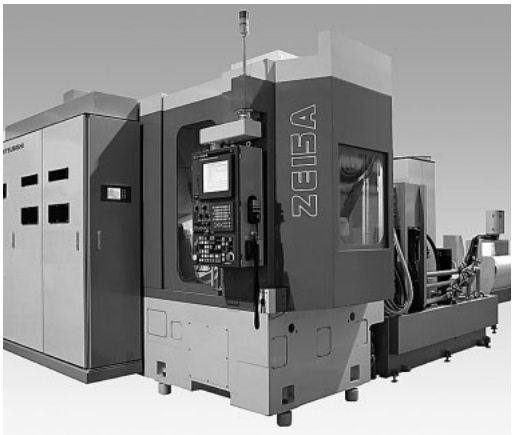
特　集　論　文



静粛・コンパクト・低コスト歯車を実現するZE15A

Gear Grinding Machine ZE15A for Low-noise, Low-cost, and Compact Gears

橋谷道明*1 Michiaki Hashitani　増尾光一*2 Kouichi Masuo　勝間俊文*2 Toshifumi Katsuma
柳瀬吉言*2 Yoshikoto Yanase　丸山和孝*2 Kazutaka Maruyama

近年，自動車用ミッションギヤの低騒音化・低振動化のために歯車の加工精度の要求がますます高まっている．従来，歯車の仕上げ加工は熱処理前のシェービング加工が主流であったが，さらなる高精度化のために熱処理歪みを除去可能なように熱処理後に高精度・高能率に加工する創成研削方式の歯車研削加工にユーザニーズが移行している．国内では欧州機がほぼ独占しているこの市場に，ユーザニーズに合致した量産ライン向け歯車研削盤としてZE15Aを開発したので報告する．

1. は　じ　め　に

歯車研削方式には大別して創成研削方式と成形研削方式がある．量産加工において求められる高能率かつ高精度な加工を実現するには，ホブ切り加工と同じ原理でねじ状砥石を用いた創成研削方式の機械が適している．国内の創成研削方式の歯車研削盤市場は，欧州機がほぼ独占しており，対抗できる歯車研削盤の開発が急務であった．

当社では急速に拡大しつつある市場ニーズに対応するために創成研削方式による歯車研削盤として，ZE15Aを開発した．主要仕様を表1に示す．開発のコンセプトは以下の3点である．

(1) 機上の自動ドレス機能による，一般砥石を用いた高精度加工

(2) 多条ねじ状砥石による高能率加工

(3) 全軸NC化と対話型入力機能によるスキルレス化

本稿では加工の原理，制御方法について述べ，開発したZE15Aを紹介し，加工事例を示す．

2. 加　工　原　理

2. 1　加工原理

ねじ状砥石を用いる歯車研削加工は図1(a)に示すように，ホブ切り加工と同様，砥石のねじ筋が被研削歯車（ワーク）とかみ合い運動を行い，インボリュート創成を行う研削方式である．本方式は，ラック歯形の平形砥石や皿形砥石を用いる割り出しを必要とする他の創成研削方法に比べて，ピッチ精度が良好で生産

表1　創成歯車研削盤ZE15A主要仕様

No	項　　目	仕　　様
1	ワーク最大径 (mm)	ϕ150
2	加工可能モジュール	1～4
3	加工可能歯数	5～1000
4	砥石径×長さ (mm)	外径ϕ300×長さ125
5	砥石最大回転数 (min^{-1})	4500
6	最大条数	7　最大ピッチ32mm
7	テーブル最大回転数 (min^{-1})	1500
8	主軸モータ（連続定格） (kW)	17
9	NCシステム	ファナック160iMB
10	機械質量 (kg)	10000

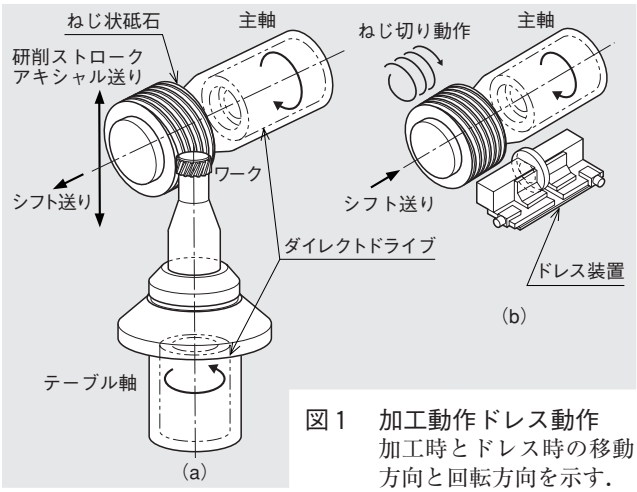


図1　加工動作ドレス動作
加工時とドレス時の移動方向と回転方向を示す．

*1 工作機械事業部技術部歯車機械設計課長
*2 工作機械事業部技術部歯車機械設計課

性が高く自動化が容易である．

2．2　多条砥石による高能率加工

砥石の回転数が同じ場合，多条砥石を使用することでテーブル軸を高速回転にでき，高能率加工が可能となる．5章の加工事例に紹介するワークの場合，1条砥石で加工すると加工時間は約150秒かかるが，3条砥石による加工では，テーブル軸の回転数を3倍に上げることが出来るので，実加工時間50.5秒である．

2．3　砥石の機上ドレス

歯車研削用のねじ状砥石の場合も他の研削砥石と同様に，砥石整形と切れ味保持のためのドレスが必要である．ねじ状砥石の場合は，図1(b)に示すように主軸とシフト軸を同期動作させることでねじ切りの動作を行いながらドレスを行う．

機上にドレス装置を設置することで，砥石を主軸から取り外すことなくドレスが可能で，高精度な砥石整形が可能となる．さらにNC軸で全てドレス動作・ドレス歯合わせ動作を行うことで，完全自動ドレスが可能となり，ドレス時間の短縮が計れる．

2．4　シフト研削と砥石の寿命

高能率でワークを加工するために本機ではシフト研削を採用した．シフト研削とは，図1(a)でシフト送りを行いながらアキシャル方向に研削送りを行う加工法である．この加工法では常に砥石の新しい切れ刃面を使用しながら加工できるので重研削が可能である．

通常，砥石の端から順にシフト研削を行い，砥石全幅を使用するとドレスを行う．ドレスインターバルは表2のワークの場合で30～40個である．

1回のドレスによる砥石の減少量は，直径で0.4 mm程度である．本機で使用可能な砥石径は300 mm～約220 mmであるので，1個の砥石で8 000個ワークが加工可能である．砥石の価格を約10万円とすると，ワーク1個当り12～13円程度の砥石費用となり，客先要求を充分満足できる．

表2　加工ワーク諸元と加工条件

被削歯車緒元	砥石緒元	加工条件		
モジュール　3	外径　ϕ300 mm		粗	仕上
歯車　31	砥石幅　125 mm	砥石回転数 (min^{-1})	2850	3800
圧力角　20°	条数　3	研削速度 (m/sec)	45	60
ねじれ角 (方向)　20° 右	使用砥石 CXY120I8V104	アキシャル送り (mm/rev)	0.8	0.4
材質　SCM415 表面硬度HRC60		ラジアル 切込み量 (mm)	0.25	0.08
外径　ϕ105 mm		送り方向	クライム	コンベ
歯幅　40 mm		研削油剤	不水溶性	

3．機械の開発

3．1　主軸・テーブル軸の構造と高精度な同期制御

多条砥石による高能率歯研を実現するためには，主軸・テーブル軸の高精度な同期制御が必要である．ギヤトレインやカップリングを有する構造では，ガタなどの非線形要素により制御ゲインを十分上げられず，必要な同期制御性能が得られない．また，ギヤトレインそのものが加工ワークの騒音発生原因となり，静粛な歯車を加工するためにはなくす必要がある．

本機では図2に示すようにビルトインモータを用いたダイレクトドライブ構造を採用した．

本機の主軸・テーブル軸最大回転数はそれぞれ4 500 min^{-1}，1 500 min^{-1}である．本回転領域で十分な制御性能が期待できるモータとして，同期ビルトインモータを採用した．

ねじ状砥石による歯車研削加工の場合，加工前ワークの歯車精度に起因する負荷変動が加工中に発生する．加工前ワークの累積ピッチ誤差が主な原因で，加工中にワーク回転周期の研削取代の変動が起こり，負荷が変動する．そのためワーク回転周期の同期誤差変動が発生し，加工後の歯車精度に大きく影響する．本機では，この負荷変動が一定の周期性を持つことに注目し，当社ギヤシェーパで採用している“フィードフォワード補正方式”[(1)]（周期的な誤差量から制御補正量を逐次求めながら制御する方式）の適用により，同期誤差量を約15 %まで抑えることに成功し，機械要求精度を大幅にクリアした．

3．2　ドレス装置の機構（特許出願中）

本機では，図3に示すように，省スペース化のため

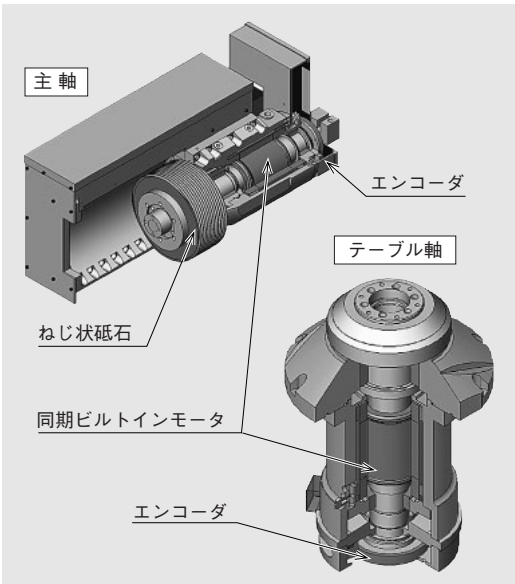


図2　主軸・テーブル軸の構造図　　ビルトインモータによるダイレクトドライブ構造．

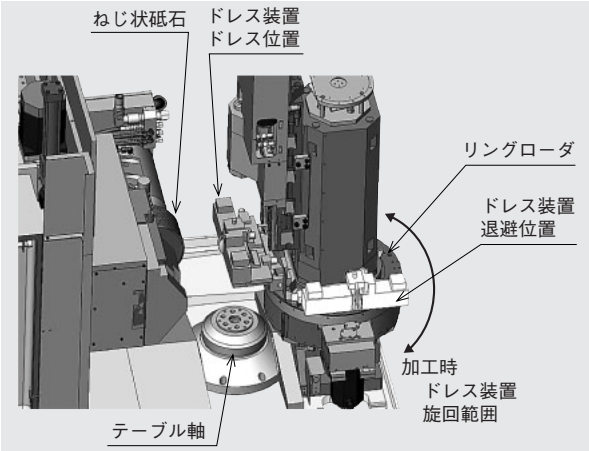


図3　ドレス装置の機構　　リングローダ上にドレス装置を設置した．

ドレス装置をリングローダ上に設置した．ドレス時には砥石正面に配置され，高精度カップリングを用いて高精度にクランプする構造である．

ドレス装置の配置としては，主軸の回転振れ誤差などの砥石の形状誤差要因を減らすために，砥石から見てワークを加工する側に配置した．また，ワーク加工時に用いるNC軸を使用してドレス動作が可能なのでドレス用にNC軸を追加する必要もない．

ワーク加工時には図3の退避位置に移動し，加工の妨げにはならず，ローダによるワークの搬入搬出時にも，退避位置側で旋回するのみである．

3．3　高速歯合わせ装置

歯車研削では砥石とワークの位相合わせのためにワークの歯溝位置を検出する必要がある．本機では非接触式センサを用いてワーク全周の歯溝位置を検出し位相合わせ位置を割出しているが，専用の高速信号処理回路を開発することで検出時間を約1秒に短縮した．

4．加工支援ソフト

4．1　加工シミュレーション

歯車加工においては加工後の歯面形状を予想する加工シミュレーションが重要なツールとなっている．特に負荷がかかった状態で騒音や振動が生じないようなかみ合いを実現するために単純なインボリュート歯形ではなく複雑な歯形・歯すじ形状を要求される場合には不可欠である．

例として，はすば歯車の歯すじ方向にクラウニングを施す場合の加工シミュレーションを説明する．

通常歯すじ修整は，砥石をワークのアキシャル方向に送るときに，砥石とワークの中心間距離に補正運動を与えることで行う．このときのシミュレーション結果を図4に示す．

本結果は補正運動により目標値通りのクラウニング量が得られることを示している．また歯幅方向で中央部の歯形は変化しないが，砥石が切り込む歯幅端では歯形圧力角(傾き)が変化していることを表している．

また，本加工シミュレーションを用いることで創成運動に同期誤差がある場合や位置決めに誤差がある場合の歯面の形状誤差を予測・解析することができ，事前検証やトラブル対策にも有効である．

4．2　スキルレス化（特許出願中）

従来のねじ状砥石による歯車研削盤の圧力角の調整方法を図5に示す．作業者は修整したい圧力角に応じスケールやゲージを用いてドレッサの旋回角度を調整

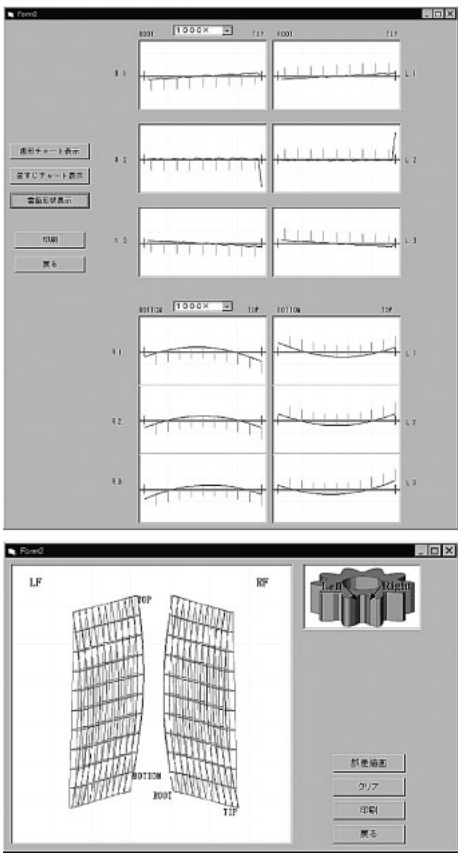


図4　シミュレーション結果　　はすば歯車の歯すじ方向にクラウニングを施す場合の加工シミュレーションを示す．

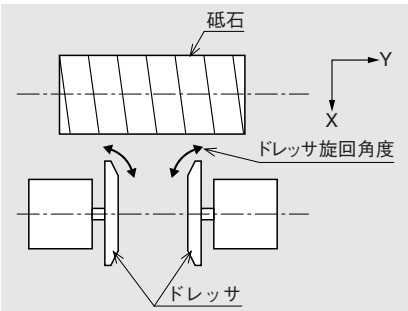


図5　従来の圧力角修整方法
ドレッサの取付け角を手動で調整する．

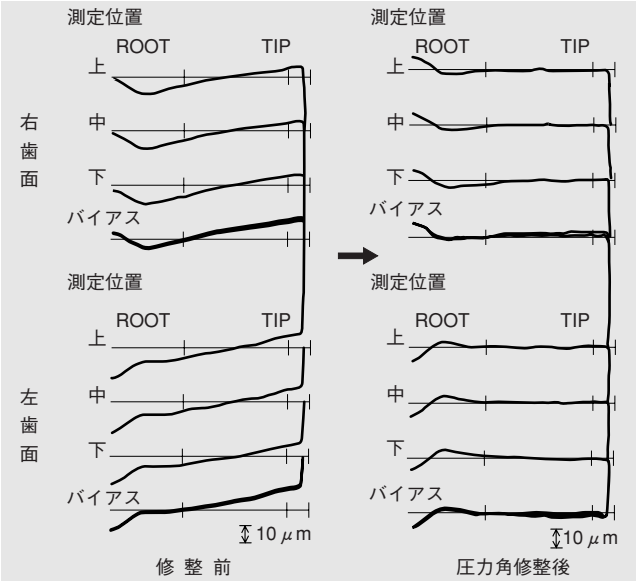
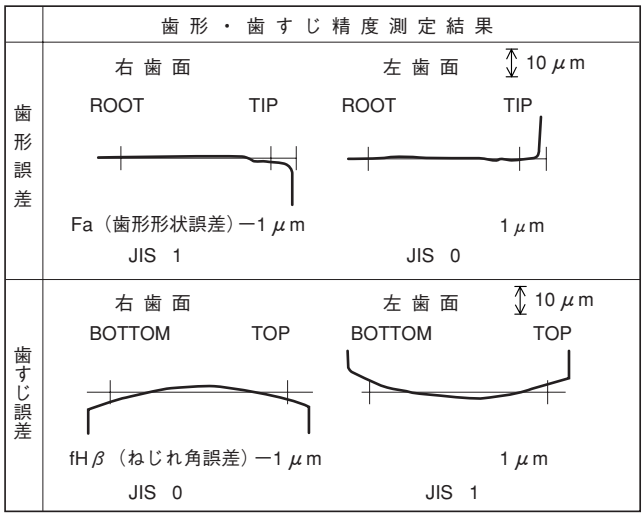


図6　圧力角の自動修整結果　　右歯面を歯先下がり10 μm，左歯面を歯先上がり10 μm補正した．



※修整歯形につき，歯すじ誤差はクラウニング量を除いた値

図7　歯形歯すじ精度　　加工したワークの歯形歯すじ精度を示す．

する必要があった．この方法では作業者のスキルやノウハウが必要で，調整に多大な時間を要した．

本機では歯形圧力角修整量を入力するだけで，自動で砥石形状を修整する方法を開発した．当社では，ドレッサの取付け角を手動で調整することなく，圧力角の修正量に応じたドレス動作と加工動作を解析的に求め，左右歯面の圧力角を独立に修正する方法を確立した．本手法による圧力角修整結果を図6に示す．

5. 加　工　事　例

本機での加工事例を表2，図7，図8に示す．実加工時間50.5秒（歯合わせ時間，ワーク搬入搬出時間を除く）で，JIS 3級の加工精度を得た．本加工例のワークであれば自動車用ミッションギヤとして充分な静粛性,耐久性及び歯研コストを満足できると考える．

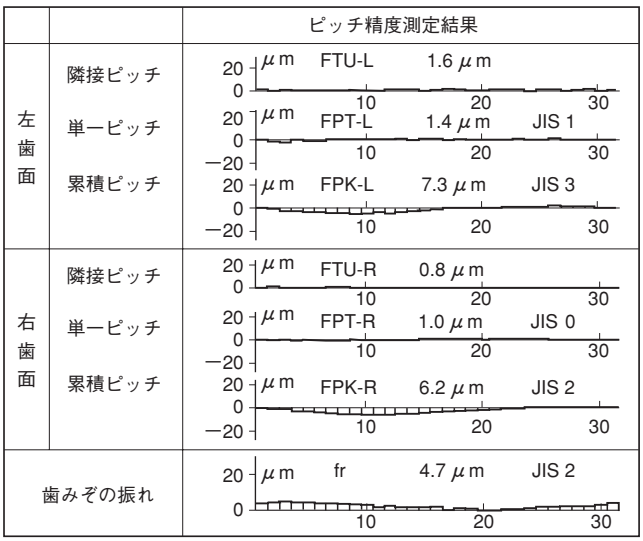


図8　ピッチ精度　　加工したワークのピッチ精度を示す．

6. ま　と　め

今後拡大が予想される量産歯車研削盤市場に対応し，

(1) 多条ねじ状砥石の機上ドレス機能

(2) 全軸NC化，対話型入力機能によるスキルレス化

を実現した，高精度・高能率歯車研削盤を開発した．

参　考　文　献

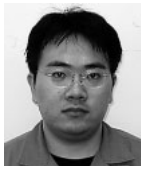
(1) 興野文人他，三菱NCガイド式ギヤシェーパの開発，三菱重工技報　Vol.34 No.2（1997）

橋谷道明

増尾光一

勝間俊文

柳瀬吉言


丸山和孝