

技術論文

パワースカイビング加工による内歯切り加工の高能率化・高精度化 Using Power Skiving to Increase the Efficiency and Precision of Internal Gear Cutting

西川 司
Tsukasa Nishikawa
島田 智
Satoshi Shimada
小林 剛
Go Kobayashi
任 宗偉
Zongwei Ren
杉田 直彦
Naohiko Sugita

近年、パワースカイビング加工は高能率かつ高精度に内歯車を加工する方法として注目されている。しかし、パワースカイビング加工は加工メカニズムが複雑であり大きな切削負荷が発生することから、各メーカーが技術確立に苦慮している。そこで本研究では建機部品に対応した大型加工設備の開発と加工解析技術開発を行い、パワースカイビング加工技術の量産化を可能とした。本報告ではパワースカイビング加工技術の概要とともに、本研究の取組みについて紹介する。

Power skiving has recently been attracting interest as a highly efficient and precise method of machining internal gears. However, manufacturers are having difficulty establishing power skiving technologies since the technique uses a complex machining mechanism and creates a high cutting load. This study has responded by developing a large machining facility that can handle construction machinery parts, developing machining analysis technology, and enabling mass-production of power skiving technology. This report provides an overview of power skiving technology, and presents the work done for this study.

Key Words: パワースカイビング, 歯切り加工, 加工解析, ギヤ, 内歯車

1. はじめに

現在世の中（自動車関係等）の動向として、低燃費化・低騒音化の観点から、遊星歯車装置に使用される歯車の高精度加工化が求められている。一方で労働力不足対応やコスト競争力強化に向けて、歯車の高能率加工化のニーズはこれまで以上に高くなっている。

近年、パワースカイビング加工（図 1）は高能率かつ高精度に内歯車を加工する方法として注目されている。パワースカイビング加工は工具が連続的に切りくずを排出する加工であるためギヤシェーパ加工よりも能率が良く、またブローチ加工に比べ加工時の制約が少ないといったメリットがある。パワースカイビング加工は 1910 年に W.von Pittler によって提案されたが、工具寿命が短いことや仕上げ面の加工精度が粗いため当時は工業的に利用されることはなかった。しかし 1970 年以降に小島昌一らがパワースカイビング加工の原理を解析的に求めた^{[1][2]}。

一方で、工具のコーティング技術の進展や加工機械の剛性、回転軸の同期性の向上が進んだ^[3]。そのため新たな実用可能な内歯車の生産技術として注目され、現在の工法に代わる加工法として研究が進められてきた^[4]。さらに工具の設計^[5]やより良い加工条件についての研究がなされている^[6]。

本研究では建機部品に対応した大型加工設備の開発と加工解析技術開発を行い、パワースカイビング加工技術の量産化を可能とした。本報告ではパワースカイビング加工技術の概要とともに、本研究の取組みについて紹介する。

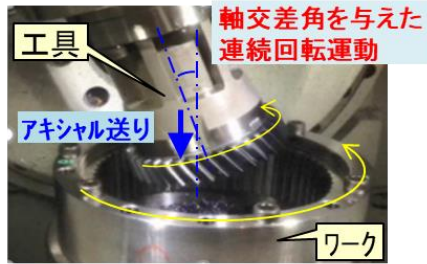


図1 パワースカイビング加工の様子

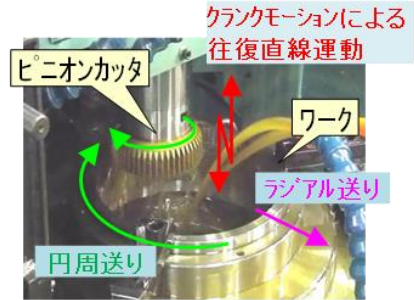


図2 ギヤシェーパ加工の様子

2. パワースカイビング加工について

まずギヤシェーパ加工とは、噛合うギヤ（大歯車）とピニオン（小歯車）の関係において、ピニオン側に逃げ角を設けてカッタにしたもの（ピニオンカッタ）を用いて、カッタの往復運動による形削にてギヤ歯車を加工する方法である（図2）。ワーク歯筋方向に刃が切削し、カッタ軸とワーク軸は必ず平行になる。この工法では加工に使われない時間が往復動作の半分を占めるため、加工能率がどうしても低くなる。

外歯車加工において確立されている、カッタの回転運動によって無駄な時間なく高能率加工できるホブ加工が、内歯車加工では実用化されていないため、フライス歯切り加工が適用可能な一部の大径・大モジュールギヤを除き、内歯車ではギヤシェーパ加工が広く用いられてきた。

それに対してパワースカイビング加工は、ピニオンカッタを回転運動させて歯車を加工する（ギヤシェーパ加工のピニオンカッタとホブ加工の回転運動の要素を足したもの）ため、内歯車でもカッタ回転運動による高能率な加工が可能となる。パワースカイビング加工では工具軸と歯車ワーク軸が平行ではなく食い違いの関係にあり、その傾き角により、カッタとワークが同期回転する際に歯筋方向の滑り成分となり、それが刃の切削作用となり、歯車を創成していく（図3）。

パワースカイビング加工の高能率加工を実現するためには、その切削力に耐えうる高剛性設備が必要となる。また、切削条件を決めるための設定パラメータが多く、加工メカニズムが複雑（すくい角が連続的に変化）であり、加工解析による適正な切削条件設定を行うことも重要となる。

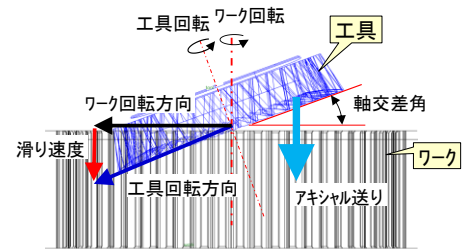


図3 パワースカイビング加工の加工原理

3. パワースカイビング加工設備の開発

パワースカイビング加工は近年の工具コーティング、設備剛性、回転軸の同期性の技術向上により新たな実用可能な歯車の生産技術として研究が進められてきた。そのような中で、パワースカイビング加工機についても2012年頃より工作機械メーカーによる開発・製品化が進んできた。しかしながら、設備開発は自動車関連部品を中心とした小型歯車向け加工機が中心であり、建設機械用部品のような大型歯車向け加工機の開発はごく一部であった。当社では過去のパワースカイビング加工試験の中で、大型歯車向け加工機として最も重要な点は設備剛性であると判断し、大型歯車向け加工機の開発を行った。開発は（株）唐津プレジジョンと共同で行うこととし、強靱な設備剛性を確保することを最大の開発コンセプトとした。開発したパワースカイビング加工機（GSV-60N）の外観を図4に示す。本機はテーブル径φ700であり、当社の内歯車生産の中で、中型パワーショベル等を含む生産量の大きい範囲をカバー出来る設備となっている。その他の特徴は以下の通りである。

- ・ 各軸の駆動フレームを門型及び両支持構造として高い剛性を確保
- ・ 対称フレーム構造の採用により、本体の軽量化及び加工物に及ぼす熱変形を抑制
- ・ 主軸及び各軸の案内面に振動減衰構造を採用
- ・ 多彩な加工を行う為、工具交換装置(ATC)を本体内部に配置



図4 パワースカイビング開発機の外観

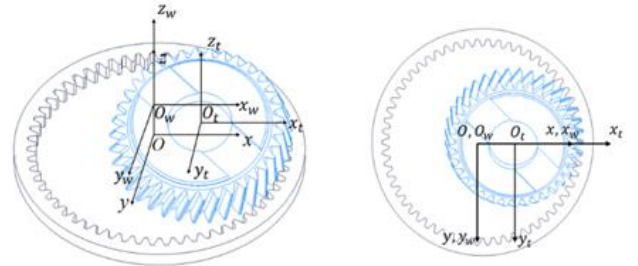


図5 工具とワークの座標系と位置関係

4. パワースカイビング加工解析技術の開発

4.1 加工原理

パワースカイビング加工を成立させるためには複雑な加工メカニズムについて、解析による切削性指標の数値化と適正化が必要となる。図5はパワースカイビング加工時の工具とワークの位置関係を示している。図5に示されている系には三つの直行座標系が設定されており、系全体に固有の座標系を $S_0(O-x, y, z)$ 、ワークに固定された座標系を $S_w(O_w-x_w, y_w, z_w)$ 、工具に固定された座標系を $S_t(O_t-x_t, y_t, z_t)$ としている。座標系 S_w, S_t の原点は座標系 S_0 においてそれぞれ $(0, 0, a)$ および $(0, b, c)$ と表記される。このとき、加工時のワークの回転速度 ω_w は次式で表される。

$$\omega_w = \frac{Z_t}{Z_w} \omega_t + \frac{2f \sin \Sigma}{m_t Z_t} \quad \#(1)$$

ただし Z_w, Z_t はそれぞれワークと工具の歯数、 ω_t は工具の角速度、 f は送り量、 Σ は軸交差角、 m_t は工具のモジュールを示す。

4.2 工具の軌跡の計算

パワースカイビング加工の工具の軌跡をシミュレーションで求める。工具の歯の側面はインボリュート曲線であり、一つの曲線は次式で表現される。

$$edge_{initial} = \begin{bmatrix} r(\cos \theta + \theta \sin \theta) \\ r(\sin \theta - \theta \cos \theta) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \#(2)$$

r は工具の基礎円の半径であり、 θ は歯先円直径 r_a によって決まるパラメータである。反対側の曲線も軸対称なものとして同様に表記できる。また工具の歯の先端部は直線として近似し計算を行った。

次に工具のすくい角及び傾斜角の分だけ工具の歯を回転させる。歯を回転中心とするための移動行列 T_{pan1}, T_{pan2} 、およびすくい角と傾斜角の分回転させる行列 T_{rake}, T_{inc} を作用させることで計算するため、工具の歯は次式で計算される。

$$edge_{tool} = T_{pan2} \cdot T_{inc} \cdot T_{rake} \cdot T_{pan1} \cdot edge_{initial} \quad \#(3)$$

ただし各行列は次式に示されるものである。

$$T_{pan1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{pan2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \#(4)$$

$$T_{rake} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_t & 0 & -\sin \gamma_t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma_t & 0 & \cos \gamma_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \#(5)$$

$$T_{inc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Sigma & -\sin \Sigma & 0 \\ 0 & \sin \Sigma & \cos \Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \#(6)$$

加工時は工具が角速度 ω_t で回転しているためその変換をする行列 T_{rotate} 、工具の軸交差角の傾きを示す行列 T_{cross} を作用させた上で、工具の位置を補正する行列 T_r を作用させる。したがって工具の軌跡は次式で表される。

$$edge_{move}(\Delta t) = T_r \cdot T_{cross} \cdot T_{rotate} \cdot edge_{tool} \quad \#(7)$$

ただし各行列は以下に示すものである。

$$T_{rotate} = \begin{bmatrix} \cos \omega_t \Delta t & -\sin \omega_t \Delta t & 0 & 0 \\ \sin \omega_t \Delta t & \cos \omega_t \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \#(8)$$

$$T_{cross} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\Sigma) & -\sin(-\Sigma) & 0 \\ 0 & \sin(-\Sigma) & \cos(-\Sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \#(9)$$

$$T_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \#(10)$$

4.3 Z-mapモデルを用いた切り取り形状の計算

Z-map モデルは三次元上の面を比較する際に用いられるモデルで、物体の通過領域などを示すことができる^[7]。今回のZ-map モデルではワークの内径を格子状に分割し、各格子の中心のx座標をy-z平面上の二次元配列に格納する。そして計算された工具の軌跡を元に各格子上のx座標を更新することで、工具先端が新たに通過した領域を二次元配列に格納する。この方法により初期平面または1サイクル前の切削過程とその次の切削過程を比較して切り取り形状を推定する。

4.4 加工解析と検証実験結果

上記の手法を用いて表1の条件に基づいて解析を行う。パワースカイピング加工では工具のx_t軸方向の切り込み深さを段階的に大きくして加工する。今回は5回に分けて加工しており、それぞれの加工をパス1, 2, 3...とする。表1の切り込み深さは各パスの増分を示している。

切り取り形状は加工現象の解明に繋がる重要なパラメータであり、そのデータから切削力を推定することや摩擦の進行を予測することが可能となる^[8]。今回はパワースカイピング加工の各パスの切り取り形状を計算により推定した。図6が各パスでの切り取り形状であり、上の図が立体図、中央の図が正面図、下の図が平面図を表している。正面図での2本の線は各パスでの刃先端部の両端を表している。すなわち2本の線の間は刃先端部、それより左側は左切れ刃、右側は右切れ刃が加工している領域を示す。

シミュレーションにおいて、パス1, 2では左切れ刃および刃先端部での加工が多く切り取り形状も直線的であるが、加工プロセスが進むにつれ右切れ刃での加工も行われ切り取り形状がV字型になっている。また平面図を

見るとパスごとに加工の進む様子が観察できる。

さらに実際の加工における各パスでの切りくずを図7に示す。計算によって得られた形状と比較すると、塑性変形を加味しても上記で述べた加工プロセスが一致していることが確認できる。パス1, 2では左切れ刃と刃先端による加工が主であり切り取り形状も直線的になっているが、切りくずも直線的な形状になっている。パス3以降では右切れ刃での加工も加わるため、切り取り形状と切りくずが共にV字型で一致していることが確認できる。

表1 切削パラメータ

Cutting tool	Teeth number [-]	36	
	Module [-]	3	
	Helix angle [degree]	20	
	Rake angle [degree]	12	
Workpiece	Teeth number [-]	58	
	Module [-]	3	
	Helix angle [degree]	0	
Cutting process	Axial feed [mm/rev]	0.8	
	Depth of cut [mm]	Pass1	2.18
		Pass2	1.61
		Pass3	1.25
		Pass4	1.00
		Pass5	0.20

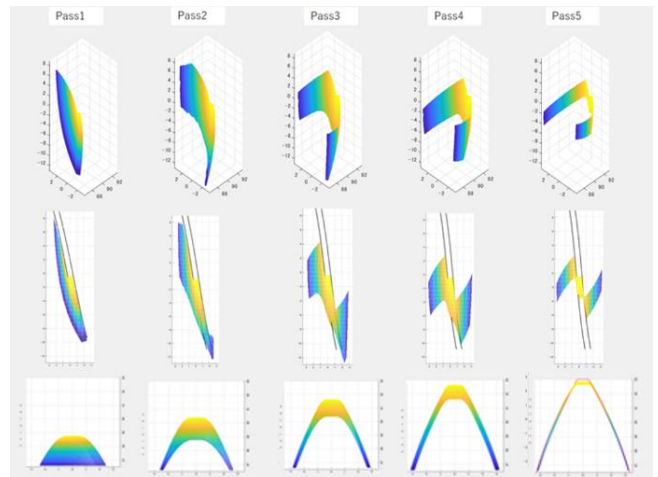


図6 各パスの切取形状

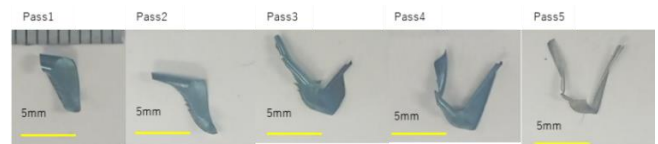


図7 切削試験での各パスの切屑形状

5. 連続加工試験結果

開発した加工機と加工解析技術による切削条件適正化を行い、モジュール 3.25、歯数 95、歯幅 121.5 mm の内歯車の連続加工試験を実施した。切削パラメータを表 2 に示す。加工後の歯車精度を図 8、図 9 に示すが、歯車精度は JIS2 級 (JIS B1702 1998) を満足することを確認した。ただし、本製品の歯形は加工時に歯先上がり 25 μ m を狙っている。歯切り加工能率はギヤシェーパー加工と比較して 3 倍 (図 10)、工具寿命は 1.2 倍を達成した (図 11)。

表 2 切削パラメータ

Cutting tool	Teeth number [-]	52	
	Module [-]	3.25	
	Helix angle [degree]	20	
	Rake angle [degree]	5	
Workpiece	Teeth number [-]	95	
	Module [-]	3.25	
	Helix angle [degree]	0	
	Tooth width [mm]	121.5	
Cutting process	Axial feed [mm/rev]	Pass1~4	0.5
		Pass5	0.3
	Depth of cut [mm]	Pass1	2.00
		Pass2	2.00
		Pass3	2.00
	Pass4	1.10	
	Pass5	0.31	

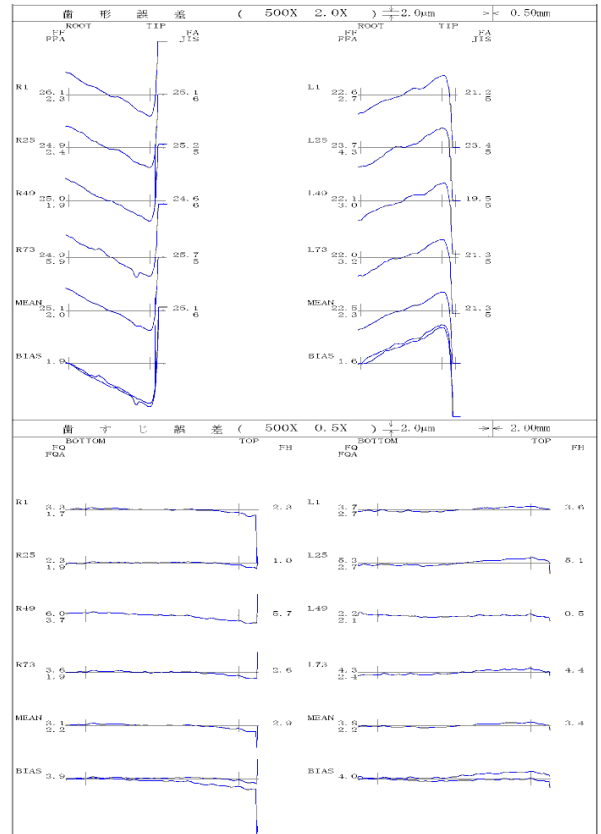


図 8 歯車精度 (歯形/歯筋)

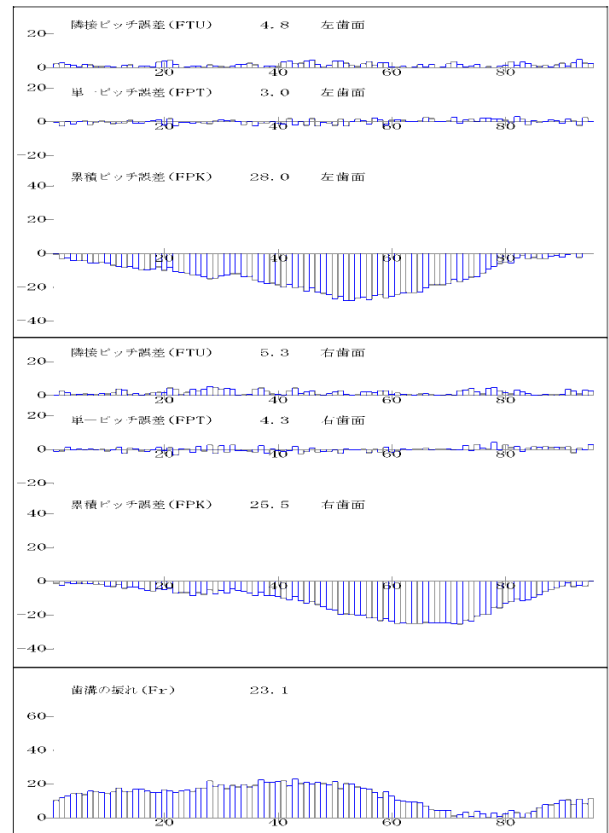


図 9 歯車精度 (ピッチ, 歯溝の振れ)

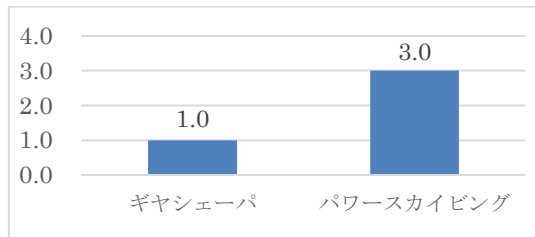


図 10 歯切り加工効率

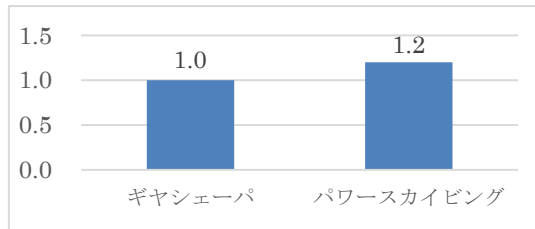


図 11 工具寿命

6. パワースカイビング加工による装置コンパクト化

パワースカイビング加工は加工効率向上のみならず、歯車の切り終わり部の短縮などの部品コンパクト化や、熱処理後のハード加工による高精度化が可能となる特徴も有している。当社ではパワースカイビング加工を採用し、歯車減速装置のコンパクト化を行った。図 12 に油圧ショベルの終減速装置の構成図を示す。これまで内歯車をギヤシェーパー加工にて加工を行ってきたため、工法上の制約から 2 段遊星減速装置に用いる内歯車は、減速 1 段目と 2 段目で歯車諸元を統一してきた。これは仮にギヤシェーパーで減速 1 段目と 2 段目の歯車諸元を変更した場合、同一方向からの加工は工具とワークの干渉により両歯車間の逃げ溝を大きく確保する必要があることや、別方向からの加工ではワーク反転が必要となるため、1 段目と 2 段目の同軸度保証や加工コストの点から採用していなかった。一方、パワースカイビング加工では同一方向から加工において、軸交差角や工具形状を最適化することで両歯車間の逃げ溝を比較的小さくすることが可能となる。さらに、パワースカイビング加工機に ATC 装置を搭載することにより 1 工程内で 1 段目と 2 段目が別諸元の 2 段ワークの加工が可能となる。図 12 の例では各段の別諸元化により最適設計することが可能となり、リングギヤの内径（歯底径）を▲9%小径化し、内蔵部品（プラネタリギヤ・サンギヤ・キャリア）のコンパクト化と合わせて▲8%の軽量化を行った。さらに装置全体の大きさの制約の中でリングギヤの肉厚を確保することで、リングギヤとハブの分割構造が可能となり、歯車部品としての強度が不要なハブの低級材化も行うことができた。本装置はパワースカイビングなどの新技術適用により、生産コストを従来比で▲10%低減することができた。

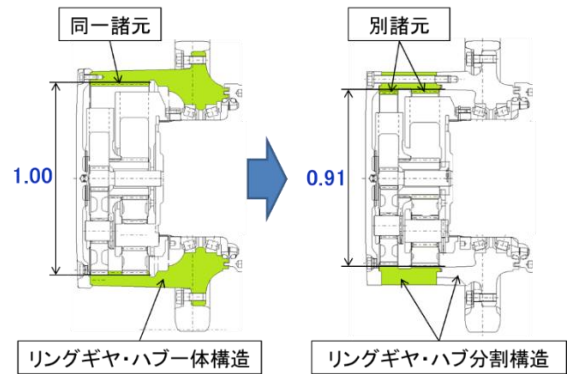


図 12 終減速装置コンパクト化の事例

7. おわりに

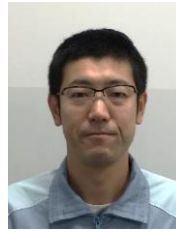
本研究では建機部品に対応した大型加工設備の開発と加工解析技術開発を行い、パワースカイビング加工技術の量産化を実現した。パワースカイビング加工での加工効率はギヤシェーパー加工と比較して 3 倍、工具寿命は 1.2 倍を達成可能であることを実証した。また、パワースカイビング加工の特徴を生かし、終減速装置コンパクト化を行い、▲8%の軽量化と▲10%の生産コスト低減を達成した。

今後は本技術の安定量産化と適用部品拡大を進めることで、当社建設機械の商品力向上に寄与したい。

参考文献

- 【1】 M. KOJIMA, “Gear Skiving of Involute Internal Spur Gear,” Tran. Proc. Paleont. Soc. Japan, no. 162, pp. 767-780, 1974.
- 【2】 Masakazu KOJIMA, “On the Clearance Angles of Skiving Cutter,” Tran. Proc. Paleont. Soc. Japan, no. 105, pp. 401-408, 1974.
- 【3】 E. Guo, R. Hong, X. Huang, and C. Fang, “Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 79, no. 1-4, pp. 541-550, 2015.
- 【4】 D. Spath and A. Hühsam, “Skiving for high-performance machining of periodic structures,” CIRP Ann. – Manuf. Technol., vol. 51, no. 1, pp. 91-94, 2002.
- 【5】 E. Guo, R. Hong, X. Huang, and C. Fang, “Research on the design of skiving tool for machining involute gears,” J. Mech. Sci. Technol., vol. 28, no. 12, pp. 5107-5115, 2014.
- 【6】 F. Klocke, C. Brecher, C. Löpenhaus, P. Ganser, J. Staudt, and M. Krömer, “Technological and Simulative Analysis of Power Skiving,” Procedia CIRP, vol. 50, pp. 773-778, 2016.
- 【7】 S. K. Lee and S. L. Ko, “Development of simulation system for machining process using enhanced Z map model,” J. Mater. Process. Technol., vol. 130-131, pp. 608-617, 2002.
- 【8】 A. Antoniadis, N. Vidakis, and N. Bilalis, “A simulation model of gear skiving,” J. Mater. Process. Technol., vol. 146, no. 2, pp. 213-220, 2004.

筆者紹介



Tsukasa Nishikawa

にし かわ つかさ
西川 司 2004年, コマツ入社。
生産本部 生産技術開発センタ所属。



Satoshi Shimada

しま だ さとし
島田 智 2016年, コマツ入社。
生産本部 生産技術開発センタ所属。



Go Kobayashi

こ ばやし ごう
小林 剛
東京大学大学院 工学系研究科
機械工学専攻。



Zongwei Ren

にん しゅう い
任 宗偉
東京大学大学院 工学系研究科
機械工学専攻。



Naohiko Sugita

すぎ た なお ひこ
杉田 直彦
東京大学大学院 工学系研究科
機械工学専攻 教授。

【筆者からひと言】

パワースカイピング加工は単に加工能率向上だけではなく、品質向上などパワースカイピング加工の特徴を生かした部品形状・構造により、コンポーネントの差別化が可能となります。今回の事例に限らず、様々な部品に適用されるよう引続き技術開発に取り組んでいきます。

産学連携共同研究を実施頂きました東京大学杉田教授および学生の皆様に心より感謝いたします。