

論文・解説

29

## エネルギー評価によるスプライン転造システムの最適化 Optimization of Spline Coldrolling System on the Basis of Energy Evaluation

田中雄幸<sup>\*1</sup> 森弘真司<sup>\*2</sup> 河野弘和<sup>\*3</sup>  
Takeyuki Tanaka Masashi Morihiro Hirokazu Kouno

### 要約

オートマチックトランスミッション(AT)内にある薄肉円筒形状の部品は、塑性加工(プレス成形等)を製造工法としている。その中でも、クラッチドラムのスプラインの成形には、高い寸法精度が求められ、当社ではスプライン転造工法を採用している。今回、スプライン転造における理想の姿を、どんな製品形状でも精度良く、かつ高効率に転造できるシステムと定義し、その最適化に品質工学を適用し、『エネルギー評価によるパラメータ設計』という塑性加工領域としては斬新な取り組みを行った。その結果として、品質を従来以上に向上させ、かつ加工送り速度を従来の5倍まで飛躍的に向上させる革新的な転造方法を確立できたとともに、開発期間を大幅に短縮できた。本稿ではその成果を報告する。

### Summary

Thin cylindrical parts for automatic transmission(AT) are manufactured with using plastic forming such as stamping. Especially, for the spline shape of clutch drum, we adopt of spline coldrolling for high dimensional accuracy. So this time, we defined the ideal spline coldrolling, in which could shape all products shape are formed with high accuracy and efficiency. For optimizing the process, we used Quality Engineering to challenge "parameter design on the basis of energy evaluation" for the first time in plastic forming fields. At last, we improved quality more than current one, and processing efficiency up to 5 times compared with current one. We also established the method of spline coldrolling that can reduce development period revolutionary. This paper introduces our development.

### 1. はじめに

自動車のオートマチックトランスミッション内部には、動力を伝達させるための部品が多く組み込まれている。その中でも変速に関わる重要な機能を有しているクラッチドラム(Fig.1右)に代表される部品は、高い生産性と高い寸法精度要求から、塑性加工を製造工法として採用している。クラッチドラムの成形工程は、まずProcess1にて、平板を円筒形状に成形する(Fig.1左)。その後、Process2で歯形(スプライン)成形後(Fig.1中央)、Process3にて、軸方向に延びた不要な部分の切断、歯部への油穴及びスナッピング溝の成形により完成する(Fig.1右)。クラッチ



Fig.1 Clutch Drum Forming Process

ドラムの中でもスプライン部は、動力を伝える重要な役割ゆえ、高い精度を要する。このProcess2の歯形成形を行う工法は回転塑性加工の一種であり、マツダではこれを『スプライン転造』と呼んでおり本工法を採用している。本稿で取り上げたスプライン転造は回転塑性加工の逐次成形工

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

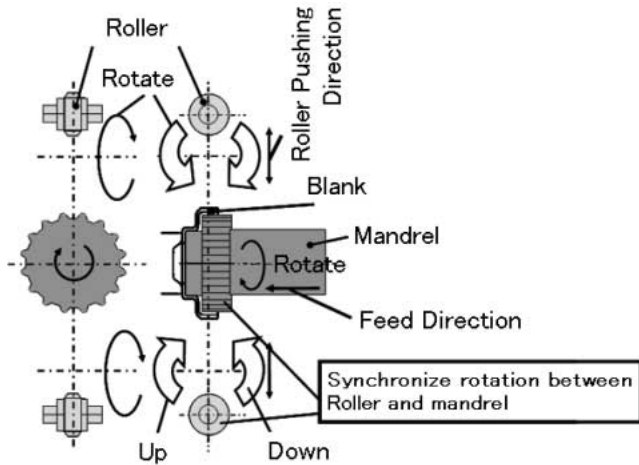


Fig.2 Forming Summary of Spline Coldrolling

法であり、加工概要をFig.2に示し、以下に説明する。(1) 歯形形状を有するマンドレルにワーク（ブランク材）をはめ込む。(2)次に、転造ローラとマンドレルの回転を同期させながらワーク外側から転造ローラでワークをたたいて押込むことにより歯形形状を形成する。この時、ローラを回転運動させて、転造・逃げの運動を繰り返すとともに、マンドレルを回転させながら送り方向に移動させることによって全ての歯型を形成していく。この工法は①転造一回ごとの加工負荷が小さく材料と工具の摩擦接触が発生しないため、ボンデ処理等の表面処理が不要、②高硬度の材料も比較的容易に成形可能、③ツール費用が安価、④プレス成形に対してサイクルタイムが長い、という特徴がある。

2. 取り組み内容

従来、スプライン転造においては加工能率と成形精度がトレードオフの関係にあるため、加工能率を上げるために送り速度を速くすると、ワークがマンドレルに添わないだ

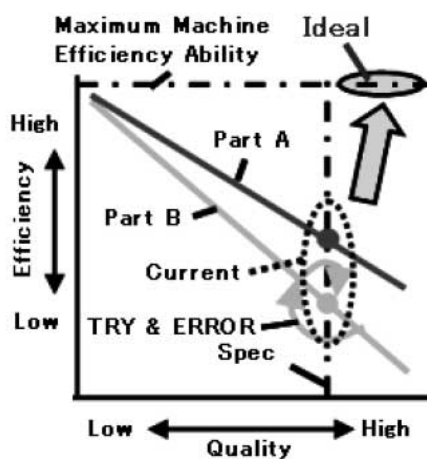


Fig.3 State of Ideal and Current

けでなくバリ発生などの品質問題が発生していた。そのためマツダではこれまで二十数年来、要求される品質とサイクルタイムを満足させるために、部品ごとに現物を使ったテストで最適条件を求めてきた。今回の取り組みの狙いは、Fig.3に示すように、加工能率と成形精度の関係をブレークスルーすることである。この課題を解決するための手法として品質工学を適用した。また、スプライン転造における理想の姿を、どんな製品形状でも精度よく、かつ高効率に転造できるシステムと定義し、その最適化に塑性加工では新しい『エネルギー評価によるパラメータ設計』に取り組んだ。

3. 基本機能の設定

品質工学において、塑性加工領域はプレスに代表される型具と製品形状の一致度で評価する『転写性での評価』が一般的であり、本研究においても当初、マンドレルの寸法とワークの寸法が一致することを理想の姿と定義し転写性での評価を試みた。しかし一定の成果は得られたものの、実験結果 (Fig.4) は理想の姿からは程遠いばかりでなく、外歯に発生するバリ (Fig.5) を評価できておらず基本機能としては不十分なものであった。そこで、本研究を進めるにあたり、スプライン転造の理想の姿を今一度考え直した。スプライン転造の工法は、単に金型内に素材を転写するのではなく、狙いの形状を得るためにツールで素材をたたいて、不要部分を軸方向に延ばす成形であり、機械加工

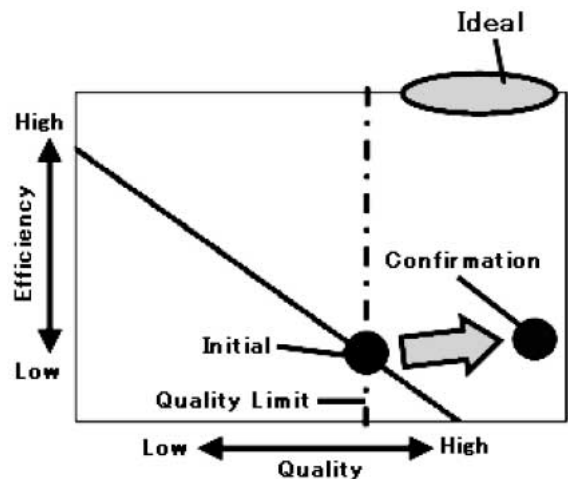


Fig.4 Result on the Basis of Transcript Evaluation

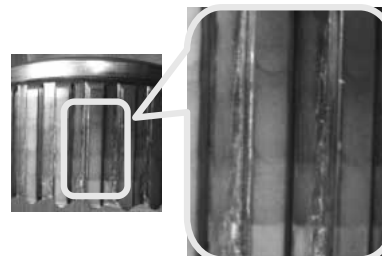


Fig.5 Bar on the Surface of Clutch Drum

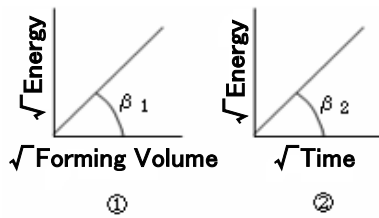


Fig.6 Ideal Function

で不要部分を削って狙いの形状を得ることと同様である。よって品質工学において、切削量をエネルギーで評価することが一般的に知られている<sup>(1)</sup> 機械加工と同様に、本工法においてもエネルギーで評価することがより有効であると考えた。そこで今回、塑性加工においても『入力したエネルギーがロスなく(品質)、かつ効率よく(能率)ワークを成形することに使われることが理想である』と再度定義した。つまり、品質と能率という2つの側面があり、それぞれの評価が必要となる。

(1) 品質に関する機能性評価

基本機能を転造量と累積エネルギー(電力量)とした(Fig.6左①)。理想の品質とは、ワークの内径はマンドレル形状、外径はローラ形状に完全に一致し、不要部分が軸方向に延ばされていることである。この状態を実現できれば、エネルギー消費は少ない状態で安定し、変形やバリなどの品質問題も撲滅できるはずである。従って、材料を転造した体積に対し、安定して電力量が少なければ良いと考えた。

(2) 能率に関する機能性評価

基本機能を時間と累積エネルギー(電力量)とした(Fig.6右②)。能率が高い条件では短時間で多くの仕事をするため単位時間でのエネルギー消費は多くなる。従って、単位時間に対する電力量が大きい条件が能率が高いと考えた。

4. 実験因子の設定

4.1 誤差因子

誤差因子は、マンドレル内歯形状をN1, N2 (Fig.7)とした。これは、マツダで使用する全ての歯型において理想の転造ができる条件追究を目指したためである。データの

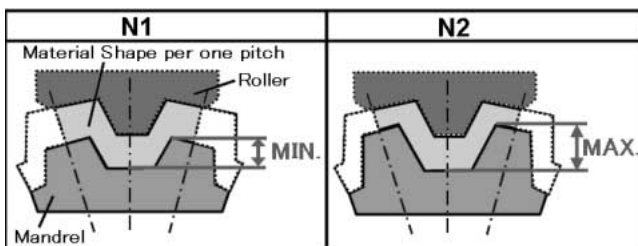


Fig.7 How to Give Error Margin Factor

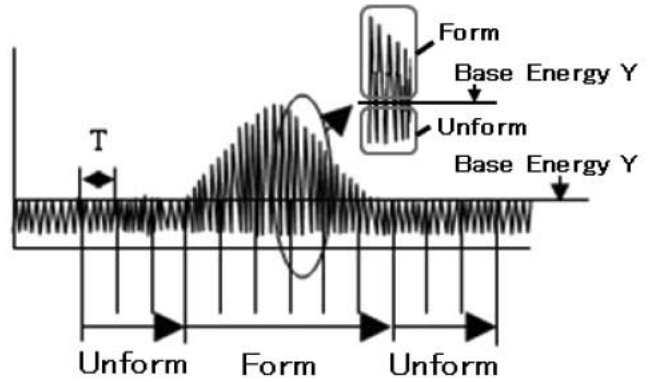


Fig.8 Measurement Method of Energy Data

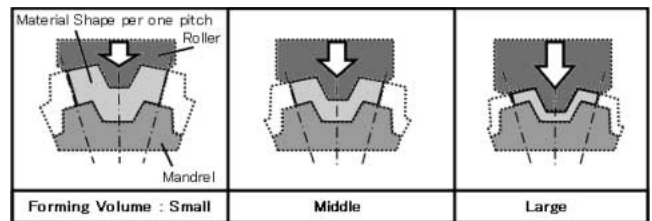


Fig.9 How to Give Signal Factor

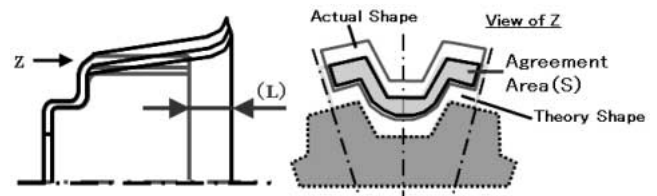


Fig.10 Measurement Method of Forming Volume

収集方法については、Fig.8に示すように、転造時、空転時でそれぞれ時間を均等に6等分し、電力の生データについて転造前後における空転時での最大値を平均化したものをベース電力とし、そのベース電力より高い値を示した値のみを、転造に使用した電力として評価した。電力の生データは、転造ローラの1回転の電力変動を評価するために、サンプリングタイムを50μsとしてデータ収集した。

4.2 信号因子

基本機能①の信号因子である転造量は、ローラ-マンドレル間の距離を遠・中・近の3水準で与え、転造量をそれぞれ小・中・大で変化させた(Fig.9)。転造量は、『理想形状と実形状の一致面積(S)』×『延びた長さ(L)』とし、マンドレル/ローラ間の理論形状に一致していない部分は仕事をしていないとみなし、計算結果から差し引いて転造量を計算した(Fig.10)。

4.3 制御因子

制御因子については、Table 1及びFig.11に示す7因子を選択し、L<sub>18</sub>直交表に割り付けた。制御因子の決定には、

Table 1 Control Factor and Level

		Level		
		1	2	3
A	Feed Speed	A1	A2	A3
B	Roller Rational Speed	Fast	Medium	Slow
C	Roller Shape	C1	C2	C3
D	Rational Resistance	High	Low	
E	Rolling Direction	Reversal	Normal	
F	Forming Method of Coldrolling Start	F1	F2	F3
G	Material Retentivity Force	Low	Medium	High

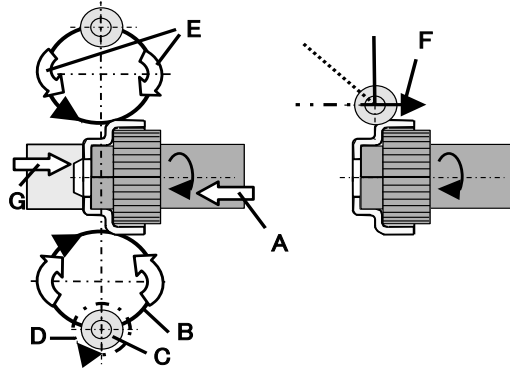


Fig.11 Explanation of Control Factor

理想の転造を定義した上で、更にその理想の実現に向けて、最も重要な材料流れを定義し、それが実現できる制御因子を考案、決定した。

### 5. 実験結果と最適条件の決定

要因効果図をFig.12に示す。最適条件は、転造量 - エネルギーのSN比が最も高くなるものを選択した。ただし因子B及びFについては、感度に及ぼす影響が大きいため、初期条件と同じ水準を最適条件とした。また、初期条件と最適条件での水準をTable 2に、確認実験結果をTable 3にそれぞれ示す。確認実験の結果から、利得が得られていることが確認できた。

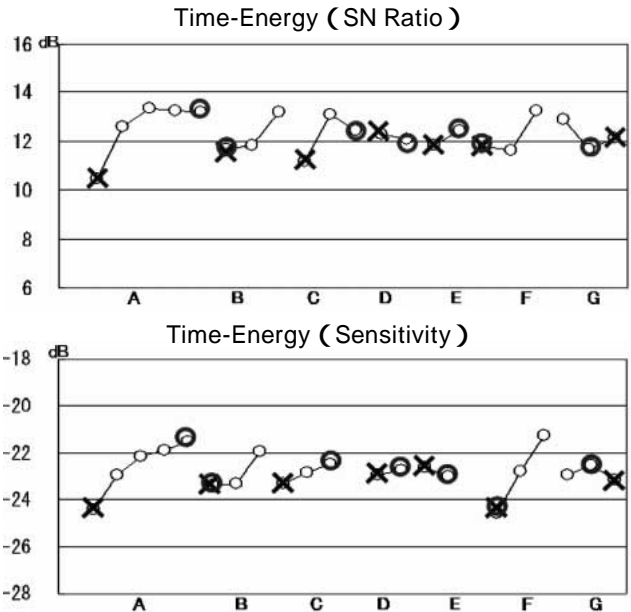


Fig.12 SN Ratio and Sensitivity

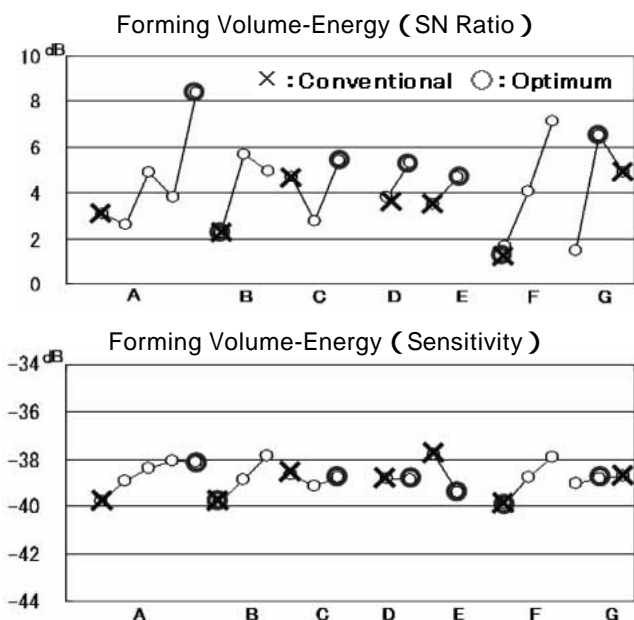
Table 2 Optimum and Initial Condition

	A	B	C	D	E	F	G
Optimum Condition	A5	Fast	C3	Low	Reversal	F1	Medium
Conventional Condition	A1	Slow	C1	High	Normal	F1	High

Table 3 Prediction and Confirmation

SN Ratio	Forming Volume - Energy		Time - Energy	
	Prediction	Confirmation	Prediction	Confirmation
Optimum Condition	8.61	3.33	11.8	13.70
Conventional Condition	-1.6	-3.29	7.45	9.73
<b>Gain</b>	<b>10.41</b>	<b>6.62</b>	<b>4.35</b>	<b>3.97</b>

Sensitivity	Forming Volume - Energy		Time - Energy	
	Prediction	Confirmation	Prediction	Confirmation
Optimum Condition	-40.94	-40.12	-23.92	-23.16
Conventional Condition	-40.77	-40.81	-28.18	-26.66
<b>Gain</b>	<b>-0.17</b>	<b>0.69</b>	<b>4.26</b>	<b>3.50</b>



### 6. 効果

今回の取り組み結果から、品質を従来条件から更に向上させるとともに、能率を飛躍的に向上させることができた。下記に本研究における効果を記す。

- (1) Fig.13, 14に示すように品質特性（ワークとマンドレルとのスキ）を従来から更に17%向上させるとともに、加工送り速度を設備能力の限界である従来5倍にまで向上できた。
- (2) Fig.13に示すようにワーク内歯形状の違い（誤差因子）に対する品質特性（ワークとマンドレルとのスキ）のバ

ラツキを従来から37%低減させることができ、よりロバストでどんな製品形状にも適用できるシステムを確立できた。

- (3) 加工時・非加工時も含めた1サイクル当たりの消費エネルギーを従来条件から約62%低減させることができた。

### 7. まとめ

今回の取り組み成果は以下の通りである。

- (1) システムを最適化することにより、品質を従来以上に向上させるとともに、加工送り速度は設備能力の最大値（現行の5倍）を実現でき、従来の品質と能率のトレードオフの関係を打破できた。これにより開発費用などのコスト削減はもちろんのこと、将来的な能力増強投資も削減できた。
- (2) 品質工学において、転写性で評価することが一般的な塑性加工においても、機械加工同様にエネルギーで評価することがより有効であることを実証した。
- (3) 本研究において明確にできた知見を他部品に適用させることで、開発期間の大幅短縮を実現した。

### 参考文献

- (1) 平井ほか：ドライ加工技術の実用化，品質工学，Vol.10，No.4，p.53-59（2002）

### 著者



田中雄幸



森弘真司



河野弘和

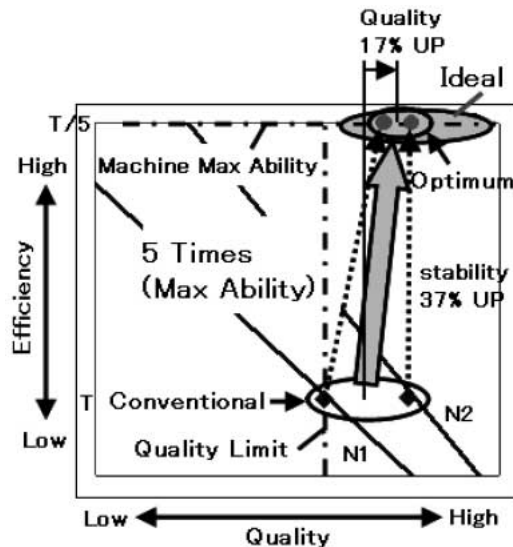


Fig.13 Relation between Quality and Efficiency

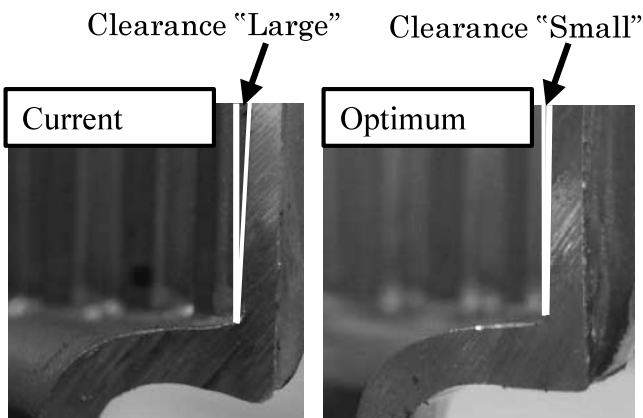


Fig.14 Phase Photograph of Clutch Drum