

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360303

研究課題名(和文)潤滑剤の流体・ミクロ挙動を考慮した塑性変形予測に関する研究

研究課題名(英文)A Numerical Analysis of Metal Forming Considering Fluid Behavior of Lubricant

研究代表者

久保木 孝(Kuboki, Takashi)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：90361823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円、(間接経費) 3,870,000円

研究成果の概要(和文)：潤滑剤の流体挙動を解明するための数値流体力学解析と、有限要素法を用いた塑性変形解析を連成することによって、潤滑剤の動的な挙動を考慮した塑性変形を解析するシステムを構築した。本システムは潤滑剤が外部から強制的に圧力によって供給される場合、或いは、材料に引き込まれて強制される場合、ともに適用可能である。本システムによって、従来研究では不可能であった潤滑と塑性変形を結ぶ課題、例えば、潤滑挙動を考慮した工具・工程設計、成形品特性改善の点からの潤滑剤の評価が可能となった。効果は実験により検証している。

研究成果の概要(英文)：This project constructed a new numerical system, which can conduct analysis of plastic deformation, such as metal forming, considering dynamic behavior of lubrication, by coupling computational fluid dynamics for lubrication and the finite element method for metal forming. The constructed system is able to be applied for the case where lubricant is supplied into the space between the metal and die by high pressure as well as the case where lubricant is drawn into the space by traction force from the metal surface. The system will be useful for solving problems involving both lubrication and plastic deformation, which cannot be solved by conventional methods. For example, the developed system realized designs of process line and tools, and evaluation of lubrication for improvement of formability. The effect of the system was verified by a series of experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，材料加工・処理

キーワード：塑性変形-流体連成解析 Reynolds方程式 深絞り加工 高圧水 潤滑 Navier-Stokes方程式 有限要素法 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

従来、塑性変形と流体挙動の相互作用があることは知られているものの、この相互作用を考慮した塑性変形挙動の解明を試みた研究はなかった。塑性変形・塑性加工を専門とする研究者は、摩擦係数を仮定して、解析を実施していた。その際、摩擦係数に分布などを与えることなく、一定の値として問題を取り扱う。実験的には面圧などによって、摩擦係数が変わることが知られているにも関わらず、ほとんどの塑性変形解析には考慮されなかった。一方、潤滑を専門とする研究者は、粘性などの評価値を基準にして、研究を進めていた。その目的は、潤滑性が良好な潤滑剤を開発することや、潤滑剤の流体としての挙動を明らかにすることに絞られていた。塑性加工における本来の潤滑剤の目的は、塑性加工時の成形機が受ける荷重の低減や成形品形状の改善であるにも拘わらず、塑性変形挙動にまで踏み込んだ取り組み事例はない。つまり、塑性加工の専門家は塑性変形だけに、潤滑の専門家は局所的な潤滑剤挙動だけに焦点を絞った研究をしており、総合的な観点からの研究は少なかった。

しかしながら、潤滑剤に対しては環境問題をキーワードにした開発が要求され、また、塑性加工成形品に対して高寸法精度が要求されている現在、塑性変形と潤滑挙動の総合的な観点からの研究が求められるべきであった。例えば、環境問題の点から、著者らは潤滑油を使わない高圧水を利用した深絞り加工法を開発し、表彰されるなど高く評価されているが、実用化には至っていない。これは、水圧レベルや高圧水の供給穴径や位置の影響の考慮などの流体挙動の検討が不十分なことが理由であった。

2. 研究の目的

潤滑剤の流体解析と塑性変形解析とを融合した解析システムの構築することを目的とする。当該システムの開発は、主として、強制圧力潤滑を用いた塑性加工を対象とした。強制圧力潤滑では、潤滑材は外部から強制的に圧力を加えながら材料と工具の隙間に供給され、潤滑剤である流体が流れる。塑性加工における被加工材の形状変化に応じて流体の流路が変化する。流路の変化に応じて流体の状態が変わり、被加工材に加わる圧力が変わる。圧力の変化は再び被加工材の変形形状に影響を及ぼす。

強制圧力潤滑の解析が実施できれば、強制圧力を用いない非強制圧力潤滑を用いた塑性加工への適用も可能である。非強制圧力潤滑では、潤滑剤を工具と材料の間に塗布する場合などに相当し、材料表面に付着した潤滑材が材料表面の移動にともない工具と材料の隙間に引き込まれる。

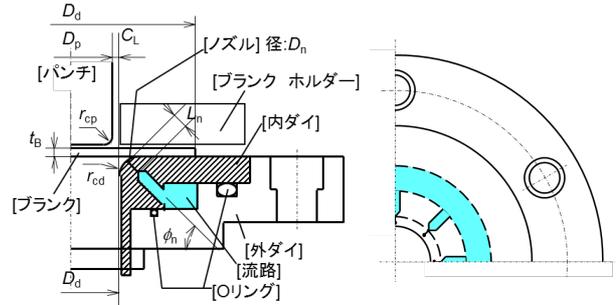
これらの流体と塑性変形が相互に影響を及ぼす複雑な現象を解明するための解析システムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

「潤滑剤の局所的な流体解析とマクロスケールの塑性変形解析とを融合した解析システム」の構築のために、大きく分けて以下のアプローチを試みた。

(1) 解析システムが対象とする加工

著者らが提案している高圧水深絞り加工を対象に解析システムの開発を実施した。高圧水深絞り加工の概要を図1に示す。



(a) 側面図 (b) 上面図  
図1 高圧水深絞り加工

基本構成は一般的な深絞り加工と同様であり、ブランクと呼ばれる素材である円形金属を穴のあいたダイの上にブランクホルダーを用いて押圧した状態で、パンチを押し下げることによってブランクをカップ形状に成形する。通常、ブランクとダイの間に油である潤滑を介在させて加工する。高圧水深絞り加工では、高圧水をノズルより供給することによって加工する。ダイは外ダイと内ダイからなり、両者の境界に高圧水の流路が備えられている。外ダイと内ダイから高圧水が漏れいしないように二つのOリングが使われている。深絞り加工条件一例を表1に示す。

表1 深絞り加工条件一例

加工条件	ポンプ圧 $P_0$ /MPa	0~60
	しわ押さえ力 $F_H$ /kN	1~3
	クリアランス $C_L$ /mm	1.15
パンチ	パンチ径 $D_p$ /mm	30
	肩半径 $R_{cp}$ /mm	2.5
ダイ	内径 $D_d$ /mm	32.3
	肩半径 $R_{cd}$ /mm	5
ノズル	径 $D_n$ /mm	0.6
	長さ $L_n$ /mm	10
	仰角 $\phi$ /degrees	45
	周方向配置	45°ピッチ, 8箇所
素材	材質	A1100 SPCC
	厚さ $t_0$ /mm	1
	直径 $D_b$ /mm	60

(2) 材料-工具間水膜の数値流体力学 (CFD)

当初、一般的に流体の解析に用いられている Navier-Stokes 方程式を、差分法を用いて解析する汎用コード OpenFoam の適用を検討

したが、Reynolds 方程式を用いる差分法コードの新たな製作を株式会社ファームフローに依頼し、カスタマイズして用いることとした。Reynolds 方程式を用いた理由は以下である。

- ・材料と工具の隙間は薄く Reynolds 方程式の適用が可能である。
- ・Navier-Stokes 方程式では水膜厚さ方向に格子を複数設定する必要があるが、Reynolds 方程式では厚さ方向に1つの格子を設定するだけでよく、計算時間を縮小可能である。
- ・Reynolds 方程式は、くさび効果、ストレッチ効果、スクイズ効果を表現でき、この内、ストレッチ効果は、本研究で扱う塑性変形による材料表面の伸縮を考慮するのに都合がよい。

解析結果例を図2に示す。ノズル周りに高圧域が発生していることを確認できる。

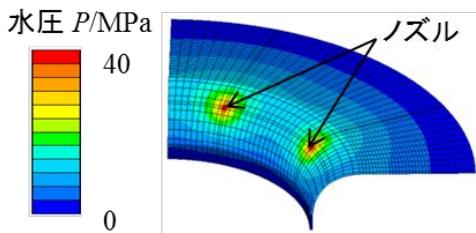


図2 水膜に発生する圧力のCFD解析結果例 (ノズル出口圧力40MPa, 水膜0.3mm一定)

### (3) 高圧水供給ノズルの理論計算

ノズル内部の流体挙動解明に対しても差分法を用いたCFDの適用も可能であるが、計算時間が圧倒的に短縮可能な理論式を適用した。当初、理論式として圧力損失、摩擦係数、ノズル長さとの関係を求めることができる Dracy-Weisbach の式と、内面粗度  $e$  から摩擦係数を算定できる Swamee-Jain の式を組み合わせ適用することを検討した。両式によって、ノズル内部の内面粗度  $e$  とノズル長さの影響を考慮して、ノズル出口部圧力  $P_1$  と出口部での流速  $u_m$  の関係を求めることができる。予め内面粗度  $e$  を求めておく必要があり、実験との比較によって求めた結果を図3に示す。

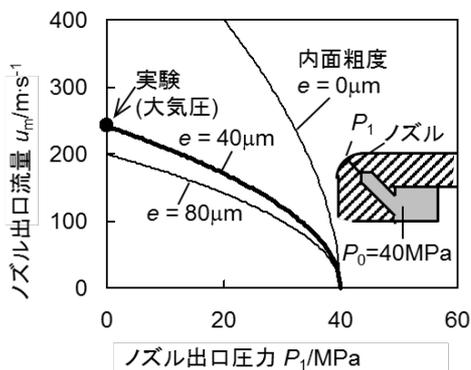


図3 内面粗度の見積もり

内面粗度は  $e$ 、大気圧下でのノズル出口流量を実験において測定し、 $40\mu\text{m}$ と求められた。但し、実験によって、ノズル長さの影響を調査したところ、ノズル長さはノズル出口部流量にほとんど影響を及ぼさないことが判明しており、ノズル長さの影響が大きくなる Dracy-Weisbach の式を見直す必要がある。

### (4) 水膜CFDとノズル理論計算の連成

ノズル出口圧力は、ノズル内部での圧力損失のために、ポンプ圧よりも低くなる。したがって、ノズル挙動を考慮して、水膜CFDにおけるノズル出口圧力を決定する必要がある。考え方を図4に示す。

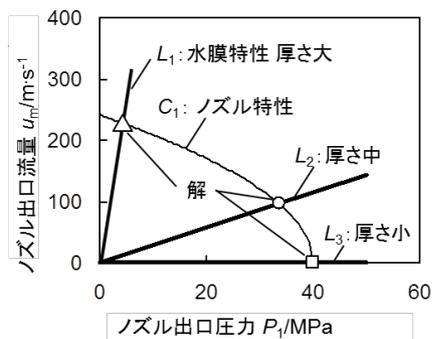


図4 水膜CFDとノズル理論計算の解(ポンプ圧  $P_0=40\text{MPa}$ )

ノズル特性は  $C_1$  に示す通りのカーブとなり、ノズル出口圧力が0の場合、最大流量を得る一方、ノズル出口圧力がポンプ圧40MPaと等しい場合は流量が0となる。CFDによって求められる水膜の挙動は  $L_1 \sim L_3$  に示す通り、ノズル出口部の圧力の増加とともに、流量は単調に増加する。ノズル特性ノズル特性  $C_1$  と水膜特性  $L_1 \sim L_3$  の交点が求められるべき解となる。水膜が厚いとき( )、ノズル出口圧力は小さく、流量が大きい。一方、水膜が薄いとき( )、ノズル出口圧力は大きく、流量は小さくなる。

### (5) 塑性変形解析

塑性加工の解析には英国ロックフィールド社製の有限要素法汎用コードELFENを用いた。ELFENでは、一般的な静的陰解法と動的陽解法の両者を切り替えて解析が可能である。本研究においては、口絞り加工において材料が局所的に薄くなる現象を考察するために動的陽解法を用いた。解析において局所的に薄くなる場合は、現実では割れ発生に相当する。また、二次元軸対称モデルと、三次元モデルを状況に応じて使い分けた。

### (6) 塑性解析から流体解析への一方向解析

深絞りの各段階における流体の状態を解析するために塑性解析の結果に基づいて流体解析を実施するシステムを構築した。フローチャートを図5に示す。まず、流体の影響を考慮しないで塑性変形解析を実施する。得

られた材料の形状や工具形状を用いて流体解析用の幾何形状を作成する．その際，材料の変形形状は不変として，水圧によって， $\Delta z$ だけ浮上していると仮定する．実際には水圧に応じて変形形状は影響を受けているかもしれないが，この方法を用いると塑性・流体の双方向の解析を行うよりも大幅に解析時間を短縮できる．

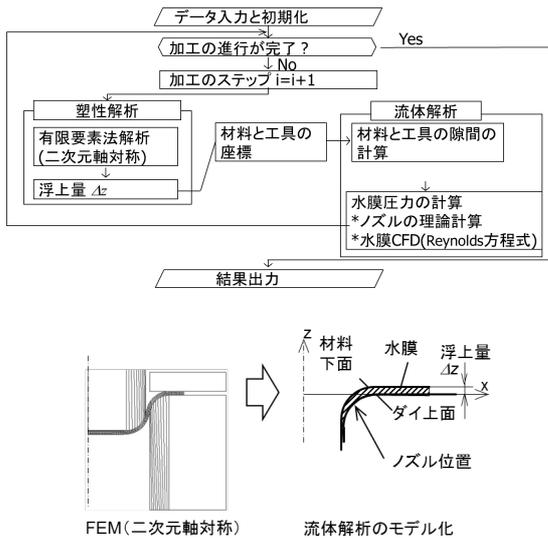


図5 塑性解析から流体解析への一方向解析

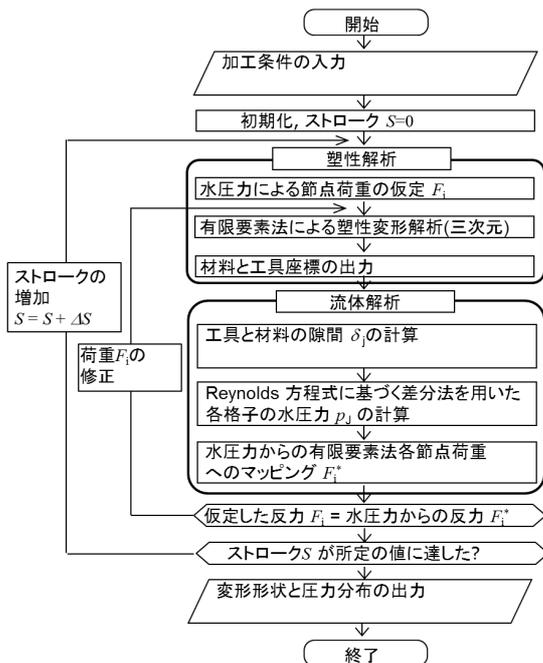


図6 塑性・流体双方向連成解析システム

(7) 塑性・流体双方向連成解析システム

塑性解析から流体解析への一方向解析に比べて時間は要するが，高精度な解析を実現するために塑性・流体双方向連成解析システムを構築した．フローチャートを図6に示す．塑性・流体双方向連成解析システムでは，材料が水膜からの力による各場所での浮上量の分布が求められる．塑性変形解析におい

て，水膜から及ぼされる節点荷重を仮定して，解析を実施する．得られた材料変形形状および工具座標から水膜分布を計算し，流体解析にて水膜に発生する圧力を算出する．この圧力から節点荷重を算出し，仮定した荷重との差を計算する．差がなくなるまで，繰り返し収束計算を実施する．

4. 研究成果

図5に示す塑性解析から流体解析への一方向解析，および，図6に示す塑性・流体双方向連成解析システムより得られた結果を以下に示す．

(1) 塑性解析から流体解析への一方向解析  
浮上量の算定

材料の水膜による浮上量 $\Delta z$ を算定した結果を図7に示す．解析は1日以内に終了した．青線にて水圧から生じる浮上力を示す．浮上量 $\Delta z$ の現象にともない浮上力が増加する．浮上力と赤線で示すパンチとブランクホルダーからの力と比較すると，ストローク $S$ が9~16mmの範囲では，材料の浮上量は10~20 $\mu\text{m}$ であることがわかる．

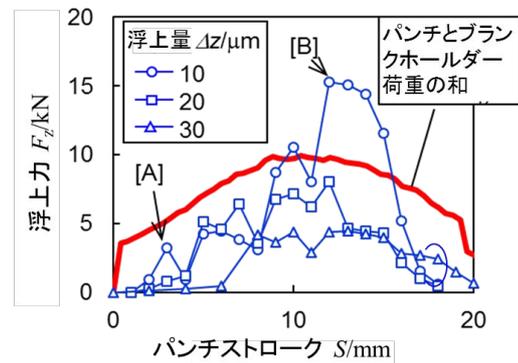


図7 浮上量の算定(一方向解析結果)

表面傷の原因究明

アルミニウム A1100 を素材として用い，高圧水深絞り加工実験を実施したところ，図8に示す表面傷が観察された．ここでは，傷をインクにてマーキングしている．

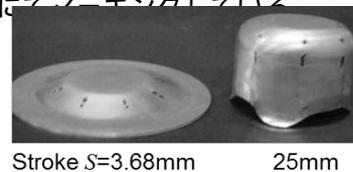
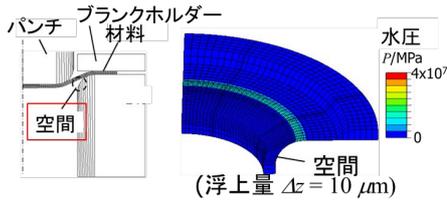


図8 観察された表面傷  
(実験，ポンプ圧 40MPa，A1100)

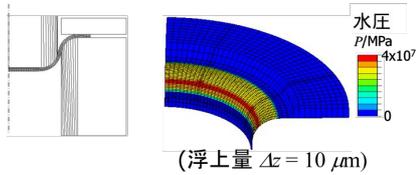
傷発生の原因を考察するために，塑性 流体一方向解析結果を図9に示す．図9(a)の通りストロークが小さいときは水圧が低く，ノズル出口部においても圧力がほぼ大気圧に等しい．この場合，図4からわかる通り，ノズルから噴出される水流速は非常に速い．この結果，噴出水が材料に衝突することによって，傷が発生したと考えられる．このために，

図 8 の通り  $S=4\text{mm}$  近傍において既に傷が生じていたと考えられる。

一方、図 9(b)の通りストロークが  $12\text{mm}$  程度のときは、十分に高い水圧がノズル出口近傍で生じており、噴出流の速度は低いと考えられる。したがって、深絞り加工の中段階以降では傷は増えることはない。



(a) ストローク  $S=4\text{mm}$



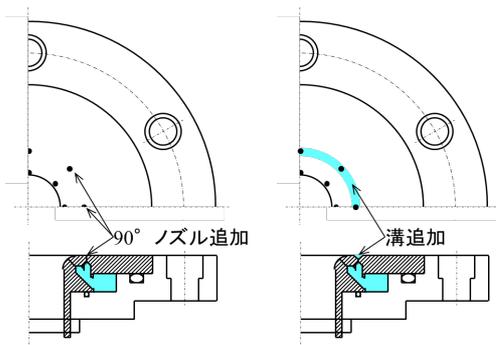
(b) ストローク  $S=12\text{mm}$

図 9 水圧分布(一方向解析, ストローク  $4\text{mm}$ )

#### 高圧水供給法の設計

浮上力を増強するために図 10 に示す二つの高圧水の供給法について検討した。一つは仰角  $90^\circ$  にノズルを追加する方法であり、もう一つはさらに仰角  $90^\circ$  ノズルの出口部を溝で連結する方法である。

これらの効果を事前に塑性・流体一方向解析によって評価した結果を図 11 に示す。新型ノズルはストロークが小さいとき、浮力改善に効果が大きいと予測された。



(a) 仰角  $90^\circ$  ノズル (b) 仰角  $90^\circ$  ノズルと溝  
図 10 浮上力を強化するためのノズル配置

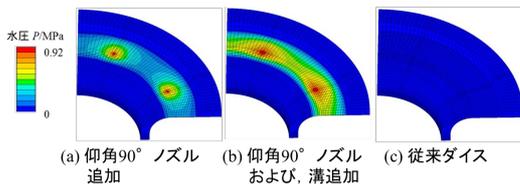
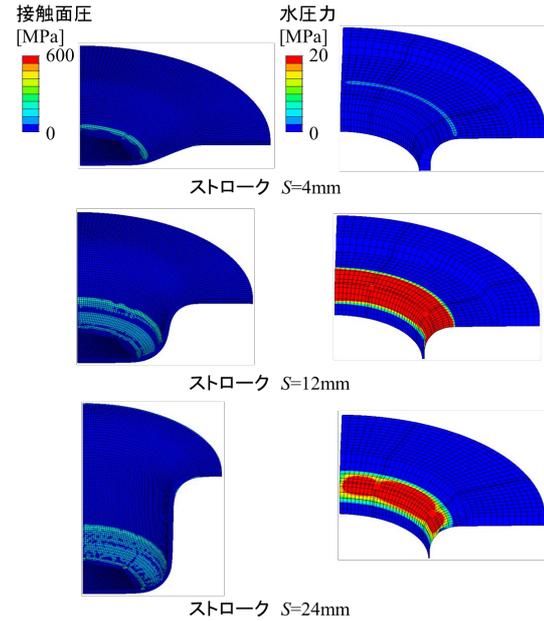


図 11 新ノズル配置に対する解析結果 (ストローク  $S=5\text{mm}$ , 塑性・流体一方向)

この効果を実験により検証した。従来ノズル配置(仰角  $60^\circ$  ノズルのみ配置)では、 $20\text{MPa}$  以上のポンプ圧が成形に必要であったが、新ノズルではポンプ圧  $10\text{MPa}$  にての成形に成功した。

#### (2) 塑性・流体双方向連成解析

より高精度な解析のために、塑性・流体双方向連成解析を実施した。解析結果の例を図 12 に示す。解析は 1 ヶ月~3 ヶ月程度要する。



(a) 塑性解析 (b) 流体解析

図 12 塑性・流体双方向連成解析結果 (材料:SPCC, ブランク径= $67.5\text{mm}$ , ノズル配置:仰角  $60^\circ$  のみ)

成形可否について、実験結果との比較結果を表 2 に示す。実験と解析は定性的に良い一致を示し、定量的にも近い結果を得た。

表 2 成形可否(SPCC)

		ブランク径(mm)				
		66	67.5	69	70.5	72
ポン プ 圧 [MPa]	0	S/S	F/F	F/F	F/F	F/F
	10	S/	S/S	F/F	F/	F/
	20	S/	S/	F/S	F/F	F/
	30	S/	S/	S/	F/S	F/
	40	S/	S/	S/	S/	F/
	50	S/	S/	S/	S/	F/

実験/解析, S:成功, F:破断

#### (3) まとめ

本研究において、潤滑剤の流体解析と塑性変形解析とを融合した二つの解析システムの構築した。一つは塑性解析結果を流体解析に一方に反映させる方法であり、もう一つは塑性と流体との双方向に連成して解を得る解析手法である。塑性・流体一方向解析では、計算時間が短縮でき、潤滑剤の流体挙動の評価、材料浮上量の概算、表面傷発生メカニズム検討、高圧水の供給方法に関してノ

ズル配置の検討などに用いることができる。一方、塑性・流体双方向解析は解析時間を要するものの、実験に対して定量的に近い結果を得ることができた。

#### 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)

Y. Horikoshi, T. Kuboki, M. Murata, K. Matsui, M. Tsubokura: Deep drawing with high-pressured water jet using ditch-engraved die, *Procedia Engineering*, (accepted), (査読有り).

T. Kuboki, Y. Jin, M. Murata: Prediction of stress-strain diagram from forming load in stretch forming, *Int. J. Mech. Sci.*, No. 60 (2012), pp. 46-53 (査読有り).

T. Kuboki, S. Uematsu, M. Murata: Composite structure composed of overlapped fibre bundles, thermoplastic resin and metal plate for secondary forming process, *Compos. Sci. and Technol.*, Vol. 70, No. 9 (2010), pp. 1338-1345 (査読有り).

[学会発表](計4件)

T. Kuboki, Y. Horikoshi, M. Murata, K. Matsui, M. Tsubokura: Evaluation of water film by Reynolds' equation in deep drawing using high-pressured water jet, *COMPLAS XII*, (2013-9), Barcelona, pp. 86-95 (査読有り).

堀越 祐樹, 久保木 孝, 村田 眞, 坪倉 誠, 松井 和己: 高圧水深絞り加工法における水膜挙動の Reynolds 方程式による評価, 平成 25 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2013-6), 名古屋, pp. 53-54.

T. Kuboki, H. Saito, Y. Tanaka, M. Murata, K. Matsui, M. Tsubokura: Lubrication characteristics of deep drawing with high-pressured water jet, *Metal forming*, (2012-9), Krakow, pp. 355-358 (査読有り).

斉藤 弘, 久保木 孝, 村田 眞, 坪倉 誠, 松井 和己: 高圧水を用いた深絞り加工における潤滑特性の検討, 平成 24 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2012-6), 小松, pp. 241-242.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mt.mce.uec.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

久保木 孝 (Kuboki, Takashi)

電気通信大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号: 90361823

(2)研究分担者

村田 眞 (MURATA, Makoto)

電気通信大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号: 10106883

松井 和己 (MATSUI, Kazumi)

横浜国立大学・環境情報研究科・准教授

研究者番号: 40313366

坪倉 誠 (TSUBOKURA, Makoto)

北海道大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 40313366

(3)連携研究者

なし