

光アクチュエータ・センサを集積化
したマイクロシステムの研究

2009年9月

遠山修

目次

第1章 緒論	1
1 .1 従来の研究.....	1
1 .1 .1 光ファイバセンシング.....	1
1 .1 .2 光アクチュエータ.....	5
1 .1 .3 高密度レーザエネルギー伝送ファイバ.....	8
1 .1 .4 ファイバスコープによる視覚機能.....	11
1 .2 従来技術の問題点・課題と解決方法.....	13
1 .2 .1 光ファイバセンシング.....	13
1 .2 .2 光アクチュエータ.....	14
1 .2 .3 高密度レーザエネルギー伝送ファイバ.....	16
1 .2 .4 ファイバスコープによる視覚機能.....	16
1 .3 マイクロシステムの基本設計.....	17
1 .3 .1 医療分野.....	18
1 .3 .2 産業応用.....	18
1 .3 .3 基本設計指針.....	19
1 .4 本研究の目的.....	20
1 .5 本論文の構成.....	21
第2章 光ファイバセンサとその応用	23
2 .1 光ファイバ圧力センサ.....	23
2 .1 .1 構造.....	23
2 .1 .2 シリコン微細加工技術.....	26
2 .1 .3 センサの詳細設計.....	28
2 .1 .4 センサの作製技術.....	28
2 .1 .5 結果及び考察.....	31
2 .2 光ファイバ圧力センサの小型化とカテーテルへの応用.....	35
2 .2 .1 小型化のためのセンサの構造変更.....	35
2 .2 .2 ウェーハ接合技術の検討.....	36
2 .2 .3 センサの詳細設計.....	43
2 .2 .4 センサ試作及び評価.....	44

2 .2 .5	ホットバルーンカテーテルへの適用	45
2 .2 .6	考察	48
2 .3	光ファイバ圧力センサの触覚測定への応用	48
2 .3 .1	触覚センサの技術動向	49
2 .3 .2	埋込型触覚センサの検討	51
2 .3 .3	埋込型触覚センサの改良	54
2 .3 .4	独立型触覚センサの検討	56
2 .3 .5	独立型触覚センサの最適化	60
2 .4	まとめ	65
第3章	光駆動アクチュエータとその応用	66
3 .1	バルーンを用いた光駆動アクチュエータと立体視機構への応用	66
3 .1 .1	立体視とは	66
3 .1 .2	立体視パラメータ	67
3 .1 .3	リング型視差可変機構を有する立体視スコープ	69
3 .1 .4	拮抗型視差可変機構を有する立体視スコープ	77
3 .1 .5	バルーン型視差可変機構を有する立体視スコープ	82
3 .1 .6	バルーン型視差可変機構の光駆動化	85
3 .1 .7	光駆動用光熱変換機構の改良	88
3 .2	光加熱型形状記憶合金アクチュエータと先端屈曲機構への応用	90
3 .2 .1	首振り構造体の基礎検討	90
3 .2 .2	内骨格型首振り構造体	95
3 .2 .3	外骨格型首振り構造体	100
3 .2 .4	全方位屈曲首振り構造体	104
3 .2 .5	光熱変換技術の基礎検討	105
3 .2 .6	伝熱媒体法及び直接照射法	109
3 .2 .7	テーパエッチドファイバとアクチュエータユニット	120
3 .2 .8	ステップエッチドファイバとアクチュエータユニット	124
3 .2 .9	ステップエッチドファイバの改良	131
3 .3	まとめ	134
第4章	センサ・アクチュエータ用光ファイバの開発	135

4 .1	フォトニック結晶ファイバとは	136
4 .1 .1	定義	136
4 .1 .2	構造	137
4 .2	フォトニック結晶ファイバの作製技術	138
4 .2 .1	Stack and Draw 法(Capillary法)	138
4 .2 .2	ドリル法	138
4 .2 .3	線引	140
4 .3	フォトニック結晶ファイバの光学特性	140
4 .3 .1	伝搬特性	141
4 .3 .2	伝送損失特性	144
4 .3 .3	曲げ損失特性	146
4 .3 .4	分散特性	147
4 .3 .5	偏波特性	149
4 .3 .6	非線形特性	149
4 .4	接続及び端末処理	152
4 .4 .1	ファイバ接続	152
4 .4 .2	端末処理	153
4 .5	超広帯域光源への応用	154
4 .6	レーザガイドへの応用	155
4 .7	偏波面保持ファイバへの応用	156
4 .8	ファイバレーザへの応用	157
4 .8 .1	ダブルクラッドファイバ	157
4 .8 .2	ファイバレーザへの応用	158
4 .9	信頼性	159
4 .9 .1	温度サイクル特性	159
4 .9 .2	機械強度特性	159
4 .9 .3	引張破断試験	160
4 .9 .4	動疲労試験	160
4 .10	まとめ	161
第5章 センサ、アクチュエータを集積化した視覚機構の開発		162
5 .1	顕微観察機能を有するマイクロ視覚機構の試作	162

5 .1 .1	観察機能及び照明機能	162
5 .1 .2	先端首振り機能	163
5 .1 .3	接触検知機能	163
5 .2	顕微観察機能を有するマイクロ視覚機構の評価	164
5 .2 .1	顕微観察機能及び照明機能の評価	164
5 .2 .2	首振り機能の評価	164
5 .2 .3	接触検知機能の評価	168
5 .3	立体視機能を有するマイクロ視覚機構の試作	169
5 .3 .1	立体視スコープの分解能の検討	169
5 .3 .2	立体視スコープの視野範囲の検討	171
5 .3 .3	立体視スコープの視差可変機構	172
5 .4	立体視機能を有するマイクロ視覚機構の評価	174
5 .4 .1	隙間の観察	174
5 .4 .2	軸挿入状態の観察	174
5 .5	マイクロ視覚機構における首振り構造体の光駆動化	175
5 .5 .1	光駆動化視覚機構の試作	176
5 .5 .2	光駆動化視覚機構の評価	177
5 .6	具体的微細構造サンプルを用いたマイクロ視覚機構の機能検証	178
5 .6 .1	微細加工物の外観観察	178
5 .6 .2	微細加工穴の寸法計測	178
5 .7	まとめ	181
第6章 結論		182
6 .1	結論	182
6 .2	今後の課題	183

謝辞

参考文献

参考論文

第1章 緒論

省資源・省スペース・省エネルギーへの寄与が期待されるマイクロマシン技術の進歩により、これまででは不可能であった微小領域における環境測定（圧力、画像）のニーズが高まってきている。特に半導体バッチプロセスや、レーザ・超音波・放電・光等の微細加工技術の進歩により、要素デバイスがこれまでには考えられなかった程に小型化している。小型化したデバイス、例えば機械量、光・放射線、磁気、バイオ・化学を測定するマイクロセンサや静電力、圧電力、電磁力、光、熱等を利用したマイクロアクチュエータ等を、微小空間に高密度に集積化することが可能になってきている。また信号の授受・エネルギーの供給には、従来のリード線ではなく光ファイバを用いることにより、細径化・電磁非干渉・安全等の大きな利点がある。

そこで先ず、これまで研究が進められてきている要素デバイスについて、その現状及び課題・問題点を明らかにすべく、光ファイバセンシング、光アクチュエータ、高エネルギー伝送ファイバ、ファイバスコープ等の従来技術の調査研究を行う。これにより得られた従来技術の問題点・課題を解決するための方策を明確化し、要素デバイスのさらなる小型化・高度化を検討する。さらに各要素デバイスを集積化して得られるマイクロシステムについて、その応用分野より要求される機能を明らかにし、その機能に必要なデバイス性能を見出すことにより、その基本設計の考察を行う。この基本設計に基づき、光マイクロセンサ・マイクロアクチュエータを集積化し、その信号・駆動力供給を全光化したマイクロシステムの検討を行う。

1.1 従来の研究

1.1.1 光ファイバセンシング

光ファイバを用いたセンシングは以前より活発に研究され、多くの種類のセンサが開発対象となっている。光ファイバは元来光通信の低損失光導波路として開発されたが、その電氣的に無放電、無誘導、高絶縁及び高耐圧であること、化学的に耐食性に優れていること、更に、可とう性に優れ、細径、軽量である事など、センサとしても優れた特徴を有しているため、応用研究が盛んに行われている。この光ファイバセンサを利用形態で分類すると、(1)受動型、(2)伝送路型、(3)機能型に大別することができる。(1)は従来の電気式センサの電線部分を光電変換器で光ファイバに置き換えたものや、被測定物体の放射する光を検出器まで導くもの等である。(2)は光ファイバ先端もしくは中間部にトランスデューサを設けたものである。(3)はトランスデューサ部に光ファイバ自身の特性変化を利用したものである。

これらの概念を Fig.1.1 に示す。また(2)の方式を利用し、従来のガラス電極、イオン選択性電極の代わりにそれに相当する感応膜を光ファイバの先端もしくは中間に固定したものを特にオプトロードあるいはオプトード(Optical Electrodeの略称)と呼び、近年研究が活発である。

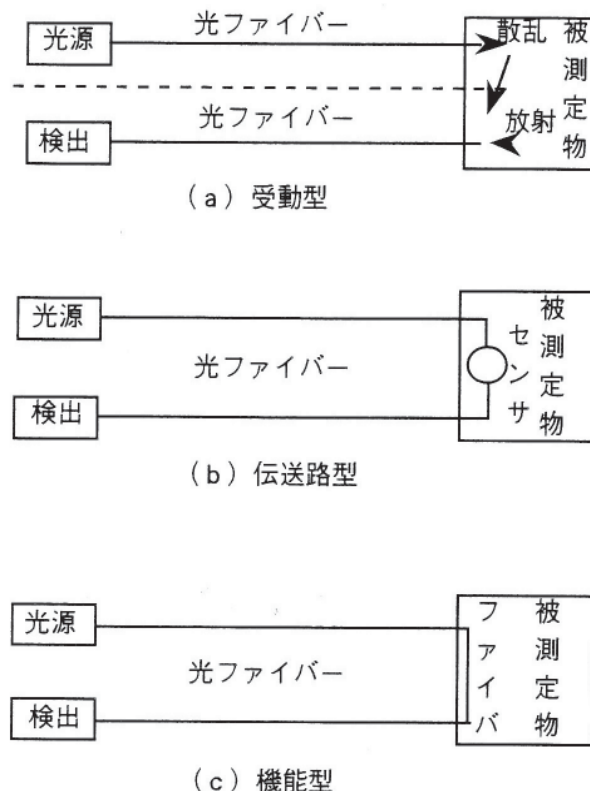


Fig.1.1 光ファイバセンサの構成

更に光ファイバセンサを被測定対象で分類すると、物理量センサと化学量センサに大別することができる。また使用する光ファイバの種類としては、光の偏光、位相などを検出する場合はシングルモードファイバが、光量を検出する場合は伝送光量の多いマルチモードファイバが用いられる。伝送距離が非常に短く損失を無視できる場合は、プラスチックファイバも使用できる。これは石英系ファイバに比べファイバ径が太く、トランスデューサ部をファイバ先端に固定しやすいという長所があり、比較的多く使用されている。

物理量センサ

現在までに報告されている物理量測定用光ファイバセンサのセンシング対象は、主として、温度、圧力、振動・加速度等である。これらのセンサの細分類を Table 1.1 に示す。温度センサに関しては、既に開発されているものもあり研究事例も圧倒的に多い。開発初期(1970年代後半)の方式は、バイメタル[1]や水銀柱[2]で対向するファイバからの光を遮断するもので、サーマルスイッチ的機能でしかなかった。しかしその後、種々の材料が、トランスデューサとして用いられるようになり、温度変化に対応したセンシング機能をもつ方式が多種報告されている。以下にそれらの報告例を示す。化合物半導体(GaAs, AlGaAs)の光吸収端の変化[3, 4], PLZT[5]の光強度の変化, LiNbO₃[6]やSiO₂[7]の屈折率等の変化(複屈折セル式)、フッ化物ガラス中にSm³⁺, Eu³⁺をドー

Table 1.1 光ファイバ物理量センサの種類

種類	検出方式	
温度センサ	接触型	インタラプタ 光強度変調 複屈折セル 蛍光放射
	非接触型	マッハツェンダー干渉計 マイケルソン干渉計
圧力センサ	光弾性素子 ダイヤフラム 液晶充填	
振動・加速度センサ	板バネ慣性系 光弾性素子 プローブ マッハツェンダー干渉計	

ブ[8]あるいはキレート化合物に Eu, Tb をドーブ[9]した材料の蛍光放射変化(-150 程度まで測定可能)等を利用した方式が報告されている。また非接触型ではマッハツェンダー干渉計[10]、マイケルソン干渉計[11]を利用したものがあり、精度が高いことが特徴である。尚、研究動向としては温度検出方式, 測定の高精度化, 広範囲化の検討が、1980年代にほとんど集中しており、近年は、トランスデューサ自体よりそれらの各種産業応用システム[12, 13]の検討が主流である。

圧力センサに関しては、1970年代から研究が進められており、その研究事例で最も多いものは、ダイヤフラムを利用した方式であるが、圧力による光弾性素子の複屈折を利用したもの[14]、液晶を利用したもの[15]などの報告例もある。ダイヤフラム方式では先ず、金属性ダイヤフラムを用いたものが研究され[16]、続いてファブリペロ(Fabry-Perot)共振器ミラー間隔を変化させるためにダイヤフラムを用いたもの[17]やシリコンビームを用いたもの[18]が研究され、最近ではダイヤフラムに接着した光ファイバにより導かれた光をpn接合に照射し、その光起電力により圧力を測定するという特殊な構成のセンサも研究されている。[19]

振動・加速度センサに関しては、1980年代に報告が集中しており、方式としては板バネの振動を用いたもの[20]、光弾性素子を用いたもの[21]、GaAs-AlGaAsによるカンチレバーに光ファイバをプローブとして光を照射するもの[22]、マッハツェンダー干渉計を利用したもの[23]などが報告されている。

化学量センサ

現在までに報告されている化学量測定用光ファイバセンサのセンシング対象は、主として、ガス種、液体種、酸素濃度、イオン種、pH、生物種等である。これらのセンサの細分類を Table 1.2

に示す。

ガスセンサに関しては、光ファイバの防爆性を利用し、爆発性ガスの濃度測定を目的としている研究事例が多い。1970年代末にNOx, SOxのセンサが研究され[24]、偏波面保存ファイバを用いた干渉計測[25]に発展している。

液体センサに関しては、主に送油管やケーブル、トランス等の油漏れの検出を目的として研究されており、ベアファイバの曲率を利用したもの[26]や、扇形にファイバを配置して一部コアを露出させたもの[27]等がある。

酸素センサに関しては、1970年代後半から研究が始まり、吸光法による血中の酸素濃度測定が報告されている[28]。その後1980年代後半になり研究が活発化し、トランスデューサとしてペリレンを用い、酸素分圧0～150kPaの範囲で±0.3kPaの精度をもつもの[29]、N-メチルアクリドン(NMA)を用い、相対誤差10%以下のもの[30]、9,10-ジフェニルアントセランを加えたポリジメチルシロキサンを用い、約10mmHg/mの感度をもつもの[31]が相次いで報告されている。1990年代に入ってからトランスデューサ部の研究とともに測定技術(光WDM)の開発[32]や応答機構の解析[33]の研究も行われている。

イオンセンサに関しては、カリウムイオンとカルシウムイオンの検出を目的としたものが主流である。カリウムイオンセンサでは、トランスデューサ部にアンバーライトXAD-2樹脂[34]、ジベンゾ-18-クラウン-6(DB18C6)[35]、変色性クラウンエーテル色素(CAB15C5)[36]を用いたものがあり、カルシウムイオンセンサでは5-(4'-ニトロフェニル)-2-ヒドロキシ-1,3-キシリル-18-クラウン-5[37]、抗生物質A23187[38]、トロポニンC[39]を用いたものが報告されている。いずれの場合も検出感度と応答速度の向上を課題としており、カリウムイオンセンサでは 10^{-8}M [35]、カルシウムセンサでは 10^{-7}M [38]が達成されている。

pHセンサに関しては、化学量センサの中で最も研究例が多く、報告は1986年以降に集中している。基本的にはpH色素をトランスデューサとしてフェノールレッドを用いた吸光方式のものが1980年代初頭に先ず研究され[40]、種々の指示薬の検討[41～43]を経て応答速度の向上[44,45]、測定pH領域の広域化[46～48]、指示薬安定性の向上[49,50]が検討されている。しかし、未だ研

Table 1.2 光ファイバ化学量センサの種類

中分類	細分類
流体センサ	ガスセンサ 液体センサ 酸素センサ
濃度センサ	pHセンサ イオンセンサ
バイオセンサ	免疫センサ 酵素センサ グルコースセンサ

究課題も多く、現在も開発途上段階である。

バイオセンサに関しても pH センサと同様な傾向があり、1980 年代から研究が活発化している。免疫センサでは、抗原抗体反応を利用したアドリアマイシンの検出[51]に始まり、最近ではベンゾピレンテトロールを $\mu\ell$, μmol のレベルで検出を可能なものまで報告されている[52]。酵素センサでは、酵素反応より基質濃度を測定するもの[53]やフェニルピルビン酸塩を $50 \sim 1500 \mu\text{mol} / \ell$ の濃度範囲で測定するもの[54]等がある。グルコースセンサでは、先ずフローインジェクション方式によるものが研究され、 $1 \mu\ell$ の血清で $400\text{g}/\text{d}\ell$ までの検量線が得られている[55]。その後は検出感度向上と応答速度向上の研究が進められ、 $0.01 \sim 2\text{mH}$ で応答速度 $8 \sim 60\text{sec}$ のものが報告されている[56]。

1.1.2 光アクチュエータ

SMA アクチュエータ

SMA アクチュエータの駆動方式は通常、通電加熱であるが、ここでは光・熱変換型を提案し、その研究開発を行なうため技術・研究動向を調査した。

SMA としては、Ni-Ti 系合金と Cu 系合金の 2 種類が実用化されているが、アクチュエータへの応用は、形状回復力が強く、回復限界変形（歪）量が大きく、耐食性・耐久性にも優れている Ni-Ti 系合金が主である。また一般的に、アクチュエータに使われる SMA の形態は線材、板材等のバルクであるが、近年、マイクロアクチュエータの研究が活発になり、薄膜の研究も行われている。バルクと薄膜では、用途、作製プロセス、技術課題等基本的に異なるため、両者の形態に分け、以下に報告する。

[バルク形態]

バルクを使用した SMA アクチュエータの動作原理を Fig.1.2 に示す。SMA バネは変態点より低温域（材料学的にはマルテンサイト相）では、バイアスバネの力により左側に押されているが、変態点より高温域（オーステナイト相）では、SMA バネの復元力により右側に移動する。この変態点

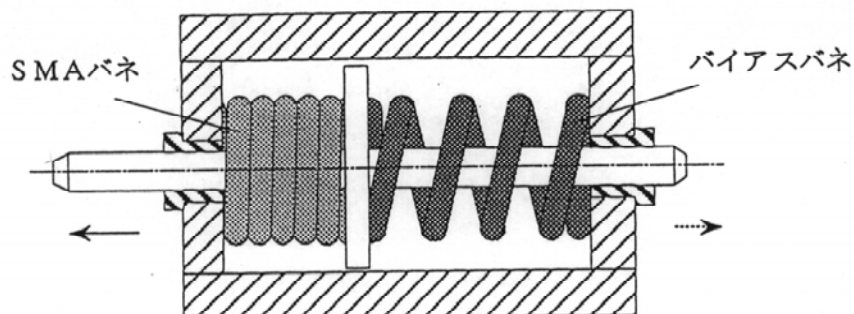


Fig.1.2 SMA アクチュエータの動作原理

を境界とした温度変化を与えることによりSMAバネは2方向の動作を行うことができる。またパイアスバネにSMAを用いて、左右逆の温度サイクルを与えることにより、2方向の動作を可能としたSMAアクチュエータの研究例も多い。このような研究は1980年代の前半から報告されており、主な課題は、信頼性及び寿命の向上、制御性の向上、応答速度の向上等である。信頼性及び寿命の向上では、先ずSMAの基本特性を把握する必要があるため、繰り返し動作によるSMAの疲労特性[57,58,59]や繰り返し特性(回復限界歪等)に及ぼす熱処理条件の影響[60]等に関する研究が行われている。また、50万回の作動テストでも劣化しないNi-Ti系SMA材料の報告もある[61]。制御性の向上では、変位量を検出し加熱電流パルス幅を制御量とした入力電流パルス幅変調制御(PWM)方式[62,63]、最近ではファジイ理論を用いた制御方式[64]、電気抵抗値を加熱電流パルス幅にフィードバックする制御方式[65]、アクチュエータ先端位置を制御する事によって全体の制御を行う”顔面方位制御方式”[66]等が研究されている。応答速度の向上では、加熱後の冷却速度を速める必要があり、様々な冷却方法が提案されている。一般的な冷却方法としては、自然冷却や空気流を用いた強制冷却[63]があるが、ヒートシンクを用いた冷却[67](自然冷却の30倍の応答速度が得られている)、ペルチェ効果を用いたサーモジュールによる冷却[68](空気流を用いた強制冷却の場合の風速10m/sに相当する効果が得られている)、ヒートパイプによる冷却[69]、液体を用いた強制冷却[60]等の研究がある。その他の研究課題としては、SMAコイルバネの設計方法[70]、アクチュエータの利用効率を向上させるための最適構造に関する研究[65,71]等がある。

応用研究の報告例として、次のような試作研究が報告されている。マニピュレータでは、アーム長1050mm、重量3.2kgで10⁵Nを出力するものが試作されている[72]。グリッパでは、クリーンルーム内で半導体チップをハンドリングするため数gfの微小な力をSMAの特性を利用してセンシングするミニチュアクリーニンググリッパが試作されている[73]。能動内視鏡では、遠隔操作によりS状結腸モデルの中にスムーズに侵入できる大腸用の能動内視鏡が試作されている[60]他、2~3の報告例[74,75]がある。その他、サブミクロンの位置精度を持つX-Yステージ[76]や、最大出力0.09W/gの回転エンジン[77]等がある。

[薄膜形態]

SMAの成膜方法としての報告例は、主としてスパッタ法、急凝固法等がある。スパッタ法は1980年代前半から研究が始まり、1990年以降マイクロアクチュエータに利用する目的の研究が増えている。アクチュエータに利用する場合、発生力を維持するためには5~10 μ m程度の膜厚が必要であり、成膜速度が問題となる。成膜速度約60nm/minで膜厚約15 μ mのNi-Ti膜を作製し、SMA特性を測定した例が報告されている[78]。具体的作製条件では、成膜中基板を加熱しない場合、膜組織はアモルファスであり形状記憶特性を持たないため、熱処理(500以上)による結晶化が必要である[79]。また、成膜されたSMA膜の組成は、ターゲット(Ni-Ti合金)の組成に比べNi過剰になる傾向がある[80]。急凝固法は1980年代中頃から研究が始められたが、近年においてはその報告例は少ない。急凝固法では、厚さ数十 μ m程度の膜が作製可能で、バルクに比べ変

態特性がシャープで変態歪も大きくなる事が報告されている[81]。その他の成膜方法として、真空蒸着法[82]、イオンプレーティング法[83]、レーザアブレーション法等が研究されているが、報告例は少ない。

応用研究の報告例として、次のような試作研究が報告されている。マイクロバルブでは、厚さ約 $10\ \mu\text{m}$ のNi-Ti系SMA膜を通電加熱により開閉させた報告がある[84]。断面構造をFig.1.3に示す。尚、このバルブで応答速度20msecが得られている。

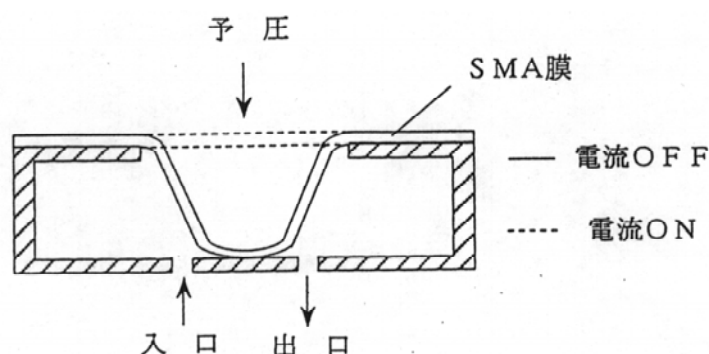


Fig.1.3 SMA膜を用いたマイクロバルブの原理[84]

熱膨張型アクチュエータ

熱膨張型アクチュエータとしては、光エネルギーによる流体の熱膨張を利用するもの（光 - 熱変換）とカンチレバー等の熱振動を利用するものに大別できる。前者のタイプでは、サイズが μm オーダーのアクチュエータも試作されている。これは片側にダイヤフラムを有するSiのマイクロセル内に作動流体と熱変換物質を封入したもので、この光熱変換物質に光を照射し、流体の加熱・気化、冷却・液化現象に伴う流体の熱膨張、収縮力によりダイヤフラムを作動させる原理である。作動流体としてはフロン113を、光熱変換物質としてはカーボンファイバを用いている。ダイヤフラムの変位は約 $35\ \mu\text{m}$ で、約74kPaの圧力に耐え、5 kHzまで応答すると報告されている[85]。応用としては、並列に配置し、腸の蠕動運動の様に順に動かす事により微量の流体を輸送する事が提案されている。また、前記原理と同様であるが、光信号を流体の圧力差として直接変換する目的（航空機等、電磁ノイズの影響を受け易い場所で電子素子の代替品として使用する）に応用した研究も報告されている[86]。レーザ光で加熱された作動流体の熱膨張を利用したレーザピストンも、これらの方式に準ずるものであるが、構造的に比較的単純であり、細径化に適するという特長がある。

後者のタイプでは、カンチレバー等に光を照射し、照射部の表面と内部の熱膨張差により発生する振動をセンサに応用する研究例が報告されている[87 ~ 89]が、技術的にはアクチュエータへの応用も可能であると考えられる。

その他の光駆動アクチュエータ

上記以外の光アクチュエータとしては、レーザ光による光圧力を利用したものや光応答性高分子ゲルを利用したものがある。レーザ光による光圧力を利用したものには、微小粒子にレーザ光を直接照射することにより、その微小粒子の捕捉、転送、回転、選別などを行うアクチュエーション法である。この原理は以下のようなものである。光は質量を持たないが運動量を持っているので、物体表面において反射や屈折等により光の進行方向が変化すると、光の運動量ベクトルが変化し、物体にはその変化量に応じた力（光圧力）が働く。この原理を用いて、波長830nmの半導体レーザ光により直径10 μm のポリスチレンラテックス球を水中で捕捉したという研究例が報告されている[90]。また、YAGレーザを用いて赤血球の回転操作を行ったり[90]、6 μm のイースト菌を16 $\mu\text{m/s}$ の速度で移動させたという報告[91]もある。

光応答性高分子ゲル（光を照射する事により伸縮する高分子ゲル）を用いたアクチュエータの研究では以下の材料について、次のような報告がなされている[92, 93]。

- 1) アゾベンゼンあるいはスピロピランを架橋剤とするポリアクリル酸エチル、ポリアミド、及びポリキノリン
- 2) アゾベンゼン基を共有結合で含む PHEMA(2-ヒドロキシエチルメタクリレート)ゲル
- 3) トリフェニルメタンのロイコ誘導体を含むポリアクリルアミドゲル

1)の光照射による変形量は0.3%以下、2)のそれは2%以下と小さいが、3)のロイコ誘導体としてロイコヒドロキシドを3.1%含むゲルは、光照射により重量が約3倍増加し、光照射を止めると元の重量に回復する。またロイコ誘導体としてロイコアニドを含むゲルは、光照射により重量が15~20倍に増大し、寸法は約2倍になる。このゲルは伸縮するのみならず屈曲運動もするので、光照射をゲルの片側だけに限定すると屈曲し、光照射を止めると元の形状に回復する。さらに、このゲルは光と電場を同時に与えると電極の極性に応じて屈曲変形する。この時の変形速度は速く、塩化カルシウム存在下で10V/cmの電場を印加すると2cmの棒状ゲルが1秒以内に屈曲する。また交番電場を印加すれば振動する。これら光応答性高分子ゲルの応用としては、光駆動分子バルブが考えられている。

1.1.3 高密度レーザエネルギー伝送ファイバ

既述の各種光アクチュエータを駆動するには、高出力の光源から光をアクチュエータ部まで伝送する必要がある。これには高出力でも光ファイバ入射、出射端面が破壊されないこと、伝送中での光損失が小さいことが要求される。そこで高密度にエネルギーが伝送可能なファイバを開発する必要がある。

レーザファイバ

ファイバによる高密度レーザ伝送の報告は、高出力のレーザであるエキシマ，YAG，CO，CO₂ に対しての報告が多い。以下にレーザ別に現状レベルについてまとめる。

エキシマレーザ用の伝送系としては、紫外域まで比較的良い透過性がある石英系光ファイバが主に使用されている。石英系光ファイバの限界パワ密度について調査した結果を Table 1.3 [94～96]に示す。エキシマレーザの場合、パルス幅が短く、光の尖頭値が高いことから伝送パワの限界が決まっている。この改善として、ロングパルスの開発が進められ、パルス幅200ns (XeCl：波長308nm) のレーザが開発されている[97]。また、ファイバ側からの検討としては、紫外光伝送にOH基の含有量が依存しており、200ppm以上のOH量が必要であるという報告がある[98]。ファイバ以外での伝送路の検討として、アルミ薄板製の中空導波路により、エキシマレーザ(KrF, XeCl)の伝送実験を行い、入射ピークパワで900kWまで伝送可能とした報告もある[99]。

Table 1.3 エキシマレーザのファイバ伝送パワ耐力

レーザ種	波長 (nm)	ファイバー入射パワ耐力 (MW/cm ²)
ArF	193	1
KrF	248	220
XeCl	308	1000

YAGレーザの高密度レーザエネルギー伝送として、通信用のファイバを使用し検討している[100]。結果を Table 1.4 に示す。この報告ではコア径10 μmのファイバで10⁹W/cm²以上の伝送が可能としているが、ファイバとの結合効率から見るとコア径以下にレーザ光を集光できておらず、実用的な伝送とは思えない。工業用加工機に使用されている大口径ファイバの現状は、レーザの集光特性からコア径400 μm以上のファイバが使用されている。伝送率は通常90%以上である。伝送特

Table 1.4 YAGレーザの入射効率と入射光エネルギー密度

光ファイバーの種類	入射効率	最大入射光エネルギー密度 (W/cm ²)
10/125 SI型	0.07	>1.3 × 10 ⁹
80/125 SI型	0.81	>2.8 × 10 ⁹
50/125 GI型	0.64	3.1 × 10 ⁸
80/125 GI型	0.81	2.2 × 10 ⁸
200/250 GI型	0.90	>6.5 × 10 ⁷

性はCW発振のレーザでは600W、パルスレーザではGeドープコアのGI型で $5 \times 10^6 \text{W}/\text{mm}^2$ 、石英コアのSI型で $10^6 \text{W}/\text{mm}^2$ である[101]。

中赤外レーザであるCOレーザ(5 μm 帯)では、吸収帯の問題より石英系ファイバは使用できないが、カルコゲナイドガラス(As_2S_3)ファイバで伝送できる。このファイバの許容伝送パワーは、ファイバの組成上、石英系に比べ劣るが、入射端面で $57 \text{kW}/\text{cm}^2$ 、出射端で $28 \text{kW}/\text{cm}^2$ 以上である[102]。

CO₂レーザの導光には、レーザメスにも見られる多関節ミラを使用した空間伝送が中心であるが、ファイバや導波管による検討も進められている。カルコゲナイドガラスファイバによる伝送では、GeSeTe/GeAsSeTe系(コア径360 μm 、クラッド径450 μm)ファイバの両端にMgF₂の無反射コーティングを施したもので、伝送効率67.7%(1m)、出射パワー13.2Wが得られている[103]。AgCl/Ag/Br系ファイバでは、コア径0.3mmのファイバで入力90W、出力65W(パワー密度 $90 \text{kW}/\text{cm}^2$)の伝送が可能である[104]。また、エキシマレーザと同様に中空導波管による伝送の検討も進められている[105~107]。

レーザ発振器とファイバの結合技術

大出力レーザとファイバを高効率で結合する技術は、レーザの発振モード及びビームの拡がり角により左右されるため、技術的な発表は少ない。このような状況の中で、ビーム拡がり角のあるレーザ光の高効率結合の報告[108]がある。これはレーザ発振器と集光レンズ間に長焦点レンズを入れることで実質的にビーム拡がり角を改善する方式である。

半導体レーザと通信用シングルモードファイバの高効率結合は、システム運用において重要な問題であり、検討が盛んに行われている。方式としては、ファイバ先端に直接マイクロレンズを作りつけ、高効率結合を実現するものである。加工方式としては、CO₂レーザによるレーザ微細加工[109]やエッチング[110]である。また、アライメント公差を大きくする方式として、単一モード

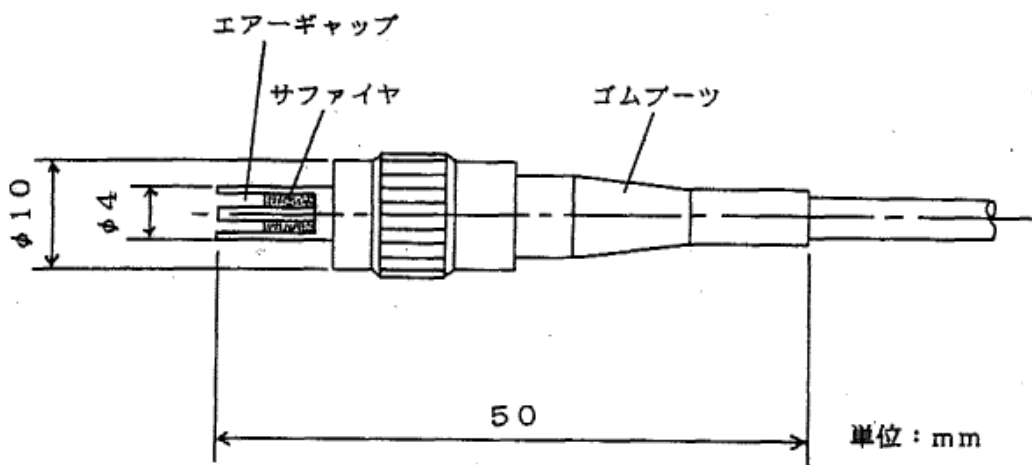


Fig.1.4 レーザ伝送用コネクタの構造

ファイバの入射端をアップテーパ化することで、アライメント公差を通常の20倍から1000倍に改善している[111]。

レーザとファイバの結合において、コネクタ構造も重要なファクタである。通常使用されているFCコネクタで、大出力レーザの伝送を行うと、ファイバを固定している接着剤に光が吸収され、熱損傷を起こしてしまう。これを解決する構造として、Fig.1.4 に示したコネクタが開発され、商用化されている[112]。このコネクタの特長は、フェルルール内のファイバをエアギャップとし、ファイバを固定するスリーブにはサファイヤ製のフェルルールを使用し、耐熱性を上げ、高出力レーザの伝送を可能にしている。

1.1.4 ファイバスコープによる視覚機能

内視機能において得られる情報は、2次元の画像情報のみである。狭隘部において微少な立体構造物を内視・認識する機能としてはこれのみでは不十分で、多機能化・高機能化のために立体視、顕微観察及び寸法計測等の要素技術の研究・開発が必要不可欠である。

立体視技術

立体視の方式は、基本的に2眼方式が主流である。初めは、2眼のアイピースを直接左右の目で見えるものであった[113]。その後 Fig.1.5 に示した様に、モニター上に左右の画像を交互に写し、これと同期を取る形で、目の前の遮光フィルターをON/OFFする。これで、頭の中で立体像を合成するものになった[114,115]。2眼立体方式のその他の検討では、対物部において視差(パララックス, 2眼スコープの間隔)を変化させる機構の検討も多く行われている[116,117]。

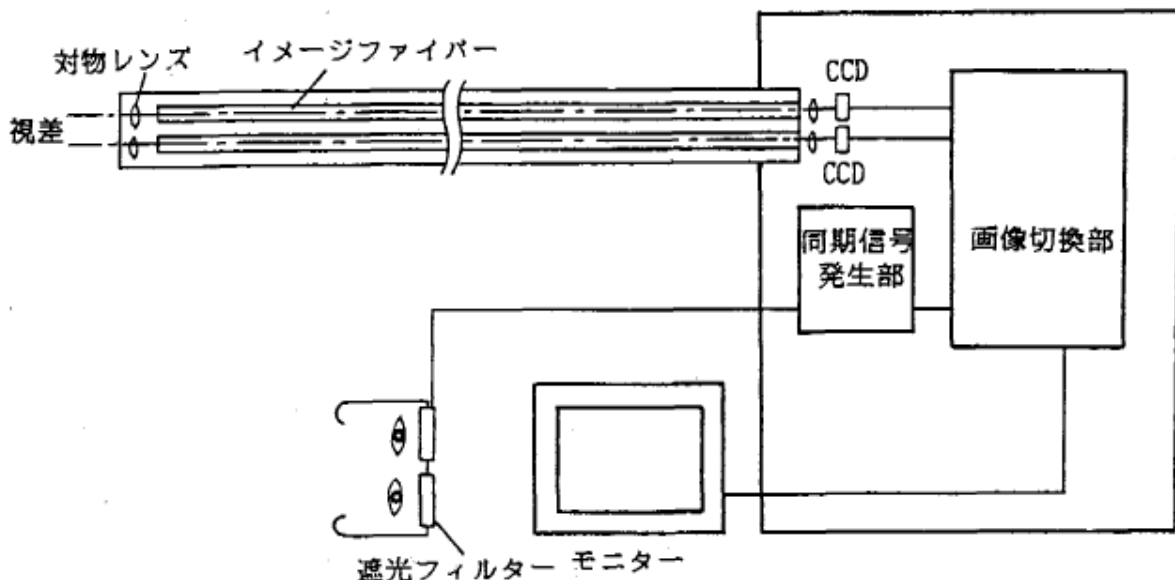


Fig.1.5 2眼方式の基本構成

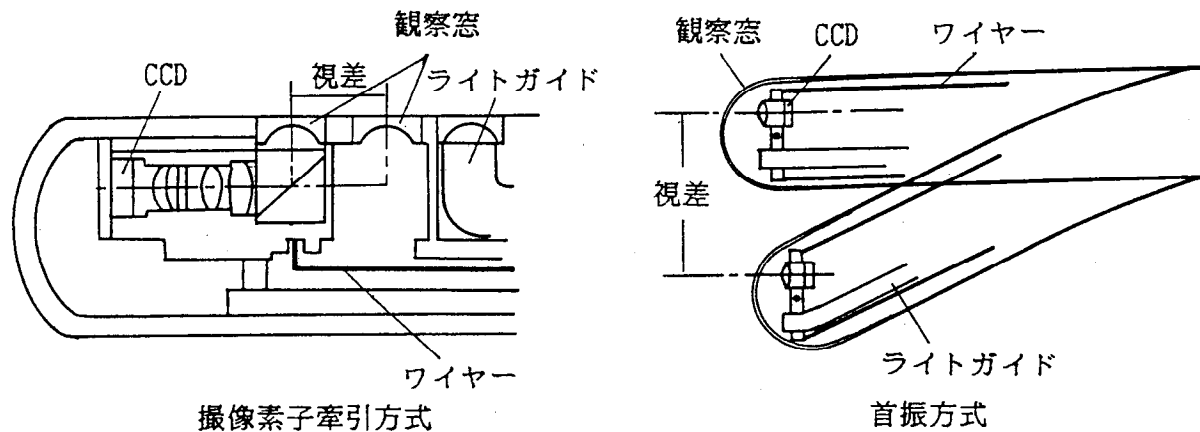


Fig.1.6 1眼立体視方式の構成

1本の内視スコープで観察窓の位置を変え、視差を得る検討も行われている。(Fig.1.6) [118,119]。2眼方式以外の検討としては、ホログラフィを利用したものがある。これは内視鏡にシングルモードファイバを仕込み、この光でDenisyukホログラムを記録するものであるが、まだ実験段階である[120]。

顕微観察技術

顕微観察の検討は、現状のファイバスコープでは画素径が4 μm 以上あることから、分解能を上げることが難しく詳細に検討された記録は少ない。医療分野において、硬性鏡(外径3~4mm)を用い、14inchブラウン管上で145倍にし、10 μm の対象が分割出来るものの開発が行われている[121]。

寸法計測技術

寸法計測において一番単純な方式は、内視鏡先端よりスケールを出し、対象物に接触させ、目盛りを読むものである[122~124]。光学方式では、種々の方式の検討が行われている。内視鏡先端より平行な光を2本出し、その一方を移動させ、その移動量を手元側で測定する方式がある[125]。また別の方式で内視鏡観察用照明とは別に、視差を持って配置した照明を設け、内視先端より対象物が遠ざかるほど、内視観察視野内に視差を持った照明の占める割合が増えることを利用し、内視鏡先端から観察位置までの距離を測定可能としている[126]レーザの回折パターンを利用し、パターンの歪より凹凸を認識し、さらに回折パターン上の任意の点を指定し、この座標を計算し、距離、大きさ等を求める方式も検討されている[127,128]。立体視スコープにおいて、この視差を利用し、左右2画面上の同一対象位置を指定することで演算処理を行い、内視鏡先端からの距離測定する方式も検討されている[129]。

1.2 従来技術の問題点・課題と解決方法

要素デバイスの小型化、マイクロシステムへの集積化に対して必要となる課題・問題点及びその解決方法を以下にまとめる。

1.2.1 光ファイバセンシング

物理量センサ

1) Si 微細加工技術

プローブを小型化、高集積化する上で、基本となる技術である。この技術課題を解決するためには高度なウェットエッチング及びドライエッチング技術の開発、さらにシリコンダイヤフラム、カンチレバー作製のため、高品質の薄膜形成技術の開発が必要である。

2) 非シリコン系材料の応用技術

センサ材料の種類を拡大し、構造や加工技術に汎用性を持たせるため検討すべき技術である。先ず化合物半導体の応用、例えばGaAsやAlGaAsが考えられるが、シリコン系との相異点は光源を集積化できることであり、非常に有利である。さらに圧電・光歪材料であるPLZTや形状記憶合金を応用することにより微小能動光学部品を構成することも可能である。

3) 組立技術

トランスデューサの作製及びトランスデューサと光ファイバの接合のため必要となる技術である。シリコン同士やシリコンとガラス等の接合には、陽極接合法の応用が期待できる。また、光ファイバと微小部品との組立には、適切な接着剤(例えばUV樹脂)の検討も必要となる。また各々の部品を高精度にアライメントする技術も重要なポイントとなる。

4) 光源技術

従来のHe-NeレーザやArイオンレーザではシステムが大型化するため小型化の観点から必要な技術である。例えば小型レーザ(例えば半導体レーザ)の開発やLEDの応用が有望である。

化学量センサ

1) 検出方式の開発

センシング対象に対し最適な検出方式を選定し、センサの仕様を決定する上で重要である。現状ではpHセンシングに対しては、蛍光反応及び変色反応、グルコース等のセンシングに対しては、光吸収反応の応用が有望であると考えられる。

2) 感応膜作製技術

オプトロード型センサの場合、トランスデューサを担持する役割を感応膜が担うため重要な技術である。具体的には、試薬室を作り、半透膜を介して被測定物と接触させる方式や無機膜(例えば誘電体膜)や有機膜(例えばクラウンエーテル)の利用が考えられるが、膜の種類により試薬が限定されるため、使用する試薬を念頭に置いて選定する必要がある。更に選定した感応膜は、光

ファイバの先端もしくは中間に形成する必要があり、ゾル - ゲル法 , 単分子累積膜法 , スピンコート法 , p (プラズマ) - CVD 等の成膜方法の応用が有望である。

3) 試薬の開発

試薬はセンサの感度 , 精度を大きく左右するため重要である。そのためには、化学反応の解明に基づく実証研究が必要である。現状では、色素 , 蛍光物質 , 微生物等が候補として考えられるが、先の感応膜への固定化の問題も踏まえて充分検討する必要がある。

1 . 2 . 2 光アクチュエータ

SMA アクチュエータ

[バルク形態]

1) 微細加工・組立技術の確立

SMA バルク材 (線材 , 板材等) 特 に Ni - Ti 合金材の材料加工技術はほぼ確立されているが、マイクロ化に伴う微細加工・組立技術は今後の課題である。10 μ m オーダーのマイクロ加工 (切削 , 穴あけ等) では、放電加工 , レーザ加工等が適用できると考えられるが、更にマイクロ化をねらう場合は新規加工技術の開発が必要である。また、SMA の変位量を大きくするためには、コイル形態が有利であるが、現状ではコイル外径 1 mm 程度のコイルリングが限界である。従って、 μ m レベルのデバイスに組み込むためには、マイクロコイルリング技術の開発が必要である。

2) 発生力・変位量の向上

SMA 材料の発生力及び変位量は、マイクロ化に伴い必然的に減少するが、アクチュエータとして十分な仕事をさせるためには、これらの向上を目的とした研究が必要である。その手段としては、Ni - Ti 合金等への他元素添加、最適組成の検討等、材料学的基礎研究が考えられる。

3) 変態温度の制御技術の確立

SMA 材料の変位や力の発生は、相変態に伴う現象であり、材料作製プロセスにおける変態温度の制御技術が課題となる。Ni - Ti 系 SMA の変態温度は通常 -10 ~ 100 であるが、組成や熱処理温度・時間に大きく影響されるため、組成制御や熱処理条件 (温度 , 時間 , 雰囲気) の最適化を図る事が必要である。

4) 位置制御技術の確立

SMA の変位に伴う位置を制御する技術は、このタイプのアクチュエータの基本技術であり、通常変態温度近傍で変化する電気抵抗 - 温度特性を利用し、抵抗値を制御量としている。しかし、光・熱変換型では今後の課題であり、フィードバック制御の確立、さらにはフィードフォワード制御の研究が必要となる。

5) 機構・構造最適化の検討

マイクロ理工学を考慮した機構・構造の検討が必要である。SMA と他の要素との複合材 , 例えば

SMA + Si , SMA + 高弾性材料 , SMA + 光歪材料等の組合せが有望であると考えられる。また通常 SMA の動作は一方向性であるので、多方向性を付与するため多数の SMA 部品やバイアスバネを利用する機構が提案されているが、これらのマイクロ化の検討には、CAD/CAE による設計 , シミュレーション解析等を用いて、技術的問題点の発見・解決を図ることが必要である。

6) 光・熱変換効率の向上

光ファイバによるエネルギー供給を考えた場合、光ファイバの高エネルギー伝送密度の特長を生かすためには、光・熱変換効率の向上が課題である。そのためには、高効率の熱変換材料や高熱伝導性材料の開発、更には光源、媒体等の光応用技術の検討を行う必要がある。

7) 冷却技術の確立

冷却技術は SMA の応答性向上及び温度制御の観点から重要である。応答性向上のためには、マイクロアクチュエータを構成する部品の熱伝導解析がまず必要であり、更に強制冷却等の機構の検討が必要である。

[薄膜形態]

1) 成膜プロセスの確立

SMA 膜の研究は浅く、最適成膜プロセスは確立されていないのが現状である。従って、マイクロアクチュエータに適用する場合、重要な課題である。成膜方法として現時点で有望視されているのはスパッタ法であるが、成膜条件さらには使用するターゲット等の検討を充分行う必要がある。

2) 合金組成の制御技術の確立

Ni-Ti 系 SMA 等の組成比は SMA 特性に大きな影響を与えるため、組成制御技術が重要となる。例えばスパッタ法では、ターゲットの組成比と作製された膜の組成比が異なるため、その組成合わせが必要であり、更に膜組成と変態温度の関係は、バルクのそれとは異なるので、それらの相関を調査する事も必要である。

3) 結晶化のための熱処理技術の確立

スパッタ法等で作製した膜は一般的にアモルファスであり、加熱による結晶化が必要である。熱処理技術では、温度、時間、雰囲気等の最適化が先ず必要となるが、半導体プロセスの適用を考える場合 500 程度以下の低温結晶化、成膜・熱処理の連続化、残留応力の検討等も必要である。

4) 薄膜の微細加工技術の確立

薄膜アクチュエータの作製では、半導体プロセスとの融合が考えられ、バッチ処理プロセスや犠牲層による三次元構造製作技術等の微細加工技術が必要となる。また、放電加工やレーザ加工等との併用も考えられる。

熱膨張型アクチュエータ

1) 光吸収性流体の研究

作動流体として液体を使用する場合は、使用するレーザ波長で、光吸収効率が高く、熱膨張係数が大きい事が必要となる。また、気体を使用する場合も含み安全性の高い流体である事が重要である。

2) 気密構造の検討

作動流体の加熱 - 冷却サイクルは閉ループであることが必要であり、流体容器の気密性が要求される。従って、アクチュエータの構造の検討は重要な課題である。

3) 熱伝導，摩擦等マイクロ理工学の解明

マイクロ化に伴い、使用環境の熱的影響が大きくなり、作動性や制御性が問題となる。また、レーザピストンでは、摺動部を有するため摩擦が問題となる。これらの問題点を解決するためには、マイクロ理工学の解明が重要な課題である。

1.2.3 高密度レーザエネルギー伝送ファイバ

1) ファイバの耐パワー特性改良

コア中の不純物が核となってファイバが破壊されるため、母材のコアに添加する不純物元素及びその添加量を最適化することが重要である。

2) 小コアサイズファイバへの高効率結合

マイクロレンズ等のバルクデバイスやテーパファイバ等のファイバデバイスによる結合光学系の開発が重要な課題である。

3) 高効率伝送に適するファイバ構造の検討

光ファイバ伝送中の損失を低減させるために、コア及びクラッドの屈折率プロファイルの最適化及び母材構造の最適化が重要な課題である。

4) 小サイズ，ハイパワー用コネクタの開発

コネクタ部分にて漏洩する光パワーにより、ファイバ端面が汚染・焼損されるので、接続部分の断熱・耐熱材料（サファイヤ等）の開発およびコネクタ構造を最適化することが重要である。

5) 薄肉・耐熱コートファイバの検討

細径化のため被覆層の薄肉化と、漏洩光・反射光による被覆層の加熱に対する耐性を向上するため、被覆樹脂の選定（難燃剤）及び押し出し技術の開発が重要な課題である。

1.2.4 ファイバ스코ープによる視覚機能

立体視技術

1) 細径2眼方式の開発

限られたスペースに2本のイメージガイドファイバを収納し、さらに自然な立体感が得られるように、画素数・画素径・外径等のイメージガイドファイバの最適化及び立体視機構の開発が重要な

課題である。

2) 信号処理（モニター，接眼フィルター間）の開発

出来るだけ簡単なシステムで、疲れのない自然な立体感が得られるような、立体視ディスプレイ（液晶シャッタ方式、偏光方式、色フィルタ方式）の開発が重要である。

3) 視差変化方式（光駆動アクチュエータによる）開発

観察対象に応じて変化させ、観察環境や作業環境に合致した両眼視差を得るために、細径という制限下での視差可変機構の設計及び最適なアクチュエータの開発が重要な課題である。

顕微観察技術

1) コンタクトスコープの開発

拡大観察時の分解能を向上させるため、特に画素径・画素間隔に留意した分解能の高いイメージガイドファイバの開発が重要な課題である。

2) 接触検知方法の開発

コンタクトスコープが被観察対象に接触したことを検知し、コンタクトスコープの押し込み力を制御するための光ファイバ触覚センサの開発と接触検知分解能の向上が重要である。

寸法計測技術

1) コンタクトスコープの開発

寸法計測・形状計測の分解能を向上させるため、特に画素径・画素間隔に留意した分解能の高いイメージガイドファイバの開発が重要な課題である。

2) 精密ステージ設計及び計測演算方法の開発

コンタクトスコープで得られた画像から、距離・形状等を把握するための計測方法・演算方法（例えば円形計測対象物の円周・中心・半径の検出）の開発が重要である。

1.3 マイクロシステムの基本設計

高機能・多機能なマイクロシステムを実現し、これを広く応用に供する為には、その応用分野より要求される機能を十分に考察し、それらの実現を盛り込んで全体の設計を行う必要がある。十分な考察なしに単に要素技術の向上・集積のみを目的としていては、真に高機能・多機能で有用なデバイスの実現できない。そこで本マイクロシステムが主に応用されると考えられる医療分野からと産業分野からの要求を解析し、これらに応えた性能を有するように基本設計の考察を行った。このように基本設計を明らかにすることにより、適用を避けなければならないもの、技術の深堀がさら

に必要なものが浮かび上がり、効率的かつ真に有用な研究の実施が可能となる。

1.3.1 医療分野

能動カテーテルは経皮的に体内に進入し、観察・薬剤注入・検査等に用いられる。これらの機能が向上するにつれ、従来開腹術で行われていた治療も、経皮的形成術により治療が可能となってきている。既に胆嚢摘出術では腹腔鏡下手術が主流となっている。これからも患者への負担が少なく回復も早い、このような低侵襲の内視鏡下手術の需要が増すものと考えられる。当然これらの低侵襲治療具の一つとして本マイクロシステムを応用することができる。使用する材料に関しては、生体適合性および安全性が要求される。またこれらを用いた手技から考えると、操作性および安全性が要求されることとなる。

これら両者から要求の高い安全性については、カテーテルの体内挿入時において誤って穿孔しないこと、電磁干渉の影響を受けないこと、誤動作の起きないシステム設計等が必要となる。トロアカールを通じて管状デバイスを挿入する場合は、手元感覚だけが頼りになりよって、デバイス先端の情報を得て屈曲部等でその状態に合わせた動作が可能で、さらに先端部で軟らかく手元部で固い剛性傾斜を持つデバイスが必要となる。前者については先端部にセンサ(画像・触覚)を装着することにより情報が得られ、この情報をフィードバックしてアクチュエータの動作を制御することにより実現される。後者については管状物材料(チューブ、編組)の長手方向に剛性を変化させることにより実現される。ここで注意すべきは、生体内に挿入されるカテーテルにこのような機能を付与する場合は、出来る限り電気的手段を用いないことである。そこで信号やエネルギー伝達を電気以外のもの(本研究の場合は「光」)を用いるべきである。また高度に発達した医療現場では、数多くの電気・電子機器が使用されており、電磁干渉の影響を排除するためにも、リード線の使用は避けるべきである。例えば、温度測定にサーミスタや熱電対を用いた場合は、リード線がアンテナの役割を果たしデータに雑音が重畳されたり、センサ部が発熱したりする危険が生じる。また実際の医療現場での使用を考えれば、簡単な操作で高度な手技が実現されるシステムが必要であり、出来るだけ複雑にならず操作性の良いコントロールユニットを考慮に入れる必要がある。

また外径制限の要求の強いカテーテルに対しては、その要求を満たすため画素数の少ないイメージガイドファイバを用いる必要がある。このため観察分解能が劣化するおそれがある。これを避けるためには、分解能を向上させる手段として顕微拡大観察を可能とすればよい。拡大観察可能とすることにより、同一観察面上で大きな画像を得ることにより、結果として分解能向上が果たされる。

1.3.2 産業応用

細い管路(例えば原子炉の熱交換器内)や構造が複雑で内部が直視出来ないような構造体(たと

例えば航空機のジェットエンジン内)に対して、視覚機構として従来から工業用ファイバ스코ープが使用されている。これは2.1で述べた医療用と違って厳しい外径制限や生体適合性は求められないが、逆に非常に厳しい環境下で用いられることが多いため、性能にも多くの要求が課せられている。まず厳しい環境として取り上げられるのが、放射線雰囲気下である。このような状況下では通常の撮像デバイスでは劣化が激しく使用できない。そのため画像取得の方法としては、イメージガイドファイバが有利である。但し通常のイメージガイドファイバではコアの屈折率を上げるための元素がドーピングされており、このドーパントの影響で劣化が進む。よってこのような環境下での応用を考慮に入れると、通常のイメージガイドファイバではなく特に高い耐放射線性を有するイメージガイドファイバを考慮に入れる必要がある。イメージガイドファイバのコアにドーピングを施さない純石英コアを用いたスコープは耐放射線性に富むことが知られている。純石英コアを用いたスコープでも高い放射線雰囲気下では劣化が速く進む。そこでより高い耐放射線性を有するスコープが望まれている。このため、コアに放射線劣化を修復するような作用をもつドーパントをドーピングして耐放射線性を高める必要があり、現在開発中のプラズマフッ素ドーパントによるイメージガイドファイバを用いるのが最適である。

また1.3.1と同様電磁干渉下での使用も多く、電磁干渉によるノイズの除去が必要である。さらに爆発雰囲気下・有毒ガス・強酸・強アルカリ雰囲気中での観察も要求されるので、これらに対応した信号・エネルギーの伝達方法が必要となる。よって従来のようにCCDカメラによる画像取得、リード線を有する電気的な駆動部位は不適であり、電磁干渉の影響を受けず耐環境性に優れる光ファイバの使用が最も好ましい。電気に代わって光でのセンシング、駆動を実現するためには、光ファイバセンサ技術、光駆動技術、高密度光エネルギー伝送技術の開発が必要不可欠となる。さらに産業応用される場合は前述のごとく外径制限が緩やかなため、若干太径になっても高機能化のため、ワーキングチャンネルを通して作業機構(グリッパ、カッタ、溶接機等)による作業を行うことも要求される。このような作業を行うためには、従来のファイバ스코ープの様な平面的な画像では作業対象物と作業工具との位置関係がはっきり把握できず、作業性能が著しく劣ることとなる。また作業対象物を効率よく確認するために、より視野の広い観察が求められる。そこでこれらの位置関係をはっきりさせるためには、立体的に観察が可能で広い視野を持つ観察機構が必要となる。立体観察には基本的には2本のイメージガイドファイバがあれば、左右眼の画像を取り込むことによって立体視が可能である。微細な構造体への作業を可能にするために立体感をより強くするような機構が必要となる。これは2本のイメージガイドファイバの視方向を変化することにより得られる。また広い視野を得るには、先端観察部分の方向を変えられる首振り機構により実現可能である。よってこのような動作を可能とする駆動機構の開発が必要となる。

1.3.3 基本設計指針

これまでの考察より、医療応用、産業応用の両面から要求される事項につき、これらを一つのマイクロシステムとして最大限取り込み、必要とされる性能を実現するための基本設計指針を Table 1.5 に示す。

Table 1.5 マイクロシステム（視覚機構）の基本設計指針

要求		機能	設計指針
医療応用	産業応用		
患部の的確な把握	作業性向上	立体観察	両眼立体視の立体能調整のための視差可変機構の開発・適用およびその光化
		顕微観察	コンタクトスコープ実現のための接触覚検知機能の開発・適用およびその光化
穿孔防止	広範囲な視野	先端首振り	高剛性管状体の屈曲機構実現のための形状記憶合金マイクロコイルの適用
穿孔防止 安全性 電磁干渉防止 細径化	防爆構造 電磁干渉防止	光ファイバセンシング 光駆動	歪ゲージ、電磁モータを用いない、新たな光センシング、光駆動技術の開発・適用
安全性	耐放射線性	ファイバ観察	CCD等の固体撮像素子を用いずファイバスコープによる観察を適用

1.4 本研究の目的

本研究では、光マイクロセンサ・マイクロアクチュエータを集積化し、その信号・駆動力供給を全光化したマイクロシステムの実現を目的に、以下の検討を行う。

光マイクロセンサでは極細径光ファイバ圧力センサを考案・試作し、その特性を評価し、さらに冠動脈用バルーンカテーテルに適用して十分実用に耐えうることを示す。また光ファイバ圧力センサを触覚測定に応用し、コンタクトスコープ、微動ステージを組み合わせることにより被観察物のサイズ測定も可能となる微細構造体の測定システムを提案する。

マイクロアクチュエータでは、バルーンを用いた光駆動アクチュエータの開発と立体視機構への応用を検討し、さらに広い観察領域をもつ視覚機構を得るために、スコープ先端に屈曲機構を構成することを検討することにより、安全で広範囲な立体観察が可能であることを示す。

またセンサ・アクチュエータ用ファイバに要求される諸特性を満足させる新規のファイバを検討し、その作製方法・光学特性とその応用・信頼性、応用可能性を評価する。

そして、これまでに得られた要素技術を集積化して、マイクロ視覚機構（環境認識デバイス）を考案・検討する。その信号・駆動力供給を全光化することにより、より細径で安全なシステムが実現され、産業用・医療用に広く応用可能であることを提案する。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、マイクロマシン技術の重要な要素技術である光ファイバセンシング、光アクチュエータ、高密度レーザエネルギー伝送ファイバ、ファイバスコープについて従来技術を述べ、さらに解決すべき重要技術課題を抽出することにより、研究の方向性を明確にし、応用・実用から要請される性能実現のために、基本的な全体設計の指針を示す。

第2章では、マイクロシステムのみならず極微小な領域(例えば血管内等)に適用することが可能な光ファイバ圧力センサを考案・試作し、その特性を評価することによりマイクロ領域への応用の可能性を評価する。さらに冠動脈用バルーンカテーテルに適用すべく更なる小型化を検討し、新規構造を考案・試作・評価することにより、考案した光ファイバ圧力センサが十分実用に耐えうることを示す。そして触覚センサとコンタクトスコープ、微動ステージを組み合わせることにより被観察物のサイズ測定も可能となる微細構造体の測定システムを提案する。

第3章では、非常に小さな部品や狭い領域を人間があたかも小さくなって、その場で観察しているような人工現実感をもつ視覚機構を実現すべくバルーンを用いた光駆動アクチュエータの開発と立体視機構への応用を検討し、実際に立体観察を行うことにより、その有用性を明らかにする。さらに広い観察領域をもつ視覚機構を得るために、スコープ先端に屈曲機構を構成することを検討する。駆動力を先端で発生させ首振りワイヤを引く方法、また厳しい環境下(例えば水中)での観察にも対応する光駆動方法を考案・試作・評価することにより、安全で広範囲な観察が可能であることを示す。

第4章では、これまで述べてきたセンサ・アクチュエータ用ファイバに要求される諸特性(曲げ損失が発生しないこと・広帯域光を伝搬できること・高NAでハイパワーの光源光を伝搬できること・広帯域光を伝搬できること等)を満足させるべく、新規のファイバ(フォトリソニック結晶ファイバ)を検討し、その作製方法・光学特性とその応用・信頼性、応用可能性を評価する。

第5章では、これまでに得られた要素技術を集積化して、マイクロ視覚機構(環境認識デバイス)を考案・検討する。環境認識デバイスは狭隘箇所において、物体の観察や検査等の視覚機能を満足し極細径であるがゆえ、マイクロファクトリ・発電施設メンテナンス・低侵襲手術・マイクロ外科手術等産業用・医療用に広く応用可能であることを提案する。

最後に第6章で本論文をまとめ、結論を述べる。

本論文の構成を Fig.1.7 に示す。

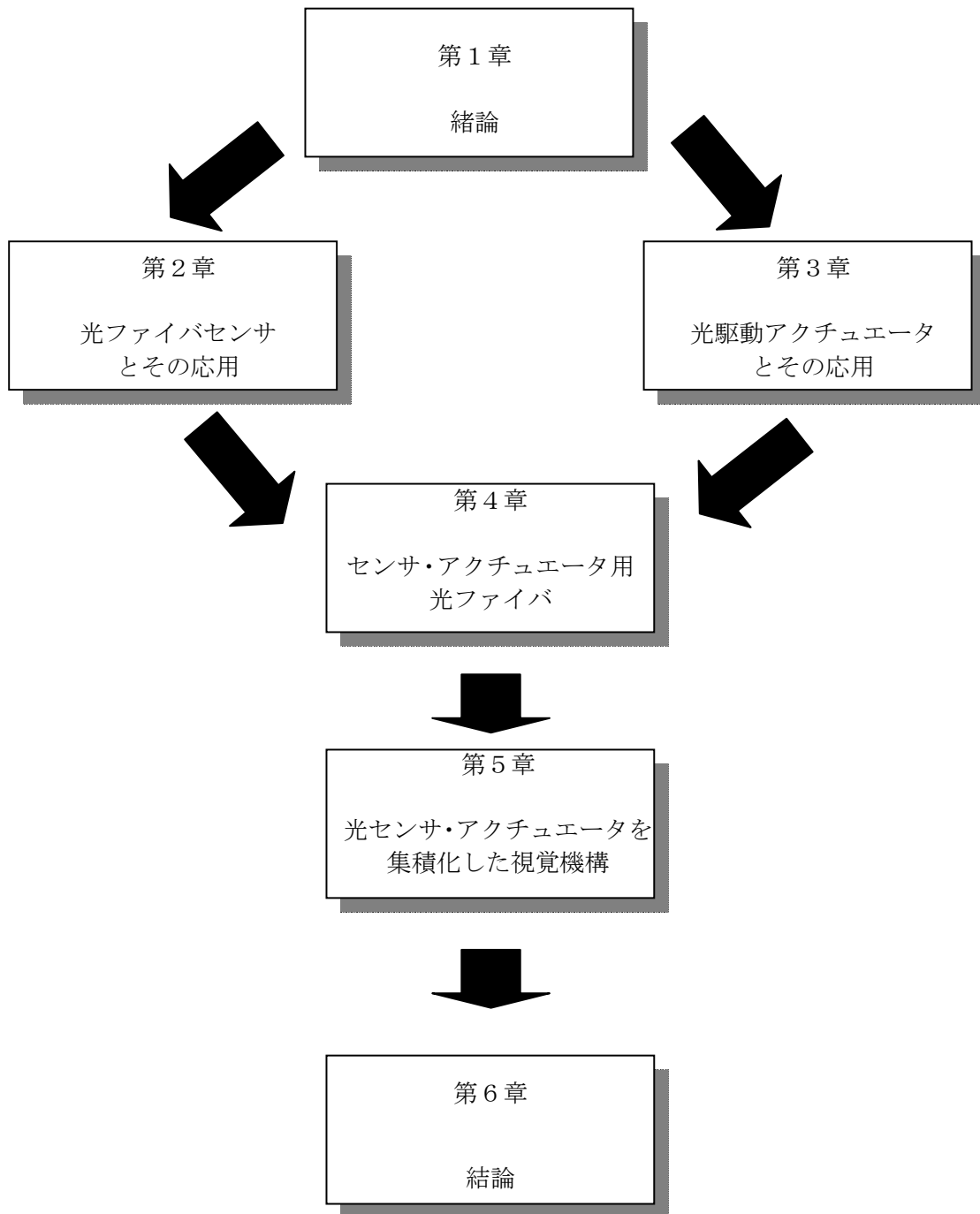


Fig.1.7 本論文の構成

第2章 光ファイバセンサとその応用

本章では、マイクロシステムのみならず極微小な領域(例えば血管内等)に適用することが可能な光ファイバ圧力センサを考案・試作し、その特性を評価することによりマイクロ領域への応用の可能性を評価する。さらに冠動脈用バルーンカテーテルに適用すべく更なる小型化を検討し、新規構造を考案・試作・評価することにより、考案した光ファイバ圧力センサが十分実用に耐えうることを示す。そして触覚センサとコンタクトスコープ、微動ステージを組み合わせることにより被観察物のサイズ測定も可能となる微細構造体の測定システムを提案する。

2.1 光ファイバ圧力センサ

微小な圧力センサとしては、半導体技術を基に感圧用のシリコンダイヤフラムと駆動、増幅、温度補償用の電子回路を一体化した集積化半導体圧力センサが実用化されている。しかし極微小な領域(例えば血管内等)に適用するには未だ大きい。そこでさらなる小型化を目指し、光ファイバ圧力センサを考案した。これは光ファイバの先端に圧カトランスデューサとして金属ダイヤフラムを設置し、その変位を基に圧力を検出するものである。ダイヤフラムはその中心が光ファイバの光軸と一致するようにシリコン基板上に配置される。この構造を実現するために、シリコン異方性エッチング、シリコン(ダイヤフラム構造体) - ガラス(ファイバストップ) - シリコン(アライメント構造体)の陽極接合、素子分離のためのダイシング技術が検討され、 $350\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ のマイクロ圧力センサを実現した。ダイヤフラムの変位を入力光に対する戻り光の強度変調方式により測定することにより、 $0.1 \sim 0.6\text{MPa}$ のレンジにおいて $0.19\ \mu\text{W}/\text{MPa}$ の平均感度を得た。これにより考案したセンサ構造の有効性が実証され、マイクロ領域への応用の可能性を明らかにした。

2.1.1 構造

圧力の測定原理を Fig.2.1 に示す。光ファイバ先端に装着された微小ダイヤフラムの圧力印加による変位を光の反射の変化で検出する。投光用ファイバから出射した光は固有のNA(Numerical Aperture:開口数)により定まる投光角で反射面に到達する。そこで反射された光は、やはりNAで定まる受光領域分のみが受光用ファイバに入射する。ここで Fig.2.1 のごとく反射面の距離(L)が変化した場合、受光用ファイバに入射する光(戻り光)の強度が変化する[130]。この光強度変調を利用して圧力を測定する。

このようなセンサにおいて重要なのは、測定圧力範囲でどの程度ダイヤフラムが変位するかである。ダイヤフラムのたわみ量はその材質と膜厚に依存し、印加圧力Pに対する4辺支持の長方形($a \times b$)ダイヤフラムの最大たわみwは式(2.1)で表される[131]。

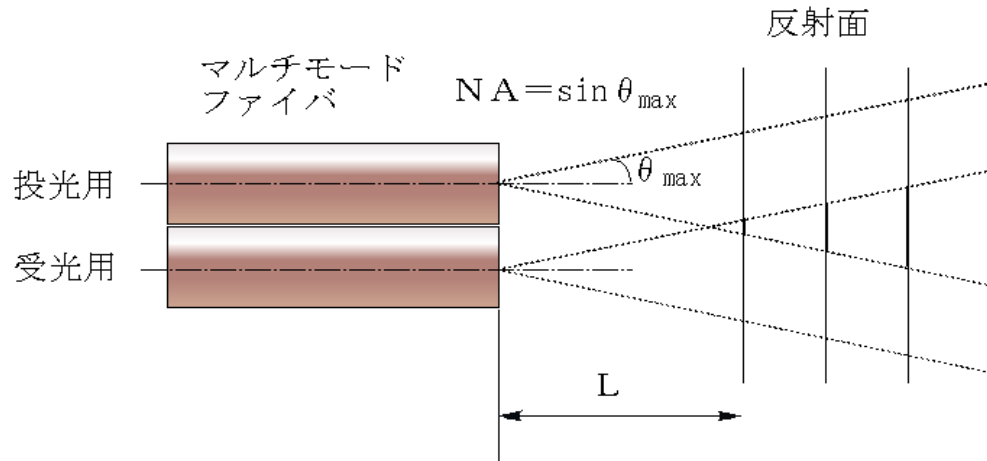


Fig.2.1 測定原理

$$P = \frac{\pi^6 E h^4}{256(1-\nu^2)} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \frac{w}{h} + \left\{ \frac{4\nu}{a^2 b^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \left(\frac{w}{h} \right)^3 \right] \quad \text{式(2.1)}$$

ここにE：ヤング率、 ν ：ポアソン比、h：膜厚、w：最大たわみである。またダイヤフラム材料をAuとしたときの印加圧力とたわみの関係を Fig.2.2 に示す。これにより所望の測定圧力範囲に対し、必要なダイヤフラム膜厚がわかる。本センサの適用を目指すホットバルーンカテーテルのバルーン内の圧力は、約0.8MPa まで上昇すると考えられる。上式および Fig.2.2 から、ダイヤフラムの材質をAu、測定圧力範囲を0.1～0.8MPa としたときのダイヤフラム膜厚を決定した。またダイヤフラムおよびアライメントストラクチャは、異方性ウェットエッチン

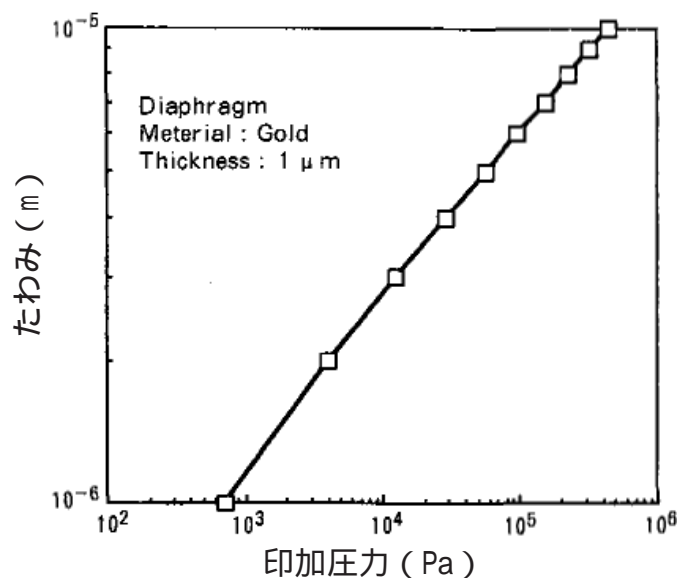


Fig.2.2 印加圧力とたわみの関係

グにより作製する。 Fig.2.3 に示すように、Siの異方性エッチングでは(100)面に対して 54.74° の傾きをもった(111)面が特異的に現われる。よって挿入するファイバ径と使用するSi基板の厚さに合わせて、エッチング開口を設定する必要がある。これらを考慮にいれて設計した光ファイバ圧力センサの基本構成を Fig.2.4 に示す。これはSi マイクロマシニングにより作製されるダイヤフラムとファイバ接続用のアライメントストラクチャ及び光ファイバ挿入時のストッパとなる透明基板よりなる。

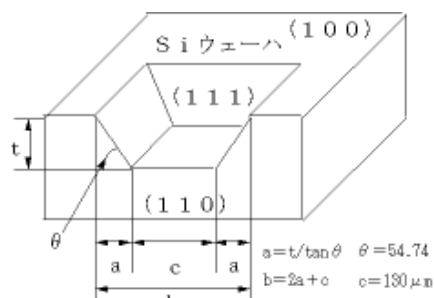


Fig.2.3 Si 異方性エッチング

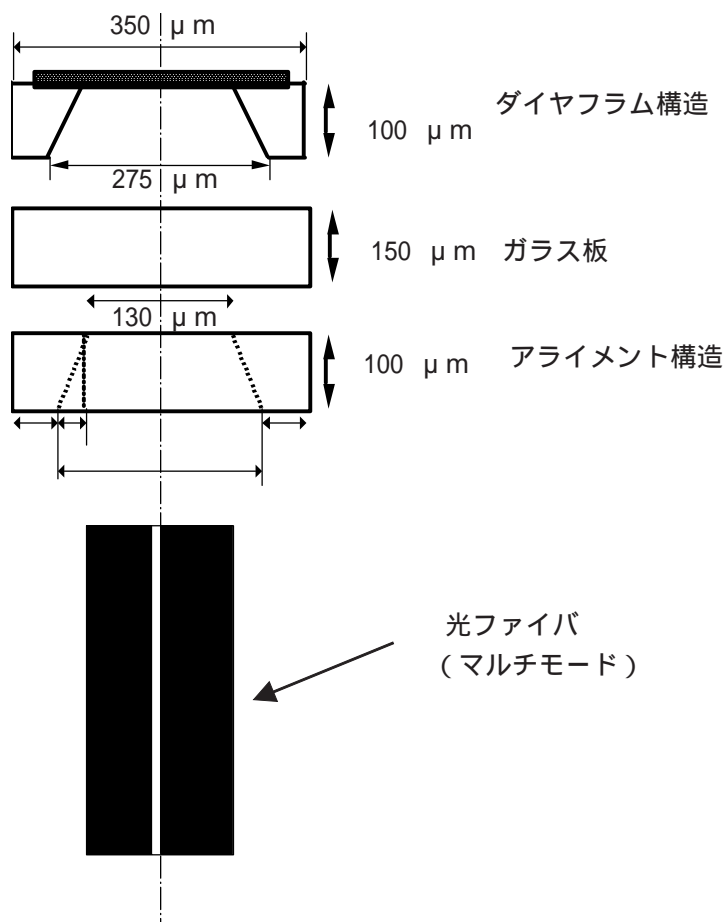


Fig.2.4 光ファイバ圧力センサの基本構成

2.1.2 シリコン微細加工技術

センサヘッドの微小部品を作製するためシリコン(Si)異方性エッチングに関する実験を行い、各種エッチャントに対するエッチングレートの基礎特性を把握し、マイクロセンサの微細構造作製技術への適用を検討した。

Si基板には(100) ,(110) ,(111)各面方位の単結晶ウェーハを用い、エッチャントとしてKOH(水酸化カリウム) , EDP(エチレンジアミン , ピロカテコール) , TEAH(水酸化テトラエチルアンモニウム) , TMAH(水酸化テトラメチルアンモニウム)[132]の4種類を使用した。実験条件をTable 2.1 に示す。評価項目は、エッチング深さ(エッチング前後のウェーハ厚を測定し、その差よりエッチング深さを求めた)及び表面粗さ(触針式表面粗さ計を用いてエッチング底面の表面粗さを測定)とした。

エッチングレートの結果を Fig.2.5 , 表面粗さの結果を Fig.2.6 に示す。各エッチャント毎の結果から、水酸化第4級アンモニウム(TEAH , TMAH)はエッチングレートは速い(約1 $\mu\text{m}/\text{min}$)がエッチング面の表面は荒れており((110)面で5 ~ 10 μm)、逆にKOH水溶液はエッチングレートは遅い(約0.2 ~ 0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$)が表面は平滑((110)面で2.2 μm)であり、EDP溶液はその中間であることが判る。

以上の知見からマイクロセンサの微細構造作製への適用を考えると、加工精度や異方性が特に重要なマイクロフィルタや光ファイバアライメント用V溝(光ファイバセンサには必要不可欠の部品)の加工にはKOH水溶液が、圧力センサ、加速度センサの基本となるダイヤフラム等、大きなエッチング量を要求されるものに対しては、水酸化第4級アンモニウムが適していることが判った。

Table 2.1 Si異方性エッチング条件

基板	Si (100) , (110) , (111) ウェーハ (40mm × 30mm)			
酸化膜	熱酸化 0.46 ~ 0.58 μm			
パターン	1250 μm 方形パターン			
エッチャント	KOH	EDP	TEAH	TMAH
	33.3wt%	エチレンジアミン (43.8mol%) ピロカテコール (4.2mol%) 水 (52mol%)	10wt%	10wt%
温度 ()	55	115	90	90
時間 (h)	7	2	2	2

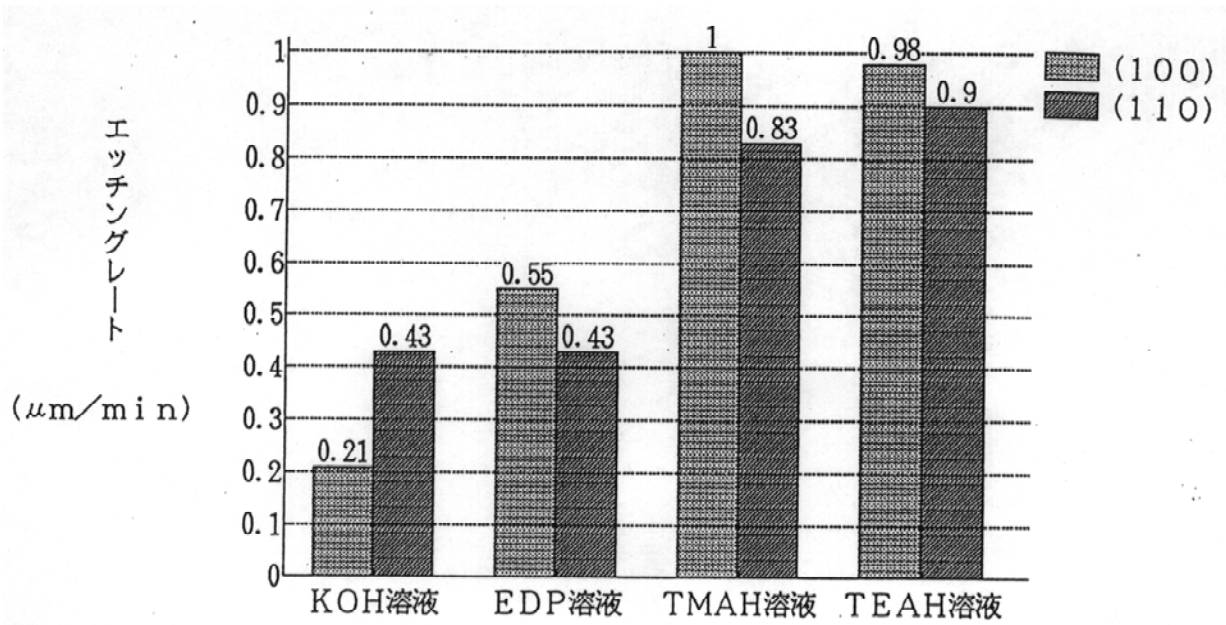


Fig.2.5 単結晶Siの各種エッチャントに対するエッチングレート

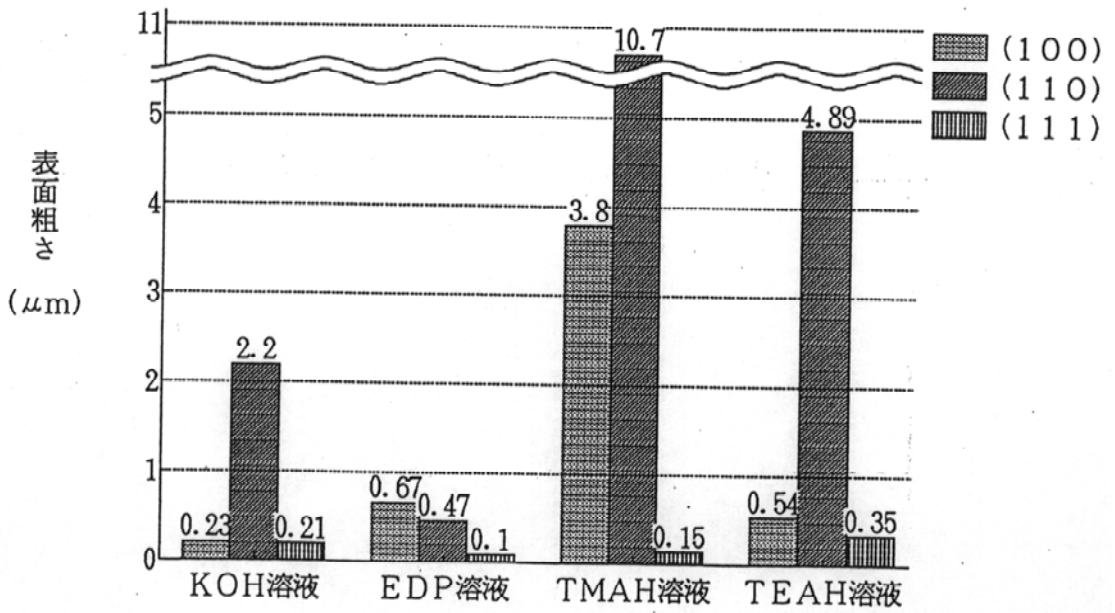


Fig.2.6 単結晶Siの各種エッチャントに対するエッチング表面粗さ

2.1.3 センサの詳細設計

圧力センサの構成部品を作製する上では、上述のSi ウェットエッチング技術が重要な技術となる。ダイヤフラムとアライメントストラクチャはこの技術を用いるわけであるが、Siのエッチングレートが構成部品の厚さを制限する要因となる。これら設計上の制限要因をまとめると

- ・ダイヤフラム、アライメントストラクチャーのSi基板厚

薄ければ薄いほど良いが、薄すぎるとプロセスハンドリングや組立、素子分離時に材料強度の問題が生じる。

- ・素子分離のダイシング

構成部品の陽極接合後、ダイシングにより素子分離するが、この時のダイシングブレード厚及びダイシング端よりアライメントストラクチャエッチング開口までの距離が問題となる。またトータルの素子厚も余り厚いと（例えば1 mm以上）ダイシングは難しい。

- ・素子幅

微小センサとして極細径の医療機器（例えばホットバルーンカテーテルやその他のカテーテル）への適用を考慮すると、極力素子幅を小さくする必要がある。

以上の各点を考慮に入れて以下の方針で設計を行なった。

- 1)アライメントストラクチャーの底部開口を信号の入出力に用いる光ファイバのサイズに合わせるため、これを130 μm とする。
- 2)感圧膜は前述の通りAuとし、膜厚及びサイズは想定測定範囲(0 ~ 1 MPa)より各々1 μm 及び130 μm とする。
- 3)Si異方性ウェットエッチングのエッチングレートについては、2.2で検討した結果を用いる。
- 4)ファイバストッパーとなる陽極接合用ガラスは入手可能なガラス基板のうち、一番薄い物として150 μm のものを用いる。
- 5)光ファイバ左端(右端)はダイヤフラム面左端(右端)と一致させる。
- 6)素子間の距離は1枚のウェーハからの収率を考えると出来るだけ短い方が良いが、ダイシングの切りしろを考慮して25 μm を加える。

2.1.4 センサの作製技術

ダイヤフラムとアライメントストラクチャはほぼ同じ構造のため、Au成膜以外は同一のプロセスで作製できる。使用したSi基板はn型、面方位:(100)、また透明基板には両面ミラーガラスウェーハを用いた。ダイヤフラムの作製プロセスを Fig.2.7 に示す。詳細は以下の通り。

(1)基板前処理

ネイティブオキサイド除去のためのエッチングを行う。まず中性洗剤にて洗浄を行い、アルコール・有機溶剤により脱水・脱脂の後、フッ酸系エッチング液(50%HF:19BHF = 1:9、室温、15

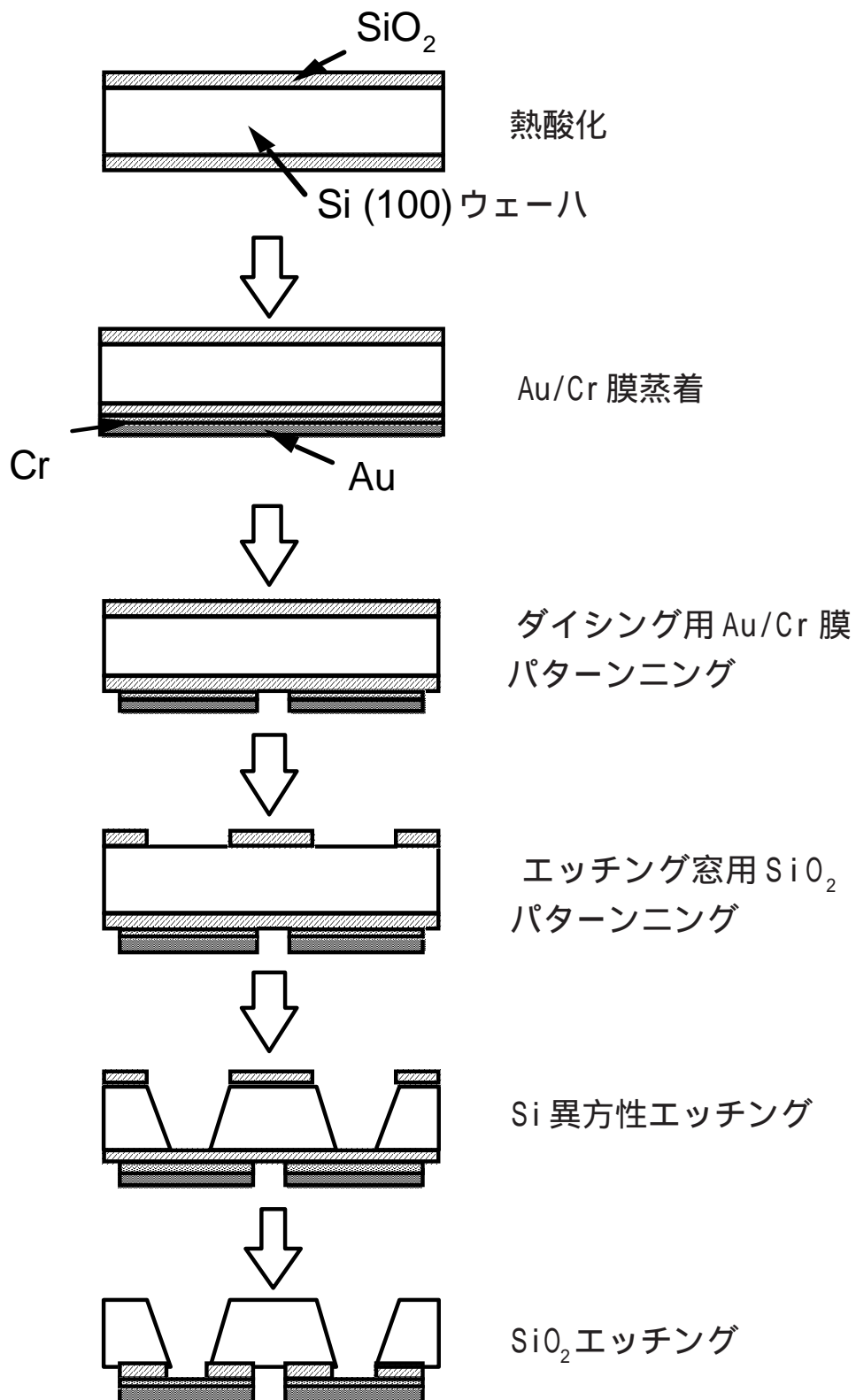


Fig.2.7 ダイアフラムの作製プロセス

分)により自然酸化膜を除去する。エッチング後の後処理はアルコール・有機溶剤により脱水・脱脂。

(2) 酸化膜形成

高温熱処理炉にて、ウェット酸化で行う。酸素は純水をパブリックして熱処理炉に供給し、温度は1000℃、時間は3時間30分。これで約0.5 μ mの酸化膜が形成される。

(3) Au 蒸着

感圧部のダイヤフラムとなるAuを、真空蒸着により形成する。Si酸化膜とAuとの密着性を高めるため、両者間にCrを介在させる。Au/Crの膜厚は各々約1 μ m/0.01 μ mである。

(4) Au パターンニング

ダイシングによる素子分離のため、カッティングラインに沿ってAuを除去する。レジストにはOMR-83(東京応化)を用い、エッチングにはゴールドストリッパーを用いる。エッチングの終了は目視確認する。

(5) エッチング開口パターンニング

(4)とパターン合わせのため、両面アライナーでパターンニングする。レジストにはOFPR8600を用い、開口部の酸化膜をフッ酸系エッチング液で除去する。このとき表面のAuを保護するために、同一のレジストを塗布しておく。

(6) Si 異方性エッチング

TMAH(テトラメチルアンモニウムヒドロキシド)によりエッチングする。エッチャントの濃度は10wt%、温度は90℃で行う。エッチング中はプロペラによりエッチャントの攪拌を行う。エッチングレートは(100)面で約0.98 μ m/min、(110)面で約0.90 μ m/minである。

(7) SiO₂ 膜除去

最終的に不要となるSiO₂膜をエッチングにより除去する。エッチング条件は基板前処理と同一でエッチング時間のみ長くすれば良い。またアライメントストラクチャについては、上記プロセスのうち(3)、(4)を除いた工程で作製される。

(8) ウェーハ接合

陽極接合によりダイヤフラム基板、ガラス基板、アライメントストラクチャ基板の3枚の基板を接合する。まずアライメントストラクチャ基板とガラス基板を温度500℃、印加電圧800Vで陽極接合する。このときガラス基板上にNaが析出する。これは次の陽極接合時にボイドの原因となるので、塩酸で除去する。しかる後、2層基板(ガラス+アライメントストラクチャ)とダイヤフラム基板を同一条件で陽極接合し、3層構造センサ基板が完成する。

(9) 素子分離

得られた3層構造センサ基板はUVダイシングテープ上で、スクライブラインに沿ってダイシングソーにより個々のチップに素子分離される。テープ拡張後、テープと素子との接着力を弱めるために、UV光がテープ裏面から照射される。

(10) 組立

得られた個々のチップは組立装置により光ファイバと接続される。本組立装置は本センサ専用設計・製作されたもので、極微量のUV樹脂をチップのアライメントストラクチャ部分にディスプレイでき、さらに光ファイバをアライメントストラクチャ上に正確に配置・接触させることができる。ウェーハプロセス後の組立手順を Fig.2.8 に示す。さらに組立装置による組み立て手順を Fig.2.9 に示す。

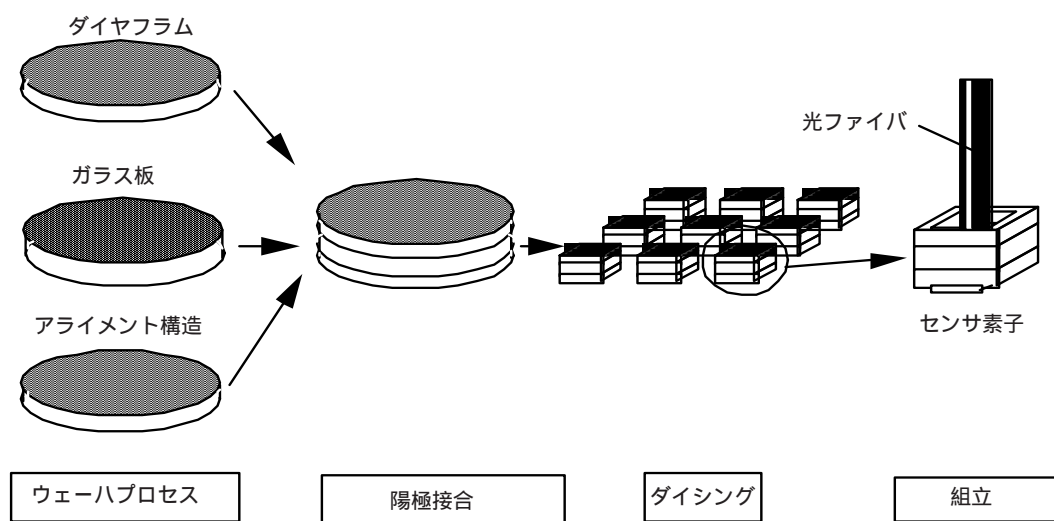
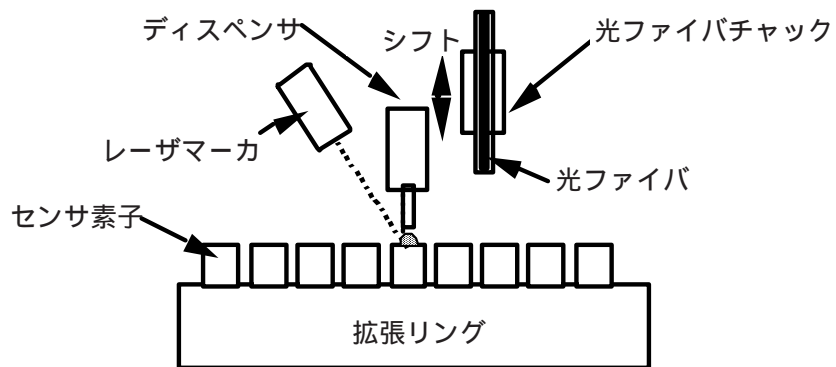


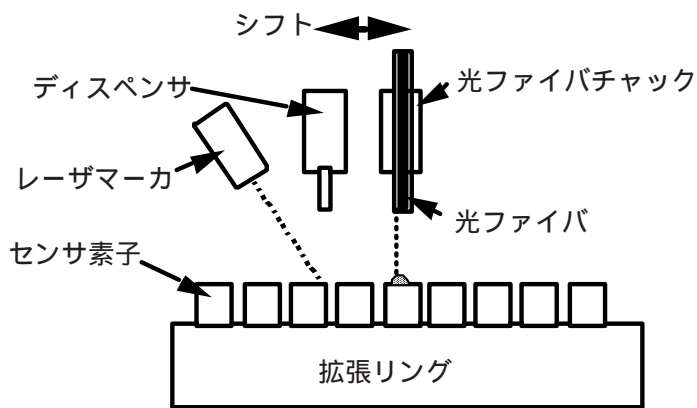
Fig.2.8 センサエレメントの作製手順

2.1.5 結果及び考察

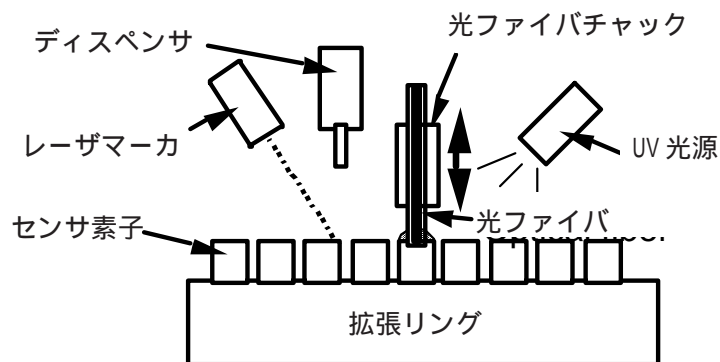
上記プロセスにより作製されたセンサチップの断面顕微鏡写真を Fig.2.10 に、光ファイバ圧力センサの顕微鏡写真を Fig.2.11 にそれぞれ示す。センサヘッドに圧力を印加し、特性評価を行うためにセンサヘッドを圧力チャンバ内に光ファイバ用シールポートを介して導入した。圧力チャンバ内には較正用に市販の圧力センサを接続してある。これにより、圧力チャンバに任意の気体(例えば窒素等)を導入することにより任意の圧力を印加することができる。センサヘッドからファイバケーブルによって2本に分岐されたファイバの内1本は投光用としてLED安定化光源(0.85 μm)に、もう1本は受光用として光パワーメータに接続した。さらに光パワーメータの出力は GP-1B を経由してパーソナルコンピュータに接続され、ディスプレイ上に検出圧力を表示できるようになっている。この圧力測定系を Fig.2.12 に示す。



(1) UV樹脂のポッティング



(2) 光ファイバチャックの移動



(3) 光ファイバとセンサ素子との接着

Fig.2.9 組立装置による組み立て手順

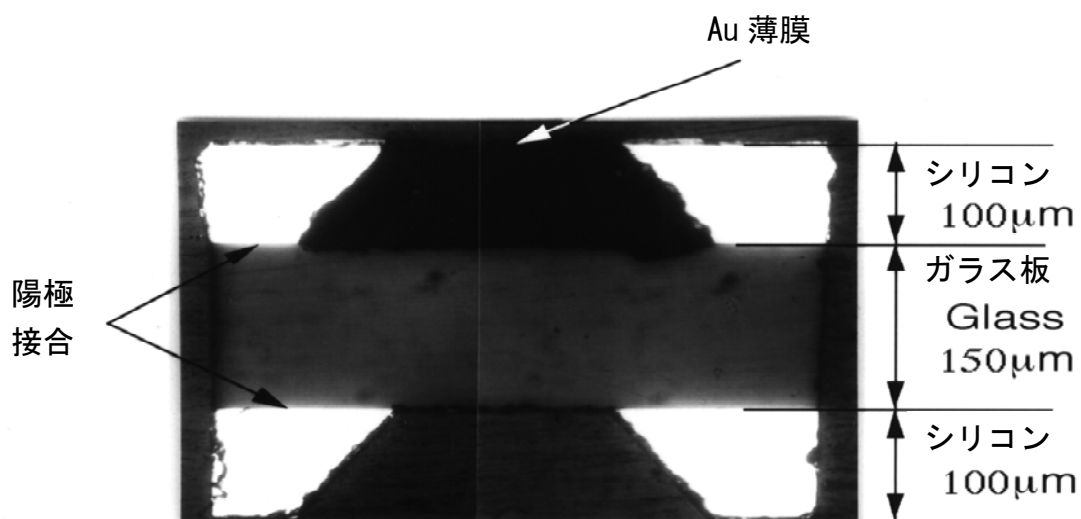


Fig. 2.10 センサヘッドの断面写真

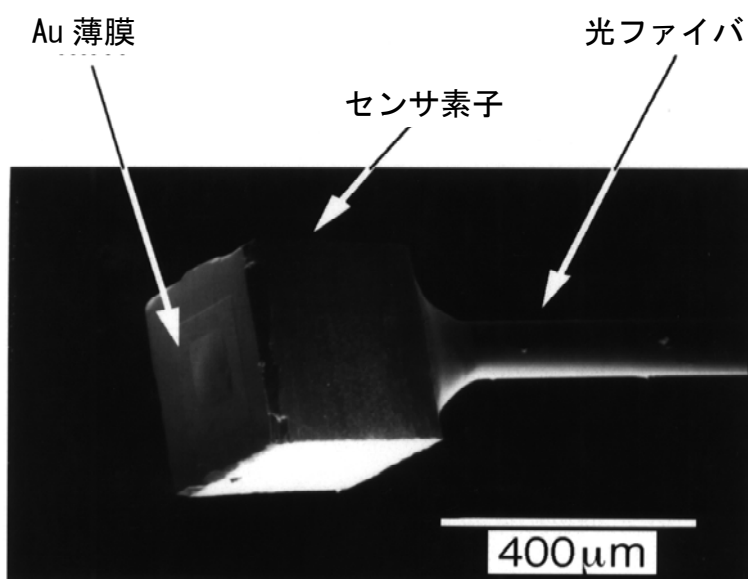


Fig. 2.11 組立後のセンサSEM写真

印加圧力を上昇させたときの、戻り光強度の変化（圧力応答）を Fig.2.13 に示す。圧力上昇によりダイヤフラム（反射面）と投・受光用のファイバとの距離が短くなり、これにより戻り光強度は対数的垂下特性を示している。これにより測定範囲においては、線形で良好な圧力応答を示しているといえる。また圧力応答特性から求めた感度は $0.19 \mu\text{W}/\text{MPa}$ であった。ただしサンプルにより若干バラツキが生じているが、これは接合、ファイバ接続時のアライメントずれが起因していると考えられる。これらは接合方法、ファイバ接続方法を改良し、アライメント精度を上げることにより改善されると考えられる。

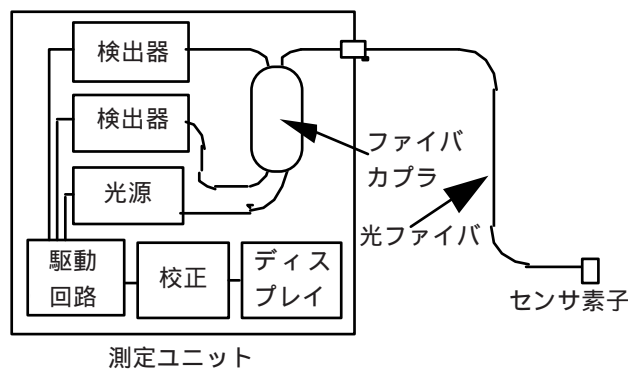


Fig.2.12 圧力測定実験系

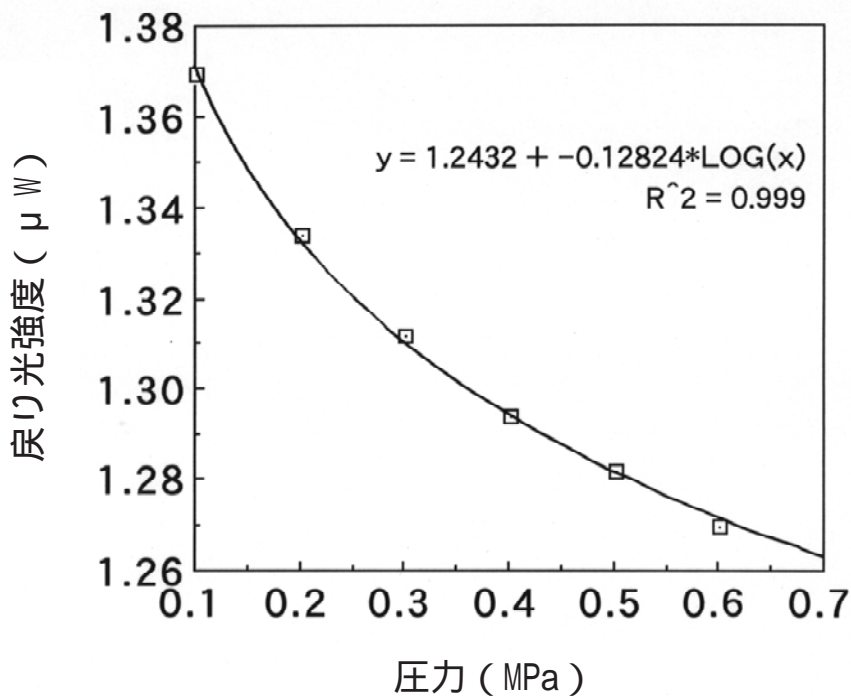


Fig.2.13 センサの圧力応答特性

2.2 光ファイバ圧力センサの小型化とカテーテルへの応用

前節で述べたセンサの実用性を実証するため、冠動脈用バルーンカテーテルに適用すべく更なる小型化を検討した。本センサはシリコン - ガラス - シリコンの3層構造であるためその大きさが入手可能なガラスウェーハに依存し、かつこの3層ウェーハを素子分離するダイシング工程におけるチップングを考慮して素子間のマージンを大きくとることが、小型化への阻害要因となっていた。そこでガラスウェーハより薄いウェーハが入手可能なシリコンウェーハをダイヤフラム構造体・ファイバストッパ・アライメント構造体全てに適用した構造を考案し、シリコンウェーハ3層接合を検討した。このシリコンウェーハの薄板化(100 μm 50 μm)と3層接合の成功により250 μm \times 250 μm \times 150 μm のセンシングヘッドを実現した。光ファイバ先端(光出射面)とダイヤフラム(反射面)との距離が短くなったため、戻り光強度が大きくなり、ガラスストッパを用いたセンサに対し約10倍の感度を得ることが出来た。さらに本センサを実際の冠動脈用バルーンカテーテルの、バルーン内圧力測定適用した。カテーテルにはインジェクタより生理食塩水が供給され、バルーンが拡張される。供給された生理食塩水は、ドレインよりインジェクタに戻る構成になっているため、インジェクタ出口にあるセンサによる圧力値と実際のバルーン内の圧力に差異が生じる。そのためこの差を正確に把握するため、本センサをバルーン内に装着し、バルーン内の圧力を実測した。これによりインジェクション圧力が0.1 ~ 0.5MPaに対し、バルーン実圧が0.1 ~ 0.28MPaとなり最大0.22MPaの圧損があることが明らかとなった。これにより、考案した光ファイバ圧力センサが十分実用に耐えうることが実証された。

2.2.1 小型化のためのセンサの構造変更

前節において試作した光ファイバ圧力センサは、従来之物に比べ非常に小さく、多くの応用用途が考えられる。しかし、これを体内や内視鏡・カテーテルに適用するには、そのワーキングチャンネルの径等から考えて、未だ大きく更なる小型化の検討が必要である。

前述のごとく、小型化への阻害要因はガラスウェーハの厚みと素子分離用の素子間のマージンである。ガラスウェーハの厚さが素子厚に直接影響している。これが薄くなれば、ダイヤフラムやファイバストッパに合わせた素子幅のセンサヘッドが得られる。また、センサヘッドがSi - ガラス - Siの3層構造となっており、この素子分離のためダイシングブレードをガラス用のものにして、よってダイシング時のカーフ(切りしろ)、チップング(欠け)が大きくなり、素子間隔が大きくなり、かつ不要な部分の体積も大きくなってしまふ。またガラスのダイシングにより、ダイシングに要する時間も長く、2インチの3層ウェーハのダイシングに数日の日数がかかる。またガラスウェーハは薄板のものが入手困難で、250 μm 以下のものは現状では得られない。

この問題を解決するために、ファイバストッパとして用いていたガラス基板をSi基板に変更する。これにより素子厚を薄くすることが可能であり、よってチップサイズの小型化が可能である。

また素子間隔も小さく出来、これにより1枚のウェーハからの素子の収率が格段に向上し、ダイシング時間も飛躍的に短くなる。但し、シリコンウェーハとガラスウェーハの光の吸収端の違いにより、第2章で用いた測定光学系では測定不可能となる。これについては、使用する光源の波長を適当に選択する事により解決可能である。最大の問題点は、極薄い加工済のシリコンウェーハ同士の接合である。そこでまず、ウェーハの接合技術について、検討を行った。

2.2.2 ウェーハ接合技術の検討

ウェーハ接合技術

2つの材料を接合一体化して新たな構造の材料を得ることは古くから行われてきた。接着剤による接着、溶接、拡散接合など、多くの方法が種々の材料に対して使われている。シリコンを主とする半導体ウェーハでも2枚のウェーハを張り合わせ一体化することができれば、例えば表側と裏側で性質が異なるウェーハや内部に異質な材料を埋め込んだウェーハが簡単に得られる。このため従来よりいろいろなウェーハ接合方法が試みられてきた。しかしながら半導体プロセスとして応用するためには、ウェーハ全面が機械的に強固に接合するのは当然として、さらに接合したウェーハが半導体製造プロセスに受け入れられるように熱的・化学的にも安定であり、また接合工程が簡便であるなどの条件が必要とされる。

このような条件を満たすウェーハ接合技術としては、ウェーハレベルの素子群を一括して接合してしまうものと、ひとつひとつの部品を逐次的に接合するものがある。前者については、陽極接合、シリコン直接接合、表面活性化接合が知られており、またそれらの組合せや、他の接合法も提案されている。後者については、電子線やレーザーを利用した接合や微細な溶着、圧着などの通常の大さの加工に利用される接合法の高度化、微細化が挙げられる。

各種一括接合の損失について Table 2.2 に、接合温度と接合層厚の関係を Fig.2.14 にそれぞれ示す。よく用いられる方法は陽極接合である。低融点ガラスを用いることによりプロセス温度を下げる研究、またガラス、シリコン以外の組合せもガラス膜を中間バインダとして利用する方法により適用範囲を広げる研究がなされている。表面の幾何学的平坦さとゴミの存在が、これらすべての一括接合プロセスに影響する。またウェーハの位置決めが問題となることも多く、光学的にカメラで位置合わせする方法、透過赤外線を用いる方法、ウェーハにマークをつける方法などがある。

シリコン直接接合はウェーハ内部に不純物拡散層や絶縁物層を形成するときに用いられる。本接合の最大の欠点は、プロセス温度が1000℃以上と高温であることであり、より低温で行うプロセスはこの後に行わなければならないことである。

表面活性化接合では、金属やセラミックス表面に真空処理などにより結合力をもたせることにより、常温で接合を行う。シリコン直接接合法では、表面に結合力をもたせるために水酸基を導入す

Table 2.2 ウェーハ接合方法の比較

	陽極接合	直接接合	界面活性化接合
接合原理	界面での静電圧力	水素結合と脱水反応	材料の凝集力
対象材料	絶縁体と導電体 ガラス/Si等	主にシリコン またはシリコン 酸化物	少なくとも 片方は塑性 変形能のあるもの
プロセス温度	450 程度	1000 以上	常温

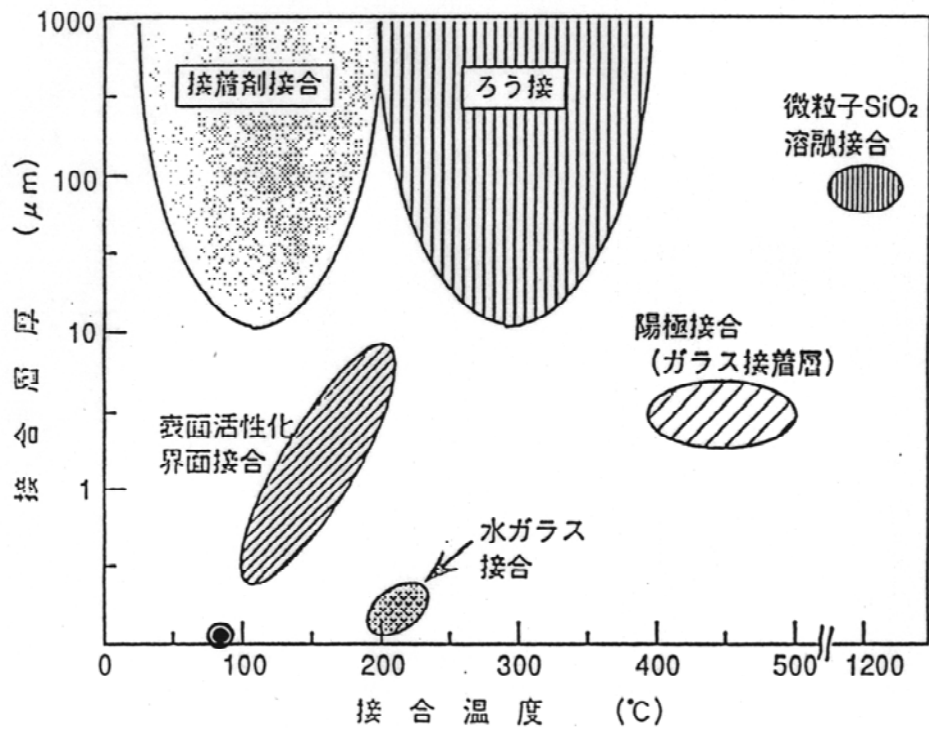


Fig.2.14 接合温度と接合層厚の関係[133]

るが、表面活性化接合法では、スパッタエッチングによる清浄表面や金属蒸着膜を利用するため接合後の加熱を必要としない。常温接合法としては、接合界面に反応層の形成はほとんどなく非常に薄い界面層しかもたないので、微小部品の接合法として有望である[133]。

これらの接合技術のなかで、光ファイバ圧力センサのセンサヘッドの作製に適用可能なものは、

低温で接合可能な表面活性化接合である。そこで表面活性化接合の一種であり、センサヘッド作製プロセスに最も適していると考えられる水ガラス接合について、検討を進める。

水ガラス接合技術

水ガラス接合とは、接合するウェーハ界面に珪酸ナトリウム溶液を介在させて、低温でウェーハを接合する技術である。使用する珪酸ナトリウム溶液は35～38% (SiO_2)、17～19% (Na_2O)で、その役割から前者をネットワークフォーマ、後者をネットワークモディファイヤと呼ぶ。接合方法は簡単で、洗浄・親水処理したSiウェーハに水ガラスを塗布し、ウェーハをコンタクトさせた後、低温(80℃前後)でアニールするだけである。

接合プロセスを成功させるためには、水ガラス塗布膜厚制御、親水処理、パーティクル除去、基板反り制御、アニール温度と雰囲気各要素条件を適切に決定することが必要である。特に重要なのは水ガラスの膜厚とアニール温度である。水ガラスの膜厚については、極々薄い層が必要で、超高速のスピンコートが必要となる。水ガラスの膜厚と接着率の関係を Fig.2.15 に示す。アニール温度については、Si-Siの接合であればそれほど問題はないが、 SiO_2 や Si_3N_4 同士の接合では温度依存性が顕著となる。この関係を Fig.2.16 に示す。特にSi-Siの接合の場合は洗浄や親水処理中にSi表面に自然酸化膜が形成されることが多く、特に注意が必要となる。

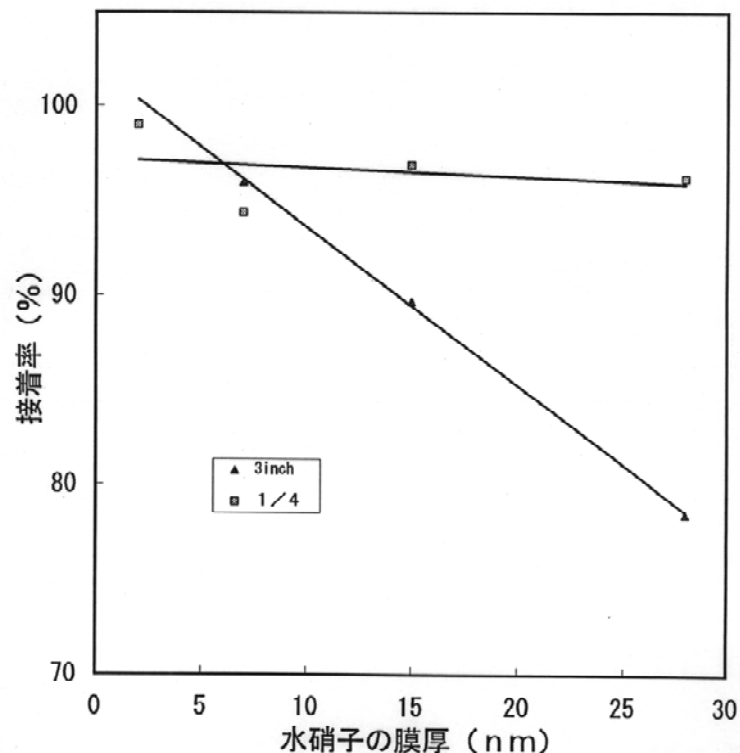


Fig.2.15 水ガラスの膜厚と接着率の関係

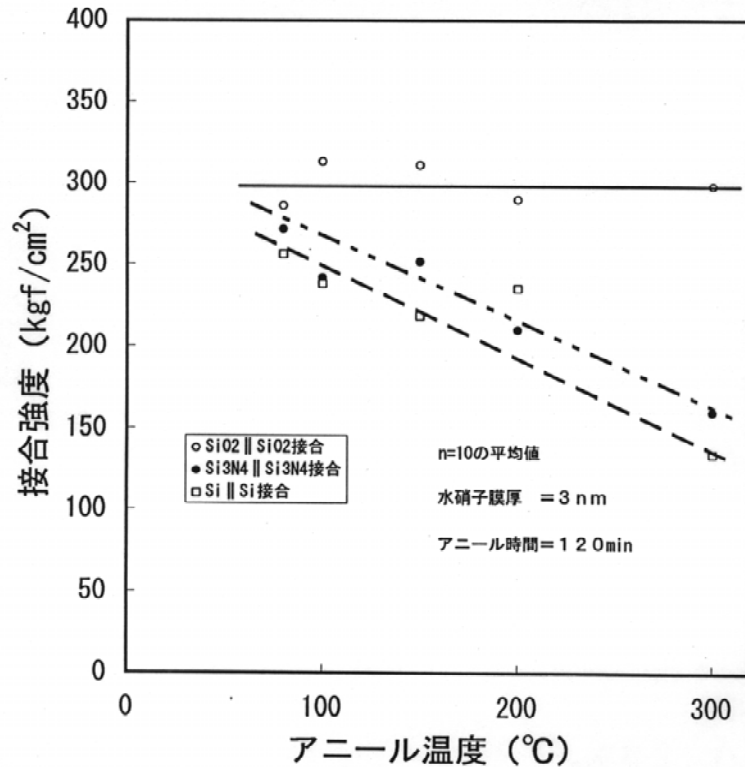


Fig.2.16 アニール温度と接合強度の関係

ウェーハ前処理技術の検討

前述のプロセス手順によれば、基本的には接合が完成するが、ウェーハの前処理条件によっては全く接合しない場合がある。予備検討として2.1.4(1)に示す条件でウェーハを洗浄・前処理を行い、水ガラスによる接合を試みたが、ほとんど接合しなかった。接合出来なかった原因としては、ウェーハ表面へのパーティクルの残留・付着が考えられる。そこで、パーティクル除去に有効な基板前処理法を検討した。

従来の基板洗浄法とパーティクル除去に主眼を置いた前処理法の比較を Fig.2.17 に示す。ここで重要なのはパーティクル除去のためのエッチング処理を行っていることと、有機溶剤による洗浄を行っていないことである。これは有機溶剤を使用するとウェーハ表面に炭素分子が残留し、ウェーハの汚染・さらにパーティクル発生の原因となるためである。この前処理の後、水ガラス接合を試みた。従来法とパーティクル除去前処理法との接合プロセスの比較を Table 2.3 に示す。このようにして得られた接合ウェーハを赤外線透過像により接合面の様子を観察し、さらに実際にチップサイズにダイシングして強固に接合している割合(良好面積率)で評価した。従来法では良好面積率はほぼ0であったのに対し、パーティクル除去前処理法による接合では良好面積率は90%以上となり、この方法の有効性が確認された。

Table 2.3 接合プロセスの比較

工程	予備検討	パーティクル除去前処理
ウェハ	3インチφ、厚さ100μm n (100)	3インチφ、厚さ500μm n (100)
Siウェハ洗浄	Fig. 3.4	Fig. 3.4
Si熱酸化膜形成	1000°C、4時間 昇温速度20°C/分、O ₂ 流量105ℓ/分、バブラ温度90°C 膜厚約6500Å	
0.05%水ガラス作製	スターラで攪拌 室温、10分	
親水処理	NH ₄ OH:H ₂ O ₂ :H ₂ O=1:2:7、85°C、10分 純水オーバーフロー 室温、3分	
ウェハ乾燥	N ₂ ブロー	スピン乾燥（スピナー使用）凸面。 水ガラス塗布直前に行う。 1st. 200rpm×2秒 2nd. 7000rpm×30秒
水ガラス塗布 (スピンコート)	0.5μmフィルタ使用。ウェハ中央に 30滴程度滴下。酸化ウェハのみ。 1st. 1000rpm×5秒 2nd. 7000rpm×30秒	0.5μmフィルタ使用。ウェハ全面に 十分に滴下。酸化ウェハのみ。凸面。 1st. 200rpm×2秒 2nd. 7000rpm×30秒
ウェハ貼り合わせ	塗布後直ちに、水ガラス塗布ウェハを テーブル上へ移動し、ベアウェハを重 ねて軽くゴムローラーで押さえる。	水ガラス塗布後直ちにスピナーチャッ ク上でベアウェハを重ね、テーブル へ移動して、ゴムローラーで一定方向 に強く数回押さえる。
バーク	85°C、30分、大気中	200°C、2時間、大気中

ここまでで、未加工のウェーハ同士の接合については、良好な条件を把握することが出来た。但し、ダイヤフラムやアライメントストラクチャに加工したSiウェーハの接合が同一条件で可能とは限らない。よってさらに加工済ウェーハによる接合実験が必要となる。

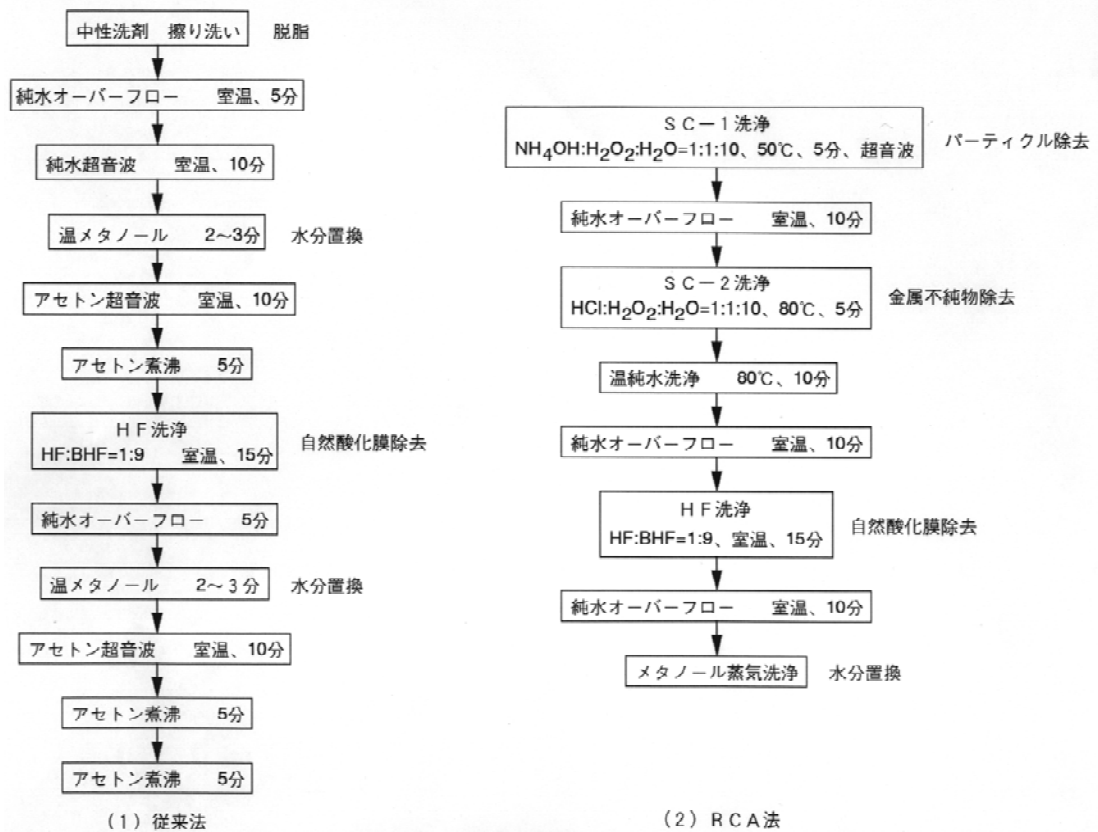


Fig.2.17 前処理法の比較

接合方法の検討

前項では未加工ウェーハの水ガラス接合条件を把握した。これを実際の光ファイバ圧力センサの作製プロセスに応用するために、ダイヤフラム及びアライメントストラクチャに加工したSiウェーハを用いて接合の検討を行った。

接合は Fig.2.18 に示す3つのパターンを行った。同図(1)と(2)は接合面積の大小による良好面積率の差が現れるかどうかを確認するために行った。接合条件を Table 2.4 に示す。前項の条件と異なっているのは、加工済のウェーハのためコンタクト時のローラ掛けでウェーハの破

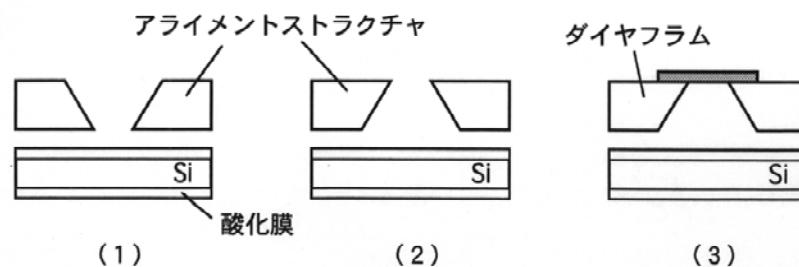


Fig.2.18 接合の3つのパターン

Table 2.4 接合実験条件




工程	条件	作業環境
熱酸化前のSiウエハの洗浄	(1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2=1:1:10$, 50°C , 5分, 超音波洗浄 (2) 純粋オーバーフロー, 室温, 10分 (3) $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:10$, 80°C , 5分 (4) 温純水, 80°C , 10分 (5) 純粋オーバーフロー, 室温, 10分 (6) $\text{HF}:\text{BHF}=1:9$, 室温, 10分 (7) 純粋オーバーフロー, 室温, 10分 (8) IPA蒸気洗浄	クリーンドラフト
Si熱酸化膜形成	拡散炉 1000°C , 4時間, 昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{min}$, O_2 流量 $1.5\ell/\text{min}$, バブラ温度 90°C 膜厚約 6500Å	クリーンルーム
0.05%水ガラス作製	珪酸ナトリウム ($\text{SiO}_2:35\sim38\%$, $\text{Na}_2\text{O}:17\sim19\%$) 水溶液の作製 スターラで攪拌, 室温, 10分	
接合前のSiウエハ洗浄	ベアウエハ及び酸化ウエハ (1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2=1:1:10$, 50°C , 5分 超音波洗浄 (2) 純粋オーバーフロー, 室温, 10分 (3) $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:10$, 80°C , 5分 (4) 温純水, 80°C , 10分 (5) 純粋オーバーフロー, 室温, 10分	クリーンドラフト
親水処理	(1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:2:7$, 85°C , 10分 (2) 純粋オーバーフロー, 室温, 3分	
ウエハ乾燥	スピン乾燥 (スピナーMIKASA 1H-DX II) 水ガラス塗布直前に行う。 1st. $200\text{rpm}\times 2\text{秒}$ 2nd. $7000\text{rpm}\times 30\text{秒}$	
水ガラス塗布 (スピンコート)	$0.45\mu\text{m}$ フィルタ使用。ウエハ全面に十分に滴下。 酸化ウエハのみ。 1st. $200\text{rpm}\times 2\text{秒}$ 2nd. $7000\text{rpm}\times 30\text{秒}$	グリーンブース
ウエハ貼り合わせ	水ガラス塗布直ちにスピナーチャック上でベアウエハを重ね、クリアファイルに挟み、テーブルへ移動してゴムローラーで一定方向に強く10回押さえる。	
ベーク	200°C , 2時間, 大気中	クリーンルーム

損を防止するため、保護措置をとっている点である。またパーティクルの影響を最大限回避するため、作業環境も記載している。ここで各作業環境のクリーン度は、クリーンルームは公称クラス1000、クリーンドラフト及びクリーンブースは公称クラス100である。

接合後の評価は、スクライブラインに沿って実際のチップサイズでダイシングを行い、ダイシング中に剥離せず強固に接合されているチップの割合を前項同様測定し、良好面積率の比較を行った。この結果を Table 2.5 に示す。未加工ウェーハ同士の接合より良好面積率は悪化するが、これは接合面積の減少によるものと考えられる。ダイヤフラム、アライメントストラクチャの2回の接合を経ると、良好面積率は50%程度に悪化すると予想されるが、チップサイズの小型化等により、ウェーハ1枚あたりのチップの収率は2.1.4のものとはほぼ同等になると考えられる。

本結果より、Si 3層接合の目処が得られたので、これを実際の光ファイバ圧力センサの作製プロセスに適用することとし、この構造でのセンサチップの設計を次項で述べる。

Table 2.5 接合後の評価結果

サンプル	良好面積率[%]	
 A	79.1	
	A	54.8
	B	76.0
 A	63.2	

$$\text{良好面積率} = (\text{良好面積} / \text{全面}) \times 100$$

2.2.3 センサの詳細設計

これまでの検討で、従来のSi - ガラス - Siの3層構造から、Si - Si - Siの3層構造に変更が可能となった。これにより設計した光ファイバ圧力センサの構造を Fig.2.19 に示す。主な変更点及び特徴を以下にまとめる。

- 1) 使用するSiウェーハ厚を50 μmとする。現在入手可能なSiウェーハは約5 μm厚程度の物までであるが、あまり薄い物はプロセス不可能であるので、実現的でない。そこで、ハンドリング可能で、各プロセス装置(エッチング槽、ウェーハアライナ等)により作業可能な最小限のウェー
- 2)アライメントストラクチャーの底部開口を信号の入出力に用いる光ファイバのサイズに合わせるため、これを130 μmする。
- 3)感圧膜は前述の通りAuとし、膜厚及びサイズは想定測定範囲(0 ~ 1 MPa)より各々1 μm及び130 μmとする。
- 4)ウェーハボンディング(ダイヤフラム - ファイバストッパ、ファイバストッパ - アライメントストラクチャ)は水ガラス接合とし、条件は前項で検討したものをを用いる。

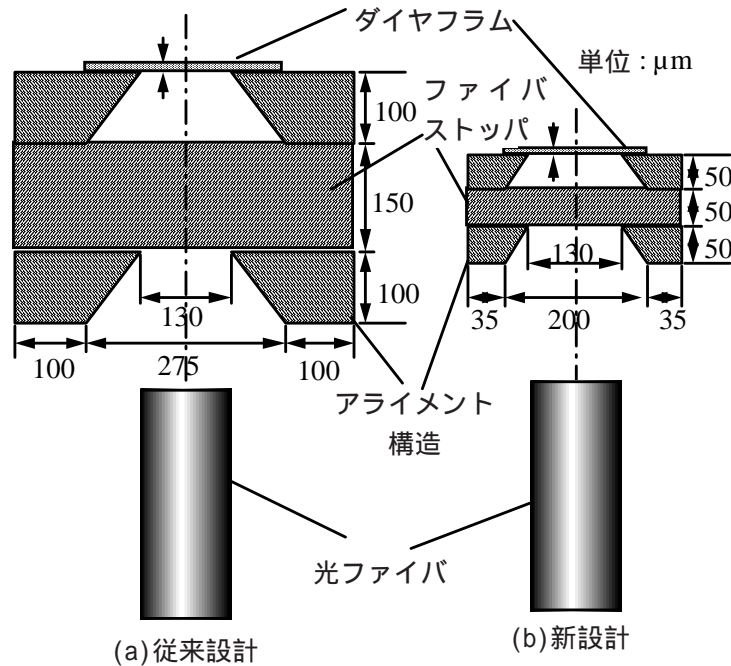


Fig.2.19 光ファイバ圧力センサの構造

- 5) ダイシングのためのカーフ（切りしろ）は従来はマージンを大きくとり、 $200\ \mu\text{m} \sim 500\ \mu\text{m}$ としていたが、Si 3層構造のため、これを $50\ \mu\text{m}$ まで小さくした。
- 6) 組立行程では Fig.2.9 に示す組立装置をそのまま使用可能である。
- 7) Si 3層構造の採用により Fig.2.19 に示すとおり、チップサイズが $375\ \mu\text{m} \times 375\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ から $270\ \mu\text{m} \times 270\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ に小型化された。

2.2.4 センサ試作及び評価

センサの作製プロセスは 2.1.4 で述べた方法とほぼ同一である。ウェーハボンディング行程のみ 2.2.2 で検討した条件で行った。また本センサの実用性を検証するためにホットバルーンカテーテルへの適用を考えて、測定システムの小型化を検討した。実際の医療機器に本センサを搭載した場合、センサが使用されるのは医療機関の手術室もしくは処置室である。そこで場所を取らず簡便に測定が可能とすべく、光源、検出器、光ファイバカプラ、キャリブレーション回路、計算回路、圧力表示ディスプレイを一体化した測定器を製作した。これにより、センサ専門技術者以外の医師や看護婦でも測定結果を簡単にその場で得ることが出来るようになった。製作した測定器を Fig.2.20 に示す。

作製された光ファイバ圧力センサは、Fig.2.20 に示す測定器に FC コネクタにて接続される。光源光 (LED、波長： $1.31\ \mu\text{m}$) は光ファイバカプラを通じてセンサに供給される。センシングエレメント先端の金ダイヤフラムで反射された光は、再び光ファイバカプラを通り検出器 (InGaAs フォトダイオード) で検出される。センシングエレメントは 2.1.5 同様圧力チャンバにシール

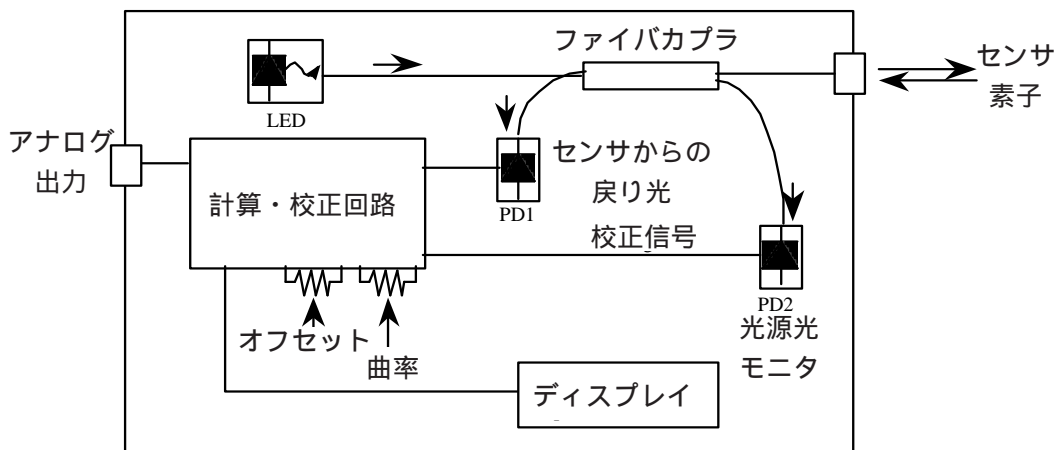


Fig.2.20 光ファイバセンサ用測定器

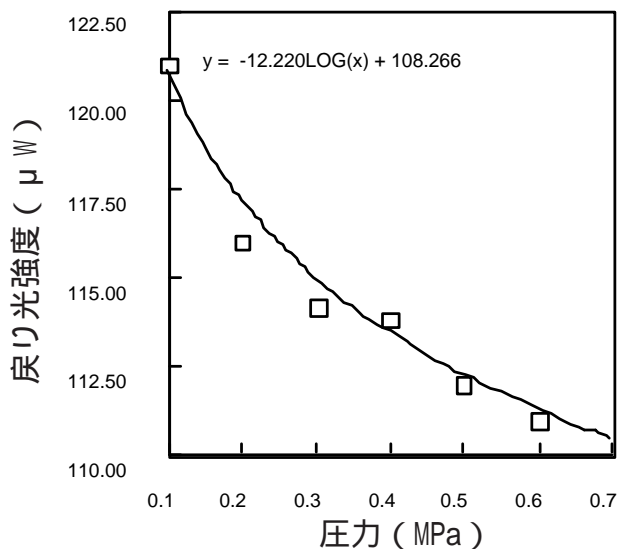


Fig.2.21 センサの圧力応答特性

ポートを介して導入される。圧力チャンバ内には0.1～0.6MPaの乾燥窒素が印加され、センサ特性が測定される。本センサの印加圧力に対する戻り光強度の測定結果を Fig. 2.21 に示す。Fig. 2.4に示すセンサ同様に、戻り光強度は自然対数的に減少する傾向が得られた。測定結果よりセンサの平均感度は1.9 μW/MPaが得られ、ガラスストップを用いたそれと比べて約10倍の特性向上が得られた。

2.2.5 ホットバルーンカテーテルへの適用

バルーンカテーテルは、心臓の冠状動脈のアテロームによる狭窄の治療等に用いられる。アテロームのバルーンによる拡張後の再狭窄を防ぐため、バルーン拡張に用いる造影剤をレーザーで加熱

するのがホットバルーンカテーテルである。医師がバルーンを拡張させる際、バルーン内の圧力は造影剤注入用のインジェクタ出口の圧力計のみで感知している。造影剤は環流するため、インジェクタ出口の圧力と、実際のバルーン内の圧力には大きな差が生じていると考えられる。しかしこれまで、実際のバルーン内の圧力が測定されたことがない。そこで開発した本センサにより、これまで得ることの出来なかった実際の拡張時のバルーン内圧を測定し、これによりセンサの実用性を検証すべくバルーンカテーテルに適用した。バルーンカテーテルと装着されたセンサの概略図を Fig.2.22 に示す。光ファイバ圧力センサは、バルーンカテーテルの造影剤戻りルーメンを利用してバルーン内に導入された。バルーンは拡張ルーメンよりの流体(造影剤もしくは生理食塩水)により拡張され、治療が行われる。さらに実験に用いた測定系 Fig.2.23 に示す。インジェクタによってバルーンに生理食塩水が供給され、バルーン拡張時のインジェクタ出口の圧力計による圧力と、バルーン内の実際の圧力の差を測定した。

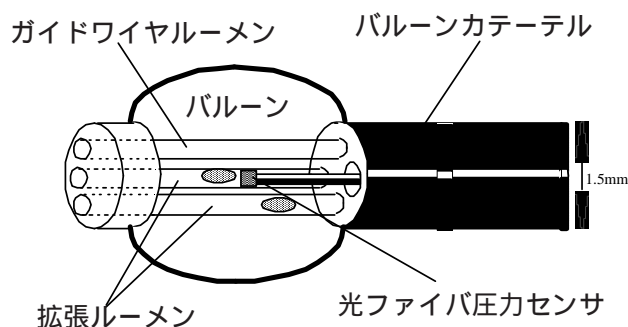


Fig.2.22 バルーンカテーテルとセンサの概略図

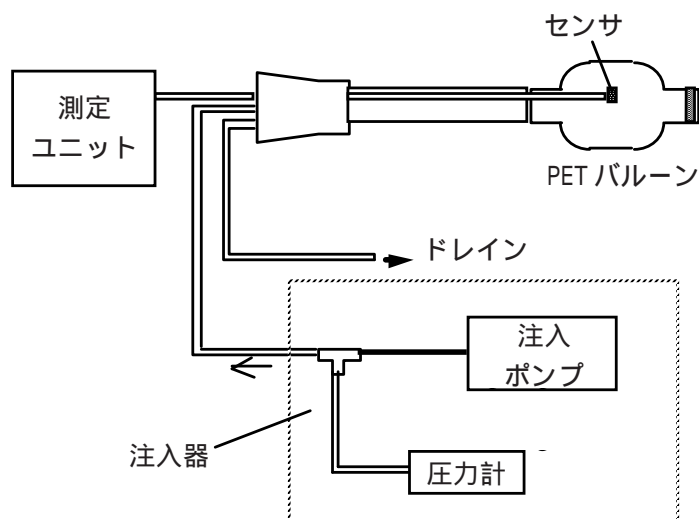


Fig.2.23 バルーン内圧測定系

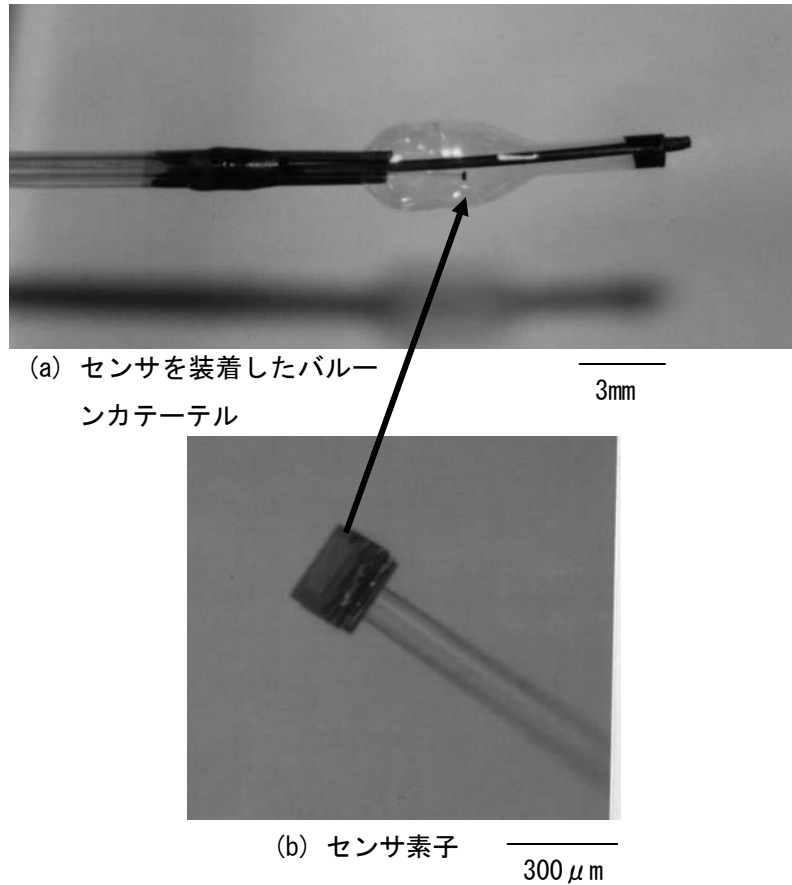


Fig. 2.24 圧力センサとバルーンカテーテルの写真

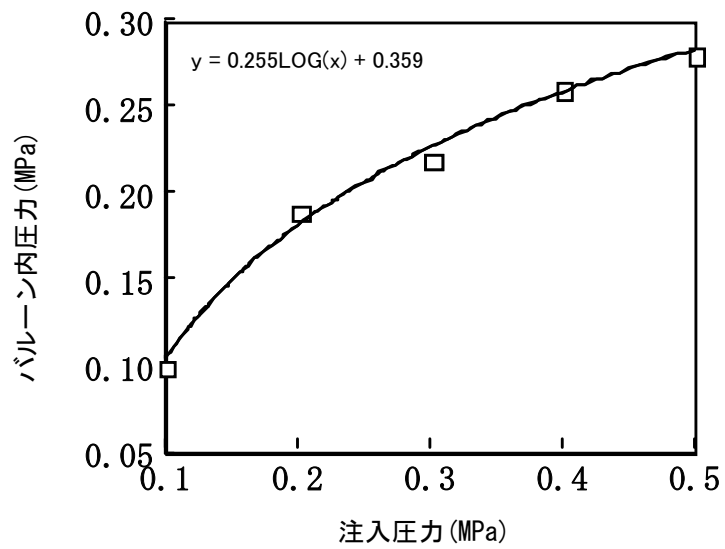


Fig. 2.25 バルーン内の圧力測定結果

作製した光ファイバ圧力センサの写真と、この圧力センサを装着したバルーンカテーテルの写真
を Fig.2.24 に示す。インジェクタから吐出圧0.1 ~ 0.5MPa の生理食塩水をバルーンに供給し
たときの、光ファイバ圧力センサによるバルーン内の圧力測定結果を Fig.2.25 に示す。測定に
当たっては光ファイバの曲げ損失の影響を排除すべく、圧力を印可するごとに戻り光強度のキャリ
ブレーションを行った。ここで明らかなことは、インジェクタの吐出圧とバルーン内の圧力には大
きな差が生じているということである。具体的にはインジェクタの吐出圧が0.5MPa の場合、バ
ルーン内の圧力は0.28MPa となっている。

2.2.6 考察

センサヘッドの小型化により、本センサの医療応用の可能性が示された。作製プロセスはほとん
ど半導体プロセスとコンパチブルなので、量産化可能である。これにより、センサチップのコスト
ダウンが可能で、医療用デバイスとしての対応が可能である。また特別な設計変更なしでそのまま
バルーンカテーテル等に適用可能なので、実用化が非常に容易となる。またカテーテルのみなら
ず、その他の医療機器や体内の圧力測定（脳室内、血管内等）にも適用可能である。

但し、使用するSi ウェーハが極薄であるため、プロセス時のハンドリングが難しく、ウェーハ
プロセス中でのウェーハの破損の可能性も高い。これについてはSi へ薄板専用のプロセス治具や
プロセス装置を開発することにより、解決可能である。

さらに実用化に近づけるためには、光ファイバ圧力センサ全体のコストダウン、作製プロセスの
最適化、信頼性試験等の検討がさらに必要となる。

2.3 光ファイバ圧力センサの触覚測定への応用

前々節、前節で述べた光ファイバ圧力センサを内視鏡・カテーテル・その他管状構造体の触覚測
定に応用すべく、センサ構造、作製技術並びにその特性を評価した。このためには、触覚検知の為
のトランスデューサを圧力センサの検知部であるダイヤフラム上に設置すれば良い。そこで、管状
構造体(ポリウレタンチューブ)の先端部を突起形状に加工し、その突起の根本部分にダイヤフラ
ム及び光ファイバを埋め込むことの出来る溝を作製した。これらの加工は全てエキシマレーザによ
り行われた。こうして得られた構造体にダイヤフラムと光ファイバを装着し、突起部に荷重を印加
して、その特性を評価した。測定原理は圧力センサと同一で、強度変調方式とした。結果として、
荷重0 ~ 200mN に対してほぼ比例した光出力を得た。また測定分解能(最小検出接触力)は10mN
が得られた。この触覚センサ付管状体を内視鏡・カテーテルに装着することにより、細管内誘導時
の穿孔を防止することが出来るばかりでなく、特殊なスコープと併用することにより、被観察物の
サイズ測定も可能となる。例えばコンタクトスコープ(被観察物に接触して画像を取得するスコー
プ、結果として拡大画像が得られる)、触覚センサ、微動ステージを組み合わせることにより微細

構造体の測定システムを提案した。

2.3.1 触覚センサの技術動向

人間の感覚機能は、五感、すなわち視覚（目）、聴覚（耳）、嗅覚（鼻）、味覚（口）、触覚（皮膚）で代表されている。この五感をセンサ技術による置き換えという観点から考察すると、視覚、聴覚はそれぞれカメラ、マイクロフォンというデバイスがあり相当に進んでいる。これに対して触覚は、単純なスイッチ類を除けば未だに確立された検出デバイスがない[134,135]。

触覚は人間の皮膚感覚であり、この感覚は体全体にわたって感ずるもので、視覚、聴覚のように体の一部に依存する感覚ではない。特に触覚は手の動作と一体化して考えられており、皮膚からの感覚情報により手の運動指令が出される。また、手の運動は視覚情報によるところも多く、視覚と触覚が相互に補完しあうことにより得られた対象物の位置情報・外形情報などにより動作している。このことから、視覚は対象物の大まかな情報を処理し、触覚は対象物の部分的な情報を処理していると考えられる。

人間の皮膚感覚をセンサとして考えた場合の分類を Table 2.6 に示す[136]。

このような触覚センサの研究において、最初に問題となるのが触覚情報の検出方法である。これまでに提案されている触覚センサの検出方式を Table 2.7 にまとめる。Table 2.7 に示した方法は、接触によって生じる圧力や圧力分布を何らかの方法で他の物理量に変換し、その変換された物理量を電気量として取り出すものである。

圧力を電気抵抗に変換する方式は歪みゲージや半導体圧力センサをファイバスコープ先端部に装着することが難しいという欠点がある。また、圧力を電圧に変換する方式は定常的な圧力情報を検出できないという欠点がある。いずれの方法も圧力情報が電気信号に変換されるためファイバスコープ先端部から情報を伝達する際に電磁障害を受けやすいという欠点もある。これに対して、圧力を光に変換する方式は信号の伝達手段として光ファイバを用いれば電磁障害を受けにくく、ファイバスコープ先端の触覚センサに適している。従ってファイバスコープ先端への装着を目的とした触覚センサは光ファイバ方式が有望であることがわかった。

光ファイバを用いた触覚センサの例としては、Fig.2.26 に示す構造が考えられる[142]。これはファイバスコープの周囲に4本の光ファイバを配置し、その上にSiなどで作製したカンチレバーを取りつけたものである。さらにカンチレバー先端には弾性体でできたカバーを取りつけてある。また、カンチレバーの内部には反射膜が形成されている。先端部のカバーに力が加わると反射膜が変位し光ファイバからの戻り光強度が変化するというものである。先端部に横方向から力が加わった場合には片側の光ファイバの戻り光の強度が大きくなり、反対側は強度が低下することから力の方向を検出することができる。ファイバスコープの先端部の外径が大きくなるものの、光を用いることにより生体内で使用しても安全な触覚センサを実現できる可能性が大きいと考えられる。

Table 2.6 触覚センサの種類

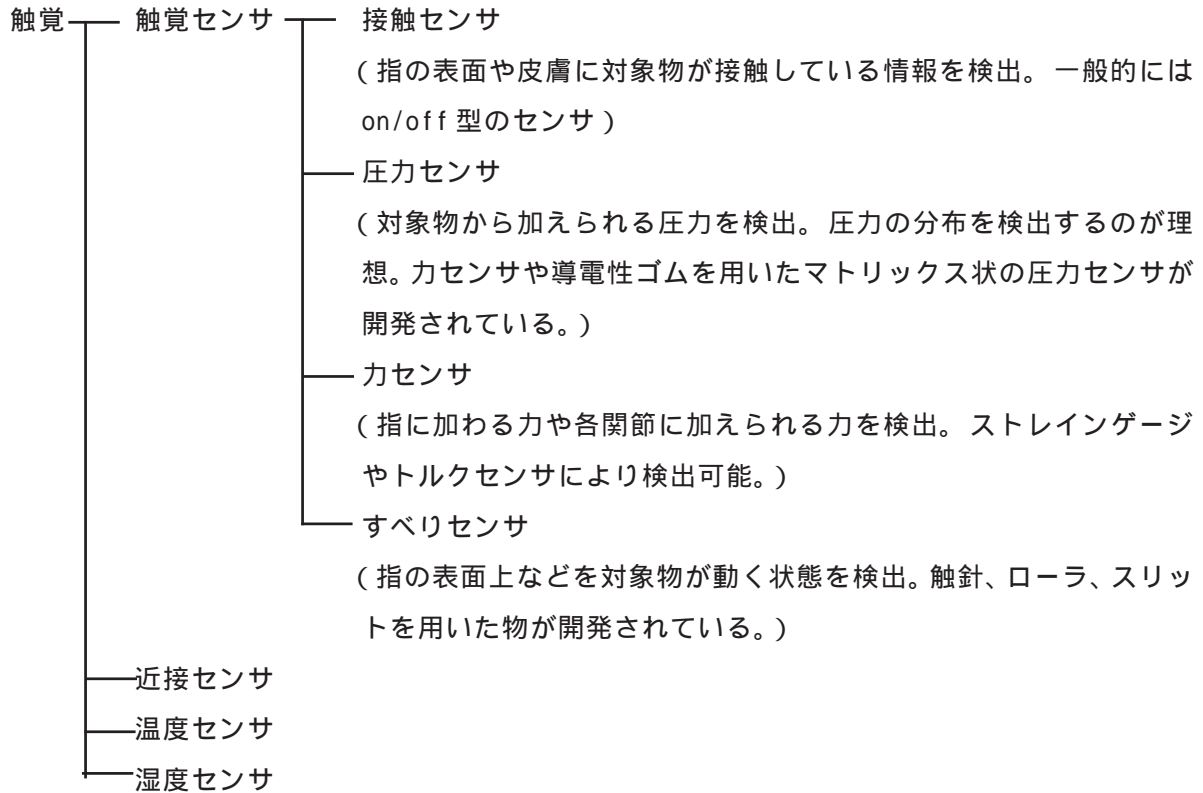


Table 2.7 触覚情報の検出方法

検出方式	特徴
各種スイッチ	<ul style="list-style-type: none"> ・扱いやすく信頼性が高い。 ・圧力を変位に変換しスイッチ動作を行うので出力は on / off 信号となる。
圧力・抵抗変換	<ul style="list-style-type: none"> ・圧力を変位に変換し、その変位を電気信号に変換して圧力を検出する。 ・歪みゲージ¹³⁷⁾や半導体圧力センサ¹³⁸⁾をシリコンゴムなどでパッケージングし荷重センサとしたものなどがある。 ・感圧導電性ゴムを用いた物もある。
圧力・電圧変換	<ul style="list-style-type: none"> ・圧電効果を利用して圧力を電気信号に変換するものである。 ・例としては P Z T、高分子材料のポリフッ化ビニリデン (P V D F)¹³⁹⁾を用いたものがある。 ・検出感度は高いが、定常的な圧力を検出しにくいといった特徴がある。
圧力・光変換	<ul style="list-style-type: none"> ・スポンジやゴムなどを透明のガラス板の上におき、下側からそのガラスの反射率の変化を測定する方法¹⁴⁰⁾。 ・光遮断方式と呼ばれる方法で発光ダイオードからの光をフォトトランジスタで受光し、その間に圧力に応じて変位する遮断物をおき受光量の変化により圧力を検出する方法¹⁴¹⁾。

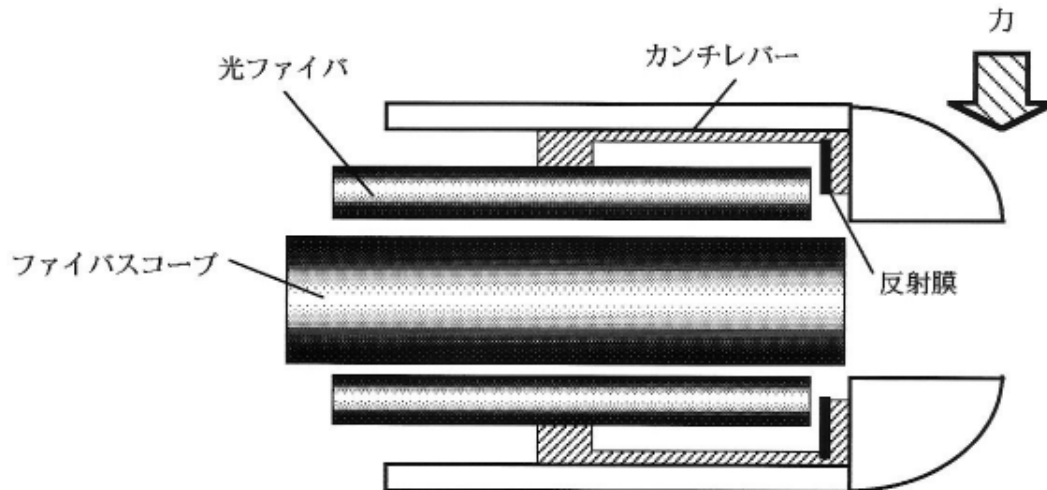


Fig.2.26 シリコンカンチレバーを応用した触覚センサ

2.3.2 埋込型触覚センサの検討

光ファイバを用いた触覚センサの例として、ファイバスコープの周囲に4本の光ファイバを配置し、更にファイバ先端に梁構造を持った構造を考案した。検出方法は先端部に加わった荷重により梁構造の下部に作製した反射面が変位し光ファイバからの戻り光強度が変化するというものである。これは、前章、前々章で述べた光ファイバ圧力センサの検出原理をそのまま応用したものである。違いは反射面の変位が圧力によるものか、荷重によるものかのみである。提案する触覚センサの反射面の変位を光ファイバからの戻り光強度により検出することが可能であるかの検討を行った。

センサ構造の最適化

触覚センサを内視鏡やカテーテルに装着して使用する場合を考えると、2.1、2.2で示したセンサ構造の様に各部品を作製して組み立てるよりも、内視鏡やカテーテルに直接作り込む方法が好ましい。そこでカテーテルの外壁にセンサ構造を作り込むことが可能かどうかの検討を行った。

また梁構造の下部に配置する反射膜は光学的に平坦な膜が要求されるためシリコンの異方性エッチングを用いて作製した金属薄膜のダイヤフラムを用いることとした。これは2.1、2.2で述べた光ファイバ圧力センサのダイヤフラムチップをそのまま流用することとした。カテーテル外壁の触覚センサの構造を Fig.2.27 に示す。

センサ構造作製技術の検討

短波長のエキシマレーザを高分子膜に照射すると高分子の化学結合鎖が切られて気化・蒸発し、レーザ照射部分が除去されることから、直接的レーザエッチングが可能となる。この現象はレーザ

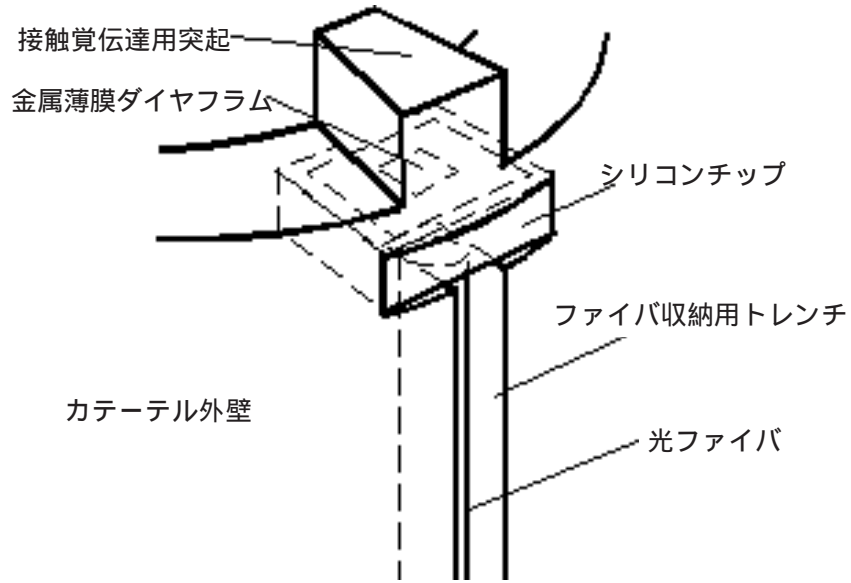


Fig.2.27 カテーテル外壁の触覚センサ

アブレーション (ablation ; 溶発) と呼ばれ、有機ポリマー膜の直接エッチング加工などの研究に応用されてきている。

レーザ照射系を Fig.2.28 に示す。波長 248nm の KrF エキシマレーザ光で照射されたマスクの像が試料表面に結像するようになっており、投影倍率は約 1/20 である。試料表面はレーザ照射系と光学系を一部共有する観察光学系によりモニタ上で観察可能である。レーザ照射系と観察系はサンプル上で同じ位置に結像するように調整されている。モニタ上で焦点のあった像が得られるよ

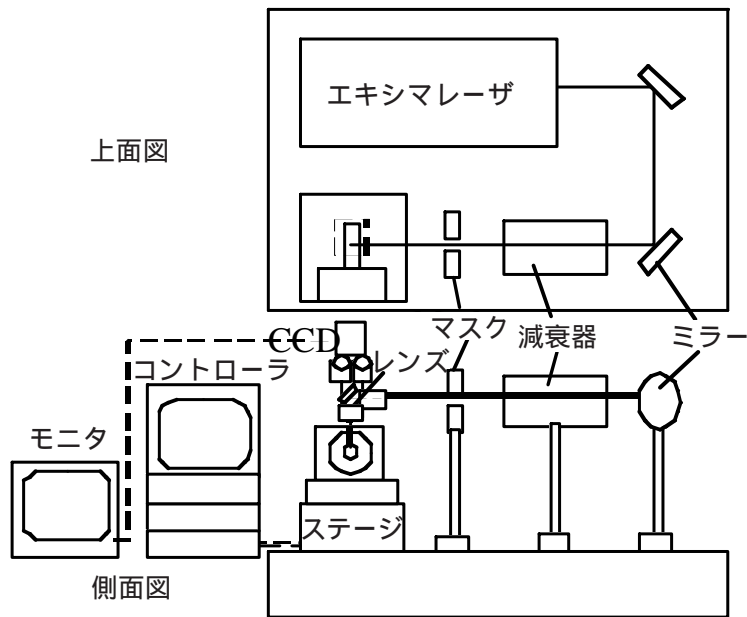


Fig.2.28 エキシマレーザ加工装置の構造

うにサンプルを光軸方向に移動することによってマスク像の焦点あわせを行う。

各種材料のアブレーション特性の検討を行った結果、エキシマレーザにより比較的アブレーションされやすいポリウレタンを用いて、試料表面でのビームサイズを $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ とした場合に深さ $500\ \mu\text{m}$ の貫通加工が可能であることがわかった。この検討結果をもとにエキシマレーザを用いて Fig.2.27 に示した触覚センサ構造体の加工を行った。金属薄膜ダイアフラムチップ用の溝は以下に述べる $450\ \mu\text{m} \times 450\ \mu\text{m} \times$ 厚さ $100\ \mu\text{m}$ のチップを挿入することが可能な大きさとした。また光ファイバ用溝は外径 $125\ \mu\text{m}$ の光ファイバを挿入可能なサイズとした。エキシマレーザを用いて作製した金属薄膜ダイアフラムチップ用の溝及び光ファイバ用の溝のSEM写真を Fig.2.29 に示す。エキシマレーザを用いてポリウレタンチューブ先端に立体的微細加工を行うことにより触覚センサ構造体を作製することが可能となった。

金属薄膜ダイアフラムは、2.2で試作したセンサヘッドのダイヤフラムをそのまま使用した。

エキシマレーザを用いて加工したセンサ構造体に上記の金属薄膜ダイアフラム及び光ファイバを挿入し触覚センサの組立を行った。組立後の触覚センサのSEM写真を Fig.2.30 に示す。

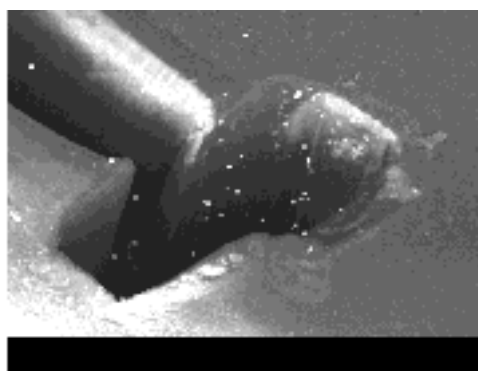


Fig.2.29 溝加工のSEM写真

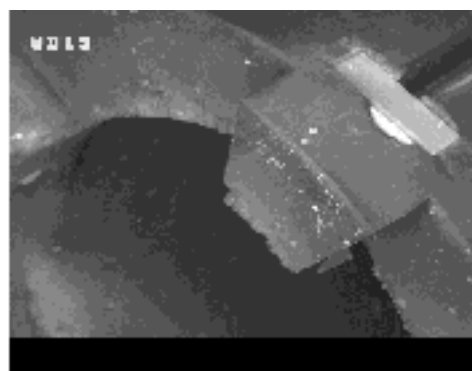


Fig.2.30 触覚センサ構造体のSEM写真

センサの特性評価

試作を行った触覚センサのセンサ特性評価を行った。特性評価に用いた装置を Fig.2.31 に示す。光源としては波長 $1.3\ \mu\text{m}$ のLED光源を用いた。光ファイバはコア径 $50\ \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\ \mu\text{m}$ のGIファイバを用いた。触覚センサの特性評価に先立ちダイヤフラム直前の光ファイバからの出射光強度を測定した結果、約 640nW であった。また光ファイバを触覚センサに装着しない状態での戻り光強度（ファイバ端およびコネクタ端からの反射）は約 19nW であった。

光ファイバをセンサ構造体に装着し突起部に荷重を $0 \sim 20\text{gf}$ 印加して戻り光強度を測定した。その結果戻り光強度は 19.1nW のまま一定であった。したがって金属ダイヤフラム膜からの反射光がまったく得られていないことがわかった。

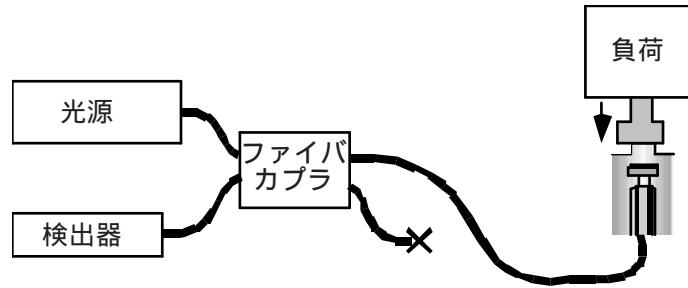


Fig.2.31 触覚センサ測定系

これは、光ファイバ配置用溝底面はファイバの長手方向に対してはほぼ平坦であったが、溝の深さは 実測した結果、約 $340\ \mu\text{m}$ と設計値 ($300\ \mu\text{m}$) に比べて大きいことがわかった。従ってファイバ端とダイヤフラムの位置ずれが生じ、ファイバから出射された光はダイヤフラムに照射されていないことがわかった。その結果戻り光強度変化が得られなかったものと考えられる。

2.3.3 埋込型触覚センサの改良

改良型センサの構造

前述のセンサ構造ではダイヤフラムサイズが $130\ \mu\text{m} \times 130\ \mu\text{m}$ と光ファイバの外径とほぼ等しくセンサチップと光ファイバの位置合わせが難しい。これはチューブを加工する際に用いるエキシマレーザ加工装置が加工平面に対する加工精度に比べて深さ方向の加工精度が劣るためである。また、前述のセンサ特性評価中に荷重を印加した際のセンサチップを観察したところ荷重の増加に伴いセンサチップ全体が変位するのが観察された。これはセンサチップを埋め込んだポリウレタンチューブが圧縮変形しセンサチップが変位するからである。従ってダイヤフラムを用いる利点は小さいと考え、 Fig.2.32 に示す改良型の触覚センサを作製した。センサチップは金属薄膜ダイヤフラムではなくシリコンウェーハに金属薄膜を蒸着したものをを用いた。チップサイズは前項で述べたダイヤフラムと同一である。改良型センサでは反射膜を光ファイバに近づけることにより光ファイバと反射膜の位置ずれが小さくなり戻り光強度が大きくなると考えられる。

改良型センサの特性評価

センサ特性評価は前項と同一の評価装置を用いて行った。センサ構造体の突起部に荷重を $0 \sim 20\text{gf}$ 印加した場合の突起部の変位量と戻り光強度の関係を Fig.2.33 に示す。測定の結果印加荷重にほぼ比例した戻り光強度が得られた。また、 20gf 印加時には突起部は約 $32\ \mu\text{m}$ 変位していることが分かった。

本触覚センサは、エキシマレーザ加工装置を用いて直接チューブの加工を行うためにセンサ構造の変更が容易である。その結果、触覚センサの突起部の形状変更やファイバ端と反射膜の距離を変更することにより測定感度の向上や測定レンジの拡大が可能である。

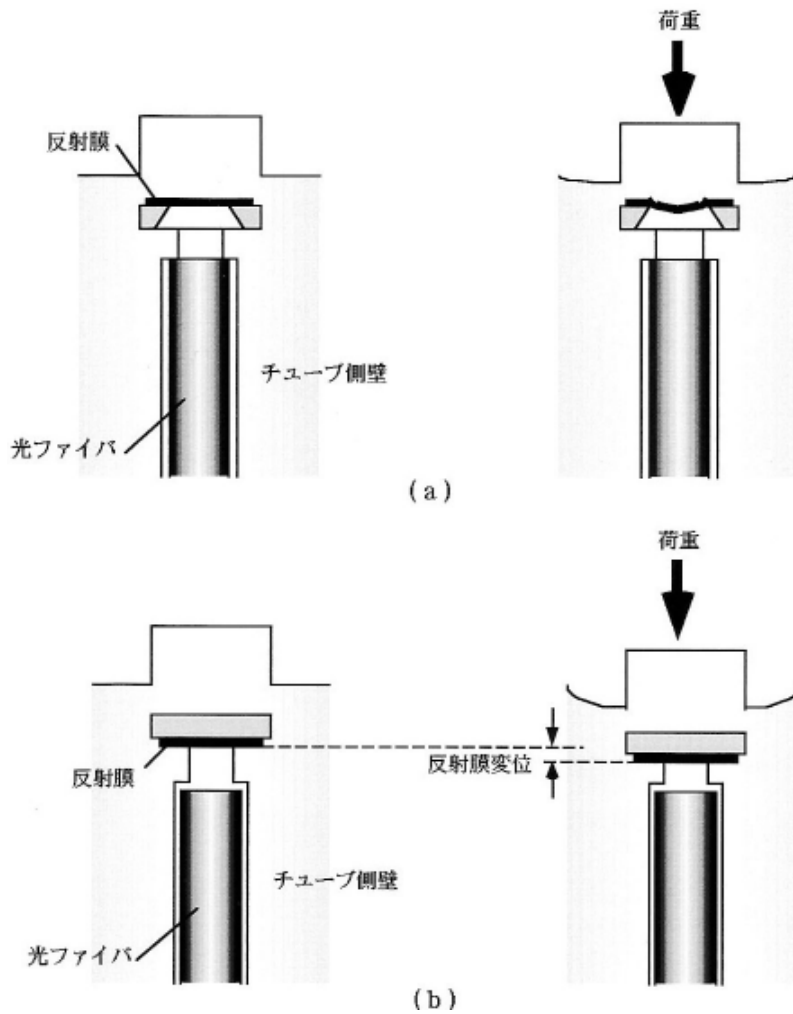


Fig.2.32 触覚センサの構造 (a :従来型、 b :改良型)

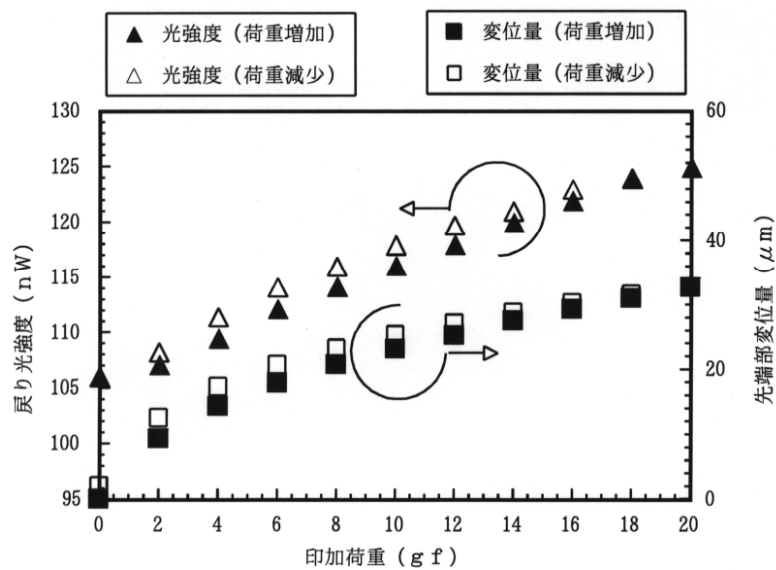


Fig.2.33 印可荷重に対する突起部の変位置と戻り光強度の関係

2.3.4 独立型触覚センサの検討

これまでに試作を行ってきた埋込型センサ構造においては、荷重を受ける部分(感圧部)と光の反射面が別の部材からなっており、組立精度に問題があった。また反射面が平面であるために、垂直方向の荷重に比べてせん断方向からの力により、センサ特性が不安定になるという問題点があった。これらの問題点を解決するために、感圧部と光の反射面を同一の材料とした。また、せん断方向からの荷重を受けた場合に、反射面が垂直方向に変位可能とするために、感圧部及び反射面を球状とした。

独立型センサの構造

問題点の改善のため、改良を行った触覚センサの断面構造を Fig.2.34 に示す。ガイド用の SUS チューブ(外径0.6mm)の中に、光の投受光用の光ファイバ(被覆外径0.25mm、クラッド径0.125mm)と、ポリウレタンシートが配置されその上に、直径0.4mmの鋼球が配置されている。外力による鋼球の変位を光ファイバの反射光強度変化として検出するものである。

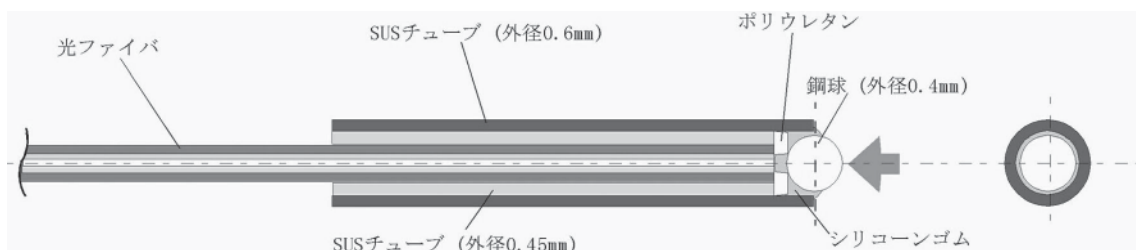


Fig.2.34 独立型触覚センサの断面

独立型センサの作製方法の検討

Fig.2.35 に触覚センサの作製プロセス図を示す。以下に作製プロセスを示す。

被覆外径0.125mmの光ファイバと外径0.45mmのSUSチューブをポリイミドチューブを介して接着剤により固定する。

で作製したものを鋼球、ポリウレタンシートのガイド用のSUSチューブ内に挿入する。

エキシマレーザにより加工した外径0.45mm、穴径0.15mm、厚さ0.1mmのポリウレタンシートをガイド用SUSチューブ内に配置する。

外径0.4mmの鋼球を配置する。

鋼球表面からの反射光強度を光ファイバを經由してモニタリングしながら微動ステージにより反射光強度が最大となるように光ファイバを位置決めし、ガイド用SUSパイプと固定する。

組立後のセンサの外観写真を Fig.2.36 に示す。

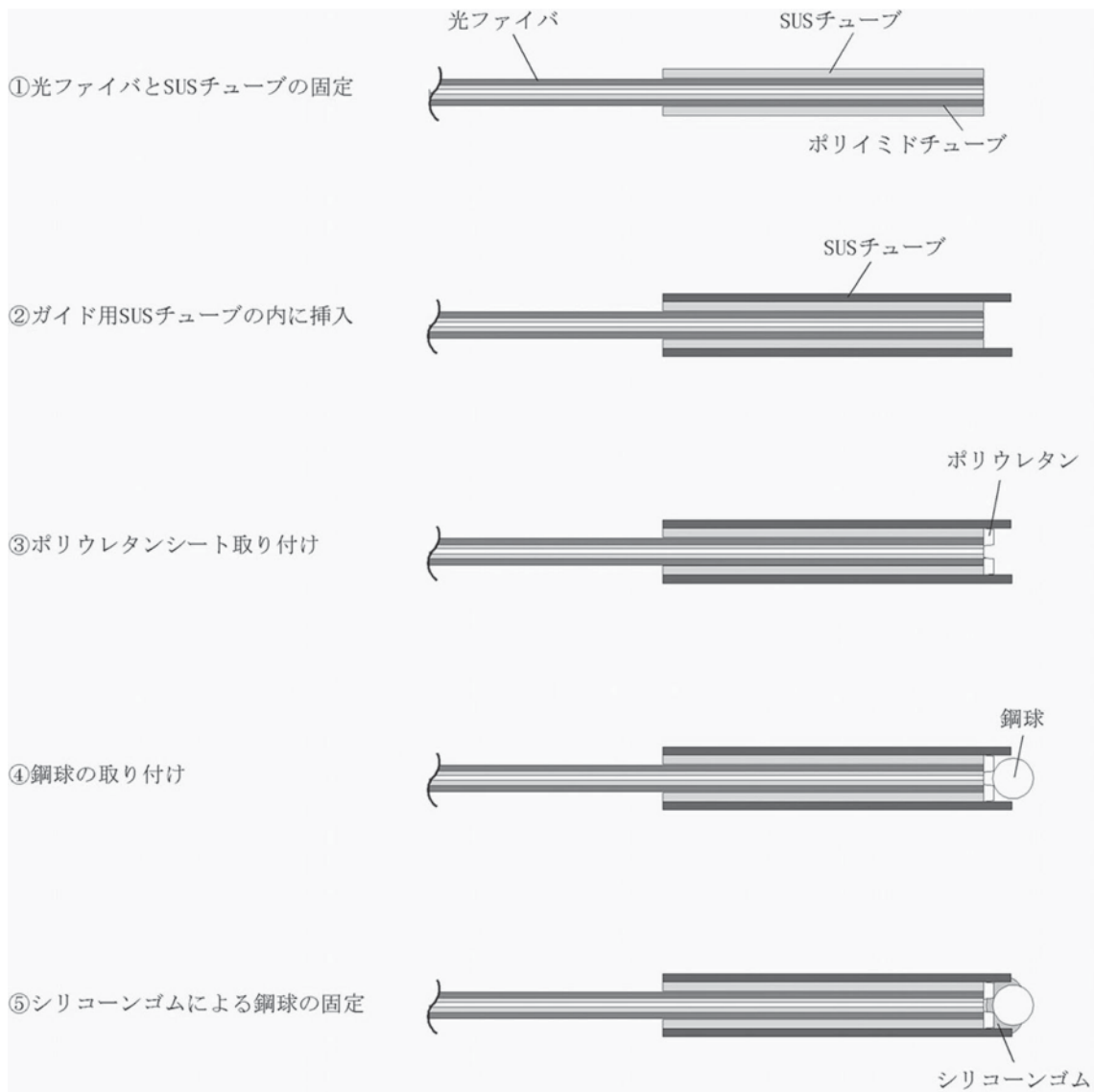


Fig.2.35 触覚センサの作製プロセス

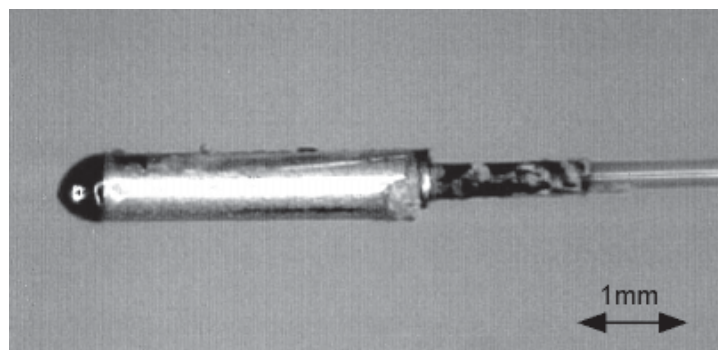


Fig.2.36 触覚センサの外観写真

独立型センサの特性評価

作製した触覚センサから4個を抽出し、それぞれのセンサ特性の評価を行った。測定装置の構成を Fig.2.37 に示す。光ファイバカプラにより入射光と反射光を分岐することにより、反射光強度の測定を行った。反射光強度の測定に用いた装置は下記の通りである。

(測定装置)

LED光源 : AQ4215 [波長 : 1.3 μm] (安藤電気製)

検出器 : AQ2733 (安藤電気製)

マルチモードカプラ : MPR-01 \times 02-050/125-50 (大崎電気工業製)

実際の測定は下記の手順により行った。

無負荷での光強度測定

一定荷重を加える

光強度測定

荷重を取り除く

光強度測定

から を繰り返しながら荷重を増加し、25mNまで測定を行った。

測定により得られた荷重と光強度との関係を Fig.2.38 に示す。

サンプル1、3、4は荷重の増加に伴い反射光強度も増加している。また、荷重を取り除いた際

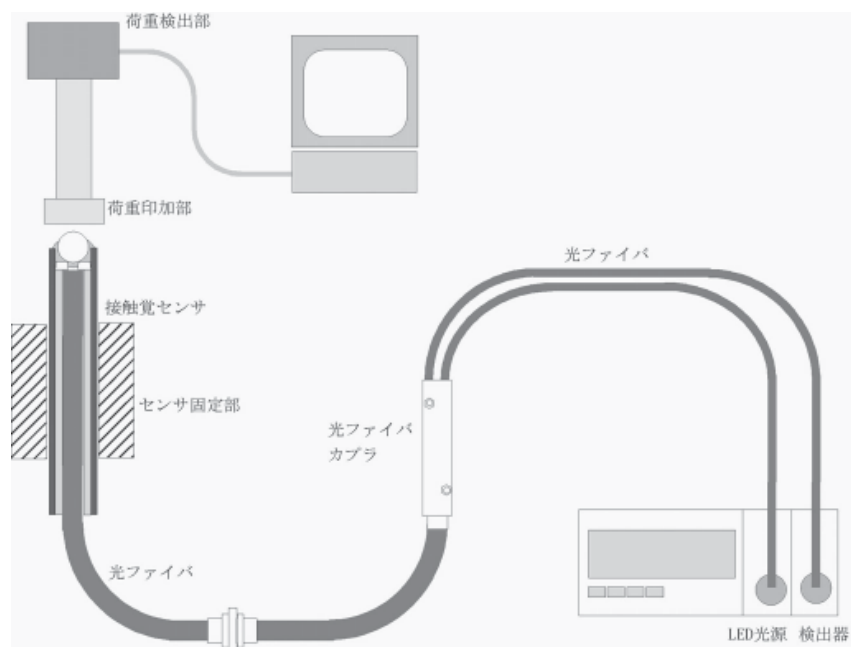


Fig.2.37 測定装置の構成

には、ほぼ一定の反射光強度となっている。これに対してサンプル2は、荷重の増加に対して反射光強度が減少しており変化も大きい。これはサンプル1、3、4が金属球(反射面)の変位方向と光ファイバの光軸の中心が同軸であるのに対して、サンプル3は傾きが生じているために、荷重の増加に対する反射光強度の減少が生じたものと考えられる。

反射光強度の変化量は10mNあたり約4 nWであり、検出器の感度から十分に変化を検出可能である。

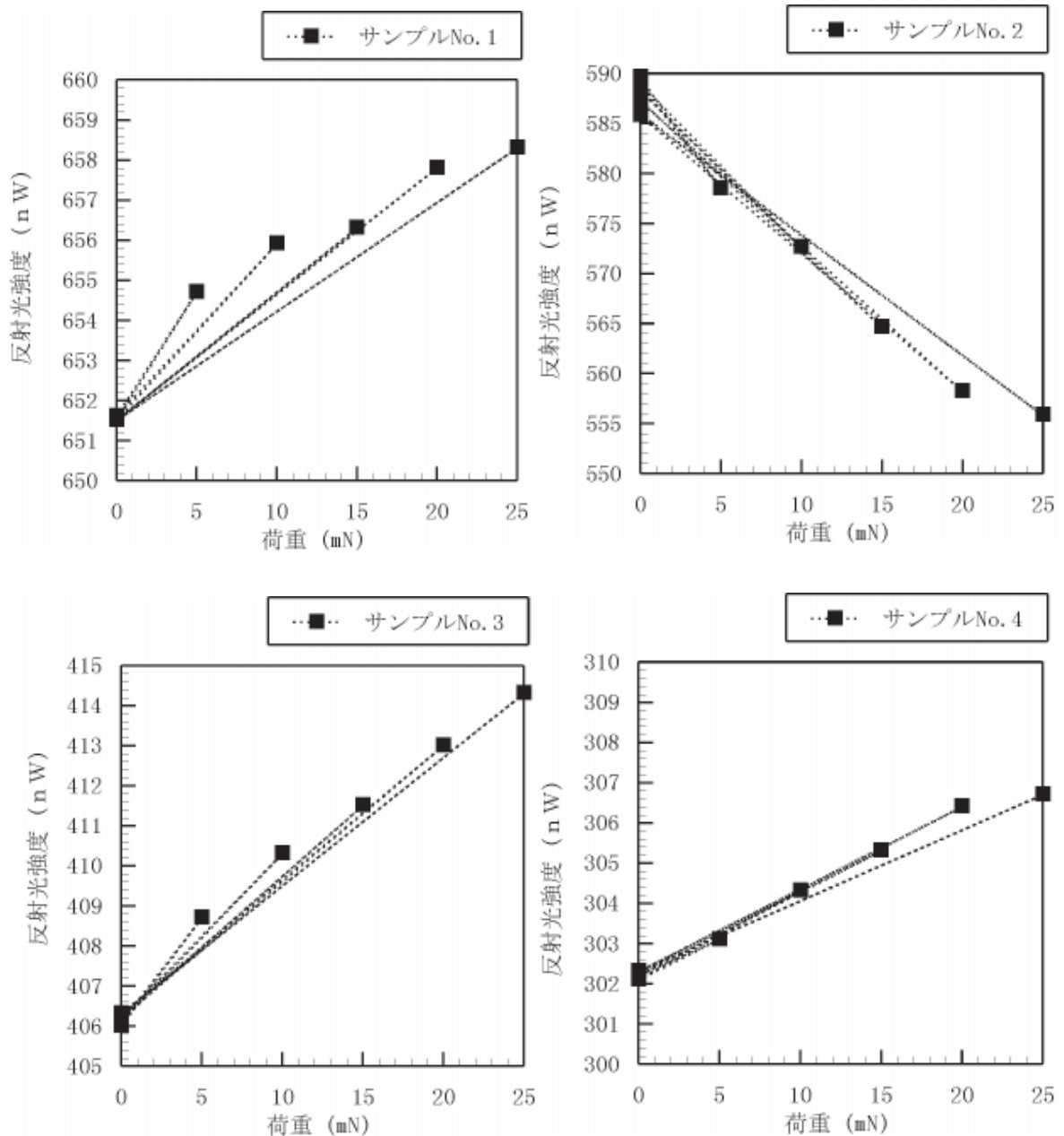


Fig.2.38 荷重と光強度との関係

2.3.5 独立型触覚センサの最適化

本触覚センサは、拡大観察機構に搭載し、微細構造物の顕微観察を行うことを目的とする。本センサと顕微観察スコープ（コンタクトスコープ）を用いた顕微観察・寸法計測システムを Fig.2.39 に示す。ここでコンタクトスコープとは通常のファイバースコープと違い、イメージガイド先端に結像用のレンズ（分布屈折率ロッドレンズ）を持たないものである。よってコンタクトスコープ先端と観察対象物間に任意の空間が存在する場合、像は観察されない。逆にコンタクトスコープ先端と観察対象物が接触している場合、結果として拡大画像が観察される。この場合、通常のファイバースコープと違い、照明光がイメージガイドに入らない。そのため、イメージガイドの一部にライトガイドからの漏洩・注入する事により、照明光を供給する。イメージガイドは画素径が非常に小さい（約 $2.8 \sim 3.8 \mu\text{m}$ 程度）ので、光の伝送損失が大きく、照明が十分に伝送されない可能性がある。そこでイメージガイド先端近傍で照明光を注入することにより、終端の CCD カメラで検出可能な画像の明るさを得ることが可能となった。このコンタクトスコープと観察対象物の「接触」を検知するのが、本触覚センサである。Fig.2.40 に寸法計測の手続きを示す。触覚センサの装着されたコンタクトスコープは、Z軸ステージに固定され（同図(a)）、ステージの下降により観察対象物に接触する（同図(b)）。このとき、触覚センサよりの接触検知信号により Z 軸ステージの下降が停止され、コンタクトスコープより拡大画像が得られる。さらに寸法計測のため、Z 軸ステージにより若干（数 μm 程度）コンタクトスコープを上昇させる。この状態でも画像取得が可能である。その後、観察対象物がマウントされている X-Y ステージを動かすことにより、モニタ上の

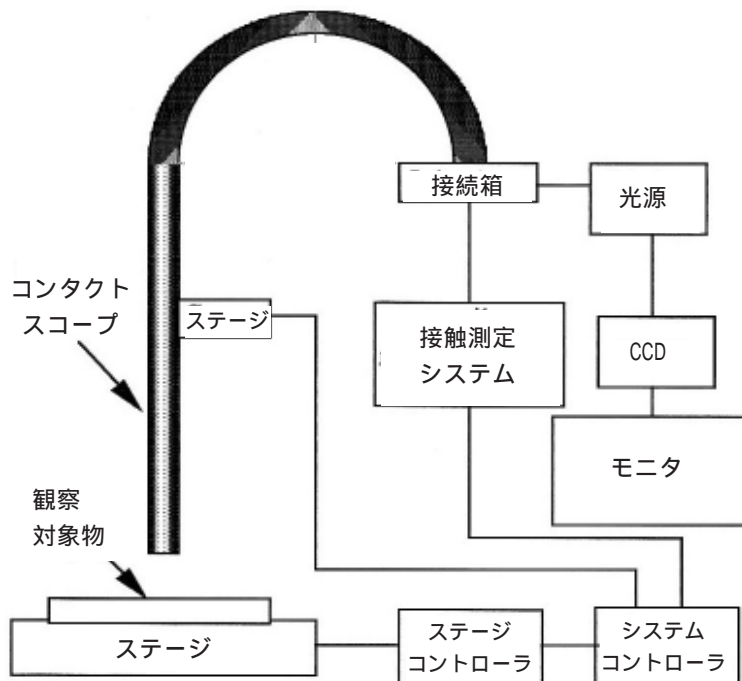


Fig.2.39 顕微観察・寸法計測システム

マーカーとX-Yステージの移動量により寸法計測が可能となる。これにより、これまでファイバスコープでは観察不可能であった、微小構造体の観察や寸法計測が可能となった。本システムにおける観察分解能は約6 μm である。このようなシステムでの光ファイバ触覚センサの使用を考えた場合、信号入出力用の光ファイバは、先端首振りを行うためのSMAアクチュエータの近傍に配置されることが予想されるため、耐熱性の向上が望まれる。このような観点から、触覚センサの実使用システムに即した最適化（光ファイバの細径化・耐熱性の向上、信号検出方式の検討等）を行った。

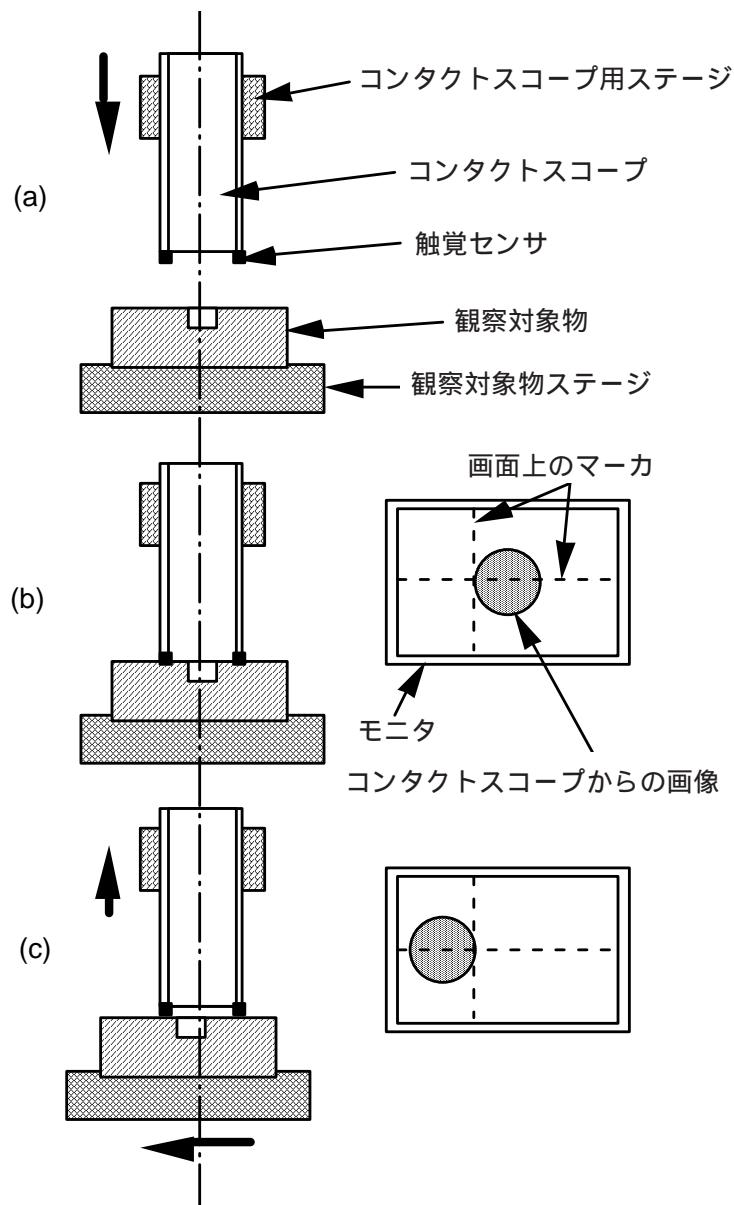


Fig.2.40 寸法計測方法

耐熱性の向上

従来用いていた光ファイバは、Fig.2.41 に示すように、250 μm のアクリルバッファコーティング層を持ち、使用温度限界は - 65 ~ 135 である。このため、コーティング層をポリアミドバッファコートに変更した。その結果、耐熱温度は375 まで向上した。また、化学的、機械的な強度が増加したことによりコーティング層の外径を 155 μm まで減少することが可能となった。この光ファイバを用いて作製した触覚センサの構造を Fig.2.42 に示す。センサヘッド部の構造及び寸法は従来と同一であるが、光ファイバ部を細径化することにより、極細径内視鏡、カテテルへの搭載が可能となった。また、耐熱性の向上によりSMAアクチュエータの熱影響を回避することも可能となった。



Fig.2.41 光ファイバの断面構造

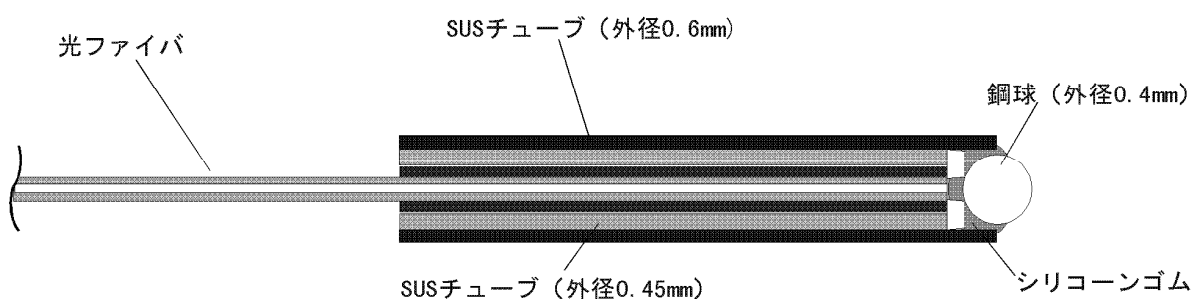


Fig.2.42 光ファイバ触覚センサの構造

信号検出システムの改善

顕微観察用ファイバスコープは、通常のファイバスコープよりも遙かに高分解能であるという特徴を持つ。しかし、この分解能は観察距離に大きく依存するため、適切な観察距離を設定する機能が必要となる。この機能の中心的な役割を果たしているのが触覚センサである。触覚センサは、顕微観察用ファイバスコープの先端部分に設置され、観察対象との接触力をセンサの戻り光強度より

求めることができる。接触信号の伝達経路の概略を Fig.2.43 に示す。まず、光マルチメータのLED光源から照射された光はファイバを通じてカブラへと入り、触覚センサへ到達する。その後、センサ内で反射された戻り光がカブラを通じてセンサユニットへ到達し、戻り光強度が測定される。戻り光強度値はパソコンに送られて演算後、接触検知と判断されれば、コントローラへ接触検知信号を発信する。

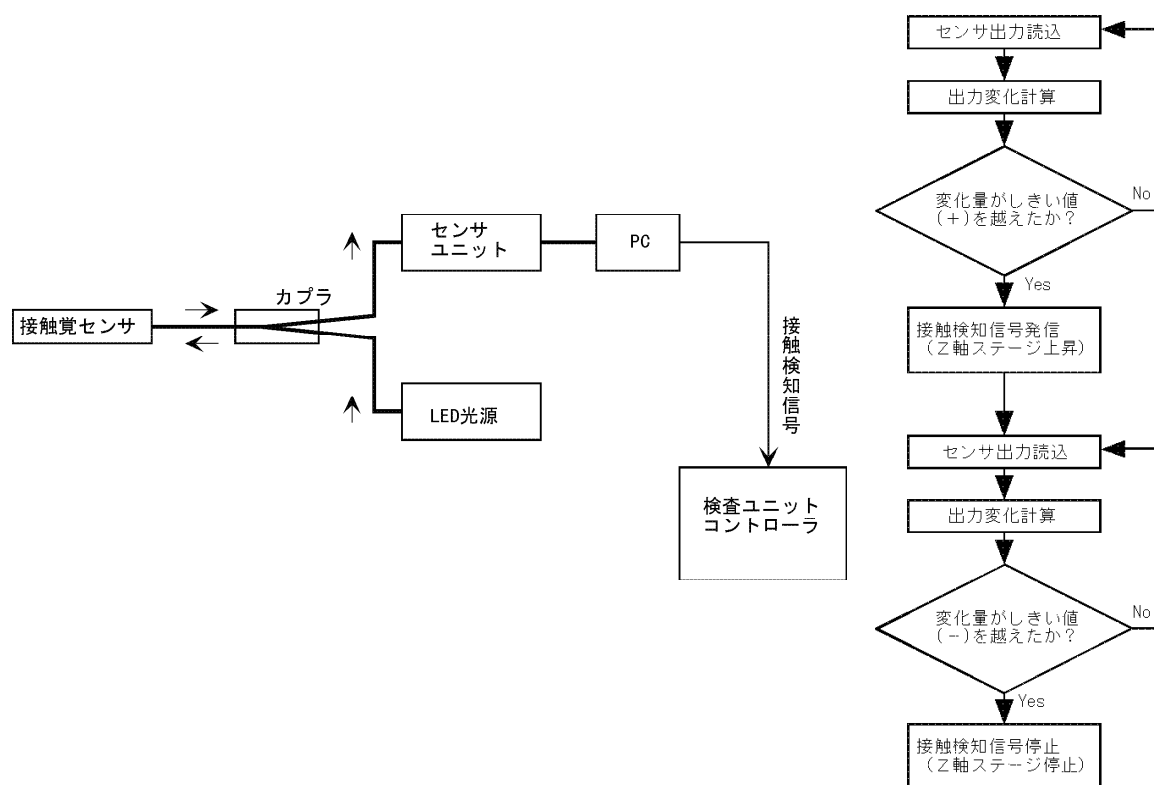


Fig.2.43 接触信号の伝達経路の概略図及び制御フロー

接触検知の判定は、センサ信号(戻り光の強度)が触覚センサの接触状態により変化することを利用して利用している。観察対象にセンサが接触すると接触力に応じてセンサ信号が増加するので、非接触時のセンサ信号と比較すれば接触状態がわかる。すなわち、センサ信号が大幅に増加或いは減少する時、センサが対象と接触或いは接触解除したことになる。

センサ信号検出の検討を行った結果、センサの接触前と接触解除後のセンサ信号が必ずしも同一にはならないことがわかった。したがって、接触検知の判別は、センサ信号の絶対値を用いた評価ではなく、センサ信号の増分(微分値)を元にした接触の判定が有効であると考えられ、Fig.2.43 に示すセンサ信号検出の制御フロー及び、Fig.2.44 に示すセンサ信号とステージ動作に変更した。

Fig.2.44 の各区間におけるセンサ信号とステージ動作を Table 2.8 にまとめる。また、

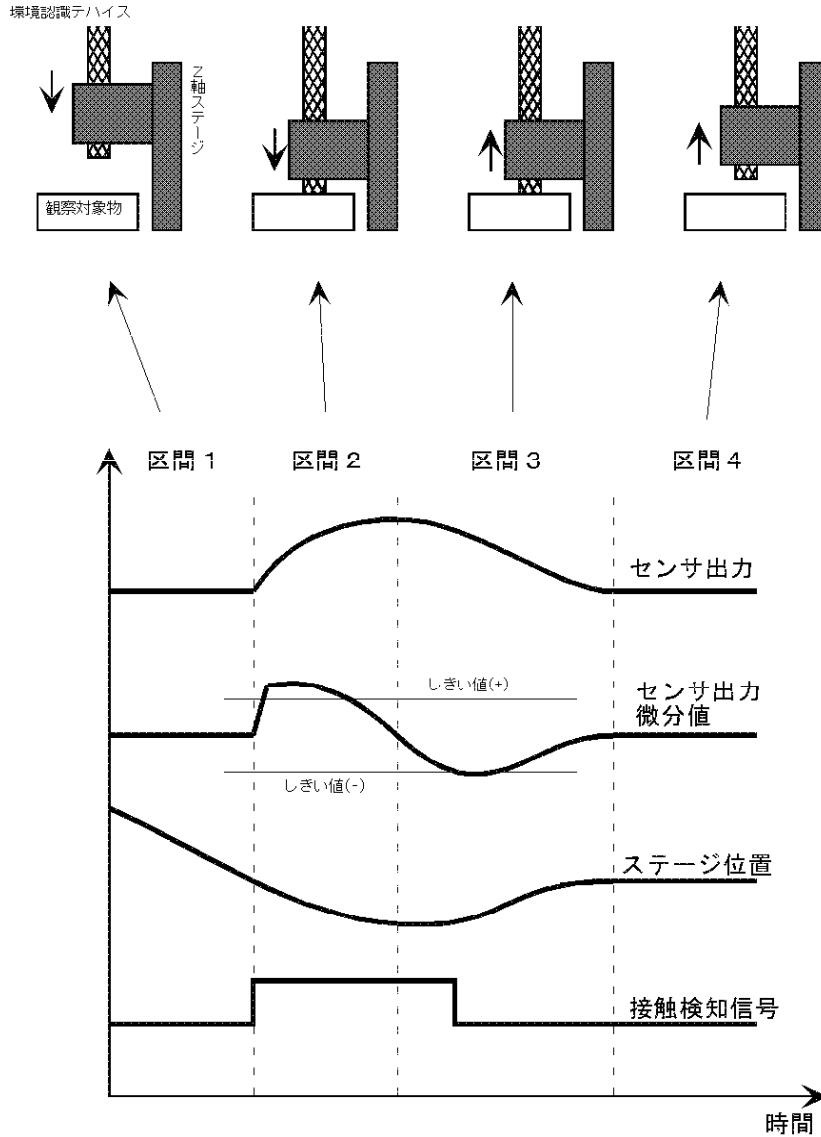


Fig.2.44 センサ信号とステージ動作の概略

Table 2.8 各区間におけるセンサ信号とステージ動作

区間	センサ信号	ステージ動作
1		・Z軸ステージが下降し、環境認識デバイスが観察対象に近づく
2	デバイス先端が観察対象に接触しセンサ出力が増加 センサ出力の微分値がしきい値(+側)を越えると「接触信号」を検査ユニットコントローラへ送信	Z軸ステージが下降 停止状態となる
3	センサ出力が減少 センサ出力の微分値がしきい値(-側)を越えると「接触信号」を解除	Z軸ステージが反転(停止 上昇)方向に動作 Z軸ステージが上昇 停止状態となる
4		・デバイス先端が観察対象から離れる

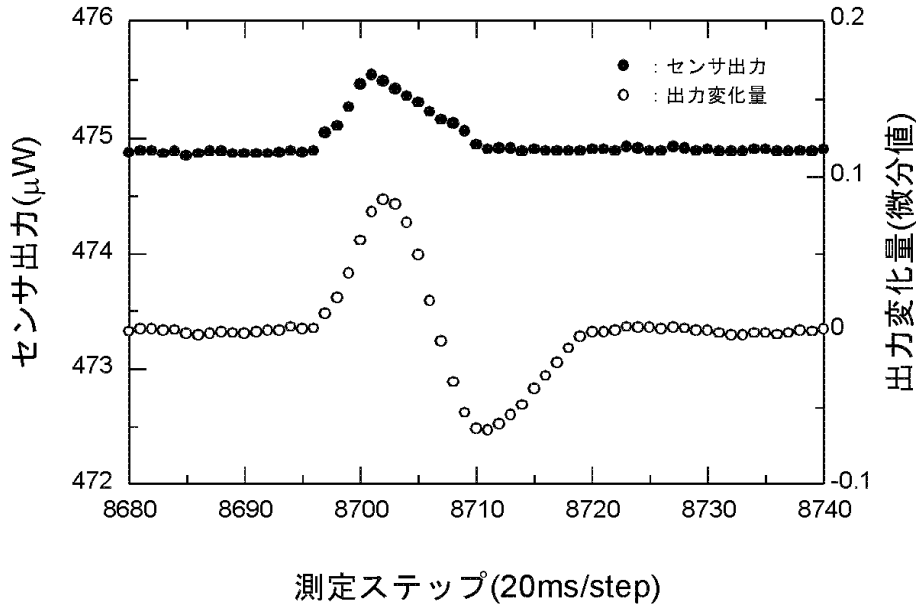


Fig.2.45 接触動作時のセンサ信号の測定結果

Fig.2.44 に示した制御フローを用いて実際に測定したセンサ出力を Fig.2.45 に示す。従来の方式に比べて、観察対象との接触力を高感度に検出することが可能となり、その結果、顕微鏡観察用ファイバ스코ープに最適な観察距離を設定することが可能となった。

2.4 まとめ

シリコンマイクロマシニングを応用した新規の光ファイバ圧力センサを考案、機能検証、小型化を検討し、さらに良好な結果の得られた光ファイバセンサを接触子の検討により触覚測定へ応用し、次の結果を得た。

- (1) ダイアフラムをシリコン基板に形成し、これにファイバストップ・アライメントストラクチャを陽極接合により接合した構造をもつ光ファイバ圧力センサを考案・試作し、感度 $0.19 \mu\text{W}/\text{MPa}$ の良好な圧力応答特性を得た。
- (2) 水ガラス接合によるシリコン3層接合によりセンサの小型化を図り、これを実際のバルーンカテーテルに適用し、世界で初めてインジェクタの吐出圧とバルーン内実圧力の差を実測した。
- (3) 圧力センサを触覚センサに応用し、これをコンタクトスコープを用いた顕微鏡観察・寸法計測システムに適用し、分解能 $6 \mu\text{m}$ の顕微鏡観察・寸法計測機能を確認した。

第3章 光駆動アクチュエータとその応用

マイクロマシンが作業を行う場合、実際に種々の作業を行うマニピュレータやその動きを制御するためのセンサと共に、周囲の状況を把握するような視覚機能を担うデバイスが必要になる。この視覚機能も平面的な画像では不十分で、実作業を考えると奥行き感覚のある立体観察が不可欠となる。また、観察範囲を広くするには、視覚機能を担うデバイスの視野を広げるべく、例えば先端首振り機能が必要となる。そこで非常に小さな部品や狭い領域を人間があたかも小さくなって、その場で観察しているような人工現実感を実現すべく立体視機構とスコープ先端への首振り機構を開発した。さらに、立体視機構と首振り機構を光駆動化することにより、安全で細径・高機能な視覚機構の実現を目指した。

3.1 バルーンを用いた光駆動アクチュエータと立体視機構への応用

立体感を得るには、人間が物を見る行為と同様の動作、つまり右目と左目に視方向が若干違う画像をそれぞれ別々に入力すればよい。このときの右目と左目の間隔を両眼間隔、視方向を輻輳角といい、これらを合わせて視差と表現している。この方式を用いてファイバスコープによる立体視を実現するには、右目入力用と左目入力用の2本のファイバスコープを用いれば良いが、単に2本のファイバスコープを並べるだけでは自然な立体感は得られない。人間が瞳を動かして観察距離を調節しているのと同様に、ファイバスコープの視方向も変化させる(輻輳)機能を具備することにより観察対象物の微妙な変化に対応可能な立体視スコープを得ることができる。これを実現させるため、並列したファイバスコープの先端をバルーンアクチュエータを用いて内側に曲げる方法を考案した。これはバルーン(医療用)の内部に作動流体を充填し、これを光ファイバにより導光されたレーザ光で拡張させるものである。この方式を用いた視差可変機構を試作し、外径2mmで輻輳角を0~5°変化させることの出来る立体視スコープを開発した。このスコープを用いて立体構造物の観察実験を行い、輻輳角の変化により、立体感が変化(輻輳角が大きいほど立体感が強調される)することを確認した。さらこれに付帯する立体画像表示システムの検討を行い、疲労感の少ない偏光メガネ方式のディスプレイを開発した。

3.1.1 立体視とは

狭隘部や細管内で作業を行う場合、実際に種々の作業を行うマニピュレータやその動きを制御するためのセンサと共に、周囲の状況を把握するような視覚機能を担うデバイスが必要になる。この視覚機能も平面的な画像では不十分で、奥行き感覚のある立体観察が不可欠となる。そこで非常に小さな部品や狭い領域を人間があたかも小さくなって、その場で観察しているような人工現実感[143]を実現すべく立体視スコープの開発が必要不可欠となる。

立体感を表示しようとする試みは非常に古くから行われており、ブリッジ回路で有名なホイートストーンも既に19世紀にステレオスコープを発表している。基本的には人間が物を見る行為と同様の動作、つまり右目と左目に視方向が若干違う画像をそれぞれ別々に入力することにより、立体感を得ることができる。このときの右目と左目の間隔を両眼間隔、視方向を輻輳角といい、これらを合わせて視差と表現している。この方式を用いてファイバスコープによる立体視を実現するには、右目入力用と左目入力用の2本のファイバスコープを用いれば良いが[144, 145]、単に2本のファイバスコープを並べるだけでは自然な立体感は得られない。人間が瞳を動かして観察距離を調節しているのと同様に、ファイバスコープの視方向も変化させる(輻輳)機能を具備することにより観察対象物の微妙な変化に対応可能な立体視スコープを得ることができる。これを実現させるため、並列したファイバスコープの先端を各種アクチュエータを用いて内側に曲げる方法を研究した。

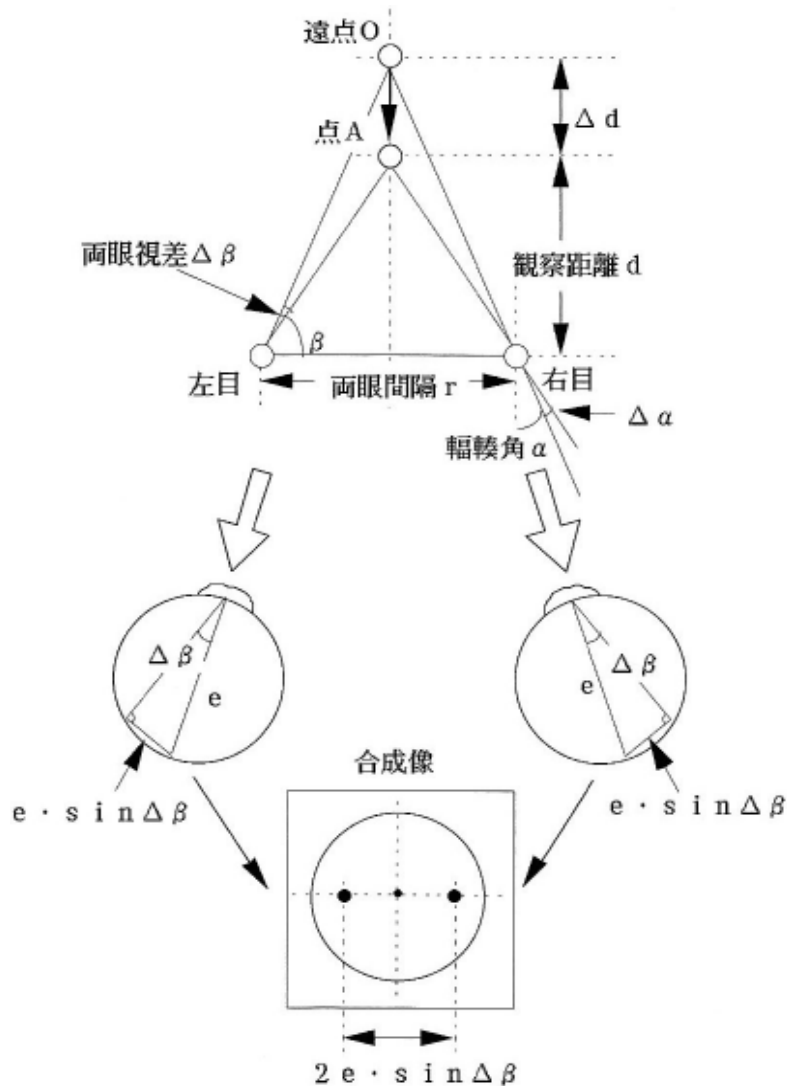


Fig.3.1 立体視パラメータと両眼視差との関係

3.1.2 立体視パラメータ

Fig.3.1 に立体視パラメータと両眼視差の関係を示す。この図から観察距離 d は輻輳角 θ と両眼間隔 r を用いて表すと

$$d = (r / 2) \tan(\theta / 2) \dots \dots \text{式(3.1)}$$

$$\theta / 2 = \arctan(2d / r) \dots \dots \text{式(3.2)}$$

r が一定の時、 d だけ観察対象が移動した場合、視差角 $\Delta\theta$ は、

$$(\theta + \Delta\theta) - \theta = \arctan(2(d + \Delta d) / r) - \arctan(2d / r)$$

これより

$$d = (r / 2) \sec^2 \theta \cdot \Delta\theta$$

$$= (r / 2 + 2d^2 / r)$$

$$2(d^2 / r)$$

であるから

$$\Delta\theta / \theta = 2(d^2 / r) \dots \dots \text{式(3.3)}$$

このような関係が導き出せる[148]。この関係を踏まえて両眼視差 s とそれぞれのパラメータの関係を考察する。

(1) 観察距離と両眼視差との関係

前方任意の一点を両眼で観察する場合を考える。Fig.3.1 より観察対象が遠点 O から点 A に移動した場合、両眼の網膜上に投影される点の位置は片眼で $e \cdot \sin \theta$ だけ移動する。この場合の左右両眼の合成像を考えると、遠点 O の網膜上の合成像の位置が同一であるとする合成像の点 A の網膜上の位置の差 s (両眼視差) は

$$s = 2 \cdot e \cdot \sin \theta \dots \dots \text{式(3.4)}$$

となる。ここで e は眼球の直径でありこれを定数とすると式(3.3)、(3.4)より観察対象が遠点 O から点 A に移動すれば、 s は大きくなり、立体知覚に与える影響が大きくなる。

(2) 輻輳角と両眼視差との関係

輻輳角の変化量 $\Delta\theta$ と視差角 θ の関係はより、 $\Delta\theta / \theta = 2(d^2 / r)$ なので式(3.4)より

$$s = 2 \cdot e \cdot \sin \theta \cdot \Delta\theta \dots \dots \text{式(3.5)}$$

となる。よって(1)の関係と同様に観察対象が近づくと輻輳角 θ は大きくなることにより、立体知覚に影響を与える。

(3) 両眼間隔と両眼視差との関係

Fig.3.2 に両眼間隔と両眼視差との関係を示す。これより輻輳角 θ は一定で両眼間隔を r だけ小さくした $r - \Delta r$ とすると、両眼視差は $s + \Delta s$ となり、この時のそれぞれの変化量は

$$\Delta r \quad \Delta s$$

であり両眼間隔が小さくなると輻輳角 θ も小さくなり、立体知覚に与える影響も小さくなる。

以上(1)~(3)の考察より立体視スコープによる立体知覚を大きくするためには、大きな輻

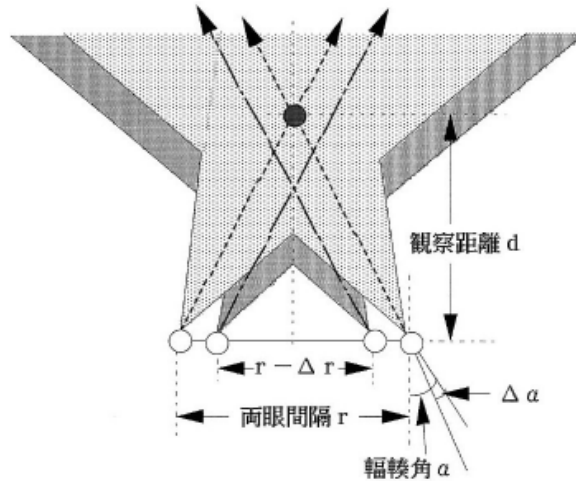


Fig.3.2 両眼間隔と両眼視差との関係

輻角と両眼間隔を与える必要があることが判った。これを基に各種アクチュエータを用いた視差可変機構の設計を行った。

3.1.3 リング型視差可変機構を有する立体視スコープ

立体視のための眼は2本のファイバースコープを用いることとする場合、輻輳角や両眼間隔を変更する機構をどのように内包させるかが問題となる。そこで Fig.3.3 に示す視差可変機構を考案した。これは2本の平行するファイバースコープの先端にSMAコイルバネを巻付け、SMAコイルを通

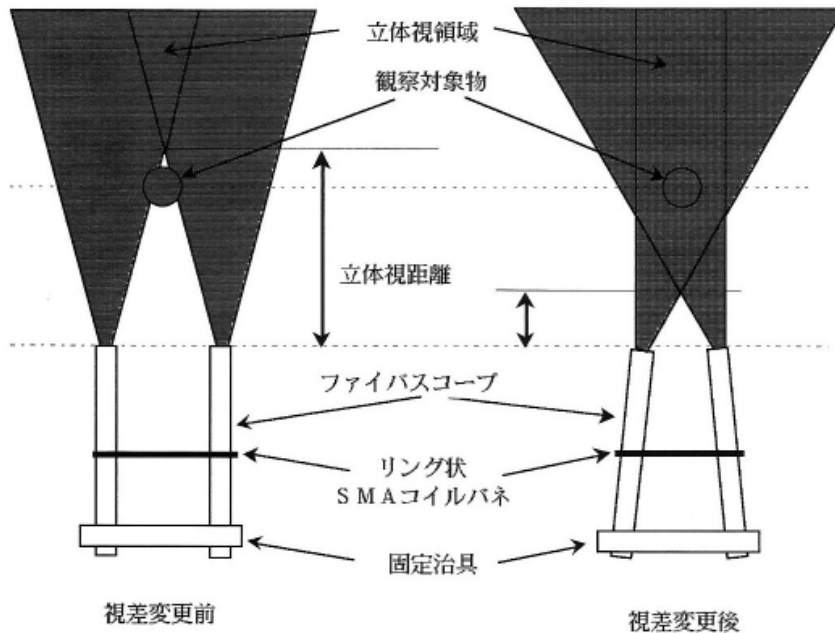


Fig.3.3 ファイバースコープによる立体観察の原理

電加熱することによりバネを収縮させ、この時の発生力により輻輳角や両眼間隔を変化させようとするものである。この視差可変機構の具体的構造を Fig.3.4 に示す。SMA コイルバネにより所望の輻輳角を与えるために必要な力を求めるため、ファイバ스코ープ先端の剛性を測定した。さらにこの結果を用いて SMA コイルバネの諸元を決定した。

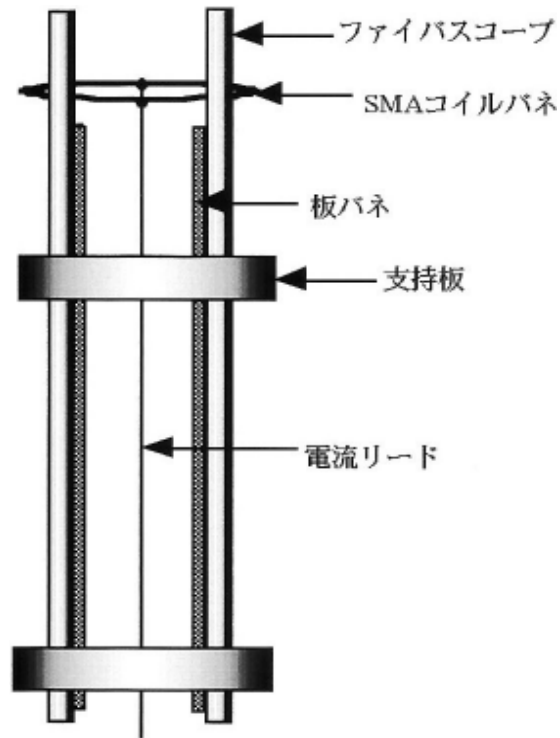


Fig.3.4 リング型視差可変機構

ファイバ스코ープ剛性評価

ファイバ스코ープの剛性測定方法を Fig.3.5 に示す。まずファイバ스코ープを移動ステージ上に設置した固定治具に取り付け、ファイバ스코ープの先端から1.5mmの位置に牽引用ワイヤを取り付ける。この牽引用ワイヤをバネばかりに接続し、移動ステージを下降させた時のファイバ스코ープ先端の変位を測定した。またファイバ스코ープの固定治具への取付位置を変化させて同様の測定を行った。ファイバ스코ープの荷重と変位量の測定結果を Fig.3.6 に示す。これより荷重と変位は直線関係を示し、ファイバ스코ープ長を長くするほど変位を大きくとれることが判る。また荷重とファイバ스코ープ先端角度の関係を Fig.3.7 に示す。ここに示すファイバスコープ長が実際に立体視スコープを作製する場合の視差変更部長となる。よって、ファイバスコープ先端を曲げるための力を考慮した上で、極力ファイバスコープを短くして輻輳角を大きくとれるようにする必要がある。

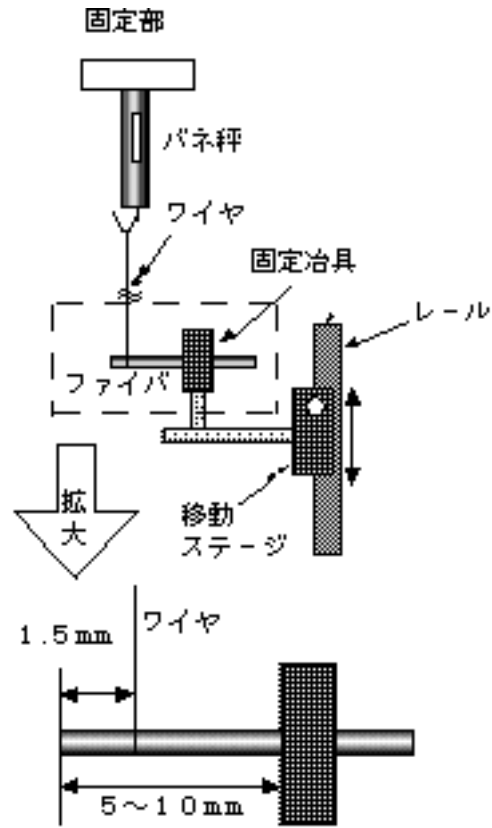


Fig.3.5 ファイバ스코ープの剛性測定方法

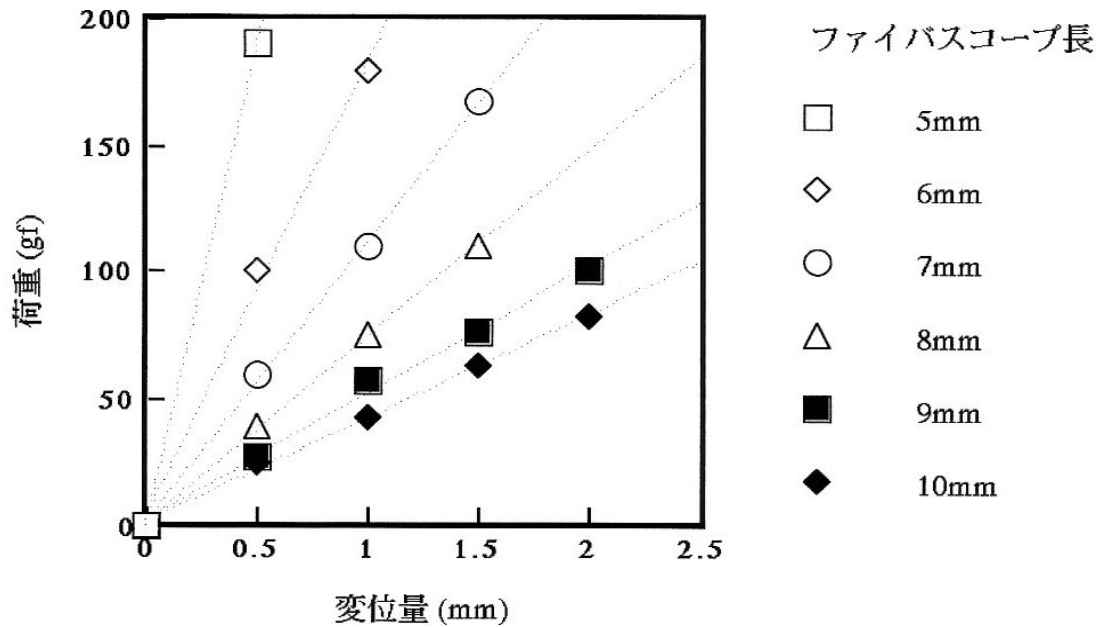


Fig.3.6 ファイバ스코ープの荷重と変位量の測定結果

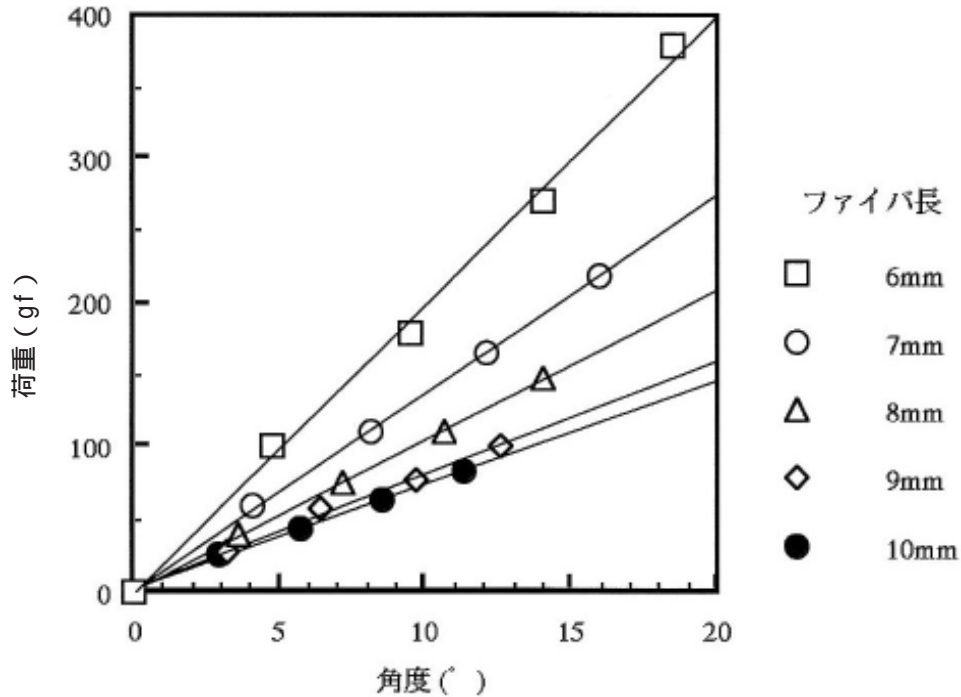


Fig.3.7 ファイバスコープ先端角度と荷重との関係

SMA コイルバネ諸元

視差変更部の長さを x [m]、Fig.3.6 の直線の傾き(ファイバスコープ先端部の見かけのばね定数)を F_1 [kgf/m]、バイアスバネの見かけのばね定数を F_2 [kgf/m] とすると全体の変位距離に対する見かけのばね定数 F は $F_1 + F_2$ となりファイバスコープを変位させるための力を K [N] とすると

$$K = 9.8 F x$$

の関係がある。次に使用するSMAコイルバネの巻数 n は (たわみ)[m] (剪断歪)[%]、 K (ファイバスコープ先端を屈曲させる力)[N]、 D (コイル径)[m]、 d (素線径)[m]、 G_H (高温状態でのSMAの横弾性係数)[Pa]、 G_L (低温状態でのSMAの横弾性係数)[Pa]のとき

$$n = \frac{G_H d^4 \delta}{\gamma \pi D^2 d^3 (G_H - G_L) - 8 D^3 K \delta} \quad \text{式(3.6)}$$

で表される。またこの時の a (コイルの伸び)[m]は、

$$a = \frac{\gamma \pi n D^2}{d} \quad \text{式(3.7)}$$

で表されリングコイル長を ℓ [m] および L (取付コイル長)[m] とすると

$$\ell = 2 d n$$

$$L = \ell + 2 a$$

で表される[146,147]。ここでファイバスコープ先端の剛性測定結果より $F = 400$ 、 $x = 7 \times 10^{-3}$ とし、素線径 $75 \mu\text{m}$ 、コイル径 0.15mm の SMA マイクロコイルを用い、付与する剪断歪を 3% として 0.5mm のたわみを与えるという使用条件で計算を行ったところ、コイルリング長 $\ell = 5.9 \times 10^{-3} [\text{m}]$ 、コイル取付長 $L = 8.0 \times 10^{-3} [\text{m}]$ という結果を得た。これを基に SMA マイクロコイルの作製を行い、視差変更部に適用することとした。

立体画像表示システム

2本のファイバスコープによって取り込まれた視差を包含した画像を、どのように表示するかが問題となる。立体画像表示方式[149]には、のぞき式、フィルタ式、時分割式、レンチキュラ式等の多くの方式があるが、ここでは Fig.3.8 に示す偏光メガネ式を用いて立体画像表示システムを構築した。本方式はファイバスコープを用いて左右別々に画像を取り込み、左右の画像は偏光フィルタを通りハーフミラー上に合成される。この画像を偏光メガネをかけて見ることにより、左右の網膜像に相当する画像対を観察者の両眼に別々に与えることができ、これにより観察者に立体感を生じさせるものである。偏光メガネを選択した理由は、比較的簡単に装置が構成でき液晶メガネ式のようなフリッカ雑音の影響もなく、また観察時の疲労感も少ないからである。同時に偏光メガネ式はディスプレイ部が大きくなってしまいうという欠点があるが、2台の画像表示装置をCRTから液晶ディスプレイに変えることにより、立体視ディスプレイの小型化を図った。実際に構築した立体画像表示システムを Fig.3.9 に示す。

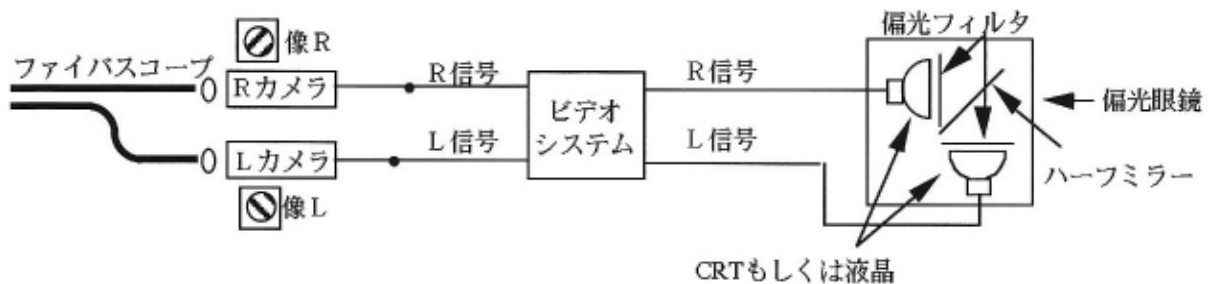


Fig.3.8 立体画像表示方式

立体視スコープの試作

作製した直径 5mm の立体視スコープの先端部拡大写真を Fig.3.10 に、断面模式図を Fig.3.11 にそれぞれ示す。このスコープの構成は、ファイバスコープ2本をお互いのイメージガイドが立体視スコープの中心方向を向くように配置してあり、各々のファイバスコープを構成するイメージガ

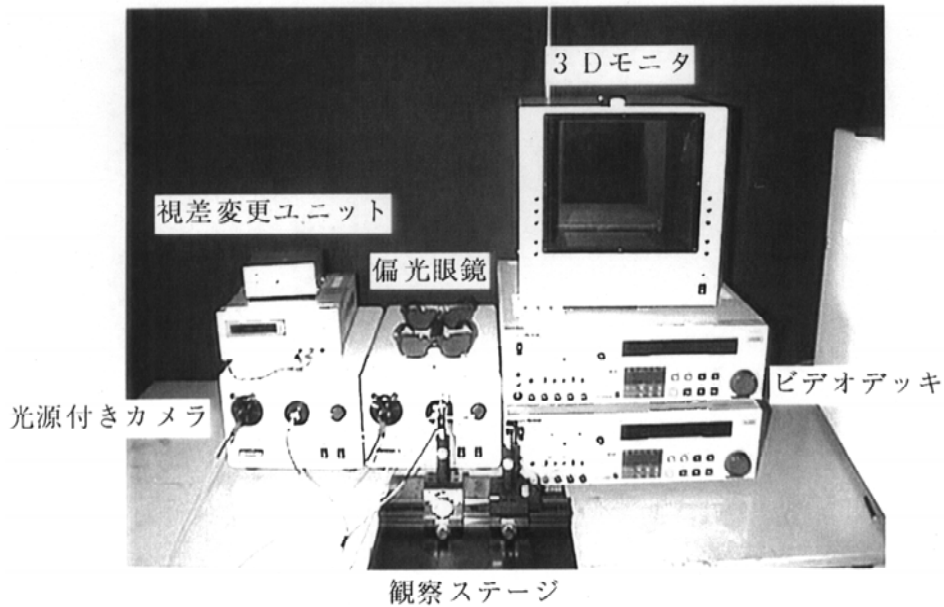


Fig.3.9 立体画像表示システム

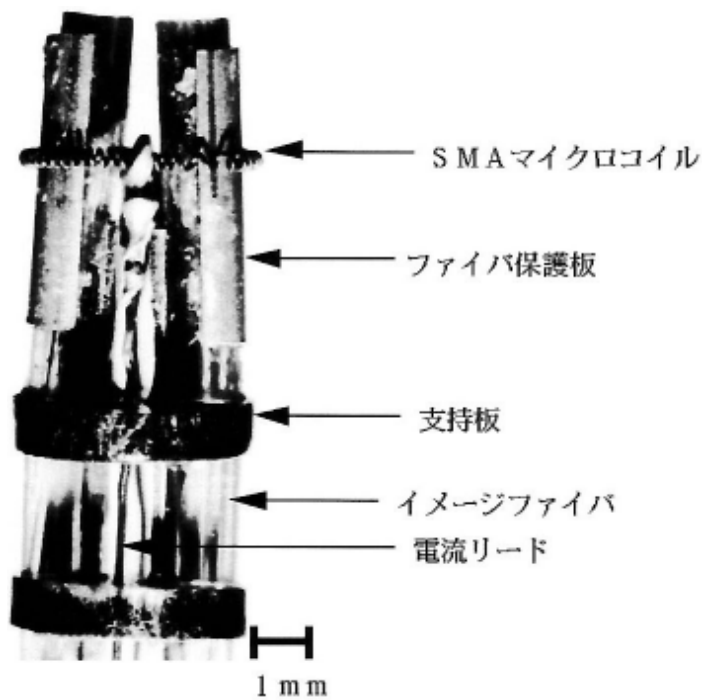


Fig.3.10 立体視スコープの先端部拡大写真

イドは12000画素、ライトガイドは直径250 μm のプラスチックファイバのものを用いている。また、視差を変化させるために用いた形状記憶合金のリング状コイルバネは、素線径75 μm 、コイル外径300 μm のコイルバネを溶接してリング状にし、2本のファイバスコープに鉢巻きのようにして装着した。そしてリング状コイルバネを通電により加熱すると、形状記憶効果により元の形状

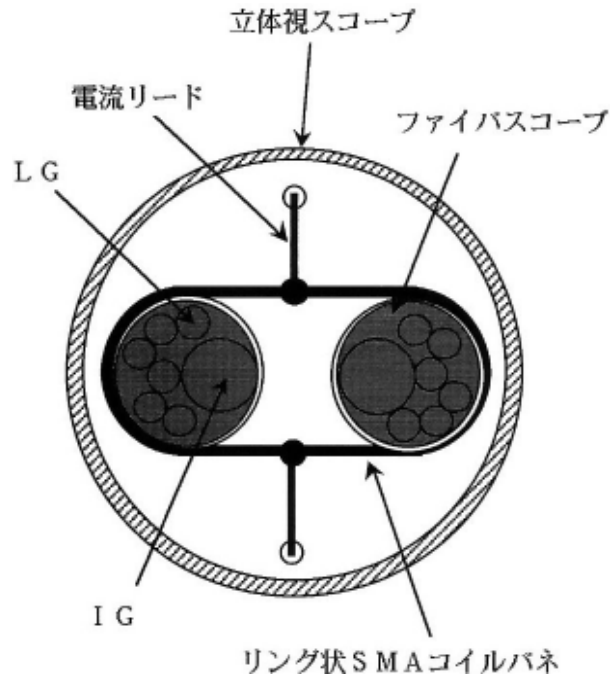


Fig.3.11 立体視スコープの断面模式図

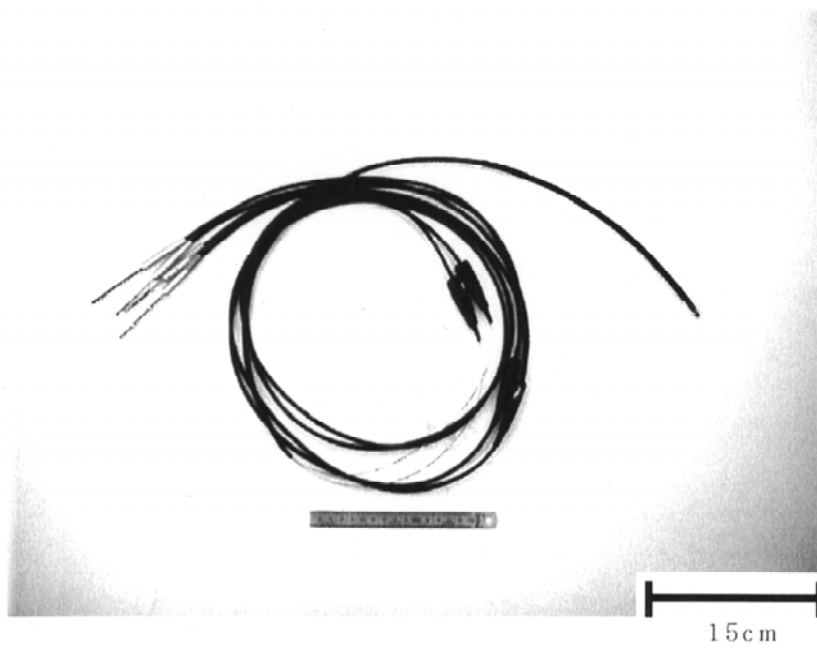


Fig.3.12 立体視スコープの全体写真

(密巻状態)に戻ろうとすることにより、結果として両眼視差(輻輳角及び両眼間隔)が変化する構造になっている。そして視差変更後、ファイバースコープを元の状態に戻すために板状のバイアスバネを組み込んだ。先端部の形状記憶合金リング状コイルバネがファイバースコープと接触する部分

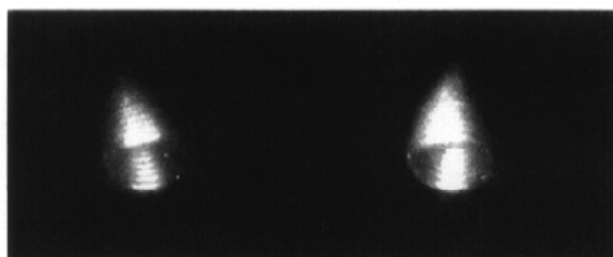
には半割りのステンレスパイプを取付け、通電加熱による発生熱からの保護を行った。なお、立体視スコープを構成する部品の加工（溶接、切断）には、微細加工が可能であるYAG($Y_3Al_5O_{12}$)レーザー加工により行った。完成した立体視スコープの全体写真を Fig.3.12 に示す。スコープの全長は1.8mで有効長は1m、先端部分の15mmが視差変更部となっている。

立体視スコープの評価

ここで作製した立体視スコープを用いて、視差可変機構により輻輳角を 3° から 6° まで変化させると両眼間隔は0.5mmから0まで変化することが判った。また観察距離を0から10cmまで変化させ両眼視差の変化について実際に調べたところ、観察対象として奥行きがあるものとしてピンセットを用いた場合、その先端が手前に出できて強調される立体像を得られ、また観察距離によって立体知覚が変化することを確認した。さらに2つの観察対象物を前後にずらしたところ、その前後関係が強調されこれまでの単眼のファイバースコープでは認識できなかった奥行き感を掴むことが出来た。特にこれは微小領域でマイクログリッパ等の道具を用いて作業を行う場合には不可欠な視覚情報となるはずである。 Fig.3.13 に視差変更前のファイバースコープの映像（b）と視差変更後のファイバースコープの映像（a）を示す。両者を比較すると（a）の方が両眼視差が大きくなっており、その結果立体知覚が変化していることが判った。よって両眼間隔と輻輳角という立体視パラメータを変化させることが、適度な立体感を得るためには必要不可欠な技術であることが判った。



(a) 視差変更後のイメージ



(b) 視差変更前のイメージ

Fig.3.13 視差変更前後のイメージ

3.1.4 拮抗型視差可変機構を有する立体視スコープ

リング型視差可変機構の問題点・課題抽出

前項の検討の結果、視差を変化させることにより立体感の向上及び観察対象物の奥行き情報を得られることを確認した。しかし、微細構造物の立体観察という目的から考えると、リング型視差可変機構を有する立体視スコープには次に示す問題点があることがわかった。

- 1) アクチュエータのストロークを大きくとることができないので、両眼視差を大きくすることができない。
- 2) 作製時に、バイアスバネとアクチュエータとのバランスがとりにくい。
- 3) 最初からわずかであるがファイバの先端に傾きがあるため前方を直視することができない。

これらの問題点を解決するために Fig.3.14 に示す拮抗型立体視スコープを提案し設計を行った。設計には前項で示した関係を用いた。その結果、SMA コイルを 1 本用いた場合、視差変更部の長さが 6、7 及び 8 mm では設計上、ファイバスコープの剛性が大きく視差を変更することができないことがわかった。また Fig.3.15 に示す視差変更部長 b とコイル長 ℓ と取付コイル長 L の関係より、視差変更部とアクチュエータ部とを加えた長さが硬性部の長さとなるので、硬性部の長さをできるだけ短くし且つ輻輳角を大きくできるようにコイル長と取付コイル長を適宜選択すること

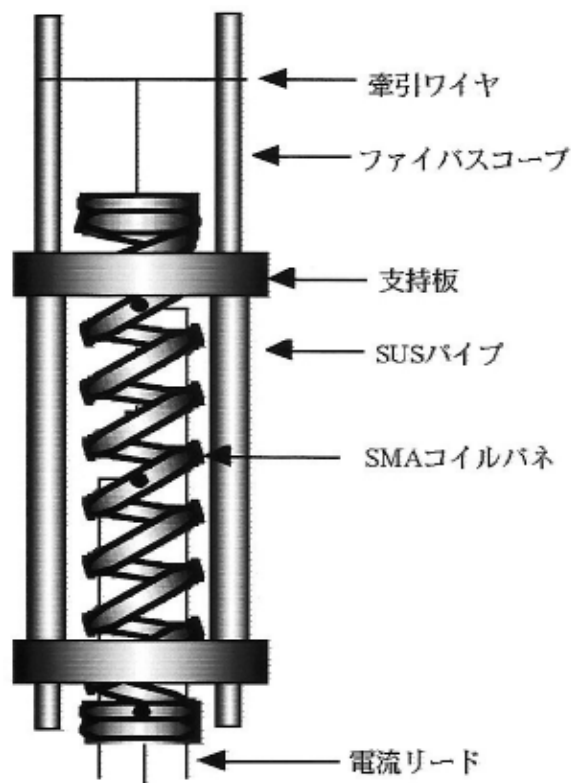


Fig.3.14 拮抗型立体視スコープ

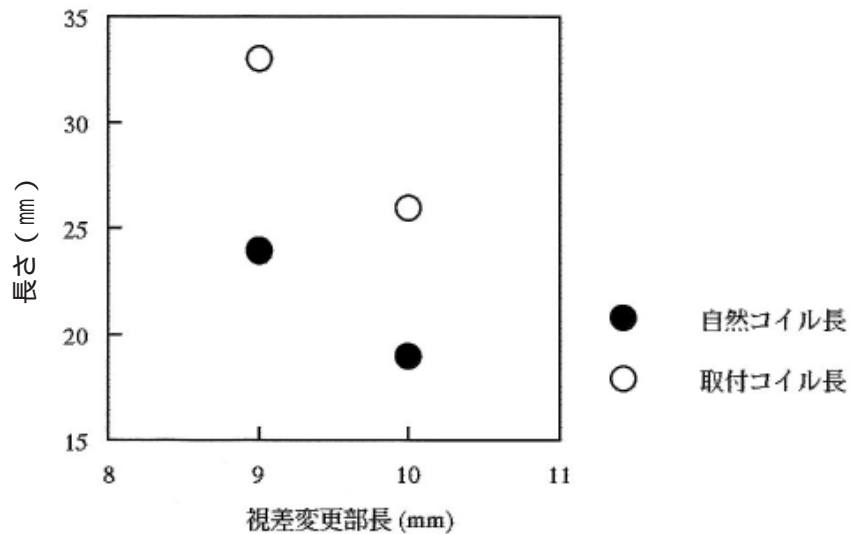


Fig.3.15 視差変更部長とコイル長さとの関係

が必要であることが分かった。

細径化のための検討

リング型視差可変機構を有する立体視スコープでは観察者の目となるイメージガイドファイバ(以下、IGと略す)の方向に追従して照明光伝送用のライトガイドファイバ(以下、LGと略す)の向きが変わるといった利点がある。しかしファイバスコープを用いる方法では、立体視スコープの内径を小さくすることは両眼間隔の距離を考えると物理的に不可能である。

IG式の立体視スコープの断面構造を Fig.3.16 に示す。立体視スコープの細径化を目的とした場合、ファイバスコープ内のIGとLGを分離することで立体視スコープの内径のうちファイバスコープの直径(1.3mm)が占めていた範囲からIGの直径(0.65mm)の範囲へ減少するので、細径化による両眼間隔の距離がとれないという問題も解決できる。

Fig.3.17 に Fig.3.5 に示した測定方法を用いてIGの剛性を測定した結果を示す。この結果とFig.3.6 で示したファイバスコープの変位量と荷重の関係を比較してみると、測定したファイバスコープ長が長くなるとファイバスコープの剛性の殆どがIGの剛性であることがわかった。そ

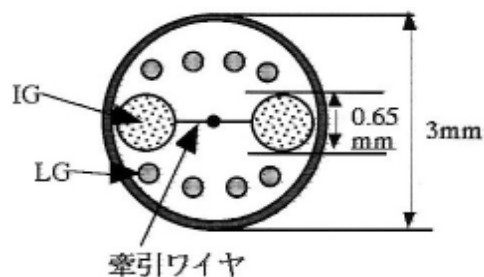


Fig.3.16 拮抗型立体視スコープの断面構造

の理由は、IGは石英製であるがLGはプラスチック製であるため変位させるための力に殆ど影響を及ぼさないと考えられる。またファイバスコープの先端部がIGと比べて剛性が強いのは、先端部を接着剤で固定してあるためだと考えられる。

Fig.3.18 に前に示した式(3.1)~(3.5)を用いてIG式拮抗型の視差可変機構の設計について、視差変更部長 b とそれぞれコイル長 ℓ と取付コイル長 L の関係を示す。設計に用いたSMAコイルは、前に示したコイル(素線径0.3mm、コイル径0.6mm)と同じである。この結果から、ファイバスコープを用いた時とほぼ同じ結果を得ることができた。

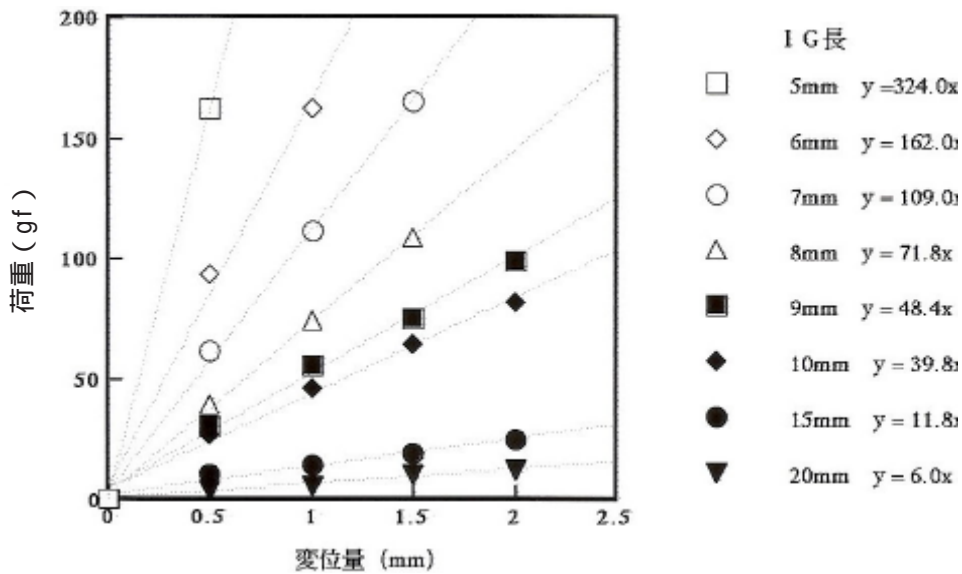


Fig.3.17 荷重と変位量の関係

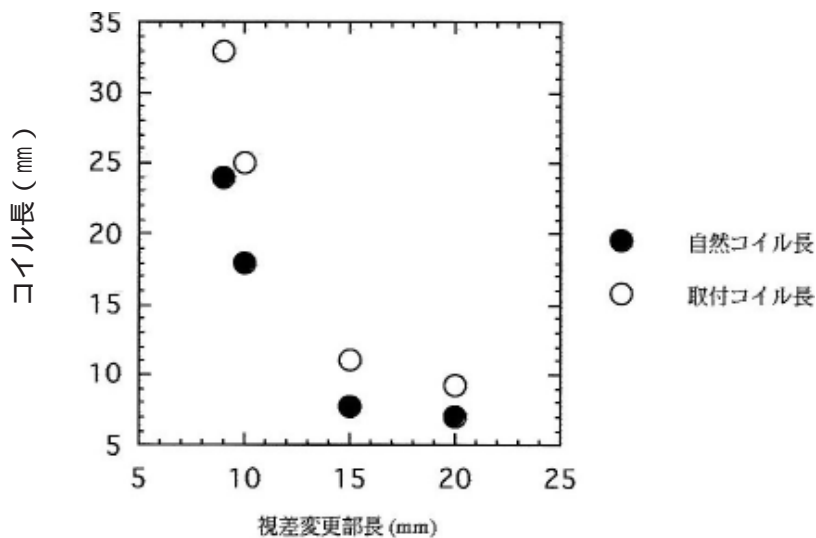


Fig.3.18 視差変更部長とコイル長さとの関係

拮抗型視差可変機構の試作

前項では、拮抗型視差可変機構を備えた立体視スコープの設計として、使用するイメージガイドの剛性測定とアクチュエータとして用いるSMAコイルの選定を行った。本項ではこれらの結果を基に立体視スコープを試作した結果を示し、更に細径化を進めるための新たな視差可変方式の開発について述べる。

まず、前項で設計した拮抗型SMAコイル視差可変機構を備えた立体視スコープを試作した結果を Fig.3.19 に、諸元を Table 3.1 に示す。この立体視スコープの特徴は、アクチュエータとしてSMAコイルを拮抗型に組み合わせて用いることで、視差(輻輳角)の制御を可能とした点である。

拮抗型に組み合わせたSMAコイルアクチュエータの動作原理を Fig.3.20 に示す。拮抗型では、それぞれのSMAコイルを記憶形状より多少引き延ばした(せん断歪を与えた)状態を初期状態とする(b)。ここで動作対象である2本のコイルに挟まれた可動部に注目すると、いずれのSMAコイルも加熱していない初期状態(b)からSMAコイル1を加熱すると、可動部は左へと移動する(a)。一方、初期状態からSMAコイル2を加熱すると、可動部は右へ移動する(c)。このように拮抗型システムはそれぞれのSMAコイルの加熱・冷却状態を制御することによって、ある範囲内で動作対

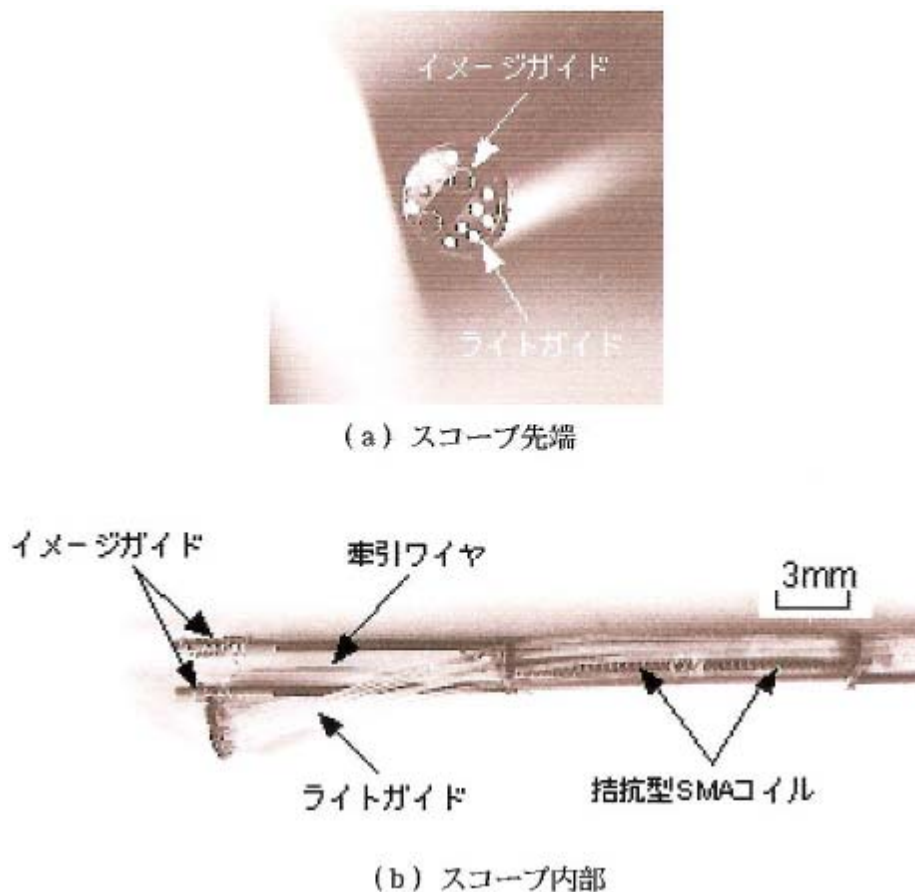


Fig.3.19 試作した立体視スコープ

Table 3.1 拮抗型SMA立体視スコープの諸元

スコープ外径	3.0mm
イメージガイド	6000画素×2本
ライトガイド	250μm×12本
輻輳角変化範囲	0°～5°
アクチュエータ	SMAマイクロコイル 素線径300μm

象を自在に動作させることを可能としたものである。

次に、Fig.3.21 に拮抗型視差可変機構の概略を示す。拮抗型視差可変機構は、イメージガイドの先端に結びつけた牽引ワイヤを動作させることで、視差(輻輳角)を変化させる。基本原理は上記の拮抗型アクチュエータの原理を適用したものであり、牽引ワイヤは同図中の可動部と連動している。このため同図におけるSMAコイル2を加熱すれば牽引ワイヤを通じて輻輳角が増大する方向へとイメージガイドが屈曲し、SMAコイル1を加熱すればイメージガイドは元の直線的な形状へと復元する。尚、SMAコイルの加熱は通電によって行っている。

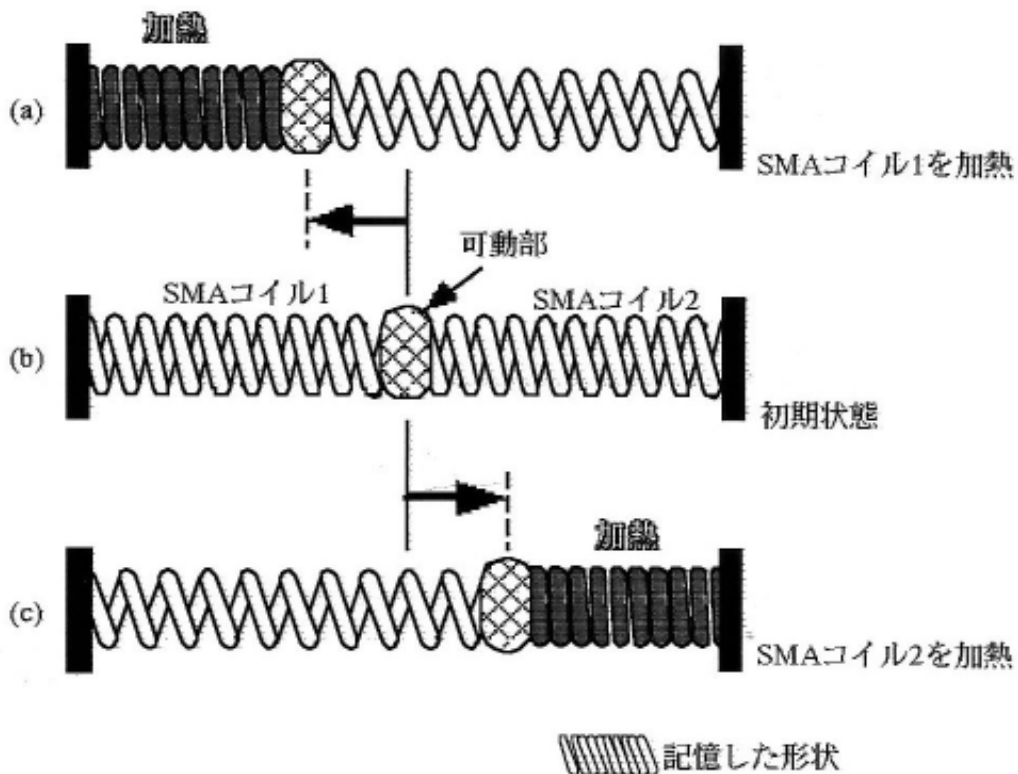


Fig.3.20 拮抗型SMAコイルアクチュエータの動作原理

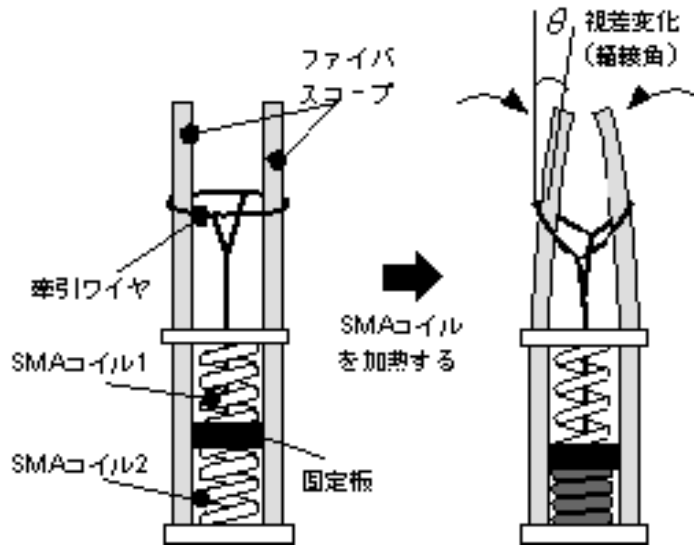


Fig.3.21 拮抗型SMAスコープの視差可変機構

3.1.5 バルーン型視差可変機構を有する立体視スコープ

拮抗型視差可変機構の問題点・課題抽出

極細径内視鏡への搭載を可能にすべく、マイクロ立体視スコープの更なる細径化を検討した結果、この拮抗型SMAコイルアクチュエータを用いた視差可変機構には以下の問題があることがわかった。

- 1) アクチュエータ部分の影響を受け、構造体の全長を短くすることが困難である。
- 2) 通電用のリード線を配置する必要から、内部の利用可能なスペースが限られたものになる。
- 3) SMAコイルを長時間駆動させた場合、発生する熱によって周辺の構成部材が破損する可能性がある。
- 4) 視差を変化させると両眼間隔も同時に変化するため、観察領域を修正する必要がある。

特に2)、3)などはより細径化が進むに従い、大きな障害になると考えられる。よってこれらの問題を解決し更に細径化を図るため、新たな視差可変機構である「バルーン型視差可変機構」を考案した。

バルーン型視差可変機構の構造

先に述べたように、従来の拮抗型SMAコイルアクチュエータ方式の視差可変機構では、一層の細径化に対して種々の問題がある。よってこれらの問題を基に要求される事項を検討すると、以下の3項目に収斂されると考えられる。

- 1) 構造体の全長を短く抑える

- 2) 発熱量を減らす
- 3) 両眼間隔の変化を抑える

これらの要求を満たす機構として考案したのが、バルーン型視差可変機構である。この機構は視差変化（イメージガイドの屈曲動作）をバルーンの膨張力を用いて行う。動作原理を Fig.3.22 に、試作したバルーン型立体視スコープの写真を Fig.3.23 に、立体視スコープの諸元を Table 3.2 にそれぞれ示す。

立体視スコープの構造は、2本のイメージガイドを上下2枚の固定板1,2を用いて1カ所を固定（固定板2）、残る1カ所を支持（固定板1）する。また、視差変化を起こすためのアクチュエータであるバルーンは、これら2本のイメージガイドに挟まれた形で設置する。

次に、イメージガイドの屈曲、すなわち視差変更動作は、高圧のエアをバルーン内に導入することで行う。すなわち高圧エアによりバルーンが膨張し、この膨張力で2カ所を固定・支持されたイ

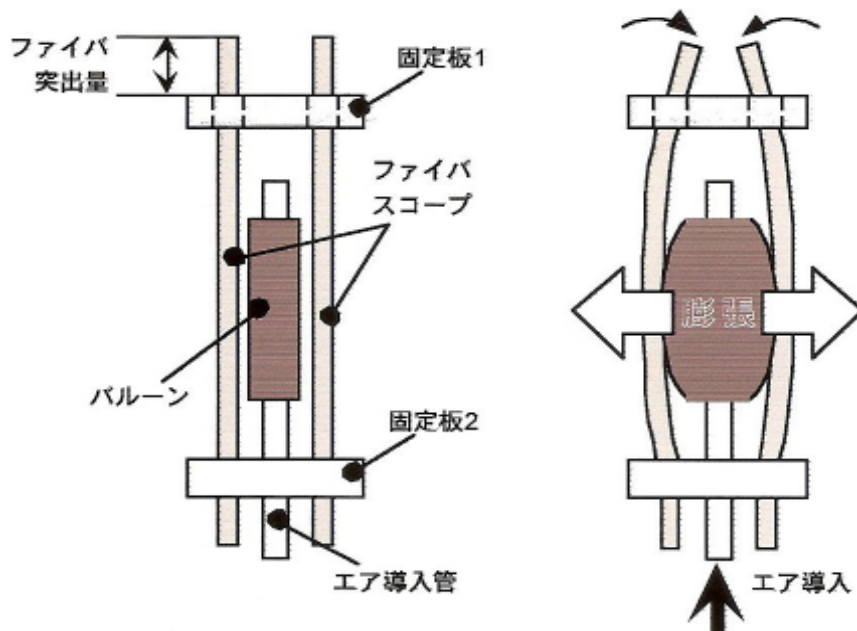


Fig.3.22 視差可変機構の動作原理

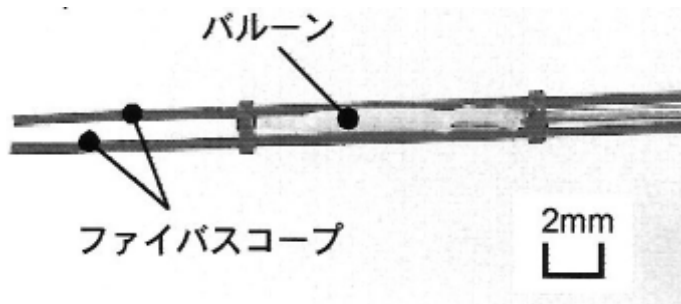


Fig.3.23 バルーン型立体視スコープの写真

Table 3.2 バルーン型立体視スコープの諸元

スコープ外径	2.0mm
イメージガイド	6000画素×2本
ライトガイド	φ 250 μ m × 4本
輻輳角変化範囲	0° ~ 5°
アクチュエータ	高圧エアによるバルーンの膨張力

イメージガイドが初期位置より外側へと押され、固定板の間で湾曲することとなる。この湾曲により固定板 1 よりスコープ先端方向に突出したイメージガイドの先端（対物部）はそれぞれ内側へ向き、輻輳角が増大する。尚、視差（輻輳角）の制御は、導入エアの圧力を加減することで可能である。

よって、以下に示すように「バルーン型視差変化機構」を用いることで 3 項の要求達成が可能となる。

- 1) 構造体の全長は冗長な SMA アクチュエータを使用しないので半分以下
- 2) 発熱量はバルーンにエアを導入するのみであるので無視できる
- 3) 両眼間隔の変化量は固定板 1 からのイメージガイド突出量を調節することでより小さく抑えることが可能

バルーン型視差可変機構の試作及び立体観察

試作したバルーン型立体視スコープを動作させ、視差変化（輻輳角変化）させた例を Fig.3.24 に示す。同図より、バルーンが大きく膨張し、その膨張力によってイメージガイドが湾曲していることがわかる。尚、同図では輻輳角の変化をわかりやすくするため、固定板からのイメージガイド突出量を大きく設定している。この時の輻輳角は約 5° である。

次に、視差変更前及び変更後のイメージガイドによる取得画像を Fig.3.25 に示す。観察対象物は、直径 1.5 mm、高さ 5mm の円筒状のポールを二等辺三角形形状に配置したものであり、スコー

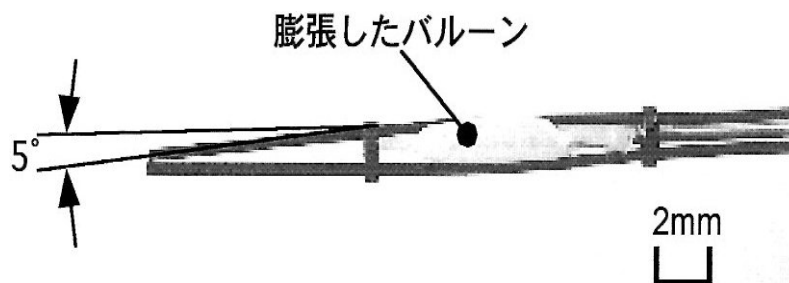
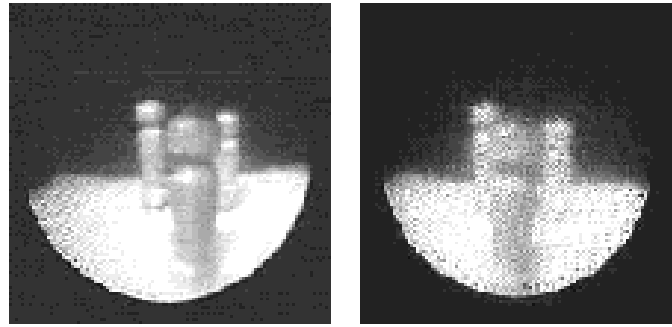
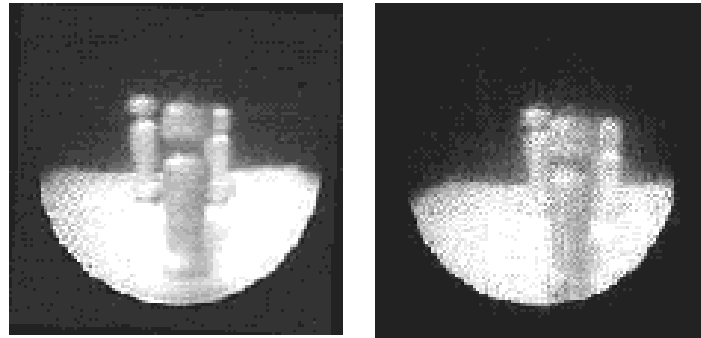


Fig.3.24 バルーン型立体視スコープの視差変化の状態



(a) 視差変更前



(b) 視差変更後

左眼画像

右眼画像

Fig.3.25 取得画像

プ先端から最も近いポールまでの距離は10mmである。同図より、視差変更前後におけるポールの位置の変化が分かる。左眼・右眼の画像はそれぞれ平行法によって立体視観察が可能である。

また、画像の観察に用いた立体画像表示装置はFig.3.8に示したように、CRTの代わりに液晶ディスプレイを用いており、液晶ディスプレイの偏光方向を偏光フィルタの方向に合わせて作製した特殊なものである。これにより表示装置のサイズを支配していたCRTの厚みが飛躍的に薄くなり、かつカメラ側及びディスプレイ側に画像位置微調節機能を付与したことにより、小型で調整の簡単なシステムを実現した。

3.1.6 バルーン型視差可変機構の光駆動化

視差可変機構

バルーンアクチュエータを用いた視差可変機構は、その駆動源を高圧気体としていた。この場合、高圧気体源(ポンプ、圧力配管)、圧力レギュレータ等の圧力制御機器が必要となる。さらにこれを医療用として体内、特に血管内での使用を想定すると、エア漏れが発生した場合は重大な事故につながる。そこでより簡単で安全な駆動源が求められる。このため視差可変機構の光駆動化を検討した。

立体視スコープの設計

新規に考案した立体視スコープの方式は従来と同一で、2本のイメージガイドを使用して右眼・左眼別個の画像を取得する方式であり、視差の変化は2本のイメージガイドの視方向の変化、つまり輻輳角を変化させることで可能となる。しかし、視差を変化させるためのアクチュエータとして、これまでSMAコイル、バルーン等を使用した。今回はバルーン方式を更に発展させ、前項の目的を満たすべく、レーザー光により駆動を可能とする方式を開発した。

新たに開発した視差可変機構を Fig.3.26 に示す。立体視スコープは2本のイメージガイドと、2枚の固定板（固定板A、B）、1つのバルーン型アクチュエータより構成される。

2本のイメージガイドは固定板によりそれぞれ一端を支持（固定板A）、他端を固定（固定板B）され、イメージガイドの間にバルーン型アクチュエータが配置されている。

この構造ではバルーン型アクチュエータの膨張・収縮動作を行うことにより、2本のイメージガイドを変形・湾曲させることができる。2つの固定板のうち、固定板Aはイメージガイドを支持しているだけなので、2本のイメージガイドの固定板Aより先端にある部分はこの点を軸に近接し、結果両眼間隔及び視方向が変化する。これは前に述べた機構と同一である。

次に、この視差変化機構で重要な役割を果たすバルーン型アクチュエータについて述べる。

前項で試作したバルーン型アクチュエータでは高圧のエアをバルーンに導入することでアクチュエータの膨張・収縮動作を行っていたが、本項ではレーザー光を利用した光駆動方式で、同様の動作

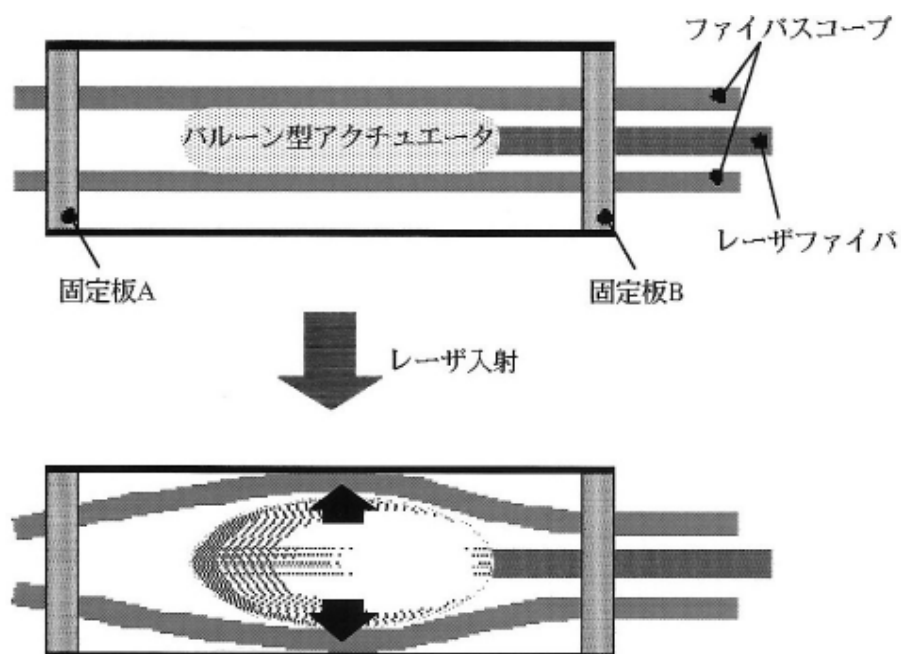


Fig.3.26 バルーンを用いた視差可変機構

が可能となるよう、設計・試作を行った。

アクチュエータはPET(ポリエチレンテレフタレート)製のバルーンに作動流体としてフッ素系不活性液体を封入したもので、作動流体を加熱するためのレーザファイバが備えられ、作動流体に照射するレーザ光の強度に応じて膨張・収縮動作を行うことが可能である。アクチュエータの形状を Fig.3.27 に、その諸元を Fig.3.28 に示す。レーザファイバ(高密度エネルギー伝送ファイバ)の詳細については、参考文献に譲る。

膨張・収縮動作はレーザ光照射により内部の作動流体が沸騰・気化することを利用している。すなわち、レーザ光照射により作動流体が気化しバルーンの内圧が上昇、体積が増加する。一方照射を停止するとアクチュエータ内部の温度が低下し、気化した作動流体が液化、内圧が減少してアクチュエータは収縮する。また作動流体を低沸点の液体とすれば、3.1.5で指摘した熱の問題も回避する事が可能である。

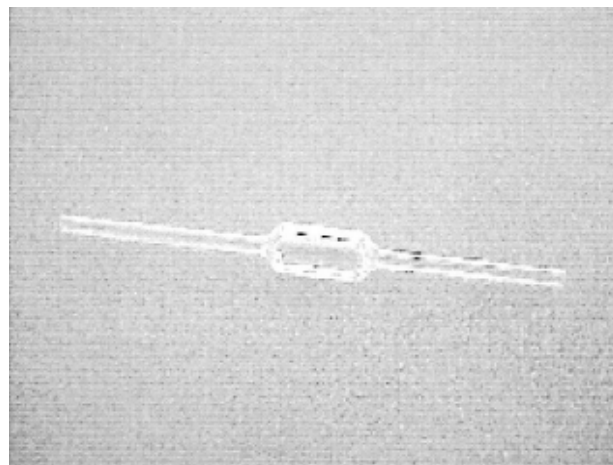


Fig.3.27 バルーンアクチュエータの形状

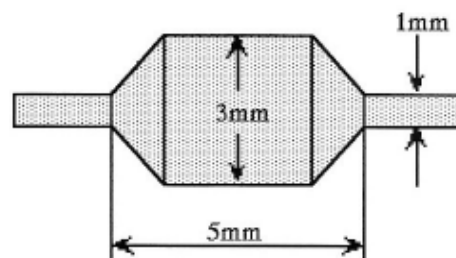


Fig.3.28 バルーンアクチュエータの諸元

輻輳角変化実験

立体視スコープの輻輳角変化実験を Fig.3.29 に、構成を Table 3.3 に示す。

アクチュエータ駆動に使用したレーザ光源は波長 810nm、駆動に要するレーザ出力は 1.0W、駆動時間（アクチュエータが最大容量まで膨張する時間）は約 5 秒である。

バルーン型アクチュエータの動作に応じてファイバースコープが湾曲し、視差が変化していることがわかる。

Table 3.3 実験構成

部品名	数量	諸元
ファイバースコープ	2	3000画素 ϕ 0.3mm
レーザファイバ	1	外径/コア径: ϕ 0.25mm/ ϕ 0.2mm
バルーン	1	PET製

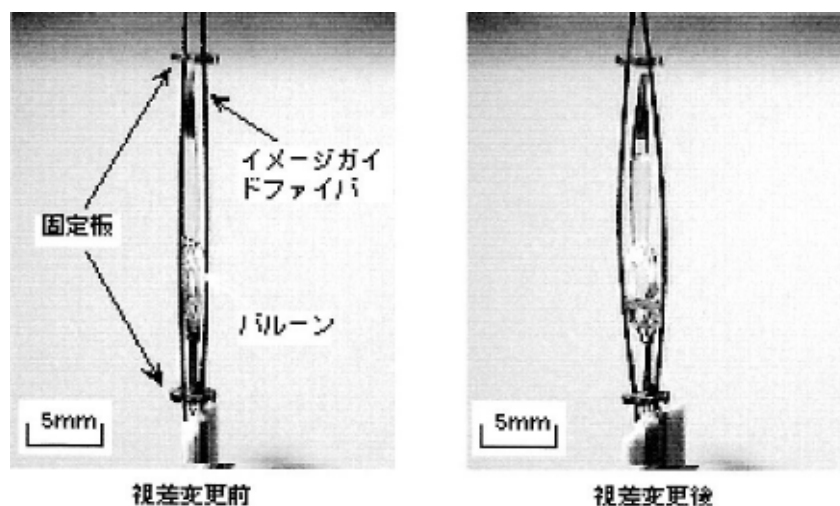


Fig.3.29 バルーン型立体視スコープの輻輳角変化

3.1.7 光駆動用光熱変換機構の改良

前項で述べたバルーン方式を用いた視差可変機構は、バルーンの最適化がなされておらず、視差可変機構のサイズ並びにアクチュエータの応答速度に課題が残った。そこでバルーンの容積を低減することにより動作速度の改善と視差可変機構の小型化を図った。視差可変機構の外径、使用するイメージガイドは前項で述べたものと同じとし、輻輳角が $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ まで変化できるようなバルーン

ンのうち、その容積が最小となるような形状を設計し、試作した。バルーンの写真を Fig.3.30 に示す。同図の下段のものが前項で用いたバルーンで、上段のものが今回試作したものである。このバルーンを用いて作製した立体視スコープを Fig.3.31 に示す。バルーンの小型化により、視差可変機構の長さも約30mmから10mmに大幅に小型化された。またバルーンアクチュエータの動作特性は、膨張部の容積が大幅に減少した結果、アクチュエータ動作に要するレーザー光出力が1.0Wの時、最大容量までに膨張する動作時間は2秒(従来5秒)となり、大幅な応答速度の向上が見られた。

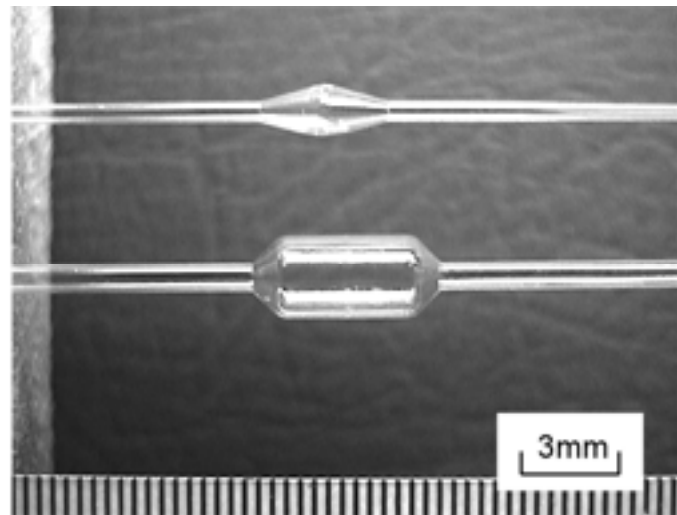


Fig.3.30 小型化したバルーン

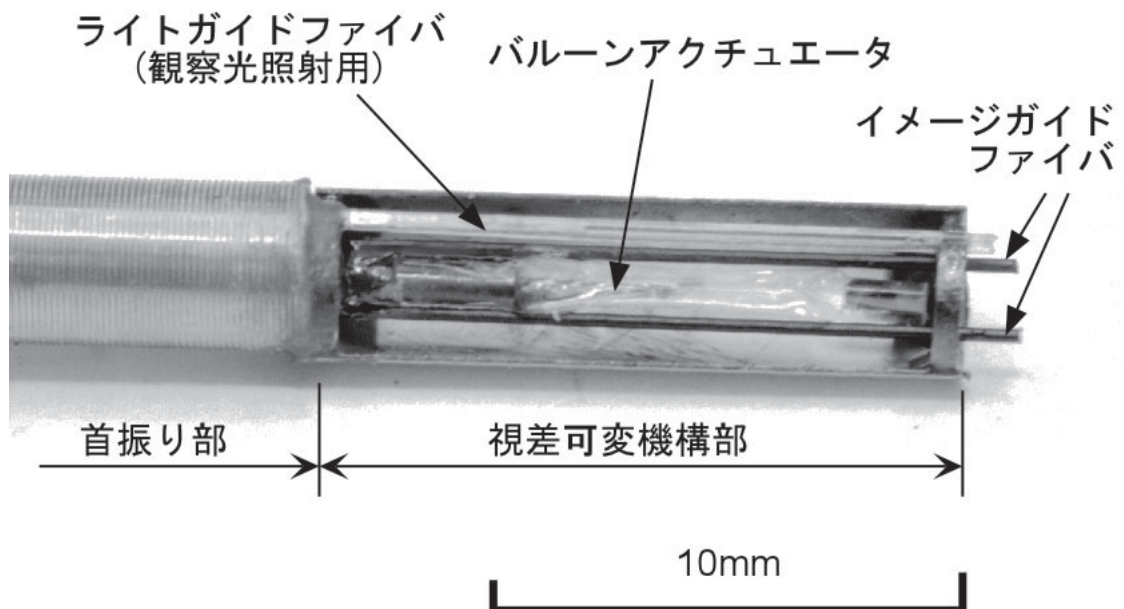


Fig.3.31 小型化したバルーンを用いて作製した立体視スコープ

3.2 光加熱型形状記憶合金アクチュエータと先端屈曲機構への応用

ファイバースコープを用いた視覚機構で広い観察領域を得るために、スコープ先端に屈曲機構を構成することを検討した。但し、従来の内視鏡・カテーテルのように牽引ワイヤを手元で引く方法では、長尺時や屈曲した経路に進入した場合に、牽引力が先端に届かないという問題がある。そこで駆動力を先端で発生させ首振りワイヤを引く方法を考案した。また厳しい環境下(例えば水中)での観察にも対応するべく、アクチュエータの駆動源を通电から光に変更した。この光駆動方式の採用によって液中での漏電を防ぐことが出来るばかりでなく、リード線を光ファイバに置き換えることにより全体寸法の細径化に寄与する。この先端首振り構造体は首振り部とSMAアクチュエータ部から構成される。このSMAアクチュエータを、レーザー照射により加熱する種々の方法を考案・検討した。その結果、レーザー照射方法は光ファイバの先端をエッチングでテーパ状に除去しコアを露出させた「テーパエッチドファイバ法」が有用であることが分かった。レーザー光はテーパエッチドファイバのテーパ形状部分から放射状に照射され、その周囲にあるSMAコイルを加熱する。加熱されたコイルは形状を回復し収縮することにより牽引ワイヤが引かれる。レーザー光の照射を停止するとコイルに加わった熱は自然放熱し、加熱していないコイルがバイアスバネとして働くため、それに伴って先端が中立位置に戻る。このレーザー照射により駆動するアクチュエータユニットの設計・試作・動作実験を行った。外径3mm、イメージガイド、ライトガイド、センサ用光ファイバを内蔵した構成で810nmの高出力半導体レーザーによる加熱を行った結果、約60°の先端屈曲角を得た。

3.2.1 首振り構造体の基礎検討

内視鏡を用いた視覚機構で、血管や消化管のような屈曲した管内を進んだり、観察部位において広い観察領域を得るために、スコープ先端に屈曲機構を構成することを検討した。通常の内視鏡・カテーテルでは先端に牽引ワイヤを固着し、これを手元で引く方法をとっている。但しこの方法では、長尺時や屈曲した経路に進入した場合に、牽引ワイヤに加わる力が途中の摩擦で減少したり、内視鏡自身の屈曲を矯正する方向に働き、牽引力が先端に届かないという問題がある。そこで駆動力を先端で発生させ首振りワイヤを引く方法を考案した。この方法であれば、どんな長尺物であっても、途中で内視鏡が180°以上屈曲したとしても、先端の首振り動作が可能となる。駆動源には細径化が可能で、単位面積あたりの発生力が大きく、ストロークも大きくとれる形状記憶合金マイクロコイルアクチュエータを用いた。

首振り機構の設計

SMAマイクロコイルの特性検討結果[146]に基づき、首振り機構の設計を行った。設計仕様をTable 3.4 に設計図を Fig.3.32 に示す。

Table 3.4 首振り機構の設計仕様

スコープ外径	5 mm
内視鏡機能	2 機能 (イメージファイバ、ライトガイド)
イメージファイバ	外径 0.38 mm、画素数 4200
ライトガイド	3 本
首振り方向	2 方向
首振り角度	$\pm / 2 \text{ rad}$
SMA コイル最大せん断歪	3 %
コイル制御方法	通電加熱、左右 ON, OFF 制御

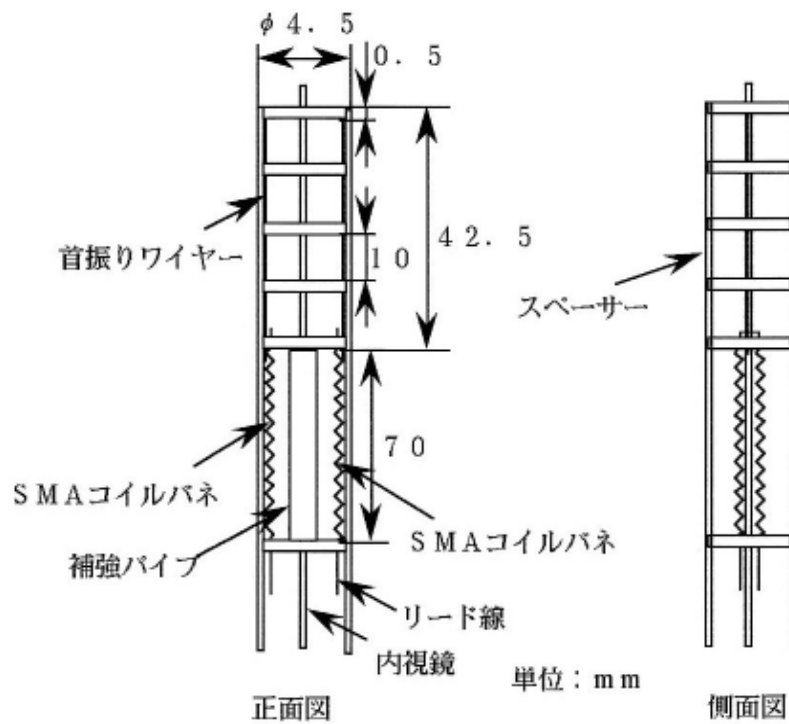


Fig.3.32 首振り機構の構造

今回設計した仕様を満足する牽引力を決定するために用いた曲げ特性試験の実験装置の原理を Fig.3.33 に示す。ここで用いた内視鏡は設計仕様を示すものと同一仕様である。この装置で実験した牽引力 - 曲げ角度、牽引力 - 変位特性を Fig.3.34 に示す。この図より設計図の SMA コイルバネ B がない場合の SMA コイルバネ A (通電 ON 時) の必要な牽引力を求めることができる。

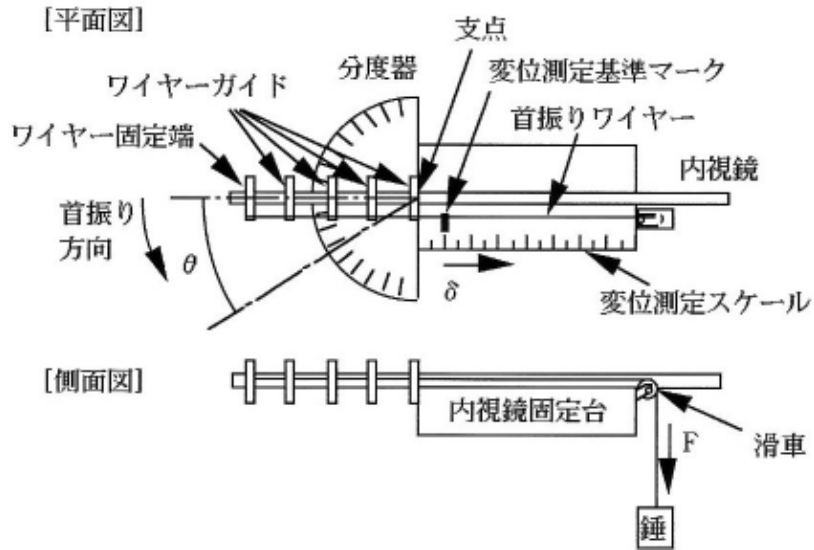


Fig.3.33 曲げ特性試験の原理

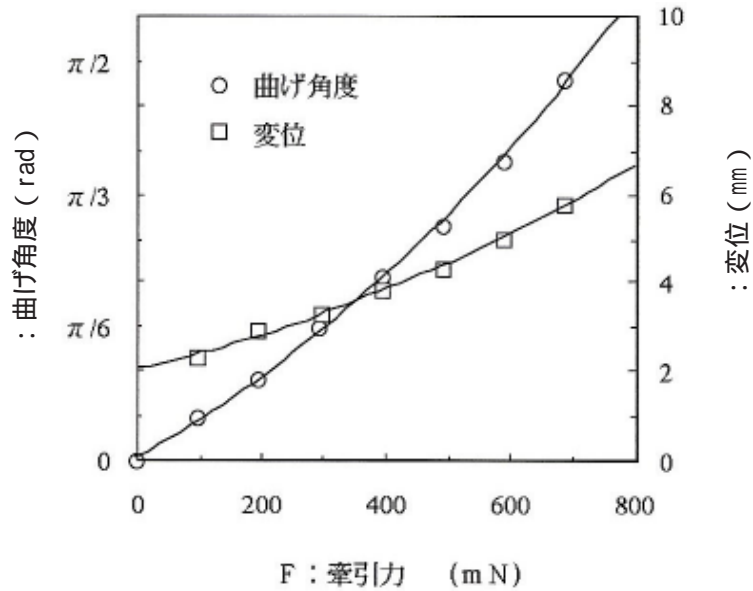


Fig.3.34 内視鏡の曲げ特性

SMA コイルバネの設計

首振り牽引力の検討結果と SMA コイルバネ B (通電 OFF 時) の引張り力 (首振り方向とは逆方向に作用する力) を加味して SMA コイルバネの諸元 (Table 3.5) を決定した [61, 150]。尚、パイアスバネの効果は内視鏡の弾性と通電 OFF 側の SMA コイルバネが受け持つこととした。

Table 3.5 SMA コイルバネの諸元

形状	密巻
線径	0.2 mm
コイル中心径	0.6 mm
自由長	45.0 mm

首振り機構の試作・評価

試作した首振りファイバスコープに対し、通電加熱（ON - OFF 制御）による動作をチェックした。その結果、左右2方向にそれぞれ30°～40°の首振り動作を確認した。Fig.3.35 に試作品の動作状態（1：通電前、2：左側 SMA 通電 ON、3：左側 SMA 通電 OFF、右側 SMA 通電 ON、4：通電停止後）を示す。首振り角度の実測値は、設計仕様（左右90°）の約40%程度であったが、この原因は首振り機構の設計に先立ち測定したイメージファイバの曲げ特性、ワイヤガイド間に設けたスペーサ（SMA コイルの初期発生力による内視鏡の座屈を防止するための部品）の抵抗力の見積り精度が予想以上に悪かったことにあると考えられる。

上述した検討結果を踏まえ、更に細径・高精度の首振りファイバスコープを設計するため、使用するイメージガイド（一般には微小管状体）の曲げ特性を評価した。

先ず、外径0.44mm、6000画素のイメージガイドの曲げ剛性（縦弾性係数×断面二次モーメント）を測定した。その結果、微小曲げにより測定した曲げ剛性の値は $23.5 \times 10^{-6} [N \cdot m]$ であり、曲げ方向による差は観察されなかった。

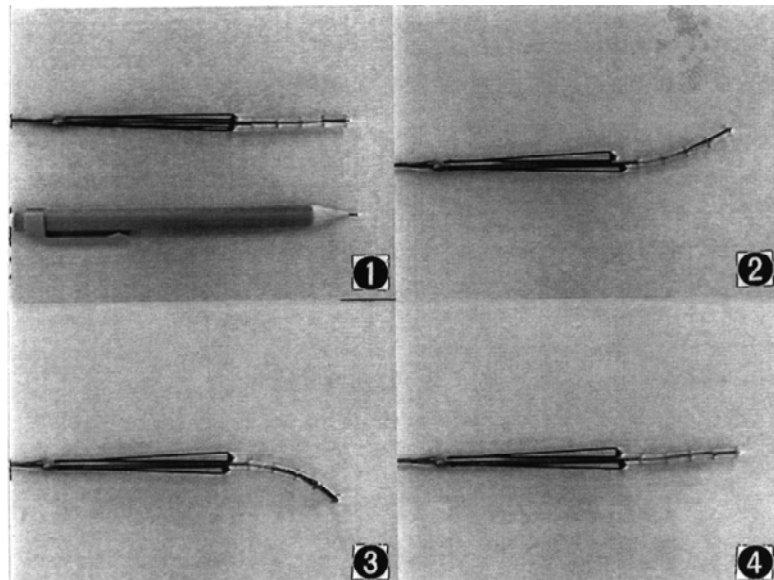


Fig.3.35 首振りスコープの動作状態

次に実際の首振りスコープを模擬したワイヤ牽引方式による曲げ特性の測定を行った。Fig. 3.36に曲げ特性測定系の概略図を示す。また、先に求めた曲げ剛性の値を用い、イメージガイドを曲がり梁と見なした計算モデル(Fig. 3.37)との比較を行った。測定及び計算は、何れもイメージファイバ湾曲部長さ L を15および20mm、牽引アーム長さ(イメージガイドと牽引ワイヤの中心距離)を1.5mmとして行った。Fig. 3.38に牽引ワイヤストロークとイメージファイバ先端の首振り角を、Fig. 3.39に牽引力との関係をそれぞれ示す。Fig. 3.38に示されるように、首振り角にはストローク増減時のヒステリシスは観察されず、また試料による差も観察されなかった。しかし、Fig. 3.38に示されるように牽引力にはストローク増減時にヒステリシスが観察された。

今回の検討により、首振りファイバスコープの設計仕様を計算モデルにより導ける可能性を示すことができた。

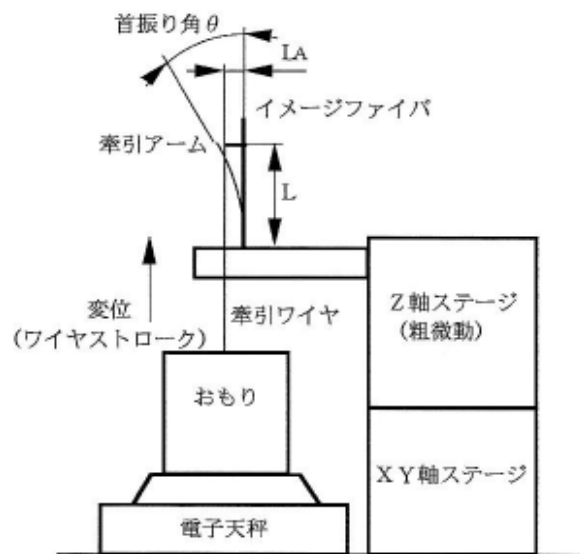


Fig. 3.36 イメージガイドの曲げ特性測定系

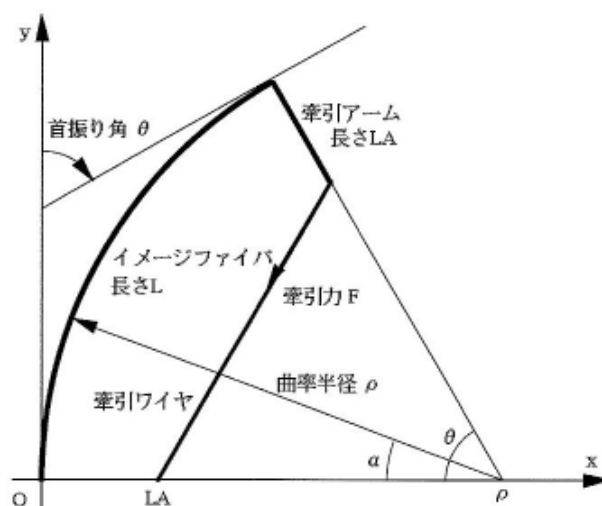


Fig. 3.37 イメージガイド計算モデル

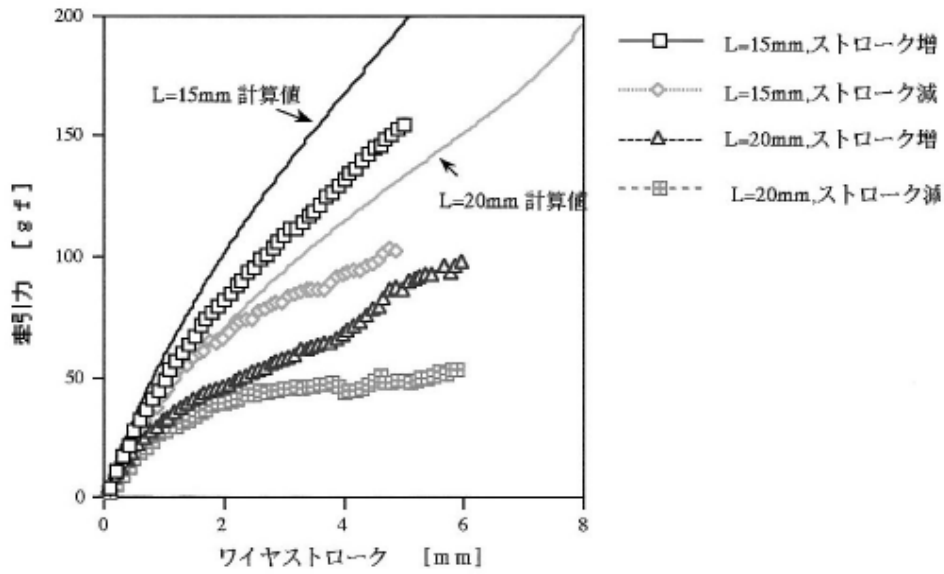


Fig.3.38 牽引ワイヤストロークとイメージガイド首振り角度との関係

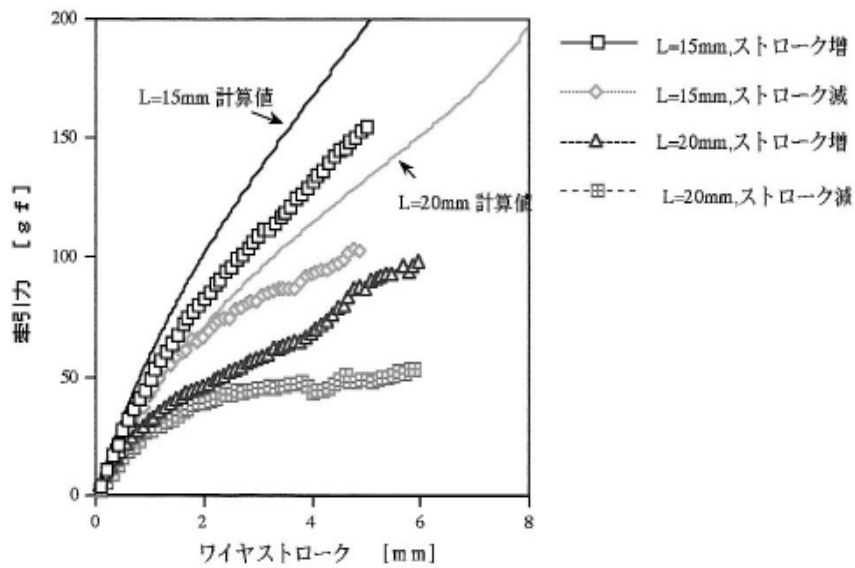


Fig.3.39 牽引ワイヤストロークと牽引力との関係

3.2.2 内骨格型首振り構造体

首振り機構の構造

これまでに試作を行ってきた首振り構造体はファイバ스코プの側面にワイヤガイドを取り付けたものであった。しかしながらワイヤガイドの外側に被覆を行うよりは、被覆部とワイヤガイドを兼用することが好ましい。従ってFig.3.40 に示す構造とした。

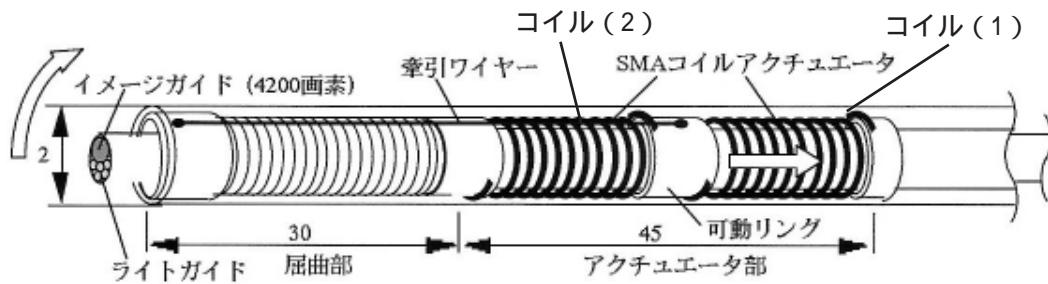


Fig.3.40 首振り構造体

この首振り構造体は外径2mmであり、首振り部とSMAアクチュエータ部からなる。首振り部の長さは30mmでありポリウレタンチューブにより被覆される。首振り部の先端とSMAアクチュエータ部の可動リングは牽引ワイヤにより結ばれている。牽引ワイヤは首振り部の剛性を高めるために用いるステンレスコイルとポリウレタンチューブに挟まれている。

SMAアクチュエータ部は2つのSMAコイルからなる。SMAコイルの片端は引き延ばされた状態でポリイミドを被覆したステンレスチューブに固定され、他端は可動リングに固定される。それぞれのコイルは通電により加熱される。

室温では両方のコイルは釣り合っており牽引ワイヤには力を及ぼさない。コイル(1)を加熱すると形状を回復し始め可動リングは右方向に移動し牽引ワイヤを引っ張る。その結果首振り部は屈曲する。次にコイル(2)を加熱すると可動リングは左方向に移動し首振り部は直線状態に戻る。

設計及び試作

SMAアクチュエータの仕様を決めるために首振り部の曲げ特性を調べた。首振り部には画素数4200のファイバースコープを導入した状態で測定を行った。測定装置を Fig.3.41 に示す。また測定結果を Fig.3.42 に示す。首振りに必要な荷重はほぼ牽引ワイヤの変位置に比例し、首振り部は一種のバネと考えることができる。見かけのバネ定数は約350N/mであった。また、60°の首振りにはワイヤの変位置が約3mm必要であることがわかった。

SMAアクチュエータ部は2本のコイルを組み合わせたものである。このアクチュエータ部に首振り部を接続した場合の変位と荷重の関係は Fig.3.43 のようになる。室温及び母相におけるバネ定数をそれぞれ k_1 、 k_2 とすると室温においては2本のSMAコイルは A 変位して釣り合っている。この状態が Fig.3.43 の (a) である。片方のコイルが加熱により母相に戻ると釣り合いの位置は (b) に移動する。ここで首振り部が接続されバネ定数を K とすると釣り合いの位置は (c) へ移動する。(a) から (c) までの変位置は式(3.8)により表される。

$$\delta = \frac{\Delta a(k_2 - k_1)}{K + k_2 + k_1} \quad \text{式(3.8)}$$

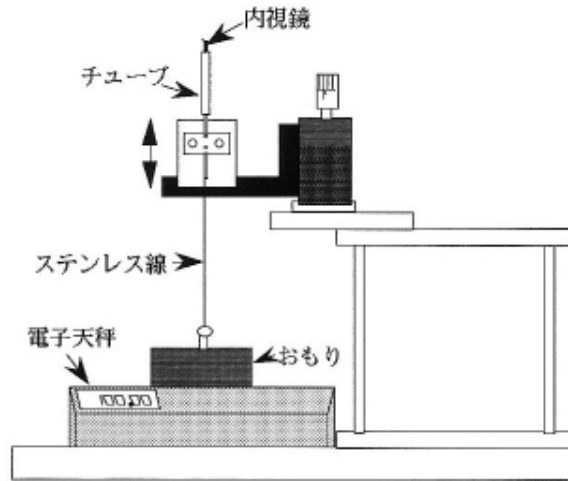


Fig.3.41 測定装置

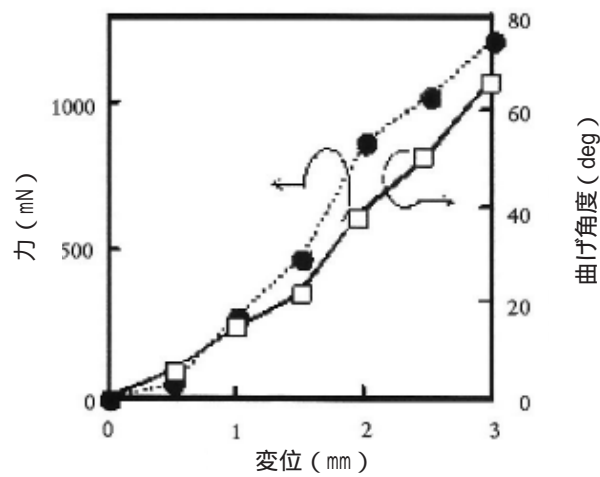


Fig.3.42 首振り部の曲げ特性の測定結果

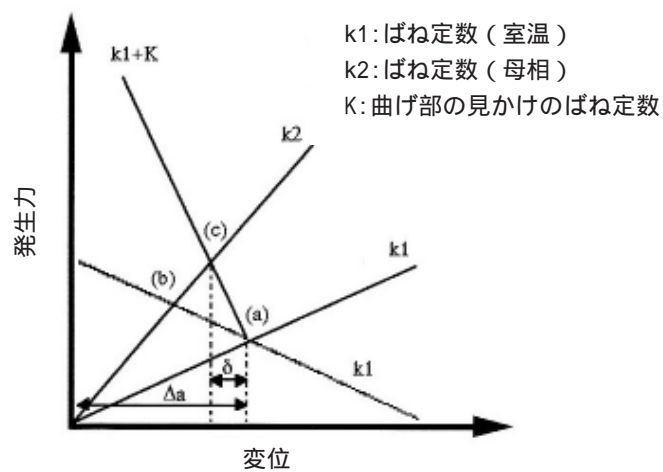


Fig.3.43 SMA コイルの変位と荷重との関係

また、 k_1 、 k_2 はそれぞれ式(3.9)、式(3.10)で表される。

$$k_1 = \frac{G^L d^4}{8D^3 n} \quad \text{式(3.9)} \quad k_2 = \frac{G^H d^4}{8D^3 n} \quad \text{式(3.10)}$$

ここで G^L 、 G^H はそれぞれ室温、母相状態での横弾性係数である。 d は素線径、 D はコイル平均径、 n は巻き数である。初期変位量 a は式(3.11)で表される。

$$\Delta a = \frac{\gamma \pi D^2}{d} \quad \text{式(3.11)}$$

はせん断歪みである。これらの式より変位量 δ は式(3.12)で表すことができる。

$$n = \frac{d}{\gamma \pi D^2} \cdot \frac{k_1 + k_2 + K}{k_1 - k_2} \cdot \left(\delta + \frac{n - m}{k_1 + k_2 + K} \right) \quad \text{式(3.12)}$$

次に素線径0.3mm、コイル平均径1.3mm、巻き数100のSMAコイルを用いて荷重と変位量の関係を調べた。測定は25℃及び100℃で行った。測定結果をFig.3.44に示す。同図より室温及び母相状態での横弾性係数は、それぞれ以下ようになる。

$$G^L = 6.7 \text{ [GPa]}、G^H = 20.4 \text{ [GPa]}$$

この結果を基に可動リングの変位量とSMAコイルの巻き数との関係を計算した。せん断歪みは3%、SMAコイルの内径は1mmとした。これはコイルの内部にファイバースコープを挿入するための空間が必要だからである。素線径を0.1、0.2、0.3mmとした場合の計算結果をFig.3.45に示す。首振り部が60°屈曲するのに必要な可動リングの変位量3mmは同図に示した範囲では素線径が0.3mmの場合にしか得られないことがわかった。また、必要なコイルの巻き数は17であることがわかった。首振り構造体の作製ではコイル端部を支持部への固定に用いるため、実際の組立には

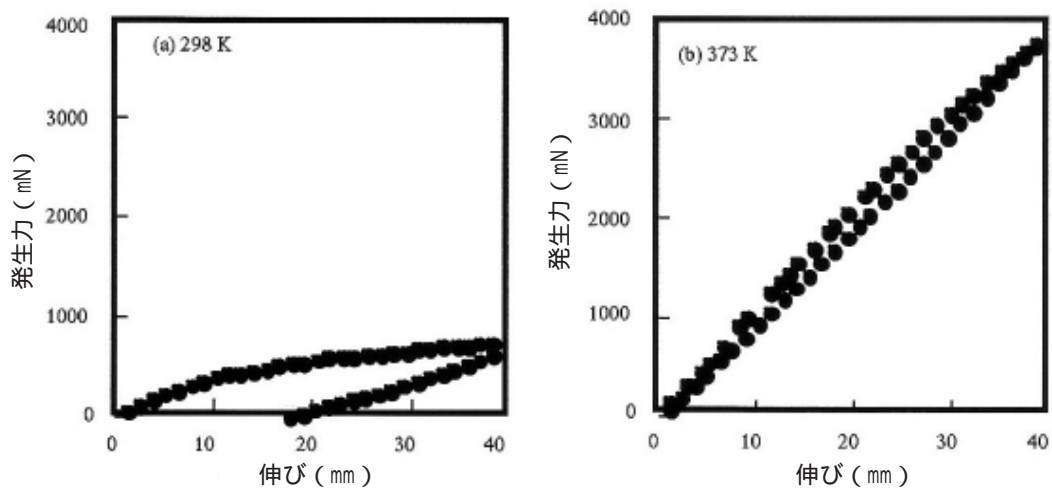


Fig.3.44 SMAコイルの荷重と変位との関係

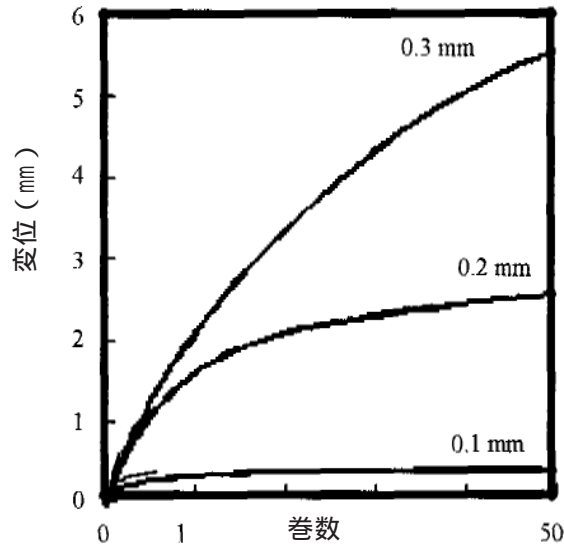


Fig.3.45 SMA コイルの巻数と可動リングの変位量との関係

巻き数が20のコイルを用いた。組立では密巻き状態を記憶したコイルを16mmに引き延ばして固定し、首振り構造体を作製した。

動作の評価

首振り構造体の動作写真を Fig.3.46 に示す。首振り動作に追従した鮮明なファイバースコープ画像がモニタ上で得られた。

SMAコイルの加熱のための電流値と首振り角との関係を Fig.3.47 に示す。ポリウレタンチューブは曲がり癖をもっているので電流を印加しない状態でも首振り部は若干曲がっている。首振り角は電流値が200mAまではほとんど変化しないが、それ以上では急激に増加する。60°の首振りには約500mAの電流が必要である。本結果より、SMAコイルの加熱方法の検討や多方向首振りの検討が必要であることが判った。

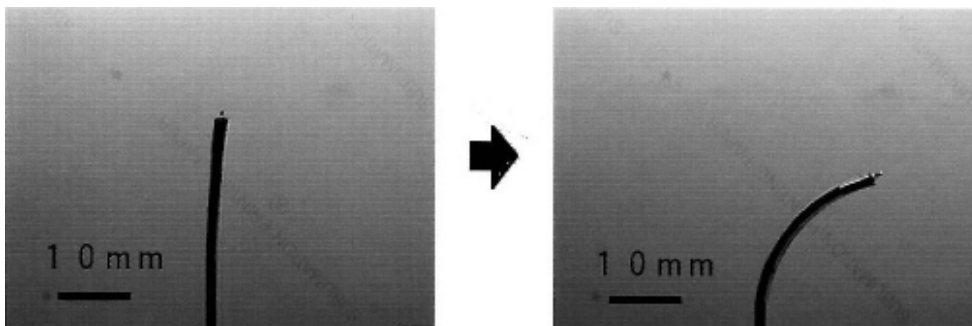


Fig.3.46 首振り構造体の動作写真

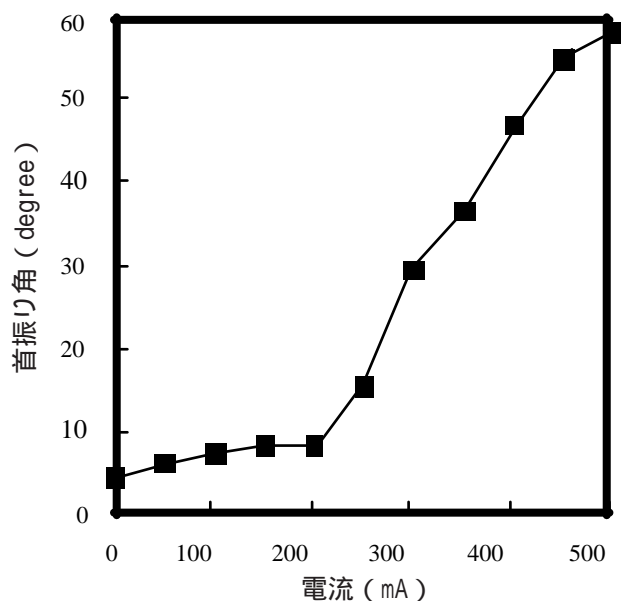


Fig.3.47 電流値と首振り角との関係

3.2.3 外骨格型首振り構造体

前項までの研究で、外径1.3mmのSMAコイルを用いたアクチュエータにより駆動する1方向首振りファイバスコープ（外径2mm）の試作を行い、その結果60°の屈曲動作を行うことができた。しかしながら、首振りファイバスコープはマイクロ視覚機構に適用することを目指しているため、その仕様から1方向首振りでは不十分であり、多方向首振りを実現する必要がある。そのためには、アクチュエータをより細径化することおよび複数配置することが必要である。そこで今回アクチュエータの細径化を進め、ユニット化し、それを4つ配置することで4方向への屈曲動作が可能な4方向首振り構造体（外径2.5mm）の設計および試作を行った。

多方向首振り構造体の構造

この首振り構造体の構造は Fig.3.48 に示すように、首振り部とSMAアクチュエータ部からなる。さらにこのSMAアクチュエータ部は4式のアクチュエータユニットからなり、隣り合うユニット同士が互いに直角になる位置に配置した構造となっている。首振り部の先端と各SMAアクチュエータユニットの可動部は牽引ワイヤにより結ばれている。首振り構造体の中心には画素数3000のファイバスコープが取り付けられている。SMAアクチュエータユニットは、全体が外径1mmのポリミドチューブに覆われ、その両端にステンレスパイプが固定されている。この両端のパイプの間に2つのSMA圧縮コイルが密着しており、更にこの2つのコイルの間に可動部が密着している。コイルが接触するポリミドチューブの内壁には固体潤滑剤を塗布している。それぞれのコイルは通電により加熱される。

アクチュエータユニット内の2つのコイルの発生力は、室温では拮抗状態にあり牽引ワイヤには

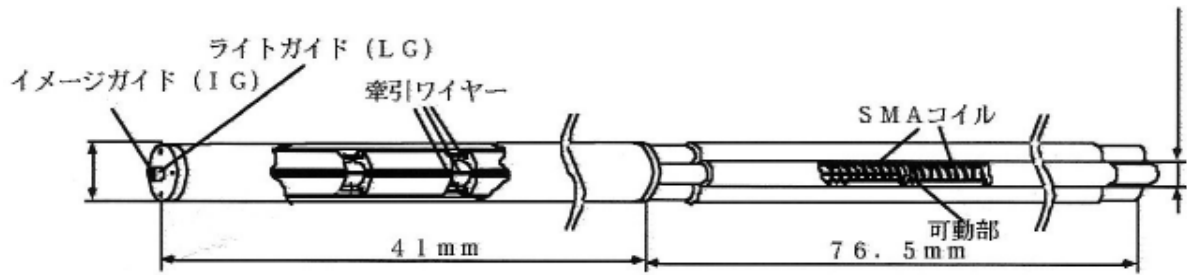


Fig.3.48 4方向首振りファイバ스코ープ

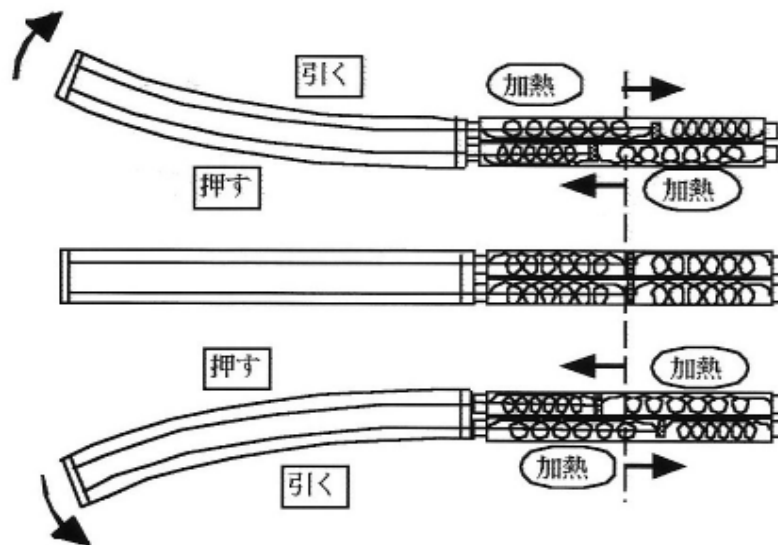


Fig.3.49 首振り動作説明

力を及ぼさない。2つのコイルのうち、片方だけを加熱するとコイルは形状を回復しその結果可動部が、加熱していないコイルの方向へ移動する。これに伴って可動部に取り付けられている牽引ワイヤが移動する。どちらのコイルを加熱するかを選択することで、牽引ワイヤを押したり引いたりすることができる。首振り部を屈曲させるためには Fig.3.49 に示すように、屈曲させたい方向にある牽引ワイヤを引っ張り、それとは逆の方向の牽引ワイヤを押し方法とした。

多方向首振り構造体の設計

SMAアクチュエータユニットの仕様を決めるため、任意の荷重を加えたときの首振り角度を測定することにより首振り部の曲げ特性を調べた。首振り部には画素数3000のファイバ스코ープを導入した状態で測定を行った。首振りに必要な荷重はほぼ牽引ワイヤの変位量に比例し、首振り部は一種のバネと考えられることが分かっており、見かけのバネ定数は約777N/mであった。また、

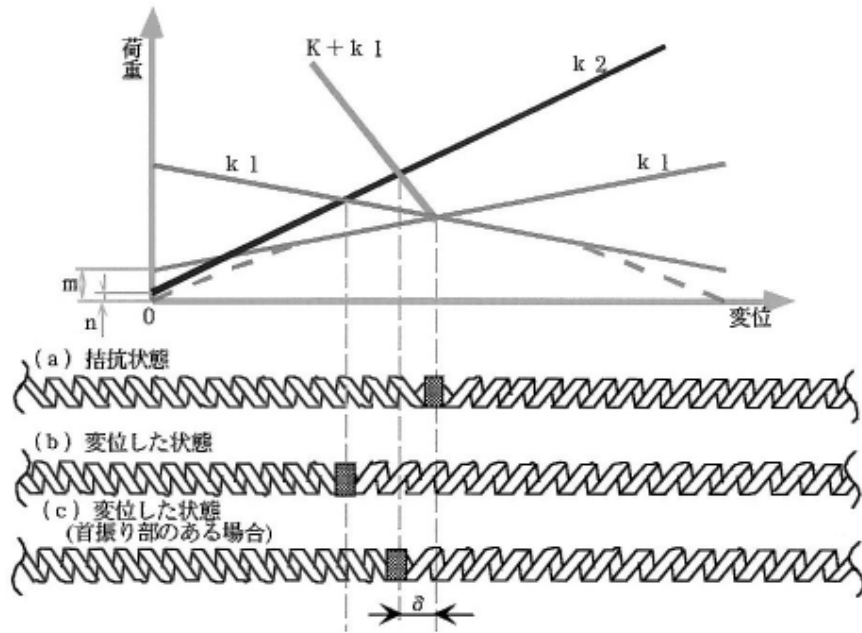


Fig.3.50 コイル仕様設計概念図

60°の首振りにはワイヤの変位量が約1.8mm必要であることがわかった。

この首振り部にアクチュエータ部を接続した場合の変位と荷重の関係は Fig.3.50 に示した概念図のような。室温においては2本のSMAコイルは釣り合っている。この状態が同図(a)である。片方のコイルが加熱により母相に戻ると釣り合いの位置は同図(b)に移動する。ここで首振り部が接続されることを考慮すると釣り合いの位置は同図(c)へ移動する。

SMAアクチュエータユニットにおいては、外骨格をなすポリイミドチューブの内壁とコイルとの間で摩擦が生じる。そのためこの摩擦力を実際に測定し、摩擦力を含んだコイルの荷重-変位の関係を測定し、関係式の傾きから室温及び母相におけるバネ定数をそれぞれ k_1 、 k_2 (N/m) として求めた。また首振り部分の見かけのバネ定数を K (N/m) とした。室温におけるSMAコイルの荷重-変位の関係はR相領域と応力誘起マルテンサイト相領域とでバネ定数が変化する。 Fig.3.50 の(a)に示す拮抗状態において、すでにコイルの内部組織は応力誘起マルテンサイト相領域にある。そこで、ユニット内での摩擦力を含んだコイルの荷重-変位の関係は変位 x が0で y 切片をもつ。これを m (N) とした。また、母相におけるSMAコイルの摩擦力を含んだ荷重-変位の関係も測定データを元に近似により関係式を求めているため y 切片をもつ。これを n (N) とした。

コイルの素線径を d (m)、コイル平均径を D (m)、コイルの巻き数を n 、せん断ひずみを γ 、拮抗状態からの変位を x (m) とした。首振り部を屈曲させるのに必要なコイルの巻数は式(3.13)のようになる。

$$n = \frac{d}{\gamma \pi D^2} \cdot \frac{k_1 + k_2 + K}{k_1 - k_2} \cdot \left(\delta + \frac{n - m}{k_1 + k_2 + K} \right) \quad \text{式(3.13)}$$

これよりコイルの仕様を求めると、素線径0.2mm、コイル外径0.7mm、コイル巻き数104巻きとなった。これに基づきアクチュエータユニットを作製し、首振り部と組み合わせ4方向首振りファイバ스코ープを試作した。

試作並びに動作試験

試作した4方向首振りファイバ스코ープの屈曲動作の様子を Fig.3.51 に、それぞれの方向に対する首振り角度を Table 3.6 に示す。動作した首振り角度は最大62°、最小44°であった。首振り角度にばらつきが生じたのは作製段階での組立誤差の要因が大きかったと考えられる。また、通電開始から屈曲し始めるまでの時間は1秒程度であるのに対して、加熱されたコイルが十分に冷却されるまでには60秒以上を必要とした。そのため、作製精度の向上、SMAコイルの放熱性の向上などをまとめて考え構造の改良などを検討する必要がある。

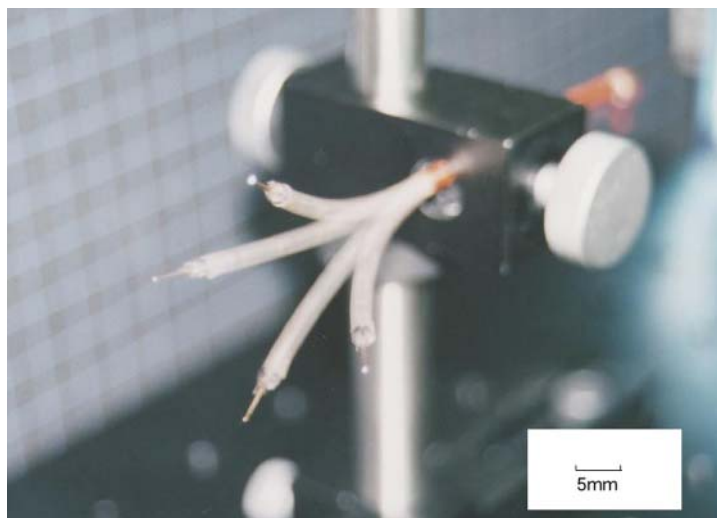


Fig.7.20 屈曲動作の様子

Table 3.6 首振り角度

方向	首振り角度(°)
A方向	62
B方向	49
C方向	49
D方向	44

3.2.4 全方位屈曲首振り構造体

これまでに検討を重ねてきた SMA を用いた首振り機構には以下の問題点があった。

- ・SMA アクチュエータ部（リジッド）が長い。
- ・首振り部全体を保持するための力が作用しないため首振り部が不安定であり、イメージガイドを用いた顕微観察に支障が生じる。

このような問題を解決するためにマクロ視覚機構用首振り機構の断面図を Fig.3.52 に示す構造とした。本構造の特徴は以下の通りである。

超弾性SMAコイルばねをバイアスばねとして首振り部内に配置することによりリジッドなアクチュエータ部を短くした。

首振り部に伸縮性を持たせ駆動コイルにより張力を与えることにより首振り部の剛性を調節することが可能である。

また駆動用SMAコイル、バイアスコイル、牽引ワイヤの組み合わせを環境認識デバイスの長手方向の中心軸に対して、120度ずつ3組配置し駆動コイルの発生力を調整することにより、任意の方向に首振り動作を行うことが可能な構造とした。

試作に用いた SMA コイル、バイアスコイルの仕様を以下にまとめる。

(d : コイル線径、 D_o : コイル外径、 p : コイルピッチ、 n : 巻数、 N : 本数)

- ・駆動 SMA コイル : $d = 0.1\text{mm}$ 、 $D_o = 0.3\text{mm}$ 、 $p = 0.1\text{mm}$ 、 $n = 351$ 、 $N = 4$ / 組

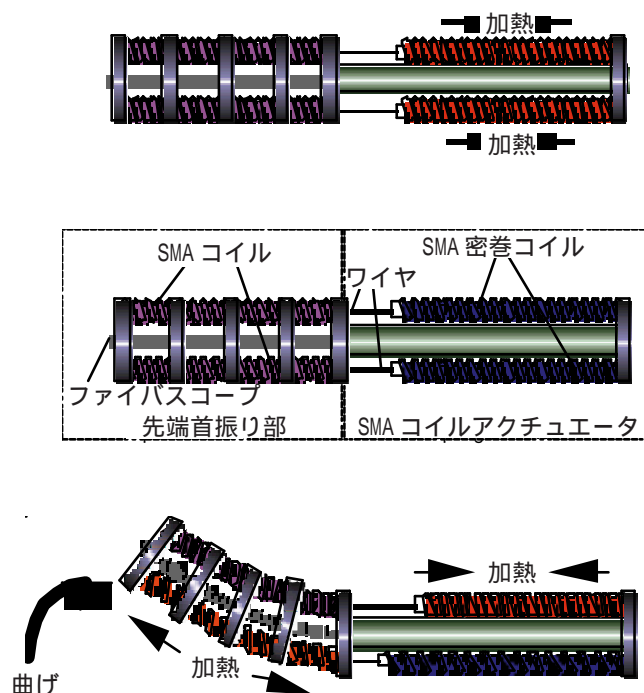


Fig.3.52 首振り機構の断面図

- ・バイアスコイル (超弾性 SMA): $d = 0.2\text{mm}$ 、 $D_o = 0.75\text{mm}$ 、 $p = 0.35\text{mm}$ 、 $n = 80$ 、 $N = 1 / \text{組}$

3.2.5 光熱変換技術の基礎検討

これまで検討してきた首振り構造体の駆動源のSMAマイクロコイルは、通電加熱による駆動方法をとっていた。しかし、この首振り構造体を医療用に応用する場合は、体内での電気の使用は感電の危険性もあり、好ましくない。また医療用のみならず、厳しい環境下(例えば水中)での観察にも対応するべく、アクチュエータの駆動源を通電から光に変更した。この光駆動方式の採用によって安全性の向上・液中での漏電を防ぐことが出来るばかりでなく、リード線を光ファイバに置き換えることにより全体寸法の細径化に寄与する。この先端首振り構造体は首振り部とSMAアクチュエータ部から構成される。このSMAアクチュエータを、レーザー照射により加熱する種々の方法を考案・検討した。

レーザー加熱による応答性評価

まず、基本的な検討として Fig.3.53 に示す測定系で、レーザー加熱によるSMAマイクロコイルの発生力をリアルタイムで測定し、応答性を評価した。密巻き状態を記憶したSMAコイルに3%の素線に対する剪断歪を与え、変位一定の条件で発生力を測定した。レーザー光源には波長 $1.48\mu\text{m}$ の半導体レーザーを用い、シングルモードファイバを用いて、SMAコイルの照射部までレーザー光を導いた。ファイバ出射端でのレーザー出力は $10 \sim 60\text{mW}$ とした。尚、実験に使用した試料の諸元を Table 3.7 に示す。代表的な試料の測定結果(最大発生力で規格化)を Fig.3.54 に示す。また、立ち下がり時間と試料サイズとの関係を Fig.3.55 に示す。同図より代表サイズの減少に伴

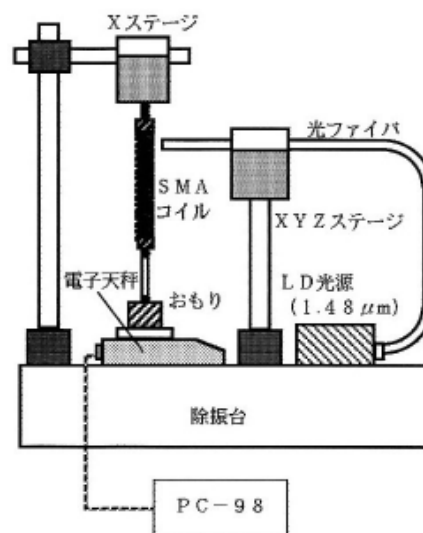


Fig.3.53 レーザ照射による発生力測定装置

Table 3.7 実験に使用したSMAマイクロコイルの諸元

資料番号	素線径 (μm)	コイル外径 (μm)	バネ指数	巻数	自由長 (mm)
1	30	92	2.07	400	1.3
2	33	112	2.39	400	1.4
3	49	195	2.98	400	2.1
4	99	395	2.99	400	4.1
5	198	798	3.03	400	8.2

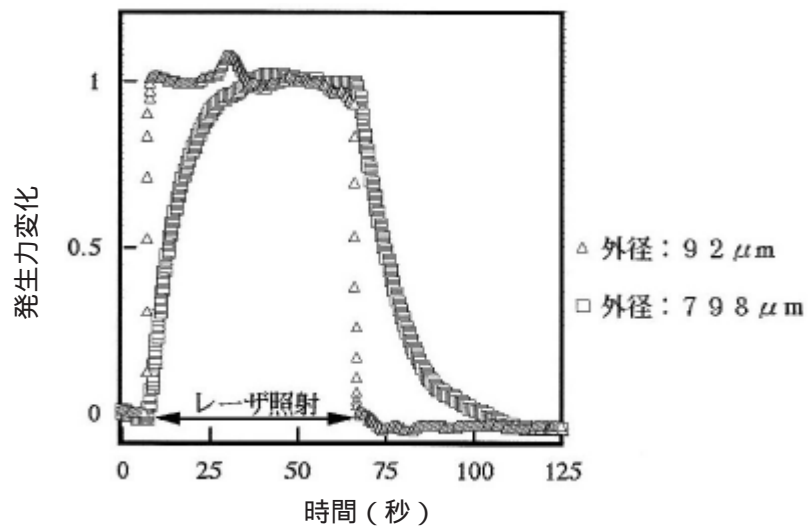


Fig.3.54 レーザ加熱による応答性 (発生力)

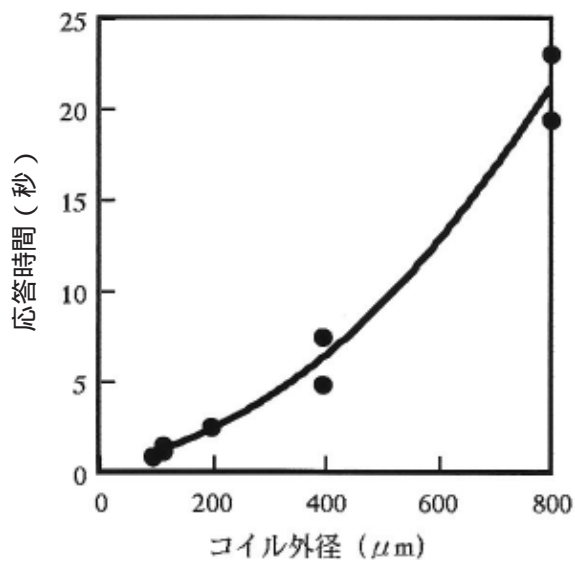


Fig.3.55 応答性とコイル外径の関係

い立ち下がり時間が減少しており、通電加熱同様、マイクロ化に伴う応答速度の向上効果が実証された。

SMA の熱伝導解析

SMA コイルへの光照射実験の結果、コイル外径を小さくすることにより応答速度が向上することがわかった。そこでこの結果を解析するために単純なモデルを仮定し非定常状態（立ち下がり時）の理論計算を行った[151]。

モデルは一樣な温度 T_0 を持つ SMA コイルを肉厚 b_0 の円筒と見なしたものである。肉厚は、コイルの素線径の $1/2$ とした。このモデルは時間 $t = 0$ より $T = 0$ なる流体に熱伝達が生じて冷却されるものであり、円筒の端面は断熱であると仮定した。また、円筒は一樣温度であるとし、表面のみの熱伝達を考えた。温度変化が一次元の場合（円筒の肉厚方向を x とする）には、温度伝導率 a を用いると

$$a = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{式(3.14)}$$

となる。 a は熱伝導率、定圧比熱 C_p 、比重量 を用いて以下のように表される。

$$a = \frac{\lambda}{C_p r} \quad \text{式(3.15)}$$

このモデルの境界条件は、円筒の肉厚部の中心を $x = 0$ とすると

$$t = 0 \text{ の時 } T = T_0 \quad \text{式(3.16)}$$

$t = 0$ の時 を外面の熱伝達率とすると

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\frac{b_0}{2}} = \alpha T_{x=\frac{b_0}{2}} \quad \text{式(3.17)}$$

$$+\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=-\frac{b_0}{2}} = \alpha T_{x=-\frac{b_0}{2}} \quad \text{式(3.18)}$$

である。式(3.14、16、17、18)より最終解は、

$$\frac{T}{T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \frac{p_n b_0}{2}}{\frac{p_n b_0}{2} + \sin \frac{p_n b_0}{2} \cos \frac{p_n b_0}{2}} e^{-ap_n^2 t} \cos(p_n x) \quad \text{式(3.19)}$$

で与えられる。ただし、固有値 p_n は式 (3 . 1 4) を満足する全ての p_n である。

$$\tan \frac{p_n b_0}{2} = \frac{\alpha}{p_n \lambda} \quad \text{式 (3 . 2 0)}$$

次に、以下のパラメータ[61,152]を用い種々の素線径 (d) について式 (3 . 1 9、2 0) より計算を行った。結果を Fig.3.54 に示す。

$$=20.9\text{J/m} \cdot \text{s} \quad =5.8\text{J/m}^2 \cdot \text{s} \quad =6.4 \times 10^3\text{kg/m}^3 \quad C_p = 251.2\text{J/kg} \cdot$$

Fig.3.56 より、マイクロ化に伴う応答性の向上効果 (立ち下がり時間の減少) を読み取ることができる。例えば初期温度 (75) が変態温度 (60) の 1.25 倍とすると、冷却過程で変態温度以下になるのに要する時間は、素線径 198 μm のコイルでは約 3 秒であるのに対し、素線径 30 μm の SMA コイルでは約 0.5 秒である。この結果は、前述の実験結果と矛盾するものではなく、本モデルが SMA マイクロコイルの駆動・制御に関する検討に有用であることが示された。

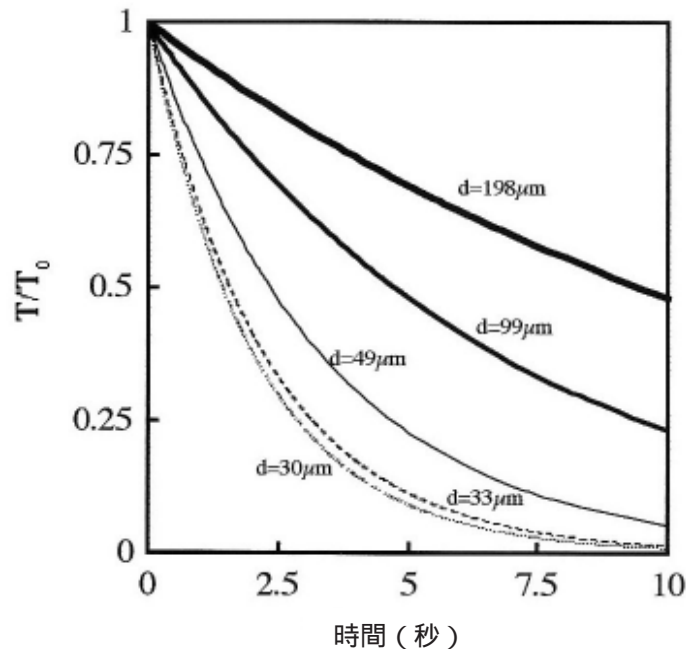


Fig.3.56 SMA コイルの冷却特性

SMA マイクロコイルの被覆検討

端面照射によりコイル全体を効率よく加熱する方法の一つとして、SMA コイル表面に熱伝導性のよい薄膜を被覆することが考えられる。そこで被覆膜の熱伝導の理論計算を行い、被覆膜がない場合と比較した。理論計算は被覆膜単体での熱伝導について 3 . 2 . 5 と同様の方法で行った。SMA

マイクロコイル上に被覆を行う方法としてはメッキ法が一般的であると考え、被覆膜としてAg、Cu、Au、Cr、Niを選んだ。計算に用いたそれぞれの金属の熱伝導率を以下に示す。

$$\begin{aligned} (\text{Ag}) &= 1785\text{J/m}\cdot\text{s} & (\text{Cu}) &= 1664\text{J/m}\cdot\text{s} \\ (\text{Au}) &= 1317\text{J/m}\cdot\text{s} & (\text{Cr}) &= 380\text{J/m}\cdot\text{s} \\ (\text{Ni}) &= 376\text{J/m}\cdot\text{s} \end{aligned}$$

被覆膜の厚さが1 μm の場合の計算結果を Fig.3.57 に示す。

理論計算の結果、被覆膜の厚さが1 μm の場合にはAu、Ag、CuはSMAマイクロコイルの熱伝導を向上する効果があるもののCr、Niはほとんど効果がないことがわかった。光熱変換型SMAマイクロコイルアクチュエータを実現する場合にSMA表面にAu、Ag、Cuの薄膜を被覆することが効果的であることが確認された。

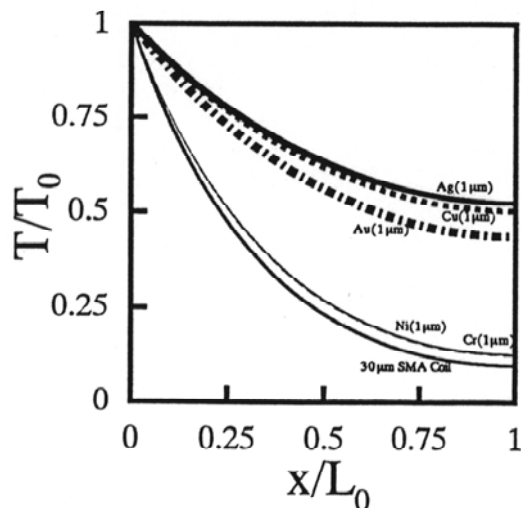


Fig.3.57 理論計算結果

3.2.6 伝熱媒体法及び直接照射法

ファイバスコープ先端の屈曲機構への適用を目指しているSMAコイルアクチュエータは、前項までの光熱変換技術の検討の結果、コイル端面にレーザ照射した場合の発生力を理論値と比較したところ、発生力は理論値の数%でありSMAコイルが効率よく加熱されていないことがわかった。また光熱変換効率を上昇させる手段としてSMA表面にAu、Ag、Cuの薄膜を被覆することが効果的であることが理論的に確認された。これまでの検討の結果、SMAコイルアクチュエータをファイバスコープ先端の屈曲機構へ適用する場合には最低でも約20mmのSMAコイルを変態温度以上に加熱することが必要である。そこで本項ではSMAコイル表面に薄膜を被覆するなど伝熱媒体を用いる方法について新たな提案を行い理論検討の後に実験を行いレーザ加熱法によりSMAコイルを20mm以上

変態温度以上に加熱することが可能であるかどうかの検討を行った。また伝熱媒体を用いる方法に対して SMA コイル全体にレーザー光を照射する全体照射法についても検討を行った。

伝熱媒体法の理論検討

伝熱媒体を用いる方法としては上記のSMAコイル表面に熱伝導率の高い金属薄膜を被覆する方法の他に、コイル内部に熱伝導率の高い金属棒(伝熱コア)を挿入しSMAコイルの長手方向への熱の伝わりを改善する方法が考えられる。そこで伝熱コアに適した材料及びサイズを検討するために理論計算を行った。

最初に、伝熱コアの端面を一定温度に加熱した場合の長さ方向 x の伝熱コア表面温度分布を計算した。金属の比較的高い熱伝導率のために任意の断面において温度は一樣であると考えられる。Fig.3.58 に示すように端面を加熱した円柱の長さ方向に沿った方向に x 軸をとり、棒の断面積を A 、周囲長さ(円周)を S 、全長を ℓ 、熱伝導率を k 、熱伝達率を h 、周囲の温度(室温)を t_r 、加熱した端面の温度を t_0 、棒の表面温度を t_s とする。また、時間に関して定常であるとする。

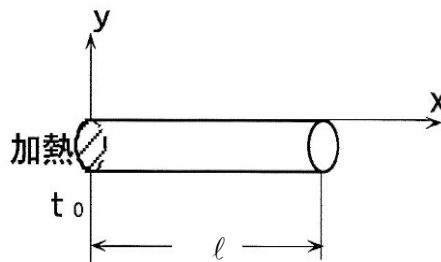


Fig.3.58 伝熱コアのモデル

このとき、伝熱コアの x 軸方向の温度分布を支配する微分方程式は式(3.21)のようになる。

$$\frac{d^2(t_s - t_r)}{dx^2} = \frac{hS}{kA}(t_s - t_r) \quad \text{式(3.21)}$$

これを以下に示す境界条件で解くと式(3.22)のようになる。

境界条件

$$q_1 = hA(t_{s\ell} - t_r) = kA \left(\frac{dt_s}{dx} \right)$$

$$t_s = \frac{(t_0 - t_r)}{1 + pe^{-2m\ell}} = (pe^{-2m\ell} e^{mx} + pe^{-mx}) + t_r \quad \text{式(3.22)}$$

$$p = \frac{km - h}{km + h}, m = \sqrt{\frac{hS}{kA}}$$

ここで

t_s : 試料表面温度 () t_0 : 試料端面温度 () t_r : 室温 () ℓ : 試料全長 (m) x : 試料長さ (m)

k : 熱伝導率 (W/mK) h : 熱伝達率 (W/m²K) A : 試料断面積 (m²) S : 断面円周 (m)

計算においては以下の条件を用いた。

- ・ 室温 : 24
- ・ 試料長さ : 30mm
- ・ 試料端面温度 : 300
- ・ レーザ波長 : 0.81 μ m

計算に用いた金属は熱伝導率の高い3種類を選んだ。Table 3.8 に計算に用いた金属とその物性を示す。

Table 3.8 計算に用いた金属とその物性値 (100 の場合)

	A g	C u	A u
熱伝導率 (W / m K)	422	395	313
反射率 (%) [波長0.81 μ mの場合]	96	87	98
比熱容量 (J / g K)	0.239	0.397	0.131
密度 ($\times 10$ g / m ²)	10.5	8.93	19.3
温度伝達率 ($\times 10$ m ² / S)	16.8	11.1	12.4
融点 ()	961.9	1084	1064

金属の光の吸収率は光の波長によって異なる。金属円柱の表面温度を式(3.22)によって求めるためには、試料の端面温度 t_0 を明確にする必要がある。しかし、レーザ光を金属に照射した場合の表面温度を理論式によって厳密に求めることは困難である。そのために光の吸収率が一定の場合について考えた。この場合は、それぞれの金属のレーザ光照射表面に光吸収層を設けた状態、つまり光の吸収率の高い物質を塗布した状態と考えられる。試料端面温度を300とした場合の各伝熱コアの試料表面温度を Fig.3.59 にそれぞれ示す。伝熱コア径は内径0.4mmのSMAコイルに挿入可能な大きさとした。熱伝導率が高いほど全体的に温度分布も高いことが分かる。Ag、Cuを伝熱コアとして用いた場合にはコア自身を約20mmにわたりSMAの変態温度以上に加熱することができることがわかった。

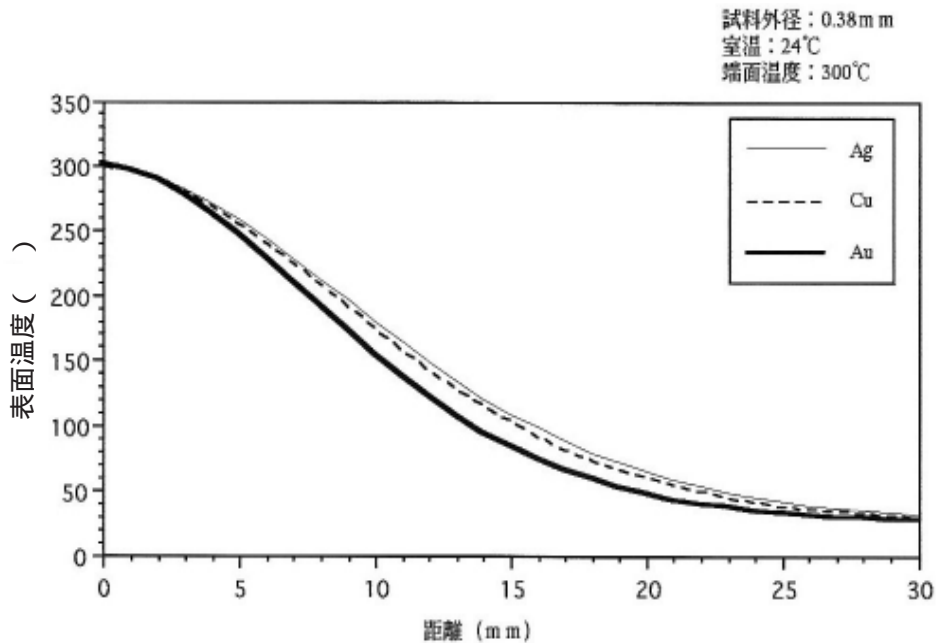


Fig.3.59 試料端面温度を 300 とした場合の各伝熱コアの試料表面温度

伝熱コアを加熱した場合、コア表面から空気への自然対流熱伝達においては速度が低いので、圧力が一定で摩擦による熱の発生はないものとみなすことができる。Fig.3.58 に示すように、端面を加熱した円柱の長さ方向に沿った方向に x 軸をとり、それと直角に y 軸をとる。このとき、金属棒の表面を y 軸の原点とする。また、自然対流境界層厚さを δ (m) で表すとする。このとき、境界層内の温度分布は式 (3.23) によって求められる。

$$t = (t_s - t_r) \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 + t_r \quad \text{式 (3.23)}$$

この式は $y = 0$ で $t = t_s$ 、 $y = \delta$ で $t = t_r$ の条件を満たす。 δ の値は円柱が水平に位置するか垂直に位置するかで異なる。これは加熱された表面近傍の流体の密度は比較的遠くの流体の密度よりも小さいために浮力を生じ、加熱された流体を上方に移動させ、このときの水平円柱と垂直円柱とでは熱伝達機構が変化するためである。水平円柱の場合と垂直円柱の場合についてそれぞれ計算を行った結果、垂直円柱の方が境界層内の熱伝達が良くなり温度分布が高温側へ位置することがわかった。垂直円柱の場合の計算は以下のように行った。

円柱が垂直に位置し、円柱の底面から加熱されている場合、ヌセルト数 Nu は式 (3.24) で与えられ、 δ は式 (3.25) で与えられる。

$$Nu = \frac{hd}{k} = \frac{2d}{\delta} = 0.53(G_r P_r)^{\frac{1}{4}} \quad \text{式 (3.24)}$$

よって

$$\delta = \frac{2d}{0.53(G_r P_r)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{式(3.25)}$$

ここで

$$G_r = \frac{g\beta(t_s - t_r)d^3}{\nu}, \quad P_r = 0.75$$

y : 半径方向の試料表面からの距離 (m)、 d : 試料外径 (m)

G_r : グラスホフ数、 P_r : プラントル数、 g : 重力 (m/s²)

β : 体膨張係数 (1/)、 ν : 動粘性係数 (m²/s)

伝熱コアとしてCuを用いた場合に試料の外径を0.18mm、0.38mm、0.58mmと変化させたときの自然対流境界層内の温度分布を Fig.3.60 に示す。試料外径が大きくなるのにしたがって温度分布が高温側へシフトしている。これは試料の体積が増加した分だけ入熱量が増加したためと考えられる。試料の外径を許される範囲で大きくすることはコイルを長さ方向に加熱するのに有効的であると言える。

理論計算の結果、仮にCu製の伝熱コア端面がレーザ加熱により300℃に加熱されたとしたならば伝熱コア外径が0.58mm程度であればコア表面から0.01mm離れた場所の雰囲気気を約20mmに渡り変態温度以上に加熱できることがわかった。従って、伝熱コアを用いた場合にもコイル表面に金属

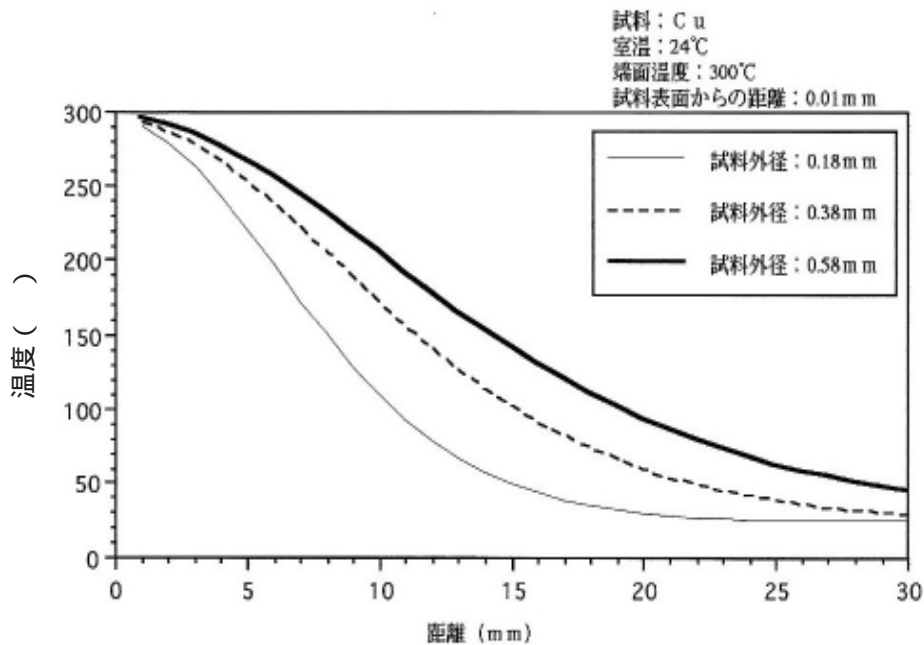


Fig.3.60 伝熱コアの自然対流境界層内の温度分布

薄膜を被覆したのと同様SMAコイルを加熱する際の光熱変換効率の向上に効果があることがわかった。

伝熱媒体法によるレーザー照射実験

以上の検討結果よりコイル表面に金属薄膜を被覆した場合と伝熱コアを用いた場合について実際にレーザー照射実験を行いSMAコイル表面の温度測定を行いSMAコイルのみの場合との比較を行った。各方式を Fig.3.61 に示す。またレーザー照射実験装置を Fig.3.62 に示す。SMAコイルは上部を固定し吊した状態で下部からレーザーファイバによりレーザー光を照射した。コイル端とファイバ端の位置合わせは2台のCCDカメラを用いて観察することにより行った。またSMAコイル表面の温度は放射温度計を用いて測定を行った。実験条件は以下の通りである。

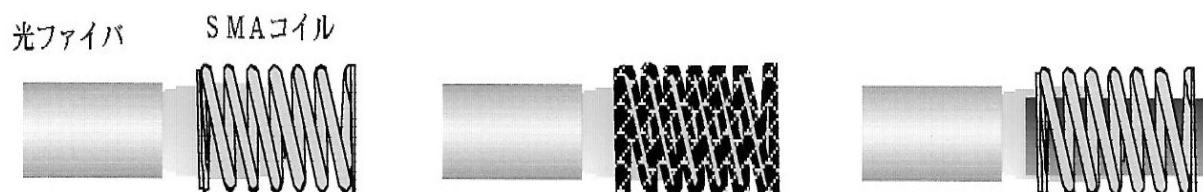


Fig.3.61 SMAコイルのみの場合と伝熱媒体を用いた方法

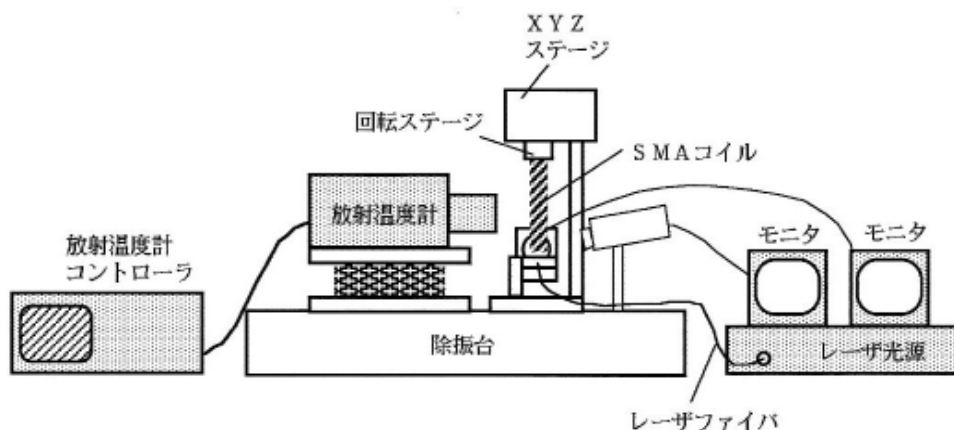


Fig.3.62 レーザー照射実験装置

[主要機器仕様]

レーザー光源...KLDS-810 (ケエテシステムサービス製) 波長 810nm

レーザーファイバ...GI-400/500 (日立電線製) NA = 0.2、コア径 = 400 μ m

放射温度計...TVS-8100 (日本アビオニクス製)

[SMA コイル仕様]

素線径：0.2mm

コイル外径：0.6mm、0.8mm、1.0mm の 3 種類

コイル長さ：60mm

[レーザ出力条件]

ファイバ端出力：500mW、750mW の 2 種類

ファイバ端とコイル端との距離：0.4mm

[金属薄膜被覆条件]

薄膜被覆法：電解メッキ法

メッキ膜：金

メッキ膜厚：約 2 μ m

[伝熱コア条件]

伝熱コア材質：銅

伝熱コア径：0.18mm（コイル外径0.6mm用）、0.38mm（コイル外径0.8mm用）、0.58mm（コイル外径1.0mm用）

[放射温度計条件]

SMA コイル（Ni-Ti 合金）の放射率：0.74

メッキ膜の放射率は小さすぎるため放射温度計では設定が不可能なため表面に黒色塗料を塗布し放射率を 1 として測定を行った。

SMA コイルのみに端面照射を行った場合の放射温度計による熱画像を Fig.3.63 に示す。また熱画像をもとにした各 SMA コイルの長手方向の温度プロファイルを図 3.64 に示す。同図における横軸の 0 近傍のピークはファイバの出射端である。レーザ出力が 500mW の場合には SMA コイルはほとんど加熱されないのに比べて、750mW の場合には SMA コイルの端部は 300 近くまで加熱されている。同図においてレーザ出力が 750mW の場合に SMA コイルの表面温度が変態温度（ $A_f = 65$ ）以上になっている部分の長さを求めた結果を Table 3.9 に示す。SMA コイルのみの場合と伝熱コアを比較するとコイル外径が 0.6mm、0.8mm の場合には伝熱コアの効果が認められるものの 1.0mm の場合には効果がない。これはレーザ光による投入エネルギーが伝熱コア径によらず一定であるためにコア径の増加に伴いコア端面の温度が十分に上昇していないためであると考えられる。金属薄膜被覆の場合にはコイル外径が 0.6mm の場合にのみ効果が認められる。これはコイルが径が小さい場合には金属薄膜による熱伝導の改善効果が得られるが、コイル外径が大きくなると表面積の増加による空気中への熱の拡散効果が大きく金属薄膜による熱伝導の改善効果を打ち消しているものと考えられる。これらの検討結果より SMA コイル外径がある程度小さい場合には伝熱媒体を用いることにより光熱変換効率を上昇させることができることがわかった。特に伝熱コアを用いればファ

イバスコープ先端の屈曲機構へ適用する場合に必要な長さ20mmのSMAコイル変態温度以上に加熱することが可能であることがわかった。

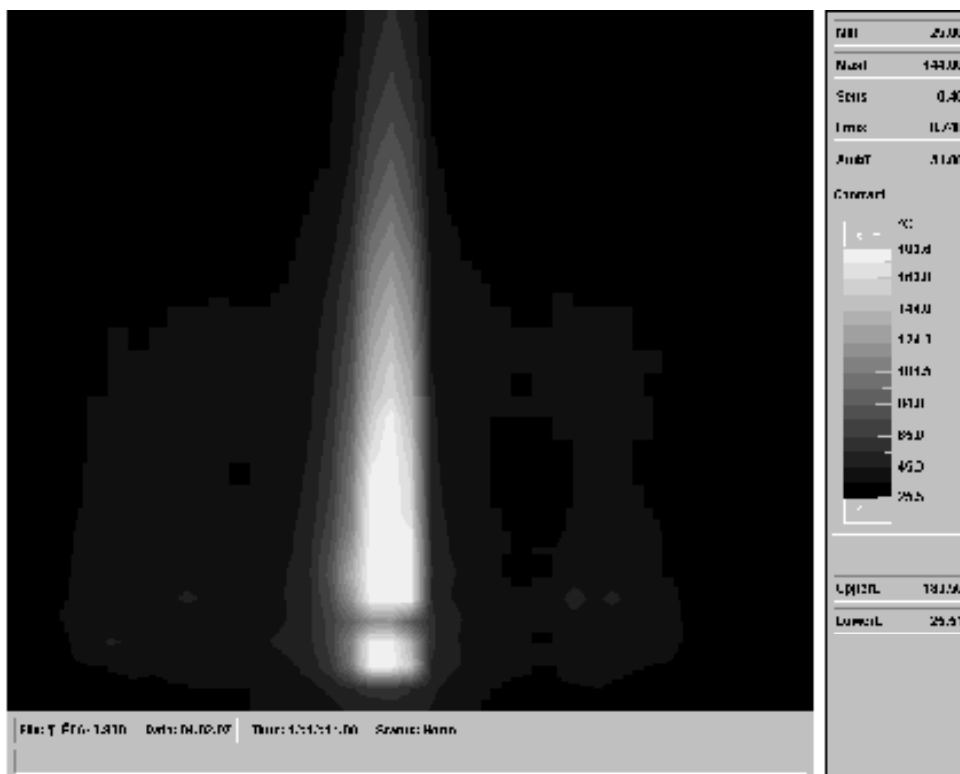


Fig.3.63 熱画像

Table 3.9 Af点以上のSMAコイル長さ

出力：750mW

単位（mm）

加熱方式	コイル外径サイズ		
	0.6	0.8	1.0
端面照射	9	13	12
伝熱棒	14	19	9
金属薄膜被覆	15	12	14

全体照射法によるレーザー照射実験

Table 3.9 においてSMAコイルの外径が大きくなるにつれてAf点以上となる部分の長さが長くなっている。これはコイルの内径がコア径より大きくなったためにコイルの内側でレーザー光が反射を繰り返しながらコイルを加熱したためにより多くの部分が加熱されたものと考えられる。した

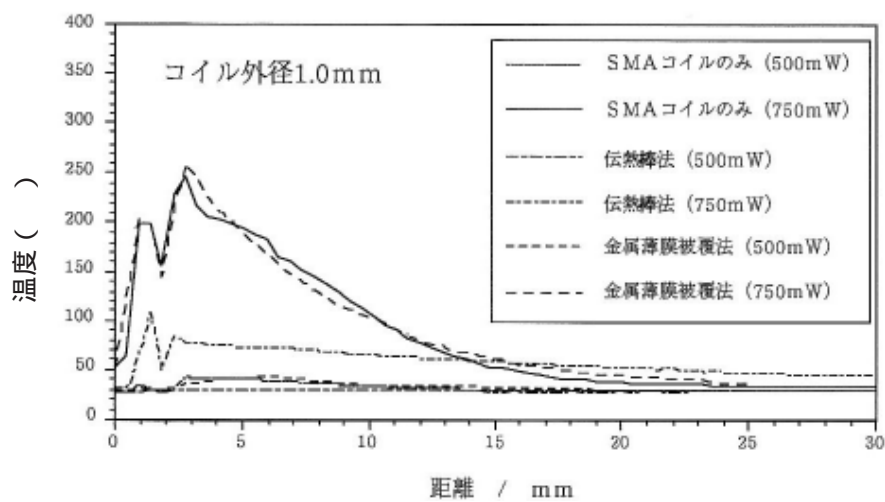
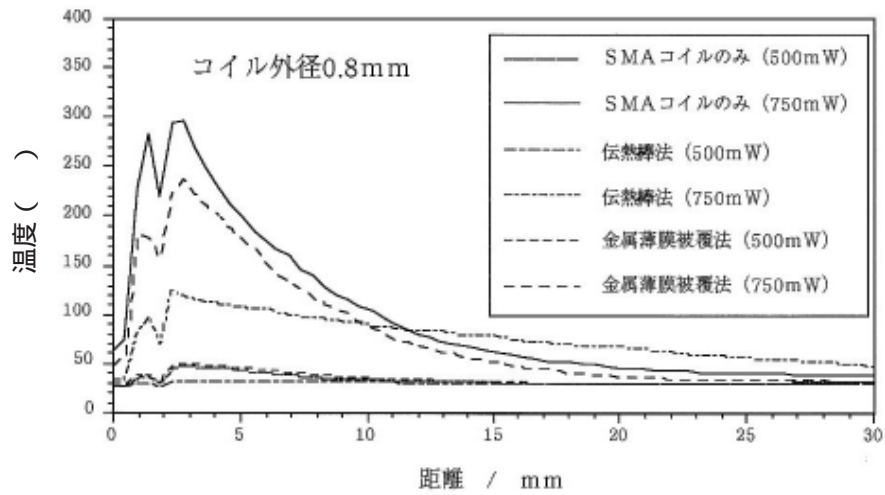
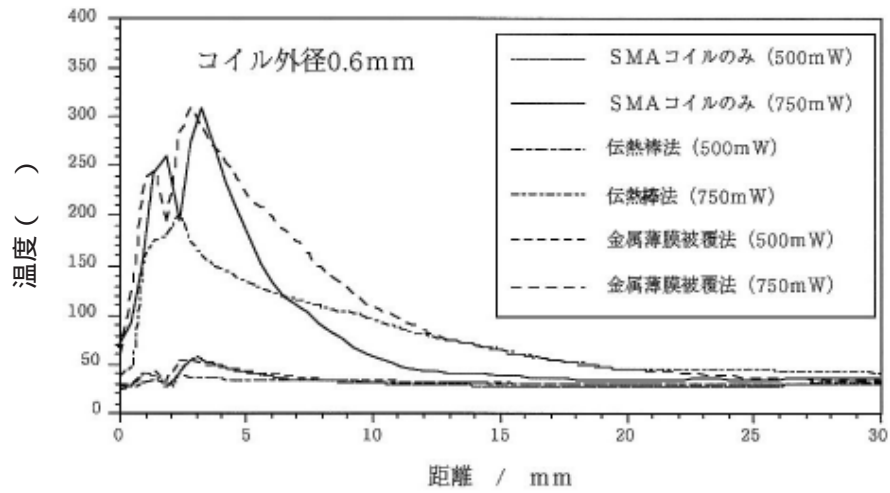


Fig.3.64 各SMAコイルの長手方向の温度プロフィール

がってレーザー光をコイル全体に照射する方法を用いても光熱変換効率を上昇させることが可能であると考えられる。ファイバ端から放射されたレーザー光をコイルのような長尺物全体に照射するためにファイバの先端部をテーパ形状としたものを用いた。テーパファイバを用いた場合の構造を Fig.3.65 に示す。テーパファイバはファイバの先端部をフッ酸溶液中で上下させることにより作製した。テーパファイバ作製装置を Fig.3.66 に示す。作製条件は以下の通りである。

移動距離：20mm

上下移動速度：1mm/sec

上下回数：60回

エッチング後のテーパファイバの写真を Fig.3.67 に示す。ファイバ先端部に20mmのテーパ形状を作製することができた。

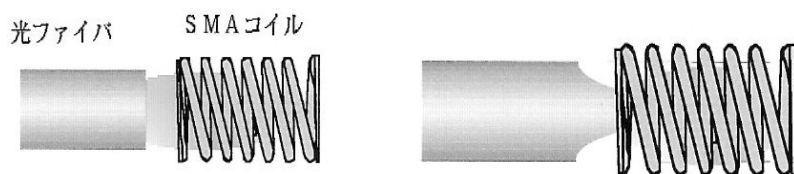


Fig.3.65 テーパーファイバを用いた場合の構造

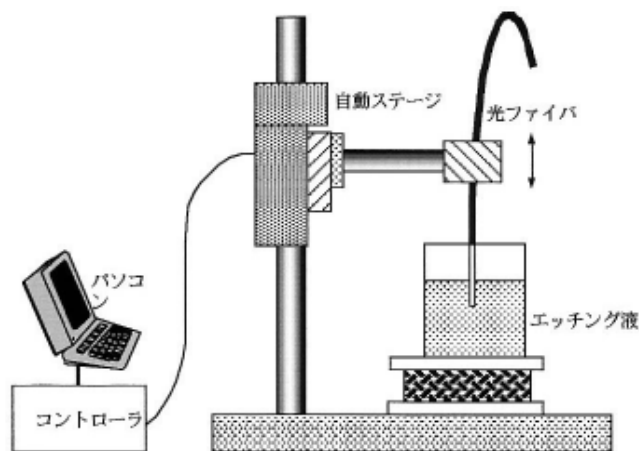


Fig.3.66 テーパーファイバ作製装置

テーパファイバを用いたレーザー照射実験は上記で述べた伝熱媒体法によるレーザー照射実験装置を用いて行った。レーザー出力条件は同一であるが、SMAコイルに関してテーパファイバを挿入することが可能な内径0.4mm及び0.6mmの場合について実験を行った。放射温度計の熱画像をもとにした各SMAコイルの長手方向の温度プロファイルを Fig.3.68 に示す。同図よりレーザー出力が750mWの場合にSMAコイルの表面温度が変態温度 ($A_f = 65$) 以上になっている部分の長さを求めた結果、コイル外径が0.8mmの場合では約13mm、コイル外径が1.0mmの場合で約11mmであることがわ

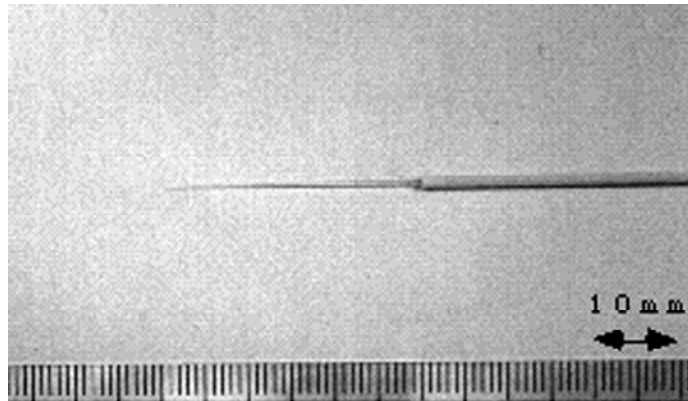


Fig.3.67 エッチング後のテーパファイバの写真

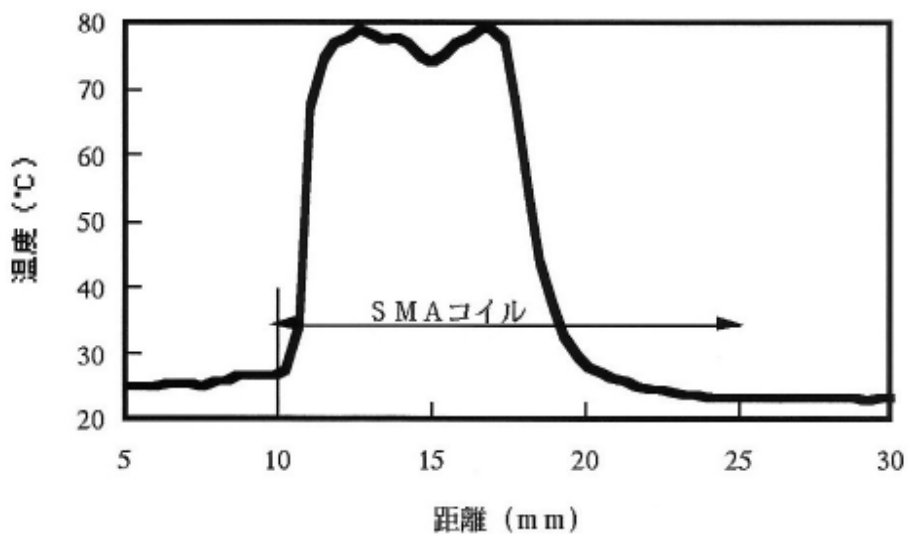


Fig.3.68 各 SMA コイルの長手方向の温度プロファイル

かった。これは Table 3.9 の SMA コイルのみの端面照射の場合とほぼ同じでありテーパファイバの有効性は確認できなかった。 Fig.3.68 のテーパファイバを用いた場合の温度プロファイルから今回用いたテーパファイバでは先端部のみからしかレーザー光が出射していないことがわかる。今後テーパ形状を最適化しテーパ部全体からレーザー光を出射させることによりSMAコイルをより長い部分加熱することができるものと考えられる。

伝熱媒体法と全体照射法を組み合わせたレーザー照射実験

上記で検討した伝熱媒体法と全体照射法についてそれぞれ組み合わせることが可能な方法について検討を行った。可能な方法としては金属薄膜被覆法とテーパファイバの組み合わせである。この

構造を Fig.3.69 に示す。SMA コイルに関してテーパファイバを挿入することが可能な内径 0.4mm 及び 0.6mm の場合について実験を行った。放射温度計の熱画像をもとにした各 SMA コイルの長手方向の温度プロファイルを Fig.3.70 に示す。レーザ出力が 750mW の場合に SMA コイルの表面温度が変態温度 ($A_f = 65$) 以上になっている部分の長さを求めた結果、コイル外径が 0.8mm の場合では約 18mm、コイル外径が 1.0mm の場合で約 17mm であることがわかった。これは金属薄膜被覆法とテーパファイバをそれぞれ単独で用いた場合と比較して光熱変換効率が上昇している。これはテーパファイバによるレーザ照射面積の拡大と金属薄膜による熱伝導性の改善効果が合わさったものであり両者を組み合わせることにより SMA コイルを効率よく加熱することが可能であることがわかった。



Fig.3.69 金属薄膜被覆法とテーパファイバの組合せ構造

3.2.7 テーパーエッチドファイバとアクチュエータユニット

前項までの検討において、ファイバスコープ先端を屈曲させるための SMA コイルアクチュエータを駆動させる方法として、SMA コイルをレーザ照射により加熱する種々の方法を検討してきた。その結果、レーザ照射方法はテーパエッチドファイバ法および伝熱棒法が有用であることが分かった。実際に首振りファイバスコープ用アクチュエータに適用する場合、SMA コイルの素線を細径化することは熱容量がより小さくなるため加熱するエネルギーが小さくなるので効率的であり、表面積がより大きくなるので加熱後の放熱性も向上する。またアクチュエータのサイズを小さくするというメリットがある。そのため、アクチュエータユニットについて構造、サイズの観点から検討した結果テーパエッチドファイバによるレーザ加熱方法が適当と考え、これを選択した。本項では、テーパエッチドファイバにより SMA コイルにレーザ照射することで駆動するレーザ駆動型アクチュエータユニットの設計および試作を行い、動作実験を行った。

アクチュエータユニットの構造及び設計

3.2.4 のアクチュエータユニットを参考にし、レーザ駆動型アクチュエータユニットの構造及びサイズを決定した。構造は Fig.3.71 に示すように、全体はステンレスパイプとその両端の固定板からなっている。1本の SMA 引張コイルは中央部で反転されそこが可動部に固定されてお

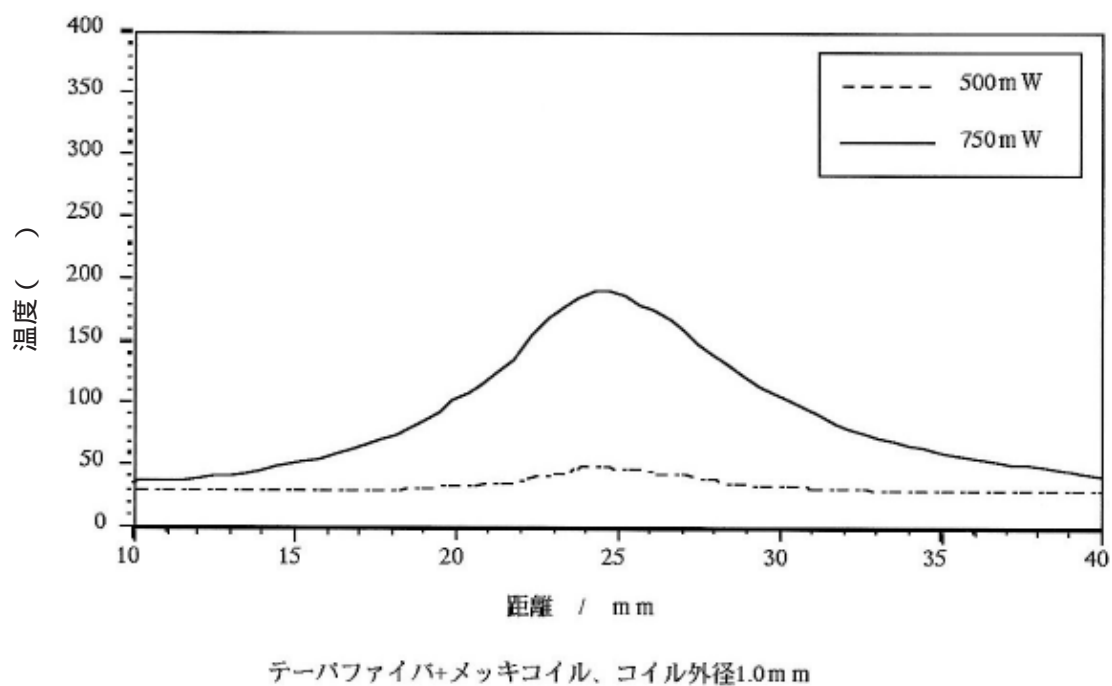
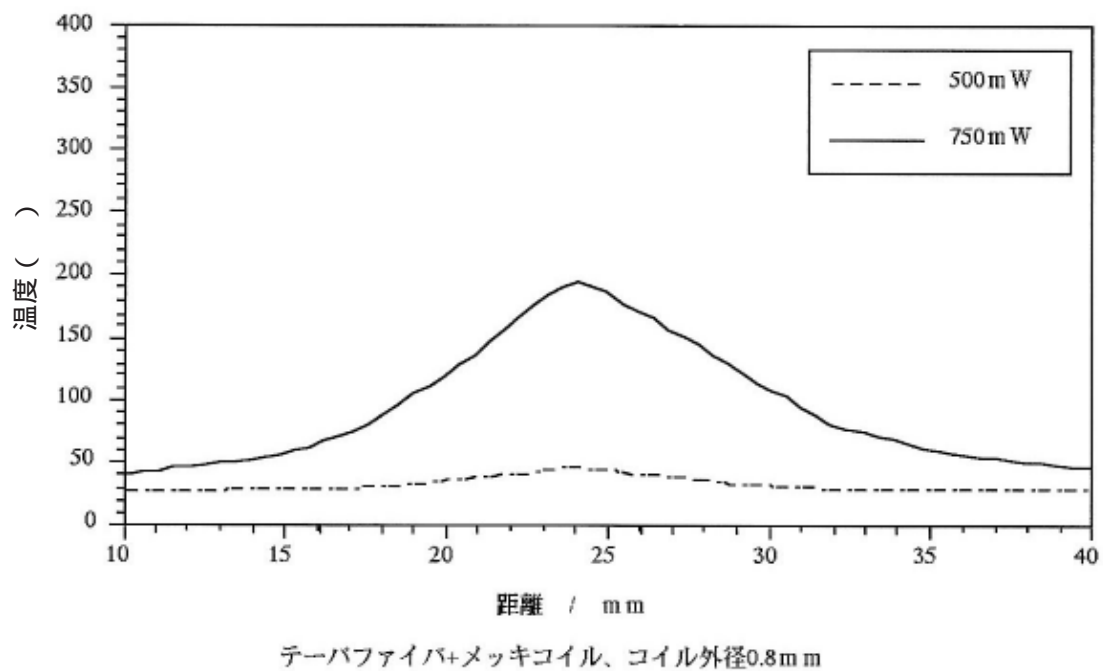


Fig.3.70 各SMAコイルの長手方向の温度プロファイル

り、両端は一方の固定板に固定されている。テーパエッチドファイバは一方の固定板から挿入され、複数のSMAコイルがファイバを取り巻くように配置される。両方の固定板にはそれぞれ2本の

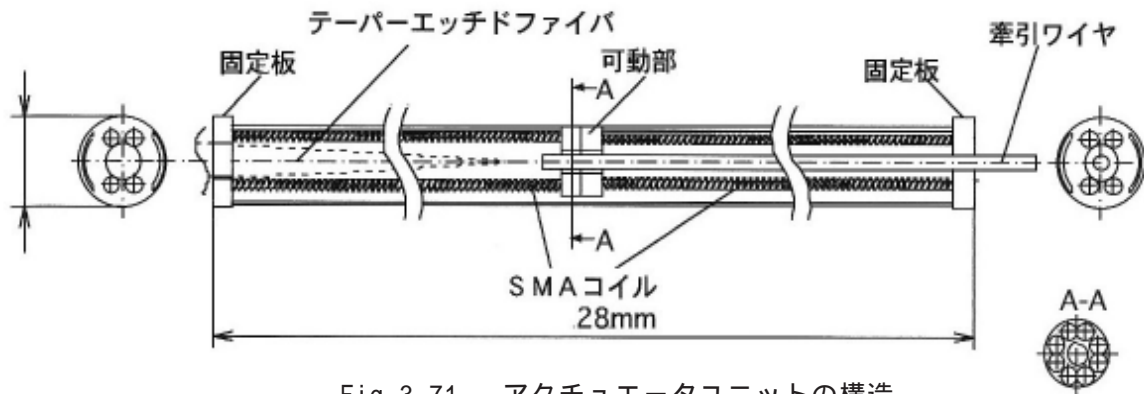


Fig.3.71 アクチュエータユニットの構造

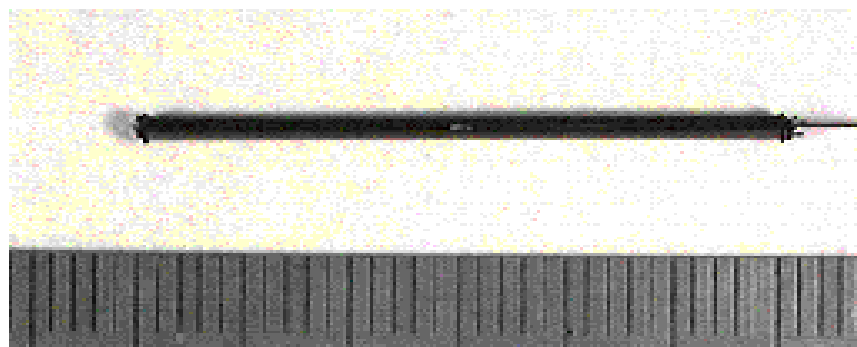


Fig.3.72 アクチュエータユニットの全体写真

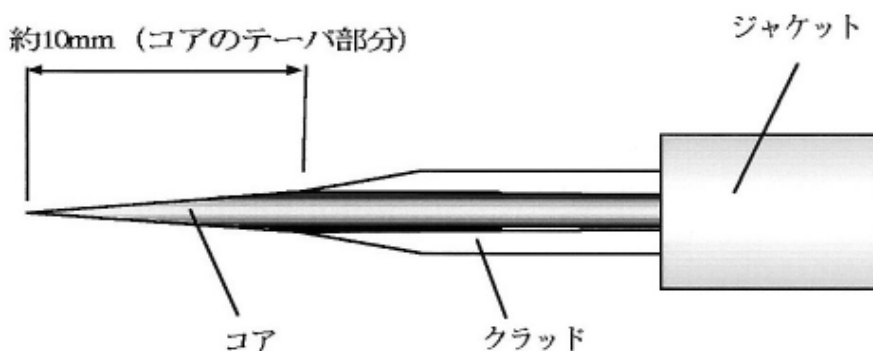


Fig.3.73 テーパーエッチドファイバの構造

コイルが取り付けられている。全体で計4本のコイルは初期ひずみを与えられて取り付けられ、拮抗状態になっている。牽引ワイヤは可動部に固定されている。アクチュエータユニットの全体写真を Fig.3.72 に示す。テーパエッチドファイバは Fig.3.73 に示すようにファイバの先端をフッ酸溶液中でテーパ形状に加工したものである。

レーザー光はテーパエッチドファイバのテーパ形状部分から放射状に照射され、その周囲にある SMA コイルを加熱する。加熱されたコイルは形状を回復し収縮する。これにより、可動部が移動し牽引ワイヤが引かれる。レーザー光の照射を停止するとコイルに加わった熱は自然放熱し、加熱して

いないコイルがバイアスバネとして働くため、それに伴って可動部が拮抗位置に戻る。

これまでの検討から、テーパエッチドファイバにより変態温度以上に加熱されるコイル長は約10mmであることが分かっている。よって、取り付け長が10mm以下で4方向首振りファイバスコープの首振り部を片側30°程度曲げるのに必要な発生力が得られる条件の下で式(3.13)の各パラメータを変化させ、素線径およびコイル本数が最小のものを選択した。その結果コイルの仕様は、素線径50 μ m、コイル外径150 μ m、コイル本数4本に決定した。

レーザー照射による駆動実験

試作したレーザー光駆動型アクチュエータユニットにレーザー光を照射し、Fig.3.74 に示す実験装置を用い駆動実験を行った。テーパエッチドファイバは下向きに固定され、アクチュエータユニットの上部から挿入される。可動部の変位量は、アクチュエータユニットの側方からCCDカメラにより観察した。実験に用いたテーパエッチドファイバは5本で、テーパ形状部分の長さ約10mm、テーパ角平均1.3°である。実験は、可動部の変位量を観察し理論式から得られる変位量と比較することで発生力を推測した。

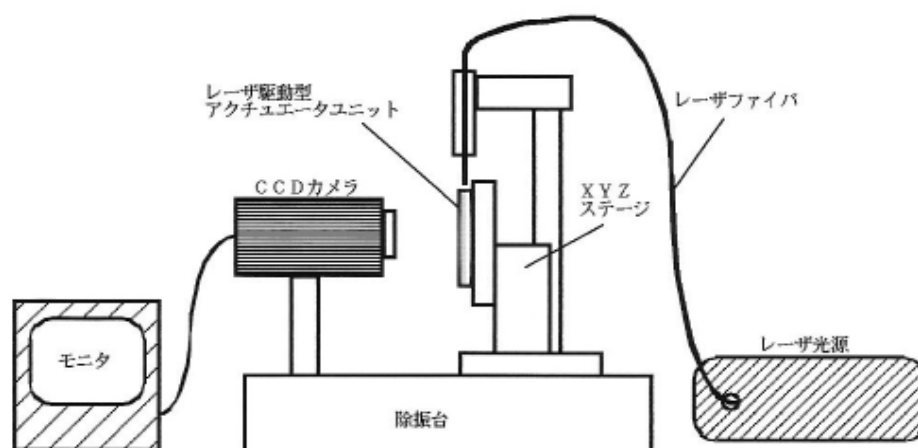


Fig.3.74 レーザ照射実験系

レーザー光を照射しない場合と照射した場合での可動部の変位の様子を Fig.3.75 に示す。また、各ファイバにおける変位量と設計に用いた理論式からの変位量との比較を Table 3.10 に示す。

これらの結果から、レーザー光を照射することによるアクチュエータユニットの動作は確認された。しかし、その変位量は設計値に対し最大で約40%であった。SMAコイル全体を十分に加熱するように熱源を近づけたところ、可動部の変位量は設計値を満たすことを確認している。このことから、実験結果については今回用いたテーパエッチドファイバではSMAコイル全体にわたり加熱できていないことが推測される。したがって、首振りファイバスコープ用アクチュエータに適用するた

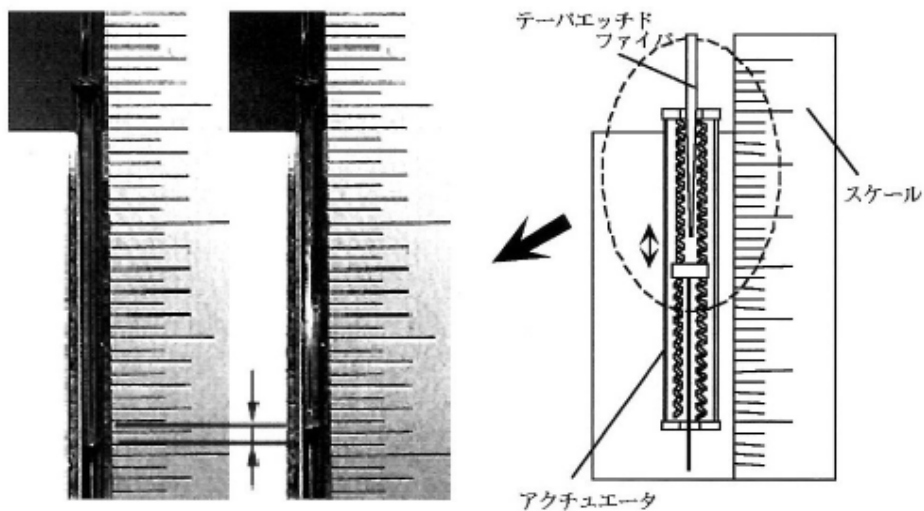


Fig.3.75 可動部の変位の様子

Table 3.10 変位量との比較

ファイバNo	変位量 (理論値に対する割合)	
	600mW	750mW
1	0.29(15%)	0.51(27%)
2	0.49(26%)	0.71(37%)
3	0.43(23%)	0.62(33%)
4	0.55(29%)	0.78(41%)
5	0.49(26%)	0.78(41%)
平均	0.45(24%)	0.68(37%)
標準偏差	0.098	0.11

めには、コイルをより長く加熱できるようなテーパエッチドファイバの形状の最適化を検討する必要がある。

3.2.8 ステップエッチドファイバとアクチュエータユニット

前節までで、試作を行った光駆動型アクチュエータユニットのSMAコイルに、テーパエッチドファイバを用いてレーザー照射することにより、アクチュエータが動作することを確認した。しかし、試作したテーパエッチドファイバでは、十分な長さのSMAコイルを変態温度以上に加熱することができず、その動作変位は設計値よりも少なかった。よって、本項では光駆動用ファイバ先端形状の最適化を行い、SMAコイルの加熱領域を増加するための検討を行った。

ステップエッチドファイバの作製

前項で試作したテーパ形状部分の長さが約10mmのテーパエッチドファイバに加え、テーパ形状部分の長さが約15, 20mmのテーパエッチドファイバ、の試作を行った。作製方法はファイバの先端をフッ酸溶液中に浸し、上下に昇降を繰り返すものである。浸す長さや昇降回数を変化させることにより、異なる長さのテーパエッチドファイバが作製できる。また、新たにファイバ先端部分の外径が先端に向かってステップ状に細くなる、ステップエッチドファイバを試作した。ステップエッチドファイバの模式図をFig.3.76に示す。作製方法はまず、エッチングしたい長さのファイバの先端をフッ酸溶液中に浸し、一定時間保持そして2mmずつ上昇させるということを繰り返すものである。今回試作したのは、ステップファイバ全体の長さと、ステップの大きさが異なる3種のステップエッチドファイバである。これらの寸法形状をまとめたものをTable 3.11に示す。

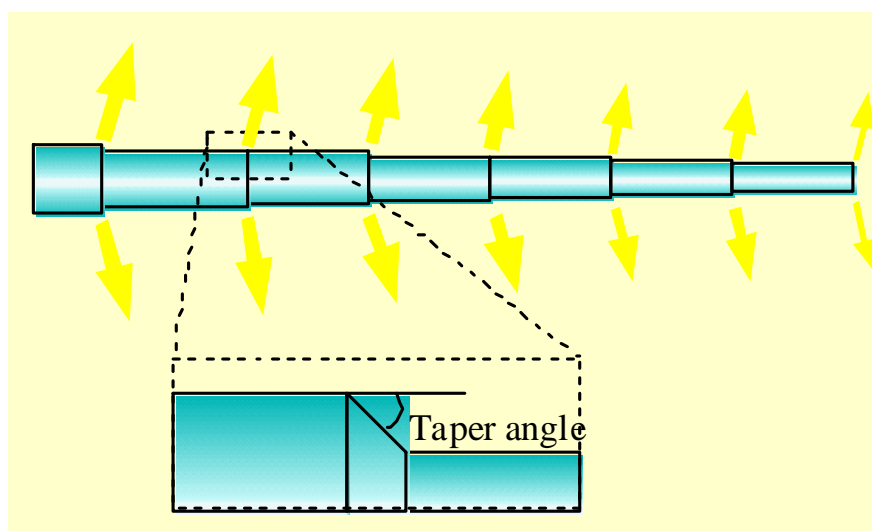


Fig.3.76 ステップエッチドファイバの模式図

Table 3.11 ステップエッチドファイバの各ステップの外径

単位：μm

ステップ数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	全長
ステップエッチドファイバ	377	295	243	182	96	58	0	-	-	-	-	10.9mm
ステップエッチドファイバ	401	390	377	374	362	340	377	321	304	281	267	20mm
ステップエッチドファイバ	391	377	317	296	235	197	149	101	30	23	0	20mm

温度プロファイルの測定

試作したテーパエッチドファイバと、ステップエッチドファイバを用いてレーザ照射した際の加熱状態を調べるため、SMAパイプ（1.05 / 0.70mm）にファイバを挿入しレーザ光を照射。その際のSMAパイプの表面温度を、放射温度計にて測定した。Fig.3.77 に実験系を示す。

熱画像解析を行い、得られたレーザ照射10, 15秒後のSMAパイプの長手方向における表面温度プロファイルを Fig.3.78 に示す。前項で示したテーパエッチドファイバと比較して、テーパエッチドファイバ、の温度プロファイルはレーザ照射10, 15秒後ともほとんど同じであり、先端部付近が最も高くそれから遠のくに従い温度が曲線的に減少する傾向を示した。これに対し、ステップエッチドファイバ、においても同様の傾向を示した。しかし、ステップエッチドファイバはレーザ照射15秒後において、やはり先端部付近の温度が最も高いが、ステップエッチドファイバ部分全体に渡り表面温度が上昇している。この結果より、ステップエッチドファイバにおいては、ファイバ部全体からレーザ光が照射されていることが推測され、SMAコイルをより長く加熱できる可能性があることが分かった。

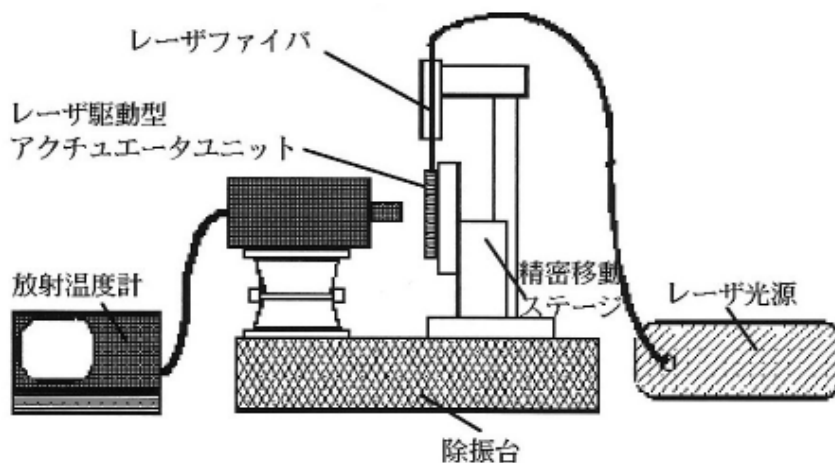


Fig.3.77 放射温度計による実験系

動作変位の測定

3.2.7で試作した光駆動アクチュエータユニットを用い、実際にレーザ駆動を行った際の動作変位を測定した。測定方法は3.2.7と同じく、固定された光駆動型アクチュエータユニットの上部からテーパエッチドファイバ、ステップエッチドファイバをそれぞれ挿入し、レーザ光を照射することで変位した可動部の変位量を、アクチュエータの側方からCCDカメラによって観察するものである。各ファイバにおける変位量と、設計に用いた理論式から求めた変位量に対する割合

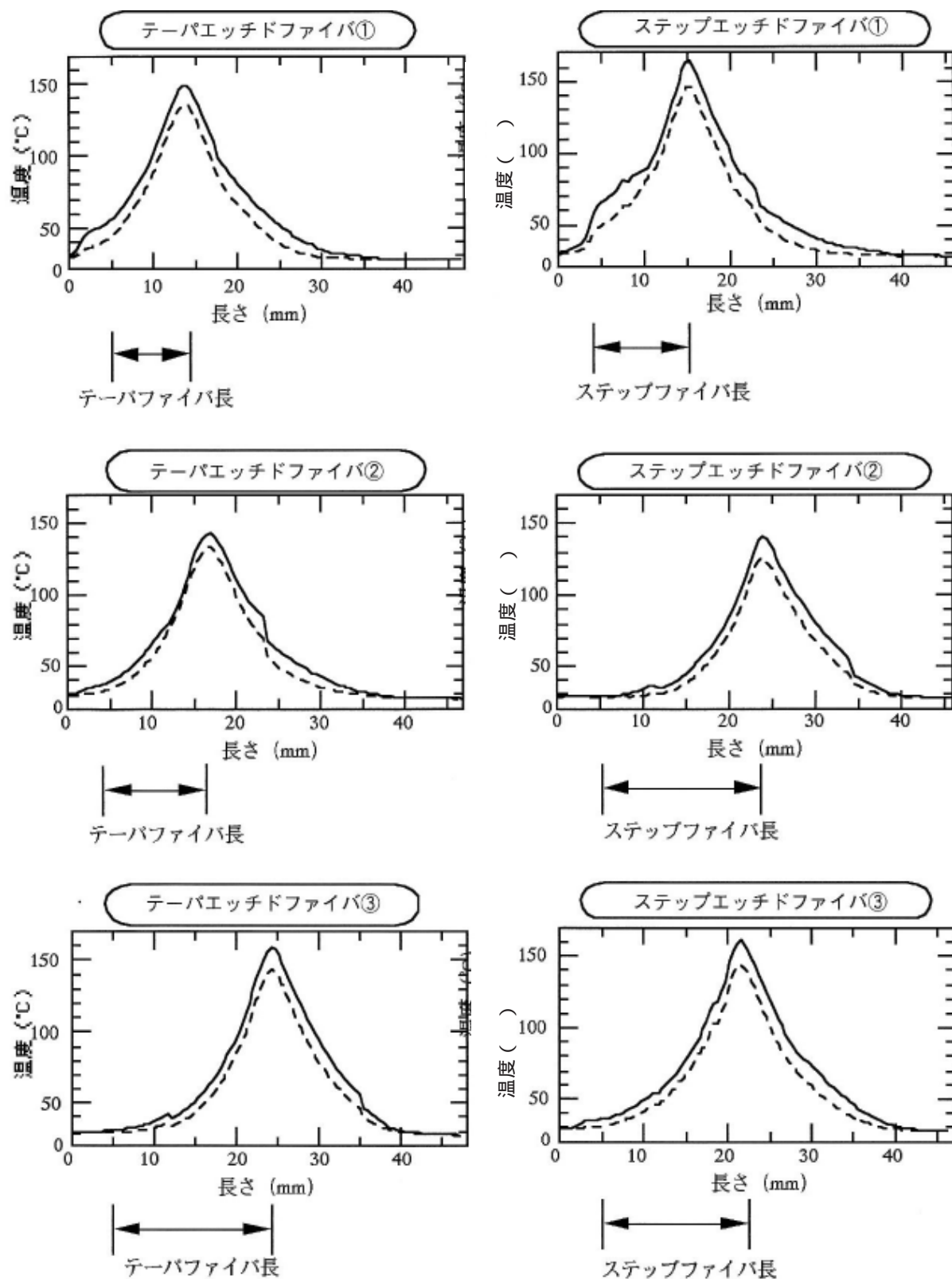


Fig.3.78 表面温度プロファイル(点線：レーザ照射10秒後、レーザ照射実線15秒後)

をまとめたものを Table 3.12 に示す。

Table 3.12 各ファイバにおける動作変位量の比較

単位：mm

	動作回数			平均	設計値に対する割合
	1回	2回	3回		
テーパエッチドファイバ	0.86	0.86	0.86	0.86	45%
テーパエッチドファイバ	1	0.86	0.76	0.87	46%
テーパエッチドファイバ	0.95	0.95	0.95	0.95	50%
ステップエッチドファイバ	1.7	1.8	1.6	1.7	89%
ステップエッチドファイバ	1	0.95	0.86	0.94	49%
ステップエッチドファイバ	1	1	1	1	53%

テーパエッチドファイバ ~ において動作変位量に大きな差は見られず、テーパ長を長くすることにより、SMA コイルの加熱長さを長くする効果は見受けられなかった。ステップエッチドファイバ、において、動作変位量はテーパエッチドファイバの結果とほぼ同じものだった。しかし、ステップエッチドファイバにおいては、これらの約2倍の動作変位を得た。この理由について、ファイバ形状の観点から考察を行う。テーパエッチドファイバ ~ の中心軸に対するテーパ角は、先端部以外は 0.5° 以下であった。ここで、ステップエッチドファイバのステップが切り替わる境界部分のテーパ角をまとめたものを、Table 3.13 に示す。

Table 3.13 ステップエッチドファイバのステップ境界部分のテーパ角

単位：°

ステップ数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ステップエッチドファイバ	3.35	3.16	6.30	3.00	4.15	-	-	-	-	-
ステップエッチドファイバ	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.25	0.20
ステップエッチドファイバ	0.15	7.10	0.20	1.10	0.35	2.00	2.10	4.15	4.50	0.10

テーパエッチドファイバと動作変位量がほぼ等しかったステップエッチドファイバは、テーパ角が 0.25° 以下であり、ステップエッチドファイバは先端部と根本側の一部を除いてテーパ角が約 2° 以下であった。これに対し、動作変位量がテーパエッチドファイバの約1.8倍であるステップエッチドファイバにおいては、テーパ角が 3° 以上であることが分かる。これより、先端部以外の部分においてステップ境界部のテーパ角が大きくなると、光の照射量が増加することが推測される。テーパエッチドファイバにおいて仮にテーパ角を 3° とすると、テーパ部の長さは約

3.8mm となり、加熱する SMA コイル長を長くすることができない。従って、SMA コイルの加熱領域をより長くするためには、テーパエッチドファイバよりも、ステップ境界部のテーパ角のある程度大きなステップエッチドファイバの方が、適していることが分かった。Fig.3.79 に動作の様子を示す。

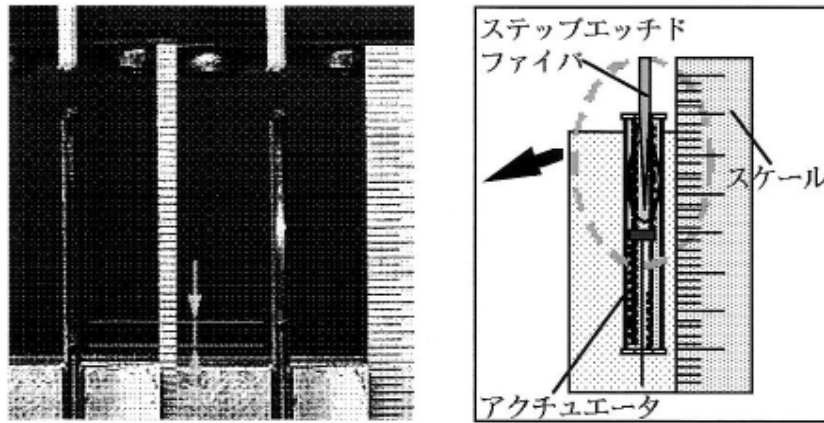


Fig.3.79 ステップファイバ を用いた動作の様子

ステップエッチドファイバを用いた首振り構造体

光駆動首振りファイバ스코ープの構造概略を Fig.3.80 に示す。アクチュエータ部はステンレスパイプとその両端の固定板から成り、牽引用 SMA コイルの片端が根本側の固定板に固定されている。そして、他端は牽引ワイヤと接続されている可動部に固定されている。レーザ照射用のステッ

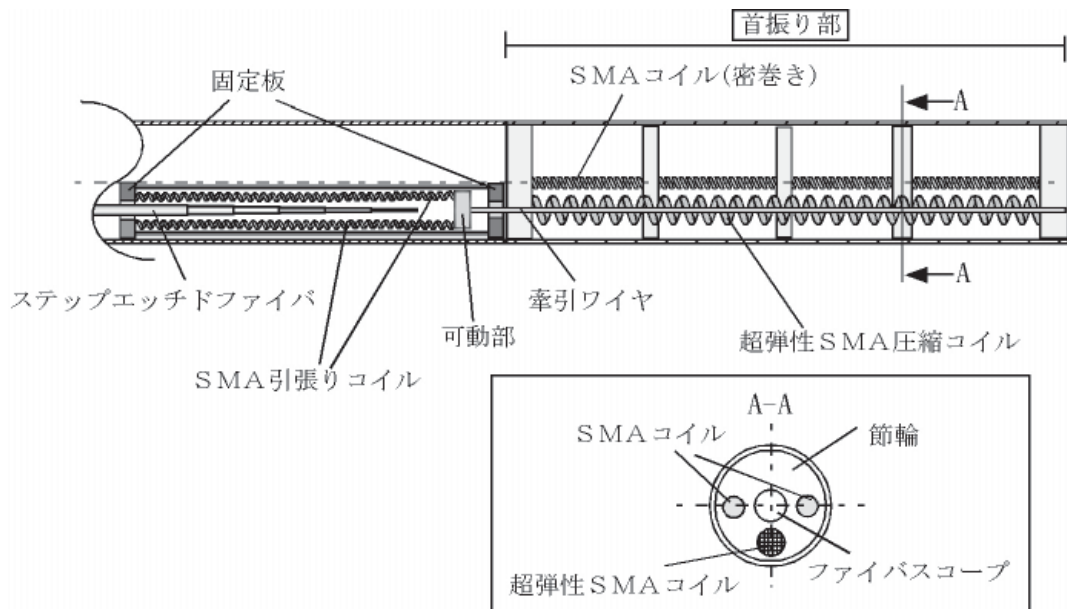


Fig.3.80 光駆動首振りファイバ스코ープの構造概略

プエッチドファイバが根本側より挿入され、その周囲に複数本のSMAコイルが配置される。首振り部は、密巻きのSMAコイルと超弾性SMA圧縮コイルと節輪およびファイバスコープから成る。首振り部の断面で見ると、中心にファイバスコープとその両側に密巻きSMAコイルが中心軸に配置され、首振り方向となる中心軸と直角の位置に超弾性SMAコイルおよび、その内部に牽引ワイヤが1本ずつ配置される。密巻きのSMAコイルはアクチュエータによりワイヤを牽引した際に首振り部が圧縮されるのを防ぎ、かつ柔軟性を有する骨格の役割を果たす。超弾性SMAコイルは、バイアスコイルの役割を果たす。超弾性SMAコイルは同サイズの金属性コイルと比較して、弾性域が広いいため変位量を大きくすることが可能である。また、変態温度を室温以下に設定することにより、同サイズのSMAコイルと比較してバイアス力を大きくすることが可能である。これらの利点を有するため、超弾性SMAコイルをバイアスバネとして選定した。

動作原理

レーザー光をステップエッチドファイバを用いて、その周囲の牽引用SMAコイルに直接照射しコイルを加熱する。これにより牽引ワイヤが根本側に向かって牽引され、首振り部が屈曲する。レーザー照射を止め、加熱された牽引用SMAコイルが放熱されるに従い、超弾性SMA圧縮コイルのバイアス力により初期状態に復元する。

コイルの仕様

コイルの仕様を決定するため、式(3.13)の各パラメータを変化させ、以下の条件により変位量および発生力の最も大きくなるものを求めた。

- ・ 首振りファイバスコープの外径は 3 mm
- ・ アクチュエータの内径は約 1.3mm、ステップエッチドファイバの外径は400 μ m
- ・ 牽引コイルの本数は、サイズが 150 / 50 μ m(コイル外径 / 素線径)なら最大14本、 225 / 75 μ mなら最大12本、 300 / 100 μ mなら最大6本。
- ・ 首振り部の曲げ剛性は一次試作のものと同程度
- ・ 牽引SMAコイルの取り付け長は20mm、首振り部の超弾性SMAコイルの取り付け長は約28mm

式(3.26)

：変位量 (m)

k 1 : 牽引SMAコイルの室温時のばね定数 (N/m)

k 2 : 牽引SMAコイルの加熱時のばね定数 (N/m)

k 3 : 超弾性SMAコイルのばね定数 (N/m)

K : 首振り部のばね定数 (N/m)

a 1 : 牽引SMAコイルの初期変位量 (m)

a 3 : 超弾性SMAコイルの初期変位量 (m)

計算の結果、コイルサイズが 225 / 75 μm のものが、最も変位量と発生力を大きくすることができることがわかった。

3.2.9 ステップエッチドファイバの改良

前節で首振り動作のための拮抗型 SMA アクチュエータには、SMA コイルを光照射により加熱する方式を検討した。首振り部のバイアスばねは、一定間隔に配置された節輪によって固定されており、バイアスコイルを首振り部に内蔵した構造とすることにより、アクチュエータ部分を短尺化することが可能となった。そこで本項では、アクチュエータの設計を行うためのパラメータである、牽引用コイルばね及びバイアスばねの仕様と、首振り部分の曲げ剛性であり、これらの最適条件の検討を行った。

ステップエッチドファイバの最適化

設計を行うためのパラメータとして、牽引用 SMA コイルの加熱可能な長さが必要である。SMA コイルにレーザー光を照射する方法には、これまでの検討により、ステップエッチドファイバによるレーザー照射が適していることが分かっている。ステップエッチドファイバは、先端に向かうにつれて段階的に外径が小さくなる構造であり、レーザー光をファイバの側方に照射することができる。ステップエッチドファイバの作製方法は、ファイバの先端をフッ酸溶液中に浸し、一定時間保持した後、任意の長さ引き上げるということを繰り返す方法である。また、外径が変化する境界部分のテーパ角度によって、出射光量が変化することが分かっている。そこで、ファイバの開口数 (NA) をこれまでの 0.25 から 0.37 へ増加させることで、ステップ境界部分からの出射光量を増加させ、これに対する最適なテーパ角度の検討を行い、前項までの結果と比較した。Table 3.14 にステップと外径の変化を、Table 3.15 に各ステップ境界におけるテーパ角度を示す。また、前項と同様にレーザー照射した際の加熱状態を調べるため、SMA パイプ (1.05 / 0.70mm) にファイバを挿入、レーザー光を照射し、SMA パイプの表面温度を放射温度計にて測定した。熱画像解析を行い、得られたレーザー照射 10、15 秒後の SMA パイプの長手方向における表面温度プロファイルを

Table 3.14 ステップと外径の変化

単位： μm

	ステップ 0	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4	ステップ 5	ステップ 6	全長 (mm)
改善前	377	295	243	182	96	58	-	10.9
改善後	375	294	252	208	165	138	96	21

Table 3.15 各ステップ境界におけるテーパ角度

	ステップ 0 - 1	ステップ 1 - 2	ステップ 2 - 3	ステップ 3 - 4	ステップ 4 - 5	ステップ 5 - 6
改善前 (NA=0.25)	3.35	3.1	6.3	3.0	4.15	-
改善後 (NA=0.37)	6.1	2.75	1.2	0.4	2.25	2.0

単位：°

Fig.3.81 に示す。

前項の結果では、ファイバ全長にわたって加熱することができていたが、大部分は先端部よりレーザー光が出射していた。これに対し、今年度の結果では、テーパ角度は小さいものの、ファイバ全体にわたって一様に加熱できていることがわかる。これはファイバの高NA化に起因しているものと考えられる。この結果より、約20mmの長さのSMAコイルを加熱できることが確認された。

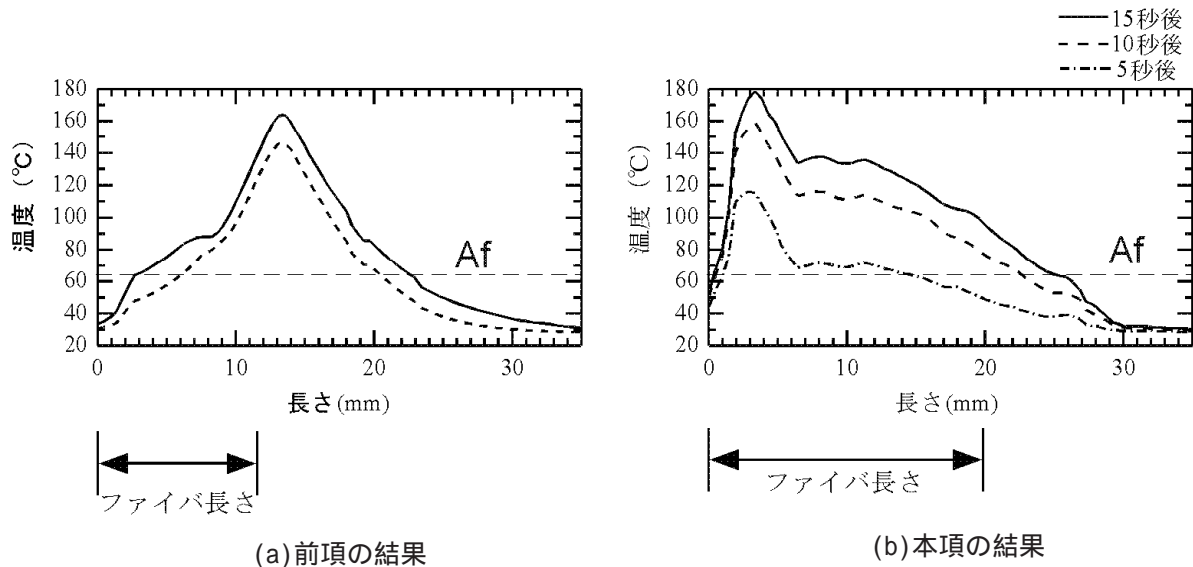


Fig.3.81 表面温度プロファイル

首振り部の曲げ剛性

首振り部の曲げ剛性は、実際に首振り部の試作を行った後に、牽引ワイヤの変位量と牽引荷重を測定し、ばね定数として求める。これは、牽引用コイルとバイアスコイルのばね定数と首振り部のばね定数により設計を行うためである。バイアスコイルが首振り部分に内蔵される構造であるため、牽引用SMAコイルとバイアスコイルの組み合わせを仮決定した後に首振り部の試作及び曲げ剛性測定を行い、コイル仕様の検討を行った。さらに首振り部の節輪の間隔を変化させることで、首振り部の曲げ剛性を低減させる検討を行った。Table 3.16 に節間隔を6、7、8 mmにした際の

首振り部の剛性を示す。

節輪間隔 7 mm のものが、最も牽引力を小さくできることがわかった。節輪の固定部分はリジッドになるため、節輪間隔 6 mm のものは曲げ剛性が大きい。また、節輪間隔 8 mm のものは、間隔が大きいためバイアスコイルが座屈しワイヤと摩擦するので、曲げ剛性が 7 mm のものより大きいと考えられる。

Table 3.16 節間隔を 6、7、8 mm にした際の首振り部の剛性

節間隔(mm)	首振り部の剛性(N/m)	標準偏差
8	351	16
7	313	27
6	425	15

アクチュエータの設計

以上の検討結果より得られた、マイクロ視覚機構に搭載する SMA アクチュエータの仕様を Table 3.17 に示す。

光駆動型アクチュエータの出力は、照射するレーザ光のエネルギーによって変化する。アクチュエータ出力の制御はオープンループで行い、レーザ出力の Duty 比を変化させてレーザ照射量を変える事で、SMA コイルの加熱量を制御している。この制御法は、照射開始直後にアクチュエータ出力が変動するものの、熱的に平衡状態となれば安定する。光駆動型 SMA アクチュエータの制御システムを Fig.3.82 に示す。

Table 3.17 SMA アクチュエータの仕様

項目	仕様
ステップエッチドファイバ	コア径:400 μm、クラッド径:430 μm、NA:0.37、被覆外径:730 μm
SMA コイルバネ	線径:100 μm、コイル外径:300 μm、巻き数:160 ピッチ:100 μm、本数:6
超弾性 SMA コイルバネ	線径:150 μm、コイル外径:600 μm、巻き数:55 ピッチ:350 μm、本数:1
首振り部の節輪間隔	7 mm

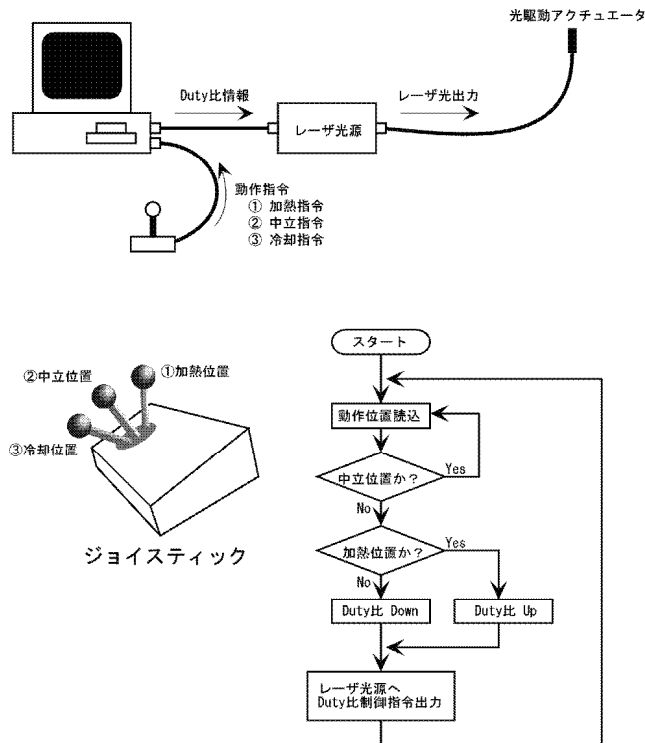


Fig.3.82 光駆動型SMAアクチュエータの制御システム

3.3 まとめ

本章では非常に小さな部品や狭い領域を人間があたかも小さくなって、その場で観察しているような人工現実感をもつ視覚機構を実現すべくバルーンを用いた光駆動アクチュエータの開発と立体視機構への応用と、広い観察領域をもつ視覚機構を得るために、スコープ先端に屈曲機構を構成することを検討し、次の結果を得た。

- (1) バルーンを用いた視差可変機構を試作・光駆動で動作させ、5°の輻輳角変化と良好な立体画像を得た。
- (2) SMAマイクロコイルを用いた首振り構造体と光照射、加熱方法を確立し、この方法により初めて光駆動首振り機構を実現した。
- (3) 立体視機能、首振り機能により、広い視野と立体能の変化が可能な高機能視覚機能を実現した。

第4章 センサ・アクチュエータ用光ファイバの開発

これまで述べてきた光ファイバ圧力センサ、光ファイバ触覚センサ、光駆動屈曲機構に対しては、光源・センサ信号・駆動エネルギーの伝搬のための光導波路が必要となる。それぞれのセンサ・アクチュエータに応じて、マルチモードファイバ(コア径: 50 μm)やレーザファイバ(コア径: 400 μm)を用いてきた。

ここで、センサ用の光ファイバには曲げ損失が発生しないこと・広帯域光を伝搬できること、アクチュエータ用のファイバには高NAでハイパワーの光源光を伝搬できること・曲げ損失が発生しないこと・広帯域光を伝搬できることが要求される。特に曲げ損失に関しては、強度変調型の光ファイバセンサに対しては、測定精度に係わる重要な要求となる。そこで、センサ・アクチュエータの要求特性を十分満足する新規の光ファイバを開発した。

光ファイバや光導波路は、コアとクラッドとのわずかの屈折率差を利用して光をコアの中に閉じ込めて導波させる。光を閉じ込める原理は、全反射(TIR: Total Internal Reflection)である。最近になり、フォトリックバンドギャップ(PBG: Photonic Band Gap)という新たな原理によって、光を閉じ込めて制御することが提案された[153]。この原理は光の波長と同程度の周期で比較的大きな屈折率変化がある媒質(通常は人工的媒質)中へは、特定の大きさのエネルギーを持つ光子(すなわち、特定の波長の光)は浸入できずに跳ね返されるが、異なるエネルギーを持つ光子(異なる波長の光)はこの媒質中を通過できることを利用する。ちょうど、半導体において規則的に並んだ原子が周期的ポテンシャル場を形成し、電子が存在できるバンドと存在できないバンドが生まれて、いわゆるエネルギーバンドギャップを作ることに類似している。そこで、光の波長と同程度の周期構造をもち、光子の浸入を禁止できる人工的媒質は、フォトリックバンドギャップ構造あるいはフォトリックバンド結晶と名付けられた。

フォトリック結晶ファイバ(PCF: Photonic Crystal Fiber)の研究開発のきっかけは、2次元のフォトリックバンド構造を実現することであった。1995年、Rusellらは、シリカガラス中にエアホールを六方配列させた構造で、フォトリックバンドが存在することを理論的に示した[154]。1996年、同グループは初めてシリカと空気からなる周期構造を持った光ファイバを発表した[155]。この光ファイバは、コアがシリカであり、通常の光ファイバと同じく全反射で光が導波していた。PBGは見出されなかったが、シングルモードの導波モードがコアを伝搬することが示され、しかもフォトリック結晶クラッドの実効屈折率が波長によって大きく変化するという奇妙な特性を示すことが明らかにされた。その後現在までは、PBG構造ファイバの実現もさることながら、全反射を原理とするPCFについて、「フォトリック結晶クラッドが示すさまざまな特性を明らかにして、その応用を追求する」ことに研究開発の重点が置かれてきた。この間、PBG構造ファイバは、1997年に、ハニカム格子(Honeycomb Lattice)構造[156]で比較的容易にPBG伝搬が可能である

こと、1998年に、三角格子(Triangular Lattice)構造[157]で実際にPBG伝搬が観測されたことが報告されている。しかし、PCFにおけるPBGの存在が証明された段階であり、実用レベルの特性が得られるまでには、乗り越えるべき課題が数多く残されている。

フォトニック結晶ファイバの作製方法・屈折率導波型PCF(後に定義を述べる)の特徴的な光学特性とその応用・信頼性につき検討し、センサ・アクチュエータ用ファイバとしての応用可能であることを確認した。

4.1 フォトニック結晶ファイバとは

4.1.1 定義

フォトニック結晶ファイバ(PCF)という用語の定義を明らかにしないまま使用してきたが、その意味する範囲は曖昧なところがある。本来、PCFはPBGを発現する光ファイバを指していたのであるが、現在は、Fig.4.1に断面写真を示す、多数のエアホールが規則正しく配列した構造のクラッドを持つ光ファイバはすべてPCFと呼ばれているようである。我々もこのような意味でPCFという呼び方を使う。

また、微細なエアホールが多数並んでいるという特徴を捉えて、孔のある光ファイバ(HF : Holey Fiber)[158]とか、微細構造ファイバ(Micro-Structured Fiber)[159]とも呼ばれている。

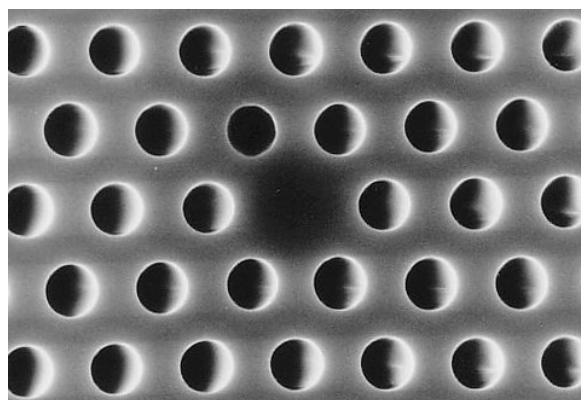


Fig.4.1 フォトニック結晶ファイバの断面写真

PCFを導波原理で分類すると、二つに分類できる。一つは、PBGによって光を閉じ込めるフォトニックバンドギャップ型PCF(PBGFあるいはPBGF、Fig.4.2(d)参照)であり、構造に厳しい周期性とホールサイズの均一性を要求する。もう一つは、全反射により光を閉じ込める、屈折率導波型PCF(Index Guiding PCF)であり、必ずしも厳しい周期性を必要としない。さらに、屈折率導波型PCFには、比較的ホール径の小さい多数のホールからなるクラッドを持つタイプ(Fig.4.2 (a))

参照)と大きなホール径で少数のホールからなるタイプ(エアクラッド型と呼ばれることがある、Fig.4.2(b)参照)に分けることができる[160]。

また、光の閉じ込めは通常の光ファイバと同じくGeなどをドープしたコアで実現したうえで、コアの周りにホールをいくつか設けたタイプ(Fig.4.2(c)参照)も提案されており、これらのタイプもHoley Fiberに含めて扱われている。この光ファイバは、ホールへの導波光の浸み出しが小さいため低損失化が比較的容易に図れる利点があるが、周期的クラッドによって発現される特性は当然ながら持つことはできない。このタイプの光ファイバはホールによって分散特性などを変化させることができるため、ホールに手助けされた(Hole-assisted)ファイバと名付けられたりしている[161]。Fig.4.2に、以上の四つのタイプの分類を模式的に示す。

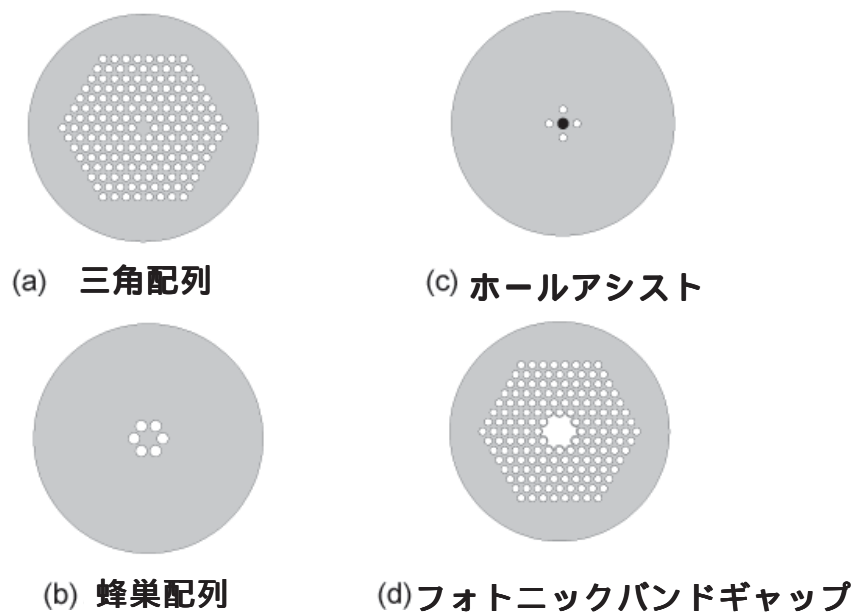


Fig.4.2 フォトニック結晶ファイバの種類

4.1.2 構造

PCFも、構造上は、通常の光ファイバと同じようにコアとクラッドに分けられる。その特性は、クラッドのエアホールの配列、エアホールの数(層数)、クラッド部面積全体の中でエアホールが占める割合(これを空隙率という)、コア径およびコアの材質で基本的には決まる。

コア部の構成およびクラッド部の構成によってFig.4.2のような種類がある。クラッドの代表的な構成は三角(Triangular)配列と蜂巣(Honeycomb)配列である。これらの構造をFig.4.2(a)と(b)にそれぞれ示す[162]。

現在最も作製例が多く報告されている構造は、コア部が高屈折率の単一欠陥(Single Defect)で、クラッド部が三角配列構造を持ったものである。ここで、欠陥(Defect)とは、結晶工学の用

語であり、周期構造の規則性が破れた部分を指す言葉である。中心コア部がホールではなくシリカであるためにこのように呼ばれる。この構造は比較的作製が容易であり、屈折率導波型PCFの標準的な構成になっている。

Fig.4.2 (a)に示す最も基本となる単一欠陥コア・三角配列クラッドを例に取り、PCFでよく使用される構造パラメータを以下に示す。

- ・ 格子間隔（ピッチとも呼ばれる） Λ : エアホールの中心間隔
- ・ エアホール径 d : クラッドのエアホールの径
- ・ コア径 $2a$: 中心欠陥の高屈折率部の最小径で第一層エアホールと外接する円の径
- ・ 比ホール径 d/Λ : d と Λ の比。この値はクラッドの実効的な屈折率と関係することから、構造の規格化パラメータとしてしばしば使われる。
- ・ 空隙率 (Air Filling Fraction) F : 高屈折率媒質に対するエアの割合を示す
- ・ 規格化周波数 $k_0\Lambda$: エアホール中心間隔に対する波長の相対的な大きさを示す。導波特性の記述には $k_0\Lambda$ のものより規格化周波数を用いた方が一般性がある。

これらのパラメータのいくつかの関係を以下に示す。

$$\text{コア径 } 2a = 2\Lambda - d \quad \text{式(4.1)}$$

$$\text{空隙率 } F = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}(d/\Lambda)^2 \quad \text{式(4.2)}$$

4.2 フォトニック結晶ファイバの作製技術

4.2.1 Stack and Draw 法 (Capillary 法)

Stack and Draw 法とは、クラッド領域のエアホールを構成するキャピラリ（石英細管）を所望のサイズに線引きし、これを多数積み重ね(Stack)でサポート管に挿入し、さらに中心にあるキャピラリをコア材料（例えば純粋石英）に置換してプリフォームとし、これを線引(Draw)する方法である。また中空のパイプでエアホールクラッドの出発材を組み立てることから、キャピラリ法とも呼ばれている。作製プロセスをFig.4.3に示す。出発材料のサイズに自由度が大きく、ホール数の多いPCFも比較的容易に作製できるため、汎用性のある方法である。例えば、コア直径、キャピラリの外径・肉厚及びサポート管の外径・肉厚を変化させるだけで、各種特性を有するフォトニック結晶ファイバを作製することが可能である。Fig.4.2(a)、(c)は本方法で作製されることが多い。但し、エアホール数が非常に多いタイプのフォトニック結晶ファイバを作製する場合、サポート管の内径・形状、キャピラリの外径の寸法公差を厳密に管理しないと、コアの偏心が発生する可能性がある。

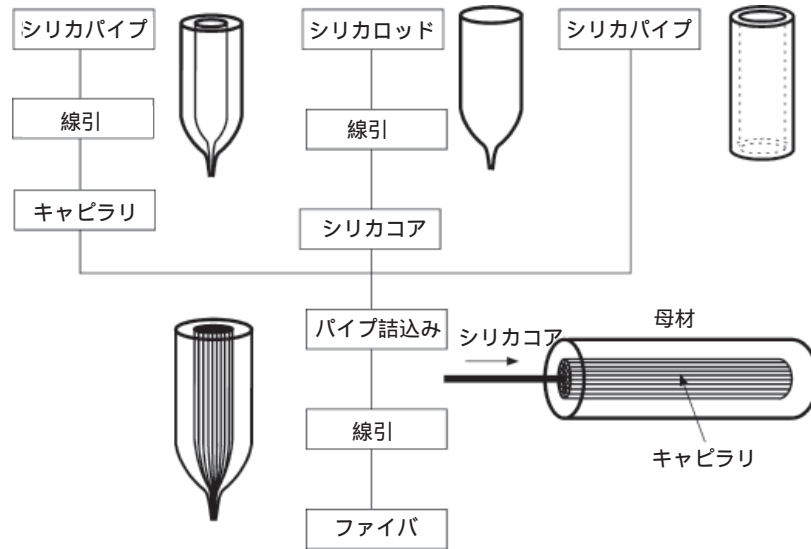


Fig.4.3 Stack and Draw 法

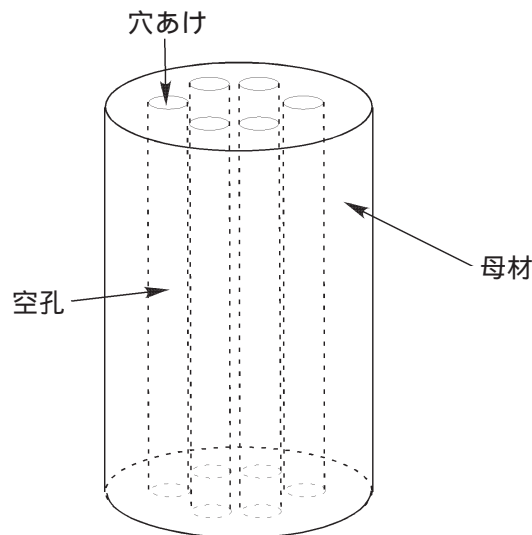


Fig.4.4 ドリル 法

4.2.2 ドリル法

ドリル法とは、円筒純粋石英ガラスロッド，もしくは中心部分にGe等の不純物添加によるコア領域を有するロッドに、ドリルでエアホールに相当する穴を開けてプリフォームとし、これを線引する方法である。プリフォームの形状をFig.4.4に示す。この方法はStack and Draw法のような偏心の可能性はほとんどないが、石英ガラスという脆性材料に精度良く多数のエアホールをドリルで穿孔することが難しいため、比較的エアホール数の少ないのフォトニック結晶ファイバ(例えばFig.4.2(b).(c))の作製に適している。また同様の理由で母材の大型化も難しいため、長尺線引きによるコストダウンが期待できない方法である。

4.2.3 線引

前記方法にて得られた母材は、従来と同様の線引機により外径125 μm 程度のファイバに加工される。Stack and Draw 法により得られた母材の線引きには、熔融一体線引法[163]が用いられる。これはイメージガイドファイバ[164]の線引きのために開発された方法で、サポート管に詰め込まれた数千から数万本の画素ファイバ間の隙間を減圧状態にしながら熔融一体化するものである。但しフォトニック結晶ファイバの場合は詰め込まれているのがキャピラリであり、キャピラリ間の隙間を減圧状態にした場合、得られたファイバのエアホールの形状が変形してしまう。そこでキャピラリ間の隙間を減圧しつつ、キャピラリ内を加圧するという方法が必要である。このため母材に圧力コントローラを装着して、キャピラリ間、キャピラリ内の圧力を精密に制御しながら線引きする方法をとっている。ドリル法によって得られた母材も、同様の方法でエアホール内の圧力が制御されている。線引装置の概略図をFig.4.5に示す。

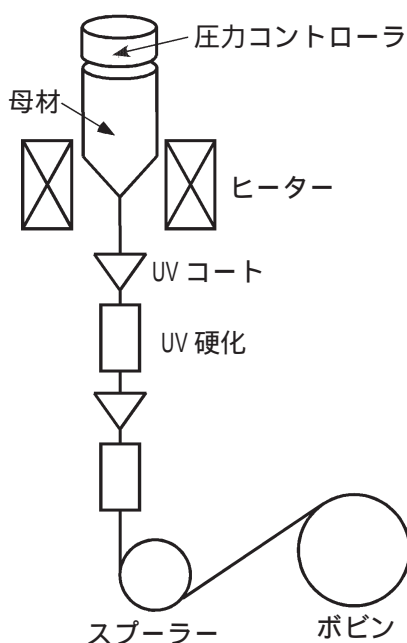


Fig.4.5 線引装置

4.3 フォトニック結晶ファイバの光学特性

屈折率導波型PCFは、導波原理が全反射である点は通常の光ファイバと同じである。両者の特性の違いを生んでいるのは、一つは、PCFのクラッド部の実効屈折率が波長により大きく変化する点である。このことによって、波長がいくら短くてもシングルモード動作することや、コア面積がどんなに大きくてもシングルモード動作するという特性（果てしのないシングルモードESM : Endlessly-Single Mode）が生まれる。

もう一つの大きな特徴は、コアとクラッドの屈折率差を通常の光ファイバよりもはるかに大きく

できるという点である。この特徴から、導波路分散を広い範囲に亘って変えることが可能となり、短波長にゼロ分散を持つ光ファイバや広い波長帯に亘って分散がフラットな光ファイバなど、さまざまな分散特性を持った光ファイバを実現できる。さらには、クラッドのエアホール径を x y 方向で異ならせて構造異方性を持たせたり、コア径を非円とすることにより大きな偏波保持性が比較的容易に生まれ、偏波保持ファイバを実現できる。

以下では、通常のステップインデックスシングルモードファイバと比較をしながら、屈折率導波型 PCF の光学特性を示すことにする。また、これ以降、屈折率導波型 PCF のことを、誤解のない範囲で単に PCF と呼ぶことにする。

4.3.1 伝搬特性

ESM のメカニズムをまず説明する [165]。ESM は、結晶構造をしたクラッドの実効屈折率が波長により大きく変化することで生まれる。クラッドの実効屈折率は、無限に広がった三角格子構造中を伝搬する電磁波モードの伝搬定数 k_c を平面波展開法などの数値解析手法により求め、空間の波数 $k = 2\pi/\lambda$ で除して実効屈折率 $n_{\text{eff}} = k_c/k$ として得られる。 $d/\Lambda = 0.6$ で n_{eff} を計算した結果を Fig. 4.6 に示す [166]。図中には、コアの屈折率、伝搬モード（基本モードと二次のモード）のモード屈折率も合わせて示されている。横軸は、規格化周波数であるが、クラッドの実効屈折率が波長 λ に対し大きく変化している。通常の光ファイバではこのようなことはなく、波長に対しクラッドの実効屈折率はほとんど変化しない。この例 ($d/\Lambda = 0.6$) では、 λ/Λ が約 1.5 以上から二次のモードが立っている。 d/Λ がさらに小さくなる ($d/\Lambda < 0.4$ 前後) とクラッドの実効屈折率が大きくなり二次のモードが存在できず、ESM 条件が成立する。また、この図には、基本モードと

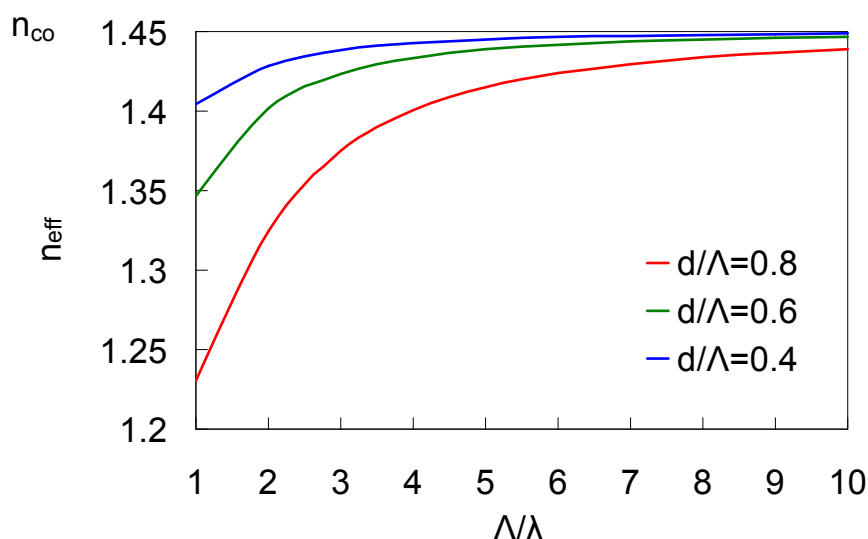


Fig. 4.6 クラッドの実効屈折率

二次のモードのモード屈折率差が大きいことも示されており、モード間の干渉が起こりにくいこともわかる。

さらに、ESMはV値というパラメータからも説明される。通常の光ファイバの導波モードの数は(3)式のV値で与えられ、V値が2.4以下でシングルモード動作する。

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad \text{式(4.3)}$$

a: コア半径、 λ : 波長、 n_{co} : コアの屈折率、 n_{cl} : クラッドの屈折率

通常のシングルモードファイバでは、 n_{co} と n_{cl} が材料分散により波長とともに同等に変化するため、式(4.3)式の $\sqrt{\quad}$ の中の値はほとんど波長に対し一定となる。その結果、V値は波長 λ に反比例して変化することになり、波長が短くなるとシングルモード条件である $V < 2.4$ が成り立たなくなる。

これをPCFに拡張すると式(4.4)式のようなになる[165]。

$$V_{eff} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_0^2 - n_{eff}^2} \quad \text{式(4.4)}$$

Λ : 格子間隔、 n_0 : シリカの屈折率、 n_{eff} : クラッドの実効屈折率

形は式(4.3)式に似ているが、 $\sqrt{\quad}$ の中の n_{eff} の値が先に示したFig. 4.6のような波長依存性を示すことにより、 V_{eff} 値は通常の光ファイバとは異なった波長変化をする。Fig. 4.7に、 V_{eff} と規格化周波数 Λ/λ の関係を計算した結果を示す。

Fig. 4.6に示すように、波長が短くなるとコアとクラッドの実効屈折率の差が小さくなり、式(4.4)中の λ と $\sqrt{\quad}$ の値が共に小さくなりそれぞれ相殺し合う。通常の光ファイバのように λ

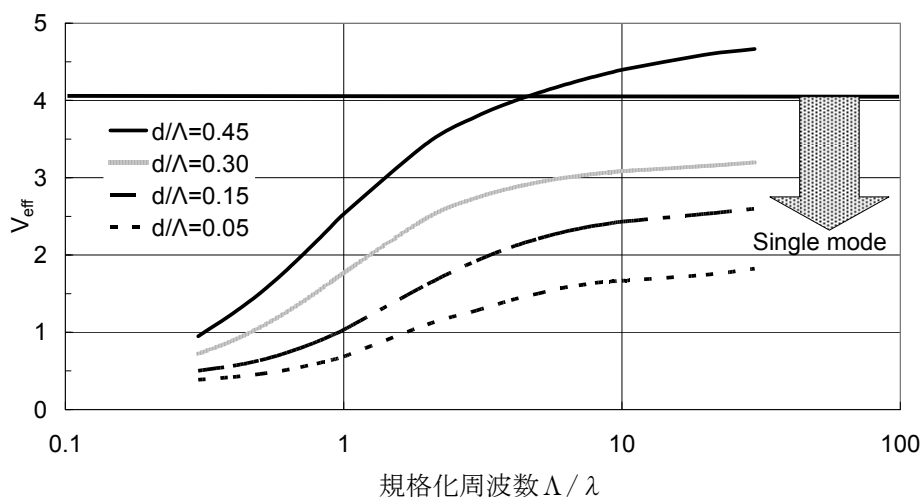


Fig. 4.7 V_{eff} と規格化周波数 Λ/λ の関係

に反比例して変化するのではなく、波長による変化が小さくなり、波長が短くなるにしたがい変化が鈍くなり一定の値（最大値）に近づく。d/Λが小さい場合、V_{eff}値の最大値はより小さな値に収束する。V_{eff}値はPCFの場合には4.1以下でシングルモード動作することが示されており[167]、この条件を満たすd/Λ値は先に述べたように約0.4以下になる。

以上の説明は、Fig. 4.8のモードプロファイルを観察すると理解できる。この図のPCFはd/Λ=0.45である。短波長の532nmでは、モードフィールドがエアホールを避けるようにして六角形状を取るのに対し、長波長の1550nmではモードフィールドはエアホール中へも浸入して円形に近くなる。短波長ではフィールドはシリカ領域に集中し、クラッドの実効屈折率はシリカのそれに近づき、コアとクラッドの屈折率差は小さくなる。一方、長波長では、クラッドの実効屈折率はエアホールとシリカの面積で決まる平均的な屈折率に近くなり、コアとクラッドの屈折率差は大きくなる。

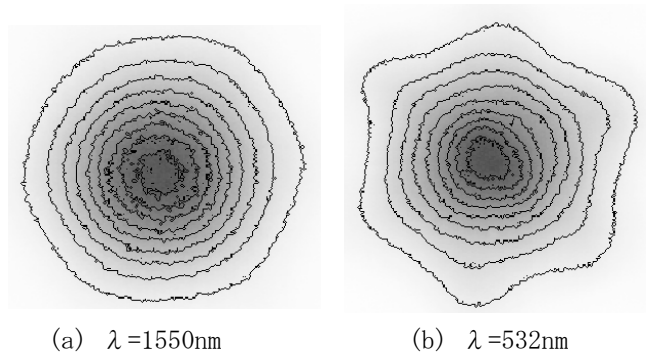


Fig. 4.8 モードフィールドプロファイル

屈折率導波型PCFでは、以上のようにクラッド実効屈折率が波長により大きく変化するため、モードフィールドおよびNAは通常の光ファイバとは異なった特性を示す。

まず、モードフィールドについて述べる。通常の光ファイバのV値と基本モードのモードフィールド半径wとの関係は、近似的に次式で与えられる（Marcuseの式）。

$$\frac{w}{a} \approx \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad (0.8 \leq V \leq 2.5) \quad \text{式(4.5)}$$

a: コア半径

この式と式(4.3)式から、波長が長くなるとV値が小さくなり、逆にモードフィールドが大きくなることがわかる。PCFでは、V値の波長変化が小さく、従って波長によるモードフィールドの変化も通常の光ファイバよりも小さい。d/Λ=0.6の光ファイバのモードフィールド径の実測結果を表2に示す。わずかし波長変化しないことがわかる。表中には、1.3μm帯シングルモードファイバのモードフィールド特性も合わせて示す。

次に、NAについて述べる。周知の通り、NAは次式で与えられる。

$$NA = n_{co} \sqrt{2\Delta n} \quad \text{式(4.6)}$$

$$\Delta n = n_{co} - n_{eff}$$

通常の光ファイバでは、コアとクラッドの屈折率差 n は、波長によりほとんど変化しないため、NAも波長による変化はほとんどない。PCFでは n_{eff} が短波長になるほど n_{co} に近づくため、顕著な波長依存性を示し、短波長になるほどNAは小さくなる。

4.3.2 伝送損失特性

通常の光ファイバの損失要因は、ガラス中の不純物吸収(特にOH吸収)、構造不整およびレーリ散乱である。PCFも同様の損失要因に支配される。したがって、全損失を要因別に分解して表すと、通常の光ファイバと同様に、

$$\text{式(4.7)}$$

と表すことができる。

PCFの損失特性の一例を以下に示す。Fig.4.9は、損失の波長特性、Fig.4.10はこれを $1/\lambda^4$ プロットしたものを示す。この光ファイバの構造パラメータは $\Lambda = 7.3$ 、 $d = 4.2$ であるが、損失は、 $0.47\text{dB/km}@1.55\ \mu\text{m}$ と 0.5dB/km 以下を達成している。また、レーリ散乱係数 $A=1.02$ 、構造不整損失 $B=0.25$ と、通常の光ファイバの値にかなり近い。

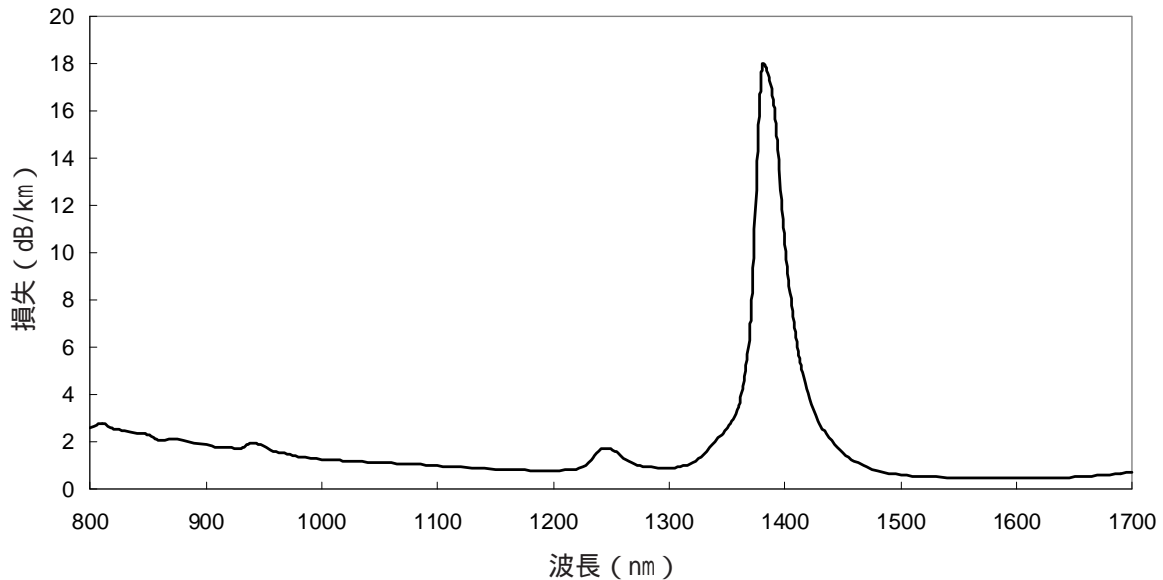


Fig.4.9 損失の波長依存性

レーリ散乱係数Aにはシリカガラスの密度揺らぎの他、エアホール表面の微細な凹凸も影響していると推定している。構造不整損失Bは、エアホールの寸法変動やエアホール表面の微細な凹凸が原因であると考えられる。OH吸収損失はコア及びエアホール表面に残留している水分が原因と考えられる。また、エアホール中に存在する水分子の影響もあろう。いずれにしろ、エアホール表面の影響が大きく、この影響をいかにして小さくするかがPCFの低損失化の課題である。

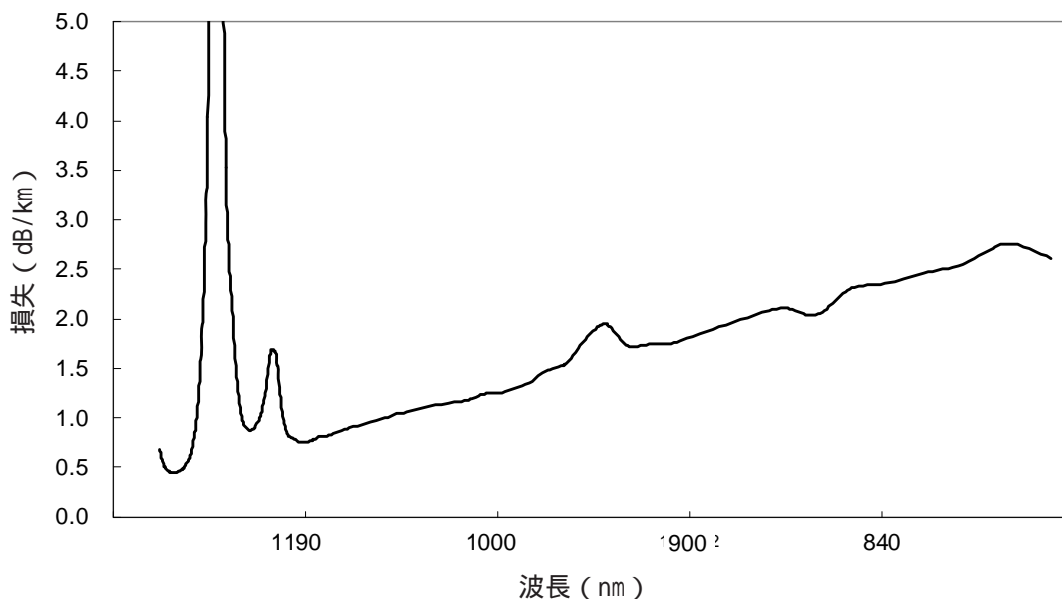


Fig.4.10 $1/\lambda^4$ プロット

以上の損失要因の他、PCF特有の損失として、閉じ込め損失 (Confinement Loss) という損失要因が加わる[168]。コアがシリカのみからなるPCFは、シリカコア、エアホールクラッド、シリカパイプの三層構造をしており、シリカコアとシリカパイプの間に何層かで構成されたエアホールクラッドが挟まれた構造をしている。エアホール層の厚さとエアホール径が大きい場合は、フィールドがクラッド部をトンネリングし、フィールドのエネルギーはシリカパイプへ漏れ出す。W型ファイバが長波長側で基本モードカットオフとなるのと同様のメカニズムと考えられる。特に、 d/λ が小さい場合、閉じ込め損失を小さくするには、ある程度のエアホール層数が必要になる。

$d/\lambda = 2.3 \mu\text{m}$ で三層ホール構造での閉じ込め損失の波長特性の計算結果をFig.4.11に示す[168]。

d/λ が小さいほど、波長が長くなると閉じ込め損失は大きくなる。PCFの場合、長波長で損失が大きくなる場合は閉じ込め損失であると判断できる。曲げ損失も長波長で現れることがあるが、閉じ込め損失は光ファイバに曲げを加えない場合にも現れることで区別できる。

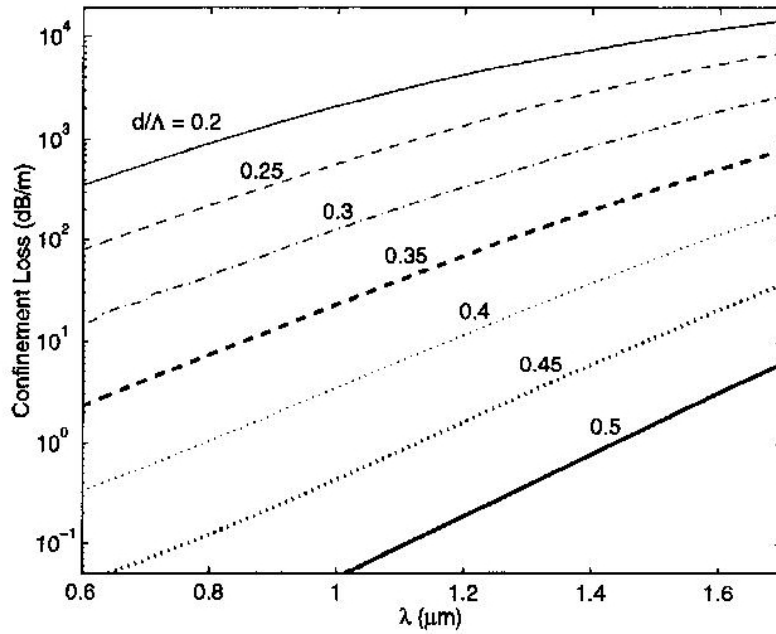


Fig.4.11 閉じ込め損失の波長特性の計算結果[168]

4.3.3 曲げ損失特性

PCFでは、波長が長い場合だけでなく、短い場合にも曲げ損失が現れることがある。長波長側の損失は通常の光ファイバと同じようにフィールドが拡がるのが原因であるが、短波長側の損失はPCF特有のものであり、短波長側でコアの屈折率とクラッドの実効屈折率が接近し、屈折率差が小さくなるのが原因である。Fig.4.12に曲げ損失を計算した結果を示す[162]。この結果は実効屈

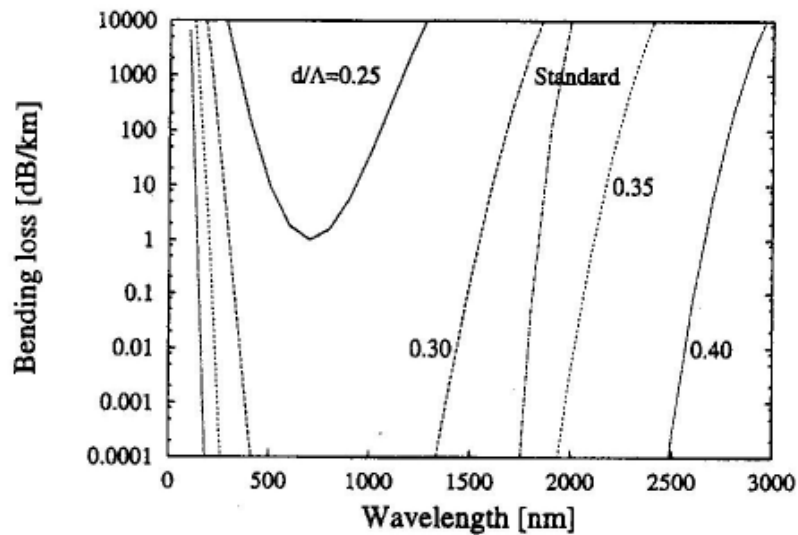


Fig.4.12 曲げ損失の計算結果[162]

折率モデルにより計算されたものであり、 d/λ が大きくなると誤差が出るが、図に示されているような d/λ が小さい場合には、実測値とよく一致する。

Fig.4.12は $\lambda = 2.3 \mu\text{m}$ の場合の計算結果であるが、この場合、 d/λ が0.35以上になると光通信の利用帯域では曲げ損失が極めて小さいことがわかる。PCFでは構造パラメータを選ぶことにより、曲げ損失が実用上全くない光ファイバが実現できる。Table 4.1は曲げ損失を通常の光ファイバと比較した結果である。

Table 4.1 曲げ損失の比較

曲げ直径 [mm]	波長 [μm]	損失増加[dB/m]			
		SMF	DSF	DCF	PCF
20 ϕ	1.31	0.12	0.04	0	-
	1.55	6.69	0.2	0	-
	1.62	18.23	0.81	0.04	-
10 ϕ	1.31	-	7.37	0	0
	1.55	-	測定不能	1.18	0
	1.62	-	測定不能	22.04	0
5 ϕ	1.31	-	-	0.21	0
	1.55	-	-	測定不能	0
	1.62	-	-	測定不能	0
3 ϕ	1.31	-	-	-	0
	1.55	-	-	-	0
	1.62	-	-	-	0

“-”は未測定、“測定不能”は損失増加が過大のため測定値が得られていない

Fig.4.12に見られるとおり曲げ損失が極小を示す波長域と構造パラメータ d 、 Λ とは密接な関係が見出せる。一般に、ホール径 d が大きくなるほど曲げ損失の小さい波長域は広がる。また、ホール間隔 Λ は、曲げ損失の小さい波長域の中心位置を決める。すなわち、最低損失を示すおよその中心波長は $\Lambda/2$ で与えられる[169]。

通常の光ファイバに見られるマイクロバンド損失についても検討されており、PCFには実用的にマイクロバンド損失はないと報告されている[170]。

4.3.4 分散特性

通常の光ファイバの波長分散は、材料分散と導波路分散の和で与えられ、材料分散が使用材料により決まり、導波路分散が光ファイバの構造により決まることは周知である。光ファイバの使用材料は、シリカまたはGeなどをわずかにシリカにドーブしたものであり、この場合、材料分散のゼロ分散波長は $1.27 \mu\text{m}$ 前後となる。したがって、波長分散の設計自由度は、導波路分散をファイバ構造設計により変えることにある。しかし、通常の光ファイバでは、導波路分散の値は材料分散のゼロ分散波長である $1.27 \mu\text{m}$ 以上の波長では、正常分散の範囲でしか変化させることができず、しかもその変化できる範囲も実際上は大きくない。

PCFでも、使用材料はシリカまたはGeなどをわずかにドーブしたものであり、材料分散のゼロ分散波長が約 $1.27\ \mu\text{m}$ であることは同じである。しかし、導波路分散は、通常の光ファイバと異なり、正常分散側にも異常分散側にも変化させることが可能であり、その変化できる範囲も極めて大きい。

PCFでこのようなことが可能となるのは、クラッドのエアホールおよびコアの径を選ぶことにより、コアとクラッドの間の屈折率差を広範囲に変えることができるからである。例えば、 $\lambda = 2.3\ \mu\text{m}$ とし、 d/λ が小さい範囲で変えた場合の波長分散特性の計算例をFig.4.13に示す[158]。 d/λ のわずかの違いで波長分散が大きく変わることが判る。 d/λ が小さい場合には、シリカの材料分散に近いこともこの図に示されている。

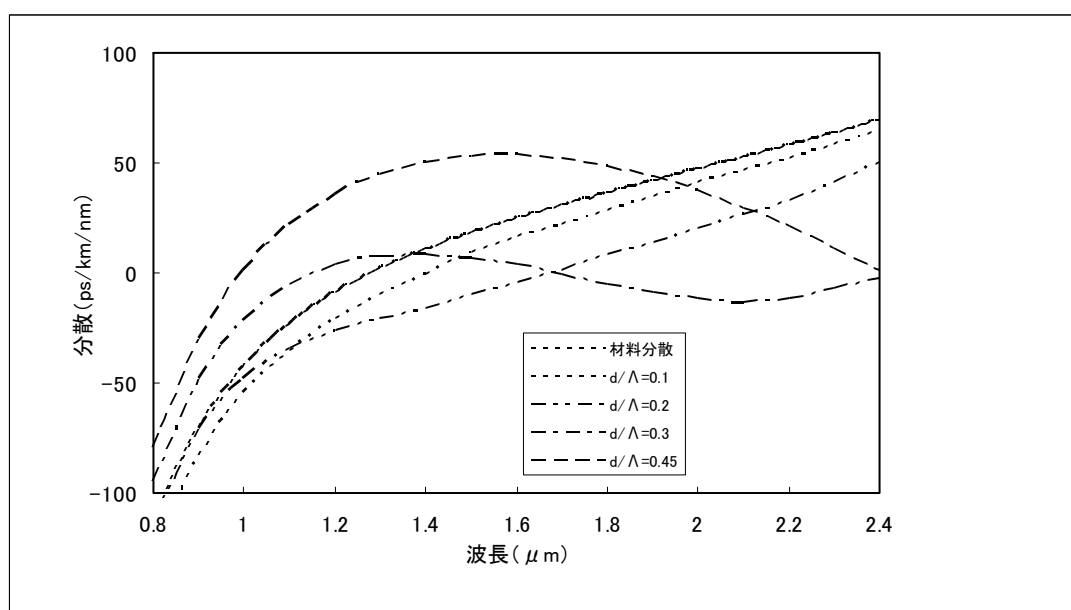


Fig.4.13 波長分散特性の計算例

PCFでは、ゼロ分散波長を、通常の光ファイバでは不可能な $1.27\ \mu\text{m}$ 以下にシフトすることができる (Fig.4.13の $d/\lambda = 0.45$ を参照)。その結果、光通信波長帯で広い異常分散領域を持ち、しかもこの波長領域でシングルモード動作させることが可能である。この特性を利用し、短波長帯でのスーパーコンティニューム光発生[171]やソリトン発生、そして $0.8\ \mu\text{m}$ 帯シングルモード伝送[172]などへの応用が考えられている。

PCFのコア径を $1\ \mu\text{m}$ 程度に小さくすると、導波路分散は正常分散側へ大きく変化し、大きな正常分散を持つ光ファイバとなる。この光ファイバは、分散補償ファイバへの応用が考えられている。

また、シリカの材料分散の分散スロープと符号がほぼ逆の導波路分散スロープをもつよう設計することも可能で、広い波長範囲で分散フラットな光ファイバが実現できる[173]。特に、分散ス

ロープと絶対値の符号が反転した導波路分散をもつよう設計することもできるので、ゼロ分散かつ分散フラットな光ファイバも可能である。

4.3.5 偏波特性

PANDAファイバなどはコアの近傍に応力付与部を形成し、コアに強い応力を加えることにより偏波保持性を得ている。PCFでは、コアとクラッドとの屈折率差を大きくできるため、コアの非対称性やクラッドのエアホール径の異方性によって容易に高い偏波保持性を作り出すことができる[174]。

Fig.4.14のPCFは、コアに隣接する二つのホールの径を他のホールよりも大きくした構造をしている。作製法は、二本のキャピラリの内径を異ならせているだけであり、その他の点は全く通常のPCFと同じである。Fig.4.14の偏波保持PCFのモード複屈折の測定結果をFig.4.15に示す[175]。シミュレーションの結果も合わせて示しており、比較的良好に両者は一致している。波長 $1.55\ \mu\text{m}$ で 1.4×10^{-3} という大きなモード複屈折率が得られている。

逆に、PCFでは、わずかな構造の対称性の乱れで大きな偏波特性が出る。偏波モード分散が問題となる応用では欠点にもなることに注意しなければならない。

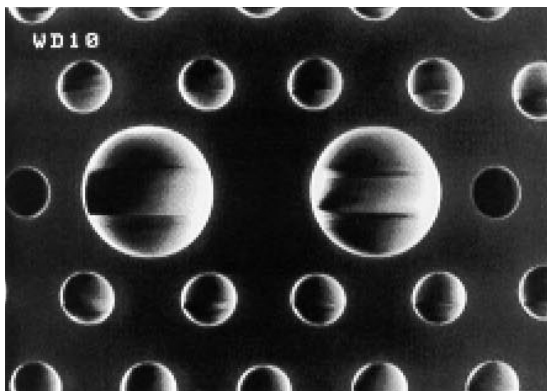


Fig.4.14 偏波保持PCFの断面図

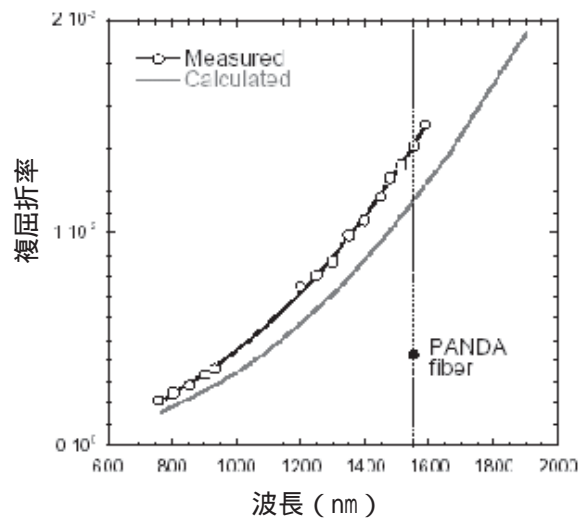


Fig.4.15 モード複屈折

4.3.6 非線形特性

光ファイバの非線形定数は式(4.8)式で表すことができる。

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{eff}} \quad \text{式(4.8)}$$

ここに λ : 波長、 n_2 : コアの実効屈折率、 A_{eff} : 実効コア断面積である。

非線形定数を高めるためには、実効コア断面積 A_{eff} を小さくし、コアの実効屈折率 n_2 を大きくするのが効果的である。PCFではコアとクラッドの屈折率差が大きいため、通常の光ファイバよりも光の閉じ込めが強く、実効コア断面積を小さくすることが可能である。またコアの実効屈折率は使用するコア材に依存するパラメータであり、コアへのドーピング材を適切に選択することにより、大きくすることが可能である。

また零分散波長近傍で非線形現象が発現しやすいことから、高いピークパワーを持つ光源の発振波長にPCFの零分散波長を合わせることも必要となってくる。特に通信帯(1310 nm, 1550 nm)に対応する高非線形PCFは、直接現状の通信システムに応用できることから、特に重要となる。そこで各波長帯に零分散波長をもつ高非線形PCFの開発を行った。具体的には純石英の材料分散を基本として、 d/Λ を調整し構造分散を重畳させることにより零分散波長の調整を行った。ここで d は空孔直径 (μm)、 Λ は空孔間距離 (μm) である。材料分散と d/Λ による分散の変化を Fig.4.16 に示す。

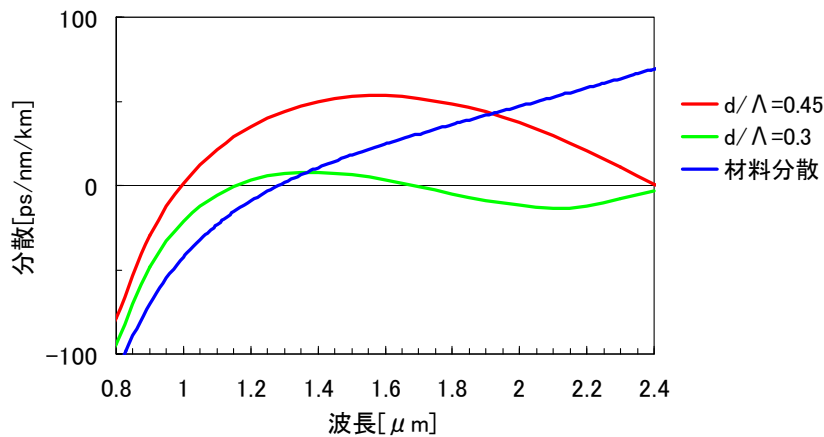


Fig.4.16 PCFの群速度分散

ここで重要なのは高非線形ファイバの性能は式(4.8)に示される非線形定数のみでなく、性能指数(γ , α : 損失)を考慮に入れる必要がある。性能指数に注目して試作した高非線形ファイバの性能比較を Table 4.2 に示す。ここで非線形定数は 1550 nm にて実測[176]し、式(8.8)式により各零分散波長帯に換算してある。

Table 4.2 から分かるように単に非線形定数を大きくするのであれば、式(4.8)式のコアの実効屈折率 n_2 を大きくするべくコア材料として Pb 珪酸塩ガラスなどを使用すればよい。但し、これにより伝送損失が極端に大きくなってしまいうので、性能指数で比較すれば、非線形定数は小さいものの Ge ドープの高非線形ファイバの方が有利であることが分かる。

Table 4.2 に示す高非線形 PCF の断面写真を Fig.4.17 ~ Fig.4.20 に示す。いずれの PCF も分散調整と非線形屈折率 n_2 を高めるため、コアに不純物をドーピングしている。各々の PCF の寸法の比較を Table 4.3 に示す。

Table 4.2 高非線形 PCF の性能比較

波長帯 (nm)	コア材料	非線形定数 γ (W ⁻¹ k m ⁻¹)	損失 (dB/km)	性能指数 γ / α
800	Ge添加石英	136	65.0	2.09
1040	Ge添加石英	37	11.7	3.16
1550	Ge添加石英	11	1.31	8.40
1550*	Ge添加石英	13	1.52	8.55
1550	Pb珪酸塩ガラス	550	40000	0.14

* : サイドトンネル型分散フラットファイバ

Table 4.3 高非線形 PCF の寸法比較

波長帯 (nm)	ファイバ外径 (μ m)	モードフィールド径* (μ m)	d / Δ
800	100	2.8/2.3	0.9
1040	155	2.8/2.8	0.46
1550	100	4.1/4.1	0.49
1550	120	5.7/4.3	—

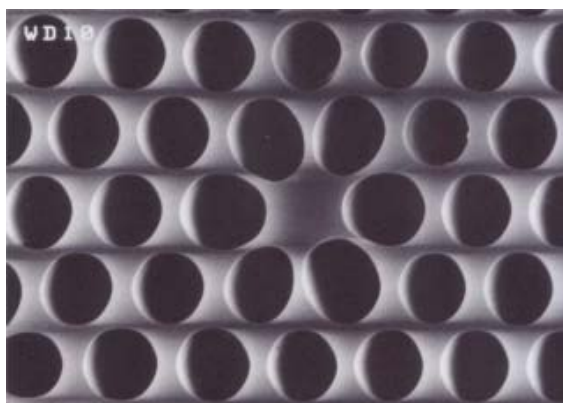


Fig.4.17 零分散波長:800 nmをもつ高非線形PCF

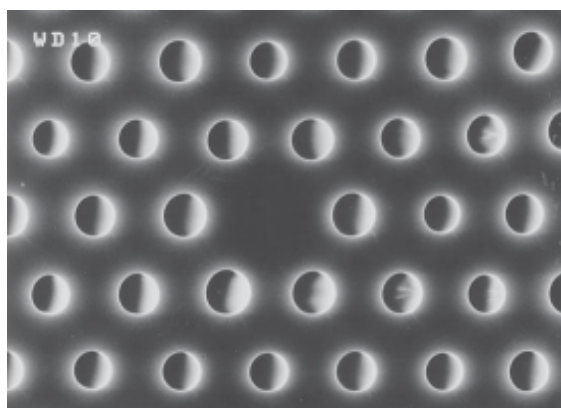


Fig.4.18 零分散波長:1040 nmをもつ高非線形PCF

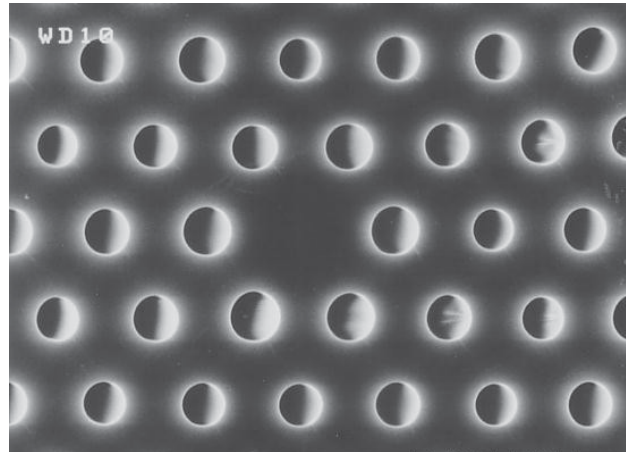


Fig.4.19 零分散波長:1550 nmをもつ高非線形 PCF

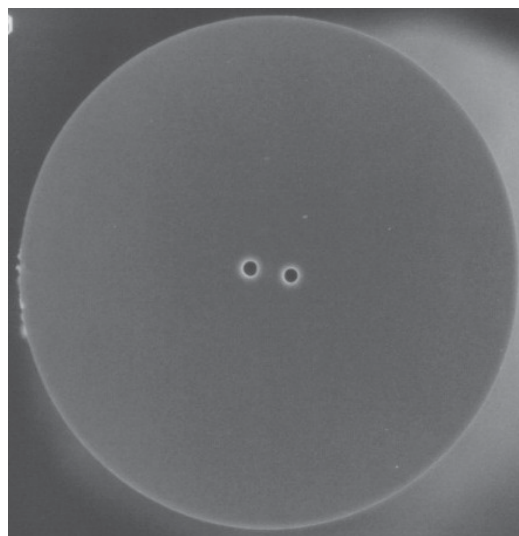


Fig.4.20 サイドトンネル型分散フラットファイバ

Table 4.3 から分かるように、いずれのファイバも高 化のためモードフィールド径が通常のシングルモードファイバに比べ、半分以下となっている。これは光源とファイバとの結合・実装時のピグテール(他のファイバ)との融着・コネクタ接続において問題となるが、詳細については次項にて述べる。

4.4 接続及び端末処理

4.4.1 ファイバ接続

PCF を各方面で応用していく上で、PCF 同士・PCF と他のファイバとの接続技術の開発が必要不可欠である。そこでファイバ接続では一般的な融着接続の検討を行った。融着接続実験にはコア径およびエアホール径の異なる 2 種類の PCF を用いた。用いた PCF の諸元を Table 4.4 に示す。融着接続は放電強度、放電時間等の接続条件及び調芯等が設定可能な融着接続機を使用した。融着接

Table 4.4 PCFの構造

	Core diameter (μm)	Air hole diameter (μm)	Pitch (μm)	MFD* (μm)	NA*
PCF-1	10.3	4.0	7.5	8.8	0.16
PCF-2	5.5	1.2	3.4	5.8	0.22

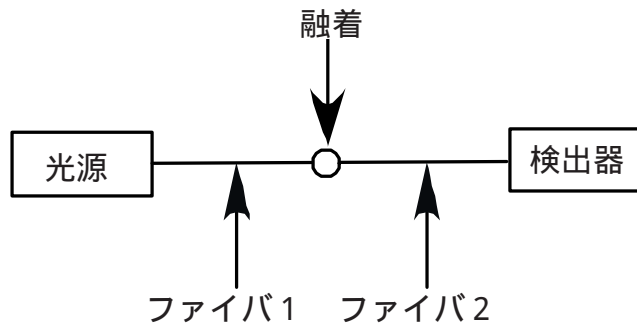


Fig.4.21 接続損失測定実験の構成

Table 4.5 接続損失

Fiber 1	Fiber 2	Average	Max	Min	S.D.
PCF-1	PCF-1	0.80	2.73	0.38	0.61
PCF-1	1.3SMF	0.63	1.03	0.40	0.19
1.3SMF	PCF-1	0.66	1.13	0.31	0.23
PCF-2	PCF-2	2.08	3.88	1.36	0.65
PCF-2	1.3SMF	1.01	1.44	0.75	0.16

続は、Fig.4.21の構成にて透過パワーをパワーメータでモニタリングしながら、接続条件を調整して実施した。

接続損失の測定結果をTable 4.5に示す。いずれも接続回数は $n=15$ とした。PCF同士の接続においては、接続損失が若干高くバラツキも大きい。これはPCF-2のホール径が小さくエアホールが潰れやすいことに起因していると考えられる。またPCFと1.3SMF非との接続では、前述の原因の他、モードフィールド径及びNAの違いが接続損失の原因となる。Table 4.4より接続条件を調整することによりPCF同士で平均0.80dB、PCFと1.3SMFで平均0.63dBと比較的良好な接続特性を得ることができた[177]。

4.4.2 端末処理

接続と同様に実際の応用に際して重要となるのは、端末処理である。PCF端面にコネクタを装着し研磨を行う場合、その断面に空孔を有するため、研磨時に水及び研磨剤が空孔中に侵入したり、

空孔間が破壊されてしまう。そこで端面処理を実施するには、何らかの方法で端面の空孔を閉塞する必要がある。例えば硬度がPCFと同等の材料を空孔部に象嵌したり、端部に蓋を装着する等の方が考えられる。これにより端面の研磨は可能となるが、本来PCFが持っている特性を損なう可能性がある。よって空孔部を閉塞する材料並びに方法は慎重に選択する必要がある。現在ある樹脂材料を空孔部に充填してコネクタを装着したにPCFにおいて、に示す方法でコネクタ接続をした場合、PCF特有の特性を損なうことなく、約0.8dBの損失で接続が可能となっている。

4.5 超広帯域光源への応用

光周波数を計測することは、長さの定義の実現のために不可欠な技術である。光周波数絶対計測には規則正しく並んだ多くの色成分を含んだ光である「光コム」を利用する。「光コム」の色成分の間隔を決めるのにセシウム原子時計を用いることで、正確な「光のものさし」として利用することができる。この「光コム」発生にPCFが応用されている。

繰り返し周波数:150 MHz, パルス幅:12 fs, 中心波長:780 nm, 平均出力:600 mWのモードロックレーザを零分散波長が800nm近辺のPCFに入射した場合の出力光のスペクトルをFig.4.22に示す。これから分かるように800 nmを中心として非常に広帯域に波長が広がった光コムが得られている[178]。

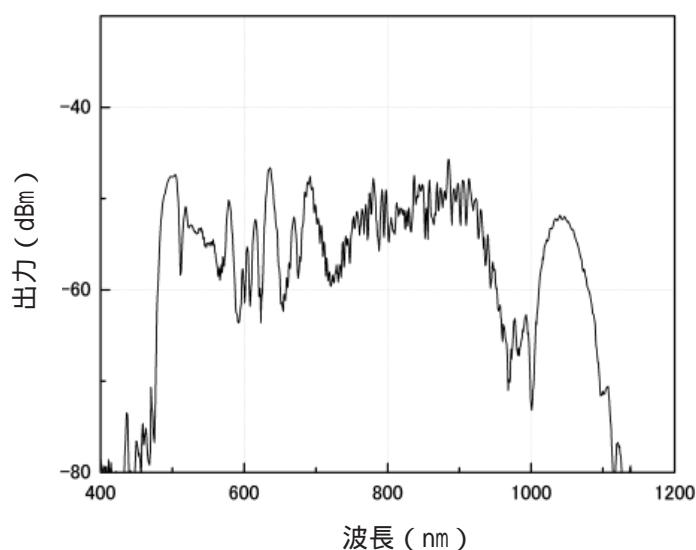


Fig.8.22 780 nm モードロックレーザによる光コム

これを用いて光周波数計測を行うには、測りたいレーザと光コムとのビート f_{beat} を測定すれば、測りたいレーザの周波数 f_{laser} は $nf_{\text{rep}} + f_{\text{beat}}$ (n :整数)として求めることができる。独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門では、本測定技術を確認し、既に光周波数の校正サービス

を開始している [179]。

また SC 光は先に述べた以外にも広帯域特性を利用して、各種センサ・測定用の光源に応用が期待されている。例えばコーティング薄膜の反射率・透過率の測定、光通信用フィルタの特性評価などに特に有効である。光源としてパルス幅が数十 ps の高エネルギーパルスを用い、零分散波長が 1550 nm 近辺の PCF (100 m) に入射した場合の出力光のスペクトルを Fig.4.23 に示す。同図より 1200 nm から 1700 nm まで広帯域なスペクトルが得られていることが分かる [180]。また出力レベルも大きく、センサ用光源として実用レベルにあると考えられる。出力光のスペクトルの長波長側については、測定装置 (光スペクトラムアナライザ) の制限に 1700 nm までしか検出されていないが、さらに長波長側に広がっていることも考えられる。使用する PCF の条長を最適化することにより、さらに広帯域・高出力の光源が得られる可能性がある。

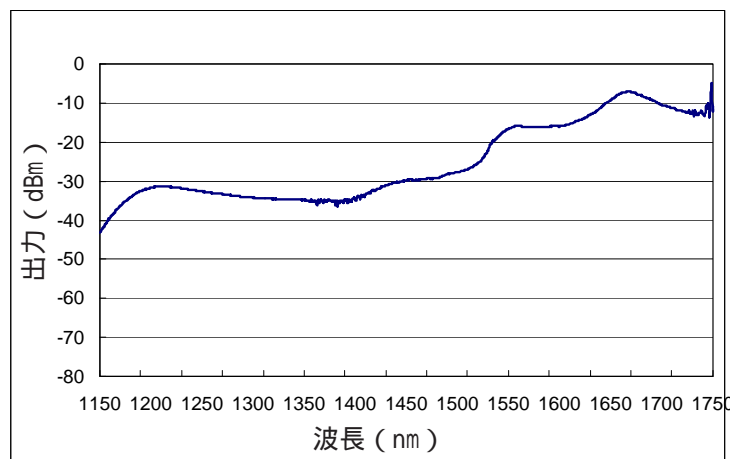


Fig.4.23 1550 nm 光源による SC 光

4.6 レーザガイドへの応用

高感度な高分散分光による高精度天文観測を行うには、大気の揺らぎを補正する補償光学系が必要となる。このためには、光波面測定用の参照光源星 (ガイド星) の観測が必要となるが、多くの場合暗くて利用できない。そこで、レーザビーム (589nm) を上空に照射し高度 90km のナトリウム層を発光させ、人工的なガイド星を作り出だされている [181]。このレーザビームをレーザ室から望遠鏡先端部までガイドする光ファイバ (リレーファイバ) が求められている。リレーファイバには 589nm においてシングルモードで、数 W 以上の入力でも低損失で数十 m の伝搬が可能であることが要求される [182]。これらの要求仕様を満たすファイバとして、PCF が候補のひとつにあがっている [183]。レーザガイドスターの概略概念図を Fig.4.24 に示す。

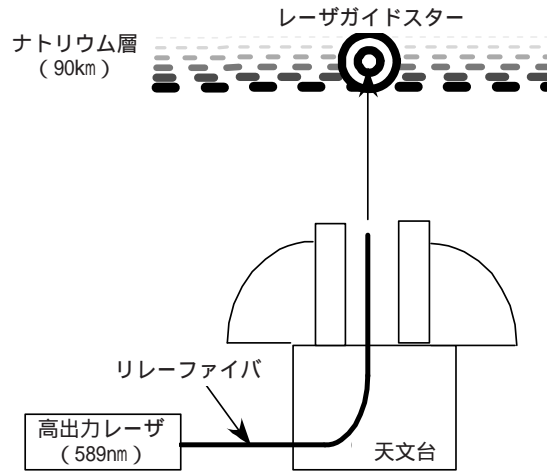


Fig.4.24 レーザーガイドスターの概念図

4.7 偏波面保持ファイバへの応用

PCFでは、コアとクラッドの屈折率差を大きく取れるため、コアの非対称性やクラッドのエアホール径の異方性によって容易に高い偏波保存性を実現することが出来る[184]。

Fig.4.25に示すPCFは、コアに隣接する二つのホール径を他のホールよりも大きくした構造をしている。作製方法は、二本のキャピラリの内径を異ならせているだけであり、その他はFig.4.3に示す作製プロセスと全く同一である。Fig.4.25の偏波保持PCFのモード複屈折率の測定結果をFig.4.26に示す。シミュレーションの結果も合わせて示しており、比較的良く両者は一致している。波長1550nmで 1.4×10^{-3} という大きなモード複屈折率が得られている。また、光ファイバ100m長における偏波間クロストークは-32dBが得られている[185]。

応用としては、偏波保存性の要求されるDFB-LDピグテールモジュールや偏波合成カプラ、PMD補償器、光機器内配線に適用可能である。前述のごとく、PCFは曲げ損失が非常に小さい特性があり。これを利用すれば、特に機器内配線では非常に小さいRでの取り回しが可能となり、モジュールや機器筐体設計時の自由度が大きくなり、有効であると考えられる。

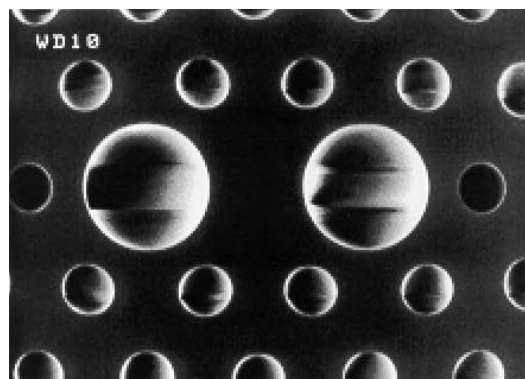


Fig.8.25 偏波保持型PCFの断面図

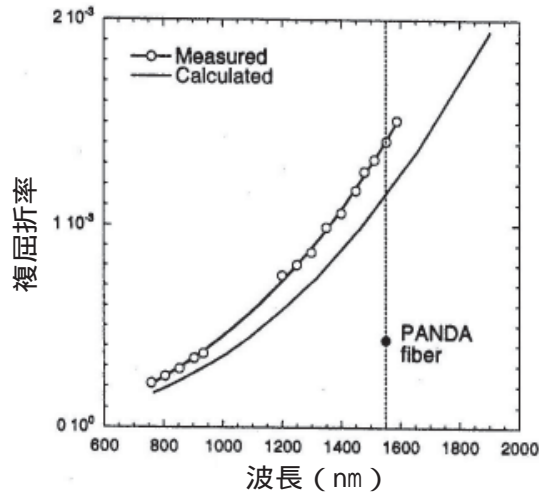


Fig.8.26 モード複屈折

4.8 ファイバレーザへの応用

4.8.1 ダブルクラッドファイバ

ダブルクラッドファイバとはレーザ発振および増幅用途に用いられる希土類ドープファイバにおいて、二重の導波構造をもつファイバである。従来のポリマ・クラッドをエアホール・クラッドに変更することで以下の利点が生まれる。

- 1) ポンプガイドNAを大きくすることが可能となる。
- 2) ポンプガイド形状をほぼ円形としてもスキュー光(コアを通過しない光)を抑制できる。
(従来ポンプガイド形状はD型, 4角形, 6角形, 8角形)
- 3) 全石英ガラス構造であるため従来のポリマ構造よりもポンプ光に対する耐性が向上する。

ダブルクラッドファイバの模式図と断面写真を Fig.4.27 に示す。

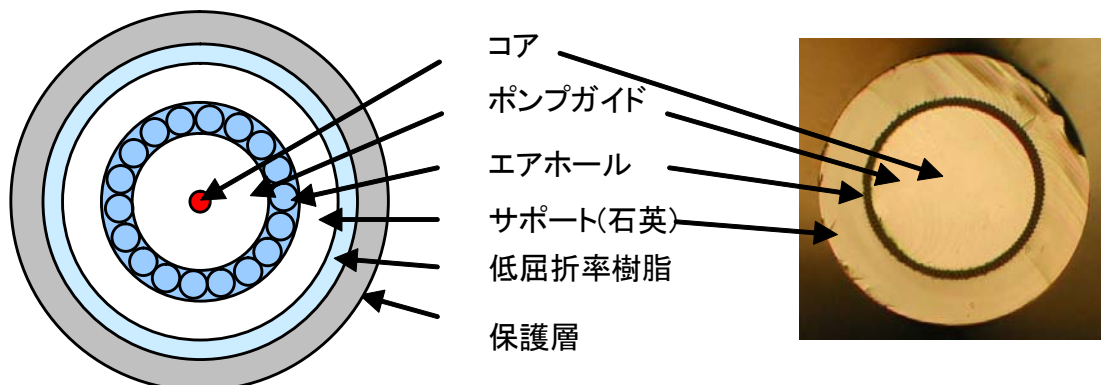


Fig.4.27 ダブルクラッドファイバの模式図と断面写真

4. 8. 2 ファイバレーザへの応用

1 μm 帯での発振を得るべく、コア・ポンプガイド・エアホール・サポート層（第2クラッド）の詳細設計を行い、高NA化によりポンプ光との結合効率を向上させた。コアにはYbを高濃度にドーブし、高効率・高出力化を図った。作製したダブルクラッドファイバの諸元を Table 4.6 に示す。また、Fig. 4.28 に10mのダブルクラッドファイバにLD光をポンプ光として注入した場合の出力強度を示す。出力光は横マルチ発振で、ビーム品質を表すM値は約7であった。同図の直線の傾きから分かるように、74%という高い変換効率を得ている。また初期寿命試験として、1,000時間の連続発振を達成している。

このように、ファイバ自体がレーザ発振媒体となるため、レーザガイドの代わりにファイバレーザを使用することにより、大型のレーザ装置が不要となり、システムの小型化に寄与する。

Table 4.6 ダブルクラッドファイバの諸元

コア径	60 μm
コアのNA	0.06
ポンプガイド径	600 μm
ポンプガイドのNA	0.5
ポンプガイドの915nmの吸収率	1.2dB/m
外径	1000 μm
一次被覆外径	1300 μm
二次被覆外径	1700 μm

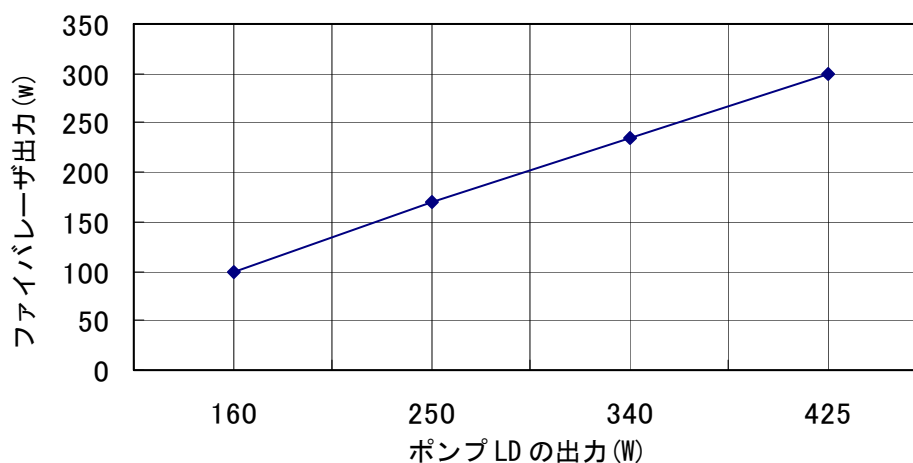


Fig. 4.28 ダブルクラッドファイバの出力強度

4.9 信頼性

PCFはこれまで述べた通り、従来のシングルモードファイバでは実現不可能な特性を得ることができるが、一方コアに沿って複数のエアホールが存在するため、実際の使用に当たってはこの影響を評価する必要がある。ここでは、伝送損失温度特性と機械強度特性について述べる。

4.9.1 温度サイクル特性[186]

測定に用いたPCFは外径125 μm 、エアホール径 $d=2.38 \mu\text{m}$ 、エアホールの格子間隔 $\Lambda=2.81 \mu\text{m}$ 、条長100m、測定波長1.55 μm で、PCF両端にはシングルモードファイバを融着接続した。融着接続部は恒温槽の外に置かれ、PCF自体の温度特性には影響を与えていない。-30 ~ +70 までの温度サイクル試験結果をFig.4.29に示す。同図より0 以下の低温領域で損失増加が発生していることが分かる。このことから、エアホール内部に残留していた空気中の水分が凍結することにより、伝送損失に影響を与えているものと考えられる。

そこでPCFのエアホール内部の水分を除去する目的で、エアホール両端を開放し、真空状態で80・13時間の加熱処理を行った。さらに、処理後に乾燥不活性ガス中で大気圧に戻し、同雰囲気中でシングルモードファイバをPCF両端に融着接続することにより、エアホール内部は完全に不活性ガス雰囲気で封止された。この乾燥パージ処理後の温度サイクル試験結果をFig.4.30に示す。本処理により損失変動が0.1dB以下に抑えられていることが分かる。よって温度サイクルによる損失変動を抑制するためには、エアホール内部の空気中の水蒸気量を使用温度範囲において、飽和水蒸気量以下にすることが有効であることが分かった。

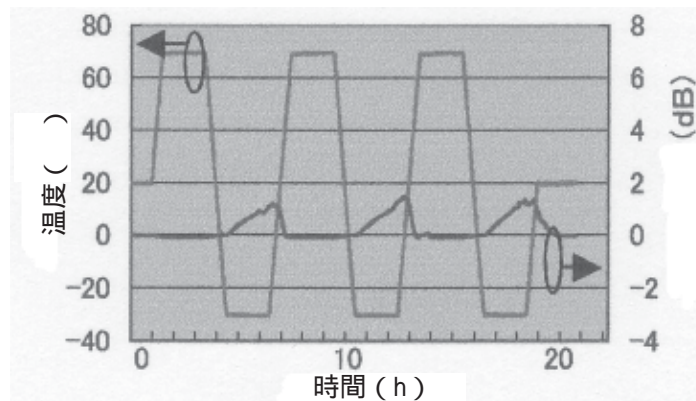


Fig.8.27 温度サイクル試験結果

4.9.2 機械強度特性

PCFのエアホールの存在がファイバの機械強度に与える影響を調べるべく、引張破断試験並びに動疲労試験を行って評価した。使用したPCFは外径125 μm 、80 μm の2種類で、いずれも紫外線硬化

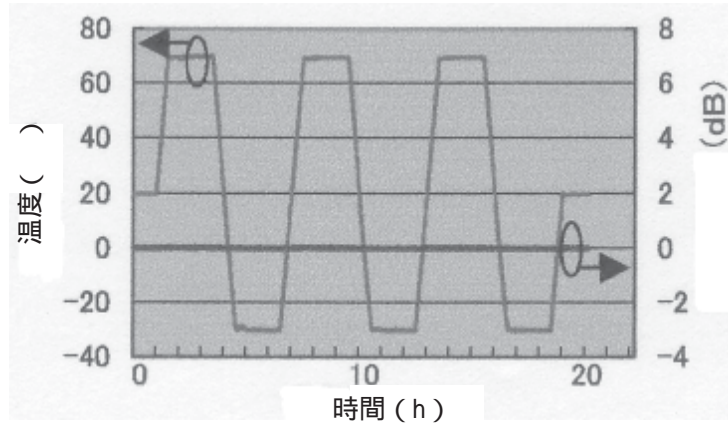


Fig.4.30 温度サイクル試験結果（改善後）

樹脂を被覆した0.25mm ファイバ心線である。

4.9.3 引張破断試験[187]

試験条件はスパン10m、引張速度500mm/minで試料数は各50である。試験環境は気温24℃、湿度40%である。破断した強度をワイブル分布でプロットした結果をFig.4.31に示す。外径125 μ mのPCFでは約60Nで破断しており、通常のシングルモードファイバと大きな差異は見られない。エアホールがファイバの軸方向に多数存在しても、大きな強度劣化は発生していないと考えられる。外径80 μ mのPCFでは破断強度が外径125 μ mのPCFに比べると低いのは、単にファイバ断面積の減少が現れているだけだと考えられる。

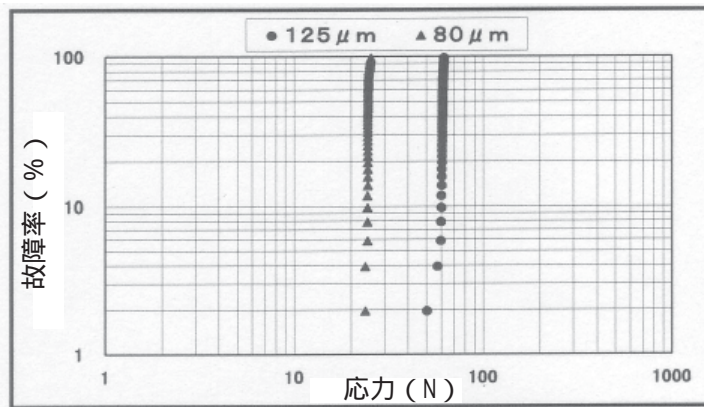


Fig.4.31 ワイブルプロット

4.9.4 動疲労試験[188]

PCFの長期信頼性を確認すべく動疲労試験を実施した。引張歪速度を50%/min、10%/min、5%/min、1%/min、0.5%/minの5種類変化させた。結果をFig.4.32に示す。動疲労係数はいずれも

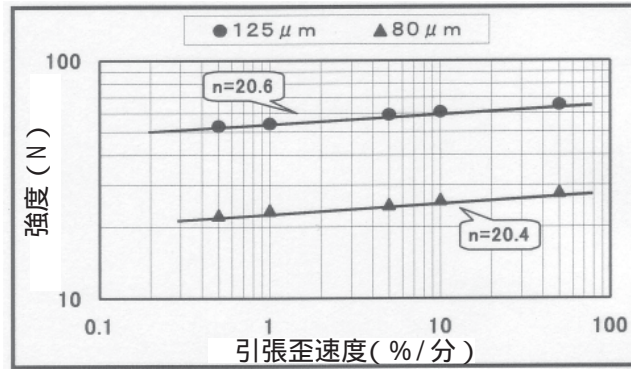


Fig.4.32 動疲労特性

20 以上であり、通常のシングルモードファイバと同程度であり、長期信頼性についても従来の光ファイバと、ほぼ同一の性能を有することが分かった。

4.10 まとめ

屈折率導波型 PCF について、その作製プロセス・モードフィールド・曲げ損失について、通常の光ファイバとは大きく異なる特性を持つことを示した。一方、PCF には空孔が存在する上での様々なデメリットも合わせ持っている。空孔内への空気・水・コンタミネーションの浸入による特性の劣化(特に低温特性)について、温度サイクル試験と劣化対策について明らかにした。さらにこれら独特の特性を利用した、広帯域光源・レーザガイド・偏波保持ファイバ・ファイバレーザへの応用について述べた。

本章で紹介した以外にも、PCF の独自の特性を生かした応用が多く研究されており、今後の展開が大いに期待される。

第5章 センサ、アクチュエータを集積化した視覚機構の開発

第2、3章から得られた要素技術を集積化して、マイクロ視覚機構（環境認識デバイス）を考案・検討した。環境認識デバイスは狭隘箇所において、物体の観察や検査等の視覚機能を満足すべく、接触検知機能・顕微観察機能・先端首振り機能・視差可変立体視機能等を有する。また画像伝送・センサ信号入出力・エネルギー供給を全て光で行うため、電磁干渉の影響を受けず、厳しい環境下にも適用可能である。外径3mm、有効長1mの筐体中に上記全機能を有する環境認識デバイスを試作し、その機能検証を行った。その結果、観察領域0.9mm、画像解像度15 μ m、顕微観察解像度6 μ m、輻輳角変化0~5 $^{\circ}$ 、最小接触検知力10mN、先端首振り角60 $^{\circ}$ の性能を得ることが出来た。前述の通り、本環境認識デバイスは極細径であるがゆえ、体内での使用も可能であると考えられる。よって本デバイスはマイクロファクトリ、発電施設メンテナンス、低侵襲手術、マイクロ外科手術等産業用・医療用に広く応用が可能である。

5.1 顕微観察機能を有するマイクロ視覚機構の試作

5.1.1 観察機能及び照明機能

これまで得られた要素技術を集積化して、顕微観察機能・先端首振り機能・接触検知機能を有するマイクロ視覚機構の試作を行った。模式図を Fig.5.1 に示す。本機構の視覚機能を担うのは、通常のイメージガイドと顕微観察用のイメージガイド及びライトガイドを持つ3機能スコープである。試作を行った3機能スコープの断面構造を Fig.5.2 に示す。3機能スコープは画像観察のためにイメージガイド、顕微観察のためのイメージガイド及び照明用のライトガイドからな

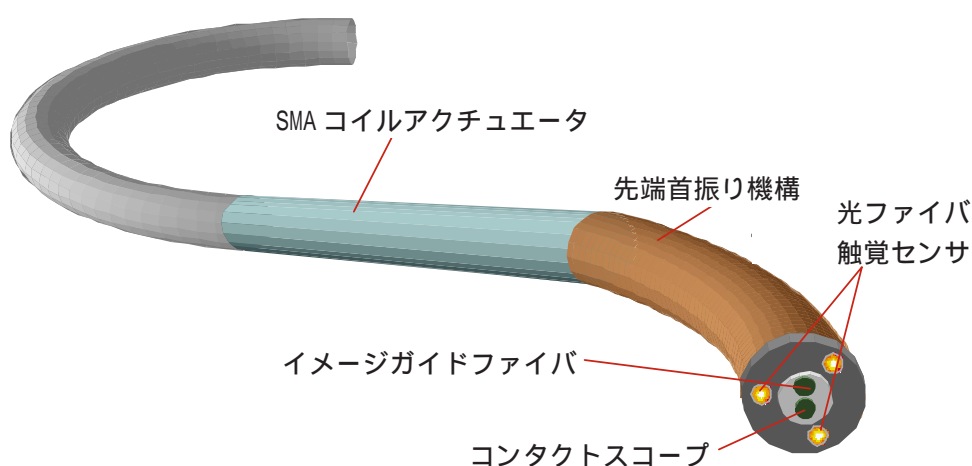


Fig.5.1 マイクロ視覚機構の模式図

る。2本のイメージガイドの根本は一つのコネクタ内に固定され、1つのCCDカメラにより画像を取得するため同一のモニタ上で、両方のイメージガイドからの画像を見ることが可能である。イメージガイドの画素数はいずれも3000画素である。3機能スコープの先端から1050mmは環境認識デバイス内に配置する必要から外径0.8mmとした。3機能スコープの仕様を以下にまとめる。

- ・イメージガイド（画素数：3000、レンズ：視野角55度）
- ・イメージガイド（画素数：3000、レンズ：なし）
- ・ライトガイド：30 μ m \times 約70本（石英製）
- ・有効部長さ：1050mm
- ・有効部外径：0.8mm
- ・有効部外覆：ポリイミド

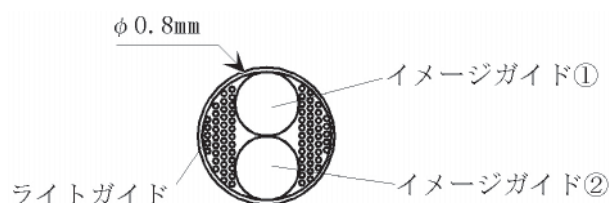


Fig.5.2 3機能スコープの断面構造

5.1.2 先端首振り機能

3.2.4で述べた全方位屈曲首振り構造体を適用した。但し、本マイクロ視覚機構には前述のごとく、顕微観察機能のためのイメージガイド2本、石英製ライトガイド70本、後述する接触検知機能のための触覚センサ3本を搭載するため、先端部の剛性が前の検討時より大きくなる。そのため駆動に使用するSMAコイル、バイアスコイルの緒元を見直した。また駆動源については、SMAコイルへの通電加熱駆動とし、本試作結果を基にステップエッチドファイバによる光駆動に発展させる予定である。結果とし外径3mm、長さ30mmで、長手方向に伸縮性を持つ先端首振り機構が得られた。

5.1.3 接触検知機能

先端首振り機能を作製した後に触覚センサの作製を行った。先端首振り部に光ファイバを配置した後に、組立を行った。触覚センサは、マイクロ視覚機構の長手方向の中心軸に対して、120度ずつ3個を配置した。触覚センサの固定には、ポリアミドイミドをエキシマレーザにより加工した部品を用いた。さらに3機能スコープと触覚センサ上に配置した、可動板及び被覆チューブを接着し、可動板と触覚センサの鋼球が接触するように位置を調整した。この結果、3機能スコープの先

端に加わった荷重が可動板を通して触覚センサに伝わり接触力を検出することが可能である。触覚センサを配置したマイクロ視覚機構先端部の断面図を Fig.5.3 に示す。また、触覚センサを取り付けた直後のマイクロ視覚機構の内部構造写真を Fig.5.4 に示す。

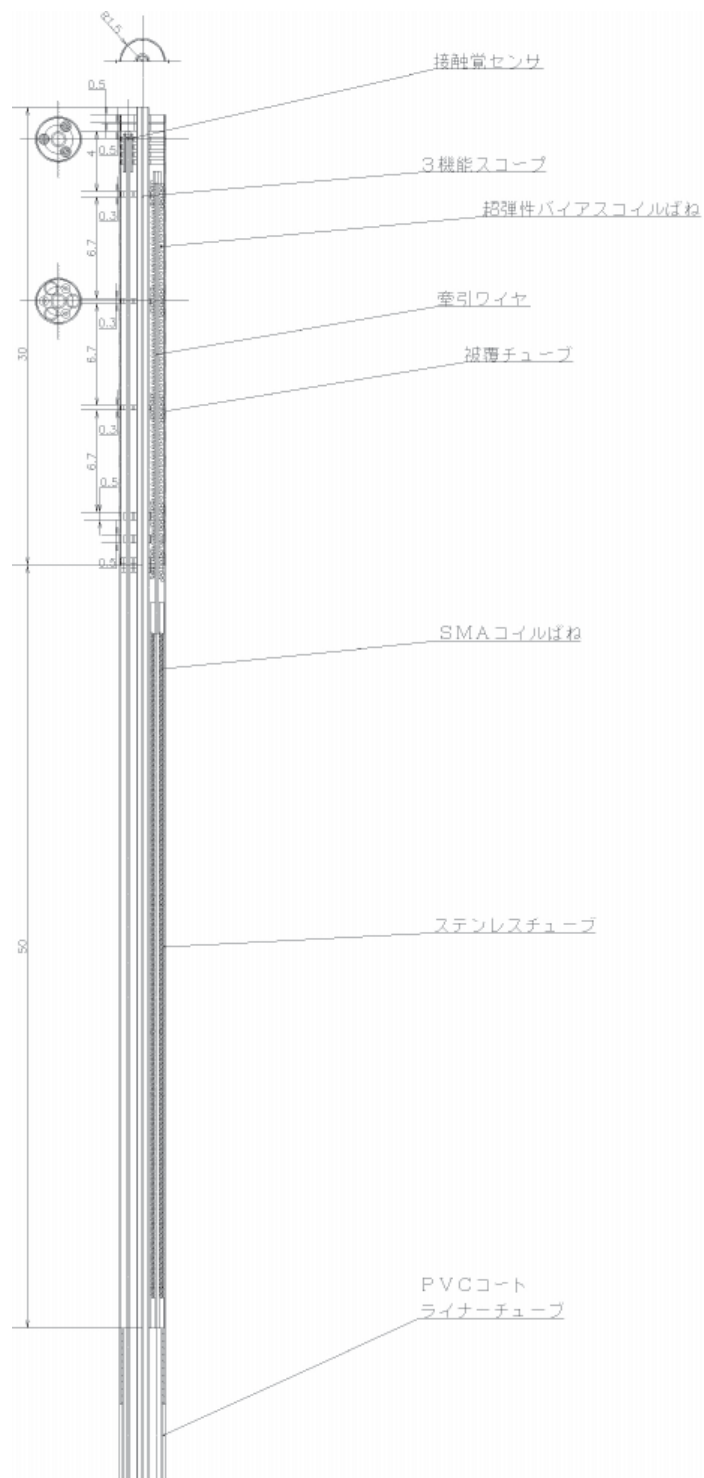


Fig.5.3 マイクロ視覚機構先端部の断面構造図

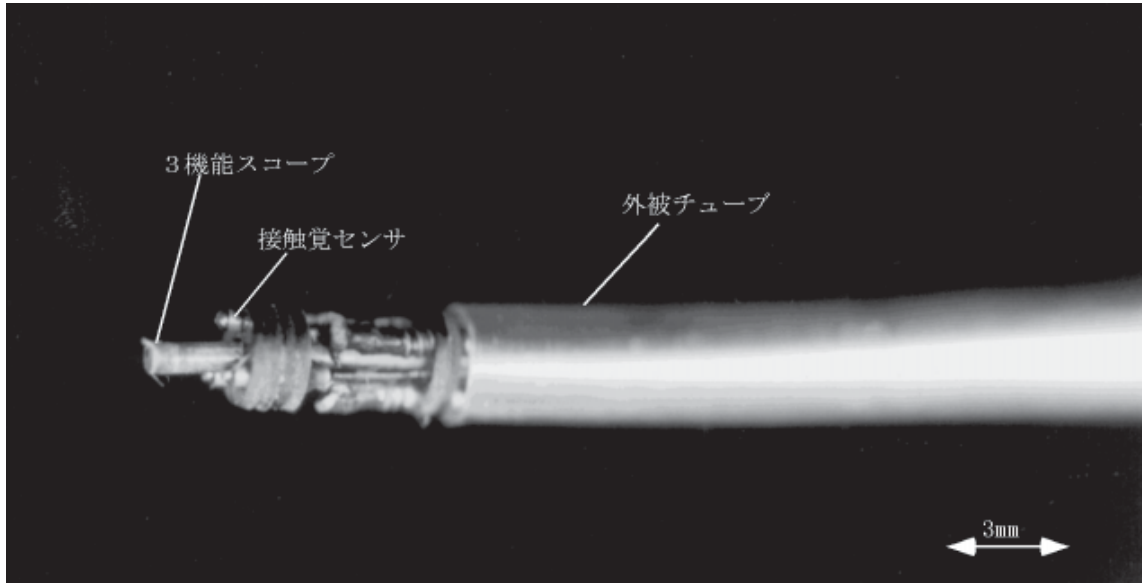


Fig.5.4 マイクロ視覚機構の内部構造写真

以上のプロセスにより 画像観察機能、顕微観察機能、照明機能、接触検知機能、先端首振り機能を備えたマイクロ視覚機構が完成した。完成したマイクロ視覚機構の概略構造を Fig.5.5 に示す。

5.2 顕微観察機能を有するマイクロ視覚機構の評価

5.2.1 顕微観察機能及び照明機能の評価

画像観察機能(画像観察)、顕微観察機能(微小領域の画像観察)については、ライン&スペースパターンを用いて分解能を評価した。評価結果を Fig.5.6 に示す。

イメージガイド については、 $39\ \mu\text{m}$ 間隔のライン&スペースを識別できており、ライン視野分解能は $39\ \mu\text{m}$ 以下であることが確認できた。また $14\ \mu\text{m}$ のラインを検知することができており、理論的にスポット視野検知能がライン視野検知能より劣ることから、観察分解能(スポット視野検知能)は $14\ \mu\text{m}$ 以下であることが確認できた。

イメージガイド については $11\ \mu\text{m}$ のライン視野分解能、および $6\ \mu\text{m}$ のライン視野検知能を有していることから、観察分解能(スポット視野検知能)は $6\ \mu\text{m}$ 以下であることが確認できた。また、観察範囲は $300\ \mu\text{m}$ 以上であり仕様を満足していることが確認できた。

5.2.2 首振り機能の評価

マイクロ視覚機構の先端首振り機能の制御フローを Fig.5.7 に示す。3組のSMAアクチュエータをそれぞれ通電加熱することにより、任意の方向に首振り動作をすることが確認できた。

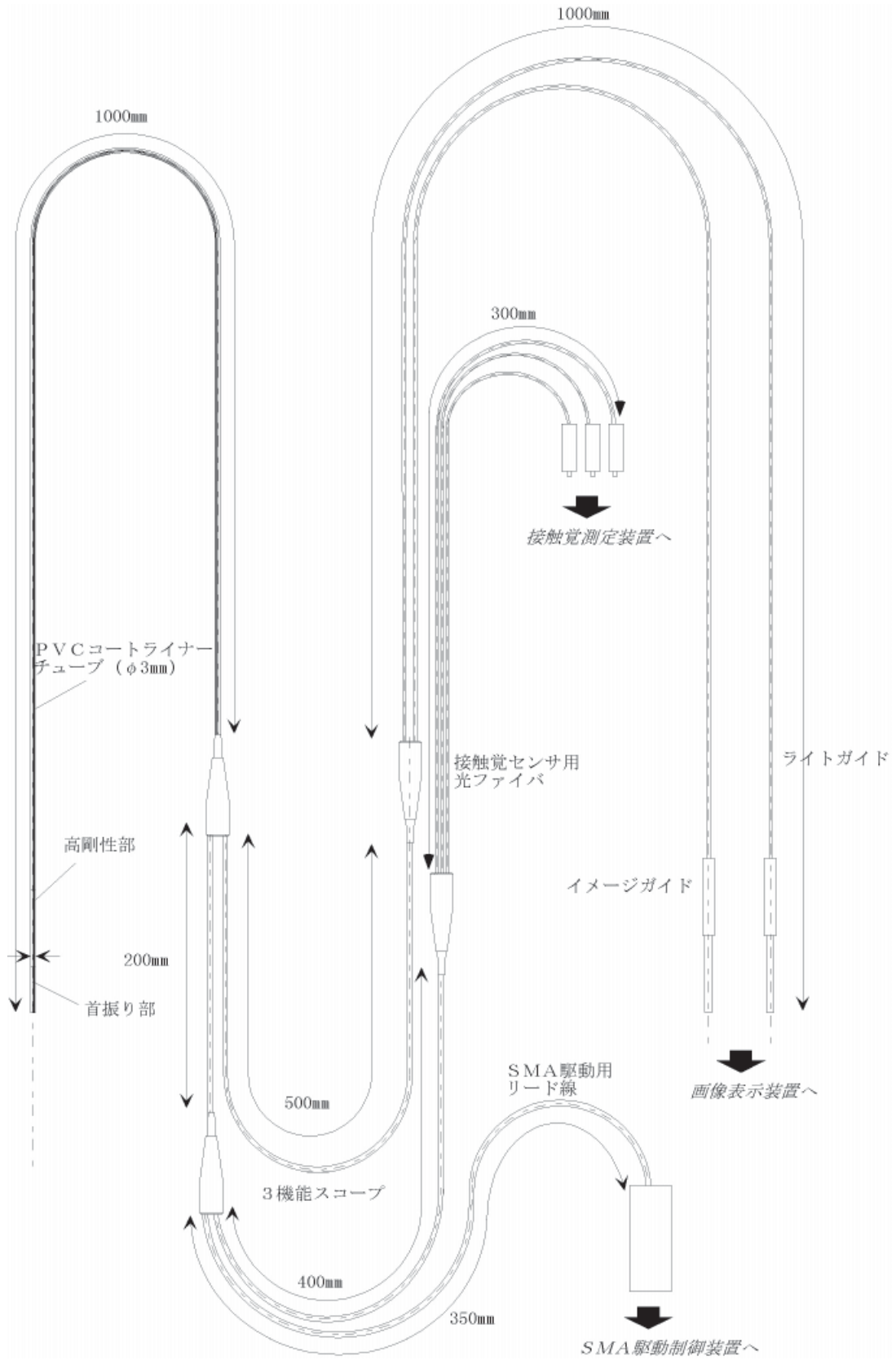


Fig.5.5 マイクロ視覚機構の概略構造

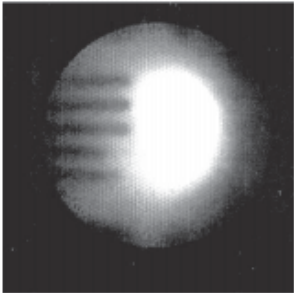
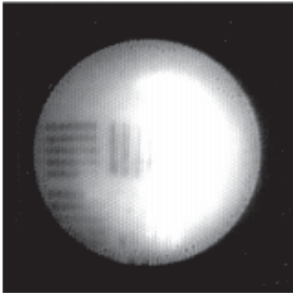
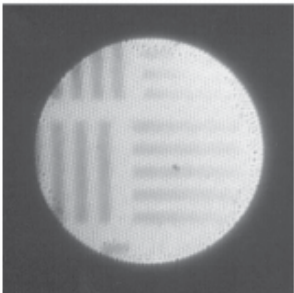
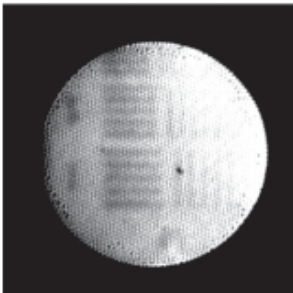
<p>イメージガイド① (画像観察機能)</p>		
<p>ライン&スペース間隔</p>	<p>39 μ m</p>	<p>14 μ m</p>
<p>イメージガイド② (顕微観察機能)</p>		
<p>ライン&スペース間隔</p>	<p>11 μ m</p>	<p>6 μ m</p>

Fig.5.6 ライン&スペースパターンを用いた分解能の評価結果

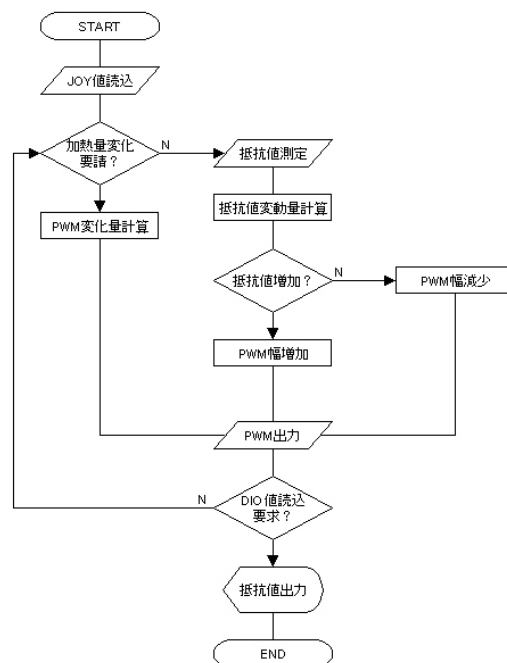


Fig.5.7 先端首振り機能の制御フロー

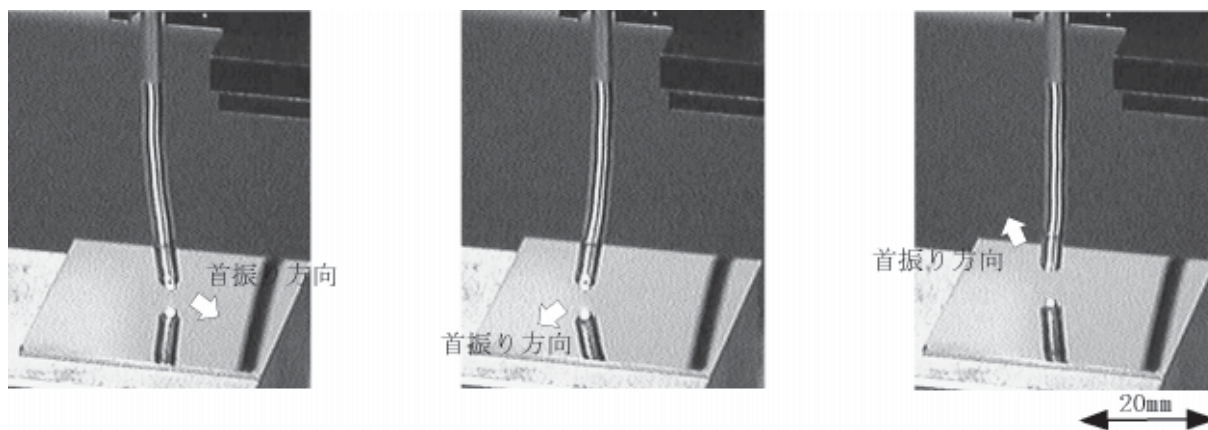


Fig.5.8 先端首振り機能の動作状態

先端首振り機能の動作状態を Fig.5.8 に示す。首振り角度は 30° （半角）以上であり、直径 15mm の範囲を観察可能であることが確認できた。

5.2.3 接触検知機能の評価

接触検知機能の評価は、2.3.4 に述べた方法および測定装置を用いて行った。測定の結果を Fig.5.9 に示す。

測定結果より、環境認識デバイスの接触検知機能は、触覚センサ単体で評価した場合に比べて可

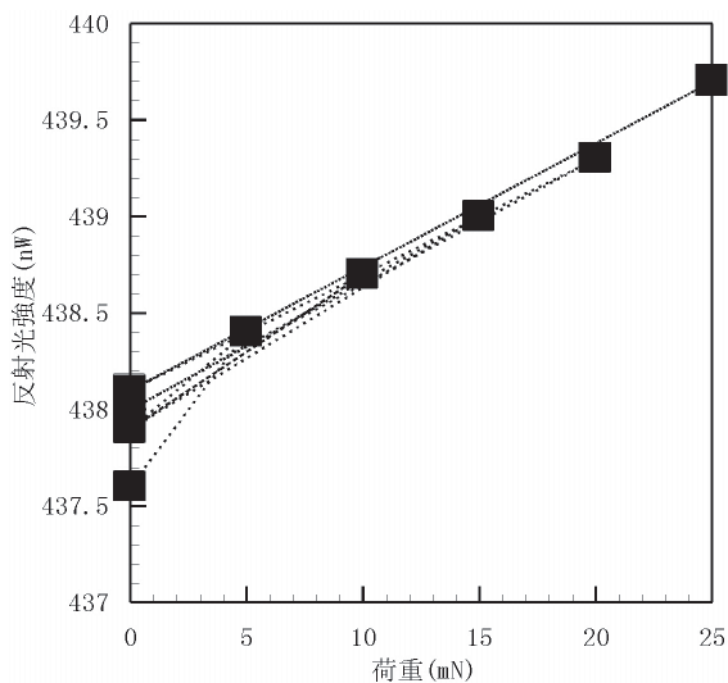


Fig.9.9 接触検知機能の評価結果

動板を經由して接触力が伝達されるために感度が劣り、反射光強度の変化量は10mNあたり約0.7nWであったが、10mNの接触力を検知することは可能であり、仕様を満足することが確認できた。

5.3 立体視機能を有するマイクロ視覚機構の試作

これまで得られた要素技術を集積化して、立体観察機能・先端首振り機能を有するマイクロ視覚機構の試作を行った。顕微観察機能を有するものと分割して試作したのは、各々の主となる機能である顕微観察機能、立体視機能の性能評価を他の機能・機構の影響を排除して独立に行うためである。これにより、正確で精度の高い顕微観察機能、立体視機能の評価が可能となる。立体観察機能を有するマイクロ視覚機構の模式図を Fig.5.10 に示す。

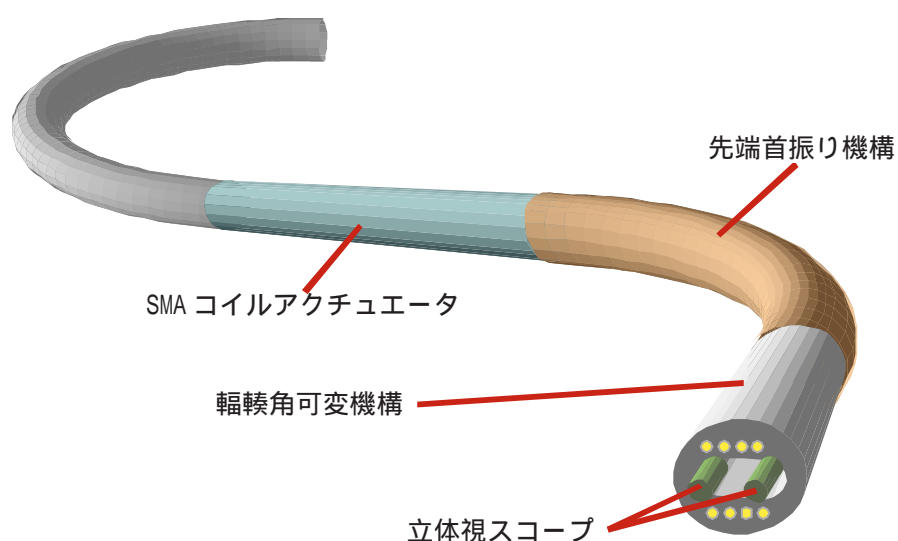


Fig.5.10 立体観察機能を有するマイクロ視覚機構の模式図

5.3.1 立体視スコープの分解能の検討

イメージガイドのレンズの焦点が適正に設定されている場合、一般的に分解能は観察対象物との距離、すなわち観察距離に依存する。このため適正な焦点距離を設定するためには、分解能の面で必要とされる観察範囲を求める必要がある。そこで分解能を求める上で代表的な値として、ライン視野分解能を基に理論計算を行った。立体視スコープの主要なパラメータを Fig.5.11 に示す。

まず、スコープと対象物間の観察距離 L とした場合、ライン視野分解能 R は式(5.1)のように表される。

a_1 をファイバスコープ 1 画素あたりのコア半径、 a_2 を 1 画素あたりのファイバ半径、 θ を視野角 (rad)、 N を画素数とすると、

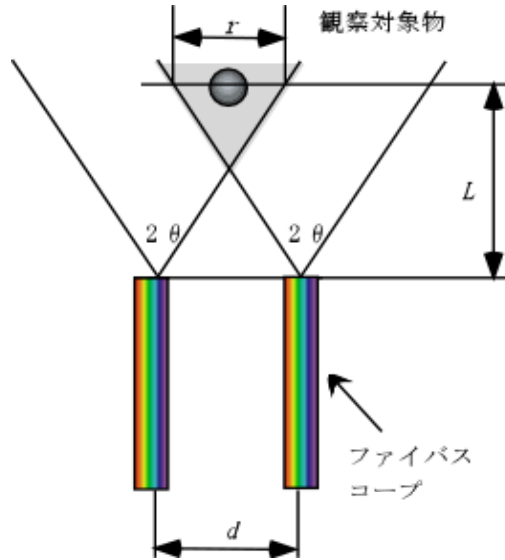


Fig.5.11 立体視スコープの主要なパラメータ

$$R = \sqrt{\frac{0.9}{N}} \cdot L \cdot \theta \cdot \frac{S_1}{2a_2} \quad \text{式(5.1)}$$

$$S_1 = 2a_1 + 2a_2 + a$$

$$a = \sqrt{3a_2} - 2a_1$$

式(5.1)を基に、視野角 22° 、 55° 及び 70° の3種のレンズを装着した3000画素のファイバースコープのライン分解能を計算した。計算結果を Fig.5.12 に示す。

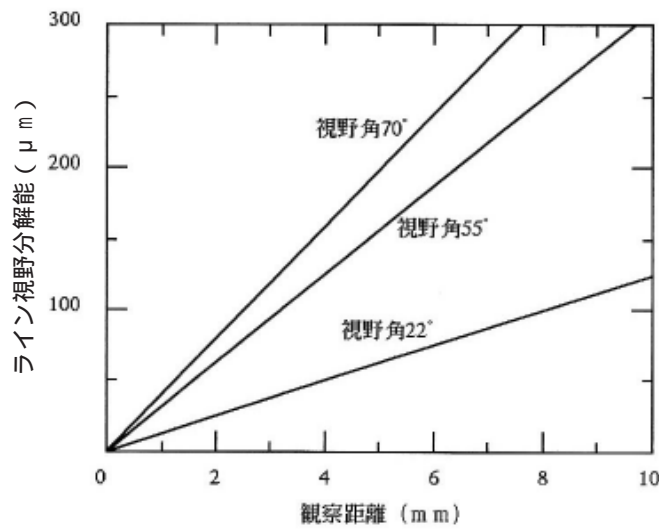


Fig.5.12 観察距離とライン分解能との関係

同図より、3000画素のファイバを使用した環境認識デバイスの場合、観察機能の仕様（40 μmの隙間検出と150 μmの歯車軸観察）を満たすためには、視野角22°のレンズで観察距離3.22mm以内、55°のレンズで1.28mm以内、70°のレンズで1.01mm以内となることがわかった。

5.3.2 立体視スコープの視野範囲の検討

次に、微細構造体観察で必要とされる立体視観察範囲 0.9mmを満たす観察距離を求める。

まず、スコープ単体の場合、視野範囲はレンズの視野角及び観察距離に依存する。すなわち同じレンズを使用した場合は観察距離と視野範囲は比例し、観察距離が同一の場合には視野角と視野範囲は比例する。

また立体視観察では、これらに加えて更に両眼間隔も重要なパラメータとなる。

Fig.5.11 に示す立体視パラメータより、スコープの視野角を（rad）観察距離をL（m）、立体視スコープの両眼間隔をd（m）とすると、視野範囲rは式（5.2）のように表される。

$$r = 2L \tan \theta - d \quad \text{式(5.2)}$$

式（5.2）より求めた視野角が22°、55°、70°のレンズを使用した場合の立体視スコープの視野範囲を Fig.5.13 に示す。

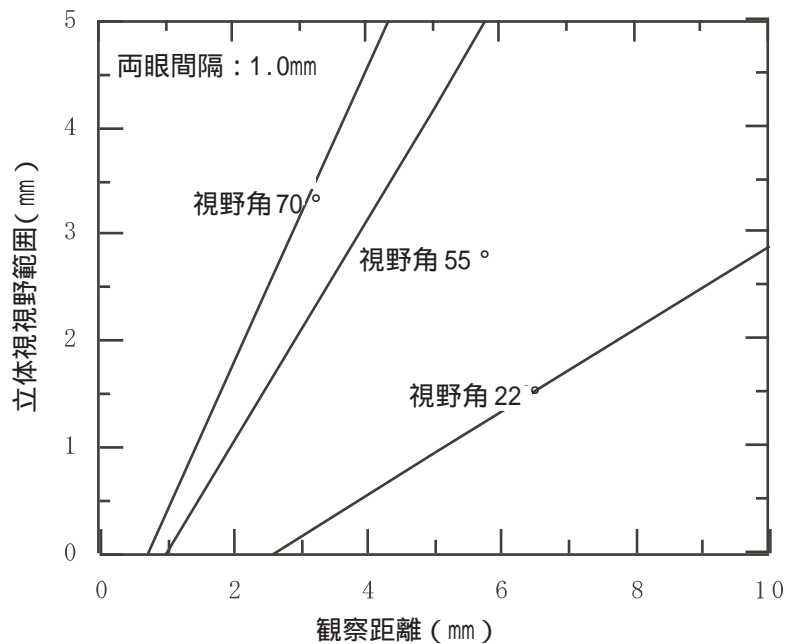


Fig.5.13 観察範囲と立体視視野範囲の関係

同図より、両眼間隔1.0mm時に視野角22°のレンズを使用した場合に4.89mm以上、視野角55°のレンズでは1.82mm以上、視野角70°のレンズでは1.36mm以上の観察距離で視野範囲 0.9mm

を満たすことがわかった。

5.3.3 立体視スコープの視差可変機構

分解能及び視野範囲の検討結果を各々 Table 5.1、 Fig.5.14 にまとめる。いずれのレンズを用いても双方の必要とされる範囲を満たすことは不可能である。

Table 5.1 観察距離

レンズ視野角	必要とされる観察距離	
	ライン分解能40 μ m	視野範囲 0.9mm
22°	3.22mm以内	4.89mm以上
55°	1.28mm以内	1.82mm以上
70°	1.01mm以内	1.36mm以上

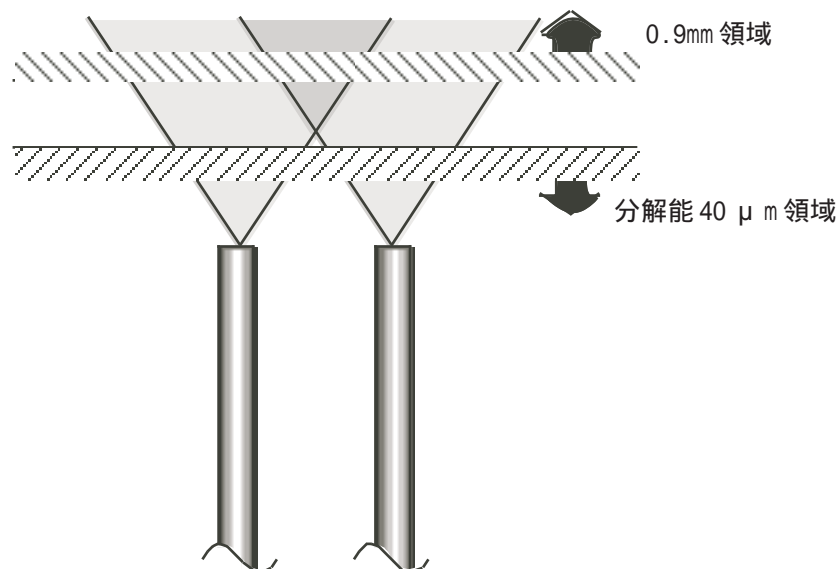


Fig.5.14 立体視範囲と分解能

そこでこの問題を改善するために視差可変機構を用いる。本来この機構は立体視スコープの視方向を変えることで、観察時の立体感を変化させるものである。しかし視野角の小さいレンズ(高分解能のレンズ)を使用して輻輳角を変化させ、2本のイメージガイドファイバの重複した観察領域を適切に設定することにより、求められる分解能と視野範囲双方の仕様を満たすことが可能となる。

Fig.5.15 に示すように、輻輳角を2 変化させた場合、変化後の視野範囲 r' は以下の式で

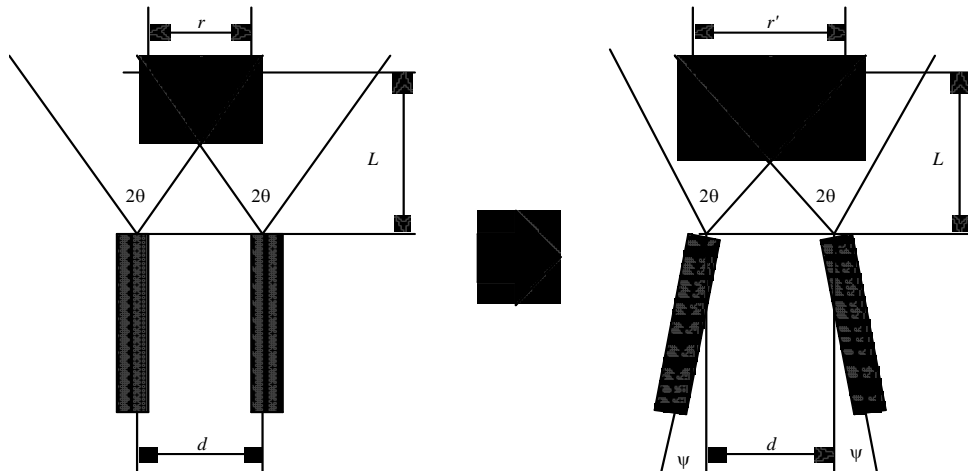


Fig.5.15 輻輳角変化

表される。

$$r' = 2L' \tan(\theta + \psi) - d' \quad \text{式(5.3)}$$

$$\text{式(5.4)}$$

$L' = \frac{r'+d'}{2 \tan(\theta + \psi)}$ 一例として、両眼間隔 1.0mm で視野角 22° のレンズを用いた立体視スコープの場合、求められ
 ライン分解能 ($40 \mu\text{m}$) となる観察距離は 3.22mm である。この時の視野範囲は 0.25mm である
 が、これを 0.9mm とするには式 (5.4) より $2\psi = 10.8^\circ$ となるよう輻輳角を設定すればよい
 ことがわかる。

このように視差可変機構を利用することで、視野範囲と分解能を両立させることが可能となり、
 今回試作した立体視スコープでは上記の設定を行っている。立体視機能以外の各機能については
 5.1 で述べたものと同一機能・プロセスとした。以上のより 立体視機能、照明機能、先端
 首振り機能を備えたマイクロ視覚機構が完成した。このマイクロ視覚機構の概略構造を Fig.5.16

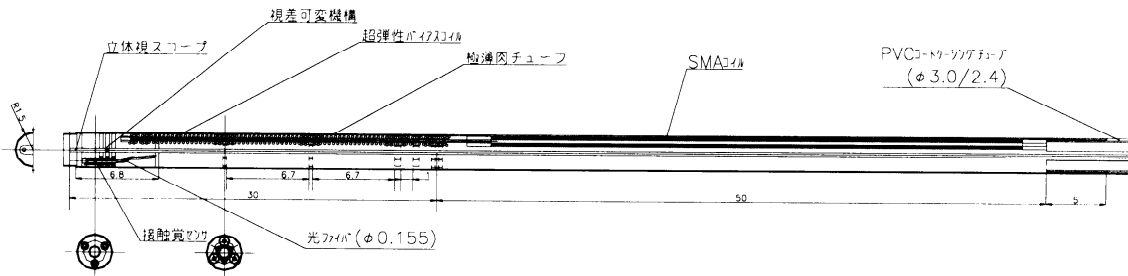


Fig.5.16 マイクロ視覚機構の概略構造

に示す。

5. 4 立体視機能を有するマイクロ視覚機構の評価

本マイクロ視覚機構において、照明機能や先端首振り機能については5. 1で述べたものと同一であるため、評価・結果も5. 2で述べたものとほぼ同じであるため、ここでは省略する。そこで立体視機能にのみ評価を行った。輻輳角変化動作については、視覚機構作製時に0°から5°までの変化を確認しているため、実際に得られる画像について議論する。評価のため、具体的な観察対象物が必要となるが、ここではマイクロターンテーブルと被加工基板、微小歯車の自立状態の観察を行った。これらの観察対象サンプルは株式会社安川電機、セイコーインスツルメンツ株式会社によって製作、提供された。

5. 4. 1 隙間の観察

マイクロ視覚機構の首振り機能を用いた隙間検査の様子を Fig. 5.17 に示す。画像観察のための立体視機能を用いることにより、被加工基板とマイクロターンテーブル間との隙間の検査が可能であった。

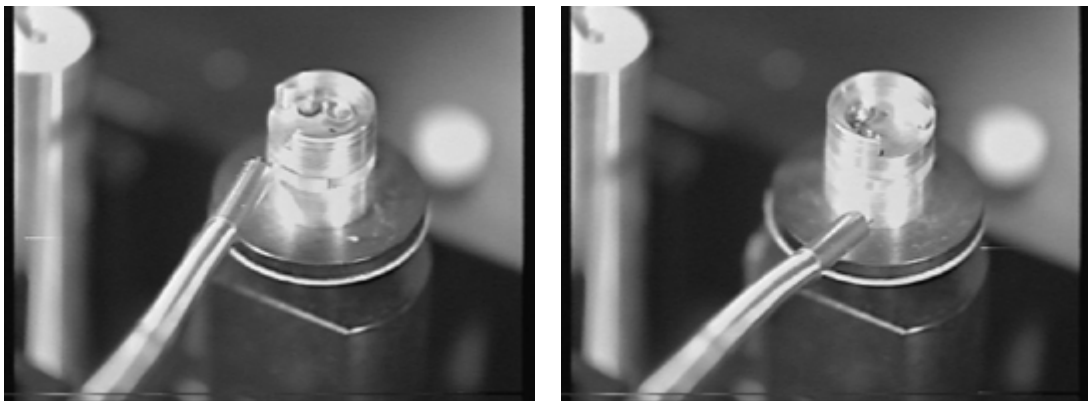
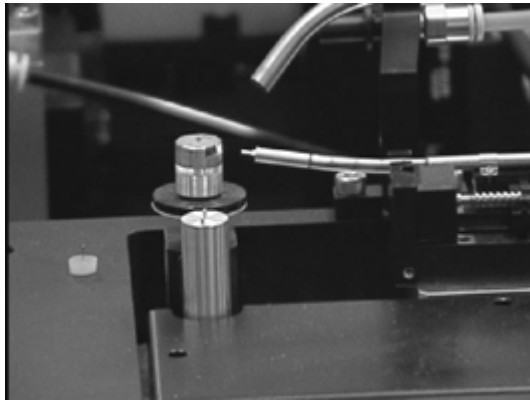


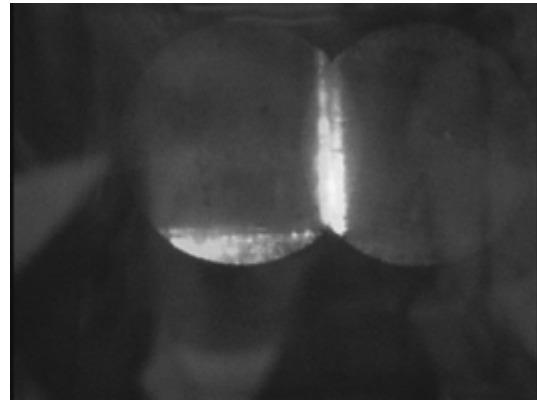
Fig. 5.17 隙間検査の様子

5. 4. 2 軸挿入状態の観察

マイクロ視覚機構の首振り機能を用いた歯車の軸挿入状態検査の様子を Fig. 5.18(a)に示す。また、立体視機能を用いた画像観察の様子を Fig. 5.18(b)に示す。Fig. 5.18(b)は歯車の軸挿入状態を検査した場合のモニタ画像である。同図より、マイクロ視覚機構による軸挿入状態の検査が可能であることが確認された。



(a) 観察の様子



(b) モニタ上の立体画像

Fig. 5.18 歯車の軸挿入状態検査の様子

5. 5 マイクロ視覚機構における首振り構造体の光駆動化

光駆動マイクロ視覚機構の仕様を Table 5.2 にまとめる。5. 1 の機構に比べて機能向上した点は、加工液中での画像観察が可能なことである。このため、アクチュエータの駆動方式を光加熱方式とし、ファイバースコープには加工液に耐性を有する樹脂のコーティングが必要である。

Table 5.2 光駆動マイクロ視覚機構の仕様

機能	用途	性能
画像観察機能 (加工液中 及び大気中)	画像観察	イメージカイト [®] : 3000画素以上 観察範囲 : $\phi 0.9\text{mm}$ 以上 観察分解能 : $15\ \mu\text{m}$ 以下(観察距離1mm) ライン視野分解能 : $40\ \mu\text{m}$ 以下(観察距離1mm) 許容曲げ半径(首振り部以外) : 45mm
顕微観察機能 (加工液中 及び大気中)	微小領域の 画像観察	イメージカイト [®] : 3000画素以上 観察範囲 : $\phi 0.3\text{mm}$ 以上(観察距離0~10 μm) 観察分解能 : $6\ \mu\text{m}$ 以下(観察距離0~10 μm)
照明機能 (加工液中 及び大気中)	観察用照明	ライトガイドによる白色照明
接触検知機能 (加工液中 及び大気中)	顕微観察時 における観察対象物 との接触	検出接触力 : 10mN
先端首振り機能 (加工液中 及び大気中)	・画像観察時の観察 領域拡大 ・先端部接触時の 退避動作	外径 : 3mm 首振り部長さ : 30mm 首振り角度 : 片側 $\pi/3\ \text{rad}$ (60°) 観察範囲 : $\phi 0.9 \times 15\text{mm}$ 首振り角精度 : $\pm \pi/90\ \text{rad}$ ($\pm 2^\circ$) アクチュエータ : 光駆動

5.5.1 光駆動化視覚機構の試作

光駆動化視覚機構の構造を Fig.5.19 に示す。作製に用いた主な部材の仕様を Table 5.3 にまとめる。画像観察、顕微観察及び照明機能用の3機能スコープは5.1と同一構造のものにパレン樹脂をコーティングしたものをを用いた。接触検知機能のための触覚センサは、マイクロ視覚機構の長手方向の中心軸に対して対称となるように2個を配置し、ファイバ径を155 μmに細径化したものをを用いた。触覚センサの固定には、ポリアミドイミドをエキシマレーザにより加工した部品を用いた。さらに、3機能スコープと触覚センサ上に配置した可動板及び被覆チューブを接着し、可動板と触覚センサの鋼球が接触するように位置を調整した。また、先端首振り機能のためにSMA

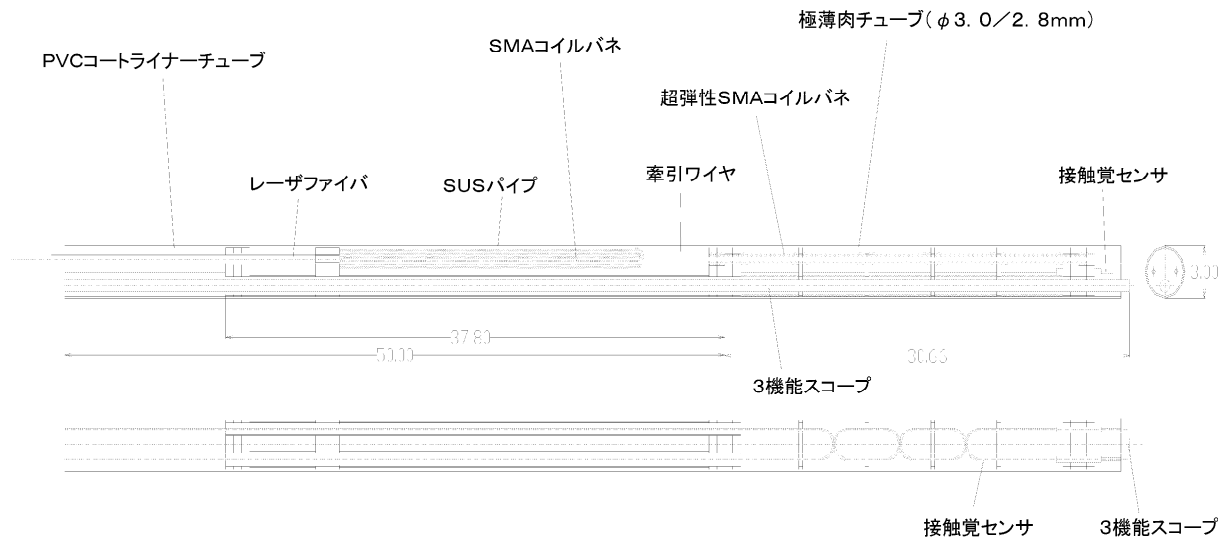


Fig.5.19 光駆動化視覚機構の構造

Table 5.3 作製に用いた主な部材の仕様

部材名	仕様
3機能スコープ	イメージガイド (画素数: 3000、レンズ: 視野角55°) イメージガイド (画素数: 3000、レンズなし) ライトガイド: 30 μm × 約70本(石英製) 有効長さ: 1050mm、有効部外径: 0.8mm
接触覚センサ	光ファイバ径: 155 μm、センサヘッド径: 600 μm
SMAコイルバネ	線径: 100 μm、コイル外径: 300 μm、巻き数: 160 ピッチ: 100 μm、本数: 6
超弾性SMAコイルバネ	線径: 150 μm、コイル外径: 600 μm、巻き数: 55 ピッチ: 350 μm、本数: 1
レーザーファイバ	コア径: 400 μm、クラッド径: 430 μm、NA: 0.37 被覆外径: 730 μm
極薄肉チューブ	外径: 3.0mm / 内径: 2.8mm (加工液への耐性付与のためパレン樹脂をコーティング)

コイルばね及び超弾性SMAコイルばねを用いた。SMAを光加熱するためにコア径：400 μm 、クラッド径：430 μm 、NA：0.37のレーザファイバを用いた。レーザ光源の波長は810nmである。首振り部の被覆には外径：3.0mm / 内径：2.8mmの極薄肉チューブを用いた。

5.5.2 光駆動化視覚機構の評価

作製した光駆動化視覚機構の機能評価を行った。Fig.5.20はマイクロ視覚機構先端を首振り動作させた場合の動作写真であり、首振り角度が 60° であることが判る。また、観察範囲が $0.9\text{mm} \times 15\text{mm}$ であり、微細構造物の観察に対して十分適用可能であることが判る。動作時のレーザ出力は1.5W(CW)である。首振り角精度の評価は、マイクロ視覚機構先端位置を基準とし、先端の変位量をレーザ変位計により測定することにより行った。マイクロ視覚機構は首振り部の長さが30mm、首振り角は 60° である。理論計算により、精度 $\pm 2^\circ$ の仕様を満たすには、先端部の振れが2.1mm以下であればよいことがわかっている。

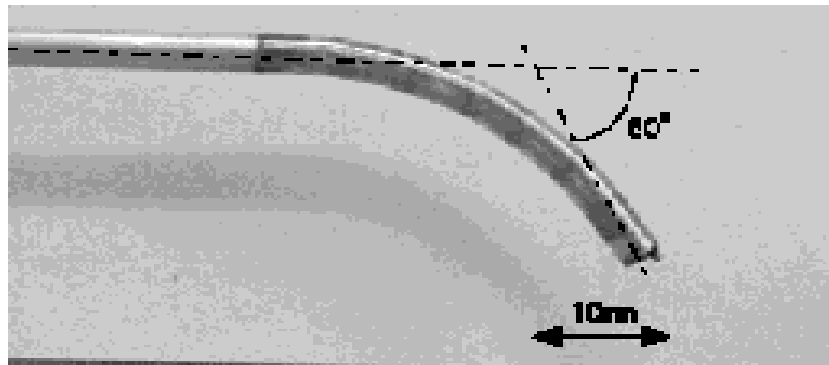


Fig.5.20 マイクロ視覚機構先端動作

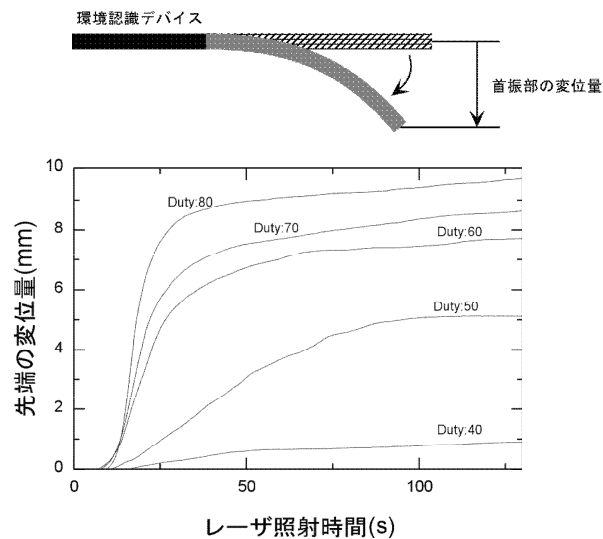


Fig.5.21 レーザ照射時間と首振り部先端の変位量との関係

レーザー照射時間と首振り部先端の変位量との関係を Fig.5.21 に示す。同図はレーザー光強度を 1 W、変調周波数を 10Hz とし、Duty 比を変化させた時の変位量を測定したものである。一方、定常状態における変位量の振れは最大で約 1.5mm であり、首振り角精度 $\pm 2^\circ$ の範囲内に入りしており、高精度な首振り制御が確認された。接触検知機能の評価結果を Fig.5.22 に示す。

戻り光強度の変化量は、荷重に対してほぼ直線となっている。また、変化量は 10mN 当たり約 4 nW であるため、接触力の検知は十分可能であり実用に適することを確認した。

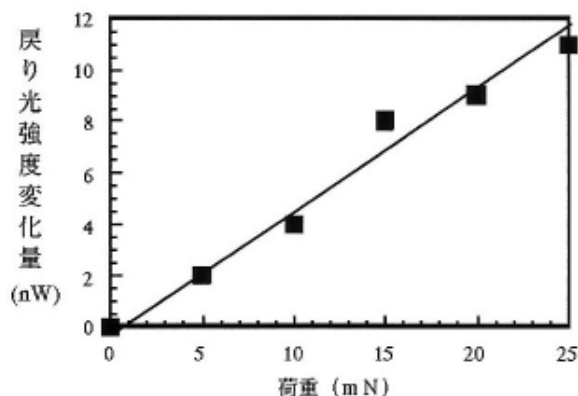


Fig.5.22 接触検知機能の評価結果

5.6 具体的微細構造サンプルを用いたマイクロ視覚機構の機能検証

本マイクロ視覚機構が、汎用性があり、実用に適し、広く応用可能であることを検証するために、具体的な観察対象物を用いてその機能検証を行った。観察対象物については 5.4 で述べた株式会社安川電機・セイコーインスツルメンツ株式会社が作製したサンプル品(穴加工品、歯車型加工品)を用いて行った。

5.6.1 微細加工物の外観観察

直径 600 μm の歯型を観察した場合の画像を Fig.5.23 に示す。遠視野画像による歯型の全体観察、及び顕微観察画像による部分観察により、微細構造物の顕微観察が可能であることを確認した。これについては、例えば電子顕微鏡内に導入し、拡大観察を行うという用途に使用することが可能である。

5.6.2 微細加工穴の寸法計測

顕微観察機能による軸穴 (0.3mm) の観察画像を Fig.5.24 に示す。軸穴の輪郭の検出が可能であり、またクロスカーソルを目視にてエッジに合わせ、座標を取得できることを確認した。



(顕微画像)

(遠視野画像)

Fig. 5.23 歯型 (直径 $600\mu\text{m}$) の観察画像

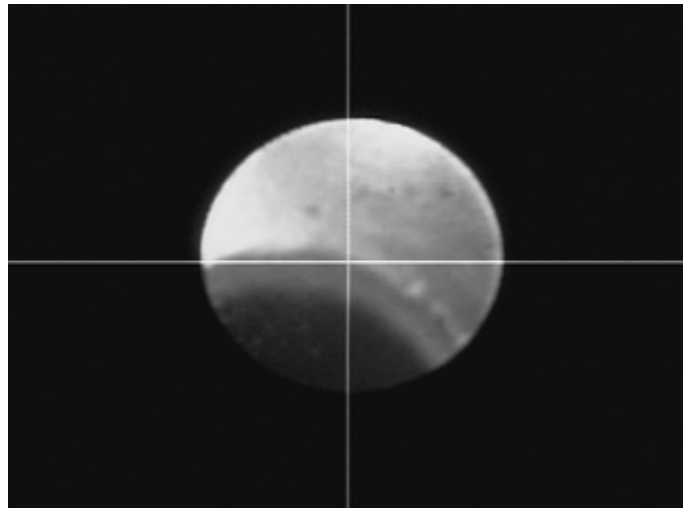


Fig. 5.24 軸穴 ($\phi 0.3\text{mm}$) の観察画

(iv) テスト穴と基準点 (軸穴中心) 間の設定距離との誤差の検査

以下の計測フローによりテスト穴と基準点 (軸穴中心) 間の距離測定を行った。

- ・ 画像観察機能 (遠視野画像) によりテスト穴を探す
- ・ 顕微観察機能にてクロスカーソルをテスト穴の中心に合わせる
- ・ ステージ座標を取得
- ・ 画像観察機能 (遠視野画像) にて軸穴を探す
- ・ 顕微観察機能にてクロスカーソルを穴のエッジに合わせる
- ・ ステージ座標を取得
- ・ 前記の繰り返しにより 5 点の座標を取得する
- ・ 得られた座標から円を近似し中心座標を求める
- ・ テスト穴の中心座標及び軸穴の中心座標から中心間距離を算出する

測定の結果得られた軸穴の円周座標を Table 5.4 に、テスト穴の中心座標を Table 5.5 に示す。次に、軸穴円周上の5点中の任意の3点から得られた、軸穴の中心座標と半径を Table 5.6 に示す。さらに、Table の平均値を使用して求めた軸穴中心とモニタ穴中心までの距離を Table 5.7 に示す。以上の結果より、テスト穴と基準点（軸穴中心）間の距離測定が可能であることを確認した。

Table 5.4 軸穴の円周座標

軸穴(円周上点)測定結果			
1回目		2回目	
X (μm)	Y (μm)	X (μm)	Y (μm)
-6860.00	-5910.81	-6920.00	-5910.80
-6860.00	-6190.81	-6970.01	-6060.81
-6610.00	-6040.81	-6870.01	-6190.81
-6660.00	-5930.80	-6670.01	-6120.81
-6680.01	-6190.08	-6689.95	-5920.81

Table 5.5 テスト穴の中心座標

加工テスト穴(中心)測定結果			
1回目		2回目	
X (μm)	Y (μm)	X (μm)	Y (μm)
-7720.01	-5190.80	-7070.00	-7310.80

Table 5.6 軸穴円周上の任意の3点より得られた中心座標と半径

	1回目			2回目		
	Cx(μm)	Cy(μm)	r(μm)	Cx(μm)	Cy(μm)	r(μm)
	-6774.00	-6050.81	164.31	-6800.06	-6033.54	172.13
	-6772.99	-6050.81	164.83	-6808.03	-6030.89	164.72
	-6770.57	-6050.75	166.08	-6810.32	-6030.13	162.61
	-6772.75	-6048.42	162.93	-6812.06	-6035.67	165.61
	-6775.73	-6054.13	166.26	-6810.57	-6035.41	166.38
	-6773.16	-6052.48	166.17	-6810.50	-6033.82	165.24
	-6774.86	-6049.37	165.08	-6810.10	-6041.26	161.10
	-6770.55	-6056.56	161.32	-6806.24	-6038.30	165.31
	-6770.56	-6052.68	164.56	-6808.57	-6033.63	163.71
	-6780.46	-6051.92	170.82	-6812.63	-6034.04	166.95
平均値	-6773.56	-6051.79	165.24	-6808.91	-6034.67	165.37
標準偏差	3.02	2.35	2.49	3.63	3.28	2.95

Table 5.7 軸穴中心とモニタ穴中心までの距離

1 回目	1279.49 μm
2 回目	1302.57 μm

5.7 まとめ

センサ、アクチュエータを集積化した視覚機構の開発を行い、次の結果を得た。

- (1) 顕微観察、寸法計測機能を有するマイクロ視覚機構をの設計・試作・評価し、遠視野・近視野の画像観察、先端の60°(全角)首振り動作、接触検知分解能10mNをもつ触覚センサを利用した寸法計測機能を確認した。
- (2) 立体視機能を有するマイクロ視覚機構をの設計・試作・評価し、実際に想定される観察対象物を用いて、広い観察範囲と立体視機能を確認した。
- (3) さらに、先端首振り機構を光駆動化し、信号の入出力・エネルギー供給全てを光化したマイクロ視覚機構を開発し、その機能確認を通じてより安全で高機能なシステムを実現した。

本システムの実現により、従来では観察が出来なかった狭隘領域において、高機能な視覚機能(視差可変機構による立体感を調整可能な立体視、視方向変化による広範囲な視野、拡大顕微観察)を提供することが可能となった。また信号・エネルギーの光化により、前記観察が非常に厳しい領域(水中、電磁干渉下、放射線下、爆発雰囲気等)となり、これまで観察が不可能であった領域でも、あたかも人間がそこに存在するように視覚情報を得ることが出来るようになった。このように多機能なデバイスを集積化することにより、今まででは得られないと考えられていた環境下の情報が取得可能となり、非常に幅の広い応用領域が開拓されると信じる。

第6章 結論

6.1 結論

第1章では、マイクロマシン技術の重要な要素技術である光ファイバセンシング、光アクチュエータ、高密度レーザーエネルギー伝送ファイバ、ファイバスコープについて従来技術を述べ、さらに解決すべき重要技術課題を抽出することにより、研究の方向性を明確にし、応用・実用から要請される性能実現のために、基本的な全体設計の指針を示した。

第2章では、マイクロシステムのみならず極微小な領域(例えば血管内等)に適用することが可能な光ファイバ圧力センサを考案・試作し、その特性を評価することによりマイクロ領域への応用の可能性を評価した。その結果、感度 $0.19 \mu\text{W}/\text{MPa}$ の良好な圧力応答特性を得た。さらにセンサヘッドの小型化を検討し、新規構造を考案・試作・評価した。その結果、感度 $0.19 \mu\text{W}/\text{MPa}$ の良好な圧力応答特性を得た。これを冠動脈用バルーンカテーテルに適用し、バルーン内圧を世界で初めて測定した。そして触覚センサとコンタクトスコープ、微動ステージを組み合わせることにより被観察物のサイズ測定も可能となる微細構造体の測定システムを提案し、接触検知分解能 10mN 以下の良好な触覚センサと分解能 $6 \mu\text{m}$ の顕微観察機構を得た。

第3章では、非常に小さな部品や狭い領域を人間があたかも小さくなって、その場で観察しているような人工現実感をもつ視覚機構を実現すべくバルーンを用いた光駆動アクチュエータの開発と立体視機構への応用を検討し、 $0^\circ \sim 5^\circ$ の輻輳角変化と良好な立体画像を得た。さらに広い観察領域をもつ視覚機構を得るために、スコープ先端に屈曲機構を構成することを検討し、形状記憶合金アクチュエータへのステップエッチドファイバによる光照射、加熱方法を確立し、レーザー駆動により 60° の先端首振り動作を実現した。

第4章では、これまで述べてきたセンサ・アクチュエータ用ファイバに要求される諸特性(曲げ損失が発生しないこと・広帯域光を伝搬できること・高NAでハイパワーの光源光を伝搬できること・広帯域光を伝搬できること等)を満足させるべく、新規のファイバ(フォトリソニック結晶ファイバ)を検討し、その作製方法・光学特性とその応用・信頼性、応用可能性を明らかにした。

第5章では、これまでに得られた要素技術を集積化して、マイクロ視覚機構(環境認識デバイス)を考案・検討した。まず顕微観察、寸法計測機能を有するマイクロ視覚機構をの設計・試作・評価し、遠視野・近視野の画像観察、先端の 60° (全角)首振り動作、接触検知分解能 10mN をもつ触覚センサを利用した寸法計測機能を確認した。次に立体視機能を有するマイクロ視覚機構をの設計・試作・評価し、実際に想定される観察対象物を用いて、広い観察範囲と立体視機能を確認した。さらに先端首振り機構を光駆動化し、信号の入出力・エネルギー供給全てを光化したマイクロ視覚機構を開発し、その機能確認を通じてより安全で高機能なシステムを実現した。これによりマイ

クロ視覚機構は狭隘箇所において、物体の観察や検査等の視覚機能を満足し極細径であるがゆえ、産業用・医療用に広く応用可能であることが実証された。

6.2 今後の課題

今後は更なる安全性・信頼性を確立すべく、各機能の繰り返し特性、寿命試験等を継続して行う必要がある。また本論文では詳しくふれなかったが、マイクロ視覚機構を動作させるための電装システム、制御システムは本体に比べ著しく大きなものになっている。そこで各種光源・検出器、画像検出器（CCDカメラ）、制御回路、制御用コンピュータ等を一体化して小型化し、汎用性の高いものにする必要がある。

謝辞

本論文を作成するにあたり、九州工業大学大学院工学研究院先端機能システム工学研究系本田崇教授には、研究全般にわたり多大なご指導を賜りましたことを心より深謝いたします。また、同大学山崎二郎特任教授、同大学大学院工学研究院電気電子工学研究系水波徹教授、同大学大学院工学研究院先端機能システム工学研究系脇迫仁准教授には、有益な助言とご配慮を賜りましたことを心より深謝いたします。

また本研究の機会を与えて頂き、ご指導、ご助言をいただきました三菱電線工業株式会社の西村泰幸前副社長、山口俊一郎技術本部長、前田力元中央研究所長、今井敬祐元中央研究所長、橘忠男元基礎技術研究部長、鈴木光一元総合研究所長、伊藤弘孝元総合研究所長、田中紘幸元情報通信・フォトニクス研究所長、藤田盛行元情報通信・フォトニクス研究所長、内海厚元医療機器部専門部長、大川光司元伊丹製作所品質保証室長に厚く御礼申し上げます。

この他有意義な議論を提供していただきました株式会社安川電機の椛島武文氏、中村裕司氏、松尾智弘氏、株式会社セイコーインスツルメンツの古田一吉氏、須田研究員、三菱電線工業株式会社の前田重雄氏、杉原正久氏、宮津信氏、植田益充氏、細谷勝宣氏、小橋実紀氏、阿部一博氏、村山学氏、藤本俊吾氏に厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」及び文部科学省科学技術振興調整費による開発課題「ブロードバンド光シンセサイザの開発」において得られたものです。

最後に、社会人博士後期課程への入学を快諾し、終始温かく見守り、時間を与えてくれた、妻富子、本論文の完成に向けて応援をしてくれた長男暁、次男翔に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 石川重太, 計装(7), p.50(1979)
- [2] 中島 巖, 光技術, Vol.1, p.31(1981)
- [3] 久間和生 他, 光技術, Vol.1, p.26(1981)
- [4] 井利英二, 三菱電線工業時報, No.75, p.63(1988)
- [5] 高岡元幸 他, 第30回応用物理関係連合講演会予稿集, 7p-Z-4(1983)
- [6] 谷内哲夫 他, 電気学会光量子デバイス研究会資料, OQD-82-65(1982)
- [7] 芳野俊彦 他, 第30回応用物理関係連合講演会, 6p-X-8(1983)
- [8] 大石泰文 他, 第32回応用物理関係連合講演会予稿集, 30a-N-5(1985)
- [9] 佐藤留美子 他, 第32回応用物理関係連合講演会予稿集, 29a-A-12(1985)
- [10] G.B.Hocker, Appl.Opt., Vol.18, p.1445(1979)
- [11] 吉村共之 他, 電子通信学会技術研究報告, Vol.82, OQE-82-4(1982)
- [12] 小野修幸, 光技術, Vol.12(9), p.46(1992)
- [13] 田中庸介, 光技術, Vol.12(9), p.38(1992)
- [14] W.B.Spillman Jr, Opt.Lett., Vol.7, p.388(1982)
- [15] M.J.Jeudy, Opt.Laser Tech., Vol.8, p.117(1976)
- [16] 榎 光一, O plus E (84), p.74(1986)
- [17] G.Beheim et al., Rev.Sci.Instrum., Vol.58(9), p.1655(1987)
- [18] K.E.B.Thornton et al., Sens.Actuators A, Vol.24(1), p.15(1990)
- [19] J.A.Dziuban et al., Sens.Actuators A, Vol.32, p.628(1992)
- [20] F.Fritsch, Opt.Lett., Vol.20, p.915(1981)
- [21] 田井修市, 信学光量エレクトロニクス研究会資料, MW81-81, p.55(1981)
- [22] C.Over' n, Proc.Int.Conf.Opt.Tech.in Process Control, p.67(1983)
- [23] A.D.Kersey, Electron.Lett., Vol.15, p.559(1982)
- [24] H.Inada, Electron.Lett., Vol.18, p.749(1979)
- [25] 久保田敏弘 他, 第30回応用物理関係連合講演会予稿集, 6p-X-3(1985)
- [26] T.Takeo, Jpn.J.Appl.Phys., Vol.21, p.1509(1982)
- [27] 丸山英樹 他, 電子情報通信学会春季全国大会予稿集, C-598(1988)
- [28] M.J.Milano et al., Anal.Chem., Vol.49, p.555(1977)
- [29] A.Sharma et al., Appl.Spectrosc., Vol.42(6), p.1009(1988)
- [30] M.R.Surgi, Opt.Fiber Sens.1988 Tech. Dig. Ser., Vol.2(2), p.349(1988)
- [31] R.A.Lieberman et al., Opt.Fiber Sens.1988 Tech. Dig. Ser., Vol.2(2), p.346(1988)

- [32] M-R.Dang et al., 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-90(153-162), p.19(1990)
- [33] E.R.Carraway et al., Anal.Chem., Vol.63(4), p.337(1991)
- [34] J.F.Alder et al., Analyst, Vol.112(8), p.1191(1987)
- [35] K.Suzuki et al., Anal. Chim. Acta., Vol.237(1), p.155(1990)
- [36] 宮崎京太 他, 分析化学, Vol.39(11), p.717(1990)
- [37] D.C.Ashworth et al., Anal. Chim. Acta., Vol.213(1/2), p.251(1988)
- [38] K.Suzuki et al., Anal. Chem., Vol.61(4), p.382(1989)
- [39] S.E.Eckert-Tilotta et al., Appl. Spectrosc., Vol.45(3), p.491(1991)
- [40] J.J.Peterson et al., Anal. Chem., Vol.52, p.864(1980)
- [41] L.A.Saari et al., Anal. Chem., Vol.54, p.821(1982)
- [42] G.F.Kirkbright, Analyst, Vol.109, p.1025(1984)
- [43] R.Narayanaswamy et al., Anal. Chim. Acta., Vol.189(2), p.365(1986)
- [44] A.M.Scheggi et al., Opt. Acta., Vol.33(12), p.1587(1986)
- [45] J.W.Attridge et al., J. Phys. E, Vol.20(5), p.548(1987)
- [46] C.Munkholm et al., Anal. Chem., Vol.58(7), p.1427(1986)
- [47] Y.Kawabata et al., Anal. Sci., Vol.3(1), p.7(1987)
- [48] H.E.Posch et al., Fresenius Z Anal.Chem., Vol.334(2), p.162(1989)
- [49] S.H.Alabbas et al., Anal. Proc., Vol.26(11), p.373(1989)
- [50] M.A.Northrup et al., US DOE Rep., p.11(1990)
- [51] B.J.Tromberg et al., Appl. Spectrosc., Vol.38(1), p.38(1984)
- [52] T.Vo-Dinh et al., Appl. Spectrosc., Vol.44(1), p.128(1990)
- [53] M.A.Arnold, Anal. Chem., Vol.57(2), p.565(1985)
- [54] C.Schelp et al., Anal. Chim. Acta., Vol.255(2), p.223(1991)
- [55] 田畑勝好 他, 日本臨床検査自動化学会誌, Vol.8, p.80(1983)
- [56] B.P.H.Schaffar et al., Biosensors, Vol.5(2), p.137(1990)
- [57] 宮崎修一 他, 日本金属学会会報, Vol.24(1), p.33(1985)
- [58] H.Tamura et al., Proc. Int. Conf. Martensitic Transform1986, p.736(1987)
- [59] 川口 稔 他, 日本機械学会論文集A, Vol.55(515), p.1657(1989)
- [60] 広瀬茂男 他, 日本ロボット学会誌, Vol.5(2), p.3(1987)
- [61] (財)大阪科学技術センター, 形状記憶合金用途開発委員会, 形状記憶合金とその使い方(1987)
- [62] 栗林勝利, システムと制御, Vol.27(9), p.589(1983)
- [63] 田中好文 他, 日本機械学会論文集C, Vol.58(545), p.138(1992)
- [64] 岡本嗣男 他, 農業機械学会誌, Vol.53(5), p.85(1991)

- [65] 広瀬茂男 他, 日本ロボット学会誌, Vol.4(2), p.15(1986)
- [66] 木下敏治 他, Robot, Vol.85, p.70(1992)
- [67] 橋本 稔, 機能材料, Vol.11(6), p.15(1991)
- [68] 斉藤春雄 他, 日本機械学会論文集C, Vol.58(545), p.133(1992)
- [69] 松島 他, 第5回ロボット工学学会学術講演会予稿集, p.87(1984)
- [70] 鈴木雄一, 金属, Vol.59(8), p.56(1989)
- [71] 広瀬茂男 他, 日本ロボット学会誌, Vol.4(6), p.28(1986)
- [72] 中里裕一 他, 日本機械学会AVDシンポジウム講演論文集, p.83(1992)
- [73] K.Ikuta, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation-90, p.2156(1990)
- [74] 高山修一 他, 日本機械学会第2回ロボット工学シンポジウム講演論文集, p.109(1992)
- [75] 郭 書祥 他, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.869(1992)
- [76] 手島恒男 他, 日本金属学会秋期大会シンポジウム講演概要, p.87(1991)
- [77] 手塚考治 他, 日本機械学会山梨地方講演会講演概要集, p.45(1989)
- [78] 宮崎修一 他, 日本金属学会秋期大会シンポジウム講演概要, p.90(1991)
- [79] 生田幸士 他, 日本機械学会第2回ロボット工学シンポジウム部門学術講演論文集, p.79(1990)
- [80] J.D.Busch et al., Materials Science Forum, Vol.56(58), p.729(1990)
- [81] Y.Furuya et al., Mat. Trans. JIM, Vol.31, p.504(1990)
- [82] 関口行雄, 工業材料, Vol.31(13), p.105(1983)
- [83] 柏木邦宏 他, 工業材料, Vol.33(6), p.69(1985)
- [84] J.D.Bucsh, Proc.IEEE MEMS-90, p.40(1980)
- [85] H.Mizoguchi et al., Proc.IEEE MEMS-92, p.31(1992)
- [86] J.O.Gurney, Journal of D.D.M.C., Vol.160(3), p.17(1986)
- [87] T.Lammerink, Proc.IEEE MEMS-91, p.160(1991)
- [88] M.Johnson, Optical Society of America, Vol.11(9), p.587(1986)
- [89] R.M.A.Fatah, Sens.Actuators A, Vol.33, p.229(1992)
- [90] 佐藤俊一 他, 日本機械学会誌, Vol.94(872), p.12(1991)
- [91] 井上 薫 他, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p.889(1992)
- [92] 入江正浩, 機能材料, Vol.11(1), p.31(1991)
- [93] 入江正浩, 日本ロボット学会誌, Vol.61(12), p.813(1988)
- [94] R.S.Taylor, J. Appl. Phys., Vol.66(9), p.4035(1989)
- [95] D.L.Singleton, IEEE J.Quantum Electron., Vol.QE-23(10), p.1772(1987)
- [96] R.S.Taylor, Appl. Opt., Vol.27(15), p.3124(1988)
- [97] R.S.Taylor, J. Appl. Phys., Vol.65(1), p.22(1989)
- [98] 岡田 他, 第9回日本レーザー医学会予稿集, K-63(1988)

- [99] 橋新 他, 第9回日本レーザー医学会予稿集, K-62(1988)
- [100] 栗原 他, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.87(175), OQE87-66(1987)
- [101] 佐竹 他, レーザーの最新技術「発振器・光学系とその評価」, p.152, レーザー熱加工技術研究会編(1991)
- [102] 佐藤, 第2回高出力ファイバー研究委員会資料(1991)
- [103] 西井, 第1回高出力ファイバー研究委員会資料(1990)
- [104] 菅田 他, 平成2年レーザー学会学術講演会第10回年次大会予稿集, 26a2(1990)
- [105] J.A.Harrington, Opt Lett. Vol.15(10), p.541(1990)
- [106] 阿部 他, 電子情報通信学会春季全国大会予稿集, C-334(1991)
- [107] 橋新 他, 第11回日本レーザー医学会大会予稿集, No.120(1990)
- [108] 三浦 他, レーザー研究, 第16巻, 第6号, p.21(1988)
- [109] H.M.Presby et al., Electron. Lett., Vol.28(6), p.582(1992)
- [110] A.Kotsas, Opt. Quantum Electron, Vol.23(3), p.362(1991)
- [111] H.M.Presby, J. Lightwave Technol., Vol.7(2), p274(1989)
- [112] 三菱電線工業加納, ファイバー光学
- [113] 鶴岡 他, 特公開 昭63-294508 (出願 1987) オシロウ
- [114] 矢島 他, 特公開 昭63-294509 (出願 1987) オシロウ
- [115] 鈴森 他, 特公開 昭64-26813 (出願 1987) 東芝
- [116] 清水 他, 特公開 昭64-19319 (出願 1987) オシロウ
- [117] 佐々木 他, 特公開 昭63-294510 (出願 1987) オシロウ
- [118] 服部 他, 特公開 平1-112216 (出願 1987) オシロウ
- [119] 服部 他, 特公開 昭63-262613 (出願 1987) オシロウ
- [120] H.I.Bjelkhabr et al., SPIE Vol.1136, Holographic Optics, p.186(1989)
- [121] 内田 他, 第5回心臓血管内視鏡レーザー形成術研究会予稿集, p.13(1991)
- [122] 渡辺 他, 実公平2-44722 (出願 1986) 町田製作所
- [123] 村田 他, 特公昭63-277028 (出願 1987) 東芝
- [124] 渡辺, 実公昭63-11005 (出願 1986) 町田製作所
- [125] 大橋, 特公平2-53 (出願 1981) オシロウ
- [126] 細田, 特公平2-3970 (出願 1987) オシロウ
- [127] 斉藤, 特公昭63-242232 (出願 1987) 東芝
- [128] 山口他, Costrotrol Endosc, Vol.27(10), p.1951(1985)
- [129] 園部, 特公平2-296209 (出願 1989) オシロウ
- [130] 伊藤他, 三菱電線工業時報, (76), p67(1988)
- [131] 日本機械学会編, 機械工学便覧, 丸善, 1991, p.A4-62

- [132] O.Tabata et al., Sens. Actuators A, Vol.34, p.51(1992)
- [133] 前田他, 機械の研究, Vol.46(1), p.90(1994)
- [134] 下条他, 日本産業技術振興協会技術資料, 136, p.51(1983)
- [135] 下条, ハイオクニスム学会誌, 17(3), p.148(1993)
- [136] 佐々木, 日経エレクトロニクス, 466, p.102(1995)
- [137] 東保他, 富山県工業技術センター研究報告, p.6(1992)
- [138] 岡部他, 日本産業技術振興協会技術資料, p141,p.20(1984)
- [139] K. Park et al., Conf. Proc. Rob., 4, p.10(1986)
- [140] 中尾他, 日本機械学会論文集(C編), 57, p.535(1991)
- [141] 川嶋, Robot, 67, p.86(1989)
- [142] L.Tenerz et al., Transducer's87, p.312(1987)
- [143] 服部, 人工現実感の世界, 工業調査会, 1991
- [144] 辻他, 医器学, 65(1), p32(1995)
- [145] K. Kaneda et al., SPIE Vol.1893 Optical Fibers in Medicine, p.43(1993)
- [146] 杉原他, 三菱電線工業時報, (87), p.70(1994)
- [147] S. Maeda et al., Proc.IEEE MEMS Workshop, p.290(1996)
- [148] 井上, OPTRONICS, 166(10), p.147(1995)
- [149] 磯野, レビジョン学会誌, 45(4), p.446(1991)
- [150] 鈴木, 実用形状記憶合金, 工業調査会, p.145(1987)
- [151] 一色, 伝熱工学, 森北出版, p.13(1985)
- [152] 清水他, センサ技術, 3(12), p.35(1983)
- [153] E. Yablonoitch, J. Opt. Soc. Am. B, Vol.10, p.283(1993)
- [154] T. A. Birks et al., Electron. Lett., Vol.31, p.1941(1995)
- [155] J. C. Knight et al., postdeadline paper PD3 at OFC1996(1996)
- [156] J. Broeng et al., Opt. Commun., Vol.156, p.240(1997)
- [157] J. C. Knight 他, Science, Vol.282, p.1476(1998)
- [158] T. M. Monro et al., J. Lightwave Technol., Vol.17, p.1093(1999)
- [159] B. J. Eggleton et al., Opt. Lett., Vol.24, p.1460(1999)
- [160] J. A. West et al., ECOC2001, Th. A. 2.2(2001)
- [161] T. Hasegawa et al., OFC2001, PD5(2001)
- [162] J. Broeng et al., Opt. Fib. Tech., Vol.5, p.305(1999)
- [163] 内海厚, レザ-研究, Vol.12, p.677(1984)
- [164] H. Hayami et al., Opt. Lett., Vol.21, p.1547(1996)
- [165] T. A. Birks et al., Opt. Lett., Vol.22, p.961(1997)

- [166] J. Broeng et al., DOPS-NYT 2-2000(2000)
- [167] T. A. Birks et al., OFC 1999, p.114(1999)
- [168] T. P. White et al., Opt. Lett., Vol.26, p.1660(2001)
- [169] T. Sørensen et al., Electron Lett., Vol.37, p.287(2001)
- [170] A. Bjarklev et al., ECOC2001 We.L.2.4(2001)
- [171] J. K. Ranka et al., Opt. Lett., Vol.25, p.25(2000)
- [172] H. Kubota et al., CLEO2001, CPD3(2001)
- [173] A. Ferrando et al., Opt. Lett., Vol.25, p.790(2000)
- [174] 川西他, 信学会 2000 年秋大会, B-10-153(2000)
- [175] K. Suzuki et al., Electron Lett., Vol.37, p.1399(2001)
- [176] 木下他, 電子情報通信学会総合大会, CS-12-10(2005)
- [177] 八若他, 信学会 2002 年秋大会, C-3-49(2002)
- [178] H. Inaba et al., IEEE Journal of Quantum Electronics., Vol.40, p.929(2004)
- [179] http://www.aist.go.jp/aist_i/press_release/pr2005/pr20050323/pr20050323.html
- [180] M. S. Khan et al., OECC2005, 6D4-7(2005)
- [181] D. Bonaccini et al., Proc.SPIE, Vol.4494, p.276(2000)
- [182] <http://merope.mtk.nao.ac.jp/NewAO/documents>.
- [183] 三菱電線工業時報, 100, p.120(2003)
- [184] 川西他, 信学会 2000 年秋大会, C-3-48(2000)
- [185] K. Suzuki et al., Electron. Lett., Vol.37, p.1399(2001)
- [186] IEC60874-1
- [187] Telcordia GR-20-CORE, R4-28
- [188] Telcordia GR-20-CORE, R4-32

參考論文

- 1 . Photonic Crystal Fibers and Their Applications
IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.4 (2009年11月)
O. Tohyama, S. Yamaguchi 公表予定
(原稿枚数6枚)
- 2 . フォトニック結晶ファイバの製作技術
レーザー研究第34巻第1号 pp.7-11 (2006年1月)
遠山修、伊藤秀明、山口俊一郎
- 3 . 高品位非線形ファイバ
オプトロニクス第24巻第10号 pp.28-31 (2005年10月)
遠山修
- 4 . Phase Locking of a Continuous-Wave Optical Parametric Oscillator to an
Optical Frequency Comb for Optical Frequency Synthesis
IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.40, No.7, pp.929-936 (2005年10月)
H. Inaba, T. Ikegami, F.-L. Hong, A. Onae, Y. Koga, T.R. Schibli, K. Minoshima,
H. Matsumoto, S. Yamadori, O. Tohyama, S. Yamaguchi
- 5 . TEMPERATURE CYCLING AND TENSILE PROOF OF PHOTONIC
CRYSTAL FIBER
Proceedings of 29th European Conference on Optical Communication and 14th
International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber
Communication (ECOC-IOOC2003),
We2.7.2 (2003年9月)
O. Tohyama, M. Tanaka, T. Kinoshita, S. Yamaguchi, H. Kubota, S.
Kawanishi
- 6 . マイクロ検査技術の開発
電気学会論文誌E第122巻第2号 pp.59-66 (2002年2月)
遠山修、前田重雄、阿部一博、村山学
- 7 . Shape memory alloy actuators and their reliability
Proceedings of SPIE Vol.4592, pp.111-118 (2001年12月)
O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama
- 8 . Microfactory System for Processing and Assembling
The 7th International Micromachine Symposium, pp.155-172 (2001年10月)
K. Furuta, M. Suda, T. Harada, H. Terashima, Y. Naruse, T. Matsuo, E. Yonezawa,
O. Tohyama

- 9 . Visual Inspection Mechanism using Fiber-Optic Sensors and Actuators
 Proceedings of International Conference on Optical MEMS and
 Their Applications (Optical MEMS 2001), P-15, pp.115-116 (2001 年 9 月)
 O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama
- 1 0 . Application and reliability of shape memory alloy microcoil actuators
 Proceedings of The International Conference on Electrical
 Engineering 2001 (ICEE2001) ,pp.1619-1622 (2001 年 7 月)
 O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama
- 1 1 . VISUAL INSPECTION MECHANISM FOR MICROFACTORY
 Proceedings of International Workshop on Microfactories 2000
 (IWMF'2000), pp.23-26 (2000 年 10 月)
 O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama
- 1 2 . Fiber-Optic Sensors and Actuators for Inspection Mechanism in Microfactory
 Proceedings of The International Conference on Electrical
 Engineering 2000 (ICEE2K) ,B-2-4, (2000 年 7 月)
 O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama
- 1 3 . Environmental recognition devices
 Sensors & Actuators: B Chemical, Vol. B64, No.1-3, pp.198-204 (2000 年 5 月)
 O. Tohyama, S. Maeda
- 1 4 . Fiber-Optic Sensors and Actuators for Environmental Recognition Devices
 IEICE Transaction on Electronics, Vol. E83-C, No.3, pp.475-480 (2000 年 3 月)
 O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama
- 1 5 . Environmental Recognition Device using Fiberscopes
 Proceedings of The Fifth International Micromachine Symposium,
 pp.211-216 (1999 年 10 月)
 O. Tohyama
- 1 6 . Environmental Recognition Devices
 Proceedings of The 10th International Conference on Solid-State
 Sensors and Actuators (TRANSDUCERS '99), 3C3.4,
 pp.1050-1053 (1999 年 6 月)
 O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama, T. Tachibana
- 1 7 . Fiberscope-Type Environmental Recognition Devices
 Proceedings of The 13th International Conference on Optical Fiber
 Sensors (OFS-13), p2-25, pp.506-509 (1999 年 4 月)
 O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama, T. Tachibana

- 1 8 . Fiber-Optic Tactile Microsensor for Detecting the Position of the Tip of a Fiberscope
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 5, No.1, pp.115-118 (1999年2月)
O. Tohyama, S. Maeda, H. Itoh
- 1 9 . Environmental Recognition Devices for Microfactory
Proceedings of International Workshop on Microfactories '98 (IWFMF'98), pp.221-226 (1998年12月)
O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama, T. Tachibana
- 2 0 . A Fiber-optic Tactile Microsensor for Detection of Tip of a Fiberscope
Proceedings of 1998 IEEE/LEOS Summer Topical Meeting on Optical MEMS, TuB2, pp.41-42 (1998年7月)
O. Tohyama, S. Maeda, H. Itoh
- 2 1 . 環境認識機構
機械と工具第42巻第6号 pp.115-118 (1998年6月)
遠山修
- 2 2 . A Fiber-optic Pressure Microsensor for Biomedical Applications
Sensors & Actuators: A Physical, Vol. A66, No.1-3, pp.150-154 (1998年4月)
O. Tohyama, M. Kohashi, M. Sugihara, H. Itoh
- 2 3 . A Fiber-optic Pressure Microsensor for Biomedical Applications
Proceedings of The 9th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (TRANSDUCERS'97), 4D3.11P, pp.1489-1492 (1997年6月)
O. Tohyama, M. Kohashi, M. Fukui, H. Itoh
- 2 4 . 「立体視認識デバイス」のめざすもの
エレクトロニクス第42巻第4号 pp.28-31 (1997年4月)
遠山修
- 2 5 . Micro Actuator with Shape Memory Alloy (SMA) Coil Spring and their Application to Active Fiberscopes
IEICE Trans. Electron., Vol.E80-C, No.2, pp.226-231 (1997年2月)
S. Maeda, O. Tohyama, H. Ito
- 2 6 . Fiberscope-type Environmental monitoring devices with Binocular Parallax Accommodation Mechanism for Stereoscopic Observation
Proceedings of The 10th IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'97), pp.400-405 (1997年1月)
K. Hosotani, S. Maeda, O. Tohyama, H. Ito

- 2 7 . A Fiber-optic Silicon Pressure Sensor for Ultra-thin catheters
Sensors & Actuators: A Physical, Vol. A54, No.1, pp.622-625 (1996年8月)
O. Tohyama, M. Kohashi, K. Yamamoto, H. Itoh
- 2 8 . Active Endoscope with SMA(Shape Memory Alloy)Coil Springs
Proceedings of The 9th IEEE International Workshop on Micro
Electro Mechanical Systems (MEMS'96), pp.290-295 (1996年2月)
S. Maeda, K. Abe, K. Yamamoto, O. Tohyama, H. Ito
- 2 9 . Environmental Recognition Device of Fiberscope Type
The First International Micromachine Symposium, 2-13, pp.135
-138 (1995年11月)
O. Tohyama, S. Maeda, K. Yamamoto, H. Itoh, M. Fukui , A. Utsumi
- 3 0 . 光ファイバマイクロ圧力センサの開発
日本電子材料技術協会会報第27巻 pp.25-28 (1995年7月)
遠山修 , 小橋実紀 , 植田益充
- 3 1 . A Fiber-optic Silicon Pressure Sensor for Ultra-thin catheters
Proceedings of The 8th International Conference on Solid-State
Sensors and Actuators (TRANSDUCER'95), 386-PC9, pp.596-599 (1995年6月)
O. Tohyama, M. Kohashi, K. Yamamoto, H. Itoh