バニシ転造の歯形解析*

(第4報, はすば歯車の転造における素材修整歯形)

尾崎 龍夫**, 岩本 和徳***, 堀川 順一***

Theoretical Analysis of the Finish Rolled Gear Tooth Profiles (4th Report, Modified Tooth Profiles of the Work in Finish Gear Rolling of Helical Gears)

Tatsuo OZAKI, Kazunori IWAMOTO, and Junichi HORIKAWA

Modified tooth profiles of the work are analysed theoretically to produce a true involute profile on the helical gear teeth finish rolled by dies with a true involute profile. The finish gear rolling experiment is done to confirm the validity of the theoretical analysis. It is proved that finish rolled tooth profiles with good accuracy are produced on gear teeth having modified profiles before rolling, using dies with a true involute profile.

Key Words: Finish Gear Rolling, Rolled Tooth Profile, Helical Gear, Modified Tooth Profile, Modified Profile Hob

1. ま え が き

前報⁽¹⁾では, はすば歯車の転造について転造モデルを設定し, 転造歯形を理論解析するとともに正しいインボリュート歯形に仕上げるための必要な工具修整歯形を理論的に求めた。しかしながら工具修整歯形は歯車諸元や加工条件によって変化するので, 生産量が少ない場合には工具歯形を修整する方法では工具費が高くつくことになる。工具歯形を修整するかわりに, 素材歯形を適当に修整し, 標準インボリュート歯形工具を用いて正しいインボリュート歯形に仕上げることであれば, ホブ切れ刃を修整すればよいので工具費を低下させることができると考えられる。そこで本報では前報と同じ転造モデルにより, そのような素材修整歯形を理論的に求めることを試みた。また歯形を求めた理論的修整歯形に研削した素材歯車を用いて予備転造実験を行い, 解析結果と比較検討した。さらに理論的修整歯形に対応した歯形修整を切れ刃に施したホブを試作して素材歯車をホブ切りし, 標準インボリュート

ト歯形工具を用いた転造実験を行って, 理論解析による素材修整歯形の実用性について考察した。

2. 素材修整歯形の解析

2・1 解析方法 前報⁽¹⁾と同じ転造モデルを用いて, 素材歯車強制駆動, 中心距離一定の場合について以下の手順で必要な素材修整歯形を求めた。

(1) ある転造代 ΔS を与えて, 正しいインボリュート歯形工具を用いて歯形誤差のない素材歯車を転造したときの歯幅中央のピッチ点における転造量 ΔS_p を求める。

(2) すべてのかみあい点で転造量が(1)で求めた ΔS_p になるように, 塑性押込み量と押込み荷重の関係式より各かみあい点の接触荷重を求める。

(3) 求めた接触荷重を各変位と接触荷重の関係式に代入して, 工具と素材歯車の全弾塑性変位を求める。 ΔS とその値との差をそのかみあい点における素材歯形修整量とする。

この手順は前報で述べた工具修整歯形を求める手順と同じである。すなわち各かみあい点において, 工具歯形の修整量を零にするように工具歯形修整量に相当する歯形誤差を素材歯車に与えればよいという考えである。

* 昭和 58 年 10 月 9 日 第 61 期全国大会講演会および昭和 59 年 5 月 9 日 九州支部北九州地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 10 月 7 日。

** 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*** 正員, キヤノン(株) (〒144 東京都大田区下丸子 3-230-2)。

表 1 工具および素材歯車諸元

	Die	Work I	Work II
Module	3		
Pressure angle	20°		
Helix angle	20°		
Number of teeth	66	52	34
Addendum modification coefficient	0	0	0
Diameter of tip circle	216.196	172.012	114.546
Diameter of root circle	204.169	159.907	101.046
Face width	30	20	
Material	SKD 11	S45C	
Flank hardness	HRC 60	HB 171

図 1 計算結果

2・2 解析結果 計算および実験に用いた工具および素材歯車の諸元を表 1 に示す。図 1 中、A は素材歯車 I について各転造代に対する素材修整歯形の計算結果を示す。また B はその修整歯形をもつ素材歯車を標準インボリュート歯形工具を用い、各転造代を与えて転造したときの転造歯形の計算結果を示す。計算による転造歯形はほぼ正しいインボリュートになっており、上述の素材修整歯形の求め方が理論的には妥当であることが確かめられた。修整歯形はピッチ点から歯元に向かって修整量はほぼ直線的にゆるやかに大きくなっており、 ΔS が増すにつれその増加割合が大きくなる。

図 2 最大歯形修整量

なる。ピッチ点から歯先に向かっては $2\Delta S$ が $60\mu\text{m}$ くらいまでは修整量はほとんど零であるが、 $2\Delta S$ がそれより大きくなるとやはり歯先に向かって修整量が大きくなる。全体としてピッチ点付近を頂点とするなだらかな山状となり、転造歯形特有のくぼみ形状を改善するために中凸状に修整すればよいことがわかる。図 2 は計算による素材修整歯形の歯形誤差に相当する値を最大歯形修整量として転造代との関係を示したものである。転造代が増すにつれ、最大歯形修整量はほぼ直線的に増加する。

3. 実験結果および考察

実験には前報と同様、2 工具プランジ転造方式の転造装置を用いた。素材歯車は自由駆動し、転造力一定および中心距離一定の条件で素材歯車を 5 回転させた。潤滑剤は SAE 20 相当の市販潤滑油を用いた。

3・1 予備実験 切れ刃を修整したホブを試作する前に、解析結果を実験的に検証するため、慣用のホブで歯切りした後インボリュートグラインダで計算に

図 3 歯形研削素材歯車の実験結果 (A: 素材歯形, B: 転造歯形)

よる修整歯形に近い歯形に研削した素材歯車を用いた転造実験をまず行った。グラインダで研削可能な最小径の制約があるため、歯数を多くした素材歯車 I (表 1) を用いた。図 3 に実験結果を示す。図 3 中 A は研削後の素材歯形、B は転造歯形である。転造力一定の条件と中心距離一定の条件では、得られた転造量、加工力線図など大差なく、転造力 $P_0 = 5.9, 7.4, 8.8 \text{ kN}$ としたものと、転造代 $2\Delta S = 40, 50, 60 \mu\text{m}$ となるように中心距離を一定にしたものがそれぞれ対応しているので、転造力一定の条件における素材修整歯形はそれぞれ対応する転造代に対する修整歯形を選んだ。すべての条件で、転造歯形は正しいインボリュート歯形に近い形状になっていることから、素材修整歯形の理論解析結果を実際に適用できる見通しが得られた。しかし図 1, 3 を詳細に観察すると、フォロー側は解析結果と実験結果がよく一致しているように思われるが、ドリブン側は特に歯元側で修整量を計算より少し大きくしたほうがよい結果が得られるようである。素材歯車を強制駆動して解析した結果を自由駆動の実験に用いること、解析で塑性押込みに対する歯面すべり方向の影響を考慮していないことなどがその差異の原因と考えられる。

3.2 修整歯形ホブの試作および転造実験 予備実験により、素材歯形を理論解析で求めた歯形に加工すれば良好な転造歯形が得られる見通しがついたので、切れ刃形状を修整したホブを設計試作した。過去の実験結果から、ホブ切り後転造により歯面を平滑に仕上げるには $2\Delta S$ が $60 \mu\text{m}$ 以上は必要であると考えられたので、 $2\Delta S = 60 \mu\text{m}$ および $100 \mu\text{m}$ に対する素材修整歯形を加工するようにホブ切れ刃形状を設計し

(a) ホブ(A) ($2\Delta S = 60 \mu\text{m}$)

(b) ホブ(B) ($2\Delta S = 100 \mu\text{m}$)

図 4 転造歯形ホブの切れ刃形状

た。図 4 にその形状を示す。今回は解析により求めた素材修整歯形はドリブン側、フォロー側で大差はなかったため、製作を簡単にするため切れ刃は左右対称とした。 $2\Delta S = 60 \mu\text{m}$ に対する修整歯形ホブをホブ(A),

2 Δ S=100 μ m に対する修整歯形ホブをホブ(B)と呼ぶことにする。なお素材修整歯形は表1に示す工具および素材歯車 II の組合せに対し計算した。計算結果は図2とほとんど同じであった。図5に修整歯形ホブを用いて素材歯車 II を歯切りしたときの、歯切り時におけるリーディング側およびトレーリング側の歯形を示す。ホブ(A)で歯切りした素材歯車を素材歯車 II a、ホブ(B)で歯切りしたものを素材歯車 II bと呼ぶことにする。図5中破線(a)、(b)はそれぞれ2 Δ S=60, 100 μ m に対して計算された理論的修整歯形を示す。ホブ切りにおいてホブ切れ刃形状をそのまま素材歯形に転写することは期待できず、切削条件を種々変えてホブ切りしたが、得られた素材歯形は目的とする歯形とはかなり形状が異なっている。素材歯車 II a のリーディング側歯形は計算による修整歯形(a)に近い形状になっているが、トレーリング側ではむしろ修整歯形(b)によく似た形になっている。素材歯車 II b のリーディング側、トレーリング側とも歯元側は修整歯形(b)に比較的良好一致しているが、歯先側は大きくくぼみ、トレーリング側ではさらに中央付近が突起し中凸形状になっている。このように必ずしも所期の素材歯形は得られなかったが、これを用いて転造実験を行い素材歯形が転造歯形に及ぼす影響について考察することにする。

実験は転造力 $P_0=9, 12, 15$ kN 一定の条件と、2 Δ S=60, 80, 100 μ m となるような中心距離一定の条件で行った。予備実験におけると同様に、 $P_0=9, 12, 15$ kN と2 Δ S=60, 80, 100 μ m の実験結果はそれぞれほぼ対応している。

図6に転造力一定の条件における転造歯形を示

す。実験では工具の回転方向を変えることにより、歯切り時のトレーリング側の歯面を転造時のドリブン側にし、したがってリーディング側がフォロワ側になる組合せと、その逆の組合せになるようにした。素材歯車 II a については、修整歯形(a)に近い歯形をもつリーディング側歯面はドリブン側、フォロワ側とも $P_0=9$ kN のとき正しいインボリュートに近い歯形になっており期待どおりの結果が得られている。しかしこの程度の転造力では接触荷重が低く、歯面は十分に平滑化されていない。転造力を増すと歯面は平滑化されるが歯形は中凹形状となる。修整歯形(b)に近い歯形をもつトレーリング側歯面では、ドリブン側は15 kN、フォロワ側は12 kN のときピッチ点から歯元側は正しいインボリュート歯形に近いが歯先部分に凸部があり歯先部の修整量が不足しているようである。素

図5 ホブ切りした素材歯形

図6 転造歯形(転造力一定の実験結果)

図 7 転造後の歯形誤差

材歯車 II b については、リーディング側、トレーリング側とも歯先寄りの修整量は計算よりかなり大きくなっているが、リーディング側をドリブン側にトレーリング側をフォロー側にして $P_o=12$ kN で転造したとき非常によい歯形が得られている。同じ転造力で歯面の組合せを逆にした場合には、ドリブン側の歯形はやや中凸状に、フォロー側はやや中凹状になっている。すなわちフォロー側の素材歯面の最大歯形修整量はドリブン側より大きくする必要がある。

図 7 は歯先のだれおよび歯元の凹部を除いて求めた転造後の歯形誤差と転造力の関係を示す。右端()内の数字は歯形誤差に関する JIS 規格等級を表す。転造前の素材歯車 II a の歯形誤差はリーディング側で約 10 μm 、トレーリング側で 15~20 μm 、素材歯車 II b のリーディング側で 15~20 μm 、トレーリング側で約 25 μm である。素材歯車 II a では当初の歯形修整量が小さいため、転造歯形が中凹形状となりやすく転造により歯形精度は向上するとは言えない。素材歯車 II b では歯形精度が向上する最適転造力が存在するようである。以上の結果から、素材歯形を中凸状に修整し、適当な転造力あるいは転造代を選べば、標準インボリュート歯形工具を用いてかなり歯形精度の良い転造歯形を得ることができることが認められた。しかしながら理論解析による修整歯形は、予備実験で示したように、転造代が小さく歯形修整量が小さいときには良好な転造歯形を与えるが、転造代を大きく設定し歯形修整量

を大きくするときには、歯先部の修整量は計算で求めたより大きく、またフォロー側の最大歯形修整量はドリブン側より大きくしないと、実際の転造で良い結果が得られない。この転造モデルで用いた弾性たわみ、弾性沈みの影響関数は弾性接触の荷重範囲では検証されているが⁽²⁾⁽³⁾、塑性押込みを伴う高荷重下での検証はなされていない。高荷重下では特に自由端の影響が大きくなると考えられる。これらが計算で求めた歯形修整量と実際の転造において必要な修整量とのくい違いを生じた大きな原因ではないかと考えられる。また歯幅方向をもう少し小さく分割することも必要であろう。今後高荷重下での弾性たわみ、弾性沈みの影響関数について、またホブ切れ刃形状の設計やホブ切り加工条件などについて検討する必要があると思われる。

4. 結 び

(1) 標準インボリュート歯形工具を用いて歯形精度の良い転造歯形を得るために必要な素材修整歯形を、簡単な転造モデルにより理論的に求めた。修整歯形形状はピッチ点付近を頂点とするならかな山状となる。

(2) 転造代が小さいときは、計算により求めた修整歯形で実際にかなり良好な転造歯形が得られるが、歯面仕上がりは不十分である。

(3) 転造代が大きいときには、歯先部で歯形修整量を計算より大きく、またフォロー側での最大歯形修

整量はドリブン側より大きくする必要があるなど、理論解析などに改良の余地はあるが、素材歯形を中凸状に修整し適当な転造代あるいは転造量を選べば、標準インポリュート歯形工具を用いて修整精度の良い転造歯形を得ることができる。

終わりに修整歯形ホブの製作にご援助いただいた(株)不二越工具製作所、ならびに実験に協力いただいた

た藤野重信氏に感謝する。

文 献

- (1) 尾崎・船津・淵, 機論, 52-473, C (昭 61), 130.
- (2) 梅澤, 機論, 38-308 (昭 47), 896.
- (3) 梅澤・石川, 機論, 38-315 (昭 47), 2979.

討 論

〔質問〕 寺 内 喜 男 (広島大学工学部)

(1) 2916 ページ左欄 18 行め以下に, 計算結果と実験結果の間に生じる違いの原因の一つとして, 駆動方式の違いが挙げられている。駆動方式が歯形形成にどのような影響を及ぼすか, ご見解をお伺いしたい。

(2) 図 5 において, ホブ切り後の歯形と計算歯形の差を生じた原因は何か。また目的とする歯形を求める方法について何かお考えがあればご教示願いたい

〔回答〕 (1) 強制駆動の実験は行っていないので明確にはお答えできないが, 計算によれば歯形の全般的特徴に著しい差はないが, 自由駆動のほうが歯形各点においてかみあい歯数の変動に伴う転造量の変動が大きい。

(2) ホブの精度 (特に歯筋隣接誤差), ホブの取付誤差, ホブ盤の剛性, 精度および構成刃先などが原因と考えられる。特に構成刃先を生じさせないホブ切り法の開発が望まれる。

〔質問〕 岡 本 隆 (京都工芸繊維大学)

(1) 歯車素材を修整して良好な仕上がり歯形をねらうことは論理的ではあるが, 修整を思うとおりに行うことは貴論文にもあるように極めて困難である。要は前歯形誤差を少なくして低い荷重あるいは小さな転造代で転造仕上げをすればよいと考えられるがいかか。

なお, 本実験における歯車素材の寸法精度およびホブ切りの詳細な加工条件をうかがいたい。

(2) 少量生産の場合ということで本研究を行っておられるが, 歯車の転造仕上げは, 大量生産に適した加工法であるといえる。したがって少量生産に対して

はダイスのコストなどを考えると得策ではないと考えられるがいかがなものか。

〔回答〕 (1) お説のとおりであるが, 良好な歯面仕上げや, 歯面の加工硬化による負荷能力向上などを目的とする場合には, ある程度大きな転造力, 転造代が必要と考えられる。

本実験において, 歯車素材は研削仕上げしており, 寸法精度は ± 0.01 mm 程度である。ホブ切りは 3 回に分けて切り込んだ。最終仕上げの加工条件は, 切削速度 17.6 m/min, 送り 1 mm/rev, 半径方向切込み約 0.5 mm である。

(2) 本加工法は少量生産向きではないが, 工具費を低減することにより本加工法の適用範囲が少しでも拡大すればと考えている。

〔質問〕 植 松 整 三 (山形大学工学部)

(1) この工具の場合, 歯数, 転位係数, ねじれ角の異なる他の歯車に, 一般的に適用可能なのか。

(2) はすば歯車は歯筋方向の位置によって歯形は一定にならないと思うが, このデータはどの断面について表示しているのか。同時に, 歯筋方向のことは議論されていないが, それはどうなっているのか。

〔回答〕 (1) 諸元が異なれば修整歯形は変化するが, その程度はあまり大きくないので, かなり広い範囲で適用可能と考える。

(2) 本転造モデルで各分割歯の歯形が計算できる。お説のとおり歯筋方向の位置により歯形は変化するが, 本報では慣用のホブ切りで前加工することを前提としているので, 歯幅中央の歯形で代表させている。歯筋については今後検討を進めたいと考えている。