

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14636

研究課題名（和文）均質化法に基づく高性能研磨パッドの創成を目的とした最適設計法の開発

研究課題名（英文）Optimal design method for high-performance polishing pads based on the homogenization method

研究代表者

野口 悠暉（Noguchi, Yuki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：00845448

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、研磨加工法における研磨パッドを対象とした最適設計法の開発を行った。具体的には、研磨パッド表面のテクスチャ構造のように、微細な表面形状を持つ構造物に対して有効な均質化法を構築し、計算効率良く圧力分布を評価できる手法を開発した。均質化法とトポロジー最適化法を組み合わせることにより、所望のマクロ圧力応答を示すミクロな表面形状の最適設計を行うことに成功した。さらに、研磨加工対象のウェハとパッド間に水や潤滑油といった流体を介在させて摩擦を低減する状況を想定し、レイノルズ方程式を基礎方程式とした流体潤滑問題を対象にトポロジー最適化法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、半導体デバイスや光学レンズ等、様々な部品の高精度化が進んでいる中、超精密研磨の需要が高まっている。研磨パッドは、研磨加工機の構成要素の中でもスラリーの保持や研磨屑を除去する役割を持ち、研磨面の仕上がりに強い影響を持つ。本研究で開発したトポロジー最適化法を研磨パッドの最適設計に援用することで、研磨性能の抜本的な向上のみではなく、パッドの多機能化や研磨プロセスの高効率化を目的としたパッド形状の具体的な設計案の創出が可能となる。研磨対象である半導体デバイスの微細化や大面積化がますます進んでいく中で、研磨加工機の高性能化や高効率化は重要な課題であり、本研究はものづくりに大きく貢献できると考える。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed an optimal design method for polishing pads in the polishing process. In particular, we proposed a homogenization method to efficiently evaluate the pressure distribution for the structures with fine surface shapes, such as the textured structure of the polishing pad. By combining the proposed homogenization method and a topology optimization method, we could conduct optimal design of microscopic surface shapes to achieve the desired macroscopic pressure response. In addition, we constructed a topology optimization method for the fluid lubrication problem based on the Reynolds equation for a situation in which fluids such as water or lubricating oil are interposed between the wafer and polishing pad to be polished to reduce friction.

研究分野：構造最適化

キーワード：トポロジー最適化 均質化法 トポロジー導関数 レイノルズ方程式 有限要素法

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体デバイスや光学レンズなど様々な部品の高精度化が進んでいる中、超精密研磨の需要が高まっている。代表的な研磨加工法である化学機械研磨（CMP）は、酸やアルカリ性の溶液を用いて研磨対象を化学的にエッチングし、軟質化した表面を機械的に除去する手法であり、半導体製造プロセスに広く用いられている。CMP に用いられる研磨加工機は主に、研磨パッドが固定された研磨盤と、加工対象であるウェハを相對運動させるキャリアから構成されている。中でも研磨パッドは、スラリーの保持や研磨屑を除去する役割を持ち、研磨面の仕上がりに強い影響を持つ。研磨パッドの機能は、パッド上の溝形状等のテクスチャ形状に依存するため、研磨性能の向上を目的に様々な形状が検討されている。しかし、従来のパッド形状は単純な幾何学的形状を用いたものに限られており、更なる研磨性能向上の余地が残っている。半導体デバイスの微細化や大面積化が進んでいく中で、研磨加工機の高性能化や高効率化は重要な課題である。このような背景から、研磨パッド形状を対象とした最適設計法の構築が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一に研磨パッドを含む系を効率的に評価可能な数値解析手法を確立することであり、第二に、その手法とトポロジー最適化法に基づく研磨パッド形状を対象とした創成設計法の構築を行うことである。

研磨パッドは、微細な表面形状から成る複雑な形状を有している。このため、研磨パッドを含む系を数値解析するためには、微小で多数の計算格子が必要となり、多大な計算コストがかかる。他方、パッド形状の最適化計算には、系の示す応答を繰り返し解析する必要があるため、計算効率良くパッドを対象とした数値解析を行う必要がある。この問題を解決するために、漸近展開に基づく均質化法を導入し、計算効率の向上を目指す。さらに、均質化法とトポロジー最適化法を組み合わせた方法論を構築し、パッド形状を対象とした最適設計法を構築する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、次の事項の研究を行った。

(1) 均質化法に基づく圧力場を対象としたマルチスケールトポロジー最適化法の構築

研磨パッドのように周期構造から成る表面形状に対して有効な数学的手法である、Periodic unfolding method を用いて圧力場を対象とした均質化法を構築した。この均質化法では、表面形状を構成する周期構造の最小単位であるユニットセルに対して境界値問題を解き、その解を用いて均質化係数を評価することによって、ユニットセルの持つ巨視的な特性が得られる。さらに、均質化係数を系全体で成り立つ支配方程式の中で用いることで、マクロな応答を計算効率良く得ることができる。本研究では、均質化法とトポロジー最適化法を組み合わせたマルチスケールトポロジー最適化法を構築した。圧力波動場を対象とした数値例により、提案する手法の妥当性と有用性を確認した。

(2) レイノルズ方程式を対象としたテクスチャ構造のトポロジー最適化

研磨パッドで見られるように、相對運動を示す面の間に水や潤滑油といった流体を介在させて摩擦を軽減する流体潤滑問題では、レイノルズ方程式を用いることで効率的に潤滑膜内の圧力を評価することができる。レイノルズ方程式は、潤滑膜の膜厚が十分に小さい場合に成り立ち、本来3次元問題として捉えられる流体潤滑問題を2次元問題に置き換えることができる。そこで、レイノルズ方程式を基礎方程式とした流体潤滑問題を対象にトポロジー最適化法を構築した。研磨加工の効率の指標となる耐荷重能を目的関数とし、テクスチャ構造を設計変数とするような最適化問題を定式化し、設計感度となるトポロジー導関数を導出した。そして、得られた設計感度に基づき最適化計算を実行し、手法の妥当性を確認した。

4. 研究成果

(1) 均質化法に基づく圧力場を対象としたマルチスケールトポロジー最適化法の構築

均質化法とトポロジー最適化法を組み合わせた方法論を構築し、マルチスケールトポロジー最適化を行った。図1は、圧力波動場である音波に対して機能する構造物の最適設計例を表す。均質化法を用いることによって、周期的に配列されたマイクロ構造のスケールについて成り立つ境界値問題と、音波の入力、出力が定義されるマクロな領域で成り立つ境界値問題を分離することに成功した。このことにより最適化計算の効率化が実現でき、多数のユニットセル構造から成る最適構造を短時間で得ることができた。まずは、単一のユニットセル構造からなる構造物を対象に最適化を行い（図1左）、次に複数種類のユニットセル構造からなる構造物を設計対象とできるように方法論を拡張した（図2右）。音波を所望の方向に伝搬させる構造が得られ、提案する最適設計法の妥当性及び有用性を示すことができた。

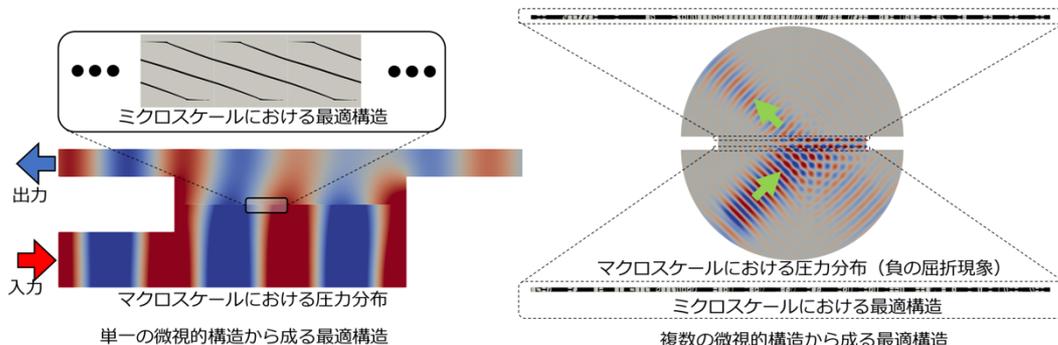


図1：均質化法に基づくマルチスケールトポロジー最適化によって得られた最適構造

(2) レイノルズ方程式を対象としたテクスチャ構造のトポロジー最適化

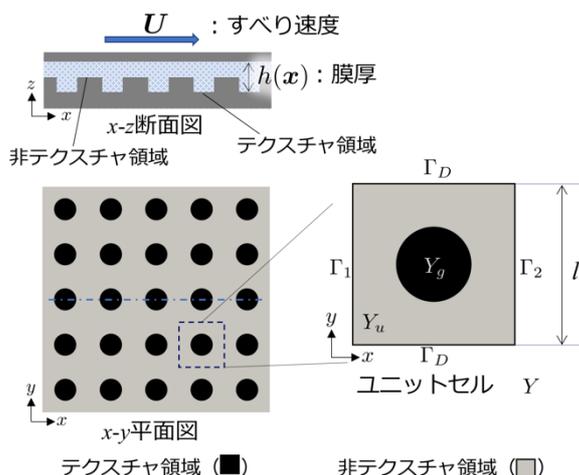


図2：問題設定

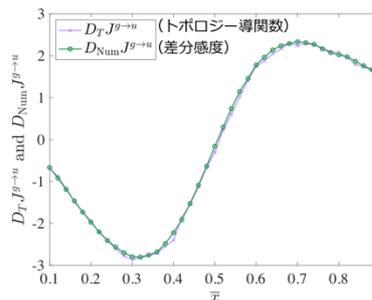


図3：トポロジー導関数の差分感度との比較

研磨パッドの系に対応する流体潤滑問題を対象とした最適化計算を行った。一定のすべり速度で移動する平板と、面内に周期的な形状を有するテクスチャが施された構造が相対し、その間を液体の潤滑膜が占める流体潤滑問題を考える（図2）。周期構造を構成するユニットセルでは、テクスチャ構造に対応して膜厚が空間分布しており、これを設計変数とするトポロジー最適化問題を考える。具体的には、膜内の流体圧力の平均値を最大化するための目的関数を設定し、耐荷重能の向上を狙った最適化計算を行った。図3は、最適化計算に必要な設計感度であるトポロ

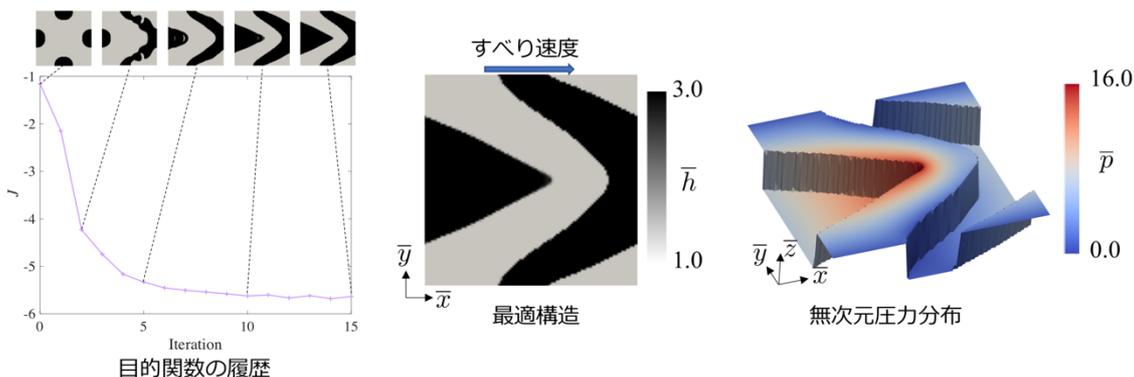


図4：最適化結果

ジー導関数の空間分布を数値差分によって得られた差分感度と比較したものである。トポロジー導関数は、微小なテクスチャ領域が非テクスチャ領域に現れた場合、または非テクスチャ領域がテクスチャ領域に現れた場合の目的関数の変化率を表す。随伴変数法に基づき導出されたトポロジー導関数は、差分感度と良好な一致を示していることから、その妥当性を確認することができた。

図4は最適化計算を行った結果を示す。図4左図に示す通り、初期構造として鏡面对称性を示す構造を設定したところ、最適化計算の早い段階ですべり速度の方向に対応して、V字が90度回転したテクスチャ形状が現れた。なお、最適化計算の数ステップでトポロジーの変化が見られ、提案手法の持つ高い設計自由度を示している。最終的に、図4中央に示す構造が最適構造として得られた。図4右は、最適構造における圧力分布を示す。最適構造は、V字状の構造の先端付近で大きな圧力を示しており、目的関数が大きく改善され、提案手法が研磨パッドに代表されるテクスチャ構造の最適設計を実現できることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Noguchi Yuki, Yamada Takayuki	4. 巻 98
2. 論文標題 Topology optimization of acoustic metasurfaces by using a two-scale homogenization method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Mathematical Modelling	6. 最初と最後の頁 465 ~ 497
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apm.2021.05.005	査読の有無 有
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 Noguchi Yuki, Yamada Takayuki	4. 巻 196
2. 論文標題 Level set-based topology optimization for graded acoustic metasurfaces using two-scale homogenization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Finite Elements in Analysis and Design	6. 最初と最後の頁 103606 ~ 103606
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.finel.2021.103606	査読の有無 有
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 野口悠暉、松島慶、山田崇恭	4. 巻 22
2. 論文標題 流体潤滑問題を対象としたレベルセット法に基づくトポロジー最適化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 123 ~ 130
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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuki Noguchi, Takayuki Yamada
2. 発表標題 Topology optimization for two-layered acoustic metasurfaces based on a two-scale homogenization method
3. 学会等名 14th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO14)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Noguchi, Takayuki Yamada
2. 発表標題 Topology optimization and sensitivity analysis for the design of acoustic metasurfaces using the homogenization method
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野口悠暉, 山田崇恭
2. 発表標題 均質化法を用いたレベルセット法に基づく音響メタサーフェスのトポロジー最適化
3. 学会等名 第30回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野口悠暉、松島慶、山田崇恭
2. 発表標題 流体潤滑問題を対象としたレベルセット法に基づくトポロジー最適化
3. 学会等名 計算数理工学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------