

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 5 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420061

研究課題名(和文) マルチワイヤソーによる電子素子材料の鏡面スライシング加工に関する研究

研究課題名(英文) Study on mirror surface slicing of electronic element materials by multi-wire saw

研究代表者

諏訪部 仁 (Suwabe, Hitoshi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：40202139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：マルチワイヤソーは遊離砥粒方式，固定砥粒方式がある．本申請課題では，従来の加工法とは異なる特殊樹脂で表面を覆ったワイヤ工具を用いて，加工中にダイヤモンド砥粒を懸濁したスラリーを供給しながらスライシング加工を行う方法において，加工精度等の加工特性に与える影響因子を実験的に解明した．そして，生産コスト削減やカーボロス低減を可能ならしめる高能率切断の可能性を明らかにした．

研究成果の概要(英文)：The multi-wire has two type of the slicing methods to be called a free abrasive method, a fixed abrasive method. In the recent years, the multi-wire saw that slices the silicon or the silicon carbide using the slurry suspended diamond abrasive grains and wire tool covered by special resin is developed. Therefore, this application was clear the relation between the slicing characteristics of efficiency or accuracy and the influence factor of slicing conditions. And, the results of this application showed the possibility of high slicing efficiency to reduce the slicing cost or the calf-loss.

研究分野：切断加工

キーワード：スライシング マルチワイヤソー Si SiC 鏡面加工

### 1. 研究開始当初の背景

太陽電池やLSI等のシリコン半導体の基板に用いられる結晶系シリコンやパワー半導体に用いられるSiC基板のとして用いられる電子素子用ウェハ需要は今後も伸びていくことが予想されている。

電子素子用ウェハのスライシング加工には図1に示すようなマルチワイヤソーと呼ばれる切断法が用いられている。このマルチワイヤソーには現在2種類の方法があり、1つはワイヤを加工部の多溝滑車に数百回巻き付け高速走行させながら、SiC砥粒(GC砥粒)と加工油脂を混合した加工液(以下スラリーと呼ぶ)を高速走行するワイヤ上に供給し、加工部に運搬させることによって多量のウェハを同時に切断する遊離砥粒方式<sup>1)</sup>である。もう1つは切断速度の向上による生産コストの低減を目指してピアノ線にダイヤモンド砥粒を電着したワイヤ工具を用いる固定砥粒方式<sup>2)</sup>である。これらの加工法は、ワイヤコスト、ワイヤ断線、加工精度等の数多くの問題が山積しているため、人件費コストの安い国々で生産したウェハに国内産業は押されつつある。

申請者は以上述べたような2種類の方法に対して、切断表面を鏡面化し、加工歪みを極限まで低減することによって高付加価値を有するウェハを製造できる新たなワイヤソースライシング法<sup>3)</sup>を見出し、本方法を第3のワイヤ切断法と位置づけ研究を進めている。

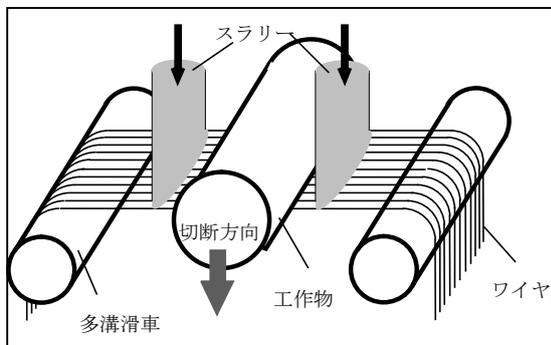


図1 マルチワイヤソーのモデル

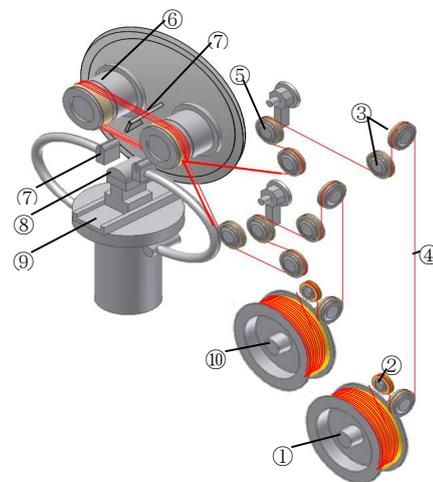
### 2. 研究の目的

本申請課題では、遊離砥粒方式や固定砥粒方式とは異なった第3のマルチワイヤソー方式を確立し、付加価値の高いウェハの創製を目指している。本方式は、特殊樹脂で表面を覆ったワイヤ工具を用いて、加工中にダイヤモンド砥粒を懸濁したスラリーを供給しながらスライシング加工を行う方法で、スラリー中の砥粒は加工圧力によってワイヤに埋め込まれ、その砥粒によって加工する方法で、半固定砥粒方式と申請者は定義している。本加工方式における加工精度等の加工特性に与える影響因子を実験的に解明し、生産コスト削減やカーフロス低減を可能ならしめる高能率切断の可能性を明らかにすることを

計画した。そして、これらの結果を踏まえて、遊離砥粒方式と固定砥粒方式の利害得失を明らかにすることによって、切断代を極限まで減らしつつある太陽電池基板、大口径化したLSI用シリコンウェハ並びにパワーデバイス用のSiC基板の高精度スライシングに重要な示唆を与えることを目標とした。

### 3. 研究の方法

図2に、本研究で使用したマルチワイヤソー((株)タカトリ製 MWS-21)のワイヤ機構図を示す。同図に示す様に本装置では、新線ボビンから送り出したワイヤをテンションプーリやガイドプーリなどを介した後、加工部の2本の多溝滑車に5回巻き付けた。そして、巻取り側テンションプーリやガイドプーリなどを介した後、巻取りボビンにてワイヤを回収する。また、加工部の多溝滑車には揺動軸を中心に最大±10degの回転往復運動を行うことで、揺動振動を付加することができる。加工の際は、ワイヤが高速往復走行を行い、下側のスラリー供給口のみを使用して加工部に極小径のダイヤモンド砥粒と加工液を攪拌したスラリーを連続的に供給した。そして、工作物を固定した加工台を上昇させ、高速走行しているワイヤを揺動振動させながら工作物に押し当てることで切断加工を行った。



- ①ワイヤ新線ボビン
- ②トラバースローラー
- ③ガイドローラー
- ④ワイヤ
- ⑤テンションローラー
- ⑥メインローラー
- ⑦スラリーノズル
- ⑧工作物
- ⑨ワークテーブル
- ⑩ワイヤ回収ボビン

図2 ワイヤソーの機構図

### 4. 研究成果

#### (1) SiC

##### ①実験条件及び工作物

表1に実験条件を示す。尚、工作物には2inchのSiCを半割加工したものを使用した。

##### ②切断面の評価

図3に加工後のウェハ表面の写真を示す。同図は加工後のウェハ表面への文字の反射状況の観察を行ったものである。同図よ

表 1 実験条件

工作物	材質	SiC	
	サイズ	2	inch
スラリー	砥粒	ダイヤモンド	
	砥粒径	G	2, 3 $\mu\text{m}$
	ベースオイル	グリコールタイプ	
	砥粒濃度	Co	5 wt%
	供給量	Sa	0.0042 $\text{m}^3/\text{min}$
ワイヤ	芯線径	D	$\phi 0.120$ mm
	樹脂厚み	Tr	3, 5, 7 $\mu\text{m}$
ワイヤ線速	V	1000-1300	m/min
新線供給量	F	1	m/min
ワイヤ張力	T	20	N
揺動角度	a	0.5	deg
揺動周波数	f	1.42	Hz
切断速度	Cs	0.08-0.12	mm/min

り、揺動振動を利用した樹脂コーティングワイヤ方式により SiC の切断を行うと、そのウェハ表面は Si 面、C 面ともに鏡面加工となっていることが明らかとなった。

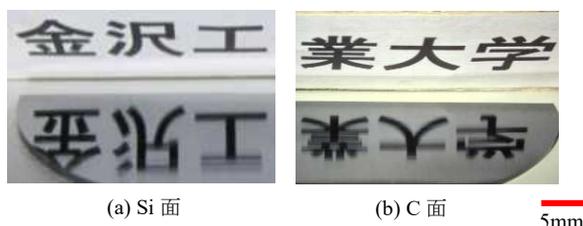


図 3 Si 面と C 面の比較

図 4 に切断速度(工作物固定台の移動速度)と表面粗さの関係を示す。同図より、切断速度を上昇させると切断方向、ワイヤ走行方向ともに表面粗さは悪化していることがわかる。次に、図 8 に切断速度を変化させたときのウェハの表面観察写真を示す。同図 (a) は切断速度 0.08mm/min、同図 (b) は切断速度 0.12mm/min で切断したウェハの表面写真を示している。同図を見ると、どちらのウェハの表面にも、ワイヤ走行方向に対して平行にスクラッチ痕が生じていることがわかる。切断速度 0.12mm/min で加工したウェハのスクラッチ痕が多くなっている。これは切断速度を上昇させると、切断抵抗が増加し、ワイヤ反転時や加中にワイヤのブレが大きくなるため、スクラッチ痕が増加したものと考えられる。そして、このスクラッチ痕の増加によって表面粗さは悪化する傾向を示したものと考えられる。

図 5 に切断速度と表面うねりの関係を示す。同図より、切断速度の上昇によってワイヤ走行方向および切断方向の表面うねりは悪化していることがわかる。本実験では  $\phi 0.12\text{mm}$  のピアノ線の表面に樹脂をコーティングすることによって切断加工を行っている。そのため、切断速度が上昇すると加工中にワイヤたわみが大きくなり表面うねりは悪化したものと考えられる。

### ③切り層の観察

図6にSiC切断後のスラリー中に分散している切りくずを集めて撮影した観察写真を示す。同図より、切りくずの形状が流れ型となっていることがわかる。このことから、揺動振動を利用した樹

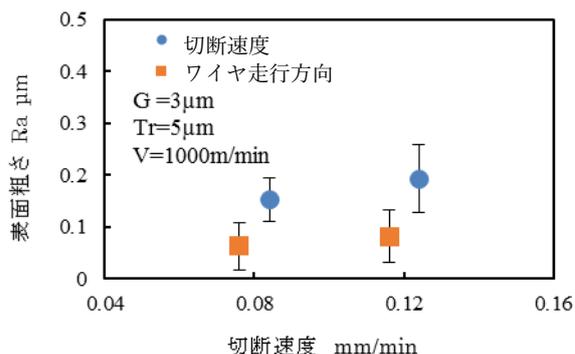


図 4 切断速度と表面粗さの関係

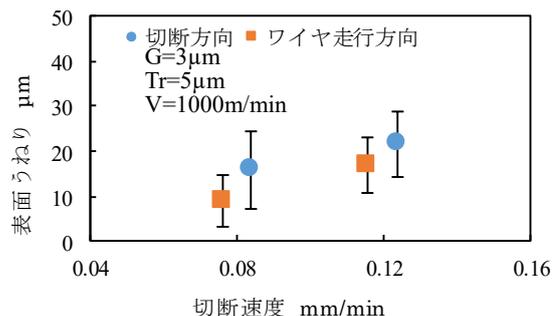


図 5 切断速度と表面うねりの関係

脂コーティングワイヤ方式によるSiC切断は延性モード加工となることが明らかとなった。

図 7 に切りくずの分析結果を示す。EDX 分析の結果を見ると、Si, C, O が多く検出された。以上の結果より、揺動振動を利用した樹脂コーティングワイヤ方式では、加工部が酸化することによって延性モード加工が実現できることが明らかとなった。

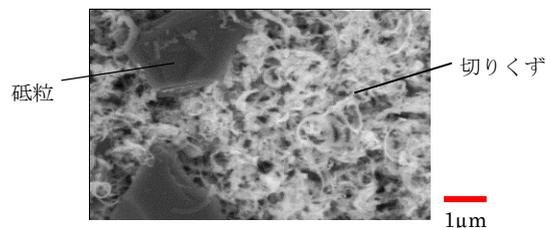


図 6 切りくずの観察

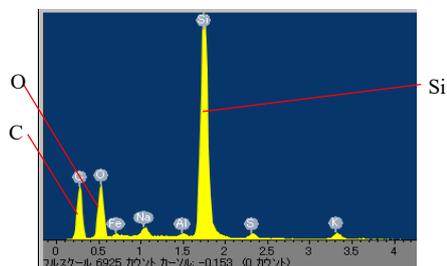


図 7 切りくずの分析結果

### (2) Si

#### ①実験条件及び工作物

表 2 に主な実験条件を示す。

#### ②切断面の評価

従来のピアノ線と芯線に異なる厚みの樹脂をコーティングした樹脂コーティングワイヤを用いて切断加工を行い、それぞれの工

表 2 実験条件

工作物	材質	シリコン	
	サイズ	60 <sup>W</sup> ×20 <sup>D</sup> ×50 <sup>H</sup> mm	
スラリー	砥粒	SD#3000	
	ベース オイル	種類	グリコール系
		粘度	31 mPa·s
	砥粒濃度	Co	5~10 %wt
	温度	293~298 K	
ワイヤ	ピアノ線	φ0.160mm	
	樹脂コーティングワイヤ	φ0.130mm(素線)+0.006~0.012mm(樹脂厚み)	
ワイヤ走行速度	V	500	m/min
新線供給速度	F	5~25	m/min
ワイヤ張力	T	25	N
ワイヤ巻数	N	41	
ワイヤピッチ	P	1	mm
切断速度	Cs	0.1~0.3	mm/min

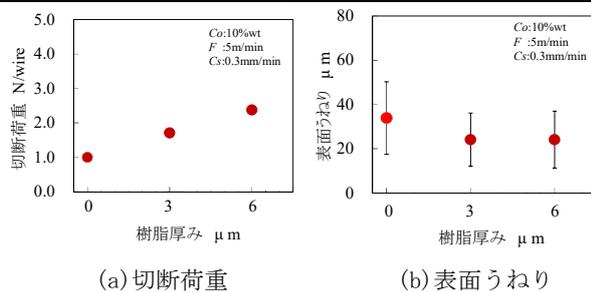


図 8 樹脂厚みと加工特性

具が加工特性に与える影響について検討を行った結果を図 8 に示す。なお、図中の樹脂厚み 0 の結果は、ピアノ線を用いた場合の値である。同図 (a) は切断荷重の変化である。同図より、ピアノ線を用いた場合の方が、樹脂コーティングワイヤを用いた場合よりも、切断荷重は減少した。また、樹脂コーティングワイヤを用いた場合では、樹脂厚みが厚い場合の方が、切断荷重は増大した。これは、樹脂厚みが厚い場合の方が、ワイヤへの砥粒の食い込み量が大きくなるために、ワイヤ表面における砥粒の保持力が大きくなる。この作用によって、砥粒の引掻き効果が大きくなり、切断荷重が大きくなったと考えられる。同図 (b) は表面うねりの変化である。同図より、ピアノ線を用いた場合よりも、樹脂コーティングワイヤを用いた場合の方が、表面うねりの平均値は減少した。また、樹脂コーティングワイヤを用いた場合では樹脂厚みが大きくなると、表面うねりの標準偏差にわずかに違いが生じていたが、表面うねりの平均値に大きな違いは見られなかった。

図 9 に樹脂厚みに対する表面粗さと加工表面の光沢度の変化を示す。測定に際して、表面粗さはカットオフ値 0.8mm で、光沢度は光沢計 (株) ビックケミー・ジャパン) を用いて、測定角度 20 度で測定した。同図 (a) は表面粗さの変化である。同図より、ピアノ線を用いた場合より、樹脂コーティングワイヤを用いた場合の方が、表面粗さの値は減少した。また、樹脂厚みが 6 μm の樹脂コーティング

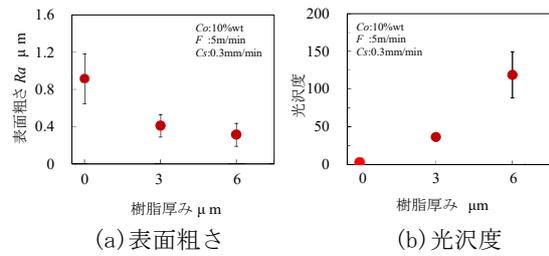


図 9 樹脂厚みと表面粗さの関係



(a) ピアノ線



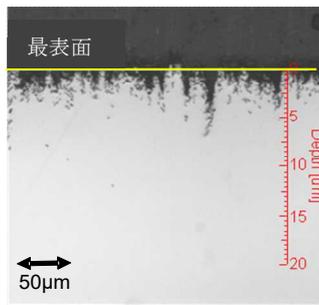
(b) 樹脂コーティングワイヤ(樹脂厚み:6 μm)

図 10 ウェハ表面の文字反射の様子

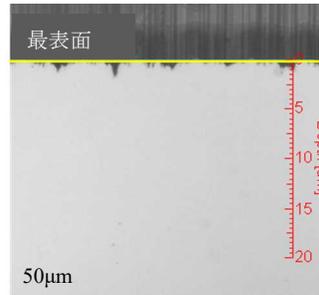
ワイヤを用いた場合に最も表面粗さの値が減少した。同図 (b) は、光沢計を用いてウェハの光沢度を測定した結果である。同図より、ピアノ線を用いた場合よりも、樹脂コーティングワイヤを用いた場合の方が、光沢度の値は大幅に向上した。また、樹脂コーティングワイヤを用いた場合では、樹脂厚みが 6 μm の樹脂コーティングワイヤを用いた時が光沢度は最も高い値を示し、ピアノ線を用いた場合よりも、光沢度は 100 以上高くなることが確認できた。これより、ウェハの表面粗さが向上することによって、ウェハ表面の光沢度は高くなることが明らかとなった。

ここで、光沢度の違いを視覚的に比較するために、実験後におけるウェハ表面の文字の反射状況を観察した結果を図 10 に示す。同図 (a) はピアノ線を用いた場合であり、同図 (b) は樹脂厚みが 6 μm の樹脂コーティングワイヤを用いた場合である。これらの結果より、ピアノ線を用いた場合では、ウェハ表面は梨地状加工面となっており、文字はウェハ表面に文字が全く写っていないことがわかる。これに対して、樹脂コーティングワイヤを用いた場合では、上の文字がウェハ表面にくっきり写るほどの良好な鏡面を得ることが確認できた。

次に、切断を行った後のウェハ加工面に対して斜め研磨法を用いて、表面クラック層の観察を行った結果を図 11 に示す。同図 (a) はピアノ線を用いた場合であり、同図 (b) は樹脂厚みが 6 μm の樹脂コーティングワイヤを用いた場合である。同図 (a) より、ピアノ線を用いた場合では、ウェハの最表面から 8 μm 程度の深さにかけて表面クラック層が生じ



(a) ピアノ線



(b) 樹脂コーティングワイヤ  
図 11 表面クラック層の観察写真

ている。それに対して、同図(b)より、樹脂コーティングワイヤを用いた場合には、ウエハの最表面から  $2\mu\text{m}$  程度の深さにかけて表面クラック層を生じており、ピアノ線を用いた場合と比較して表面クラック層は約  $1/4$  まで低減できることが確認できた。これより、樹脂コーティングワイヤを用いることによって、表面クラック層は大幅に低減できることが明らかとなった。

### ③ 延性モード加工の検証

樹脂コーティングワイヤを用いて、切断加工を行った時の切りくずの観察を行った結果を図 12 に示す。同図の丸枠内に示すように、樹脂コーティングワイヤとダイヤモンド砥粒を用いた場合の切りくずは流れ型の形状をしていることが確認できる。このような流れ型の切りくずは延性モード研削によるせん断変形によって形成される。一般的に、延性モード研削は金属の切削加工で形成されるが、今回実験で使用した単結晶シリコンのような脆性材料ではせん断変形する前に引っぱり破壊するので、流れ型の切りくずは形成されない。しかし、切込み量をきわめて小さくすることによって単結晶シリコンでも延性モード研削が可能になる<sup>4)</sup>と報告されている。また、この延性モード研削は、工作物に対する砥粒の切込み深さが小さい場合に生じやすく、切りくず以外の特徴として、工作物の表面には砥粒切れ刃が通過した切削条痕が残る<sup>5)</sup>と報告されている。そこで、実験後のウエハ表面を観察した結果を図 13 に示す。同図(a)はピアノ線を用いた場合であり、同図(b)は樹脂コーティングワイヤを用いた場合の観察写真である。同図(a)、(b)より、樹脂コーティングワイヤを用いた場合には、ピアノ線を用いた場合と比較するとウ

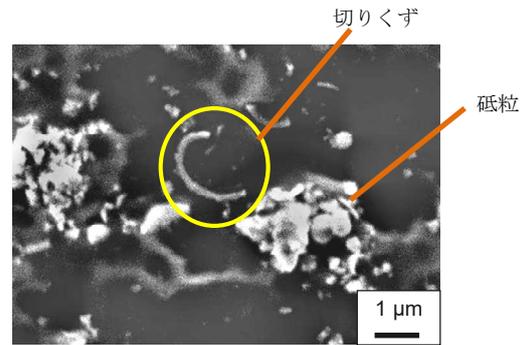
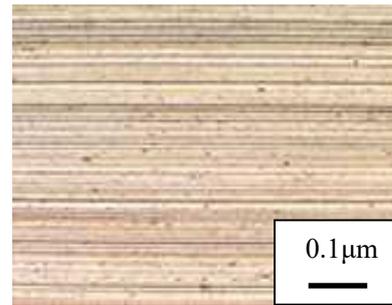
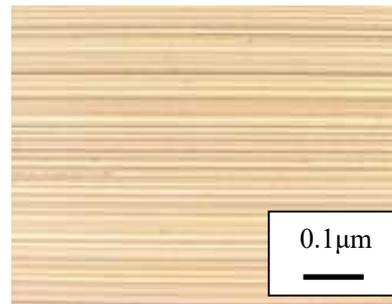


図 12 切りくずの観察写真



(a) ピアノ線



(b) 樹脂コーティングワイヤ  
図 13 ウエハ表面の観察写真

エハの表面には幅の細いスクラッチ痕が多数発生していることが確認できる。この幅の細いスクラッチ痕は、加工によって生じた研削条痕であると考えられる。これより、切りくずやウエハ表面の観察結果から、樹脂コーティングワイヤを用いた場合には延性モード研削による加工が行われ、砥粒の切込み深さが減少したことによって表面クラック層が軽減したと考えられる。

### 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 3 件)

- ① 諏訪部仁, 硬脆材料の延性モードスライシング加工, 機械の研究, 査読無, 68 巻, 2016, 922-928
- ② 諏訪部仁, 大久保順平, 松川和平, 石川憲一, マルチワイヤソーによる SiC の延性モードスライシング加工に関する研究, 砥粒加工学会誌, 査読有, 60 巻, 2016,

91-96

- ③ 諏訪部仁, 四田一高, 石川憲一, A study on grain actions at the processing part of multi-wire saw, Proceedings of 15th International Conference on Precision Engineering (ICPE2014), 査読有, 2014, 627-628

[学会発表] (計 13 件)

- ① 諏訪部仁, 安岡岳俊, 石川憲一, 樹脂コーティングワイヤ方式を用いたマルチワイヤソーによるガラスの延性モード加工, 精密工学会, 2017年3月15日, 慶應義塾大学
- ② 諏訪部仁, 佐治季貴, 石川憲一, 樹脂コーティングワイヤを用いたマルチワイヤソーにおける砥粒挙動が加工に与える影響, 精密工学会, 2017年3月15日, 慶應義塾大学
- ③ 諏訪部仁, 佐治季貴, 石川憲一, 樹脂コーティングワイヤを用いたマルチワイヤソーにおける加工部の砥粒挙動, 砥粒加工学会, 2016年8月23日, 兵庫県立大学
- ④ 諏訪部仁, 大久保順平, 石川憲一, マルチワイヤソーによるSiCの高精度スライシング加工に関する研究, 砥粒加工学会, 2016年8月23日, 兵庫県立大学
- ⑤ 諏訪部仁, 佐治季貴, 石川憲一, 遊離砥粒加工の砥粒挙動が加工に与える影響に関する研究, 日本設計工学会, 2016年6月25日, 福井大学
- ⑥ 諏訪部仁, 大久保順平, 石川憲一, マルチワイヤソーによるSiCの高精度・高能率加工に関する研究, 精密工学会, 2016年3月17日, 東京理科大学
- ⑦ 諏訪部仁, 安岡岳俊, 石川憲一, マルチワイヤソーの鏡面スライシング加工における接着剤が加工面に及ぼす影響, 精密工学会, 2016年3月17日, 東京理科大学
- ⑧ 諏訪部仁, 大久保順平, 松川和平, 石川憲一, マルチワイヤソーによるSiCの延性モード加工, 砥粒加工学会, 2015年9月9日, 慶應義塾大学
- ⑨ 諏訪部仁, 松川和平, 石川憲一, マルチワイヤソーによるSiCの延性モード加工に関する研究, 精密工学会, 2015年3月18日, 東洋大学
- ⑩ 諏訪部仁, 山田大介, 石川憲一, シリコンウエハの鏡面スライシング加工における加工液と工作物固定用接着剤が加工に与える影響, 精密工学会, 2015年3月18日, 東洋大学
- ⑪ 諏訪部仁, 四田一高, 石川憲一, 遊離砥粒マルチワイヤソーの加工部における砥粒挙動に関する研究, 精密工学会, 2014年9月17日, 鳥取大学
- ⑫ 諏訪部仁, 松川和平, 石川憲一, 揺動振動を利用したマルチワイヤソーによるシ

リコンの切断加工特性に関する研究, 精密工学会, 2014年9月17日, 鳥取大学

- ⑬ 諏訪部仁, 四田一高, 石川憲一, マルチワイヤソーの加工溝底部における砥粒挙動に関する研究, 砥粒加工学会, 2014年9月11日, 岩手大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

諏訪部 仁 (SUWABE, Hitoshi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号: 40202139

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

( )