

# エポキシ樹脂含浸モールド形高電圧筒状絶縁物

An Epoxy Molded System for High-voltage Cylindrical Insulating Materials

磯 貝 時 男\* 井 上 利 夫\*\*  
Tokio Isogai Toshio Inoue

## 要 旨

新方式により開発した紙基材エポキシ樹脂含浸モールド形筒状絶縁物の製作要因および実用上、特に問題とされるいくつかの特性について紹介した。

本方式によればこの種の含浸モールド形筒状絶縁物製作時もっともむずかしい問題であり、主として製品の径方向のサイズに大きく影響されるき裂発生の問題を実用上必要とされる領域全般にわたって解決することができる。製作された絶縁物はすぐれた誘電特性と、樹脂の完全含浸により非常に安定な耐電圧特性を有している。さらに実用時間問題となる耐湿性、耐冷熱サイクル性、接着強度などにも十分な特性を有していることが確認されたが、これらのことは本方式による筒状絶縁物が、高電圧機器絶縁の高性能化、小形化に有効であることを示すものである。

## 1. 緒 言

近年エポキシ樹脂の高電圧絶縁への応用が盛んになり各方面で脚光をあびてきているが、紙あるいは布を基材とし、エポキシ樹脂を用いて作った積層筒状絶縁物（各種絶縁筒、変圧器用コンデンサブッシング、ケーブル付属品など含む）の開発も国の内外で活発になっている<sup>(1)~(5)</sup>。

この種のエポキシモールド絶縁には、紙基材を所定形状に巻回しこれに液状樹脂を減圧含浸、硬化させた「含浸モールド形」のものと、紙基材に樹脂をあらかじめ塗布または含浸させておきこれを所定形状に巻回して硬化させた「塗工紙形」の2種あるが、各研究者それぞれ独特な成形方法によって製品を開発している。

日立製作所においては約10年前から新しいタイプの「含浸モールド形」筒状エポキシモールド絶縁の研究に着手してきたが、特殊な成形法を採用することにより高性能なエポキシ含浸モールド絶縁法の開発に成功した。これら絶縁物の製作上の問題点といくつかの特性について記述する。

## 2. エポキシ含浸モールド絶縁筒のき裂の問題

紙基材を所定形状に巻回し、これに樹脂を含浸硬化させる紙基材積層筒状エポキシ含浸モールド形絶縁物の製作において、もっともむずかしいことは含浸エポキシ樹脂の硬化時に示す収縮ストレスや熱収縮のストレスと、構成材料や構造の非等方性などが相まってき裂（主として基材の層に沿って発生する）が発生しやすいことで、これを解決することが最初の問題となる。このため基材には含浸性、柔軟性が要求され、含浸樹脂には低粘度でしかも収縮率が小さく、さらに硬化時の発熱もできるだけ低く、機械特性にもすぐれているという条件が満たされていなければならない。さらに重要なことは含浸樹脂の硬化法であり、前述したように樹脂の硬化時収縮によるストレスを緩和するような方法をとらねばならない。

き裂の発生はまた製作する筒状絶縁物のサイズにも大きく関係することに注意しなければならない。すなわち絶縁厚のうすいものでは理想的なものを製作し得ても100 mm, 200 mmと厚肉になればなるほどき裂発生の可能性も大きくなり、したがって基材、含浸樹脂、硬化法に望まれる条件はいっそうきびしくなる。超々高圧送電の具体的実施化時代を迎えた現在、エポキシモールド法の採用による高性能で厚肉な筒状絶縁物の完成は、高電圧機器絶縁の小形化のうえ

表1 エポキシ含浸モールド形筒状絶縁物製作の要点

項 目	要 点
形 式	エポキシ樹脂含浸モールド形
含 浸 方 式	減 圧 含 浸 方 式
モ ー ル ド 方 式	特 殊 モ ー ル ド 方 式
使 用 基 材	特殊加工クラフト絶縁紙および不織布。 含浸体に要求される性質により使いわける。
使 用 樹 脂	酸無水物系含浸用エポキシ樹脂。 硬化時収縮率小さく、硬化反応熱低い。 独特な配合で pot life など試料サイズにより調節。

に非常に望ましいことである。

筆者らはこれら各種の問題点を詳細に検討し非常に厚肉なものまでき裂なしに製作し、かつきわめて高性能なエポキシ含浸モールド絶縁の開発に成功した。表1は製作上の要点をとりまとめたものである。特殊なモールド法によって紙層中に全くボイドが残されていない。使用樹脂は粘度とポットライフ、硬化時収縮と反応熱に対して特に重点的に検討された。

特に重要な問題点であったき裂発生に対しては、含浸モールド形、塗工紙形を問わず筒状絶縁物全般にわたって通常中心管径と厚肉の関係があげられている<sup>(6)</sup>が、特殊なモールド方式の採用によって実用上要求される領域全般にわたって全くき裂のないものが製作された。またこのようなき裂の抑制のみならず生産性の問題からモールドは比較的短時間に行なわれるのが望ましく、さらに含浸樹脂の硬化時発熱によるひずみの発生を抑える意味でも本方式の採用はきわめて有効である。

## 3. エポキシ樹脂含浸モールド形筒状絶縁物の特性

筒状絶縁物に要求される特性はいろいろあるが、実用上特に必要と思われるいくつかの特性について記述する。

### 3.1 電 気 特 性

図1に示したのが本方式によって得られた絶縁物の  $\tan \delta$ ,  $\epsilon$  の温度特性である。図中1形, 2形, 3形は主として基材の相違によるものであるがそのほかの特性とあわせ考えて、対象物によって使いわけることが可能である。しかし、どのタイプのものでも実用上さしつかえない良好な特性といえる。

電圧特性も非常に良好で、 $\tan \delta$  特性、コロナ特性など実用上全く問題ないが一例について示すと図2のようである。現在までに得られた実績をもとにして示したものであるが、試料は絶縁層内にそう入された一つの電極と内径電極に電圧を印加する構造の筒状絶縁物

\* 日立製作所日立研究所

\*\* 日立製作所日立研究所 工学博士

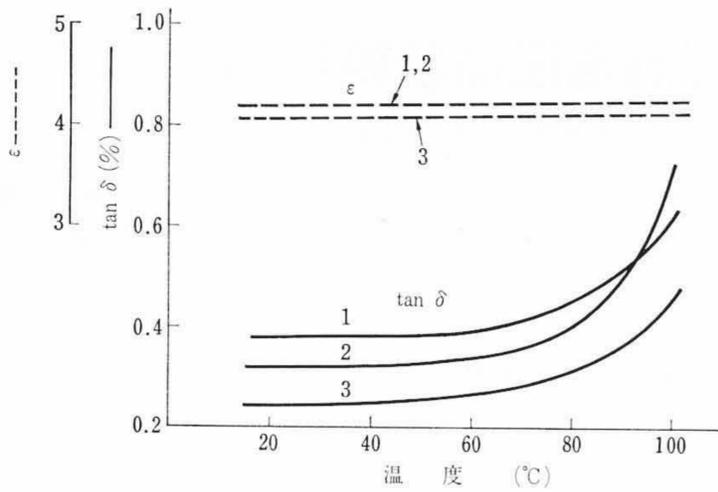


図1 tanδ, εの温度特性

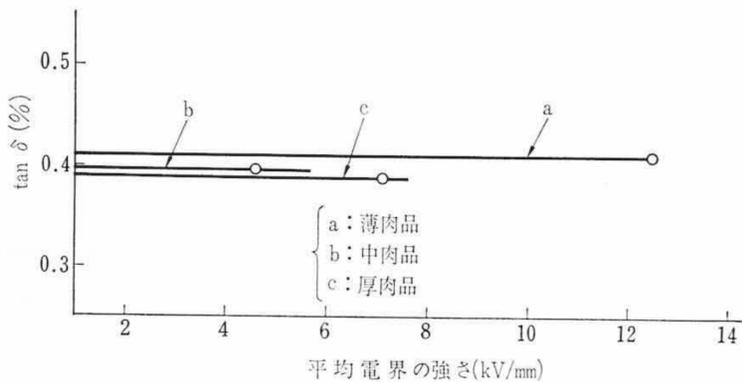


図2 tanδの平均電界強度特性

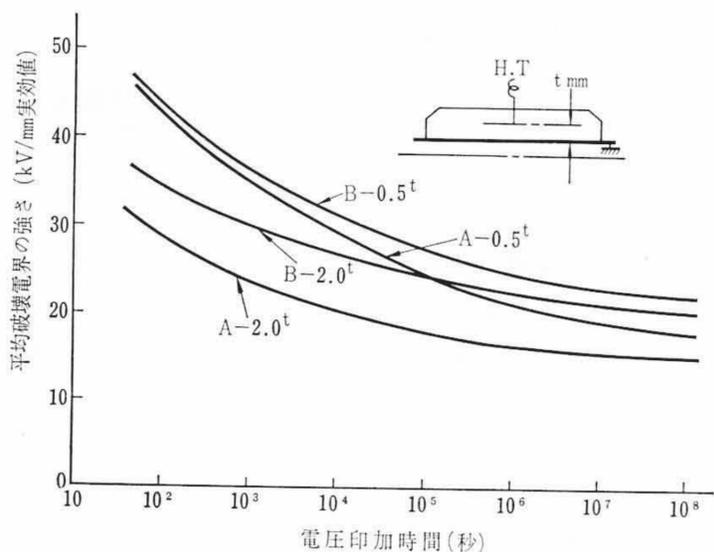


図3 V-t 特性

である。図からわかるように tanδ-電圧特性は平坦で従来の絶縁筒よりもたいへんすぐれている。図中○印の電界までは筒内コロナが全く観測されない実績である。これ以上の平均電界では外部コロナが発生したため明白ではないが、tanδ-電圧特性が全く平坦なことから tanδ を測定した電界まで内部コロナが発生していないものと考えられる。

中肉品、厚肉品については今のところ平均電界 10 kV/mm 程度以上の特性測定の実績を得ていないが、薄肉品と同等の特性を十分維持しているものと考えている。

総絶縁厚で 10 mm 未満を薄肉品、60 mm 未満を中肉品と称し、それ以上の絶縁厚を有するものを厚肉品と称しているが、図2のデータは測定電極間距離がそれぞれ 4 mm、35 mm、70 mm の場合について示したものである。また図2の特性を示した試料はすべて図1、1形の材料による筒状絶縁物試料である。

次にこの種の筒状絶縁物について、破壊までの課電時間特性(V-t特性と称す)の基礎データを図3に示したが、短時間領域よりむしろ長時間領域にすぐれた特性をもつようにくふうしてある。特にB形はすぐれているが、これはA形を改良したものである。V-t特性における厚みの効果が出ているが、これは電極間距離が大きくなる

表2 エポキシ含浸モールド形筒状絶縁物の耐圧安定性

試#	試料寸法	試験内容と結果
1	内径 50φ 全長 1,471 mm 測定電極間距離 60.0 mm	① AC50 c/s 耐圧 385 kV O. K インパルス耐圧 825 kV O. K
		② AC50 c/s 耐圧 760 kV O. K
2	内径 50.8φ 全長 1,350 mm 測定電極間距離 30.0 mm	AC50 c/s 耐圧 720 kV O. K インパルス耐圧 1,260 kV O. K
3	内径 54.0φ 全長 1,750 mm 測定電極間距離 60.0 mm	AC50 c/s 耐圧 800 kV O. K インパルス耐圧 2,100 kV O. K
4	内径 60.0φ 全長 2,740 mm 測定電極間距離 67 mm	AC50 c/s 耐圧 550 kV O. K
5	内径 320φ 全長 464 mm 測定電極間距離 12 mm	AC50 c/s 耐圧 150 kV O. K インパルス耐圧 210 kV O. K
6	内径 52φ 全長 800 mm 測定電極間距離 20 mm	AC50 c/s 耐圧 460 kV O. K インパルス耐圧 840 kV O. K

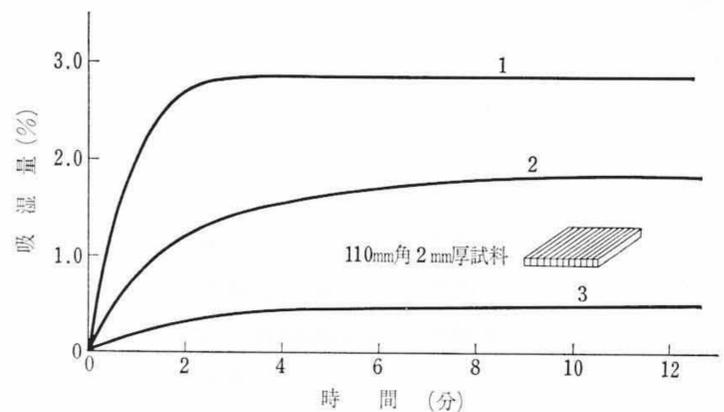


図4 積層板の吸湿特性

につれて電極内の最大電界も、また電極端最大電界も、図の縦軸に示した平均電界より高くなっていくためである。この種の絶縁筒の長時間特性には最低破壊電界の強さ(半永久的に破壊が生じないと思われる電界の強さ)が存在するが、その値も著しく高いことが図より推定される。

インパルス耐圧はA形では 110~120 kV/mm、B形では 120~130 kV/mm (1×40 μs 標準波、いずれも 0.5 t のもので測定)である。これらの耐圧データはすべてごく薄肉品のものであるが中肉品、厚肉品のものでも非常に良い特性を示しておりそのいくつかの例を表2に示した。これらの試料はいずれも特殊設計による筒状絶縁物であるが、その耐圧の安定性が注目される。

以上のように、この種のエポキシ樹脂含浸モールド形筒状絶縁物の耐電圧特性はきわめてすぐれており、これらを利用することにより高電圧、小形な筒状絶縁の設計が容易になる。

### 3.2 耐湿特性と耐冷熱サイクル特性

エポキシ樹脂含浸モールド形絶縁物のもつ物理的、機械的諸特性のうち耐湿性と温度変化に対する安定性(耐冷熱サイクル特性)は特に重要な問題である。

#### 3.2.1 耐湿性

図4に 40℃、100% RH のふん囲気中での本方式による積層絶縁物の吸湿量の時間特性を示した。試料は図中に示したように特に吸湿しやすい構造のものである。約4日ほどで吸湿量は大体飽和するが飽和量は1形、2形、3形それぞれ約 2.85%、1.85%、0.5% である。1形、2形、3形の違いは図1でも説明したように主として基材の差異によるものであり、1形のものでも実用上ほとんど問題はないが、特にすぐれた耐湿性を必要とする場合には3形が良い。これらは対象物によって使いわけすることや局部的な使いわけが可能である。

表3は比較的大形な筒状絶縁物によるいろいろな条件での耐湿特性と乾燥による特性の回復状況を示したものである。特性判定はすべて tanδ 特性によった。試料は内径 38φ、外径 120φ、全長

表3 筒状絶縁物の耐湿性

項目	試験条件	tan δ	
1	常温, 常湿大気中に 84 日間自然放置 (室内)	放置前	0.35%
		放置後	0.60%
2	同上試験後 40℃ 100% RH ふん囲気中に 35 日間放置	放置前	0.60%
		15 日後	1.00%
		35 日後	1.10%
3	同上試験後, 常温, 常湿中に 7 日間放置	放置前	1.10%
		7 日後	0.76%
4	同上試験後 60℃ で減圧乾燥処理 6h 行なう	乾燥処理前	0.76%
		乾燥処理後	0.38%

表4 筒状絶縁物の耐冷熱サイクル特性

試 #	試料構造	ヒートサイクル条件および試験結果
1	内径 25 φ, 外径 35 φ, 全長 400 mm の筒状絶縁物で, 金属との接着をみるため絶縁層内にハク状金属をそう入。	+90℃ 2h <sup>*</sup> , -10℃ 2h の条件で 50 c/s。更に +80℃ 2h <sup>**</sup> , -20℃ 2h の条件で 60 c/s。 き裂, ハク離は全くな <sup>く</sup> tan δ, コロナ特性異常なし
2	内径 38 φ, 外径 120 φ, 全長 1,200 mm の筒状絶縁物で金属との接着もみるためハク状金属を絶縁層内にそう入。	+80℃ 2h <sup>**</sup> , -20℃ 2h の条件で 70 c/s。 き裂, ハク離は全くな <sup>く</sup> tan δ, コロナ特性など異常なし。
3	内径 320 φ, 外径 402 φ, 全長 1,500 mm の筒状絶縁物で金属との接着もみるため絶縁層内にハク状金属をそう入。	+50℃ 1h <sup>***</sup> , -20℃ 1h の条件で 10 c/s。 き裂, ハク離は全くな <sup>く</sup> tan δ, コロナ特性など異常なし。

(注) \* :昇温, 降温に total で 4h  
 \*\* :昇温, 降温に total で 4h  
 \*\*\* :昇温, 降温に total で 2h。いずれも試料が内部まで所定温度になることを確認。

1,300 mm のもので材料は 1 形(図 1, 図 4)である。表 3 からわかるように常温, 常湿の大気中(室内)にかなり長時間放置していてもそれほど吸湿は進まず, また強制的に吸湿させた試料もその特性の回復が非常に容易であり, これらの特性を十分認識しておけば吸湿性の面で問題になることはまず皆無と考えられる。なお表中の試験項目 1 の大気中放置前と, 項目 4 の減圧乾燥処理後の両者について tan δ の電圧特性, コロナ特性を検討し, 特に問題のないことを確認している。

筆者らはさらに吸湿の機構, 基材の層方向と吸湿特性の関係, 樹脂含量と吸湿特性の関係, 吸湿量と各種電気特性との関係, 耐湿表面処理の問題など種々検討を重ね, エポキシ樹脂含浸モールド形筒状絶縁物の耐湿の問題に対処しているが, これらの問題については今後機をみて別途報告したい。

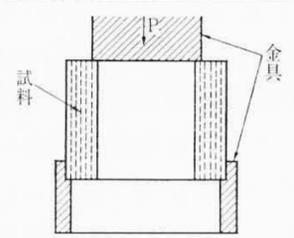
3.2.2 耐冷熱サイクル特性

耐冷熱サイクル特性は筒状絶縁物のみならず, エポキシ樹脂モールド品全般にわたる実用上もっとも懸念される点である。いかにき裂なしに製作し, 種々の特性がすぐれていても使用中の冷熱変化によってき裂が発生すると, その部分にコロナ放電が発生し寿命を著しく短縮するし, き裂の状態によっては瞬時のうちに絶縁物が破壊し大きな事故をひきおこすおそれがあるからである。筒状積層絶縁物は, その層方向により絶縁物の熱膨張率が異なることや内部に金属を含む場合は, 絶縁層と金属との熱膨張率の相異などによってき裂が発生するのであるが, 筆者らは本方式によって得られた筒状絶縁物について数種の実用試験を行ないすぐれた耐冷熱サイクル特性をもつことを確認した。二, 三の例について表 4 にまとめて示した。

表 4 からわかるように本方式による筒状絶縁物は, 絶縁層内のき裂発生に対する安定性はもちろんのこと, 金属との接着も非常に良好であり, 試験条件の過酷さから考えてすぐれたものと判断できる。

表5 筒状絶縁物の接着の強さ

ハク離部分	接着の強さ
絶縁層部	>60kg/cm <sup>2</sup>
そう入金属箔部	>30kg/cm <sup>2</sup>
接着の強さ $\frac{\text{ハク離時圧力(P)}}{\text{ハク離部分面積}}$	



耐き裂性の判定は tan δ の電圧特性, コロナ特性の測定で行なわれた。筆者らは冷熱サイクル試験としてさらに小形のもの, 大形のものなどいろいろ検討しているが十分な特性が得られている。

3.3 絶縁層の接着の強さ

表 5 は本方式による筒状絶縁物の沿層方向の接着の強さを示したもので, 絶縁層中に金属ハクをそう入した場合の, 金属ハクと絶縁層との接着の強さも示した。高電圧絶縁筒, プッシング, 各種シールド筒など筒状絶縁物を使用する場合通常かなり大きな応力が加えられている。その応力には絶縁物の紙沿層方向に加わる力, 貫層方向に加わる力など種々あるが, まず実用時の問題として沿層方向に加わる応力が重要である。この方向における接着の強さは, 使用条件によって種々要求値も異なるが過酷な使用条件を考慮すると 5 kg/cm<sup>2</sup> 程度の値が満たされる必要がある。この点エポキシ樹脂含浸モールド形絶縁物の接着の強さは表 5 に示したように, 絶縁層で 60 kg/cm<sup>2</sup> 以上もあり十分な安全性が保証されている。また絶縁層中にハク状金属をそう入した場合でも 30 kg/cm<sup>2</sup> 以上あり, さらにこのハク状金属の場合は, 材質, 構造によってより以上高い接着の強さをもつものが比較的容易に得られるので, 実用上全く心配ないものと考えられる。

以上筒状絶縁物を実用する場合特に問題になると考えられる諸特性について記述してきたが, 筆者らはさらに油中長時間使用における特性の安定性などを含む耐油性(鉱油, 不燃性合成油), 長時間課電使用における特性の安定性, 機械的, 熱的諸特性など広範囲にわたって検討を加えたが, 各特性とも非常にすぐれていることを確認している。

4. 結 言

以上筆者らが検討, 開発した新方式によるエポキシ樹脂含浸モールド形筒状絶縁物について, その構成要因, 製作方法と耐き裂性, また実用上特に重要と思われる誘電特性, 耐電圧特性, 耐冷熱サイクル特性, 吸湿特性, 沿層方向の接着の強さなどについて記述してきたが要約すると次のとおりである。

- (1) 基材, 含浸樹脂, モールド方式全般を含む新方式の採用によりエポキシ樹脂含浸モールド形筒状絶縁物製作時の問題である完全含浸の問題, 含浸樹脂の硬化時発熱の問題, き裂発生の問題などに対して実用上要求される絶縁厚全般にわたって解決し得たのをはじめ, 本方式は比較的短時間での成形の必要性の問題や材料費など経済性の問題の解決にも非常に有効である。
- (2) 得られた絶縁物は樹脂の完全含浸とき裂の全くないことから tan δ-電圧特性, コロナ特性など非常に良好である。また絶縁紙中への樹脂の含浸程度によって大きく影響される耐電圧特性, 特に長時間課電圧特性にすぐれ, 筒状絶縁物の高電圧, 小形化にきわめて有効である。耐電圧特性では測定電極間距離 30 mm の中肉品, 60 mm の厚肉品でそれぞれ AC 1 分間耐圧 24 kV/mm, 13.3 kV/mm, インパルス耐圧 42 kV/mm, 38.3 kV/mm まで異常なしの実績を得ているが, 気中放電によりこれ以上の確認ができなかったもので, 極薄品の特性から考えさらに高電圧まで安定

な特性を示すものと推定される。

誘電特性、温度特性においても含浸樹脂と基材の選択によって実用上全く問題ないものとなっている。

(3) 絶縁物の吸湿特性は使用材料、主として基材によって異なるが実用上十分な耐湿絶縁物を得ることができる。また比較的吸湿しやすい材料を用いて作った中肉絶縁物による吸湿実験によれば、40℃、100% RH ふん囲気内で35日間吸湿して40℃における  $\tan \delta$  で約0.8%上昇したが、乾燥処理によって容易に特性は回復した。これらのことは筒状絶縁物を実用する際非常に有利である。

(4) この種の筒状絶縁物を実用する際、通常もっとも懸念される耐冷熱サイクル性についても、各種サイズのものについて検討した結果、実用上ほとんど問題ないことを確認した。試料としては金属ハクを絶縁層中にそう入したものを採用したが、この部分にもハク離は全く現われなかった。

(5) 紙層に沿ったいわゆる沿層方向の接着の強さを検討し実用上問題ないことを確認した。

(6) そのほか油中長時間使用における特性の安定性、機械的、熱的諸性質についても検討を加えたが、本方式による筒状絶縁物が実用上すぐれた性質をもつことを確認した。

なお本方式による筒状絶縁物は、いわゆる高電圧絶縁筒はもちろ

ん、それ以外の筒状絶縁物であるケーブル端末や変圧器用ブッシング、壁貫ブッシング、特殊なシールド筒などへの応用が考えられ、筆者らは超々高圧送電の具体的実施化時代を迎えた昨今電力用機器絶縁の高性能、小形化をめざして広範囲な応用分野を開拓するため検討を進めていく所存である。

終わりにのぞみ本研究を進めるに当たり、終始ご協力いただいた日立製作所国分工場、日立電線株式会社日高工場および日立製作所日立研究所の関係各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 副島, 増田ほか3名: 古河電工時報 第30号 p.14 (昭37-11)  
菊地: 昭39年電気学会東京支部大会 271  
細川: 昭41年電気学会東京支部大会 282
- (2) G. L. Atkinson, W. R. Thomas: I. E. E. E. Winter Power Meeting (1966.1~2) Conference Paper 66-165
- (3) Ciba 社 technical note (1966-3)
- (4) H. Kappeler: Bulletin de L'association Suisse des Electriciens 1962. 11, p. 557
- (5) L. Balk: Proceedings of Sixth Electrical Insulation Conference 1965, 9 に発表した論文
- (6) K. Antolic: Schweizer Archiv für Angewandte Wissenschaft und Technik p.309 (1958-10)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第817837号

諏訪志郎・近藤秀雄

演 算 器

この考案は抵抗ひずみ素子によって構成されたブリッジ回路が、2種の入力、すなわちひずみ量とブリッジの電源電圧との積によって出力電圧を発生することを利用して演算を行なわせる演算器にかかわるもので、図1は抵抗ひずみ素子によるブリッジの原理図でありひずみ量から出力電圧を発生するもので、 $R_1, R_2, R_3, R_4$ はそれぞれ抵抗ひずみ素子の抵抗を表わし、いまこれら抵抗をすべて等しいとすると各変化分  $\Delta R$  もそれぞれ等しく、ひずみ量と出力電圧  $E_0$  との関係は抵抗ひずみ素子に与えられたひずみ量を  $\epsilon$ 、抵抗ひずみ素子のゲージ率  $G_F$  (一定値)、電源電圧を  $E$  とすれば、 $E_0 = \epsilon E G_F$  なる関係となり、出力電圧  $E_0$  は与えられたひずみ量  $\epsilon$  と電源電圧  $E$  の積に比例するからして、本回路を用いることによりひずみ量  $\epsilon$  と電源電圧  $E$  を変数と考えれば、2種の入力の積に比例する出力が得られるよ

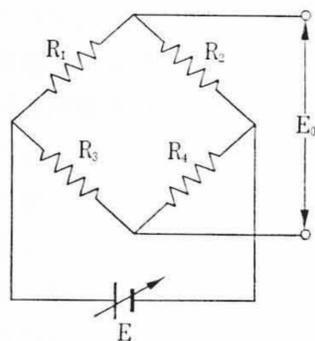


図 1

うな演算が可能となる。図2は図1に示す原理を用い、圧力温度補正を施してなる演算器の一例で、1は測定流体の測定点を表わすもので、これより圧力  $P_1$  に比例する信号および測定状態における流体温度  $T_1$  (°K) に比例する信号を取り出すものである。2は圧力電流変換器で、測定圧力  $P_1$  に比例する電流  $I$  を出力として導出する。3は抵抗ひずみ素子によるブリッジ、4は測温抵抗体、5は抵抗である。したがって抵抗体4および抵抗5の抵抗値を適宜選定することにより抵抗ひずみ素子3に流入する電流  $i$  は絶対温度に逆比例する関係が成立する。

本案によれば、抵抗ひずみ素子たとえばワイヤストレンゲージ、半導体抵抗素子などでブリッジを構成し、1個の入力を変位量として抵抗ひずみ素子にひずみを与え、他の1個の入力を親ブリッジの電源電圧とすると、ブリッジの出力電圧は上記の2個の入力信号の積で表わし得る演算が可能となるもので、圧力、温度、比重などの分野での工業的効果が期待できるものである。(西宮)

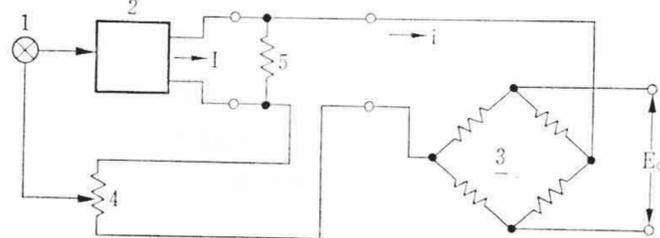


図 2