

#### (4) - 1 - 3 光ファイバ電流センサの開発

福岡県産業・科学技術振興財団 因 浩之、九州大学 武部 博倫、森永 健次

(フェーズII 期間：H11年9月～H14年11月)

##### (4) - 1 - 3 - 1 研究概要

フェーズIでの成果および森永研究室に蓄積された粘度等のガラスの高温物性やガラス設計に関する多くの研究蓄積を利用して、新規光ファイバの開発と光ファイバ電流センサモジュールの開発を行った。

本開発の初期段階では、福岡県工業技術センターに新規導入された光ファイバ線引装置を使用して、多成分ガラスを用いたシングルモード光ファイバ作製に関する基盤技術の確立を行った。光ファイバの原材料となるプリフォームガラスを準備することで、ファイバ線引と同時に樹脂被覆まで可能となり、連続的かつ所定の径のファイバを安定に製造することが可能となった。

また第二段階として電流センサ用途に新規ガラス材料の開発を行った。電流センサに光ファイバを用いるには、光弾性定数が小さな材料を選定する必要がある。従来センサにも用いられてきた石英ファイバは光弾性定数が $3.7 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ と非常に大きく、ファイバの内部に曲げによる複屈折を誘起して直線偏光の偏光状態に影響を及ぼすため、精度良く計測することは材料本来の性質上不利であった。

従って解決策として光弾性定数の小さな材料を電流センサ用光ファイバに使用する提案がなされ、その候補として唯一の材料である高鉛含有ガラスが挙げられた。このガラスは昔から広く知られている安定で使いやすいガラスであるが、材料組成を選定することで光弾性定数が $0.01 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 以下の極めて小さな値を取ることが報告されている。しかしながらこの系のガラスは有害な鉛を高含有量含むこと、石英の屈折率1.47程度に対し1.85以上の極めて高い屈折率を有するために石英ファイバとの接続性や広く普及している石英ファイバ用部材を転用することに難点があり、実用上は必ずしも徴用されていない。我々は石英系ファイバおよび同部材とのマッチング性を備えた非鉛含有系の新規低屈折率・低光弾性材料の開発を行った。低光弾性材料はファイバ用途以外でも最近では液晶プロジェクタレンズ用等のバルクタイプのもでも注目されている。

第三段階としては開発した新規低光弾性材料を用いて、ファイバ化の検討を行った。この段階では特に加熱線引き時の材料の結晶化の問題が顕在化し、結晶化を防ぐための組成改良を中心に実施した。

開発の最終段階では、得られた光ファイバを用いて大電流計測用電流センサモジュールを作製し、実際に電流センサとしての実証試験を実施した。

##### (4) - 1 - 3 - 2 目的

省エネルギー化・高効率化の促進や分散型電源の普及に伴い、今後送・配電線系の整備が加速していくことが予想される。それに伴って従来利用されてきた鉄心巻線タイプに変わるコンパクトで信頼性の高い電気計測システムが求められることが予測される。

光ファイバ自体をセンサ素子として用いた光計測システムは従来法に比べ絶縁性、軽量性、安全性、低ノイズによる高信頼性等に優れ大きな優位性を有しており、多成分系ガラスの特徴を活かした開発ターゲットとしても有望である。

本研究では国内公的研究機関保有設備としては唯一である光ファイバ線引装置を利用して、新しい電流センサ用光ファイバの開発及びそれを用いたコンパクトな大電流用光ファイバ電流センサを開発することを目的とする。

#### (4) -1-1-4 スラリー法による低コストガラス膜の形成

低コストガラス膜形成プロセスとして超微粒石英材料を用いたスラリー法の検討を行った。図4-1-1-6に膜形成プロセスのフローを示した。原料には250nmの高純度石英超微粒子（純度99.999%）を用いた。本材料は、粒径が均一で球状であるというユニークな特徴を有する。本材料の粒度分布とFE-SEM像をそれぞれ図4-1-1-7、図4-1-1-8に示した。

塗布法でスラリーとして使用するために単分散化処理をしたのち溶媒を超純水として粘度調整の検討を行った。ちなみに水系溶媒を使用しても光ファイバーの製造方法と同様に最終プロセスでの脱水処理は可能であるし、高純度であれば非水系溶媒の使用も可能である。スラリーの流動特性を円錐コーン型粘度計を用いて測定した結果を図4-1-1-9に示した。これより固/液比の調整により粘度を広い範囲で調整することが可能になった。

シリコンウェハー基板上にスラリーを所定量滴下後、基板とともにスピンドーターを用いて2000rpmで回転させ膜形成状態の検討を行った。各粘度条件での成膜結果を図4-1-1-10に示した。各条件で形成された膜とも断面方向において一様に堆積されているのが確認できた。同時にスラリー粘度に対する成形体厚膜を整理した結果を図4-1-1-11に示した。これよりスラリー粘度を調整することにより直線的に膜厚制御が可能であることが確認できた。例えば10 $\mu$ mの成形体膜厚の場合には0.25Pa $\cdot$ sの粘度が選定される。

また本方法により作製した成形膜の特徴として、球状粒子をもった材料のために数10nmオーダーの微細な空隙が含まれるということがあげられる。先に挙げた脱水処理にはフッ素系のガス処理が好ましいがこの空隙を通してその処理を効果的に行うことが可能であり、種々の後処理に対して有利な構造といえる。

最後に成形膜を焼成することによりガラス多孔体膜の緻密化を行った。図4-1-1-12に表面と破断面のSEM写真を示した。これより成形体の空隙部は完全に緻密化し、きれいな透明ガラス膜を得ることができた。

#### (4) -1-1-5 まとめ

rfマグネトロンスパッタ装置で条件を最適化することにより高品位な石英系ガラス膜の形成が可能になった。また低コストプロセスとしてスラリー塗布法による成膜法を検討した結果、透明で緻密なガラス膜の形成が可能になった。特に塗布法による成膜は大面積化に適したプロセスであり、さらに屈折率調整材としてのゲルマニウムを原料中へのドーピングまたは多孔膜形成後に導入することにより、容易に透明な大面積光導波路基板の形成が見込める。

一方で当初薄膜型光導波路の市場に関して急激な伸びとエンドユーザーにおける光導波路加工の内作化が予想されたが、実際には製品の多様化により薄膜型光導波路タイプの製品がそれほど伸びなかったこと、またメーカー数が想定したほど増大しなかったこともあり、光導波路加工前の状態で光導波路用基板としてメーカーに提供するというコンセプトが陳腐化してしまった。従って光導波路関連製品の商品化のためには光導波路自体の低コスト製造プロセスまで含めた新規開発が必要となり、結果的にハードルが高くなった。

従って我々は当グループの特色を生かすためにも無機ガラスの材料設計技術がもっとも効果的に活用できる光ファイバ用新規材料の開発へとテーマを変更することとした。

#### (4) - 1 - 3 - 3 光ファイバー線引技術の確立

図4-1-3-1、図4-1-3-2に光ファイバ線引装置の外観写真および装置構成図をそれぞれ示した。

本装置の特徴として、ファイバ外径計測器を実装しているため、キャプスタンと連動運転させることにより1%以内の精度内で任意のファイバ径が制御可能なこと、UV硬化樹脂用ランプを線引炉垂下部に設置してありファイバ表面に擦過傷がつけられる前に被覆することが出来、連続的な線引とポビンへの巻き取りが可能であることがあげられる。装置スペックとしては線速300m/minまでの製造条件に対応が可能である。

電流センサ用光ファイバは、偏波光を維持するためシングルモード構造とする必要がある。同時に実用的な光ファイバとして使用するにはコネクタ端子を使用することも必要であるため、一般的な通信用光ファイバの共通規格である125 $\mu$ mに設定することが望ましい。

ファイバ化時の設定外径を調整したときの一例を図4-1-3-3に示した。設定外径が細くなるほど線速は反比例的に増大し、例えば20mm $\phi$ のガラスロッドを用いたときに125 $\mu$ m設定時の巻き取り線速は91m/minであった。これより125 $\mu$ mのファイバが連続的かつ安定的に製造できることが確認された。

#### (4) - 1 - 3 - 4 低屈折率・低光弾性材料の開発

電流センサ素子として光ファイバを用いるには光弾性定数が小さな材料を選定することが望ましいが、同特性を持つ材料としては環境に対して有害な鉛を多量に含むガラスしか選択できなかった。

我々は鉛を含まない新規低光弾性ガラス材料の開発を目指すとともに、同時に種々のファイバ用部材が石英ガラスに対してラインアップされており特に屈折率はコスト的な観点からみて石英ガラスに近い方が圧倒的に有利であることから、低光弾性特性と同時にクリアされるべき屈折率上限値を1.60とした。汎用的な接着剤、樹脂等の屈折率の上限が1.60程度のためである。高鉛含有ガラスを含め、市販されている光学ガラスを調査し、屈折率と光弾性定数の関係を明らかにし、本材料の開発ターゲットとともに図4-1-3-4に示した。

低光弾性定数の材料を実現するために、高分極性の陽イオンが有効であることおよびネットワーク状に形成されるガラスの主構成物の選択が重要であることを見出し、特に低光弾性材料としてバリウムリン酸塩ガラス系が有望であることが確認された。リン酸ガラスは本質的に石英ガラスに対して低光弾性的な特性を有するが、さらにBaOとP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>との組み合わせにおいてそのモル比率を調整することで極めて小さな低光弾性定数(0.08 $\times 10^{-12}$ Pa<sup>-1</sup>)を実現させることができた。図4-1-3-5に結果を示した。しかし一方で光弾性定数0.3 $\times 10^{-12}$ Pa<sup>-1</sup>以下の領域ではガラスとしての熱的安定性が低減するため、ガラスを形成する適性なプロセスも同時に開発した。

本リン酸ガラス系は屈折率も1.60以下の特性を有し、目的の物性値を満足することが確認できた。

#### (4) - 1 - 3 - 5 新規ガラス材料を用いた新規低光弾性光ファイバの開発

光を伝搬させるコアガラスに低光弾性ガラスを用いてファイバ化できれば、低光弾性光ファイバとして機能させることが出来る。しかし本開発ガラスは光ファイバ線引時に電気炉内で結晶化の問題が発生することが判明した。円柱状のガラス母材が線引き時に結晶化が生じた写真を図4-1-3-6に示した。結晶化しない同一サイズの市販光学ガラスと比較すると試作ガラスでは表面にシワ状に結晶が析出し、連続的に線引を継続できなかったが、非結晶化ガラスではスムーズな表面を保ちながら徐々に延伸し、連続的なファイバ化が可能であった。

上記問題を解決するために検討を重ねた結果、ガラスの主要特性を大きく変化させることなく少量の添加

で結晶化に対して効果のある耐結晶化助剤を見出した。助剤添加量に対する結晶化の程度を示す結晶化発熱量の変化を図4-1-3-7に示した。2.3m o 1%以上の添加により発熱量がゼロに抑えられており、この領域では線引き時も結晶化を完全に抑制することに成功できることがわかった。

本技術を採用することにより、125μmのシングルモード光ファイバの開発に成功した。開発した光ファイバの断面構造とスペックを図4-1-3-8に示した。透過損失は3.8dB/mであり結晶化の問題も無く良好にファイバー化が実現していることが確認された。

#### (4) - 1 - 3 - 6 大電流計測用光ファイバ電流センサモジュールの開発

開発した光ファイバを用いて電流センサモジュールを製作した。光ファイバをセンサ素子に用いて電流を計測する原理はファラデー効果を利用する。原理を模式的に図4-1-3-9に示した。

直線偏光が磁場の強さに応じて偏波面が回転する角度を読みとるもので、我々は交流電流を計測するために次式を採用した。

$$S = V_{(R)} / V_{(O)} \quad \dots (1)$$

$$I = (S \times K) / (2 \times v \times n) \quad \dots (2)$$

ここで、Sは変調度(無単位)、 $V_{(R)}$ はフォトダイオード交流成分信号(V)、 $V_{(O)}$ はフォトダイオード直流成分信号、Kは装置定数、vはヴェルデ定数(rad/AT)、nはファイバー巻数(T)、Iは電流(A)を示す。本材料のヴェルデ定数は $2 \times 10^{-6}$  (rad/AT)である。

センサモジュールの構成図を図4-1-3-10に、光ファイバが収納されるセンサのヘッド部分を図4-1-3-11に示した。センサヘッドの重量は270gである。本開発モジュールでは光源に1.55μmのLDを使用し、直線偏光を偏光素子を通して取り出す構造とし、またセンサ部でのゆらぎ成分を補正するためにセンサ出射後の光を偏光ビームスプリッターを通じてx、y軸それぞれに分離し合成検出する構成とした。

光ファイバを5ターンさせ電流を計測した測定結果を図4-1-1-12に示した。これより50A以上においておよそ3%内の精度で計測できることが確認された。ただし、20A未満の低電流部や一部に誤差の大きな部分も見られるため改良の余地があることも指摘された。

また本モジュールは本来大電流計測用途に適しており、原理的には本モジュールで14kAまで計測可能であるため、フィールドでの大電流計測試験が必要である。

#### (4) - 1 - 3 - 7 まとめ

バリウムリン酸塩ガラス系で低屈折率・低光弾性新規ガラスを開発した。

また同ガラスを用いて結晶化を防止しながら光ファイバ化を行うことに成功し、電流センサ用途の125μmのシングルモード光ファイバを開発した。

開発した光ファイバをセンサ素子とした軽量・コンパクトな電流センサモジュールを開発した。

同センサモジュールは50A以上の電流を3%以内の精度で測定可能なことが確認された。

#### (4) - 1 - 3 - 8 今後の取組(フェーズⅢ)

今後は大電網において電力各社を中心に光ファイバ電流センサの市場調査を実施し、市場の可能性が見込まれた場合、製品化検討を行う予定である。

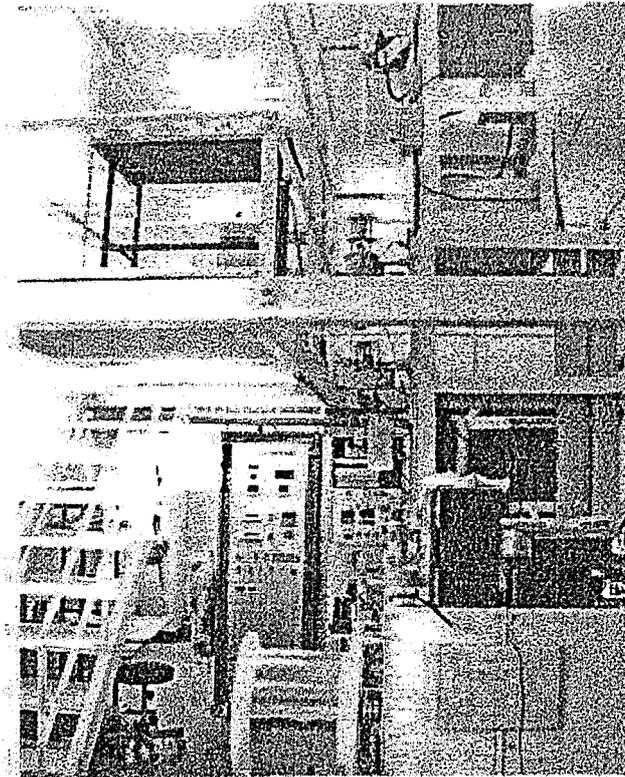


図4-1-3-1 光ファイバ線引装置（装置正面より）

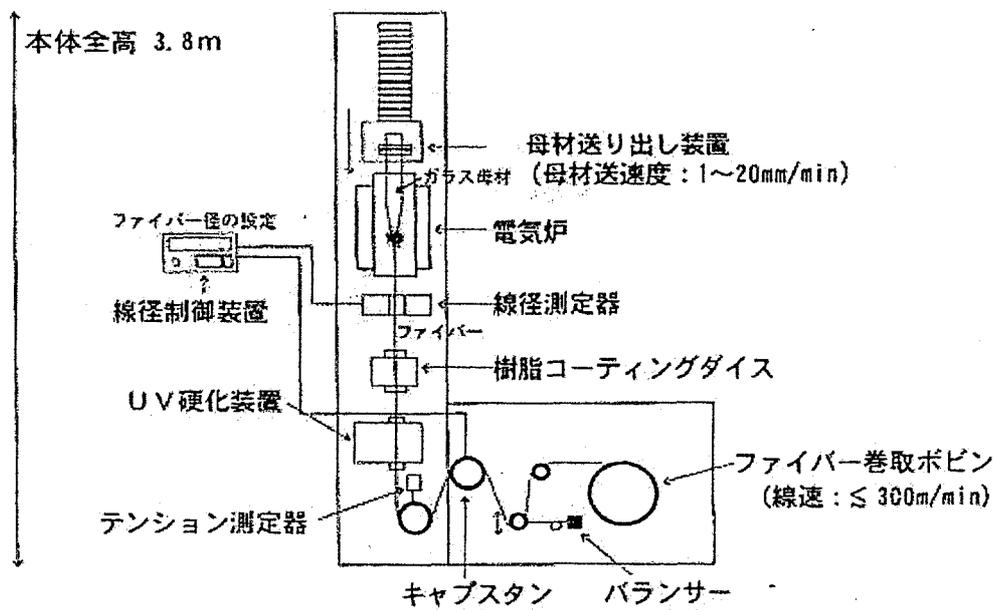


図4-1-3-2 光ファイバ線引装置模式図

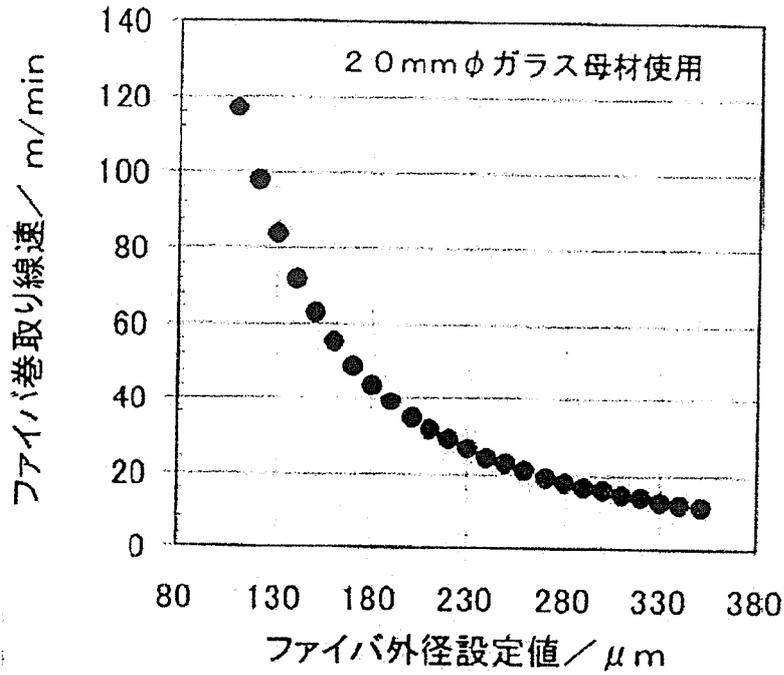


図4-1-3-3 ファイバ外径設定値と巻取り線速の関係

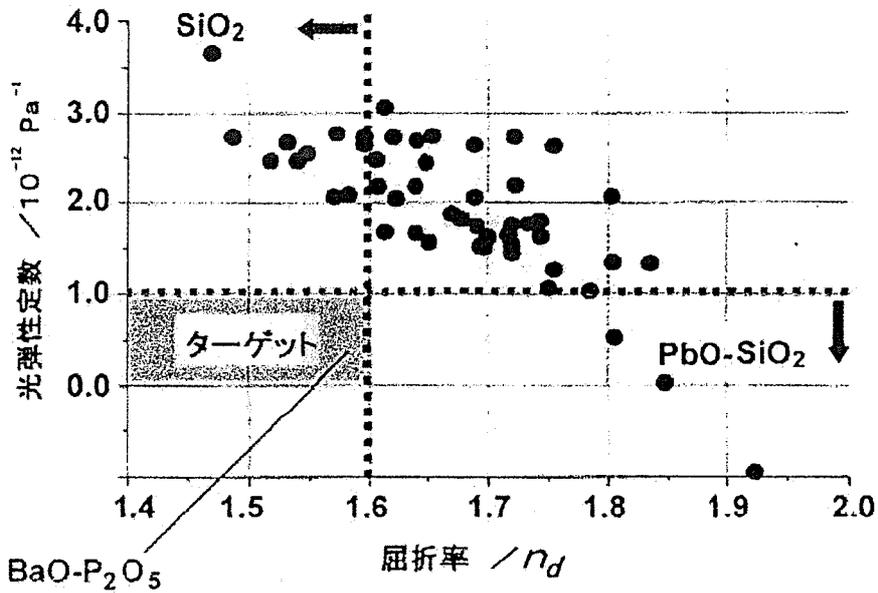


図4-1-3-4 屈折率と光弾性定数で表わされる光学ガラスの分布と材料開発のターゲット

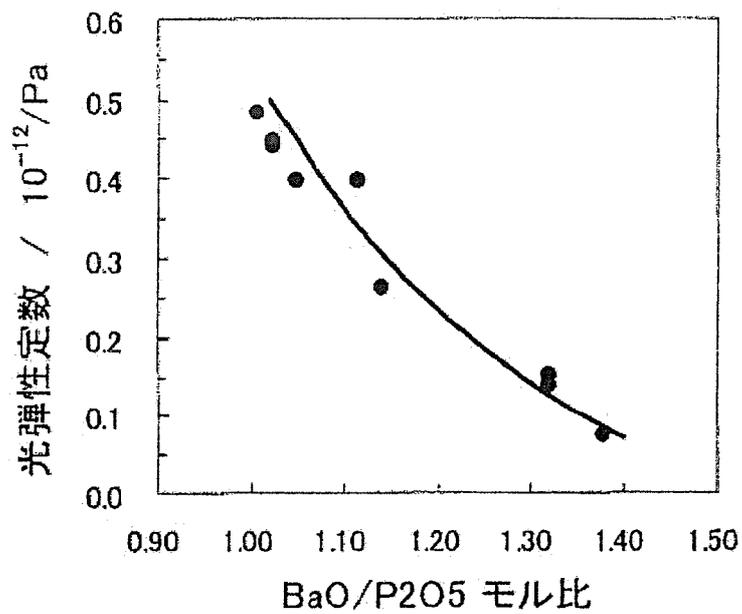


図4-1-3-5 光弾性定数の組成依存性

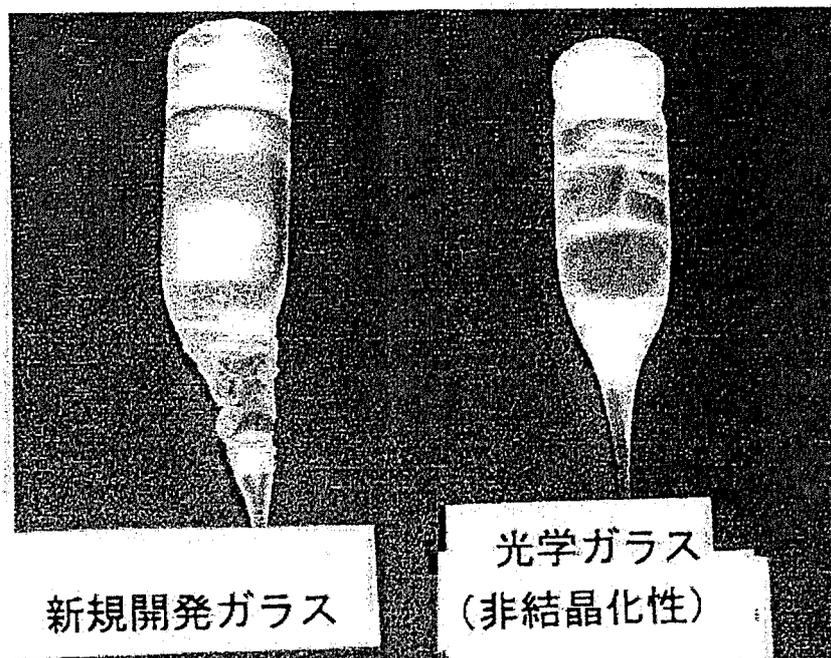


図4-1-3-6 線引時のガラス母材への結晶化の影響

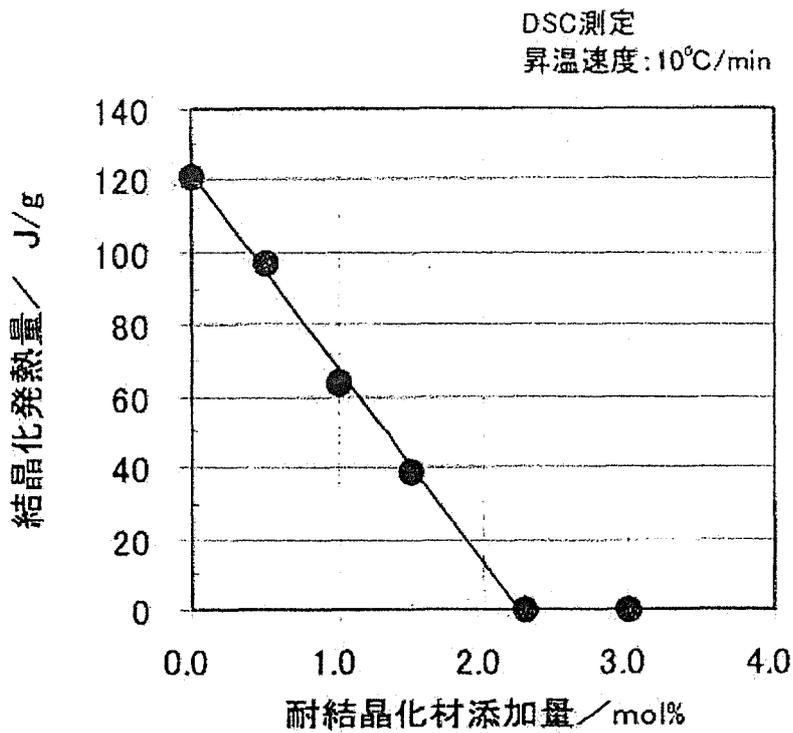
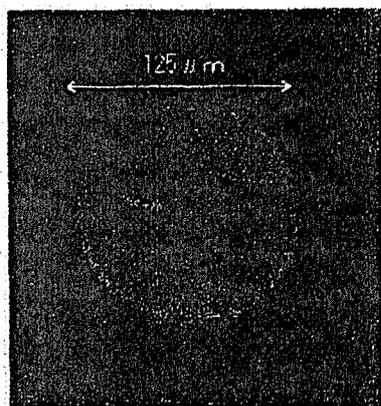


図4-1-3-7 結晶化発熱量の耐結晶化助剂量依存性



コア屈折率: 1.5773 (@1.55 μm)  
 比屈折率差: 0.21%  
 コア径: 9.5 μm  
 クラッド径: 125 μm  
 規格化周波数: 2.34  
 透過損失: 3.8 dB/m

図4-1-3-8 新規開発光ファイバーの構造と特性

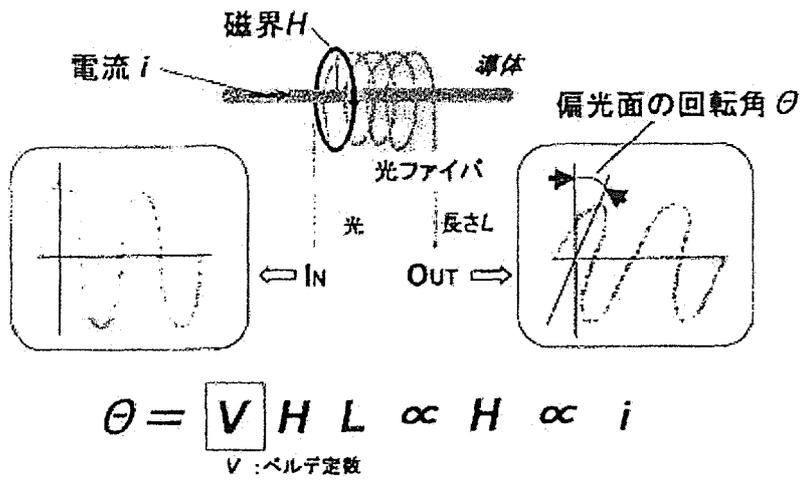


図4-1-3-9 電流測定の実理（ファラデー効果）

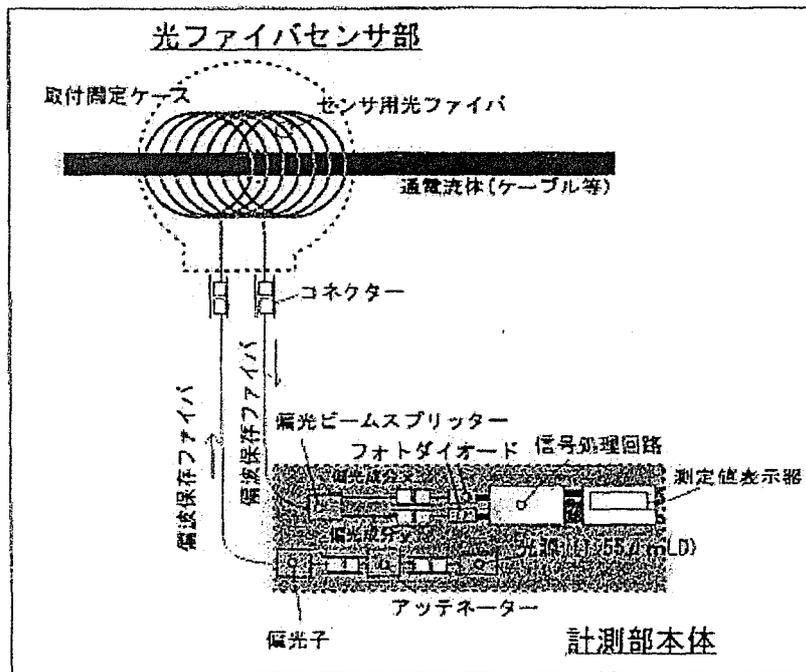


図4-1-3-10 光ファイバ電流センサモジュールの構成

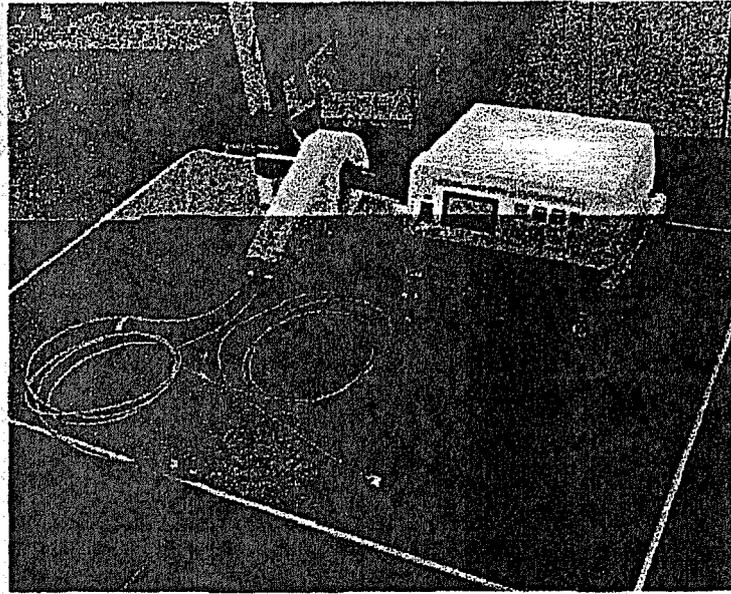


図4-1-3-11 センサモジュールヘッド部

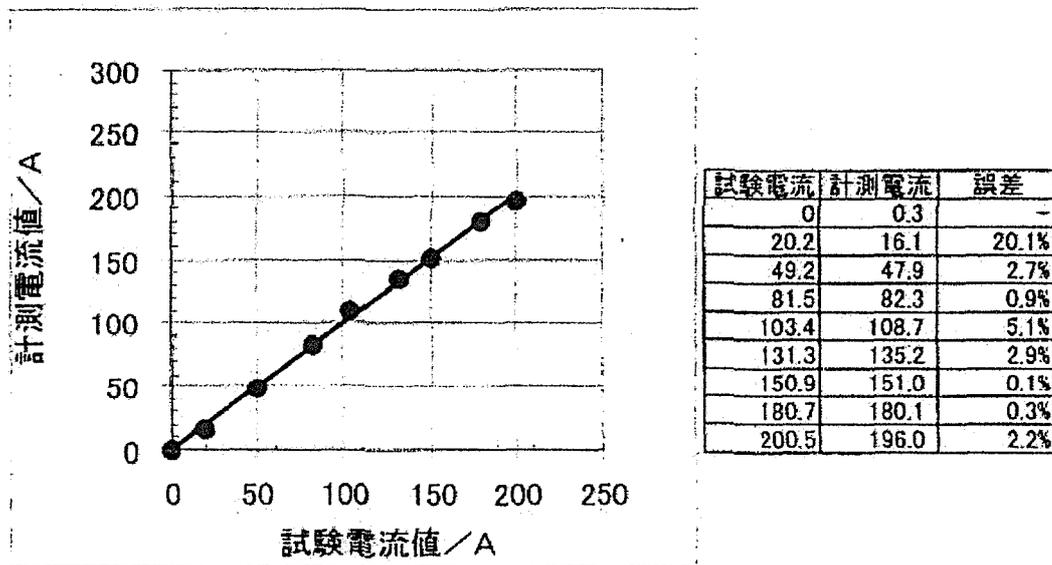


図4-1-3-12 光ファイバ電流センサによる電流計測