

これからの“ものづくり”とは —形状創成から機能創成へ—

To the New Frontier of Nano-Precision Mechanical Manufacturing
Technology (from Form Generation to Function Generation)



厨川常元*
Prof. Tsunemoto
KURIYAGAWA

To survive in the current economic climate after Lehman Crisis and the Great East Japan Earthquake, research and development works in manufacturing processing technology must be changed to the creation and development of new manufacturing principles and technologies to contribute to the competitiveness of Japanese manufacturing industry. This report reveals one of the solutions to exploit the new frontier of manufacturing, such as nano-precision micro/meso mechanical manufacturing (M⁴ process) for a generation of functional interface on the machined surface.

Key Words: micro/meso mechanical manufacturing, M⁴ process, nano-precision, functional interface

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は日本全体に甚大な被害と、社会生活に大きな影響を与えた。特に福島第1原子力発電所事故の影響で、各地の原子力発電所は停止状況に陥り、電力供給不足が切実な問題となっている。これを契機として“エネルギー問題”を再考する動きが活性化してきた。今後は今まで以上に、太陽光や太陽熱、風力、地熱などの再生可能エネルギーの利用技術や、そのエネルギーを蓄える蓄電技術等への関心が高まり、研究開発もより活性化するものと考えられる。一方、このようなエネルギーハーベスト技術への関心が高まる中、省エネルギー技術への研究開発も盛んである。省エネルギーは相対的にエネルギーを生み出すことに等しいからである。このようにリーマンショック後の日本産業再生の1つの切り口と相乗して、エネルギー問題を解決するためのシステムやデバイスの開発が注目を集め、そのための“ものづくり”技術が何なのか、さらにはグローバル競争の中で日本を優位にする技術は何なのかを検討することが最重要課題となっている。

さて、これからの“ものづくり”を考える場合、今後の日本の人口動勢も考慮しなければならない。図1は日本の人口の推移予想^{1), 2)}を示したものである。この図からわかるように、一昨年1億2800万人だった人口は

減少を始め、2050年には1億人を切り、100年後の2100年には今より1/3の4800万人になると予想している。この数は100年前の1900年の頃とほぼ同じである。しかし100年前と100年後の大きな違いは、人口の年齢構成である。0～14歳の年少人口と15～64歳の生産年齢人口を加えた人口は大きく減少するのである。そして日本人の平均寿命の伸びも予測されており、2060年には男性が84.19歳、女性が90.93歳に達するとしている²⁾。すなわち、現在65歳以上の高齢者が「4人に1人」であるのに対し、2060年には「2.5人に1人」と急増し、国民の1/3以上が65歳以上の老年人口となる。

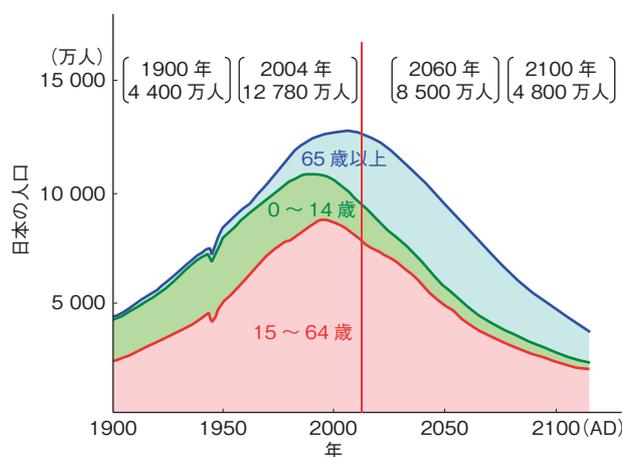


図1 日本の人口動勢¹⁾
Demographics of Japan

*東北大学 大学院 教授 博士 (工学)

このような状況変化の中で、これまでの大量生産・大量消費対応型の“ものづくり”は終焉を向かえ、今後は様々な価値観に対応する分散型の“ものづくり”に変革していかなければならないであろう。我々は、今、日本の産業構造が大きく変革していくまただ中にあり、次の世代に何を残したらいいのかを真剣に考えなければならない時期にあることを認識しなければならない。したがって、これからの“ものづくり”を考えると、将来何が求められているのか、何が売れるのかを十分予想し、バックキャストの発想で、そのための技術は何か、今解決すべき技術課題は何かを考えていかなければならない。

2. 究極の形状創成と機能創成の融合

日本の“ものづくり”が、これからも世界をリードしていくためには、海外の技術では到達できない、より高い精度と付加価値を持った製品開発を強力に推進していかなければならない。従来は、加工された製品の形状精度と表面粗さの2つが評価基準であり、それらが設計通りにできていれば十分であった。しかし加工精度を極限まで追求しようとする場合、加工面に残留するナノオーダーのうねり模様が問題となり、均一な加工面を得ることが難しい。このうねり模様を除去し、加工面の均一性を得る加工法が必要不可欠となる。本報では最初に、非球面研削加工を例にとり、研削加工だけで25nmの形状精度を得ることを目標に開発した種々の研削法について紹介する。まず仕上面粗さをよくする“パラレル研削法”、次に形状精度を向上させる“円弧包絡研削法”を示し、最後に均一な加工面を得るための“超安定非球面研削法”について説明する。

このような形状精度の追求は、今や原子オーダーに達しており、限界に達しているのが現状である。そこで次は、このようにして得られた加工表面上に微細構造体を創成したり、加工表面近傍の結晶構造を制御したりすることにより、新たな機能を加工表面に発現させるための工夫を加味した“ものづくり”が要求されるようになるであろう。すなわち単なる形状創成から、機能創成を加味した新しいものづくり技術への融合、発展である。そこで“形状創成+機能創成”を目指したナノ精度マルチスケール機械加工についても紹介する。

3. 非球面光学素子のナノ精度研削加工

3.1 パラレル研削法

現在行われている軸対称非球面の代表的な研削法を図2(a)に示す。図に示すように砥石軸と工作物軸とが直交する縦型構成で、xy軸の2軸同時制御によって加工が行われる³⁾。この方式では、研削点において工作物の回転方向と砥石の周速ベクトルが直交(クロス)するのが特徴で、図3(a)に示すように工作物半径方向の研削条痕が形成される。そこでこの研削方式をクロス研削と名付ける。

多くの場合、クロス研削では作業面をV字型に成形した算盤玉状砥石のエッジが使用される。研削方向に垂直な砥石断面上の1点で研削が行われるため、砥石の摩耗や砥粒の目つぶれがその1ヵ所に集中するという欠点があり、工作物がセラミックスのように高硬度である場合や、大口径である場合には効率的に研削することは事実上不可能となる。

そこで図2(b)に示すように、工作物の回転方向と砥石の周速ベクトルが平行になるような研削法を考え、パラレル研削と名付ける。クロス研削法とパラレル研削法の違いは、砥粒切れ刃の切削方向の違いだけである。もし球状の砥石を使用した場合は、幾何学的には全く同一と見なすことができる。しかし研削理論⁴⁾を用いて仕上面粗さを理論的に計算すると、これからは全く異なった結果となる。すなわち、クロス研削よりパラレル研削のほうが有効切れ刃数増大のため、全ての研削条件においてパラレル研削のほうが仕上面粗さは小さくなることが明らかになった⁵⁾。図3(b)は実際に超硬金型を研削した表面のノマルスキー顕微鏡写真である。図3(a)に示したクロス研削の場合と比較すると明らかのように、全く同じ砥石、研削条件であるにもかかわらず、パラレル研削による仕上面粗さのほうが約1/2と小さいことが分かる。このように仕上面粗さをよくする研削法がパラレル研削である。

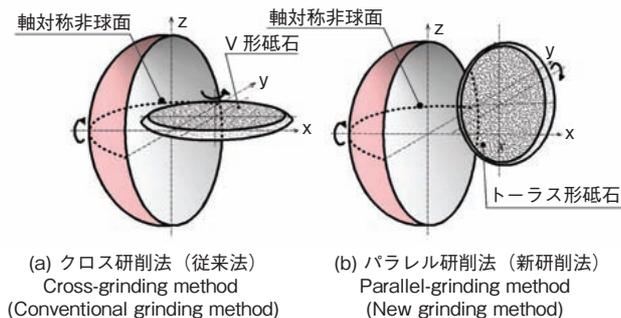


図2 非球面研削法の比較
Comparison of aspherical grinding method

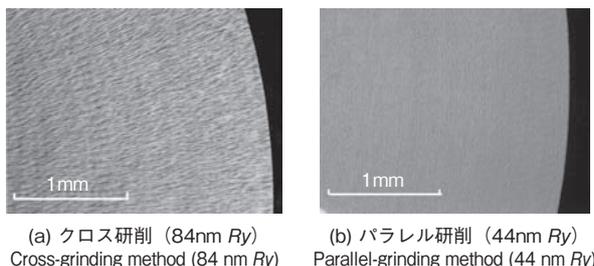


図3 研削表面のノルマスキー顕微鏡写真
Nomarski photomicrographs of ground surfaces

3.2 円弧包絡研削法

前述したように、従来の研削方法では砥石断面上の研削点に変化せず、その1点でのみ研削が行われるため、そこに摩耗が集中することを指摘した。そのためドレッシング間寿命が短くなり、大きな工作物の場合には能率よく研削することは事実上不可能となる。さらに最も致命的な点は、非球面の形状精度の劣化を引き起こすことである。この問題点を解決するには、1点に固定されていた研削点を砥石幅方向に移動させればよい。そのためには図4に示すように円弧断面を有する砥石を使用し、その円弧断面の包絡により非球面形状を創成研削すればよい⁶⁾。この場合、有効研削幅が増大し砥石摩耗が分散する。その結果、図5に示すように円弧包絡研削法では砥石摩耗の大幅な低減が可能となり、非球面研削における形状精度の大幅な改善が達成される。

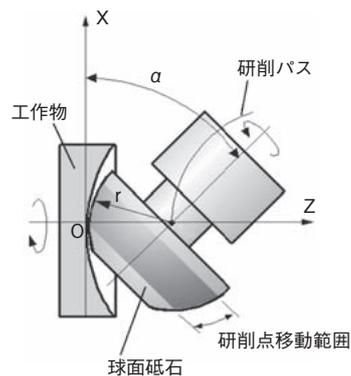


図4 円弧包絡研削法
Arc-envelope grinding method

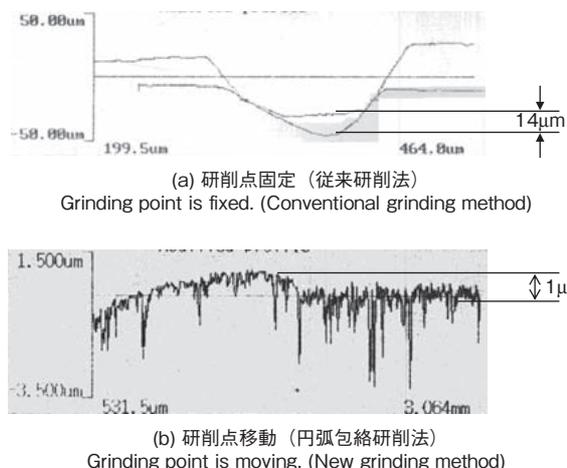


図5 研削点移動による砥石摩耗量の低減効果
Decrease in wheel wear due to the movement of grinding point

3.3 超安定研削法

非球面研削加工の難しさは、ナノオーダーの仕上面粗さと高精度の輪郭形状が同時に要求される点である。これらの問題に対しては、前節の平行研削法と円弧包絡研削法の併用により、大きな効果が上がることを示した。その結果、形状精度50-100nm、表面粗さ10-30nmRyが達成されている。しかしより鮮明で精細な光学像を得るために、非球面レンズに要求される精度は年々高くなってきている。そして、形状精度25nm以下、表面粗さ数nmが要求されるようになってきた。このような高精度加工を達成するためには、従来から行われてきたような加工機の高精度化対策だけでは不十分になってきている。例えば加工機の制御分解能は今や1nmとなり、限界に近づいているのはその一例である。その結果、別の視点から加工面の精度向上について検討する必要性がでてきた。

現在の非球面研削加工での残された問題点は、レンズ

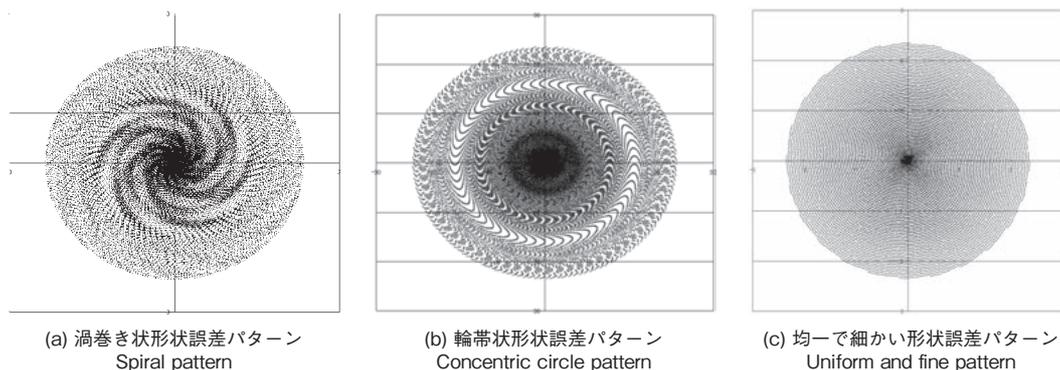


図6 軸対称非球面の研削表面に残留する誤差形状パターン
Grinding marks generated on axi-symmetric aspherical ground surface

加工表面に発生するうねりの3次元形状（形状誤差パターン）に再現性が無いことである。例えば、ある時は図6(a)に示すような渦巻き状の形状誤差が、ある時は図6(b)に示すような輪帯状の形状誤差が入ったりで、その再現性がないことが経験される。そこで筆者は、超精密研削表面のナノトポグラフィー創成機構に関する基礎的研究により、この形状誤差パターンの揺らぎは、砥石軸と工作物軸の回転むらと、砥石のアンバランスに大きく起因していることを見いだした⁷⁾。そして加工機械が有するこのような不安定さ（むら）のために、均一な形状誤差パターンと形状精度25nmを達成することは、現在市販されているほとんどの超精密非球面研削装置では難しい。この問題を解決するためには、加工表面の形状誤差パターンが均一になるように、加工結果に影響を与えるすべてのパラメータを所定の値に完全に制御して、一切変動がない、ばらつきがない、揺らがない加工、すなわち超安定加工（fluctuation-free machining）を実現する必要がある。

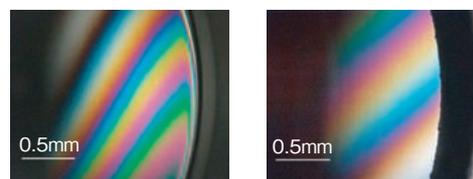
3.4 超安定・超精密非球面研削加工システムの開発

ナノトポグラフィー創成機構に関する基礎的研究の結果、工作物と砥石軸の回転数変動が0.1%以下になれば誤差形状パターンは目立たなくなることが明らかになった（図6(c)）。そこで前述した平行研削法（仕上面粗さの向上）、並びに円弧包絡研削法（形状精度の向上）を同時に実施でき、かつ研削中の回転変動率を0.1%以下とすることができる超安定・超精密非球面研削加工システムを新たに開発した。装置写真を図7に示す。この研削装置を用いて内視鏡（硬性鏡）用非球面ガラスレンズ（直径4mm）を研削加工した。その結果、形状精度は±25.5nm、表面粗さは21nmRyとなり、従来製品に比べ形状精度で約1/5、表面粗さで2/3の良好な加工面

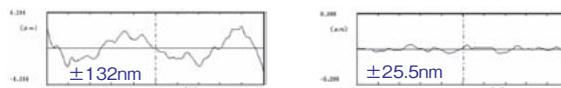
が得られた。また図8に示すように、形状誤差パターンも従来品に比べ格段に減少した。また高精細デジタルカメラ用非球面ガラスレンズを成型するための超合金製凹型非球面金型（金型直径25.0mm、レンズ口径24.4mm）を研削加工した。その結果、形状精度±25.5nm、表面粗さ18nmRyを得た。またその加工表面に形状誤差パターンがなく、レンズのサジタル像面、メリディオナル像面で解像度評価を行った結果、従来法のものと比較して向上することを確認した。



図7 ジェイテクトと共同開発した超安定・超精密非球面研削装置
Newly-developed fluctuation-free ultra-precision aspherical grinding machine



ノマルスキー顕微鏡写真



形状誤差曲線

(a) 従来研削法 Conventional grinding method (b) 超安定研削法 Fluctuation-free grinding method

図8 ガラス製非球面レンズ加工結果一例
Ground aspherical glass lenses

4. ナノ精度M⁴プロセス技術

前章では形状精度を極限まで高める超安定加工法に関して紹介した。本章ではさらに機能を追加するための機能創成法の一つである M⁴ プロセスについて紹介する。

機能を発現するための構造の一つに、図9に示すような、ナノ・マイクロ・マクロ複合構造体があげられる。これは nm オーダーの平滑面を有するマクロサイズの自由曲面（あるいは平面）上に、マイクロサイズの機能性微細構造が形成され、さらにその表面上にナノサイズの微細構造が重畳して形成されたものである。このようなナノ・マイクロ・マクロ複合構造体は、光学的、あるいは電氣的、熱的、機械的に特異な機能を発現することが期待されている。その創成には従来の超精密機械加工技術のみでは対応できず、図10に示した範囲をカバーする加工技術の創出が新たに必要である。そのために、これまで独自に発展、深化してきた様々な機械加工技術に関して、その加工対象の大きさを数 μm オーダーにまで小さくすると同時に、加工精度をナノオーダーまで高めたナノ精度マルチスケール機械加工技術（Micro/Meso Mechanical Manufacturing; 以下、ナノ精度 M⁴ プロセスという）が期待されている。

ナノ精度 M⁴ プロセスの代表的なものを表1に示す。加工メカニズムは従来の機械的加工法とほとんど同じであると予想されるが、加工対象が小さくなることにより、下記に示す新たな問題が生じてくる。

- ① M⁴ 加工機、システムの開発：加工力制御が可能な多軸制御ナノ精度マイクロ加工機の開発が必要になる。
- ② M⁴ プロセス複合化技術：複合加工に対応したユニット開発が必要。
- ③ M⁴ プロセス工具開発：使用する工具が微小になるため、その製作技術を新たに開発しなければならない。
- ④ M⁴ プロセス計測評価技術：加工力自体も小さくなるため、微小力の測定、制御技術が新たに必要になる。また加工形状が小さいため、新たな形状測定技術が必要になる。さらに、加工面のサブサーフェースダメージの評価法の開発も不可欠である。
- ⑤ M⁴ プロセス加工メカニズムや機能性発現のメカニズム解明：除去単位の極小化のためには材料自体の除去特性の把握が必要で、加工シミュレーション、FEMと分子動力学法を融合した大規模分子レベルシミュレーション、材料変形や熱挙動等の複数の物理現象を総合的に解析するためのマルチフィジックスシミュレーションなどの新解析手法の開発が不可欠である。

またこのようなナノ精度 M⁴ プロセス等の加工においては、切りくず自体もナノオーダーである。この場合、材料の除去メカニズムに関しても化学的な要素が強く影響してくることが容易に予想され、これまでの機械工学的なアプローチだけでは解明できない点が多くなってきている。すなわち、ナノ領域における本質的な物理化学事象を単に機械工学的な視点で捉えるのではなく、原子の結合状態の変化とそれを引き起こす電磁気的あるいは化学的相互作用の視点を加えて量子力学的に整理する機械科学的なアプローチが必要となろう。この意味で、共通基盤技術としての加工シミュレーション技術、並びにナノ精度計測評価技術の開発研究がさらに重要視される。

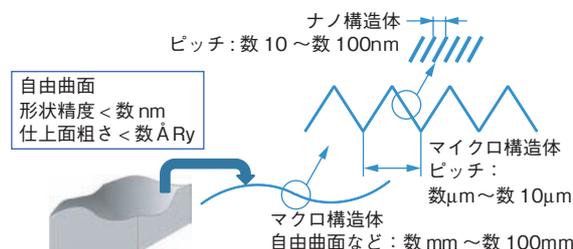


図9 ナノ・マイクロ・マクロ複合構造体
Nano/micro/macro hybrid-structure

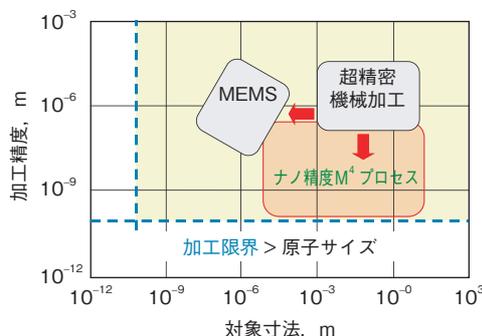


図10 ナノ精度 M⁴ プロセスにおける加工対象
Object size and machining accuracy focused in nano-precision M⁴ processes

表1 ナノ精度 M⁴ プロセスの種類
Various type of nano-precision M⁴ processes

砥粒加工	マイクロ研削 マイクロ研磨 マイクロ超音波加工 マイクロアブレイシブジェット加工 等
切削加工	マイクロ切削 マイクロミーリング 等
その他	パーティクルジェットコーティング マイクロ放電加工 マイクロ付着加工 マイクロパンチング マイクロレーザ加工 マイクロ成形加工 等

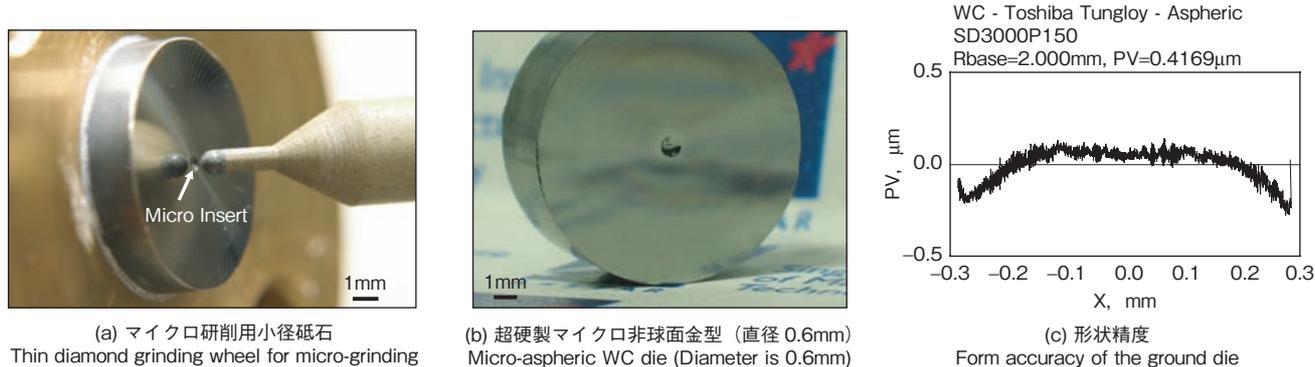


図11 マイクロ研削加工によって加工されたマイクロ非球面⁹⁾
Micro-aspherical die generated by micro-grinding process

4.1 マイクロ非球面加工

M⁴ プロセスの例として、マイクロ非球面の研削加工を紹介する。対象とする非球面の大きさはいわゆるサブミリサイズである。このような大きさの加工においては、従来の加工サイズではほとんど問題にならなかったり、あるいは無視できたような現象も、無視できなくなる。例えば直径がサブミリサイズの非球面形状を直径1mm以下の砥石でマイクロ研削する場合においては、小径砥石のツルーイング、ドレッシングやその使用技術が問題となる。その解決のためには、

- ・有効切れ刃が多くなるようなツルーイング法、ドレッシング法の開発。
- ・超高集中度の砥石の開発。
- ・砥石摩耗、表面粗さが小さくなるような研削方法の開発。

などが重要になる。また工作物自体が小径の場合には、加工力が小さくなるような工夫（超音波研削など）も検討しなければならない。

図11は直径1mmのSD3000P150極微粒ダイヤモンド砥石を用いて研削した超硬製マイクロ非球面レンズ金型である。形状精度は0.4μm、仕上面粗さは62nmであった。通常サイズの砥石を使用した研削結果と比較し、1桁大きい結果となっている。これは小径砥石を使用した場合、有効切れ刃数が極端に小さくなるためである。

4.2 複合振動援用研削加工によるナノ・マイクロ構造体の創成

一般的にナノ・マイクロ構造体の創成はナノインプリント技術や自己組織化等による表面創成技術を用いて行われる。そのため、複雑3次元表面や大面積への創成が困難であったり、高コストであったりとまだ問題も多い。

そこで比較的安価に、また大面積上にサブミクロンオーダーの構造体を機械的な手法で創成する方法について紹介する。

図12(a)は、数Hz程度の低周波振動と数10kHzの超音波振動を重畳させた複合振動援用研削の原理を示したものである^{9), 10)}。軸方向の超音波振動は専用の超音波スピンドルで与え、低周波振動と工作物の送りは加工機のNC指令で与える。(b)は砥石切れ刃の切削軌跡を示したものであるが、それらが重畳する位置を制御することにより、(c)に示したような微細形状を得る。図13は直径1mmのSD600小径砥石を用いることによりジルコニアセラミックス表面に創成した500nmピッチの周期構造である。送り速度、振動周波数等を変化させることにより、種々の形状が創成可能となる。

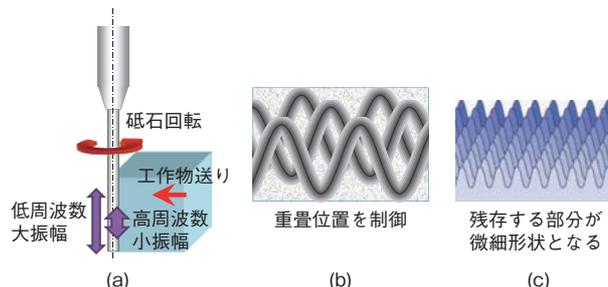


図12 複合振動援用加工による微細形状創成原理
Principle of fine structure generation utilizing hybrid-vibration assisted grinding

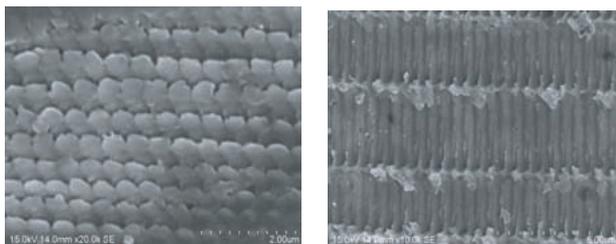


図13 複合振動援用研削で作成した500nmピッチの周期構造体¹¹⁾

Periodic structure with 500nm pitch generated by hybrid-vibration assisted grinding

5. まとめ

本報では、今後の“ものづくり”を考える上で重要であると思われるキーワードについて紹介した。これまでの単なる“形状創成”だけにとどまらず、その表面、あるいは内部に機能を発現する構造を作り込む“機能創成”が重要な役割を担うようになるであろう。本報では機械加工の一つである研削加工を例にとり、形状精度を高める超安定研削法、また微細形状を創成するための複合振動援用研削加工を紹介した。しかし、機能創成のための手法は機械的手法だけにとどまらず、光加工、MEMS加工のようなトップダウンアプローチ型のものづくり手法も有効に適時取り入れるべきである。さらには分子設計や自己組織化を効果的に使用したボトムアップアプローチ型ものづくり手法も有効な手段となるであろう。

このように、これからの“ものづくり”のための加工技術基盤実現のためには、「ナノの世界の現象の本質を把握した科学的な合理性を持ったものづくり」を実現する学問体系と技術、およびその研究基盤の構築が必要不可欠である。すなわち、①原子レベル、ナノレベルでの機械的挙動を電磁気現象や化学反応との連成問題と位置づけ、量子力学的視点での解明、②ナノメカノケミストリー、ナノ材料・ナノ加工に関わる諸現象の科学的解明、③マイクロマシン、ナノマシン、ナノシステムの設計と構築、④原子レベル、ナノレベルでの材料・強度信頼性評価やエネルギー変換システムの安全性評価研究の確立、⑤超環境耐久性材料および高信頼ナノマシン・ナノシステムなどの開発、⑥ナノ計測・評価技術の開発を強力に推進する必要がある。今後の開発研究の進展が、非常に楽しみである。

参考文献

- 1) 加藤康司, エネルギー自立自然共生のロハスの家(復興と百年の計), 日本機械学会誌, vol. 115, no. 1126(2012) 664-667.
- 2) 日本の将来推計人口報告書(WEB版), 国立社会保障・人口問題研究所(平成18年12月推計) <http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/suikai07/index.asp>
- 3) 鈴木浩文, 小寺直, 前川茂樹, 森田訓子, 桜木英一, 田中克敏, 前田弘, 厨川常元, 庄司克雄, マイクロ非球面の超精密研削に関する研究(斜軸研削法によるマイクロ非球面の鏡面研削の可能性検証), 精密工学会誌, 64, 4(1998)619-623.
- 4) S. Matsui and K. Syoji: On the Maximum Height Roughness of Ground Surface, Technology Reports, Tohoku Univ., 38, 2(1973)615-626.
- 5) 佐伯優, 厨川常元, 庄司克雄, パラレル研削法による非球面金型加工に関する研究, 精密工学会誌, 68, 8(2002), 1067-1071.
- 6) 厨川常元, 立花亨, 庄司克雄, 森由喜男, 円弧包絡研削法による非軸対称非球面セラミックスミラーの加工, 日本機械学会論文集(C編), 63, 611(1997) 2532-2537.
- 7) 吉原信人, 庄司克雄, 厨川常元, 佐伯優, 軸対称非球面研削における研削模様について, 精密工学会誌, 70, 7(2004)972-976.
- 8) W. K. Chen, T. Kuriyagawa, H. Huang, N. Yosihara, Machining of micro aspherical mould inserts, Precision Engineering, 29, 3(2005)315-323.
- 9) 嶋田慶太, 立石匠, 吉原信人, 閻紀旺, 厨川常元, 電着ダイヤモンド砥石による超音波援用マイクロ研削に関する研究, 砥粒加工学会誌, 53, 1(2009)45-48.
- 10) 嶋田慶太, 立石匠, 吉原信人, 閻紀旺, 厨川常元, 電着ダイヤモンド砥石による超音波援用マイクロ研削に関する研究 第2報: 砥石端面による工作物除去に及ぼす超音波振動の影響, 砥粒加工学会誌, 54, 1(2009) 37-40.
- 11) 嶋田慶太, 振動研削に関する研究, 東北大学学位論文(平成24年3月27日取得)