

技術論文

5軸加工によるベベルギヤの高精度化

Manufacturing of High-precision Bevel Gears with Five-axis Machining

川村直之
Naoyuki Kawamura
岩佐健司
Kenji Iwasa

直交軸伝達用の歯車としてダンプトラック等のアクスルなどに用いられるベベルギヤについて、コマツでは一部で歯切加工を専用機から同時5軸制御マシニングセンタ（5MC）へ切替え、旧来の専用機に優る生産性を実現してきた。また歯面精度について、予め予想される熱処理歪を歯切工程へ逆歪形状として織込むヒートコレクションに5軸加工の特徴を活かし、専用機では実現不可能な詳細な歪形状のヒートコレクションを行うことで、熱処理後の歯面仕上げ加工なしに高い精度を得ることができた。

For bevel gears which are used for an axle of dump trucks etc. as a gear for perpendicular-axis transmission, Komatsu made a change in a part of the gear cutting process, from exclusive units to the simultaneous five-axis control machining center (5MC), and has realized the productivity superior to the conventional exclusive units. Also, for the precision of the tooth surface, we introduced the characteristics of the five-axis machining to the heat correction that preliminarily incorporates expected distortion amount in the gear cutting as an inverse distortion shape to realize the heat correction to detailed distortion which is impossible with the exclusive units. This achieved high precision of bevel gears without the finishing process of tooth surface after heat treatment.

Key Words: 5軸加工, ベベルギヤ

1. はじめに

直交軸の動力伝達に多く用いられるベベルギヤ(傘歯車)はコマツにおいてもダンプトラックやホイールローダなどのアクスルをはじめ広く用いられている(図1)。ベベルギヤの歯面は複雑な曲面となっており、歯切専用機を用いて加工されることが多い。ベベルギヤ歯切専用機を用いた一般的な製造工程はスプレッドブレード・フィックスドセッティング法(以下5カット)と呼ばれ、ピニオン3工程、ギヤ2工程で歯切される(図2(a))。一方で近年実用化が進む同時5軸制御マシニングセンタ(5MC)は複雑な曲面でも正確な加工が可能となっており、これを用いたベベルギヤの加工実績も散見される。5軸加工では汎用のエンドミルを用いてピニオン、ギヤそれぞれ1工程で歯切が行え、また面取などの工程も集約できるため(図2(b))、ワークハンドリング工数、仕掛低減が可能である一方、一般には加工時間が非常に長く、生産性で専用機に劣るとされることが多い。コマツではこの課題に取組み、サイクルタイムを大幅に短縮することで一部の大型機種で5軸加工の採用を進めた。本紙ではコマツにおいて5軸加工をベベルギヤに採用するまでの経緯と、5軸加工の特徴を活かした精度向上の取組に関して紹介する。

2. ベベルギヤの5軸加工化

専用機による歯切工程は前述の通りギヤ2工程、ピニオン3工程で行われているが、現在社内で使用されている歯切専用機は老朽が進み、軸の損耗などにより能率、精度ともに課題を抱えていた。将来に向け投資も検討されていたが、グリーソンやクリンゲルンベルグといった専用機メーカー製の大型設備は非常に高価であるため、同等サイズで設備価格が約1/2となる5軸加工について検討を行った。

ベベルギヤの5軸加工化を進めるために当初懸念として(1)エンドミル加工による歯面の耐久性、(2)コストや出来高といった生産性が挙げられた。これらについては事前に十分検証を行う必要があったため、以下に検証結果の概要を記す。

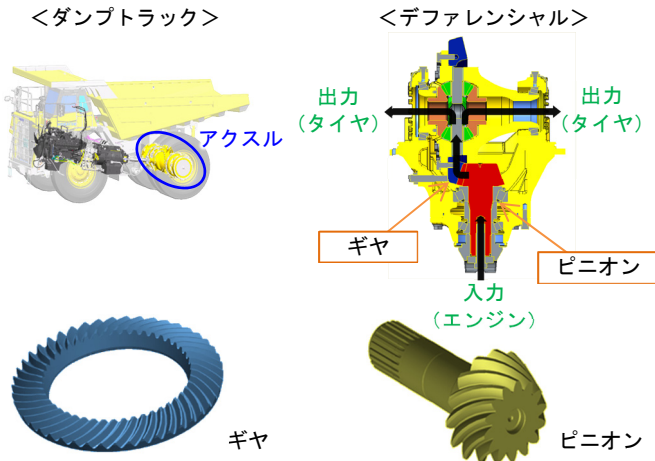


図1 コマツにおけるベベルギヤの使用例

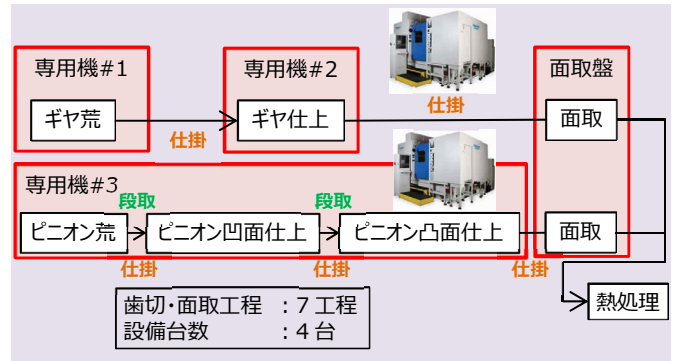
(1) 歯面の耐久性

図3に示すように5軸加工で歯車を加工する場合、多くはエンドミルの側面を用いたスワープ加工で歯の曲面を繋ぐように加工パスを作成する。この特徴から専用機と比較すると図4のように歯面に多角形誤差と呼ばれる曲面の近似誤差と、エンドミル1刃毎の送り量によるうねりが生じる。いずれも数 μm の凹凸であり、ショットピーニングや共ラップによる凹凸の改善も可能であったが、このような追加工程はコストの観点から必要最小限にとどめるべきである。そのため、多角形誤差やうねりが耐久性の低下を招くことがないか検証試験を行った。実車の運転負荷条件で目標時間まで耐久試験を行った歯面写真の1例を図5に示す。試験の結果、歯面にはわずかにマイクロピットを生じるのみであり耐久性に問題がないことを確認した。

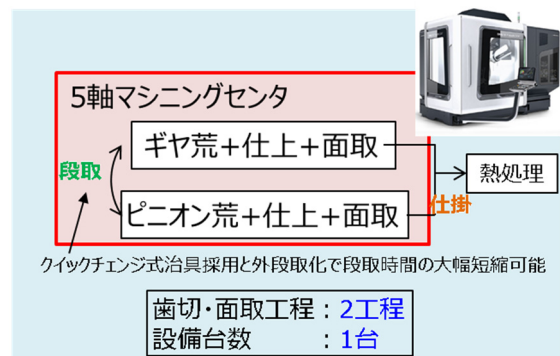
(2) 5軸加工の生産性

5軸加工での試作を開始した当初、エンドミルによる加工条件はほとんどが工具メーカーカタログによる推奨条件を用いていた。当初の加工条件は非常に生産性の低いものであったが、生産技術開発センターでは加工条件最適化のツールとして、振動解析や刃先温度解析の技術を有しており、これらを適用した加工条件向上、および加工パスの見直しによるエアカット低減、専用機では手扱い作業となっていた面取工程を集約するなどの改善を行うことで専用機に比べ大幅なサイクルタイム短縮を実現することができた。図6には専用機とのサイクルタイムの比較結果を示す。歯切加工時間としては若干増加するものの、工程集約、面取の時間短縮によりサイクルタイムは約49%の低減が可能となった。

上記により当初の懸念を解消することができたため、現在は大型ベベルギヤを中心に5軸加工の採用を進めている。



(a) 専用機による製造工程

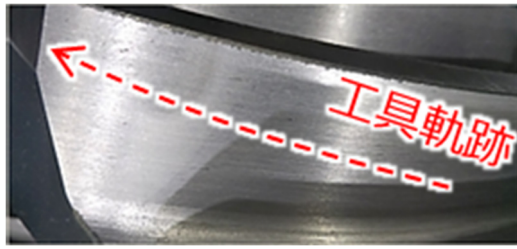


(b) 5MCによる製造工程

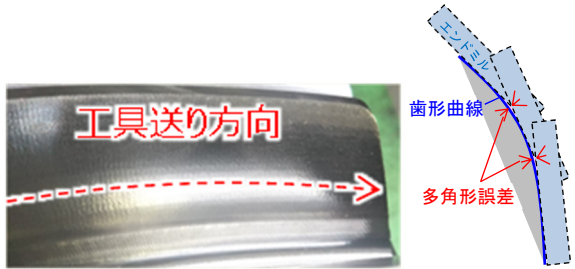
図2 5MCでの工程集約



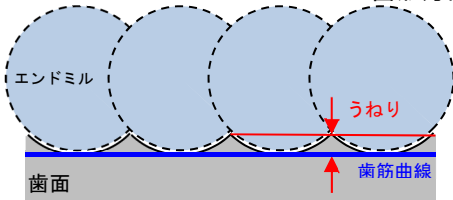
図3 汎用エンドミルを使ったピニオンの5軸加工



(a) 専用機による加工歯面



歯形方向断面模式図



歯筋方向断面模式図

(b) 5軸加工歯面

図4 専用機と5MCによる加工歯面の外観，特徴



図5 耐久試験運転後の歯面

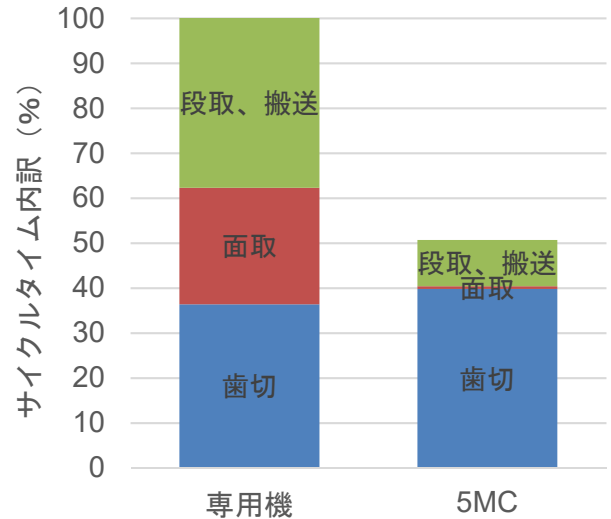


図6 専用機と5軸加工のサイクルタイム比較

3. 5軸加工を用いた歯面の高精度化

3.1 熱処理歪とヒートコレクションによる補正

ベベルギヤは歯切加工を行った後、浸炭焼入れ、焼戻し、組付基準面加工、歯面の共ラップの工程を経るが、熱処理後に歯面の仕上加工は行われず、一般に歯面精度を向上させたい場合、熱処理後に歯面の仕上加工工程を追加することが考えられるが、コスト増加を抑制するため、熱処理前の歯切り工程の工夫による精度向上に取組んだ。

ベベルギヤは熱処理歪によってねらいの歯面形状から乖離する場合、予め想定される熱処理歪量を、逆歪形状として歯切加工に織込んで加工するヒートコレクションが一般的に行われる。

専用機を用いた5カット工法ではピニオンの凹凸両歯面をそれぞれ別工程で仕上加工するため、表1上段に示すようにヒートコレクションはピニオンの仕上工程のみに適用され、ギヤ側は熱処理で歪んだ歯面をそのまま採用することがほとんどである。この歪んだギヤの歯面に対してねらった歯当りが得られるよう、ピニオンに対してヒートコレクションが行われているのが現状である。より設計性能に近い性能を担保するためにはギヤ、ピニオンそれぞれに対しヒートコレクションを行うことが望ましいが、専用機ではギヤの凹凸両歯面を同時に切削するため、ヒートコレクションにより両歯面を同時に高精度化することが難しく、追加コストが必要な点からも現実には採用されてこなかった。また表2に示すように、熱処理歪による歯形歯筋への影響は圧力角誤差、ねじれ角誤差、クラウニングといった比較的単純な変化だけでなく、うねりなどを持つ複雑な歪が発生し、専用機を用いたヒートコレクションではこれらの歪を正確に修正することができない。一方5軸加工の場合、前述の通り工具は一般的なエンドミルを用い、歯面の座標群に基づいて加工するため、NCプログラムの変更のみで複

雑な熱処理歪に対しても精度の高いヒートコレクションを低コストで実施することが原理上可能である。この特徴を活かし、歯面の座標群をベースとした高精度なヒートコレクション技術の具体的な手法の検討をおこなった。

表1 専用機, 5MCのヒートコレクションの比較

凡例 ○:可 △:うねりなどを除き一部可

ヒートコレクション適用ギヤ	ヒートコレクション前	ヒートコレクション後	専用機	5MC
ピニオン	<p>ギヤ歯面 実歯当たり ねらい歯当たり</p>	<p>ギヤ歯面 ギヤはずれたまま歯当たりは一致 応力増加 赤:実歯形 青:設計時</p>	○	○
ピニオン & ギヤ	同上	<p>ギヤ歯面 ギヤ歯形も変更し歯形、歯当たりとも一致 設計時のねらい通りの分布</p>	△	○

表2 誤差タイプと専用機, 5MCでの補正可否

凡例 ○:可 ×:不可

誤差タイプ	誤差イメージ	専用機	5MC
圧力角誤差		○	○
ねじれ角誤差		○	○
クラウニング		○	○
うねり		×	○
局所ダレ形状		×	○

3.2 歯面の誤差測定と補正方法

歯面の測定は大阪精密機械HyB-85 (図7) を用いて実施し、歯車諸元、設計サマリ (工具形状、専用機加工のプログラム情報) を基に計算されたノミナル歯面を基準とした法線方向誤差量を測定した。歯面の法線方向誤差は1歯面で歯筋方向29点×歯形方向113点取得している (図8)。得られた誤差量を基に、ヒートコレクション用サーフェスを作成する手順を図9に示した。計測で得られた誤差量にマイナスを乗じたものをヒートコレクションのねらい量とし、このねらいを持つ歯面の3次元座標を計算する。そのままでは歯底形状などの情報が不足しているため、この座標群をhypoid-facemill (ANSOL) に取込んで5~7次の曲面として多項式近似、スムージングし、歯底を含んだ歯切の狙い歯面の点群を出力させている。出力されたねらい歯面の座標群を3DCAD上でつなぎ合わせ、CAM用のサーフェスを作成し、これを基にツールパスを作成し加工用のプログラムを出力している。



図7 HyB-85外観

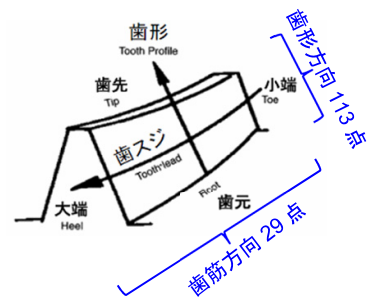


図8 HyB-85測定点数

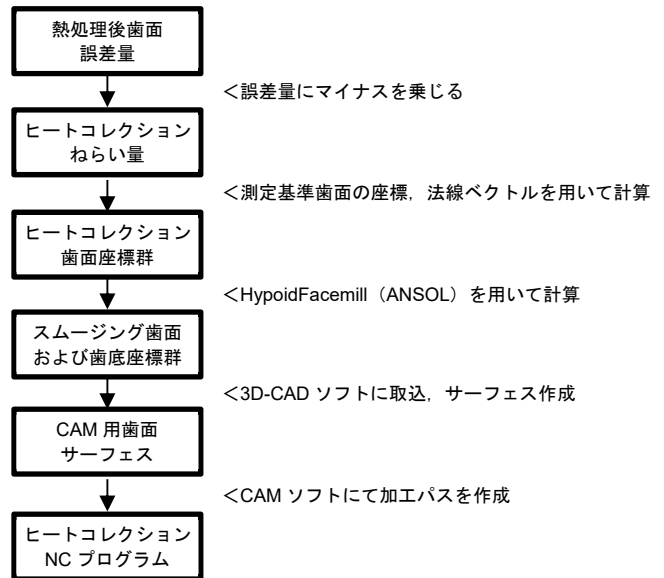


図9 ヒートコレクション用サーフェスの作成手順

試験に用いたギヤに対し、上記のねらい量（測定誤差をマイナスしたもの）をグラフ化したものを図10に示す。ヒートコレクションを行う前の最大誤差は48 μm であった。これを多項式近似した実際のねらい量を図11に、図12には近似による誤差量をそれぞれ示す。この結果から近似による誤差は最大15 μm 程度となった。

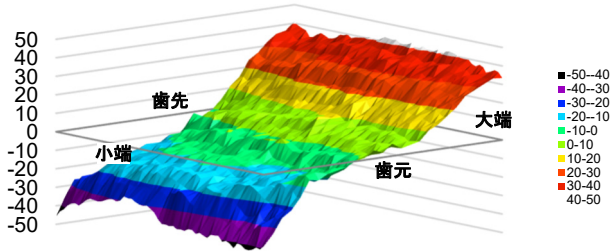


図10 ねらい量 (μm)

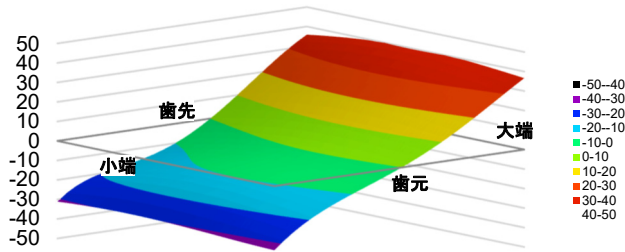


図11 多項式近似したねらい量 (μm)

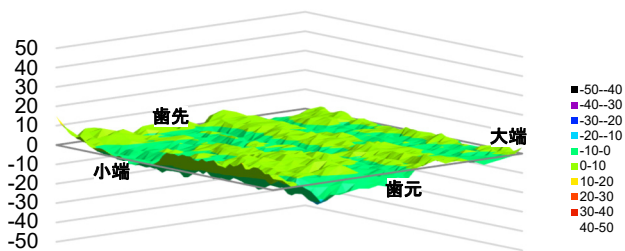


図12 近似による誤差量 (μm)

3.3 ヒートコレクション後の歯面精度

作成したギヤ用のヒートコレクションサーフェスを基にNCプログラムを作成し加工を行った。加工後歯面の外観を図13に示す。得られた歯面は十分滑らかであった。このギヤに熱処理を施し、熱処理歪が加わった後の歯面測定結果から、評価範囲でのねらい形状との誤差をプロットしたものを図14に示した。この結果からヒートコレクションにより最大誤差を48 μm から26 μm まで改善することができた。図15には参考として専用機を用いたヒートコレクション後のねらい形状との誤差の1例を示す。圧力角誤差やねじれ角誤差を修正しているが、歯筋方向に熱処理歪による大きなうねりが残り、最大誤差は37 μm となっている。これらの結果から上記手法により高精度なヒートコレクションが実現できていることが分かる。

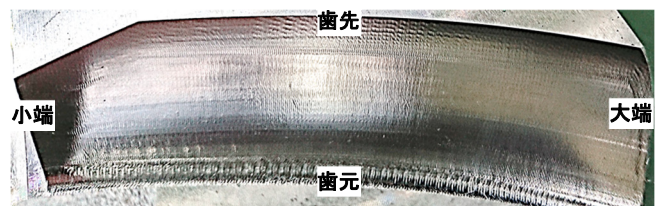


図13 ヒートコレクション後の加工歯面外観

(μm)

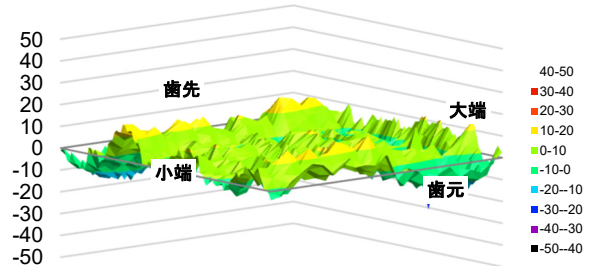


図14 ヒートコレクション後のねらい形状との誤差

(μm)

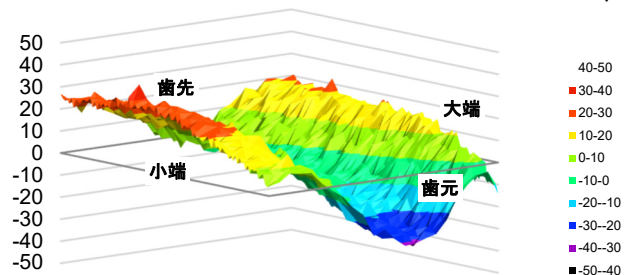


図15 専用機を用いたヒートコレクション後の狙い形状との誤差

4. 今後の展望

本紙では精度向上のため、ヒートコレクションによる熱処理前の歯切工程での改善を紹介したが、今後更に高い精度が要求されることが予想される。その場合、熱処理後の歯面仕上工程が必要となるが、本文中で触れた通りコスト増加が懸念となるため、熱処理後の歯面仕上についてもコストを抑制する加工技術の開発を進めたい。最近では5MCを前提とした生産性の高い歯形の研究も進んでおり、このような視点で設計強度と生産性を両立する歯形設計手法なども含め、さらに生産性、精度を向上できると考えている。

5. おわりに

5MCによる工程集約の例は世の中でも多く紹介されているが、本紙では特殊な曲面形状のねらい加工への適用と精度向上の例を紹介した。同様の加工技術はベベルギヤ以外にも適用可能と考えている。特に大型ワークは熱処理後の仕上加工工程を追加するとコストの大幅増加につながるため、本紙のような手法がコストの抑制に寄与すると考える。冒頭に触れた工程集約と合わせ5軸加工の特徴を最大限引き出すことで更なる生産性の向上を目指したい。

筆者紹介



Naoyuki Kawamura

かわむら なおゆき

川村直之 2011年、コマツ入社。

生産本部 生産技術開発センタ所属



Kenji Iwasa

いわさ けんじ

岩佐健司 2008年、コマツ入社。

生産本部 生産技術開発センタ所属

【筆者からひと言】

5MCは本例の工程集約などをはじめ、自動化に大きく貢献できる技術であるほか、その特徴を活かした部品形状や、アディティブマニュファクチャリング等と組合せた自由な設計を可能にしている。このような技術を活かし今後の商品力向上に寄与していきたい。