ねじ状工具による歯車の仕上げ転造*
(歯面, 歯元隅肉部の同時転造)矢野 健太郎*¹, 尾崎 龍夫*², 竹増 光家*²Finish Gear Rolling by Screw-Shaped Tool
(Simultaneous Rolling of Tooth and Fillet Surface)

Kentaro YANO, Tatsuo OZAKI and Teruie TAKEMASU

Widely used plunge-feed rolling method has some problems, such that the tooth profile accuracy of the product is low without some modification of teeth of the tool or the work, and the tooth surface and the fillet at the root cannot be rolled at the same time. A new rolling method by screw-shaped tool was proposed in our previous report. This method resembles finish gear hobbing. With a small rolling load due to a small contact area, it is expected that any modification of the tooth profile of the tool or the work is unnecessary. In this report, to finish the tooth surface and the fillet at the root of gears in one pass, we prepare several kinds of screw-shaped tools. Gears with good tooth profile accuracy and good surface finish are produced by this method. Tooth surfaces and fillets at roots are remarkably work hardened. TiN coating is effective to avoid scoring.

Key Words: Gear, Tool, Surface Roughness, Work Hardening, Finish Gear Rolling, Screw-Shaped Tool, Surface Rolling, Fillet Rolling

1. ま え が き

歯車の仕上げ転造において, 広く行われている2ダイスブランチ転造方式では, 大荷重で押込みながら工具を素材にかみあわせるため, 同時かみ合い歯数の変動や歯の弾性たわみにより接触荷重が変動し, 正しいインボリュート歯形を持つ歯車を製作するには, 工具, もしくは素材の歯形修整が必要である^{(1)~(4)}. また, 歯面, 歯元隅肉部の同時転造が困難であるなど, はん用性, 歯形精度, 生産性の面でいろいろ問題がある. そこで, 著者らは, ねじ状工具を用いる新しい転造方式を考案し, 前報⁽⁵⁾で, 転造装置, 加工法およびS25C材の歯面転造実験について報告した.

本報では, ねじ状工具を用いることの利点の一つである歯面, 歯元隅肉部の同時転造を行うため, ホブ, 転造工具を選定し, 転造実験を行った結果を報告する.

まず, 素材歯面, 歯元隅肉部を同時に転造できる工具形状を決定するために, 2種類のホブ, 3種類の転造工具を用いて転造を行い, 適当なホブと転造工具の

組合せを決定した.

次に, 転造工具の素材半径方向への押込み量を変えて転造を行い, 歯面および歯元隅肉部を十分加工できる押込み量を求めた.

最後に, 工具回転数を速くしたときの焼付きを避けるために, 転造工具にTiNコーティングを施し, 装置の限界まで工具回転数を上げた実験を行い, 実用化の可能性について検討した.

2. 実験装置および実験条件

2・1 実験装置 図1に実験装置の外観, 図2にねじ状工具と素材の取付状態を示す. ①はねじ状工具, ②は素材である. ③の工具支持台には, 押付け力測定のための水晶メジャリングピンを取付けており, ④の主軸部分に転造トルク測定のためのひずみゲージを貼付けている.

転造加工は, ねじ状工具を用いて, ホブ切りと類似の創成運動によって行われる.

2・2 素材 素材はモジュール3, 圧力角20°, 歯数40, 歯幅20mmの標準平歯車で, 材質はSCM415である. 素材の機械的性質を表1に示す.

2・3 潤滑 潤滑油には出光興産(株)製, ダフニダイナドローFS50を用い, 油量は7l/min. とした.

* 原稿受付 平成4年6月25日.

*¹ 正員, 九州大学大学院 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1).*² 正員, 九州大学工学部.

2・4 工具回転数および送り速度 まず、焼付きを避けるために、低速、低送りとし、工具回転数は 70 rpm、素材の歯すじ方向への送り速度は 1 mm/rev. とし、コーティングした工具を用いる実験では、工具回転数および送り速度をさらに上げた。

3. 工具形状の影響

3・1 前加工用ホブ、転造工具 前報では、歯面転造のみで、歯元隅肉部の転造は行っていないが、本転造方式はプランジ転造方式とは異なり、工具と素材の接触領域が狭く、小さな加工力で転造できるため、歯面、歯元隅肉部の同時転造が可能である。そこで、歯面、歯元隅肉部を同時転造する工具を設計した。

ホブ、転造工具ともに標準歯形の場合、歯面垂直方向の転造代(S_0)は式(1)のように、工具の素材半径方向への押込み量のみにより決定されるが、歯元隅肉部での転造代には、前加工用ホブの歯先丸み半径、転造工具の歯先丸み半径、歯末の丈、および押込み量などが関係する。ホブの歯先丸み半径に対し、転造工具の歯先丸み半径が相対的に小さいほど、転造工具の歯末の丈が長いほど、歯元隅肉部での転造代が大きくなる。

$$S_0 = i \times \sin \alpha \cdots \cdots (1)$$

i : 押込み量

α : 圧力角

素材の歯切りに用いるホブは、標準歯形とし、素材歯元隅肉部での転造代を変えるために、歯先丸み半径(以下、歯先 R と呼ぶ) 1.13 mm (市販品) および 1.17 mm の 2 種類とした。

転造工具は、ホブと類似の標準歯形とし、歯末の丈、歯先 R を変えて、3 種類試作した。図 3 に歯形の歯直角断面の概略図を、表 2 にホブおよび転造工具の歯末の丈(hk)、歯先 $R(R1)$ をそれぞれ示す。

押込み量は、過去の実験⁽⁶⁾ などから、鋼材の加工の場合、100 μm (歯面転造代 34 μm) 以上になると焼付きを生じやすいことがわかっているので、100 μm 以下に設定した。

3・2 実験結果 表 3 にホブと転造工具の各組合せにおける、押込み量(i)、Hofer の 30° 接線に基づく

表 1 素材の機械的性質

Material	Proof stress	Tensile strength	Elongation	Hardness
SCM415	334MPa	515MPa	37.2%	HV196

図 1 転造装置外観

図 2 ねじ状工具と素材

表 2 ホブおよび転造工具の歯末の丈、歯先 R

Unit: mm

	hk	R1
HOB 1	3.75	1.13
HOB 2	3.75	1.17
Rolling Tool A	3.70	1.18
Rolling Tool B	3.68	1.03
Rolling Tool C	3.70	0.94

図 3 工具歯形の歯直角断面概略図

危険断面における、 i に対応して幾何学的に求めた転造代($S1$)、および実際の歯元危険断面部の転造量(Sr)を示す。図6、7のように、実験で歯すじ方向への送りが歯幅の中央付近に達したところで転造加工を中断し、ピッチ点での歯すじ曲線における加工部と未加工部の段差から歯面の転造量を、歯元危険断面部の歯すじ曲線から歯元危険断面部の転造量を求めた。

転造工具 A では、歯先 R1.17 のホブで歯切りした素材の転造で、歯元危険断面部の転造は全く行われない。歯先 R1.17 のホブを用いた素材より、歯先 R1.13 のホブを用いた素材のほうが、歯元危険断面部の転造代は小さくなるので、歯先 R1.13 のホブを用いた素材の転造実験は行わなかった。

転造工具 B では、歯先 R 1.17 のホブを用いた素材で、押込み量 $69\mu\text{m}$ のとき、フォロワ側の歯元危険断面部で $4\mu\text{m}$ 程度転造されているが、ドリブン側の歯元危険断面部では全く転造されておらず、十分転造されたとは言えない。歯先 R 1.13 のホブを用いた素材については、歯元危険断面部はフォロワ側、ドリブン側とも転造されていない。

転造工具 C では、歯元隅肉部の転造量が大きくなり焼付きを生じる恐れがあったので、TiN コーティングを施した。歯先 R 1.13 のホブを用いた素材の加工において、押込み量 $71\mu\text{m}$ で、フォロワ側の歯元危険断面部は $14\mu\text{m}$ 程度転造されている。なお、転造量が過大になる恐れがあったので、歯先 R 1.17 のホブを用いた素材については実験を行わなかった。

以上の結果から、これ以後の実験では、歯先 R1.13 のホブで歯切りした素材を、転造工具 C を用いて転造することにした。

なお、転造工具 C では、歯面と歯元危険断面部の転造量を比較した場合、歯元危険断面部での転造量がいくぶん大きくなっている。転造量は、工具の焼付きなどの観点から、歯面、歯元危険断面部とも同程度となることが望ましいと思われるので、最適な工具歯先形

状については、今後有限要素法を用いたシミュレーションモデルを構築し、理論的に求める予定である。

4. 押込み量の影響

転造工具 C を用いて、 $38, 56, 71\mu\text{m}$ の 3 通りの押込み量について転造を行った。その他の実験条件については前述の通りである。

4・1 転造量 図4に、歯面(ピッチ点付近)および歯元危険断面部の転造代と実際の転造量との関係を示す。歯面、歯元危険断面部とも転造代と転造量との関係は同じような傾向を示しており、だいたい2次曲線で近似できる。

4・2 歯形、歯すじ、ピッチ精度 図5に歯形曲線、図6にピッチ点付近の歯すじ曲線をそれぞれ示す。なお、転造量を測定するために加工を途中で止めているので、歯すじ曲線には転造部の未転造部の段差が生じている。

歯形精度は、ホブ切り後 JIS 2~3 級程度のものが、 $38\mu\text{m}$ の押込みで 1 級に、 $56\mu\text{m}$ の押込みで 0 級に、 $71\mu\text{m}$ の押込みで 1 級になっている。 $71\mu\text{m}$ の押込みでは転造量が大きくなりすぎ、 $56\mu\text{m}$ のものに比べると、歯形精度はかえって悪くなっている。

歯すじ精度については、ホブ切りによる精度が良いために、それほど顕著に改善されていないが、転造後は歯面が滑らかになっている。

単一、累積、隣接のすべてを総合したピッチ精度は、ホブ切り後 JIS 1 級のものが、 $56\mu\text{m}$ の押込みによる転造後、0 級となり、その他の押込み量では、1 級のままである。

図7に歯元危険断面部の歯すじ曲線を示す。押込み量 $38\mu\text{m}$ (転造代 $36\mu\text{m}$) では、表面はあまり平滑化されていないが、転造され、 $4\sim 5\mu\text{m}$ 圧下されている。押

表 3 工具形状の影響

Unit : μm

	i	$S1$	Sr Follower side	Sr Driven side
HOB2-R.T. A	8 7	3 6	0	0
HOB1-R.T. B	6 0	3 4	0	0
HOB2-R.T. B	6 9	4 6	4	0
HOB1-R.T. C	7 1	5 6	1 4	9

図 4 歯面、歯元危険断面部の転造代と転造量との関係

込み量 56, 71 μm (それぞれ転造代 47, 56 μm) では、表面も平滑化され、十分に加工されている。

4・3 歯面粗さ 図 8 に転造前後の歯面粗さの変化を示す。歯面粗さは、ピッチ点付近を歯丈方向に測定した。転造工具の表面粗さは、 R_{max} で 3.5 μm である。押込み量 56 μm では、ホブ切り後、 R_{max} 4 μm 程度のものが、転造により 2 μm 程度となり、工具面粗さより滑らかになっている。

4・4 加工硬化 図 9 に、押込み量 38, 56, 71 μm のときの加工後の歯面硬さの歯すじ方向分布を示す。素材の加工前の硬さは、HV196 である。押込み量 38 μm で転造した素材は、あまり硬さが上昇していないが、56, 71 μm のものは、ともに約 15% 向上しており、歯面強さの向上が期待できる。

図 5 歯形曲線

図 6 ピッチ点付近の歯すじ曲線

図 7 歯元危険断面部の歯すじ曲線

図 10 に押込み量 56, 71 μm のときの加工後の歯元危険断面部表面の硬さの歯すじ方向分布を示す。押込み量 56, 71 μm とともに、約 20% 硬さが上昇している。歯元危険断面部の転造量は、押込み量 56 μm のときに比べ、押込み量 71 μm のときのほうがいくぶん大きくなっているが、硬さはほぼ同程度に向上しているの

図 8 歯面粗さの変化

図 9 転造後の歯面硬さの分布

図 10 転造後の歯元危険断面部表面硬さの分布

押込み量 $56\text{ }\mu\text{m}$ 程度で十分加工硬化しているものと思われる。

ブランジ方式による S 45 C 材の歯元隅肉部転造の際には、16%程度の硬さの上昇で、曲げ疲労強度が約 33%向上している⁽⁶⁾ことから、本転造方式でもかなり曲げ疲労強度が向上するものと期待できる。

以上のように、歯形精度、歯すじ精度、ピッチ精度、歯面粗さ、加工硬化の点から考えると、本実験条件下では、押込み量は $56\text{ }\mu\text{m}$ 程度が適当であると考えられる。なお、工具や素材の材質、前加工精度など加工条件により最適押込み量は変わると思われるので、加工条件に応じて、最適押込み量は実験的に決定する必要がある。

4・5 転造力 転造力は、上部工具支持台に取付けた日本キスラー(株)製、水晶メジャリングピンを用いて測定した。図 11 に押込み量と転造力との関係を示す。転造力は押込み量 $71\text{ }\mu\text{m}$ で最大 2 kN 程度である。

4・6 転造トルク 転造トルクは、工具主軸に貼

図 11 押込み量と転造力との関係

図 12 押込み量と転造トルクとの関係

付けたひずみゲージから測定した。図 12 に押込み量と転造トルクとの関係を示す。転造トルクは押込み量 $71\text{ }\mu\text{m}$ で最大 70 Nm である。

5. 加工時間の短縮

本転造方式の加工時間 $T(\text{min})$ は、素材の歯幅、歯数、歯すじ方向への送り量、および工具主軸回転数の関数で、式(2)のように表せる。

$$T = (B \times Z) / (f \times N) \quad \dots\dots\dots (2)$$

B : 素材の歯幅 mm

Z : 素材の歯数

f : 素材の歯すじ方向への送り量 mm/rev.

N : 工具主軸回転数 rpm

そこで、工具の押込み量を $56\text{ }\mu\text{m}$ に固定し、加工時間の短縮のために、(1)素材の歯すじ方向への送り量(素材 1 回転あたりの移動量)を大きくする、(2)主軸の回転速度を上げる、の二つの方法を試みた。

5・1 素材の歯すじ方向への送り量 素材 1 回転あたりの送り量が大きいほど、加工時間を短くすることができるが、工具加工面が曲面であるため、押込み量 $56\text{ }\mu\text{m}$ (歯面垂直方向に $19\text{ }\mu\text{m}$) では、素材 1 回転あたりの送り量が 5 mm 以上になると、理論上、転造加工されない部分が残ることになる。そこで、送り量を 1.5 mm および 2 mm に増加させた場合について、実験を行った。

図 13 にその歯すじ曲線をそれぞれ示す。送り量を 1.5 mm とした場合には、 1 mm のときと同様、歯すじは滑らかであるが、 2 mm とした場合には、その周期で振幅 $2\text{ }\mu\text{m}$ 程度の凹凸(送りマーク)を生じている。そこで、素材の歯すじ方向への送り量は、 1.5 mm が適当と思われる。

5・2 工具主軸の回転速度 本実験装置の工具主軸の最高回転速度である 260 rpm においても焼付きを生じることなく加工できた。このとき、送り量が 1.5 mm で加工時間は正味 2 分程度である。

コーティングなしの工具で、S 25 C 材を加工する場合には、工具の焼付きのため、主軸回転数を 130 rpm までしか上げることができず、加工に約 5 分要するが、

図 13 送り量の違いによる歯すじ曲線の変化

コーティングを施すことにより加工時間が半分以下にできた。本装置では実験できなかったが、回転速度を今少し上げて焼付きは生じないのではないかと思われるので、加工時間はさらに短縮できよう。

6. 結 論

従来のプランジ方式による転造では、歯面、歯元隅肉部の同時転造が困難であり、また、正しいインボリュート歯形を持つ歯車を製作するために、工具、もしくは素材の歯形修整が必要であるが、ねじ状工具による転造方式では、市販のホブ（標準歯形、歯先 $R1.13$ mm）で前加工を行った素材に対し、標準歯形のねじ状工具（歯末の寸 3.70 mm、歯先 $R 0.94$ mm）を用いることにより、歯面、歯元隅肉部の同時転造が可能である。今回、工具歯形は標準歯形とし、歯先は単一半径の円弧形状としたが、工具歯先形状についてはまだ検討の余地があり、今後、有限要素法を用いたシミュレーションモデルを構築し、工具の最適形状を決定する予定である。

素材の転造後の歯面の硬さは、約 15%、歯元隅肉部の硬さは約 20% 向上しており、歯面強さ、曲げ疲労強度の向上が期待できる。

工具にコーティングを施すことにより、歯数 40 枚、歯幅 20 mm の歯車については、正味 2 分程度で転造を行えることが確認できた。今後、さらに工具回転数を上げた実験を行う予定である。

最後に、本研究を行うにあたり、工具の製作にご協力いただいた三菱重工業(株)京都精機製作所、潤滑油を提供していただいた出光興産(株)に深く謝意を表す。

文 献

- (1) 尾崎・西村・岡本, 機論, 43-365 (1977), 359.
- (2) 尾崎・今村, 機論, 45-398 (1979), 1158.
- (3) 尾崎・船津・淵, 機論, 52-473, C (1986), 130.
- (4) 尾崎・岩本・堀川, 機論, 52-483, C (1986), 2914.
- (5) 矢野・尾崎・竹増, 機論, 57-539, C (1991), 2395.
- (6) 矢野・小田・小出・五家・尾崎, 機論, 58-551, C (1992), 2212.