

UDC 681.325.53.2:
621.45

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-382

自動計測のための力平衡型圧力変換器の試作研究

松木正勝・鳥崎忠雄・西尾健二・高原北雄
越沼威・能瀬弘幸・山本孝正・三村富嗣雄
井上重雄・臼井弘

1974年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

| | |
|--------------------------|----|
| 1. ま え が き | 1 |
| 2. 圧力変換器の方式の選定 | 2 |
| 3. 力平衡型圧力変換器の原理と機構 | 2 |
| 4. 圧力変換器の構成 | 3 |
| 5. 圧力変換器の要素 | 6 |
| 1) 受圧ベローズ | 6 |
| 2) 平衡ビーム | 6 |
| 3) 変位検出器 | 7 |
| 4) 増幅器 | 8 |
| 5) 負荷抵抗 | 8 |
| 6) 永久磁石 | 8 |
| 7) 可動コイル | 8 |
| 8) 零スプリング | 8 |
| 9) 圧力容器 | 8 |
| 10) 電源 | 9 |
| 6. 圧力変換器入出力 | 9 |
| 1) 電源入力端子 | 9 |
| 2) 圧力入力端子 | 9 |
| 3) 出力端子 | 9 |
| 7. 圧力変換器の出力特性 | 11 |
| 1) 出力係数 | 11 |
| 2) 出力の零点変動 | 11 |
| 3) 出力の直線性 | 11 |
| 4) 出力のスパン変動 | 12 |
| 5) 出力の据付位置特性 | 12 |
| 6) 出力の応答特性 | 12 |
| 7) 温度環境試験 | 17 |
| 8) 振動特性 | 17 |
| 8. 検 査 | 17 |
| 1) 外観検査・寸法検査 | 17 |
| 2) 精度検査 | 17 |
| 3) 電源電圧変動検査 | 17 |
| 4) 零点出力変動検査 | 18 |
| 5) 漏洩検査 | 18 |
| 6) 絶縁・耐圧検査 | 18 |
| 7) 応答検査 | 18 |
| 8) ライン圧検査 | 18 |
| 9. 圧力変換器の校正方法 | 18 |
| 10. 総 合 精 度 | 18 |
| 11. あ と が き | 18 |
| 12. 附 録 | 19 |

| | 基本設計 | システム設計 | 細部設計 | 検査・検定・試験 |
|------------|------|--------|------|----------|
| 航 技 研 | | | | |
| 松木正勝 | ○ | ○ | | |
| 鳥崎忠雄 | ○ | ○ | | |
| 西尾健二 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 高原北雄 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 越沼 威 | | ○ | ○ | ○ |
| 能瀬弘幸 | | | ○ | ○ |
| 山本孝正 | | | | ○ |
| 三村富嗣雄 | | | | ○ |
| 井上重雄 | | | | ○ |
| 白井 弘 | | | | ○ |
| 東京航空計器 K・K | | | | |
| 村木俊博 | ○ | | | |
| 青木邦雄 | | ○ | ○ | |
| 浜野雅哲 | | ○ | ○ | ○ |

自動計測のための力平衡型圧力変換益の 試作研究*

松木正勝** 鳥崎忠雄** 西尾健二** 高原北雄**
越沼 威** 能瀬弘幸** 山本孝正** 三村富嗣雄**
井上重雄** 臼井 弘**

Research and Development on a Force Balance Type Pressure Transducer for Computer Aided Measurements

By Masakatsu MATSUKI, Tadao TORISAKI, Kenji NISHIO, Kitao TAKAHARA,
Takeshi KOSHINUMA, Hiroyuki NOUSE, Takamasa YAMAMOTO,
Fujio MIMURA, Shigeo INOUE and Hiroshi USUI

A new force-balance type pressure transducer was designed and developed for computer aided data processing system of jet engine component tests. Cost reduction and maintenance free mechanism of the transducer by simplifying the structure were of our main interests at the design stage. Through several environment tests and endurance tests, the characteristics of this transducer were proved to be satisfactory enough for the engine component test applications. As a great deal of cost reduction of the products has been achieved, economical and simultaneous acquisition of multi-pressure data is now possible by using one transducer to one pressure hole. Hence, the time required for testing an engine as well as its components is shortened and the time for data processing by a computer is also reduced. This paper presents details of the construction of the transducer and the results of the performance tests.

1 ま え が き

航空宇宙技術研究所では、さきにV/STOL機用リフトジェットエンジンの研究試作を開始するに当り、電子計算機HIPAC-103を用いたデータ処理システムを開発し、エンジンの研究試作の期間の短縮をはかった。しかしながら、エンジンの構成要素である圧縮機、燃焼器、タービン等の試験について多数

の測定点の同時計測を行なう必要があるために計測装置の費用が膨大となり自動化の実現が遅れていた。中でもこれらのエンジン要素試験に共通して多用される圧力変換器については安定性、精度、使い易さに優れ、且安価なものがなく計測の自動化を進める上で最大の隘路となっていた。この問題を解決するためその第一段階とし計算機を用いることを前提に精度、安定性を犠牲にすることなく機構を簡素化した比較的安価な圧力変換器をエンジン要素計測のために試作した。この圧力変換器の完成により各圧力測定点ごとに適切な測定範囲の圧力変換器を使用することが出来、経費の点

* 昭和49年2月14日受付

** 原動機部

からも可能となり、エンジンおよび要素の試験に要する時間の大幅な短縮と測定精度の向上が可能となった。本報告はこのような目的で試作した圧力変換器の機構ならびに実用化のための試験結果について述べたものである。

2 圧力変換器の方式の選定

エンジンの要素試験における計測では、試験機により測定対象、測定点数は異なるが、フロントファン、多段圧縮機での圧力計測点は50点以上が必要となるので、一台当りの圧力変換器の価格が安くならない。

圧力を電気信号に変換する方式として各種の方式があるが、最も一般的なものとして受圧板、空ごり、ブルドン管等の変位をストレインゲージ、差動トランス、ピエゾ、半導体などにより変位に比例した電気信号に変える方式があるが、そのいずれも復調器、増幅器、チャージ増幅器等のシグナルコンディショナにより電算機でデジタル処理するに適する電圧まで増幅する必要がある。多点の計測を計算機で行なう場合、増幅器は測定点数に応じて設けなければならないし、その各々についてドリフト、ゲイン調整をその都度行なわねばならず又精度の維持のためには計測の担当者にとって負担が大きい。一方、力平衡型圧力変換器は原理的に精度の高い直流増幅器を必要とせず、容易に高出力が得られる。原動機部においては昭和38年度よりジェットエンジンの計測に使用しており、この方式の圧力変換器の安定性、精度が極めて高いことが確認されているがこの方式の圧力変換器は極めて高価であり多数備えることが困難で多点の計測に適当でなかつ

た。

本試作研究はこれらの点を解決するために行なったもので高精度を維持しながら低価格を実現したものである。その方法として、力平衡型圧力変換器としては既存のもの小型化、時定数の改善をはかり、安定性、信頼性を従来通りとした。零調整、ゲイン調整機構を全く省略して電子計算機側のソフトウェアで行うものとした。受圧ペローズの変位は差動トランス型変位検出器により電気信号に変換される。この出力は安定性の高い増幅器で増幅した後復調され圧力に比例した直流出力として取り出されるようにし、高い安定性を与えている。又ユニット構造としてラック電源で24点の圧力変換器が組込めるようにした。

3 力平衡型圧力変換器の原理と機構

図1に示す様に受圧ペローズ内外に圧力差 ΔP が生ずるとA点に力Fが生じ、平衡ビームが変位する。この変位が変位検出器(差動トランス)で検出され、増幅器で増幅し、同期整流して得られる直流電流Iが平衡ビームに取りつけられた復元コイルと負荷抵抗に流れる。最終的に復元コイルによる電磁力と受圧ペローズによる力は平衡する。この系統は零型サーボ系を構成し、平衡状態では常に

$$I = C \cdot F$$

但し Cは定数

が成立し、ループゲインが充分大ならば、平衡ビームの変位量は極めて僅かですみ、かつ、バネ定数(受圧ペローズ、零設定スプリング、支点板バネ)、変位検出器、増幅器のゲイン変動の影響を受けることも少なく高精度の変換が可能となる。

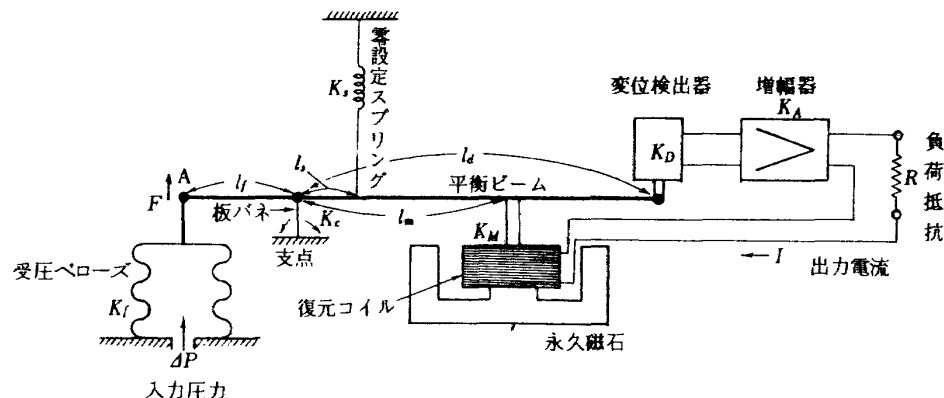


図 1 力平衡型圧力変換器の原理図

4 圧力変換器単体の構成と ユニットの構成

圧力変換器単体の外形寸法は図2に示す。なおその前面および裏面の写真を図3、図4に示す。これらの図から分る様に前面には出力係数や測定個所の番号を記す用紙入れと圧力変換器の製品の銘板の他に検定時に出力を取り出すチェック端子を設けた。又裏面には測定個所の番号を記す用紙入れ、電源の入力端子、圧力の入力端子、出力端子、接地端子、フューズ箱と入出力端子記号板を設けた。この圧力変換器単体の側面には内部に塵が入らない様に防塵カバーが取り付けられている。この防塵カバーを取り去ると内部は図5に示す

様に圧力変換器の機構部(図6)と増幅器(図7)が収められている。この圧力変換器単体24個を横4列、上下に6段計24個を標準ラックに組付けその電源を下部に収納した。ユニットの全体図を図8に示す。なおその前面および裏面の写真を図9、図10に示す。この圧力変換器ユニットを移動が容易になる様にキャスタと釣り下げ用のフックを取り付けた。なお計測時には固定しておくことが好ましいのでユニット固定用の固定ボルトを設けた。

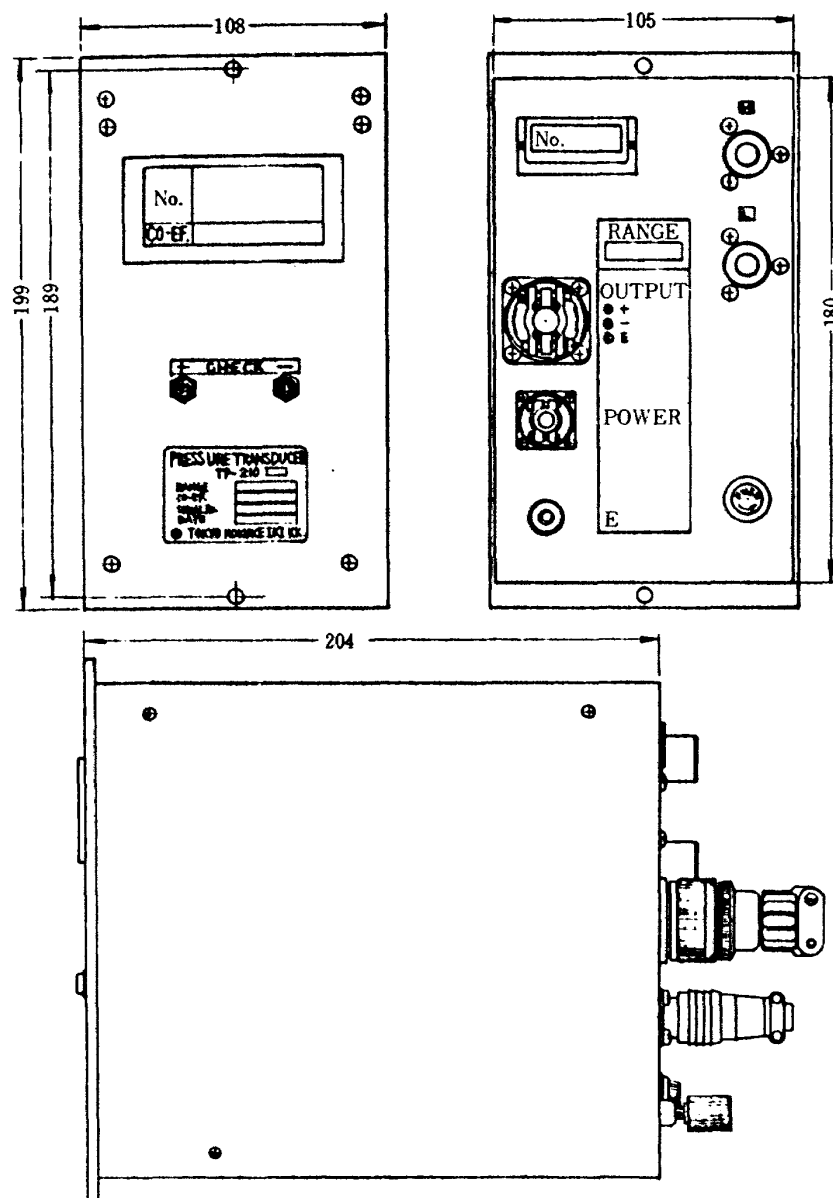


図 2 圧力変換器単体全体図

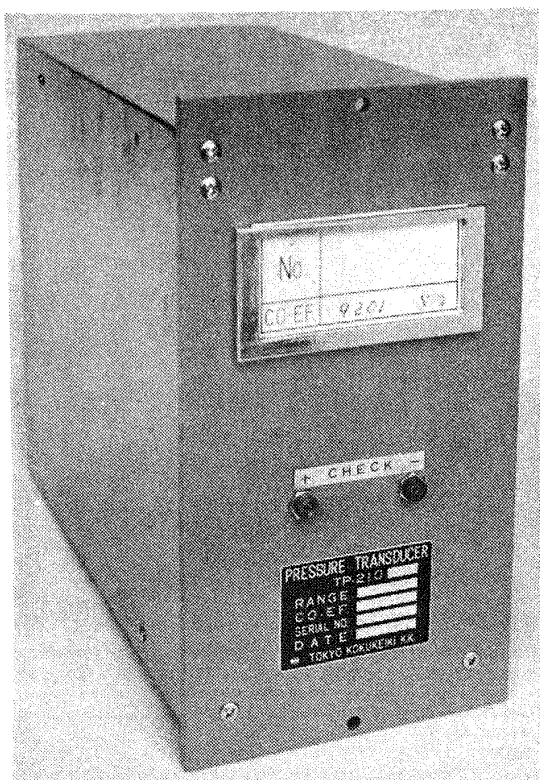


図 3 圧力変換器単体の前面部



図 4 圧力変換器単体の(ゲージ圧)の裏面部

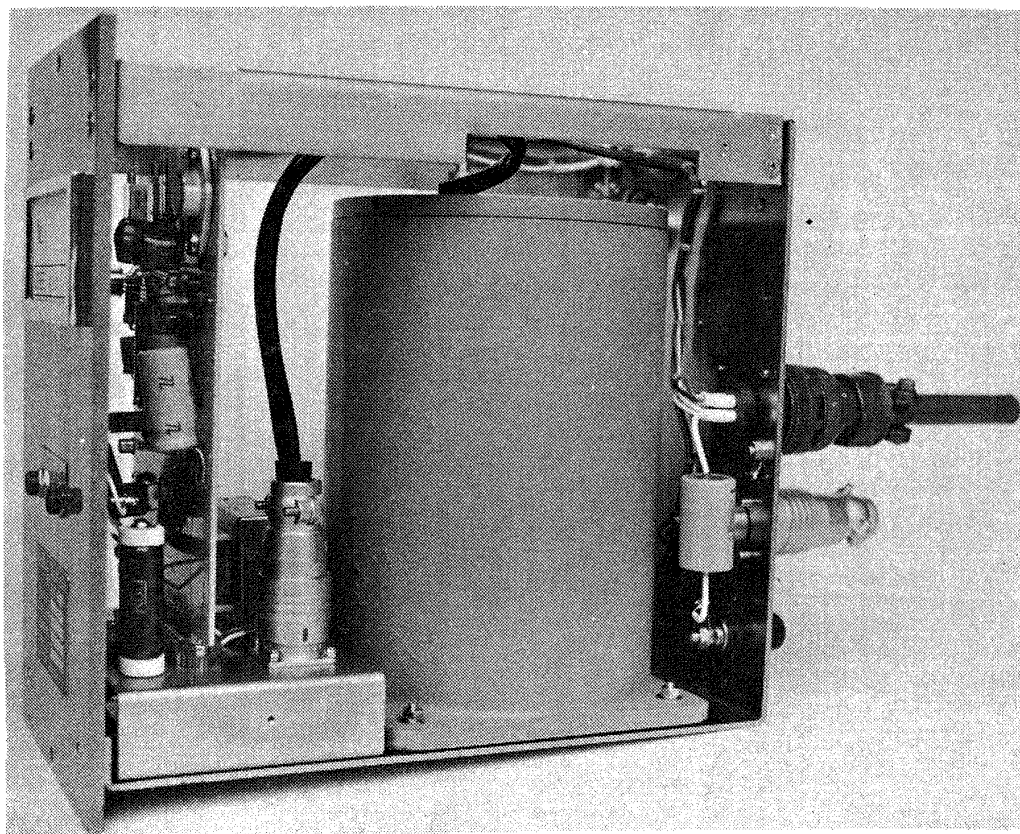


図 5 圧力変換器単体の内部側面部

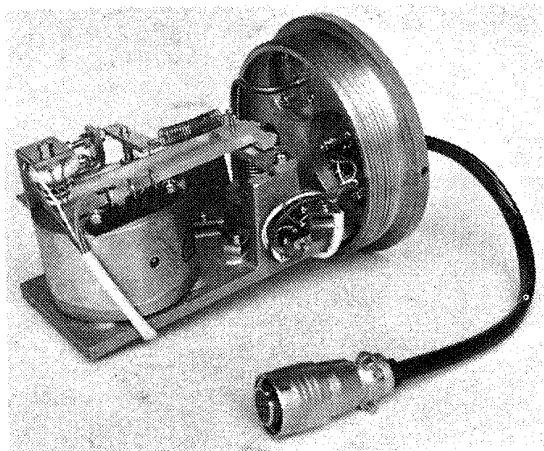


図 6 圧力変換器の機構部

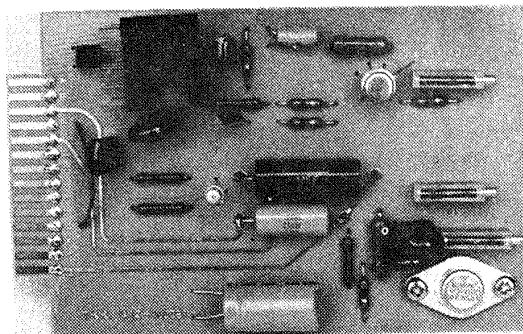


図 7 圧力変換器の増巾部

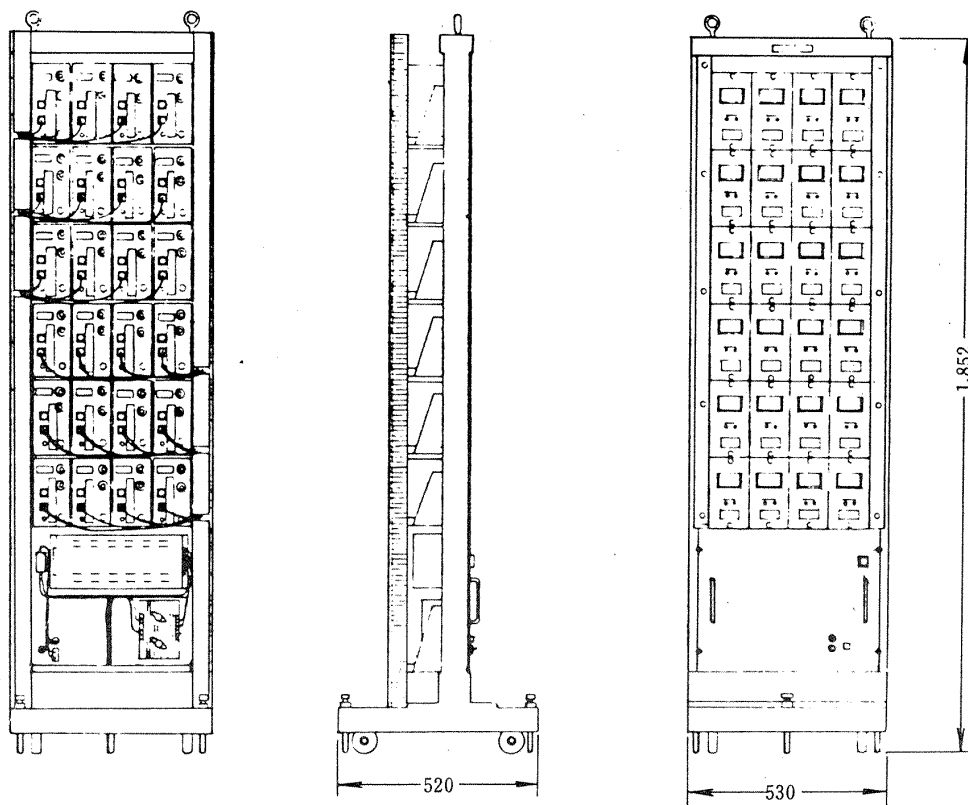


図 8 圧力変換器ユニットの全体図

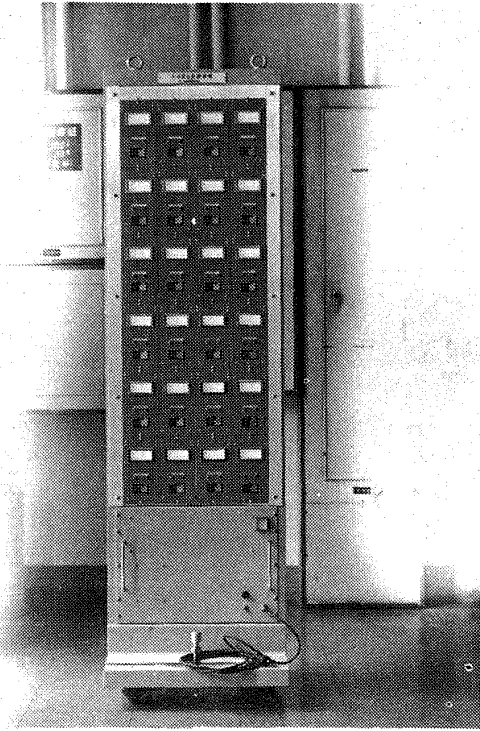


図 9 圧力変換器ユニットの前面部

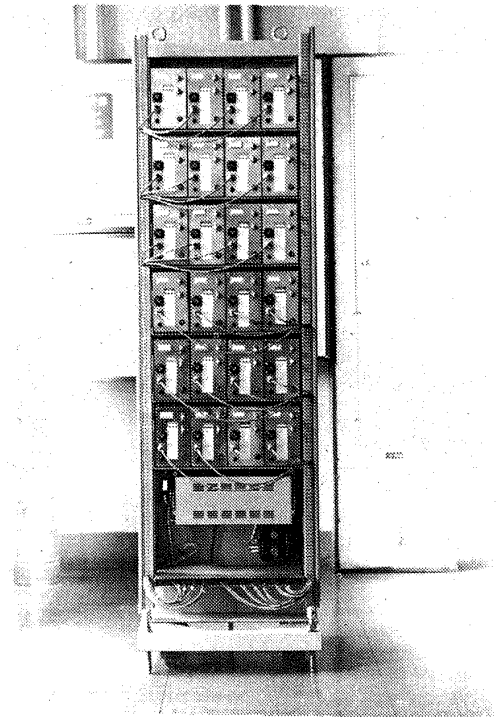


図 10 圧力変換器ユニットの裏面部

5 圧力変換器の構成要素

本圧力変換器は下記に述べる受圧ベローズ, 平衡ビーム, 変位検出器, 増幅器, 負荷抵抗, 永久磁石, 可動コイル, 零設定スプリング, 圧力容器, 電源等から構成されている。これらは出力特性を安定化するために, 主要部品のうち電源部を除いてエージングを行なっている。特に永久磁石は上記のエージング時間の倍以上費している。

5.1 受圧ベローズ

力平衡型のダンピングを考えた時に, 受圧ベローズの

バネ定数はヒステリシスとダンピングに対する影響を除くためには出来る限り小さいことが好ましい(付録参照)。又, 一方耐圧の問題と製造上の問題から板厚の最小値が制限されるので表1に示す様に受圧ベローズの規格を決定した。

5.2 平衡ビーム

平衡ビームは図11に示す様に平衡状態において下記に示す式が成り立つ

$$F_1 l_1 = F_2 l_2$$

ここで F_1 は可動コイルの長さでマグネットの空隙磁束密度と可動コイルを流れる電流によつて決まる力で

| | 有効面積 cm^2 | 肉厚 mm | 山数 | 外径×長さ mm | 容積 cc | 材質 | 1山当り弾性率 Kg/mm |
|-----------|-------------|---------|----|------------|---------|-----|-----------------|
| 受圧ベローズ(A) | 5.092 | 0.08 | 9 | 30φ×29 | *1.20 | 磷青銅 | 1.40 |
| (B) | 2.689 | 0.08 | 10 | 22φ×21 | *5.0 | " | 7.70 |
| (C) | 1.463 | 0.10 | 8 | 17φ×17 | *1.8 | " | 3.30 |
| (D) | 0.746 | 0.07 | 8 | 12φ×13 | *0.8 | " | 6.45 |
| (E) | 0.330 | 0.08 | 8 | 8φ×9 | 0.3 | " | 18.00 |

* ゲージ圧の場合はカラーを入れて容積を小さくしてある。

表 1 受圧ベローズの規格

あり、 F_2 は受圧ペローの有効断面積と測定圧とによつて決まる力である。なおこの平衡ビームの全長は66 mm であるが l_1 , l_2 の比は各圧力範囲によつて設定することが出来る。更にこの l_2 の長さの精度は、 $1/100$ の加工精度を必要としている。この平衡ビームを用いることにより圧力範囲は $0 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ から $0 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ までの広範囲の圧力に対して適応できる様に設計を行なつた。平衡ビームは重量の軽いことや温度により変形しにくいことを考慮して材質は高力アルミを使用し、形状も剛性の高い様に設計した。平衡ビームの支点は図1に示すように板パネを用いており、系のループゲインを大きくする、(付録参照) 支点位置の変化をおさえる等の理由でパネ定数の小さい板パネを用いる必要があり、板厚1 mm のベリリウム材を用いた。

5.3 変位検出器

変位検出器としての差動トランスは零平衡方式のため直線性を重視せず、下記の点に重点を置いて設計を

行なつた。

- 1) 零位置における残留電圧(零電圧)が低いこと。
- 2) 零位置の近傍の感度が高いこと。
- 3) 周波数、温度変化による零位置の変動が少ないこと。
- 4) 慣性によるハンチングを防ぐため、コアの重量を軽くし、小さいものとする。
- 5) 消費電力の少ないこと。

以上の観点から変位検出器の仕様を表2の如く定め

| | | | |
|--------|----|-------|------------------------|
| 一次側コイル | ; | 線径 | 0.12 ϕ |
| | | 巻数 | 150 T |
| 二次側コイル | ; | 線径 | 0.05 ϕ |
| | | 巻数 | 500 T |
| コア | ; | 材質 | 電磁軟鉄 |
| | | 寸法 | 4 ϕ \times 5 mm |
| 感度 | | | 0.37 mV/ μ m |
| 残留電圧 | | | 1.3 mV (実効値) |
| | 但し | 1次側電圧 | 1.38 V Ac |
| | | 周波数 | 10 K Hz |

表 2 変位検出器の仕様と特性

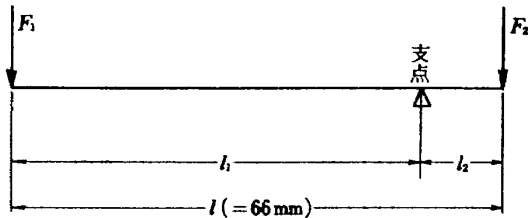


図 11 平衡ビームの力のバランス

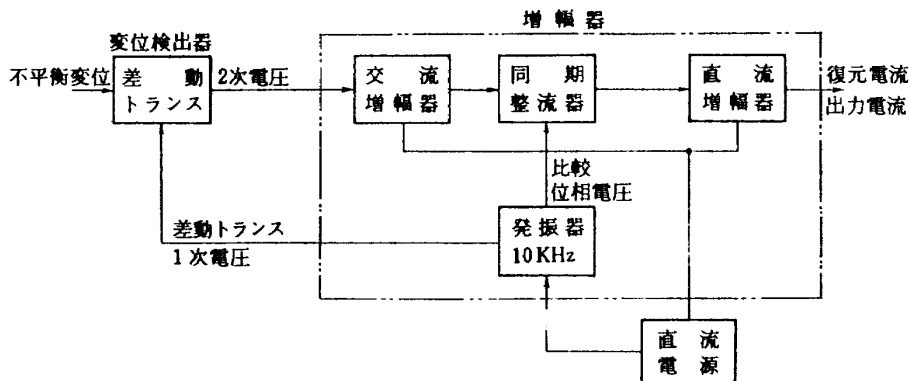


図 12 変位検出・増幅系統のブロック図

5.4 増幅器

図12において、約10KHzの発振器の出力が、力平衡機構に取りつけられた差動トランスに与えられ、平衡ビームに固定されたコアの変位を検出する。差動トランスの出力は、交流増幅器で増幅され、同期整流器で整流される。同期整流器の出力電流は直流増幅器で更に増幅され、復元電流及び出力電流として復元コイルと負荷抵抗を流れ、力平衡機構の平衡がとられる。この増幅器の小型化、安定化をはかるために、直流増幅器にIC化された演算増幅器を用いている。

5.5 負荷抵抗

負荷抵抗に不平衡変位に比例した出力電流を流しその電圧を検知して、出力電圧としている。これに使用している負荷抵抗値は150Ωの固定抵抗と50Ωの巻線型可変抵抗で構成していたが、振動対策上、巻線型可変抵抗は好ましくないので200Ωの金属皮膜固定抵抗を使用した。この抵抗器は変換器の系全体の温度特性を考慮して、温度特性は-100PPM/℃の温度抵抗係数をもつものを採用した。

5.6 永久磁石

永久磁石の磁束の変動は直接出力に影響するので高い保磁力と強い残留磁気を有し、磁気エネルギーの大きい磁石を選ぶ必要がある。このことを考慮して、ここで使用する永久磁石として表3に示すALNICO #5

を採用した。なおこの永久磁石とヨークの形状を図13に示す。

5.7 可動コイル

復元力を出来る限り大きくするために、可動コイルの巻線に、出来る限り細い銅線を使用し、巻数を増した。他方可動コイルのボビンの加工上の問題、空隙の巾、巻線の抵抗、電源電圧の関係から600Ω以下になるようにした。表4にその仕様を示す。

5.8 零設定スプリング

零設定スプリングは支点と復元コイルの間にとりつけ零点の出力電圧が約1Vになる様に調整するためのものである。この零設定スプリングは零点調整後、変動してはならないので、本器では線径0.5φのニッケルスパンC材を熱処理しバネ特性を安定させたものを採用し、零点調整後、調整用ネジ等の可動部分は全て振動等によつて動かない様にロックした。

5.9 圧力容器

圧力容器の材質はアルミ鋳物製で差圧型と絶対圧型は圧力容器内と受圧ベローズ間の差圧を測定するケース差圧方式を採用した。このため圧力容器の気密性を保つために、ベーク真空含浸を施し、更に、ケースと蓋、電気信号の入出力端子、圧力用接座のシールはOリングを採用した。

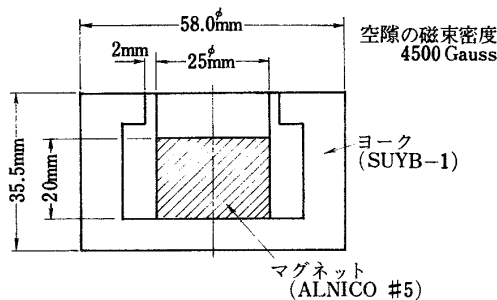


図13 永久磁石とヨークの形状と特性

| | | |
|----------|-----|-------------------------|
| 最大エネルギー積 | B×H | 45×10 ⁶ G・Oe |
| 残留磁気 | Br | 11,500 G |
| 保磁力 | Hc | 620 Oe |
| 飽和磁化力 | Hs | 3,000 Oe |
| 磁気方向性 | | 異方性 |

表3 ALNICO #5の特性

| 線材 | 巻数 | 抵抗値 | 復元力 | 使用圧力範囲 |
|------------------|------|-----|---------|--|
| エナメル電線2種 (0.05φ) | 200T | 150 | 40.7g重 | 0~1,000mmAq |
| " | 400T | 300 | 81.4g重 | 1000~2000mmAq |
| " | 500T | 375 | 101.7g重 | 0.4~2.0Kg/cm ² 3.0Kg/cm ² |
| " | 600T | 450 | 122.1g重 | 2.5Kg/cm ² 4.0~5.0Kg/cm ² |

復元力は最大復元力を示し出力電流が50mA流れた時の値

表4 可動コイル巻線仕様

5.10 電 源

電源は外部供給方式で圧力変換器単体24台分の容量を持つたものである。この電源は標準ラックの下部に取りつけられて、ケーブルを介して、各々一台づつに供給する様にした。この電源の仕様は表5に示される様に、48V用と±12V用の直流安定化電源よりなっている。

| | |
|--------------|------------------------|
| 48V用直流安定化電源 | |
| 入力電圧 | 80V~110V 50, 60Hz |
| 安定精度 | ±1.0% |
| 直流出力 | 48V 0~4.0A |
| 負荷変動 | 3V(0~100%) |
| リップル電圧 | 0.3V(実効値)以下 |
| 大きさ | 185×380×143mm |
| ±12V用直流安定化電源 | |
| 入力電圧 | 90~110V 50, 60Hz |
| 入力変動 | 0.05%以下(100V±10V(対して)) |
| 直流出力 | ±12V ±400mA |
| リップル電圧 | 3mV p-p以下 |
| ドリフト | 0.5%(8H)以下 |
| 大きさ | 90×120×75mm |

表 5 供給電源の仕様

6 圧力変換器の入出力端子

圧力変換器の入出力は電源、圧力、出力電圧であり、それぞれ接栓、接手により容易に接続できるようにした。

6.1 電源の入出力端子

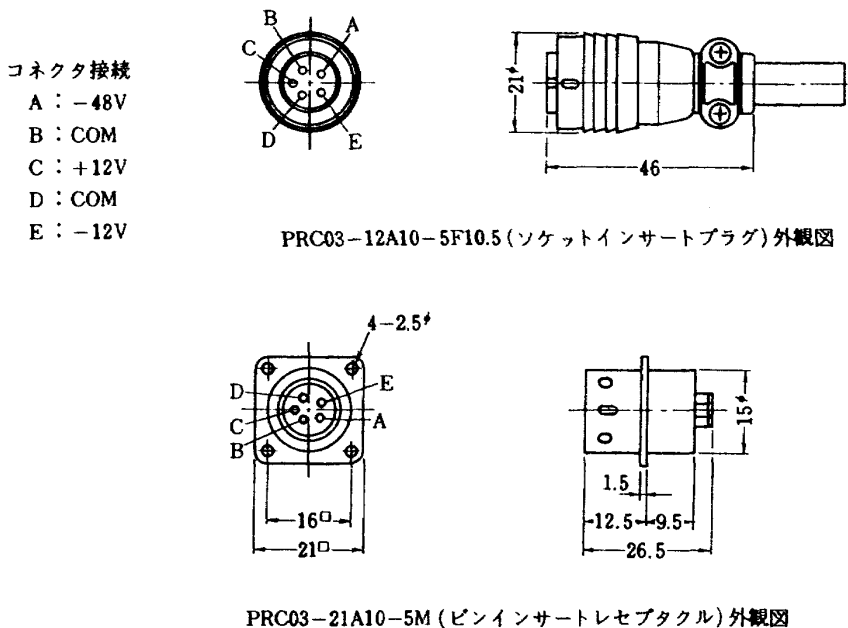
圧力変換器ユニットの電源入力端子は100Vの通常端子により入り、圧力変換器単体の電源入力端子は図14に示すコネクタを使用し、48V(DC)、±12V(DC)を供給している。

6.2 圧力入力端子

圧力入力端子は圧力容器、受圧ベローズから導かれた圧力配管用銅管に接座を溶接し、ネジで圧力変換器単体の裏面に取りつけた。又この接座に圧力配管が出来る様になつているが、図15に示すビニール管(8φ-12φ)の圧力接手を取りつけることが出来る様に考慮した。接座、接手の個数は、ゲージ圧力計、連成型圧力計には各々1個、差圧力計、については圧力入力端子2個を設けてある。

6.3 出力電圧端子

出力電圧は圧力変換器単体裏面からキャノンブラ



PRC03-12A10-5F10.5(ソケットインサートプラグ)外觀図

PRC03-21A10-5M(ピンインサートレセプタクル)外觀図

コネクタ定格

| 品 名 | 極数 | 電線接続孔径 | 電 圧 | 電 流 | 耐 電 圧 | コード取付寸寸法 |
|--------------------|----|-----------|--------|------|---------|----------|
| PRC03-12A10-5F10.5 | 5 | 1.2φ (mm) | AC350V | 7.5A | AC1000V | 9φ (mm) |
| PRC03-21A10-5M | 5 | 1.2φ | AC350V | 7.5A | AC1000V | |

図 14 電源入力端子

グにより取り出すことが出来るが一方圧力較正を行な 能となつている。
 う時には前面のチェック端子により取り出すことも可

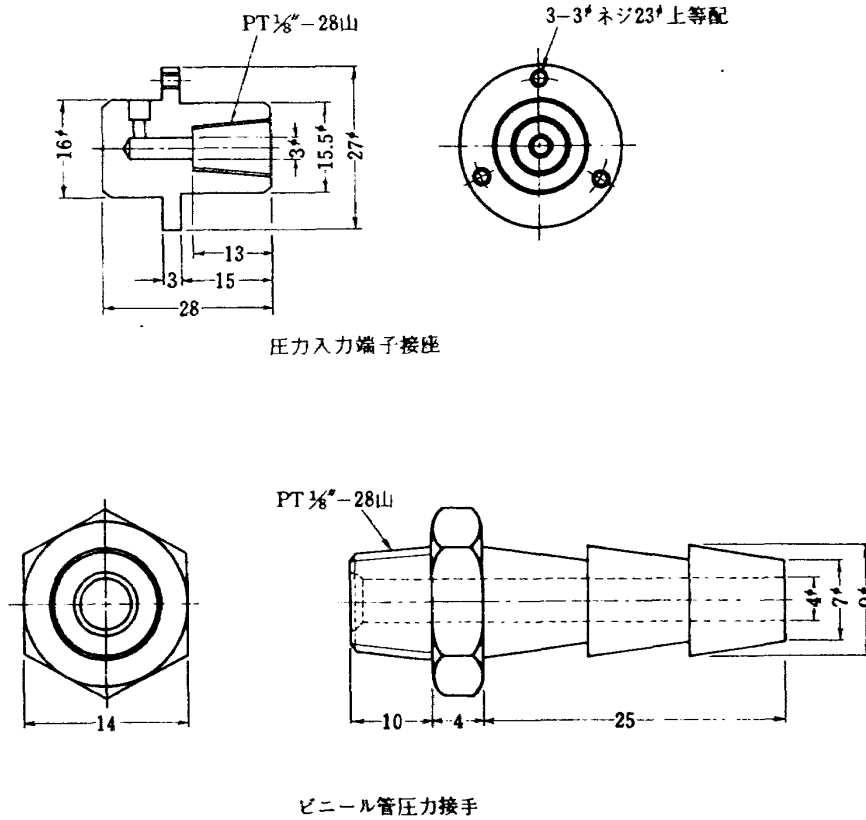


図 15 圧力入力端子

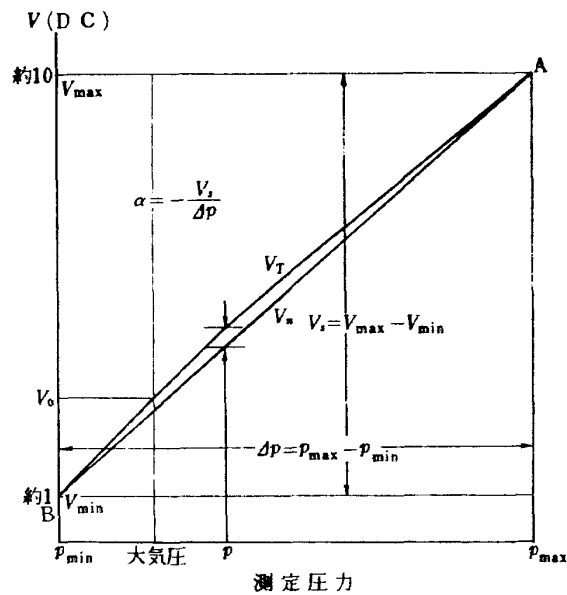


図 16 圧力変換器の出力特性

7 圧力変換器の出力特性

7.1 出力係数

本圧力変換器は電子計算機により処理することを前提とし、機構の簡素化をはかっているため、零点、ゲインの調整機構をもっていない。このため通常の計測器の校正表を各変換器につけることを止め、圧力と出力電圧の比、出力係数を表示し、取扱いの簡素化をはかった。測定圧力と出力電圧の関係は図16に示す様に計算式は下記の通りである。

$$a = \frac{V_{max} - V_{min}}{P_{max} - P_{min}}$$

- a ; 出力係数
- P_{max} ; 最高測定圧
- P_{min} ; 最低測定圧
- V_{max} ; 最高測定圧時の出力電圧
- V_{min} ; 最低測定圧時の出力電圧

7.2 出力の零点変動

測定圧入口を大気開放した時の出力電圧(図16にV₀で表す)の変化を零点変動と呼ぶ。この零点変動があまり大きいことは好ましくない。圧力変換器に電

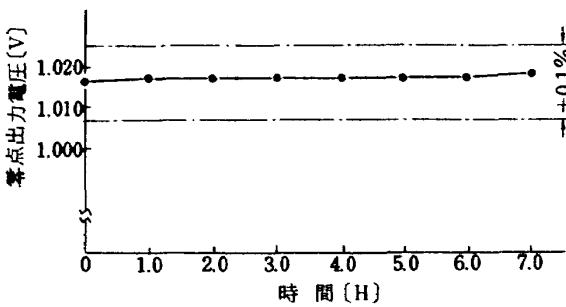


図 17 零点変動

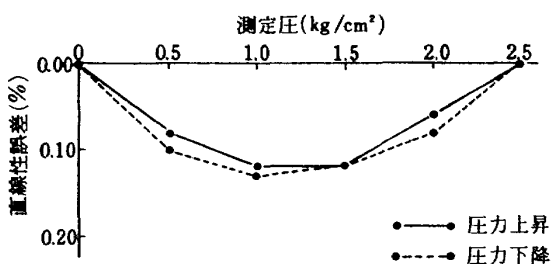


図 19 直線性誤差の一例

源投入直後から7時間のこの零点の変動を図17に示す。又、抜取検査した零点変動の台数分布を図18に示す。この縦軸は検定した圧力変換器の台数を取り、横軸には下記に示す零点変動誤差を取つて示す。

$$\tilde{V}_0 = \frac{V_{on} - V_{oo}}{V_s} \cdot \times 100$$

\tilde{V}_0 ; 零点変動誤差(% of F.S.)

V_{on} ; n時間後の零点出力電圧

V_{oo} ; 電源投入直後の零点出力電圧

V_s ; 出力電圧のスパン電圧

この図から分る様に±0.02%以内に全体の86%が含まれているが、本器のデータ処理の性格上、ここでの規格は±0.2(% of F.S.)にした。

7.3 出力の直線性

図17に示す様に最高、最低測定圧力時の値A点、B点を通る直線からの測定誤差の最大値を出力の直線性最大誤差と呼ぶ。即ち直線性誤差は下記に示す誤差 \tilde{V}_L である。

$$\tilde{V}_L = \frac{V_r - V_n}{V_s} \times 100$$

\tilde{V}_L ; 直線性誤差(% of F.S.)

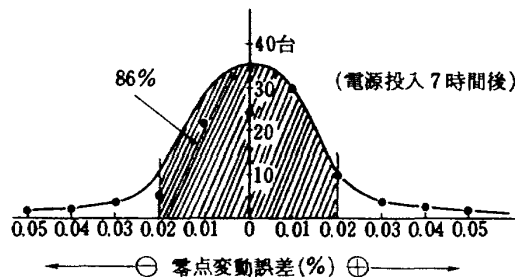


図 18 零点変動の分布

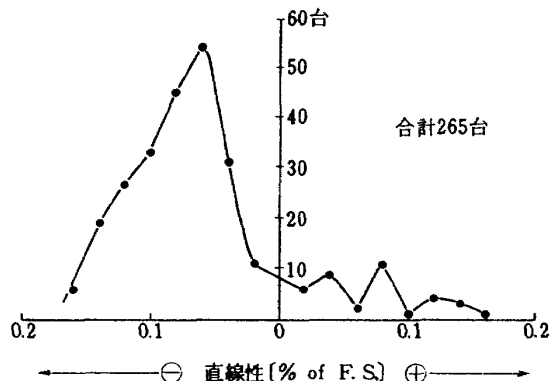


図 20 直線性誤差の分布

- V_T ; 測定圧の出力電圧
- V_n ; 測定圧の計算出力電圧
- V_S ; 出力電圧のスパン電圧

図19に圧力変換器の直線性誤差の一例を示す。又、図20に圧力変換器265台についての直線性最大誤差についての分布を示す。

7.4 出力のスパン変動

航技研原動機部で実際に使用する環境下においてスパン変動誤差を時間、日、月について計測したものを示す。

1) 7時間スパン変動

図21, 図22に圧力変換器の周囲温度 21 ± 2 ℃の環境下での7時間スパン変動とその誤差を示す。このことから、電源投入後のスパン変動による誤差はほぼ0.05%程度であることが分る。

2) 8日間スパン変動

図23に圧力変換器の周囲温度 21 ± 1 ℃の環境下での8日間スパン変動誤差を初日のスパンを基準として示す。このことから周囲温度が安定している時にはスパン変動は少ないことが分る。

3) 6ヶ月間スパン変動

図24に圧力変換器の周囲温度 $11 \sim 31$ ℃の環境下での6ヶ月にわたるスパン変動誤差を初日のスパン変動を基準として示す。その結果、周囲温度が 20 ℃変化した時のスパン変動誤差が ± 0.25 (% of F.S.)となつている。従つて温度変化の激しい、春夏秋冬の季節ごとにスパンの較正を行ない圧力係数の書き換えを行なえばより正確な測定をすることが出来る。

7.5 出力の据付位置特性

圧力変換器単体を種々の据付位置での零点出力とスパン変動を表6に示す。この結果、零点出力は ± 0.022 V (± 0.25 % of F.S.)変動したがスパンは図25に示すようにほとんど変化を示さなかつた。従つて、測定中に圧力変換器を動かさない限り正しい計測が行なわれることが出来ることが分つた。

7.6 出力の応答特性

図26にゲージ圧力計、連成圧力計、差圧力計、絶対圧力計の各圧力変換器の応答特性試験の系統ブロック図を示す。

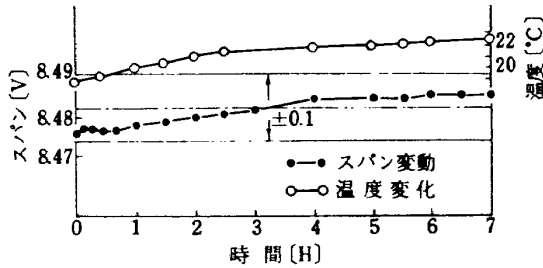


図 21 7時間のスパン変動の一例

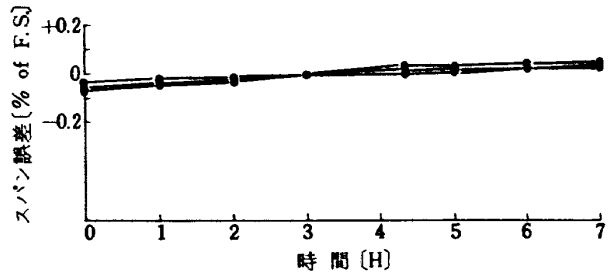


図 22 7時間のスパン変動誤差

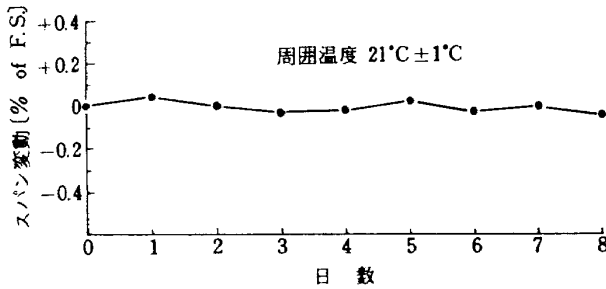


図 23 8日間のスパン変動誤差

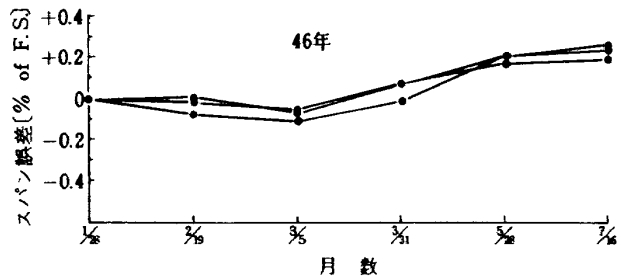


図 24 6ヶ月のスパン変動誤差

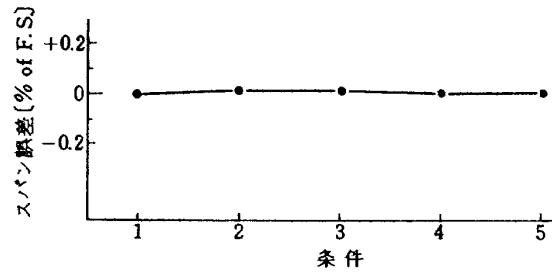


図 25 据付位置によるスパン変動誤差

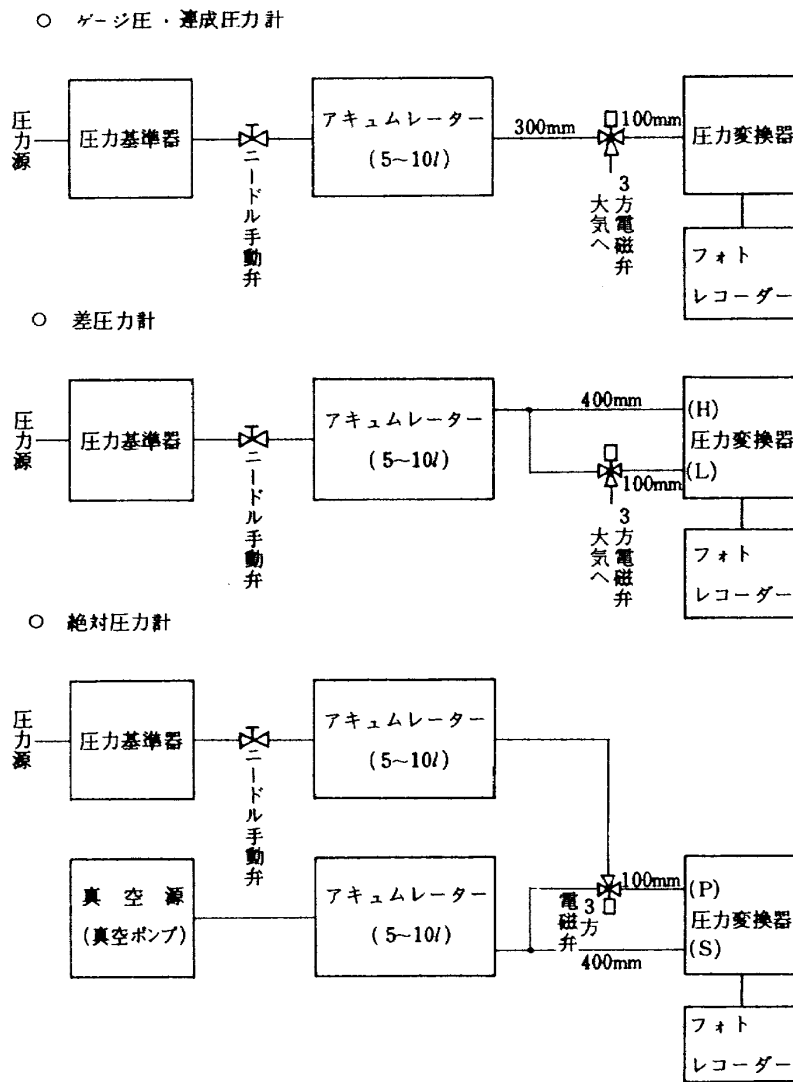
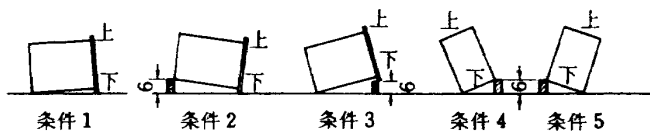
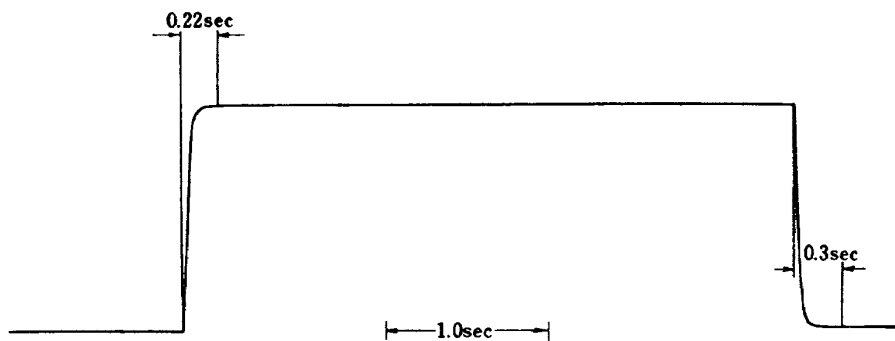


図 26 各圧力変換器の応答特性試験のブロック図



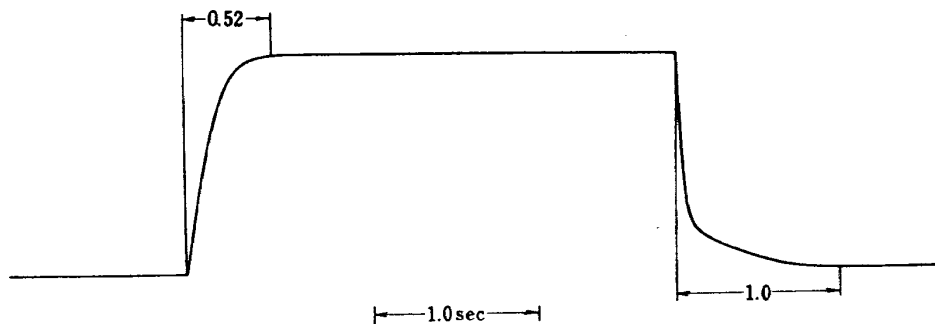
| 条件 | 零点出力電圧(V) | 誤差(% of F.S.) | スパン出力電圧(V) | 誤差(% of F.S.) |
|----|-----------|----------------|------------|----------------|
| 1 | 0.852 | 0.00 | 9.019 | 0.00 |
| 2 | 0.830 | -0.24 | 9.020 | +0.01 |
| 3 | 0.873 | +0.23 | 9.020 | +0.01 |
| 4 | 0.857 | +0.06 | 9.020 | +0.01 |
| 5 | 0.846 | -0.07 | 9.020 | +0.01 |

表 6 圧力変換器の据付特性の一例



圧力範囲 0-5kg/cm² (ゲージ圧)
 温度 25°C
 紙送り速度 5 cm/sec

図 27 ゲージ圧，連成圧力計の応答速度



圧力範囲 0-2,000mmAq (差圧)
 温度 25°C
 紙送り速度 5 cm/sec

図 28 差圧力計の応答速度

1) ゲージ圧力計, 連成圧力計

図 2 6(a)に示す様に圧力源より分銅式圧力基準器により圧力変換器の測定圧力範囲の最高圧力をアキュムレータに封入し, 電磁弁を瞬間的に開放し, 圧カステップを加え, その数秒後に再び, 大気開放してその出力電圧をフォトレコーダに記録した。その結果を図 2 7に示す。この結果, 最大出力電圧の 99.9% 値に到達する整定時間は, 0.3 秒以下であることが判つた。

2) 差圧力計

図 2 6(b)に示す様に, 同様に圧力源より分銅式圧力基準器により圧力変換器の測定圧力範囲の最高圧力をアキュムレータから高圧側, 低圧側の圧力入力端子に加え, ニードル手動弁にて封入する。その後, 電磁弁を瞬間的に低圧側を大気開放し, その数秒後に再び, 低圧側の圧力入力端子にアキュムレータ内の最高圧力を加え, その出力電圧をフォトレコーダに記録した。その結果を図 2 8に示す。この結果, 整定時間 1.0 秒(目標値の 99.9%) であることが判つた。

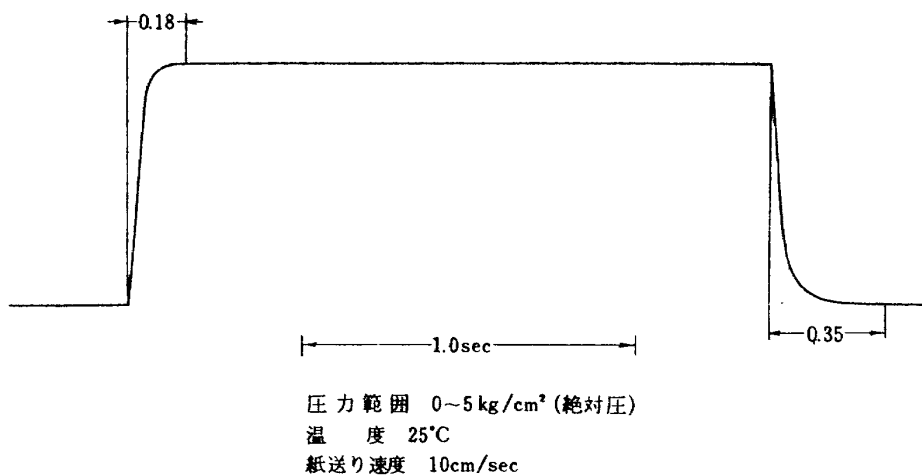


図 29 絶対圧力計の応答速度

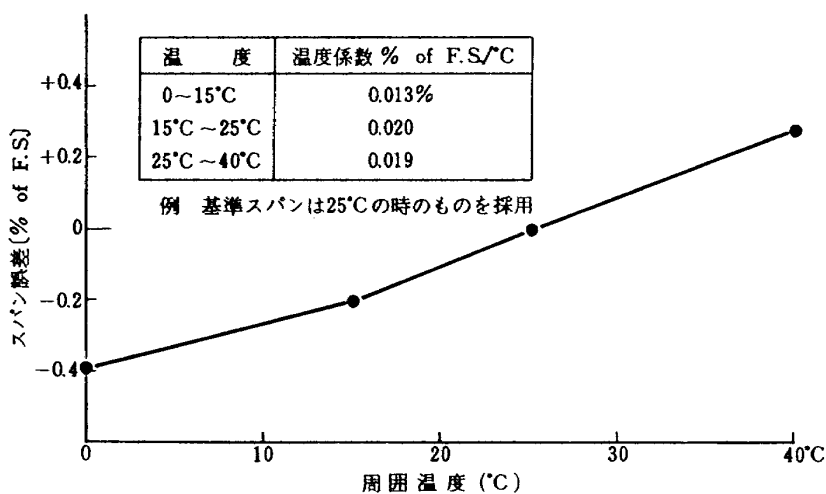


図 30 スパンの温度特性

3) 絶対圧力計

図26(c)に示す様に圧力変換器の高圧側、低圧側を真空ポンプで真空状態にし瞬間的に圧力変換器の高圧側を測定圧力範囲の最高圧力を電磁弁の切り換えによりP側に加え、その数秒後に再び高圧側を真空状態に電磁弁で切り換え、その出力電圧をフォトレコーダに記録した。その結果を図29に示す。この結果、整定時間は0.35秒以下であった。

7.7 温度環境特性

圧力変換器の周囲温度により出力特性が変ることについて6.3の「出力のスパン変動」についても記したが、その影響を調べるために圧力変換器を恒温室に入れ、0℃、10℃、25℃、40℃について実験を行なった。この圧力変換器の熱容量があるので十分な時間をかける必要があるので1.5～2.0時間、それぞれの温度を一定に保ち、その後、恒温槽の外部より加圧し、その出力電圧を測定した。この時のスパンの温度特性は個々の圧力変換器によつて若干違いがあるが、図24からも分る様に、あまり大きな変化はない。図30に周囲温度と圧力変換器のスパン変動の一例を示す。この温度によるスパン変動を減少するために4.5に示した負荷抵抗の温度抵抗特性が-100PPM/℃のものを使用した。

7.8 振動特性

圧力変換器を前後方向、左右方向、上下方向に周波数30Hz、振幅1mm(1.8G)の振動を1時間与え、

| | 振動試験前 | 振動試験後 | 変動誤差 |
|------------------------|--------|--------|---------------|
| 圧力 0Kg/cm ² | 1.035V | 1.026V | 0.1% of F.S. |
| 0.4Kg/cm ² | 9.488V | 9.492V | |
| スパン | 8.453V | 8.466V | 0.15% of F.S. |

表7 振動試験結果

その前後の零点出力及びスパン変動の測定を行なった。その結果を表7に示す。

8 検査

検査は外観検査、寸法検査、精度検査、電源電圧変動検査、零点出力変動検査、漏洩検査、絶縁・耐圧検査、応答検査、ライン圧検査等を行なった。

8.1 外観検査、寸法検査

外観の傷、汚れのないことや、銘板に測定圧力範囲、出力係数等の記載の有無の他に、圧力変換器ユニットの相互間で圧力変換器単体の互換性を持たせるための各種の寸法検査を行なった。

8.2 精度検査

ゲージ圧力計、差圧力計の場合には圧力変換器の高圧側圧力端子に加圧し、測定圧力範囲内の5点の圧力に対する各々の出力電圧を測定した。絶対圧の場合には圧力変換器の低圧側を真空ポンプで吸引しながら高圧側に加圧又は吸圧して測定圧力範囲間の5点を取り、各々の出力電圧を測定した。又、連成圧力計の場合には圧力変換器の圧力入力端子に測定圧力範囲間5点を加圧、吸引しながら5点の出力電圧を測定した。この5点の測定値は下記に示す規定値V_cに対し±0.2% (of F. S.) の誤差以下であること。

$$V_c = V_{min} + \frac{V_{max} - V_{min}}{5} \times N$$

V_c ; 規定値

N ; 1, 2, 3, 4, 5

V_{max} ; 最高測定圧時の出力電圧

V_{min} ; 最低測定圧時の出力電圧

8.3 電源電圧変動検査

圧力変換器ユニットに入る電源電圧を100±10Vの範囲で変動させた時、圧力変換器の測定圧力範囲の最小点及びスパンの出力電圧の変動が、電源電圧100Vの時の値に対して±0.1% (of F. S.) 以下であること。

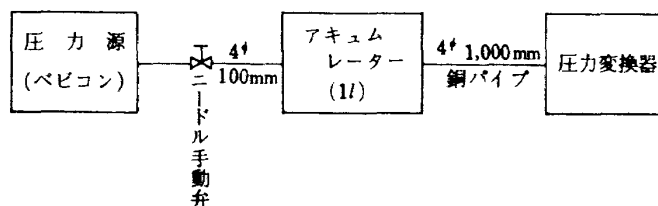


図31 漏洩試験のブロック図

8.4 零点出力変動検査

圧力変換器ユニットに電源投入後30分時を起点とし1時間毎7時間の零点変動を測定し±0.1(% of F.S.) / 7 HR 以下であること。

8.5 漏洩検査

図31に示す様に配管し、圧力変換器の測定最大圧力を加圧後、ニードル手動弁を閉にして、出力電圧が-0.1(% of F.S./MIN)以下であること。差圧の場合は更に、両孔より加圧し、ケース外部への漏洩のないこと。

8.6 絶縁・耐圧検査

絶縁・耐圧検査はケースとコネクタ間を250Vメガーにて5MΩ以上であること。又ACプラグとケース間に250V(AC)を1分間加えて異常のないこと。

8.7 応答検査

6.5「応答特性」の項参照

8.8 ライン圧検査

差圧力計のライン圧は高圧側、低圧側の圧力入力端子に0, 1, 2, 3, 4, 5 Kg/cm²を加え、零点出力変動の検査をする。この変動はライン圧が0の時を基準として±0.02(% of F.S./Kg/cm²)以下であること。

9 圧力変換器の較正方法

圧力変換器の検査は図32のブロック図で示された回路構成で行なった。まず圧力源より7~8 Kg/cm²の空気圧をうけ空気式圧力基準器により圧力変換器の測定圧力範囲を5等分し、それぞれの圧力を加える。その時の基準器に流れる空気流量は下記の方法によって決めた。それは基準器のニードル弁で流量を変えながら、本体ケースと分銅荷重の間の抵抗値が無限大になる流量の時を最適流量値とする。この時基準器は水平状態にあり、振動がないことが必要である。この様に設定した圧力を圧力変換器に加え、その変換器前

面パネルにあるチェック端子により出力電圧はデジタルボルトメータで測定した。変換器の発振の有無はオシロスコープで測定した。

10 総合精度

圧力変換器の試作研究の結果表8に示す総合精度を得た。この圧力変換器は零点調整、ゲイン調整機構を持たないのでこの補正を計算機で行なり。すなわち、この圧力変換器を用いて圧力を測定するには下記の様になる。

この圧力変換器の出力係数は個々に検定して、下記の様にする(図17参照)即ち

$$a = \frac{P_{max} - P_{min}}{V_{max} - V_{min}}$$

この圧力変換器内の受圧ベローズ内外の差圧がない時の出力電圧を初期値 V_{min} として計算機内に記憶させ、任意のベローズ内外の差圧発生時の出力電圧 V の時の測定圧力は下記の様計算機内で処理して圧力 P を求める。即ち $P - P_{min} = a (V - V_{min})$

11 あとがき

この力平衡型圧力変換器は昭和45年4月に計画をたて、昭和46年3月第一号機を試作しその後、細部の設計変更を行ない、種々の環境条件のもとで試験等を実施した。昭和46年度より高温タービン、フロントファン等の諸研究における圧力計測に計算機を組合せて実用に供し、その信頼性、精度について満足すべき結果を得ている。この圧力変換器は操作の簡略なこと、互換性という点で優れた特色を持っていることが判つた。この圧力変換器は電子計算機と組合せて使用することを前提として、零点調整の省略等の簡素化を行ない、実際に試験のプログラム作成、操作を行ない機能上影響がないことを確かめた。現在航空機用ジェットエンジンの研究開発の省力化、効率向上に寄与している。

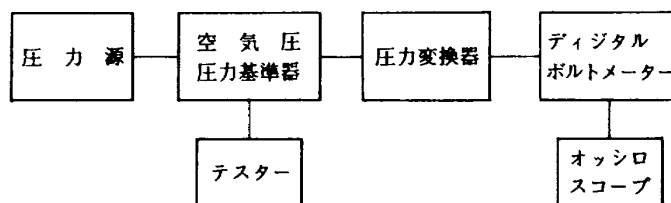


図 32 圧力変換器の検定ブロック図

| | | | |
|-----------------|---|--|--------------------------|
| 測定流体 | 非腐蝕性気体（磷青銅に対して） | | |
| 種類と測定圧力 | | | |
| ゲージ圧 | 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0 (Kg/cm ² G) | （差圧圧力計の低圧入力端子を大気圧開放としたもの） | |
| 絶対圧 | 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 (Kg/cm ² abs) | （差圧圧力計の低圧入力端子を真空ポンプ等で吸引して使用する） | |
| 差圧 | 500, 1000, 2000, 4000, 5000 (mm Aq) | 1.0, 5.0 (Kg/cm ²) | |
| 連成圧 | -0.5~0.5, -0.5~1.0, -1.0~0.5, -1.0~1.0, -1.0~1.5, -1.0~2.0 (Kg/cm ² G) | （差圧圧力計の低圧入力端子を大気開放とし零設定スプリングにより測定圧力範囲を大気圧以下にまで広げたもの） | |
| 許容過圧 | 200% of F.S. (瞬間) | | |
| 出力電圧 | $V = \alpha P + V_0$ | α ; 出力係数 | P ; 測定圧 V_0 ; 零点出力電圧 |
| 直線性 (含ヒステリシス) | ±0.2% of F.S. 以下 | | |
| 零点変動誤差 | ±0.1% of F.S. 以下 | | |
| スパン変動 | 0~0.1 Kg/cm ² 以下に対して | ±0.4% of F.S. | |
| | 0~0.2 Kg/cm ² → 0~5 Kg/cm ² | ±0.2% of F.S. | |
| 温度係数 | ±0.02% / °C of F.S. | | |
| 電源電圧変動誤差 | ±0.1% of F.S. 以下 (AC100V±10V に対して) | | |
| フルスパン応答時間 | ゲージ圧 | 0.3秒以下 | |
| (99.9% of F.S.) | 差圧 | 1.0秒以下 | |
| | 絶対圧 | 0.5秒以下 | |
| 周囲温度 | 0~50°C | | |
| 寸法 (単体) | 108×250×199mm | | |
| 重量 | ゲージ圧計4Kg | 1ユニット (24台) | 153Kg |
| | 差圧・絶対圧計5Kg | " | 180Kg |
| 電源 | 100V±10V (AC) | | ユニット |
| | 48V (DC) 150mA | ±12V (DC) 10mA | 単体 |

表 8 圧力変換器の種類と精度

付 録

ここでは力平衡型圧力変換器の各機構部が総合特性に与える影響について考察する。まず本文図1に於て平衡ビーム系に働く回転モーメントについて考える。なお図1中の文字は次の量を表わす。

- F ; ペローズから平衡ビームに加わる力
- l_f ; ペローズからの支点距離
- l_s ; 零設定スプリングからの支点距離
- l_m ; 復元コイルからの支点距離
- l_d ; 変位検出器からの支点距離
- K_f ; ペローズのバネ定数
- K_c ; 支点板バネの単位回転角度あたりの曲げモーメント
- K_s ; 零設定スプリングのバネ定数
- K_D ; 変位検出器の感度
- K_A ; 増幅器のゲイン
- K_M ; 復元コイルの電流-力変換係数

平衡ビーム系の回転モーメントは次式で表される。

$$J \ddot{\theta} = N \tag{1}$$

- 但し J ; 平衡ビーム系の慣性能率
- θ ; 平衡ビームの変位角
- N ; 回転モーメント

(1)式に於て、 N は次の成分の合成と考えられる。

- $N_1 = -K_f \theta$ ペローズのバネ定数によるモーメント
- $N_2 = -K_s \theta$ 零設定スプリングのバネ定数によるモーメント
- $N_3 = -K_c \theta$ 支点板バネのバネ定数によるモーメント
- $N_4 = -D \dot{\theta}$ 制動係数^{*}によるモーメント
- $N_5 = F l_f$ ペローズからのモーメント
- $N_6 = -K_M \cdot l_m \cdot I$ 復元コイルに流れる電流によって生ずるモーメント

- 但し $K_f' = l_f \cdot K_f$
- $K_s' = l_s \cdot K_s$

* 機能上、制動作用を果すものとして、受圧ペローズ、バネ系、復元コイルの逆起電力、空気抵抗等がある。この圧力変換器では大きな制動係数を得る目的で、復元コイルのボビンをアルミニウム製とし、これに流れる渦電流作用を利用した制動（電磁制動）を行っている。

従って(1)式は

$$J \ddot{\theta} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 \\ = -D \dot{\theta} - (K_f' + K_s' + K_c) \theta + F \cdot l_f - K_M \cdot l_m \cdot I \tag{2}$$

故に

$$J \ddot{\theta} + D \dot{\theta} + K \theta = F \cdot l_f - K_M \cdot l_m \cdot I \tag{3}$$

但し $K = K_f' + K_s' + K_c$

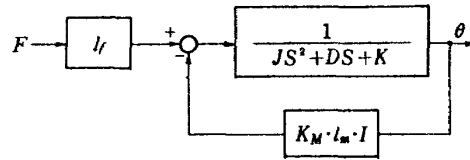
(3)式をラプラス変換し、整理すると

$$(J S^2 + DS + K) \theta(s) = F(s) \cdot l_f - K_M \cdot l_m \cdot I(s) \tag{4}$$

故に

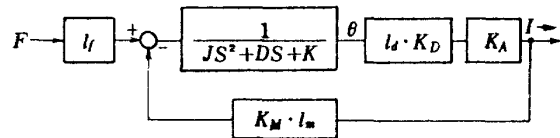
$$\theta(s) = \frac{F(s) l_f - K_M l_m I(s)}{J S^2 + DS + K} \tag{5}$$

(5)式により付図1に示すブロック図が得られる。



付 図 1

変位 θ は変位検出器によって電気信号に変換され、増幅器によって入力電圧に比例した出力電流を得る。付図1に変位検出器、増幅器を加えれば、付図2が得られる。



付 図 2

付図2のブロック線図より、 $F \cdot l_f$ をInputとした時の伝達関数 $G(s)$ は、

$$G(s) = \frac{l_d \cdot K_D \cdot K_A}{J S^2 + DS + K} = \frac{l_d \cdot K_D \cdot K_A}{1 + \frac{l_d \cdot K_D \cdot K_A}{J S^2 + DS + K} \cdot K_M \cdot l_m} \tag{6}$$

平衡状態に於ては、(6)式で $S = 0$ と置き

$$G(0) = \frac{l_d \cdot K_D \cdot K_A}{K} \cdot \frac{1}{1 + \frac{l_d \cdot K_D \cdot K_A \cdot l_m \cdot K_M}{K}} \tag{7}$$

(7)式において

$$\frac{l_d \cdot K_D \cdot K_A}{K} = A \text{ (前向きゲイン)} \tag{8}$$

$$K_M \cdot l_m = B \text{ (後向きゲイン)} \tag{9}$$

とおけば平衡状態におけるゲインは次式のように表わ

される。

$$G(o) = \frac{A}{1 + AB} \quad (10)$$

(6)式は2次遅れ要素の典型的な形として次式で表わす事が出来る。

$$G(s) = \frac{G(o)}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0} s + 1} \quad (11)$$

但し

$G(o)$; 平衡状態に於けるゲイン

ω_0 ; 固有振動数

ζ ; 減衰定数

$$G(o) = \frac{l_d \cdot K_D \cdot K_A}{K + l_d \cdot K_D \cdot K_A \cdot l_m \cdot K_M} \cdot \frac{A}{1 + AB} \quad (12)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K + l_d \cdot K_D \cdot K_A \cdot K_M \cdot l_m}{J}} = \sqrt{\frac{K}{J} (1 + AB)} \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{D}{2\sqrt{J} (K + l_d \cdot K_D \cdot K_A \cdot l_m \cdot K_M)} = \frac{D}{2\sqrt{JK} (1 + AB)} \quad (14)$$

$G(o) = 1$ に於る (11) 式の過渡応答は

$$Y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_0 t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_0 t + \phi) \quad (15)$$

但し

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right]$$

以上の(1)~(5)式から、次のような結果が得られる。

1. 系のヒステリシス誤差

系のヒステリシス誤差の原因として

- (1) 変位検出器 (差動トランス)
- (2) 受圧ベローズ

の2つが主な原因として考えられる。これらの対策として

- a) 個々の部品のヒステリシス特性を改善する事。
- b) 個々の部品のヒステリシス誤差が系の特性に悪影響を及ぼさないよう、機構、回路を工夫する。

があげられる。系のヒステリシス誤差を小さくするにはループゲイン ($A \cdot B$) を出来る限り大きくする事が望ましい。ループゲインを大きくするには力平衡機構上でのバネ要素 (受圧ベローズ, 支点板バネ, 零設定スプリング) のバネ定数が小さい程良い。

2. 系の過渡応答特性と安定性

系の過渡応答特性及び安定性は、 ω_0 , ζ の値によって左右される。系のヒステリシス誤差改善の為にループゲインは大きい程良いが、(14)式より大きすぎると ζ の値が小さくなり不安定となる。大きな制動係数が得られない場合は、慣性能率及びバネ定数を小さくする必要がある。上記に於て、慣性能率を小さくすれば ω_0 の値が大きくなる事になり応答が速くなる。慣性能率を小さくする為には系全体を小型、軽量にする必要があるが、小型化に伴いループゲインが減少するのでこれを補うより電気系の特性 (K_D , K_A , K_M) を考慮せねばならない。

航空宇宙技術研究所報告382号

昭和49年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(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
