

画像のベクトル化を用いた加工変質層の深さの定量的推定

横山さかり*1, 李 和樹*2, 山田高三*2, 武居昌宏*2, 齋藤兆占*3

Quantitative estimation of damaged layers depth using image vectorization

Sakari YOKOYAMA, Hwa-Soo LEE, Takazo YAMADA, Masahiro TAKEI and Yoshifuru SAITO

機械加工により加工表面付近の粒界が変化した画像をベクトル化し、その回転演算を施すことにより、加工変質層の深さを推定する手法を提案した。その結果、従来の方法では定量的にとらえることができなかった加工変質層の深さを数値化することができた。本手法に要する時間は3分程度であり、従来の加工変質層の深さの測定法に比べて短時間でかつ容易にその深さを推定することができた。

Key words : image processing, vectorization, pixel, depth of surface damaged layers, vickers hardness

1. 緒言

機械加工によって材料の加工面近傍に生成される加工変質層は、母材と材質が異なるため、表面の耐摩耗性や硬さに影響を及ぼす。加工変質層については古くから注目されており¹⁾、主にその生成機構の研究が行われている^{2)~5)}。これらによると、加工変質層は加工時に材料表面に作用する応力や熱が不均一なために、粒界の塑性流動が発生する、あるいは部分的に材料の組織変化が発生するために生成されるものと考えられている。

これらの加工変質層の生成機構に関する研究では、加工変質層の深さを測定するために、

①表面近傍の加工後の金属組織を観察して加工前の組織と見比べる方法

②表面近傍の硬さ変化から測定する方法

③表面近傍の残留応力の変化から測定する方法

等の方法が用いられている。①の方法は、加工変質層の深さを定性的に示すことはできるが、定量的に示すことはできない。②の方法は、加工変質層の深さを定量的に測定することはできるが、測定に長時間を要するばかりか、測定者個人に依存する測定誤差を避けることができない。また③の方法は、比較的正確に加工変質層の深さを測定することは可能であるが、測定に特別な装置を必要とし、実験室レベルで簡単に深さを測定するには向かないと考えられる。

このような状況のもと、筆者らは加工変質層近傍の画像を演算処理することにより、その深さの評価が行えるかどうか検討してきた。また、筆者のひとり、電気電子工学分野の画像において、新しい画像処理方法を提案している⁶⁾。これは画像を構成する画素をベクトル場のベクトルポテンシャルとみなし、その回転演算を施すことにより、画像をベクトル化し、ベク

トル演算をすることにより元画像の特徴を抽出するという方法である。

本研究では、加工変質層が生じたときに特徴的に現れる金属材料の粒界の変化に着目し、この画像をベクトル化して回転演算を施すことにより、加工変質層の深さを定量的に推定し得る方法を提案している。

2. 画像のベクトル化

図1(a)は加工表面近傍の金属組織の模式図である。左端が加工表面であり、下から上に向かって加工されたようすを示している。本研究はこの図に示した粒界の流れの特徴を抽出することにより、加工変質層の深さを定量化するものである。

デジタル画像は、濃度をもったピクセルの集合体である。そこで、各ピクセルのもつ濃度をポテンシャルエネルギー V と考え、図2に示すように白を1、黒を0と考えると、各ピクセルの濃度情報を0から1の間の数値情報として表現することができる。図3に示すように、各ピクセルのポテンシャルエネルギー V の回転演算から得られる回転ベクトル v は、反時計回りを正として、

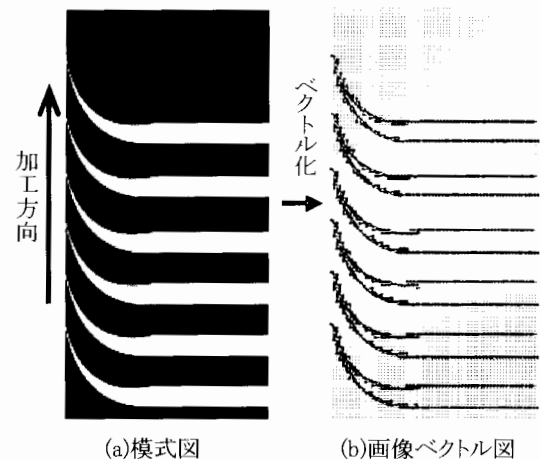


図1 加工表面近傍の模式図とベクトル図

*1 日本大学大学院: 〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14

*2 日本大学理工学部: 〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14

*3 法政大学工学部: 〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2
(学会受付日: 2003年4月10日)

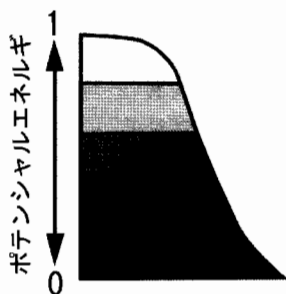


図2 各画像の色の濃淡に基づくポテンシャルエネルギーの概念図

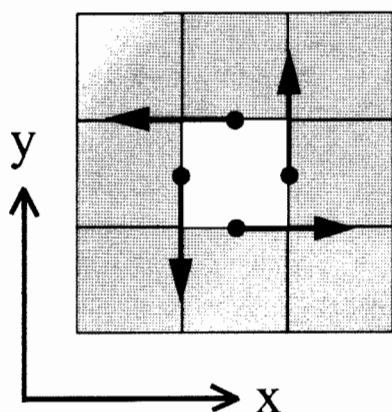


図3 ポテンシャルエネルギーに対応する回転ベクトル

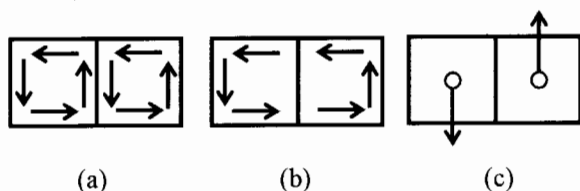


図4 隣り合った二つのピクセル間におけるベクトル演算の例

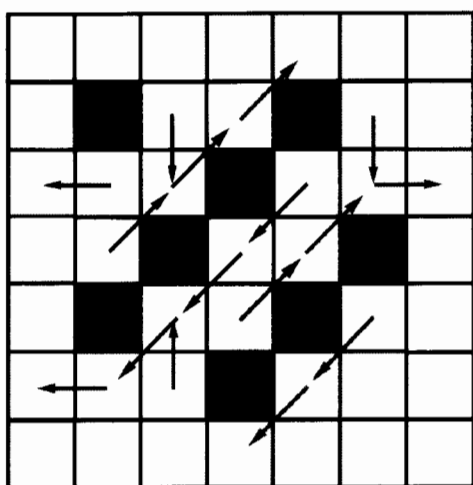


図5 二次元的な色の濃度に基づいたベクトル演算の例

$$\mathbf{v} = \text{rot } V = \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right) \mathbf{i} - \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) \mathbf{j} \quad (1)$$

のように表すことができる。

このように各ピクセルのもつ濃度をベクトルで表すと、隣り合ったピクセル間のもつベクトルを単純に演算することができる。図4は左右に二つ並んだピクセルの回転ベクトルを演算した例を示している。まず同図(a)に示すように、隣り合った二つのピクセルが同じ絶対値の回転ベクトルをもつと仮定すると、両者の接辺において左のピクセルがもつ上向きのベクトルと右のピクセルの下向きのベクトルが打ち消しあうため、同図(b)に示すベクトルをもつと考えることができる。さらに両者のピクセルはそれぞれ左右に向けたベクトル成分をもつため、これらが打ち消しあってゼロとなり、最終的には同図(c)に示すように左のピクセルは下向き、右のピクセルは上向きのベクトルのみをもつことになる。この演算を図5に示す上下、左右、斜め方向に並んだピクセル間で行うと、濃度に基づいて各ピクセル間のもつベクトルを簡単に演算しその特徴を抽出することができる。図1(b)に同図(a)の模式図をベクトル化した結果を示す。隣り合ったピクセルの濃度が変化する点にベクトルが存在し、これらのベクトルが模式図の特徴を良くとらえていることがわかる。このように、各ピクセルのもつ濃度に基づいたポテンシャルエネルギーを演算すると、画像がもつ濃度の特徴をベクトルを用いて表現することが可能となる。

3. 硬さ試験による加工変質層の評価

3.1 実験条件と方法

本研究で提案する画像のベクトル化による加工変質層の深さの推定結果と比較するために、加工表面近傍の硬さ分布を測定した。試料は表1に示すように、S45Cをエンドミルにて乾式アップカットを行ったものを用いた。表面から深さ方向に対する断面の硬さ分布を、マイクロビッカース試験機を用いて測定した。表2に硬さ試験の条件を示す。S45Cを構成するフェライトとパーライトの部分では硬さが異なるため、本実験ではフェライトの部分のみの硬さを測定した。一般的に硬さ試験において、隣り合う圧痕が近い場合には圧痕による硬さの変化が隣の硬さ試験結果に影響を及ぼすことが知られている。ISOの規定によればS45Cの硬さを測定する場合、隣り合う圧

表1 加工条件

工作機械	縦軸フライス盤
工作物	S45C 生材
工具	エンドミル φ20 mm
切削速度	4.21 m/min
送り速度	100 mm/min
切り込み量	1 mm
切削方法	乾式アップカット

表2 マイクロビッカース硬さ試験の条件

圧子の押付け荷重	0.49 N
圧子の押付け時間	15 sec

痕の中心間距離を $2.5d$ 以上(d は圧痕の対角線長さ)離さなければならぬとされている。しかしながら、本研究で測定しようとする加工変質層の深さは、数十 μm 程度と浅いことが予想される。そこで、中心間距離を $2d$ と $2.5d$ とした場合とで予備実験を行った結果、両者に大きな違いが認められなかったことから本実験においてはこの間隔を $2d$ として測定を行った。

3.2 実験結果

図6は加工後の表面近傍の金属組織のデジタル画像である。左端が加工表面であり、下から上に向かって加工されている。白いフェライトの部分と黒いパーライトの部分を観察されており、これらの境界である粒界を明確に観察することができる。加工表面付近では、加工時に発生した応力の作用によって粒界が加工方向に流動しており、機械加工により加工変質層が生成されていることがわかる。

この加工断面の硬さ試験を行い、加工表面からの深さ方向に対する硬さの分布を測定した結果を図7に示す。硬さの測定は各深さにおいて7回測定を行い、その平均値を示している。硬さの値は、加工表面近傍において大きく、表面からの距離が増加するに従い徐々に減少する傾向にある。この結果よ

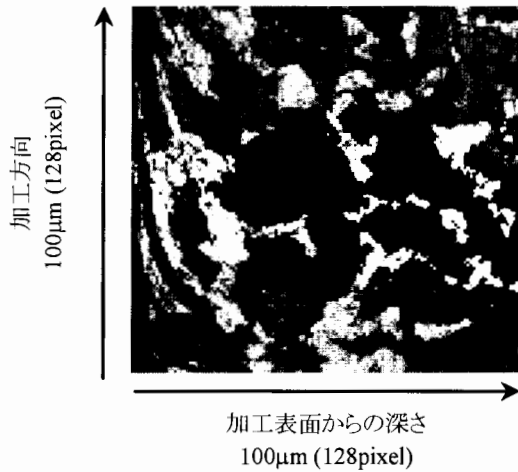


図6 フライス加工された工作物表面近傍の顕微鏡写真

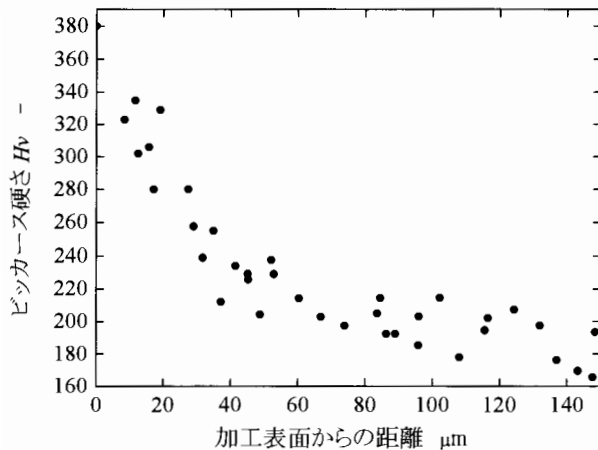


図7 工作物表面近傍の硬さの変化

り、機械加工された工作物の表面付近は変質していることが確認され、その深さは50 μm 程度であると予想される。

4. 画像のベクトル化処理と考察

4.1 画像の処理方法と処理結果

図6に示したデジタル画像から粒界の流れを捉えるため、画像のベクトル化を行った。図6の画像は、縦横128のピクセルによって構成されている。そこで図8に示すように、任意の深さにおける1ピクセル毎に得られたベクトルを平均し、各深さでのベクトルの平均 V_{av} を、

$$V_{av} = \sqrt{\frac{(\sum v_x)^2 + (\sum v_y)^2}{n}} \quad (2)$$

のように算出した。ここで、 v_x, v_y は各ピクセルにおけるベクトルの x, y 成分、 n は各深さにおけるピクセル数で、この場合は128である。

このようにして得られた各深さにおけるベクトルの平均値を図9に示す。同図によれば、ベクトルの平均値には大きなばらつきがあるものの、表面付近では大きな値を示し、深くなるにつれ減少する傾向があると思われる。図6において加工表面

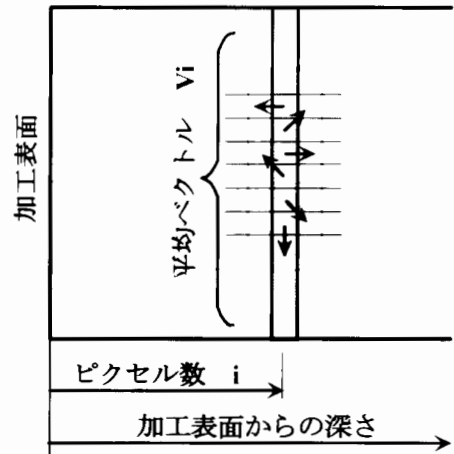


図8 粒界のベクトル化の概念図

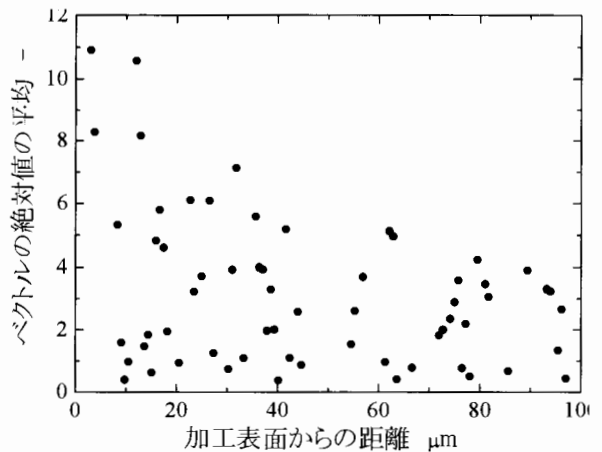


図9 各深さにおけるベクトルの平均値

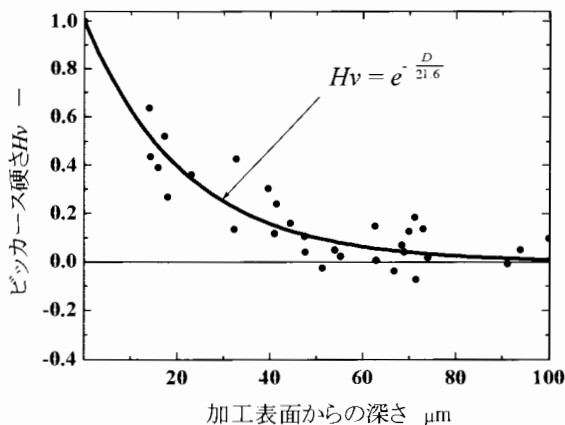
付近をみると、すべての粒界が大きく流動している。このことから、表面付近のベクトルの向きは流動方向に揃っているためベクトルの平均値が大きくなったものと考えられる。一方、加工の影響の少ない深い部分では、粒界はランダムな方向を向いているため、そのばらつきは大きい、ベクトルは互いに相殺するため表面付近に比べるとその平均値が小さくなる傾向があるものと考えられる。

4.2 硬さ試験と画像処理結果の比較

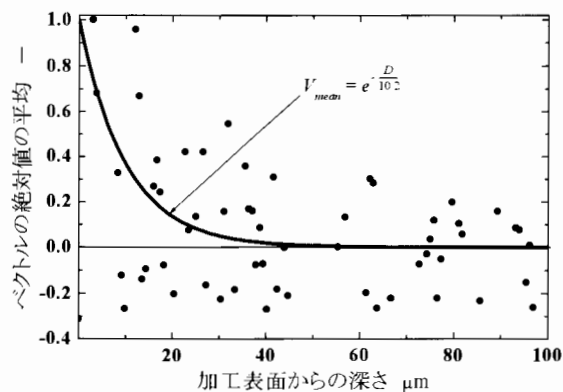
図7に示した硬さ試験結果と図9に示した画像のベクトル化



(a) 加工表面近傍の顕微鏡写真



(b) 硬さ試験結果



(c) 画像処理結果

図10 硬さ試験・画像処理結果の比較

処理とを比較するために、次のように正規化を行った。測定した最大の値を1とし、加工の影響を受けていないと思われる表面から深い部分(この場合は図6の顕微鏡写真において、顕視により確認し、深さ50μm以上の部分とした)の平均をとり、これを0とした。このようにして図7と図9を正規化したものが図10である。また、これらの図には、正規化した後のデータを指数関数に最小二乗近似した曲線とその近似式を示している。ここで、指数部分のDは表面からの深さを示しており、また指数部分の分母はステップ応答における時定数に相当する値である。周知のように時定数は物理量が指数関数的に変化するときに、その変化のようすを数値によって表現できるという特徴を持っているため、ここではこの概念を導入して加工変質層の深さを評価することにした。

両者の近似結果を比較すると、硬さ分布と画像のベクトル化処理とでは、その指数部分の分母に2倍程度の違いがあり、両者が一致していないことがわかる。しかしながら図10(c)に示した画像のベクトル化によって得られた近似曲線は、同図(a)に示した粒界の流れと比較的に良く一致していることから、粒界の流れの傾向を良く表しているものと考えられる。これに対して(b)の硬さ試験結果では、画像で観察される粒界の流動している範囲より深い部分において、画像では捉えられない機械的性質の変化があるためではないかと考えられる。

本研究で提案した画像処理方法では、図10に示した曲線ならびに近似式を求めるまでに必要な時間は3分程度である。硬さ試験や残留応力を測定する従来の方法に比べると短時間でかつ容易に加工変質層深さを数値化することができた。

5. 結言

本研究で得られた結果は次のようである。

- 1) 金属顕微鏡画像に基づいて画像ベクトル化する方法を提案した。
- 2) この方法を適用しS45Cの加工変質層を測定したところ、粒界の流れの様子を定量化することができた。
- 3) 本方法に要する時間は3分程度であり、従来の加工変質層の測定法に比べて短時間でその深さを同定し得ることを示した。

最後に本研究を行うにあたり、本学学生であった北村昌俊君、鈴木信君、高垣貴雅君に協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

6. 参考文献

- 1) 河村末久, 中村義一ほか: 表面測定技術とその応用, 共立出版社 (1991) 99-101.
- 2) 高沢孝哉: 研削面表面温度分布の理論とその測定法—研削温度に関する理論的解析(第1報)—, 精密機械, 30, 11 (1964) 851-857.
- 3) 江田弘, 貴志浩三: α-Fe-Fe₃C合金の研削加工層, 日本機械学会論文集(第3部), 43, 372 (1977) 3112-3124.
- 4) 大村悦二, 山内忍, 江田弘: 研削加工における組織変態過程のコンピュータシミュレーション—研削加工変質層の総合的研究(第1報)—, 砥粒加工学会誌, 37, 5 (1993) 273-278.
- 5) 白樫高洋, 帯川利之, 笹原弘之, 和田武司: 切削加工変質層生成過程のシミュレーション解析(第1報)—残留応力分布の予測法と妥当性の検証—, 精密工学会誌, 59, 10 (1993) 1695-1700.
- 6) 齋藤兆古: 知的可視化情報処理(2)—画像の支配方程式—, 日本AEM学会誌, 10, 1 (2002) 41-52.