

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-117

ロケット用テレメータ機上装置の集積回路化

新田慶治・松崎良継

1967年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-55	ロケット模型風洞試験における超音速相似則の応用	1965年5月	河崎俊夫, 谷 喬
TM-56	2024-T4アルミニウム合金平滑丸棒の常温回転曲げ疲労試験	1965年7月	石田 誠, 河野哲雄
TM-57	極超音速における軸対称物体の前面抵抗	1965年7月	曾 我 国 男
TM-58	試験用飛しょう体の超音速風洞試験	1965年8月	齋藤秀夫, 木村友昭
TM-59	ジェットリフトエンジンの空気取入口実験 (I)	1965年9月	近藤 博, 増田惣平
TM-60	吹出式超音速風洞における実験データの処理方式について (II)	1935年9月	原 亘 利, 高島一明 関 根 英 夫, 中 正 夫 戸 川 保 子, 矢 沢 健 司 塚 末 健 一, 吉 田 征 一 野 雄 四 郎, 能 村 宏 一 佐 野 四 信, 府 宏 一 別 江 川 幸 一
TM-61	クインエア機の風洞試験	1965年9月	飯 田 宗 四 郎
TM-62	高温歪ゲージの温度特性試験	1965年10月	
TM-63	2024-T3アルミニウム合金の有孔補強平板の軸荷重による疲労特性	1965年10月	
TM-64	応力集中による材料の疲れ強さに関する一実験 (I)	1965年10月	池 田 為 治, 坂元思無邪 光 山 敏 雄, 雄 二 隆 武 内 澄 夫, 宮 地 敏 雄 星 谷 昌 二, 堀 内 正 司 斎 藤 村 浩 子, 計 測 部 機 体 第 一 部, 機 動 部 原 戸 川 隼 人, 石 黒 登 美 子
TM-65	ジェットエンジンの翼の固有振動に関する実験	1965年11月	
TM-69	質量分析計による水蒸気を含む試料のガス分析	1965年12月	
TM-71	可動アイアンバードの構造および機能	1965年12月	
TM-72	地上付近の風の影響による小型ロケットの姿勢角変化	1965年12月	
TM-73	固定端を有する薄肉円筒殻の自由振動について	1966年1月	田 寺 木 一, 泉 日 出 夫
TM-74	回転振動試験装置の計画, 構造および特性	1966年2月	武 内 澄 夫, 宮 地 敏 雄 星 谷 昌 二, 清 水 福 寿 牛 田 永 崇 一 吉 小 川 鉦 一
TM-75	高マッハ数風洞の消音装置について	1966年2月	
TM-76	コーティングの断熱効果のアナログシミュレーション	1966年2月	
TM-77	テレメータ電波の偏波面の回転を利用したロケットのスピン測定について	1966年3月	田 畑 淨 治, 桜 井 善 雄 三 浦 雅 男, 森 幹 彦 堀 川 勇 壯, 直 治 二 蔵 中 野 佳 直, 齋 藤 秀 夫 新 田 慶 哲, 藤 原 盛 三 植 崎 原 久 政, 柳 隆 均 石 外 立 均, 宗 美 秀 夫 宗 長 洲 秀 夫, 柏 原 登 喜 子
TM-78	昇降舵の操舵力特性に関するシミュレータ解析	1966年3月	
TM-79	テレメータ機上装置の小型化の研究	1966年3月	
TM-80	安定制御のための一計算法	1966年3月	
TM-81	吹出式超音速風洞の起動時および停止時における過負荷防止装置	1966年3月	
TM-82	ピトー管による境界層速度分布測定について	1966年4月	
TM-83	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験 (II)	1966年4月	近 藤 博, 増 田 惣 平
TM-84	二段ロケットの低速風洞試験	1966年7月	毛 利 浩, 田 村 敦 宏 佐 野 四 郎, 能 村 宏 一 小 野 幸 一
TM-85	航空機の滑走路走行時の振動に関する実験的研究	1966年8月	
TM-87	極小型超音速機用姿勢制御装置の特性解析	1966年8月	池 谷 光 榮, 畑 山 茂 樹
TM-88	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験 (I)	1966年9月	犬 丸 矩 夫, 岡 部 祐 二 郎 北 村 清 美, 川 幡 長 勝 川 井 友 昭, 泉 日 出 夫 戸 川 忠 彦, 隼 人, 石 黒 登 美 子
TM-89	有孔板の振動について	1966年9月	
TM-90	地上付近の横風の影響による小型ロケットの方位角変化	1966年9月	
TM-91	高速タービン翼列二次元試験	1966年10月	近 藤 博, 藪 田 光 弘 山 崎 紀 雄, 吉 田 晃 大 山 耕 一, 菅 原 昇 中 山 晋 男, 味 光 澄 夫 五 味 内 澄 夫, 宮 地 敏 雄 星 武 内 澄 夫, 宮 地 敏 雄 星 佐 野 政 明, 蕪 岡 一 洋
TM-92	リフトジェットエンジン試験設備 (I) 一台上運転設備一	1966年10月	
TM-94	J-3ジェットエンジン用タービン動翼の固有振動特性	1966年11月	
TM-95	超軽量軸流圧縮機動翼の固有振動特性	1966年11月	
TM-96	2024-T4および7075-T6有孔平板の曲げ疲労試験と2024-T4平滑丸棒の軸荷重疲労試験	1966年11月	

ロケット用テレメータ機上装置の集積回路化*

新田 慶治**・松崎 良継**

薄膜技術とテレメータ装置を構成する回路方式の簡易化の検討を行ない、集積回路化するための指針として次の2項目が明らかとなった

1. C_r-Si 膜が、物理的、電気的特性から考え、テレメータ装置を集積化するのに最も適している。
2. テレメータ装置は2種の基礎回路に分割でき、この基礎回路を集積化することにより全装置の集積化も可能である。

以上の指針に基づいて薄膜集積回路による試作を行ない十分な試験を行なった結果、温度特性を除いては良好な性能を示した。温度特性に対してはダイオードの逆抵抗の温度変化による補償法がとられたが、この方法は、特性の方からも、補償回路の大きさの面からも十分な結果を示した。以上の試作結果に基づき NAL-7 型ロケット用5チャンネル装置を試作したが、従来のものに比較し1/10程度の容積のものが得られた。またさらに小型化し、従来のものの1/40~1/50程度のもも不可能でないことが明らかとなった。

1. は し が き

直径70φ程度の小型ロケット (NAL 7 型ロケット) の飛しょう特性を測定するため、テレメータ装置の小型化の研究を行ってきたが、従来の小型部品の組み合せによる方法では、もはや NAL 7 型ロケット搭載用のものとしては2チャンネル程度が限界であって、さらに多チャンネル化するためには集積回路化を計る以外に方法がない。このような理由から、昭和40年度に試作した2チャンネルのテレメータ機上装置と同程度の大きさでかつ5チャンネルのものを試作する目的で、テレメータ機上装置の集積回路化についての検討を行ない、NAL 7 型ロケット搭載用の5チャンネルテレメータ装置の試作を行なった。試作された装置の大きさは、目標とした大きさとほとんど同程度のもので、かつ集積化したため機械的強度は増大した。試作にあたり最も苦心したのは温度特性を悪化させないための温度補償方法で、ダイオードの逆方向抵抗の温度変化を利用する方法を見いだした。以下試作の概要について述べる。

2. テレメータ装置用集積回路方式

ロケット搭載用テレメータ装置を集積回路化し、小型化を計る場合、デジタル機器における場合と異なり、次のような特殊性が上げられる。

(1) きわめて低いレベルの信号を高いレベルまで増幅する必要があり、常に回路の安定性および直線性が要求される。

(2) 取り扱う周波数がきわめて広帯域におよび、周波数の安定性も、きわめて重要である。

(3) 温度、加速度、振動等の苛酷な環境条件に耐えねばならない。

(4) さらにこれはデジタル機器の場合にも云えることであるが、価格が低廉であること、信頼性の高いものであること。

以上の問題点を解決するため、まず金属薄膜抵抗特性(付録A)ならびに、サーメット抵抗特性(付録B)の調査を進め、さらにテレメータ回路を1~2種の汎用基礎回路で構成できるか否かについて検討を行なった結果から次に示す方針が得られた。

(1) 低レベルの直流信号を増幅する必要があるのは副搬送波部の直流増幅器であり直線性の高い差動増幅器形とする。

(2) 取り扱う周波数は直流から 169 Mc までにおよ

* 昭和42年8月10日受付

** 計測部

ぶが現在の集積回路では 40~50 Mc 程度までしか利用できないので送信部の初段のてい倍段まで集積化し、残りは超高周波トランジスタを使用する。

(3) 温度の変化に対し安定な回路素子として考えられるサーメット薄膜抵抗を利用し、かつ周波数決定用のコンデンサはすべてスチロールコンデンサかマイラコンデンサを使用する。

(4) 低価格に押えるため差動増幅器、副搬送波発振器および混合増幅器は汎用性の高い回路構成とし汎用性の低いゲージバランス、差動増幅器の帰還抵抗、副搬送波用ろ波器抵抗は小型の炭素皮膜抵抗を使用する。

(5) 大出力トランジスタは放熱の関係上集積化することは困難であるから安定化電源部の電力トランジスタはそのまま使用する。

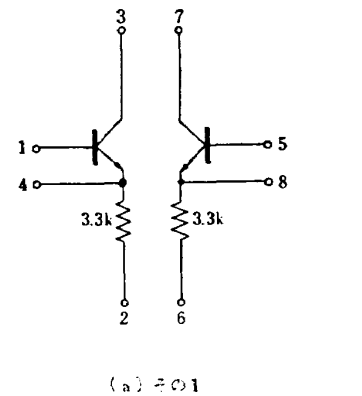
3. 基礎集積回路

現在集積回路用として使われているものは、半径 5 mm (TO-5 と呼ばれている。) か 6 mm (TO-6 と呼ばれている。) の円筒状のトランジスタ ケースのいずれかで、TO-5 では 3 mm × 3 mm のガラス板が、TO-6 では 3.5 mm × 3.5 mm のガラス板が蒸着基板として使われている。今回はできるだけ小型のものを得る目的から TO-5 を用いるものとし、基礎集積回路を構成することとした。

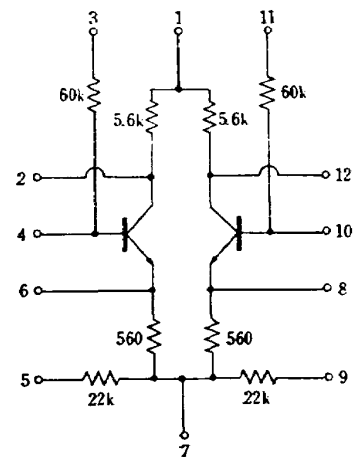
付録 A の表 2 からわかるように、Ni-Cr 金属皮膜では膜厚 50 Å で面積比抵抗は高数 100 Ω/(mm)²、1000 Å では数 Ω/(mm)² となり数 10 kΩ の抵抗体を構成するには膜幅を 50 μ としても、(数 Ω/(mm)² × X (mm))/50(μ) = 数 10 kΩ、すなわち X ≒ 500 mm の長さを要し 3 mm 角基板にはとうてい収納できない。一方、付録 B の結果から Cr-SiO₂ のサーメットを同時蒸着法で蒸着すれば面積比抵抗 1.7 kΩ/(mm)² の膜が得られ、数 10 kΩ の抵抗体を得るには膜幅 50 μ で、約 1.5 mm の長さで十分である。したがって、スペースファクタを 10 程度としても 10 本程度の抵抗体が 3 mm × 3 mm のガラス基板に入れられる。

一方、著者等がこれまで得た経験¹⁾ から副搬送波部の増幅器は 2 段の直結直流差動増幅器とし、副搬送波発振器はマルチバイブレータ方式のものを用いることが、回路の簡易化と、優れた直線性を得るのに有利であることが明らかで、かつ両者の回路の結線方法(抵抗体ならびにトランジスタの接続法)も類似している特徴を考え合わせると同一の基礎回路(TO-5 に収められたトランジスタの集積化回路)の組み合わせにより各回路が構成できるものと考えられる。以上のような

理由から直結直流差動増幅器、副搬送波発振器、副搬送波増幅器、および安定化電源回路を、2 種類の基礎回路に分解し、おのおのについて回路定数(抵抗値)を定め、それにしたがって 3 mm × 3 mm のガラス基板に 50% Cr-SiO₂ を蒸着し、超小型トランジスタを組み合わせて TO-5 に収納したものを試作した。図 1 にこの 2 種の基礎回路を、図 2 に基礎回路その 2 の蒸着パターンを示す。この 2 種の基礎回路によって構成された副搬送波部全体の回路を図 3 に示す。



(a) No. 1



(b) No. 2

図 1 基礎回路

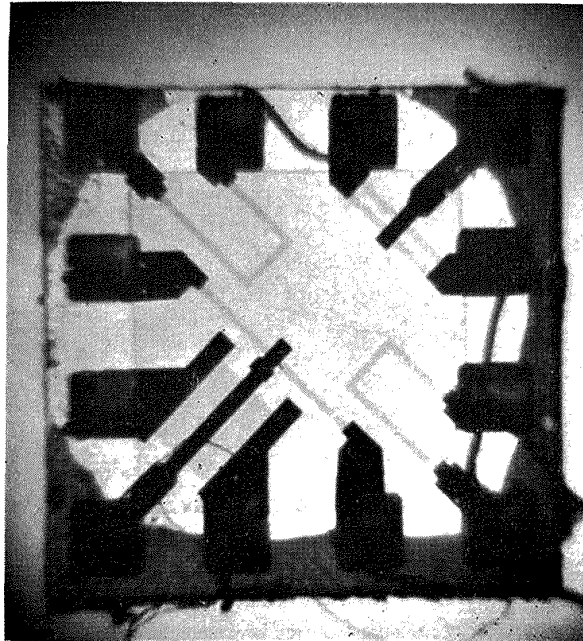
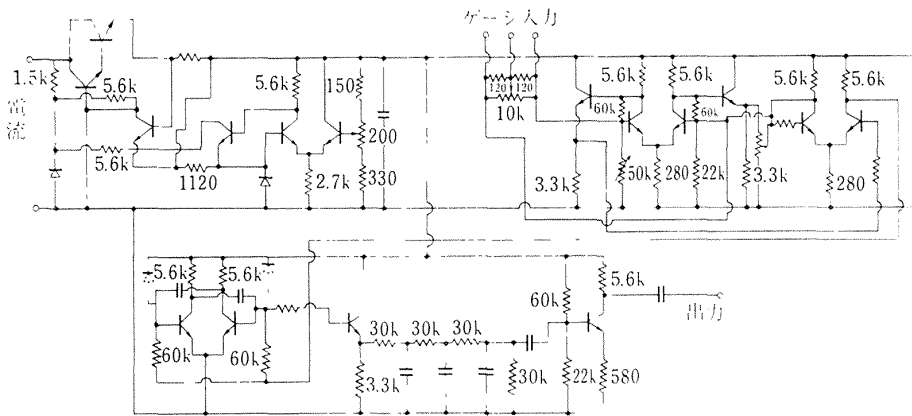
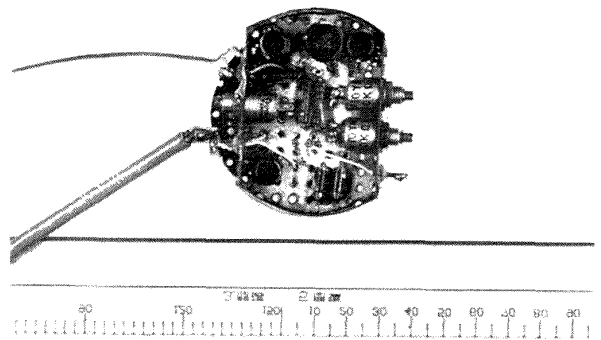


図 2 基礎回路その2 蒸着パターン



(a) 副搬送波部回路

図 3 集積回路化副搬送波部



(b) 副搬送波部セット

4. 基礎集積回路の温度特性

以上3で述べた方法によって副搬送波部の集積回路化を計ったが、実用上最も問題となる点は、直結差動増幅器と副搬送波発振器の温度特性と考えられる。その理由は、直結増幅器に入ってくる信号は各検出器、

(今回の場合は抵抗線歪ゲージを想定した。)の出力であって、一応テレメータ装置と切り離して考えるのが普通であり、また副搬送波発振器の出力は交流出力となってしまう、かつその発振周波数さえ伝送すればよいので発振器以後につながる回路に多少の温度ドリフトが存在しても問題とはならないからである。

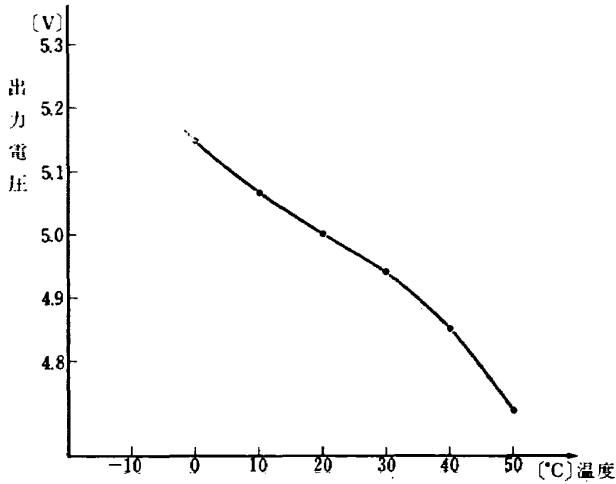


図4 直流増幅器温度特性

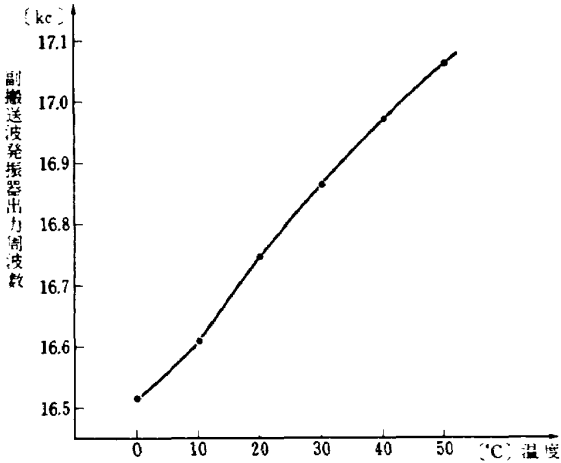


図5 副搬送波発振器温度特性

以上のことから差動直流増幅器のみの温度特性ならびに入出力特性、および副搬送波発振器のみの温度特性ならびに変調特性を測定した。図4は直流差動増幅器の無信号入力時における出力電圧の温度特性であり、図6は入出力電圧特性である。一方図5および7は、副搬送波発振器の無信号入力時における温度特性と入力電圧に対する出力周波数特性（変調特性）である。

図4と図5を比較すると、一応差動直流増幅器と副搬送波発振器の温度ドリフトは、たがいに打ち消し合う方向にあるが、発振器ドリフトは $0.15\text{kc}/10^\circ\text{C}$ 程度、すなわち、変調特性から考えて入力換算ドリフトに直せば約 $0.006\text{V}/10^\circ\text{C}$ である。一方直流差動増幅器のそれは約 $0.6\text{V}/10^\circ\text{C}$ である。したがってこの二つを組み合わせるだけではドリフトを完全に補償し得ない。いずれにしてもこのようなドリフトの原因を考えると50% Cr-SiO 膜では抵抗の変化値はたかだか

$0.1\sim 0.2\%$ ($0\sim 50^\circ\text{C}$) でこのような大きなドリフトは考えられず、結局超小型トランジスタ温度特性によるものと考えられる。差動直流増幅器の出力電圧だが温度の上昇にともない低下するのは、出力（副搬送波発振器入力となる。）としてバランス出力をとらず、片側出力をとるため最終段のコレクタ電流が増大するのが最も大きな原因と考えられる。

一方副搬送波発振器の周波数 f は

$$f = 1 / \{2RC \ln [(E_A/E_B) + 1]\}^2$$

ただし

$$1/R(1/R_B) + (I_{ed}/e_1) + (I_{co}/e_1)$$

R_B : 入力抵抗

I_{ed} : エミッタ遮断電流

I_{co} : コレクタ遮断電流

e_1 : ベース電圧

E_A : 入力電圧

E_B : 電源電圧

によって表わされ、 I_{ed} 、 I_{co} が温度とともに増大するので R が減少し f が増大するものと考えられる。

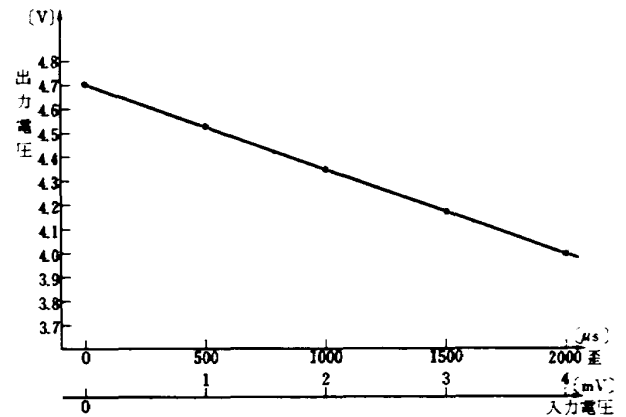


図6 直流増幅器入出力特性

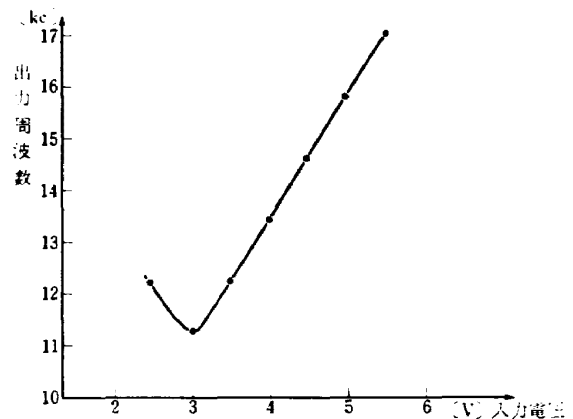


図7 副搬送波発振器変調特性

以上の結果から、差動増幅器の温度特性ならびに発振器の温度特性を改善するためには差動増幅器の出力が温度とともに増大するような方向に、また副搬送波発振器の出力周波数は温度とともに減少するような方向にそれぞれ補償すればよいわけである。

しかしながら差動増幅器のダイナミックレンジ（直線性の成立する範囲）は、図6、図7を比較すればわかるように、副搬送波発振器のそれに比してかなり狭いので、補償回路を入れるとバランスがくずれてしまう恐れがあり、初めから発振器とつなぎ合せ発振器側に補償回路を入れる方が望ましい。この場合発振器のドリフトを故意に増大させ差動増幅器のそれと釣り合わせることになる。

このように故意にドリフトを増大させ、結果的には補償してしまう方法は通常行なわれていず、サーミスタとかバリスタなどの温感素子で、個々の回路を補償し、それをつなぎ合わせる方法がとられているが、温感素子の温度係数はトランジスタのそれとはかなり異なるため並列に可変抵抗を入れ係数を合わせる必要があり、調整の面倒さ、ならびに可変抵抗体の大きさなどの点から、このような方法では、せつかく集積回路化して小型化を計っても結果的には大きなものとなってしまふ。

以上の理由から故意にドリフトを増大させる補償法をとることにし、かつ係数の異なるサーミスタ等の温

感素子を一切使用せず、ダイオードを逆接続にし、発振器の電源電圧（B電圧）とベース間に入れ、逆方向抵抗が温度とともに減少するのを利用し実効的に入力抵抗 R_B を下げ、周波数を上げる補償法を採用した。

図8はこの方法によって温度補償を行なった結果で①の曲線は補償なしの場合、②はHV15を1本だけ入れた場合、③はゲルマニウムダイオードSD34を1本だけ入れた場合（この場合は補償のし過ぎである。）④はシリコンダイオード1S306を1本だけ入れた場合、⑤、⑥はそれぞれ1S306を2本および4本入れた場合である。

以上の結果1S306を発振器の両ベース間にそれぞれ2本ずつ計4本使用すれば25~50°Cの温度範囲で、中心周波数の0.2%以内の温度ドリフトに押えられることがわかった。

5. 搭載用5チャンネル装置の試作

以上で副搬送波部の集積回路化が可能であることが判明したが、搭載用の装置とするためには副搬送波低域ろ波器の段数を決定することと、送信部をどの程度まで集積化できるかが問題となる。ろ波器について考えてみると、漏話を極力少なくする意味でLC形の急峻な遮断特性をもつろ波器を用いると位相まわりが大きくなり位相歪が増大する²⁾のみならずインダクタン

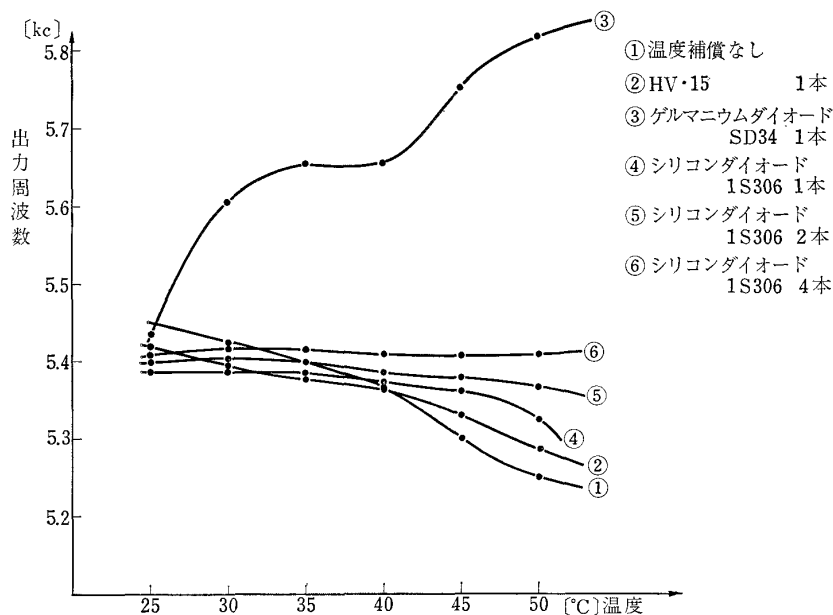


図8 直流増副器と幅搬送波器を組み合せた時の温度特性

スを与えるためコイルを巻く必要が生じる波器そのものの大きさが問題となってくる。したがってRC低域ろ波器のようなゆるやかな遮断特性のものが望ましい。一方あまり遮断特性が悪いと当然漏話が発生するのでRCろ波器の段数を適当に選ぶ必要が生じてくる。

発振器の波形は矩形波でその振幅を A 、基本周波数を ω とすれば

$$y = A(4/\pi) \{ \sin \omega t + (1/3) \sin 3\omega t + (1/5) \sin 5\omega t + \dots \}$$

で表わされ、第三次高調波の振幅は、基本波のその1/3程度で高次の高調波振幅はさらに小さくなる。もし一段のRCろ波器を挿入すれば、基本波に対する第三次高調波の振幅は $(1/3) \times (1/3) = 1/9$ 、二段のろ波器では $(1/3) \times (1/3) \times (1/3) = 1/27$ 、三段のろ波器で $(1/3)^4 = 1/81$ となり、段間の損失を含めても、基本波と高調波のレベル差は -30dB 以下と考えられ、この三段RCろ波器を使って5チャンネル副搬送波を混合し、漏話を実験を行なった。図9はその実験結果で、無変調時の混合波をこのろ波器を通して弁別したもので、弁別出力は完全に直流出力となっており全く漏話がみられない。したがって三段のろ波器で十分なことが判明した。

一方送信機の集積回路化は副搬送波部に比し、かなりむずかしくかつ集積化を行なっても小型化はあまり

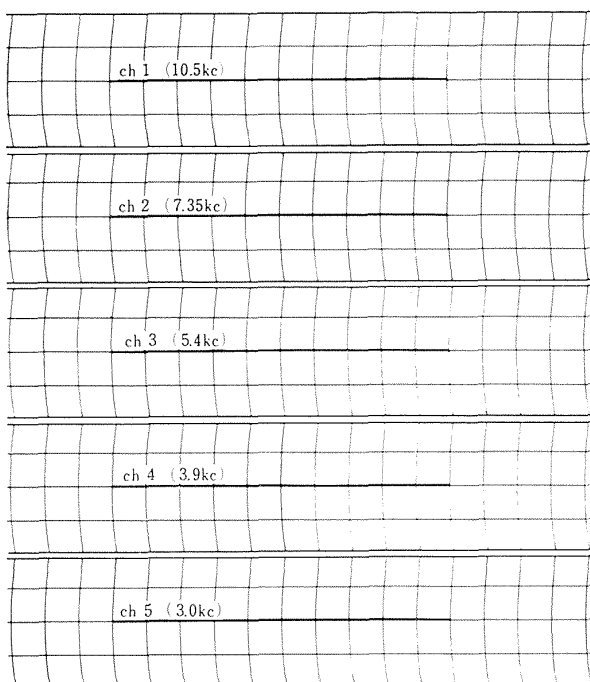


図9 3段RC低域ろ波を付加した場合の漏話実験結果

期待できない。その理由は以下の通りである。

(1) 高周波になると薄膜抵抗が周波数特性を持つようになり、回路を構成する各素子の調整を行なう必要が生じ、集積化してしまうとこの調整がむずかしくなる。

(2) 高周波回路ではコイル部品が多く、安定なコイル集積部品の得られない現状では、集積化が困難であり、集積化による小型化はむずかしい。

(3) 高周波電力増幅数では、回路的には集積化が可能であるが、熱損失が大きく、集積化による小型化を無理に行なえば焼損の恐れがある。

(4) 薄膜抵抗間の Q が下がり、 $40 \sim 50\text{Mc}$ 以上になると増幅回路、発振回路の性能が急激に降下する。

したがって水晶発振段および電圧増幅2てい倍段までを集積化し、できるだけ小型化する意味から可変容量による位相変調方式¹⁾を採用することとした。

以上の結果をまとめて5チャンネルロケット搭載用テレメータ装置を試作した。このテレメータ装置の要目は次の通りである。

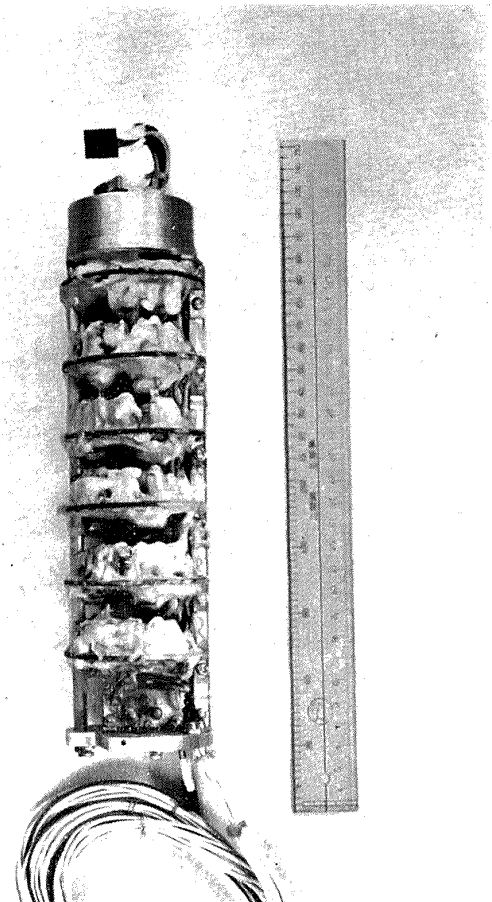


図10 試作5チャンネルテレメータ装置

送信機搬送周波数	165.65Mc
搬送周波数安定度	2.5×10^{-5}
搬送波最大周波数偏積	60kc
送信電力	30~100mW (可基)
副搬送波中心周波数	10.5kc, 7.35kc, 5.4kc, 3.9kc, 3kc
副搬送波周波数安定度	1%(B.W)以下
副搬送波帯域幅	中心周波数の $\pm 7.5\%$
寸法	$6.5\phi \times 20\text{cm}$

図10はこの装置の外観を示したもので、調整時の操作を行なう場合を考えて、かなり余裕のある実装を行なったため、長さが20cmにもなったが、実装方法をあらためれば約10cm程度のものである。

従来 NAL-16 ロケットなどに用いられていた5チャンネルのものでは直径12~15cm程度で長さは20cm程度あり、かつ直流増幅器も同程度の大きさである。今回試作したものは直流増幅器も含めて $6.5\phi \times 20\text{cm}$ であるから、従来のものに比較し容積は1/10程度になったことを示しており、実装方法をあらためれば

1/20程度となる。

この装置について搭載するロケットが出合うと思われる以下に示す環境条件で動作試験を行なったが全く異常が生ぜず、十分な実用性をもつことが確認された。

振動

縦方向	5~50c/s	2mm (p-p)
	50~200c/s	10g
横方向	5~50c/s	1mm (p-p)
	50~2,000c/s	5g

加速度

縦方向	50g (2分間)
横方向	10g (2分間)

衝撃

縦方向	60g(10~12ms)
横方向	10g(10~12ms)

温度

$10^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{C}$

図11, 12に温度試験結果ならびに振動試験結果を示す。

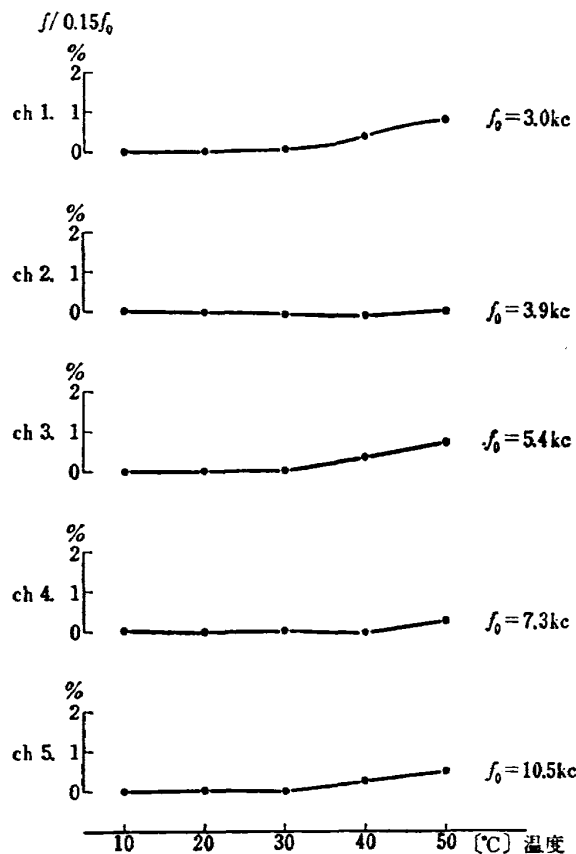


図 11 試作テレメータ機上装置温度特性

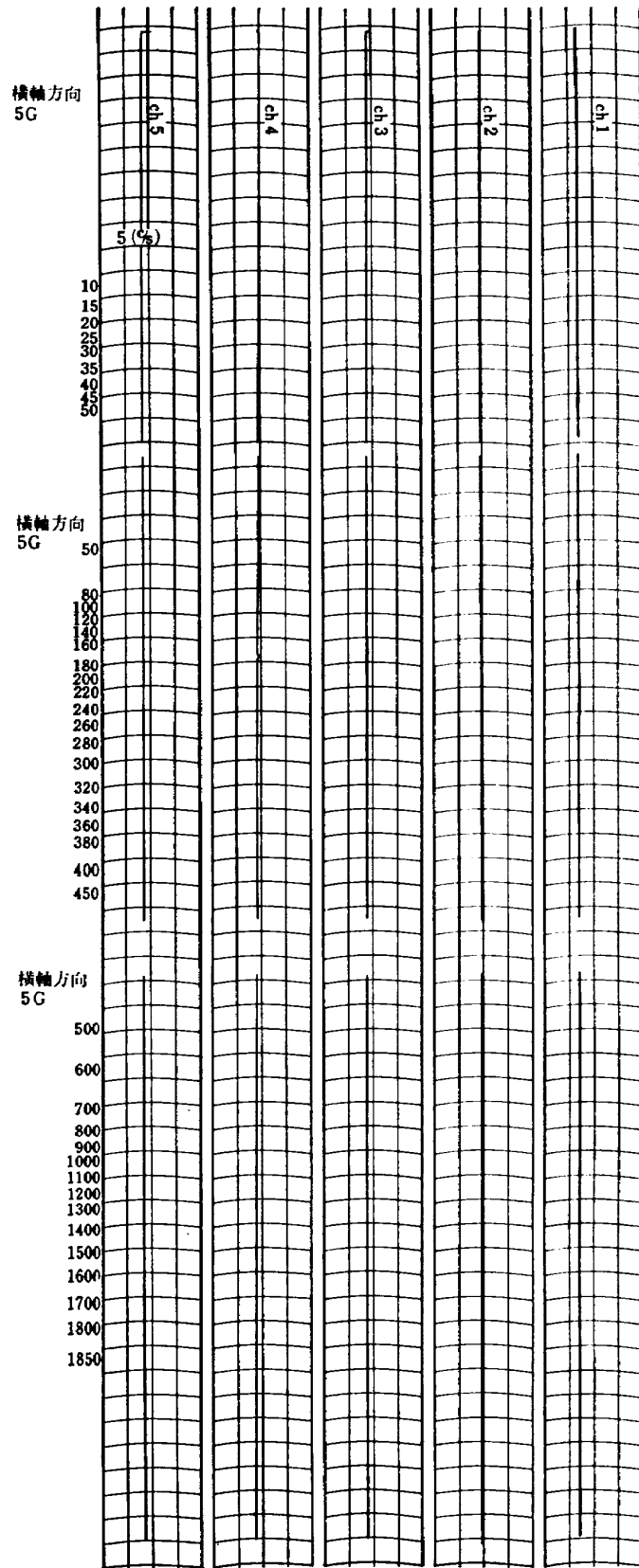


図 12 試作テレメータ装置振動試験

6. 検討ならびに結論

以上集積回路化によってかなり小型化されたが、素子の面からみると、固定抵抗ならびにトランジスタ、ダイオード類以外のものの集積化は安定性の上から困難であると考えられる。したがって当分の間、5まで述べて来たような方式で集積回路化が進められるであろう。そのような理由から、この方式でどの程度小型化可能かについて考えてみる。

図3を参照すれば、直流差動増幅器ならびに副搬送波発振器の固定抵抗は約50本、入力バランスと周波数調整に各1個の可変抵抗器、周波数決定用に2個のコンデンサを必要とする。1~3の検討結果から3mm×3mmのガラス基板に10~15本程度の抵抗体を蒸着できるから50本の抵抗を蒸着するには6mm×6mmのガラス基板があれば十分であろう。一方可変抵抗体の小型のものとしては米国B社の4mm×10mm×10mm程度のものが利用できる。また周波数決定用コンデンサの大きさは、5mmφ×10mm程度であろう。そう考えると直流差動増幅器と副搬送波発振器はそれぞれ13mm×20mm×33mm程度の空間内におさまる。全く同様に、5チャンネルのゲージバランスも、また安定化電源も、さらには低域ろ波器ならびに増幅器も、13mm×20mm×33mmの空間内におさまってしまう。

したがって副搬送波部全体でも55mm×85mm×35mm以内におさまれる。この大きさは従来NAL-16ロケット用として使われてきたものに比較すれば1/40以下の容積である。一例として、このような副搬送波部の部品配置ならびに寸法を描けば図13のようになる。

一方送信部の方は5で述べたような理由から現在の寸法より小型化することは困難であろう(試作した送信部寸法は100mm×35mm×50mmである)。

以上集積回路化によるテレメータ装置の小型化と現在の集積回路上の技術レベルに立った場合のその限界について述べたが、多少ともこの方面にたずさわる方々に参考になれば幸いである。

最後に本稿をまとめるように御鞭撻下さった樋口計測部長、田畑研究室長に感謝致します。

文 献

- 1) 新田慶治; テレメータ機上装置の小型化の研究, 航技研資料 TM-79
- 2) 新田慶治他; FM多重テレメータの動特性, 航技研報告 TR-124
- 3) R. H. Alderson & F. Ashwork; Vacuum Deposited Films of Nickel-Chromium Alloy, Brit. J. Appl. physics, vol 8, No.5, 1957.

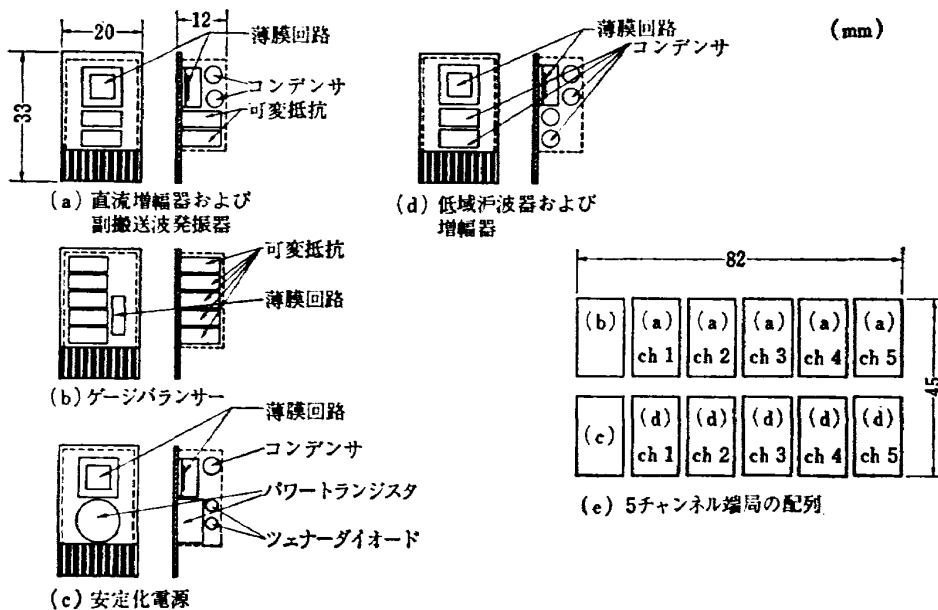


図 13

- 4) L. Holland; Vacuum Deposition of Thin Films John Wiley and Sons (1960)
- 5) 薄膜工学ハンドブック I-34
- 6) M. Beckerman & R. E. Fhum; The Electrical and Structural Properties of Dielectric Metal Mixtures, Trans. Eighth Nat'l Vacuum Symp., p. 906 (1961)
- 7) 太田他; 電圧一周波数変換回路
電子技術, vol 6-6, pp.116~119 (1964)

付録A・金属薄膜抵抗の性質

a. 電気伝導の形状効果

金属内の自由電子密度を $N[\text{Cm}^{-3}]$, 平均自由行路 $\lambda[\text{Cm}]$, 膜厚を $d[\text{Cm}]$ とすると膜厚が十分厚い場合の伝導度 $\lambda_{\infty}[\Omega\text{-Cm}]$ のは次式で与えられる。

$$\sigma_{\infty} = (1/2) \cdot (Ne^2\lambda_{\infty}) / (mv) \quad (\text{A} \cdot 1)$$

ただし

e : 自由電子の電荷 [Coul]

m : 自由電子の質量 [g]

τ_{∞} : 膜厚が十分厚い場合の衝突緩和時間 [sec]

τ : 膜厚が薄い場合の衝突緩和時間 [sec]

λ_{∞} : 膜厚が十分厚い場合の平均自由行路 [Cm]

λ : 膜厚が薄い場合の平均自由行路 [Cm]

v_{∞} : 膜厚が十分厚い場合の自由電子の平均速度 [Cm/sec]

v : 膜厚が薄い場合の平均速度 [Cm/sec]

$$\lambda = \tau v \quad [\text{Cm}]$$

$$\lambda_{\infty} = \tau_{\infty} \cdot v_{\infty} \quad [\text{Cm}]$$

いま自由電子の平均速度がフェルミ分布していると仮定すれば, $\lambda_{\infty} N^2 / \lambda_{\infty} = \lambda N^2 / \sigma = 1.27 \times 10^{-4}$ となり各金属の N と λ_{∞} が与えられれば, 膜厚が十分厚い場合の比抵抗 $\delta_{\infty} = 1/\sigma_{\infty}$ は求まる。

表1は各金属の N と λ_{∞} とから比抵抗を計算したものであるが膜厚が薄くなると, 表面における電子の散乱のため実効的なが短くなり伝導度は小さくなる。この効果については Holland⁴⁾ 等が計算しているが近似的には次式で与えられる。

$$\rho_{\infty} / \rho = \sigma / \sigma_{\infty} \doteq 1 - (3/8)(\lambda_{\infty} / d)^5 \quad (\text{A} \cdot 2)$$

したがって表1の値を(A・2)に代入し膜厚と比抵抗の関係を計算すると図A.1のようになる。

しかしながらいくら膜厚を薄くして高い比抵抗を得ようとしても, 格子不整や凝集効果のため, 安定性の上から無理で, 一般には膜厚の限界は 50\AA 程度であると云われ, その場合の各金属薄膜の比抵抗は表⁵⁾

の通りである。

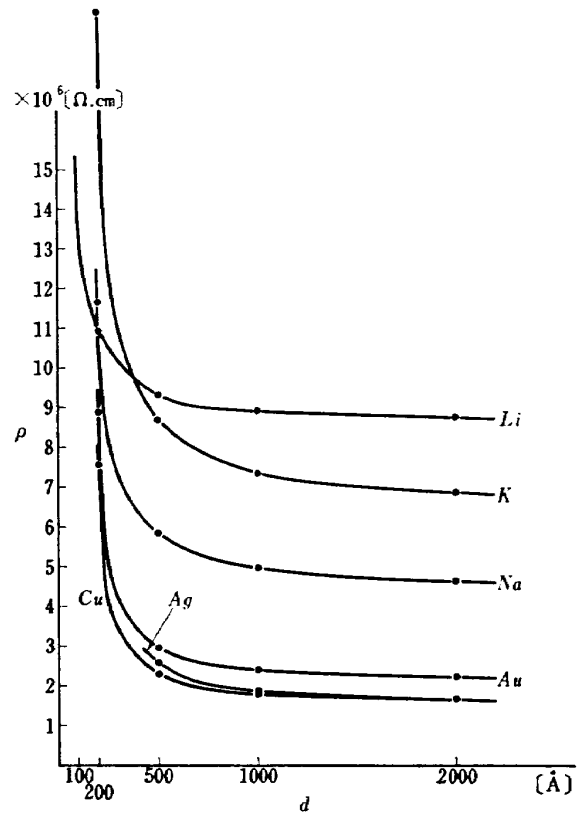


図 A.1 比抵抗と膜厚

b. 薄膜金属の抵抗温度係数

比抵抗の温度変化は平均自由行路 λ の変化によって生ずるものと考えられる。いま(A・1)の ρ_{∞} , λ_{∞} に関し温度 T についての変分をとれば

$$\begin{aligned} \alpha_p &= (1/\rho_{\infty})(d\rho_{\infty}/dT) = -(1/\lambda_{\infty})(d\lambda_{\infty}/dT) \\ &= -d(\ln\lambda_{\infty})/dT = d(\ln(1/\lambda_{\infty}))/dT \\ &= \lambda_{\infty} d(1/\lambda_{\infty})/dT \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 3)$$

全く同様にして

$$\alpha = \lambda d(1/\lambda)dT \quad (\text{A} \cdot 4)$$

ただし α_{∞} : 膜厚が十分厚い場合の抵抗温度係数

α : 膜厚が薄い場合の抵抗温度係数

したがって $d(1/\lambda)/dT = d(1/\lambda_{\infty})/dT = \text{一定}$ と考えてもよいから

$$\alpha / \alpha_{\infty} = \lambda / \lambda_{\infty} \quad (\text{A} \cdot 5)$$

一方(A・1)から $\rho\lambda = \rho_{\infty}\lambda_{\infty} = \text{一定}$ であるから

$$\begin{aligned} \alpha / \alpha_{\infty} &= \rho_{\infty} / \rho \quad \text{となり} \quad (\text{A} \cdot 2) \text{ を代入して} \\ \alpha &= \alpha_{\infty} (1 - (3/8)(\lambda_{\infty} / d)) \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 6)$$

を得る。

(A・6)から膜厚が薄くなるほど比抵抗が高くなりかつ温度係数が下がるので, 付録Bで示すサーメット抵抗に比較し若干比抵抗が低い点をのぞけば, 集積回路

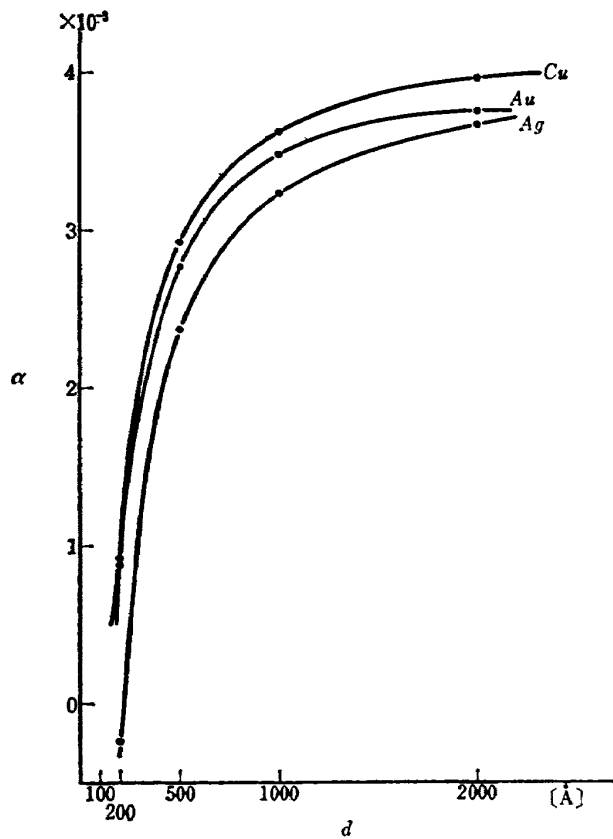


図 A.2 温度係数と膜厚

用の素子としては望ましい性質をもっていることがわかる。図A.2 は金属薄膜抵抗の一例としてCu, Ag, Au の比抵抗を(A・5)から計算したものである。

付録B Cr-SiO 膜抵抗の性質

金属薄膜で高い比抵抗のものを得るには1000Å以下の膜厚にする必要があるが、当然薄くすることにより膜強度が低下するので望ましくない。十分な膜強度をもつ高比抵抗体を得るためには金属とセラミックを混合蒸着させる方法がありこのような抵抗体をサーメット薄膜抵抗と云う。サーメット薄膜抵抗には種々のものがあるが、Beckerman⁶⁾等によればCrとSiOを別個の蒸発源に入れ各々の蒸発速度を制限しながら蒸着する同時蒸着法 Cr-SiO 膜が最も膜強度が強かつ温度係数も小さいとされている。図B・1⁶⁾はこのCr-SiO膜の温度特性であって、成分比が50%-50%の時が最も望ましい。図B・2⁶⁾は、成分比と比抵抗の関係を示す。図B・2から膜厚が1500Åの時の比抵抗は0.25mΩ・Cmであるから面積比抵抗に計算し直すと0.25mΩ・Cm・Cm²/1500Å=1.7kΩ/(mm)²を得る。

表 1 膜厚の十分厚い場合の金属比抵抗⁵⁾

	Li	Na	K	Cu	Ag	Au
$N \times 10^{23} [\text{Cm}^{-3}]$	46.5	25.5	13.3	84.6	58.6	58.9
$\rho_{\infty} \times 10^{-6} [\Omega \cdot \text{Cm}]$	8.55	4.34	6.38	1.55	1.49	2.04
$\lambda_p [\text{Å}]$	115	338	354	424	564	411

表 2 安定に作りうる金属薄膜抵抗特性⁵⁾

金属	面積比抵抗 [Ω/mm ²]	温度係数 [%/°C]
Au	5.0	0.3
Pt	15.6	0.3
Rh	15.8	0.2
Pd	20.8	0.2
Ni	41.0	0.5
Ir	42.5	0.4
Mo	49.0	0.02
Ti	59.5	0.07
Cr	62.0	0.06
Zr	134.0	0.01
Ta	768.0	<0.01
W	4225.0	<0.01
Ni-Cr	300	<0.015

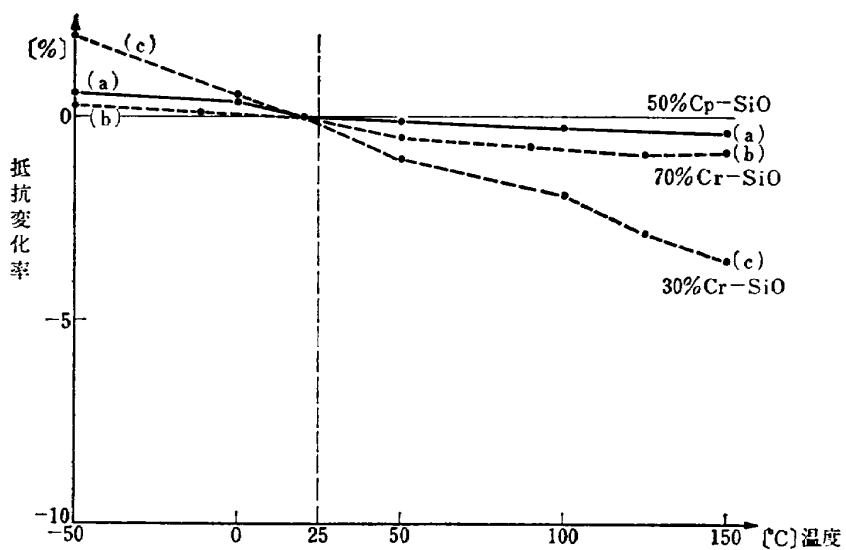


図 B.1 Cr-SiO 膜の抵抗温度変化

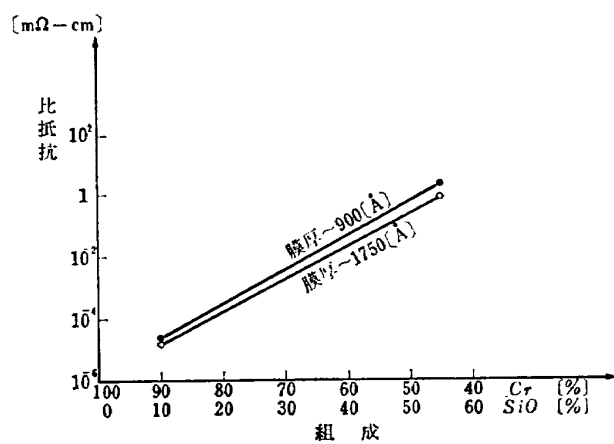


図 B.2 同時蒸着による Cr-SiO 膜の組成比と比抵抗

正 誤 表

ページ	行	正	誤
4	11	$1/R = (1/R_B) + \dots$	$1/R (1/R_B) + \dots$
6	18	漏話の実験	漏話と実験
10	7から 17	$\alpha_p = \dots$	$\alpha_p = \dots$
10	7から 5	$\dots (\lambda_p/d)$	$\dots (\lambda_p/d)$

TM-97	高マッハ数風洞について(II)	1967年1月	吉永崇井上建二 広田村正行榎篤彦 野村茂昭相原康 大月正浄男鈴木孝 田畑正浄男治木繁 近藤博昌大城章 望月昌斎藤一 五代富文斎藤信 五湯克宜伊藤克 堀武敏一 越出恒夫 築地洋 林洋 森田一 田甫之
TM-98	40kWプラズマ発生装置の諸特性	1967年1月	
TM-99	搭載機器用環境試験装置の特性	1967年2月	
TM-100	二連型リフトエンジンの吸込み抵抗	1967年3月	
TM-101	低圧環境下における固体ロケットモータの性能	1967年3月	
TM-102	弾性支持片持板の振動	1967年3月	
TM-103	結合梁の振動について	1967年3月	
TM-104	平板翼模型の固有振動モードの測定	1967年4月	
TM-105	非定常境界層方程式を含む放物型積分方程式の数値解法	1967年4月	
TM-106	動安定微係数測定用風洞天秤について	1967年5月	高島一明 榎原盛三 原一亘 利北出大 金成正好 岡部祐二 丸矩夫 川幡長 北村清美 柳沢友三 高橋秀夫 柳沢三
TM-107	プロペラ後流偏向型STOL機の風洞試験(II)	1967年6月	
TM-108	インダクタンス型小型圧力変換器の試作とその応用	1967年7月	
TM-109	ロケットの飛しょう径路計算のためのプログラム	1967年7月	戸川隼人 石黒登美子
TM-110	二次元スラットおよびスロツテッドフラップの実験的研究(I)	1967年8月	丸矩夫 北村清美 川幡長勝 西村博史
TM-111	リフトジェットVTOL機の離陸径路に関する近似解	1967年8月	
TM-112	極超音速風洞ペブル加熱器の特性	1967年8月	橋爪宏 橋本登 森田光男 岩部柱 関根静雄 武田克 藤井昭一 松木正 五味光男 吉正勝 大塚光吉 鈴木邦 田丸貞貞 乙木安 鈴木邦男 相波雄 邦男 相波哲
TM-113	リフトジェットエンジン試験設備(II)	1967年9月	
TM-114	五段遷音速軸流圧縮機の空力設計	1967年9月	
TM-115	燃料蒸発管に関する研究(I)	1967年9月	
TM-116	高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(I)	1967年9月	

注：欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料117号

昭和42年9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)44-9171(代表)

印刷所 一誠社総合印刷株式会社
東京都武蔵野市御殿山1-6-10

