

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02022

研究課題名（和文）レーザーピーニングによる3D積層造形金属の疲労強度向上と表面欠陥の無害化

研究課題名（英文）Improvement of fatigue strength and non-damaging of surface defects in 3D additive manufactured metals by laser peening

研究代表者

高橋 宏治（Takahashi, Koji）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90334630

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：3D積層造形で作製した金属では、欠陥が生じやすく、そのような欠陥が疲労強度を低下させる。本研究では、レーザーピーニング(LP)やショットピーニング(SP)により導入した圧縮残留応力が、3D積層造形した金属の疲労強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。マルエージング鋼およびアルミニウム合金を3D積層造形した後、試験片を作製した。これらの試験片に対して、LPまたはSPを施工した。その後、圧縮残留応力の深さ方向への分布および疲労強度を評価した。LPやSPにより導入された圧縮残留応力の効果により、表層でのき裂進展を抑制することにより、大幅に疲労強度が向上することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3D積層金属を普及させるためには、積層後の表面粗さと内部の欠陥による疲労強度低下の問題を克服する必要がある。本研究では、3D積層造形した金属に対して、レーザーピーニング(LP)およびショットピーニング(SP)を施工した。LPにより導入される深い圧縮残留応力の効果により、大きな表面欠陥を無害化できることを実験と解析の両面から明らかにした。さらに、SPによる圧縮残留応力導入と表面粗さの低減の効果により、積層造形後の粗い表面を有する材料の疲労強度を向上できることを明らかにした。これらの成果を活用することにより、3D積層造形した金属材料の強度・信頼性の向上に資することができる。

研究成果の概要（英文）：In metals fabricated by 3D additive manufacturing (AM) process, defects are easily formed in the materials, and such defects reduce the fatigue strength. The objective of this study was to clarify the effect of compressive residual stress introduced by laser peening (LP) and shot peening (SP) on the fatigue strength of metals manufactured by the 3D AM process. Maraging steel and aluminum alloy manufactured by selected laser melting process were used as the test material. LP or SP was applied to the specimens. It was found that the compressive residual stresses introduced by LP or SP significantly improved fatigue strength of these specimens by suppressing crack propagation at the surface layer.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：3D積層造形金属 レーザーピーニング ショットピーニング 疲労強度 残留応力 表面欠陥

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3D 積層造形は設計から生産までの期間の大幅な短縮、寸法や形状が異なる多種類の部材や複雑形状の部材の製造を可能とする革新的製造技術として注目されている。しかし、実用化されている製品は破損しても大きな問題が生じない用途に限られ、現状では重要な構造部材への適用は進んでいない。その理由として、積層後に残存する欠陥（特に表面欠陥）が部材の疲労強度を著しく低下させるためである。近年、欧米を中心に 3D 積層造形した金属の疲労強度に及ぼす欠陥の影響が研究されている。しかし、低下した疲労強度を改善する有効な方法は確立されていない。そこで、この問題を解決する新たな技術の確立が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまで蓄積してきた各種ピーニングによる構造材料の信頼性向上に関する研究成果を基盤として、最先端の表面改質技術であるレーザピーニング(LP)を適用することにより、3D 積層造形した二種類の金属（マルエージング鋼およびアルミニウム合金）の疲労強度を向上するとともに、有害な表面欠陥や表面粗さを無害化し、高信頼化する技術を構築する。そこで、以下の二つの研究課題を設定した。

- (1) マルエージング鋼の LP 施工による疲労強度向上と表面欠陥の無害化
- (2) 積層面を有するアルミニウム合金の SP および LP による疲労強度向上

3. 研究の方法

- (1) マルエージング鋼の LP 施工による疲労強度向上と表面欠陥の無害化

供試材として、3D 積層造形したマルエージング鋼を用いた。3D プリンタで長さ 90 mm、幅 20 mm、厚さ 6 mm の板材を幅方向に積層造形後、溶体化処理を行い、図 1 に示すような試験片形状に切削加工した。表面欠陥を導入していない「Smooth」、Smooth に LP を施工した「Smooth+LP」、試験片最小断面部に表面欠陥を模擬した半円スリットを導入した「Slit」、LP 施工後に Slit 同様の半円スリットを導入した「LP+Slit」の各試験片を用いた。半円スリットの深さは、0.2、0.4、0.6 mm の 3 種類を用意した。図 1 には LP の施工範囲を示した。

LP が 3D 積層造形したマルエージング鋼の材料特性に与える影響を明らかにするため、表面粗さ、硬さ分布、残留応力分布の測定を行った。平面曲げ疲労試験は、室温大気中、応力比 $R=0$ 、周波数 20 Hz で実施し、 10^7 回繰返し応力に耐久した最大の応力振幅を 10^7 回疲労強度(σ_w)と定義した。

- (2) 積層面を有するアルミニウム合金の SP および LP による疲労強度向上

アルミニウム合金(AlSi12)の 3D 積層造形した試験片を供試材として用いた。図 2 に試験片形状を示す。また、実験では以下の 5 種の疲労試験片を用いた。3D 積層造形後の表面粗さを有する試験片(As built)、As built に対して SP を施工した試験片(As built+SP1)、As built+SP1 を焼鈍することにより残留応力を除去した試験片(As built+SP2)、As built に対して LP を施工した試験片(As built+LP)および 3D 積層造形後の表面粗さを機械加工によって取り除いた試験片(Smooth)である。As built は切欠部のみ最終形状となるように 3D 積層造形し、応力除去焼鈍を行った後、切欠部以外を機械加工して作製した。Smooth は 90 mm×8 mm×12 mm の板材に積層した後、機械加工、応力除去焼鈍の順で作製した。最終的な試験片の形状は、全ての試験片で同じである。これら試験片を用いて、大気中、応力比 $R=0$ 、周波数 20 Hz の条件で平面曲げ疲労試験を行った。また特性測定として、表面性状、残留応力分布および硬さ分布の測定を行った。

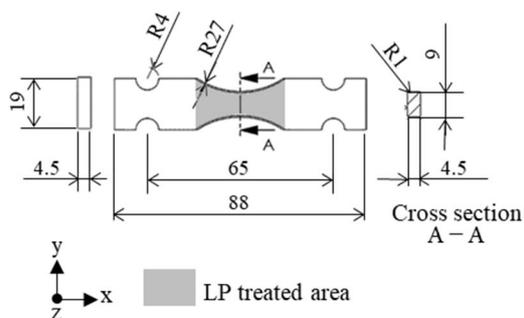


図 1 試験片形状 (マルエージング鋼)

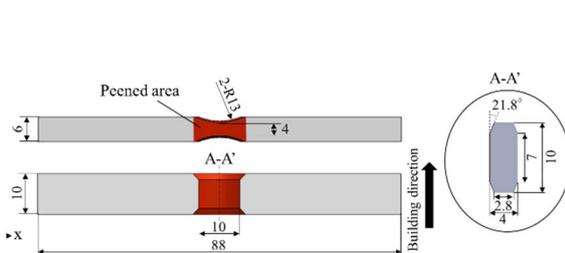


図 2 試験片形状 (アルミニウム合金)

4. 研究成果

- (1) マルエージング鋼の LP 施工による疲労強度向上と表面欠陥の無害化

種々の条件で LP 施工した後、残留応力分布を測定することにより、最適な LP 条件を決定したり。図 3 に、表面から深さ方向の残留応力分布を示す。LP により、最表面で 1060 MPa、深さ 0.02 mm で最大 1150 MPa の圧縮残留応力が確認され、導入深さは 0.7 mm であった。図 4 に、疲労試験結果として縦軸に 10^7 回疲労強度(σ_w)、横軸にスリット深さ a をとったグラフを示す。すべての試験片において、LP により σ_w が向上することが明らかになった。

疲労試験終了後に観察した破断面の例を図 5 に示す。疲労き裂発生起点は、LP を施工していない Slit では、図 5(a)のようにスリット部であった。LP+Slit では、 $a=0.4$ および 0.6 mm ではすべてスリット部を起点としたが、 $a=0.2$ mm の 4 本中 3 本は、図 5 (b)のように、スリット部ではなく内部に存在する積層時に生じた融合不良が起点となっていた。これは、LP で導入された圧縮残留応力によりスリット部からのき裂進展が抑制されたためである。したがって、LP は 3D 積層造形材の疲労強度向上に有効であるといえる。

本研究における欠陥の無害化の条件は、LP+Slit において(a) σ_w が Smooth+LP 材の 90%以上まで向上すること、または(b)半数以上の試験片の破壊起点がスリット部以外であることのいずれかを達成した場合と定義した。LP+0.2Slit では、 σ_w が Smooth+LP の 91%であり、半数以上の試験片がスリット以外を起点として破断した。つまり条件(a)(b)を満たすため、LP により深さ $a=0.2$ mm の半円スリットを疲労限度上無害化できるといえる。 $a=0.4$ および 0.6 mm の場合には、それぞれ σ_w が Smooth+LP の 90%未満であり、破壊起点はすべてスリットであったため、条件(a)(b)ともに満たさない。したがって、3D 積層造形材マルエージング鋼の LP による無害化可能最大欠陥寸法は少なくとも $a=0.2$ mm である。

また、応力拡大係数に着目して算出された無害化可能最大欠陥寸法の推定値は、 $a=0.38$ mm である²⁾。この値は、 $a=0.2$ mm の半円スリットを無害化でき、 $a=0.4$ および 0.6 mm は無害化できないという試験結果と整合する。さらに、 $a=0.2$ mm の半円スリットの寸法 ($\sqrt{area}=251 \mu\text{m}$) は、破面で観察された最大の破壊起点欠陥寸法 ($\sqrt{area}=170 \mu\text{m}$) よりも大きい。つまり、LP 施工により、3D 積層造形材に含まれる表面近傍の欠陥を無害化できるといえる。

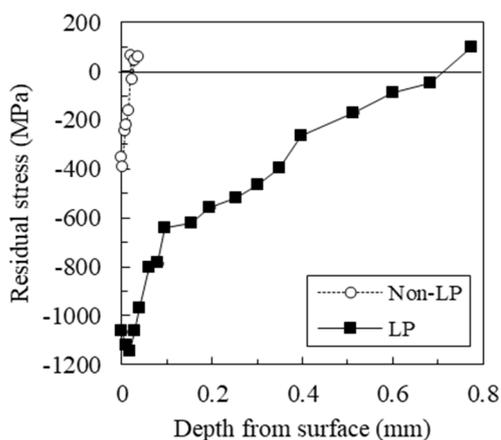


図 3 残留応力分布 (マルエージング鋼)

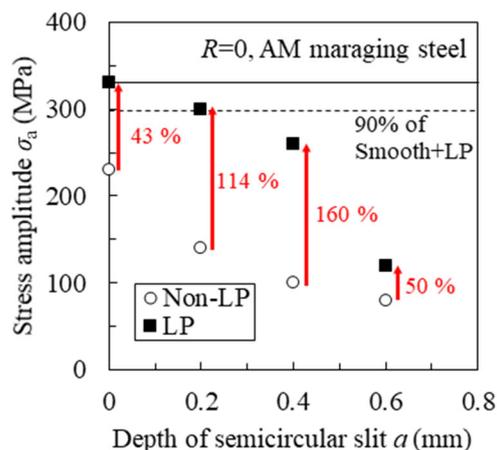
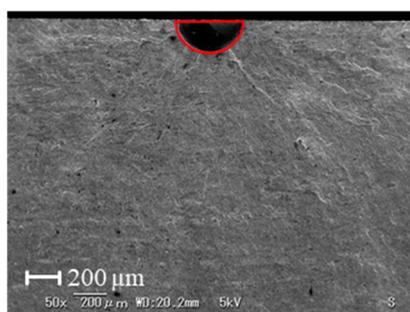
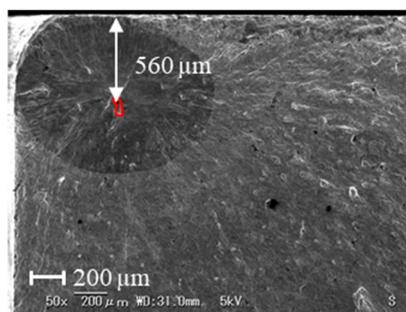


図 4 疲労試験結果 (マルエージング鋼)



(a) 0.2Slit ($\sigma_a = 200$ MPa, $N_f = 2.35 \times 10^5$)



(b) LP+0.2Slit ($\sigma_a = 340$ MPa, $N_f = 8.10 \times 10^6$)

図 5 破断面の観察結果 (マルエージング鋼)

(2) 積層面を有するアルミニウム合金の SP および LP による疲労強度向上

図 6 に平面曲げ疲労試験から得られた S-N 線図を示す。→印は 10^7 回の繰返し応力に耐久した試験片であることを示している。図 6 より As built+SP1 および As built+LP の 10^7 回疲労強度(σ_w) は、As built と比較してそれぞれ 60%および 80%向上した。また破断面観察より、Smooth 以外の試験片において破壊起点は図 7(a)に示すように、3D 積層造形材特有の表面凹部であった。一方 Smooth の破壊起点は図 7(b)に示すように、表面近傍の未溶融欠陥であった。

図 8 に表面から深さ方向への残留応力分布を示す。圧縮残留応力分布の表面から深さ方向へ

の積分値と疲労強度の間に相関があると報告されている³⁾。表1には表面残留応力値(σ_m)および圧縮残留応力の積分値(S)を示す。 S はAs built+SP1が引張側に推移する深さを目安とし、表面から深さ0.1 mmまでの圧縮残留応力の積分値とした。図8よりAs built+SP1およびAs built+LPを比較すると、 σ_m はAs built+SP1の方が大きい、 S はAs built+LPの方が大きい。

試験片表面を3Dプロファイルで観察したところ、SPおよびLP施工後も3D積層造形材特有の凹凸が確認された。疲労強度と相関の有る表面粗さのパラメータとして、最大高さうねり W_z の適用が提案されている⁴⁾。図9に最大高さうねり(W_z)と σ_w の関係を示す。As builtおよびAs built+SP2を比較すると、SP施工による W_z の低減は σ_w を40%向上させたといえる。一方、LP施工により W_z は29%増大したが、 σ_w は全試験片の中で最も高かった。

ここで図9において、圧縮残留応力がほとんど導入されておらず、 W_z のみ異なるAs built、As built+SP2およびSmoothについて、 W_z および σ_w の関係式を導出した。しかし、As built+SP1およびAs built+LPの σ_w は、この関係式から算出される σ_w に対して大幅に高い。これは圧縮残留応力の導入による効果である。また、As built+SP1と比較してAs built+LPの σ_w は高いことから、疲労強度の向上には、圧縮残留応力の値として σ_m ではなく、積分値 S が重要であると分かる。よってAs built+SP1およびAs built+LPでは、圧縮残留応力の効果により、疲労き裂の進展が遅延し、疲労強度が向上したと考えられる。また図9において、As built+SP1およびAs built+LPの σ_w はSmoothのそれと同等またはそれ以上である。よって、ピーニングによる圧縮残留応力の導入により、疲労強度上、表面粗さが無害化されたといえる。

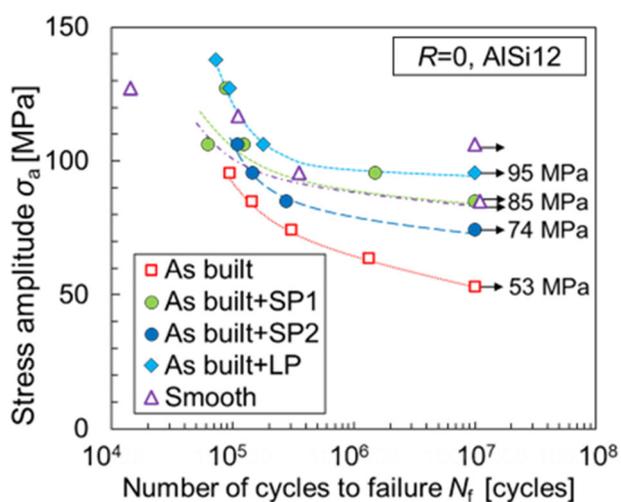
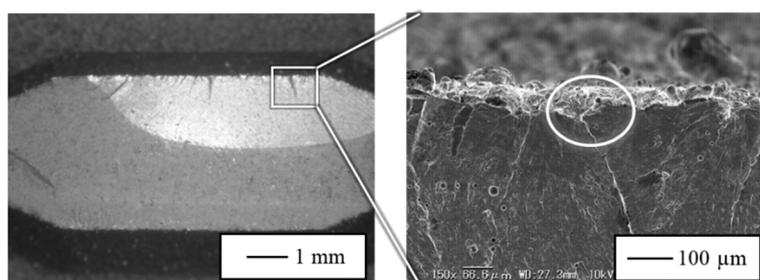
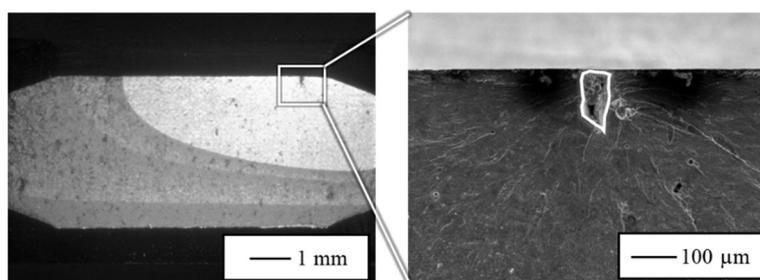


図6 S-N線図 (アルミニウム合金)



(a) as-built ($\sigma_a=84.9$ MPa, $N_f=1.43 \times 10^5$)



(b) smooth ($\sigma_a=116.7$ MPa, $N_f=1.10 \times 10^5$)

図7 破断面の観察結果 (アルミニウム合金)

表 1 表面残留応力と圧縮残留応力の積分値

	σ_m [MPa]	S [mm · MPa]
As built	17	1.6
As built +SP1	-64	6.1
As built +SP2	5	2.1
As built +LP	-34	8.1
Smooth	8	1.4

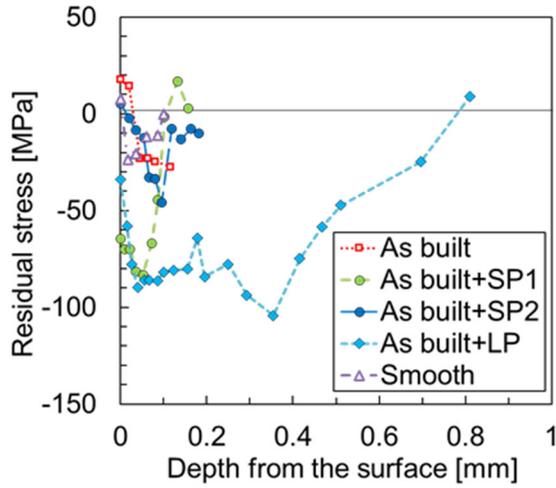


図 8 残留応力分布 (アルミニウム合金)

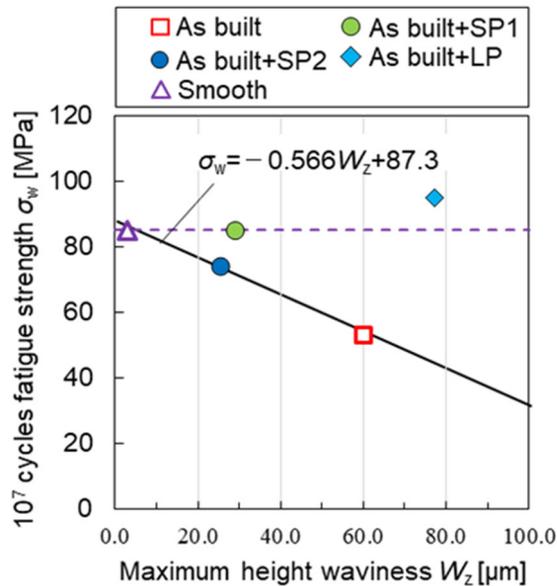


図 9 疲労強度と最大高さうねりの関係 (アルミニウム合金)

<参考文献>

- 1) 土屋詩織, 高橋宏治, ばね論文集, 66, 7-12, 202.
- 2) S. Tsuchiya, K. Takahashi, Metals, 15(1), 315, 2022.
- 3) T. Morita, et al., Results in Materials, 7, 100128, 2020.
- 4) 澤田俊之, 柳谷彰彦, 日本金属学会誌, 74(10), 682-687, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Koji Takahashi Yuta Kogishi Norihito Shibuya Fumiaki Kumeno	4. 巻 43
2. 論文標題 Effects of laser peening on the fatigue strength and defect tolerance of aluminum alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fatigue Fract Eng Mater Struct.	6. 最初と最後の頁 845-856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ffe.13201	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 小岸 優太, 高橋 宏治, 角谷 利恵, 千田 格	4. 巻 32
2. 論文標題 レーザーピーニングによるアルミニウム合金の疲労強度改善	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ショットピーニング技術	6. 最初と最後の頁 7-12
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 金子 恵理, 高橋 宏治	4. 巻 32
2. 論文標題 3D積層造形したアルミニウム合金の疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ショットピーニング技術	6. 最初と最後の頁 2-6
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 土屋詩織, 高橋宏治	4. 巻 66
2. 論文標題 3D積層造形したマルエージング鋼の疲労強度に及ぼすレーザーピーニングの影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ばね論文集	6. 最初と最後の頁 7-12
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 Shiori Tsuchiya, Koji Takahashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Improving Fatigue Limit and Rendering Defects Harmless through Laser Peening in Additive-Manufactured Maraging Steel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met12010049	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 中村美仁, 高橋宏治, 斉藤悠太	4. 巻 34
2. 論文標題 3D積層造形後の表面粗さを有するアルミニウム合金の疲労強度に及ぼすショットピーニングの効果	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ショットピーニング技術	6. 最初と最後の頁 9-14
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2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 土屋詩織, 高橋宏治
2. 発表標題 3D積層により造形したマルエージング鋼の疲労強度に及ぼすレーザピーニングの影響
3. 学会等名 2020年度秋季「ばね及び復元力応用講演会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小岸 優太, 高橋 宏治, 角谷 利恵, 千田 格
2. 発表標題 レーザピーニングによるアルミニウム合金の疲労強度改善
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

プレスリリース「表面欠陥をレーザーピーニングにより無害化」
https://www.ynu.ac.jp/hus/koho/23800/34_23800_1_1_200330115359.pdf

日本ばね学会で「最優秀ポスター賞」を受賞
<https://www.ynu.ac.jp/hus/engk2/24856/detail.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------