

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：53401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14632

研究課題名（和文）all pair法によるロバスト性とコストに優れた工作機械の熱変形補正式決定法

研究課題名（英文）Determination of thermal deformation compensation formula for heat distortion, focusing on robustness and cost-efficiency

研究代表者

伊勢 大成 (Ise, Taisei)

福井工業高等専門学校・機械工学科・講師

研究者番号：20734594

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、熱変形を予測可能な簡易な式を少数箇所の温度測定値から導き、all pair法による実験計画を活用した少数回の試験により、熱変形誤差を補正する方法を提案する。まず、実験条件に基づいた解析結果から装置各部の熱変形を分析し、熱変形挙動を可視化した。また、実機試験における非線形な熱変形現象を主軸モータと装置各部の温度差で説明できることを明らかにした。以上より、all pair法で設定した実験条件と熱変形の関連性を確認できた。また、all pair法による実験計画と分析手法を確立し、工作機械実機での試験で予測式の精度を評価し、試験回数を削減できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、少数の温度測定値から予測式を導き、all pair法に基づく実験計画を活用することで、熱変形誤差を効果的に補正する手法を提案した。all pair法による実験計画と分析手法を確立し、工作機械実機での試験で予測式の精度を評価し、試験回数を削減できることを確認した。この成果は工作機械全般の品質向上や高精度化のためのコスト削減に貢献し、より信頼性の高い工作機械の開発や産業技術の発展に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a method to compensate for thermal deformation errors by deriving a predictive formula for heat distortion from temperature measurements. Experimental designs based on the all-pairs method are employed. The thermal deformation of each component is analyzed under determined experimental conditions, and the behavior of heat distortion is visualized. The ability to replicate the thermal deformation behavior is demonstrated during actual machine tests. The nonlinearity of thermal deformation is attributed to temperature differences between the main spindle motor and various machine components. This confirms the relationship between the experimental conditions set by the all-pairs method and thermal deformation. Furthermore, an experimental design and analysis methodology are established using the all-pairs method. The accuracy of the predictive formula is evaluated through tests on machine tools, resulting in a reduction in the required number of tests.

研究分野：センサ工学

キーワード：all pair法 工作機械 熱変形補正

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

工作機械の熱変形は高精度加工への影響が大きく、対称構造の形状や熱源の配置の工夫が対策として提案されているが、設計の制限となり一般的な適用が難しい。また、熱変形を許容し、有限要素解析による補正方法も提案されているが、NC装置など解析機能の組み込みが難しく、対応可能な機種に限られる。一方、温度測定値から熱変形量を予測し補償する方法が実用化されており、比較的低コストで運用が可能であるが、式の導出には多くの試験と経験が必要で、ロバスト性の保証が困難であり、複数機種の工作機械への展開は困難である。

2. 研究の目的

本研究では、低コストかつ容易に決定および運用が行え、環境温度や切削油の有無などによらず、様々な状況で使用可能なロバスト性に優れた熱変形予測式を導く方法を確認する。解析、切削を模擬したコストの低い試験による熱変形予測式の決定、実験計画を利用した少数の実切削試験による、様々な条件に対応可能な実験定数の補正を可能とする。実験計画に **all pair** 法を用い、さらに、従来の方法である直交表を用いた結果と比較する。**all pair** 法を用いた補正式の決定を行うとともに、熱変形補正システム実装の検証のため、複数機種への展開に向けて提案する方法の汎用性を評価する。

3. 研究の方法

本研究では広範囲な条件に対して高い補正効果が得られる工作機械の熱変形予測式を、直交表を用いる場合よりも少数の実験で決定可能とするために、ソフトウェアのテストケース作成に用いられる **all pair** 法を用いて実験条件を決定することを試みる。

対象機種として高松機械工業(株)製小形 CNC 旋盤 XT-6 を使用した。XT-6 の外観を図 1 に、仕様を表 1 に示す。指定寸法の製品を切削する実切削試験により、装置の作動による発熱にともなう加工径変化量と温度変化を測定した。温度変化は装置各部の 22 箇所に熱電対を貼付し測定した。

主軸刃物間距離 C と各測定位置の温度変化量 $\Delta T_i (i=1\sim 4)$ との関係を表(1)のように表した。 $\Delta T_i (i=1\sim 4)$ は、それぞれ装置の可動部である主軸部、刃物台部、非可動部である油圧ユニット部、および工作機械設置環境の 4 箇所の温度変化量である。主軸刃物間距離 C は各部の温度と実験定数から予測する値であるため、熱変形予測式と表記する。

$$C = a_1\Delta T_1 + a_2\Delta T_2 + a_3\Delta T_3 + a_4\Delta T_4 \quad (1)$$

C : 熱変形予測量[μm], ΔT_i : 温度変化量[$^{\circ}\text{C}$], a_i : 実験定数[$\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$]

式(1)中の実験定数 $a_i (i=1\sim 4)$ は、温度変化量と主軸刃物間距離の変化量の実測値と、同式による計算値との誤差が最小となるように決定する。

先の研究では 4 因子・3 水準を分析可能な直交表 L_9 を使用し、表 3 に示す加工条件(A)~(D)の加工径、加工長さ、加工回数、環境温度を因子として直交表 L_9 に割り付けた。切削油については、直交表の因子・水準数の制約から直交表の外に設定し、表 4 のように切削油不使用の条件を $L_1\sim L_9$ として、切削油を用いる条件を同順番で $L_{10}\sim L_{18}$ の条件として設定した。

本研究で扱う **all pair** 法とは、主にソフトウェアのバグ検出テストに用いられる手法で、2 因子間の因子と水準の組み合わせが少なくとも 1 回は出現する組合せを選定する実験計画法である。**all pair** 法では、直交表のように各因子の水準数が制限されず、各因子でそれぞれの水準が同数実行される制限を受けない。そのため、水準の有無の 2 つである切削油の使用を因子として取り込むことが可能であるとともに、一般的に直交表よりも試験回数が少なくなり、条件の追加や削除などの修正が容易である。**all pair** 法で使用する条件は、Microsoft 社製のソフトウェア PICT を用いて決定した。表 5 に **all pair** 法により設定した試験条件を示す。表 4,5 の条件で実験を行い、それぞれで得られた結果から式(1)の実験定数を導き、両者の推定精度を比較した。



Fig. 1 Overall view of XT-6.

Table 1 Specification of XT-6.

Headstock	Height of the center from floor (mm)	960
	Max. spindle speed (min^{-1})	4,500
	Power of spindle motor (kW) Short-time rating / Continuous rating	7.5 / 5.5
Tool post	Max. stroke (mm)	X:120 Z:280
	Power of servo motor (kW)	X:0.75 Z:1.8
Weight(kg)		2,300
Size:Length x weight x Height (mm)		1,360x1,370x1,700

Table 2 List of temperature measurement points.

Ch 1	Chuck side of head stock	Ch 12	Left front side of inside bed
Ch 2	Cylinder side of head stock	Ch 13	Spindle motor
Ch 3	Chucking cylinder	Ch 14	Front side of bed under head stock base
Ch 4	Front side of head stock	Ch 15	X axis ball screw
Ch 5	Rear side of head stock	Ch 16	Hydraulic unit
Ch 6	Bed under Z axis servo motor	Ch 17	Bed under headstock
Ch 7	Z axis servo motor	Ch 18	Room temperature
Ch 8	Left front side of bed	Ch 19	Outdoor temperature
Ch 9	Left rear side of bed	Ch 20	Housing of turret
Ch 10	Right front side of bed	Ch 21	Bed around hydraulic unit
Ch 11	Right rear side of bed	Ch 22	Rear side of bed under head stock base

Table 3 Cutting condition.

Factor	Level		
	1	2	3
(A) Diameter(mm)	50	35	20
(B) Length(mm)	10	30	50
(C) Times	1	4	5
(D) Temperature	Increase	Constant	Decrease
(E) Cutting fluid	Non use	Use	-

Table 4 Each cutting condition by L9 orthogonal array.

Test Number	Diameter [mm]	Length [mm]	Times	Temperature
L1	50	10	1	Increase
L2	50	30	4	Constant
L3	50	50	5	Decrease
L4	35	10	4	Decrease
L5	35	30	5	Increase
L6	35	50	1	Constant
L7	20	10	5	Constant
L8	20	30	1	Decrease
L9	20	50	4	Increase

Table 5 Each cutting condition by All pair method.

Test Number	Diameter [mm]	Length [mm]	Times	Temperature	Cutting fluid
N1	35	50	1	Decrease	Non use
N2	50	30	4	Constant	Use
N3	20	10	5	Constant	Non use
N4	20	50	4	Increase	Use
N5	35	30	5	Increase	Non use
N6	50	50	1	Constant	Non use
N7	20	30	1	Decrease	Use
N8	35	10	4	Decrease	Use
N9	35	50	5	Constant	Use
N10	50	10	1	Increase	Use
N11	50	10	5	Decrease	Non use
N12	35	30	4	Constant	Non use

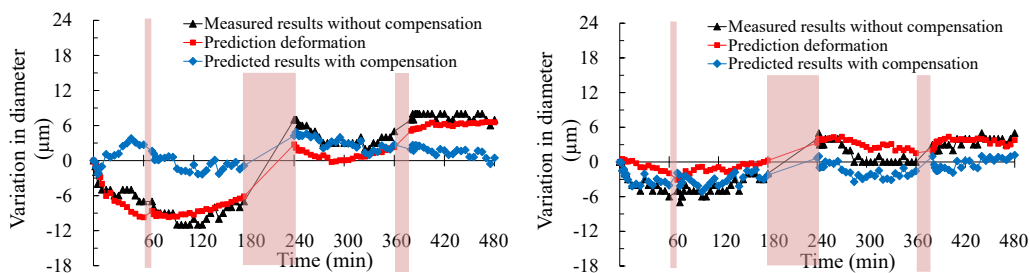
4. 研究成果

熱変形補正の一例として、図2にN5, N6条件での加工径変化量の実測値および式(1)による予測値、予測値による補正後の加工径変化量の時間変化を示す。式(1)の実験定数は表7の値であり、all pair法の条件による実験結果から算出した。N5, N6の両条件で加工径変化を抑えられている。all pair法と直交表の条件で算出した表6, 7の実験定数による予測式による補正結果を表8, 9に示す。直交表とall pair法の両者による補正式で加工径変化量は同程度に低減されており、all pair法による試験条件設定は有効であることを確認できた。

直交表の実験結果から、水準別の加工径変化量の平均値を求め図示した要因効果図を図3に示す。図3より、補正前は温度上昇の条件が加工径変化量への影響が大きく、切削油有りの条件では温度上昇による影響が若干抑えられており、補正後の効果は切削油無しの方が熱変形への影響が小さいことがわかる。

all pair法では、各因子の水準ごとの出現回数が異なり、直交表による解析のように水準ごとの平均による効果の推定ができない。そこで、多変量解析の数量化理論I類に基づき、因子の有無を1, 0のダミー変数 k_i として、式(2)のように各因子・水準に対応する偏回帰係数を設定した加工径変化量の推定式を設定し、誤差が最小となるように偏回帰係数を調整し、同式の偏回帰係数から各因子の影響度を推定した。各試験の加工径変化量の最大値と最小値の差分 ΔC について、試験結果と推定値の残差二乗和を計算し、その総和が最小となるよう、偏回帰係数 a_{ij} を決定する。なお、切片を a_m とする。偏回帰係数の大きさが因子の影響度に相当する値となる。

$$\Delta C = a_m + a_{A1}k_{A1} + a_{A2}k_{A2} + a_{A3}k_{A3} + a_{B1}k_{B1} + \dots + a_{E2}k_{E2} \quad (2)$$



(a) N5

(b) N6

Fig.2 Examples of thermal displacement prediction.

Table 6 Temperature measurement points and experimental constants by L9 orthogonal array.

i	1	2	3	4
T_i	Ch6	Ch8	Ch17	Ch20
a_i	2.68	-2.41	0.25	0.13

Table 7 Temperature measurement points and experimental constants by All pair method.

i	1	2	3	4
T_i	Ch12	Ch14	Ch15	Ch22
a_i	-0.87	-1.32	0.52	2.12

Table 9 Approximate results from the thermal deformation prediction equation by All pair method.

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
N1	10.0	5.8	1.9	2.2	2.4	1.2
N2	13.0	12.7	3.2	2.2	2.2	1.7
N3	13.0	6.3	3.5	2.9	2.3	1.6
N4	15.0	6.4	3.2	1.5	3.0	1.0
N5	19.0	7.2	6.5	1.9	2.5	1.2
N6	12.0	6.4	3.1	2.0	1.8	1.3
N7	10.0	6.6	2.5	2.0	1.5	1.2
N8	14.0	9.4	3.6	1.6	2.4	1.2
N9	9.0	6.4	2.8	2.4	3.0	1.5
N10	14.0	7.3	3.5	3.5	2.4	1.5
N11	5.0	5.0	1.8	0.8	1.3	0.6
N12	12.0	7.2	3.0	1.7	1.8	1.1
Average	12.2	7.2	3.2	2.1	2.2	1.3

同式から求めた要因効果図を図4に示す。all pair法と直交表による要因効果図で共通して、補正前は、温度の因子の加工径変化量への影響が大きく、温度上昇で加工径が大、温度下降で加工径が小となる。また、その他の因子の効果は同程度で、気温と比較して小さい。また、補正後は切削油無しの方が高精度である。これは切削油の使用により被削物周辺の温度変化の挙動が複雑になり、加工径変化量の予測精度が低下することによると考えられる。

要因効果図による分析結果を考慮し、all pair法で設定した表5の条件から、加工径変化量への影響が補正前後で小さい因子である長さ、加工回数に着目し、中間の水準であるB2(材料長さ30mm)およびC2(加工回数4回)が含まれる条件を表5から除外して式(1)の熱変形予測式を決定し、表10に示すように熱変形予測式による補正効果を確認した。各条件の熱変形予測式による補正後の加工径変化量の最大値と最小値の差分を示している。表10の各条件で補正後の誤差の平均値が8.5 μm 以下であることから、要因効果図を用いて条件の絞り込みを行うことで、熱変形予測式決定のための実験条件数の削減が可能であることを確認できた。

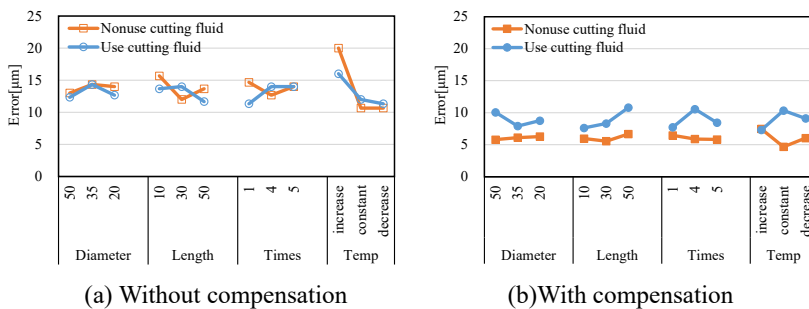


Fig.3 Graph of factorial effects by L9 orthogonal array.

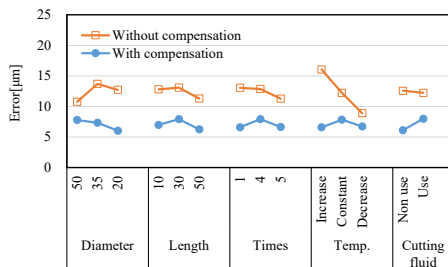


Fig.4 Graph of factorial effects by All pair method.

Table 8 Simulation results of the correction effect of the thermal deformation prediction equation determined by L9 orthogonal array.

(a) Without cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	22.0	7.5	6.8	1.5	2.9	1.1
L2	7.0	3.7	3.4	2.0	2.0	0.9
L3	10.0	6.1	4.1	0.9	2.7	0.8
L4	12.0	5.8	4.2	1.7	2.7	1.2
L5	19.0	6.8	6.4	1.0	2.6	0.8
L6	12.0	5.7	3.7	2.5	2.8	1.0
L7	13.0	4.5	3.5	1.5	2.3	1.0
L8	10.0	6.2	4.5	3.3	2.5	1.3
L9	19.0	11.1	5.5	2.3	2.9	1.7
Average	13.8	6.4	4.7	1.9	2.6	1.1

(b) With cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L10	14.0	6.0	3.5	2.2	2.4	1.3
L11	13.0	12.5	3.0	2.3	2.2	1.7
L12	10.0	11.7	3.2	3.7	1.6	2.8
L13	14.0	8.5	3.6	2.3	2.4	1.0
L14	19.0	5.2	5.4	1.7	3.2	1.2
L15	10.0	10.0	2.8	3.2	1.6	1.7
L16	13.0	8.4	9.0	6.1	2.7	1.3
L17	10.0	7.2	2.5	2.7	1.5	1.7
L18	15.0	10.7	3.2	2.1	3.0	1.7
Average	13.1	8.9	4.0	2.9	2.3	1.6

Table 10 Simulation results of the correction effect of the thermal deformation prediction equation determined by each condition.

	①	②	③	④	⑤
L1	22.0	7.5	8.8	9.8	11.5
L2	7.0	3.6	4.2	6.6	7.1
L3	10.0	6.1	6.6	5.4	6.2
L4	12.0	5.8	5.8	5.5	6.4
L5(N5)	19.0	6.8	7.2	7.3	6.9
L6	12.0	5.7	5.6	8.5	7.0
L7(N3)	13.0	4.5	6.3	7.8	7.9
L8	10.0	5.5	7.2	6.4	9.5
L9	19.0	8.1	9.9	9.9	9.3
L10(N10)	14.0	5.8	7.2	7.6	7.1
L11(N2)	13.0	12.5	12.8	12.7	11.7
L12	10.0	11.7	13.1	12.7	12.2
L13(N8)	14.0	8.5	9.3	10.2	9.1
L14	19.0	5.2	9.0	11.3	12.7
L15	10.0	10.0	8.5	9.5	9.9
L16	12.0	7.2	9.8	7.9	9.7
L17(N7)	10.0	7.2	6.6	8.6	7.0
L18(N4)	15.0	10.7	6.5	7.4	8.3
N1	10.0	7.6	5.8	5.7	8.1
N6	12.0	8.0	6.4	6.1	7.2
N9	9.0	8.3	6.4	6.6	7.7
N11	5.0	7.6	5.0	5.1	4.0
N12	12.0	7.4	7.2	6.6	9.1
Average	12.57	7.45	7.61	8.05	8.50

- ① Without compensation
- ② L1~L18
- ③ All pair
- ④ All pair without B2
- ⑤ All pair without C2

また、装置の熱変形挙動を確認するため、SOLIDWORKS Simulation により装置各部の温度分布を再現し、温度分布により生じる装置各部の熱変形から主軸と刃物台間の距離である加工径変化量を求めた。解析の温度分布と変位量の例として、L1 条件 $t=28800s$ の熱解析結果を図 5 に、L1、L3 条件の時間区分ごとの解析結果と実機との比較を図 6 に示す。解析結果では実機と比較し実験開始直後の加工径変化量が低下する傾向がみられなかったが、全体の変化の傾向は概ね対応している。

図 7 に装置の熱変形挙動の概要を示す。図 7(a)はベッド全体の温度変化により、ベッドが膨張・収縮し、主軸刃物間距離が温度と比例して増減する変形である。図 7 (b)は青丸に示すように主軸モータの発熱が、主軸台座の角度に影響を与え、主軸の位置が変位し負の加工径変化量が生じる変形である。熱変形の挙動には、大別してこれらの 2 つの変形モードがあると考えられる。

Z 軸サーボモータと主軸の温度のバランスにより、加工開始後一定時間経過すると図 7 (b)に見られる主軸台座の角度の変化は飽和するが、待機後の動作開始時には主軸モータの温度が下がっており、主軸台座の傾きが収まり、加工径変化量が増加すると考えられる。

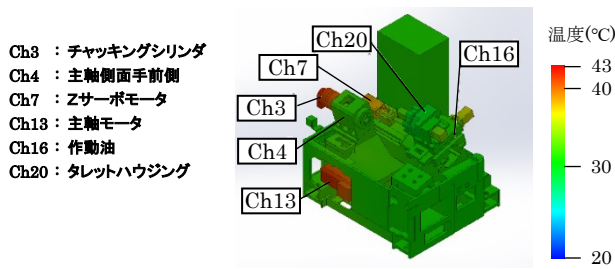


Fig.5 Temperature distribution (L1 : $t=28800s$)

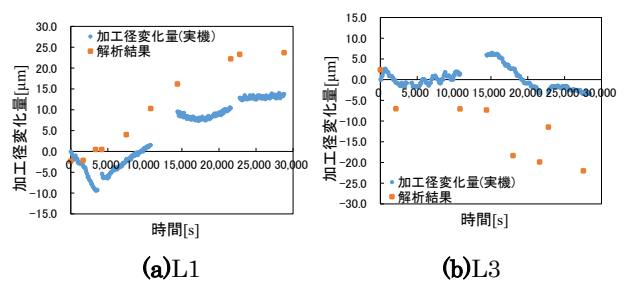


Fig.6 Comparison between actual measurement and analysis

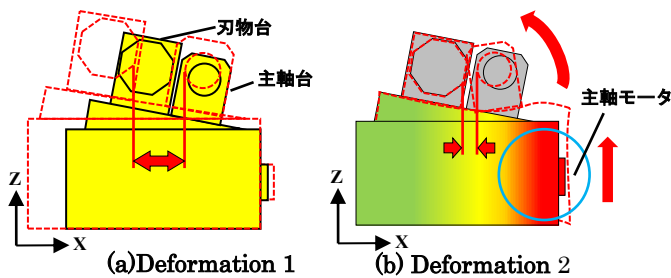


Fig.7 Overview of thermal deformation behavior

本研究では、熱変形予測式決定の効率化を目的に、all pair 法を用いて少数回で網羅性の高い実験条件の設定を行い、直交表による条件設定による熱変形補正の効果を比較し、同程度の効果が得られることを確認した。また、要因効果図により各因子の熱変形への影響度を可視化し、影響の小さい条件を除くことによる条件の削減が可能であることを確認した。以上より、熱変形補正システムを低コストで構築する手法を提案できた。さらに、実験条件に基づいた解析結果から装置各部の熱変形を分析し、熱変形挙動を可視化した。また、実機試験における非線形な熱変形現象を主軸モータと装置各部の温度差で説明できることを明らかにした。以上より、all pair 法で設定した実験条件と熱変形の関連性を確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 ISHINO Yoshiaki、TACHIYA Hiroshi、SUZUKI Naohiko、KANEKO Yoshiyuki、ISE Taisei	4. 巻 87
2. 論文標題 Determining a prediction equation for thermal deformation of a CNC lathe using the experimental design	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00266
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00266	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊勢 大成、石野 嘉章、鈴木 直彦、金子 義幸、立矢 宏
2. 発表標題 All pair法を用いた少数回の実験によるCNC旋盤の熱変形予測式の決定
3. 学会等名 日本機械学会年次大会、2022、2022 巻、セッションID J132-01
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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