

## 【佳作】

# 銅合金による木目金の接合条件に関する科学的検討

藤原奈生

岐阜大学工学部化学・生命工学科3年

## 要旨

銅合金による木目金の製作のため、その接合条件について科学的に分析した。この結果、表面を研磨して圧力をかけた地金が、加熱温度 900 °C、5 時間の加熱保持で接合した。しかし、状態図や拡散速度、および実体顕微鏡や走査型電子顕微鏡による観察によって他の条件でも接合できる可能性が示唆された。

## 1. 背景

木目金は、色の異なる金属を幾重にも重ね合わせて接合し、その表面を彫り、更に鍛造を繰り返すことで、木目に似た模様を作り出す日本独自の金属工芸のことであり、鑲木目や板目金とも呼ばれる<sup>[1][2]</sup>。その特徴は、地金を作る際に拡散接合を用いることであり、拡散接合は固相接合の一種である。その接合原理は、表面を平滑にした金属板を原子の拡散を利用して接合する方法となり<sup>[3]</sup>、現在でも宇宙・航空機工業、加速器などの先端分野や、一般工業品の接合に利用されている<sup>[1]</sup>。

木目金は、江戸時代の初期、刀装具の職人であった正阿弥伝兵衛が俱利彫りを考案したことに始まると言われている<sup>[3]</sup>。「俱利彫り」とは、色の異なる金属を幾重にも重ね合わせたものに唐草や渦巻きの文様を彫ったものであり、中国で宋から明の時代に作られた「屈輪」が起源であるという説がある。「屈輪」は、室町時代に日本に輸入された、色漆を何層にも塗り重ねて蕨型の曲線を彫り入れる技法である<sup>[3]</sup>。正阿弥伝兵衛によって考案された木目金の技術は、江戸時代中期に俱利彫りの得手として活躍した高橋興次によって完成された。江戸時代は世情が安定し、刀剣は武器としての用途から、装飾としての用途へ変化し、自己のアイデンティティを表現するものとなっていた。このような時代背景の中で、俱利彫りや木目金は刀や刀装具の装剣金工の技術として発明・使用された。また、矢立や煙管などの実用品に使用されるなど、民衆文化にも浸透していった<sup>[3][4]</sup>。

しかし、明治時代になり廃刀令が公布され武器としての刀製作が禁止されると、刀工たちは廃業に追い込まれ、木目金の伝承も途絶えたとされる<sup>[3]</sup>。しかし、人々の努力によって再び技術がよみがえり、近年では日本のみならず海外でも「MOKUMEGANE」と呼ばれ、愛好家も多い。実際にInstagramで調べてみると、「木目金」の投稿数は 5000 件以上あり、さらに「mokumegane」の投稿数は 5.3 万件もあった(2022年1月22日現在)。ただ、国内の木目金に関する文献には、制作方法の概要は示されているものの、具体的な接合条件の記載は極めて幅広く、それゆえに金属加工に関する知識が十分になれば、接合条件を特定し実践することは難しいと思われる。そこ

で具体的な条件が分かれば、道具は揃っているが金属加工に関する知識が十分でないという素人でも挑戦しやすくなると考え、木目金の接合条件を具体的にするために科学的観点から調査した。

## 2. 実験方法

木目金の製法は、①地金準備、②地金研磨、③地金積層、④治具固定、⑤加熱、⑥鍛造加工(圧延など)、⑦文様切削、⑧彫り・鍛造加工の繰り返し、⑨成形の9つの段階がある。今回は接合条件の検討をするため、⑥までの工程を行った。

使用した金属は安価で入手しやすい銅、黄銅、青銅、白銅の板材となり、切断機を用いて約12 mm×15 mmに切断した。表面の酸化被膜や傷を除くため、卓上試料研磨機を用いてエメリー紙 #1200で湿式研磨した(図2)。湿式研磨後は金属板表面に酸化被膜が形成されるのを防ぐため、直ちにエタノールの中に入れて、超音波洗浄器で約5分間洗浄した。そして、接合する直前にエタノールから金属板を取り出し、速やかに積層し接合した。積層順は各金属板がそれ以外の金属板と必ず接するように、

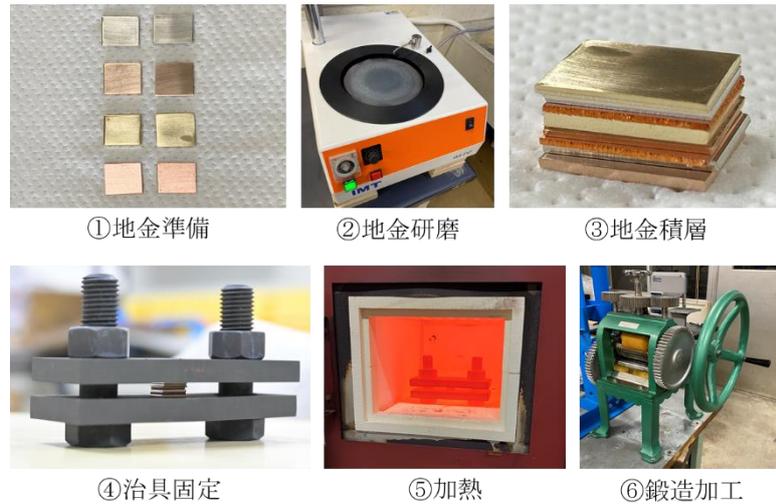


図1 木目金の製法

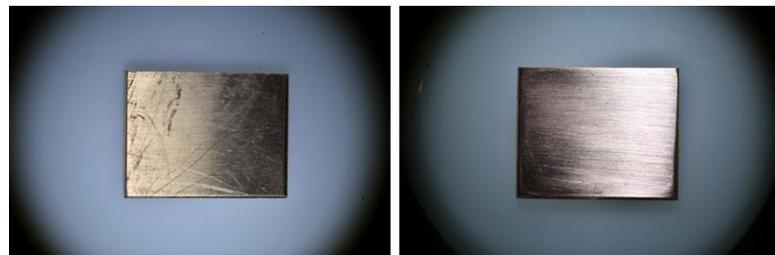


図2 研磨前(左)と研磨後(右)の表面

図1-③に示すように青銅、白銅、銅、青銅、黄銅、銅、白銅、黄銅とした。積層した金属板を治具の中央に置き、ボルトで固定した。治具は耐熱性に優れたステンレス(SUS310S)製である(図1-④)。その後、積層した金属板を密着させるため、油圧プレスで治具に3 US t(約2720 kg、約148 MPa)の圧力を加えボルトとナットを増し締めした。あらかじめ実験温度まで昇温した電気炉に所定の時間入れた。実験温度は850℃、900℃、930℃の3条件とし、加熱時間は2及び5時間とした。実験温度を上記のように設定したのは、市販されているホビー用の安価な電気炉の最大温度である900℃を基準として、接合条件に強く影響する拡散速度を変化させるためである。なお、今回使用した金属の中で青銅の融点が約1050℃と最も低く、この温度を十分に下回る930℃とした。加熱後は電気炉の電源を切り炉冷した。冷却後のサンプルはバンドソーで酸化が生じている端を切り落とし、その後圧延ローラーで延ばした。金属は加工に伴い硬化し壊れやすくなるためガ

スパーナーを用いて加熱することで焼鈍を施し、金属を軟化させた。接合の可否の判断は、元の厚さから50%薄くすることが可能であるかで判断した。また、拡散接合による接合状態を観察するため、実体顕微鏡(Nikon製SMZ745)と走査型電子顕微鏡(SEM, 日立ハイテクフィールドイニング製S-3000N)を用いて、接合界面の観察を行った。SEM観察用のサンプルの観察面は、回転研磨機を用いてエメリー紙#120~800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9mm, 3mm)とアルミナペースト(粒径1mm)を用いて鏡面仕上げとした。

### 3. 結果

金属板の表面をエメリー紙#1200で湿式研磨したサンプルを接合した結果を表1に示す。○が接合可、×が接合不可を示し、接合不可の場合は剥離した面も合わせて示す。900℃、5時間の加熱条件では接合できたが、それ以外の条件では接合できなかった。接合不可の条件では、圧延過程で剥離が生じた。930℃の条件では、図3に示すように黄銅の層が白く浮き出していた。このサンプル内部の断面を実体顕微鏡によって観察すると、図4に示すように青銅と黄銅の層に微小な穴が開いているのを確認した。

表1 実験結果および剥離した面

加熱時間 [時間]	2	5
850℃	×(青銅/銅)	×(黄銅/青銅、青銅/銅)
900℃	×(白銅/銅)	○
930℃	×(層の溶出)	



図3 930℃、2時間で接合したサンプルを側面から観察



図4 実体顕微鏡で観察した断面

次に、電気炉内で加熱中の治具を取り出し、プレス機で再加圧を施し、再度加熱した結果を表2に示す。○が接合可、×が接合不可を示している。この場合も900℃、5時間の加熱条件のみ接合でき、加熱中に再加圧を行うことで加熱時間の短縮や加熱温度を低下させる効果は、今回の実験条件では確認できなかった。930℃の条件では図5に示すように金属板が外部に押し出されたと思われる状態が確認できた。このサンプルの断面を実体顕微鏡で観察すると、図6のように青銅の層に穴が開いていることを確認した。

表 2 実験結果および剥離した面

加熱時間 [時間]	2	5
850 °C		×(青銅/銅)
900 °C	×(青銅/銅)	○
930 °C	×(層の溶出)	



図 5 930 °C、2 時間で接合したサンプルを側面から観察

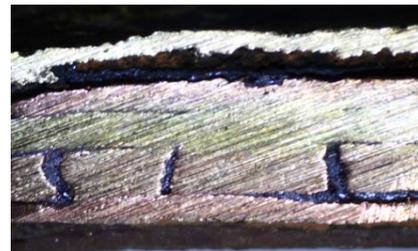


図 6 実態顕微鏡で観察した断面

次に、接合できた加熱温度 900 °C、5 時間の条件に対して、酸化皮膜や表面状態の影響を評価するために金属板をエメリー紙で研磨しなかった条件、さらに油圧プレスで加圧をせずに治具に固定した条件で接合した。その結果、どちらの条件でも圧延過程で剥離し、拡散接合には酸化被膜の影響と加圧による影響があると考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 硬度と剥離面についての考察

圧延中に剥離が生じた面は接合条件に依存せず、おおむね青銅/銅、白銅/銅、青銅/黄銅間で生じていた。そこで、セミビッカース硬度計を使って各金属のビッカース硬さを 3 回計測し、その平均値を算出した。その結果を表 3 に示す。剥がれやすかった面の硬度の差が大きいことが分かる。接合する金属板の硬度差が広がると圧延時の変形のし易さが大きく変わるため、剥がれやすくなったと考えられる。

表 3 各金属の硬度

	1 [HV]	2 [HV]	3 [HV]	平均 [HV]
銅	83.4	82.4	83.7	83.2
黄銅	99.1	98.6	101	99.6
青銅	219	211	215	215
白銅	150	148	154	151

### 4.2 拡散速度による考察について

木目金は拡散接合によって各金属が層状に接合されており、この接合のためには互いの原子が十分に拡散し合う必要がある。本実験で用いた金属は純銅及び僅かに異種金属が混ざった銅合金であることから、銅の拡散速度が接合の可否に強く影響すると思われる。図 7 に示す Choi による報告では、銅の自己拡散速度は 850 °C で約  $6 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/sec、900 °C では約  $2 \times 10^{-5}$

cm<sup>2</sup>/sec としている<sup>[6]</sup>。従って、本実験の加熱時間で生じる拡散は、850 °Cで 0.108 cm<sup>2</sup>、900 °Cで 0.36 cm<sup>2</sup>となる。おそらく、十分な強度で接合するための拡散の閾値は 0.108 cm<sup>2</sup> から 0.36 cm<sup>2</sup>の間にあり、その条件を満たした900 °Cで 5 時間の加熱条件で接合できたものと思われる。

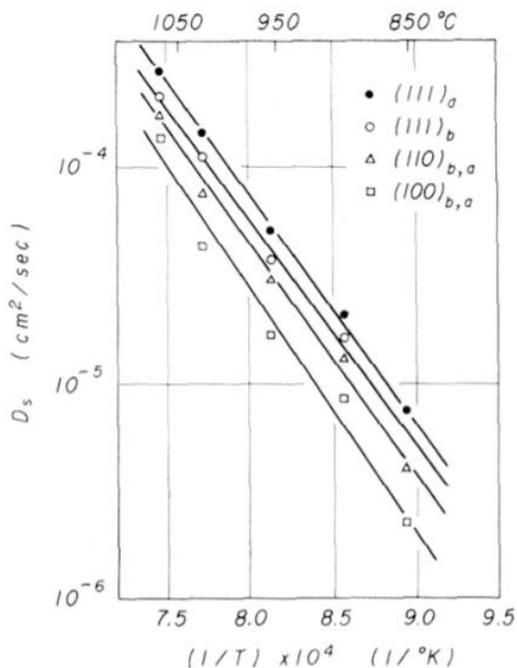


図 7 Cu の表面自己拡散係数の温度依存性 (Choi と Shewmon による<sup>[6]</sup>)

### 4.3 熱平衡状態図による考察

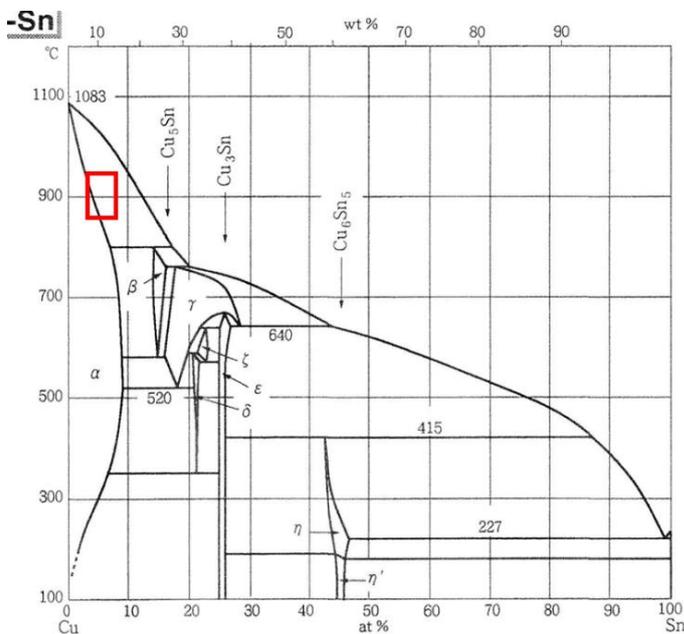


図 8 Cu-Sn の状態図 (長崎誠三と平林真による)<sup>[7]</sup>

加熱したサンプルを切断し、青銅と黄銅の層を実体顕微鏡で観察すると、930 °Cで 2 時間加熱した場合、青銅が事前調査で調べた融点に達していないにもかかわらず図 3 や図 5 のように溶出していた。そこで、銅と錫の二元系熱平衡状態図を調べた。長崎等による状態図を一部改変したものを図 8<sup>[7]</sup>を示す。単体の金属は温度が一定ならば単相となり、固体(固相 S)と液体(液相 L)が混在して存在することはない。しかし、異なる金属が混ざった合金では、複数の相が共存する場合がある。熱平衡状態図は合金元素の割合と種々の温度条件における相の状態を示したものである。本

実験で用いた青銅の Sn 濃度が約 5 % のリン青銅となり、状態図から確認できる液相のみとなる温度(融点)は約 1077 °C となり、事前に調べていた一般的な青銅の融点とほぼ同じだった。一方で、本実験で用いた 5 % Sn のリン青銅は 930 °C において固相( $\alpha$ , FCC 構造)と液相(L)が混在している領域であることがわかった(図 7 の赤い四角の部分)。そのため、本実験で用いた 930 °C 下の青銅は、当初見込んだとおり完全な溶融には至っていないものの、一部が溶融し液相と固相が混在した状態となっていたと思われる。よって加熱温度 930 °C、2 時間の加熱において、加熱中に再加圧した際に層が溶出してしまったのは、加熱に伴い青銅の液相化した部分が流れ出し、大きな欠陥が形成されたと考えられる。黄銅についても青銅と同様の傾向が見られた。

#### 4.4 走査型電子顕微鏡による接合界面の観察

接合状態を詳細に分析するため、SEM で接合材の断面を観察した。拡散接合できなかった 850 °C、5 時間の結果を図 9、拡散接合できた 900 °C、5 時間の断面を図 10 に示す。850 °C、5 時間の試料では、接合していない部分(図 9-A、B)がある一方で、金属板の組み合わせによっては接合している部分もあった(図 9-C)。そのため、850 °C、5 時間の条件で接合できない組み合わせを除けば、この条件でも接合は可能であると思われる。また 900 °C、5 時間の試料では、内側よりも端の方は界面が明確であった。積層した金属板の端は圧力がかかりにくく、高温の大気に曝されることから酸化しやすく、接合不良が生じやすいと思われる。そのため、接合不良を起こしている端を切断してから加工すれば、しっかりした木目金がつくことができると考えられる。

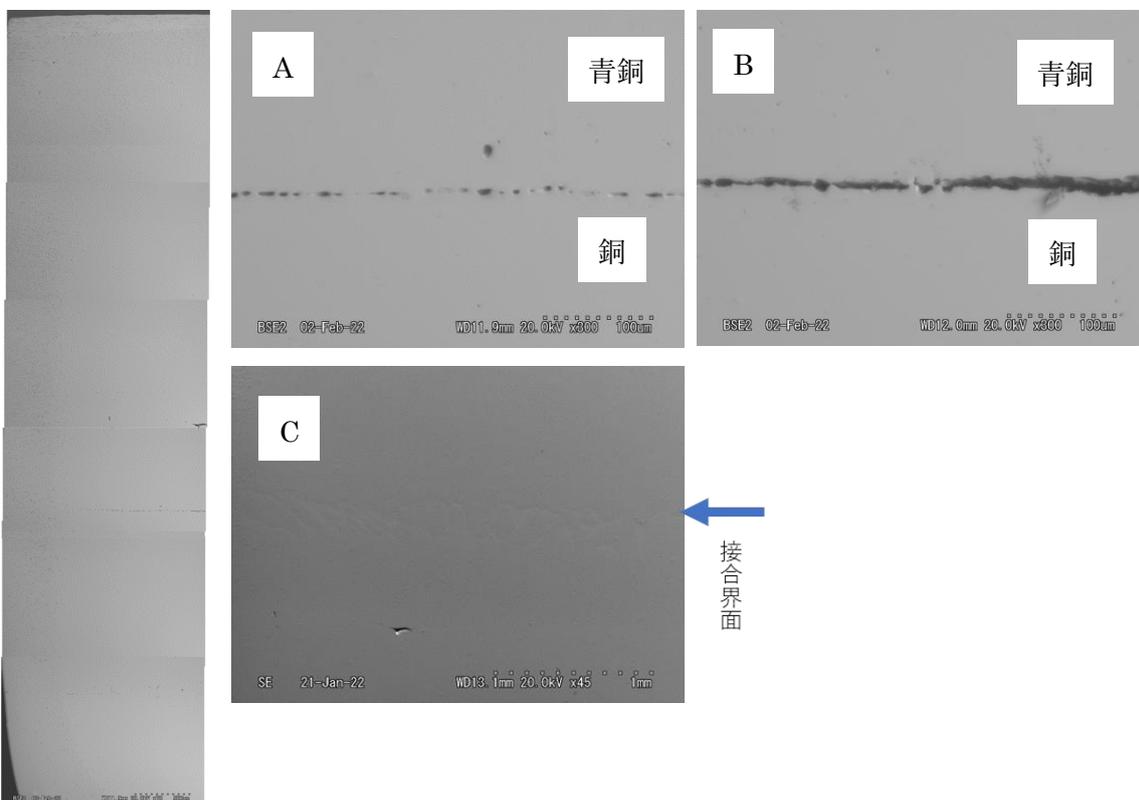


図 9 走査型電子顕微鏡で観察した 850 °C、5 時間の断面(右 1 枚)及び界面の拡大写真(A、B、C)

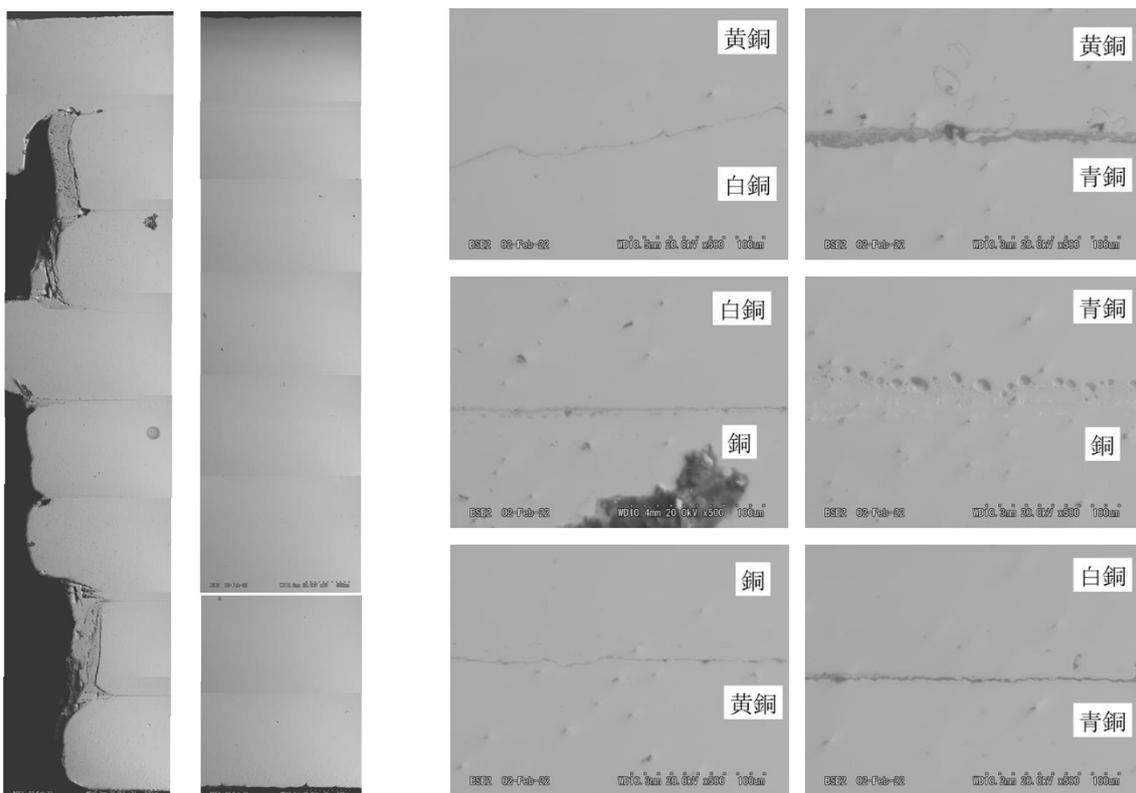


図 10 走査型電子顕微鏡で観察した 900 °C、5 時間の断面(左 2 枚)及び接合界面(端側)の拡大写真(右 6 枚)

## 結言

本研究では、銅合金の拡散接合による接合条件を、温度、圧力、加熱中の再加圧や表面の状態、状態図、または実体顕微鏡や走査型電子顕微鏡による断面の観察により検討した。その結果、表面の研磨や治具を固定する際に加圧しながら行わないと接合ができないことが明らかになった。また、本実験では 900 °C の加熱温度で 5 時間の加熱保持により、青銅、黄銅、白銅、銅すべてが接合できることが分かった。ただ、接合が出来なかった条件であっても実体顕微鏡や走査型電子顕微鏡による断面の観察により接合できている金属の組み合わせも確認できた。そのため、接合できなかった金属の組み合わせを除けば、接合できる可能性が示唆された。

## 謝意

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にて実施した。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 川井健太 石黒農 平井柚輝 野田尚人、「学生による木目金伝統工芸の再現」、日本高専学会誌 第 18 巻 第 4 号(2013)、pp.45-50
- [2] 伊藤廣利、「素材の云い分 —木目金制作を通して—」、美術研究教育研究会会誌『美術研究教

- 育』 No.1(1995)、pp.37-44
- [3] 「温故知新で未来につなぐ木目金」、日本金属学会会報『まてりあ』 第 58 巻 第 8 号(2019)、pp.421-424
- [4] 高橋正樹、「木目金ジュエリーによる装飾表現の可能性－KIZUNA 絆 JEWELRY－」、東京藝術大学大学院美術研究科博士論文(2012)
- [5] 高橋正樹 日本木目金研究所、「木目金の教科書」、東京美術(2014)
- [6] Choi, J Y, and Shewmon, P G. *EFFECT OF ORIENTATION OF THE SURFACE SELF-DIFFUSION OF COPPER*. (1961)
- [7] 長崎誠三 平林眞、「二元合金状態図集」、株式会社アグネ技術センター (2001)、p.140