

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420063

研究課題名(和文)超音波放電加工による多結晶ダイヤモンド焼結体の高能率微細加工に関する研究

研究課題名(英文) Study on high-efficiency processing of polycrystalline diamond by ultrasonic electro-discharge machining

研究代表者

二ノ宮 進一 (Ninomiya, Shinichi)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80453950

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、原料ダイヤモンド粒径が比較的大きな各種の多結晶ダイヤモンド焼結体(PCD)の精密加工を対象として、電極を超音波振動させた放電加工の加工特性を調査した。形彫り放電加工において、電極を縦振動させることで加工能率が向上し、電極消耗率が極めて小さくなることを明らかにした。その加工機構において、電極の振動が、加工屑の排出性を向上させ、放電頻度を安定化させることを導いた。さらには、PCDセグメントを微細加工用回転工具として用い、同一PCD工具で超硬合金等を総形溝加工する放電・研削逐次加工を提案した。

研究成果の概要(英文)：For a purpose to improve electric discharge machinability of PCD composed of coarse diamond particles, which has been thought to be extremely difficult to EDM, in this study, a US-EDM method to give an ultrasonic vibration to an electrode in axial direction, flexural direction and complex direction that couples axial and flexural directions was attempted. As a result, it was found that EDM efficiency could be improved to 6 times higher than a standard efficiency obtained in machining conventional PCD and the electrode wear could be reduced to 1/2 by giving vibrations to the electrode in axial direction. Furthermore, precise groove machining could be achieved on a cemented carbide workpiece by utilizing a combined method of EDM and grinding using only a single tool, i.e. a rotary PCD disc tool acting as an electrode for EDM and as a wheel for grinding.

研究分野：機械加工学、精密加工学、生産工学、品質工学

キーワード：超音波放電加工 多結晶ダイヤモンド焼結体 形彫り放電加工 ワイヤカット放電加工 加工能率 電極消耗率 放電・研削逐次加工

1. 研究開始当初の背景

多結晶ダイヤモンド焼結体(PCD)は、硬質でありながら欠けにくい特徴を有しているため、難加工材料加工用の切削工具等に多用されている。また、PCDの主構成要素であるダイヤモンド粒子は、高硬度だけでなく、高い熱伝導性や低い摩擦抵抗を有するなど優れた物理化学特性を示すことから、半導体やマイクロデバイスなど多くのダイヤモンド製部品への応用展開が期待されている。一方、PCD 素材自身の加工は極めて困難であり、研削や放電加工時に多くの問題点を抱えている。特に放電成形では焼結助剤であるコバルト等への放電発生により加工が進行するものの、原料ダイヤモンド粒子が非導電性のため、加工能率は著しく低くなり、加工不能になる場合も多い。PCDの放電加工を安定に行うため、電極極性を「-」としてオンタイムを極めて短くする ( $t_e = 1\mu s$ ) 方法や、電極の極性を交互に正逆反転させる方法などが他者より提案されているが、加工能率は依然として低く、電極消耗も著しいのが現状である。上記 PCD に対する放電加工の問題点を解決する新しい方策として、本研究では、電極を超音波振動させる方法に着目した。

2. 研究の目的

原料ダイヤモンド粒径の異なる各種 PCD に対して、電極を超音波振動させることによる放電加工特性向上効果を明らかにするとともに、その加工機構を明確にする。この技術を応用し、加工能率向上や電極消耗率が極めて小さくなることを利用して、微細加工用 PCD 製工具に微細で精密な形状加工を付与する。さらには、PCD 素材の新しい応用を目指して、極薄電極や微小径ワイヤ電極を利用した超音波放電加工を適用して PCD プレート上にマイクロ形状の創成を試みることを目的とする。

3. 研究の方法

各種 PCD の形彫り放電加工およびワイヤ放電加工において、基本的な加工特性を把握すると共に、電極超音波振動を付与する効果を調査する。

(1) PCD の超音波形彫り放電加工特性の調査

実験装置の模式図および外観を図 1 に示す。電極の振動モードを、縦振動、撓み振動、複合振動(縦振動+撓み振動)に変更できる超音波振動装置(多賀電気株)を使用した(図 2)。電極は振動ホーン先端部に純銅を蝋付けした。放電加工面の寸法は  $6.2 \times 2.2 \text{mm}^2$  である。ホーン一体型電極を縦振動モードでは 28kHz で、撓み振動モードでは 20kHz で振動させた。複合振動モードの振動数は両者の混合であるが非同期である。超音波発振器の出力調整により振幅を可変できるが、本実験では縦振動振幅は  $\delta = 18\mu\text{m}$ 、たわみ振動振幅は  $\delta = 6\mu\text{m}$  に設定した。PCD は、通常のダイヤモンド粒子で構成される S-PCD (粒径  $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ )

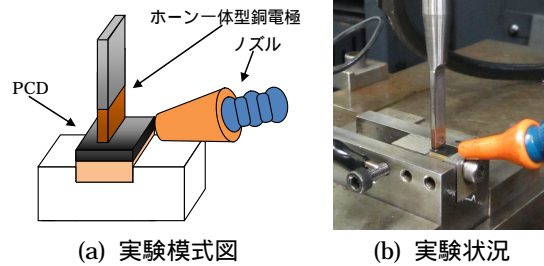


図1 電極超音波振動付与形彫り放電実験

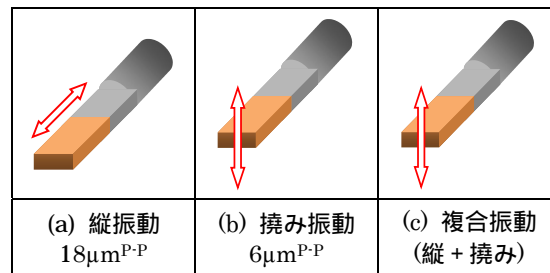


図2 各種超音波振動モードと振動振幅

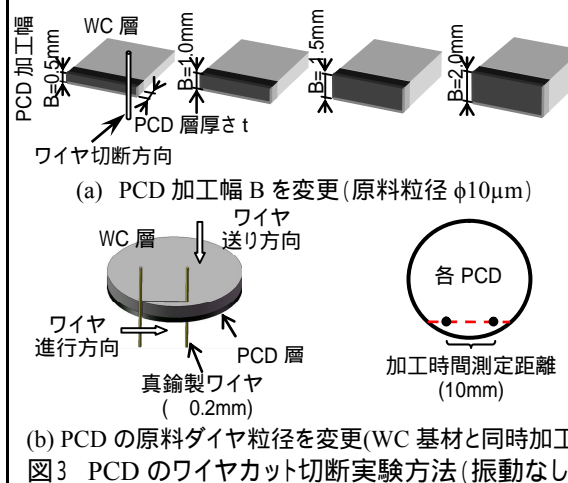


図3 PCD のワイヤカット切断実験方法(振動なし)

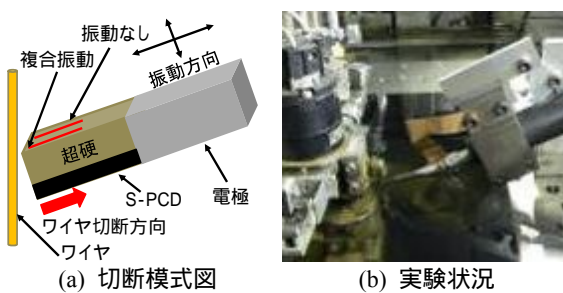


図4 超音波ワイヤカット放電切断実験

を用いた。比較として、導電性ダイヤモンド粒子で構成される EC-PCD でも一部調査した。最終年度では、超音波スピンドル(インダストリア製)による回転電極を用いた PCD の放電加工実験を行った。

(2) PCD の超音波ワイヤ放電加工特性の調査

超音波ワイヤ放電加工実験に先立ち、各種 PCD に対して通常のワイヤ放電加工特性を調査した(図 3)。また、超音波振動を付与

する方法は、本研究では、ワイヤ電極ではなく、供試 PCD 材を超音波振動させる方法を採用した（図 4）。

#### 4. 研究成果

本研究によって得られた研究成果は以下の通りである。

##### (1) PCD の超音波形彫り放電加工特性

既存 PCD(S-PCD: 粒径 25 $\mu\text{m}$ )の形彫り放電加工に 3 種類の電極振動モードを採用し、最適超音波振動モードを調べた。図 5 に除去能率、電極消耗率、表面粗さを、図 6 に放電加工中の電流・電圧波形を示す。

除去能率は、振動を付与しない通常放電加工では、放電波形が極めて不安定になるとともに、加工能率は 0.011 $\text{mm}^3/\text{min}$ （彫り込み深さ = 0.01 $\text{mm}/10$  分）と極めて低く、ほとんど彫り込みが行われなかった。

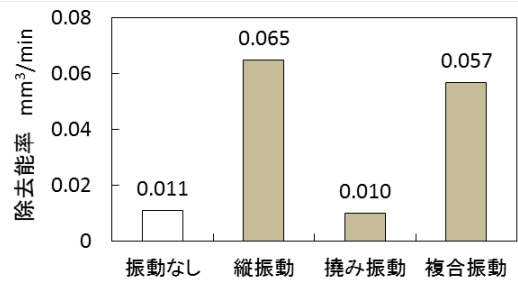
縦振動モードの場合、放電波形は振動なしに比べて放電頻度が多くなり規則的な放電波形が継続するとともに、除去能率も約 6 倍 (0.065 $\text{mm}^3/\text{min}$ ) になった。撓み振動モードの場合、放電頻度は振動無しの場合より高くなっているが、放電の安定性は縦振動ほどではない。また、撓み振動付与時の能率は振動無しの時とほぼ同等だった。縦振動と撓み振動を複合させた条件では、放電波形は安定化すると共に実電流値が縦振動時よりも 20% 程度大きくなった。しかし、加工能率は縦振動付与時よりも若干低くなった。

電極消耗量は、通常放電加工時に 178% であったのに対し、電極を縦振動させると 77%、撓み振動させると 32%、複合振動付与時には 26% と大幅に低減した。これらの結果も超音波振動付与による安定した放電が行われたことによるものと思われる。

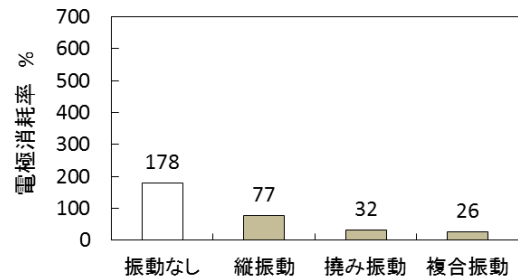
放電加工面粗さは、電極を振動させない場合に  $R_z=6.6\mu\text{m}$  であったのに対し、電極を振動させたときのそれは  $R_z=3.4\sim 4\mu\text{m}$  に改善されていた。

電極を超音波振動させることで、放電加工特性が向上する理由について考察する。放電波形を観察した結果より、電極に超音波振動を付与することによって、放電頻度が増大して、放電パルス条件 ( $t_e=0.5\mu\text{s}$ 、 $t_o=5\mu\text{s}$ ) に対応する安定した放電波形を得た。放電発生には極間距離が重要であるが、超音波振動モードは、縦振動および複合振動において加工能率の向上に顕著に効果が現れたことから、電極を超音波加振することによって、 $\approx 18\mu\text{m}$  の振幅の範囲で瞬時に放電発生に適した極間距離に調整されていると推察できる。また、電極振動によって加工液へも振動が重畳されるため、キャビテーション作用により放電屑の排出効果が生じたものと考えられる。両者の相乗効果によって、PCD の加工能率が向上したと推察できる。

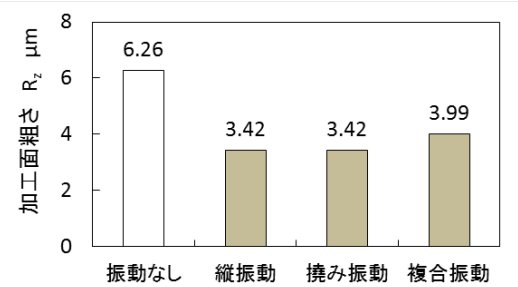
さらに、形彫り放電加工における両 PCD(S-PCD、EC-PCD)の超音波放電加工は、他の材料（金型材料として多用されているダ



(a) 除去能率



(b) 電極消耗率



(c) 加工面表面粗さ

図5 S-PCD025 の形彫り超音波放電加工結果

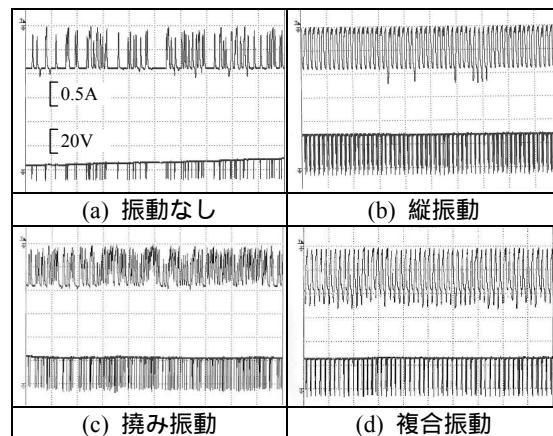


図6 放電加工中の電流電圧波形  
(上段: 電流、下段: 電圧)

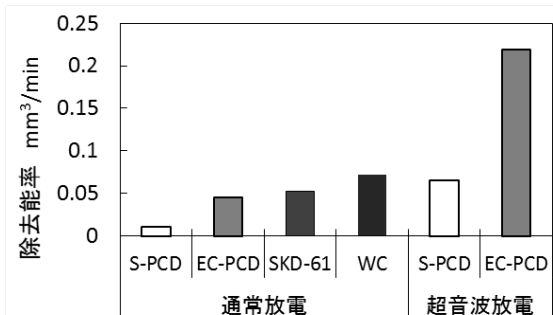


図7 PCD のワイヤカット放電切断能率  
(ダイヤモンド粒径 25 $\mu\text{m}$ )

イス鋼(SKD61)および超合金(RD50)の通常放電加工と比較しても、極めて除去能率が高くなることを示した。ちなみに本比較は加工能率の向上が顕著だった縦振動を用いている(図7)。

### (2) PCDのワイヤカット放電切断特性

図3(a)の実験方法で、PCD加工幅の影響を調査した。EC-PCD( $B=0.5\text{mm}$ )を切断距離 $l=0.5\text{mm}$ と $0.4\text{mm}$ で加工した。PCD層の厚み $t$ の制限があるので、ワイヤ径による加工溝の曲率を考慮せず、加工終了後の溝コーナ端部の最長箇所を実加工距離として算出した。なお、S-PCD層の厚みは $0.46\text{mm}$ で、切断距離 $l=0.5\text{mm}$ の時に超硬基材まで加工溝が到達する場合があったが、実加工長さおよび加工時間の値はそのまま測定した。それぞれのPCDの加工能率の結果を図8に示す。PCD加工幅 $B=0.5\text{mm}$ の場合、加工対象部分が薄いため、ワイヤの接触感知が不安定となりデータがばらつく傾向があったものの、両PCDともに加工幅の増加に伴って、切断速度が減少した。導電性ダイヤモンドで構成されるEC-PCDは、S-PCDに比べていずれのPCD加工幅でも加工能率が約2倍になった。

また、図3(b)の方法による実験により、原料ダイヤモンド粒径が大きいほど、放電切断速度が遅くなり、特にS-PCDでは粒径が顕著に影響することがわかった。さらに、S-PCDでは、放電切断後に超硬基材とPCD層の界面部に放電溝が生じること、この放電溝の形成はEC-PCDでは抑制できることを明らかにした(図9)。

図4の実験方法で、各PCDの超音波ワイヤカット放電切断実験を行った結果、超音波振動(複合振動)を付与した場合、振動なしに比べて切断速度の向上は10%以下に留まった(図10)。ワイヤカット放電加工では、電極であるワイヤは、常に新しいワイヤが供給される(移動している)ので、形彫り放電加工に比べて放電屑の排出性が良く、超音波振動によるアドバンテージが生じ難いと考えられる。すなわち、超音波放電加工による加工特性改善の効果は、超音波振動による放電間隙中の放電屑の排出性の向上が大きく寄与していると考察した。

### (3) PCD片による放電・研削逐次加工の提案

PCDの加工が容易に行えることから、新しい加工方法として単一のPCDセグメントを回転軸に装着し、放電加工用電極および研削仕上げ用砥石として利用した放電研削逐次加工を提案した。EC-PCDセグメント電極を回転させて、超合金材に対して比較的大面積な放電加工を実現すると共に、同一工具で研削仕上げした場合の加工特性を調査した(図11)。EC-PCD電極では、電極の消耗が生じていないことが確認できたので、放電加工後に同一PCD工具でスパークアウト研削、または放電加工後に同一PCD工具で強制切

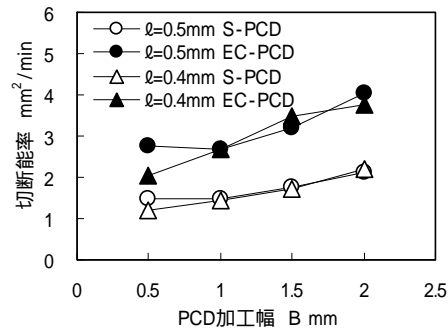


図8 PCDのワイヤカット放電切断能率

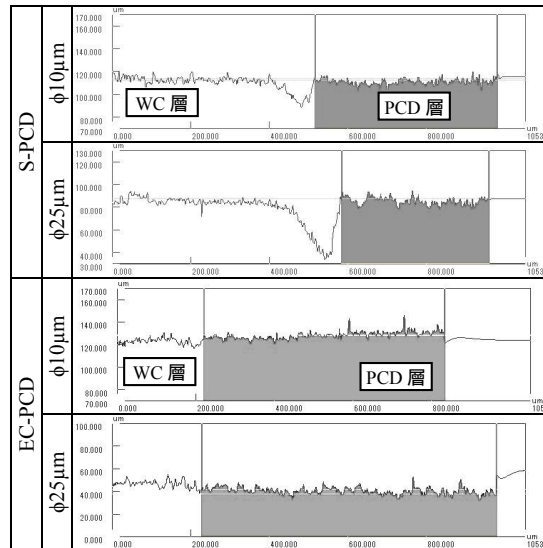


図9 PCD層とWC層の境界部の切断面状態 (切断面の断面プロファイル)

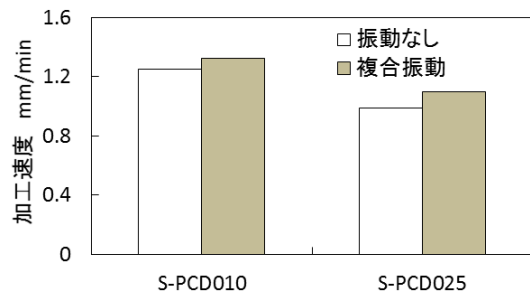


図10 各PCDの超音波ワイヤカット放電切断結果

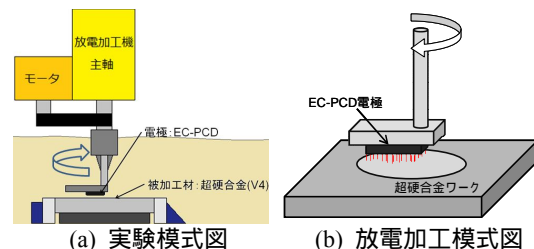


図11 PCD片回転電極による放電加工実験

込み $10\mu\text{m}$ の研削を行った(図12)。研削をすることで、被加工面は鏡面を呈することが確認できた。同時に最大高さ $R_z$ も飛躍的に向上し、 $R_z=0.3\sim 0.6\mu\text{m}$ 程度の被加工面を得ることが可能となった。この技術は、放電加工で生じた熱影響層を同一工具で容

易に機械的除去できる方法である。

さらに、円弧形状の回転 EC-PCD 工具や所望の形状を付与した回転 EC-PCD 電極を用いることによって、超硬合金材を総形加工する可能性も示唆された。

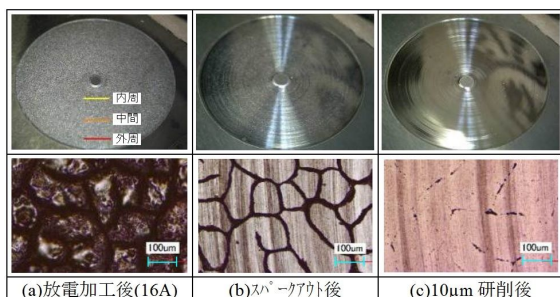


図 12 EC-PCD 工具(電極&砥石)による超硬加工後の外観(上段)と表面性状(下段)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

Fumio Koga、Shinichi Ninomiya、Kiyoshi Suzuki、Precise machining method by combining EDM and grinding with a rotary PCD segment tool for cemented carbide、Advanced Materials Research、査読有、Vol.806、2015、pp. 446-451、DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.806.446

二ノ宮進一、機械加工研究室の研究概要(機械工学科の研究活動と教育活動)、日本工業大学研究報告、査読無、Vol.45、No.3、2015、pp. 99-102、<http://ci.nii.ac.jp/naid/120005690682>

William Chen、Manabu Iwai、Shinichi Ninomiya、Kiyoshi Suzuki、Performance of EC-PCD Made of Boron Doped Diamond as an Electrode for EDM of Cemented Carbide、Advanced Materials Research、Advances in Abrasive Technology XV、査読有、Vol.1017、2014、pp. 776-781、DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1017.776

William Chen、Shinichi Ninomiya、Shunsuke Nochi、Manabu Iwai、Kiyoshi Suzuki、Wire-EDM Properties of EC-PCD Made up of Boron Doped Diamond Particles、Advanced Materials Research、Advances in Abrasive Technology XV、査読有、Vol.1017、2014、pp. 770-775、DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1017.770

William Chen、Manabu Iwai、Shinichi Ninomiya、Kiyoshi Suzuki、Material Properties of a New PCD Made of Boron Doped Diamond Particles、Advanced Materials Research、Advances in Abrasive Technology XV、査読有、Vol.1017、2014、pp. 154-159、DOI: 10.4028

[/www.scientific.net/AMR.1017.154](http://www.scientific.net/AMR.1017.154)

M.Iwai、S.Ninomiya、Z.zhou、K.Suzuki、Effect of Ultrasonic EDM on Machinability of Coarse PCD、Advanced Materials Research、査読有、Vol.797、2013、pp.362-367、DOI: 10.4028/www.scientific.net.797.362

[学会発表](計8件)

二ノ宮進一、塩島亜木斗、藍立明、鈴木清、超音波放電加工による多結晶ダイヤモンド焼結体の細孔加工、2016年度精密工学会春季大会学術講演会、2016.3.15、東京理科大学(千葉県野田市)

二ノ宮進一、PCDの加工技術と応用、塑性加工学会北関東・信越支部第1回技術講演会、2015.5.13、日本工業大学(埼玉県南埼玉郡)

二ノ宮進一、古賀文雄、鈴木清、PCDセグメント回転工具による超硬合金の放電研削逐次加工、2015年度精密工学会春季大会学術講演会、2015.3.18、東洋大学(東京都文京区)

野地駿輔、二ノ宮進一、岩井学、ウィリアムチェン、鈴木清、導電性多結晶ダイヤモンド焼結体(EC-PCD)のワイヤカット放電加工に関する研究、2014年度砥粒加工学会学術講演会、2014.9.13、岩手大学(岩手県盛岡市)

二ノ宮進一、PCD活用技術(PCD工具とPCDワーク)、精密工学会第34回マイクロ生産機械システム専門委員会、2014.1.27、産業技術総合研究所臨海副都心センター別館(東京都江東区)

二ノ宮進一、PCD工具による超硬金型の精密加工と関連技術、システム制御情報学会第16回サステイナブル・フレキシブル・オートメーション研究分科会、2013.12.3、(株)新日本テック本社(大阪府大阪市)

岩井学、二ノ宮進一、鈴木清、PCDの超音波放電加工における振動モードの影響、砥粒加工学会学術講演会、2013.8.27、日本大学(東京都千代田区)

二ノ宮進一、PCDの精密加工技術の展開、砥粒加工学会第50回次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会、2013.8.23、上智大学(東京都千代田区)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

二ノ宮進一(Ninomiya, Shinichi)  
日本工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 80453950