

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560139

研究課題名(和文) 難加工材の成形加工におけるトライボ状態及び製品欠陥の超音波反射を利用した評価

研究課題名(英文) Evaluation of tribological conditions and product defects using ultrasonic measurement in metal forming of hard-to-work materials

研究代表者

丸茂 康男 (Marumo, YAsuo)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：90199927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：塑性加工成形品の欠陥(しわ)の発生状態、金型と被加工材料接触界面における摩擦潤滑状態(トライボ状態)を、超音波計測を利用してインプロセスで評価した。しわ発生状況は超音波反射に影響を与えており、インプロセスで検知および評価が可能である。また、接触モデルを利用した潤滑状態の超音波評価も可能である。研究期間内に得られた成果は、超音波計測による製品欠陥のインプロセス検出の高度化や摩擦潤滑状態のインプロセス計測を深める上で重要となる。

研究成果の概要(英文)：In press forming, ultrasonic measurement was applied to the detecting of product defects and the evaluation of tribological conditions in the contact interface between the tool and workpiece. A main defect, i.e., wrinkling was estimated during the press operation. The ultrasonic reflection was influenced by wrinkling. The tribological conditions were evaluated using the ultrasonic measurement based on presented contact models. Obtained results are useful for the sophistication of the in-process inspection of defects and the advancement of in-process measurement of tribological conditions.

研究分野：成形加工学

キーワード：成形加工 トライボ条件 欠陥評価 超音波計測 センサー 加工特性

1. 研究開始当初の背景

自動車用部品、電気電子機器用部品や精密機器用部品などの金属プレス部品には高い品質が求められている。近年、これらの部品の軽量化や小型化が急速に進むなかで、強度を落とさずに軽量化や小型化を実現するために、難加工材の適用がますます増えている。これらの難加工材料をしわ、割れ、焼きつきなどの欠陥が無い状態で加工するためには、金型と被加工材料間の摩擦状態や潤滑剤挙動《すなわち、金型・被加工材料間のトライボ状態》の解明、金型・被加工材料間のトライボ状態の成形性への影響の解明、が不可欠である。

上記の課題の解明のために、超音波計測の利用は強力な方法の一つである。この方法においては、金型と被加工材料間で反射する超音波強度から、しわ発生状況や金型・被加工材料間のトライボ状態の評価が可能となる。接触界面の評価には、接触界面の電気抵抗の計測、加工後の接触面の顕微鏡観察、透明工具による接触状態の観察などが方法として挙げられる。著者等のこれまでの研究で、アルミニウム円柱の圧縮塑性変形（自由鍛造）において、加工中の金型と被加工材料間の接触状態を超音波計測し、加工中の接触率の変化、金型と被加工材料間の摩擦せん断応力の変化や潤滑剤挙動を検討してきた。金型と被加工材料間の微視的な接触状態は、金型と被加工材料間の微細突起同士が接触し、未接触部には潤滑剤が閉じ込められた状態になっている。これらの接触状態は場所によって異なり、また、加工とともに接触状態は変化し、潤滑剤もそれとともに流動する。面圧が高く、大きな相対すべりの箇所では、潤滑剤の膜切れなども生じ焼きつきや型かじりも生じやすくなる。接触界面に入射した超音波は、突起が接触していない箇所では、ほとんどが反射する。一方、突起接触部では、一部反射し、一部が透過する。これらの反射強度は潤滑膜厚さにも影響される。したがって、超音波を計測することで、トライボ状態を評価することができる。また、被加工材料にしわが発生すると、金型と被加工材料間にしわ高さ分のすきまができるため、これに応じて超音波の反射強度が変化し、しわ発生状態を検知することができる。ここでの手法は、難加工材のプレス加工にも適用できると考えられる。そこで、本研究では、プレス金型に超音波センサーを組込んだ《しわ・トライボ評価システム》を利用し、しわ発生状況とトライボ状態の評価を行う。

2. 研究の目的

高品質プレス成形品の加工においては、主要な不良の一つである「しわ」（板材の面内座屈）発生状態や金型と被加工材料接触界面における摩擦潤滑状態（トライボ状態）をインプロセスで評価し、加工の最適化に反映することが不可欠となる。そこで、本研究では、

プレス金型に組込んだ超音波センサーによる加工中のしわ発生状態やトライボ状態を評価するシステム《しわ・トライボ評価システム》を用いて、しわ発生状況の評価とトライボ状態の評価を行う。

3. 研究の方法

(1) しわ発生状態の評価

Fig. 1 に、接触界面での超音波反射の模式図を示す。超音波探触子から発せられた波は、接触界面において一部が通過し残りが反射する。接触の状態により反射状況が変化する。これを、板材成形において、しわ検知に適用した模式図を Fig. 2 に示す。ここでは、しわ状況の計測評価を述べる。上工具の下面が空気と接触しているときは、超音波は下面で反射（反射強度 I_0 ）する。上工具と下工具で素板がはさまれ、しわが発生していない状況での接触界面における反射強度を I_3 とする。一方、しわが発生し、工具と素板の接触面積が減少すると反射強度は増加する。接触面積の減少の程度により、反射強度は I_1 もしくは I_2 と変化する。このとき、反射強度の大きさは、 $I_0 > I_1 > I_2 > I_3$ となり、反射強度の変化からしわ発生やしわ変化の状況を把握することが可能となる。

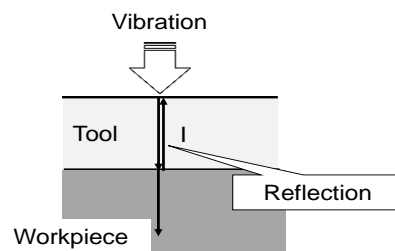


Fig.1 Schematic illustration of the reflection and penetration of ultrasonic wave

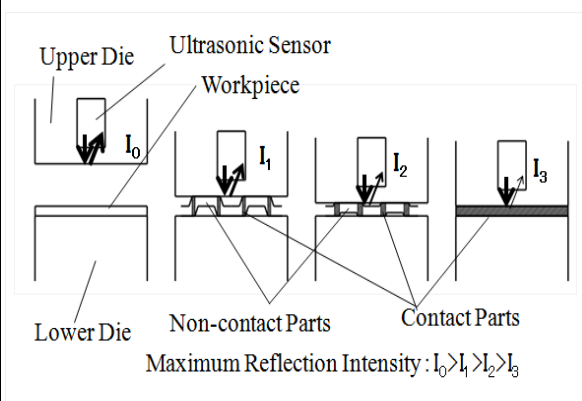


Fig.2 Variation in reflection intensity with the conditions of wrinkles

Fig.3 に試験機の模式図を示す。試験では、しわ押さえ圧力、素板厚さ、潤滑条件を変更し、しわ発生状況による超音波反射強度の変化を調べた。超音波探触子を金型に埋め込み、反射強度を測定した。パルサーレーザー、

プローブから発信された所定の周波数の音波は、ダイス内を通り、ダイスと素板の接触界面で反射する。この反射波はパルサーレーザ、デジタルオシロスコープを介してコンピュータに記録される。

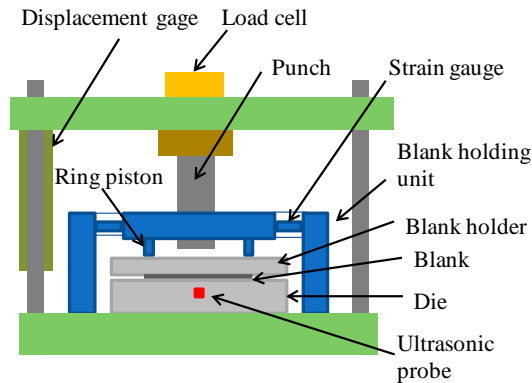


Fig.3 Schematic illustration of the main part of the experimental setup

(2) トライボ状態の評価

Fig. 4 に、液体潤滑における工具と被加工材料間の接触状態の概略を示す。工具と被加工材料の接触を微視的にみると、工具と被加工材料表面の微細突起部が接触し、凹部には潤滑剤が捕捉されている。凹部の潤滑剤は加工中に突起接触部に供給され摩擦が低減される。加工中、母材変形、突起部の変形や相対すべりとともに、接触状態は複雑に変化する。このため、加工中の潤滑剤状態を把握することは容易ではない。そこで、加工中の潤滑剤を含めた接触状態を把握するために、Fig. 5 に示すような、トライボ接触モデルを用いて接触状態を検討する。このモデルにおいては、被加工材料部の表面に凹凸を設定し代表パラメータとして、突起接触部の相当平均潤滑膜厚さ t_a 、凹部の相当平均潤滑膜厚さ t_{ave} 、接触率 R 、突起部の平均傾斜角度 α を導入する。これらのパラメータを用いることで複雑に変化する接触界面の状態を評価することができる。Fig. 6 に $\alpha=90^\circ$ の場合を示す。

ここに示した、モデルでは被加工材料表面のみに凹凸を設定したが、工具表面にも凹凸を設定しても考え方は同様である。

4. 研究成果

(1) しわ発生状態の評価

しわが発生している試験片に対応する超

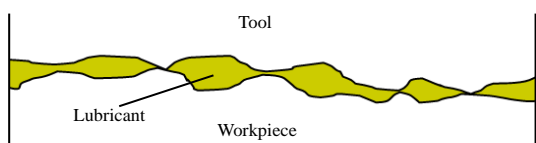


Fig.4 Schematic illustration of the contact interface between tool and workpiece

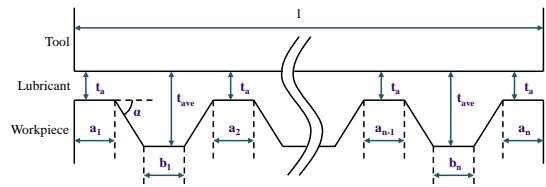


Fig.5 Schematic illustration of the contact model with taper angle

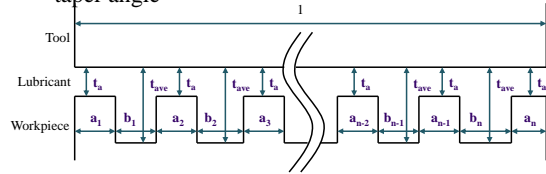


Fig.6 Schematic illustration of the contact model with taper angle of 90°

音波計測結果を Fig.7 に示す。それぞれ、潤滑条件を無潤滑、牛脂、グリセリンと変更した。無潤滑条件では、ほぼ全反射している。牛脂の場合、無潤滑に比べて超音波が透過していることがわかる。グリセリンを塗布した場合は、しわ発生状況の変化に伴う相対反射強度の変化が認められる。

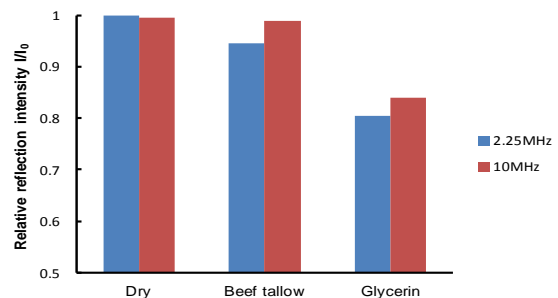


Fig.7 Relationship between relative reflection intensity and lubricant conditions

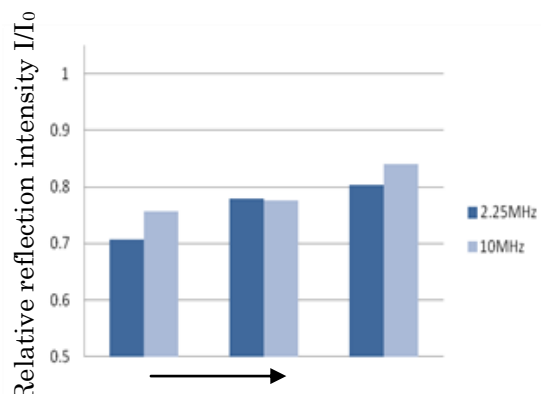


Fig.8 Relative reflective intensity (glycerin)

Fig.8 に、しわ高さの変化にともなう相対反射強度の変化を示す。矢印方向にしわ高さが大きくなっている。しわ高さの増大とともに、相対反射強度も増加しており、欠陥検出とともに、しわ高さのインプロセス計測も可能である。この他にも、しわの波長と相対反射強度との相関も得られており、当初の予想より

精度の高い計測が可能である。

(2) トライボ状態の評価

工具と被加工材料間に一定厚さの潤滑膜がある場合、相対反射強度は潤滑膜厚さと周波数の関数となる (式 (1))。

$$I/I_0 = g(t, f) \quad (1)$$

この関係は、潤滑油体積と周波数の関係としても表すことができる (式 (2))。

$$I/I_0 = g(V, f) \quad (2)$$

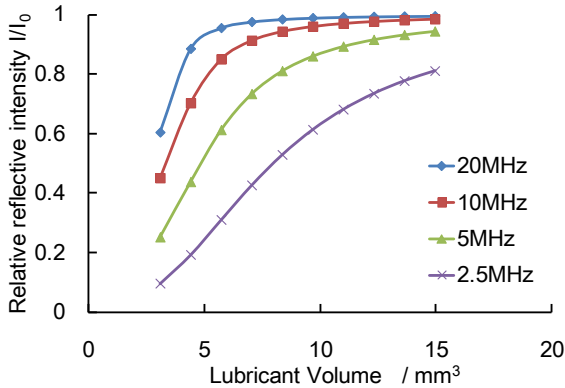


Fig.9 Variation in relative reflection intensity with lubricant volume

潤滑油体積と相対反射強度との関係の一例を Fig. 9 に示す。潤滑油体積の増加とともに、相対反射強度は増加している。周波数が高いほど、相対反射強度の増加割合は大きくなっている。周波数が低いほど、波は潤滑剤を透過しやすい。このような変化は周波数ごとに異なっている。

相対反射強度は、式 (3) に示すように、突起部の相当平均潤滑油体積 V_a 、凹部の相当平均潤滑油体積 V_v 、接触率 R 、超音波周波数 f の関数として表すことができる。

$$I/I_0 = g(R, V_a, V_v, f) \quad (3)$$

したがって、異なる周波数で反射強度を測定することで、未知量 R, V_a, V_v を評価することができる。この関係を利用して、潤滑剤の状態の評価を試みた。

円柱試験片を軸方向に圧縮した場合の圧縮荷重に対する超音波反射強度の変化を異なる三つの周波数で計測し、これらの結果から、式(3)を用いて R, V_a, V_v を評価したところ、圧縮荷重の増加にともなう潤滑油量の変化を推測することができた。

Fig.10 に板材を用いた押し込み摺動摩擦試験の概要を示す。実験の方法としては、短冊状試験片を、ダイス面上にセットし素板押さえで拘束し、ポンチで押し込み、工具面上で試験片を強制的に摺動させる。このときの工具

と試験片との接触状態を超音波で評価する。超音波プローブはダイスに内蔵されており、接触界面からの反射強度を計測する。

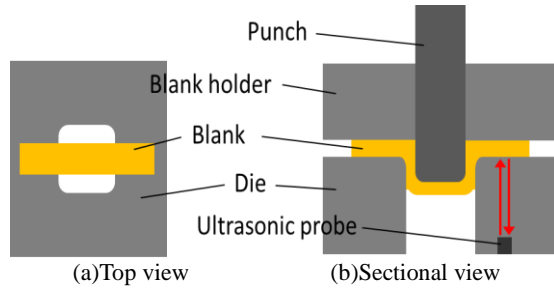


Fig.10 Schematic illustration of drawing tests

試験片材料には、ステンレス鋼、工業用純アルミニウム、マグネシウム合金を用いた。潤滑剤にはグリセリンを使用して実験を行った。相対反射強度は押し込みが進むにつれてゆるやかに増加し、やがて、さらに増加する。潤滑状態の変化が超音波反射に反映していると言える。塑性加工中のトライボ状態が超音波計測で評価でき、加工中の焼き付き状態のインプロセス計測評価も期待できる。

上記の他に、下記の項目を実施した。

(3) しわのモデル試験片を用いて、しわの寸法形状としわ測定位置が超音波反射強度に及ぼす影響を調べた。

(4) 極薄板、金属箔等の板厚が極めて薄い条件での加工特性 (摺動曲げ特性、しごき曲げ特性、曲げ特性など) を調べた。

(5) 超音波反射の音響シミュレーションを実施した。シミュレーションにより反射状態の把握と説明が可能となることが期待できる。

本研究で得られた成果は、超音波計測による製品欠陥のインプロセス検出の高度化やトライボ状態のインプロセス計測を達成する上で重要となる。今後は、これらの成果に基づき本研究をさらに深化発展させていく。

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)

[学会発表] (計7件)

① YUTA MIYAZAKI, YUJI SEGAWA, YASUO MARUMO, TENGZI MA, KENJIRO YONEI, RYOTA KAKINOKI, YASUHIRO IMAMURA, TOMOHIRO NONAKA, YUTAKA SAKATA, Ultrasonic Examination of Wrinkling in Deep Drawing of Metal Sheets, The 4th World Conference on Applied Sciences, Engineering and Technology, Oct. 24th-26th, 2015, Japan.

② R. Kakinoki, Y. Miyazaki, T. Ma, Y. Marumo, Y. Imamura, T. Nonaka, Y. Sakata, Study on Ultrasonic Detection of Wrinkle

Defect in Sheet Forming, Proc.of ACEE
2014, pp. 365-366, Japan, 2014, 査読無.

- ③ S. Tanaka, H. Imanishi, S. Matsumoto, Y. Marumo, Y. Imamura, T. Nonaka, Y. Sakata, Ultrasonic Examination of Lubrication Conditions in the Tool-Workpiece Contact Interface in Metalworking, Proc. of ACEE 2014, pp. 363-364, Japan, 2014, 査読無.

- ④田中 聡一郎, 今西 弘樹, 松本 昌平, 丸茂 康男, 今村 康博, 野中 智博, 坂田 豊, 超音波計測を利用した潤滑挙動の検討, 日本塑性加工学会 平成 26 年度九州若手技術交流会, 2014 年 11 月 21 日, 鹿児島市.

- ⑤柿木 亮太, 宮寄 雄太, 馬 騰子, 丸茂 康男, 今村 康博, 野中 智博, 坂田 豊, 金属薄板成形におけるしわ検知に関する研究日本塑性加工学会 平成 26 年度九州若手技術交流会, 2014 年 11 月 21 日, 鹿児島市.

- ⑥ S. Tanaka, T. Nonaka, Q. Zhang, Y. Marumo, H. Imanishi, Y. Sakata, L. Ruan, Evaluation of lubricant behavior and asperity contact in metal forming, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, Dec.2nd-6th, 2013, USA

- ⑦ Q. Zhang, T. Nonaka, Y. Sakata, Y. Marumo, K. Gotoh, L. Ruan, Study on Contact Conditions in the Contact Surfaces between Tool and Workpiece under Lubrication in Material Forming, The 8th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, Aug. 4th-9th, 2013, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸茂 康男 (MARUMO, Yasuo)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：9 0 1 9 9 9 2 7

(2) 研究分担者

原田 博之 (HARADA, Hiroshi)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：9 0 1 4 5 2 8 5

阮 立群 (RUAN, Liqun)
熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授
研究者番号：3 0 2 4 4 1 0 6

(3) 連携研究者

坂田 豊 (SAKATA, Yutaka)

西日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：4 0 4 4 1 7 2 9

野中 智博 (NONAKA, Tomohiro)
西日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：8 0 4 1 6 5 1 0