

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：51101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K01311

研究課題名（和文）プラントの安全管理のための電位差計測に基づく配管減肉モニタリング手法の開発

研究課題名（英文）Development of pipe wall thinning monitoring method by DC potential difference method for plant safety management

研究代表者

武尾 文雄（Takeo, Fumio）

八戸工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：70171626

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）：各種プラントで使用される配管は、長期間のうちに内部の流れの影響により減肉が発生し、ついには事故に至る場合もある。本研究では、管内面が一樣に減肉する場合と局部的に減肉する場合を対象に、直流電位差法により減肉の状況をモニタリングする方法を開発した。本方法では、管外面に等間隔で設置した複数の電極端子を利用する。外側の2本の端子間に一定の直流電流を供給し、他の端子間で計測される電位差の変化から肉厚の変化を評価することが可能である。有限要素法による電位場解析に基づき、肉厚を簡単に評価できる実用的な手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見は、直流電位差法により配管減肉状況を把握するための基礎となるものであり、一樣減肉から局部減肉までを対象に、それぞれに適する簡便な評価手法を統一的に検討した点に特色を有する。本手法では、設置した電極と配線を残しておくことにより、以後の計測は引き出した配線と計測装置を接続するだけで可能となる。したがって、他の方法に比べて長期間のモニタリングに要する経費や労力を劇的に縮減でき、各種プラント等の安全管理に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：The wall thickness of the pipes used in the plant is reduced by the effect of the internal flow during long-term use, which may eventually lead to an accident. In this study, a method to monitor the state of wall thinning using the DC potential difference method for both cases of uniform wall thinning and local wall thinning was developed. This method utilizes a plurality of electrode terminals equidistantly attached on the outer surface of the pipe. A constant DC current is supplied between the two outer terminals, and the change in wall thickness is evaluated from the change in potential differences measured between the other terminals. Based on electric field analysis using the finite element method, a practical method that can easily evaluate wall thickness was proposed.

研究分野：非破壊検査，材料強度

キーワード：直流電位差法 配管 減肉 評価 有限要素法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2004年に発生した美浜原子力発電所の配管破裂事故を契機に、発電設備などの各種プラントにおける配管減肉状況を長期間にわたってモニタリングできる非破壊評価手法が求められている。プラントの配管には、オリフィスや弁など減肉を誘発する要素が多数使用されており、また配管が高所や土中に設置されていたり保温材で被覆されていることも多い。そのため、測定箇所を露出させて探触子を密着させる必要がある超音波パルス反射法によって、減肉が疑われる全ての箇所の検査を行うには膨大な経費と時間を要する。

これに対し、例えば日本機械学会が策定した火力設備配管減肉管理技術規格では、肉厚の検査方法として測定精度の高い超音波パルス反射法を規定する一方、放射線透過法、パルス渦流法、電位差法、3次元超音波検査法を設備管理者の責任において適用可能であるとしており、減肉管理に伴う上記の課題解決に向けた研究が進められている。

2. 研究の目的

各種プラントの安全管理に不可欠な配管減肉状況を長期間にわたってモニタリングできるシステムの開発を目的とし、直流電位差法を用いて配管内面に生じた減肉を管外面側から簡便かつ定量的に非破壊評価する手法の開発を目指す。本手法では、初回検査時に設置した電極と配管を残したままで保温材等を復元することにより、以後の検査は引き出した配線と計測装置を接続するだけで可能となり、配管の設置場所に関わらず長期にわたるモニタリングに要する経費や労力を劇的に削減できる可能性を有する。本研究では、減肉部のタイプを一様減肉および周状の局部減肉に大別し、局部減肉については最大深さと開口幅で表わされる溝状欠陥として一般化して捉えることにより、簡便に減肉の程度を把握できる現場適用型の汎用的な評価手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

図1に示すように、円管の内面に発生した減肉を、管外面に設置した端子を用いて直流電位差法によって評価する。外径 D なる円管表面の管軸方向に $2s_1$ なる間隔で電流入出力端子を設置して一定電流 I を入出力し、その同一直線上で $2s_2$ なる間隔で設置した2本の端子によって電位差 V 、またはその分布を計測する。電位差の計測位置は、電流入出力端子の中心を原点とする座標 x で表す。減肉は、図1(a)に示すような一様減肉、および図1(b)に示すような開口幅 $2w$ 、最大深さ b なる円弧型断面を有する周状の局部減肉の2種類としてモデル化した。簡単のため、減肉部は電流入出力端子間の中心にある場合を対象とした。減肉前の肉厚を t_0 とし、長さ寸法は t_0 を基準として表す。また減肉していない部分の電位差を V_0 、減肉部の電位差を V_1 とし、電位差比 V_1/V_0 の値やその分布の情報をもとに残存肉厚 t/t_0 、あるいは局部減肉の最大減肉深さ b/t_0 を推定するものとした。なお、円管の基礎として、 D/t_0 が無限大の場合に相当する平板の場合も対象とした。

減肉部寸法による電位差比の変化を3次元有限要素法(FEM)により解析し、その特性について考察するとともに、 t/t_0 または b/t_0 を評価する手法について検討した。なお解析にあたっては、基準肉厚を $t_0=10\text{mm}$ または 5mm 、供給電流を $I=1\text{A}$ 、材料の電気抵抗率はステンレス鋼SUS304を想定し $\rho=72\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ とした。また管長 L は、管端面の影響が生じないよう十分大きくした。

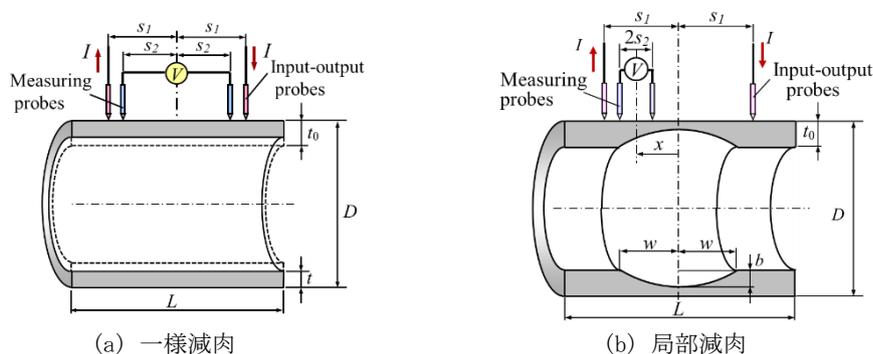


図1 配管内面の減肉部モデル (断面図)

4. 研究成果

(1) 端子間隔の最適化

直流電位差法による減肉評価は、材料表面の2点間に入出力した電流が材料内に形成する電流場と、裏面や裏面側の溝状欠陥との相互作用を材料表面の電位差変化として捉えるものである。よって評価対象と強い相互作用を生じる電流場を形成できる電流入出力端子間隔 $2s_1$ と、同相互作用を高精度に計測できる電位差計測端子間隔 $2s_2$ を選定することは非常に重要である。そこで平板の一様減肉の場合を対象に、FEMによる電位場解析を行い、健全時の肉厚 t_0 を基準とし

た電流入出力端子間隔 s_1/t_0 、および端子間隔の比 s_2/s_1 の最適化について検討した。

本手法では、基準肉厚 t_0 、および減肉後の肉厚 t に対する電位差をそれぞれ V_0 、 V_1 とし、肉厚の変化に対する電位差比 V_1/V_0 によって肉厚変化を評価する。したがって高感度に肉厚を評価するためには t/t_0 の変化に対する V_1/V_0 の変化が大きくなる端子間隔が好適である。一方、肉厚評価の基となる電位差を高精度に計測するためには、 V_0 や V_1 の値が大きくなる端子間隔が好適である。そこで種々の肉厚、端子間隔の場合に対する FEM 解析を行い、電位差比 V_1/V_0 の変化に及ぼす s_1/t_0 と s_2/s_1 の影響、及び電位差 V の大きさに及ぼす s_1/t_0 と s_2/s_1 の影響を明らかにした。得られた結果を前述の二つの観点から総合的に考察した結果、今回検討した範囲では s_1/t_0 は 4~5 程度、 s_2/s_1 は 0.8 以下でできるだけ大きく設定することが適切であるとの結論を得た。

また、円管の一樣減肉の場合について同様の検討を行い、適切な端子間隔の範囲が平板の場合と同様であることを確認した。

(2) 一樣減肉の評価

図 1(a) に示すような一樣減肉に対し、配管肉厚による電位差比の変化を FEM 解析し、肉厚の評価手法について検討した。端子間隔は、前項での検討結果をもとに $s_1/t_0=5$ 、 $s_2/s_1=0.8$ とした。種々の管外径 D/t_0 の場合について、肉厚比 t/t_0 と電位差比 V_1/V_0 の較正関係を FEM 解析により求めた結果を図 2 に示す。図中、 $D/t_0=\infty$ は平板の場合を表す。同図より、較正曲線は管外径の影響を受けており、 D/t_0 が大きくなるにつれて全体的に V_1/V_0 が大きくなり、平板の場合に漸近していることがわかる。同影響は、 $D/t_0=10$ 程度以下において顕著であるものの、市販されている配管の多くが該当する $D/t_0=10$ 程度以上の場合には平板に対する較正関係とほぼ一致している。そこで、図 2 の $D/t_0=\infty$ の場合の関係を次式で近似し、これを較正関係式として用いた肉厚評価実験を行った。図 2 の曲線は式 (1) を表しており、 $D/t_0=\infty$ の場合の関係を良好に近似していることが確認できる。

$$\left(\frac{V_1}{V_0}\right) = \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-0.96932} \tag{1}$$

実験には外径 $D=48.6\text{mm}$ の配管用ステンレス鋼管 (SUS304 TPS) を使用した。公称肉厚は 5.1 mm、3.7 mm、3.0 mm、2.8 mm の 4 種類であり、 $t_0=5.1\text{mm}$ のものを減肉前の配管、他の 3 種類を減肉後の配管とみなした。なお、この場合の D/t_0 は約 9.5 である。電流入出力端子及び電位差計測端子には市販のコンタクトプローブを用い、製作の都合上、端子間隔は $2s_1=50\text{mm}$ 、 $2s_2=35\text{mm}$ とした。この端子間隔では $s_2/s_1=0.7$ となるが、較正関係は $s_2/s_1=0.8$ の場合とほぼ同一であることを確認した。直流安定化電源により電流入出力端子間に $I=1\text{A}$ の一定電流を供給し、電位差計測端子間の電位差を計測した。管軸方向の中央部分で、円周方向に 90 度ずつ離れた 4 ヶ所の電位差を、電極の正負を入れ替えて各 2 回、計 16 回計測し、その平均値より式 (1) を用いて肉厚を評価した。結果を表 1 に示す。評価結果はいずれの場合も実測値と良好に一致しており、本評価手法の有効性が確認できる。

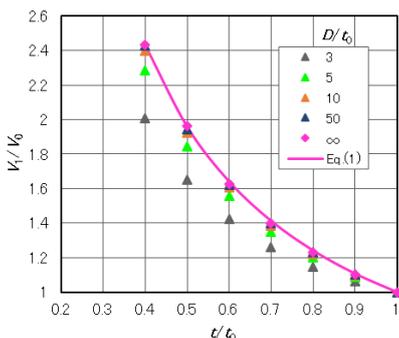


図 2 円管の一樣減肉に対する較正関係

表 1 一樣減肉の肉厚評価実験結果

No.	Thickness (mm)		
	Nominal	Actual	Evaluated
1	5.1	5.1	(Reference)
2	3.7	3.7	3.8
3	3	2.9	2.9
4	2.8	2.8	2.8

(3) 局部減肉の評価

図 1(b) に示すような局部減肉部の評価手法を検討した。局部減肉の場合、減肉部寸法に関するパラメータが一樣減肉の場合よりも多いため、電流入出力端子間における電位差分布の情報を利用する。円管表面の管軸方向に $2s_1$ なる間隔で電流入出力端子を設置し、その同一直線上で $2s_2$ なる間隔で設置した 2 本の端子によって電位差 V の分布を計測する。減肉部の位置および減肉幅 $2w$ は電位差分布波形から推定できるものと考えられるため、減肉部を中心として電流入出力端子を設置する場合を対象とした。実際の配管では、オリフィス下流部など局部減肉の発生が予想される部位に、あらかじめ管軸方向に等間隔の端子列を設置しておき、最も外側の端子間に電流を供給して得た電位差比分布波形から推定した減肉中心位置をもとに、改めてこれを中心とする 2 本の端子を電流入出力端子に設定する方法が想定される。

同一の計測点において、減肉の有無による電位差の比 V_1/V_0 を求め、その分布波形をもとに最大の減肉深さ b/t_0 を推定する方法を検討した。オリフィス下流部の局部減肉を想定した場合、基準肉厚が同一の円管であっても減肉幅は管外径 D に依存し、 $2w$ は $0.5D \sim 2D$ 程度の範囲が多く

なるものと想定される。ここでは減肉部が溝状欠陥とみなせるような場合、すなわち w/t_0 が比較的小さい場合を対象とすることから、市販されている各種配管の寸法を参考に管外径は $D/t_0=10$ とした。電流入出力端子間隔は上記の減肉幅の範囲を考慮して $2s_1=2D$ 、すなわち $s_1/t_0=10$ とし、電位差計測端子間隔は電位差分布を計測することを考慮して $s_2/s_1=0.1$ と設定した。

種々の減肉寸法の場合について管表面における電位差分布を FEM 解析し、減肉幅 w/t_0 、減肉深さ b/t_0 による電位差比分布波形の変化を調べた。その結果、電位差比分布は減肉部中心をピークとする波形となり、 w/t_0 が大きくなるにつれて波形の幅が、 b/t_0 が大きくなるにつれてピーク値がそれぞれ大きくなることが確認された。これをもとに最大減肉深さの評価手法を検討した。図 3 に減肉深さ b/t_0 と電位差比 V_1/V_0 のピーク値の関係を示す。同図は減肉深さを評価する際の較正曲線となる。同図より、電位差比は b/t_0 とともに増加する曲線となることが確認できる。一方、電位差比は減肉幅にも依存しており、 w/t_0 が大きくなるにつれて曲線の傾きが徐々に大きくなり、 $w/t_0=\infty$ で表した一様減肉の場合に漸近することがわかる。そこで、電位差比分布波形などの情報から別途 w/t_0 を推定することを前提に、 w/t_0 の影響を考慮した減肉深さ評価手法について検討した。

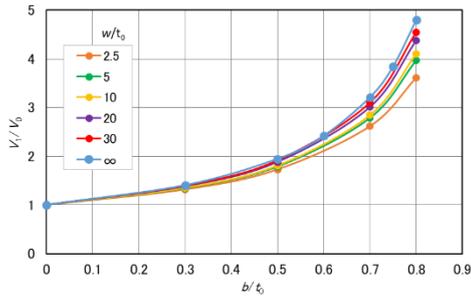


図 3 減肉深さ b/t_0 と電位差比 V_1/V_0 の関係

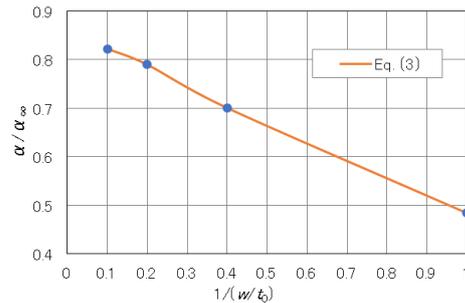


図 4 式(2)の係数 α と w/t_0 の関係 ($1 \leq w/t_0 \leq 10$)

図 3 の関係をもとに、任意の w/t_0 に対応する較正曲線を簡便に得る方法を検討した。図 3 の関係を式(2)の関数で近似し、各曲線に対する係数 α を求めて w/t_0 との関係調べた。

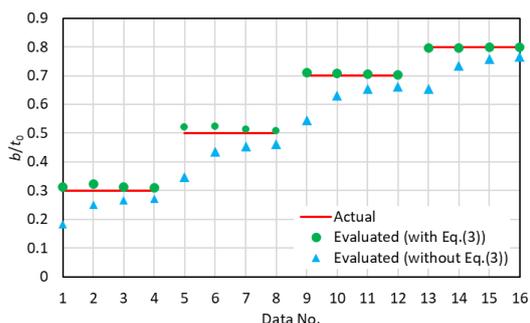
$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\alpha}{1 - b/t_0} + (1 - \alpha) \quad (2)$$

結果の一部を図 4 に示す。図 4 の横軸は w/t_0 の逆数、縦軸は $w/t_0=\infty$ の一様減肉の場合に対する係数 $\alpha_\infty=0.94954$ で正規化した α/α_∞ を表す。なお、図 4 の関係は減肉幅 $2w$ が電流入出力端子間隔 $2s_1$ と等しくなる $1/(w/t_0)=0.1$ を境に異なる傾向を示したため、二つに区分して扱った。図 4 は減肉幅が電流入出力端子間隔よりも小さい $1 \leq w/t_0 \leq 10$ の場合の結果である。図 4 は図 3 の較正曲線に及ぼす減肉幅の影響を表すものである。そこで図 4 の関係を式(3)に示す関数で近似した。 $1 \leq w/t_0 \leq 10$ および $10 \leq w/t_0 \leq \infty$ の各場合に対して、式(3)の係数 $P_1 \sim P_4$ は表 2 のように得られた。図 4 の曲線は式(3)を表す。

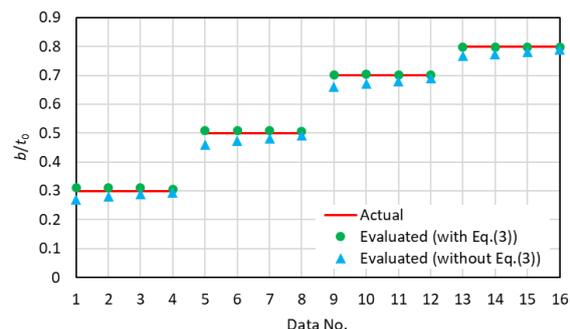
$$\frac{\alpha}{\alpha_\infty} = P_1 \left(\frac{w}{t_0}\right)^{-3} + P_2 \left(\frac{w}{t_0}\right)^{-2} + P_3 \left(\frac{w}{t_0}\right)^{-1} + P_4 \quad (3)$$

表 2 式(3)の係数

		P_1	P_2	P_3	P_4
(a)	$1.0 \leq w/t_0 \leq 10.0$	0.55873	-0.78794	-0.128828	0.84296
(b)	$10.0 \leq w/t_0 \leq \infty$	305.38	-40.176	-0.7938	1



(a) $1 \leq w/t_0 \leq 10$



(b) $10 \leq w/t_0 \leq \infty$

図 5 数値実験による減肉深さ評価結果

式(3)を用いれば任意の w/t_0 に対する係数 α を求めることができ、これを式(2)に代入すれば任意の w/t_0 に対する較正曲線を得ることができる。

以上で述べた減肉深さ評価手法の妥当性を検証するため、FEM 解析により得た電位差を計測値と見立て、式(2)、(3)より減肉深さを評価する数値実験を行った。なお減肉幅は別途、推定することを前提としている。結果を図5に示す。図中の線は実際の減肉深さを、●は本手法による評価深さを表す。同一の深さに対して4種類の w/t_0 の場合を対象としており、Data No.の小さい順に、(a)は $w/t_0=1, 2.5, 5, 10$ を、(b)は $w/t_0=10, 15, 20, 30$ の場合である。全体に良好に評価されていることが確認できる。一方、▲は w/t_0 の影響を補正する式(3)を用いず、一様減肉に対する較正関係によって評価した深さを表す。特に w/t_0 が小さい図5(a)では両者の差が大きく、減肉幅の影響を考慮する式(3)の効果が大きいことがわかる。

(4) 幅の広い局部減肉部の評価

減肉開口幅 $2w$ が初期肉厚 t_0 に比してはるかに大きい場合には、前項で示した溝状欠陥として評価するよりも、電流入出力と電位差計測の4端子を一定間隔で固定し、管軸方向に走査して肉厚分布を評価する手法が有効であると考えられる。この場合、電流入出力端子間に挟まれた部分の肉厚変化は小さく、一様減肉に近い状態となる。そこで、(2)で述べた一様減肉の評価手法を適用し、肉厚分布の評価を試みた。

円管内面に幅の広い局部減肉部を加工するのは困難であるため、電流分布の対称性を考慮し、試験片は中心軸を含む平面で二つに切断した半円管形状のものを用いた。外径 $D=48.6\text{mm}$ 、初期肉厚 $t_0=5.1\text{mm}$ 、長さ $L=380\text{mm}$ の SUS304 ステンレス鋼管をワイヤカット放電加工によって二つに切断し、その内面にボールエンドミルを取り付けたマシニングセンタにより減肉部を切削加工した。

(1)で得た適切な端子間隔の条件を基に $2s_1=50\text{mm}$ の間隔で電流入出力端子を、その中心に $2s_2=40\text{mm}$ の間隔で電位差計測端子を設置し、二つ割り試験片の切断面と管外面の交線となる角部に端子を接触させて電位差を計測した。供給電流は 1A とした。これを管軸方向に 2.5mm ずつ移動しながら繰り返し、得られた電位差から一様減肉に対する較正関係を用いて肉厚の分布を評価した。

結果を図6に示す。減肉部の最大深さを $b=2\text{mm}$ で一定とし、減肉幅 $2w$ を $50, 75, 100, 200\text{mm}$ とした場合であり、実線は実測値、同じ色のプロット点は評価値を表す。減肉幅が小さい減肉に対しては幅、肉厚ともに誤差が大きいものの、最も減肉幅の大きい $2w=200\text{mm}$ の場合には、肉厚の評価誤差は 10% 程度となっている。

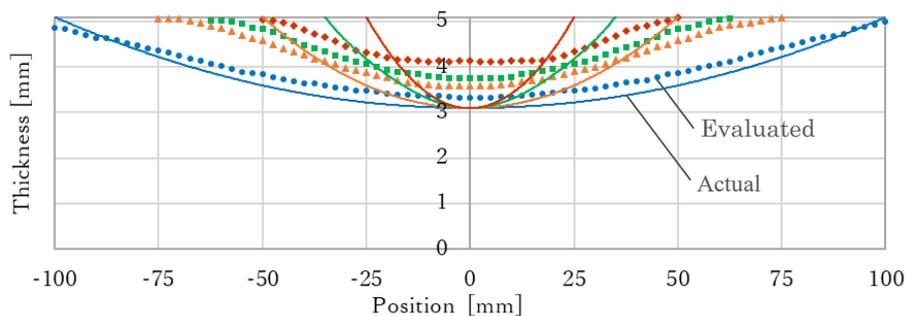


図6 肉厚分布評価実験の結果

(5) 得られた成果の位置づけと今後の展望

本研究で得られた成果は、直流電位差法により配管減肉の状況を把握するための基礎的知見となるものである。一様減肉から局部減肉、及びその中間的な幅の広い局部減肉までを対象に、それぞれに適する評価手法を統一的に検討した点に特色を有する。本手法は、一度、電極と配線を設置すれば以後の検査が容易であり、他の方法に比べ長期間のモニタリングに要する経費や労力を劇的に縮減できる可能性がある。現場への適用にあたっては、本手法によって減肉傾向が認められた部位について超音波パルス反射法による詳細調査を実施する、などの方法が有効と考えられる。今後、管端部の影響などさらに実際的な検討を進めて実用化を図ることにより、各種プラント等の安全管理への貢献が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 武尾 文雄, 長利 颯大
2. 発表標題 直流電位差計測に基づく配管局部減肉の評価手法に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武尾文雄, 中村真慈, 高田晴輝, 程熊幸佑
2. 発表標題 直流電位差計測に基づく円管の一様減肉評価
3. 学会等名 2019年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武尾 文雄, 荒木亮太, 藤森大将, 河内秀樹
2. 発表標題 電位差計測に基づく減肉評価のための最適端子間隔の検討
3. 学会等名 日本機械学会 第26回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2018) (招待講演)
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
---------------------------	-----------------------	----

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