

特集 振動同期パルス電解加工技術の開発*

—CO₂冷媒ヒートポンプ給湯機 (ECO CUTE) トライボプレート工程への適用—

Development of Precise ECM with Synchronized Vibration

— Application to Tribology Plate of CO₂ Scroll Compressor (ECO CUTE) —

寺井 文人

Fumihito TERAJI

永井 暢彦

Nobuhiko NAGAI

柴田 英則

Hidenori SHIBATA

伊東 昌則

Masanori ITO

岩波 重樹

Shigeki IWANAMI

A thrust sliding bearing -tribology plate- in CO₂ Scroll Compressor has successfully produced in DENSO CORP. since 2010. A high load carrying capacity and low friction bearing is required especially for a CO₂ scroll compressor due to its high refrigerant pressure. Above performance depends on the design of tribology plate which has 84 circular bump pattern with high accuracy wedge profile on its surface. New developed precise electrochemical machining (P-ECM) is used as rough and finishing operation for that process.

In this paper, it is described the approach way by P-ECM with vibration how to experimentally achieve such a complex shape and highly wedge accuracy with well productivity.

Key words : ECM, vibration, tribology, edge finishing.

1. 緒 論

近年、自動車や家電の製品機能向上を背景に、部品エッジ部はミクロンオーダーの精度が求められ始めた。製造現場では、エッジ高精度化に対応する加工技術開発が必要不可欠となってきた。

電解加工は、金属イオンの溶出を加工原理とすることから格子欠陥レベル（サブミクロン）の加工精度が実現可能であるが、一般的な電解加工技術は能率、精度の両面において、加工中に発生するスラッジとガスを阻害要因として±0.01mm程度を実用限界としてきた。

電解加工の電極転写精度向上の取り組みとして、短パルス化による電解反応の選択性向上、ピエゾ振動付与によるスラッジ排出性の向上などの提案が多く報告されているが、いずれもφ10mm以下、電流10A以下の小物部品に特化した精密型彫り加工の提案で加工能率を考慮しておらず量産化には適さない^{1) 2)}。またPEM-tec社に代表される欧州メーカーは近年、偏芯カム振動付与による高精度電解加工技術の実用化に成功している³⁾。しかし偏芯カムの打撃音による騒音、装置が非常に高価で経済生産性が悪いなど、普及への課題が山積である。また国内外いずれの研究においても、電極転写精度向上に特化しており、エッジ部のミクロ

ンオーダーの仕上げを実現する提案はほとんどない。

本研究では、上記課題を解決すべく、電極に振動を付与し、印加パルス電圧の時期を振動と同期させる振動同期パルス電解加工技術（P-ECM）を安定量産可能な独自構造で製作し、狭ギャップ加工による高い電極転写精度と加工進度に応じたギャップ制御によるサブミクロンオーダーのエッジ精度を両立するシステムを提案する。本システムは2010年より、CO₂冷媒ヒートポンプ給湯器（ECO CUTE）スクロールコンプレッサを支える滑り軸受け部品（トライボプレート：後述）の異形型彫り加工およびエッジ仕上げ加工工程に適用し十分な量産実績を得ている。

そこで本報では、キー技術である振動機構、電解液供給方式、ギャップ制御技術の理論検証と加工実験による実証結果を報告する。

2. 加工システムの構成と原理

2.1 開発対象製品（トライボプレート）

トライボプレートとは、CO₂給湯機のスクロールコンプレッサ（Fig. 1）に搭載されている滑り軸受け部品である。コンプレッサの出力性能は、トライボプレート（φ100）と相手部品との摺動性に依存しており、

*2015年8月26日 原稿受理

くさび効果による極薄油膜発生のため、トライボプレート表面に84個配置されている異形状（Bump：浮島と呼ぶ，Fig. 2）はFig. 3に示すようにエッジ部にはアスペクト比200以上（深さサブミクロン：長さ0.14mm以上）の滑らかな微小クラウニングを備え，受圧に必要なφ3.3mm以上の有効径（Valid Diameter）が求められた⁴⁾。

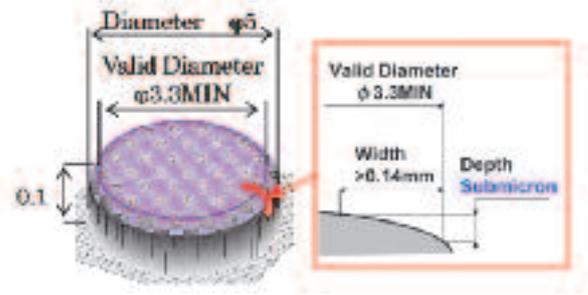


Fig. 3 Drawing of circular Bump Edge profile

2.2 開発目標と開発課題

本開発の精度，能率の目標値をTable 1にまとめる。精度面では，体格・性能の目標より，有効径φ3.3を確保しつつ，深さサブミクロン：長さ0.14mm以上の高アスペクト比エッジ形状を実現する。

Table 1 Goal of this development

Category	Items	Target	Conventional
Quality	Valid Diameter [mm]	φ3.3 MIN	φ2.1
	Edge width [mm]	0.14MIN	0.05
Cost	Processing time [sec]	30	600
	Processing depth [mm]	0.1	0.1
	Machine number	1	2

能率面では，事業性の観点より，1台の設備で0.1mmの深さの異形型彫りとエッジ仕上げを30秒以内で加工すること，とした。加工能率に換算すると体積除去能率10mm³/sec，深さ除去能率0.003mm/secとなる。

なお，Table 1の右欄に開発初期段階の一般的なパルス電解設備による加工結果を記載した。今回の目標値は，従来技術に比べ，精度面で3倍，能率面で40倍近く向上させる必要があったことを意味する。

本開発の課題は，高精度化と高能率化の両立である。

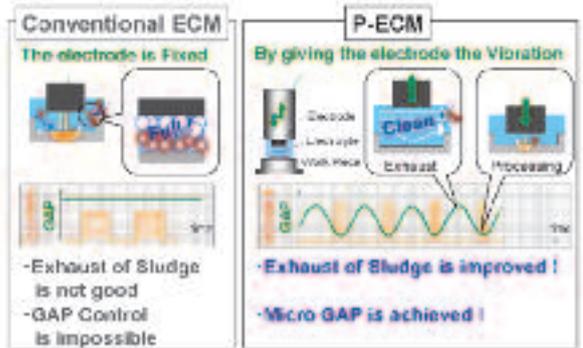


Fig. 4 Basic structure of P-ECM

2.3. 加工システムの原理

上記課題を解決し目標を達成するため，Fig. 4， Fig. 5の加工システムを構築する。

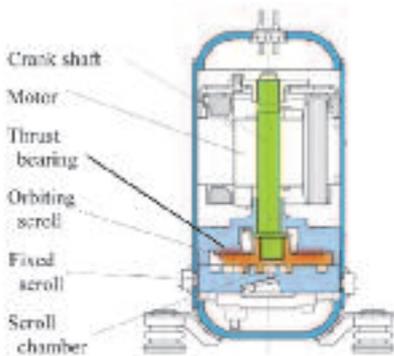


Fig. 1 Cross section of CO2 Scroll Compressor

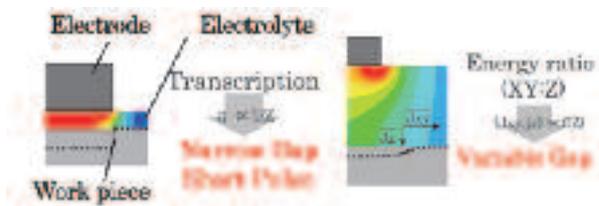


Fig. 5(a) Approach for high transcription

Fig. 5(b) Approach for edge control

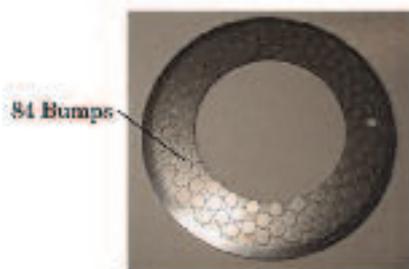


Fig. 2 Picture of thrust sliding bearing : Tribology plate

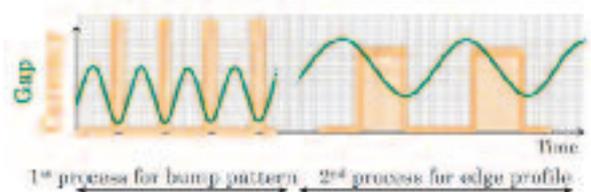


Fig. 5(c) Flexible Gap control system

高精度化実現には、電極形状転写性向上とエッジ精度向上の2つの課題がある。電極形状転写性には、狭ギャップ化と短パルス化により電解反応の選択性を高めることが重要である。しかし、極間にスラッジ、ガスが溜まると放電現象が発生し、狭ギャップ加工ができないため、Fig. 5.(a)に示すようにフラッシングの動きと印加時期を同期させ、電極と工作物が接近時のみ加工し、電極の離脱時はスラッジを排出し、新鮮な電解液による理想的な加工環境を作り出すことにより電極転写性を向上する。

エッジ精度向上には、Fig. 5.(b)に示すように電流密度の加工進度に応じた制御が有効であると考えた。電流密度はギャップと相関を持つ。つまりギャップをあえて広げてエッジ部分を含む広範囲に電流を流す。またその時エッジ近傍に新鮮な電解液を供給する必要がある。電解液供給方式の最適化も重要である。

加工能率向上には、振動を高速化し、加工機会を増加させることが有効である。

以上を集約したシステムをFig. 5.(c)に示す。狭ギャップで異形型彫りを実施し、所望の広ギャップでエッジを滑らかに仕上げ、振動により高速化することにより高精度と高能率の両立を実現する。本システムのキー技術を以下3つに整理した。

- 1) 狭ギャップを実現する同期高速振動付与技術
- 2) エッジ精度安定化を実現する電解液供給技術
- 3) 加工進度に応じたギャップ制御技術

次項では、振動機構の最適設計を目的とした必要振動周波数の導出、電解液の供給方式の発案、開発機を用いた印加電圧パルス幅、極間ギャップと加工精度の相関調査を順次実施したので報告する。

3. 同期高速振動機構の理論検討と構造設計

3.1 振動周波数導出

開発機の振動仕様を明確にすることを目的として、検討を実施した。

最低周波数は、目標加工時間から求められるが、最大周波数はパルス電圧印加から次の印加までの時間内にスラッジが排出することができるかという観点から求められる。これは振動が早すぎると次の印加時に加工障害物が残り、精度悪化要因になってしまうことを意味する。

以上の観点から、最適な周波数領域を求め、振動仕様とする。

3.2 最低周波数

最低周波数は式(1)で表される。トライボプレートの除去量から算出される必要エネルギー量を単位エネルギー量で割ることで必要な投入回数が求まり、投入回数を目標加工時間で割ることで、単位時間当たりの投入回数が求まる。

$$f(\min) = \frac{\Sigma idt}{I_p * T(\text{on}) * T(\text{mt})} \quad \dots (1)$$

Σidt : 累積電流量[As], I_p : ピーク電流値[A],
 $T(\text{on})$: 印加時間[ms], $T(\text{mt})$: 目標加工時間[s]

この式に下記の暫定加工条件を代入すると、
 $\Sigma idt = 4000[\text{As}]$, $I_p = 1000[\text{A}]$, $T(\text{on}) = 5[\text{ms}]$,
 $T(\text{mt}) = 30[\text{s}]$,

$$f(\min) = 26.7[\text{Hz}]$$

が求まる。約27Hzが、目標加工時間を満足するために必要な最低周波数である。

3.3 最大周波数

パルス電圧印加時に発生したスラッジは電解液流速に乗って系外へ排出される。その流速は電解液供給量と振動による流路面積の変化から表される。排出必要距離はトライボプレート内外径差より20mmとした。

Fig. 6に64Hzの時の電極振動の変位を示す。振幅は300 μm とした。

振動による圧力変化を考慮しない場合、流速 $v(\text{in})$ は式(2)で表され、下死点0mmでのギャップを100 μm 、供給量(10L/min)のときの時間変化をFig. 7(a)に示す。

$$v(\text{in}) = \frac{Q}{S} \quad \dots (2)$$

Q : 供給流量[L/s], S : 断面積[mm^2],

一方、振動により体積増加時に負圧による流入、体積減少時には正圧による流出が起これ、その関係は式(3)で表される。時間変化をFig. 7(b)に示す。

$$v(t) = \frac{Q * \Delta V}{S} \quad \dots (3)$$

ΔV : 体積変化量[mm^3/s],

以上の二つの式を合成し、圧力変化量を加味した流速の時間変化をFig. 7(c)に示す。最低流速は0m/sであり、上死点より2.5ms早いタイミングとなる。その付近で流速は正負逆転し、スラッジが滞留する期間が存在することを意味する。そこでアクリル板を用いた流れの可視化治具を製作し、高速ビデオカメラでのスラッジに見立てた砥粒の挙動を観測した (Fig. 8)。結果、計算と同様にスラッジが遙動するような動きを確認できた。

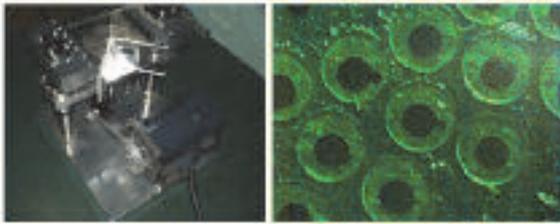


Fig. 8 HS video observation for sludge flow

合成流速を時間積分することにより、発生スラッジの一位置 D が算出できる。(式 (4))

$$D = \int (v(m) + v(t)) dt \quad \dots (4)$$

スラッジ移動距離量 D の時間的变化をFig. 9に示す。スラッジ排出に使える0.0106秒以内に20mm以上スラッジが移動できることがわかる。

逆に、振動周波数64Hz以上にすると、フラッシング中にスラッジが完全に排出できないことがわかった。

以上の検討により、トライボプレート加工の最適振動領域を27~64Hzとし、 piezoアクチュエータなどが必要な高周波領域ではなく、カムやモータで実現可能な低周波領域にその解があることがわかった。

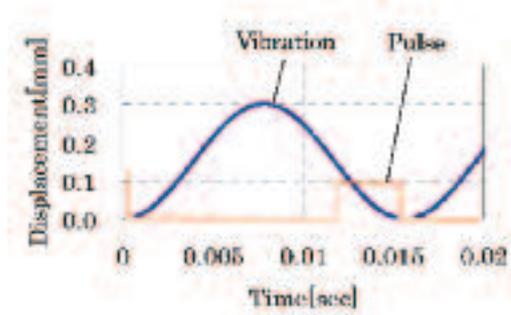


Fig. 6 Electrode vibration curve and pulse timing

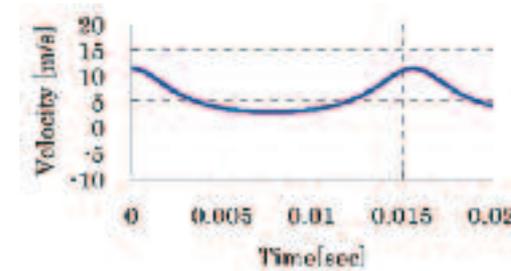


Fig. 7(a) Electrolyte velocity without pumping effect

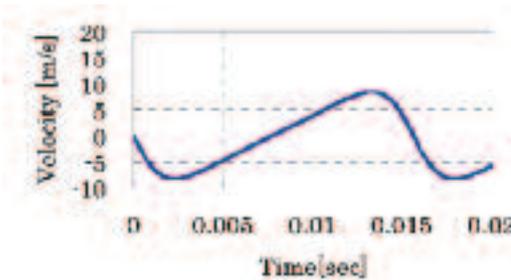


Fig. 7(b) Electrolyte velocity by pumping effect

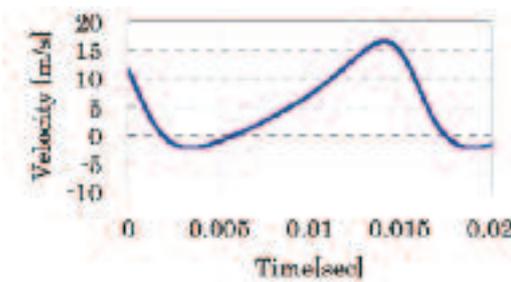


Fig. 7(c) Compounded electrolyte velocity

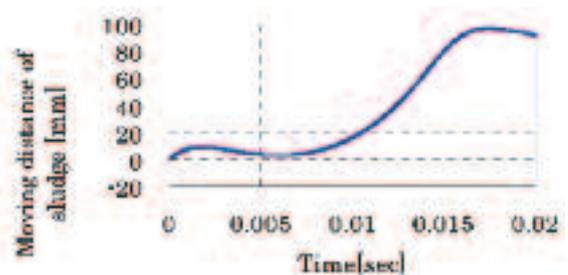


Fig. 9 Moving distance of sludge

3.4 振動機構の設計

開発設備の外観をFig. 10に示す。(W700, D1270, H2000) 設備上部には振動機構を備えており, Fig. 11に示すように振動発生部にはモータ+カムフォロア方式を採用し, 高精度繰返し位置決め ($\pm 3\mu\text{m}$) と振幅 ($300\mu\text{m}$) および低騒音 (83dB以下) を実現した. またFig. 12に示すように, 振動伝達機構は塩環境に対応すべく摺動部を持たないダイヤフラム方式を考案した. そのダイヤフラムプレート設計は応力集中部を最小化できるよう, 応力解析を活用した.



Fig. 10 Outline of developed P-ECM

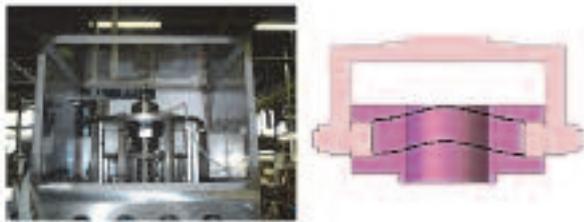


Fig. 11 Outline of Vibration mechanism

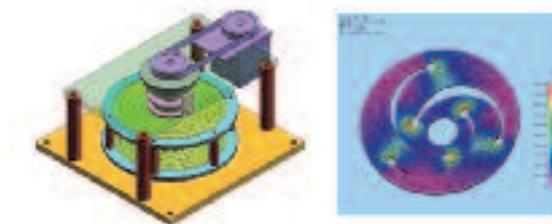


Fig. 12 Outline of Transmission mechanism

4. 流体解析に基づいた電解液供給方式の確立

4.1 一般的な液供給方式の問題点

安定したエッジ品質を実現するためには, エッジ近傍への均一な電解液の供給排出経路を備える電極設計が必要不可欠である. まず一般的な電解液供給方式を用いて, 加工実験を行った. APC社パルス電解加工機を使用し, Fig. 13(a), Fig. 13(b)に示す電極を用い, 内径から供給し外径へ排出する一方向の電解液流れによる加工とした.

加工条件をTable 2に示す.

結果, 加工時間は約6分で深さ0.1mm型彫り加工は可能であるが, 浮島の外周部にFig. 14に示すような1~2 μm の加工残しが発生した (P=2.7%). このような突発的な不良は開発技術の検証を妨げるため, 改善が急務であった.

4.2 電解液流れ解析1

外側にのみ不良が偏ることから, 電解液の流れの不均一性が原因と考え, 流れ解析を行った. 計算条件をTable 3(a)に電解液の物性値をTable 3(b)に示す.

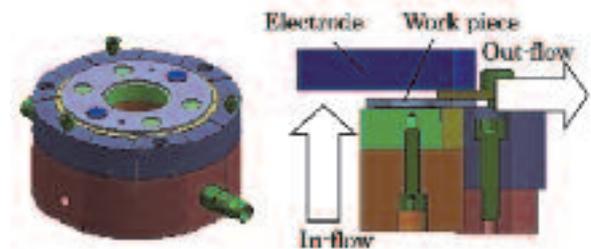


Fig. 13(a) 3D Model Fig. 13(b) Electrolyte flow

Table 2 Experimental condition

Electrolyte	NaNO ₃ (1.25wt%, 25°C, PH7.8)
Flow qty	16L/min
Voltage	20Vconst, DUTY25%
Peak Current	I _p = 600A
Pulse width	10msON/30msOFF
Flushing Gap	Every 10 second 0.2mm



Fig. 14 Result of edge profile

解析結果をFig. 15に示す. 流れは排出開放部で流速が増加し, 外周島周辺では流れの剥離が起こる. 剥離点周辺ではスラッジのワークへの凝着やガス滞留による導電率の低下など電解反応を阻害する環境が形成されやすく, この流れの不均一性が加工残しの要因と言える. また, エッジ部流速の最小と最大の差R=3.84m/sであった.

4.3 電解液流れ解析2

改善にはエッジの流れを均一にすればよく, 浮島一つ一つに電解液供給部を設け, 電解液がまずエッジに供給されれば流路の影響を受けずに安定流速を得られ

ると考えた (Fig. 16).

事前比較検証のため、流れ解析を行った。使用した電解液の供給方式モデルを Fig. 17(a), Fig. 17(b)に示す。電解液の供給は各浮島から流入、内外2方向への排出とし、解析条件は前回同様とした。

解析結果を Fig. 18 に示す。エッジ全周の流速ばらつきが改善され、エッジ部流速の最小と最大の差 $R = 0.95\text{m/s}$ であり、従来に比べて75%のばらつきが改善できた。

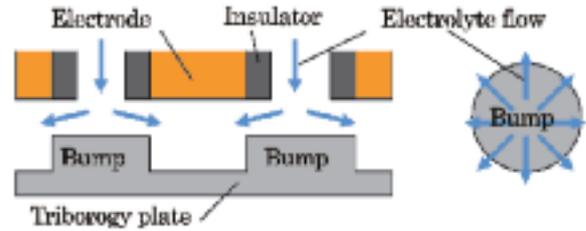


Fig. 16 Concept of a new electrode design

Table 3(a) Calculation condition

Items	Condition
Method	3D steady analysis
Solver	STAR-CDv3150A
Model	500,000 elements
Boundary condition	Inlet: in-flow Outlet: out-flow, open atmosphere
Calculation condition	Difference scheme : UD

Table 3(b) Electrolyte physical property

Physical property	Condition
Concentration [wt%]	20
Density [kg/m3]	397.56
Viscosity [Pa*s]	0.00134
Flow qty [L/min]	10

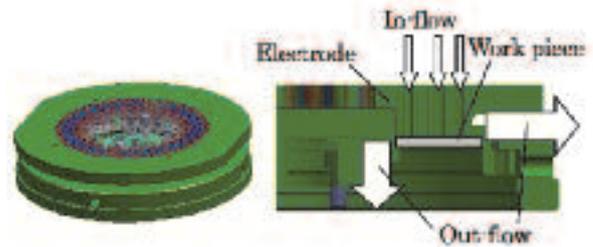


Fig. 17(a) 3D Model Fig. 17(b) Electrolyte flow

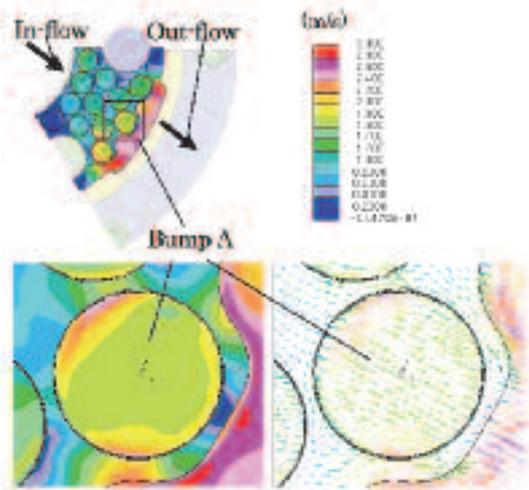


Fig. 15 Velocity distribution on Bump A

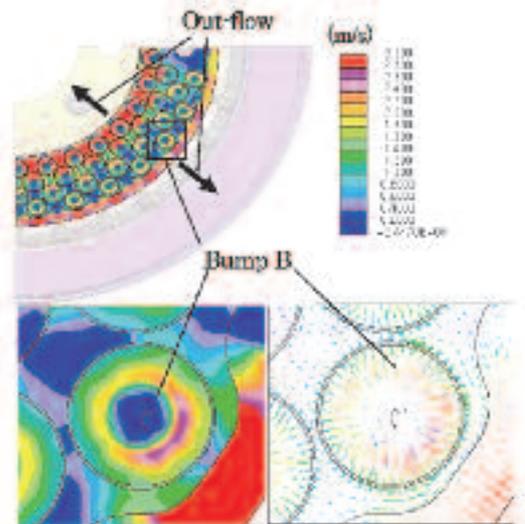


Fig. 18 Velocity distribution on Bump B

4.4 改善効果

実際に電極を製作し、加工検証を行った。設備、加工条件は前回同様とした (Table 2)。

結果、従来電極で2.7%発生していた加工残し不良が0%となった。

5. ギャップ制御技術の検討

5.1 電極転写性に及ぼすギャップ、パルス幅の影響調査

トライボプレートの有効径はφ3.3mmを確保するためには、Fig. 19に示すように、エッジラウニングの取代を考慮して、型彫り工程では、有効径はφ4.6mm以上が必要である。電極側はφ5.1mmで設計されており、電極形状転写精度90%以上が必要となる。

本実験では、ギャップとパルス幅を変化させ、有効径の変化を確認した。加工条件をTable 4に示す。有効径の測定には平面度測定器 (ZYGO社NV6300) を用いた。

加工結果をFig. 20に示す。ギャップとパルス幅と電極転写性には顕著な相関が見られ、パルス幅は微細で

あればあるほど転写性は向上する。一方、今回の実験は周波数64Hzを限界値としたが、パルス幅1msではDUTY6.4%, 3msでは、DUTY19.2%, 深さ0.1mmの型彫りに要した加工時間がそれぞれ125秒, 42秒となった。

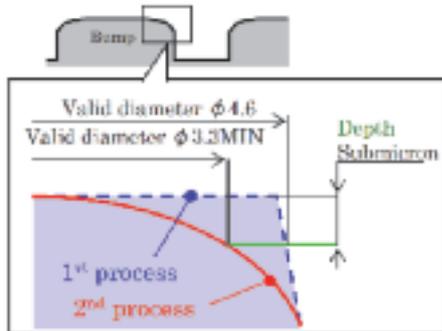


Fig. 19 Breakdown for 1st process target

Table 4 1st Process condition

Items	Condition
Electrolyte	NaNO3 (1.25wt%, 25°C, PH7.8)
Flow qty [L/min]	10
Control	Const currency
Peak Currency [A]	1000
Pulse width [ms]	1/3/5/7/10/20/30
Duty [%]	Depend on frequency
Timing of supply	Bottom dead center
Flushing	Every vibration cycle
Vibration frequency [Hz]	30-64
Gap	0.03/0.05/0.10/0.15 /0.20/0.30/0.40/0.5

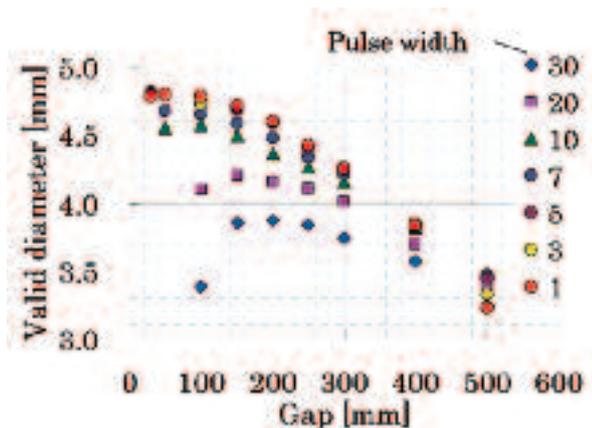


Fig. 20 Relationship between transcription and pulse width / Gap

5.2 エッジ幅に及ぼすギャップ、パルス幅、積算電流量の相関調査

トライポプレートエッジ部の高アスペクト比のクラウニング (D:W=サブミクロン:140μ以上) を確保するためには、狭ギャップ加工時は、溝部分に電流を

集中させ、広ギャップ加工時はエッジ部分を含む広範囲に電流を流す方法が考えられる。本実験では、ギャップとパルス幅および単位面積当たりの積算電流量を変化させ、エッジ幅の変化を確認した。加工条件をTable 5に示す。エッジ幅の測定にはZYGO社NV6300を用いた。

パルス幅10msの加工結果をFig. 21に示す。ギャップと積算電流量とエッジ幅には顕著な相関が見られ、ギャップが広く、積算電流量が大きければエッジ幅は大きくなる。

Table 5 2nd Process condition

Items	Condition
Electrolyte	NaNO3 (1.25wt%, 25°C, PH7.8)
Flow qty [L/min]	10
Control	Const currency
Peak Currency [A]	1000
Pulse width [ms]	5/10/20/30
Duty [%]	Depend on frequency
Timing of supply	Bottom dead center
Ampere second [As/cm2]	2%/0.3%/10%/2/14
Flushing	Every vibration cycle
Vibration frequency [Hz]	30
Gap	0.05/0.1/0.2/0.3/0.4/0.5

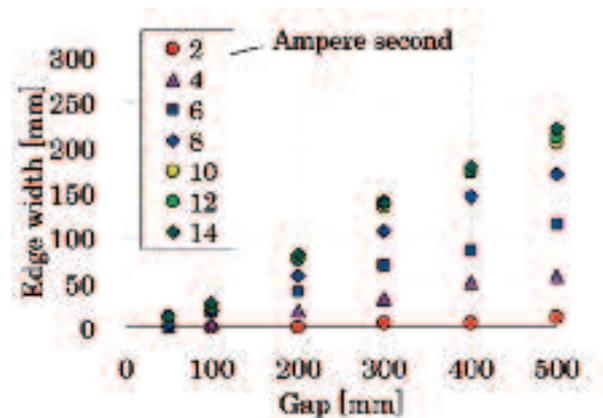


Fig. 21 Relationship between edge width and pulse width / Gap / Ampere second

また、この結果をJUSE Package Softwareを用いて、重回帰分析を行った。結果、相関係数0.806, 有意差1%で、エッジR幅 Y [mm]は式 (5) で表される。

$$Y = 0.338(x_1) + 1.443(x_2) + 0.337(x_3) - 116.357 \quad \dots (5)$$

x_1 : ギャップ[mm], x_2 : パルス幅[ms],
 x_3 : 積算電流量[As]

これによりエッジ幅140 μ m以上を確保するためのパラメータ条件を予測することが可能となり、一例として、ギャップ400 μ m、パルス幅10 μ m、10.4As/cm²以上となる。

6. 開発結果

以上の知見を基に設定した加工条件にて、開発目標を達成し、本開発機を量産ラインへ適用した。初期流動期間の加工結果をTable 6にまとめる。

Table 6 Goal of this development

Category	Items	Target	Result
Quality	Valid Diameter [mm]	ϕ 33 MIN	ϕ 368
	Edge width [mm]	0.14MIN	0.18
Cost	Processing time [sec]	30	25
	Processing depth [mm]	0.1	0.10
	Machine number	1	1

結果は全てバラツキを加味した平均値 $\pm 3\sigma$ で表している。

7. まとめ

振動を付与したP-ECM技術の内製開発を通じ、以下の知見を得た。

- 1) 電極へ付与する振動周波数の導出方法を提案し、トライボプレート加工の適正値が27~64Hzであることを明らかにした。
- 2) 電解液のセンタースルー供給方式を考案し、各浮島エッジ近傍の電解液流速バラツキを75%低減できることを確認した。(特許1件)
- 3) 開発機を用いて、パルス幅とギャップの電極転写性に与える影響調査により、短パルス、狭ギャップが転写性を向上させることを確認し、生産性を考慮した最適解を求めた。
- 4) 開発機を用いて、パルス幅とギャップと積算電流量のエッジ幅に与える影響を明らかにし、重回帰分析を用いて、傾向の定量化を試みた。
- 5) 本研究で得られた知見を基に、量産加工条件を設定し、4年間の流動実績を得た。

謝 辞

論文投稿の際、親身なるご指導頂いた東京農工大学夏教授に深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 阿部敬行, 正木健, 和田紀彦, 増沢隆久: マイクロパルス電解加工研究 (電気加工学会2004)
- 2) 栗田恒雄, 近森邦夫, 窪田真一郎, 服部光郎: 微細電解加工機による3次元形状の加工, 機械学会論文集C編668号 (2002-4, 01-0881)
- 3) 築山弘明: 精密電解加工機ペムセンタ, 電気加工学会誌vol.47/No.1142013.3, P44-47
- 4) S.Kawabata: Hydrodynamic lubrication effect of multiple circular bump pattern for a thrust sliding bearing of a scroll compressor, Tribology online 7 (1), 13-23, 2012
- 3) 佐藤敏一: 電解加工と化学加工 (朝倉書店)
- 4) S.Hinduja, M.Kunieda: Modeling of ECM and EDM processes, CIRP 2013 annals STC E, 62/2/2013, P.775

<著 者>



寺井 文人
(てらい ふみひと)
ダントツ工場推進部 第1生産
システム室
精密加工分野の生産技術開発,
工程設計に従事



永井 暢彦
(ながい のぶひこ)
生産技術研究部 第2生技研究室
除去加工技術研究に従事



柴田 英則
(しばた ひでのり)
試作部 開発試作室
開発試作品の設備装置設計に
従事



伊東 昌則
(いとう まさのり)
熱製造3部 第3生産技術室
CO₂給湯機スクロールコンプ
レッサの生産技術開発に従事



岩波 重樹
(いわなみ しげき)
空調冷熱技術2部 第3技術室
CO₂給湯器スクロールコンプ
レッサの開発・設計に従事