

令和元年6月6日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06012

研究課題名（和文）穴内面穴放電加工法の開発 - 穴加工の常識を打破する穴内面への穴加工技術の確立 -

研究課題名（英文）Development of Hole-Inside-Hole Electrical Discharge Machining Method  
---Establishment of Technique for Machining a Hole on the Inside Wall of Another Hole---

研究代表者

石田 徹（ISHIDA, Tohru）

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・教授

研究者番号：20313421

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：現在実用化されている除去加工法では、穴の内面に穴を形成することはできない。すなわち、除去加工法を用いて形成できる穴形状に限界がある。このような限界を克服するために、穴の内面に対して形成される穴を穴内面穴と呼び、穴内面穴を放電加工により創成する装置を開発してきた。しかしながら、これまでに開発した装置により創成できる穴内面穴は、長さが短く、内径が限られており、真直性が低かった。そこで本研究では、これらの問題を解決できるように装置を改良した。実験の結果、改良した装置によって、創成できる穴内面穴の長距離化と大径化、さらには、その真直性の向上を実現できることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械を設計するには、対象とする機械が要求された性能を発現するように、その機械の構成部品の属性（例えば、形状やその精度など）を決定する必要がある。ただし、その属性は実現できるものに限られる。具体的には、部品は一般に機械加工により製作されるため、機械加工の能力の限界を越えないものに限られる。このことは機械設計の基本であるが、同時に機械加工の能力限界が機械設計の自由度を阻害しているともいえる。この問題を解決するには、機械加工の能力限界を打破すればよい。そこで本研究では、現在の穴加工では不可能とされてきた、穴の内面に対する穴の加工を実現するとともに、加工可能な穴形状の自由度の拡張に成功した。

研究成果の概要（英文）：Removal machining put into practical use at present cannot generally fabricate a hole on the inside wall of another hole. In other words, removal machining has the limitation for its fabricatable hole shape. To overcome the limitation, the device had been developed which can machine such a hole. However, the hole which the device could machine had short length, almost no variety of its inner diameter, and low straightness. Therefore, this study has improved the device so that it can machine the hole with longer length, a variety of inner diameters, and higher straightness. The results obtained in the experiments show that the improved device has the ability to machine the hole whose length, inner diameter, and straightness are longer, various, and higher, respectively.

研究分野：生産加工学

キーワード：放電加工 穴加工 穴内面穴

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

機械設計や機械加工を専門とする技術者が反射的に着想する穴加工法はドリルを用いた切削加工である。よって、彼らが反射的に着想する穴形状は穴の中心軸の形状が直線状、かつ、穴の横断面の形状が中心軸に沿って一定のものとなる。ドリル加工以外の穴加工法も実用化されているが、一般に除去加工によって実現できる穴形状の自由度は高いとはいえない。人間である設計者が着想する穴形状の自由度と比較すれば、加工可能な穴形状の自由度はかなり低いと言わざるを得ない。すなわち、設計の自由度が加工の自由度により相当に抑制されているともいえる。このような問題を克服するべく、研究代表者は加工可能な穴形状の自由度を向上させることを目的として、これまでに中心軸形状が曲線状である穴や断面形状が中心軸に沿って変化する穴を放電加工により創成する方法について研究開発を行い、一定の成果をあげてきた。これらの研究開発に加え、本研究課題では、中心軸が断面の半径方向に分岐する穴を放電加工により創成する方法について研究開発を行おうと考えた。

加工可能な穴形状の自由度が低いために生じる典型的な問題のひとつに、油空圧機器に形成される作動流体供給用管路の設計と加工がある。この管路の形成には一般にドリル加工が利用されているため、管路の形状は必然的に直線状あるいは複数の直穴を連ねた折れ線状となる。このように形成された典型的な管路を図1(a)に示す。この図に示すような3本の直穴から構成される管路を形成する一般的な方法として、直穴Aと直穴Bおよびこれらの直穴を接続する直穴Cを加工した後、直穴Cを止め栓で閉塞するという方法が採用される。しかし、複数の管路が複雑に入り組んだ油空圧機器の設計や油空圧機器の小型軽量化を目指した設計を行う場合、図1(b)に示すように、直穴Cを加工する領域に他の管路や機器の構成要素が配置されてしまい、直穴Cの加工自体が不可能になるという問題が生じる。このような問題を解決するためには、図1(c)に示すように、直穴Bの内面から直穴Dが形成できればよい。本研究課題において研究開発を行おうと考えた中心軸が断面の半径方向に分岐する穴を放電加工により創成する方法が実現できれば、直穴Dの形成が可能となる。

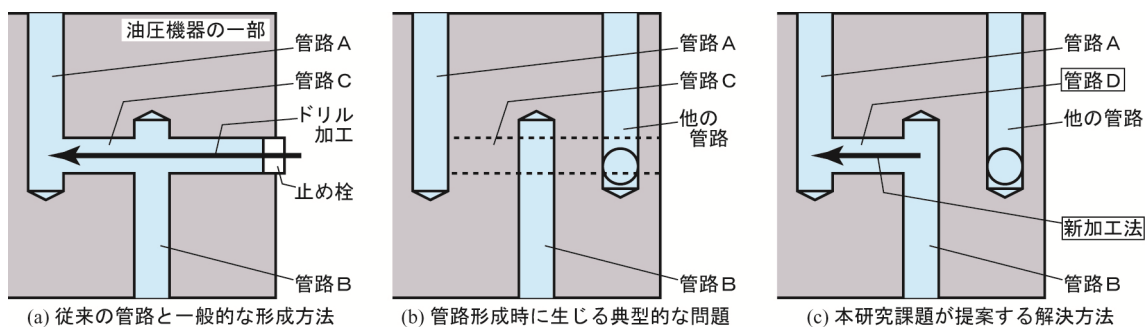


図1. 従来の管路とその形成方法および形成時に生じる問題と本研究課題が提案する解決方法

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、図2に示すように、あらかじめ加工された直穴の内面に対し、放電加工を用いて直穴を創成する方法を開発することである。本研究課題では、このような穴を「穴内面穴」とし、また、放電加工を用いて穴内面穴を創成することを「穴内面穴放電加工」と呼ぶ。

一般に除去加工により実現できる形状には制限があり、人間である設計者が発想する形状には及ばない。すなわち、加工の形状自由度の低さが人間の創造力を阻害しているといえる。よって、本研究課題は除去加工により実現できる形状の範囲を拡張し、それによって不可能とされる設計を可能にすること、すなわち、人間の創造性に課せられた制約を打破することを目的としている。

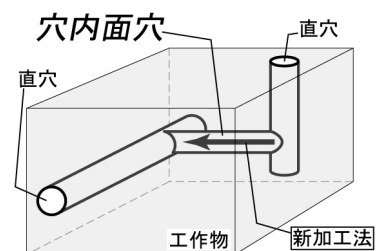


図2. 本研究課題が開発を目指す穴加工法

### 3. 研究の方法

図3に研究代表者が穴内面穴放電加工を実現するために開発した装置の基幹構造と加工過程を示す。図3(a)に示すように、放電加工用電極は薄くて長い直線状をした金属製の板ばねを介して彫形放電加工機の主軸に取り付けられており、さらに、電極と板ばねは絶縁材料製のガイドに形成された直線部分と曲線部分からなる溝の内部に組み込まれている。一方、あらかじめ直穴（図1における直穴Bに相当）が加工された工作物が放電加工機の加工槽に設置されており、さらに、この直穴には電極と板ばねを溝に組み込んだガイドが挿入され状態で固定されている。

この状態から主軸を工作物の方向に向かって水平に移動させると、図3(b)に示すように、板ばねはガイドの溝の入口、内部、出口において同時に次のような挙動をとる。すなわち、溝の入口では板ばねは変形のない直線状のまま進入する。溝の内部では板ばねは溝の形状に沿うように弾性変形しながら移動する。溝の出口では板ばねは弾性回復により再び直線状に戻りつつ、出口の向きと同じ方向に押し出されるように退出する。これによって、電極も板ばねと同様

にガイドの出口から押し出され、出口の向きと同じ方向に直線運動する。さらに、電極は主軸に板ばねを介して機械的に結合されているため、電極には主軸による極間距離制御動作が伝達される。よって、上記の運動をする電極を用いた放電加工が可能になる。その結果、図3(b)に示すように、あらかじめ加工された穴の内面に直穴(図1における直穴Dに相当)すなわち穴内面穴が創成される。

本研究では、図3に示す装置の改良や改善およびこの改良や改善を施した装置による動作実験や加工実験とその結果の検証を繰り返すことにより、加工可能な穴内面穴の形状の多様化と形状精度の向上に取り組んだ。

#### 4. 研究成果

前章で説明した方法で本研究を遂行した結果、得られた主な成果を以下に示す。

##### (1) 穴内面穴の長距離化と大径化

本研究を開始する前に行っていた基礎的な研究段階において開発した装置(以下、従前の装置と呼ぶ)では、内径21mmのあらかじめ加工された直穴の内面に対し、長さ70mm、内径3.1mmの穴内面穴しか創成できていなかった。あらかじめ加工された直穴の内径に対する穴内面穴の内径の比率を内径比と定義し、内径比も加えて表現すれば、従前の装置では、長さ70mm、内径3.1mm、内径比15%の穴内面穴しか創成できていなかった。この原因は、穴内面穴の長さに関しては、放電加工自体は安定していたことからさらに長い穴内面穴の創成は可能であるにもかかわらず、従前の装置における主軸の移動可能距離が最長で70mmであったためであり、穴内面穴の内径に関しては、従前の装置において使用したガイドに適用できる電極の直径が最大で3.0mmであったためである。

そこで、次に示す2点の改良を行った。1点目は、主軸の移動可能距離を最長で130mmとなるように装置全体を改良した。2点目は、より大きい直径の電極が適用できるようにガイドの構造を改良した。ただし、板ばねが通過するガイドの溝部分の構造はほぼ同様とした。具体的には、溝の横断面は縦0.2mm、横3.5mmの長方形で、溝の円弧部分の曲率半径は8.0mmである。

改良した装置を用いて、穴内面穴の長距離化と大径化を目的とした加工実験を行った。使用した放電加工条件を表1に示す。また、あらかじめ加工された直穴の内径は21mmとし、主軸の移動量はこの装置の限界となる130mmとした。板ばねには厚さ0.1mm、幅3.0mm、有効長さ170mmのほぼ短冊状をしたばね鋼製のものを、電極には直径が7.5mm、厚さが1.5mmのほぼ円柱形をしたタフピッチ銅(C1100)製のものをそれぞれ使用した。板ばねの材質や厚さと幅および概形、電極の材質やほぼ円柱状であることは、従前の装置で使用した板ばねと電極と同様である。相違点としては、主軸の移動量が70mmから130mmと1.86倍に延長されていることと電極の直径が3.0mmから7.5mmと2.5倍に拡大されていることである。よって、単純に言えば、改良した装置により創成される穴内面穴の長さや内径は、従前の装置によるそれらと比較して、長さが1.86倍、内径が2.5倍になることを意味する。すなわち、穴内面穴の長距離化と大径化が可能となる。

図4にこの加工実験で得られた工作物の断面を示す。この図より、あらかじめ加工された直穴の内面に対して、放電加工により穴内面穴が創成されていることがわかる。また、この加工実験から、主軸の移動量が設定した130mmになるまで安定な放電加工が持続することが確認された。創成された穴内面穴の長さや内径および内径比はそれぞれ126mm、7.7mm、37%であり、加工時間、加工速度、電極消耗率(体積、重量)はそれぞれ368.0min、18.0mm<sup>3</sup>/min、0.075%、0.25%であった。この結果から、改良した装置は従前の装置と比較して長さが1.8倍かつ内径や内径比が2.5倍となる穴内面穴を創

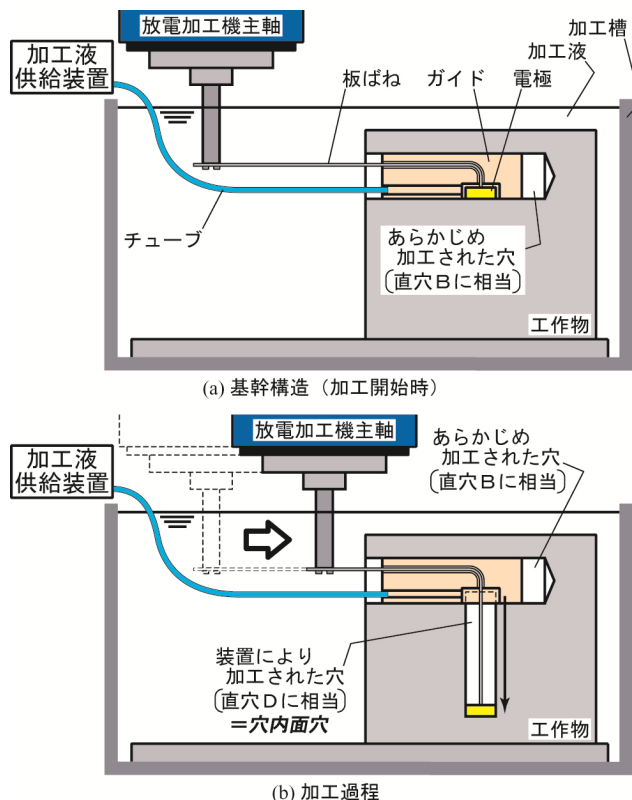


図3. 穴内面穴放電加工装置の基幹構造と加工過程

表1. 使用した放電加工条件

電極	タフピッチ銅 (C1100)
工作物	アルミニウム合金 (A5052)
加工液	油 (イソパラフィン系炭化水素)
極性	電極(+)/工作物(-)
加工電流	4.5 A
パルス幅	79 μs
デューティ比	78 %
ジャンプ	不使用
揺動	不使用

成できることが示された。

## (2) 穴内面穴の真直化

図4からわかるように、創成された穴内面穴の中心軸形状は予想していたような直線状とはならず、むしろ曲線状となっている。この原因は、板ばねがガイドを通過する際に曲線状に塑性変形するためである。すなわち、曲線状に塑性変形した板ばねがガイドから押し出されるように退出するため、電極の運動軌跡も曲線状になり、中心軸形状が曲線状の穴内面穴が創成される。

このことは、穴内面穴の大径化に関する研究をさらに進めていく過程でも確認されたが、この過程において、創成される穴内面穴は内径が大きくなるほど、穴内面穴の中心軸形状が直線状に近づく傾向にあることが観察された。この理由は次に示す現象によるものと予想した。創成される穴内面穴を大径化するためには、電極を大径化する必要がある。それに伴って、電極の質量が増加する、すなわち、電極に働く重力が増加する。よって、電極から板ばねに及ぼされる荷重も増加する。したがって、曲線状に塑性変形した板ばねがこの荷重によって弾性変形することによって直線状に近い形状になる。これによって、中心軸形状がより直線状となった穴内面穴が創成される。

この現象を利用して穴内面穴の真直化を実現しようと考えた。しかし、穴内面穴の内径は指定されるため、おのずと電極の直径は決定されてしまう。さらに、装置の構造上、電極の体積を増加させることによって質量を増加させることはできない。このような条件下において、電極の質量を増加させるためには、電極に密度の高い材料を用いればよいが、放電加工に利用できる電極の材質は限られている。

そこで、電極の質量すなわち電極が板ばねに及ぼす荷重を増加させることなく、曲線状に塑性変形した板ばねを弾性変形させることによって、板ばねをより直線状に近い形状にさせるためには、板ばねの剛性を低下させればよいと考えた。これを実現させるために、厚さが薄い板ばねを使用することとした。具体的には、使用する板ばねの厚さを0.1mmから0.05mmに変更した。

厚さを薄くした板ばねを用いて、穴内面穴の真直化を目的とした加工実験を行った。使用した装置や放電加工条件などは穴内面穴の長距離化と大径化を目的とした加工実験のものとはほぼ同一である。

図5にこの加工実験で得られた工作物の断面を示す。この図に示すように、あらかじめ加工された直穴の内面に対して穴内面穴が創成された。この加工実験においても主軸の移動量が設定した130mmになるまで安定な放電加工が持続した。創成された直穴2(穴内面穴)の内径と長さおよび内径比はそれぞれ7.7mm, 126mm, 37%であり、加工時間、加工速度、電極消耗率(体積, 重量)はそれぞれ429.9min, 14.2mm<sup>3</sup>/min, 0.099%, 0.33%であった。

図4と図5に示した穴内面穴の真直性を定量的に評価する簡易的な指標として、穴内面穴の入口断面の中心を通る鉛直線から横断面の中心までの最大距離を導入した。両者について測定したところ、前者は8.65mm, 後者は1.72mmであった。この結果から、板ばねの厚さを薄くすることによる板ばねの剛性の低下が創成される穴内面穴の真直化に寄与することがわかった。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計5件)

- (1) **石田 徹**, 小川識太郎, 溝渕 啓, 竹内芳美: 穴内面穴放電加工法の開発 — ツイン板ばね方式による穴内面穴の真直化 —, 電気加工学会全国大会 (2018) 講演論文集, 53-54, 2018.11.29, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府)
- (2) 久保田竜太, **石田 徹**, 溝渕 啓, 竹内芳美: 穴内面穴放電加工法の開発 — 加工穴の小径化の試み —, 日本機械学会第12回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 講演番号 B08, 1-2, 2018.10.13, 兵庫県立大学姫路環境人間キャンパス (兵庫県)
- (3) 常國雄平, **石田 徹**, 小川識太郎, 溝渕 啓, 竹内芳美: 穴

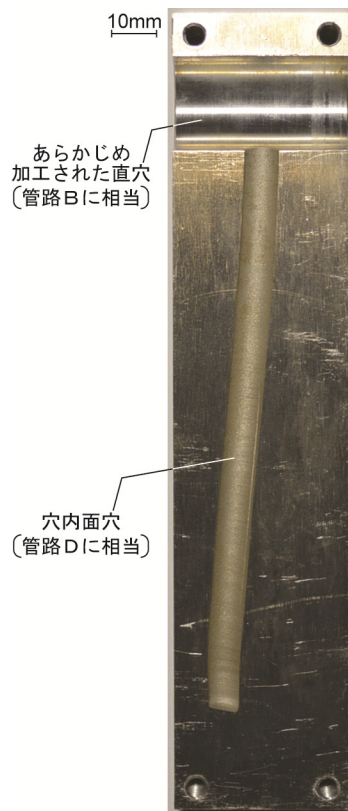


図4. 穴内面穴の長距離化と大径化を目的とした加工実験で得られた工作物の断面

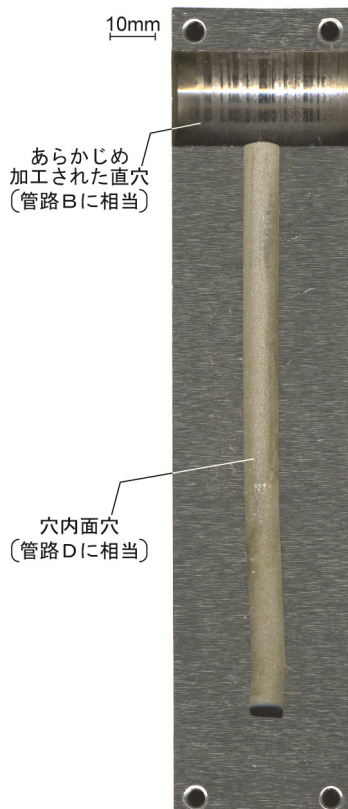


図5. 穴内面穴の真直化を目的とした加工実験で得られた工作物の断面

内面穴放電加工法の開発（板ばねの薄片化による穴内面穴の真直化），日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集，講演番号 S1330001, 1-3, 2018.9.11, 関西大学千里山キャンパス（大阪府）

- (4) **Tohru Ishida**, Shohei Tahara, Shikitaro Ogawa, Akira Mizobuchi and Yoshimi Takeuchi : Hole Fabrication inside a Hole by Means of Electrical Discharge Machining ---Expansion of Machinable Hole Diameter---, Proceedings of 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), Paper No. D32 (023), 1-5, 2017.11.16, International Conference Center Hiroshima (Hiroshima, Japan)
- (5) **石田 徹**, 俵原翔平, 小川識太郎, 溝渕 啓, 竹内芳美 : 穴内面穴放電加工法の開発（加工穴内径の拡大）, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集，講演番号 S1340101, 1-4, 2017.9.5, 埼玉大学大久保キャンパス（埼玉県）

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。