

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業（補正予算）
「難加工材のマイクロ鍛造による一体成形に関する研究開発」

研究開発成果等報告書

管理法人 タマティーエルオー株式会社

委託先 関東経済産業局

平成22年3月31日

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. 2 研究成果概要	3
1. 3 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	6
1. 4 研究実施場所	11
1. 5 活動状況（運営委員会、幹事会、開発委員会）	12
第2章 マイクロ鍛造金型の表面処理技術とトライボロジー特性評価	
2. 1 はじめに	13
2. 2 マイクロ金型の表面コーティング条件と膜厚・密着度評価	15
2. 3 スクリーニング試験方法と試験結果	18
2. 4 マイクロ鍛造試験によるパンチの耐摩耗性評価	20
2. 5 環境制御による潤滑特性の評価	25
2. 6 金型のマイクロ化に適合するトライボロジー特性評価	31
2. 7 まとめ	36
第3章 高精度一体成形システムの開発と難加工材の精密一体成形	
3. 1 はじめ	37
3. 2 高精密一体成形システムの開発	37
3. 3 マイクロ鍛造による表面粗さ低減効果	43
3. 4 難加工材の精密一体成形	47
3. 5 まとめ	50
第4章 総合調査報告	
4. 1 マイクロ医療・マイクロバイオ分析市場	51
4. 2 国内外におけるマイクロ成形加工関連研究開発の調査	57

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

A. 背景

パーソナル情報家電にて普及廉価商品は海外での生産が定着し、国内では高機能で高級感のある商品に特化し、その更なる高度化への需要が高まっている。廉価をイメージするプラスチック製から金属製、更に難加工材仕様になりつつある。サイズも益々小形化するとともに微細な立体形状で部品点数を減らし機能を高めるユニットの需要が増大している。

金属材料のマイクロ成形加工が近年大変注目されている。ヨーロッパでは、EU 連合の大型コンソーシアム研究プロジェクト（略称：MASSMICRO、期間：2005-2009）、ドイツ大型研究プロジェクト（Micro Cold Forming、期間：2007-2014）など多くのマイクロ成形加工研究開発が行われており、マイクロ材料の変形特性、マイクロ加工機械、マイクロプロセスなど基礎から応用に至るまでの研究開発が進められている。また日本では、金属プレス部材の成形加工、マイクロ部品の表面処理、マイクロ接合技術などを組み合わせることによって、金属材料のマイクロデバイスの試作に成功したが、マイクロ成形に起因する素材表面荒れや形状不良の課題は未解決であり、量産のための生産技術の確立に至っていない。

難加工材での部品は、材料特有の諸問題が微細化でより顕著になり、微細な立体形状は極めて少量の潤滑油で寸法変化があることから安定量産の障害となっている。加工条件等のプレス技術の高度化と金型工具の改質を含むコーティング条件の最適化が必要となる。また、微細部品で構成されるユニットはハンドリングが困難なことから金型内組立工法が有効であるが、微細ユニット特有の問題があり、試作レベルでは完成されたものの安定量産には至らず、更なる開発を要している。

B. 本研究開発の目的と概要

本研究開発では、難加工材に適した高精度な金属材料プレス成形・型内組立技術、金型表面処理技術などの要素技術を開発し、マイクロプレス一体成形に精密鍛造を取入れ、素材の初期精度などに対するインプロセス矯正技術や高精度素材搬送・位置決めシステムを開発することにより、難加工材を用いたマイクロユニット部品の型内一体成形を実現し、高品質・高効率な生産システムを確立することを目的とする。

1. 2 研究成果概要

本研究開発では、難加工材のマイクロ鍛造による一体成形によるマイクロユニット部品の型内一体成形を実現し、高品質・高効率な生産システムを実現するために、要素技術として、チタンやステンレスなどの難加工材に適したマイクロ金型表面処理技術を開発し、そのトライボロジー特性評価、及びマイクロ鍛造適用性評価を行った。また、システム技

術として、一体成形のためにマイクロ鍛造用精密プレス加工機、薄材送り装置、金型内素材位置検出装置を開発した。さらに、これらの技術を応用して、医療用マイクロカンシの試作を行った。

テーマ毎の具体的成果は以下に示す。

A. マイクロ精密鍛造技術の確立

マイクロ鍛造金型の表面処理技術

工業用チタンシートのドライマイクロ鍛造に用いるコーティングについて、その種別選択を目的としたスクリーニング実験を行い、コーティングの剥離性指標としてスクラッチ強度を測定し、チタン球を相手材としたボール・オン・ディスク試験を、鍛造条件を想定して行った。高面圧による過酷な摺動条件での実験結果では、工具保護被膜として実用的な信頼性のあるセラミックコーティングならびに DLC-Si コーティングにおいて、摩耗が大きく、3600 秒まで凝着なしに低摩擦を示すコーティングはなかった。しかし、その中で TiAlN、DLC-Si、ナノ積層 DLC コーティングは比較的優位な耐久性を有していることが分かった。その後、チタン材のドライマイクロ鍛造試験用の工具・金型コーティング種に TiAlN、DLC-Si 及びナノ積層 DLC コーティングを採用し、500 回程度ドライマイクロ鍛造試験を行った。ほとんどすべてのコーテッド工具、表面処理工具に対して、Ti 粉の付着（バリなども含む）が観察され、鍛造プレス回数（N）の増加にともなって、付着面積は急激に増加している。チタンに代表される難加工材の潤滑油を用いないドライマイクロ鍛造では、2 つの要因として、1) チタン粉の凝着による工具・金型表面性状の劣化、2) 鍛造システムの高コンプライアンス化があることがわかった。前者と後者とは相互に深く関係しており、鍛造回数の増加に伴うチタン粉の凝着の進行にともなって、高コンプライアンス化が進むなど、複雑な様相も有している。一方、鍛造回数、コーティング種などにほぼ依存せず、ドライマイクロ鍛造時の変形率とコンプライアンスとは 1 対 1 に対応しており、型技術として低コンプライアンス化を図りつつ、コーティング・表面処理技術の深化で凝着を低減できれば、コーティングしない金型・工具によるマイクロ鍛造と比較して、格段の高変形率と耐久性を実現できると考えられる。

チタン材のドライマイクロ鍛造プロセスによる実用生産では、狭隘なクリアランスでも稼働できる薄い膜厚で、チタン粉に対する脱付着性、しごきあるいはせん断工程での基材-コーティング間の密着性などがさらに課題となることが想定される。膜質制御性を高めるとともに、基材と保護膜主層との間のインターレイヤー設計にも配慮した検討が必要である。

また、プレス成形型のマイクロ化に伴い、金型表面応力の増大だけでなく、成形中素材と金型との接触状態が局所的かつ断続的になるため、その状態を再現するための局所的・断続的な摩擦実験を提案し、その妥当性を実証した。摩擦条件によってトライボロジー特性が大きく異なり、金型のマイクロ化にともない表面の材料凝着、はく離形態が著しく変

わることがわかった。局所的かつ断続的な接触状態に対応するコーティング膜の設計の必要性を示した。

インプロセス矯正による素材の表面粗さ、板厚ばらつきの低減及び平坦度向上

市販されている難加工材 Ti に対して、実際にマイクロ鍛造を行い、鍛造による表面粗さの改善を試みた。事前に鍛造部中心に穴を開け、変形による材料流動がある場合は、金型の表面が素材に転写され、表面粗さの低減効果が見られた。しかし、穴がない場合、変形による材料流動が少なく、表面粗さの低減効果が小さいことが分かった。ただし、今年度開発されたマイクロ鍛造用サーボプレスを用いて、振動を加えた鍛造を行った場合は、表面粗さの低減効果が見られた。今後サーボプレスの特長を活かした素材表面矯正実験をさらに進め、実験データの蓄積による加工条件の最適化を行う必要がある。

難加工材料製品品質向上のための、材料制御技術

チタンなどの難加工材は加工中に起こる材料表面酸化膜の剥離・粉末化によって工具の耐摩耗性を低下するので、それを防ぐための手法として、チタン成形中にArガスを用いた雰囲気制御が表面酸化層生成防止に有効であることがわかった。また、同様にマイクロ鍛造の雰囲気を溶液中にした場合の各種表面処理のトライボロジー特性評価を行った。その結果、DLC-Si コーティングが初期から非常に低い摩擦係数で安定した結果を示した。この材料の場合、摩耗痕もほとんどなく、Ti ボール側もチップング状の小さな傷だけが観察されているが、大きな摩耗は見つからない。これらの結果より、Ti材のマイクロ鍛造において、金型表面に適切な表面処理とコーティングを施すことにより、摩擦・摩耗の低減に有効であった。また、適切な雰囲気制御もチタンの剥離・粉末化の低減に有効であり、その結果、金型表面処理の耐摩耗性効果がさらに向上できる。

B. 一体成形のための高精度素材順送機構、高精度位置決め

マイクロ精密鍛造用卓上型サーボプレス機械の開発、金型への精密素材送り装置の開発、さらに内組立を実現するための型内素材位置検出装置の開発を行った。いずれも市販された装置にはない小型かつ高精度なものであり、難加工材での微細部品精密鍛造、複数部品から構成されるユニットの型内組立の実現による高品質・高効率な生産システムの確立に大きく前進した。ただし、今年度は開発時間の制約上、開発した個々の装置の特性評価が十分に行われておらず、さらにこれらの装置を組み合わせたシステムの評価も今後行う必要がある。

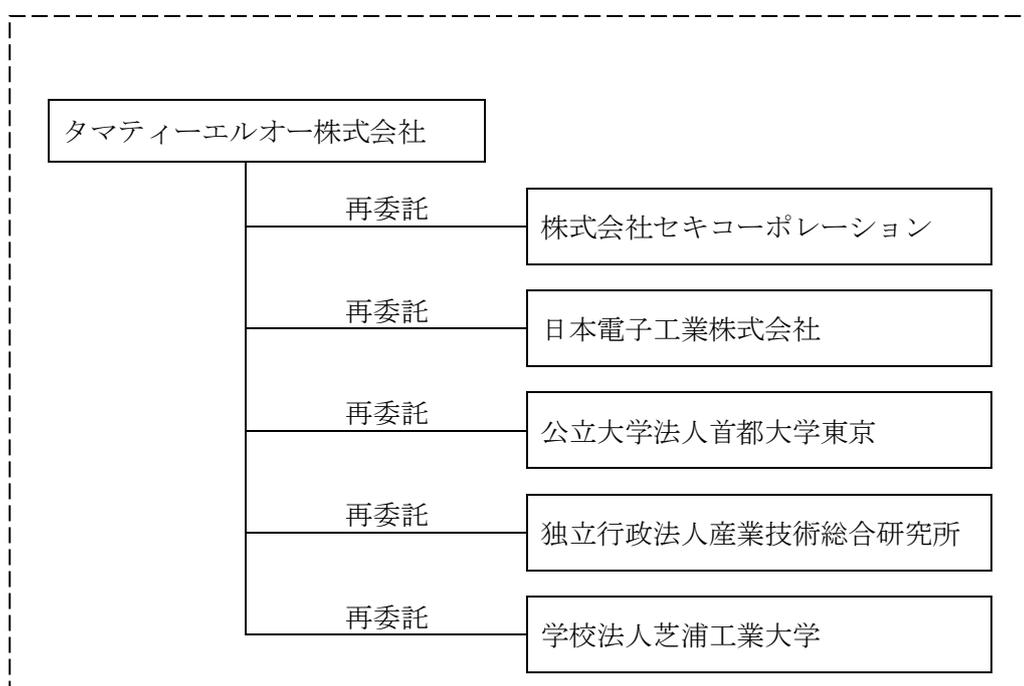
C. 難加工材の精密一体成形技術とマイクロ医療部品の試作

本研究開発プロジェクトで提案した精密一体成形システムを利用して、マイクロ医療部品として微小鉗子を取り上げ、その設計と試作を試みた。マイクロ鍛造を含む精密一体成

形を用いて、微小鉗子を製造する加工プロセスを設計した。上述したように実システムの評価がまだ出来ていないため、実加工は出来ていない。ただし、微小鉗子の主要部品を加工する金型を設計し、単体部品の試作を行い、加工精度などの課題について検証した。今後、評価実験を重ねると同時に、精密一体成形システムとしての課題も明確にしていく必要がある。

1. 3 研究体制（研究組織）

研究組織を以下に示す。



総括研究代表者（PL）
公立大学法人首都大学東京
大学院システムデザイン研究科
教授 楊 明

副総括研究代表者（SL）
株式会社セキコーポレーション
顧問 伊藤 國吉

第2章 マイクロ鍛造金型の表面処理技術とトライボロジー特性評価

2.1 はじめに

ここでは、工業用純チタンのドライマイクロプレスにおいて、低摩耗・低摩擦および高耐久性を保證できるコーティング処理を、ボール・オン・ディスク試験によって評価し、良特性を示すコーティング処理を選択することを第1の目的とする。さらに環境効果など、化学的に活性な金属であるチタンと金型・工具とのドライ接触に影響を与える因子についても検討する。

チタンベースのセラミック・コーティング処理に関しては、日本電子工業株式会社が、Si含有DLCコーティング処理に関しても日本電子工業株式会社が、ナノ積層DLCコーティングに関しては芝浦工業大学が、イオン注入処理に関しては産総研が担当した。

評価試験に関しては、上記のスクリーニング試験を芝浦工業大学が、環境効果試験などを産総研がそれぞれ担当した。基材は、超硬（TH10相当）およびSHK51、SKD11材の3種とし、形状は12x12x5tに統一した。表面処理条件一覧を表2.1.1にまとめた。

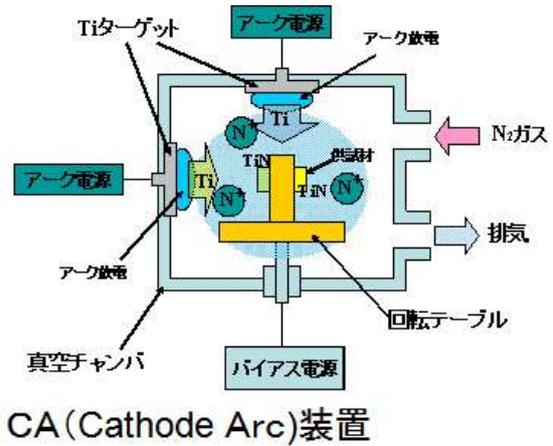
表 2.1.1 スクリーニング試験に用いた7種類の表面処理条件

コーティング種	担当	コーティング方法	備考
TiN	日本電子工業	HCD（ホロカソード放電法）	TiチップおよびTiターゲット Ar/N ₂ ガス
TiCN	日本電子工業	HCD	Tiターゲット Ar/N ₂ /CH ₄ ガス
TiAlN	日本電子工業	CA（カソードアーク法）	Ti-Alターゲット N ₂ ガス
TiSiN	日本電子工業	CA	Ti-Si/Ti-Alターゲット N ₂ ガス
DLC-Si	日本電子工業	プラズマCVD法	Ar/N ₂ /CH ₄ /TMS 超硬：窒化なし 400℃ SKH・SKD材：窒化有、500℃
n-DLC	芝浦工業大学	RFスパッター	積層間隔：10 nm Ar/CH ₄ ガス

なお、コーティングに使用した主要装置の概略を図2.1.1に示す。



KOBELCO製:AIP-S40

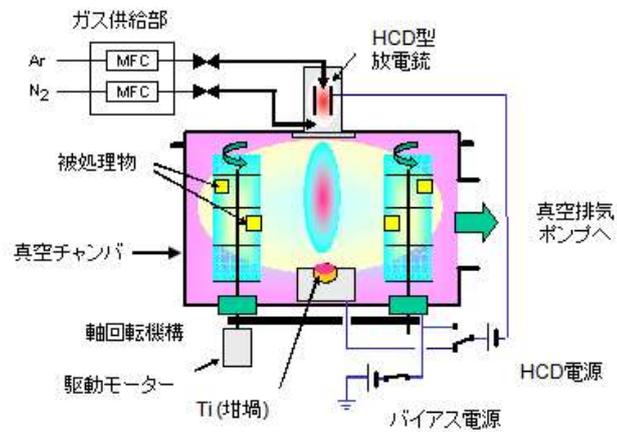


CA (Cathode Arc)装置



NACHI製:SS-28

HCD装置



NDK製:JPC815-6SC

PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition)装置

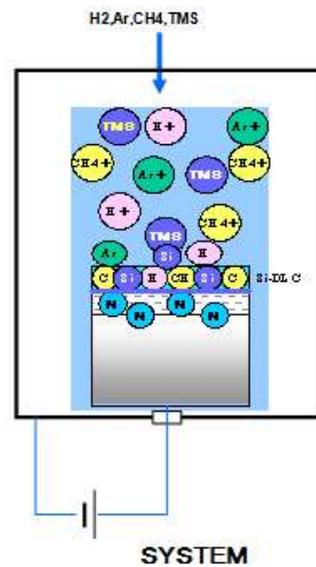


図 2.1.1 本試験に用いた主要なコーティング装置

2. 2 マイクロ金型の表面コーティング条件と膜厚・密着度評価

A. コーティング条件

採用したコーティング種は、切削工具の保護膜に広く使用されているTiベースのセラミックコーティングとして4種類、(TiN、TiCN、TiAlN、TiSiN)、最近ドライ加工用のコーティングとして広く普及しはじめているDLCとして2種類(DLC-Si、ナノ積層DLC(n-DLC))およびイオン注入を、候補として採用した。コーティング厚さは1 μ m一定とした。上記のコーティング条件を表2.1.1にまとめた。

なお、それぞれのコーティング条件の詳細は、以下の表2.2.1-2.2.6に示す。セラミックコーティングおよびDLC-Siコーティングは単層であるため、加熱・プレスパッター・コーティングで整理した。またDLC-Siに関しては、鉄鋼基材では前処理としてプラズマ窒化を行い、その上にコーティングした。その他のケースでは、特にコーティング主層と基材との間には、バッファ層は導入していない。

表 2.2.1 TiN コーティングの詳細 (Ti ターゲット、Ti プレート)

a) Ti プレートを原料にしたコーティング

プロセス	時間 (分)	ガス	電流 (A)	温度 (C)	圧力 (Pa)
加熱	70	Ar	70	300	1.4
プレスパッター	30	Ar	6.5	350	1.4
コーティング	25	Ar, N2	6.5	400	0.8

b) Ti ターゲットを原料にしたコーティング

プロセス	時間 (分)	ガス	バイアス (V)	温度 (C)	圧力 (Pa)
加熱	80	---	---	400	---
プレスパッター	15	Ar	400	---	2.66
コーティング	20	N2	100	---	3.99

表 2.2.2 TiCN コーティングの詳細 (Ti プレート)

プロセス	時間 (分)	ガス	電流 (A)	温度 (C)	圧力 (Pa)
加熱	70	Ar	70	300	1.4
プレスパッター	30	Ar	6.5	350	1.4
コーティング	30	Ar, N2, CH4	6.5	450	1.0

表 2.2.3 TiAlN コーティングの詳細 (Ti-Al ターゲット)

プロセス	時間 (分)	ガス	バイアス (V)	温度 (C)	圧力 (Pa)
加熱	80	---	---	400	---
プレスパッター	15	Ar	400	---	2.66
コーティング	20	N ₂	100	---	3.99

表 2.2.4 TiSiN コーティングの詳細 (Ti-Si、Ti-Al ターゲット)

プロセス	時間 (分)	ガス	バイアス (V)	温度 (C)	圧力 (Pa)
加熱	80	---	---	300	---
プレスパッター	15	Ar	400	---	2.66
コーティング	35	N ₂	30	---	3.99

表 2.2.5 DLC-Si コーティングの詳細

a) 超硬基材の場合

プロセス	時間 (分)	ガス	電流 (A)	温度 (C)	圧力 (Pa)
加熱	90	Ar	---	400	400
プレスパッター	45	Ar, H ₂	---	400	400
コーティング	30	Ar, H ₂ , CH ₄ , TMS	10	---	400

b) SKH51 および SKD11 基材の場合

プロセス	時間 (分)	ガス	電流 (A)	温度 (C)	圧力 (Pa)
加熱	90	H ₂	---	500	400
窒化	40	H ₂ , N ₂	---	500	400
プレスパッター	45	Ar, H ₂	---	500	400
コーティング	30	Ar, H ₂ , CH ₄ , TMS	10	---	400

表 2.2.6 ナノ積層 DLC コーティングの詳細

プロセス	時間 (分)	ガス	バイアス (V)	温度 (C)	圧力 (Pa)
プレスパッター +加熱	30	Ar	500	250	2.6
インターレイヤー 成膜	23	Ar, N ₂	100	250	0.9
コーティング	100	Ar, CH ₄	0-200	250	0.9

B. コーティング膜厚および密着強度

コーティングした試料の膜厚に関しては、カロテスターおよび精密表面粗さ測定器により測定した。コーティングの密着強度に関しては、スクラッチ試験機により測定した。スクリーニング試験対象の各種コーティングの膜厚ならびにスクラッチ強度を表 2.2.7 に示す。目標値 (1 μm) に対して、ほぼ近い値でコーティングされている。一般に膜厚を大にすると、スクラッチ強度はみかけ上昇するが、100N が 1 つの目安であり、高強度で強靱なチタンに対して、より高い強度が必要とされる。ナノ積層化 DLC では、積層間隔が 10 nm 以下で積層数が 25 以上であれば、積層数によらずに、スクラッチ強度が 100 N 以上に達することがわかっている。また基材にスクラッチ試験圧子が貫入しても、スクラッチ痕には局所クラックさえも観察されないことから、スクラッチ強度の膜厚依存性も少ないと考えている。

表 2.2.7 スクリーニング試験対象の各種コーティングの膜厚、スクラッチ強度

膜種	膜厚 (μm)	スクラッチ強度 (N)
TiN (HCD)	0.81	68
TiN (AIP)	0.77	77
TiCN	1.18	84
TiAlN	1.08	108
TiSiN	0.92	53
DLC-Si	1.12	74
n-DLC	1.05-1.1	> 100

2. 3 スクリーニング試験方法と試験結果

A. 試験方法

相手材を工業用純チタンとした場合に、低摩耗・低摩擦を達成する良好なコーティングを選出するために、チタンボールを相手材（ボール材）として、ボール・オン・ディスク試験を行った。表 2. 3. 1 に試験条件を示す。当該条件は、過酷なドライプレス加工を想定しており、基材との密着性が優れ、膜がアブレイシブ摩耗により薄くなっても剥離しないコーティング種の選別を目標にしている。なお、測定トルクが許容値を超えた時点で試験を中止するか、最大 1 時間（3600 s）まで試験を、無給油条件（ドライ条件）で行った。

表 2. 3. 1 スクリーニング試験条件

試験条件項目	内容
ディスク材	7 種類のコーテッド基材
ボール材	チタン I 種材（5/16”）
試験条件	負荷荷重：10N 一定、回転数：160 rpm（50 mm/s）
測定項目	トルク計測より摩擦係数 試験後の摩耗状態観察

B. 試験結果

3 種類の基材に対して、7 種類のコーティングを施したサンプルを用いて行った、スクリーニング試験にいたる耐久性結果を表 2. 3. 2 にまとめる。前述したように、測定トルクが許容値を超えた時点までを、秒単位で示している。なお、『0』は測定開始直後に凝着のため、装置が停止し、測定不能であることを意味している。

表 2. 3. 2 スクリーニング試験による寿命結果

	TiSiN	TiCN	TiN	TiAlN	DLC-Si	n-DLC
SKH51	45	35	40	45	2	970
TH10	5	75	170	160	730	3600
SKD11	65	30	0	795	0	3600

これより Ti ベースのセラミック・コーティングでは TiAlN が、DLC に関しては、DLC-Si と n-DLC がチタンのマイクロ鍛造用工具・金型のコーティングに利用できる耐久性を有していると考えられる。基材の影響に関しては、摩耗時の基材変形の影響が明瞭に観察され、超硬基材を用いたコーティングはすべてのコーティングで最も長い試験時間耐久性を示した。コーティングによって、基材依存性が大きく変化するものもあり、SKD11 基材への TiN、DLC-Si のコーティングでは試験開始時点で、固着が生じ、摩耗試験が実施できなかった。

次に測定したトルクから求めた摩擦係数の時刻歴を調査した。基材を TH 10 とした場合の、6 種類のコーティング材の摩擦係数変化を図 2.3.1 に示す。Ti セラミック・コーティングの中では、TiAlN を用いた場合に最も低い摩擦係数を示し、また耐久性時間も長かった。DLC-Si コーティングでは、平均摩擦係数が 0.2-0.3 となり、上記のコーティングの場合よりも摩擦係数は低減した。通常の DLC が 0.1-0.2 の摩擦係数であることを考えると、Ti ボールとの凝着が生じ、平均摩擦係数を押し上げている可能性がある。実際、図中の摩擦係数の履歴には、Sticking による振動が表れており、部分凝着時に摩擦力が上昇したことを示している。

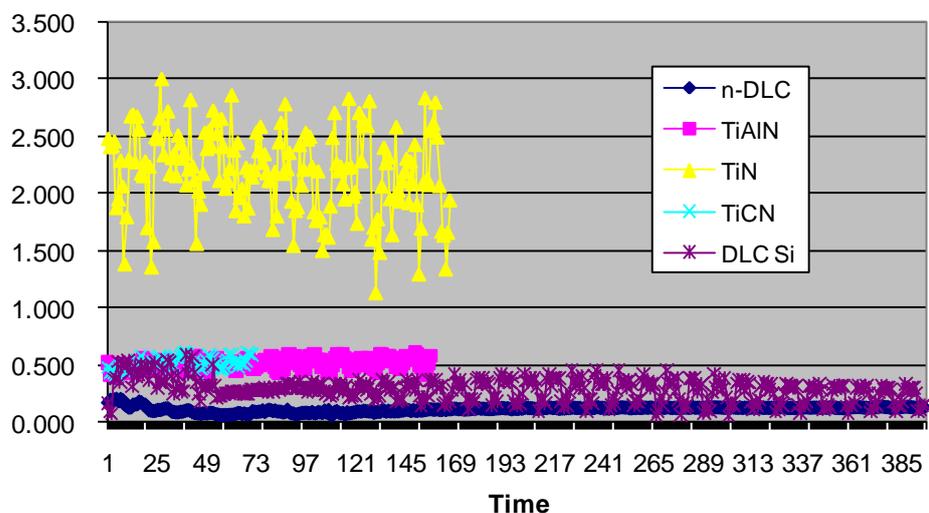


図 2.3.1 各種コーティングの摩擦係数の時刻歴

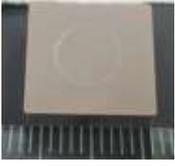
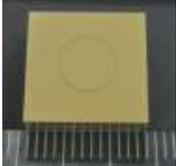
TiSiN	TiCN	TiN	TiAlN
			
DLC-Si	n-DLC		
			

図 2.3.2 各種コーティングの試験終了後の摩耗痕の観察結果

ナノ積層化 DLC の場合、その摩擦係数履歴は、上記 DLC-Si が示す摩擦係数下限値で一手に推移しており、 $\mu = 0.1$ 程度の良好な低摩擦性をしました。履歴上に Sticking に起因するような摩擦係数の変動が見られないことから、Ti ボールとナノ積層化 DLC 膜との凝着も発生していないことがわかる。

次に各コーティング材における摩耗状態を検討する。一般に摩耗量が大きい場合、ボールオンディスク試験後のコーティング材に残る摩耗痕は大きくなり、著しい摩耗が生じると基材そのものが観察されるようになる。図 2.3.2 には、超硬基材を用いた場合の各コーティング材における表 2.2.2 に示した試験時間後の表面状態をまとめて示す。TiSiN、TiCN および DLC-Si 材に関しては、基材まで見えるほど摩耗痕が深い。これは、コーティング材と Ti ボールとの摩擦状態が、単なるアブレーション摩耗ではなく、Ti ボールとの凝着摩耗が発生していることを示唆している。これに対して、TiN および TiAlN 材では、摩耗は基材まで到達しておらず、凝着程度が軽微である可能性が大きい。一方ナノ積層化 DLC 材では、全く摩耗痕はほとんど観察されず、Ti との凝着もアブレーション摩耗も小さいことがわかる。

2. 4 マイクロ鍛造試験によるパンチの耐摩耗性評価

A. はじめに

チタンに代表される難加工材料を、潤滑油を全く用いずに、ドライで精密複雑形状部品へとプレス加工する場合には、コーテッド金型・工具と言えども、厳しい摩耗摩擦状態に置かれる。ここでは、事前のトライボロジー試験でスクリーニングした 4 種のコーテッド工具、表面処理工具を選択し、それらを用いて、マイクロ鍛造試験による工具摩耗特性に

ついて評価した。コーティング選択において、DLC-Si、TiAlN コーティングに関しては、日本電子工業が、ナノ積層 DLC コーティングに関しては、芝浦工業大学が、イオン注入による表面処理に関しては、産総研がそれぞれ担当した。マイクロ鍛造試験は一括して、セキコーポレーションが行った。工具材質は、TH10 相当材（超硬材）、微細粒超硬材、工具鋼 SKH51 および SKD11 とした。以下の実験では、コーティング名と基材（TH10 相当材：W、微細粒超硬材：U、SKH51：H、SKD1：D）との組み合わせで、種々のコーテッド工具・表面処理工具を作製した。本年度は、4 種の内、3 種、すなわち CVD による DLC-Si コーティング、RF スパッターによるナノ積層 DLC コーティングおよび金イオン注入による表面改質による工具を作製し、実験に供した。なお、以下では、記号を用いて各コーテッド工具・表面処理工具を表示する。例えば、「DLC-Si/W」は超硬 TH10 相当基材の工具に、表 2.4.1 の DLC-Si コーティングを施したことを意味する。

B. マイクロ鍛造試験内容

マイクロ鍛造試験では、図 2.4.1 に示すような圧縮潰し試験を採用する。被加工材には、0.2mm 厚の工業用純チタンシート材を用い、図中のポンチ部、ダイ駒部分に、準備したコーテッド工具・表面処理工具を挿入し、試験を行う。潤滑油あるいは加工油を全く用いないドライ条件では、試験中にチタン材からの金属凝着が想定される。

表 2.4.1 4 種類のコーティング条件

コーティング種	実施機関	膜厚	その他条件
DLC-Si	日本電子工業	約 1 μ m	Si 源に TMS を用いた CVD 法
N1-DLC	芝浦工業大学	1.0–1.1 μ m	Cr-CrN 傾斜構造のインターレイヤー ナノ積層間隔：10 nm
AuII	産総研	改質層 100 nm	金のイオン注入（75keV、注入量 1E16/cm ² 、室温処理） ポストアニール 700K 30min

図 2.4.2 において、ポンチとダイ駒で、中央に円孔のあるチタンシートを圧縮変形させると、低剛性である中央円孔近傍が変形し、板厚減少とともに、孔径が小さくなる。また、あらかじめ想定した圧縮量（図中、ポンチの突込み量）とチタンシート材の板厚減少量とは、工具系の弾性変形（スプリングバック量）分だけの差異が生じる。以上より、この 2 つをそれぞれ材料流動性ならびに潤滑性の指標とした。すなわち、前者に関しては、式 1) で定義する、マイクロ鍛造前後の中央円孔の直径減少率 (D_R) で評価する。一方、後者に関しては、式 2) で定義する、コンプライアンス率 (C_s) で評価する。

$$D_R = [(\text{成形前の孔径}) - (\text{成形後の孔径})] / (\text{成形前の孔径}) \times 100 \quad 1)$$

$$C_s = [(\text{ポンチの突込み量}) - (\text{成形後のチタンシート板厚})] / (\text{ポンチの突込み量}) \times 100 \quad 2)$$

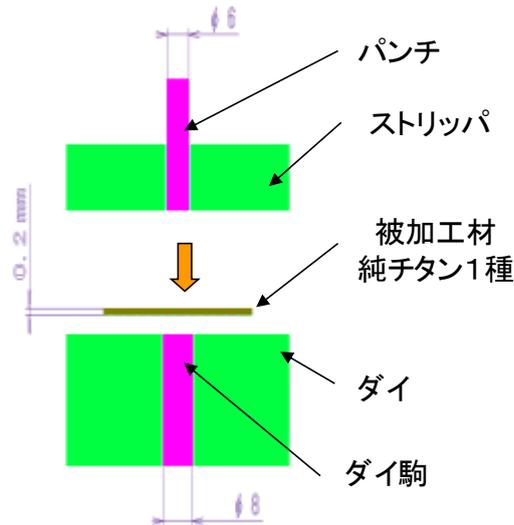


図 2.4.1 マイクロ鍛造試験の概要

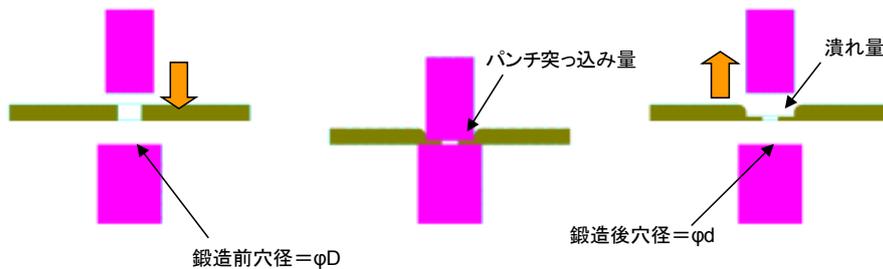


図 2.4.2 マイクロ鍛造試験における工具の動作とチタン材の変形

C. マイクロ鍛造実験結果

ドライ条件下でのマイクロ鍛造実験結果を図 2.4.3 にまとめる。DLC-Si に限定することなく、ほとんどすべてのコーテッド工具、表面処理工具で観察されたのは、Ti 粉の付着（バリなども含む）である。写真中の白い付着物であり、鍛造プレス回数（N）の増加にともなって、付着面積は急激に増加している。ポンチならびにダイに 2 重の白線が観察されるのは、潰し面において、円孔近傍部分の凝着が内側の円弧、潰し工程における抑え部分に相当する外周部分が外側円弧を形成しているためである。特に N = 100 での凝着部位が内側に向かっていることから、チタン材の内側へのせん断変形で凝着が進行するものと考え

えられる。なお、図 2.4.4 において、ポンチとダイに見られる 2 重白線の形成から、凝着は特に圧縮応力の高い限定された部位で生じていることがわかる。

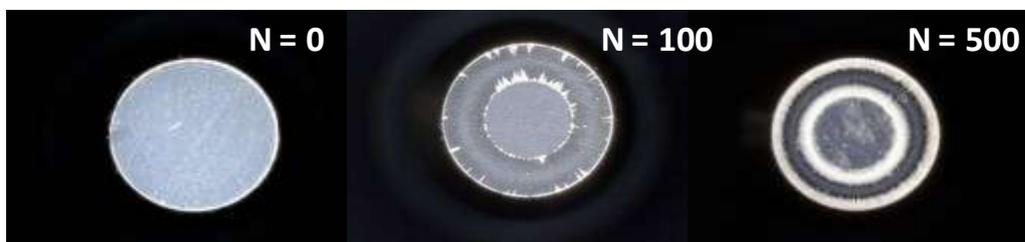


図 2.4.3 DLC-Si/U ポンチの表面性状変化

表 2.4.2 に、N=500 まで行ったマイクロ鍛造試験における、中央円孔の変形量、その減少率 (DR)、成形後板厚、コンプライアンス率を、まとめて示す。全般的に直径減少率が小さいのは、それだけマイクロ鍛造時の塑性変形が限定的に生じていることによる。このことは、相対的に高いコンプライアンス率に反映しており、ほとんどのポンチの突込み量がスプリングバックしていることがわかる。さらに N=100 の値と N=500 の値とを比較すると、直径減少率の低下、すなわち塑性変形の局所化と、コンプライアンス率の増加、すなわちスプリングバックによる工具の逃げの増加とは一層明確になる。

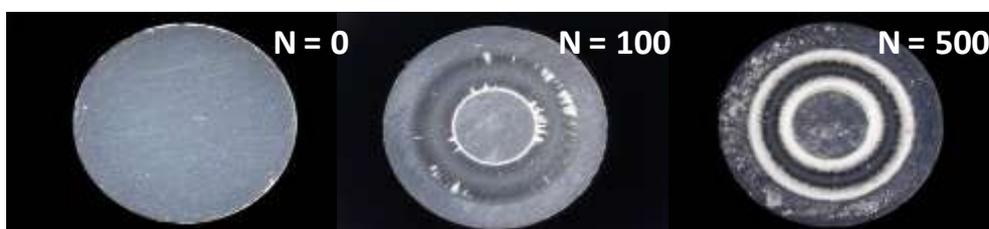


図 2.4.4 DLC-Si/U ダイの表面性状変化

表 2.4.2 ドライマイクロ鍛造試験における力学指標の変化

工具	N = 100				N = 500			
	径変化	D _R	潰し量	C _s	径変化	D _R	潰し量	C _s
nDLC/ H	0.109	3.6 %	0.013	91%	0.049	1.6%	0.006	96%
DLC-Si/ U	0.139	4.6%	0.018	88%	0.118	3.9%	0.013	91%
DLC-Si/ W	0.2	6.7%	0.023	85%	0.139	4.6%	0.013	91%

図 2.4.3、2.4.4 で観察される凝着は、塑性変形の局所化と、系としての加工環境の低下に対応している。

次に基材の影響を見ておこう。全般的に SKD51 より耐久性は良好ではなく、表 2.4.2 においても、直径変化量も DR 率も小さい。特にスプリングバック量増大に見られるように、工具の逃げが生じることがわかる。一方、微細粒超硬材 (W材) と超微細粒超硬材 (U材) との差異が明確ではなく、表 2.4.2 では、W材の方がより適しているように見えるが、スプリングバック量に差が見られないなど、必ずしも差異は明瞭ではない。

次にドライ条件下でのマイクロ鍛造挙動を俯瞰するために、図 2.4.5 に示すようにデータ整理した結果を、横軸にコンプライアンス率 (C_s)、縦軸に直径変化率をとって考察する。興味深い点は、 $N=100$ のデータをまとめるとほぼ一直線になることから、チタンのドライマイクロ鍛造で求められる高変形率は、コンプライアンス率の低下で一義的に達成されるという点である。すなわち、コーティングによる凝着防止とともに、鍛造金型内での系としての剛性増加をはかる必要性を示唆している。特に N を増加することで、高コンプライアンス側に移行することを考えると、実用上できわめて重要な示唆である。一方、コーティング効果に関しては、同一のコンプライアンス率でなお、高い変形率を示すことから、明瞭な効果が見られる。このコーティング効果は、低コンプライアンス率でさらに増加するものと考えられる。

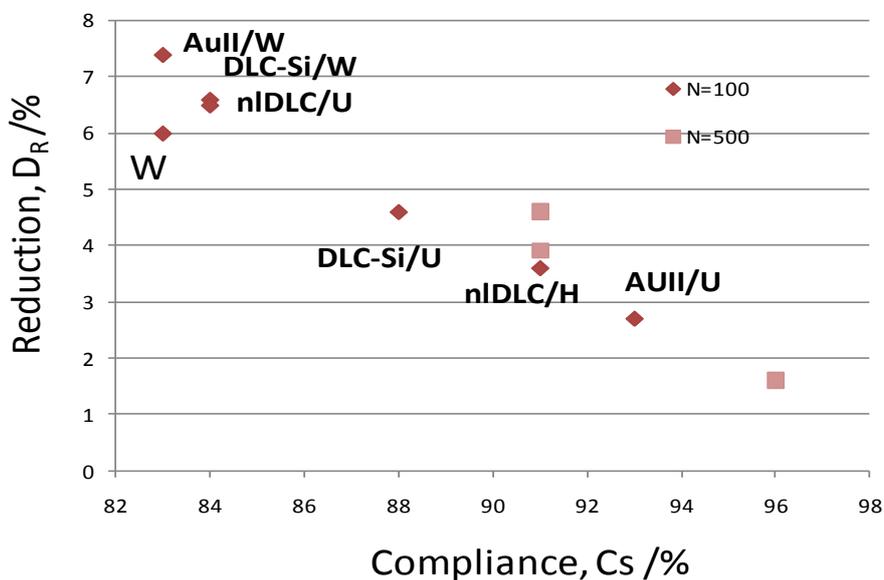


図 2.4.5 コンプライアンス率に対する変形率の依存性

D. おわりに

チタンに代表される難加工材の潤滑油を用いないドライマイクロ鍛造では、2つの要因として、1) チタン粉の凝着による工具・金型表面性状の劣化、2) 鍛造システムの高コンプ

ライアンス化があることがわかった。前者と後者とは相互に深く関係しており、鍛造回数の増加に伴うチタン粉の凝着の進行にともなって、高コンプライアンス化が進むなど、複雑な様相も有している。一方、鍛造回数、コーティング種などにほぼ依存せず、ドライマイクロ鍛造時の変形率とコンプライアンスとは1対1に対応しており、型技術として低コンプライアンス化を図りつつ、コーティング・表面処理技術の深化で凝着を低減できれば、コーティングしない金型・工具によるマイクロ鍛造と比較して、格段の高変形率と耐久性を実現できると考えられる。

2. 5 環境制御による潤滑特性の評価

A. 概要

チタン材料を無潤滑油・Dry 環境での鍛造加工を期待し実験を進めているが、そこでの課題として、チタンが剥離・粉末化することによる型・プレス機・製品へのダメージの課題について解決が必要である。これらを踏まえ、かつ実際の製品化については、潤滑状態や環境制御による性能向上を図ることも併せて実施し、問題解決を早急に実現することが望ましいと考えている。そこで、ここでは、加工時の環境制御として、溶液中での加工とガス雰囲気中での加工について検討する。

これらの実施の考え方としては、加工時の材料の挙動の把握と製品不良原因の排除であり以下のように考えた。

- ・ Dry にしたい理由
 - (ア) 潤滑油に起因する製品品質の劣化の回避。
 - (イ) 残留油脂の洗浄。
- ・ Dry での課題
 - (ウ) チタン材剥離・粉末化およびその付着による製品品質劣化

最初に課題から考えると、チタン材についてはその加工時の材料の剥離・粉末化は生じると考えられる。これはチタンの酸化および脆化により加工力が加わった場合に粒子状に表面からの脱落が生じるためである。ここではこの酸化・脆化を制御する事を解決策として検討した。すなわち、空気中の自然酸化に対し、酸素量を制御した環境・雰囲気中での加工を行うことによりチタンの表面状態を制御し、剥離を防ぎ製品品質を向上させるものである。雰囲気制御としては、トライボケミカル反応の制御技術として検討されているが、Dry ガスや溶液により加工周囲の雰囲気を制御する方法がある。これらについて以下検討する。

B. ガス雰囲気利用について

ガス雰囲気利用として、酸素濃度制御ガスを導入する。数パーセント酸素を混入した不活性ガスを用い、加工部にガスを流しながら加工する。通常空気中の酸素分圧約 20% に比べ低下させることによりチタンの酸化状態（速度、酸化量）を制御しこれにより剥離を防ぐことを考える。この手法の利点としては、Dry 環境が維持されるため、潤滑油に起因する製品品質の劣化（特に表面油膜による製品傷）の問題がない。一方ガスを利用するため作業者の安全やコストの観点からプレス機を密閉しガスを導入することが有効であり、これは装置コスト・ランニングコスト的に難しい課題である。効果が高い場合でも産業的には慎重に実施が必要となる。しかしながら、研究開発レベルでの実施や、今回作成した小型生産用プレス機等では、その容積も小さく、さらに将来は全体構造からガス導入用に設計するなどの可能性もあるので、今回いくつかの実験を行った。

実験装置の都合からまず Ti-Ti の摩擦試験について、大気中、アルゴン中、真空中で行い比較をした。装置としては、雰囲気制御型摺動試験装置である。図 2.5.1 の装置には XPS (X-ray Photoluminescence Spectroscopy) 分析装置も設置しており、大気の影響を受けずに表面の分析を実施できる。この装置内で Ti ディスク、Ti ピンを使った Pin on disk 試験を行った。結果を図 2.5.2 に示す。

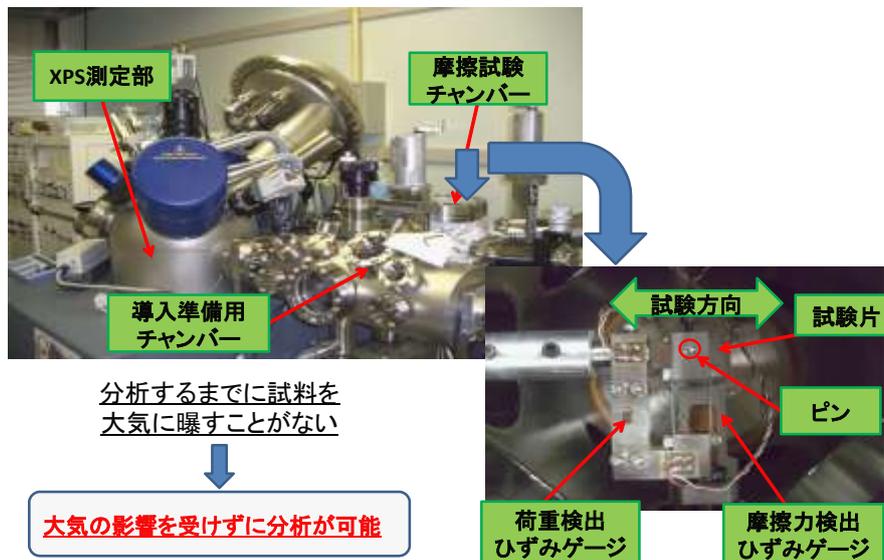


図 2.5.1 雰囲気制御型摩擦摩耗試験機

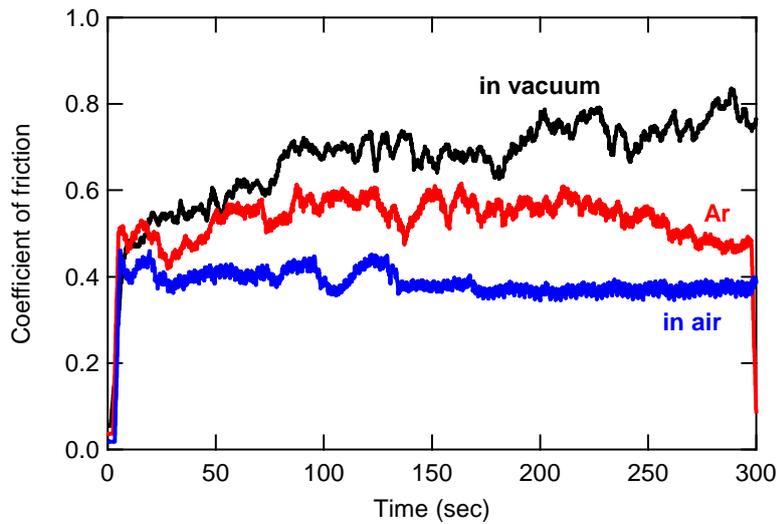


図 2.5.2 雰囲気の違いによる摩擦試験結果の違い (Ti-Ti)

図 2.5.2 から判るように、摩擦係数は大気中が小さく、真空中では高くなる。これはトライボケミカル反応が生じ、摩擦係数に影響を与えていることをはっきりと示した例である。また XPS 分析の結果は、図 2.5.3 のようになり、結果として真空中やアルゴン中では酸化膜が形成され難く、高い摩擦係数を示すことが分かる。逆に大気中では酸化膜が形成され、これが摩擦係数を下げていると考えられる。加工時の摩擦だけに着目した場合、適当な酸化被膜の形成が効果的であることが分かる。

このように加工表面において形成される状態が変化することから、このような反応制御を利用していくことが重要である。

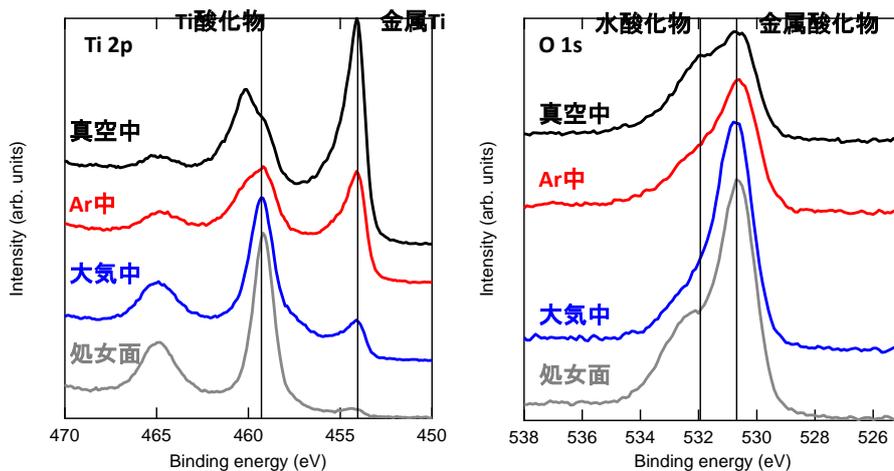


図 2.5.3 摺動試験面の XPS 表面分析結果

C. 溶液雰囲気利用について

より産業導入しやすい方法として、溶液制御の手法がある。これは通常プレス加工機においても潤滑油の導入メカニズムは準備されていることが多く導入が容易なメリットがある。しかしながら通常の潤滑油では、滑り特性だけに着目し、いかに工具・材料の滑りを良くするかという視点のみが先行する。ここでは、流体の特性として、粉が発生した場合でも溶液中に留めかつ溶液と一緒に流してしまう、「洗浄効果」と、環境ガスとして空気および空气中酸素の表面への浸透を制御する「保護効果」、液中の酸素量等による酸化等科学反応の制御を考える。また流体材料としての課題については、濡れ性制御による液膜厚さや流れの制御により加工時の液溜等を抑止する。洗浄についても、最初から製品に対し無害な溶液の利用等が有効と考えている。またガス雰囲気で得られた結果を参考に考えれば、酸化を適宜促進する事も有効と考えられる。そこで、今回は水溶性の溶液について検討した。測定はレスカ社製 pin on disk 試験機 FPR-2100 を利用した。

図 2.5.4 に Ti 板、WC ボールを用いた試験結果を示す。図でわかるように、Dry 環境では、早い段階から摩擦係数の増大が見られ、水溶液 1 中のほうが安定した結果となっていることが分かる。

またさらに比較を進め、ガス雰囲気で得られた酸化促進の効果を見ることとした。ここでは、サンプル板側に超硬材料を用い、ボールをチタン製とした。これは、ボール表面のコーティングが難しい事等の理由による。サンプルの評価面側には、日本電子工業や産業技術総合研究所において表面処理を行った。また溶液もより酸化を期待する水溶液 2 とした。結果を図 2.5.5、2.5.6 に示す。これらの結果から、未処理 Dry の場合、超硬板に対し Ti ボールの試験ではすぐに高い摩擦係数になるとともに異音が生じ実験を中止している。ボールの摩耗や凝着などによるダメージが大きい。また、産業技術総合研究所でおこなった金処理や日本電子工業での TiAlN コーティングではやはり高い摩擦係数を示したが、実験は長時間行えた。金処理では Dry、液中の比較を行ったが、液中では最初摩擦係数が高くなるがやがて下がり安定している。この低摩擦係数での安定状態の理由は現在確認中だが、この状態を得られれば、有効と考えられる。

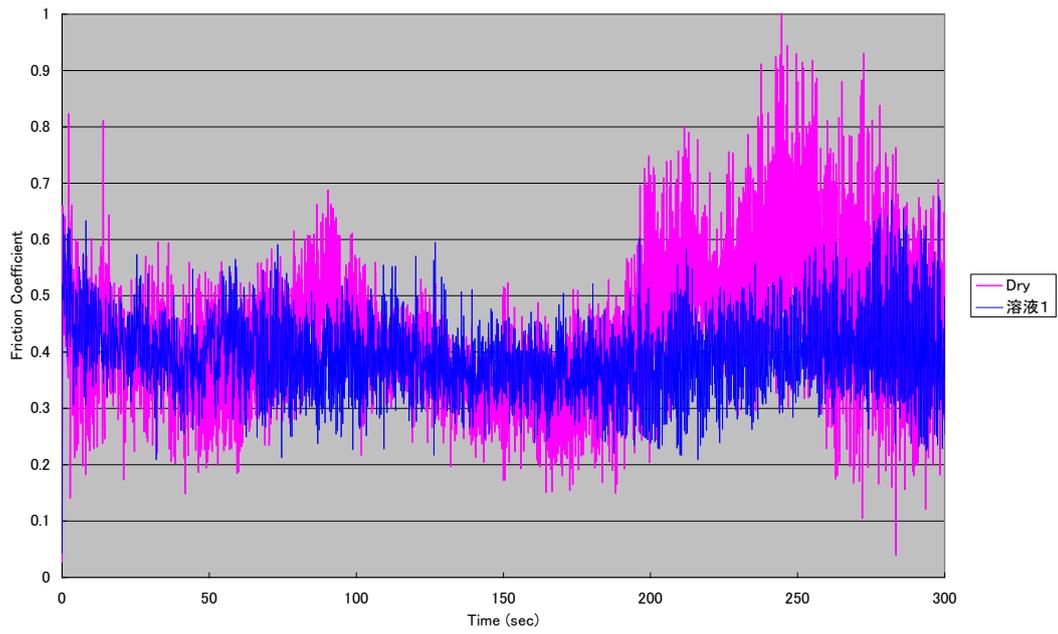


図 2.5.4 溶液 A 中の Ti-WC 摩擦係数

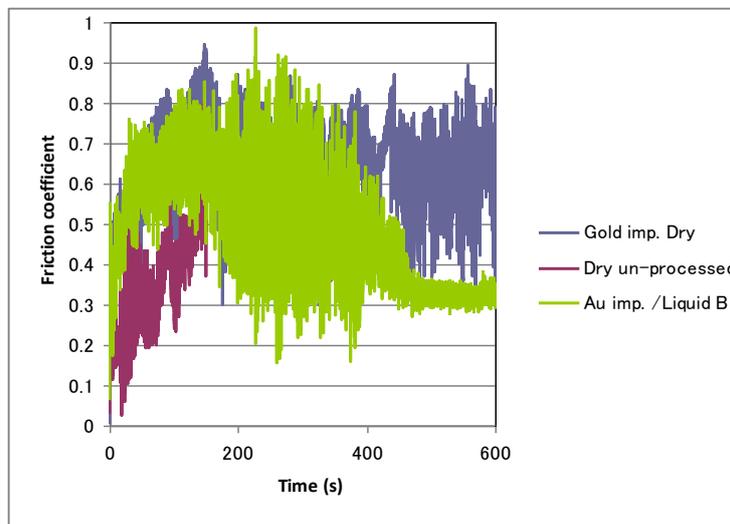


図 2.5.5 溶液 B 中試験の結果（産業技術総合研究所にて表面処理・金処理と未処理）

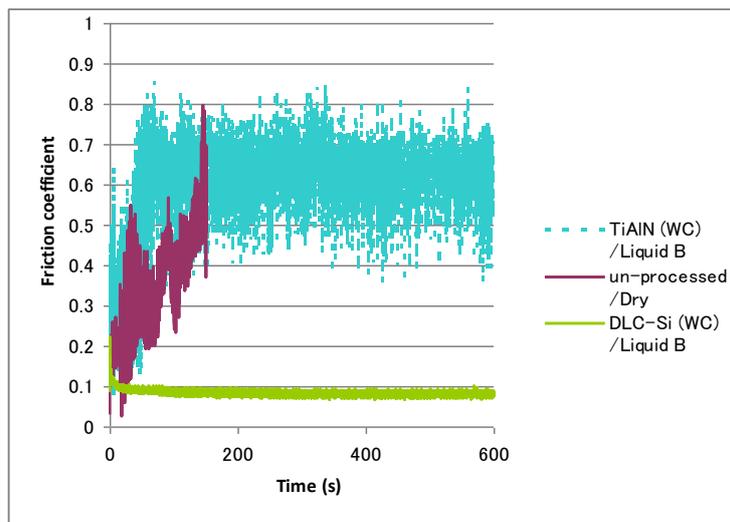


図 2.5.6 溶液 B 中摩擦試験結果（日本電子工業 DLC・TiAlN）

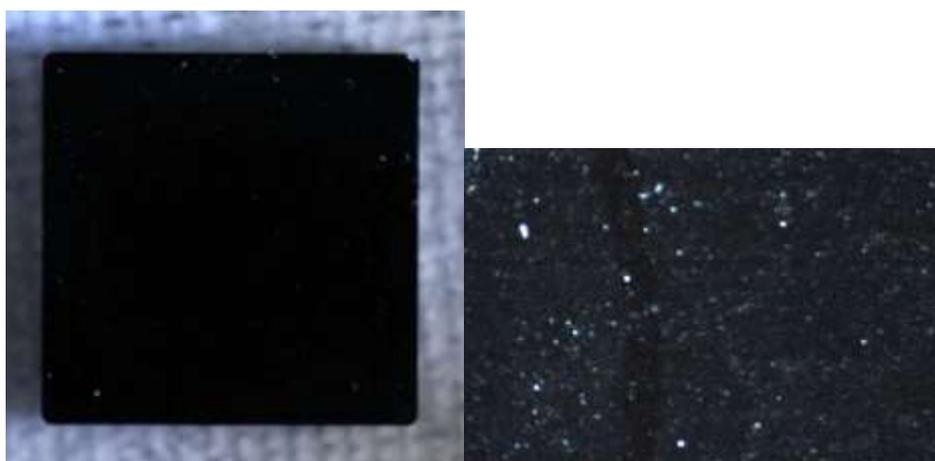


図 2.5.7 日本電子工業(DLC-Si コーティングサンプル溶液 B 中磨耗試験後写真)
左：全体図 右：トラック拡大図（見やすくコントラスト調整）

一方初期から非常に低い摩擦係数で安定した結果を示したのが日本電子工業の DLC-Si コーティングの液中試験である。この材料の場合、摩耗痕もほとんどなく、Ti ボール側もチッピング状の小さな傷だけが観察されているが、大きな摩耗は見つからない。

DLC 系のコーティングは元来低摩擦コーティングとして著名であるが、水溶液 B との関係が良く、適度な潤滑膜となっているものと考えられる。安定した加工に有効な条件と考えられる。

また水溶液 B の課題としては、弱酸性 (Ph 約 5) であり、金型・プレス機に対してダメージを与える可能性がある。酸化 (サビ) 対策を行う、使用後の管理等が求められる。一

方製品に対しては、水系の材料であり、水による洗浄により完全に除去可能であるし、そのまま乾燥させた場合にも全て揮発する。加工時の面圧による条件等の課題を明確化し、実用化につなげたい。

2. 6 金型のマイクロ化に適合するトライボロジー特性評価

A. はじめに

マイクロ塑性加工では金型のスケールがマイクロ化することにより材料の表面粗さ・うねりの影響が顕著になる。また、潤滑油のような流体潤滑は困難になり、潤滑は表面硬化処理による固体薄膜によって行われる。そのため塑性加工中での金型への荷重はマクロな金型に比べ断続的で不均一なものになる。マイクロ塑性加工の研究開発において、現在までに DLC (Diamond Like Carbon) 等の多くの表面処理技術が考案・評価がされているが、その評価に関してはボールオンディスクなどの一般的なトライボロジー試験によるものが多い。しかし、前述のようにマクロとマイクロな金型の表面における特徴は大きく異なり、評価すべき項目も変化する。ボールオンディスクなどの評価はマイクロ金型表面でのトライボロジー現象を再現しているとは言い切れず、マイクロ金型の表面により適合した評価基準を設けることが必要になる。

そこで、金型のマイクロ化にともなうトライボロジー現象を実験により再現してその特徴をあきらかにし、マイクロ金型のトライボロジー特性と表面コーティング特性評価の提案を目的とし、マイクロ金型の断続的、不均一な摩擦を考慮した摩擦試験機を用いて実験を行い、その摩擦の特徴を調べた。摩擦係数の変化、表面の凝着状態について、金型のマイクロ化にともなう影響を調べた。また表面保護膜への影響を調べるため、DLC 膜を実際に成膜して、そのはく離の条件について評価した。

B. 実験方法・条件

本研究で使用した実験装置の概要を図 2.6.1 に示す。試料に加えられる荷重は実験装置

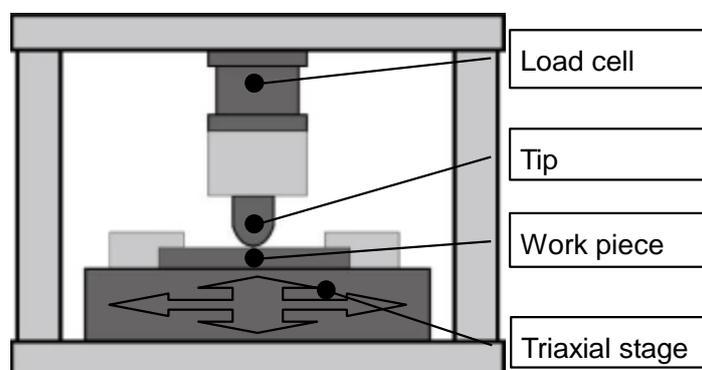


図 2.6.1 マイクロ金型摩擦特性評価実験装置概要

上部に備え付けたロードセルにて測定した。ロードセルは水平方向、垂直方向の三軸を同時に測定し、水平方向と垂直方向の荷重の比から摩擦係数を算出した。試料に加える垂直荷重は垂直方向のステージの変位を操作することによって設定する。微粒子超硬合金を用いて先端形状がマイクロ金型と同程度の試験工具(以降チップと称す)を作製した。図 2.6.2 にチップ概要と主要寸法を示す。チップは形状・寸法により点接触、線接触、面接触の三種類に分類している。点接触チップと線接触チップの先端の曲率半径は 0.1mm である。面接触チップの先端の曲率半径は 3.0mm である。各種寸法のチップを用いることで、接触面積の違いによる摩擦の影響を評価した。次に表面保護膜への影響を評価するため、DLC を成膜したチップにより、はく離特性を評価した。DLC は CVD 手法により、厚さ 0.4 mm に成膜した。

摩擦実験は大きく二つに分けて定常モード (Sliding) と振動モード

(Vibration) に分けられる。定常モードでは垂直方向の変位を変えず、一定のまま水平方向に運動を行う。振動モードでは水平方向の摩擦に加え、垂直方向の振動を加えた運動を行う。摩擦の方向は加工材である SUS303 の圧延方向に対して平行にした。実験の条件を表 1 に示す。定常モード、振動モードの両方の条件で速度 0.1mm/s、距離 20mm の走査を 3 回行った。振動モードでは振幅 200 μm、振動数 3Hz で垂直方向の振動を与えた。垂直荷重はヘルツの最大接触圧力が近い値になるように設定した。

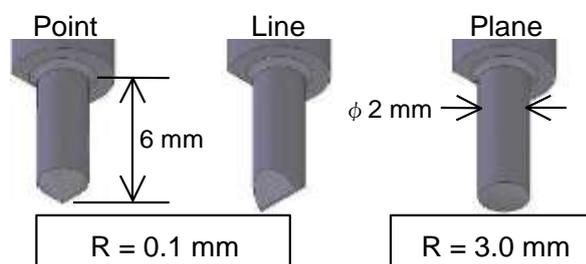


図 2.6.2 マイクロ金型先端形状と主要寸法

表 2.6.1 実験条件

Friction distance	20 mm×3
Frictionspeed	0.1 mm/s
Amplitude of vibration	50 μm
Frequency of vibration	3 Hz
Load (Hertz stress)	
Point contact	3 N (9 GPa)
Line contact	40 N (4 GPa)
Plane contact	120 N (5 GPa)
Tip	WC/Co
Work piece	SUS303 (Ra = 0.08 μm)

C. 提案手法によるトライボロジー特性の評価

前述の実験条件に従い、各々の接触面積での定常モードと振動モードの摩擦係数と表面の変化を観察した。その結果より、接触面積の減少と不連続化の影響を考察する。

3 軸ロードセルにより取得した荷重から算出した摩擦係数のグラフを図 2.6.3 に示す。点接触、線接触、面接触ごとにグラフに示した、定常モードの摩擦係数を太線、振動モードの摩擦係数を細線で示した。定常モードでは摩擦係数は 0.2 前後で安定した。しかし振動モードの摩擦係数は各接触で特徴が異なった。面接触では振動モードでの摩擦係数が定常モードに比べて大きく低下した。点接触でも同様の傾向が見られたが、低下幅は少ない。

対して線接触では摩擦係数の値に大差は無かった。また接触面積の少ない点接触、線接触では振動モードでの摩擦係数が短い接触時間の中で上昇する傾向が見られた。これは先端の曲率半径が微小なために材料が掘り起こされることによって生じたものと考えられる。接触面の微小化は摩擦係数の上昇の度合いを変化させることができる。

摩擦実験後のチップ表面の顕微鏡写真を図 2.6.4 に示す。加工材の凝着が確認できた部分を点線で囲ってある。また、図中の矢印は摩擦の進行方向を示す。定常モードではすべてのチップ形状で材料の凝着がみられたが、振動モードでは凝着部分がほとんど観察できなかった。振動モードでは垂直方向の運動によるチップ表面への凝着のみではなくはく離の影響が大きいと考えられる。定常モードでの表面への凝着箇所がチップ形状によって異なる。線接触、面接触では摩擦方向の前方部分に凝着が集中したが、点接触ではチップの頂点部分に凝着が集中した。定常モードでみられた凝着が振動モードで観察されなくなったことは、振動時に凝着とともにはく離が生じていると考えられる。振動を生じる摩擦では表面にはく離による損傷が生じる影響が考えられる。

以上のことから、本研究の手法によって接触面積の減少、摩擦の断続化によってトライボロジー特性に影響がでることを明らかにした。次節より、表面保護膜への影響について議論する。

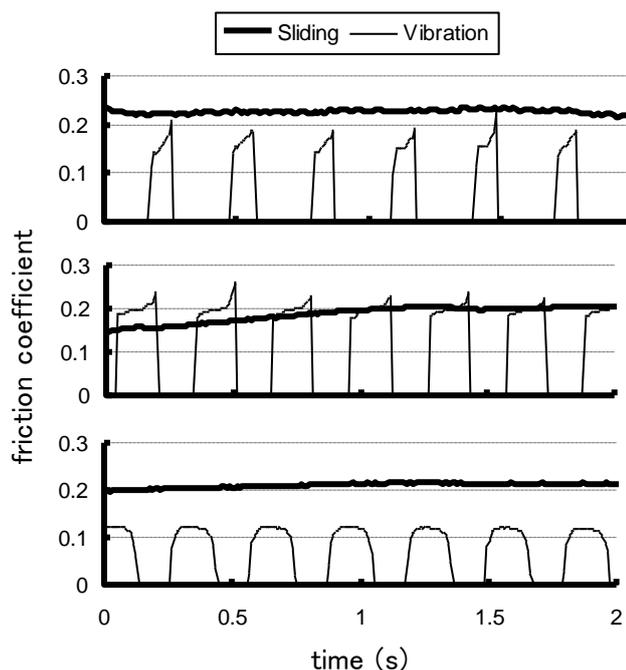


図 2.6.3 各種摺動モードにおける摩擦係数

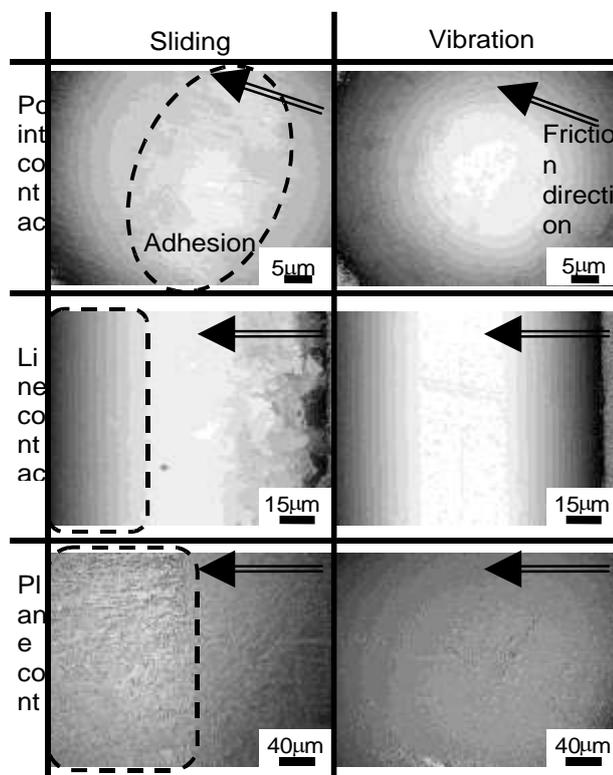


図 2.6.4 チップ表面摩耗形態観察

D. DLC 膜のトライボロジー特性評価

チップ表面に DLC 成膜をおこなったときの摩擦係数は成膜前の 0.20~0.22 から 0.15~0.16 に低下した。図 2.6.5 に各摩擦条件で行った実験後のチップ表面の顕微鏡写真を示す。定常モード、面接触ではく離は一樣で均一なものとなった。他の条件では部分的なはく離が多く見られ、特に振動モード、面接触では部分的なはく離が多く見られる部分と一樣な部分に分かれた。振動モード、面接触で二つのはく離特徴が現れたことから、表面に影響する主な応力状態がはく離の形態に影響を与えていると考えられる。表面に影響する応力が垂直応力とせん断応力であると考えると、摩擦方向によってそのバランスが変わる。摩擦方向による応力の推移を図 2.6.6 に示す。通常の摩擦試験のように接触面が大きく、垂直方向の変化が無い場合では、図 2.6.6(a) のように表面にはせん断応力が主に影響する。そのため定常モード、面接触のはく離のように一樣なはく離が現れる。しかし摩擦に振動が加わり垂直方向の運動が加わった場合、図 2.6.6 (b) のように表面の損失は圧縮応力によるものが主になる。そのため振動モード、面接触のように部分的なはく離が現れる。接触面積が微小化した場合には、材料の表面粗さの影響が大きくなる。それにより振動モードと同様に圧縮応力の影響が強くなり図 2.6.6(c)

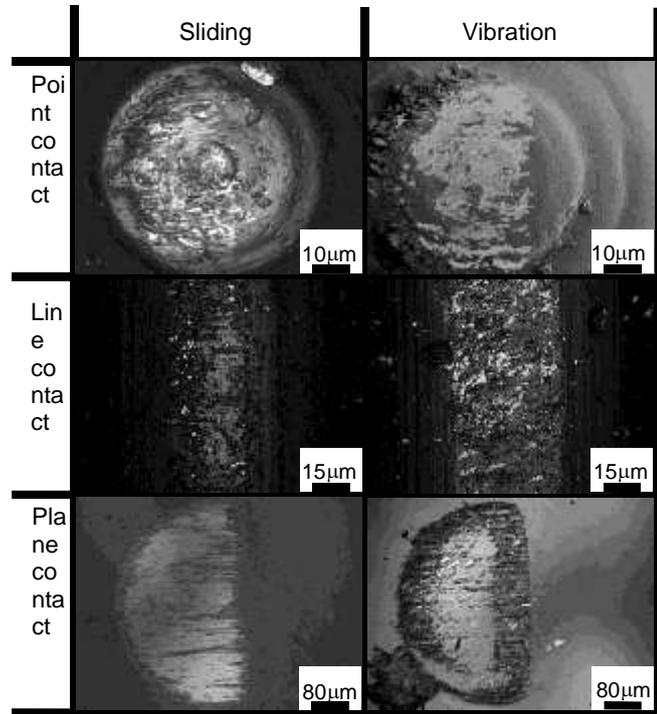


図 2.6.5 DLC コーティング工具の摩耗形態観察

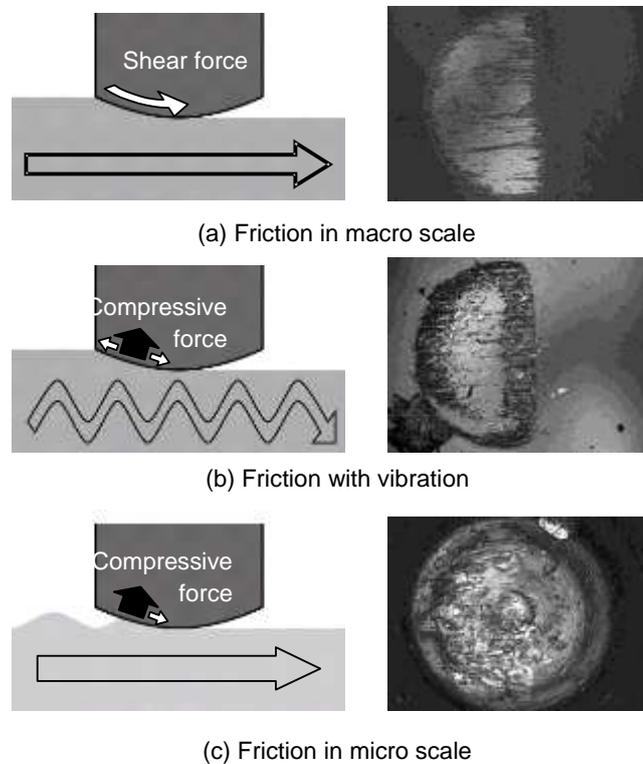


図 2.6.6 各種摺動モードでの異なる応力成分の影響

のように部分的はく離が支配的になる。通常の摩擦ではせん断応力の影響により一様なはく離が進展していくが、圧縮応力が支配的になるマイクロスケールでのはく離は硬質膜にクラックが入り、部分的にはく離が進展していくと考えられる。

フッ素を添加した DLC 膜は通常のものと比較して柔軟性をもつ³⁾ ため圧縮応力に対してクラックが発生しにくくなる。実験により表面膜に圧縮応力を加えた場合、通常の DLC 膜で生じた部分的はく離 (図 2.6.7(a)) がフッ素添加した DLC 膜では生じなかった (図 2.6.7(b))。このことから、マイクロ金型の表面保護膜には圧縮応力への耐性が大きい柔軟性の高いものが向いているといえる。

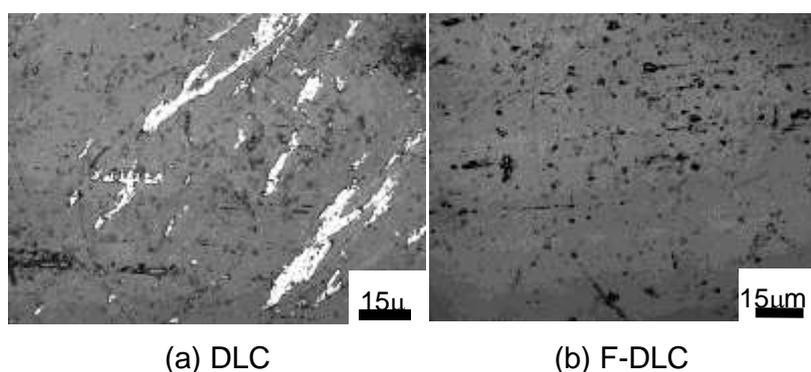


図 2.6.7 圧縮応力における DLC とフッ素 DLC の剥離形態の比較

E. まとめ

型のマイクロ化に適合するトライボロジー特性を明らかにするため、本研究では局所的・断続的な摩擦実験を提案し、その妥当性を実証した。摩擦条件によってトライボロジー特性が大きく異なり、金型のマイクロ化にともない表面の材料凝着、はく離形態が著しく変わることがわかった。マイクロ金型の表面評価では、これらの変化を考慮した評価を行う必要性を示した。

F. 参考文献

- 1) 早乙女康典, 精密工学会誌 Vol. 69, No. 9, 1221-1225 (2003)
- 2) 斉藤秀俊, DLC 膜ハンドブック, エヌ・ティー・エス (2006)
- 3) 黒河内昭夫, フッ素添加ダイヤモンドライクカーボン薄膜に関する研究, 埼玉県産業技術総合センター研究報告 第5巻 (2007)

2. 7 まとめ

ここでは、工業用チタンシートのドライマイクロ鍛造に用いるコーティングについて、その種別選択を目的としたスクリーニング実験を主体に研究した。コーティングの剥離性の指標としてスクラッチ強度を測定し、チタン球を相手材としたボール・オン・ディスク試験を、鍛造条件を想定して行った。ただし、ボール・オン・ディスク試験では、狭いクリアランスと鍛造潰し工程でのしごきプロセスあるいはせん断変形を考慮して、高面圧による過酷な摺動条件を設定した。そのため、工具保護被膜として実用的な信頼性のあるセラミックコーティングならびに DLC-Si コーティングにおいて、摩耗が大きく、3600 秒まで凝着なしに低摩擦を示すコーティングはなかった。しかし、その中で TiAlN ならびに DLC-Si は比較的優位な耐久性を有しているため、チタン材のドライマイクロ鍛造試験用の工具・金型コーティング種に採用することとした。またナノ積層 DLC コーティングに関しても、スクラッチ強度、ボール・オン・ディスク試験ともに有意なデータを示しており、上述の 2 種とともに、ドライマイクロ鍛造試験に採用することとした。

チタン材のドライマイクロ鍛造プロセスによる実用生産では、狭隘なクリアランスでも稼働できる薄い膜厚で、チタン粉に対する脱付着性、しごきあるいはせん断工程での基材-コーティング間の密着性などがさらに課題となることが想定される。膜質制御性を高めるとともに、基材と保護膜主層との間のインターレイヤー設計にも配慮した検討がさらに必要になるものと考えている。

第3章 高精度一体成形システムの開発と難加工材の精密一体成形

3.1 はじめに

難加工材での微細部品成形加工の各種課題の中、微細部品精密鍛造、複数部品から構成されるユニットの型内組立を実現し、高品質・高効率な生産システムを確立するために、鍛造用小型サーボプレス機械の開発、金型への精密素材送り装置の開発、さらに内組立を実現するための型内素材位置検出装置の開発を行った。また、開発された装置及び精密金型を用いて、難加工材のマイクロ鍛造、さらに精密一体成形を試みた。この章では、これらの成果をまとめた。

3.2 高精度一体成形システムの開発

A. 高精度一体成形システムの概要

本研究開発で提案している高精度一体成形は、順送プレス成形において、微細部品のマイクロ成形だけでなく、複数部品から構成されるユニット部品を型内組立を実現するものである。また、プレス一体成形に精密鍛造を取入れ、素材の初期精度などに対するインプロセス矯正技術や高精度素材搬送・位置決めシステムを開発することにより、難加工材を用いたマイクロユニット部品の型内一体成形を実現し、高品質・高効率な生産システム確立を目指す。図 3.2.1 にシステム概要のイメージを示す。システムの主な構成要素は、素

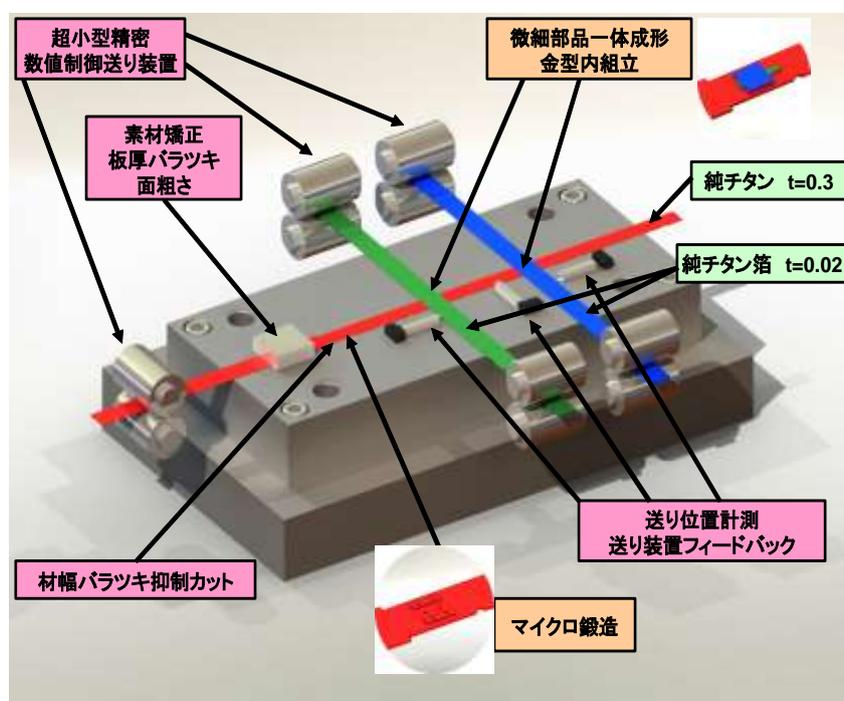


図 3.2.1 高精度一体成形システムの概要

材を精密に金型に送る数値制御材を精密に金型に送る数値制御送り装置、型内材料送り位置計測装置及び送り装置と連動するフィードバック制御、素材板厚ばらつき及び表面粗さを矯正する精密矯正鍛造、さらにこれらの動作が実現できる精密マイクロ鍛造プレス機械である。これらの要素技術を研究開発することにより、高精度一体成形を実現する。以下では、本年度、研究要素された高精度マイクロ鍛造用プレス機械、精密素材送り装置及び金型内素材位置計測装置について述べる。

B. 高精度マイクロ鍛造用プレス機の開発

本年度、マイクロ鍛造を可能とし、小型部品に適した卓上タイプのサーボプレス機械を開発した。最大加圧力は 200KN、鍛造加工で重要な決め押しが可能なスクリー（精密ボールネジ駆動式）タイプにしており、偏芯荷重に強い 2 ポイント押しの設計にした。ロードセルと変位計を内蔵し、加圧力を測定しつつ加圧時の変位量の測定も出来る。図 3.2.2 に装置の写真、主な仕様及び各要素の拡大写真を示す。



図 3.2.2 プレス機のイメージ写真、主な仕様及び主要部分の拡大図

このサーボプレス装置の特徴として、小型で高強度なフレーム構造を有しており、装置の剛性が高く、高精度な下死点位置精度を得ることが出来る。また、制御用ソコンにて様々なモーション（動作）を自由に変えることが出来、マイクロ鍛造に最適なモーションを実

験出来る。小型であることから操作性、特にマイクロ部品試作や実験作業に適している。次節で述べる精密素材送り装置及びマイクロ一体成形用金型を取り付けることにより、高精度型内一体成形を可能にした。

C. 高精度薄材送り機構の開発

市販の素材送り装置はエアで駆動するエアフィーダーが一般的に使われている。この場合、金型内においてパンチで素材に穴を開け、パイロットピンと穴による位置決めを行うが、素材送り量の調整や位置制御が難しく、複数部品型内組立のための位置調整には適応できない。そこで、本研究開発では、薄材を高精度に金型へ送るための小型サーボモータを採用した素材送り装置を開発した。アンコイラ(コイル材料搭載器)を送り装置に付属することで小型化省スペースを実現した。素材のレリーシングは、プレス機が下降時に送り装置のレバーを押すことでローラーを開放するレバー式とした。送り駆動にサーボモータを採用したため、送り精度が $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下であり、素材の位置検出情報によりフィードバック制御を行うことが可能である。



(a) アンコイラ付き素材送り装置全体写真



(b) 送り装置拡大写真

図 3.2.3 高精度薄材送り装置の写真

表 3.2.1 高精度薄材送り装置の主な仕様

項目	仕様
最大板厚	0.2mm
最大送り速度	300mm/s
素材レリーシング	レバー式
コイル材料搭載方式	アンコイラ付属

D. 金型内素材位置検出システムの開発

精密一体成形を実現するために、金型内での材料位置決め精度が大変重要である。単一部品加工の場合、材料はパイロットピンによって位置決めが行われ、それなりの加工精度が得られている。しかし、複数の部品を金型内で位置合わせを行い、カシメなどで締結する場合、その位置決め精度が高く要求され、また、カシメ用のバーリングの引っ張り部分と他方の部品の穴位置を合わせた状態で押し込む必要があり、パイロットピンの機能が有効になる前の高い精度の位置が必要となる。そこで、本研究開発プロジェクトでは、金型内蔵素材位置検出センシングシステムを開発し、その検出信号を素材送り装置へフィードバックすることによる高い位置決め精度を実現することを最終目標とする。図 3.2.4 に位置決めセンシングシステムと素材送り装置と連動したフィードバック制御の概要図を示す。今年度は、金型内蔵センサーの設計開発を行い、その特性評価を行った。

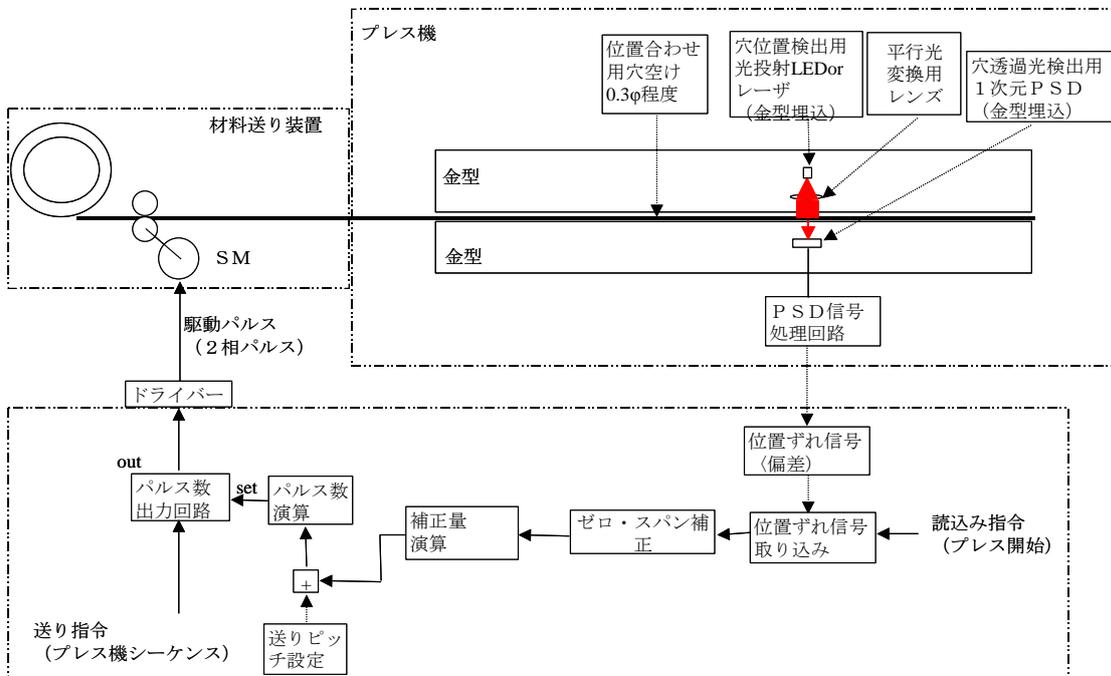


図 3.2.4 金型内蔵素材位置計測センサーと高精度素材位置決め制御概念図

図 3.2.5 に金型内像センサーの位置検出原理と構成要素を示す。金型内にレーザ素子と光の輝点の位置を検出できる素子をそれぞれ上型と下型に埋め込み、加工品に空けた穴を通過した光を輝点検出素子に当てることにより、材料位置を検出するという方式を採用した。このセンサーシステムは小型レーザ素子、凸レンズと PSD (Position Sensitive Detector) 素子の 3点で構成され、大きさが数ミリメートル程度、応答時間 5ms 程度である。素材にサブミリメートルの小さい穴を開けることにより、原理上 $1\mu\text{m}$ 程度の精度で位置検出が可能である。図 3.2.6 にレーザ素子とレンズをケースに固定した光源ユニットと下型に組み入れた PSD 素子の写真を示す。

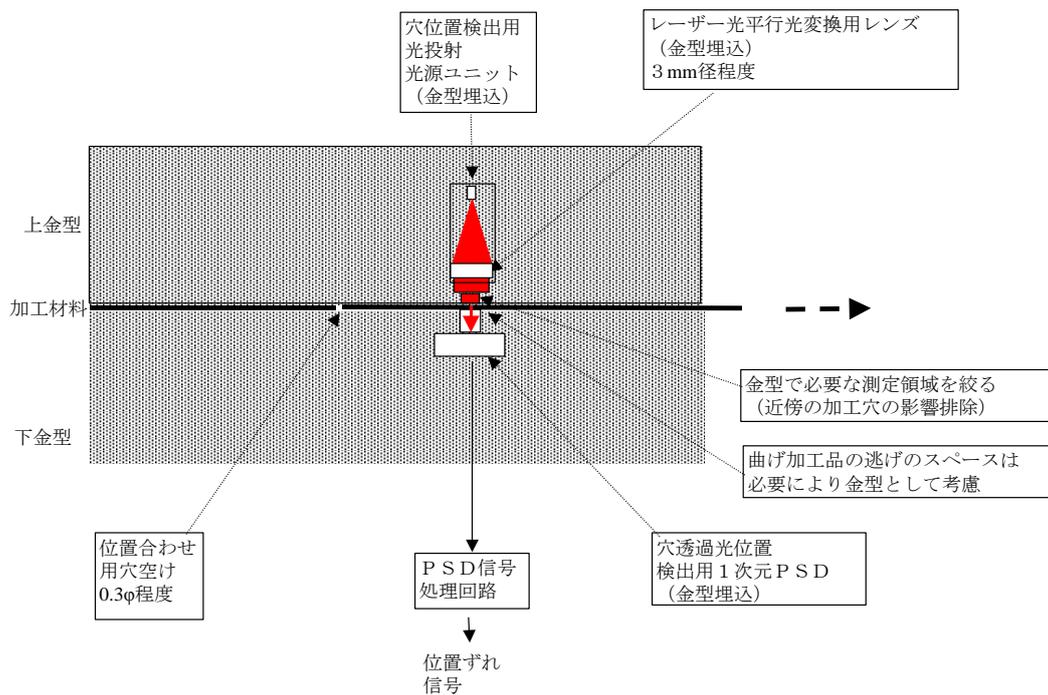


図 3.2.5 金型内蔵センサーの位置検出原理と構成要素

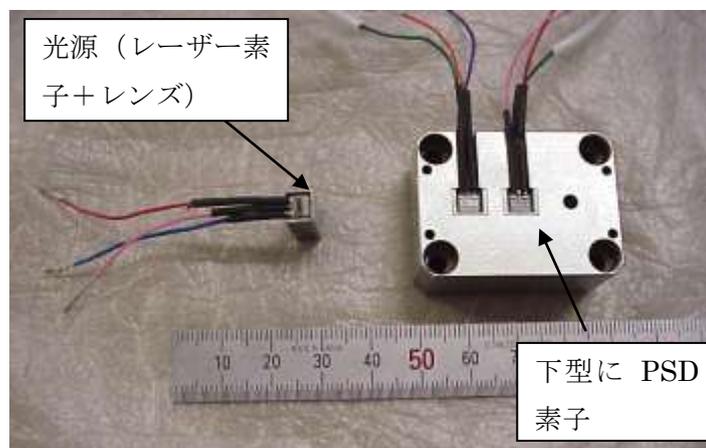


図 3.2.6 センサー構成要素図

上述位置検出センサー内蔵金型を卓上サーボプレス機に取り付け、センサーの動作確認および素材送り装置の送り精度の確認実験を行った。材料送りピッチを 10mm に設定し、位置検出穴開けも 10mm ピッチで行われた。また、上型が下死点に来た状態で、PSD 信号処理回路の光量モニター出力が 7V 程度になるように光源用電源の電圧を調整した。

具体的な評価項目と評価結果は以下の通りである。

(1) センサー信号の応答特性と分解能評価

PSD 信号処理回路からのデータ収集サンプリング時間を 20ms、サンプルデー

タ数 300 に設定し、信号取り込開始後プレス機の連続運転をスタートさせ、6 秒間のデータを確認した。材料送りを 0.1mm/s の速度でそれぞれ順方向 200 μ m、逆方向 200 μ m を行った後、停止状態にした場合の結果を図 3.2.7 に示す。

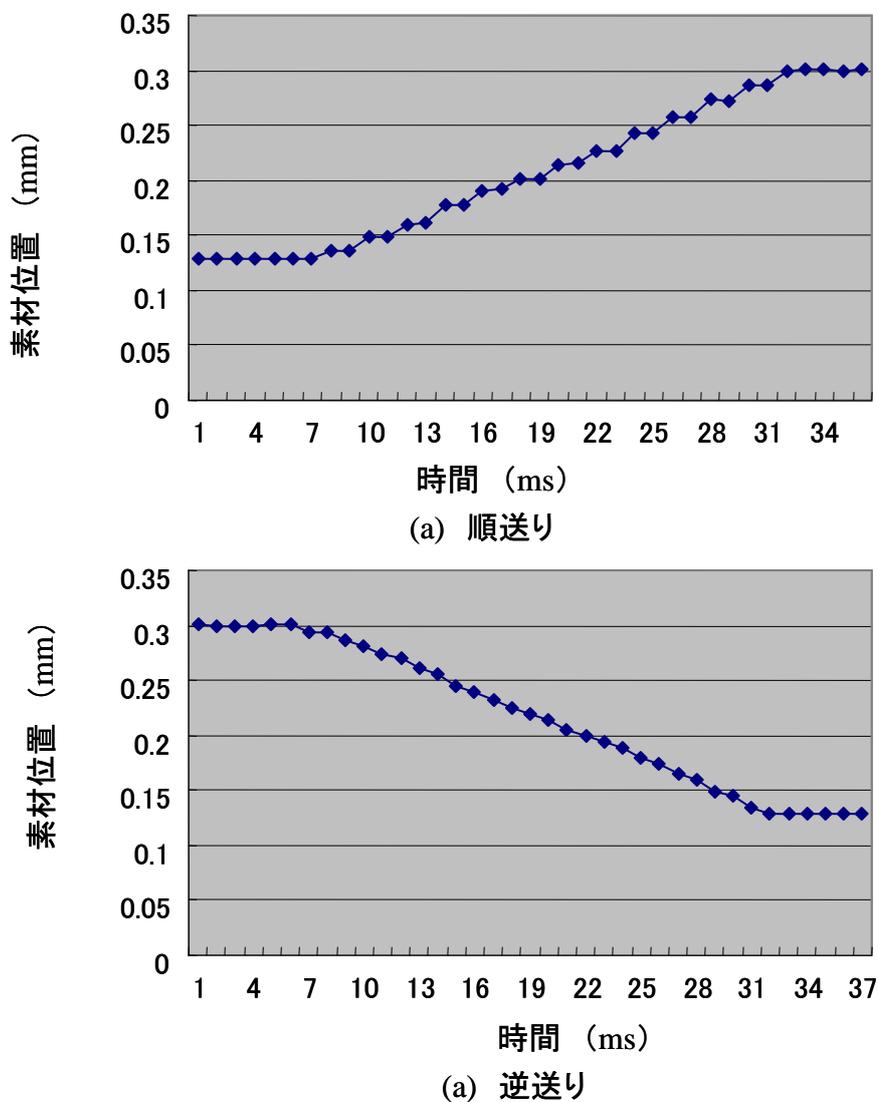


図 3.2.7 素材送り位置検出結果

結果より、5msのサンプリングタイムでは、材料送りの速度に十分応答することが分かる。また、停止時のデータの安定度について評価した結果、ばらつきは最大 2 μ mであった。ただし、3回の平均値では1 μ 以下になることが分かった。また、材料位置を固定した状態で、光源の電源をオンにしてから、センサー信号が落ち着くまでの時間を計測したところ、5ms程度で立ち上がっていることが分かった。従って、位置検出時、常時点灯していなくても測定するタイミングに合わせて点灯させればよいことが分かった。

(2) 材料送り精度評価

同様な実験条件で、材料送りを 0.1mm/s の速度でそれぞれ順方向に 200 μ m、逆方向に 200 μ m を行った後、素材の位置を検出し、材料送り精度の評価を行った。順送りの場合は材料の送り量が 150 μ m 程度となり、50 μ m の不足であり、逆方向では、送り量が 190 μ m 程度となり、10 μ m の不足であったことがわかった。その原因について、材料送りピンチロールと素材とのすべりの可能性があると考えられるが、今後追加実験を行い、解明していく予定である。

今回開発した材料位置検出センサーは位置決め精度が大よそ設計仕様通りであり、今後高精度送り装置とリンクして、素材の高精度送りの実現に適用したい。複数の薄板帯状の材料を供給して加工する一体成形の場合は、材料の位置決め精度が成否に影響する。一般的な順送加工の場合は、金型内にパイロットを設置し送り装置の精度を矯正しているが、一体成形の場合はパイロットで矯正する前に組み合わせとなるので送り装置の精度頼りとなる。順送で加工が進むと設計値の送り長さとは異なることから組み合わせ部分にて送り精度を計測し矯正する必要がある。マイクロ部品の一体成形にては、極めて微小な計測システムが必要で、本開発システムはマイクロ一体成形の送り精度計測に十分な小型化が実現できた。

E. まとめ

鍛造用小型サーボプレス機械、金型への精密素材送り装置、さらに内組立を実現するための型内素材位置検出装置を開発した。これらの装置はマイクロ精密一体成形を実現するために必要な性能を十分備えており、システムを構成する要素技術の開発は成功した。今後、マイクロ鍛造やユニット部品のマイクロ一体成形に適応することにより、システムとして課題を明確にする必要がある。

3. 3 マイクロ鍛造による表面粗さ低減効果

A. 素材表面粗さ低減のニーズと課題、本研究の取組

金属材料によるマイクロ部品加工時、素材の品質が大変重要となる。現状では、市販されているチタンやステンレス鋼などの難加工材料の薄材は、板厚のばらつき、平坦度、表面粗さなどにおいてまだ多くの課題が残されている。素材が薄くなり、平坦度や表面粗さの影響が相対的に大きくなり、マイクロな製品寸法精度に与える影響が大きくなる。高精度なマイクロ製品製造には、素材品質の向上が必要であると同時に、加工プロセス中に表面粗さを含む材料寸法の矯正を行う必要がある。それに対して、磨かれた金型表面が材料に転写される工法が効果的と考える。特に純チタンにおいては、鍛造の潰し厚のバラツキが顕著であり表面粗さと共に金型転写技術の確立が重要となる。そこで、マイクロ鍛造技術を用いて、平坦な表面を有する金型表面転写による素材矯正に関する実験を行い、その効

果を評価した。

B. 実験方法

開発したマイクロ鍛造用プレスに順送形式の金型をセットし、プレス鍛造による評価実験を行った。図 3.3.1 に実験用金型及び試験片の写真を示す。材料は純チタン 1 種で板厚は 0.2mm のものを用いた。まず $\phi 3\text{mm}$ の穴を明け、次に $\phi 6\text{mm}$ の鍛造パンチで板厚 0.2mm に対して 0.15mm まで突っ込む潰しを行う。その結果で、パンチ突っ込み量（潰し量）に対して、実際のスケルトンの潰れ量と、 $\phi 3\text{mm}$ の穴の減少具合を計測し、変形による材料の流動を調査した。材料に金型面状態を転写するには、潰しにより材料が移動することが効果的であり、その移動量が大きい金型材料と金型面粗さを模索する。実験では無潤滑とするが、移動に効果的な潤滑処理についても開発する。また、直径 $\Phi 3\text{mm}$ のパンチを用いて、板厚 $200 \cdot \mu\text{m}$ のチタン材の鍛造実験を行い、鍛造時の荷重をチタンの降伏応力 ($=275\text{MPa}$) と同程度 (18kN) とし、表面粗さ改善について評価した。

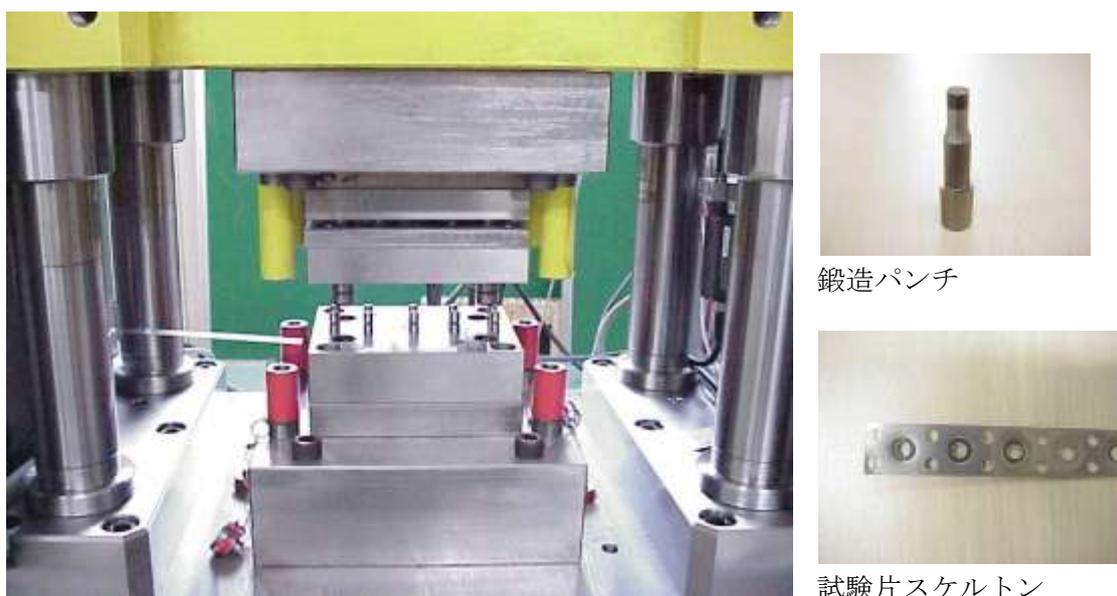


図 3.3.1 マイクロ鍛造評価実験用金型及び試験片の写真

C. 実験結果と考察

まず、 $\Phi 3\text{mm}$ の穴開け後に、 $\Phi 6\text{mm}$ のパンチによる鍛造の結果を図 3.3.2 の写真に示す。鍛造することにより、穴径 $\Phi 3\text{mm}$ から $\Phi 2.9\text{mm}$ に縮小し、変形による材料の流動が見られた。また、鍛造で表面性状が初期状態（鍛造加工を受けない部分）と比較して、明らかに変化が見られた。そこで、共焦点レーザ顕微鏡を用いて、鍛造による表面粗さを測定した。図 3.3.3 に示すように測定条件を示す。



図 3.3.2 鍛造後の Ti 表面性状写真

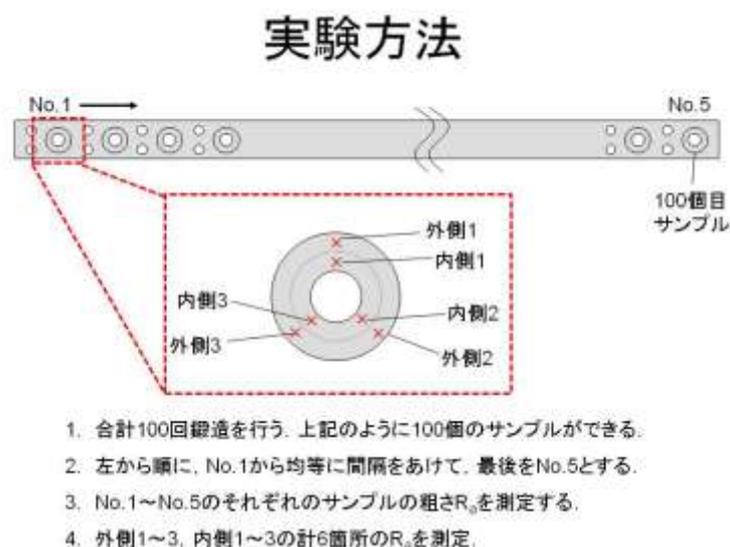


図 3.3.3 鍛造後による粗さ低減に関する測定方法

測定した結果を図 3.3.5 に示す。図 3.3.5 から分かるように、素材の初期表面粗さに対して、何れの測定点においても、粗さの低減が見られた。また、穴に近い内側のほうがより小さい表面粗さを示す。これは変形による材料の流動によって金型表面が転写され、その結果表面粗さの低減につながった。また、材料の流動性のよい金型材質または表面処理によって、その傾向が強いと考えられる。それに対して、中心穴を開けずに、 $\Phi 3\text{mm}$ のパンチを用いて鍛造を行った結果では、表面粗さの変化が殆ど見られなかった。

また、サーボプレス機械の特徴を活かして、より効率的に表面粗さを低減できる方法として、振動を加えて、動的な圧力を与えることにより、表面粗さの低減効果について評価した。この場合、同様に $\Phi 3\text{mm}$ のパンチを用いて鍛造を行うが、パンチが材料表面に対して、 32Hz の周波数で、振幅 $100\mu\text{m}$ の振動を加えることにより、振動鍛造を行った。振

動鍛造後の材料表面写真を図 3.3.6 に示す。図 3.3.6 より、粗さは僅かではなるが、変化が見られた。これは、動的な圧力を加えることによって、表面粗さの突起部分に振動エネルギーが集中し、突起部分がより変形しやすくなったと考えられる。ただし、今回の実験では、与えられた振動の周波数が小さいため、効果が小さいが、より高い周波数で振動することにより、小さい圧力でも表面粗さの低減が期待できる。

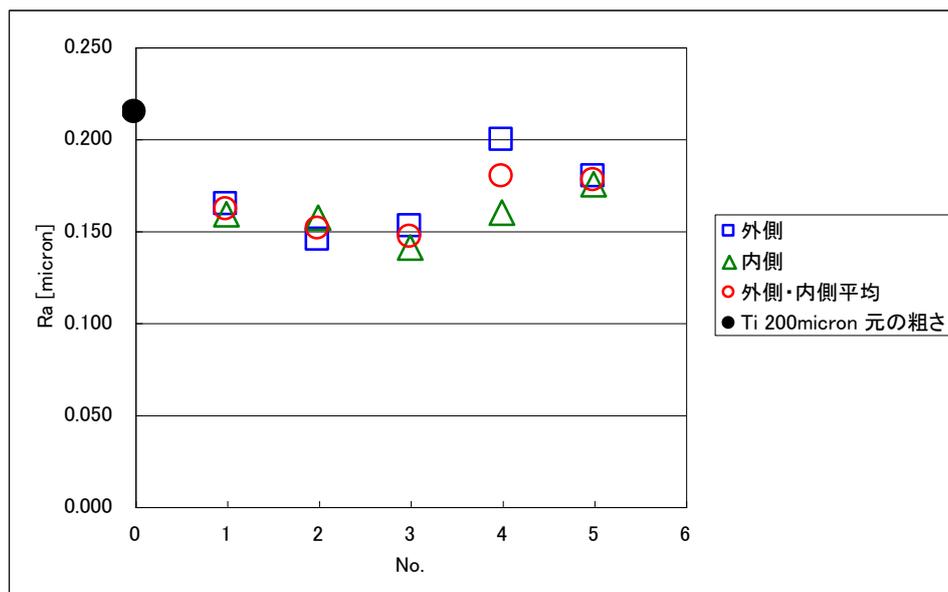


図 3.3.4 鍛造による表面粗さの変化



図 3.3.5 振動鍛造による表面粗さの変化

3. 4 難加工材の精密一体成形

A. 医療用マイクロ部品例と課題

医療用の微小鉗子は、プレス技術に関してはある程度完成されているが微小であることから組立が極めて困難である。マイクロ鉗子は3次元形状となっており、鍛造を含む一体成形（金型内組立）順送加工には様々な問題点を含んでいる。例えば、材料の供給精度の問題、原材料の面状態、マイクロ鍛造金型強度、ドライ加工等が考えられる。

それらの問題を確認し解決策を講じることで、医療用マイクロ鉗子に限らず、益々小形化するセンサー部品、マイクロマシン部品の量産安定と低コスト実現に貢献する。本研究プロジェクトでは、微小鉗子を例に取り上げ、精密一体成形プロセスの設計を行った。また、その要素部品をプレス成形で製造することをを行った。

B. 微小鉗子の一体成形プロセス設計と加工方法

図 3.3.6 に微小鉗子を一体成形する場合のプロセスを示す。4種類の素材を同じ金型内でそれぞれプレス成形し、カシメ加工により、成形部品を組立て、最終製品となる。

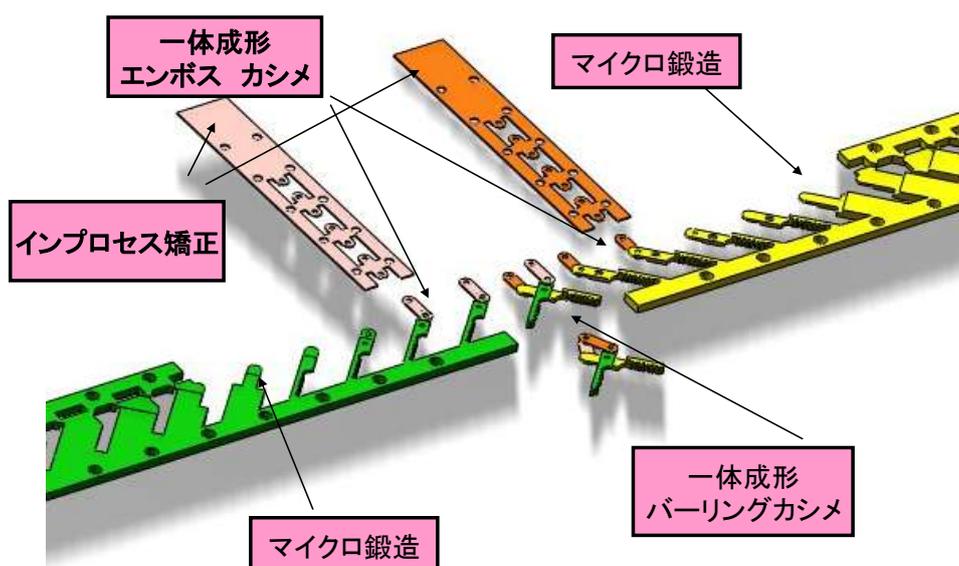


図 3.3.6 微小鉗子の一体成形プロセスイメージ図

必要となる加工プロセスはプレス鍛造以外に、抜き加工、エンボス、バーリング加工などである。鍛造実験での成果を踏まえ、鍛造精度の安定から鍛造工程を2～3工程とした。試作時には、今回開発した「小型卓上鍛造プレス機」にてモーションを多段として実験する。プロセス詳細を図 3.3.7 に示す。ただし、本年度は鍛造による材料の流動状況を確認し、各工程間で送りピッチの変化を確認する。金型表面粗さの転写状況、微細抜き部分の金型耐久性、無潤滑での鍛造の問題点等を調査するが時間的に問題点の摘出のみとする。

実際成形加工を行う部品の設計図を図 3.3.8 に示す。寸法は長さ 3.45、幅 0.5、高さ 0.6 mm 程度のものである。使用する素材は純チタンと SUS304 である。



図 3.3.7 微小鉗子成形工程図

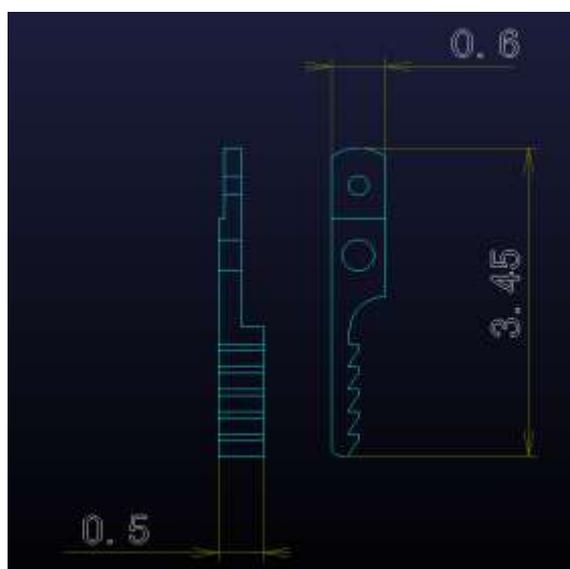


図 3.3.8 微小鉗子主要構成部品の設計図（寸法：長さ 3.45×幅 0.5×高さ 0.6 mm）

C. 単体部品の加工と試作品例

今年度、微小鉗子の連結板部品及び鉗子部品の成形加工を試みた。図 3.3.9 に成形用金型を示す。また、鉗子部品単体の試作品を図 3.3.10 に示す。



(a) 鉗子部品成形用金型



(b) 鉗子連結板成形用金型

図 3.3.9 微小鉗子部品成形用金型写真



(a) 表面



(b) 裏面

図 3.3.10 微小鉗子部品試作品写真

D. 今後の展望

本年度は微小鉗子単体部品の成形加工を行い、マイクロ鍛造順送の問題点を摘出し、対策を考慮するが、今後さらにこれらの問題点を踏まえ、鉗子2個と連結板2個で構成される4部品の一体成形技術の考えられる問題点を摘出し、その対策案を具体的な一体成形順送型で実現する。更に送り装置の送り精度フィードバックシステムや、原材料の矯正システムを内蔵した金型へ発展させたい。

3. 5 まとめ

マイクロ精密鍛造用小型サーボプレス機械の開発、金型への精密素材送り装置の開発、さらに内組立を実現するための型内素材位置検出装置の開発を行った。いずれも市販された装置にはない小型かつ高精度なものであり、難加工材での微細部品精密鍛造、複数部品から構成されるユニットの型内組立の実現による高品質・高効率な生産システムの確立に大きく前進した。また、開発された装置及び精密金型を用いて、難加工材のマイクロ鍛造、さらに精密一体成形を試みた。鍛造による表面粗さの改善効果が見られ、今後更なる実験データの蓄積による加工条件の最適化を進めていく必要がある。また、マイクロ鍛造を含む一体成形についても、設計及び加工システムの構成ができており、今後、評価実験を重ね、加工システムとしての課題を明確にし、改善していく必要がある。

第4章 総合調査報告

4.1 マイクロ医療・マイクロバイオ分析市場

マイクロ医療としては、ロボットが「鉄腕アトム」によって開発のゴールが一つのイメージが与えられていたがごとく、一世代前に制作された映画が、その後の進歩の道筋を一つの夢として指し示していたとも見える。それは「ミクロの決死圏」である。

ミクロに変身させた人間からなる医療チームを体内に送り込み、体内から治療するというSF映画である。人間をミクロに変身させるのは今でもあり得ないが、着想は奇抜で、体内から治療を行う、また低侵襲で手術を行うことは、現代では現実のものとして追及されてきている。具体的には内視鏡手術、インテリジェント手術、カプセル内視鏡であり、ミクロの視野にある検査・分析手法としてバイオチップ、マイクロTASなどが実用化の域に達しつつある。それは、半導体・シリコン加工・成形技術の進歩により、マイクロ・ナノの加工、製品が実用化され、医療・バイオ分野では遺伝子・ゲノムの解析がコンピュータの発達とともにマイクロ分析が特別なものでなくなった状況が出現したことによる。

機械加工の精度でも、前述のミクロの決死圏の時代には通常要求できるレベルは±0.05mm程度であったが、現在はその一桁下が常識となり、超精密切削加工ではnm台の精度にも対応できるようになっている。

医療においては、世界的に長寿命化が進み、疾病による死亡原因がかなり明らかになってきた。アメリカでは心臓疾患が正に致命的な死因となっており、ペースメーカーの商品化や心臓移植手術などが急展開し、一つの市場を形成する結果となった。

日本では最近まで、ガン、特に胃がんが死因のトップであったことから、また、精密光学メーカーの技術力により内視鏡が発達し、世界市場で大きなシェアを占めるまでになった。

一方、診断機器は応用物理のハイテク適用による、CTやMRIが実用化され、診断技術は前記ミクロの決死圏の時代には想像も出来ないレベルに到達している。この分野でも日本は超電導技術、電子・電機技術におけるリーダーシップにより、米欧に対峙する存在となっている。

以下、先端医療に関わる市場に絞って、現状を概観する。

A. マイクロ医療市場の現状

マイクロ医療市場というものは現実にはまだ形成されておらず、一般の医療機器市場の中で今後成長が期待される部門として位置付けられる。大局的見方としては、高齢化の進展が様々な医療事業の展開を促すことになるのは間違いない。

日本の高齢化は急速で、2005年厚生労働省の調査報告「医療機器・技術産業ビジョン」に示されているとおり、2010年の高齢化率20%が2050年には倍の40%に達する(図4.1.1)。

医療機器市場は図4.1.2の通り全体で2兆5千億円規模であり、GDP成長を上回る安

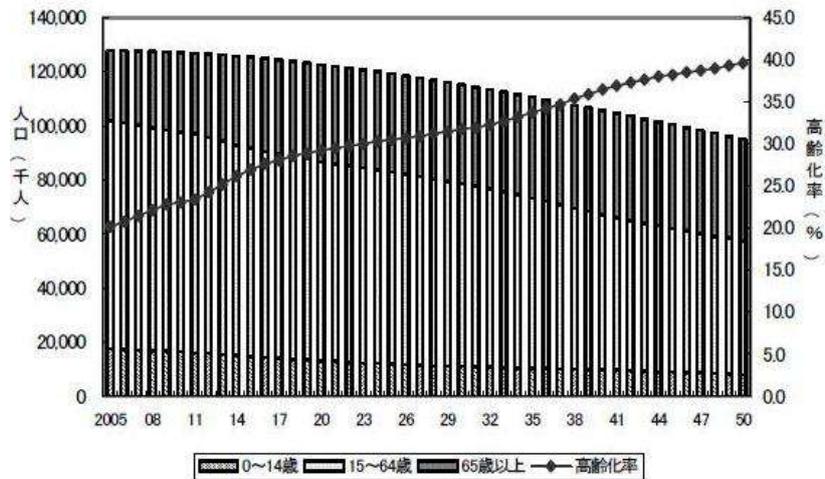


図 4.1.1 日本における高齢化予測（高齢化率＝65才以上人口比率）

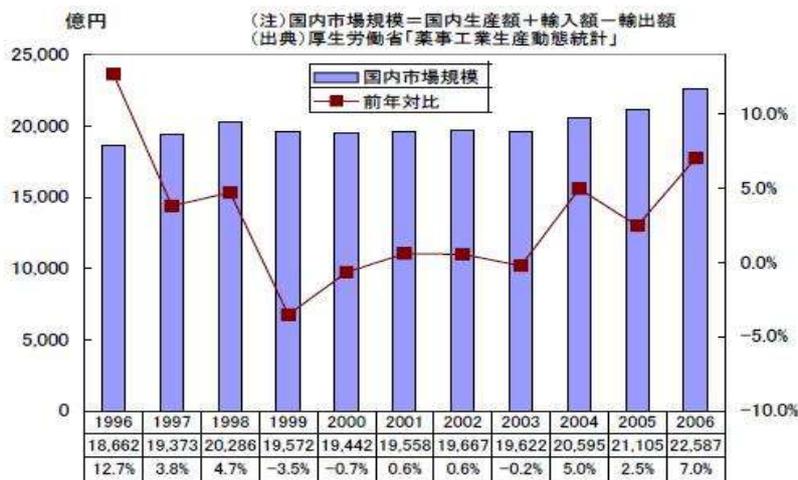


図 4.1.2 国内医療機器の市場規模と対前年伸び率の推移

定成長を示しており、国内産業としても一定の期待を抱かせる部門であるが、中でも手術用デバイスはかなりの高成長が見込まれている（図 4.1.3）。オリンパス単体で2000億円を越える売上げがあり、マイクロ・精密デバイス部門でおおまかに20億円程度の市場はあるものと見られる。

しかし国際的には、日本の企業は規模が小さく（図 4.1.4）、医療水準そのものも遅れがあると、医療従事者は見ている。

しばしば指摘されるように、医療に関するこれまでの厚生省の認可体制の遅さが問題視されているが、出遅れの結果ますます大きく水を空けられているというのが実態である。

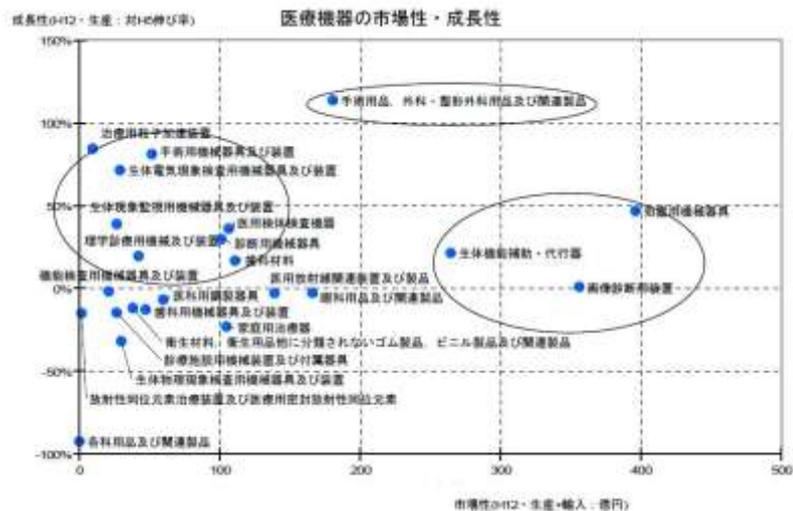


図 4.1.3 市場性・成長性

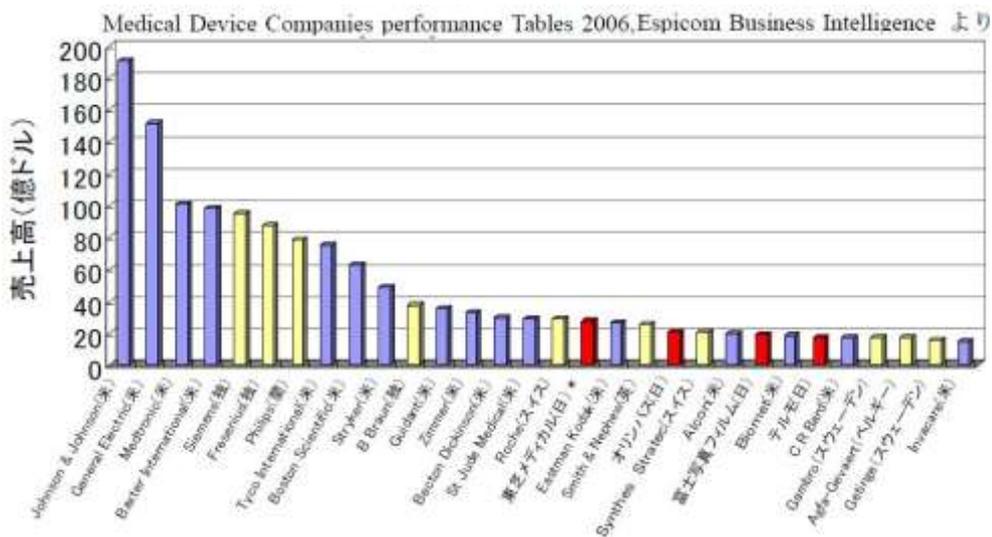


図 4.1.4 医療機器関連企業の世界ランキング

B. マイクロ医療市場の成長性

日本の得意分野としては、CT、MRI 等の診断系の比重が高いが、独自性の意味では内視鏡などの精密機器系に競争力がある。

国のプロジェクトとしても、この精密とロボット・IT という日本の強い方面を伸ばす、インテリジェント手術の開発プロジェクトが NEDO で進行中である (図 4.1.5)。マイクロ鍛造という分野を切り開く、本研究開発の一つのゴールと位置づけられるマイクロ鉗子は、NEDO プロジェクトの現実化において非常に重要な要素となる。

手術部位によって、鉗子は大きさ、形状ともに様々なものとなり、大量に必要なになるので、鍛造・自動組み立ての量産プロセスの確立は必須である。

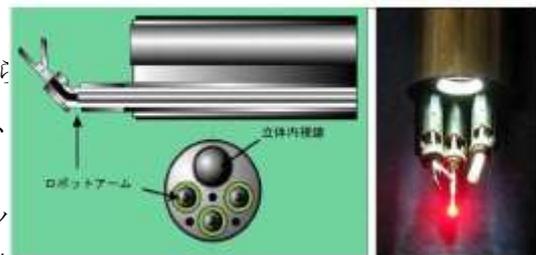
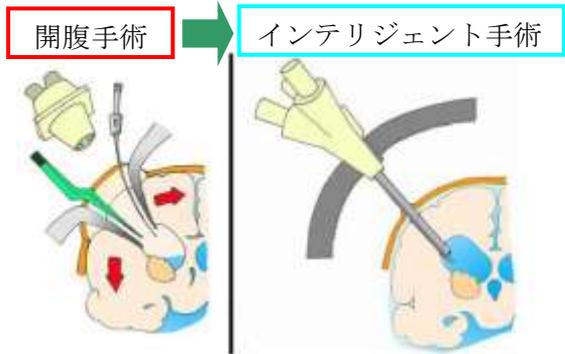


図 4.1.5 インテリジェント手術機器の例

図 4.1.6 はインテリジェント手術における内視鏡の機能を示しており、図 4.1.6 左に示すように、内視鏡は単に体内を観察するだけでなく、センサーや手術デバイスをも導く。

LED ライトガイドにより体内部位を照らし手術ツールポートを通じて小型 (マイクロ) 鉗子や電気メス、超音波プローブを操作して手術を行う。

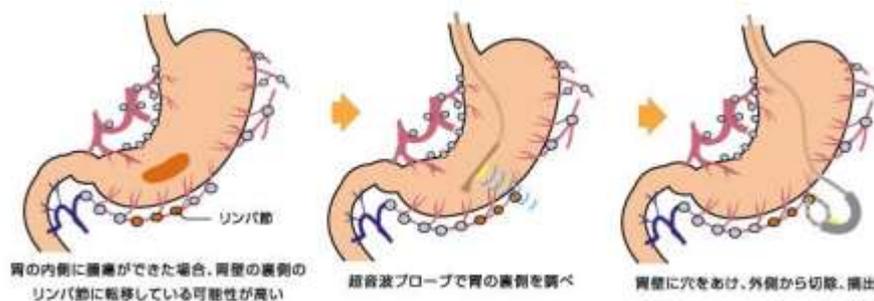
同図右では従来の開腹手術がインテリジェント手術に変わることによって、開腹ダメージをほとんど解消することができ、低侵襲手術が実現される状況を示しており、ロボットアームの動きと、その先端に装着した鉗子、およびライトガイドによる照明状況を示している。



前から超音波プローブによってリンパ節の位置を特定し、内視鏡に装着した電気メスによって穴を開け、裏側からガンを切除するものである。この場合は開腹どころか、腹には一切穴は開けない。図 4.1.7 下はさらに先を行くもので、腹部の小径の穴から内視鏡を進め、心臓の裏側から手術を行う様子を示している。

いずれも低侵襲手術を実現でき、患者のQOL（生活の質）は飛躍的に向上する。

リンパ節に転移したガンの切除・摘出



心臓の裏側を内視鏡手術する場合



図 4.1.7 内視鏡手術の展望

C. サポインの趣旨を実現

上述のとおりインテリジェント手術を支えるマイクロ医療は、世界の最先端に日本の医療技術が踊り出ることが可能にするもので、本事業ではオリンパス(株)がアドバイザーとして大きな期待と熱意を持って参加しており(全開発委員会に出席実績)、当面市場ニーズを的確に把握しながら開発・事業化を進めることができる。

現状でTi 鍛造はマイクロ医療において必ずしも必須技術ではないが、図 4.1.8 の例にも見られるように将来的には優位技術として着目されることになる可能性は高い。実際、マイクロでない分野では歯科インプラントや人工関節などでTi は必須材料となっている。

オリンパス(株)の期待にタイムリーに答えていくことにより、正にサポインの趣旨を実現していくことができる。



4. 2 国内外におけるマイクロ成形加工関連研究開発の調査

精密機械加工や成形加工技術を生化学分析、マイクロ医療、燃料電池などの応用や安心安全社会作りのための各種3次元構造マイクロデバイスへの応用が期待される。マイクロ生化学分析を実現する μ TAS (Micro Total Analysis System) やバイオチップは多様な試薬や生化学物質を含む気体や液体を扱う必要があり、これらの気体液体の輸送、混合、反応、分離などの操作を実現するための3次元構造、駆動機構、さらにそれらに適した材料や表面処理などが求められる。さらに、マイクロ医療の場合は、材料の生体適合性などが求められる。ニーズの多様性に対応した多品種少量生産の製造技術もこれらのデバイスの実用化に欠かせない。

これらのニーズに対応して、最近、高分子材料をベースとしたプリンティングやインプリンティング、マイクロ射出成形、インクジェット技術などを用いた分析用デバイス製造の研究開発が行われている。また、マイクロ放電、マイクロ機械加工、電子ビーム、イオンビーム、レーザービームなどによる精密加工技術、さらに、金型を用いた金属材料や金属ガラス材料の成形加工技術などが研究されている。メリットとして、シリコン以外の材料の選択や、低コスト、多品種少量生産への対応などが挙げられる。マイクロ生化学分析、高密度記憶媒体、小型燃料電池構造部材、マイクロ医療機器などの機能性デバイスに関する材料開発、金型創製及び製造技術の実用化が期待される。

海外においては、EUの13ヶ国が中心になって進められている金属材料の微細加工生産システムの大型産学連携研究開発プロジェクト(MASMICRO、2005-2009)のほか、ナノ金属材料の開発や、マイクロ金属成形加工に関する大型研究プロジェクトが進められている¹⁾⁻³⁾。ドイツでは、2006年から「Micro Cold Forming」(SFB747)が3つのフェーズで計12年計画の大型研究プロジェクトがブレーメン大学にある複数の研究所を中心にスタートされ、金型加工、マイクロ材料の成形特性評価、マイクロプロセスライボロジー特性評価、マイクロレーザー加工との複合加工など、統合的なナノ・マイクロ加工の大型研究開発プロジェクトが進められている⁴⁾⁻⁶⁾。アジアでは中国や韓国が、ナノ材料の研究開発やその加工技術に関する国の重点研究プロジェクトが幾つか進められている⁷⁾。

また、成形加工関連技術として、マイクロ射出成形、マイクロ熱間転写成形などの技術高度化による高精度3次元マイクロ樹脂成形技術の研究開発がEU10ヶ国のコンソーシアムプロジェクト(COTECH、2008-2011)として進められている⁸⁾。レーザー加工やマイクロ放電加工を含む各種機械加工を融合した高精度マイクロ加工技術の研究開発がEUのFP7プロジェクト(Integ-Micro、2007-2011)として進められている⁹⁾。これは最近日本でも大変注目されている技術融合(コンヴァージェンス・テクノロジー)を取り入れたものづくり技術の高度化である。

日本国内においても、最近行われている国のプロジェクトでは、「高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発」(NEDO、H19-H23)に代表される各種ナノ・マイクロ関連の部材及び成形加工に関する研究開発が進められている¹⁰⁾。また、経済産業省が近年中小

企業ものづくり支援策として進められている戦略的基板技術高度化支援事業で採択されている研究開発プロジェクトの中でも、金型、金属プレスなどの分野において、「ナノ微粒超合金を用いた精密金型の開発」(H19-H21)、「任意形状付シームレス極細パイプの高精度加工技術の確立及び高効率製造装置の開発」(H19-H21)、「超微細粒冷延薄板を用いた精密部品プレス加工技術開発」(H19-H21)、「情報家電、医療機器分野に使用する金属材料を主体としたマイクロポンプ、マイクロバルブの開発」(H19-H21)など、ナノ・マイクロ成形加工に関するものが多く見られ、今後、金属材料などのナノ・マイクロ加工技術の実用化が期待される¹¹⁾。

これらの研究プロジェクトを含めて、多くの研究開発成果が発表されている。ガラスやアモルファス金属材を用いたナノインプリント加工や転写加工が研究されており、材料表面にナノ・マイクロ形状が得られている。押出し加工やプレス加工、精密転造、射出成形などにより、各種微細部品やデバイスの加工に関する研究がなされた。レーザー援用マイクロ成形加工やその他の高エネルギービームを利用した成形加工に関する研究が数多く見られた。また、他の加工との複合加工に関する研究として、ナノ・マイクロ金型の超微細加工やイオン照射、DLC コーティングなどのマイクロ金型の表面処理技術が研究開発されている。マイクロ加工に適した微細結晶粒材料の研究開発やマイクロ化に伴う材料変形特性やトライボロジー特性に関する計測評価の研究がなされており、研究成果も多く報告されている。金属材料、ガラス、樹脂材料を用いたナノ・マイクロ成形加工及びマイクロ部品やデバイスの製造のための高精度な生産加工技術として確立するために、材料や高精度な金型の研究開発だけでなく、ナノ・マイクロスケールに適したプロセスの開発、加工技術の融合、接合などを含む統合的な研究開発が必要であり、今後、日本でも、統合的な産学官連携研究開発の立上げが強く求められる。

参考文献：

- 1) <http://www.masmicro.net/index.aspx>
- 2) Qin, Y. et al: Development of a new machine system for the forming of micro-sheet-products, Proc. of ESAFORM, (2008), (CD-ROM).
- 3) Pan, Wenke et al: FE analysis of multi-cycle micro-forming through using closed-die upsetting models and forward extrusion models, J. Mater. Process. Technol., 201(2008), 220-225.
- 4) <http://www.sfb747.uni-bremen.de/sfb-747-general-description>
- 5) Z. Hu et al: Modelling of friction with respect to size effects, Proc. ESAFORM, (2008), (CD-ROM).
- 6) Stephen, A. et al: Laser chemical manufacturing of micro forming tools, Proc. ICTP, (2008), (CD-ROM), 2113-2118.

- 7) Zhang, K. F. et al: Micro superplastic bulging behavior of Zr₀2Ni nanocomposite, *ibid.*, (CD-ROM), 1854-1859.
- 8) <http://www.integ-micro.eu/>
- 9) <http://www.fg7-cotech.eu/>
- 10) <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p07007.html>
- 11) <http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/seizousangyou/sapoin/itakuhi.html>
- 12) Geißdörfer, S. et al: Micro-extrusion of ultrafine grained copper, Proc. ESAFORM, (2008), (CD-ROM).
- 13) Yoshino, M. et al: Control of optical transmittance by nano plastic forming, Proc. ESAFORM, (2008), (CD-ROM).
- 14) Park, H. P. et al: Manufacturing of thick-wall plastic lens mold with conformal cooling channel using rapid tooling technology, Proc. ICTP, (2008), (CD-ROM), 1181-1186.
- 15) Furushima, T. et al: A novel processing for microtubes - superplastic dieless drawing technique -, Proc. ICTP, (2008), (CD-ROM), 205-210.
- 16) Montazerolghaem, H. et al: Manufacture of miniature parts using micro electro hydraulic forming of thin aluminium sheets, Proc. ICTP, (2008), (CD-ROM), 1111-1116.
- 17) Sagisaka, Y.: Micro forming using shock wave generated by femtosecond laser irradiation, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1878-1883.
- 18) Kinsey, Brad et al: Microscale Flanging Using Quasi-Static and Electromagnetic Forming Processes, Proc. ICMP, (2008), (CD-ROM), 1-9.
- 19) Ogawa, Hiroki et al: Welding of Metallic Foil with Electron Beam, Proc. ICMP, (2008), (CD-ROM), 1-7.
- 20) Hirota, K. et al: Precision blanking of thin sheet metals with the help of chemical etching, *J. Mater. Process. Technol.*, 201(2008), 209-213.
- 21) Yang, M. et al: Surface treatment of micro dies for improving tribological properties, *Steel Res.*, 79-12(2008), (CD-ROM), 421-426.
- 22) Gau, Jenn-Terng et al: Tensile And Micro Stretch Bending Experiments For Studying Stainless Steel 304 Foil For Micro Sheet Forming, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1-7.
- 23) Tejedor, R. et al: Plastic deformation of a nanostructured and ultra-fine grained fe-1%cr with a bimodal grain size distribution, *ibid.*, (2008), (CD-ROM).
- 24) Cheng, M. et al: Development of a new evaluation index for microformability of bulk amorphous alloy in supercooled liquid region, Proc. ICTP, (2008), (CD-ROM), 189-192.

- 25) Geißdöfer, S. et al: A novel approach for in-situ observation of local deformation behaviour at micro scale, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 199-204.
- 26) Yoshino, M. et al: Deformation characteristics of metallic materials in nano/micro plastic forming, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1866-1871.
- 27) Xue, W. Y. et al: Research of micro hardness of a duplex stainless steel by nano indentation, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1908-1913.
- 28) Lee, E.-K. et al: Evaluation of mechanical characteristics of plate-type polymer hyperfine pit structure fabricated by thermal- nanoindentation process, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1144-1149.
- 29) Sahli, M. et al: Comparative quality analysis of micrometric patterns replicated by hot embossing and micro-injection moulding, *Steel Res.*, 79-1 (2008), (CD-ROM), 521-527.
- 30) Bui, V.H. et al: Parametric study on formability in micro halfblanking process of thin sheet material, *ibid.*, 79-1 (2008), (CD-ROM), 32-38.
- 31) Quinard, C. et al: Viscous behavior and critical channel size of 316L stainless feedstock tested by micro capillary dies, *ibid.*, 79-2(2008), (CD-ROM), 536-543.
- 32) Mahabunphachai, Sasawat et al: Investigation of size effects on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales, *Inter. J. Machine Tools & Manufacture*, 48(2008), 1014-1029.
- 33) Eichenhüller, B. et al: Process parameter interaction in micro forming, *Proc. ESAFORM*, (2008), (CD-ROM).
- 34) Lee, R. S. et al: Effect of thickness to grain size ratio on drawability for micro deep drawing of AISI 304 stainless steel, *Proc. ICTP*, (2008), (CD-ROM), 183-188.
- 35) Shimizu, T. et al: Surface topography effect in micro deep drawing process, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 193-198.
- 36) Song, H.-W. et al: Hot workability of Ti-6Al-4V alloy with equiaxed $\alpha + \beta$ microstructure: grain size effect, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 762-767.
- 37) Yu, S. et al: Effect of the grain size on the micro-extrusion process, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1117-1121.
- 38) Chang, C. C. et al: Effects of process parameters on filling of grooves in micro metal imprinting, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1884-1889.
- 39) Zhou, Q. et al: Size effects on plastic deformation in meso-scale at elevated temperature, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1896-1901.
- 40) Li, J.M. et al: Effect of hot embossing process parameters on polymer flow and microchannel accuracy produced without vacuum, *J. Mater. Process. Technol.*, 207(2008), 163-171.

- 41) Yeh, Fung-Huei et al: Study of thickness and grain size effects on material behavior in micro-forming, *ibid.*, 201(2008), 237-241.
- 42) Shimizu, Tetsuhide et al: Influence of Surface Topographical Interaction between Tool and Material in Micro Deep Drawing, Proc. ICMP2008, (2008), (CD-ROM), 1-9.
- 43) Wagner, K. et al: Tool life enhancement in cold forging by locally optimized surfaces, *J. Mater. Process. Technol.*, 201(2008), 2-8.
- 44) Zeng, P. et al: Frame of micro-forming in macro-field, *ibid.*, (2008), (CD-ROM), 1872-1877.