閉そく型を導入した転造法による歯車の塑性加工* (端面摩擦を伴わない遠心流による型内への材料充满)

堤 成晃^{*1}, 田中 繁一^{*2}, 斉藤 誠^{*3}

Cold Rolling of Gears with Closed Die (Die-Filling by the Radial Flow of Material without Frictional Constraint on the Transverse Planes)

Shigeaki TSUTSUMI, Shigekazu TANAKA, and Makoto SAITO

A new method of producing precision cylindrical gears in quantities is developed. In this method, the middle part of a blank cylinder bulges by the cold rolling onto the adjoining part of the cylinder, and the material flows radially into a closed die to form a gear. This forming technique has several advantages over the conventional die forging. Firstly, the material moves radially without frictional constraint on the transverse planes of a gear to fill a closed die. Secondly, the localized deformation of the material reduces a forming load. Moreover, the accuracy of the products formed by this method is better than that by conventional gear-rolling. The experimental demonstration of this method is carried out on aluminum specimens with different modules, and conditions suitable for practical application are investigated.

Key Words: Forming, Gear, Machine Element, Components-Rolling, Closed Die.

1. 結 言

重要な機械要素の一つである金属製円筒歯車は、その大部分が切削、シェービング、研削などの加工法によって生産されているが、需要が極めて多い実状を背景として、生産性および材料歩留りの向上が強く望まれている。これにこたえるために、鍛造あるいは転造の活用が試みられ幾多の成果が得られているが⁽¹⁾⁽²⁾、塑性加工法により所望の製品を得る手段を他に見いだすこともなお強く要望されている。本報では、塑性変形による円筒歯車の新たな加工法として「閉そく型歯車転造法」を提案し、その可能性を確認するとともに、本法の基礎特性について検討した結果について述べる。

2. 閉そく型歯車転造法の原理および特徴

「閉そく型歯車転造法」とは転造加工に鍛造類似の閉そく型を組合せ、両者の欠点を互いに補わせようとするものである。慣用の歯車転造では、材料流動の自

由度が大きく、歯形精度やピッチ精度の低下、あるいはピッチ円精度不良などが引き起こされやすい。さらに、加工中のかみあいピッチ円直径が変化するために歯数の正確な割出しが困難であることや、工具と材料との間に存在するすべりのために歯形面において一方に偏った材料流動が起りやすいことなどが、そのような好ましくない傾向を助長する。これは一つの工具が圧下と成形の役割りを兼ねていることに起因している。そこで、図1に示すように、素材②の成形部外周に鍛造類似の成形型③を配し、その両側を転造ダイスで圧下することにより、型内に加工物材料を充满させて、④の製品を得る加工法を考案した。

本方式は、平歯車の鍛造加工と類似しているが、以下の点で大きく異なっている。第1に、歯車鍛造においては、工具圧下面と素材端面の間に半径方向の摩擦が存在するために、歯形頂角部への材料充满が阻害される。これに対して、本法では素材は自由に半径方向に流動して型内に充满することができ、また、型内での軸方向摩擦成分も存在しない。第2に、本法では型内への充满が円周位置を変えながら順次行われるので、鍛造に比べて格段に小さな加工力で目的を達することができる。また、材料は閉そく型によってその輪郭形状を完全に拘束されるから、転造において問題と

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年5月2日。

^{*1} 正員、名古屋大学農学部(〒464-01 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 正員、名古屋大学工学部。

^{*3} 名古屋大学大学院。

図 1 閉そく型歯車転造法

図 2 予備実験の方式

図 3 素材形状(予備実験)

なる形状不良(歯形不正, ピッチ不正, ピッチ円真円度不良など)が生起しない。

3. 可能性および予備的検討

本法の成立は所定量の材料遠心流が得られることを前提としているから, 本法の可能性に関する予備的実験として, まず, 閉そく型を置かない状態での材料流動の基本特性に関する検討を行った。類似の変形は断付き軸の熱間転造でも見られるが⁽³⁾, ここでは, 冷間で本報の適用を考慮した形状に着目した。加工には丸形ダイスを油圧で圧下する方式の市販ねじ転造盤を流用した。実験の方式は図 2 (a) のとおりで, 加工物の②の部分に④のダイスが回転しながら押し込まれ, ⑤

のスペーサに対向する素材の自由表面を隆起させて図 1 ①の成品を得る。実際の歯車を製造する場合にはこの部分を取り囲む形に閉そく型が配置され, その内面に材料が充満することによって歯形が形成されるのであるが, ここでは閉そく型を置かないでこの部分の盛り上がりに関する検討を行った。工具は, 加工物両端の拘束板①を保持するための円板③と, 素材に押し込まれるダイス④, およびスペーサ群⑤, ⑥から構成される。スペーサは, 拘束板および閉そく型の間隔を保持するためのものであり, 拘束板は, 加工時に材料が軸方向へ流出するのを防ぐためのものである。また, 工具がもつ形状パラメータの一つとして, 図 2 (b) に示すような傾角 θ に着目し, これを変更した。実験に

用いた加工物の材質はアルミニウム A1050F 材で、これを図 1 ②に $\phi 15$ の軸を付加した図 3 の形状に加工し、加工物センタの保持および回転の検出に利用した。実験条件の詳細は表 1 のとおりである。

実験では、かみ込み率(加工物半回転当たりの工具移動量)、圧下部と盛り上がり部の軸方向寸法比、圧下面の傾角 θ を変更して加工を行い、それぞれが材料流動その他に及ぼす影響について検討を行った。

3・1 かみ込み率 図 4 は、かみ込み率が 1.00 (半径) $\text{mm}/0.5 \text{ rev.}$ 、 Z_1 (盛り上がり部の軸方向幅) $= 5 \text{ mm}$ 、 $\theta = 0^\circ$ としたときの各加工段階での加工物子午断面形状の実測結果である。盛り上がり部は頂部を平

表 1 実験条件

Rolling machine	Maximum rolling force : 196KN Revolving speed of dies : 0.92 rpm Nominal penetration rate 0.02 ~ 1.00 mm/0.5 rev.
Product	without teeth
Blank	Material : aluminium A1050F Diameter : 58.00 mm Length Z_0 : 15.00~20.00 mm
Lubricant	Machine-oil (60%) + Gas-oil (40%)

図 4 加工物子午断面形状
($1.00 \text{ mm}/0.5 \text{ rev.}$) 図 6 加工物子午断面形状
(盛り上がり部軸方向寸法を増大: $Z_1 = 10 \text{ mm}$) 図 5 加工物子午断面形状
(かみ込み率を低減: $0.02 \text{ mm}/0.5 \text{ rev.}$) 図 7 加工物子午断面形状
(圧下面傾角を増大: $\theta = 30^\circ$)

たんに保ったまま隆起しており、材料流動から見て閉そく型歯車転造法を実施するのに好都合な状況であることを示している。かみ込み率を $0.02 \text{ mm}/0.5 \text{ rev.}$ と小さくして加工を行った図 5 の場合には、盛り上がり部の頂部が V プーリ状にくぼむ傾向が見られる。これは、かみ込み率が小さくなると塑性変形領域がより局所化されることに起因する。

3・2 圧下部と盛り上がり部軸方向寸法比 他の条件は図 4 と同一に保ち、 $Z_1 = 10 \text{ mm}$ ($Z_0 = 20 \text{ mm}$) とし、盛り上がり部の軸方向寸法を大きくした図 6 の場合には、盛り上がり部中央近傍における材料の盛り上がりが不足しており、最終的に V プーリ状になっている。

3・3 圧下面傾角 工具圧下面に傾角 θ を与えるとフィーチャ部への材料流動を促進できると考えられるが、とくに大きな傾角 $\theta = 30^\circ$ を与えてみた場合の結果が図 7 である。このように大きな傾角を与えた場合には、盛り上がり部の頂部が V プーリ状になる。また、素材との接触面圧の軸方向成分によってダイスが弾性的に押し広げられるなど、過大な傾角をつけることは望ましくないことが判明した。

図 8 歯車転造実験の方法

図 9 素材形状(歯車転造実験)

図 10 閉そく型

表 2 閉そく型諸元

Module m	Number of teeth z	Root diameter d_r	Tip diameter d_k
0.993	38	35.2512	39.7200
1.500	26	35.2500	42.0000
2.015	20	35.2625	44.3300

表 3 実験条件(歯車加工実験)

Rolling machine	Maximum rolling force : 196kN Revolving speed of dies : 0.92 rpm Nominal penetration rate : 1.00 mm/0.5rev.
Product	with teeth (Module:0.993~2.015)
Blank	Material : aluminium A1050F Diameter : 35.25 mm Length Z0: 24.50 mm
Lubricant	Machine-oil(60%)+Gas-oil(40%) Flourotelomer Graphite

4. 閉そく型を用いた歯車転造加工法の実施例ならびに結果

3章の結果をふまえて、図8のようにハッチングで示された閉そく型を素材の成形部外周に配して、転造実験を行った。素材を圧下するダイスは、3・3節の結果を参照してその圧下面傾角 θ を小さな量にとどめ、工具のたわみが問題とならない範囲で材料流動を促進させるように配慮した。さらに、ダイス④は剛性を増すため厚さを10mmとした。ここで使用した素材の形状は図9のとおりである。加工に際しては、潤滑材としてマシン油(60%)+軽油(40%)を用いたが、とくに閉そく型側面にはテトラフロエチレンテレマ分散液(10%)を塗布して、圧下工具との摩擦を低減するとともに、閉そく型内面にも同液(5%)を塗布し、加工終了(材料が型内に充満するか、あるいは、歯形形成が停止した時点)後に閉そく型から加工物を抜き取りやすくした。また、拘束板①にはグレファイトHを塗布し

てダイス③とのすべりをよくした。本実験で使用した閉そく型は、SKD11の円板を焼入れ・焼なまし後、研削加工で厚さを規定の寸法にそろえ、ワイヤカット放電加工で歯車め型を加工したもので、型面の表面あらさは R_{max} が $0.7\mu\text{m}$ 以内に仕上げられている。閉そく型の詳細を図10および表2に示す。また本章に関する実験条件は表3のとおりである。

4・1 歯形の形成過程 図11は、工具圧下面傾角 θ を 3° とし、モジュール1.5の閉そく型を用いて加工した製品の一例である。また、図12(a)は歯幅を二等

分する軸直角断面で製品を切断し、万能投影機で歯形プロフィールを観察したものであり、図 12(b)はこれを閉そく型形状と重ね合わせて示したものである。歯形の左頂部にわずかなすきまが存在するものの、材料が型内に十分に充満していることがわかる。このときの加工荷重と工具位置を加工物の回転履歴を横軸として表したのが図 13 である。加工荷重は 40kN で目的が達せられていることが確認できる。また、図 13 中に一点鎖線で示した、1.95, 2.46, 3.19, 4.35, 5.07 回転の各

図 11 歯形加工例

(a)

(b)

図 12 歯形形状

段階において加工を中断し、それぞれの加工段階における形状を測定した結果が図 14 である。図 14(a), (b)はそれぞれ軸直角断面および子午断面形状を表しているが、従来の歯車転造において生じがちであったまくれこみ現象も見られず、歯形は順調に形成されている。

4.2 モジュールの変更 次に、図 10 のように歯底円直径を同一に保ち、モジュールを 0.993, 1.500, 2.015 の 3 とおりに変更した閉そく型を準備して実験を行った。

圧下面傾角を 3° とし、かみ込み率を 1.00 mm/0.5 rev. に設定して加工を行った場合の歯形の完成度に関する測定結果を図 15 に示す。ここで、横軸はモジュールを表し、縦軸は一つの軸直角断面に関する歯形の盛り上がり高さを全歯について平均した値を表す。白丸は、図 15 中に示すように軸方向における歯形の高さの最大値 $h_{\max}$ を表し、黒丸は歯形の高さの最小値 $h_{\min}$ つまり軸方向中央のくぼみ部における完成度を表す。また、破線は閉そく型の歯車め型の全歯丈 $h = 2.25m$ (m : モジュール) を表している。図 15 で明らかに、モジュールが小さいときには材料が型内に

図 13 加工荷重および工具変位

(a) 軸直角断面形状

(b) 子午断面形状

図 14 歯形の形成過程

図 15 モジュールを変更した場合の歯形の完成度
(圧下面傾角: $\theta=3^\circ$)

図 16 モジュールを変更した場合の歯形の完成度
(圧下面傾角: $\theta=9^\circ$)

充満して歯はほぼ完成しているが、モジュールが大きくなると充満が不完全となる。

4.3 圧下面傾角の変更による材料流動の改善

モジュール増大に伴う歯先への材料充満不足を改善するために、圧下面傾角を大きくして加工を試みた。図 16 は圧下面傾角を 9° にした場合の結果であるが、このように傾角を大きくするとモジュールが 2.015 の場合においてもかなり充満させることができた。しかし、子午面内で歯先中央部が若干くぼむ現象が現れる。

4.4 実用素材を前提とした加工実験 本法実施に際して供せられる素材は、棒材からクロッピングされて後、冷間すえ込みにより両端面を平坦化されたものあるいは同時にセンタ穴を付与されたものが対象になると思われる。この場合の素材側面はたる形になるから、今回は切削加工により図 17 のような素材を

図 17 素材形状

図 18 モジュールを変更した場合の歯形の完成度
(たる形素材を使用, 圧下面傾角: $\theta=9^\circ$)

用意して加工を行ってみた。図 18 はその結果で、どのモジュールにおいても材料をほぼ完全に型内に充満させることが可能であった。素材がたる形をもつことは、盛り上がり部の V プリー状化を防止する観点からはむしろ好しいことで、本法の実用化に対する見通しはいちだんと深められた。

5. 結 言

塑性変形による円筒歯車の新たな加工法として「閉そく型歯車転造法」を提案し、その可能性を確認するとともに諸条件が歯形の完成度に及ぼす影響を明らかにした。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 本方式により高精度の円筒歯車が加工できることを確認した。

(2) 本方式は、鍛造に比べて格段に小さな加工力で目的を達することができ、また、材料は閉そく型によってその輪郭形状を完全に拘束されるから、転造において問題となる形状不良が生じにくい。

(3) 工具圧下面に適度の傾角を与えることにより型内への材料流動を促進することができる。これを活

用すれば, 比較的大きなモジュールの歯形をもつ歯車を加工することも可能である。

(4) 実用素材を想定してたる形形状の試片を用いた加工実験を行い, 本法の実用化に対してより好都合であることを確認した。

文 献

- (1) 近藤・ほか2名, 機論, 51-462, C(昭60), 390.
 - (2) 団野・ほか4名, 第29回塑性加工連合講演会講演論文集, (昭53), 40.
 - (3) 塚本・樹下, 転造など回転成形の現状に関する講習会資料, (昭55), 24, 中部生産加工技術振興会.
-