

氏 名 <sup>ます</sup> 橋 <sup>の</sup> 野 <sup>くに</sup> 邦 <sup>お</sup> 夫

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 58 年 5 月 11 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 32 年 3 月

金沢大学理学部化学科卒業

学 位 論 文 題 目 通信伝送路用ガラス複合材料の研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 池田 拓郎 東北大学教授 高橋 実

東北大学教授 虫明 康人

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

ガラスは古くから知られた材料であるが、その脆性のために高信頼性が要求される通信用部品としては、電子管等を除いてほとんど使用例がない。しかし、これを他の適切な材料と複合化することによって優れた特性を付与し、通信伝送路に使用可能な高信頼度部品を実現することができる。

本研究は、セラミックの上にガラスを被覆したグレーズドセラミック基板、および、光ガラスファイバとプラスチックとの複合体である光ファイバケーブルの 2 種類のガラス複合材料について、高性能化と高信頼化をねらいとした構成材料の開発と複合化のための構造設計に関するものである。

グレーズドセラミック基板については、セラミック材料の選定とグレーズ用ガラス組成の開発、および、これらを複合化するための構造設計、信頼性評価法の検討を行う。この結果、海底伝送方式中継器における混成 IC 用基板を実現する。一方、新しい伝送媒体としての光ファイバケーブルについては、光ファイバ製作技術の基礎的検討に引き続き、複合材料としての機械的熱的性質を考慮したプラスチック材料の選定、ファイバ外径の設計、光ファイバ心線および光ファイバケーブルの構造設計を行う。これらにより、中小容量伝送方式用の低損失・高信頼度光ファイバケーブルの実現をはかる。

## 第2章 通信伝送路用ガラス複合材料開発上の問題点

ガラスとセラミックスからなるグレーズドセラミック基板(図1)とガラスとプラスチックの複合材料である光ファイバケーブル(図2)について、おのおのの特性をいかし、通信伝送部品として使用できる高い信頼性を持った部品とするために、材料の選択および構造設計が必要である。

従来、表面の平滑性に優れているガラスが混成IC用基板に使われていた。しかし、回路の高密度化、トランジスタの高出力化にともない熱放散、機械強度、加工性が問題になり、グレーズドセラミック基板が要求され、本章では、この複合材料について、要求特性を明らかにした。また、光ファイバケーブルは全く新しい材料であり、この研究に対する要求特性および検討内容を明らかにした。それらをまとめて表1および表2に示す。

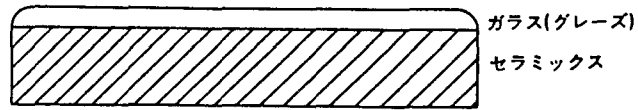


図1 グレーズドセラミック基板の構造

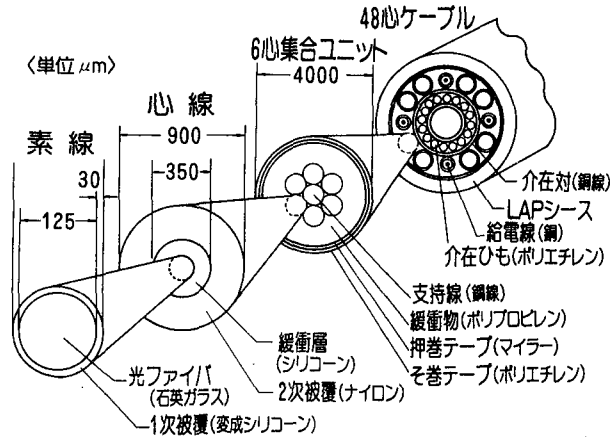


図2 光ファイバケーブルの概念図

表1 グレーズドセラミック基板の要求特性と検討内容

| 項目    | 特性   | 検討内容                    |
|-------|--|-------------------------|
| 放熱性   | 熱伝導度大  | 基板セラミックスの最適化            |
| 表面平滑性 | 表面あらさ $<0.01\mu\text{m}$   | 基板の平滑度<br>ガラス組成及びグレーズ技術 |
| 強度特性  | 衝撃強度 $\sim 30\text{G}$<br>熱衝撃 $\sim 300^\circ\text{C}$               | 基板セラミック<br>ガラス組成(熱膨張係数) |
| 電気特性  | 表面抵抗 $>10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$                                  | アルカリ含有量の低減              |
| 耐酸性   | エッチング速度 $<0.5\mu\text{m}/\text{秒}$<br>( $\text{HF}+\text{HNO}_3$ 混酸) | ガラス組成の最適化               |

表2 光ファイバケーブルの要求特性と検討内容

| 項目              | 特性                                | 検討内容                          |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 光ファイバ製作         | 低損失化<br>量産性                       | 不純物の低減<br>新製造法の開発             |
| 光ファイバ<br>外径設計   | 応力の低減化                            | 外径の最適化                        |
| 光ファイバ心線<br>構造設計 | 過剰損失<0.1dB/km<br>損失の温度変動<0.1dB/km | 緩衝層材料・外径の最適化<br>二次被覆材料・外径の最適化 |
| 光ケーブル<br>構造設計   | 過剰損失<0.2dB/km                     | ケーブル構造の最適化                    |

### 第3章 グレーズドセラミック用材料の組成と特性

本章では、グレーズドセラミック基板に用いるセラミック板の選択と、グレーズ用ガラスについてその組成の選択を行った。まず、セラミック板について、熱伝導度の良い入手し易いベリリヤ、アルミナを選び、各種純度のこれらセラミックスの表面形状、機械強度、耐熱性等を検討した。その結果を表3に示す。表面形状、機械強度、耐熱性については、純度97%以上のアルミナが優れている。

表3 セラミック基板材料の特性

| Sample      | Surface Roughness<br>( $\mu\text{m}$ ) | Bending Strength<br>(kgw/cm <sup>2</sup> ) | Heat Resistance |
|-------------|--|--|-----------------|
| Alumina *   | $\lesssim 2$                           | 4100                                       | No-breaking     |
| Beryllia ** | $\lesssim 10$                          | 1780                                       | Breaking        |

\* 97% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

\*\* 99% BeO

一方、グレーズ用ガラスについて、高軟化点を有し、低アルカリ濃度でガラス化するという観点から、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系、 $\text{SiO}_2\text{-BaO-Al}_2\text{O}_3$ 系、 $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3$ 系の3つの系を主体に検討した。これらの系でガラス化する領域を検討し、熱膨脹係数、軟化点等のガラス物性を評価し、アルミナ、ベリリヤ等のセラミックスに適合するグレーズ用ガラス組成の選定方法を明らかにし、併せて最適ガラス組成を選定した。検討したガラスの中で代表的ガラスの熱的性質を表4に示す。この中で、Na54組成ガラスがアルミナに、Na5417組成ガラスがベリリヤに適合する。

表4 代表的なグレーズ用ガラスの熱特性

| System  | Sample no. | $\alpha \times 10^{-6}$ | $T_s$ (°C) |
|---|------------|-------------------------|------------|
| $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$         | 91         | 4.8                     | 865        |
|   | 92         | 6.9                     | 815        |
|   | 122        | 6.4                     | 820        |
| $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO}$         | 35         | 4.8                     | 750        |
|   | 37         | 4.8                     | 775        |
|   | 43         | 5.9                     | 715        |
| $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-PbO}$         | 71         | 4.2                     | 555        |
| $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-BaO}$     | 50         | 6.0                     | 735        |
|   | 54         | 7.6                     | 700        |
|   | 57         | 6.9                     | 725        |
| $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-BaO-PbO}$ | 5417       | 7.9                     | 660        |

#### 第4章 グレーズドセラミック基板の作製と基本特性の評価

グレーズ形成の目的は、表面平滑性の確保にあり、熱伝導度の良くないガラスは薄い程望ましい。前章で得たガラス組成を用いセラミック板との複合化技術としてグレーズ化技術の検討、製造技術上からの薄さの限界の検討を行った。またグレーズの基本特性として、表面形状、抵抗素子作製時に必要な性質、耐酸性、耐熱性の検討および電気的特性の評価を行った。

グレーズの厚さは30 $\mu\text{m}$ 以上が望ましいこと、アルミナ用グレーズはNa54組成ガラスが適当であり、これは800°Cの高温に耐えること、ベリリヤ用グレーズはNa5417組成ガラスが適して、760°Cの高温に耐えること、これらのグレーズは十分な絶縁性を有すること等を明らかにした。このほか、グレーズとセラミックの中間層の観察、グレーズドセラミックの熱放散特性の検討を行った。

以上の検討結果と、(1)機械的強度の大きいこと、(2)入手の容易さ、(3)加工性に優れていること等から、海底中継装置等の高安定薄膜混成IC用基板として、グレーズドアルミナが適している。

## 第5章 海底中継装置用グレーズドアルミナ基板の構造設計と特性評価

海底中継装置には、中継器の信頼度30FITという極めて高い信頼性が要求される。また、敷設時等に非常に大きな応力が負荷される。このような過酷な条件下で中継器回路の高信頼度動作を保証するために、グレーズドアルミナ基板の構造設計を行った。

セラミック板の寸法設計のため、図3に示すモデルを考えた。円形平板は周囲が一様に締めつけられ、板面状に回路部品が一様に搭載されていると仮定すると最大応力 $\sigma_{max}$ および最大たわみ $\omega_{max}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= (\sigma_r)_{r=a} \\ &= \frac{3}{4} \cdot \frac{Pa^2}{h^2} \\ &= 0.75 \frac{Pa^2}{h^2} \dots\dots (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega_{max} &= \frac{Pa^4}{64D} = 0.177 \frac{Pa^4}{Eh^3} \\ &\dots\dots (2)\end{aligned}$$

ここでDは板の曲げ剛性、 $D = Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$ 、Eはアルミナのヤング率、 $\nu$ はポアソン比である。(1)、(2)式から、半径/厚さ比(=  $a/h$ )と $\sigma_{max}$ と $\omega_{max}$ の関係を算出し、たわみを $10\mu\text{m}$ 以下におさえるためには $a/h < 30$ にすれば良いことを明らかにした。

すなわち、半径55mmが与えられれば、厚さは約2mmが適当であることが分った。また、初期そりのある板に側圧によるそりを近似計算により算出し100kgw程度の側圧の時、初期そり $30\mu\text{m}$ 以下であれば問題のないことを明らかにした。

一方、セラミック板とグレーズ複合体のモデルを設定し、両者の熱膨脹係数と、グレーズの厚さ、最大たわみ量を検討し、セラミックスとグレーズの熱膨脹係数の差を $0.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ にすれば、グ

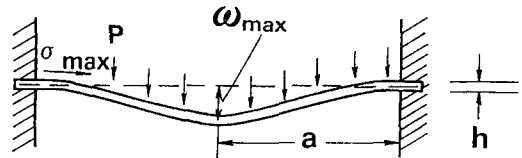


図3 基板の力学的モデル

表5 グレーズドアルミナ基板の諸元

| Material      | Item                          | Parameter   |
|---------------|-------------------------------|---|
| alumina plate | purity                        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 97%                |
|               | diameter                      | 110 $\pm$ 0 / -0.1 mm                             |
|               | thickness                     | 2.0 $\pm$ 0.1 / -0.04 mm                          |
| glaze         | composition                   | No. 54 *  |
|               | thickness                     | 30-65 $\mu\text{m}$                               |
|               | thermal expansion coefficient | $7.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |

\* SiO<sub>2</sub>(50.0 wt.%) - BaO(25.0) - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(6.0) - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5.0) - CaO(10.0) - ZnO(1.75) - Na<sub>2</sub>O(1.65) - K<sub>2</sub>O(0.60)

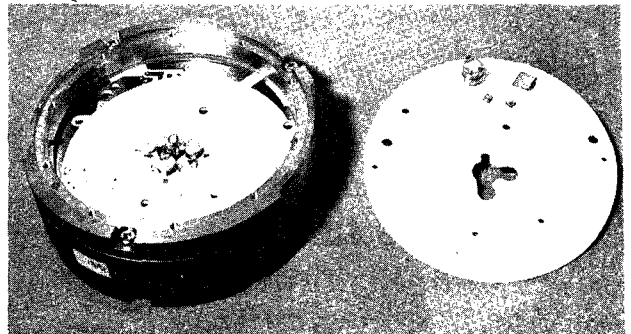


図4 海底中継装置増巾器用グレーズドアルミナ基板と同基板の実装状態

レーズの厚さは65  $\mu\text{m}$ まで許容できることを明らかにした。以上の検討の結果、得られた海底中継器用グレーズドアルミナ基板の諸元を表5に、試作した同基板を図4に示す。

設計したグレーズドアルミナ基板の機械強度、耐熱性、形状特性を評価し、さらに、信頼性保証のための各種保証試験を導入し、CS36M海底ケーブル方式の中継器用として、増幅器、海洋区間等化器、高群および低群監視発振器、前置および後置等化器の6種類の混成IC基板の実用化を行った。

## 第6章 低損失光ファイバの製作と基本特性の測定

低損失光ファイバの製作のため、まず、レーリ散乱の小さいソーダ石灰シリカガラスを用いて不純物イオンの光吸収への影響を調べ、その除去、および二重つぼ法を用い光ファイバ構造作製の検討を行った。この多成分ガラスファイバ製造は、不純物混入が大きな問題であり、低損失化の点から石英ガラス系ファイバが有利であることが明らかになった。

そこで、純石英、ドープト石英合成について、出発原料から直接ガラス化する製造法を開発した。この方法は $\text{Al}_2\text{O}_3$ 以外の添加に対しては、良好なドープトシリカを得ることは出来なかった。この点の改良は、その後引き続き行われ、それが多孔質母材合成法に移り、その結果、気相軸付け法（VAD法<sup>\*</sup>）の発明に致っている。

本研究の直接ガラス化法で得た石英を線引きする技術を検討し、石英コア、ポロンドープトシリカクラッド光ファイバを得、図5に示す最良値3.8 dB/km（波長1.06  $\mu\text{m}$ ）の低損失光ファイバの実現に成功した。これは当時としては最も損失の少ないものであった。

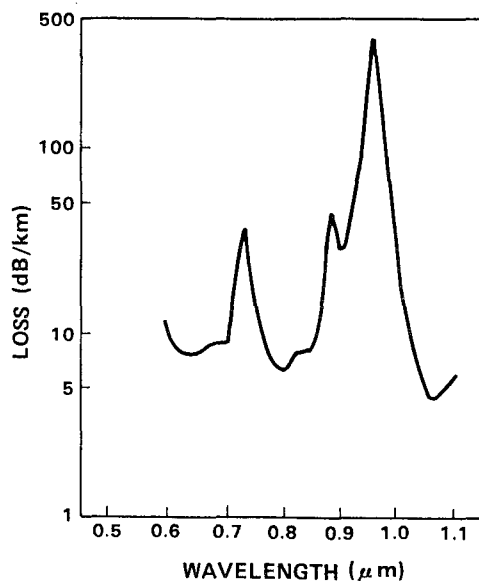


図5 石英コア、ポロンドープトシリカクラッド光ファイバの光損失波長特性

## 第7章 光ファイバおよび光ファイバ心線の設計

光ファイバは、通常、取り扱いやすさ、破断強度の改善および長期信頼性確保等のために、厚さ数  $\mu\text{m}$ のプラスチックをコート（一次被覆）し、その上に二次被覆をほどこし光ファイバ心線とする。この被覆材料と光ファイバの熱膨脹係数の差が2桁あり被覆後の冷却時にファイバに側圧が加わり、光損失増加が現われる。この側圧を緩和し、特性を改善するためには、一次被覆と二次被覆の間にシリコンゴム等の緩衝層を設けた3層構造心線が望ましい。

本研究では、まず、光ケーブルの実用的な観点から二次被覆のヤング率、心線の外径、心線の撚りピッチ、接続部余長処理ポピン半径等のケーブルパラメータとファイバに生ずる応力の関係を探

\* Vapour-phase Axial Deposition method.

め、応力の最小値から最適ファイバ外径を決定する新しい設計法を提案した。その結果、荷重 0.5 kgw、撚りピッチ 150 mm、余長処理ポビン半径 25 mm、二次被覆のヤング率 100 kgw/mm<sup>2</sup>、外径 0.9 mm の心線を仮定すると、ファイバ外径は 110 ~ 130 μm とするのが最適であることが明らかになった。経済化をはかるために、ファイバ径を細くするには、心線に加わる荷重を小さくし、心線径を太く、しかも二次被覆材料のヤング率を高く設計すれば良いことも明らかにした。

また、3層構造心線について、等価線膨脹係数を算出し、低温における光損失増加量との関係を実験的に求めた。そして、低温領域における光損失増加量と光ファイバ心線の構造パラメータとの関係を明らかにした。その結果、心線外径、0.4 ~ 0.6 mm、シリコン緩衝層の径と心線外径の比は 0.4 ~ 0.6 が光損失の温度変動が小さいことを明らかにした。

## 第 8 章 中小容量伝送方式用光ケーブルの構造設計と特性評価

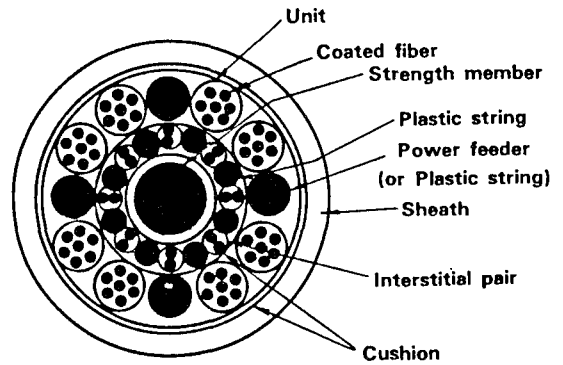
電電公社が、初めて光通信方式として採用する中小容量光伝送方式に用いるための光ケーブルにおいて、光ファイバ心線数は約 50 心、伝送容量は 32 Mb/s 100 Mb/s を採用することとした。

この光ケーブルの設計方針を、(1)伝送特性の優れていること、(2)機械強度に優れていること、(3)従来の線路設備を使えるようにすること、(4)取り扱い易いケーブルにすることとし、給電線、介在対を入れ、ガス保守を行えるケーブルを設計することとした。

この方針のもとに、撚りの形、抗張力線、給電線、外被構造等の検討を行い、48心光ケーブルの設計を行った。設計した光ケーブル構造を図 6 に示す。ユニット形の撚り構造で給電線、介在対を中心に配し、外径 30 mm、重さ約 700 kg/km、光損失平均 2.8 dB/km、伝送帯域平均 800 MHz · km の低損失・広帯域ケーブルを開発した。試作した光ケーブルを図 7 に示す。

この光ケーブルを用い、東京都区内

20.8 km で現場敷設試験を実施し、特性を評価し、特性変化のない、良好な光ケーブルであることを確認した。



Weight : 620-740kg/km (without PF)  
700-800kg/km (with PF)

| Item                  | Cable with PF |
|-----------------------|---------------|
| Coated fiber diameter | 0.9 ± 0.1mm   |
| Unit diameter         | 5.5mm         |
| PF diameter           | 1.2mm         |
| SM diameter           | 5.5mm         |
| Sheath                | L A P         |
| Sheath diameter       | 30mm          |

PF : Power feeder  
SM : Strength member

図 6 中小容量伝送方式用光ケーブル構造



図7 48心光ファイバケーブル

## 第9章 結 論

本研究は、古くから知られているガラスを複合化し、材料選定の段階から構造設計に至るまでを行い、優れた伝送特性と高い信頼性を持つ伝送部品を得ることを狙いとした。

従って、まず、複合体における構成材料の特性を把握し、ついで複合化によって生ずる問題点に着目し構造設計により高信頼化をはかった。

本研究において開発されたグレーズドセラミック基板は、CS-36M海底ケーブル方式用中継装置の部品として実用に供され、現在、主に九州-沖縄間に敷設、商用として使用されていて、中継器回路の全故障率30FIT以下を保証するものであることが確認されている。

また光ファイバケーブルは、市内局間中継伝送路として、伝送容量32 Mb/s、あるいは100 Mb/sの中小容量伝送方式に用いられ、現在、商用に使用されている。

この研究についてさらに希望を述べれば、両部品とも特性をそこなわずに如何にして経済化をはかるか、光ファイバケーブルについては、伝送特性の長期信頼性の把握等が検討項目となろう。

本研究成果は、独り伝送部品への適用にとどまらず、一般にガラスおよびセラミックス等窯業材料の高信頼部品への応用に新しい指針を与えるものと考えられる。



## 審査結果の要旨

ガラスは、従来電子管の材料に用いられて来たが、高信頼性通信伝送路用部品の材料として注目されるようになったのは最近のことで、その主なものに、セラミック基板のグレーズと光ケーブルのファイバーとが挙げられる。これらのガラスは、他の材料との複合の形で用いられて安定性が付与されている。本論文は、この両者を探り上げ、複合化に伴う諸問題を検討し、伝送路部品としての信頼性を得るに致る研究の経緯と成果を述べたもので、全編9章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、信頼性の観点から、ガラス複合材料開発上必要な諸条件を考察している。

第3章では、グレーズドセラミック板に用いる材料組成の検討結果を述べている。熱伝導性、絶縁性、平滑性、機械的熱的強度などを検討して、セラミックには97%以上のアルミナ板が、グレーズにはCaO、BaO、PbOを含むガラスが適することを確かめている。

第4章では、これらの複合基板について、表面形状、放熱性、化学的安定性、機械強度の検討を行っている。

第5章では、海底中継装置用の大型基板について、実用上の諸条件を考慮して構造設計を行い、セラミック板及びグレーズの厚さを限定し、ガラス組成を決定している。この基板の実用化試験より、全システムの故障率が30FITという信頼性が保証されている。

第6章では、光ファイバーガラスの作製法が検討されている。光損失に対する不純物の影響を検討して、石英系ガラスの母材ロッドの作製及びファイバー線引きの実際的方法を提案し、低損失ファイバーが安定に得られることを示している。

このファイバーを緩衝材、被覆材、抗張力材などと複合して光ケーブルが作成される。第7章では、ファイバーの曲りによる損失増加をできる限り低減するための諸条件を検討し、ケーブル設計の指針を定めている。

第8章では、中小容量伝送方式に用いる光ケーブルの現場試験を行い、平均光損失2.8 dB/km帯域800 MHz・kmの好結果を得たことを示している。

第9章は結論である。

以上要するに、本論文は、通信伝送路に用いるガラス複合部品として重要な、グレーズドセラミック基板及び光ファイバーケーブルについて、材料組成の吟味から始めて、複合化に伴う問題点を多角的に検討し解決した研究の成果をまとめたもので、実用化の基礎付けを与えると共に、その研究手法は他の複合材料の研究にも参考となる所が多く、材料物理学に寄与する所が少ない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。