

三角縁神獸鏡の組成と金属組織

…つばい おおつかやま椿井大塚山古墳出土の三角縁神獸鏡を中心に…

村上 隆

一．はじめに

三角縁神獸鏡は、古墳時代に出土する青銅製の鏡であり、外周を巡る縁の断面形状が三角形であること、鏡背の文様に神像や靈獸とみられる図像が配されていることからその名で呼ばれる。神獸図像の数や配置にさまざまなパターンがあり、また同じ文様を有する、いわゆる同型鏡も多数存在し、すでに四百面を超える鏡の出土をみている。日本考古学史上もつとも注目を浴びている遺物の一つといつてよいだろう。これまでも三角縁神獸鏡に関して、制作地や制作技術を巡る考察や、同型鏡が出土した古墳の分布などから鏡の所有者間の支配関係を論じるなど、提出された論考は多数にのぼるが、そのほとんどが考古学的見地に立つものである。一方、鏡そのものの材質や制作技術などについての論考は極めて少ないが、三角縁神獸鏡が基本的に銅とスズの合金、いわゆる青銅でできており、少量の鉛を含んでいることはすでに周知されている。本研究では、一九五三年京都府相楽郡山城町椿井大塚山古墳から出土した三角縁神獸

鏡に対して実施した金属学的調査研究を中心に、三角縁神獸鏡の組成と金属組織について考察し、今後三角縁神獸鏡を論じる上での基礎的知見を供することを目的としている。

二．研究の経緯

三角縁神獸鏡が極めて貴重な文化財であり、調査・研究に際しても現状の姿を大事にすることが前提であることは言うまでもない。すなわち、一般的には材質調査のためであってもサンプリングなど直接的な調査手法を用いることができず、まったく非破壊的な方法で迫ることが要求される。しかし、制作されてから長い年月を土の中で経た鏡などの金属製品の表面は厚いサビ層に変質してしまっており、表面からの蛍光X線分析などの非破壊的な分析方法だけでは正確な組成を把握することは難しいこと^{1,2,3)}も事実である。

本研究は、一九五三年に京都府相楽郡山城町椿井大塚山古墳から出土した三角縁神獸鏡に対して実施した組成分析と金属組織の調査の報告であるが、この研究に至った経過を述べておく必要がある。

一九五三年に出土した椿井大塚山古墳の三二面の鏡は、京都大学考古学研究室の梅原末治氏と樋口隆康氏が中心になって調査が行われた。その際に、鏡の化学分析の依頼を受けた名古屋大学の山崎一雄氏は、樋口氏から三二面の分析用資料の提供を受け、化学成分分析と鉛同位体比測定を実施した⁽⁴⁾。測定後に残った二四面の資料は山崎氏によって保管されていたが、二〇〇二年に山崎氏から村上に対して、改めて金属学的調査を実施するよう要請があり、資料を託された。金属学的調査を実施するには鏡の断面を研磨し分析用試料を作成する必要があるが、椿井大塚山古墳出土の三角縁神獸鏡は重要文化財に指定されていることもあり、文化庁、京都大学など関係各位の了解を得た上で、実際の調査を行うに至った。山崎氏から託された資料は、化学成分分析と鉛同位体比測定後に残った小断片であり、断面観察が可能と判断できたのは三角縁神獸鏡二二面分であった。二〇〇三年に、村上はまず三角縁神獸鏡五面に対して、資料内部の金属組織の光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察、電子線プロップ微小部分分析法 (EPMA) による元素カラーマップिंगと定性・定量分析を行うと共に、腐食状態についても検討を加えた⁽⁵⁾。その後、残りの資料の分析を実施し、二〇〇六年に椿井大塚山古墳出土三角縁神獸鏡二二面と共に、同様の分析を実施した滋賀県東近江市雪野山古墳出土の二面、兵庫県神戸市西求女塚古墳出土の四面を加えた、計二八面の三角縁神獸鏡の金属組織の比較検討も行った⁽⁸⁾。ただし、腐食のため、実際にデータ化できたのは二六面である。なお、同一の鏡で複数個の試料が作成できた場合もあり、また三角縁神獸鏡以外の鏡式の鏡に対しても同様の分析を行ったので、分析した全試料数は四一点となる。検討を加えた三角縁神獸鏡二八

面中には、文様を同じくする同型鏡が三古墳間で五組存在し、これらの同型鏡の金属組織の比較検討も含めてここに改めて報告する。

三、分析に供した三角縁神獸鏡

三角縁神獸鏡の形式と番号は、基本的に文献に従う(表1)が、本報では簡略化し、椿井大塚山古墳出土鏡二二面は、T3～T25(T12を除く)、雪野山古墳出土鏡二面は、Y3、Y4、西求女塚古墳出土鏡四面は、N2、N3、N8、N10と表示する。この内、同型鏡は、椿井大塚山古墳内で三組(西求女塚古墳出土鏡を含む)、雪野山古墳との間で一組、西求女塚古墳内で一組、計五組である。五組の関係を以下にまとめておく。

- ① (T3～Y4) … 三角縁唐草文帯並列式四神四獸鏡(挿図1)
② (T7・T8・N8) … 三角縁銘帯並列式四神四獸鏡(挿図2)

鏡番号	形 式
T1	長宜子孫内行花文鏡
T2	方格規矩四神鏡
T3	三角縁唐草文帯並列式四神四獸鏡
T4	三角縁銘帯並列式四神四獸鏡
T5	三角縁 同上
T6	三角縁 同上
T7	三角縁 同上
T8	三角縁銘帯並列式四神四獸鏡 (7と同型)
T9	三角縁櫛目文帯並列式四神四獸鏡
T10	三角縁 同上
T11	三角縁画文帯並列式五神四獸鏡
T12	三角縁獸帯並列式四神四獸鏡
T13	三角縁 同上
T14	三角縁 同上
T15	三角縁 同上
T16	三角縁獸帯交互式四神四獸鏡
T17	三角縁 同上
T18	三角縁鋸齒文帯交互式四神四獸鏡
T19	三角縁獸帯交互式三神三獸鏡
T20	三角縁銘帯並列式三神五獸鏡 (31と同型)
T21	三角縁 同上
T22	三角縁銘帯交互式五神四獸鏡
T23	三角縁銘帯四神二獸鏡
T24	三角縁獸帯二神二獸鏡
T25	三角縁獸帯同向式二神二獸鏡

表1 鏡の形式⁽¹⁰⁾(Tは、椿井大塚山古墳をさす)

- ③ [T9-T10]：三角縁櫛目文帯並列式四神四獣鏡（挿図3）
- ④ [T13-T14-T15]：三角縁獣帯並列式四神四獣鏡
- ⑤ [N3-N10]：三角縁獣帯並列式三神五獣鏡

四、分析方法

各資料は、鏡面と鏡背を同時に観察できるように樹脂埋め後研磨し、分析試料とした。光学顕微鏡による金属組織の観察に加えて、SEM観察、さらにはEPMAによる試料断面の元素カラーマップニングと定性・定量分析を行った。使用装置は、JEOL製EPMA (WDS) JMA8900。分析元素は、銅 (Cu)、スズ (Sn)、鉛 (Pb)、酸素 (O)、銀 (Ag)、ビスマス (Bi)、ヒ素 (As)、アンチモン (Sb)、イオウ (S)、

塩素 (Cl)、臭素 (Br) である。また、相同定に、マイクロフォークス X 線回折を行った。なお、試料すべての母相の金属相の Cu、Sn、Pb 主要三元素の平均値を、SEM に付帯する X 線分析 (SEM-EDX) による半定量分析によって求めた。用いた装置は、SEM 部：フィリップス製 Quanta200FEG、分析部：Oxford Inst. 製 INCA Energy⁺、加速電圧 15 kV にし、一定領域 [400 μm × 600 μm] (× 200 視野) における分析である。分析は、(株)コベルコ科研にて実施した。

五、三角縁神獣鏡の母相の金属組織と組成

これまでに行ってきた三角縁神獣鏡の断面観察から、表面に厚い腐食層が形成されていることがわかって^(36, 7)いる。

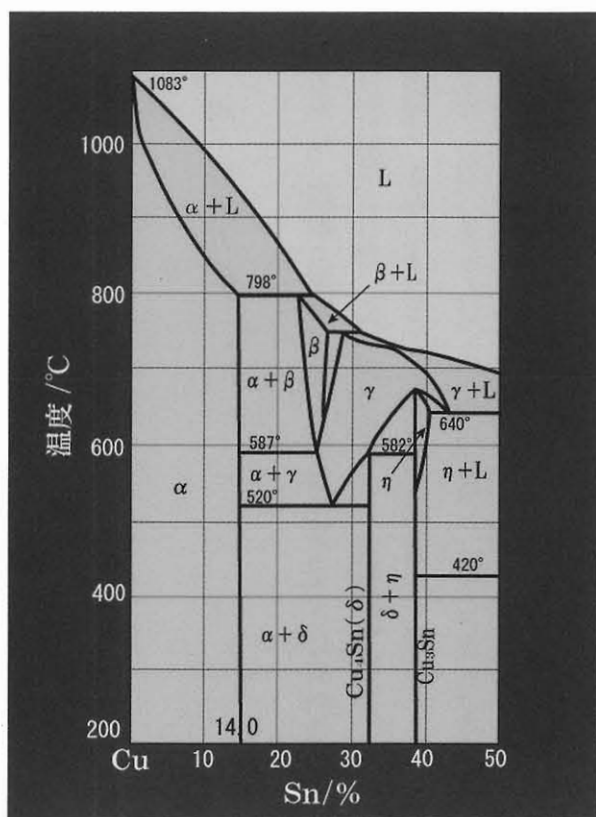
椿井大塚山古墳、雪野山古墳、西求女塚古墳のいずれの古墳から出土した三角縁神獣鏡もやはり厚い腐食層が形成されているものがほとんどであった。T8、T12と T21 は、作製した試料の中心部まで腐食が進行しており、詳細な分析を断念せざるを得なかった。一例として、図 2 に T21 の試料断面を示す。試料全体が完全に腐食層に変質しており、まったく金属質が遺存していないことがよくわかる。その他の二六試料は、いずれも表面からの腐食を認めるが、中心部には健全な金属組織を残した母相を残す。

図 5 に、一例として T3 試料断面の光学顕微

挿図 1 [T3-Y4]：三角縁唐草文帯並列式四神四獣鏡^(6), 9)

挿図 2 [T7-T8-N8]：三角縁銘帯並列式四神四獣鏡^(7), 9)

挿図 3 [T9-T10]：三角縁櫛目文帯並列式四神四獣鏡⁹⁾



挿図4 (銅-スズ) 二元系合金の実用状態図

鏡観察を示す。鏡の表裏ともに厚さ四〇〇 μm を越える厚い腐食層が形成されているのがわかる。図4は、図3の四角の囲い部分①の光学顕微鏡観察である。これが三角縁神獣鏡の母相の金属組織である。健全な母相部分では、平均酸素濃度が一%以下となり、制作当初の組成を遺存しているとみなしてよい。⁽³⁾ SEM観察を図7に示す。SEM-EDXにより、ポイント分析を行うと、①「黒い部分」は、ほとんどCuとSnであり、(Cu:Sn) = (九一・三九:八・六一) (at%)となる。これは、スズ一四・九六wt%にあたり、(銅-スズ)二元系の実用状態図⁽¹⁾(挿図4)(平衡状態図ではなく、鑄造作業に基づいて作成したもの)から、固溶限が十五%程度の α 相によく対応することがわかる。また、②「灰色状態ネットワーク」は、(Cu:Sn) = (八〇・六八:一九・三二) (at%)となり、マイクログフォカス

X線回折で得られた[Cu₃₁Sn]と対応する。また、これはSn:三〇・九〇wt%にあたり、 δ 相に相当すると考えられる。 α 相と δ 相の境界に島状に点在する白色粒状は、Pbを主としている。以上を総合して、三角縁神獣鏡の母相は鉛入り高スズ青銅 (high-tin bronze) に特有の α 相 (Cu + Sn (15%)) の固溶体と α 相と δ 相の共析組織を呈していることがわかる。また、鑄込み時のガス抜け不良で生じた鬆⁺(空隙) が所々認められる。

図6に、T14の健全な母相における元素カラーマッピングを示す。PbはCuには固溶せず、粒界に細かく分散した球状の単独相を形成し、Biは酸化物としてその核に存在することがわかった。また、Pb相にはOやS、Agを伴う。ここで、特に興味があるのは、Agである。古代の青銅中の銀が鉛に伴っていることは、鉛と銀の親和性を如実に示している。一方、Sbは、 δ 相中に存在し、Asは均一に分布している。今回の分析で、各元素の存在箇所を明らかにすることができたことは重要である。

次に、三角縁神獣鏡の健全な母相の一定領域 ([四〇〇 μm × 六〇〇 μm] (二〇〇倍視野)) に対するSEM-EDX半定量分析を行った。先でも述べたが、健全な母相が厚さ四〇〇 μm に及ぶ腐食層の下に存在する試料もあり、またこの腐食層が銅よりスズが高濃度になる傾向を持ち、さらに他の微量元素にも移動が生じることが認められている。⁽³⁾ 従って、得られた分析値の検証は十分慎重を要するが、本報における分析結果(表2参照)は、サンプリングの際に懸念される表面の腐食層の影響を最大限排除していることが特徴である。この母相部分での主要三元素、Cu、Sn、Pbの平均値は、Cu:七二・五、Sn:二三・〇、Pb:四・五 (wt%) (各元素の標準偏差:一・四%、

鏡番号	Cu	Sn	Pb
T 1	69.37	25.30	5.33
T 2	71.36	24.10	4.54
T 3	71.27	24.17	4.56
T 4	73.12	22.74	4.14
T 5	70.97	24.24	4.79
	70.60	24.53	4.87
T 6	71.22	24.53	4.25
T 7	72.55	22.90	4.55
	73.38	22.31	4.31
T 8	—	—	—
T 9	70.65	24.94	4.41
T10	72.78	21.96	5.26
	72.87	21.67	5.46
T11	72.29	21.64	6.07
T12	—	—	—
T13	72.77	22.94	4.29
T14	72.27	22.81	4.92
T15	71.03	23.80	5.17
T16	75.68	21.01	3.31
	74.57	22.05	3.38
T17	72.10	23.21	4.69
T18	75.32	20.55	4.13
T19	72.96	22.09	4.95
	73.64	21.55	4.81
T20	74.35	22.59	3.06
T21	—	—	—
T22	70.77	24.34	4.89
T23	74.45	21.37	4.18
	72.95	22.20	4.85
T24	71.73	21.20	7.07
T25	73.61	22.66	3.73

表2 椿大塚山古墳出土の鏡の主成分（銅（Cu）、スズ（Sn）、鉛（Pb））の分析結果（wt%）

一・四％、〇・九％）となった。これは、椿井大塚山古墳出土の二〇面（T1、T2、T8、T12、T21を除く）、雪野山古墳出土の二

二面、西求女塚古墳出土の四面、計二六面の三角縁神獸鏡から得た四一点の試料に対する平均値ではあるが、三角縁神獸鏡全体を考えると上でも目安になる値としてよからう。スズの含有量に注目すれば、二一・〇一～二五・八八％となる。因みに、同様の調査を行った静岡市午王堂山三号墳出土の三角縁神獸鏡のスズ含有量は二一・二一％であり、この範囲内に納まる。鏡の形式はそれぞれ異なるが、今回分析データを得た三角縁神獸鏡二六面はいずれも古いグループに相当し、この比較的安定した配合比には制作時の意図を秘めている可能性が高い。また、制作地や制作者、さらには制作技術を考える上でも重要な基礎的知見であり、この点については他の観点からの考察を含め、今後さらなる総合的な検証が必要とならう。

三角縁神獸鏡の金属組織の基本は α 相と δ 層であるが、組織単位

影響も考慮する必要がある、今後さらなる検証を重ねる必要がある。

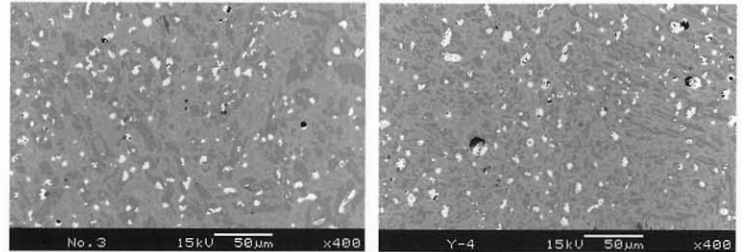
本報では、腐食については今後の課題とし、ここでは触れないが、三角縁神獸鏡の断面は、健全な母相と腐食層に大きく分かれ、さらに腐食層にも二層あることが認められる。この腐食現象に関しては、改めて詳細な検証を行いたいと考えている。

六、金属組織による三角縁神獸鏡の分類と同型鏡との相関

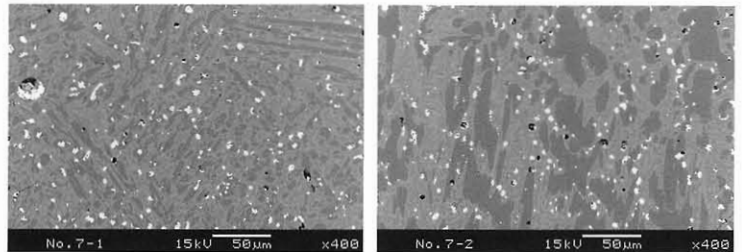
今回分析に供した三角縁神獸鏡の主要三元素の配合比は安定し、その金属組織の基本は α 相と δ 相で構成されることがわかった。しかし、金属組織の大きさに着目すると粗・密の二タイプが存在する。例えば、母相の主要三元素の組成がほぼ同様な値をとるT17とY3の組織を比べると、T17は、荒く大きな組織単位をとり、Y3は、細かく精緻な組織単位をとる。すなわち、平均組成が同じでも、金

位をとるのが、例えばT3、T7、T14の試料である。細かく精緻な組織単位をとるのが、T5、T15の試料となる。ただし、部分的に採取された小さな試料の金属組織が、鏡全体を代表するかという点は検討を要する問題である。この点については、同型鏡の金属組織の比較の際に、六で改めて論じるが、一枚の鏡の中でも薄いところは1mm以下、厚いところは2cmに近いというように、肉厚が極端に変化しており、これが冷却速度に影響を与え、金属組織に反映されるのは当然である。また、鋳型の材質の違いが冷却速度に与える

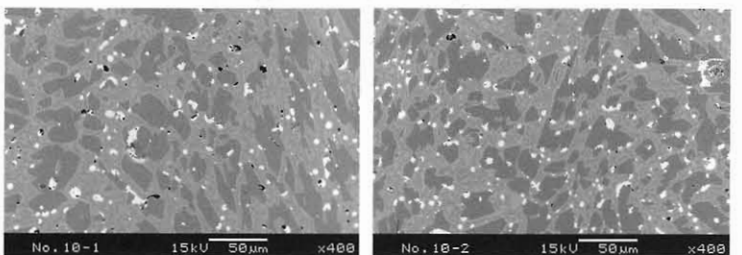
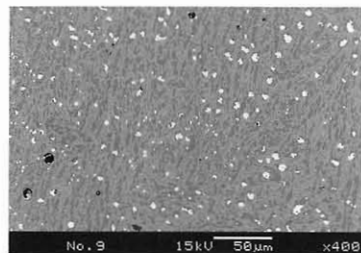
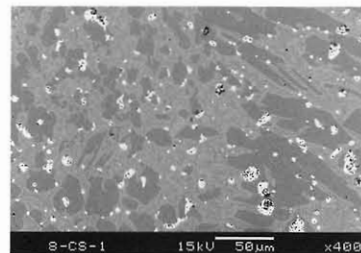
属組織の様子は大きく異なることを示す。まず、同型鏡である①〔T3-Y4〕の場合を見てみる。T3とY4は、それぞれ〔Cu:Sn:Pb〕Ⅱ（七一・二七、二四・一七、四・五六）、（七・一・六二、二三・四九、四・八六）（wt%）と組成は近いが、T3の組織は荒く、Y4



挿図5 同型鏡（樺井大塚山古墳出土T3鏡（左）と雪野山古墳出土Y4鏡（右））の金属組織



挿図6 同型鏡（樺井大塚山古墳出土T7鏡（上）と西求女塚古墳出土N8鏡（下））の金属組織



挿図7 同型鏡（樺井大塚山古墳出土T9鏡（上）とT10鏡（下））の金属組織

4はどちらかといえば細かい（挿図5）。また、②〔T7-T8-N8〕では、T8は残念ながらデータが取れなかったが、T7に対しては2個の試料T7-1、T7-2によって金属組織を観察できた。しかし、同じ鏡の中でも組成と金属組織も様相を異にし、同型鏡N8とはT7-2がよく似た組織を示した（挿図6）。③〔T9-T10〕は、金属組織の粗密の違いがよくわかる事例である。なお、T10も二個試料を得たが、こちらはほぼ同じ様相を呈したが、T9とは異なる（挿図7）。ここで、金属組織の粗・密の違いをわかりやすくするために、Ⅰ〔a相〕を赤、Ⅱ〔a相+δ相〕を青、Ⅲ〔Pb相〕を緑というように各領域を色分けして比較した事例を改め

て示す（図7-9）。

金属の凝固組織は、鑄込み時における熔湯の温度、金属凝固時の冷却速度、鑄型の材質などに左右されるものであり、同じ鏡でも全体が均一な組織を保障されるものではない。特に三角縁神獸鏡は、部分的に肉厚差が大きく、これが金属組織に大きな影響を与えていると考えられる。今回分析に供した三角縁神獸鏡二六面の金属組織観察でも、このことを再確認する結果となった。なお、今後、今回得た金属組織の詳細を改めて精査していく中で、制作技術の検証を行なえる可能性は十分あると考える。

七. まとめ

我が国の古代青銅器を代表する三角縁神獸鏡の組成と金属組織について、椿井大塚山古墳出土の三角縁神獸鏡を中心に概略をまとめた。今回分析した計二六面の三角縁神獸鏡の調査では、基本的に、二三%程度のスズと数%の鉛を含む銅合金、いわゆる高スズ青銅 (high-tin copper) であることを再確認する結果を得たことになる。古代にこれだけの精度で合目的にモノづくりをしていたことを明らかにできたことは重要である。しかし、組成はこの枠内に納まっても、それぞれの鏡は個性を持ち、簡単に画一的に扱えないことを金属組織が語っている。同一の鏡の中でもさまざまな要因によって金属組織は変化する。さらに長い年月の経過によって表面に形成された腐食層もまたそれぞれ置かれていた環境によって異なった様相を呈することになる。

古代の青銅鏡の制作技術に対する考察をこれまでも行ってきた。⁽¹²⁾ここで得られた基礎的知見をもとに改めて三角縁神獸鏡を精査する中で、さらにその核心に迫ることを考えている。また、青銅器の腐食メカニズムの考察は本報では扱わなかった。この点についても今後の課題としたい。

〈参考文献〉

- 1 村上 隆 「『科学の眼』でモノを見るために ―材料分析を中心に―」『金工技術』(日本の美術 No.四四三) 至文堂 (二〇〇三)
- 2 村上 隆 「青銅器の科学的研究における課題と展望」『考古学ジャーナル』四七〇(ニューサイエンス社)(二〇〇一)

- 3 村上 隆 「三角縁神獸鏡の材料科学的研究 ―静岡市午王堂山3号墳出土鏡を巡って―」『学叢』第32号 29～35頁 京都国立博物館(二〇一〇)
- 4 山崎一雄・室住正世・馬淵久夫・平尾良光「付論 椿井大塚山出土鏡の化学成分と鉛同位体比(改訂)」『昭和28年椿井大塚山古墳発掘報告』(一九九八)
- 5 村上 隆・山崎一雄「椿井大塚山古墳出土三角縁神獸鏡の金属学的キャラクターゼーション」『文化財保存修復学会第25回大会発表要旨集』(二〇〇三)
- 6 村上 隆・肥塚隆保・沢田正昭「雪野山古墳出土の青銅鏡に対する科学的調査研究」『雪野山古墳の研究』八日市市教育委員会(一九九六)
- 7 村上 隆 「西求女塚古墳から出土した青銅鏡に関する科学的研究」『西求女塚古墳』神戸市教育委員会(二〇〇四)
- 8 村上 隆・山崎一雄・樋口隆康「三角縁神獸鏡の金属学的研究: 椿井大塚山古墳出土鏡を中心に」『日本文化財科学会第 大会発表要旨集』(二〇〇六)
- 9 京都大学文学部考古学研究室編「椿井大塚山古墳と三角縁神獸鏡」(一九八九)
- 10 樋口隆康「三角縁神獸鏡綜鑑」(新潮社)(一九九二) 付編: 山崎一雄・室住正世・馬淵久夫「椿井大塚山出土鏡の化学成分と鉛同位体比」
- 11 日本金属学会「非鉄合金」(一九五四)
- 12 Ryu MURAKAMI, Masaki SAWADA, Paul JET, Tom CHASE "A Scientific Study of Identical Bronze Mirrors from Japan", "Scientific Research in the Field of Asian Art" 97-102 Archetype (London) (二〇一三)