

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「三次元マイクロ構造加工用金型およびプレス技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

委託者 関東経済産業局
委託先 財団法人日立地区産業支援センター

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
1.1.1 研究開発の背景	1
1.1.2 研究目的	2
1.1.3 研究目標	2
1.2 研究体制	5
1.2.1 研究組織及び管理体制	5
1.3 成果概要	7
1.3.1 3DM 加工用プレス金型の開発	7
1.3.2 3DM 加工用金属材料の選定	7
1.3.3 3DM プレス加工技術の確立	7
1.3.4 3DM 加工品へのPR 電気銀めっき技術の確立	8
1.3.5 3DM 加工品の試作と評価	8
1.3.6 量産性評価	8
1.4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	
2.1 3DM 加工用プレス金型の開発	9
2.1.1 金型材料の選定	9
2.1.2 精密微細加工法の開発	9
2.1.3 三次元マイクロ構造加工（3DM 加工）法の開発	10
2.1.4 3DM 加工用表面コーティング材の選定	11
2.2 3DM 加工用金属材料の選定	12
2.2.1 銅合金材料の選定	12
2.2.2 アルミニウム材料の選定	13
2.3 3DM プレス加工技術の確立	14
2.3.1 プレスマシンの選定	14
2.3.2 プレス加工条件の最適化	15
2.4 3DM 加工品へのPR 電気銀めっき技術の確立	16
2.4.1 PR めっき法の開発	16
2.4.2 電気銀めっき液組成の最適化	17
2.5 3DM 加工品の試作と評価	17
2.5.1 リードフレームの試作	18
2.5.2 リチウムイオン電池キャップの試作	19
2.5.3 3DM 加工精度の測定	20
2.5.4 界面接着強度の測定	21
2.6 量産性評価	23
2.6.1 リチウムイオン電池キャップの量産性評価	23
最終章 全体総括	24

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1.1.1 研究開発の背景

1) 情報家電に関する事項

現在情報家電業界においては、携帯機器、特に小型 PC、携帯電話、デジタルカメラ、ビデオカメラなどの小型軽量化のために、半導体パッケージの小型高密度化が急速に進んでいる。また最近では、メモリーやロジック、高周波トランジスタなどの半導体パッケージのほか、MEMS や、これらを集積収納した小型高機能ハイブリッドモジュールも開発されている。このような状況のなかで、最近これら高機能デバイスを正常に機能させ、また外部環境から保護する半導体パッケージやモジュールの信頼性低下の問題が急浮上している。それは、半導体パッケージを小型化した場合、半導体デバイスや MEMS を封止する樹脂と基板との接着面積が少なくなり、耐湿性や耐熱性の低下を招くためである。現在も基板として多く用いられているのは金属製（主に銅合金）のプレス加工リードフレームであるが、これらには通常、ワイヤボンディングのための金や銀の貴金属めっきが施される。貴金属は樹脂との密着性が弱い欠点があることから、封止樹脂との接着部にはめっきを施さない工夫（部分めっき）がなされている。しかしながら小型半導体パッケージでは、部分めっきのみ出しやめっき寸法変動によって、封止樹脂との接着性の低下が避けられない問題が発生している。また貴金属めっきがなされていない部分であっても、接着面積の低下による信頼性の低下が免れない状況となっている。

また最近では、環境問題から、ハイパワーLED の一般照明用途への実用化研究開発が加速している。このハイパワーLED では高輝度化のためにリードフレームの全面に反射率の高い銀めっきが施される。この場合には、封止樹脂との界面も銀めっきとなり信頼性の低下がより大きな問題となっている。

2) 自動車に関する事項

現在自動車業界においては、国策としての CO2 削減を目指したエコ社会の実現から、電気自動車（EV）やハイブリッド自動車（HEV）の普及を加速させている。これら EV や HEV には小型軽量高出力のリチウムイオン二次電池モジュールが用いられる。これは、EV, HEV 自動車の軽量化と長距離走行を可能にするためである。このことによって HEV ではエンジンのガソリン使用量を削減でき、より環境対応性能の高い自動車としてエコ社会の実現に貢献できる。また EV においても家庭用電源からの高速充電（プラグイン）が可能な、高性能リチウムイオン電池の開発競争が全世界規模で行われている。この小型軽量高出力のリチウムイオン電池には、アルミニウムのプレス深絞り加工による電池ケースが用いられる。この電池ケースは、ケース本体（負極側）とケースキャップ（正極端子）とからなっている。このケース本体とケースキャップとは電気絶縁性の接着剤によって接着されている。リチウムイオン電池は高出力化に伴い発熱量も増大し冷却が問題となっている。発熱により電池ケースに高い内部圧力が加わり、接着強度の高い接着剤の選定が課題となっている。また電気自動車のリチウムイオン電池は常時、走行振動に耐えなければならないが、電池寿命は現在 10 年間の耐久性を保証しなければならない。このことから、自動車用のリチウムイオン電池は、機密性の高い電池ケースの開発が課題となっている。

1.1.2 研究目的

三次元マイクロ構造（以下3DM）加工精密微細金型と高速プレス加工技術によって、金属表面へ精密な三次元マイクロ構造加工を施す革新的技術を開発する。この技術完成により金属界面と樹脂材料との接着強度が高まり、LEDや高周波トランジスタなどの半導体パッケージの一層の小型化が可能になる。また高出力のリチウムイオン電池においては、電池ケースと絶縁材料の接着強度が向上し、電池の高い安全性を確保できる。

1.1.3 研究目標

本計画は、情報家電および自動車に関する複雑三次元加工部品を対象としている。

2) 情報家電に関する事項

・川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

ア. 精密化、微細化

イ. 軽量化・小型化・静音化・高放熱化

1) 自動車に関する事項

・川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

オ. 軽量化

以下に研究の高度化目標とその目標値を記述する。

1) 高度化目標

3DM加工用プレス金型の開発には、パンチ形状の設計、パンチ材料の選定、精密微細溝加工方法、順送プレス金型への組み込み設計、および3DM加工金型製作について行う。精密微細溝形成の機械加工による限界の見極めをまず行い金型設計に着手する。加工限界の見極めは、切削加工、エンドミル法などについて行う。加工を検討する溝形状を図1に示す。

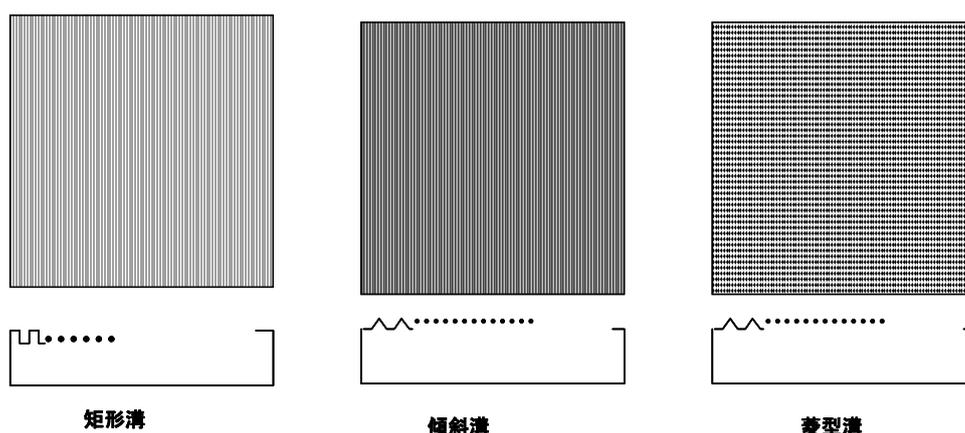


図1 3DM加工のための精密微細溝加工形状

パンチの材料には、超微粒子超硬、および平均粒子径 $10\mu\text{m}$ の超超微粒子超硬を検討する。精密微細溝加工は、例えば最小設定単位 10nm の精密非球面微細加工装置を用いて行う。この装置を用いると、最小溝幅 $3\mu\text{m}$ 、深さ $3\mu\text{m}$ 、溝ピッチ $10\mu\text{m}$ 程度までの精密微細加工を行うことができる。またエンドミル加工の場合、平面に対して二次曲線の溝加工が可能である。エンドミルツールにはダイヤモンド

を用いる。ツールの選定によって精密非球面微細加工装置に近い最小溝幅、深さ、溝ピッチが得られる。超硬材料への精密微細溝加工は焼き入れ前に行う。切削加工における切削痕が残らない切削工具の選定もあわせて行う。

また精密微細溝上への3DM加工は、1~3 μm 程度凹凸をダイヤモンド砥粒研削加工またはブラスト加工によって形成する。また、3DM加工性にすぐれた、金型部品（パンチ、ダイ）の表面コーティング材料の選定を行う。一般的に鍛造加工にはTiCNなどのコーティング材が用いられているが、3DM加工では鍛造磨耗のほかに、精密な転写精度、高速プレス稼動時における金型への焼き付きのないことが重要である。このため、3DM転写性能、離型性、耐久性に優れた表面コーティング材を新たに選定する。図2に3DM加工用金型パンチ形状と順送プレス工法を、図3に3DM加工技術を応用したリードフレーム半導体パッケージを示す。半導体パッケージは現在小型化の一途を辿っており、高周波バイポーラトランジスタでは、外部リード端子寸法も含めて、1.2mm口程度まで小型化が進んでいる。またLEDパッケージでは、照明用途も実装パッケージが主流になりつつあり、3.5mm口の小型パッケージが開発されている。これらの場合、リードフレームの先端からパッケージの樹脂端面までの距離は、0.3~0.5mm程度の近距離となっている。従って外部環境からの透湿パスは非常に短くなる。このためリードフレームの表面を3DM加工する意義は小型パッケージ程高まっている。図3では、リードフレームの表面のみを3DM加工した図を示しているが、リードフレームの裏面もダイを加工することによって3DM加工が可能である。リードフレームの側面も同様に、パンチ側面の加工によって3DM加工をすることができる。したがって、リードフレームの樹脂封止部分全周の3DM加工が可能となるので、封止樹脂との密着性が向上し、パッケージの耐湿性を大きく改善させることができる。

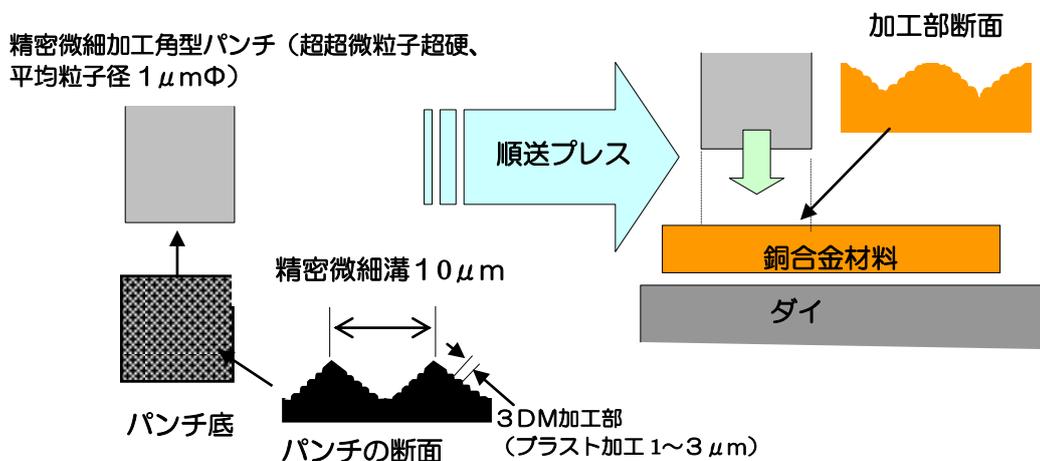


図2 3DM加工用金型パンチ形状と順送プレス工法

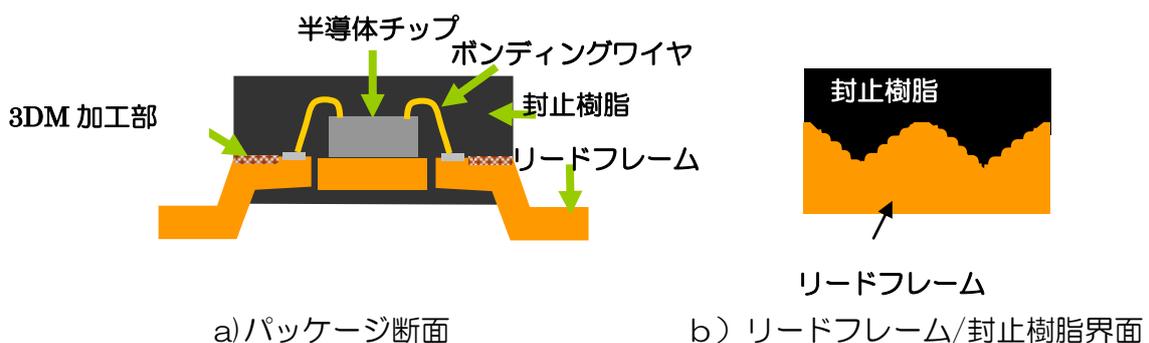


図3 3DM加工リードフレームを用いた半導体パッケージの構造

リチウムイオン電池へ応用した場合のリチウムイオン電池の構造を図4に示す。

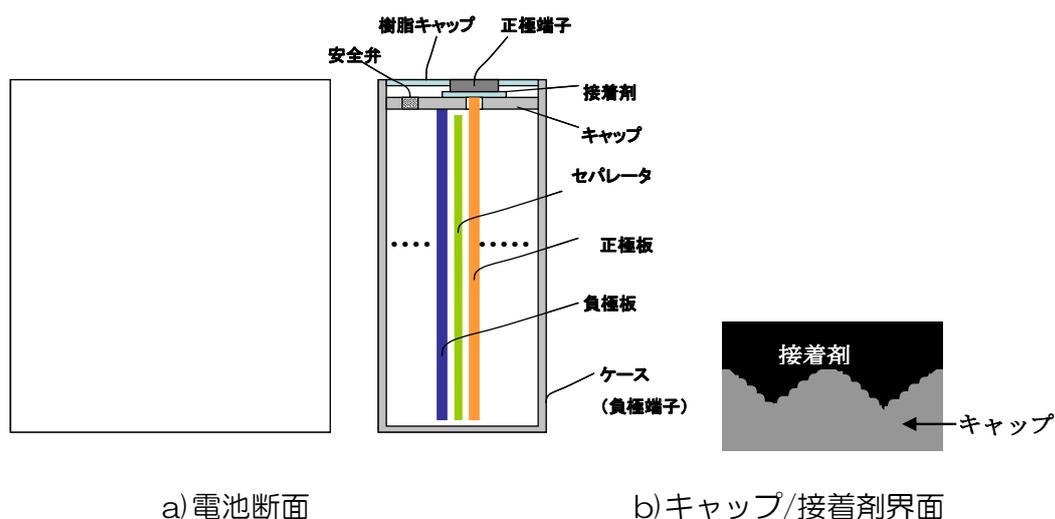


図4 3DM加工を応用したリチウムイオン電池の構造

2) 研究開発項目と目標値

【1】3DM加工用プレス金型の開発

精密微細加工溝幅；MIN.10 μ m、3DM加工；3 μ m以下
を目標とする。

【2】3DM加工用金属材料の選定

精密微細加工溝幅；MIN.10 μ m、3DM加工；3 μ m以下の転写精度の
得られる銅合金およびアルミニウム材料の選定

【3】3DM加工品へのPR(正逆極性反転)電気銀めっき技術の確立

3DM加工転写溝幅変動； $\pm 10\%$ 以下 を目標とする。

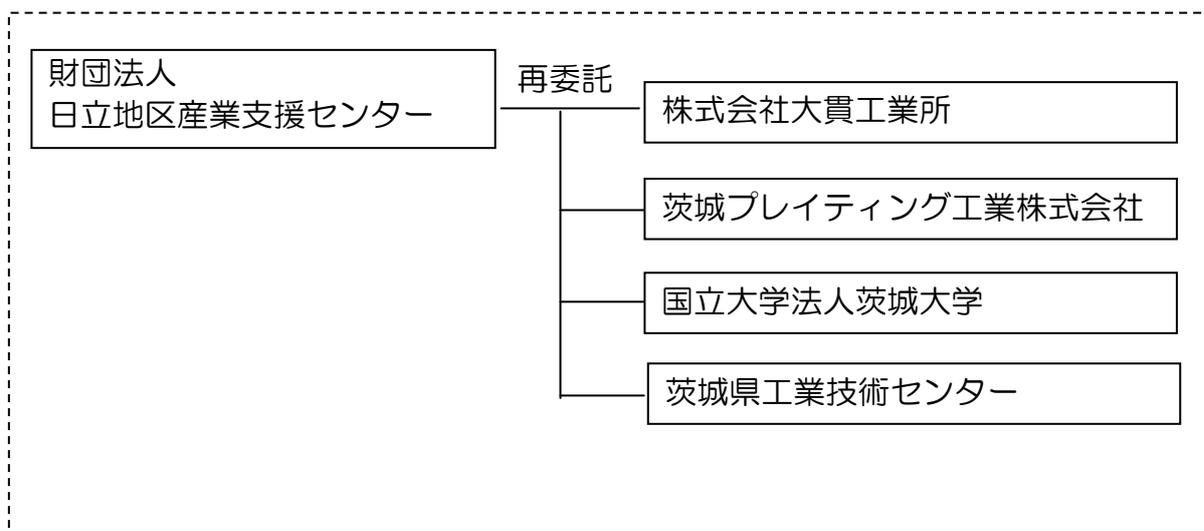
【4】3DM加工品の試作と評価

リードフレームおよびリチウムイオン電池の具体的な顧客納入製品につい
ての試作および信頼性評価を行う。

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）



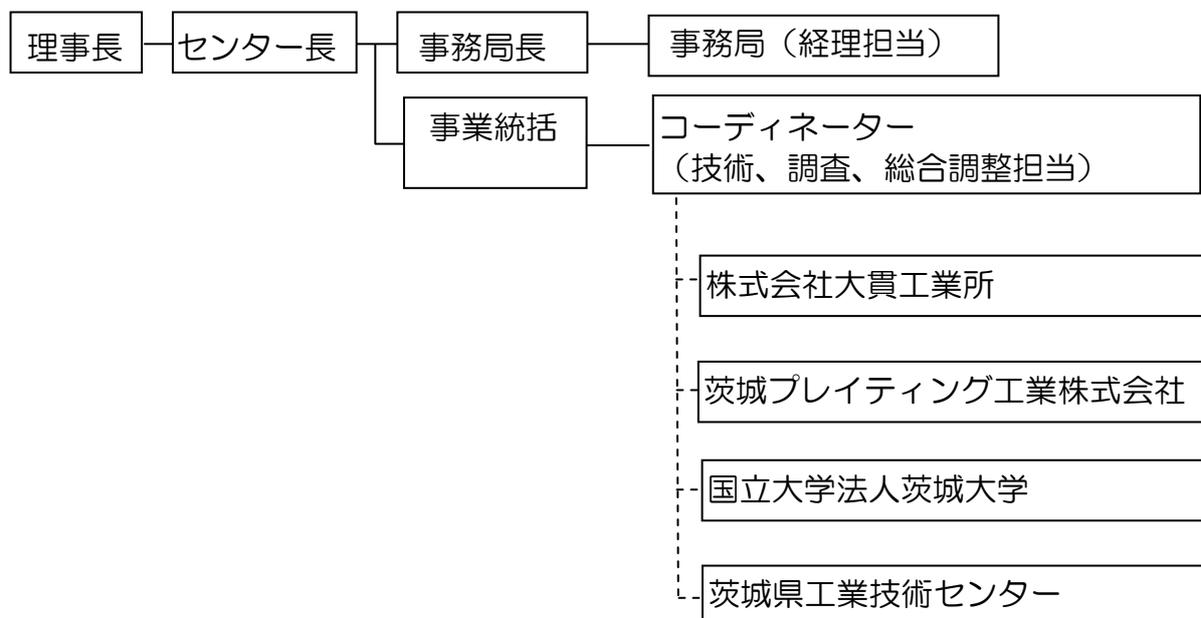
総括研究代表者（PL）
株式会社大貫工業所
代表取締役社長 大貫 啓人

副総括研究代表者（SL）
株式会社大貫工業所
技術顧問 御田 護

2) 管理体制

a) 事業管理機関

[財団法人日立地区産業支援センター]



3) 管理員及び研究員

a) 管理員

【事業管理機関】 財団法人日立地区産業支援センター

氏名	所属・役職	備考
小山 修 中山 桂司	事業統括 コーディネーター	

b) 研究員 【再委託先】

株式会社大貫工業所

氏名	所属・役職	備考
大貫 啓人	代表取締役社長	PL
大貫 英仁	常務取締役 設計部 部長	
林田 勉	製造部 部長	H22年度
和田 正勝	設計部員	
上嶋 宏樹	設計部員	
増田 剛	設計部員	SL
御田 護	技術顧問	

茨城プレイング工業株式会社

氏名	所属・役職	備考
大澤 健一 石川 強志	取締役 工場長 製造部 技術課 課長	

国立大学法人茨城大学

氏名	所属・役職	備考
西野 創一郎	大学院理工学研究科 准教授	

茨城県工業技術センター

氏名	所属・役職	備考
早乙女 秀丸	先端材料部門 技師	

4) 協力者(アドバイザー)

氏名	所属・役職	備考
深津 克明	日立オートモティブシステムズ(株) PT&電子統括本部電子設計本部 センサ設計部 チーフ・プロジェクトリーダー	H22年度
五十嵐 信弥	日立オートモティブシステムズ(株) 電子統括本部電子設計本部 センサ設計部 部長	H23年度
中嶋 勝也	茨城県商工労働部 産業技術課 課長	
濱中 豊	(社)日本金属プレス工業協会 専務理事	

1.3 成果概要

平成20年度～22年度の研究成果概要を各々のテーマ毎に以下に示す。

1.3.1 3DM加工用プレス金型の開発(実施：(株)大貫工業所、茨城大学、茨城県工業技術センター)

1) 金型材料の選定

SKD11（高炭素工具鋼）、ダイス鋼、超硬の3種のパンチの微細構造加工性を検証した。マシニングセンターを用いた加工性の検討結果、最終的に3DM加工用の金型材料として、SKD11を選定した。

2) 精密微細加工法の開発

主にマシニングセンターによる精密微細溝加工技術を開発した。切削工具にはCBNツールを用いた。この加工法による微細溝加工パンチとダイを製作し、プレス金型に組み込んで高精度の精密微細加工金型を製作した。

3) 三次元マイクロ構造加工（3DM加工）法の開発

主にブラスト加工法による、超硬およびSKD11製パンチ、ダイの3DM加工実験を行った。SiCおよびアルミナ粒子によるブラスト加工実験結果、SiCの粒子径30 μ m相当が最も超硬およびダイ表面のブラスト加工性に優れるとがわかった。

4) 3DM加工用表面コーティング材の選定

DLCコーティング3DM加工パンチによる、クランクプレスを用いた銅（C1100）およびアルミニウム（A1050）の3DM加工実験を行った。実験結果、DLCコーティングパンチによる3DM加工が可能であることが分かったが、実際のリチウムイオン電池キャップ（アルミニウム）などの量産における、パンチ、ダイの耐久性最終評価が今後の課題となった。

1.3.2 3DM加工用金属材料の選定(実施：(株)大貫工業所、茨城大学、茨城県工業技術センター)

リチウムイオン電池の集電電極に用いられる、銅（C1100）およびアルミニウム（A1050）の3DM加工性の評価を行った。クランクプレスによるプレス加工実験の結果、銅、アルミニウム共に3DM加工が可能であることが分かった。

1.3.3 3DMプレス加工技術の確立(実施：(株)大貫工業所)

80トンクランクプレスによる3DM加工条件の最適化を行った。その結果、通常のクランクプレスでプレス速度50SPM(ショット/分)における3DM加工が可能であることを確認した。またサーボプレスによる3DM加工実験により、最高プレス速度151SPMでの3DM加工が可能であることを実証した。

1.3.4 3DM加工品へのPR電気銀めっき技術の確立(実施：(株)大貫工業所、茨城ブレイディング工業(株)、茨城県工業技術センター)
PR電源による3DM加工面への電気銀めっき膜形成実験結果、PR電源は3DM加工金属表面の微細な凹凸の再現性に優れていることが明らかにした。3DM加工面へのPR電気めっき法の応用によって、樹脂封止や樹脂成形における、金属と樹脂のアンカー効果（投錨効果）による密着性の向上が期待できる。

1.3.5 3DM加工品の試作と評価(実施：(株)大貫工業所、茨城大学、茨城県工業技術センター)
3DM加工技術を応用した、高輝度ハイパワーLED用リードフレームおよびリチウムイオン電池キャップの試作を行った。ガスリーク試験によって、3DM加工の金属表面は、銅（C1100）およびアルミニウム（A1050）共に3DM加工なしの金属表面と比較して、樹脂との密着性に優れることを検証した。

1.3.6 量産性評価(実施：(株)大貫工業所)
DLCコーティング3DM加工パンチおよびダイ（SKD11製）を組み込んだ量産性評価用金型を試作した。DLCコーティングパンチ、ダイによる、銅（C1100）およびアルミニウム（A1050）の3DM加工がクランクプレスおよびサーボプレスにより可能であることを確認したが、最終的な顧客要求仕様に基づくリチウムイオン電池キャップおよび電極の量産性評価が今後の課題として残った。

1.4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関

〒316-0032

茨城県日立市西成沢町2丁目20番1号

財団法人日立地区産業支援センター 担当 コーディネーター 中山 桂司

連絡先 TEL. 0294-25-6121

FAX. 0294-25-6125

中核研究機関

〒316-0025

茨城県日立市森山町5丁目10番8号

株式会社大貫工業所 担当 代表取締役社長 大貫 啓人

連絡先 TEL. 0294-53-3821

FAX. 0294-53-6839

第2章 本論

2.1 3DM加工用プレス金型の開発((株)大貫工業所、茨城大学、茨城県工業技術センター)

2.1.1 金型材料の選定

リードフレーム用銅合金やアルミニウムなどの金属材料への転写性、離型性の観点から傾斜溝として、各種超硬材料（超微粒子、超超微粒子など）の切削溝加工性を検証した。3DM加工（切削溝加工表面への微細な凹凸加工）に適した材料の選定も合わせて行った。

3DM加工は、プレス加工によるマイクロ構造加工金型のパターンを銅、アルミニウムなどの金属材料に直接常温で転写する技術開発であり、金型材料の要求特性として下表に示す項目を掲げた。

表 2.1.1-1 3DM加工に必要な金型材料の要求特性

要求特性	具体的性能
1. 切削加工性	サブミクロンの仕上がり加工精度が可能な材料
2. 結晶組織	結晶粒度 $10\mu\text{m}$ >
3. 硬さ	HRC 50 <
4. 靱性	圧縮降伏応力 $2,000\text{N}/\text{mm}^2$ <
5. コーティング性	コーティング下地処理との密着性
6. 再生可能	コーティング再生性

具体的にSKD11（高炭素工具鋼）、ダイス鋼、超硬の3種についてパンチを製作して、金型加工性（微細溝加工、3DM加工）の比較検証を行った結果SKD11が最もマシニングセンター加工性に優れる結果が得られた。

2.1.2 精密微細加工法の開発

SKD11を用いてマシニングセンターによるパンチを製作した。最終的に精密微細加工法として確立した条件を下表に示す。

表 2.1.2-1 3DM加工パンチの加工条件

加工条件	内容	備考
1. 加工機	マシニングセンター	安田工業(株)製
2. マシニング回転速度	$20,000\text{RPM}$	
3. ツール送り速度	$100\text{mm}/\text{min}$	
4. 溝深さ	$60\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$	連続直線溝
5. 溝ピッチ	溝深さ $60\mu\text{m}$; ピッチ $250\mu\text{m}$ 、 溝深さ $100\mu\text{m}$; ピッチ $300\mu\text{m}$	

SKD11による溝深さ $60\mu\text{m}$ 、溝ピッチ $250\mu\text{m}$ の加工面のレーザー顕微鏡像を下図に示す。。

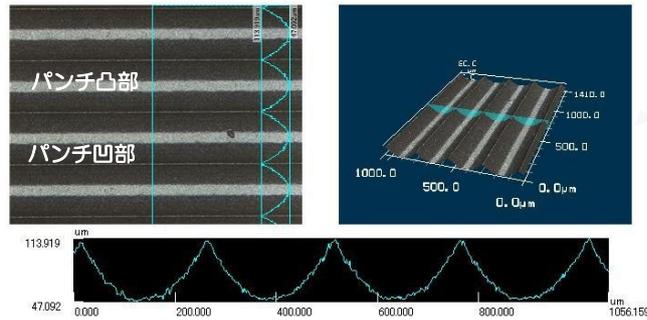


図 2.1.2-1 レーザ顕微鏡による微細溝加工部の観察像
(パンチ材料；SKD11、溝深さ；60 μm 、溝ピッチ；250 μm 、ブラスト加工後)

2.1.3 三次元マイクロ構造加工（3DM加工）法の開発

1) ブラスト加工法の検討

精密微細溝加工を施した面にさらに3DM加工（微細加工）を実施する方法として、ブラスト法を検討した。実験結果、超硬、SKD11に対して加工が可能な粒子はSiCおよびアルミナ粒子であることが分かり、SiCおよびアルミナ粒子によるブラスト加工条件の最適化を行った。下表にSiCおよびアルミナ粒子による超硬材料のブラスト処理実験結果を示す。実験結果、超硬のブラスト加工にはSiC粒子径30 μm 相当が適している。

表 2.1.3-1 ブラスト処理法の検討結果（超硬材料の例）

No	条件			ブラスト加工面の平均粗さ Ra (μm)
	砥粒（平均粒子径/ μm)	ノズル噴射圧力 (MPa)	ノズル送り速度 (mm/min)	
1	SiC(28)	0.3	100	0.82
2	アルミナ(20)	0.4	100	0.25
3	アルミナ(20)	0.4	50	0.27
4	SiC(13)	0.2	100	0.19
5	SiC(13)	0.4	100	0.20

下図にSiC粒子径28 μm による超硬のブラスト加工面の光学顕微鏡写真を示す。画像からは粒子径は2~3 μm 程度となっている。

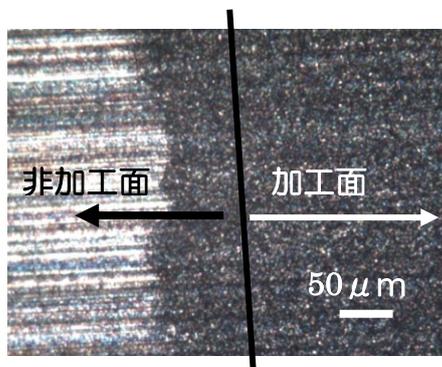


図 2.1.3-1 SiC(28 μm 粒子径)による超硬のブラスト加工面
(光学顕微鏡写真)

2.1.4 3DM 加工用表面コーティング材の選定

1) 耐凝着性 DLC コーティング膜の選定

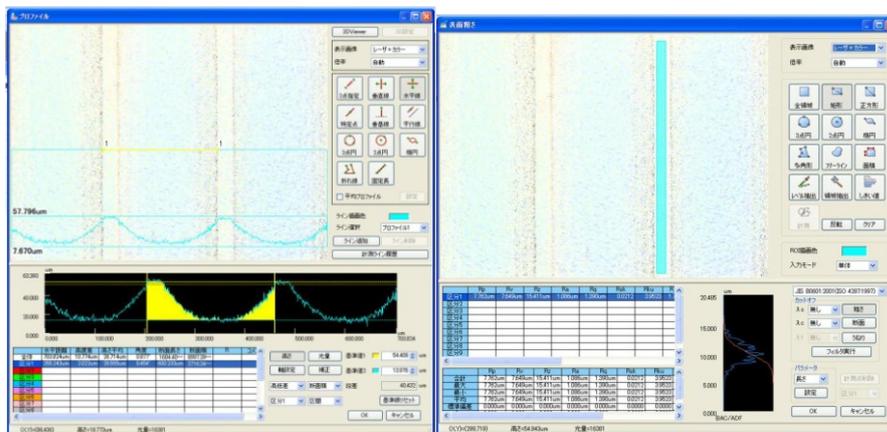
マイクロ構造加工においては、パンチの微細パターンを正確に転写するにはコーティング膜の硬度、平滑性、摩擦係数などが重要と考えられる。この観点から DLC が最も適していると考えられるが、実際には微細加工パンチ表面へのコーティング膜の形成性、および膜の寿命も重要であるので、DLC コーティング膜を形成したパンチを製作し実際の評価を行った。

処理メーカーの異なる 3 種類の DLC 膜について、アルミニウム板鍛造加工による凝着性の評価を行った。その結果、C 社 DLC コーティング膜が最も優れた耐凝着性を示した。このため、パンチの溝形成およびブラスト処理加工した面に、C 社 DLC コーティング膜を処理形成して金属材料への 3DM 加工実験を行った。各社 DLC 膜の仕様を下表に示す。

表 2.1.4-1 耐凝着性評価に供した DLC コーティング膜

種類	膜硬さ (HV)	平均膜厚 (um)	耐熱温度 (°C)	摩擦係数
A 社	3,000~5,000	1 ± 0.2	400	-
B 社	-	2~3	-	-
C 社	>3,000	0.1~0.2	500	0.15

C 社 DLC コーティング膜形成後の 3DM 加工用パンチ (SKS 1 1) のレーザ顕微鏡による観察結果を下図に示す。



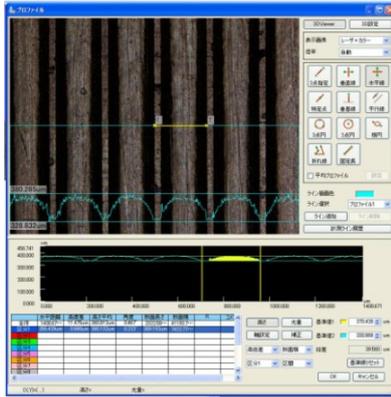
(a) 溝形状

(b) 粗さ

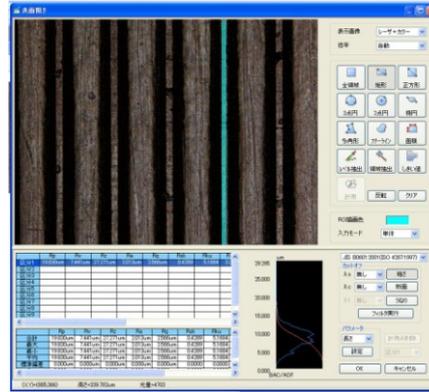
図 2.1.4-1 C 社 DLC コーティング 3DM 加工用パンチ (SKD 11)
(溝ピッチ: 258 μm、溝深さ: 53 μm、平均粗さ Ra1.1 μm)

2) DLC コーティング処理パンチによる 3DM 加工実験結果

DLC コーティングパンチを用い、純銅およびアルミニウムに対して 3DM 加工を行い加工性を評価した。3DM 加工には 80 トンクランクプレス (50 SPM) を用いた。DLC 加工面のレーザ顕微鏡による観察結果を下図に示す。

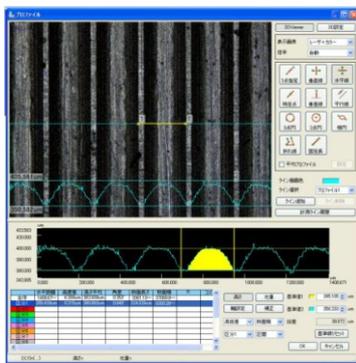


(a) 溝形状

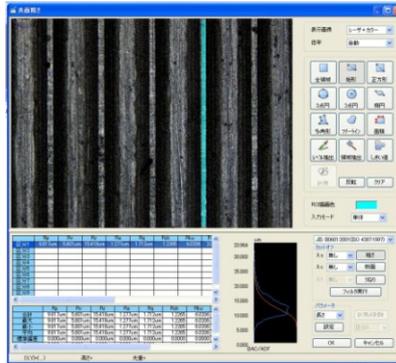


(b) 粗さ

図 2.1.4-2 DLC コーティングパンチによる3DM 加工面のレーザ顕微鏡像
(純銅/C1100R-O、溝ピッチ； $255\ \mu\text{m}$ 、溝深さ； $52\ \mu\text{m}$)



(a) 溝形状



(b) 粗さ

図 2.1.4-3 DLC コーティングパンチによる3DM 加工面のレーザ顕微鏡観察結果
(アルミニウム/A3003-H26、溝ピッチ； $255\ \mu\text{m}$ 、溝深さ； $55\ \mu\text{m}$)

純銅、アルミニウム共に、溝ピッチおよび溝深さは DLC コーティングパンチと大きな差はないが、表面粗さはパンチと 3DM 加工品は若干異なっている。DLC コーティングパンチの表面粗さ (R_a) は $1.1\ \mu\text{m}$ であるが、純銅の 3DM 加工部は $2.0\ \mu\text{m}$ 、アルミニウムの 3DM 加工部は $1.3\ \mu\text{m}$ の表面粗さ (R_a) となっている。アルミニウムはパンチ形状に近いが、純銅の表面粗さはパンチと比較して大きい結果となった。この原因は金属材料の物性による違いか、または 3DM 加工条件によるかは今後の課題である。

2.2 3DM 加工用金属材料の選定((株)大貫工業所、茨城大学、 茨城県工業技術センター)

2.2.1 銅材料の選定

半導体パッケージ用リードフレームなどの金属材料には、主に高導電率の銅合金が使用される。また LED 用パッケージは、LED ランプに用いられる特殊用途であるが、放熱が大きな課題となっているために、高放熱性の銅合金が使用されている。またリチウムイオン電池の集電電極材料には純銅が用いられる。下表に LED 用の代表的な銅合金とリチウムイオン電池用の純銅の機械的特性を示す。

表 2.2.1-1 3DM加工用被加工材料（銅合金材料）

材料名 (応用製品)	伸び (%)	引張り強度 (Mpa)	線膨張係数 (ppm)	成分 (mass%)
銅合金 EFTEC3-1/2H (古河電工リードフレーム用合金)	15<	216-294	17.3	Sn0.1-0.2/Cu
銅合金 ZC (C15150-1/2H) (三菱伸銅リードフレーム用合金)	6<	245-295	17.7	Zr0.015-0.03/Cu
純銅 (リチウムイオン電池用電極部 品) C1020-0材	-	-	-	Cu99.96

平均粗さ Ra 3 μm のブラスト加工パンチにより 3DM 加工を行った溝加工部のレーザー顕微鏡観察結果を下図に示す。

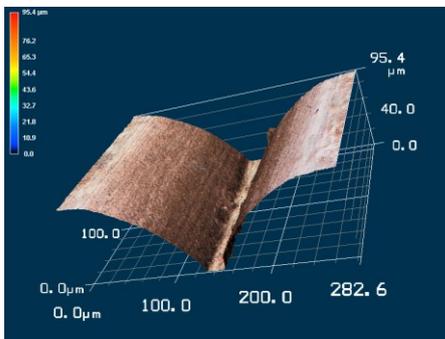


図 2.2.1-1 3DM 加工溝部のレーザー顕微鏡観察像
(材料；純銅 (C1100-O、1.0mm t)、3DM 加工パンチ；SKD11 ブラストあり、溝深さ 60 μm、溝ピッチ 250 μm)

レーザー顕微鏡による加工面の平均粗さ測定では、パンチの平均粗さ同様 3~4 μm であり、パンチの粗さがプレス加工により銅材料表面に再現されている。

2.2.2 アルミニウム材料の選定

アルミニウムは LED ランプのリフレクタのほか、リチウムイオン電池キャップや電極に用いられる。これらの用途のアルミニウム材料物性を下表に示す。

表 2.2.2-1 3DM加工用被加工材料（アルミニウム）

材料名 (応用製品)	伸び (%)	引張り強度 (N/mm ²)	線膨張係数 (ppm)	成分 (mass%)
A1050-O (LED 用リフレクタ、リチウムイオン電池キャップ)	25<	60<	17.3	Al99<
A3003-H26 (リチウムイオン電池用電極)	3<	165<	-	Al97

以下にアルミニウム A1050-O 材による 3DM 加工実験結果について述べる。ブラスト加工 SKD11 パンチによる溝加工部のレーザ顕微鏡による観察結果を下図に示す。

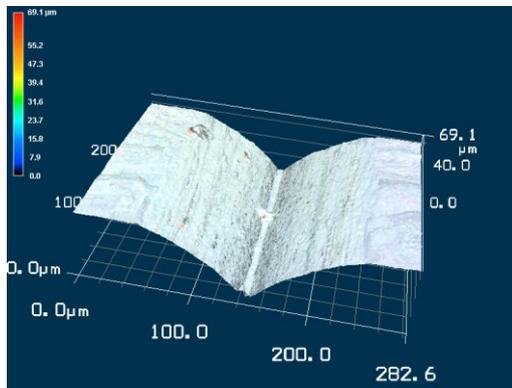


図 2.2.2-1 3DM 加工溝部の断面マイクロ組織観察結果（光学顕微鏡/断面拡大）
（材料；アルミニウム（A1050-O, 1.0mm t）3DM 加工パンチ（SKD11, プラストあり）；溝深さ60 μm 、溝ピッチ250 μm ）

アルミニウムも純銅同様ブラスト加工パンチのパターンが銅表面に転写されている。レーザ顕微鏡による加工面の平均粗さは、パンチの平均粗さ同様3~4 μm であった。

2.3 3DM プレス加工技術の確立

2.3.1 プレスマシンの選定

1) クランクプレスによる3DM加工実験結果

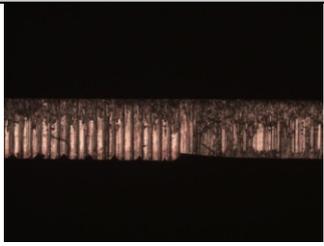
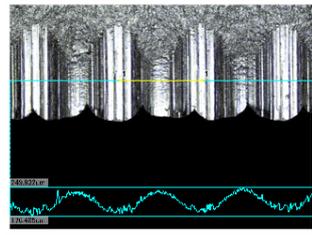
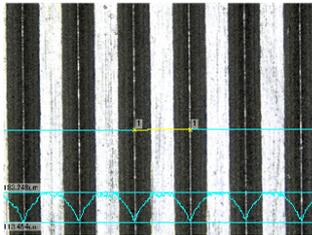
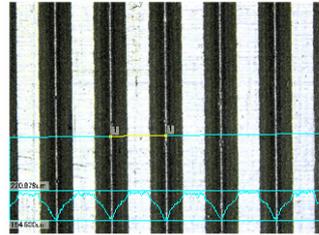
80トンクランクプレスによる3DMプレス加工条件を下表に示す。クランクプレスではプレス速度50SPMが最大であり、これ以上の速度では、3DM加工における溝深さの変動が大であった。

表 2.3.1-1 プレス加工実験条件

条件	内容	備考
1. プレスマシン	クランクプレス	耐荷重80トン、下死点精度（ $\pm 10\mu\text{m}$ ）
2. プレスオイル	揮発性オイル	
3. パンチ押し込み深さ（ μm ）	50、100	ストリップパからのパンチ高さ
4. プレス加工荷重（トン）	5	順送プレス金型全体のプレス加工荷重
5. プレス速度（SPM）	50	
6. 3DM 加工用パンチ	溝深さ；60（ピッチ250 μm ）、100 μm （ピッチ300 μm ）の2種類（パンチおよびダイの両方に溝加工）	材質；SKD11 ブラスト加工パンチ
7. 加工金属材料	銅材料；純銅 C1100-O アルミニウム材料；A1050-O, A3003P-H26など	厚さ；1mm

各種金属材料の3DM加工実験結果（SKD11パンチ溝深さ60 μm の場合）を下表に示す。

表 2.3.1-2 プレス加工実験結果
（SKD11パンチ溝深さ60 μm 、ピッチ250 μm ）

金属材料	レーザ顕微鏡観察結果		
	側面	表面（パンチ側）	裏面（ダイ側）
純銅（C1100-O）			
アルミニウム（A3003-H26材）			

金属材料	測定項目	表面（パンチ側）	裏面（ダイ側）
純銅 （C1100-O材）	溝ピッチ（ μm ）	249.5	250.48
	溝深さ（ μm ）	46.07	47.76
アルミニウム （A3003-H26材）	溝ピッチ（ μm ）	249.71	251.62
	溝深さ（ μm ）	58.49	56.40

同一クランクプレス加工条件において、アルミニウムの方が純銅と比較して、加工溝が深くなっている。これはアルミニウムがより瞬間的な常温塑性流動性に優れているためと考えられる。

2.3.2 プレス条件の最適化

クランクプレス（アイダ、80トン）を用いた場合、プレス速度は50SPMが限界であった。これはクランクプレスの下死点変動がより高い回転数で大きくなるため、パンチ形状の材料面への転写精度が低下するためと考えられる。

このため、サーボプレス（アイダエンジニアリング（株）製NC1-1500（D））を新たに導入して3DM加工実験を行った。下表に最適化した3DM加工条件を示す。プレス条件の検討結果、振り子モーショで、製品の狙い深さ0.05mmの設定において、3DM加工が可能な最高プレス速度151SPMが得られた。これは、初期の達成目標が100SPMに対して、生産に十分な加工速度である。

表 2.3.2-1 3DMプレス加工最適化条件

加工パラメータ	加工条件	備考
プレスモーション	振り子モーション	-
パンチ押し込み深さ (mm)	0.07	金型設定値
プレス速度 (SPM)	151	目標100
被加工材料	アルミニウム A105 0-材	電池キャップ用 1.2 t×6×32mm

2.4 3DM 加工品への PR 電気銀めっき技術の確立((株)大貴工業所、 茨城プ レイティング工業(株)、茨城県工業技術センター)

2.4.1 PRめっき法の開発

3DM 加工を行った金属材料（端子テストピース）にシアン化銀めっき浴による PR 電気銀めっきを行った。めっき後の表面をレーザ顕微鏡で観察し、PR 電気銀めっきによる表面形状の変化を調査した。下図にパンチによる加工面のめっき前後の観察結果を示す。

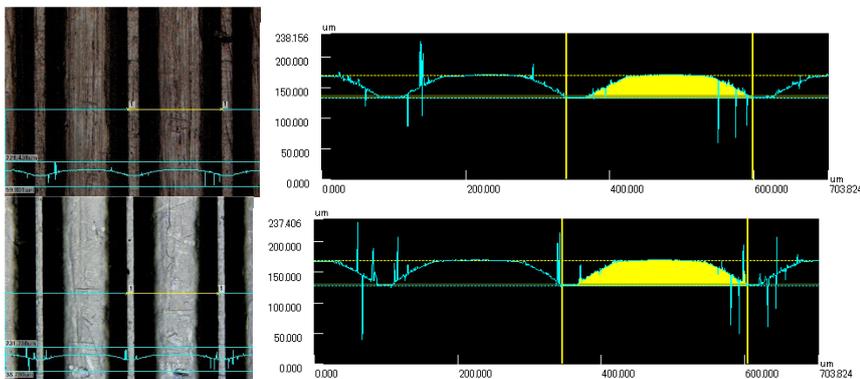


図 2.4.1-1 PR 電気銀めっき前後の3DM 加工部（パンチ側形状）
上/めっき前、下/めっき後、PR 電気銀めっき条件；正側 $2\text{A}/\text{dm}^2 \times 10\text{ms}$ 、逆側 $5\text{A}/\text{dm}^2 \times 0.5\text{ms}$ 、逆側休止時間；1ms

観察結果、溝ピッチはめっき前 $258.1\ \mu\text{m}$ 、めっき後 $258.1\ \mu\text{m}$ 、溝深さはめっき前/ $37.5\ \mu\text{m}$ 、めっき後/ $44.1\ \mu\text{m}$ であり、大きな差が無く PRめっきの効果が見られる。また下図に表面粗さ測定結果を示す。

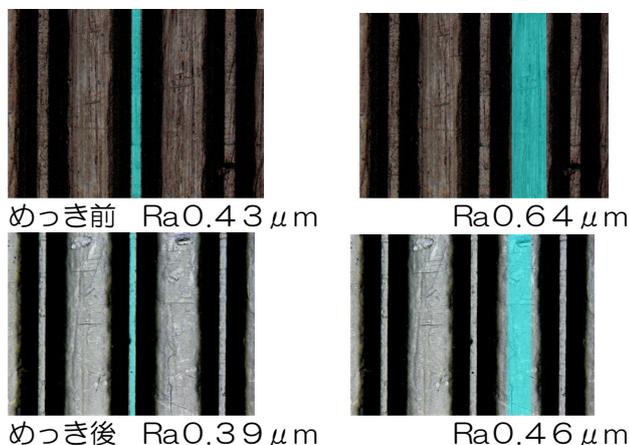


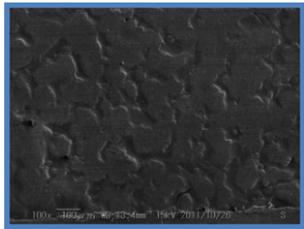
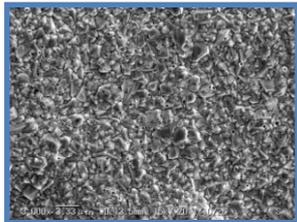
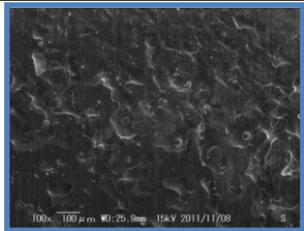
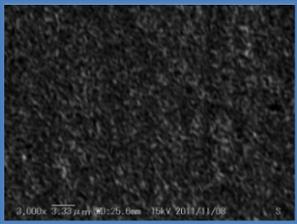
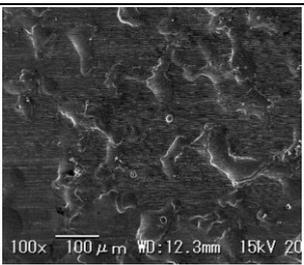
図 2.4.1-2 PR 電気銀めっき前後の3DM 加工部（パンチ側粗さ）

表面粗さでは、めっき後で0.1～0.2 μm程度小さくなっている。

2.4.2 電気銀めっき液組成の最適化

半導体プロセス用のフリーシアン電気銀めっき液を用いて、3DM加工面の微細構造を再現できるPR電気めっき条件の検討を行った。PR電源による3DM加工面へのめっきのSEM観察結果を下表に示す。

表 2.4.2-1 フリーシアン浴によるPR電気めっき膜の表面SEM観察結果

めっき条件	低倍率SEM像	高倍率SEM像
DC (直流) 10A/DM ²		
正側 20A/dm ² 10ms 休止 1.0ms 逆側 120A/dm ² 0.5ms 休止 1.0ms		
めっきなし (被加工材)		-

フリーシアン浴によるPR電気めっきでは、銀めっき膜の結晶組織が微細化されており、高い電流密度でそれが顕著である。この効果は、逆電流印加時における、析出銀原子の選択的な溶解、および正側への復帰時のめっき結晶核の新たな成長によるものと考えられる。PRめっきでは、めっき結晶の微細化により、3DM加工金属表面の微細な凹凸の再現性に優れていることが明らかとなった。したがって、PR電気めっき法によって、樹脂封止や樹脂成形における、金属と樹脂のアンカー効果（投錨効果）による密着性の向上が期待できる。

2.5 3DM加工品の試作と評価(大貫工業所、茨城大学、

茨城県工業技術センター)

3DM技術を応用した具体的な製品として、LED用リードフレームおよびリチウムイオン電池キャップの試作を行った。LED用リードフレームは、アルミニウムリフレクタと銅リードフレームをカシメ方式で一体化し、さらに樹脂成形で電極間を充填した構造の高輝度LED用のパッケージ構造である。またリチウムイオン電池キャップは、銅、およびアルミニウム電極を樹脂成形で一体化した構造である。

いずれも樹脂と金属界面の密着性が性能に大きく影響するため、密着性の向上が課題になっている。

2.5.1 リードフレームの試作

試作したLED用リードフレームは、1W以上のLED素子搭載が可能なハイパワー用である。LEDパッケージの構造を下図に示す。

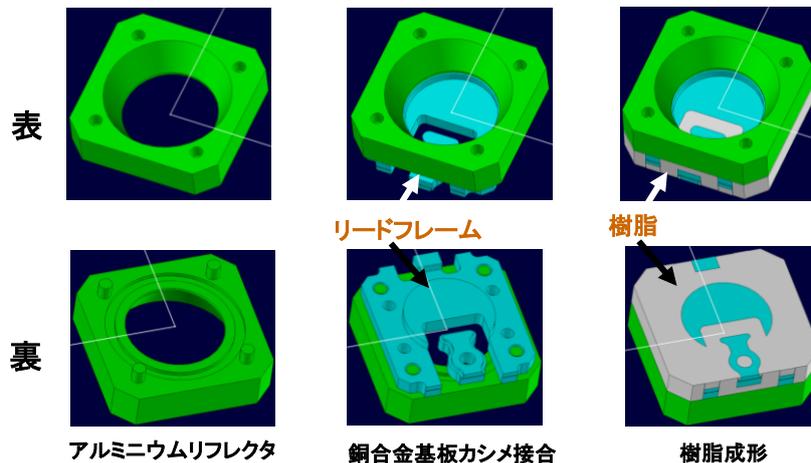


図2.5.1-1 3DM加工リードフレームを用いた5mm□LEDパッケージ構造

試作パッケージの構造は図に示すように、アルミニウムリフレクタとリードフレームを高反射率の樹脂で一体成形した構造となっている。銅リードフレームを下図に示す。



図2.5.1-2 5mm□LED用3DM加工リードフレーム
(樹脂との接着部のみに3DM加工)

銅リードフレームにはワイヤボンディング性に優れた高反射率の電気銀めっきを行った(下図)。



図2.5.1-3 5mm□LED用PR電気銀めっき3DM加工リードフレーム

最終的に上図の試作リードフレームをアルミニウムリフレクタとカシメ締結後、高反射率樹脂により一体成形した。一体樹脂成形金型および成形機を下表に示す。

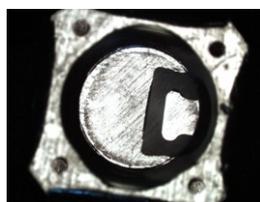
表2.5.1-1 LEDパッケージ試作における樹脂成形条件

樹脂成形金型・成形樹脂	樹脂成形機
<p>樹脂成形金型</p>  <p>外形寸法；150mm×250mm×250mm 成形樹脂/ソルベイ社、アモデル</p>	<p>樹脂成形機</p> <p>(東洋機械金属(株)製、全電動縦型成形機 型式；ET-80/HR2, E75)</p>  <p>外形寸法；1,240W×3,896L×2,384H 射出ストローク；128mm スクリーン直径；32mm 最大射出速度；150mm/s 最大射出圧力；215.6MPa 総電気容量；11KVA</p>

樹脂成形し、完成した5mm□LEDパッケージを下図に示す。



外観



パッケージ内部拡大

図2.5.1-4 試作完成した5mm□LEDパッケージ

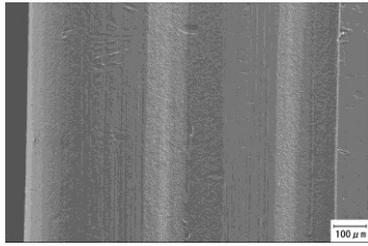
試作したLEDパッケージは下表に示す特徴を有している。

表2.5.1-2 試作したLEDパッケージの特徴

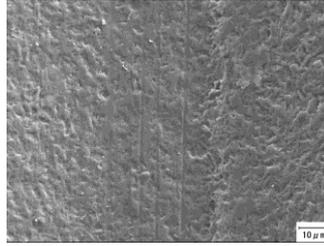
特徴	内容
1. 高放熱性	前方後方(リフレクタ、基板の両側)2方向からの放熱構造。
2. 高反射率	波長450nmにおける全反射率90%以上
3. 高耐久性	アルミリフレクタ採用により、反射率の経年低下が少ない。
4. 組み立て工程の簡略化	LEDランプメーカーの組み立て工程を簡略化できる。

2.5.2 リチウムイオン電池キャップの試作

リチウムイオン電池キャップの試作を目的としてアルミニウム電池キャップへの3DM加工実験を行った。加工溝部のSEM観察像を下図に示す。溝底部に3DM加工パンチ(ブラスト加工SKD11)の微細な粗さ形状が転写されていることが分かる。



溝部



溝底部

図2.5.2-1 3DM加工部のSEM観察像
(プラスチックによるアルミニウム電池キャップ (A1050-0))

下図に表面粗さ計による溝形状の測定結果および、溝底部の表面粗さ測定結果を示す。

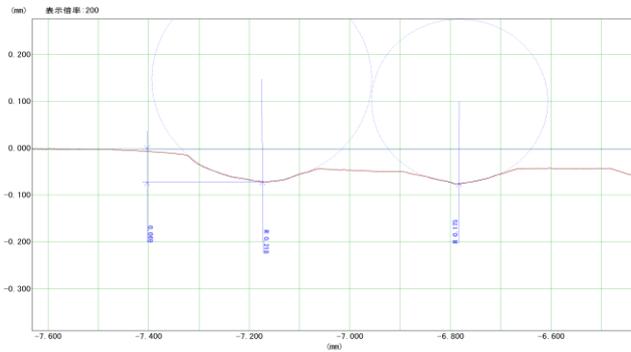


図2.5.2-2 3DM加工溝形状

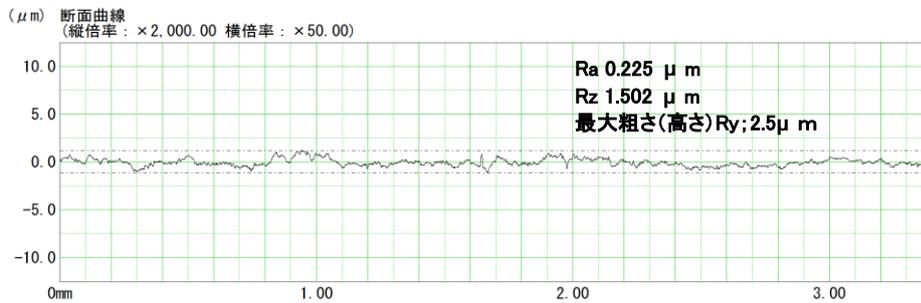


図2.5.2-3 3DM加工表面粗さ

2.5.3 3DM加工精度の測定

サーボプレスにより、プレス開始初期から 10,000 ショットまでの溝底部の粗さを測定し3DM加工の精度を検証した。下図に表面粗さ計による、微細構造加工精度の測定結果を示す。

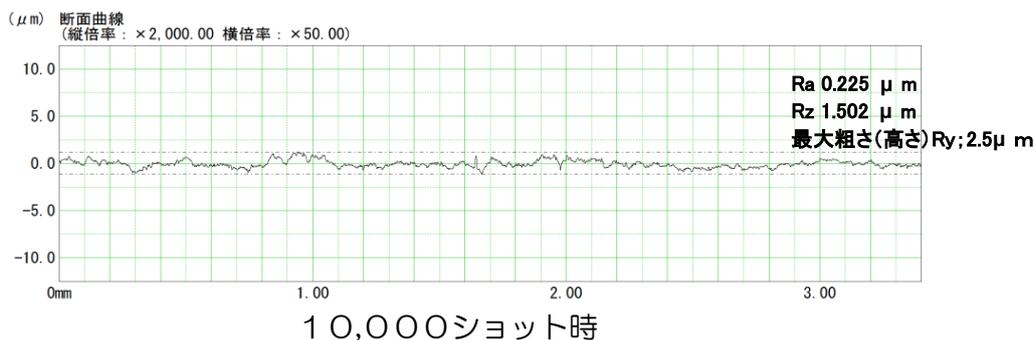
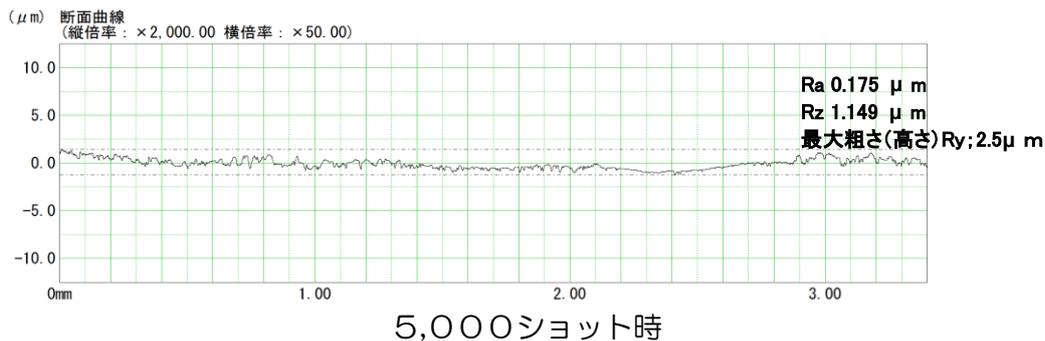
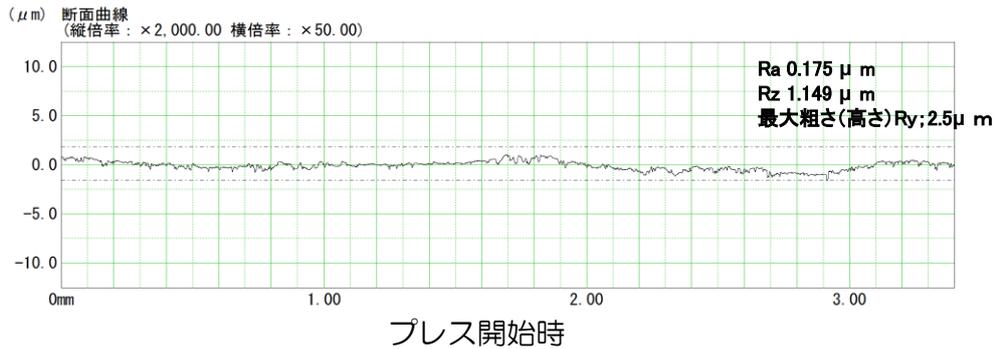


図2.5.3-1 3DM 微細構造加工精度

測定結果5,000ショットまで平均粗さ Ra は0.17 μm であるが、10,000ショットで Ra0.225と粗くなっている。この原因のひとつには、3DM 加工パン(SKD11)のハードコーティングを行っていないために、SKD11パンチの磨耗またはアルミニウムの凝着が考えられる。

2.5.4 界面接着強度の測定

3DM 加工部の界面接着強度をガスリーク試験法により評価した。以下にその評価方法および評価結果を記述する。

1) ガスリーク試験用試験片

3DM 加工の効果を検証するためのガスリーク試験用テストピースを作成した。樹脂モールドテストピースの形状を下図に示す。

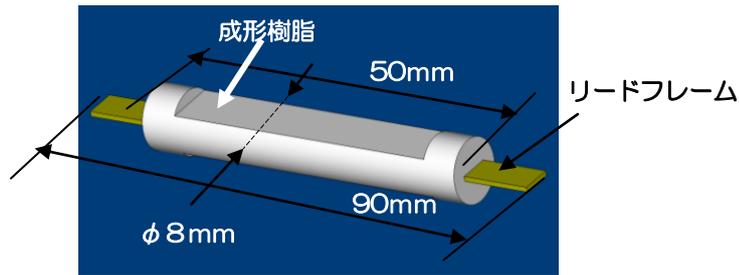


図 2.5.4-1 樹脂モールドテストピースの形状

リードフレームの材料には、リチウムイオン電池用厚さ1.0mmのアルミニウムおよび純銅を選定した。そしてこの材料を用いてプレス加工したリードフレーム中央部10mmの表裏および両側面に3DM加工を行った。

2) ガスリーク試験方法

ガスリーク試験装置を下図に示す。この装置は、コンプレッサーからの空気圧をガスリーク試験サンプルの一方に接続し、もう一方からリークするエアバブルを水中捕集メスシリダーにより計量する方式である。

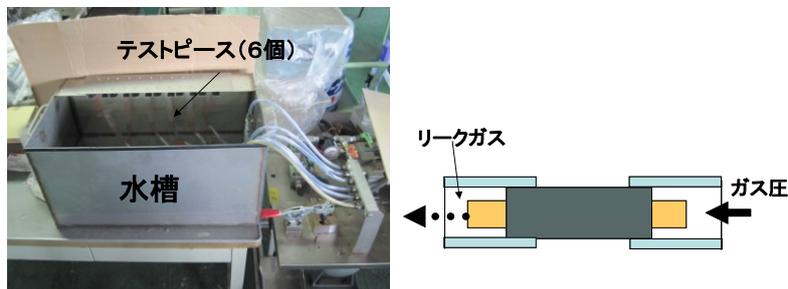


図 2.5.4-2 ガスリーク試験装置

3) ガスリーク試験結果

3DM加工テストピースの耐ガスリーク性能を、コンプレッサー圧力を0.1～0.6MPaまで変化させて評価した。試験時間は1hとしガスリークを起こしたサンプル数からリーク発生率を求めた。テストピースは銅、アルミニウムの各3DM加工有無で作成した。ガスリーク試験結果を下表に示す。試験結果、3DMなしでは銅、アルミニウムのいずれも0.5MPaの圧力でリークが発生した。

表 2.5.4-1 ガスリーク試験結果（試験時間1 h）

圧力 (MPa)	銅 (C11000)			
	3DMあり*		3DMなし	
	リーク発生本数	リーク発生 (%)	リーク発生本数	リーク発生 (%)
0.1	0/15	0	0/15	0
0.2	0/15	0	0/15	0
0.3	0/15	0	0/15	0
0.4	0/15	0	0/15	0
0.5	0/15	0	1/15	7
0.6	0/15	0	1/15	7

圧力 (MPa)	アルミニウム (A3003-H24)			
	3DMあり*		3DMなし	
	リーク発生本数	リーク発生 (%)	リーク発生本数	リーク発生 (%)
0.1	0/15	0	0/15	0
0.2	0/15	0	0/15	0
0.3	0/15	0	0/15	0
0.4	0/15	0	0/15	0
0.5	0/15	0	1/15	7
0.6	0/15	0	3/15	20

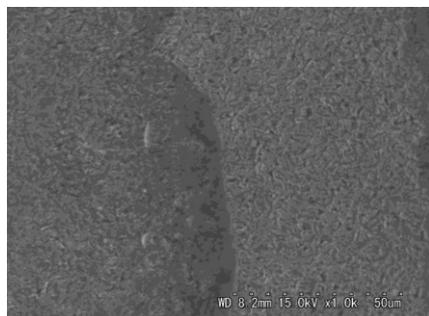
*3DM加工；テストピース中央10mm、ブラスト処理パンチおよびダイを使用。

2.6 量産性評価（大貫工業所）

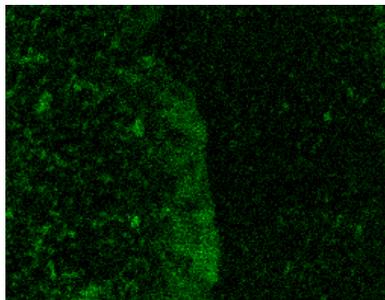
2.6.1 リチウムイオン電池キャップの量産性評価

1) 3DM加工用金型部品の耐アルミニウム凝着性

3DM加工10,000ショット後のダイ表面（SKD11，DLCコーティングなし）のSEM観察結果を下図に示す。下図はブラスト加工ダイ表面のSEM像を示す。A1の元素マッピング分析の結果アルミニウムの凝着部が確認された。パンチ側はSEM観察用ホルダーに収納できないため観察不可能であったが、ダイ同様凝着が起こっているものと考えられる。ダイのブラスト加工面の磨耗は見られないが、アルミニウムの凝着が観察される。



a) 表面SEM像



b) Al元素マッピング

図2.5.1-1 3DM加工ダイ表面のSEM観察結果
(DLCコーティングなしSKD11、10,000ショット後)

2) 今後の課題

3DM加工におけるサーボプレスによるプレス条件の最適化の結果、151SPMのプレス速度を達成できた。このプレス速度は通常の製品と変わらない生産速度であるが、3DM加工金型のアルミニウムなどの被加工材の凝着が課題となった。このため、メンテナンス上パンチ、ダイへのコーティングが必要である。耐凝着性各種コーティング膜の選定により、DLCコーティングが最も耐凝着性に優れる結果が得られたが、量産における最終検証には至らなかった。今後も本研究開発を継続し、DLCコーティング処理パンチおよびダイを製作して、量産における耐久性の最終評価を行う。

最終章 全体総括

スマートフォンなどの小型高機能携帯情報端末の普及により、LEDやリチウムイオン電池に限らず、汎用電子部品の小型化が今まで以上に強く求められている。しかしながら半導体やMEMSなどの電子部品の小型化は、信頼性低下の面で多くの課題を抱えている。小型化により全体に占める樹脂と金属の界面の領域が狭くなり、水分や腐食性物質の浸入による電子部品の機能不良が発生するためである。本研究開発は、金属と樹脂の密着性の向上を目的とした、金属表面へのマイクロ構造加工を目指し推進してきた。金属表面のマイクロ構造加工は、金属の樹脂との接触界面の増加による密着性の向上が期待できる。通常の金属のマイクロ構造加工は、化学的粗化处理やインプリント加工などが良く知られているが、これらは、環境汚染の問題や新たな追加工程が必要になるなどの課題を抱えている。

本研究開発が目指した「3DM加工技術」は、従来の金属プレス加工でそれを成し遂げるものであり、環境汚染の問題もなく、新たな生産プロセスの追加も必要としない。技術的には、一瞬の高速プレス加工において、ミクロンオーダーの金型の微細形状が、非加工材である金属表面に精度良く転写再現できるかが大きな疑問であったが、3年間に亘る研究開発の結果、プレスによってそれが可能であり、またガスリーク試験結果からも、3DM加工の樹脂密着性向上効果を検証することができた。この高速プレスによるマイクロ構造加工がどのような塑性加工メカニズムで達成できているのか、今後金属学的に解明することが課題として残されている。

本研究開発の成果は、プレス加工の新たな扉を開くと期待されるが、現段階で顧客の最終仕様による量産性の最終検証に至らなかった。量産対応には、パンチおよびダイの耐久性向上の課題が残されており、表面コーティングやプレスオイルの改良など技術の追求が必要であるため今後も継続して開発を進める。