

低騒音歯車加工を目指した同期ギヤシェービング盤

The Synchronous Gear Shaving Machine Aimed at Low-Noise Gear

鍋 倉 正 和 橋 谷 道 明
西 村 幸 久 薄 出 淳 二



自動車用トランスミッションギヤの高精度化，コンパクト化のため，焼入前の最終工程で，低価格化が可能なギヤシェービング仕上げ加工の高精度化が求められている．トランスミッションの振動，騒音を低減するためにはミッションギヤのピッチ精度の改善が重要である．従来のギヤシェービング加工は，連れ回り加工であり，歯車の累積ピッチ誤差は前加工精度にならうため改善することができない．そこで，累積ピッチ誤差の改善が実現できる同期ギヤシェービング盤を開発し，高速・高精度同期システムを確立した．

1. ま え が き

自動車・二輪車等の量産メーカでは，低振動，低騒音化のために高精度のミッションギヤを低コストで加工するニーズが強い．そのため，歯車をホブ切り加工した後にギヤシェービング加工で歯面を仕上げるのが一般的である．

ミッションギヤによる振動・騒音を低減するためにはピッチ誤差の改善が重要であるが，これまでのギヤシェービング加工はカッタ軸駆動によるワーク軸連れ回り方式であり，累積ピッチ誤差は前加工のホブ切り精度にならうため，改善することができない．そこで，カッタ軸とワーク軸を同期駆動により加工する同期ギヤシェービングに対するニーズが強まっている．

累積ピッチ誤差の改善が実現できる同期ギヤシェービング盤FS30Aを開発し，高速・高精度同期ギヤシェービング加工システムを検証したので報告する．本論文では，加工の原理，制御方法について述べ，開発したFS30Aを紹介し，累積ピッチ誤差が改善された加工例を示す．

2. 加工機構の検討

2.1 本機の加工法

ギヤシェービング加工は図1に示すようにカッタ軸とワーク軸に軸交差角を与えて噛み合わせ，それによって生じる相対すべり速度を利用して加工する方法で，以下の4つの加工方法がある．

- ① プランジシェービング
- ② コンベンショナルシェービング
- ③ ダイアゴナルシェービング
- ④ アンダーパスシェービング

上記の加工方法の概要を図2に示す．

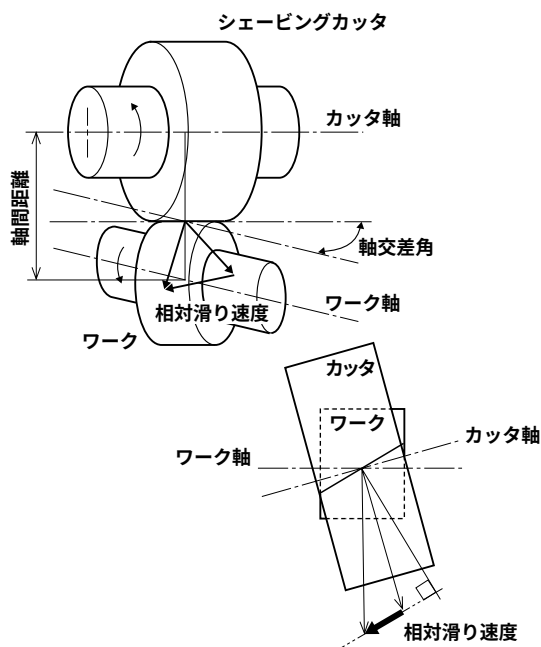


図1 加工法の概要と移動方向と回転方向の関係
カッタ軸とワーク軸を公差させ，それにより生じる相対滑り速度を利用して切削する．また，加工に必要な制御軸と補正方向の関係を示す．

2.2 プランジ加工

プランジシェービング加工はカッタを切込み方向に動作させるだけの最も単純な加工法であり，加工時間を短くできるので，量産加工に採用されることが多い．同期ギヤシェービングを行うためには，カッタ軸とワーク軸をそれぞれの歯数の逆比で同期回転すればよい．ワーク軸の回転数 N_w を基準とするとカッタ軸の回転数 N_c はワークの歯数を Z_w ，カッタの歯数を Z_c として

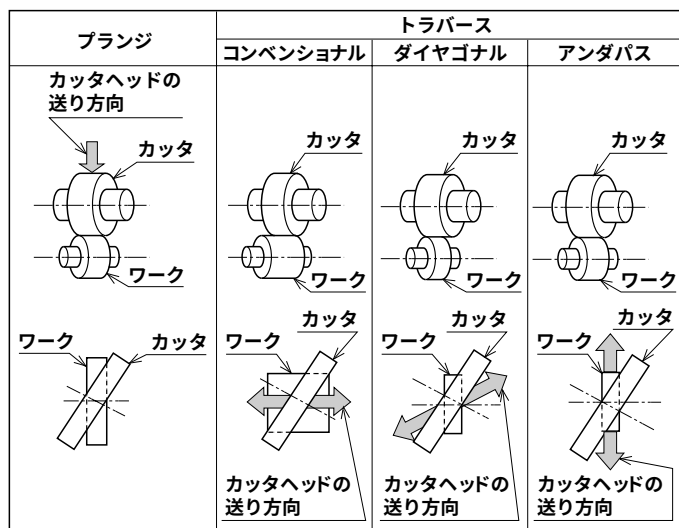


図2 本機の加工法 プランジ方式及びトラバース方式の加工法を示す。

$$N_c = (Z_w / Z_c) \times N_w \quad (1)$$

で求められる。\$N_w\$ 及び \$N_c\$ をそれぞれの駆動モータに指令し加工する。

2.3 トラバース加工

②, ③, ④を総称してトラバース加工と呼ぶ。カッタ軸とワーク軸を相対的に移動させるので、プランジシェービング加工のように歯数の逆比の回転同期のみでは、カッタとワークの歯が干渉し正しい歯形が得られない。そのためにトラバース動作と連動した同期回転の補正が必要となる。開発した本システムではカッタ軸に補正回転を与えることで同期トラバース加工を可能とした。この補正量 \$\Delta B\$ は式(2)で表される。関数 \$f(\Delta Y)\$, \$g(\Delta Z)\$ はそれぞれ独立した関数として与えられる。

$$\Delta B = f(\Delta Y) + g(\Delta Z) \quad (2)$$

ここで、

\$\Delta B\$: カッタ回転移動量 (rad)

\$\Delta Y\$: ワーク軸直角方向移動量 (mm)

\$\Delta Z\$: ワーク軸方向移動量 (mm)

回転数に変換すると

$$\Delta N_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta B}{2\pi} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{f(\Delta Y) + g(\Delta Z)}{2\pi} \right) \quad (3)$$

ここで、

\$\Delta N_c\$: カッタ補正回転数 (sec⁻¹)

従って、トラバース移動中のワーク回転数を \$N_w\$ とすると、カッタ回転数 \$N_c\$ は式(1)より式(4)で表される。

$$N_c = (Z_w / Z_c) \times N_w + \Delta N_c \quad (4)$$

また、トラバース移動開始時及び終了時の加減速時についても上記の関係を保つ必要があるため、指令値と実際の動作に差が生じないようにフィードフォワード制御を用いた。

3. サーボ機構の解析

3.1 同期システムの構成

本同期システムはカッタ軸回転とワーク軸回転を歯数の逆比にて同期回転させるものである。この同期を NC で実現す

るためには次の2通りの方式がある。

① 主軸パルス追尾方式

一方を基準回転とし、その基準回転のフィードバックから他方の回転を指令し、追尾側(従動側)を同期回転させる。

② パルス分配方式

基準指令を生成し、歯数に応じて2軸にパルスを分配する。

ギヤシェービング加工では負荷の変動が小さいことから、

②のパルス分配方式を採用した。本システムの制御ブロック線図を図3に示す。なお、指令回転速度が大きいワーク軸側を基準回転とし、カッタ軸側でトラバース動作の補正回転を行うこととした。

3.2 同期誤差のシミュレーション

機械の開発に当たって、本システムの同期誤差量の予測を行った。シミュレーションは、ミッションギヤの一例として、モジュール1.86、歯数18枚、ねじれ角25°の条件を採用した。

シミュレーションの条件を表1、切削負荷のパターンを図4に示す。同期誤差シミュレーションの結果は図5に示すように、ワーク軸1回転毎の同期誤差が、最大切削負荷時でも5 \$\mu\$m以下であり、累積ピッチ誤差JIS 6級以内を実現する見通しを得た。

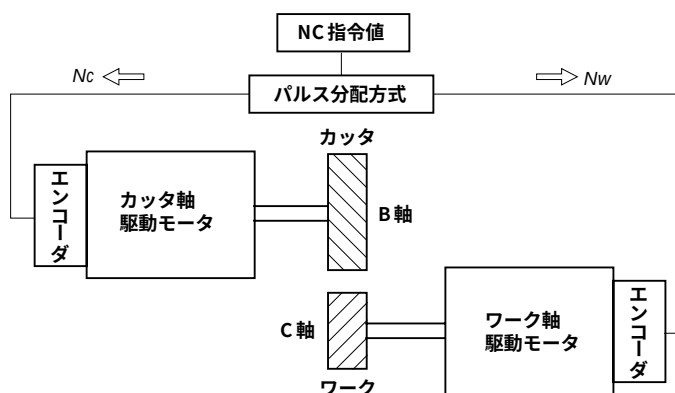


図3 制御ブロック 高速高精度同期システムの制御ブロックを示す。

表1 シミュレーション条件

ワーク諸元	ワーク外径 (mm)	60.4
	モジュール	1.86
	歯数	18
	ねじれ角 (deg)	25
	ピッチ円径 (mm)	36.941
カッタ諸元	ワーク歯幅 (mm)	33.4
	外径 (mm)	219.1
	ピッチ円径 (mm)	213.42
加工条件	歯数	113
	カッタ回転数 (B軸) (min ⁻¹)	350
	ワーク回転数 (C軸) (min ⁻¹)	2197

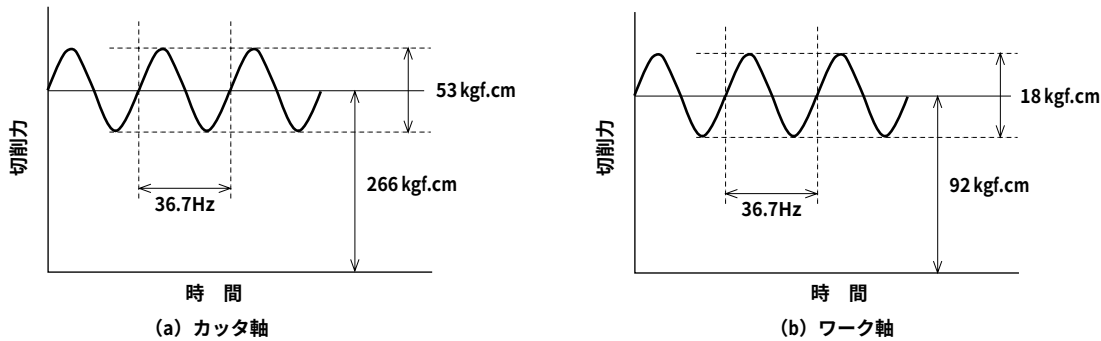


図 4 切削負荷のパターン（モータ軸換算）

シミュレーションに用いた切削負荷のパターンを示す。

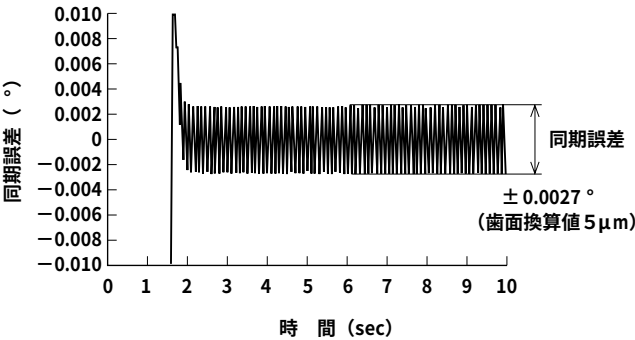


図 5 シミュレーション結果 加工中の同期誤差のシミュレーション結果を示す。

表 2 機械の主要仕様

	項 目	仕 様
能力	加工最大径	φ310mm
	加工最大モジュール	8mm
	加工最大歯数	150mm
	センタ間最大距離	400mm
	切削方法	プランジ，アンダパス コンベンショナル，ダイアゴナル
カッタ ヘッド	ワーク最高回転数	3 000 min ⁻¹
	カッタ最大径	φ 250 mm
	カッタ最大幅	50.8 mm (2 ")
	カッタ内径	φ 63.5 mm
	カッタ回転数	40 ～ 500 min ⁻¹
	旋回角（A 軸）	± 20 °
	カッタヘッド移動量（X 軸）	150 mm (115 ～ 265)
	前後移動量（Y 軸）	± 30 mm
センタ ハイト	左右移動量（Z 軸）	± 75 mm
		1150 mm
床面積		間口 × 奥行 2 300 × 2 750 mm
重量		5 000 kg

4. 同期ギヤシェーピング盤 FS30A の開発

4. 1 機 構

以上の検討結果を基に開発した同期ギヤシェーピング盤 FS30A の外観を冒頭に、主仕様を表 2 に示す。NC 軸数は 6 軸である。A 軸はカッタ軸に交差角を与える軸であり、加工

名称	ピニオンギア	切削方法	プランジカット
モジュール	1.5	カッタ回転速度	400 min ⁻¹
歯数	20	カッタ周速	251m/min
圧力角	17.5 °	ワーク回転速度	2 620 min ⁻¹
振じれ角	22 ° RH	プランジ送り速度	2.62 mm/min
外径	φ35.3 mm	ドウェル	1.1 秒
歯幅	23 mm	実加工時間	5.2 秒

	加工前				加工後			
歯形誤差	右歯面		左歯面		右歯面		左歯面	
	ROOT	TIP	ROOT	TIP	ROOT	TIP	ROOT	TIP
歯すじ誤差	右歯面		左歯面		右歯面		左歯面	
	BOTTOM	TOP	BOTTOM	TOP	BOTTOM	TOP	BOTTOM	TOP
ピッチ誤差	加工前				加工後			
	FTU-L 5.7				FTU-L 2.8			
	FPT-L 3.6 JIS 5				FPT-L 1.7 JIS 2			
	FPK-L 6.7 JIS 3				FPK-L 4.4 JIS 2			
左歯面	FTU-R 22.8				FTU-R 2.4			
	FPT-R 13.5 JIS 8				FPT-R 2.1 JIS 3			
	FPK-R 20.0 JIS 6				FPK-R 7.6 JIS 4			
	fr 28.0 JIS 8				fr 8.2 JIS 5			

図 6 プランジ加工での加工精度 ピニオンギア相当のギヤを加工し、加工精度を測定した結果 JIS 6 級の精度を得た。

中は油圧力にて固定される。カッタ軸を B 軸，ワーク軸を C 軸とし、B 軸と C 軸の同期回転を行う。プランジ加工は切込 X 軸のみの動作にて加工を行う。トラバース加工を行う場合には、前後 Y 方向，左右 Z 方向の動作に合わせ B 軸に式(4)による補正回転を与えて加工を行う。さらに歯すじのテーパ，クラウニング加工は X，Y，Z の補間動作で加工する。

4. 2 対話ソフト

本機は対話ソフトを備えているのでワーク諸元，カッタ諸元，加工条件，加工時の歯筋形状のねらい値を画面の表示に

従って入力するだけで、簡単にNCデータを作成できる。同期回転数の計算及びトラバース動作のための回転補正は本ソフトにて自動計算できる。

4.3 精密歯合わせ

高精度加工の実現、工具寿命延長の点から、ワークの左右両歯面を均等に加工することが望ましいので、カッタとワークの歯の位相を高精度に合わせる必要がある。本機ではこの精密歯合わせ動作を加工開始前に自動的に行う。この歯合わせ機能の繰返し位置決め誤差は 0.003° 以下である。(シミュレーションしたギヤの場合、歯面換算で $1\mu\text{m}$ 以下)

5. 加工例

5.1 ブランジ加工

同期ギヤシェービング盤FS30Aを用いたブランジ加工の例を図6に示す。モジュール1.5歯数20枚のピニオンギヤを実加工5.2秒で加工し、加工精度JIS 6級を得た。累積ピッチ精度も前加工精度JIS 8級を6級に改善できることを確認した。

また同期誤差のデータからもワーク1回転ごとのピッチ誤差に相当する周期的な変化は見られなかった。

5.2 トラバース加工

トラバース加工を行い図7に示す加工精度を得た。モジュール3、歯数46枚の歯車を実加工88.2秒で加工し、JIS 6級の加工精度を得た。

6. まとめ

従来、連れ回り式ギヤシェービングでは不可能であった累積ピッチ誤差の改善を可能にした同期ギヤシェービング盤の開発に取り組み、システムを確立した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) カッタ軸とワーク軸を同期回転させて加工を行い、累積ピッチ誤差が改善されることを確認した。
- (2) ブランジ、コンベンショナル、ダイヤモンド、アンダーパスの4方式の同期シェービング加工が可能であることを確認した。
- (3) 以上の成果から本同期ギヤシェービング盤でギヤをシェービング加工すればトランスミッションの低振動化・低騒音化の期待ができる。

名称	テストピース		切削方法	コンベンショナルカット	
モジュール	3		カッタ回転速度	395 min ⁻¹	
歯数	46		カッタ周速	270 m/min	
圧力角	20 °		ワーク回転速度	610 min ⁻¹	
振じれ角	0		テーブル送り速度	170 mm/min	
外径	φ144 mm		ドウェル	4.8 秒	
歯幅	30 mm		実加工時間	88.2 秒	
歯形誤差	加工前		加工後		
	右歯面 左歯面		右歯面 左歯面		
	ROOT TIP	ROOT TIP	ROOT TIP	ROOT TIP	
	Fa 26	Fa 13	Fa 8	Fa 8	
	JIS 9	JIS 6	JIS 5	JIS 5	
歯すじ誤差	右歯面 左歯面		右歯面 左歯面		
	BOTTOM TOP	BOTTOM TOP	BOTTOM TOP	BOTTOM TOP	
	fHβ-4	fHβ 4	fHβ 0	fHβ 3	
	JIS 4	JIS 4	JIS 0	JIS 3	
	ピッチ誤差	加工前		加工後	
左歯面	単一ピッチ	FPT-L 7.2	JIS 6	FPT-L 2.6	JIS 3
	累積ピッチ	FPK-L 32.8	JIS 6	FPK-L 21.3	JIS 5
右歯面	単一ピッチ	FPT-R 7.7	JIS 6	FPT-R 2.6	JIS 3
	累積ピッチ	FPK-R 34.8	JIS 6	FPK-R 19.4	JIS 5
歯溝の振れ	fr 48.4	JIS 8	fr 4.6	JIS 1	

図7 トラバース加工での加工精度 外径144 mmのギヤを加工し、加工精度を測定した結果 JIS 6級の精度を得た。



鍋倉正和
工作機械事業部
技術部
工作機械設計二課長



橋谷道明
工作機械事業部
技術部
工作機械設計二課主
席



西村幸久
工作機械事業部
技術部
工作機械設計二課



薄出淳二
工作機械事業部
技術部
要素技術開発課