

力・温度に基づくギヤスカイピング加工の歯面評価

東京大学 ○五十子周太 任周偉 木崎通 方正隆 ©杉田直彦
株式会社 小松製作所 馮雁楠 長田哲 富山公博

要旨

近年高品質な内歯車製造法が求められており、ギヤスカイピング加工が注目されている。しかし、先行研究では工具摩耗や精度に関するものが多く、加工後の歯車表層に関する議論は乏しい。本研究では、歯面形成時の加工現象の解明のため幾何解析による切削力の推定と加工時のワーク温度の実測を行い、評価した。本研究で得られた成果により加工原理に基づく歯面品質の向上が可能となる。

1. 序論

近年、遊星歯車機構の需要増大をうけて高能率かつ高品質な内歯車製造法が求められている。ギヤスカイピング加工はこれらを両立し得る加工法として注目を集めている。ギヤスカイピング加工の概要 Fig. 1 に示す。これは工具とワークに軸公差角をつけて同期回転させ、連続的に切削し歯面を創成する加工法である。工具負荷低減のため、ギヤスカイピング加工では Fig. 2 のように複数回に分けて加工し、歯面を創成する、この各切削をここでは“Pass”と呼称する。

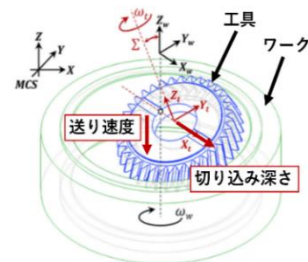


Fig.1 ギヤスカイピング加工の概要 [1]

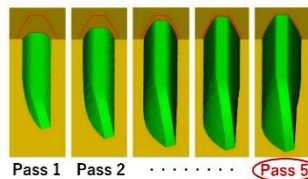


Fig.2 ギヤスカイピング加工の Pass 分割 [2]

ギヤスカイピング加工後の歯面品質について、これまで幾何的精度に関する多くの研究がなされてきたが、切削により生じる加工変質層などに関する議論は乏しい。しかし、加工後の結晶組織の変化はその後の熱処理プロセスや、最終的な歯車強度・寿命に大きな影響を与えると考えられる。また、ギヤスカイピング加工では送り速度・切り込み深さが加工現象を決定する主要な要素であり、これらは歯面の表面組織変化にも大きく関わると予想される。従って、送り速度・切り込み深さにより加工変質層を制御することで、歯車性能の向上ができると考えられる。本研究では歯面形成に関する最後の Pass における送り速度・切り込み深さが、歯面表層組織に与える影響を、切削力・温度に基づき評価する。

2. 切削力解析

(a) 解析方法

幾何的解析により、歯面が形成される時の切削力を評価する。Fig. 3 に最後の Pass における切り取り形状を示す。これは工具が 1 回ワークを切削する際の加工領域を指す。ギヤスカイピング加工では、この切取形状のまま歯筋方向に沿って、何度も切削していく。このうち、上縁部は一度切削されたらその後は加工されない部分であり、ここが加工後の歯面とな

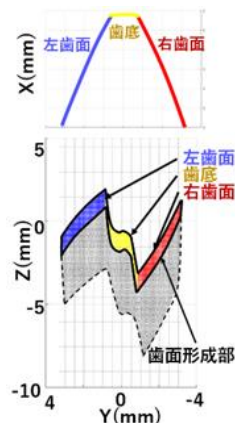


Fig.3 最後の Pass の切取形状と歯面形成部

る。そのため、ここの加工条件が歯面状態に大きく影響すると思われる。この部分を歯面形成部と呼称する。ギヤスカイピング加工では下に送りながら何回も加工し、Fig. 4 のように少しずつ歯面を形成していく。実際に加工後のワークには Fig. 5 のような S 字のカットマークが見られる。

本研究では加工後の歯面に与える影響を考えるため、Fig. 3 の赤・青色の領域の切削条件を解析する。解析にあたってはまず、ギヤスカイピング加工をシミュレーションする。次に、3 次元加工モデルとして傾斜加工モデルを採用し、すくい角、切取厚さなどを求めた [3]。それらを元に切削力を計算した。最後の Pass における送り速度・切り込み深さを変化させながら、合計 42 水準で解析を行い、左右歯面が形成されときの切削力を評価した。

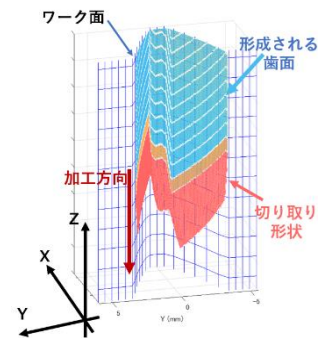


Fig.4 歯面の形成過程

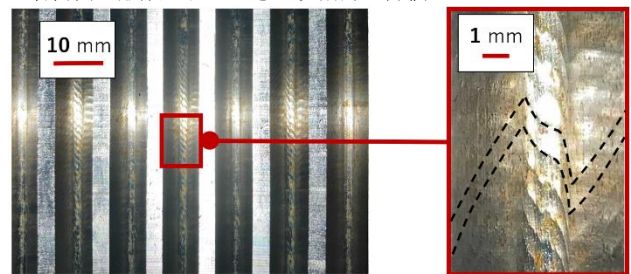


Fig.5 実際の加工後ワーク

(b) 解析結果

Fig. 6 に送り速度と左右歯面を形成する時の平均切削力を示す。代表して切り込み深さを 0.05mm, 0.5mm に設定した際の切削力を取り上げた。左右歯面ともに、送り速度を大きくすることで切削力が大きくなっていることがわかる。一方、切り込み深さは 10 倍に変化させてもほぼ切削力に影響がないことがわかる。また、左右歯面で比較をすると右歯面の切削に必要な力の方が若干大きくなっているが、送り速度による影響に比べ、その変化は小さい。従って、歯面形成時の切削力の変化は送り速度による影響が支配的であるといえる。

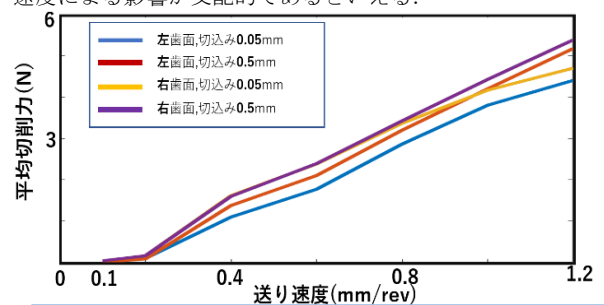


Fig.6 送り速度と切削力の関係

3. 加工温度測定

(a) 測定方法

ギヤスカイピング加工の最後の Pass におけるワークの加工温度を測定する。しかし、ワークの温度はサーモグラフィで計測できず、さらに工具とワークがともに回転するため、工作機械の外から有線で繋ぐことも不可能である。このような理由から、ギヤスカイピング加工における温度測定事例は報告されていない。そこで、歯車研削における熱電対を用いた温度測定事例を参考にした[4]。

本研究で使用した温度測定システムと実験系を Fig. 7 に示す。最後の Pass 前まで加工したワークを用意し、ある歯面の中央に、直径 0.4mm の穴を外から開けた。そこに熱電対を埋め込み歯面より露出された。熱電対の接点は加工時に素線を変形させて形成する。温度変化に応じ熱電対で誘起される電圧をデータロガーで 12kHz のサンプリング周波数で読み取り、SD カードに保存できるようにした。データロガーはワークの外側にネジ止めた。工具は 1 刃のみついているものを使用し、工具回転数は 400rpm、送り速度 0.8mm/rev、切込み深さ 0.2mm で加工を行った。この条件で左右歯面の加工時ワーク表面温度を測定した。



Fig.7 温度測定システムと実験系の概観

(b) 測定結果

Fig. 8 下に左歯面における温度測定結果を示す。加工中 4 回のピークが確認され、それぞれのピーク間隔は 4.3s であった。本実験の加工条件では、ある歯溝は計算上 4.35s 間隔で加工されるため、これは加工起因によるものと考えられる。最初のピーク以外は 250℃ 程度の温度を示していることがわかる。

次に、Fig. 8 上に最後のピークの温度変化を拡大したものを示すおよそ 0.1ms で温度が急上昇し、その後 0.9ms で 100℃ まで温度が下がる急激な変化をとらえることに成功した。

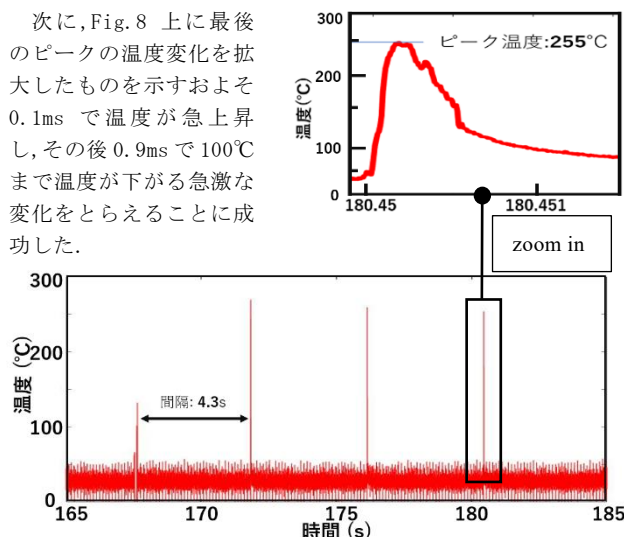


Fig.8 左歯面の温度測定結果

4. 考察

2, 3 章で得られた結果から、歯面の表面組織への影響を考える。まず加工温度の観点から考えると、加工温度の測定結果はピーク温度が 255℃ 程度であった。加工時の温度変化は、結晶組織の再結晶化による粒成長や、急激な体積変化による残留応力という形で影響を与えると考えられるが、鋼の再結晶温度は 450℃ 程度であり、それよりも 200℃ 近く低いことから加工温度の

与える影響は小さいと考えられる。従って、加工後の表面組織の変化は主に切削力の観点から議論できると考えられる。

切削力の解析では、切り込み深さの影響は小さく、送り速度が支配的となる結果が得られた。これは工具の運動を考慮することで理解できる。Fig.9 に工具軌跡と歯面形成の二次元に落とし込んだ模式図を示す。緑色の領域が歯面形成部であり、この切削力を解析した。最終的に形成する歯面は変わらないため、切り込み深さを変えるのは点線の位置を左右に動かすことである。本研究で解析した切り込み深さの範囲では、点線が緑色の領域に大きく干渉することがなかったため、切削力の変化が見られなかったと考えられる。一方、送り速度を変えると歯面形成部は全体的に厚くなる。そのため送り速度に切削力が概ね比例する結果が得られたと考えられる。

以上の結果・議論より、ギヤスカイピング加工後歯面の表面組織に与える影響は切削力によるものが主であり、それは最後の Pass の送り速度の影響が支配的であることが予想される。

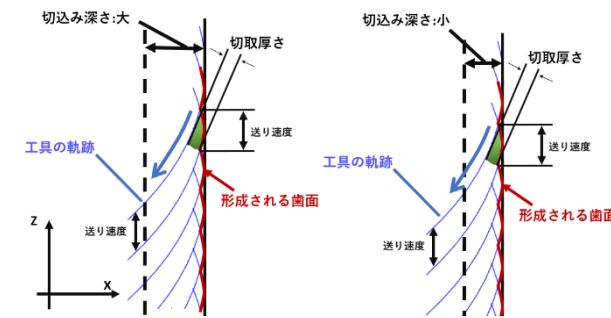


Fig.9 工具軌跡と歯面形成の関係

5. 結論

本研究により、以下の結果が得られた。

- ・幾何的解析によりギヤスカイピングの歯面形成時の切削力は送り速度の影響が大きいと分かった。
- ・ギヤスカイピング加工の温度測定に成功し、結晶組織への熱影響は限られることが分かった。
- ・以上の結果から、歯面の表面組織変化は送り速度により変化する切削力から説明できると予想される。

今後の展望としては、実際に最後の Pass を異なる送り水準で加工し、そのワークの表面組織を観察することで上述した予想と一致するか確認する必要がある。本研究に得られた成果で、加工原理に基づき歯面の表面組織を制御し、付加価値を持たせることに貢献できると考えられる。

参考文献

- [1] Z.Fang et.al, "Construction of uncut chip geometry in gear skiving using level contours", Precision Engineering, vol.73, pp.93-103, 2022
- [2] E.Guo et.al., "Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.79, No.1-4, pp.541-550, 2015
- [3] 小林剛, "傾斜加工モデルに基づくパワースカイピング加工の切削力解析", 精密工学会講演会論文集, 2019S(0), pp.652-653, 2019
- [4] T.Kizaki et.al., "Prospects of dry continuous generating grinding based on specific energy requirement", Journal of Manufacturing Processes, vol.61, pp.190-207, 2021