

平成28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

「ゴムコア通電ボールを電気接触ピンとして利用した

新方式半導体ソケット開発」

研究開発成果等報告書

平成29年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 一般社団法人産学金連携推進機構

## 目 次

### 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

1-2 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 連絡窓口

### 第2章 本論

2-1 複合ゴムボールコアーシェル構造製造技術

2-2 通電ボール検査装置設計と製造

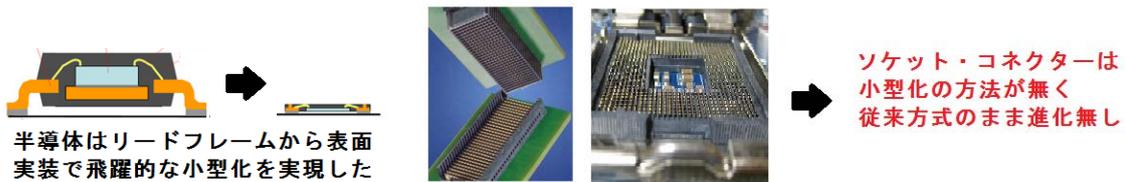
### 最終章 全体総括

## 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 研究開発の背景

電子デバイスの分野では半導体・電子部品の高機能化・多機能化・大容量高速情報処理化に向けて、小型化、実装面積を小さくするためリードフレームと呼ばれる接続部品を廃止、はんだボール・バンプ等でダイレクトに接合することで小型化が進み小型軽量化してきたが、他の基板、モジュール等とデータ転送のやり取りにおいてコネクタ部分のみが従来技術まま進歩していない状態が続いている。



半導体や導体や電子部品と異なりコネクタは抜き挿し出来なければならないという機能を要求される。したがって、熔融接合せずに電気信号を伝えるためには、導電体である金属ピンを一定以上の力で押し当てることが不可欠で、金属を細長く加工したバネ機能を付与したピンを利用する以外に方法がないとされ、表面実装のような方法での小型軽量化は不可能であるとされてきた。

新方式は、表面実装と同等の形状において導電体同士を押し当てる機能を付与するために、微小なゴムボールの表面に金属皮膜を形成して、ゴムが持つ弾性を押し当てる力として利用して情報通信データが可能なレベルの通電性を得る画期的な方法である。

#### ② 研究開発の高度化目標及び技術的目標値

##### <高度化目標>

##### エ. 特殊形状接合用部品及び極微小接合用部品の実現

従来方式は他に手段が無いことから従来の方法で小型化するという手段で対処してきたが金属の特性上、小型化すると押し当てる力のスプリング性能も比例して低下し導電体同士が接触する面積も小さくなることから抵抗値が上がり小型化するとデータ通信能力も低下すると共に耐久性も低下してしまうという弊害を抱えていた。

そこで、金属バネ材に代わる新規な弾性材料を用いて接続する機構を発想し、省スペースで接続でき、単純な接続機構で高周波特性に優れ、製造プロセスの単純化による低コストで製造できる新たな接続機構を実現する。

これまで解決すべき課題が多すぎるということで諦められていたゴムボールに金属皮膜を形成した方式である新技術で広い接触面積を得て低抵抗、単純で表面積が広く電気信号を伝達でき高周波ノイズが出ない方法で小型軽量化・低コストでかつ大容量データ通信性能も飛躍的に向上させ高度化を図る。

高度化すべき課題とその具体的な技術目標は以下の通りである。

##### 【1. 複合ゴムボール製造技術開発】

##### 【1-1】材料の選定

水性媒体中でシリコーンゴム原料含有有機液滴とポリイミド原料含有有機液滴を合体させる際に、界面張力差を利用して、シリコーンゴム原料含有液滴をポリイミド原料含有相で覆った状態をマイクロリアクターの流路において複合液滴化する。流体力学を利用して水流で材料を均一に千切り、界面活性剤により調整された界面張力を利用して球形化させるため、比較的低粘度な材料である必要がある。

0.3 Pa・s以下の粘度 2材料の界面張力差付与

#### 【1-2】製造技術の確立

新規マイクロリアクターを設計試作し、0.3mm 0.5mm 0.8mm それぞれの均一粒子径で、シリコーンゴムコアボールの外側にポリイミド層が直径に対して所定の厚さ(直径の5%と想定)の粒子を生成する。

### 【2. 通電ボール製造と応用】

#### 【2-1】通電ボール製造技術確立

【1】で得られた複合ゴムコアボールにスパッタリング、湿式めっきで金属皮膜を形成してゴムコア通電ボールを製造する。この結果の品質を保証するための粒径検査技術を確立する。

#### 【2-2】通電ボールを用いたソケットの開発

完成したゴムコア通電ボールを電気接触ピンとして利用した半導体ソケット・コネクタの開発を行う。

目標としては、4種混合ガス試験に合格し、高温放置後も特性維持できる1000ピン前後の半導体ソケットの試作開発を行う。

## 1-2 研究体制

### 1. 事業管理機関

住所: 〒170-0005 東京都豊島区南大塚2-4-9-702

名称: 一般社団法人産学金連携推進機構

代表者役職・氏名: 会長 小島 彰

---

### 2. 総括研究代表者 (PL)

(フリガナ): タキザワ アキミチ

氏名: 瀧澤 明道

所属組織名: 株式会社リトルデバイス

所属役職: 代表取締役

### 3. 副総括研究代表者 (SL)

(フリガナ): トリイ トオル

氏名: 鳥居 徹

所属組織名: 国立大学法人東京大学

所属役職: 新領域創成科学研究科 教授

### 4. 特定研究開発等の拠点となる施設 (主たる研究開発等の実施場所)

施設名称: 国立大学法人東京大学 新領域創成科学研究科358号室内

住所: 千葉県柏市柏の葉5丁目1-5

5. 研究等実施機関【チェック】法認定中小企業者：☆、法認定申請者以外の中小企業：○

法認定申請者以外の小規模事業者：◎、大学・公設試等：□

研究等実施機関 (機関名)	代表者 役職氏名	連絡先	企業 チェック	備考
株式会社リトルデバイス	瀧澤 明道 代表取締役	① 埼玉県比企郡小川町腰越 555-1 ② 瀧澤 明道 ③ Tel. 0493-72-5692 ④ Fax. 0493-53-4085 ⑤ takizawa@little-device.com	☆	小規模事業者
国立大学法人東京大学	五神 真 総長	① 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 ② 鳥居 徹 ③ Tel. 04-7136-4656 ④ Fax. 04-7136-4647 ⑤ torii@k.u-tokyo.ac.jp	□	
住友精化株式会社	上田 雄介	① 大阪府大阪市中央区北浜 4-5-33 ② 辛島 修一 ③ Tel. 06-6220-8551 ④ Fax. 06-6220-8541 ⑤ S-karashima@sumitomoseika.co.jp		
株式会社エレック北上	林 和幸	① 岩手県北上市相去町平林 21 ② 石田 巖 ③ Tel. 0197-67-2341 ④ Fax. 0197-67-2340 ⑤ ishida@elec-k.co.jp	○	

6. アドバイザー

機関名又は氏名	所在地又は住所	代表者等	具体的な協力内容
山一電機株式会社	〒144-8581 東京都大田区南鎌田 2-16-2	太田 佳孝 CS 事業部 古畑 利之 03-6715-8944	ソケット開発
沖電線株式会社	〒211-8585 川崎市中原区下小田中 2-12-8	来住 晶介 営業部 稲穂 望 044-754-4363	コネクタ開発

### 1-3 成果概要

微小流路を用いてシリコンゴムとポリイミドを用いたコア-シェル微粒子および通電ボールの作製を行った。シミュレーションより、最適なシェル厚として40 $\mu\text{m}$ を想定した。界面張力の測定/拡張係数の導出により、架橋剤濃度に対するコア-シェル安定性を明らかにした。溶媒の希釈と最適な流量条件の導出により、シングルステップでのコア-シェル液滴生成プロセスを確立した。加えて、量産化に際し、ラプラス圧を考慮し気泡が滞留しない流路設計を行った。8流路並列化実験では気泡の残留が見られず、変動係数4%以下の単分散液滴が生成された。また、安定的な脱溶剤プロセスを考案した。生成した液滴乾燥処理後の粒子・スパッタ後の通電ボールの観察を行い、コア-シェル構造を確認した。また、180 $^{\circ}\text{C}$ 、24時間の耐熱試験を行い、クラック等が見られないことから熱膨張を抑制できている事を確認した。以上の結果から、微粒子生成に係わる基本的な製造技術を確立できたと考えている。今後は、シリコンゴムのコア-シェルが粒子の中心に正確に位置するように材料の微調整を行う必要がある。

前記、粒子を製造する過程においてポリイミドに含まれているトルエンが、シリコンゴムに吸い込まれ体積が膨張し、これを架橋させるとトルエンが抜けることで体積が収縮しポリイミド外殻とシリコンゴム心材との間に空間が発生することがある。

これを抑制するためにシリコンゴムの分子にPTFE(四フッ化エチレン)骨格をつなぐことで耐薬品性を持たせることに成功しトルエン・ヘキサン等に溶解しないシリコンゴムを開発できた。

次の工程である架橋(加熱して固化)作業において前記コア-シェルは、通常シリコンゴムの場合、比重密度が0.9~1.0gであり、これにトルエン0.86が進入すると比重が0.9g程度まで低下し1.0gのPVA水溶液に沈まない現象が起こる。

一方でポリイミドは比重が1.43gこの比重差により均一なポリイミド外殻が形成されない現象が発生することがあるが、PTFE骨格を持たせたシリコンゴム(フルオロタイプ)にすることでPTFEの比重2.0gが加わるため全体としての比重が1.42gとなりポリイミドとの比重差がなくなると共にPVA水溶液に確実に沈降することから安定したコア-シェルが可能となり、次の工程である架橋にあいてもシリコンゴムにトルエンが進入しないことから架橋後の体積収縮がなくなりポリイミド外殻とシリコンゴム心材との間に空間が発生しない。

金属皮膜の形成においてポリイミドとの密着強度が重要となるがポリイミドは金属との密着が悪いが、プラズマを照射することで表面の分子が分解されN基(窒素)を露出させる、これにチタンをスパッタ蒸着するが、この時にチタンが膜を形成しない程度(横つながりがない状態)に成膜し続いて銅系蒸着し膜が完全に覆う0.4 $\mu\text{m}$ まで厚さを確保する、これは次の銅膜を厚くする湿式メッキの際にメッキ液がコア-シェルに水分の浸入を防止させる必要がある、これは電子機器を製造する際によく行われる半田を溶解させ電子部品を電子基板に接合するリフロー時に270 $^{\circ}\text{C}$ 前後の過熱が行われる際に進入していた水分が気化し金属皮膜を破壊することがしばしば発生するため、これを防止するため0.4 $\mu\text{m}$ 以上を確実にスパッタで得る。

湿式メッキにおいてコア-シェル直径の5%を超えない金属皮膜にした、これを超えると降伏限界点と言われる値が上昇しゴムコア金属皮膜ボールを変形させた時に金属皮膜が折れやすくなり、これが繰

り返されるとひび割れの原因となる。

かといってコネクタースocket等は、各ピンに信号線、GND、電源等、多様な電圧、電流が流されることから薄すぎると電源等の電流が大きい電気が流れると許容量を超えた場合発熱発火の原因となるため降伏限界点、上限の金属膜の厚さを確保した。

金属は、酸素、窒素、硫黄分などと結合し電気絶縁化するセラミック質に化学変化する、本ゴムコア通電ボールは、溶融接合ではなく接触圧力を利用した非溶融接合であるため金属同士は接触しているだけであるため、ここが酸化等で電気絶縁化していくと電気抵抗地が上昇することから唯一酸化等を起こさない金属である金を表層に0.2 μm以上の膜を形成した。

全数検査装置の開発を行った。

電気を通電させるものであるもののひび割れ、欠損等があっても球形であるため全周が完全にひび割れないと電気を通して多少、電流量の低下、抵抗値の上昇等の性能低下は発生するものの電気自体は通電する。すべてを電圧抵抗測定することは事業化する際のコストとして膨大なものとなり非現実的であるため外観が正常であることを確認することを重視した全数検査装置を開発した。

球面であるため視覚的に確認する方法は、六方向からの確認が必要となることから1個単位での光学的な検品は、生産性が低下しコスト的に膨大なものとなるため近年、パソコンハードディスクの小型化によりマイクロボールベアリングに使用される鋼球の検査検品方式を応用した。

正常に球形なものはスムーズに転がり、突起へこみ等を有していると転がる速度が低下する、この速度差を理由して良品・不良品を分別する方式の検査装置を開発した。

大きさの選別はハの字に開いた二軸ローラーを用いてサイズを分別する方式とした。

socket型コネクタースハーネスを製作した。

300mm長さのフレキシブルプリント配線板の両端に各200個のゴムコア通電ボールを搭載するラウンド電極パットを形成しボールを保持する楕円の穴を開けた保持板を接着し反対側にはボールを均一に押し付ける補強版を接着した。

汎用性ボール保持板の製作を行った。ボール直径より20%薄い板にBGA規格に基づいた間隔で楕円穴を形成しユーザーは必要に応じたサイズに切り分けて使用する。

保持板には、接着剤が塗布されており加熱すると接着できる。電子基板のBGA電極パット上にボールをはめ込んだ保持板を載せてLGAタイプの半導体等を乗せて押し付ける。

微小ネジ等で押し付けることも可能であり、ネジを外せば半導体を取り外せる。取り外す必要が無い場合は、ネジを使わず押し付けながら100℃の加熱で接着させ固定化することも出来るものを作成した。

本補助事業とは別に応用品見本として部品内臓基板同士を電気接続させる電子基板を作成中。

電子基板に止まり穴型のスルーホールにボールを直接はめ込み基板同士を張り合わせる事が可能な構造である。

評価試験、簡易的な180℃24時間の加熱試験、圧縮による破損は実施した。

コア-シェルのポリイミド外殻が厚すぎる、厚さが部分的に薄い厚い、表面にざらつきがある、金属

皮膜の密着強度が弱い等、完成度が低いため重要な評価試験は実施に至らなかった。

ポリイミドの外殻が厚すぎるとゴムコア通電ポールをどの程度の圧力で変形しどの程度の電気抵抗地になるかが正確ではなくなる。

表面にざらつきがあると高周波レベルの電気特性は良い結果が出ないことが明らかであること。

ポリイミドの厚さに部分的に薄い厚い箇所があると繰り返し耐久テスト・ヒートショック・ヒートサイクル試験は正確な値が得られないこみとから実施しなかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

一般社団法人 産学金連携推進機構

〒170-0005 東京都豊島区南大塚2丁目4番9-702号

産学連携推進部 佐藤 麻子

Tel:03-6902-0526 Fax:03-6902-0546 E-mail:asato@snow.ocn.ne.jp

## 第2章 本論一（1）

### 1 複合ゴムボールコアシェル構造製造技術

ゴムコアー通電ボールの概略を図1に示す。シリコンゴム(シリコンゴム)のコアーとポリイミド(ポリイミド)のシェル、ならびに金属被膜層からなる。本章では、作製すべきゴムコアー粒子のシェル厚さを決めるために熱膨張ならびに圧縮時のシミュレーションを行った。コアーシェル液滴生成するための条件ならびに、液滴生成条件を明らかにした。さらに量産化のための流路並列化の設計指針を明らかにした。以下各項目の説明を行う。

### シミュレーション結果

ANSYS を用いたコアーシェル粒子の有限要素解析を行った。3D CAD を用いて、コア 500  $\mu\text{m}$ 、膜厚 5  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  のコアーシェル粒子のモデルを作製し、熱膨張および圧縮のシミュレーションを行った。熱膨張は 22 $^{\circ}\text{C}$  から 200 $^{\circ}\text{C}$  までの加熱とした。圧縮のシミュレーションではポリイミドの破壊強度である 200 MPa を破壊基準として、コアーシェル粒子の耐久性を評価した。プラスチックは熱条件や厚さによって延性・脆性破壊の両方が起こりうるため[1]、最大主応力・ミーゼス応力双方による検討を行った。

熱膨張シミュレーション結果の一例を図2（1）に示す。シリコンゴム粒子の熱膨張をシェル厚が 25  $\mu\text{m}$  のコアーシェル粒子では約 1/7 に抑制することができた。金属皮膜も数  $\mu\text{m}$  の熱膨張ではクラックは生じないため、25  $\mu\text{m}$  のシェル厚があれば十分にシリコンゴムの熱膨張に耐久出来ると考えられる。圧縮のシミュレーション結果の一例を図2（2）に示す。平板剛体は非表示にしている。圧縮部とボール中央部の間に最大応力を観測し、シェル表面の最大主応力・ミーゼス応力を測定した。その結果、シェル厚が 40-50  $\mu\text{m}$  あれば 15%程度の圧縮に耐久出来ることが分かった。また、50  $\mu\text{m}$  のシェル厚があれば、50-100 mN の荷重に耐久出来ることが分かった。以上の実験より、目標とするシェル厚を 40 $\mu\text{m}$  として液滴生成実験を行った。

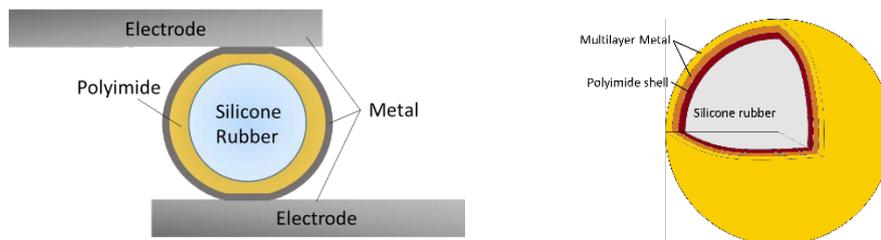
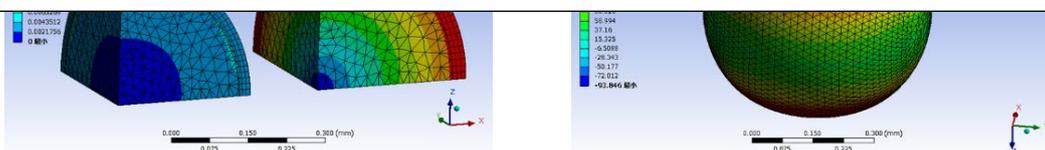


図1 ゴムコアー通電ボール概略図



(1) 熱応力解析

(2) 圧縮応力解析

図2 シミュレーション結果

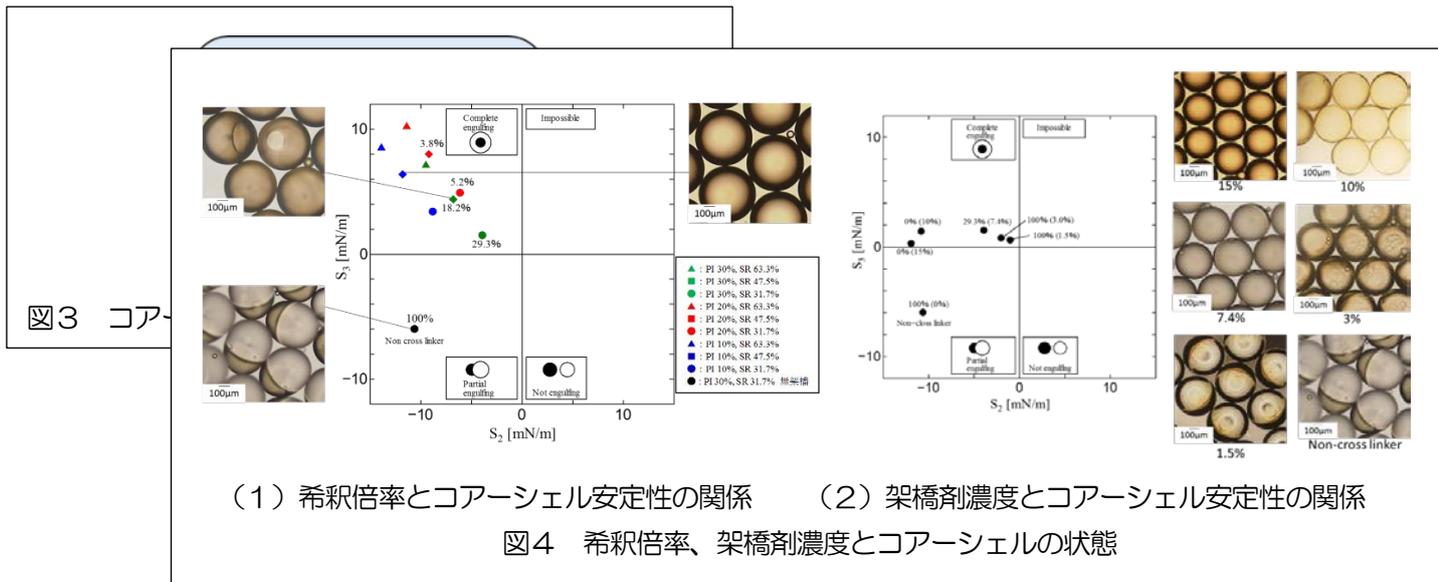
### コア-シェル安定性

コア-シェル粒子の安定性を確認するために、拡張係数の導出を行った。拡張係数は、図3に示すように3つの材料間の各界面張力 $\gamma_{12}$ ,  $\gamma_{13}$ ,  $\gamma_{23}$ によって求めることができる。拡張係数 $S_i$ は次式で与えられる[2]。

$$S_i = \gamma_{jk} (\gamma_{ij} + \gamma_{ik})$$

界面張力の測定には接触角計を用い、画像処理により導出した。2つの材料がコア-シェル構造となるには、式(1)で示される拡張係数 $S_i$ が $S_1 < 0$ ,  $S_2 < 0$ ,  $S_3 > 0$ となる場合である。1はシリコンゴム、2はPVA水溶液、3はポリイミドである。

図4(1)に希釈倍率を、同(2)に架橋剤量を変えた場合の拡張係数の測定結果を示す。架橋させたポリイミド全てでコア-シェルとなる条件が成立した。無架橋のサンプルでは全てが部分内包液滴となった。希釈倍率が高いほど部分内包粒子が増加することを確認した。架橋剤導入量を変化させた場合、架橋剤を導入したすべての粒子がコア-シェルの条件となったが、架橋剤導入量が少ない場合、部分内包粒子を得た。以上の結果から、溶剤は出来るだけ希釈せず、架橋剤量は7.4-10wt%とすることが望ましいと考えられる。



### 液滴・粒子・通電ボール生成

ガラス流路を用い液滴を生成した。図5(1)に示すように、分散相にポリイミド(荒川化学 ポリイミド AD 300)とシリコンゴム(Adeka TS-O19)で二相流を形成し、界面張力差によってコア-シェル構造の液滴を生成した[3]。ポリイミドには架橋剤(荒川化学 HBAD)を7.4wt% (vs ポリイミド)導入した。連続相にはポリビニルアルコール(PVA)2wt%水溶液を用いた。ポリイミドとシリコンゴムは溶媒のトルエン濃度を変え、液滴生成様相を観察、生成範囲を導出した。図5(2)に実験装置に示す。流路の連続相サイズは図6に示す2種類の大きさのものを使用した。送液にはシリンジポンプを用い、観察には高速度カメラを用いた。液滴はn-デカン層を形成したガラス容器内に回収した。液滴生成後、真空チャンバー内でトルエンを脱溶剤した。その後、PVA水中で予備加熱後、純粋で洗浄・ろ過し、オープンで加熱して乾燥・硬化させた。硬化させた粒子の断面図をSEM・3次元内部構

造顕微鏡で観察した。また、スパッタリング・メッキによる金属皮膜の塗布を行い、通電ボールを作製した。作製した粒子は 180℃のオーブンで 24 時間の耐熱試験を行った。

図6に液滴生成の観察図を示す。シリコンゴムをトルエンで希釈することで液滴生成が実現した。図6(2)は流路幅 250 $\mu\text{m}$  の流路を用いた液滴生成の様子を示す。また、図7に生成した液滴の顕微鏡観察図を示す。連続相の幅を小さくしても液滴が生成できた。この結果により、連続相流量を 40% 削減できることが示された。

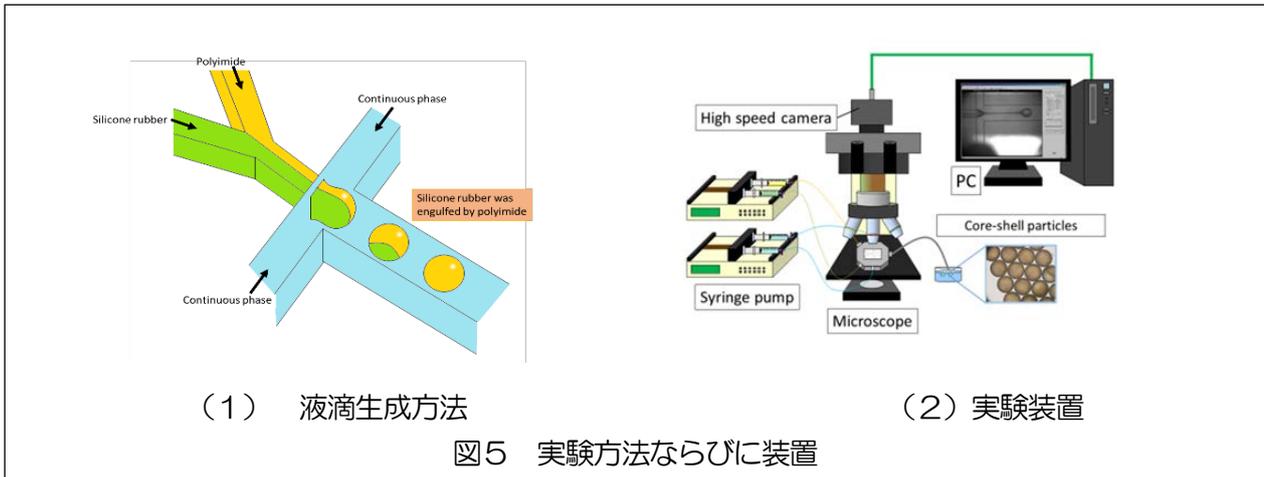
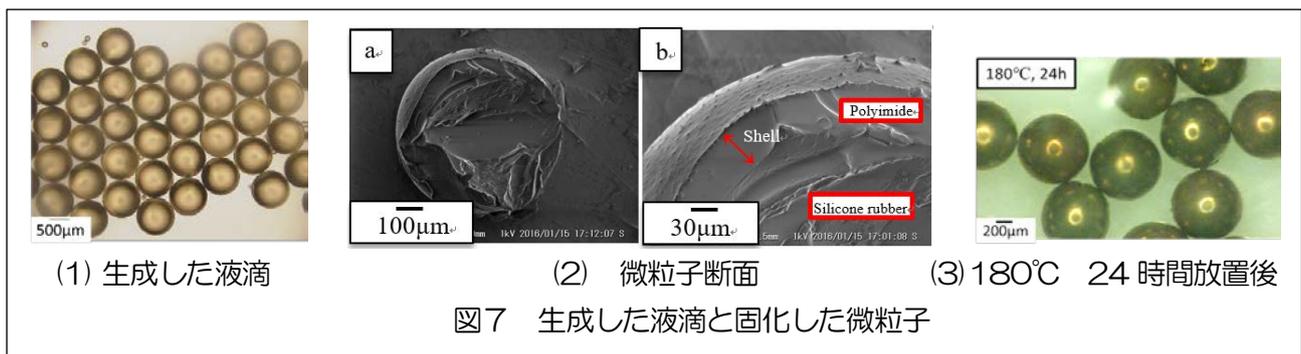
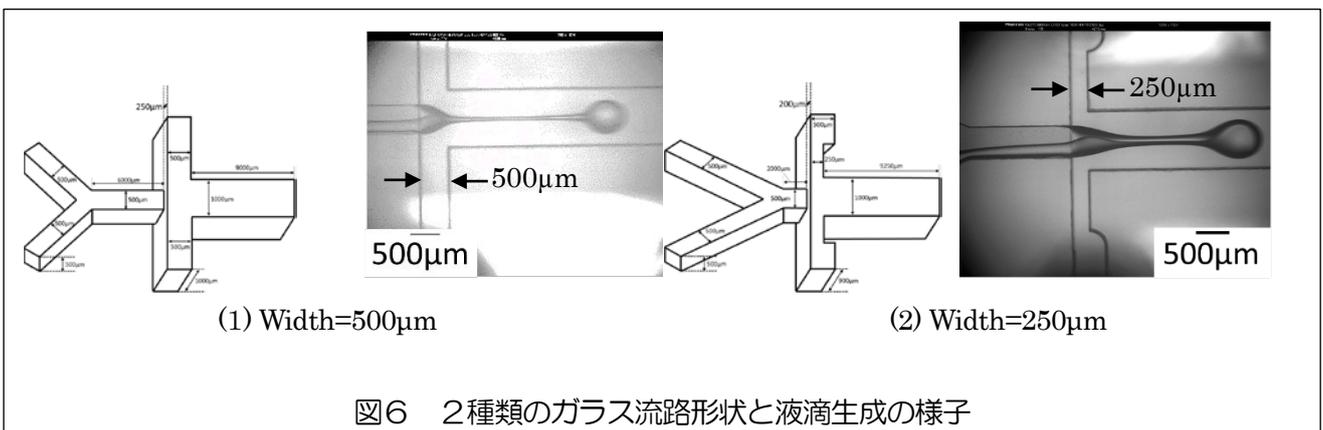


図7(2)は乾燥粒子の内部構造の SEM 観察図である。また、コア-シェル構造および金属皮膜を含めた 3 層構造の確認ができた。また、図7(3)は 180℃、24 時間放置する耐熱試験後の通電ボールの観察結果である。金属皮膜に亀裂が発生していないことから、ポリイミドによるシリコンゴムの熱膨張抑制ができていることが確認できる。また、金属ボールの CV 値を測定したところ、4.5%と非常に良い単分散性を得ることができた。今後は、シリコンゴムのコアが粒子の中心に正確に位置するように材料の微調整を行う必要がある。



### 並列流路を用いた液滴の量産化

コア-シェル液滴の量産化を行うため、微小流路を用いた液滴生成の量産化を行った。円形に流路を配置し中央で滴を回収する手法[4]を採用し、ガラス流路を作製した。連続相の送液には流量を増やすためにギアポンプを用いた。

図8における流路では気泡が残留したため単分散な液滴を得ることが出来なかった。気泡を押し出す圧力（ラプラス圧）と送液に必要な流動圧の関係を図9に示す。PVA 水は粘度 1.95 cP、表面張力 44.5 mN/m、流路長 3 mm、流速 50 mL/h として計算した。流路サイズが 500 μm では流動圧がラプラス圧よりも低いため、気泡を排出することが出来ない。流路サイズを 200 μm にすると流動圧がラプラス圧を上回るため気泡を排出することができる。この結果に基づき新しい流路形状を設計した（図10）。生成した結果を図11に示す。それぞれの流路で液滴生成が行われ、変動係数 5%以下の単分散液滴を得ることが出来た。液滴生成レートは単流路の時と比べ約 6-7 倍の生成率を得ることができるため、生産性を飛躍的に向上させることができた。

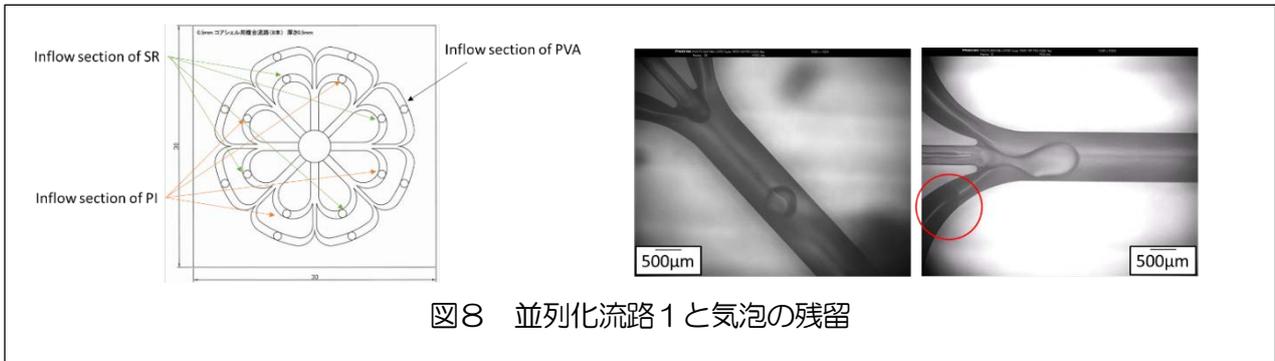


図8 並列化流路1と気泡の残留

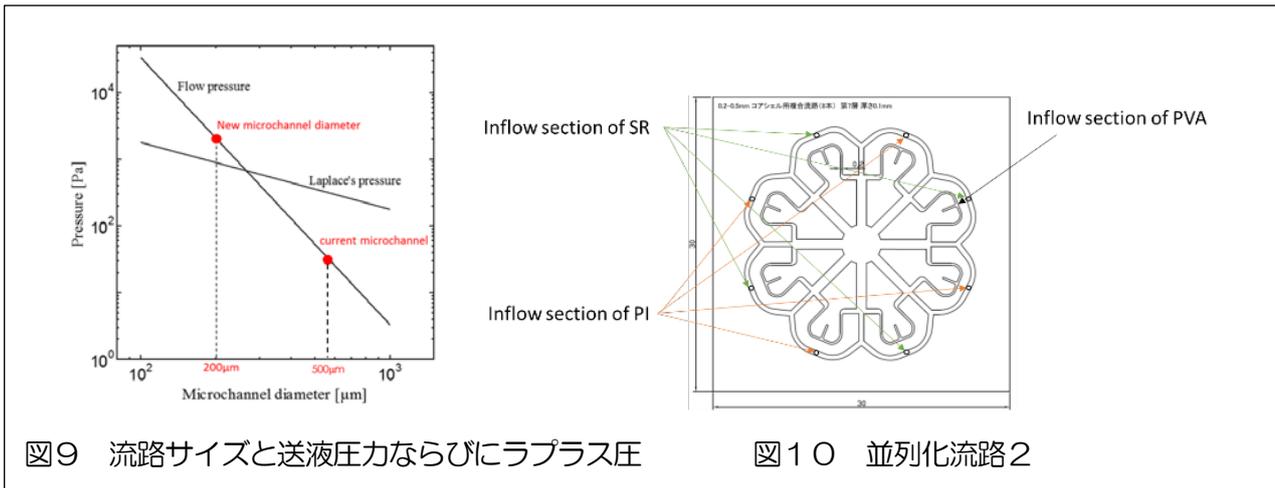


図9 流路サイズと送液圧力ならびにラプラス圧

図10 並列化流路2

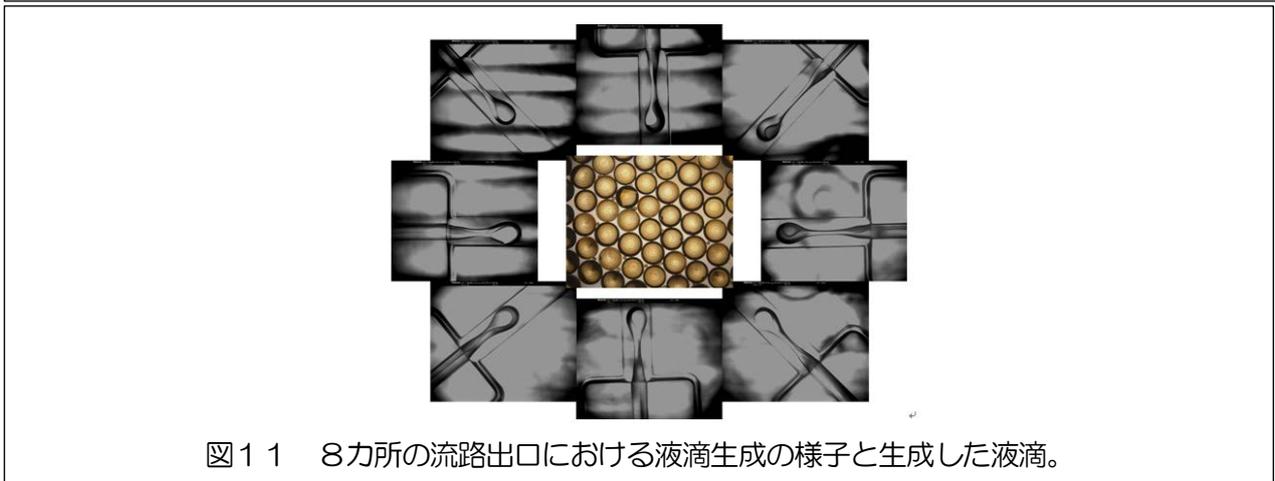


図11 8カ所の流路出口における液滴生成の様子と生成した液滴。

## まとめ

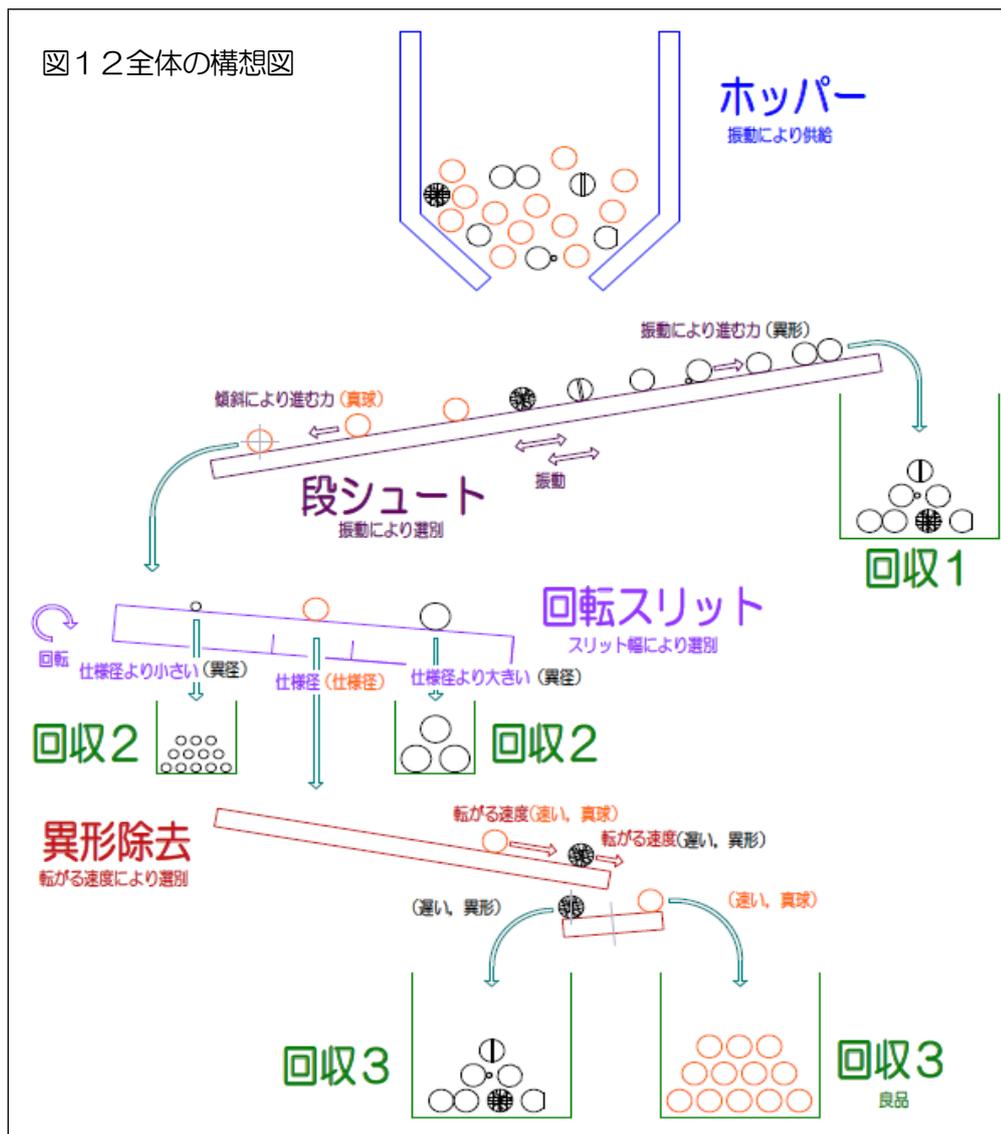
シリコンゴムとポリイミドを用いたコア-シェル微粒子および通電ボールの作製に成功した。シミュレーションより、最適なシェル厚を想定した。界面張力の測定/拡張係数の導出により、架橋剤濃度に対するコア-シェル安定性を観測した。溶媒の希釈と最適な流量条件の導出により、シングルステップでのコア-シェル液滴生成プロセスを確立した。加えて、量産化に際し、ラプラス圧を考慮し気泡が滞留しない流路設計を行った。8流路並列化実験では気泡の残留が見られず、変動係数4%以下の単分散液滴が生成された。また、安定的な脱溶剤プロセスを考案した。乾燥処理後の粒子・スパッタ後の通電ボールの観察を行い、コア-シェル構造を確認。また、耐熱試験を行い、熱膨張を抑制できている事を確認した。以上の結果から、微粒子生成に係わる基本的な製造技術を確立できたと考えている。

## 文献

- [1] 本間精一, プラスチックス 55, 1, 174-182 (2004).
- [2] S. Torza et al., J. Colloid and Interface Sci., Vol. 33, No. 1, 67-82, (1970).
- [3] たとえば T. Nisisako et al., proc. IMRET9, 1152-1156, (2006).
- [4] T. Nisisako et al., Lab on a Chip, 8, 287-293 (2008).

## 2 通電ボール検査装置設計と製造

図1 2全体の構想図



はんだボールの寸法検査方式・マイクロボールベアリングの検査方式を融合させてゴムコア通電ボールの検査装置を開発した。

まず供給容器から定量を供給し段シュートというベルトコンベアに流す、やや傾斜させ高いほうに上昇させることで極めて异形なボールは転がる事が出来ないことからベルトコンベアで運ばれる。

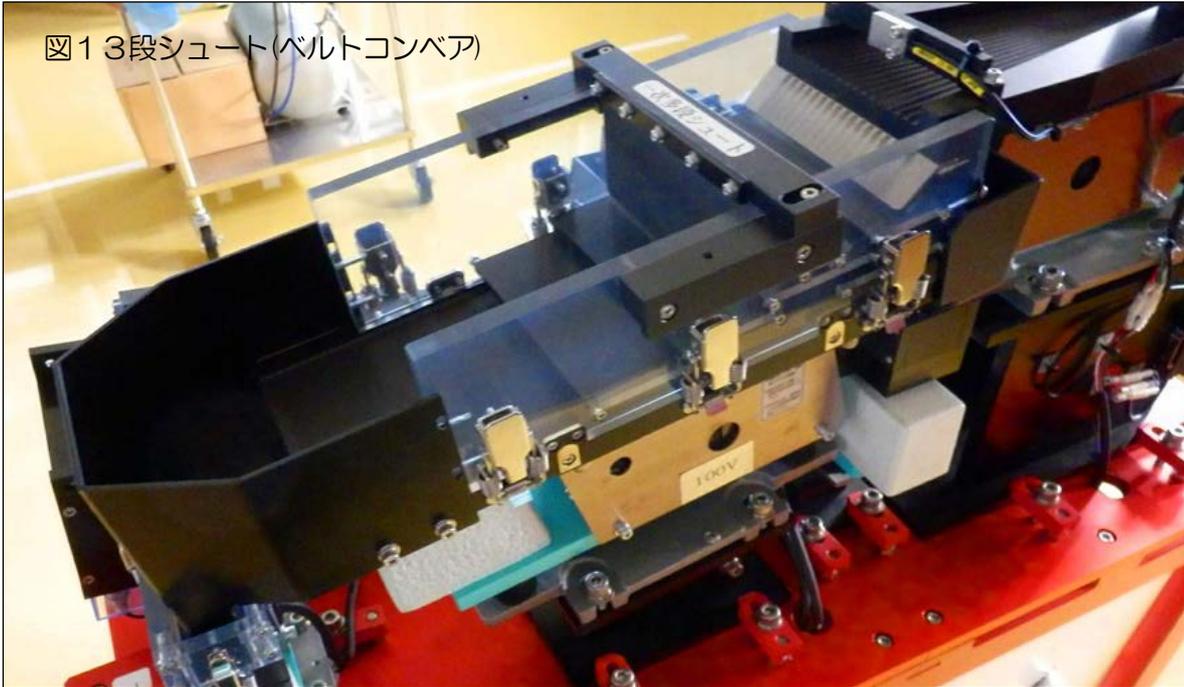


図1 3段シュート(ベルトコンベア)

図1 3段シュート(ベルトコンベア)

ベルトコンベアはアラミド繊維の布で出来ておりざらつきがあることから球形でない異形物、転がれないものや、かろうじて転がれる程度の物はベルトコンベアで運ばれて回収ボックスに収納される。

この機構を設けたのは極めて異常な形状が次の寸法を分別するハの字二軸ローラーに入り込むと転がらずローラー間に挟まり詰まらせてしまうことから転がることが出来るレベルのボールだけに絞り込むことが必要。

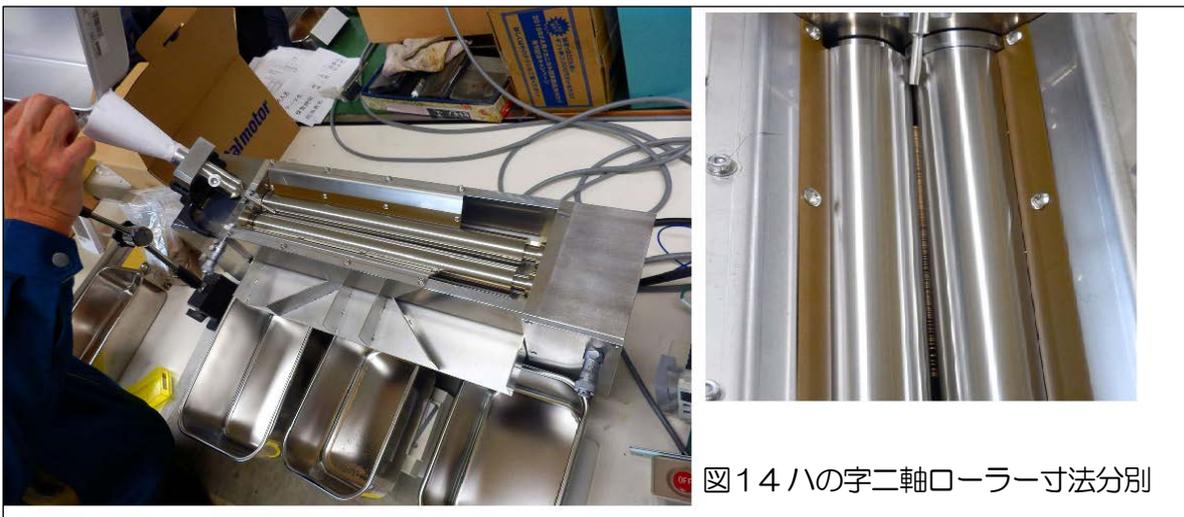


図14 ハの字二軸ローラー寸法分別

ハの字に設置された二本のローラーにボールを狭い方から供給する。左右のローラーは外側に向けて回転させる、右ローラーは時計回り、左ローラーは時計と反対方向に回転させ回転スピードにやや回転数をずらすことでボールがローラー間に挟まることを防止させ安定して広い方向へ転がす。

二本のローラーの回転数が同じであると共振してボールが暴れる現象が発生するとボールの直径よ

り広いところに到達しても落下しないことがあるため振動を打ち消すため 1 対 1.08 のスピード差を設定する。

1.08 と言うのは音楽で言う不協和音という半音と同じ周波数で共振しえない振動の組み合わせである。



図15 異形除去滑り台  
傾斜壁

些細な傷や凹凸があるものの排除を行う。

緩やかな傾斜で長い距離ボールを転がすボールことでスピード差を発生させ正常な球形は遠くへ飛び凹凸等があるものは勢いがなく近くに落ちることで分別を行う。

距離は直径の 1000 倍とした、長いほど良いが一定以上長くしても効果がないことから雨どいに 5mm のプラスチックボール比重が近い 1.4g のボールを転がし最適な長さとして 1000 倍とした。

傾斜がきついと異形物も勢い良く転がることから雨どいの傾斜角度を調整しながら実験を繰り返して 15% の傾斜が最適であることが確認された。

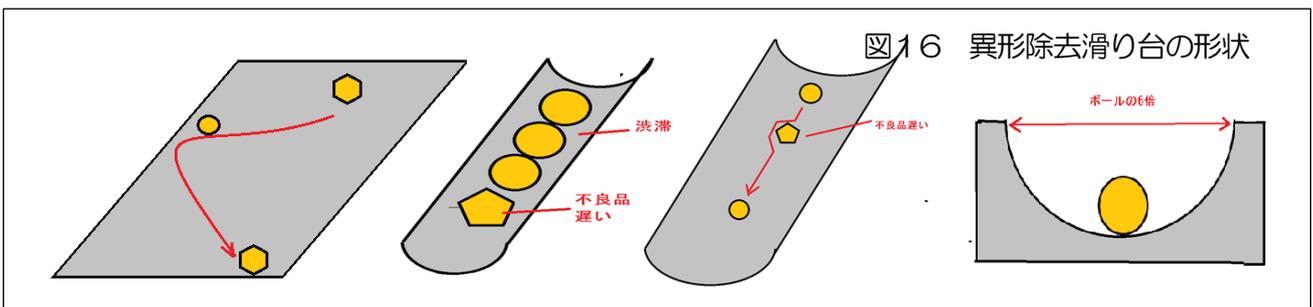


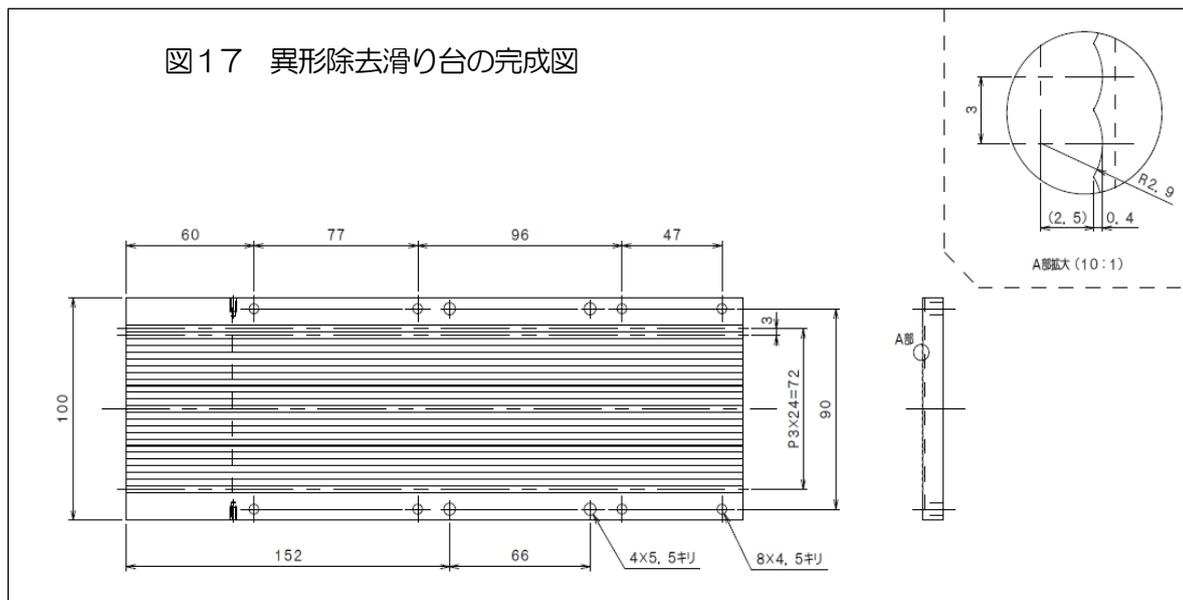
図16 異形除去滑り台の形状

滑り台がフラットであると異形物は蛇行してある程度、勢い良く転がってしまい良品に入り込むことが発生した。良品はまっすぐ転がることから異形物が蛇行して転がる際に良品と衝突しスピードが弱められ良品が不良品に入ってしまう現象も見られた。

異形品もまっすぐ転がしスピードが出ないように矯正させた結果、スピードは落ちるものの湾曲させたが湾曲がきつくと後から来る良品が詰まってしまう現象が発生した。

湾曲をゆるくすることで後から来る良品がすりぬめられる湾曲を算出するため細長いアルミ板を紐で縛り湾曲させ様々な湾曲を作り出して実験した結果ボール直径 6 倍があるとすり抜けていく現象が見られたことから図 17 の通りの滑り台とした。

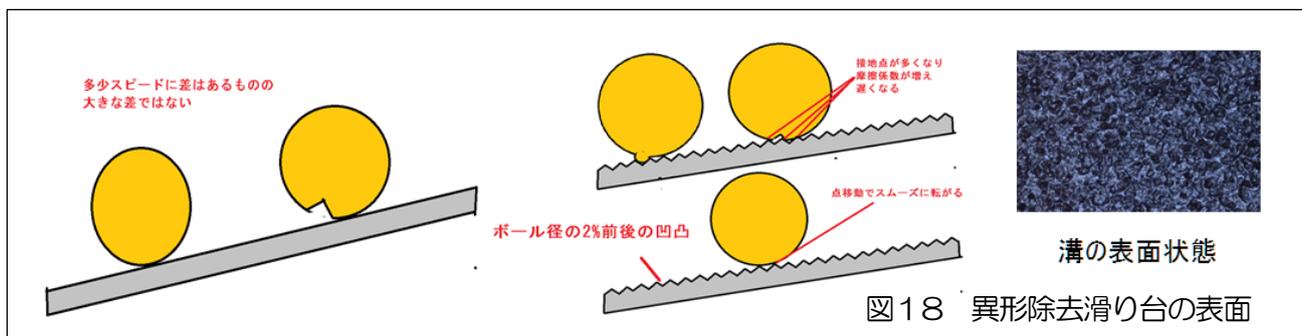
図17 異形除去滑り台の完成図



溝が鏡面のように綺麗であると転がらずに滑ることから異形品もスピードが出てしまうことから道路の舗装の仕組みを応用した。

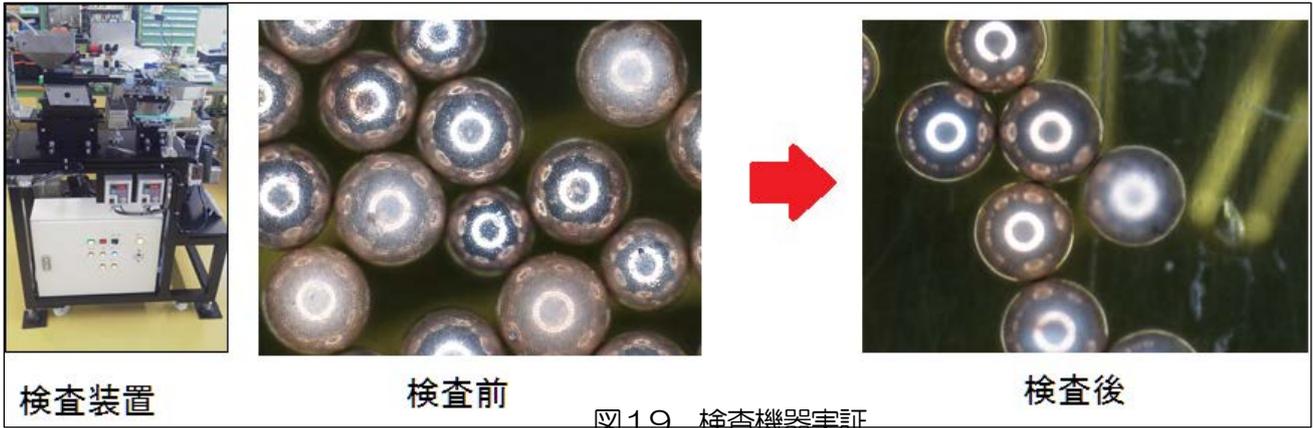
自動車道の舗装は、力が加わればタイヤが転がり前へ進みブレーキを踏めば適度な摩擦で停止するように砂利の大きさが厳格に定められている。

普通車のタイヤ外形が600mm~700mmに合わせ砂利は10mm~20mm前後であり約2%前後の大きさであることから、それに習い図17の溝に図18のような5 $\mu$ m凹凸形成した。



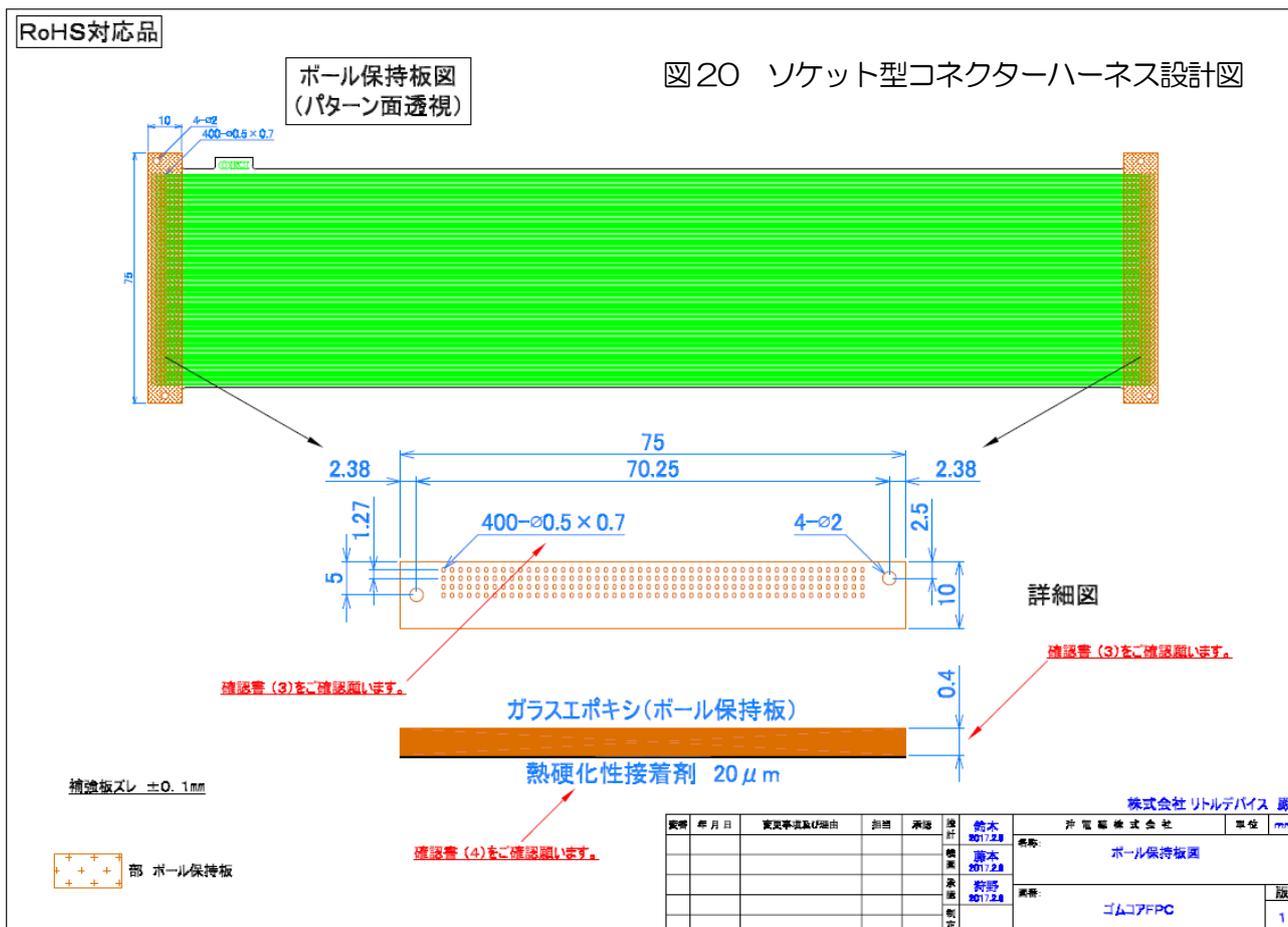
凹凸にも鋭利や、なだらかなボス、傷が無数にあるよう状態など様々あるためそれらを検証する。そのため紙やすりで菱形に傷をつける・サンドブラストによる凹凸の形成・アルマイト処理などを試した。結果、鋭利な凹凸であるほうがスピード差が良く出ることと良品の転がる速度も安定することが判明した。アルミを強い電流でアルマイト処理を行うと鋭利な凹凸が得られた。

正常に球形であれば凹凸の先端で点移動をしていき、ボールに傷や突起がある場合、複数の凹凸先端が接触することで摩擦が強まりスピードが落ちる。



完成した検査機器にて実験を実施した結果、寸法±5%の範囲(機器の調整で範囲は変えられる)傷、凹凸したものは完全に排除できていることが確認された。

### 3 ソケット型コネクタの開発



本補助事業の目的であるゴムコア通電ボールを開発しソケット・コネクタの見本を製作することについて上記、図 20 を作成した。

電氣的性能評価テストにも使用できるようにフレキシブルプリント配線板と一体のものとした。

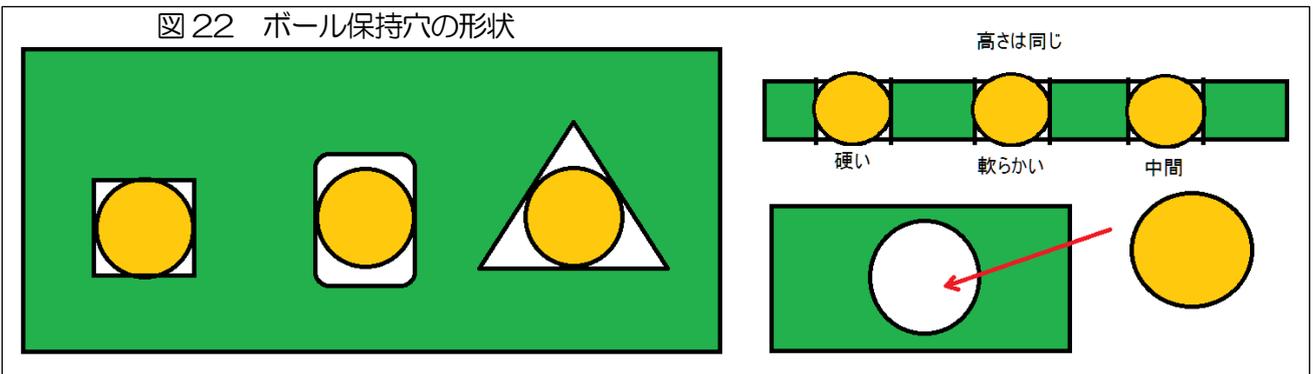
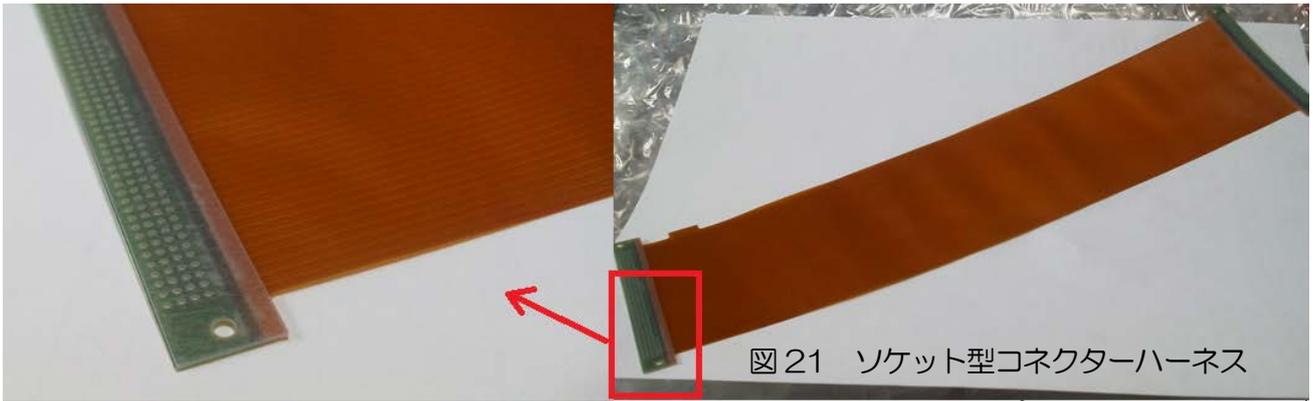


図 22 ボールを保持する方法としてボールよりやや小さい(5%)の穴に押し込めばボールの弾性でとどまり叩いたり振動では、抜けたり、ずれたりすることも見られなかった。

正四角・長方形・三角形を実験したが、いずれもボールの高さは同じであったが、最適なのは長方形に押し込み 2 点で保持するほうほうが弾性が軟らかくなった。

ボール保持するために接触する部分が少ないほうが弾性が軟らかくなる。

丸穴である場合、ボールと穴の直径が全く同じでないと保持されない、ボールが少しでも大きいとはめ込むことが出来ず、ボールが少しでも小さいと保持されず抜けてしまう。

図 21 は、加工上の制約から小判型にて作成した。

### スパッタ蒸着の安定化

コア-シェル粒子に金属皮膜を形成する初工程としてチタンの打ち込みと銅の成膜を回転式バレルスパッタで行う予定であるが、少量であれば問題が無いが大量に入れた場合、コア-シェル粒子がドーム内部でよく攪拌されないと成膜にばらつきが生じる。

このため図 23 のような回転式バレルスパッタを実物大を模した実験機を製作し検証を行った。

実証では、コア-シェル粒子に近い軟性ポリスチレンを用い、赤白に着色したものを各 250cc づつ投入し回転数 3 秒で 1 回転で行った。

粒子サイズは 0.3mm 0.5mm 0.7mm と回転数も若干変化させながら行った。

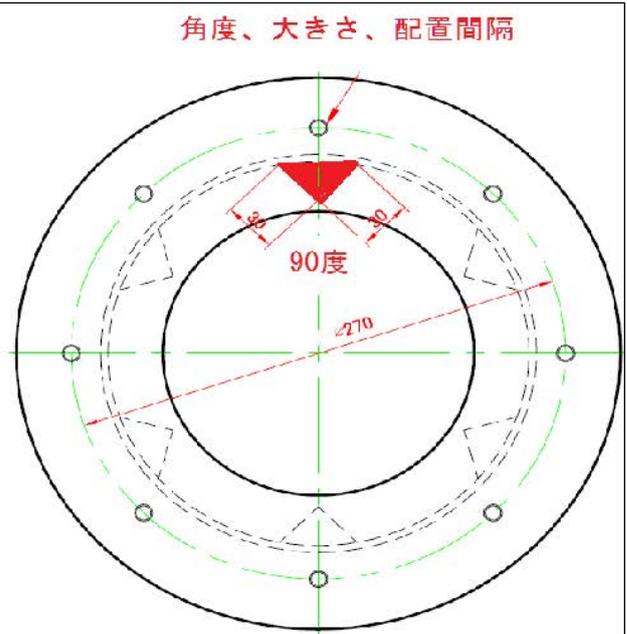
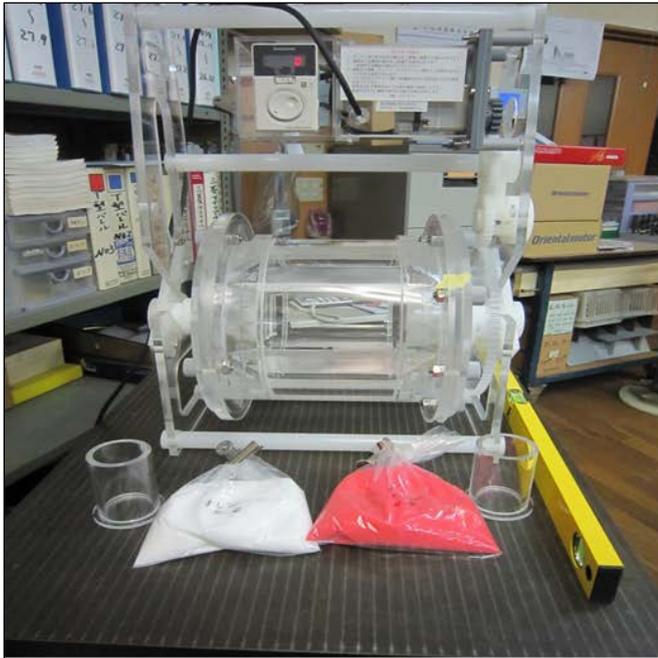


図 23 粒子混合実験機

実験の結果、円筒上に高さ 25mm 角度 90 度の三角のバー材を 6 箇所設置することで大量の粒子を投入しても 60 秒程度で赤白粒子が完全に混ざりあうことが判明した。

粒子が細かいほうが若干混ざる時間が長くなる傾向にあったが 0.3mm と 0.7mm での差は 10 秒の違いであった。

内部を六角形にするという案もあったが他の大学で特許を権利化していたため円筒状に三角バーを 6 箇所とした。

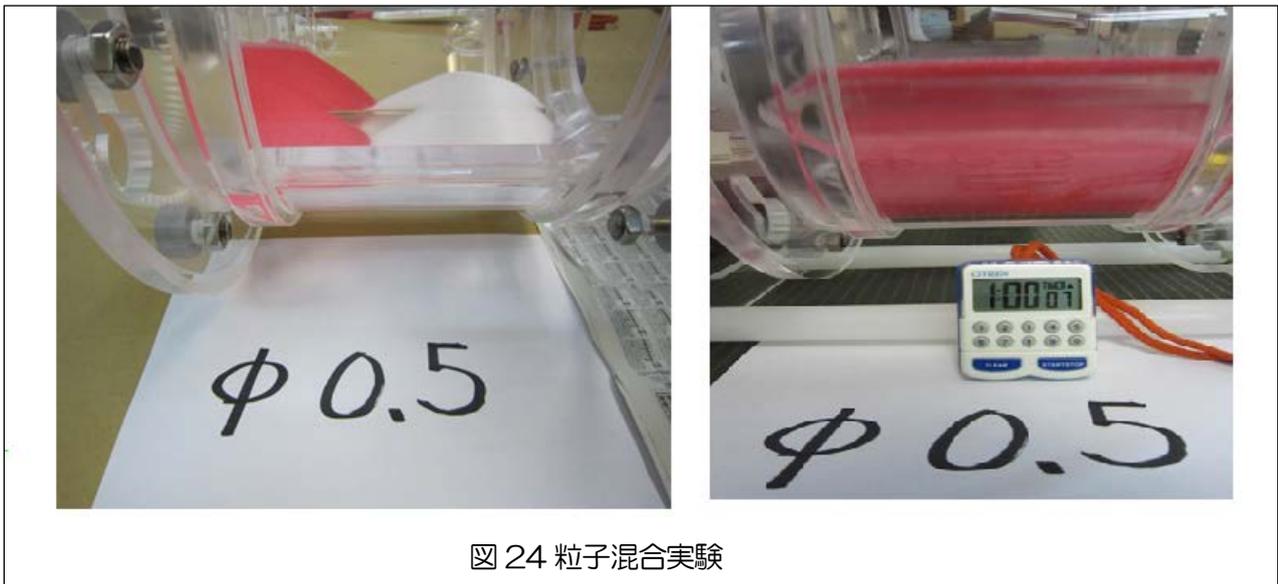


図 24 粒子混合実験

## 最終章 全体総括

### 「複数年の研究開発成果」

26年度においては、研究開発に必要な設備・備品の設計を実施した。

材料をコアシェル粒子化するための設備、材料の粘度測定機器、ガラス流路などを準備し次年度の研究開発の準備を整えることが出来た。

27年度においては、コアシェル粒子化の実証実験・ポリイミド、リコンゴムの低粘度化・架橋プロセス・全数検査装置の開発を実施した。

コアシェル粒子化の実証実験においては、幸いポリイミドの方が表面張力が高く外殻がポリイミド、心材がシリコンゴムにすることが可能であることが判明した。

初期においては、シリコンゴムの粘度が高く500mpaでありトルエンにて希釈するなどして粘度を開発していたが、300mpa程度まで粘度を下げる事が出来生産性が向上した。

しかしポリイミドに含まれているトルエンがシリコンゴムに浸透し膨張することから架橋したときにトルエン残留分が抜けると外殻と心材との間に空間が出来た。

シリコンゴムが低粘度化したことでトルエン希釈量を減らすことが可能となりトルエンの含有量が減ると前記した余蘊空間が減ることが確認できた。

ゴムコア通電ボールが完成していないことから近い軟性ポリスチレンボールに金属皮膜を形成したダミーボールを大量に製作しこれを使用して全数検査装置の開発を行った。

若干、手直しの必要は認められるものの全体としては全数検査が行える装置が開発できた。

28年度においては、不良率は高いものの架橋したコアシェルも出来るようになりこれに金属皮膜を形成して簡易的な検証を行った。

180℃に加熱しシリコンゴムの膨張圧力をポリイミドの外殻で押さえ込み金属皮膜の破損が防げるかの実験を行い、膨張を抑制し金属皮膜が破損しないことが確認された。

不良率の高さを改善するため「低粘度・高耐熱フルオロシリコンゴム」の開発に着手した、原因であるポリイミド側に含まれているトルエンがシリコンゴムに浸透してシリコンゴムが膨張するとともにトルエンを奪われたポリイミドの粘度が上昇しコアシェルが上手く作れない、ポリイミドのほうが重たいことにより変芯し外郭に薄い厚い部分が発生したりシリコンゴムが露出する現象もあったことからシリコンゴムにPTFE骨格を結合させることでトルエン等の溶剤の浸透を防止し比重がポリイミドと同等となりPVA溶液に確実に沈ませることが出来るようになった。

一般的にフルオロシリコンゴムは既存品として存在するが、非常に粘度が高く耐熱性が劣ることからコアシェル粒子の作成は不可能であったが、東レダウコーニング社が、本開発に共感し高耐熱・低粘度・高比重のフルオロシリコンゴムの開発に至ったことで今後、不良率が低下し良品率が高くなることが期待される。全数検査装置の最終工程の微細な凹凸の排除に関して湾曲させる表面に鋭利な凹凸を設ける事で安定度を増すことが可能となった。

よって基礎的に開発は成功したと判断できる。

## 「研究開発後の課題」

低粘度・高耐熱フルオロシリコンゴムの開発に成功したことで不良率が高かったことも改善される。

ポリイミドと金属皮膜の結合を高めることが重要でありポリイミド用エッチング液を開発し密着強度を向上させること、クリーンルーム環境下での金属皮膜の形成、高周波特性が良い利点を最大限に生かすためには不純物を含まない高純度な金属皮膜の形成が不可欠である。

電気を通さない不純物が混入した状態であると直進性が高い高周波伝送においては反射して信号が乱れることで性能が低下する。

上記の2点を解消することで完成度が高まる、さらに高周波性能を向上させるために「グラフェン」を金属皮膜の上に転写させることを予定している。

平成29年3月7日にほぼ希望通りの基本特許が成立した。

PCT国際出願の制度を上手く活用したことで権利期間を1年延長でき平成48年6月まで有効とすることが出来た。

## 「事業化展開」

IoTや自動車自動運転においてセンサー類と半導体の融合、テレビの8K放送、移動体通信第五世代などデータ通信の高速化による従来型コネクタの許容量オーバーなどゴムコア通電ボールの必要性が市場において高まっている現状である。

日本ではベンチャー企業が育たないと言われる一因としてベンチャー企業自身が生産しようとする傾向があり、これが失敗の最大原因である。

PLは長年、製造業分野で生きてきたことで企業風習も熟知しており、特に日本企業は、ベンチャー企業が生産したものは、採用したがない、供給の不安定さ、企業の存続性、万が一のリコール保証に耐えられないなどが理由である。

であるため量産は大企業に任せファブレスとする一方で社会的信用が高い大企業数社にも同じものを生産供給してもらうユーザーに安心して採用してもらえ環境を構築する。

電子機器の世界標準とすることを目的に幅広く活用されるようにするために特許ライセンスは低価格で行う予定である。

そのためにも複数社が参入することが不可欠である。

自然災害、人災(工場火災)などにより供給の供給危機、さらなる性能向上と低コスト化には、競争原理が不可欠で他に数社、同じものを生産供給する企業を設けることを予定している。

29年に入り講演や報道によるプレスリリースを開始しているが既に本開発品に興味を示す大企業が多く現れている、信越ポリマー、花王、富士写真フイルム、日鉄マイクロニクスなどが本開発品を生産供給することを検討している。

ユーザーでは、日立製作所、日立金属、日本マイクロニクス、ルネサステクノロジー、SMK、住友電装など、周辺部材として、沖電線、利昌工業、倉敷紡績、長瀬産業など好調なスタートが切れている。

VHS ベータマック戦争のように特許でがんじがらめにすることなく安いライセンス料にて多くのユ

ーザーに活用してもらう展開を考えている。

市場規模(2016年時点)としてコネクタ分野 5000 億円、センサー半導体 2000 億円、周辺部材 3000 億円、合計 1 兆円、IoT 化等の加速で、年 10%台の市場拡大が予測されている。