

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業(平成23年度第3次補正予算事業)

「微細・高精度切削加工技術の開発による医療用多機能ガラス電極の実現」

## 研究開発成果等報告書

2013年2月

委託者 東北経済産業局

委託先 財団法人いわて産業振興センター

## 目 次

第1章 研究開発の概要	… 1
1-1 研究開発の背景・研究目的および目標、研究の概要	
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	
1-4 当該研究開発の連絡窓口	
第2章 本論	… 11
2-1 母材への多穴切削加工技術に関する開発	株式会社コニックテクノ
2-2 高精度ガラス熱延伸加工技術に関する開発	檜山工業株式会社
2-3 ガラス金属複合一体化技術に関する開発	株式会社中原光電子研究所
2-4 先端鋭利化に関する開発	株式会社アキタ・アダマンド
2-5 実装技術に関する開発	アダマンド工業株式会社
最終章 全体総括	… 23

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1 研究の背景

近年、脳深部神経細胞を電気・光・で刺激して脳内神経細胞の活性度、神経系情報伝達の仕組みを解明する光遺伝学(Optogenetics)の研究が世界中で活発に行われている。これはパーキンソン病、うつ病、てんかんなどの病気の原因解明およびその治療を行える可能性があり、そのためのツールとして、電気、光さらには薬物も加えた脳深部刺激用電極の実現が望まれている。

しかし現在までのところ、脳神経への電氣的刺激および神経電位の計測には金属電極を埋め込んだガラス電極が用いられ、光学的な刺激には別に用意された光ファイバが使用されており、単機能の電極しかなかった。このため、同一の神経に異なる種類の刺激を与えたり、同時または周期的に複数の刺激を与えたりすることが困難などの課題があった。また、これら電極のほとんどが外国製品であり、用途に応じて構造・寸法を変えた電極を入手するのは非常に困難な状況にあった。

一方、我が国では、金属やガラス・セラミックスの切削加工技術では高い水準を維持しており、光ファイバやレーザの技術においても世界的に高度な技術を有している。ミクロン単位での高精度な加工技術が必要とされる光ファイバコネクタフェルールにおいても同様である。しかし、これらは個別の技術としては優れているものの、これらを統合して前記脳内神経細胞用の電極を作る技術には到っていない。

#### 1-1-2 研究の目的

上記の状況を踏まえ、各種のガラス切削加工技術を超精密・微細な加工技術として統合し、応用範囲拡大を図ることによって、電氣的、光学的、化学的な刺激に対応可能な脳内神経細胞用ガラス電極を実現することが川下製造事業者および電極使用者からの強いニーズとして出されていた。

本研究では切削加工技術を高度化し、1本の電極で電氣的、光学的、化学的刺激を可能とするハイブリッドタイプの多機能ガラス電極を実現することを目的とする。

#### 1-1-3 研究の目標

本研究の目標として、ガラスキャピラリー $\phi 300\mu$ の断面内中心部に1本の金属芯電極、周辺部に4本の細い金属電極、前記電極の周辺部に光ファイバ、流路が複合化されたガラス電極の実現とその光源・制御装置を実現することを目標とする。

従来この種電極は図1-1(a)に示すように、直径数百ミクロン程度の細いロッド状のホウケイ酸ガラスや石英ガラスに金属電極を埋め込んで作られていた。全長100mm程度で先端部は針のように鋭利になっている。

本研究では図1-1(b)に示すように類似の構造体の中に光ファイバと流路を含めて一体化することを狙う。

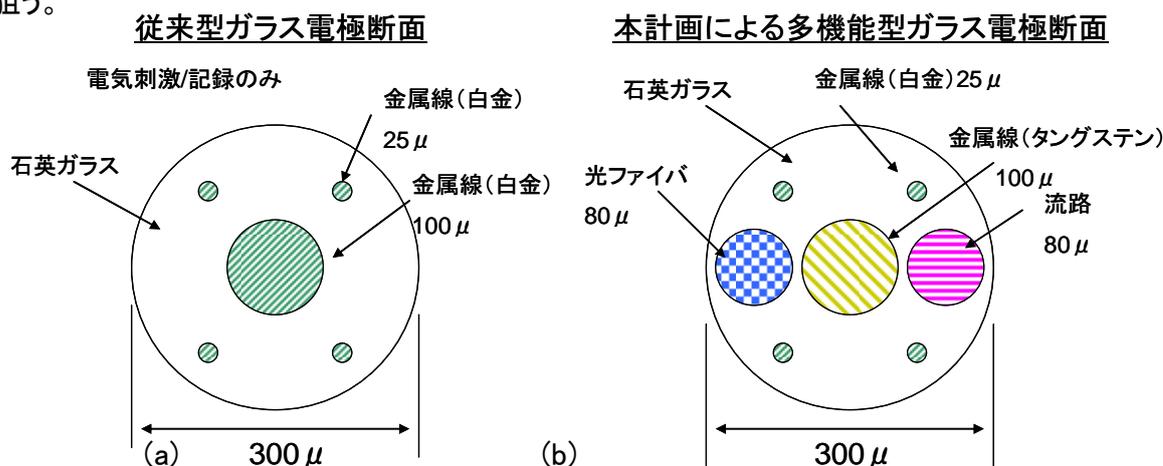


図1-1 電極断面模式図

上記に示した断面のガラス電極を作製するに際して、 $\phi 300 \mu \times 100 \text{mm}$ の細いガラスに $100 \mu \sim 25 \mu$ の穴を直接形成することはきわめて困難である。従ってまず図1-2に示すように、ガラス電極の100倍～200倍の大きなガラス母材に超音波切削加工で穴を開け、次いでこれを相似的に熱延伸加工して細径化し、金属線、光ファイバを挿入、複合一体化させた後先端を研磨鋭利化し、さらに電気・光・液体などのコネクタ付けをするなどの製造方法とした。

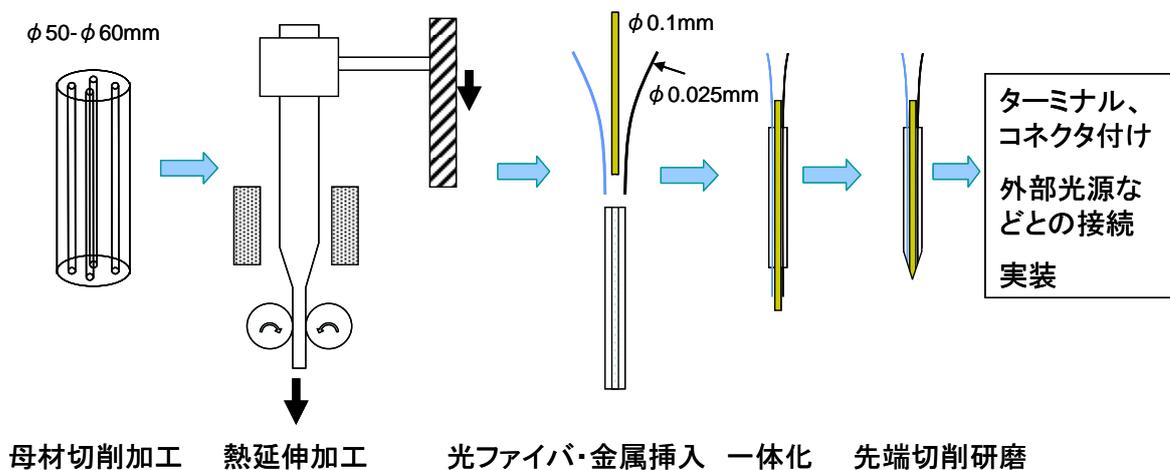


図1-2 本研究による多機能電極製造方法

また、本研究は図1-2の工程毎にその製造・評価装置を新規開発し、開発された装置を使用して製造条件などの検討を行う事として進めた。

具体的には工程毎に下記の研究項目とそれぞれの目標を設定して研究を実施した。

(1) 母材切削加工

$\phi 50\text{-}60 \phi \times 300 \text{mm}$ 長のガラス母材に7本の穴を密集して空けなくてはならない。このため穴間の厚さが薄くなくても割れない技術と長さ方向に真直に穴を形成する技術および真直度を測定する装置を開発することを目標とした。

目標とした穴ピッチは $\phi 60 \text{mm}$ に対して $1.5 \text{mm}$ 、真直度は $0.05$ である。

## (2) 熱延伸加工

前記で穴加工されたφ50mm0-φ60mmの石英ガラス母材を熱延伸加工によって直径数ミリまたはそれ以下のガラスキャピラリーに細径化しなければならない。このキャピラリーの穴の寸法形状を母材と相似形にすることが可能な熱延伸装置開発を行い、90%の相似性確保や直径変動の最小化などの技術開発を行う。開発装置で延伸可能な母材寸法は最大φ60mmとし、延伸後のキャピラリーの直径変動は±1μ(φ300μに対して)を目標とした。

## (3) ガラス金属複合化加工

ガラスキャピラリー中の金属等を加熱加工によって一体化する装置と技術を開発する。この工程では石英ガラスと金属の熱膨張係数の違いによる割れ、剥離を防ぐ事が課題となるため、加熱部動径方向の温度勾配を300℃以上取れる熱源開発とそれを組込んだ複合化装置を開発することを目標とした。さらに開発装置を使用して、割れ、剥離のなりガラスと金属等(タングステン線φ0.1mm1本、φ0.025mm4本、光ファイバ)が複合化されたキャピラリーを試作する。

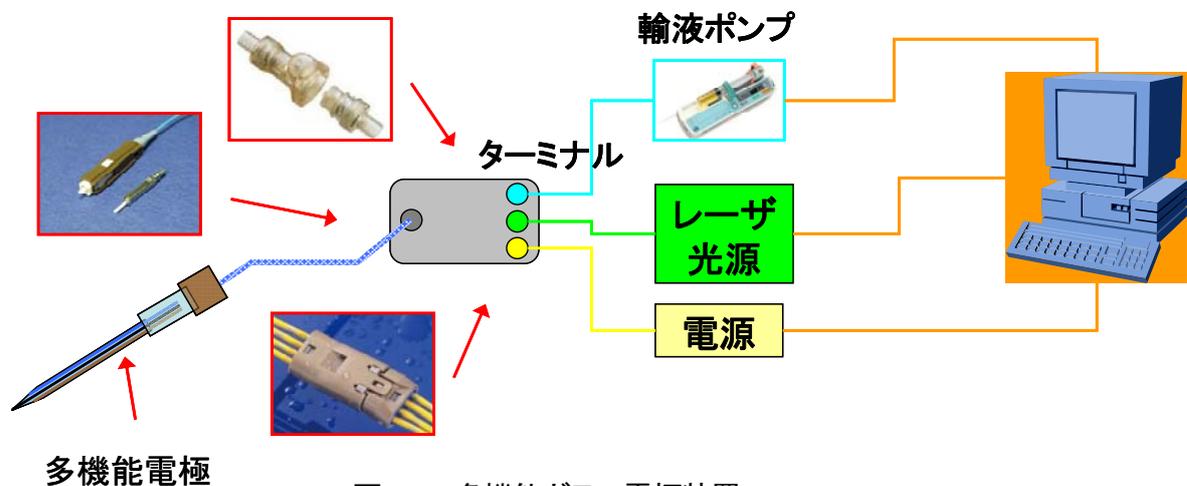
## (4) 先端鋭利化加工

前記ガラス金属複合化されたキャピラリーの先端を研磨する装置と技術を開発する。現状は先端角度90度までしか研磨できないがこれを17度まで鋭利にする装置を開発することを目標にした。さらに研磨後の表面状態について、現状Ra=0.2をRa0.025に平滑化することを目標にした。

## (5) 実装技術

先端鋭利化されたガラスキャピラリーに外部電極装置類とのインターフェースであるターミナル部を設けた多機能ガラス電極を実現することを目標にした。ターミナルサイズは20x20x10mm以内とすることを目標にした。またターミナル部には電気、光、流路用の超小型コネクタを開発し、特に光コネクタについては接続損失0.5dBを目標にした。また多機能ガラス電極を駆動させるための電気、光、薬液輸送が実装された電極装置を開発することも目標とした。

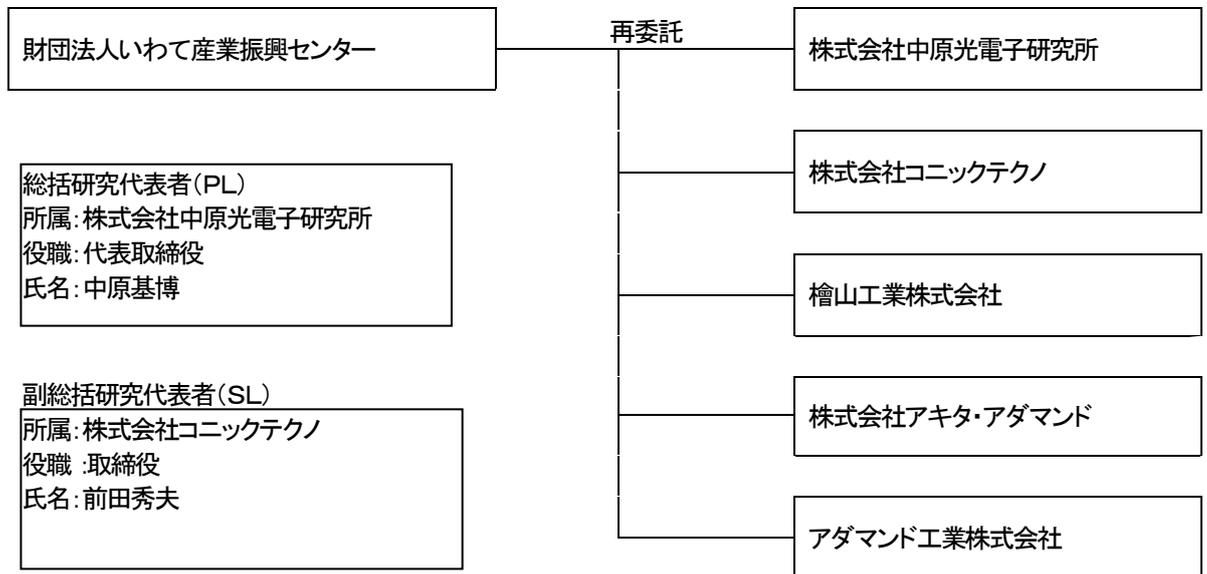
以上の工程毎に定めた目標に向けて研究を行い、これらの各要素を統合して最終的には図1-3に示す多機能ガラス電極装置を実現することを目標にする。



## 1-2 研究体制

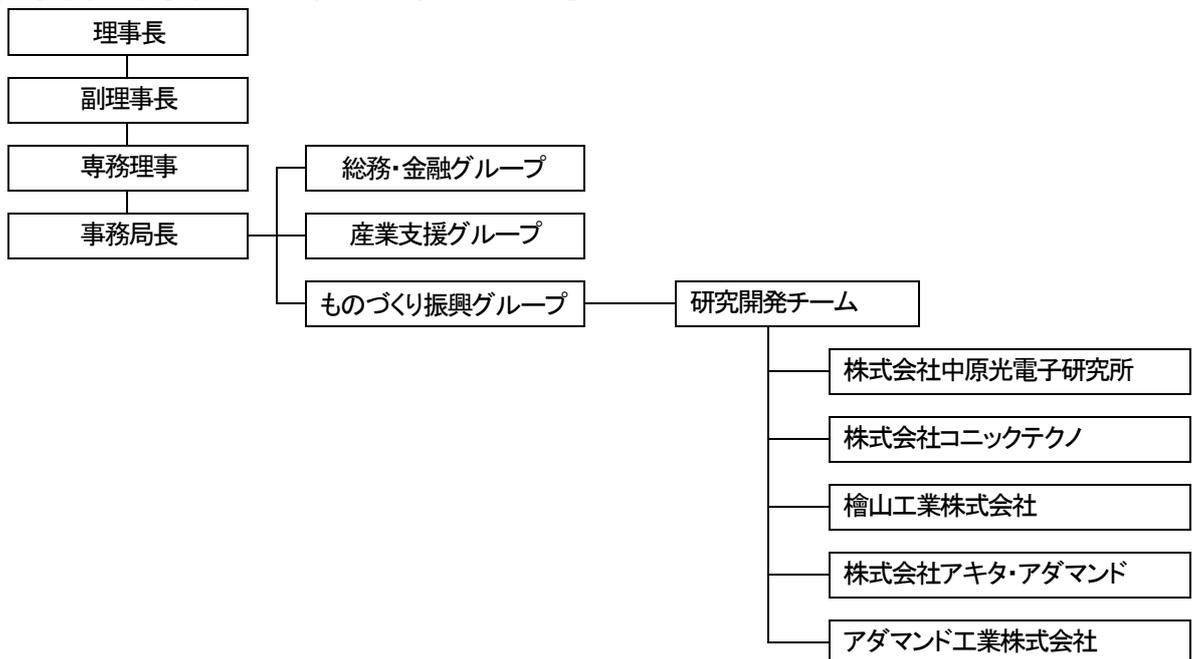
### (1) 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織(全体)



#### 2) 管理体制

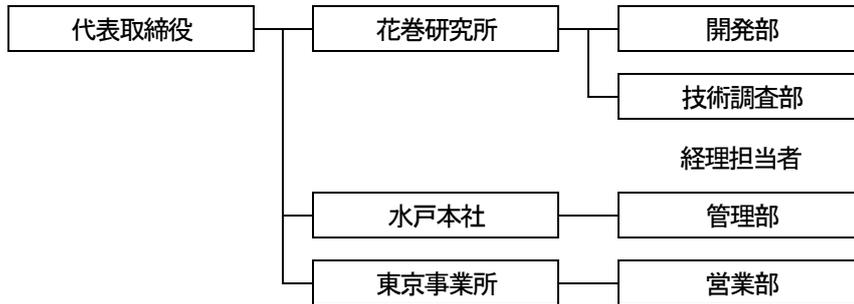
##### ① 事業管理者[財団法人いわて産業振興センター]



②(再委託先)

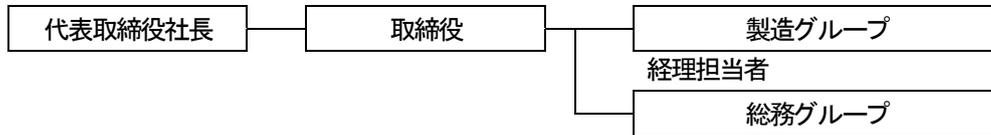
株式会社中原光電子研究所

業務管理者



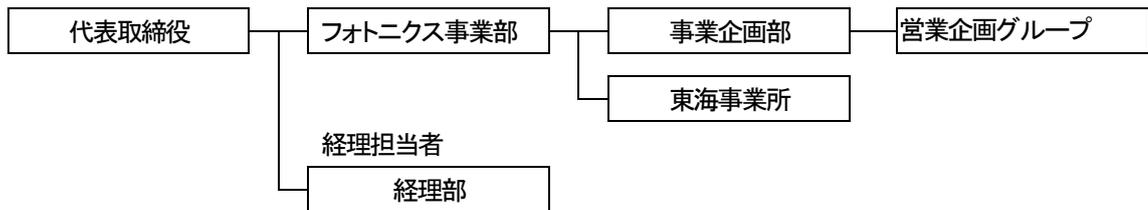
株式会社コニックテクノ

業務管理者



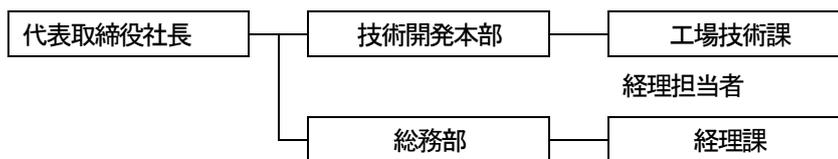
檜山工業株式会社

業務管理者



株式会社アキタ・アダマンド

業務管理者



アダマンド工業株式会社

事業管理者



## (2) 研究員及び管理員(役職・実施内容別担当)

## 【事業管理者】いわて産業振興センター

## ②管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
平井 孝典	ものづくり振興グループ グループリーダー	⑦
村上 淳	ものづくり振興グループ 参事	⑦
古山由香利	ものづくり振興グループ 主事	⑦
山本 忠	ものづくり振興グループ 事業化プロモーター	⑦
熊谷 和彦	ものづくり振興グループ 産学連携コーディネーター	⑦
佐々木建二	ものづくり振興グループ 医工連携コーディネーター	⑦

## 【再委託先(研究員)】

## 株式会社中原光電子研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
中原 基博	花巻研究所 所長	PL、③、⑥
塩谷 正博	営業部長 (平成24年8月21日から)	③、⑥

## 株式会社コニックテクノ

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
前田 秀夫	取締役	SL、①
川崎 博巳	製造グループ リーダー	①

## 檜山工業株式会社

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
田地 修司	フォトニクス事業部 事業企画部 部長	②-1、②-2
塩谷 正博	フォトニクス事業部 事業企画部課長(平成24年8月20日まで)	②-1、②-2
大友 克也	フォトニクス事業部 東海事業所 主任	②-1、②-2
中込 多郎	フォトニクス事業部 東海事業所	②-1、②-2
小椋 昇平	フォトニクス事業部 東海事業所	②-1、②-2

## 株式会社アキタ・アダマンド

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
千原 映二	技術開発本部 本部長	④
吉田 健美	技術開発本部 工場技術課 係長	④
石川 晃維	工場技術部 試作開発課	④

## アダマンド工業株式会社

氏名	役職・所属	実施内容
野代 卓司	事業開発部 部長	⑤、⑥
山内 勲	開発部 開発課 コネクタ係 係長	⑤
石川 正紀	事業開発部 事業開発課	⑤
杉村 彰紀	事業開発部 事業開発課	⑤、⑥

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】

財団法人いわて産業振興センター

(経理担当者)ものづくり振興グループ 主事

古山 由香利

(業務管理者)ものづくり振興グループ グループリーダー

平井 孝典

【再委託先】

株式会社中原光電子研究所

(経理担当者)代表取締役

中原 基博

(業務管理者)代表取締役

中原 基博

株式会社コニックテクノ

(経理担当者)総務グループ

安 千佳子

(業務管理者)取締役

前田 秀夫

檜山工業株式会社

(経理担当者)経理部

土田 一隆

(業務管理者)フォトニクス事業部 事業企画部 部長

田地 修司

株式会社アキタ・アダマンド

(経理担当者)総務部 経理課長

鈴木 明

(業務管理者)技術開発本部 本部長

千原 映二

アダマンド工業株式会社

(経理担当者)経理部 経理部長代理

熊谷 薫

(業務管理者)事業開発部 部長

野代 卓司

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
中原 基博	株式会社中原光電子研究所 代表取締役	PL <input type="checkbox"/> 委
前田 秀夫	株式会社コニックテクノ 取締役	SL <input type="checkbox"/> 委
川崎 博巳	株式会社コニックテクノ 製造グループ リーダー	<input type="checkbox"/> 委
田地 修司	檜山工業株式会社 フォトニクス事業部事業企画部 部長	<input type="checkbox"/> 委
塩谷 正博	檜山工業株式会社 フォトニクス事業部事業企画部課長 (平成24年8月20日まで) 株式会社中原光電子研究所 営業部長 (平成24年8月21日から)	<input type="checkbox"/> 委
檜山 巖	檜山工業株式会社 代表取締役社長	
千原 映二	株式会社アキタ・アダマンド 技術開発本部 本部長	
野代 卓司	アダマンド工業株式会社 事業開発部 部長	<input type="checkbox"/> 委
杉村 彰紀	アダマンド工業株式会社 事業開発部 事業開発課	<input type="checkbox"/> 委
虫明 元	東北大学大学院 医学研究科生体システム生理学分野 教授	アドバイザー
古澤 義人	東北大学病院 肢体不自由リハビリテーション科 医師	アドバイザー
宮下 忠	TMフォトニックアドバイザーズ 代表	アドバイザー
平井 孝典	財団法人いわて産業振興センター ものづくり振興グループ リーダー	
山本 忠	財団法人いわて産業振興センター 事業化プロモーター	

アドバイザー 氏名	主な指導・協力事項
虫明 元	多機能ガラス電極を使用して脳神経系の研究を行う観点からの助言
古澤 義人	多機能ガラス電極について、臨床医療の現場からの観点からの評価
宮下 忠	北米での研究動向、市場動向について助言

### 1-3 成果概要

多機能ガラス電極を実現するため図1-2の工程毎に新規にその関連装置を開発すると共に、関連の各要素技術を開発することができた。具体的には以下の通りである。

#### (1) 母材切削加工

- ①加工した穴の真直度を測定して切削条件にフィードバックさせるための母材検査装置をあらたに開発した。
- ②これを用いてφ50mm、φ30mm石英ガラス母材に多数穴の加工を行い、穴ピッチ2.25mm(φ50mm×300mm)、1.0mm(φ30mm/210mm)で加工することができた。真直度については、φ6mmの穴では0.02を達成できた。しかし、φ4～φ18までの全ての穴に対しては0.09-0.25の範囲にあり今後の課題として残った。

#### (2) 熱延伸加工

- ①母材サイズ最大φ50×300mmまでを延伸可能な熱延伸装置を開発できた。
- ②母材と延伸後キャピラリーとの穴形状の相似性についてはφ30mm母材を使用した場合には90%、φ50mm母材に対しては80%を達成した。
- ③φ50mmの母材を300μmのキャピラリーにした場合にその直径変動±1μm以内に安定化することに成功し目標を達成できた。

#### (3) ガラス金属複合化加工

- ①石英ガラスを選択的に加熱させることが可能な炭酸ガスレーザを熱源として用いたガラス金属複合化装置を開発した。ガラスキャピラリーφ2mmの加熱に対して動径方向の温度勾配は300℃以上確保できているものと推定された。
- ②タングステン線(φ0.1×1本、φ0.025×4本)、光ファイバを挿入したキャピラリーを、開発した複合化装置を用いてφ300μm×30mm以上に複合一体化した。10mm程度の短長では割れ、剥離のないものを試作できた。しかし、30-50mm全長に渡って均一に複合化することはできなかつた。熱雰囲気条件などの設定と複合化後の直径変動の抑制が課題として残った。

#### (4) 先端鋭利化加工

- ①先端を17度の鋭角で研磨するための装置として新たに2軸回転研磨装置を開発した。
- ②この装置を用いてタングステン線、ガラスキャピラリーそれぞれ単体においては先端角度17度研磨を実現できた。また、表面状態についてはガラス単体でRa=0.1を達成した。しかしガラス金属との複合体研磨での先端角度17度の確認と表面状態Ra=0.025の実現が課題として残った。

#### (5) 実装技術

- ①ターミナルの設計試作については20×20×10mmのサイズで実現させることができた。またこのターミナルに超小型の光コネクタ(接続損失0.5dB以下)を新たに開発し、電気コネクタと共に搭載した。
- ②多機能電極装置については、波長450nm、470nm、590nmのLDと電気駆動制御系などを搭載したプロトタイプを試作した。

以上述べたように各工程に必要な装置の開発については大きな成果があった。また各要素技術についても開発を行い上記成果を得たが、それらを統合して多機能ガラス電極の実現までには到らなかった。今後各要素技術をさらに向上させると共に全体として統合して多機能ガラス電極・装置を実現することが課題である。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

連絡窓口 財団法人いわて産業振興センター（担当:佐々木）

連絡先 tel 019-631-3825

fax 019-631-3830

E-mail k\_sasaki @joho-iwate.or.jp

## 第2章 本論

### 2-1 母材への多穴切削加工技術に関する開発

株式会社コニックテクノ

#### 開発の目的

電極外径 $300\mu\text{m}$ を熱延伸加工するための石英ガラス母材(外径 $\phi 50\sim 60\text{mm} \times 300\text{mm}$ )には、電極・光ファイバ・流路のための大小異なる穴を密に空けなくてはならない。

本計画で加工する石英ガラス母材の穴は $\phi 3.4\sim \phi 17.2$ 程度のもの4種類であり(熱延伸加工との関連で最終的な穴径は変わる)、 $300\text{mm}$ 以上の長さの母材への穴あけ加工は通常の切削加工では困難である。従って、超音波穴あけ加工機(先端に取り付けた穴あけ工具を超音波で振動させながら穴あけを行う)での切削方法によらなければならない。しかし、この加工法でも $\phi 3.4$ 長さ $300\text{mm}$ 以上の細径で長い穴あけ工具は剛性が小さく曲がり易く真直度が悪くなる。

これまでの実績では、 $\phi 4$ 穴長さ $300\text{mm}$ で真直度 $0.2$ である。本テーマでは、複数個の穴を狭ピッチで空ける事になるため穴壁が薄くなる箇所ができワレが発生するという問題がある。これを解決するため、この真直度を $0.05$ にする必要がある。

また、外径 $\phi 17$ 以上長さ $300\text{mm}$ 以上の長い穴あけ工具では剛性は大きくなるが、振動条件の制約により振幅がとれなくなり加工性が劣り、更にクラック・ワレが発生し易くなる。これまで肉厚 $2.0$ までは実績があるが、本開発ではこれを $1.3\text{mm}$ にまで狭ピッチ化しなければならない。

#### 開発結果および考察

##### 2-1-1 狭ピッチの多穴加工に関する検討

これらの問題を解決するために、剛性および振動条件に対しては、穴径に応じた穴あけ工具の材質・形状(工具のパイプ肉厚、長さ)を検討し、加工性に対しては工具表面の電着ダイヤモンド粒度などを選定し、長尺で高剛性・加工性の良い穴あけ工具を開発した。

母材寸法として、熱延伸加工との関連で図2-1-1を設定した。この母材加工の実現のため、穴径 $\phi 5\sim \phi 19$ 長さ $300\text{mm}$ 以上の狭ピッチ多穴加工において、穴壁の肉厚 $1.5\text{mm}$ でワレないこと、穴の真直度を $0.05$ とすることを本開発の目標とした。

結果は、最小肉厚が $2.25\text{mm}$ でワレは発生せず、問題はなかった。更に、外径 $\phi 50$ 長さ $300\text{mm}$ の中心に $\phi 5\sim \phi 19$ の穴あけ加工を行い、その真直度を評価した。

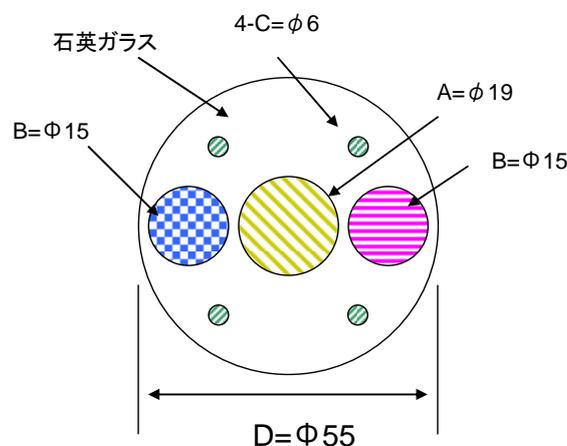


図2-1-1 設定した母材寸法

## 2-1-2 穴真直度の向上のための3次元画像検査方法の確立

外周がスリガラス状で多数の穴が空いている長さ300mmの円筒状母材の穴の真直度測定は通常の方法では、穴の入口・出口の位置関係から穴の真直度(曲がり)を推定することしかできず、穴がどのように曲がっているのかを知ることは困難である。石英ガラス母材をそれと屈折率( $N_d=1.458$ )が同じ整合液に浸漬すれば液表面が透明であるため母材に空けられた穴を直接観察することができる。本テーマでは、屈折率がほぼ近い水に浸漬し画像測定機で測定可能となるよう最適な光源を得ることにより可視化を可能とした。

三次元的な穴の曲がり(真直度)を計測処理するため、専用の組み込みソフトウェアを開発し、画像測定機に組み込み導入した。本装置を用いて可視化された穴の輪郭を計測し穴形状・寸法等を三次元的に計測処理して、高精度な真直度情報を得た。得られたデータは超音波穴あけ機の回転数・送り・振動周波数・振動強度などの加工条件にフィードバックして穴あけ加工を実施し、以下の結果を得た。

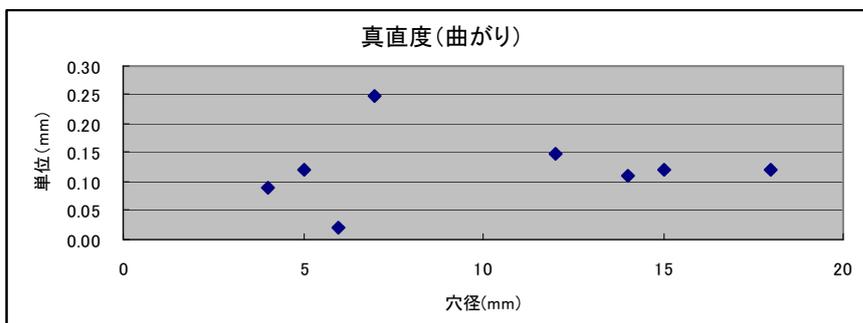


図2-1-2 穴径と真直度

結果として、真直度は0.02~0.25となり、目標の0.05に対してφ6は0.02と達成したがそれ以外は未達成となった。

今後、後工程の検討結果をフィードバックして母材寸法を設定し必要な母材加工を行っていくと共に、下記課題の解決に向かう。

- ① 工具外径の真円度の向上(真円度 0.01 以下)
- ② 4本セットの工具外径差を小さくすること(外径差 0.05 以下)
- ③ 工具交換時の段差の原因究明
- ④ 加工条件の更なる最適化

## 2-2 研究開発テーマ:高精度ガラス熱延伸加工技術に関する開発

檜山工業株式会社

### 2-2-1 研究の目的

2-1で穴空け加工された $\phi 50\text{mm} \times 300\text{mm}$ 程度の石英ガラス母材を $\phi 2\text{mm} \sim \phi 0.3\text{mm}$ のキャピラリー状に熱延伸加工するための装置開発と延伸技術開発を行うことを目的とした。

特に穴空き母材では種々の直径の穴が同一円周上ではない位置に配置されているため、熱延伸後に母材形状の相似性を保つことが困難になる。また、母材が従来の $\phi 30\text{mm}$ から $\phi 50\text{--}60\text{mm}$ に大型化するため延伸後の直径変動が $\phi 30$ の時に較べて大きくなる可能性がある。これらを克服するため、大型母材の延伸装置を開発し相似性と直径変動抑制の観点から検討を行った。

具体的な目標値としては母材延伸キャピラリーの相似性については90%、直径変動に対しては $\phi 300 \mu \pm 1 \mu$ を設定した。

### 2-2-2 装置開発

石英ガラスの軟化点は約 $1700^\circ\text{C}$ であり、これを加工するにはさらに $100\text{--}200^\circ\text{C}$ 高い温度が必要になる。本研究ではカーボン炉を使用して $\phi 50\text{--}60\text{mm} \times 300\text{mm}$ 長の母材を $1/25\text{--}1/200$ にまでその直径を細める装置を開発した。

全体の装置構成は、電気炉上部に母材を送る機構を設け電気炉中央部付近で母材を軟化延伸加工しこれを下部に設けられた開口部から引取る構成とした。

### 2-2-3 相似性確保の検討

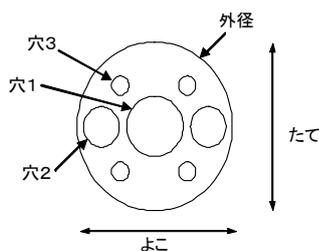
延伸に用いた母材の写真を図2-2-1に示す。母材サイズは $\phi 50\text{mm} \times 220\text{mm}$ 長であり、中央部に $\phi 17\text{mm}$ の穴が1個( $\phi 0.1\text{mm}$ タングステン線用)、その両サイドに $\phi 12\text{mm}$ の穴が2個(光ファイバと流路用)、四方方向に $\phi 6\text{mm}$ の穴が4個( $\phi 0.025\text{mm}$ タングステン線用)配置された構造になっている。



図2-2-1  $\phi 50\text{mm}$ 母材写真

図2-2-2に $\phi 50\text{mm}$ 母材の延伸加工結果を示す。ここでは $\phi 3 \sim \phi 1$ まで種々の外径で延伸を行った。結果として $\phi 30\text{mm}$ の場合に比べて外径の縦横が変形し、それに応じて内部の穴の歪も大きくなっている。

### 延伸加工結果



設定外径	外径		穴1径		穴2径		穴3径	
	たて	よこ	たて	よこ	たて	よこ	たて	よこ
φ2	2.093	1.922	0.747	0.685	0.5	0.43	0.233	0.211
φ1	1.014	0.934	0.365	0.332	0.242	0.21	0.114	0.106
φ3	3.057	2.85	1.079	1.003	0.722	0.647	0.344	0.321
φ1.5	1.502	1.395	0.539	0.492	0.36	0.315	0.17	0.157
φ1.3	1.322	1.228	0.473	0.43	0.313	0.278	0.143	0.134
φ1.8	1.883	1.751	0.671	0.681	0.45	0.4	0.213	0.2
φ2.5	2.519	2.364	0.877	0.844	0.588	0.537	0.279	0.267

図2-2-2 延伸加工後ガラス管断面と測定データ

図2-2-2のデータから延伸後のキャピラリーの母材に対する相似性を求めると80%であった。

今回の研究目標では相似性90%としているためその値は確保出来なかった。これはφ30mmの場合に比べてφ50mmの母材では母材の設置位置が電気炉中央部から少しでもずれると動径方向での温度分布の影響を受け易い事が原因として挙げられる。また延伸温度、速度等もφ50母材に対して未だ最適化されていない事にも起因しているものと考えられる。

穴径の縦横比率が1から大きくずれると次のガラス金属複合化の工程で、金属線の挿入が困難になる事がありまた複合化の際の不均一性の原因ともなるので今後改善を図っていく。

### 2-2-4 延伸後のキャピラリー径の安定化の検討

開発した熱延伸装置の電気炉内に流入させるアルゴンガスの流量と複数箇所の流入口に対する流入比率などを変えて延伸後キャピラリーの直径変動を測定した。

図2-2-3は電気炉温度、母材送り速度、引取り速度とキャピラリー径を測定した結果である。

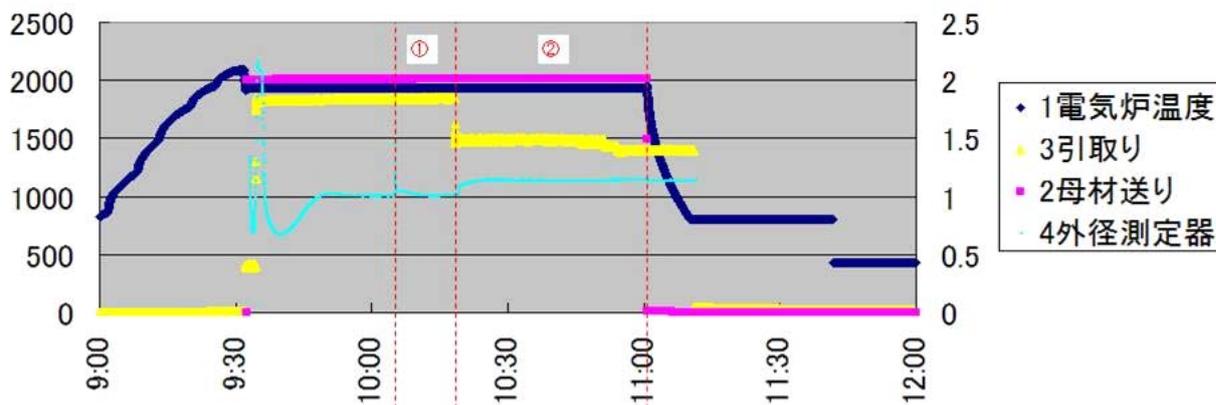


図2-2-3 延伸後キャピラリーの外径(薄い青色)

図2-2-3に示すようにφ0.3直径に対し±1.8μであった。これは目標である±1.0μにほぼ近い値を示しているといえる。

### 2-2-5 高精度ガラス熱延伸加工技術成果

以上述べたことをまとめると以下の成果が得られたことになる。

発項目	目標	成果
熱変形	母材とキャピラリーとの形状、寸法の相似性: 90% ( $\phi$ 50mm母材に対して)	$\phi$ 30mm母材で90%、 $\phi$ 50mm母材で80%達成
装置開発	$\phi$ 60mm母材延伸可能 キャピラリー直径安定性: $\pm 1 \mu$ ( $\phi$ 300 $\mu$ に対して)	炉芯管無しで $\phi$ 60mm可能 炉芯管有りで $\phi$ 50mm可能 $\pm 1.8$ ミクロン達成

今後の課題として、延伸後の相似性を90%にまで高めると共に直径変動を $\pm 1 \mu$ にまで安定化する事が上げられる。

## 2-3 ガラス金属複合一体化技術の開発

株式会社中原光電子研究所

### 開発の目的

多機能ガラス電極を実現するためには、延伸された多穴の石英キャピラリーに金属線や光ファイバを挿入しこれらを複合一体化しなければならない。特にガラスと金属は熱膨張係数が異なることからこれを克服することが課題となる。そのためここでは特に次の研究開発項目を設定して実施した。①石英ガラスとタングステン線を複合化するための装置開発。②開発された装置を使用してガラスと金属線、光ファイバを複合化する技術開発。

以下その開発結果を述べ考察する。

### 開発結果及び考察

#### 2-3-1 ガラス金属複合化装置の開発

石英キャピラリーに金属線を封止する方法として、まず $\phi 1\text{mm} \sim \phi 2\text{mm}$ 程度の石英ガラスキャピラリーに金属線、光ファイバなどを挿入し、これをさらに延伸してガラスと金属を複合一体化する直接封止方法を採用した。

直接封止法では金属とガラスの熱膨張係数が異なるため封止後に割れや剥離などの現象が生じやすくなる。これを防止するため本研究では炭酸ガスレーザを熱源とする石英ガラスの延伸機を開発した。

炭酸ガスレーザは $10.6\ \mu$ の光を出すものであり、石英ガラスに良く吸収され発熱する。また、レーザ光の吸収による発熱では温度は石英ガラスの表面から内部に入るに従って指数関数的に低下する。このため金属線は一般の熱伝導による加熱に較べて低い温度に保たれる。さらに炭酸ガスレーザによる加熱では石英ガラス延伸部の温度分布を急峻にすることが可能であり、また昇温降温の簡便性から本研究の目的に適しているものとみなされる。

使用した炭酸ガスレーザは最大光出力30WのDC放電による連続発振レーザであった。温度の空間分布をできるだけ均一にするため、ミラーなどを用いてレーザ光は延伸部に対して4方向から照射するようにした。

延伸装置は縦型とし、上部に $\phi 1-\phi 2\text{mm}$ の母材を送る機構、下部にはこの母材を $\phi 300\ \mu$ に延伸する引取機構とを備えている。

本装置を使用して石英ガラスキャピラリーのみを加熱した場合と、タングステン線を挿入した石英ガラスキャピラリーを加熱した場合の加熱状態を観察した。石英ガラスのみの場合にはガラス表面が白熱した状態が見られる。タングステン線が挿入された場合にはタングステン線からの放熱を受けて上下対象の石英ガラス内部からの赤い輻射光が見られた。これはタングステン線の熱伝導率が高い事も影響して石英ガラス内部の温度は低下し、タングステン線は加熱され難く石英ガラスの方が選択的に加熱されていると考えられる。

なお、延伸部分の直径変動は $\phi 300\ \mu$ に対して $\pm 25\ \mu \sim \pm 50\ \mu$ でありかなり変動していた。これは延伸前の石英ガラスキャピラリーの直径が $\phi 2\text{mm}$ であり熱容量が極めて小さいため炭酸ガスレーザ加熱部直近の空気の擾乱の影響を極めて受けやすいためであると推定された。

#### 2-3-2 ガラス金属複合化技術の開発

表面張力によって石英ガラス中に金属線を直接封止し複合化する方法を行った。石英ガラス管(外径 $\phi 1\text{mm}$ /内径 $\phi 0.5\text{mm}$ )を炭酸ガスレーザ出力を変えて加熱し内径/外形の比率を求めた。レーザ出力26Wまでは内径/外径比は保たれたがそれ以上では小さくなり28W以上では完全に内径は零になった。つまり金属線が挿入された場合においても表面張力によって内径を縮小するよう温度を上げる事ができれば金属は石英ガラスと複合化することができることを確認した。

次に金属線を挿入し石英ガラスと複合一体化させるためまず7穴の $\phi 2\text{mm}$ 石英ガラスキャピラリーにタン

グステン線(φ0.1mm×1、φ0.025mm×4、光ファイバ1本)を挿入した。図2-3-1は金属線と光ファイバを挿入した1例である。

図2-3-2は図2-3-1の石英ガラスキャピラリーを延伸した結果である。(a)においてはタングステンと石英ガラスは複合化はされている。しかし空気中でタングステンは容易に酸化されるため密着力は小さく外部からの力で容易に割れ、剥離が生じる。レーザ出力が高い場合には特に黒化が激しい(c)。レーザ出力が低い場合には表面張力が小さく封止されない(b)。従って直接封止ではタングステン線を酸化させることなく可能な限り封止温度を上げることが重要である。

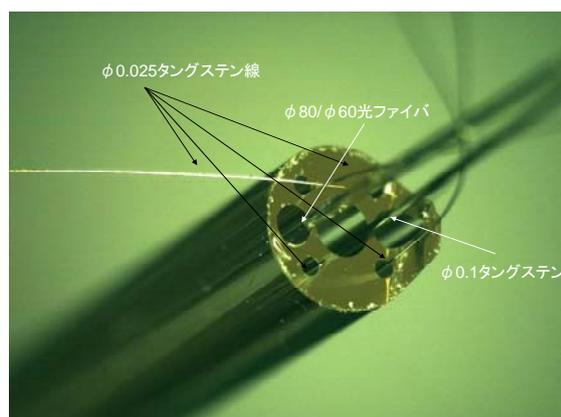


図2-3-1 金属線と光ファイバを挿入した例

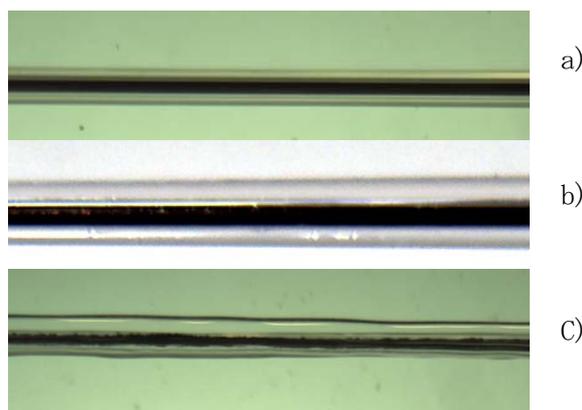


図2-3-2 直接封止した石英ガラスキャピラリー  
レーザ出力: (a) 30W、(b) 28W (c) 35W

図2-3-3は石英ガラスキャピラリーの穴部分を、酸素を含まない雰囲気中に置換して直接封止を試みた結果である。この場合にはタングステンは黒化することなく石英ガラスに封止された。

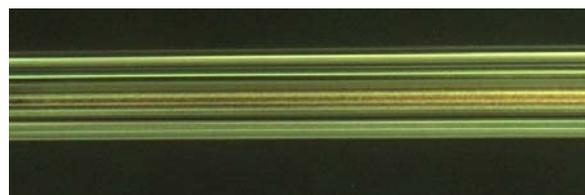
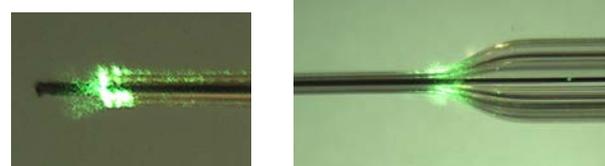


図2-3-3 直接封止されたタングステン線



(a)先端部、 (b)ネックダウン部

図2-3-4 光ファイバの封止

図2-3-4に光ファイバが封止された状態を示す。使用した光ファイバはクラッド径210μ、コア径200μ、フッ素ドープ、UV被覆の光ファイバである。ネックダウン部では原理的に光の反射が生じるためその散乱光が観察された。先端部にまで光が到達していることは確認できた。

以上記載したように、タングステン、光ファイバ共に石英ガラスキャピラリーに封止され複合化はされたが以下の問題が残った。

①延伸部の直径が大きく変動するため長さ方向に封止されている箇所、封止されていない箇所の変化が大きい。次の章で述べるが、外径変動は先端鋭利化の工程において研磨中の偏芯となり割れなどの現象が発生することになる。

②酸素の不活性ガスとの置換がまだ不十分であり、長さ方向にタングステン線の酸化状態に変化がある。部分的にでも酸化された箇所では封止は不完全となる。

③流路については表面張力のみを利用する直接封止方法で形成することは現時点では困難であった。

上記①については装置加熱部空気擾乱抑制できよう必要な改良を行う事で解決させる。②については長さ方向で安定にタングステン線が黒化しない置換条件を見出す。③については②と同様に雰囲気圧力制御などによって実現していく。

## 2-4 先端鋭利化に関する開発

株式会社アキタ・アダマンド

### 開発の目的

金属と複合化されたガラス電極の先端を鋭利加工する為の装置開発とガラス電極の先端を角度17度、表面粗さRa0.025で仕上げる加工条件の確立を目的とする。

従来の研磨装置は、光ファイバを45度～60度の加工実績はあるものの本製品の要求角度に対応する機構が装備されていない。また、ガラスと金属の複合体の加工実績がほぼ皆無である為、研磨技術の研究が必要である。一般的には異種材料を同時に加工した場合、硬度の違いから加工レートの差が生じてしまい研磨面が不均一になる可能性が高い。よって研磨ホイルの選定、ホイル回転数、送り速度など加工条件の確立が重要である。

### 研究開発結果および考察

#### 2-4-1 装置開発

##### ①製品チャック部の検討

ガラス電極の外径はφ0.3mmと極細であり要求仕様を満たすにはガラス電極を正確に固定保持する必要がある。チャック方式は接着方式、V溝固定方式なども検討したが、部品の作りやすさと作業性(製品の取り付け易さ)を考えコレットチャック方式を採用した。用意したガラス管を取り付け、指で左右に押ししてみたところ折れは確認されなかった。次にガラス管の先端を引張り上げたがガラス管の抜けは確認されなかった。よって、製品チャック部の設計、作製は実現出来た。

##### ②2軸スピンドル機構の検討

表面粗さRa0.025を確保するには、工程を荒加工と仕上げ加工の2工程に分ける必要がある。従来の装置では1軸であった為、荒加工機と仕上げ加工機の2台が必要であった。本開発では、1台の装置内にそれぞれ種類の違うホイルを取り付けられるように2軸スピンドルで設計した。荒加工機から仕上げ加工機へと製品の付け替えが無くなり、作業性が向上した。また、製品の付け替えが無くなった事により同一機上で加工が出来る為、加工精度を確保し易くなった。

##### ③画像処理の検討

従来の方式では、機上にカメラ等が取り付けられていなかった為、製品の出来ばえを確認するには一度、機上から取り外し別の測定器で計測する必要があった。ここで問題になるのが再加工の為、再度、製品を取り付けると位置ずれをおこしてしまい調整が必要であった。本装置ではカメラを取り付け、機上で計測できる画像処理装置を取り付けた。

##### ④装置全体

①～③の仕様を盛り込み開発した装置が下記の写真である。



図2-4-1開発した研磨装置

## 2-4-2 研磨技術の検討

完成した装置を使用し、各種材料の加工実験を行った。

### ①タングステンの加工結果

φ0.3mmのタングステン材を加工した結果、角度15.4度であった。加工時に製品のしなりが見られ、送り量＝加工量とはならず角度に影響を及ぼした。研磨ホイルの再選定が必要で有る。しかし先端形状は、かなり鋭利な形状に仕上がっており、この点に関しては目標を実現した。

### ②石英ガラスの加工結果

外径φ0.5mm×内径φ0.13mmの石英ガラス材を加工した結果、角度17.8度と目標とする精度を確保できた。タングステンより、径が太い為、加工時のしなりが発生しなかった事が影響している。

### ③ガラス電極の加工結果(本開発品)

外径のバラツキが大きく、チャックが精度良く出来なかった。又、チャックは出来ても製品が大きく振れたり、保持力が弱いため抜け落ちたりする状況が見られた。

### ④まとめ

材質	角度	表面粗さ	判定
タングステン	15.4度	Ra0.19	△
石英ガラス	17.8度	Ra0.1	△
ガラス電極	測定不可	測定不可	×



タングステン



石英ガラス



ガラス電極

図2-4-2研磨結果

## 2-5 実装技術に関する開発

アダマンド工業株式会社

### 開発の目的

従来の電極は神経電位測定用の電気コネクタのみであったが、本事業のガラス多機能電極は、光刺激、薬剤による化学刺激の機能を有するため、光と薬液の専用コネクタを有するターミナルが別途必要とされる。特に光コネクタについては外径100 $\mu\text{m}$ 以下のコア径を持った光ファイバが使用されるため、接続時の損失をいかに低減できるかが重要となる。

さらに多機能ガラス電極の実際の使用においては電気に加え、光、薬液の刺激を制御するため、ユーザーが使用しやすい実装評価装置の開発を行う必要がある。

上記の理由から課題となる以下の2項目の実装技術について開発を行った。

- ①金属線、光ファイバ、流路のターミナル固定技術開発
- ②電極装置としてのデザインレビュー、プロトタイプ装置開発

### 研究開発結果および考察

#### 2-5-1 金属線、光ファイバ、流路のターミナル固定技術開発

開発を行うにあたり、最初に多機能ガラス電極に必要とされるターミナル、実装評価装置の仕様を調査した。その仕様に基づきターミナルの開発を行い、課題は残っているものの図2-5-1に示すように目標とした20 $\times$ 20 $\times$ 10mm以下のターミナルを作製することができた。また、光コネクタについても接続損失0.5dB以下を満足する結果が得られた。加えて電極の特性として重要となるインピーダンスの値を制御するための、電極面積の影響ついて実験を行い、図2-5-2に示すように今後の開発の指標を得ることができた。

課題としては、光コネクタの強度改善と、開発の遅れからまだ作製できていない金属線と流路のコネクタがあげられる。これについては、すでに準備を進めており、今後実験を行っていく予定である。

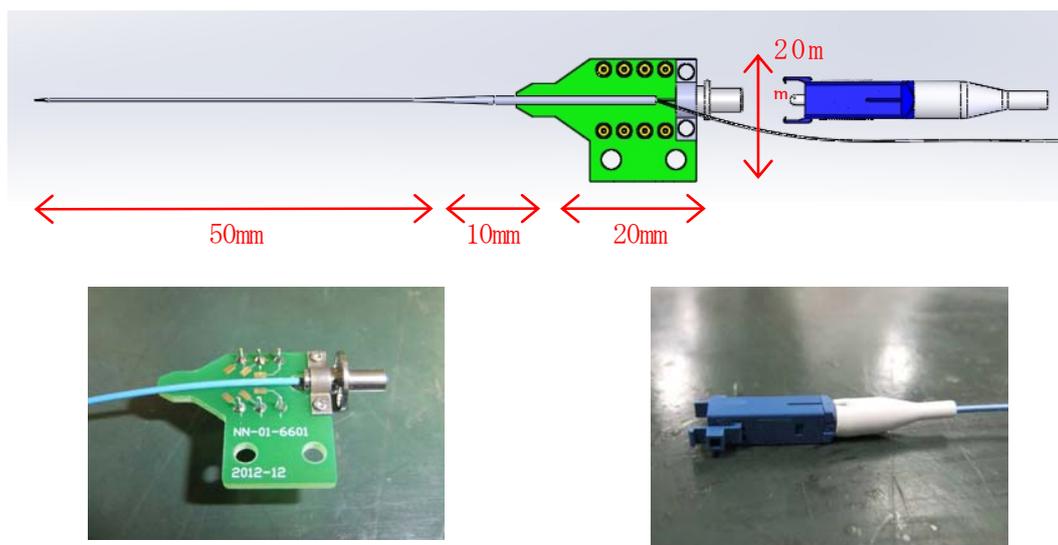


図2-5-1 開発した電極ターミナル

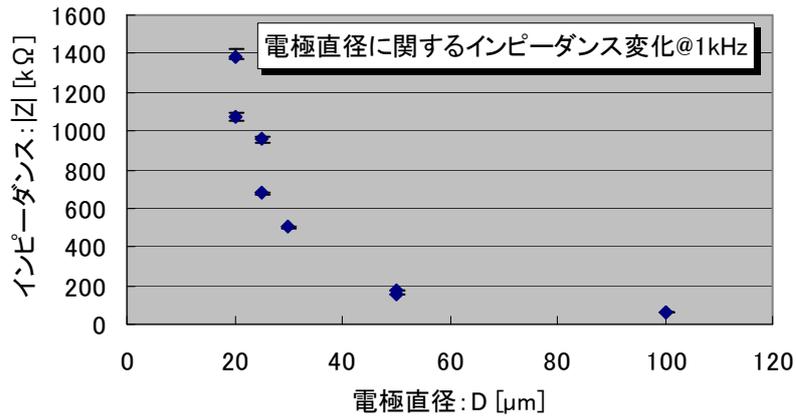
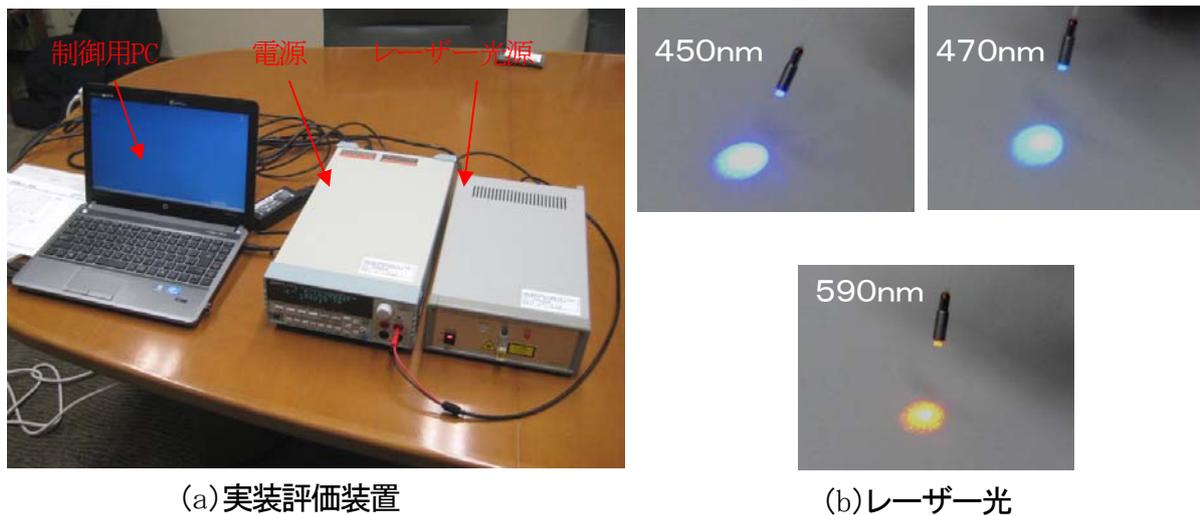


図2-5-2 電極径に対するインピーダンス変化(@1kHz)

### 2-5-2 電極装置としてのデザインレビュー、プロトタイプ装置開発

多機能ガラス電極を実際に使用する際に必要となる実装評価装置について、仕様を検討、設計を行い、図2-5-3に示すように装置を作製した。開発した装置としては希望の仕様を満たしており、3波長の中から任意の波長のレーザー光をパルス照射することができる。アドバイザーからは光刺激用の装置として使用してみたいとのコメントも得られた。ただし、電極の作製が遅れているため一体化した評価を行うことができておらず、当初の目標としていたデザインレビューまで到達することはできなかった。残った課題については電極作製に伴い継続的に開発を進めていく予定であり、将来的にアドバイザーに協力頂き実際に光刺激と神経電位の測定実験を行い、デザインレビューをする予定である。



(a) 実装評価装置

(b) レーザー光

図2-5-3 開発した実装評価装置

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発成果

医療用多機能ガラス電極を実現するには、母材切削加工、熱延伸加工、ガラス金属複合化加工、先端鋭利化加工などの多くの工程を必要とし、さらに多機能ガラス電極をユーザーが容易に使用できるようにするためにコネクタ付けなどの実装工程と、光源・電子回路、ソフトウェアを組み込んだ実装装置の開発までが必要である。

しかも母材切削加工、熱延伸加工、ガラス金属複合化加工、先端鋭利化加工についてはその加工装置・評価装置等の開発から行わなければならない。

今回それらの装置について新たに設計試作し、所定の性能を確認できた。これらの装置はいずれも動作原理から新規に設計し多くのノウハウを含めて試作したものであり、従来の切削加工関連装置にはないユニークで優れた特徴を有するものである。その観点から本装置開発は切削技術を高度化に向けて大きく前進させたといえる。実装装置についても新たに医療用の超小型光コネクタを開発し、小型のターミナルに組み込んだ。光源についても、波長450nm、470nm、590nmの青2色、黄色1色のレーザーを組み込み将来のユーザー使用に備えた。

また、試作した装置を用いて工程毎に目標に向けて技術開発を行った。その結果母材加工、熱延伸加工、ガラス金属複合化加工、先端鋭利化加工などの各要素技術については基本的なデータを得ることができ、工程毎に設定した当初目標値に近い成果を得た。特にφ50mmの石英ガラスロッドに精密に7つの穴を開け、これを相似性80-90%でキャピラリーに延伸し、タングステン、光ファイバをこのキャピラリーに挿入後封止し先端を鋭利化する一連の全く新しい工程を行った事は特筆に値する。

ただ、最終的には現時点までは初期目標の多機能ガラス電極の実現にまで至っていない。これは、各要素技術の統合が未だ十分に取れていないため技術の統合化が不完全であることに起因していると考えられる。

### 3-2 研究開発後の課題

研究開発後の課題として以下の3点が挙げられる。

- ①工程毎に各装置の必要な改良をする。
- ②各工程の受け渡し仕様を整合させる。
- ③要素技術を統合して多機能ガラス電極を実現する。

このため、今後継続的に本研究を行い多機能ガラス電極およびその装置を商用品として完成させる。

### 3-3 事業化展開

#### ①顧客への試作品提供と評価

今後、開発された各要素技術を統合し多機能電極としての試作を行う。試作した多機能電極はまず当該研究を行っている研究機関に提供し基本的な機能、性能の評価を受ける。この評価結果を元に試作を繰り返しまずは国内研究機関において使用可能な多機能電極としての完成度を向上させる。その後市場調査結果を参考に世界への試作品販売を開始する。

#### ②事業化に向けての市場調査

事業化に向けて本開発製品の優位性を調査するため、競合他製品の技術動向、基本機能・性能、販売価格、について調査を行う予定である。調査に際しては国内の医療機器販売メーカーとも連携して情報収集する。