

論文・解説

27

# セミドライ高能率加工技術の開発

## Development of Efficient Near-dry Machining

平井 泰史\*<sup>1</sup> 河崎 日出夫\*<sup>2</sup>  
Yasushi Hirai Hideo Kawasaki

### 要約

マツダの環境保全への積極的な取り組みの中で、機械加工領域においては、高品質化・低コスト化と両立できる技術として、廃棄物、エネルギー消費、作業環境などの環境負荷の低減を狙いにクーラント液の代わりに微量の油で加工するセミドライ切削加工への取り組みを進めている。

本稿はクランクシャフト油穴加工において、既存のセミドライ加工に比べ送り速度が2倍となる加工条件を品質工学により見出し量産ラインに適用した事例を報告する。

### Summary

We are forwarding “near-dry machining,” using particle of lubricant instead of coolant for the purpose of improving quality, reducing cost, and the environmental protection by reducing industrial wastes and energy and improving working environments. In the oil-hole-drilling operation for crankshaft, we found a machining condition to double the feeding speed according to Quality Engineering, and incorporated the approach into our the mass-production.

### 1. はじめに

社会の環境問題への関心の高まりとともに製造分野においても高品質化・低コスト化といった従来の要求に加えて、環境への対応技術の開発が重要となってきている。

環境問題への対応には、1) 有害物質の使用廃止、2) 廃棄物の削減、3) エネルギーの消費抑制からのアプローチがあり、機械加工領域においては、品質確保や刃具寿命向上を目的としたクーラント液の使用削減が上記の点から対応すべき大きな課題である。

クーラント液使用による環境負荷を低減する対応技術の1つとしてセミドライ加工が注目されている。これはクーラント液を大量にかける代わりに、オイルをミスト化して微量を切削点へ供給する方法である (Fig.1)。マツダにおいても高品質化・低コスト化と両立できる技術として Table 1に示すようにセミドライ加工の導入を進めている。なかでも鋼材の深穴加工であるクランクシャフトの油穴加工においては、クーラント液に比べ加工能率が大幅に改善できることも報告されており<sup>1)</sup>設備投資削減の側面からも

有効な技術といえる。

本稿ではこうしたクランクシャフトの油穴加工において、セミドライ加工での加工能率の上限を見究めるべく品質工学を用いたテストを行い、量産ラインに適用した活動事例について紹介する。

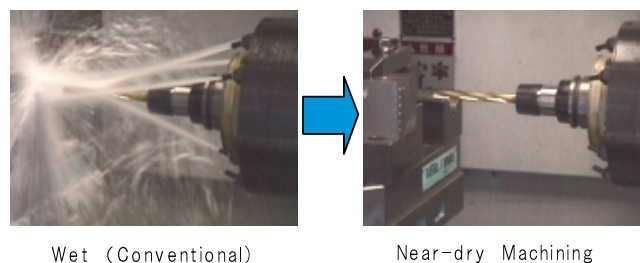


Fig.1 Wet and Near-dry Machining

\*1, 2 パワートレイン技術部  
Powertrain Production Engineering Dept.

Table 1 Application of Near-dry Machining

○: Applied   ×: not Applied   —: no Process

Parts	Materials	Process					
		Drilling	Thread Cutting	Reaming	Boring	Spot Facing	Turning
Cylinder Head	Aluminum	○	○	○	×	○	—
Cylinder Block	Aluminum	○	○	○	○	○	—
Crankshaft	Steel	○	○	○	○	○	×
Connecting Rod	Steel	○	○	○	○	○	—
Knucle	Cast Iron	○	○	○	○	○	—

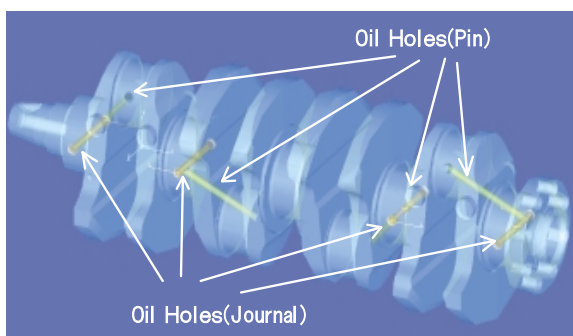


Fig.2 Crankshaft Oil Feed Holes

## 2. クランクシャフト油穴加工

クランクシャフトの油穴加工は加工長と穴径の比(L/D)が15以上となる深穴加工であり (Fig.2), 切屑詰まり・ドリルの曲がり・切削熱の滞留などによってドリルの折損が生じやすい工程である。そのため、従来のクーラント液を使用したラインでは、特殊な刃先形状と低送りにより微細化した切屑を高圧で大量のクーラントを噴射することで排出させるガンドリル加工か、加工途中でドリルを加工穴から抜いて切屑を排出するステップ加工で行っている。いずれの場合も加工能率が低くクランクシャフト加工のネック工程の1つである。

このネック工程を解決するための技術として、油穴加工に対するセミドライ加工の導入してきた。その結果、従来比1.5倍の加工能率が実現できた。しかし、この改善効果は専ら切削速度の高速化によるものであり、加工能率を決めるもう一方の主因子である回転あたりの送り量 (以下、送り (mm/rev)) については大きな改善はしていない。

## 3. 高送り化に向けた取り組み

ドリル加工において加工能率を上げるには、送り軸の速度 (以下、送り速度 (mm/min)) を早くすれば良い。送り速度は穴径・切削速度・送りの基本条件で定まるが、送りを上げるだけの単純な高能率化では、時間あたりの切屑排出量の増大による切屑詰まりや、切削負荷の増大による加工穴の曲がりといった不具合が発生する。

加工穴の曲がりや切屑詰まりに影響を与える因子とし

て、ドリル形状、前加工であるパイロット穴を含んだ加工条件、セミドライ条件があり、これらの最適化により加工能率を向上できると考えた。ドリル形状に関しては次章に述べる最適ドリルの選定を行った。次に、選定したドリルの最適条件を統計的手法に基づき策定した。手法には量産での使用環境に応じてロバスト性を確保できうる品質工学を用いた。一連のテストは社内の実験用加工機にミスト装置を取り付け実施した。

## 4. 高送り最適ドリルの選定

高送り可能なドリルに必要な要件には、切屑形状の微細化、切屑排出性の向上、切削抵抗低減が考えられる。これらに影響を与える因子はドリル先端の形状、溝形状、材質など非常に多く、また相互に影響を与え合う因子間の相互作用も予想される。今回の活動ではこうした因子ひとつひとつを取り上げて、新たなドリル形状を設計するのではなく、既成ドリルに対して高送り化へのポテンシャルを比較すべく実加工テストを行いその結果に基づき選定した。

テスト対象とするドリルはオイルホール付き超硬ロングドリルを製作している主要メーカーから先に述べた必要条件を満たすと思われるドリルを6種選定した。次に、テスト条件は制御可能な切削条件、すなわち切削速度と送りを9条件で変化させてその他の条件は固定とした。また、評価項目は切屑形状観察および主軸負荷電力波形とした。

結果として、9条件中の高送り領域の条件まで加工が可能であったドリルは既存ラインで使用しているドリルを含めてわずか2種であった。

Fig.3に既存ドリルと新規ドリルの切屑形状を示す。既存ドリルでは連なった切屑が見られ、切屑排出性が悪化し切屑詰まりによる折損が発生しやすいと考えられる。一方、新規ドリルでは切屑は均一な扇状であり、高送り条件においても切屑詰まりがなく安定した加工が期待できる。

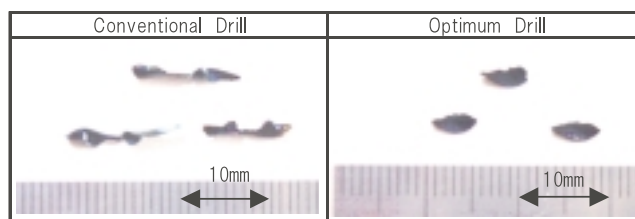


Fig.3 Chips

次にFig.4に主軸負荷電力波形を示す。この図は9条件をマトリクス形式で示したもので、右上ほど高能率な条件となる。既存ドリルでは図中の黄色で示す範囲では加工後半で主軸負荷電力が上昇する波形の乱れが生じ、図中のピンク色で示す条件では折損により加工できなかった。この波形の上昇・乱れは切屑詰まりが原因と考えられる。一方、

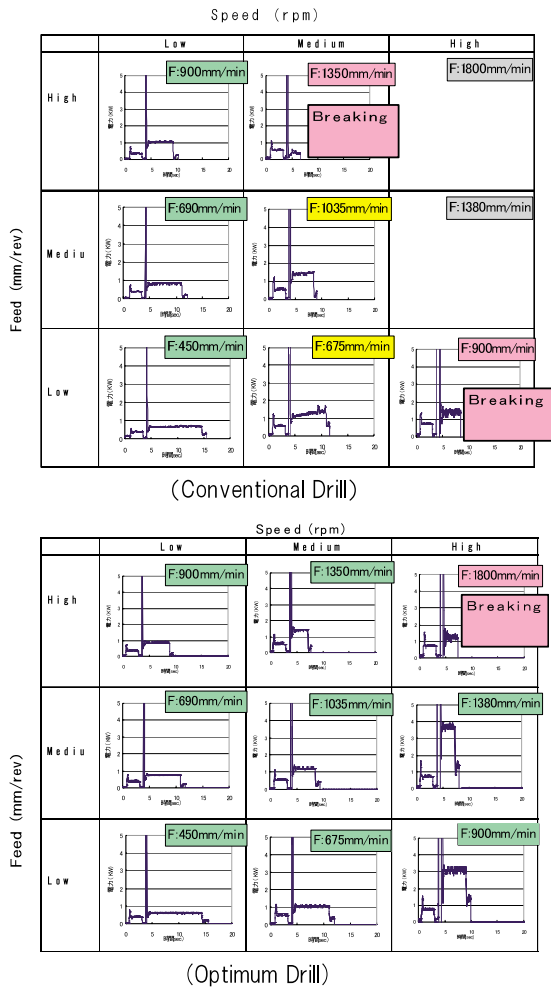


Fig.4 Spindle Power

新規ドリルでは最も高能率である右上の条件で折損した他は全加工条件で主軸負荷電力は安定している。

新規ドリルの特徴をTable 2に示す。各項目の対策には目新しいコンセプトは見られない。しかしながら、本章の冒頭にも述べた通りこうした特徴およびこれら以外の多くの因子の組合せによって高送りに最適なドリル形状が得られると考えられる。今回の評価では現状最適なドリルを選定したと考える。

なお、最適なドリル形状の設計に関しては刃具メーカーを取り込んだ活動が必要であり解決には時間・開発コストを要する。今後の課題として取り組むにはこうした費用対効果の考慮も不可欠である。

Table 2 Characteristic of Optimum Drill

Aim		Mean
Improve Chip Ejection	Large Flute section	Big Heel Chamfer
	Large Flute section	Back Taper in Flute
	Improve Flute Roughness	Lapping after Coating
	Prevent Chip Packing	Deep Web Thinning
Break Chip into Small Parts	Make Chip Round	Small Radius of Flute
Prevent Corner Edge Chipping	Optimize Corner Edge	Negative Rake

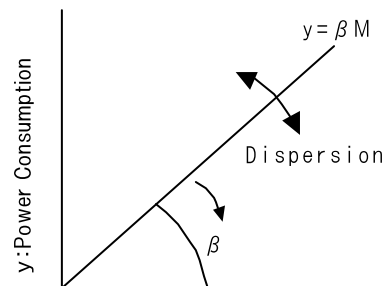
### 5. 品質工学手法による加工条件の最適化

#### 5.1 深穴加工についての機能性

ドリル加工において、加工中に切屑詰まりや穴の曲がりがない状態であれば、振動や異音の発生はなく、加工に要する電力量は小さく安定していると考えられる。そのため、加工で除去される重量（以下、切削重量）に対し電力量が少なく安定する条件では、切屑詰まり等が起こらず、品質も安定であり加工能率が向上できると考え、基本機能を切削重量と累積電力 ( $y = M$ ) とし、Fig.5の傾き（感度： $\beta$ ）とばらつき（S/N比）を評価した。この基本機能では、S/N比が大きく、感度が小さい条件が最適となる。

#### 5.2 テスト方法

誤差因子は量産ラインでは複数の穴を連続で加工することから、連続加工で全ての加工穴の主軸負荷電力が小さく安定するように、連続加工で前半/後半に分け誤差因子とした。今回のテストではFig.6に示すように6穴連続加工し、前半3穴、後半3穴に分けた。主軸負荷電力量は空転電力量を差し引き1穴から3穴までを累積し、基本機能（切削重量と主軸負荷電力量）を評価した。



M: Removed Weight

Fig.5 Generic Function

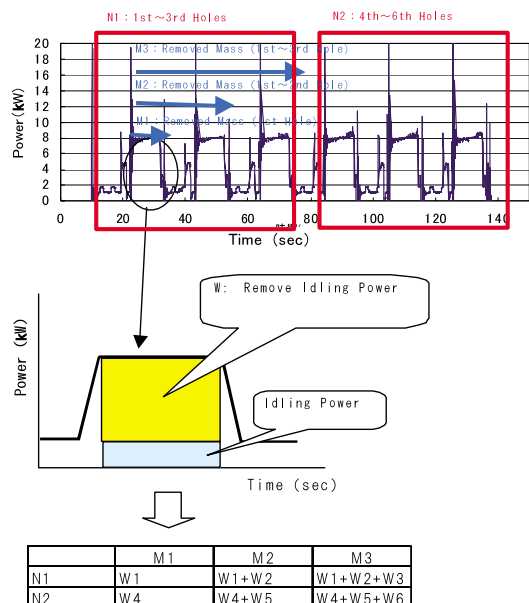


Fig.6 Noise and Signal Factors

Table 3 Control Factors and Level

Factors	1	2	3
A.No Factor	-	-	/
B.Self Pilot Depth	No Guide	Low	High
C.Pilot Hole Depth	Low	Medium	High
D.Pilot Hole Diameter	Low	Medium	High
E.Mist Pressure Gap	Low	Medium	High
F.External Mist	No Mist	Oil	Oil·Water
G.Speed(rpm)	Low	Medium	High
H.Feed(mm/rev)	Low	Medium	High

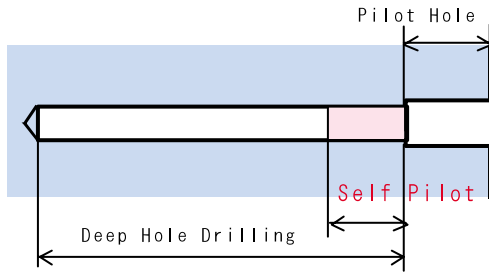


Fig.7 Self Pilot

5.3 制御因子

制御因子と水準をTable 3に示す。制御因子は7種類を選定し、L18直交表に割り付けた。B：セルフガイドはFig.7に示すように本加工での食い付きでの安定性を得るために入り口部分だけ回転数と送りを低く設定する部分であるが、今回はその深さを因子の水準として設定した。F：外部ミストは工具の側面の潤滑とドリルの冷却を狙いに因子の水準を、なし、オイルミスト（潤滑効果を狙う）、オイルミストと水ミストの併用（オイルの潤滑効果と水の冷却効果を狙う）として、因子に取り入れた。

5.4 テスト結果

Fig.8, Fig.9に本テストのS/N比と感度の要因効果を示す。要因効果図より、S/N比については、E：ミスト装置差圧、F：外部ミストの効果が大きく、オイルミストおよび水ミストにより、潤滑、冷却効果が得られ主軸負荷電力の変動が抑えられると考えられる。感度についてはG：回転数、H：送りの効果が大きく、低速・高送りの条件が主軸負荷電力の上昇を抑えられると考えられる。以上の結果からS/N比の大きい水準、感度の小さい条件を組み合わせると、Table 4に示す最適条件を選定した。

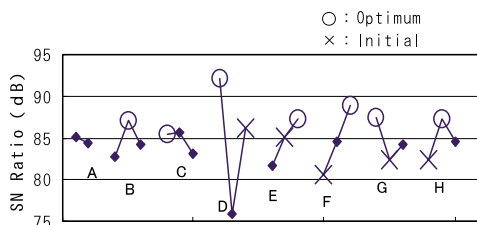


Fig.8 Factorial Effect Diagram (S/N Ratio)

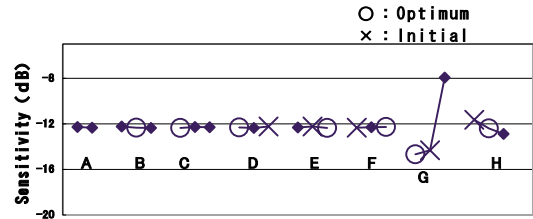


Fig.9 Factorial Effect Diagram (Sensitivity)

Table 4 Optimum and Initial Condition

	B	C	D	E	F	G	H
Optimum	Medium	Low	Low	High	Oil·Water	Low	Medium
Initial	Medium	Low	High	Medium	No Mist	Medium	Low

Table 5 Confirmation Experiment

	SN Ratio (dB)		Sensitivity (dB)	
	Estimation	Verification	Estimation	Verification
Optimum	107.34	98.68	-14.90	-14.90
Initial	80.96	95.45	-13.72	-13.54
Acquisition	26.38	3.23	-1.19	-1.36

5.5 確認実験

次に、推定した最適条件の再現性を検証するために確認実験を行った。Table 5に確認実験結果を示す。感度については再現性が得られたが、S/N比では改善効果は得られたものの推定ほどの効果は得られなかった。この原因については、要因効果図からもS/N比については山谷のある因子が多いため、再現性が悪化したと思われる。

6. 量産ラインでの効果確認

セミドライ加工を量産導入した油穴加工工程において、最適ドリル選定テストと品質工学テストで得られた条件を用いて効果確認をした。変更した因子は同ラインで変更可能であった、工具、回転数、送りで、Table 6に示した条件に変更した。

条件変更による効果として油穴の加工時間をFig.10に示すが、切削中の送りを約2倍にすることにより既存条件に比べ、切削と穴間移動などの位置決めを合わせた加工時間を20%短縮できた。切削長75.4mにおけるドリル切れ刃の状態は異常摩耗やチッピングもなく摩耗量は既存と同程度以下であった。このため、工具交換周期も既存のままとしたが、今後、刃具寿命の延長を追及してゆく。また、加工時間の短縮と主軸の低回転化により、主軸負荷電力量を24%削減することができた (Fig.11)。

Table 6 Mass Production Condition

	Tool	Speed (Index)	Feed (Index)
Conventional	Conventional Drill	1.00	1.00
Optimum	Optimum Drill	0.88	1.92

参考文献

- (1) 井上 勤：小径深穴加工を高能率に行うセミドライ加工システム，ツールエンジニアリング，第45巻，第3号，P46 (2004)

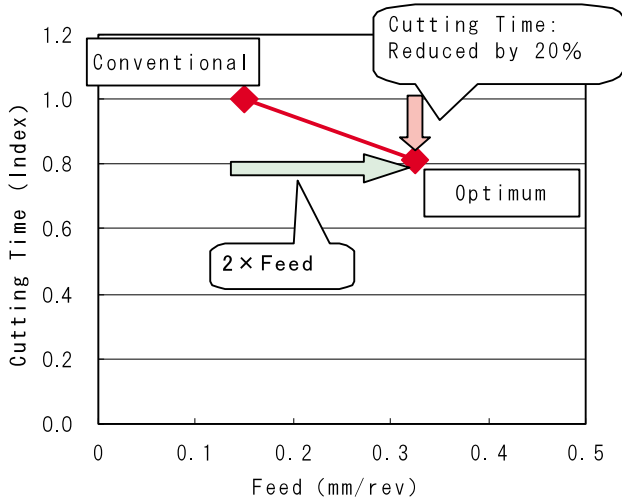


Fig.10 Cutting Time

著者



平井泰史



河崎日出夫

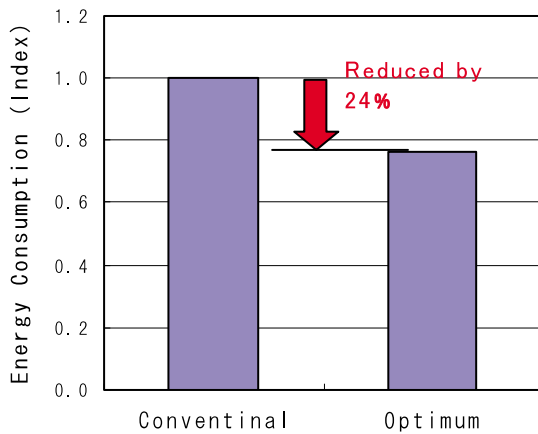


Fig.11 Energy Consumption

7. おわりに

深穴加工の送り速度が2倍となるドリル・切削条件を策定し，量産ラインに展開することで設備投資なしでの増産対応が達成できた。今後は，織り込めなかった因子についても最適化することにより，更に高能率で環境にやさしい加工ラインを構築していく。

最後に，本取り組みにご協力を頂いた関係部門各位に誌面を借りて感謝申し上げます。