

ISSN 0452-2982

UDC 62-523:

62-551.3:

62-551.4

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-532

浮動型積分ジャイロ用温度制御方式の研究

円居繁治・大月正男・鈴木孝雄

1984年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 浮動型積分ジャイロ用温度制御方式の研究\*

円居 繁治\*\* 大月 正男\*\* 鈴木 孝雄\*\*

## 1. まえがき

浮動型積分ジャイロは、誘導制御系の主センサ要素として、極めて高精度なものが要求される。本研究は、この浮動型積分ジャイロの高精度化の研究の一環として行ったものであり、浮動型積分ジャイロの温度制御に関するものである。

図1に浮動型積分ジャイロの概略図を示す。ジャイロ・ロータが支持収納されているフロート・ジンバルは、その軸摩擦を極力少なくして高精度化をはかるために、浮動油の中に浮かされている。浮動油は、周囲温度にかかわらず、浮動油中のフロート・ジンバルの浮力と重力が釣り合うように、温度制御が行われる。温度制御の方式としては、いくつかの方式があり、制御電力の高効率化、およびドリフトレートに影響のあるノイズの低減化が要求されている。

温度制御方式としては、従来、直流電流比例制御方式（直流制御方式）が使用されている。この方式は、制御効率が低いうえ制御回路の発熱量が多く、さらに電源も大きくなる欠点がある。その他の方式として、ON-OFF 制御方式があり、この方式は制御効率は良い反面、温度安定度が低く、ノイズも多いため高精度ジャイロには使用されていない。そこで、パルス幅変調による比例制御方式（PWM 制御方式）に着目し、PWM 制御方式と直流制御方式およびON-OFF 制御方式について比較検討を行った。その方法としては各制御装置の試作、各装置の温度安定度、制御効率およびジャイロの信号発生器(SG)に誘起されるノイズについて実験を行った。その検討結果について報告する。

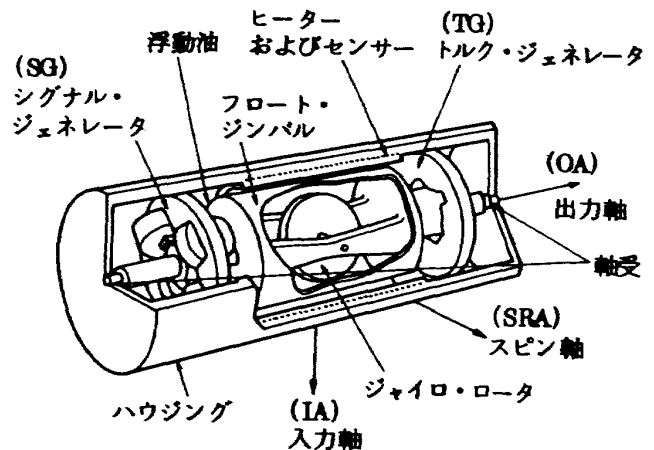


図1 浮動型積分ジャイロ概略図

## 2. 温度制御方式の構成と制御回路

### 2.1 PWM制御方式

PWM制御方式は、ジャイロの温度変化に応じたパルス電流を、コントロール・ヒータに加えて制御する方式である。

図2にブロック図、および図3にタイミング・チャートを示す。まず、三角波発振部で、周波数 140 Hz、振幅  $3V_{P-P}$  の三角波を発振①（これはブロック図およびタイミング・チャート内部の番号）させる。ジャイロの温度センサーが、ブリッジの一辺となっているブリッジの出力②と、前記の三角波①とを波形合成部で合成③し、レベル検出部に入力する。レベル検出部では、ある一定レベルの電圧 (2.1V)

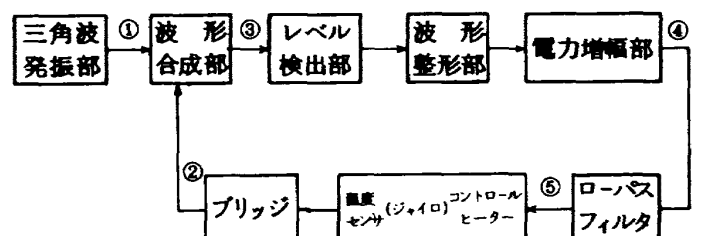


図2 PWM制御方式 ブロック図

\* 昭和59年4月25日 受付

\*\* 計測部

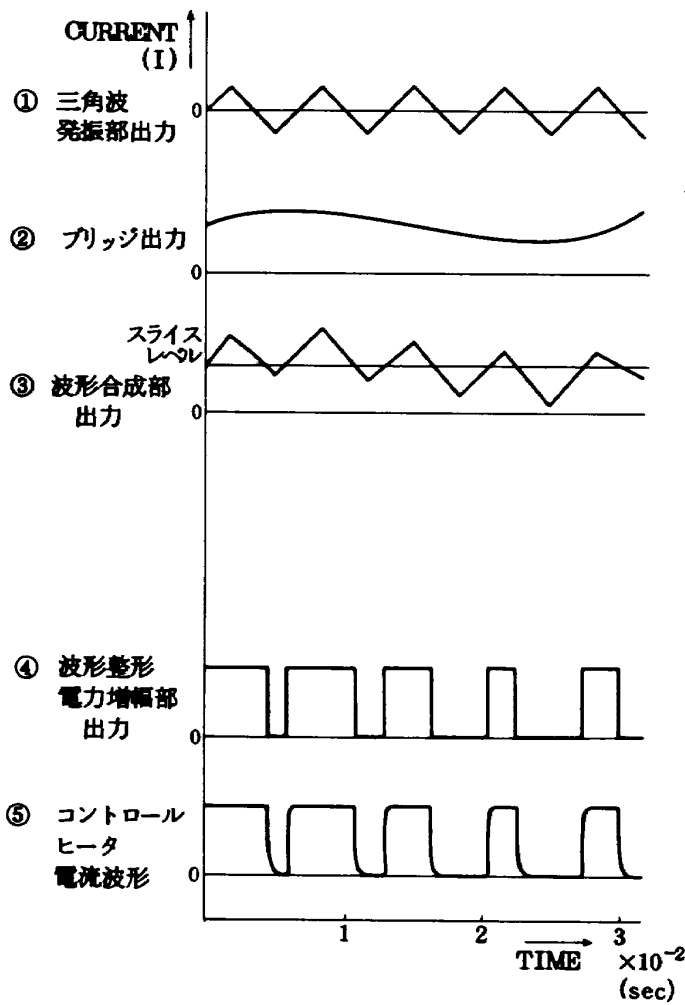


図3 PWM制御方式  
タイミングチャート

以上の入力電圧に対してON, それ以下の電圧では, OFF の動作をする。レベル付近では, ノイズのためチャタリング出力のおそれがあるため, 次の波形整形部(シュミット・トリガー)で, チャタリングのない, きれいなパルス波にする。そして, 電力増幅部④でコントロール・ヒータに供給するに十分な電力に増幅する。この増幅されたパルス波形は, 矩形波であり, この矩形波の高調波成分が, SGに発生するノイズとなりジャイロ誤差(ドリフトレート)となる。従って, ここではCRで構成したローパス・フィルタを挿入して, ノイズの低減化を計った⑤。以上の全体回路図を, 図4に示す。

2.2 直流制御方式

直流制御方式は, ジャイロの温度変化に応じた直流電流を, コントロール・ヒータに加えて制御する方式である。

図5のブロック図の実線部分, および図6にタイミング・チャートを示す。ジャイロの温度センサーがブリッジの一辺となっているブリッジの出力①を, 直流増幅部で電圧増幅し, 直流電力増幅部で, ジャイロのコントロール・ヒータに供給する約17Wの電力に増幅②する。直流制御方式の回路図を図7に示す。

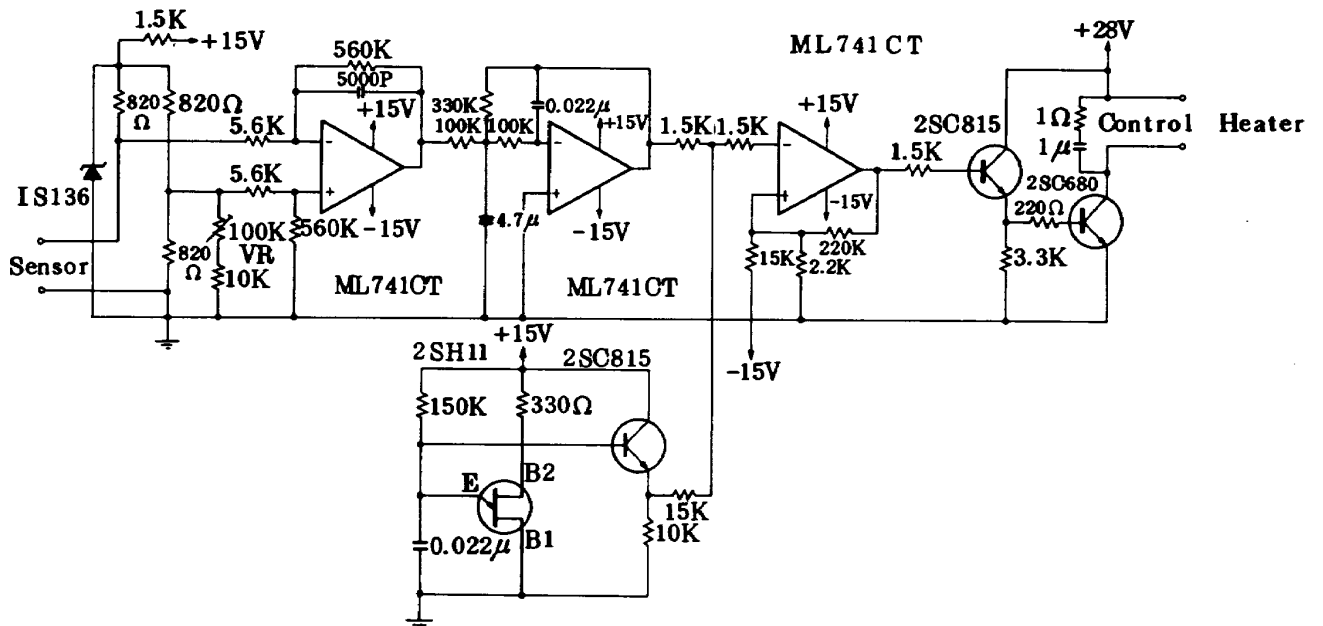


図4 PWM制御方式 回路図

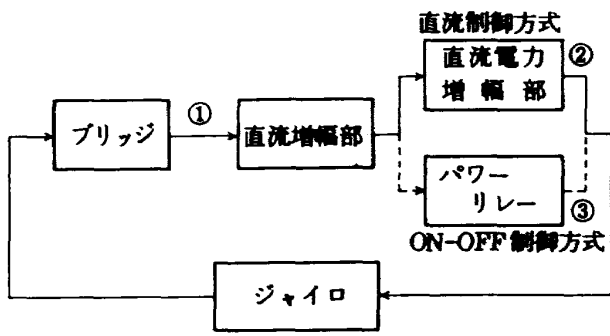


図5 直流制御方式およびON-OFF制御方式ブロック図

### 2.3 ON-OFF制御方式

ON-OFF制御方式は、パワーリレーで一定直流を、ジャイロの温度変化に応じてON-OFFさせる方式である。回路構成は、最も単純である。

図5に、ブロック図(一部点線部分)、および図6にタイミング・チャートを示す。ジャイロの温度センサーが、ブリッジの一辺になっているブリッジの出力①を、直流増幅部で、パワーリレーをコントロールできる電圧に増幅し、パワーリレーをON-OFFさせて、ジャイロのコントロール・ヒータに電力を供給する。ON-OFF制御方式の回路図を、図8に示す。

## 3. 実験装置および測定方法

### 3.1 温度安定度試験

実験装置および測定方法は、恒温槽の中に、ジャ

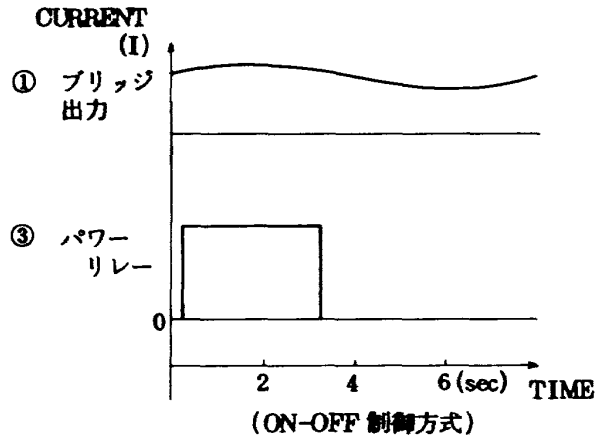
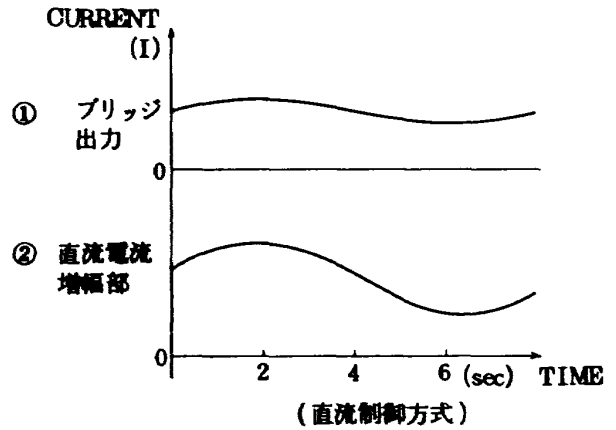


図6 直流制御方式およびON-OFF制御方式タイミングチャート

イロ単体を入れ、制御回路は、恒温槽外部に置いて切換スイッチで、各方式が短時間の内に比較検討できるように、切替えて測定した。ジャイロ単体には、温度センサーとして外周に $+0.314\Omega/(C^{\circ}\cdot m)$ の電気抵抗変化を持つ合金線(Ni 70%, Fe 30%)を巻

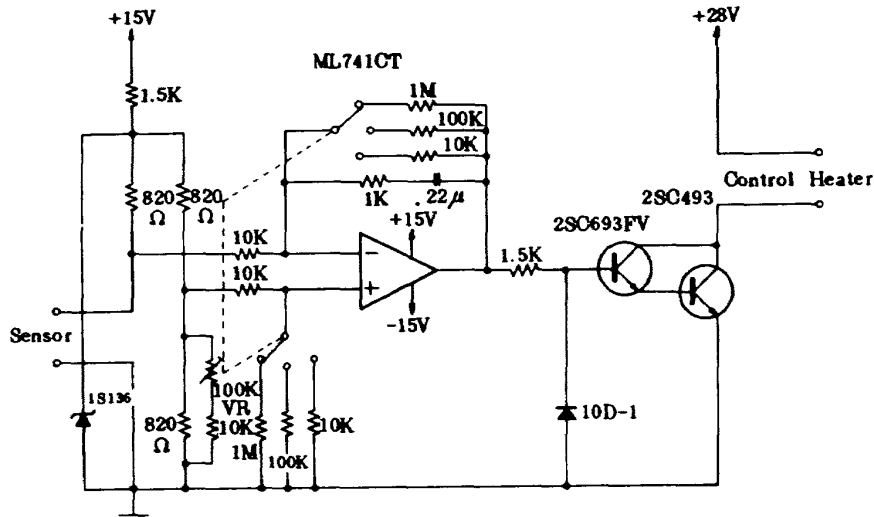


図7 直流制御方式回路図

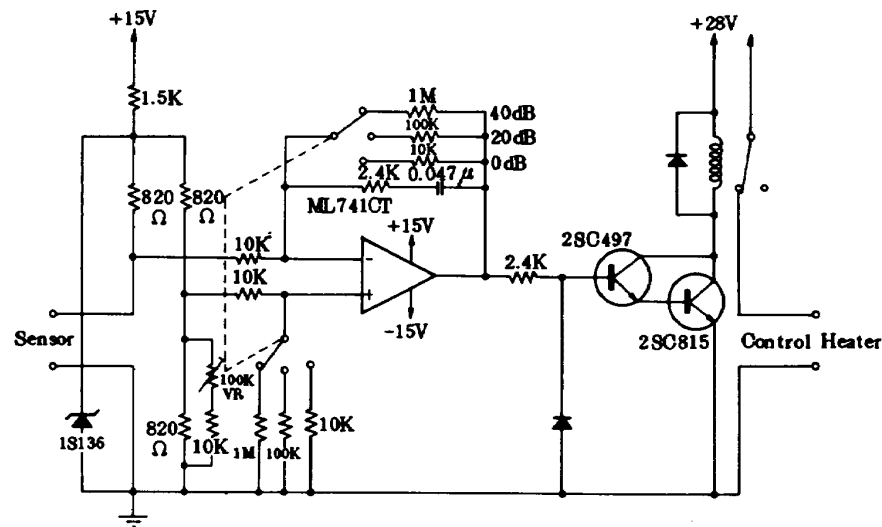


図8 ON-OFF制御方式 回路図

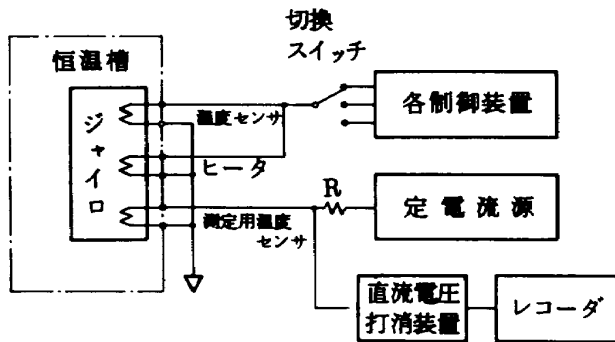


図9 温度安定度試験測定方法

き、74°Cで抵抗値が820Ωになるようにした。これは、ジャイロの温度制御用センサーと、材質、抵抗値が同じものである。図9に示すように定電流源より、1.565mAの電流を流し、温度センサー端子に、4mV/°Cの電圧変化が表われるよう設定した。又ペンレコーダに変化分のみを記録するため、直流電圧打消装置を接続して測定した。以上のような実験装置で、次の項目について測定した。

- (1) 周囲温度 20°C一定での温度安定度
  - (2) 周囲温度を8°Cから55°Cまで変化させたときのジャイロの温度変化
  - (3) 制御回路の電源投入時よりの温度応答
- なお、測定に使用した計測器は次のものである。

定電流源 ; ジョンフルーク 382 A  
 直流電圧打消装置 ; 東亜 PB-31 A  
 レコーダ ; HP 7035 B  
 抵抗 (R) ; 金属被膜抵抗 820 Ω  
 恒温槽 ; テニー・チャンバー

### 3.2 制御効率試験

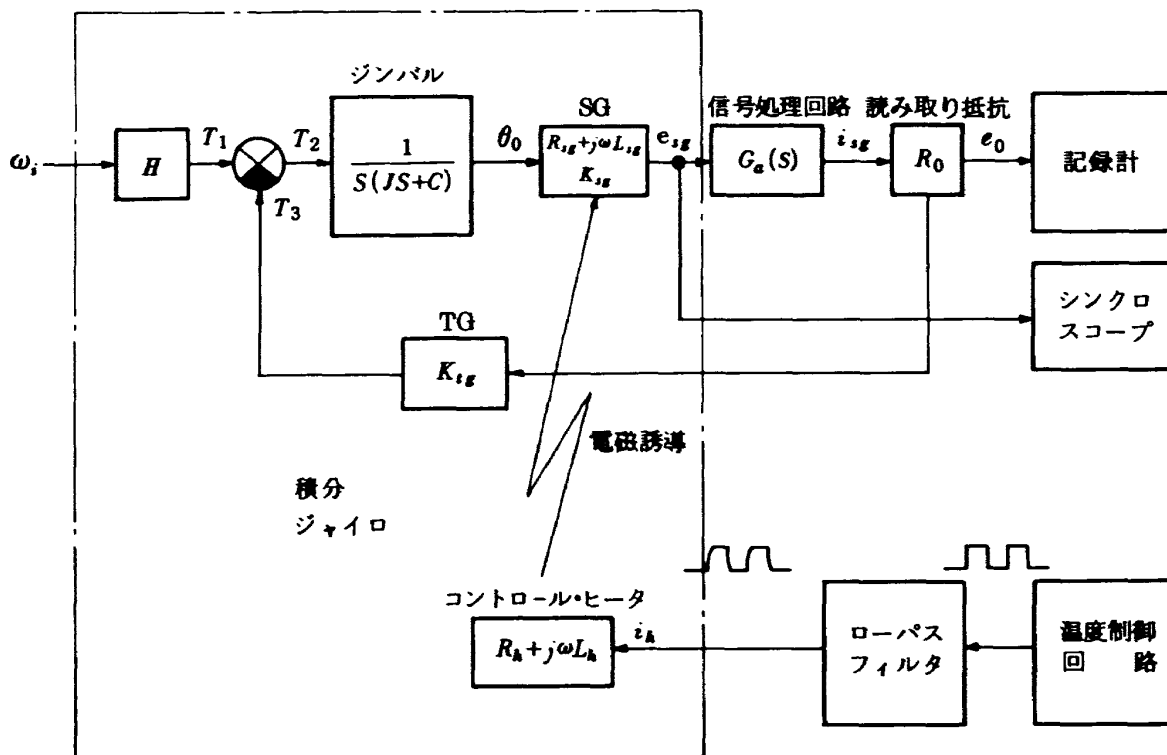
制御電力量の効率は、各方式の総合消費電力量と、ジャイロ本体で消費される電力量との、電力比率で求めた。制御効率試験も、温度安定度試験と同じように温度試験槽の中に、ジャイロを入れ、周囲温度を8°Cより55°Cまで変えて測定した。

### 3.3 ジャイロ信号発生器 (SG) に誘起されるノイズとジャイロドリフトレートの測定

PWM制御方式、およびON-OFF制御方式では、コントロール・ヒータに流れる電流波形がパルス波形であるため、コントロール・ヒータのインダクタンス6.5μH(コントロール・ヒータは、インダクタンスを極力小さくするように、バイファイラー巻きになっている。)によって、パルス状の磁力線を発生する。その磁力線によって、ジャイロのSGにパルス状のノイズ電圧が誘起される。その結果、ジャイロドリフトレートとして出力される。

図10に示すように温度制御回路のあとに、CRで構成したローパスフィルタを挿入して、ノイズをどこまで低減し得るかについて測定した。測定については図10に示すようにアナログ・トルク・リバランスモードでトルカーと直列に挿入した読み取り抵抗に発生する電圧を記録した。又SGに発生する誘導パルスの波形も、シンクロ・スコープで測定した。

なお、アナログ・トルク・リバランス回路を図11に、その周波数特性を図12に示す。



諸定数

$R_h$ ; コントロールヒータ直流抵抗	16.9 $\Omega$
$L_h$ ; コントロールヒータインダクタンス	6.5 $\mu\text{H}$
$R_{sg}$ ; シグナルジェネレータ直流抵抗	33.5 $\Omega$
$L_{sg}$ ; シグナルジェネレータインダクタンス	4.89 mH

図10 ドリフト・レートおよびSGノイズ電圧測定回路 ブロック図

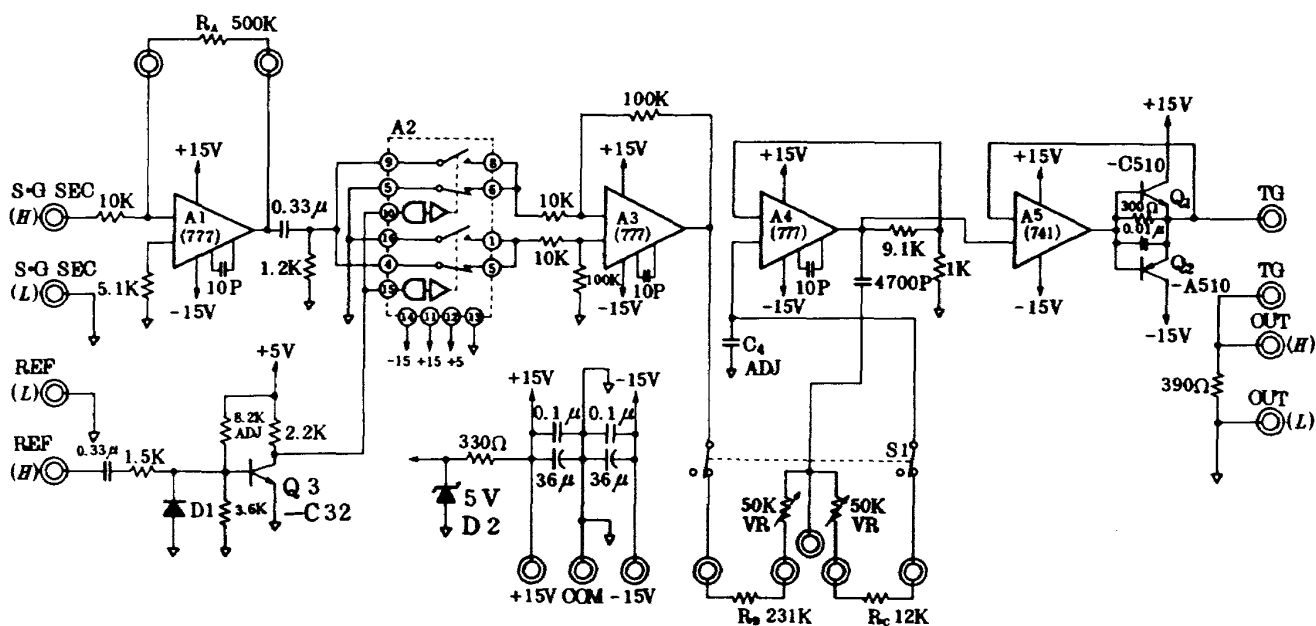


図11 アナログ・トルク・リバランス回路

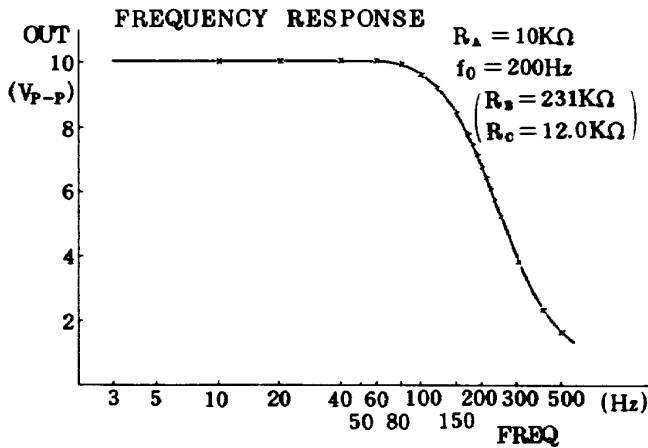


図12 アナログ・トルク・リバランス回路  
周波数特性

### 4. 測定結果

#### 4.1 温度安定度試験

##### (1) 周囲温度一定環境下における試験

恒温槽内部の温度を20°Cにして、十分にウォーミング・アップされたジャイロで、温度安定度試験を行った。ここでは、各方式について約20分間のサンプル・データについて図13に示す。図13に示すよう

に、PWM 制御方式における温度変化は、最大幅で0.028°C、直流制御方式およびON-OFF 制御方式では、それぞれ0.023°C、および0.19°Cであった。この結果から温度安定度についてPWM制御方式は、直流制御方式とはほぼ同等であるが、ON-OFF制御方式は、前者より約7倍の温度振幅があった。

##### (2) 周囲温度を変化させたときの試験

周囲温度の変化に対するジャイロ温度の制御性能を調べるために、恒温槽の温度を約8°Cから55°Cの間で数点にわたって変え、ジャイロ温度の変動を測定した。その結果を図14に示す。これは制御温度を基準として各設定温度に対する変化分のみを示した。測定値は、各設定温度について3分間にわたって測定した平均的な値を示す。

その結果、PWM制御方式が $+3.9 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ であり、直流制御方式が $+3.1 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ であるのに対して、ON-OFF制御方式は、最大で $1.9 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$ の周期的な振幅変化があり、他2者との比較対照にならないため、このグラフには記入しなかった。

##### (3) 温度応答試験

温度コントロール回路の電源投入時よりのジャイ

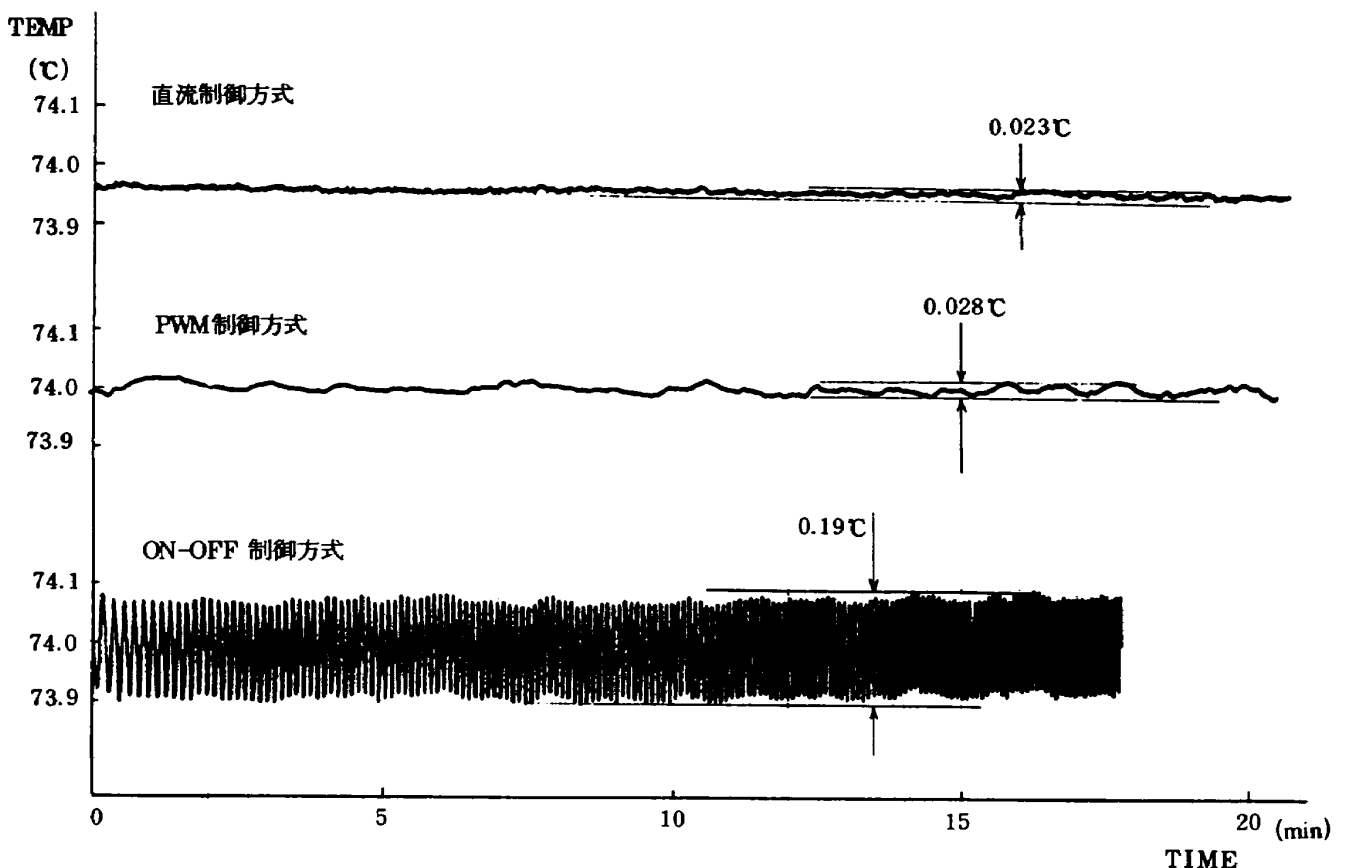


図13 周囲温度一定環境下における温度安定度

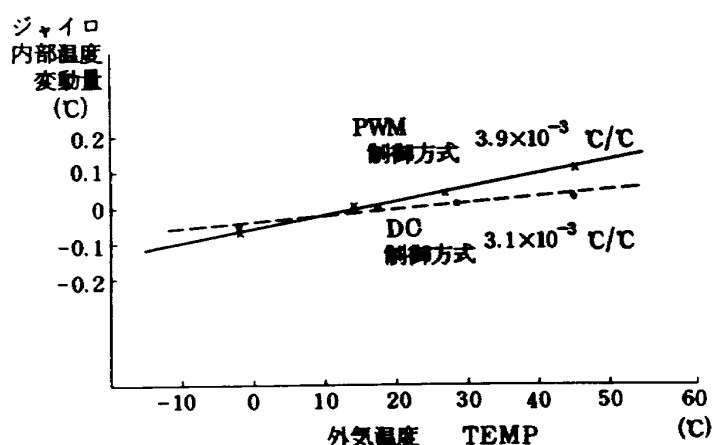


図14 周囲温度に対するジャイロ内部温度変動量

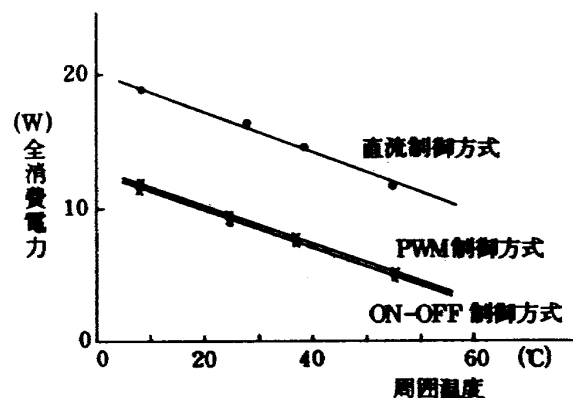


図16 周囲温度対全消費電力

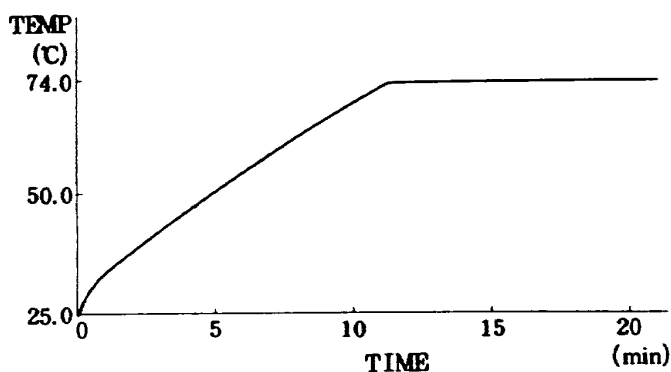


図15 PWM制御方式温度応答曲線

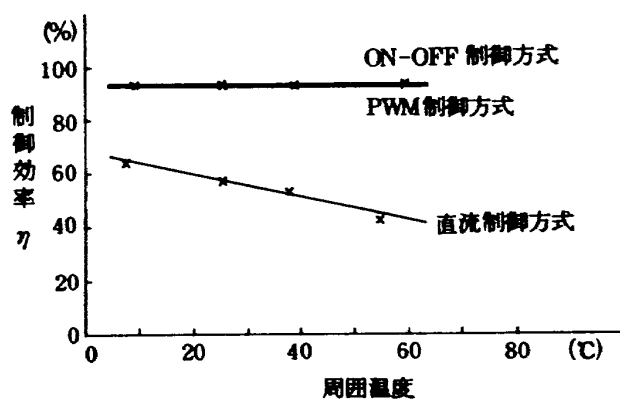


図17 周囲温度に対する制御効率

口の温度上昇曲線が図15である。ここでは、PWM制御方式のみを図に示したが、他の方式もほぼ同様に約12分で、規定温度に達している。

#### 4.2 制御効率試験

周囲温度を変化させたときの全消費電力を求めた。図16に測定結果を示す。周囲温度が上昇するに従って、消費電力が下ってくるのは、ジャイロ自体の放熱量が少なくなるためである。また直流制御方式が他の方式に比べて約7.5W消費電力が多くなっているのは、制御回路のパワートランジスタのコレクタ損失によるものである。図17に制御効率を示す。PWM制御方式とON-OFF制御方式は、周囲温度による制御効率の変化はなく、92%で一定である。これは、両方式とも制御回路のパワートランジスタの動作点が、ONかOFFのどちらかであり、コレクタ電流が多くなっても、コレクタ損失があまり変わらないためである。従って電力損失も少なく、発熱も少ない。直流制御方式は、周囲温度が上昇すれ

ば、パワートランジスタの動作点が、中間点付近で上昇し、従ってコレクタ損失が増加して、制御効率が低下する。又発熱量も多い。

#### 4.3 ジャイロ信号発生器 (SG) に誘起されるノイズとジャイロドリフトレートの測定

PWM制御方式は、コントロール・ヒータに流れるパルス電流が、ジャイロのSGにノイズを発生させる。その波形を図18㉑に示す。パルス電流のON-OFF時にSGに、最大28mV<sub>p</sub>のノイズ電圧が発生した。SGの共振周波数は、60kHzであるのでヒータ回路に発生する60kHzに近いノイズ成分をできるだけ消去する必要がある。コントロール・ヒータのもつインダクタンス(L)が適量であれば、バンド・エリミネート・フィルタを構成することができるが、微少のためローパス・フィルタ構成にせざるを得ない。そこでローパス・フィルタを挿入した結果3mV<sub>p</sub>まで減少させることができた。その波形を図18㉒に示す。

ローパス・フィルタの容量(C)に対するノイズ電



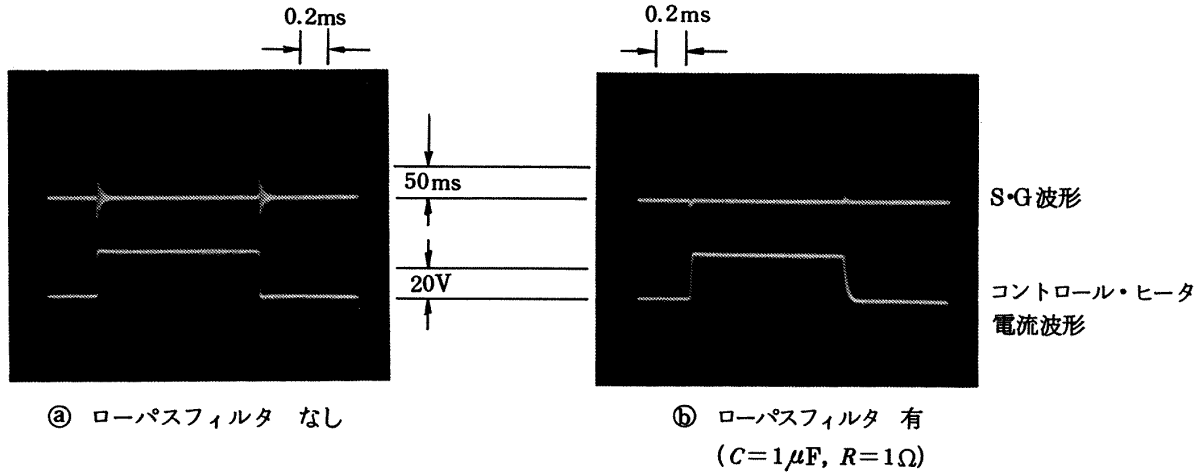


図18 PWM制御方式のローパス・フィルタ効果

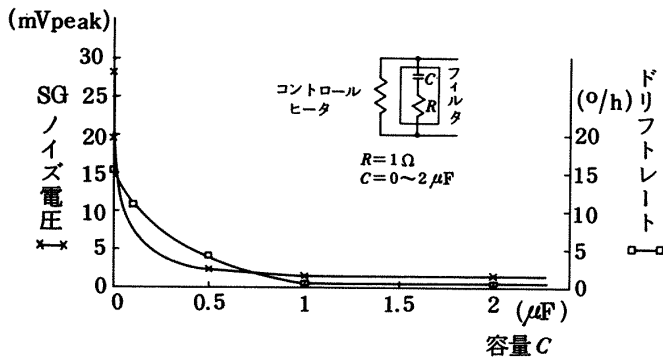


図19 ローパス・フィルタの容量(C)に対するSGノイズ電圧およびドリフト・レート

圧, およびジャイロドリフトレートの測定結果を図19に示す。Cが $1\mu\text{F}$ とした場合のローパス・フィルタのカット・オフ周波数は、 $62\text{kHz}$ 、 $2\mu\text{F}$ の場合には、 $44\text{kHz}$ であるが、実験結果から $1\mu\text{F}$ も $2\mu\text{F}$ も同じ結果を得た。したがって $1\mu\text{F}$ で十分である。PWM制御方式のときのアナログ・リバランス・モードにおけるドリフトレートについて、ローパス・フィルタを用いない場合は、 $15.6(^\circ/\text{h})$ であり、ローパス・フィルタを用いた場合は、 $C=1\mu\text{F}$ で $0.33(^\circ/\text{h})$ までに低減することができた。図20に、ローパス・フィルタの容量(C)を変えた場合のドリフトレートを示す。他の方式についても、アナログ・リ

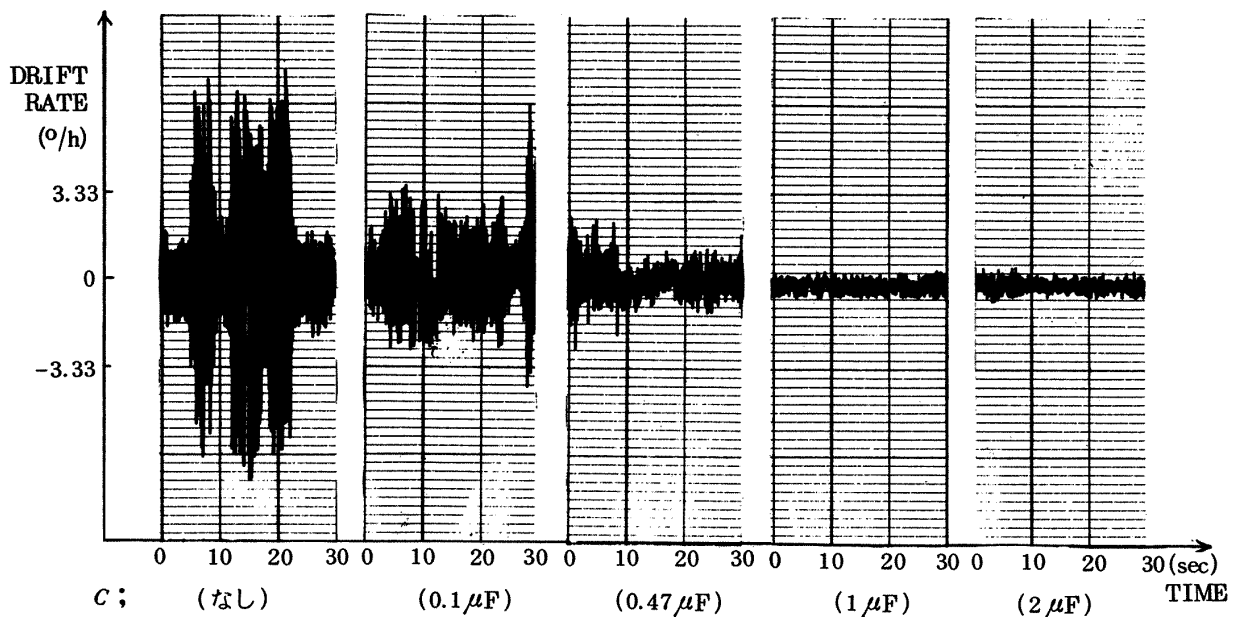


図20 ローパス・フィルタの容量(C)を変えた場合のドリフト・レート (PWM制御方式)

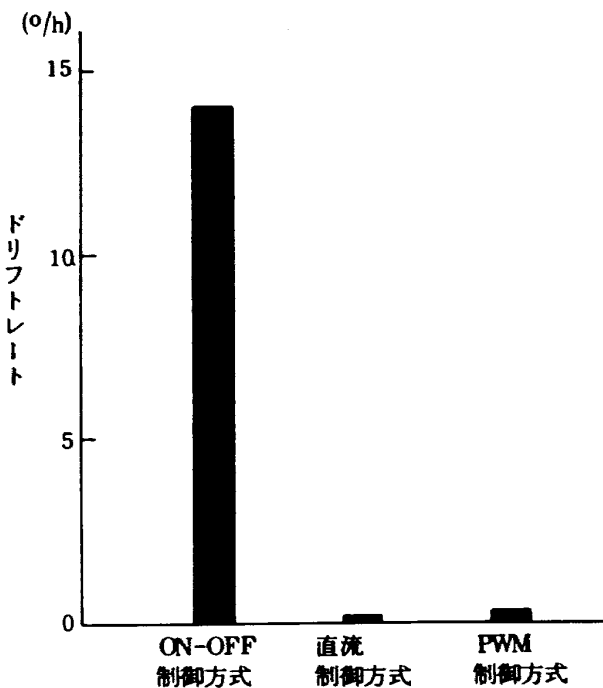


図21 制御方式対ドリフトレート

バランス・モードで、ドリフトレートを測定した。その結果を図21に示す。

直流制御方式におけるドリフトレートは、0.17(°/h)、ON-OFF制御方式については、14(°/h)のドリフトレートであった。ゆえにON-OFF制御方式のドリフトレートは、PWM制御方式と比較して約42倍、直流制御方式と比較して約82倍大きい。

### 5. 結 論

浮動型積分ジャイロの温度制御方式としてPWM制御方式に着目し、同方式と従来から用いられている直流制御方式およびON-OFF制御方式について実験的な性能比較検討を行った結果、次のような結論を得た。

(1) 温度安定度については、PWM制御方式が最大温度変動幅で0.028℃、直流制御方式およびON-OFF制御方式は、それぞれ0.023℃、0.19℃であった。浮動型積分ジャイロの温度安定度は、5/100℃が要求されており、PWM制御方式および直流制御方式は、許容範囲内であることを確認した。

(2) 制御効率は、原理的にON-OFF動作を基本構成としているPWM制御方式、およびON-OFF制御方式が共に92%であり、直流制御方式は、周囲温度20℃で60%であった。制御効率の低下は、電源装置の大型・重量化および回路の発熱量の増大を招く。ゆえにPWM制御方式、ON-OFF制御方式は制御効率が良く、電源および制御回路の小型・軽量化が可能である。

(3) ドリフト・レートについては、PWM制御方式は、0.33°/h、直流制御方式は、0.17°/h、ON-OFF制御方式は、14°/hの測定結果を得た。PWM制御方式の0.33°/hは、ヒーター回路にローパス・フィルターを挿入して得られた結果であり、ローパス・フィルターを挿入しなければ、15.6°/hのドリフト・レートがあった。

(4) 総合的結論として、これらの結果よりPWM制御方式は、若干制御回路の複雑化は伴うが、従来から積分ジャイロ用温度制御方式として使用されている直流制御方式と比べて温度安定度では、ほぼ同等であり、制御効率においては、良好である。さらにドリフト・レートについては、若干多めであるがジャイロ出力の高速な取り込みによるデータの平均化を行うような使用法であれば、装置の小型・軽量化と共にミッション搭載用として最適と思われる。ON-OFF制御方式は、温度安定度、ドリフト・レ

表1 試 験 結 果

試験項目 制御方式	温度安定度 (変動幅 °C)	制御効率 (%)	ドリフト・レート (°/h)	長所・短所
P W M	0.028	92	0.33	高安定, 高効率, 高精度 回路複雑
直 流	0.023	60	0.17	高安定, 高精度 低効率, 発熱大
ON-OFF	0.19	92	14	高効率, 回路簡単 低安定, 低精度

ートの点で、高精度な積分ジャイロの周囲温度制御には、用いられると思われるが、直接ジャイロの温度制御には不適當である。

これらの試験結果をまとめて表にしたものを、表 1 に示す。

最後に、本実験を行うにあたり日本航空電子株式会社の関連各位から助言と協力を得たことを付記し、謝辞に代える。

## 参 考 文 献

- 1) 大月, 鈴木, 田畑, 円居; 搭載機器用環境試験装置の特性, 航空宇宙技術研究所資料 TM- 99, 1967 年 2 月
- 2) 円居, 大月, 鈴木; 浮動型積分ジャイロ用温度制御方式の研究, 第 18 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 175 - 176, 1979 年 8 月
- 3) 大月, 新宮, 鈴木, 円居, 田畑; ストラップダウン方式用広角度積分ジャイロの研究, 航空宇宙技術研究所報告 TR- 349, 1975 年 11 月

---

## 航空宇宙技術研究所資料532号

昭和59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町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山5-6-17

---

