

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06080

研究課題名（和文）炭素繊維強化プラスチックの高効率・高品質ドライ研削加工技術の開発研究

研究課題名（英文）High Efficiency and High Quality Dry Grinding of Carbon Fiber Reinforced Plastic

研究代表者

大橋 一仁（Ohashi, Kazuhito）

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：10223918

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、炭素繊維強化プラスチックをダイヤモンド砥石でドライ研削すると同時に砥石表面にドライアイスジェットを作用させることによって、研削に伴う砥石の目づまりが抑制され、通常のドライ研削よりも砥石寿命が向上し、研削面品質も良好になることを実験的に明らかにした。さらに、湿式研削では、研削面の炭素繊維に微細な破砕が生じることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボン繊維強化プラスチックの高精度かつ高品質なドライ研削加工をドライアイスジェットの利用によって実現できることを明らかにしたことは、これまでに報告されておらず、本研究の学術的意義は高い。この成果は、航空・宇宙分野等におけるカーボン繊維強化プラスチックの加工コストを低減するとともに高品質化をもたらし、カーボン繊維強化プラスチックの大幅な利用拡大への布石となり得る。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed the dry grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) using the dry ice jet blowing on a diamond grinding wheel surface in the grinding process. As a result, it was experimentally clarified that the dry ice jet controls the wheel loading due to grinding of CFRP to lead the extent of wheel life and the increase of ground surface quality rather than the normal dry grinding. Furthermore, it was confirmed that some carbon fibers on the ground surface were finely crushed in wet grinding.

研究分野：精密加工学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 研削 目づまり 砥石寿命

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

カーボン繊維強化プラスチックは、特に航空機部品としての海外メーカからの我が国の受注が増加している。ところが、その部品の製造法および条件は、航空機メーカにより厳格に管理され、素材成形後の二次加工は、ドライ条件での切削加工が多く実施されている。そのため、極めて短い工具寿命や加工面品位の劣化に代表される問題を克服するための技術的課題に直面しているのが現状である。

一方で、クーラントを用いたウェット研削加工は、カーボン繊維強化プラスチックの2次加工法として多用されている切削加工に比べて工具寿命や加工面品位の点で有利であるものの、航空機産業で指定されるドライ加工の条件下では、砥石の目づまりによる砥石寿命の低下やそれにとまう加工面品位の劣化が著しく、ドライ研削加工の航空機部品の二次加工への適用は困難とされてきた。このような状況から、カーボン繊維強化プラスチックをドライ環境下で高能率かつ高品質に研削加工する技術の開発を試みた。

### 2. 研究の目的

本研究では、カーボン繊維強化プラスチックのドライ研削加工において致命的な問題である砥石の急速な目づまりによる切れ味低下を研削加工と同時に微粉ドライアイスブラストを適用しインプロセスで解消させることによって、砥石寿命を飛躍的に向上させ、カーボン繊維強化プラスチックの高品質な精密加工面を砥石のドレッシングをすることなく極めて高能率に生成する画期的なカーボン繊維強化プラスチックのドライ研削加工技術の開発を目的としている。

### 3. 研究の方法

図1に、本研究で用いた、平面研削実験装置の概略を示す。本研究では、平面研削盤を用いてビトリファイドダイヤモンド砥石に所定の切込み量を与え、繊維角度  $\theta=0^\circ$  あるいは  $90^\circ$  となるようにカーボン繊維強化プラスチックを固定し、ダウンカットで1パス研削することにより行った。表1に主な研削条件を示す。ウェット研削においては、平面研削盤のクーラントシステムを用いて80倍希釈のソリュブル研削液をノズルから研削点に供給した。研削抵抗は、工作物を固定するバイスを取り付けた水晶式圧電型動力計により測定を行った。砥石研削点温度は、ポリエステル被膜したコンスタンタン線と、カーボン繊維を熱電対とした熱電対埋込み法<sup>①</sup>により測定を行った。測定されたデータは、DCアンプを使用して、PCに出力した。また、研削面性状は、SEMまたはマイクロスコープによって観察を行い、研削面粗さ  $Ra$  は接触式表面粗さ計で測定した。

図2に、ドライアイスブラスト (DIB) 援用研削実験装置の概略図を示す。カーボン繊維強化プラスチックのドライ研削により発生する砥石の目づまりを抑制するため、ドライアイスブラスト装置を採用した。ドライアイスブラスト装置には液化炭酸ガス、窒素ガスがそれぞれボンベより供給され、液化炭酸ガスは装置内部で粒径およそ  $50\mu\text{m}$  以下のドライアイス微粒子になり噴射される。実験はビトリファイドダイヤモンド砥石に所定の切込み量 ( $\Delta=400\mu\text{m}$ ) 与え、ドライアイスの粒子を、窒素のアシストガス ( $0.45\text{MPa}$ ) で砥石表面に噴射しながら、繊維角

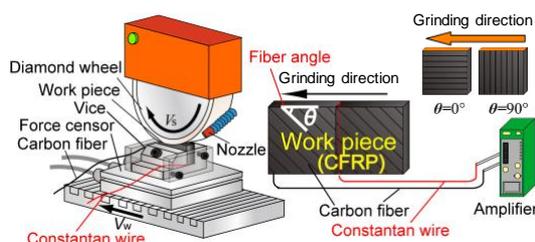


図1 平面研削実験装置

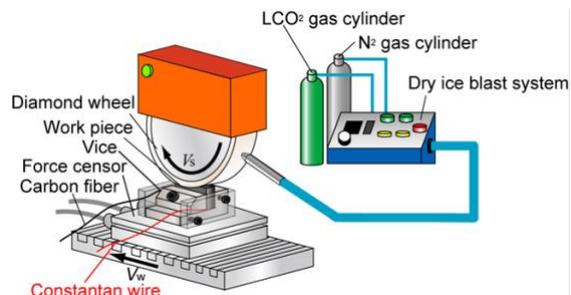


図2 DIB 援用研削実験装置

表2 DIB 援用研削条件

表1 主な研削条件

Grinding wheel	SD230F75V( $\phi$ 250×10mm)
Workpiece	CFRP(UD)( $\theta=0^\circ, 90^\circ$ ) (20×20×5mm×2pieces)
Grinding direction	Down-cut grinding
Peripheral wheel speed	$V_s=23.6\text{m/s}$
Workpiece speed	$V_w=0.08\text{m/s}$
Setting depth of cut	$\Delta=40,100,200,400\mu\text{m}$
Grinding atmosphere	Dry, Wet
Dressing/Truing	Rotary dresser (WA320/GC80)

Grinding wheel	SD230F75V( $\phi$ 250×10)
Workpiece	CFRP(UD)( $\theta=0^\circ$ ) (20×20×3mm×2pieces)
Grinding direction	Down-cut grinding
Peripheral wheel speed	$V_s=23.6\text{m/s}$
Workpiece speed	$V_w=0.08\text{m/s}$
Setting depth of cut	$\Delta=400\mu\text{m}$
Nozzle angle	$90^\circ$
Nozzle standoff	1mm
Blasting pressure	0.45MPa
L-CO2 supply	2.7,5.3,10.7,16.0,21.3 g/s

度  $\theta = 0^\circ$  のワークをダウンカットで 1 パス研削することにより行い、研削抵抗、研削面粗さ等によりドライアイスプラストによる目づまり除去の効果を実験的に検討した。表 2 に主な研削条件を示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 研削雰囲気による研削特性への影響

図 3 に、ドライおよびウェット研削における繊維角度  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  での設定砥石切込み量と研削主分力の変化過程を示す。各加工雰囲気において、設定切込み量の増加に伴い、各研削抵抗は増加する傾向となった。また、図からドライ研削の方がウェット研削より研削主分力が大きくなる。ドライ研削では砥石の目詰まりが生じ、ウェット研削より主分力が大きくなったと考えられる。さらに、ウェット研削においては、研削液の潤滑効果によって研削主分力が低減されたと考えられる。また、繊維角度  $\theta = 0^\circ$  よりも  $90^\circ$  の方が主分力は大きい。これは、繊維角度  $\theta = 90^\circ$  では繊維の配列方向と、研削方向が垂直になり炭素繊維を切断しながら砥粒切れ刃が切削するためと考えられる。

図 4 に、繊維角度  $\theta = 0^\circ$  における各設定砥石切込み量  $\Delta = 400\mu\text{m}$  で研削した後の砥石表面の観察結果を示す。ドライ研削では砥石の砥粒がほぼ見えないほど切りくずの目づまりが確認された。しかしウェット研削では、目づまりは元より砥石表面に切りくずの付着すら確認されない。これはクーラントによって切りくずの砥石表面への付着が抑制されるためと考えられる。

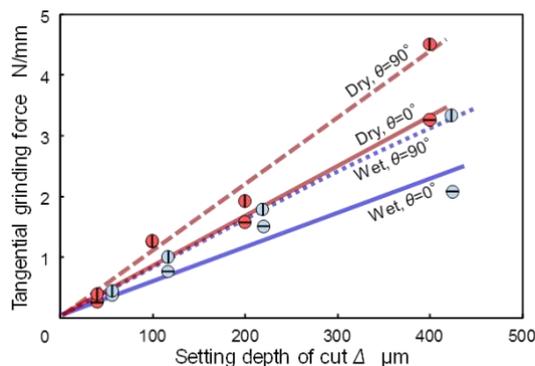


図 3 研削主分力の変化過程

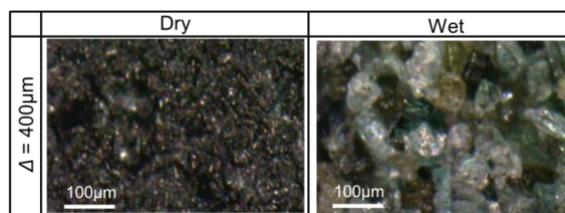
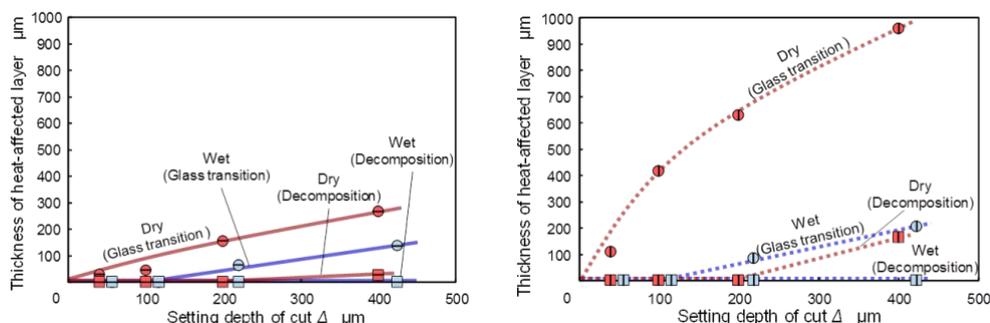


図 4 砥石表面観察結果

##### (2) カーボン繊維強化プラスチックの研削加工変質層

カーボン繊維強化プラスチックをドライおよびウェット研削する場合の砥石研削点温度を基にして研削面近傍の熱影響層をシミュレーションし、この結果から研削によってマトリックス樹脂がガラス転移する温度および熱分解する温度に達する深さをまとめた結果を図 5 に示す。図から、繊維角度にかかわらずドライ研削における設定砥石切込み量  $\Delta = 200\mu\text{m}$  までは、マトリックス樹脂が熱分解する層は生成されないが、設定砥石切込み量  $\Delta = 400\mu\text{m}$  ではマトリックス樹脂が熱分解する層の生成することがわかる。これは設定砥石切込み量が増加することで、研削熱の影響が大きくなり、マトリックス樹脂の熱分解が生じる可能性を示している。

いっぽう、ウェット研削においては繊維角度にかかわらず、ドライ研削より各熱影響層の生成が抑制される。これはクーラントの冷却効果によって研削熱の影響が低減したことが要因と考えられる。また、繊維角度にかかわらず設定砥石切込み量  $\Delta = 100\mu\text{m}$  までマトリックス樹脂のガラス転移は生じることなく、ドライ研削と比べても繊維角度  $\theta = 90^\circ$  においては最大で約 80%



(a)  $\theta = 0^\circ$

(b)  $\theta = 90^\circ$

図 5 カーボン繊維強化プラスチックの研削熱影響層深さ

もガラス転移が生じる層を低減することが示唆される。また、熱分解が発生する層は繊維角度にかかわらず設定砥石切込み量  $\Delta=400\mu\text{m}$  でも発生しない。

また、繊維角度  $\theta=0^\circ$  よりも  $\theta=90^\circ$  の各加工影響層深さが大きくなる傾向にある。これは、 $\theta=90^\circ$  ではマトリクス樹脂に比べて熱伝導率の高いカーボン繊維が研削面に対して垂直に配向することで切込み深さ方向の工作物の熱伝導率が繊維角度  $0^\circ$  の場合よりも大きいためと考えられる。

### (3) カーボン繊維強化プラスチックの高能率ドライ研削

本研究では航空機部品の加工で求められるカーボン繊維強化プラスチックのドライ加工の能率をさらに向上させるためにドライアイスブラスト (DIB) を採用する研削技術を提案し、通常では早期の目詰まりが生じるドライ研削において、目詰まりを抑制しながら研削加工することで砥石寿命を延長する効果について検証を行った。すなわち、研削抵抗、砥石研削点温度、研削面粗さ、さらに本研究で定義した砥石表面を観察することで目詰まりによる研削限界距離 (DIB の有効研削距離) などを通常のドライ研削の場合と比較検討し、ドライアイスブラストによる加工性能向上への効果を定量的に評価した。なお本研究では、ドライアイス流量を変更パラメータとして研削特性の比較評価を実施した。

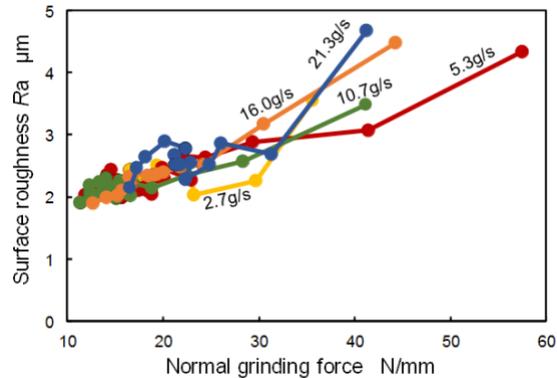


図 6 研削背分力と表面粗さとの関係

図 6 に、DIB 援用研削で異なる液化二酸化炭素供給量に設定してドライ研削を継続する場合の研削背分力と研削面粗さ  $Ra$  の相関関係を示す。図から各ドライアイス流量において、DIB 援用研削の研削面粗さが  $3\mu\text{m } Ra$  以下の場合には研削背分力も  $30\text{N/mm}$  を上回らないことが認められる。しかし、研削面粗さ  $Ra$  が  $3\mu\text{m}$  を超えると、研削背分力は急激に上昇し最大で  $50\text{N/mm}$  を超える。

また、図 7 に液化二酸化炭素供給量  $10.7\text{g/s}$  において、研削面粗さが  $3\mu\text{m } Ra$  を超える前 (研削距離:  $760\text{mm}$ ) と、超えた後の砥石表面の観察結果 (研削距離:  $800\text{mm}$ ) を示す。図から、研削面粗さが  $3\mu\text{m } Ra$  を超える前の砥石表面にはダイヤモンド砥粒の突出しが確認されるものの、 $3\mu\text{m } Ra$  を超えた砥石表面は目詰まりが著しく発生しており、砥粒の突出しがほとんど確認されない。これらの結果から本研究では、研削面粗さが  $3\mu\text{m } Ra$  に達するまでの研削距離を有効研削距離と定義する。

図 8 に、DIB 援用研削における液化二酸化炭素供給量による DIB による有効研削距離の変化を示す。図から、液化二酸化炭素供給量の増加に伴い有効研削距離は増加し、液化二酸化炭素供給量が  $5.3\text{g/s}$  の時に研削距離は  $1120\text{mm}$  で最大となるが、液化二酸化炭素供給量をさらに増加させると有効研削距離は減少する結果となった。この結果から本研究の条件における最適な液化二酸化炭素供給量は  $5.3\text{g/s}$  であることがわかる。通常のドライ研削における研削限界距離は、 $40\text{mm}$  程度であるため DIB を用いることで、約 28 倍もの加工能率向上が達成される。

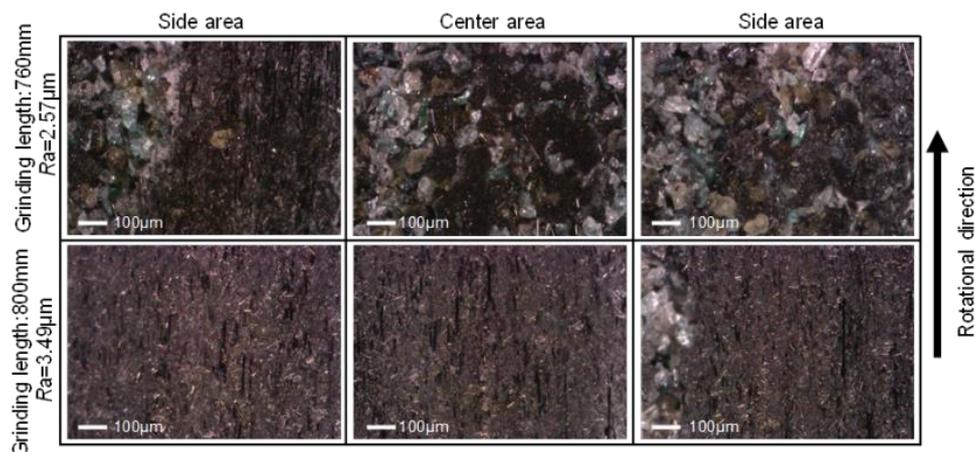


図 7 砥石表面

以上から、本研究で提案する DIB 援用研削は、ドライアイスブラストを用いて、砥石の目詰まりをインプロセスで除去することにより、カーボン繊維強化プラスチックの高能率なドライ加工を可能にすることが明らかになった。

<引用文献>

- ① 大橋一仁, 前野隼人, 藤原良平, 窪田真一郎, 吉川満雄, 塚本真也, **CFRP** の研削特性に及ぼす加工雰囲気の影響 (水溶性クーラントおよび液体窒素供給の効果), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.808, 2013, 5068-5078

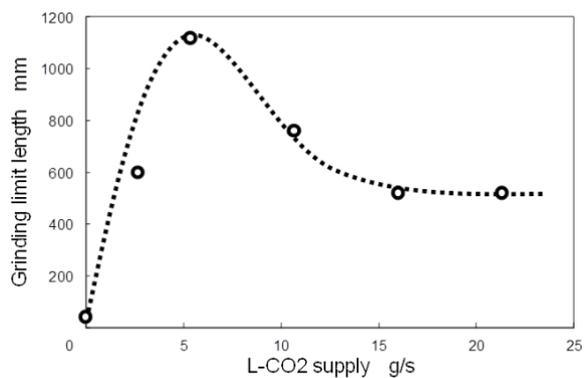


図 8 DIB 援用による有効研削距離

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroyuki Kodama, Shingo Okazaki, Yifan Jiang, Hiroyuki Yoden, Kazuhito Ohashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Thermal Influence on Surface Layer of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) in Grinding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.04.005">https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.04.005</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shingo OKAZAKI, Yifan JIANG, Hiroyuki KODAMA, Hiroyuki YODEN, Kazuhito OHASHI	4. 巻 -
2. 論文標題 Influence of Grinding Temperature on Surface Quality of CFRP	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2019)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shingo Okazaki, Yifan Jiang, Hiroyuki Kodama, Hiroyuki Yoden and Kazuhito Ohashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Influence of Grinding Atmosphere on Grinding Characteristics of CFRP	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (IC3MT 2018)	6. 最初と最後の頁 105-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuto Katayama, Yuki Ohta, Hiroyuki Kodama, Kazuhito Ohashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Recovery of Grindactivity by Dry Ice Blasting on Micro-Grit Diamond wheel in dry Grinding of Carbon	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology	6. 最初と最後の頁 76-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 岡崎真吾, 江 一帆, 児玉紘幸, 余田裕之, 大橋一仁
2. 発表標題 CFRPの研削加工に及ぼす研削雰囲気の影響
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo OKAZAKI, Yifan JIANG, Hiroyuki KODAMA, Hiroyuki YODEN, Kazuhito OHASHI
2. 発表標題 Influence of Grinding Temperature on Surface Quality of CFRP
3. 学会等名 The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋一仁
2. 発表標題 パーティクル・ジェットで広がる精密加工技術
3. 学会等名 精密加工研究会第98回例会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Okazaki, Yifan Jiang, Hiroyuki Kodama, Hiroyuki Yoden and Kazuhito Ohashi
2. 発表標題 Influence of Grinding Atmosphere on Grinding Characteristics of CFRP
3. 学会等名 2018 International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (IC3MT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuto Katayama, Yuki Ohta, Hiroyuki Kodama, Kazuhito Ohashi
2. 発表標題 Recovery of Grindactivity by Dry Ice Blasting on Micro-Grit Diamond wheel in dry Grinding of Carbon
3. 学会等名 The 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡崎真吾, 江 一帆, 児玉紘幸, 余田裕之, 大橋一仁
2. 発表標題 ドライアイスブラストを用いたCFRPドライ研削における熱影響の検討
3. 学会等名 2018年砥粒加工学会卒業研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江 一帆, 児玉紘幸, 余田裕之, 大橋一仁
2. 発表標題 CFRP の研削加工における熱影響のシミュレーション
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	児玉 紘幸  (Kodama Hiroyuki)  (60743755)	岡山大学・自然科学研究科・講師    (15301)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤原 貴典 (Fujiwara Takanori) (20274011)	岡山大学・研究推進機構・教授  (15301)	
研究分担者	大西 孝 (Onishi Takashi) (90630830)	岡山大学・自然科学研究科・助教  (15301)	