

研磨加工に用いる砥石の微細構造と和鋼の被研磨特性

矢尾板 航己^{*1} ヘンドリック リンデラウフ^{*2} 千葉 雅史^{*3}

Microstructure of Whetstones Used for Polishing Japanese Steel and Surface Morphology by Stock Removal

by

Kouki YAOITA^{*1}, Hendrik Hubert Maria Goncalo LINDELAUF^{*2}, and Masafumi CHIBA^{*3}

(Received on Mar. 25, 2022 and accepted on Jun. 4, 2022)

Abstract

Japanese swords were valuable not only as weapons, but also as traditional works of fine art. Forging technology and the polishing process are important elements of sword manufacturing. However, there has been little quantitative discussion of the process. In this paper, the microstructure and the composition of various whetstones used for polishing are quantitatively evaluated to clarify their characteristics. The effects of differences in the properties of the whetstones, which are a specific polishing material, on the surface of Japanese steel were examined. The crystal structure of natural whetstones is hexagonal, and the main component is quartz in the form of SiO_2 . Other impurities such as C, Al, K, and Mg ions were also detected. In particular, the concentration of C contained in quartz is of great significance. It was found that increasing the concentration to 13 at% as a threshold gave a hard touch feel, whereas decreasing it gave a soft touch feel during the polishing. On the other hand, artificial whetstones use SiC or Al_2O_3 as the abrasive, and have a more porous structure than natural whetstones. The parameters of the surface morphologies such as the root mean square and the arithmetic mean roughness were obtained by conducting experiments of polishing nails made of Japanese steel. The effects of the properties of the whetstone on the surface roughness were investigated. In the case of an industrial artificial whetstone, a positive correlation was found in which the surface roughness of the steel surface increased as the roughness of the grindstone increased. Furthermore, a slight negative correlation was found in the case of the whetstone used for sword polishing.

Keywords: Surface morphology, Polishing process, Whetstone, Japanese steel, Microscopic structure

1. 緒言

日本刀は伝統的な武器としての機能性だけでなく、美術工芸品として現在では日本の文化財を象徴する重要な位置付けにある。刀身の素材である玉鋼(たまはがね)は、砂鉄を直接精錬して作ることから、資源に乏しい日本独自の製鉄技術として古くより伝承されている¹⁻³⁾。さらに、玉鋼の折り返し鍛錬によって形成される層状の刀身組織と、焼入れ工程で付与される刃部の刃文や光沢から生まれる造形からも、日本刀が武具としての特徴と価値だけでなく、美術工芸品としての魅力も持ち合わせていることは明白である⁴⁻⁷⁾。そして刀剣製作過程において必要な様々な技術の中でも、日本刀に美術品としての付加価値を与える要素のひとつが表面の研磨作業である。単に切れ味を高めて武器としての性能向上を目指すのではなく、刀身を磨く過程で、沸(にえ)、匂(におい)、砂流(すながし)などの多数種類の表情を刀身から引き出す狙いで施される^{8, 9)}。日本刀研磨では一般的な刃物と同様

に砥石が用いられるが、天然砥石のみならず人造砥石も併用される。実際の工程では、下地砥では研磨力の強い人造砥石を用いる場合があるが、仕上砥の段階では全て天然砥石が用いられる。日本では天然砥石の産出が豊富で、砥石は荒砥、中砥、仕上砥などに分類されて目的別に使い分けられている。一方で、工業製品における研磨と研削加工に関しては、粒状の研磨材を結合剤で固めた人造砥石を使って行われることがほとんどであり、砥石の特性評価項目についても、研磨能率、研削比、仕上面粗さなど極めて多岐にわたって実験を伴った科学的な検証が多数見受けられる^{10, 11)}。しかし刀剣研磨ではその重要性が求められるものの、技術が流派内の伝承で異なっていることや、研ぎ師の感覚に頼るところが大きく、研磨に対する定量性についての議論はほとんど前例がない。

そこで本研究では、日本刀の文化的価値を付与する工程である研磨技術に着目し、刀剣製作技術の一翼を担う研磨工程の理解に意義を求めるものであり、まず最初に研磨に用いられる各種砥石の構造と組成などを定量的に評価して特性を明らかにし、次に砥石の性状の差異が被研磨材料である和鋼の表面に与える影響について考察することを目的とする。

^{*1} 工学部精密工学科学部生

^{*2} 生方刀剣研磨工房、日本刀研師

^{*3} 工学部精密工学科教授

2. 刀剣研磨工程

刀剣研磨の目的は 2 つに大別することができる。1 つは刃物としての切断力を向上させるためであり、日本刀を実用品として利用していた時代に主に行われていた。それとは別に、鍛造後の日本刀に対して姿形を整えて各部位の特徴を明確に表現し、美術鑑賞的価値を付与することを目指して研がれることがあり、現在では後者の方が主流となっている。行き届いた環境の下で保管されていない刀身は状態が健康的とは言えず、表面に錆が発生したものや、欠損あるいは著しい腐食の進行が認められるものが多数存在する。そこで、下地研ぎと仕上研ぎの 2 つの工程を経て、作製された当時の姿形をより美しく再現するための作業が刀剣研磨加工である。

Table 1 は研磨の作業工程順にその工程名称と、そこで用いられる砥石あるいは研磨剤や道具の特徴を取りまとめたものである。なお、作業は本阿弥流や藤代流などの流派や研ぎ師、あるいは刀身の状態によって適用される工程や資材は異なるが、標準的な手法によると前半の下地研ぎは「1-1 金剛砥」から「1-6 内曇砥」までの 6 段階あり、後半の仕上研ぎは「2-1 刃艶」から「2-7 流し」までの 7 段階で構成される。表に示したように、「1-1 金剛砥」から「1-5 細名倉砥」までの下地研ぎの段階では人造砥石が用いられる場合もあり、目安値として工業用研磨微粉の粒子サイズで規定される番手#180~3000 を併記した。下地研ぎでは粗目の砥石から徐々に細目の砥石へと番手を上げながら表面を研ぎ、地金を均して刀身を整える作業を行う。ここで、研磨力が強力な「1-1 金剛砥」は、刀身に欠損や極度に錆が進行した場合にのみ適用される工程であり、薄い錆身程度であれば「1-2 備水砥」工程から開始することが多く、順次、前工程の研ぎ跡を消しつつ次工程へと作業を進める。

次に仕上研ぎは、地金の色調を整えたり刃文のコントラストを創出して、波形状をより鮮明に可視化できるよ

う表現するために行われる。下地研ぎとは異なり、各工程で使用する砥石や治具が工程ごとに変化する。例えば、「2-1 刃艶」は内曇砥をベースに層状劈開面を利用してペレット状に薄く分割して漆で和紙を裏打ちしたものをを用い、「2-3 拭い」は丁子油に火造（ひづくり）の際に生成された酸化鉄や Cr_2O_3 、 HgS 等の粉末を混合したペーストを使う。さらに「2-5 磨き」と「2-7 流し」の工程では、W を母材とする円柱状の超合金を使い、鎬地と棟を完全な光沢鏡面にする研磨を施したり、はばき元に研ぎ師の銘となる印影を刻印する作業を行う。

3. 実験方法

3.1 試料の選択と準備

本研究が対象とする砥石は 2 タイプである。1 つは工業用途であり精密研磨用微粉を研磨剤に含む人造砥石で、その番手は、#240, 400, 800, 1500, 3000, 6000, 8000, 10000 の 8 種類である。もう 1 タイプは刀剣研磨に用いる砥石であり、「1-2 備水砥」、「1-5 細名倉砥」、「1-6 内曇砥」、「2-2 地艶」の 4 種で、本実験では 10 試料入手した。Table 2 に本実験で用いた刀剣研磨用砥石の種類と、試料 ID、人造あるいは天然の種別などをまとめた。なお、表中の Touch の欄にある Hard と Soft の表記は、砥石そのものの硬度を示したのではなく、研磨作業中に研ぎ師が感覚的に受ける手応えを意味し、砥石と刀身との接触状態を作業者の掌を介して伝わる情報から、硬軟の程度に見立ててそれぞれ“Hard”および“Soft”の 2 値で表現したものである。

次に、日本刀の製作許可ならびに登録対象となるには、「伝統的な製作方法によって鍛錬し、焼き入れを施したもの」とされており¹²⁾、このことを解釈すると、鉄鉱石由来の鋼の使用は認められず、現代においても砂鉄を出発材料として、たたら製鉄法により精錬して生成した玉鋼を素材として製作することを意味する。このことは各都道府県の教育委員会が定める規定にも明記されている¹³⁾。しかし、玉鋼の入手は刀匠資格者にのみに限定的で

Table 1 Example of polishing process for Japanese swords.

Process	Grit size	Polishing material
1. Shitajitogi		
1-1 Kongoudo	#180~#200	Artificial or Natural stone
1-2 Binsuido	#400	Artificial or Natural stone
1-3 kaiseido	#800	Artificial or Natural stone
1-4 Chuunagurado	#2000~#3000	Artificial or Natural stone
1-5 Komanagurado	—	Artificial or Natural stone
1-6 Uchigumorido	—	Natural stone
2. Shiagetogi		
2-1 Hazuya	—	Natural stone
2-2 Jizuya	—	Natural stone
2-3 Nugui	—	Paste with iron oxide
2-4 Keshoutogi	—	Natural stone
2-5 Migaki	—	Tungsten alloy
2-6 Narume	—	Natural stone
2-7 Nagashi	—	Tungsten alloy

Table 2 Whetstone for Japanese sword.

Process	Sample ID	Stone type	Touch
1-2 Binsui	bs-01	Artificial	Hard
	bs-02	Artificial	Hard
	bs-03	Natural	Soft
1-5 Komanagura	kn	Artificial	—
	bn	Natural	—
1-6 Uchigumori	ug-01	Natural	—
	ug-02	Natural	Soft
	ug-03	Natural	Hard
2-2 Jizuya	jz-01	Natural	Soft
	jz-02	Natural	Hard

あることから、玉鋼と同一出自で入手容易な和鋼に着目して試料選択した。つまり、本実験での被研磨材である和釘は、有限会社嘉孝製作所（新潟県三条市）製で、階折頭頂形状の長さ 36 mm のもので、日本刀の原材料と同様の砂鉄を母材とする和鋼と同等とみなし、それに対する各種評価実験を行った。なお、試料の和釘には折返し鍛錬を施していない。

各種砥石による研磨が和釘の表面性状に与える影響を検討するため、以下に述べる研磨加工を施したものを評価対象試料とした。最初に、入手直後の和釘は目視的にも表面状態が様ではなく、 FeO や $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4 などの酸化皮膜で覆われていることが一般的に知られている¹⁴⁾。そこで、全ての研磨実験の前段階として、#600 のサンドペーパーで 500 回の表面研磨を行って酸化皮膜を除去し、これを前処理とした。次に、精密研磨用微粉からなる人造砥石を用いた研磨実験では、先の前処理に続いて各種砥石で 500 回研磨したものを評価対象試料とした。さらに、刀剣研磨用砥石については、同一工程の砥石の中から、bs-03, bn, ug-01, jz-01 の 4 種の天然砥石を選択し、砥石そのものを#1000 のダイヤモンド砥石で 500 回研磨して表面を平坦化し、それを用いて前処理済みの和釘に対して各 500 回ずつの研磨を工程順に行ったものを評価対象試料とした。

3.2 評価方法および測定条件

各種砥石の物性評価と和釘に対する研磨実験後の表面性状の測定を行った。まず、表面状態については、白色干渉顕微鏡を用いて測定倍率 $\times 20$ 倍で観察した。なお、観察前には表面付着物を除去する目的でエタノールによる超音波洗浄を行った。次に刀剣研磨用砥石の組成ならびに結晶構造を検討するため、セラミクス製乳鉢を用いて砥石を微粉化し、X線回折法による結晶構造解析を行った。また、砥石の任意の場所を約 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 角のペレット状に碎き、エネルギー分散型 X 線分析装置を用いて含有元素の検出と定量分析を行った。さらに、砥石の断面形態と空隙率の差異を検討するため、走査型電子顕微鏡を用いて断面観察を行った。ここで、空隙率の評価方法には OpenCV を用いて先に観察した断面 SEM 像を二値

化し、黒で表現されたピクセルを空隙と見なして全ピクセルに対する割合を導出して空隙率とした。なお、詳細な評価項目と測定条件を Table 3 にまとめて示す。

4. 結果および考察

4.1 刀剣研磨用砥石

4.1.1 外観と特徴

先に述べたように、刀剣研磨では人造砥石を用いることもあるが、多くは鉱山より採掘される天然砥石が用いられる。天然砥石は自然界において長期間かけて結晶化した鉱物であり、含有イオン種や元素の濃度と分布、不純物の分散などは人工物と比較して一般的にばらつきが大きいと考えられる。かつては京都府をはじめ国内各地で産出された天然砥石ではあるが、近年は安価で大量生産が可能で、かつ均質な人造砥石が普及したことで、鉱山は閉山が相次いで安定的に天然砥石を得ることが難しい状況にある。

Fig. 1 は本実験で用いる 4 種類 10 試料の刀剣研磨用砥石の外観写真を一覧にしたものであり、各試料の特徴である組成物由来の色調や紋様について比較すべく撮影したものであり、拡大倍率は資料毎に異なる。試料のうち bs-01 と bs-02 は平滑な表面で、組成物由来の着色コントラストが揃っており、岩石中の紋様も認められず、人造物ならではの均質な外観を呈していることがわかる。一

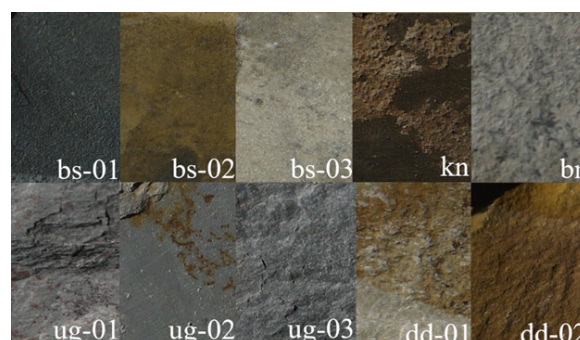


Fig. 1 Appearance images of the whetstone for Japanese sword.

Table 3 Analysis apparatus and measurement conditions.

Evaluation	Apparatus, Model	Measurement conditions
Surface morphology	White light interferometry Nikon; BW-S507	Magnification; $\times 20$ Scan area $X \times Y$; $561.530 \times 561.518 [\mu\text{m}]$ Z range; $\pm 20 [\mu\text{m}]$ Scann step; $20 [\text{nm}]$
Crystal structure	X-ray diffraction Bruker; D8-DISCOVER	X-ray; Cu-K α Voltage-Current; $40 [\text{kV}]$ - $40 [\text{mA}]$ Scan step; $0.02 [\text{deg}]$ Scan speed; $0.03 [\text{deg/s}]$
Composition	Energy dispersive X-ray analysis JEOL; NeoScope JCM-6000PLUS	Acceleration voltage; $15 [\text{kV}]$ Magnification; $\times 100 \sim 600$
Cross section	Scanning erectro microscope JEOL; NeoScope JCM-6000PLUS	Acceleration voltage; $10 \sim 15 [\text{kV}]$ Magnification; $\times 100 \sim 600$

方、備水の bs-03 と黒名倉の bn、および内曇の ug-01 から地艶の jz-02 までの 7 つが天然砥石である。外観に関する特徴を列挙すると、ug-01 には赤色の斑点、ug-02 には茶色が混ざった模様があり、ug-03 はわずかに白い粒子が見られ、さらに jz-01 は全体的に灰色の模様に薄茶色の斑点、jz-02 は薄オレンジ色の母相に茶色の模様が確認できる。このように目視的にも均質ではなく、随所に色調の異なる粒子や模様が観察でき、これらは天然産出物がゆえの構造的特徴が顕著に表れていることが確認できた。

4.1.2 X 線回折プロファイル

準備した 10 試料に対して組成および結晶構造の検討を行った。Fig. 2 は線源に Cu-K α 線を用いて X 線回折測定を行なった結果を示したものであり、縦軸は相対強度 I/I_0 を使用して全ての回折線を規格化してある。図中の回折線は下段より bs-01 から jz-02 まで Table 2 の記載に準じて整理した。なお、ピーク位置の同定とフィッティングには Materials Data の JADE を使用し、化合物の定性は ICDD の PDF データベースと照合して行なった。ここで、類似のプロファイルを示した測定結果を分別して着色したところ、赤、緑、そして水色の 3 つに区分できることがわかった。水色で示した 7 種の試料は、先の外観観察で述べた天然砥石による砥石試料と符合しており、同一の組成構成であると同える。その他の 3 種の人造砥石は、赤と緑で示した 2 種類に分別できた。そこで、3 色にグループ分けした回折線について順次簡単に考察を行なう。

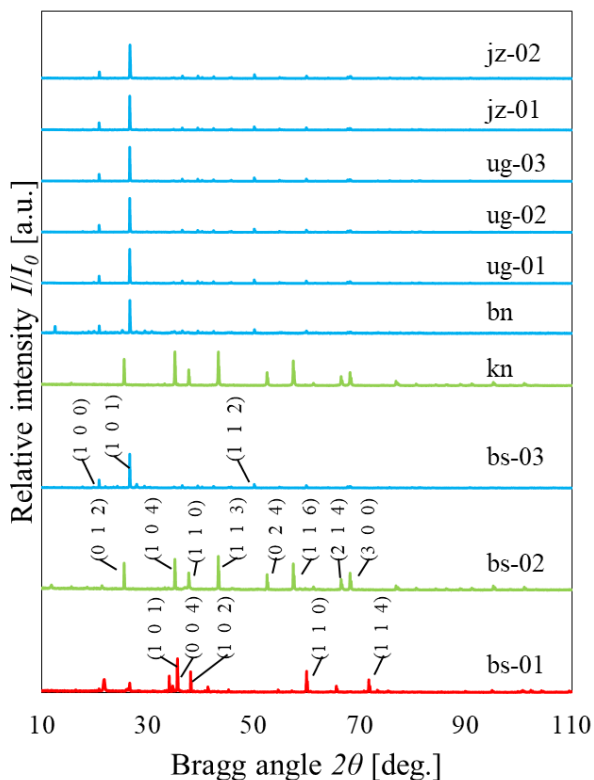


Fig. 2 X-ray diffraction profiles from the various whetstone for Japanese sword.

まず赤で示した試料 bs-01 からの回折線については、強度最大の 1st peak から強度順に 35.64° , 60.00° , 38.12° の強い回折線が観測され、これをもとに PDF#29-1127 と照合した結果、化合物は SiC で結晶構造は六方晶であり、それぞれ (004), (110)ならびに(102)面とよい一致を示した。また、その他の回折線についても面間隔に大きなずれはない。ただし、最大強度を示す回折線に着目すると、既知データでは 34.76° の (101) 面であるのに対し、実験では 35.64° の (004) 面からの回折線が優勢であることから、配向性に変化が認められた。さらに、低角度側に見られる 21.8° と 26.6° の比較的強度の強い回折線は六方晶 SiC のデータとはマッチングできず、今後詳細な検討を必要とするが、SiC に加えて他の化合物と混合物を形成している可能性があると考えられる。いずれにしても、試料 bs-01 の人造砥石は、研磨剤の母材が六方晶 SiC で構成されていると推定できる。

次に、緑で示した試料 bs-02 と kn からの回折線も同様に 1st peak から強度順に 3 本の回折線を選んでフィッティングしたところ、PDF#10-0173 と非常に良い一致が見られた。ピーク位置 43.3° は (113) 面、 35.5° は (104) 面そして 25.5° は (012) 面からの回折線であり、その他のピークと強度に対しても既知データと合致しており、配向性の変化も認められず、この 2 つの試料は主たる研磨剤が Al_2O_3 から構成されている人造砥石であることが明らかとなった。

さらに、水色で示した天然砥石に対する測定結果と既知データ (PDF#46-1045) とを照合したところ、面間隔ならびに強度ともほぼ完全一致しており、六方晶構造をした化合物 SiO_2 の石英であることがわかった。ここで同じ石英でありながらも、先の外観観察の結果では色調にそれぞれ変化が見られるが、これは母相である石英に含まれる不純物イオン種とその濃度に起因するものであると推察できる。

4.1.3 組成構成

先に述べた X 線回折の結果より、7 種類の天然砥石の母相は全て石英であることが明らかとなった。そこで、同じ石英でも研磨時の感触が異なる内曇砥石の ug-01、ug-02 および ug-03 の 3 種類に着目し、母相以外の含有元素を検出するため、EPMA を用いて元素分析を行なった。Fig. 3 は 3 種の内曇砥石から検出された主な元素とその含有量を図に表したものである。母相を構成する O と Si 以外に、含有量が多いものから順に C, Al, K そして Mg が検出された。ここで、約 21 at% の Si と結合している O_2 以外は、Al と結合した Al_2O_3 や、Mg と結合して $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を形成していると考えられ、残りの約 5 at% は O_2 の状態で母岩中に存在していると思われる。

ここで、C 量に有意な差異が認められたことが特徴的であり、それ以外の K や Mg などの微量元素には大きな違いはない。すなわち、ug-03 は ug-02 の約 2.6 倍の C 量であり、ug-01 は両者の中間程度であるとの定量結果を得た。このことと、Table 2 に示した研磨時の研ぎ師の手

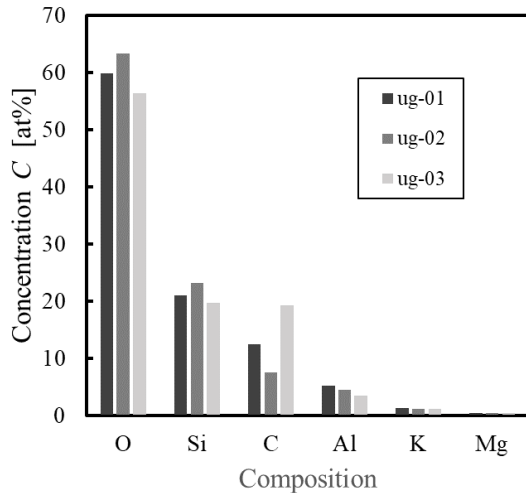


Fig. 3 Compositions and concentrations of whetstone used in Uchigumori process.

の感触とを総合的に検討すると、母岩中のC含有量が13 at%を境に増加すると硬い感触となり、逆にC量が減少すると柔らかく感じることに対応させることができる。ここで、研磨時の感触を決定する要因にはこの他にも粒子の形態、砥石の表面粗さや含水量など、複数の原因が複雑に関係していると考えられるが、本実験の範囲において天然内曇砥石中に含まれるC量が寄与しているものと考えられる。

4.1.4 断面形態ならびに空隙率

下地研ぎの初期段階で使用される、比較的目の粗い備水砥石を用いてその断面形態を観察し、そこから砥粒の充填状態を検討した。観察対象として選択したのは人造砥石のbs-01と天然砥石のbs-03で、先の分析結果から双方ともに構造は六方晶で、組成はそれぞれbs-01はSiCでbs-03はSiO₂（石英）である。また、精密研磨用微粉を研磨剤に用いた#240の人造砥石も、比較対象として評価に加えた。Fig. 4は各試料の破断面をSEMを用いて観

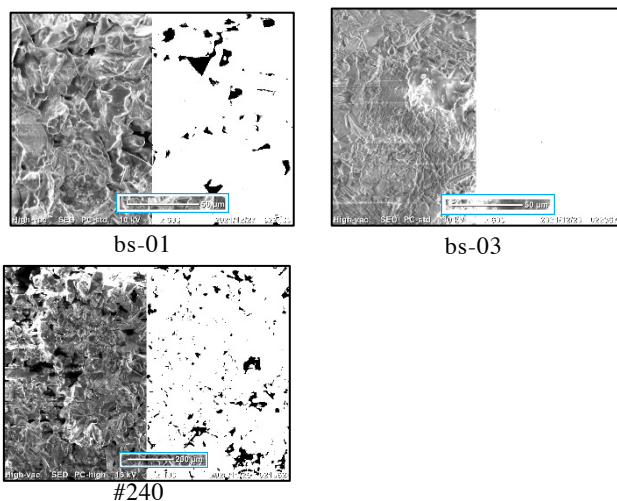


Fig. 4 Cross-sectional SEM images and binarized images of the whetstone sample of bs-01, bs-03, and #240.

察したものであり、それぞれ観察時の1視野を左右に2分割し、左部分はSEM像を、右側半分をOpenCVを用いて二値化処理した画像にして示した。なお、二値化に必要な閾値を40に設定し、二値化処理後の黒ピクセルを空隙と見なして画素数に対する割合を算出したものを空隙率とした。

まず、人造試料のbs-01と天然試料のbs-03を倍率×500で観察した結果からは、bs-01の破断面は不揃いな形状の粒子がランダムに凝集して凹凸が激しい形態となっており、他方bs-03の破断面は緻密で細かく揃った微粒子で形成され、劈開時に発生したと思われる流れの筋模様が観察できる。また、それぞれの空隙率は、bs-01は3.53%で、bs-03にはほとんど空隙はなく 1.20×10^{-3} %であり、約3000倍の高充填率を示すことがわかった。これは、天然砥石は堆積物からなる岩石を採掘し、鑿や鑿を用いて適切な大きさに切り出すのに対し、人造砥石は人工の研磨剤砥粒と結合材を固化する製造法の違いに起因するものと考えられる。

次に、工業用途の#240の精密研磨用砥石を比較対象として同手法で観察したが、先の試料にも増して凹凸が顕著で、倍率を×100に設定して観察せざるを得なかった。これに対しても二値化処理をしたところ、黒ピクセルの分散がbs-01よりもさらに面内全体に点在していることがわかった。なお、空隙率は約7.21%と算出でき、刀剣研磨用のbs-01よりもさらに疎な構造となっていることが確認できた。

4.2 和釘に対する研磨加工と表面性状

ここまでの実験で明らかになった特徴を有する砥石を用いて、具体的に和釘に対して研磨加工を施し、白色顕微鏡にて表面性状パラメータを求め、研磨特性に与える

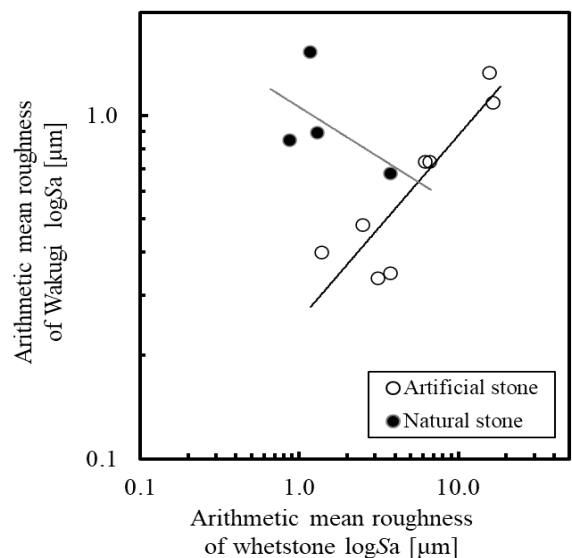


Fig. 5 Relations of the arithmetic mean roughness between Wakugi and whetstone as a function of various kinds of stone type.

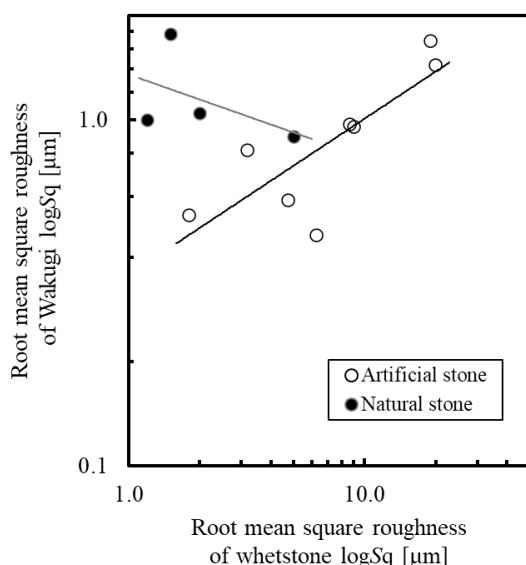


Fig. 6 Relations of the root mean square roughness between Wakugi and whetstone as a function of various kinds of stone type.

砥石の表面粗さの影響について検討する。Fig. 5 および Fig. 6 は、いずれも横軸に砥石の表面粗さをとり、縦軸には研磨加工後の和釘の表面粗さをとってプロットしたものであり、図中の記号○は精密研磨用微粉砥石での値を、●は刀剣研磨用砥石（試料 bs-03, bn, ug-01 および jz-01）を使用した実験の結果を示す。なお、Fig. 5 は算術平均粗さ Sa で、Fig. 6 は二乗平均平方根粗さ Sq で評価したものであり、双方ともに類似の結果である。

精密研磨用微粉からなる人造砥石そのものの表面粗さ Sa および Sq は、#240 では 16.3 ならびに 19.9 μm であり、そこから番手数の上昇に伴ってそれぞれの値は小さくなる。すなわち平坦化の傾向がある。図から、○で示した精密研磨用微粉砥石の場合には砥石の表面粗さが増すとともに和釘表面の表面粗さも増加していく正の相関が見られる。砥石は表面を被研磨材に擦りつけることで加工を行うため、砥石と和釘の表面性状に正の相関が見られることは比較的容易に納得できる。

一方、刀剣研磨用砥石での場合には、砥石の表面粗さとは逆にわずかな負の相関性が見られ、 Sa や Sq の指標のみでは説明が難しい。天然砥石での研磨時には研汁の発生が多く、これが砥石と和釘の間に混入することで研磨に影響を及ぼしていることと、研磨中に砥石が削れて微粉化し、砥石の表面状態が常に変化していることが予想される。以上の結果から、特に天然砥石については表面性状のみで研磨特性を評価することは困難であり、砥粒の粒径や硬度とともに剥離状態なども検討しなければならないと考えられる。

5. 結言

鍛刀と研磨は共に日本刀製作過程において最も重要な技術である。中でも、刃部の刃文や地鉄の構造表現など、

美術工芸品としての魅力を最大限に引き出したり、保存状態の思わしくない刀剣を蘇らせたりする研磨加工は、刀剣本来の文化的価値を付与する工程である。そこで本研究では研磨に用いられる各種砥石の構造と組成などを定量的に評価して特性を明らかにし、さらに砥石の性状の差異が被研磨材料である和鋼の表面に与える影響について考察することを目的として、形態観察、表面性状測定、微細構造評価および断面観察など各種の実験を通して以下の知見を得た。

刀剣研磨用砥石の中でも天然砥石は、目視的にも均質ではなく、随所に色調の異なる粒子や模様が分散分布しており、天然産出物ゆえの構造的特徴が顕著であった。またその結晶構造は六方晶で、組成は SiO_2 を母相とする石英で構成されており、わずかに C や、Al, K, Mg などの不純物イオンが含まれていた。またそれらの不純物は母岩中に Al_2O_3 や $Mg(OH)_2$ などの化合物を形成して安定的に存在していると考えられる。研磨作業中において砥石と金属表面との間で生じる相互作用に起因する手応えは、石英中に含まれる C の濃度が 13 at% を閾値として増加すると硬い感触となり、減少すると柔らかく感じるものがわかった。一方、人造砥石は研磨剤に SiC や Al_2O_3 が用いられ、比較的空隙率の高い構造をしており、堆積物からなる天然砥石とは明らかに異なる特徴を有することがわかった。

このような特徴を有する刀剣研磨用砥石や工業用途である精密研磨用微粉砥石を用いて、和釘に研磨加工を施して表面性状パラメータを求め、表面粗さに与える砥石の性状の影響について検討した。その結果、算術平均粗さと二乗平均平方根粗さによる指標を使って評価したところ、精密研磨用微粉砥石の場合には砥石の表面粗さの増加と共に和釘表面の表面粗さも増加していく正の相関が見られ、一方、刀剣研磨用砥石での場合にはわずかな負の相関性が見られた。今後は、砥粒の粒径や硬度とともに加工中の剥離状態などを計測し、相関性に与える影響を明らかにしたい。

謝辞

本研究を推進するにあたり、微細構造評価を本学キャンパスサポートオフィス(技術共同管理室)の高度物性評価施設および本学イメージング研究センターにて行った。各種測定において熱心にご指導いただいた森川真紀技師補をはじめ関係各位に御礼申し上げます。また、工学部精密工学科の内田ヘルムート貴大准教授からは有益な助言をいただき、心から感謝致します。

参考文献

- 1) 清永欣吾: たたら製鉄とその金属学, あたりあ, Vol. 33, No.12, pp.1453-1458 (1994).
- 2) 井上達雄: 日本刀-その材料, 鍛錬および焼入れのシミュレーション, あたりあ, Vol.35, No.2, pp.174-178 (1996).
- 3) 臺丸谷政志: 日本刀の科学, SB クリエイティブ

- (2016).
- 4) 佐々木直彦, 桃野正: 伝統的鍛錬工程における日本刀材料の炭素量変化, 鉄と鋼, Vol.93, No.12, pp.792-798 (2007).
 - 5) 井上達雄: 日本刀-その美, 外国刀との比較と焼入れの変態・熱・力学シミュレーション, まてりあ, Vol.47, No.7, pp.359-363 (2008).
 - 6) 井上達夫: 日本刀に息づく科学と技術, 材料, Vol.66, No.11, pp.804-810 (2017).
 - 7) 公益財団法人日本美術刀剣保存協会: “刀剣博物館, 日本刀を知る”.
<https://www.touken.or.jp/museum/sword/attraction.html>, (参照 2021-07-13).
 - 8) 俵國一: 刀の研ぎ面の模様と鍛錬組織, 鉄と鋼, Vol.7, No.3, pp.201-204 (1921).
 - 9) 俵國一: 日本刀の研磨法に就き, 鉄と鋼, Vol.6, No.2, pp.171-189 (1920).
 - 10) 岡田昭次郎: 研削砥石, 精密機械, Vol.49, No.7, pp.938-940 (1983).
 - 11) 岩崎重義: 刃物, まてりあ, Vol.34, No.8, pp.995-1001 (1995).
 - 12) 銃砲刀剣類登録規則(昭和三十三年文化財保護委員会規則第一号).
 - 13) 神奈川県. “銃砲刀剣類登録審査会・各種手続のお知らせ”.
<https://www.pref.kanagawa.jp/docs/ar3/cnt/f6660/index.html>, (参照 2022-03-17).
 - 14) 古主泰子: 備中国分寺和釘の酸化皮膜の調査, 鉄と鋼, Vol.91, No.1, pp.91-96 (2005).