

論文・解説

27

高能率フェイスミル加工技術の開発 Development of High Efficiency Face Milling Technology

中山 亨^{*1} 鳥居 元^{*2} 網井 義浩^{*3}
Toru Nakayama Hajime Torii Yoshihiro Amii
平井 泰史^{*4}
Yasushi Hirai

要 約

マツダでは、お客様のニーズ（車種・排気量・グレード等）の変化に即応するためフレキシブルかつロバストな生産システムに革新してきた。各加工法（ドリル・フェイスミルなど）においては多品種を加工できる標準刃具の実現に取り組んでいる。今回、フェイスミル加工において狙いの品質と生産性を両立する刃具諸元と加工条件の最適化をテーマとした。

また、この高能率フェイスミル加工技術の課題解決を進めるプロセスにおいて、品質工学と切削シミュレーションの組み合わせによる切削評価というこれまでにないアプローチを行った。切削現象を解析することでシミュレーションを実用レベルに改善し、シミュレーション上で品質工学実験を行うことで短期間に最適刃具諸元と最適加工条件を導き出した。更に試作回数を最小とし、その刃具での量産評価を行って狙いの品質と生産性を両立したものである。

Summary

In response to variation of customer's needs (vehicle type, displacement, grade), Mazda have innovated flexible and robust production system. In each machining (drill, face-milling), we're developing standard tooling, which can machine various parts.

This report describes on face-milling, aiming to obtain both quality and productivity by optimizing tooling condition and cutting condition.

For the development of high efficiency face milling, we made a new approach by integrating Taguchi method into machining CAE, which can upgrade simulation to practical analysis tool, enabling us to save engineering time and cost greatly. Based on this analysis, we fabricated only one optimum tool which enabled us to achieve both the target quality and productivity in production.

1. はじめに

近年、お客様の多様なニーズにタイムリーに応えるため、生産加工ライン（Fig.1）には、量と種類の変動に対し、フレキシブルかつロバストな生産システムが要求されている。エンジンおよびトランスミッションの機械加工ラインも、上記システムの実現を目指し、加工機械や刃物の標準化を進めている。具体的には、従来の各製品加工面の形状に対応した専用加工機械および専用フェイスミルカットにより「ワンパス」で加工する方法から、標準マシニングセ



Fig.1 Machining Production Line

*1~4 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

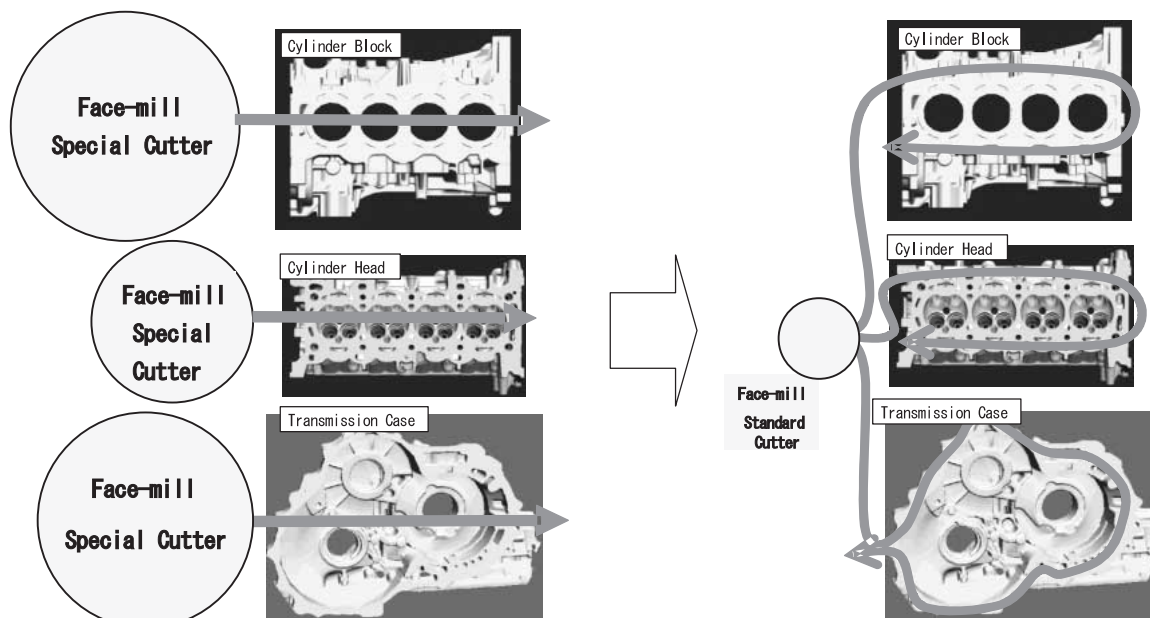


Fig.2 Contouring Process

ンタと標準フェイスミルカッタにより製品の加工必要部位のみを加工するコンタリング加工 (Fig.2) への展開である。コンタリング加工には、品質と生産性において以下の技術課題がある。

- (1) 品質上の課題
 - ① 加工パスの繋ぎ目に生じる段差
 - ② 標準機械にはヒーリング機構⁽¹⁾がないために、後刃が加工面をこすするため仕上げ面粗さ悪化

- (2) 生産性の課題
 - 小径カッタのため加工長が長くなることによる加工時間の増加

以上の課題を解決する上で、従来からの実切削による最適条件設定の取り組みでは、開発期間の長さや検証費用が問題となっていた。そこで今回、短期間に効率良く高能率なフェイスミル加工技術を開発する方法として、品質工学を用いた実験に切削シミュレーションを組み合わせた切削評価プロセス (Fig.3) へと最適化を行った。本稿では、これらの活動から得た成果とプロセスの有効性について述べる。

2. 切削評価プロセスの変革

これまでにも、切削加工分野で品質工学を用いた技術開発を行ってきたが、従来の切削評価プロセスでは多種類のフェイスミルの製作が必要となる。また、フェイスミル諸元についても市販品からの選択となるがゆえに、水準が大きく振れないという制約が生じるため、十分な改善効果が得られないことが予想された。

そこで、今回の取り組みにおいては切削シミュレーショ

ンの「刃具諸元を任意に設定できる」利点を活用することで、「これでいい」と妥協せず「これがいい」と納得するまで行動し、最適化を追求した。このことにより多くの制御因子や水準での実験・評価で良い条件を導き出せると考えた。また、物を作らずに評価することで、開発期間短縮と検証費用削減に大きく貢献できる新しい切削評価プロセスへの変革も狙った。

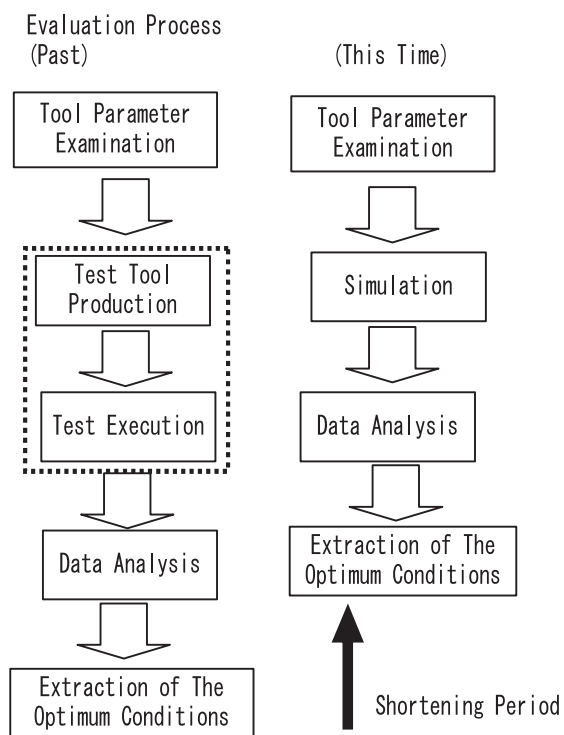


Fig.3 Cutting Evaluation Process

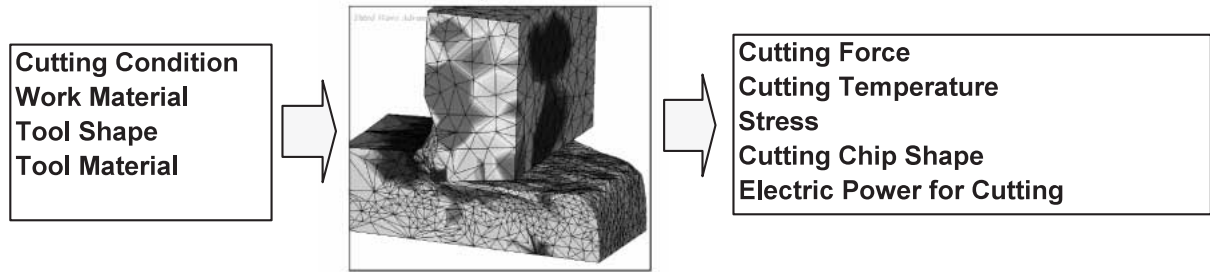
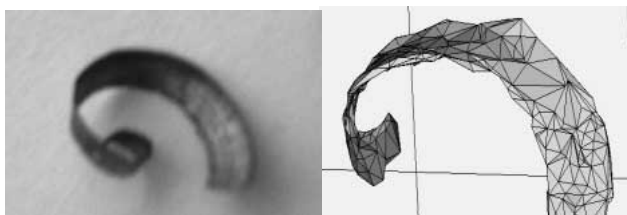


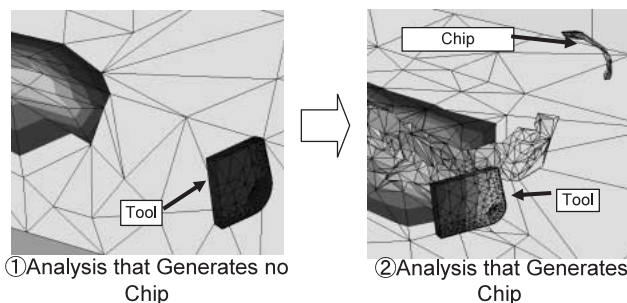
Fig.4 Cutting Simulation



Real Cutting Chip

Simulation Chip

Fig.5 Chip



①Analysis that Generates no Chip

②Analysis that Generates Chip

Fig.6 Analytical Result

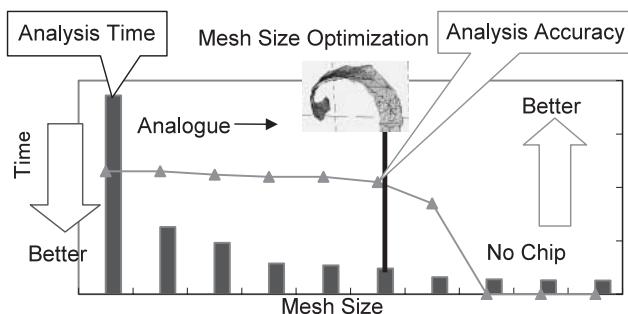


Fig.7 Mesh Size Optimization

3. 切削シミュレーションの課題

今回使用した切削シミュレーション (Fig.4) は、切削速度、送り速度などの切削条件、被削材質の材料定数、工

具形状を入力し、有限要素法に基づいて切削抵抗，切削温度，応力，切削動力を求めるものである。

解析モデルのメッシュ長は、工具寸法に合わせて自動設定されるため、先端部では微細となる。また、メッシュ長が小さくなるほど解析精度は向上するが、解析時間は大幅に長くなる。当初、1解析あたり約48時間かかり、L18直交実験に必要な108回の実験には7ヶ月を要することが予想されたため、解析精度確保と解析時間短縮を両立できるメッシュ長の最適化が切削シミュレーションを効率的に進めるための課題であった。

今回、切削加工の良否判定をする場合の判断基準として、実物の切屑形状 (Fig.5) を選定し、メッシュ長を50段階に変更しながら同一形状条件での解析に取り組んだ。この時、実切削加工とかけ離れた解析結果、つまり切屑が発生しない状態のメッシュ長は採用せず (Fig.6①)、段階的に条件変更を行いながら、Fig.6の②に示すような切屑生成、つまり実物切削の切屑評価項目 (カール径・長さ・幅・厚さ等) と見比べて切屑形状の一致度と解析時間の最適点を導出させた条件を見出し、メッシュ長を決定した (Fig.7)。結果、解析期間を85%短縮できる。

4. 品質工学実験

4.1 基本機能と誤差因子

基本機能は、切削重量に対する切削エネルギーとした (Fig.8)。工具の切れ味を追究することは、単位重量あたりの切削エネルギーを極小化することであり、後刃のこすりによる粗さ悪化を防ぎ、段差発生をなくすだけでなく、加工率も向上できると考えた。また、今回のシミュレーションの切削エネルギーは切削動力が結果として現れるが、切削重量は分からないため、切削重量の正確な把握も課題の一つとなっていた。

誤差因子はアルミ材質の違いとした。すべてのアルミ材に適用させることと、材質の違いにより切削エネルギーが大きく変化するために、切屑形状に大きな差が生じると考えられるので、当社で使用中の2種類の被削材質を設定した。

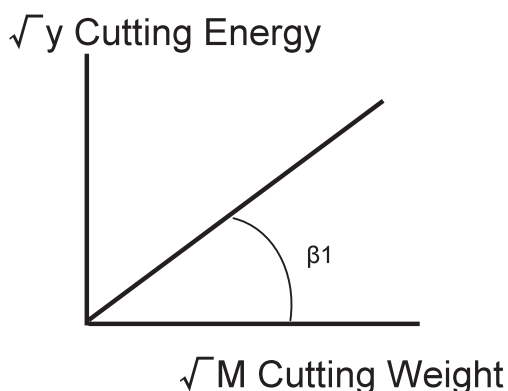


Fig.8 Ideal Function

Table 1 Control Factor and Level

Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A: Coolant	A1	A2	A3
B: Main Axis Rotational Speed	Low	Median	High
C: Feed (mm/Insert)	Low	Median	High
D: Side Blade Corner	Small	Median	Large
E: Axial Rake Angle	Small	Median	Large
F: Radial Rake Angle	Small	Median	Large
G: Relief Angle	Small	Median	Large
H: Corner R	H1	H2	H3

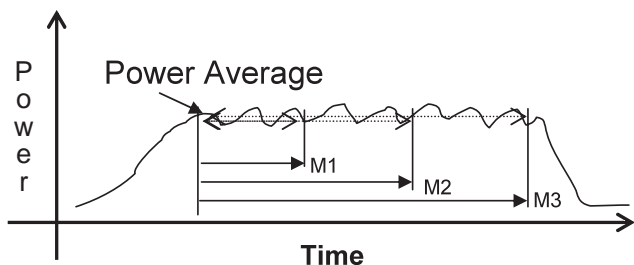


Fig.9 Wave Data

Table 2 Experiment Data

L1	N1			N1		
	y 11	y 12	y 13	M11	M12	M13
	0.0573	0.1135	0.1669	0.0004	0.0008	0.0012
L1	N2			N2		
	y 21	y 22	y 23	M21	M22	M23
	0.0486	0.1032	0.1540	0.0004	0.0008	0.0012

Unit (y:KW) Unit (M:g)

4.2 制御因子と水準

Table 1に示すように制御因子と水準は、切削条件・工具諸元の8因子を取り上げ、L18直交表に割り付けた。なお、要因効果が明確に現れるように、切削条件は設備能力の最大値まで、刃具諸元は製作可能な限界まで水準を大きく振って割り付けた。

4.3 波形データ処理方法

解析期間・回数を短縮するため、切り込み深さを変えて複数の実験を行うのではなく、1度の加工で得られる切削動力波形を分割し、算出した重量を信号因子とした⁽²⁾。

Fig.9に示す波形データのように直線部を3等分割しM1・M2・M3の信号因子とした。切削動力の平均値を求め、その時にかかる時間と積算することで切削エネルギーとした。この方法により解析時間を1/3に短縮した。切削重量は、波形データの時間、回転数、送り速度から切削体積を求め、密度との積にて算出した。次に算出した実験データ (Table 2) を用いて、ばらつきの指標であるSN比と平均値の効果を表す感度を求めた。

4.4 要因効果図と最適条件の選定

Fig.10に実験結果のSN比と感度の要因効果図を示す。図中の○は現行条件であり、要因効果図のSN比優先から最適条件は、図中の丸印で囲ったA₁B₁C₁D₁E₂F₂G₁H₃となる。

しかし、要因B₁C₁を選定すると加工能率が現状より50%低下するため、能率を現行条件以上とできるB₂C₂を採用した。また、要因Aについては、感度優先としA₁を選定した。なお、他の要因については、従来の技術的知見から説明できる結果であった。

以上からTable 3に示すように、効果推定と確認実験のSN比と感度について品質工学の計算式に基づいて現行条件に対する最適条件の利得を算出した。この結果、SN比、感度とも利得があり良好な再現性も得られている。

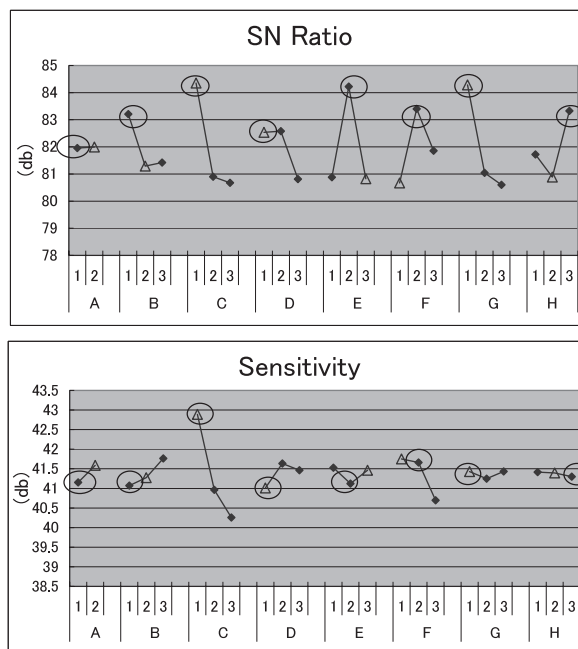


Fig.10 SN Ratio and Sensitivity

Table 3 Prediction and Confirmation (db)

	SN Ratio		Sensitivity	
	Prediction	Confirmation	Prediction	Confirmation
Conventional Condition	82.99	83.77	43.20	41.44
Optimum Condition	88.18	88.54	40.99	39.07
Gain	5.19	4.77	-2.20	-2.37

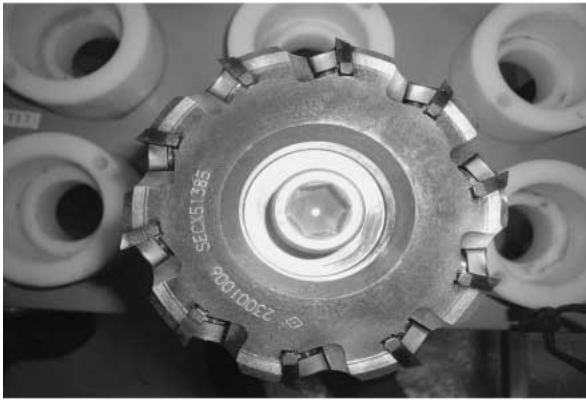


Fig.11 Fabricated Face-mill Cutter with Optimum Specification

を確認した。そのときの切削負荷トルク状態を表したのが Fig.13である。最適条件（下）は、現行条件（上）に比べ送り速度を上げているが切削負荷トルクは下がっている。このことは、狙いの基本機能である切削エネルギーを極小化しており「すばっと切れて少ないエネルギーで加工されている」といえる。この最適条件により大幅な加工時間短縮となっている。

5.2 効果確認

以下に今回の活動の効果を示す。

- (1) 段差，粗さ（品質特性）は，現行条件に比べ，約10%向上を達成した。更に加工能率を181%向上できた（Fig.14）
- (2) 開発期間は，43%短縮できた（Fig.15）。これは，メッシュ長を最適化したことと切削シミュレーションから求める動力波形を分割する処理ソフトを自社開発したことによる。更にソフトのカスタマイズを行うことにより開発期間の更なる大幅な短縮を見込んでいる。

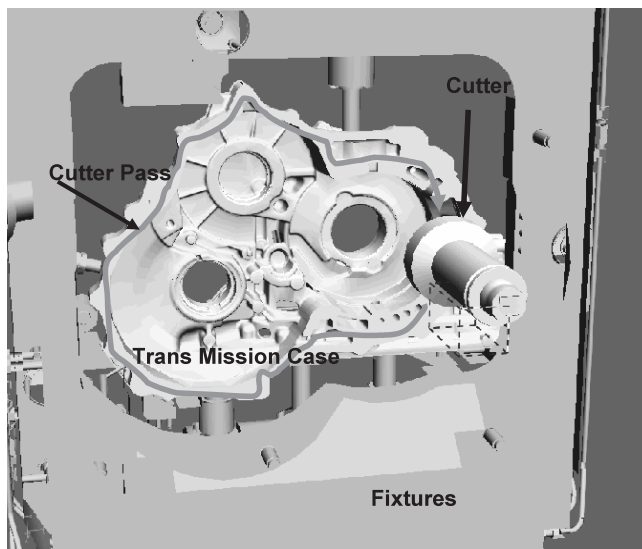


Fig.12 Cutting Trans Mission Case

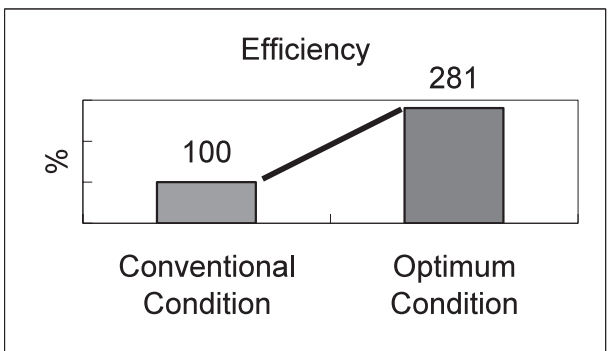
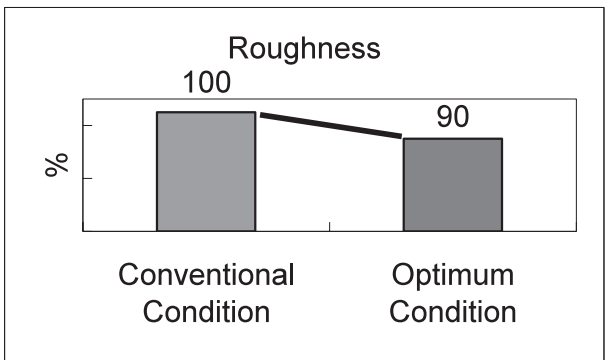
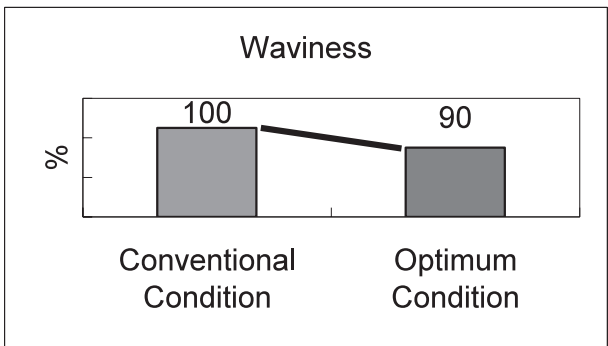


Fig.14 Effect of Waviness, Roughness and Efficiency

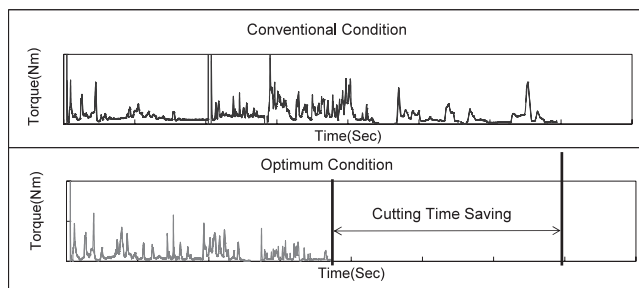


Fig.13 Cutting Torque

5 . 最適条件検証

5.1 量産検証

品質工学実験で得られた最適諸元の刃具（フェイスミルカッタ）を1個のみ製作した（Fig.11）。このフェイスミルカッタで実部品トランスミッションケースのコンバータハウジング取り付け面等をFig.12のように加工した。

最適条件は，現行条件の最大6倍の送り速度（F3,200 ~ F16,000mm/min F19,200mm/min）で加工し品質・能率

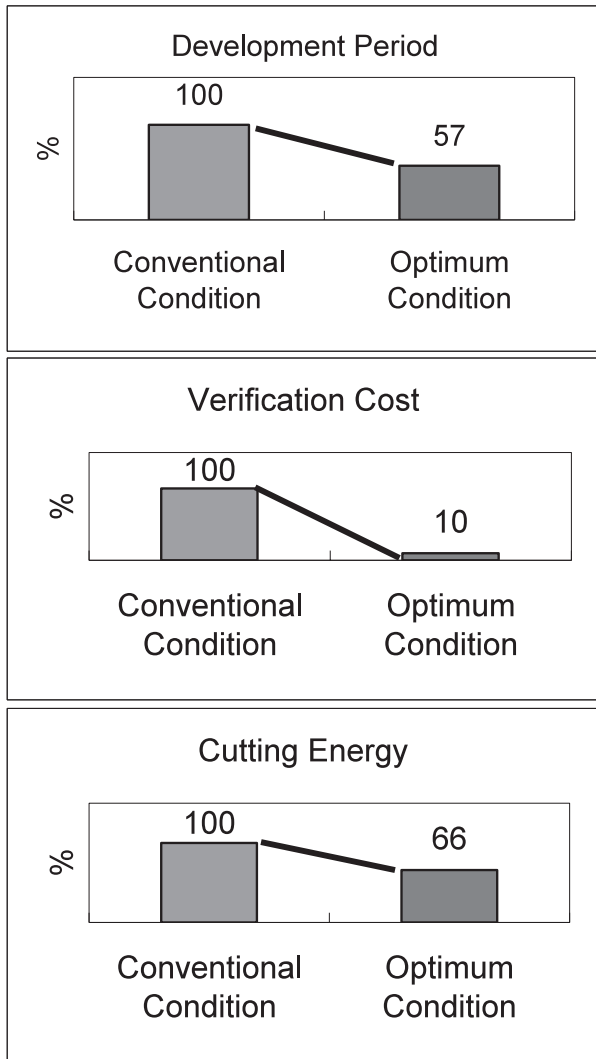


Fig.15 Effect of Development Period, Verification Cost and Cutting Energy

今後この切削評価プロセスを更にスパイラルアップさせ、他の切削工法への展開を図っていく。現在、更なる品質（段差，粗さ）の向上を目指し、今回使用した以外のデータ域，つまり不安定域まで踏み込み，評価範囲を拡大して解析評価を進めている。

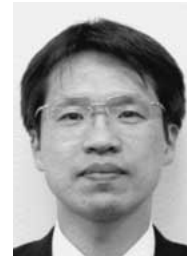
参考文献

- (1) 中村健三：フライス加工ハンドブック，切削油技術研究会，p.89（1988）
- (2) 神蔵ほか：セミドライによる高速深穴加工条件の最適化，第11回品質工学研究発表大会論文集，p.308-311（2003）

著者



中山 亨



鳥居 元



網井義浩



平井泰史

- (3) 検証費用は，90%削減である。今回の検証用に製作したフェイスミルカッタは1個のみである（Fig.15）。
- (4) 切削エネルギーは，34%の低減を実現した（Fig.15）。
- (5) 無形効果としてシミュレーションでの切削評価プロセスの有効性を実証できた。

6. まとめ

今回の取り組みでの成果は，

- ① 狙いの品質と生産性をともに向上させるフレキシブルなフェイスミル加工の最適条件を求めることができ，目標の効果を刈り取れたこと。
- ② 品質工学と切削シミュレーションを組み合わせた切削評価プロセスを確立でき，その有効性を実証できたこと。
- ③ 物を作らずに一回で良い条件を決めるプロセスが確立でき，「これがいいと納得できる」仕事のやり方への革新ができたことである。