

# 多波長レーザによる近接場光を用いた工具刃先高さ位置の高精度非接触検出

生産技術部

寺山裕

九州工業大学大学院 情報工学研究院

知的システム工学研究系 先進機械分野

カチョーンルンルアン・パナート

超精密加工の高能率加工を実現するためには、加工直前の工具刃先高さ位置（工具長）の高精度な机上計測が重要である。接触式計測は工具刃先の破損などの課題があり、近年は非接触式計測が注目されている。九州工業大学では、測定基準表面でレーザ光を全反射させた際に表面から数百ナノメートル発生する近接場光を用いて、刃先高さ位置を非接触かつナノスケール精度で検出する手法が提案されていた。本研究では、九州工業大学と共同研究を行い、同手法を用いた光学系観測装置を独自に設計製作した。多波長の近接場光領域において検出可能な高さ方向範囲を検証した結果、マイクロ工具（外径 0.05 mm）の刃先高さ位置は、測定基準表面から 160 nm の範囲までは、 $\pm 18$  nm ( $2\sigma$ ) の不確かさで測定されることが確認できた。

## 1. はじめに

高性能かつ微細な光学製品、医療機器、半導体製造装置の構成部品を生産するため、製造業では金型や微細な部品を、高品質に加工する技術が求められている<sup>1-3)</sup>。一般に精密加工には NC（数値制御式）加工機が用いられ、図面に基づいて、小径工具刃先位置の移動量（加工パス）が設定されている。しかし、周囲温度・工具摩耗現象、回転時の工具振れなどによって工具刃先高さ位置（工具長）は随時変化している。そのため、加工直前に工具刃先高さ位置を工作機械上で高精度に検出し、高さ位置を事前に補正する必要がある。

そこで通常、工具の刃先高さ位置を機上で把握するために、工作機械内部に設置されたツールセッタが用いられており、接触式計測と非接触式計測がある。接触式計測では特に小径工具の先端を破損させる恐れがあり、非接触式計測（レーザ方式、撮像方式）では光の回折限界の要因で繰り返し測定精度が実質  $1\ \mu\text{m}$  レベルで限界と、それぞれに課題がある。

このことから、小径工具の刃先高さ位置を、より高精度かつ非破損に計測する技術が求められている。これまで、レーザ回折光を用いた工具先端と被加工物表面間の距離計測手法<sup>4)</sup>やダイヤモンド工具刃先の表面から発生させた近接場光に被加工物が侵入した時の散乱光を検出する手法<sup>5)</sup>などが提案されていた。本研究では、近接場光によって、よりナノスケール精度に小径工具刃先位置を非接触で計測する手

法を検討し、マイクロ工具（外径 0.05 mm）において、その刃先高さ位置検出精度を検証した。

## 2. 工具刃先高さ位置の測定原理・手法

### 2.1 近接場光の発生方法

図 1 に近接場光の発生原理を示す。レーザ光を高屈折率  $n_{\text{high}}$  媒質（例えば、ガラス基板など）側から低屈折率  $n_{\text{low}}$  媒質（例えば、大気など）側に向けて入射角  $\theta_i$  ( $\theta_i > \theta_c = \arcsin[n_{\text{low}}/n_{\text{high}}]$ ) の全反射条件で照射する。この時、自由空間伝搬をしない近接場光と呼ばれる光が、基準面近傍（境界面から数百ナノメートル程度）のみに局在して発生する<sup>6,7)</sup>。近接場光は、自由空間伝搬レーザ光の最小スポット径（数  $\mu\text{m}$  程度）よりも薄く、必然的に焦点深度外の物体には照明されない。そのため、表面近傍の物体のみに限定して照明され、一般的な光学的回折限界よりも高い検出精度での計測が可能となる。

また、近接場光の光強度は、式(1)で示され、発生面から垂直方向へ指数関数的に減衰する。つまり、基準面からの高さに応じた光強度をもつ。ここで、 $I_{ev}(z, \lambda)$  は表面から高さ  $z$  における近接場光の光強度、 $\lambda$  はレーザ光波長を表し、 $I_{z=0}$  は表面での光強度、すなわち照射レーザの光強度そのものになる。

$$I_{ev}(z, \lambda) = I_{z=0} \times \exp\left[-\frac{z}{z_c(\lambda)}\right] \quad (1)$$

このとき  $z_c$  は、しみこみ深さ定数距離（近接場光強度が  $I_{z=0}/e$  になる時の高さ;  $e$  はネイピア数）であり、式(2)に示すように、照射するレーザー光波長  $\lambda$  と入射角  $\theta_i$ 、各媒質の屈折率  $n$  に依存して定められる。

$$z_c(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{(n_{\text{high}})^2 \sin^2 \theta_i - (n_{\text{low}})^2}} \quad (2)$$

## 2.2 工具刃先の非接触ナノスケール測定原理

この限定された近接場光内に物体が存在した時、物体から散乱伝搬光が発生するため、その散乱光を光学的に検出することで、基準面近傍においてナノスケールの現象を観測することができる<sup>8,9)</sup>。

本研究における、近接場光を小径工具の刃先非接触検出に適用した場合の原理<sup>10,11)</sup>を図2に示す。工具刃先が基準面（ガラス基板の表面等）から数百nm近傍へ侵入するのを検知し、刃先が基準面に接近するほど大きな散乱光量  $I_{sc}$  が検出される。しかし、この検出のみでは刃先が基準面に接触するまで基準位置が不明であった。

そこで、本手法を応用し多波長の近接場光を用いた工具刃先高さ位置の高精度検出手法<sup>12)</sup>を図3に示す。レーザー光の波長ごとに近接場光のしみ込み深さ距離定数  $z_c$  が異なるため、散乱光検出タイミングや散乱光量比によって、刃先高さ位置  $z_{\text{edge}}$  を高精度に検出できる。レーザー光波長が  $\lambda_1, \lambda_2$  の場合の工具刃先からの散乱光量は、式(3)、(4)と表せる。

$$I_{sc}(z_{\text{edge}}, \lambda_1) = KI_{sc,0}(\lambda_1) \exp\left[-\frac{z_{\text{edge}}}{z_c(\lambda_1)}\right] \quad (3)$$

$$I_{sc}(z_{\text{edge}}, \lambda_2) = KI_{sc,0}(\lambda_2) \exp\left[-\frac{z_{\text{edge}}}{z_c(\lambda_2)}\right] \quad (4)$$

ここで、 $K$  は刃先高さ位置への換算係数である。式(3)と(4)を連立させると、 $I_{sc,0}(\lambda)$  は同じ光量、 $z_c(\lambda)$  は既知数のため、カメラで検出された散乱光量  $I_{sc}(\lambda_1)$  と  $I_{sc}(\lambda_2)$  の比によって、基準面からの工具刃先高さ位置（工具長）を式(5)のように、換算係数なしで算出することが可能となる<sup>13)</sup>。

$$z_{\text{edge}} = \frac{z_c(\lambda_1)z_c(\lambda_2)}{z_c(\lambda_1) - z_c(\lambda_2)} \log_e \left[ \frac{I_{sc}(\lambda_1)}{I_{sc}(\lambda_2)} \right] \quad (5)$$

## 3. 多波長近接場光による工具刃先高さ位置のナノスケール精度測定

### 3.1 観測装置の設計と製作

小径工具刃先高さ位置の非接触検出手法の基礎検証のために製作した観測装置の概要図を図4に示す。また、光学系の各種実験パラメータを表1に示す。

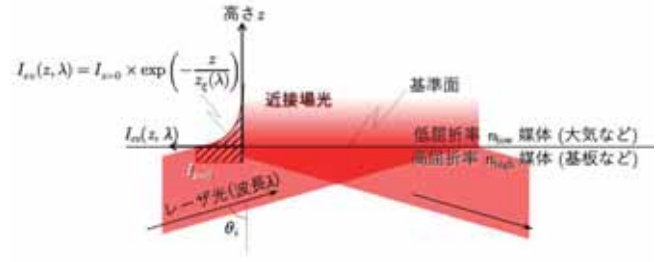


図1 近接場光の局所的な発生

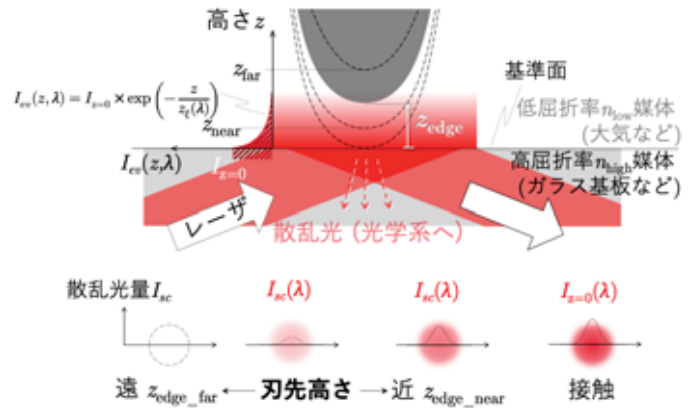


図2 小径工具刃先の検出原理

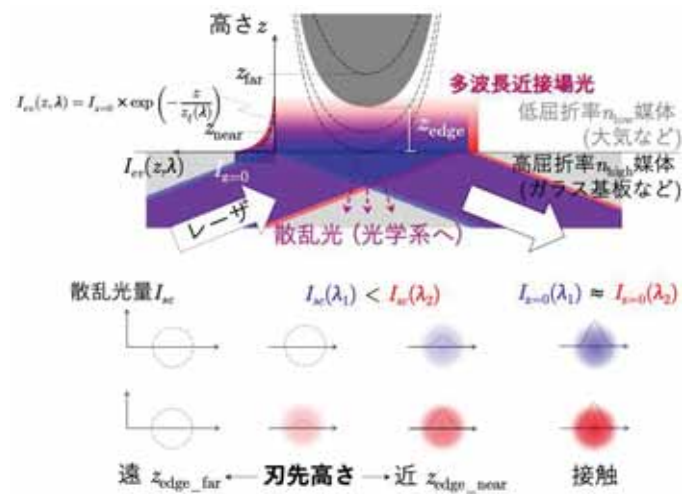


図3 小径工具刃先高さ位置の測定原理

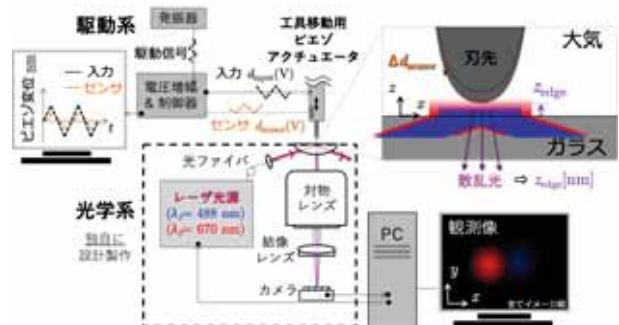


図4 観測装置(駆動系・光学系)の概要図

駆動系において、小径工具は高精度位置決めピエゾアクチュエータに取り付けて、ナノメートル精度で刃先をガラス基準面に接近させた。なお、レーザ光源は(株)島津製作所製4波長レーザモジュールを使用し、ピエゾアクチュエータは九州工業大学が保有する設備を利用した。

近接場光内に工具が侵入すると工具刃先から散乱光が発生する。その散乱光は光学系で集光・結像され、撮像素子で可視化かつ刃先位置が検出される。

現在は基礎検証の段階であり、製作した観測装置の大きさは高さ220 mm、幅150 mm、奥行き100 mmである。将来、非接触ツールセットとして加工機内に設置し、インプロセス測定を実現するために、光学系部の更なる小型化を目指している。

表1 実験パラメータ

| Laser illumination          |           | $(\lambda_{blue})$ | $(\lambda_{red})$ |
|-----------------------------|-----------|--------------------|-------------------|
| - wavelength $\lambda$      | nm        | 488                | 670               |
| - incident angle $\theta_i$ | deg       | 50                 |                   |
| - penetration depth $z_c$   |           | 69                 | 94                |
| CMOS camera                 |           |                    |                   |
| - pixel size                | $\mu m^2$ | 5.48 × 5.48        |                   |
| - exposure time             | ms        | 25                 |                   |
| - recording speed           | fps       | 40                 |                   |
| Optical system              |           |                    |                   |
| - total magnification       |           | 30×                |                   |
| - numerical aperture        |           | 0.4                |                   |

### 3.2 検出高さ方向範囲の検証

製作した観測装置の光学系を用いた場合の、検出高さ範囲を検証するために、マイクロ工具（外径0.05 mm、材質：超硬合金）を、ピエゾアクチュエータに取り付け、印加電圧によって変位量  $d_{input}$  を指示した。本実験では、マイクロ工具をガラス基準面に一定速度320 nm/sで接近させ、工具刃先を観測しつつ、アクチュエータ内部に搭載されたひずみゲージを用いた実質的なアクチュエータの変位量  $d_{sensor}$  を測定した。撮影条件は露光時間25 ms、撮影速度40 fpsで、背景ノイズ除去後の観測像および変位量に対する散乱光量推移を図5に示す。

検出可能な高さ方向範囲は、工具刃先が各波長  $\lambda$  の近接場光に侵入し、散乱光が検出され始めた時点から、刃先がガラス基準面に接触するまでのピエゾアクチュエータの高さ方向相対変位量であり、これが近接場光領域となる。

結果として、本実験条件で検出可能な刃先高さ範囲は、波長  $\lambda_{red}$  の近接場光では約300 nm、波長  $\lambda_{blue}$  の近接場光では約200 nmであった。なお、各波長におけるしみこみ深さ定数距離  $z_c$  の約3倍であった。

これらの結果により、使用したマイクロ工具の刃先高さ位置がナノスケール範囲で検出可能であることが確認された。また、水平XY方向における観測範囲は、光学系による拡大率や撮像センサの大きさに依存するが、本実験装置では約  $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$  であり、外径0.05 mm工具刃先の検出に十分な検出範囲であった。

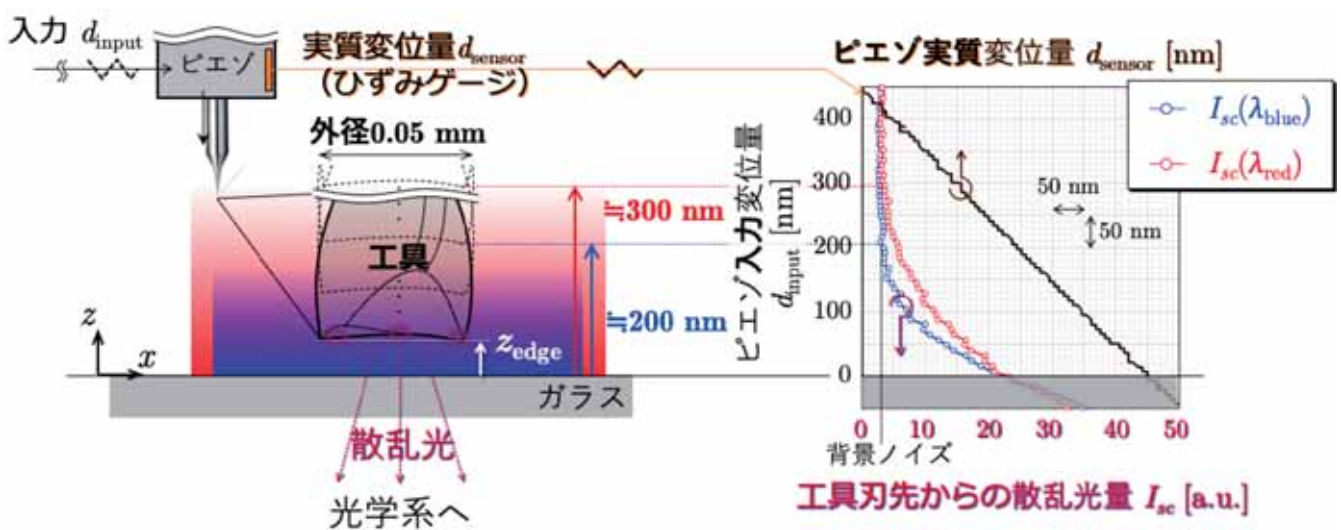


図5 多波長近接場光による工具刃先の検出範囲

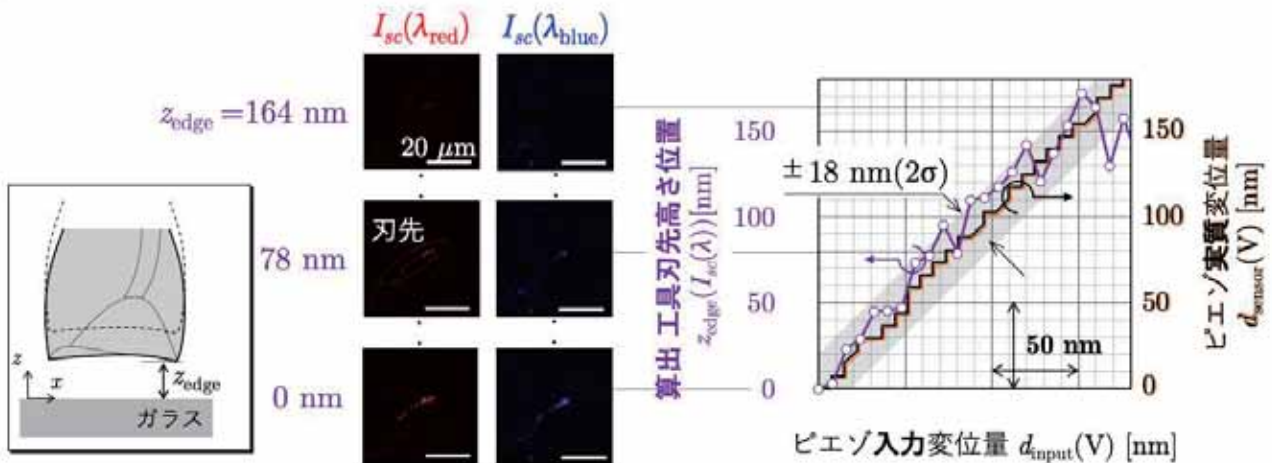


図6 算出された工具刃先高さ位置

### 3.3 小径工具刃先高さ位置の測定

刃先がガラス基準面に接触した時点を刃先高さ位置  $z_{\text{edge}}=d_{\text{sensor}}=0 \text{ nm}$  とし、式(5)を用いて表面からの刃先高さ位置（工具長）を算出した結果を図6に示す。本実験では、表面から  $160 \text{ nm}$  の範囲まで  $\pm 18 \text{ nm}$  ( $2\sigma$ ) の不確かさで刃先高さ位置が測定されていることから、本手法の有効性が確認された。

### 4. おわりに

本研究では、多波長レーザによる近接場光（全反射時にガラス表面から数百  $\text{nm}$  近傍で低屈折率側へ発生する光）を用いて、小径工具の刃先から発生した散乱光量を検出するため、独自に開発した光学系の観測装置を設計製作した。

本光学系で、外径  $0.05 \text{ mm}$  のマイクロ工具から発生した散乱光を結像させて観測像を取得した結果、近接場光での検出可能な高さ範囲は、波長  $\lambda_{\text{blue}}$  ( $488 \text{ nm}$ ) で約  $200 \text{ nm}$ 、波長  $\lambda_{\text{red}}$  ( $670 \text{ nm}$ ) で約  $300 \text{ nm}$  であった。また、2波長の散乱光量から算出した刃先高さ位置は、基準面から  $160 \text{ nm}$  の範囲において、 $\pm 18 \text{ nm}$  ( $2\sigma$ ) の不確かさで測定され、本手法の有効性が確認された。

今後は、刃先高さ位置測定の繰り返し精度の検証や、様々な工具材質ごとの光学的特性評価などについて検討し、本手法の基礎検証を進めていきたい。

### 参考文献

- 1) 高谷裕浩: 非接触機上計測のこれまでと展望, 精密工学会誌, 90 巻, 5 号 (2024) pp.387-393.
- 2) 福田将彦: 自動車用部品精密部品の超精密加工を支える機上測定, 精密工学会誌, 85 巻, 7 号 (2019) pp.628-631.

- 3) 田中克敏, 福田将彦, 甲斐義章, 鈴木清, 植松哲太郎: 超精密加工機械の高精度化の研究 -第 3 報: 超精密非球面加工機の開発と性能-, 砥粒加工学会誌, 51 巻, 9 号 (2007) pp.553-558.
- 4) カチョーニルンルアンパナート, 木村景一, 鈴木恵友: レーザ回折光による高速回転中の工具先端と被加工物間の距離計測, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集 (2010) pp.765-766.
- 5) 吉岡勇人, 井手隼人, 澤野宏, 新野秀憲: 光学的手法を用いた工具-工作物接触状態検知に関する研究, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集 (2012) pp.829-830.
- 6) E.J. Ambrose: A surface Constant Microscope for the study of Cell Movements, *Nature*, Vol. 178, No.4543 (1956) p.1194.
- 7) S. Takahashi, R. Nakajima, T. Miyoshi, Y. Takaya and K. Takamasu: Development of an evanescent light measurement system for Si wafer microdefect detection, *Key Engineering Materials*, Vol. 295 (2005) pp.15-21.
- 8) カチョーニルンルアンパナート: 近接場光(エバネッセント光)による壁面近傍のナノ粒子観測方法, 精密工学誌, 90 巻, 2 号 (2024) pp.184-188.
- 9) Y. Terayama, P. Khajornrungruang, J. Seo, S. Hamada, Y. Wada, H. Hiyama: Direct Observation of Removal of Sub-100 nm Silica Particle Detachment: Lateral Force and Evanescent Microscopy Study, *ECS Journal of Solid Science and Technology*, Vol. 14 (2025) 044004.
- 10) 井上智樹, カチョーニルンルアンパナート, 鈴木恵友: 近接場光を応用した工具刃先検出法の

確立-工具先端位置検出精度の検討-, 第24回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集 (2017) pp.9-10.

- 11) 甲斐 雅貴, カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友: 近接場光を応用した工具刃先計測の数値シミュレーションによる散乱光特性の評価 - 第二報: 工具材への金属モデルの適用-, 2021年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集 (2021) pp.635-636.
- 12) カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友, シンソムブーン カウィー, 井上智樹: 超近接スイッチ, 特開 2019-164205, 2019.9.26 公開.
- 13) 寺山裕, カチョーンルンルアンパナート: マイクロ工具長の非接触ナノスケール検出手法の精度検証, 型技術誌, 39 巻, 13 号 (2024).