応用地質学的な視点から見た天然砥石の特徴と その産業技術への展開

竹村 貴人*・斉藤奈美子**・池野 順一***・高橋 学****

要 旨

近年の急速な産業技術の発展に伴い、レンズやシリコンウェハなどの先端材料の精密加工の需要が非常に高まっている。そのような背景のもと、砥石は物作り産業をはじめとする産業技術の基盤を支える重要な道具の一つであることはいままでもない。しかしながら、天然砥石の合砥と呼ばれる仕上げ砥は、未だに人工的に造られた人工砥石よりも優れた研削性能を持つものもあるとされており、現在でも日本刀や和包丁など刃物の研ぎ師が好んで使っている。ここでは、このように優れた研削性能を持つ天然砥石、とくに合砥に関する情報を人工砥石に取り入れることを目的として、合砥の内部構造の特徴を応用地質学的な視点を交えてまとめた。その結果、質の高いとされる合砥はサブミクロンオーダーの空隙が多く存在していることが明らかになった。

Key words : 天然砥石 natural wheel stone, 合砥 awasedo, 内部構造 microstructure

1. はじめに

「諺に砥は王城五里を離れず、帝都に髓ひて産すと云ふも空ごとにもあらずかし」と江戸時代の書物¹⁾にあるように、砥石は古くから常に文化の発展を担ってきた重要な“地質材料”の一つであることは言うまでもない。わが国においては、文化の中心として長く栄えてきた京都の近郊にて良質の天然砥石が産出し、天然砥石は木材を削る鉋、和包丁や日本刀の刃などの金属材料の加工に多大な貢献をしてきた。例えば、鉋の刃を精度よく加工することは、寺社を始めとした木造建造物に使われる木材の加工精度を左

右する重要な作業である。このような天然砥石は、形状創成に使われる粗砥、形状仕上げに使われる中砥、そして、表面仕上げに使われる合砥(仕上げ砥)があり、その種類は用途により多様化している。例えば、合砥は産地により対馬砥や三河白などと名付けられており、さらに対馬砥がステンレス用に、三河白が刀剣用などに用途により分類されている²⁾。

近年の急速な産業技術の発展に伴い、砥石は文化の発展を担うという役割のみならず、レンズやシリコンウェハなどの先端材料の加工にも使われるようになり、物作り産業をはじめとする産業技術の基盤を支える道具としての役割も担うようになってきている。そのような中、砥石は、天然砥石からより安価で大量の安定供給ができる人工砥石へと移り替わってきている。しかしながら、そのような中でも合砥は、未だに人工的に造られた人工砥石よりも優れた研削性能を持つものもあるとされており、とくに日本刀や和包丁など刃物の研ぎ師は現在でも合砥を好んで使っている。岡田²⁾は天然砥石が歴史的遺物として完全に消滅するまでに、天然砥石(合砥)の研磨能力の解明を行っておく必要性を強調している。

そのような背景のもと、斉藤ほか³⁾は合砥が微小な粘土粒子から構成されていることに着目して合砥を電子顕微鏡で観察し、合砥を構成している粘土粒子からなる内部構造が異方性を持つ層状構造を持つことを明らかにした。さら

* (独)産業技術総合研究所地質情報研究部門((現)日本大学文理学部地球システム科学科) Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Sciences and Technology (Now at Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University)(会員)
 E-mail: takemura.takao@nihon-u.ac.jp

** (元)(財)機械振興協会技術研究所 Former Technical Research Institute, Japan Society for the Promotion of Machine Industry

*** 埼玉大学大学院生産環境科学講座 Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

**** (独)産業技術総合研究所地圏資源研究部門 Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Sciences and Technology(会員)

に、このような粘土粒子の層状構造を模した新しい超精密研削用砥石の開発を試みており、カオリン粘土を使った人工砥石を作成している。また、SAITO *et al.*⁴⁾は鱗片状黒鉛、池野ほか⁵⁾は人工雲母を使った層状構造を持つ人工砥石を開発し、シリコンウェハの研削加工を行い、表面の鏡面創成が可能であることを示した。これらの結果は、砥粒を微細化させることで仕上げ加工を行っていた研削加工では困難であった鏡面創成が、合砥の持つ層状構造を人工砥石に加えることで可能になることを示している。ここで、合砥が泥岩であることや、合砥が木材と同様に柃目、板目があることから、合砥は粘土粒子からなる内部構造の異方性が強いということは明らかである。しかしながら、合砥の特徴がただ単に内部構造の異方性が強いということだけでないことは、その種類が多様なことから明らかであり、その他に粘土鉱物の種類や適度に水を保持するための空隙からなる内部構造などが研削特性に関与していると考えられる。しかしながら、このような合砥の粘土粒子や空隙などからなる内部構造が研削特性すなわち摩擦特性にどのような影響を与えているかについての詳細は明らかにされていない。

ここでは、このような合砥の粘土粒子や空隙などからなる内部構造の特徴を応用地質学的な視点を交えてまとめる。また、同じ合砥でも、質の高いものと低いものの内部構造を比較することで、質の高い合砥の特徴とは何かについての考察を行う。

2. 天然砥石(合砥)の地質学的背景

国内でも良質の天然砥石が産出するとされる京都では、丹波帯Ⅰ型地層群中の三畳紀中世からジュラ紀中世にかけての層状チャートの下位にある珪質頁岩(砥石型珪質頁岩⁶⁾)が風化したものがとくに合砥として採掘されている⁷⁾。この砥石型珪質頁岩が産出する砥石層は遠洋性海洋生物の大量絶滅のあったペルム-トリアス境界(P/T境界: 古生代と中生代の境界)付近に伴うことが指摘されており、地質学的側面からは、付加コンプレックス形成時のデコルマ面としての役割が注目されている⁸⁾。また、砥石型珪質頁岩は丹波帯Ⅰ群地層群中だけでなく、美濃帯・秩父帯のペルム-トリアス系境界付近にも認められる⁹⁾。このような砥石型珪質頁岩は化学組成の分析から丹波帯Ⅰ群のものは、やや中性火成岩の卓越する後背地から、丹波帯Ⅱ型地層群のものは大陸地殻上部が供給源であるとされている⁷⁾。

3. 鳴滝砥石の岩石学的特徴と内部構造

ここでは、京都市北西部から産出される合砥である鳴滝砥石について詳細を述べたい。鳴滝砥石は浅黄色を呈しており、風化が進行している砥石型珪質頁岩である。本論では、天然砥石(合砥)としての質が高いとされている合砥A

図-1 合砥 A の (a)偏光顕微鏡(クロスニコル)による薄片写真(葉理面に垂直)、(b)デジタルマイクロスコープによる表面の写真(葉理面に平行)

と質が低いとされている合砥Bについて、顕微鏡観察とX線回折による岩石学的特徴の記載と弾性波速度の測定、空隙径分布、比表面積そして空隙率の測定による内部構造の評価を行った。ここで、合砥の質は合砥の採掘場において採掘業者の判断によるものである。

①岩石学的特徴: 図-1に合砥Aの偏光顕微鏡での観察結果とデジタルマイクロスコープでの観察結果を示す。ここで、顕微鏡観察からは合砥AとBでの構成鉱物、粒径に差異は認められなかった。顕微鏡下での観察では、異なる二つの種類の石英粒が認められた。一つは直径200 μm ほどの楕円型に押しつぶされた形状を持つもので、これは、放散虫化石が石英により置換されたものと考えられる。もう一つの石英粒は基質部を構成する粘土鉱物に挟まれるように存在し、その直径は5 μm 以下であることが確認できる(図-1(a),(b))。さらに、図-1(a)中には所々に数 μm 程度の大きさの不透明鉱物が確認された。また、粉末X線回折分析から鳴滝砥石の鉱物組成を求めた結果、その構成鉱物は、石英、イライト(絹雲母)、カオリナイトからなることがわかったが、不透明鉱物を示す鉱物は検出されなかった。

②内部構造: 合砥の弾性波速度異方性を評価するため、乾

図-2 水銀圧入法とガス吸着法による合砥Aと合砥Bの空隙分布
(1)と(2)は水銀圧入法による。(3)と(4)はガス吸着法による。

図-3 ガス吸着法による比表面積の測定結果

図中の右方向矢印は圧入圧力に対する吸着を、左方向矢印は圧入圧力に対する脱着を意味している。

燥させた試料の葉理面に直交と水平な方向の弾性波速度を測定し、その速度比を求めた。ここで、弾性波速度異方性は動的なヤング率に依存するもので、力学的な強度異方性と密接な関係がある^{10), 11)}。測定の結果、直交方向と水平方向の速度比は1.98であった。その他の粗砥や中砥では弾性波速度の速度比はほぼ1.00であることより、合砥は力学的な異方性が強いということがいえる。また、その原因となっているものは肉眼でも確認できるほどの顕著な葉理面であり、粘土鉱物の配向であるといえる。

次に空隙率、空隙径(空隙半径)分布と比表面積を見るため、水銀圧入法による細孔分布測定装置(Micromeritics社製 Automated Mercury Porosimeter)とガス吸着法による比表面積/細孔分布測定装置(Micromeritics社製 Surface Area and Porosimetry Analyzer TriStar)を使った空隙からなる構造の評価を合砥A, Bに対して行った。二つの測定方法のうち、前者の水銀圧入法は主に空隙率と $10^{-3} \mu\text{m}$ から $10^2 \mu\text{m}$ の範囲の空隙(細孔)径分布を評価する

のに優れており(岩石試料の測定に関する詳細は高橋ほか¹²⁾を参照)、後者のガス吸着法はBET法と呼ばれる方法での窒素分子の吸着量から計測するため、より微細な空隙径分布($10^{-1} \mu\text{m}$ 以下)および比表面積を測定することができる。測定の結果、空隙率 ϕ は合砥Aで13.30%、合砥Bで10.11%であった。また、水銀圧入法による空隙径分布をみると、質の悪いとされる合砥Bの試料では、合砥Aに比べて空隙率が小さいにもかかわらず、 $1 \mu\text{m}$ より大きな空隙が多く存在していることがわかる(図-2)。さらに、ガス吸着法により測定された $10^{-1} \mu\text{m}$ 以下の空隙径分布をみるとより多くの微細な空隙が合砥Aに存在していることがわかる。

また、図-3にガス吸着法により測定された比表面積の測定結果を示す。その結果、合砥Aの比表面積は $5.1136 \text{ m}^2/\text{g}$ に対して合砥Bの比表面積は $2.9250 \text{ m}^2/\text{g}$ と合砥Aの半分ほどであった。これら空隙からなる構造に関する測定結果から見た良質な天然砥石の特徴は、マイクロメートルオーダーの空隙が非常に少なく、多量のナノオーダーの微細空隙から構成されているといえる。

4. 合砥による研削機構

図-4に合砥により研削された金属材料(鉄)表面の電子顕微鏡画像を示す。画像中に見られる筋の密度を測定すると、 $0.84 \text{ 本}/\mu\text{m}$ であり、一本あたりの幅はおおよそ、 $1 \mu\text{m}$ であった。これらの筋は粘土鉱物の隙間に存在している石英粒によるものと考えられる。ここで、金属表面が研削され

図-4 合砥により研削された金属材料(鉄)表面の電子顕微鏡画像

するためには、砥粒として作用する石英粒が剥がれやすくもなく、剥がれにくくもない適度な力で保持されている必要があるといえる。この適度な力はすなわち、石英粒子と基質部となる粘土粒子がなす抵抗モーメントが研削によって生じる回転モーメントに対してどの位の大きさであるかと言換えることができる。

また、合砥の特徴として挙げられるものの一つとして、研ぎ汁が挙げられる。研ぎ汁は研削の工程に使われる水を捨てずに使い続けることで砥石表面にたまる水のことである。乾燥状態の砥石では、研削がうまくいかないことを考えると、水はその役割の一つとして潤滑の役割を持っている。研ぎ汁が砥石に吸い込まれずに砥石表面に保持されるためには、撥水性など粘土鉱物の表面特性と砥石表面の空隙からなる構造が重要となってくる。また、このような研ぎ汁は、合砥から出た石英粒や粘土鉱物を含んでおり、ただ単に潤滑のみの役割を果たしているのではなく、粘土鉱物により研削過程に何らかの化学的な連成作用を働かせている可能性も考えられる。その理由の一つとして、合砥とほぼ同じ粒径・空隙径である人工砥石であっても、その水の保持能力や研削された金属の表面が天然砥石とは異なるという点が挙げられる。今後、このような、合砥の空隙からなる構造や表面特性と水の保持能力や研削力との関係については実験的な事例を増やし追求していく必要があると考えている。

このような天然砥石の特性を背景にして、斉藤ほか³⁾は合砥が先端材料の研削加工に適應できるかを検証するため、鳴滝砥石を用いてシリコンウェハの鏡面研削を試みた。その結果、シリコンウェハの平面度は $0.1\mu\text{m}$ を得ることができ、鏡面を創成できることを報告している。今後、合砥の良い点を人工砥石へと取り込み、より高機能な人工砥石を開発していくためには、まず、合砥の特性を把握し、その研削メカニズム、言い換えると摩擦機構を理解していく必要があると考えられる。

5. お わ り に

このような、合砥の優れた研削性能についてのメカニズムを解明するためには、岩石物性と空隙構造、風化の度合いや粘土鉱物の種類など応用地質学的な特徴の両方を定量的に関連づけて理解する必要がある。また、刃物を扱う職人や超高精度の研削作業を行う精密工学の分野で、そのような需要があるにもかかわらず、これまで地質材料を扱う研究者は、地質材料の工学的特徴を土木工学以外の工学分野や産業界にあまり提供してこなかった。今後、このような需要に的確に応えるべく、空隙構造、岩石物性や摩擦特性など、より一般的な視点から地質材料についての研究を

進めていく必要があると考える。

謝辞 本研究を進めるにあたり、加藤砥石礦業所の加藤晴永様には天然砥石の採掘場での試料採取や天然砥石についてのアドバイスをいただきました。また、内部構造の測定に関しては、(独)産業技術総合研究所の佐東大作氏に測定をしていただきました。二人の査読者より有益な助言・コメントをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引 用 文 献

- 1) 木村孔恭(1799): 日本山海名産図会, 2 巻.
- 2) 岡田昭次郎(1981): 天然砥石, 精密機械, Vol.47, No.9, pp.1142-1143.
- 3) 斉藤奈美子・池野順一・竹村貴人(2005): 天然砥石に学ぶ超精密研削用砥石に関する研究(第 1 報)—天然砥石の構造解析と層状砥石の試作—, 精密工学会, Vol.71, No.12, pp.1531-1535.
- 4) SAITO, N., TAKEMURA, T. and IKENO, J. (2004): Ultra-precision grinding wheels based on the structure of natural whetstones, *Proceedings of American Society for Precision Engineering Annual Meeting*, pp.546-549.
- 5) 池野順一・斉藤弘憲・斉藤奈美子・竹村貴人(2009): 合砥に基づく新たな鏡面研削用砥石に関する研究—合砥の調査および積層砥石の開発—, 砥粒加工学会, Vol.53, No.3, pp.174-179.
- 6) IMOTO, N. (1984): Late Paleozoic and Mesozoic Cherts in the Tamba Belt, Southwest Japan (Part 1), *Bull. Kyoto Univ. Educ. Ser.B*, No.65, pp.15-40.
- 7) 武蔵野実(1993): 砥石型珪質頁岩の化学組成—その 1—, 地質調査所月報, Vol.44, No.12, pp.699-705.
- 8) 中江訓(1993): デコルマ面としての遠洋性珪質岩中の P-T 境界—丹波帯のジュラ紀付加作用に関連して—, 地質調査所月報, Vol.44, No.8, pp.471-481.
- 9) 山北聡(1987): 四国東部秩父帯中のチャート相二畳—三畳系間の層序関係, 地質学雑誌, Vol.93, No.2, pp.145-148.
- 10) MOVKO, G., MUKERJI, T. and DOVORKIN, J. (1998): The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media, Cambridge University Press, Cambridge, 329p.
- 11) TAKEMURA, T., GOLSHANI, A., ODA, M. and SUZUKI, K. (2003): Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.40, No.4, pp.443-454.
- 12) 高橋学・林為人(2004): 水銀圧入式ポロシメータで得られる情報と測定の問題点, 資源と素材, Vol.120, No.8, pp.455-460.

(2008年 7 月 5 日受付, 2009年 3 月 23 日受理)

Engineering Geological Properties of Natural Wheel Stone and Its Application to Advanced Industrial Science and Technology

Takato TAKEMURA, Namiko SAITO, Jyun-ichi IKENO and Manabu TAKAHASHI

Abstract

The recent rapid advances in technology have resulted in an increased demand for the high-precision processing of the industrial materials such as silicon wafer. Against this backdrop, the wheel stone is one of the important tools for industrial technology and manufacturing industry. However, as for the finishing wheel stone, called “Awasedo”, it is assumed that the natural wheel stone may still more excellent than the artificial wheel stone. “Awasedo” is the most appreciated and most commonly used by craftsman whetting the edge of a Japanese sword.

In this paper, the objective is to innovate the excellent performance of “Awasedo” to the artificial wheel stone. With this objective in mind, we characterized the microstructure of “Awasedo” from the viewpoint of the engineering geology. As the results, we find out that the micropore of the high quality “Awasedo” is mainly composed of sub-micron pores.

Key words : natural wheel stone, awasedo, microstructure