

ホブ加工歯面多角形誤差の解析

Analysis of Hobbing Tooth Surface Polygonal Error

板屋大樹 H. ITAYA 小幡俊祐 S. OBATA 中川 悟 S. NAKAGAWA

Hob gear cutting is widely used as an inexpensive and highly accurate processing method. Even in the rack and pinion type used in electric power steering, the pinion is machined by hob gear cutting, which has a major impact on performance. Hob processing is an extremely complicated processing in which a large number of cutting edges process the tooth surface, so analysis and evaluation are commensurately difficult.

The authors clarified the mechanism of tooth surface creation for hob gear cutting and developed analysis software. We also proposed a new evaluation method. Finally, we prototyped and evaluated gears using this method, actually mounted them on an electric power steering system, and confirmed the usefulness of this method.

Key Words: hob, polygonal error, electric power steering, rack and pinion gear, friction force, tooth surface

1. はじめに

ステアリングシステムには、ラック&ピニオン(Rack & Pinion: R&P)式が主に用いられており、ステアリングの音・振動にはR&Pのかみあい歯面の性状が大きく影響を与えている。特に近年の環境意識の高まりからハイブリッド車や電気自動車などの静粛性の高い車両の割合が増えてきている。電動パワーステアリング(Electric Power Steering: EPS)にもR&Pが用いられており、今後の電動化の流れから、さらなる静粛性が求められている。

図1に参考としてステアリング用R&Pの概略を示す。大多数のステアリング用R&Pは車両の搭載条件により、ラックとピニオンギヤが直交しておらず交差角を持つという特徴がある。インボリュート歯形を持つ歯車はかみあいの進行とともに、歯形方向に対して滑りを持つことは良く知られているが、交差角を持つステアリング用R&Pは同時に歯すじ方向にも滑りが発生する。この歯形方向・歯すじ方向の滑りと歯面形状により発生するしゅう動音が近年特に問題となっており、ステアリング用R&Pのかみあい歯面性状は歯形方向・歯すじ方向を同時に論じる必要がある。

R&Pの構成部品であるピニオンは、生産性・コストの観点からホブ加工が用いられている場合が多

い。ホブ加工は高速加工が可能で生産コストが安く量産に適しているが、断続切削による創成加工のため独特な凸形状を有し、これを多角形誤差と呼ぶ。図2は実際に歯面に現れた多角形誤差の様子である。多角形誤差はホブ加工を行ううえで必ず発生する加工誤差でしゅう動面上に発生する凸形状となり、しゅう動音の原因となる。

このようにステアリング用R&Pでは、歯形・歯すじ方向に滑りが発生すること、ピニオン歯面は多角形誤差を持つ特徴があり、歯面全体を包括的にみた多角形誤差の解析を実施する必要がある。また多角形誤差は製造コストにも影響を与えるため、いたずらに多角形誤差が小さくなる条件を追求することは、良質廉価な製品を提供するうえで現実的ではない。

そこで筆者らは、歯面全体の多角形誤差を導出する理論式を求め解析ツールを開発した。また多角形誤差に着目した測定方法を確立し、前述の解析ツールと連携させることによって、より現実に即した評価方法を確立した。最後に本手法を用いて多角形誤差の最適条件を試行しギヤを試作しステアリングシステムに組み込み、性能評価を実施した。これらの事例について報告する。



図1 デュアルピニオン式 EPS
Dual-pinion type electric power steering

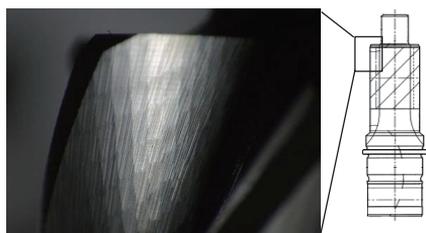


図2 歯面写真
Photo of tooth surface

2. 歯面解析方法

2.1 歯形方向多角形誤差

ホブ歯切り加工はホブと呼ばれる多数の切れ刃を有する刃具と被削ギヤの同期回転によって行われる加工方法である。図3にホブ歯切り加工の概略を示す。ホブ歯切り加工は刃具と被削ギヤの歯形形状が一致しない創成加工であると同時に、切れ刃が次々と歯面を加工する断続加工という特徴を有する。これらの特徴から、図4に示すように、理想的な歯形曲線とホブ切れ刃との差が切り残しとして生ずる。これが歯形方向の多角形誤差として歯面に現れる。

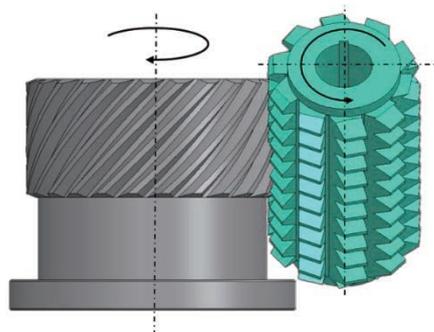


図3 ホブ歯切り加工
Cutting teeth by hobbing

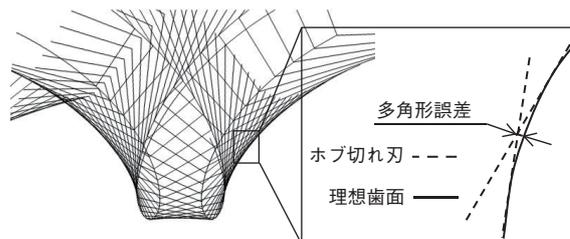


図4 歯形方向多角形誤差
Polygon error, tooth profile

2.2 歯すじ方向多角形誤差

ホブ歯切り加工では歯すじ方向にホブを移動させながら加工する。この際に図5に示すように、ホブの円筒形状と送り量に伴う切り残しが発生する。この切り残しをかみあい歯面に転写したものが、歯すじ方向の多角形誤差である。ここでホブの送り量を小さくすると多角形誤差は小さくなるのは自明である。その一方、加工時間が長くなり加工能力が悪化するデメリットがある。

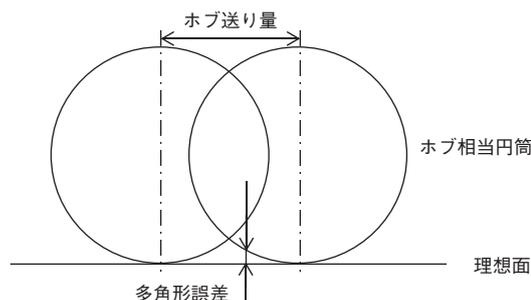


図5 歯すじ方向多角形誤差
Polygon error, tooth lead

2.3 歯面に表れる多角形誤差

実際のホブ歯切り加工で仕上げられた歯面には、前述した歯形方向・歯すじ方向の多角形誤差が複合した形で現れる。ホブは多数の切れ刃を持ち、またホブ自体の軌跡や諸元によって、実際に歯面を加工する切れ刃の加工軌跡が変わる。歯面に現れる多角形誤差を求めるには、これらの諸条件を考慮する必要がある。

そこでこれらの諸条件を考慮した歯面全体の多角形誤差形状を計算するツールを開発した。開発ツールによる多角形誤差の解析例を図6に示す。実際の歯面は歯形方向にはインボリュート等の歯形曲線、歯すじ方向にはヘリカルギヤの場合らせん状になるが、本ツールは誤差の無い理想歯面を平面と置き換えた形で、歯面に生じた誤差を表す。歯面任意位置での多角形誤差量が分かると共に、グラフィカルな表現を用い直感的に理解しやすい形

で多角形誤差が表現できている。

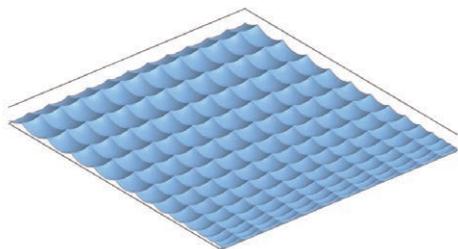


図6 歯面に現れた多角形誤差の解析例
Polygon error analysis on tooth surface

3. 歯面測定・評価方法

実際の歯面形状は歯車試験機によって測定される。歯形方向の歯車試験機の測定結果と解析結果の比較例を図7に示す。歯車試験機の測定結果は理想的な歯面を直線としてその誤差量をプロットする。実際の歯車試験機測定の結果では、設備の振れや振動、刃具の状況に応じて歯面形状に微小な誤差やうねりが生じている。これらは出来ばえを判断するのに重要な指標である一方、多角形誤差のみを評価したい場合にはノイズとなり、想定された加工ができたのか判断するのが困難な一因となっている。そこで多角形誤差の持つ周期性に着目し歯面形状の周波数分析を行った。この際、先に述べた解析ツールと歯車試験機の測定結果を連携させ、評価範囲を厳密に一致させる工夫を施した。図8の結果から、実測と解析の周波数分析結果が高い精度で一致しており、本手法を用いることで、実際の歯車の多角形誤差が正しく評価できるようになったと共に、解析ツールの確からしさも確認できた。

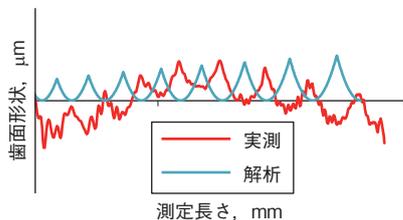


図7 歯面形状の比較
Comparison of tooth surface profile

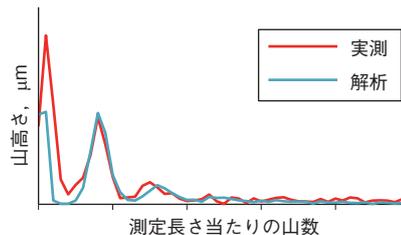


図8 歯面形状の周波数分析比較
Frequency analysis comparison of tooth surface profile

4. 多角形誤差改善テスト

本解析手法を用いて多角形誤差の改善を試みた。比較のために歯車諸元、刃具諸元、ホブ周速、送り量といった諸量は同一とし、生産に与える影響が些少なホブ軌跡などをパラメータとして開発ツールを用いて解析し、最適な加工条件を求めた。また得られた最適加工条件を元に実際に歯車を試作した。現行品と最適加工条件を元に試作した試作品の結果を図9に示す。現行品と比較して試作品の方が、歯面が平滑で高品位に加工できていることが確認できる。

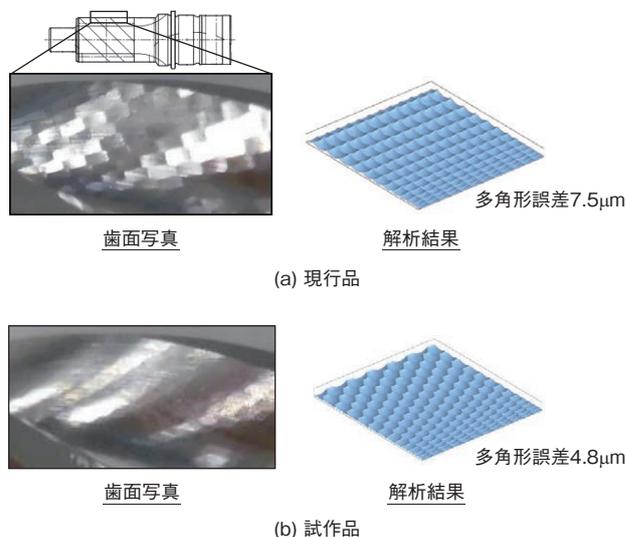


図9 歯面の比較
Comparison of tooth surface

また、現行品と試作品を実際にステアリングに搭載し、多角形誤差が製品に与える影響を確認した。試験方法の概要を図10に示す。システムは異音問題が多いDP-EPSシステムを選定した。ステアリングシステムを治具に固定し、ラックに対して一定速度で負荷を与え、ラックを駆動側、ピニオンを従動側として、その際の負荷をロードセルで測定した。熱処理ひずみ・アライメント

誤差・潤滑の影響を極力抑える為に同一のステアリングシステムに対して、現行品と試作品のピニオンを差し替えて試験を行った。またピニオンは熱処理後に仕上げホブ加工を実施している。図11にラック負荷測定結果を示す。多角形誤差を改善した試作品ピニオンを用いた場合のラック負荷の方が小さくなっていることが分かる。比較結果を図12に示す。横軸はそれぞれ現行品と多角形誤差を改善した試作品、縦軸は現行品を100%としたときのノーマライズされた結果である。試作品の方が現行品より、ラック負荷最大値は10%、変動幅は14%低減する結果となった。実際の車両においても聴感にて音の改善が認められており、多角形誤差の改善がステアリングシステムの性能向上に寄与することが分かった。

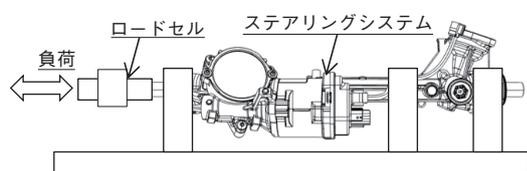


図10 試験方法の概要
Outline of examination procedure

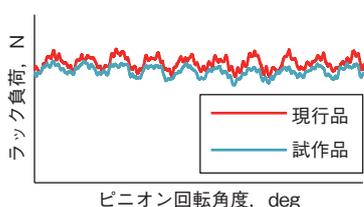


図11 ラック負荷測定結果
Result of rack load measurement

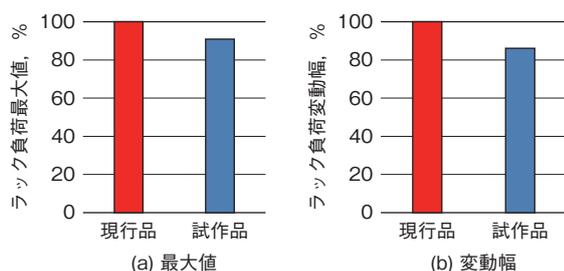


図12 現行品と試作品の比較結果
Results of trial product and current product

5. おわりに

ホブ歯切り加工によって生じる多角形誤差の解析・評価技術の取り組みを紹介した。得られた結果は、次の通りである。

- (1) 歯面全体の多角形誤差の理論を導き、簡便に多角形誤差を計算できる解析ツールを開発した。
- (2) 歯面形状を周波数分析し開発した解析ツールと連携させることで、多角形誤差に着目した歯面の評価ができるようになった。
- (3) 開発した解析ツールを用いて導出した多角形誤差を改善する加工条件をもとに試作品を製作した結果、高品位の歯面が得られた。またその試作品をステアリングシステムに組み込んだ結果、ラック負荷最大値およびラック負荷変動幅が改善され、本手法の有効性を確認できた。

本報告の手法を用いることで、これまで実験的手法に頼っていたホブ歯切り加工条件の解析が可能となり、また解析と実測結果を連携させることで多角形誤差に着目した評価が可能となった。本手法はホブ歯切り加工全般に適用可能で、今後の発展が期待できる。

参考文献

- 1) 小林 恒, 柴田英紀: ラック&ピニオンかみあいによるステアリング用ラック揺動トルクの理論推定, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1006(2009)24.

筆者



板屋大樹*
H. ITAYA



小幡俊祐**
S. OBATA



中川 悟**
S. NAKAGAWA

* 生産技術本部 駆動生産技術部

** 生産技術本部 ステアリング生産技術部