

平成24年度

# 宮城県産業技術総合センター研究報告

The Annual Research Report of Industrial Technology Institute, MIYAGI Prefectural Government

No.10 (2012)

---

---

## 目次

1. 高度電子産業育成促進に向けた実用化研究 ..... 1
  - サブテーマ1 : SPS法による機能性焼結体の実用化 ..... 2
  - サブテーマ2 : 超精密加工技術の実用化 ..... 7
  - サブテーマ3 : 微細形状の創成および転写技術の実用化 ..... 12
  - サブテーマ4 : 光学機器の高付加価値化を実現する微細光学部品の開発 ..... 17
  - サブテーマ5 : 軽量繊維活用した自動車・家電機器製品などの高強度・軽量化 ..... 19
2. 保護機能付き組込み用リアルタイムOSの開発 ..... 21
3. クリーンエネルギー対応組込みシステムの開発 ..... 23

## 【平成20～24年度 県単研究】

### 高度電子産業育成促進に向けた実用化研究

材料開発・分析技術部, 機械電子情報技術部, 自動車産業支援部, 企画・事業推進部

#### 研究の目的・背景

宮城県には半導体分野に関わる企業群(半導体製造装置製造, 同部品製造, 半導体デバイス製造およびパッケージ, それらを応用した電子部品製造)による高度電子産業に関わる企業集積が加速度的に進展している。近年, 半導体分野では超低消費電力, 超高性能をキーワードに, Siウエハの大型化やLSIの高密度集積化と, それに伴う半導体製造装置の高性能化・高機能化や, パワーデバイス用の新しい半導体材料である単結晶SiCの実用化開発など, 技術開発競争が一層厳しさを増してきている。宮城県産業技術総合センターでは, 平成20年度から24年度まで「高度電子産業育成促進に向けた実用化研究」と題して, 県内の高度電子産業の育成を目的として, 当センターのオンリーワン技術である機能性焼結・接合技術や超精密加工技術, 成形加工技術を活かした研究開発を実施してきた。

#### 研究内容

実施内容は, 以下の5つのサブテーマに分かれる。括弧内は実施年度を示す。

##### ○サブテーマ1: SPS法による機能性焼結体の実用化(H20～H24)

通電加熱焼結法(Spark Plasma Sintering:SPS法)を用いて, 県内外の企業からの委託試作による各種焼結体や接合体を開発してきた。本報告書では, 半導体製造に関連した代表的な試作案件として, 超耐磨耗材料(緻密体)及び真空吸着材料(多孔質体)を選定し, これらの実用化への取り組みを紹介する。

##### ○サブテーマ2: 超精密加工技術の実用化(H20～H24)

次世代半導体製造装置のセラミックス製部品の超精密乾式研削加工技術を開発し, 光学系部品に使用される石英ガラスの鏡面研削加工技術の開発も実施した。得られた成果については, 積極的に技術移転を進め, いくつかの製品の実用化に向けた開発を行った。

##### ○サブテーマ3: 微細形状の創成および転写技術の実用化(H20～H23)

MEMS製造コストの7割を占めるパッケージ部分に焦点をあて, インプリント技術を応用して, MEMSデバイスの低コストのウエハレベルパッケージング技術の開発を行った。具体的には, 研削によりブロックパターンモールドを作製し, そのモールドの形状をホットエンボスによりガラスウエハに転写し, MEMSセンサ用パッケージとした。

##### ○サブテーマ4: 光学機器の高付加価値化を実現する微細光学部品の開発(H24)

スマートフォンやタブレット等の液晶表示装置の必須部品である導光板に対する薄型化のニーズは高い。ここでは, インプリント技術を新たに応用した導光板の製造プロセス開発を行った。具体的には, 液体二酸化炭素による樹脂表面の可塑性を利用したインプリント法を開発し, 室温で迅速にアクリル樹脂表面への金型の微細形状転写が可能であることを見出した。

##### ○サブテーマ5: 軽量繊維を活用した自動車・家電機器部品などの高強度・軽量化(H24)

炭素繊維で強化された長繊維強化熱可塑性樹脂(CF-LFT)を用い, 射出成形時の混練・可塑化工程での繊維切断を抑えるべくスクリュ構造の検討と, CF-LFTの耐熱性と電磁波シールド性の評価を行った。その結果, 繊維切断を抑制できる射出成形機のスクリュ構造を見出し, CF-LFTのマトリックス樹脂の変更により使用温度範囲を拡大できること, 長繊維状態のCFは電磁波シールド性に効果があることがわかった。

個々の内容については, 次ページよりサブテーマ毎の研究報告として記載する。

## 高度電子産業育成促進に向けた実用化研究

### －サブテーマ1: SPS法による機能性焼結体の実用化－

阿部 一彦・大山 礼・内海 宏和・浦 啓祐\*・天本 義己\*\*・斎藤 雅弘  
材料開発・分析技術部・\*宮城県産業人材対策課・\*\*企画・事業推進部

県が注力している半導体や自動車関連産業では用途に応じて様々な素材や部品が使用されている。現状において、県内企業で生産されている物もこれらの産業で幅広く使用されている。しかし、汎用品的な既存製品に関しては県外や海外企業からの新規参入の増加や金融情勢の変化などにより、急激にその競争力を失いつつある。この様な状況の中、半導体や自動車に関連した県内企業の競争力向上策の1つとしては、エンドユーザーに対する製品の高付加価値化を図ることが挙げられ、この対応が急務となっている。これには、既存方法では具現化できない製品を他社に先駆けていち早く提案できる開発力が不可欠となる。高付加価値化を図った素材や部品を作製する際に既存法では自ずと限界があり、新しい製法による開発が必要となる。新しい製法として、色々な手法が提案されているが、通電加熱焼結法によるもの作りが注目されている。本研究では、この通電加熱法を主要製法として位置づけ、特に半導体製造装置に関連した新しい機能性部品としての利用を想定し、用途に応じた作製条件の最適化を図った。

キーワード: 通電加熱, 焼結, 接合, 耐摩耗性, 多孔質性, 透光性

#### 1. 緒言

通電加熱焼結法(Spark Plasma Sintering:以下, SPS法と略記)は、金属やセラミックス粉末あるいはこれらの複合粉末に対して、粉体間の隙間に低電圧・大電流の直流パルス通電を行うことでグロー放電を発生させ、これに伴うジュール熱と粉体への加圧力との併用により極めて効率良く焼結体や接合体を作製する手法である。

までの粗密制御が可能⑤薄物から厚物まで幅広い対応⑥組成や密度の傾斜化などが挙げられる。

これまでに、SPS法を用いて各種焼結体や接合体を試作開発してきたが、本報告書では半導体製造に関連した代表的な試作案件として、①超耐摩耗材料(緻密体)②真空吸着材料(多孔質体)を選定し、これらの試作内容を記載する。

#### 2. 試作開発結果

##### 2.1. 超耐摩耗材料

半導体製造に必要な各種原料の製造プラントや部品として使用されている耐摩耗材料は、これまでタングステンカーバイド(以下, WCと略記)系鋼材やダイヤモンドなど硬い素材を選定したり、汎用素材にDLCなどの硬質皮膜をコーティングすることなどで対応してきた。しかし、生産性向上のために製造ラインの稼働条件が厳しくなると、従来の耐摩耗材の使用ではライフが大幅に短縮し、メンテナンス作業が多くなるため、製造設備の稼働率が逆に低下してくる。このため、この抜本対策として新しい超耐摩耗材料の開発が急務となっていた。

従来の耐摩耗材料が摩耗する主因としては、材料を構成する原料同士を結合するバインダーがあり、これが原料粉末と比べて耐摩耗性が著しく低いために、このバインダーが選択的に摩耗することで材料としての耐摩

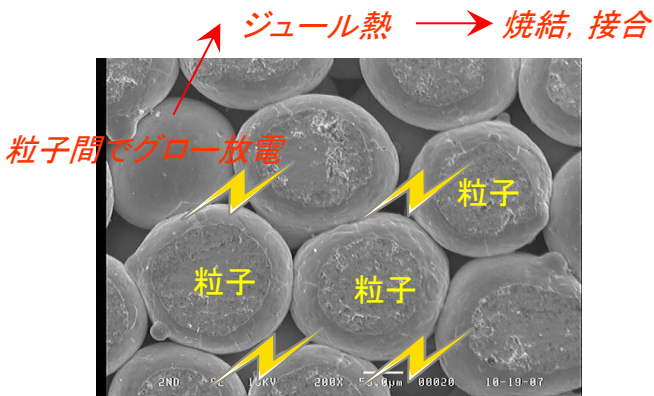


図1 SPS法による放電現象(概念図)

SPS法は従来法と比べて数多くの特長を有している。具体的には、①結晶粒粗大化抑制②完全バインダーフリー化③同種・異種材料の接合④緻密体から多孔質体

耗性が大幅に低下することが確認されている。

一般的に従来法ではバインダー未使用で焼結体を作製することができないのに対し、SPS法はバインダー未使用でも焼結体を作製できることを特長としている。

そこで、耐摩耗材料として汎用的なWCを選定し、SPS法によりバインダーを全く添加しないWC焼結体を作製することで耐摩耗性の大幅な向上を目指した。

#### 【原料粉末】

原料としては、バインダーを一切使用しないため、焼結性の向上を踏まえてWCの超微粉(日本新金属(株)製WC-F, 平均粒径 $0.7\mu\text{m}$ )を選定した。

なお、耐摩耗性のバインダー添加量依存性を調べるために、バインダーとしてCo粉(三井物産(株)輸入EXTRA FINE製, 平均粒径 $1.5\mu\text{m}$ )を選定し、主原料であるWC粉末に対してそれぞれ1, 2.5, 4, 5, 8wt%を混合し、48hの乾式ボールミル混合を行った。

#### 【作製方法】

$\phi 50 \times 5\text{mm}$ 厚相当のWC焼結体作製に必要な原料粉末を計量後、下部パンチ( $\phi 50 \times 50\text{mm}$ , 東洋炭素(株)製ISO-68)を挿入した焼結用グラファイトダイス(内径 $\phi 50 \times$ 外径 $\phi 90 \times 100\text{mm}$ , 東洋炭素(株)製ISO-68)の中に振動をかけながら充填後、上部パンチ( $\phi 50 \times 50\text{mm}$ , 東洋炭素(株)製ISO-68)を挿入した。

また、WC粉末の焼結には高温が必要となり、グラファイトと容易に反応することで離型が困難となるため、 $0.2\text{mm}$ 厚のカーボンシート(東洋炭素(株)製PF-20)をダイス内壁と、焼結体上下部に設置した。

使用したSPS装置は、住友石炭鉱業(株)製Dr. Sinter SPS - 7.40(電極サイズ $\phi 250$ , 最大荷重値100Ton, 最大電流値10,000A)である。

SPSによる基本的な焼結条件として、 $1700^\circ\text{C}$ -5min, 65MPaを設定し、Co添加量に応じて、焼結密度が100%となる様に作製条件の最適化を行った。

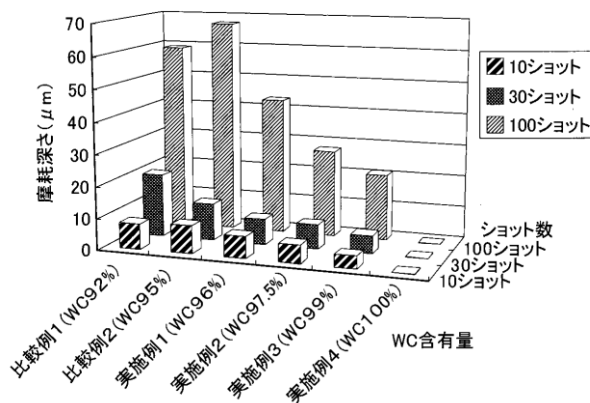


図2 WC焼結体摩耗量Co添加量依存性

#### 【耐摩耗性評価】

作製した焼結体は、簡易的なブラストエロージョン試験装置により、耐摩耗性を評価した。

ブラストエロージョン試験は、ブラスト材をノズルから所定噴射条件でサンプルに噴射することを1ショットとして繰り返して複数のショット行い、10ショット後、30ショット後および100ショット後の3種について、それぞれ焼結体の磨耗量(磨耗深さ： $\mu\text{m}$ )を三鷹工器株式会社製非接触三次元測定器NH-3SPで計測した。その結果を図2に示す。

なお、テストに用いたブラスト材は、ホワイトアルミナ(98%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 硬さ： $\text{HV} 2050$ )、粒度： $\#240$ 、粒子径： $\sim 127\mu\text{m}$ のものであった。

また、1ショットの噴射条件は、ノズル径： $\phi 0.6\text{mm}$ 、噴射圧力： $0.8\text{MPa}$  G、粒子速度： $110\text{m/sec}$ 、噴射時間： $0\text{on } 80\text{msec}$ 、 $\text{OFF } 40\text{msec}$ 、ワーク距離： $3\text{mm}$ 、入射角： $90^\circ$ であった。

これより、バインダー無添加WC材(WC100%)は、従来WC材(WC95%に相当)と比べてショット数が多い程、顕著な耐摩耗性の向上が図られていることが判明した。

この素材を用いることにより、耐摩耗性を必要としている部品のメンテナンス時間が大幅に軽減できることが期待できる。ただし、耐摩耗性が向上すると同時に材料延性が低下するため、適用箇所によっては延性材料と組み合わせた組成の傾斜化などの対策が必要となる。

#### 2.2. 真空吸着材料

半導体製造ではウエハーなどの搬送や固定を目的として真空吸着材料が使用されている。この真空吸着材料には無数の穴が開いており、この穴の分布や連続性の良し悪しにより、多孔質体の通気性が大きく変わるため、用途に応じた多孔質体の気孔任意制御ができることが求められている。

しかし、従来の真空吸着材料の穴は制御して作製しているものではなく、成り行きで作製しているため、これを厚さが薄いウエハーなどの搬送や固定に使用すると割れや反りが発生し、歩留りが大幅に低下することになる。

そこで、多孔質材の材料として用途が多岐にわたっているメタル系の材料を選定し、SPS法により気孔任意制御した多孔質体の試作を行った。

#### 【原料粉末】

通気性を向上させる目的から、原料粉末は球状であり、かつ限定された粒径分布であることが必要と考えられる。

さらに、コストの観点から流通量が多いものを調査し

た結果、(株)山陽特殊鋼のガスアトマイズ法による球状 SUS316L (105  $\mu$ m $\sim$ 210  $\mu$ m)、金型素材などで使用される SPC5 (90  $\mu$ m $\sim$ 150  $\mu$ m)を選定した。

写真1, 2に、原料粉末の SEM 観察結果を示す。

いずれも粒度分布はあるものの、通気性に大きな影響を与える程のものではないことが分かった。

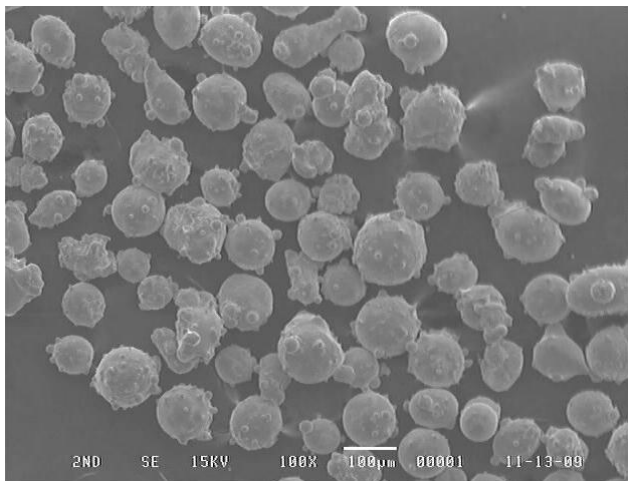


写真1 原料粉末の表面形態(SUS316L)

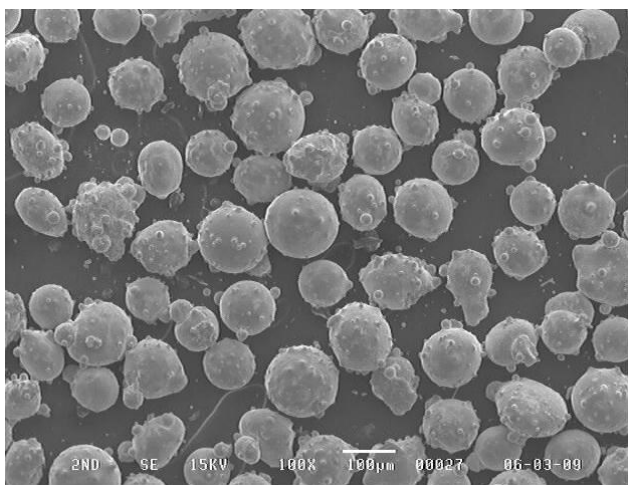


写真2 原料粉末の表面形態(SPC5)

#### 【作製方法】

製作する多孔質体サイズは、量産化や 12in サイズのウエハー搬送や固定での使用を想定し、 $\phi$  300mm、厚さ 30 $\sim$ 50mm、相対密度 60% $\sim$ 85%となる様に設定した。原料粉末を所定量秤量し、グラファイト製ダイス(東洋炭素製、ISO-68、内径  $\phi$  300 $\times$ 外径  $\phi$  450 $\times$ 100mm に充填後、上下にグラファイト製パンチ(東洋炭素製、ISO-68、 $\phi$  300 $\times$ 55mm)を挿入し、約 1500kN で予備加圧した。なお、離型を容易とするために、ダイス内壁および上下パンチの焼結体接触面に 0.2mm 厚のカーボンシートを設置した。焼結に用いた装置は、SPS シンテックス(株)製大型 SPS 装置(Sinter Expert™

SPS30300T(電極サイズ  $\phi$  400、最大荷重値 3000kN、最大電流値 30000A)である(写真3)。この大型 SPS 装置は、現時点において民間企業等が自由に使用できる量産化検証可能な国内唯一のものとなっている。

多孔質体作製条件として、焼結は約 10Pa の真空下で実施し、圧力は 30MPa とした。この温度は、ダイス表面を外部から赤外線放射温度計にて測定したものである。

図3に、焼結時における負荷電流と温度データの一例を示す。電流を適時変更しつつ昇温させ、所定の厚みに達した時点で焼結を終了した。焼結に必要な時間は冷却時間を除くと約1時間 30 分であり、大型焼結体の作製時間としては比較的短かった。なお、大型焼結体作製の場合、焼結体の均一性を確保するため、温度制御ではなく電流制御で行っている。



写真3 大型 SPS 装置の外観

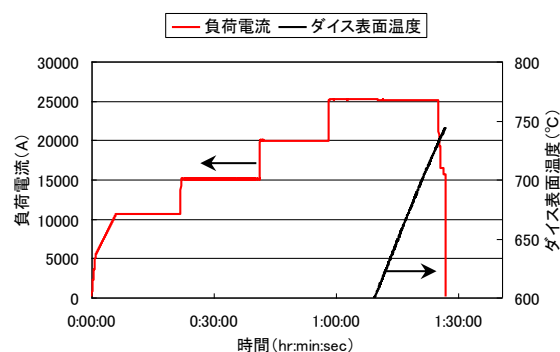


図3 焼結時の負荷電流とダイス表面温度の一例

#### 【焼結体の作製結果】

焼結条件及び焼結体の形状・密度を表1に示す。厚さ、相対密度ともに、当初の目的通りの焼結体が作製できている。写真4には、 $\phi$  300 $\times$ 52mm 厚の多孔質体焼結体の外観を示す。ただし、ダイスから取り出した直後であるため、カーボンシートが付着した状態である。

表2には、SUS316L (29mm厚、相対密度84%)と SUS316L (36mm厚、相対密度68%)のそれぞれについて、

焼結体中央部と外周部を切り出し、密度を測定した結果を示す。これより、中央部は外周部に比べて緻密化する傾向があり、また36mm厚に比べ、より緻密化した29mm厚の方が、密度の差が大きい。この原因は、焼結時に、焼結体の中央部と端部に温度差があるためと考えられる。これを改善するには、昇温速度を下げるなどの対策が考えられる。通気性金型の素材として、通気性に影響が大きい焼結体の密度差をさらに低減させるには、必要に応じてこのような対策を施す必要がある。

表1 焼結条件及び焼結体の形状・密度

材質	焼結条件		焼結体のサイズ、密度			
	焼結温度(°C)	加圧(MPa)	厚さ(mm)	直径(mm)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	相対密度(%)
SPC5	830	30	30	297	6.38	83%
SUS316L	890	30	29	297	6.72	84%
	775	30	36	297	5.41	68%
	750	30	40	297	5.41	68%
	765	30	41	297	5.28	66%
	745	30	52	297	5.14	64%
	700	30	54	297	4.95	62%



写真4 焼結体外観 (SUS316L, φ300×52mm厚)

表2 多孔質体の中央部と外周部の密度比較結果

	SUS316L, 36t					SUS316L, 29t	
	中央部	外周部①	外周部②	外周部③	外周部④	中央部	外周部
密度(g/cm <sup>3</sup> )	5.54	5.50	5.45	5.41	5.48	6.93	6.66
相対密度	69.5%	68.9%	68.3%	67.7%	68.6%	86.8%	83.5%

【焼結体の後処理および特性評価】

焼結後の多孔質体から、真空吸着材料として使用できる形状にするには、切削、研削、放電などの加工方法が用いられるが、特に複雑な製品形状に対応するためには放電加工が多用される。写真5には、作製した多孔質体に対して放電加工後の表面のSEM像を示す。比較のため、市販品(ポーセラックス)の放電加工面を合わせて示す。相対密度68%のSUS316Lは若干の空孔が認められるが、市販品においては、放電加工により粒子が熔融、変形して空孔が埋まっている。いずれのサンプルにおいても、この状態では素材本来の通気特性は発揮されないため、何らかの後処理が必要である。

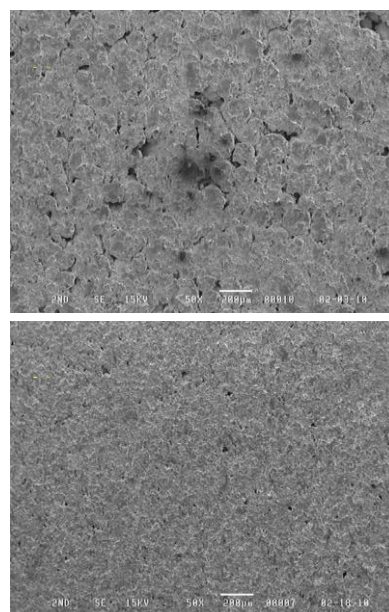


写真5 試作品及び市販品の放電加工面のSEM像

通気性を確保するための後処理として、研磨により表面近傍における熔融粒子を除去し、さらに無電解エッチングを追加した。研磨方法は、メッシュ#600にて湿式研磨とし、厚さで数10μm程度磨いた。無電解エッチングは、FeCl<sub>3</sub>(濃度:210g/L, 温度65°C, エッチング時間:600秒, SPC5のみ300秒)を用いた。なお、研磨粉等の粒子を効率良く除去するため、超音波洗浄をエッチングと同時に実施した。写真6には、研磨とエッチング後における表面のSEM像を示す。

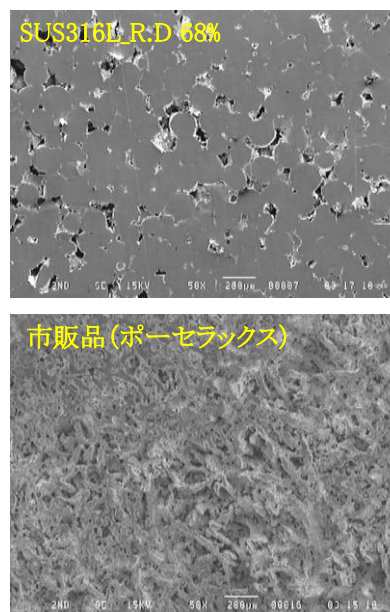


写真6 試作品及び市販品の研磨、エッチング後の放電加工面のSEM像

放電加工面と比較すると、研磨により粒子の形状が明確になり、さらにエッチングを施すことで、空孔の目詰まりが改善されている。なお、ポーセラックスはエッチング条件が強かったため、表面に腐食生成物が発生している。

試作品及び市販品を後処理したサンプルについて、通気性を評価した。図4に、通気特性評価装置の概略を示す。

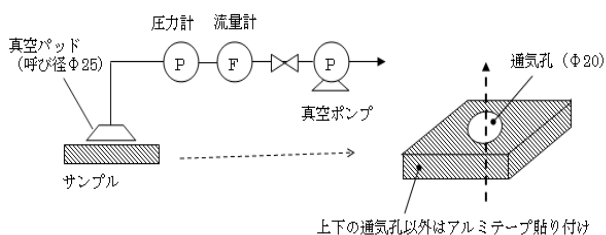


図4 通気特性評価装置の概略

本装置で得られる通気流量には、真空パッドと多孔質体間で発生するリーク量が含まれる。多孔質体を通気した状態でのリーク量を測定することはできないため、通気特性の評価方法は下記の通りとした。

まず、サンプルの大気側をシールした状態で、圧力を50kPaに設定し、このときの流量を測定する。得られる流量値は真空パッドとサンプル間のリーク量が大部分を占めると考えられる。次に、サンプル大気側のシールを取り外して、圧力および流量を測定する。サンプルにリーク部を上回る通気性があれば、圧力は低下し、流量は増加する。このようにして得られた圧力低下比と流量増加比を、各サンプルについて、後処理が研磨のみの場合とエッチングを追加した場合で比較した。なお、サンプルの厚さは10~12mmである。厳密には厚さ補正が必要だが、各サンプルで厚さに大きな差が無いいため、今回の比較では無視するものとした。

図5に、通気特性評価結果を示す。これより、今回の評価対象の中では、SUS316L、相対密度68%の通気特性が優れていることがわかる。研磨のみの場合とエッチングを追加した場合を比較すると、密度の高いサンプルについては、通気性が改善される傾向があるが、密度の低いサンプルでは、大きく変わらない。なお、ポーセラックスについては、エッチング条件が厳しかったため、腐食生成物が通気性を阻害していると考えられる。

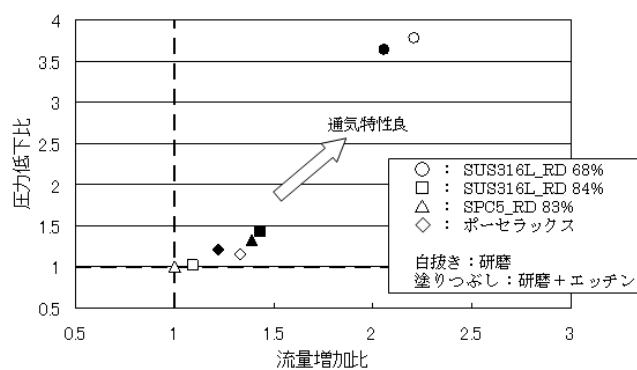


図5 通気特性比較結果

### 3. 結言

半導体製造に関連したものづくりとして、超耐摩耗材、真空吸着材料の試作を行った結果、以下の様な結果を得た。

#### 【超耐摩耗材料】

- (1) SPS法を用いることにより、完全バインダーフリーのWC材(WC100wt%)を作製することができた。
- (2) WC100%材は、バインダーが添加された従来のWC材と比べて大幅な耐摩耗性の向上が図られた。
- (3) WC100%材は靱性が低いため、適用箇所によっては延性材料と組み合わせた組成の傾斜化などの対策が別途必要となる。

#### 【真空吸着材料】

- (1) ガスアトマイズ法による粒径 105  $\mu\text{m}$ ~210  $\mu\text{m}$  の球状粉を用いた相対密度 60~70%の大型多孔質体 ( $\phi$  300  $\times$  50mm 厚) を、SPS法により再現性良く製作することが可能であった。
- (2) 相対密度 60~70%の大型多孔質体を通常の機械加工方法で加工し、さらに研磨等の後処理を施すことで、真空吸着材料として必要とされる通気性を確保できた。
- (3) 相対密度 60~70%の大型多孔質体を研磨等で後処理したものは、市販品(ポーセラックス)と比べて優れた通気性を有していることが判明した。
- (4) 真空吸着材料での使用を目的として、焼結後の後処理として実施するエッチングについては、素材、形状により方法が大きく異なるため、用途に応じて最適な条件出しが肝要である。

以上の様に、SPS法では完全緻密体から多孔質まで幅広い材料を簡便に作製できる。これまでに産業技術総合センターではこの他にも数多くの試作開発を行っており、今後においてもこれらの基盤技術をベースとして、リアルニーズを踏まえた実用化支援を継続して行っていく予定である。

高度電子産業育成促進に向けた実用化研究

－サブテーマ2：超精密加工技術の実用化－

渡邊 洋一・齋藤 佳史・久田 哲弥  
自動車産業支援部

近年、高い付加価値を付与できる超精密加工技術は金型や部品など様々な製品を製造する上で必要不可欠な技術となっている。本研究では、これまで培った超精密加工技術の技術移転を積極的に進め、本技術を適用して製品の実用化に向けた開発を行った。

キーワード：セラミックス、ダイヤモンド砥石、超精密加工、高能率加工、乾式研削

1. 緒言

製造業の国際的競争が激しくなる中、高い付加価値を付与できる超精密加工技術は金型や部品など様々な製品を製造する上で必要不可欠な技術となっている。例えば、高度電子産業では半導体ウエハの更なる大口径化に伴い半導体製造装置の大型化が進められ、これらの部品として軽量で高強度なファインセラミックスの適用が検討されている。これらの部品は高精度加工が必要であることに加え、不純物混入の原因となる研削液を使用しない乾式研削が求められるなど、製品化を進めるためには更に新しい超精密加工技術の開発も急務となっている。

本研究では、これまで培った超精密加工技術<sup>1)~4)</sup>の技術移転を積極的に進め、更に本技術を発展させることで製品の実用化に向けた開発を行った。特に、セラミックス製次世代半導体製造装置部品の超精密乾式研削、ガラス基板の仕上げ研削の技術開発を行い、製品化への取り組みを行った。

2. セラミックス製半導体製造装置部品の超精密乾式研削加工技術の開発

大型半導体製造装置向けの装置部品として軽量で材料特性に優れたファインセラミックスの適用が検討され、特に不純物混入の原因となる研削液を使用しない乾式研削での超精密加工技術が求められている。本項では、特にファインセラミックスの中でも機械特性の信頼性の高い窒化ケイ素(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)を対象に、加工能率1μm/min以上で平面度1μm以下を達成可能な加工技術の開発を行った。

2.1 実験方法

乾式による研削加工では研削液による砥石の冷却が

できないため、本実験では砥石のボンド材に耐熱性の高いビトリファイドボンドを採用し、砥粒はダイヤモンドと立方晶窒化ほう素の2種類を検討した。実験は表1に示す加工条件にて実施し、研削抵抗、被削材の平面度、加工比(=実加工量/総切込量)を評価することで最適加工条件を導出した。

表1 実験条件

被削材	窒化ケイ素
被削材外形	□50mm×t20mm
加工機	超精密 CNC 研削盤 SGU52SXS <sub>N</sub> 4 (ナガセインテグレックス社製)
砥石	SD170V(ダイヤモンド砥粒) cBN170V(立方晶窒化ほう素)
砥石周速度	800, 1300, 1800m/min
切込量	1, 3, 5 μm
総切込量	30μm
テーブル送り速度	前後 50mm /min, 左右 8m/min
動力計	水晶圧電型 3 成分動力計 9257B (KISTLER 社製)

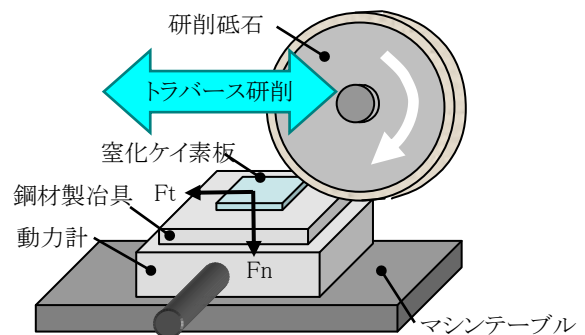


図1 実験装置の模式図



なお、加工実験には、静圧式の砥石軸とテーブル案内を搭載し切込方向の最小設定位置決め分解能が0.01 $\mu\text{m}$ である超精密CNC成形平面研削盤を使用した。また、研削抵抗の測定には水晶圧電型3成分動力計を、被削材の平面度の評価には三次元座標測定機(ZEISS製UPMC550A)を使用した。実験装置の模式図を図1に示した。被削材は鋼材製治具に熱可塑性樹脂を用いて接着固定した後、研削盤のテーブルに設置された動力計に取り付けた。

## 2.2 実験結果

実験結果を表2に示した。ダイヤモンド砥粒の砥石(SD170V)による加工では、研削抵抗、平面度ともに立方晶窒化ほう素砥粒の砥石(cBN170V)と比較して小さくなる傾向が得られた。また、SD170V砥石で砥石周速度1300m/min又は1800m/minの加工条件加工した場合、被削材の平面度が1 $\mu\text{m}$ 以下となり、且つ高い加工比(=実加工量/総切込量)での加工が可能となることが明らかとなった。これらの結果から、目標の加工精度と加工能率を達成する最適条件を見出すことができた。

表2 窒化ケイ素の乾式研削実験結果

砥石	周速度 m/min	切込 $\mu\text{m}$	研削抵抗 N		平面度 $\mu\text{m}$	加工比
			接線	法線		
SD 170 V	800	1	2.8	7.5	0.9	1.0
		3	9.2	26.1	1.0	1.0
		5	12.4	33.0	1.0	1.0
	1300	1	1.0	3.2	0.6	1.0
		3	2.5	6.2	0.6	1.0
		5	2.0	6.9	0.7	1.0
	1800	1	0.4	3.6	0.6	1.0
		3	1.3	4.5	0.6	0.9
		5	2.4	6.4	0.7	0.9
cBN 170 V	800	1	2.9	7.4	1.2	0.7
		3	11.5	30.0	1.3	0.7
		5	14.9	37.7	1.6	0.6
	1300	1	11.3	27.9	0.8	0.6
		3	18.4	48.8	0.9	0.6
		5	22.6	63.2	1.1	0.6
	1800	1	14.4	33.7	0.7	0.7
		3	20.9	51.5	0.9	0.7
		5	27.1	57.2	0.8	0.7

ダイヤモンド砥石は、従来、耐熱性が低く乾式加工には適さないと考えられていた。しかしながら、本実験により、ダイヤモンド砥粒の砥石でも最適条件で加工を

実施することで高精度、高能率な加工が実現可能となる結果を得たため、製品の実用化を急速に進展させることが可能となった。

## 3. 石英ガラスの仕上げ加工技術の開発

光学系部品や半導体製造装置などに使用される石英ガラスの加工では、仕上げ工程での研磨加工において大量のセリア( $\text{CeO}_2$ )研磨剤を使用する。しかしセリウム(Ce)はレアアースであり、世界的な需要の増加と流通量の減少により価格高騰や供給量の減少が懸念されている。一方で使用済みセリア研磨剤の再利用はガラスの研磨屑との分離が難しいことから、現在は産業廃棄物として処理されている。これらの理由から、ガラスの仕上げ加工ではコストや環境負荷の面で早急な改善が求められており、県内のガラス加工に携わるメーカーからも加工技術の改善に対する期待が高まっている。このため、本研究では研磨工程に代替する技術として、加工能率と環境負荷の面で優位性があり、加工形状の自由度が高い、産業技術総合センターが持つ精密研削技術の適用を検討した。

現在、ガラス部品は主に硬質なダイヤモンド砥粒を含む砥石で加工されているが、ガラス表面に多数の破砕が生じるために、砥石の使用は中仕上げまでの工程に留められている。そこで本研究ではこの工程にレジノイドボンドセリア砥石を適用し、仕上げ工程と同等の加工表面が得られる最適加工条件を導出した。ガラスの仕上げ工程では加工表面の破砕が無く、表面粗さ10nmRz以下が求められるため、これらを目標とした。

### 3.1 実験方法

実験はボンド材にレジノ、砥粒にセリア( $\text{CeO}_2$ )を使用した有気孔レジノイドボンドセリア砥石CM10000BP、無気孔レジノイドボンドセリア砥石CM10000Bおよび有気孔レジノイドボンドダイヤモンド砥石SD12000BLの3種類について実施した。始めに、予備実験の結果から得られた表3の実験条件により、各砥石の周速度を変化させた場合の研削抵抗、加工比と表面性状の相関関係を調査し最適な砥石周速度を求めた。次に、得られた最適砥石周速度において、切込み量と加工プロセスを変化させた場合の表面粗さと内部欠陥の評価を行い、最適加工条件を導出した。

実験装置は前項と同等のものを使用した。研削液には40倍に希釈したケミカルソリューションタイプ(pH=8.9)を使用した。石英ガラス板材は鋼材製治具に熱可塑性樹脂を用いて接着固定した後、研削盤のテーブルに設置した水晶圧電型3成分動力計に取り付けた。加工表面の破砕や内部欠陥の評価は、非接触三次元測定機

(三鷹光器製NH-3SP)に付属する光学顕微鏡の観察像にて実施し、表面粗さの評価には触針式表面粗さ測定機(AMETEK製タリサーフPGI1250A)を使用した。なお実験に使用した石英ガラス板材は、有気孔レジノイドボンドダイヤモンド砥石(SD2000BL)により予め表面を研削加工したものを使用した。

表 3 ガラス仕上げ加工の実験条件

被削材	石英ガラス (信越石英製)
被削材外形	□30mm×t2mm
加工機	超精密 CNC 研削盤 SGU52SXS4 (ナガセインテグレックス製)
前加工面	SD2000BL による研削面
仕上げ砥石	SD12000BL , CM10000BP , CM10000B (東京ダイヤモンド工具製作所製)
砥石外形	平型砥石 (直径 200mm, 幅 8mm)
ドレス方法	単石ダイヤモンドドレス法
研削液	ケミカルソリューションタイプ
加工開始位置	平面研削 (0.5 $\mu$ m 切込み)にて 法線研削抵抗 $F_n > 10N$ となる位置
動力計	水晶圧電型 3 成分動力計 9257B (KISTLER 製)

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 砥石周速度による影響について

砥石仕様及び砥石周速度が加工面及び加工比に及ぼす影響を調査するため表 4 の実験条件により実験を行った。

表 4 砥石周速度選定のための実験条件

砥石周速度	SD12000BL : 600m/min CM10000BP: 300, 600, 900m/min CM10000B: 300, 600, 900m/min
総切込み量	7.2 $\mu$ m (0.3 $\mu$ m×24回)
テーブル速度	6m/min
トラバース速度	50 mm/min

図2に、各砥石と周速度(図中のV)における、砥石の総切込み量に対する加工比(=実加工量/総切込み量)の関係を示した。図中で周速度はVと示した。レジノイドボンドセリア砥石については総切込み量に対して周速度が600m/min.の場合に高い加工比となり、総切込み量7.2 $\mu$ mで加工比が0.5以上となる結果となった。これにより最適周速度は600m/min.であることが確認できた。また無気孔レジノイドボンドセリア砥石は周速度が900m/min.の場合に加工比が低下する結果となった。一方、有気

孔レジノイドボンドダイヤモンド砥石(SD12000BL)はレジノイドボンドセリア砥石と比較して加工比が小さくなる結果となった。

図3に砥石周速度600m/minの場合の各砥石における総切込み量と法線研削抵抗値を示す。法線研削抵抗値は総切込み量が増加すると単調増加する結果が得られた。特に加工比が少ないレジノイドボンドダイヤモンド砥石の場合はセリア砥石と比較して研削抵抗値も高くなる傾向が得られた。

表5に各砥石において砥石周速度600m/minで加工した場合の、総切込み量が2.4 $\mu$ m, 4.8 $\mu$ m, 7.2 $\mu$ mとなった際の加工面観察像を示す。SD12000BLの砥石ではすべての加工面において破砕が生じていた。無気孔レジノイドボンドセリア砥石(CM10000B)では総切込み量2.4 $\mu$ mの時点で破砕は観察されず総切込み量7.2 $\mu$ mにおいても破砕は生じなかった。一方、有気孔レジノイドボンドセリア砥石(CM10000BP)では総切込み量2.4 $\mu$ mの時点で破砕が発生しており総切込み量7.2 $\mu$ mでも僅かに破砕が見られた。これは砥石に含まれる中空ガラスビーズなどの気孔形成剤が加工表面に破砕を及ぼしたと考えられる。

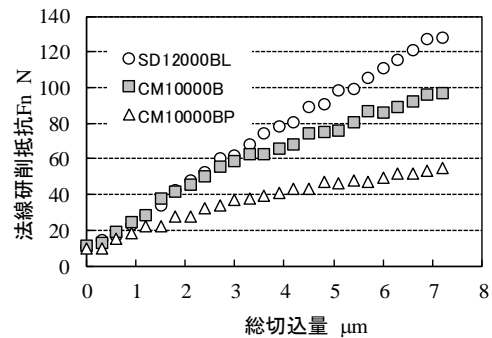
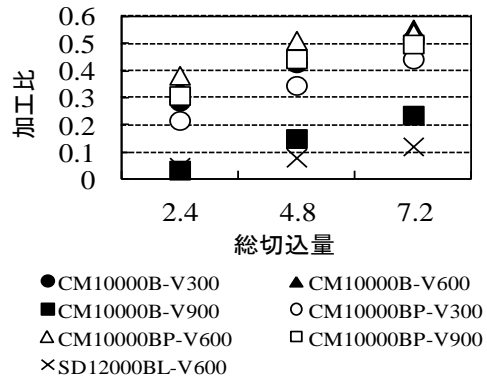
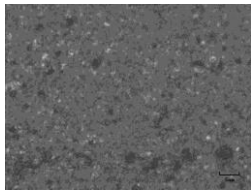



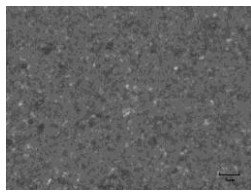
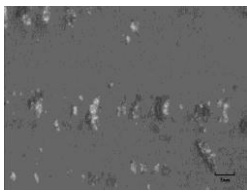
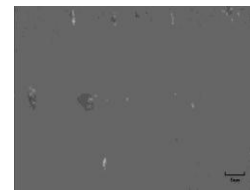

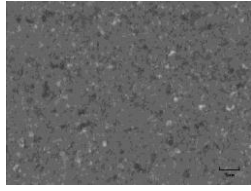
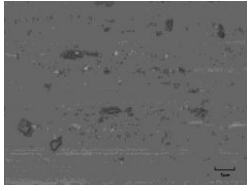
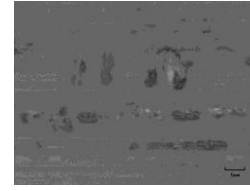
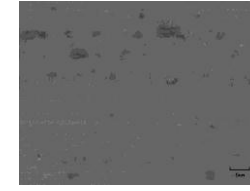


図 3 各砥石における総切込み量と法線研削抵抗の関係 (砥石周速度 600m/min)

表 5 仕上げ加工時の観察像および表面粗さの加工結果

砥石	100倍観察像			
	前加工面(SD2000BL)	総切込 2.4mm	総切込 4.8mm	総切込 7.2mm
CM10000B				
CM10000BP				
SD12000BL				

### 3.2.2 加工プロセスによる表面粗さおよび内部欠陥への影響について

2種類のセリア砥石を使用した場合に、切込量やスパークアウト回数が表面粗さや表面破砕、内部欠陥に及ぼす影響を評価するため、表6に示す条件にて実験を行った。砥石周速度は加工比が最も高くなる600m/minとした。まず、仕上げ加工後にサンプルの表面粗さと表面破砕を観察した。次に内部欠陥の評価を行うにあたり、サンプル表面をフッ酸にて約3μm程度エッチングにて除去し、その面の表面粗さと観察を行った。

表7に各仕上げ加工後における加工面の表面粗さと

表6 加工プロセスを評価するための実験条件

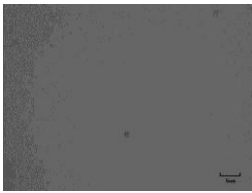
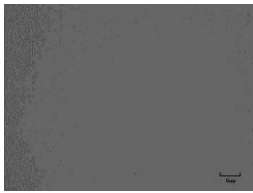
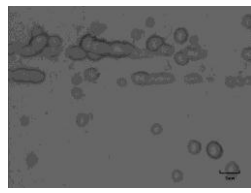
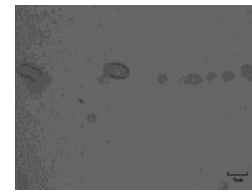
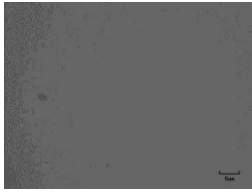

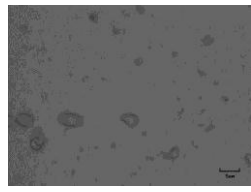
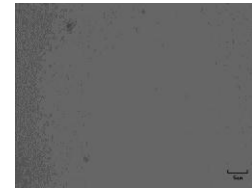
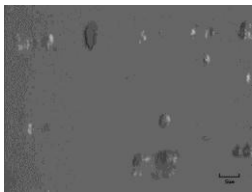
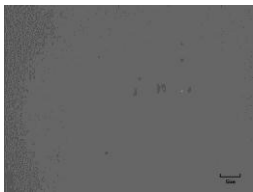
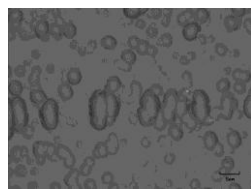
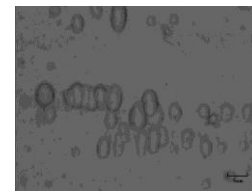
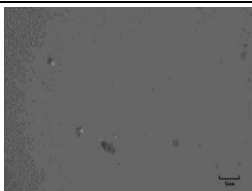
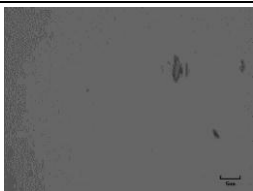
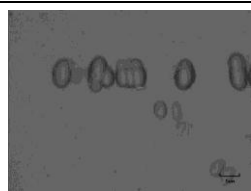
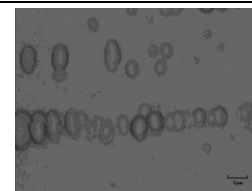
前加工面	SD2000BL による研削面
仕上げ砥石	CM10000B, CM10000BP (東京ダイヤモンド工具製作所製)
砥石周速度	600m/min
テーブル速度	6m/min
トラバース速度	50 mm/min
プロセス A	0.3μm × 6 回 ⇒ 0.1μm × 6 回 ⇒ スパークアウト無し, または 20 回
プロセス B	0.3μm × 12 回 ⇒ 0.1μm × 6 回 ⇒ スパークアウト無し, または 20 回

観察像を示す。有気孔レジノイドボンドダイヤモンド砥石(SD2000BL)で加工した前加工面には深さ0.3μm以上の破砕が多数発生し、表面粗さは30.5nmRaであった。無気孔レジノイドボンドセリア砥石(CM10000B)で仕上げ加工を行った場合には、加工プロセスA, Bともに微小な破砕が散見されたが、スパークアウトを20回実施することで表面破砕を取り除くことが可能となった。また表面粗さに関して、加工プロセスAよりも加工プロセスBの方が良好であり、スパークアウト20回実施後で2nmRaを得た。一方有気孔レジノイドボンドセリア砥石(CM10000BP)で仕上げ加工を行った場合には、加工プロセスAと比較して加工プロセスBの方が破砕は少なく、良好な表面粗さを得た。またスパークアウト回数を20回実施することで破砕は減少したが、深さ0.2μm程度の破砕が散見された。

内部欠陥に関しては、無気孔レジノイドボンドセリア砥石(CM10000B)の場合の方で少なくなる傾向が見られた。また加工プロセスBの条件でスパークアウトを20回実施することで内部欠陥無く仕上げ加工することが可能となる結果を得た。

以上の結果より、石英ガラスの仕上げ加工では無気孔レジノイドボンドセリア砥石(CM10000B)を使用し、切込量が大きい加工プロセスBにてスパークアウト回数を20回行う加工方法で表面破砕及び内部欠陥が少ない良好な加工表面となり表面粗さ2nmRaが得られることが明らかとなった。

表 7 仕上げ加工時の加エプロセスが表面粗さ及び内部欠陥に及ぼす影響

		観察像(エッチング前)		観察像(エッチング後)	
		スパークアウトなし	スパークアウト 20 回	スパークアウトなし	スパークアウト 20 回
CM1000B	加エプロセス A	 4nmRa, 62nmRz	 2nmRa, 25nmRz	 45nmRa, 880nmRz	 12nmRa, 762nmRz
	加エプロセス B	 4nmRa, 17nmRz	 2nmRa, 13nmRz	 6nmRa, 135nmRz	 2nmRa, 55nmRz
CM1000BP	加エプロセス A	 12nmRa, 268nmRz	 4nmRa, 130nmRz	 75nmRa, 801nmRz	 96nmRa, 1485nmRz
	加エプロセス B	 3nmRa, 76nmRz	 4nmRa, 102nmRz	 12nmRa, 753nmRz	 68nmRa, 1434nmRz

#### 4. 結言

超精密加工技術の技術移転を積極的に進め、いくつかの製品の実用化に向けた開発を行った。実績やその開発過程で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 平成 20 年度から平成 24 年度の 5 年間で県内外の 14 企業へ、延べ 75 件の支援を実施した。特に、セラミックス製次世代半導体製造装置用部品の超精密乾式研削に関する技術支援においては実際に製品として採用された事例もあった。
- (2) 窒化ケイ素材の乾式研削加工技術の開発では、SD170V 砥石で砥石周速度 1300m/min 又は 1800m/min で加工した場合に、平面度が 1 $\mu$ m 以下で切込み量指令値と実切込量との差異が僅かな加工が可能であり、目標の加工精度と加工能率を達成する条件を見出すことができた。
- (3) 石英の仕上げ加工では、無気孔レジノイドボンドセラリア砥石 CM1000B を用いることにより、表面破碎がない、表面粗さ 2nmRa の加工面が得られる条件を見出した。また切り込み量及びスパークアウト回数を増加させた場合には、内部欠陥も少なくなることが明らかとなった。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、秋田県立大学システム科学技術学部の呉勇波先生には多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 森由喜男, 和嶋直, 鈴木福雄, 佐々木泰孝, 高橋正直, 児玉省明: 宮城県工業技術センター研究報告, 27(1996), P13.
- 2) 森由喜男, 久田哲弥, 和嶋直, 林正博, 渡邊洋一, 家口心, 齋藤佳史: 宮城県産業技術総合センター研究報告, 2(2004), P15.
- 3) 庄司克雄ほか: 超精密加工と非球面加工(2004), P177.
- 4) 森由喜男, 中塚朝夫, 久田哲弥, 家口心, 齋藤佳史: 宮城県産業技術総合センター研究報告, 4(2006), P1.

## 高度電子産業育成促進に向けた実用化研究

### －サブテーマ3: 微細形状の創成および転写技術の実用化－

家口 心・渡邊 洋一\*・阿部 宏之  
機械電子情報技術部 ・ \*自動車産業支援部

本テーマでは、研削とホットエンボスを用いた MEMS デバイスのウエハレベルパッケージング技術の開発を行った。MEMS デバイスは汚染に脆弱であるため、デバイス部を封止して製品化される。複数のデバイスが作製されたシリコンウエハとガラスウエハを接合しデバイス部を封止するウエハレベルパッケージングは、デバイスの小型化、量産化に有効な方法である。本手法では、デバイス部とガラスウエハとの干渉を回避するため、キャビティを有するガラスウエハ(キャップウエハ)を用意する必要がある。このキャビティの形成方法として、我々はホットエンボスを提案する。具体的には、研削によりブロックパターンモールドを作製し、そのモールドの形状をホットエンボスによりガラスウエハに転写する。本プロセスで作製したキャップウエハとMEMS センサの作製されたシリコンウエハとの陽極接合を行い、本センサの特性試験とヘリウムリーク試験を実施した結果、本プロセスはウエハレベルパッケージングに有用であることが明らかとなった。

キーワード: 研削, ホットエンボス, ガラス, MEMS, ウエハレベルパッケージング, 陽極接合

#### 1. 緒言

MEMS デバイスは汚染に脆弱なため、通常デバイス部を封止して製品化される。デバイスの小型化と生産の効率化が実現できるため、ウエハレベルパッケージングが注目されている<sup>1), 2)</sup>。本手法では、複数のデバイスが作製されたシリコンウエハとガラスキャップウエハを接合しデバイス部を封止する。その後ウエハをダイシングし、多数のデバイスを得る。この手法を適用する場合、キャップウエハにはデバイスとの干渉を回避するキャビティを形成する必要がある。キャビティを形成する方法としてはエッチング<sup>3), 4)</sup> やショットブラストがあるが、これらの方法は非効率である他、使用する薬品や投射材による環境負荷が懸念される。そこで、キャビティの形成方法として我々はホットエンボスを提案する。具体的には、耐熱材料の板を平面研削した後、格子状に溝加工し、ブロックパターンのモールドを作製する。このパターンを、ホットエンボスによりキャップウエハに転写し、箱型のキャビティを形成する。この方法によれば、キャップウエハ上に任意の寸法・間隔のキャビティを効率的に形成できる。本プロセスの有効性について実験的に検討した内容を本稿で報告する。

#### 2. 実験方法

本プロセスの概略を図1に示す。(i) 先ず、研削により

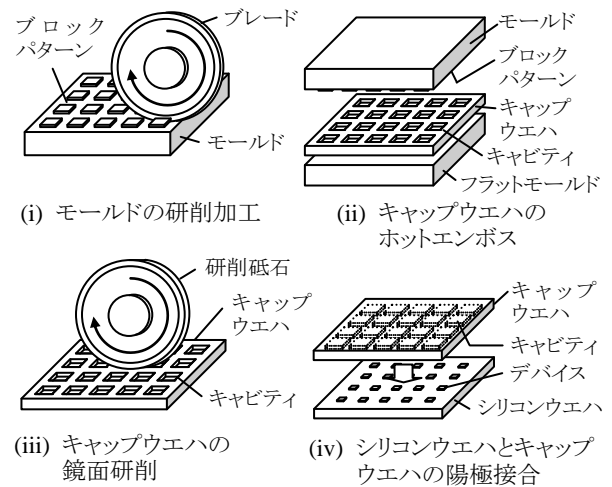


図1 研削とホットエンボスを用いたウエハレベル MEMS パッケージングの模式図

ブロックパターンモールドを作製し、(ii)ホットエンボスによりガラスキャップウエハに転写する。(iii)その後キャップウエハの両面を鏡面研削し、(iv)シリコンウエハとキャップウエハの陽極接合を行う。以下に各プロセスについて詳述する。

##### 2.1 モールドの加工

ブロックパターンモールドの形状と寸法を図2に示す。一対の超硬合金(J05, 富士ダイス)の板(30×30mm, 厚

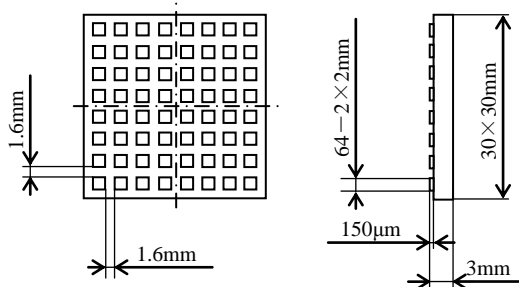


図2 ブロックパターンモールドの形状と寸法

表1 フラットモールドの平面研削条件

研削方式	横軸平面研削(トラバース送り)
研削盤	SGM-52E(ナガセインテグレックス)
モールド材質	超硬合金 J05(富士ダイス)
モールド寸法	30×30mm, 厚さ 3mm
予備仕上げ砥石	SD2000V, 幅 8mm, 直径 200mm (ニートレックス) ※GC1000 ブロックの平面研削により目立て
仕上げ砥石	SD12000B, 幅 5mm, 直径 200mm (東京ダイヤモンド工具製作所) ※SUS304 ブロックの平面研削により目立て
砥石周速度	600m/min
テーブル速度	12m/min
クーラント	ノリタケクール AF-T(ノリタケ)

表2 ブロックパターンモールドの溝加工条件

溝加工方式	クリープフィード研削
溝加工装置	SPG-150(ナガセインテグレックス)
パターン寸法	2×2mm, 高さ 0.15mm, 溝幅 1.6mm
ブレード	SD200B, 幅 1mm, 直径 100mm (東京ダイヤモンド工具製作所) ※GC500 カップツルアにより目立て
砥石周速度	1500m/min
テーブル速度	50mm/min
工具パス	各溝毎に 0.3mm ピッチで 3 パス
クーラント	ノリタケクール AF-T(ノリタケ)

表3 キャップウエハのホットエンボス条件

成形装置	Reprina-T50(オリジン電気)
ガラス基板材料	TEMPAX Float(SCHOTT)
ガラス基板寸法	30×30mm, 厚さ 0.6mm
成形温度	655℃
成形圧力	2.83MPa(2.55kN)
加圧時間	1800s
冷却	炉冷(655℃~450℃) →空冷(450℃~250℃) →水冷(250℃~40℃)
離型剤	BN 粉末(オーデック)
雰囲気	真空(50Pa)

さ 3mm)の片面を鏡面研削した後、一方のモールドの鏡面研削面を格子状に溝加工し、ブロックパターンを形成した。ブロックパターンの突起部の寸法は2×2mm、高さ150μmとし、溝幅は1.6mmとした。

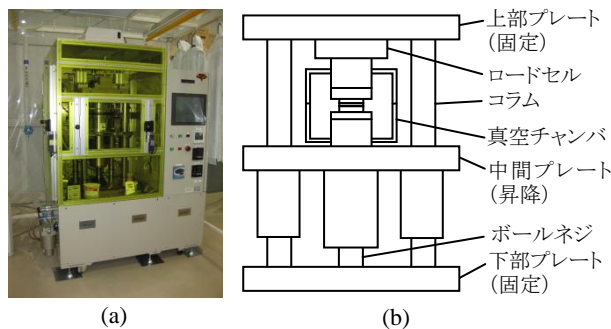


図3 キャップウエハのホットエンボスに用いた成形装置の外観(a)と概略図(b)

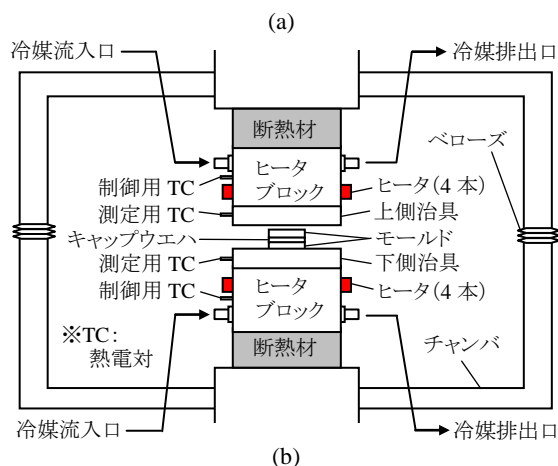
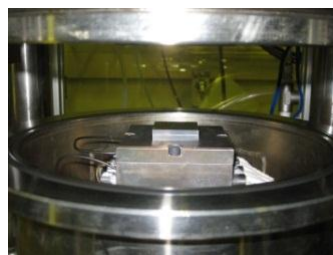


図4 真空チャンバ内部の写真(a)と概略図(b)

平面研削条件を表1に示す。ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石を用いて予備仕上げを行った後、極微粒レジノイドボンドダイヤモンド砥石を用いて鏡面仕上げを行った<sup>5)</sup>。

溝加工条件を表2に示す。カップツルア<sup>6)</sup>(RS-61, リード)を用いて目立てした1mm幅のレジノイドボンドダイヤモンドブレードを、各溝毎に0.3mm間隔で3パス通過させ1.6mm幅の溝を加工した。

## 2.2 キャップウエハのホットエンボス

キャップウエハのホットエンボス条件を表3に示す。キャップウエハの素材にはシリコンウエハとの陽極接合が可能なTEMPAX(30×30mm, 厚さ0.6mm, SHOTT)を用いた。高橋ら<sup>7)</sup>による成形実験を参考に、加熱温度655℃, 加圧力2.83MPa(モールドの投影面積を基準と

表 4 キャップウエハの平面研削条件

研削方式	横軸平面研削(トラバース送り)
研削盤	SGM-52E(ナガセインテグレックス)
予備仕上げ砥石	SD2000V, 幅 8mm, 直径 200mm (ニートレックス) ※GC1000 ブロックの平面研削により目立て
仕上げ砥石	SD12000B, 幅 5mm, 直径 200mm (東京ダイヤモンド工具製作所) ※SUS304 ブロックの平面研削により目立て
砥石周速度	600m/min
テーブル速度	12m/min
クーラント	ノリタケール AF-T(ノリタケ)

表 5 シリコンウエハとキャップウエハの陽極接合条件

接合装置	AB-40(アユミ工業製)
接合温度	400℃
印画電圧	600V
雰囲気	真空(1mPa)
キャップウエハの前処理	酸洗浄(硫酸 + 過酸化水素水)

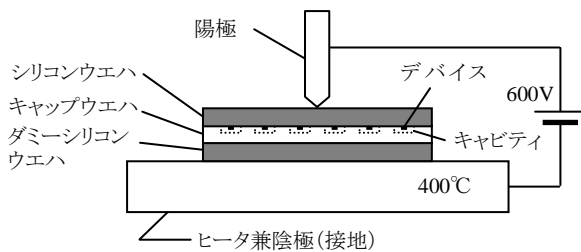


図 5 シリコンウエハとキャップウエハの陽極接合

した加圧荷重は 2.55kN), 加圧保持時間 1800s でキャップウエハの成形を行った。

ホットエンボスに使用した装置の外観と概略図を図 3 に示す。本装置は内部の真空脱気, または窒素置換が可能なチャンバを装備し, その内部において任意の温度, 荷重でのホットエンボスが可能である<sup>8)</sup>。図 4 にチャンバ内部の写真と概略を示す。ブロックパターンモールドとフラットモールドの間にキャップウエハを配置し, さらにそれらを下側の治具上に配置した。予備実験から, 離型剤なしではキャップウエハとモールドの離型が困難であることが判明したため, モールドの成形面には離型材として窒化ホウ素 (BN) の粉末を塗布した。モールドの酸化防止と転写性向上のため, チャンバ内を真空にして加熱を開始した。加熱はヒータブロックに配置したカートリッジヒータにより行われる。加熱温度は上下のヒータブロックに配置した熱電対により制御される。モールドにさらに近い位置での温度を把握するため, 上下治具のモールドとの接触面から 5mm の位置にも熱電対を配置した。目標の加熱温度に到達後, 所定の加圧荷重で成形を開始した。設定した加圧保持時間が経過した後, 中間プレートの位置を保持したまま 40℃まで冷却

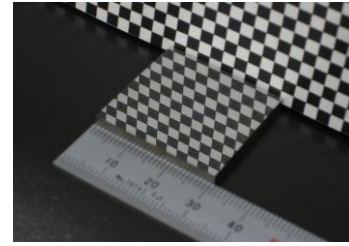
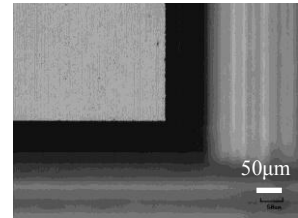
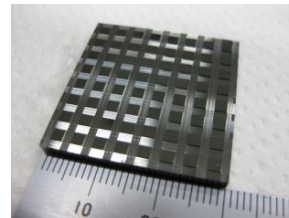


図 6 平面研削したフラットモールドの外観



(a)

(b)

図 7 研削したブロックパターンモールドの外観(a)とパターン角部(b)

した。その後, チャンバを開放しモールドとキャップウエハを取り出した。

### 2.3 キャップウエハの平面研削

後述するように, ホットエンボス後のキャップウエハは BN 粉末の離型剤を用いたことによって梨地面となり, そのままではシリコンウエハとの陽極接合が困難であった。そこでキャップウエハ両面の平面研削を行った。研削条件を表 4 に示す。ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石を用いて予備仕上げを行った後, 極微粒のレジノイドボンドダイヤモンド砥石を用いて最終仕上げを行った。

### 2.4 陽極接合

シリコンウエハとキャップウエハの陽極接合条件を表 5 に, 陽極接合の模式図を図 5 に示す。研削したキャップウエハを酸洗浄後, キャップウエハの接合面(キャビティ形成面)上に, MEMS センサが作製されたシリコンウエハを積層し, 陽極接合を行った。電界の安定とウエハの均熱化を目的としてキャップウエハと陰極側ヒータの間にダミーのシリコンウエハを配置した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 モールドの加工結果

図 6 に平面研削後のフラットモールドの外観を示す。モールドの研削面は表面粗さ 1.4nmRa, 9.5nmRz の鏡面となった。図 7 にブロックパターンモールドの外観とパターン角部の観察像を示す。ブロックパターンの角部や端部は, ほぼチップングなく加工できた。図 8 に溝底面の観察像を示す。溝底面には研削方向と平行に縞状の加工痕が観察され, それと垂直な方向における表面粗さは 0.4µm Ra, 2.3µmRz であった。この加工痕は,

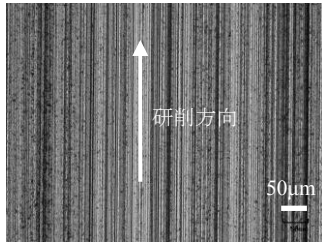


図8 ブロックパターンモールドの溝底面の観察像

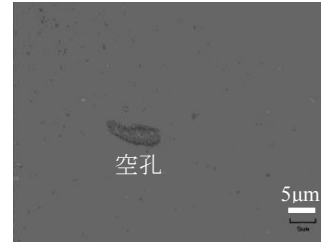


図12 キャップウエハの仕上げ面の観察像

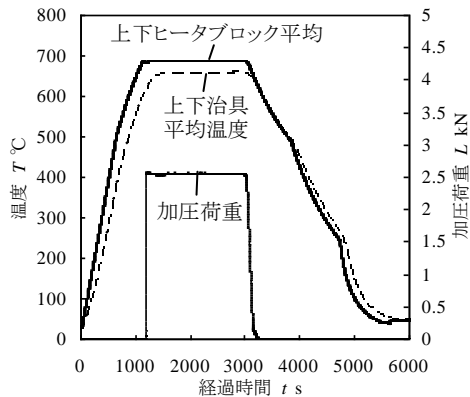


図9 ホットエンボス中における上下ヒータブロック及び上下治具の平均温度と加圧荷重の変化

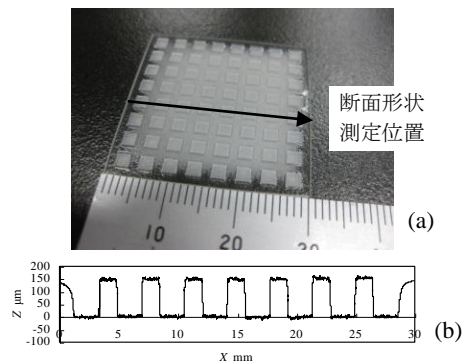


図10 成形したキャップウエハの外観(a)と断面形状(b)

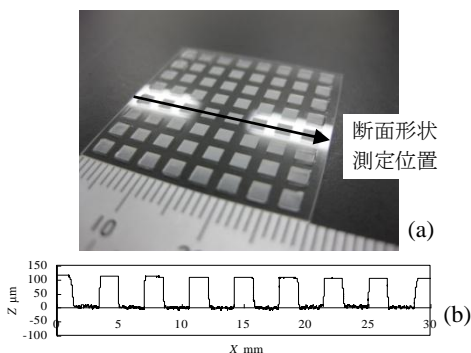


図11 平面研削後のキャップウエハの外観(a)と断面形状(b)

キャップウエハに転写されシリコンウエハとの接触面積を減少させるため、接合強度を低下させる要因となる。

よって、今後、平滑な底面が得られる溝加工技術の開発を行う予定である。

### 3.2 キャップウエハのホットエンボスの結果

図9にホットエンボス中における上下ヒータブロックの平均温度、および上下治具の平均温度と加圧荷重の変化を示す。当初、加熱温度(ヒータブロック温度で制御)を655°Cに設定し実験を行った。この時、ヒータブロックは設定温度に到達するものの、治具は約30°C低い温度であった。そこで、設定温度を688°Cに変更した。その結果、定常状態での治具温度は上側で約654°C、下側で約657°Cとなり、平均で約655°Cとなった。よって、この時の加熱温度を655°Cとして取り扱うこととした。

図10に655°C、2.83MPa、1800sの条件で成形したキャップウエハの外観と断面形状曲線を示す。成形後のウエハは、モールドの溝加工痕は転写されなかったが、BN粉末を塗布したため、梨地面となった。また、キャビティの断面形状から、外側のキャビティの側壁が垂直に成形されておらず、深さも他のキャビティと比較して浅いことが分かる。この原因は、ホットエンボス時にウエハの側面が自由表面になるため、材料が側方へ流動したためである。よって、この現象は型構造を密閉型にすることにより抑制できると思われる。その他のキャビティについてはモールドの形状が概ね転写された。

### 3.3 キャップウエハの平面研削結果

図11に平面研削後のキャップウエハの外観と断面形状を示す。研削後のキャップウエハは、キャビティ部を除き透明であった。平面研削により外側のキャビティ深さに他のキャビティを一致させた結果、研削後のキャビティ深さは約110μmとなった。図12に平面研削後のキャップウエハの仕上げ面の拡大観察像を示す。研削面を拡大観察すると10μm前後の空孔が若干観察されたが、空孔部を除く表面粗さは1.9nmRa、11.6nmRzであった。今後、キャビティ部も含む鏡面転写技術や成形後の研削を省略できる手法を検討する。

### 3.4 パッケージング性能の評価

図13に陽極接合後のウエハの外観を示す。キャップウエハのキャビティ周囲にある配線用貫通穴(直径約1mm)は高速スピンドルを搭載したフライス盤(F-MACH



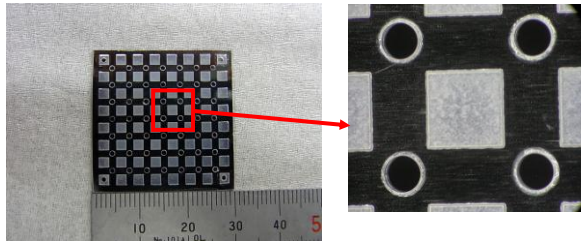


図 13 陽極接合後のウエハの外観

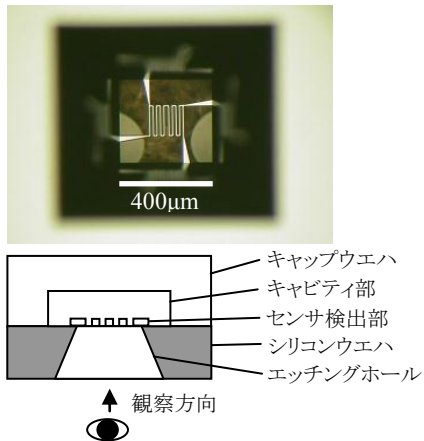


図 14 シリコンウエハのエッチングホールから観察したダイシング後の MEMS センサの検出部

442, 東芝機械)を用い、ダイヤモンド被覆された超硬ドリルにより穿孔した。本ウエハを個片化後、ヘリウムリーク試験 (MIL-STD-883C) を実施した。その結果、 $3.8 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  のリークレートが得られた。

図 14 に、シリコンウエハとキャップウエハを接合後、シリコンウエハのエッチングホールから観察したセンサ検出部の写真を示す。この図からセンサが損傷なく接合されたことがわかった。

#### 4. 結言

研削加工した超合金製ブロックパターン金型を用いたホットエンボスにより、TEMPAX (SHOTTO) 製キャップウエハに箱型キャビティを成形した。さらに成形後のキャップウエハを平面研削し、MEMS センサが形成されたシリコンウエハとの陽極接合を行った。その結果、以下に示す結言が得られた。

- 1) ホットエンボス ( $655^\circ\text{C}$ - $2.83\text{MPa}$ - $1800\text{s}$ ) により、箱型キャビティ ( $2 \times 2\text{mm}$ , 深さ  $150\mu\text{m}$ , キャビティ間隔  $1.6\text{mm}$ ) を有するキャップウエハが成形可能である。
- 2) ホットエンボス時、キャップウエハと超合金モールドは BN 粉末の離型剤を用いることにより離型可能である。
- 3) ホットエンボス時に BN 粉末の離型剤を用いた場合、キャップウエハは梨地面となるが、粒度 #12000 のレジノイドボンドダイヤモンド砥石を用いてキャップウエハを平面研削することにより、シリコンウエハとの陽極接合 ( $400^\circ\text{C}$ ,  $600\text{V}$ ) が可能となる。
- 4) 本プロセスにより、 $3.8 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  のリークレート (MIL-STD-883C) での MEMS パッケージングが可能である。

#### 参考文献

- 1) Masanobu Saruta, Hideyuki Wada, Michikazu Tomita, Kohei Matsumaru, Tatsuo Suemasu, Hirokazu Hashimoto: Wafer Level MEMS Packaging, Fujikura Tech. J., 110, 4(2006)46 (in Japanese).
- 2) Takafumi Okudo, Toru Baba, Koji Goto, Masanao Kamakura, Yoshiyuki Takegawa, Takashi Saijo: Micro-Miniaturization of MEMS Devices Bases on Wafer-Level Packaging, Matsushita Tech. J., 56, 3(2008)76 (in Japanese).
- 3) Xinghua Li, Takashi Abe and Masayoshi Esashi: Deep Reactive Ion Etching of Pyrex Glass, Proc. 13th IEEE MEMS 2000, Tech. Digest, Miyazaki, (2000)271.
- 4) Xinghua Li, Takashi Abe, Yongxun Liu and Masayoshi Esashi: High Density Electrical Feedthrough Fabricated by Deep Reactive Ion Etching of Pyrex Glass, Proc. 14th IEEE MEMS 2001, Tech. Digest, Interlaken, (2001)98.
- 5) Shin Kaguchi, Yoshifumi Saito, Tetsuya Hisada: Development of High Precision Grinding Technology of Reaction Sintered Silicon Carbide, Proc. ABTEC 2007, (2007)55 (in Japanese).
- 6) Matsui Seiki, Katsuo Syoji and Cheng Hao Piao: Study on Truing of Diamond Vitrified Wheels (2nd Report) -Truing Performance of Cup Truer-, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 53, 3(1987)486 (in Japanese).
- 7) Masaharu Takahashi, Ryutaro Maeda: Large-Area Micro-Hot Embossing of Grass Materials with Glassy Carbon Mold Machined by Dicing, J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity, 47-549, 10(2006)963.
- 8) Hajime Kaburaki, Masami Kuroda: Thermal Nanoimprint System for Reserch and Development, Reprina-T50, Origin Tech. J., 71-II (2008)8 (in Japanese).

## 高度電子産業育成促進に向けた実用化研究

### －サブテーマ4: 光学機器の高付加価値化を実現する微細光学部品の開発－

石井 克治・家口 心\*・林 正博・阿部 宏之・高田 健一  
機械電子情報技術部 ・ \*自動車産業支援部

液体二酸化炭素による樹脂表面の可塑化を利用したインプリント法を開発し、室温で迅速に樹脂表面への金型の微細形状転写が可能であることを見出した。室温、液体二酸化炭素への含浸時間1分、金型プレス時間1分、プレス圧力0.55MPaの条件で、アクリル樹脂表面に高さ11 $\mu$ mの形状転写が可能であることを実験的に明らかにした。また、ポリエチレンテレフタレート、ポリカーボネートなど複数種類の熱可塑性樹脂材料に対して同様の形状転写が可能であることを明らかにした。

キーワード: 光学部品, 樹脂, 微細形状, 熱インプリント法, 超臨界二酸化炭素, 液体二酸化炭素

#### 1. 緒言

光学機器の高性能化のためには、構成部品の高付加価値化が必要不可欠である。例えば、ディスプレイの高性能化のためには、樹脂部品である導光板やフレネルレンズの大面積化、薄肉化、および表面への微細形状付与が必須である。従来技術である射出成形法では、微細形状を有する大面積、薄肉部品において、射出された熔融樹脂が微細形状に充填する前に固化してしまうため、金型形状を精密に転写できない。樹脂表面に微細形状を転写する技術として熱インプリント法が注目されているが、熱によって樹脂を可塑化させるため、加熱・冷却に長い時間を要するという課題がある<sup>1)</sup>。この課題に対して、超臨界二酸化炭素による樹脂の可塑化を利用したインプリント法が近年提案されているが、超臨界状態を安定に保持するには、二酸化炭素の高い圧力に耐えうる大がかりな装置を必要とする<sup>2)~4)</sup>。また、超臨界状態から減圧する際に、樹脂が発泡しやすく、微細形状を有する光学部品などには不向きである。そこで、工業生産に適う転写時間で、大がかりな装置を要せず、微細形状のインプリントを実現するために、液体二酸化炭素による樹脂の可塑化を利用したインプリント法の研究を行った。

#### 2. 実験方法

液体二酸化炭素によって樹脂表面を可塑化し、金型をプレスすることによって、微細形状を転写する装置の概略図を図1に示す。装置は、二酸化炭素の導入バルブと排出バルブを備えた高压容器(設計耐圧20MPa)、樹脂板、金型、金型ホルダー、金型を樹脂板にプレス

するためのピストンとバネから構成されている。高压容器と樹脂板間、及び高压容器とピストン間は、Oリングによって封止している。

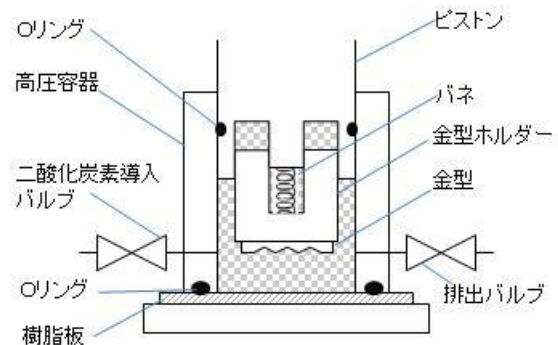


図1 液体二酸化炭素を利用したインプリント装置

転写のプロセスを図2に示す。はじめに、高压容器と樹脂板で密閉された空間に二酸化炭素を導入する(a)。二酸化炭素のボンベから直結で導入した場合、20℃で5.7MPaの気体の二酸化炭素で高压容器内が満たされる。次に、ピストンを下げ、高压容器内の体積を減少させることによって、二酸化炭素を液化させる。樹脂板表面を液体二酸化炭素で浸し、二酸化炭素の樹脂板への含浸によって、樹脂表面を可塑化させる(b)。次に、さらにピストンを下げ、可塑化した樹脂表面に金型をプレスし、金型形状を樹脂表面に転写する(c)。最後に、ピストンを上げて、金型を離し、二酸化炭素を高压容器から排気し、高压容器を樹脂板から離す(d)。本プロセスは、一端に開口部を有する高压容器を樹脂板に押圧することによって密閉空間を構成するため、樹脂を板状

のまま送り出して連続転写できる。すなわち、生産ラインへの導入が容易であるという長所を持つ。

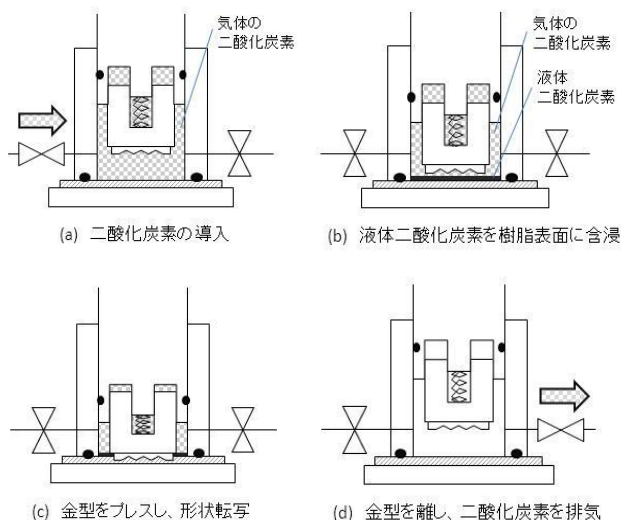


図2 液体二酸化炭素を利用したインプリント法

### 3. 実験結果及び考察

実験に用いた金型(サイズ20mm×20mm, 厚さ2mm, グラッシーカーボン製), およびインプリントしたアクリル樹脂(厚さ1mm, アクリライトL 三菱レイヨン株式会社)の外観写真を図3に示す。また, 金型, 及びインプリントした樹脂表面の形状を測定した結果を図4(a), (b)にそれぞれ示す。形状測定は, 非接触三次元形状測定機(三鷹光器株式会社 NH-3SP)を用いて行った。金型には幅100  $\mu\text{m}$ , 高さ47  $\mu\text{m}$ のV溝形状が全面に形成されている。また, 樹脂表面の転写高さは11  $\mu\text{m}$ であった。転写条件は, 室温(20 $^{\circ}\text{C}$ ), 液体二酸化炭素への含浸時間1分, 金型プレス時間1分, プレス圧力0.55MPaであり, 転写時間は合計2分である。同等の転写結果を得るために20分の時間を要する従来の熱インプリント法の転写時間を1/10に短縮できることを明らかにした。さらに, 樹脂の転写面側のみを可塑化するため, 転写条件及び転写結果が樹脂板の厚さに依存しないことを実験的に確認済みである。



図3 金型と転写したアクリル樹脂板の外観写真

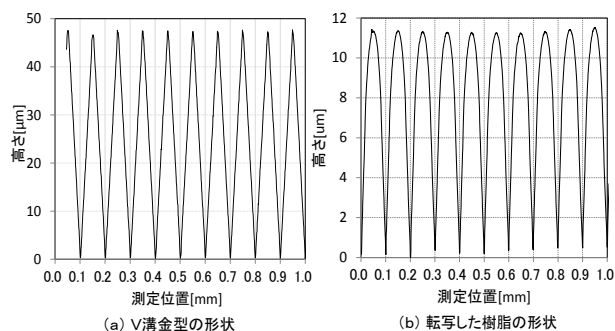


図4 表面形状の測定結果

表1に, 同じ金型を用いて, 各種樹脂に対して, インプリントした結果を示す。転写条件は前述と同様である。アクリル樹脂に限らず, ポリエチレンテレフタレート, ポリカーボネートなど, 多くの樹脂材料に対して, ミクロンオーダーの形状転写が可能であり, 非晶性でかつ極性基を持つ樹脂ほど, 転写高さが高いことを明らかにした。

今後, 転写条件の最適化とともに, 二酸化炭素の樹脂板への含浸および可塑化特性の解明に取り組む予定である。

表1 各種樹脂における転写高さ

樹脂名	転写高さ[ $\mu\text{m}$ ]	結晶化度	極性の有無(構成元素)
アクリル樹脂	11.1	非晶性	有(C,H,O)
ポリエチレンテレフタレート	10.1		
ポリカーボネート	4.4		有(C,H,Cl)
ポリ塩化ビニル	4.2		
ポリスチレン	9.5		
シクロオレフィン・コポリマー	2.2	結晶化度高い	無(C,H)
シクロオレフィンポリマー	0.6		
ポリプロピレン	0.5	結晶性	有(C,H,F)
ポリテトラフルオロエチレン	0.0		

### 4. 結言

液体二酸化炭素による樹脂表面の可塑化を利用したインプリント法の研究を行い, 従来の熱インプリント法の1/10の時間で, ミクロンオーダーの形状転写を可能とした。本研究は, (独)産業技術総合研究所 コンパクト化学システム研究センター 相澤崇史 上級主任研究員との共同研究で実施した。本研究の成果については, 共同で特許出願(特願2013-068743)済みである。

### 参考文献

- 1) 平井義彦: 精密工学会誌 Vol.76, No.2, pp.143-147, 2010
- 2) 遊佐敦, 杉山寿紀: 特開2004-235613号
- 3) 須藤克典: 特許第4202901号
- 4) 遊佐敦, 小賀野順之: 特許第4611731号

## 高度電子産業育成促進に向けた実用化研究

### －サブテーマ5:軽量繊維活用した自動車・家電機器部品などの高強度・軽量化－

佐藤 勲征 ・ 推野 敦子  
材料開発・分析技術部

炭素繊維で強化された長繊維強化熱可塑性樹脂(CF-LFT)を用い、射出成形時の混練・可塑化工程での繊維切断を抑えるべくスクリュ構造の検討と、CF-LFTの耐熱性と電磁波シールド性の評価を行った。その結果、CF-LFTにおいて、混練・可塑化工程での繊維切断を抑制できる射出成形機のスクリュ構造を確認できた。また、CF-LFTのマトリックス樹脂を変更することで使用温度範囲を拡大できること、CF-LFTでCFを長繊維の状態で作成させることは電磁波シールド性に優位性あることがわかった。

キーワード:長繊維強化熱可塑性樹脂, 炭素繊維, 繊維切断, 耐熱性, 電磁波シールド

#### 1. 緒言

自動車業界や産業機械業界では、部品の軽量化による使用燃料や電力の削減のニーズがある。また、家電・OAモバイル機器業界ではスマートフォンやタブレットPCのハウジングに代表されるように薄肉・幅狭傾向があり、材料の高い剛性が求められる。これら要求に応えられる方法として金属部品の樹脂化(金属代替)が挙げられ、各メーカーが検討を行っている。

一方で金属代替の可能性のある樹脂材料としてLFT(長繊維強化熱可塑性樹脂)が開発されており、強化繊維として炭素繊維(CF)を用いた場合は、アルミニウムに匹敵する引張強度が得られるとされる。しかしながら、LFTを用いて所望の物性を発現するには、加工過程で繊維の切断を抑制することが必要とされる。また、繊維切断の抑制と相反することとして、ウエルド強度の低下や成形品の流れ方向と直交する方向の収縮率(ヒケ)が大きくなるという問題が指摘されている。

そこで、本研究では炭素繊維で強化されたLFT(CF-LFT)を用い、射出成形時の混練・可塑化工程、金型充填工程の繊維切断を抑制した上で、ウエルド強度の向上ならびに成形品として寸法精度を高め、軽量・高強度の要求への対応を図ることを最終目的とし、その第1段階として、射出成形時の混練・可塑化工程での繊維切断を抑制するスクリュ構造の検討と、CF-LFTの適用範囲を確認するべく耐熱性および電磁波シールド性の評価を行ったので、報告する。

#### 2. 実験方法と結果

##### 2.1. スクリュ構造の検討

CF-LFTの繊維の切断を抑えた成形を可能にするために、宮城県産業技術総合センター設置の射出成形機(実験機レベル, JSW製 J50E-C5)に取り付け可能なLFT専用のスクリュを製作した。製作したスクリュは従来スクリュに比べ、全体に深溝とし、供給部が長く、圧縮部を短くした。このスクリュにより、実験機レベルの射出成形機を用いたLFTの安定的な計量が可能となった。この結果をふまえて、量産機レベルの射出成形機(150ton)のLFT専用のスクリュを設計・製作した。LFT専用スクリュの定量的な効果を示すため、量産機レベルの射出成形機を用い、従来スクリュ(STD)と製作したLFT用スクリュ(LFT)を用いた際の繊維の切断状況を調べた。繊維の切断状況は、射出成形機ノズル先端から射出されるパージ材を対象に、樹脂部を薬品で溶解させ、濾過により繊維成分を取り出し、それを無限希釈しマイクロスコップで残存繊維長を測定することで調べ

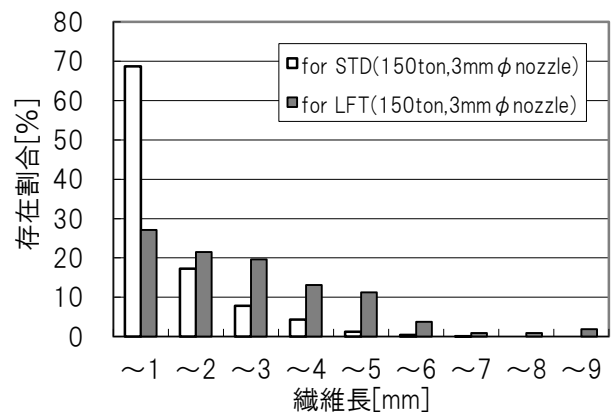


図1 パージ材の残存繊維長

た。成形材料として繊維長9mmの炭素繊維で強化された半芳香族ポリアミドをノズル径3mmφで射出した時の結果を図1として示す。図1より、STDスクリュを用いた場合、1mm以下の長さの繊維が70%程度を占めるのに対して、LFTスクリュでは1mm以下の繊維が30%程度であり、長い繊維が多く残存していることがわかる。この結果より、製作したスクリュ繊維の切断の抑制に大きく貢献していることがわかった。今後は、LFT用のスクリュを用い、射出成形条件が繊維の切断や物性に及ぼす影響を調査するとともに、繊維切断の抑制によって現れるウエルド強度や成形品の形状精度の低下の問題解決に材料面、金型面から着手する予定である。

## 2.2. 耐熱性評価

CF-LFTの耐熱性を評価するために、各種マトリックス樹脂での引張強度の温度依存性を測定した。検討したマトリックス樹脂は、構造の異なる半芳香族ポリアミド2種とPPSである。結果を図2に示す。

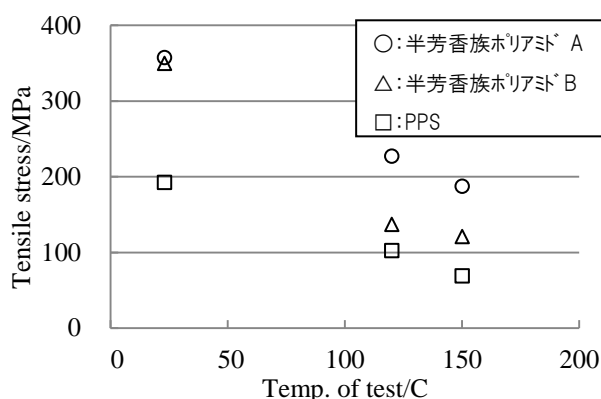


図2 引張強度の温度依存性

図2より、CF-LFTの耐熱性はマトリックス樹脂に依存、詳しくはガラス転移温度に依存することがわかった。試験温度が高くなるほど、引張強度は低下するが、半芳香族ポリアミドAをマトリックス樹脂としたCF-LFTでは、150℃においても、常温強度の半分程度を維持していることがわかった。

## 2.3. 電磁シールド性評価

CF-LFTの電磁波シールド特性を把握するため、CFの存在形態(長繊維, 短繊維)とCFの含有量を変えた平板を作製し、マイクロ波ベクトルネットワークアナライザと電磁シールド材料評価ホルダ(ADVANTEST TR17302プラスチックシールド材評価器(遠方界用))の構成により、周波数範囲10MHz-1GHzのシールド特性を評価した。その結果を図3, 4に示す。

図3, 4の結果から、長繊維状態でCFを存在させることで、短繊維状態と比較し、CFの接触頻度が多くなり、その結果として良好なシールド特性が得られた。また、

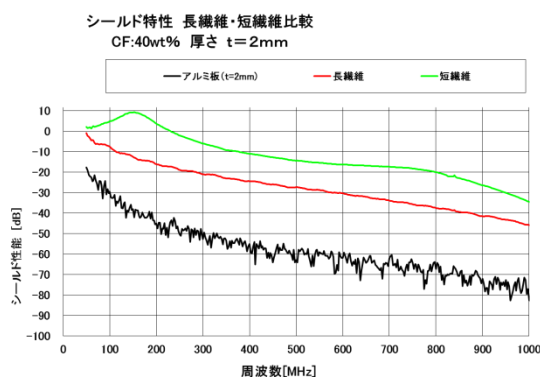


図3 CF存在形態の違いによるシールド特性

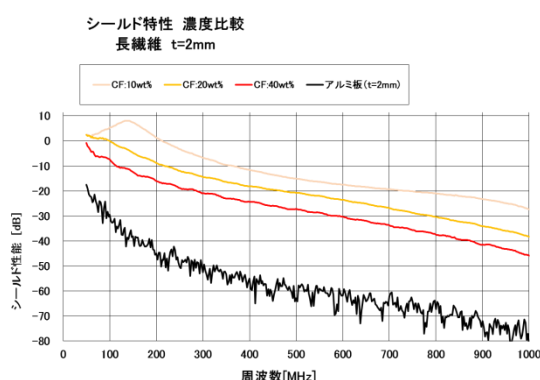


図4 CF含有量の違いによるシールド特性

CF含有量が多いほど、シールド特性が良好であることがわかった。

## 3. 結言

- CF-LFTにおいて、射出成形機のスクリュを専用のものにする事で、混練・可塑化工程での繊維切断を抑制することができた。
- CF-LFTの適用範囲を広げる検討を行い、マトリックス樹脂を変更することで使用温度範囲を拡大できることを確認した。
- CF-LFTで、CFを長繊維の状態が存在させることで、電磁波シールド性に高まることがわかった。今後、電磁波シールドが必要な部材への展開を進めたい。

## 保護機能付き組み込み用リアルタイムOSの開発

小野 仁・荒木 武・今井 和彦  
機械電子情報技術部

保護機能付きOSは、あるモジュールの不具合が他のモジュールに波及することを防止し、組み込みシステム全体の信頼性を向上させる。

本開発では、保護機能付きOSとしてTOPPERS/HRP2カーネルを選択し、多くの組み込みシステムに用いられる32ビットCPU(ARM Cortex-M3)上で、保護機能の確認と実行性能の測定を行った。また、保護機能付きOSを移植する際の課題を抽出した。

キーワード: CPU, リアルタイムOS, メモリ保護機能, TOPPERSプロジェクト, MMU, MPU

### 1. 緒言

組み込みシステムの信頼性を向上させ、デバッグの工数及びコストを削減する手段の一つとして、保護機能付きOSの活用が挙げられる。保護機能付きOSは、あるモジュールの不具合が他のモジュールに波及することを防止し、組み込みシステム全体としての信頼性を向上させる。なお、本稿では、保護機能とはメモリ保護機能とオブジェクトアクセス保護機能を指す。

一般的に、パソコンには高性能のCPUが搭載され、その上で動作するOSは保護機能を有することが多いが、組み込みシステムに搭載されるCPUは性能が比較的低いため、OSは搭載されないか、保護機能を持たないリアルタイムOSが搭載されることが多い。

そこで本開発は、多くの組み込みシステムに用いられる32ビットCPUをターゲットとした保護機能付きリアルタイムOSの開発を目標として開始した。

今年度は、既存の保護機能付きリアルタイムOSの評価と、移植の際の課題を抽出したので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 MMUとMPU

OSがメモリ保護機能を実現するためには、CPUにMMU(Memory Management Unit)またはMPU(Memory Protection Unit)が搭載されている必要がある。一方、組み込みシステムでは静的なメモリ配置が可能な場合が多く、リアルタイム性を保証するためには、アドレス変換を伴わないMPUの方が有利となる<sup>1)</sup>。この様子を図1に示す。

#### 2.2 特権モードとユーザモード

MMPやMPUを搭載したCPUの動作モードには、全てのメモリ領域にアクセスできる特権モードと、メモリ領域毎にアクセスを制限できるユーザモードがある。アプリケーションソフトウェアは通常はユーザモードで動作する。後述のTOPPERS/HRP2カーネルの場合、OS上のタスクは、ユーザモードで動作するユーザタスクと、特権モードで動作するシステムタスクの2種類がある<sup>2)</sup>。

#### 2.3 評価対象

マイコンボードは、ARMコアを内蔵した32ビットCPU(Cortex-M3, 50MHz, ROM256KB, RAM64KB)を搭載したTEXAS INSTRUMENTS製EK-LM3S6965を使用した。

保護機能付きOSは、MPUに対応し、国内製で無償かつ使用制限の無いTOPPERS/HRP2カーネル(バージョン2.1.0)<sup>3)</sup>を使用した。比較対象となる保護機能無しOSは、TOPPERS/ASPカーネル(バージョン1.7.0)<sup>4)</sup>を使用した。

	MMU	MPU
機能	アドレス変換とメモリ保護	メモリ保護のみ
CPU	ARM(Cortex-A), SH3, SH4, 他	ARM(Cortex-M), SH1, SH2, Rx, 他
適用例		
	論理アドレス MMU 物理アドレス	物理アドレス MPU 物理アドレス
	0x0000 0x3FFF 0x0000 0x5FFF 0x0000 0x2FFF	0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0xFFFF
	アプリ1 アプリ2 アプリ3	アプリ1 アプリ2 アプリ3
	アプリ1~3は別のメモリ空間を持つ	アプリ1~3は同じメモリ空間を持つ
実行時間	アドレス変換情報の入れ替えが起ると遅くなる(予測不可)	常に一定
特徴的用途	実メモリに入りきらない大きなプログラムの実行	ハードリアルタイム性が要求される組み込みプログラムの実行

図1 MMUとMPUの違い

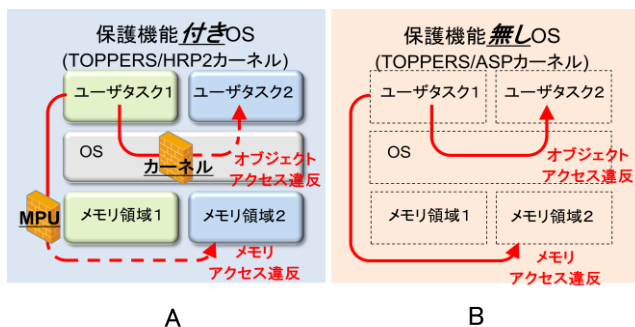


図2 今回使用したマイコンボードの外観図

## 2.4 保護機能の確認

故意にアクセス違反を起こすユーザタスクを用意し、保護機能付きOSと(図3A)保護機能無しOS(図3B)それぞれの上で動作させることにより、保護機能の動作を確認した。アクセス違反の種類は、ユーザタスクが不正なメモリ領域にアクセスするタイプ(メモリアクセス違反)と、ユーザタスクが操作を許可されていない保護ドメインに属するカーネルオブジェクトに対して、サービスコール経由でアクセスを行うタイプ(オブジェクトアクセス違反)の2種類とした。

2種類用意した理由は、ユーザタスクのメモリアクセス違反はハードウェア(MPU)で検出できるのに対し、オブジェクトアクセス違反はサービスコール内で検出する必要があり、検出のメカニズムが異なるためである。



A B  
図3 保護機能の確認方法

## 2.5 実行性能の測定

保護機能付きOSの実行性能が、保護機能無しOSと比較してどの程度変化するかを、様々な条件<sup>1)</sup>でシステムコール(act\_tsk)を実行することにより測定した(表1)。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 保護機能の確認結果

保護機能付きOSにより、2種類のアクセス違反を両方検出することができた。これにより、保護機能付きOSが適切にアクセス保護を行っていることが確認できた。

### 3.2 実行性能の測定結果

保護機能付きOSでは、保護機能無しOSと比較してact\_tskの実行時間が4~7 μ sec(相対値で120~180%)

表1 act\_tskの実行条件と実行結果

タスク切り替えの有無	呼び出し元	タスク切り替え先	保護機能付きOS (TOPPERS/HRP2 カーネル)	保護機能無しOS (TOPPERS/ASP カーネル)
切り替え無し	システムタスク	-	6.9	2.7
	ユーザタスク	-	7.6	
切り替え有り	システムタスク	システムタスク	7.9	3.7
	ユーザタスク	システムタスク	8.2	
	ユーザタスク	ユーザタスク (同じ保護ドメイン)	9.7	
	ユーザタスク	ユーザタスク (別の保護ドメイン)	10.2	

程度増加した(表1)。

保護機能無しOSのact\_tskの実行時間が3~4 μ secであることや、アドレス変換情報の入れ替えによるさらなる実行時間の遅れが発生しないことから、多くのソフトウェアにおいてリアルタイム性が保証できると考えられる。

## 3.3 保護機能付きOSの移植について

MMU搭載CPUへのMPU対応保護機能付きOSの移植は、メモリアクセス違反をTLB(Translation Lookaside Buffer)のヒットミスとして検出することにより可能である。また、リアルタイム性の観点からアドレス変換を行わない方が有利である。

一方で、保護機能付きOSへの既存のソフトウェア資産の移植は、移植対象となるソフトウェアのモジュール分割を保護ドメインの観点で見直すことが必要となり、そのための工数が発生する。

## 4. 結言

既存の保護機能付きOSの保護機能の確認と実行性能の測定を実施し、移植における課題を抽出した。今回の成果は、保護機能付きOSの活用を考える際の一つの指針となる。

### 参考文献

- 1) 石川卓也, 本田晋也, 高田広章 : コンピュータソフトウェア, Vol.29 No.4 (2012), p.161
- 2) TOPPERS 新世代カーネル統合仕様書 Release 1.5.0, p.21-25, p.63-67  
[http://www.toppers.jp/documents.html#ngki\\_spec](http://www.toppers.jp/documents.html#ngki_spec)
- 3) TOPPERSプロジェクト: TOPPERS/HRP2カーネル,  
<http://www.toppers.jp/hrp2-kernel.html>
- 4) TOPPERSプロジェクト: TOPPERS/ASPカーネル,  
<http://www.toppers.jp/asp-kernel.html>

## クリーンエネルギー対応組込みシステムの開発

小野 仁・今井 和彦  
機械電子情報技術部

一般的にクリーンエネルギーはエネルギー密度が低いため、これを利用する機器は、省エネルギーであることが求められる。また、組込み機器には高機能化が求められており、クリーンエネルギー対応組込み機器は高機能化と省エネルギーの両立が必要となる。

本開発では、開発対象を独立電源の無線センサ応用システムとし、高機能化と省エネルギーの両立を示すプロトタイプシステムとして、9個のノードからなるマルチホップ通信網を構築し、センサネットワークとしての機能及び通信ネットワークとしての機能、そして省エネルギー性を評価した。

キーワード：クリーンエネルギー、省エネルギー、マイコン、マルチホップ、センサネットワーク

### 1. 緒言

#### 1.1 無線センサ

無線センサは各種の産業におけるデータ収集の手段として幅広いニーズがある。また近年は、電力消費量の監視等、一般家庭にもニーズが広がりつつあるため、無線センサ応用システムの適用対象は拡大している。

#### 1.2 デジタル無線の規格

無線センサとして活用できるデジタル無線には表1の通り各種の規格が存在するが、後述するマルチホップ通信によるセンサネットワークの構築には、IEEE802.15.4 (ZigBeeの基礎部分に採用されている規格) 対応の無線端末が適している。

表 1 各種のデジタル無線の規格<sup>1)</sup>

名称	無線LAN	Bluetooth	ZigBee
標準規格	IEEE 802.11	IEEE802.15.1	IEEE 802.15.4
業界団体	Wi-Fi Alliance	Bluetooth SIG	ZigBee Alliance
通信速度	~450Mbit/s	1Mbit/s	250Kbit/s
通信距離	~100m	~100m	~100m
消費電力	1,000mW程度	100mW程度	数10mW

#### 1.3 マルチホップ通信

マルチホップ通信は、無線機器間で最大通信距離を越えた通信を行うために、機器が互いに情報を中継し合う技術で、基地局が必要無いため、様々な設置条件に対応できる(図1A)。

一方で、独立電源の無線機器間でマルチホップ通信を行う際、電力の消費を抑えるため、各無線機器が同期してスリープモードに入る必要がある(図1B)。

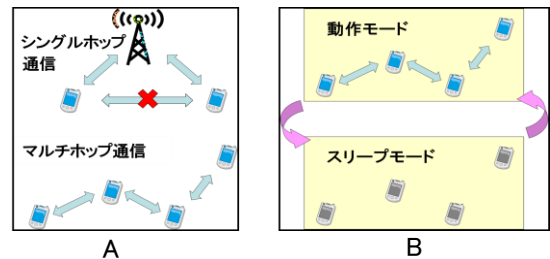


図 1 マルチホップ通信

本開発では、1年目にシングルホップ通信システム<sup>2)</sup>を、2年目にマルチホップ通信システムを構築した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 プロトタイプシステム全体像

9個のマルチホップ通信対応センサノードを、各センサノードが隣同士とだけ通信できる距離に調整して配置した。また、全体の片方の端に情報集約ノード1を、反対側の端に情報集約ノード2を設置した。これらのノードは連携して以下の機能を実現する(図2)。

- (1) 情報集約ノードへの全温度データの転送と表示
- (2) 情報集約ノード1, 2間での文字列の送受信

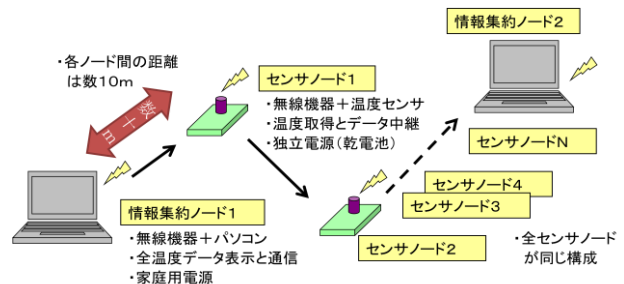


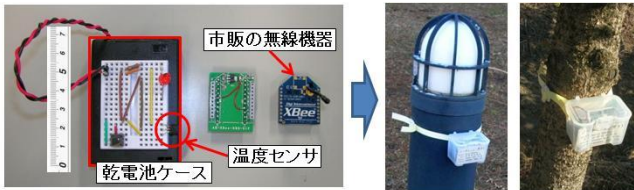
図 2 プロトタイプシステムの全体像



## 2.2 センサノードの概要

市販の安価な無線機器(IEEE802.15.4対応 2.4GHz帯)にアルカリ乾電池(単三・3本直列)と温度センサを組み合わせた回路を9個作製し、密閉して当センターの敷地内(屋外)に設置した(図3)。

無線機器は9個全てが同期して5秒間の動作モードと595秒間のスリープモードを繰り返すように設定した。なお動作モード5秒間は9個のノード間でマルチホップ通信を行うために必要な最低限の時間である。



乾電池+ 温度センサ+ 無線機器 密閉して屋外に設置

図3 センサノードの概要

## 2.3 情報集約ノードの概要

ハードウェアは1ノードあたり1台のパソコンと1台の無線端末の組み合わせとした。ソフトウェアは、各センサノードの温度データを収集し、地図上に表示するものを作成した。文字列の送受信は、フリーのターミナルソフトウェアを活用した(図4)。



図4 情報集約ノードの概要

## 2.4 データ送信方法

各センサノードで収集した温度データは、データ到着率を測定するためブロードキャストにより送信した。情報集約ノードのパソコンに入力される文字列は、一般的なユニキャストにより送信した(表2)。

表2 データ送信方法

設定	送信元の動作	各ノードの動作
ブロードキャスト	送信先を指定せずデータを4回必ず送信	全ての方向にパケットを中継する
ユニキャスト	送信先からACKを受け取るまで送信(最大10回)	送信先の方向のみにパケットを中継する

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 温度データ収集結果

情報集約ノードに全センサノードからの温度データが

到達していることが確認できた(図5)。

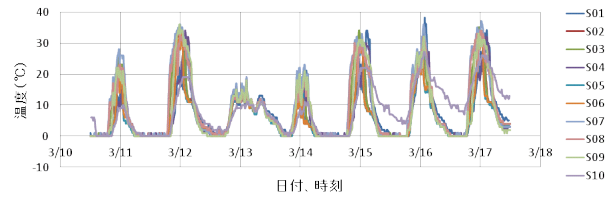


図5 センサノード別温度データ

一方で、情報集約ノードに届かないデータもあった。データ到着率は1ホップあたり2~3%低下した(図6)。

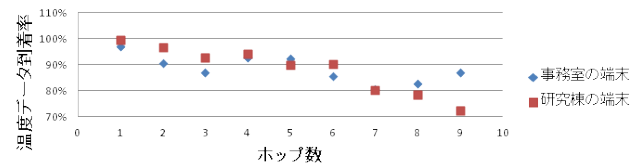


図6 データ到着率とホップ数の関係

## 3.2 文字列の送受信結果

5秒間の動作モード中に、256バイトの文字列が双方の情報集約ノード間で送受信可能であり、文字列に欠落が無いことを確認した。また、文字列の送受信による温度データの欠落も生じなかった。

## 3.3 省エネルギー性の評価結果

今回使用した無線機器の消費電力は、動作モードでは165mW、スリープモードでは165μWである。本センサノードはこの無線機器を使用するので、動作モードとスリープモードを平均した消費電力は3.1mWとなり、単三のアルカリ乾電池3本により約130日間動作する。

本センサノードの専有面積程度の多結晶太陽電池の太陽光による最大出力は約300mWなので、太陽電池と二次電池やコンデンサとの組み合わせにより、本センサノードには十分な電力が供給可能である。

## 4. 結言

市販の安価な無線機器を利用して、10ホップ程度であれば通信システムとしても活用可能な独立電源のセンサネットワークが構築できることを示した。

今回の結果は企業の技術的支援等で活用・普及していく。

## 参考文献

- 堀賢治 他4名 : 電子情報通信学会誌, Vol.96 (2013) No.5, p.325
- 小野仁, 今井和彦 : 宮城県産業技術総合センター業務年報, Vol.42 (2011), p.16

---

平成24年度

宮城県産業技術総合センター研究報告 No.10(2012)

平成25年8月発行

発行所

宮城県産業技術総合センター

〒981-3206

宮城県仙台市泉区明通二丁目2番地

TEL 022-(377)-8700

FAX 022-(377)-8712

---