

論文

クランクプレスを用いたせん断加工時に生ずる 余剰エネルギーを利用した発電技術の開発

中村 健太^{*1)} 玉置 賢次^{*2)} 倉持 幸祐^{*3)}

Development of an electronic power generator using the surplus energy generated during the shearing process using a crank press

Kenta Nakamura^{*1)}, Kenji Tamaoki^{*2)}, Kosuke Kuramochi^{*3)}

A system has been developed to recover the surplus energy during the shearing process of a crank press as electrical power energy. The energy transduction equipment with the piezoelectric device was implemented in the metal die used in the crank press for recovering the electrical power energy. As a result of evaluation test, it was proved that 18 mW of power generation was possible.

キーワード：発電，圧電素子，プレス加工

Keywords：Electronic power generation, Piezoelectrics, Press processing

1. はじめに

東日本大震災による電力供給量の低減は，日本の生産を担う中小企業にも影響を及ぼしている。中小企業はこれまで，電力使用量を少なくする省エネルギー（以下，省エネという。）活動を行ってきたが，生産の現場において無駄な電力を省くことができる量とそのため技術の開発も頭打ち状態である。これに対する方策として，“創エネルギー（以下，創エネという。）”技術が注目されている。

プレス加工機はサーボプレス化による創エネ技術が開発されており，サーボ制御を利用して，無負荷状態での回生電力を回収する創エネ技術が例として挙げられる。ところが，サーボプレス機の導入には数千万円の投資が必要であり，製造業の主体である中小企業では機器の導入に踏み切れないのが現状である。

さて，中小企業で多用されるプレス加工機は，導入コストがサーボプレス機の半分程度で済みながらも，大量生産が可能なクランクプレスである。クランクプレスの動作は，簡単にいえばレシプロエンジンの逆動作である。つまり，モータによりフライホイールを回転させ，この回転運動を，クランクシャフトを介してスライダを上下方向に運動させて加工力を得るものである。したがって，クランクプレスを用いた場合には，加工の全体を通して，モータは一定の動力で動いている必要があり，モータで行う以上の省エネ効果は期待できない。

ここで，クランクプレスによるせん断加工を説明する。まず，スライダに取り付けられた金型（ダイセット）をスライダが下方に押し付けると，ガイドポストに沿ってダイセットが下方に移動する。これによりダイセットに取り付けられたパンチが被加工材と接触する（図1.a）。更にスライダが下方に移動することで，パンチが被加工材に押し当てられ，材料からの反力に打ち勝ちながら被加工材を変形させて（図1.b），加工が終了し，スライダの移動の下限値である下死点に到達（図1.c）後，加工前の位置までダイセットが上昇して1回の加工が終了する。

また，クランクプレスは回転数により最大加工力を調整することができ，回転数を小さくすることで最大加工力を小さくすることができる。しかしながら，回転数を小さくすることは一つの製品を製造する時間が長くなるため，生産の現場では，加工効率の観点から必要とする加工力以上の回転数で加工が行われている。つまり，加工に必要以上のエネルギーが使われていることになる。

ところで，パンチと被加工材が接触した時から加工が終了するまで，工具や工具を支える金型の部材には被加工材

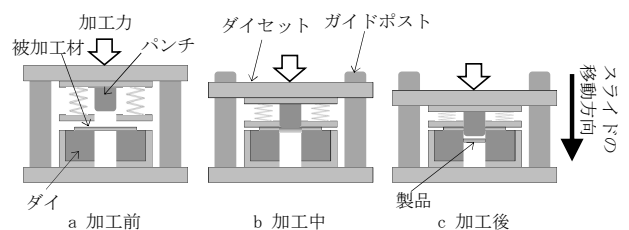


図1. プレス機を用いたせん断加工の様子

事業名 平成23年度 基盤研究

*1) 機械技術グループ

*2) 城南支所

*3) 実証試験セクター

からの反力が作用している。つまり、金型の部材が弾性変形をしながら加工が進行する。すなわち、工具や金型の弾性係数を小さくすると、加工位置が下死点に近づくことになる。また、上述したように、クランクプレスはスライドが上下運動を繰り返すだけで、動力源の回転数が同一であれば金型や工具の弾性係数が違って、消費するエネルギー量は変わらないのである。

そこで、必要以上のエネルギーを余剰エネルギーと定義して、余剰エネルギーの一部を部材の弾性変形を利用して電気エネルギーに変換する発電システムの検討を行った。発想としては、金型部材の一部に、鉄鋼材料に比べて弾性係数が小さい圧電素子を採用し、これを発電媒体として電力を得ようとするものである。したがって、本研究では、この発電システムの開発の最初のステップとして、実際の加工で生ずる余剰エネルギーを、圧電素子を用いた発電装置によりどの程度の電力に変換できるかを定量的に評価することを目的とした。

2. 金型の設計と発電量の予測

2.1 圧電素子の決定 圧電素子は分極により素子内の電荷が偏り、正電荷の過剰に存在する面と、その反対側には負電荷が過剰に存在する面ができる。電荷が過剰に存在する面では空気中の浮遊電荷などが集まり、表面は電気的な平衡状態となる(図2.a)。また、圧電素子の強誘電性により、素子に荷重を作用させることで素子の結晶にひずみが生じ、分極した面から電荷が素子内部で移動する(図2.b)。この時、素子側の表面の電価が減少するため、空気中から供給されていた電荷は再び空気中の電荷と結びつくことで、素子表面での電気的平衡が保たれる。一方、除荷することで素子内部の電荷が移動し、荷重を作用させる前の状態に戻り、表面には浮遊電荷が集まってくる(図2.c)。したがって、荷重を作用させた時に電流計を接続すれば、電流を観測することができる(図2.d)。

最近の研究⁽¹⁾では、圧電素子として代表的なチタン酸ジルコン酸鉛(Pb(Zr, Ti)O₃。以下、PZTという。)に他の元素を

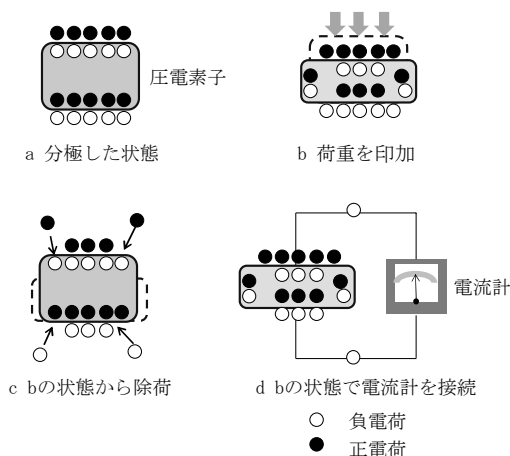


図2. 圧電素子に荷重を作用させた時の電荷の様子

添加することで電圧応答性を向上できるとの報告があり、圧電素子を発電体としてとらえた場合、ニオブ Nb を PZT に適量添加することで発電効率が向上するとの報告がある。この報告には、Nb を添加することで発生電圧が PZT 単体に比べて高くなるものの、Nb が 1 wt% を超えて添加された場合には発電特性が低下することが示されている。したがって、本研究では PZT に Nb を 1 wt% 添加した材料で圧電素子を作成する。

2.2 加工形態の決定 圧電素子を発電体とした場合、発電特性は応力と作用する荷重の加速度に比例することが知られている⁽¹⁾。つまり、大きな力が、瞬間的に素子に作用した方が発電特性は優れるのである。ところで、プレス機を用いて行われる加工には、せん断加工、絞り加工、しごき加工、曲げ加工、鍛造などがある。本研究ではクランクプレスのような汎用プレス機を用いた場合を想定しているので、絞り加工、しごき加工、曲げ加工は被加工材から受ける反力による応力の加速度が小さくなり発電量が望めない。一方、せん断加工は板厚数 mm の材料を“打抜く”ことから、上述した加工の中でも応力の加速度が大きい加工と言える。したがって、せん断加工を対象に金型を設計することにした。

2.3 加工条件の決定 せん断加工において、板厚 t 、直径 D の円盤形状の製品を得る場合には、せん断を受ける面積 $A (= \pi Dt)$ と被加工材の引張強さ σ から求められる最大加工力 $F_{max} = 0.8 \cdot A \cdot \sigma$ が必要である。すなわち、金型が被加工材から受ける反力を大きくするには、被加工材の引張強さを大きくすればよい。

現在市販用板材の中で最も引張強さが大きいものは、980 MPa 級の高張力鋼板であり、引張強さ σ は 980 MPa である。本研究では、この高張力鋼板を被加工材として採用し、 $D=10$ mm、 $t=1$ mm の円盤製品を得ることにするので、必要な最大加工力は 25 kN である。なお、発電装置の評価試験に用いるクランクプレスの最大加工能力は 150 kN であり、金型設置面の大きさから、2 枚を同時に打抜くことができる。加工速度は 100 spm とし、パンチと被加工材間の相対速度は 70 mm/s である。

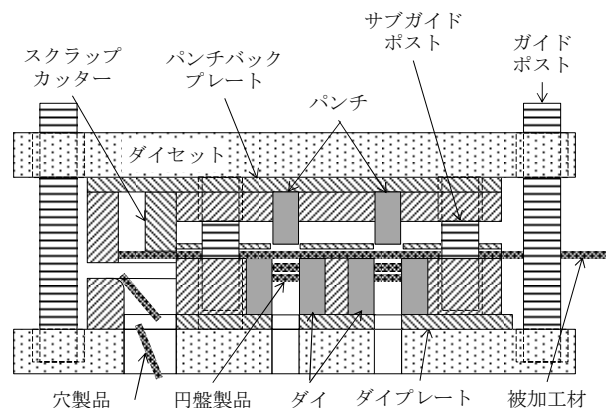


図3. 連続せん断加工用金型の概略図

2.4 発電装置の設置個所の決定 本研究では圧電素子にひずみを作用させることで発電を行うため、弾性変形をしやすい部位に圧電素子を設置する必要がある。図3は上述した金型の設計指針に基づいて設計した金型の概略図である。金型は、上下のダイセット、パンチ側バックキングプレート、パンチホルダー、固定ストリッパー、ダイホルダー、ダイ側バックキングプレートの部材で構成されており、工具としてパンチとダイが金型に取り付けられる。ダイホルダー、ダイ側バックキングプレート、下ダイセットにはスクラップ排出穴などがあり連続的な平面を得にくいいため、パンチ側に発電装置を設置することにした。

また、圧電素子において繰り返し応力が作用する場合には10 MPa以下の圧縮応力とすることが望ましく、圧縮応力がこれより大きいと疲労により破壊しやすくなる。そのため、10 MPa未満の圧縮応力が広範囲で作用する箇所に発電装置を設置するのが望ましい。そこで、加工時のパンチ側で生ずる応力の分布を知る必要があるためFEMによる応力解析を行った。解析を行うソースはせん断加工を精度よくシミュレートできるDEFORM (ver. 10.2) 2Dとした。解析モデルは図4に示すように、直径10 mm、厚さ1 mmの円盤を打抜くモデルとし、パンチ、パンチホルダー、バックキングプレートを弾塑性体と仮定して行った。

図4には解析により得られた加工中の応力分布を併せて示しているが、パンチホルダーにはパンチとの接触部に圧縮応力が作用するものの、その周辺では引張応力が発生している。一方、パンチには大きな圧縮応力が作用しており、これを支えるバックキングプレートにも圧縮応力が分布している。バックキングプレートのパンチ直上では20 MPa以上の圧縮応力が発生しているが、その周辺には10 MPa前後の圧縮応力が分布している。したがって、上ダイセットとバック

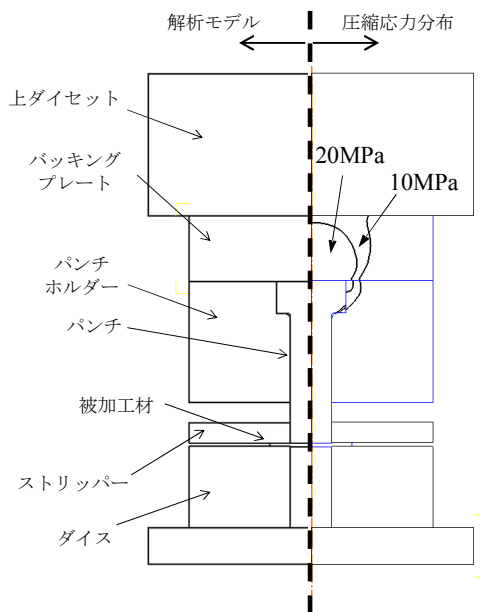


図4. FEM 解析モデルと応力分布の状態

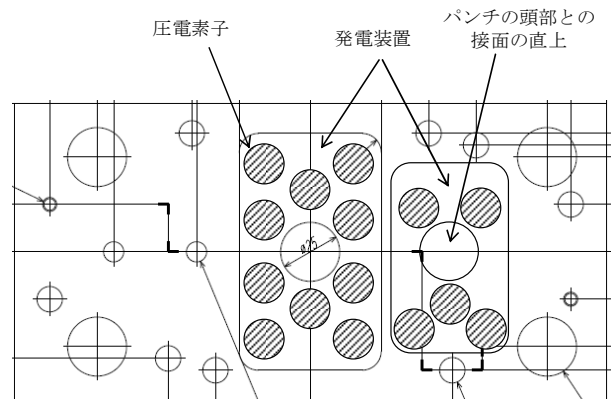
キングプレートの間を発電装置設置場所とした。

2.5 発電装置の設計 図5に発電装置の組み込みの様子を示す。発電装置はバックキングプレートを改造したもので、図中のハッチングされた丸が圧電素子を示し、圧電素子群の中央付近にあるのが、パンチの荷重を直接受ける部位である。バックキングプレートの上ダイセット側には圧電素子を埋め込むための穴が開けてあり、パンチの荷重を受ける部位はバックキングプレートと一体となっており、穴を開けることによる部材強度の低下を最小限にし、適当な応力が発生する位置に複数の素子を設置できる仕様になっている。

圧電素子を金型に設置する際には、圧電素子から発生する電荷を回収する必要がある。金型が金属製であることから、図6に示すように、圧電素子を純銅製の電極で挟み込み、電極からの漏電を防ぐために電極と金型部材の間にゴム板を設置した。また、圧電素子は脆性材料であり、引張応力が作用することで容易に破壊してしまうため、加工中にずれや引張応力が作用しにくくする必要がある。そのため絶縁も兼ね備えたゴム製の入れ子に圧電素子をはめ込む構造とした。

3. 発電装置の性能評価

発電量を確かめるため、設計した金型に発電装置を組み込んだものを、クランクプレスに取り付けて実験を行った。



パンチバックプレートをダイセット側から見た図

図5. 発電装置組み込み箇所

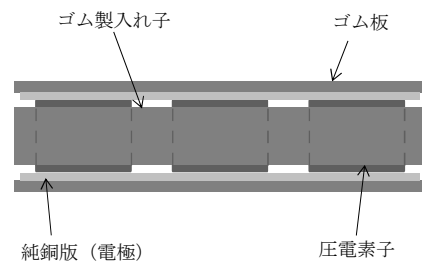


図6. 発電装置の構造

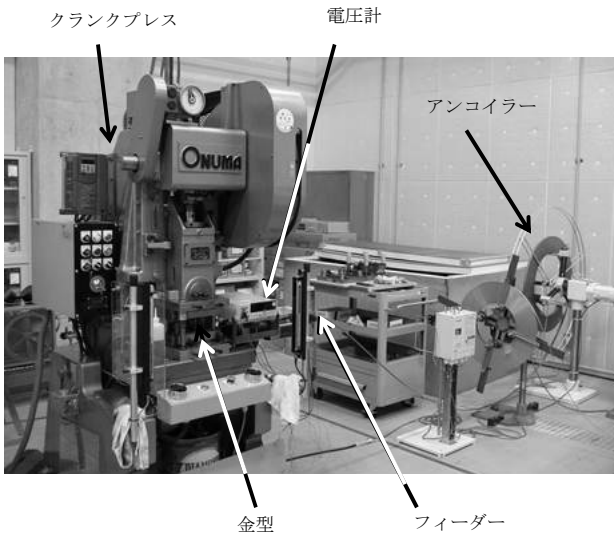


図7. 発電装置評価用装置の外観

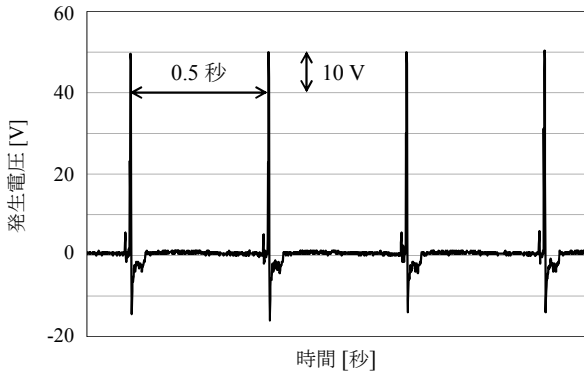


図8. 発生電圧の時刻歴

実験装置の外観を図7に示す。コイル状になった被加工材を、アンコイラーにより適量排出し、それをエアフィーダーで加工部まで供給し、クランクプレスにより金型の上ダイセット側を上下させることで、工具が被加工材を打抜き、この時に圧電素子にひずみを作用させて発電するというシステムである。発電量は発生する電圧をオシロスコープで測定することで評価した。図8に電圧の測定結果を示す。加工時に圧電素子に圧縮応力が作用し、解放されるまでの時間は0.02 sであり、発生電圧は最大50 V、最低-16 Vの値であることが分かる。また、図示したのは4回の加工を連続してサンプリングしたものであるが、周期的に安定した電圧が発生していることが分かる。

ここで、発電装置により得られた電力の回収効率について述べる。発生電圧の時刻歴より、電圧計の内部抵抗値 ($10^6 \Omega$) を用いて求めた電力は18 mWであった。一方で、図9に示す、発電装置の設置場所とした上ダイセットとバックキングプレートとの間に作用する力のFEMによる解析結果から、被加工材からの反力が発電装置にするに仕事は、1回の加工で約12 N・mである。つまり、今回の実験では1秒間に

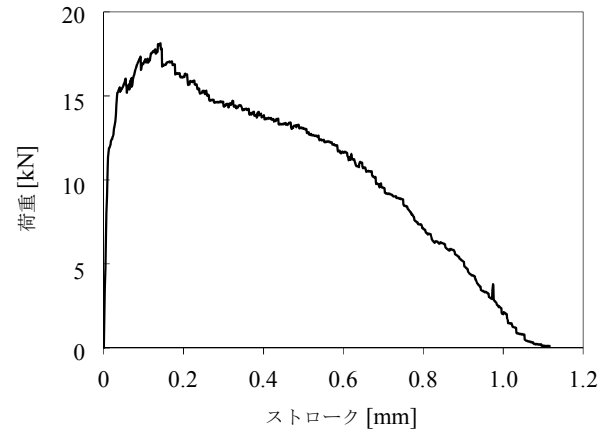


図9. バックキングプレートとダイセットの間に作用する力のストロークに対する変化

2回の加工が行われるため、反力が発電装置にした仕事(24 W)の0.1%を電力として回収できたことになる。

4. 発電量増大への方策

まず、実際の加工で用いられる金型は、本研究で用いたものよりも大きく、発電装置の設置面積を大きくすることができる。設置面積を大きくすることで圧電素子を多くできるので回収できる電荷量も増えると考えられる。次いで、圧電素子は積層化することで、より多くの電荷を得ることができる。最後に、一般的な加工現場での加工回数は1日当たり数千回から数万回であり、1回の加工による発電量が少なくても長期でみれば十分な量になると考えられる。したがって、本方法と装置を用いて、積層化と設置面積を拡大することで、実用可能な発電が期待できる。

5. おわりに

クランクプレスを用いてせん断加工を行った際の余剰エネルギーを、電気エネルギーに変換する方法を提案し、変換装置を試作し、金型に変換装置を組み込んで性能を評価した。また、金型内部で加工時に発生する応力をFEMにより解析し、圧電素子を用いた発電に最適な部位を決定した。高張力鋼板(980 MPa級)を用いたせん断加工時には、発電装置が加工時に被加工材から受ける反力がする仕事の0.1%に相当する、18 mWの電力を得ることができた。

一方で、発電した電荷を蓄積し、有効な電力として利用するためには、圧電素子の発電特性に見合った整流回路の検討と蓄電方法を検討する必要がある。

(平成26年7月7日受付, 平成26年8月19日再受付)

文 献

- (1) 藤本滋, 一木正聡, 矢野聡, 北原時雄: 「圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究: 第1報 添加剤を加えた圧電素子の発電特性」, 設計工学, Vol.47, No.12, pp.596-602 (2012)