

金属基圧電複合材料センサによる塑性加工プロセスモニタリング

工学院大学 機械工学科

准教授 柳迫 徹郎

(2018 年度 奨励研究助成 (若手研究者) AF-2018045-C2)

キーワード：曲げ加工，圧電複合材料，プロセスモニタリング

1. 研究の目的と背景

近年様々な分野において IoT 技術を駆使した自動化・データ取得が進められおり、製造業においても例外ではなく自動化および生産データの取得し、加工プロセスをモニタリングすることで生産性を高める研究が進められている¹⁾。多くの製造業において塑性加工は広く用いられている加工方法であるが、塑性加工におけるプロセスモニタリングには課題が残る。プロセスモニタリングの目的としては加工精度の保証、加工時における良品・不良品判定および加工条件のトレーサビリティなど多岐にわたるが、

- 1) 目標曲げ角度への到達度
- 2) 繰り返し加工時のばらつき

の 2 点をモニタリングすることに大きな利点がある。

しかしながら塑性加工におけるプロセスモニタリングは、特に金型を使用するため、金型内部の状況をカメラなどで直接計測することが困難であり、また、金型内部にセンサを取り付けたとしても加工荷重の大きさからセンサに大きな負荷が生じることおよび多点計測のためにセンサ数が多くなり、計測システムとしての信頼性を保つことが難しい。

本研究では、金属コア圧電ファイバ/アルミニウム複合材料 (以下 Piezo/Al と呼称)²⁾ をセンサとして塑性加工プロセスモニタリングに適用することを検討する。本複合材料はアルミニウムに金属コア圧電ファイバ³⁾ を界面層形成・接合法⁴⁾ を用いて複合化したものであり、複合化プロセス中に生じる圧電セラミックスとアルミニウムの熱膨張係数の差に起因する残留圧縮応力により、圧電セラミックスの脆弱さを克服したものである。また、本複合材料はセンサとして用いた際に同様のひずみを生じさせてもひずみ方向が変化すると出力電圧が変化する出力電圧異方性を有していることが報告されている⁵⁾。本複合材料をセンサとして用いることで、優れた機械的性質によるロバスト性と出力電圧異方性を有効に利用することでセンサ数を低減することを意図している。

塑性加工プロセスモニタリングに対する本複合材料の有用性を有限要素法によるシミュレーションを用いて検討を行ったのち、実際に V 曲げにおけるプロセスモニタリングを検証することで評価した。モニタリング対象となる塑性加工プロセスは代表的な塑性加工である金属の V 曲げとした。この加工プロセス中に、本複合材料の圧電セラミックスはその電極構造に起因した放射状の分極状態をもつため、先行研究により開発された出力電圧算出方法を

適用することで加工プロセス中に生じる出力電圧を算出し、本複合材料が塑性加工プロセスモニタリングに用いることが可能であるかを検討した。

2. 実験方法

2-1 有限要素法による検証

図 1 に示す V 曲げ用のパンチ、ダイ、被加工材である金属板、金属コア圧電ファイバ/アルミニウム複合材料のモデルを示す。このモデルを用いて、パンチを y 方向に 5.1 mm, 5.1 mm/s の速度で移動させた際に金属コア圧電ファイバ/アルミニウム複合材料から生じる出力電圧を有限要素解析により算出した。モデル作成には Solidworks (Dassault Systèmes SolidWorks Corporation 製)、メッシュャとして MSC Apex (MSC software 製)、ソルバー/ポスト処理ソフトとして Marc/Mentat (MSC software 製) を用いている。なお、計算コストの節約のため 1/2 モデルとしてモデルを作成している。加えて表 1 に本解析で用いた各材料の物性値を示す。なお、被加工材である SPCC 板は、降伏応力 290 MPa, 加工硬化係数 0.219 として塑性加工解析を行っている。加えて、金属基圧電複合材料の取り付け角度を 0, 45 および 90° と変化させ、取り付け角度による出力電圧の変化を検討した。

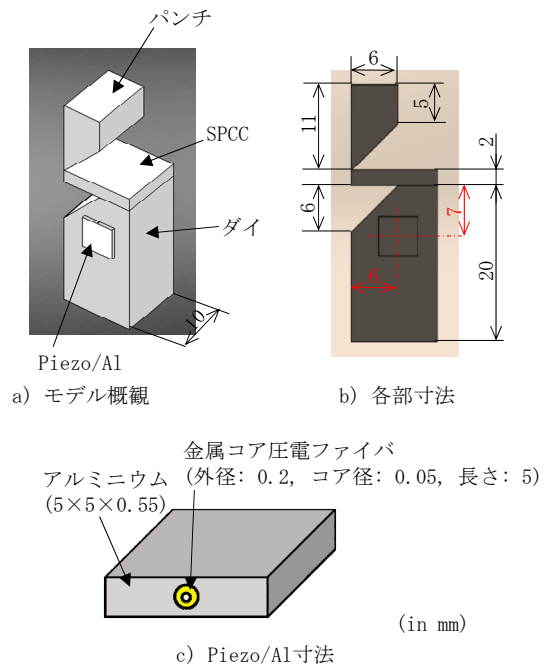


図 1 FEM に使用したモデル。

表1 解析に使用した物性値.

材料	ヤング率 /GPa	ポアソン比	使用部位	その他
SKD11	210	0.3	パンチ, ダイ	-
SPCC	210	0.3	被加工材	降伏応力: 290 MPa 加工硬化指数: 0.219
アルミニウム	69	0.34	母材	-
PZT	60	0.3	圧電ファイバ	圧電定数, d_{31} : -275, d_{33} : 593, d_{15} : 731 pC/N 誘電率: 2400
白金	168	0.38	コア	-

圧電材料からの出力電圧を得るためには圧電方程式を解く必要がある. しかしながら, この圧電方程式に存在する圧電定数は物性値であり, 通常 z 軸方向に分極されていることが前提となっている. このため, 放射状電極構造を持つ Piezo/Al は通常の圧電方程式を適用することができない. このため先行研究で有用性が確認された座標変換および分極状態を補正する手法⁶⁾を用いて出力電圧を算出する. 出力電圧異方性は, 本複合材料における圧電材料の分極方向が放射状のため, 外力により生じた応力に対し分極方向が一定の角度を取らないこと, つまりファイバの各位置において圧電定数である d_{33} および d_{31} の影響が異なることが原因であり, ローカル座標原点をファイバ露出面における圧電ファイバ中心に設定し, z 軸が圧電ファイバ中心軸に一致するように設定する. V 曲げプロセス中の圧電ファイバに生じる応力を求め, その応力を基に圧電方程式 (式 (1)) より出力電圧を算出する.

なお, 機械的パラメータである応力 T と電氣的パラメータである電気変位 D および電界 E が圧電効果により結びついている. ここで, 電気変位 D および電界 E はベクトルであるので, 3次元空間において, 3成分を持つ. また, 応力 T は対称テンソルであるので, 独立の6成分を持つ. これらの電気変位を D_1, D_2, D_3 , 電界を E_1, E_2, E_3 , 応力のうち x, y, z 方向の垂直応力 T_1, T_2, T_3 , せん断応力を T_4, T_5, T_6 とする. なお, d_{31} は -275 pC/N, d_{33} は 593 pC/N および d_{15} は 731 pC/N の値を用いた.

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

ここで, 圧電ファイバに生じる応力はモデル作成時の座標で出力されるが, 本複合材料においては既述の通り分極軸が放射状になっているため, 座標変換を行う必要がある. 解析モデルにおいて, 圧電ファイバ中心軸と z 軸が一致する為, 座標変換は式 (2) に示す z 軸周りの回転で表される.

$$\begin{bmatrix} \sigma'_x & \tau'_{xy} & \tau'_{xz} \\ \tau'_{xy} & \sigma'_y & \tau'_{yz} \\ \tau'_{xz} & \tau'_{yz} & \sigma'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

ここで, σ は各軸の垂直応力, τ は各面におけるせん断応力であり, 左辺は変換後の垂直応力およびせん断応力である. なお, 回転角度 θ は下記で与えられる.

ここで, x, y は各節点における x, y 座標である. この座標変換後の各応力と d 定数の行列から出力電気変位 D_{out} が導かれる. このとき, 座標変換後の y 軸が分極軸となる為, d 定数行列を修正し計算を行った.

また, 本複合材料は円筒コンデンサと同構造をしており, 中心部からの距離に反比例し電界が弱くなることから, 圧電ファイバ外周部においては分極処理が充分ではなく, d 定数が圧電ファイバ中心部と比較し減少していることが予想される. このため, d 定数が分極時の電界分布に比例すると仮定し, 補正を行った. 得られた電気変位 D_{out} と誘電率を用いることにより出力電圧を求めた.

2.2 実験による塑性加工プロセスモニタリング

圧電セラミックスファイバとして ϕ 0.05 mm の白金線のコアとした圧電ファイバ (ϕ 0.2 mm. 産総研製), マトリックス材として厚さ 1.5 mm の純アルミニウム板 (A1050P-0), インサート材として厚さ 0.01 mm の純銅箔 (純度 99.90%以上) を用いて Piezo/Al を作製した. ダイおよびパンチは SKD11 を用い, 解析と同様の形状としている. SPCC に関しては, 50 mm \times 10 mm \times 2.0 mm にシャーリングによって切り出したものを試験片とした. 実験時のハンドリング向上のため FEM 解析のものより試験片長さを向上させている.

厚さ 1.5 mm のアルミニウム板を 2 枚と厚さ 0.01 mm の銅箔を長さ 20 mm, 幅 30 mm に切断し, 酸化被膜除去のため #600 の耐水研磨紙により研磨し, アセトンにより脱脂した. 続いて, アルミニウム板に銅箔を重ね, これに ϕ 0.25 mm の SUS304 ばね用ステンレス鋼線を油圧プレス装置により圧力 98 MPa, 保持時間 0.18 ks で押し付けることで繊維配列用の U 溝列を形成させた. 形成した U 溝内に繊維を配列後, 同形状のアルミニウム板を重ねてホットプレスを行った. ホットプレス条件は温度 873 K, 圧力 2.2 MPa, 保持時間 2.4 ks, 真空度 0.1 kPa とした. その後, 銅箔とコアを導電性ペーストにより導通させ, エポキシ樹脂を用いて電極部を保護した. 電極とマトリックス間に 300 V, 1.8 ks の電圧を印加することで圧電セラミックスの分極処理を行った後, 作製した試料をダイヤモンドホイールソーにて 5 mm \times 5 mm に切り出し, 解析モデルと同様の位置にシアンアクリレート系接着剤を用いて接着した. なお, 取り付け角度は先述の FEM による検討結果から 0° とした. Piezo/Al を取り付けたダイ, パンチおよび SPCC 試験片をテンシロン型試験機に設置し, クロスヘッド速度 5.1 mm/s で試験を行った. この際, Piezo/Al から出力される電圧

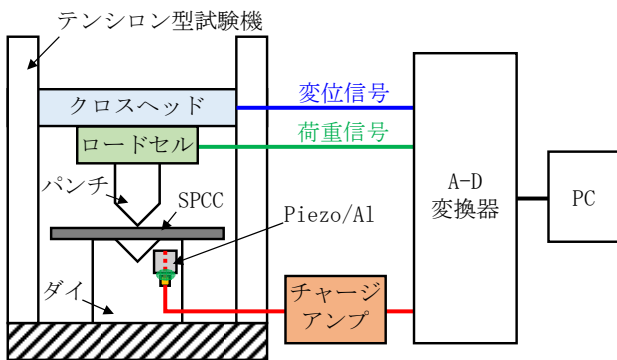
はチャージアンプおよびA-Dコンバータを介してPCに記録した(図2)。

3. 実験結果および考察

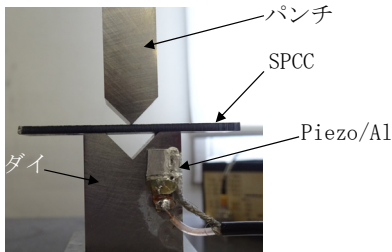
3.1 有限要素法による検証

図3に取り付け角度 0° の際のFEM結果を示す。メッシュの貫通など無く、V曲げプロセスをシミュレートできていることがわかる。また、この結果より得られた曲げ角と荷重の時間変化を図4に示し、Piezo/Alより得られる出力電力波形を図5に示す。図4および図5から、取り付け角度 0° の際の出力電圧と荷重の波形が極めて酷似しており(相関係数 $R^2: 0.98$)、取り付け角度 0° を用いると荷重モニタリングが可能であることが示唆された。

加えて、本課題においては曲げ角と出力電圧間に良い相関が得られなかったものの、取り付け角度 90° においては、 0° の際と逆符号の出力電圧が算出されるなど取り付け角度の影響が大きいことが示された。これは、Piezo/Alの電極構造に依存しており、荷重方向からの伝達応力が極めて高いため、 0° では圧電定数 d_{31} が支配的となり、 90° では d_{33} が支配的になるからであると考えられる。取り付け角度 45° においては両定数の影響が拮抗するが d_{31} 側の影響が高かったものと考えられる。このことから、取り付け角度および取り付け位置を調整することで、曲げ角に対し良い相関の得られる、すなわち曲げ角のモニタリングが可能であることが示唆された。



a) 試験システム概略図



b) ダイ, パンチ, SPCCおよびPiezo/Al写真

図2 V曲げ試験システム概略図。

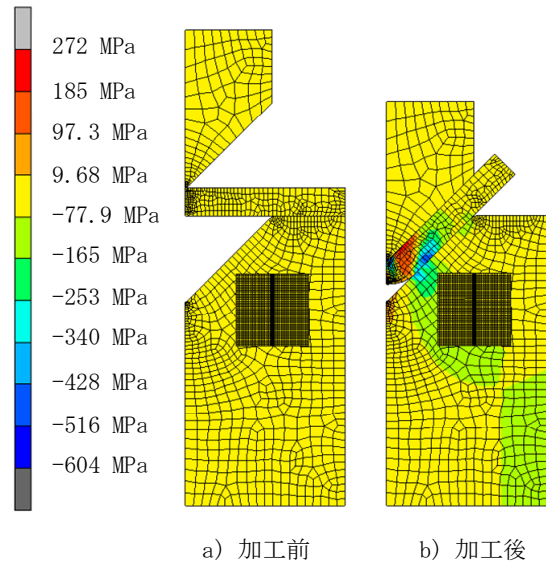


図3 FEMによるV曲げ解析例(取り付け角度 0°)。

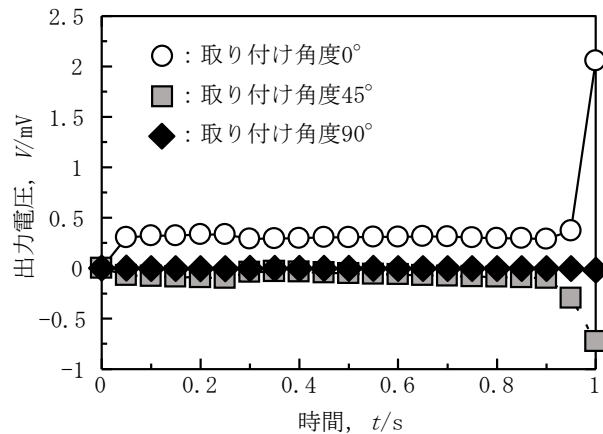


図4 曲げ角度と荷重の時間による変化。

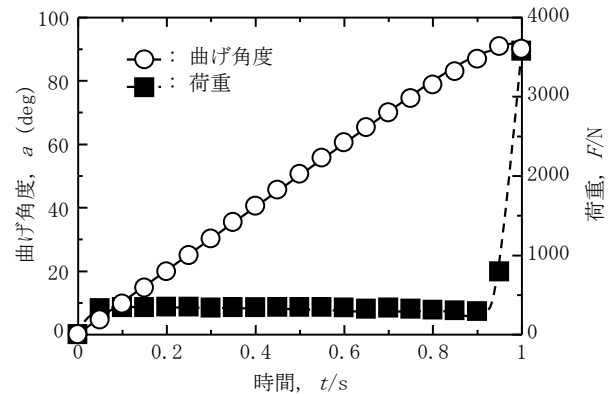


図5 各取り付け角度における出力電力波形。

3.2 実験による塑性加工プロセスモニタリング

図6に実験によって得られたV曲げ荷重とPiezo/Alからの出力電圧の時間変化を示す。同図と解析による結果を比較すると、荷重に関しては絶対値に差異が認められるものの傾向は一致しており、解析結果が妥当であることが示された。しかしながら、解析および実験による荷重波形に

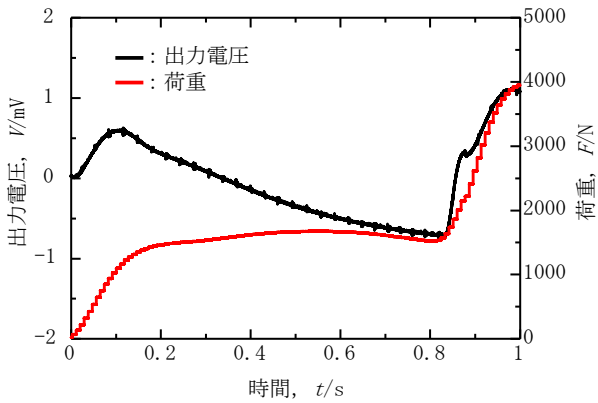


図6 実験によって得られた出力電圧および荷重波形。

おけるプラトーな領域の荷重に関して、明確な差異が確認された。解析では加工時間 0.1 秒にて荷重波形がほぼプラトーな領域に達するが実験においては加工時間約 0.14 秒でプラトーな領域に達している。この差異は降伏応力の差に起因しているものと考えられる。解析において SPCC の降伏応力は 290 MPa に設定したが、実験から得られた降伏応力は、375 MPa であった。このため、降伏に達するまでの時間がより長く、そして荷重は高く測定されたものと考えられる。加えて、Piezo/Al の出力電圧は解析結果と異なる波形が得られた。これは、荷重波形の 0.1 から 0.8 s にある荷重がほとんど変化しないプラトーな時間領域における Piezo/Al の出力電圧を見ると過渡応答的に減少していることが確認される。このことから圧電セラミックス内部における電流リークが生じているものと考えられる。圧電セラミックスに応力が生じると電荷が生じるが、この電荷は理想的には保持されるが、現実的には圧電セラミックスは有限の抵抗値を持つため、電流が流れ電圧降下が生じる。このリークを補正したものが図 7 であり、実験で得られた荷重波形も併せて示している。同図から得られた回帰直線 (図 8, 相関係数 $R^2: 0.975$) を用いることにより推定した誤差は最大 10.2% と大きい、これは図 7 における荷重波形に観察されるように、テンシロン型試験機から出力される出力電圧の時間分解能が低く、階段状の波形になっていることに起因している。

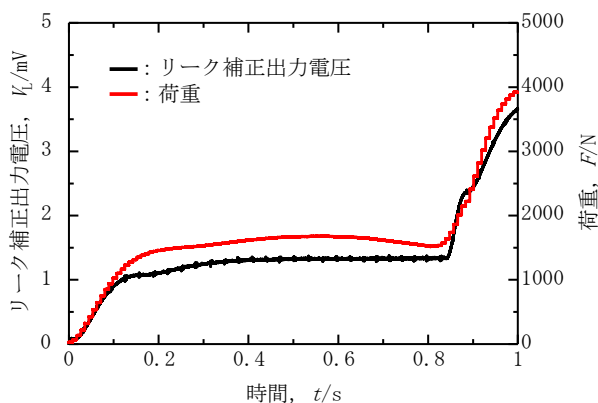


図7 リーク補正出力電圧波形および荷重波形。

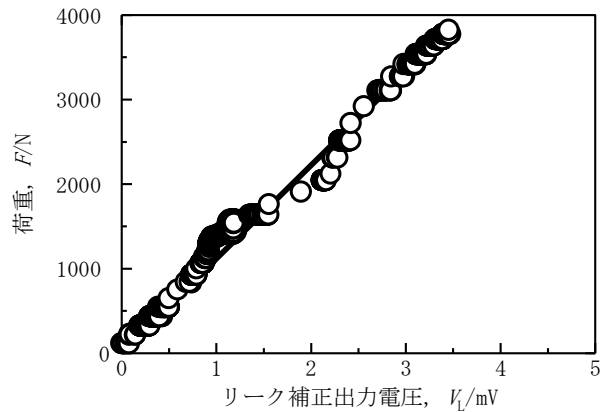


図8 リーク補正出力電圧と荷重の関係。

この時間分解能を 10 倍とし、本研究によって得られた電圧値間を線形に変化すると仮定すると、最大で約 2% の誤差となり、リーク補正を行うことで荷重をモニタリングすることが可能であることが示された。

4. 結言

金属基圧電複合材料を用いた塑性加工プロセスモニタリングの実現を目的とし、有限要素解析による検討および実験による検証を行い、下記のような結果を得た。

- 1) 金属基圧電複合材料からの出力電圧は、取り付け角度に依存する。この取り付け角度への依存性は電極構造および圧電定数に起因している。
- 2) 取り付け角度 0° において、出力電圧と曲げ荷重に良い相関が得られ、荷重モニタリングが可能であることが示された。実際においては、リークによる電圧降下が生じるためリーク補正を行うことで良好なモニタリング精度を得ることができる。また、リーク補正出力電圧から荷重求める際に使用する回帰直線を求める際に、十分な時間分解能が求められることを明らかとした。
- 3) 金属基圧電複合材料の取り付け角度および取り付け位置を変更により、曲げ角度に対するモニタリングが可能であることが示唆された。

謝辞

本研究は天田財団奨励研究開発助成 (AF-2018045-C2) の助成を受けて遂行されたものである、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 萩野直人, 小宮聖司, 遠藤純一, 石濱正男: プレス加工における金型と被加工材の接触状態のインプロセスモニタリング, 塑性と加工, 57-669 (2016), 983-990
- 2) T. Yanaseko, H. Asanuma, H. Sato, Characterization of a metal-core piezoelectric ceramics fiber/aluminum composite, Mechanical Engineering Journal, 2, 2 (2015).

- 3) H. Sato, T. Sekiya, M. Nagamine, Design of the metal-core piezoelectric fiber, Smart Structures and Materials, 2004, SPIE, pp. 97-103.
- 4) H. Asanuma, The Development of Metal-Based Smart Composites, 2000, JOM, pp. 21-25.
- 5) T. Yanaseko, H. Asanuma, T. Chiba, N. Takeda, H. Sato, Output Voltage Characteristics of Piezoelectric Fiber/Aluminum Composites Fabricated by Interphase Forming/Bonding Method, Transactions of the Materials Research Society of Japan, 39, 3 (2014), pp. 325-329.
- 6) T. Yanaseko, I. Kuboki, H. Sato, H. Asanuma, Effect of Microstructure of Metal-core Piezoelectric Fiber/Aluminum Composites on Output Voltage Characteristics, Mechanical Engineering Journal, 5, 3(2018).