

特集：新型デミオ

24

MZR 1.3/1.5 シリンダブロック加工ラインの紹介

MZR 1.3/1.5 Cylinder Block Machining Line

鳥居 元*¹ 山下 貢丸*² 平井 泰史*³
Hajime Torii Tsugumaru Yamashita Yasushi Hirai
山田 義弘*⁴
Yoshihiro Yamada

要約

エンジン部品加工領域においては、より一層の高精度な加工技術（高品位加工）とともに、省エネルギーで廃棄物を出さない環境にやさしい工法の開発が求められている。

新型デミオに搭載されたMZR 1.3/1.5 エンジンでは、シリンダブロック加工ライン新設に当たり、これらの要求に応えるため、多くの当社独自の新技术/システムを開発し導入した。

本稿では、①シリンダボアの仕上げ加工に採用した高精度な加工技術であるボア高品位加工の事例、②シリンダブロックの加工に採用した環境にやさしい工法であるクーラントレス加工の事例を紹介する。

Summary

Engine parts machining process requires environmentally-friendly technologies with energy saving and no wastes, as well as high-precision machining.

In constructing a new cylinder block machining line for MZR 1.3/1.5 engine mounted on New Demio, Mazda has developed and adopted a number of new technologies and systems of our own to improve machining accuracy and achieve an environmentally-friendly process.

This paper introduces ①A new process for enabling much higher accuracy in cylinder bore finishing, ②Ecological coolant-less machining, that results in reducing significant machining energy and wastes.

1. はじめに

近年、自動車エンジンの高性能化により、加工領域においてもこれに対応するためにより一層の高精度な加工技術が求められている。

また、社会の環境問題への関心の高まりから、省エネルギーで廃棄物を出さない、環境にやさしい工法の開発も求められている。

マツダでは、新型デミオに搭載されたMZR 1.3/1.5 エンジンのシリンダブロック加工ラインを新設するに当たり、生産性やコストを考慮した上で、これらの要求に応えるため、多くの当社独自の新技术/システムを開発し導入した。

本稿ではその事例として、以下について紹介する。

- ① シリンダボアの高品位加工
- ② クーラントレス加工

2. シリンダボアの高品位加工への取り組み⁽¹⁾

2.1 ボアの高品位加工⁽²⁾

エンジンの高出力化、低燃費、低エミッションへの要求が高まる中、加工領域において、高精度が得られる高品位加工が求められている。特にシリンダブロックのシリンダボア (Fig.1) は、Table 1に示すように、加工精度とエンジン性能が密接に関係している加工部位であり、これまで以上の加工精度が要求されている。

そこで、MZR 1.3/1.5 シリンダブロック加工ラインでは、これらの要求を満足しつつ、生産性も向上できるボアの高品位加工へ取り組んだ。

* 1 ~ 3 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

* 4 第1工務技術部
Workshop Engineering Dept. No.1



Fig.1 Cylinder Brock Bore

Table 1 Relationship between Engine Performance and Quality

Engine Performance	Aim	Cylinder Bore Accuracy	Evaluate Items	Effect
Fuel-Efficient	Reduce Friction	Improve Accuracy	Diameter, Cylinder, Cylinder	Reducing Piston-ring Clearance Reducing Piston-ring Tension
Low-Emission	Reduce Oil Consumption	Improve Roughness	Rvk, Mr2	Reduce Oil Retention Volume
Seisure Resistance	Stability of Lubrication	Improve Roughness	Rvk, Mr2	Keep Oil Retention Volume
		Reduce Plastic Flow	Surface, Cross Section	Keep Lubrication by Carbon

Table 2 Matrix for Improving Accuracy

Bore Diameter						
Form						
Roughness						
Surface						
Bore Accuracy	Factor	Work	Allowance	Tool	Machining Heat	Dimensional Detection
Concept of High Accuracy Machining						
Improving of Stiffness						
No-deformation						
Constant Machining Condition						

Table 3 Issues in High Accuracy Machining

Issues	Subject
Zero Work Deformation	Work Deformation Analysis
Constant Allowance	Control Allowance
Minimum Allowance	Minimum Allowance
Higher Tool Rigidity	Tool Deformation Analysis
Machining Heat Reduction	Machining Thermal Analysis
Control Temperature	Machining Thermal Analysis
Constant Dimension Detection	Precise Dimension Detection
Constant Cutting Performance	Cutting Performance Control

2.2 ボア高品位加工の課題

まず、ボアの高品位加工を行う上での課題を抽出した。Table 2は高品位加工を達成する上での基本的な考え方と、ボア加工の関連因子を展開し、ボア加工の品質特性とを関連づけたマトリックスである。次に、Table 3は開発及び検証が必要な具体的技術課題リストである。

これら全ての技術課題を解決し、加工ラインへ導入した。

2.3 取り代の一定化~ボアフィニッシャの開発

ボア加工精度を確保する上で、ホーニング仕上げ工程でいかに取り代(加工代)を少なく、かつ安定させるかが重要である。そのためには、前段階であるボーリング工程での加工径・形状精度の安定化がキーとなる。従来はボーリ

ングとホーニング工程は別々の設備で構成されており、品質を満足させるためには本来重要視されるべき加工径・形状の相互の情報交換が必要であった。

この問題を解決するため、今回は上記2工程を統合した「ボアフィニッシャ」を開発した(Fig.2)

このボアフィニッシャの加工プロセスをFig.3に示す。ボーリング加工後の径・円筒形状をアフターゲージで自動計測し、その結果を荒ホーニングにフィードフォワードする。またボーリング加工へは径の結果をフィードバックし径が一定となるよう自動補正をする。一方、荒ホーニングでは測定結果に基づいて、Fig.4に示すようにNCストローク制御にてストロークパターンを変化させ円筒度を積極的に修正する。

この連携したシステムの結果、ホーニング仕上げ前の取り代が均一化され、円筒度が30%向上するなど安定したボア加工精度を実現した。

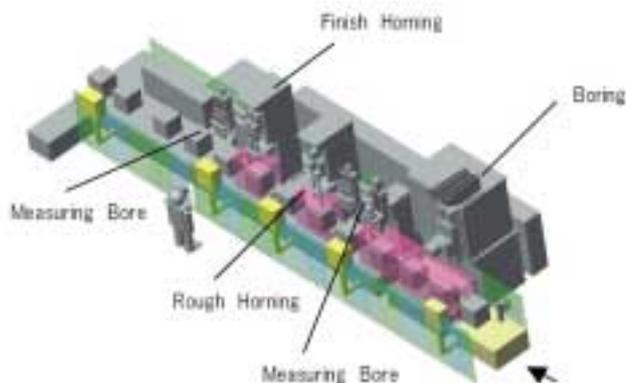


Fig.2 Bore Finisher

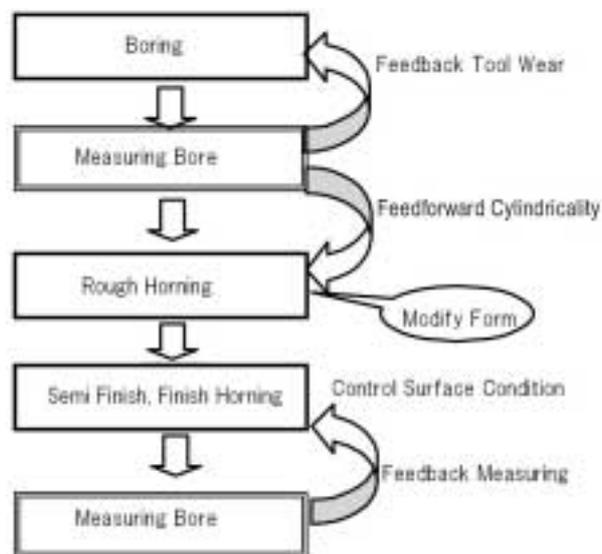


Fig.3 Machining Process of Bore Finisher

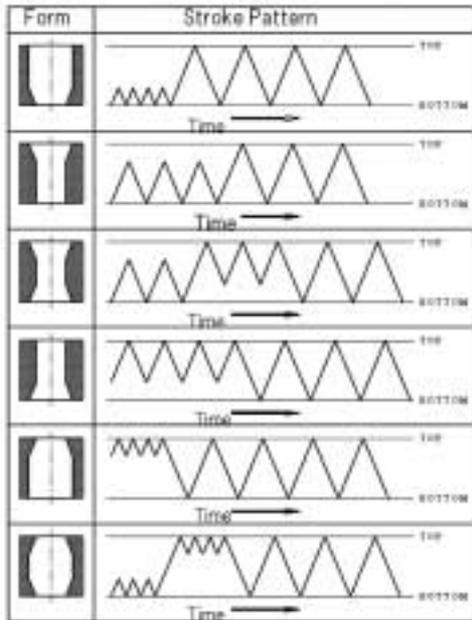


Fig.4 Stroke Pattern

2.4 取り代の微少化～砥石ダブル拡張の開発

仕上げホーニングでは、ボア径・形状精度の確保のみならずボア表面粗さの造り込みが要求される。これはエンジン性能を左右する重要な要素である。

表面性状の管理はFig.5に示すように、ボア粗さの負荷曲線（BAC）があり、このうち油溜まり深さ（Rvk）はオイル消費量と密接に関係がある。このRvkを安定してより精密に造り込むには、仕上げホーニングの取り代を微少化しなければならない。そこで従来の、荒/仕上げホーニングの加工から、油溜まり量を安定させる3ステージ加工を採用することとした（Fig.6）

3ステージ加工とするために、仕上げホーニングの刃具へ従来の仕上げ砥石と3ステージ目の砥石を組み入れたFig.7のダブル拡張方式を開発した。その結果、従来の仕上げ砥石の加工中心と3ステージ目の加工中心が一致することで取り代の微少化が可能となり、ボア表面粗さの向上とオイル消費量削減などのエンジン性能向上に寄与している。

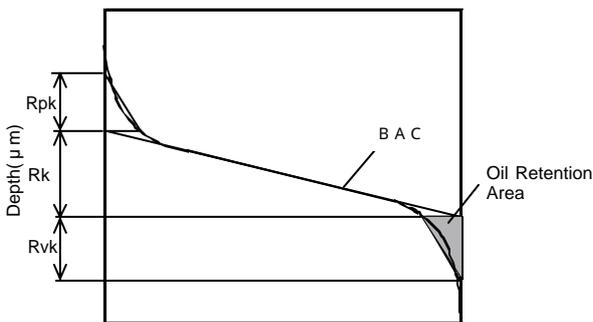


Fig.5 Relationship Between Bearing Area Curve (BAC) and Oil Retention Volume

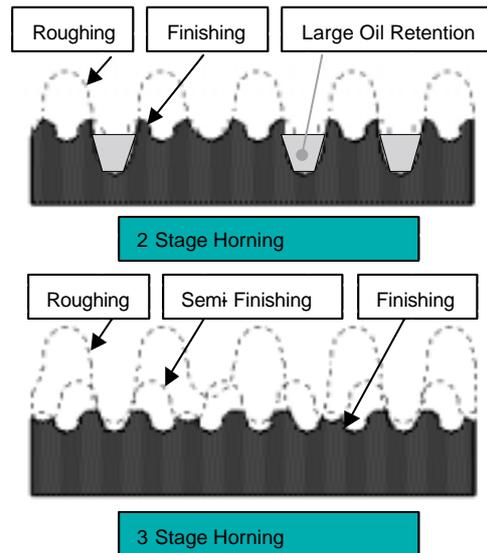


Fig.6 Image of Magnified Machining Surface

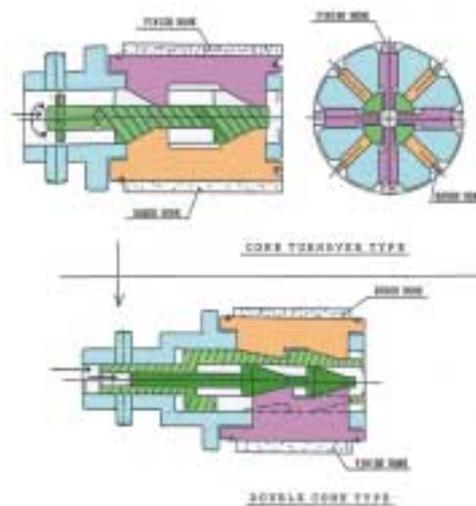


Fig.7 Hone Double Extension

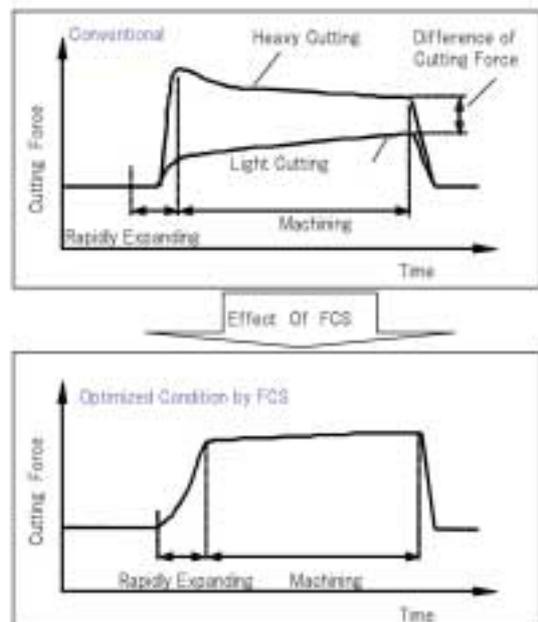


Fig.8 Effect of FCS

2.5 切れ味の一定化～切り込み制御「FCS」の開発

次に、切れ味の一定化であるが、ホーニング加工は一般に砥石拡張ロッド等の切り込み伝達系のたわみにより、砥石がボア内面に切り込む際の加工面圧が不安定になる「かつぎ」と呼ばれる現象が起きる。そこで、理想の加工面圧と実際の切り込み力の差やバラツキをなくし、狙いのボア精度や表面性状を得ることが必要である。

このために、「FCS」(Force Control System)と呼ぶ切り込み制御技術を開発・導入した。Fig.8にその効果、Fig.9にその概要を示す。

FCSは圧電センサーを用いて、切り込み力をリアルタイムで監視し、切り込み速度をコントロールする。それによって切り込み力の変動を抑えながら、目詰まりのない安定した加工が可能となった。その効果は次の2点である。

① 表面性状の安定化

Fig.10にボアの断面拡大図を示す。前述したように油溜まり量を低減すると、必然的にオイル消費量は削減されるものの潤滑機能の低下が懸念され、今度は耐焼き付き性の確保が必要となる。このためボアの表面性状で特に潤滑機能を持つ黒鉛の状態が重要である。一般に切り込み力が大きくなるとボア表面での金属組織が押し潰され、黒鉛にかぶさるなどの「塑性流動」と呼ばれる現象が起きる。そこで、FCSを用いて理想の加工面圧にコントロールすること

で塑性流動を最小限に抑えて潤滑機能を維持しボアの耐焼き付き性を向上した。

② ボア径精度の安定化

Fig.11にFCSを用いた場合と用いない場合のボア径精度のバラツキを示す。FCSによる加工安定化は、仕上げ寸法の高精度化に大きく寄与し、新たに開発した加工中にインプロセスでボア径を測定できる定寸装置との組み合わせで、バラツキを約6割に抑えることができた。

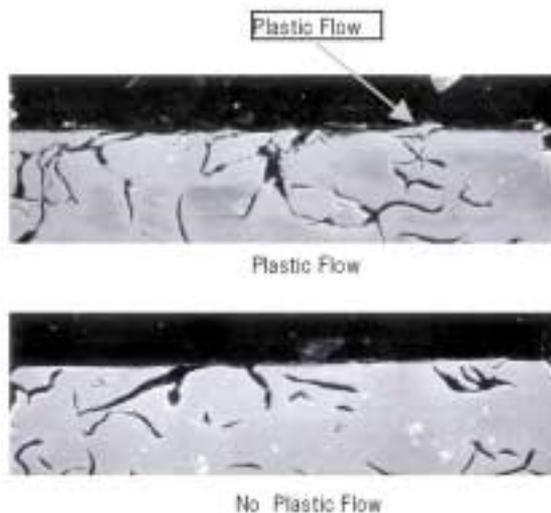


Fig.10 Cross Section of Bore

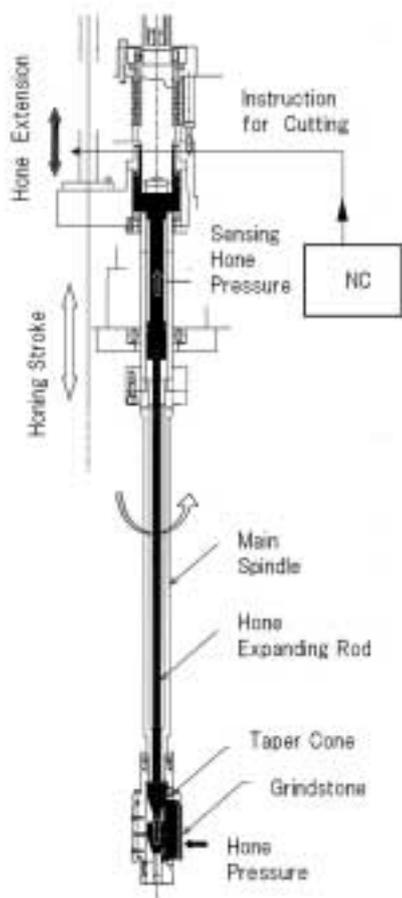


Fig.9 FCS

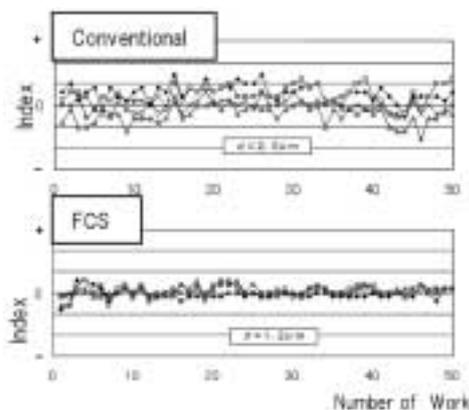


Fig.11 Measured Bore Diameter



Fig.12 Numbering

2.6 全数トレーサビリティシステム

高品位加工を行う上で、より精密な品質の造り込みとともにその品質を確実に保証するシステムも重要である。

同加工ラインはFig.12に示すように、ブロックに直接番号を刻印し、自動計測工程と番号読み取り装置を併用させ、品質データをネットワークを介して収集し、番号と対比した形で、品質データを保存するシステムを導入した。これにより、いつでも履歴データを活用でき、品質情報としてのフィードバックを可能にした。

2.7 ポア高品位加工の成果

技術課題の解決によりポア加工における径、形状精度(円筒度・真円度)、油溜まり深さ(Rvk)、表面性状を飛躍的に向上させることができた。

更に、以下の効果を得ることができた。

- ① ポア径精度向上によるポアランク分け測定・刻印工程の廃止(1ランク化)及び、組み立てラインでのランク別ピストン選択作業と仕掛かり削減を達成。
- ② ポアフィニッシャ開発による工程統合でエネルギーコスト50%を削減。

3. クーラントレス加工への取り組み

従来、機械加工ラインでは、様々な用途で大量の切削液(クーラント)が使われてきた。しかし、環境面においては、クーラントを循環させるために大量の電力を消費していること(Fig.13)、劣化後は廃棄物として処理されること(Fig.14)、クーラントには塩素やリンなどの有害物質が含まれることから、環境への負荷が大きいという問題がある。そのため、これを使わないようにするクーラントレス加工に取り組んだ。

クーラントには、潤滑、冷却、切り屑処理の3つの機能があり、クーラントレス化によって、これらの機能がなくなることにより、品質や稼働に悪影響を与える。そこで、クーラントレス加工を目指す上での課題を、その機能からFig.15のように考え、低コスト・低投資で解決するようにTable 4に示す技術課題に展開した。

これら6つの技術課題に対し、それぞれ対策を立案し、実際のラインの設備、ツーリングに織り込んだ。

3.1 クーラントレス精度保証設備構造

対象とするシリンダブロックはアルミ製である。従って、鉄系の材質で造られた治具との間には熱膨張率の差があり、高い位置精度が要求される工程では雰囲気温度が設定温度より外れると、加工位置精度が悪化する(Fig.16)。従来は温度変化によるワークと治具の伸縮差による精度不良を防ぐために、温度調整したクーラントを使用していた。

今回、このような工程でのクーラントレス化による冷却機能の代替として、ワークの熱変位に追従する治具を開発した。

本取り組みでは、①治具の熱膨張率をワークに合わせる

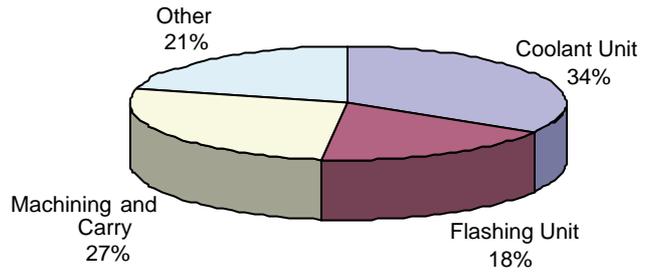


Fig.13 Energy (Power)

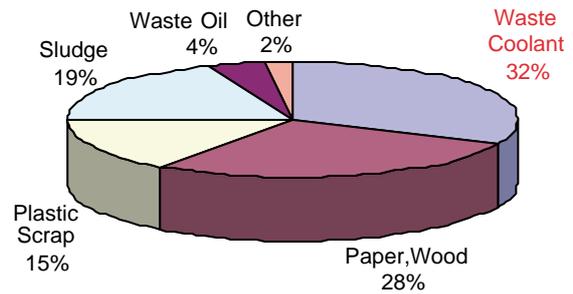


Fig.14 Waste

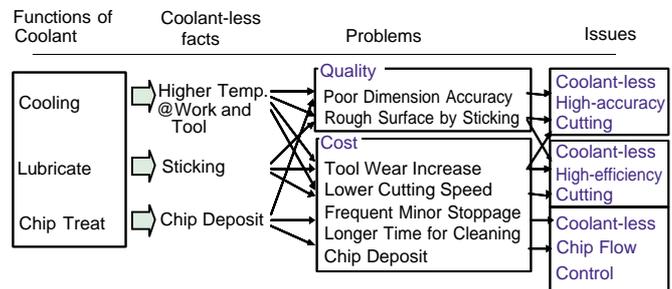


Fig.15 Issues in Coolant-less Machining

Table 4 Technical Issues

High-accuracy Cutting	High-efficiency Cutting	Chip Treatment	Low-cost, Low-investment	Issues in Coolant-less Machining
				Coolant-less Technical Issues
				Facility Structure to Assure Higher Accuracy
				Low-cost/Low Volume Lubrication to Tools
				Optimum Tooling Conditions
				Low-cost Cooling to Tools
				Chip Deposit Prevention
				Low-cost Chip Collection

ための治具のアルミ化, ②治具の熱変位方向をワークに合わせるための「3D熱変位解析」による治具形状決定, ③主軸を治具・ワークの熱変位に追従させるフローティング機構の採用, を行った。

本治具をFig.17に示すクランク, ノック穴仕上げ工程に導入したが, 従来のクーラント温度調節を用いた工程にも増して, 高い寸法精度を確保している。

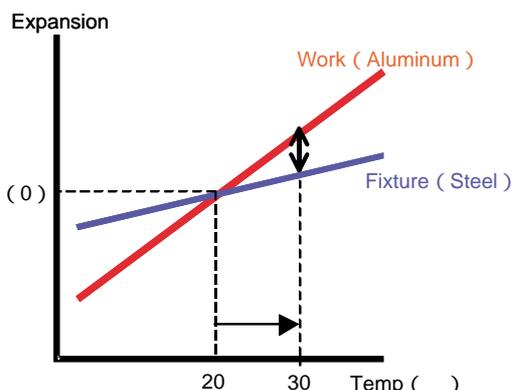


Fig.16 Thermal Expansion Gap Between Work and Fixture



Fig.17 Aluminum Fixture

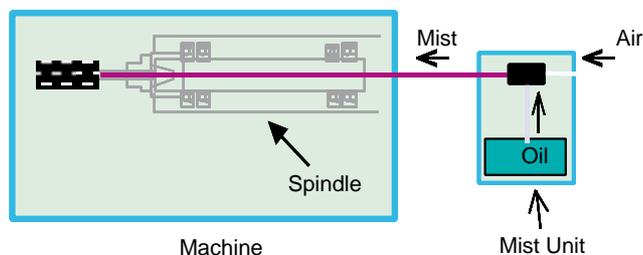


Fig.18 MQL Machining System

3.2 低コスト刃先潤滑技術

クーラントの刃先潤滑機能がなくなることにより, 品質不良や工具寿命の低下が問題となる。そのため, 潤滑機能の代替として, Fig.18に示す微量のオイルをエアにより霧にして刃先に供給するMQL加工 (Minimum Quantity Lubricant) 技術を導入した。

今回, Table 5に示すように, 低コストなMQL加工を導入する上での問題点に対する対策を加工ラインへ導入した。その具体事例として, オイルの再利用について述べる。

Table 5 Issues in Low-cost MQL Machining

Issues	Countermeasures
Liquefaction in Spindle and Pipe	Uniform Pipe Dia in Spindle Design Piping to Large Curvature in Bending Point Design Piping to Center in Spindle
Waste Oil	Oil Recycle
Reduce Oil Cost	Develop Low Cost Oil
Reduce Introduction cost	Trial by Mazda

MQL加工では噴霧されたオイルは切粉やマシンに散逸するが, 回収 再利用することで資源を節約しコストを削減することを目指した。

本システムでは, オイル回収時に潤滑油等が混入することを考慮し 加工機内で洗浄液に混じったオイルを分離機, フィルタで抽出し, これを再利用するようにした。

オイルは, 切削油, 潤滑油として使用できるもの (MFF: Multi Function Fluid) を油脂メーカーと共同で開発した。また, このオイルは生分解性の機能を有しており, 環境へも配慮している。

3.3 ツーリング (刃具・切削条件) 最適化

MQL加工の基礎テストの段階で, 切り屑が工具の溝に付着する溶着により (Fig.19), ドリルが折損する問題があった。溶着が起こると, 刃先に付着した被削材により工具の切れ味が低下し, 切削負荷上昇や変動により工具折損に至ることから, 工具の切れ味を改善することにより溶着が防止できると考え, 品質工学手法で, その最適化に取り組んだ。

品質工学実験では, 工具の切れ味が良い状態であれば加工に要するエネルギーが小さく安定し, その結果, 品質が安定し能率も高くなることが分かった。そこで, 工具の切れ味をエネルギーで捉えるために, 加工に使われる電力量と切削で除去されるワークの重量 (切削重量) の比例性を基本機能として, その安定性を評価した³⁾。

実験の結果, 電力の安定化に, 送りや工具形状が効くことが分かり, これらを最適化することにより電力が安定し, 溶着による工具の折損がなく加工できる条件を見出した。



Fig.19 Welding Deposit

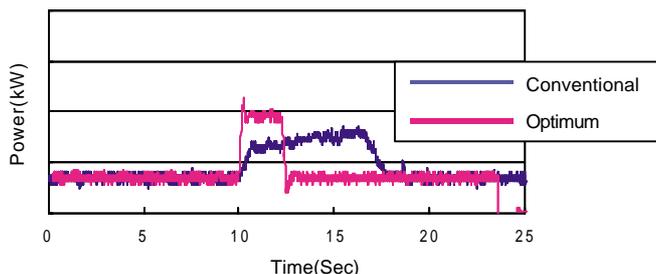


Fig.20 Electric Energy



Fig.21 Developed Fixture

Fig.20に実験での電力波形を示すが、初期条件では溶着により加工開始とともに電力波形が上昇しているが、最適条件では安定に推移しており、加工に要するエネルギー（電力量）も46%減少している。

3.4 刃先冷却技術

アルミの加工では、融点が低いことと熱伝導率が高いことから、もともと、切削中の刃先温度はあまり高くない。その上、安定して速く削れる条件では、切削の際に生じる熱はほとんど切り屑によって持ち去られてしまう。よって、刃先冷却については特別な代替策を講ずる必要はないと判断した。

3.5 切り屑堆積防止技術

今回採用した治具では、Fig.21のように、①フラット部を徹底排除、②治具の傾斜は60度以上とすること、③治具直下に大きな開口部を配置し切り屑が直接トラフに落ちや

すくする構造にした。これらにより、設備内に残る切り屑量は従来の1/30となった。

また、上記の対策により治具剛性の低下が生じ加工精度が悪化することが懸念されたが、3Dデータに基づいた治具設計 剛性解析を行い、加工精度に影響のない治具形状を実現した。

3.6 切り屑の回収

設備内に残った切り屑の除去及び切り屑の回収については、低コスト・低投資を目指すために、Fig.22に示すように、従来の手法である液体による切粉回収方法と、代替手段である、吸引、エアブローについて、切粉回収にかかるエネルギーコストを比較したが、液体による切粉回収が最も効率的であると判断した。そのため、切り屑の回収は液体で行うこととし、使用する液体には機械の防錆性を考慮して、切削液に比べ低コストである洗浄液を採用した。

また、ポンプ動力最小化のために、間欠式フラッシング（ICFシステム：Intermittent Chip Flush away System）を導入した。

従来は最大吐出量に合わせたポンプ動力が必要であったが、今回のシステムでは加工はMQLで行うため、常にクーラントを流す必要がない。そのため、Fig.23のようにマシン上部に受水槽を設け、そこに少量ずつ供給し、必要時に一気に放出することで吐出側での切粉処理能力を満足する流量を確保した。これにより、タンク、配管を小型化でき、ポンプ動力は従来の1/4となった。

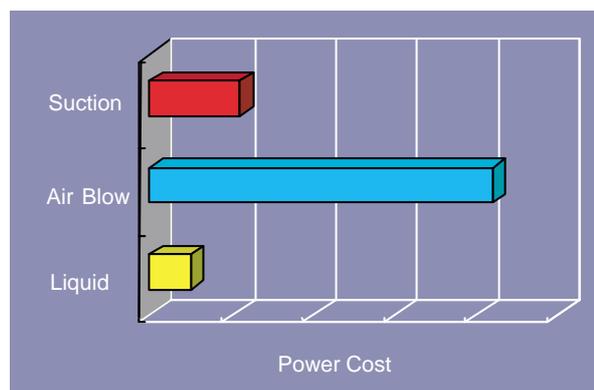


Fig.22 Energy for Chip Control per NC Machine

3.7 成果

MQL加工，オイルのリサイクルシステム，切り屑堆積対策治具，洗浄液を使ったICFシステムを組み合わせた当社独自のセミドライ加工システムを構築し，同加工ラインのほぼ全工程（シリンダボアの仕上げボーリングおよび研磨（ホーニング）工程は除く）に導入し，切削液の使用量を従来工法から84%削減した。

その結果，

- ・省エネルギー：切削液の循環ポンプ動力を75%削減。
 - ・廃棄物削減：切削液廃棄時の焼却処理量を80%削減。
- により，環境への負荷を大幅に軽減することができた。

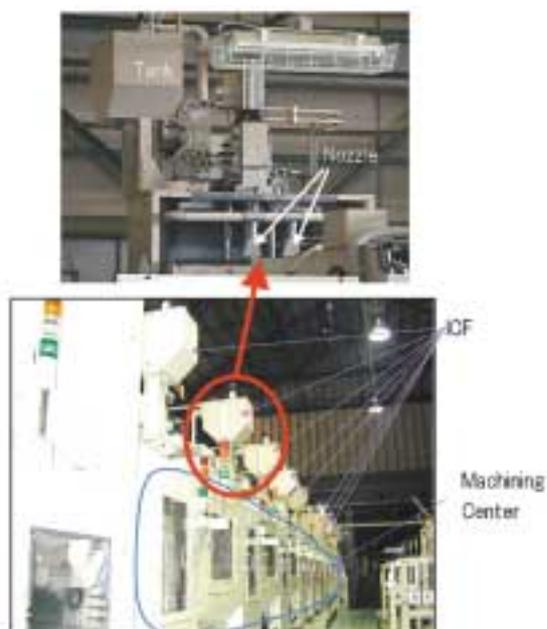


Fig.23 ICF System

著者



鳥居 元



山下 貢丸



平井 泰史



山田 義弘

4 . おわりに

今後とも高品位加工，環境にやさしい生産ラインの構築のため，努力を続ける決意である。

最後に，お取引先様をはじめ関係部門各位に対し，ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- (1) 藤村 他：シリンダーブロックボアの高品位加工，「機械と工具」(工業調査会)，Vol.46，10，p.20-24 (2002)
- (2) 宮中 他：New I4エンジン工場の紹介，マツダ技報，No.20，p.86-96 (2002)
- (3) 中西 他：ドライ加工技術の実用化，品質工学，Vol.10，p.53-59 (2002)