

平成22年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「MEMS用貫通配線基板の製造技術とその利用技術の開発」

成果報告書

平成23年12月

委託者 東北経済産業局

委託先 公益財団法人みやぎ産業振興機構

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
 - 1-2-1 研究組織及び管理体制
 - 1-2-2 研究員及び管理員
 - 1-2-3 他からの指導・協力者及び指導・協力事項
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論—MEMS用貫通配線基板の製造技術とその利用技術の開発

- 2-1 セラミック基板への微細加工
 - 2-1-1 微細小径工具の仕様調査と選定
 - 2-1-2 加工条件の最適化
 - 2-1-3 工具先端の振れとチップングの大きさについて
 - 2-1-4 切削力と工具寿命の関係
 - 2-1-5 まとめと今後課題
- 2-2 貫通孔への金属配線用装置の開発
 - 2-2-1 金属ボールの挿入実験装置
 - 2-2-2 金属ボールの加熱加圧実験装置
 - 2-2-3 その他の実験装置
- 2-3 金属配線の形成技術の開発
 - 2-3-1 加圧用ウェハ作製技術
 - 2-3-2 金属ボール配線形成技術
- 2-4 貫通配線基板の利用技術の検討
 - 2-4-1 ウェハレベルパッケージング技術の検討
 - 2-4-2 段差を有するウェハへの配線形成技術の検討

第3章 全体総括

- 3-1 セラミック基板への微細加工
- 3-2 貫通孔への金属配線用装置の開発
- 3-3 金属配線の形成技術の開発
- 3-4 貫通配線基板の利用技術の検討

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

自動車、情報、環境・エネルギー、医療などの産業分野に係わる、電子機器の小型化・高密度化の更なる進展を図るため、LSI や MEMS の 3 次元実装技術の高度化が求められている。しかしながら、高度化する上で最も困難な製造技術である層間配線形成において、いまだに有力な技術が確立されていない。現在、層間配線形成に広く使われている貫通配線の製造技術としては、電解めっきによる「Cuめっき法」があるが、ウェハ 1 枚当り 10 時間の製造時間を要しているため、製造コストを安価にすることが難しく、ウェハレベルによる 3 次元積層構造デバイスを広く実用化する妨げとなっている。

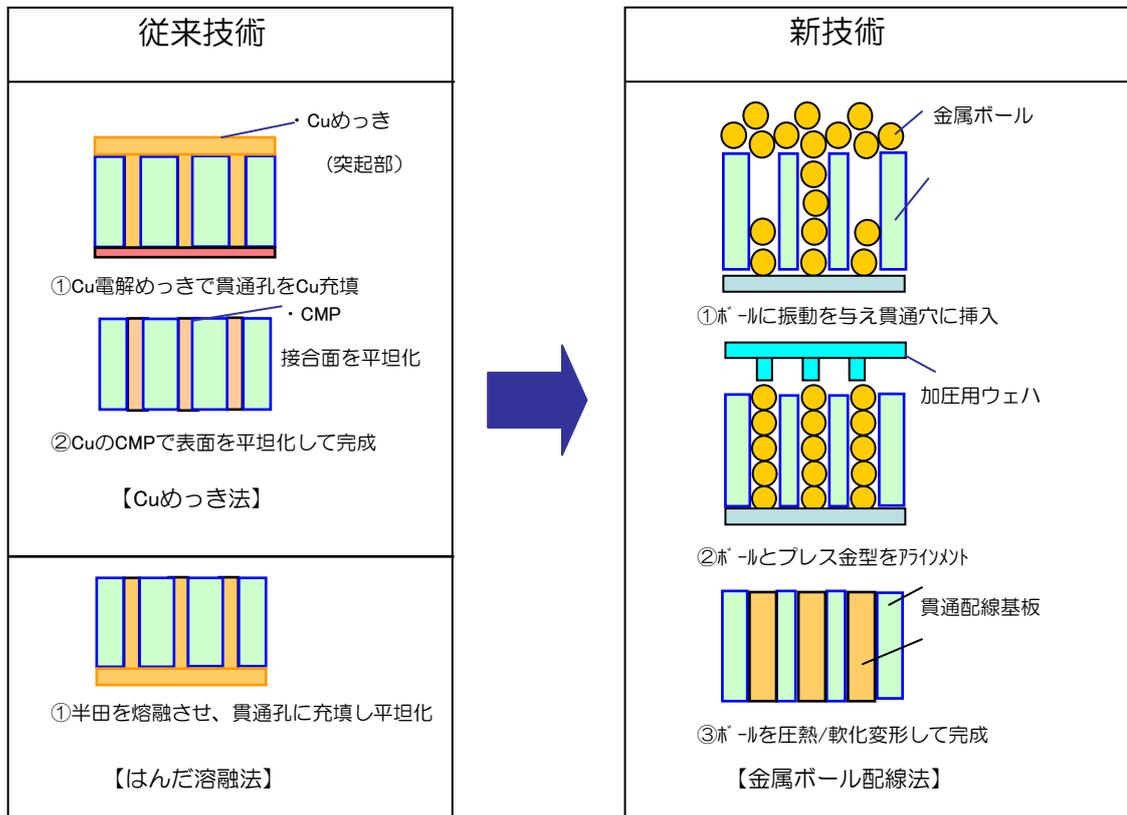
本研究では、平成 21 年度補正予算事業およびその後の補完研究における研究成果を基に、

①低コストで作れる高周波対応の貫通配線基板

②ウェハレベルパッケージングに使用する高気密封止が可能な貫通配線基板の実用化に向けた、「金属ボール配線法」による製造技術の確立を目的とした。

特に、①では基板材料として Si に代わってセラミックス基板（貫通孔の加工難易度が高いサファイヤ基板）に微小貫通孔を精度よく開ける技術を開発し、②では気密性に優れた貫通配線基板を製造可能な貫通配線形成プロセスを開発する。

従来技術（Cuめっき法、はんだ溶融法）と新技術（金属ボール配線法）との違いを下図に示す。



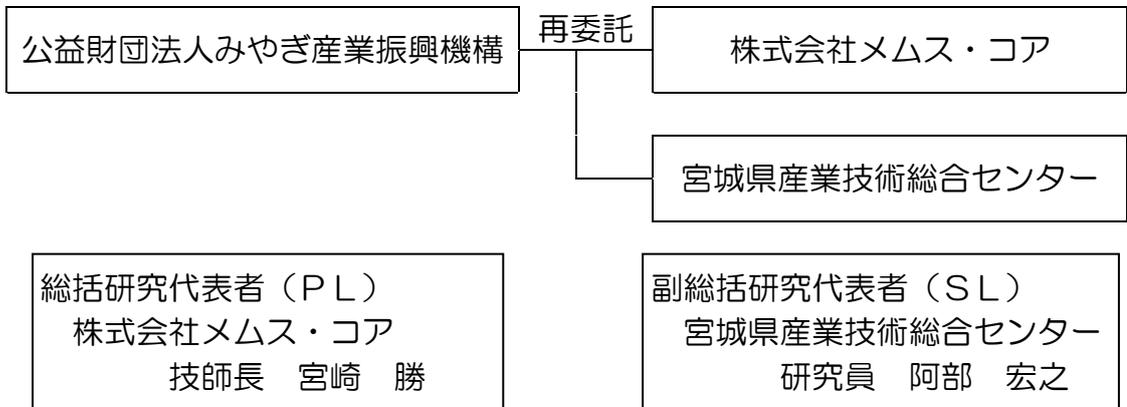
本研究における実施内容と目標は、以下の通りとした。

- ① セラミック基板への微細加工
 - ・加工難易度の高いサファイヤ基板について、最小加工孔径100 μ mの貫通孔を加工する技術を開発する。
 - ・直径100 μ mの貫通孔において、深さ300 μ m、孔の縁のチップング10 μ m以下、加工速度300秒/孔での加工を目標とする。
- ② 金属ボール配線用製造装置の開発
 - ・補正予算事業で製作した製造用の実験装置について、機能向上を図るため機構部やジグ類を製造・改造し、直径50 μ mの金属ボールのボール搬入・搬出歩留り90%以上を達成し、ボールの回収を1分以内で行い、貫通配線基板の生産用製造装置を指向した開発を行う。
- ③ 貫通配線製造プロセス技術の開発
 - ・金属ボールの挿入技術、金属ボールによる配線層の形成技術及び気密構造技術の開発を行い、製品歩留まり90%、めっき法でつくったものと同程度の気密性、製造工程の標準化、各部品の検査工程の確立を目指す。
- ④ 貫通配線基板の利用技術の検討
 - ・利用技術としてMEMS用貫通配線基板を使ったウェハレベルパッケージング技術とMEMS型モジュール技術について調査と検討を行う。

1-2 研究体制

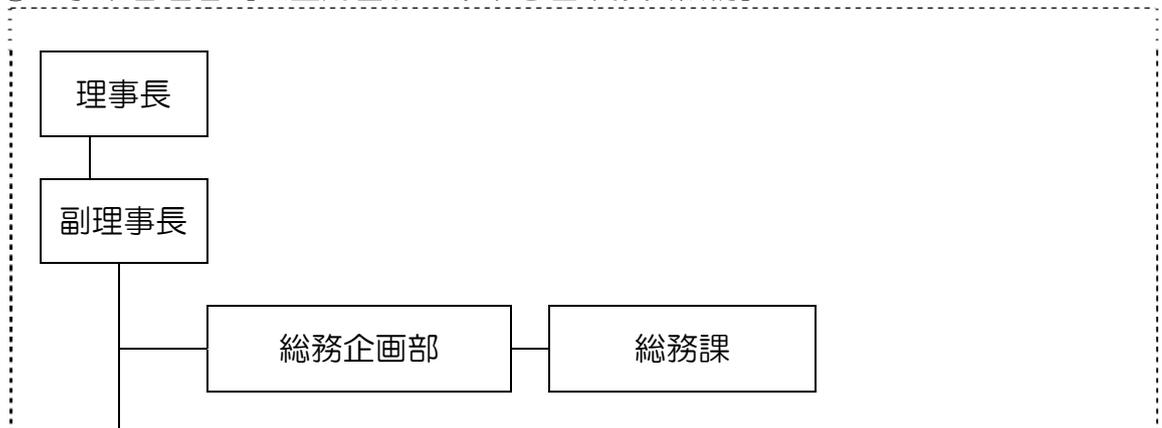
1-2-1 研究組織及び管理体制

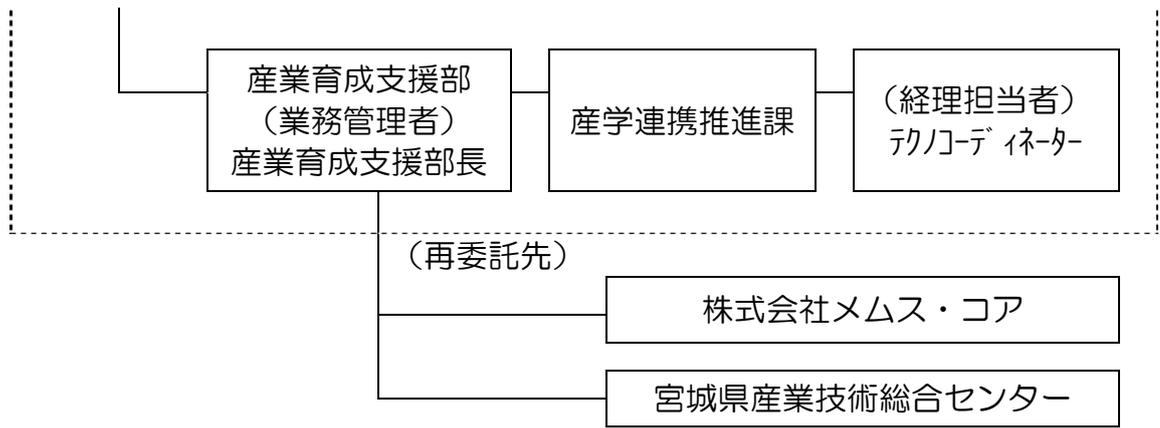
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

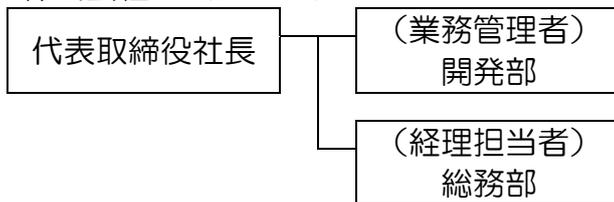
① 事業管理者 [公益財団法人みやぎ産業振興機構]



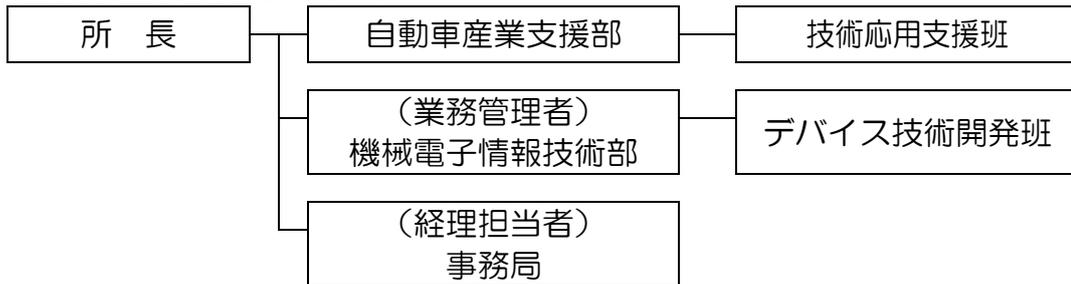


② (再委託先)

株式会社メムス・コア



宮城県産業技術総合センター



1-2-2 研究員及び管理員 (役職・実施内容別担当)

【事業管理者】公益財団法人みやぎ産業振興機構

氏名	所属・役職	実施内容
中塚 朝夫	産業育成支援部 部長	全体総括
村上 信幸	産業育成支援部産学連携推進課 課長	及び
碓井 聡	産業育成支援部産学連携推進課 副参事	進捗管理
町田 博	産業育成支援部産学連携推進課 テクノ・デザイナー	他
八重樫 順一	産業育成支援部産学連携推進課 テクノ・デザイナー	
石川 宙生	産業育成支援部産学連携推進課 主事	

【再委託先（研究員）】

株式会社メムス・コア

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
宮崎 勝	技師長	②③④ PL
葉 淑映	開発部 シニアエンジニア	②③④
伊藤 一孝	試作部 主任技師	②③
小山 克人	開発部 主任技師	②③④
日下 和彦	開発部 技師	③④
千葉 誠	試作部 主任	③
伊藤 麻人	試作部 技師	③
大友 和行	試作部 技師	③

宮城県産業技術総合センター

氏名	役職・所属	実施内容 (番号)
古川 博道	自動車産業支援部 部長	①
熊谷 実	機械電子情報技術部 部長	③
久田 哲弥	自動車産業支援部 技術応用支援班 班長	①
堀 豊	機械電子情報技術部 上席主任研究員	③
渡邊 洋一	自動車産業支援部 技術応用支援班 副主任研究員	①
阿部 宏之	機械電子情報技術部 研究員	③ SL
林 正博	機械電子情報技術部 研究員	③
家口 心	機械電子情報技術部 研究員	③
石井 克治	機械電子情報技術部 技師	③

1-2-3 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

アドバイザー 氏名	主な指導・協力事項
小尾 茂樹	貫通配線基板の利用技術の指導・協力
舘山 信太郎	貫通配線基板を使った応用製品化の討論・協力

1-3 成果概要

(1) セラミックス基板における微小貫通孔加工技術の開発では、厚さ 300 μm のサファイア単結晶基板に孔径 100 μm の貫通孔を加工する技術を開発した。1本のドリルで加工可能孔数 50 個、チップング大きさ約 18 μm 、加工時間 600 秒/孔を達成した。

(2) 貫通孔への金属配線製造用に金属ボール挿入実験装置の改造を行って、金属ボールの搬出、回収の機能を新たに付加して、この工程の作業時間は約 10 分になり、従来に比べ約 1/3 の改善効果が得られた。

(3) 貫通孔への金属配線製造用に加熱・加圧実験装置の改造を行って、加熱時間の短縮できる構成を付加して、この工程の作業時間は約 50 分になり、従来に比べ約 20% の改善効果が得られた。

(4) 位置合せ機能付きマニピュレータの改造とウェハ接合評価装置の導入により、6 インチウェハ全面の観察が可能になり、貫通配線基板製造の品質管理の検査に使用できるようになった。

(5) 貫通配線基板の部品（貫通孔基板、加圧用ウェハ、ダミー基板）の製造において、規格内の寸法精度で部品が生産できる見通しが得られた。

(6) 貫通配線基板の製造において、金属ボールの溶融・加圧の形成条件を最適化することで気密性のよい貫通孔配線が実現できる見通しが得られた。

(7) 光素子（LED や VCSEL）のウェハレベルパッケージングの調査と製造プロセスの検討を行った。本開発の貫通配線基板技術が使用できることが分かった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人みやぎ産業振興機構

〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉1丁目14-2

TEL : 022-225-6636 FAX : 022-263-6923

E-mail : koudo@joho-miyagi.or.jp

産業育成支援部長 中塚 朝夫

産業育成支援部 産学連携推進課

村上 信幸

町田 博

碓井 聡

八重樫 順一

第2章 MEMS用貫通配線基板の製造技術とその利用技術の開発

2-1 セラミックス基板への微細加工

単結晶サファイアは、その優れた機械的特性、化学的安定性、光学特性からエレクトロニクス産業を支える高信頼性部品材料として、ますます重要度を増している。安定な誘電率、極めて低い誘電損失、高い電気絶縁性から超高周波領域のMEMS用貫通配線基板の材料として適用が可能である。

一般に、基板への微細貫通孔加工が可能な方法には、エッチング、超音波加工、レーザー加工、切削加工が挙げられる。シリコンやガラスでは一般的な方法であるエッチングでは、サファイアへの数百ミクロン深さの貫通孔加工に耐えられるマスク材料がない。さらに、等方性エッチングであるため、深く微細な貫通孔の加工が困難である。超音波加工では、孔径の精度が悪いため、均一な直径を持ったデジタルマイクロボールで配線を行う本事業には不向きである。レーザー加工では、テーパ孔となるため、貫通配線の線幅が均一にならない。また、材料を溶融・昇華させて貫通孔を開けるため、加工変質層が生成する。加工変質層のある貫通孔に配線材料を充填すると、界面にクラックが入り配線材料の剥離が起きる恐れがある。

本研究では、サファイア単結晶基板への微細貫通孔加工(穿孔加工)を微細小径工具による切削加工で行うが、高硬度の脆性材料であるサファイア単結晶では工具、加工条件が最適化されていない。そこで、これまでに得た知見からダイヤモンドコーティングドリルと単結晶ダイヤモンドドリルを使用し、サファイア単結晶基板への微細貫通孔加工のメカニズムを解明し、微細小径工具の選定および最適加工条件の検討を行う。具体的には、厚さ 0.3mm のサファイア単結晶基板に孔径 0.1mm の貫通孔を 300 秒/孔、孔の縁のチッピングを 10 μ m 以下で加工可能とする技術の開発を行う。また、非接触工具位置測定器と多成分切削動力計を使用し工具先端の振れとチッピングの大きさとの関係、切削力と工具寿命との関係を把握することで、効率的に最適加工条件を得る方法と工具寿命を予測する方法について検討を行った。本研究では、微細小径工具による穿孔加工の企業への技術移転を容易にするため、特注ではなく市販されている機械装置や工具を使用することを前提とした。

2-1-1 微細小径工具の仕様調査と選定

平成 22 年度の研究成果で得たアルミナ基板への穿孔加工の最適加工条件から、ダイヤモンドコーティングドリル、単結晶ダイヤモンドドリルによるサファイア単結晶材への穿孔加工実験を実施した。穿孔加工可能孔数の調査と孔の観察を行い、最適な微細小径工具を選定した。

2-1-1-1 実験方法

実験には宮城県産業技術総合センターに既設の高速NCフライス盤（東芝機械 F-MACH442）を使用した。装置の外観を図 1 に、基本仕様を表 1 に示す。

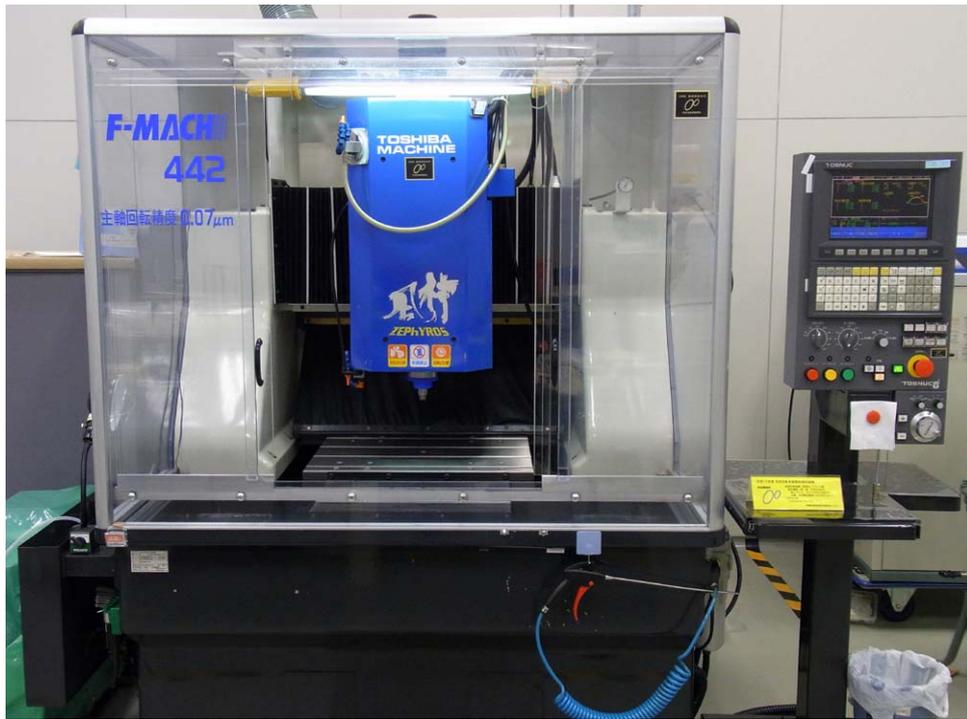


図1 高速NCフライス盤の外観

表1 高速NCフライス盤の仕様

装置名	東芝機械 F-MACH442
主軸回転数	6,000～60,000 /min (空気静圧軸受)
最大加工サイズ	400×400×200 mm
送り速度	～100,000 mm/min

図2に実験装置の概略図を示す。被削材にはセンター保有のサファイア単結晶材（角棒（5.0mm×5.0mm×65.0mm））を使用した。被削材をテンパックスガラスの保持板に熱可塑性ワックスで接着し、保持板側を真空チャックで加工機に固定した。なお、加工方法は、ステップフィード送り方式とした。ステップフィード送り方式とは、穿孔加工において図3に示すように、ステップフィード量のみ材料を切削しドリルをリトラクト高さまで戻す動作を繰り返し、設定した深さまで加工する方法である。ステップフィード量を少なくすることで、ドリルへの負荷が少なくなり、孔の縁に発生するチッピングを抑制することができるという長所を持つ。

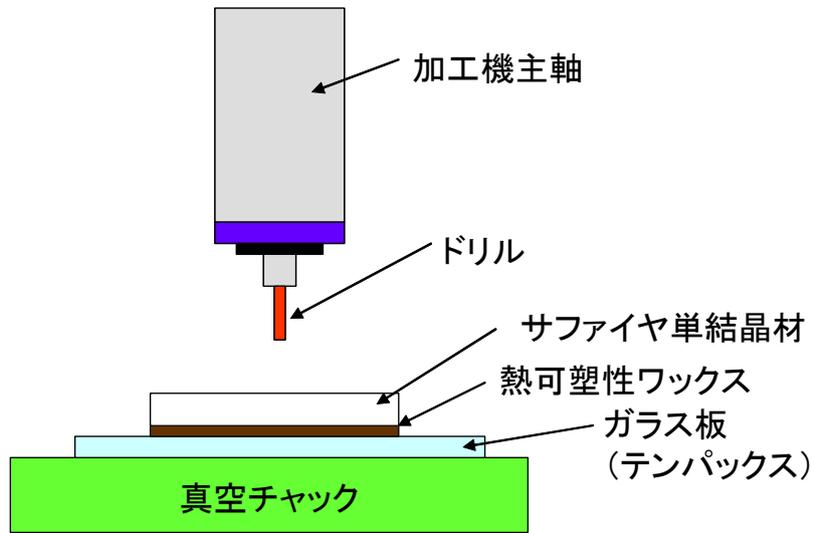
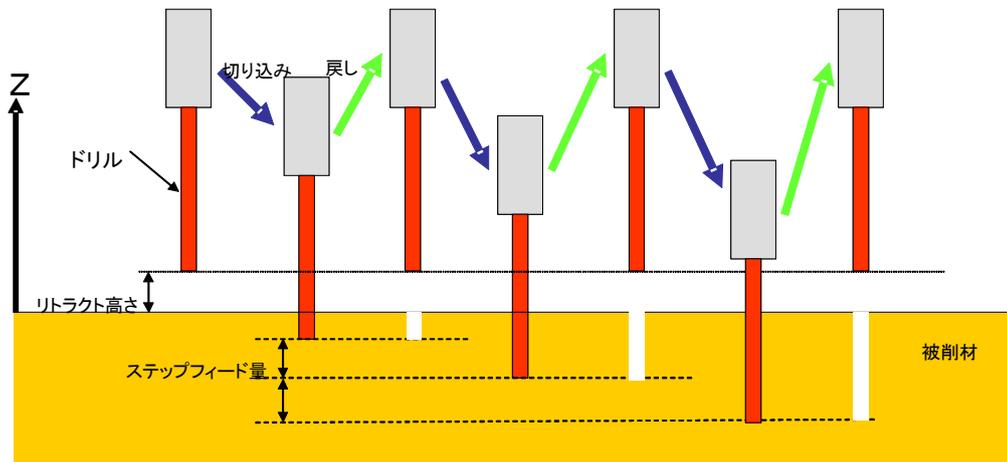


図2 実験装置の概略図



※ステップフィード量のみ切込、リトラクト高さに戻る。(Z軸のみの動作)

図3 ステップフィード送り方式

$\phi 0.2\text{mm}$ の穿孔加工にはダイヤモンドコーティングドリル（三菱マテリアル社製 DC-SSS）を使用した。工具材質は超硬であり、表面にダイヤモンドを気相成長により成膜したものである。穿孔加工に使用する前に撮影した工具先端の SEM 写真を図4に示す。表面に微細なダイヤモンド結晶の凹凸があり、結晶が切れ刃として作用することから高脆材の切削が可能である。 $\phi 0.1\text{mm}$ の穿孔加工にはダイヤモンドコーティングドリル（三菱マテリアル社製 DC-BSS）と単結晶ダイヤモンドドリル（マイクロダイヤモンド社製 KAS）の2種類を使用した。穿孔加工に使用する前に撮影した工具先端の SEM 写真を図5と図6にそれぞれ示す。ダイヤモンドコーティングドリルの素材とコーティング膜は $\phi 0.2\text{mm}$ のものと同様であるが、工具直径が 0.1mm と細いため工具側面の溝が $\phi 0.2\text{mm}$ の工具と比較して浅い形状になってしまう。これにより切り屑の排出性が低下し、工具の摩耗が急速に進展することが考えられたため、種類の違う工具（単結晶ダイヤモンド工具）についても検討を行った。単結晶ダイヤモンド工具は工具材質が超硬であり、先端に単結晶ダイ

ダイヤモンドの微粉末をろう付けしたものである。ダイヤモンドコーティングドリルと同様に、工具側面に溝がないため、切り屑の排出性がないと考えられるが、ダイヤモンド自体の高い耐摩耗性により、ダイヤモンドコーティング工具と比較して長寿命であり、良好な穿孔加工結果が得られると予想した。

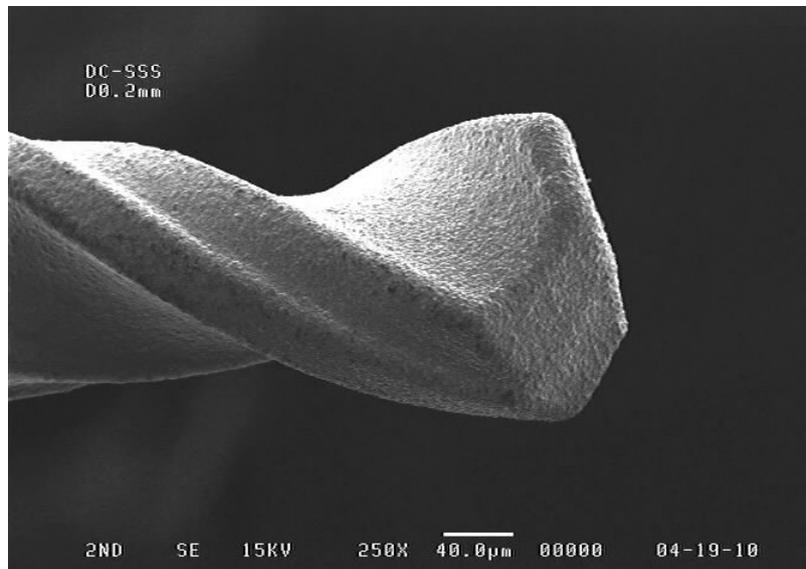


図4 φ0.2mmのダイヤモンドコーティングドリル

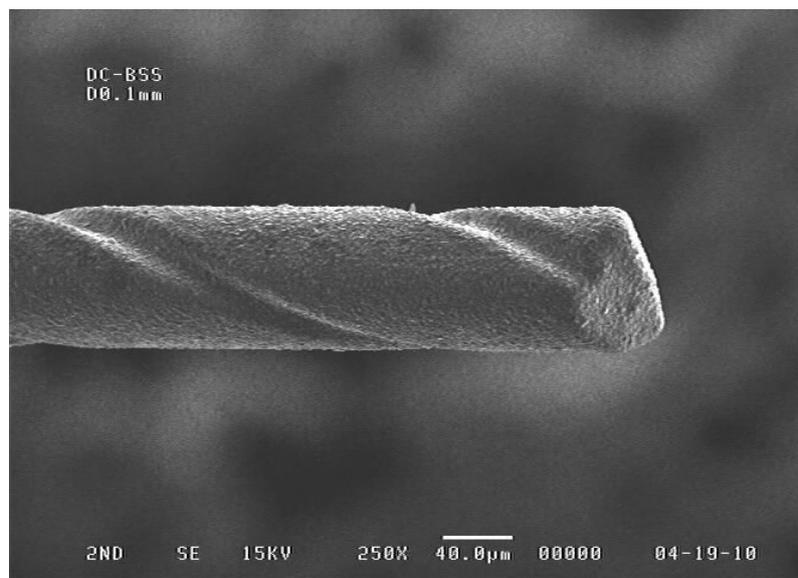
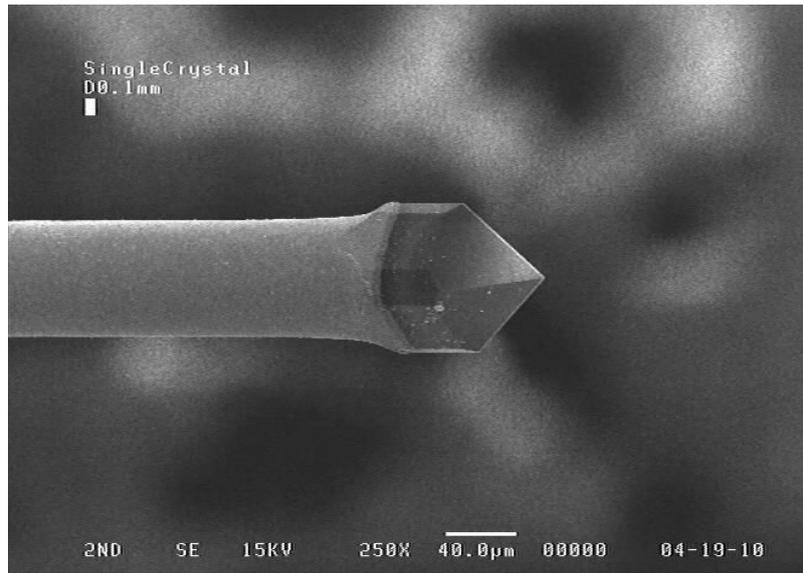


図5 φ0.1mmのダイヤモンドコーティングドリル

図6 $\phi 0.1\text{mm}$ の単結晶ダイヤモンドドリル

加工条件は平成 22 年度の研究成果で得たアルミナ材の最適条件から表 2 のとおりとした。サファイア単結晶材は高脆材であるため、チッピングを抑えるためにステップフィード量を $2\mu\text{m}$ 以下とした。実際に穿孔加工するサファイア基板の厚さは $300\mu\text{m}$ であるが、本実験に使用した被削材の厚さは 5mm と厚いため、穴の深さを $350\mu\text{m}$ とした。

表 2 加工条件

工具	ダイヤモンド $\phi 0.2\text{mm}$	ダイヤモンド $\phi 0.1\text{mm}$	単結晶ダイヤ $\phi 0.1\text{mm}$
工具回転数	20,000/min	24,000/min	24,000/min
切削送り速度	5mm/min	5mm/min	5mm/min
ステップフィード量	$2\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$
切削液	水	水	水

2-1-1-2 実験結果

$\phi 0.2\text{mm}$ の穿孔加工では、ダイヤモンドコーティング工具で加工可能孔数 100 個以上という結果を得た。図 7 に 100 個穿孔加工後の孔の観察結果を示す。チッピングの大きさは $9.0\mu\text{m}$ 程度であり、良好な結果となった。加工時間は 4 分 30 秒であり目標を達成していることが確認できた。

$\phi 0.1\text{mm}$ の穿孔加工では、加工可能孔数はダイヤモンドコーティング工具では 36 個、単結晶ダイヤモンド工具では 77 個であり、単結晶ダイヤモンド工具での加工が良好であった。図 8 に単結晶ダイヤモンド工具で 30 個穿孔加工後の孔の観察結果を示す。チッピングの大きさは $10\sim 40\mu\text{m}$ 程度で、目標の $10\mu\text{m}$ 以下を達成していない。工具の選定に当たっては、アルミナ材の最適条件で加工を行ったが、サファイア単結晶への穿孔加工では、改めて最適な加工条件の導出を行う。

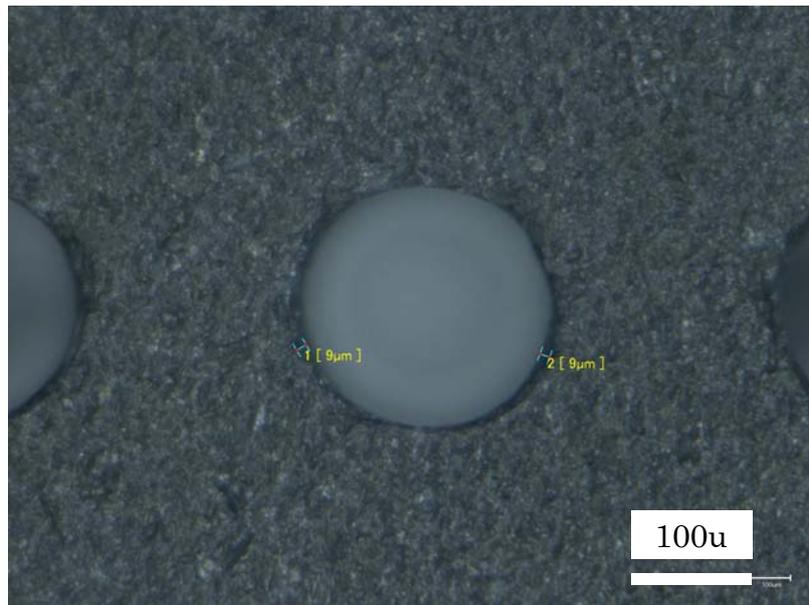


図7 100個穿孔加工後の孔の写真（ $\phi 0.2\text{mm}$ ）

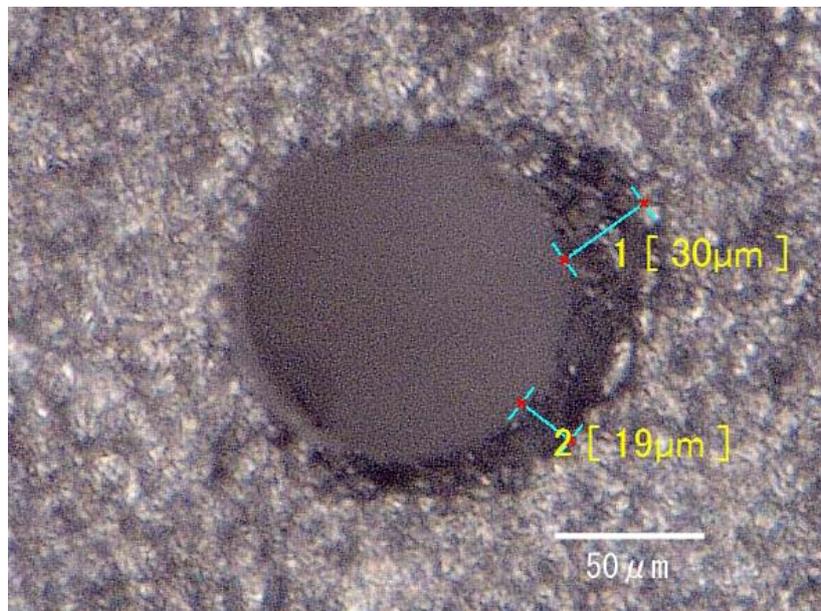


図8 30個穿孔加工後の孔の写真（ $\phi 0.1\text{mm}$ ）

2-1-2 加工条件の最適化

2-1-1で得た結果をもとに $\phi 0.1\text{mm}$ の穿孔加工に適した単結晶ダイヤモンド工具について加工条件の最適化を行った。

2-1-2-1 実験方法

厚さ 0.3mm のサファイア基板を同じ材質のバックアッププレートに貼りあわせ、図1に示した高速NCフライス盤で穿孔加工を行った。孔を確実に貫通させるため、工具先端がバックアッププレートまで到達するように深さ $400\mu\text{m}$ まで穿孔加工を行った。加工条件を表3に示す。装置仕様では、最大 $60,000/\text{min}$ の工具回転数での加工が可能であるが、主軸の動バランスが悪化しているため、最高回転数を $50,000/\text{min}$ に抑えて加工を行った。回転数ごとに10個の貫通孔を加工し、光学顕微鏡像から孔の縁のチッピングの大きさを計測した。孔1つ当たり10箇所のチッピ

ングの大きさを測定し、平均値を算出した。

表3 加工条件

工具回転数	20,000, 30,000, 40,000, 50,000/min
切削送り速度	5mm/min
ステップフィード量	1 μ m
切削液	水（界面活性剤入り）

2-1-2-2 実験結果

図9に各工具回転数での孔のチップングの大きさを測定結果を示す。孔番号の数字は、10個の孔の加工した順番を示している。いずれの回転数でもチップングの大きさは20 μ m程度であり、目標を達成することが出来なかった。特に、回転数20,000/minでの加工では、ばらつきが大きく、チップングの大きさも最大であった。図10に回転数20,000/minで穿孔加工した2番目の孔の写真を示す。孔の縁の半分以上に大きなチップングが発生しており、その大きさは最大58 μ mであった。サファイア単結晶のように硬く脆い材料を低回転で加工すると、高回転で加工した場合と比較して工具1回転あたりの切込量が多くなるため、大きなチップングが発生するものと思われる。一方、チップングの大きさが最小となるのは、回転数が30,000/minの条件であり、大きさは平均で17.8 μ m、ばらつきも小さく良好な加工状態を得た。図11に回転数30,000/minで穿孔加工した5番目の孔の写真を示す。孔の縁全体にチップングが発生しているが、大きさは20 μ m以下であり、良好な加工結果となった。2-1-1と2-1-2の結果から、 ϕ 0.1mm単結晶ダイヤモンド工具での最適加工条件は、工具回転数30,000/min、切削送り速度5mm/min、ステップフィード量1 μ mであることを明らかにした。

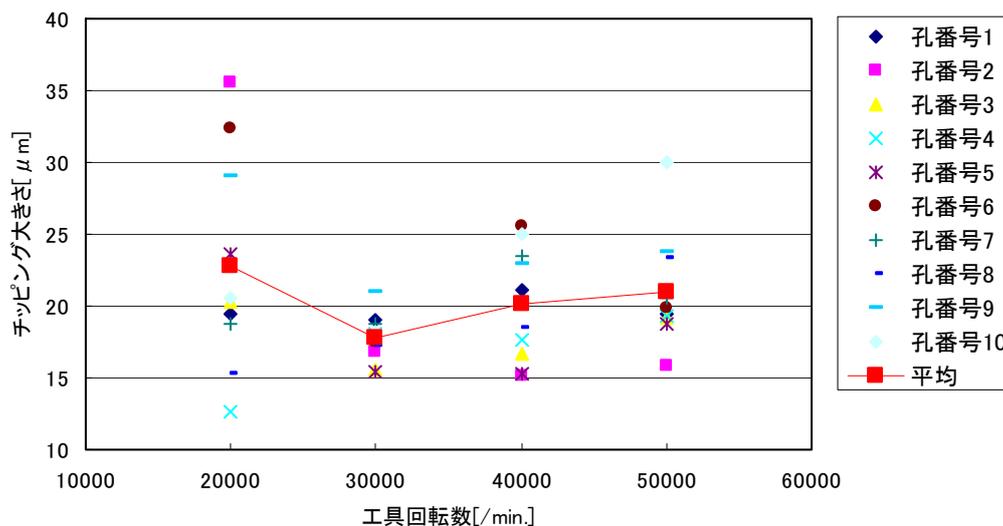


図9 工具回転数とチップングの大きさの関係

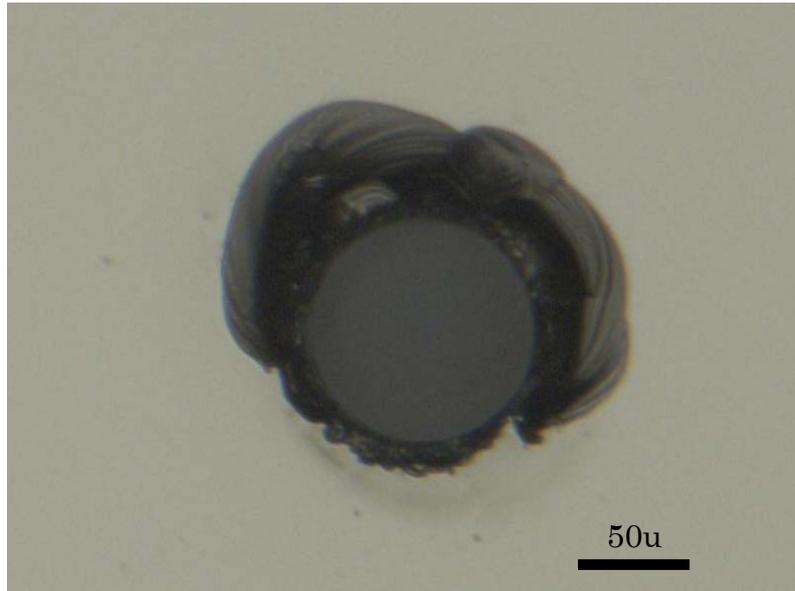


図 1 0 回転数 20,000/min での加工における孔のチッピング

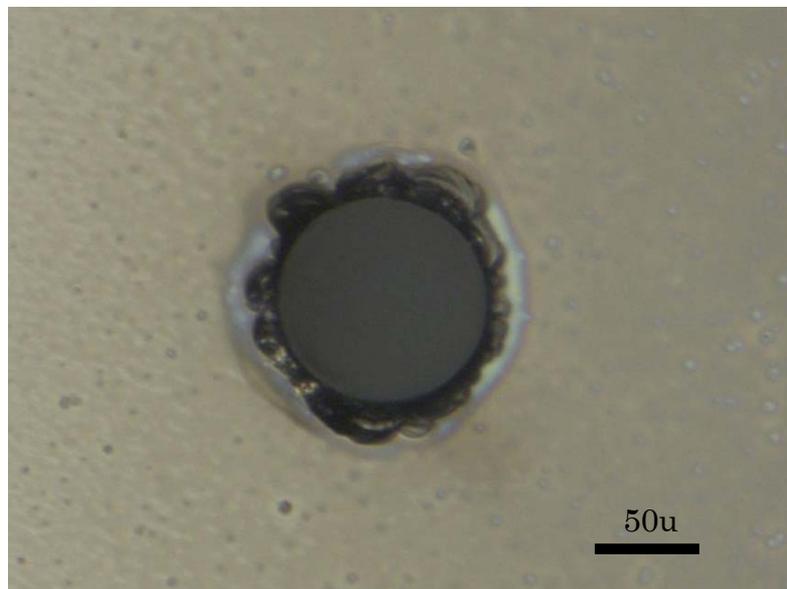


図 1 1 回転数 30,000/min での加工における孔のチッピング

2-1-3 工具先端の振れとチッピングの大きさについて

微小径工具による穿孔加工の最適加工条件を導出するためには、工具回転数、送り速度など種々の加工条件を変更しながら材料を加工し、検討する必要がある。本研究では、本事業で導入した非接触工具位置測定器を用いて測定した工具回転時の先端振れ量と2-1-2の結果で得た最適加工条件との関連性を調査し、最適加工条件導出プロセスの高効率化に関する検討を行った。

2-1-3-1 実験方法

φ0.1mm の単結晶ダイヤモンド工具を用いて非接触工具位置測定器にて工具先端の振れ量を測定した。加工機のテーブルに設置した非接触工具位置測定器の写真を図12に示す。測定器には CCD カメラと光源が同軸に対向して設置されており、その中間位置に工具を移動させて回転時の振れ量を測定する。測定分解能は 0.1 μm まで可能である。測定は 10 秒間行い、主軸の回転が安定してから測定を開始した。各

回転数において 10 回測定を実施し平均値を算出した。

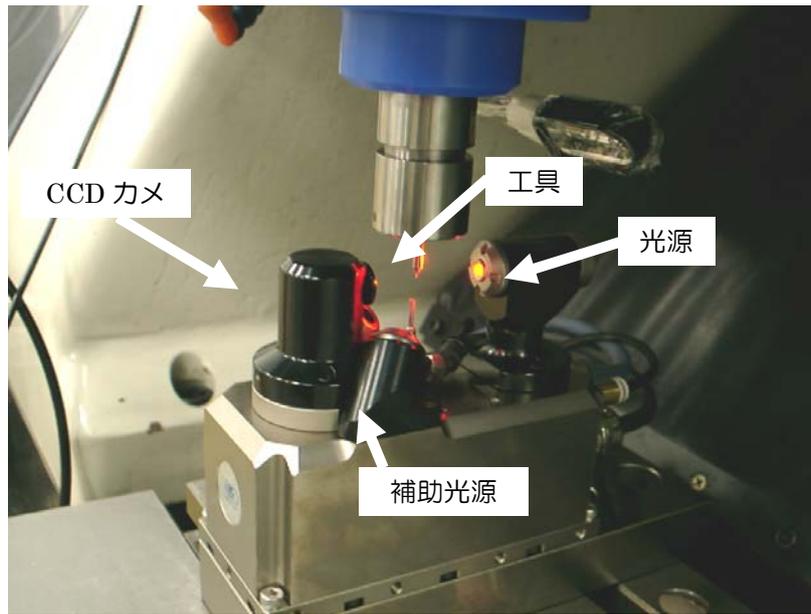


図 1 2 非接触工具位置測定器の概観

2-1-3-2 実験結果

図 1 3 に工具回転数と工具の振れ量の関係を示す。各回転数において数 μm 程度のばらつきはあるものの、回転数 50,000/min 以下では振れ量が $10\mu\text{m}$ 以下となり、回転数 30,000/min が最も振れ量が小さくなった。回転数 60,000/min では加工機主軸の動バランスが維持できないため、振れ量が大きくなったものと思われる。

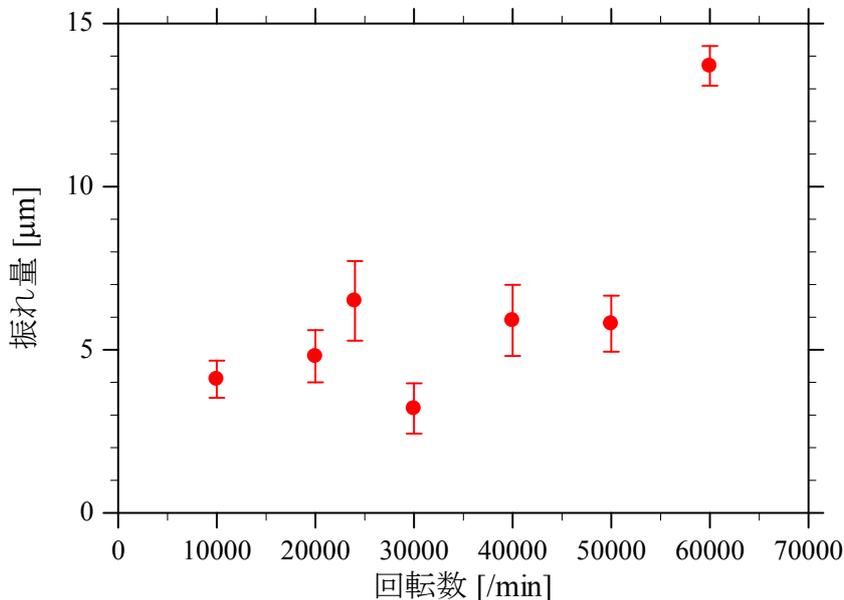


図 1 3 工具回転数と工具の振れ量の関係

2-1-2 において、チップングの大きさは回転数 30,000/min で最小となる結果を得た。さらに本実験においても同様に回転数 30,000/min において工具振れ量が最小となる結果を得たことから、工具回転数に対する工具振れ量とチップングの大きさは同じ傾向になることが明らかとなった。よって、工具の振れ量が少ない工具回

転数で穿孔加工を行うことでチップングの大きさを抑制できると考えられる。他の高脆材（ガラスやアルミナ）についても同様の結果が得られると推察されるので、確認のための実験を実施する予定である。

2-1-4 切削力と工具寿命の関係

サファイアのような高硬度脆性材料の微細穿孔加工では、工具表面が急速に摩耗し、加工途中で工具が折損する可能性が大きい。折れた工具が基板内に残留してしまうとその基板は廃棄せざるを得ないため、工具の折損をあらかじめ把握できれば基板の無駄がなく効率的な加工が可能である。そこで本研究では、単結晶ダイヤモンド工具の工具寿命を測定するため2-1-2で得た最適加工条件をもとに単結晶ダイヤモンド工具を用いたサファイア基板への多穴加工を実施した。具体的には本事業で導入した切削動力計で工具の軸方向に働く切削力（ F_z ）を測定し、穿孔加工可能孔数と切削力との相関関係の把握を行った。

2-1-4-1 実験方法

2-1-2で得た最適加工条件にて単結晶ダイヤモンド工具での多穴加工を実施した。表4に加工条件を示す。実験は2回実施し、加工中に工具の軸方向に作用する切削力を多成分切削動力計で加工開始直後から工具が折損するまで測定した。

表4 加工条件

工具回転数	30,000/min
切削送り速度	5mm/min
ステップフィード量	1 μ m
切削液	水（界面活性剤入り）

図14に導入した多成分切削動力計を示す。切削動力計は、3成分のカセンサ部とリアクショントルクセンサ部から構成される。カセンサ部ではX、Y、Z方向の各切削力を、リアクショントルクセンサ部ではZ軸回りのトルクを測定可能である。トルクセンサ部に自作した治具を取り付け、予備実験を行ったところZ方向の切削力は測定可能であった。しかしながら、X、Y方向の切削力とZ軸回りのトルクについては、測定結果が電気ノイズレベル以下であり、データ解析が困難であったため、Z方向の切削力について測定を実施した。X、Y方向の切削力とZ軸回りのトルクがノイズレベル以下であったのは、加工する孔が $\phi 0.1$ mmと微細であるため切削力が微小であることが原因と考えられる。測定を可能にするには、センサ部からアンプまでの信号線のノイズ対策や電源の安定性を向上させるなどの対策が必要である。

本実験ではトルクセンサ部を使用しなかったため、図15に示すように新たに自作した治具でサファイア基板をカセンサ部に固定し、加工中のZ軸方向の切削力を測定した。

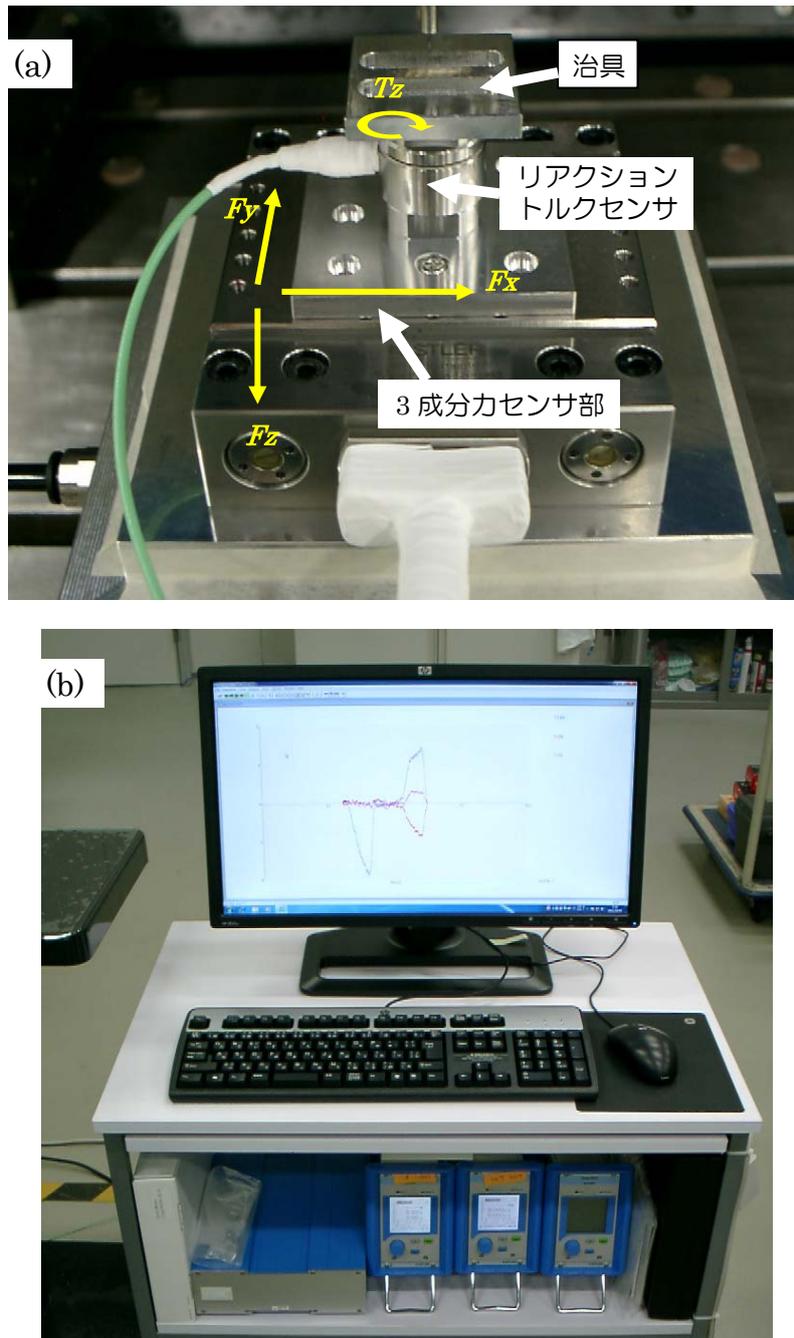


図14 導入した多成分切削動力計
((a) センサ部 (b) アンプ及びデータ取得用ワークステーション)

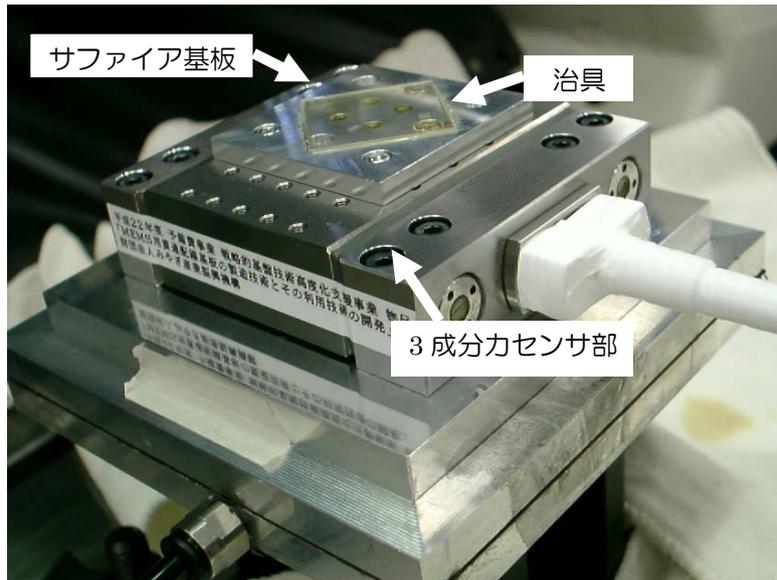


図15 実験に使用した切削動力計（センサ部）と加工治具

2-1-4-2 実験結果

多穴加工を実施した結果、1回目は49個、2回目は45個を穿孔した段階で工具が折損した。加工時間は1孔あたりおよそ600秒であった。図16に加工個数と切削力の関係を示す。今回行った2回の実験においては、加工個数と切削力の関係はほぼ同じであった。加工開始直後の切削力の値は小さいものの、加工個数が多くなるに従い単調に増加し、工具折損時に最大となる結果を得た。加工開始直後の切削力は、およそ2.5Nであったが、工具の磨耗が進行することで切れ味が悪化し、工具折損時には6.5~7.0Nに増加したと思われる。以上の結果から、 $\phi 0.1\text{mm}$ の単結晶ダイヤモンド工具では工具の軸方向の切削力(F_z)が6.5N以上になると折損することが明らかになった。この値は工具が変わらなければ、加工する材料が変わっても同じであると考えられる。したがって切削力を測定することで使用する工具の寿命を判定することが可能となった。

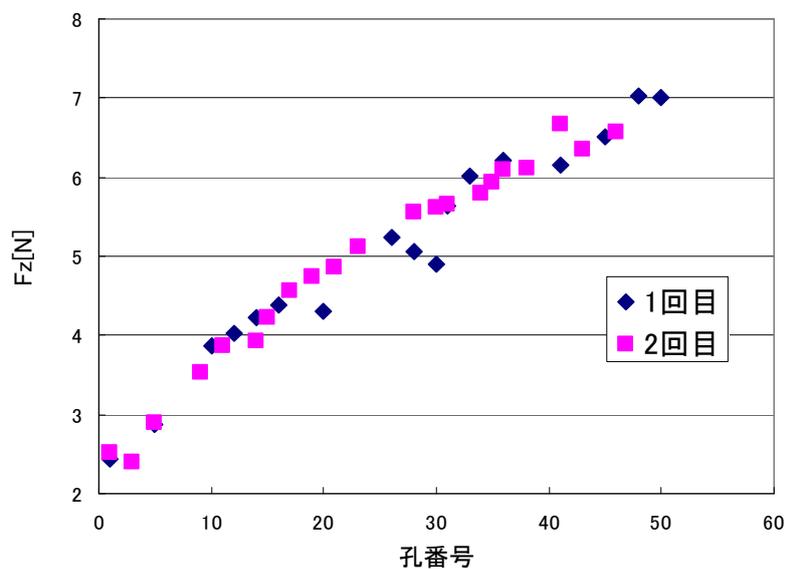


図16 加工個数と切削動力の関係

2-1-5 まとめと今後の課題

サファイア基板への穿孔加工実験で得た知見について以下に示す。

(1) 微細小径工具の仕様調査と選定

- ・ $\phi 0.2\text{mm}$ の穿孔加工では、1本のダイヤモンドコーティング工具で深さ $350\ \mu\text{m}$ の穿孔個数 100 個以上を達成した。
- ・ $\phi 0.1\text{mm}$ の穿孔加工では、1本の単結晶ダイヤモンド工具で深さ $350\ \mu\text{m}$ の穿孔個数最大 77 個を達成し、穿孔個数が 36 個であったダイヤモンドコーティング工具よりも良好な結果となった。

(2) $\phi 0.1\text{mm}$ 穿孔加工における加工条件の最適化

- ・ $\phi 0.1\text{mm}$ の単結晶ダイヤモンド工具にてチップングの大きさが最小となる工具回転数は $30,000/\text{min}$ である。そのときの切削送り速度は $5\text{mm}/\text{min}$ 、ステップフィード量は $1\ \mu\text{m}$ である。

(3) 工具先端の振れとチップングの大きさについて

- ・ 工具回転数と工具の振れ量との相関と工具回転数とチップングの大きさとの相関は、ほぼ同じ傾向を示し、いずれも工具回転数が $30,000/\text{min}$ で最小値となる。
- ・ 工具の振れ量の小さい回転数で加工することでチップングの大きさを抑制することが可能である。

(4) 工具寿命の測定

- ・ 単結晶ダイヤモンド工具による孔径 0.1mm 、深さ 0.3mm の貫通孔の穿孔可能個数は、およそ 50 個である。
- ・ $\phi 0.1\text{mm}$ の単結晶ダイヤモンド工具では、工具軸方向の切削動力が穿孔個数に従い増加し、およそ $6.5\sim 7.0\text{N}$ に到達すると工具の折損が発生する。
- ・ 切削力を測定することで、工具の寿命が判定可能である。

本研究では、孔の縁に発生するチップングの大きさや加工時間について目標を達成していない。目標達成のために以下の課題が考えられる。

(1) チップングを抑制するための工具の開発

本研究では、市販の工具を使用することを前提としたが、工具を新規に開発することも考えられる。宮城県内には、微細穿孔加工が可能な工具を開発・製造している企業があり、切り屑の排出性が良好な形状を有する工具の開発や、多結晶ダイヤモンド (Poly Crystalline Diamond: PCD) 工具、小径電着砥石などの開発を共同で実施する必要がある。

(2) 加工時間短縮のための加工条件の再検討

加工時間を要する原因としては、ステップフィード量が $1\ \mu\text{m}$ と非常に細かいことが挙げられる。現在、ステップフィード量を一定にして穿孔加工しているが、孔の縁部分の加工 (加工初期) では小さくし、孔の内部の加工では大きくするなど、穿孔加工位置におけるステップフィード量の最適化を行うことで加工時間の短縮化が実現可能と考えられる。

(3) 加工時間短縮のための加工プログラムの検討

ステップフィード送り方式は工具の動作量に対して実切削量が非常に少ない。よって非加工時における工具動作の高速化の検討が必要となる。

2-2 貫通孔への金属配線用装置の開発

本研究開発による貫通配線形成技術の概要は、高精度の加工で形成した貫通孔基板に単一分散技術で作った径の揃った金属ボールを挿入し、金属ボールを圧着して貫通孔に微小配線を形成することである。

図17に本開発による貫通配線基板製造の全体の流れを示す。①材料、部品と②組み立てジグ、ホルダーを用い製造用実験装置を使って貫通配線基板を製作する。

図18に、本開発で使用する貫通孔基板と金属ボールの部品の形状、寸法例を示す。これらは高精度加工技術で製造しており、Si基板に加工された貫通孔はほぼ垂直の断面形状である。また、金属ボールの直径はきわめて分散の小さい揃ったものが入手できる。

平成21年度補正予算事業では、貫通孔に金属配線層を形成するための実験装置及びジグ類を製作して開発を行い、従来のCuめっき法と対比して本開発の製造法では貫通配線の形成に要する製造時間を大幅に短縮できる見通しが得られた。この実験に用いるために製作した実験装置を使って成果が得られたものの、実用化して行く観点からいくつかの製造装置に関する課題が明らかになり、更なる機能向上を図るために生産用製造装置の開発を指向した研究を行っている。本研究開発では既存の実験装置を基に検討を重ね、課題を解決するためにこれらの実験装置に改造を加えて性能の向上を図った。

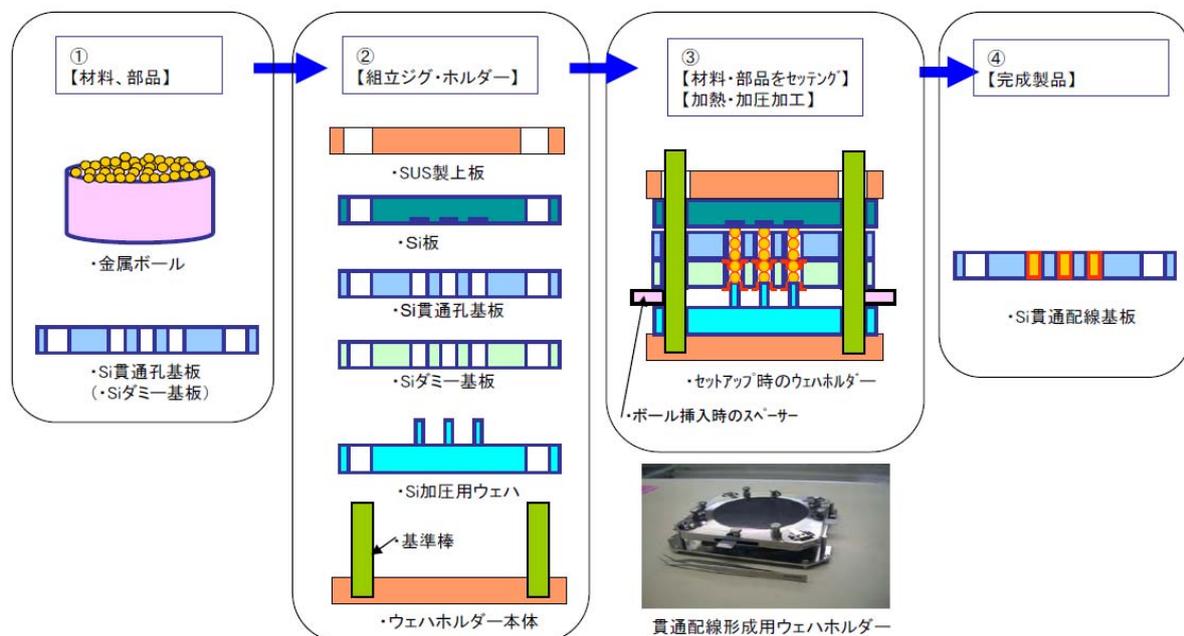


図17 本開発による貫通配線基板製造の流れ(全体)

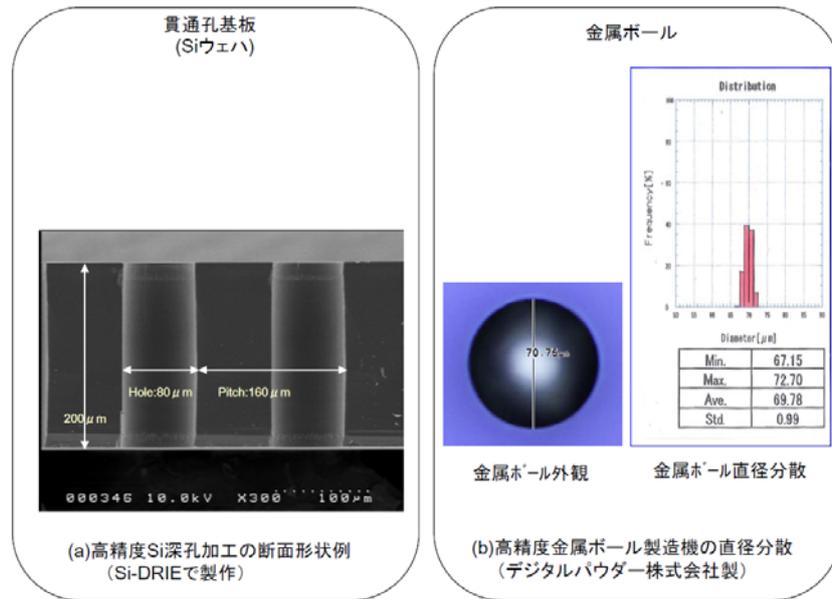


図18 高精度加工技術で作られる部品（貫通孔基板と金属ボールの例）

図19に、貫通配線基板製造工程の概略とこれに使用するウェハホルダー、実験装置及び検査装置の関係を示す。

部品（貫通孔基板、貫通ダミー基板および加圧用ウェハ）を組立用ウェハホルダーに配置してこれらを重ね合わせる。重ね合わせ精度は規格値以内の寸法（±5 μm以内）になるようセッティングする。金属ボールを容器からウェハ表面上に搬出し、

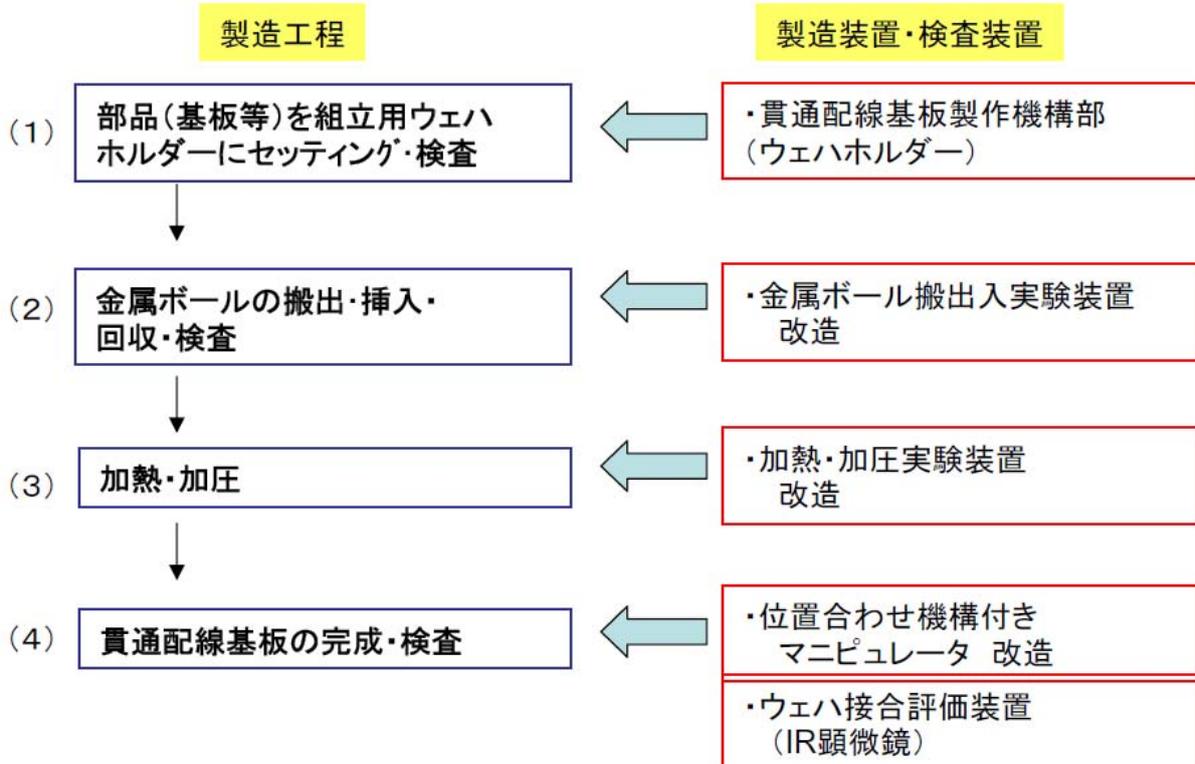


図19 貫通配線基板製造工程の概略とこれらに使用する実験装置と検査装置

貫通孔に金属ボールを確実に挿入・充填し、不要な金属ボールを容器に回収する。加熱雰囲気下で、金属ボールを加圧用ウェハで圧着して貫通配線基板を製造する。これらの貫通配線形成実験に使用するために開発・改造した実験装置に関する実験結果と検討内容を以下に述べる。

2-2-1 金属ボールの挿入実験装置

2-2-1-1 開発の目標、経緯

本開発で使用する金属ボールの直径と種類を表5に示す。現状では、入手可能な単一分散技術で作れる金属ボールの最小直径は約 $40\mu\text{m}$ であり、上限は約 $200\mu\text{m}$ である。この金属ボールは材料をるつぼで溶解しパルス状で放出して形成されるのでボールの材質の種類は多く、Au、Cu などの純金属や、SnCu などはんだ合金材を入手することができる。少量購入は割高であり、大量需要による大量生産によって単価の安い金属ボールが供給される仕組みであり、供給元（デジタルパウダー社）との連携が必要である。

表5 金属ボールの種類

項目	内容
直径(μm)	<ul style="list-style-type: none"> ・ $\Phi 50 - \Phi 200$ 程度 (直径の分散例：$\Phi 70 \pm 3$)
種類	<ul style="list-style-type: none"> ・ SnCu (Sn と SnCu 合金微粒子の混合体) (Sn5Cu6 合金の融点は 413°C) ・ Au ・ Cu

金属ボールの挿入実験装置は、H21 年度に可変振動機能を有する振動方式を選択して製作し、金属ボールが貫通孔に確実に入ることを確認した。この実験装置は改造に着手するまで使用していたが、一連の工程は手作業の部分がほとんどであるため生産性に問題があった。特に、微小の金属ボールの搬出・回収を手作業で取扱うため手間が掛かり、また、回収作業でボール回収不能による欠損が多く生じていた。

この課題の対応策として、図20の概念図で示した機構を持つ実験装置を開発することを目標にして開発・製作を行った。金属ボールは保存容器（バッファ容器と呼ぶ）に保管し、これから金属ボールを基板上に供給し、金属ボールを挿入後バッファ容器に回収する動作を行えるようする。さらにこの容器はどちらの機能にも1個の容器で兼ねられるよう、機構に改良を加えてこの実現を図った。同図のように改造した各機構は主に3種類から構成されている。

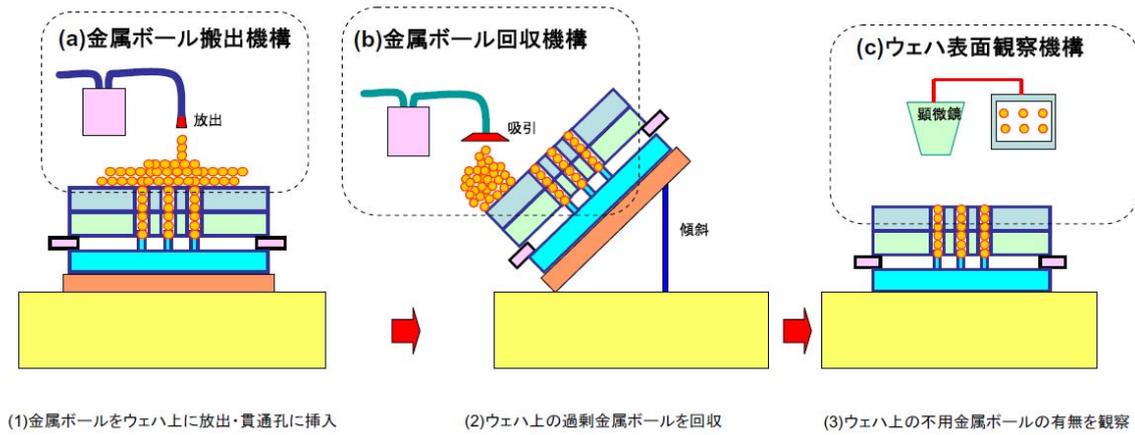


図20 金属ボール挿入実験装置の改造、基本動作概念図

2-2-1-2 結果と検討

今回、改造を加えて製作した実験装置の外観写真を図21に示す。開発目標である3つの機構の実現を目指して製作した。以下、各図によって詳細に説明を行う。



図21 金属ボール挿入実験装置改造の外観写真(全体)

(1) 金属ボール搬出機構

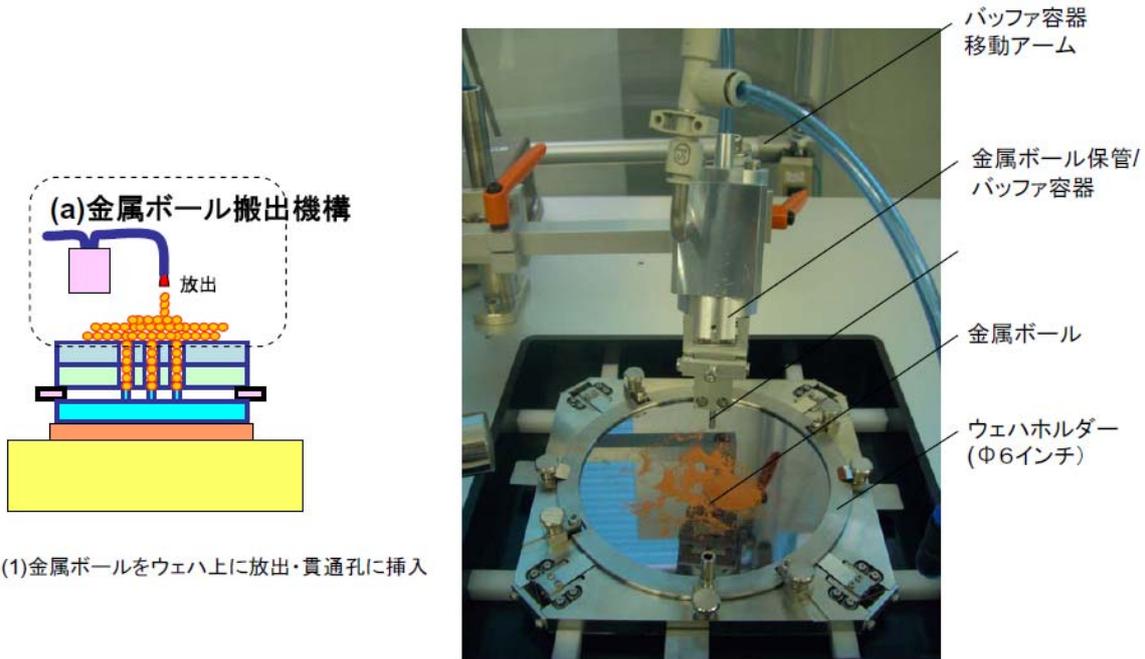


図2.2 金属ボール搬出機構

図2.2に金属ボールの搬出機構の写真を示す。バッファ容器に保管している金属ボールはシャッターを開けて加圧 N₂ ガス(およそ毎分3L)によってウェハホルダーの Si 貫通孔基板表面に放出、供給するようにした。バッファ容器の移動機構により手動でこれを動かしてウェハ全面に余分に金属ボールを分散する。次のステップで、本実験機は従来通り、ウェハホルダーに振動を与え、金属ボールを振動させて貫通孔にボールを充填する動作を行い、ほぼ100%の歩留まりで金属ボールの充填ができています。振動システムには今回新たに振動周波数をスイープする機能を付加した。これによって金属ボールが効果的な振動動作をしていることを確認した。改造で付加したボール搬出機構は正常な機能で動作しており、ボールの搬出・供給・分散の作業がこの機構によって安定化できたことの効果は大きい。

(2) 金属ボール回収機構

図2.3に金属ボールの回収機構の写真を示す。金属ボールの回収用として振動機構の台座が最大45度まで傾斜できる機構を新たに設けた。この設計指針は次のようである。①台座を傾けた状態で振動を与えていると金属ボールは重力で効率よく高部から底部へ移動して一箇所に集めることができる。②集めた箇所に吸引パイプを設け金属ボールをバッファ容器に回収する。実験の結果、台座の回転角度は金属ボールが孔の中から飛び出さないよう顕微鏡で観察して、最大約30度の上限に定めた位置で金属ボールの集合を行っている。

図2.4に実験したときの吸引パイプ近傍の顕微鏡写真を示す。同図は2コマ写真の例だが、集まってきた金属ボール群が吸引されて量が減少している様子が分る。金属ボールの移動は雪崩が起きると同じように、連動して落下するようである。今回の実験では、自動で金属ボールをウェハから完全に回収することができず、100%除去するためには手作業で表面を掃いて達成させた。ウェハ上のボールの動きは、ボールの乾燥状態、作業環境の湿度管理、ウェハ表面のクリーン度などに影

響される要因があり、完全に自動で回収する方法に関しては今後引き続き検討する予定である。従来のすべて手作業で回収する方法では多くのボールを紛失していたが、今回の機能を付加することによって極端に少なくなり、作業利便性が向上し自動化装置へつなぐ指針が見えてきた。改造で製作した機構は有効に機能しており、本開発の目標はクリアーしている。また、バッファ容器は回収・搬出用が1個で共用できる機構も機能して本改造によって十分な成果が得られた。



図2-3 金属ボール回収機構

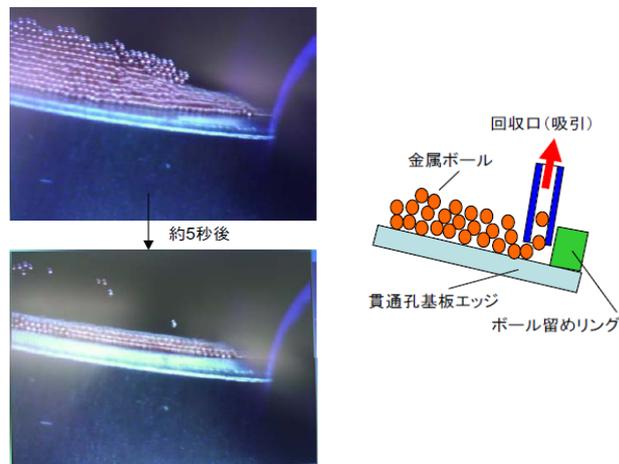


図2-4 金属ボールの移動・吸引回収の顕微鏡写真例

(3) ウェハ表面上の金属ボール観察機構

図2-5にウェハ表面上の金属ボールを観察する機構の写真を示す。実体顕微鏡を移動アームに取り付けて、ウェハ表面の全領域を実体顕微鏡で観察できるようにした。また、実体顕微鏡の接眼レンズから観察画像を動画で記録できる機能を付加した。このような改造によって金属ボール挿入装置の利便性が著しく向上した。可視装置があることで、ウェハ上の金属ボール残りをなくして、貫通配線基板の製作歩留の向上に大きく寄与することができる。

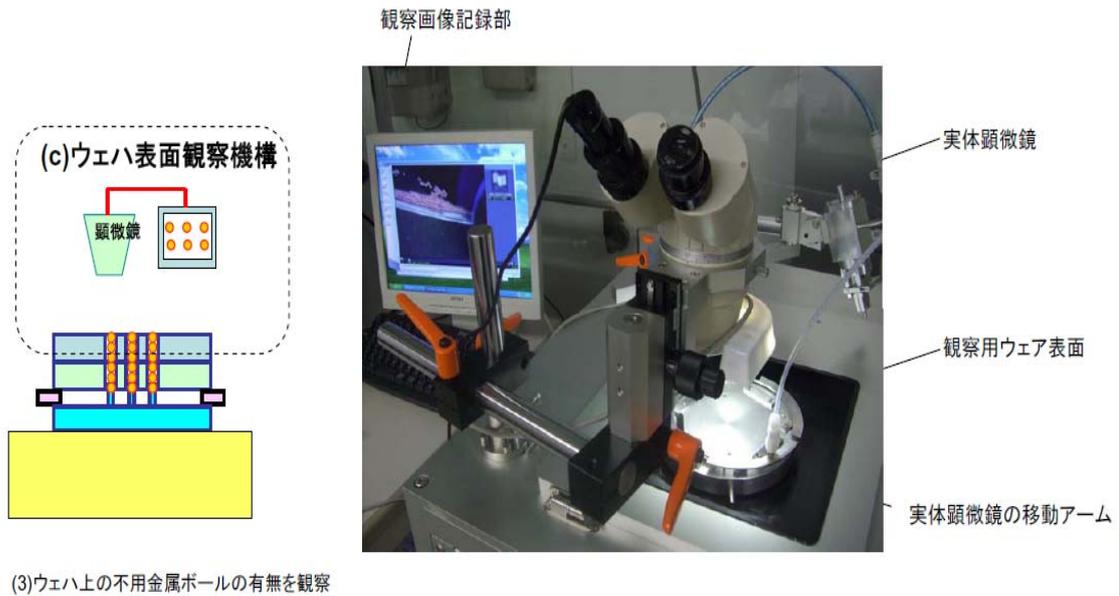


図25 ウェハ表面上の金属ボール観察機構

本開発の金属ボール挿入実験装置改造によって得られた結果を表6に示す。概ね、使いやすい実験装置に仕上がっていることが分かった。

表6 金属ボールの挿入実験装置改造製作の評価結果

項番	項目	結果	コメント
1	金属ボールの搬出	良好 (○)	
2	金属ボールの挿入	良好 (○)	
3	金属ボールの回収	ほぼ満足 (△)	・ 金属ボールを掃き集める補助が必要
4	金属ボールの観察	良好 (○)	
5	全体の作業時間	ほぼ満足 (△)	・ 約10分、まだ改善の余地あり

2-2-2 金属ボールの加熱・加圧実験装置

2-2-2-1 開発の目標、経緯

H21年度で製作した金属ボールの加熱・加圧実験装置を使った実験で成果が得られたものの、残された課題が明瞭になり、以下の改造内容の設計と製作を行った。

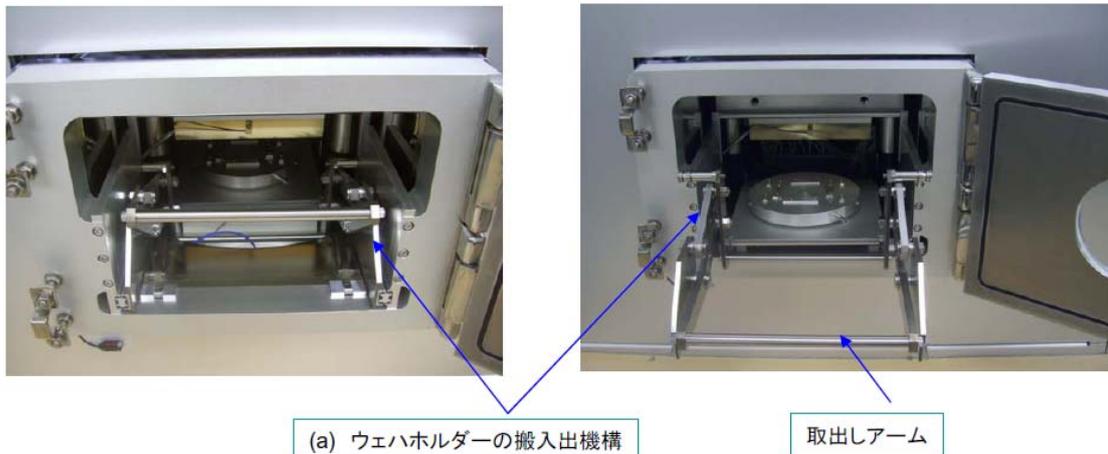
- ・ 作業時間短縮化のための加熱、冷却の装置改良
- ・ 金属ボール圧着最適化のためのハード、ソフト両面の改良

2-2-2-2 結果と検討

図26に改造した加熱・加圧実験装置の外観写真を示す。加熱・加圧実験装置は、金属ボール、貫通孔基板と加圧用ウェハをセットしたウェハホルダーを上部ホットプレートと下部ホットプレートに挟んで加圧する構造からなる。従来は、上部ホットプレートが、最上部(オープン)と接触部(加圧作業)の2位置の動作しかできなかったものを、任意の位置に設定し移動できるように改造した。



図26 加熱・加圧実験装置改造の外観写真(全景)



(a) ウェハホルダーでの圧着作業終了

(b) ウェハホルダーの取出し

図27 加熱・加圧実験装置改造のウェハホルダー搬入出機構新設

この改造によって、上部ホットプレートがウェハホルダーに近接して保持できるようになったので昇温時間の短縮ができた。

図27に加熱・加圧実験装置改造によりウェハホルダーの搬入出機構を新設した部分写真を示す。従来、手作業でウェハホルダーの移動を行っていたものが、搬入出機構の新設による取出しアームの使用で、安全、確実に作業ができるようになり、大きな改善効果が得られた。この機構の付加によりウェハホルダーは高温でも取り出しができ、改造後は温度が150度以下から取出して冷却しているので従来の80℃取出しより作業時間が短縮できるようになった。

図28に本実験で使っている貫通配線基板製造用の温度、圧力シーケンスを示す。本改造で加圧シーケンスが任意に設定できるようになったので貫通配線基板の加熱・加圧の条件を変えた実験がしやすくなった。同図の場合、本改造によって、圧着作業時間の短縮は60分から48分に短縮することができた。

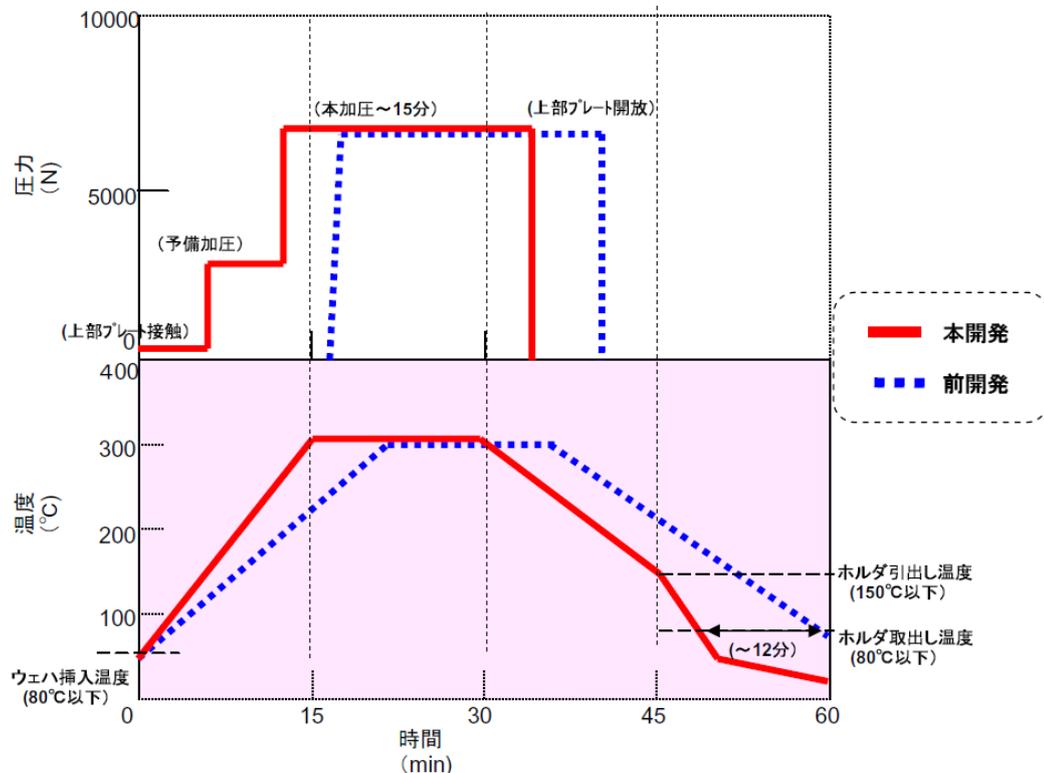


図28 貫通配線基板製造時の温度、圧力シーケンス例
(加熱・加圧実験装置改造によるハード・ソフト新設による機能)

本開発の加熱・加圧実験装置の改造によって得られた結果を表7に示す。概ね、使いやすい実験装置に仕上がっていることが分かった。

表7 加熱・加圧実験装置改造製作の評価結果

項番	項目	結果	コメント
1	ウェハホルダー	ほぼ満足 (△)	・操作上に、まだ改良の余地あり
2	上部ホットプレート停止位置	良好 (○)	・時間短縮に寄与
3	加圧の自動制御	良好 (○)	
4	ウェハホルダー搬入出機構	良好 (○)	・時間短縮に寄与
5	全体の作業時間	ほぼ満足 (△)	・48分、約20%改善効果あり

2-2-3 その他の実験装置

2-2-3-1 位置合せ機能付きマニピュレータの改造

(1) 開発の目標、経緯

今回の改造では、顕微鏡による試料の観察領域を 6 インチウェハ全面に対応できるように顕微鏡移動機構の改造を行った。これには本実験装置を位置合せの機能に限定せずに、移動機構の制御系を改良して、タッチパネルから顕微鏡が多点の観察位置に高速で移動できるようにして、加圧用ウェハや貫通孔基板等の部品の外観検査が迅速にできるようにする目的がある。観察、検査のために簡単な寸法計測機能をつけ、大量の画像データを記録できるようにした。

(2) 結果と検討

図29に改造した位置合せ機能付きマニピュレータの外観写真と顕微鏡写真の測定例を示す。表8に位置合せ機能付きマニピュレータ改造後の装置構成と改造要点を示す。

以上、今回の改造によって以下の成果が得られた。

- ・ 顕微鏡走査範囲が XY 軸ともに 150mm になり、任意の位置に移動できるようになった。
- ・ 移動速度は高速・低速モードの切り替えをつけて、移動時間を短くできるようにした。
- ・ 画像の記録システムの付加により、大量の測定データを自動取り込ませ、残せるようにした。

本実験装置はウェハ表面の外観検査機として使用することが出来るようになり、使用頻度が向上して有効活用している。

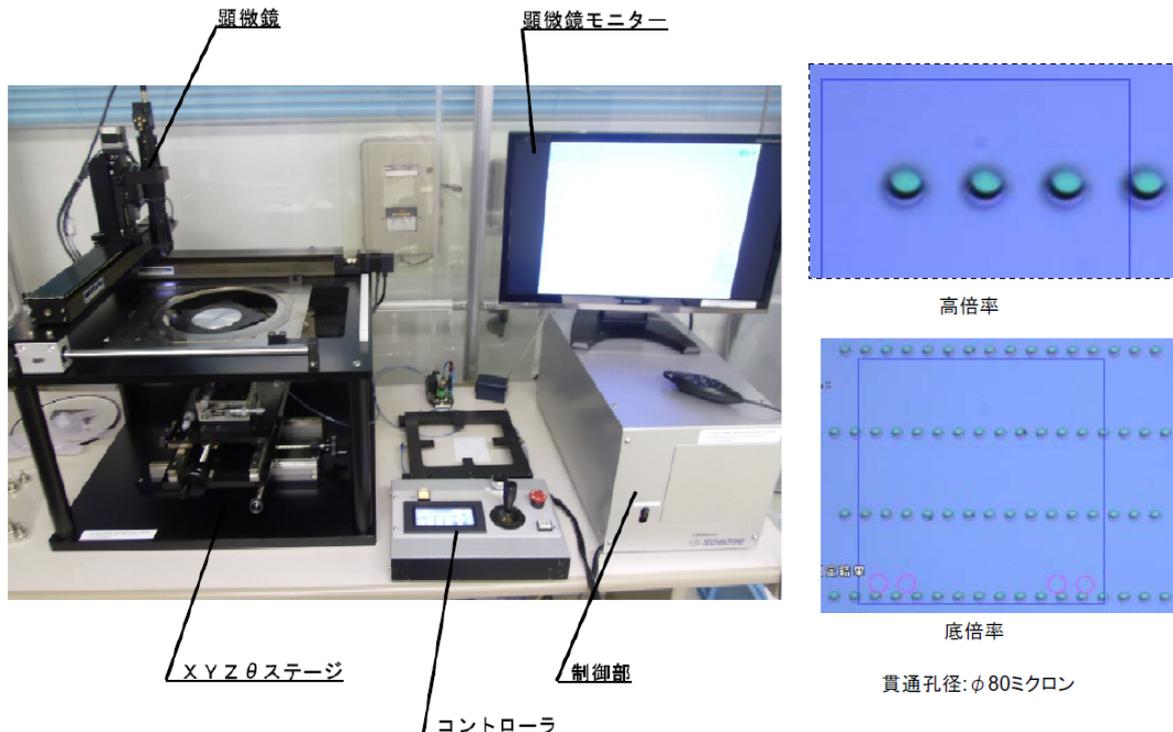


図29 位置合せ機能付きマニピュレータ改造の外観写真と測定例

表8 位置合せ機能付きマニピュレータ改造後の装置構成と改造要点

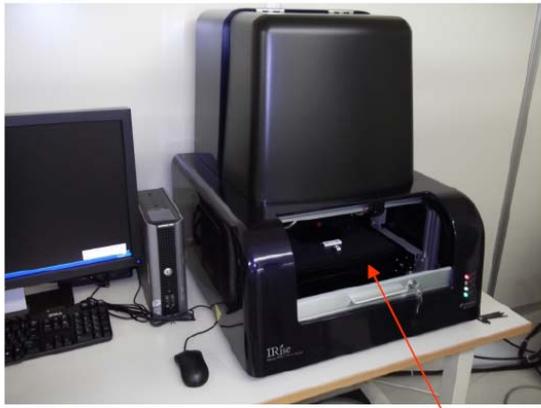
(A)装置構成	内 容
①	・XY 軸ステージ
②	・Z 軸ステージ
③	・回転ステージ
④	・サンプル観察・確認顕微鏡(追加改善)
⑤	・測定プローバ
⑥	・制御系(追加改造)
(B)改造要点	
①	・顕微鏡走査範囲をXY 軸ともに150mmにした (6インチウェハ全面観察可能)
②	・タッチパネルから移動位置を設定できるようにした
③	・顕微鏡のピント調整をモータ駆動にした
④	・顕微鏡の画像を記録する機能を付けた

2-2-3-2 ウェハ接合評価装置

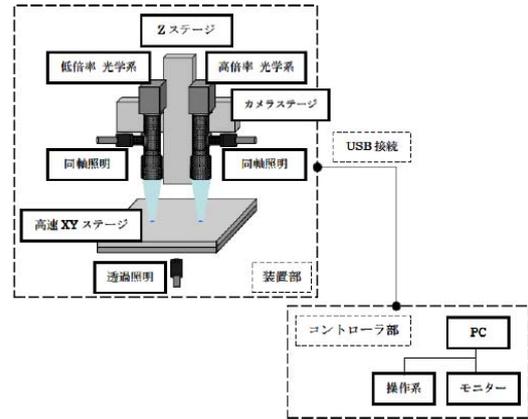
(1) 開発の目標、経緯

ウェハ接合装置は低倍率と高倍率の IR 顕微鏡により Si ウェハの表面から裏面までの状態を観察できる。この機能により、貫通配線基板の Si の割れ、クラック、異物、加工不良の観察、検査を目的に本装置を導入した。貫通配線基板を使った Si ウェハレベルパッケージ利用技術開発にはウェハ間の接合状態を観察する用途に使用でき、本装置は製造プロセス開発・生産での主要な検査機としての位置づけがある。

図30に本開発で導入したウェハ接合評価装置の外観とシステム構成図を示す。ウェハ接合評価装置の性能を表9に示す。本装置の特徴は、低倍率と高倍率の IR 顕微鏡を備え、高速に200mm 範囲を移動できる試料ステージにより自動的に画像を取り込み、自動合成機能によりウェハ全面のマクロ観察が行える。また、IR の反射透過の画像が観察できる。高倍率 IR 顕微鏡の拡大率は7.5~40倍である。



試料移動ステージ



(a)装置外観写真

(b)システム構成図

図30 ウェハ接合評価装置の外観とシステム構成図

表9 ウェハ接合評価装置の性能表
(株モリテックス製)

項番	項目	内容
1	画素数	低倍率：130万画素 高倍率：130万画素
2	ZOOM 機能	あり
3	倍率	低倍率：0.75～4.5 倍 高倍率：7.5～40 倍
4	自動画像合成機能	各倍率で 200mm×200mm を合成可能
5	マクロ観察機能	ウェハ全面観察可能
6	照明	反射照明（ハロゲン光源） 透過照明（ハロゲン光源）
7	ステージ移動	電動
8	ステージ作動範囲	300mm×300mm

(2) 結果と検討

図31に本ウェハ接合評価装置で Si ウェハを重ね合せて位置ずれを観察した例を示す。貫通配線基板の製造に使う組み合わせは同図 (a) の場合で、加圧用ウェハと貫通孔基板の合せずれが鮮明に観察できる。これらの機能は貫通配線基板の外観検査および評価装置として役立っている。

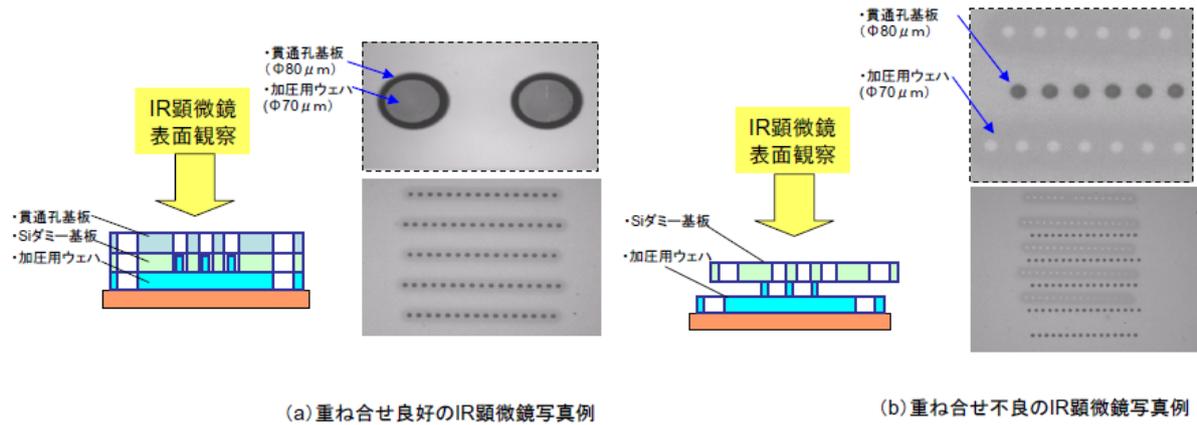


図3-1 ウェハ接合評価装置によるSi重ね合わせウェハ表面の観察例
(IR反射光による)

2-2-3-3 貫通配線基板製作機構部

本機構部は、貫通配線基板の製作工程において重ね合わせて使用している加圧用ウェハ、ダミー基板および貫通配線基板を分離するために用いることを目的に製作した。図3-2に貫通配線基板製作機構部を、図3-3に貫通配線基板製作機構部の加圧ウェハからダミーウェハを取外す操作イメージを示す。

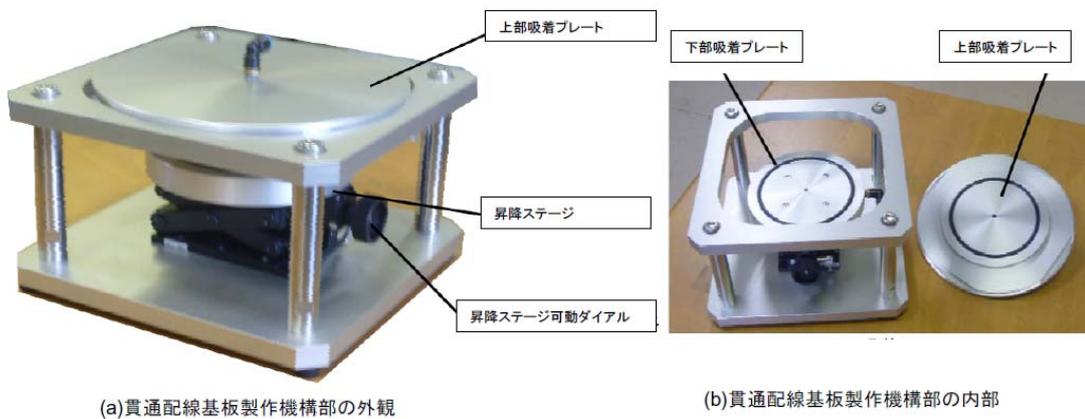


図3-2 貫通配線基板製作機構部

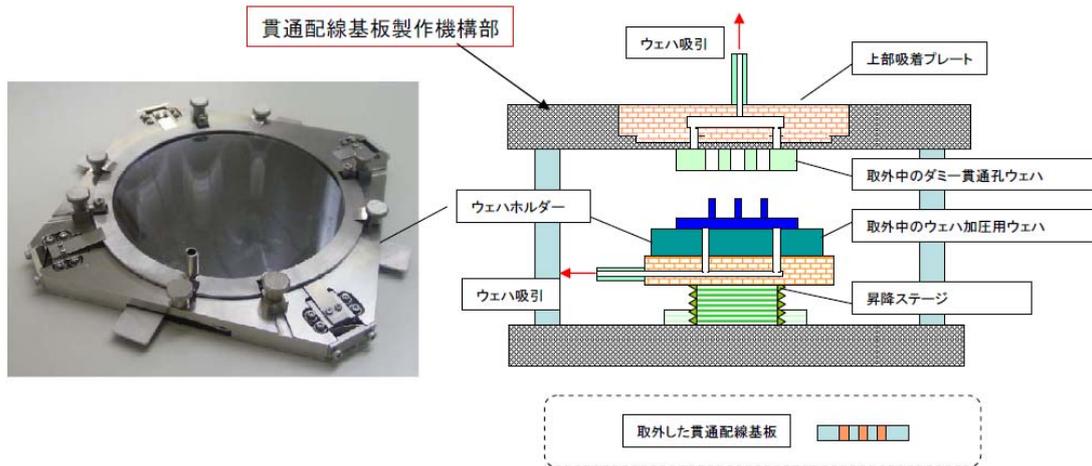


図3-3 貫通配線基板製作機構部の操作イメージ
(加圧ウエハからダミーウエハを取外し)

本機構部を使用して、製作中の試料を真空チャックして高精度の垂直移動機構によって上下させ、各基板を安全に取り外す実験を行った。

今回試作したウェハホルダーは、ウェアサイズが30mm□、4インチ及び6インチ用である。ウェハサイズの小さいものは貫通配線基板の最適化の実験を繰り返して行っており、ウェハホルダーとこの機構部の組み合わせで使用しやすい形に部品を作り直して機能の確認をした。サイズの大きい4インチ及び6インチ用は取り扱いやすく、製作ジグのまま本製作機構部の機能を確認することができた。

2-3 金属配線の形成技術の開発

2-3-1 加圧用ウエハ作製技術

この節では本開発で使用する重要部品の①加圧用ウエハと、②貫通孔基板の作製技術を、またデジタルパウダー(株)から入手している金属ボール(製品名デジタルマイクロボール)の検討結果を述べる。

2-3-1-1 加圧用ウエハ

図3-4にSi加圧用ウエハの製造工程を示す。この部品は自社の製造ラインで作製している。Si板厚が約600 μm のウエハから直径 Φ 70 μm 、高さ200 μm の多数の円柱をSi-DRIE(Si深掘ドライエッチング)装置で加工する。金属ボールとSiが反応しないように0.5 μm 以上の膜厚の熱酸化膜を表面に形成する。

図3-5にSi加圧用ウエハの顕微鏡写真を示す。加圧柱は細長い円柱形状なので光学顕微鏡の観察は上面と底面のみであり、SEM観察は効果的である。また、今回導入したウェハ接合評価装置のIR顕微鏡機能により加工後のSiウエハ全面にわたって異物や加工不良等の箇所を観察・検査を行い、部品作製の工程管理に使用している。

図3-6に加圧円柱の高さのウエハ内面内寸法分布を示す。6インチウエハの面内で高さ規格：200 \pm 20 μm の範囲で作製できることが分った。また、加圧面になる円柱の先端の直径は Φ 70 μm \pm 3 μm 以内の範囲であった。

加圧用ウエハを貫通配線基板作製の実験に使用しているが、繰り返し使用できる

状況にまだ至っていない。加圧工程後、加圧用ウェハがスムーズにはずれない不良が生じている。加圧用ウェハが外れなくなる原因は、金属ボールの圧着後、金属ボールとの接着力が大きいこと、ダミー基板と加圧用ウェハの隙間に溶けた金属ボールが入りこむ、などが考えられるが、後者による影響が大きいと推察している。このことは2-3-2-2の観察結果で詳しく述べる。加圧用ウェハの取り外しに関しては、貫通配線基板の製作条件に深く関与しているので、引き続き総合的な実験、検討を行う上で形状や寸法などの改良によって解決策を捜す予定である。

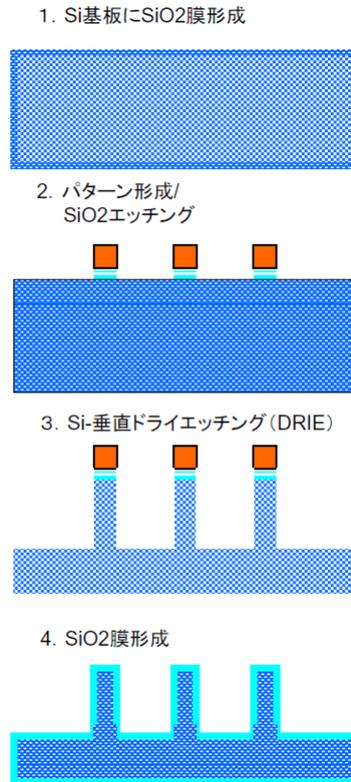


図34 Si加圧用ウェハの製造工程

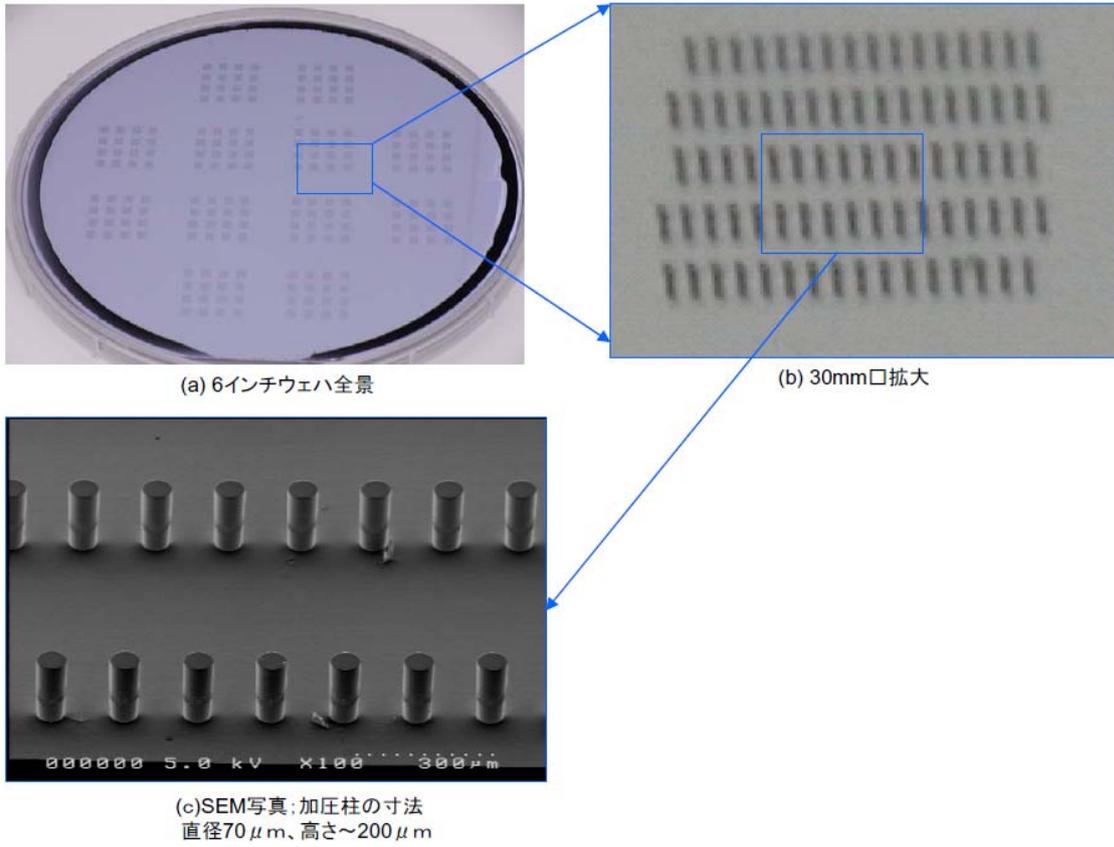


図35 Si加圧用ウェハ作製後の顕微鏡写真

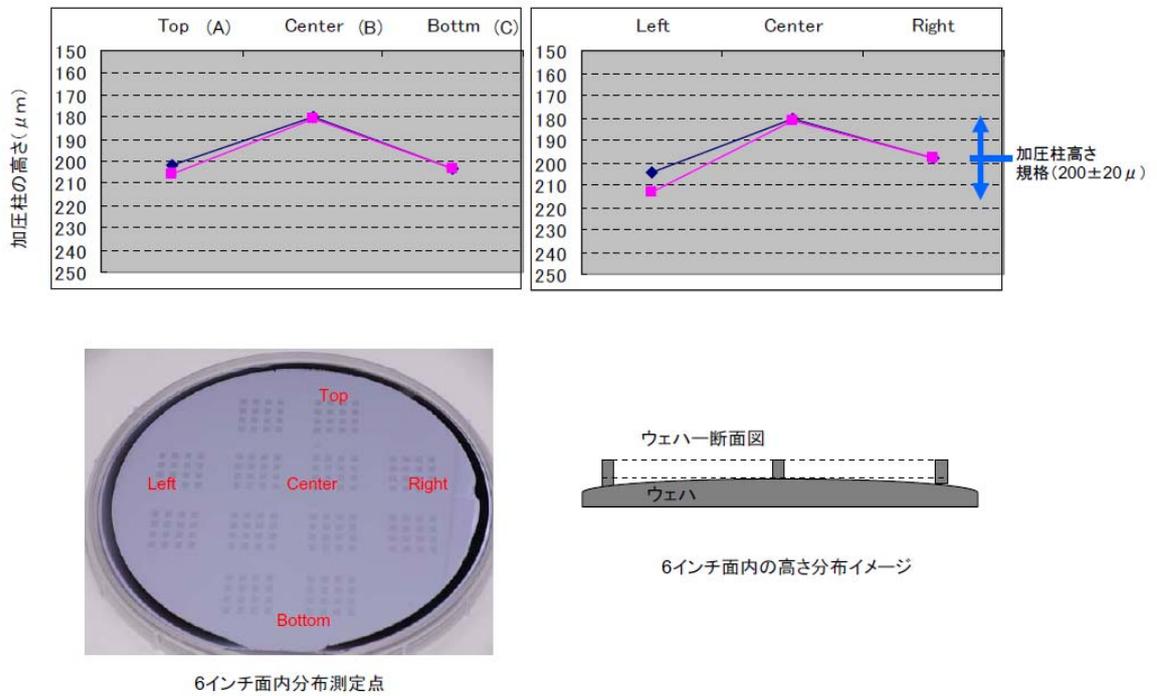


図36 Si加圧用ウェハの高さ寸法の面内分布

2-3-1-2 貫通孔基板

図37に Si 貫通孔基板ウェハの製造工程を示す。この部品は自社の製造ラインで作製している。Si 板厚は200~300 μm の範囲のウェハを使用して、直径 $\Phi 80 \mu\text{m}$ の多数の貫通孔を Si-DRIE (Si 深掘ドライエッチング) 装置で一括に加工する。貫通孔間の電氣的絶縁性を確保するため、1 μm 以上の膜厚の熱酸化膜を表面に形成する。貫通配線基板の作製工程で使用する貫通孔ダミー基板も同じ工程で製作する。ダミー基板の場合 Si 板厚の異なるものを使用するので幾種類かを製造して保有して置く必要がある。この基板は繰り返し使用する。

図38に Si 貫通孔基板の完成品の顕微鏡写真を示す。製品検査では深くて小さな貫通孔の内部は光学顕微鏡で観察することができないので、上面と底面の形状観察と寸法測定で良否の判定を行っている。また、今回導入したウェハ接合評価装置の IR 顕微鏡で異物による加工不良、割れなどの不良箇所を明瞭に観察できることが分かったので加工後の Si ウェハ検査に使用している。本部品作製の工程管理の品質検査に本装置を使用することで作業効率が上がり、歩留まり向上にも寄与している。

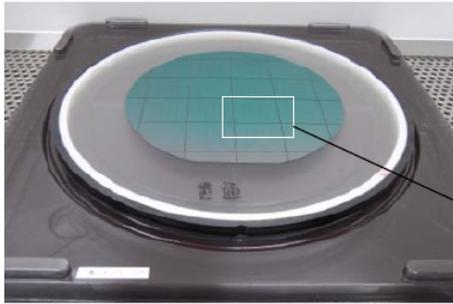


図37 Si貫通孔基板ウェハの製造工程

図39に $\Phi 6$ インチウェハ全面に形成した貫通孔径の面内寸法分布を示す。加工の規格値は $\Phi 80 \mu \pm 3 \mu\text{m}$ 以内に対して、作製した貫通孔基板の大半は合格品として仕上がっていることが分る。

図40に貫通孔基板内の良品チップ取得数の例を示す。6インチウェハ1枚の中に5mm口チップが192個あり、この良・不良品を検査した結果である。現状は約94%以上で良品が作製されている。貫通孔基板の量産技術を引き続き検討する予定である。

貫通孔基板ダイシング後写真(30mmカット)



(a) 6インチ貫通孔基板全景

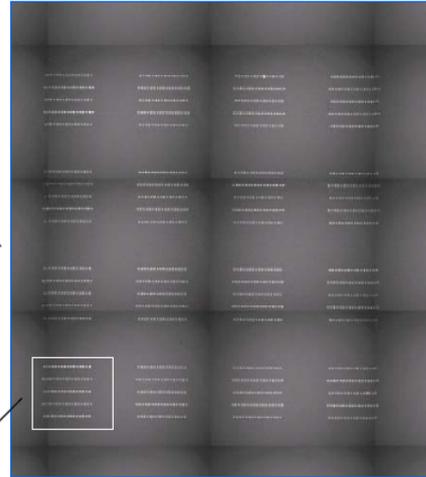
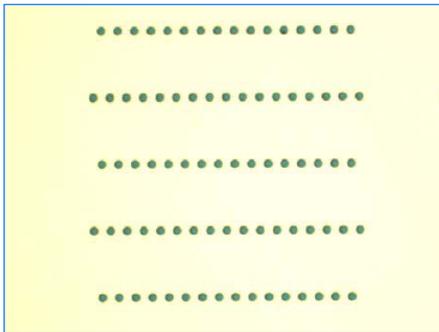
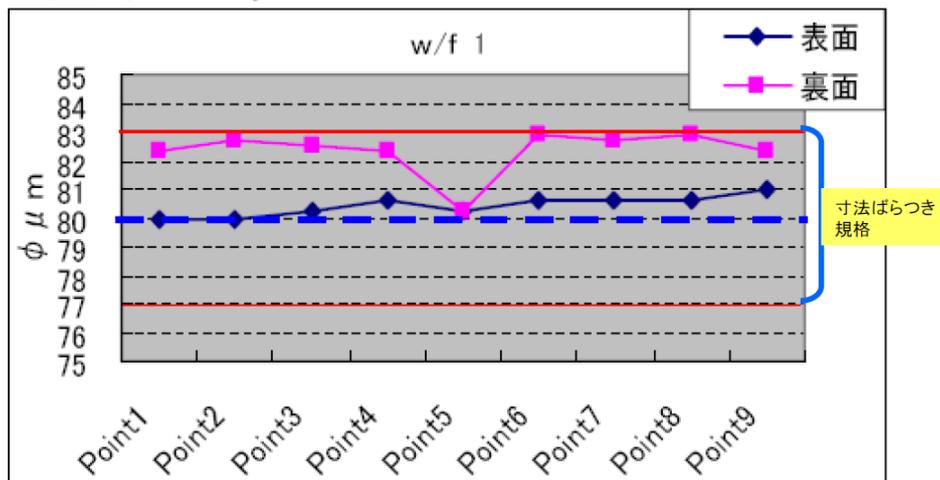
(b)30mm□貫通孔基板部
IR顕微鏡写真(c)5mm□貫通孔部実体顕微鏡写真
Si貫通孔直径80 μ m

図38 Si貫通孔基板作製後の顕微鏡写真

規格: $\phi 80 \pm 3 \mu$ 図39 貫通孔径の面内寸法分布(ϕ 6インチ基板)

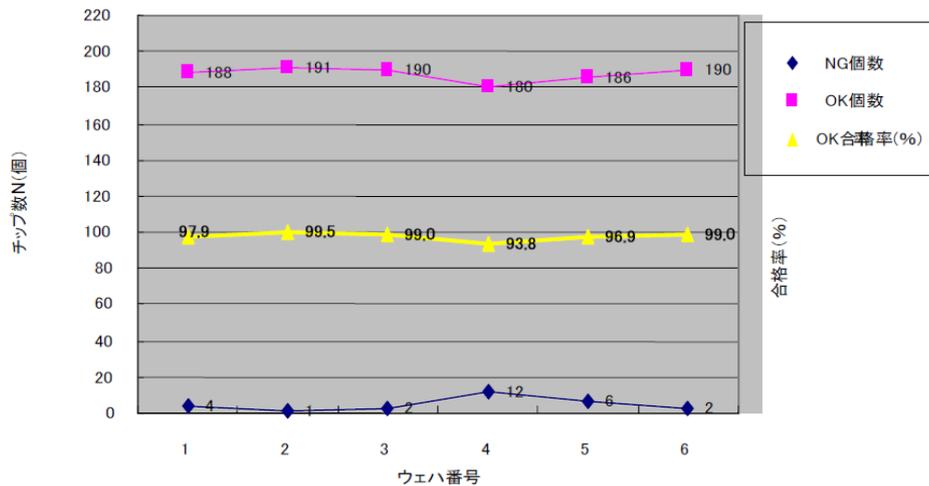


図40 貫通孔基板内の良品チップ取得数
(5mm口チップ×192個/6インチ基板)

2-3-1-3 金属ボール

図41にデジタルパウダー(株)から入手している金属ボール(製品名: デジタルマイクロボール)の寸法検査結果と金属ボールの物性、特徴を示す。球の直径は $\Phi 70\mu\text{m}$ 中心から最大・最小 $2.5\mu\text{m}$ 以内にある。

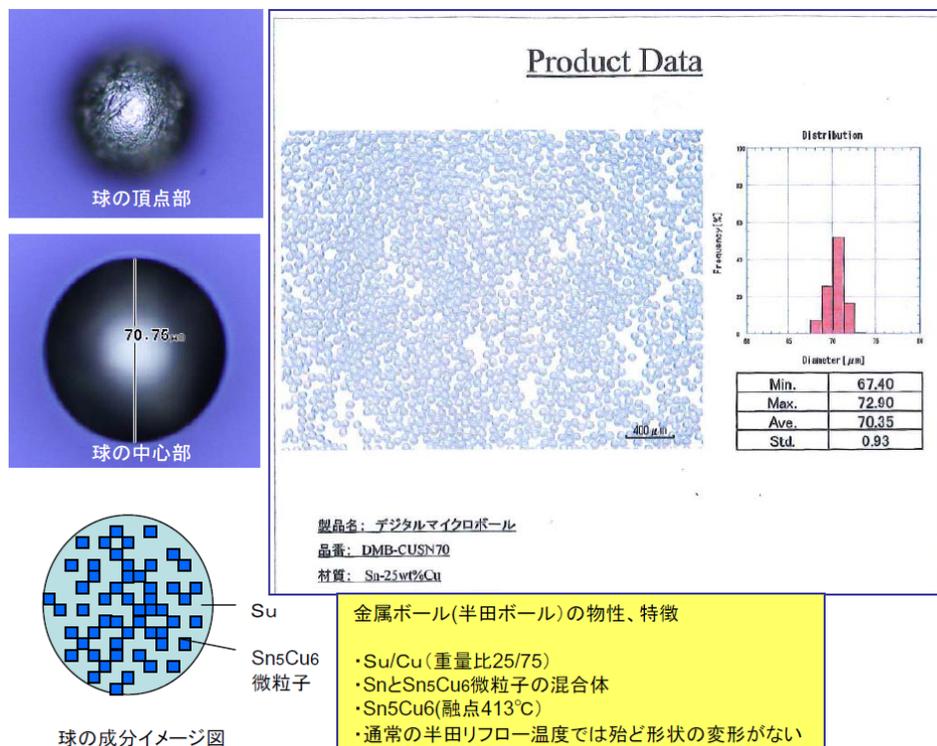


図41 金属ボールの直径分散データ及び外観写真
(金属ボール径 $\Phi 70\mu\text{m}$)

今回使用している金属ボールは SnCu の成分で、ボール組成は同図のイメージ図のような Sn と SnCu 共晶微粒子(融点 413°C)の混合体を構成している。この

ため Sn が溶け始めても球の形はある程度保たれて、通常のはんだリフロー温度では変形しない特徴がある。

金属ボールのつぶれ具合を観察した結果を述べる。この実験は金属ボールを Si ウェハ間に挟んで、加圧 500N の条件下で加熱温度を変えて行った。図 4 2 にこの結果と観察写真を示す。金属ボールは 200℃位からつぶれはじめることが分かった。

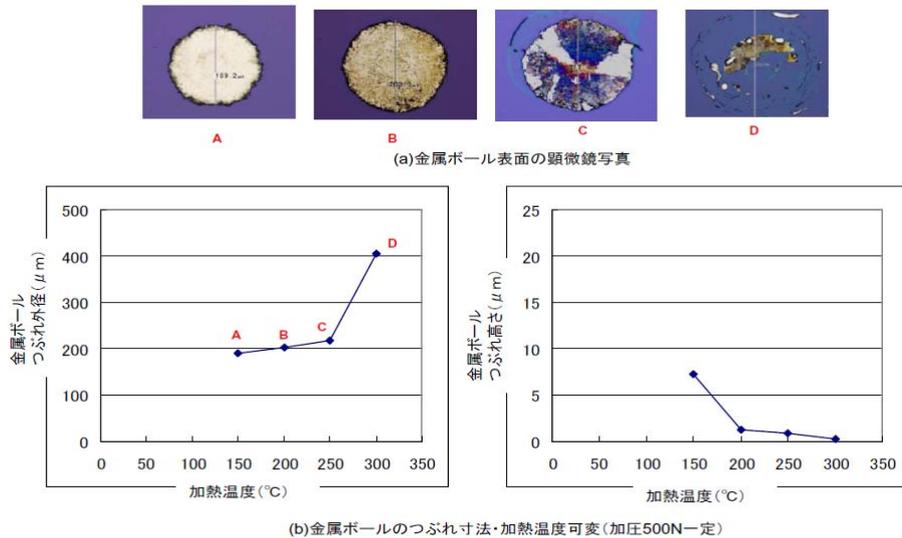


図 4 2 加熱温度による金属ボールのつぶれ観察 (加圧 500N)

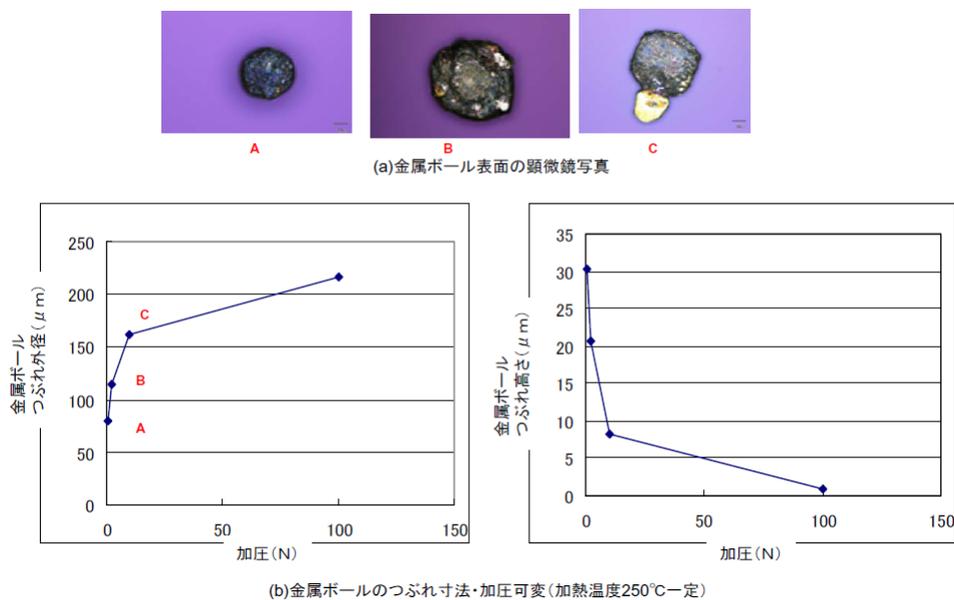


図 4 3 加圧による金属ボールのつぶれ観察 (加熱温度 250°C)

図 4 3 に加熱温度を 250℃一定にして加圧を変えた実験結果を示す。この場合、小物部品の重し (A,B,C) では変形が小さかったが、実験装置で加圧が約 100N 以上から薄板に変形されていることが分かった。これらの基礎データは実際の加熱加圧条件の最適化を求める実験の指針に役立っている。

2-3-2-1 製造工程技術

本節の金属ボールによる貫通配線層の形成実験技術開発は、今まで述べた技術の集約によってなされるものである。図44に本製造工程に係わるこの相関を纏めて示す。貫通孔加工で形成したセラミックス基板や Si 基板の部品を使い、今回は改造した実験装置を駆使して単一分散の金属ボールの充填したものを熱圧着によって貫通配線層を形成する。

図45に、ウェハサイズが30mm□のものを使い、金属ボール配線形成の基本実験を行った工程の流れを示す。実験サイズと規模がコンパクトなものになり貫通配線基板の作製実験を繰り返し行えるようにした。改造した製造装置の立上げ実験、評価にも機能的に対応することができるようになって、2-2-1の金属ボールの挿入実験装置の項で述べたように金属ボールを取扱う技術開発を加速させこの装置性能向上と確立に寄与することができた。

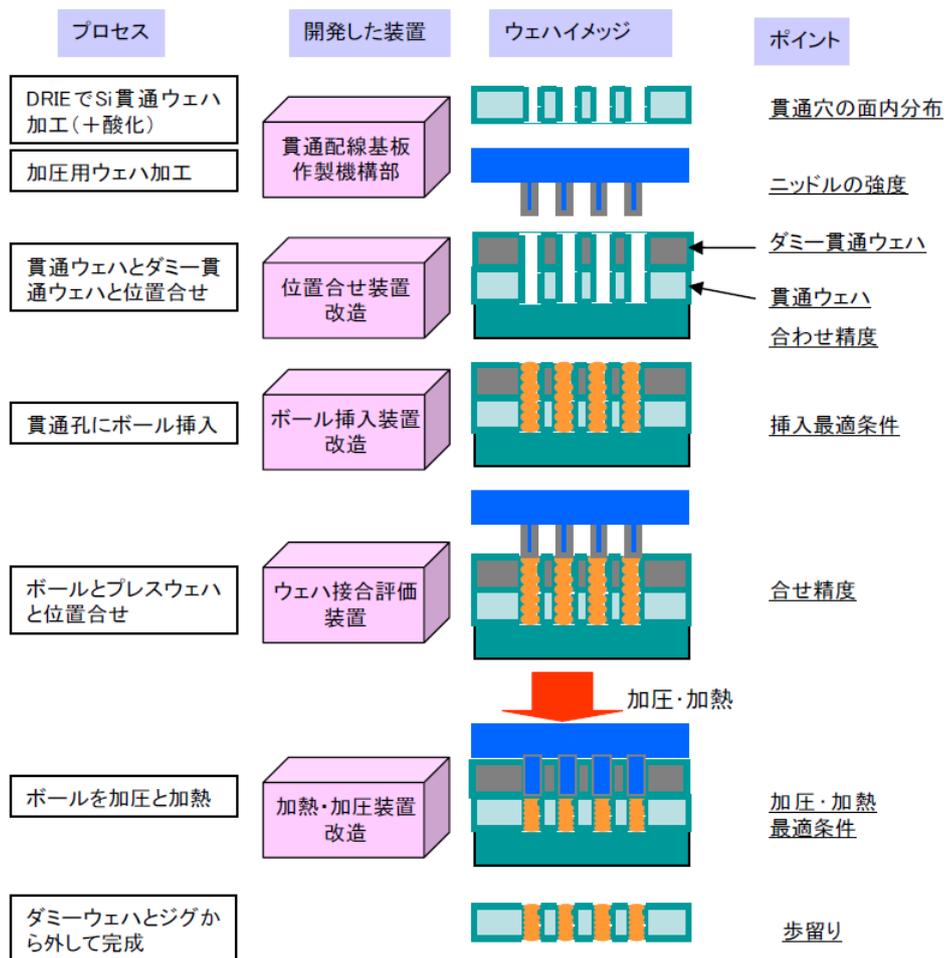


図44 金属ボールを用いた貫通配線製造工程（全般）

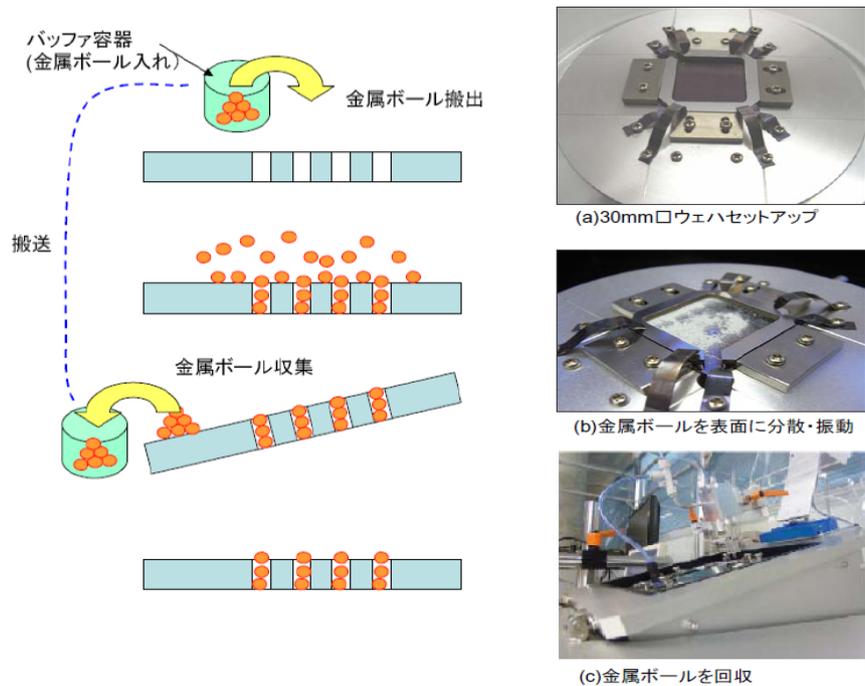


図45 金属ボール配線形成の基本実験工程の流れ
(ウェハサイズ：30mm口)

2-3-2-2 基板製造技術

金属ボールは毎回、ほぼ100%の歩留まりで貫通孔に挿入・充填することが出来るようになってきている。貫通配線基板の評価は、貫通配線の表面と裏面の金属ボールの変形状態を観察して行っている。充填された金属ボールを加圧用ウェハで熱圧着して、良好な貫通配線基板が得られた SEM 写真を図46A と46B に示す。図46A は加圧用ウェハ側から見た基板表面の観察結果である。加圧柱の上面跡がよく分る。図46B は平板ウェハ側から見た基板表面の観察結果である。金属ボールが平板に押されている形跡がほとんど見られなく、ボールの数が足りないためと思われる。ボール圧着時の温度、圧力の違いが加圧用ウェハ側と平板ウェハ側のつづれ面の面積の大きさで現れる。加圧用ウェハ面に圧力がかかり易く、温度が低いと金属ボールの変形量が少ない傾向が見られ、高いと溶融が進む。金属ボールの溶融とつづれの両者をバランスよく使う条件設定の技術開発を行ってきた。

図47に金属ボールを5個使用して作製した貫通配線基板の段差寸法評価結果を示す。貫通配線基板の表面を加圧用ウェハ側、裏面を平板側として寸法を測定した。ウェハ番号1, 2, 3は作製条件の違いであり、加熱温度が250、300、350℃の順番の場合である。ウェハ番号2の製作条件で、比較的良好な結果が得られている。配線層の凹みギャップ (Du) の大きさは加圧用ウェハ側 (Du) で (-3 ~ -8) μm 、平板側で (+0 ~ -5) μm であった。200 μm 板厚基板において、段差をゼロに近づけるようにするには、6-7個/孔の金属ボールが必要であり、ダミー基板と加圧柱の高さの最適化もまた重要であることが分かった。

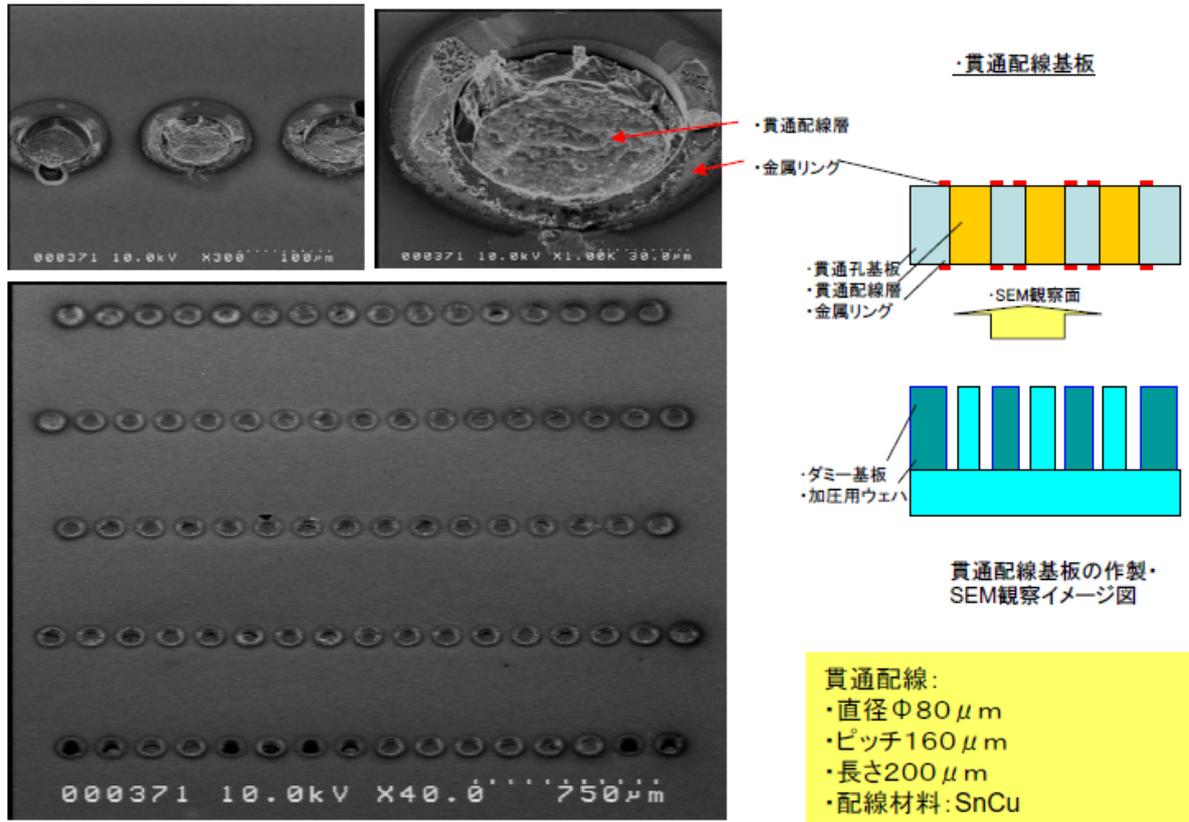


図4 6A 貫通配線基板の表面写真（加圧用ウェハ側）

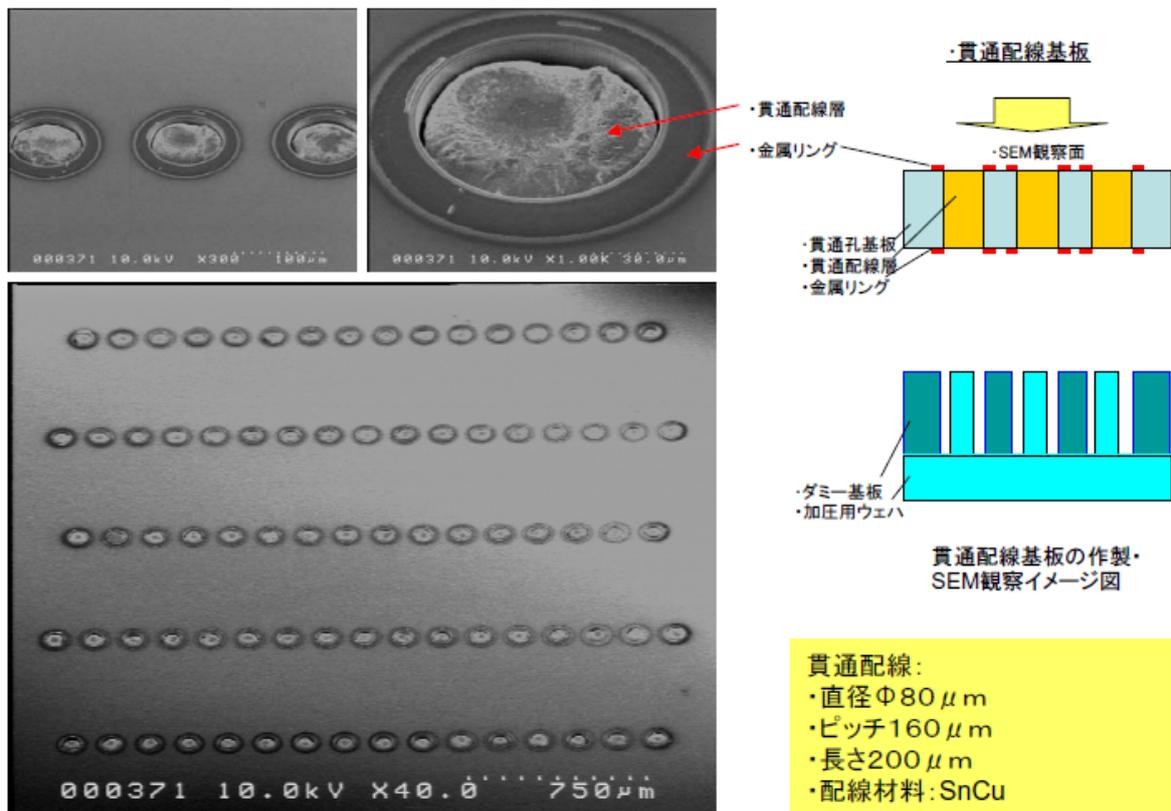


図4 6B 貫通配線基板の表面写真（平板ウェハ側）

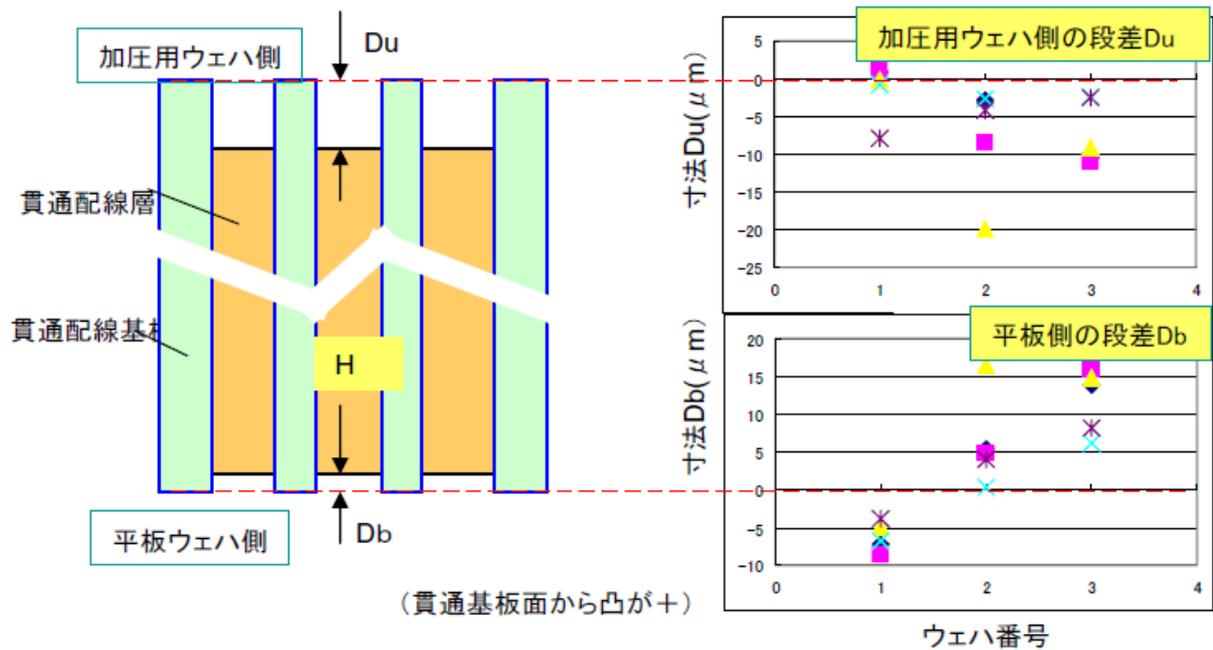


図4.7 貫通配線基板の寸法評価（ギャップ、高さ）

図4.8～5.1に貫通配線基板の製作条件をパラメータにして得られた実験結果を示す。本実験では、金属ボールを圧着する温度条件を変化させて行った。貫通孔の周囲に金属層を被着していない基板を用いると、貫通孔の中で圧着された金属ボールによる配線層は貫通孔基板から加圧用ウェハを引き出す時にはずれ、加圧柱先端に圧着された金属ボールを付いたまま一緒に取り出すことができる。これをSEMで観察して加熱・加圧条件の結果を観察した。SEMの写真から以下の項目を推論し、改善策を検討してゆく。

- ① 250-300℃の温度では、貫通孔内の金属ボールはお互いに連結・接続状態を保っているものの、十分に溶融している形跡がない。
⇒加熱、加圧がどちらも不足か。
- ② 350℃では金属ボール同士がよく溶け合っているが平板側に押し付けでできる平坦部がない。
⇒ボールの数量が不足していること、隙間に流れこむことが原因と考えられる。
- ③ 400℃ではさらに金属ボール同士がよく溶け合っている。
⇒貫通配線層の円柱形状は良好であるが、金属ボールで貫通孔を完全に充填するには7個が必要であり、ダミー基板の厚さと加圧柱の高さを320 μmにする必要がある。
- ④ 加圧柱周囲またはダミー基板の孔の周囲に金属のバリが見られる。
 - (ア) ⇒金属ボールが溶解して加圧柱(Φ70)とダミー基板の貫通孔(Φ80)の隙間に解けた金属が入り込んでいる。これは300℃からの実験でも見られていて、毛細管作用の吸上げで出来たものと推定している。
 - (イ) ⇒加圧用ウェハが外れない主要原因がこのバリと考えられる。溶融金属が隙間に入り込まない構造を検討しており、ダミー基板および加圧用基板の形状と寸法の最適化で解決できると考えている。
 - (ウ) ⇒加圧用ウェハの加圧先端部表面と金属ボールは反応がなく、はがれやすいものと観察される(図5.2)。

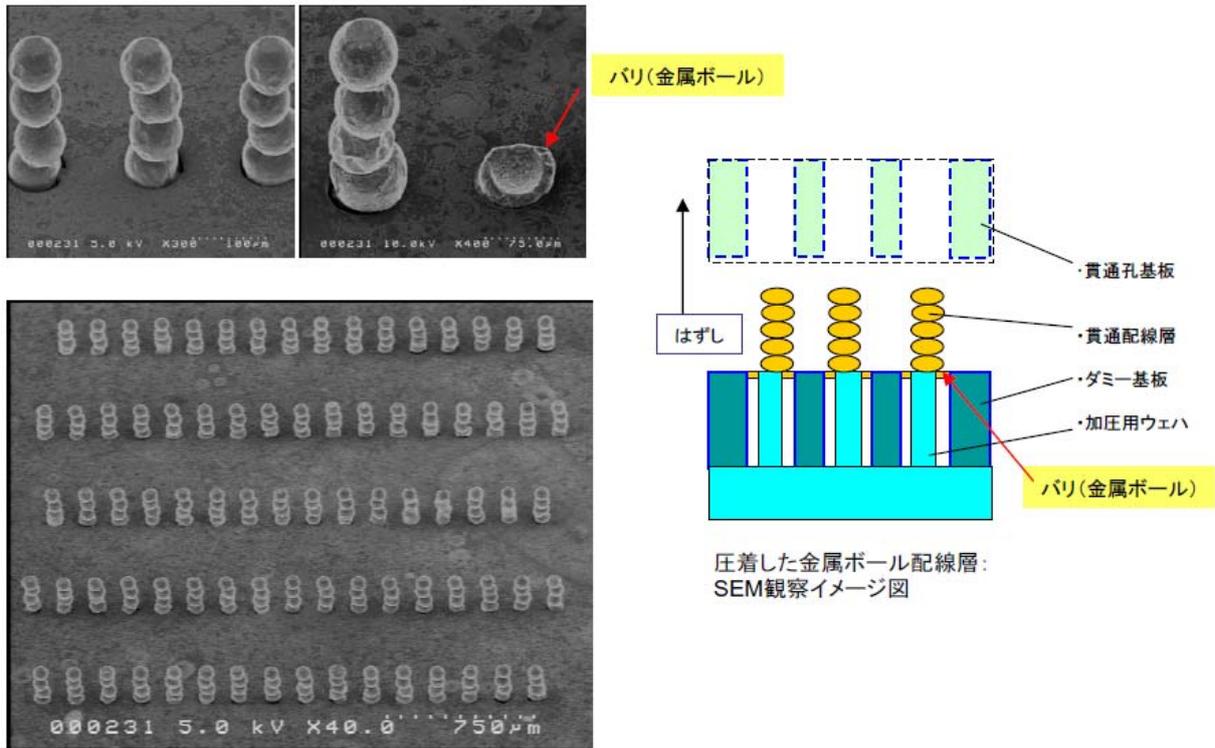


図48 貫通配線の作製条件テスト(1)
(上/下部プレート加熱温度 250/300℃、加圧 1800N の場合)

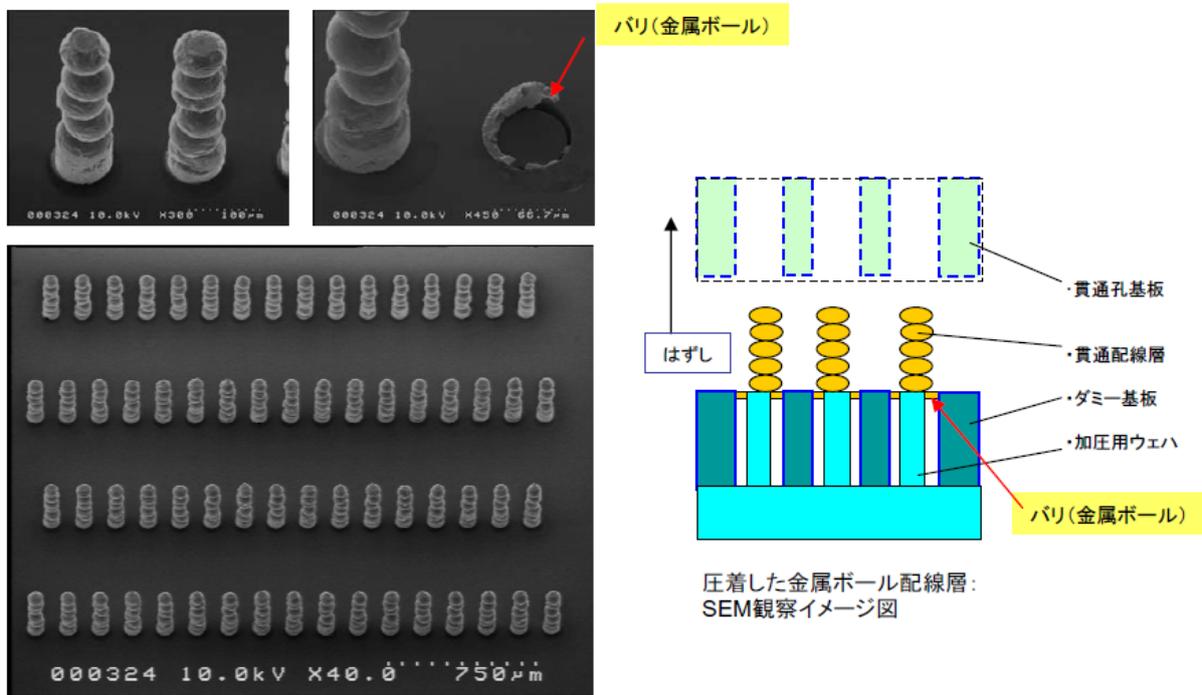


図49 貫通配線の作製条件テスト(2)
(上/下部プレート加熱温度 300/300℃、加圧 1800N の場合)

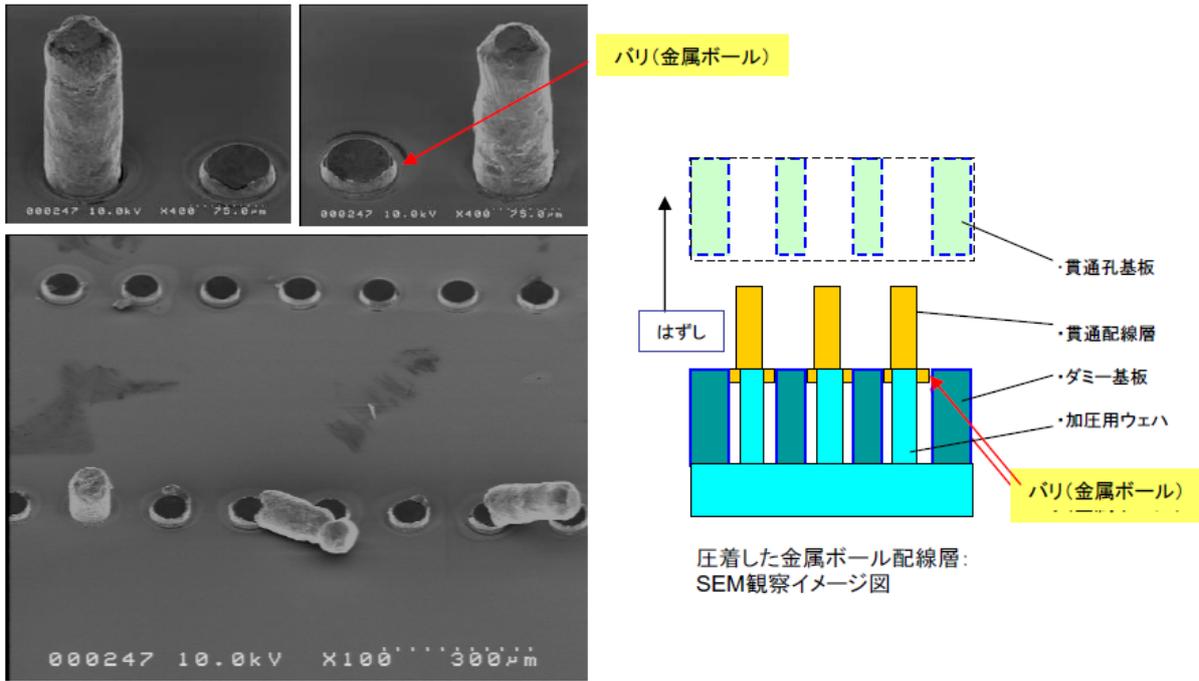


図50 貫通配線の作製条件テスト(3)
(上/下部プレート加熱温度 350/350℃、加圧 1800N の場合)

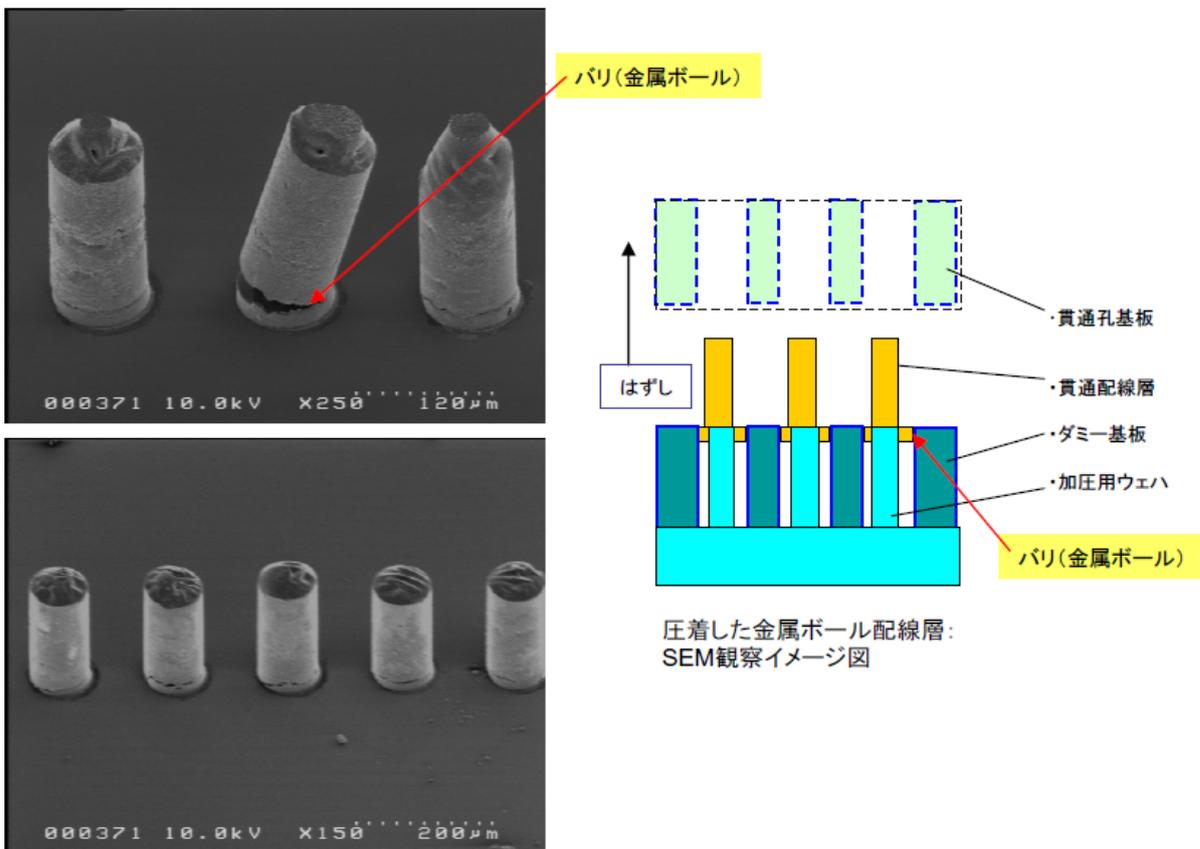


図51 貫通配線の作製条件テスト(3)
(上/下部プレート加熱温度 250/400℃、加圧 1800N の場合)

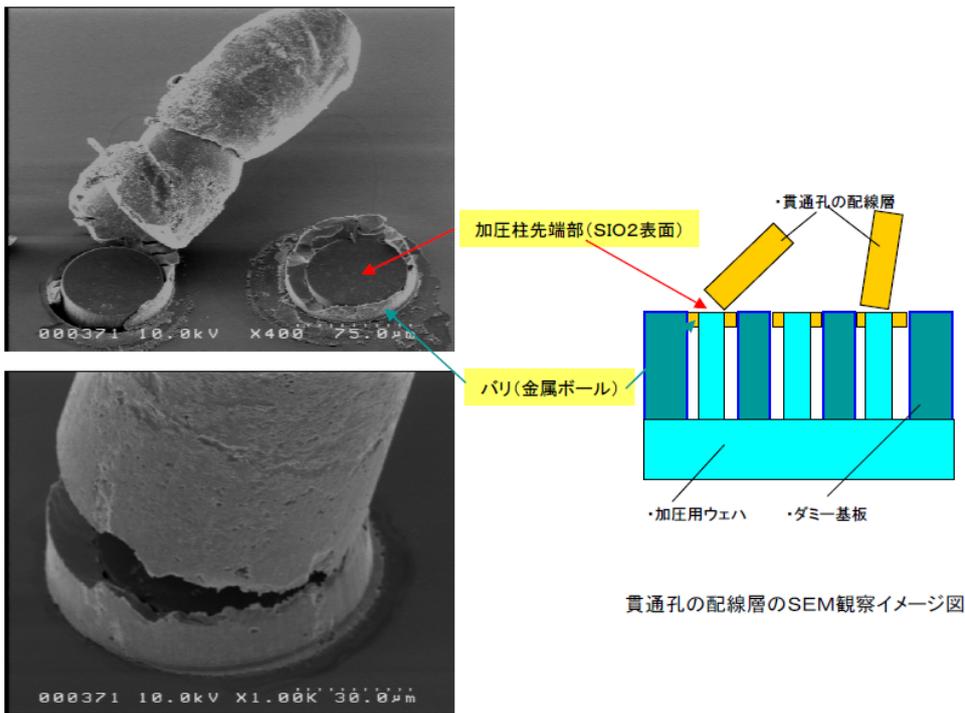


図52 貫通配線の作製条件テスト(3)の主要部拡大図
(上/下部プレート加熱温度250/400℃、加圧1800Nの場合)

今回の実験によって以下の成果と課題が明らかになった。

- ① 本開発の方式で形成条件を最適化すると気密性のよい貫通孔配線が実現できる見通しが得られた(図51)。
- ② 狭ギャップの毛細管作用によりダミー基板側に金属ボールが移動していることが分り、ダミー基板の形状と寸法の最適化の検討が必要であることが分かった。
- ③ 上記②の問題が解決されると、加圧柱の先端加圧部と金属ボールは弱い力で分離させることが出来る見通しがあることが分かった(図52)。
- ④ 貫通孔の高さと貫通配線長を揃えるため、ダミー基板と加圧用基板の部品を多種類用意して実験を行う予定である。

【アルミナ貫通配線基板の製作】

アルミナ貫通孔基板にCuボールで貫通配線の形成実験をした。

図53にアルミナ貫通孔基板にCuボールで貫通配線形成の、工程毎に並べた写真を示す。図54に本開発で試作したアルミナ貫通配線基板(Cuボール配線)を示す。アルミナ基板は2-1で述べた微細小径工具による穿孔加工で $\Phi 200\mu\text{m}$ の貫通孔を形成したものである。今回の貫通配線形成用金属ボールは同じ外形寸法 $\Phi 200\mu\text{m}$ のCuボールを用いた。同径のCuボールであっても貫通孔の入り口にボールが捕獲されているので、これを平板に挟んで加圧して挿入した。今回の実験では突起形状を持つ加圧用ウェハは使わずに、1孔当り3個のCuボールを繰り返して充填することができ、最後に平板に挟んで加圧した。貫通孔と金属ボールの直径公差を設けなくても貫通配線形成ができる可能性がある知見が得られたので、今後引き続き、貫通配線基板製作技術の検討を続ける予定である。

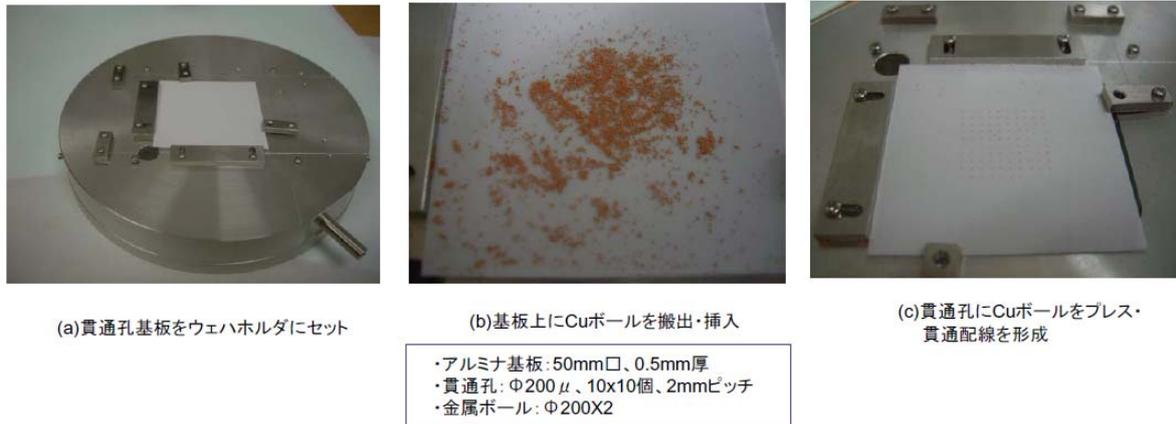


図5.3 アルミナ貫通孔基板にCu貫通配線形成例、工程毎写真

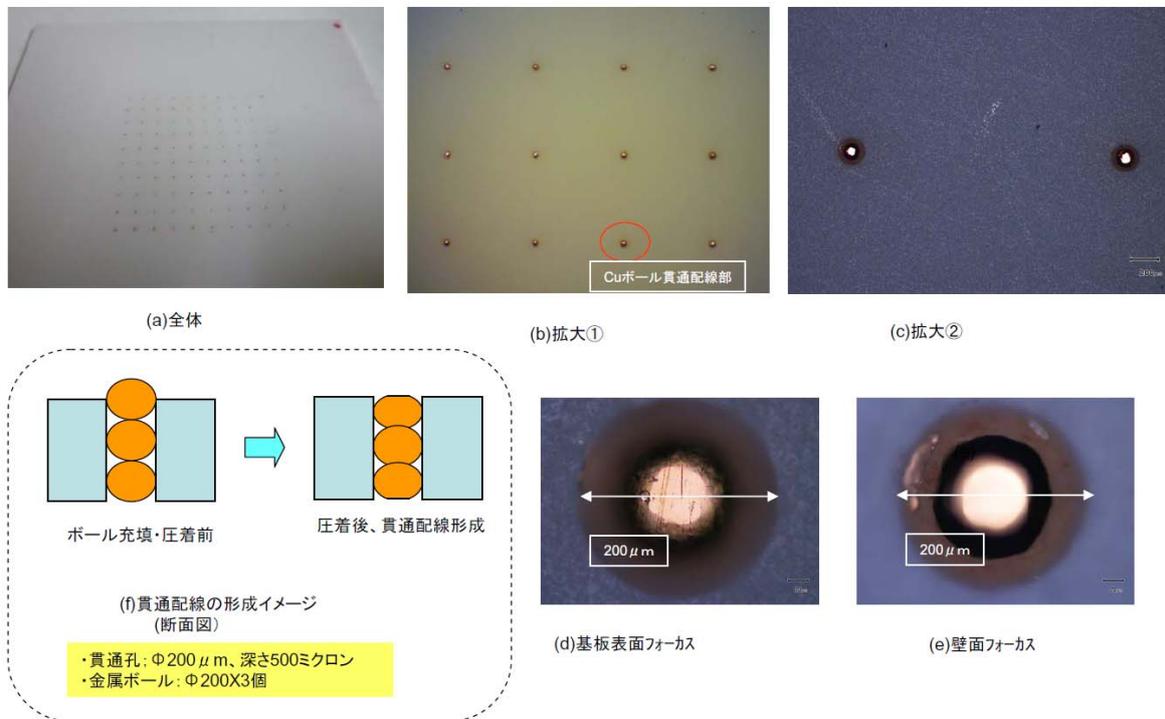


図5.4 本開発で試作したアルミナ貫通配線基板 (Cuボール配線)

本開発の目標にウェハレベルパッケージングに使用する気密封止が可能な貫通配線基板の製作をあげている。貫通配線基板の作製技術が確立できた後、この気密テストを進める。この気密テストの概要を以下に説明する。

図5.5は 貫通配線基板の気密テストを行うための概略図である。Si貫通配線基板と凹部を持つガラス基板を使ってウェハレベルパッケージをするため陽極接合を行い、ウェハからチップに切り出して、チップを検査に使用する。チップは貫通配線のあるものとなないものを同じ工程で作り、貫通配線からのリーク量だけを評価する。チップのリークテストはHe加圧雰囲気中でチップにHeを入れたものを取り出し、微小リーク検出装置で計測して貫通配線のリーク量を評価する。ウェハレベルパッケージの製作に用いる陽極接合装置と微小リーク検出装置は株式会社メムス・コ

アに設置してあり、これらを使用する予定である。

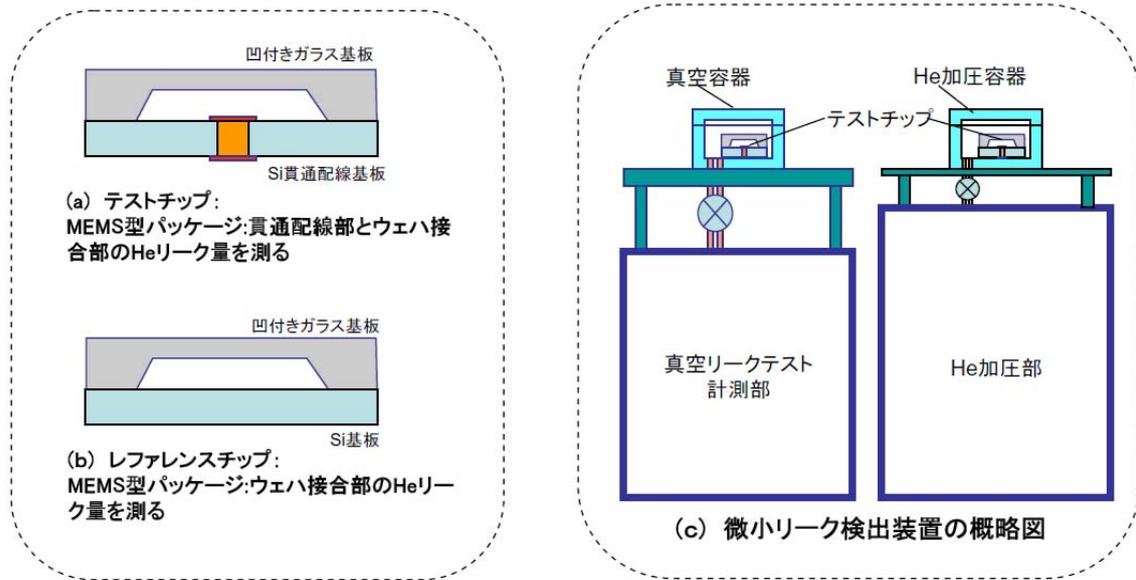


図55 貫通配線基板の気密テストの概略図
(ウエハレベルパッケージからチップを製作し
Heリークテスト法でリーク量を計測)

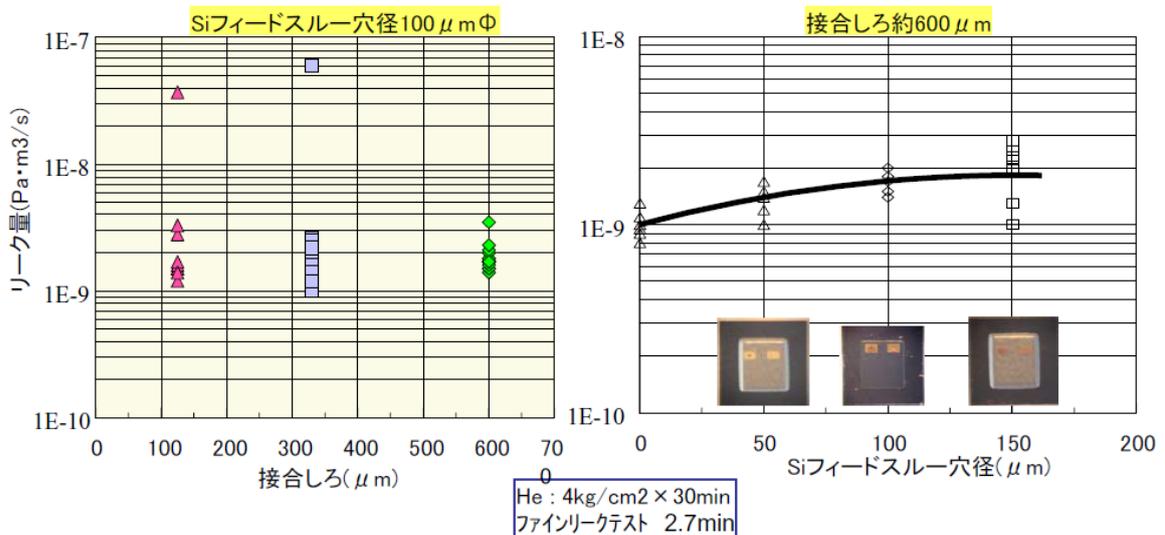


図56 ウエハレベル真空パッケージングの気密テスト例
(ガラス蓋ウエハとCuめっき法Si貫通配線基板)

図56に従来のCuめっき法で作製した貫通配線の実験結果を示す。パッケージの接合しろが大きく、貫通配線孔の小さいものがリーク量の少ない気密性パッケージに使用出来る傾向がある。測定限界 ($1 \times 10^{-9}\ \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) の結果の技術で製作されたものが水晶発振子のパッケージとして適用される。本開発の貫通配線基板もCuめっき法と同水準の気密性を目標としている。

2-3-2-3 貫通配線基板表面への配線技術

貫通配線基板はこの上にデバイス用の配線パターンを上下面に形成して使われる。今回、Si-DRIEで垂直加工したSiステンシルマスクを作製して配線パターンの金属層を形成した。

図57に製作方法と結果の写真を示す。貫通配線の裏面に全面のメタルをつけてボンディングパターン間の抵抗を測定した。

表10に測定抵抗値を示す。1孔当り貫通配線層の抵抗値は3.8~6.8Ωの値であった。直接に貫通孔上の貫通配線にプローブ針を接触させて計った抵抗値は1オーム以下であったので、今回の抵抗の高い理由は試作した配線パターンの配線金属層の厚さが薄かったためと考えられる。ステンシルマスクで形成した配線層の金属膜厚は表面より薄くなるのが原因であることが分かっているので配線パターンの形成はステンシルマスク法や通常のリソグラフィ工程で作る製法を対比して検討する予定である。

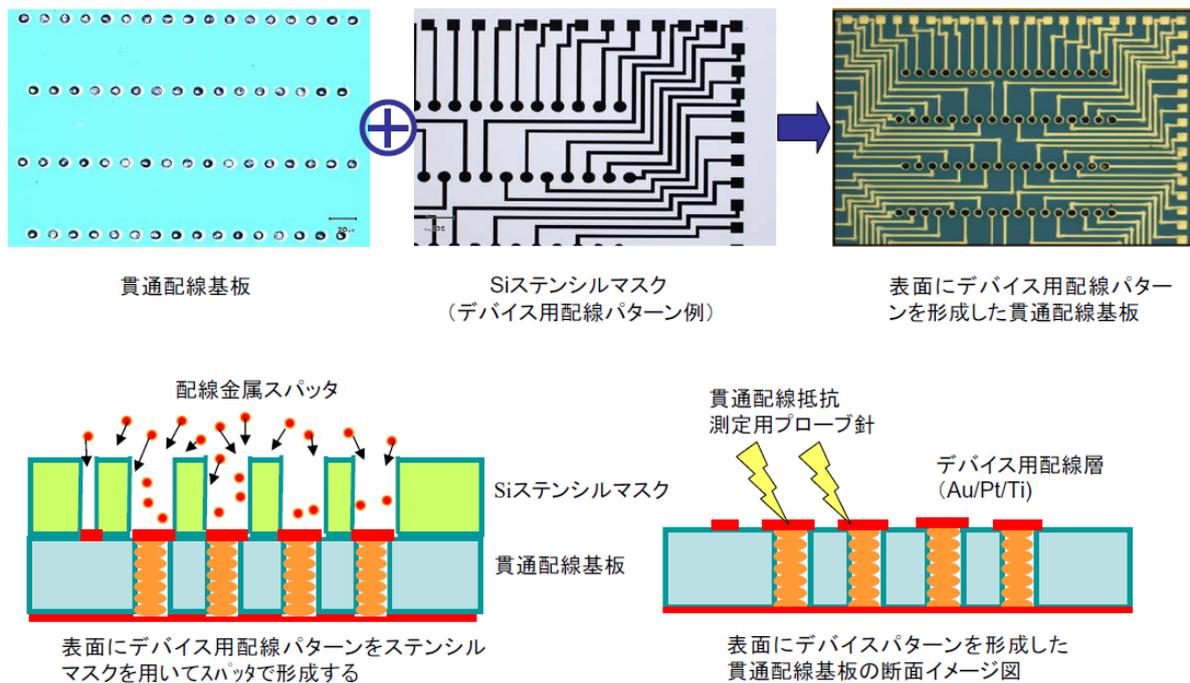


図57 貫通配線基板上に配線パターン形成

表10 貫通配線抵抗の測定例

point	1	2	3	4	平均
抵抗値	5.78 Ω	6.80 Ω	3.81 Ω	6.74 Ω	5.8 Ω

2-4 貫通配線基板の利用技術の検討

2-4-1 ウェハレベルパッケージング技術の検討

MEMS では貫通配線基板はウェハレベルパッケージングとして主に使われるので機械的強度を保つために基板は厚いものが使われる。また、水晶振動子用貫通配線基板はパッケージされたキャビティ内が長期間に亘って真空状態を維持することから、貫通配線基板の貫通孔と配線金属の界面が気密であることが要求されている。本開発では金属ボールの材料と圧着技術条件の最適化で気密性を高めるように検討をしている。しかしながら、気密性の要求が水晶振動子ほど厳しくない貫通配線基板のウェハレベルパッケージングの利用技術を検討してゆく中で、発光素子は高輝度照明用ランプとして産業規模を拡大し、この波及効果として高出力光源、高速光通信の分野にMEMS化が浸透していることが分かった。

図58は集光レンズ付き発光素子をウェハレベルパッケージング技術で製作する例である。図59にこの製造工程の一例を示す。発光素子としてはLEDや面発光レーザ（VCSEL）が利用され、高速光通信システム的小型・低コスト化に貢献できることが期待される。

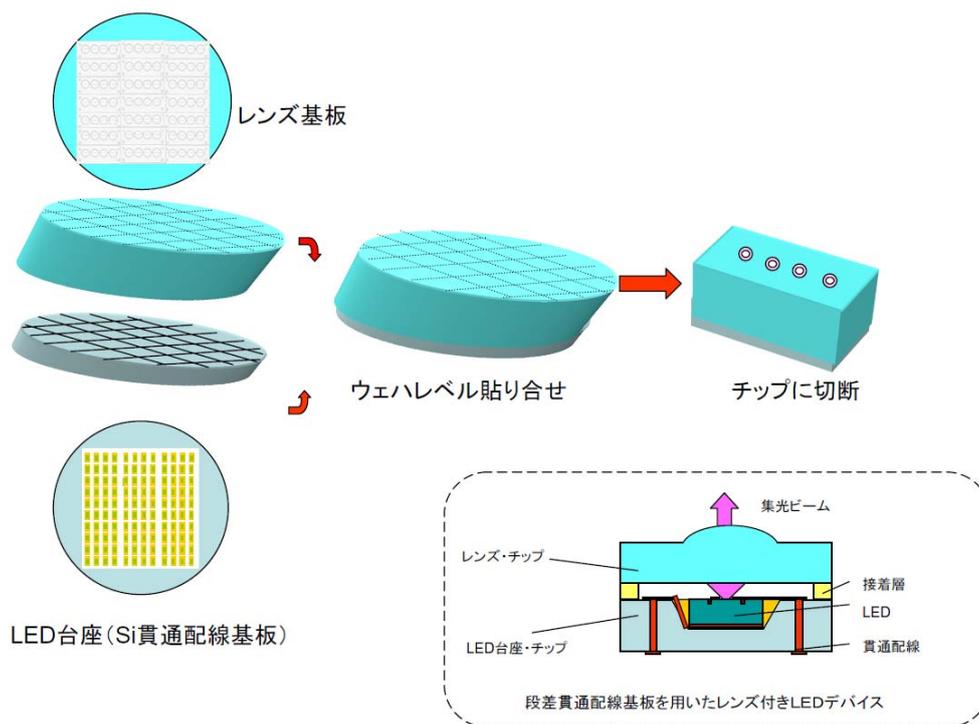


図58 集光レンズ付き発光素子のウェハレベルパッケージング技術応用例

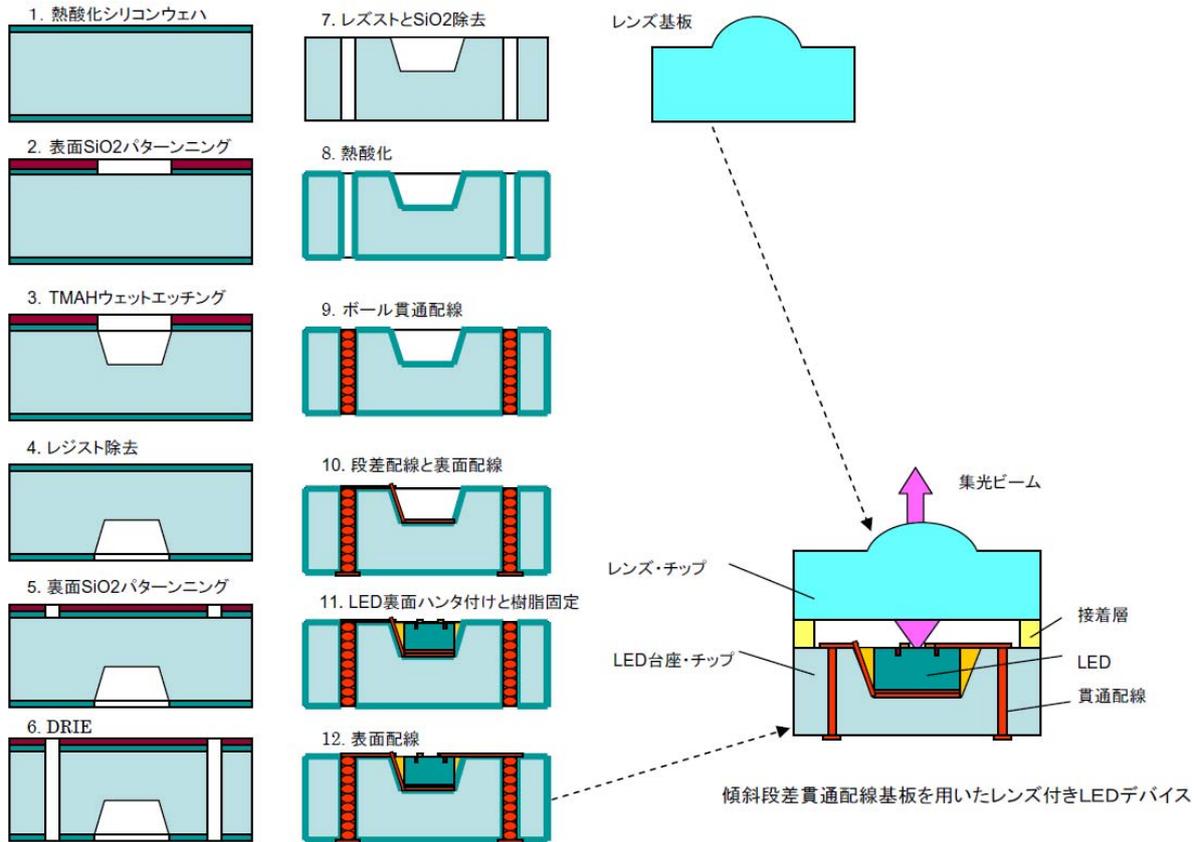


図59 傾斜段差貫通配線基板を用いたレンズ付きLEDデバイス製造プロセス(全体)

図59に示した製造プロセスで分るように、Si貫通配線基板は、LEDを実装するため約 $300\mu\text{m}$ の段差空間が必要である。また、LEDチップの底辺部から電極を貫通配線基板の上面まで上げる配線形成工程が必要である。このため本開発による貫通配線基板技術と傾斜段差をSiの異方性エッチングで加工し、スプレー塗布レジストプロセスで段差間の配線層を形成することで、ウェハレベルパッケージでレンズ付きLEDデバイスが実現できる見通しが明らかになった。

2-4-2 段差を有するウェハへの配線形成技術の検討

図60に示す貫通配線基板は段差の底部と表面部に異なる長さの貫通配線がある構造である。この基板を用いるとLEDの上・下部電極が簡単に貫通配線の電極に接続でき、垂直段差のため、より高密度、小型化の実装ができる特徴を有する。

図61にこの構造の貫通配線基板の製造プロセス(全体)を示す。垂直段差形状の貫通孔基板は通常の技術の組み合わせで形成でき、同図に示したようなサポート基板を補助部品として用いることで、本開発の金属ボール圧着法でこの様な貫通配線基板の形成ができる見通しがある。今後、引き続き基板と利用技術の検討を進める予定である。

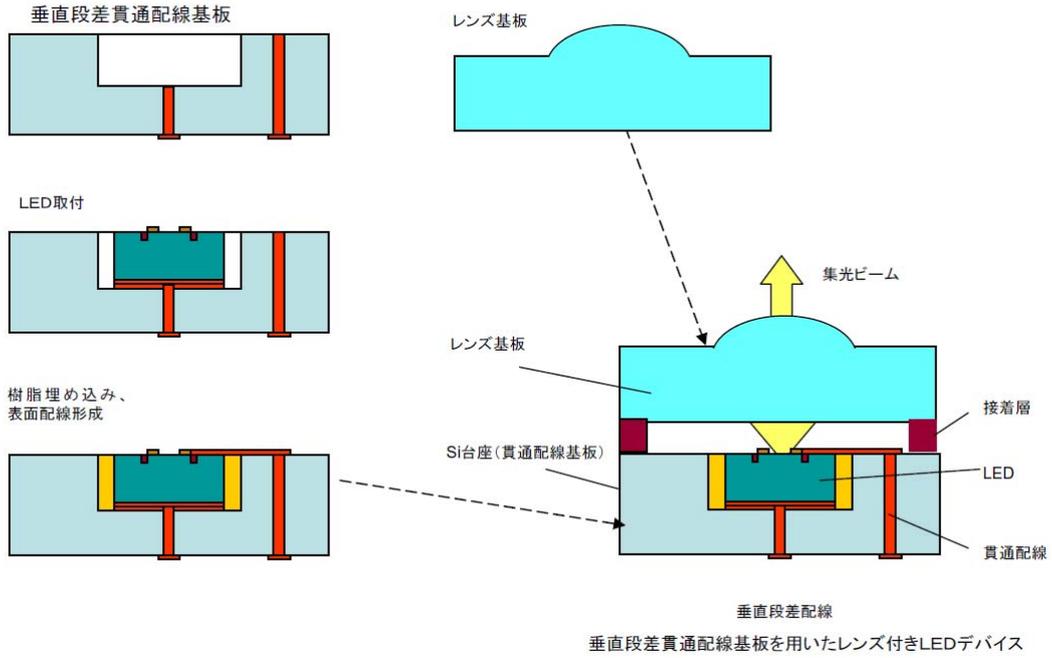


図60 垂直段差貫通配線基板を用いたレンズ付きLEDデバイス製造プロセス(部分)

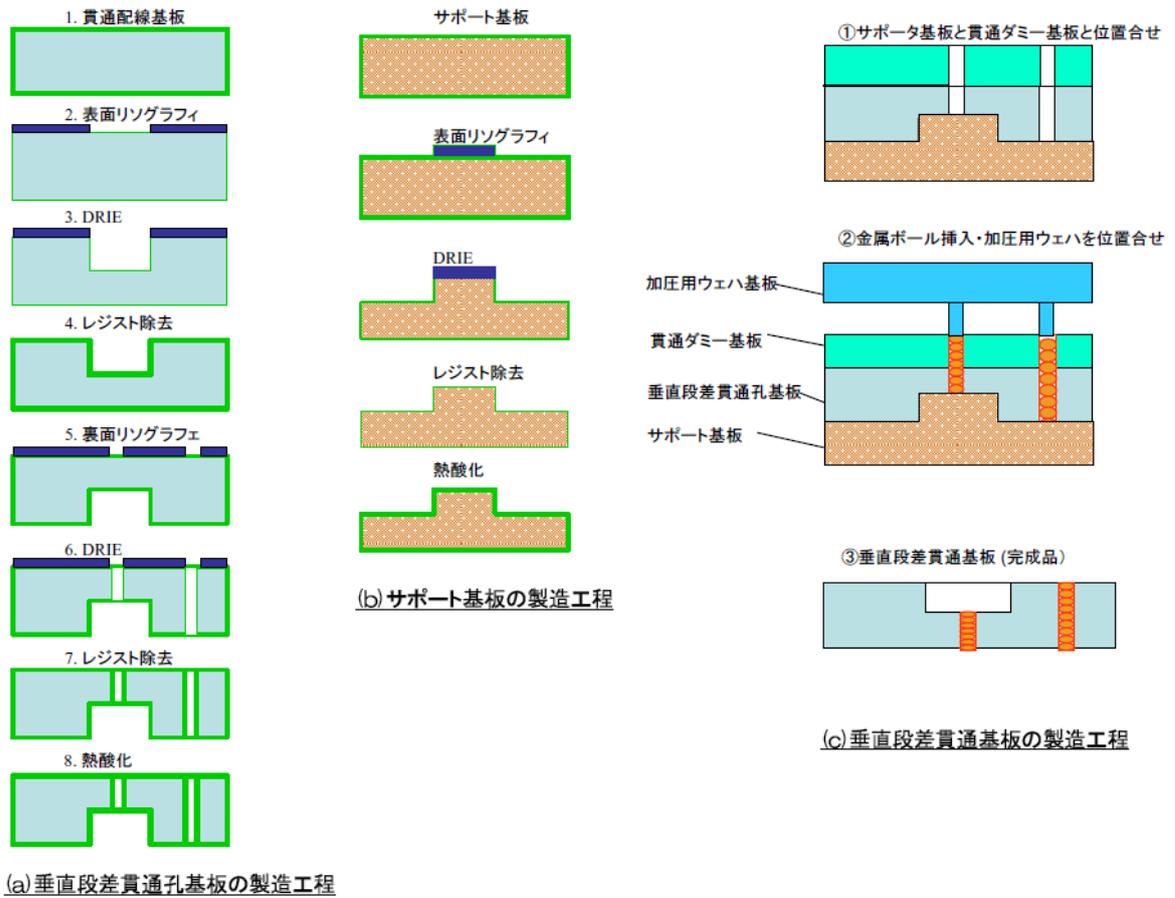


図61 垂直段差貫通基板の製造プロセス(全体)

第3章 全体総括

MEMS 用貫通配線基板の製造技術の研究開発を行い、以下のような結果が得られた。

3-1 セラミック基板への微細加工

- ・アルミナ基板への微細穿孔加工では、厚さ $500\mu\text{m}$ のアルミナ基板に孔径 $200\mu\text{m}$ の貫通孔を再現性よく形成する条件を確立し、1本のドリルで目標とする加工可能孔数 1000 個以上、加工時間 30 秒以下/孔を達成した。
- ・厚さ $300\mu\text{m}$ のアルミナ基板への孔径 $100\mu\text{m}$ の微細穿孔加工条件では、切り屑の目詰まり発生によりステップフィード量を $5\mu\text{m}$ 以下にする必要があることがわかった。1本のドリルで加工可能孔数約 200 個、加工時間 500 秒/孔であり、目標を達成することができなかった。
- ・サファイア単結晶基板への微細穿孔加工では、厚さ $300\mu\text{m}$ のサファイア単結晶基板に孔径 $100\mu\text{m}$ の貫通孔を加工する技術を開発した。1本のドリルで加工可能孔数 50 個、チップング大きさ約 $18\mu\text{m}$ 、加工時間 600 秒/孔を達成した。
- ・アルミナ基板とサファイア単結晶基板の孔径 $100\mu\text{m}$ の微細穿孔加工において、目標を達成するためには、工具メーカーと共同でチップングを抑制するための工具の開発、加工時間短縮のための加工条件の再検討、加工時間短縮のための加工プログラムの検討を行う必要がある。

3-2 貫通孔への金属配線用装置の開発

- ・金属ボール挿入実験装置の改造では、金属ボールの搬出、回収、及び実体顕微鏡観察の3つの機構を設計、製作して、目標通りの機能を確認した。
- ・この実験装置を貫通配線基板の製作に適用し、この工程の作業時間は約 10 分になり、従来に比べ約 $1/3$ の改善効果がえられた。
- ・加熱・加圧実験装置改造によりウェハホルダーの搬入出機構を新設し、安全、確実に作業ができ、作業時間の短縮にも貢献した。
- ・加熱・加圧実験装置の改造では、作業時間の短縮を目的に装置の設計、製作を行い、全体で約 20% の時間短縮が図れた。加圧制御部の自動設定で本作業の再現性が向上する効果を確認した。
- ・位置合せ機能付きマニピュレータの改造により、6インチウェハ全面の観察が可能になり、画像検査装置として品質管理の検査に使用できるようになった。ウェハ接合評価装置の導入で Si 位置合せの精密画像観察に、6インチ全面のマクロな赤外線画像が取得でき Si 貫通孔基板製造の異物検査に使用できるようになった。

3-3 金属配線の形成技術の開発

- ・Si 加圧用ウェハの製作において、6インチウェハの面内分布として、加圧円柱の高さ $200\pm 20\mu\text{m}$ 以内、円柱直径 $\Phi 70\mu\text{m}\pm 3\mu\text{m}$ 以内が得られ、高精度の部品が製作できていることが分かった。
- ・Si 貫通孔基板の製作において、 $200\mu\text{m}$ 厚6インチウェハの面内分布として、貫通孔の表面及び裏面直径 $\Phi 80\pm 3\mu\text{m}$ 以内が得られ、高精度の部品が製作できていることが分かった。5mm口チップの良品歩留まりは90%以上が得られていることが分かった。

- ・本開発の方式で金属ボールの溶融・加圧の形成条件を最適化することで気密性のよい貫通孔配線が実現できる見通しが得られた。
- ・ダミー基板側に溶融金属が移動して、加圧用ウェハの隙間に入り込んで加圧用ウェハの取り外しを出来なくしていることが明らかになり、溶融金属が隙間に入り込まない構造を、ダミー基板および加圧用基板の形状と寸法で最適化してゆくことで解決できる見通しが得られた。

3-4 貫通配線基板の利用技術の検討

- ・本開発の貫通配線基板技術と傾斜段差をSiの異方性エッチングで加工し、スプレー塗布レジストプロセスで段差間の配線層を形成することで、レンズ付きLEDデバイスが実現できる見通しを得た。

貫通配線基板の製造技術に残された課題を以下にまとめて示す。

- ・貫通配線基板で使用する製造装置の基本形は今回の改造装置によって仕上がったが、生産用装置として課題が残っている。金属ボール挿入装置では、金属ボールの回収にボール残りがあること、加熱・加圧装置では、処理時間をさらに短縮化することである。これらについて実験を継続して見通しを得る予定である。
- ・貫通配線基板の製作プロセスでは、金属ボールの溶融・加圧プロセス及と加圧用ウェハの取外しに関して最適条件を見つける課題が残った。これらについて実験を継続して見通しを得る予定である。
- ・貫通配線基板の表面・裏面に配線パターンを形成する工程で、貫通部から電極を取出す技術開発に課題が残った。貫通孔の段差をなくす製造技術開発など、実験を継続して見通しを得る予定である。

以上の課題を検討し、今後の事業展開を以下のように進める予定である。

- ・貫通配線基板を利用したウェハレベルパッケージング技術開発の検討を光通信事業メーカー等と行う。
- ・貫通基板用部品の低コスト化の検討を行う。
- ・貫通配線基板の低コスト化の検討を継続して行う。
- ・製造時間の短縮化のためにウェハホルダー、ジグ類を見直して自動化沿った検討を行う。
- ・市場動向に注目し、生産用装置の検討及び基本構想設計を行なう。

この印刷物（リサイクル適性A）は、印刷用紙などの
紙へのリサイクルに適した資材を使用しております。

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。