

氏名	田中弘義
生年月日	
本籍	富山県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第131号
学位授与の日付	平成8年9月30日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	高品質・低コスト加振用電気-油圧制御弁の開発と chipless切断機への応用 (Development of New Electro-hydraulic Control Valve and its Application to the Chipless Cutting Machines)
論文審査委員	(主査) 上野久儀 (副査) 岡島厚, 安井武司 木村繁男, 米山猛

## 学位論文要旨

**Abstract** This paper presents the performance of the new electro-hydraulic control valve successfully used instead of expensive servo valve and its application to the chipless cutting machine for vibro fine blanking method.

### 1. Development of the valve

Miniaturization and simplification of the valve were investigated which are essential to enhance the response and to reduce the cost of the valve.

The numerical simulations of oil flow, hydraulic force compensation method and magnetic field analysis in the solenoid were carried out to develop the new electro-hydraulic control valve.

### 2. Application of the valve to chipless cutting machine

Different types of fine blanking machines were constructed which enable to vibrate the cutting tools with excellent performance for chipless machining.

Shear mechanism analysis during blanking was also carried out to establish the optimum conditions for machining in the vibro fine blanking machine.

物づくりの原点は物の切断にある。物の切断法として昔から種々考案されてきたが理想的な切断加工として求められるものは、省資源・省エネルギーであって、かつ切断時の音や切りくずが発生しない無公害のものでなければならない。

本論文は、その目的を持った刃物を用いない「ぜい性材料の液圧による側圧切断の研究」が始まりである。この技術を延性材料の切断に展開する場合には、繰り返し側圧を加えることが必要となる。そこで力の制御性に優れた液圧を使用する事を前提とすれば、油圧への変換機器として高能率な電気-油圧制御弁が必要となる。この目的のために「高品質・低コスト加振用電気-油圧制御弁の開発」を行っ

た。さらに、これら制御弁を活用して「chipless 切断機への応用」を展開した。いずれの過程にあっても、Zero Emission・High Efficiency・Low Costを基本的流れとした。

ここでいう「高品質・低コスト加振用」とは、従来であれば油圧サーボ弁を使用していたが、機器が高価でかつメンテナンスに専門技術が必要とされる。加振用として高機能化でなく目的にあった品質という意味で「高品質」と表現し、利用拡大の意図で「低コスト」を目標とすることを意味している。本研究の結果を要約すると以下のようになる。

## 1. 高品質・低コスト加振用電気-油圧制御弁の開発

制御弁の性能目標として、制御系の動的条件を疲労試験機、工作機械、工業用ロボット群をターゲットとして、動的使用範囲である周波数帯域20~100Hzを満足させること、一方価格面では電気-油圧サーボ弁と従来のソレノイド弁の間に位置するメカニカルサーボ弁の価格指数を上回らない事とした。開発の方針として、応答性と低コスト化をはかるために基本的な課題である小型化・単純化に注力した。また開発を効率的に行うための事前解析手法の開発を重視した。

### 1.1 各種制御弁の研究で得られた効率的な解析・設計手法

#### (1) 流れの数値シミュレーション解析

圧力・流量制御弁の小型化を目的として従来の構造を小型ロジック方式とした。ロジック方式は単純な構造ながら騒音の発生や安定性に欠けるので、ポペットとスリーブ形状の異なる4種類の電気-油圧制御弁の騒音実験を行い、それらを含め7種類の内部流動のシミュレーションと比較検討し、次の結論をえた。

- (a) 実験により、本制御弁の騒音の主体は、キャビテーションであり、ポペットとスリーブ形状(弁座、弁室)により、騒音の強さが大きく異なることがわかった。
- (b) 実験と計算との比較の結果、キャビテーションを抑えるためには、弁室体積を大きくして、定在的な大きな渦を発生させるのが有効であることがわかった。
- (c) 計算と実験結果の考察結果から、バルブに2段絞りを設けて平均圧力を抑えるのがよい。これは渦列の移動と成長を妨げる。

図1に(b)(c)の対応を加味した無次元時間 $t=0.5, 1, 2$ における流線および圧力分布を示す。(イ)は(b)(c)、(ロ)は(b)の対策、(ハ)は不安定な例を示す。

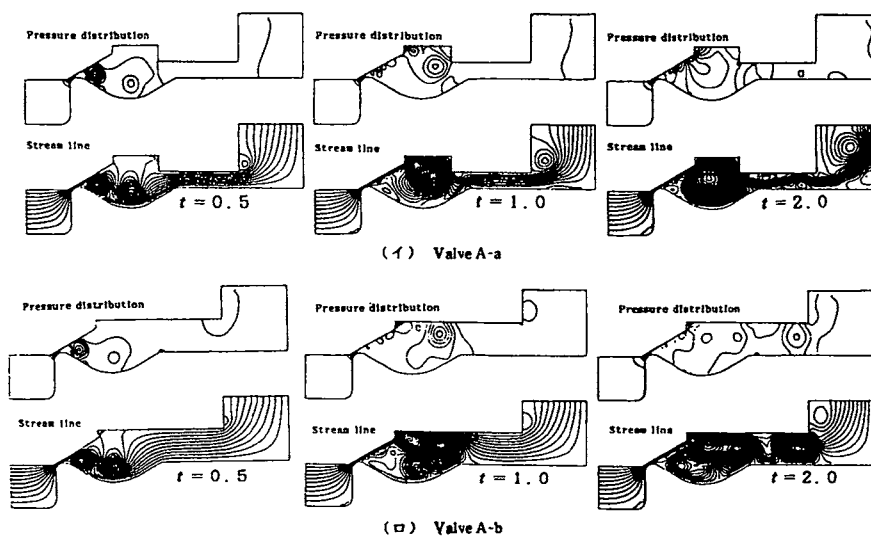


図1 フローパターンと等圧線

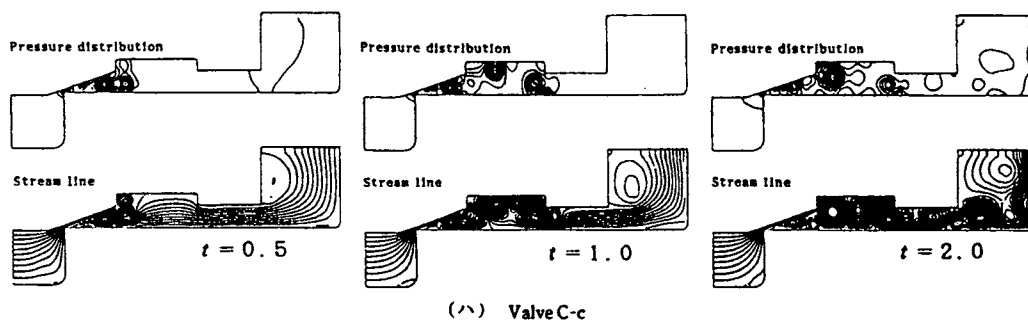


図1 (続) フローパターンと等圧線

### (2) 流体力の補償

二方向型高速電磁弁(デジタル制御弁)の小型化のため、高速電磁弁に働く流体力の低減法を示し、弁の低操作力化と切替え時間の圧力・流量依存問題を解決した。このように積極的な流体力補償をかけることで弁の小型化が可能となった。図2に弁の構造、図3に流体の補償スロットル部を示す。

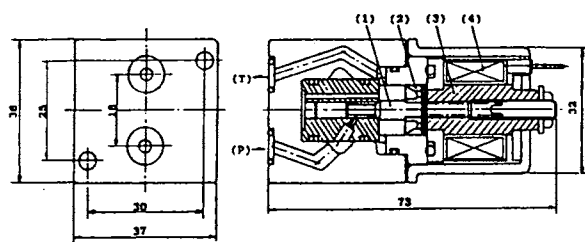
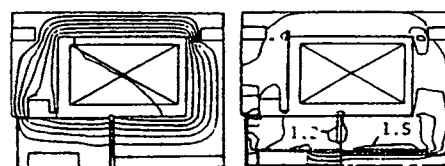
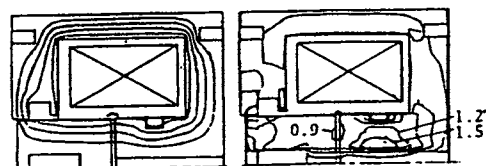


図2 弁の構造



(a) ソレノイド(A)の磁束線図、等磁束密度線図(T) (0.3 A ごとの等高線)



(b) ソレノイド(B)の磁束線図、等磁束密度線図 (0.3 A ごとの等高線)

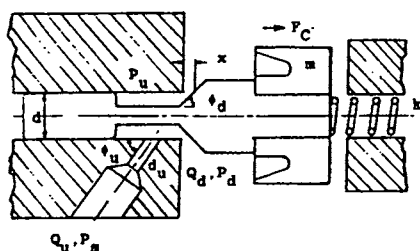


図3 スロットル部

図4 磁束線図と等磁束線図

### (3) FEM 解析によるソレノイドの磁場解析法

制御弁の電磁コイルによる磁場を FEM 解析することにより吸引力特性の向上をはかり、弁の低電力・高速化を行った。図4は O リング溝の有無の影響を調べた磁束線図と等磁束密度線図である。ソレノイド (B) 溝付はソレノイド (A) 溝なしに比べ吸引力の低下を明確に示唆している。

このようにして得られた高速電磁弁をパルス幅変調法で制御し油圧シリンダの位置制御機構に応用する場合の弁の流量ゲインとサンプリングタイムが安定性に及ぼす影響を明らかにした。

#### 1. 2 開発した加振用電気-油圧制御弁

上述の解析および設計手法を用いて(1) 圧力・流量制御弁 (ESR 弁)(2) デジタル方向制御弁 (HYDIS

弁) (3) 高速電磁比例弁 (ESH 弁) の3種類の制御弁を開発した。

これら制御弁は、周波数特性として加振用の分野 MAX 100Hzを達成した。また、価格面 (指数) については、メカニカルサーボ弁の価格指数内に入れる目標を達成することができた。

低コストな制御弁の開発とともにシステムの保全コストの引き下げも重要な課題である。油圧の場合、保全のコストに占める割合はほとんど (約90%) が作動液のコンタミネーション管理費である。従って、コンタミに強い機器を使えば保全コストを下げるができる。単純な構造を採用することで、NAS 等級でサーボ弁に対して約2等級使用限界を下げるができた。

## 2. 高品質・低コスト油圧源の開発

電気-油圧制御弁の活用によって、圧力と流量制御が可能でセンサ付可変ピストンポンプの開発と閉ループ制御におけるアンプの可変ゲイン化による低圧特性の改善を行った。開発した可変ゲイン方式とは、閉ループ制御における負荷圧力による圧力モニタ信号を、流量フィードバック系にフィードバック補償として付加し、制御アンプ部の流量ゲインを固定ゲインから可変ゲイン化したことである。補償を付加することで次の結果をえた。

- (1) 低圧域でヒステリシスが30%向上し再現性も改善された。
- (2) 流量の応答性についても良好な結果が得られた。
- (3) 5 MPa までの制御流量の負荷圧力変動が低減された。

## 3. Chipless 切断機への応用

「繰り返し圧力」により材料に直接液圧を加えて液体の刃物で材料の切断を行う側圧切断機を応用機械 (I) とし、「繰り返し圧力」の加振力を利用して固体の刃物を動作させて切断する切断機を応用機械 (II) とした。

### (1) 応用機械 (I)

電気-油圧制御弁を使用した「ブースタ方式による繰り返し高圧発生機」を試作し、次の結果をえた。

- (a) 繰り返し圧力0~500 MPa, 繰り返し回数60サイクル/分の初期目標を達成することができた。
- (b) 圧力制御に電気-油圧制御弁を使用することで、圧力の繰り返し回数および最高圧力の制御が容易に行うことができた。
- (c) 本繰り返し高圧発生機により延性材の切断をアルミニウム試験片について行い、切断において切りくずや騒音を発生しないことを示した。

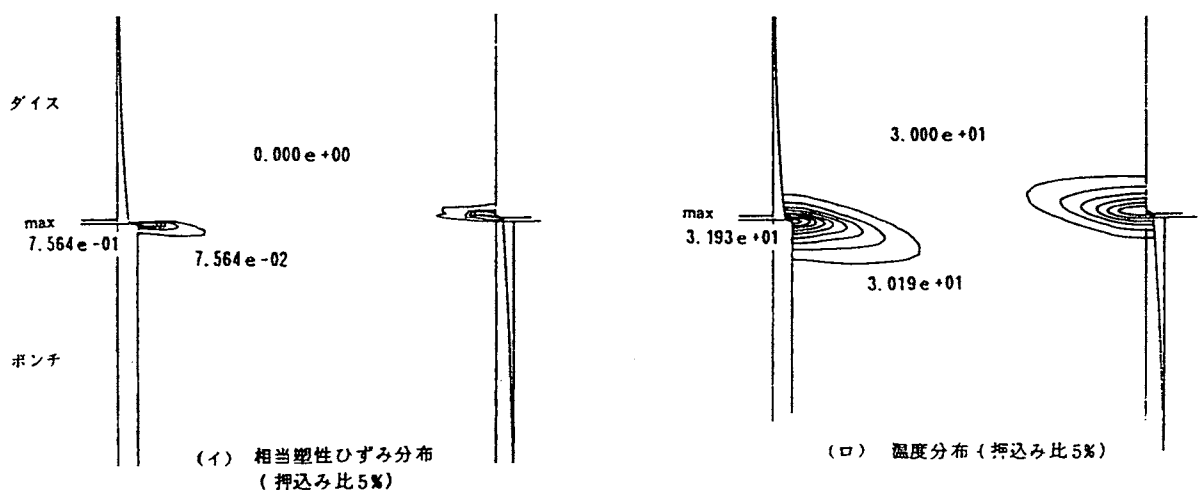


図5 アクリル材料の押し込み

## (2) 応用機械 (II)

電気-油圧制御弁を活用した chipless 超精密せん断加工機(フェーシングバイプロ, コイニング打抜き, バイプロゲートカッタ)を試作し, 下記の成果をえた。

### (a) VFB 加工機への展開

コイニング打抜きでは2~3Hz, バイプロゲートカッタでは20Hz, フェーシングバイプロでは50~100Hzと目的に応じて加振制御ができ, VFB 加工 (Vibro Fine Blanking 加工の略で, 従来のFB加工に Vibro を加味したもの) の特徴を出すことができた。

VFB 加工について FEM 解析・実験を行って, せん断メカニズムの解明をし効率的に加工を行うことが可能となった。アクリル材における塑性ひずみ分布と温度分布の解析例を図5に示す。

### (b) VFB 加工による chipless 化

延性材料, プラスチック複合材の切断において切断面の良さ, 微粉極少の chipless 加工の可能性の確認ができた。

以上, 側圧切断のニーズから電気-油圧制御弁の開発を行い, その制御弁の活用で chipless 切断機を生み出し, 力の制御性に優れた油圧駆動の有意性を示した。

## 学位論文の審査結果の要旨

当該学位論文に対し, 平成8年7月18日, 8月6日に第1回, 2回学位論文審査会を行い, 合わせて専門及び語学の学力試験を課した。8月12日に口頭発表会と最終審査委員会を開催し, 協議の結果, 以下のように判定した。学力試験は合格と判定した。申請論文は, 従来の電油サーボ弁に替わる高品質(高応答性, 省エネルギー, 低騒音)にして低コストな数種類のアナログおよびデジタル電気-油圧制御弁及び油圧源の開発研究を行い, それらを chipless な繰り返し加振による切断機に応用したものである。電気-油圧制御弁開発の具体策として, ①弁内の油流動の数値シミュレーションを行い, 流体騒音の少ない弁形状を明らかにしている。②弁内流れに基づくフローフォースの補償法を提案し, 弁の低操作力化を図っている。また, ③弁の電磁操作力向上のため, 磁場の FEM 解析を行い, ソレノイドの吸引力特性を改善し高速化を達成した。さらに, 省エネルギー油圧源として, 低圧特性を改善した可変ゲイン方式ピストンポンプの開発も行っている。上記の電気-油圧制御弁を繰り返し圧力発生器として採用し, 従来, 精密な切断が困難であった延性材料に対し, 液体刃物として振動圧を直接印加する側圧切断機及び振動工具を利用するせん断加工機を開発し, さらにせん断メカニズムの実験・解析を通して最適加工条件を明らかにし, その有用性を実証している。

以上の研究は, 高品質な電気-油圧制御弁の開発と, それらを活用した良好な切断面と切り屑がほとんどでない精密切断機を新規開発するために研究したものであり, 開発した多くの機器及び途上で得られた有用な知見は, 社会に貢献するところ大である。

以上より, 本論文は, 博士(工学)の授与に値するものと認定する。