

令和 2 年 7 月 15 日現在

機関番号：57301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06104

研究課題名（和文）ダイヤモンドワイヤ製造工程における砥粒分散状態のオンマシン計測

研究課題名（英文）In-process-monitoring of a diamond wire surface topography

研究代表者

坂口 彰浩（Sakaguchi, Akihiro）

佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：00332099

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、オンマシンでダイヤモンドワイヤ表面の砥粒分散状態を定量的に評価する手法の提案を行った。その結果、約200m/minで走行中のダイヤモンドワイヤの表面画像に対し、ディープラーニングを用いることで約99.2%の精度で画像中のダイヤモンド砥粒を抽出できることが確認できた。また、その結果を基に統計的に評価することでダイヤモンドワイヤ全体の砥粒分散状態を表す指標を取得することもできた。加えて、加工過程において、この指標を用いることで適切な加工状態を維持できるようになることも分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スライス加工を行う際のワイヤ線速は、本手法の計測条件の数倍速いが、一般的にスライス加工はワイヤを往復させながら加工を行うため、一瞬ではあるがワイヤが停止する瞬間があり、その前後で画像を取得できれば、加工中におけるワイヤの表面状態を評価できるようになると考えられる。一方で、砥粒の分散状態と加工精度の関係について定量的に評価できるようになったことから、スライスする材料や加工条件などに適した砥粒の分散状態を評価できるようになり、目的に応じた砥粒の分散状態を持つワイヤの製作などに応用できると考えられる。以上のように、本手法を応用することで、ワイヤ関連の加工分野の発展に大きく寄与できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：As a result, it was confirmed that regions of abrasive grain can be extracted with about 99.2% accuracy using a deep learning method from captured images in running at 200m/min. And, a state of diamond wire surface topography could be expressed with some statistical method. In addition, a relationship before and after a slice processing was found numerically.

研究分野：研削加工

キーワード：ダイヤモンドワイヤ スライス加工 ダイヤモンド砥粒 オンマシン計測 画像処理 ディープラーニング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体材料などを薄板状にスライス加工する際に用いるダイヤモンドワイヤの表面に固着されている砥粒の分布状態が加工精度に大きな影響を与える。ダイヤモンドワイヤの線径は百数十 μm と細く、また、固着されるダイヤモンド砥粒の粒径は数十 μm と小さいため、従来までは電子顕微鏡やレーザ計測装置などを用いてダイヤモンドワイヤ表面状態の観察が行われていた。一方で、ダイヤモンドワイヤは数十～数百 km もあることから、従来までの手法により観察されている範囲は極めて小さく、ダイヤモンドワイヤ表面の状態を表す指標として十分と言えなかった。加えて、計測の際にはダイヤモンドワイヤの一部を切断する必要があり、また、計測に手間と時間を要するという問題もあり実用的ではなかった。

このようなことから、筆者らは画像処理を用いてダイヤモンドワイヤ表面に固着されている砥粒の分散状態を定量的に評価する手法の開発を行ってきた。この手法では、1000fpsの高速度カメラを用い20m/minの速度で走行するダイヤモンドワイヤの表面の画像を取得し、画像処理により砥粒を抽出するアルゴリズムを提案している。従来までの計測手法と比較して、効率的に評価できることが確認できたが、砥粒の抽出精度が約87%とやや低いため、評価指標としての信頼性にやや欠ける点があった。また、ワイヤの走行速度が遅く、加えて、計測できる範囲がワイヤ表面の20%程度と狭いことから、実用面では多くの課題が残っていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、オンマシんでダイヤモンドワイヤ表面の砥粒分散状態を定量的に評価することである。そのために、①ダイヤモンドワイヤの製造工程や、スライス加工時における比較的低速走行中のダイヤモンドワイヤ表面の画像を取得するシステムを構築し、②取得した走行中のダイヤモンドワイヤ画像からダイヤモンド砥粒のみを高精度に抽出し、③それを基にダイヤモンドワイヤの表面の状態を定量的に評価することである。なお、ダイヤモンドワイヤは、非常に長いため、その全長を計測・評価することは現実的ではないことは明らかである。そこで、④ダイヤモンドワイヤ表面全体の砥粒分散状態を表す指標を統計的観点から導出する。また、⑤加工過程におけるダイヤモンドワイヤ表面の砥粒分散状態の変化形態を明らかにすることである。

3. 研究の方法

3. 1 走行中のダイヤモンドワイヤ表面画像の取得

図1に示すように、ワイヤ加工装置のプリー付近に高速度カメラとファイバー照明を設置し、約200m/minで走行中のダイヤモンドワイヤ表面を高速度カメラにより撮像する。本実験で用いる高速度カメラの解像度は640px \times 144px、1画素当たりの物理量は5.71 μm \times 5.71 μm で、フレームレートを20000fpsとした。対象となるダイヤモンドワイヤの細径は160 μm で、平均砥粒径30 μm の砥粒が着着により固着されている。図2に取得した画像の例を示す。図中の暗い色調がワイヤの結合材部を、明るい色調、または、暗い色調の粒状の部分が砥粒を示している。また、走行中のワイヤ画像であること、撮影に使用したファイバー光源が1方向からしか照射していないため、画像の左右で明るさがやや異なっていたり、全体的に流れたような不鮮明になっていることが分かる。したがって、従来までの画像処理技術のみでは、砥粒抽出のための各種フィルタの閾値の設定が非常に困難であり、精度よく砥粒を抽出することは難しいと考えられ、加えて砥粒の分散状態の評価は、砥粒の抽出精度に大きく依存するため、従来とは異なる砥粒抽出手法が必要になる。

3. 2 ディープラーニングを用いた砥粒の抽出

図2に示したように、取得したダイヤモンドワイヤ表面画像は、砥粒を示す領域の特徴量は様々であり、また、ダイヤモンドワイヤ表面の曲率による照明の反射の差、ダイヤモンドワイヤ表面の凹凸によるノイズなども存在しており、従来までの画像処理技術では、その抽出アルゴリズムが非常に複雑となり、また、高い抽出精度をえることが難しい。そこで、本手法では、ディープラーニング技術の1つであるU-Netを用いる。U-Netは、特定の領域を抽出するための手法の1つである。これを用いて原画像から砥粒領域のみを抽出した画像を生成する。なお、この手法は教師あり学習であるため、ネットワークの学習を行うには、学習用画像とその教師画像を準備する必要がある。そこで、本手法では、従来の画像処理技術を用い砥粒抽出画像を生成する。この時、2値化処理やノイズ除去処理によって、抽出されるべき砥粒が除去されたり、除去されるべきノイズが残ったりする。この教師画像の精度が砥粒抽出ネットワークの精度に大きな影響を与えることから、本手法では目視により確認しながら、手動で教師画像の補正を行うことで、精度の高い教師画像を生成する。

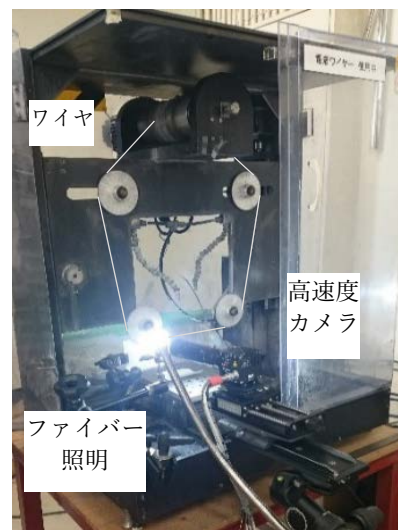


図1 ワイヤ画像計測装置

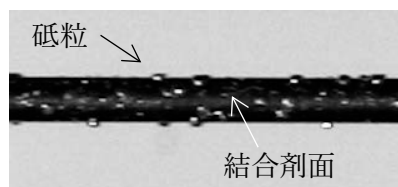
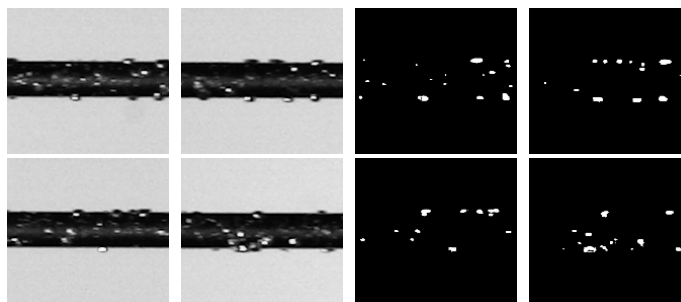


図2 ワイヤ表面画像

ダイヤモンドワイヤ表面の原画像と上述のようにして生成した教師画像を用いて砥粒抽出ネットワークを構築するが、原画像における砥粒の映り方が一様でないことから、原画像のサイズのまま学習を行うと学習の精度向上の妨げになり、また、画像サイズが大きく学習に時間を要すること、実用際の処理時間を短くすることを考え、図3に示すように4分割した画像を用いてネットワーク構築のデータセットを生成する。



(a) 入力画像 (b) 教師画像

図3 学習用データセット

3.3 統計的手法を用いた砥粒分散状態の評価

図2に示すような画像におけるダイヤモンドワイヤの実際の長さは約3.6mmであることから、取得した各画像における砥粒の分散状態を評価（例えば、砥粒数や最近傍砥粒間距離の分散値など）したとしても、ダイヤモンドワイヤ表面に固着されている砥粒の分散状態は一様でないことから、それらの評価値がダイヤモンドワイヤ全体の砥粒の分散状態を表す指標としては適切ではない。均一にダイヤモンドワイヤ表面に砥粒が固着できているとすると、任意の場所における狭い範囲を比較した場合、砥粒分散状態の評価値が同じになると思われる。逆に考えると、砥粒の分散状態がある一定値に収束する区間の長さを求めることができれば、その区間の長さがワイヤ全体の砥粒の分散状態を示す指標となる。つまり、区間長が短ければ均一に、長ければばらつきが大きいということになる。そこで、本手法では統計的解析手法を用い、任意の場所における砥粒分散状態の評価値が一定になるような評価区間長を求める。図4のように、区間長を変えながら砥粒分散状態の評価値を求め、その変化の様子からダイヤモンドワイヤ全体の砥粒分散状態を表す評価指標を求める。本手法では、砥粒分散状態の評価値として、区間内の砥粒の個数と、区間内の各砥粒に対する最近傍の砥粒までの距離の標準偏差を用いる。

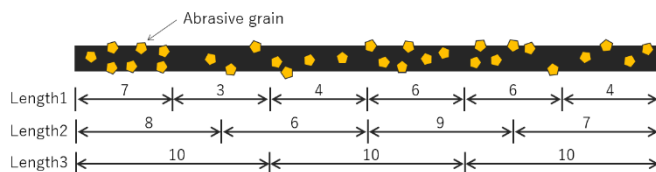


図4 砥粒分散状態の定量的評価

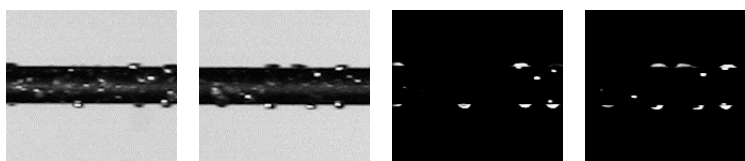
3.4 加工過程における砥粒分散状態の変化形態の評価

ダイヤモンドワイヤによりスライス加工したウェハ表面の状態は、ダイヤモンドワイヤ表面の砥粒の分散状態に影響を受けると考えられる。そこで、複数回のスライス加工実験ごとにダイヤモンドワイヤ表面の画像を取得し、ダイヤモンドワイヤ表面の砥粒分散状態の評価値がどのように変化するかについて評価を行う。

4. 研究成果

4.1 U-Netを用いたダイヤモンド砥粒の抽出実験

3.1節で示した条件で取得したダイヤモンドワイヤ表面の画像から、画像中のダイヤモンドワイヤ表面部分が重複しないように抜き出した画像を用いて砥粒抽出ネットワークの学習を行った。本実験では、学習用画像を8100枚、評価用画像を900枚、テスト用画像を300枚用い、学習回数は20回とした。なお、学習終了時における砥粒の抽出精度は99.2%であった。図5に抽出結果の例を示す。図から非常に精度よく砥粒が抽出できていることが確認できる。この画像を用い、砥粒分散状態の評価に用いる。



(a) 入力画像 (b) 出力画像

図5 砥粒抽出結果

4.2 砥粒分散状態の定量的評価

U-Netにより出力される砥粒画像から、本手法では区間長内における単位区間長ごとの砥粒の数と、区間長内に存在する各砥粒に対して最近傍に存在する砥粒までの距離の標準偏差を算出し、区間長ごとの評価値の変化を調べた。なお、本手法では単位区間長として、取得した画像1枚の長さである約3.6mmを用いた。図6に約3.6mm(単位区間長)ごとに、図7に約36.6mm(10単位区間長)ごとに算出した砥粒個数と最近傍砥粒間距離の標準偏差のグラフを示す。この結果を比較すると、計測区間長を長くしたほうが評価値のばらつきが小さくなっていることが分かる。そこで、区間長を単位区間長ごとに変化させながら、砥粒個数と最近傍砥粒間距離の変化を調べた。なお、本手法では、区間長ごとの砥粒個数の標準偏差と、最近傍砥粒間距離の標準偏差の標

標準偏差を用いた。図8にその結果を示す。グラフから、砥粒個数と最近傍間砥粒距離の標準偏差値が、区間長が0~50mmの間は急激に評価値が小さくなり、区間長が50mm以降は緩やかに減少していき、区間長が250mm付近で一定値に収束していることが確認できる。したがって、このダイヤモンドワイヤにおいては、任意の場所の250mmの区間について評価すればほぼ同じような評価値が得られることになる。したがって、この250mmという値がダイヤモンドワイヤ表面に固着されている砥粒の分散状態を表す指標として用いることができると考えられる。

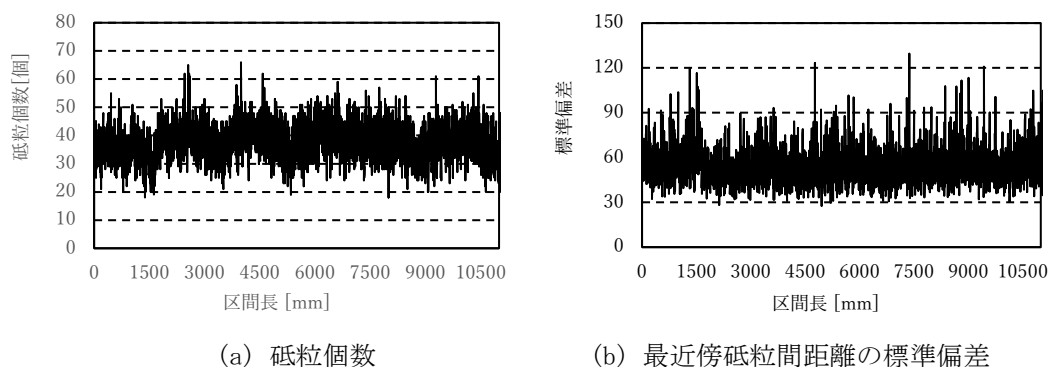


図6 3.6mmごとの砥粒分散状態の評価値

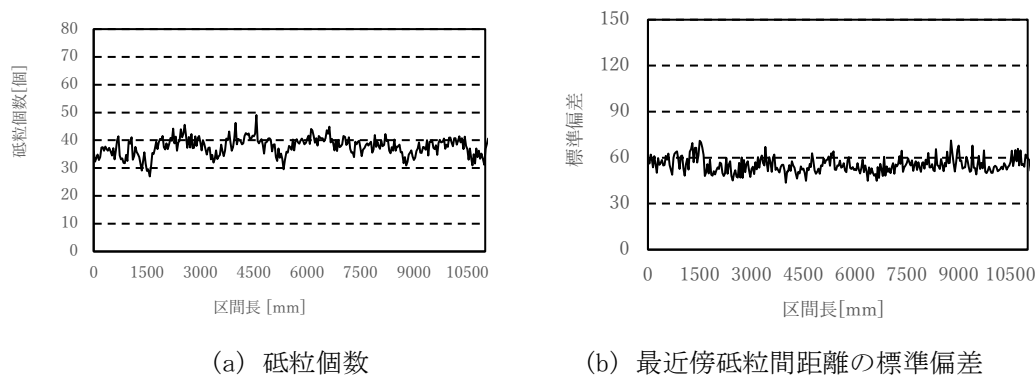


図7 36.6mmごとの砥粒分散状態の評価値

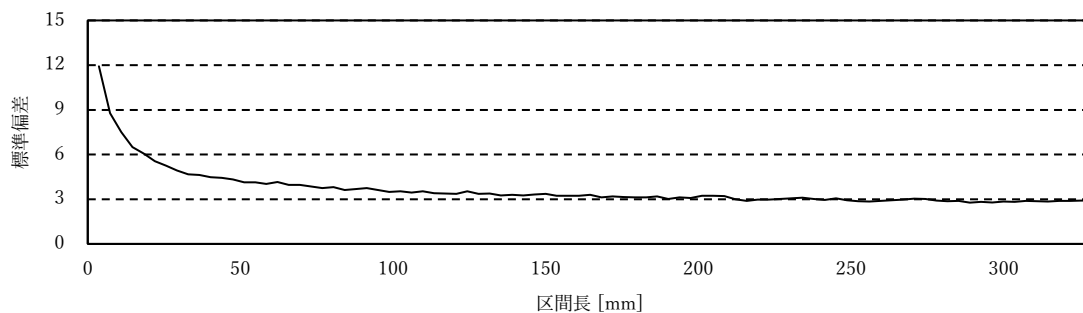
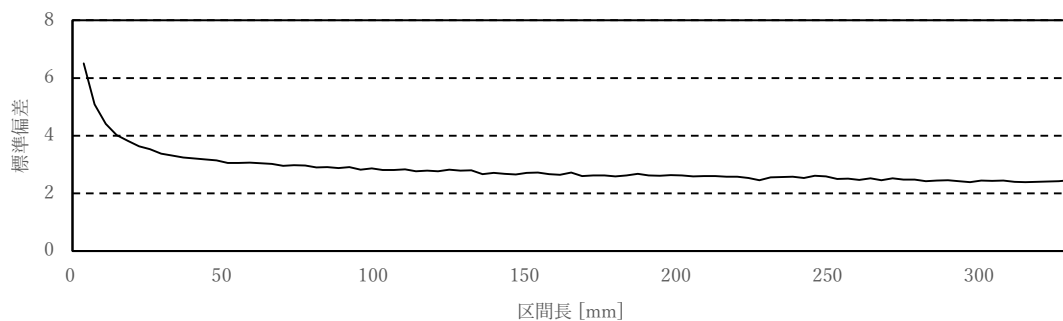


図8 区間長に対する砥粒分散状態の評価値

4. 3 加工工程における砥粒分散状態の変化

加工過程におけるダイヤモンドワイヤ表面の砥粒分散状態の変化形態を評価するため、シリコンインゴットのスライス加工実験の前後のダイヤモンドワイヤ表面の画像を取得して比較を行った。なお、本実験では、図9に示すように10インチのシリコンスプレーを半分にカットしたシリコンインゴットのスライス加工実験を行った。表1に加工前後のダイヤモンドワイヤ表面の砥粒分散状態の評価値を示す。なお、本実験では、ダイヤモンドワイヤの重複部分がないように取得した約6000枚の画像に対して、U-Netを用い砥粒のみを抽出し、その結果から約3.6mmごとの砥粒個数と最近傍砥粒間距離の標準偏差を算出した。



図9 スライス加工実験

表1 スライス加工前後の砥粒分散状態の変化

	平均砥粒個数	最近傍砥粒間距離の平均	最近傍砥粒間距離の標準偏差
加工前	52.28	17.82	7.45
加工後	54.83	14.38	6.87

この結果をみると、平均砥粒個数が増えているが、これは、加工を行うことで尖った砥粒の先端部が摩耗し研削に関与するようになったこと、また、結合剤に埋もれている砥粒が結合剤の摩耗により表面に現れたことが原因と考えられる。砥粒数が増えたことに伴って砥粒間距離が小さくなり、最近傍砥粒間距離のばらつきも小さくなったと考えられる。

4. 4 まとめ

本研究では、オンマシンでダイヤモンドワイヤ表面の砥粒分散状態を定量的に評価する手法の提案を行った。その結果、約200m/minで走行中のダイヤモンドワイヤの表面画像に対し、ディープラーニングを用いることで約99.2%の精度で画像中のダイヤモンド砥粒を抽出できることが確認できた。また、その結果を基に統計的に評価することでダイヤモンドワイヤ全体の砥粒分散状態を表す指標を取得することもできた。加えて、加工過程において、この指標を用いることで適切な加工状態を維持できるようになることも分かった。

実際にスライス加工を行う際のワイヤ線速は、本手法の計測条件の数倍速いものであるが、一般的にスライス加工はワイヤを往復させながら加工を行うため、一瞬ではあるがワイヤが停止する瞬間があり、その前後で画像を取得できれば、加工中におけるワイヤの表面状態を評価できるようになると考えられる。一方で、砥粒の分散状態と加工精度の関係について定量的に評価できるようになったことから、スライスする材料や加工条件などに適した砥粒の分散状態を評価できるようになり、目的に応じた砥粒の分散状態を持つワイヤの製作などに応用できると考えられる。以上のように、本手法を応用することで、ワイヤ関連の加工分野の発展に大きく寄与できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 A.Sakaguchi, T.Kawashita, S.Matsuo and M.Matsumoto
2. 発表標題 Statistical evaluation of a fixed diamond wire surface topography using a deep learning
3. 学会等名 Proc. of 21th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本, 坂口, 川下, 松尾, 内田, 栗原
2. 発表標題 ディープラーニングを用いたダイヤモンドワイヤ表面の砥粒抽出
3. 学会等名 平成30年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩永, 坂口, 川下, 松尾
2. 発表標題 ダイヤモンドワイヤの砥粒突出し量の計測
3. 学会等名 2018年度精密工学会九州支部大会北九州地方講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂口彰浩, 川下智幸, 松尾修二, 松谷茂樹, 濱田裕康, 大浦龍二
2. 発表標題 ディープラーニングを用いたダイヤモンドワイヤ表面の砥粒抽出と 砥粒分散状態の統計的評価
3. 学会等名 2017年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2017)
4. 発表年 2017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
連携研究者	川下 智幸 (Kawashita Tyomoyuki) (00270380)	佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科・教授 (57301)	
連携研究者	志久 修 (Shiku Osamu) (00235516)	佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科・教授 (57301)	