はすば歯車形ナイロンラップによる歯面仕上げ* (試作加工装置および加工例)

中江道彦^{*1}, 日高一憲^{*1}, 有浦泰常^{*2}

Gear Finishing with a Nylon Lap (A Lapping Machine and Lapped Surfaces)

Masahiko NAKAE, Kazunori HIDAKA and Yasutsune ARIURA

This study aims at developing a technology that the tooth flanks of a hardened gear can be mirror-finished in a short time. We propose a simple gear finishing method using a helical gear made of nylon for the lap. This method is a lapping in which the work gear is meshed with a helical gear set at a helical angle, analogous to shaving. The gear flanks are loaded by means of braking the following shaft. Lapping fluid is splashed between the gear teeth as the gear rotates. Laps made of soft nylon are easy to manufacture, and their accuracy will hardly influence the accuracy of lapped gears. The features of a new lapping machine and the accuracy of lapped gears are described.

Key Words: Gear, Hardened Gear, Mirror Finishing, Lapping, MC Nylon, Surface Roughness

1. 緒言

歯車の歯面粗さはその伝動性能に大きく影響を及ぼすもので、滑らかにすれば負荷能力が向上する。また、高精度でしかも鏡面のように滑らかに仕上げられた歯車は運転騒音および振動の低減に効果があることが明らかにされている⁽¹⁾⁽²⁾。

歯車研削は形状精度とともに歯面粗さを向上させることができるが、鏡面のような滑らかな仕上げ面を得ることは容易ではない。また高価な研削盤を必要とし、加工時間も長時間を要する。ギヤシェービングは加工能率は良いが、鏡面まで滑らかに仕上げることはできない。このように従来の方法で歯面を鏡面仕上げることは容易ではない。

鏡面仕上げ加工法の一つとしてラッピングがあり、顕微鏡試料の作成等は比較的簡単な装置で容易に鏡面が得られる。歯車のラッピングについては、これまでも高精度の鋳鉄製歯車などをラップ工具とした数多

くの実験⁽³⁾が試みられているが、ラップ工具の精度維持が困難であること、荷重を大きくすると焼き付きを起こす恐れがあること、歯たけ方向のラッピング量が均一にならないことなどの問題が指摘されている。またMCナイロンを用いたとの報告⁽³⁾もあるが、それは比較的粗い砥粒を用いて、歯形や歯すじなどの形状誤差を修正しようとしたものであり、加工後の歯車精度は明らかにされていない。

本研究は、精度よく作られた中高硬度歯車の歯面を簡便な装置を用いて、形状精度を低下させることなく短時間に鏡面のように滑らかに仕上げることで歯車ラッピング技術を開発することを目的とするものである。本報では、MCナイロン製はすば歯車ラップ工具と被加工鋼歯車をギヤシェービングの場合と同様の状態でかみ合わせてラッピングを行う簡便な加工法を提案し、試作した加工装置ならびにそれを用いて仕上げた歯車の歯面粗さについて述べる。

2. 本加工法の特長

本方法はナイロン製はすば歯車(材質MC901ナイロン材)をラップ工具として用い、これに被加工歯車を

* 原稿受付 1995年6月1日。

^{*1} 正員、佐世保工業高等専門学校(〒857 11 佐世保市沖新町1-1)。

^{*2} 正員、九州大学工学部(〒812 81 福岡市東区箱崎6-10-1)。

かみ合わせて高速回転させ、はねかけ方式で両歯面間にラップ剤を供給することによりラッピング加工しようとするものである。MC 901ナイロンは、本質的には6ナイロンと呼ばれるポリアミド樹脂であるが、重合されたままの状態であるため、引張強さや耐摩耗性などが熔融成形されたナイロンより優れているのが特長である。表1にMC 901ナイロンの主な性質を示す。軟らかいMC ナイロン材をラップ工具として用いるため、金属製に比べて製作が容易なうえ、その精度が加工精度に及ぼす影響は少ない。ラップ工具をはすば歯車にして駆動軸と従動軸を交差させているため、シェービング加工の場合と同様に歯すじ方向にもすべりが存在し、ピッチ点付近も十分ラッピングされる。

3. 試作した加工装置

加工装置は図1に示すように案内面を持つベッド、2組の軸と軸受台、駆動用モータ、往復移動用送り装置、負荷ブレーキ装置およびラップ剤容器から構成される。被加工鋼歯車の真上にMC ナイロン製はすば歯車が位置するように駆動軸の上に従動軸を取り付けている。また従動軸は駆動軸に対して、交差角が -30° ～ 30° の範囲で任意に旋回固定できる。モータの回転は平歯車を介して駆動軸に伝えられるため、換え歯車により加工速度が変化できる。駆動軸側の軸受台はきざぎざ仕上げした案内面上に置かれ、往復移動できる。モータ軸の歯車の歯幅は駆動軸の歯車が軸方向に移動してもかみ合いが外れない程度に大きくし、回転を伝達しながら軸方向に往復移動できるようにした。往復運動は、送りモータをリミットスイッチにより自動的に正逆転することによって行われる。従動軸に設けた

Table 1 Properties of MC901 nylon

Specific gravity(23°C)	Tensile Strength(MPa)	Elastic modulus(MPa)	Hardness (HRR)
1.15~1.17	78~96	2.9~3.4	115~120

Fig.1 New lapping machine

ブレーキの締め付け力を変えることにより、歯面荷重を任意に設定できる。ブレーキ力はばね秤を用いて求めた。

4. 実験条件

被加工歯車は、SCM435材の平歯車で、モジュール4、歯数17、歯幅15mmである。まずこぶ付ホブを用いて前加工した歯車をHB500とHB300の硬さになるように焼入れ焼戻しを行った。HB500の歯車はTiNコーティング超硬ホブを用いて、またHB300についてはTiNコーティング高速度鋼ホブを用いて仕上げた。なお、ラッピング加工の際、鋼歯車の歯先部がナイロン歯車の歯面を傷つけるのを防止するため、約0.2mmの面取りを施した。

ラップ工具となるMC ナイロン製はすば歯車は歯数19、歯幅23mm、ねじれ角 $10\sim 30^{\circ}$ で、ホブ切りのままである。粗い砥粒による荒ラッピングには右ねじれはすば歯車を、細かい砥粒による仕上げラッピングには左ねじれ歯車を使用した。これは、このようにすることによって荒ラッピングと仕上げラッピングにおけるラップ剤の擦過痕の方向を図2に示すように交差させることができ、加工量が増加して加工時間を大幅に短縮できることが基礎実験で明らかにされたためである。ラップ剤はマシン油（粘度32.7cSt/40°C）200ccにWA砥粒5gを混ぜたものを使用した。砥粒・粒度はWA500、WA1000およびWA2000を用いた。

駆動軸と従動軸をナイロン歯車のねじれ角だけ交差させ、被加工歯車を駆動軸に、ナイロン歯車を従動軸に取り付けてかみ合わせる。被加工歯車を1200rpmで回転させながら、軸方向に5mm/secの速度で、ストローク17mmの往復運動を行わせた。歯面荷重Pは15.2Nおよび7.6Nとした。荒ラッピングではホブ切りで生じた送りマークが除去されるまで、また仕上げラッピングでは荒ラッピングによる擦過痕が消滅するまで加工を行った。加工終了後、被加工歯車の歯形、歯すじおよび歯面粗さの変化を調べた。歯形は歯幅中央部を、歯すじは歯先歯元付近およびピッチ点の3箇所を測定した。

5. 実験結果および考察

5・1 硬さHB500の歯車の加工

図3(a)(b)はHB

Fig.2 Lapped tooth flank

500に硬くした鋼製平歯車をねじれ角 30° のMCナイロン製はすば歯車とかみ合わせ、1000番の砥粒を用いて、歯面荷重をそれぞれ15.2Nおよび7.6Nとしてラッピング加工したときの歯すじ方向の歯面粗さの変化を比較したものである。図(a)に示す歯面荷重15.2Nでは120秒間の加工で切削時に生じた歯面のうねりがほぼ取れている。しかし図(b)に示す7.6Nの場合には180秒間加工したにもかかわらず、うねりの山がほとんどとれていないことがわかる。また荷重をそれ以上大きくすると歯形の変形が生じた。このことからHB500の歯車の加工では歯面荷重15.2Nを適値とした。

図4は歯面荷重を15.2Nとし、粒度500の砥粒を用いて45秒間荒ラッピング加工し、その後粒度2000の砥粒で60秒間仕上げラッピング加工した歯車の歯すじ方向の歯面粗さの変化を示したものである。なお、このときもねじれ角は 30° である。荒ラッピングでは粗い砥粒を用いたため、3(a)の場合に比べて歯面は幾分粗いが、うねりが除去される時間はかなり短縮できるこ

とがわかる。その後細かい砥粒で仕上げ加工を行うと、非常に滑らかな歯面が得られ、特にピッチ点付近は $R_y 0.5\mu\text{m}$ 程度の光沢のある面になっている。図5は加工後の歯車をグラフ用紙の上に置いたもので、歯面に野線が鮮明に写っていることがわかる。このときの歯形およびピッチ点における歯すじ形状の変化を示したのが図6である。ラッピング加工によって、粗さの山がしだいになだらかになっていく様子がわかる。

図7は歯形精度の悪い歯車を、図6の場合と同じ加工条件にしてラッピング加工したときの歯形および歯すじ形状の変化を示したものである。ラッピング加工条件は同じであるが、前記の歯車に比べてホブ切り精度が悪いため、荒ラッピングにやや長い時間を必要とした。また歯面粗さは減少するが、歯形精度はホブ切り時とほとんど変わらず、本加工法では歯形の改善は

Fig.3 Influence of lapping load on roughness (HB500)

Fig.4 Changes of roughness with lapping (HB500)

Fig.5 Example of finished tooth flank (HB500)

期待できないことがわかる。したがって前加工はできるだけでいいに行い、歯形を正しくしておく必要がある。また歯すじの両端に2~3 μm のだれが生じることがあるが、この原因については今後さらに検討する必要がある。

図8はナイロンラップ歯車のねじれ角が加工能率に及ぼす影響を調べたもので、ピッチ点の歯面粗さの変化を示す。前加工後の粗さにばらつきがあるが、いずれの場合も光沢ある滑らかな仕上げ面が得られる。特にねじれ角 30° では短い時間で急激に滑らかになっていることがわかる。ねじれ角が小さいと軸方向すべり率も小さいため、加工に時間を要するものとする。そこで本研究ではねじれ角 30° のナイロンはすば歯車をラップ工具として採用した。

5・2 硬さHB300の歯車の加工 図9はHB300の歯車を加工したときの歯形および歯すじ形状の変化を示す。図(a)は加工条件をHB500の場合と全く同じにしたときのものである。加工時間とともに滑らかにはなるが、ピッチ点付近にくぼみが生じ、歯形精度がしだい

に悪化することがわかる。ピッチ点付近では、1枚かみ合いになるため、面圧が大きくなり、加工量が増加するものと思われる。そこで歯面荷重を半分の7.6Nにして加工を行ったところ、図(b)に示すようにピッチ点付近のくぼみは少なくなった。図10はこの歯車の歯すじ方向歯面粗さの変化を示す。荒ラッピングによってホブ切り時のうねりが除去され、仕上げラッピング

Fig. 8 Influence of helix angle

Fig. 6 Changes of tooth profile and tooth trace (In case of high accuracy)

Fig. 7 Changes of tooth profile and tooth trace (In case of low accuracy)

(a) Lapping under heavy load

Fig. 9 Changes of tooth profile and tooth trace (HB300)

Fig.10 Changes of roughness with lapping (HB300)

Fig.11 Tooth flank of nylon lap 3mm

Fig.12 Abrasive grains stuck on nylon lap (SEM) 40 μ m

Fig.13 Fe distribution on nylon lap (X ray analysis) 40 μ m

では硬い歯車の場合と同程度の粗さに仕上がっている。しかし HB500の歯車のときのような光沢ある鏡面は得られず、にぶい光沢面となった。

5・3 ナイロン製ラップ歯車の歯面観察 図11は

Fig.14 Chips in lapping 0.05mm

Fig.15 Influence of chips in lapping fluid on roughness (HB500)

WA500の砥粒を用いて歯車6個を加工したのちのナイロンラップ歯車の歯面を示したものである。被加工歯車が接触した部分に擦過痕が観察され、黒ずんで見える。図12はその部分を走査型電子顕微鏡で拡大したものである。むしろたナイロン歯面に砥粒が埋まり込んでいるのがわかる。このことからラップ工具と歯車材の歯面間に噛み込まれた砥粒が加工圧により軟らかいナイロンラップ歯面に埋め込まれ、これが砥石と同様の作用をするものであることがわかる。またこの部分のFeについてのX線元素分析の結果を同倍率で図13に示す。全面にFeの分布が見られ、被加工歯車から削り取られた肉眼では見えないような切りくずの微粒子が付着していることがわかる。

5・4 ラップ剤の変化 ラッピング加工に使用するラップ剤は、加工歯車数の増加とともに切りくずの混入によってしだいに黒く汚れてくる。図14はラップ剤に含まれる切りくずを拡大したものである。研削と同様の細かい切りくずが削り出されていることがわかる。

図15(a)～(c)はラップ剤の使用時間の増加が歯面粗さに及ぼす影響を示したものである。図(a)は新しいラップ剤(WA500)を、(b)は630秒間(歯車21個加工)使用した後のものを、(c)は1230秒間(歯車41個加工)使用した後のものを用いて、それぞれ30秒間ラッピング加工を行ったときの歯すじ方向歯面粗さを示したものである。なお、この場合はすべてHB500の歯車を用いた。ラップ剤の使用時間が増加するとともに加工能力が低下し、図(c)の場合にいたってはホブ切り時のうねりが残ったままである。これはラップ剤に混入する切りくずがしだいに増加し、歯面間にかみ込まれることによって歯面に傷つけたり、切削作用を妨げたりするためと思われる。

そこで図(c)の状態のラップ剤からマグネットを用いて切りくずを除去したものをを用いてラッピング加工を行った。そのときの歯すじ方向歯面粗さを示したのが図(d)である。切りくずを除去すれば図(a)の場合と同程度の粗さが得られることがわかる。なお、この程度の加工時間ではまだ砥粒の破碎や摩耗は認められなかった。

6. 結 言

MCナイロン歯車をラップ工具とする簡便な方法によって歯車歯面のラッピング加工を行った結果、次のようなことがわかった。

(1) 歯車の硬さに応じた、適切な歯面荷重で加工すれば、荒ラッピングと仕上げラッピングを合わせて約90秒の短い加工時間で歯形形状を損なうことなく、歯面粗さをRy0.5 μ m程度まで滑らかにすることができる。

(2) 本加工法では、両歯面間にかみ込まれた砥粒がナイロンラップ歯面に埋め込まれ、これが切れ刃となって研削と同様の切削作用をする。

(3) 加工時間の増加と共に、ラップ剤に混入する切りくずが増加し、ラッピング加工に悪影響を及ぼすため、適当な方法で切りくずを除去する必要がある。

おわりにMCナイロンを提供していただいた日本ポリペンコ(株)社と砥粒を提供していただいたノリタケダイヤ(株)社に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 石橋・ほか2名, 機論, **50**-456, C(1984), 1484.
- (2) 石橋・ほか4名, 機論, **56**-532, C(1990), 3410.
- (3) 仙波, 歯車第9巻, (1966), 日刊工業新聞社, 3595.