

$$m' = m \left( \frac{R - G_y}{R - y_a} \right) \quad (5-1-4)$$

ここで、 $G_y$ と $y_a$ はそれぞれ地盤表面から機体重心までの距離と付加質量等までの距離である。

表 5-1-4 に各基準の安定度の再現に必要な付加質量の値を 1g 場と遠心場について示す。車両系建設機械構造規格による最低基準値 5 度を再現するために必要な付加質量は 1g 場では 735g であるが、遠心場では 1169g 必要である。この 1169g を与えた模型の 1g 場における安定度は 2.0 である。従って、同一の付加質量を与えられた模型は 1g 場よりも遠心場においてより安定する。

遠心場走行実験では小型模型を 1g において準備する。そのため、まずは 1g 場において安定することが必要である。1g 場での安定度に余裕がないと、遠心力を付加する際に転倒する可能性がある。その理由は、遠心装置の回転に伴って、僅かではあるが振動や加速度が働くためである。そのため、模型に与える安定度については、遠心場における再現条件と 1g 場等での安定性を考慮して決定する必要がある。

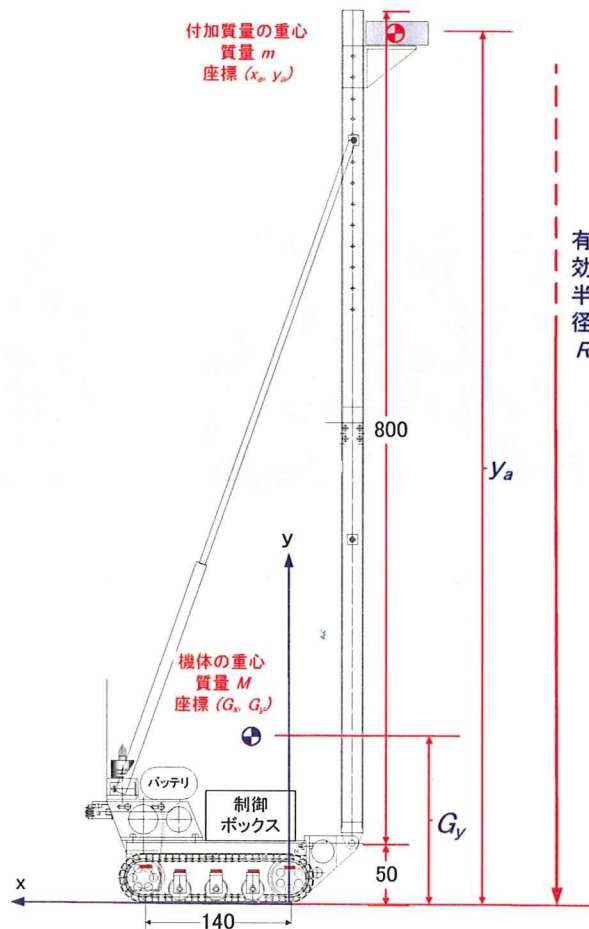


図 5-1-3 くい打機模型の重心高さと有効半径

## 5.2 くい打機模型の改良

本研究は平成19年度より3年間実施している。実験を積み重ねることにより明らかとなった模型の問題点について、随時、改良を行い、実験精度を向上させるよう試みた。詳細は後述するが、大がかりなハード面の改修や、実験結果を詳細に検証し明らかとなった細かな部分にも着目し改良を行った。

### 5.2.1 履帯の改良

遠心走行実験後の模擬地盤表面に写真5-2-1(a)に示す劣化が見られた。これは、履帯が模型地盤表面を引きちぎりながら走行したことを意味している。写真5-2-1(b)に改良前の履帯を示す。写真に見られるように、履帯を構成する要素の間に間隙が存在していることがわかる。履帯要素は金属チェーンに溶接されており、各要素がスプロケットを通過して地面に接地する際に、開いた間隙が収縮するため、地盤を挟み込んだと考えられる。

この問題を改善するため、今年度は履帯を構成する各要素の長さを5mmから8.5mmに変更し、写真5-2-1(c)に示すように履帯要素がオーバーラップするように改良した。その結果、履帯要素がスプロケットを通過する前後に見られた間隙がなくなり、模型地盤の噛み込みを解消することができた。本年度は、履帯形状の改良に加え、接地圧力を減少させる目的で、履帯幅を25mmから30mmに増加させた。

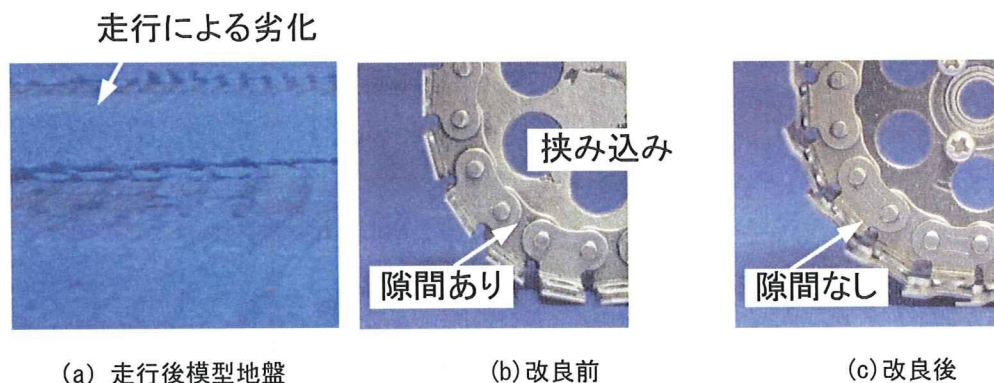


写真 5-2-1 履帯形状と模型地盤劣化

### 5.2.2 車軸形状の改良

下部走行体に備わる車輪は、車体より片持ち梁構造で支持されており、その車軸アームにひずみゲージを貼り付けることで、車軸に生じる荷重の計測が可能となっている。

実験では、最大荷重が働く前輪（FS：Front Sprocket）の実験値が機体の傾斜が考慮されていない理論値に比べて小さいという矛盾が見られた。この原因はくい打機模型が遠心場で走行する際に、履帯に生ずる引張力によって車軸荷重が過小に評価されたことが考えられた。

写真 5-2-2(a)に改良前の車軸を示す。改良前の車軸はスプロケットの回転軸とアームの中心軸が同軸上にないことがわかる。そのため、走行時の履帯に生じる引張力が水平力となって車軸に働く。その結果、車軸アーム部分には、図 5-2-1 に示す“ねじれ力”が働き、鉛直荷重の計測値に影響を与えることが明らかになった。

そこで、車軸アームがねじれる現象を極力小さくするために、回転軸とアームを同軸上に配置した。同時にアーム部分と車体が接する部分の板厚を増加させて、剛性を高めた。さらに、従来はひずみゲージを1枚貼り付けて、1ゲージ法で計測を行っていたが、前輪荷重は最も重要なデータであるため、アームの表面と裏面の両面にひずみゲージを貼り付けて、2アクティブゲージ法で計測を行った。2アクティブゲージ法にすることで、鉛直荷重の分解能が高くなるとともに、荷重-応答ひずみ関係が直線的になるという利点がある。写真 5-2-2(b)に改良後の車軸を示す。

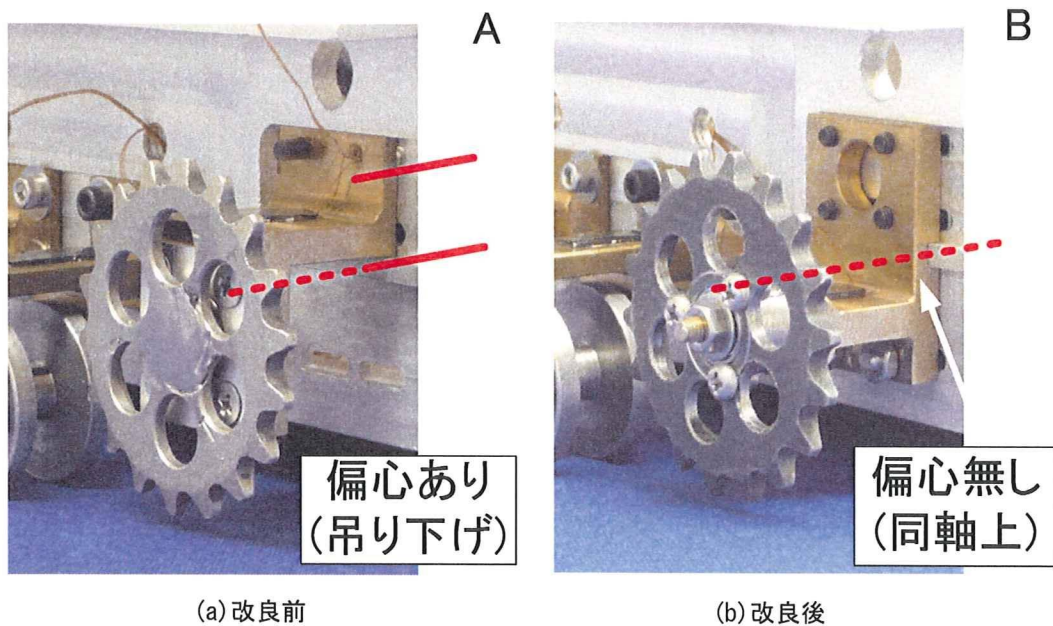


写真 5-2-2 車軸形状の比較

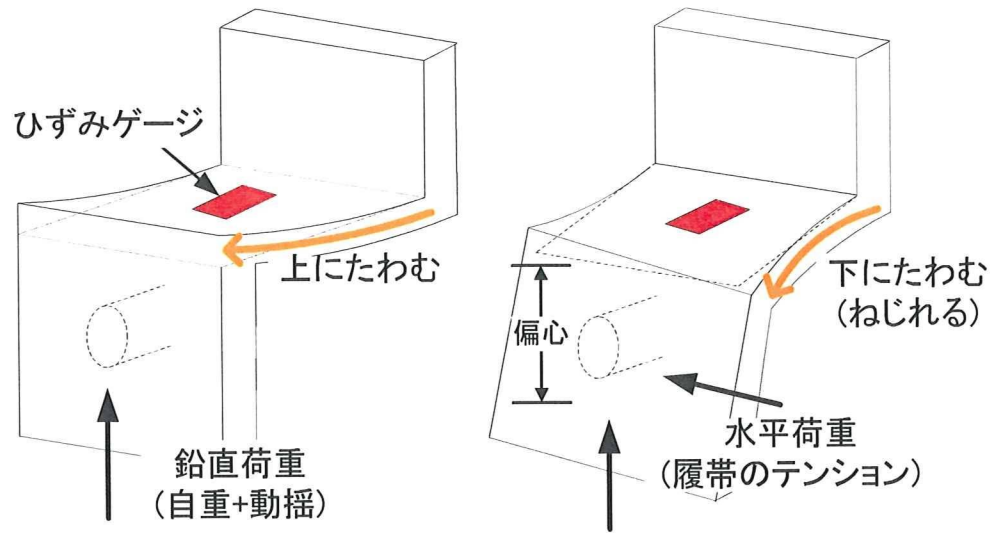


図 5-2-1 車軸アームのねじれの様子



### 5.2.3 3点支持棒の改良

リーダーを支持する「3点支持棒」の取り付け位置を変えた。写真5-2-3に改良前と改良後の小型模型を比較して示す。3点支持棒は2本一組であり、機体の後方部とリーダーを連結する部材である。改良前の模型ではリーダー側の連結部が中間高さ付近にあったが、改良後は上部に移動させた。これは付加質量を搭載したリーダー部と下部走行体との剛性を高めて、機体全体を一体的に揺動させるためである。

写真5-2-4は平成19年度に行った現場実験で使用したくい打機を示す。このくい打機は重量102トンを有するものであった。リーダーにはサンドコンパクション用の機械が備わり、下部走行体の後部にはカウンターウェイトと発電機が搭載されている。機体の安定度は前方が17.53度、後方が22.21度、側方が17.04度である。3点支持棒の連結位置を見ると、リーダーの上部と結合されており、リーダーが機体と一体的に応答する構造となっている。

図5-2-2は後述する遠心場走行実験において計測された、リーダー部における応答加速度の時刻歴<sup>3)</sup>を示す。加速度成分は進行方向に対するものであり、値は前方が正である。改良前の曲線では、リーダー中央の振幅が最も大きく現れており、上部と下部のそれは小さい。走行体を軸とした揺動を仮定すると、応答加速度はリーダー上部に向かって理論的に増幅する。しかしながら、リーダー上部の応答が中央部のそれに比べて小さくなっている。この原因は、連結位置が中央高さにあるため、その上部の曲げ剛性が相対的に小さくなり、一体的に運動しなかったと考えられる。図示した以外の実験では、上部での応答が揺動の周期によって異なった反応を示し、位相が生じた場合も見られた。

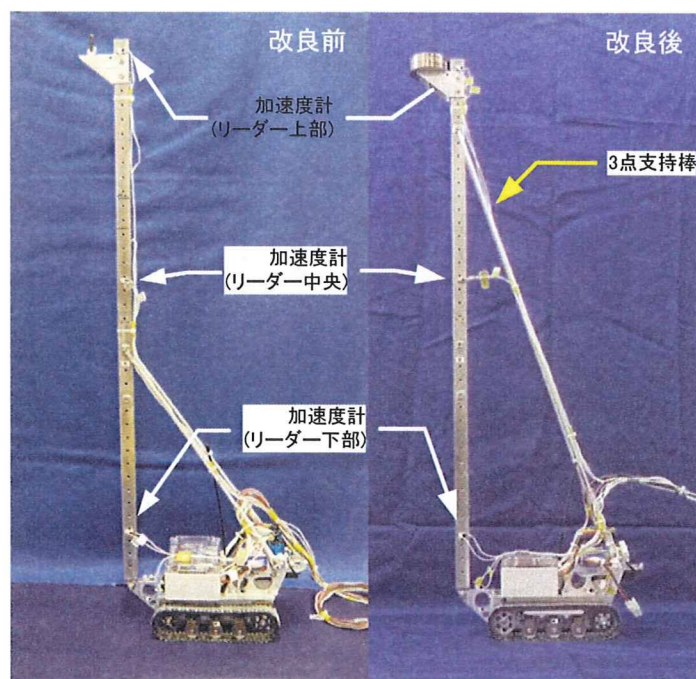
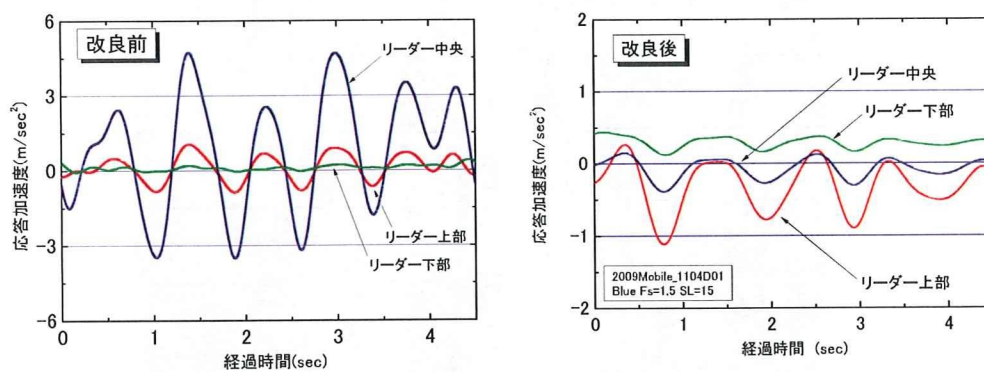


写真5-2-3 3点支持棒の取り付け高さに関する改良前後の比較



写真 5-2-4 実大走行実験に用いたくい打機の外観



(a) 改良前の応答加速度

(b) 改良後の応答加速度

図 5-2-2 履帯形状と模型地盤劣化

改良後の波形はリーダ-上部の振幅が最も大きく、増幅する様子が現れている。これは3点支持棒の連結位置を上端に改良したことにより、リーダ-部の剛性が高まり、走行体と一体的な運動が再現できるようになったことを示している。



#### 5.2.4 遠心力により生じる履帯張力の低減

遠心加速度は履帯の自重を増加させる。改良前の模型では、この増加によって履帯に張力が生じることがわかった。そのため、この張力を低減するための改良を行った。写真 5-2-5 は改良前と改良後の履帯付近を比較して示す。

履帯は、その両端が前輪(FS)と後輪(RS)で支持されている。RS は駆動輪であり、FS は従動輪である。履帯の下面は 3 つの補助輪(FR,CR,RR)で支持されている。一方、上面については支持するものがなかった。そのため、改良前の模型では遠心場で履帯にたわみが生じ、履帯には張力が発生した。

FS, RS, FR, CR, RR では載荷荷重(鉛直荷重)を計測している。その目的は支持地盤に働く接地圧力を明らかにするためである。その詳細は後述するが、発生する履帯の張力は FS と RS に水平荷重として作用し、載荷荷重の計測に干渉する問題があきらかになった。

また張力は軸受けの摩擦を増加させる問題も発生させる。その影響により駆動力が低下し、走行速度は安定しない問題があった。

この 2 つの問題を解決するために、張力の増加を低減する改良を施した。その方法は上面の履帯を支持する補強板を取り付けるものである。写真 5-2-6 は上面の履帯を支持する補強盤の様子を示す。写真 5-2-7 は補強盤の外観を示す。補強盤はアルミ製であり、片持ち梁構造で筐体に取り付けられる。履帯のチェーンが接触して擦れる部分には、高強度で摩擦係数が小さなテフロン材を貼り付けている。

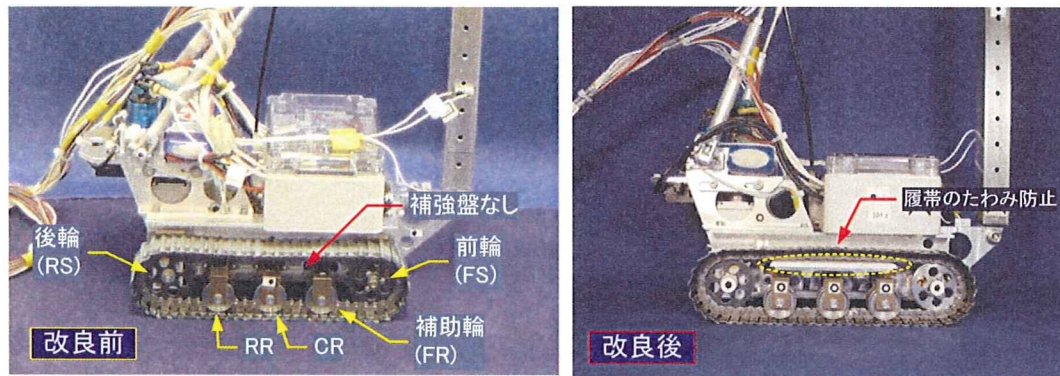


写真 5-2-5 履帯のたわみを防止する補強盤の改良

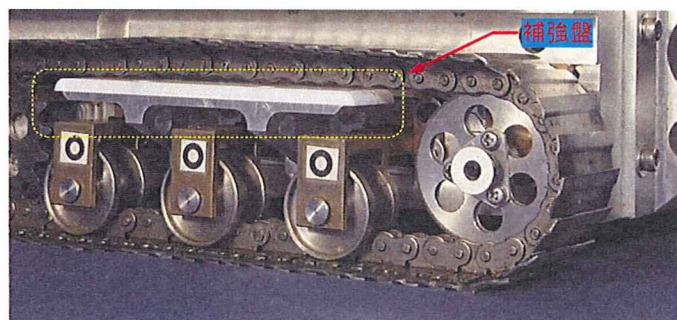


写真 5-2-6 上面の履帯を支持する補強盤の様子

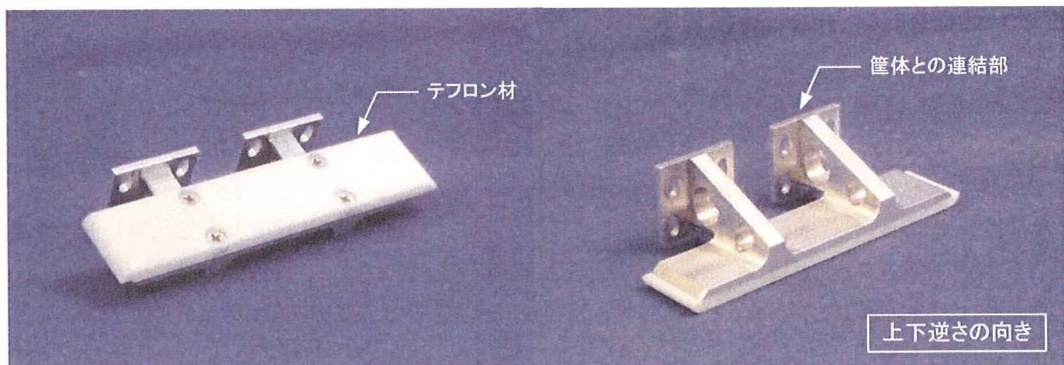


写真 5-2-7 補強盤の外観



### 5.2.5 車軸に生じる載荷荷重の計測

履帯から支持地盤に働く接地圧力を計測するために、履帯を支持する前輪と後輪および補助輪のアームにひずみゲージを貼り付けた。写真 5-2-8 は各部の支持アームを示す。後輪(RS)の支持アームは円形のベアリングが備わり、この部分に駆動軸が貫通する。アームの表と裏に貼り付けられたひずみゲージにはそれぞれ 2 本のリード線が接続している。ひずみゲージの表面は VM テープで養生して保護されている。

前輪は車軸とアームが同一直線上にあり、先ほど述べた水平力の作用による干渉を最小限にするための構造が与えられている。車軸部分にはベアリングを内蔵した従動輪が取り付けられる。補助輪には 2 重構造の円盤が備わり、円盤の間部分を履帯に内蔵されるチェーンが通過する。

写真 5-2-9 筐体に取り付けられた各支持アームの様子を示す。各支持アームはボルト止めされ、載荷荷重に対して片持ち張り構造となる。従って、載荷荷重が働くと支持アームは曲げ変形する。この曲げ変形をひずみゲージで計測し、後述する校正係数を用いて載荷荷重を求める。なお、補強盤は支持アームとは独立して筐体に取り付けられており、補強盤に働く荷重が支持アームのひずみゲージに干渉しない構造を与えた。

写真 5-2-10 は後輪を駆動する軸の構造を示す。先の写真 5-1-5 に示したギアボックスにはかさ歯車が備わる。このかさ歯車は後輪の駆動軸上に取り付けられたかさ歯車に契合する。これにより駆動力が後輪に伝達される。なお、後輪に載荷荷重が作用すると支持アームは曲げ変形する。この変形を妨げずに後輪を駆動するために、駆動軸にはスリットカップリング構造を与えた。この構造は車軸にスリット上の切れ目が複数与えられている。これにより駆動力を伝達するための強度を有しつつ、比較的自由的な曲げ変形が可能となっている。

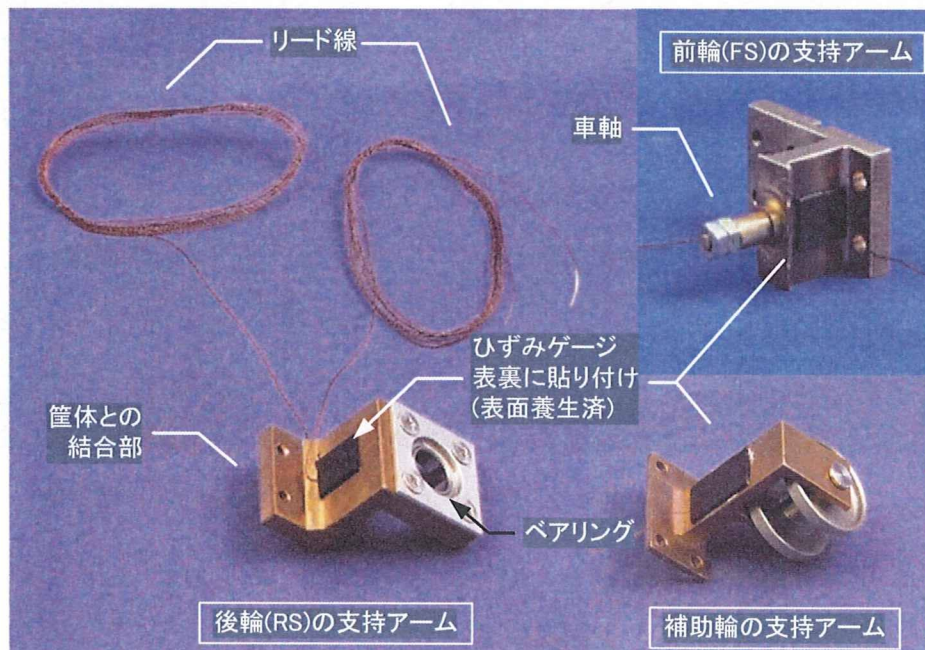


写真 5-2-8 前輪と後輪と補助輪の支持アーム

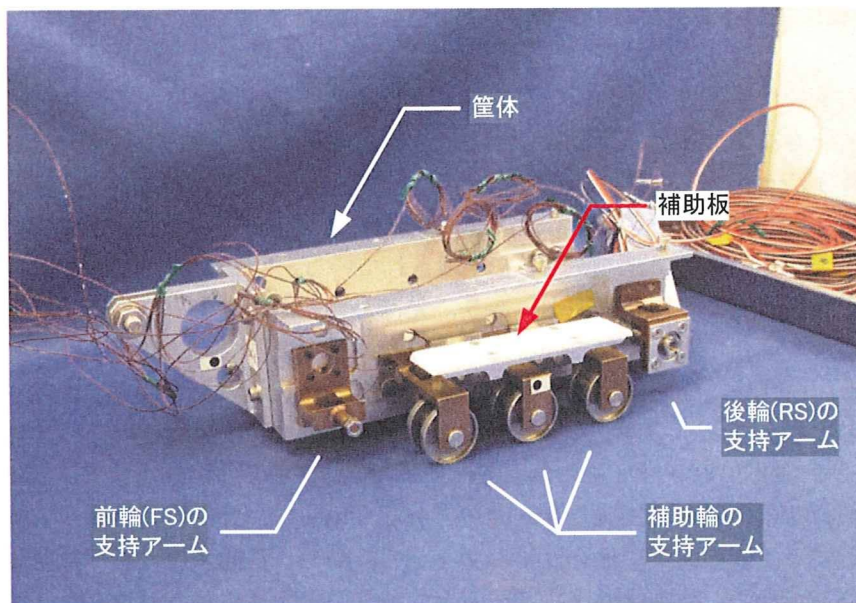


写真 5-2-9 筐体に取り付けられた支持アーム

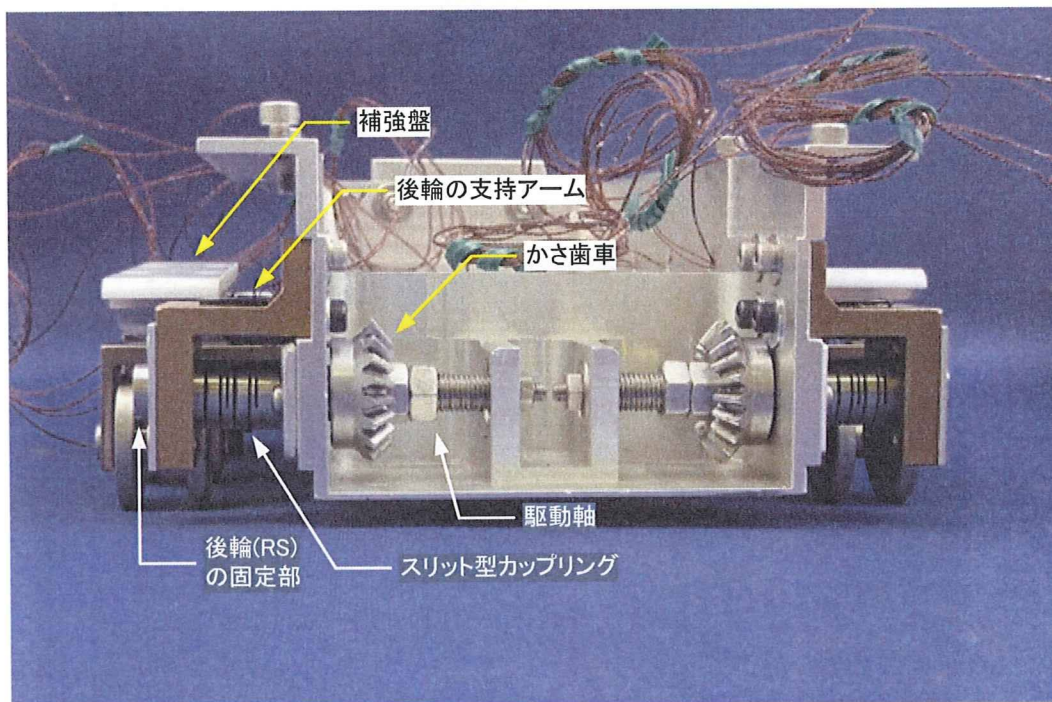


写真 5-2-10 スリット型カップリングを与えた後輪(RS)の駆動軸



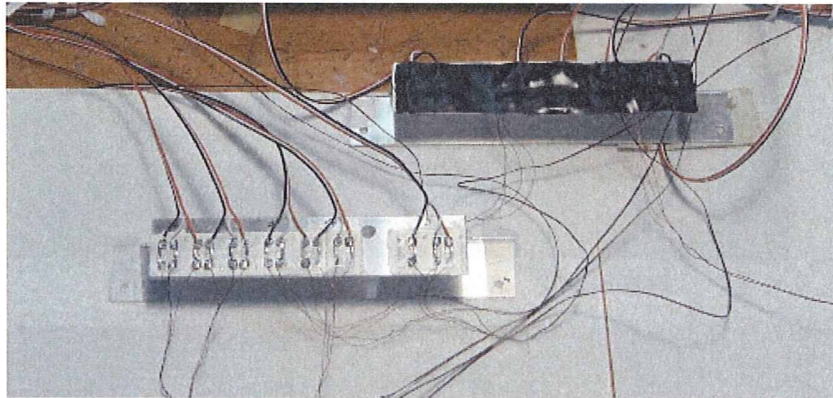
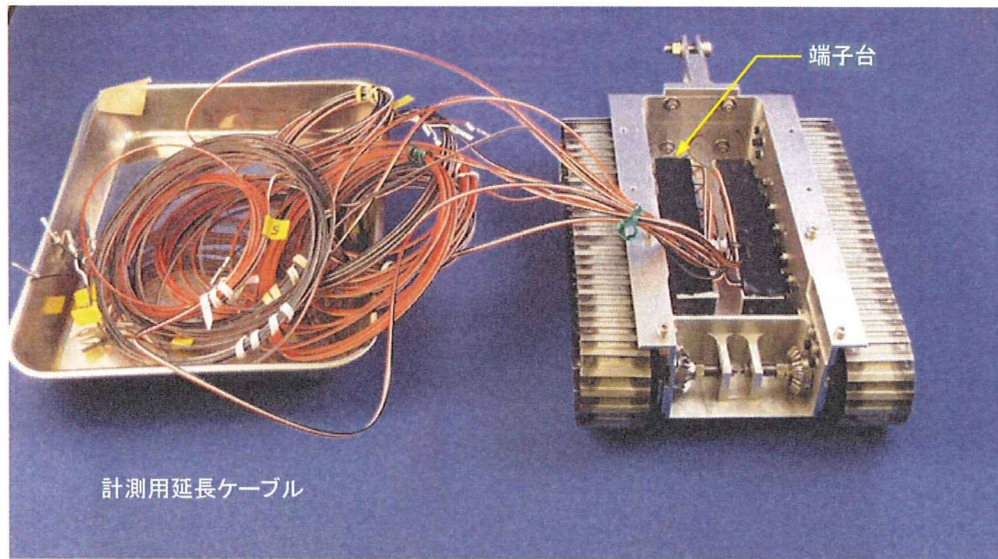


写真 5-2-11 筐体に内蔵する端子台と計測用延長ケーブル  
(上：筐体に設置された端子台，下：2ゲージ法で接続したリード線と延長ケーブル)

写真 5-2-11 は筐体に内蔵された端子台の様子と端子台における変換接続の状態を示す。筐体の左右に備わる全ての支持アームには2枚のゲージが貼り付けられており，出力されるリード線の全数は40本となる。支持アーム1個につき4本のリード線が出力されるが，これを筐体に内蔵する端子台で2ゲージ法に変換する。従って，1つの支持アームについて3線となる。

別に用意した3線タイプの延長ケーブルを端子台に接続し，他端には平状の圧着端子を取り付ける。これは，後述するブリッジボックスとの接続を容易にするためである。端子台の表面はVMテープで養生する。



5.2.6 車軸荷重と応答ひずみの検定

車軸荷重と応答ひずみの関係を調べるために、各車軸に対して検定を行った。载荷試験には支持アームを固定するために専用の治具を作製した。写真 5-2-12 に作製した治具とこれに取り付けた支持アーム及びケーブルを接続するブリッジボックスを示す。

写真 5-2-13 に载荷試験の様子を示す。試験には空圧式载荷装置を用いた。本装置には複動式のベロフラムシリンダーが内蔵されている。荷重はベロフラムシリンダーに供給する 2 系統の空気圧の差によって発生し、昇降台が上下する。空気圧力は装置に備わる空圧調整バルブで増減させる。試験体は昇降台と载荷板の間に設置する。载荷荷重は载荷板の上部に配置した荷重計で計測され、その値は荷重支持計にも表示される。

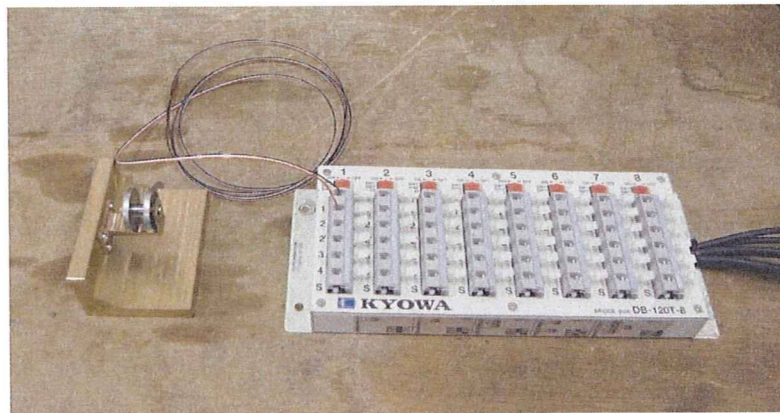


写真 5-2-12 治具に取り付けた車軸と計測機器

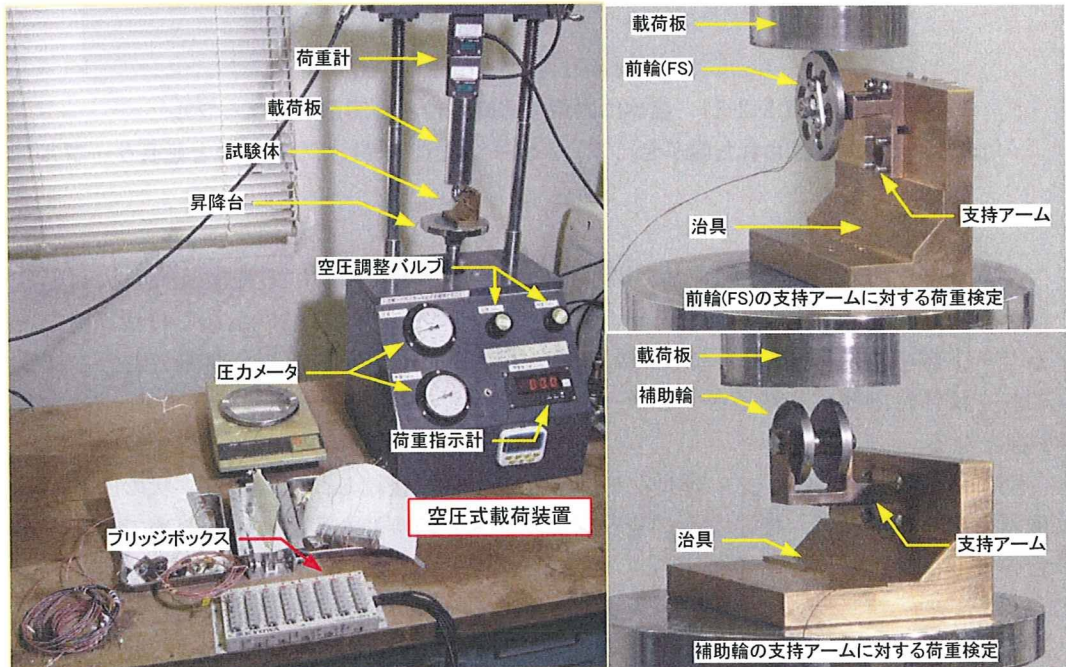


写真 5-2-13 支持アームの検定に用いた試験装置と载荷の様子（左：空圧式载荷装置，右上：前輪の支持アームの荷重検定，右下：補助輪の支持アームの荷重検定）

右上の写真は前輪(FS)の支持アームに対する荷重検定の様子を示す。支持アームは治具にボルト留めされており、片持ち梁構造である。検定は支持アームに前輪が取り付けられた状態で実施した。空圧をゆっくりと増加させて、載荷荷重( $F$ )を与えた。荷重検定では  $F$  の上限値を約 300N とした。

載荷板との接触面にはグリスを塗布して摩擦を軽減した。これは摩擦が水平荷重となって車輪に働くと、支持アームの応答ひずみ( $r_s$ )に干渉が生じるためである。すなわち、鉛直の  $F$  増分に対する  $r_s$  増分の直線性が損なわれないようにするために、グリスで摩擦を低減した。

右下は補助輪の支持アームに対する荷重検定の様子である。補助輪には2つの車輪が備わる。この車輪の間隔は履帯に内蔵されたチェーンの幅より大きく、模型ではチェーンをまたぐように位置する。荷重検定では治具にボルト留めした片持ち梁構造を与え、FS と同様に検定を行った。

$F$  と  $r_s$  のデータを、載荷時と除荷時の両方で計測した。データのサンプリングの周波数は 1Hz である。本研究では、各車軸の番号を図 5-2-3 の通り定義した。

図 5-2-4 は筐体左側に備わる支持アーム Ch1 から Ch5 の  $F$  と  $r_s$  の関係を示す。Ch1(前輪)と Ch5(後輪)の直線性が補助輪 Ch2, 3,4 に比べて良好である。これは Ch1 と Ch5 は車輪が 1 個であるためと思われる。

Ch1 と Ch5 では荷重の載荷点からゲージを貼り付けた位置までの距離が一定であり、荷重増分に対する曲げモーメント増分は比例して大きくなる。一方、補助輪には車輪が 2 個備わるために、この両輪に対する荷重の分担が変化することによって曲げモーメントの出力増分に影響が生じる。その結果、荷重増加に対して曲げモーメントが必ずしも比例した増加を示さない状況が生じたものと考えられる。この影響と見られるヒステリシスが Ch2,3,4 の曲線には幾分見られる。しかしながら、その程度は顕著ではなく相関係数は 0.99 程度の良好な直線性を示している。

図 5-2-5 は筐体右側に備わる支持アーム Ch6 から Ch10 の  $F$  と  $r_s$  の関係を示す。左側とほぼ同様な傾向が見られる。Ch7,8,9 は補助輪の支持アームに関する結果であり、左側と同様に幾分ヒステリシスが見られる。しかしながら、相関係数は 0.99 を超えており良好な直線性が認められる。表 5-2-1 に校正係数と相関係数を示す。

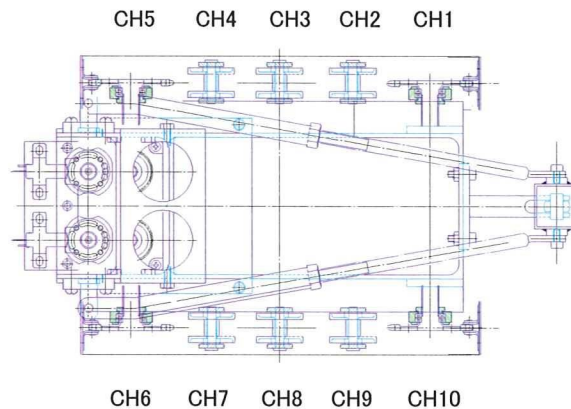
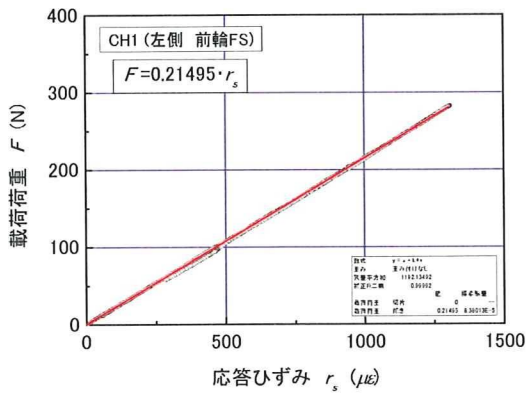
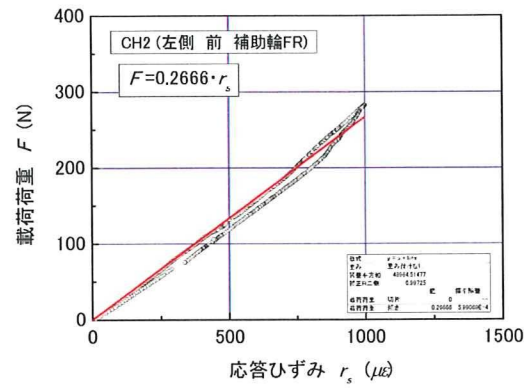


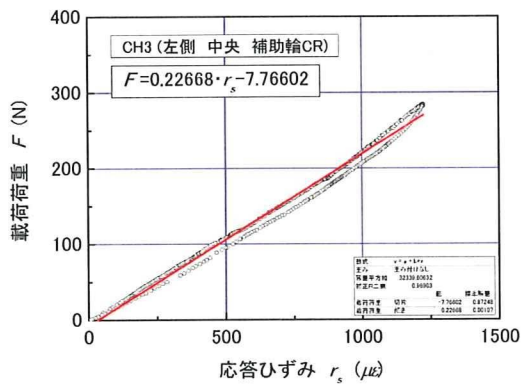
図 5-2-3 車軸番号



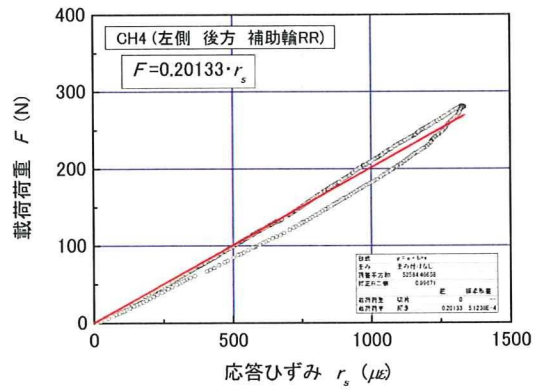
(a) ch1



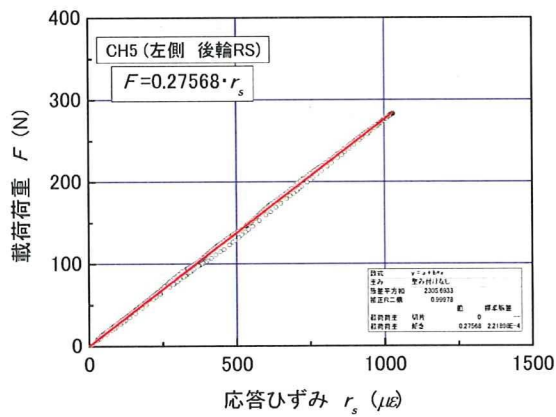
(b) ch2



(c) ch3



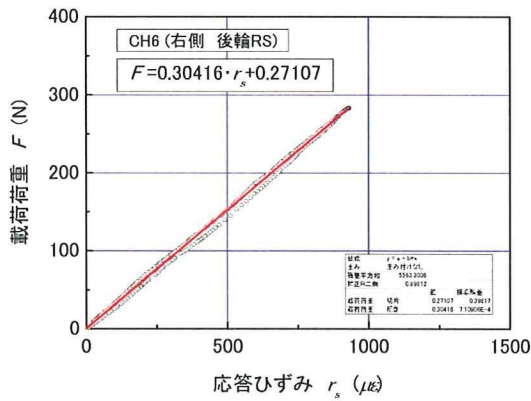
(d) ch4



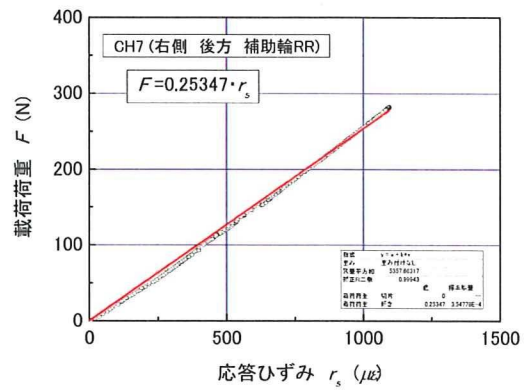
(e) ch5

図 5-2-4 左側支持アームの荷重検定の結果

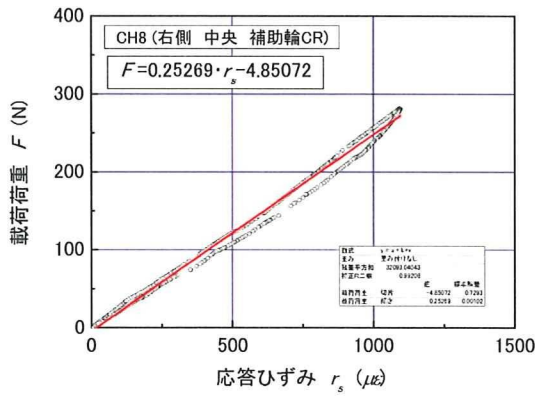




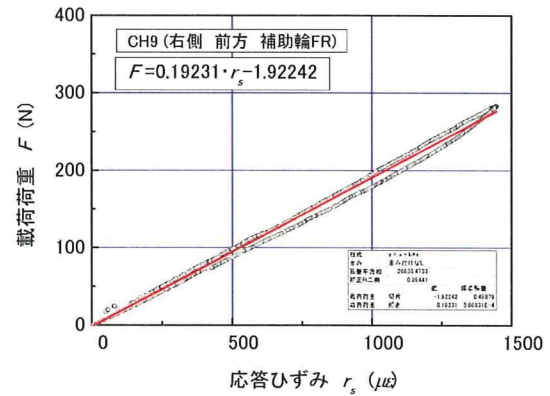
(f) ch6



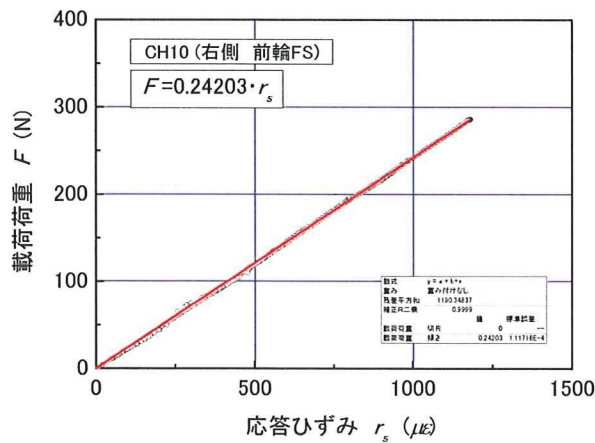
(g) ch7



(h) ch8



(i) ch9



(j) ch10

図 5-2-5 右側支持アームの荷重検定の結果

表 5-2-1 校正係数と相関係数

チャンネル番号	校正係数 (N/ $\mu\epsilon$ )	相関係数
ch1	0.21495	0.99992
ch2	0.26666	0.99725
ch3	0.22668	0.98903
ch4	0.20133	0.99671
ch5	0.27568	0.99978
ch6	0.30416	0.99812
ch7	0.25347	0.99943
ch8	0.25269	0.99208
ch9	0.19231	0.99441
ch10	0.24203	0.99990

### 5.3 その他の実験装置

#### 5.3.1 遠心模型実験装置

実験に使用した遠心模型実験装置の概要を写真5-3-1および図5-3-1に示す。表5-3-1には主な仕様を示す。

遠心模型実験装置は当研究所建設安全実験棟の遠心模型実験室の地下1階に備わる。この装置に動的試験用と静的試験用に独立したプラットフォームが備わり、非対称な構造を有している。動的試験用のプラットフォームには強制着座システムが備わり、安定した加振が可能となっている。静的試験用プラットフォームは1.5m×1.1mの面積を有し、有効半径が2.3mクラスでは最大規模である。

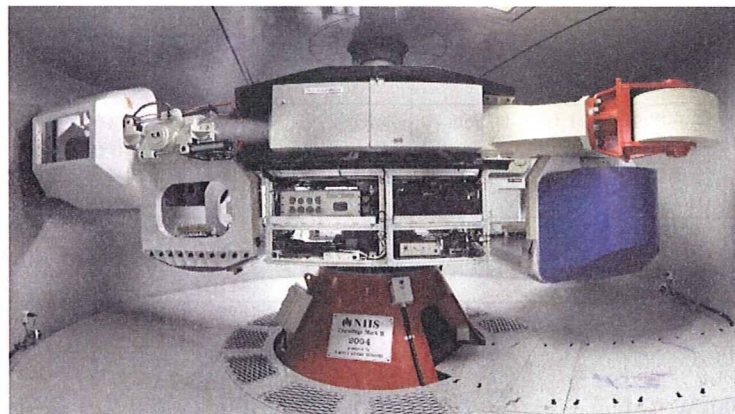


写真5-3-1 遠心模型実験装置 (NIIS Mark-II Centrifuge)

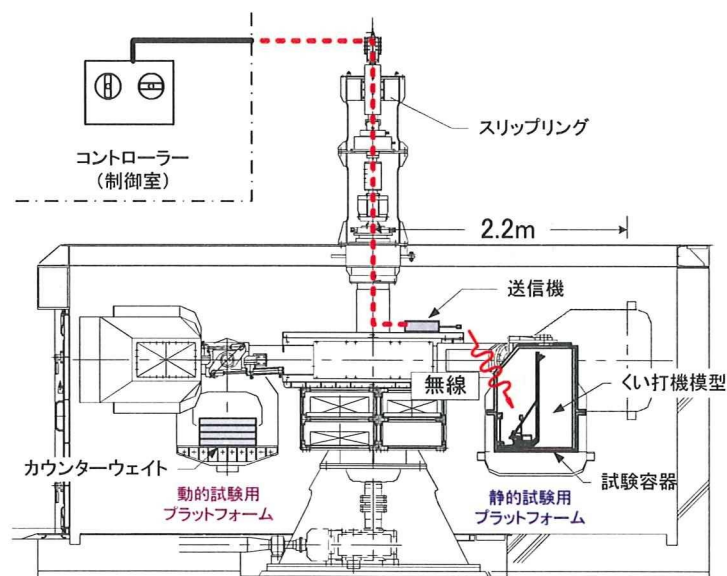


図 5-3-1 遠心模型実験装置の概要



表 5-3-1 遠心模型実験装置の主な仕様

型式	静的・動的試験専用独立 プラットフォーム型	バランス機構	プラットフォーム上での手動調整+ 自動調整式(オートバランサー) バランスウェイト 1.28ton・m オートバランサー ±24kg/m
回転半径	動的試験用 2.20m 静的試験用 2.38m	装置全質量	約 35ton (回転アーム 14ton)
ビット	内径 5.7m 有効高さ 2.7m 架台部ビット φ 2.5m -400mm 駆動軸ビット幅 1m -350mm	操作制御 システム	運転制御 回転数増分一定及び遠心加速度増分一定 制御対象 速度制御 制御精度: ±0.05FS 回転数指令 0~194rpm(0.1 間隔) 遠心加速度指令 0~100g(0.1 間隔)
最大遠心加速度	動的試験 50g (143rpm) 静的試験 100g (194rpm)	着座方式	動的試験 油圧強制着座方式
搭載質量	動的試験 1000kg 静的試験 500kg	カウル	動的試験 回転アーム部 静的試験 プラットフォーム部
遠心場能力	動的試験 50g-ton 静的試験 50g-ton	動力ユニット	直流電動機 GF100-225B1(MEIDEN) 90kW 直交縦型減速機 オイルバス潤滑
プラットフォーム 搭載サイズ(最大)	動的試験 W1.1m × L0.95m × H1m 静的試験 W1.5m × L1.1m × H1.18m	スリップリング	動力用 2極(AC100V 30A) 制御用 17極(AC100V 1A) 回転載荷部のターミナルボックスとは有線 接続
ビット冷却方式	自然換気 (吸排気ダクト付き)	ロータリー ジョイント	油圧用 2ポート 21MPa 空圧用 3/4 インチ 1ポート 0.7MPa 水圧用 3/4 インチ 2ポート 0.5MPa

装置本体は 90kW の直流モーターで駆動され、最大 100g の遠心力を載荷することができる。なお、動的実験については搭載する加振装置の仕様により最大加速度は 50g に制限される。

遠心装置の荷重バランスは、カウンターウェイトの搭載による手動調整と、支柱内に内蔵されたオートバランサーの移動による自動調整により確保される。運転制御については、遠心加速度の増加と減少がコンピュータ制御されており、回転数増分一定と遠心加速度増分一定の 2 つの方式による増減が可能である。

スリップリングには動力用と制御用が備わる。動力用では AC100V30A 用に 2 極備わり、制御用には AC100V1A 用に 17 極備わる。ロータリージョイントには油圧、空圧、水圧の 3 系統が備わる。油圧は 2 系統で供給され 1 系統プラットフォームの着座及びオートバランサーの移動用を使用するものである。もう一つの系統は加振装置の動力用である。空圧用に 1 系統(0.7MPa)と水圧用に 2 系統(0.5MPa)が備わり、これまでに遠心場降雨実験に使用されている。

### 5.3.2 データ収録装置

遠心模型実験では耐 G 性を有するデータ収録装置を使用する必要がある。当研究所の遠心装置には共和電業製の遠心载荷試験用シグナルコンディショナ MCA-164AS が搭載されている。写真 5-3-2 に収録装置本体を示し、主な仕様を表 5-3-2 に示す。

本装置の耐 G 性能は約  $392\text{m/s}^2$  (40G) である。この装置は遠心装置の中心近くのラックに搭載されており、この位置までの最大半径は約 1m である。同一回転数における遠心力の値は半径に比例するため、約 90g までの実験が可能になる。

表 5-3-3 にシグナルコンディショナの仕様を示し、表 5-3-4 に A/D ボード変換部他の仕様を示す。本体には CPU ボードとメモリボードとトリガーボードが内蔵される。シグナルコンディショナボード 1 枚には 4 チャンネルの計測装置が備わる。本体にはこのシグナルコンディショナが 16 枚搭載されており、最大 64 チャンネルまでの計測が可能である。16 ビットの A/D 変換器が内蔵されており、全チャンネル同時計測が可能である。遠心模型実験ではパーソナルコンピュータにインストールされた制御ソフトウェアからの指令により静的収録モードと動的収録モードの切り替えが可能である。

アンプ部と A/D 変換部の設定および集録データの回収は、GP-IB インターフェースを介して制御用パソコンで行う。サンプリング周波数は最高が 40kHz であり、最大のサンプリングレイトは 1 時間である。



写真 5-3-2 データ収録装置本体の外観(共和電業製 MCA-164AS)

表 5-3-2 遠心場データ収録装置の主な仕様

分類	項目	条件
CPU ボード	インターフェース	GB-IB 最大転送速度 200K バイト/s
TR G (トリガ) ボード	レベルトリガ トリガチャンネル	任意の 1 チャンネル
	設定範囲	0~±100%
	外部トリガ	接点信号入力 (フォトカプラにより絶縁)
	トリガ出力	オープンコレクタ出力
メモリボード	メモリ容量	1M バイト (500K ワード) /チャンネル
シグナルコンディショナボード	測定チャンネル数	4/ボード × 16 ボード=64 チャンネル
	測定入力信号	ひずみゲージ, 半導体ゲージ, 電圧 (リモート制御)

表 5-3-3 シグナルコンディショナの仕様

適用ブリッジ抵抗	120~1000Ω (ブリッジ電源 DC2V の場合 ひずみゲージ) 700~3000Ω (ブリッジ電源 DC10V の場合 ひずみゲージ, 半導体ゲージ)
ブリッジ電源	DC2V (ひずみゲージ), DC10V (ひずみゲージ, 半導体ゲージ)
測定レンジ ひずみゲージ	200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000×10 <sup>-6</sup> ひずみ
電圧/半導体ゲージ	0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10V
校正値	各設定レンジのフルスケール値 精度 ±0.5%以内
校正モード	ZERO, +CAL, -CAL (4チャンネル一括)
入力チェック	可能 (ひずみゲージ入力時)
平衡調整	自動平衡調整 (CPU ボードによる)
平衡調整範囲	±10000×10 <sup>-6</sup> ひずみ
精度	±15×10 <sup>-6</sup> ひずみ以内
応答周波数範囲	DC~20kHz (偏差+1, -3dB)
ハイパスフィルタ	1Hz -6dB/oct. (ON, OFF リモート制御)
ローパスフィルタ	-48dB/oct. バタワース特性
カットオフ周波数	10, 100, 200, 500Hz, 1, 2, 5, 10, 20kHz (リモート制御)
モニタ出力	0~±2V
非直線性	±0.2%FS

表 5-3-4 A/D 変換部他の仕様

分解能	16 ビット (符号 1 ビット含む)
サンプルホールド	全チャンネルサンプルホールド付
サンプリングレイト	1 時間, 30, 10, 5, 1 分, 30, 10 秒, 1, 2, 5, 10, 100, 200, 500Hz, 1, 2, 5, 10, 40kHz
動作モード	ダイレクトモード A-D 変換と同時にデータを出力 (静的測定用) ストレージモード A-D 変換終了後にデータ出力 (動的測定用)
耐 G 性能	遠心加速度 392.3m/s <sup>2</sup> (40G) (筐体先端部では 686.5m/s <sup>2</sup> (70G) 以下) 衝撃 545.2m/s <sup>2</sup> (60G) (10ms ハーフサイン波)
電源	DC 12V (10~15V) または AC100V (90~100V)