

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01757

研究課題名(和文) 金属板材せん断部の微視組織情報とFEM解析による2次破壊機構の究明

研究課題名(英文) Investigation of secondary fracture mechanism at sheared edge of sheet metal through microstructure evaluation and FEM analysis

研究代表者

高村 正人 (Takamura, Masato)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・上級研究員

研究者番号：00525595

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,360,000円

研究成果の概要(和文)：金属板材において、せん断加工によって生じた破面で発生する、疲労破壊や遅れ破壊のような2次的な脆性破壊の抑制が課題となる。この問題に対して、本研究では陰極チャージ材面内曲げ試験を実施し、打ち抜き加工部に水素チャージ条件下で負荷された引張応力と、耐遅れ破壊性の関係を解明した。2次的破壊が発生するメカニズムの検討のためのツールとして、FEMによる新たなせん断解析手法を開発し、薄鋼板の打ち抜きに適用した。また、破面の集合組織や残留応力測定をラボレベルで可能とするために、小型中性子源による回折計を新たに開発し、大規模施設に匹敵する集合組織測定が可能になったとともに、応力測定にも道が拓けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車等の軽量化に欠かせない高張力鋼板を適用する上で、遅れ破壊や疲労破壊の問題は、車両の安全性を確保するために避けて通れない。本研究結果により、これら2次的破壊を引き起こすメカニズムを解明するための実験手法、解析手法、測定手法が確立された。すなわち、2次的破壊の問題を打ち抜き加工条件と関連付けて解明するための道具立てが整い、車両の安全性を確保しながら軽量化、低炭素化を進める技術的基盤づくりに寄与できた。

研究成果の概要(英文)：Secondary fractures such as fatigue fracture or delayed fracture occurring in punched surface of sheet metals are becoming serious problems that should be under control. In this study, in-plane bending tests with the specimen with hydrogen concentrated by cathodic charging were conducted and the relationship between delayed fracture resistance and applied tensile stress was clarified.

In order to analyze the mechanisms of secondary fracture generation, newly developed FEM method for punching process was adopted.

Furthermore, measurement methods for texture and residual stress of the punched surface by neutron diffraction were developed by using a compact neutron source, which enable us to perform the on-site neutron diffraction at metal forming research site with the accuracy comparable to those with large neutron facilities.

研究分野：塑性加工学，金属組織学，中性子回折

キーワード：高張力鋼板 せん断加工 残留応力 遅れ破壊 陰極チャージ 中性子回折 小型中性子源 飛行時間法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

金属板材は通常、所定の形状に切断された後にプレス加工によって成形される。切断加工としては打ち抜きやブランクング、ピアシングのようなせん断加工が最も広く普及している。自動車や家電のようなプレス加工が主体となる部材においては、せん断加工によって生じた破面（以下、せん断切り口）で発生する、疲労破壊や遅れ破壊のような 2 次的な脆性破壊の抑制が課題となる。

破壊力学的な側面からせん断加工部をとらえた場合、未知なる部分はあまりに多い。せん断切り口では 400%以上のひずみが生じており、残留応力は 1GPa を超え、凹凸は激しく、金属組織もぐちゃぐちゃな状態である。このような状況を反映させてせん断切り口の疲労破壊や遅れ破壊を適切に予測できるような理論は現在のところ存在していない。

例えば、結晶塑性有限要素法（以下、FEM）シミュレーションによる各種材料の集合組織発展の解析や仮想材料試験としての力学特性の予測は盛んに行われているが、対象となっているのはマクロ的には一様変形の領域のみである。結晶塑性的な観点でせん断切り口のような極めて局所的な大変形領域を解析した例は無い。さらに破壊まで至るに、集合組織等の結晶の配向を考慮してそのメカニズムの解明が試みられたことも無い。

上記の背景のもと、本研究では“問い”を破断部近傍の集合組織、残留応力、延性破壊的な損傷度を如何にモデル化できるのかという点、およびこれらが 2 次的な疲労や遅れ破壊のき裂発生と進展挙動にどのように影響するかという点とする。

### 2. 研究の目的

本研究では金属板材のせん断切り口の疲労や遅れ破壊に代表される、破断後のさらなる 2 次的な脆性破壊挙動のメカニズム解明を目的とする。これにより、超高強度・薄肉材の推進による構造部材の軽量化と信頼性の向上、構造部材の寿命評価等の産業応用に繋げる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 陰極チャージ材面内曲げ試験

面内曲げに用いる試験片を図 1 に示す。中央部にせん断加工（クリアランス 10 %t における  $\phi$  10 mm の穴抜き。ここで、%t は板厚に対する割合を示す）によって設けた切り欠きを有しており、この切り欠きが曲げ外となるように曲げが加えられる。供試材には 1180MPa 級の冷延鋼板 JSC1180Y (1.2 mm 厚) を用いた。

面内曲げ試験機として、チオシアン酸アンモニウム水溶液浸漬による水素陰極チャージと面内曲げ負荷を同時に行う曲げジグを新たに開発した。図 2 にその模式図を示す。試験片はチオシアン酸アンモニウム溶液プール中に設置され、錘荷により面内にて 3 点曲げされる。また、当該ジグは塩酸、硫酸等の強酸も使用できるように樹脂製としている。負荷時間は 24 時間を上限とし、遅れ破壊が生じた時間と曲げ負荷による応力増分値を評価した。

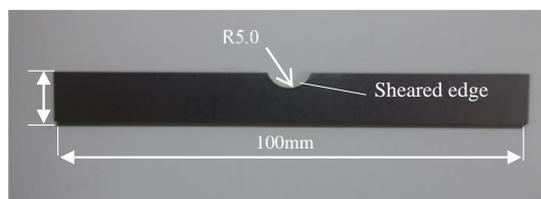


図 1 面内曲げ試験用試験片

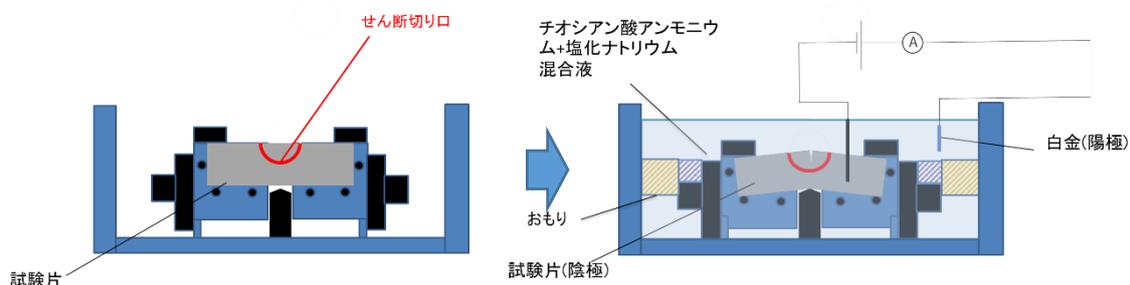


図 2 陰極チャージ面内曲げ試験機

(左：無負荷状態，右：曲げ応力負荷状態でチャージ)

#### (2) 亀裂線追加法によるせん断 FEM 解析

本研究では、静的陽解法有限要素法によるせん断過程の解析手法をベースに、より高精度、高分解能な応力分布を求めることを目指して、広く使われるような要素剛性低減（あるいは要素削除）による破壊の表現に代えて、「亀裂線追加法」を開発し、穴抜き過程への適用を試みた。

#### (3) 小型中性子源による集合組織測定

金属の塑性変形メカニズムと関連のある微視組織情報をバルク平均（mm オーダー）として取得

する手法として、中性子回折による残留応力や集合組織測定技術が注目されている。この手法をラボのレベル（塑性加工研究の現場）で使用可能とするため、理研小型中性子源（Riken Accelerator-driven Compact neutron Source, 以下、「RANS」）（図3）における回折測定を高度化し、せん断破面における微視組織情報測定の実現を目指す。特に集合組織測定の高精度化、及び応力測定の実現を目指した回折線の分解能向上に取り組んだ。

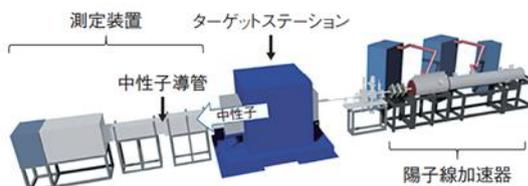


図3 理研小型中性子源 RANS  
(Riken Accelerator-driven Compact Neutron Source)

#### 4. 研究成果

##### (1) 陰極チャージ材面内曲げ試験

面内曲げに先立ち測定したせん断切り口中央部の残留応力は周方向：731MPa、板厚方向：262MPaであった。コリメータ径をφ0.3mmとしてパルステック工業社製のX線応力測定機μ-X360を用いて測定し、全サンプルにて評価された値の最大値を上記の残留応力としている。

錘による負荷応力は有限要素法シミュレーションによって見積もった。錘重量と切り口の周方向応力増分との関係を図4に示す。

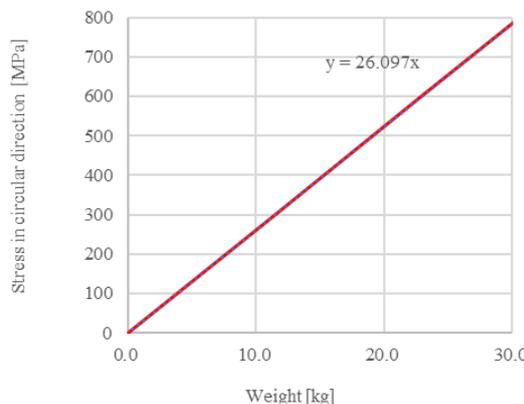


図4 錘重量と切り口の周方向応力増分との関係

図5に割れが発生した時間と負荷応力増加分との関係を示す。図5より負荷応力494MPaにおいては2回実施中の2回とも遅れ破壊が発生しており、それ以下の468MPaにおいては2回のうち1回遅れ破壊が発生している。468MPaを境に遅れ破壊が発生すると考えられる。図6は試験後の試験片切り口（JSC1180Y, 520MPa 負荷・1時40分チャージ）を撮影したものである。穴あけ加工による切り欠き部中央で遅れ破壊が発生していることが分かる。多くの場合せん断面より亀裂が発生し、破断面へ伝播する。ただし、その伝播は極めて速い。破断面の残留応力が引張側で高いことを考えると切り口の形状のような幾何学的な影響が初期残留応力よりも大きいことが示唆される。

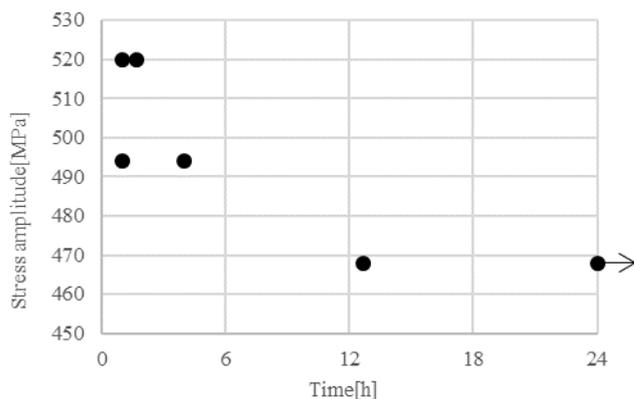


図5 割れ発生時間と負荷応力増加分の関係

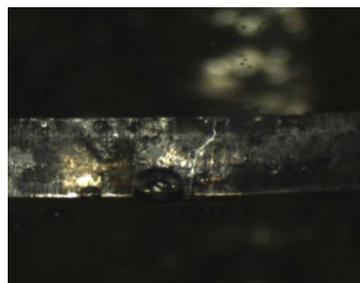


図6 試験後の試験片切り口（520 MPa 負荷・1時40分チャージ）

##### (2) 亀裂線追加法によるせん断FEM解析

本手法においては、図7に示すような延性破壊条件によって破壊判定された要素の集合を定義し、その中に亀裂線を定義する。さらに亀裂表面が新たな外形線とみなしてリメッシュを繰り返す事でせん断加工における亀裂発生や伝播を表現する。本研究では、打ち抜き破面の局所的な残留応力を評価するために本手法の実加工への適用を試み、図8のような結果を得た。

##### (3) 小型中性子源による集合組織測定

RANSでは、飛行時間型中性子回折と呼ばれる回折手法を用いている。この手法では、様々な波

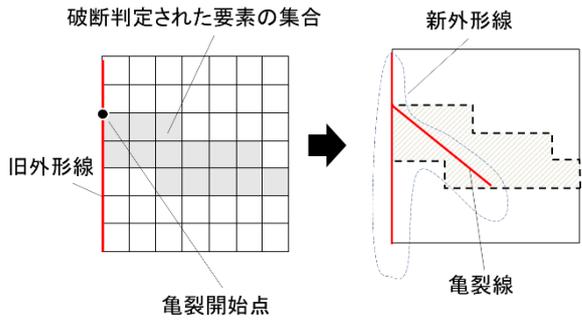


図7 せん断亀裂伝播解析時の破壊条件と亀裂線定義

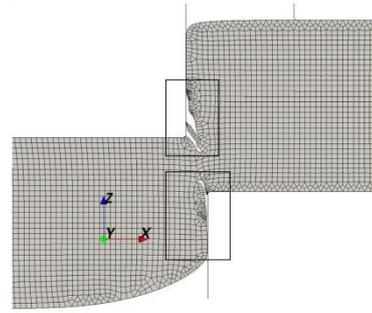


図8 せん断解析例

長を有する中性子線はそれぞれ異なる飛行速度を持つため、中性子が発生してから試料に当たり、検出器にたどり着くまでの時間を計測することで、異なる波長の中性子線を見分けることができるという原理を利用している。中性子線を試料に照射し、その試料の結晶方位に依存する回折パターンを解析することで、集合組織を知ることができる。図9にRANSの回折計外観を示す。



図9 RANS回折計外観

本研究では、薄鋼板サンプルを加工して、一辺15mmの立方体形状の試料を用意した。ビーム強度の点で劣ることによる低統計な回折パターンを有効に活用するために、バックグラウンドノイズ遮蔽やスペクトル解析条件を最適化したことで、小型加速器中性子源を用いた鉄鋼材料の集合組織測定に世界で初めて成功した。

今回の結果は、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)に設置された工学材料回折装置「匠」で測定した結果とほぼ一致しており、中性子ビーム強度が3桁違う大型実験施設に匹敵する計測能力を小型中性子源で実現したことになる(図10)。

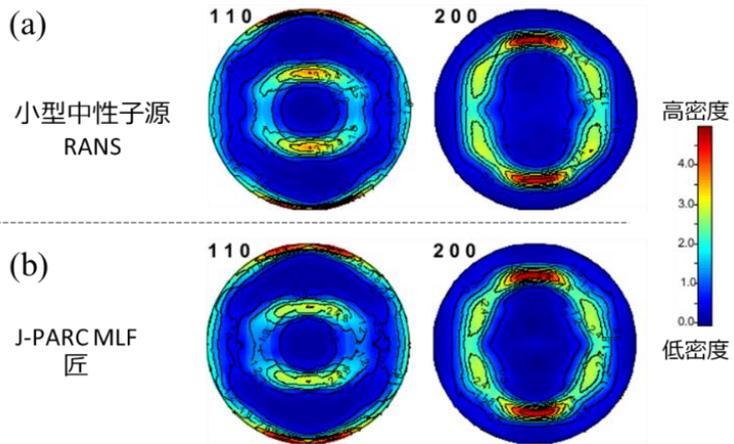


図10 RANS及びJ-PARC「匠」で得られたIF鋼極点図

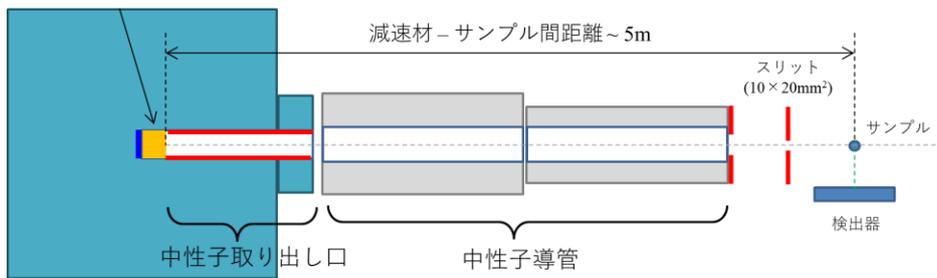


図11 中性子ビームラインの概要

応力測定の実現においては、回折線の分解能を向上させながら、回折線強度を増強し、かつバックグラウンドノイズを低減するためのビームライン開発を行なった。まず、空間的・時間的に広がった中性子ビームがサンプルへ照射されることを防ぐため、また、広がった中性子ビームが実

験室内床面などから散乱されることで発生するバックグラウンドを抑えるため、減速材から中性子取り出し口までの開口部内壁に、熱中性子遮蔽材であるB4Cゴムシートを貼りつけた。さらに、サンプルへのビーム強度を増加させるため、これまで中性子取り出し口からサンプルまでの間に設置していた長さ3m、開口50×50mm<sup>2</sup>のポリエチレンコリメータを外し、長さ3m、開口250×250mm<sup>2</sup>のボロン含有ポリエチレン導管を設置した。この導管の下流側開口部には、上流からのビーム由来のバック

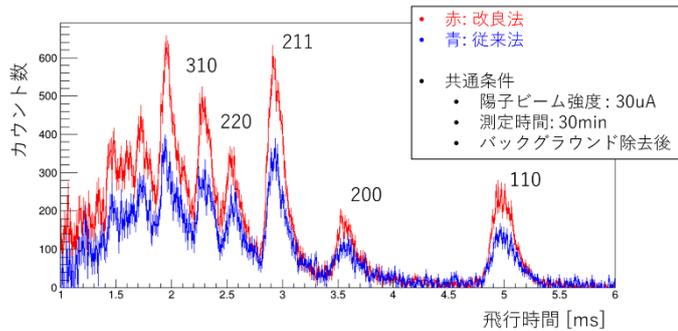


図 12 ビームライン改善前後で比較した BCC 鉄粉末サンプルからの回折線分布

グラウンドを低減するために、BPE 導管の最下流に開口 50mm 角、厚さ 15mm の B4C ゴムシートで作成したコリメータを設置した。本セットアップの概要を図 11 に示す。

この改善後のセットアップを用いて BCC 鉄粉回折線を測定し、改善前のセットアップ時における回折線分布と比較した結果を図 12 に示す。200 結晶面以外の回折線ピークにおいて、セットアップ改善後の回折線強度が増加し、また回折線ピークの形状も鋭い形状をしている結果が得られており、RANS における残留応力測定の S/N 向上及び測定時間短縮化の可能性を示している。

これらの成果により、今後塑性加工研究の場でビームタイムを専有することが可能となり、せん断破面などの組織分析に大きな自由度を獲得したと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 T. Hakoyama, Y. Ikeda, M. Takamura, Y. Otake, T.Hama, H. Suzuki and M. Kumagai	4. 巻 52
2. 論文標題 Measurement of twinning volume fraction for pure titanium using compact neutron source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings 52nd International Cold Forging Group meeting	6. 最初と最後の頁 289 ~ 292
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 Xu Pingguang, Ikeda Yoshimasa, Hakoyama Tomoyuki, Takamura Masato, Otake Yoshie, Suzuki Hiroshi	4. 巻 53
2. 論文標題 In-house texture measurement using a compact neutron source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Crystallography	6. 最初と最後の頁 444 ~ 454
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1107/S1600576720002551	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 徐平光, 高村正人, 岩本ちひろ, 箱山智之, 大竹淑恵, 鈴木裕士	4. 巻 774
2. 論文標題 小型加速器中性子源RANSを使用した鋼材特性の分析技術開発 ものづくり現場で中性子線を使った材料分析が可能に	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISOTOPE NEWS	6. 最初と最後の頁 7 ~ 10
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 無
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10件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岩本ちひろ, 池田義雅, 高村正人, 箱山智之, 鈴木裕士, 徐平光
2. 発表標題 小型中性子源を用いた角度分散法中性子回折による高分解能残留応力測定法の開発
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第179回春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井貴浩, 松野崇, 北條智彦, 浜孝之, 高村正人
2. 発表標題 陰極チャージ材面内曲げ試験によるせん断加工部の遅れ破壊耐性評価
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松野崇
2. 発表標題 自動車用次世代高強度鋼製部材に向けた応力測定と数値シミュレーションの複合的解析
3. 学会等名 理研セミナー 中性子シリーズ第47回(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Pingguang XU, Masato TAKAMURA, Yoshimasa IKEDA, Ryu KAKUTA, Chihiro IWAMOTO, Tomoyuki HAKOYAMA, Yoshie OTAKE, and Hiroshi SUZUKI
2. 発表標題 In-House Texture Measurement using RIKEN Accelerator-Driven Compact Neutron Source
3. 学会等名 19th International Conference on Textures of Materials (ICOTOM-19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井貴浩, 松野崇, Ridha Muhamad, 浜孝之, 箱山智之, 高村正人
2. 発表標題 陰極チャージ材面内曲げ試験によるせん断加工部の遅れ破壊耐性評価
3. 学会等名 日本塑性加工学会2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松野崇
2. 発表標題 高張力鋼板せん断加工における課題と対策について
3. 学会等名 令和元年度第3回創造例会，はりま産学交流会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松野崇
2. 発表標題 軽量化を目的とした自動車用鋼板高張力化の動向とCAEの活用
3. 学会等名 鳥取県産業技術センター 自動車用鋼板の加工とシミュレーション技術講習会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松野崇， 藤井貴弘， 浜孝之， 箱山智之， 高村正人
2. 発表標題 せん断切り口遅れ破壊評価のための面内曲げ試験方法の開発
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高村正人
2. 発表標題 プレス部品のハイテン化と残留応力
3. 学会等名 金属プレス加工技術展オープンセミナー（（一社）日本金属プレス工業協会 残留応力研究部会）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高村正人
2. 発表標題 中性子で測る塑性変形挙動
3. 学会等名 早稲田大学各務記念材料技術研究所 2020年度教育プログラム『材料工学のための中性子利用 基礎と利用』（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

RANS - 理研の小型中性子源システム <a href="http://rans.riken.jp/">http://rans.riken.jp/</a>
---

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	松野 崇 (Matsuno Takashi) (30781687)	鳥取大学・工学研究科・准教授  (15101)	
研究分担者	浜 孝之 (Hama Takayuki) (10386633)	京都大学・エネルギー科学研究科・准教授  (14301)	
研究分担者	箱山 智之 (Hakoyama Tomoyuki) (20799720)	岐阜大学・工学部・助教  (13701)	

6. 研究組織（つづき）

	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	北條 智彦  (Hojo Tomohiko)  (50442463)	東北大学・金属材料研究所・助教    (11301)	
研究分担者	池田 義雅  (Ikeda Yoshimasa)  (80612142)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・特別研究員    (82401)	削除：2018年7月9日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関