



M.Kijuchi

マイクロ・ナノ加工技術

東京大学 名誉教授
木内 学

1. 緒言

1990年代より、フォトリソグラフィ等の半導体製造技術あるいは超精密マシニング他の加工技術を利用して、高精細・高精密な機器・デバイスおよびそれらの部品・部材の製造が盛んに試みられるようになった。これらの製品および製造技術の発展は、医薬、バイオ、通信、計測、情報、画像等に関連する機器および使用技術の目覚ましい進歩と高度化を先導し、その過程で、各分野の固有必要機能を担う機器やデバイスのみならず、高精細な計測・検査・加工・移送などの能力を発揮する汎用的且つ先進的な機器・デバイスの開発も急速に進んだ(図1参照)。加えて、それら高精細・高精度な機器・デバイス・部品・部材の製造・加工技術も拡大・拡張が進み、リソグラフ, LIGA, マイクロ放電加工, マイクロレーザ加工, マイクロ光造形などの加工技術, あるいはそれらの複合

プロセスなどが提案され, その機能・効果について, 多面的な検討が進められている。

同時に, 各種マイクロ機器や微細デバイス, 更に, 特殊な機能部品・部材の製造が, 新たな産業として, 急速に成長し, 目下, 各国間で激しい開発競争が繰り広げられている。しかしながら, 求められている機能を備えたマイクロ機器・デバイスを量産していくためには, 素材材料・工具・加工機械をはじめ組立て・検査・ハンドリングなど, 広範なマイクロ・ナノ技術が必要となる。それらを逐次積み上げて, マイクロ・ナノ製造技術の体系を作り上げていくためには, 今後, 官・産・学の戦略的連携による研究開発の推進が不可欠である。図2には, マイクロ機器・デバイスの製造に用いられる主な加工プロセスや技術を示す。

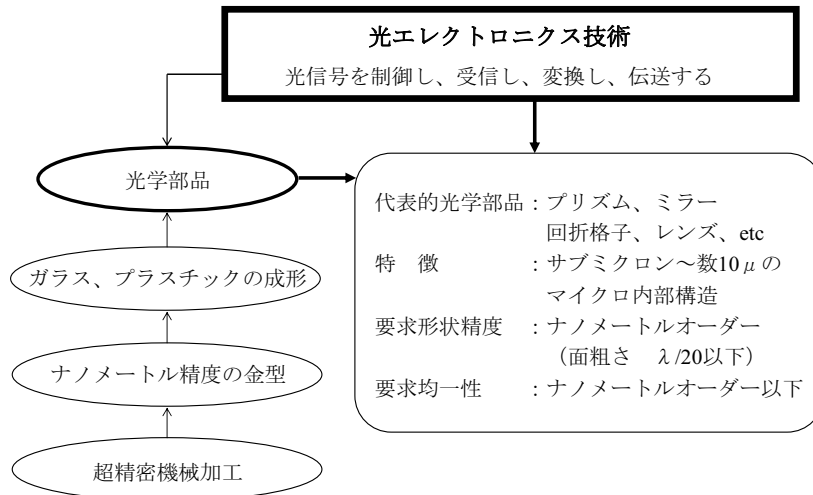


図1 マイクロ・ナノ加工による光エレクトロ技術の発展

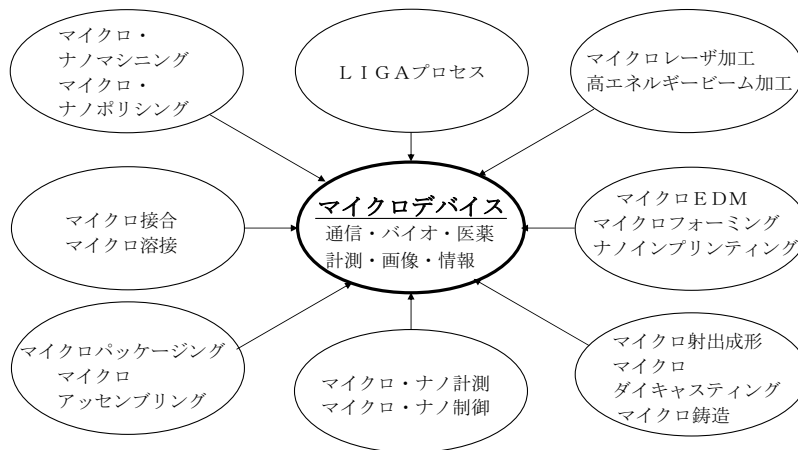


図2 マイクロデバイス・部品の製造技術

2. 高精度加工技術の系譜

マイクロ・ナノ加工の基盤となる考え方や技術は、マイクロ機器やナノ部品の開発が叫ばれはるか以前から、様々な産業や生産の場で、実製品の加工技術を通して構築されてきた。即ち、古くはレンズの磨きや工芸品・装飾品の微細加工の時代があり、近年に至る工業技術の発展と共に、ブロックゲージのサブミクロン絶対精度仕上げ、厚さ数ミクロンのパッケージ用アルミ箔の広幅圧延、直径10数ミクロンのボンディングワイヤの引き抜き、精密機器の長尺摺動面のきさげ仕上げ、超高精度リニアスケールの製作、厚さ数10nmの金箔の打ち出し、複雑且つ高精度な時計他の精細・精密機械とそれらの部品の製造など、現在のマイクロ・ナノ加工に匹敵する高精細・高精度な加工が広く行われてきた。

これらの製品・部品は、外寸法は数mm～数100mmであっても、部分的な寸法精度はサブミクロンあるいはナノレベルのものもあり、求められる製品機能と精度の獲得には、工具・機械・材料等にかかわる極めて高度な技術が必要とされてきた。すなわち、マクロな世界にもミクロな問題は常に存在し、マイクロ・ナノ級の高精度加工の実現に向けて、技術の長い蓄積が続けられて来たことと云うことができる。

故に、マイクロ・ナノ加工技術は、(1) マクロスケール製品への応用と、(2) ミクロスケール製品への応用とに分け、その特質と課題および今後の展開を検討する必要がある。

図3,4には、塑性加工を例にとり、高精度化を支えてきた要素技術の寸法精度の変遷と、関連技術開発の事例、および高精度塑性加工によって製造されている製品の例を示す。

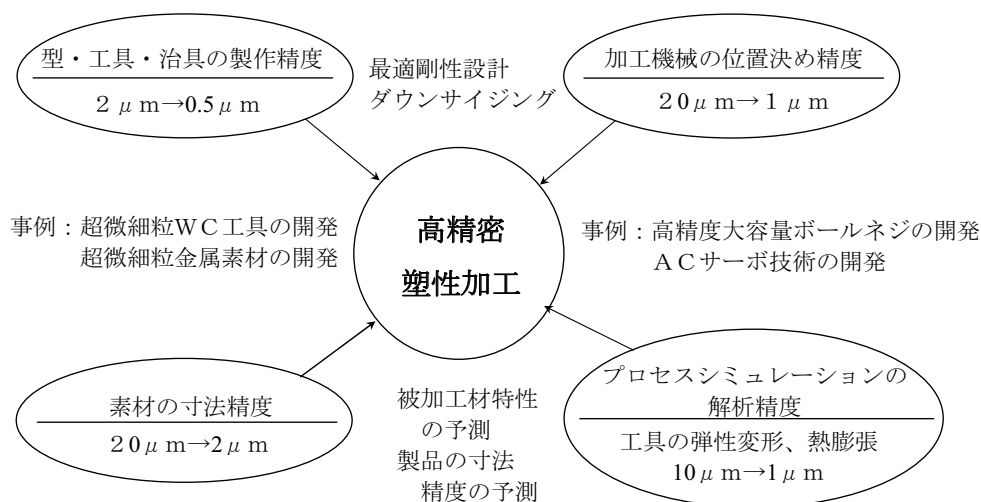


図3 高精度塑性加工を支える要素技術の高精度化

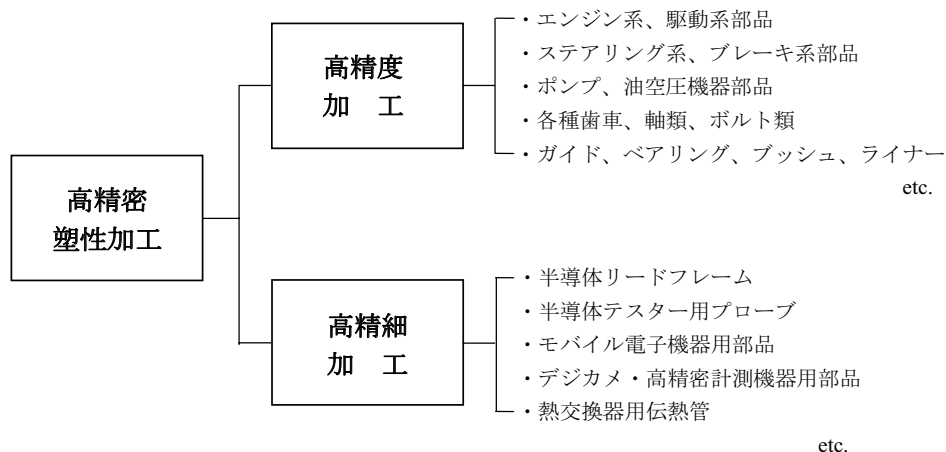


図4 精密塑性加工技術の適用範囲・応用分野

3. ミリスケール（マクロ）製品のマイクロ・ナノ加工

ミリスケール製品（外寸法がミリメートル級又はそれ以上）にかかわるマイクロ・ナノ加工は、多くの場合、被加工材又は製品の表面やその一部に微細な構造を形成する技術として利用される。そこでの主な課題は、(1) 工具と被加工材との微細な相対運動あるいは接触関係の制御、(2) 微細な工具先端や型突起部位等のマイクロ・ナノ級寸法精度の確保、(3) 加工機械の微細なゆがみ・たわみ・ガタ・バックラッシュ等の

排除、またはそれらに起因する加工誤差のマイクロ・ナノスケールでの補償、(4) 被加工材への微細加工適合特性の付与、(5) 温度・雰囲気・潤滑・振動など、加工にかかわる環境・雰囲気条件の最適な制御と管理、などにある。

例えば、高密度記憶媒体用ディスクの超平滑・超平坦な面を高能率で仕上げるためには、耐摩性に優れ形状精度保持能力の高いダイヤモンドバイトをディスク面に対して所定の位置に保ちつつ超高速でスキニングさせる必要があるが、

その場合、バイト先端のマイクロな挙動のみならず、被加工材全面をカバーする工具支持部等の加工機部位のマクロ動きについても、動的絶対精度や繰り返し再現精度が求められ、ナノメートル級の精度保証が必要となる。このように、加工に際して、マクロ精度とマイクロ精度の両立を図らなければならないところに、マクロ製品にかかわるマイクロ・ナノ加工の難しさがある。

かかる問題に対処するため、新しい被加工材料や工具材料の開発やそれらの利用技術の研究も進んでいる。表1, 図5は、今後の被加工材料や金型材料の開発のコンセプト、即ち、材料開発の目指すべき方向、考慮すべき主要因子、また、狙いとする材料特性、などを示す。図6は、高精度精細金型の製作のために、今後活用が期待される各種の加工法を示す。要求される金型形状精度や表面仕上げ性状を獲得するため、従来の機械的切削・研磨や放電加工法に加えて、各種のビームを用いるツルニング技術などが検討されている。表2は、放電加工と他の加工技術との融合による、新しいマイクロ・ナノ加工の可能性を列挙した結果である。

表1 高易加工材料、マイクロ・ナノマテリアル

1.	極軟化、超延性、超塑性、形状記憶性、知能性
2.	高加工硬化性、高熱処理硬化性
3.	微細熱軟化性、微細加工軟化性
4.	超微粉、超薄箔帯、極細線、極細管
5.	微細圧粉、微細モールドイング
6.	微細加熱、微細冷却、微細焼結
7.	マイクロアロイング、マイクロファブリクス、マイクロテクスチュア
8.	マイクロ切断、マイクロ結合
9.	その他

図7,8には、マイクロ・ナノ加工技術に大きく依存しているミリスケール級製品の例を示す。これらの製品に組み込まれる部品・部材には、サブミリメートル級のものも多く含まれており、その意味では、ミリメートル級機器・デバイスとサブミリメートル級のそれとの境界は、あまり明確とは云えない。

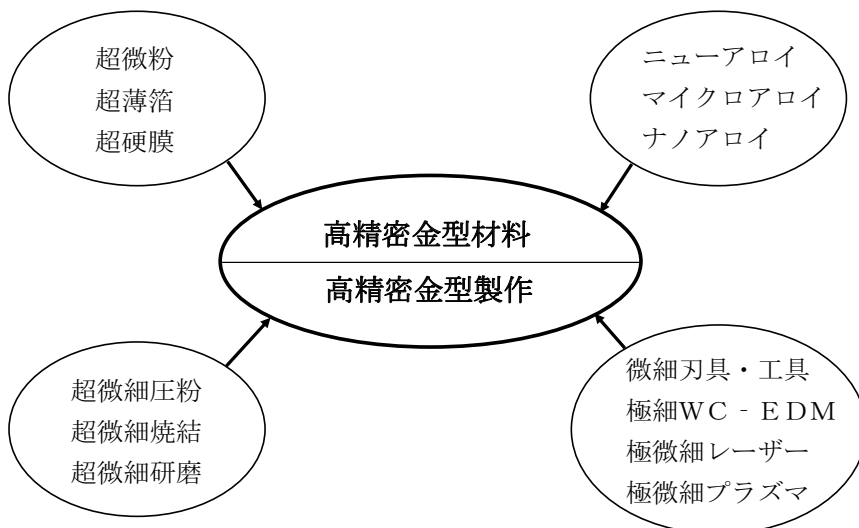


図5 高精密金型材料の創成・加工技術

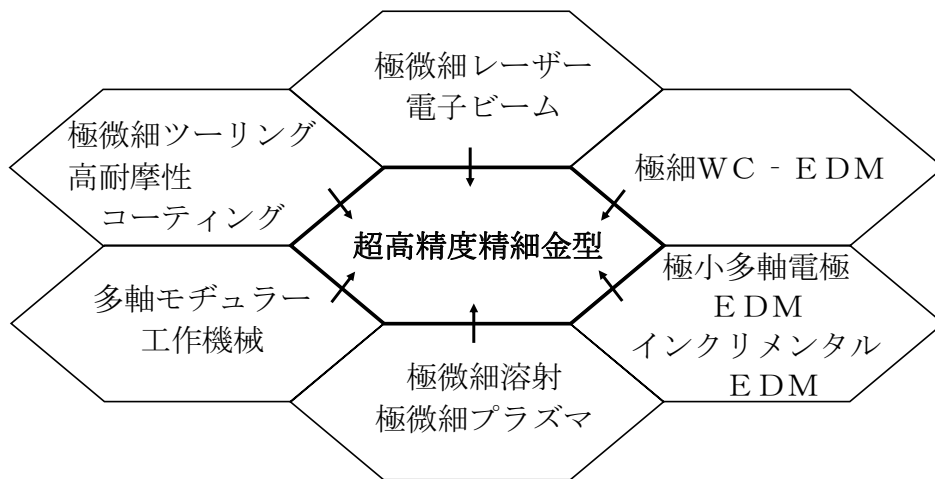


図6 高精密金型製作用微細加工技術

表2 プロセス融合によるEDMの応用分野の拡大

EDMの複合化によるマイクロ・ナノ加工への拡張(例)	
(1) 切削との複合化	WEDMで微細ドリル、マイクロエンドミルなどを作成し、これを用いて、同一加工機内で切削を行う。
(2) 超音波加工(USM)との複合化	マイクロEDMの穴あけ用電極をそのままマイクロUSMの工具として用いる。
(3) 研削との複合化	メタルボンド砥石をEDMでツルーイングしながら研削を行う。
(4) 打抜きとの複合化	EDMによる工具成形装置と打抜き装置を一体化、マイクロ工具の製作と位置合わせを超高精度で実現
(5) レーザ加工(LBM)との複合化	YAGレーザで下穴をあけ、EDMで仕上げる。レーザによる効率的な穴あけとEDMの高精度を獲得
(6) 電铸との複合化	中空材の電铸に用いるコアの作成と電铸後の外形・外表面の仕上げにEDMを用いる。

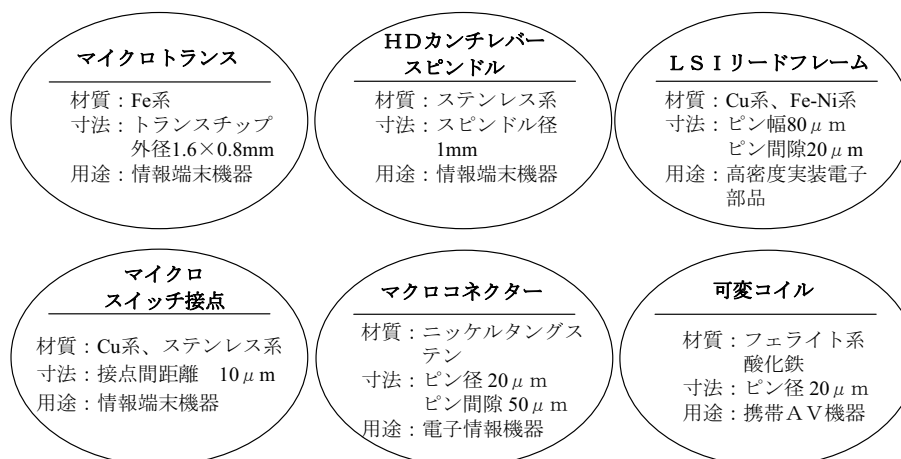


図7 マイクロ・ナノ加工技術の応用製品の例(1)

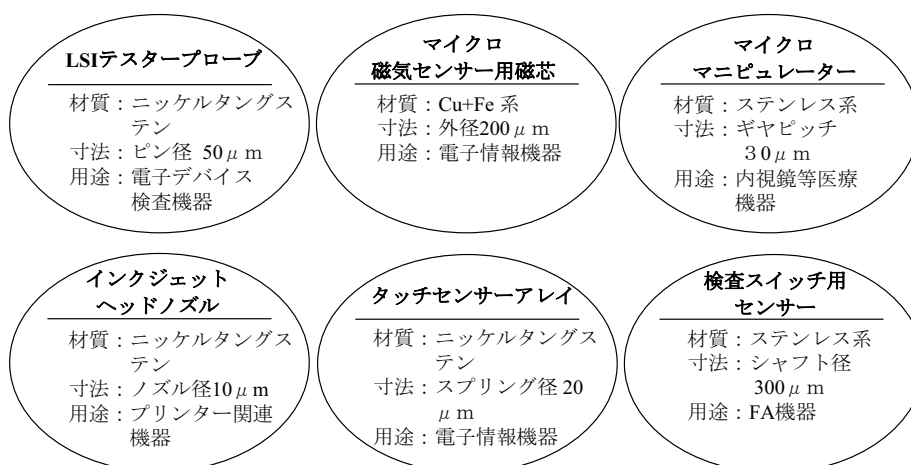


図8 マイクロ・ナノ加工技術の応用製品の例(2)

4. サブミリスケール（マイクロ）製品のマイクロ・ナノ加工

サブミリスケール製品（外寸法がミリメートル級以下）に関するマイクロ・ナノ加工においては、被加工材および工具には、ミクロン単位の外寸法が求められ、加工に際しても、マイクロ・ナノメートル単位の動作精度が必要となる。かかる微細形状および動作精度を獲得するためには、(1) 被加工材および工具材料の超微細寸法への易適合特性、(2) 工具の超高精度製作技術、(3) 位置決め・ハンドリングを含む超高精細加工機・加工システム、(4) 超高分解能計測・検査技術、などの面から、総合的に検討しなければならない。

例えば、被加工材および工具にとっては、それらに求められる微細な寸法や精度に応じた材料特性、特に内部結晶構造の適正化が不可欠である。一般に多結晶体からなる金属材料は、程度の差こそあれ内部の結晶粒度とその方位に応じた異方性を有している。塑性加工にせよ切削加工にせよ、微細な加工になればなる程、この結晶異方性や結晶粒界に起因する不均一変形が、製品の形状寸法精度に与える影響が相対的に大きくなり、無視できなくなる。微細な切削バイトの刃先は、結晶粒界を通過する際に微小な抵抗の変化を感知して変動し、その影響が仕上げ面又は寸法の変化として現れる。微細なパンチや金型による成形に際しても、結晶粒度や方位による粒内迂りの偏りや量的不均一、あるいは、結晶粒それぞれの回転の相違が、変形の微細な不均一を誘発し、加工後の寸法や精度の誤差を引き起こす。図7に示したように、マイクロ・ナノ加工には、微細加工に適した被加工材料（高易加工性材料）および工具材料の開発が重要である。

5. 実製品のマイクロ・ナノ加工

マイクロ・ナノ技術の重要性が高まる中、2002年度から2006年度にかけて、経済産業省主導の「革新的部材産業創出プログラム」の下、NEDO 管掌の国プロとして、[精密部材成形用材料創製・加工プロセス] プロジェクトが実施された。図9は、このプロジェクトで目指した開発技術の枠組と、

含まれる技術課題を示す。図中に示すように、被加工材料や工具材料の製造技術、高精密金型の製作技術、高精密精密製品の成形加工技術、高精密部材の組立て技術などが開発目標となり、更に、各技術を実現するため、超超微細結晶粒を持つプローブ電極用 Ni-W 合金の開発や、高精密金型用超微細 WC 粉末の製造技術の開発など、多くの新技術の開発が行われた。さらに、実製品として、いずれも次世代製品への搭載を狙うインクジェットプリンター用ノズル、集積回路テスター用プローブ、光ファイバコネクタが設定され、これら製品の実生産を可能とするマイクロ・ナノ加工技術の開発が推進された。各技術課題について、目覚ましい成果が得られたが、内容の詳細は、(財)金属系材料研究開発センターより出版されている報告書を参照されたい。

以下、この開発事例を引用しながら、マイクロ機器や微細デバイスの加工・製造技術の展開について述べる。

6. 実製品の加工精度

マイクロ・ナノ加工の基本コンセプトは、“微細領域における構造・形状・特性の秩序化である”とされているが、この秩序化を再現性良く安定的に実現するためには、被加工材や工具についての幾つかの条件が満足される必要がある（図10参照）。

一般に、外寸法が数 100 μm 以下のマイクロ部品の加工精度は、サブミクロン即ちナノメートル単位で制御および管理される必要がある。例えば、人体内に入って血管や臓器の検査あるいは治療を行うことが期待されている医療用マイクロ機器の多くは、外寸法数 100 μm 以下のマイクロ部品を必要とするが、その製作精度はナノメートル級であることが求められる。

上記国プロで対象とした光ファイバ用コネクタは、数 mm 角の製品であるが、コネクタ内でのファイバの心合せ精度は、最低でも 0.5 μm 以下を保持することが求められている。このことは、コネクタの内部で光ファイバを保持するアレイ溝又は貫通孔のピッチや内径精度は、最悪でも 0.25 μm 以下でなければならないことを意味している。更

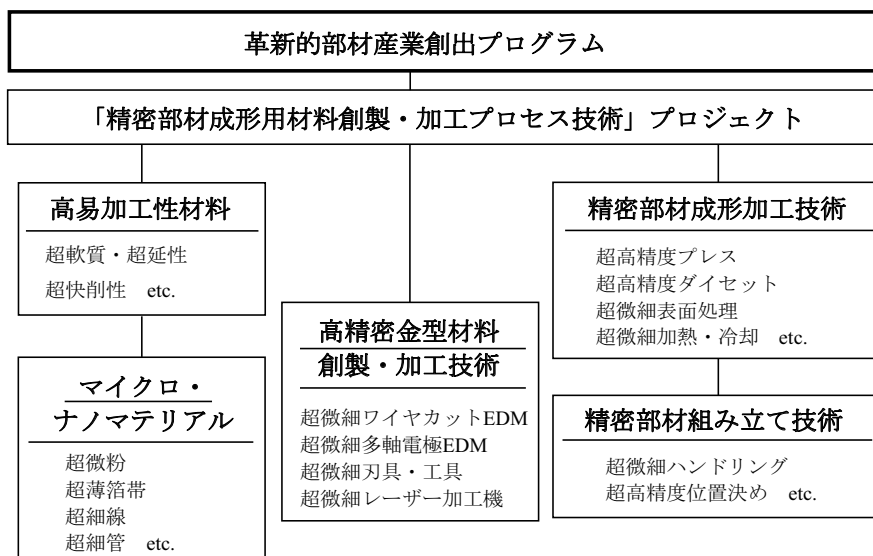


図9 ナショナルプロジェクトの枠組

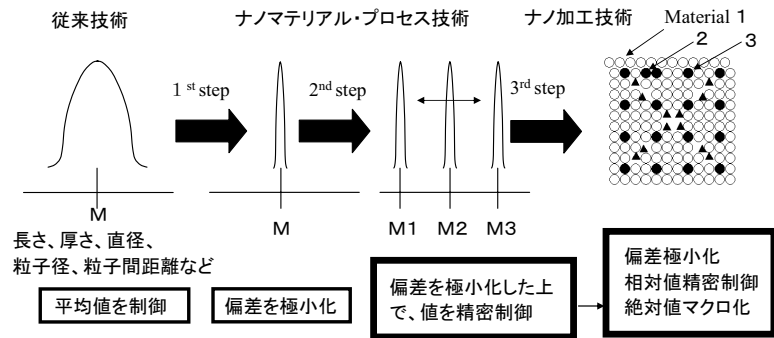
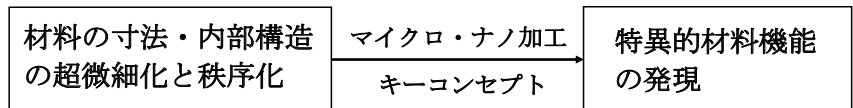


図 10 マイクロ・ナノ加工用被加工材料開発の考え方

に、現在では、1-4 芯（接続するファイバーの本数）のコネクターが用いられているが、次世代型コネクターでは、これを 24 芯程度に機能向上することが求められており、かかる多心コネクターが互換性を以って用いられるためには、溝位置や孔位置に関する精度は、いずれ $0.1 \mu\text{m}$ 以下を目指す必要がある。他の目的製品についても、事情は殆ど変わらない。このような部品精度を確保するためには、既述のように、それを可能とする被加工材料、工具、加工機械、計測・検査方法などが求められる。

7. 超微細結晶材料

被加工材については、特に微細な塑性変形や切削・研削・研磨に適応し易く、加工後の寸法精度や面の仕上げ粗さが数 10nm 以下に収まり易い素材として、粒径が $0.1 \mu\text{m}$ 、すなわち、 100nm を下まわる超微細結晶構造を有する素材が望まれる。特に、マイクロ部品の量産技術として期待されている型成形（ナノインプリント）においては、被加工材の型への完全な充満を確保することが至上命題となるが、そのため

には微細成形性に優れる超微細結晶素材が不可欠である。

かかる超微細結晶素材の製造方法として現在有望視されているのが、電鍍法である。これは、電解イオンメッキ法の原理を応用し、基板上に鍍積層を成長させて、これを基板と一体化したまま又は基板より取り外して素材として用いる方法である。この方法によれば数 nm ～数 10nm の結晶粒を持つ大寸法金属素材を作ることができる。これまでに、Ni-W 系合金の製造などが行なわれている。

この他、内部構造の超微細化は、被加工材に特異な特性を付与することもある（図 11 参照）。

8. 工具材料に必要な特性

高精度マイクロ機器や部品の製造には、超高寸法精度を持つ微細な型・工具・刃具・治具（以下総称して型・工具）も必須である。かかる型・工具用材料として、被加工材の場合と同じ理由によって超微細結晶構造を有する材料が求められる。例えば、広く使われている超硬材についてみると、その原料となる WC の素粉末の現行の量産可能最小粒径は $0.5 \mu\text{m}$

1000nm ($1 \mu\text{m}$)	サブミクロン	<p>超微細粒効果・超薄箔帯効果</p> <p>結晶粒や粉末粒子の超微細化により、材料強度の著しい向上、焼結反応の活性化などが起る。また、超薄帯化により、変形能・接合性の向上が起る。</p> <p>サイズ効果</p> <p>材料をナノスケールまで小さくすることで、比表面積の増大や体積の減少により、反応活性・選択性の著しい向上や、極低消費エネルギー性などが具現化される。 (ex. 電子デバイスにおいて、集積度や動作速度の向上が実現するため、極低消費エネルギーで素子の機能を発現する、など)</p> <p>規則性の効果</p> <p>ナノスケールで原子や分子が規則正しく配列することで、平均化されていた物質特性が先鋭化され、その機能が著しく増大する。 (ex. ポリマー分子鎖の分子長、原子配列を規則的に配列制御することにより、機械強度や熱特性等の機能が著しく向上する、など)</p> <p>量子効果</p> <p>物質をナノスケールまで微小化することにより、電子状態が変化し、連続的であったエネルギー準位が離散的になり、これまでにない波長選択性等が発現する。 (ex. 数 nm に高度に粒子制御されたクラスターにおいて、光（波長）の分離や光電変換機能が発現する、など)</p>
100nm	ナノ	
10nm	シングルナノ	
1nm	サブナノ	

図 11 超微細化（ナノサイズ化）に伴う材料特性変化

とされている。更にこれを焼結しバルク化した超硬素形材の実質結晶粒径はこれよりやや大きい。いずれにせよ、このような粒径を有するバルク材から作られる型・工具の寸法精度や表面粗度は、上述の $0.1\mu\text{m}$ 以下の加工精度を目指す場合に適切であるとは考え難い。何故ならば、 $0.5\mu\text{m}$ の粒径を持つ超硬素形材から型・工具を製作した場合に予想される最終寸法精度および表面粗度に $0.1\mu\text{m}$ 以下を期待することは難しいからである。そこでより微細な内部構造を持つ超硬素形材を求めて、粒径 $0.3\mu\text{m}$ 更には $0.1\mu\text{m}$ 以下となるWC素粉末の製造技術およびそれらのバルク化技術の開発が、上記国プロで開発された。結果は、予想通り極めて良好であり、既に一部使用が始まっている。

9. 工具の超高精度加工技術

先進的な材料の開発と合わせて、型・工具の製作技術の高精細化・高精度化が求められる。現状の加工精度の限界は $0.1\mu\text{m}$ とされているが、製品精度として $0.1\mu\text{m}$ が求められる世界では、工具精度は更にその1桁上でなければならない。即ち、 10nm 単位の精度水準を目指す必要がある。但し、この水準までくると、従来の製作技術の延長線上に答を見出すことができるとは限らない。型・工具の製作手段の枠組を大きく広げて再検討する必要がある。

従来の型・工具の多くは、切削、研削、放電、研磨、などの手段を組み合わせる目指す形状創成を達成してきた。しかしながらこれまでの加工方法には、高い形状創製能力が備わっている一方、使用工具・電極等の先端形状の微細な変化に対する補償制御に難点があり、超高精度の型・工具の製作には適応しきれない面が残っている。

これとは別に、レーザー、プラズマを用いる方法も試みられてきたが、加工精度と加工能率を直接左右するエネルギー線の絞込み可能最小径と投入可能な最大エネルギー量とに限界があり、獲得できる寸法精度や表面粗度が、求められている水準には今一歩及ばないのが現状である（表3参照）。

イオンビームの応用については、半導体製造の分野で古くから有力加工法として考えられてきてが、1970年代末に、液体金属イオン源を用いたFIB(収束イオンビーム)技術により、線幅 $0.1\mu\text{m}$ 程度の加工が可能であることが示され、以後このFIB技術によるマイクロ・ナノ加工が関心を集めてきた。その中で、FIBによるマスクレスエッチング法が、形状創製能力に優れ、熱やひずみをほとんど与えないドライな加工法として注目され、超微細加工への応用が期待されている。

FIB加工やフェムト秒レーザー加工は、次世代のマイクロ加工というよりもナノ加工を担うキーテクノロジーと考えられている。現在までのところ、これらの加工法の加工単位は微小であり、相応の加工時間を要するが、型・工具の加工時間としては受容可能範囲から遠くない考えられる。但し、かかる加工法を利用するとしても、型・工具の最終仕上り精度は、元材料の結晶粒度や結晶方位に大きく影響される可能性があることに注意を要する。

10. マイクロ・ナノ型成形(ナノインプリント)技術

マイクロ・ナノ加工分野に於いても、生産性やコストは大きな関心事である。その意味からマイクロ・ナノ加工における量産技術として、超微細型成形法が期待されている。例えば、LSI製造に威力を発揮している紫外光リソグラフィ法(又はLIGA法)に匹敵する極微細形状創製能力を有し、生産性ではそれをはるかに凌ぐ加工法としてナノインプリント法が提案されている。型を用いて被加工材に形状を転写する加工原理は、従来の鍛造、コイニングと同一であるが、目指す加工は極めて微細である。超微細な転写加工では、被加工材と型とに様々な特性や機能が要求されることは、既に述べた通りである。しかしながら、マイクロ・ナノスケールでの転写加工が可能になれば、生産設備の小型化、設備投資の大幅な削減などが可能になり、高効率な製造が実現できる。

ナノインプリント法以外にも、型を用いた成形法は種々の角度から検討されている。表4には、これまでに試みられて

表3 超精密加工プロセス(1)

加工の種類	要素技術	加工機能
超精密マシンニング	・ ツール=単結晶ダイヤモンド ・ エアーターパービンスピンドル10万rpm	・ 直進軸真直度 $0.1\mu/100\text{mm}$ ・ 直進軸分解能 1nm
超精密研削	・ 2重静圧スライド機構 ・ 超精密油静圧駆動機構 ・ 送り機構: ボールネジ+CNC駆動方式	・ 作動速度 $10\text{m}/\text{min}$ ・ 位置分解能 10nm ・ 10nmの微小切り込み
ELID研削 (インプロセスドレッシング研削、 砥石:陽極)	・ 鉄コバルト系メタルボンド砥石 ・ プラズマ放電ツールイング法 ・ 直流パルス電源	・ #4000 砥石 ・ ステンレス板・ 20nmRy 、 40nmRa
マイクロ放電加工	金属一般、W電極、形状分解能 $=5\mu\text{m}$ 微小穴EDM、 極細ワイヤEDM、EDG	最小表面粗さ $0.05/\mu\text{m}$ 、 最小穴径 $0.5\mu\text{m}$ (直径 $0.5\mu\text{m}$ 深さ $0.05\mu\text{m}$ の穴加工)
シリコンマイクロマシンニング	単結晶シリコン他、分解能 $=0.1\mu\text{m}$	
マイクロ光造形	金属粉末、光硬化性樹脂	表面粗さ $1\mu\text{m}$ 以上
電子ビーム FIB	金属、セラミックス、 プラスチック、分解能=数nm	EPL: Electron Projection Lithography
レーザー	ArF(波長193nm)、 F2(157nm)、Ar2(126nm)	
フェムト秒レーザー	10^{-15} 秒 10^9 (ギガ)W級	高価、低効率
ピコ秒レーザー	10^{-12} 秒	低コスト、経済的
半導体レーザー		小型・軽量、変換効率50%以上

表4 マイクロフォーミング事例

<p><u>マイクロフォーミング</u></p> <p>主として金属ガラスを対象とする加工</p>	<p>マイクロフォーミング</p>	<p>素 材 : Pd基金属ガラス</p> <p>製品例 : ピッチ径 120 μm、歯数 12 モジュール 12 μmの歯車</p>
	<p>マイクロエクストルージョン</p>	<p>ダイス : ポリイミド (エキシマレーザ・アブレーション加工)</p> <p>製品例 : 歯車シャフト (ピッチ径 : 50 μm)</p>
	<p>マイクロコイニング</p>	<p>金 型 : (エキシマレーザ・アブレーション加工)</p> <p>素 材 : 厚100 μmの金属ガラス板</p> <p>製品例 : 100ヶの歯車同時成形 (ピッチ径40 μm、歯数12)</p>

いるマイクロフォーミングの事例をまとめて示す。

11. マイクロ・ナノ加工機械

ナノ加工を連続的に実施し、所要の加工精度を実現するためには、加工機械・システムの安定化が必須である。そのためには、加工機械の構造や機構の根本的な見直しを行い、機構の簡素化やダウンサイジングを徹底する必要がある。機構の簡素化とサイズの縮小は、加工の安定化と精度の向上に最も有効な手段となる。同時に、知能化および完全無人化も不可欠である。超微細な被加工物を取り扱う関係上、加工工程への人力による介入は事実上不可能である。完全に無人化されたシステムの中で、加工に必要な全ての動作が様々な状況の中で柔軟に行えるよう、加工機およびシステムが知的能力を備えていることが望まれる。表5には、提案されている超精密加工機(ナノマシン)の概要を示す。

マイクロ・ナノ加工には理論武装が大きな成果をもたらす。例えば、型による高精度・超微細転写加工は、最終過程でのより良い形状・寸法精度を求めての過大な加工力による型の破損や、被加工材の型キャビティへの充満不足による形状・寸法不良などが予想される。これらを防ぐためには、現象論的な考察や経験則に裏付けられた被加工材料・機械・

型・工具等の適切な組み合わせに加えて、理論的手法に基づくプロセス設計が重要となる。特に、被加工材の微細な変形挙動については直接観察することが極めて難しいため、内部構造に関する考察も含めて、理論的解析を通してそれらを明らかにしていく努力が必要である。

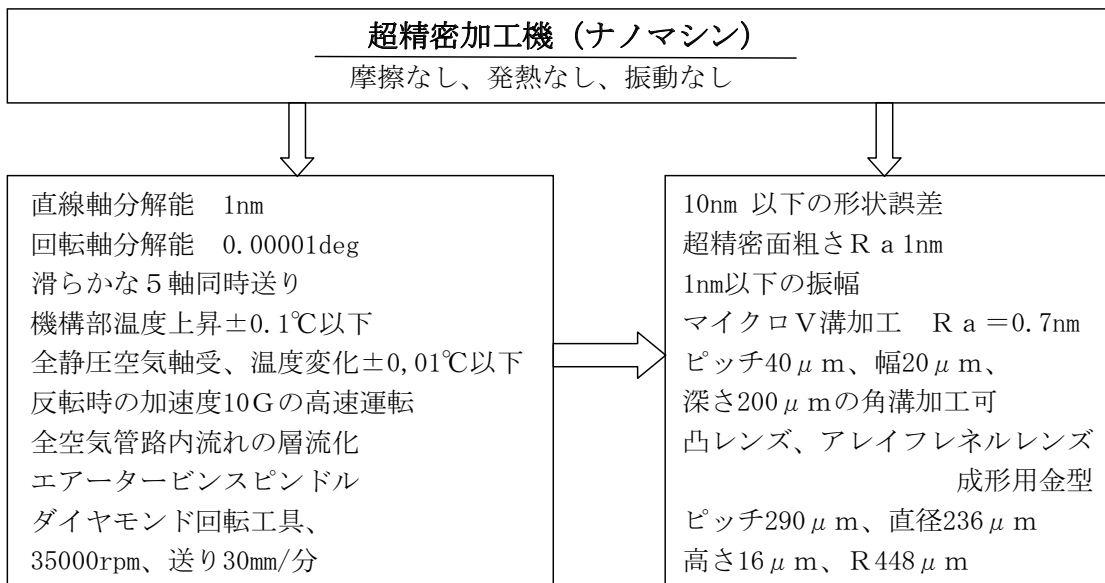
加えて、型による安定した転写加工を実現するためには、被加工材の特性のみならず、加工時の型の温度・潤滑・雰囲気などについても適切な条件を選択することが重要である。そのような条件の選択は、多くの場合、実測に基く試行錯誤による手法では困難であり、基本原理や理論に立脚した解析や予測によってはじめて可能になる。いずれにせよ、ミクロになればなるほど、直接観察は困難になり、その分だけ原理・理論・解析・シミュレーションに基づく予測・推定などの重要性が増してくる。

12. マイクロ・ナノ計測技術

ナノメートルレベルの寸法精度を保証する3次元形状の創製には、ナノメートルレベルで利用できる計測技術と精度管理技術が不可欠である。

ミクロン単位からナノメートル単位にわたる微細3次元形

表5 超精密加工機(ナノマシン)の例



状測定手段として広く用いられているのは、いわゆる3次元座標測定器（以下3D-CMM;Coordinate Measuring Machine）である。通常の測定方式としては、X-Yテーブル上に置かれた被測定物の表面をプローブ（触子）でトレースしてその3次元(x, y, z)座標を測定する方法が採られており、従来型3D-CMMの現状最高水準分解能は1 μ mとされている。更に微精細な計測を必要とする場合について、極微細球を装備したマイクロプローブや原子間力を利用したプローブを用いることにより、10nmの分解能を実現したものもある。

3次元形状の測定機としては、光学的測定法を用いる方式も研究されており、ラインレーザを用いて行う仮想格子モアレ法や格子パターン投影法などが研究されている。これらは、超精密な型・工具の計測を可能とし、10nm以下の分解能を有するとされている。更にその上位の計測手法として、レーザ顕微鏡やレーザ干渉顕微鏡などがあり、Z方向の分解能だけみれば、公称1nmの分解能を目指している。しかしながら、分解能が上がる程、計測可能範囲は狭くなり、分解能10nmの場合の計測可能範囲は概ね1.0mm以下である。

既述の如く、微細な型・工具・被加工品等の精度管理を実施していく上で、超精密な3D-CMMの装備が不可欠であるが、その核心はマイクロプローブの開発にある。これまでに、プローブ球径50 μ m程度のもので使用されているが、プローブ球径と位置検出分解能とは数値的に対応しており、微細な分解能を得るためには極小のプローブ球径を要する。今後、10nm程度の検出分解能を実現していくためには、20—10 μ m以下のプローブ球径が必要になると考えられる。しかしながら、プローブ球径がこのレベルになると、プローブの保持機構や極微な接触力の検出が著しく難しくなる。かかるマイクロプローブの研究は各所で進められているが、光ファイバーの先端に微小球を形成してプローブとして用いる方式、光の放射圧によって捕捉した微小球が外力によって変位す

る量をレーザ光の干渉を用いて検出する方式、などが提案されている。

13. 結言

本稿では、マイクロ機器・微細デバイスとそれらに必要な超微細部品の製造にかかわる問題について述べた。最初にも指摘したように、この分野は、近い将来、新しい産業として大きく発展することが予想されている。その中であって、ナノインプリント法やマイクロモルディング法など、超微細塑性加工技術も重要な役割を果たすことが求められており、その成果が大いに期待される場所である。

参考文献

- 1) 「精密部材成形用材料創製・加工プロセス技術」報告書、金属系材料研究開発センター(2003)
- 2) ワークショップ「革新的部材産業創出プログラム—素材産業から部材産業へ」講演要旨集、経済産業省、NEDO(2002)
- 3) 高谷裕浩：塑性と加工, 44-510 (2003), 708-712
- 4) 木内 学：塑性と加工, 44-514 (2003), 1071-1073
- 5) 江刺正喜：塑性と加工, 44-514 (2003), 1074-1078
- 6) 杉山 進：塑性と加工, 44-514 (2003), 1079-1017
- 7) 大森整也：塑性と加工, 44-514 (2003), 1018-1023
- 8) 早乙女康典：第220回塑性加工シンポジウムテキスト(2003), 1~10
- 9) 河合智彦：第220回塑性加工シンポジウムテキスト(2003), 41~48
- 10) 増沢隆久：第220回塑性加工シンポジウムテキスト(2003), 31~40