

砥石表面解析の方法と評価 —考古資料を対象として—

森 貴 教・月 山 陽 介・新 田 勇

はじめに

先史時代から現在に至るまで、人類にとって刃物の研磨作業に砥石は欠かせない。天然砥石は、構成鉱物粒子の大きさによって粗いものから極細粒のものまで多様であり、研磨する対象物に応じて砥石の材質を見極め、その種類が選択される。日本では弥生時代に金属器、とりわけ鉄器が導入されると砥石の種類が明確になり、より目的に適した石材を選択する必要性が増したと考えられる。砥石の長い歴史において、弥生時代は研磨対象物の材質変化との関連性から最大の画期といえる。

こうした観点から筆者は、弥生時代の後半期における工具刃先の材質変化（鉄器化）について、砥石の消費形態の時期的変遷、特に砥石目（砥粒の大きさ、砥石粒度）の細粒化に着目して検討を進めてきた¹⁾。ただし、遺跡出土砥石の研磨・研削機能をいかに客観的に評価するかについては、トライボロジーの観点から方法論的課題も存在する。また、先行研究において分析方法は簡略的に述べられているのみであり、共有化されていない状況である。

そこで本稿では、今後の考古学的な砥石分析の効率性・利便性を高めることを目的として、砥石目の同定方法に関するマニュアルおよび顕微鏡下での観察のための対照カタログを提示する。また、新潟県上越市裏山遺跡出土品を対象として、砥石の表面性状を高精度で明らかにする方法を提示し、得られた表面粗さパラメータに基づいて砥石を分類・評価してみたい。

1. 研究の現状と分析方法の課題

1.1 砥石の考古学的研究

①砥石の定義と認定の問題点

砥石はその形態ではなく、機能・用途から定義づけられる種類の道具である。ここで機能は道具の「はたらき」、用途は「使いみち」を指す²⁾。砥石の機能は、「岩石の表面と加工対象物の表面を擦り合わせることで対象物を変形させること」で、用途は「利器の研磨」である。刃物砥石と工作砥石の2つに大別されており、刃物砥石は石・鉄・青銅などを素材とする利器の刃部の研磨を行うためのもの、工作砥石は利器の刃部の研磨以外の用途に使用す

る砥石をすべて含むものである。また用途の細別として、切断、研削、穿孔など加工対象物を大きく変形するような複数の加工に使用するもの、つや出しなどの表面研磨に使用するものなどがある³⁾。

さて、以上のように砥石を定義する場合、考古資料としての砥石を認定・抽出するためには、研磨を行った面、すなわち作業面（砥面）が確認できるかという点が基準となる。ここで問題となるのは、考古資料に認められる「滑らかな面」が、利器を対象に研磨・切削を行った作業面であることをいかに明らかにできるか、という点である。食料加工具である石皿・磨石、顔料を擦るための石杵・石臼、墨を擦るために用いる硯などもまた、砥石と同一の「機能」をもつ石製品であることから、形態的属性からのアプローチのみでは砥石との峻別に限界もある。そのため「用途」も含めて、加工対象物の検討を同時に進めていく必要があるといえ、付着物の理化学的分析や使用痕跡を含む作業面の痕跡研究が課題である。また、考古資料の「滑らかな面」について、ナノ／マイクロレベルにおける表面性状の定量的評価も、今後の砥石の認定において重要な指標となるものと考えている。

②砥石に関する研究史

遺跡出土砥石の分析方法に関する研究史を整理する。1980年代以降、砥石を対象とした分析において、砥石の目の細かさ（砥石目）が注目され始めた。しかしながら、先行研究や報告文中に認められる粗砥、中砥、仕上砥といった砥石目の区分や使用痕などについては、主観的・経験的に述べられる傾向が強く、具体的な分析基準が示されていないかった。

こうした研究状況のなか2002年に村田裕一は、形態、使用痕といった砥石の諸属性を整理し各属性の分類基準を定義した上で、弥生時代における砥石使用形態の時間的変遷について検討した。特に、サンドペーパー（研磨布紙）を指標として、JIS（日本工業規格）で規定されている「研磨材における粒度」の表記方法を援用することで、砥石目を客観的に提示する方法を確立した点は非常に重要である⁴⁾。

その後、村田により提示された分析方法是、京都市田齊当坊遺跡や佐賀県吉野ヶ里遺跡など、砥石が多く出土した遺跡の発掘調査報告書における記載方法として採用されている⁵⁾。そして近年は、一遺跡や小地域を対象とした砥石の詳細な分析が進んでいる。渡辺亮志は、福岡市比恵・那珂遺跡群における砥石の変遷について砥石目の組成に着目して検討し、弥生時代中期中葉～後期前葉は砥石目 #800と #2000への集中、後期中葉～終末期（古墳時代初頭）では #2000に一極化することを指摘している⁶⁾。また土屋みづほは、東北部九州（遠賀川以東地域）における砥石の分析から石器生産と鉄器化の関連について考察している⁷⁾。ここでも砥石目組成の遺跡間変異が注目されている。

1.2 本稿の課題

これまでの砥石に関する考古学的研究では、砥石のもつ属性として砥石目が注目されてき

たが、その分析方法は十分に解説されてこなかった。村田（2002）は、サンドペーパーの粒度と砥石表面の「きめ」を顕微鏡下で比較対照することにより、砥石目を決定することを説明している⁸⁾。しかし、その方法は簡略的に述べられているのみであり、広く共有化が図られている状況にない。そこで、今後の考古学的な砥石分析の効率性・利便性を高めることを目的として、砥石目の同定方法に関するマニュアルおよび顕微鏡下での観察のための対照カタログを提示したい。

また、一般に市販されているサンドペーパーのうち、JISの#40（番手、以下省略）・#60・#80・#100・#120・#150・#180・#240・#320・#400の10種は粒度分布に応じた研磨材（ガーネットなど）をクラフト紙に直接接着したものが主である一方、#600・#800・#1000・#1500・#2000の5種は研磨剤（溶融アルミナなど）をスプレーコーティングした耐水紙であり、表面の構造が前者と大きく異なっている⁹⁾。さらに、紙の色調が灰色で、研磨剤が無色透明に近いものであることから凹凸の輪郭を把握しにくい。したがって、砥石目の細かな#600以上のものについては、村田（2002）が提示した低倍率による顕微鏡観察では粒度を客観的に同定することが非常に困難といえる。

さらに、一般的な実体顕微鏡やデジタルマイクロスコープによる観察では砥石表面の粒子の平面形や粒子径について捉えることが可能である一方、表面粗さや立体構造については明らかにできないという別の問題もある。

そこで本稿では、新潟県上越市裏山遺跡出土品を対象として、表面粗さ測定機を用いて砥石の3次元的な表面性状を明らかにする方法を新たに提示し、得られたパラメータに基づいて砥石を分類・評価してみたい。

2. 砥石目の同定方法

2.1 サンドペーパーと粒度

砥石目は村田裕一の方法¹⁰⁾にならい、サンドペーパーの研磨材の粒度との比較によって分類する。分類の指標として用いたサンドペーパーは、JIS#40・#60・#80・#100・#120・#150・#180・#240・#320・#400・#600・#800・#1000・#1500・#2000の15種類（三共理化学株式会社製）で、#40が最も粗く#2000が最も細かいものである。#2000以上のさらに細粒のものについては現状では区分しておらず、一括している。

なお、「研磨布紙用研磨材の粒度（JIS R 6010：2000）」に規定されている粒度分布は表1のとおりである¹¹⁾。例えば、P100は125 μ mのふるいの目を全体の92%以上が通過する粒度分布に適合し、P600は最大粒子径が72 μ m以下で全体の95%は粒子径18.0 μ m以上の粒度分布であるということを示す。このようにサンドペーパーは、最大粒子径のみではなく粒度分布に基づいて、研磨材の粒度が規定されている¹²⁾。

表 1 研磨布紙用研磨材の粒度 (JIS R 6010:2000)

粒度	5 段ふるいの目開き (μm)	1 + 2 + 3 + 4 + 5 段累積網上量 Q 5 (%)
P40	300	96以上
P60	212	92以上
P80	150	96以上
P100	125	92以上
P120	90	96以上
P150	75	96以上
P180	63	90以上

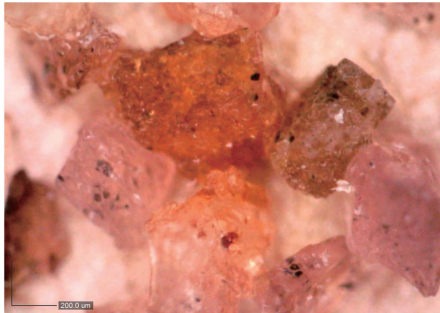
粒度	最大粒子径 (μm)	累積沈降高さ95%の粒子径 (μm)	備考
P240	110以下	44.5以上	
P320	94以下	34.2以上	
P400	81以下	25.2以上	
P600	72以下	18.0以上	
P800	67以下	15.1以上	
P1000	63以下	12.4以上	
P1500	58以下	8.3以上	沈降試験方法による
P2000	58以下	6.7以上	沈降試験方法による

2.2 比較方法

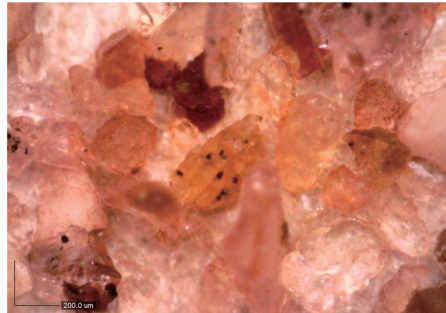
サンドペーパーの研磨材と砥石表面の粒度の比較は、まず肉眼観察から行う。そして手持ちルーペ (Vixen製M13) および携帯型顕微鏡 (Kenko Tokina製Do・Nature STV-40M) により、20倍～40倍の範囲でサンドペーパーと対象とする砥石表面の粒度を相互に比較する。一つの砥面に対し、約5箇所を観察しその平均的な粒度とする。肉眼観察および触感により砥石目におよその見当をつけ、その予想される砥石目を中心として、5枚程度のサンドペーパーの中からより粒子径・粒度分布の近似するものを、繰り返し比較することで絞り込んでいくというのが実情である。構成鉱物粒子 (主に石英) が明瞭で、比較的砥石目の粗いもの (#40～#240程度) については、この作業により基本的に同定が可能である。

次に、砥石目のさらに細かいものについては、上述の方法に加えデジタルマイクロスコープ (AnMo Electronics製Dino-Lite Edge AM7915・AM7515) を用いて比較する。あらかじめサンドペーパーの表面画像を撮影しておき、この撮影画像と同一の拡大倍率で砥石表面を比較することにより、同定の精度を高めるとともに客観性を担保する (図1～4)。筆者は #40～#400は200倍、#600～#2000は420倍にそれぞれ倍率を設定し比較している。

ただし、上述したように、市販されている #600・#800・#1000・#1500・#2000の5種のサンドペーパーは研磨剤をスプレーコーティングした耐水紙であり表面の構造が異なるため、粒度分布を適切に評価することが難しい。そこで、サンドペーパーの表面を420倍で撮影した画像を、画像編集ソフト (Adobe Photoshop 2020) の輪郭検出および二階調補正により凹凸の輪郭を強調させた画像を新たに作成し、比較対照のための画像とした (図3-11



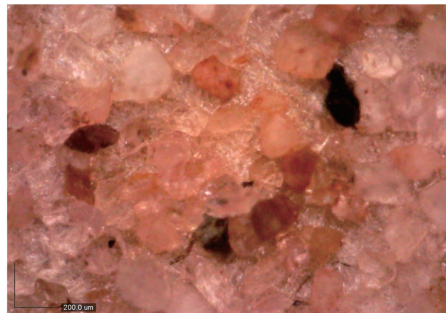
1 砥石目#40



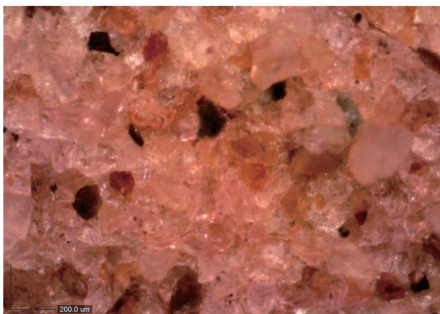
2 砥石目#60



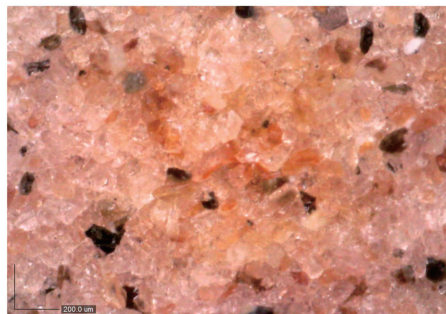
3 砥石目#80



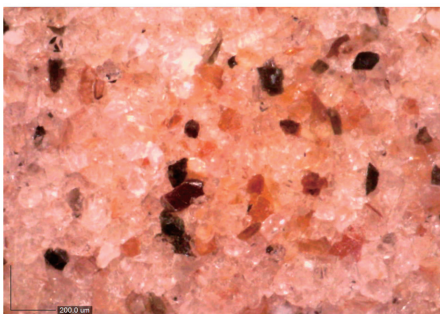
4 砥石目#100



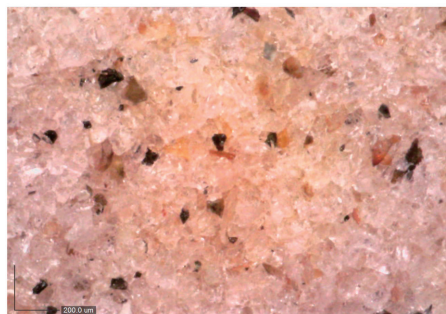
5 砥石目#120



6 砥石目#150

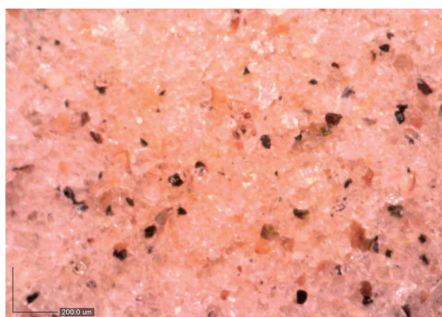


7 砥石目#180

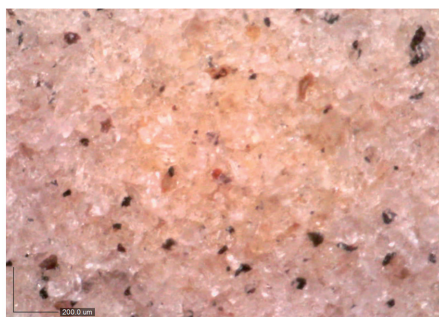


8 砥石目#240

図1 砥石目同定のためのサンドペーパー対照画像 (1) (200倍で撮影)

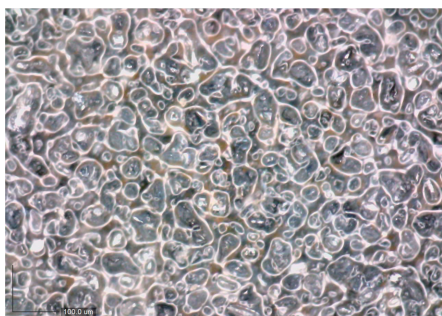


9 砥石目#320

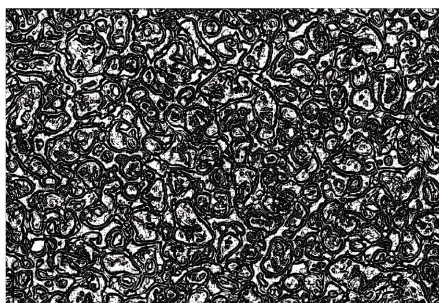


10 砥石目#400

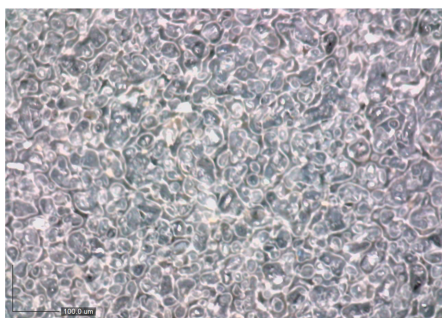
図2 砥石目同定のためのサンドペーパー対照画像(2)(200倍で撮影)



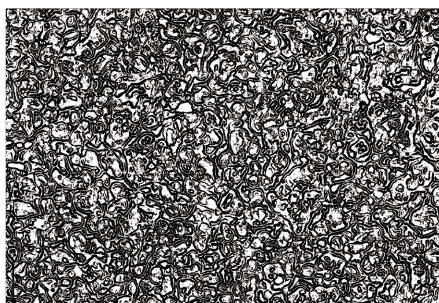
11① 砥石目#600



11② 砥石目#600 [輪郭・二階調補正]



12① 砥石目#800



12② 砥石目#800 [輪郭・二階調補正]

図3 砥石目同定のためのサンドペーパー対照画像(3)(420倍で撮影)

②・12②、図4-13②・14②・15②)。

以上の比較観察を経てもなお判定が困難な場合は、デジタルマイクロ스코プの測定モードにより画面上(キャプチャー上)で砥石表面の粒子径を計測し、表1の粒度分布を参照して最も適合的なものを選択する。デジタルマイクロ스코プでの測定は、粒子径の正確な寸法測定のために事前にキャリブレーションをしておく必要がある。

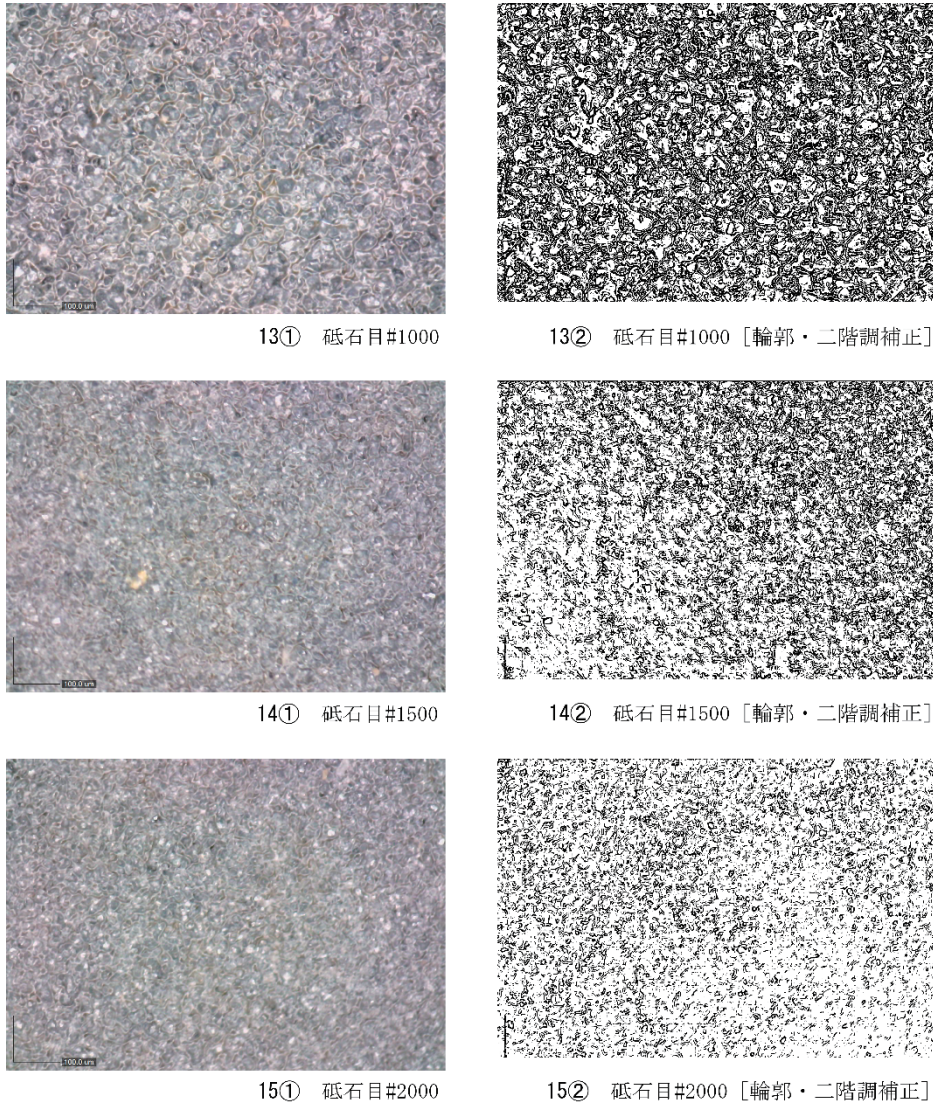


図4 砥石目同定のためのサンドペーパー対照画像 (4) (420倍で撮影)

3. 砥石表面解析の実際 ―裏山遺跡出土品を対象として―

3.1 分析資料と方法

新潟県上越市裏山遺跡(弥生時代後期後葉)出土の砥石計12点について、表面粗さ測定機(東京精密製サーフコム1400-G12)を用いて、表面粗さの各種パラメータについて測定した。砥石はすべて凝灰岩製で砥石目#2000のものである¹³⁾。また測定値を評価するために、現代の対馬産砥石¹⁴⁾を参考資料として測定した。図5・6には資料ごとに、測定位置(触針した位置)を記入している。カットオフ値は0.8mm、測定範囲は4.0mmに設定し、砥石の長軸方向に測定した。

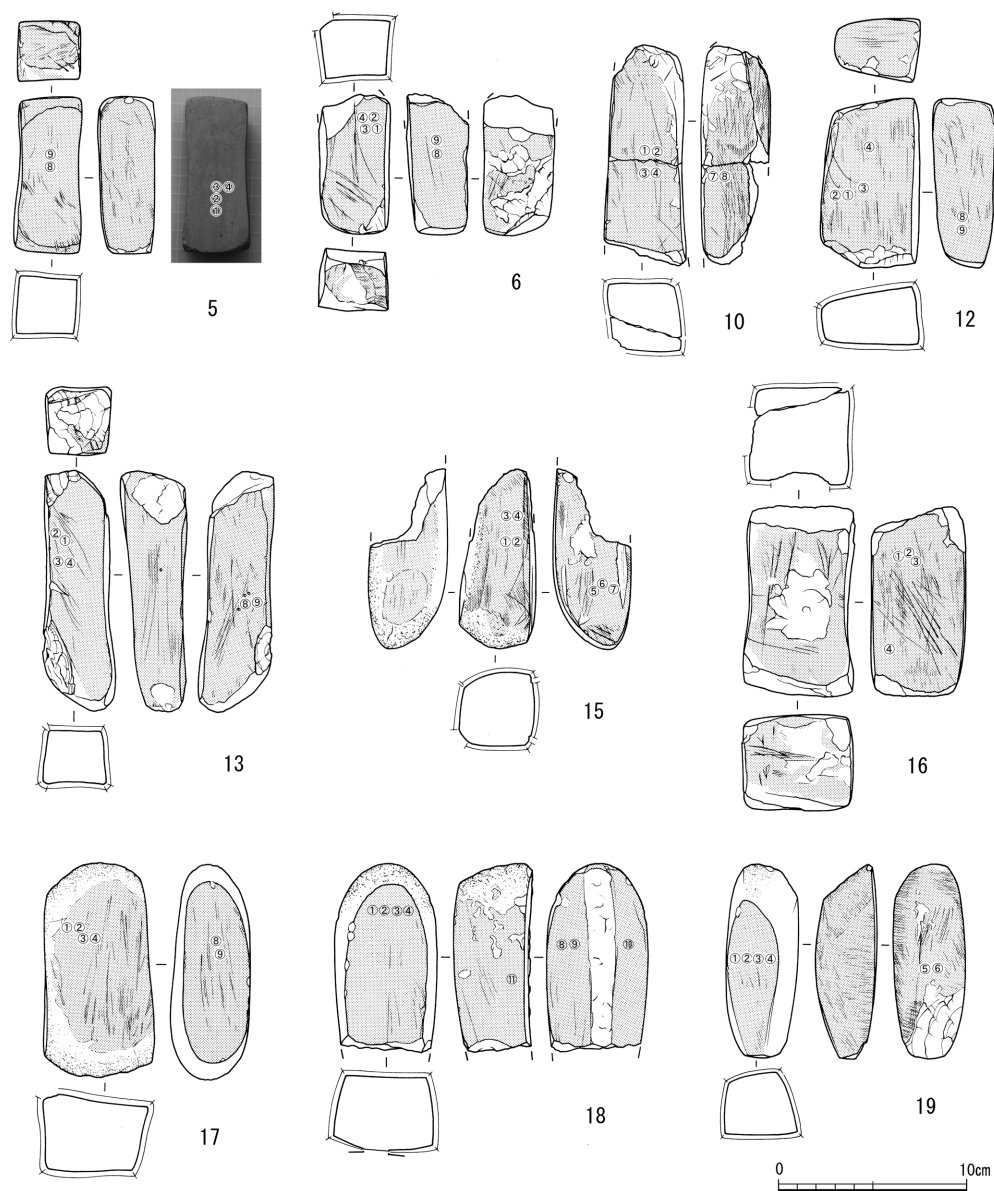


図5 対象資料と測定位置 (1) ($S=1/4$)

表面粗さ測定とは、ナノレベルのダイヤモンド圧子を嵌め込んだ検針部で分析対象物の表面の一定区間を触針し、その粗さを計測する方法である。粗さは、山と谷をもつ粗さ曲線として定量的に評価され、基準長さを基に表面性状に関する各種パラメータの測定値が得られる。本分析では、代表的な表面粗さパラメータである算術平均粗さ (Ra)、最大高さ粗さ (Rz)、粗さ突起の形状を示すスキューネス (ひずみ度、Rsk) およびクルトシス (とがり度、Rku) を測定した (表2)。

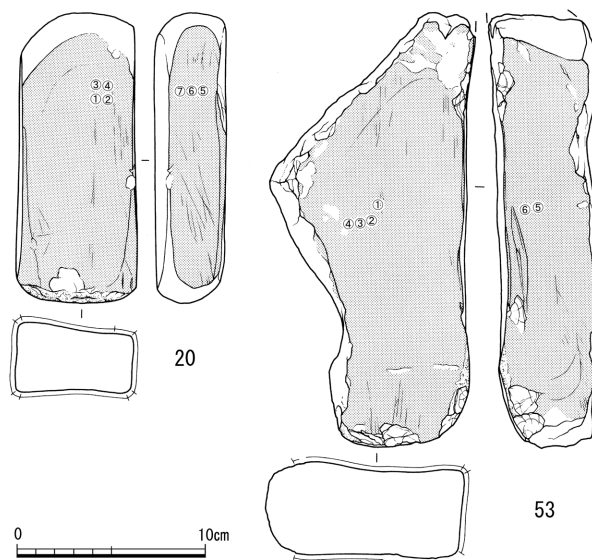


図6 対象資料と測定位置 (2) (S=1/4)

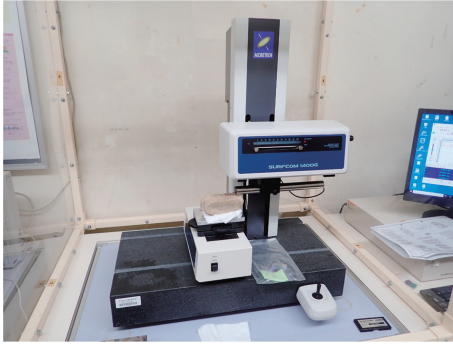
3.2 分析結果

資料ごとにRaとRskの測定値の関係をみたものが図8である。RaとRskのそれぞれについて平均値を算出し、標準偏差を誤差範囲として示している。Raは粗さ突起の平均的な高さを示すものであり、数値が小さいほど表面が滑らかな砥石であることを示す。Raは砥石の目の細かさ、研磨荷重、研磨方向、研磨対象物の材質・形状などによって変化すると考えられる。一方、Rskは粗さの山と谷の分布の偏りを示し、値が0の場合は山と谷が均等に分布しており、値が正の場合は山の割合が多く、負の場合は谷の割合が多いことを示す。値の絶対値の大きさはその傾向の強度を示す。例えば、ランダムな表面ではRskは0になるが、研磨対象物の方が軟らかい場合は表面粗さの比較的高い山のみが選択的に削られやすい傾向にあり値は負になる。一方、研磨対象物の方が硬い場合には表面が掘り起こされる過程で突起が形成されるため正になる傾向にある。以上からRskはその材料と相手材の硬度の関係などによって変化すると考えられる。

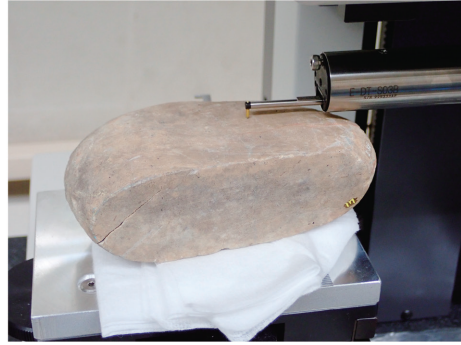
図8より、Raは約2～5 μm の範囲で分布しており、これは現代の工作機械による削り加工（フライス加工など）で仕上げられた金属表面の粗さと同等の表面粗さである。また、Rskの値はほとんどの砥石で-1～0付近の狭い範囲に分布していた。測定された砥石はRaの値が大きい群（資料No.10・12・15・53）、Raの値が小さい群（資料No.5・6・13・16・18・19・20）、Rskの値が0以上の1点（資料No.17）の3つの群に区分できた。区分が同じ砥石は、砥石の使用方法や研磨対象物の材質・形状が類似していた可能性が考えられる。ただし、粗さの定量的な予測は難しいため、研磨対象物の材質・形状や砥石の使用方法を特定するには類似の砥石を使用した実証実験によって確かめる必要がある。

表2 測定値一覧

資料 番号	測定 位置	Ra(μm)	Rz(μm)	Rsk	Rku	資料 番号	測定 位置	Ra(μm)	Rz(μm)	Rsk	Rku
5	①	1.873	11.703	-0.411	3.124	17	①	3.868	22.579	0.276	2.896
	②	1.890	11.916	-0.109	2.754		②	3.410	20.715	0.339	3.207
	③	2.743	15.525	-0.323	2.632		③	4.272	22.810	0.307	2.568
	④	2.612	15.221	-0.552	2.835		④	4.047	22.714	0.667	2.988
	⑧	2.704	17.349	-0.539	3.066		⑧	2.510	14.287	0.075	2.525
	⑨	2.724	19.090	-0.272	3.750		⑨	2.865	17.502	-0.067	2.720
6	①	1.593	10.463	-0.683	3.543	18	①	1.664	13.018	-0.912	5.659
	②	2.180	14.059	-0.597	3.541		②	1.433	9.191	-0.061	2.702
	③	2.551	15.784	-0.579	3.164		③	1.760	12.088	-0.436	3.699
	④	2.195	15.392	-0.842	4.446		④	1.623	10.883	-0.525	3.460
	⑧	1.981	11.957	-0.377	2.728		⑧	2.792	16.528	-0.886	3.557
	⑨	2.067	13.240	-0.767	3.470		⑨	4.064	24.423	-0.738	3.579
10	①	5.243	28.533	-0.706	3.003		⑩	4.208	24.233	-0.595	3.501
	②	3.500	21.358	-0.386	3.485		⑪	3.203	19.223	-0.618	3.068
	③	2.620	16.341	-0.076	2.754	19	①	2.952	17.266	-0.201	2.789
	④	4.744	25.575	-0.317	2.768		②	2.119	13.063	0.124	3.110
	⑦	5.924	31.953	-0.676	3.041		③	2.580	14.402	-0.466	2.989
	⑧	3.794	25.491	-1.001	4.755		④	3.409	17.060	0.007	2.462
12	①	4.876	31.965	-0.069	3.265		⑤	3.440	21.735	-0.818	3.968
	②	6.099	37.102	-0.417	3.073		⑥	4.459	28.665	-0.482	3.199
	③	3.952	24.710	-0.379	2.855	20	①	2.824	18.723	-0.762	4.003
	④	5.157	31.103	-0.401	2.961		②	2.247	12.659	-0.363	2.520
	⑧	4.408	25.497	-0.618	3.238		③	1.985	14.406	-0.472	4.060
	⑨	3.259	18.880	-0.459	2.817		④	2.248	14.392	-0.877	4.121
13	①	3.565	22.281	-0.685	3.304		⑤	3.702	24.032	-1.411	6.043
	②	2.776	15.537	-0.358	2.758		⑥	2.453	14.570	-0.344	2.768
	③	2.550	17.168	-1.027	4.043		⑦	3.535	19.868	-0.537	3.209
	④	2.851	18.232	-0.470	3.401	53	①	4.318	24.573	-0.768	3.326
	⑧	2.595	16.319	-0.639	3.237		②	3.418	17.168	-0.171	2.210
	⑨	3.156	19.863	-0.612	3.315		③	3.196	16.980	-0.457	2.507
15	①	5.288	28.697	-0.530	2.813		④	4.328	23.320	-0.743	2.961
	②	4.048	21.851	-0.217	2.496		⑤	4.555	25.979	-0.675	3.260
	③	3.106	17.210	-0.523	2.673		⑥	4.692	25.171	-0.578	2.751
	④	4.511	26.873	-0.726	3.685	対馬産 砥石	①	1.825	13.448	-0.268	3.246
	⑤	5.460	29.765	-0.004	2.589		②	2.217	14.992	-0.137	2.986
	⑥	3.373	18.029	-0.250	2.383		③	2.073	14.400	-0.152	2.955
	⑦	5.953	33.482	0.221	2.873						
16	①	2.899	17.714	-0.642	3.474						
	②	2.643	15.981	-0.279	2.926						
	③	2.519	16.608	-0.764	3.628						
	④	3.107	20.446	-0.243	3.494						



1 表面粗さ測定機



2 計測状況

図 7 砥石表面解析の状況

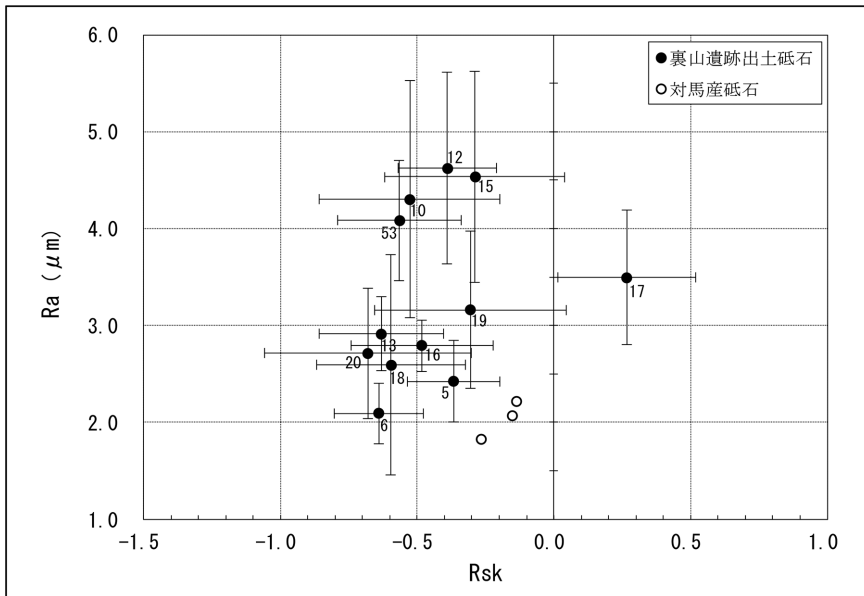


図 8 表面粗さパラメータ (Ra・Rsk) の関係 (平均値±標準偏差, 図中の数字は資料番号)

おわりに

本稿では、考古資料としての砥石を対象とした表面解析の一端として、研磨・切削機能に関わる属性と考えられる砥石目の同定方法を解説した。また、新潟県上越市裏山遺跡出土の砥石を対象として、砥石の表面性状を高精度で明らかにする方法を提示し、得られた表面粗さパラメータに基づいて砥石を分類・評価した。

本稿が、今後の砥石や研磨技術に関する考古学的研究を行ううえでの手がかりとなれば幸いである。なお、本稿の執筆は3.2を月山・新田、その他を森が担当した。

謝辞

理化学的分析のための資料借用にあたり、上越市教育委員会の羽深忠司氏、湯尾和宏氏、今井晃氏に便宜を図って頂き御協力を賜った。また、分析では新潟大学工学部・技術職員の須佐昂太氏のお手を煩わせた。末筆ながら御世話になった皆様に深く感謝申し上げる。

なお本研究はJSPS科研費（JP18K12555、JP20H01365）および令和2年度新潟大学U-goグラントの助成を受けたものである。

注

- 1) 森 貴教「砥石の消費形態からみた鉄器化とその意義—弥生時代北部九州を対象として—」（『考古学は科学か 上 田中良之先生追悼論文集』中国書店、2016年）467-485頁。
森 貴教「近畿弥生社会における鉄器化とその意義—砥石分析による再検討—」（『古代文化』71-4、2020年）21-36頁。
- 2) 上條信彦「民具から考古資料を見直す」（『理論考古学の実践 I 理論篇』同成社、2017年）259-278頁。
- 3) 村田裕一「工具—砥石」（『考古資料大観 9 弥生・古墳時代 石器・石製品・骨角器』小学館、2002年）197-200頁。
- 4) 村田、注3前掲、199頁。
- 5) 土屋みづほ「(6) 砥石」（『市田齊当坊遺跡』京都府遺跡調査報告書第36冊、京都府埋蔵文化財調査研究センター、2004年）106-108頁。
能登原孝道「(10) 砥石」（『吉野ヶ里遺跡』佐賀県文化財調査報告書第163集、佐賀県教育委員会、2005年）77-80頁。
- 6) 渡辺亮志「砥石から見た弥生時代鉄器化への諸様相—比恵・那珂遺跡群出土資料より—」（『九州考古学』82、2007年）77-88頁。
- 7) 土屋みづほ「砥石からみた弥生時代の社会変化」（『遠古登攀 遠山昭登君追悼考古学論集』遠古登攀刊行会、2010年）401-423頁。
- 8) 村田、注3前掲、199頁。
- 9) 粒度は、1インチ（25.4mm）四方の枠を分割したふるいの目で表される。表記は#を用い、例えば#100は1インチ四方の枠を100分割したふるいの目を通過できる大きさの粒子径であることを示す。
- 10) 村田、注3前掲、199頁。
- 11) 研磨布紙に使用する研磨材の粒度は、従来、「研磨材の粒度（JIS R 6001：1987）」に依っていた。しかし、国際規格との対応から、1991年に「研磨布紙用研磨材の粒度（JIS R 6010）」が新たに制定された。従来のJIS規格を基準とした粒度は#で、1991年以降の研磨布紙用研磨材を基準とした粒度はPで表される。同じ番号でも#とPではPの方がやや粗く、その粒子径が均質である。
- 12) 財団法人日本規格協会『JISハンドブック 5 工具 2001』2001年、1086-1088頁。
- 13) 森 貴教「越後における弥生時代の鉄器化—砥石の分析から—」（『新潟考古』31、2020年）75-87頁。
小池義人ほか編『裏山遺跡』（新潟県埋蔵文化財調査報告書第96集、新潟県教育委員会・財団法人新潟県埋蔵文化財調査事業団、2000年）。
- 14) 長崎県対馬市豊玉町で現在まで、砥石の採石・加工をされている阿比留啓次氏に提供して頂いた。干潮時に豊玉町金木地区の海底から採石する青灰色泥岩製の極細粒の仕上砥であり、包丁や剃刀、日本刀など刃物の研磨に用いられる。

図版出典

図1～4・8・表1・2：筆者作成、図5・6：小池ほか、注13文献より改変引用、図7：筆者撮影。