はすば歯車形ナイロンラップによる高精度歯車の歯面仕上げ*

中江道彦^{*1}, 日高一憲^{*1}, 有浦泰常^{*2}
松波俊宣^{*3}, 小原正男^{*4}

Finishing of High-Precision Gears with a Nylon Lap

Masahiko NAKAE^{*5}, Kazunori HIDAHA, Yasutsune ARIURA,
Toshinori MATSUNAMI and Masao KOHARA^{*5} Department of Mechanical Engineering, Sasebo National College of Technology,
1-1 Okishin-cho, Sasebo-shi, Nagasaki, 857-1193 Japan

This research aims at developing a new lapping process which can make efficiently tooth flanks of hardened steel gears smooth as a mirror. The lapping process is carried out using a nylon helical gear and a simple mechanical device. This paper shows causes of increases of tooth profile errors in this lapping and proposes how to prevent them according to results of lapping tests with many ground high-precision gears under various conditions. It is concluded that it is important to carry out the lapping for a short time using a nylon gear which has a large helix angle and high-teeth under a condition of high-speed revolution and light load in order to prevent increases of tooth profile errors.

Key Words: Gear, Hardened Gear, Lapping, Nylon Lap, High-Precision, Surface Roughness, Tooth Profile Error, Abrasive Grain

1. 緒言

高精度かつ滑らかな歯面をもつ高硬度歯車は耐摩耗性, 耐ピッチング性が優れるとともに, 運転時の振動・騒音も少ないことが知られている⁽¹⁾⁽²⁾.

歯車の歯面仕上げにはシェービング, 超硬ホブ切り, 研削およびホーニングなどの方法が実用されている。しかし, これらは専用の高価な加工機を必要としたり, 高度な加工技術と長い加工時間を要するものが多い。また歯車材の硬さに制約があるものもある。しかもこれらの加工法では鏡面まで滑らかに仕上げることは困難である。鏡面仕上げ加工法としてはラッピングがあり, 歯車のラッピングについても, これまでに鋳鉄製歯

車などをラップ工具とした多くの研究⁽³⁾が行われているが, 良い結果は得られていない。

本研究は, ナイロン製はすば歯車をラップ工具とする比較的簡便な装置を用いて, 浸炭や高周波焼入れなどにより極めて硬く焼入れした歯車の歯面を, 短時間に鏡面に仕上げるができるラッピング加工法を開発しようとするものである。前報⁽⁴⁾では, 焼入れした後, 超硬ホブにより仕上げ切りした歯車に, 本ラッピング加工法を適用すれば, 比較的容易に歯面を滑らかに仕上げるができるが, 必ずしも歯形の精度は向上しないこと, 長時間のラッピングを行うとむしろ歯形精度が劣化すること, また本加工法における砥粒の作用機構などを明らかにした。

本報では, 浸炭および高周波焼入れによって歯面を硬くした後に研削を施した高精度歯車の歯面粗さの改善を目的として, 種々の条件の下でラッピング加工を行った。そして本加工法における歯形精度劣化の原因を明らかにするとともに, その防止法を提案し, 図1に示すような鏡面仕上げされた歯面をもつ高精度歯車を実現した。

* 原稿受付 2002年1月15日。

^{*1} 正員, 佐世保工業高等専門学校機械工学科(☎857-1193 佐世保市沖新町1-1)。^{*2} 正員, フェロー, 九州大学大学院工学研究院(☎812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。^{*3} 正員, 岐阜ギヤー工業(☎500-8367 岐阜市宇佐南2-2-2)。^{*4} 正員, ユシロ化学工業自動車産業事業部(☎253-0114 神奈川県高座郡寒川町田端1580)。

E-mail: nakae@post.cc.sasebo.ac.jp

2. 実験装置、実験方法及びその条件

図2は実験に用いたラッピング加工装置を示す。これは著者らが設計製作したものである⁽⁴⁾。ラップ工具にMCナイロン製はすば歯車を用い、これに鋼製の被加工歯車をかみ合わせて高速で回転させ、はねかけ方式でラップ剤を歯面間に供給して片歯面のラッピング加工を行うことができる。被動のナイロン製ラップ歯車にブレーキをかけて負荷を与える。ナイロン歯車をはすばにすることにより、歯すじ方向にも滑りが生じ、ピッチ点付近の加工が可能となる。また、被加工歯車を軸方向に往復させることにより、歯幅全体を均等に加工することができる。

表1に被加工歯車およびラップ歯車の諸元を示す。被加工歯車はモジュール4、歯数25、歯幅10mmで、材質は、浸炭焼入れして860HVに硬くしたSCM415と、高周波焼入れして640HVにしたSCM435で、高精度に歯面を研削仕上げしたものである。これらの歯車はいずれも同程度の精度をもつもので、その歯形、歯すじお

Fig.1 Lapped gear

Fig.2 Lapping machine

Table 1 Specifications of work and lap gears

	Work gear	Lap gear
Module	4	4
Press. angle (deg.)	20	20
Helix angle (deg.)	0	15,23,30 (R,L)
No. of teeth	25	19
Face width (mm)	10	34
Materials	SCM435(640HV) SCM415(860HV)	MC Nylon
Tooth flank condition	Ground	Hobbed

よび歯面粗さの代表例を図3に示す。なお、歯形は歯幅中央、歯すじはピッチ円筒上を測定し、歯面粗さはピッチ点付近を歯形方向に測定したものである。図からわかるように、形状精度はJIS0級であるが、歯面粗さは $1.5 \sim 2 \mu\text{mRy}$ 程度である。

ラップ工具であるMCナイロン製はすば歯車は歯数19、歯幅33mm、ねじれ角 $15^\circ \sim 30^\circ$ で、ホブ切りしたものである。その歯形の例を図4に示す。

表2にラッピング加工条件を示す。前報⁽⁴⁾と同様に加工は荒加工と仕上げ加工の2段階方式とし、荒加工には右ねじれはすば歯車を用い、仕上げ加工には左ねじれはすば歯車を用いた。これによりラッピングによる加工目を交差させることができ、短時間に荒加工目を除去することができる。ラップ剤は、荒加工にはWA1000の砥粒5gをラッピング油200ccに混ぜたものを用い、仕上げ加工にはGC6000の砥粒を約14%含むものを用いた。

駆動軸(被加工鋼歯車軸)回転数は610, 1210, 2290および3420rpmとし、軸方向送り速度300mm/min、ストローク11mm一定とした。したがって一往復に約4秒を要する。ラッピング荷重はピッチ点での垂直力に換算して3.8N, 7.6Nおよび15.2Nとした。

Fig. 3 Tooth profile and roughness of ground gear (Before lapping)

Fig. 4 Tooth profile of nylon gear

Table 2 Lapping conditions

Abrasive grain	WA1000,GC6000
Speed of revolution of work gear (rpm)	610,1210,2290,3420
Traverse feed rate (mm/min)	300
Stroke (mm)	11
Load (N)	3.8,7.6,15.2

3. 実験結果及び考察

3. 1 ピッチ点および歯元のくぼみ発生とその原因

図5は、浸炭焼入れ後研削仕上げした歯車を、ねじれ角 30° のナイロンラップ歯車を用いて前報⁽⁴⁾と同様に回転数 1210rpm, ラッピング荷重 15.2N, 砥粒 WA1000 の条件の下で荒ラッピングを行った後の歯形、歯すじおよび歯面粗さを示す。図のようにうねりは除去できないが、7往復(約 30 秒間)の加工で歯面の前加工目が除去され、 $0.7\mu\text{mRy}$ 程度(基準長さ 0.25mm)の滑らかな歯面が得られる。しかし、歯形からピッチ点付近にくぼみが生じているのがわかる。ラッピング荷重を 7.6N に小さくして加工しても同じ現象が現れた。ピッチ点付近では一歯かみ合いとなって面圧が増加するため、くぼみが生じやすくなるものと考ええる。しかし、この回転数では荷重を小さくすると、加工時間が長くなり、くぼみの発生は防止できない。

そこで回転数を 2290rpm に上げ、歯面荷重を 3.8N に小さくして浸炭焼入れ歯車を加工した。わずか2往復(約 8sec)の荒ラッピングで前加工目が除去され、滑らかな歯面が得られた。そのときの歯形を図6に示す。図からピッチ点付近のくぼみは認められない。

図7は、歯面硬度がやや低い高周波焼入れ歯車を、上記と同じ条件でラッピングしたときの歯形である。ピッチ点の歯形くぼみは発生していないが、歯元に深さ $4\mu\text{m}$ 程度のくぼみが発生していることがわかる。なお、浸炭焼入れ歯車の場合も歯面荷重を 7.6N に大きく

Fig. 5 Tooth profile and roughness of lapped gear

Fig. 6 Tooth profile of lapped gear

Fig. 7 Occurrence of concavity on dedendum flank

してラッピング加工すると、歯元に同様のくぼみを生じた。

図8は、回転数 2290rpm の下でラップ歯車と接触する被加工鋼歯車の各歯面位置での滑り速度の計算値を鋼歯車 1° 回転毎に示したものである。半径 50mm が歯先の位置で、ラップ歯車のねじれ角 30° と 15° の場合について示している。図より鋼歯車の歯元部は他の位置より滑り速度が大きく、しかも点の間隔が密になっていることからかみ合い移動速度が遅いことがわかる。したがって、歯元部での除去量が他より多くなり、ここにくぼみが生じたものと考ええる。図6の浸炭歯車の場合は除去量が少ないために目立たないが、負荷を大きくしたり、長時間加工したりすると歯元にくぼみを生じる。

3. 2 歯元くぼみの防止法

3. 2. 1 ラップ歯車の歯先修整効果 ラッピングによる歯元部のくぼみを防止するために図9に示すように、ラップ歯車のいくつかの歯の歯先部を削り落としてナイロンラップ歯車の歯先が被加工歯車の歯元を擦る割合を少なくするように歯形修整したものを製作して用いた。なお修整量を大きくしたため、歯形修正した歯の歯先は接触しなくなる。

図10(a)~(c)は、ラップ歯車の歯数 19 枚のうちそ

Fig. 8 Sliding velocity on tooth flank of steel gear

Fig. 9 Profile modification of nylon gear

れぞれ7枚, 12枚, 17枚を修整したものをういて2往復ずつ加工したときの高周波焼入れ歯車の歯形を示している。歯面粗さはいずれの場合もほぼ同程度に滑らかに仕上がった。図からわかるように歯元のくぼみは歯形修整した歯の数が増すほど小さくなる。しかし、歯形修整した歯が接触を始める部分にも小さな第2のくぼみが発生するようになり、歯元のくぼみが分散する。

ラップ歯車の歯形修整歯数と被加工歯車の歯形誤差の関係を示したものが図11である。修整歯数が増すにつれ、被加工歯車の歯形誤差は減少するが、いずれの場合も加工前に比べて歯形精度は劣化していることがわかる。

3. 2. 2 ラップ歯車のねじれ角の影響 ナイロンはすば歯車のねじれ角の大きさが加工精度に及ぼす影響を調べるために、ねじれ角を 15° 及び 23° に変えたものを製作して高周波焼入れ歯車の加工を行った。ねじれ角が小さい場合は、ラッピング荷重 3.8N では除

去量が少なく、加工に長時間を要するため、荷重を 7.6N にして実験を行った。

図12はねじれ角 15° のラップ工具を用いて加工した歯車の歯形と歯面粗さを示したものである。図(a)に示すように2往復のラッピング加工の後では歯元部のくぼみはほとんど生じていないが、粗さはあまり減少していない。そこでさらに2往復の加工を行うと、図(b)に示すように歯面は滑らかになるが、歯元部にくぼみが生じる。また、ねじれ角を 23° にした場合についても実験を行ったが、 15° の場合と同じ傾向を示した。

図8に示したように、ラップ歯車のねじれ角が小さくなると滑り速度が非常に小さくなる。そのため、ねじれ角 15° のラップ歯車では除去量が少なくなる。また、ねじれ角が小さくなるほど、ピッチ点付近と被加工歯車の歯元付近の滑り速度の差は大きくなる。したがって、ねじれ角の小さいラップ歯車を用いて歯面粗さを十分に滑らかにしようとするとき、歯元部のくぼみは大きく発生しやすくなることがわかる。

3. 2. 3 高歯ラップ歯車の効果 図13のように歯たけを 1mm 高くしたねじれ角 30° のナイロンはすば歯車をラップ工具として、図7および10と同じ加工条件、すなわち回転数 2290rpm 、荷重 3.8N の下で高周波焼入れ歯車をラッピング加工した。並歯ラップ歯

Fig.10 Effect of profile modification of nylon gear

Fig.11 Effect of modified tooth of nylon gear

Fig.12 Effect of helix angle of nylon gear ($\beta=15^\circ$)

Fig.13 High tooth

車を用いたときと同様に2往復の加工で滑らかな歯面が得られた。そのときの歯形を示したのが図14であるが、歯元のくぼみは発生していないことがわかる。この歯車をさらに加工したときの歯形誤差の変化を並歯ラップ歯車の場合と比較したのが図15である。高歯ラップ歯車の場合、3往復(12秒間)の加工後も歯形誤差の変化はほとんどなく、並歯の場合に比べて非常に小さいことがわかる。しかし、さらに加工を行うと、歯形誤差は急増する。このように高歯にしても加工し過ぎるとやはり歯元にくぼみが生じる。しかしこのくぼみは並歯の場合よりさらに歯元側に広く生じ、くぼみが発生しても相手歯車とのかみ合いへの影響は少なく、有効な方法であるといえる。歯車の歯を高歯にするとかみ合い率が大きくなり、かみ合い始めの負荷を減少させることができる。実験に用いたナイロンはすば歯車の歯たけを1mm高くすると、かみ合い率が1.98から2.20に増加する。このため図16に示すように、かみ合い始めに3枚かみ合いとなり、歯元部(→印)の面圧が減少し、くぼみが軽減されるものと考えられる。

図17(a)(b)は浸炭焼入れ歯車を高歯ラップ歯車で荒加工した後、並歯のラップ歯車によって仕上げたときのそれぞれの歯形と歯面粗さである。2往復の荒加工で歯形、歯面粗さとも良好に仕上がっている。さらにねじれ角 30° の並歯左ねじれナイロンはすば歯車を

用いて、砥粒GC6000、歯面荷重7.6Nで仕上げラッピングを行うと、ラップ剤の粒径が小さいため、荒ラッピング時の加工目が取れるまでに4往復の加工を要した。図(b)からわかるように微細砥粒による仕上げ加工であっても歯元部にわずかにくぼみが観察される。したがって仕上げ加工においても高歯のラップ歯車を用いる必要がある。

3. 2. 4 回転数の影響 3.1で示したように回転数は歯面のすべり速度に影響し、加工精度に影響を及ぼす。そこで高歯ラップ歯車を用いて回転数の影響をさらに詳しく調べた。

回転数610~3420rpmでラッピングを行ったときの浸炭歯車の歯面粗さと歯形誤差の変化状況を回転数によって比較して示したのが図18(a)(b)である。図(a)より、回転数が高いほど、より短時間に歯面粗さが減少することが明らかである。610rpmの場合、2往復の加工で粗さ $1.0\mu\text{mRy}$ 程度までは減少するが、さらに加工往復数を増してもほとんど改善されない。一方、3420rpmの場合は1往復の加工で粗さは非常に小さくなる。図(b)より、低速回転では加工時間が長くなるこ

2290rpm, 3.8N, WA1000, 2strokes, SCM435(640HV)
Fig.14 Effect of nylon gear with high-teeth

Fig.15 Effect of nylon gear with high-teeth

Fig.16 Contact of steel gear and nylon gear with high-teeth

(a) After rough-lapping(3.8N,WA1000,2strokes)
(b) After finish-lapping(7.6N,GC6000,4strokes)
2290rpm, SCM435(860HV)

Fig.17 Effect of nylon gear with high-teeth
(Lapping of carburized gear)

とによって歯形誤差が増加し始めることがわかる。高速回転で加工を行えば、滑り速度の上昇によって除去

量が増加し、短時間で加工を終了できる。そのため、歯形精度の劣化が軽減できるものとする。

(a) Roughness of tooth flank

(b) Tooth profile error

Fig. 18 Effect of speed of revolution

4. 結 言

歯面を硬くした後、歯面研削を施した高精度歯車を被加工歯車としてラッピング加工を行った結果、次のことがわかった。

(1) 低速高負荷での加工では、一歯かみ合いとなるピッチ点付近にくぼみが生じやすくなる。

(2) 高速回転になるほどかみ合い点の滑り速度が上昇し、歯形位置による滑り速度の差も大きくなる。特に被加工歯車歯元部では他の部分より滑り速度が大きく、しかもかみ合い移動速度が遅いため、除去量が多くなってくぼみが生じやすくなる。

(3) ラッピング加工による歯形精度劣化防止には、30°のような大きいねじれ角のラップ歯車を用い、高速回転させて歯面の滑り速度を大きくするとともに歯形位置におけるすべり速度の差を小さくし、軽負荷の下で短時間の加工を行うことが肝要である。

(4) また、ラップ歯車をできるだけ高歯にしておきかみ合い率を増し、かみ合い始めの面圧を軽減することが本加工法の成否を決する。

(5) 本加工法を用いれば、860HVのような硬い浸炭焼入れ歯車でも精度を劣化させずに短時間に歯面粗さを0.5 μmRy以下まで滑らかにすることが可能である。

文 献

- (1) 石橋・田中・江副, 機論, 50-456, C (1984), 1484.
- (2) 石橋・穂屋下・江副・陳・園田, 機論, 56-532, C (1990), 3410.
- (3) 仙波, 歯車第9巻, (1966), 日刊工業新聞社, 3595.
- (4) 中江・日高・有浦, 機論, 62-594, C (1996), 735.