

ニッケル基超合金のエンドミル加工条件の最適化

Optimization of Endmill Cutting Condition for Nickel Base Super Alloy

梶 浦 幸 生*
Sachio KAJIURA

神 部 靖 彦*
Yasuhiko JINBU

桑 原 和 也**
Kazuya KUWABARA

要 旨

ニッケル基超合金のエンドミル加工条件を最適化するために、従来の逐次法や実験計画法とは異なる、品質工学によるパラメータ設計を適用した。

評価特性としては、設定除去体積と実際の切削除去量を比較する“切削加工の転写性”を選択した。

その結果、パラメータ設計で得られた最適条件で加工すれば、従来の加工条件に対し、切削加工の転写性のバラツキを標準偏差で約 60%低減することができた。

ABSTRACT

Parameter design of TAGUCHI METHOD is applied to optimize endmill cutting condition for Nickel base super alloy.

“Cutting as a presetting removal volume” has been considered as fundamental function, and evaluated with SN ratio.

As a result, about 60% decrease in dispersion of cutting has been done with optimized cutting condition by the parameter design, as compared with current condition.

1. まえがき

従来機械加工の分野では、加工条件を適正化するには各パラメータを逐次的に、または、たすき掛け的に組み合わせる実験を行い、加工面粗さや寸法・工具の逃げ面摩耗・装置の切削抵抗といった“品質特性”で評価する方法が一般的であった。しかしそのような方法ではパラメータ間の交互作用によって、あるパラメータの水準を良いと思われる方向にずらしてみても、結果は期待通りにならないことが多い。また仮に統計的手法による実験計画法を使ってみても、品質特性に対する各パラメータの寄与率は定量的に表わされるものの、バラツキの低減を含めた加工性の最適な条件を得ることは困難である。

近年、従来の逐次法や実験計画法とは異なる、品質工学によるパラメータ設計が提案されており、この方法でTi材の高速切削加工条件や焼入鋼のエンドミル加工条件の最適化を図った事例はこれまでも発表されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、通常鍛造及び研削加工にて製品化されることの多いニッケル基超合金(難削材)の切削加工に適用した事例はなかった。

そこで今回我々は、品質工学のパラメータ設計を適用して、ニッケル基超合金(難削材)を縦型フライスで切削加工する際の加工条件の最適化を図った。

* 和光基礎技術研究センター

** 本田技研工業(株)埼玉製作所

2. 実験計画

2.1. 基本機能

品質工学で機械加工の評価をする方法には、主に加工寸法の転写性で評価する方法と、加工エネルギーで評価する方法との二つがある。近年では後者の加工で消費されたエネルギーで評価する方法、つまり機械に入力された電力量と、実際に機械が加工に使用した電力量から求めたエネルギーの入出力を用いて評価する方法についての研究が盛んである⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし実際に切削機械の消費電力を測定してみると、アイドリング時(空転時)の消費電力に比べて、加工時の電力が非常に小さいために、その差が測れなかったとの報告もある⁽⁵⁾。

そこで本研究では、切削加工の機能は“設定除去体積をその設定通りに切削除去すること”との基本にたち、その転写性で評価する方法を選んだ。

2.2. 信号因子と評価特性

切削加工の基本機能は、設定除去体積をその設定通りに切削除去することである。つまり設定が倍になれば除去量も倍に、3倍になれば3倍にと、両者が比例関係になることが理想である。ここで入力(信号因子)をM:設定除去体積、出力(評価特性)をy:実加工質量とすると、両者の理想の関

係は次式のようなゼロ点比例式である。

$$y = \beta M \quad (1)$$

しかし実際の切削加工では両者の関係は制御できない諸々の誤差の影響(X1, X2, ..., Xn)を受けて次のような複雑な関係式となる。

$$y = f(M, X1, X2, \dots, Xn) \quad (2)$$

但し、この複雑な関係を解いて各々の影響と特性値との相関関係を求めても、実際にはバラツキの低減を含めた最適解を得ることはできない。

品質工学は、式(2)で表わされる関数関係を式(1)の比例式に近づけるための最適化手法である。従来の実験計画法では、品質特性をそのまま解析の特性値に用いていた。品質工学では信号因子:Mと評価特性:yから信号とバラツキの比に変換した SN 比という特性値で実験の解析を行う。

本実験では信号因子:Mと評価特性:yの関係を次式のゼロ点比例式とした。

$$y^{1/2} = \beta M^{1/2} \quad (3)$$

信号因子(設定除去体積)の水準は3水準とした。設定除去体積の増加に比例して、実加工質量も増加するが、工具の破損等により途中から加工できなくなる条件もある。そのような場合はデータ処理上、実加工質量は最後の加工面の値を代入した(Fig.1)。これは工具寿命が長く、加工精度が高い条件を見いだすためである。

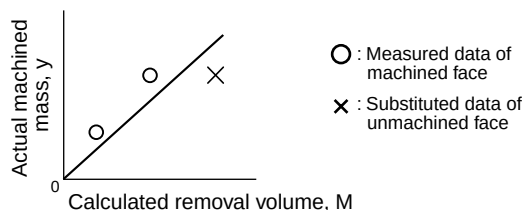


Fig.1 Schematic of ideal function

2.3. 誤差因子

切削条件に限らず加工や製造条件を最適化する場合“バラツキの低減”も含めて条件選定をするが、実験計画段階では考えられなかった掌握しきれていない誤差要因によって最適化ができないことが多い。品質工学ではそのような誤差も含めて、何に対してロバストな条件にしたいかを考える。その“何に”を誤差因子として実験に組み込む。

本実験では加工効率の観点から、

(1) 切削方向(アップカット/ダウンカット)に拘わらず精度よく切削できること。

(2) 突き出し量(短い/長い)に拘わらず精度よく切削できること。

の2点に対してロバストな条件を見いだすこととし、この2つを調査して次のような誤差因子とした。

N1(切削易): 突き出し量短-ダウンカット

切削加工にプラスに働く誤差

N2(切削難): 突き出し量長-アップカット

切削加工にマイナスに働く誤差

2.4. 制御因子

制御因子とは切削加工において制御できる各パラメータであり、フライス加工においては“工具スペック(材質, コーティング, 逃げ角, 刃先角, 刃先R, 工具径等)”, “一刃送り量”, “切削速度”, “回転数”, “加工方向”等多くのパラメータがある。品質工学では実験を計画する際に、パラメータの交互作用の影響が出にくい“L18 直交表”が一般的に用いられている。この場合8つのパラメータまで割り付けることができるが、各パラメータは独立して制御できなければならない。本実験では“工具メーカー”, “一刃送り量”, “切削速度”, “径方向切込み”, “深さ方向切込み”の5つのパラメータを選択した。各パラメータの水準値については、工具メーカーは1, 2の2水準, その他の4パラメータは小, 中, 大の3水準とした。これらを Table 1 のように割り付けた。18通りの実験条件として各パラメータの水準を整理した表(L18 直交表)を Table 2 に示す。

Table 1 Control factors and levels

Factor	Level		
	1	2	3
A Tool maker	1	2	
B Error			
C Feed per tooth	Low	Middle	High
D Cutting speed	Low	Middle	High
E Width of cut	Low	Middle	High
F Depth of cut	Low	Middle	High
G Error			
H Error			

Table 2 L18

Exp. No.	Control factors								Noise	
	A	B	C	D	E	F	G	H	N1	N2
1	1		Low	Low	Low	Low				
2	1		Middle	Middle	Middle	Middle				
3	1		High	High	High	High				
4	1		Low	Low	Middle	Middle				
5	1		Middle	Middle	High	High				
6	1		High	High	Low	Low				
7	1		Low	Middle	Low	High				
8	1		Middle	High	Middle	Low				
9	1		High	Low	High	Middle				
10	2		Low	High	High	Middle				
11	2		Middle	Low	Low	High				
12	2		High	Middle	Middle	Low				
13	2		Low	Middle	High	Low				
14	2		Middle	High	Low	Middle				
15	2		High	Low	Middle	High				
16	2		Low	High	Middle	High				
17	2		Middle	Low	High	Low				
18	2		High	Middle	Low	Middle				

2.5. 固定条件

次の条件は固定条件とした。

- ・ ツールホルダー
- ・ ツール種類(径, 刃数等)
- ・ 切削油(油種, 油量等)

3. 実験結果

3.1. データの検討

L18 直交表の組み合わせに基づいて切削加工を行った。品質工学では各実験でのデータの差(SN比の差)が大きい方が精度の高い評価ができるとされている。ここで例として実験 No.5 と 13 の結果について、加工後の試験片写真を Fig.2, 3 に示す。またデータを Table 3 及び 4 に、グラフを Fig.4, 5 に記す。

写真であきらかなように実験 No.5 では誤差因子 N 1 (切削易)で信号因子の3水準(加工面で3面)目まで加工できたが、N 2 (切削難)では2水準(2面)目の途中から加工不能となった。実験No.13ではN 2で3面目の表面に加工跡が残っているもののN 1, N 2とも3面目まで加工することができた。

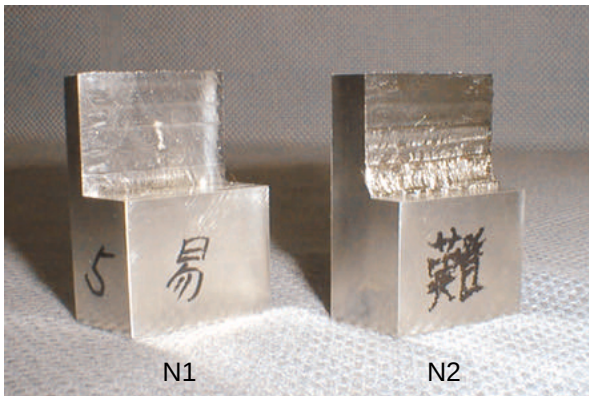


Fig.2 Machined test piece (No.5)

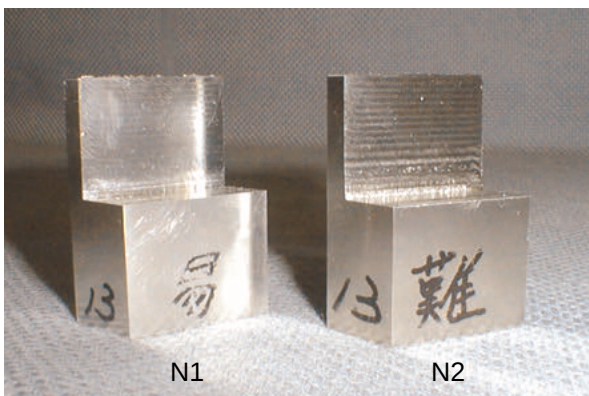


Fig.3 Machined test piece (No.13)

Table 3 Data of No.5

	M (mm ³)	y (g)	
		N1	N2
1	1289.217	11.10	10.49
2	2578.434	22.10	20.97
3	3867.651	33.08	20.97

Table 4 Data of No.13

	M (mm ³)	y (g)	
		N1	N2
1	1285.806	10.97	10.89
2	2571.612	22.01	21.84
3	3857.419	32.95	32.79

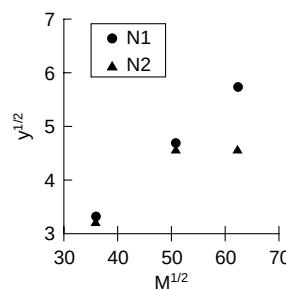


Fig.4 Exp. result (No.5)

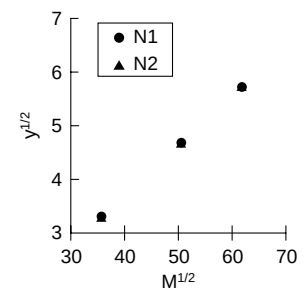


Fig.5 Exp. result (No.13)

3.2. SN 比の計算

実験 No.5 の結果について SN 比の計算例を示す。Table 5 に信号因子及び評価特性を 1/2 乗(√)したデータを示すとともに、それを用いて変動の分解を行った。

Table 5 Data of No.5

	M ^{1/2}	y ^{1/2}	
		N1	N2
1	35.905 7	3.331 7	3.238 9
2	50.778 3	4.701 1	4.579 5
3	62.190 4	5.751 5	4.579 5

・ 全変動

$$S_T = 3.3317^2 + 4.7011^2 + \dots + 4.5795^2 + 4.5795^2 \\ = 118.7138 \quad (f=6) \quad (4)$$

・ 線形式

$$L1 = 35.9057 \times 3.3317 + 50.7783 \times 4.7011 \dots \\ + 62.1904 \times 5.7515 \\ = 716.0273 \quad (5)$$

$$L2 = 633.6328 \quad (6)$$

・信号因子の一次効果の変動

$$S_{\beta} = (L1 + L2)^2 / 2r$$

$$= 117.7448 \quad (f=1) \quad (7)$$

但し,

$$r = 35.9057^2 + 50.7783^2 + 62.1904^2$$

$$= 7735.3013 \quad (8)$$

・誤差因子の変動

$$S_N = S_{N \times \beta}$$

$$= (716.0273^2 + 633.6328^2) / r - 117.7448$$

$$= 0.4388 \quad (f=1) \quad (9)$$

・誤差の変動

$$S_e = S_T - S_{\beta} - S_N$$

$$= 0.5302 \quad (f=4) \quad (10)$$

・誤差因子の効果を含んだ誤差変動

$$S_{N'} = S_{N+e} = S_T - S_{\beta}$$

$$= 0.9690 \quad (f=5) \quad (11)$$

以上の計算結果を Table 6 の分散分析表にまとめた。
分散分析から SN 比 η 及び感度 S は次式から以下となる。

$$\text{SN比: } \eta = 10 \log \frac{\frac{1}{2r} (S_{\beta} - V_e)}{V_{N'}} = -14.06 \text{db} \quad (12)$$

$$\text{感度: } S = 10 \log \frac{1}{2r} (S_{\beta} - V_e) = -21.19 \text{db} \quad (13)$$

Table 6 Analysis of variance (No.5)

	Factor	F	Sum of squares	Variance
Primary effect	β	1	117.7448	117.7448
Noise factor	$N \times \beta$	1	0.4388	0.4388
Error	e	4	0.5302	0.1325
	N'	5	0.9690	0.1938
Total	T	6	118.7138	

同様にして各実験データから SN 比と感度の計算を行った結果を Table 7 に示す。

次に, SN比と感度の計算結果をもとに算出した各制御因子の分散分析表(SN 比)を Table 8 に示す。また Fig.6, 7 に SN 比と感度の要因効果図を示す。

Table 7 SN ratio & S(sensitivity) of each experiment

Exp. No.	SN ratio (db)	Sensitivity (db)
1	11.52	-20.73
2	16.83	-20.70
3	-22.19	-22.28
4	9.85	-20.70
5	-14.06	-21.19
6	19.86	-20.70
7	13.38	-20.73
8	17.86	-20.69
9	-13.98	-21.16
10	-13.41	-21.12
11	22.78	-20.67
12	-13.71	-21.13
13	20.74	-20.70
14	17.11	-20.68
15	14.58	-20.68
16	7.85	-20.72
17	12.46	-20.71
18	20.96	-20.68
Average	7.13	-20.89

Table 8 Analysis of variance – SN ratio

Factor	F	S	V	ρ
A Tool maker	1	140.5463	140.5463	3.6%
C Feed per tooth	2	391.8760	195.9280	10.2%
D Cutting speed	2	76.0836	38.0418	2.0%
E Width of cut	2	1570.2173	785.1087	40.7%
F Depth of cut	2	186.6962	93.3481	4.8%
e Error	8	1488.0059	186.0007	38.6%
Total	17	3853.4253	226.6721	

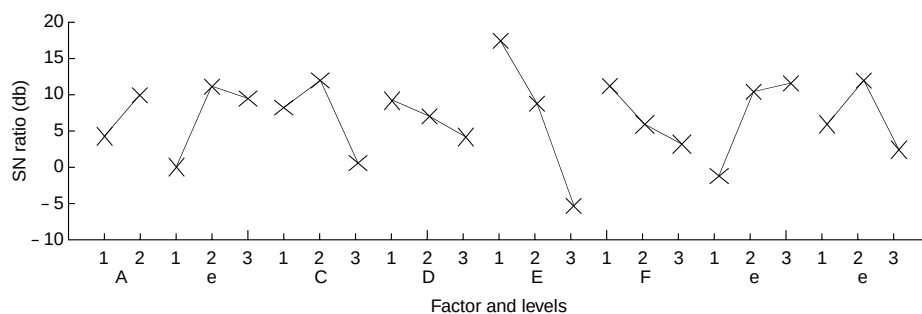


Fig.6 Factor effect diagram on SN ratio

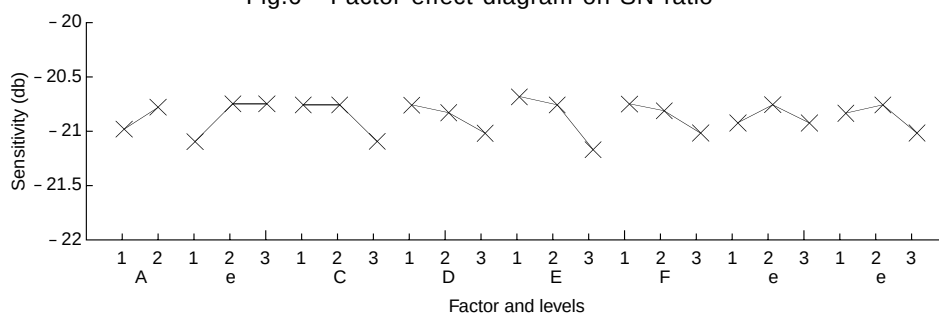


Fig.7 Factor effect diagram on Sensitivity

品質工学では、SN比の要因効果図において、水準間の差の大きい因子ほど評価特性に対する寄与率が高いとされ、また SN 比の大きい水準ほど目的に合致(転写性の向上)した水準を示す。

式(13)で算出した感度 S とは、基本機能(Fig.1)における直線の傾き β を用いて、式(14)で表されるもので、今回の実験では、理論上、 β は切削除去した部分の密度を表している。

$$\text{感度 } S = 10 \log \beta^2 \quad (14)$$

今回使用したニッケル基超合金の密度は $8.53 \times 10^{-3} \text{g/mm}^3$ であるので、式(14)から計算した理想の感度 S は -20.69db となる。感度 S の値が小さいと、切削除去した部分の密度が小さい、つまり設定除去体積に対して実際には切削除去できていなかったということになる。

Fig.6, 7 から SN 比、感度とも各水準による傾向は同じことから、SN比の高い水準を選定すれば感度も向上すると考えられる。

今回の実験では Table 8 からあきらかなように、“径方向切込み”の寄与率が 40.7%と、最も高い値を示した。“径方向切込み”の影響の大きいことは、これまでの切削加工実験からも同様の傾向があらわれていたが、今回の実験によって、他の因子と合わせてその寄与率を定量的に把握することが出来た。一方、誤差列の寄与率も 38.6%であり、制御因子と比較し無視できないレベルであることが示された。

4. 最適条件の推定

4.1. 最適条件の推定

最適条件を推定するため、Fig.6 に示した SN 比の要因効果図から、各制御因子について SN 比が最大となる水準を選択し、現行条件と対比して Table 9 に示す。現行条件は各種の切削加工実験をもとに、逐次的な組み合わせの結果を用いて設定してのものであり、今回の実験 No.2 と偶然一致した。

Table 9 Optimal and current condition

Factor	Optimal condition	Current condition
A Tool maker	2	1
C Feed per tooth	Middle	Middle
D Cutting speed	Low	Middle
E Width of cut	Low	Middle
F Depth of cut	Low	Middle

最適条件と現行条件とで同じ水準を示した制御因子は“一刃送り量”のみであり、他の4つの因子については水準が異なるため、それによる転写性の改善にどの程度の効果を期待できるのか、定量的に推定を行った。

4.2. 最適条件での SN 比の推定

全ての制御因子の各水準の SN 比から、最適条件と現行

条件での SN 比の推定を行い利得を求め、比較した結果を Table 10 に示す。

Table 10 Estimation of average value (db)

	Optimal condition	Current condition	Gain
SN ratio	32.15	12.33	19.82
Sensitivity	-20.25	-20.67	0.42

この推定結果は、最適条件で切削加工を行うと SN 比は 32.15db であり、現行条件の 12.33db に比較し約 20db の利得が見込めることを示している。一方、現行条件と等しい、実験 No.2 での実験結果に基づく SN 比は 16.83db であり、推定値 12.33db との間に 4.50db の差があった。これは前述の制御因子の分散分析表(Table 8)で示されているように従来掌握されていなかった誤差要因によるものと考えられる。この誤差要因によって、推定した最適条件で切削加工した場合の利得が、どのような影響を受けるかを明らかにするために確認実験を行った。

5. 確認実験結果及び考察

以上述べた、品質工学のパラメータ設計により求めた切削加工の最適条件及び現行条件(Table 9)で確認実験を行い、SN 比と感度を算出した結果を Table 11 に示す。

Table 11 Confirmed result (db)

	Optimal condition	Current condition	Gain
SN ratio	18.48	10.50	7.98
Sensitivity	-20.67	-20.70	0.03

最適条件で切削加工した場合、現行条件との比較でSN比の利得は 7.98db であった。これは下記計算に示すように、切削加工の転写性のバラツキを標準偏差で約 60%低減できることを表している。

式(12)で算出したSN比は、傾きを β 、バラツキ(標準偏差)を σ とすると、式(15)で表される。

$$\text{SN比: } \eta = 10 \log \left(\frac{\beta}{\sigma} \right)^2 \quad (15)$$

よって最適水準での SN 比を $\eta_{(\text{最})}$ 、傾きを $\beta_{(\text{最})}$ 、バラツキを $\sigma_{(\text{最})}$ 、現行条件での SN 比を $\eta_{(\text{現})}$ 、傾きを $\beta_{(\text{現})}$ 、バラツキを $\sigma_{(\text{現})}$ とすると、

$$\eta_{(\text{最})} - \eta_{(\text{現})} = 10 \log \left(\frac{\beta_{(\text{最})}}{\sigma_{(\text{最})}} \right)^2 - 10 \log \left(\frac{\beta_{(\text{現})}}{\sigma_{(\text{現})}} \right)^2 = 7.98 \text{db} \quad (16)$$

また Table 11 から、 $\beta_{(最)}$ $\beta_{(現)}$ であるから、

$$\eta_{(最)} - \eta_{(現)} = 10 \log \left(\frac{\sigma_{(現)}}{\sigma_{(最)}} \right)^2 = 7.98 \quad (17)$$

$$\therefore \left(\frac{\sigma_{(現)}}{\sigma_{(最)}} \right)^2 = 10^{0.798} = 6.281 \quad (18)$$

$$\therefore \frac{\sigma_{(現)}}{\sigma_{(最)}} = 2.506 \quad (19)$$

よって、

$$\sigma_{(最)} = 0.4 \sigma_{(現)} \quad (20)$$

となる。

一方、推定結果で示された SN 比の利得 19.82db に対し、確認実験の結果では約半分の 7.98db しか得られなかった。また確認実験の結果、現行条件の SN 比は 10.50db であり、予備実験の場合の SN 比 16.83db との間に大きな差があり、実験そのものの再現性という点でも課題を残した。

本研究では評価特性として、設定除去体積と実際の切削除去量を比較する“切削加工の転写性”を選択している。この場合、異なった切削加工条件でも、評価特性の切削除去量が同一であれば SN 比も同一となるが、切削加工システム全体での評価を考えると、誤差要因も含めて、パラメータの影響を十分に把握できていない可能性がある。

例えば、現在一般的に使われている主軸回転数がフィードバック制御される加工機械では、切削抵抗が大きくなり主軸回転数が落ちようとすると、電力を上げて回転数が一定に保たれる。その結果、評価特性である転写性は同一であったとしても、その切削加工に使用されたエネルギー（消費電力量）は大きくなる。この余分なエネルギーは、熱・振動・音等に変換され、バラツキを生み出す原因となることが考えられる。

従って今後更に、加工条件の最適化、利得推定精度を向上させるためには、“切削除去量”だけではなく、切削加工システム全体を考えた“消費電力量”等も評価特性に加えることが必要と考える。

6. まとめ

ニッケル基超合金のエンドミル加工条件を最適化するために、品質工学のパラメータ設計を適用し、以下の知見を得た。

- (1) 最適条件で加工すれば、切削加工の転写性のバラツキを約 60%低減することができた。
- (2) 更に条件選定の精度を向上させるためには、切削加工システム全体を考えた評価特性の見直しが必要である。

参考文献

- (1) 藤本賢志, 藤懸清, 藤本良一, 東原和行, 高橋和仁: Ti 高速切削工程の最適化, 第 6 回品質工学研究発表大会 論文集, p.173-178 (1998)
- (2) 和合健: エンドミルによる焼入鋼切削の最適化, 第 7 回品質工学研究発表大会 論文集, p.189-192 (1999)
- (3) 市川和愛, 嘉指伸一, 藤土盛嗣, 住田典夫: ON 時と OFF 時のエネルギー評価による旋削加工技術の開発と生産性向上, 品質工学, 第 8 巻, 第 1 号, p.38-42 (2000)
- (4) 高橋和仁, 高坂慎治, 星谷清春, 矢野耕也, 西内典明, 矢野宏: 電力を利用した切削加工条件の最適化, 品質工学, 第 8 巻, 第 1 号, p.24-30 (2000)
- (5) 中谷善一, 鷺谷武明, 徐世中, 梶浦幸生, 堀川雅彦, 高倉篤, 杉山昭, 堀信夫: 中硬度鋼材の高速ボールエンドミル切削加工条件の最適化, 第 7 回品質工学研究発表大会 論文集, p.165-168 (1999)

■ 著 者 ■



梶浦幸生



神部靖彦



桑原和也