

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「レーザー露光技術によるロボット向け超微細MEMSコネクタの開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 株式会社キャンパスクリエイト

目 次

第1章 研究開発の概要	P2
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	P2
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	P4
1-3 成果概要	P6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	P7
第2章 本論	
2-1 初期コンセプトのMEMS コネクタ	P8
2-2 初期コンセプトモジュールの伝送特性	P9
2-3 レーザリソグラフィーによる高 アスペクト DFR 加工	P10
2-4 高強度エレクトロフォーミング素材の開発	P11
2-5 MEMS コネクタの水平型コンセプトと試作	P13
2-6 微細 MEMS コネクタのロボットへの応用	P15
2-7 MEMS コネクタ量産での自動検査システム	P16
2-8 特許・展示会・学会発表について	P16
最終章 全体総括	
(1) 研究総括	P17
(2) 実用化総括	P19

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

研究開発の背景

日本のロボット産業は、図1に示すように今後も大きな成長が期待されており、日本はこの分野で世界でも最も生産額が大きく技術的にもリードしている。それ故、高性能なロボットは、国が目指す『安全で安心な社会の構築』に欠かせない製品である。

今後、ロボット技術はこれまでの多関節のアーム型の溶接ロボットなどから、図2のような医療ロボット、介護ロボット、警備など、小型で複雑な作業の補助ができるロボットへと進化することが期待され、具体的に開発と実用化が進んでいる。現在アルファ精工と共同研究をスタートした 東京大学 情報理工学系研究科の石川・妹尾研究室のハンド型ロボットでは多数のケーブルがコネクタで結合した構成となっており複雑な指の動きでボールを掴んで投げる動きが可能である。

国内ロボット市場規模予測(経産省 NEDO)

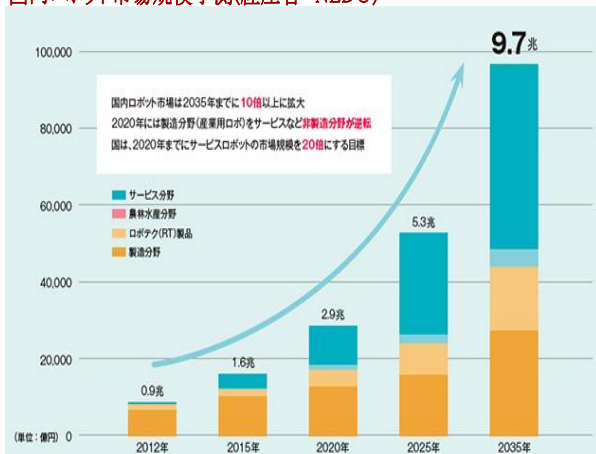


図1 国内ロボット市場予測

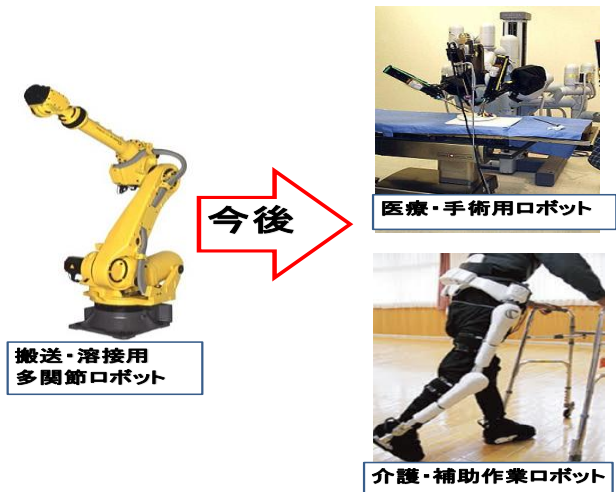


図2 今後のロボット発展分野

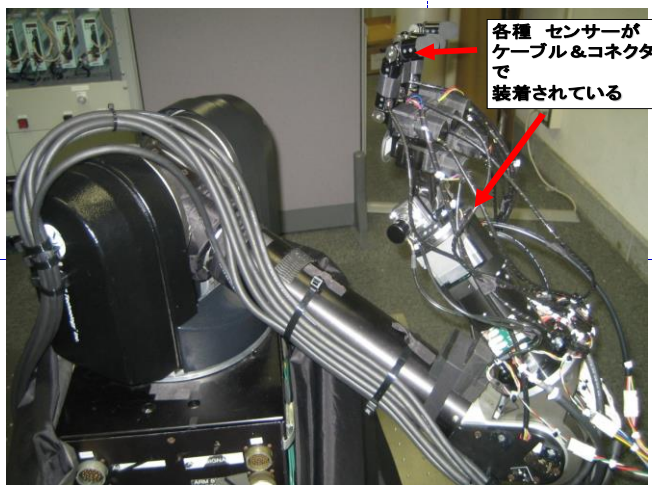


図3 東京大学 石川・妹尾研究室のロボットハンド

現状では、図3の写真に示すように、ケーブルとケーブル、あるいはケーブルと機器を接続するコンパクトなコネクタが存在しないため、手の外側にケーブルが複雑に絡んだ形態になっており、当然複雑で俊敏な動き

の妨げとなっている。そこで、コネクタを微細化し同時にケーブルをコンパクト化することで、以下の各種ロ

ボットの高性能化が可能となる。

- ・多関節ロボット →高速可動が可能 →生産性の拡大
- ・介護ロボット →軽量化が可能 →小型化と低価格化が可能
- ・組み立てロボット →微細で複雑な組み立てが可能 →生産性の拡大
- ・医療ロボット →複雑な医療行為が可能 →小型化が可能

内視鏡カメラと超音波診断装置では、ケーブルの多芯微細接続で高精細な画像伝送が可能で、医療技術の進歩に貢献できる

研究目的

本研究開発では、細線同軸ケーブルタイプのコネクタを基本として、MEMS 技術で、それよりはるかに小さい図4のような超小型構造のケーブル間接続コネクタを開発する。

実際に開発中の製品断面構造を図5に示す。

この微細なコネクタは上下のΦ0.3～0.5mmの同軸ケーブル同士を繋ぐもので、現行の市販のものは最小のものでもコネクタ径は Φ5～10mmで接続部長さは15mm以上と大きい。

本開発では、この部分をΦ0.5～1.0mm 長さ5mm程度と小さくする。ここで重要になる技術を優先順に挙げると

- ① コネクタの 凹凸端子の 立体的形状加工
- ② 端子の接続の電氣的信頼性確保（＝端子素材の硬さ、バネ性、表面性情）
- ③ 挿抜に耐える機械的耐久性確保（＝構造、端子強度、剛性など）
- ④ 同軸ケーブルの垂直アセンブリ加工方法
- ⑤ 多彩な動きに耐えうる接続固定方法

などである。

固定は補強のために全体をΦ0.5～1.0mmのスリーブで補強した構造のケーブルコネクタを開発する予定で進めている。

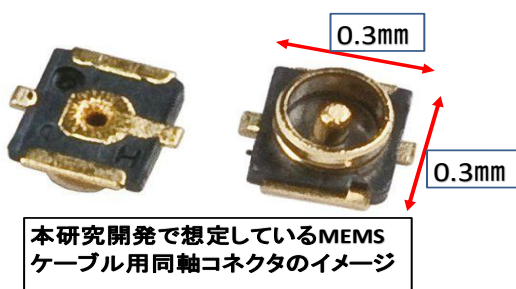


図4 本研究で目指す3次元MEMSコネクタのイメージ

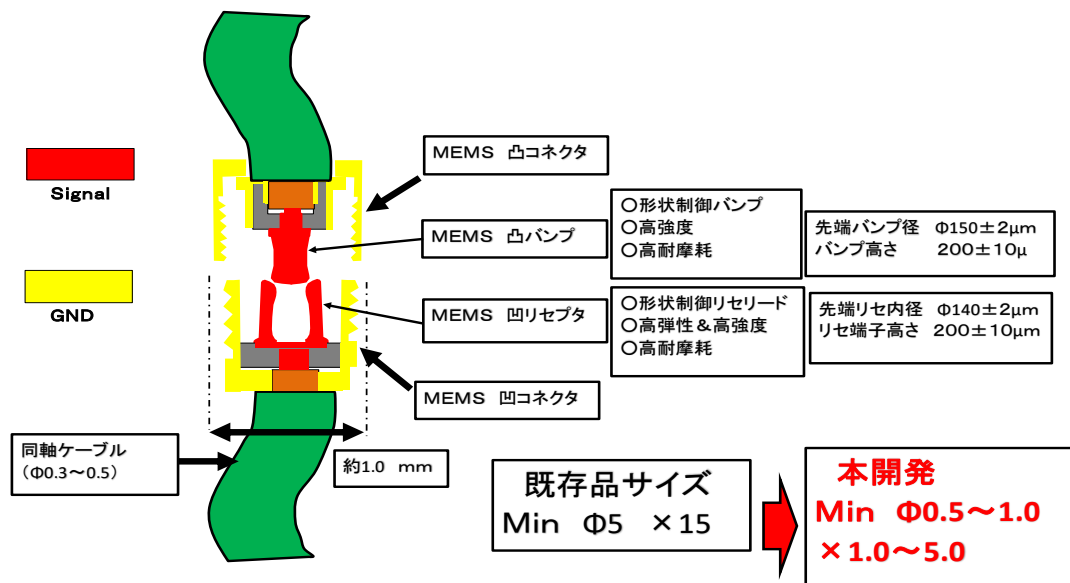


図5 開発目標とする超小型 MEMS コネクタ&ケーブルモジュール

1-2 研究体制

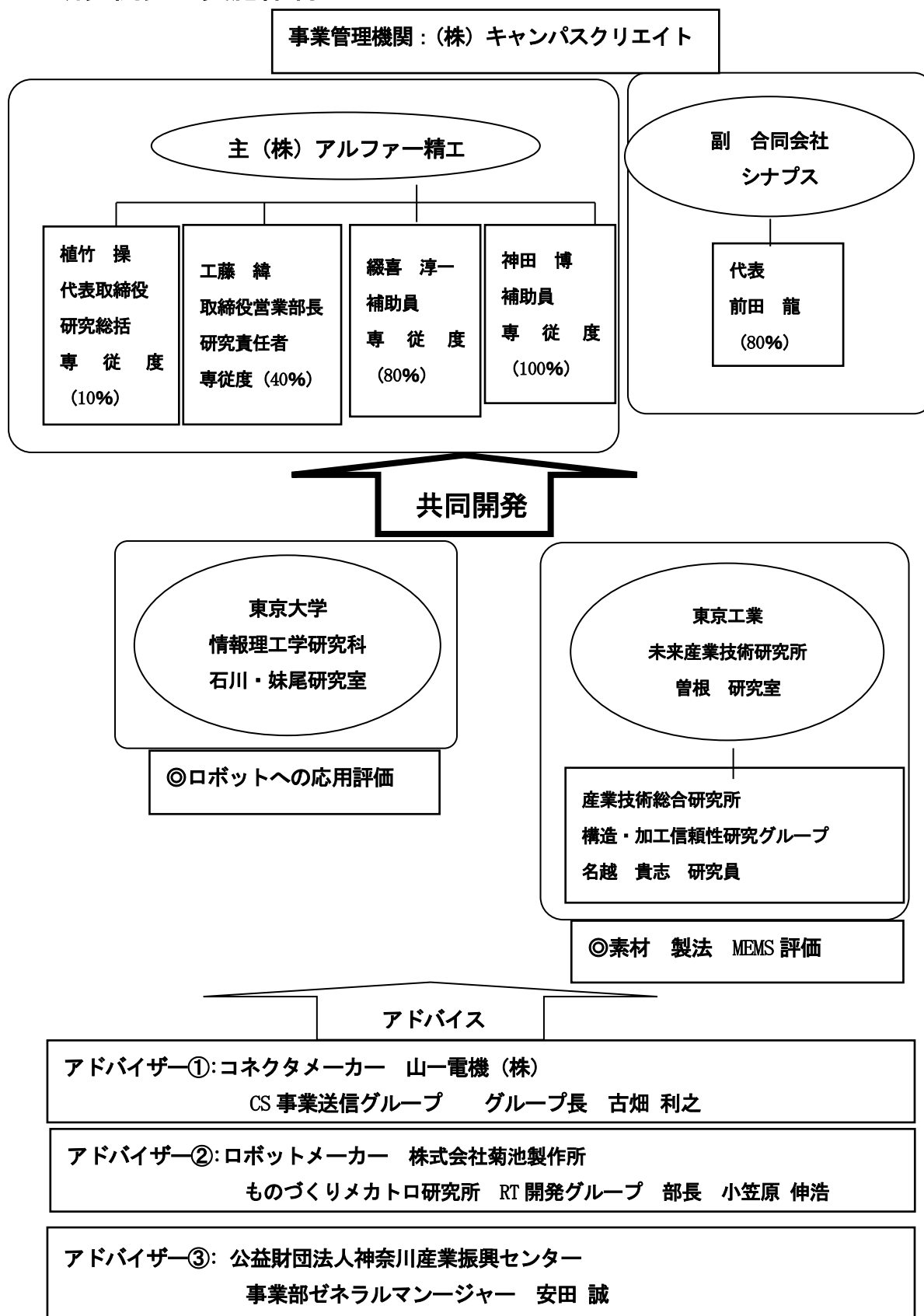
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

研究実施体制は、事業管理機関(株)キャンパスクリエイトが幹事となり、(株)アルファ精工が主になり、合同会社 シナプスが共同研究開発社として開発を推進する。これに 東大 石川・妹尾研究室 と東工大 曽根研究室、産業技術総合研究所の名越研究員が共同研究者として研究開発に参画して研究開発する構図である。またアドバイザーとしてはロボットメーカーからは株式会社菊池製作所、ロボットに関連する財団からは公益財団法人神奈川産業振興センター、コネクタメーカーからは山一電機株式会社に加わってもらいアドバイスを受ける開発体制となっている。

本開発では、主に(株)アルファ精工でレーザーリソグラフィーを用いた高精度で微細なコネクタ試作に成功し、合同会社シナプスではこれに同軸ケーブルをアセンブリして、コネクタとケーブル一体構造のモジュール作製に成功した。

東工大曽根研究室と産業技術総合研究所では、コネクタに用いる高強度・高靱性のNiエレクトロフォーミング素材開発に成功し、東大妹尾研究室で実際ノロボットハンドのセンサー部分に、試作したコネクタモジュールを取り付け実用化試験を行い実証試験に成功した。

研究開発の実施体制



1-3 成果概要

3年間で達成した全体的な成果概要と 研究開発項目と目標達成率の表を下記に示す。

○レーザー直描による超微細加工のMEMSパーツができることがわかり、今後の微細電子部品作製において極めて有意義な加工法を開発した。
 ○世界一小さいロボット用の同軸ケーブル&コネクタモジュール開発に成功し、ロボットの小型軽量化と俊敏な動きのできるロボット開発に貢献できることが分かった。
 ○量産レベルでの製造に、量産レベルでの自動検査装置を導入し、低コストで信頼性の保証できるコネクタ製造技術開発を可能にした。
 ○今年度開発結果より、量産化に向けた大型シートでの加工が可能であることがわかり、今後量産化と低コスト製造が可能であることがわかり、実用化一歩手前まで来ることができた。

研究開発項目と目標達成率（2019年3月）	
研究開発項目	達成率（%）
①高精度の3次元MEMS立体造形技術課題への対応	
①-1レーザーの露光光源の改良による、より高精度の部品加工の技術開発	100
①-2 立体方向への形状変化する露光現像技術の開発	平成29年度完了
①-3 直描リソグラフィにおけるレーザーアライメント技術開発	100
①-4 DFRの積層技術開発	平成29年度完了
①-5 高アスペクト加工の現像技術開発	平成29年度完了
①-6 DFRの最終剥離技術開発	100
②高弾性金属素材の課題への対応	
②-1 高強度・高弾性 NIエレクトロフォーミング素材の開発	平成29年度完了
②-2 エレクトロフォーミング時間の短縮化の開発	平成29年度完了
②-3 マイクロ エレクトロフォーミングパーツの評価解析技術の開発	100
③マイクロコネクタの開発評価技術課題への対応	
③-1 ロボットケーブル用マイクロコネクタの設計	100
③-2 コネクタの取り付け作業性の評価技術の開発	100
③-3 コネクタの耐久性の評価	100
④量産技術開発の課題への対応	
④-1 大型シートで多数個取りにおける高精度位置合わせ技術の開発	95
④-2 大型シート内製造における面内各種ばらつき改善	85
④-3 画像検査による不良品認識の検査システムの確立	100

(株)アルファー精工

工藤 緯

E-mail **kudo@alphaseiko.jp**

代表

前田 龍

E-mail ryumaeda5635@ozzio.jp

曾根 正人

Email sone.m.aa@m.titech.ac.jp

妹尾 拓

E-mail Taku_Seno@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

名越 貴志

E-mail nagoshi-t@aist.go.jp

2章 本論 (2-1) 初期コンセプトのMEMS コネクタ

2016～2017 年にかけて下記の垂直に同軸ケーブルをアセンブリした、凹凸のコネクタ開発を行った。図6の写真は試作した凹凸コネクタである。ケーブルアセンブリして凹凸コネクタを勘合すると図7の写真のようになるものである。

このコネクタは初期の設計値通りのものが試作加工できたが。同軸ケーブルのアセンブリが極めて困難であり開発方向修正せざるを得なかった。

微細径の同軸ケーブルをレーザー露光で作製する 3 次元 MEMS コネクタの開発に成功した。

凹凸 MEMS コネクタ バンプ (直径: 0.8 mm 高さ: 0.2 mm)

試作に成功した 凹凸MEMSコネクタ バンプ
(直径:0.8mm 高さ:0.2mm)

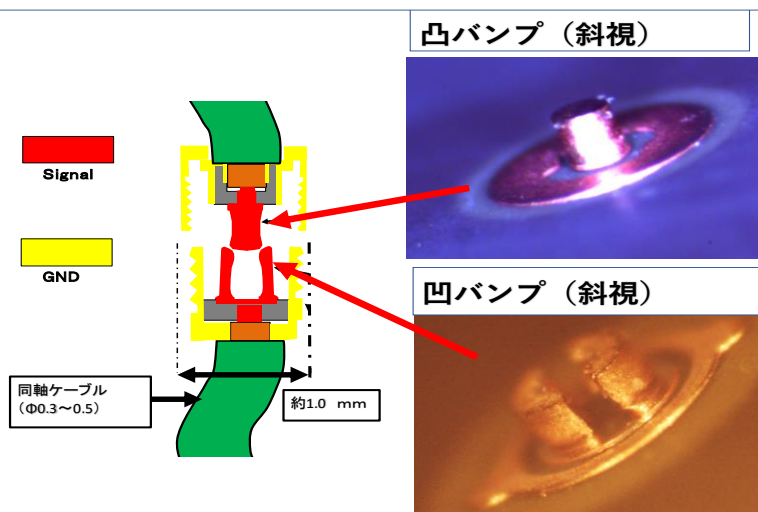


図6 初期試作 MEMS コネクタ

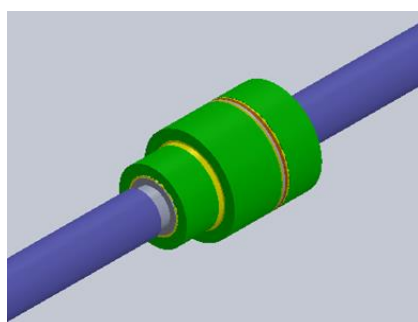


図7 同軸ケーブルアセンブリ後の凹凸勘合状態 (CAD 完成図: 凹凸勘合状態)

試作では図 7 のように高精度のバンブ形成が可能となった。

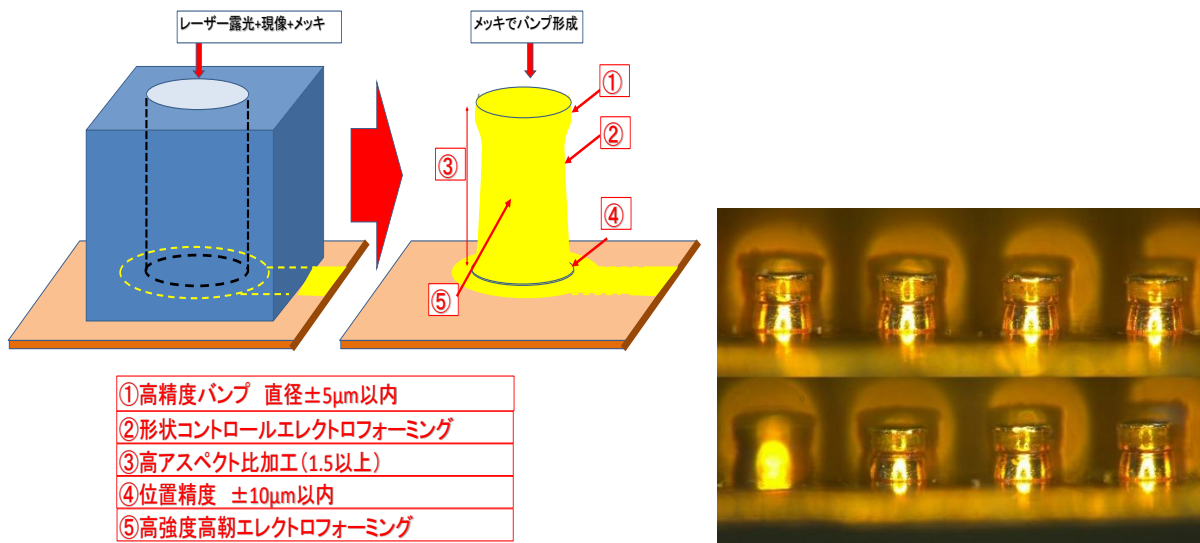


図8 初期コンセプトの試作に成功したバンブ精度とバンブ形状の例

当初 本研究の最大の課題は図8のような高アスペクト比で高精度で且つ、写真のような3次元の高さ方向に形状制御したバンブができるかどうかであった。このバンブがコネクタの基本パーツとなる。

この課題に向けて、各種条件出しを行い、ほぼ理想的なバンブ作製に成功した。

バンブ直径は $\pm 5\mu\text{m}$ 直径が $150\mu\text{m}$ で高さが $250\mu\text{m}$ 以上のものが試作できた。

(2-2) 初期コンセプトモジュールの伝送特性

そして 凹凸のバンブ形成したものに、図7のCAD図面のような同軸ケーブルをアセンブリしたものは、FEMによる伝送路の電磁解析で 図9のようになり、コネクタが有っても、同軸ケーブルとほぼ同一の伝送特性になり、極めて損失の少ないコネクタができるかを示していた。

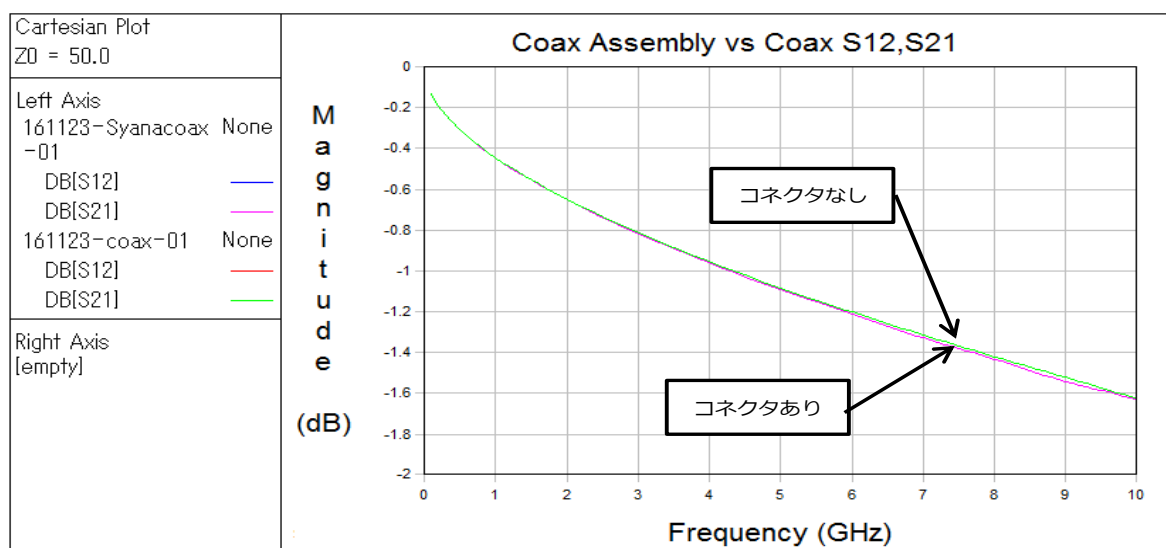


図9 MEMS コネクタがある場合ない場合の伝送特性の比較

(2-3) レーザリソグラフィーによる高アスペクト DFR 加工

本開発では、通常のハロゲン光源によるリソグラフィではなくレーザリソグラフィーを用いる点が特徴である。

その理由として

- ① 極めて高精度で大きさ 500mm 角シート全面に加工できる点。
- ② さらに レーザ光特有の露光光源委より DFR への高アスペクト加工ができる点にある。

図 10 その試験結果の一例であり、各種のレーザリソグラフィーの条件と露光現像の条件を最適化することにより、凹凸の無い平坦な差材である SUS 上に形成した場合 アスペクト比 3 程度の加工を達成することができた。

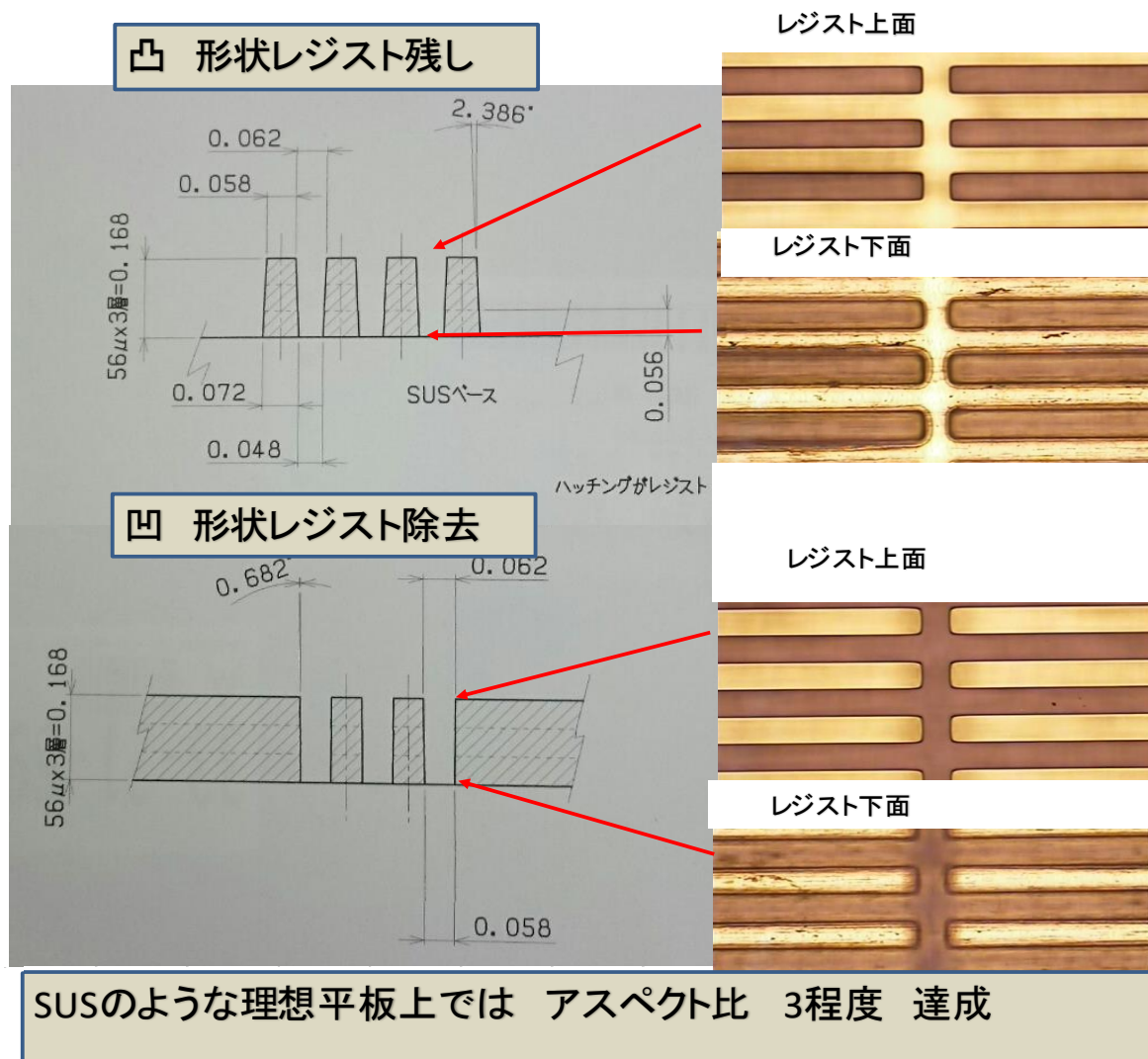


図 10 レーザリソグラフィーによる高アスペクト加工に関して

このような、高アスペクトの DFR 加工により、その後のエレクトロフォーミングによる Ni メッキが、高さ方向に高精度にしかも立体的に加工でき、勘合性能と信頼性に優れる凹凸立体 MEMS コネクタの開発が可能となるものである。

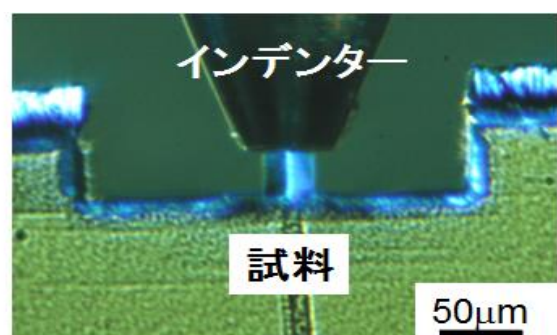
(2-4) 高強度エレクトロフォーミング素材の開発

本開発の微細な MEMS コネクタには、高強度で高靱性素材の Ni エレクトロフォーミング材料が必要となる。

そこで、本件に関し、(株)アルファ精工 合同会社シナプス 東工大菅根研究室 および産総研名越研究員で高強度な Ni 素材開発を行った。

東工大菅根研究室 産総研名越研究員は下記図 10 のような、マイクロパーツの機械特性の把握が可能でありであり。種々の条件のもと、図 11 に示すような極めて高強度の Ni 電鍍素材開発が可能となった。

この素材は引張強さが 270MPa で、弾性領域が大きいことから、MEMS コネクタとしては理想的素材と推測される。



変位制御による圧縮試験

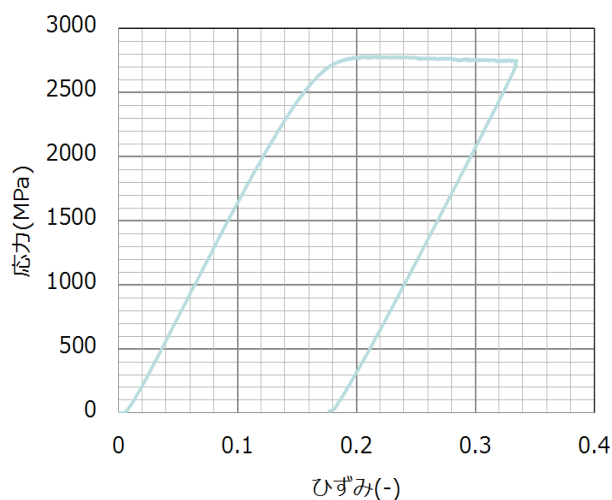


図 11 開発した Ni 電鍍素材の機械的測定データ

このような Ni 電鍍素材は、電気メッキ時の電流密度やメッキ形成する平板上のメッキ位置によって大きくメッキ厚ばらつきが生じることも判明し、量産時におけるメッキ条件を厳しく管理することが重要であることが分かった。

図 11 にメッキ電流密度と、メッキした素材の機械特性の関係を示す。ここでは 20mA が機械特性面で優れていることが分かった。

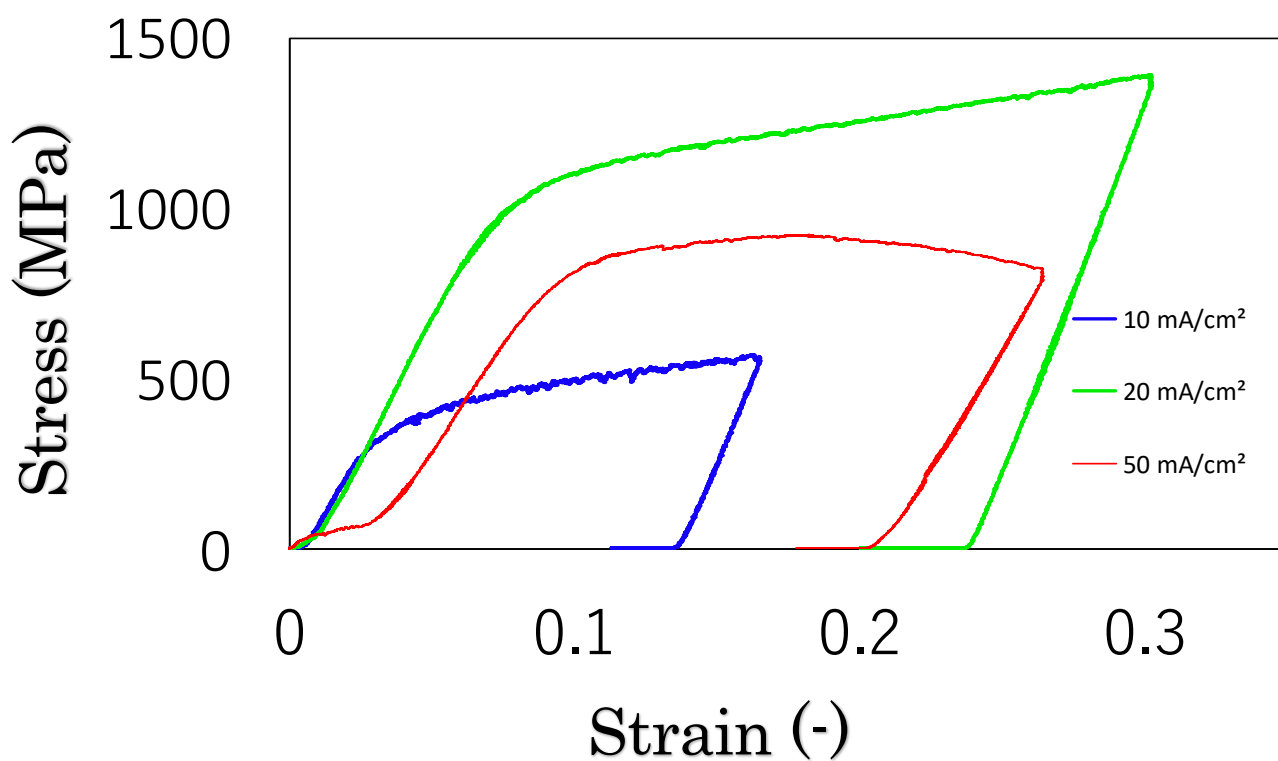
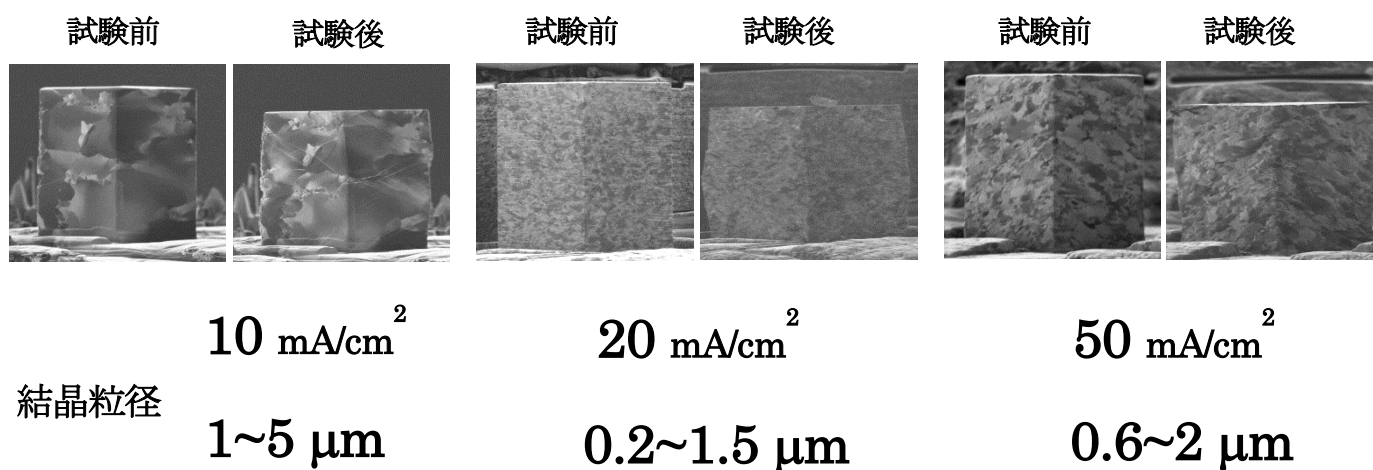


図 12 メッキ電流密度と素材機械特性の関係

このメッキ電流水密度を変化させた場合のマイクロ素材の圧縮試験前後の SEM 像を図 13 に示すが、電流密度 20A の時が一番微細な結晶粒径であることが観察できる。

図 13 圧縮試験前後の SEM 像



(5) MEMS コネクタの水平型コンセプトと試作

開発 1 年目の垂直型 MEMS コネクタでは同軸ケーブルアセンブリが極めて困難であることから、開発 2 年目からは、図 14 に示すような水平型の凹凸端子のコンセプトに変更し、高強度の Ni 電鍍素材でコネクタサンプル加工を行った。この製法により、同軸ケーブルを水平方向から接続でき、試作が可能となった。

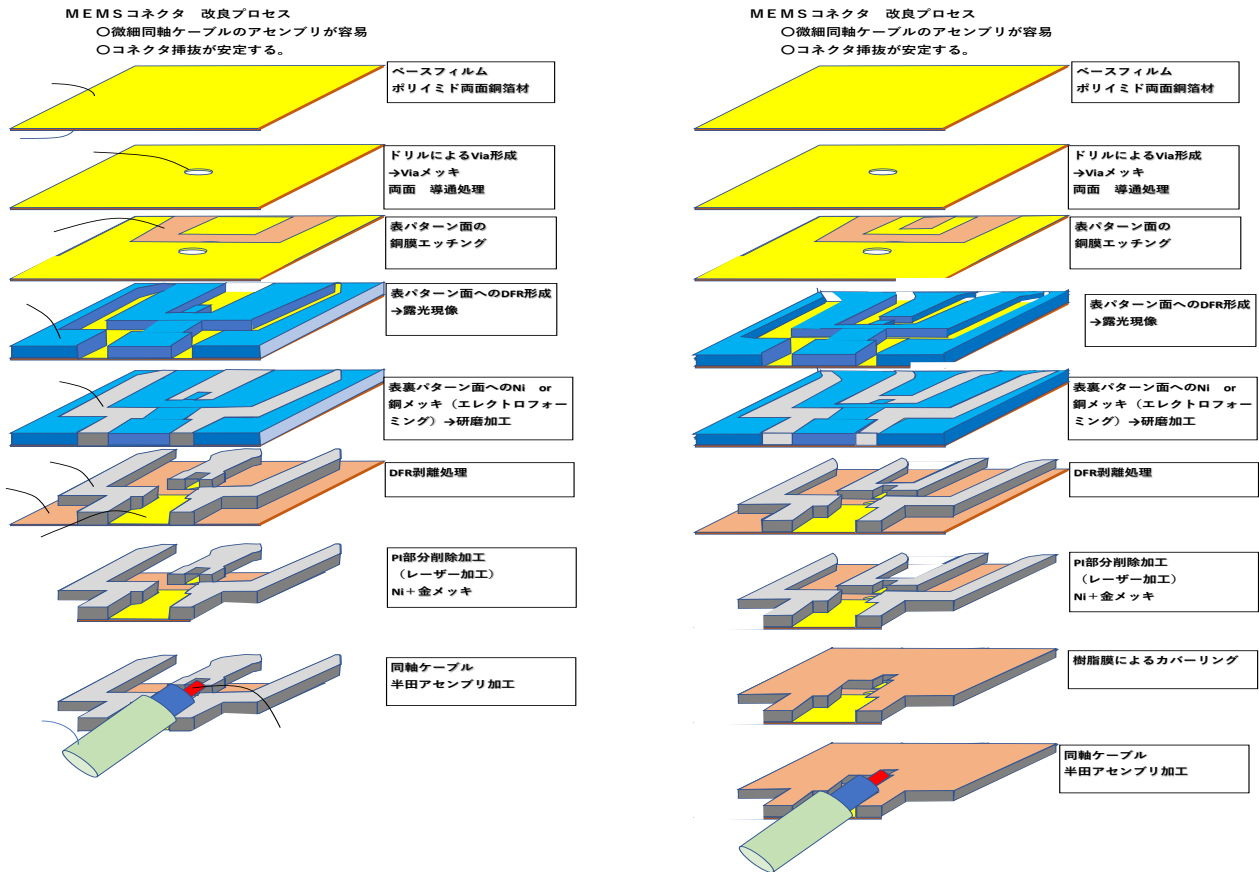


図 14 水平型 凹凸 MEMS コネクタ製造プロセスとケーブルアセンブリ方法

この方法により試作した同軸ケーブルアセンブリ前の凹凸コネクタの写真を下記に示す。

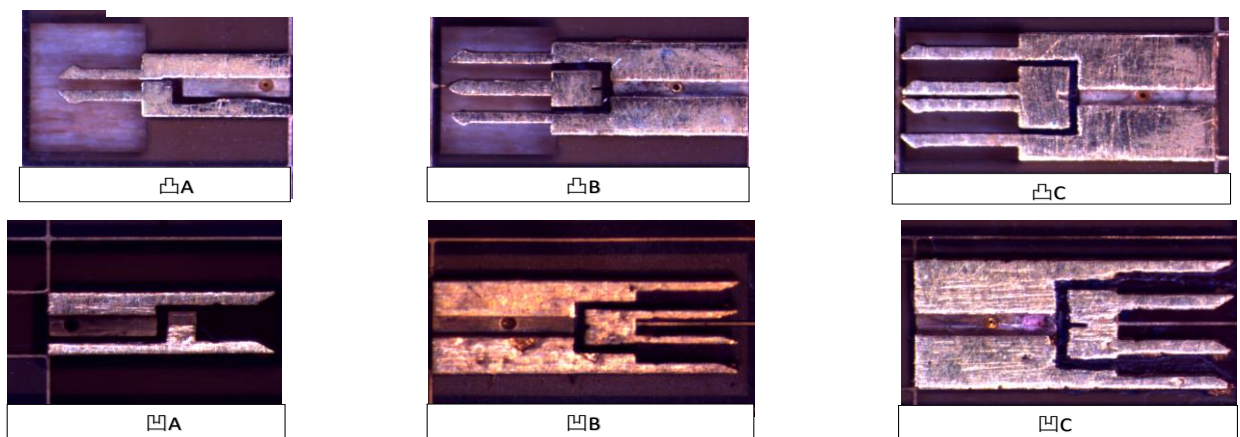


図 15 試作した水平型 MEMS コネクタ

また 凹凸端子を勘合して挿抜試験した前後の電気接触抵抗試験の結果と勘合写真を図 16 に示す。
Ni 電鍍素材のばね性が良好であるため、100 サイクル挿抜後も接触抵抗はほとんど変化しなかった。

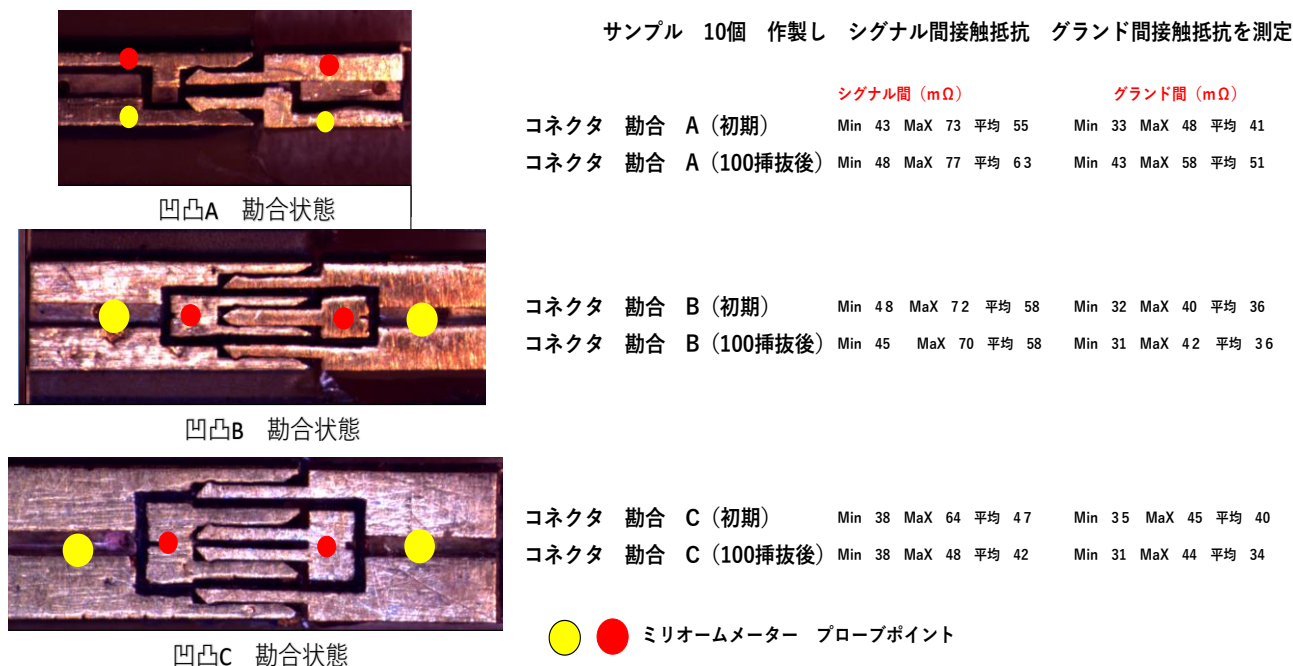


図 16 開発に成功した、サイズの異なる凹凸 MEMS コネクタの勘合サイクル試験結果

φ0.3 mmの極細同軸ケーブルをコネクタにアセンブリし、両社を勘合した場合の写真を図 17 に示す。

また 既存の最も小さい同軸コネクタとの比較で示すが、本開発により体積で 1/ 100 以下の小型化が可能となった。

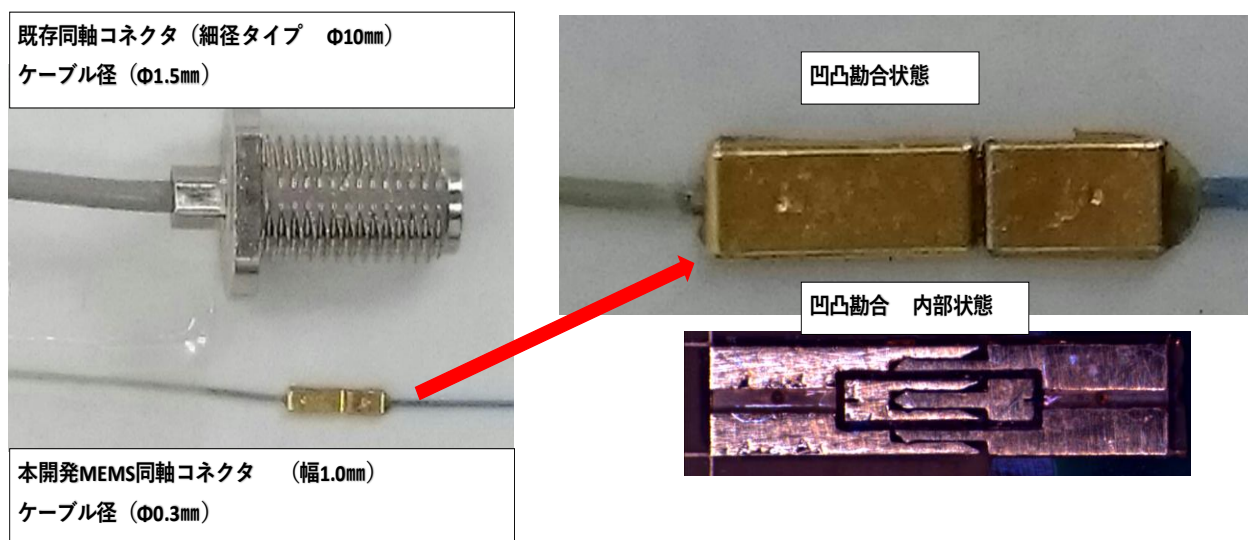


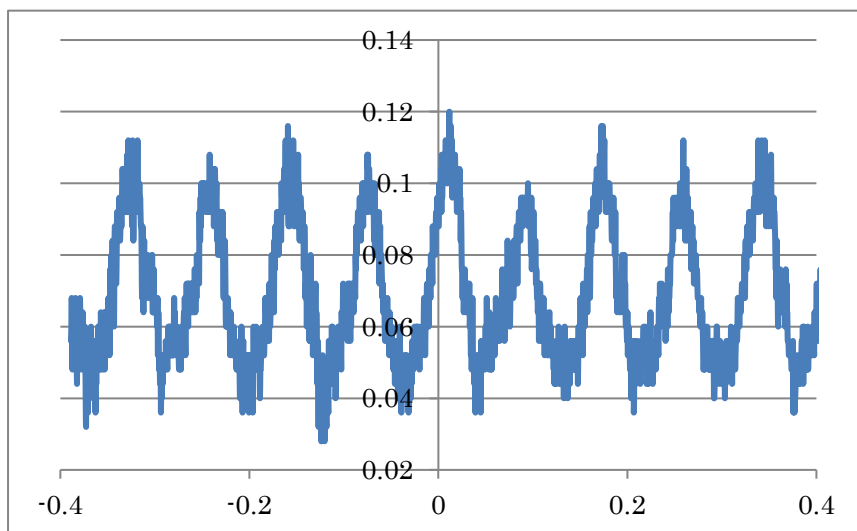
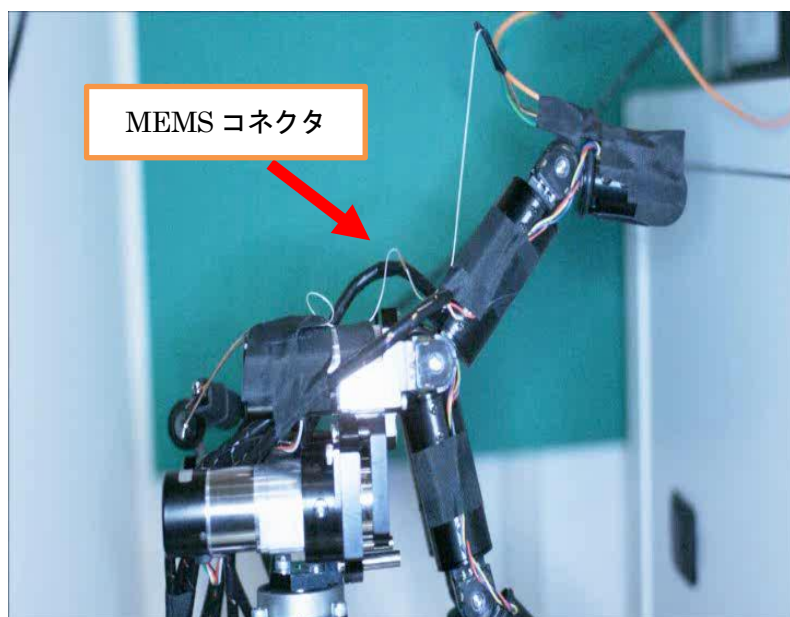
図 17 開発した同軸ケーブルアセンブリコネクタと、既存品との比較

(6) 微細 MEMS コネクタのロボットへの応用

次に、ここで開発した同軸ケーブル付き MEMS コネクタを、東大 石川・妹尾研究室のロボットの指のセンサー信号の伝送部分に応用した。

ロボットの指先に近接覚センサーを取り付け、近接覚センサーの配線部にケーブルコネクタを用いた。

指先数センチ手前に壁をおき 6Hz の sin 波軌道で指先を制御し、指を高速で上下に振動させ、その時の近接覚センサーの出力を測定すると、図 17 のように従来の大きいケーブルコネクタの場合とほとんど変わらなく信号伝送が可能であることが分かった。



ロボット制御に
問題なく利用可能

図 18 東大 石川妹尾研究室のロボットハンドに MEMS コネクタを応用しシグナルの応答を観察

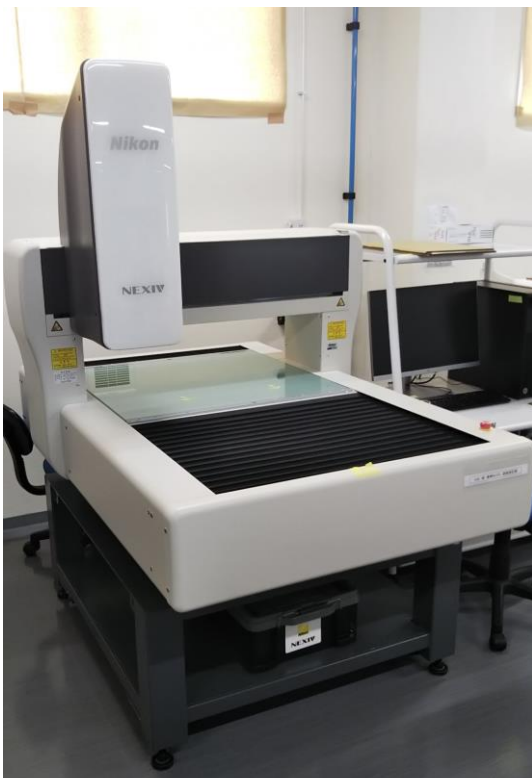
（7）MEMS コネクタ量産での自動検査システム

本開発では、コネクタ単価を安くするため、250 mm×500 mm角シート全面にコネクタを面付して製造する量産製造を検討した。

この製造方法により、コネクタ単体価格を1個 10円程度まで低コスト化することが可能となる。しかし、量産ではシート面内での製品ばらつきや、個々のコネクタの異形状など不良が多々発生する。

そこで（株）アルファード精工では下記の全自動の画像計測装置を購入し、製品不良を自動で検知する品質保障システムを確立した。

これにより本コネクタの量産での製造とその品質の保証が可能となった。



CNC 画像測定器の導入

○測定領域 XYZ : 650×550×200 mm

○測定精度 0.1μm 以下

MEMS コネクタの DFR パターン自動計測&不良認識 ソフトを作成し検査システムを確立した

図 19 MEMS コネクタ量産製造における、製品の全自動検査システム

（2-8）特許・展示会・学会発表について

本研究開発を遂行するにあたり、下記2件の特許出願と、国内と海外論文発表、展示会での製品発表を行い製品PRを行った。

特許出願 2件

○2016年出願 垂直型MEMSコネクタ

○2018年出願 水平型MEMSコネクタ

国内学会

1. 山本 貴大, 井川 健吾, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, 名越 貴志, 工藤 緯, 前田 龍, 曾根正人.
スルファミン酸ハイスピード浴を用いて電気めっきしたニッケル膜の機械的特性に
及ぼす電流密度の影響, 応用物理学会第 65 回春季講演会, 応用物理学会第65回春季講演会, Mar. 2018.

国際学会

2. Takahiro Yamamoto, Kengo Igawa, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Takashi Nagoshi, Osamu Kudo,
Ryu Maeda, Masato Sone. Micro-Mechanical Properties of Defect-Free Nickel Electrodeposited
at a High Growth Rate toward MEMS Devices, 44rd International Conference on Micro & Nano
Engineering (MNE2018), 44rd International Conference on Micro & Nano Engineering
(MNE2018), Sep. 2018.
3. Takahiro Yamamoto, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Osamu Kudo, Ryu Maeda, Masato Sone.
Effects of Current Density on Mechanical Properties of Electroplated Nickel with High Speed
Sulfamate Bath, 22nd Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry, Apr. 2018.

展示会 2回

ものづくりパートナーフォーラム in 東京 2017 に出展

ものづくりパートナーフォーラム in 東京 2018 に出展

最終章 全体総括

(1) 研究総括

全体の各テーマの目標と最終年での目標および最終年末での進捗達成状況を下表で示す。

各テーマ ほぼ 100%に近い進捗率であったが、下表④に示す大型シート製造時の量産プロセスに関しては、まだ課題が残り検討の必要がある。しかし全体的には当初の計画に沿ってほぼ満足できる研究開発が達成できた。

究開発実施内容	年度目標	進捗状況
①—1 レーザーの露光光源の改良による、より高精度の部品加工の技術開発	直描機のレーザー光源径を小さくしΦ50～100μmの抜け加工を確立する。	光源径ではなく加工条件を改良し、抜け加工直径でΦ20～50μmの微細加工を達成した。今期ほぼ100%達成。
①—2 立体方向への形状変化する露光現像技術の開発	2種類のDFRで3～5度のテーパ加工を可能とする。	1種類のDFRで立体方向の形状を把握し約3度のテーパ加工を達成した。今期100%達成。(平成29年度で達成済)

①—3 直描リソグラフィにおけるレザアライメント技術開発	ワークサイズの縮小とアライメント位置ずれ 20 μ m 以内	A4 サイズにワークを縮小し最大 8～10 μ m の位置ずれに抑えることができた。今期 100%達成。
①—4 DFR の積層技術開発	50 μ m 厚 DFR5 層、トータル 200～300 μ m 積層で、反りと皸検証する	5 層までは問題なく積層化でき、反り量と皸発生の原因を検証した。今期ほぼ 100%達成。（平成 29 年度で達成済）
①—5 高アスペクト加工の現像技術開発	DFR200～300 μ m で、アスペクト比 1.2～1.5 の加工の条件見つける。	アスペクト比で 1.2～1.5 の安定加工の条件を把握した。今期 100%達成。（平成 29 年度で達成済）
①—6 DFR の最終剥離技術開発	特殊 DFR 素材で 1 時間以内の剥離加工を目標とする。	特殊 DFR 素材では課題が多く、通常素材であったが、0.5～1 時間で剥離できる技術開発を行った。今期 100%達成。
②—1 高強度・高弾性 Ni エレクトロフォーミング素材の開発	引張強度 50～80Kg 程度のエレクトロフォーミング素材を開発する。	種々のメッキ液から 200k g 以上の高強度 Ni メッキ系を確立した。今期 100%達成。（平成 29 年度で達成済）
②—2 エレクトロフォーミング時間の短縮化の開発	エレクトロフォーミングの高速メッキで各種条件により 10 時間以内のメッキを目標とする。	新規設備導入設備で電流密度とメッキ状態の関係を把握し 数時間でトータル 200 μ m 厚みのメッキ条件を把握した。今期ほぼ 100%達成。（平成 29 年度で達成済）
②—3 マイクロエレクトロフォーミングパーツの評価解析技術の開発	曽根研究室と共同で微小試験片の降伏強度の計測試験を行う。	マイクロエレクトロフォーミングパーツを FIB により微小サンプル加工し降伏強度の計測実験を行った。今期 100%達成。
③—1 ロボットケーブル用マイクロコネクタの設計	新規コンセプトでモジュール開発を行う。	新規コンセプトで 4 種類の MEMS コネクタの試作を行い、ケーブルモジュールも作製した。今期 100%達成。
③—2 コネクタの取り付け作業性の評価技術の開発	挿抜性を改良したコネクタを試作しロボット用に応用する。	新既コンセプトのコネクタで挿抜性を改良し、ロボットに組み込み試験した。今期ほぼ 100%達成。
③—3 コネクタの耐久性の評価	コネクタの耐久性において屈曲試験で 1～3 万回をクリアする。	コネクタの挿抜や屈曲試験を行い、屈曲 3 万回をクリアした。今期 100%達成。

④ー1 大型シートで多数個取りおける高精度位置合わせ技術の開発	250×500 mmサイズで±10μmの位置合わせ精度を確立する。	今期はワークサイズ縮小し250 mm角で±8μmの位置精度&位置合わせ技術の開発を行った。今期ほぼ95%達成。
④ー2 大型シート内製造における面内各種ばらつきの改善	250×500 mmサイズでばらつきを把握する。	250×500 mm角のワークサイズでシート内の位置ずればらつきを測定した。今期ほぼ85%達成。
④ー3 画像検査による不良品認識の検査システムの確立	デジタル画像検査機で実試験し検査の課題発掘と検査技術の改善を行う。	デジタル画像検査で検討開始し量産での品質保証のめどたった。今期ほぼ100%達成。

(2) 実用化総括

本開発ではロボット分野に特化したEMSコネクタの開発であり、下表のようなロボット分野への応用ニーズがあり将来に期待したい。

現状では本開発品のMEMSコネクタの販売実績はないが、ロボット以外の分野でスマホアンテナのケーブルコネクタ、内視鏡カメラのコネクタ、半導体試験装置のコネクタなど引き合いがあり試作を始めている状態である。いずれの分野も、小型薄型で超微細な本MEMSコネクタの利用が期待される分野であり、今後市場が期待される分野でもある。

本試作で実績を出し、将来ロボット分野で製品販売で貢献したと考えている。

MEMS コネクタの具体的なニーズ(ロボット分野)

用途 製品	具体的ユーザー	
高屈曲耐荷重ケーブル&コネクタ	沖電線 igus	
力覚センサー(特にロボット指先)	BLオートテック ワコーテック	
ドローン	自律制御システム研究所, パロット等	
ロボットハンド	THK, Robotiq等	
統合ロボットシステム (手先に各種センサー 3Dカメラ)	ファナック 安川電機	