

高強度・高電気伝導性を有する 放電加工用電極材料の開発

立命館大学 理工学部 機械工学科
教授 藤原 弘

2025年10月9日

放電加工の仕組みとその電極材料

放電加工の仕組み

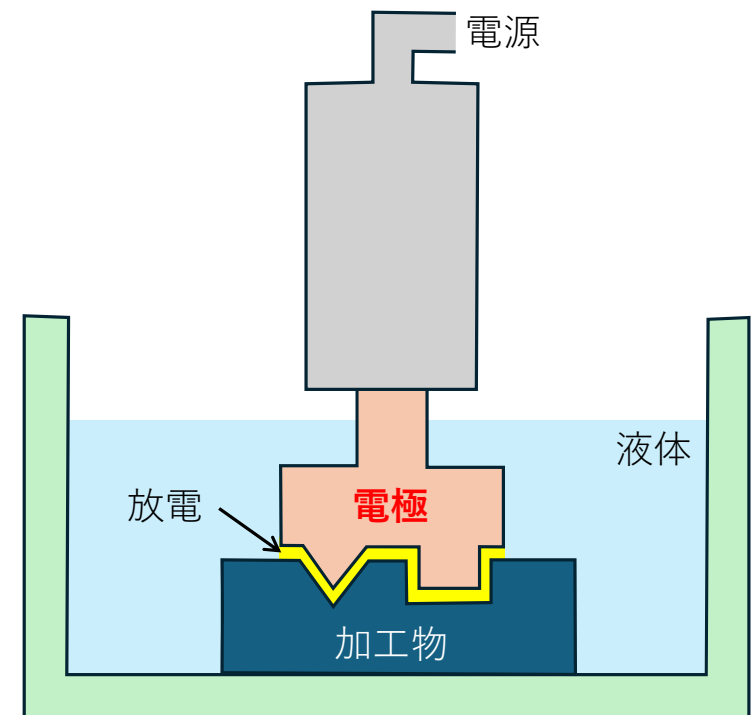
- 電極と加工物の間で放電を起こし、その熱で材料を溶かして削る加工法。
- 硬い材料や複雑形状も精密に加工できる。

電極材料の重要性

- 放電を安定して起こすためには、電極の性能が重要。
- 必要な特性：熱伝導率・導電率の高さ、耐熱性・耐摩耗性、など

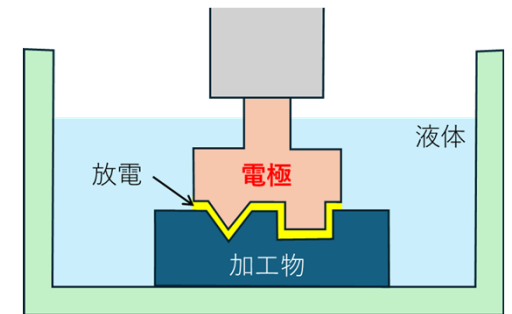
代表的な電極材料

- 銅（精密加工向け）
- グラファイト（粗加工向け）
- **銅タングステン**（高精度・高耐久向け）



従来技術とその問題点

放電加工の電極材には、高い加工速度と低消耗性が求められる。一般に、熱伝導率と融点の積が大きいほどこれらの特性に優れており、**銅タングステン**が代表的な材料として用いられている。銅タングステンの製造には溶浸法が使われるが、製法上の制限により銅とタングステンの比率は7：3に固定され、**熱伝導性**や**力学特性**を柔軟に調整することが難しいという課題がある。



新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術では課題となっていた**銅とタングステンの比率制御**に成功した。
- 従来は銅およびタングステンの添加量に制約があったが、本技術ではその比率を自在に調整できるため、**導電率は最大37%、硬度は最大85%向上**し、材料特性を大幅に高性能化できる。
- これにより、熱伝導率の向上および低摩耗性の実現が期待でき、高効率な放電加工用電極材料の開発が可能となる。

想定される用途

- 本技術により作製された銅タングステンは、放電加工における加工性および耐久性の大幅な向上が期待できる。
- さらに、得られた高い熱伝導率を活かすことで、**放熱基板材料**への応用展開も可能である。

放電加工

機械的エネルギーを利用せず、放電による熱で工作物を溶かし、電極形状を転写する加工方法

放電加工用電極に必要とされる特性

高熱伝導率

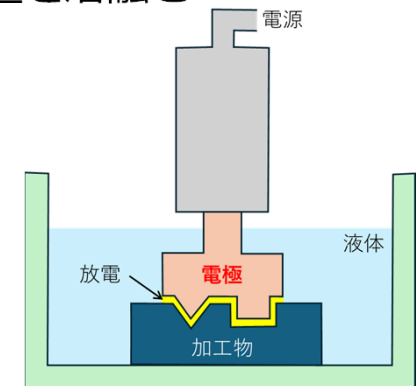
与えられた熱を素早く拡散し、電極の表面温度を低く保つ

高融点

放電時の熱で電極を溶融させない

高強度

微細・複雑形状の高精度加工では剛性が必要



→放電加工用電極には**高熱伝導率**の**Cu**と**高融点・高強度**の**W**を用いた**Cu-W**が広く用いられている

従来材と新規開発材の構造の違い

従来材



銅の中にタングステン粒子が分散

新規開発材



タングステンの中に銅粒子が分散

複合調和組織 (Harmonic Structure)

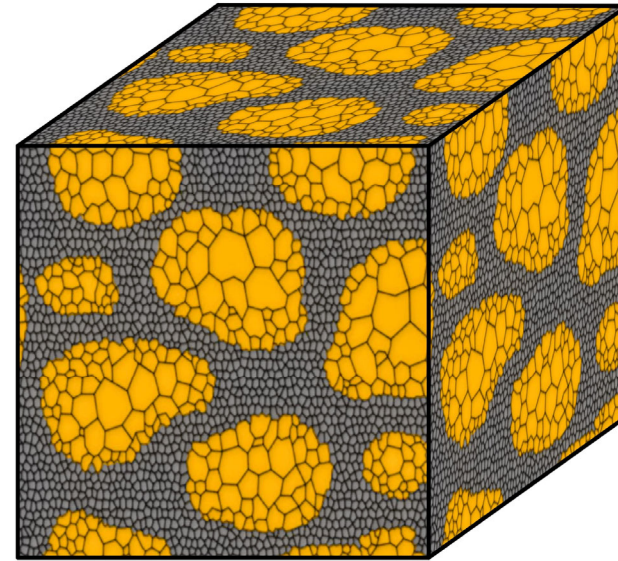
異なる金属材料による調和組織

粗大結晶粒領域 → 島状に分散

Cu : 高熱伝導率

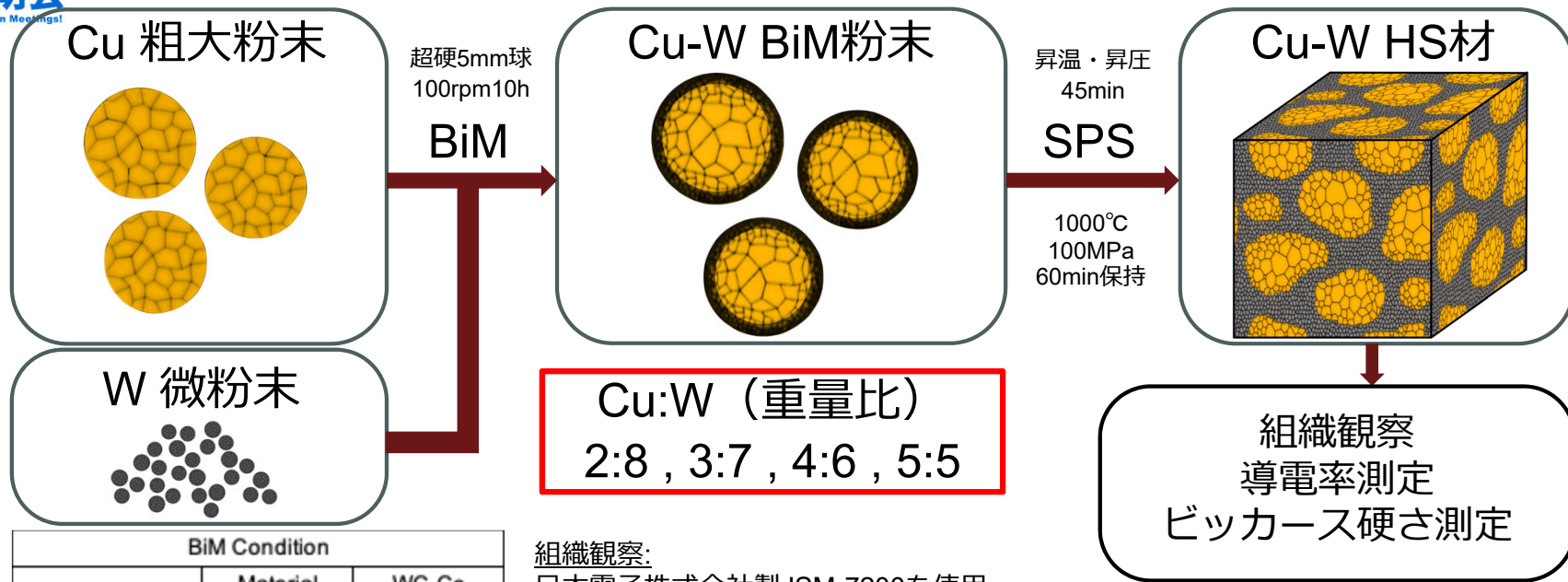
微細結晶粒領域 → ネットワーク状に結合

W : 高融点・高強度



Cu-W複合調和組織制御により期待される効果

- ・ 調和組織構造による**強度の向上**
- ・ 強度を維持したままCu割合を増やすことができる
→ **熱伝導率(導電率)の向上**
- ・ Cuの周りを高融点のWが覆う構造からCuが溶け出しにくい
→ **電極消耗低減**



BiM Condition		
Ball	Material	WC-Co
	Weight	100 g
	Diameter	5 mm
Powder	Cu	10,15,20,25 g
	W	40,35,30,25 g
Atmosphere	Ar	
Rotating Speed	100 rpm	
Rotating Time	36 ks (10 h)	
Temperature	Room Temperature	
SPS Condition		
Sintering temperature	1273 K (1000°C)	
Heating time	2.7 ks (45 min)	
Holding time	3.6 ks (60 min)	
Compression	100 MPa	

組織観察:

日本電子株式会社製JSM-7200を使用

体積抵抗率測定:

日置電機株式会社製RM3545を使用

試験片: Φ15の円柱形状、両面を#2000まで研磨布紙で湿式研磨

測定方法: 4端子法

測定回数: 12回(最大値、最小値を除いた10点で評価)

体積抵抗率から導電率(%IACS)に変換

ビッカース硬さ試験:

株式会社フューチャテック製FV-100eを使用

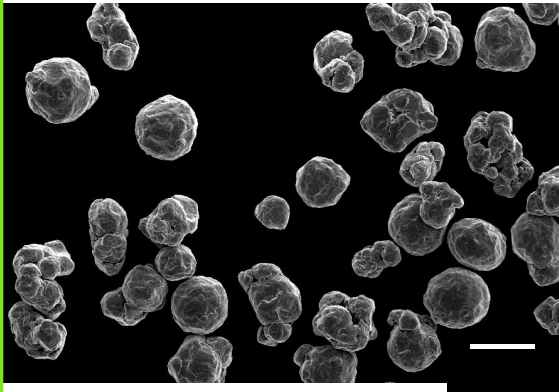
荷重: 30kgf (294.2N) 保持時間: 15s

測定回数: 12回(最大値、最小値を除いた10点で評価)

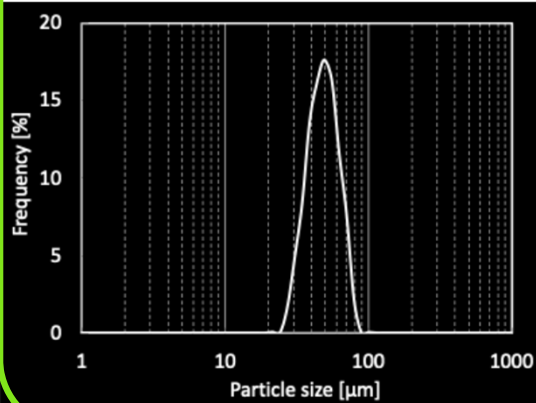
初期粉末外観と粒度分布

Cu粗大粉末

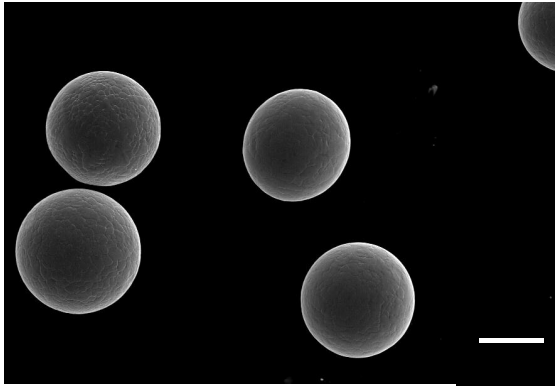
山陽特殊製鋼(株)製
-53 μm Cu粉末



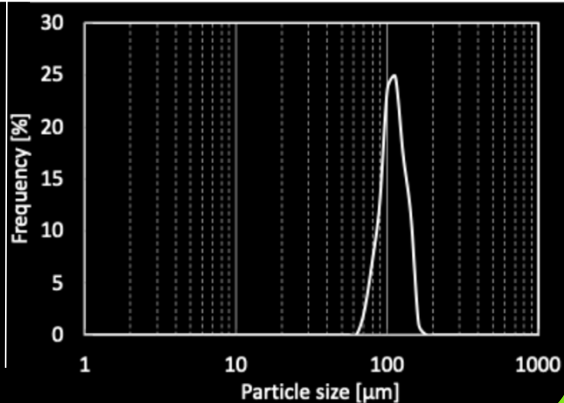
平均粒子径 45 μm



福田金属箔粉工業(株)製
-106 μm Cu粉末

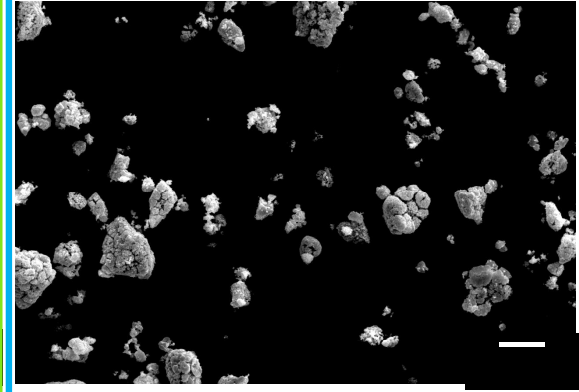


平均粒子径 103 μm

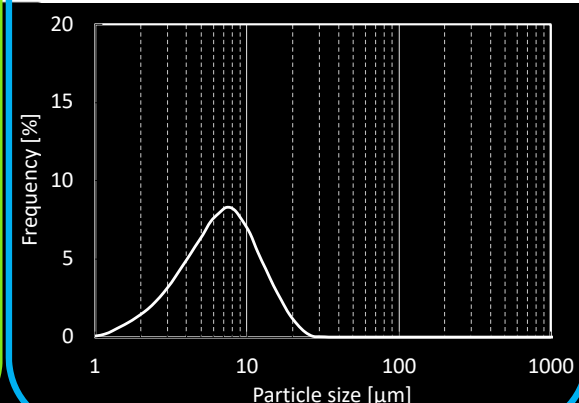


W微粉末

日本新金属(株)製
0.5 μm W粉末



平均粒子径 6.1 μm

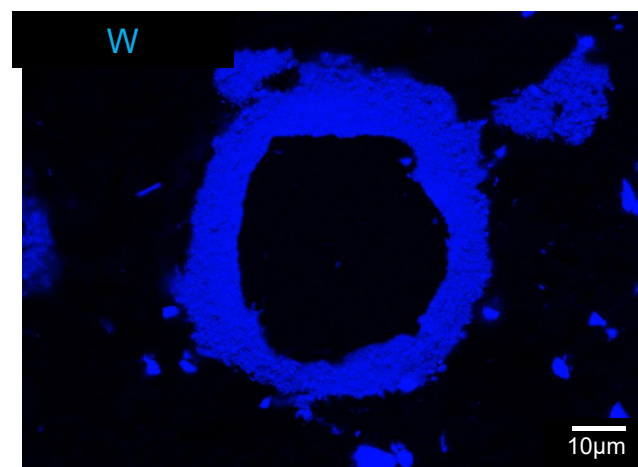
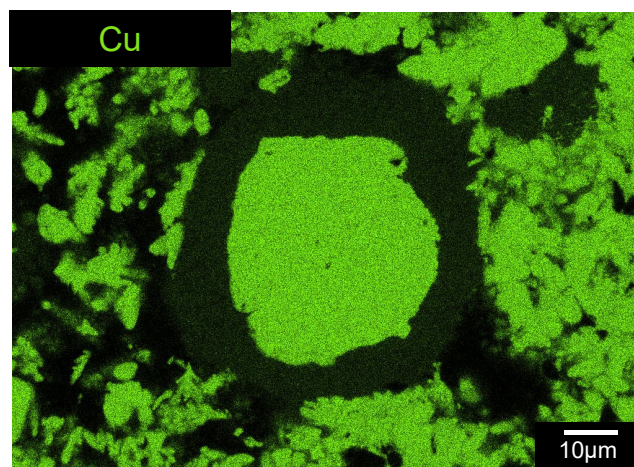
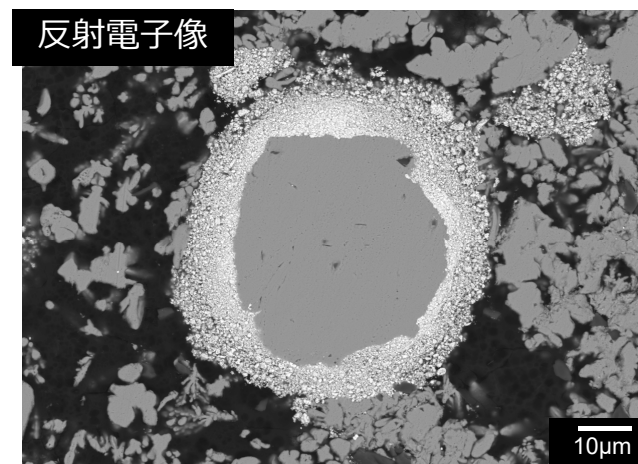
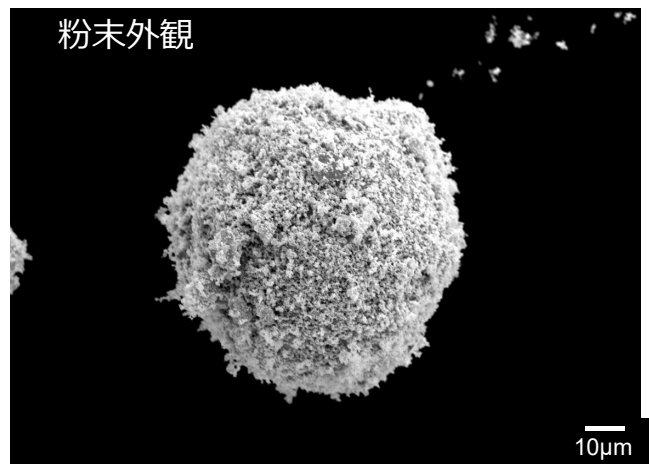


BiM粉末外観と断面EDS

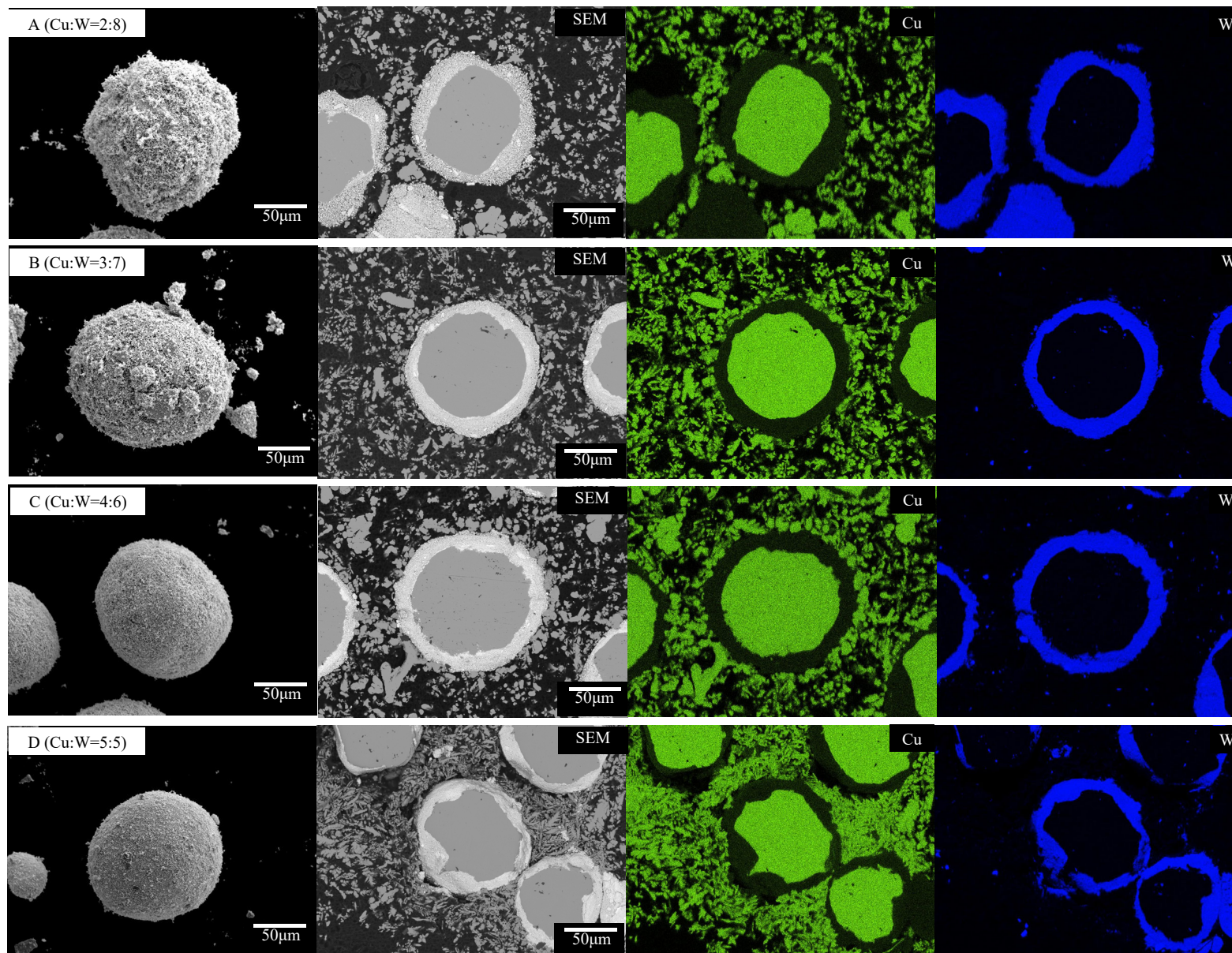
-53 μ m Cu粉末使用

Cu W 5 5

BiM条件：100 rpm 36 ks (10 h)



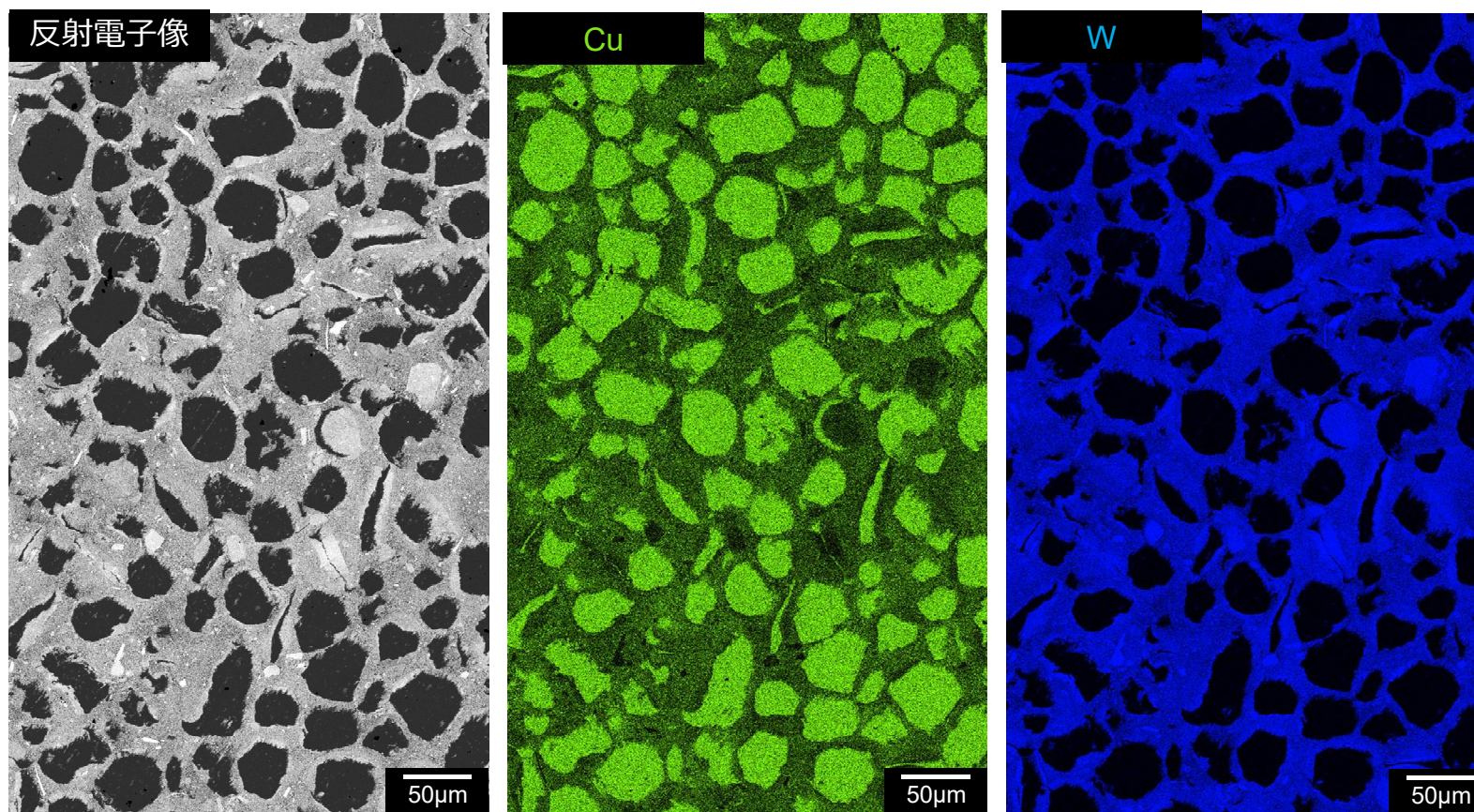
Cu粉末の周りにW粉末が付着している→**BiM粉末の作製に成功した**
※ 粉末周囲のCu反応は、包含用樹脂に含まれるCuによるもの



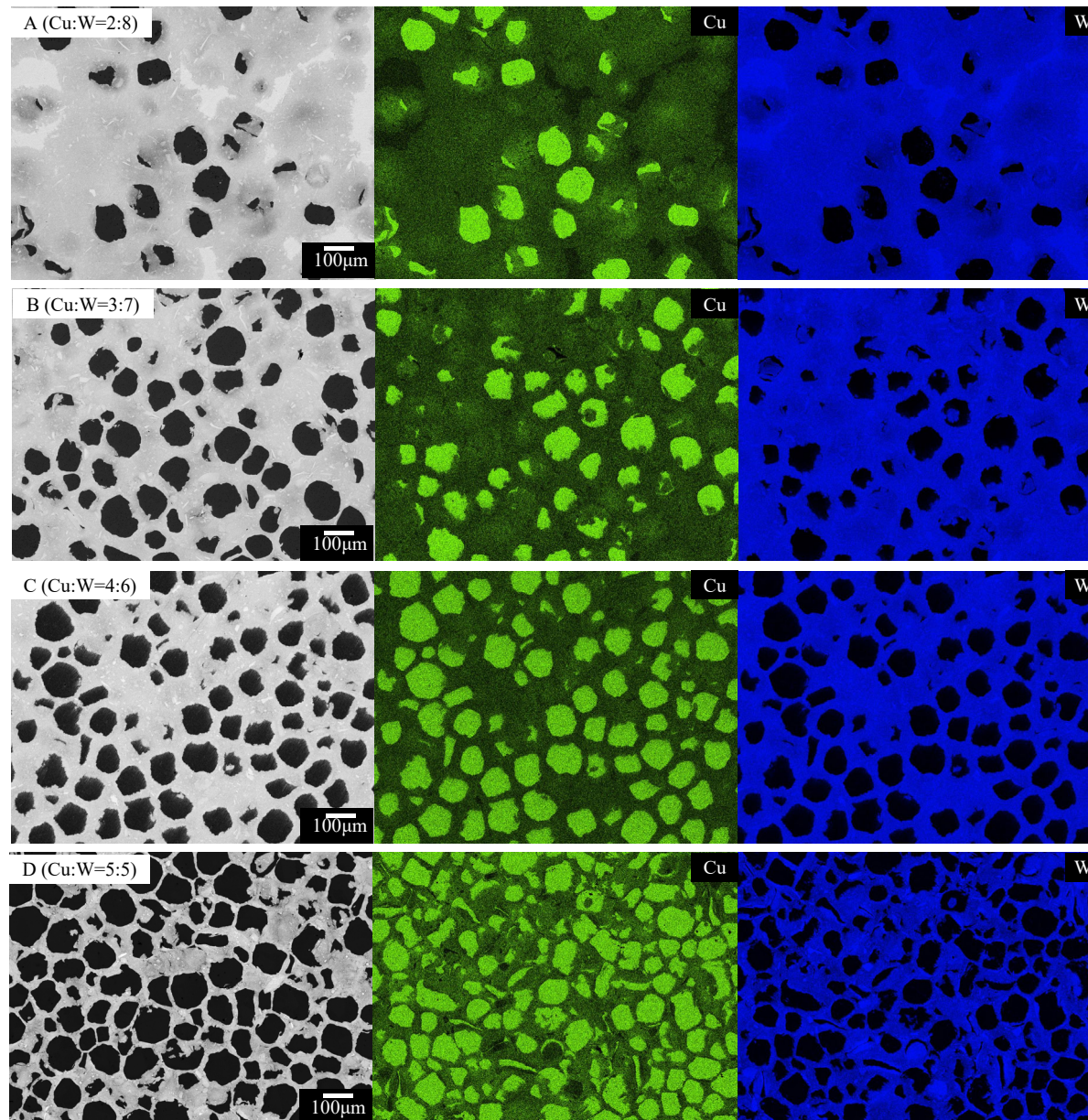
焼結体EDS

-53 μ m Cu粉末使用
Cu W 5 5

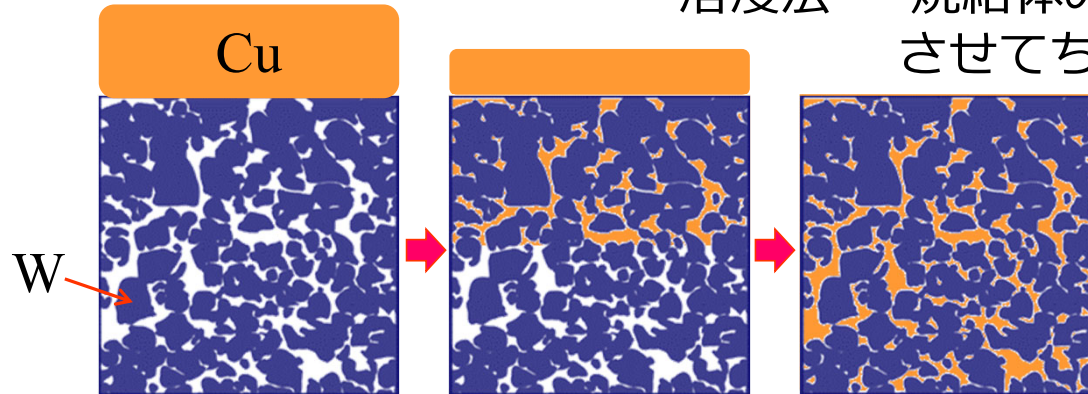
SPS条件：100 MPa 1273 K 昇温45 min 保持60 min



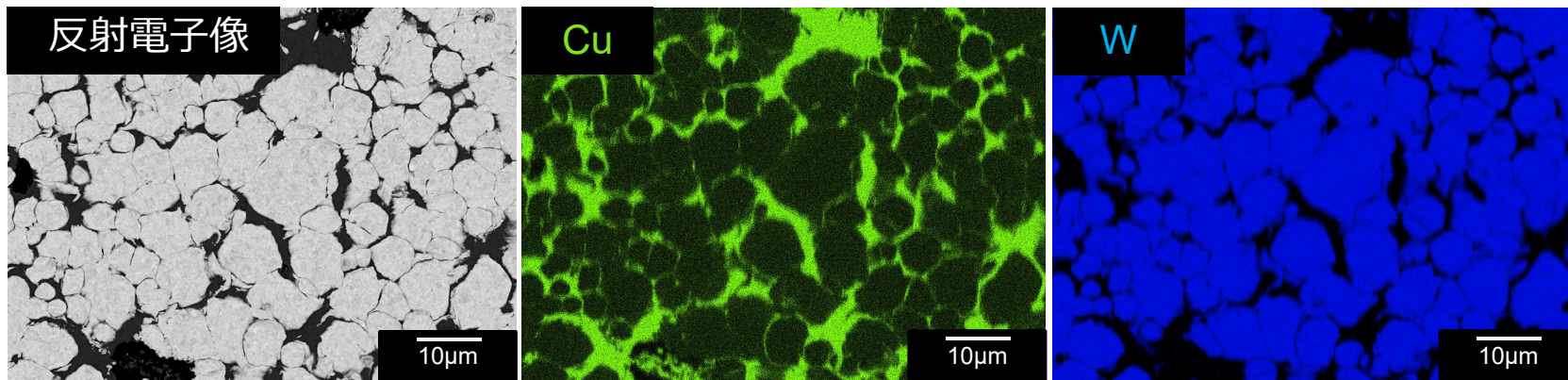
・分散部にCu、ネットワーク部にW反応が出ている
→複合調和組織の作製に成功した



溶浸法 … 焼結体の気孔に溶融金属を浸透
させてち密化する製法



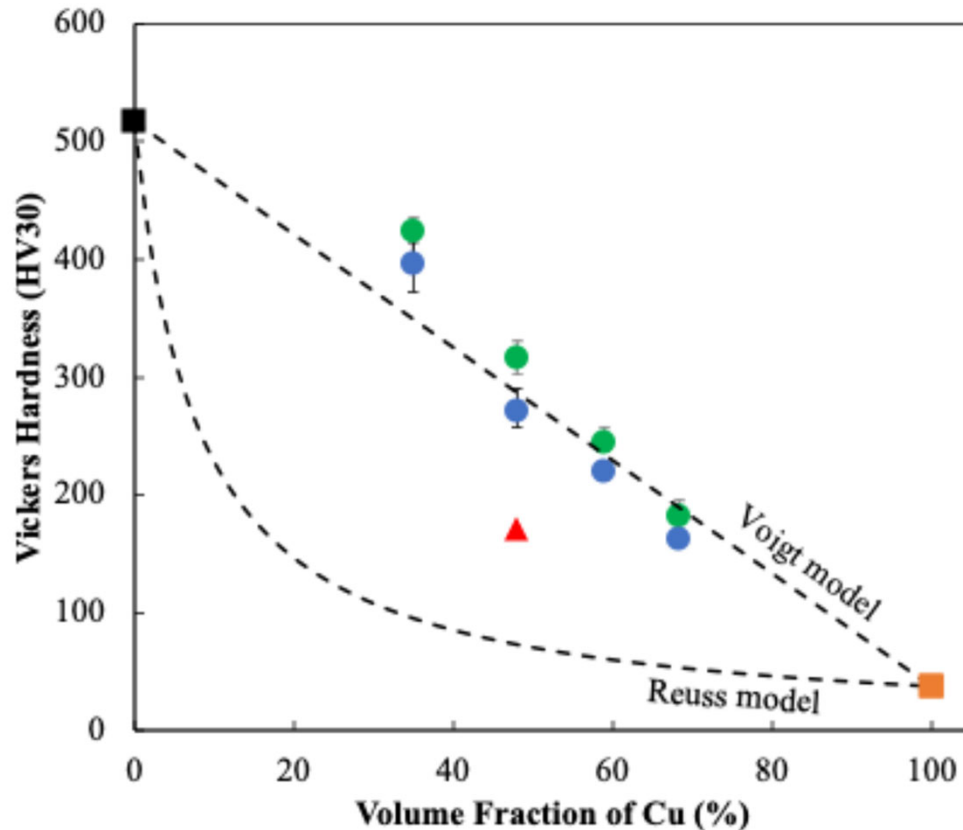
溶浸法による銅タングステン製造法の模式図



溶浸法で製造された Cu-Wの反射電子像とEDS

重量比 $\text{Cu}:\text{W} = 3:7$

Cu混合比とビッカース硬さ



Cu混合割合とビッカース硬さの関係

- HS材のビッカース硬さは複合則の上限値に近い値を示し、溶浸法Cu-Wと比較して優れた硬度を示す
- HS材において、同じCu混合割合で比較した場合、使用するCu粉末粒子径の小さい方が優れた硬度を示す

- -53μmCu粉末使用HS材
- -106μmCu粉末使用HS材
- Cu IP焼結体
- W IP焼結体
- ▲ 溶浸法Cu-W

Voigt model (複合則の上限値)

$$H_{\text{Voigt}} = f_{\text{Cu}}H_{\text{Cu}} + f_{\text{W}}H_{\text{W}}$$

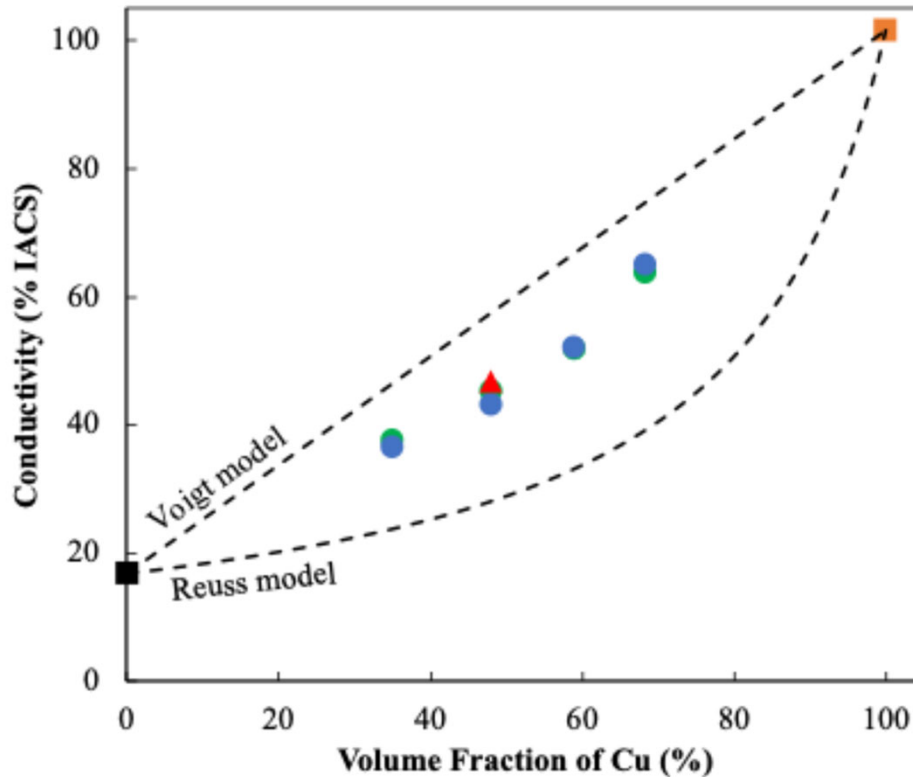
Reuss model (複合則の下限値)

$$H_{\text{Reuss}} = (f_{\text{Cu}}/H_{\text{Cu}} + f_{\text{W}}/H_{\text{W}})^{-1}$$

$f_{\text{Cu}}, f_{\text{W}}$: Cu, Wの体積分率

$H_{\text{Cu}}, H_{\text{W}}$: Cu, WのIP焼結体硬さ

Cu混合比と導電率



Cu混合割合と導電率の関係

- -53μm Cu粉末使用 HS材
- -106μm Cu粉末使用 HS材
- Cu IP焼結体
- W IP焼結体
- ▲ 溶浸法 Cu-W

Voigt model (複合則の上限値)

$$\sigma_{\text{Voigt}} = f_{\text{Cu}}\sigma_{\text{Cu}} + f_{\text{W}}\sigma_{\text{W}}$$

Reuss model (複合則の下限値)

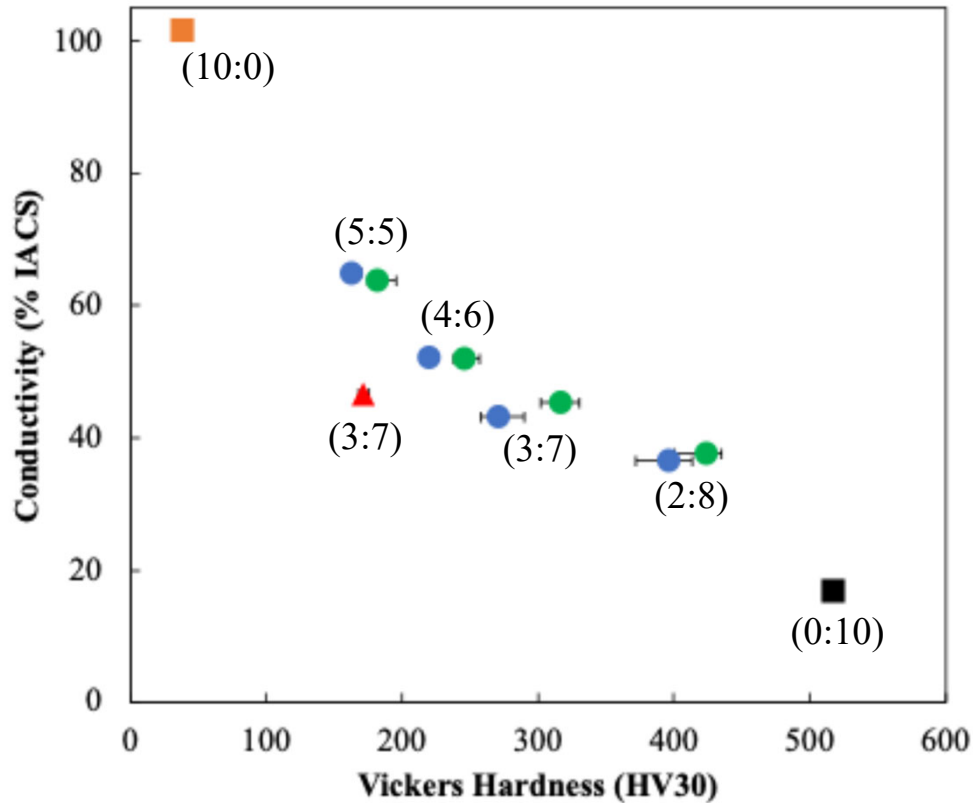
$$\sigma_{\text{Reuss}} = (f_{\text{Cu}}/\sigma_{\text{Cu}} + f_{\text{W}}/\sigma_{\text{W}})^{-1}$$

$f_{\text{Cu}}, f_{\text{W}}$: Cu, Wの体積分率

$\sigma_{\text{Cu}}, \sigma_{\text{W}}$: Cu, WのIP焼結体導電率

- ・ Cu粉末の粒子径の違いによる導電率の違いは無い
→ 導電率はCu混合割合に依存する

ビッカース硬さと導電率



- -53 μ mCu粉末使用HS材
 - -106 μ mCu粉末使用HS材
 - Cu IP焼結体
 - W IP焼結体
 - ▲ 溶浸法Cu-W
- (Cu:W) 重量比

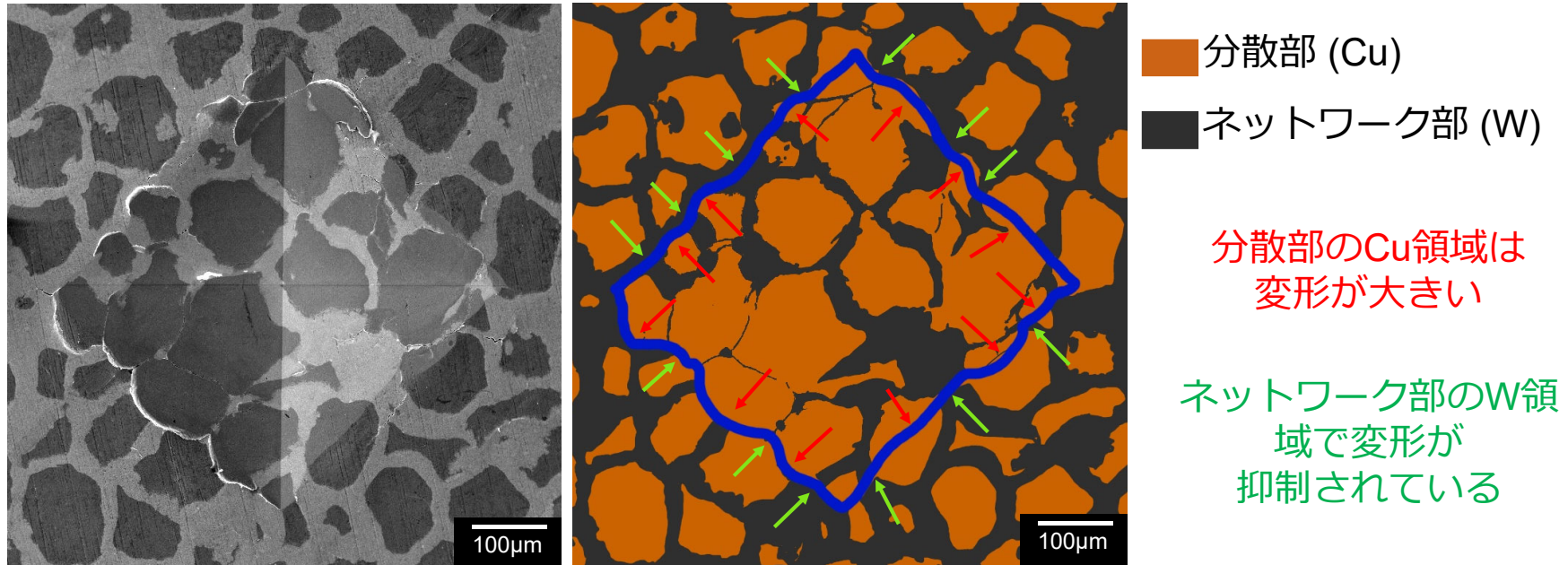
溶浸法Cu-Wと-53 μ mCu使用HS比較

質量比	硬さ	導電率
5:5	-	37% ↑
4:6	44% ↑	11% ↑
3:7	85% ↑	-

ビッカース硬さと導電率の関係

- ・ CuとWの混合割合を変化させることで、溶浸法Cu-Wと比較して硬さと導電率を向上させることに成功した

考察 HS材ビッカース硬さ向上のメカニズム



↑ 圧痕二次電子像(-106μmCu粉末使用 HS材 Cu:W重量比5:5)

HS材ではネットワーク状にWが材料全体で結合されている



作用する試験力は高強度である**W領域全体**で分配されて受ける

W領域で変形が抑制されたことで高硬度を示したと考えられる

まとめ

- ・ Cu-Wの複合調和組織（HS）材の作製に成功した。
- ・ HS材のビッカース硬さは複合則の上限値に近い値を示した。
- ・ 調和組織を微細化することで変形がより抑制され、硬度が向上した。
- ・ 導電率は銅とタングステンの混合割合によって決定され、組織形態には依存しない。
- ・ HS材において Cu:W 重量比が 4:6 のとき、溶浸法Cu-Wと比較して硬さと導電率ともに向上させることに成功した。

調和組織構造による強度の向上により、従来材と比較してCuの割合を増やすことが可能となり、導電率の向上に成功した

実用化に向けた課題

- 現在、特異な微細組織を有する銅タングステン材料の作製には成功しているものの、実際の放電特性については未検証である。
- 今後は放電特性に関する実験データを取得し、放電加工用電極材料としての適用条件を検討する必要がある。

企業への期待

- **放電加工用電極材料**の開発に取り組む企業との共同研究、あるいは実用化に向けた検討を希望している。
- また、**放熱基板材料**への応用を検討している企業にとっても、本技術の導入は有効であると考えられる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術はメカニカルミリングや放電プラズマ焼結技術を利用しているため、粉末冶金技術を有する企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 複合材料、放電加工用電極、
複合材料の製造方法
- 出願番号 : 特願2024-223962
- 出願人 : 学校法人立命館
- 発明者 : 藤原弘、蔦川拓真

産学連携の経歴

- 2014年-2016年 株式会社アイデアと共同研究実施
- 2018年-2020年 株式会社静甲と共同研究実施
- 2018年-2019年 アドバンスコンポジット株式会社と共同研究実施
- 2019年-2020年 株式会社鈴木楽器と共同研究実施
- 2022年-2023年 トヨタ自動車株式会社と共同研究実施
- 2023年-2024年 日星電機株式会社と共同研究実施
- 現在も 1 社と共同研究実施中

お問い合わせ先

立命館大学

研究部 BKCリサーチオフィス

T E L 077-561-2802

e-mail liaisonb@st.ritsumei.ac.jp