

電子スイッチを用いた回転体の多点応力測定装置

Development of Multichannel Stress Measuring Equipment of Rotor Using Analog Switches

回転体内の応力を測定する作業は、日常、各分野で盛んに行なわれている。従来の測定法では、スリップリングを用いるため、1回の実験で測定できる点数は制限される。

そこで、今回、回転体内の応力を最大16点まで測定できる装置を開発した。本装置は回転体内に電子スイッチと増幅器とを内蔵し、各点のひずみ検出用ブリッジの出力電圧を、回転体外部からの光の信号により、任意に切り換えこれを増幅した後、スリップリングを介して静止側に引き出すものである。

本装置を最高6,000rpmまでの回転速度で性能試験を行ない、次の結論を得た。(1)平均感度： $1.014\text{mV}/1 \times 10^{-6}$ ストレイン(ブリッジ電圧2V)、(2)各チャネル間の感度のばらつき： $\pm 0.5\%$ (平均感度に対する百分率)、(3)非直線性： $\pm 0.5\%$ (定格ひずみ： $1,000 \times 10^{-6}$ ストレインのとき)、(4)測定値のばらつき： 10×10^{-6} ストレイン以下である。また応用例として、本測定装置を用いてターボ圧縮機用羽根車の遠心応力を測定した例について述べた。

赤津利雄* Akatsu Toshio

兼清喜雄** Kanekiyo Yoshio

木下和人* Kinoshita Kazuto

1 緒 言

ターボ機械、ポンプ、発電機など、回転機械の信頼性向上を図るには実働状態の正確な把握が必要である。このためには、回転体内の応力測定が必要となる。また、このほかにも、回転体内の応力、温度などの測定は、各分野で日常盛んに行なわれている。

従来の測定方法は、スリップリングを用いる方法がほとんどであったが、この方法では1測定点当たり4素子のスリップリングを必要とする。この場合、種々の制約から実際に使用できるリング数は普通20素子(したがって、応力測定の場合、測定点は5点)程度に制限される。

日常、回転体内の多数点の応力を測定する必要性は非常に高い。例えば、スピンテストを用いて圧縮機やタービンの羽根車の遠心応力を測定する場合には、羽根車の形状、測定の目的にもよるが、測定点数は普通50～60点若しくはそれ以上になる。この場合、従来の測定法では1回の実験で5点測定したのち羽根車を停止させ、次の測定点につなぎ替えて同じ実験を繰り返す方法が採られていた。

この方法では、同じ実験を多数回繰り返すことになる。ところが大形のスピンテストでは、1回の起動、停止だけで2～3時間もかかるため、測定には長時間を要するだけでなく、測定条件の時間的変化の影響を受けやすい欠点がある。また、高い回転速度で羽根車に生ずる応力が塑性域に入る測定では、繰り返し実験ができないため、上述のつなぎ替えによる多数点の応力測定は不可能である。

このため、筆者らは計測の能率化と精度向上を図る目的で、回転体内の応力を16点まで測定可能な装置を開発した。この測定装置は、回転体内に電子スイッチを取り付け、各測定点に接着したひずみゲージで構成したブリッジの出力電圧を任意に切り換えて測定するものである。この測定法では、後述するように7素子のスリップリングを用いているが、測定点数が増してもこの数は一定である。

本論文では、測定装置の動作原理、構造、特性などについて述べ、更に、ターボ圧縮機の羽根車の遠心応力の測定に使用した例を述べた。

2 測定装置の概要

本測定装置は、回転体内に電子スイッチと増幅器を内蔵し、各測定点に接着したひずみゲージによって電気信号に変換された応力信号を、回転体の外部からの光の断続信号により任意に切り換える。次いで、この信号は回転体内で増幅した後、1素子のスリップリングを介して静止側に引き出し、測定するものである。

上述の電気信号に変換された応力信号を静止側に引き出す装置を多点信号伝送器(以下、単に伝送器という)と呼ぶ。

また、伝送器からの出力電圧を測定したり、光による切換信号を発信する静止側の装置を操作盤と呼ぶ。なお、操作盤の中には、伝送器の電子回路を動作させるために必要な直流定電圧電源と、ひずみ検出回路に供給する直流定電圧電源なども含まれている。

伝送器の電子回路には固体素子を使用している。このため、可動部がなく、かつ小形、軽量となっている。また各素子は高い遠心力に耐えるよう考慮されている。

2.1 伝送器の動作原理

図1に伝送器の回路図を示す。同図により回路の動作を説明する。

図1のランプ回路で、ランプ以外は操作盤の中に含まれている。 $L_1 \sim L_5$ はランプで、これらは伝送器の静止側に設けられている。また伝送器の回転軸上には、各ランプに対応してホトトランジスタPTr1～PTr5が設置してある。ここで光信号を電気信号に変えて、次のフリップフロップ回路(以下、FF回路と呼ぶ)に加えている。

ホトトランジスタの出力電圧は、常時0V(以下、このレベ

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所土浦工場

ルの信号を0と呼ぶ)で、光を受けたときだけ、EV(以下、このレベルの信号を1と呼ぶ)に変化する。軸が回転中にランプを点燈すると、ホトトランジスタは1回転に1回ずつわずかな時間だけ光を受けて、出力は0から1に変化する。この1の状態を1回転中保持するのが次段のFF回路である。

次のアナログスイッチ回路は、伝送器の心臓部となる回路である。このスイッチは2個を一組として使用される。ここでは、AS1とAS1'の組みについてその動作を説明する。アナログスイッチ1個の中には8素子のスイッチが内蔵されている。各スイッチ素子の入力端子 $I_1(I_1')$ ～ $I_8(I_8')$ には、ひずみ検出用ブリッジ回路の出力電圧が印加されている。

まず、OE1、OE1'端子に1の信号を加えると、AS1、AS1'が動作状態になり、このときゲート信号入力端子 2^0 、 2^1 、 2^2 にFF回路からの3ビットの論理信号が加わると、8素子のスイッチのうちいずれかがONになり、出力端子01、01'にブリッジの出力電圧が現われる。この電圧は、次の差動増幅器で増幅された後、スリップリング(SR6)を介して静止側に引き出す。

本伝送器には、二組みのアナログスイッチを用いており、いずれの組みを選択するかはランプ L_1 のON、OFFによって決まる。

以上のように、4個のランプ(L_1 ～ L_4)のON、OFFの組合せによって16点の応力を任意に選択し測定することができる。ここで上述の回路を動作させるに要する電源、及びブリッジ回路の電源は、スリップリングを介して静止側から供給されている。

2.2 伝送器の構造

図2は伝送器の構造図である。同図に示すように、本装置は大別すると電子回路を実装した部分とスリップリング部分とから成っている。まず、電子回路実装部の構造について述べる。

回転軸は2個のベアリングを介して外側ケースに支えられている。図1に示した電子回路のうち、ホトトランジスタ以外は、すべてフレキシブルなプリント基板上に取り付け、軸中央部に巻き付けてある。軸の回転バランスが崩れないよう、部品は円周方向に等分に配置してある。また、この外側は黄銅の筒によって保護し、筒と軸との空間にはエポキシラバーを真空注入して、電子部品が高い遠心加速度に耐えるようにしてある。

A、A'断面上には、軸上に4個のホトトランジスタを取り付け、これに対応してケース上にはランプが取り付けられている。これらは、図1におけるPTr1～PTr4及びランプ L_1 ～ L_4 である。更に、B、B'断面上では、2個のホトトランジスタと1個のランプが取り付けられている。1個のホトトランジスタは図1のPTr5であり、他の1個は軸の回転バランスをとるために取り付けられたもので回路の動作には無関係である。また、ランプは同図の L_5 に相当するものである。端子板には、アナログスイッチの入力端子32個と、ひずみ検出用ブリッジ回路への電源供給用端子2個、及び回路チェック用の端子2個、合計36個の端子が埋め込まれている。

電子回路実装部とスリップリング部の回転部分は、ピンとフランジによって連結されている。ここでスリップリング側

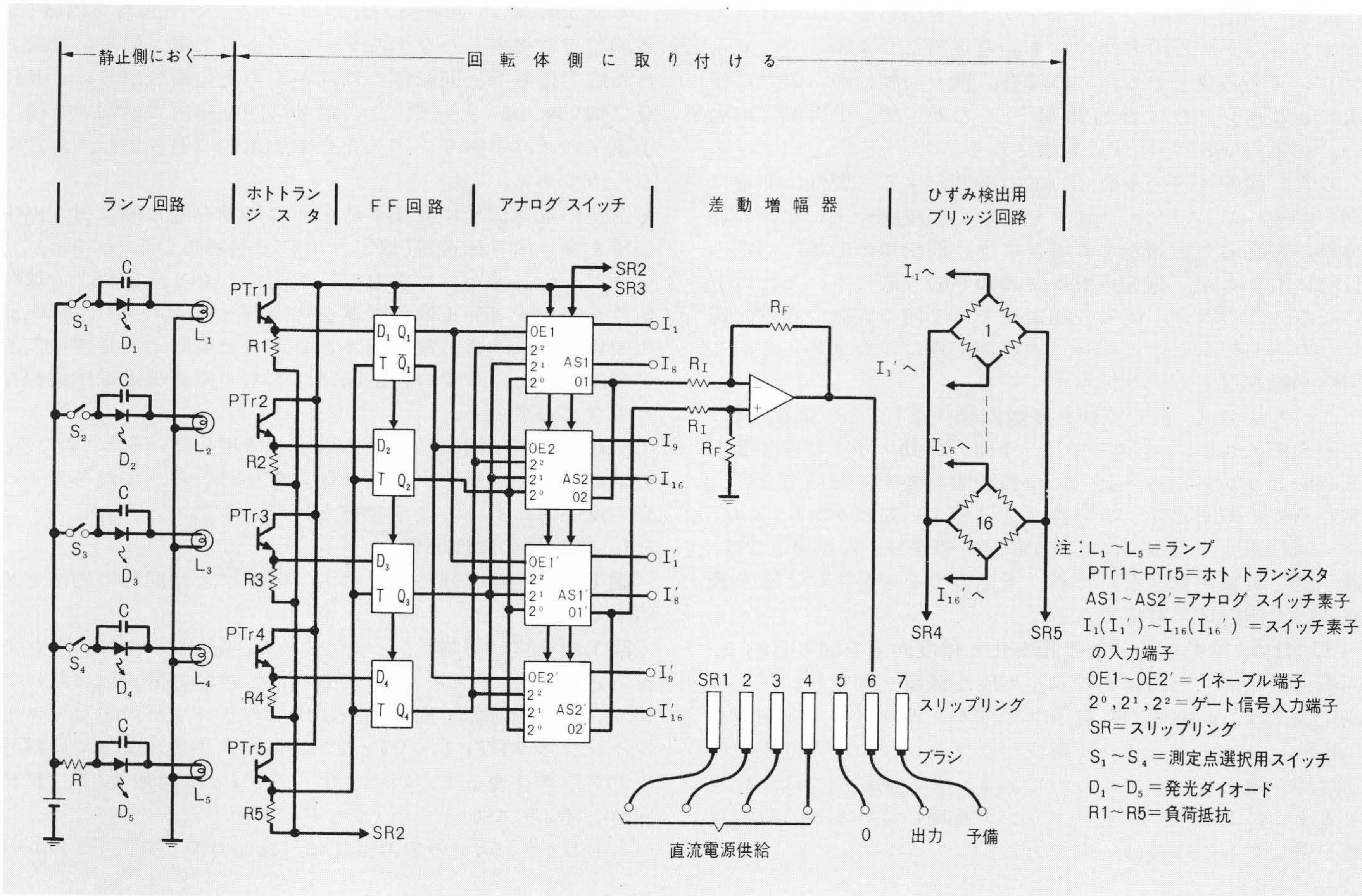


図1 多点信号伝送器の回路図 回転体内の16点の応力を電気量に変換し、これを任意に切り替えて、増幅するための回路図を示す。

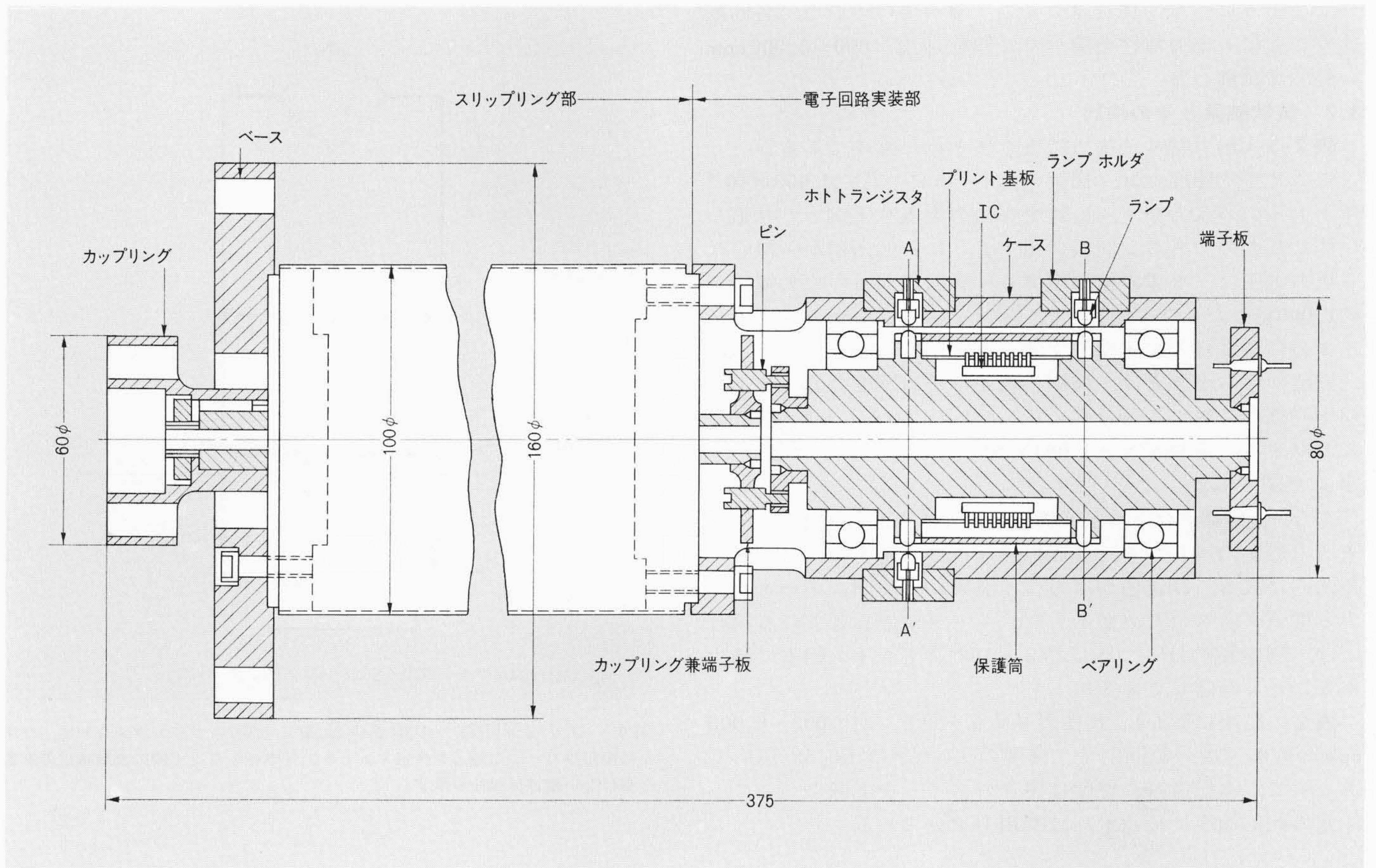


図2 多点信号伝送器の構造 図1に示した電子回路とその出力を静止側に引き出すこと及び電子回路とひずみ検出回路に電源を供給するためのスリプリングとを組み合わせた全体の構造図を示す。

のフランジは端子板を兼ねており、リングからの線と電子回路からの線はこの端子板上で接続している。

図3に伝送器と操作盤を示す。

3 伝送器の入出力特性

図1で、回転体に接着したひずみゲージが回転中に受ける機械的ひずみと伝送器の出力電圧(スリプリング6を介して静止側に得られる電圧)との関係(以下、これを入出力特性と呼ぶ)を調べた。次にその試験方法と結果について述べる。

3.1 試験方法

入出力特性試験で、回転中に回転体内のひずみゲージに正確な機械的ひずみを与えることは困難なので、入力ひずみは静止側から標準ひずみ発生器によって与えた。

この発生器は、ブリッジ回路の2辺の抵抗値を、スイッチにより一定量ずつ変化させるようにしたもので、スイッチを1段進めるとひずみゲージが 100×10^{-6} ストレインの機械的ひずみを受けたときに相当する抵抗変化を生ずる。ひずみの範囲は、 $\pm 1,000 \times 10^{-6}$ ストレインである。この標準ひずみ発生器には、株式会社横河電機製作所製の標準電圧発生器により2.0000Vの直流電圧を加えた。このときの標準ひずみ発生器の特性を表1に示す。

このひずみ発生器により、 200×10^{-6} ストレインずつ、 $\pm 1,000 \times 10^{-6}$ ストレインまでのひずみを発生させ、そのときの出力電圧をスリプリングSR4, SR7(図1参照)を介してアナログスイッチの入力端($I_1, I_1' \sim I_{16}, I_{16}'$ まで)に導き、以後は差動増幅器、スリプリング(SR6)を通して再び静止側に引き出すようにした。

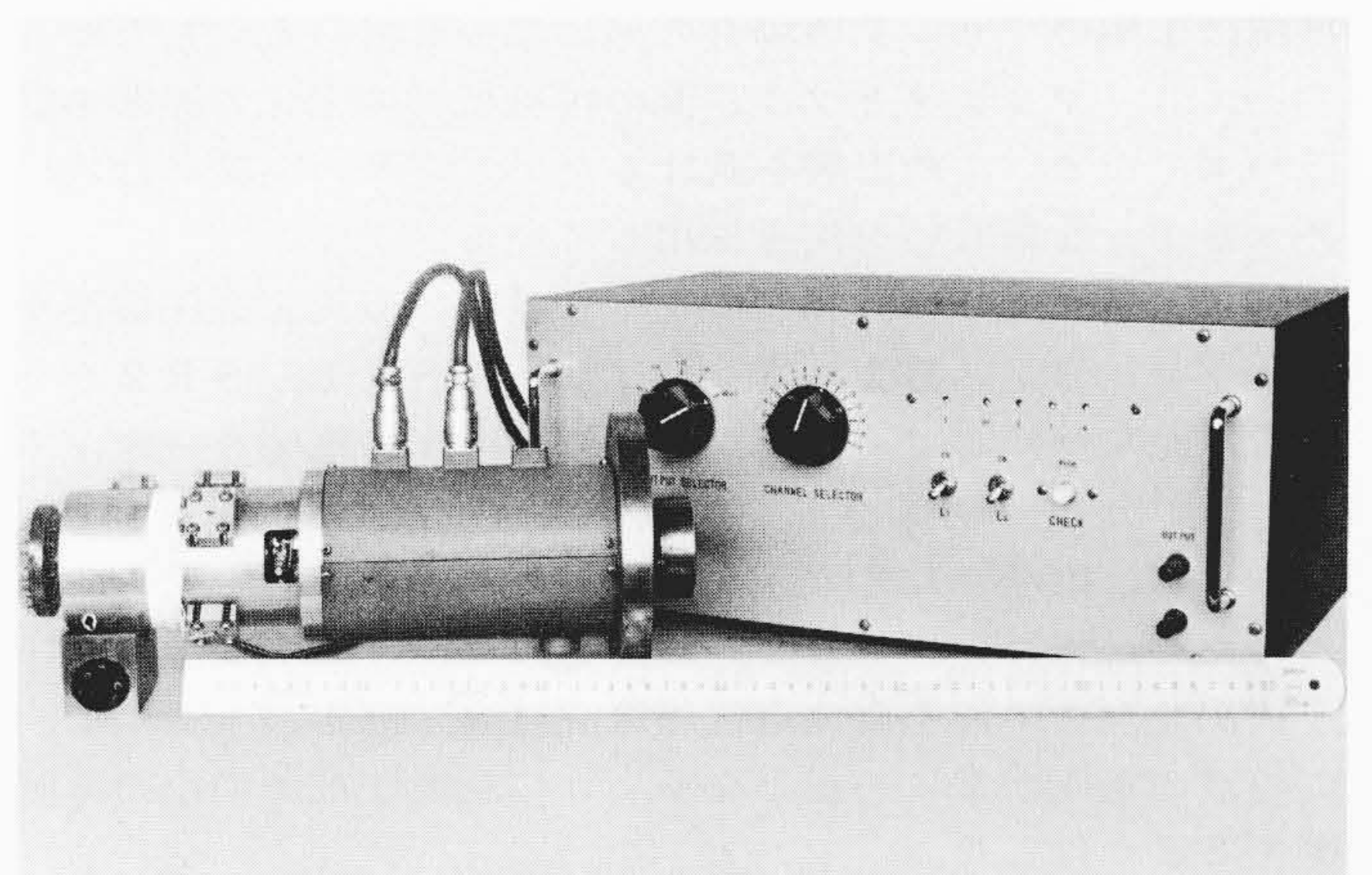


図3 多点信号伝送器と操作盤 16点までの測定点を任意に選択して測定できる。

表1 標準ひずみ発生器の特性 標準ひずみ発生器に2.0Vの電圧を印加したときの特性を示す。

項 目	特 性
出 力 電 圧	$1,000 \mu V / 1,000 \times 10^{-6}$ ストレイン
非 直 線 性	0.004%以下
ヒステリシス	0.02%以下

このようにして、16点のスイッチすべてについて、各回転速度ごとに入出力特性を調べた。回転速度は600～6,000rpmの範囲で試験した。

3.2 試験結果とその検討

表2は入出力特性試験の結果をまとめたものである。ここで平均感度とは、16個のスイッチについて、 $1,000 \times 10^{-6}$ ストレインの入力ひずみに対する出力電圧を実測した結果を平均したものである。同表に示すように、伝送器から得られる出力電圧は、ひずみ検出用ブリッジ回路からの出力電圧を約1,000倍したものである。スリップリングから生ずるノイズの影響はほとんどなくなり、測定精度が向上する。感度のばらつきとは、16個のスイッチの感度の違いを上述の平均感度に対する百分率で示したものである。非直線性は、入力ひずみの定格値を $\pm 1,000 \times 10^{-6}$ ストレインと仮定して求めた値である。

また、測定値のばらつきは約 10×10^{-6} ストレイン相当あり、上述の感度のばらつき、非直線性はこの測定値のばらつきの範囲内に入る。測定値がばらつく原因は、周囲のモータから出る電気ノイズのためであった。モータが停止している場合には、測定値のばらつきは約 2×10^{-6} ストレイン相当に減少することも確認してある。

表2の結果によると、16個のスイッチ間で、かつ600～6,000rpmの回転速度の範囲内で、感度のばらつきは $\pm 0.5\%$ 以内であるので、本伝送器の感度は任意のスイッチ1個について、任意の回転速度で校正すれば実用上十分である。

4 ブリッジ回路への電源供給法

前述したように、ひずみ検出用ブリッジ回路への電源は、スリップリングを介して静止側から供給している。ここで、すべてのブリッジの電源側は共通に接続しているため、合成抵抗は1個のブリッジの場合の $1/16$ に減少している。したがって、スリップリングとブラシ間の接触抵抗の変化の影響を受けやすくなる。この影響を避けるため、電源の供給には次に述べるような新しい方法を採用している。

図4に示すように、16個のブリッジには直流定電圧電源から、ブラシB1、B2、スリップリングSR1、SR2を介して電源を供給している。定電圧電源の出力電圧を一定とすると、ブラシとスリップリング間の接触抵抗の変化によって、ブリッジに供給される電圧が変化し、測定誤差をもたらす。このため、更にブラシB3、B4を設け、リング面上の電圧を検出し、この値を直流定電圧電源にフィードバックして、この点の電圧が常に一定となるように定電圧電源の出力を制御するようにした。

ここで、ブラシB3、B4とスリップリング間の接触抵抗も変化するが、制御端子からみた定電圧電源の内部抵抗は非

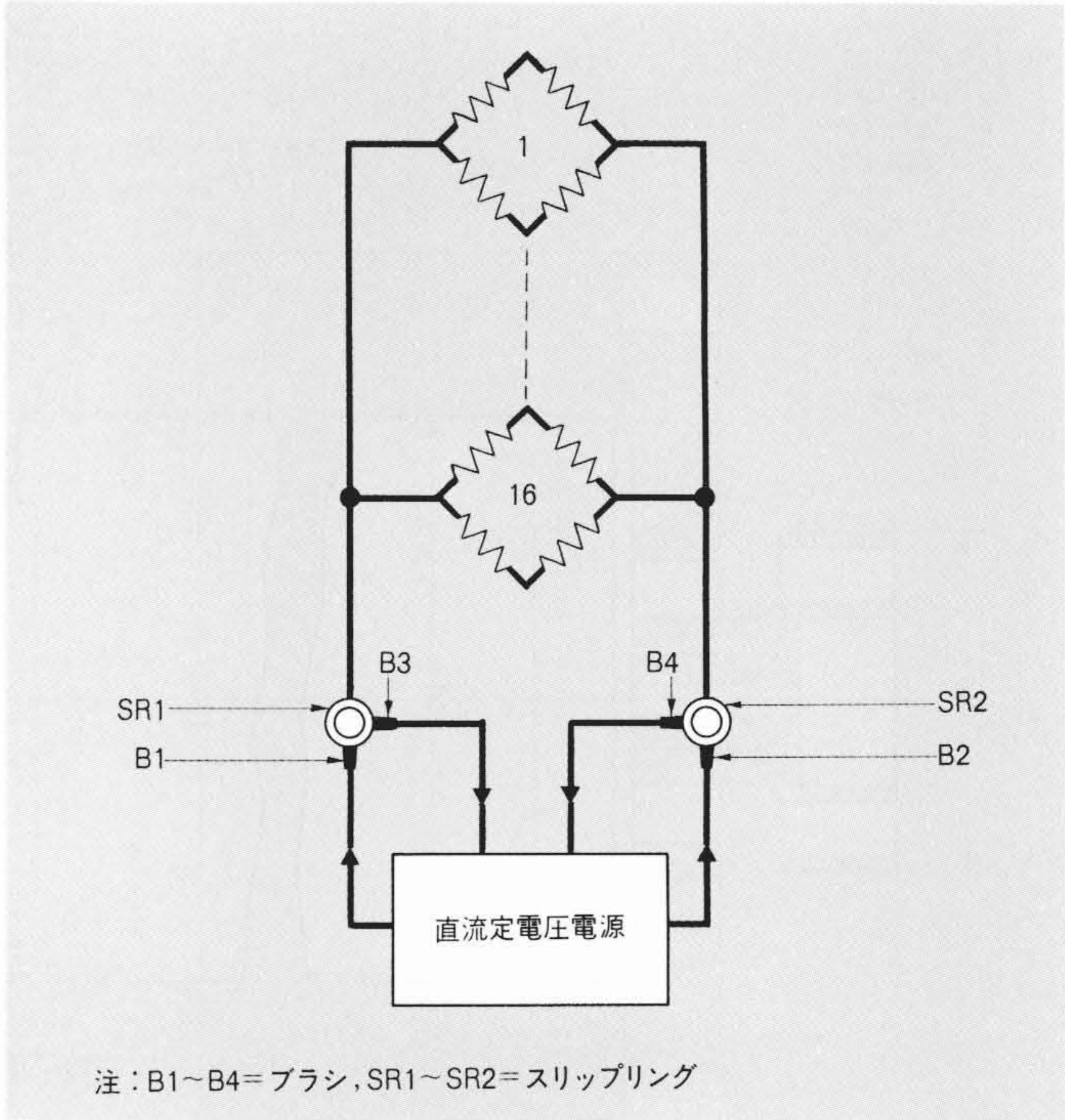


図4 ブリッジ回路への電源供給法 スリップリングを介して、ひずみ検出用ブリッジに電源を供給するとき、ブラシとリング間の接触抵抗の影響を受けない電源供給法を示す。

常に大きく、この回路には電流はほとんど流れないので、接触抵抗の変化は問題にならない。

図5は上述の電源供給法の効果を示す実験結果の一例である。この実験ではスリップリングには、接触抵抗の大きいパワー用のものを用いた。リング材は炭素工具鋼(SK3)で、外径350mm、幅18mmで回転速度は3,600rpm(周速66m/s)である。また、ブラシには銀-グラファイト合金(グラファイト25%、銀75%)を用いた。ひずみ検出用ブリッジは 120Ω のひずみゲージで、16のブリッジを並列に接続した場合、合成抵抗は 7.5Ω になるが、ここでは 3Ω の負荷抵抗で代用し、供給電圧は2Vとした。

図5(a)はリング面上の電圧をフィードバックしないで、定電圧電源の出力電圧を一定としたときの、負荷抵抗の両端に印加される電圧の変動分の波形である。また、同図(b)はリング面上の電圧を定電圧電源にフィードバックしたときの、負荷抵抗両端に印加される電圧の変動分である。

図5(a)では、約4mV_{p-p}の電圧変動が生じているが、同図(b)では、ほとんど0になっており、新しい電源供給方法が非常に効果があることが分かる。

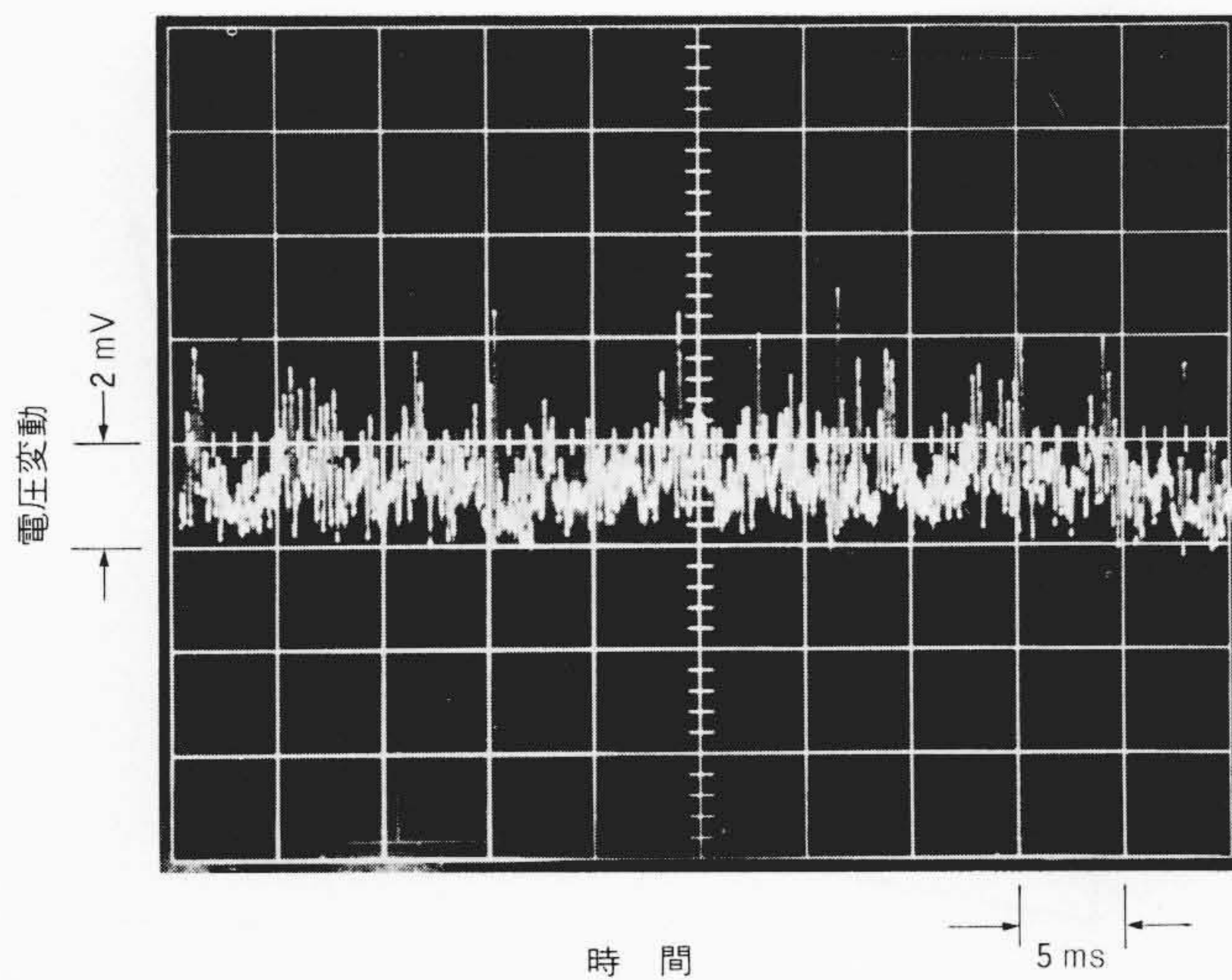
5 回転円板の遠心応力測定

前章までに述べた多点測定装置の実用性を確認する目的で、回転円板に生ずる遠心応力を実測する実験を行なった。以下、実験方法及び結果について述べる。

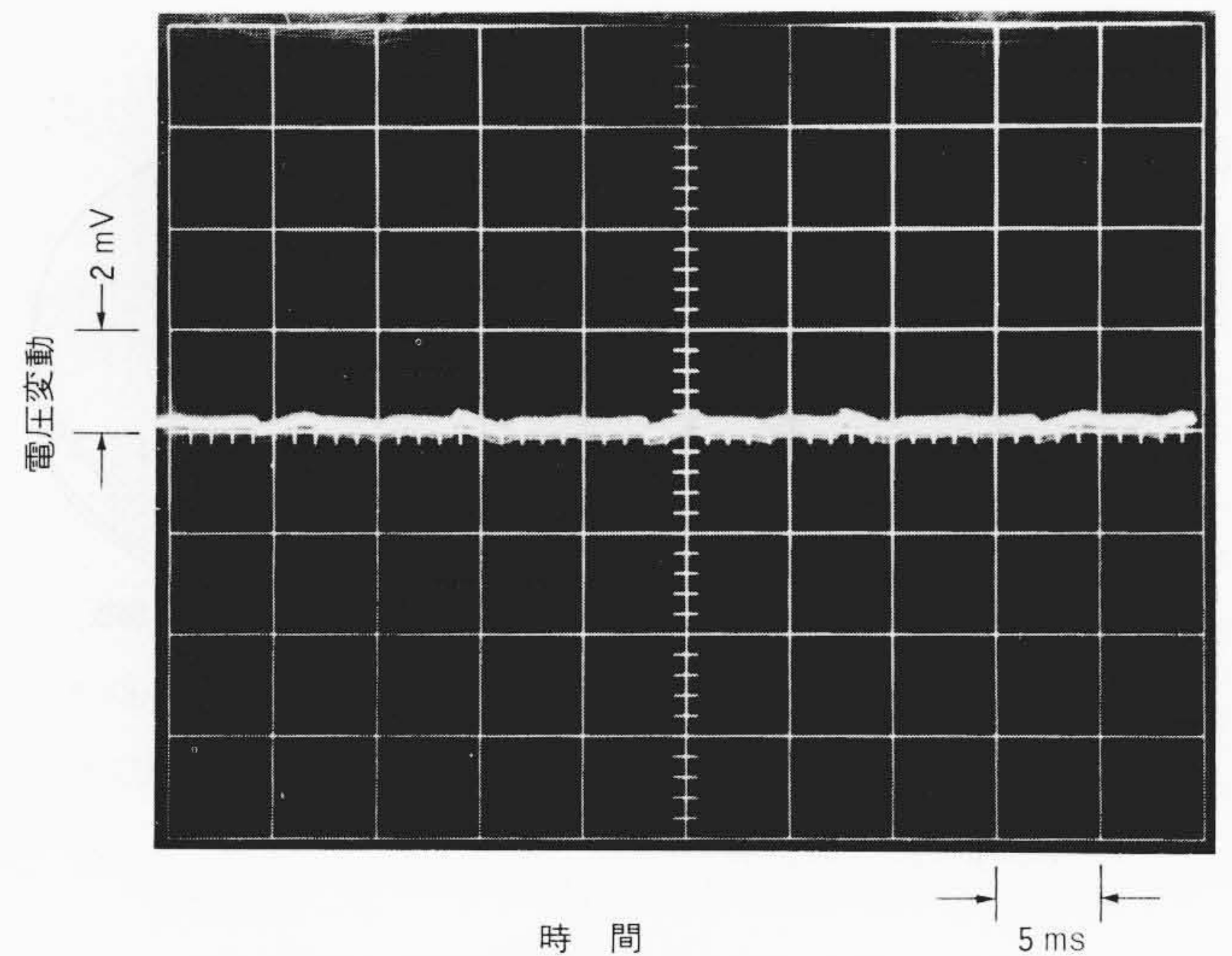
図6に、実験に供した回転円板の形状と応力の測定位置を示す。各測定点には、円板の半径方向と円周方向のひずみを検出するように直交ゲージを接着した。

これら8枚のアクティブゲージに対して、リムの側面と外周に同一ロットのゲージを24枚接着し、これをダミーゲージとして8個のブリッジを構成した。これらのブリッジの出力端子を、伝送器の入力端子に接続した。そして回転速度を

表 2 多点信号伝送器の特性		ひずみ検出用ブリッジに2.0Vの電圧を印加したときの機械的ひずみと多点信号伝送器の出力電圧との関係を示す。
項	目	特 性
平 均 感 度		1,034mV/1,000×10 ⁻⁶ ストレイン
感度のばらつき		±0.5%以下
非 直 線 性		±0.5%以下
測定値のばらつき		10×10 ⁻⁶ ストレイン相当以下



(a) リング面の電圧をフィードバックしないとき



(b) リング面の電圧をフィードバックしたとき

図5 ブリッジ回路への電源供給法の効果 ひずみ検出用ブリッジに新しい方法で電源を供給したときの効果を、従来の方法と比較して示した。

600rpm, 1,200rpm, 1,800rpm, 3,000rpmと変化させ、そのときの各点のひずみを測定した。また、従来の測定方法であるスリップリングとストレインメータを用いて、同じ実験条件のもとでひずみ測定を行なった。

図7は測定結果の一例で、アクティブゲージ1rと4tの測定結果を示したものである。同図には、多点測定装置で測定した結果と、従来のスリップリングとストレインメータとにより測定した結果を同時に示した。両者の測定値の違いは最大 5×10^{-6} ストレイン以内であり、よく一致している。この実験から多点測定装置の実用性が確認できた。

6 ターボ圧縮機用羽根車の応力測定

ターボ圧縮機用羽根車は、流体力を受けるとともに高速回転による遠心加速度を受けているため、強度上かなり過酷な状態にある。

このような羽根車を安全に使用するためには、遠心応力による延性破壊条件や、起動、停止に伴う遠心応力の繰返しによる疲労強度を明確にする必要がある。ここで、延性破壊条

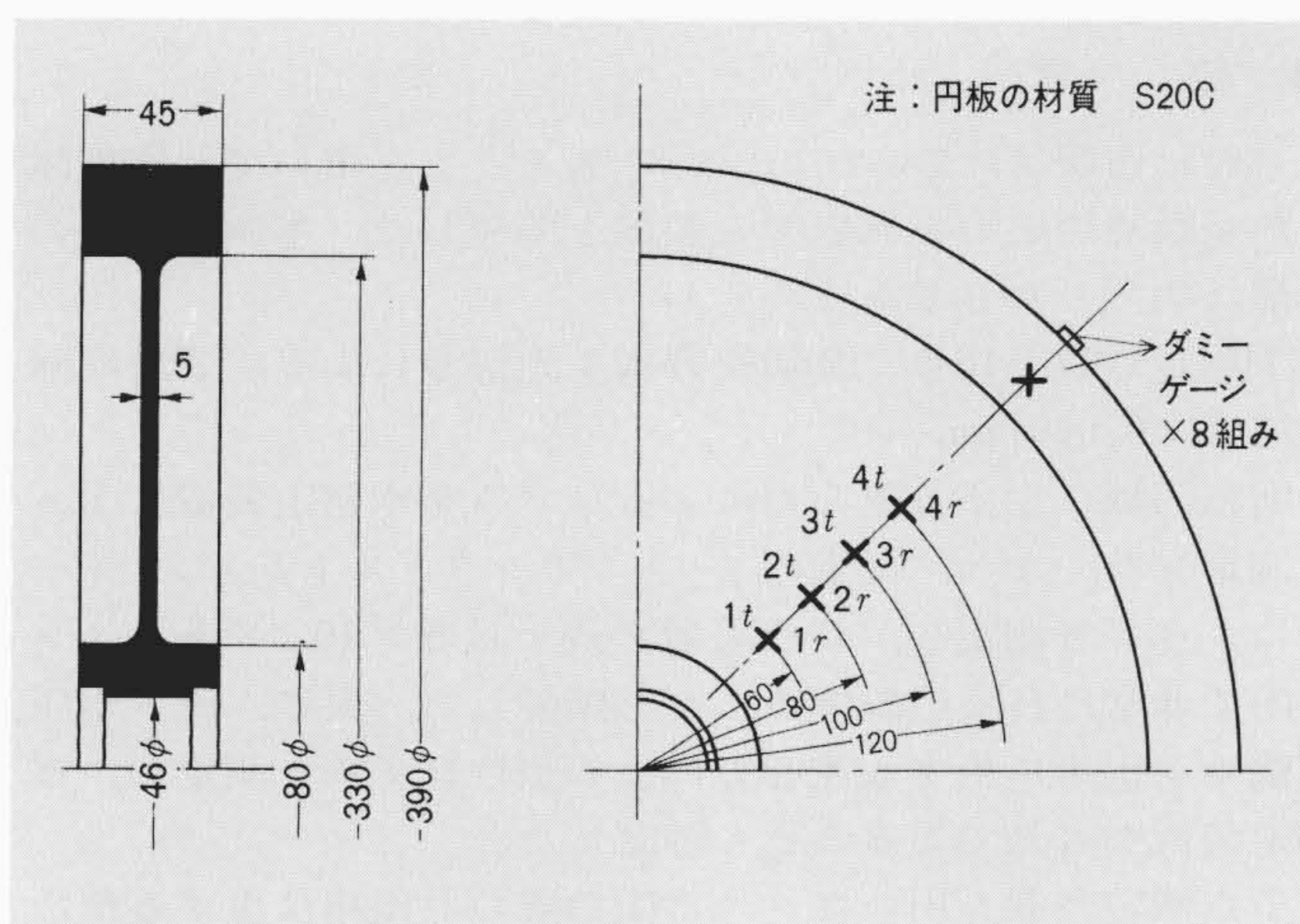


図6 回転円板とひずみ測定位置 回転速度は、最大3,000rpmまで測定した。

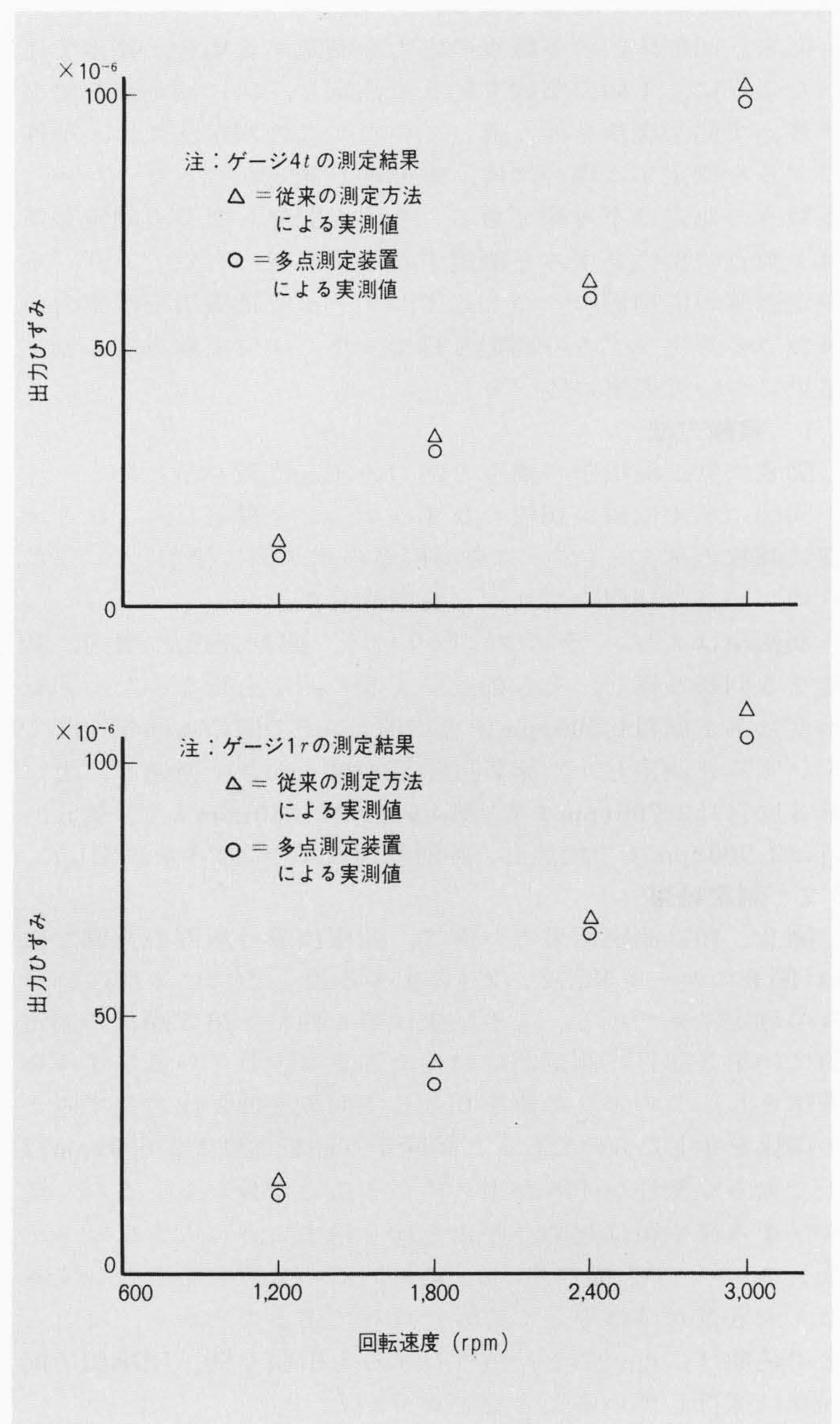


図7 回転円板に生ずる遠心力によるひずみ 多点測定装置による測定結果と従来の測定法による測定結果との違いは最大 5×10^{-6} ストレイン以内で、両者は良く一致している。

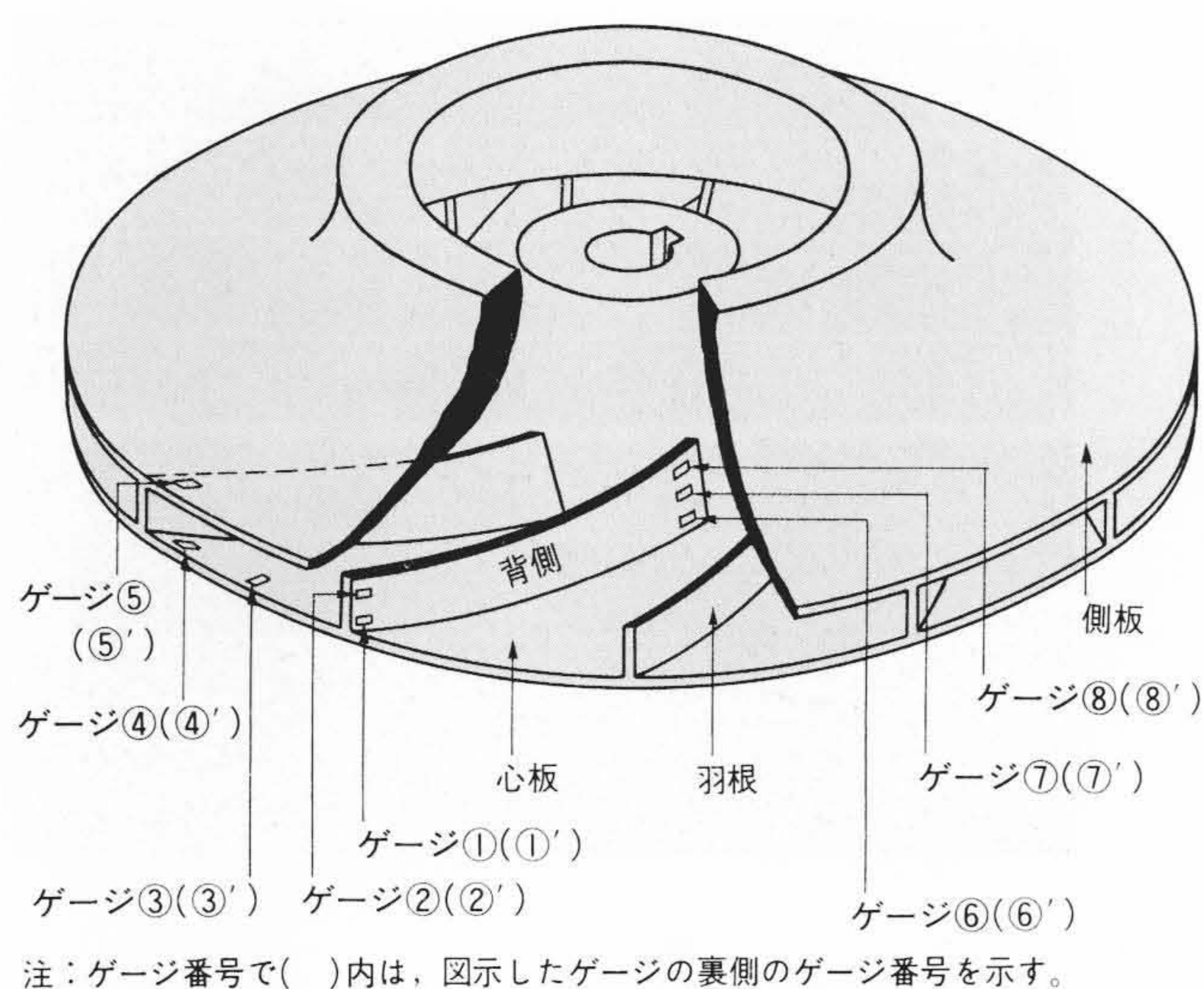


図8 羽根車の構造とひずみ測定位置 実験に供したターボ圧縮機用羽根車の構造とひずみの測定位置を示す。

件を検討するためには、羽根車内各部での塑性ひずみの発生状況を知ることが必要である。

従来、回転体内の多数点の応力を測定する場合、緒言で述べたように、1回の実験で約5点測定し、次に測定点をつなぎ替えて同じ実験を繰り返していた。この測定法では、塑性ひずみを測定する場合には、繰り返し測定ができないため、多数点の測定は不可能である。今回、開発した多点測定装置は多数点の塑性ひずみを測定する場合に特に有効であり、本測定装置の応用例の一つとして、ターボ圧縮機用羽根車内の多数点の塑性ひずみの測定を行なった。次に実験方法と測定結果について簡単に述べる。

6.1 実験方法

図8に供試羽根車の構造と応力の測定位置を示した。

同図に示す位置に16枚のひずみゲージを接着し、これとは別に48枚のダミーゲージを羽根車のボス部に接着した。これらのゲージで16個のブリッジを構成した。

羽根車はスピンテストに取り付け、回転速度の増速、減速を5回繰り返し、その都度ひずみの測定を行なった。回転速度は第1回目1,500rpmまで増速し、その間の各回転速度でのひずみを測定した。第2回目は2,200rpmまで増速し、更に第3回目は2,700rpmまで、第4回目は2,840rpmまで、第5回目は2,900rpmまで増速し、各回転速度でのひずみを測定した。

6.2 測定結果

図9、10は測定結果の一例で、羽根の最外周部の背側と腹側(図8のゲージNo. 2, 2')に生ずる遠心力による塑性ひずみの測定結果である。この結果は第4回目と第5回目の測定値で、第3回目の測定が終わったときに生じているひずみを基準とし、このときの値を0として回転速度と出力ひずみの関係を示したものである。両図から回転速度が2,600rpm以上で大きな塑性ひずみが生じていることが分かる。また、塑性ひずみ発生後は起動、停止を繰り返すごとに大きなヒステリシスループを描いている。更に、この2点に生じたひずみは、大きさがほぼ等しく符号が反対であることから、ほとんど単純曲げに近いこと、塑性ひずみも引張り側、圧縮側で同程度に進行していることなどが分かる。

このようにして、羽根車内の16点について回転速度と遠心力による塑性ひずみの発生量の関係を調べた。この実験からも多点測定装置が非常に有効であることが確認できた。

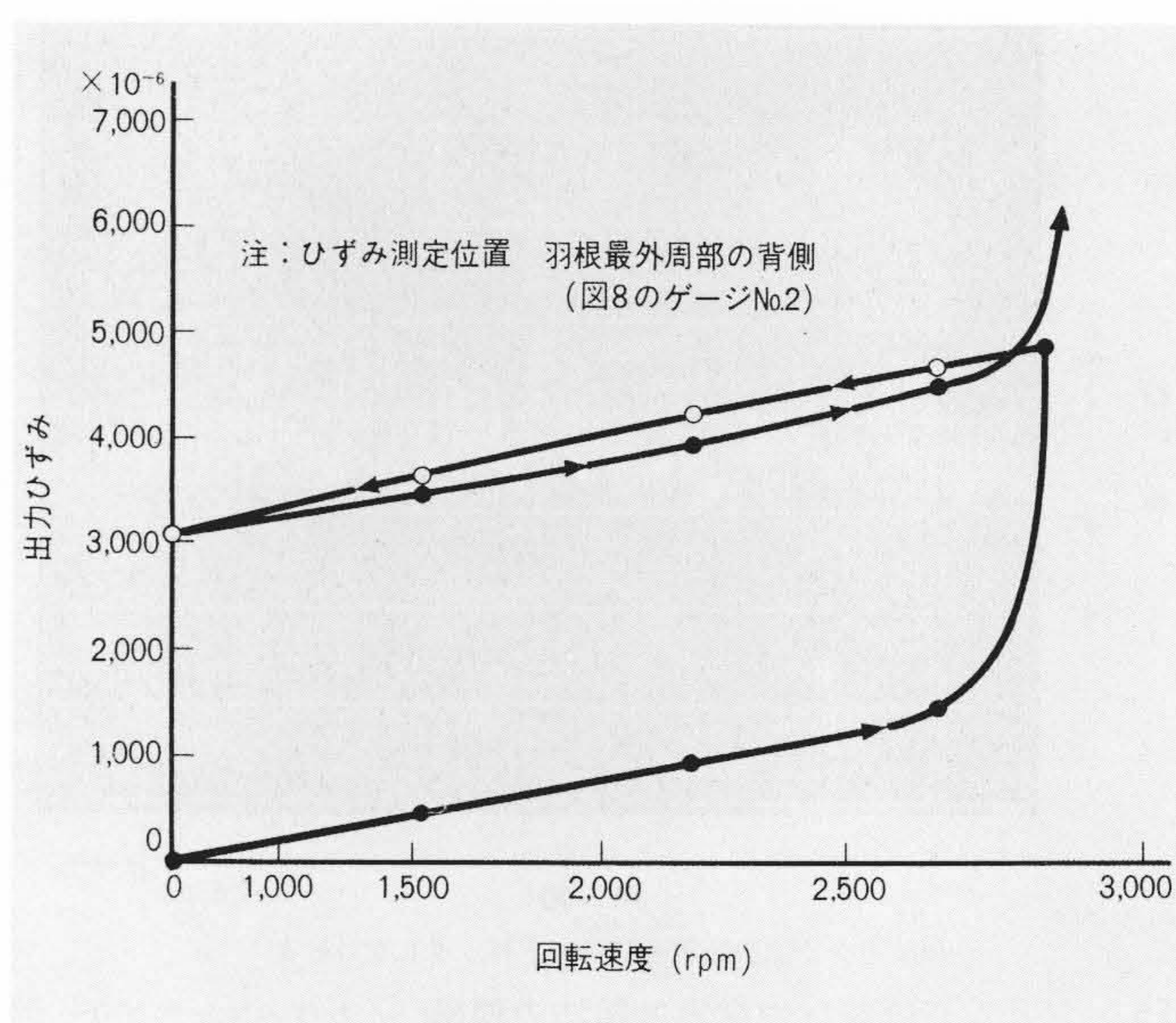


図9 羽根に生ずる遠心力によるひずみ ターボ圧縮機用羽根車の羽根の最外周部の背側に生ずる遠心力によるひずみの測定結果で、非常に大きな塑性ひずみが生じている。

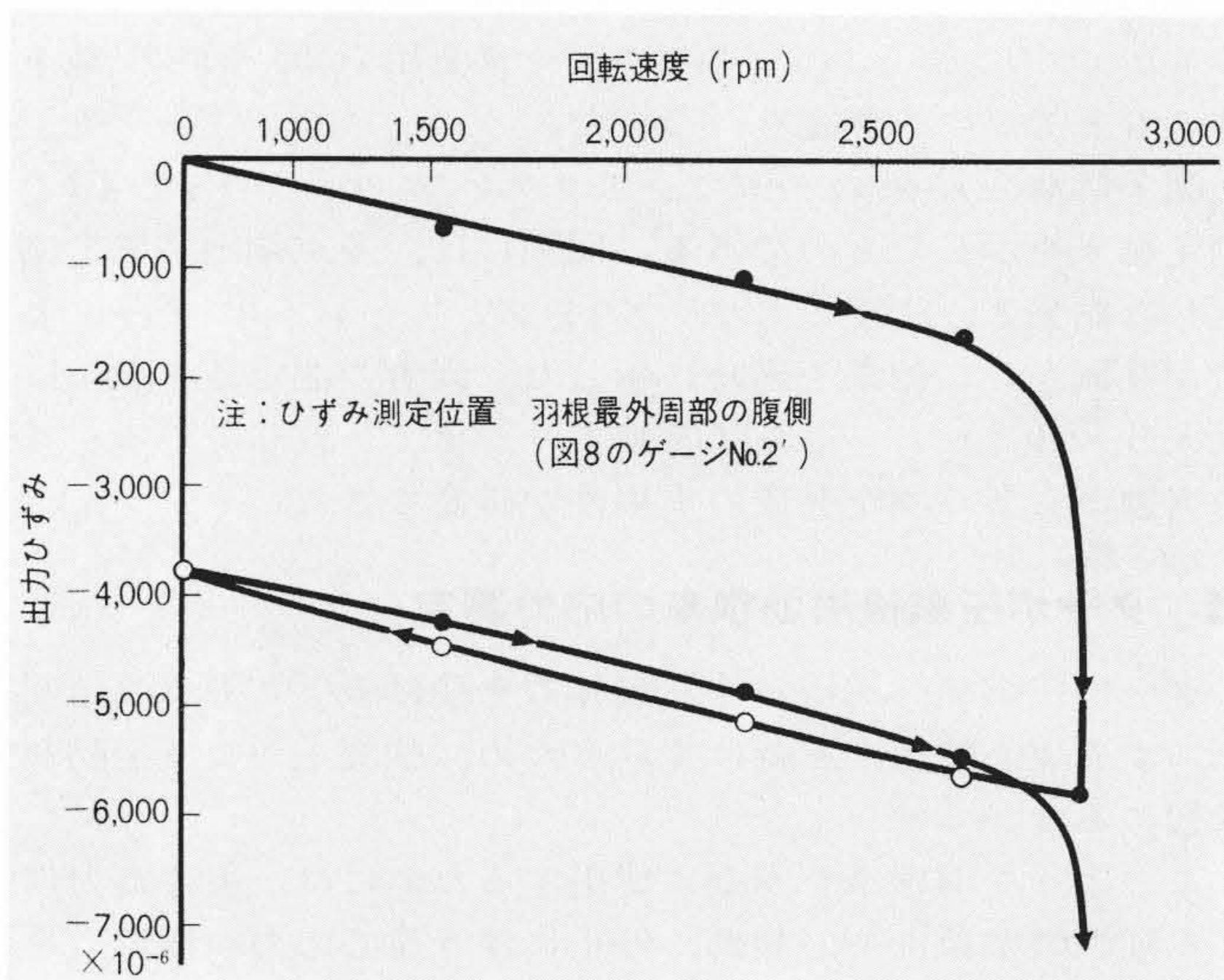


図10 羽根に生ずる遠心力によるひずみ ターボ圧縮機用羽根車の羽根の最外周部の腹側に生ずる遠心力によるひずみの測定結果で、非常に大きな塑性ひずみが生じている。

7 結 言

一般に市販されているアナログスイッチを用いて、回転体内の多数点の応力を測定する装置を開発した。本測定装置の仕様は次のとおりである。

(1)測定点数：16点 (2)切換方式：光信号による。(3)最高回転速度：6,000rpm

回転円板に生ずる遠心力によるひずみを本測定装置によって測定した。また、従来のスリップリングとストレインメータによっても測定し、この両者の違いは 5×10^{-6} ストレーン以内で非常に良く一致することを確認した。更に、ターボ圧縮機の羽根車に生ずる遠心力による塑性ひずみを測定し、本測定装置が有効であることも確認した。

多点測定装置を用いたターボ圧縮機の羽根車に生ずる塑性ひずみの測定は、日立製作所機械研究所の河合研究員に労を煩わした。ここに深謝の意を表わす次第である。