

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760649

研究課題名（和文） 有限要素モデリングに基づく材料表面改質による疲労強度向上  
メカニズムの解明研究課題名（英文） Clarification of the mechanism of fatigue strength improvement  
by material surface modification based on finite element modeling

研究代表者

西川 雅章 (NISHIKAWA MASAOKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60512085

研究成果の概要（和文）：

本研究では、航空機構造部品等に用いられる金属材料の軽量化・高強度化のために用いられる表面改質（ピーニング）技術が疲労強度向上をもたらすメカニズムを有限要素モデリングに基づき検証した。特に、高速水噴流中の気泡の崩壊時に生じる局所的な高衝撃力を利用したキャビテーションピーニング（Cavitation Peening, CP）を取り上げ、CP後の材料表面の残留応力・降伏応力等の力学特性評価値と疲労特性との関係を明らかにした。また、結晶粒界は多結晶金属材料の塑性特性に大きく影響を与えるため、粒界に代表される微視的要因が及ぼすピーニング後の金属表面の力学特性への影響について結晶塑性有限要素モデルを用いて明らかとした。

研究成果の概要（英文）：

The present study investigated the mechanism of fatigue strength improvement by peening technology used for weight reduction and strength enhancement of metallic materials, such as the materials for aeronautic components, based on finite element modeling. Especially, focusing on the cavitation peening (CP) using locally high impact force generated by the bubble collapsing in a high-speed water-jet, the relationship between the mechanical properties (residual stress, yield stress) evaluated on the surface of the material after CP and its fatigue properties was clarified. Since the grain boundary much affects the plastic properties of polycrystalline metals, the effect of the microscopic factors including grain boundary on the surface mechanical properties after peening were also clarified using crystal-plasticity analyses.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,600,000 | 780,000 | 3,380,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：圧子押し込み試験，表面改質，材料メカニクス，有限要素法，逆問題解析

## 1. 研究開始当初の背景

燃費改善のため、航空機構造部品の軽量・

高強度化が必要不可欠とされているが、これらの構造部品に用いられる金属材料の疲労

強度を向上する目的で、材料表面を改質するピーニング技術は有用である。特に近年、高速水噴流中の気泡の崩壊時に生じる局所的な高衝撃力を利用したキャビテーションピーニング (Cavitation Peening, CP) が開発されてきた。CP とは、高速水噴流によって生じるキャビテーション衝撃を用いて金属表面を改質し、表面に等二軸圧縮残留応力を導入する手法である。CP におけるピーニング条件の最適化の為に疲労特性向上のメカニズムを理解する必要がある。一つの仮説は、圧縮残留応力が材料内の微小き裂の発生を抑制するというものだが、過去の実験によれば、CP によって圧縮残留応力が導入された層が従来のショットピーニング (Shot Peening, SP) に比べて薄い場合でも、顕著に疲労寿命が伸びたという報告もある。したがって疲労特性向上のメカニズムを理解するには、ピーニング処理された表面改質層の特徴を定量的に評価する必要がある。表面層の残留応力は、X 線回折法により評価されてきたが、CP による加工硬化を受けた際の表面改質層の降伏応力上昇や疲労特性との関係について明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、構造材料・部品として用いられる金属材料を対象に、CP 後に材料表面がどのように改質されているか、その結果として疲労強度が向上しているのかを材料マイクロメカニクスの立場から解明することである。これに基づき、CP による材料改質の特徴を明らかにし、より最適な強度向上につながる知見を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 圧子押し込み試験による降伏応力評価

金属の表面改質による疲労特性変化は、表面改質層におけるすべり変形能の変化によるものと考えられる。したがって、表面改質層の降伏応力 (塑性変形能) の状態を評価することは重要である。本研究ではまず、圧子押し込み試験法を用いて改質層の局所的な降伏応力を同定する手法を確立した。

具体的には圧子押し込み試験の弾塑性有限要素モデルにより、実験結果の押し込み荷重-変位曲線を再現し、逆問題解析による降伏応力の同定手法を提案した。圧子押し込み試験結果には、圧子形状、材料の弾性定数や塑性特性といった因子が、複雑に相互作用して含まれている。それらを切り分けて、例えば、改質された材料の降伏応力が上昇したのかどうか、などといった点を評価するには、試験結果と力学モデルとを対比させて評価する必要がある。

従来、圧子押し込み試験を用いた手法は、押し込み点直下の代表ひずみの考え方をを用いた

近似関係式により、非常に多くの工業材料に適用可能な手法が提案されているが、実際の

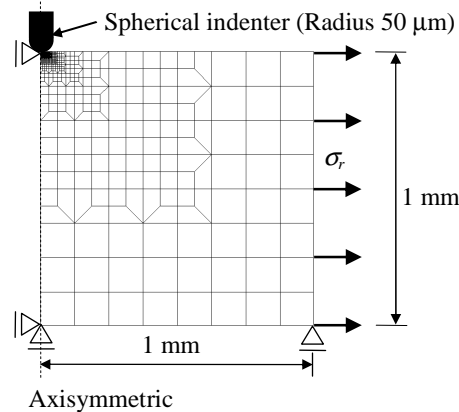


図 1 球状圧子押し込み試験の有限要素モデル

計測においては、押し込み深さの計測は誤差が生じる傾向にあるため、表面改質層の局所的な降伏応力変化に対する感度が十分でない。まず、一般の材料の疲労特性に影響を与える粒径のオーダーが数十・ $\mu\text{m}$  程度であることを考慮して、適切な押し込み荷重・深さを与える圧子押し込み試験装置を用いた。また、実際の押し込み試験をモデル化した有限要素解析を直接利用する手法により、精度の向上を試みた。また、同定する材料特性に対する感度の観点から、荷重-変位曲線を特徴づける指標を適切に選定した。

逆問題解析においては、弾塑性有限要素解析結果を基に、縦弾性係数、降伏応力、加工硬化指数といった未知の材料定数と関係づける応答曲面を随時更新する手法により作成した。この更新された応答曲面上で予測値と実際の値との残差の最小二乗法により、降伏応力を同定した。

実際に、アルミニウム材やステンレス鋼のバルク材を供試材とし、押し込み試験結果から同定した降伏応力を、引張試験結果と比較し、本手法の有用性を検証した。

### (2) CP 処理表面の降伏応力評価と疲労特性との関係

次に、様々な改質条件で改質した CP 処理を施した金属表面改質層における力学特性 (残留応力・降伏応力・疲労強度等) を、圧子押し込み試験法・X 線回折・平面曲げ疲労試験といった実験手法により評価し、その改質のメカニズムについて比較・検討した。表面処理時間を変化させ、最適な改質条件についても検討した。

CP 処理には、図 2 に示す伴水噴流水中キャビテーション装置を用いた。この装置は、水中に低速水噴流を噴射し、さらに低速水噴流中に高速水噴流を試験片に向かって噴射する。高速水噴流圧力は  $p_{H1} = 30 \text{ MPa}$ 、低速水

噴流圧力は  $p_L = 0.02$  MPa であり、スタンドオフ距離は、 $s = 80$  mm とした。

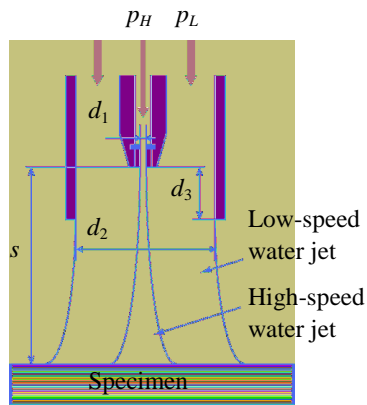


図2 伴水噴流水中キャビテーション装置

具体的には、オーステナイト系ステンレス SUS 316L 調質材を供試材として、CP 処理によって導入された表面改質層の降伏応力分布を同定し、疲労特性との関係について評価した。球状圧子を用いた押し込み試験により、降伏応力を評価した。また、CP 処理前後での疲労特性を平面曲げ疲労試験を用いて調べ、表面改質層における降伏応力変化と対比させて検討した。

### (3) 表面改質層における疲労き裂伝播特性評価

安全性・信頼性設計の観点から、運用中の疲労き裂の寸法や余寿命評価は重要とされており、CP 処理を施した材料の疲労き裂伝播特性を把握することが望ましい。そこで、平滑材を用いて疲労強度を評価するのみならず、予き裂を導入した疲労試験片を用いた疲労き裂伝播特性評価法について検討した。疲労負荷は応力比を-1、最大負荷応力を 350 MPa とした。

さらに、この疲労き裂伝播特性を力学的にモデル化した。具体的には、結合力モデルを組み込んだ有限要素解析手法(図3)により、疲労き裂進展シミュレーションを実施し、表面改質による降伏応力・残留応力変化が及ぼす疲労き裂進展特性の変化を検証した。

具体的には、まず、結合力モデルを疲労き裂進展試験の未処理試験片の結果にフィッティングした。表面改質に伴う等二軸圧縮残留応力は端部応力境界条件および疲労負荷応力範囲を変化させることで与えた。なお、試験片厚み方向の拘束条件を考慮して、予き裂面にも応力境界条件を与えた。降伏応力の上昇は、初期降伏応力値のみを変化させた同一条件の加工硬化曲線により表現した。今回のモデルでは、本実験において用いた試験片のX線回折を用いた残留応力の計測の結果に基づき等二軸圧縮残留応力を 300 MPa 導入し、

降伏応力はNP試験片の加工硬化曲線から 200 MPa 上昇させた。

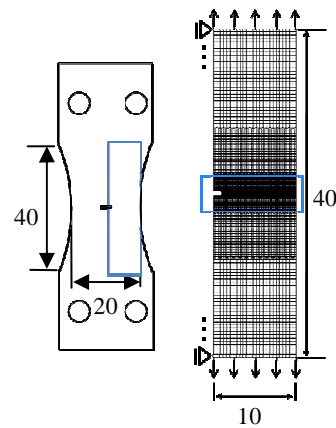


図3 疲労き裂進展試験のモデル化

上記の有限要素モデルを用いて、疲労き裂進展解析を行い、表面改質の効果が疲労き裂進展に及ぼす影響を調べた。

### (4) 多結晶金属の表面改質におけるショット径・速度の影響の解明

表面改質技術の発展に伴い、CP 処理の他にも、微粒子ピーニングやレーザピーニングが行われており、金属表面に与える衝撃速度の高速化および衝撃圧の高圧化がなされている。このことに着目し、表面改質の最適化のためには、衝撃速度の高速化が重要であると考えられる。また、微粒子ピーニングに見られるように、ショット径を小さくすることでピーニング後の金属材料の力学的特性に及ぼす効果が高いと考えられている。ショット径が粒径オーダーとなった場合、粒界に代表される微視的要因はピーニング後の金属

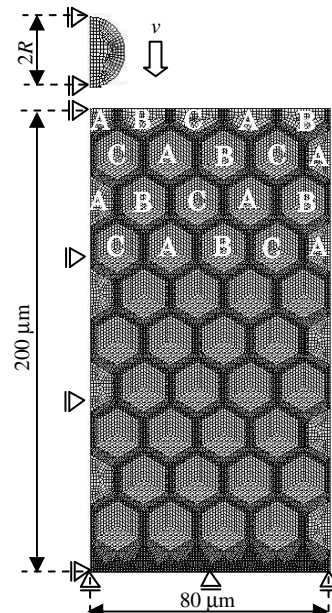


図4 ショット径効果に関する有限要素モデル

表面の特性を評価する際に重要である。特に、結晶粒界は多結晶金属材料の塑性特性に大きく影響を与えることが報告されている。

そこで、表面改質時の結晶粒オーダーでの加工硬化メカニズムを検証するために、非局所結晶塑性理論に基づく有限要素解析により、単一ショットピーニングをモデル化した。このモデルを用いて、ショット寸法と結晶粒の相対的寸法を考慮することで、表面改質時の影響面積が加工硬化に及ぼす影響を結晶粒オーダーで検証した。

粒界の存在による加工硬化への影響を考慮するために、図4に示すように、A, B, Cと結晶粒毎に互いに異なるすべり系を定義した。変形に対して各結晶粒が拘束しあうことで粒界の影響を考慮した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 圧子押し込み試験による降伏応力評価

圧子押し込み試験を用い、金属表面改質層の降伏応力を同定する手法を提案した。圧子押し込み試験の弾塑性軸対称有限要素モデルを構築し、押し込み試験中の荷重-変位曲線を適切に評価する方法について検討した結果、負荷中の最適な押し込み深さを2点、および、弾性回復深さの計3点を用いる必要があることが分かった。特にX線回折測定による残留応力評価結果を用いて逆問題解析を行う方法を検討し、引張試験結果と比較して妥当な降伏応力値が得られた(図5)。なお、残留応力の効果を近似式により表し、より簡便に降伏応力を同定する手法も検討し、良好な結果が得られている。

##### (2) CP処理表面の降伏応力評価と疲労特性との関係

疲労特性向上の観点からCP処理時間を最適化した。表面に導入された圧縮残留応力の大きさは、CP処理時間 $t_p$ とともに増加し、 $t_p = 4$  s/mm以上では、ほぼ一定となり、飽和した。一方、繰返し応力 $\sigma_b = 400$  MPaの疲労試験における、CP処理時間 $t_p$ と破断繰返し数 $N_f$ の関係を調べた。CP処理時間とともに疲

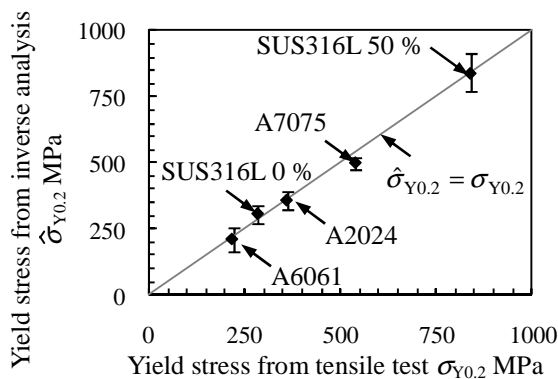


図5 降伏応力同定結果の実験的検証

労寿命が延びた。ここで、試験片表面に導入される圧縮残留応力がほぼ一定となったCP処理時間( $t_p = 4$  s/mm)以上においても疲労寿命が延びており、疲労寿命は必ずしも表面の残留応力値のみで決まらないことが示唆される。 $t_p = 16$  s/mm以上では、破断繰返し数はほぼ一定となった。

最適処理時間 $t_p = 16$  s/mmの場合について、未処理材とCP処未処理材とCP処理材とで降伏応力の変化を評価した結果、CP処理によって、表面の降伏応力が300 MPaから498 MPaに上昇していた。降伏応力変化は深さに依存し、表面から約50 μmの厚さで顕著に降伏応力が上昇していた(図6)。また降伏応力の上昇は、深さ約500 μmまで見られ、この範囲までCP処理による改質を受けていることが分かった。上記の未処理材とCP処理材に対して平面曲げ疲労試験を実施した。低サイクル疲労範囲では、CP処理材の疲労寿命が向上した。また、最大繰返し数 $10^7$ 回とした疲労限は、未処理材で277 MPa、CP処理材で362 MPaであり、CP処理により大幅に上昇した。したがってCP処理では、表面に顕著な降伏応力上昇を与えることで、疲労特性を向上させることが分かった(図7)。

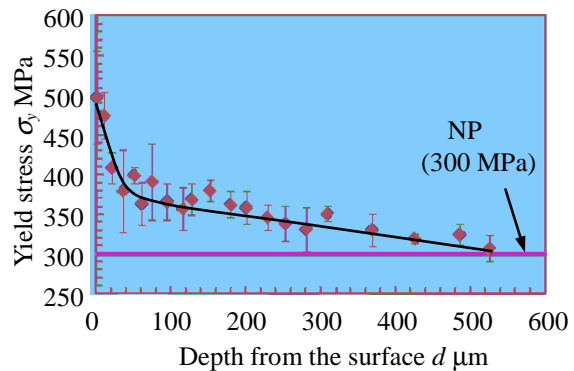


図6 CP処理試験片の降伏応力の分布

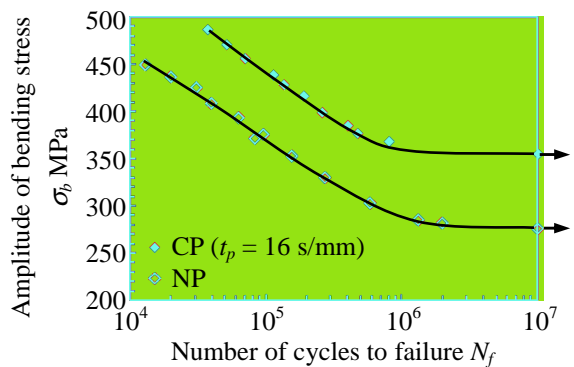


図7 CP処理試験片と未処理試験片の疲労特性の比較



(3) 表面改質層における疲労き裂伝播特性評価

実験において、繰返し応力  $\sigma_b = 350$  MPa の疲労き裂進展試験において、未処理 (NP) 試験片では、疲労回数  $N = 20,000$  回で 5.0 mm のき裂が発生しており、その後急速に疲労き裂が進展し、37,000 回で破断に至る。一方、CP 処理時間 4 s/mm および 16 s/mm の試験片では、それぞれ 50,000 回および 66,000 回で破断した。これにより、CP 処理を施すことで疲労寿命の向上が確認された。

また、結合力モデルを用いた有限要素モデルにより、表面改質によって導入された力学的特性変化によるき裂進展への影響を解析した。解析においても圧縮残留応力の導入と降伏応力の上昇が同時に起きた場合でも、き裂進展を抑制する傾向にあることがわかった (図 8)。また、解析モデルにより予き裂先端の応力集中が小さいために (図 9)、き裂の進展が抑制されることが得られた。

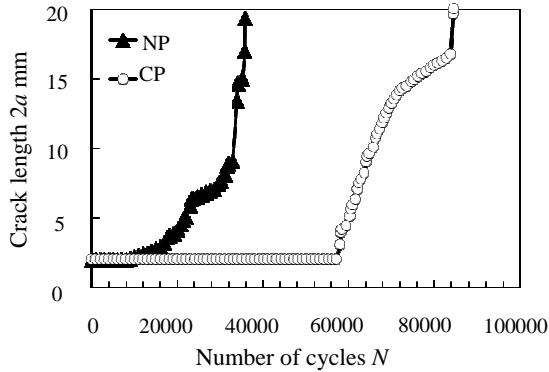
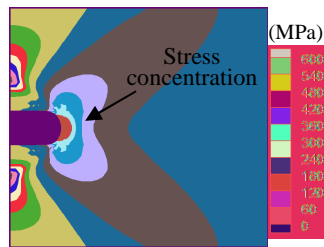
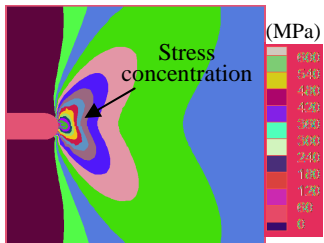


図 8 CP 処理試験片と未処理 (NP) 試験片の疲労き裂進展解析結果

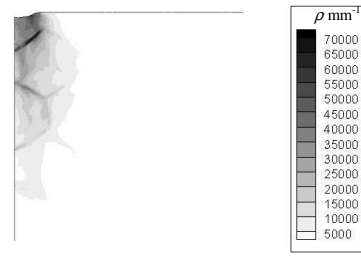


(a) 未処理 (NP) 試験片

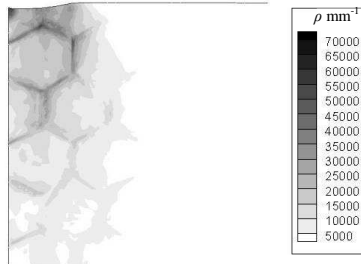


(b) CP 処理試験片

図 9 CP 処理試験片と未処理試験片の応力分布の比較



(a) ショット径が小さい場合  $R=10 \mu\text{m}$ ,  $v=300 \text{ m/s}$ , 圧痕深さ  $d=1.47 \mu\text{m}$



(b) ショット径が大きい場合  $R=50 \mu\text{m}$ ,  $v=60 \text{ m/s}$ , 圧痕深さ  $d=1.67 \mu\text{m}$

図 10 転位密度分布 (加工硬化分布) の比較

(4) 多結晶金属の表面改質におけるショット径・速度の影響の解明

表面改質時の加工硬化メカニズムを結晶粒オーダーで検証することを目的とし、非局所結晶塑性理論に基づく有限要素解析により、ショットピーニングをモデル化することで、ショット径  $R$  およびショット速度  $v$  が加工硬化に及ぼす影響を評価した (図 10)。その結果、ショット径が比較的小さい場合、特に最表面の結晶粒内での加工硬化が大きくなる。ショット径が大きい場合は、結晶粒界に沿って加工硬化がおこるため、最表面結晶粒内の加工硬化が起こりにくい。一方、深さ方向に対しては著しい改質が可能である。今後、これらの結果を基にすれば、キャビテーションピーニングにおける気泡崩壊衝撃力分布の実験的測定などと組み合わせ、衝撃力分布 (等価なショット径) と結晶粒径との関係から、表面加工硬化層の導入メカニズムが明らかとなり、疲労特性に関する最適化が期待される結果であると言える。

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 西川雅章, 高桑脩, 祖山均, キャビテーションピーニングを受けたステンレス鋼の表面改質層の降伏応力分布と疲労特性の評価, 日本機械学会論文集 A 編, 76, (2010) 1367-1372, 査読有。

② 西川雅章, 河原木雄介, 祖山均, 球状圧子を用いた微小押込み試験による金属材料の降伏応力の同定法, 日本機械学会論文集 A 編, 76, (2010) 1781-1788, 査読有.

③ Masaaki Nishikawa, Hitoshi Soyama, Indentation Technique for Characterization of the Metal Surface Modified by Cavitation Peening, MFN Metal Finishing News: Science Update, 10, (2009) 58-60, 査読無.

[学会発表] (計 8 件)

① 河原木雄介, 西川雅章, 祖山均, 非局所結晶塑性理論を用いた微小押込み試験によるステンレス鋼の評価, 第 54 回日本学術会議材料工学連合, 平成 22 年 10 月 26 日, 京都市.

② 西川雅章, 高桑脩, 山宮康平, 祖山均, キャビテーションピーニングによるステンレス鋼の疲労き裂進展抑制効果に関する数値解析, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 平成 22 年 10 月 10 日, 長岡市.

③ Masaaki Nishikawa, Osamu Takakuwa, Kohei Yamamiya, Hitoshi Soyama, Cohesive Zone Modeling of Fatigue Crack Growth on the Surface of Austenite Stainless Steel Suppressed by Cavitation Peening, International Conference on Fracture and Strength, 平成 22 年 10 月 4 日, 仙台市.

④ 西川雅章, 高桑脩, 祖山均, キャビテーションピーニングを受けたステンレス鋼の表面き裂の疲労進展挙動, 日本材料学会・第 59 期通常総会・学術講演会, 平成 22 年 5 月 22 日, 札幌市.

⑤ 河原木雄介, 西川雅章, 祖山均, 球状圧子を用いた微小押込み試験による金属材料の降伏応力の定量的同定手法, 日本機械学会 東北支部 第 45 期総会・講演会, 平成 22 年 3 月 12 日, 仙台市.

⑥ 西川雅章, 高桑脩, 祖山均, 球状圧子を用いた押込み試験による金属表面改質層の評価, 日本機械学会 関東支部 第 16 期総会・講演会, 平成 22 年 3 月 11 日, 東京都.

⑦ 西川雅章, 高桑脩, 祖山均, キャビテーションピーニングによる金属表面改質層の降伏応力変化がもたらす疲労特性への影響, 第 14 回破壊力学シンポジウム, 平成 21 年 10 月 24 日, 石垣市.

⑧ 西川雅章, 祖山均, キャビテーションピーニングによる表面改質層の圧子押込み試験を用いた評価, ショットピーニング技術協会シンポジウム, 平成 21 年 10 月 15 日, 東京都.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
無し.

[その他]  
無し.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西川 雅章 (NISHIKAWA MASAOKI)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60512085

### (2) 研究分担者

無し.

### (3) 連携研究者

無し.