

平成21年5月28日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19206017  
 研究課題名（和文）広域ナノパターンジェネレータ（ANGEL）の開発とナノ加工特性の解明  
 研究課題名（英文） A Newly Developed of Advanced Nano-pattern Generator with Large Work Area (ANGEL) and Investigation on the Nano-machinability  
 研究代表者  
 新野 秀憲（SHINNO HIDENORI）  
 東京工業大学・精密工学研究所・教授  
 研究者番号：40196639

## 研究成果の概要：

本研究では先端科学技術分野で重要となる広領域を対象とする超精密加工を実現するため、広域ナノパターンジェネレータ（ANGEL）と称する超精密加工システムの開発を行なっている。システムを構成する機構部、センサ部、制御部などの各構成要素は、理想的な構造を実現するために新たに開発したものである。開発した加工システムの性能評価を行なった結果、加工対象表面に所要のナノメートルオーダーの微細加工を実現可能であることを確認している。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	15,600,000	4,680,000	20,280,000
2008年度	21,700,000	6,510,000	28,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	37,300,000	11,190,000	48,490,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 生産工学・加工学

キーワード：マザーマシン，ナノ加工，ナノ加工特性，ナノモーション制御，微細形状創成

## 1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会の到来に伴い、情報通信、エレクトロニクス、メカトロニクス分野を中心に各種製品の高性能化への要求が一段と高まっている。その結果、光学素子のような3次元マイクロ形状や平面アンテナのような大面積にナノパターンを創成する加工要求が高まっている。このようなナノスケールの形状やナノパターンの創成により、機械システムにおいても在来の特性を超えた新たな機能を付与でき、飛躍的な性能向上が期待

されている。例えば、軸受面への創成は、高剛性化・長寿命化・安定化、伝熱面への創成は、伝熱効率の増大に効果があると予測される。しかし、これまでそのようなナノスケールの加工要求に対して、小サイズを対象とした半導体プロセスを適用することが一般的であり、大面積のマイクロパターンを創成するための技術は、国内外でほとんど検討されていない。そのため、半導体プロセスによるナノ加工が不可能な難加工材料を様々な機能素子の構造材料として適用する際の障害

にもなっている。

## 2. 研究の目的

(1) 数 100mm 平方の加工空間内でナノパターンを創成可能な ANGEL と称する世界最高の性能を有する工作機械を実現する。

(2) 長時間にわたり静的・動的・熱的に安定なマザーマシンの構造設計方法を提示する。更に、新たな概念に基づく主軸系、テーブル系、熱制御系などから構成される ANGEL を実現する。

(3) 加工点近傍に設置したマイクロセンサにより加工中の計測を行い、ナノパターン創成のための最適加工条件の設定や加工戦略の索定方法を定式化する。

## 3. 研究の方法

開発するシステムは理想的な機能を実現するため、従来の延長線上にない構造形態を新たに提案した。以下にその概要を述べる。

### (1) 開発したシステムの構造概念

大面積の超微細加工を実現するためには、工具および工作物の運動をストローク全域にわたってナノ運動制御する必要がある。本システム内の駆動部は全て非接触支持および非接触駆動を基本としていることから、摩擦現象に代表される非線形挙動を極限まで排除することが可能となった。さらに熱的・力学的安定性を付与するため、主要構造に比剛性が高く低熱膨張であるセラミックスを適用すると共に、各要素を軸対称になるように配置して熱変形および不要な構造振動を低減した。また、これらの構造体は恒温エンクロージャ内に設置し、アクティブ除振システムを用いて支持し、周辺環境からシステムへの外乱の伝達を抑制した。図 1 に構築したシステムの概観を示す。

### (2) ハイブリッドリニア駆動平面ナノ位置決めテーブルシステム

図 2 に開発した主要構成要素であるハイブリッド駆動平面ナノ位置決めテーブルシステムを示す。平面運動テーブルは空気静圧軸受により浮上するとともに、高精度かつ長ストロークの駆動を実現するため、XY 軸方向ともボイスコイルモータおよび円筒形リニアモータを採用したハイブリッドリニア駆動機構により運動制御される。また機構全体を対称構造とすることにより XY 軸駆動方向に重心駆動を実現し、回転方向の運動誤差を抑制している。さらに構造的に誤差要因を含まず、制御系によりテーブルに作用する外乱のインプロセス推定が容易であることから、加工力をリアルタイムで補償するフィードバックシステムを開発し、加工中においても高精度位置決めを実現した。

### (3) ハイブリッド駆動高精度回転機構

複雑 3 次元形状のナノ加工をおこなうた

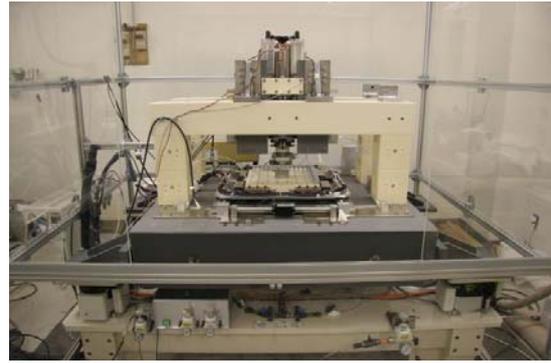


図 1 開発した ANGEL の概観



図 2 ハイブリッドリニア駆動平面ナノ位置決めテーブルシステム

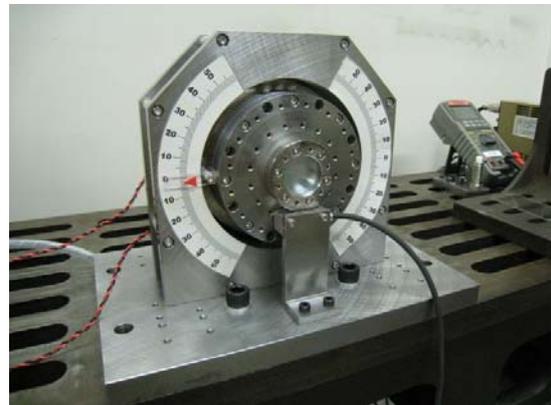


図 3 ハイブリッド駆動高精度回転機構

めには、直動機構のほかに高精度回転機構が必要不可欠である。これらの回転機構には搭載物の重力によるモーメントが常に作用する状況においても高精度な位置決めが要求される。本研究では超精密加工システムにおける旋回機能の高度化を目的として新たに図 3 に示すハイブリッド駆動高精度回転機構を開発した。搭載物の支持に必要な高いトルクとナノ位置決め制御を両立するため、空気圧アクチュエータと電磁アクチュエータを同軸上に配置したハイブリッド駆動機構を提案し、実際にこれらを組み込んだ回転機

構を実現した。

(4) マイクロセンサを用いた加工プロセスの適応制御

従来の加工システムは予めプログラムされた軌跡通りに工具および工作物の位置を制御して加工を行うが、加工プロセスをより柔軟、かつ最適化するためには、加工状況に応じてシステムを最適に稼働させる必要がある。本研究では、工具の刃先近傍にマイクロセンサを直接搭載することにより、微細加工中のわずかな加工状態変化を捉え、この情報を用いてシステムの適応制御を行った。その結果、図4に示すような加工温度を一定に維持するような加工が可能となり、工具摩耗の抑制や加工変質層の最小化などが期待できる。

(5) 微細表面形状の創成

開発した微細加工システムを用いて実際に加工対象に微細表面形状を創成し、評価を行なった。図5はダイヤモンド工具によりNiPの表面に加工を行なったSPMによる観察結果の一例である。図から明らかなように数10ナノメートルの微細パターンが明確に転写されていることが確認できる。

#### 4. 研究成果

(1) システム内に含まれる誤差要因の排除および抑制を行った超精密加工システムの新たな構造概念を提示し、実際に新素材の適用および最適な要素配置を行なうことで熱的・力学的に安定な加工機構を実現した。

(2) ハイブリッドリニア駆動機構を用いることにより、従来比100倍の面積のナノ運動制御が可能となり、広域にわたるナノメートルオーダの平面位置決めを実現した。

(3) 工具刃先に搭載したマイクロセンサの情報を用いて、加工点の温度を一定に保持する超精密切削加工の適応制御を実現した。

(4) 開発した広域ナノパターンジェネレータANGELを用いて工作物への微細表面形状創成実験を行なった結果、数10ナノメートルオーダの微細加工を実現可能であることを確認した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

① Hidenori SHINNO, Hatato YOSHIOKA, Mamoru HAYASHI, A High Performance Tilting Platform Driven by Hybrid Actuator, Annals of the CIRP(Annals of the International Academy for Production Engineering), Vol.58, No.1, 2009, pp.363-366, 査読有り。

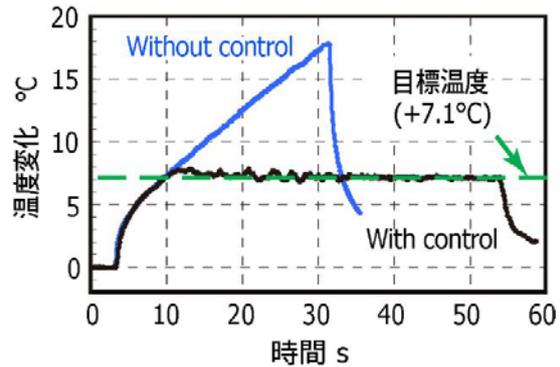


図4 加工温度一定の適応制御

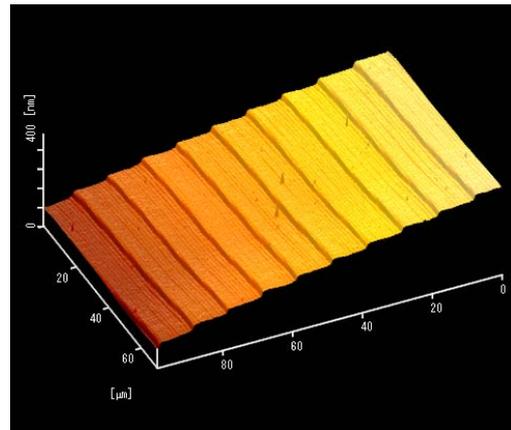


図5 加工面のSPM像(段差40nm)

② 吉岡 勇人, マイクロ温度センサを用いた超精密切削加工の適応制御, 日本機械学会誌, Vol.112, 2009, 143, 査読なし

③ 吉岡 勇人, 新野 秀憲, 超精密加工機「ANGEL」の特徴と今後の展開, 型技術, Vol.24, 2009, 103-106, 査読なし

④ 新野 秀憲, 吉岡 勇人, 特集 未来技術【超精密加工機“ANGEL”】, 生産財マーケティング, Vol.46, 2009, A-37, 査読なし

⑤ 高橋 信彦, 吉岡 勇人, 新野 秀憲, 集束イオンビームによる硬ぜい性材料のナノ加工に関する研究, 精密工学会誌, Vol.74, 2008, 491-497, 査読あり

⑥ Hayato YOSHIOKA, Toshimichi GOKAN, Hidenori SHINNO, Design and Nanomotion Control of a Noncontact Stage with Squeeze Bearings, International Journal of Automation Technology, Vol.2, 2008, 18-23, 査読あり

⑦ 吉岡 勇人, 完全非接触 XY 平面位置決めテーブルを用いた微細加工, 日本機械学会誌,

Vol.111, 2008, 129, 査読なし

⑧ M.Takahashi, H.Yoshioka, H.Shinno, A Newly Developed Long Stroke Vertical Nano-Motion Platform with Gravity Compensation, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.2, 2008, 356-365, 査読有り

⑨ M.Hayashi, H.Yoshioka, H.Shinno, An Adaptive Control of Ultraprecision Machining with an In-Process Micro-Sensor, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.2, 2008, 322-331, 査読有り

⑩ Hidenori SHINNO, Hayato YOSHIOKA, Koichi TANIGUCHI, A Newly Developed Linear Motor-Driven Aerostatic X-Y Planar Motion Table System for Nano-Machining, Annals of the CIRP(Annals of the International Academy for Production Engineering), Vol.56, No.1, 2007, pp.369-372, 査読有り.

⑪ 新野秀憲, 吉岡勇人, 油空圧機器と超精密加工技術—流体制御技術の適用による3次元ナノ加工の実現—, 油空圧技術, Vol.47, 2007, 1-6, 査読なし.

⑫ 新野秀憲, 吉岡勇人, 超精密加工機のハードウェア技術, 機械の研究, Vol.60, 2007, 67-72, 査読あり,

[学会発表] (計9件)

① M.Takahashi, H.Yoshioka, H.Shinno, Ultraprecision Machining System for Fabricating Nano-Devices, The 9th **euspen** International Conference, 2009年6月4日, スペイン・サンセバスチャン

② M.Hayashi, H.Yoshioka, H.Shinno, High Torque and High Precision Rotary Table System Driven by Hybrid Actuator, The 9th **euspen** International Conference, 2009年6月4日, スペイン・サンセバスチャン

③ 林遵, 吉岡勇人, 新野秀憲, ハイブリッドアクチュエータを用いた高トルク高精度回転機構の開発, 第7回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会, 2008年11月22日, 岐阜県・長良川国際会議場

④ Hayato YOSHIOKA, Mamoru HAYASHI, Hidenori SHINNO, Adaptive Control for Ultraprecision Machining Using an

In-Process Micro Thermosensor, The 13th International Machine Tool Engineers' Conference, 2008年10月30日, 東京・東京ビッグサイト

⑤ H.Yoshioka, M.Takahashi, H.Shinno, Vertical Nano-Positioning System for Precision Machine, The 8th **euspen** International Conference, 2008年5月20日, スイス・チューリッヒ

⑥ H. SHINNO, M. TAKAHASHI, H. YOSHIOKA, Vertical Nano-Positioning Stage with Noncontact Gravity Compensator, The 13th International Machine Tool Engineers' Conference, 2008年10月30日, 東京・東京ビッグサイト

⑦ Mamoru HAYASHI, Hayato YOSHIOKA, Hidenori SHINNO, An Adaptive Control of Ultraprecision Machining with an In-Process Micro-Sensor, The 4th International conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21), 2007. 11. 7, Fukuoka, Japan

⑧ Toshimichi GOKAN, Hayato YOSHIOKA, Hidenori SHINNO, A Newly Developed Compact Nano-Positioning Table System Using Squeeze Bearing, The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21), 2007. 11. 7, Fukuoka, Japan.

⑨ Motohiro TAKAHASHI, Hayato YOSHIOKA, Hidenori SHINNO, Vertical Nano-Positioning System with Gravity Compensator, The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21), 2007. 11. 7, Fukuoka, Japan.

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

①

名称: 重力補償機構及びそれを用いる鉛直方向位置決め装置

発明者: 吉岡勇人, 新野秀憲

権利者: 東京工業大学

種類: 特願

番号: 2007-194124

出願年月日: 2007年7月26日

国内外の別: 国内

②

名称: ロータリアクチュエータ

発明者: 吉岡勇人, 新野秀憲, 林遵

権利者: 東京工業大学

種類: 特願

番号: 2009-042043

出願年月日：2009年2月25日  
国内外の別：国内

〔その他〕

○新聞発表（計2件）

①

“1 ナノメートル分解能持つ切削加工機開発  
東工大 完全非接触の機械構造”，p.14，科  
学技術・大学欄，日刊工業新聞 朝刊，2008  
年11月24日．

②

“加工機向け駆動装置 重量物，高精度に保  
持 東工大 1万分の1度で制御”，p.22，科  
学技術欄，日刊工業新聞 朝刊，2009年4月  
10日．

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新野 秀憲 (SHINNO HIDENORI)  
東京工業大学・精密工学研究所・教授  
研究者番号：40196639

### (2) 研究分担者

吉岡 勇人 (YOSHIOKA HAYATO)  
東京工業大学・精密工学研究所・准教授  
研究者番号：90361758

澤野 宏 (SAWANO HIROSHI)  
東京工業大学・精密工学研究所・助教  
研究者番号：40514295

### (3) 連携研究者

なし