

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03805

研究課題名（和文）情報量エントロピーを応用した工具作業面上の砥粒分散性定量評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of quantitative evaluation method applying information entropy for abrasive grain distribution on tool surface

研究代表者

孕石 泰丈（Haramiishi, Yasutake）

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：10402489

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）：研削工具に存在する砥粒の状態を計測・評価することは加工を行う上で重要事項です。本研究では感圧紙を用いた転写から得られる砥粒分布状態、偏光カメラを用いた個々の砥粒状態を計測する方法を開発しました。加えてそれぞれに対して評価する方法として分布状態のばらつきに関して情報量エントロピーを用いて数値化する評価方法を提案し、偏光カメラによる個々の砥粒状態では、加工に伴い破碎した砥粒の位置と個数を評価する方法を提案し、評価方法が正しいかを実験的に確認しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで砥粒の分布状態を評価するには、砥粒同士の間隔（連続切れ刃間隔など）や砥粒密度を用いた評価しかありませんでした。しかし実際の砥粒分布には偏る場合があったり、均一に分布する場合があります。このばらつきを数値的に評価する方法はありませんでしたが、本研究によりばらつきを数値的に評価する方法を開発しました。これは研削加工における加工能率や加工精度の向上などに貢献できる技術です。また分布状態のばらつきを評価する他の分野にも適用可能な手法となっています。

研究成果の概要（英文）：Measuring and evaluating the state of abrasive grains on the working surface of a grinding tool is important for processing. In this study, we used two approaches to measure and evaluate the state of abrasive grains. The first was to evaluate the distribution of abrasive grains over a wide area. A transferred image of the abrasive grain distribution was obtained using pressure-sensitive paper. And this was evaluated using a quantification method based on information entropy. The second was to measure and evaluate the state of individual abrasive grains using a polarized camera. Various image processing methods were used to evaluate the location and number of abrasive grains that were broken during processing. The correctness of these evaluation methods was confirmed through experiments.

研究分野：加工学，生産工学

キーワード：研削加工 情報量エントロピー 砥粒分布 画像処理 偏光カメラ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研削ベルトや研削砥石などの工具を用いて加工する際に、同じ種類の工具を用いても、加工効率や工具寿命、加工面の精度が工具ごとに異なる場合がある。この要因の一つとして作業面の砥粒の有効切れ刃の状態が挙げられる。有効切れ刃の状態として切れ刃単体の形状も重要であるが、その分布状況も加工に影響すると考えられる。砥粒切れ刃の計測方法として触針法による断面計測、カメラによる画像解析、レーザー変位計での計測が提案されている。これらは、一直線上の凹凸計測であったり、高倍率での計測で範囲が限られていたりと局所的な計測である。また計測データを基にした評価方法は、砥粒切れ刃密度、連続切れ刃間隔などの各要素について評価が行われているが、広範囲な砥粒分布の分散性・ばらつきを定量的に評価する手法はない。

### 2. 研究の目的

本研究では、単位面積当りに存在する砥粒の確率を定義し、これを基に砥粒分布の乱雑さ・ばらつきの程度、すなわち分散性を定量的に評価する手法について、情報量エントロピーを用いた計算方法を考案した。加えて提案手法の有効性を加工実験により確認するとともに、手法の改善を目的として研究を行った。併せて、偏光カメラによる砥粒個別の状態変化の検出・識別をする手法を開発することを目的とした。偏光カメラとは、近年開発され4方向の偏光情報を1度の撮影で得られるという特徴からマシンビジョン等に用いられつつあるカメラである。得られた偏光情報より直線偏光度、偏光角度、反射除去画像の生成が可能となる。本研究では、偏光カメラを使用して工具作業面の砥粒の割れ、脱落、摩耗に関して計測・評価を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 情報量エントロピーを用いた砥粒分布の分散性評価

研削工具上には、幅方向と周方向に沿って情報源  $X \cdot Y$  が存在する。工具の観察領域を正方形の箱に区切り、その中に存在する砥粒数を情報源とする。情報源が生成される確率(砥粒が箱内に存在する確率)を  $P(X, Y)$  とするとエントロピーは次のように表される。

$$H(X, Y) = -\sum_{i=1}^m P(x_i, y_i) \log_2 P(x_i, y_i) \quad [\text{bit}] \quad \text{ここで} \quad \sum_{i=1}^m P(x_i, y_i) = 1$$

一般に  $H(X, Y)$  は無秩序や複雑さを表す。砥粒分布の場合、その分布が均一であれば  $H(X, Y)$  の値が大きくなる。一方で  $H(X, Y)$  は母数の影響を受ける。つまり砥粒の数が増えると  $H(X, Y)$  も大きくなる。したがって、観察された砥粒の数が異なると単純に  $H(X, Y)$  で比較することができない。そこで、比エントロピーとして  $HR = H(X, Y)/H(X, Y)_{max}$  を定義する。ここで  $H(X, Y)_{max}$  は最大エントロピーであり、最も均一な分布状態のエントロピーである。本研究ではさらに考察を加え、観察領域を正方形の箱に区切る分割数  $m$  を小さくした場合を考えた。この時の最大エントロピーは次式のように表される。

$$H(X, Y)'_{max} = (m'^2 - c) \times \left(-\frac{l}{n} \log_2 \frac{l}{n}\right) + c \times \left(-\frac{l+1}{n} \log_2 \frac{l+1}{n}\right)$$

ここで  $m'$  は新たな分割数 ( $m' < m$ ) で、砥粒数  $n$  を分割領域数  $m'$  で除した時の商が  $l$  で、余りが  $c$  である。砥粒分布が均一の場合は  $H(X, Y)'_{max}$  の値に近づき、偏った分布の場合は  $H(X, Y)_{max}$  となる。これを用いた修正比エントロピーを以下のように定義する。

$$HR^{mod} = \frac{H(X, Y)}{H(X, Y)_{max}}$$

以上の評価手法を研削ベルトの加工実験を通して有効性の検討をする。実験は、炭化ケイ素砥粒 C#60 の研削ベルトを用いて、研削速度 300m/min で加工を行った。被加工物は S50C とした。10 分毎に加工を中断し、感圧紙を用いた砥粒分布の撮影をした。撮影装置を図 1 に示す。荷重点から 10,20,30,40,50,100N の負荷をかけて撮影した。

## (2) 偏光カメラによる砥粒の状態評価

近年ロボットビジョンで用いられる偏光カメラを使用し研削ベルト作業面上の砥粒の脱落・割れや摩耗などの加工に伴う状態の変化を観察する。偏光カメラから得られる偏光度や偏光角度といった情報と画像処理を用いることによって、加工に伴う砥粒の状態を評価する手法を提案する。研削ベルト加工において、図 2 に示すような偏光カメラによる撮影装置を開発した。炭化ケイ素砥粒 C#24 とアルミナジルコニア砥粒 Z#24 において加工実験を行い、加工前と加工後の作業面を撮影しその結果から砥粒の状態変化を評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 情報量エントロピーを用いた砥粒分布の分散性評価結果

図 1 の装置を用いて撮影した結果を図 3 に示す。撮影画像は各種画像処理を加えて、砥粒分布を点に集約した上で、前述した  $HR$  及び  $HR^{mod}$  を求めた。結果を図 4 に示す。荷重が小さい時、エントロピー値は小さい。これは加工初期の砥粒分布に偏りがあることを示している。ただし比エントロピーの値(図 4(a))だけでは、分布が本当に偏っているかどうかを正確に判断するには不十分である。そこで比エントロピーと修正比エントロピー(図 4(b))の差を求め、これをばらつき指標とした。この差  $HR - HR^{mod}$  が正の値であれば分布が偏っており、負の値であれば均一な分布となる。加工時間に伴って変化する  $HR - HR^{mod}$  の結果を図 5 に示す。工具寿命に近い 60 分~70 分では各負荷の  $HR - HR^{mod}$  の値が近づく。なおかつ負の値であるので均一分布であると

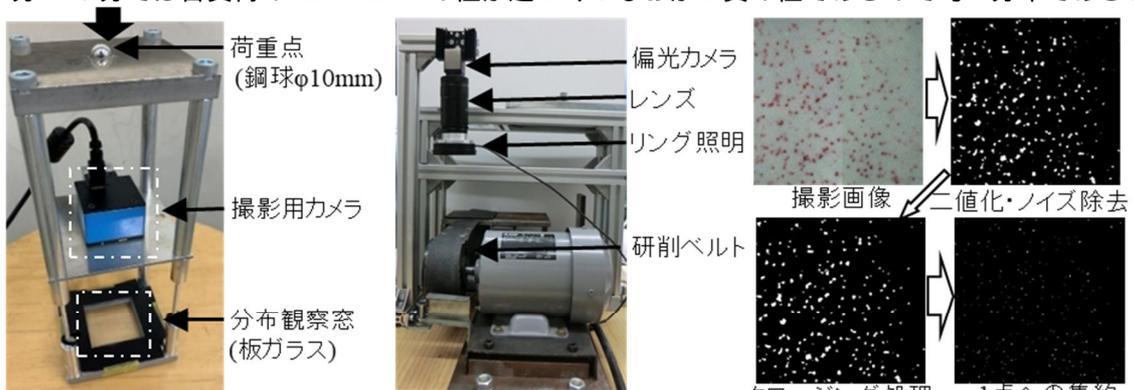


図1 砥粒分布撮影装置

図2 偏光カメラによる撮影装置

図3 砥粒分布の撮影画像と画像処理

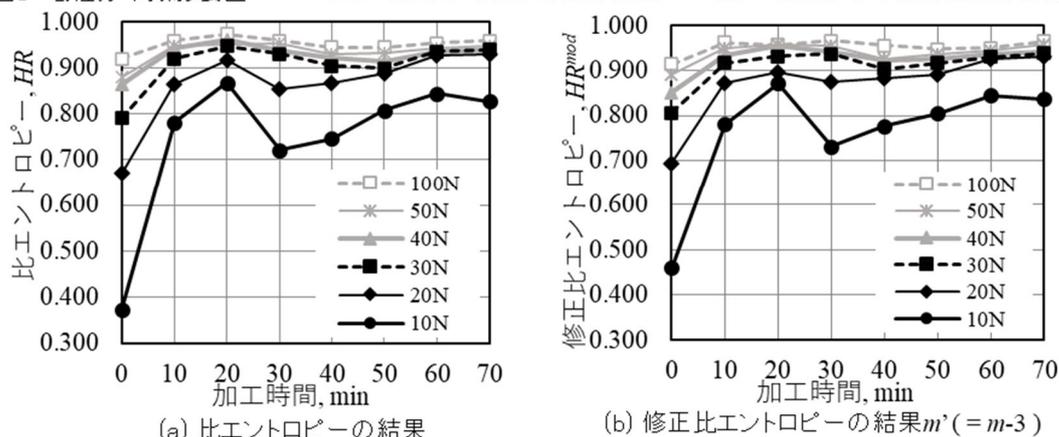


図4 加工時間に伴う比エントロピーと修正比エントロピーの比較

判断できる．また加工初期の段階では，負荷の大小で  $HR - HR^{mod}$  値が大きく変化している．この  $HR - HR^{mod}$  の変化のばらつきが，加工性能に影響を与えるのではないかと考え，各時間における  $HR - HR^{mod}$  の分散を求め，研削量との関係性を求めた．結果を図 6 に示す． $HR - HR^{mod}$  の分散と加工量には線形関係が見られ，その分散が大きくなるほど，加工量が増加する．つまりばらつきの指標である  $HR - HR^{mod}$  が大きく変化するとき，工具は加工能力を有していると言える．また工具作業面の  $HR - HR^{mod}$  の分散を求めることで，研削工具の研削量を推定できる可能性があることが示された．

## (2) 偏光カメラによる砥粒の状態評価

図 7 に偏光カメラから得られた反射除去画像を示す．図 7(a)は加工前，(b)は加工後で，両者から輝度の差分を求めた画像が(c)で，それを二値化したものを(d)として示す．差分画像を求める際に差分値が正になるか負になるかで図 8 のような状態になっていると仮定した．つまり砥粒の割れが発生すると砥粒に凹凸があり反射光は散乱する．この場合反射除去ができず，差分は正の値となる．一方で摩耗の場合は，一定の反射光となり反射除去される．実際に砥粒の割れと検出された場所を囲う枠(バウンディングボックス)を加工後の画像に投影したものを図 9 として示す．砥粒の割れと検出された箇所のうち複数の箇所を 3 次元形状測定機で観察し比較したところ，砥粒の割れは正しく検出できていることを確認した．一方で摩耗と検出された箇所は，摩耗と脱落を併せて検出していることを確認した．偏光カメラの反射除去画像を利用した本手法は，砥粒の割れの位置と個数を検出できるが，摩耗と脱落には他の偏光度や偏光方向といった偏光情報を利用する必要があることが分かった．

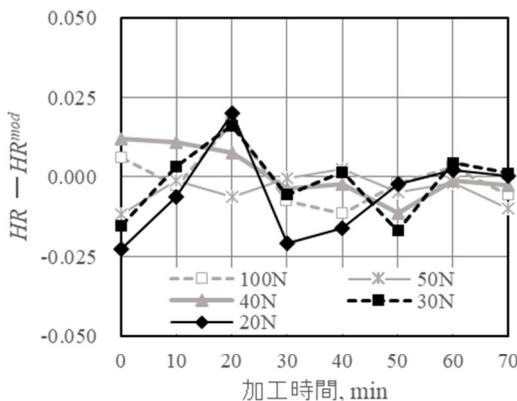


図5 比エントロピー  $HR$  と修正比エントロピー  $HR^{mod}$

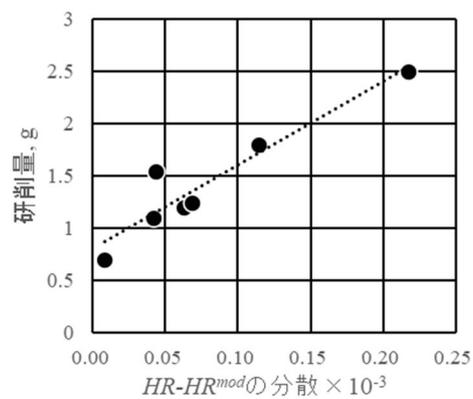


図6 研削量と  $HR - HR^{mod}$  の分散の関係

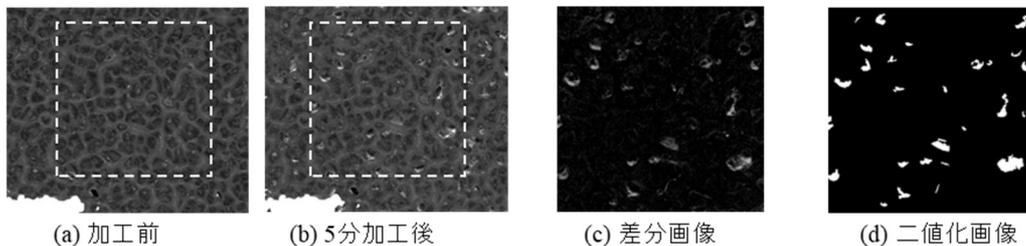


図7 加工前後の反射除去画像とそこから求めた差分画像および二値画像

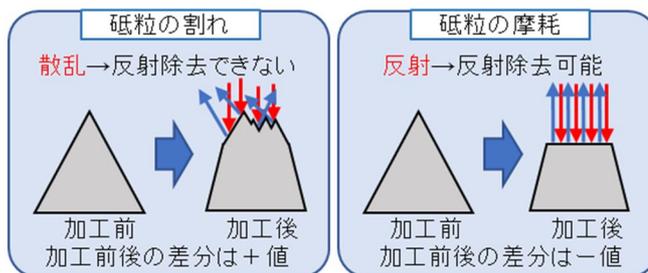


図8 砥粒の状態変化による反射光のイメージ

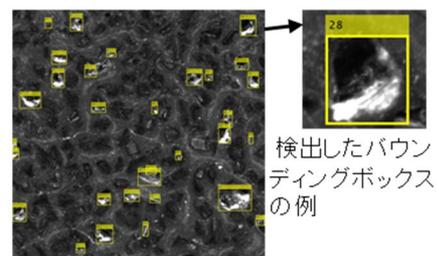


図9 砥粒の割れと検出した結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Haramiishi Yasutake, Shimizu Tsuyoshi	4. 巻 18
2. 論文標題 Evaluation of Abrasive Grain Distribution of the Grinding Belt Based on Modified Information Entropy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 189 ~ 197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2024.p0189	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Haramiishi Yasutake, Shimizu Tsuyoshi
2. 発表標題 Evaluation of abrasive grain wear condition on the grinding belt by polarization camera
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大平 洸, 孕石泰丈, 清水毅
2. 発表標題 偏光カメラによる研削ベルト作業面上の砥粒状態の評価
3. 学会等名 2022年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hikaru Ohira, Yasutake Haramiishi, Tsuyoshi Shimizu
2. 発表標題 Improved information entropy evaluation of abrasive grain dispersibility in grinding
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 孕石泰丈、大平洗、清水毅
2. 発表標題 偏光カメラを用いた研削工具作業面の評価
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第29期総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大平洗、孕石泰丈、清水毅
2. 発表標題 画像処理を用いた研削ベルトにおける砥粒分散性のエントロピー評価
3. 学会等名 2021年度砥粒加工学会学術講演会（ABTEC2021）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大平洗、孕石泰丈、清水毅
2. 発表標題 砥粒分散性の情報量エントロピー評価における分割領域の検討
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第 28 期総会・講演会
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
研究分担者	清水 毅  (Simizu Tsuyoshi)  (40293443)	山梨大学・大学院総合研究部・教授    (13501)	

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