

伝統技法によって製作された銅器の金属組織評価
Microstructure evaluation of copperware worked by traditional technique

中田隼矢^{1), *}, 山中ももこ²⁾, 大橋保隆³⁾

Toshiya NAKATA, Momoko YAMANAKA, Yasutaka OHASHI

1) 岐阜大学教育学部技術教育講座, 2) 岐阜大学教育学部技術教育講座 (卒業生), 3) 鍛起職人

※E-mail: tnakata@gifu-u.ac.jp

論文要旨

伝統的な金属加工法に関する理解を深めるため、鍛起銅器の特徴について金属工学的な分析を実施した。鍛起銅器と比較として評価したへら絞りによって成形された銅製タンブラーの金属組織は、未加工材よりも粗大化しており、鍛起材でより顕著だった。しかし、鍛起材の底面角部近傍では未加工材と同程度まで組織が微細化しており、結晶粒内に強いチャネリングコントラストが観察され、硬さも大きく上昇していた。

1. 背景

今日の我々の生活において、金属で作られた製品は欠かすことができない。その用途は、様々な機械や建築物、身近な生活用品などと極めて幅広い。これらの製品に金属を用いるためには、金属を様々な形状に加工する必要がある。中学校学習指導要領（技術編）¹⁾における「材料と加工」では、金属の加工方法に関する学習があげられている。しかし、金属は木材などと比べて硬質なため、加工には機械装置が必要となることが多く、現在の教育現場では実施しにくい題材である。一方で、同指導要領の中では“我が国の伝統的なものづくり”に関する学びの重要性も示されている。金属加工はものづくりの基盤技術であり、日本のものづくりを長年支えてきた。今日では、安定して大量生産するための機械化された加工が主となるが、人の手による伝統的なものづくりの技術も伝承されている。これによって製作された金属器の一つが鍛起銅器である。鍛起銅器は新潟県燕市で古くから続く伝統的な技法で製作された銅器であり、県及び国の無形文化財にも指定されている。この銅器は、木槌や金槌で木型や鉄棒に当てた銅板を繰返し叩くことによって、その形状を徐々に変化させるものであり、皿や鍋、薬缶などが製作されている。変形量が大きくなると加工に伴って蓄積したひず

みによる硬化（加工硬化）が生じるため、これを回復（軟化）させるために焼鈍しと呼ばれる熱処理が必要となる。銅板を複雑な形状に加工する場合は、ガスバーナーなどを用いた焼鈍しが必要となるが、加工に必要な道具は木槌や木型等の簡便なものである。そのため、中学校の教育現場でも実践しやすく、伝統的加工法を生徒自身の手で体験することができる。その一方で、鍛起銅器に限らず、伝統技法によって製作された金属器と工業的に大量生産された金属器の差異については、必ずしも整理されていない。これは、今日まで伝承されている伝統的金属加工法は、工芸品として扱われることが多いのも一因であろう。美術的な観点からその製法などが分析されることは多いが、“道具”として評価される例は少ない。職人の長きにわたる研鑽によって磨かれたその製法とそれによって実現される美術性を評価することも重要な価値観であるが、元来日常生活で使用される道具であったものについては、道具としての実用性を正しく評価し、日常生活で使い続けることも重要だと考える。そこで本研究では、鍛起銅器に加え、スピニング加工の一種であるへら絞りによって加工したタンブラーを対象に、加工方法の違いによって生じる銅器の差異を金属工学の観点、具体的にはその金属組織と硬さによって分析した。

2. 実験方法

純銅板をへら絞り及び鋤起加工によって成形した小型のタンブラーを分析対象とした。その写真を図 1 に示す。前述の通り、鋤起銅器は一枚の銅板を木槌などで叩くことで徐々に変形させ、目的の形状に成形する加工法であり、打ち出し加工の一種である。へら絞りはスピニング加工の一種であり、回転させた金属板にへらを押し当てることで同心円状に加工する。機械化もされているが、金属板にへらを押し当てる力を精密に制御する必要があり、人の手によって行われることもある。加工対象に人力でへらを押し当てる場合でも、自身の体重をへらに付与することで効率的に加工することができる。そのため、鋤起加工と比べて大きな変形を導入しやすく、加工工程で必要となる焼鈍しの回数を抑えることで、生産性を向上できる。具体的には、本研究で用いたタンブラーの製作においては、へら絞り加工では 3 回程度、鋤起加工では 10 回程度の焼鈍しが加工途中に施されている。これらのタンブラーを放電加工によって中心軸に沿って輪切りにし、そこから幅 1.5 mm 程度の帯状サンプルを切り出し、その中心側の断面を観察できるように熱硬化性樹脂内に埋め込んだ。輪切り後のサンプルと分析領域を図 2 に示す。このサンプルの表面を回転研磨機を用いてエメリー紙 120~2000 番によって機械研磨を施した後、ダイヤモンドペースト（粒径 3 μm ）とアルミナペースト（粒径 1 μm ）を用いて鏡面仕上げとした。その後、蒸留水にペルオキシニ硫酸アンモニウムを重量比で 10% 加えた混合液によって化学腐食をするか、またはコロイダルシリカによる琢磨によって金属組織を現出させた。化学腐食仕上げのサンプルは光学顕微鏡、コロイダルシリカ仕上げのサンプルは走査型電子顕微鏡（日立ハイテクフィールドイニング製 S-3000N）の反射電子検出器を用いて組織観察を行った。また、ビッカース硬さ試験によって断面の硬さを測定し、その強度を評価した。未加工材や加工材の側面は押し込み荷重 9.8 N で試験を実施し、加工材の角部近傍では押し込み荷重 2.94 N で硬さ試験を実施した。



図 1 純銅製タンブラー 左：鋤起加工，右：へら絞り加工

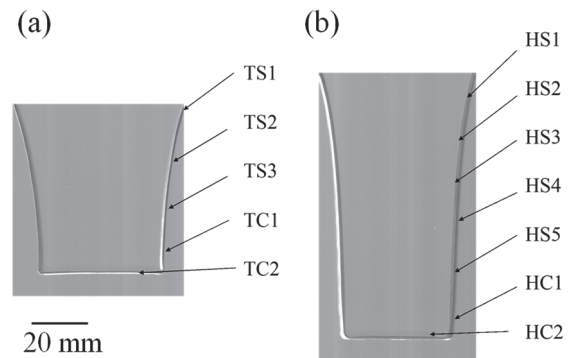


図 2 放電加工後のタンブラーの断面と分析位置 (a) 鋤起加工, (b) へら絞り加工

3. 結果

純銅の未加工材（受け取りまま材）と、へら絞り及び鋤起加工で製作したタンブラー側面の光学顕微鏡による組織観察結果を図 3 に示す。受け取りまま材は、粗大結晶粒と微細結晶粒が混ざった混粒組織を呈している。これは製造工程中の熱処理や圧延処理によって形成された加工組織だと思われる。一方で、両加工材の組織は粗大化が進んでおり、へら絞り材と比べて鋤起材の組織がやや粗大だった。また、へら絞り材の側面（HS-1~5）よりも角部近傍（HC-1, HC-2）の組織がやや粗大だった。鋤起材の角部近傍（TC-1, TC-2）では化学腐食によって金属組織が現出せず、光学顕微鏡によって観察することができなかった。そこで、サンプルの表面仕上げをコロイダルシリカによる琢磨とし、走査型電子顕微鏡の反射電子検出器を用いて金属組織を観察し

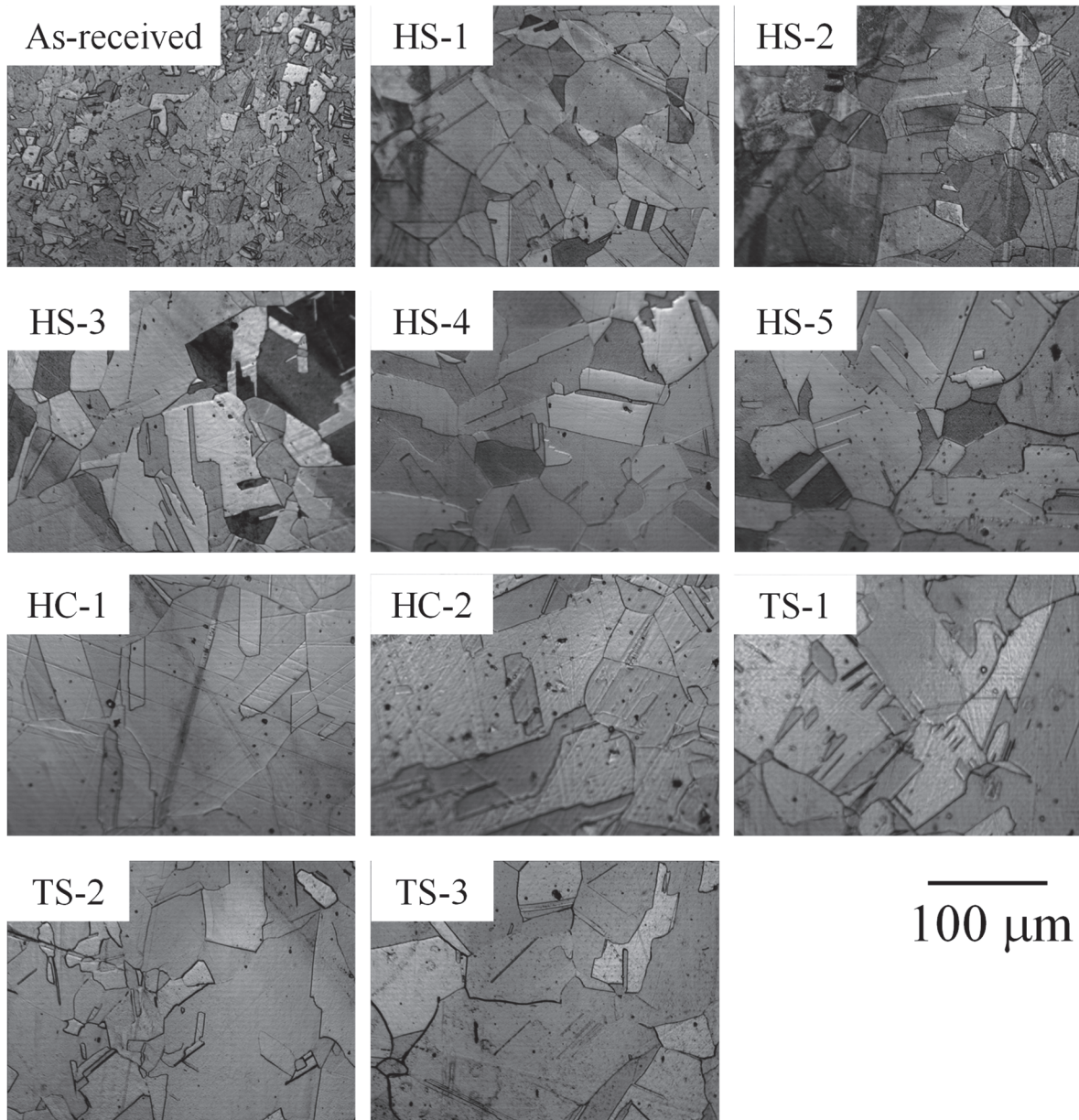
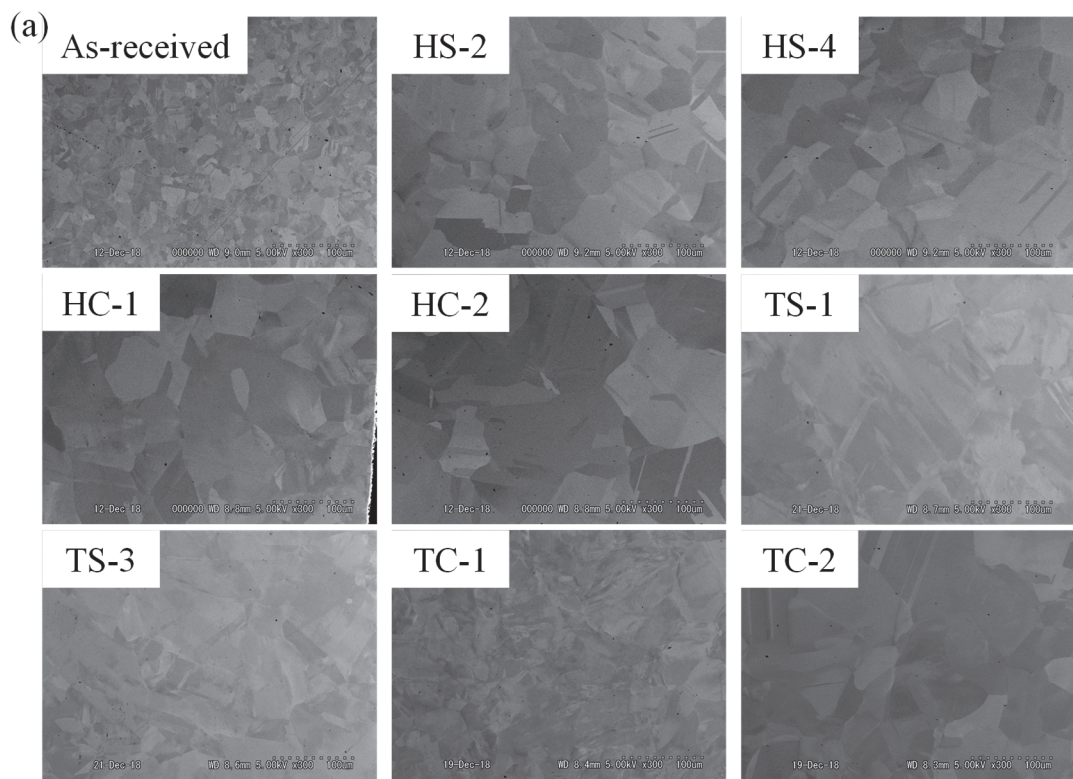


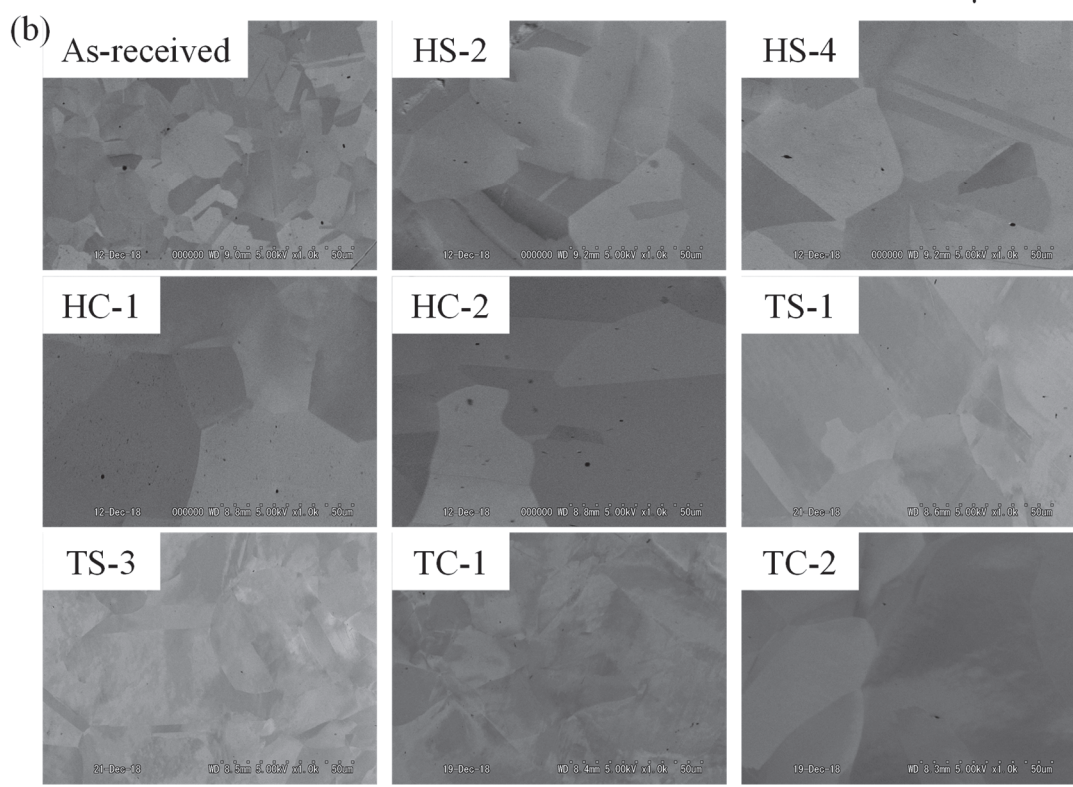
図3 光学顕微鏡によって観察したへら絞り及び鋤起加工製純銅タンブラーの組織写真

た。低倍と高倍の観察結果を図4に示す。受け取りまま材や加工材側面の組織の大小関係は光学顕微鏡観察結果と同様の傾向だった。鋤起加工材の金属組織は部位によって大きく変化しており、側面の組織は光学顕微鏡観察の時と同様にポリゴナルな形状を呈しているものの、結晶粒内には僅かにコントラスト差が確認された。光学顕微鏡で観察することができなかった角部近傍(TC-1, TC-2)の金属組織はポリゴナル形状を呈しているが、TC-1の形状はやや歪んでおり、強い加工が導入されたことを示唆している。ま

た、鋤起材の結晶粒内部に複雑なコントラスト差が生じており、特にTS-3とTC-1の結晶粒内で顕著だった。TC-1の結晶粒サイズは受け取りまま材と同程度の微細結晶粒だった。ビッカース硬度試験の結果、受け取りまま材とへら絞り材の全域及び、鋤起材の側面の硬さは約HV70前後となり、有意な差はなかった。一方で、鋤起材のTC-1及びTC-2では、ややバラツキがあるもののHV80~90程度を示し、局所的にはHV100を超える場合もあった。



100 μm



25 μm

図4 走査型電子顕微鏡の反射電子検出器によって観察したへら絞り及び鋤起加工製純銅タンブ

4. 考察

走査型電子顕微鏡の反射電子検出器は、電子銃から照射された電子線がサンプル表層近傍で反射した電子を検出し結像する。この反射電子の発生量は試料の組成（原子番号）や結晶の向きに依存するため、組成や結晶方位が異なると観察像にはコントラスト差が生じる。本供試材は純銅となっているため材料内の組成は均一であり、組成差に起因するコントラスト差は生じない。したがって、本観察で確認された結晶粒内のコントラスト差は、結晶方位差に起因するチャネリングコントラスト²⁾だと考えられる。鋸起材の加工工程を考えると、加工量が最も大きくなるのは角部となるが、一度の加工で大きな変形を導入できないため、加工と焼鈍しを繰り返すことになる。金属は大きな加工（塑性変形）によって原子配列の乱れ（転位などの格子欠陥）が高密度に蓄積し、これが加工硬化の要因となる。転位密度が上昇した状態で原子の拡散が生じる程度まで加熱することで回復が生じ、さらに加熱を続けると転位密度の高い領域が新たな結晶の境界となる再結晶が生じる。この現象は結晶粒内で生じることから、再結晶が生じることで結晶粒内が分割され、結晶粒が細分化される。従って、鋸起加工の角部で結晶粒の微細化が生じていたのは、加工と焼鈍しの繰り返しの再結晶が生じ、結晶粒の微細化が進んだためと思われる。さらに、TC-Iでは強いチャネリングコントラストが観察されたことから、加工の影響が強く残存しており、これが硬さの上昇をもたらしたと考えられる。鋸起銅器の側面部においては、加工量が少ないにもかかわらず加熱が繰り返されたため、結晶粒が成長し粗大化が進んだと思われる。また、硬さ試験の結果だけでは断定できないが、鋸起加工材の角部近傍では再結晶による組織の微細化が生じており、この組織の微細化も強度上昇に寄与した可能性も考えられる。したがって、加工と焼鈍しを繰り返すことで製作する鋸起銅器では、その加工手順によっては部材の強度を向上できる可能性が示された。タンブラーや鍋などは、テーブルやガスコンロ

と接触する底面やその角部で摩耗が生じやすく、これが製品の耐久性に影響する。本研究で用いた鋸起銅器のように、最適な加工手順で金属を丹念に鍛え上げることで、製品の耐久性を向上できる可能性が示唆された。

5. 結言

本研究では、代表的な金属加工法であるへら絞りと伝統的金属加工法である鋸起加工で製作された純銅製タンブラーを対象に、加工法の違いによって金属工学的にどのような差異が生じるかを顕微鏡による組織観察と硬さ試験によって評価した。得られた知見を以下に示す。

1. 銅器の側面の結晶粒は加工前と比べて結晶粒が粗大化し、鋸起銅器でその傾向がやや強かった。これは加工過程で施す焼鈍しに起因し、鋸起銅器は焼鈍し回数が多いため結晶粒の粗大化が進行したと推定される。
2. 鋸起銅器の底面角部では組織が微細化していた。これは、成形過程で加工と焼鈍しが繰り返されることで再結晶が生じたためと推定される。
3. 鋸起銅器の底面角部ではビッカース硬さが上昇していた。走査型電子顕微鏡による反射電子像観察の結果、硬さが上昇していた部位では結晶粒内に強いチャネリングコントラストが生じており、加工の影響が強く残留していることが示唆された。

謝辞

本研究で実施した走査型電子顕微鏡観察は岐阜大学科学研究基盤センター 機器分析分野、放電加工は岐阜大学工学部機械工場にて実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 文部科学省：中学校学習指導要領解説 技術・家庭編（2017）
- 2) 杉山昌章，重里元一：転位組織解析のためのSEM-ECCI法の応用，顕微鏡，48巻，3号，pp. 216-220（2013）