焼入れ歯車の転造仕上加工に関する研究*

(第1報, 基礎的考察)

森 脇 一 郎^{*1}, 岡 本 隆^{*1}, 久 保 愛 三^{*2}
山 田 寿^{*3}, 井 澤 康 浩^{*4}Roll-finishing of a Quenched Gear
(1st Report, Fundamental Investigation)Ichiro MORIWAKI, Takashi OKAMOTO, Aizoh KUBO,
Hisashi YAMADA, and Yasuhiro IZAWA

In the present report, the possibility of the roll-finishing of a quenched gear was discussed. In order to reveal the effects of the quenching of a gear on a roll-finished tooth form, computer simulations were carried out. In the simulation, an increase of flank hardness by quenching was regarded as an increase of contact compliance of the tooth flank, i. e. an increase in resistance to contact deformation. The simulation result showed that an increase in contact compliance reduced the amount of rounding down at both tooth edges on a roll-finished tooth trace. Then, experiments of the roll-finishing of a quenched work-gear were carried out. In these experiments, the roll finishing of work-gears with flank hardness $H_{RC}=40$ induced a fairly good tooth form, as in the simulation results. However, when the flank hardness of the work gear was $H_{RC}=55$, a strong interference between the tooth tip of the die-wheel and the tooth root of the work-gear was induced and roll-finishing did not proceed.

Key Words: Gear, Helical Gear, Roll-finishing, Tooth Form, Heat Treatment, Hardening, Quenching, Flank Hardness

1. 緒 言

一般に、動力伝達用歯車は、シェービングなどの仕上加工を施した後、焼入れなどの熱処理により歯面硬度を上げて用いられている。このため、仕上加工を行うにあたり、焼入れによる熱変形を考慮しなければならない。したがって、研削仕上げのように、焼入れ後の仕上加工が可能となれば、より精度良く加工できるものと期待できる。

本研究では、このような現状に対処するため、焼入れを施して歯面硬度を上げた歯車に対し、転造仕上げを行い、その可能性を検討する。そこで、本報ではまず、歯面硬度が大きくなったときの転造仕上後の歯形の定性的傾向を把握するため、被加工歯車歯面の接触変形こわさを大きくした場合について、著者らがこれまでに作成してきたコンピュータシミュレーションプログラム⁽¹⁾を用いて、計算を行い、さらに、その結果をもとに、実際に焼入れ歯車に対して転造仕上加工

実験を行い、焼入れ歯車を転造仕上げる際の問題点を明らかにする。

2. 焼入れ歯車の転造仕上後の歯形の定性的傾向

歯面硬度の大きい歯車を転造仕上げしたときの仕上後の歯形の定性的傾向を把握するために、まず、コンピュータシミュレーションを行ってみた。シミュレーションでは、被加工歯車の歯面硬度の増加を、その塑性域における接触変形こわさを大きくすることにより考慮することにした。すなわち、接触による近寄りの影響係数の塑性域における補正量および歯面の塑性変形量の計算⁽¹⁾において、ある定数（以下で接触変形こわさを3倍にしたというときには1/3）をこれらに乗ずることにより、考慮した。歯面硬度が大きくなった場合、これらの値は、例えば塑性変形量の分布荷重

表 1 ダイス歯車および被加工歯車の諸元

	DIE	WORK
tooth form	normal	
module (mm)	2	
press. angle (deg.)	20	
number of teeth	80	34
addendum mod. coef.	0	0
helix angle (deg.)	23LH	23RH
face width (mm)	30	12
material	SKS3	S45C

* 昭和63年10月18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24日。

^{*1} 正員、京都工芸繊維大学（〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町）。

^{*2} 正員、京都大学工学部（〒606 京都市左京区吉田本町）。

^{*3} 准員、三菱電機（株）（〒617 長岡京市馬場園所）。

^{*4} 学生員、京都工芸繊維大学大学院。

の増加に対する増加の割合が変化するなど、もっと複雑な変化を示すことも考えられるが、仕上がり歯形の定性的傾向を見るうえでは、これで十分であるものと考えた。表1に計算に用いたダイスおよび被加工歯車の諸元を示す。

図1および図2は、被加工歯車の接触変形こわさを3倍にして、転造荷重を21 kNとし、ダイス歯車回転数25 rpmで5 s間転造仕上げしたときの正面方向および歯すじ方向の仕上がり歯形の計算結果を示したものである。図1、2のS1、S2およびS3は、それぞれ、歯のかみあい初め側歯幅側端から3 mm離れたところ、歯幅中央、および、歯のかみあい終わり側歯幅側端から3 mm離れたところの正面方向歯形を、また、L1、L2およびL3は、それぞれ、歯先より作用面上の距離で、2.4、4.8 mm (ピッチ点に対応) および

7.2 mm離れたところの歯すじ方向歯形を示したものである。計算は、ダイス歯車には全く誤差はないものとし、被加工歯車については、その仕上がり程度の見るために、加工前歯形として正面方向のかみあい領域に、歯形誤差曲線で表したときピッチ点で頂上となる高さ10 μm の山形となる歯形を与えて行った。なお、比較のために、接触変形こわさを1倍に、すなわち、接触変形こわさを変えずに、転造荷重11 kNとして計算を行ったときの結果(b)も合せて示している。このように転造荷重を設定したとき、被加工歯車歯面の塑性変形量がほとんど同じになった。

これだけ加工に要する荷重が大きくなると、同時かみあい歯数の変動にともなう加工圧力の変化もかなり大きくなるものと考えられ、その結果、ピッチ点付近の中くぼみが非常に大きくなるものと思われる。図3

(a) 接触変形こわさが3倍

(b) 調質材

図1 正面方向の仕上がり歯形の計算結果

(a) 接触変形こわさが3倍

(b) 調質材

図2 歯すじ方向の仕上がり歯形の計算結果

は、歯面上の荷重分布の計算例として、グイス歯車と被加工歯車の1回めのかみあいにおける被加工歯車の被動側歯面のそれを示したものである。図の縦方向は歯幅方向に対応し、また、横方向はかみあい長さ方向に対応しており、いずれも歯幅およびかみあい長さで無次元化してある。このように被加工歯車の接触変形こわさを大きくすると、加工圧力の変化が激しくなることがわかる。ところが、図3に示したように、正面方向歯形については、被加工歯車の接触変形こわさが大きくなっても仕上がり歯形の大きな変化は特に認められない。これは、被加工歯車の接触変形こわさが大きくなったことにより、加工圧力の変化に対する歯面塑性変形量の変化が小さくなったためであると考えられる。したがって、焼入れ歯車を転造仕上げする際に留

意しなければならないことは、正面方向歯形については、特にないようである。

一方、歯すじ方向歯形を見てみると、若干変化が認められる。すなわち、歯幅側端部でのだれが小さくなっている。この歯幅側端部のだれは、自由端近傍における接触変形こわさが、自由端から十分離れたところのそれに比べ小さくなることに依存する。そこで、歯面塑性変形の自由端効果に対する補正係数⁽²⁾について調べてみた。図4は、図3の場合に対するこの補正係数の分布を示したものである。この補正係数は、自由端からの距離と分布荷重の関数として与えられ、そして分布荷重に対しては、荷重が小さくなるほどこの補正係数の値は大きくなることを著者らは以前示した⁽²⁾。したがって、被加工歯車の接触変形こわさを大

(a) 接触変形こわさが3倍

(b) 調質材

図3 作用面上での荷重分布

(a) 接触変形こわさが3倍

(b) 調質材

図4 作用面上での自由端効果に対する補正係数の分布

きくすると、加工に要する荷重が大きくなるため、前掲の図3に示したように、接触変形こわさを変えない場合に比べ、歯幅側端部での分布荷重の減少量が小さくなっている。このため、図4に示したように、自由端付近においても、接触変形こわさを変えない場合に比べ、この補正係数はさほど大きくなっていない。それゆえ、歯幅側端部のだれの小さな歯すじ方向歯形が得られたものと考えられる。

このように、被加工歯車の接触変形こわさを大きくすると、正面方向歯形については大きな変化は認められないが、歯すじ方向歯形については、歯幅側端部でのだれが小さくなるという特徴が認められる。

3. 焼入れ歯車の転造仕上げ

2章でのシミュレーションの結果をふまえ、真空焼入れを施し歯面硬度を高くした被加工歯車に対して、実際に転造仕上加工実験を行った。実験に用いた転造仕上装置は、2ダイス定圧押込方式のもの⁽³⁾である。

図5は、歯面硬度 $H_{RC}=40$ の被加工歯車に対し、転造荷重を 18, 21, 24 kN の3種類に設定してダイス歯車回転数 25 rpm で5 s間転造仕上げしたときの転造前後での歯形誤差測定記録例である。図5中の数字は最大歯形誤差を μm 単位で示したものである。歯面硬度は、焼入れ後に歯の側面の数箇所測定を行ったところ5%程度のばらつきであった。なお、比較のため、調質材 ($H_{RC}=12$) に対する結果⁽⁴⁾も合わせて示した。

図5に示したように、焼入れを施していないときには11 kN程度の転造荷重で十分に加工が行われていたにもかかわらず、焼入れを施すことにより歯面硬度を高くすると、転造荷重を18 kNと大きくしても、加工前歯形がほとんどそのまま残っており、荷重が不足している。転造荷重を21 kNまで上げて初めて良好な仕上がり歯形が得られている。しかも、その仕上がり歯形は、調質材の被加工歯車を転造仕上げしたときの仕上がり歯形と大きな差は認められない。さらに、転造荷重を24 kNと大きくするとピッチ点付近の中くぼみが非常に大きくなる過転造の状態を示しており、さらに高い歯面硬度を持つ歯車の加工も可能ではないかと期待できる。

図6は、このときの歯すじ方向誤差の測定記録例である。図6中の数字は最大歯すじ方向誤差を μm 単位で示したものである。このように、歯すじ方向の歯形も非常に良好な歯形が得られており、しかも、調質材の仕上がり歯形に見られる歯幅側端のだれも、シミュレーションの結果と同様に、かなり小さくなっている。したがって、 $H_{RC}=40$ 程度の歯面硬度を持つ歯車であれば、転造仕上げで十分に仕上げるができるものと思われる。

前述のように、歯面硬度が $H_{RC}=40$ の歯車でも、転造荷重を大きくしていくと過転造の状態が認められた。そこで、より歯面硬度の高い被加工歯車に対して転造仕上加工実験を行ってみた。図7は、歯面硬度が

(a) 歯面硬度が $H_{RC}=40$ の場合

(b) 歯面硬度が $H_{RC}=12$ の場合

図5 転造前後での歯形誤差測定記録例

$H_{RC}=55$ の被加工歯車を転造荷重 27 kN、ダイス歯車回転数 25 rpm として 5 s 間転造仕上げしたときの転造前後での歯形および歯すじ方向誤差を示したものである。

このように、転造荷重を 27 kN と非常に大きくしても、まだ、加工前歯形がほとんどそのまま残っている。しかしながら、かみあいが歯元から始まる従動側歯面で、非常に大きな歯元のくぼみが生じているのがわかる。これは、転造荷重が大きすぎたため、歯の弾性たわみが非常に大きくなりダイス歯車の進入量も非常に大きくなってしまい、その結果、ダイス歯車の歯先と被加工歯車の歯元が非常に強い干渉を起こしたこ

によるものと考えられる。したがって、さらに転造荷重を大きくしてもこの歯元干渉が強くなるだけで、歯面の加工が進むとは考えられず、歯面硬度が $H_{RC}=55$ と大きくなると、通常の転造仕上げでは加工は困難であると思われる。このため、このように歯面硬度が高い歯車を転造仕上げする場合には、この歯元干渉を防ぐため、被加工歯車の歯元に逃げを与えたり、あるいは、より低い転造荷重で加工が可能となるクラウニングダイスを用いる方法⁽⁴⁾や軸交差方式の転造仕上げ⁽⁵⁾などを採用すればよいものと思われる。

L.S.: Leading Side of Meshing
T.S.: Trailing Side of Meshing

(a) 歯面硬度が $H_{RC}=40$ の場合

L.S.: Leading Side of Meshing
T.S.: Trailing Side of Meshing

(b) 歯面硬度が $H_{RC}=12$ の場合

図 6 転造前後での歯すじ方向誤差測定記録例

(a) 正面方向歯形

L.S.: Leading Side of Meshing
T.S.: Trailing Side of Meshing

(b) 歯すじ方向歯形

図 7 歯面硬度が $H_{RC}=55$ の場合の歯形誤差測定記録例

4. 結 言

焼入れを施して歯面硬度を高くした歯車の転造仕上げについて、コンピュータシミュレーションおよび実際の転造仕上加工実験を行った結果、次のことが明らかになった。

(1) 焼入れを施して歯面硬度を高くした歯車を転造仕上げすると、正面方向の仕上がり歯形には歯面硬度を高くしたことによる大きな変化は認められないが、歯すじ方向の仕上がり歯形に一般的に生じる歯幅側端部のだれが小さくなる。したがって、ダイス歯車の設計にあたっては、このことに注意が必要である。

(2) 本実験の範囲では、歯面硬度 $H_{rc}=40$ 程度の歯車までは、転造仕上げにより、良好な仕上がり歯形が得られる。

しかしながら、歯面硬度が高すぎると、加工に要する荷重が非常に大きくなるため、ダイス歯車の歯先と被加工歯車の歯元の干渉が非常に強くなり、加工が困難となる。したがって、転造荷重が低くても加工が可能となるクラウニングダイスを用いる方法や軸交差方式の転造仕上げが有効となるものと期待できる。この点については次報で取り上げる。

終わりに、実験を進めるにあたり労多かつた京都工芸繊維大学学生 金明洙君に深甚の謝意を表する。

文 献

- (1) 岡本・ほか2名, 機論, 46-403, C (昭55), 308.
- (2) 森脇・ほか3名, 機論, 52-474, C (昭61), 562.
- (3) 岡本, 機講論, No. 750-9 (昭50-8), 307.
- (4) 森脇・ほか4名, 機論, 51-467, C (昭60), 1550.
- (5) 岡本・ほか3名, 機論, 49-445, C (昭58), 1564.

討 論

〔質問〕 団 野 敦〔(株)豊田中央研究所〕

焼入れ歯車の転造仕上加工について可能性を示されたことは、歯車の転造仕上加工技術の発展のうえで大変意義深いと思う。

著者は、この種の硬質歯車の仕上転造では、必要な転造加工力の増大に対応して、ダイス歯車および被加工歯車の歯の弾性たわみが大きくなり、その影響が特に正面歯形に強く現れてくるものと予想していた。しかし、貴論文では、図5で歯面硬さが高くなると正面歯形の圧力角が若干小さくなるような傾向は認められるものの、過転造の場合を除けば、正面歯形に対する歯面硬さの影響はそれほど強くは認められない。

高硬度歯車の仕上転造におけるダイス歯車と被加工歯車の歯の弾性たわみの寄与度について、ご見解があればお伺いしたいと思う。

〔回答〕 ご指摘のとおり、歯車の転造仕上げにおいて、歯の弾性たわみは仕上がり歯形に大きな影響を与えるものと考えられる。著者らは、転位歯車の転造仕上げを取り上げ、これを明らかにした(付1)。すなわち、仕上がり歯形に影響を及ぼすのは、歯の弾性たわみの大きさではなく、ダイス歯車の歯と被加工歯車の歯の曲げこわさの差である。被加工歯車の歯のこわさのほうが大きいと仕上がり歯形には負の圧力角誤差が発生し、逆に小さいと正の圧力角誤差が発生する。本研究で取り上げた焼入れ歯車の場合には、焼入れによる歯の曲げこわさの変化はほとんどないものと考えられるため、正面方向の仕上がり歯形には、そのような影響が認められなかったものと考えられる。

(付1) 森脇・ほか3名, 機論, 49-445, C (1983), 1555.