

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18798

研究課題名（和文）マイクロ熱検知素子と格子パターン融合による熱収支検出型高精度変位計測の新原理創出

研究課題名（英文）A new method for precision displacement measurement based on the heat-flow detection by a micro thermal sensor combined with grating pattern structures

研究代表者

清水 裕樹（Shimizu, Yuki）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70606384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：自己ジュール発熱により微小間隙に安定熱収支場を生成してその変化を高精度に検知するマイクロ熱検知素子を用い、高精度マイクロパターン（スケール）の3次元形状を読み取ることで、超コンパクトな形態での高精度・多軸変位計測を実現する「マイクロ熱収支場検知式エンコーダ」の基礎原理を提案した。フォトリソグラフィプロセスを用いてガラス基板上にマイクロ熱検知素子を試作し、マイクロパターン群を有する回折格子と組み合わせてマイクロ熱収支場検知式エンコーダのプロトタイプを構築して原理検証実験を行い、その実現可能性を実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案する「マイクロ熱収支場検知式エンコーダ」は、マイクロ熱検知素子-回折格子スケール間に生成した安定熱収支場をもとにスケール格子パターンを読み取ることで素子-スケール間相対変位の高精度読み取りを実現するものである。「熱」を積極的に精密計測に援用する本手法は学術的にも意義があるもので、従来はリニアスケールを設置できなかった狭小スペースにおいても高精度な変位検出を実現できる可能性を有することから、その産業的波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：A new principle of a compact linear scale for displacement measurement, in which a heat flow generated between a micro thermal sensor and precision three-dimensional micro pattern structures prepared on a scale surface is employed to read the scale displacement, has been proposed. A reading head composed of several micro thermal sensors patterned on a glass substrate has been fabricated based on the photolithography process. A prototype linear scale has been developed by combining the reading head with a diffraction grating, and the experimental results have demonstrated the feasibility of the proposed linear scale based on the detection of the heat flow between the micro thermal sensor and a scale grating.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：熱収支場 エンコーダ マイクロパターン

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 最先端の工学・医療分野では、スケール目盛りをもとに高精度に変位を読み取るエンコーダ<sup>①</sup>等の変位センサ出力をもとに、物体を所望の位置に精度良く停止させる「精密位置決め」が必須技術である。従来の光学式エンコーダでは、マイクロメートルサイズ目盛りの電氣的分割により、読み取り最小値がサブナノメートルにも達する一方、検出ヘッドのサイズが大きく、適用対象に制約がある。フォトリソグラフィ技術で小型化した例もあるが<sup>②</sup>、作製プロセスが複雑でその適用は容易ではない。また、温度変化など周囲環境に対するロバスト性にも問題があり、工場環境下で用いられる工作機械等における加工精度向上の足かせとなっている。

(2) 本課題遂行者は、薄膜抵抗体で構成したマイクロ熱検知センサを用い、サブマイクロメートル以下の間隙に生成した熱収支場により半導体ウエハ等の表面欠陥を検出する技術を開発している<sup>③</sup>。その過程で、基板へのガラス材適用でセンサ感度が格段に向上し、間隙量を数マイクロメートルに広げても高感度な熱収支場が維持できることを実験的に見出している。また、レーザ分光向け2軸回折格子スケール露光装置も開発している<sup>④</sup>が、その開発過程において、この格子スケールと前記マイクロ熱検知センサを融合した、全く新たな原理に立脚したコンパクトかつ対環境ロバスト性に優れた多自由度エンコーダのコンセプトを考案した。

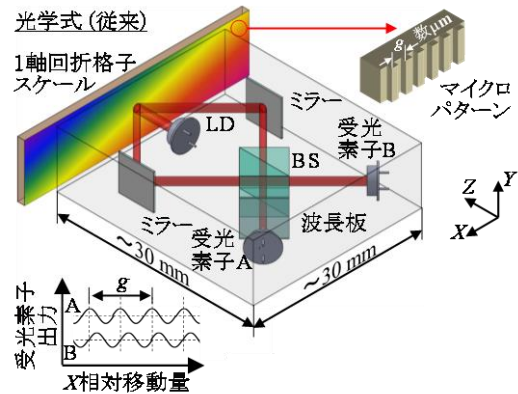


図1 光干渉型リニアエンコーダ  
光学系模式図 (従来手法)

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、自己ジュール発熱により微小間隙に安定熱収支場を生成してその変化を高精度に検知するマイクロ熱検知素子を用い、高精度マイクロパターン (スケール) の3次元形状を読み取ることで、超コンパクトな形態での高精度・多軸変位計測を実現する「マイクロ熱収支場検知式エンコーダ」の基礎原理を確立することである。

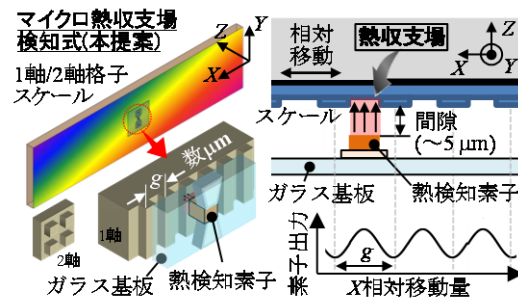


図2 マイクロ熱収支場検知式  
リニアエンコーダ (本提案)

(2) 本目的の実現に向け、熱検知素子およびスケール格子パターン3次元形状を踏まえた微小間隙間熱収支場の数値計算モデルを確立し、これをもとに熱検知素子とマイクロパターンスケールの設計を試みる。

(3) また、数値計算モデルをもとに設計した熱検知素子とマイクロパターンスケールを試作してその基礎特性を評価するとともに、これを組み合わせることでエンコーダのプロトタイプを構築し、変位検出実験を通してその実現可能性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 本提案の基礎原理確立に向け、熱検知素子-スケールパターン間に生成する安定マイクロ熱収支場の理論的検討修正レイノルズ方程式に立脚し、空気自由分子行程をパラメータとして導入したエネルギー方程式をもとに、スケールパターンの3次元形状、熱検知素子上の温度分布、およびスケール-素子間隙量を主なパラメータとしたマイクロ熱収支場の解析を試み、微小間隙間熱収支場理論モデルを確立する。また、このモデルをもとに数値計算を試み、本提案手法によりどの程度の測定分解能の達成が見込めるかを定量的に明らかにするとともに、達成可能な測定分解能と熱検知素子サイズの関係性を明らかにする。

(2) 上記(1)での検討結果をもとに、複数の熱検知素子を同一基板上に配列したパターン検出ヘッドを設計するとともに、フォトリソグラフィプロセスを用いてガラス基板上にマイクロ熱検知素子を配列したパターン検出ヘッドを試作する。また、マイクロパターン群を有するスケールも併せて試作する。

(3) 試作したパターン検出ヘッドとスケールとを組み合わせ、マイクロ熱収支場検知式エンコーダのプロトタイプを構築する。スケールを高精度リニアステージに搭載し、パターン検出ヘッド-スケール間に相対運動を与えてスケールパターンを読み取る原理検証実験を行い、提案手法の実現可能性を明らかにする。また、熱検知素子の信号処理回路についても低ノイズ化を図り、測定分解能の向上を試みる。

#### 4. 研究成果

(1) 修正レイノルズ方程式に立脚し、空気分子行程をパラメータとして導入したエネルギー方程式をもとに、スケールパターンの3次元形状、熱検知素子温度、およびスケール-素子間隙量を主なパラメータとしたマイクロ熱収支場の解析計算による微小間隙間熱収支場の理論モデル化を試みた。図3に示すように、素子有効面およびスケール面上にそれぞれ仮定した微小面積間における熱流束を数式化し、これを素子有効面全面に渡り積算することで熱収支場を数値解析的に求める解析モデルを構築し、スケール基板上に設けた周期パターンを読み取った際の熱検知素子温度変化、すなわちセンサ出力変化を数値解析的に求めた。この結果、フォトリソグラフィで作成される周期パターンを読み取ることで、変位検出に用いることが可能な正弦波状の読み取り出力が得られる見通しがあった。

(2) また、構築した解析モデルをもとに算出した正弦波状読み取り出力による変位測定誤差を見積もった結果、パターン周期 $P$ を熱検知素子の1辺のサイズ $w$ の2倍程度に設定した場合に最も測定誤差が少なくなると見積もられた(図4)。

(3) リニアエンコーダにおいては、測定対象の移動方向を判断するために、位相が90度異なる2つの正弦波状読み取り信号が必要とされる。そのため、フォトリソグラフィプロセスを用いてガラス基板上にマイクロ熱検知素子を複数配置した読み取りヘッドを試作した(図5)。プロセスに用いる装置の制約から、用いるガラス基板のサイズは $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ に設定し、基板中央に熱検知素子を4つ並べた構成とした。また、素子への配線は導線パターンを用いて基板外端まで伸ばし、ガラス基板の2辺をリセスした構造とすることで、熱検知素子がスケールパターンに近接した際にも配線が問題とならない構成とした。

(4) 試作した読み取りヘッドを、上記熱収支理論モデルをもとに算出したパターン間隔を有する線状レジストパターンを有する変位検出用リニアスケールを試作し、これらを組み合わせて安定マイクロ熱収支場検知式エンコーダの原理検証実験装置を構築した(図6)。また、読み取りヘッド上の多素子マイクロ熱検知センサからの読み取り信号を同時に処理する信号変換回路を試作するとともに、これにフィルタ機能を付与して低ノイズ化を図った。なお、読み取りヘッドをリニアスケールに近接するために、別途開発した光学式角度センサを装置に組み込み、読み取りヘッド、リニアスケール双方の角度位置を精密に検出してその調整を試みた。

(5) ガラススケールを精密リニアスライド上に配置し、これに位置調整機構に搭載した読み取りヘッドを近接した際の多素子マイクロ熱検知センサ出力を確認した(図7)。開発した熱検知素子により、 $100\text{nm}$ ステップのスケール変位が検出できることを実験的に確認している。この結果は、シンプルな構成の熱検知素子がコンパクトかつ高精度な変位センサとしても機能することを示すもので、本提案以外の手法にも活用が期待できる。

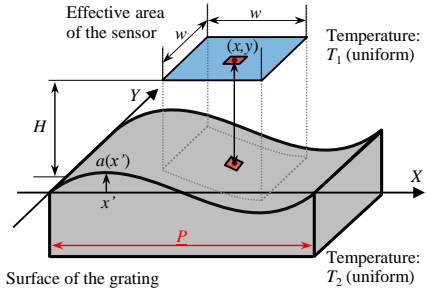


図3 熱検知素子-スケールパターン間マイクロ熱収支場解析モデル模式図

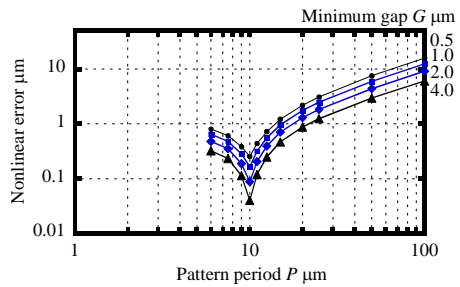


図4 パターン周期に対するスケール測定誤差見積もり結果

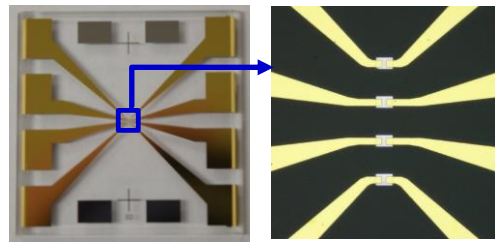


図5 ガラス基板上に複数のパターン読み取り用熱検知素子を有する読み取りヘッド試作結果

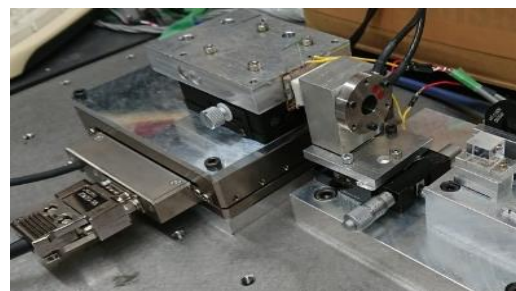


図6 構築したマイクロ熱収支場検知式エンコーダのプロトタイプ機

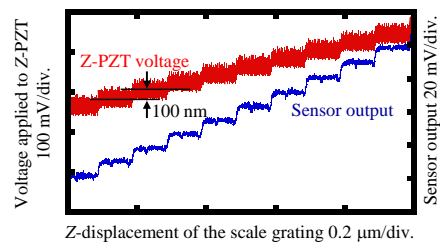


図7 試作した熱検知素子によるスケール近接検出結果

(6) 熱検知素子をスケールパターン表面に対して数マイクロメートルまで近接した状態で、読み取りヘッド-スケール間に相対変位を与えた際の熱検知素子出力を観察し、正弦波状の読み取り出力が得られることを実験的に明らかにした(図8)。また、複数の読み取りヘッド出力を同時に捕捉することで、検出した変位方向弁別に必須となる、位相が異なる複数の正弦波状信号が得られることも併せて確認した。さらに、これら複数素子から得られた信号をもとに内挿処理を試み、提案手法によるサブマイクロメートル級の測定分解能での変位検出の実現可能性を実験的に明らかにした。

<引用文献>

- ① 超精密位置決めアンケート報告書, 精密工学会超精密位置決め専門委員会アンケート小委員会 (2015).
- ② 澤田廉士ら, 超小型マイクロエンコーダとそのドップラーセンサとしての応用, 精密工学会誌, 82-9 (2016) 778-787.
- ③ Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Yuan-Liu Chen, and Wei Gao, Design and Testing of a Micro Thermal Sensor for Non-Contact Surface Defect Detection, International Journal of Automation Technology 11-5, 2017, 781-786.
- ④ Yuki Shimizu, Ryo Aihara, Kazuki Mano, Chong Chen, Yuan-Liu Chen, Xiuguo Chen, Wei Gao, Design and testing of a compact non-orthogonal two-axis Lloyd's mirror interferometer for fabrication of large-area two-dimensional scale grating, Precision Engineering, 52, 2018, 138-151.

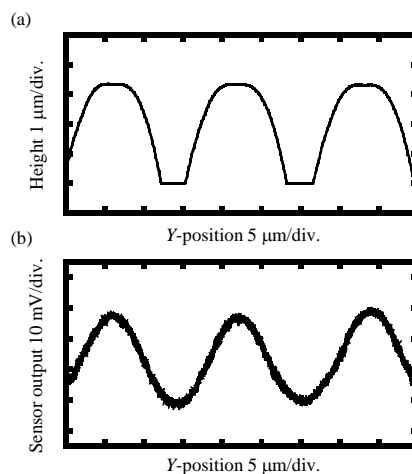


図8 (a)スケールパターン形状と(b)熱検知素子により得られた読み取り出力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuki Shimizu, Ayaka Ishida, Hiraku Matsukuma, Wei Gao	4. 巻 -
2. 論文標題 Theoretical calculation of the reading output from a micro thermal sensors for precision positioning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing, ICAM 2018	6. 最初と最後の頁 24-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Ayaka Ishida, Hiraku Matsukuma, Wei Gao	4. 巻 -
2. 論文標題 Feasibility study on a compact encoder system employing a micro thermal sensor head for precision positioning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th International Conference on Precision Engineering, ICPE2018	6. 最初と最後の頁 D-1-6 (4pp)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 石田彩華, 清水裕樹, 松隈啓, 高偉
2. 発表標題 熱収支場式エンコーダの開発に関する研究 -試作エンコーダを用いた基礎特性評価-
3. 学会等名 2019年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田 彩華, 清水 裕樹, 松隈 啓, 高 偉
2. 発表標題 熱収支場式エンコーダの開発に関する研究-利用可能なパターン検討シミュレーション-
3. 学会等名 精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Shimizu, Ayaka Ishida, Hiraku Matsukuma, Wei Gao
2. 発表標題 Theoretical calculation of the reading output from a micro thermal sensors for precision positioning
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing, ICAM 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Shimizu, Yuki Matsuno, Ayaka Ishida, Hiraku Matsukuma, Wei Gao
2. 発表標題 Feasibility study on a compact encoder system employing a micro thermal sensor head for precision positioning
3. 学会等名 The 17th International Conference on Precision Engineering, ICPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yuki Shimizu	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 15
3. 書名 Metrology (Book Chapter) Chapter 16 Contact-Type Micro Thermal Sensor for Surface Defect Detection	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学大学院工学研究科 高・清水・松隈研究室ホームページ  
<http://web.tohoku.ac.jp/nanometrology/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----