

光ファイバを使用した生体内流動  
情報の計測に関する基礎研究

1997年8月

坂田秀徳

①

光ファイバを使用した生体内流動

情報の計測に関する基礎研究

1997年3月

飯田秀徳

# 目 次

|   |    |
|---|----|
| 第1章 緒論                                  | 4  |
| 1.1 はじめに                                | 5  |
| 1.1.1 センサの必要性                           | 5  |
| 1.1.2 センサの小型化と微小化                       | 6  |
| 1.1.3 センサの高感度化                          | 6  |
| 1.2 光ファイバの原理と種類                         | 6  |
| 1.2.1 光技術開発の経緯                          | 6  |
| 1.2.2 光ファイバの原理                          | 8  |
| 1.2.3 光ファイバの種類（屈折率分布による）                | 8  |
| 1.3 本研究の背景                              | 16 |
| 1.3.1 生体用光ファイバセンサの現状                    | 16 |
| 1.3.2 光ファイバセンサの研究動向                     | 16 |
| 1.3.3 従来の研究の問題点                         | 16 |
| 1.4 本研究の目的と本論文の構成                       | 17 |
| <br>                                    |    |
| 第2章 光ファイバセンサによる液体の屈折率計測に関する技術           | 20 |
| 2.1 緒言                                  | 21 |
| 2.2 従来の光ファイバ屈折センサ                       | 21 |
| 2.2.1 屈折センサの構造                          | 21 |
| 2.2.2 屈折センサの問題点                         | 22 |
| 2.3 光ファイバ屈折センサ                          | 25 |
| 2.3.1 光ファイバ屈折センサの改良                     | 25 |
| 2.3.2 コンピュータシミュレーションによる融着半径と<br>信号出力の関係 | 25 |
| 2.3.3 融着自動化装置                           | 33 |
| 2.3.4 融着光ファイバ屈折センサ先端の試作                 | 33 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2. 4    | 屈折率測定装置                                   | 36 |
| 2. 5    | 測定結果と考察                                   | 38 |
| 2. 6    | 結論  | 47 |
|         |   |    |
| 第3章     | 微細光ファイバ屈折センサによる血管を模擬した<br>弾性管内の流量測定に関する研究 | 48 |
| 3. 1    | 緒言  | 49 |
| 3. 2    | 光ファイバ屈折センサの構造と原理                          | 49 |
| 3. 3    | 実験装置と測定方法                                 | 50 |
| 3. 4    | 実験結果と考察                                   | 50 |
| 3. 5    | 測定誤差の数値解析                                 | 61 |
| 3. 5. 1 | 矩形インパルス状注入の場合の管内流速の解析                     | 61 |
| 3. 5. 2 | 測定誤差のシミュレーション                             | 63 |
| 3. 6    | 結言  | 72 |
|         |   |    |
| 第4章     | 膜で仕切られたセル内の水溶液の<br>凍結過程における局所濃度計測         | 73 |
| 4. 1    | 緒言  | 74 |
| 4. 2    | 実験装置および方法                                 | 74 |
| 4. 3    | 実験結果と考察                                   | 77 |
| 4. 3. 1 | シャドウグラフと流動の観察実験                           | 77 |
| 4. 3. 2 | 鉛直方向濃度および温度分布                             | 77 |
| 4. 4    | 結言  | 82 |
|         |   |    |
| 第5章     | 結論  | 83 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 付録 1              | 87  |
| 付録 2              | 97  |
| 主な記号              | 107 |
| 参考文献              | 109 |
| 本研究に関する著者の論文と研究発表 | 112 |
| 謝辞                | 114 |

# 第 1 章

## 緒 論

## 第1章 緒論

### 1.1 はじめに

最近の医療には、全国民から生じる膨大な医療需要に対処するため、多数のME機器（医用電子機器）が診断・治療のために導入されている<sup>(1)</sup>。

現在急速に進行している医療の技術革新にともなって、生体計測に対する要求も高度化し、計測データは客観的でしかも定量的であり、患者に対しては苦痛を与えない無侵襲な計測が強く要求されるようになってきた。

このように高度な要求に対応してゆくためには、生体の特性をよく理解し、また最新の工学的手法にも精通していることが必要である。

生体計測の情報処理化、すなわち生体計測結果は、ある程度情報処理をしたうえで出力に表すべきで、このためには情報処理を含めた医用計測システムの開発が必要である。

#### 1.1.1 センサの必要性

科学技術は人類の福祉と繁栄のためにある。また、科学技術は豊かな個人生活を可能にすると同時に、健全な社会の維持、保証のために不可欠である。エネルギーや資源の確保、節約、開発等は時代の要請であり、また健全な社会環境の維持は個人の生活の基礎となっている。医療や健康管理なども今や、個人ベースというよりも社会的課題となって、センサ技術の適用が活発となっている。

このような観点から、我々の社会生活にとってセンサ（センシング技術を含む）は欠くことのできないものである。産業における計測制御技術はもとより、情報化社会にあっては、各種の情報収集デバイスは、その基本である。

### 1. 1. 2 センサの小型化と微小化

マイクロエレクトロニクスの技術は、センサを小型・微小化、機能化、高精度化することに大きく貢献した。

小型化は、単に小型、軽量、低電力という意味ばかりでなく、センサの場合には性能の向上に貢献する。例えば、CCD のようなイメージセンサでは、受光部の大きさが小さくできるため、分解能を上げることができる。

さらに身近には、真空管がトランジスタになったように、センサを小型にすることによって大量生産が可能となり、センサのコスト低下に大きく役立っている。

微小化は、空間分解能を上げるためには、極めて重要である。

センサの製造上で重要な項目は信頼性や歩留りの向上の面において小型・微小化は大いに貢献している。まず、均質な一定の材料により、同一ロットで多数のセンサの作成ができるために、センサ内の材質は安定し、高信頼性につながる。さらに、特性の揃ったものが得られるために歩留りは向上する。このように、小型・微小化は生産技術の上からも有効であると考えられる。

### 1. 1. 3 センサの高感度化

センサは信号変換の機能を有するデバイスであるから、その変換感度は高いことが望ましい。高感度化の目的にも新材料の開発や、エレクトロニクス基礎技術の発展が重要な貢献をしている。本研究でも高出力レーザや高感度光パワーメータを使用し、新材料である偏波面保存光ファイバの使用やコンピュータシミュレーションによって高感度化の構造検討を行っている。

## 1. 2 光ファイバの原理と種類<sup>(2)</sup>

### 1. 2. 1 光技術開発の経緯

1960年に初めてのレーザとしてルビーレーザが Maiman によって実現された。その後、数年のレーザ技術の進歩は目覚ましいものがあった<sup>(3)</sup>。1960年代には、通信用として使用に耐えるレーザや光の変・復調法、レーザ光を長距離伝送する光伝送路等に関する基礎的研究が行われた<sup>(4)</sup>。

光通信の中心となる技術の一つとして光伝送路の光ファイバが考えられる。ガ



ラスを用いた光ファイバをより高純度化することにより、光通信に使えるまで光の損失を下げるができるという研究が進められ、1960年の半ばにはガラスの伝送損失が200dB/kmの確認され、ガラス中の不純物の除去により伝送損失が20dB/kmも可能であるという予測が立てられた<sup>(5)</sup>。1970年に、石英ガラスを用いた光ファイバにより、20dB/kmの損失が確認され<sup>(6)</sup>、光通信に有望であることが明らかになってきた。その後、ファイバの製造方法、ケーブル化、接続方法、光学特性の測定法の開発が進められ、現在では実用的な光ファイバケーブルが得られている。特にファイバ損失については、0.2dB/kmという極低損失の値が実現されており<sup>(7)</sup>、過去十数年間で、損失が3桁以上低下するという目覚ましい進歩がみられた。

もう一つの大きな光技術の進展は、電気信号を光信号に変換する素子である。各種のレーザの中でも、小型で直接電流駆動ができるという特徴を持った半導体レーザは、1962年に発表され<sup>(8)</sup><sup>(9)</sup><sup>(10)</sup>、1970年に室温連続動作が達成された<sup>(11)</sup>。この室温連続発振の達成は、光ファイバ低損失化の見通しとほぼ同時に行われたものであり、しかもGaAsレーザの発振波長は、当時の光ファイバが最低損失となる波長に一致していたため、これらを用いた光通信研究の気運が世界的に盛り上がった。

光ファイバの低損失化は、同時に、最低損失を与える最適波長が長波長にシフトするという結果をもたらした。これは、光ファイバの損失を決める要因の一つであるRayleigh散乱の大きさが、波長の4乗に逆比例して、長波長になるに従って減少するためである。実際、不純物を極力減少させたファイバでは、波長0.85  $\mu\text{m}$ では損失約2.5dB/km、1.3  $\mu\text{m}$ では0.5dB/km、1.55  $\mu\text{m}$ では0.2dB/kmという損失値となる。これ以上長い波長では、石英ガラスの赤外吸収により損失が増加する。したがって、1~1.7  $\mu\text{m}$ の波長帯を用いることにより、中継間隔を数十kmから百km以上ときわめて長くすることができる。このような長波長帯の光ファイバ伝送<sup>(12)</sup>には、0.85  $\mu\text{m}$ 帯のAlGaAs半導体レーザと異なり、InGaAsPレーザが開発された<sup>(13)</sup>。

光検波器は、0.85  $\mu\text{m}$ の短波長帯では、Siのフォトダイオードが用いられ、<sup>(14)</sup> 1~1.6  $\mu\text{m}$ の長波長帯ではGeが用いられる<sup>(15)</sup>。

1970年代の後半には、光ファイバ同士の接続法として融着接続や着脱式のコ

ネクタの開発も進み、光ファイバ伝送方式の実現のお膳立てが整えられた。この時期に、世界の技術先進国では、実際に光ファイバを布設して現場環境における試験が行われ、光ファイバ伝送方式の特徴と有用性が認識された<sup>(16)(17)</sup>。

### 1. 2. 2 光ファイバの原理

光ファイバをセンサに適用する光ファイバとして、主に光ファイバ通信用のものが用いられる。この光ファイバは石英ガラス（ $\text{SiO}_2$  を主成分）、プラスチック（PMMA を主成分）などの誘電体で作られた非常に細い（直径 1/8～1/5mm）光学繊維であり、近赤外から可視域の光に対して非常に低損失の伝送路として用いられ、特に石英ガラス光ファイバの技術進歩は目覚ましい。

その理由は、光通信用光源としてのガリウム砒素系やインジウム燐系の半導体レーザや発光ダイオードの発光波長と、シリコンやゲルマニウムの受光素子の最大感度波長とが、その光ファイバの透過率の良い低伝送損失の波長域と非常に良く整合しているためである。現在では、伝送損失が 0.2dB/km すなわち、15km 伝送後に光パワーがやっと半分に減衰するのみという理論限界に近い驚異的な低損失光ファイバが得られている。

光ファイバ素線・心線の基本的な構造<sup>(18)</sup>は図 1-1 に示す。素線は光が導波伝搬するコアと、コアよりもわずかに屈折率の小さいクラッドからなる。石英ガラス系光ファイバの場合には、その外側にシリコンの1次被覆（プライマリコート）とシリコン樹脂の緩衝層とナイロンジャケットの2次被覆を施しており、直径 0.9mm の光ファイバ心線である。

### 1. 2. 3 光ファイバの種類（屈折率分布による）

表 1-1 に、光ファイバの3種類の導波路構造を示す<sup>(19)</sup>。光ファイバ中の光波の伝搬は、マックスウェルの波動方程式を解いて求められるが、光ファイバの断面寸法が光の波長に比べて十分大きいときには、近似的に光の強度を光線で表すことができる。

表 1-1 のステップ・インデックス(SI)型光ファイバは、石英ガラス系、樹脂クラッド系、多成分ガラス系、プラスチック系など大口径光ファイバとして用いられる。この光ファイバ中の光波の伝搬は、コアとクラッドとの境界面での全反射

によるものと考えられ、コア屈折率 $n_1$ 、クラッド屈折率 $n_2$ としたとき、図 1-2 に示すように、

$$\theta_c = \cos^{-1}(n_2 / n_1) \quad \dots \dots \dots (1.1)$$

なる臨界角 $\theta_c$ より大きい入射角の光線は、一部クラッドへの放射モードとなり、伝搬し得ない。したがって、光ファイバの重要なパラメータである開口数 (NA : Numerical Aperture) は、光ファイバ端面から光ファイバ内を伝搬し得る光線の受光角を示すもので、

$$NA = \sin \theta_{\max} = n_1 \sin \theta_c = n_1 \sqrt{2\Delta n} \quad \dots \dots \dots (1.2)$$

$$\Delta n = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \dots \dots \dots (1.3)$$

で表される。この $\theta_{\max}$ は、光ファイバ端面からの光の放射角にも相当している。

図 1-2 からわかるように、臨界角 $\theta_c$ の大きいほど、NA の大きいほどいろいろな角度で入射した光線が伝搬できる。波動理論を解くと、これらの光線はコア/クラッド境界条件を満たすために不連続の値をとる。そして、その跳び跳びの伝搬可能な定数を光線モード (mode) という概念で区別し、もっとも小さい入射角の光線すなわちもっとも速い伝搬速度の光線から順次モード番号をつける。

NA が大きく、多くの光線が伝搬し得る光ファイバは一般に多モード光ファイバと呼ばれる。SI 型多モード光ファイバ中の各モードの光波は光ファイバ内の異なった電界分布をもち、高次モードほど軸方向の速度が遅くなって (モード分散) 伝送帯域を広くできない原因となる。

表 1-1 のグレーテッド・インデックス(GI)型多モード光ファイバは、コア部の屈折率が中心軸より二乗分布に従って低くなっているため、ある角度で入射した光線は外側にいくに従って少しずつ内側に曲げられ、中心軸に沿って蛇行して伝搬する。媒体中の光の速度は媒体の屈折率に反比例するので、コアの中心軸からそれた光線ほど光路長が長くなるが、いずれの光線も軸方向の速度がほぼ等しくなり、モード分布は小さくできる。現在通信用の GI 型光ファイバは、コア径 50  $\mu\text{m}$ 、クラッド径 125  $\mu\text{m}$ に標準化されている。

表 1-1 の単一モード光ファイバは上記 2 つに比べてコア径が 10  $\mu\text{m}$ 以下と極めて細く、基本モードの光波のみが伝搬し得るため、本質的にモード分散がなく、

きわめて広帯域の伝送が可能である。

前述の各種光ファイバにおいて、多モード光ファイバはモード分散のため情報容量が比較的小さいだけでなく、導波光の位相や偏波面の情報が利用できないなどの制約がある。しかし、コア径と  $NA$  とが大きいので、光ファイバ同士や光源との結合が容易で軸ズレに対する許容量も大きいなど取扱いやすい利点があり、低周波数、短距離の光伝送や光応用計測には使いやすい。他方単一モード光ファイバでは、情報容量がきわめて大きく、光波の位相情報の利用もできる利点があるが、コア径が  $10\ \mu\text{m}$  以下であるため、光源との結合などの扱いが難しくなる。

その他に偏波面を保存する光ファイバ<sup>(20)</sup>がある。通常、通信に用いられる単一モードファイバは真円に近いコア、クラッドをもっており、基本モードは、互いに直行する  $x$  方向の偏光と  $y$  方向の偏光からなる。これらの直交する固有モードの伝搬定数差は、光ファイバのコアやクラッドが完全に真円ならば零であるが、現実には注意深く製造された単一モード光ファイバでも完全な真円コアでなく、また不均一歪みを含んでいるため零ではない。この自然複屈折性のために、わずかに異なる速度で伝搬している  $x$  方向と  $y$  方向の偏光の間でモード変換を生じやすい。またこの両モード間のエネルギー授受は周期的で、その割合は相間長(ビート長)  $L_b = 2\pi/\Delta\beta$  で表され、最も完全に近い単一モード光ファイバでも高々  $L_b = 15\text{m}$  の値が得られているにすぎない。このように通常の単一モード光ファイバでは微弱な外乱(温度、圧力、振動など)によってモード変換や偏光状態の乱れを受けやすく、光の位相情報や偏光状態を安定に保持して伝搬することはむずかしい。

そこで逆に基本モードの 2 つの直行モード間の  $\Delta\beta$  を大きくしてモード変換を生じにくくし微弱な外乱では偏光状態が乱されないようにした単一モード光ファイバが偏波面保存光ファイバと呼ばれるものである。実際に  $\Delta\beta$  を大きくする ( $\Delta\beta \geq 3000\text{rad/m}$ ) 方法として、表 1-2 に示すようにコアに屈折率異方性をもたせた楕円ジャケット型、サイドピット型、PANDA 型 (Polarization Maintaining and Absorption Reducing Fiber) などの光ファイバが開発されている。表 1-2 に示すように、偏波面保存光ファイバでは  $1.5\ \mu\text{m}$  帯の波長に対してビート長  $L_b = 2\sim 6\text{mm}$ 、消光比  $-20\sim -30\text{dB}$ 、伝送伝送損失  $0.4\sim 0.8\text{dB/km}$  の良好な特性が得られている。

光ファイバを屈折計として使用する場合、光源からファイバプローブ間での偏光状態の変動が戻り光出力の変動になる。著者は今までマルチモード光ファイバや通常のシングルモード光ファイバを使用していた。そのため光ファイバのハンドリングなどによる偏光状態の変動のため大きな出力変動があった。そこで本研究ではプローブの入射側には偏波面保存光ファイバを使用した。

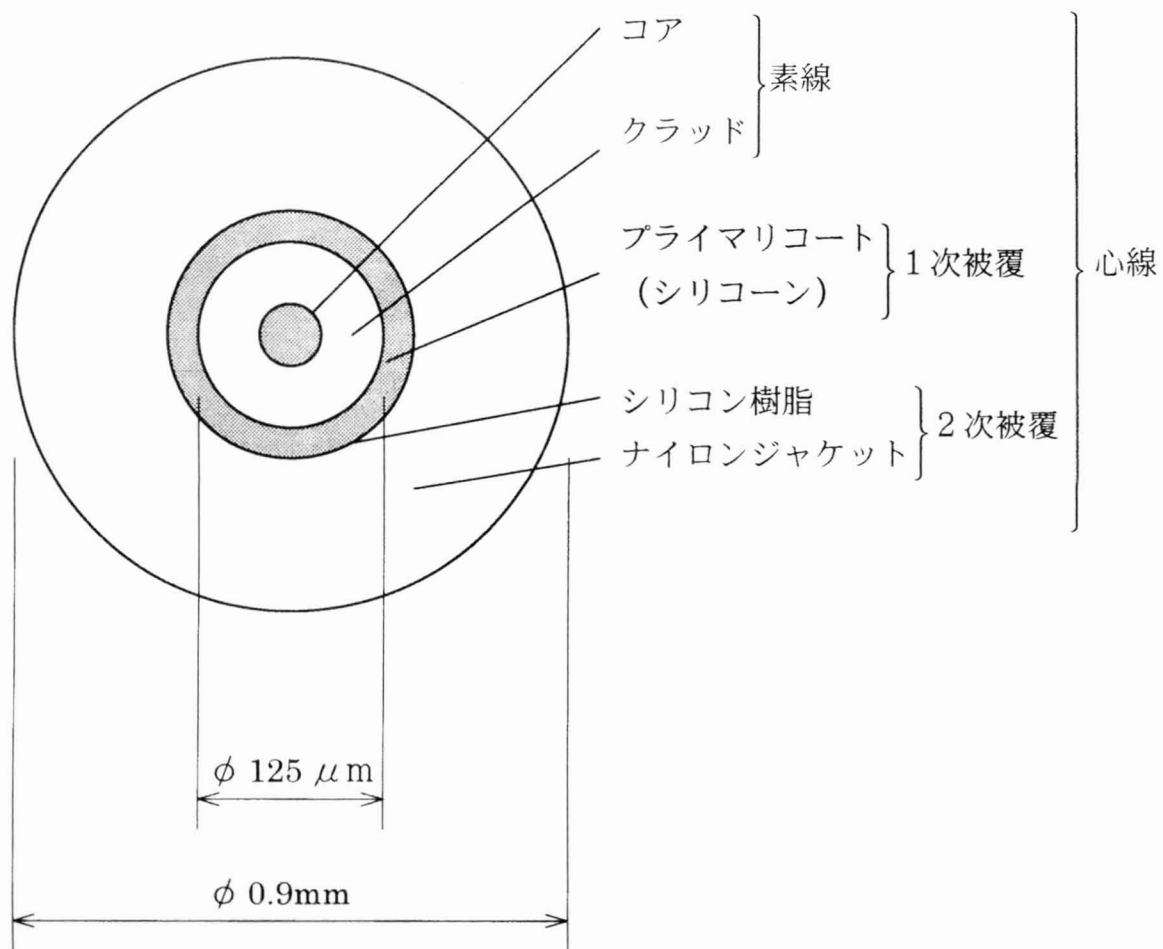


図 1-1 光ファイバ素線・心線の断面構造

表 1-1 光ファイバの種類と構造

| 光ファイバの種類                           | 光ファイバの形状と伝搬モード | 屈折率分布 | 材 料          |              |
|------------------------------------|----------------|-------|--------------|--------------|
|                                    |                |       | コア           | クラッド         |
| ステップ<br>インデックス型<br>多モード<br>光ファイバ   |                |       | 石英ガラス        | 石英ガラス        |
|                                    |                |       | 石英ガラス        | ポリマ          |
|                                    |                |       | 多成分ガラス       | 多成分ガラス       |
|                                    |                |       | ポリマ          | ポリマ          |
| グレーデッド<br>インデックス型<br>多モード<br>光ファイバ |                |       | 石 英<br>ガ ラ ス | 石 英<br>ガ ラ ス |
| 単一モード<br>光ファイバ                     |                |       | 石 英<br>ガ ラ ス | 石 英<br>ガ ラ ス |

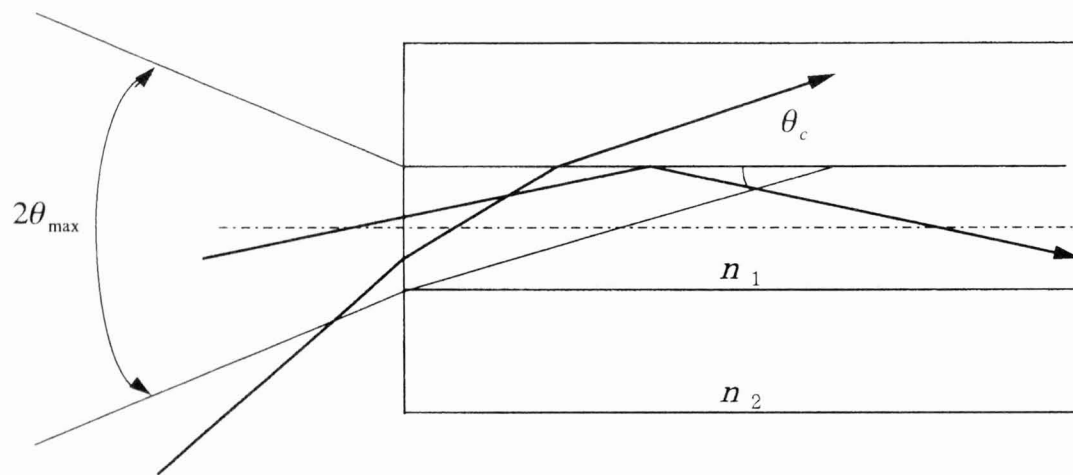


図 1-2 光ファイバの受光特性と  $NA$



表 1-2 偏波面保存光ファイバの構造と種類

| 分 類  | 楕円ジャケット型               | サイドピット型                | PANDA 型                |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 断面構造 |                        |                        |                        |
| 伝搬損失 | 0.8dB/km(1.55 $\mu$ m) | 0.4dB/km(1.55 $\mu$ m) | 0.4dB/km(1.55 $\mu$ m) |
| 消光比  | -30dB                  | -25dB                  | -23dB                  |
| ビート長 | 2mm                    | 6.3mm                  | 6mm                    |

## 1. 3 本研究の背景

### 1. 3. 1 生体用光ファイバセンサの現状

光ファイバの細径，可撓性，透過光域の広さ，化学的安定性，生態に対する適合性に富んでいるなどの特徴を生かして，生理学や医療分野への応用を目的とした，光ファイバセンサが活発に研究開発されている。

### 1. 3. 2 光ファイバセンサの研究動向

生体用センサの代表例として血液中の酸素飽和度センサ（オキシメータ），pH センサ，生体組織分光センサがある。

血液中の赤血球に含まれるヘモグロビンは肺で酸素と結合し，これを体内の各組織へ運搬する機能を果たしている。したがって，身体各部の血管系内において血液中のヘモグロビンに対する酸素と結合しているヘモグロビンの濃度比を測定できれば，循環器系や呼吸器系の障害検知だけでなく，生体組織の機能評価に有用であるため，光ファイバオキシメータ<sup>(21)</sup><sup>(22)</sup><sup>(23)</sup>が研究されている。

また，生体成分の pH を 2 本の光ファイバを先端に装着した構造の光ファイバで pH を測定するためのセンサ<sup>(24)</sup>や，生体組織の機能や病態に応じて変化する，生体表面の反射光の分光分析を行うための光ファイバ分光センサ<sup>(25)</sup><sup>(26)</sup><sup>(27)</sup>が開発され，臨床応用が試みられている。

### 1. 3. 3 従来の研究の問題点

筆者は今まで光ファイバを使った屈折計により局所的な濃度計測が行える屈折計プローブの研究を行ってきた。しかしこのプローブは，石英系マルチモード光ファイバを研磨後接着固定する方法や，多成分マルチモードファイバを低温で熔融・融着する方法で製作していた。そのためプローブの軸ずれや光源からの偏光面の変動により，信号出力は 10%程度変動していた。

また本プローブは高戻り光出力を得るために光ファイバを 3 ないし 4 本を並列接着している。そのためプローブ先端の幅は 4 本の場合で 0.5mm になる。

そこで本研究では，この問題点を解決するために，信号出力変動が小さく比感度の大きい，かつ高精度で屈折率の測定が行えるプローブ構造と，センシングシ

システムの研究を行う。また生体内への挿入を考えプローブのより微小化要求があるため、微小化方法について開発を行う。さらに本システムの実用性を示すため、血管を模擬した弾性管内の流量測定に関する研究を行う。

#### 1. 4 本研究の目的と本論文の構成

以上述べたような背景と現状を踏まえ、本研究では、各種の光ファイバを使用した、小型のセンサプローブを研究し、これを使用することにより、生体内流動情報の計測に関する基礎研究を行った。

研究の最終目標は図 1-3 に示すように、光センサプローブと光電変換器を一体にした光ファイバ微小屈折センサシステムである。

本論文は次のように構成されている。

第 1 章においては、本研究の目的および概要について述べた。

第 2 章では光ファイバセンサによる液体の屈折率計測に関する技術を確立するための手法として、温度計測のセンサとして広く使われている熱電対と同程度の使い勝手で液体の濃度測定ができるようにという目標を掲げ、従来の光ファイバ屈折センサの改良を種々行った。特にプローブ部先端の光ファイバの軸ずれによる出力変動を防ぐため、新たな固定方法について検討を行った。また製作方法として、コンピュータシミュレーションによるプローブ先端の融着半径と信号出力の関係を解明し、信頼性の高い局所濃度測定法を提案した。例として食塩水の屈折率を広い濃度、温度範囲にわたって求めた。

第 3 章では流量測定法の一つとして、微細光ファイバ屈折センサによる血管を模擬した弾性管内の流量測定に関する研究を行い、比較的簡便で安価な装置によって計測できる方法を提案した。細径管内の測定を行うため、プローブ先端の微細化について検討した方法について述べた。本実験では、この方法で得られた流体の屈折率差に対し比感度の大きい微細光ファイバ屈折センサを使って、血管を模擬した弾性管内の流量測定をトレーサー法により試みた。実験により得られた測定結果から、誤差を小さくする方法を提案した。さらにシリンジから注入されるトレーサー液による弾性管内の流速の影響を数値解析により求めた。また、トレーサー液の注入時間、注入量、シリンジとプローブ、プローブとプローブ間距離、弾性管の肉厚など各条件による測定誤差について解析を行い、測定誤差を小

さくするための測定系の条件設定について提案した。

第4章では一例として膜で仕切られたセル内の水溶液の凍結過程における局所濃度計測を行った。凍害発生，細胞損傷のメカニズムを解明する目的の一環として，マクロな生体膜を模擬した，一枚の人工膜で仕切られたセル内での濃度の異なる水溶液が凍結過程において物質が移動する様子をこれまでに開発した光ファイバプローブと熱電対からなる濃度センサを使用して，セル膜近くにおける濃度の空間的，時間的変化を測定した。生体膜を模擬したセロハン膜で鉛直に仕切られたセル内に入れた食塩水溶液と蒸留水の組合せにおいて，限られた冷却条件ではあるが，セル側面から冷却凍結する際の溶液の混合の様子を観察した結果，仕切り膜を通過した溶質および溶媒は両セル内で密度成層を形成することが分かった。また凍結の進行と共に濃溶液側に二重拡散のインターフェイスの存在をシャドウグラフおよび濃度センサを使って確認した。

第5章では結論として本研究で得られた成果について要約してまとめ，今後の課題と将来展望について述べる。

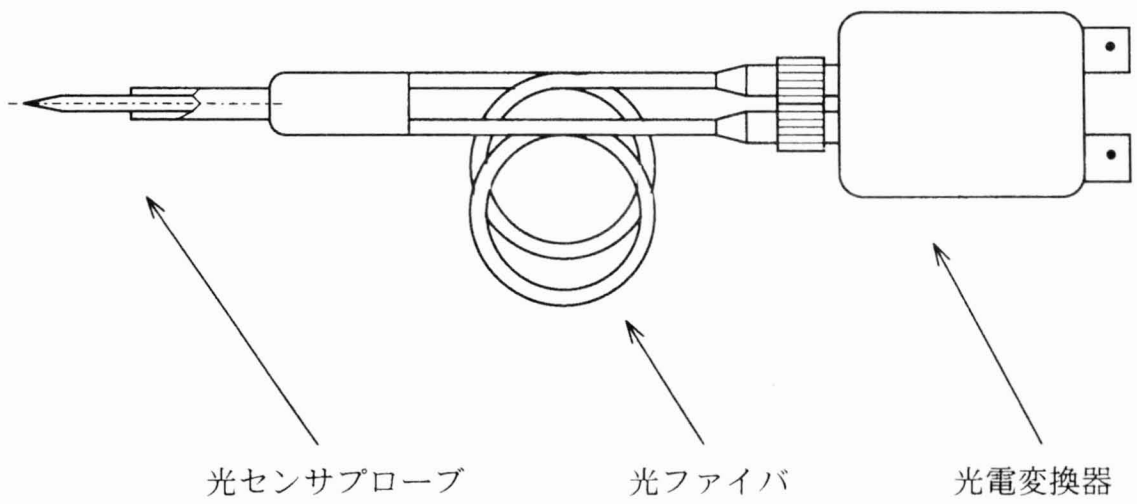


図 1-3 光ファイバ微小屈折センサシステム

## 第 2 章

### 光ファイバセンサによる液体の 屈折率計測に関する技術

## 第2章 光ファイバセンサによる液体の屈折率計測に関する技術

### 2.1 緒言

近年熱流体工学において、容器内での層分化状態にある LNG のロールオーバー現象や深海流におけるソルトフィンガ現象にみられる溶液の濃度と温度が同時に変化する場合の二重拡散による対流問題に関心が深まっている。さらにソーラボンドの塩水による蓄熱システム、作業流体として臭化リチウムを使う吸収式冷凍機、薬や薬品の製造といった広い分野で濃度に関わる問題が生じ、その計測が行われている。

従来の濃度計測はサンプリングによる方法が普通であるが、局所的な温度と濃度を連続的に測定できる信頼性の高いセンサが開発されれば非常に有用なものとなる。この目的にかなった光ファイバを使った屈折率計による濃度計測の報告がある<sup>(28)</sup>。Takeo and Hattori は光ファイバのクラッドを剥離したU形状のプロープを提案している<sup>(29)</sup>。また最近では、さらに微小化したプロープによる塩分の測定を Bergman et. al. が報告しており<sup>(30)</sup>、シングルモード光ファイバを使った屈折計を Meyer and Easley が発表している<sup>(31)</sup>。筆者も光ファイバセンサを使う一つの方法をこれまで研究してきた。

本章は計測の主要部であるセンサ先端部の形状についてコンピュータシミュレーションから飛躍的な信号出力の改善を予測し、その結果に基づいて試作したセンサの測定精度を蒸留水、食塩水の温度、濃度の変化に応じて変わる屈折率の測定により調べた。特に報告の見当たらない凍結温度近くの 0°C 以下の低温度を含む食塩水の屈折率を不確かさ  $\pm 0.03\%$  で求めた。

### 2.2 従来の光ファイバ屈折センサ

#### 2.2.1 屈折センサの構造

図 2-1 に従来の光ファイバ屈折センサプロープの詳細を示す。プロープは外径 125  $\mu\text{m}$  の石英系通信用マルチモード光ファイバ素線を 3 本使い、両端の 2 本は先端部が 30° に研磨してあり、残りの真ん中の 1 本は平面に研磨してある。図

のように極先端近くを除いて軸ずれを防ぐためガラス保護管に入れ、接着剤で固定したものである。したがって反射光路になる先端部分は接着剤は塗られていない。投光側から入った光は、光ファイバ内を全反射しながら先端検出部に達する。光は  $30^\circ$  に研磨した境界においてフレネルの式に従って、検出部を覆っている流体の屈折率に依存した光量で反射、屈折を繰り返して、受光側ファイバを戻ってくる。その光量を測定し、あらかじめ作成した校正曲線をもとに、流体の屈折率を求めることができる。入射光束と反射光束は互いに平行で向きが反対である。反対向きの光束にするのに必要な光ファイバ素線の数  $N_n$  とファイバ端の研磨角  $\theta$  との間には

$$\theta \cdot N_n = \pi / 2 \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

の関係がある。 $N_n = 2$  の場合には  $\theta = 45^\circ$  ,  $N_n = 3$  の場合には  $\theta = 30^\circ$  となる。全反射角  $\theta_c$  に依存するが、 $\theta = 45^\circ$  でプローブを作った場合、光はプローブ端面から流体側に屈折して出ていく光が多くて、受光側ファイバに戻ってくる光量が少なくなる。

測定流体が液体の場合には  $\theta$  が小さい程、利得は大きくなる。しかし工作の精度とプローブの大きさの観点からはこの時点では 3 本が適当と考えて、3 本を採用していた。

### 2. 2. 2 屈折センサの問題点

この方法は、接着剤の劣化のため軸ずれしやすく、素線の間に入った汚れを洗浄するのが難しいという欠点があった。また製作における研磨、接合工程にはかなりの熟練を必要とした。図 2-2 は研磨接着法で試作した  $80/125 \mu\text{m}$  光ファイバ屈折センサプローブを空気中で計測した出力信号とセンサ先端の温度である。この変動の原因は、光ファイバのマイクロベンドによる光路の変化が出力変動を発生する。その変動量は、光ファイバを意図的に揺すった場合大変大きく 10% 程度に達する。

以上の欠点を克服するために、光ファイバ先端部をマイクロトーチで球状に溶かし、融着する方法に切り替えた。また精密な測定は除振台上に置くこととした。



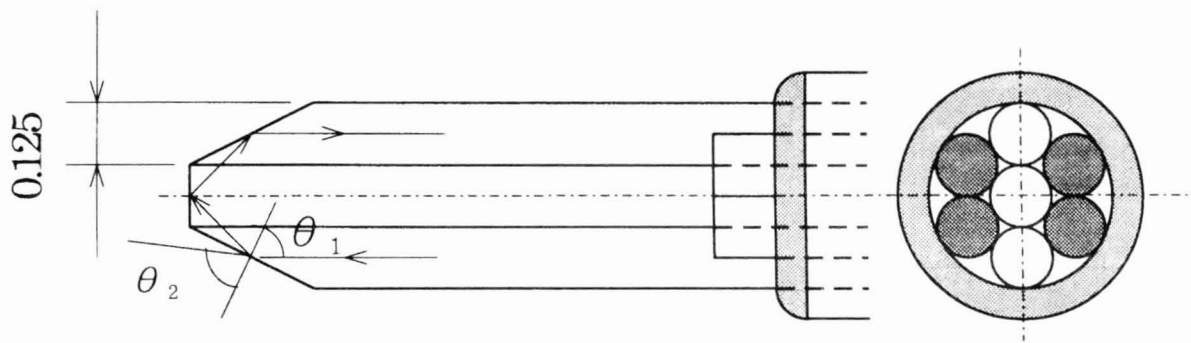


図 2-1 従来の光ファイバ屈折センサのプローブ構造

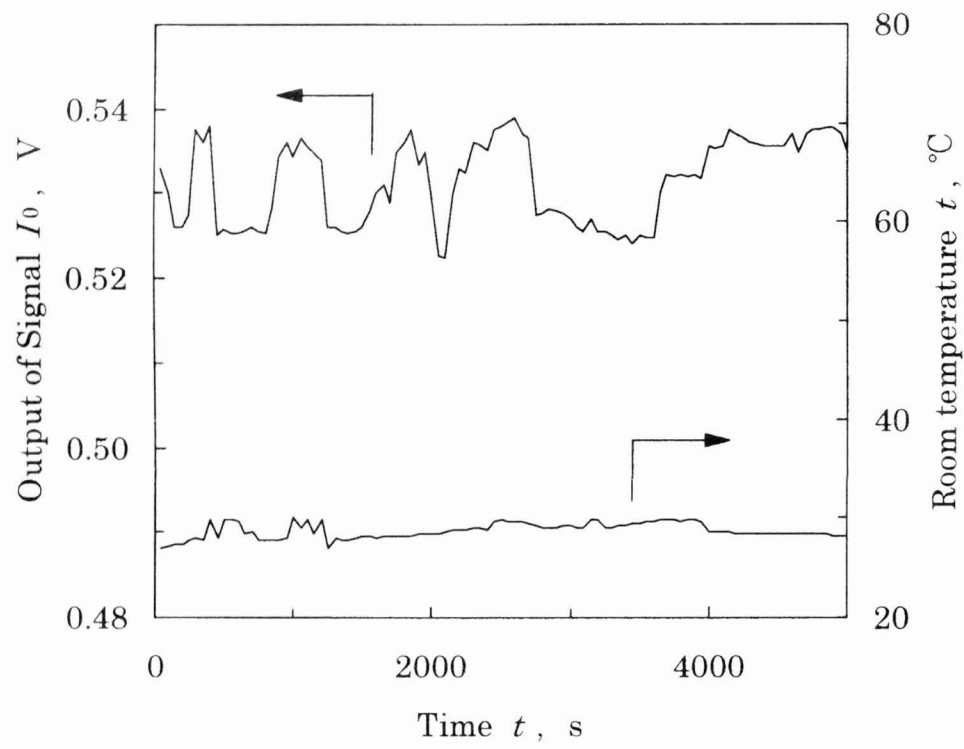


図 2-2 光ファイバ屈折センサ(80/125  $\mu\text{m}$ )の空気中における信号出力

## 2. 3 光ファイバ屈折センサ

### 2. 3. 1 光ファイバ屈折センサの改良

新たに製作した光ファイバ屈折センサおよびその先端部を図 2-3 に示す。以前には光ファイバ先端は 125  $\mu\text{m}$  の光ファイバ素線 3 本を軸に平行に並べ両端の 2 本を軸に対して  $30^\circ$  に、真ん中の 1 本を  $90^\circ$  に研磨したものを接着剤で接合したものであった。この場合は接着剤の劣化のため軸ずれし易く素線の間に入った汚れを洗浄するのが難しいという欠点があった。また製作における研磨、接合工程にはかなり熟練を必要とした。以上の欠点を克服するために光ファイバ先端をマイクロトーチで球状に溶かし、融着する方法を開発した。

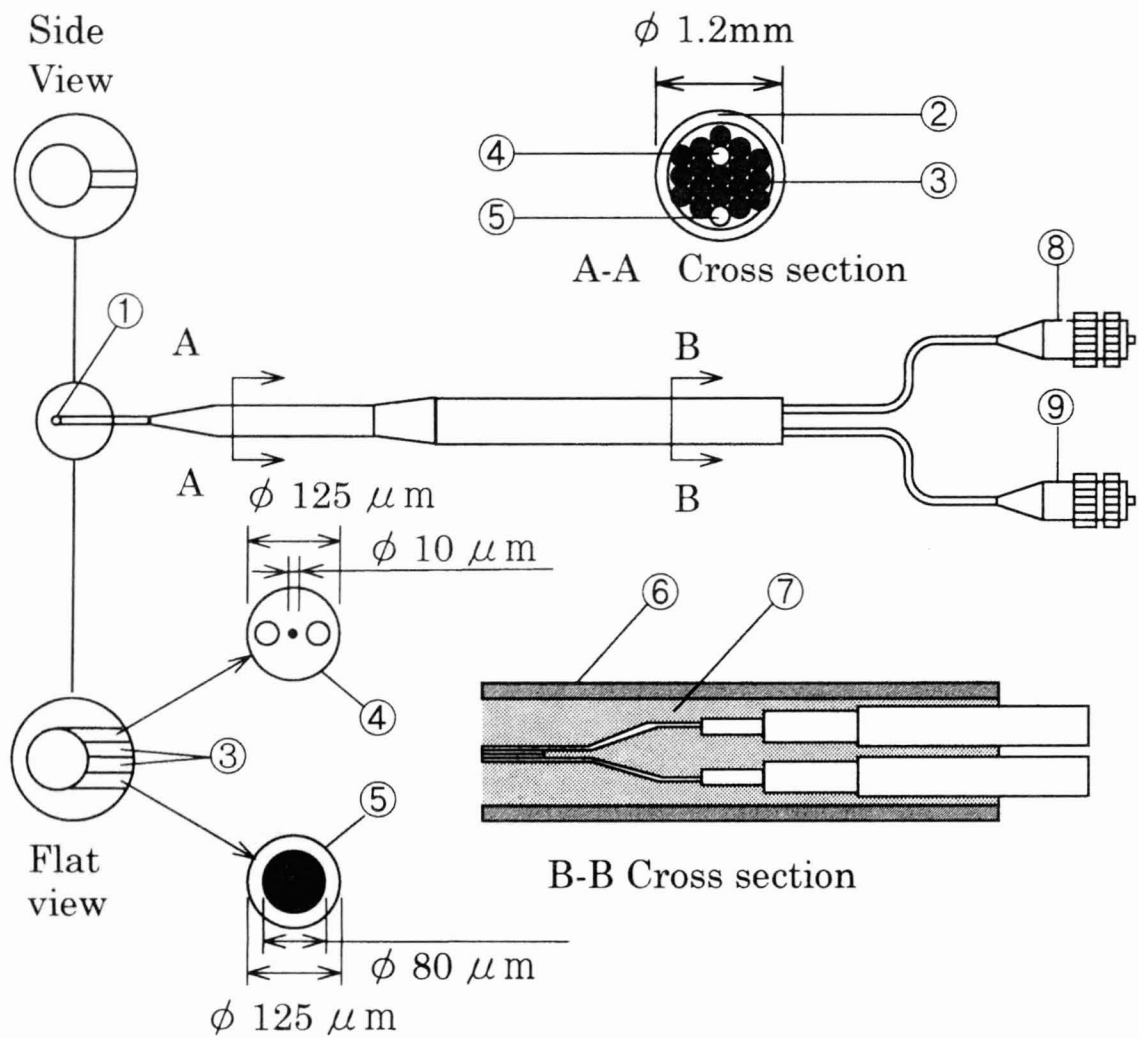
また入射側の光ファイバは、光源からの偏光状態の変動を防ぐために PANDA 型偏波面保存光ファイバを使用した。

### 2. 3. 2 コンピュータシミュレーションによる融着半径と 信号出力の関係

フレネルの反射の式 (2.2) に基づいた二次元の光路のシミュレーションにより、センサの信号出力について検討した。

$$\left. \begin{array}{l} \text{入射面に垂直な偏光成分} \\ I(\theta_1) = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \\ \text{入射面に平行な偏光成分} \\ I(\theta_1) = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $I(\theta_1)$  はそれぞれセンサ先端融着部の界面での光線の入射角、屈折角、界面で反射して戻ってくる光の強さを表す。これまでの研究結果より投光側、受光側の光ファイバ素線は少し離して、平行に融着するとセンサ感度が適切になることが分かったので、本研究では真ん中に 1 本あるいは 2 本を挟んだ場合について、すなわち光ファイバの素線の本数を 3 本と 4 本の場合における信号出力への影響と、融着したときにできる球体の半径の大きさによる信号出力への影響について調べた。



- ① Tip of sensor
- ② Pyrex glass tube
- ③ Spacer fiber
- ④ Single-polarization single mode fiber
- ⑤ Multi mode fiber
- ⑥ Stainless tube
- ⑦ Ceramic bond
- ⑧ Connector of incident light
- ⑨ Connector of detective light

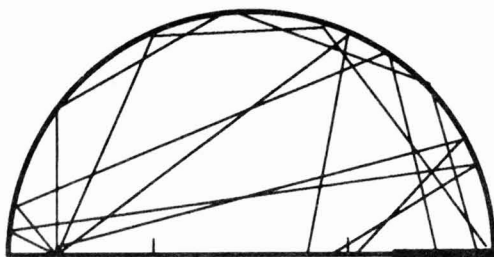
図 2-3 光ファイバ屈折センサ

図 2-4 は、光ファイバ素線 3 本の場合と 4 本の場合におけるセンサ先端部で光が反射を繰り返している光路の様子をコンピュータでシミュレーションしたものである。図 2-4 において水平線に太線で示した部分が受光部コアである。反射光すべてが戻り光として受光側に入らないことが分かる。投光側の偏波面保存光ファイバ (Single-polarization single mode fiber) (クラッド径  $125 \mu\text{m}$ , コア径  $10 \mu\text{m}$ ) の一点から正規分布,  $1\text{mW}$  の光の強さで放射されるとし, 受光側のマルチモード光ファイバ (Multi mode fiber) (クラッド径  $125 \mu\text{m}$ , コア径  $80 \mu\text{m}$ ) のコア部に戻る光の光量, すなわち信号出力  $I$  を求めた。

図 2-5 (a), (b) は屈折率 1.00 (空気), 屈折率 1.33 (水), 屈折率 1.36 (エチルアルコール), 屈折率 1.40 の被検物質による光ファイバ素線 3 本と 4 本の場合の受光側の信号出力  $I$  のシミュレーション結果を, 例として入射面に垂直な偏光成分の場合について示したものである。

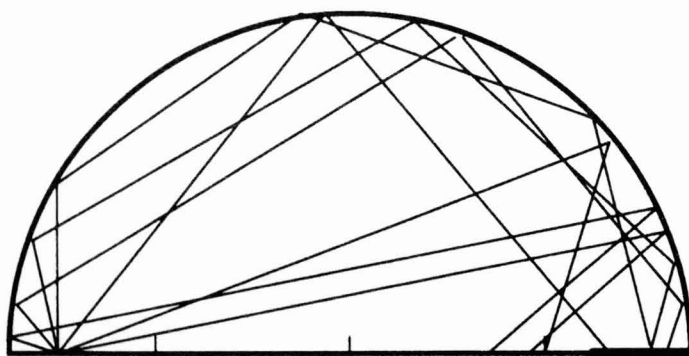
入射面に平行な偏光成分の場合もほぼ同様な結果が得られている。横軸の曲率半径  $R$  は融着の進行する方向に合わせて右側にいくにしたがって小さくなるようにとってある。標準偏差  $\sigma$  とは放射される光の広がり度を表す。使用した偏波面保存光ファイバの開口端より放射する光の強さの分布測定から値を 0.2 に採用した。図 2-5 より 3 本の場合も 4 本の場合も曲率半径の大きい範囲では, 試料液の信号出力は  $\text{nW}$  の大きさで小さく, 屈折率が小さくなるにつれて大きくなるが曲率半径に依存しない。ある限界融着半径になると屈折率の小さい順に信号出力が急上昇することがわかる。この変化は, 3 本の場合は 4 本の場合に比べて曲率半径の短い区間で起こる。このため, 希望の測定感度である球の半径に融着を制御し, 製作するのが難しくなくなると思われる。そこで製作しやすい 4 本融着の場合についてさらに検討を進めるために, 水とエチルアルコールに対応する屈折率で急上昇する領域について拡大したものを図 2-6 に示す。仮に A~C の線で示したところの半径で融着した場合の空気, 水, エチルアルコールの信号出力とそれらのエチルアルコールの信号出力に対する比を図 2-6 に示す。これから, 屈折率 1.33 から 1.36 の範囲の水溶液をおもに測定する場合, B が信号出力を適当な大きさでとれ, 比率も高くセンサの半径として適切であることがわかる。また屈折率が 1.40 と比較的高い試料液の測定には, C の場合といったように用途に応じて製作半径を変えればよい。

光が反射する様子 (3 本)



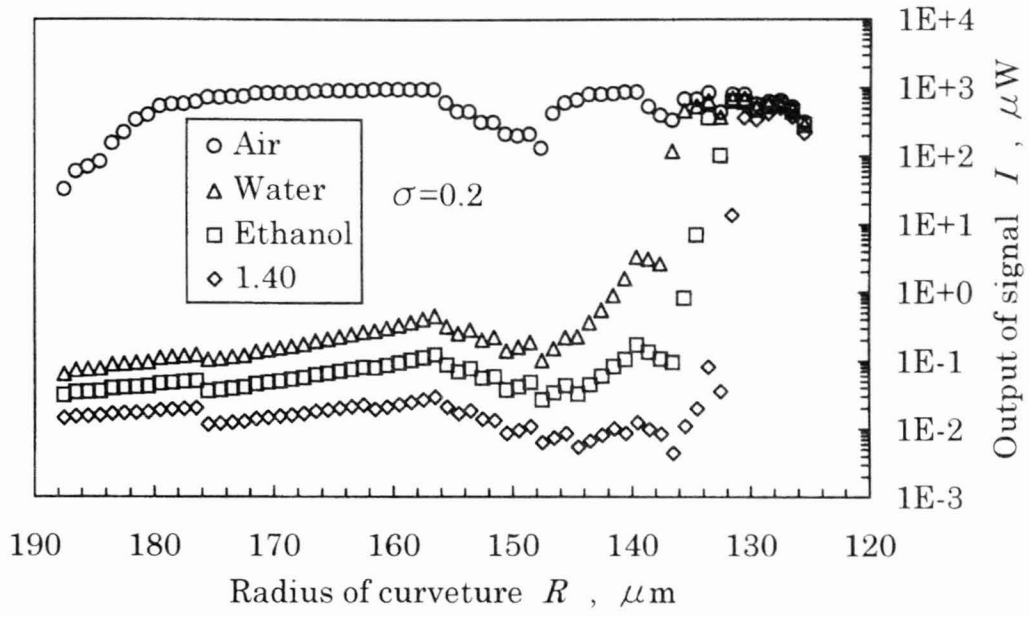
$R$  ,  $\mu\text{m}$

光が反射する様子 (4 本)

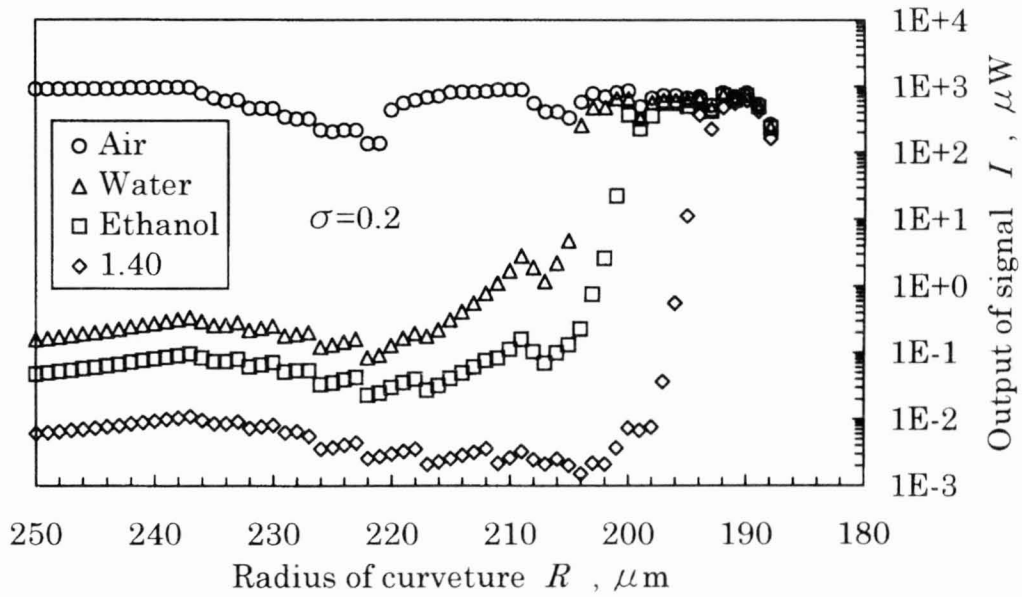


$R$  ,  $\mu\text{m}$

図 2-4 光ファイバ素線 3 本と 4 本の場合におけるセンサ先端部で  
光が反射を繰り返している光路の様子



(a) 3本の場合



(b) 4本の場合

図 2-5 光ファイバ素線 3 本と 4 本の場合の受光側の信号出力  $I$  のシミュレーション結果 (入射面に垂直な偏光成分)

A

|         | $I(\mu\text{W})$ | Ratio |
|---------|------------------|-------|
| Air     | 335              | 1970  |
| Water   | 19               | 110   |
| Ethanol | 0.17             | 1     |

B

|         | $I(\mu\text{W})$ | Ratio |
|---------|------------------|-------|
| Air     | 720              | 248   |
| Water   | 500              | 172   |
| Ethanol | 2.9              | 1     |

C

|         | $I(\mu\text{W})$ | Ratio |
|---------|------------------|-------|
| Air     | 460              | 1.31  |
| Water   | 410              | 1.17  |
| Ethanol | 350              | 1     |

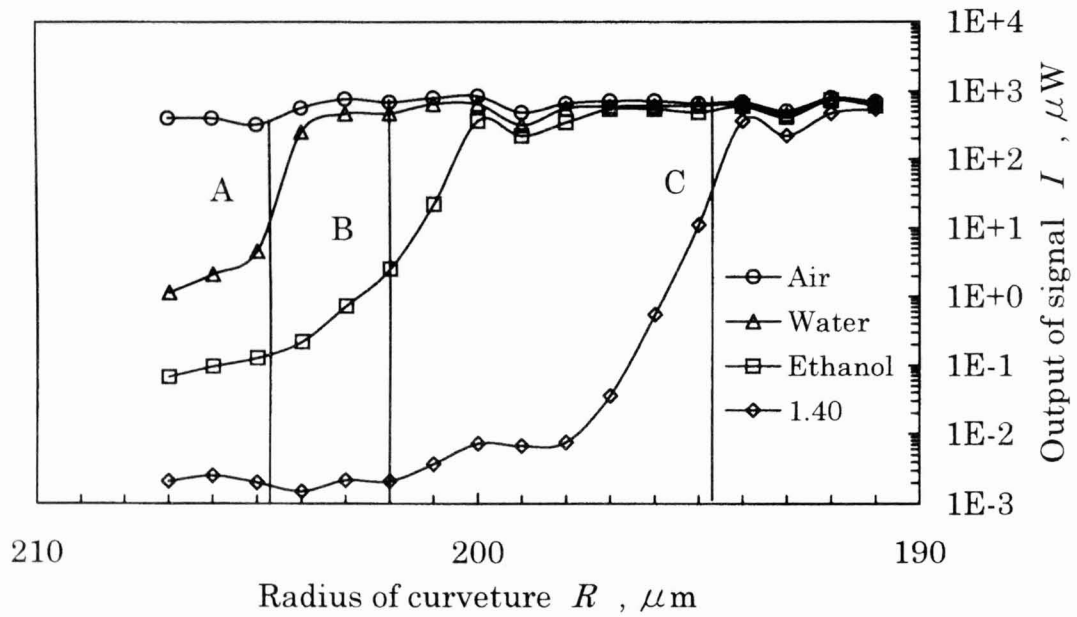


図 2-6 信号出力  $I$  が急上昇する部分の拡大



図 2-7 は試料液が水で、標準偏差  $\sigma$  を 3 種類変えた場合の信号出力  $I$  への影響を示したものである。標準偏差が小さいほど信号出力を大きくとれることがわかる。シミュレーションの結果、入力光には標準偏差が小さいシングルモード光ファイバ素線が適当であり、受光側はなるべく反射してきた光を集光できるコア径の大きいマルチモード光ファイバ素線が有効であることがわかった。また入射光を伝える光ファイバとして偏波面保存光ファイバを採用したのは次のような理由による。初期の光源に、ランダム偏光ガスレーザを使用していたが、半導体レーザの発展に伴い小型で使いやすい 1310nm の固体レーザに変更した。半導体レーザ特有の偏光光源では、測定室の温度変化に起因するわずかの光ファイバのねじれによって伝搬している光の偏光面の回転が生ずる。このことが先端部での反射光量に影響し、屈折率測定精度を下げる結果となる。そこでセンサ先端部までは偏光面を保存するシングルモード光ファイバ素線が必要となった。偏波面保存光ファイバ採用の結果、偏光面の回転による測定誤差のほかにマルチモードで発生するモード変動による光の強さの変動も防ぐことができた。

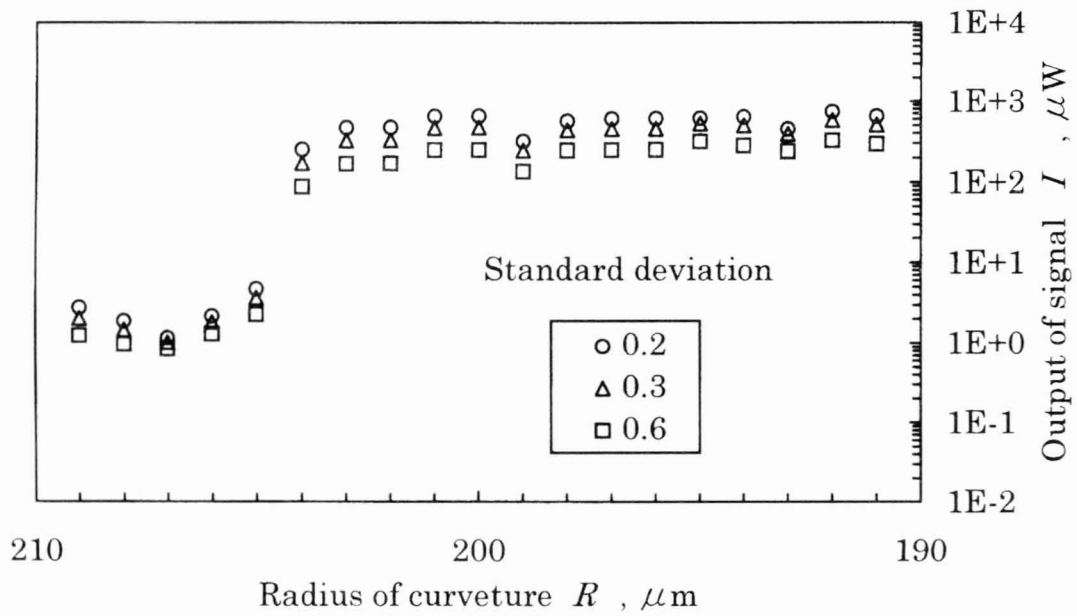


図 2-7 試料液が水で，標準偏差  $\sigma$  を 3 種類変えた場合の  
信号出力  $I$  への影響

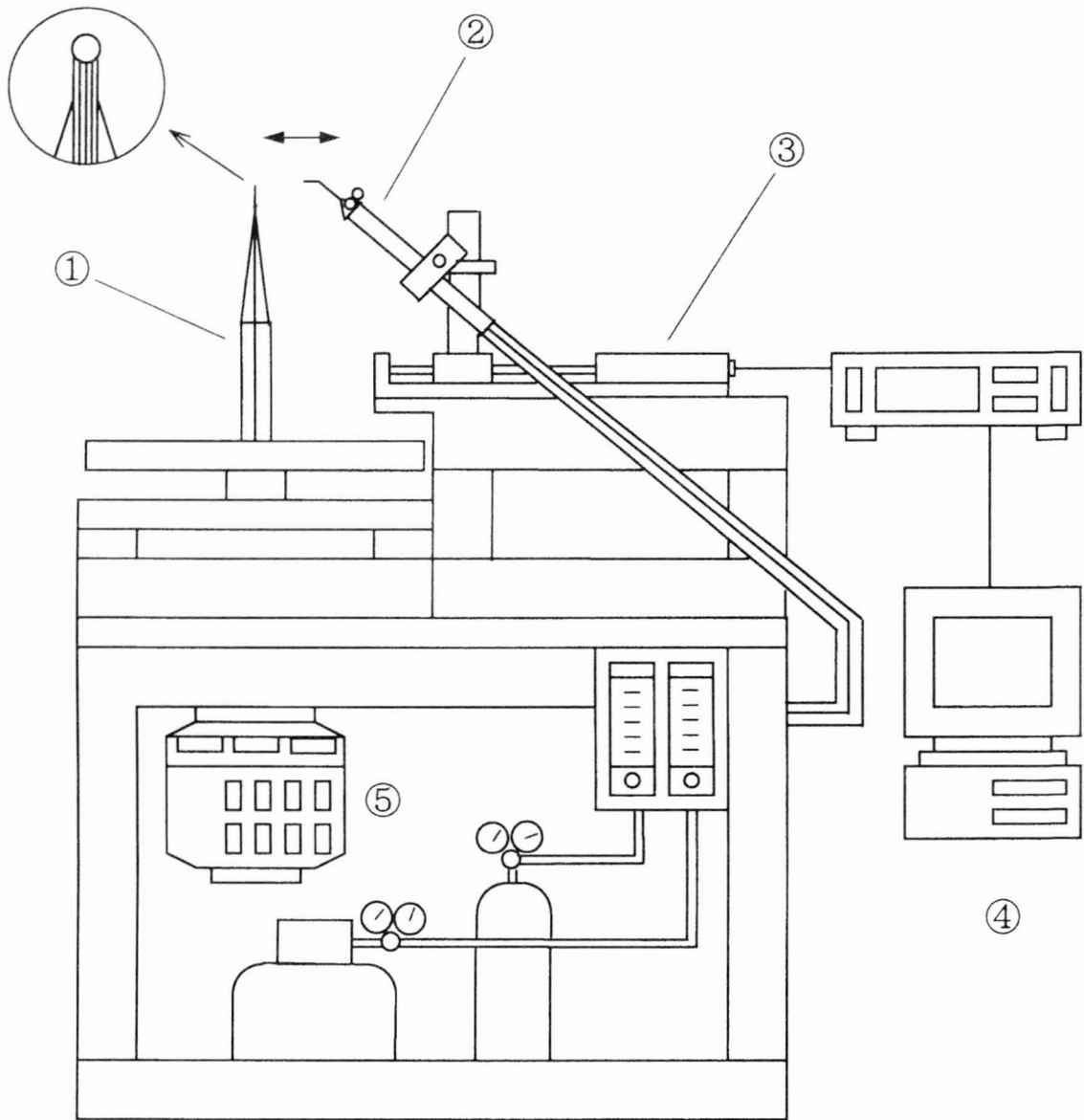
### 2. 3. 3 融着自動化装置

以上のようなシミュレーションの結果を踏まえて、融着装置を使い 4 本光ファイバの先端をマイクロトーチで徐々に溶かしながらその都度受光側における、空気、水、エチルアルコールの信号出力特性を調べ、センサ先端の製作を行った。

製作した融着装置を図 2-8 に示す。先端の製作はまず被覆を 50mm 剥離し、4 本そろえて軸中心が正確にファイバ中心になるようにした取付け治具①に先端上向きに置く。光ファイバ先端はモータ⑤によって低速回転（80 回/分）できるようにになっている。プロパンと酸素ガスの燃焼によるマイクロトーチ②の炎を調節し、1 回につき数秒間ごと繰り返し加熱できるように自動送り装置③をパーソナルコンピュータ④で制御している。

### 2. 3. 4 融着光ファイバ屈折センサ先端の試作

信号出力特性結果の一例を図 2-9 に示す。縦軸は信号出力  $I$ 、横軸はマイクロトーチによるセンサ先端の加熱回数  $N$  を示す。シミュレーションの結果では横軸は融着部の曲率半径  $R$  であり、加熱回数では直接比較できないが、加熱回数が増すごとに融着半径は小さくなるのが観察されているので定性的な検討は可能である。加熱ごとの融着半径の測定ができればよいが現在はできていない。加熱回数は水の信号出力が上昇を始めた時点からの回数である。縦軸が対数で示してあるのではっきりしないが空気の場合の信号出力はいったん下がり再び上昇している。水、エチルアルコールの信号出力は波打ちながらときどき階段状に上昇していく。この様子は図 2-6 の横軸を拡大した特性曲線と定性的に一致しており、また加熱回数 47 で融着操作を終わりにしたときの信号出力は空気が  $380 \mu\text{W}$ 、水が  $274 \mu\text{W}$ 、エチルアルコールが  $2.83 \mu\text{W}$  とシミュレーションが二次元の粗いものであったにもかかわらず、B の場合に相当する値を得た。この結果は従来のセンサでは水が  $1.20 \mu\text{W}$ 、エチルアルコールが  $0.06 \mu\text{W}$  程度であったのと比べてみると、屈折率では約 50 倍の信号出力の増加となって感度が飛躍的に向上していることがわかる。



- |          |               |
|----------|---------------|
| ① 取付治具   | ② マイクロトーチ     |
| ③ 自動送り装置 | ④ パーソナルコンピュータ |
| ⑤ モータ    |               |

図 2-8 センサ融着装置

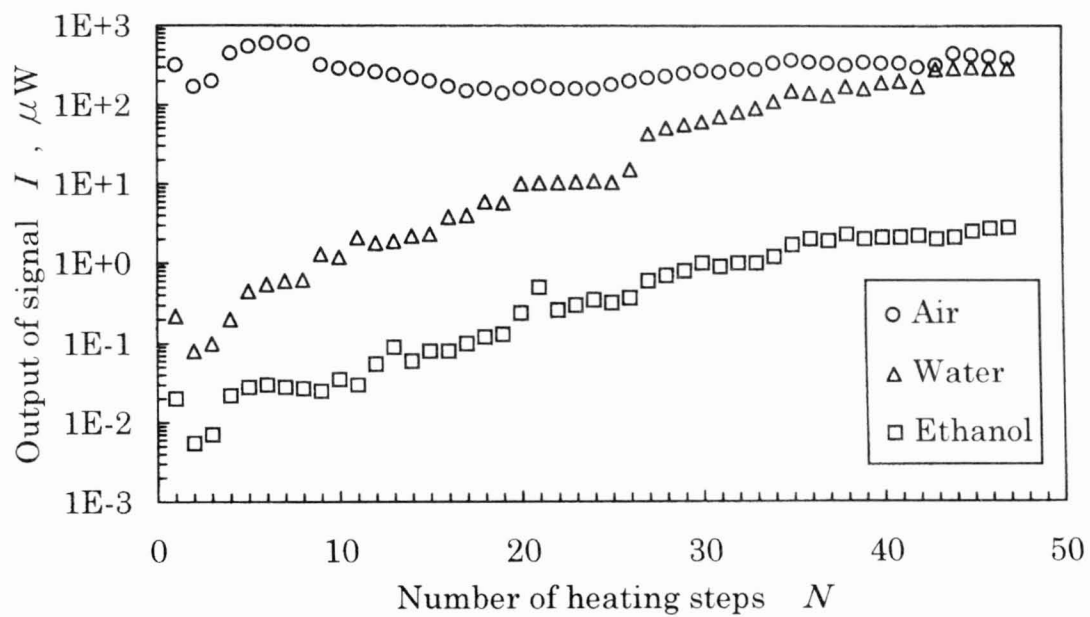
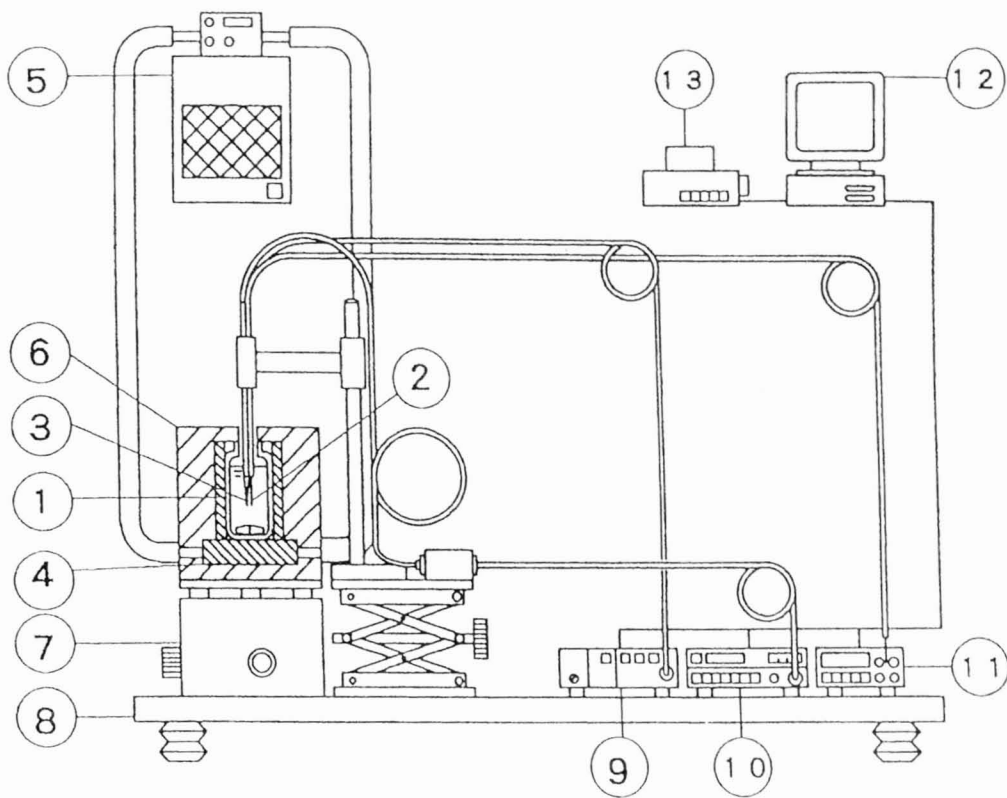


図 2-9 信号出力  $I$  と加熱回数  $N$  の関係

## 2. 4 屈折率測定装置

図 2-10 に実験装置の概略について示す。100ml の試料液体を入れたガラス容器①は銅ブロック製の伝熱部④によって上部を除いて包まれている。その外周は断熱材⑥で囲み保温され、攪拌器⑦の上にのせてある。光ファイバ屈折センサ③と温度測定用の 0.5mm シース熱電対②が試料液に漬けられている。光源にはアドバンテスト製 Q8142A, 出力 1mW, 出力安定度 0.05dB 以下, 波長 1310nm のレーザダイオード光源⑨を使用した。受光にはアドバンテスト製 Q8214A, 測定確度±5%のパワーメータ⑩を使用した。温度計にはアドバンテスト製 TR2114H, 測定確度±0.3°Cマルチ温度計⑪を使用した。これらの装置は除振台⑧の上においた。恒温槽⑤によって試料の温度を温度調節器を使って徐々に加熱, 冷却することによって連続的に屈折率を測った。

パワーメータとマルチ温度計の GP-IB からの信号出力をパーソナルコンピュータに連続的に取り込むために、付録 1 に示す BASIC のプログラムを作成した<sup>(32)(33)(34)</sup>。信号出力をパーソナルコンピュータ⑫に取り込みプリンタ⑬で記録した。



- |                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| ① Container            | ② Thermocouple      |
| ③ Optical fiber sensor | ④ Copper block      |
| ⑤ Cooler               | ⑥ Thermal insulator |
| ⑦ Stirrer              | ⑧ Isolator          |
| ⑨ LD light source      | ⑩ Power meter       |
| ⑪ Digital thermometer  | ⑫ Personal computer |
| ⑬ Printer              |                     |

図 2-10 実験装置の概略

## 2. 5 測定結果と考察

図 2-11 に蒸留水の測定結果の記録例を示す．下方曲線は温度  $T$ ，上方曲線は屈折率に対応する光の強さの信号出力  $I$  で，横軸は測定時間を表す． $11^{\circ}\text{C}$  から  $0.1^{\circ}\text{C}$  まで温度を下げ再び加熱して  $21.9^{\circ}\text{C}$  まで上昇したときの様子を示している． $10^{\circ}\text{C}$  から氷点近くまでの屈折率の変化が小さいことがわかる．信号出力の変動は蒸留水あるいは空気について調べたところ， $24 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ， $45\text{min}$  において， $0.5\%$  であった．

図 2-12 は蒸留水について，加熱，冷却を連続的に繰返した場合の信号出力  $I$  の履歴を調べたものである．約  $1.5\%$  の変動内に収まっている．以前のセンサはエポキシ系接着剤で固着した部分があり，光ファイバと接着剤の熱膨張率の違いによるマイクロバンド効果の信号出力への影響が加熱，冷却時の固着部分の温度分布の相違から，条件によっては約  $5\%$  ほどのヒステリシスのある変動として観察された．本研究ではスペーサとして光ファイバ束を使ってパイレックス管で封印固着する方法をとった結果この点を改善することができた．実際の測定では，溶液の屈折率を測るので測定の後に洗浄が必要である．また測定日すなわち室温を始めとする測定環境が異なる場合が普通である．いろいろな濃度の食塩水屈折率測定前に水で洗浄し，センサの再現性を確認するため，蒸留水についての測定を行った．図 2-13 にその結果を示す．これからわかるように信号出力  $I$  は毎回測定ごとに異なり，その変動は  $2.8\%$  ほど存在する．このデータを元に不確かさを計算すると，包括度  $95\%$  において屈折率の値で  $\pm 0.03\%$  となる．図 2-13 の測定結果について，出力値を  $20^{\circ}\text{C}$  の値で正規化すると毎回測定ごとに異なっていたデータは 1 本の特性曲線としてまとめられることがわかっている．この散らばりの原因を取り除けばさらに精度を上げることができる．

屈折率の測定精度は光ファイバセンサに送る光源の安定性，光ファイバコネクタの取付損失，光ファイバのマイクロバンドによるクラッドからの漏れ，センサ先端における偏光面の安定度，センサの汚れ，センサ接着部の熱膨張による応力の影響，出力端から出た光強度をいかに正確にパワーメータで測定するかあるいは温度計の精度に依存する．このうち誤差のおもな要因は現在のところ，パワーメータの正確度に基づく偏り誤差とセンサの汚れではないかと推測している．



図 2-14 に食塩水の各濃度における信号出力  $I$  と温度  $T$  の関係の例として 1.5, 5.0% について示す. 食塩水の測定前に測定した蒸留水も示してある. 水の場合と違って, 食塩水は凝固点近くでも屈折率の温度依存性が高いことを示している. 実線は実験点に合う実験式で, 信号出力を温度の三次元の多項式で表したものである. 図 2-15 は種々の濃度の食塩水について温度  $T$  を変え, 本屈折計で測定した信号出力  $I$  を縦軸対数で示したものである. これによれば食塩水の高い濃度においても屈折率の温度依存性が存在することがわかる.

図 2-16 に屈折率既知の蒸留水, エチルアルコール, 20°C 食塩水を使って, 本センサの屈折計の信号出力  $I$  - 屈折率  $n$  の校正曲線を示す. 図 2-13 に示した蒸留水の実験点は屈折率 1.332 から 1.334 に相当しているが, 本図ではほとんど散らばりとして認められず一直線上に重なっている. 屈折率の増加とともに信号出力は減衰していく曲線である. 屈折率が 1.35 までは感度はほぼ直線性を示しており理想的である. 光ファイバ素線の屈折率は石英ガラスの 1.45 に近い. 理論上, 測定する液体の屈折率が 1.45 に近い場合, 信号出力が小さくなり測定精度は下がる.

図 2-16 に使用した校正曲線の式を(2.3)に示す. この校正曲線を使って屈折率  $n$  を求めた結果を表 2-1 に示す. ただし蒸留水の屈折率は International Critical Tables の値を, 20°C 食塩水の屈折率値はアタゴ屈折計データブックから引用した.

$$\left. \begin{aligned}
 n &= a_2 + a_3 I + a_4 I^2 + a_5 I^3 + a_6 I^4 + a_7 I^5 \\
 a_2 &= 1.364662 \\
 a_3 &= -8.479463 \times 10^{-4} \\
 a_4 &= 1.648655 \times 10^{-5} \\
 a_5 &= -1.828235 \times 10^{-7} \\
 a_6 &= 9.656259 \times 10^{-10} \\
 a_7 &= -1.937022 \times 10^{-12}
 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.3)$$

Measurement of Concentration of Solution H-32 H2O (uV)  
Start: 20:38:53

1993/02/17  
21:21:30

Number of data= 1148 Sam. Int.= 2 sec max= 161.18 min= 147.87 range= 13.31  
Mean= 149.787 Standard deviation= 2.88877 Variation= 8.89872 (X)  
\* Temperature: max= 21.9 min= .1 range= 21.8  
mean= 6.24745 S.D= 5.42886 variation= 348.942 (X)

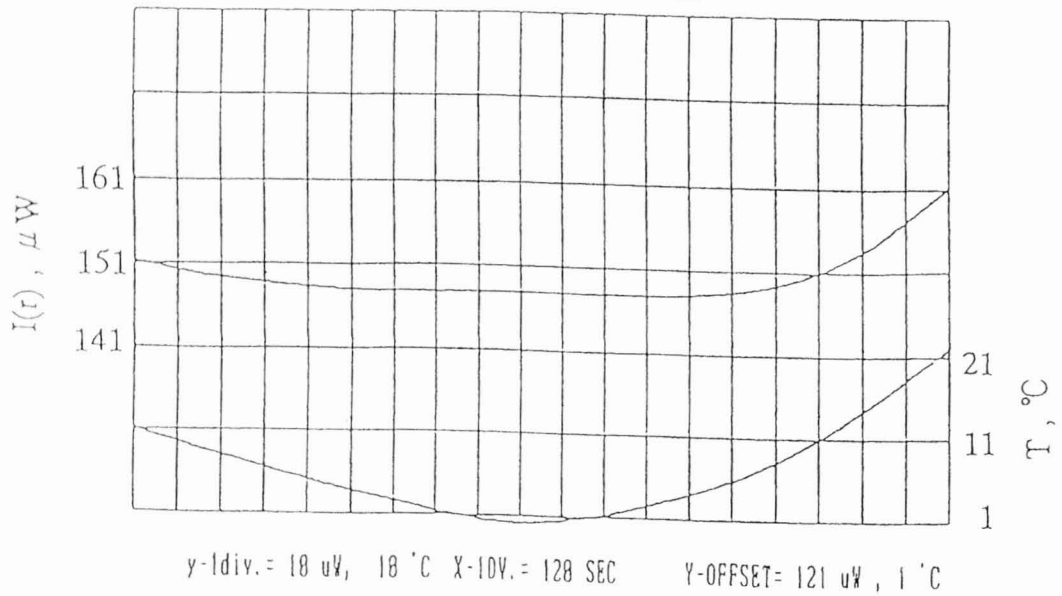


図 2-11 蒸留水の測定結果の記録例

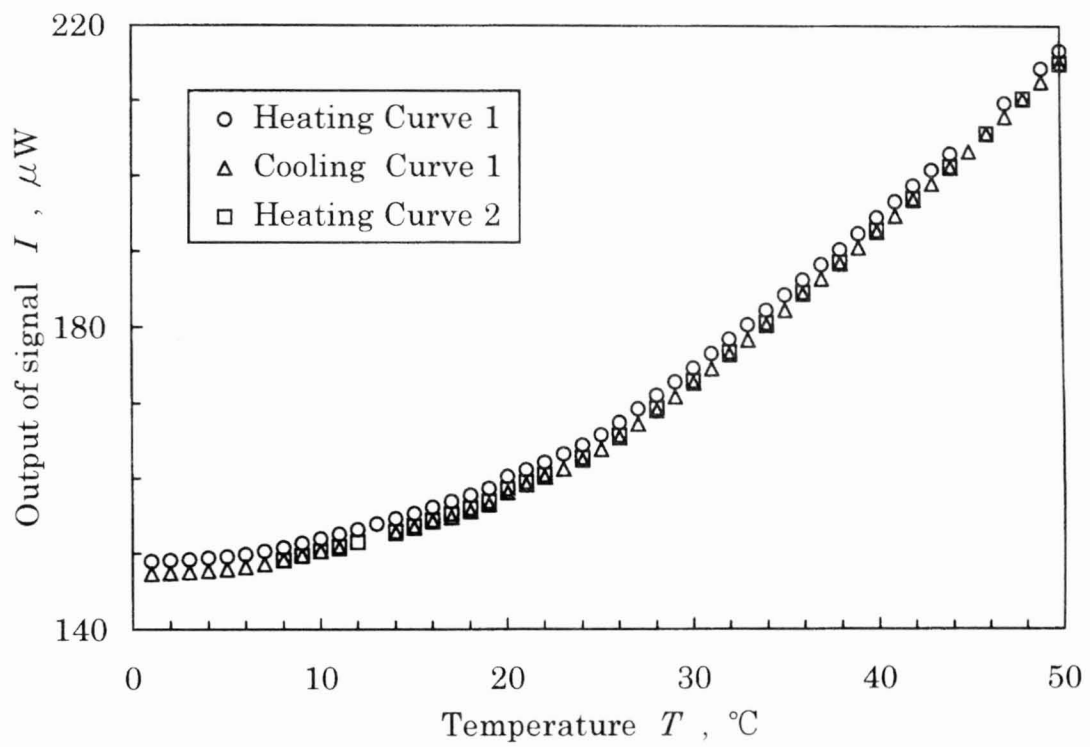


図 2-12 蒸留水について、加熱、冷却を連続的に繰り返した場合の信号出力  $I$

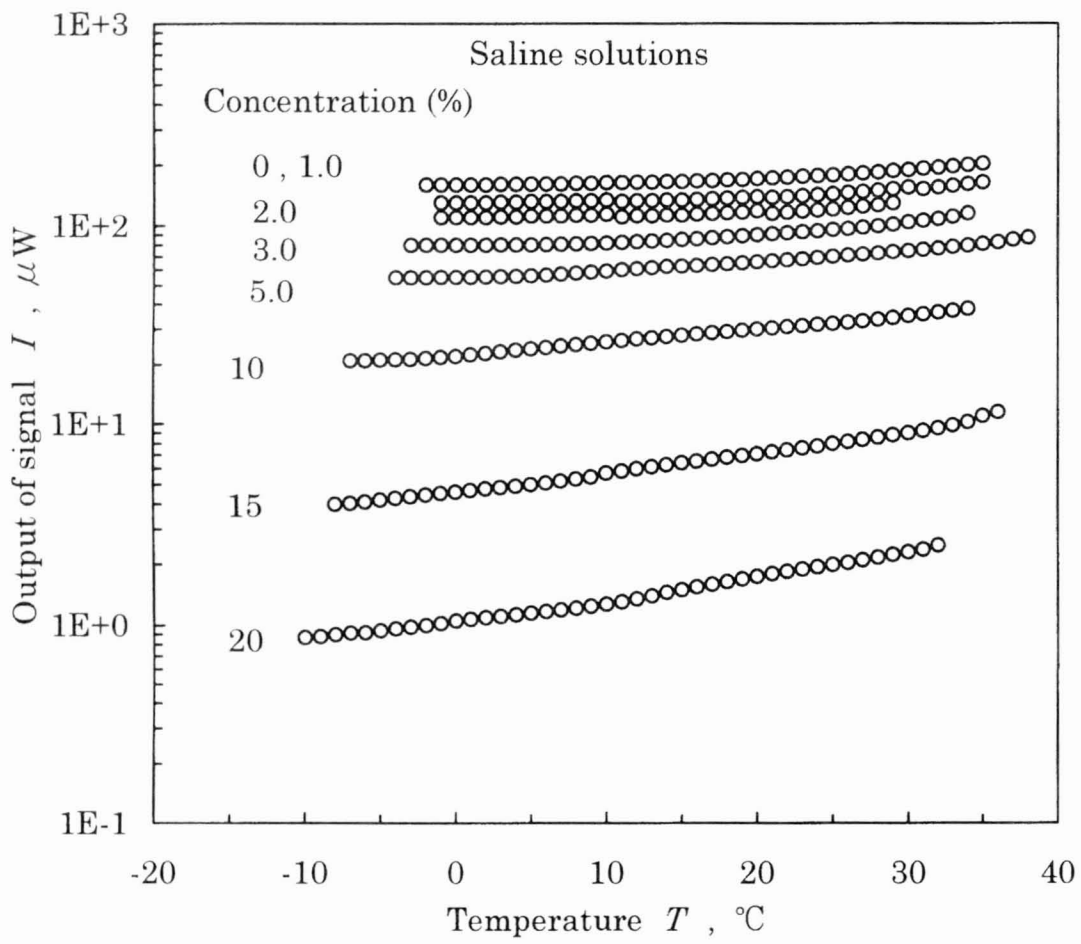


図 2-15 食塩水の各濃度における信号出力  $I$  と温度  $T$  の関係

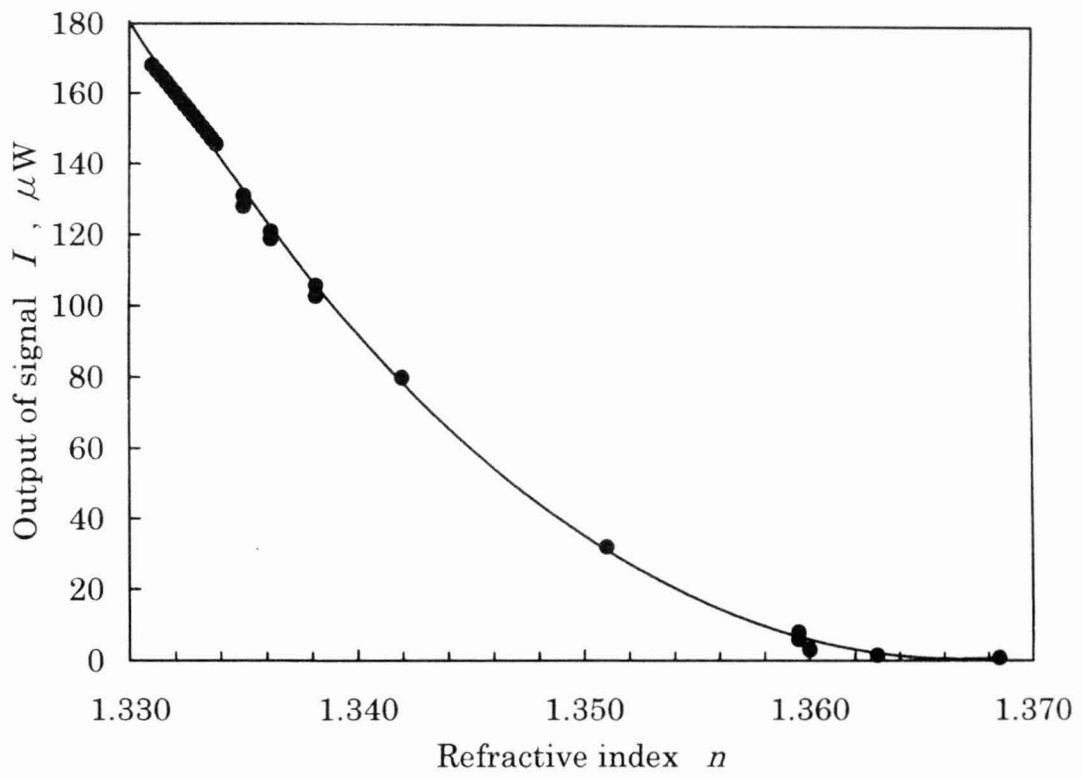


図 2-16 屈折率計の信号出力  $I$ —屈折率  $n$  の校正曲線

表 2-1 食塩水の屈折率  $n$

| Temp.(°C) | Concentration (%) |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 0*                | 0.5    | 1.5    | 2.0    | 3.0    | 5.0    | 10     | 15     |
| -8.0      |                   |        |        |        |        |        |        | 1.3616 |
| -7.0      |                   |        |        |        |        |        | 1.3530 | 1.3615 |
| -6.0      |                   |        |        |        |        |        | 1.3529 | 1.3615 |
| -5.0      |                   |        |        |        |        |        | 1.3528 | 1.3614 |
| -4.0      |                   |        |        |        |        | 1.3438 | 1.3527 | 1.3614 |
| -3.0      |                   |        |        |        | 1.3400 | 1.3438 | 1.3527 | 1.3613 |
| -2.0      |                   |        |        | 1.3378 | 1.3400 | 1.3438 | 1.3526 | 1.3612 |
| -1.0      |                   |        | 1.3368 | 1.3378 | 1.3400 | 1.3437 | 1.3525 | 1.3612 |
| 0.0       | 1.3340            | 1.3343 | 1.3367 | 1.3378 | 1.3399 | 1.3437 | 1.3524 | 1.3611 |
| 1.0       |                   | 1.3343 | 1.3367 | 1.3378 | 1.3399 | 1.3437 | 1.3523 | 1.3610 |
| 2.0       |                   | 1.3343 | 1.3367 | 1.3378 | 1.3399 | 1.3436 | 1.3522 | 1.3610 |
| 3.0       |                   | 1.3343 | 1.3367 | 1.3377 | 1.3398 | 1.3436 | 1.3521 | 1.3609 |
| 4.0       |                   | 1.3343 | 1.3366 | 1.3377 | 1.3398 | 1.3435 | 1.3520 | 1.3608 |
| 5.0       | 1.3339            | 1.3343 | 1.3366 | 1.3377 | 1.3397 | 1.3434 | 1.3519 | 1.3608 |
| 6.0       |                   | 1.3343 | 1.3365 | 1.3376 | 1.3397 | 1.3434 | 1.3518 | 1.3607 |
| 7.0       |                   | 1.3343 | 1.3365 | 1.3376 | 1.3396 | 1.3433 | 1.3516 | 1.3606 |
| 8.0       |                   | 1.3343 | 1.3364 | 1.3375 | 1.3396 | 1.3432 | 1.3515 | 1.3605 |
| 9.0       |                   | 1.3342 | 1.3364 | 1.3375 | 1.3395 | 1.3432 | 1.3514 | 1.3604 |
| 10.0      | 1.3337            | 1.3342 | 1.3363 | 1.3374 | 1.3394 | 1.3431 | 1.3513 | 1.3603 |
| 11.0      |                   | 1.3342 | 1.3362 | 1.3373 | 1.3393 | 1.3430 | 1.3512 | 1.3603 |
| 12.0      |                   | 1.3341 | 1.3362 | 1.3372 | 1.3392 | 1.3429 | 1.3510 | 1.3602 |
| 13.0      |                   | 1.3341 | 1.3361 | 1.3372 | 1.3391 | 1.3428 | 1.3509 | 1.3601 |
| 14.0      |                   | 1.3340 | 1.3360 | 1.3371 | 1.3390 | 1.3427 | 1.3508 | 1.3600 |
| 15.0      | 1.3334            | 1.3340 | 1.3359 | 1.3370 | 1.3389 | 1.3426 | 1.3507 | 1.3599 |
| 16.0      |                   | 1.3339 | 1.3359 | 1.3369 | 1.3388 | 1.3425 | 1.3505 | 1.3598 |
| 17.0      |                   | 1.3339 | 1.3358 | 1.3368 | 1.3387 | 1.3424 | 1.3504 | 1.3597 |
| 18.0      |                   | 1.3338 | 1.3357 | 1.3367 | 1.3386 | 1.3423 | 1.3503 | 1.3596 |
| 19.0      |                   | 1.3338 | 1.3356 | 1.3366 | 1.3385 | 1.3422 | 1.3501 | 1.3595 |
| 20.0      | 1.3330            | 1.3337 | 1.3355 | 1.3365 | 1.3384 | 1.3421 | 1.3500 | 1.3593 |
| 21.0      |                   | 1.3336 | 1.3354 | 1.3364 | 1.3383 | 1.3420 | 1.3499 | 1.3592 |
| 22.0      |                   | 1.3336 | 1.3353 | 1.3363 | 1.3381 | 1.3419 | 1.3497 | 1.3591 |
| 23.0      |                   | 1.3335 | 1.3352 | 1.3362 | 1.3380 | 1.3417 | 1.3496 | 1.3590 |
| 24.0      |                   | 1.3334 | 1.3351 | 1.3361 | 1.3379 | 1.3416 | 1.3495 | 1.3589 |
| 25.0      | 1.3325            | 1.3333 | 1.3350 | 1.3360 | 1.3378 | 1.3415 | 1.3493 | 1.3587 |
| 26.0      |                   | 1.3332 | 1.3349 | 1.3358 | 1.3376 | 1.3414 | 1.3492 | 1.3586 |
| 27.0      |                   | 1.3331 | 1.3348 | 1.3357 | 1.3375 | 1.3412 | 1.3490 | 1.3585 |
| 28.0      |                   | 1.3331 | 1.3347 | 1.3356 | 1.3373 | 1.3411 | 1.3489 | 1.3583 |
| 29.0      |                   | 1.3330 | 1.3346 | 1.3355 | 1.3372 | 1.3409 | 1.3488 | 1.3582 |
| 30.0      | 1.3320            | 1.3328 | 1.3345 | 1.3354 | 1.3371 | 1.3408 | 1.3486 | 1.3580 |
| 31.0      |                   | 1.3327 | 1.3344 | 1.3352 | 1.3369 | 1.3407 | 1.3485 | 1.3579 |
| 32.0      |                   | 1.3326 | 1.3342 | 1.3351 | 1.3368 | 1.3405 | 1.3483 | 1.3578 |
| 33.0      |                   | 1.3325 | 1.3341 | 1.3350 | 1.3366 | 1.3404 | 1.3482 | 1.3576 |
| 34.0      |                   | 1.3324 | 1.3340 | 1.3348 | 1.3365 | 1.3402 | 1.3481 | 1.3575 |
| 35.0      |                   | 1.3322 | 1.3339 | 1.3347 | 1.3364 | 1.3401 | 1.3479 | 1.3573 |
| 20.0 §    |                   | 1.3339 | 1.3357 | 1.3366 | 1.3383 | 1.3418 | 1.3505 | 1.3594 |

\* Cited from the International Critical Tables.

§ Cited from the data book for ATAGO refractometer.

## 2. 6 結論

温度計測のセンサとして広く使われている熱電対と同程度の使い勝手で液体の濃度測定ができるようにという目標を掲げ、従来の光ファイバ屈折センサの改良を種々行い、簡易な製作法を確立し、信頼性の高い局所濃度測定法を提案した。例として食塩水の屈折率を広い濃度、温度範囲にわたって求め、次のような結果を得た。

(1) 本論文で提案したセンサ先端部を球状に融着する方法はコンピュータシミュレーションから従来の光ファイバセンサに比べて信号出力について飛躍的に改善できることを予測した。予測に基づいて感度の高いセンサを試作し、本方法の有用性を示した。

(2) センサの測定精度を蒸留水、食塩水の温度、濃度の変化に応じて変わる屈折率の測定により調べた。特に測定報告の見当たらない凍結温度近く、 $0^{\circ}\text{C}$ 以下の低温度を含む食塩水の屈折率を不確かさ $\pm 0.03\%$ で求めることができた。

## 第 3 章

微細光ファイバ屈折センサによる血管を  
模擬した弾性管内の流量測定に関する研究



### 第3章 微細光ファイバ屈折センサによる血管を模擬した 弾性管内の流量測定に関する研究

#### 3. 1 緒言

最近の医療には多数の医用電子機器が診断・治療のために導入されている。その中で血流測定装置は循環系の診断や研究、あるいは症状の監視などに必要である。さらに人体の体温分布モデルの基礎研究となる血流による熱輸送機構の解明にも血流測定が欠かせない。したがって古くから各種の血流計測法が開発されてきた<sup>(35)</sup>。その主なものに超音波ドップラ血流計<sup>(36)(37)</sup>やレーザドップラ血流計<sup>(38)</sup>、指示薬希釈法<sup>(39)</sup>がある。超音波ドップラ血流計はビームを一定の角度に保つことが必要であり、レーザドップラ血流計は管壁が薄い血管に限られる。血管に光ファイバを挿入する光ファイバレーザドップラ血流計は、後方散乱光利用のため、散乱光強度が弱く、そのためS/N比が低くなるといった問題があった<sup>(40)</sup>。

著者はこれまでに微細な光ファイバ屈折センサを使用した濃度計について研究してきた。本研究は血管内の流量測定法の一つとして、高価な設備や熟練した測定技術を必要としないこの濃度計を使ったトレーサー法について実験的に検討を行い、実験精度に関する若干の理論的考察を加えた。

#### 3. 2 光ファイバ屈折センサの構造と原理

従来から水の流量測定法として塩水速度法がある<sup>(41)(42)(43)</sup>。この方法は、導管のある場所から瞬間的に塩水を混入し、この塩分が下流のある場所へ何秒後に到達したかを測定し、これによって求めた平均流速と管径とから流量を求めるものである。本研究は生体に適している微細な光ファイバプローブを塩分測定センサとして利用した。

図3-1は光ファイバ屈折センサの詳細を、図3-2はセンサ先端部の拡大写真を示す。センサは光ファイバを並列に並べ、先端を溶融融着・延伸する方法で製作される。今回使用した光ファイバは外径125 $\mu\text{m}$ で、投光側は偏光面の回転による

出力変動を防ぐために偏波面保存シングルモード光ファイバを使用し、受光側は通常のシングルモード光ファイバを使用している。投光側から入った光は、光ファイバ内を全反射しながら先端検出部に達する。光は先端境界面においてフレネルの式にしたがって、検出部を覆っている流体の屈折率に依存した光量で反射、屈折を繰り返して、受光側光ファイバを戻ってくる。

### 3. 3 実験装置と測定方法

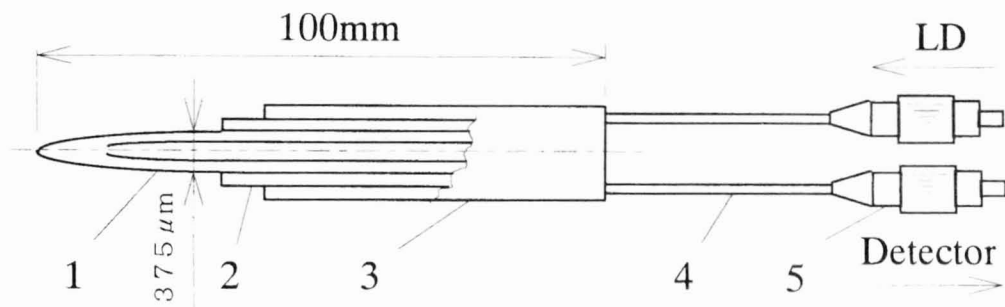
図3-3に実験装置の概略を示す。実験には血管を模擬した弾性管のシリコンチューブ⑤を使用した。容器①に生理食塩水とほぼ等しい1wt%の食塩水③を入れ、高さ $H$ を一定に保つ。この容器に内径1.5mm、外径2.0mmのシリコンチューブをつなぎ一定流量を流す。チューブに2本の光ファイバ屈折センサA⑦、B⑧を500mmの距離 $L_2$ で挿入し、屈折センサAの上流、距離 $L_1$ の点から流量 $q$ で2wt%の食塩水④を注入する。このときの戻り光出力 $I_A$ 、 $I_B$ をパワーメータ⑪⑫で検出しコンピュータ⑬で処理した。実際の平均流量 $Q$ の検定はメスシリンダー⑥にて行った。なお測定は常温の20°Cで行った。

### 3. 4 実験結果と考察

図3-4は2本の光ファイバ屈折センサを使って食塩水の濃度 $C$ を変えた場合の信号出力を示す。生理食塩水濃度近傍の0.0から3.0wt%，屈折率 $n_2$ で言えば1.333から1.3383まで変化させたときの屈折センサの出力特性はリニアであり、屈折センサA、Bの出力 $I_A$ 、 $I_B$ は式(1)、(2)の一次の相関式で表すことができた。 $I_A$ 、 $I_B$ の単位はnWである。この式は本実測値を±0.19nW以内の偏差で表している。この結果より本センサは、わずかな屈折率変化でも検出可能であり、塩水速度法に利用可能なことが分かる。

$$I_A = -318.96n_2 + 430.78 \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$I_B = -209.39n_2 + 281.65 \quad \dots \dots \dots (3.2)$$



1 : Optical fiber 10/125 $\mu$  m

2 : Glass tube

3 : SUS tube

4 : Optical fiber cord

5 : Optical connector

図3-1 光ファイバ屈折センサの構造

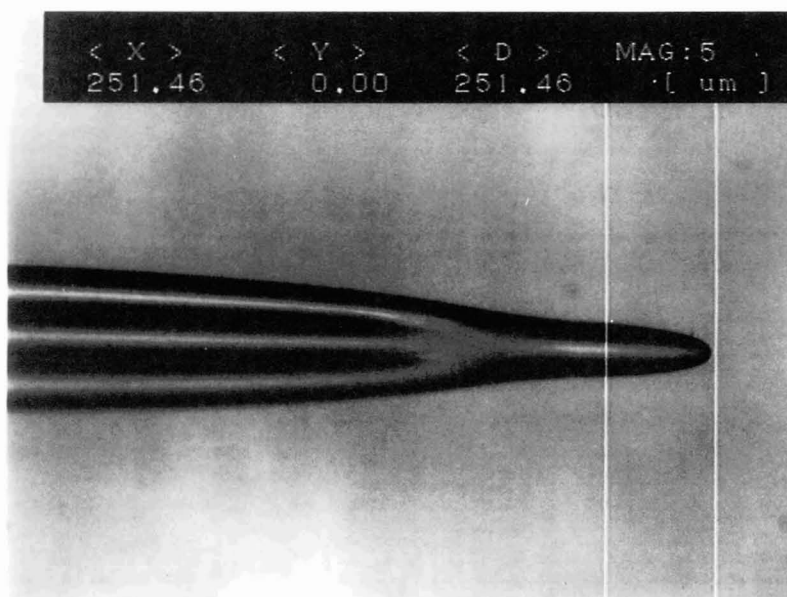
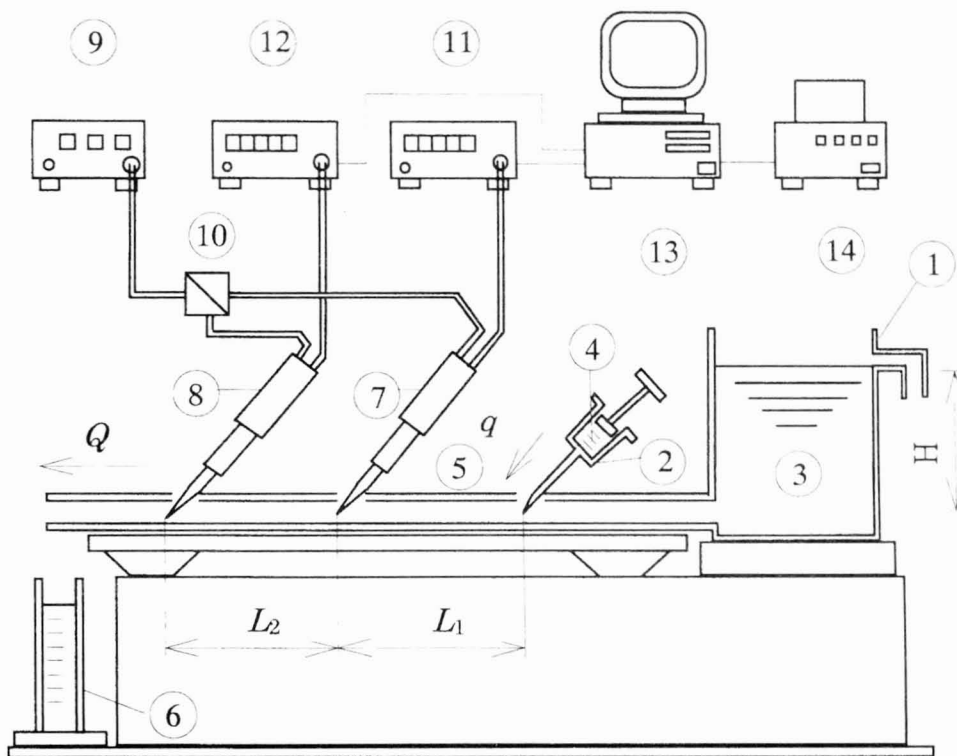


図3-2 屈折センサ先端部の拡大写真



- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 : NaCl container             | 8 : Fiberoptic refractometer B |
| 2 : Syringe                    | 9 : LD Light source            |
| 3 : NaCl 1wt% solution         | 10 : Optical coupler           |
| 4 : NaCl 2wt% solution         | 11 : Power meter A             |
| 5 : Silicon tube               | 12 : Power meter B             |
| 6 : Measuring cylinder         | 13 : Personal computer         |
| 7 : Fiberoptic refractometer A | 14 : Printer                   |

図3-3 弾性管内流量測定実験システム

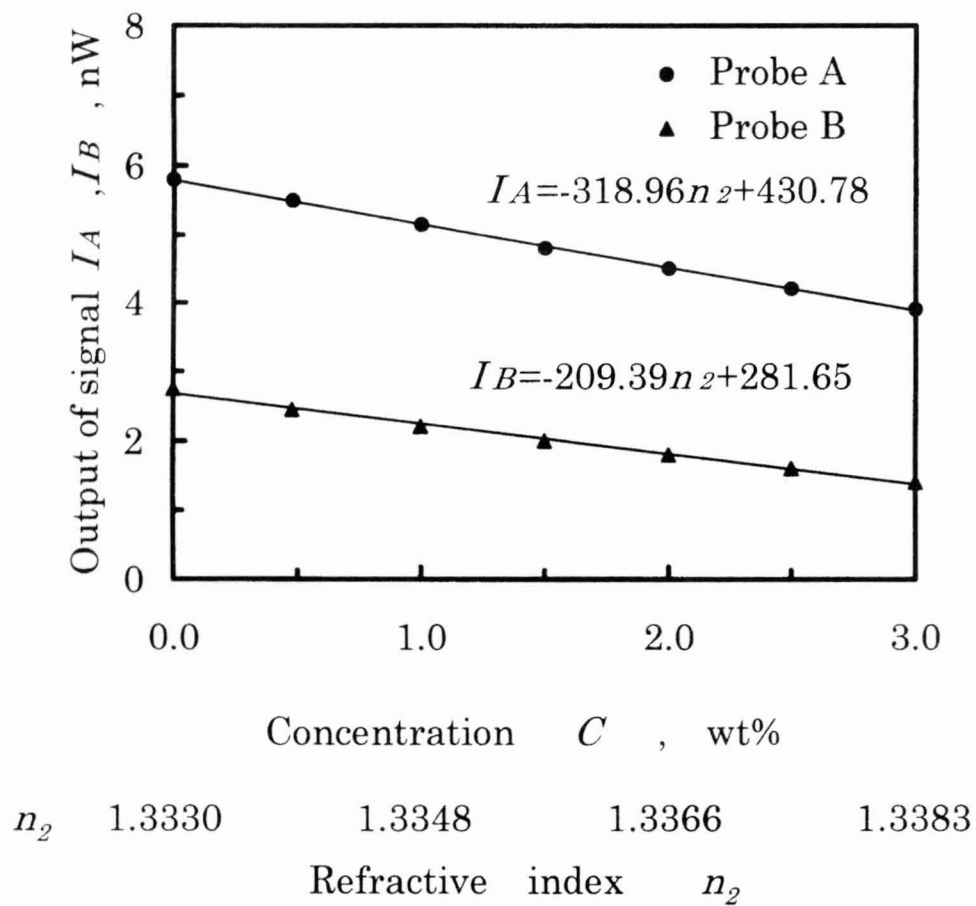


図3-4 食塩水濃度と出力の関係

図3-5は異なる二種類の流量 $Q$ 、3.3ml/minと5.9ml/minに対する出力波形を測定した一例である。横軸は注入時刻から計った経過時間 $t$ である。距離 $L_1$ は500mmに設定し、シリンジからは2wt%の食塩水を6ml/minの等速度で10秒間注入した。この測定記録をもとにして一定の基準出力から立ち下がる点、最低出力のピーク点、および重心法の三種類の 방법으로平均流量を求め検討を行った。戻り光出力は、センサのハンドリングによる光ファイバへの応力変化、先端の汚れ、光源の出力変動により較正時と測定時は8%の誤差があり必ずしも一致しないが、リニアリティは保たれていることを確認している。しかも本測定は絶対値測定ではないため、この誤差は測定に影響しない。

表3-1は距離 $L_1$ を500mmに固定し、流量 $Q$ が3.3ml/minと5.9ml/minの二種類の場合について、食塩水の注入流量 $q$ 、注入時間 $\tau_0$ を変えて行った結果の一例を示す。ここで $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ は立ち下がり法、ピーク法、重心法で求めた流量を表す。

立ち下がり点、ピーク点は検出は簡単であるが、立ち下がり法 $Q_1$ は管中心部の流速の速い所を検出するため実際の平均流速より速い値を示す。ピーク法 $Q_2$ は一つのピークがはっきり現れない場合があり、誤差の要因になっている。また重心法 $Q_3$ による測定結果は、シリンジから短時間で注入することにより、平均流量 $Q$ と一致した値が得られた。

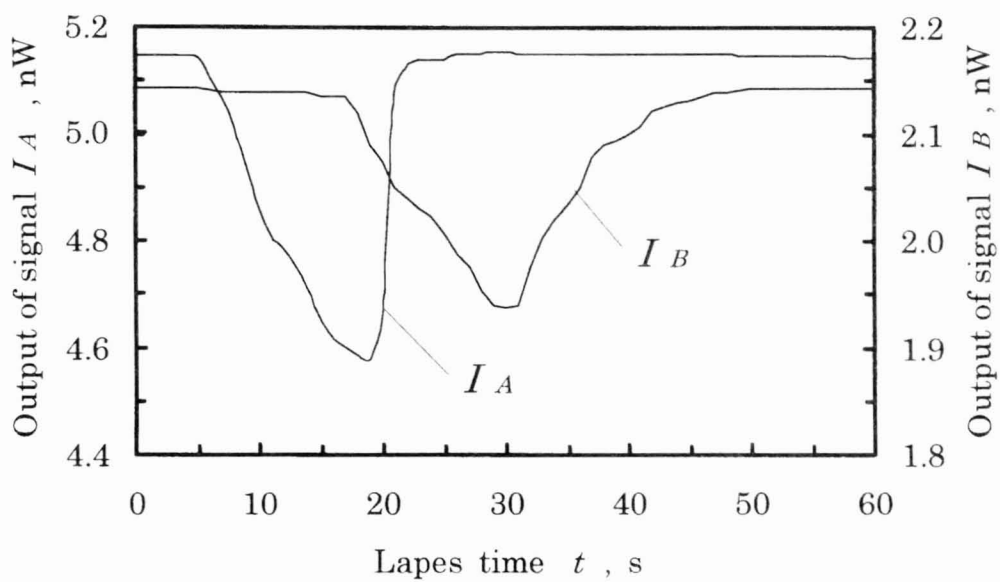
図3-6はシリンジと屈折センサAとの距離 $L_1$ を100mmと1000mmに変えた場合の出力波形の測定記録である。ここで、流量 $Q$ は3.3ml/min、シリンジからの注入流量 $q$ は6ml/min、注入時間 $\tau_0$ は5秒である。距離 $L_1$ が1000mmと長くなると出力変化は小さくなり、波形がなだらかになるためピークははっきりしなくなる。そのためピーク法では測定誤差が大きくなる。

表3-2は、流量 $Q$ が3.3ml/minの場合において、距離 $L_1$ を100mm、500mm、1000mmに、注入量 $q$ を6ml/minにて注入時間 $\tau_0$ を5秒、10秒と変えたときの重心法による測定結果を示す。注入時間 $\tau_0$ を5秒とした場合、距離 $L_1$ が500mmから1000mmの範囲において測定誤差は3%程度であった。しかし距離 $L_1$ が500mmの場合、注入時間 $\tau_0$ が10秒では+33%の誤差を示した。この結果より、注入時間 $\tau_0$ が長くなるほど距離 $L_1$ を長くしないと、測定誤差は大きくなることが分かる。

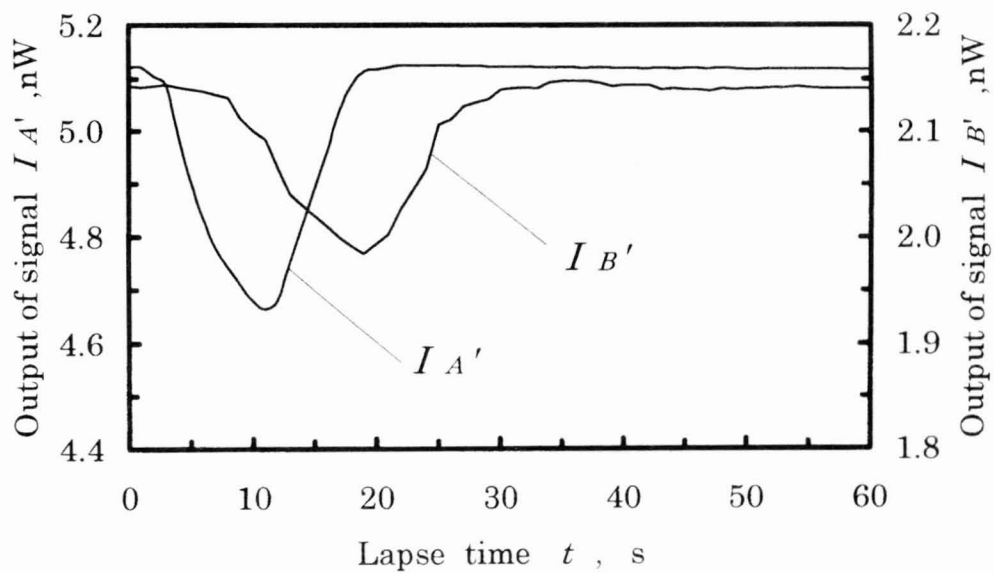
表3-1, 表3-2の結果を総合すると, 本実験範囲では, 注入流量6ml/min, 短い注入時間5秒でトレーサー液を入れ, トレーサーによる流速への影響のなくなる十分な距離 $L_1$ をとれば, 重心法により不確かさ $\pm 5.2\%$ で平均流量を測定できることが分かった.

シリンジからの注入流量 $q$ と注入時間  $\tau_0$  は測定する流体に加速の影響を与えると考えられる. この影響に関して次節で理論解析を行う.





(a)  $Q = 3.3$  ml/min

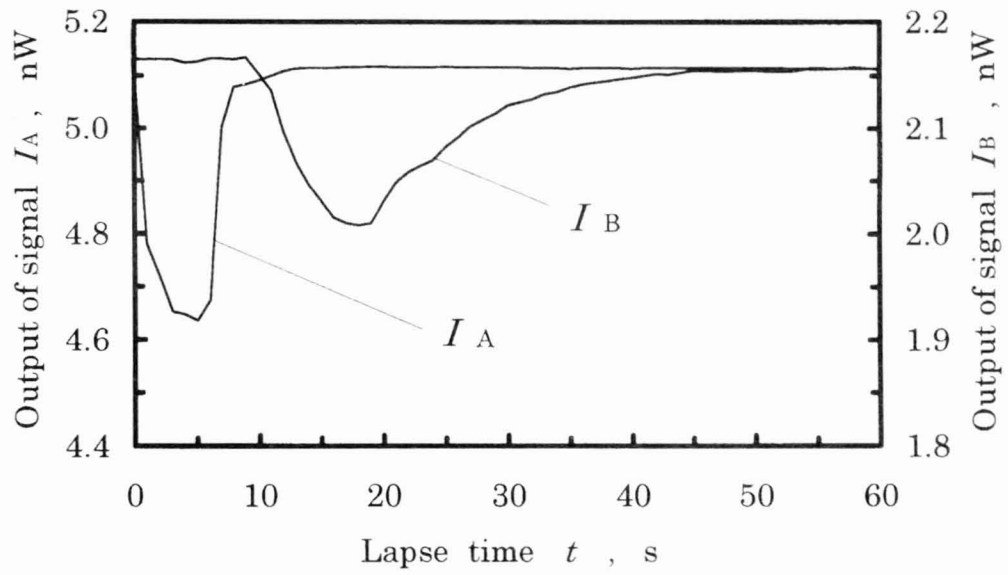


(b)  $Q = 5.9$  ml/min

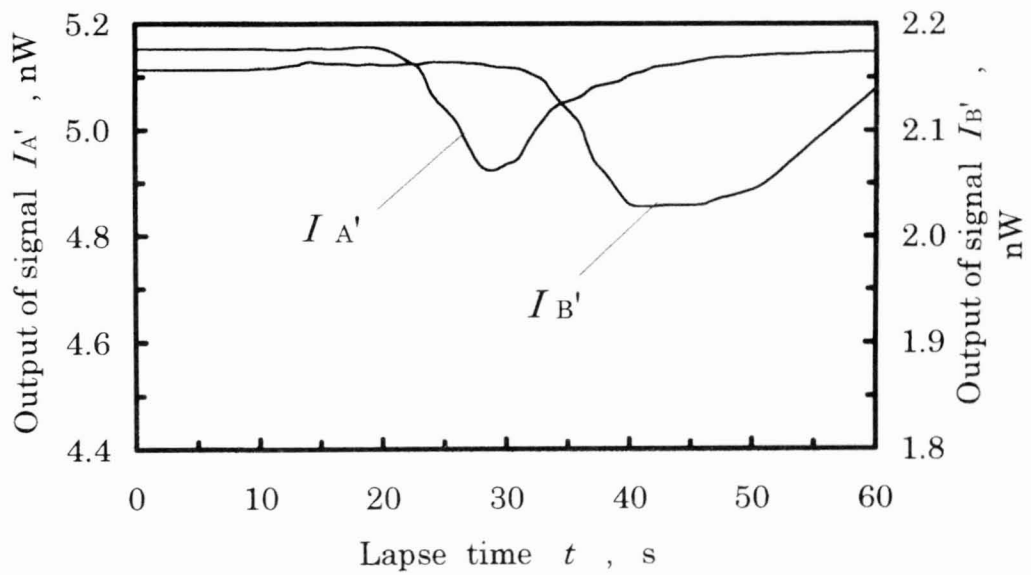
図3-5 異なる流量に対する出力波形

表3-1 異なる測定原理による流量測定結果  
( $L_1=500\text{mm}$ )

| $Q$<br>(ml/min) | $q$<br>(ml/min) | $\tau_0$<br>(s) | Falling point     |              | Peak to peak      |              | Center of gravity |              |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
|                 |                 |                 | $Q_1$<br>(ml/min) | Error<br>(%) | $Q_2$<br>(ml/min) | Error<br>(%) | $Q_3$<br>(ml/min) | Error<br>(%) |
| 3.3             | 6               | 5               | 5.3               | +61          | 4.8               | +45          | 3.3               | 0.0          |
|                 | 6               | 10              | 4.8               | +45          | 5.9               | +79          | 4.0               | +21          |
|                 | 3               | 10              | 4.0               | +21          | 4.5               | +36          | 2.8               | -15          |
|                 | 3               | 20              | 4.8               | +45          | 3.8               | +15          | 2.8               | -15          |
| 5.9             | 6               | 5               | 6.7               | +14          | 5.3               | -10          | 5.9               | 0.0          |
|                 | 6               | 10              | 8.8               | +48          | 6.7               | +49          | 6.7               | +14          |
|                 | 3               | 10              | 8.8               | +48          | 3.3               | -44          | 5.7               | -3.4         |
|                 | 3               | 20              | 8.8               | +48          | 6.7               | +14          | 5.1               | -14          |



(a)  $L_1 = 100$  mm



(b)  $L_1 = 1000$  mm

図3-6 シリンジとプローブ距離に対する出力の波形

表3-2 シリンジと屈折センサAとの距離 $L_1$ の  
違いによる流量測定結果

| $Q$<br>(ml/min) | $L_1$<br>(mm) | $q$<br>(ml/min) | $\tau_0$<br>(s) | Center of gravity |              |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|
|                 |               |                 |                 | $Q_3$<br>(ml/min) | Error<br>(%) |
| 3.3             | 100           | 6               | 5               | 4.7               | +42          |
|                 | 100           |                 | 10              | 6.4               | +94          |
|                 | 500           |                 | 5               | 3.4               | +3.0         |
|                 | 500           |                 | 10              | 4.4               | +33          |
|                 | 1000          |                 | 5               | 3.2               | -3.0         |
|                 | 1000          |                 | 10              | 3.3               | 0.0          |

### 3. 5 測定誤差の数値解析

#### 3. 5. 1 矩形インパルス状注入の場合の管内流速の解析

図3-7に示すように、一定流速 $v_0$ で流下している細いゴム等の弾性管のA点にトレーサー液注入用のシリンジを取り付け、シリンジから

$$q = 2v_a \times \frac{\pi}{4} D^2 \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

の流量を矩形インパルス状に注入した時、任意の時刻 $t$ 、位置 $x$ における一次元流速 $v$ の変化について考察する。ここでは、流量 $q$ の一部がAC区間で大きさ $v_a$ の増速に寄与し、一部がAB区間で大きさ $v_a$ の減速に寄与するものとする。実際の流量分配はシリンジの注入形態や上流、下流の圧力損失に関係するが、問題を簡単にするためにこのようにおいた。また、トレーサー液の拡散については考えないものとする。

連続の式は次式となる。

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\rho g \left( \frac{1}{E_v} + \frac{D}{\delta E} \right) \frac{\partial H}{\partial t} \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

ここで $\rho$ は流体の密度、 $E_v$ は流体の体積弾性係数、 $E$ は弾性管のヤング率、 $\delta$ は弾性管の肉厚、 $D$ は弾性管内径、 $H$ は圧力水頭である。

運動方程式は一次元について考えると

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2g} + H \right) + \frac{fv^2}{8gR} = 0 \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

ここで $R$ はぬれ縁面積 ( $R = D/4$ ) である。また、流体の流れを層流と仮定すれば  $f$  は

$$f = \frac{64}{R_e} \quad \dots \dots \dots (3.6)$$

である。 $R_e$ はレイノルズ数である。ここで式(3.4)を $x$ で、式(3.5)を変形して $t$ で偏微分すると次式となる。

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -\rho g \left( \frac{1}{E_v} + \frac{D}{\delta E} \right) \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} \quad \dots \dots \dots (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \frac{64}{2g D^2} \frac{v}{\partial t} \dots \dots \dots (3.8)$$

式(3.7)と式(3.8)から  $\frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t}$  を消去する.

流れは層流とし、流体を伝わる音速に比べて速度  $v$  は十分小さいものとし、さらに管は薄肉弾性管で管自身の運動は考えないとする以上の仮定のもとに、連続の式と運動方程式を変形して得られる管摩擦を考慮した波動方程式、境界条件および初期条件は以下のようなになる.

(波動方程式)

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + 2\kappa \frac{\partial v}{\partial t} - c^2 \frac{\partial v}{\partial x^2} = 0 \dots \dots \dots (3.9)$$

ここで  $\kappa$  および媒質中の音速  $c$  は

$$\kappa = \frac{16\nu}{D^2} \dots \dots \dots (3.10)$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{E_v}{\rho}\right) / \left(1 + \frac{E_v D}{E \delta}\right)} \dots \dots \dots (3.11)$$

である.

(境界条件)

$$0 < t \leq \tau_0 : v(0, t) = v_0 + v_a \dots \dots \dots (3.12)$$

$$\tau_0 < t < \infty : v(0, t) = v_0 \dots \dots \dots (3.13)$$

$$x = \infty : v(\infty, t) = v_0 \dots \dots \dots (3.14)$$

(初期条件)

$$v(x, 0) = v_0 \dots \dots \dots (3.15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}(x, 0) = 0 \dots \dots \dots (3.16)$$

$v_0$  は弾性管内を一定で流下する流速,  $v_a$  はシリンジからの注入による弾性管内の流速,  $\nu$  は流体の動粘性である.  $S$  は弾性管内の流速とシリンジからの流速の比

$(v_a/v_0)$ ,  $D$ は弾性管内径,  $\delta$ は弾性管肉厚,  $E$ は弾性管のヤング率,  $E_v$ は流体の体積弾性係数,  $\rho$ は流体の密度,  $\tau_0$ はシリンジからの注入時間,  $\tau$ は代表時間を表す. ここで次の無次元量を導入し,

$$V = \frac{v - v_0}{v_0}, \quad T = \frac{t}{\tau}, \quad X = \frac{x}{D}, \quad T_0 = \frac{\tau_0}{\tau} \quad \dots \dots \dots (3.17)$$

ラプラス変換により解析解を求めると

$$V(X, T) = S \left[ e^{-\frac{b}{a}X} \left\{ E\left(T - \frac{X}{a}\right) - E\left(T - \frac{X}{a} - T_0\right) \right\} + \frac{bX}{a} \int_{T-T_0}^T H(\lambda) d\lambda \right] \quad \dots \dots \dots (3.18)$$

となる. ここで

$$H(\lambda) = e^{-h\lambda} \frac{I_1 \left\{ b \sqrt{\lambda^2 - \left(\frac{X}{a}\right)^2} \right\}}{\sqrt{\lambda^2 - \left(\frac{X}{a}\right)^2}} \quad \dots \dots \dots (3.19)$$

$$\kappa \tau_0 = b \quad \dots \dots \dots (3.20)$$

$$\frac{\tau_0 c}{D} = a \quad \dots \dots \dots (3.21)$$

である.  $I_1$ は変形ベッセル関数,  $E(T)$ は単位関数である.

### 3. 5. 2 測定誤差のシミュレーション

図3-8は式(3.18)で得られた速度場を使って, 注入開始時に入れられたトレーサー粒子の到達距離 $x_i$ とその粒子の各点における速度 $v_i$ の関係を数値積分によって求めたものである. 数値解析はBASICプログラムを作成し行った. 計算には, 微分はルンゲ・クッタ法を, 積分はシンプソン法を, 変形Bessel関数はAllenの近似式を使用した. このプログラムリストを付録2に示す.

理論解析は無次元で行ったが, 計算は実際の測定値と比較するため有次元で行った. 計算条件はシリンジからの注入時間 $\tau_0$ を2.5秒, 5秒, 10秒と変化させ, 管

内の真の流量 $Q$ は3.3ml/min (流速 $v_0$ は0.031m/s), シリンジからの注入流速度比 $S$ は1, 弾性管内径 $D$ は1.5mm, 弾性管肉厚 $\delta$ は0.25mmとした. 必要な物性値は文献より, 弾性管のヤング率 $E$ は $1.5 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>, 流体の体積弾性係数 $E_v$ は $2 \times 10^9$  kg/m<sup>2</sup>, 流体の密度 $\rho$ は $10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 流体の動粘性 $\nu$ は $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/sとした. 図3-8の結果よりトレーサー粒子はかなり長い距離の区間, 真の流速より加速された速度で移動することが分かる.

図3-9は距離 $L_2$ を500mmに固定したときに, 距離 $L_1$ と解析から推定した測定誤差 $e$ の関係と実験値を表したものである. 解析から推定した測定誤差 $e$  (百分率)は式(3.22)で表す.

$$e(\%) = \frac{\bar{v}_t - v_0}{v_0} \times 100 \quad \dots \dots \dots (3.22)$$

ここで $\bar{v}_t$ は区間 $L_2$ での $v_t$ の平均値である.

シリンジから6ml/minの流量で内径1.5mmの弾性管にトレーサー液を注入した実験の $S$ は0.90に相当する. しかし測定結果は図によると, 偏り誤差がある距離にわたって存在する傾向は理論と一致するが,  $S$ が1から2の間と大きい値を示している. これはトレーサー液を注入した場合,  $S$ が1のとき理論では上流側の液は停止し, 下流側には速度 $2v_0$ であると仮定したことになるが, 実際にはシリンジの針を下流側に斜めに挿入したので上流側の流量を吸引したジェットポンプの状態測定されていて, 流量分配が理論と異なっていたことが原因と考えられる.



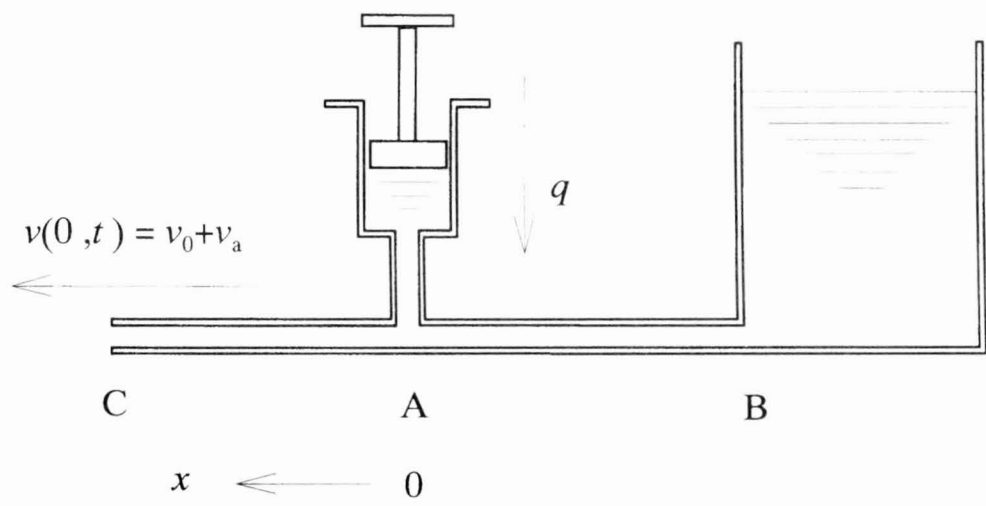


図3-7 測定誤差解析モデル

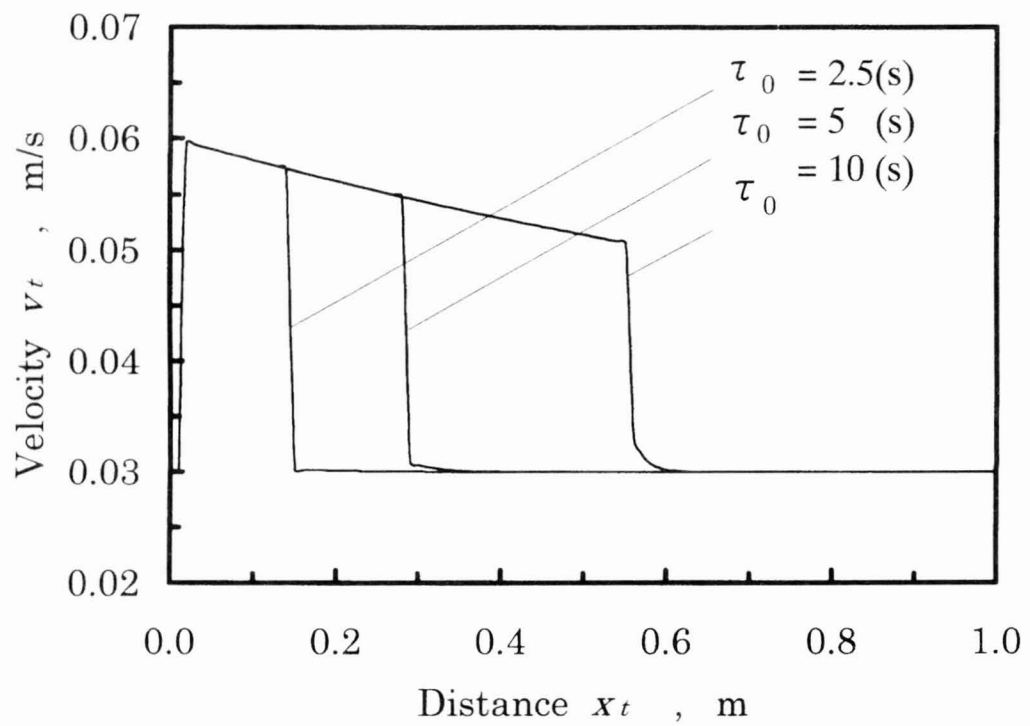


図3-8 注入時間に対するトレーサ粒子の到達距離と速度の関係

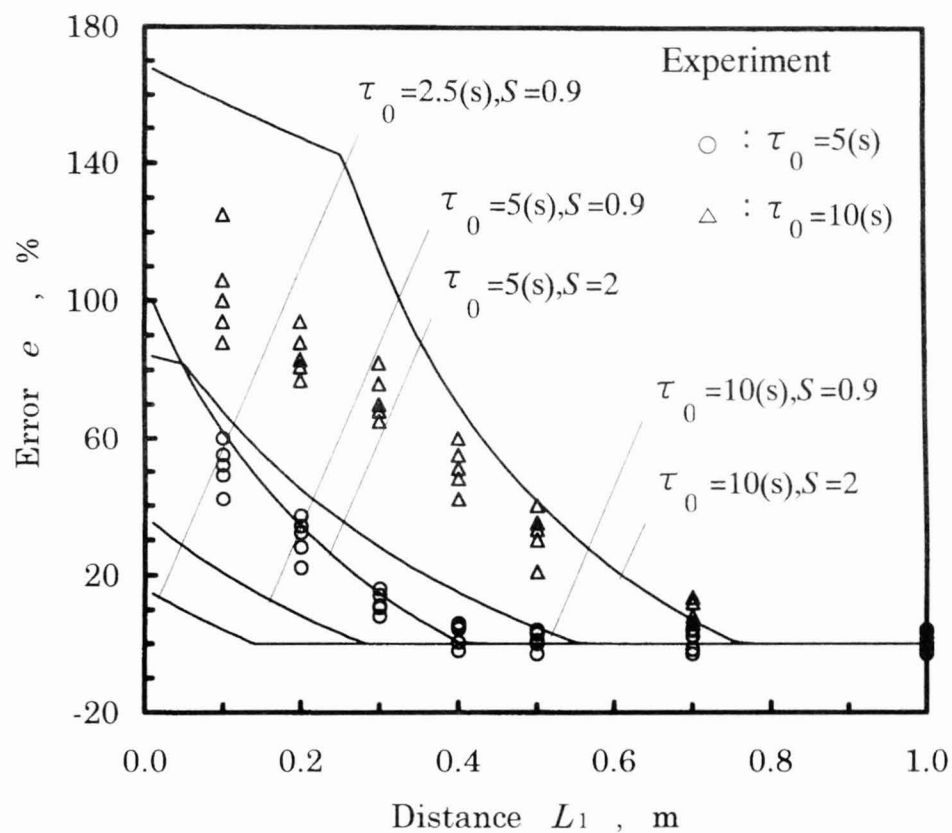


図3-9 注入時間に対するシリンジと屈折センサAの  
距離と解析誤差の関係

注入時間 $\tau_0$ が5秒の場合、理論では距離 $L_1$ が0.27mで真の流速に漸近するはずが、実験では多少大きくなって0.40m近くで偶然誤差 $\pm 5.2\%$ で漸近している。注入時間 $\tau_0$ が10秒の場合、距離 $L_1$ が0.54mの漸近理論値に対して、実験では0.80m近くまで偏り誤差が認められた。この結果は測定対象として、人間の腕や大腿部を想定した場合、採用する距離 $L_1$ には限度があるので、 $\tau_0$ を短くすることが望ましいことを示唆している。しかし注入量( $\tau_0 \times q$ )を減らさず短時間で注入すると、吸引効果による上流流体との混合拡散により濃度が低くなり、信号出力が得難くなるのでむやみに短時間の注入はできない。現在の測定条件では2.5秒程度が適当であると考えられる。

図3-10は距離 $L_1$ を300mmに固定したとき、距離 $L_2$ と解析から推定した測定誤差 $e$ の関係で示したものである。この図より距離 $L_2$ が500mmでは、注入時間 $\tau_0$ が5秒の場合は+0.1%の、注入時間 $\tau_0$ が10秒の場合は+28%測定誤差が含まれることを示している。解析結果よりシリンジからの注入時間 $\tau_0$ が5秒以下の場合距離 $L_2$ を100mm以上にすれば誤差を0.5%以下にすることができる。しかし注入時間 $\tau_0$ が10秒の場合は距離 $L_2$ を1000mmにしても12%の偏り誤差が含まれることを示している。

図3-11は距離 $L_2$ を500mmに固定したとき、弾性管肉厚 $\delta$ を0.02mm, 0.10mm, 0.25mmと変化させた場合の距離 $L_1$ と解析から推定した測定誤差 $e$ の関係を表したものである。計算条件は管内の真の流量 $Q$ を3.3ml/min (流速 $v_0$ は0.031m/s), シリンジからの注入流量 $q$ を6ml/min, シリンジからの注入流速比 $S$ を1と一定とした。この解析結果より弾性管肉厚を変えることにより減衰曲線は変化するが、一定値に収束するのはほとんど同じであり、この結果では距離 $L_1$ が300mm以上で誤差がなくなることが分かる。

ここでシリンジから注入量が等しい二つの場合について考える。図3-12は距離 $L_2$ を500mmに固定したとき、シリンジからの注入流速比 $S$ を1.0, 注入時間 $\tau_0$ を5秒の場合Aと、注入流速比 $S$ を0.5, 注入時間 $\tau_0$ を10秒の場合Bについて解析した結果である。この図より、Aの場合は距離 $L_1$ が300mm以上で一定になるのに対し、Bの場合は距離 $L_1$ が450mm以上にならないと一定値に収束しないことが分かる。

これら解析結果より、シリンジとプローブの距離 $L_1$ を短くするには、大流量でも短時間で注入することにより誤差を小さくできることが確認された。

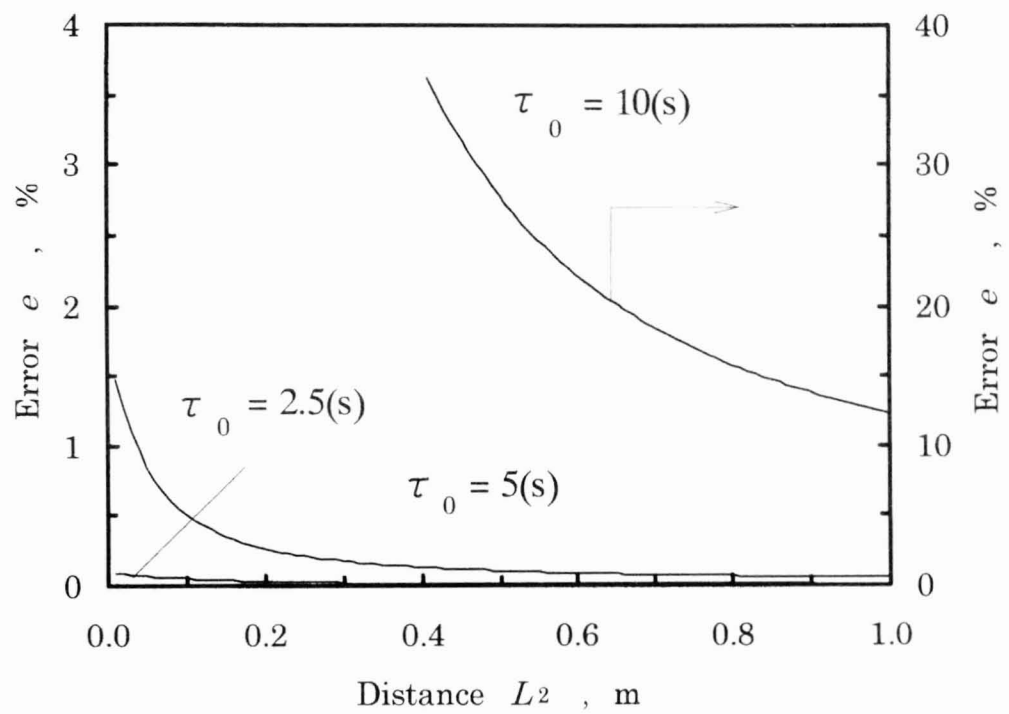


図3-10 注入時間に対する屈折センサA, Bの  
距離と解析誤差の関係

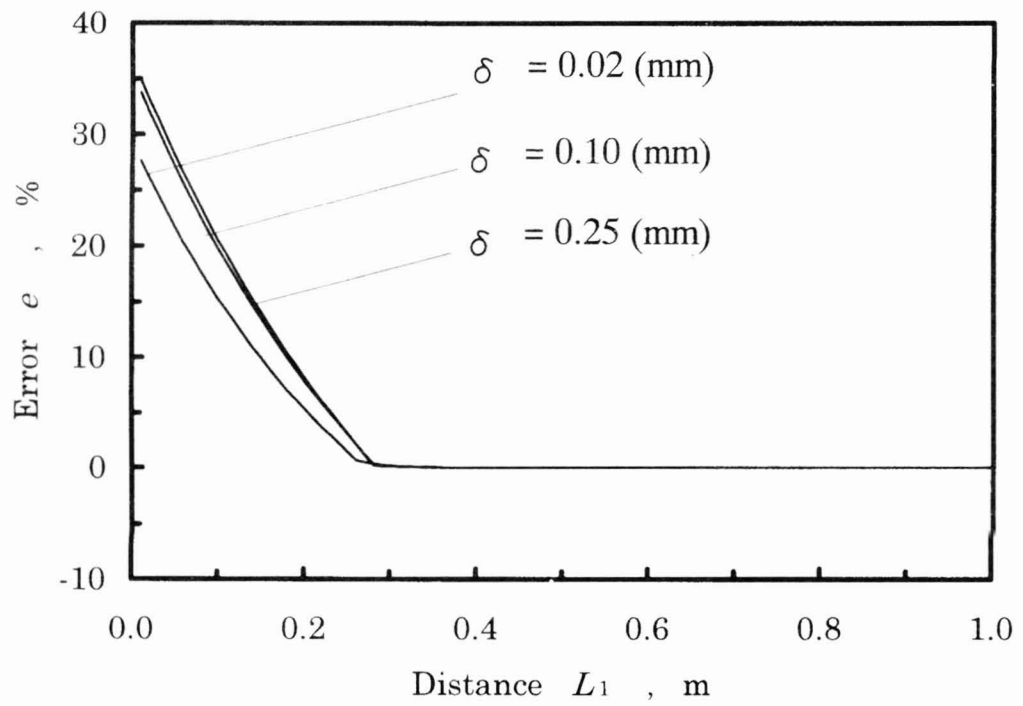


図3-11 弾性管肉厚に対するシリンジと屈折センサAの  
距離と解析誤差の関係

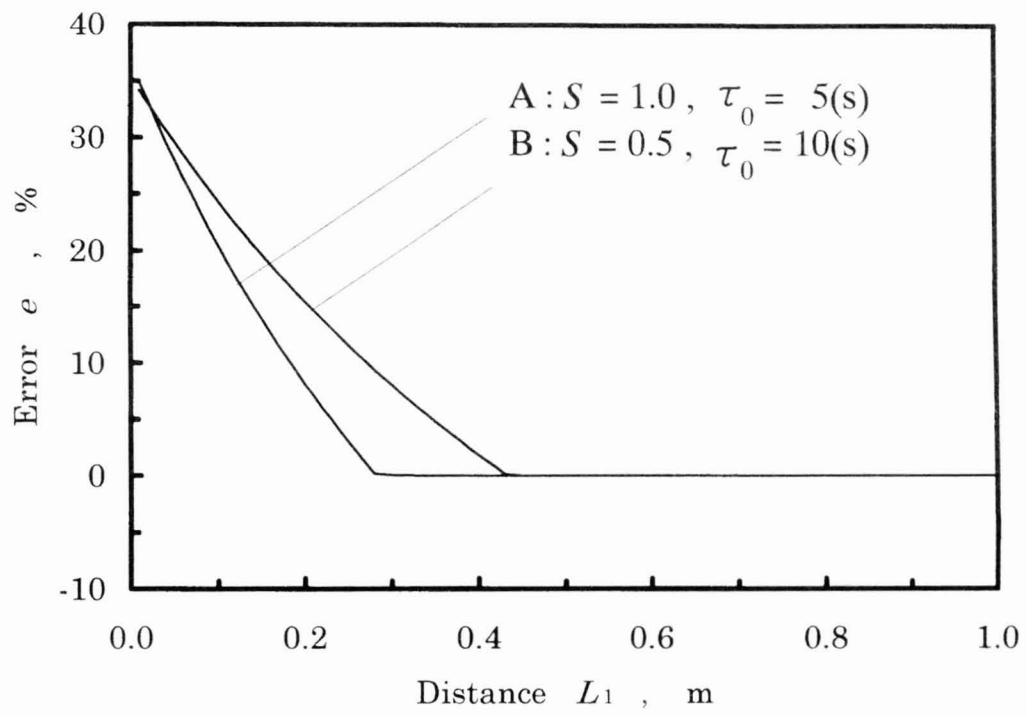


図3-12 同じ注入量に対するシリンジと屈折センサAの  
 距離と解析誤差の関係

### 3. 6 結言

流量測定法の一つとして、比較的簡便で安価な装置によって計測できる方法を提案した。実験は流体の屈折率差に対し比感度の大きい微細光ファイバ屈折センサを使って、血管を模擬した弾性管内の流量測定をトレーサー法により試みた。またシリンジから注入されるトレーサー液による弾性管内の流速の影響を数値解析により求め、各条件による測定誤差について解析を行った。その結果をまとめると次のとおりになる。

- (1) 生理食塩水とわずかに異なる濃度のトレーサー食塩水の信号出力を検出することができ、その出力波形の重心から不確かさ $\pm 5.2\%$ で平均流量を測定できた。
- (2) トレーサー液の注入速度が大きくても時間が短ければ測定誤差を小さくできることが分かった。
- (3) 数値解析の結果を用いることにより、測定誤差を小さくするための測定系の条件設定が可能になった。



## 第 4 章

膜で仕切られたセル内の水溶液の  
凍結過程における局所濃度計測

## 第4章 膜で仕切られたセル内の水溶液の凍結過程における局所濃度計測

### 4.1 緒言

近年、バイオエンジニアリングにおける重要な課題の一つに、生物の生命機能を損なわずにその一部である臓器を低温で冷凍保存する技術の確立がある。臓器保存の障害の原因となっているには、冷凍過程における細胞膜内外の水分移動による細胞内電解質の濃縮の結果発生する細胞の塩害、また成長する氷片による細胞膜の物理的損傷などが考えられる。著者は凍害発生、細胞損傷のメカニズムを解明する目的の一環として、マクロな生体膜を模擬した、一枚の人工膜で仕切られたセル内での濃度の異なる水溶液が凍結過程において物質が移動する様子をこれまでに開発した光ファイバ屈折センサと熱電対からなる濃度センサを使用して<sup>(44)</sup>、セル膜近くにおける濃度の空間的、時間的变化を測定した結果を述べる。

### 4.2 実験装置および方法

実験装置は図 4-1 に示すように、試料容器 1 とそれを左右両面から冷却する二つの熱交換器 2 とからなる。エチルアルコールを試料冷却用冷媒液として使用し、2 台の温度制御付きの冷凍恒温槽 3 に接続されている。試料容器は、半割りの矩形セルで、その中央、鉛直に膜 4 を挟むようにできている。寸法は  $38.4 \times 50 \times 30 \text{mm}^3$  で上部は開放してあり、両側面は熱伝導のよい銅板で、ほかはアクリル製である。水溶液の可視化にはシャドウグラフ法を採用した。パーソナルコンピュータ 6、コントローラ 7 を使って、パルスステージ 8 の上に乗せた試料容器を上昇速度  $1.5 \text{mm}$ 、下降速度  $5.0 \text{mm}$  で上下移動できるようにした。試料容器の上に光ファイバ屈折計と  $0.25 \text{mm}$  シース熱電対をはりつけた濃度センサ 9 を置くことによって鉛直方向  $z$  軸の濃度と温度分布を測定した。光ファイバ屈折計のほうを動かさない理由は光ファイバ屈折計の測定精度は移動装置による振動の影響を受けるためである。現在は光ファイバ屈折計を第 2 章に述べた構造にすることにより、動かしても問題にならない。

濃度測定原理は光ファイバから入った光がファイバの先端と溶液との界面でフ

レネル反射して戻ってくる。この光量を示す出力電圧が濃度と温度に依存する屈折率と関係づけられていることに基づいている。あらかじめ濃度、温度の判っている試料を使ってアッペ屈折計と本研究の光ファイバ屈折計の出力電圧とを校正しておく。溶液の未知濃度測定は光ファイバ出力電圧と熱電対による温度を知って求める。測定は水溶液冷却面からの距離  $y$  を種々変えて測定したが、ここでは濃溶液側の膜近く、 $y = 15.9\text{mm}$  の位置で、溶液の底からの距離、 $z = 3\text{mm}$  より水面の位置、 $z = 35.0\text{mm}$  までの結果についての報告である。屈折計の光源には出力  $15\text{mW}$ 、 $\pm 1\%$  の出力変動の Ar レーザ 10 を使用し、信号光はフォトダイオード 11 で受光し、増幅した後、温度計 5 の信号とともに波形解析器 12 に取り込みプロッター 13 で記録した。測定精度は、 $\pm 5\%$  の相対誤差の精度で得られた。膜構造が刺激に応じて特定の物質の透過をするといった高次の機能性を除けば人工膜も生態膜も物質輸送機構は化学ポテンシャルの差などの同一の駆動力によっているので、生体膜模擬の第 1 段階としてよく知られている人工膜であるセロハン膜を採用した。溶質として食塩を使用し、溶液の初期濃度は  $20\%$  とした。

測定の方法は、初期温度  $40^\circ\text{C}$  の試料水溶液と蒸留水とをあらかじめ冷却した膜で仕切られた各セル内に入れ、このときから冷却温度測定を行った。冷却の条件は、水溶液側の恒温槽の温度  $-20^\circ\text{C}$ 、蒸留水の恒温槽の温度  $-5^\circ\text{C}$  に設定した。

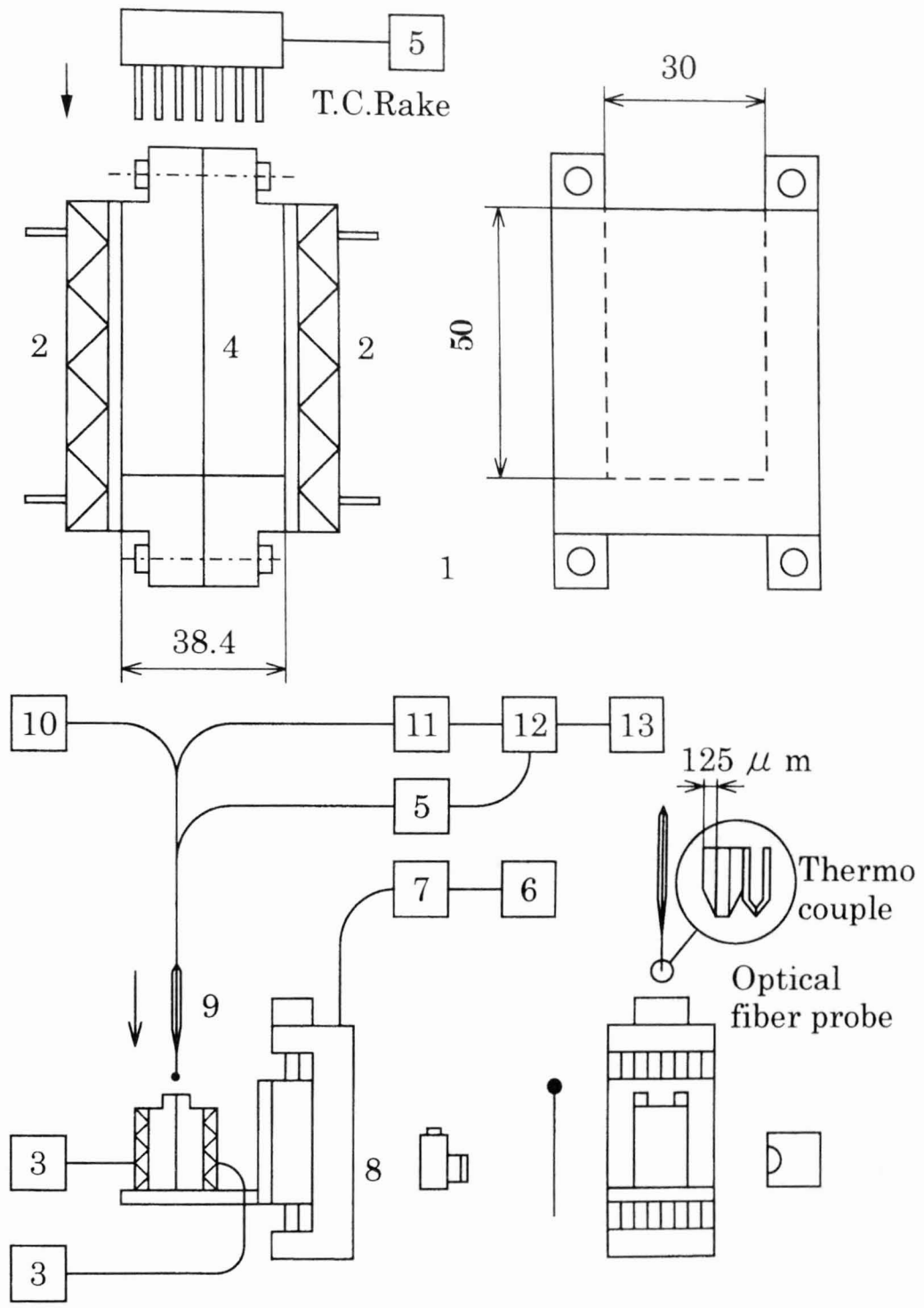


图 4-1 实验装置

## 4.3 実験結果と考察

### 4.3.1 シャドウグラフと流動の観察実験

伝熱面制御によって溶液は最初おもに熱対流が支配しているが、氷の形成が進むと、濃縮された溶質が排出され、氷に沿って下降する。さらに蒸留水側から食塩水溶液側へは蒸留水が浸透圧により膜を透過し、食塩水溶液よりも軽いために食塩水溶液側の上方にたまり希釈がおこる。逆に濃度拡散により食塩水溶液側から蒸留水側へ水和イオンの状態の食塩水溶液が膜を透過し、水より重いために蒸留水側の下方にたまる。その結果密度成層が形成されていく。一方しばらくして壁面の冷却速度に応じて温度の違いによる密度変化と濃度の違いによる密度変化の相互作用により特別な自然対流、すなわちいくつにも密度分離した水平対流層を発生する。この対流現象を支配する物性は物質の拡散係数と温度係数（温度伝導率）であることから2重拡散の対流と呼ばれている。密度の階段状の変化はシャドウグラフでは明暗の縞となって観察される、流動方向はアルミ粉末トレーサによって確認した。図4-2は、3層に分離した際のスケッチで実験開始95.8min後の場合である。層の数や様子は時間と共に変化する。また右の層も同様な対流状況となる。

### 4.3.2 鉛直方向濃度および温度分布

図4-3は光ファイバ屈折計と熱電対の信号出力の測定例である。 $t=7s$ ,  $-70mV$ が液面 $z=38.5mm$ での屈折率、 $t=26s$ ,  $-50mV$ が $z=3mm$ での屈折率に対応する。屈折信号に3ヶ所矢印で示すように階段状変化がみえるがこれが2重拡散によって生じた図4-2の3重の濃度の縞に対応している。しかし温度のほうには対応する階段状の変化はみえない。

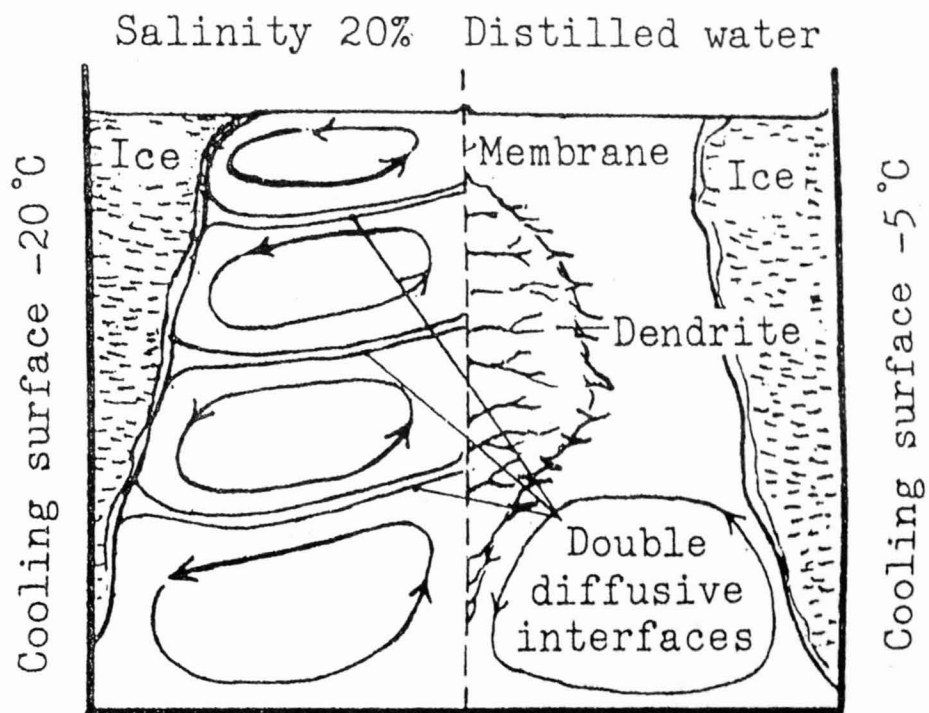


図 4-2 膜で仕切られた 2 つのセルのシャドウグラフのスケッチ

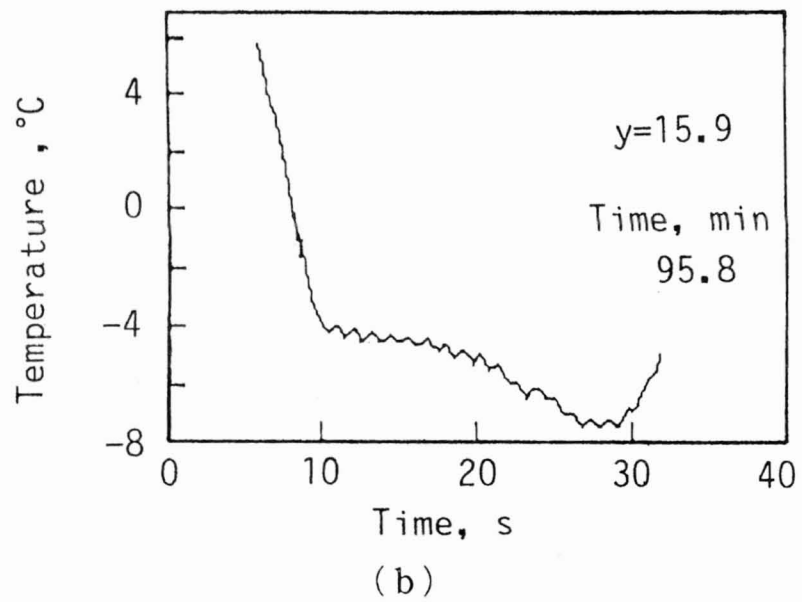
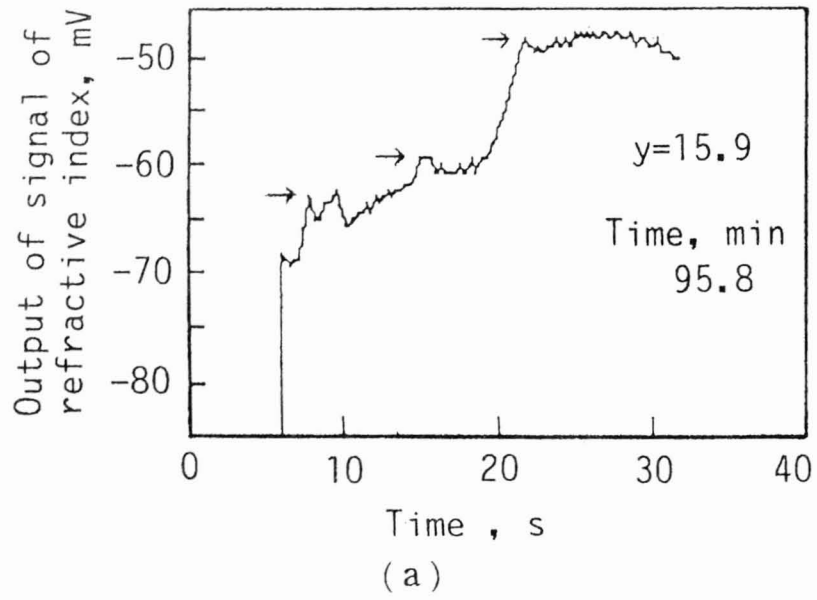
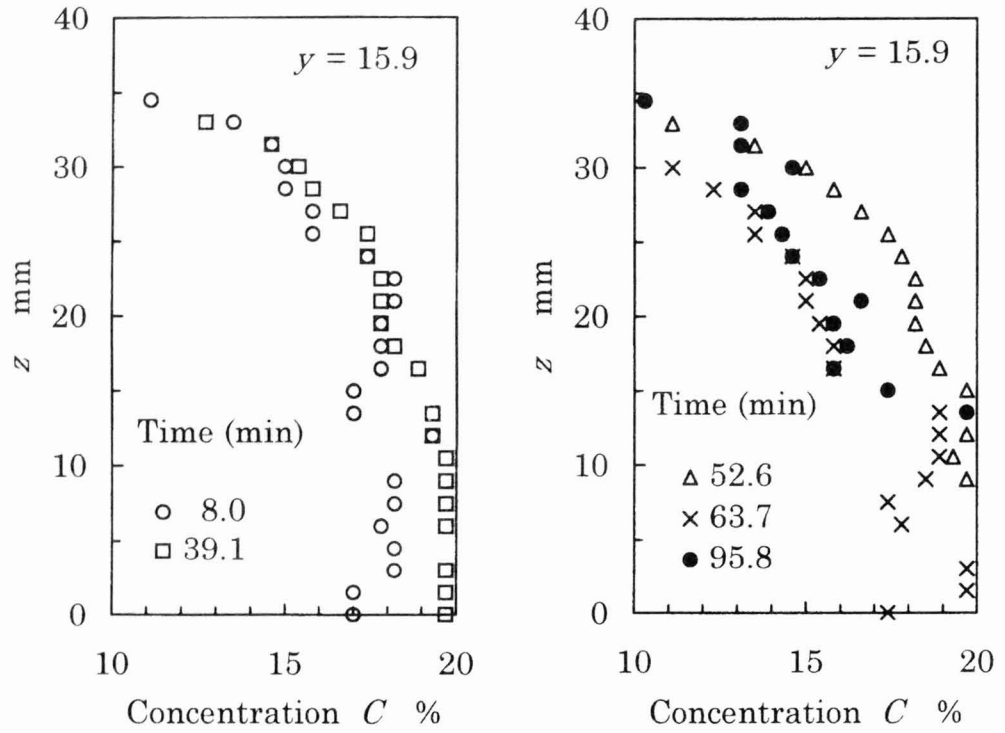


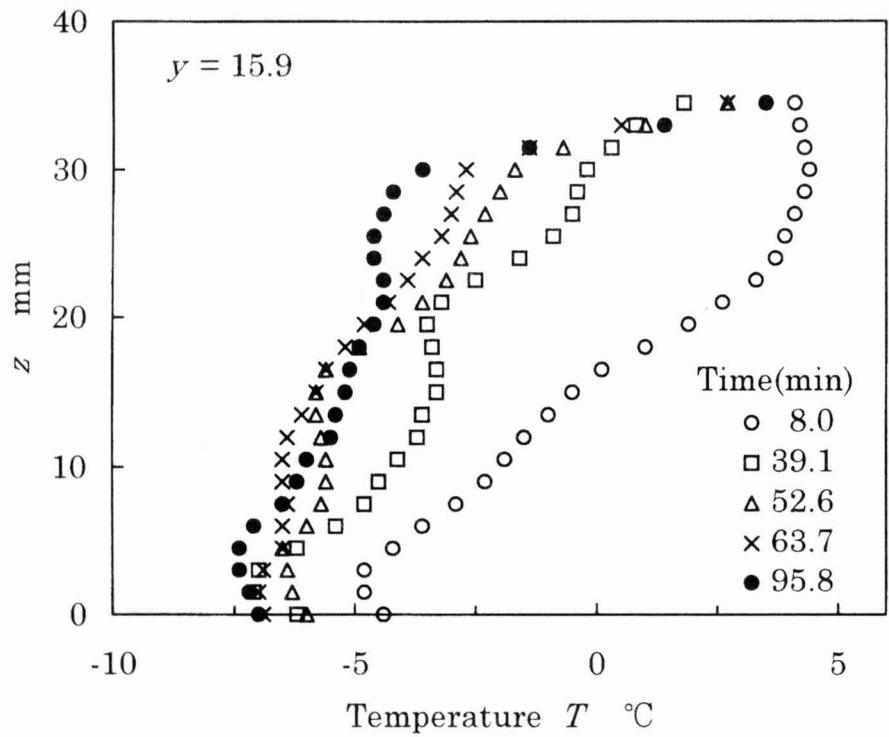
図 4-3 光ファイバ屈折計と熱伝対の信号出力の測定例

図 4-4 は図 4-3 に例示した濃度センサから得られる測定結果と校正曲線を使って、濃溶液側の膜近く、 $y = 15.0\text{mm}$  における鉛直方向濃度分布と温度分布を時間の経過とともに示したものである。 $z = 20\text{mm}$  以下の低部では測定時間が変わるたびに濃度 20%から 17.5%の間で濃くなったり淡くなったりしている。数回の再現実験でも観察されるこの変動は膜から離れた点での測定ではみられない。変動の大きさは約 12.5%で、センサの測定精度 $\pm 5\%$ と比較して大きい。そこで変動の原因を、冷却している左側の凍結進行で生じる濃溶液の下降流と膜から浸透した清水との局所的な混合過程を捉えたものと考えている。 $z = 20\text{mm}$  より上部では、全体として密度成層が形成されており、その上に時間と共に変化する階段状あるいは小山状の濃度の高い部分が重なっている。温度分布は、冷却開始初期の  $t = 8\text{min}$  を除いて水面近くに非常に大きい温度勾配を形成している。また鉛直下方部になるにつれて全体の傾向としては温度は下がっているが、 $z = 23\text{mm}$  では $-4^\circ\text{C}$ の一定温度を維持していて、2重拡散対流の生成と関係する温度勾配の符号が時間経過と共に逆転していることがわかる。





(a)



(b)

図 4-4  $y = 15.9\text{mm}$  における濃度と温度の鉛直方向のプロファイル

#### 4.4 結言

生体膜を模擬したセロハン膜で鉛直に仕切られたセル内に入れた水溶液と蒸留水の組合せにおいて、限られた冷却条件ではあるが、セル側面から冷却凍結する際の溶液の混合の様子を観察した結果、仕切り膜を通過した溶質および溶媒は両セル内で密度成層を形成することがわかった。また凍結の進行と共に濃溶液側に2重拡散のインターフェイスの存在をシャドウグラフおよび濃度センサを使って確認した。

## 第 5 章

### 結 論

## 第5章 結論

本研究は、光ファイバの細径、可撓性、透過光域の広さ、化学的安定性、生体に対する適合性などの特長を生かして、生理学や医療分野への応用を目的とした光ファイバセンサによる生体内流動情報の計測に関する基礎研究である。光ファイバは細径ではあるが生体に対してはまだ十分小さくはないため、生体内用の光センサの使用は限られた部位や計測項目に限られていた。そこで、各種の光ファイバを使用して、小型のセンサプローブを研究し、これを使用することにより、生体内流動情報の計測を目指すための基礎的研究を行った。本論文の結論を各章ごとにまとめると以下ようになる。

第1章は「緒論」として、光ファイバセンサの必要性、本研究に使用した光ファイバ素線について原理と種類、および従来開発されている生体用センサについて述べ、本研究の目的の意義を明確にした。

第2章は「光ファイバセンサによる液体の屈折率計測に関する技術」として、従来の光ファイバ屈折センサ構造を示し、新たな方式による屈折センサの改良と製法を確立した。さらに信頼性の高い局所濃度測定法の例として食塩水の屈折率を広い濃度、温度範囲にわたって求めた。この章の研究で明らかにされたことは以下の通りである。

- (1) コンピュータシミュレーションによりプローブ先端の融着半径から信号出力の改善と高感度化可能なことを明確にした。
- (2) シミュレーション結果に基づいて感度の高いセンサを試作し、本方法の有用性を示した。
- (3) 蒸留水、食塩水の温度、濃度の変化に応じて変わる屈折率を測定することにより、光ファイバ屈折センサが高い測定精度を有していることを実証した。

第3章は「微細光ファイバ屈折センサによる血管を模擬した弾性管内の流量測定に関する研究」として、比較的簡便で安価な装置によって計測できる方法を提案した。まず、流量測定のための光ファイバ屈折センサの構造と原理を示した。実験は流体の屈折率差に対し比感度の大きい微細光ファイバ屈折センサを使って、血管を模擬した弾性管内の流量測定をトレーサー法により試み実験結果と考察を示した。またシリンジから注入されるトレーサー液による弾性管内の流速

の影響を数値解析により求め、各条件による測定誤差について解析を行った。この結果より、将来実際の血管内の血液流量測定に有力な方法であることが示された。この章の研究で明らかにされたことをまとめると以下の通りになる。

- (1) 生理食塩水とわずかに異なる濃度のトレーサー食塩水の信号出力を検出することができ、その出力波形の重心から平均流量を測定できることが分かった。
- (2) 数値解析の結果を用いることにより、測定誤差を小さくするための測定系の条件設定が可能であることを明確にした。

第4章は「膜で仕切られたセル内の水溶液の凍結過程における局所濃度測定」として、生物の生命機能を損なわずにその一部である臓器を低温で冷凍保存する技術の確立のために、水溶液の凍結過程における局所濃度測定をおこなった。生体膜を模擬したセロハン膜で鉛直に仕切られたセル内に入れた食塩水溶液と蒸留水の組合せにおいて、セル側面から冷却凍結する際の溶液の混合の様子を観察した結果、仕切り膜を通過した溶質および溶媒は両セル内で密度成層を形成することが分かった。また凍結の進行と共に濃溶液側に二重拡散のインターフェイスの存在をシャドウグラフおよび濃度センサを使って確認した。

最後にまとめると、本屈折センサによる局所濃度測定の方法は生体成分分析への一つの足がかりを得たと考えられる。

本研究では光ファイバを使用して、小型の光ファイバ屈折センサプローブを研究・開発し、このプローブを使用することにより、生体内の流動情報の計測に関する基礎研究を行った。光ファイバは近年の光通信技術の確立により、極めて安価で容易に入手できる材料になった。センサプローブは外径 125  $\mu\text{m}$  の通信用光ファイバをマイクロトーチで簡単に溶融加工した。しかし、光ファイバは脆性材料である石英ガラスでできているため、実際に生体内に挿入する場合にはセンサプローブ部の断線保護対策が必要になる。この対策を行うことにより将来、動物や人体などの生体内の局所濃度変化やこの情報をもとにした生体内流動情報の計測が可能になると考える。

さらに今回は、最終目標であるセンサプローブと光電変換部を一体化した測定器までの研究は行えなかった。温度補償された LD とフォトダイオードチップ、および光電変換器を集積化し、基板上に回路化できれば、測定精度が向上し小型で使い易い測定器となるであろう。

この達成により，光ファイバ屈折センサシステムとして高信頼性製品の提供が可能になる．

最終目標の達成のため，本研究成果が今後の研究，開発に有用となることを期待する．

# 付 録 1

```

1000 '*****
1010 '*
1020 '* MEASUREMENT OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE BY IEE-488 (GPIB) *
1030 '* Instruments: Optical Power Meter and Multimeter TR2114 *
1040 '* file name : MECT2V2F *
1050 '* write text file program *
1060 '* 1994.06.22 H.Iida *
1070 '*****
1080 ON STOP GOSUB *OWARI
1082 DIM TIMEA$(1150),DA(1150),DBA(1150),DT(1150),DTA(1150)
1090 'STOP ON
1100 ITA=0 :YUNIT$="uW" :YUNITT$="°C"
1110 CONSOLE 0,25,0,1 :CLS 3
1120 COLOR 6:PRINT " *** Concentration and Temperature Measurement
      (GPIB) *** " :COLOR 7 :PRINT :PRINT
1130 COLOR 4:PRINT " ----- M E N U -----
      " :COLOR 7
1140 LOCATE 15,7:PRINT " Confirmation of Condition ..... 1 "
1150 LOCATE 15,9:PRINT " Set of Condition ..... 2 "
1160 LOCATE 15,11:PRINT " Start of Measurement ..... 3 "
1170 COLOR 2:LOCATE 10,15 :INPUT " Choose !! ", BAN :COLOR 7
1180 ON BAN GOSUB *CONF,*SETCON,*START
1190 END
1200 '//////////////////// sub START //////////////////////////////////////
1210 *START
1220 CONSOLE 0,25:CLS 3:GOSUB *READCON : DNUM=4*INTVAL
1230 '
1240 COLOR 6:PRINT " Concentration of Solution";:COLOR 2:PRINT " "; KIND$;:
      COLOR 6:PRINT " (;YUNIT$;)"
1250 HIZUKES="19"+DATE$:COLOR 7:LOCATE 65,0:PRINT HIZUKES$
1260 NUM=0 :WA=0 :WAA=0 :WBA=0 :WAT=0 :WAT1=0 :WAT2=0
1270 COLOR 4:PRINT " Start:";TIMES :PRINT
1280 COLOR 7:CONSOLE 2,4 :'WA=0
1290 'GOSUB *ZAHYOU
1300 ISET IFC
1310 ISET REN
1320 CMD DELIM=0
1330 CMD TIMEOUT=60

```



```

1340 ' N=0
1350 POLL 2,B
1360 POLL 4,B
1370 POLL 23,B
1380 PRINT@ 23;"AOF3M1"
1390 PRINT@ 23;"PRO"
1400 ' PRINT@ 23;"P6,1,2"
1410 ' IF ITA>=1 THEN 340
1420 ' ***** offset *****
1430     FOR I=1 TO OFFNUM
1440         INPUT@ 2;DB$
1450         INPUT@ 4;D$
1460 '     PRINT@ 23;"E"
1470         FOR K=1 TO 2
1480     IF K=1 THEN PRINT@ 23;"N01":PRINT@ 23;"E":GOTO 1500
1490     IF K=2 THEN PRINT@ 23;"N02":PRINT@ 23;"E"
1500         INPUT@ 23;DT$(K) : NEXT K
1510         DA$=RIGHT$(D$,10): DA=VAL(DA$)*KETA : ' WATER 106 ,ETHANOL 109
1520         DBA$=RIGHT$(DB$,10): DBA=VAL(DBA$)*KETA : ' WATER 106 ,ETHANOL 109
1530         DT=VAL(DT$(1)) :DTA=VAL(DT$(2))
1540         GOSUB *OFFSET
1550     NEXT I
1560 ' *****
1570 GOSUB *ZAHYOU
1580 ' DIM TIMEA$(NDATA),DA(NDATA),DBA(NDATA),DT(NDATA),DTA(NDATA)
1590 LN=3:N=0:CLS
1600 LOCATE 0,2: INPUT WAIT INTVAL*10, " ",DAM
1610 INPUT@ 2;DB$
1620 INPUT@ 4;D$
1640 FOR J=1 TO 2
1650 IF J=1 THEN :PRINT@ 23;"N01":PRINT@ 23;"E":GOTO 1670
1660 IF J=2 THEN :PRINT@ 23;"N02":PRINT@ 23;"E"
1670 INPUT@ 23;DT$(J) : NEXT J
1680 DA$=RIGHT$(D$,10):DA=VAL(DA$)*KETA: DA(NUM)=DA ' WATER 109 ,ETHANOL 109
1690 DBA$=RIGHT$(DB$,10): DBA=VAL(DBA$)*KETA: DBA(NUM)=DBA
1700 DT=VAL(DT$(1)) :DTA=VAL(DT$(2)) :DT(NUM)=DT :DTA(NUM)=DTA
1710 TIMEA$(NUM)=TIMES
1720 IF LN=6 THEN LN=3:CLS:N=0

```

```

1740 WBYTE &H5F;
1750 NUM=NUM+1
1770 '----- max,min ,Mean -----
1780 IF NUM =1 THEN MAX=DA:MIN=DA:SUM=0:SSUM=0:MAXB=DBA:MINB=DBA:SUMB=0:
      SSUMB=0:MAXT=DT:MINT=DT:SUMT=0:SSUMT=0:MAXTA=DTA:MINTA=DTA:SUMTA=0:
      SSUMTA=0
1820 IF DA>MAX THEN MAX=DA
1830 IF DBA>MAXB THEN MAXB=DBA
1840 IF DT>MAXT THEN MAXT=DT
1850 IF DTA>MAXTA THEN MAXTA=DTA
1860 IF DA<MIN THEN MIN=DA
1870 IF DBA<MINB THEN MINB=DBA
1880 IF DT<MINT THEN MINT=DT
1890 IF DTA<MINTA THEN MINTA=DTA
1900 SUM=SUM+DA :SSUM=SSUM+DA*DA
1910 SUMB=SUMB+DBA :SSUMB=SSUMB+DBA*DBA
1920 SUMT=SUMT+DT :SSUMT=SSUMT+DT*DT
1930 SUMTA=SUMTA+DTA :SSUMTA=SSUMTA+DTA*DTA
1940 '-----
1980 LOCATE 40*N, LN
1982 IF NUM=1 THEN LPRINT :LPRINT :LPRINT
1990 PRINT USING " ###.### ###.### ##.# ##.# ";DA,DBA,DT,DTA,
1992 GOSUB *PLOT:GOTO 2000
2000 N=N+1
2010 IF N>1 THEN N=0 : LN=LN+1
2020 IF NUM MOD 6 =0 THEN LOCATE 65,1:COLOR 5:PRINT TIME$;:COLOR 7
2032 IF NUM MOD NDATA=0 THEN GOSUB *TXIT: GOSUB *MEAN
2040 GOTO 1600
2050 END
2060 '----- sub graph -----
2070 *ZAHYOU
2080 CLS 3
2090 WINDOW (-20,-170)-(1200,20):VIEW (10,15)-(620,180)
2100 LINE (0,0)-(1140,0) :LINE (0,0)-(0,-120)
2110 LINE (0,0)-(1140,0) :LINE (0,0)-(0,-120):LINE (1140,0)-(1140,-120)
2120 LOCATE 1,11:PRINT "A":LOCATE 1,13:PRINT "B"
2130 '
2140 FOR I=0 TO 6

```

```

2150 YL=-I*20
2160 LINE (0,YL)-(1140,YL)
2170 NEXT I
2180 FOR J=1 TO 19
2190 XL=J*60
2200 LINE (XL,0)-(XL,-120)
2210 NEXT J
2220 LOCATE 1,22:PRINT " y-A-1div.=";Y1DIVA;YUNIT$;" , y-B-1div.=";Y1DIVB;
      YUNIT$;" , y-1div.=";Y1DIVT;YUNITT$;" , x-1div.=";X1DIV;"SEC"
2230 LOCATE 1,23:PRINT " y-A-OFFSET=";OFFSETA;YUNIT$;" , y-B-OFFSET=";OFFSETB;
      YUNIT$;" , y-OFFSET=";OFFSETT;YUNITT$
2240 LOCATE 0,3:COLOR 7
2250 '
2260 RETURN
2270 '
2280 *PLOT
2290 PX=NUM
2300 PY=-(DA-OFFSETA)*(20/Y1DIVA):PYT=-(DT-OFFSETT)*(20/Y1DIVT)
2310 PYB=-(DBA-OFFSETB)*(20/Y1DIVB)
2320 PYTA=-(DTA-OFFSETT)*(20/Y1DIVT)
2330 PSET(PX,PY),4:PSET(PX,PYT),2 :PSET(PX,PYTA),5 :PSET(PX,PYB),3
2340 RETURN
2350 '
2360 *MEAN
2370 CLS:CONSOLE 2,25
2380 MEAN=SUM/NUM :SD=SSUM/NUM-MEAN*MEAN :RANGE=MAX-MIN
2390 MEANB=SUMB/NUM :SDB=SSUMB/NUM-MEANB*MEANB :RANGEB=MAXB-MINB
2400 MEANT=SUMT/NUM :SDT=SSUMT/NUM-MEANT*MEANT :RANGET=MAXT-MINT
2410 MEANTA=SUMTA/NUM :SDTA=SSUMTA/NUM-MEANTA*MEANTA:RANGETA=MAXTA-MINTA
2420 IF SDB<0 THEN SDB=0 : IF SDC<0 THEN SDC=0
2430 IF SD<0 THEN SD=0
2440 IF SDT<0 THEN SDT=0
2450 IF SDTA<0 THEN SDTA=0
2460 LOCATE 0,2:PRINT " Number of data=";NUM;" Sam. Int.=";INTVAL;"sec"
2470 COPY :ITA=ITA+1
2480 PRINT " CONCENTRATION A:";" max=";MAX;" min=";MIN;" range=";RANGE
2490 LPRINT " CONCENTRATION A:";" max=";MAX;" min=";MIN;" range=";RANGE
2500 PRINT " Mean=";MEAN;" Standard deviation=";SQR(SD) ;" Variation="

```

```

;RANGE/MEAN*100;" (%)”
2510 LPRINT " Mean=";MEAN; " Standard deviation=";SQR(SD) ;" Variation="
;RANGE/MEAN*100;" (%)” :LPRINT
2520 PRINT " CONCENTRATION B:";" max=";MAXB;" min=";MINB;" range=";RANGEB
2530 LPRINT " CONCENTRATION B:";" max=";MAXB;" min=";MINB;" range=";RANGEB
2540 PRINT " Mean=";MEANB; " Standard deviation=";SQR(SDB) ;" Variation="
;RANGEB/MEANB*100;" (%)”
2550 LPRINT " Mean=";MEANB; " Standard deviation=";SQR(SDB) ;" Variation="
;RANGEB/MEANB*100;" (%)” :LPRINT
2560 '
2570 PRINT " * LIQUID TEMPERATURE A: "; "max=";MAXT;" min=";MINT;" range="
;RANGET
2580 LPRINT " * LIQUID TEMPERATURE A: "; "max=";MAXT;" min=";MINT;" range="
;RANGET
2590 PRINT " mean=";MEANT;" S.D=";SQR(SDT);" variation=";RANGET/MEANT*
100;"(%)”
2600 LPRINT " mean=";MEANT;" S.D=";SQR(SDT);" variation=";RANGET/MEANT*
100;"(%)” :LPRINT
2610 ' COPY :ITA=ITA+1
2620 PRINT " * LIQUID TEMPERATURE B: "; "max=";MAXTA;" min=";MINTA;" range="
;RANGETA
2630 LPRINT " * LIQUID TEMPERATURE B: "; "max=";MAXTA;" min=";MINTA;" range="
;RANGETA
2640 PRINT " mean=";MEANTA;" S.D=";SQR(SDTA);" variation=";RANGETA/MEANTA*
100;"(%)”
2650 LPRINT " mean=";MEANTA;" S.D=";SQR(SDTA);" variation=";RANGETA/MEANTA*
100;"(%)” :LPRINT
2660 ' COPY : ITA=ITA+1
2670 LPRINT CHR$(&HC);:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
2680 RETURN *START
2690 '
2700 *OFFSET
2710 WAA=WAA+DA
2720 WBA=WBA+DBA
2730 ' IF WAA>WBA THEN WA=WBA ELSE WA=WAA
2740 IF Y1DIVA<.1 THEN 2780
2750 IF Y1DIVA<1 THEN 2770 ELSE 2760
2760 OFFSETA=INT(WAA/OFFNUM)-Y1DIVA*4 :GOTO 2790

```

```

2770 OFFSETA=INT(WAA*10/OFFNUM)/10-Y1DIVA*4 :GOTO 2790
2780 OFFSETA=INT(WAA*100/OFFNUM)/100-Y1DIVA*4
2790 IF Y1DIVB<.1 THEN 2830
2800 IF Y1DIVB<1 THEN 2820 ELSE 2810
2810 OFFSETB=INT(WBA/OFFNUM)-Y1DIVB*3 :GOTO 2840
2820 OFFSETB=INT(WBA*10/OFFNUM)/10-Y1DIVB*3 :GOTO 2840
2830 OFFSETB=INT(WBA*100/OFFNUM)/100-Y1DIVB*3
2840 '
2850 WAT1=WAT1+DT
2860 WAT2=WAT2+DTA
2870 IF WAT1>WAT2 THEN WAT=WAT2 ELSE WAT=WAT1
2880 IF Y1DIV<1 THEN 2900 ELSE 2890
2890 OFFSETT=INT(WAT /OFFNUM)-Y1DIVT*1: GOTO 2910
2900 OFFSETT=INT(WAT*10/OFFNUM)/10-Y1DIVT*1
2910 RETURN
2920 '//////////////////// sub SET CONDITION //////////////////////
2930 *SETCON
2940 CLS :LOCATE 15,3:COLOR 6:PRINT " ----- SET OF CONDITION -----"
2950 COLOR 5: LOCATE 18,6: PRINT " 新規設定.....(1) "
2960 LOCATE 18,8 :PRINT " 一部変更.....(2)      "
2970 LOCATE 18,20:COLOR 3: INPUT " Select !! ";AN
2980 ON AN GOSUB *SINKI, *HENKOU
2990 '
3000 *SINKI
3010 CLS :LOCATE 15,3:COLOR 6:PRINT " ----- SET OF CONDITION -----"
3020 COLOR 7: LOCATE 10,8: INPUT " Kind of Solution "; KIND$
3030 LOCATE 10,10:INPUT " Sampling Interval(sec) ";INTVAL
3040 LOCATE 10,12:INPUT " Number of ldiv. of y-A-axis (Concentration) ";Y1DIVA
3050 LOCATE 10,14:INPUT " Number of ldiv. of y-B-axis (Concentration) ";Y1DIVB
3060 LOCATE 10,16:INPUT " Number of ldiv. of y-axis (Temperature) ";Y1DIVT
3070 X1DIV=60*INTVAL
3080 LOCATE 10,18:INPUT " Multiplier of y value ; 1E6, 1E9 "; KETA
3090 IF KETA=1E+06 THEN YUNIT$="uW"
3100 IF KETA=1E+09 THEN YUNIT$="nW"
3110 LOCATE 10,20:INPUT " Number of data (MAX=1140) "; NDATA
3120 GOSUB *VERIFY
3130 OPEN "mec-tB.dat" FOR OUTPUT AS #1
3140 WRITE #1, KIND$,INTVAL,Y1DIVA,Y1DIVB,Y1DIVT,X1DIV,KETA,YUNIT$,NDATA

```

```

3150 CLOSE #1
3160 RETURN 1110
3170 *HENKOU
3180 CLS :LOCATE 15,3:COLOR 6:PRINT " ----- SET OF CONDITION -----"
3190 OPEN "mec-tB.dat" FOR INPUT AS #1
3200 INPUT #1, KIND$,INTVAL,Y1DIVA,Y1DIVB,Y1DIVT,X1DIV,KETA,YUNIT$,NDATA
3210 CLOSE #1
3220 FLV=1
3230 GOSUB *VERIFY
3240 OPEN "mec-tB.dat" FOR OUTPUT AS #1
3250 WRITE #1, KIND$,INTVAL,Y1DIVA,Y1DIVB,Y1DIVT,X1DIV,KETA,YUNIT$,NDATA
3260 CLOSE #1
3270 RETURN 1110
3280 ' ////////////////////////////////// sub CONFIRM CONDITION //////////////////////////////////
3290 *CONF
3300 CLS :LOCATE 15,5:COLOR 6:PRINT " ----- CONDITION -----" :COLOR 7
3310 OPEN "mec-tB.dat" FOR INPUT AS #1
3320 INPUT #1, KIND$,INTVAL,Y1DIVA,Y1DIVB,Y1DIVT,X1DIV,KETA,YUNIT$,NDATA
3330 CLOSE #1
3340 LOCATE 10,7 :PRINT " Kind of Solution "; KIND$
3350 LOCATE 10,8 :PRINT " Sampling Interval(sec) ";INTVAL
3360 LOCATE 10,9 :PRINT " Number of ldiv. of y-A-axis(CONCE.) ";Y1DIVA;YUNIT$
3370 LOCATE 10,10:PRINT " Number of ldiv. of y-B-axis(CONCE.) ";Y1DIVB;YUNIT$
3380 LOCATE 10,11:PRINT " Number of ldiv. of y-axis(TEMP.) ";Y1DIVT;YUNITT$
3390 LOCATE 10,12:PRINT " Number of ldiv. of x-axis ";X1DIV
3400 LOCATE 10,13:PRINT " Multiplier of y value ";KETA
3410 LOCATE 10,14:PRINT " Unit of y-axis ";YUNIT$;" , ";
      YUNITT$
3420 LOCATE 10,15:PRINT " Number of data "; NDATA
3430 COLOR@(45,7)-(60,15), 4
3440 GOSUB *PR
3450 ' ////////////////////////////////// sub READ CONDITION //////////////////////////////////
3460 *READCON
3470 OPEN "mec-tB.dat" FOR INPUT AS #1
3480 INPUT #1, KIND$,INTVAL,Y1DIVA,Y1DIVB,Y1DIVT,X1DIV,KETA,YUNIT$,NDATA
3490 OFFNUM=3
3500 CLOSE #1
3510 RETURN

```

```

3520 '//////////////////// sub VERIFICATION //////////////////////
3530 *VERIFY
3540 CLS :LOCATE 15,5:COLOR 6:PRINT " ----- VERIFICATION OF CONDITION ---
      -----" :COLOR 7
3550 LOCATE 10,9: PRINT " 1. Kind of Solution "; KIND$
3560 LOCATE 10,10:PRINT " 2. Sampling Interval ";INTVAL
3570 X1DIV=60*INTVAL
3580 LOCATE 10,11:PRINT " 3. Number of ldiv. of y-A-axis(CONCE.) ";Y1DIVA
3590 LOCATE 10,12:PRINT " 4. Number of ldiv. of y-B-axis(CONCE.) ";Y1DIVB
3600 LOCATE 10,13:PRINT " 5. Number of ldiv. of y-axis(TEMP.) ";Y1DIVT
3610 LOCATE 10,14:PRINT " Number of ldiv. of x-axis ";X1DIV
3620 LOCATE 10,15:PRINT " 6. Multiplier of y value ";KETA
3630 LOCATE 10,16:PRINT " Unit of y-axis ";YUNIT$
3640 LOCATE 10,17:PRINT " 7. Number of data "; NDATA
3650 COLOR@(50,9)-(58,18), 4
3660 IF FLV=1 THEN 3710
3670 LOCATE 5,20:COLOR 5: INPUT " Correction ? (y/n)"; AN$:COLOR 7
3680 '
3690 IF AN$="y" OR AN$="Y" THEN 3710 ELSE RETURN 3130
3700 '----- correction -----
3710 PRINT:COLOR 6: INPUT " Number for correction ";CN:COLOR 7
3720 ON CN GOTO 3730,3740,3750,3760,3770,3780,3790
3730 COLOR 7: INPUT " Kind of Solution "; KIND$ :GOTO 3810
3740 INPUT " Sampling Interval ";INTVAL:GOTO 3810
3750 INPUT " Number of ldiv. of y-A-axis (CONCE.)";Y1DIVA:GOTO 3810
3760 INPUT " Number of ldiv. of y-B-axis (CONCE.)";Y1DIVB:GOTO 3810
3770 INPUT " Number of ldiv. of y-axis (TEMP. )";Y1DIVT:GOTO 3810
3780 INPUT " Multiplier of y value ; 1E6, 1E9 "; KETA:IF KETA=1E+06 THEN
      YUNIT$="uW" ELSE YUNIT$="nW":GOTO 3810
3790 INPUT " Number of data "; NDATA :GOTO 3810
3800 '
3810 FLV=0
3820 GOSUB *VERIFY
3830 RETURN
3840 '
3850 '////////////////////sub pr //////////////////////
3860 *PR
3870 COLOR 2 :LOCATE 5,22:PRINT " Press Any Key !! "

```

```
3880 A$=INKEY$ :IF A$="" THEN 3880 ELSE RETURN 1110
3890 *OWARI
3900 CLS 3
3910 CHAIN "MENUF"
3920 RETURN
3930 *TXIT
3940 CLS : CONSOLE 2,16
3950 PRINT " Make Data File "
3960 INPUT " Data File Drive No. ";DRV$
3970 FILES DRV$+"*.txt"
3980 INPUT " Data Name ";NA$
3990 IF NA$="" OR LEN(NA$)>8 THEN PRINT "  RETRY  ":GOTO 3980
4000 OPEN DRV$+NA$+".txt" FOR OUTPUT AS #1
4010 FOR I=1 TO NDATA
4020  WRITE #1,TIMEAS(I),DA(I),DBA(I),DT(I),DTA(I)
4030 NEXT I
4040 CLOSE
4050 RETURN
```



## 付 録 2

```

1000 '*****
1010 '*
1020 '*      管内流量測定の数値解析 (C+dat)
1030 '*      グラフ作成
1040 '*      FILE NAME : V3X' SOU.BAS      Ver.2.2
1050 '*      H.IIDA      1994.05.31
1060 '*
1070 '*****
1080 CLS 3
1090 CONSOLE 0,25,0,1
1100 DEFDBL G
1110 INPUT "INPUT PRINTER ON ... 1      OFF ... 0 ";PRI
1120 FILENAME$="V3X' SOU.BAS"
1130 PRINT "FILE NAME = ";FILENAME$
1140 IF PRI=1 THEN LPRINT "FILE NAME = ";FILENAME$
1150 INPUT "A = 15.8 ";A      ' a = 15.8
1160 IF PRI=1 THEN LPRINT "A = ";A,
1170 INPUT "B = 7.11 ";B      ' b = 7.11
1180 IF PRI=1 THEN LPRINT "B = ";B,
1190 INPUT "V0 = 0.03 ";V0      ' v0 = 0.03
1200 IF PRI=1 THEN LPRINT "V0 = ";V0,
1210 INPUT "S = 1 ";S      ' S = 1 : 倍率
1220 IF PRI=1 THEN LPRINT "S = ";S
1230 INPUT "T0 = 5 ";T0      ' t0 = 5 or 10 : 注入時間
1240 IF PRI=1 THEN LPRINT "T0 = ";T0,
1250 INPUT "Z0 = 0 ";Z0      ' Z0 = 0
1260 IF PRI=1 THEN LPRINT "Z0 = ";Z0,
1270 INPUT "キザミ H = 0.01 ";H      ' H = 0.01
1280 IF PRI=1 THEN LPRINT "キザミ H = ";H,
1290 INPUT "Y の初期値 = 0 ";Y0      ' Y0 = 0
1300 IF PRI=1 THEN LPRINT "Y の初期値 = ";Y0
1310 INPUT "Y の範囲 (X0 , X9) = 0 , 1 ";X0,X9      ' X0 = 0 : Y9 = 1
1320 IF PRI=1 THEN LPRINT "X0 = ";X0,
1330 IF PRI=1 THEN LPRINT "X9 = ";X9
1340 DEF FNVA(X,Y)=EXP(-B*X/A)
1350 DEF FNVB(X,Y)=X*B/A
1360 DEF FNV1(X,Z)=B*EXP(-B*Z)
1370 DEF FNN1B(X,Y)=FNVB(X,Y)*V4

```

```

1380 DEF FNN1(X,Y)=1/(V0*(1+S*(FNN1A(X,Y)+FNN1B(X,Y))))
1390 G=V0
1400 H2=H/10
1410 N=(X9-X0)/H
1420 N2=(X9-X0)/H2
1430 PRINT "X", "Y", "V"
1440 IF PRI=1 THEN LPRINT "X", "Y", "V"
1450 PRINT X0,Y0,G
1460 IF PRI=1 THEN LPRINT X0,Y0,G
1470 '
1480 '
1490 '
1500 '  相関図
1510 CLS 1
1520 PRINT TAB(20);"***** 相関図 *****"
1530 CLS 2
1540 '***** 入力 *****
1550 CLS 1
1560 DIM DX(N),DY(N),DYYY(N)
1570 FOR I=1 TO N
1580 GOSUB *VV
1590 DX(I)=X0:DY(I)=G :DYYY(I)=Y0
1600 NEXT I
1610 '
1620 PRINT " Make Data File "
1630 INPUT " Data File Drive No. ";DRV$
1640 FILES DRV$+"*.TXT"
1650 INPUT " Data Name ";NAS$
1660 IF NAS$="" OR LEN(NAS$)>8 THEN PRINT " RETRY " : GOTO 1650
1670 OPEN DRV$+NAS$+".TXT" FOR OUTPUT AS #1
1680 FOR I=1 TO N
1690 XT=XT+H
1700 WRITE #1,XT,DYYY(I),DY(I)
1710 NEXT I
1720 CLOSE
1730 '***** 計算 *****
1740 DIM MI(2),MA(2),AV(2),SE(2)
1750 CLS 1:PRINT "WORKING !!!"

```

```

1760 T=0
1770 MI(1)=DX(1):MA(1)=DX(1)
1780 FOR L=1 TO N
1790 IF DX(L)<MI(1) THEN MI(1)=DX(L)
1800 IF MA(1)<DX(L) THEN MA(1)=DX(L)
1810 T=T+DX(L)
1820 NEXT L
1830 AV(1)=T/N
1840 T2=0
1850 FOR I=1 TO N
1860 T2=T2+(DX(I)-AV(1))^2
1870 NEXT I
1880 SE(1)=SQR(T2/N)
1890 T=0
1900 MI(2)=DY(1):MA(2)=DY(1)
1910 FOR L=1 TO N
1920 IF DY(L)<MI(2) THEN MI(2)=DY(L)
1930 IF MA(2)<DY(L) THEN MA(2)=DY(L)
1940 T=T+DY(L)
1950 NEXT L
1960 AV(2)=T/N
1970 T2=0
1980 FOR I=1 TO N
1990 T2=T2+(DY(I)-AV(2))^2
2000 NEXT I
2010 SE(2)=SQR(T2/N)
2020 WZ=0:WX=0:WY=0:XJ=0:YJ=0
2030 FOR I=1 TO N
2040 WZ=WZ+DX(I)*DY(I)
2050 WX=WX+DX(I):WY=WY+DY(I)
2060 XJ=XJ+(DX(I))^2:YJ=YJ+(DY(I))^2
2070 NEXT I
2080 R0=((N*XJ-WX^2)*(N*YJ-WY^2))
2090 IF R0<0 THEN R0=1 : GOTO 2110
2100 R0=SQR(R0)
2110 Z0=N*XJ-WX^2
2120 IF R0=0 OR Z0=0 THEN FOR I=1 TO 3:PRINT CHR$(7):NEXT I:CLS 1:PRINT "分母
= 0 DATA 再入力 !!!":ERASE MI,MA,AV,SE:FOR I=1 TO 1500:NEXT I:GOTO 1570

```

```

2130 R=(N*WZ-WX*WY)/R0
2140 A=(XJ*WY-WX*WZ)/Z0
2150 B=(N*WZ-WX*WY)/Z0
2160 CLS 1
2170 PRINT :PRINT " X - 最小      = ";MI(1)
2180 PRINT :PRINT "      最大      = ";MA(1)
2190 PRINT :PRINT "      平均      = ";AV(1)
2200 PRINT :PRINT "      標準偏差  = ";SE(1)
2210 LOCATE 35,1:PRINT " Y - 最小      = ";MI(2)
2220 LOCATE 35,3:PRINT "      最大      = ";MA(2)
2230 LOCATE 35,5:PRINT "      平均      = ";AV(2)
2240 LOCATE 35,7:PRINT "      標準偏差  = ";SE(2)
2250 LOCATE 0,11:PRINT "相関係数          ";R
2260 PRINT:PRINT "回帰直線 - < y=a+bx >"
2270 PRINT "1 ヲ 回帰係数          a = ";A
2280 PRINT "                          b = ";B
2290 LOCATE 0,18:PRINT SPC(79):LOCATE 0,18:INPUT" X 軸の最小目盛り      ";XL
2300 IF MI(1)<XL THEN BEEP:GOTO 2290
2310 LOCATE 0,19:PRINT SPC(79):LOCATE 0,19:INPUT"          最大目盛り      ";XH
2320 IF XH<MA(1) THEN BEEP:GOTO 2310
2330 LOCATE 0,21:PRINT SPC(79):LOCATE 0,21:INPUT" Y 軸の最小目盛り      ";YL
2340 IF MI(2)<YL THEN BEEP:GOTO 2330
2350 LOCATE 0,22:PRINT SPC(79):LOCATE 0,22:INPUT"          最大目盛り      ";YH
2360 IF YH<MA(2) THEN BEEP:GOTO 2350
2370 LOCATE 40,20:PRINT SPC(38)
2380 LOCATE 40,20:PRINT "回帰直線を書きますか (Y/N)  ?";
2390 Z$=INPUT$(1):PRINT Z$
2400 IF Z$<>"Y" AND Z$<>"N" THEN BEEP:GOTO 2370
2410 '***** 相関図 *****
2420 CLS 1
2430 X1=6*8+4:Y1=0*8+4:X2=79*8+4:Y2=21*8+4
2440 BX=4:BY=4
2450 B1=65*8/BX:B2=20*8/BY
2460 D1=B1/((XH-XL)/BX):D2=B2/((YH-YL)/BY)
2470 LINE(X1,Y1)-(X1,Y2),1:LINE(X1,Y2)-(X2,Y2),1
2480 FOR I=0 TO BX
2490 LOCATE (X1-4)/8+I*B1/8+1,(Y2-4)/8+1:PRINT USING "###.###";XL+I*(XH-XL)/BX
2500 LINE(X1+5*8+I*B1,Y1)-(X1+5*8+I*B1,Y2),1,,&HAAAA

```

```

2510 NEXT I
2520 FOR J=0 TO BY
2530 LOCATE (X1-4)/8-5,(Y2-4)/8-J*B2/8:PRINT USING"###.#####";YL+J*(YH-YL)/BY
2540 IF J=0 THEN GOTO 2560
2550 LINE(X1,Y2-J*B2)-(X2,Y2-J*B2),1,,&HAAAA
2560 NEXT J
2570 FOR K=1 TO N
2580 CIRCLE(X1+5*8+D1*(DX(K)-XL),Y2-D2*(DY(K)-YL)),1
2590 NEXT K
2600 COLOR 4
2610 IF Z$="N" THEN GOTO 2690
2620 K1=XL:K3=XH
2630 K2=A+B*K1:K4=A+B*K3
2640 IF A+B*XL<YL THEN K1=(YL-A)/B:K2=YL
2650 IF A+B*XL>YH THEN K1=(YH-A)/B:K2=YH
2660 IF A+B*XH<YL THEN K3=(YL-A)/B:K4=YL
2670 IF A+B*XH>YH THEN K3=(YH-A)/B:K4=YH
2680 LINE(X1+5*8+(K1-XL)*D1,Y2-(K2-YL)*D2)-(X1+5*8+(K3-XL)*D1,Y2-(K4-YL)*D2),2
2690 LOCATE 0,23:Z$=INPUT$(1)
2700 IF Z$<>"D" AND Z$<>"G" AND Z$<>"E" THEN BEEP:GOTO 2690
2710 IF Z$<>"D" AND Z$<>"E" THEN CLS 1:PRINT "WAIT !!!!":CLS 2:GOTO 2160
2720 IF Z$<>"E" THEN CLS 1:PRINT "WAIT !!!!":CLS 2:ERASE MI,MA,AV,SE:GOTO 1570
2730 COLOR 7
2740 END
2750 '
2760 '
2770 '
2780 *VV
2790 GOSUB *HENKEI.BESSEL.NO.X
2800 GOSUB *HENKEI.BESSEL
2810 GOSUB *SINPUSON
2820 GOSUB *RUNGE.KUTTA
2830 X0=X0+H
2840 G=1/FNN1(X0,Y0)
2850 PRINT X0,Y0,G
2860 IF PRI=1 THEN LPRINT X0,Y0,G
2870 RETURN
2880 END

```

```

2890 '
2900 '
2910 '
2920 *HENKEI.BESSEL.NO.X
2930 DEF FNV2(X,Z)=SQR(Z^2-(X/A)^2)
2940 IF ZZ0^2 < (X0/A)^2 THEN V2=0 : RETURN
2950 V2 = FNV2(X0,ZZ0)
2960 RETURN
2970 '
2980 '
2990 *HENKEI.BESSEL
3000 FOR J=0 TO 8
3010 A(J)=0
3020 NEXT J
3030 IF V2 > 3.75 THEN GOTO *XI3.75
3040 ' Xi <= 3.75
3050 A(0) = .5
3060 A(1) = .87890594#
3070 A(2) = .51498869#
3080 A(3) = .15084934#
3090 A(4) = .0265873
3100 A(5) = 3.01532E-03
3110 A(6) = 3.2411E-04
3120 V3=0
3130 FOR K=0 TO 6
3140 V3=V3+A(K)*(V2/3.75)^(2*K)
3150 NEXT K
3160 RETURN
3170 '
3180 *XI3.75
3190 ' Xi > 3.75
3200 A(0) = .39894228#
3210 A(1) = -.039880242#
3220 A(2) = -3.62018E-03
3230 A(3) = 1.63801E-03
3240 A(4) = -.01031555#
3250 A(5) = .022829673#
3260 A(6) = -.028953121#

```

```

3270 A(7) = .017876535#
3280 A(8) =-4.20059E-03
3290 V3=0
3300 V3B=0
3310 FOR K=0 TO 8
3320 V3B=V3B+A(K)*(3.75/V2)^K
3330 NEXT K
3340 V3=V3B/(V2^(3/2)*EXP(-V2))
3350 RETURN
3360 '
3370 '
3380 *SINPUSON
3390 IF Y0 <= TO THEN V4=0 : RETURN
3400 ZB0=ZZ0
3410 ZB9=ZZ0+H
3420 N2=10
3430 V4=0
3440 V4A1=0
3450 V4A2=0
3460 V4A3=0
3470 V4A4=0
3480 IF V2 > 3.75 THEN GOTO *V2.3.75
3490 ' V2 <= 3.75
3500 V4A1=FNV1(X0,ZB0)*V3*H2/3
3510 FOR L=2 TO N2-2 STEP 2
3520 V4A2=V4A2+FNV1(X0,ZB0)*V3
3530 ZB0=ZB0+H2
3540 NEXT L
3550 ZB0=ZZ0
3560 V4A2=H2/3*2*V4A2
3570 FOR L=1 TO N2-2 STEP 2
3580 V4A3=V4A3+FNV1(X0,ZB0)*V3
3590 ZB0=ZB0+H2
3600 NEXT L
3610 V4A3=H2/3*4*V4A3
3620 ZB0=ZZ0+H
3630 V4A4=H2/3*FNV1(X0,ZB0)*V3
3640 GOTO *V4

```



```

3650 '
3660 *V2.3.75
3670 ' V2 > 3.75
3680 V4A1=FNV1(X0,ZB0)*V3
3690 FOR L=2 TO N2-2 STEP 2
3700 V4A2=V4A2+FNV1(X0,ZB0)*V3
3710 ZB0=ZB0+H2
3720 NEXT L
3730 V4A2=H2/3*2*V4A2
3740 ZB0=ZZ0
3750 FOR L=1 TO N2-2 STEP 2
3760 V4A3=V4A3+FNV1(X0,ZB0)*V3
3770 ZB0=ZB0+H2
3780 NEXT L
3790 V4A3=H2/3*4*V4A3
3800 ZB0=ZZ0+H
3810 V4A4=H2/3*FNV1(X0,ZB0)*V3
3820 '
3830 *V4
3840 V4=V4A1+V4A2+V4A3+V4A4
3850 ZZ0=ZZ0+H
3860 RETURN
3870 '
3880 '
3890 *RUNGE.KUTTA
3900 K1=0
3910 K2=0
3920 K3=0
3930 K4=0
3940 GOSUB *VVA
3950 K1 = H*FNN1(X0,Y0)
3960 K2 = H*FNN1(X0+H/2,Y0+K1/2)
3970 K3 = H*FNN1(X0+H/2,Y0+K2/2)
3980 K4 = H*FNN1(X0+H,Y0+K3)
3990 Y0=Y0+(K1+2*K2+2*K3+K4)/6
4000 RETURN
4010 '
4020 *VVA

```

```
4030 IF X0=0 THEN GOTO 4090
4040 IF Y0<X0/A THEN GOTO 4090
4050 IF Y0=X0/A THEN GOTO 4110
4060 IF Y0<X0/A+T0 THEN GOTO 4130
4070 IF Y0=X0/A+T0 THEN GOTO 4090
4080 IF Y0>X0/A+T0 THEN GOTO 4090
4090 DEF FNN1A(X,Y)=0
4100 GOTO 4140
4110 DEF FNN1A(X,Y)=FNVA(X,Y)/2
4120 GOTO 4140
4130 DEF FNN1A(X,Y)=FNVA(X,Y)
4140 RETURN
4150 END
```

## 主な記号

|       |                            |
|-------|----------------------------|
| $c$   | : 媒質中の音速                   |
| $C$   | : 濃度                       |
| $D$   | : 弾性管内径                    |
| $e$   | : 解析から推定した測定誤差             |
| $E$   | : 弾性管のヤング率                 |
| $E_v$ | : 流体の体積弾性係数                |
| $H$   | : 圧力水頭                     |
| $I$   | : 屈折センサ先端部界面で反射して戻ってくる光の強さ |
| $L_1$ | : シリンジと屈折センサ A の距離         |
| $L_2$ | : 屈折センサ A と屈折センサ B の距離     |
| $n$   | : 屈折率                      |
| $N$   | : マイクロトーチによる屈折センサ先端の加熱回数   |
| $N_n$ | : 屈折センサの光ファイバ本数            |
| $NA$  | : 開口数                      |
| $q$   | : 流量                       |
| $Q$   | : 弾性管内の平均流量                |
| $R$   | : ぬれ縁面積                    |
| $Re$  | : レイノルズ数                   |
| $S$   | : 弾性管内の流速とシリンジからの流速の比      |
| $t$   | : 時間                       |
| $T$   | : 温度                       |
| $v$   | : 流速                       |
| $x$   | : 距離                       |
| $y$   | : 水溶液冷却面からの距離              |
| $z$   | : 鉛直方向の距離                  |

- $\delta$  : 弾性管肉厚  
 $\nu$  : 流体の動粘性  
 $\theta$  : 角度  
 $\rho$  : 流体の密度  
 $\tau$  : 時間  
 $\Delta n$  : 屈折率差

## 参考文献

- (1) 片岡・柴田・高橋・山崎, センサハンドブック, (1986), 1067, 培風館.
- (2) 特集「光ファイバの使い方」, オプトロニクス, No.4, (1984).
- (3) 光エレクトロニクス辞典, (1992), 3, 産業調査会.
- (4) 大原・木村, 光通信, (1981), 2, コロナ社.
- (5) K.C.Kao and G.A.Hockham, Dielectric fiber surface waveguides for optical frequencies, Proc.IEE, vol.113, No.7(1966), 1151.
- (6) F.P.Kapron, D.B.Keck and R.D.Maurer, Radiation loss in glass optical waveguides, Appl. Phys. Lett., vol.17, No.10(1970), 423.
- (7) T.Miya, Y.Terunuma, T.Hosaka and T.Miyashita, An ultimate low-loss single-mode fiber at  $1.55 \mu\text{m}$ , Elect. Lett., vol.15, No.4(1979), 106.
- (8) R.N.Hall, G.E.Fenner, J.D.Kingsley, T.J.Soltys and R.O.Carlson, Coherent light emission from GaAs junctions, Phys. Rev. Lett., vol.9, No.9 (1962), 366.
- (9) M.I.Nathan, W.P.Dumke, G.Burns, F.H.Dill and G.J.Lasher, Stimulated emission of radiation from GaAs pn junctions, Appl. Phys. Lett., vol.1, No.3 (1962), 62.
- (10) T.M.Quist, R.H.Rediker, R.J.Keyes, W.E.Kraig, B.Lax, A.L.McWhorter and H.J.Zeigler, Semiconductor maser of GaAs, Appl. Phys. Lett., vol.1, No.4 (1962), 91.
- (11) I.Hayashi, M.B.Panish, P.W.Foy and S.Sumski, Junction lasers which operate continuously at room temperature, Appl. Phys. Lett., vol.17, No.3 (1970), 109.
- (12) T.Kimura and K.Daikoku, A Proposal on optical fiber transmission systems in a low-loss  $1.0\text{-}1.4 \mu\text{m}$  wavelength region, Opt. Quant. Electron., vol.9, No.1 (1977), 33.
- (13) K.Oe, S.Ando and K.Sugiyama,  $1.3 \mu\text{m}$  cw operation of GaInAsP/InP DH Diodo lasers at room temperature, Japan, J. Appl. Phys., vol.16, No.9 (1977), 1273.
- (14) H.Kanbe, T.Kimura, Y.Mizushima and K.Kajiyama, Silicon avalanche photodiodes with low multiplication noise and high speed response, IEEE Trans. Electron Device, vol. ED-23, No.12 (1976), 1337.

- (15) H.Ando, H.Kanbe, T.Kimura, T.Yamaoka and T.Kaneda,  
Characteristics of germanium avalanche photodiodes in the  
wavelength region of 1-1.6  $\mu$  m, IEEE J. Quantum Electron., vol.  
QE-14, No.11 (1978),804.
- (16) Bell syst. Tech. J., Atolanta Fiber System Experiment, vol.57, No.6  
(1978).
- (17) 電気通信研究所, 通研実報, 近距離光ケーブル伝送方式現場試験特集,  
vol.28, No.9 (1979).
- (18) 久間・布下, 光ファイバセンサ, (1986), 47, 情報調査会.
- (19) 久間・布下, 光ファイバセンサ, (1986), 49, 情報調査会.
- (20) 梶岡, O plus E, (1982, 9月号), 84.
- (21) F. Tremolieres, et al., Europ. J. Intens. Care Med., 2 (1976) 177.
- (22) 宮坂, 血中酸素の無侵襲計測, 日本 ME 学会誌, 1-9(1987), 26.
- (23) 青柳, 光による血中酸素濃度の計測の実際, 日本 ME 学会誌, 4-4  
(1990), 44.
- (24) A. M. Scheggi, Proc. of OFS'84, Stuttgart, (1984), 93.
- (25) 平本・他, レーザー研究, 13 [2] (1985), 38.
- (26) 會沢・他, エレクトロニクス, (1985-1月号), 60.
- (27) 小野・神田・平本・四谷・佐藤, 光ファイバプローブを用いた医用反射  
光スペクトル分析装置, 医用電子と生体工学, 28-3(1990), 200.
- (28) Hinata,S., ほか 5 名, Miniature Optical Fiber Refractometer for  
Measuring Local Concentration of Solution, *Proc. 9th Int. Heat Transf.*,  
3, Jerusalem, (1990), 211.
- (29) Takeo, T. and Hattori, H., Optical Fiber Sensor for Measuring  
Rfractive Index, *J. Appl. Phys.*, 21 (1982), 1509
- (30) Bergman, T. L., Incropera, F. P. and Stevenson, W. H., Miniature  
Fiber-Optic Rfractometer for Measurement of Salinity in Double  
Diffusive Thermohaline Systems, *Rev. Sci. Instrum.*, 56 (1985), 291.
- (31) Meyer, M. S. and Eesley, G. L., Optical Fiber Refractometer, *Rev. Sci.  
Instrum.*, 58 (1987), 2047.
- (32) Q8214A オプティカルパワーメータ取扱説明書, (1989),  
アドバンテスト.
- (33) TR2114 デジタルマルチ温度計取扱説明書, (1984), アドバンテスト.
- (34) PC-9801-21n GP-IB(IEE-488)インターフェースボードユーザズ  
マニュアル, (1987), 日本電気.
- (35) 片岡・柴田・高橋・山崎, センサハンドブック, (1986), 523, 培風館.
- (36) 古幡, 無侵襲的血流量測定法, 日本 ME 学会誌, 1-4(1987), 263.

- (37) Yoshimura, S., Kodaira, K., Fujishiro, K and Furuhata, H., A Newly Developed Non-Invasive Technique for Quantitative Measurement of Blood Flow, *Jikei Med. J.*, 28(1981), 241.
- (38) 梶谷・平松・小笠原・三戸・辻岡, レーザドップラ血流計測法, 日本ME学会誌, 4-4(1990), 2.
- (39) 朝比奈・鈴木・中橋・白川・大井田・長尾・塚田・小川・吉村, 光ファイバカテーテルを用いた血管内血流量の計測, 日本ME学会誌, 4-4(1990), 53.
- (40) 沖野・菅原・松尾, 心臓血管系の力学と基礎計測, (1982), 390, 講談社.
- (41) 抜山, 塩水速度法による水の流量測定の精度に就いて, 機械及電気, 1-6(1936), 897.
- (42) 抜山, 塩水速度法による水の流量測定の精度に就いて [2], 機械及電気, 1-7(1936), 1069.
- (43) 抜山, 塩水速度法による水の流量測定の精度に就いて [3], 機械及電気, 1-8(1936), 1237.
- (44) S. Hinata, J. E. S. Venart, A. C. M. Sousa, B. Zhou, M. Sakurai and M. Nakazawa, Miniature Optical Fiber Refractometer for Measuring Local Concentration of Solution, 9th Int. Heat Transfer Conf., 3 (1990), 211.

## 本研究に関する著者の論文と発表

- (1) 飯田秀徳, 日向滋, 中沢賢, 姫野修廣, 桜井正幸, 寺尾計彦, 微細光ファイバ屈折センサによる血管を模擬した弾性管内の流量測定に関する研究, 日本機械学会論文集, 61-585B, (1995), 307.
- (2) 日向滋, 姫野修廣, 桜井正幸, 飯田秀徳, 横田徳之, 光ファイバセンサによる液体の屈折率計測に関する技術, 日本機械学会論文集, 61-585B, (1995), 313.
- (3) 日向滋, 姫野修廣, 桜井正幸, 寺尾計彦, 飯田秀徳, 膜で仕切られたセル内の水溶液の凍結過程における局所濃度計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.4, (1993), 480.
- (4) 飯田秀徳, 日向滋, 中沢賢, 姫野修廣, 桜井正幸, 寺尾計彦, 微細光ファイバ屈折センサによる血管を模擬した弾性管内の流量測定に関する研究, 第3回バイオエンジニアリングシンポジウム講演論文集, (1994), 244.
- (5) 日向滋, 姫野修廣, 桜井正幸, 飯田秀徳, 横田徳之, 光ファイバセンサによる液体の屈折率測定技術, 第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集, vol.1, (1994), 289.
- (6) S.Hinata, N.Himeno, M.Sakurai, K.Terao and H.Iida, Mixing and Freezing of in Two Cells Separated by a Membrane, *Transport Phenomena Science and Technology*, Ed.by B.X.Wang, Higher Education Press, (1992), 535.



- (7) 日向滋, 姫野修廣, 桜井正幸, 片岡十吉, 寺尾計彦, 飯田秀徳, 高橋健夫, 光ファイバを使った微小屈折計による溶液の局所濃度測定, 計測自動制御学会第9回センシングフォーラム予稿集, (1992), 73.
- (8) 日向滋, 飯田秀徳, 姫野修廣, 桜井正幸, 微細光ファイバ屈折センサによる血管を模擬した弾性管内の流量測定精度についての考察, 日本伝熱学会北陸信越研究グループ '94 秋季セミナー予稿集, (1994).
- (9) 日向滋, 姫野修廣, 桜井正幸, 飯田秀徳, 横田徳之, 光ファイバセンサによる液体の屈折率測定技術—センサの製作方法とその特性—, 日本伝熱学会講演予稿集, (1994).
- (10) 日向滋, 姫野修廣, 桜井正幸, 寺尾計彦, 飯田秀徳, 膜で仕切られたセル内の凍結過程における濃度測定, 計測自動制御学会中部支部インテリジェントセンシング技術研究会講演論文集, No.1, (1991), 5.

[特許出願]

- (1) 接触型光ファイバセンサおよび流れの測定方法および装置  
特許出願公開番号: 特開平8-29207
- (2) 接触型光ファイバセンサおよびその製造方法および屈折率の測定方法  
特許出願公開番号: 特開平8-145735

## 謝 辞

本研究を遂行し、論文をまとめるにあたり、終始温かいご指導と御鞭撻を賜りました信州大学繊維学部教授日向滋博士ならびに同教授中沢賢博士に謹んで感謝し、厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、貴重な御教示、御助言を賜りました信州大学繊維学部助教授姫野修廣博士、同助手桜井正幸氏に深く感謝致します。

本論文を御査読頂き、貴重な御助言を賜りました信州大学繊維学部教授鳥羽栄治博士、同教授篠原昭博士、同教授清水義雄博士、同教授鳥海浩一郎博士に厚く感謝致します。

本研究の実施に便宜を与えていただきました東京特殊電線株式会社 築山均代表取締役社長、村松正孝 取締役研究開発部長、大前進一 取締役光製品部長、寺尾計彦 営業本部技師長、佐藤幸彦 顧問、土屋幸成 光製品部次長に心から感謝致します。

研究を行うにあたり助言、励ましのお言葉を頂きました東京特殊電線株式会社 光製品部、研究開発部の皆様に感謝致します。

最後に今まで暖かく励まして頂いた両親と妻に心より感謝いたします。