

## スカイピング加工における切削力に関する研究

東京大学 ○荒金拓宏, 任宗偉, 小林剛, ◎杉田直彦  
株式会社 小松製作所 西川司, 島田智, 久古潤史, 名畑英二

### 要旨

近年高精度な内歯車が必要とされており, スカイピング加工が注目されている. 高精度に加工できる一方, 摩耗が激しいため改善が求められている. しかしながら, 先行研究では幾何関係や加工精度に関するものがほとんどである. 本研究では有限要素法を用いてスカイピング加工における切削力, 応力, 温度を解析した. 本研究で得られた成果により, 工具の摩耗量を推定することが可能となる.

### 1. 序論

近年, 自動車のハイブリッド化が進んだことにより減速機に用いられている内歯車に高い精度が要求されるようになってきた[1]. しかしながら優れた加工法は確立されておらず, Table 1 に示すようにどの加工法も一長一短である. スカイピング加工は加工精度が非常に良いが, 工具摩耗が激しいという大きな欠点がある.

ギアスカイピング加工とは, Fig.1 に示すように工具とワークを同期回転させて連続的に切りくずを除去する加工である. 段階的に切込み深さを変えて数回に分けて加工を行い, この段階をそれぞれ pass1, pass2, ... というように呼ぶ. スカイピング加工は最近注目され始めた加工法であるので, 詳細はまだあまり解明されていない. よって幾何関係や加工精度に関する先行研究がほとんどであり, スカイピング加工最大の欠点である工具摩耗に着目しているものはない. そこで本研究では, FEM(有限要素法)を用いて応力と切削, 温度を解析し, 工具の摩耗量を推定することを目的とする.

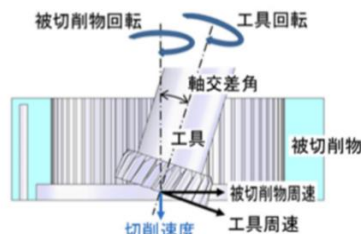


Fig. 1 Cutting mechanism of gear skiving [2]

Table 1 Features of machining method of internal gear

	ギアシューパ ー加工	ブローチ加工	ギアスカイ ピング加工
加工時間	×	◎	○
加工精度	△	△	◎
工具費	△	○	×
設備費用	○	×	△
加工制約	◎	×	○

### 2. 解析モデル

本研究で用いた解析モデルを Fig.2 に示す. このモデルは pass1 の定常状態の動きを再現したものである. 計算時間の短縮のため工具とワークの一部のみをモデル化した. ワークは接触部のメッシュを特に細かくした(黒く見えている部分). また, メッシュの詳細を Table 2 に示す.

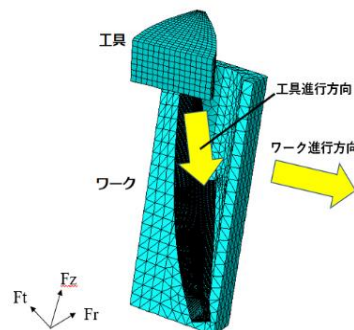


Fig. 2 Model of analysis

Table 2 Details of mesh

	工具	ワーク(接触)	ワーク(非接触)
要素	六面体	四面体	四面体
要素数	6225	303443	4968

### 3. 切削力解析

解析モデルの有効性を示すために, 切削力測定を行い, 解析値と比較した. Fig.3 に実験装置の様子を示す.

Kistler の回転動力計 RCD Type 9124B を用いて工具座標系における切削力 3 成分の測定を行った. 工具材は粉末ハイス鋼であり, 被削材は SVC435 である. なお工具は一枚刃であり, 計測のサンプリング周波数は 10000Hz である.

実験結果と解析結果の比較を Fig.4 に示す. なお  $F_z$  と  $F_r$  はそれぞれ主分力と背分力を表している. 最大値に誤差はあるものの, 切削力の支配的要素である主分力のグラフ形状は概ね一致しており, モデルの有効性が示された.

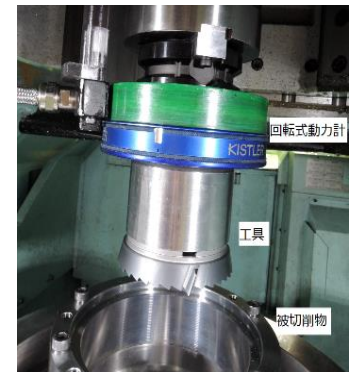


Fig. 3 System of experiment

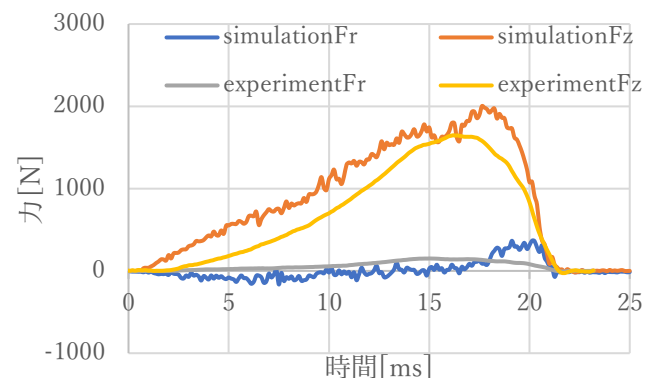


Fig. 4 Comparison of experiment and analysis of cutting force

### 4. 応力解析

スカイピング加工においては, 工具とワークの接触面積が絶えず変化するため単純に切削力の大小だけでは摩耗量を比較できない. そこで, 工具摩耗に大きく寄与する工具のすくい面における垂直応力を解析した. 切削力が最大値をとる 18[ms]時におけるすくい面のコンター図を Fig.5 に示す. 応力は右歯面に集中しており, 摩耗が大きくなることが推測できる.

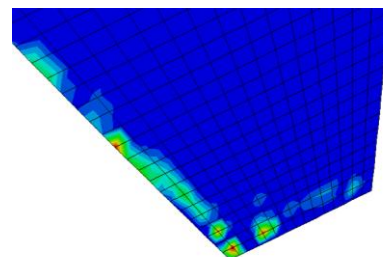


Fig. 5 Contour plot of vertical stress at 18ms

## 5. 温度解析

### 5.1 FEMによる温度解析

切削点温度の解析結果を Fig.6 に示す。工具とワークが接触すると、温度は急激に上昇し 500°C を超える。それから徐々に温度が上昇していき 700°C に達するが、19[ms]から 21[ms]にかけて再び急激に上昇しピークでは 850°C に達する。そして工具とワークが接触しなくなると、温度は急激に低下し約 270°C となる。

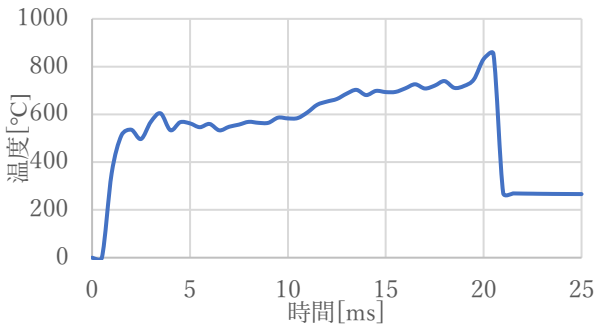


Fig. 6 Temperature in cutting

### 5.2 テンパカラーによる温度推定

前述したように切削力測定実験を行ったが、温度については計測が困難であったため実験値が得られていない。そこで FEM による解析結果と比較するため、実験で得られた切りくずの色から温度推定を行った。実験で得られた切りくずの一つを Fig.7 に示す。

切削加工における切りくずの色はテンパカラーと呼ばれており、切削点温度を推定することができる。テンパカラーと切削点温度の関係は経験的に知られているが、先行研究によってその精度がかなり高いということが示されている[3]。テンパカラーと切削点温度の関係を Table 3 に示す。淡青色の切りくずがいくつも見られたことから、切削点温度が 600°C 以上となっていることが分かり、工具に大きな負担がかかっていることが分かった。また、解析結果の妥当性も示された。



Fig.7 Chip of work piece(pass1)

Table 3 Relation of tempa color and cutting temperature

テンパカラー	切削点温度
薄黄色	約 300°C
褐色	約 350°C
紫色	約 400°C
薄紫色	約 450°C
濃青色	約 530°C
淡青色	約 600°C以上

### 6. 摩耗量推定

ギアスカイピング加工においては被削材に含まれる硬質粒子によって機械的に工具刃先が削り取られるアブレシブ摩耗が発生しているが、それに加えて高温・高圧環境下で工具材成分が被削材

中に拡散することによって摩耗が進展する拡散摩耗も発生していると考えられる。その二つの摩耗を考慮した次式は、先行研究によって旋削加工における有効性は示されている。このモデル式がスカイピング加工にも適用できるのではないかと考えた。

$$dW = dL \cdot C_1 \cdot \frac{H_w}{H_t} + dL \cdot C_2 \cdot \sigma_t \cdot \exp\left(-\frac{C_3}{\theta_t}\right) \quad (1)$$

ただし、 $dW$ :摩耗量の増分、 $dL$ :切削距離の増分、 $\sigma_t$ :すくい面の垂直応力、 $\theta_t$ :切削点温度、 $H_w$ :被削材の硬さ、 $H_t$ :工具材の硬さ、 $C_1, C_2, C_3$ :係数である。

このモデル式によって工具摩耗を求める手順を Fig.10 に示す。被削材の硬さ  $H_w$  と工具材の硬さ  $H_t$  は温度によって変化する。その結果をプロットしたものが Fig.8 と Fig.9 であり、フィッティングした近似式をそれぞれ式(2)と式(3)に示す。

$$H_w = -0.805\theta_t + 1236 \quad (2)$$

$$H_t = a\theta_t^4 + b\theta_t^3 + c\theta_t^2 + d\theta_t + e \quad (3)$$

( $a = -3.53e-08, b = 3.99e-05, c = -1.71e-02, d = 1.75, e = 2.65e+03$ )

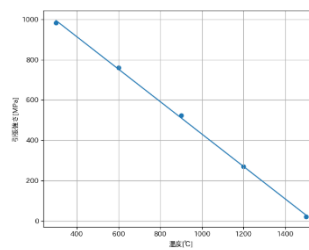


Fig.8 Relation of hardness of work and temperature

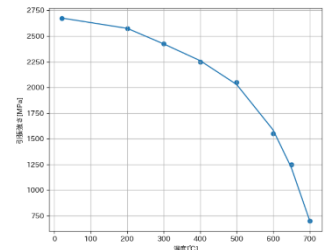


Fig.9 Relation of hardness of tool and temperature

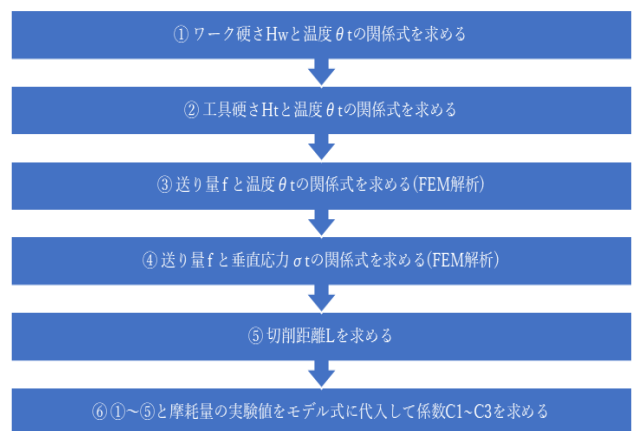


Fig.10 Flowchart of estimation of wear

## 7. 結論

- ・切削力解析によって FEM モデルの有効性を示した。
- ・応力解析によって工具摩耗が右歯面で大きいことが推定でき、温度解析と切りくずのテンパカラーによって切削点温度が 600°C を超えることを示した。
- ・実験値と解析値による摩耗量推定式の構築法を提案した。

## 参考文献

- [1] 瓜生耕一郎, “内歯車のスカイピング加工用テーパカッタ設計に関する研究,” 日本機械学会論文集, Vol.83, No.853, 2017.
- [2] 門田哲次, “内歯車加工の工具長寿命化・高能率化の実現,” 三菱重工技報, Vol.52, No.1, 2015.
- [3] 藤村善雄, “テンパカラーの酸化膜厚さによる数量化について,” 精密機械学会誌, 38 巻, 11 号, pp.902-907, 1972.