で使用されている産業用ロボットの機構と機能に着目し、産業用ロボットを用いた模型支持システムと風洞試験方法を開発した。

この産業用ロボットを用いた模型支持システムによる小型自動着陸実験機の風洞試験では、従来の低速風洞試験と同様に、模型に働く空気力および翼面上の圧力測定を行うと共に、地面効果試験を実施した。

地面効果試験ではロボットアームの先端に取り付けた風洞模型を上下 (Z 方向) に制御することにより、模型と地面板との相対的な距離を逐次変化させて、空気力測定と同時に模型 (天秤中心を基準点) の風洞内での位置情報 X Y Z 座標を収集した。

産業用ロボットを用いた風洞模型支持システムを構築することにより、従来の模型支持では実施できなかった模型の移動制御を伴う新しい風洞試験方法を実現した。本報告は、産業用ロボットを用いた模型支持システムの構成、機

能およびその特性について述べる。

2. 模型支持システムの設計構想

我々が産業用ロボット (以後ロボットと称する) を用いた模型支持システムを設計する上での基本的な考え方は、導入するロボットが工業界で使用されている一般的な既成品であること、そのロボットを設置する風洞は既設の風洞で、且つその風洞に備えつけられた設備を利用できることである。この考え方を基に風洞試験を実施する上で必要な事項を加味し以下に述べる点を考慮してシステムを設計することとした。

(1) 産業用ロボットの選定条件

- 小型自動着陸実験機の風洞試験内容 (風速、迎角等) から、模型に働く空気力と模型支持金具等を含めた重量に十分対応できる可搬重量を有し、地面効果試験の模型移動に対応出来る動作範囲を有すること。
- ロボットの移動、設置等の作業時は突風風洞に既設の設備 (クレーン; 可搬重量 24500 N) が使用可能であること。

(2) 産業用ロボットの機能条件

- ロボットの制御により、風洞模型の迎角、横滑り角および回転角の設定が可能であること。
- ロボットの制御により、風洞模型 X Y Z 方向の移動量および移動時の速度設定が可能であること。
- ロボットの制御装置は、適当なインターフェイスを用いて既存の計測用計算機等と接続が可能であること。
- 地面効果試験における模型移動時の時間、位置情報および模型に働く空気力測定の同期がとれること。

(3) 使用風洞との整合性

- 風洞は当所調布飛行場分室の突風風洞¹⁾を用い、風洞本体を改修することなくロボットを設置する。
- 風洞試験準備のため、測定部カートの移動が可能であること。
- 計測および制御は、突風風洞が有する既設の計測設備²⁾³⁾を用いる。

(4) その他

- ロボット使用時の風洞内作業における安全を確保する。

3. 模型支持システムの構成

産業用ロボットを用いた模型支持システムは、大別すると図 1 に示すようにホスト計算機 (ECLIPSE MV/7800XP 又はパーソナルコンピューター; PC9801 等)、ロボット制御装置およびロボットから構成されている。ロボットの

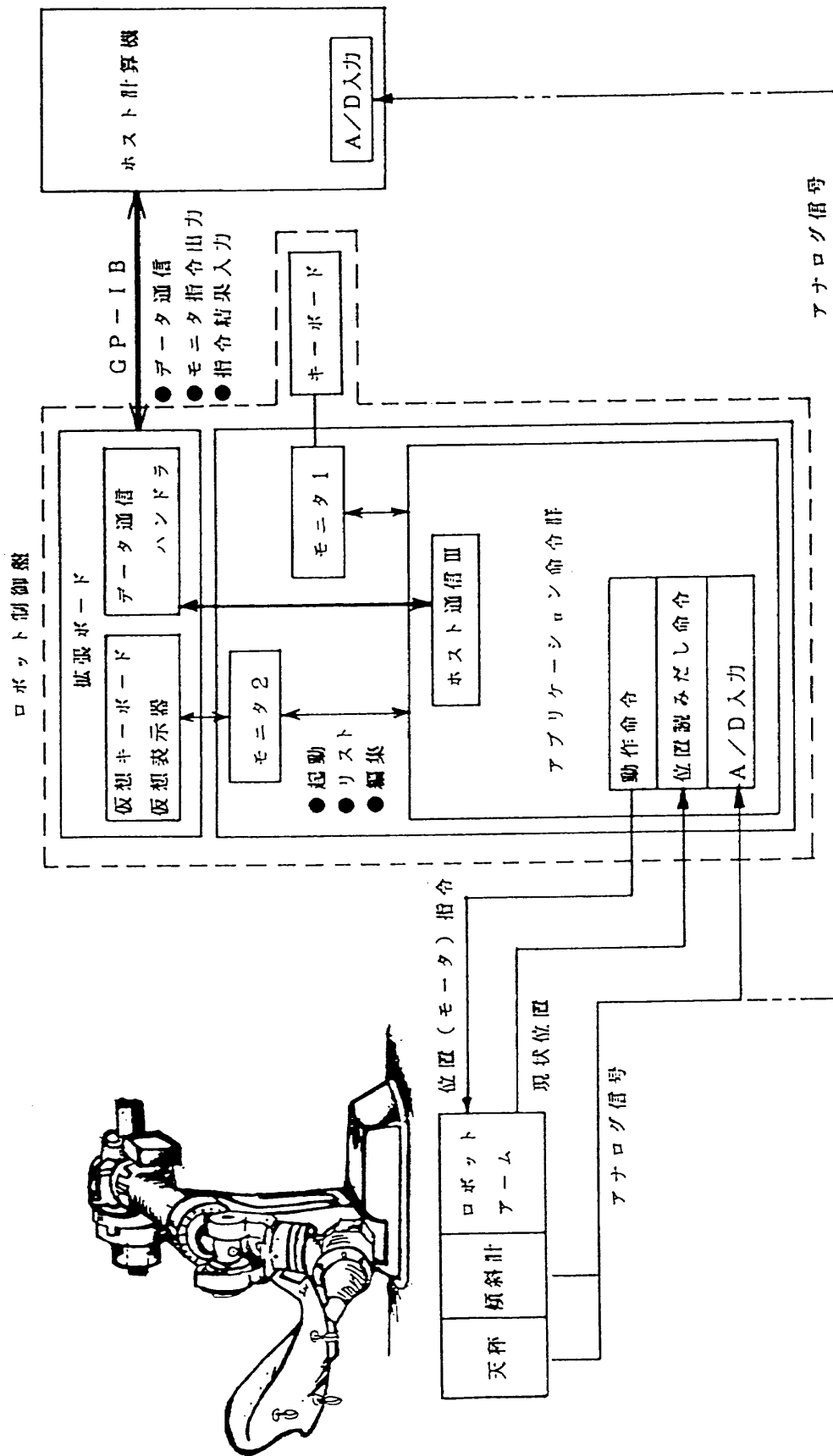


図1 模型支持システムの構成

アーム先端には、風洞模型支持用のスティングと6分力天秤が取り付けられる。そして、このスティング部分には模型の迎角、回転角を監視するための傾斜計を内装することができる。

本システムでは、ホスト計算機とロボット制御装置はGP-IB インターフェースで接続されている。また、ロボットの先端に取り付けられた天秤と傾斜計のアナログ信号は、ロボット制御装置またはホスト計算機のA/D入力部のいずれかに接続する。これにより、ホスト計算機からロボット制御装置を介してロボットへの制御指令、モニタ指令等のデータ通信を行うと共に、天秤と傾斜計の出力を計算機に取り込む。この計算機にデータを取り込む方法は、通常の風洞試験で行われる静的試験の場合と、地面効果試験で模型を連続的に移動させながら測定する動的試験の場合のように、風洞試験の内容によって二つ手段がある。これらの風洞試験方法とデータ収集の詳細については別途説明する。

3.1 産業用ロボットの概要

産業用ロボットは作業内容に応じた形状と機能を有した既成品があるが、その大部分が溶接および塗装用として開発されたロボットである。そして、それらのロボットの可搬重量は50N～100N程度の非常に軽い作業用具を対象にしたものである。このため、風洞模型の支持ならびに風洞試験に適用できる可能性のあるロボットの機種は非常に限定された。

我々は本システムの設計構想に基づいてロボットを厳選した結果、川崎重工業株式会社製のUX-150型に決定した。その外観とロボットアームの動作範囲を図2に、仕様を図3に示す。

このロボットの選定理由としては、

- ①平行四辺形リンクと多関節を組み合わせた機構で6自由度を有し、風洞模型の姿勢制御が可能である。
- ②設置スペースに対して可搬重量1470Nとこのクラスでは最大であり、模型支持と風洞試験に適用できる。
- ③ロボットの動作範囲が広く、速度は各軸によって異なるが $100^{\circ}/s \sim 200^{\circ}/s$ と高速であり、その速度制御ができる。

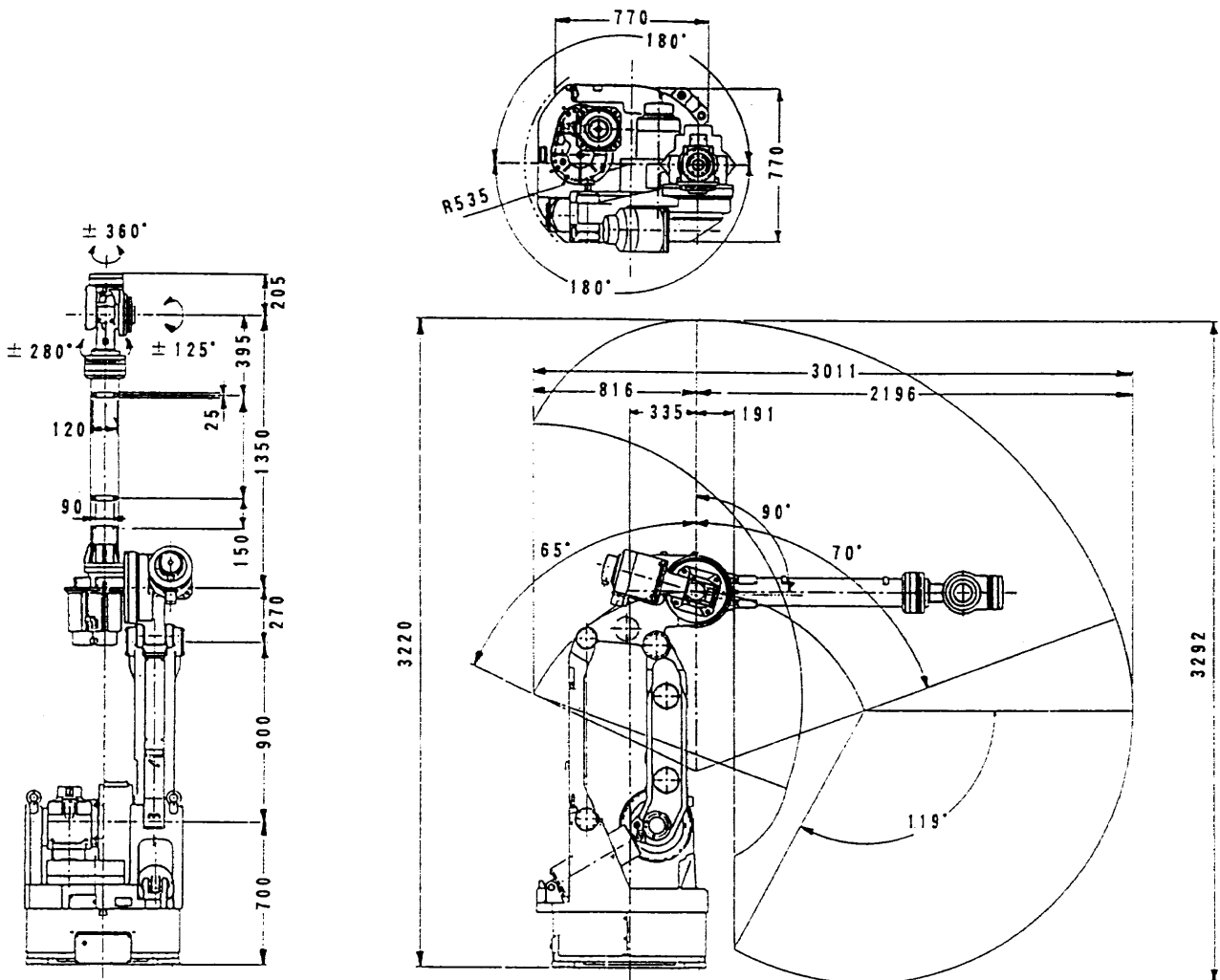


図2 ロボット外観と動作範囲

型 式	U X 1 5 0 多関節極座標形		
動作自由度	6 軸		
動作範囲・速度	動作 軸	動作 範 囲	最高速度
	左右旋回 (J T 1)	$\pm 135^{\circ}$ (最大 $\pm 180^{\circ}$)	$100^{\circ}/\text{sec}$
	前後振り (J T 2)	$+70^{\circ} -65^{\circ}$ (135°)	$100^{\circ}/\text{sec}$
	上下振り (J T 3)	$+90^{\circ} -119^{\circ}$ (209°)	$100^{\circ}/\text{sec}$
	手首回転 (J T 4)	$\pm 280^{\circ}$ (560°)	$125^{\circ}/\text{sec}$
	手首曲げ (J T 5)	$\pm 125^{\circ}$ (250°)	$125^{\circ}/\text{sec}$
	手首振り (J T 6)	$\pm 360^{\circ}$ (720°)	$200^{\circ}/\text{sec}$
可 搬 重 量	1470.0 N		
手首許容トルク	動作 軸	負荷モーメント	慣性モーメント
	手首回転 (J T 4)	833 Nm	71.5 Nms^2
	手首曲げ (J T 5)	833 Nm	71.5 Nms^2
	手首振り (J T 6)	441 Nm	31.4 Nms^2
位置繰り返し精度	$\pm 0.5 \text{ mm}$		
駆動電動機	同期形ブラシレスACサーボモータ		
重 量	約 14700.0 N		

図3 ロボット仕様

④位置繰り返し精度が $\pm 0.5\text{mm}$ 以下である。

⑤ロボット本体の自重が14700Nであり、風洞への取り付け取り外し作業等に当風洞のクレーン設備が使用できる。が主にあげられる。

3.2 ロボット制御装置の概要

ロボット制御装置（型式：UX150FA55）の外観を図4に、仕様を図5に示す。ロボット制御装置はロボット用に開発されたコンピュータ制御システムAS⁴⁾と、ロボット単体システムとしての基本的な動作制御に必要な最小限の操作スイッチが装備されており、それらは

○操作パネル：制御装置の電源ON/OFF、リピータ運転等を行う。

○パネルディスプレイ部：作業プログラムや各種データ、システムの動作状態などを表示する。

○キーボード：ロボットの動作制御、各種データの入力および編集等を行う。

○ティーチペンダント：ロボットをマニュアル操作するときに使用。

から構成されている。また、制御装置には今回の小型自動着陸実験機の風洞試験で機体が地面板に連続的に接近する動的な地面効果試験を考慮し、オプションとして、①A/D入力部、②補助記憶装置、③外部通信機能（GP-IBインターフェイス）、等を装着した。

これによりロボット制御装置はGP-IBインターフェイスによってホスト計算機と接続され、ホスト計算機からの指令によってロボット制御およびデータ転送等が行われる。

3.2.1 ロボットのマニュアル操作

ロボットをマニュアルで操作するのは、ティーチペンダ

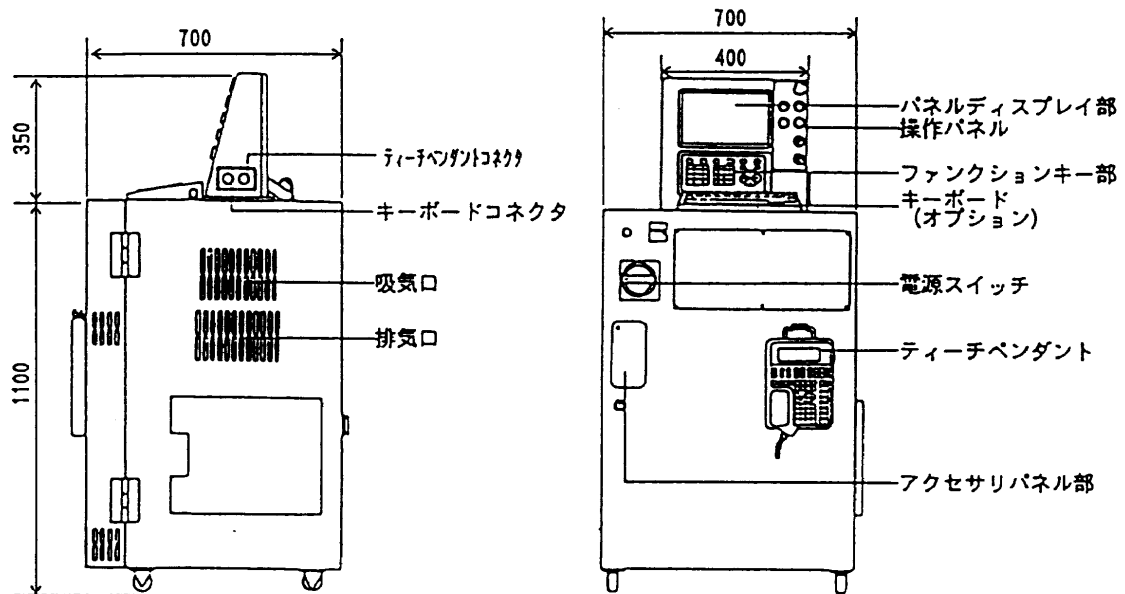


図4 ロボット制御装置外観

型 式	A 5 5
構 造	自立全閉型制御本体部、及び分離操作部
制 御 軸 数	6 軸
駆 動 方 式	フルディジタルサーボ
動 作 方 式	手動動作モード：各軸独立、ベース座標系、ツール座標系 再現動作モード：各軸補間、直線補間
記 憶 容 量	5 1 2 K B (標準 システムメモリ含む)
分 離 操 作 部	● P D U 表示部 ● 基本操作スイッチ
ティーチ ペンダント (ケーブル 15m)	● L C D 表示部、動作キー、メニューキー ● 非常停止、ティーチロック、トリガスイッチ
所 要 電 源	A C 2 0 0 / 2 2 0 V ± 1 0 % , 3 相 5 0 / 6 0 H z
I / O 信 号	外部操作信号： 2 回線 (非常停止、外部ホールド) 汎用入力： 1 6 回線 (標準 専用信号含む) 汎用入力： 1 6 回線 (標準 専用信号含む)
オ プ シ ョ ン	記 憶 容 量： 5 1 2 K B 補助記憶装置： F D D (3. 5 インチ 2 H D) 外部通信機能： G P - I B アナログ入： 8 チャンネル

図5 ロボット制御装置仕様

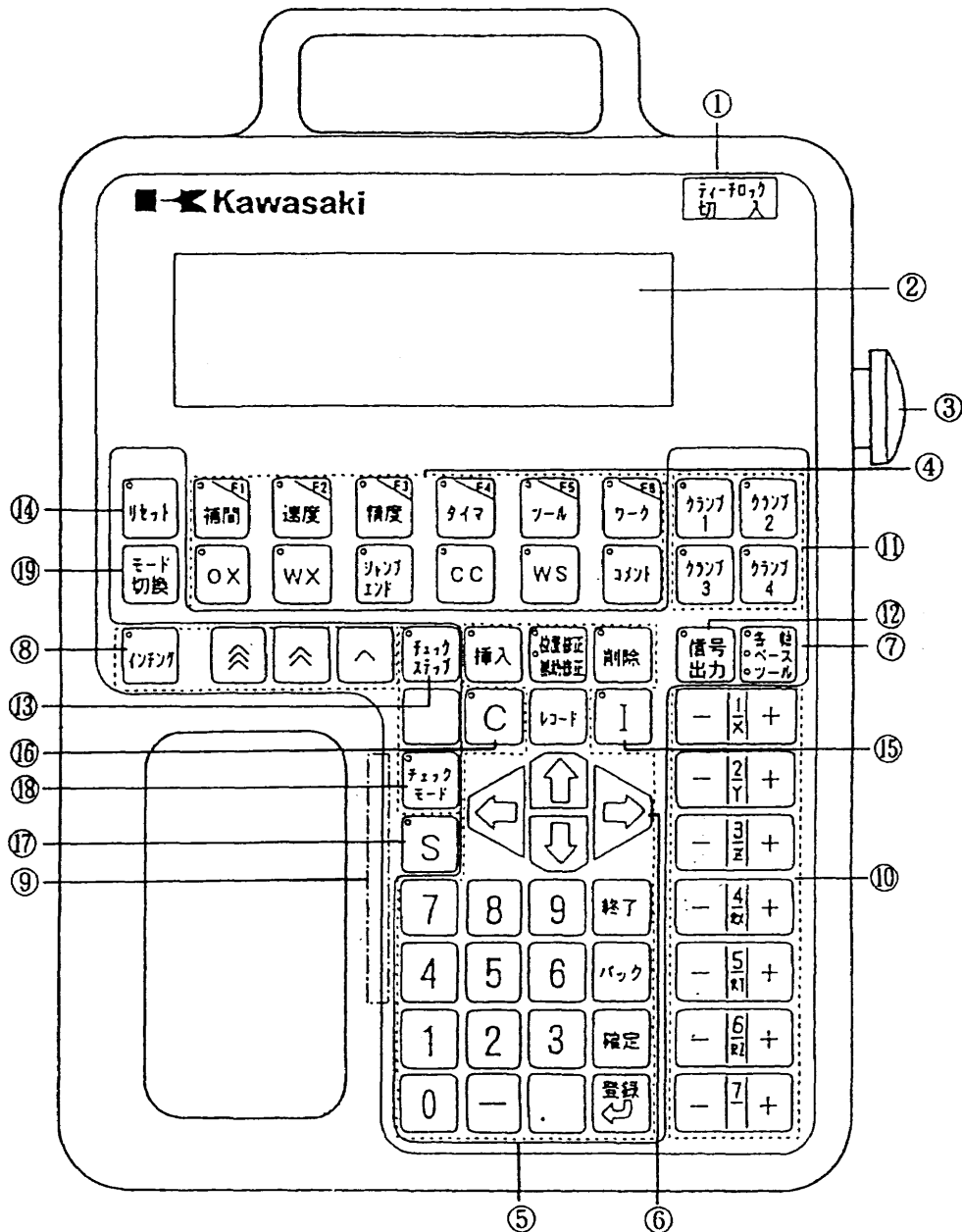


図6 ティーチペンダント外観

ントを使用して

- ロボットを教示したい姿勢に設定したいとき。
- ロボットを教示したい位置に移動させたいとき。
- ロボットに何らかの異常が発生し、ロボットアームを移動させたいとき。

の場合に行う。ティーチペンダントの外観を図6に、そのキー、スイッチの機能を図7(a), (b)に示す。

3.2.2 ロボットのリピート操作




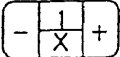
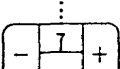
リピート操作は、風洞試験におけるロボットの制御用に作成したアプリケーションソフトを自動的に再現動作させることである。この操作は制御装置の基本操作部、または外部(ホスト計算機)からの操作で行うことができる。






基本操作部によるリピート操作は、主に風洞試験実施前に行う。その一例としては、地面効果試験における風洞模型の位置を、ティーチペンダントを用いて地面板に最も接近した位置と最も離れた位置の2点を設定後、その2点が教示通りに記憶されているかどうか確認するために、実際に模型を移動させる場合である。

外部(ホスト計算機)からのリピート操作は、風洞試験時に模型の移動を行う場合である。今回は地面効果試験における模型移動開始指令を出力し、模型が移動開始から停止までの移動中における天秤出力と模型の位置情報等のデータ収集をプログラム操作で行った。

番号	キー/スイッチ	機 能
①	ティーチロック 入/切	教示中に他の人が知らずにリビート運転をすることのないよう安全上設けられたスイッチです。ティーチペンダントを用いてロボットの動作範囲に入るときは、必ずこのスイッチを「入」に切り換えてください。「入」の状態のときのみ軸キーが有効です。ティーチロック中（「入」の状態）はリビート運転できません。
②	液晶ディスプレイ部	ステータス表示及びティーチングデータ、各種データなどを表示します。
③	非常停止	このスイッチを押すと、モータ電源が遮断されロボットの動作が停止します。
④	補助データ設定 キー	簡易ティーチ時に使用する各種補助データを設定・実行します。メニュー表示のレイアウトに対応しています。
	補 間	教示ステップへのロボットの動作を各軸補間、直線補間、円弧補間（オプション）するかを選択します。
	速 度	教示ステップのロボットが動くスピードを選択します。ソクド0（10%の速さ）からソクド9（100%の速さ）に設定できます。（変更可能）
	精 度	教示ステップのロボットの位置を決める精度を選択します。精度1～4の精度範囲は変更可能です。
	タ イ マ	教示ステップで停止する時間を選択します。（1～3）（0は設定なし）
	ツ ー ル	教示ステップで使用するツール番号を選択します。（1～9）
	ワ ー ク	
	O X	ロボットから外部への出力信号を設定します。（1～16, 最大64）
	W X	外部からの入力信号を設定します。（1～16, 最大64）
	ジャンプ エ ン ド	現在のステップから他のプログラムへジャンプさせる時は、「ジャンプ」を、また現在のステップで終了させる時は、「エンド」を設定します。
	C C	スポット溶接のときのクランプ条件を設定します。溶接ガンの種類等に応じた信号入出力の条件を番号で選びます。また、2段ストロークガンの大開、小開を指定する場合にも使います。
	W S	スポット溶接のときの溶接条件番号を設定します。スポット溶接をするときには、この番号に対応する信号がロボットから溶接機に出力されます。
	コ メ ント	現在のステップがどのようなポイントであるかを示すためのコメント文を設定します。
⑤	レ コ ード	ティーチ時の教示内容や位置データなどを記憶する時に使用します。
	挿 入	プログラムの修正でステップを挿入する時に使用します。このキーを押して位置や補助データを設定後、レコードキーを押すと教示ステップが挿入されます。このキーは終了キーまたは挿入キーが押されるまで保持されます。
	削 除	プログラムの修正でステップを削除する時に使用します。このキーを押した後、レコードキーを押すと表示ステップが削除されます。このキーはレコードキーを押すと、自動的に削除が解除されます。
	位 置 修 正 補 助 修 正	プログラムの位置データや補助データを修正する時に使用します。このキーを押して位置データや補助データを修正後、レコードキーを押すと、位置または補助データが記憶されます。このキーは終了キーまたは位置修正/補助修正キーを押すまで保持されます。このキーを押す毎に通常→位置修正→補助修正と変化します。

図 7(a) ティーチペンダント説明

番号	キー/スイッチ	機 能
⑤	0～9	0～9、ピリオドを入力する時に使用します。
	確定	文字入力モード等で文字を確定する時に使用します。
	終了	各種作業、機能を終了、または途中終了させる時に使用します。
	バック	入力文字を1文字ずつ消去する時に使用します。
	—	負符号を設定する時に使用します。
	登録	データを入力する時に使用します。
⑥	↑ ⇐ ⇐ ⇐ ↓	上下左右それぞれ独立したカーソルキーです。指示メニュー選択やデータ設定値を選択する時に使用します。⇐キーでステップが進み、↑キーでステップが戻ります。※
⑦	各軸/ べ-2/ 7-4	マニュアル動作座標系モードを指定します。
⑧	インテング	手動操作速度を設定するときを使用します。スピードを設定する時は、この2種類のキーを組み合わせ使用します。 [A][A]キーを同時に押すと複数ステップが前進/後退します。※
	  	
⑨	トリガ	ティーチモード：スイッチを引くとマニュアル操作が可能です。 チェックモード：スイッチを引くとロボットは起動状態、引かなければ停止状態。 リピートモード：無効
⑩		ティーチモードでロボットをマニュアル操作する時に使用します。
		
⑪	クランプ1 クランプ2 クランプ3 クランプ4	クランプ信号を設定する時に使用します。
⑫	信号出力	ティーチモードにてOX信号を出力する時に使用します。
⑬	チェック ステップ	チェックモード選択後、このキーを押すと表示されたステップに向かって動作します。押し続けると連続チェックとなります。
⑭	リセット	エラー発生時、エラーリセットする時に使用します。ただし、エラーの内容によってはリセットできないものもあります。
⑮	I	プログラム編集（AS言語の命令を入力する）に使用します。
⑯	C	補助データ設定に使用します。
⑰	S	各種データ設定時、各キーと併用します。（例えば速度キーと同時なら9→8→・・・→1→0） 外部軸選択用（例えば軸キーと同時なら1→8軸、2→9軸・・・となる）
⑱	チェックモード	チェックモードを選択します。このモードでは教示されたデータ（位置、補助データ）の内容を確認できます。
⑲	モード切換	ティーチモード、プログラム選択、ステップ選択、現在値表示などのモードを切り換える時に使用します。 立ち上げ時はティーチモードになっています。

		
なし	1ステップ戻る	1ステップ進む
	2ステップ戻る	2ステップ進む
	5ステップ戻る	5ステップ進む
	20ステップ戻る	20ステップ進む



ティーチペンダントのキーとキーを同時に押すと、一度に複数ステップの前進/後退が可能です。

図 7 (b) ティーチペンダント説明

4. AS システム

4.1 AS 概要⁵⁾

AS とは、ロボット製作会社が開発した、ロボット制御用のオリジナルソフトウェアであり、ユーザからの指令を処理したり、プログラムの実行管理を行ってロボットの制御を行う。

AS は、ロボット制御装置内のメモリに書き込まれており、制御電源を入れると同時に AS は起動し、ユーザからの指令待ちの状態（プリンプト “>” が出てる状態）となる。

AS はユーザからの指令、あるいは実行中のプログラムからの指令に従ってロボットの制御を行う。また、プログラムを実行しロボットの制御を行っている間にも、キーボードから指令を入力することができる。このとき、処理できる機能はシステムの状態表示・制御、ロボットの位置等の変数定義、プログラムや位置情報等のデータのディスクへの保存、およびプログラムの作成・修正等がある。これは、プログラム実行中に AS がロボットの動作制御のための演算を周期的に行い、この演算の空き時間を利用して、ユーザからの指令を処理できるようになっている。

4.2 AS システム状態

AS システムには各種のモードがあり、AS がどのような入力を待っているか、または処理を行っているかによって分類される。

(1) モニタモード

AS システムの実行を管理・監視する基礎となるモードで、モニタ指令（プログラムやデータを扱ったり、プログラムの実行を制御したり、システム全体の状態を制御したり等の操作をキーボードやティーチペンダントを用いて行う）を実行できる。このモードからエディタモード（EDIT 指令）、プレイバックモード（EXECUTE 指令）に移行することができる。

(2) エディタモード

プログラムを作成・修正する時のモードで、この時エディタ指令だけが受け入れられる。

(3) プレイバックモード

プログラムを実行中のモードで、プログラムからの命令に従うと同時に、一定時間周期毎にロボット動作を制御するために必要な計算が行われているが、ターミナルからほとんどモニタ指令を入力することができる。

5. 産業用ロボットの風洞内設置

ロボットの風洞内設置にあたっては、当風洞の測定部と拡散洞の構造上の特長を利用した。当風洞の測定部は断面が 2 m の正方形、長さが 4 m で突風実験以外の通常の低速

風洞として使用する場合は固定壁カートを用いる。また、吸い込み用ベルマウスを取り付けることにより、開放型測定部としても使用できるようになっている。その場合には、第 1 拡散洞の一部を取り外すことになる。

我々は取り外し可能な第 1 拡散洞に着目し、この第 1 拡散洞下の床部分にロボットを設置すると共に、ロボット用の新たな第 1 拡散洞を制作することとした。

ロボットの設置位置の決定、および第 1 拡散洞の設計ではロボットの動作範囲を十分に取り、かつ測定部カート移動等の試験準備作業、風洞試験時の風洞胴体とロボットの干渉を避けることを考慮した。

この結果、ロボットの設置状態を図 8 に示すように決定した。これによりロボットの動作範囲は、測定カート中心から測定部天井および床部まで含む。よって、地面効果試験における模型の上下方向への移動は、この動作範囲内にあり制御が可能である。

新たに制作した第 1 拡散洞の床部分は、ロボット設置後、第 1 拡散洞の取り付け作業が容易にできるように制作した。図 9 にロボット取り付け、図 10 に第 1 拡散洞取り付け作業状況を示す。

また、ロボット設置状態での測定部カートの移動については、ロボットのアームを伸縮させロボット全体を回転し、第 1 拡散洞の幅 1 m の中に収納することにより実現した。そのロボット収納状況を図 11 に示す。

5.1 ロボットの風防設計

第 1 拡散洞の新たな制作により、ロボットの風洞内設置が実現した。しかし、第 1 拡散洞の床部分は、図 12 に示すようにロボット設置用に改造され、またロボットの外形は駆動用モーターと配線等がむき出し状態である。この状態では風洞の気流およびロボット本体に大きな影響を及ぼすことが懸念されるため、適当な形状の風防を取り付ける必要がある。

ロボットの機構はリンクとアームから構成されており、その動作は従来の模型支持とは大いに異なる。また、地面効果試験での模型制御では、模型支持用のアームが大きく上下方向に移動し、これに伴うロボット全体の動きを想定することは不可能である。よって、安易に風防をロボットに取り付けることは、ロボットのアームと風防が干渉して破壊する可能性が高い。

このため、風防はロボットの形状と動作を考慮して設計しなければならない。この結果、ロボットアームびリンク部分は現状のままとして、風防は図 13 に示す形状に決定した。この風防は第 1 拡散洞の床部分の隙間を塞ぐプレートと、ロボットのベース上部の駆動用モーター部を覆うカバーから構成され、ロボットのリンク機構の前後への動作と、ロボット本体の左右への回転が可能である。

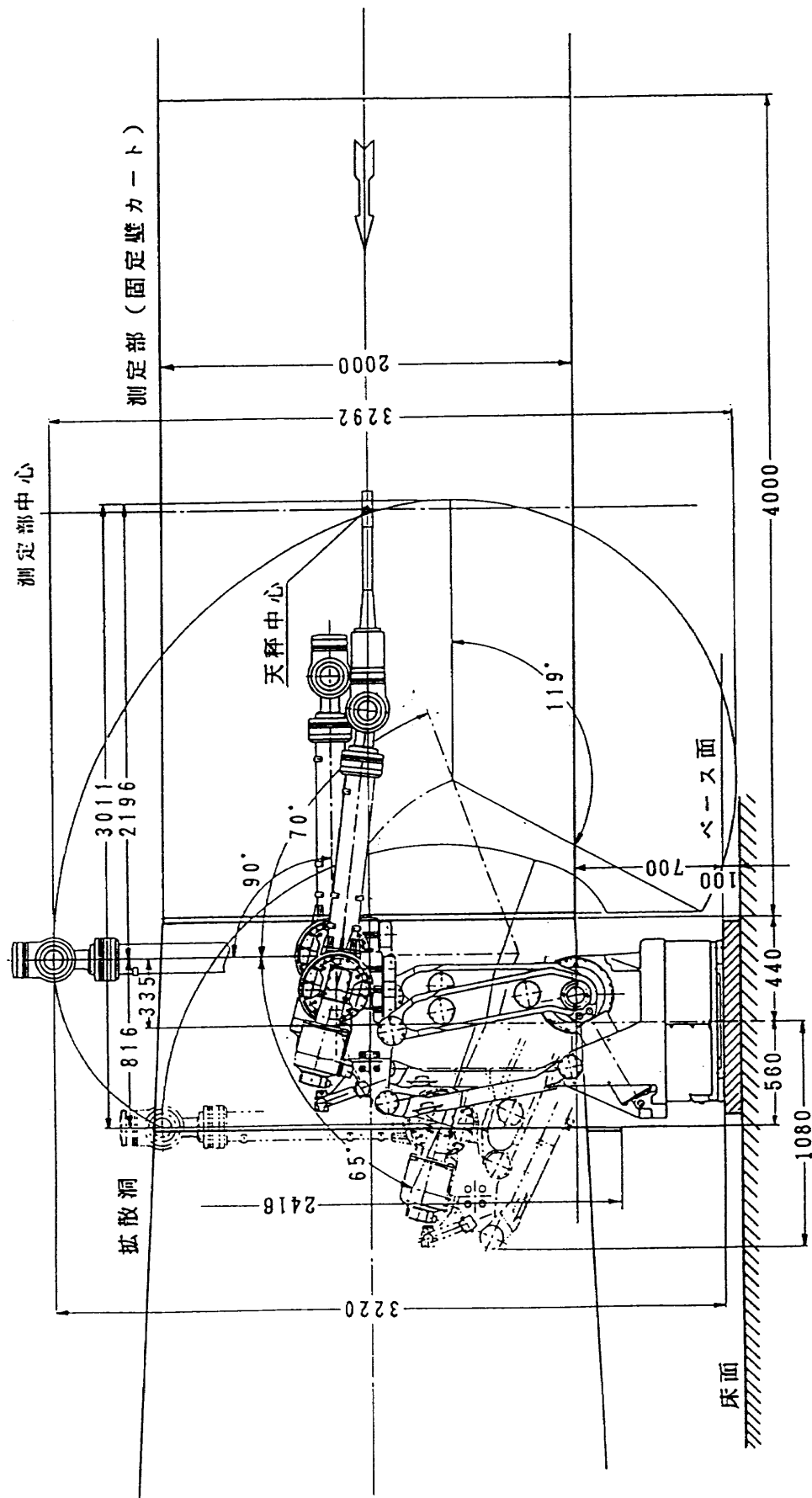


図8 ロボット設置状態

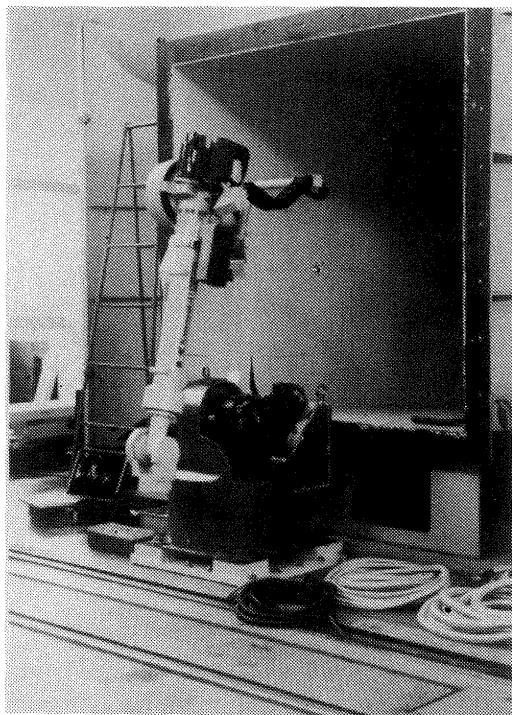


図9 ロボット据えつけ作業状況

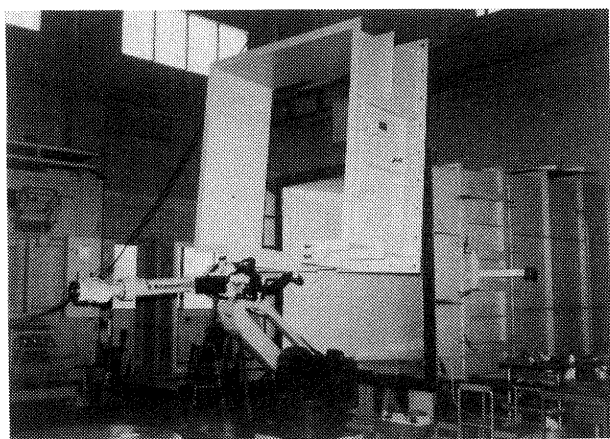


図10 第1拡散洞取り付け作業状況

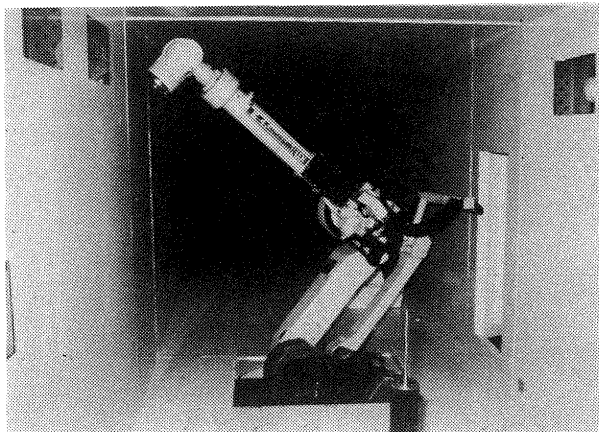


図11 ロボット収納状況

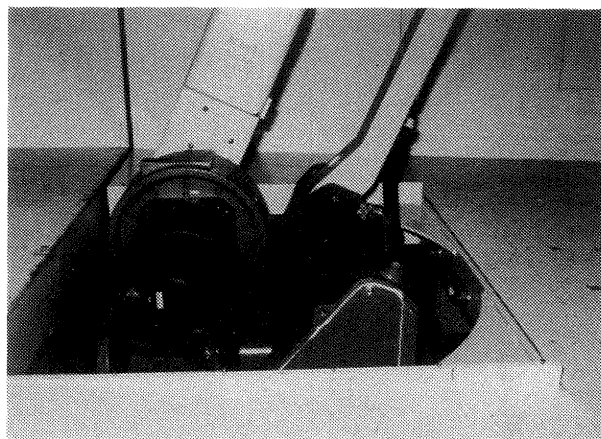


図12 第1拡散洞床部形状

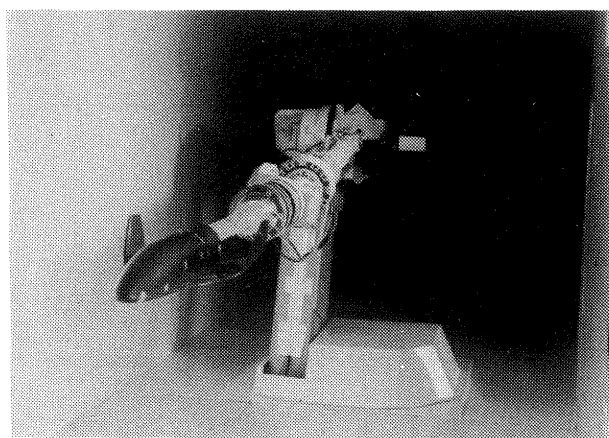


図13 ロボットの風防

6. 風洞模型の取り付け

通常、ロボットに作業をさせる場合、ツールをロボットのアーム先端部のフランジ面に取り付ける。このツールは、ハンドやガンなどと呼ばれ作業目的によって種々の形状がある。従って、ツールを使用する場合には、ツールの取り付け寸法を登録することによって、必要な作業が行われる。また、ロボットの基準位置となるベース座標系も設置状況に応じて登録することができる。図14に示すようにロボットはベース座標とツール座標の二つを持ち、マニュアル操作では動作座標系モード（各軸，ツール座標，ベース座標）を選択して制御することができる。

風洞模型の姿勢および移動方向を制御するためには、模型の任意の点を基準点として、ロボットのフランジ面から模型の基準点までの寸法を登録する必要がある。我々はロボットを用いた風洞試験においても、模型姿勢の制御に当たっては、通常行っている風洞試験に準じた方法を用いることが誤操作を防止し、効率的であると考えた。そこで、模型の迎角および偏揺れ角が 0° の時の機体軸を風軸と一致させ、天秤中心を模型基準点として測定部中心に置いた。

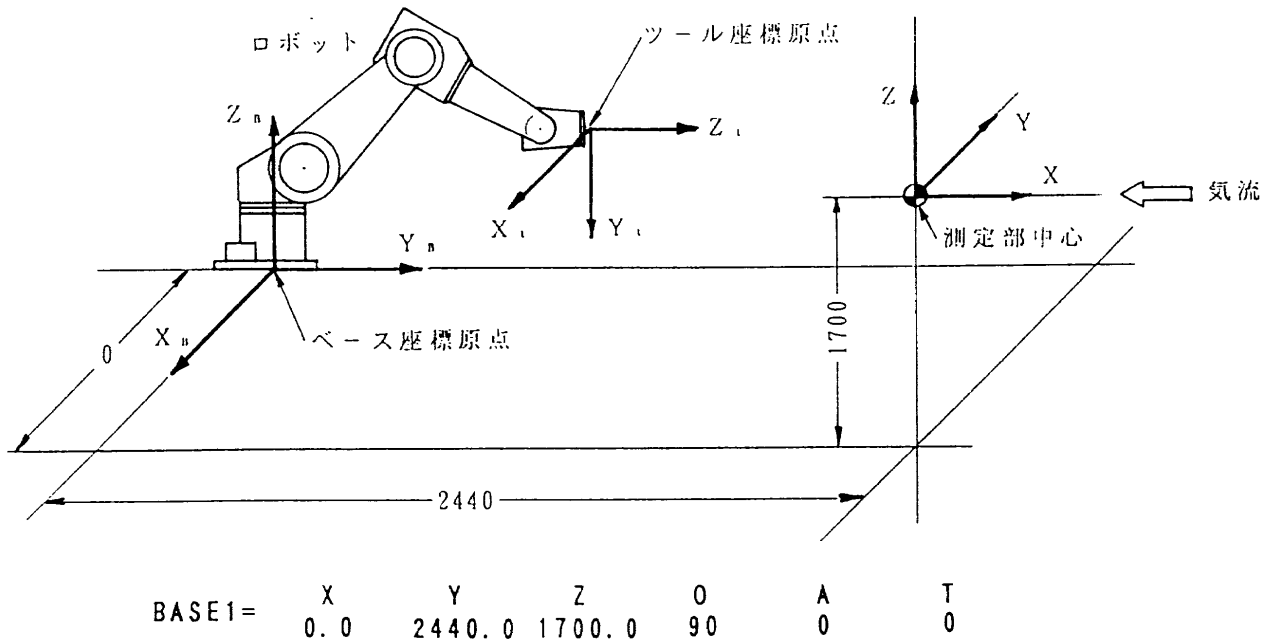


図14 ロボットのベースおよびツール座標

これにより模型は常に天秤中心を中心点とした姿勢制御となり、模型の移動に関する位置情報は天秤中心の移動距離として扱うことができる。以下にその詳細を記す。

6.1 ツール寸法の登録

ツール座標は、ロボットアームの手首先端のフランジ面がツール原点で、フランジ面に垂直な方向をZ軸とし、そのツールの基準点（ハンドあるいはガンの狙い点）をツール原点からの座標で定義する。従って、ツール座標の方向は手首が動作するとそれにつれて一緒に移動する。このツール座標動作では、ロボットのアームの位置や姿勢を考慮しないでツールの方向を基準に動作でき、ツールの姿勢を一定にしたまま平行移動することができる。

(1) ツール寸法の登録方法

ツール寸法を登録する場合には、AS プログラム命令の変数等の定義命令“TOOL”を用いて、ロボットアームの手首先端のフランジ面を原点として、X、Y、Z軸方向へのツール基準点の平行移動量(mm)および座標系の回転角O、A、T(deg)を登録する。ここで

O……Z軸回りの回転角で、Y軸方向への回転を正とする。

A……Oを設定した後のY軸回りの回転角で、Z軸正方向との角度を表す。

T……O、Aを設定した後のZ軸回りの回転角。

は座標系の回転を表すパラメータである。

(2) 風洞模型基準点の登録

風洞模型は、ロボットアーム先端のフランジにスティングを介して取り付けられる。よって、スティングを一種の

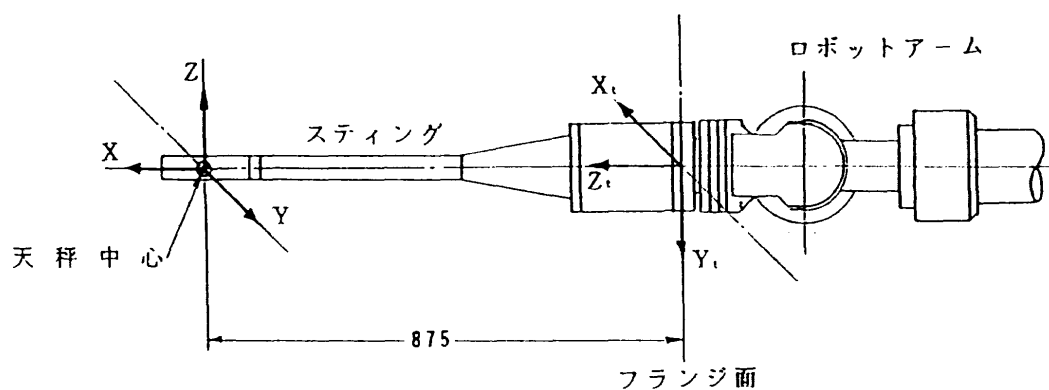
ツールとして考え、模型の天秤中心を基準点にしてツール寸法を登録した。

小型自動着陸実験機の低速風洞試験におけるロボットアーム形状とスティング取り付け状態、およびツール寸法の登録（ツール名；tool 1）を図15(a)に、地面効果試験におけるロボットアーム形状とスティングの取り付け状態およびツール寸法の登録（ツール名；tool 2）を図15(b)に示す。この図が示すように、ロボットアームの形状によってツール座標の方向が異なる。このため、ロボットアームの形状にかかわらず模型の姿勢および移動方向を制御するためには、天秤中心を基準点としたX、Y、Z軸の方向を決め、これにツール座標の各軸を回転させて合わせる方法を用いる。ここで回転角O、A、Tの設定値は、通常行っている風洞試験での風軸と機体軸を一致させた場合の回転角度である。この方法は地面効果試験で模型を移動させるときに、移動方向の間違いを防ぐ上で役に立った。

尚、このようにツール寸法を登録した場合は、模型および風洞設備の破損を防ぐために、ツール寸法の登録後直ちにマニュアル操作でツールモードを選択し、登録した各軸の回転角による方向の正負について模型を動作して確認しておく必要がある。

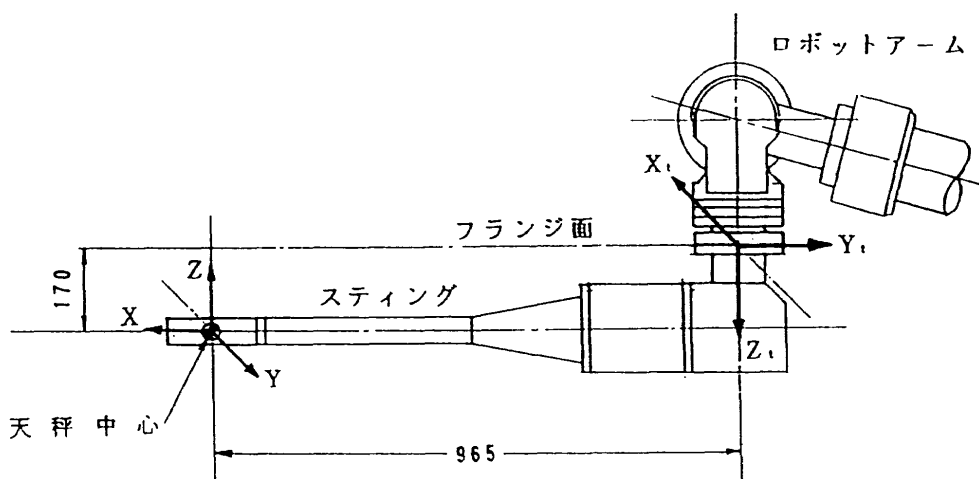
6.2 ベース座標の登録

ロボットと風洞の関係は図8に示した。この場合、ツール登録した模型基準点（天秤中心）に関する位置情報はベース座標で表され、ロボット設置部のベース中心が原点となっている。よって、模型の位置情報はロボットのベース中心点から模型基準点までのX、Y、Z座標値で表される。



tool1= X Y Z 0 A T
 0.0 0.0 875.0 -90 90 180

(a)



tool2= X Y Z 0 A T
 0.0 -965.0 170.0 90 180 0

(b)

図15 ツール寸法の登録

風洞試験における模型の位置情報に関しては、測定部中心と模型基準点（天秤中心）を一致させて、この点を新たに模型位置の原点とした方が模型制御の場合や、データ処理の上で非常に便利である。このような原点の登録の方法には、変数等の定義命令“BASE”を用いる。

小型自動着陸実験機の低速風洞試験における原点移動のベース座標登録（ベース名；BASE 1）は、すでに図14に示したようにロボットのベース原点から新たな原点とする測定部中心までのX、Y、Z方向の距離と、各軸の回転角によって行う。ここで回転角O、A、Tの設定値は、ベース座標のX軸を風軸と一致させたときの各軸の回転角度である。

7. ロボットの機能試験

ロボットは工業界の各方面で使用され、生産ラインの自動化、省力化を実現し作業能率の向上に大きな役割を果たしている。しかし、産業用ロボットを風洞内に設置して風洞模型の支持を行うという試みは、国内外でも初めてのことである。

風洞のような限られた空間内や通風時の環境下で、ロボットが十分にその機能を発揮できるかは、模型支持装置として使用する上で大きな問題である。そして、懸念されることはロボット本体の風速に対する強度、剛性および模型の姿勢角設定精度や、ロボット設置による風洞気流への影響等である。

そこで、我々はロボットを用いた模型支持による風洞試験に先立ち、下記の項目について検定した。

- ①ロボットの制御による風洞模型の姿勢角およびXYZ方向の移動距離の精度を確認する。
- ②通風時においてロボットの各機能（角度設定、XYZ方向の移動等）が十分に作動することを確認する。
- ③通風時におけるロボットのアームの振動や、負荷による変位量を調べる。
- ④ロボットの風洞内設置による測定部気流への影響を調査し、結果によってはデータの補正方法を検討する。

7.1 模型姿勢角度の設定精度

本システムで風洞模型の姿勢角度を制御するには、準備作業として、風洞模型をロボットアームの先端にスティングを介して取り付け後、模型基準点（天秤中心）のツール登録およびベース座標の移動（原点変更）を行う。これらの作業が終了後、我々が作成した風洞試験における模型の姿勢制御用アプリケーションプログラムを実行することにより、直接に模型の姿勢角度（迎角、横滑り角、回転角）をキーボードから数値を入力して設定する。

そこで、模型姿勢のキーボードからの設定値入力による模型姿勢角度の精度を調べるため、傾斜計 (SENSOREX INCLINOMETER 41400) をスティング内に装備し、その出力値と設定値とを比較した。図16に迎角、図17に回転角の設定値と読み取り値の結果を示す。

この結果、迎角設定では迎角を0°から30°まで設定した時、迎角30°の時で傾斜計の読み取り値が29.87°であり0.2°以下の誤差があった。また、この迎角設定では迎角が大きくなるにつれて回転角に誤差が生じ、迎角30°の時に回転角が0.48°の値を示した。また、負側の迎角設定でも同様の傾向を示した。このように迎角の設定では、高迎角になるに従って回転角に若干の誤差が生じることが確認された。

次に、回転角設定で回転角を0°から±45°まで設定した場合では、回転角45°設定のとき傾斜計の読み取り値が44.8°、回転角-45°設定のとき傾斜計の読み取り値は-44.8°を示し、回転角の設定値と0.2°程度の誤差があった。また、回転角の設定では、回転角45°のとき迎角-0.6°、回転角-45°のとき迎角0.3°の値を示し、迎角設定の場合と同様に回転角の設定が高くなると迎角にも若干の誤差が生じることが確認された。

このようにロボットによる模型姿勢の設定では、角度が大きくなると設定値に対して約0.2°程度の誤差が生じると共に他の角度へ影響を与えることが分かった。このため、風洞試験においては、模型姿勢の精度を維持するための手段として、スティングに内装した傾斜計の出力を常時参照すると共に、その出力を模型姿勢のデータとして収集しデータ処理に用いた。

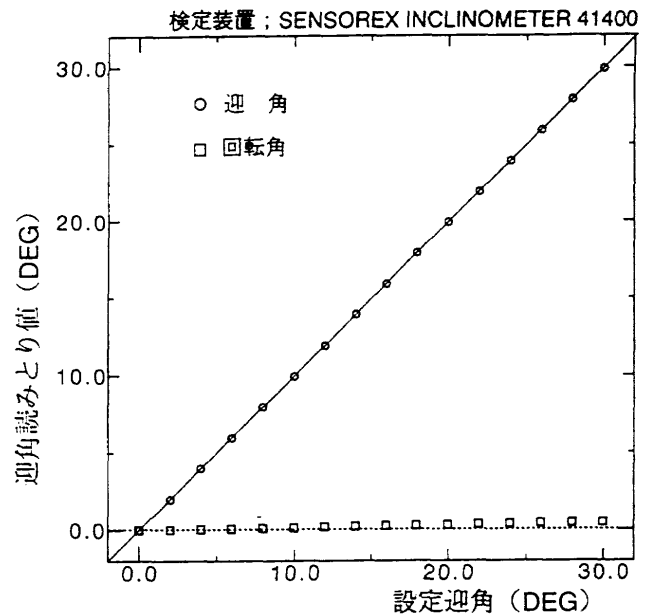


図16 模型姿勢角度（迎角）の設定精度

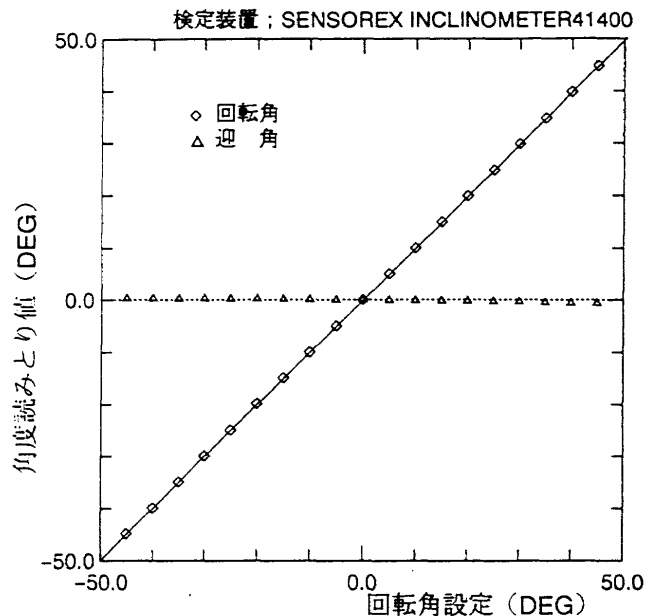


図17 模型姿勢角度（回転角）の設定精度

7.2 模型移動の設定精度

本システムの特長は、模型の移動についても模型姿勢角度と同様に制御が可能で、その方向、移動量および移動速度を任意に設定することができることである。

やはり、この場合も地面効果試験における模型の移動制御に先立ち、模型移動量のキーボードからの設定値入力に対する実際の移動精度を調べた。この検定には、高精度非接触変位センサー（三京貿易株式会社 GYST-700）を用いた。

この方法は、キーボードから移動量設定値を0点から100mmおきに500mmまで入力し、これに基づいて移動

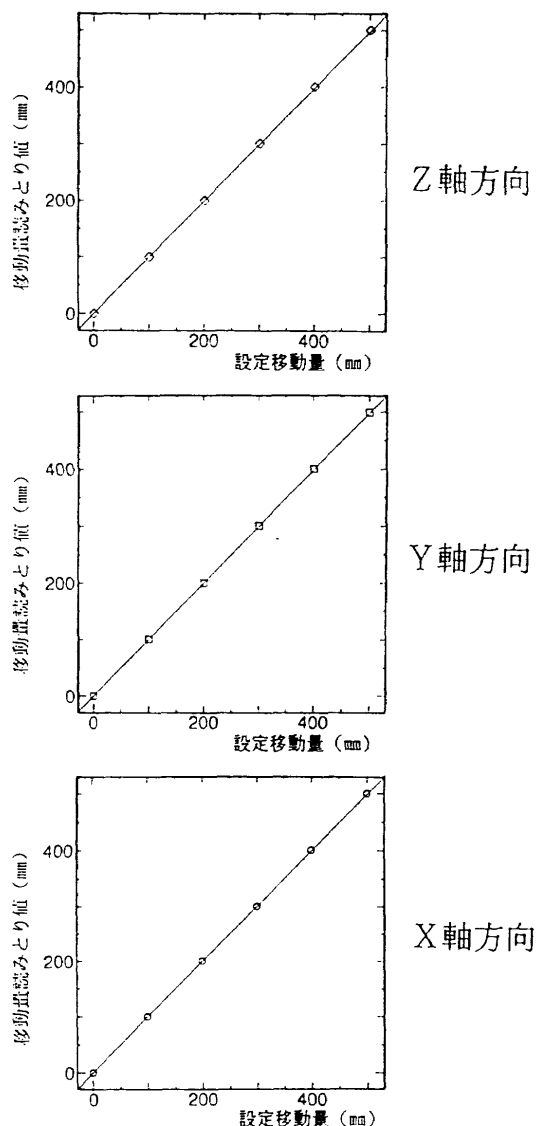


図18 模型移動の設定精度

したロボットアーム先端に取り付けたセンサーの出力値を読み取り、設定値と読み取り値を比較した。図18にX, Y, Z方向における移動量の設定値と読み取り値の結果を示す。この結果、各方向とも移動量は0.5mm以下、再現性は±0.5mm以下の精度を有することが分かった。この精度であれば模型の移動制御に関して問題は無く、ロボットによる風洞模型の移動制御を行う地面効果試験の実施が可能である。

また、移動の速度制御に関してはASプログラム命令の速度・精度等の制御命令“SPEED”によって、10段階に設定できる。図19は地面効果試験を想定してロボットに教示した2点、上方の模型位置（天秤中心基準）から地面板付近の位置までの距離を速度制御した時の模型移動状態である。この2点間を移動する時の模型位置情報の取り込みに要する時間は約64msecで一定であり、移動速度を高めると収集するデータ数が減少する。このため、連続的な移動

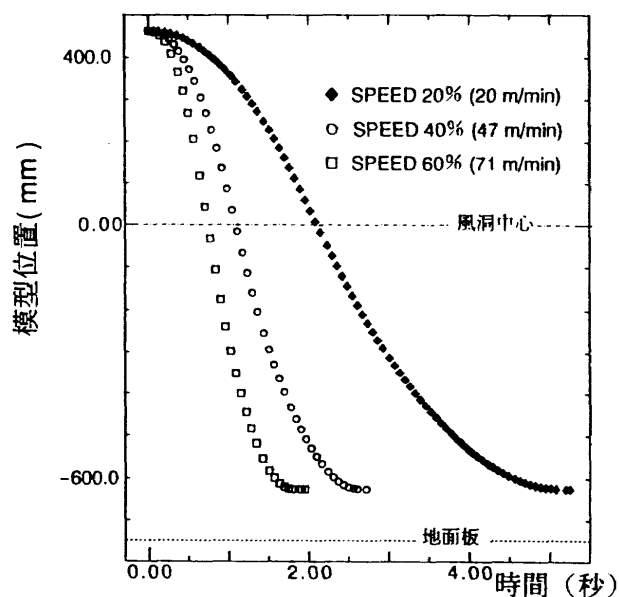


図19 模型（天秤中心）の移動状態

による地面効果試験は、SPEED 40%とSPEED 60%の二通りの速度で実施した。この地面効果試験の結果については別途報告する。

7.3 負荷によるロボットアームの変位

風洞試験中、模型姿勢の精度を維持するためには、ロボットアームの先端に取り付けられた模型に働く空気力による模型姿勢への影響を考えなければならない。

このため模型に働く空気力に相当する負荷をロボットアームに加えて、ロボットアームの変位量を調べた。

今回の地面効果試験に用いる小型自動着陸実験機は、既に当風洞で一次風洞試験（簡易スティング支持）⁶⁾が終了している。この試験結果から模型に働く空気力の大きさが推定でき、この空気力を参考に最大500Nまでの負荷を用いてロボットアームのX方向およびZ方向について変位量を調べた。

このときのロボットアームの形状は、地面効果試験時の模型取り付け状態である。このアームの形状は地面効果試験時の模型が高迎角を設定することと、地面板の風洞床面からの高さを考慮して決定した。

負荷による変位量の測定はダイヤルゲージを用い、スティング取り付けのフランジ面とロボットアームの手首位置の2点で調べた。この結果を図20、図21に示す。この結果、スティング取り付け部で最大負荷500Nの場合Z方向に約1.5mm X方向に約0.5mm程度の変位が見られた。これはロボットがリンクと多関節を組み合わせた機構によるものと考えられる。

今回の風洞模型、小型自動着陸実験機に働く空気力（揚力）は、一次試験の結果から推定して約250N程度であり、

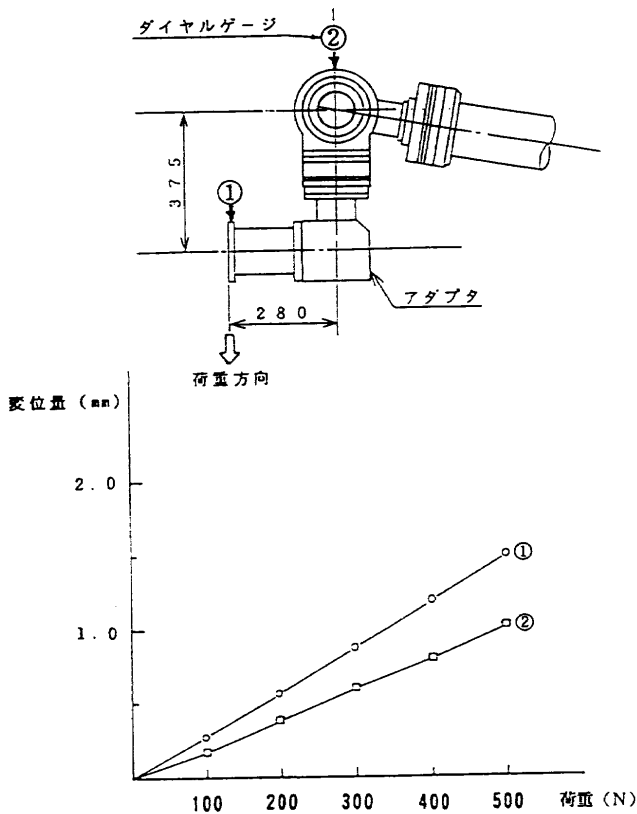


図20 負荷によるロボットの変位 (Z方向)

その空気力によるロボットアーム先端の変位量は1mm以下であることが予想できる。また、実際に風洞試験中のスティングに内装した傾斜計の出力から模型の姿勢を監視した結果、この程度の変位量では模型の姿勢角度にほとんど影響がなかった。

7.4 ロボットアームの振動

風洞試験中の模型に働く空気力や気流によって、ロボットアームが振動することが考えられる。

振動の測定は、スティング取り付け部のアダプタ内に加速度計（日本電気三栄株式会社 9E07-A2-10H）を取り付け、左右および上下方向について検討した。測定条件は風洞試験内容に合わせて最大風速50m/sで模型迎角を $-10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ と変化させ、迎角によるロボットアームの振動を測定した。この時、通風下におけるロボットがどのような状態になるか予測ができないため、安全上から風速設定は30m/sから開始し、加速度計の出力を検討しながら最大風速50m/sまで実施した。

図22、図23に風速50m/sについての測定結果を示す。図22は模型の各迎角による振動を調べるために、加速度計出力をペンレコーダに記録したものである。図23は振動幅を調べるため迎角 0° における加速度計出力を当風洞の計測システムの高速A/Dで収集し、X-Yプロッターに出力したものである。これらの結果から、振動は模型の各迎角に

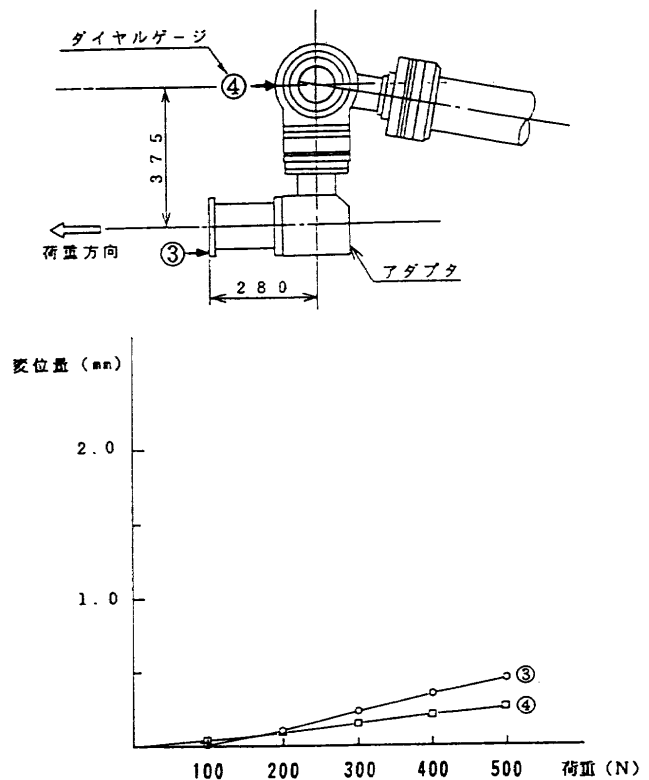


図21 負荷によるロボットの変位 (X方向)

よる変化はなく、ほぼ一定の値を示していることが確認された。また、加速度計の出力から振幅を計算すると、左右および上下方向の振幅はともに0.02mm以下であった。

よって、ロボットによる模型支持方法は、その強度、剛性および精度等から風速50m/sの風洞試験に十分適用できることが確認された。

7.5 ロボット支持による気流への影響

ロボット支持におけるブロックageは、模型の姿勢角によっても異なるが約9.3%程度である。

ロボットによる気流への影響を調べるため、風洞内のロボットの有無状態による模型位置（測定部中心）前後の風速分布を風洞風速30～50m/sについてそれぞれ測定した。風速分布の測定範囲は、高さを風洞中心に合わせ、測定部中心の上流側1000mmから下流側400mmまでとした。これは当風洞が所有するトラバース装置の駆動範囲によって決定した。この測定結果を図24に示す。

風速分布の測定結果より、いずれの風速においても測定範囲前方から測定部中心の後方200mm付近までは、ロボットの有無にかかわらずほぼ一致しており、模型周りの流れに差は無いと思われる。しかしロボットの直前、スティング取り付け部の位置付近に風速分布の変化がみられる。これはロボット本体によるものでなく、ロボットアームとスティング取り付け用アダプタの影響によるものと考えら

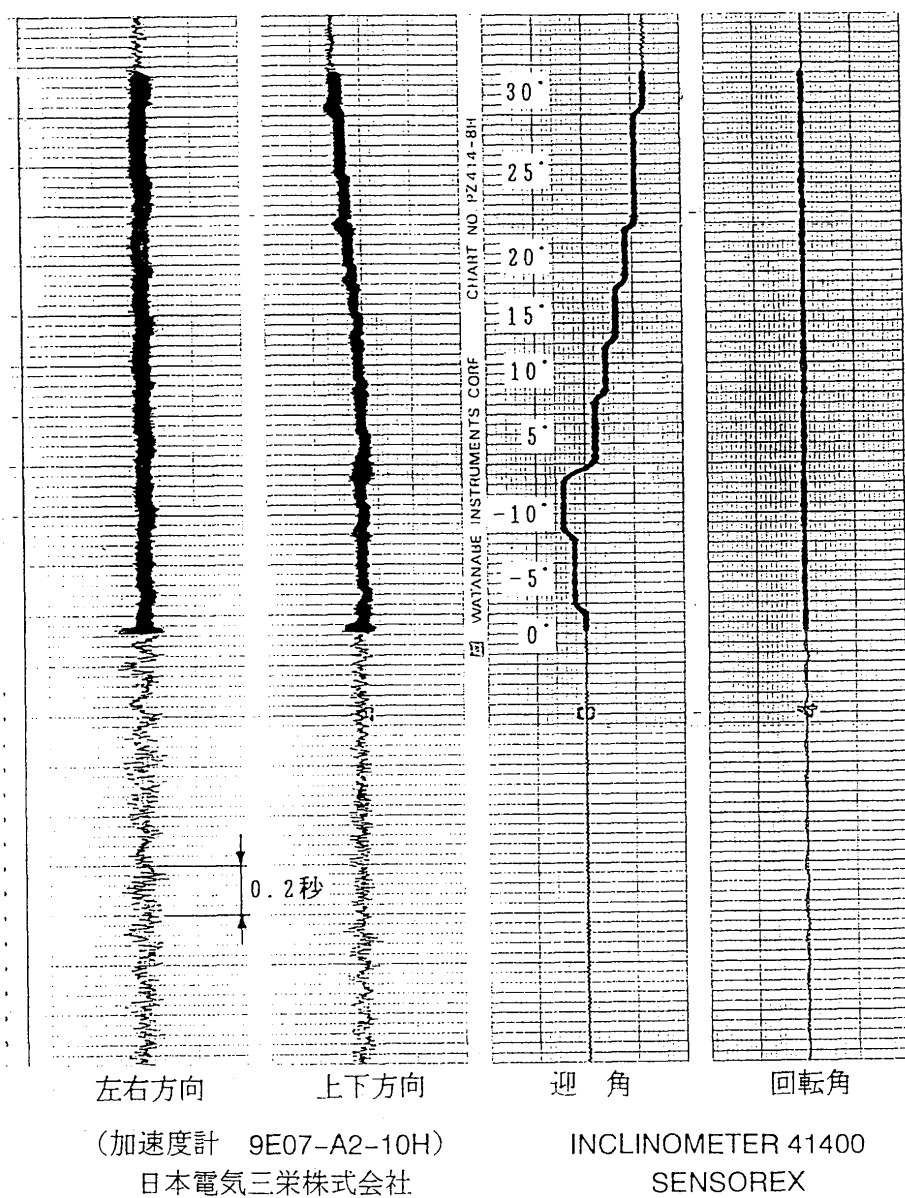


図22 ロボット振動検定 (風速=50m/s)

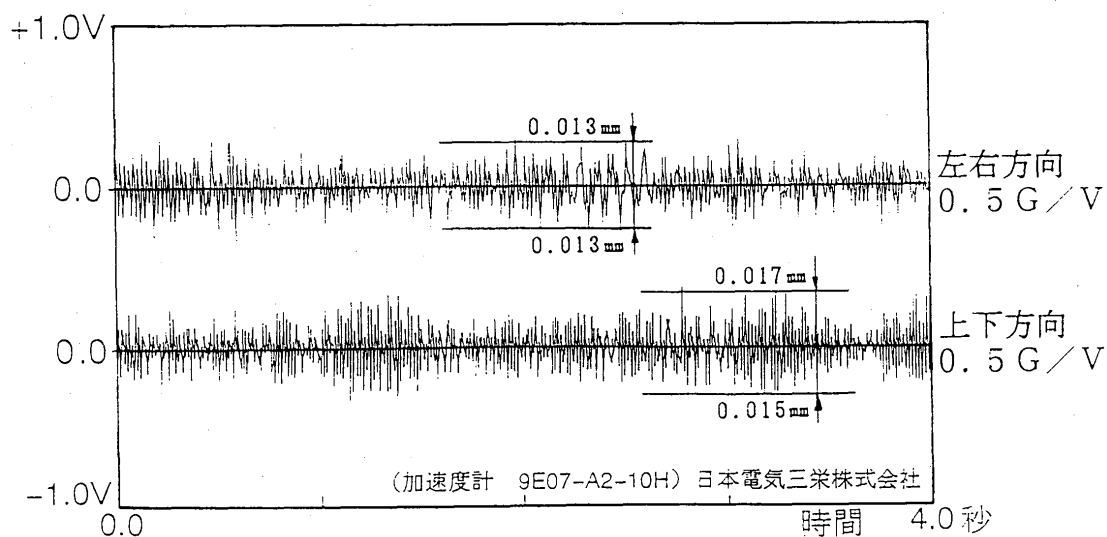


図23 ロボット振動測定 (風速=50m/s)

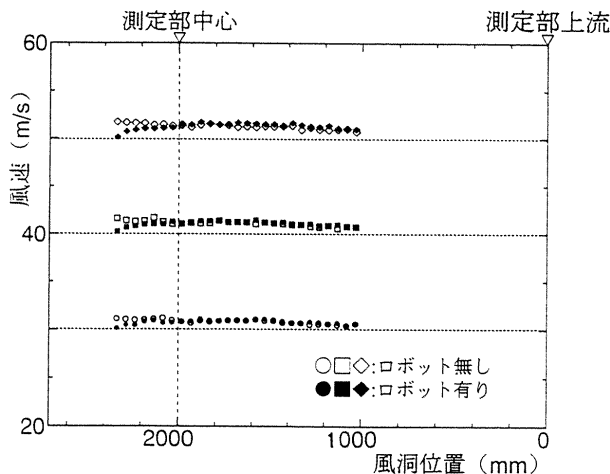


図24 風速分布測定結果

れる。よって、この影響に対しては、風速分布状態からスティングの長さを検討することにより解決できる。また、各風速の分布がロボットの有無の両状態で、ともに設定風速に対して約1m/s程度高めに出ている。この原因としては、測定部床に設置し、風速分布測定に用いたトラバース装置の影響によるものであると考えられる。それは設置したトラバース装置の前方部分の風速が設定風速に近づいていることから分かる。

8. ロボットを用いた風洞試験方法

我々は前項までの検定結果から、ロボットによる風洞模型支持方法は十分に強度、剛性を有し、模型姿勢設定精度も高く、測定部気流への影響も少ないことを確認した。よって、風洞試験を実施する上でなんら問題は無いと判断した。

風洞試験はロボットを用いて風洞模型を支持することにより、従来の風洞試験で行われる模型姿勢のみを制御する通常の試験の場合と、模型と地面板間の距離を変える地面効果試験の場合の二通りが可能である。

また、地面効果試験においても模型と地面板間の距離を段階的に移動させ、その都度模型に働く6分力を測定する静的地面効果試験と、模型を連続的に移動させながら模型に働く6分力を測定する動的地面効果試験の二つの方法が実施できる。

8.1 一般的な風洞試験の方法

一般的な風洞試験とは、ロボットによる風洞模型支持の場合でも、一定風速のもとで模型の迎角または横滑り角等を変化させて、模型に働く空気力の測定を行う方法である。この場合、本方法がロボット支持と内挿式天秤を用いているのに対して、従来の突風風洞における風洞試験が外挿式のピラミッド天秤を用いるように、模型の支持方法と天秤の形式が異なるだけである。このため、データ収集・処理

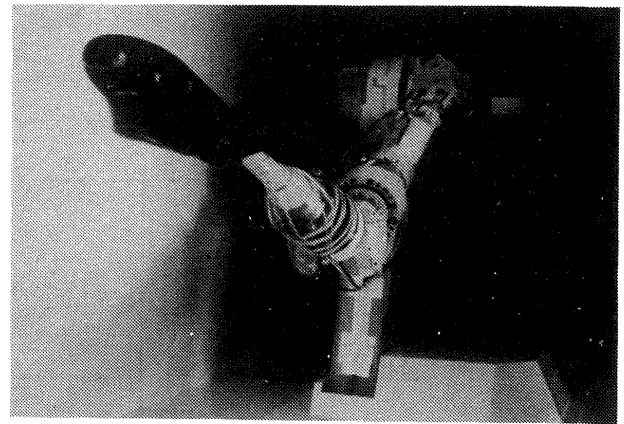


図25 低速風洞試験状況

方法は文献2に述べたピラミッド型天秤による風洞試験の場合と同様であり、データ・ファイルの構造およびデータの一次処理と表示等に関しても同様である。よって、ロボット支持による風洞試験の計測でも模型姿勢と天秤出力のアナログ信号は、他の風洞パラメータとともに直接計算機のA/D入力部の取り込まれる。図25に小型自動着陸実験機の低速風洞試験状況を示す。

ロボットを用いた模型支持による一般的な風洞試験の特長は、常時模型を測定部の中心位置に保ちながら模型姿勢（迎角、横滑り角、回転角）を制御できることである。この特長は、模型を後方から支持するスティング方式と比べると、スティング方式では模型がある迎角を越えると風洞壁に近づくことや、横滑り角の設定が回転角と迎角の組み合わせによって行っている点が大きく異なる点である。

8.2 地面効果試験方法

地面効果試験には既に述べたように二通りの方法がある。その一つの方法である静的な試験は、模型の姿勢を保ち、地面板付近まで段階的に距離を変化させ、その都度模型に働く6分力測定を行う。この試験では地面板に対して模型を上下に移動させる制御を行うだけであり、データ収集は一般的な風洞試験の場合と同様に直接計算機で計測・処理を行う。

他方、地面効果試験の動的な試験の場合は、模型の姿勢を保ち、地面板付近まで一定速度で移動しながら模型に働く6分力を測定するものである。この場合、6分力の測定と共に、図19に示したようにその時の模型の位置情報を同期を取って収集する。

動的な地面効果試験を行う場合のデータ収集プロセスは、図26に示すように、①風洞起動前の処理（無風時データ）、②実験中の処理（通風時データ）、③風洞停止後の処理（無風時データ）の3段階からなる。

1) 風洞起動前の処理

風洞起動前に各計測器の初期値、模型自重風袋の較正值

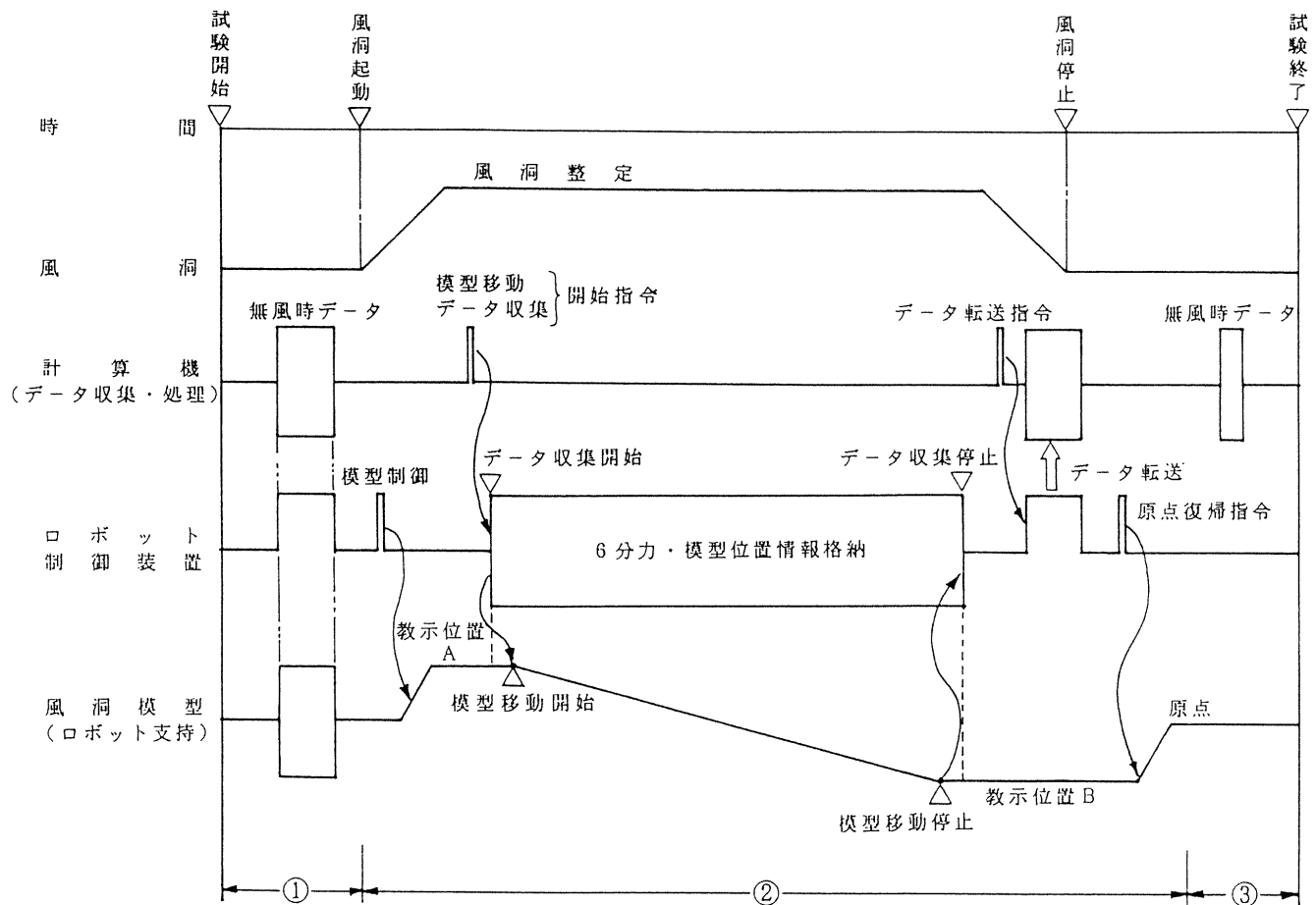


図26 地面効果試験タイムチャート

データのデータ収集を行い、データファイルにデータを格納する。これらのデータは、各計測器の零点補正と模型自重による干渉量と補正に用いる。

2) 実験中の処理

風洞が起動され試験風速が設定される間に、風洞模型を教示位置 A に移動して待機する。

風速整定後、計算機からロボット制御装置に模型移動開始とデータ収集開始指令を出す。この指令によってロボット制御装置は、模型を教示位置 A から教示位置 B (地面付近) へ指定された速度で移動を開始させるとともにデータ (6 分力、位置情報等) の収集を開始する。この場合、移動中のデータを連続的に収集するので、これらのデータはロボット制御装置内のバッファに一時格納する。

模型が教示位置 B に達すると、データ収集を停止し計算機にデータ転送の要求メッセージを表示する。

風洞の停止操作を行い、計算機からロボット制御装置に対して、データの転送開始指令を出して、格納されたデータの取り込みを行う。この間に模型を原点位置 (測定部中心) に復帰させる。

3) 風洞停止後の処理

風洞停止後、模型が初期設定状態に戻っていることを確

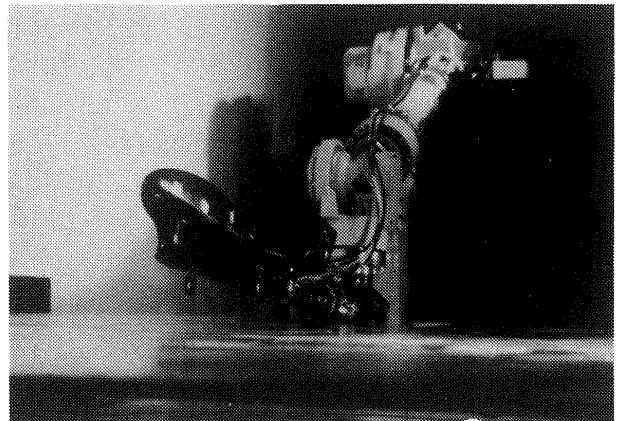


図27 地面効果試験状況

認してデータ収集を行い、データファイルに格納してファイルをクローズする。

以上の一連の操作で動的地面効果試験が終了する。図27に地面効果試験状況を示す。

9. 模型支持方式の相違による空力データの比較

ロボットを用いた風洞模型支持システムの構成とその機

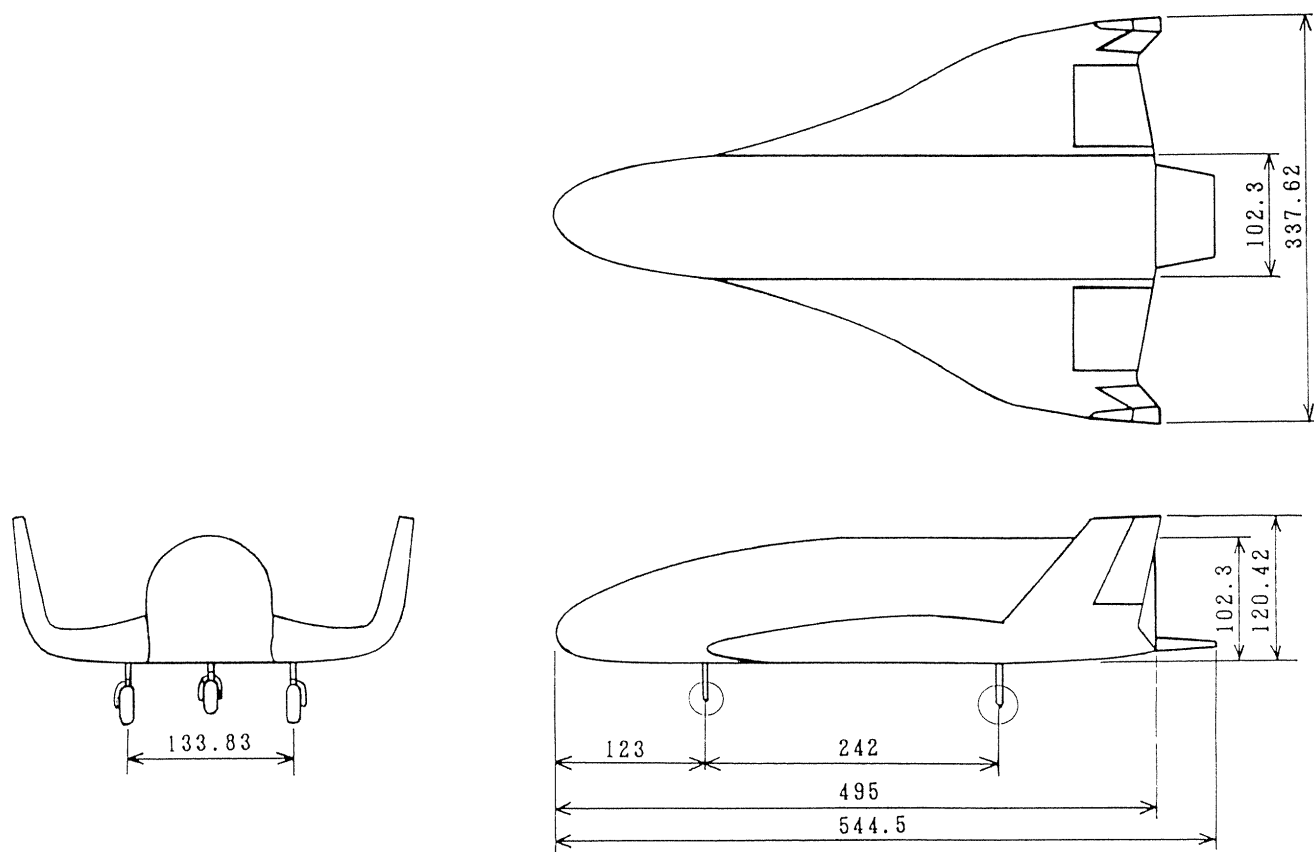


図28 小型自動着陸実験機8.9% 風洞模型

能および各検定結果と風洞試験方法については既に述べた。しかし、本システムによる風洞試験を実施する上で重要なことは、他の模型支持による風洞試験と比較して、測定結果にどの程度の差があるかである。そこでその一つの方法として当風洞で既に実施した、文献6の小型自動着陸実験機の第一次風洞試験結果と比較して、模型支持方式による影響を検討した。以下にその試験について述べる。

9.1 風洞模型

風洞試験に使用した小型自動着陸実験機(ALFLEX)8.9%模型の外観と形状寸法を図28に示す。模型形態は、各舵面の偏角をすべて0にした基本形態の他、脚、エレボン、ラダー、ボディフラップおよびスピードブレーキ等による特性試験の形態設定が可能である。

9.2 模型支持

文献6の第一次低速風洞試験は、当風洞を使用して1993年に基本形態での6分力のかに、各舵面操舵による特性試験と翼面の圧力分布測定を実施した。

この一次試験における風洞模型の支持は、模型の構造上当風洞の支持装置に直接設置することが困難であるため、新たに十字形の支持装置(簡易スティング)を制作した。この簡易スティングを当風洞の支持装置に固定し、先端に

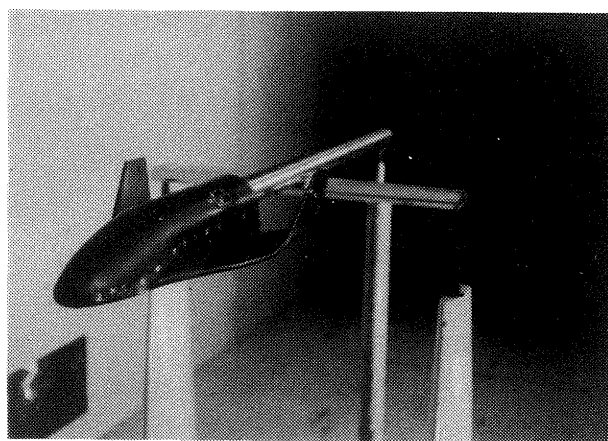


図29 簡易スティング支持による風洞試験状況

内挿天秤(日章電気株式会社、低速風洞用天秤)を取り付け、模型を設置した。図29に簡易スティングによる風洞試験状況を示す。

本システムは、小型自動着陸実験機の第二次風洞試験としての地面効果試験に対応するために導入されたものである。よって、ロボットアームの先端に取り付けた模型支持用スティングを新たに制作したが、使用した天秤、風洞模型は第一次風洞試験と同様である。

9.3 風洞試験結果

小型自動着陸実験機の第2次低速風洞試験は、簡易スティングを用いて実施した第1次低速風洞試験の模型形態全般について、新たにロボット支持によって同様の内容を実施した。その試験終了後に地面効果試験を行った。よって、模型支持方式の相違は、地面効果試験以外の模型形態による試験結果を基に一応の検討を行うことができる。本報告では基本形態における迎角変化の試験結果から模型支持方式の相違について検討した。尚、小型自動着陸実験機の第2次風洞試験に関する低速および地面効果試験結果は、別途報告される⁷⁾。図30に簡易スティングとロボットによる模型支持の風洞試験結果を示す。ここで簡易スティング支持による試験結果は、ダミー支柱による支柱干渉試験を実施して処理したものである。

この図から、 C_D および C_m は簡易スティングとロボットの支持方式の相違にかかわらず、ほぼ一致した値を示している。しかし、 C_L に関しては迎角 20° までは、他と同様にはほぼ同等の値を示しているが、迎角 20° 以降に簡易スティングとロボット支持に若干の差が現れている。これは高迎角によって模型に剥離が生じ、後方の模型支持方式の相違によるブロックageによって剥離が影響を受けているためと思われる。しかし、詳細については今後の課題として検討したい。この結果から解るように、剥離が生じる迄は簡易スティングとロボットの模型支持方法の相違による差は殆どない。また、文献6および文献7の試験結果からもロボットを用いた模型支持方式は、模型の姿勢角および移動を容易に制御することができ、風洞試験を実施する上で非常に有効な手段であると言える。

10. ま と め

当所と宇宙開発事業団との共同研究「H-IIロケット打ち上げ型有翼回収機 (HOPE)の研究」の一環として、平成4年度から平成5年度にかけて第1次、第2次の小型自動着陸実験機 (ALFLEX) の低速風洞試験を突風風洞で実施した。この第2次のALFLEXの着陸時空力特性を把握するための地面効果試験において、産業用ロボットを用いた風洞模型支持システムを導入し、風洞試験を実施した。

本システムを用いて実施した、ALFLEXの風洞試験では、風洞模型の姿勢角や風洞模型と地面との相対的な距離を容易に設定することができ、地面効果試験が効率的に行うことができた。

また、地面効果試験では風洞模型と地面との距離を段階的に変化させて計測する静的地面効果試験と、風洞模型を連続的に地面に接近させて計測する動的地面効果試験を実施することができた。これにより風洞模型の制御と計測方法に新しい展開を示した。

さらに、両者（静的、動的）の試験結果を比較検討する

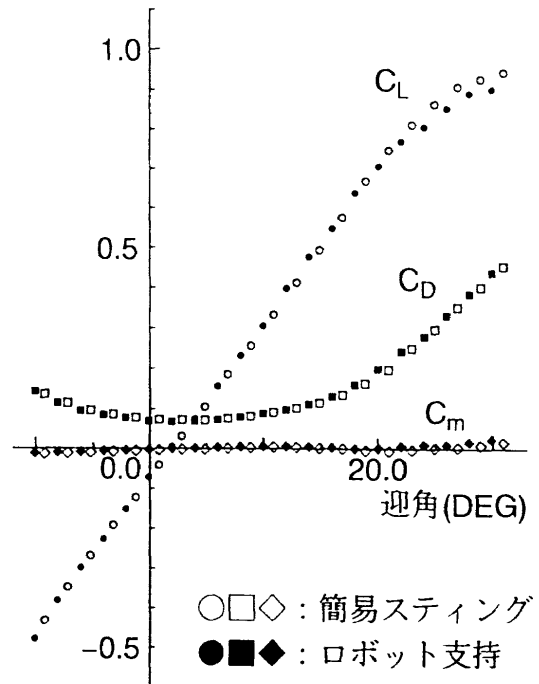


図30 支持方式の比較（基本形態、脚付き）

ことにより機体空力特性に対する動的運動の影響を把握することができる可能性を示した。

今回の風洞試験の結果、産業用ロボットを用いた風洞模型支持システムが風洞試験に非常に有効な手段であることが確認された。しかし、動的地面効果試験における計測と処理等に検討すべき課題も残されており、今後は本システムを用いた風洞試験方法と測定技術とその試験精度の向上をはかりたい。

最後に本システムの制作を担当された川崎重工業株式会社の関係各位に感謝の意を表します。

11. 参 考 文 献

- 1) 廣末健一，北村清美，村上義隆，進藤重美；航空宇宙技術研究所突風風洞の計画と整備試験，航技研報告 TR-335，1973年9月。
- 2) 藤田敏美，岩崎昭人，藤枝郭俊；突風風洞データ処理装置（データ収集部）の改修，計測システムのオンライン化，航技研資料 TM-611，1989年7月。
- 3) 藤田敏美，岩崎昭人，伊藤婦美子，藤枝郭俊；電子走査多点圧力センサー（ESP）を用いた突風風洞圧力測定システム，航技研資料 TM-638，1991年7月。
- 4) 川崎ロボットコントローラ Aシリーズ/ADシリーズ 操作説明書：川崎重工業株式会社 FA・ロボット事業部 90203-1005DJA。
- 5) 川崎ロボットコントローラ Aシリーズ 言語解説書：川崎重工業株式会社 ロボット事業部 A8058MN2。

- 6) 重見 仁, 岩崎昭人, 藤田敏美, 大貫 武, 李家賢一, 中安英彦, 加納康臣; HOPE小型自動着陸実験機8.9%模型の低速風洞試験, 航技研報告 TR-1215, 1993年11月.
- 7) 重見 仁, 藤田敏美, 岩崎昭人, 大貫 武, 李家賢一, 中安英彦, 勾坂雅一; HOPE小型自動着陸実験機8.9%模型の静的・動的な地面効果試験, 航技研報告 TR-1236, 1994年5月.

航空宇宙技術研究所資料 666号

平成 6 年 6 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 丁目 44 番地 1
電話三鷹 (0422) 47-5911 (大代表) 〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12
