

高性能歯車研削盤の開発

Development of High Efficiency Gear Grinder

京都精機製作所 橋谷道明*¹ 井上順章*²
安崎洋子*³

トラック、建設機械及び産業機械を中心に歯車装置の高精度化、コンパクト化のニーズが高まってきた。そのために、歯車の熱処理ひずみを能率よく、高精度に除去できる歯車加工法及び歯車研削盤が望まれてきた。筆者らは、このニーズに対応できる成形方式の歯車研削盤及びそれに必要な加工ソフトウェアを開発、商品化した。本機は電着CBN砥石（といし）の使用により、JIS 1級のトラック用歯車を約4minで仕上げることができるとともに、通常砥石を機上で整形することによりJIS 0級の歯車の高精度加工が可能である。

The demand for high accuracy and compact transmissions is increasing in the field of truck, construction vehicle and general power train manufacturing. The development of new technology for removing the distortion of heat-treated gears accurately and economically have long been awaited. We have developed a formed gear grinder and achieved following results. 1. We have developed a new algorithm to calculate wheel profiles with high speed, and an automatic dressing system. 2. We have developed a highly accurate and high speed workpiece table which can index within an error of 1 arcsecond error in 0.3 second (in the case of 40 gear teeth). 3. The JIS 0 class gear accuracy is achieved using a ceramic wheel dressed on the machine and JIS 1 class accuracy is achieved using an electro plated CBN wheel with a 4-minute grinding time.

1. ま え が き

従来歯車装置においては、航空機等の輸送機械や印刷機械等の産業機械の限られた分野で研削仕上げ歯車が用いられてきた。しかし、近年ユーザーの高級化志向に伴う低騒音化やコスト低減をねらったコンパクト化のため、トラック及び建設機械用ミッションギヤ等の歯車装置や一般の産業機械用の歯車装置においても、研削仕上げ歯車が採用されつつある。そのため、少量生産から中量生産向けの高精度で高効率な歯車研削盤の開発が望まれてきた。

筆者らは、このニーズに対応するため、電着CBN砥石（といし）を用いた高効率な成形研削加工が可能な歯車研削盤を開発し、さらにより高精度な加工を行うために、対話入力により砥石整形を自動的に行う機能を開発し組込んだ。本報では、機上での砥石整形のための砥石形状計算を行うアルゴリズム及び機械の開発内容について述べ、最後に得られた加工結果について述べる。

2. 砥石形状の解析

2.1 砥石形状を求める計算

成形研削では、被研削歯車のモジュール・圧力角・歯数・ねじれ角及び転位量の変化に応じて、その都度砥石整形を行う必要がある。そこで、被研削歯車の歯形の座標から砥石座標へ、従来より高速に変換する計算式を導入した。

被研削歯車と砥石の座標系を図1に示すようにとる。被研削歯車の形状を表す方程式を、

$$r = r_0(k, \theta) + p\theta k \quad (1)$$

被研削歯車と砥石の接触点における被研削歯車の形状曲線 r の法線 n を

$$n = \frac{\partial r}{\partial x_0} \times \frac{\partial r}{\partial \theta_0} \quad (2)$$

と表すと、被研削歯車の形状が既知の場合の砥石との接触条件は、

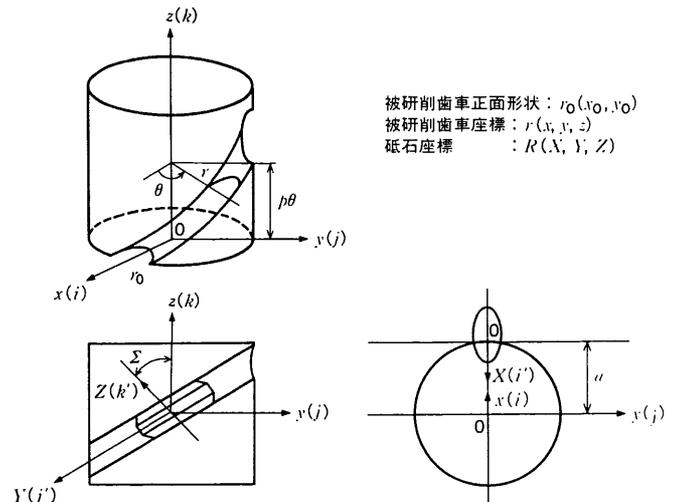


図1 被研削歯車と砥石の座標系
被研削歯車座標と砥石座標の関係を示す。
Relationship between gear and wheel

$$(k' \times R) \cdot n = 0 \quad (3)$$

となる。式(3)から、

$$f(\theta) = \left(\sin\theta + \frac{dy}{dx_0} \cos\theta \right) \theta \cdot p^2 \cdot \sin\Sigma + \left[\left(x_0 + y_0 \frac{dy}{dx_0} \right) y_0 \sin\Sigma + p a \frac{dy}{dx_0} \cos\Sigma \right] \sin\theta - \left[\left(x_0 + y_0 \frac{dy}{dx_0} \right) x_0 \sin\Sigma + p a \cos\Sigma \right] \cos\theta + (p \cos\Sigma + a \sin\Sigma) \left(x_0 + y_0 \frac{dy}{dx_0} \right) \quad (4)$$

となる。

ここで、

θ : 被研削歯車の正面形状の回転角 (rad)

Σ : 砥石取付角 (rad)

*1 技術部汎用機設計課
*2 技術部精機設計課
*3 技術部管理課

p : リード/ 2π
 a : 砥石・被研削歯車の中心距離 (mm)

である。

$f(\theta)=0$ を満たす θ の値を反復方法による解法で求める。この θ の値を座標変換式に代入すれば、砥石座標が求められる。

2.2 歯形パターン

図2に被研削歯車の歯形パターンの例を示す。

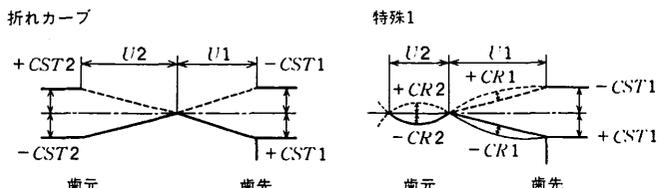


図2 被研削歯車の歯形パターンの例
 歯車の歯形が用意されている。
 Example of tooth profile patterns
 全部で12パターンの被研削歯

ここで、

U : 歯形チャート上の長さ

CST : 圧力角修正量

CR : 歯形アール修正量

本機には、例に示したのものも含めて12パターンの歯形が用意されている。それぞれに、対話画面で U , CST , CR の値を与えると、被研削歯車の形状が求められ、2.1節の計算により、砥石形状が求められる。さらに砥石形状からドレスのためのNCプログラムが自動作成される。

3. 歯車研削盤

3.1 機械構成

本機は主軸のほか、6軸をすべてNC化している。ワークテーブル軸 (C軸) のほかに、両軸の軸間距離を制御して切込みを与える X 軸、砥石の軸方向位置を設定する Y 軸、歯車の軸方向に砥石を送る Z 軸、砥石の取付け角を設定する A 軸がある。さらに、機上ドレスを行うには、砥石ヘッド上部に2個のロータリドレス装置を有するドレス装置を装着する。この装置にはドレス軸と砥石軸との軸間距離を制御する U 軸がある。砥石形状の整形はこの U 軸と Y 軸を用いて行う。

また、2.2節で述べた計算を行うために、本機には、NC装置とは別に32ビットのコンピュータを搭載している。

3.2 ワークテーブル

JIS 0 級のピッチ精度を実現するためには、割出し精度が3角度秒以下が必要であり、また非研削時間を短縮するために割出し時間を最小化する必要がある。そのために、トラクションドライブを用いたバックラッシのない駆動系を採用し、さらにテーブル軸に高精度ロータリエンコーダを直接取付け、クローズドループ制御を行った。また、減速比を大きくとり (1/60) テーブルの低慣性化を図った。その結果、 ± 0.92 角度秒の割出し精度 (ポリゴンミラーとオートコリメータによる計測結果) と 0.4 s の割出し時間 (歯数 40 枚時) を達成した。

3.3 熱変形対策

成形研削で仕上げた歯車の加工精度、特に歯形誤差は、砥石の輪郭形状のほか、砥石の取付角や砥石軸とワークテーブル軸との中心間距離の誤差に大きく影響を受ける。モジュール 5、歯数 20、ねじれ角 25° の歯車を歯形精度 JIS 0 級に仕上げるためには取付

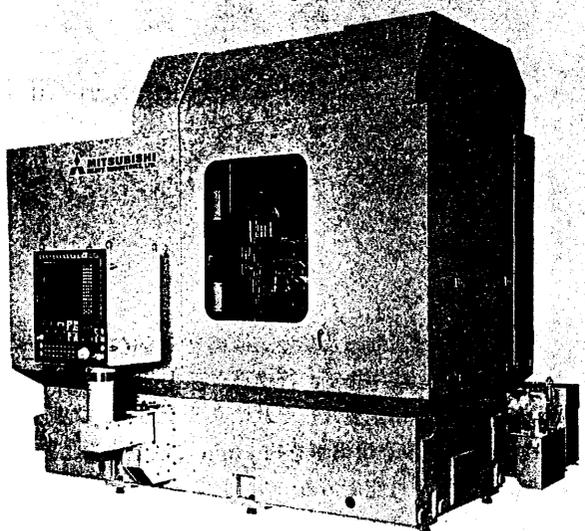


図3 三菱 CNC 歯車研削盤 ZG 400 CNC 開発した歯車研削盤の外観
 Mitsubishi CNC gear grinder ZG 400 CNC

表1 機械の主要仕様
 Main specifications

項目		仕様
加工	径(最大)	mm 400
モジュール	ル(最大)	mm 8
加工	歯幅(最大)	mm 300
加工	ワーク長(最大)	mm 500
ねじれ	角	deg ± 45
砥石	回転数	rpm 200~6 000
砥石	軸径	mm 80
砥石	径(最大)	mm 300
中心	間距離	mm 350(40~390)
ラジアル(X軸)速度	研削送り/早送り	mm/min (0.01~20)/5 000
砥石シフト(Y軸)速度	研削送り/早送り	mm/min (0.01~20)/1 000
アキシャル(Z軸)速度	研削送り/早送り	mm/min (0.1~5 000)/12 000
砥石ヘッド回転(A軸)速度	早送り	deg/min 720
テーブル(C軸)速度	研削送り/早送り	deg/min (0.01~3 600)/11 880
砥石	軸モータ	kW 11(30 min 定格)
総	電力容量	kVA 40
機	械寸法(間口×奥行×高さ)	mm 3 375×4 250×3 000
機	械重	kgf 15 000

角で 0.01°, 中心間距離で 10 μ m 以下の精度が必要である⁽¹⁾。そこで、本機では主要軸を高精度スケールを用いてクローズドループ制御するとともに、オイルシャワーの採用等により、機械温度分布を均一化し熱変形を抑えている。

3.4 歯車研削盤の主要仕様

歯車研削盤 ZG 400 CNC を図3に、また、その主要仕様を表1に示す。

4. 砥石と加工精度

4.1 電着 CBN 砥石による高能率加工

電着 CBN 砥石を用いると、ノードレスで高能率加工が可能になる。反面、平均砥粒間隔が長いために加工面が粗くなりやすく、歯形精度は砥石精度に依存する。

表2に電着 CBN 砥石を用いて加工したトラック用歯車の諸元と加工条件を示す。加工結果を図4に示す。JIS 1 級、表面粗さ

表2 加工歯車の諸元と研削条件
Gear specifications and grinding conditions

項目	トラック用歯車	産業機械用歯車
モジュール	3.35	4
歯数	28	62
圧力角	20°	20°
ねじれ角	28°, LH	25°, RH
外径	114 mm	278 mm
歯幅	26 mm	40 mm
硬度	670 (HV)	50~55 (HRC)
ワーク形状		
砥石種類	CBN ホイール 電着	一般砥石 ビトリファイド
寸法	160×30×80 mm	250×16×76.2 mm
砥粒	CBN 100 μm (荒砥石3枚, 仕上げ砥石1枚)	PA
ドレス	ドレス速度 ドレス切込み	ロータリッドレス
	ノードレス	100 m/min 0.01 mm×2回
研削条件	取り代 砥石回転数 砥石周速 仕上げ速度 仕上げ回数 加工時間	0.3 mm (片歯面) 4 200 rpm 35 m/s 1 350/1 500 mm/min 2 回 4 min/個
		0.12 mm (片歯面) 1 900 rpm 24.8 m/s 1 000 mm/min 2 回 21.5 min/個

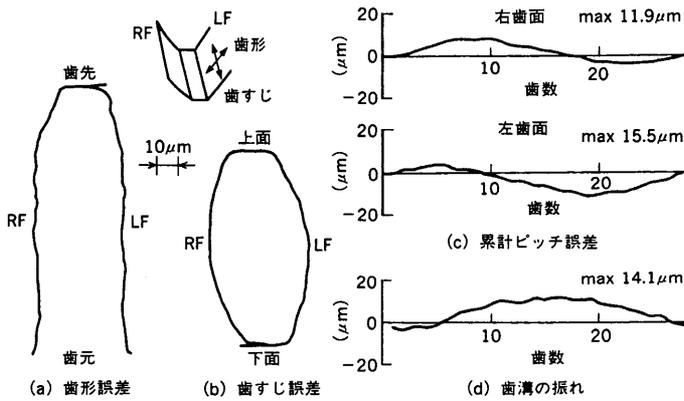


図4 加工精度 トラック用歯車を加工した結果, JIS 1級を満足した。Machining accuracy

Rmax 4 μm, 加工時間 4 min が得られ, トラック, 建設機械等の中量生産に適用できることが確認できた。

また, この歯車の加工後の歯面の残留応力を測定したところ, 歯面で約 600~800 MPa の圧縮応力が残留していることが分かった。さらに歯面近傍での硬度低下も認められなかった。歯底研磨が可能であることとあいまって本加工法は歯面強度の向上に有効であることが確認できた。

4.2 通常砥石による高精度加工

通常砥石は電着 CBN 砥石ほど寿命は長くないが, 適宜ドレスを施すことで, 正規の砥石形状を回復できるため高精度を得やす

項目	規格 (μm)	測定値 (μm)	
		左歯面	右歯面
単一ピッチ誤差	JIS 0級 6	3.2	3.5
隣接ピッチ誤差	↑ 6	3.1	3.5
累積ピッチ誤差	↑ 23	15.8	18.1
歯溝の振れ	↑ 16	12.7	
歯形誤差	↑ 4	下記	
歯すじ誤差	JIS 0級 9	下記	
面粗度	-	Rmax 1.5	
歯すじ誤差 (JIS 0級)			
左歯面	下面	上面	右歯面
			下面
			上面
歯形誤差 (JIS 0級)			
左歯面	歯元	歯先	右歯面
			歯元
			歯先

図5 加工精度 産業機械用歯車を加工した結果, JIS 0級を満足した。Machining accuracy

い, この研削法により, 表2に示す諸元の産業機械用歯車を加工した結果を図5に示す。歯車精度は JIS 0級に合格しており, 表面粗さは Rmax 1.5 μm であり加工時間は 21.5 min であった。

5. まとめ

トラック, 建設機械及び産業機械用の焼入れ後の歯車を高効率・高精度に研削することができる歯車研削盤の開発に取組み, 次の結果を得た。

- (1) 砥石形状の計算を高速に行うアルゴリズムを導入し, 対話入力から砥石整形を自動的に行うシステムを商品化した。
- (2) トラクションドライブ機構の割出しテーブルを組み込んだ歯車研削盤を商品化した。
- (3) 電着 CBN 砥石を用いて, トラック用の減速歯車を加工時間 4 min で, 形状精度 JIS 1級, 表面粗さ Rmax 4 μm に加工できた。
- (4) 機上ドレスした通常砥石を用いて, 産業機械用の歯車を形状精度 JIS 0級に加工できた。
- (5) 本機による加工が, 歯面及び歯底の強度向上に有効であることが確認できた。

最後に本研究を進めるに当たり, 砥石形状の計算アルゴリズムの開発において御指導いただきました九州産業大学工学部丘華助教授に謝意を表します。

参考文献

- (1) 吉野ほか, 歯車の成形研削における誤差補正について, 日本機械学会論文集 Vol.57 No.543 (1991-11)