歯車転造機構の研究 (第1報)*

—転造中のかみあい状態が精度に及ぼす影響—

井 上 和 夫** 植 松 整 三** 鏡 光 夫***

Gear-Rolling (1st Report)

—Effect of the Contact Phase in Rolling Operation on the Accuracy of Roll Formed Gears—

Kazuo INOUE, Seizo UEMATSU, Mitsuo KAGAMI

There are two contact phases in roll forming process. One is the conjugate action between the roller tooth and the blank tooth. The other is the non-conjugate action between the tip edge of roller tooth and the fillet surface or the bottom land of blank tooth. In the reports of this type published to date the operations are classified as the rough and the finish rolling because of the amount of material that must be moved by the rolling. But in this report the operations are classified by the above contact phases, and the experimental consideration is done to get the effect of phases on the pitch error and the profile error for the module m 3, spur and helical gears. The following results are obtained: If the gear blank meshes with dies holding conjugate action during rolling, the accumulated error after rolling is 5 to 20 μm , and the profile error is 13 to 20 μm , where the material used is JIS S 20 C steel, the tooth depth of pre-gashed blank is 6.0 to 7.0 mm in range. But in the same condition the material and the pre-gashing depth the non-conjugate action at the fillet surface of the blank tooth may be inserted into the process, the accumulated error after rolling becomes 10 to 20 μm , the profile error becomes lower grade 20 to 30 μm . After rough rolling, the rolled gears are further processed by finish roll holding conjugate action. In this case the accumulated error held the same level, but the profile error is improved 15 to 20 μm , though 40 μm in rough rolling. Further, when the rough and finish combined rolling is applied to the high hardness metal JIS S 55 C steel, the profile error is improved higher grade 5 to 10 μm .

1. 緒 言

歯車の転造に関する研究は最近急速に増加し^{1),2)}, 転造歯車は一部で実用化されはじめたが³⁾, それらは仕上転造に属するものが多い。筆者らは転造について①平歯車, はすば歯車の転造法と精度向上に関する実験⁴⁾, ②転造法の応用として切削法では加工困難な歯車, 例えば円弧歯筋歯車⁵⁾, やまば歯車⁶⁾に前加工として素材に近似成形歯切りまたは単なる荒切りを施し, 最後に転造法を試みる実験について報告した。このように両者を平行して推進して来たが, 歯車の形式にかかわらず転造後の精度は, 特に歯形誤差がピッチ点付近にくぼみを生じ, 精度向上について限界に達したと思われる結果となり, 転造機構の検討の必要性を痛切に感じた。

本報では, 転造中のかみあい状態にある時, 工具歯面

と素材歯面が接触するインボリュートかみあいと工具歯先が素材の歯元すみ肉部および歯底と接する非インボリュートかみあいがあることに着目した。この状態を歯面だけの転造と歯面のほかに歯元すみ肉部および歯底を含む転造に分類し, モジュール3の歯車について, それらがピッチ精度, 歯形誤差に及ぼす影響を検討した。この結果に基づいて歯底を含めて転造する場合を荒転造と呼ぶことにし, 次いで別の工具を用い歯面のみを転造する仕上転造を試みた。この結果, 荒転造ではピッチ点付近のくぼみが大きく30~40 μm あった歯形誤差が, S 20 Cでは10~15 μm , S 55 Cでは約5 μm にまで少なくなり精度が向上した。

2. 実 験 方 法

転造装置⁷⁾は筆者らが従来から使用しているものであり, これは図1に示すように工具が3方向から油圧で押込まれる。転造圧力はシリンダ内径105 mmのピストンにかかるゲージ圧である。工具の回転数は40 rpm, 1回の転造時間を5 sとして最高20 sまで追加し, 自由駆

* 原稿受付 昭和49年3月30日。精機学会昭和48年度関西地方定期学術講演会(昭和48年7月7日)にて発表。

** 正 会 員 山形大学工学部(米沢市城南4-3-16)

*** 富士通(株)(東京都千代田区丸の内2-6-1)

1: 素材, 2: 工具, 3: 工具軸受, 4: 油圧シリンダ
図1 転造装置

表1 工具および素材諸元

	工 具		素 材	
モジュール	3		3	
圧力角	20°		20°	
歯 数	30	28	26	25
ねじれ角	0°	20°	0°	20°
歯幅(mm)	30		20	
材 質	NR 2		S 20 C 焼鈍材 S 55 C 市販材	
歯たけ(mm)	6.47		予備切削深さは表2参照	
歯みぞの振れ(μm)	12~16	7~8	15~50	
単一ピッチ誤差(μm)	1~3	1~2	3~13	
累積ピッチ誤差(μm)	6~11	6~11	15~65	
歯形誤差(μm)	2~4	1~3		

素材硬度: S 20 C $H_{RB} 65$, S 55 C $H_{RC} 27$

表2 素材の予備切削深さ

ホブカッタの種類	ホブカッタの歯たけ(mm)	予備切削深さ(mm)
標 準	6.47	6.5, 6.4, 6.3, 6.2, 6.1, 6.0, 5.7, 5.4, 5.1, 4.8, 4.5, 3.0, 1.5
標 準	6.75	6.8, 6.7, 6.6, 6.5, 6.4, 6.3, 6.0, 5.7, 5.4, 5.1, 4.8
PP (コブ付 きホブ)	7.05	7.0, 6.9, 6.8, 6.7, 6.6, 6.5, 6.4, 6.3, 6.2, 6.1, 6.0, 5.5

動方式で転造した。工具および素材諸元は表1に示す。転造工具の製作にあたって、荒転造用工具は工具と素材間の頂隙をなくすために横転位して工具歯厚を薄くし

図2 転造中の工具と素材のかみあい状態

て、歯先かどを1.5 C 面とりした。仕上転造用工具は歯厚を標準につくり、荒転造された素材の歯元すみ肉部に工具歯先が接触しないように、その歯先に修正を施し、工具両歯を一つの円弧でつないだ。

素材の精度管理には特に注意した。歯車の円筒形素材は穴径 30 mm H 7, 外径は研削仕上を行い目標値 ± 0.02 mm に加工し、偏心を極力小さくした。それらの予備切削後のピッチ精度および歯みぞの振れは表1に示す。素材外径は予備切削深さ 6.0~7.0 mm の素材はすべて 85.00 mm, 他は転造による盛上がり量を予想し、おのおの変化してある。

工具と素材間のかみあい状態と精度に関する実験は、仕上転造用工具を用い、はすば歯車、平歯車について行った。その時の素材の予備切削深さおよび使用したホブカッタの条件を表2に示す。ここでは、工具と素材のかみあい状態を簡単のために、(a), (b), (c) として表す。すなわち、(a) 歯面のみ転造、(b) 歯面のほかに工具歯先が素材歯元すみ肉部と接する転造、(c) 前記(b)のほかに歯底とも接する転造である。このようにして、3種類のホブカッタで切削された素材は直ちにカッタの種類によりかみあい状態(a), (b), (c) に対応しない。各カッタにより切削された素材とも予備切削が浅く、それが工具歯たけより低いときには、転造が進行した時点で、工具歯先が素材歯底および歯元すみ肉部に接触する転造となる。したがって、各カッタごとに、予備切削深さを段階的に変化させれば、それがある深さに達した素材からおのおのかみあい状態(a), (b), (c) となる。それらの状態は模型的に図2に示す。例えば、PP ホブカッタで6.9 mm 歯切りした素材は、かみあい状態(a)となる。標準ホブカッタ、歯たけ6.75 mm を用い、6.5 mm 歯切りした場合、工具歯先は素材歯底に接触しないから、かみあい状態(b)となる。標準ホブカッタ、歯たけ6.47 mm を用いた場合、転造が進行し素材歯底と工具歯先間に頂隙がなくなれば、工具歯先は素材の歯底に接触するから、かみあい状態(c)となる。

(1) ホブカッタ：標準，歯たけ 6.47 mm の場合

(2) 前加工用ホブカッタ歯たけの影響

ホブカッタの種類 (mm): ●標準 6.47, ○標準 6.75,
△PP 7.05, 転造圧力: 10 kg/cm², 転造時間: 10 s

図 3 予備切削深さと累積ピッチ誤差の関係

荒転造において加工硬化した素材に、さらに歯面のみ
の仕上転造を追加することを組合せ転造と名づけた。こ
の方法で S 20 C を転造した結果、歯形誤差が予想外に
向上したことから、材料の変形抵抗の差が歯形精度に及
ぼす影響を S 55 C を用いて比較した。

3. 実験結果

3.1 ピッチ誤差

図 3 に予備切削深さと転造歯車の累積ピッチ誤差の関
係を示す。転造前の精度は転造後のそれに影響する^{4),5)}
ので、素材の精度は表 1 に示すように作り、予備切削深
さを変化量とした。

図 3(1) に示す結果は、歯たけ 6.47 mm の標準ホブカ
ッタを用いて予備切削した。その深さ 6.0 mm から 1.5
mm の範囲において精度は直線的に劣化する。予備切削
深さの減少することは大きな転造力を必要とすること
であり、そのために工具たわみは増加する。したがって、
工具はその状態でピッチ分割するために転造歯車の精度
が劣下するものと考えられる。そして、6.0 mm 付近の
精度が最もよくなり、それ以上深く予備切削すればやや
劣下する。

次に、表 2 に示した 3 種類のホブカッタを用いて、予
備切削深さ 6.0 mm から 7.0 mm までの素材を作り実験
した結果を図 3(2) に示す。PP ホブカッタで切削した素
材はかみあい状態 (a) に相当し、データのばらつきも少
なく、ほとんどの素材は JIS 0 級になる。標準ホブカ
ッタ、歯たけ 6.75 mm で切削した場合、かみあい状態 (b)

条 件 (1) (2) (3)
予備切削深さ (mm) 7.0 6.5 6.2
ホブカッタ (mm) PP 7.05 標準 6.75 標準 6.47
転造圧力 (kg/cm²) 10 10 10
ただし、転造時間 0s は、ホブ切り状態である

図 4 転造過程における累積ピッチ誤差の推移

になる。素材歯たけは 6.3~6.8 mm と高く、しかも転
造しろがほとんどないから、工具歯先が素材歯底と接触
することを避けても、工具歯先と素材歯元すみ肉部のほ
かに、転造の進行に伴って、素材歯先が工具歯元すみ肉
部に接触する。素材にとって、歯元すみ肉部と歯先で非
インボリュートかみあいをすることが、精度のばらつき
を大きくし、よい精度の歯車が得られない原因と考えら
れる。

標準ホブカッタ、歯たけ 6.47 mm を用いて予備切削
した場合、素材歯たけ 6.5 mm 以外のものは工具歯たけ
より低い。したがって、素材歯たけ 6.0 mm ならば、転
造時間 10 s では歯底も含めて転造されるが、その時、素
材歯先は工具歯元すみ肉部に接触していない。しかし、
それが 6.0 mm 以上になり、例えば 6.2 mm の素材は転
造 10 s の時点で素材歯底も転造され、さらに素材歯先
は工具歯元すみ肉部とも非インボリュートかみあいをする。
このようなことから、6.0 mm より深く切削された
素材は 6.0 mm 切削の素材に比較し、転造後の精度は劣
るものと考えられる。

図 4 に転造過程における累積ピッチ誤差の変移を示
す。図 4(1) の場合、歯面のみのかみあいが 10 s 間続き、
その間、精度は向上している。素材歯たけが転造工具の
それより高いために、転造が進行し、素材歯先が工具歯
元すみ肉部と非インボリュートかみあいを始めるころから
精度は劣下する。図 4(2) においては、転造中のどの
時間であっても歯面同志のインボリュートかみあいのほ
かに工具歯先と素材歯元すみ肉部および素材歯先と工
具歯元すみ肉部の非インボリュートかみあいが行われるか
ら、精度向上する最適時間は見当たらない。図 4(3) の場
合、予備切削 6.2 mm の素材は低歯のような形をしてい
るから、転造初期 5 s 以内は歯面のみのかみあいが行わ
れ、その間、精度は向上する。その後、素材歯先部の非
インボリュートかみあいも生じ、精度は劣下する。

ホブカッタの種類 (mm): ●標準 6.47, ○標準 6.75, △PP 7.05, 転造圧力: 10 kg/cm², 転造時間: 5 s
 (2)においてD歯車, F歯車には精度の差がなくなったから, その区別をつけて記入していない。

図5 予備切削深さと歯形誤差の関係

単一ピッチ誤差についても図3, 図4に対応する結果は同様な傾向であった(結果は省略)。

3.2 歯形誤差

図5に予備切削深さと歯形誤差の関係を示す。図5(1)において, 予備切削深さ6.0 mmから3.0 mmの範囲は転造しろの増加に対応してドリブ側歯面* (以下これをD歯面と書く)の精度は劣下している。これは転造しろが多くなれば, 転造圧力も増加させなければならない必然的な要求に伴い, 工具のたわみが増すことが原因と考えられる。これに対しフォロ側歯面** (以下これをF歯面と書く)の精度は転造しろの変化に特に対応していない。

図5(2)に示す結果は前記3種類のホブカッタを用い, 6.2~7.0 mm予備切削し, 転造時間5 sである。PPホブカッタを用いて6.5~7.0 mm切削し歯面のみを転造した素材は, D歯面, F歯面に精度の差がなくなり10~20 μmであった。素材の歯元すみ肉部および歯底を含む転造の場合, すなわち, 標準ホブカッタを使用して予備切削深さ6.2~6.8 mmの寸法を与えた素材において, 歯形誤差はD歯面, F歯面ともに20~30 μmになった。このように工具歯先が素材歯元すみ肉部にわずかも接

* 工具の駆動側歯面と接触する歯面。

** 工具のフォロ側歯面と接触する歯面。

平歯車, モジュール: 3, 歯数: 26, 転造圧力: 10 kg/cm², 転造時間: 5 s

図6 転造中のかみあい状態が歯形誤差に及ぼす影響

触すれば, その時の歯形誤差は, かみあい状態(a)で転造される歯形に比較し, 少なくとも10 μmは劣下する。

工具歯先が転造中に素材歯元すみ肉部に接触した時に生ずる素材の歯形誤差の変化を, はすば歯車に比較して, その影響が顕著に現れる平歯車について図6に示す。標準ホブカッタを使用して6.2 mm切削した素材は, 歯面のほかに歯元すみ肉部が転造されている。このようにかみあい状態(b)では, ピッチ点付近のくぼみが大きい歯形となり, その誤差は約70 μmになる。次に, PPホブカッタを用いて予備切削6.9 mmを素材に与え, 歯面のみを転造すれば, 歯形誤差のピッチ点付近のくぼみはほとんどなくなり, 25~35 μmになる。この歯形誤差はJIS 5~6級で精度は満足なものではないが, 転造中に工具歯先が素材歯底はもちろんのこととして, 歯元すみ肉部と接触しないことは精度向上にきわめて大きい意味をもつことを示している。

3.3 組合せ転造法における精度

以上の実験は, 転造中のかみあい状態の面から精度向上について検討した。その応用として, 組合せ転造法および材料の変形抵抗の影響を検討した。

図7に組合せ転造における累積ピッチ誤差の変移を示す。荒転造行程のかみあい状態は, 先に示した図4(3)すなわち, かみあい状態(c)と同じである。S55Cは材料の変形抵抗が大きく転造が進行しにくいから, 転造精度の向上する割合は, S20Cに比較して遅い。しかし, 精度約30 μmの素材は荒転造で約10 μmにまで向上した。次に, これらの素材に仕上転造を行うと, S55Cの場合, 精度は10~15 μmの範囲で一定またはやや劣下した。S20Cについても同様であるが, 仕上転造が15 sになれば精度は劣下した。

図8に組合せ転造における歯形誤差を示す。S20Cを転造した場合, 荒転造終了時に歯先側の突起が大きく歯形誤差は約40 μmある。これに仕上転造を5 s間加える

図7 組合せ転造による誤差の変移

図8 組合せ転造における歯形誤差曲線

と約 $20 \mu\text{m}$ になり, さらに 5 s 間仕上転造を行うと約 $15 \mu\text{m}$ にまで向上した. しかし, 転造をさらに 5 s 間追加すれば, 素材歯元すみ肉部と工具歯先の接触が生じ, 歯形はくぼみタイプとなり約 $30 \mu\text{m}$ に劣下した. S55C の場合, 荒転造終了時に約 $10 \mu\text{m}$ で凹凸のあった歯形は, 5 s 間の仕上転造によって $5 \mu\text{m}$ より良好で平滑な歯形となった. しかし, この場合にも仕上転造時間が長くなると歯形精度は再び劣下することは前例と同様である.

また, これらの結果において, 材料の変形抵抗の大きい S55C は, 変形の容易な S20C に比較して, よい精度の歯形が得られた.

4. 考 察

本報において, 転造中のかみあい状態を三つに分類し, 転造しろの多少と転造精度の関係をこの方法で整理した. 例えば, 予備切削 6.0 mm から 7.0 mm の範囲の素材は, 転造しろも少なく, 転造圧力は 10 kg/cm^2 の同一条件であるが, 精度はおおの図 3 (2), 図 5 (2) および図 6 に示したように, かみあい状態によって明白な差が現れた. これは素材の形状から判断して, 転造中にイン

ポリュートかみあいだけであった素材が, 他のかみあい状態を保った素材に比較し, ピッチ精度, 歯形誤差ともにすぐれていることを意味する.

次に組合せ転造の結果, 図 7, 図 8 に示したように, 素材と工具が形状的にインポリュートかみあいが可能であっても, 転造が進行し非インポリュートかみあいが増えれば精度は劣下している. すなわち, 工具歯先が素材に対し非インポリュートかみあいをした場合に, 転造歯車の精度は劣下する. 工具歯車の歯先が相手に対し接触することは, 歯車の歯先ふちのかみあい現象であり, その接触点における圧力角は, インポリュート歯面上の接触点のそれに比較して大きい値を有する. したがって, 工具歯先のかみあいが転造のかみあい作用に加わることは, 歯面同志で行うインポリュートかみあい状態の圧力角を変動させる. これが工具のたわみおよび半径方向振動の原因となり, 転造歯車の歯形およびピッチ精度が劣下するものと考えられる.

転造によるピッチ分割作用は, インポリュートかみあい が保たれている場合, 工具歯面が素材歯面を平滑化することによってなされる. 例えば, 図 4 (1), (3) および図 7 (S20C を用いた荒転造工程) に示すように, 転造時間 5 s で精度は $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 向上している. しかしながら, S55C は S20C と同一転造条件であっても, 材料硬度が増しているために歯面の平滑化の進行が遅く, ピッチ精度の向上は遅れている.

これらのことから, 上記のことは考えられるが, 同時に, 工具のたわみおよび半径方向の振動が少ないことが, 工具の動荷重を少なくし, ピッチ精度が向上する一因となっているものと思われる.

一方, 転造が進行し工具歯先の非インポリュートかみあいが加わった場合, または, 素材の予備切削深さが少なくなり, その幾何学的形状によって工具歯先が素材に接触する場合には, 工具のたわみおよび半径方向振動が, 工具歯先の接触しない状態に比較し多くなる. このようなかみあい状態のとき, 工具のたわみおよび半径方向振動は, 転造における創成運動の誤差となって現れ, それが, 歯面の平滑化された素材に対し, ピッチ誤差として加わるものと考えられる.

5. 結 論

平歯車, はすば歯車の転造において, 素材の予備切削深さと転造時間を変化し, すなわち素材の幾何学的形状を変化することによって, 転造中のかみあい状態が精度に及ぼす影響を検討した. その結果, 次の結論を得た.

(1) 工具と素材のかみあい状態は, 歯面同志のインボ

リユートかみあいとし、工具歯先と素材歯元すみ肉部および歯底の非インボリユートかみあいを含まないときに、精度のよい転造歯車が得られる。転造中に非インボリユートかみあいが行われると、歯形誤差は著しく劣化する。例えば、転造中に非インボリユートかみあいが生じた場合、モジュール3の平歯車で、歯形誤差はピッチ点付近にくぼみを有し70 μm になる。しかし、それを避けることによって、歯形誤差はくぼみが減少または除去され、25~35 μm に向上した。

- (2) 予備切削が浅い素材またはむく材からの転造のように歯底を含めて転造する場合、荒転造された素材歯元すみ肉部に、仕上転造用工具歯先が接触しないように設計すること。さらに、仕上転造工程の圧力と時間は、その工具歯先が素材に対し非インボリユートかみあいをしないように設定すること。

- (3) 仕上転造においては、変形抵抗の大きい材料がその小さい材料よりよい歯形が得られる。

参 考 文 献

- 1) 尾崎龍夫, 西村邦雄: 歯車のバニッシュ転造における歯形の解析, 日本機械学会講演論文集, No. 730-18 (1973) 119.
- 2) 鈴木隆充, 杉山栄彦, 竹山雅彦: 冷間転造による歯車の歯形精度と所要力について, 第24回塑性加工連合講演会講演論文集 (1973) 101.
- 3) F. J. Lavoie: Roll-forming Gears, *Mechine Design*, 41, 9 (1969) 223.
- 4) 鏡 光夫, 植松整三, 井上和夫: 切削を加味した転造について, 日本機械学会講演論文集, No. 180 (1967) 69.
- 5) 井上和夫, 植松整三: 円弧歯筋歯車の転造法について, *精密機械*, 36, 11 (1970) 725.
- 6) 井上和夫, 植松整三: 特殊歯車の転造法 (第1報), 日本機械学会講演論文集, No. 199 (1968) 177.
- 7) 成瀬政男編: 歯車の塑性加工, 養賢堂 (1963) 35.

書 評

加 工 の 力 学

臼井英治, 白樫高洋共著, 朝倉書店発行, 1974年10月, 3800円

各種の加工に関する共通の基礎を塑性力学と破壊の力学に求め、各種加工法の原理を有機的に関連させようと試みている点が本書の大きな特長である。まず塑性に関する基礎事項をあげ (1~3), 章ついで各種塑性加工・切削・砥粒加工の解析に最も多くのページ数がさかれ (4章), 5~6章ではすべり線理論と上・下界定理が紹介されている。7~9章では材料物性 (加工硬化, 温度, ひずみ速度, 異方性), 加工過程, 応力・変形の伝ばなど随所に著者自身の研究成果が大いに取り入れられ斬新な

内容が盛り込まれている。

本書はA5版, 297ページの中形の本であるが、冒頭に記した線に沿ってよく整理され簡潔に書かれており、各章ごとに適切な演 (習問題巻末に解説あり) が設けられているので、かなり読みごたえのある本といえよう。なお読者が理解が十分でないと思われる箇所は、巻末に紹介されている図書のいくつかを参考にされるとよいであろう。

(増田泰二)