

論文・解説

16

ハイポイドギヤ高速加工条件の最適化 Optimization of High Speed Cutting for Hypoid Gears

三石 智洋*¹ 松岡 保道*² 樋口 昭彦*³
Tomohiro Mitsuishi Yasumichi Matsuoka Akihiko Higuchi
坂東 武夫*⁴
Takeo Bando

要約

本研究では自動車のデファレンシャルユニット内に内蔵されるハイポイドギヤの高速加工条件の最適化を行った。ハイポイドギヤの歯切加工は非常に複雑であるため、一般的な機械加工で行われる品質工学的アプローチを適用することが困難であった。そのため、加工条件の評価は、因子ごとにテストを繰り返し、テスト後の刃具状態や加工精度から判断するものであった。そこでパラメータ設計を行い、従来の評価プロセスからの脱却を試みた。当初は「消費電力」と「切削除去量」を基本機能として評価を進めたが、一般的な機械加工とは加工メカニズムが異なるため、加工の特徴を明確に表現できる解析を新たに提案した。具体的には、刃具と被削物の当たり方からメカニズムを考えていき、1) 切削負荷が変化する、2) 断続切削であるという2つの特徴をパラメータ設計に反映させた。結果、この考え方とアプローチの有効性を実証することができ、ギヤ加工のみならず、様々な刃具形状や加工メカニズムに対しても汎用性を示す一例となることができた。

Summary

We studied on optimization of high speed cutting for Hypoid gears that is built into the differential units of automobiles. The cutting process, Face Hobbing, is complicated and Taguchi Method can not be used, and to assess the process conditions, we had to test every parameter and check the blade chipping and machining accuracy on the gear flank after each test. To achieve a better process, we designed parameters. Firstly we evaluated cutting energy and weight of chips generated in a cutting process as basic functions, but as the Face Hobbing is a complicated mechanism, we suggested a method that clearly expresses process features. Two features were reflected in the parameter, one is that chip load changes in a cutting process, and the other is the Face Hobbing is an intermittent cutting process. As a result, this new method was proved to be effective, which could be used not only for the gear machining but also for various cutting methods.

1. はじめに

ハイポイドギヤ (Fig.1) は、自動車のリヤデフユニットや4WD用駆動伝達ユニット (Power Take Off) に内蔵されるギヤセットに用いられる。今回、この部品加工の近年の主流であるフェイスホブ歯切加工にパラメータ設計を適用し、従来の技術開発アプローチからの脱却を図った。

この加工方案のメカニズムは以下の通りである。①カッター (Fig.2) と被削材が互いに逆方向に回転 (異なる回

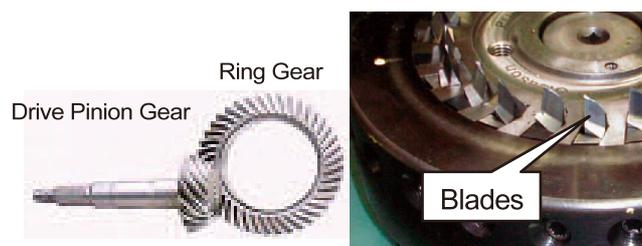


Fig.1 Hypoid Gears

Fig.2 Face Hob Cutter

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

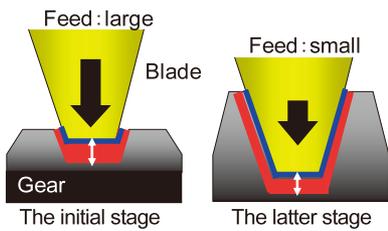


Fig.3 Transition of Cutting Cross-sectional Area on Face Hobbing

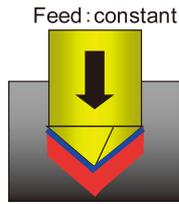


Fig.4 Cutting Cross-sectional Area on Drilling

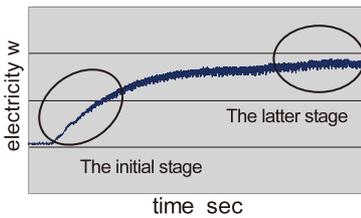


Fig.5 Cutting Energy of Face Hobbing

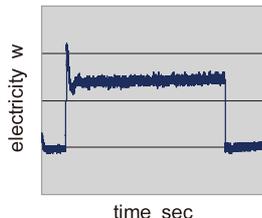


Fig.6 Cutting Energy of Drilling

転数), ②カッターは内刃と外刃のペアで構成。1つのペアで1つの歯溝を切削するが, 2つのペアが別の歯溝を同時切削する瞬間が存在, ③カッターの被削材に対する切込み角度は鋭角。機種(被削材の大きさや歯数など)の差によって変更が必要だが, その最適角度算出は微細過ぎて現状不可, ④カッターの先端にはクサビ形状のブレード(Fig.2)が組付いているため, 切削中に被削材とブレードが接する接触長・面積が常に変化。その変化に伴い送り速度を段階的に減少させる必要あり(現状は3段階)。

これらメカニズムから, 本方案の主な特徴は以下A, Bの通りである。A: 切削荷重の変化。カッターの切込みに従い, 切削除去される断面と送り速度がそれぞれ変化する(Fig.3)ため, 切削荷重は常に変化する(Fig.5)。これに対し, ドリル加工に代表される一般的な機械加工では, 切削除去される断面が加工中一定(Fig.4)であり, 切削荷重は一定である(Fig.6)。B: 断続切削。ブレードは歯溝通過時のみ被削材と接する(Fig.7)。この離合を繰り返す, 歯溝をつくり上げていく。ドリル加工では刃物が常時被削材と接する(Fig.8)連続切削である。

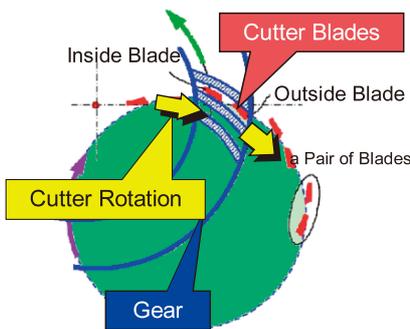


Fig.7 Face Hobbing (Intermittent Cutting)

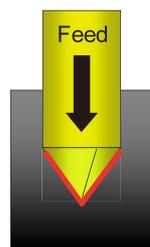


Fig.8 Drilling (Continuous Cutting)

従来, フェイスホブ歯切加工においては, 複雑な加工メカニズムのために, その組合せによる影響を正確に把握することは極めて困難であった。そのため, マシン設定値(送り, 回転数など)の経験的/部分的な組合せでのテストをトライ&エラー的に実施し, 品質特性(結果系指標: 被削材の粗さ, ブレード摩耗状態・寿命など)で評価することを主体とせざるを得なかった。従って, 部分最適ではあるものの, 加工条件, マシン, 刃具と治具などで構成される加工システム全体の最適化には至らず, それを実現する技術評価プロセスの確立と適用が課題であった。

2. エネルギー変換による評価

ドリル加工に代表される“連続切削”において, 理想を「スパッと切れ, ロスなくエネルギー変換する状態」と捉え, 切削時の“累積電力”で評価するアプローチは既に一般的であり, 社内においても数多くの事例を通じその有効性を実証してきた。

今回, フェイスホブ歯切加工のような“断続切削”においても, これら特徴を局所的かつ瞬間的に捉えることで連続切削と同様のアプローチが適用できると考え, 以下の二つの仮説を立てた。「切削荷重が変化する場合, 単位断面積あたりの電力を評価することで, 刃先にかかる荷重を捉えることが可能である。」加工初期の切削断面積が小さい場合には, 消費エネルギーは少ないように見えるが, 単位切削断面積あたりではエネルギーを多く消費しているはずであり, これが表現可能と考えた。また, 「断続切削の場合, 切削時に荷重が瞬間的に変動するため, これを評価することで荷重を更に正確に捉えることが可能である。」電力波形形状が同等であっても, その瞬間的な変動の大きさに差がある場合, 切削状態は異なるはずであり, 区別化を図ることが可能であると考えた。

ただし, 様々な因子が複雑に絡み合い, その影響度合が常に変化しながら加工する本方案について, これらの特徴を正確に捉えることは, 従来のアプローチでは不可能であり, 創造的かつ慎重な検討により以下の技術課題をプレイクスルーする必要があった。

A: メカニズム①~④の組合せの各影響度合が絶えず変化の中で“単位断面積あたりの切削荷重”を正確に捉えるための解析式の提案・適用

B: 断続切削の評価に不可欠な“切削荷重の瞬間的変動”に対する有効成分の抽出方法の提案・適用

3. パラメータ設計

3.1 対象の絞り込み

まず, 予備実験(切削荷重と電力波形の検討: 詳細後述)から, 以下の通り対象(工程, 被削材)を絞った。フェイスホブ歯切加工は, 荒加工と仕上げ加工で構成される。予備実験結果から荒加工に対象工程を絞った。これは

予備実験により、荒加工が加工システム全体のエネルギーの大部分を支配していることを明確にできたためである。

また、ハイポイドギヤにはドライブピニオンとリングギヤがあり、荒加工は両部品共通の工程である。加工条件がより厳しい部品であるドライブピニオン（歯面のねじれがより大きく、歯幅がより長い）を対象部品に選択することで両部品の最適化を図った。

3.2 基本機能の決定と解析方法（技術課題A）

基本機能を検討する上で、まず、ドリル加工で一般的な基本機能（Fig.9左）では今回の加工システムは表現できないことを改めて確認した。加工初期の電力は後期（ブレード全体が切削に寄与）と比較して小さく、基本機能の関係グラフは谷状となった（Fig.15左、丸部）。また、この時の最適条件では、全ブレードにチッピングが発生し、基本機能が不適切であることを裏付けた。

これを踏まえ、今回の加工システムに合致する基本機能を検討した。電力には加工時の“切削負荷の総和”が現れるため、これを計測特性とした上で、本加工に関わるパラメータの微細な変動を“単位切削断面あたり”で捉え、基本機能を以下の通り決定した（Fig.9右）。

「切削除去量」×「単位切削断面あたりの累積電力量」

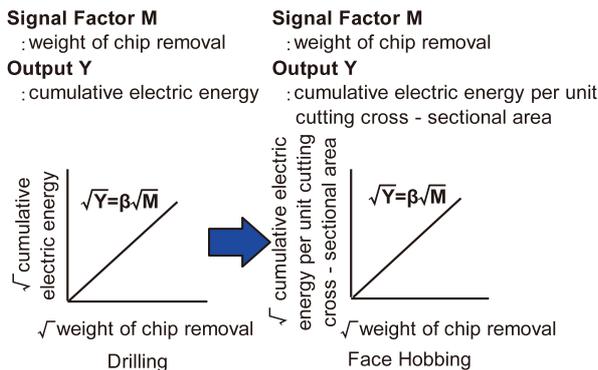


Fig.9 Generic Function

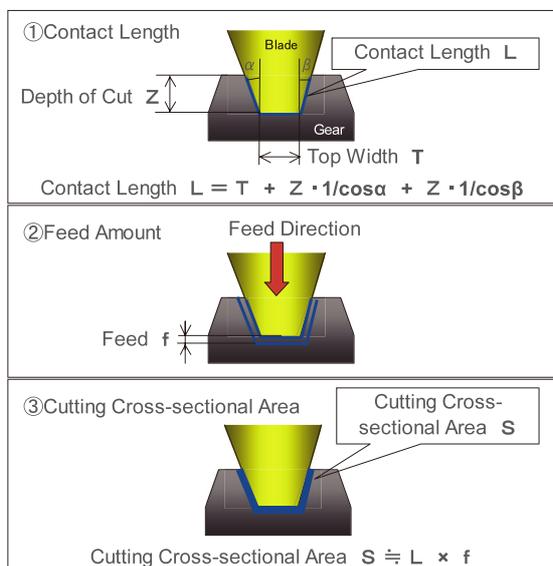


Fig.10 Calculation of Cutting Cross-sectional Area

- a : 送り量
- b : 切削長(歯面長手方向)
- c : 接触長(歯底方向)
- a×b : 切削断面積(歯面長手方向)
- a×c : 切削断面積(歯底方向)
- b×c : 切削面積(歯面長手方向)
- a×b×c : 切削体積

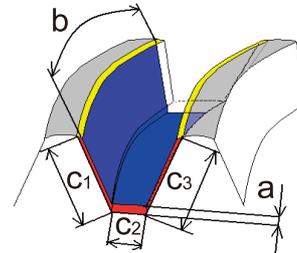


Fig.11 Changable Three Factors on Cutting Process

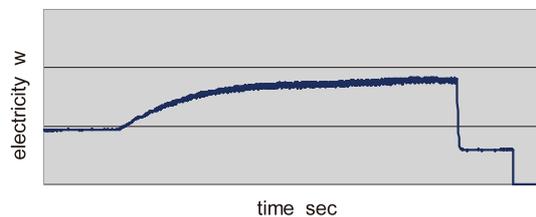


Fig.12 Cutting Energy on Roughing

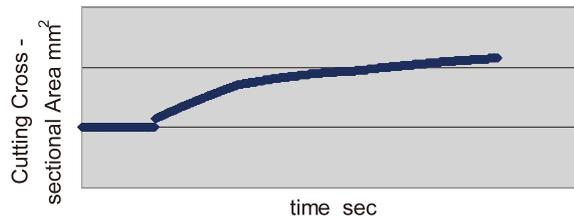


Fig.13 Transition of Cutting Cross-sectional Area (Simulation)

具体的に導出・解析方法を述べる。

- (1) 本加工の電力値がFig.5の形のような波形となる要因を再考した。マシンセッティングだけではなく、刃物と被削材の接触の仕方や軌跡（Fig.11）に着目して考え得る全10因子を抽出し、①因子間の因果関係の有無、②計測可否、③加工1サイクル間の変動の有無について評価した。3つのパラメータ（a, b, c）を洗い出し、その組合せを含めた7つのパラメータを決定した。
- (2) 次に、1サイクル間の各パラメータ値の波形と、実機の電力波形の一致度を評価した。自ら各パラメータ値のシミュレーションプログラムを開発・適用し、シミュレーション結果と実機の電力波形を比較・評価した。その結果、a×c（切削断面積（歯底方向））の波形（Fig.13）が電力波形（Fig.12）と相関があるため、これを解析対象のパラメータと決定した。なお、それ以外のパラメータ値の波形は電力波形と全く異なったため対象外とした。

このa×cの波形の変動ロジックを再現させる数式を導出

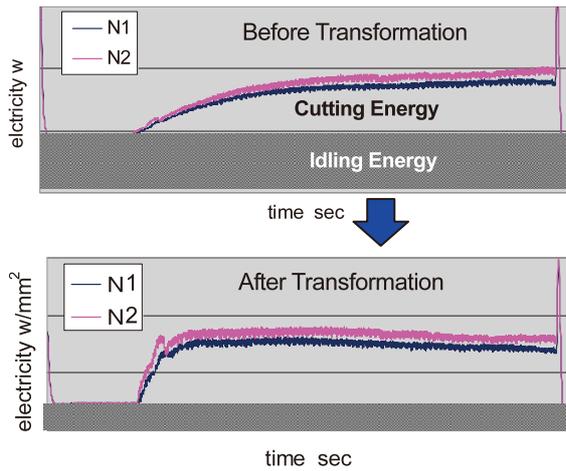


Fig.14 Transformation of Electric Energy

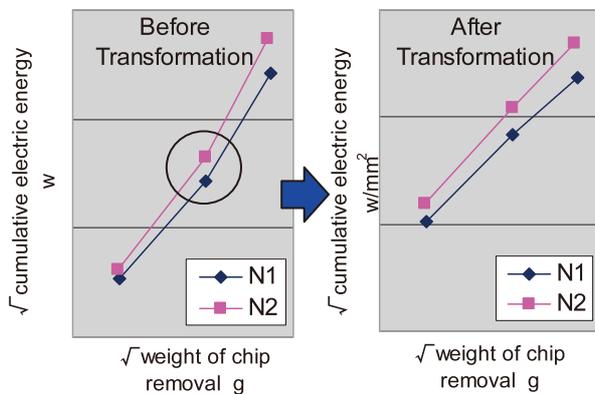


Fig.15 Generic Function

した。その数式は「切削長」と「単位時間あたりのカッターの送り量」の“積”で表される。単位切削断面積(1mm²)あたりの電力は計測電力をこの“積”(Fig.10①②, 机上計算値)で除して算出した (Fig.14)。この結果, 加工初期では消費エネルギーが少ないと思われていたが, 単位切削断面積あたりでは, 加工後期と同等のエネルギー量が費やされており, 仮説を検証できた。そして, 基本機能の関係グラフは線形となった (Fig.15右)。

3.3 信号因子と誤差因子

信号因子は切削除去量とし, カッターの切込み量を小・中・大で変化させた時の重量とした。除去重量は加工前後のテストピースを電子秤で計測し, その差から算出した。

次に誤差因子は, 加工によって生じる「ブレード摩耗の有無」と, ブレード組付け時に発生する「組付け高さのばらつき」とし, 出力小側をN1, 出力大側をN2として調査した (Table 1)。なお, ブレード摩耗品は, 実際にギヤ加工し限界摩耗品を準備した。本実験に先立ち, 加工時のカッター主軸電力波形の振幅とブレード摩耗との関係を確認するために, 予備実験を実施した。

その結果, ブレードが被削材と接する時に受ける瞬間的な負荷変動の大きさがブレード摩耗の進行を決定している可能性が高く, 電力波形の“振幅”が重要な評価指標となることが分かった。

Table 1 Noise Factors

	Blade Wear	Blade Hight Step
N1	no wear	small
N2	wear	large

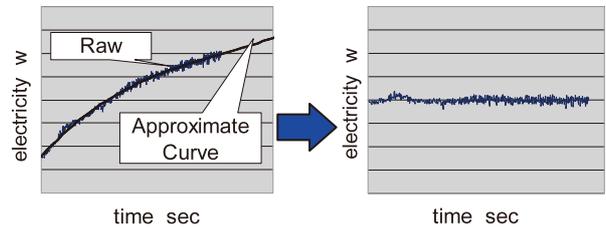


Fig.16 Standard Deviation σ of Waveform

Table 2 Control Factors and Levels

Control Factors	levels			units
	1	2	3	
A. Blade Relief Angle	small	large		deg
B. Feed Position	small	medium	large	deg
C. Feed Angle	small	medium	large	deg
D. Cutter RPM	low	medium	high	rpm
E. Feed End chip 1	small	medium	large	mm
F. Feed End chip 2	small	medium	large	mm
G. Feed End chip 3	small	medium	large	mm
H. Feed End chip 4	small	medium	large	mm

3.4 SN比算出方法 (技術課題B)

上記を踏まえ, 今回の電力量評価では, “振幅のみ”を正確に抽出するため, 意図的に与えた誤差 (Table 1) と振幅の標準偏差 σ を含めたSN比算出方法を採用した¹⁾。

まず計測した消費電力を単位切削断面積あたりの電力に変換した。次にこれを送り量による被削材とブレードの接触長・面積の変化の観点で3区間に分け, 各区間での累積電力値を算出した。

電力の標準偏差 σ は, 区間ごとに波形データ (曲線部分) を3次関数で近似し, 生波形データとの差を取り出し算出した (Fig.16右)。更に, SN比算出式 (式12) の誤差分散の項に電力波形N1, N2の各区間での σ^2 の平均を加え, SN比を算出した。

3.5 制御因子の水準と実験方法

制御因子は刃具諸元, 切削条件から8つの因子を抽出し, L18直交表に割り付けた (Table 2)。L18実験では, カッターホルダに2ペア (外刃, 内刃各2本) の合計4本のブレードを組付けた。これは実ラインの状態を再現するためであり, ブレード1本あたりの削り代が, ブレード26本全てが組付いている通常のカッターと同条件になるように, カッターの送り量を設定した。

3.6 実験結果と最適条件の決定

解析例として実験No.1の結果をTable 3, 4に示す。後述の計算式で各条件のSN比と感度を求め, 要因効果図を作成した (Fig.17, 18)。Fig.17から削り代を小さくする制御因子 (E, F, G, H) がSN比向上に影響が大きいことが分かった。特に“加工初期”の削り代を小さくする因子E

Table 3 Weight of Chip Removal and Consumption Electric Energy per Unit Area (Data No.1)

No.1	√Weight of chip removal g	N1	4.64	8.63	11.55
		N2	4.65	8.67	11.63
	√Consumption electric energy w/mm ²	N1	257.47	391.75	475.89
		N2	281.58	422.97	513.35

Table 4 Variance of Electric Energy in Each Section (Data No.1)

σ ² w ²		1	2	3
		N1	3449.1	5192.6
	N2	4573.5	6633.1	8325.2

有効除数 $r_1 = 4.64^2 + 8.63^2 + 11.55^2 = 229.33$ (1)

$r_2 = 4.65^2 + 8.67^2 + 11.63^2 = 232.11$ (2)

全2乗和 $S_T = 257.47^2 + 391.75^2 + 475.89^2 + 281.58^2 + 422.97^2 + 513.35^2 = 967952.65$ (3)

線形式 $L_1 = 4.64 \times 257.47 + 8.63 \times 391.75 + 11.55 \times 475.89 = 10070.15$ (4)

$L_2 = 4.65 \times 281.58 + 8.67 \times 422.97 + 11.63 \times 513.35 = 10948.37$ (5)

比例項の変動 $S_\beta = \frac{(L_1 + L_2)^2}{r_1 + r_2} = 957390.60$ (6)

N × β の変動 $S_{N \times \beta} = \frac{L_1^2}{r_1} + \frac{L_2^2}{r_2} - S_\beta = 1224.24$ (7)

誤差変動 $S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} = 9337.81$ (8)

誤差分散 $V_e = \frac{S_e}{4} = 2334.45$ (9)

調査誤差変動 $S_N = S_{N \times \beta} + S_e = 10562.05$ (10)

調査誤差分散 $V_N = \frac{S_N}{5} = 2112.41$ (11)

SN比 $\eta = 10 \log \left(\frac{\frac{1}{r_1 + r_2} \times (S_\beta - V_e)}{V_N + \frac{1}{6} (\sigma_{11}^2 + \sigma_{12}^2 + \dots + \sigma_{32}^2)} \right) = -5.78$ (12)

感度 $S = 10 \log \left(\frac{1}{r_1 + r_2} \times (S_\beta - V_e) \right) = 33.19$ (13)

が最も効果があった。これは削り代が小さいと切削時の電力波形の振幅が小さくなり、加工の安定化に大きく寄与することを表す。

このことから、加工初期で切削負荷の低減が加工システム全体の安定化の鍵であることが明確となった。以上の考察をもとに、加工の安定性からSN比の向上を重視し、A1B1C1D3E1F1G1H1を最適条件に決定した。次に、得られた最適条件と現行条件で確認実験を実施した。その結果、SN比の利得と感度の利得はともに再現性が得られた (Table 5)。ここでSN比の利得を真値に換算し直すと、加工システム全体のばらつき (標準偏差) が従来の60%に抑えられる。更に最適条件での実加工を実施し、電力の生データ波形の振幅を確認した。その結果、波形の標準偏差σ (3区間の平均) は従来の65%となり、実加工においても再現性があった。

この結果の妥当性を検証するため、切削断面積で割らな

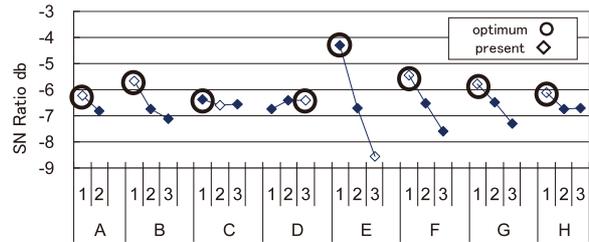


Fig.17 Graphs of Factorial Effects SN Ratio

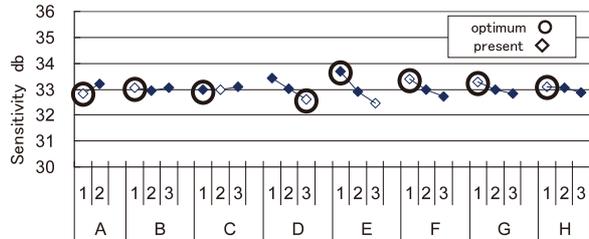


Fig.18 Graphs of Factorial Effects Sensitivity

Table 5 Results of Confirmation Experiments SN Ratio and Sensitivity

	SN Ratio db		Sensitivity db	
	estimation	confirmation	estimation	confirmation
Present	-5.19	-7.86	32.55	32.76
Optimum	-0.92	-3.34	34.2	34.74
Gain	4.27	4.52	1.65	1.98

い従来法 (Fig.19) と標準SN比 (Fig.20) を用いたSN比算出を行い、結果を比較した。今回の単位切削断面積あたりの電力での評価では加工初期におけるN1とN2の電力差がより顕著となり、SN比の強弱が従来 (Fig.19, 20) よりも明確となった。これは加工初期の削り代の水準の効果の差として要因効果図に明確に表れている (Fig.17)。つまり、単位切削断面積あたりの電力での評価は、従来法 (Table 6) よりも検証精度が向上しており再現性も高く、その有効性も実証できた。このことから、仮説の妥当性を実証できたとともに、技術課題A, Bの解決が効いていることがわかる。

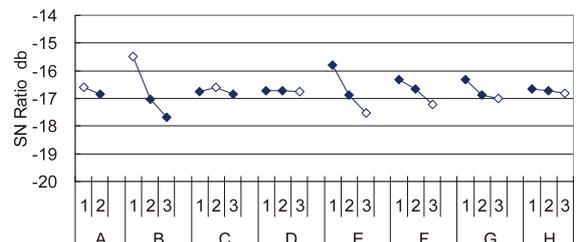


Fig.19 Graphs of Factorial Effects SN Ratio Calculated by Conventional Methods

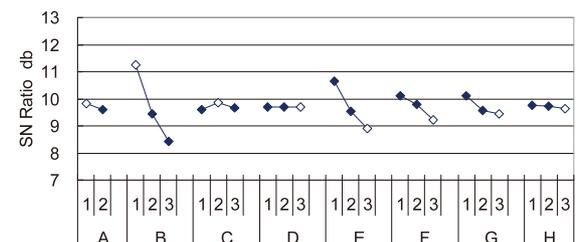


Fig.20 Graphs of Factorial Effects SN Ratio Calculated by Standard SN Ratio

Table 6 Results of Confirmation Experiments
Conventional Methods and Standard SN Ratio

	by Conventional Methods		by Standard SN Ratio	
	SN Ratio db		SN Ratio db	
	estimation	confirmation	estimation	confirmation
Present	-15.16	-18.06	11.57	8.73
Optimum	-13.55	-17.32	13.08	9.46
Gain	1.61	0.74	1.51	0.73

4. 効果の確認

導出した最適加工条件を'08年10月からドライブピニオンの量産工程に適用した。荒加工から仕上げ加工まで通した効果を以下の通り確認した。

- ・歯面の粗さ (Ra) : 35%向上
- ・ブレード摩耗 (大チップング) : ゼロ達成
- ・刀具寿命: 30%延長, 刀具費: 約25%削減

更に、リングギヤ加工においても、上記と同等の効果を確認した。

5. まとめ

今回、ハイポイドギヤ加工を対象に、切削負荷が絶えず変化する加工システムにも対応できる技術評価プロセス (単位切削断面積あたりの電力で評価) を導出し効果を刈取することで、その有効性を実証できた。この評価プロセスを適用することで、従来の問題点であった刀具寿命 (結果系指標) についても大幅な効果を確認した。

この結果には、技術課題A, Bの解決方法の提案・適用が大きく寄与し、複雑な加工メカニズムを正確に再現できたといえる。

更に、今回の基本機能とアプローチは、切削負荷が絶えず変化する加工システム (ホブ加工やドリル加工の食いつき時の微細評価など、他部品・他領域) に汎用的かつ有効的に適用できると考えられる。今後も更なるロバスト性追究を狙い、活動の深化 (今回設定していない制御因子・水準や誤差因子を含めた再実験など) と展開を継続しつつ、実効を刈取ってゆく所存である。

参考文献

- (1) 早川幸弘ほか: 電力による旋削加工条件の最適化, 機械技術, 第55巻, 第7号, p36-41 (2007)

■ 著 者 ■



三石智洋



松岡保道



樋口昭彦



坂東武夫