

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03899

研究課題名(和文) SiC透明電極を用いた加工間隙の直接観察による放電加工の現象解明と加工特性の向上

研究課題名(英文) Improvement of Machining Characteristics of EDM by Direct Observation of Gap Phenomena using Transparent SiC Electrode

研究代表者

國枝 正典(Kunieda, Masanori)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：90178012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：透明体電極を用いて放電加工間隙を観察した。単発放電において、溶融域の過熱による突沸が除去メカニズムの一つであることが分かった。そこで、電流を急峻に止める三角波状の電流パルスの除去効率が最も高いことを示した。また、両電極からの金属蒸気を作る放射状の流れ場が、溶融部をせん断力によって除去する現象を見出した。そこで、沸点の低い亜鉛を工具電極に用いることにより、加工速度が増大することを示した。また、連続放電において、放電で生じた気泡境界に次の放電が生じる確率が高いことを明らかにした。さらに、ワイヤ放電加工において、気泡の膨張によるワイヤ振動の発生や、放電点の集中によるワイヤ断線現象を可視化した。

研究成果の概要(英文)：EDM gap phenomena were observed using transparent electrodes. Observation of single pulse discharges showed that occurrence of bumping due to superheating of the molten pool is one of the removal mechanisms. Thus, a triangular current waveform with a sharp falling of current resulted in the largest material removal among the waveforms tested. It was also found that the shear force generated by the radial flow due to the collision of the metal vapour jets from the electrodes can be another removal mechanism. It was verified by the experiment results that use of zinc, which has a lower boiling point, as the tool electrode material showed a material removal rate higher than copper or brass. About the discharge location, discharge was more likely to occur on the periphery of the bubble generated by the previous discharge. In wire EDM, vibration of the wire electrode excited by the expansion of the bubble and the wire breakage due to concentration of discharge locations were visualized.

研究分野：放電加工、電解加工、微細加工、金型加工

キーワード：放電加工 ワイヤ放電加工 加工現象 透明体電極 放電点 気泡 除去メカニズム

1. 研究開始当初の背景

放電加工には未解明な現象が多く、アーク柱の直径や、気泡の体積率など、加工間隙のモデルに不正確な部分が多い。また、除去のメカニズムも完全には解明されていない。溶融部の数パーセントしか加工くずとして除去されておらず、残りは再凝固することが知られており、溶融部をすべて除去できれば加工速度は飛躍的に増大できるはずである。

2. 研究の目的

SiC や Ga₂O₃ の単結晶が導電性をもち、かつ光学的に透明であることを利用して、それらを電極材料として用いて加工間隙を直接観察する。そして、単発放電での除去メカニズムを解明する。また、連続放電での放電位置の分布を観察し、加工の安定性との関係を調べる。さらに、ワイヤ放電加工の加工間隙を観察し、ワイヤの振動や、ワイヤ断線を引き起こす原因を解明する。

3. 研究の方法

図1は透明体電極を通して加工間隙を高速ビデオカメラ観察するための実験装置である。単発放電について、放電痕の形成、アーク柱直径、加工屑の飛散、気泡の膨張などを観察した。また、連続放電における気泡や加工液の挙動と放電位置の観察などに用いた。

透明体電極上に放電痕が形成されると透明性が失われるので、図1の装置では放電痕の形成過程や、アーク柱の中心部での除去現象の観察は困難である。また、SiC という特別な材料を用いるので、一般の炭素鋼などの工作物材料の除去過程の観察はできない。そこで、図2に示すように、棒状の工具電極と平板状の工作物(SKD11)との間で生じる単発放電を斜めから高速ビデオカメラを用いて観察した。

また、ワイヤ放電加工の加工現象の観察のために、図3に示すように加工槽側に突き出した透明なアクリル製の窓を製作し、SiC とワイヤ電極との間の放電現象を高速ビデオカメラで拡大観察した。

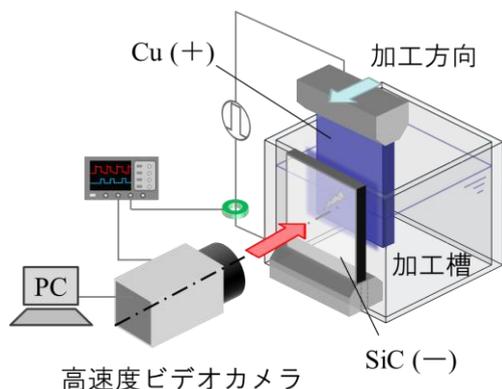


図1 透明体電極を用いた加工間隙の観察

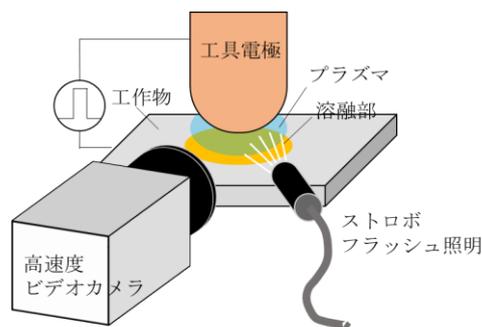


図2 放電痕の形成と加工屑の発生を可視化するための実験装置

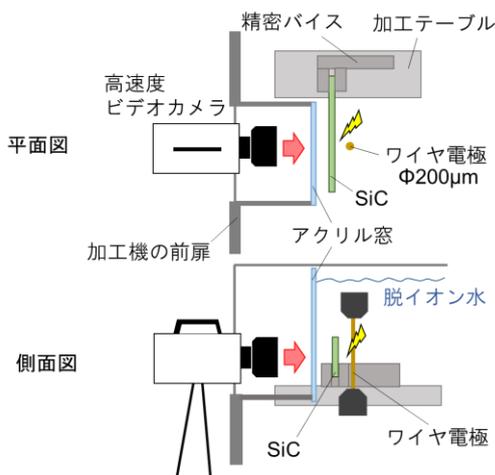


図3 ワイヤ放電加工の観察実験装置

4. 研究成果

(1) 単発放電現象

図4は透明体電極を用い、単発放電を高速ビデオ観察した結果である。中心の暗く見える領域が放電痕であり、それを取り囲む明るい領域がプラズマである。アーク柱直径はギャップ長を 100μm とすると、その数倍である。気泡直径は、さらに大きく数十倍に及んでいる。また、Yoshida ら¹⁾は、単発放電により生成する加工屑を顕微鏡観察し、数μm から 20μm の直径の加工屑が数百個も生成されることを明らかにした。よって、単発放電現象は図5のように描く方が現実に近い。

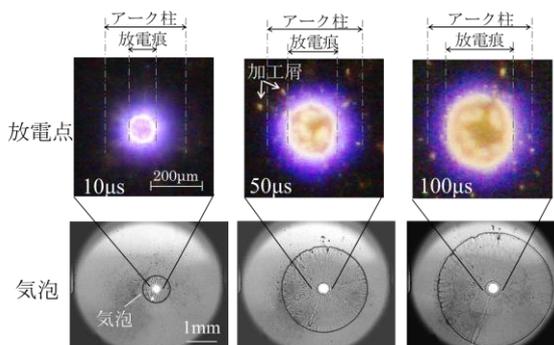


図4 単発放電の観察(放電電流20A)

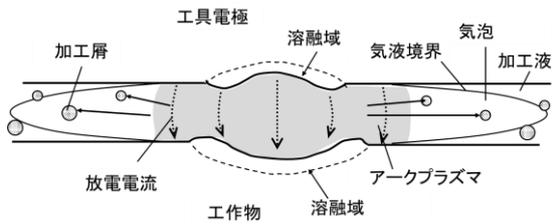


図5 放電加工の単発放電現象

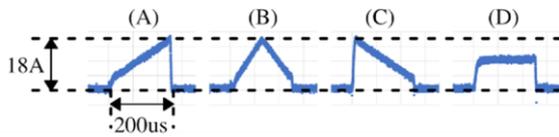


図6 放電加工の単発放電現象

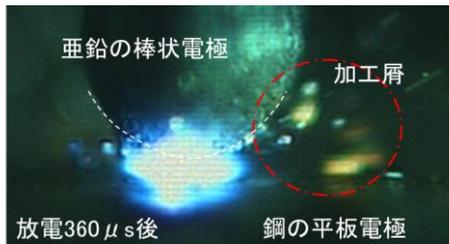
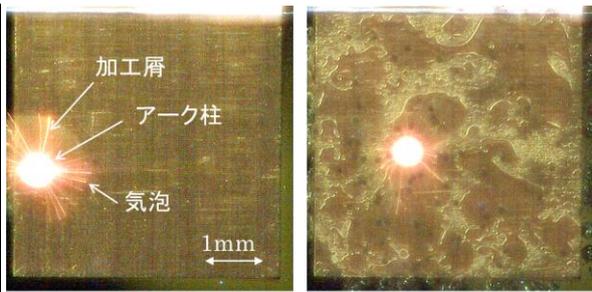


図7 放射状流れ場のせん断力による鋼の除去量は対向する電極が亜鉛の方が銅の場合より大きい

前述の通り、融点以上に達した領域の体積のうち、加工層として除去される割合は1-10%に過ぎない。融点に達した部分の除去メカニズムについては、放電痕の中の過熱された溶融域の突沸が原因であるとの説がある。つまり、溶融域の中の圧力分布が、材料内部から表面に向かって負の勾配を持っていけば、溶融域の原子は外に向かって加速され、加工層として排出されるという除去メカニズムである。このメカニズムの妥当性は、極間隙を真空と仮定したモデルを用いた分子動力学計算により、除去と放電痕の形成が生じることから証明できた²⁾。この説によれば、放電中かどうかを問わず、溶融域内部の圧力が表面の圧力より高ければ、溶融材料の除去はいつでも生じ得ることになる。実際、図4より放電持続時間中に加工層の発生が観察できた。そこで、より大きな負の勾配が生じ易いように図6(A)に示す放電電流波形を用いて単発放電による除去量を測定し、他の波形と比較した。その結果、予想通り図6に示す波形の中では最も大きな除去量が得られた。今後は、連続放電実験を行い、加工



放電1回目(0秒) 放電100回目(0.03秒後)

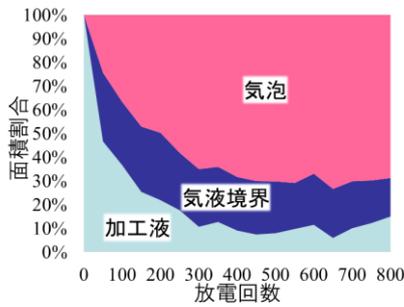
図8 透明体電極を用いた放電加工現象の観察 (放電電流10A, 放電持続時間10μs, Cu(+), SiC(-))

速度について調べる必要がある。

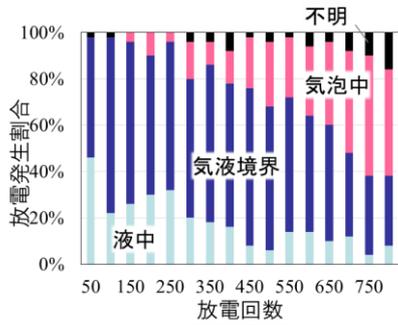
また、両電極表面からの金属蒸気のジェットが衝突して作る放射状流れ場によるせん断力の作用も考えられる。図7は、放射状流れ場によるせん断力が原因と考えられる除去の瞬間を図2の方法で捉えた映像である。鋼の平板電極の除去量が、対向する電極が亜鉛の方が銅の場合より大きいことが分かった。これは、低融点の亜鉛電極からのジェット噴流によるせん断力が大きいことを示している。そこで、黄銅ワイヤと亜鉛被覆ワイヤを用いて工作物との間に単発放電を生じさせ、放電反力に起因したワイヤ振動を測定した。その結果、亜鉛被覆ワイヤの方が振動が大きく、ジェット噴流によるせん断力も除去のメカニズムとして無視できないことが分かった。それと同時に、亜鉛被覆ワイヤの加工速度が黄銅ワイヤより大きい理由のひとつが、低融点の亜鉛電極からのジェット噴流によることが解明された。

(2) 連続放電現象

放電加工では、放電点がランダムに分散することが加工の安定性にとって重要である。図8に示すように、単発放電により生じた気泡の直径は2mm以上であり、その中を加工層が飛散して、気泡の外周で止まっていることが分かる。前出の図5の予想図を裏付ける結果である。これは、Yoshidaら¹⁾が寒天の中で単発放電を生じさせ、固まった寒天の中に保存された気泡と加工層の分布を光学顕微鏡観察した結果と矛盾はない(多くの加工層は気泡の外周上に分布していた)。また、放電が始まって数十回のパルス放電の後、加工間隙の多くは気泡で満たされることが分かった。



気泡と加工液の面積割合の変化



放電発生雰囲気の変化

図9 放電面上の気泡面積割合と放電発生雰囲気

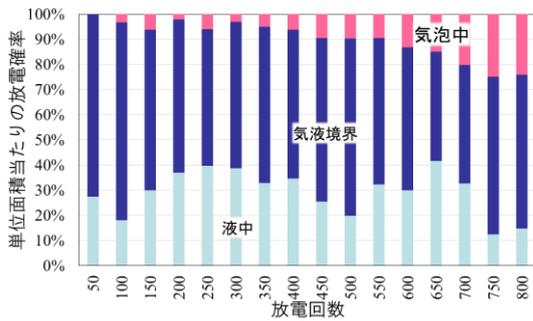


図10 単位面積当たりの放電確率の変化

従来、放電が液中で生じているか、あるいは気泡中で生じる可能性があるのかが未解明であった。これについても透明体電極を用いた図8の観察結果より、放電開始後の気泡、気液境界、加工液の占める面積割合が図9に示すように測定された。ここで、気液境界は、放電痕の直径に相当する幅(0.1mm)を持つと考え、境界の長さの合計と0.1mmとの積を気液境界の面積と定義している。加工間隙が気泡で満たされるとともに、液中で生じる放電の割合は減少し、90%近くが気泡中、あるいは気液境界で生じることが分かった。単位面積当たりに換算すると、図10に示すように、最初から気液境界で放電が生じる確率が最も高いことが分かった。その理由は、前節で述べたように、加工層が気泡の外周に分布するからである。

5mm角の放電面上で放電点がランダムに分布しているならば、x座標とy座標それぞれについて定義域が0~5mmの乱数を発生させることによって放電点分布をシミュレーシ

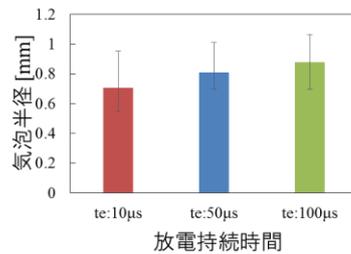
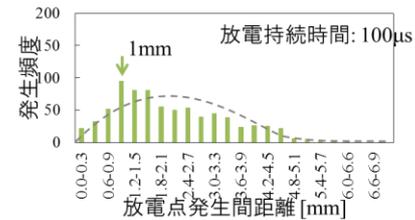
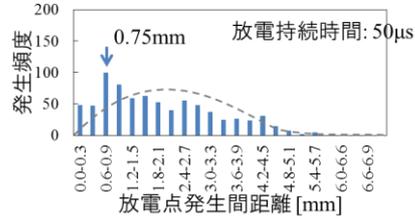
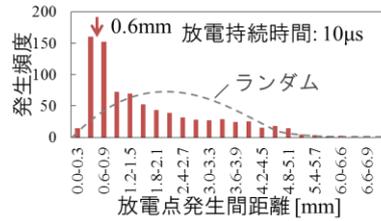


図11 連続して発生した放電点間の距離と気泡半径の関係

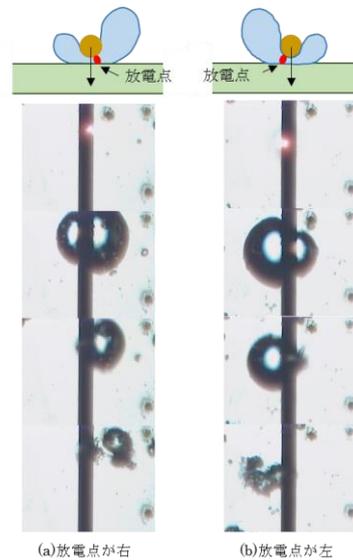


図12 周方向における放電点と気泡の挙動

ョンできる。ランダムの場合、連続して生じる放電点間の距離は、理論的には図11に棒線で示した分布を示すはずである。しかし、実測した結果は、放電持続時間10, 50, 100μsについて棒グラフで示した傾向を示し、放電点分布はランダムではないことが分かる。そして、もっとも高い確率を示す相対距離はそ

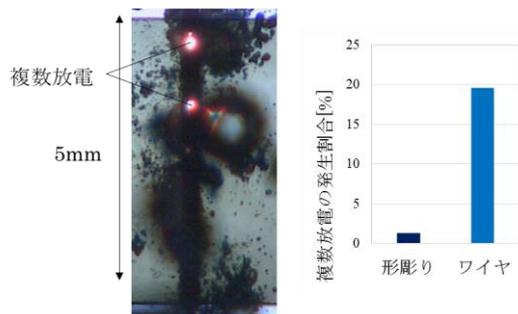


図13 ワイヤ放電加工における複数放電(左)と定常状態での発生割合(右)

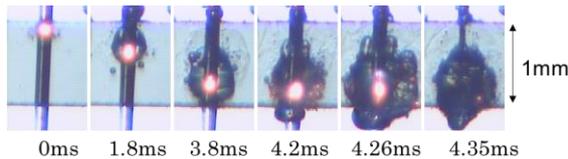


図14 黄銅ワイヤ上に放電点が集中しワイヤ断線が生じる様子

それぞれの放電持続時間で発生する気泡の半径に等しい。これは、直前の放電で生じた気泡の外周で次の放電が生じる確率が最も高いことを示している。その理由は、加工層が気泡の外周に分布することで説明できる。

(3) ワイヤ放電加工現象の観察

図3の方法でワイヤ放電加工の放電点を観察した。図12に示すように、 $1\mu\text{s}$ の放電持続時間中に生成した気泡が膨張し、約 $40\mu\text{s}$ 後に直径が最大となり、収縮に転じて周期 $80\mu\text{s}$ で膨張収縮の振動を繰り返す現象が観測された。進行方向に対して放電点がワイヤ中心軸の左側か右側に発生するかによって、気泡も非対称に膨張し、ワイヤが進行方向に垂直な方向にも振動することが明らかになった。

また、図13はひとつのパルスに対して複数点で同時に放電が生じる現象を捉えている。ワイヤのインピーダンスが形彫り放電加工で使用するようなブロック状の電極よりも大きいため、ある点で放電が発生しても、ワイヤ上の離れた点での電位は遅れて減少する。従って、ワイヤ放電加工では複数同時放電が発生し易いと考えられる。図13に複数同時放電の発生確率を形彫り放電加工とワイヤ放電加工とで比較した結果を示した。形彫りでは2%程度であるが、ワイヤ放電加工では20%に達することが分かる。

ワイヤ断線の瞬間を観察した。故意に休止時間を短くし $2\mu\text{s}$ とすると、図14に示すように放電点が黄銅ワイヤ上のある点に集中し、断線が生じた。集中した点の移動速度はワイヤの巻取り速度と一致しており、黄銅ワイヤの表面温度の上昇によりプラズマの消沈が困難となり、放電点が集中したものと考えられる。一方で、亜鉛被覆黄銅ワイヤを使用した場合は、放電点の集中が生じるという結果は同じであるが、放電点はSiC電極表面上に固定され、ワイヤ表面上を滑る現象が観測された。従って、放電点の集中が生じたと

してもワイヤ断線の確率は低下した。これは、沸点の低い亜鉛を被覆することによりワイヤ上の放電点の表面温度が低下するためであると考えられる。よって、亜鉛被覆ワイヤの方がワイヤ断線を生じさせずに放電エネルギーを大きくできるので、最大加工速度が大きい理由が解明された。

参考文献

- ① M. Yoshida, M. Kunieda: Study on the Distribution of Scattered Debris Generated by a Single Pulse Discharge in EDM Process, IJEM, No.3, 39-47 (1998)
- ② 楊曉冬、韓笑、国枝正典、分子動力学を用いた放電加工の除去メカニズムの解明、電気加工技術、37, 116: 25-37 (2013).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Tomoo Kitamura, Masanori Kunieda, Observation of relationship between bubbles and discharge locations in EDM using transparent electrodes, Precision Engineering, 40, 26-32 (2015) <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.09.009>
- ② Azumi Mori, Tomoo Kitamura, Masanori Kunieda, Direct Observation of Multiple Discharge Phenomena in EDM using Transparent Electrodes, IJEM, 20, 53-58 (2015).
- ③ 国枝正典、現象解明が拓く放電加工技術の将来、先端加工技術、96, 1-3 (2015)
- ④ 北村朋生、国枝正典、透明体電極を用いた放電加工極間現象の直接観察、精密工学会誌、81, 11, 983-986 (2015) <http://doi.org/10.2493/jjspe.81.983>
- ⑤ 国枝正典、放電・電解加工の最新動向と未来、先端加工技術、100, 8-9(2016)
- ⑥ 国枝正典、放電加工の現象解明と技術動向、型技術、32, 4, 臨時増刊号「放電加工技術の最前線 2017」, 10-13 (2017)
- ⑦ 国枝正典、放電加工現象、電気加工学会誌、51, 126, 83-88 (2017.3)

[学会発表] (計12件)

- ① 北村朋生、国枝正典、透明体電極を用いた放電加工のフラッシング効果の観察、電気加工技術、39, 122, 1-12 (2015)
- ② Azumi Mori, Masanori Kunieda, Kohzoh Abe, Observation of wire EDM using transparent electrode, 6th ASPEN in Harbin (2015, Aug 15-20)
- ③ 森あづ実、国枝正典、阿部耕三、透明体

電極を用いたワイヤ放電加工における断線現象の観察、2015年度精密工学会秋季大会講演論文集、11-12 (2015. 9)

- ④ Norliana Mohd Abbas, Masanori Kunieda, Observation on the Concentration of Discharges for micro EDM with Controlled Pulse Train Method using Transparent Electrode, 電気加工学会全国大会(2015)講演論文集、69-72 (2015)
- ⑤ Azumi Mori, Masanori Kunieda, Kohzoh Abe, Clarification of Gap Phenomena in Wire EDM using transparent electrodes, 18th CIRP conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), 601-605 (2016. 4. 21) doi:10.1016/j.procir.2016.02.219
- ⑥ 橘 華実、国枝正典、単発放電加工における電流電圧波形の放電痕形状への影響、2016年度精密工学会秋季大会講演論文集、149-150 (2016. 9)
- ⑦ 橘 華実、国枝正典、放電加工における電流電圧波形が放電痕形成の経時変化に及ぼす影響、電気加工学会全国大会(2016)講演論文集、35-38 (2016)
- ⑧ Yue Xiaoming, Yang Xiaodong, Masanori Kunieda, Influence of tool electrode material with low melting point on the material removal process of EDM, 2017年度精密工学会春季大会講演論文集、699-700 (2017. 3)
- ⑨ Yue Xiaoming, Yang Xiaodong, Masanori Kunieda, Measurement of discharge reaction force caused by metal vapor jets in EDM, 2017年度精密工学会秋季大会講演論文集、93-94 (2017. 9)
- ⑩ 石川敦士、国枝正典、単発放電加工における電流波形が放電痕形状と極間現象に与える影響、2018年度精密工学会春季大会講演論文集、891-892 (2018. 3)
- ⑪ Masanori Kunieda, Tomoo Kitamura, Observation of difference of EDM gap phenomena in water and oil using transparent electrode, 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 342-346 April 2018, Bilbao, Spain
- ⑫ Xiaoming Yue, Xiaodong Yang, Masanori Kunieda, Comparison of Electrical Discharge Machining Speed of Tool Electrodes with Different Thermo-physical Properties Related to Ease of Boiling, 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 138-143 April 2018, Bilbao, Spain

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

国枝 正典 (KUNIEDA MASANORI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：90178012

(2) 研究分担者

趙 永華 (ZHAO YONGHUA)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：90759052

(3) 連携研究者

細江廣太郎 (HOSOE HIROTARO)
株式会社放電精密加工研究所・技術開発部・部長

原田武則 (HARADA TAKENORI)
株式会社ソディック・放電加工機事業部・副事業部長

(4) 研究協力者

北村朋生 (KITAMURA TOMOO)
東京大学・大学院工学系研究科・大学院生

Norliana Mohd Abbas
東京大学・大学院工学系研究科・大学院生

森 あづ実 (MORI AZUMI)
東京大学・大学院工学系研究科・大学院生

橘 華実 (TACHIBANA HANAMI)
東京大学・大学院工学系研究科・大学院生

楊 曉冬 (YANG XIAODONG)
ハルビン工業大学・機電工程学院・教授

岳 曉明 (YUE XIAOMING)
ハルビン工業大学・機電工程学院・大学院生

石川敦士 (ISHIKAWA ATSUSHI)
東京大学・大学院工学系研究科・大学院生