青色半導体レーザを用いた指向性エネルギー堆積法による マルチマテリアル放電加工電極の開発

石川県工業試験場　機械金属部
研究主幹　谷内　大世
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022229-B3）

キーワード：青色半導体レーザ，放電加工電極，銅タングステン

１．研究の目的と背景

形彫り放電加工(Electrical Discharge Machining: EDM)は，工具電極と工作物間に発生する放電現象を利用した非接触型加工法であり，高硬度材料や複雑形状の高精度加工を可能とすることから，金型製造などの精密加工分野では広く利用されている[1]．EDM は，電極材料が加工性能に大きな影響を及ぼし，材料除去率，電極消耗率，加工表面品質および寸法精度が左右される．そのため，電気伝導性および熱伝導性に優れる純銅が広く用いられているが，材料コストの高さや除去加工に伴う材料ロスが課題となっている[2]．さらに，加工中に電極が消耗することは EDM の本質的問題であり，特に角部では消耗が顕著となる．この課題に対して，銅タングステン(Cu-W)電極の適用により，電極消耗の抑制および加工精度向上が報告されている[3]．

近年では，積層造形(Additive Manufacturing: AM)技術の発展により，EDM 電極の新たな製造手法が提案されている．AM により複雑形状電極や内部流路構造の実現が可能となり，加工効率向上が期待されている[4]．また，迅速製造技術により製造時間の短縮や材料使用量の削減が可能であることが示されている[4]．一方で，AM 製電極では内部気孔や欠陥に起因する導電性低下や電極消耗率の増加が課題として報告されており，性能向上が必要である[5]．

このような課題に対して，異種材料を組み合わせるマルチマテリアル構造が注目されている．特に，レーザ指向性エネルギー堆積法(Directed Energy Deposition: DED)は異種材料の選択的堆積が可能であり，機能傾斜構造を形成可能な有力な手法である[6]．一方，純銅のレーザ加工では，近赤外レーザは吸収率が低く加工効率が悪いという問題があるが，青色半導体レーザは純銅に対して高い吸収率を示し，安定した加工を可能とする[7]．さらに，青色半導体レーザを用いた DED では，低希釈かつ高密度な純銅層の形成が可能であることが報告されている[8]．加えて，プロセス最適化により高密度な銅構造体の形成が可能であることも示されている[9]．以上より，青色半導体レーザと DED を組み合わせることで，従来困難であった高機能電極の実現が期待される．

本研究では，放電加工用の電極工具の長寿命化と製造コスト削減を目的に，青色半導体レーザを搭載した肉盛積層装置を用いて，鋼材等の安価な基材上に純銅または銅タングステンを選択的に溶融・凝固させてコーティングすることにより，新たなマルチマテリアル放電加工電極の開発を目指すため，①純銅コーティングした電極を試作し，放電加工性能を検証すること．②DED 方式にて銅タングステンのコーティングを可能にすることを目的とする．

２．実験方法

2・1　純銅製放電加工電極の試作

青色半導体レーザを用いた指向性エネルギー堆積法により，放電加工用電極の試作を行った．電極の造形には，㈱村谷機械製作所製の最大出力 300 W の青色半導体レーザ発振器を搭載したレーザ肉盛積層装置「ALPION Type Blue」を用いた．基材には，直径φ5 mm，長さ 80 mm の SUS304 製の丸棒を使用した．この基材の側面および端面上に対し，山陽特殊製鋼㈱製の純銅粉末を用いてコーティングを施した．粉末は篩により粒径 32～53 μm の範囲に分級して使用した．コーティングは積層数を約 25 層とした．

造形後の電極は，旋盤加工によりコーティング部分を外径φ7 mm，長さ 15 mm となるよう仕上げ加工を施し，放電加工試験用電極とした．

電極造形では，レーザ光出力が造形品質に与える影響を調査するため，レーザ出力を 120 W，180 W の 2 水準に設定した．その他の造形条件については表 1 に示すとおりである．

表 1　放電加工電極の造形条件

波長	455 nm
レーザスポット径	φ0.26 mm
レーザ光出力	120W，180W
加工ヘッド送り速度	20 mm/sec
粉体供給量	12 mg/sec
粉体供給ガス流量	0.5 L/min
集束ガス流量	3.5 L/min
シールドガス流量	5.0 L/min
ハッチングピッチ	0.2 mm

作製した電極の造形欠陥評価として，断面試料を作製し，デジタルマイクロスコープ（㈱キーエンス・VH-6000）および走査電子顕微鏡（日本電子㈱製・JSM-7001F）による観察に加え，エネルギー分散型 X 線分析(EDS)による組成分析を実施した．SEM 観察では加速電圧 15 kV とし，

観察倍率は 50～1000 倍の範囲で行った．観察位置は，基材と肉盛層の界面および肉盛部内部とした．さらに，放電加工性能の評価として，表 2 に示す条件のもと，SUS304 製ブロック材に対して形彫り放電加工を行った. 比較対象として, 従来のタフピッチ銅を切削加工により作製した電極を用い，同一条件で加工試験を実施した．これにより，レーザ出力が肉盛層の組織および放電加工性能に与える影響を評価した.

表 2　放電加工実験条件

電源電圧	120 V
サーボ基準電圧	80 V
放電持続時間	50 μs
放電休止時間	400 μs
サーボゲイン	0.2

2・2　銅タングステンの造形

放電加工では，電極のエッジ部が最も消耗しやすく，電極寿命の短縮や加工精度低下の要因となる. そこで本研究では, 純銅よりも高融点かつ耐損耗性に優れる銅タングステン(Cu-W)を電極の端部に適用することで，長寿命化および電極製造コストの低減を図るマルチマテリアル放電加工電極の実現を狙った．その基礎検討として，本節では Cu-W の造形性について評価を行った. 本研究における造形性とは, 1 つ目に Cu-W 混合粉末によるビード造形が安定して可能であること，2 つ目に造形後の肉盛層に設定した組成比(Cu：W = 3：7)が適切に反映されていることの 2 点を指す.

実験は，2.1 節と同様に青色半導体レーザを搭載したレーザ肉盛積層装置「ALPION Type Blue」を使用した．粉末は，2.1 節で使用した純銅粉末に加え，三菱製鋼㈱製のタングステン粉末（平均粒径 15 μm）を使用した．これらの粉末を重量比 Cu：W = 3：7 となるように秤量し，小型容器に投入した後，ボールミルを用いて回転速度 300 rpm で 15 分間混合した．なお，本組成は一般的に放電加工電極として用いられている Cu-W 材料の組成に基づいて設定した. 混合後の粉末は積層装置の粉体供給機に導入し，表 3 に示す条件のもとでビード長さ約 15 mm の肉盛造形を行った．基材には，25 mm×25 mm，厚さ 3 mm の SUS304 板および純銅板の 2 種類を用い，それぞれの表面上に対して造形を行った.

表 3　銅タングステンビード造形条件

レーザ光出力	50，100，150，200，250，280W
加工ヘッド送り速度	10 mm/sec
粉体供給量	6　mg/sec
粉体供給ガス流量	0.5 L/min
集束ガス流量	3.5 L/min
シールドガス流量	5.0 L/min

造形後は，マイクロスコープによる表面観察を実施し，ビード形状や連続性などの外観評価を行った．さらに，EDS 分析により銅およびタングステンの組成比を測定し，設定した組成が肉盛層に反映されているかを評価した. これにより，青色半導体レーザを用いた Cu-W 混合粉末の肉盛造形の可否および組成均一性を明らかにした.

3．実験結果

3・1　純銅製放電加工電極の試作

図 1 に，レーザ出力 120 W で造形した試作放電加工電極の外観を示す. 青色半導体レーザを用いた DED 法により，所定寸法の純銅製放電加工電極の造形が可能であることが確認された．一方で，電極側面には局所的に空隙欠陥と考えられる部位が観察された．純銅の積層造形は，高い熱伝導率の影響により未溶融や空隙欠陥が発生しやすいことが報告されており，本結果はこれらの知見と一致する [2,5].



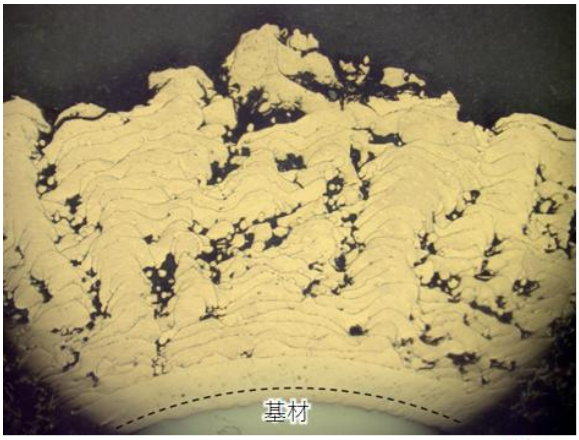
図 1　120W で造形した試作放電加工電極の外観

図 2 に，レーザ出力 120 W および 180 W で造形した電極の端面近傍における断面組織を示す. 図 2 より，造形内部には多数の空隙欠陥が存在していることが確認された. 特に条件 120 W ではビードの不連続形成および層間融合不良が認められた．一方，180 W ではこれらの欠陥が部分的に改善された．DED プロセスではレーザ出力の増加により基材と肉盛層の希釈および元素混合が促進されることが知られており [6]，本結果もこれと一致する.

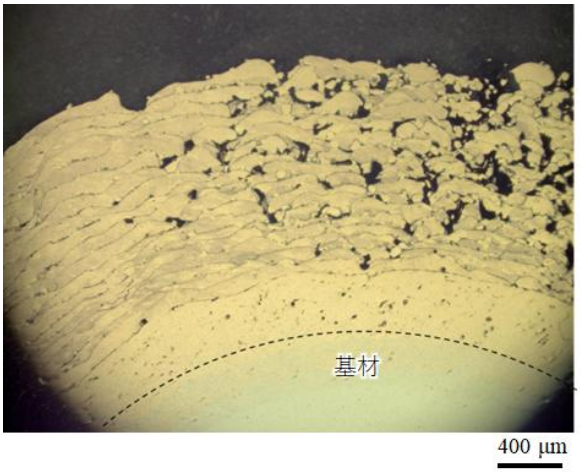
条件 180 W では，120 W と比較して基材近傍で空隙欠陥の少ない領域が増加しており, また顕著な割れも認められなかったことから，造形条件としては 120 W よりも良好であると考えられる．しかしながら，基材から離れるに従って空隙欠陥の低減が見られず, 依然として内部欠陥が多く存在することが確認された．これは，純銅の高い熱伝導率により，積層が進むにつれて熱が拡散しやすくなり，レーザによる有効な入熱が不足することで, 層形成が不安定となったためと考えられる.

以上の結果を踏まえ, 造形中の入熱量を適切に制御するため，積層初期（1～10 層）をレーザ出力 180 W で造形し，その後の積層（11～25 層）をレーザ出力 240 W に増加させた条件で電極造形を行った. その結果を図 3 に示す. 図 3 に示すとおり, 本条件ではビードが連続的に形成されており, 層間の融合不良が大幅に低減されていることが確認された．また，120 W および 180 W 単独条件と比較して，内部の空隙欠陥の発生が抑制されている．以上の結果

より，純銅のような高熱伝導材料に対する DED 造形では，積層進行に伴う熱拡散の影響を考慮し，レーザ出力を段階的に制御することで，欠陥の少ない高品質な造形が可能となることが明らかとなった．



(a)条件 120W



(b)条件 180W

図 2　電極端面近傍の断面観察写真

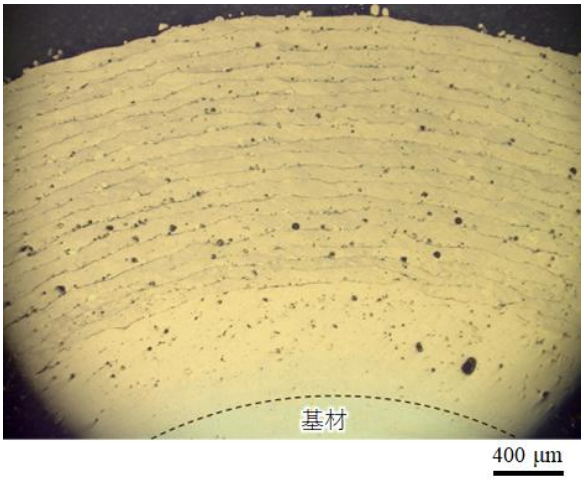


図 3　条件 180W+240W 電極端面近傍の断面観察写真

電極における基材とレーザ肉盛層の界面近傍について，走査電子顕微鏡による観察結果を図 4 に示す．図 4 より，界面近傍には異なる特徴を有する 3 種類の層が形成されていることが確認された．これら各層の組成を明らかにするため，エネルギー分散型 X 線分析(EDS)による線分析を行い，その結果を図 5 に示す．線分析の結果より，各層 A，B，C には基材である SUS304 の主成分である Fe が含まれていることが明らかとなった．また，Fe の含有量は層 C から層 A にかけて徐々に減少し，最終的には肉盛層側で Cu 主体の組成へと移行していることが確認された．さらに，層 A～C に相当する領域は，およそ 10 層分の肉盛層に相当しており，他の領域と比較して空隙欠陥が少ないことが観察された．この領域は比較的健全な接合状態を有する領域であると考えられる．レーザ出力を 120 W から 180 W へ増加させた場合では，当該領域の厚さが増加する傾向が確認された．これは，レーザ出力の増加に伴い入熱量が増加し，基材と肉盛層の溶融・混合が促進された結果，Fe と Cu の拡散および混合が進行し，遷移領域が拡大したためと考えられる．

以上の結果より，レーザ出力は界面近傍における組成分

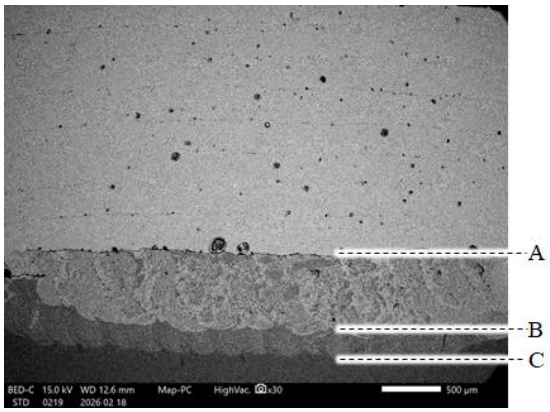


図 4　界面近傍の走査電子顕微鏡像

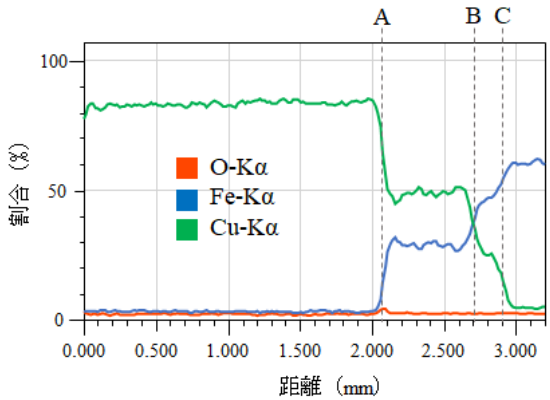
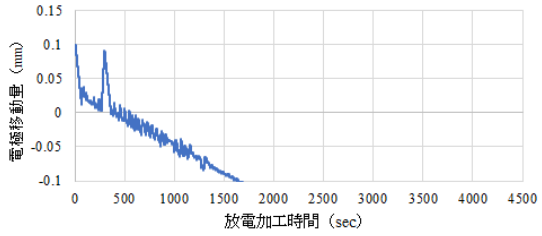


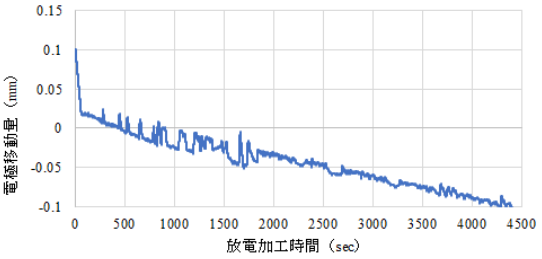
図 5　EDS による図 4 中の線分析結果

布および混合挙動に大きく影響を与え，結果として健全な接合領域の厚みに変化をもたらすことが示唆された．

レーザ肉盛により作製した放電加工電極について，加工性能評価を行った．その結果を図 6 に示す．放電加工性能評価の結果，レーザ肉盛電極は従来の純銅電極と比較して加工時間が約 2.5 倍となった．EDM では電極材料の電気伝導率が加工性能に大きく影響すると報告されており [1]，本研究の電極では，SUS304 基材の影響および内部空隙により導電率が低下したことが主な要因と考えられる．また，積層造形電極では内部欠陥が加工安定性に影響を及ぼすことも指摘されており [5]，本結果とも一致する．実際に，造形電極端面における空隙率を測定した結果，約 2.87% の空隙が存在していることが確認された．以上のことから，従来電極と同等の加工性能を得るためには，まず空隙欠陥の発生を抑制可能なレーザ肉盛条件の最適化が必要であると考えられる．加えて，本研究で提案する安価な基材上



(a)従来電極



(b)レーザ肉盛による電極

図 6　放電加工実験結果



図 7　放電加工前後における端面の様子

への純銅コーティング型電極に適した放電加工条件の検討も重要である．

一方，放電加工後のレーザ肉盛電極先端部を観察した結果を図 7 に示す．電極表面には X 方向および Y 方向に対して直交する方向に積層された痕跡に起因すると考えられる網目状のパターンが形成されていることが確認された．この現象は，積層過程で形成された空隙欠陥が放電時に優先的に除去された結果として，電極の消耗形態に反映されたと考えられる．

3・2　銅タングステンの造形

図 8 に 2 種類の基材（SUS304 板および純銅板）上に対して銅タングステン(Cu-W)のビード造形を行った結果を示す．SUS304 基材上では，レーザ出力 50 W から 280 W までの全ての条件でビードの形成が可能であった．一方で，基材を純銅とした場合には，いずれのレーザ出力条件でも安定したビード造形は確認されなかった．この要因として，純銅の高い熱伝導率により，レーザによる入熱が基材側へ拡散しやすく，粉末の十分な溶融および基材の局所的な加熱が達成されなかったことが挙げられる．これは，DED における典型的な現象である [6), 7)]．特に最大出力に近い 280 W でも，造形に必要な熱量を確保できず，ビード形成が困難であったと考えられる．

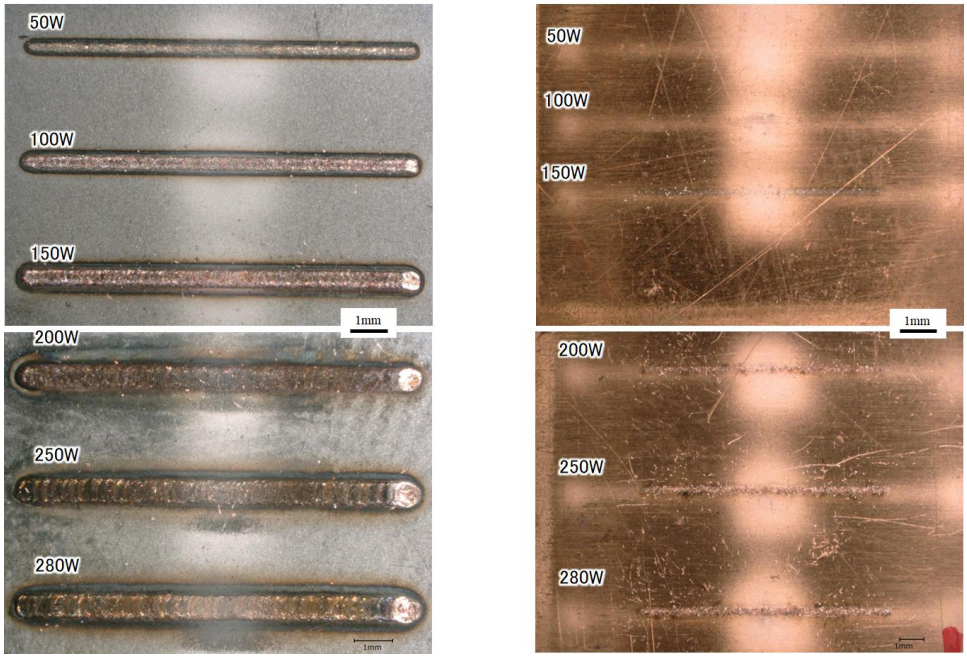
そこで，レーザ出力を 280 W に固定し，レーザ加工ヘッドの送り速度を低下させることで単位時間あたりの入熱量を増加させ，ビード造形を試みた．送り速度は 5.0 mm/s および 2.5 mm/s の 2 条件とし，その結果を図 9 に示す．いずれの条件でもビードの形成は可能であったが，5.0 mm/s では一部に造形の不安定な領域が観察された．これに対し，2.5 mm/s では比較的安定したビード形成が得られたことから，本条件の方が適切な造形条件であると判断される．ただし，いずれの場合でも造形されたビード幅は約 200 μm と比較的微細であった．

以上の結果より，Cu-W のビード造形は可能であったが，安定した造形を実現するためには高い入熱条件が必要であり，本研究で使用した装置仕様には 300 W 以上のレーザ出力が求められることが示唆された．

次に，送り速度 2.5 mm/s で造形したビードに対して EDS による定性分析を実施した．使用した粉末の組成は重量比 Cu:W = 3:7 であったが，分析結果から推定されるビード組成は Cu:W = 8:2 となり，大きく変化していることが確認された．

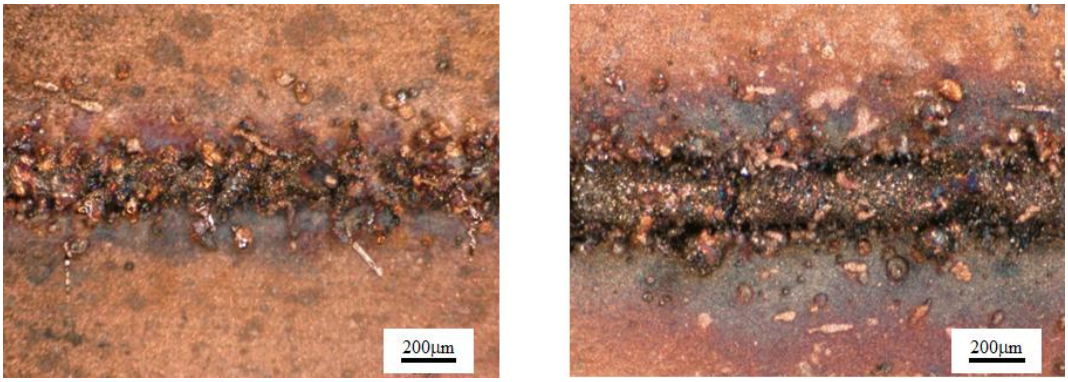
この組成変化の要因として，Cu と W の融点差が影響していると考えられる．純銅の融点は約 1080℃であるのに対し，タングステンの融点は約 3500℃と極めて高い．本実験条件では入熱量が不足しており，タングステン粉末が十分に溶融しなかったため，結果として銅成分が優先的に溶融・堆積し，造形ビード中の W 含有量が低下したと考えられる．同様の現象は既報にも報告されている [3)]．

以上より，青色半導体レーザを用いた DED 法により Cu-W の造形は可能であることが示されたが，一般的な放



(a)基材：SUS304　　(b) 基材：純銅

図 8　各基材に対する銅タングステンのビード造形結果



(a)5.0mm/sec　　(b) 2.5mm/sec

図 9　加工ヘッド送り速度 5.0mm/sec および 2.5mm/sec のビード造形結果

電加工電極材料として用いられる組成(Cu:W = 3:7)を実現するためには，十分な入熱を確保する必要がある．そのため，本研究で当初目標とした，電極の損耗が著しい端部のみに Cu-W を適用したマルチマテリアル放電加工電極の実現には至らなかった．しかしながら，本結果は Cu-W 造形の可能性を示し，今後は青色半導体レーザのさらなる高出力化やプロセス条件の最適化により，実用的な造形の実現が期待される．

４．結言

本研究では，青色半導体レーザを用いた指向性エネルギー堆積(DED)法により，安価な基材上に純銅および銅タングステン(Cu-W)を局所的に付与したマルチマテリアル放電加工電極の開発を目的として検討を行った．得られた主な知見を以下に示す．

(1) 青色半導体レーザを用いた DED 法により，SUS304 基材上に純銅を積層した放電加工電極の造形が可能であることを確認した．特に，レーザ出力を積層層数に応じて段階的に制御することで，内部空隙や層間融合不良を低減し，健全な造形体を得ることが可能であった．

(2) 基材と肉盛層の界面近傍では，Fe と Cu が混在する遷移領域が形成され，レーザ出力の増加に伴い元素の混合および拡散が促進されることが明らかとなった．これにより，接合状態の改善に寄与することが示唆された．

(3) 試作電極の放電加工性能は，従来の純銅電極と比較して加工時間が増加する傾向を示した．これは，基材に SUS304 を用いたことによる電気伝導率の低下およ

び純銅層内部の空隙欠陥に起因すると考えられる．したがって，加工性能向上には空隙低減を目的とした造形条件の最適化および適切な放電加工条件の設定が必要である．

(4) Cu-W 混合粉末を用いたビード造形の場合，SUS304 基材上では広い条件範囲で造形が可能である一方，純銅基材上では高い熱伝導率の影響により造形が困難であることが明らかとなった．また，送り速度を低減することで入熱量を増加させることにより，Cu-W のビード形成が可能となることを確認した．

(5) 得られたビードの組成は目標とした Cu:W = 3:7 とは大きく異なり，Cu:W = 8:2 となった．これは融点差に起因してタングステン粉末の溶融が不十分であったためと考えられ，高融点材料を含む造形にはさらなる入熱量の確保が必要であることが示唆された．

以上より，青色半導体レーザを用いた DED 法による純銅電極の造形および Cu-W 造形の可能性が示されたが，本研究で目標とした Cu-W を端部に適用したマルチマテリアル放電加工電極の実現には至らなかった．

今後は，レーザ出力のさらなる高出力化やプロセス条件の最適化により入熱量を向上させるとともに，空隙欠陥の抑制および組成制御技術の確立が重要である．これにより，電極の高耐久化と低コスト化を両立した実用的なマルチマテリアル放電加工電極の実現が期待される．

謝　辞

本研究を実施するにあたり，ご支援頂きました公益財団法人天田財団に心より感謝申し上げます．

研究遂行にあたり多大なご尽力を頂いた，金沢大学の設計製造技術研究所に所属の古本達明教授，山口貢准教授，理工研究域機械工学系に所属の小谷野智広准教授に心より感謝申し上げます．

参考文献

1) Zahoor, S., Abdul-Kader, W., Hussain, A., Ahmad, A.,“Performance Evaluation of Electrode Materials in EDM,” Proceedings of IEOM, 2020.

2) Garba, E., Abdul-Rani, A.M., Yunus, N.A., et al., “A Review of Electrode Manufacturing Methods for Electrical Discharge Machining: Current Status and Future Perspectives,” Machines, Vol. 11, No. 9, 906, 2023.

3) Wu, J., He, L., Sheng, X.M., et al.,“Experimental Investigation of Copper-Tungsten Electrode Wear in EDM,” Advanced Materials Research, Vol. 1017, pp. 818–822, 2014.

4) Faroze, F., et al.,“Rapid Tooling EDM Electrodes, ”Progress in Additive Manufacturing, 2026.

5) Bordón, P., Paz, R., Monzón, M.D.,“Evaluation of the Performance of Atomic Diffusion Additive Manufacturing Electrodes in Electrical Discharge Machining,” Materials, Vol. 15, 5953, 2022.

6) Yadav, S., et al., “Cu–SS Multi-material Structures Fabricated by Laser Directed Energy Deposition,” Sustainability, 2024.

7) Zapico, E., et al.,“Blue Laser Welding of Copper: Process Efficiency and Absorption Behavior,” Journal of Laser Applications, Vol. 34, 2022.

8) Yoshida, S., et al.,“Blue Diode Laser Directed Energy Deposition of Copper,” Journal of Smart Processing, 2025.

9) Yang, Y., et al.,“Directed Energy Deposition of Pure Copper Using Blue Laser,” Transactions of the China Welding Institution, 2022.