

## 内歯車ラッピング盤の開発\*

中江道彦\*\*, 森川浩次\*\*

### Development of the lapping machine for internal gears

Masahiko NAKAE, Hiroshi Morikawa

The objective of this research is to develop a gear lapping machine which can simultaneously make all tooth flanks of an internal gear smooth in a short time. A work gear is meshing with two lap gears as crossed helical gears and supported by a guide gear during the lapping. The two lap gears and the guide gear are made of nylon. Lapping slurry containing abrasive grains is supplied to the meshing teeth.

The structure of the lapping machine designed and manufactured by the authors is shown on this paper. The shapes of lap gears are proposed based on the calculated amounts of interferences between a work gear and a lap gear. Moreover, the work gears lapped using the lap gears and the new lapping machine are evaluated with regard to the tooth roughness and the accuracy of the tooth profile.

The results are as follows. (1) A lap gear which has modified tooth traces based on the calculated amounts of interferences meshed with a work gear without occurring the interference. (2) Tooth flanks of work gears were finished smooth as a maximum peak-valley height ( $R_z$ ) of less than  $1\text{ }\mu\text{m}$  through lapping. (3) Although the removal rate was higher on lapping using WA500 abrasive grain, the tooth flank roughness was reduced smoother through lapping using WA1000 abrasive grain. (4) It is necessary to shorten the lapping time for putting this lapping process to practical use.

**Key Words :** Gear, Lapping, Internal gear, Abrasive grain, Nylon lap, Surface roughness, Tooth profile

### 1. 緒 言

各種機械の高性能化，高速化に伴い，それらに使用されている歯車には静粛性や耐久性，効率の向上が求められ，各方面で調査研究が行われている．歯車の歯面を硬くするほど負荷能力が増し，また高精度に作られた歯車の歯面を滑らかに仕上げると歯面強さが向上する<sup>(1)</sup>とともに運転騒音が低下する<sup>(2)</sup>ことが知られている．

本研究が対象とする内歯車は遊星歯車減速機やギヤカップリングなどに多く用いられている．遊星歯車減速機は少ない段数で大きな減速比が得られ，しかも大きなトルクが伝達できること，そして入力軸と出力軸が同軸上に配置できること，さらには歯車装置を小型化できることなどの利点がある．その一方，一般的に内歯車は外歯車に比べて形状寸法上の制約が多いために加工が困難である．そのため，大型の内歯車を対象とした研削盤<sup>(3)</sup>は30年前に開発されているが，比較的小径の内歯車を対象とした仕上げ用加工機は少なく，ギヤシェーパーやブロー

チを用いた歯切り加工の後に熱処理を行い，精密な仕上げ加工を施すことなく使用されることが多かった．近年，自動車産業において減速機の静粛性および効率の向上のために内歯車の高精度化が要求され，その歯面を仕上げることのできる研削盤<sup>(4)</sup>やシェービング盤<sup>(5)</sup>も開発されている．その結果，高精度の内歯車の加工が可能となってきたが，それらの加工機は高価であり，使用する工具の製作および精度維持が困難である上に，作業に熟練と多くの時間を要する．著者らはこれまでに高硬度の外歯車歯面の仕上げを目的として，ワーク歯車とナイロン製ラップ歯車をねじ歯車の状態にかみ合わせて加工するラッピング盤<sup>(6)</sup>を開発し，さらにワーク歯車を軸等に固定することなく，左右歯面を同時に加工できるラッピング盤を開発<sup>(7)</sup>した．その結果，ラッピングによって高硬度の歯車歯面を  $1\text{ }\mu\text{m}R_z$  以下まで能率よく滑らかにすることを可能とし，ナイロン製ラップ歯車は製作が容易な上にその精度が加工精度に影響を及ぼしにくいことを明らかにした．

本研究は，同様の手法を用いて基準ピッチ円径 110～

\* 原稿受付 平成 27 年 11 月 20 日

\*\* 佐世保工業高等専門学校 機械工学科

210mm 程度の小径内歯車を対象として歯面粗さを  $1\mu\text{mRz}$  以下まで滑らかに能率よく仕上げることのできる内歯車ラッピング盤の開発を目的としている。まず、2つのラップ歯車主軸台、ガイド歯車軸、ワーク歯車支持部、送り装置等からなる簡便な構造を持つラッピング盤を試作した。次に、ワーク歯車とのかみ合いにおいて干渉を起こすことなく、良好な歯当たりが得られるラップ歯車の寸法形状を検討した。そしてそれらを用いて各種条件の下で加工実験を行い、ワーク歯車の形状精度を低下させることなく能率よく歯面粗さを改善することを試みた。以下に加工法、試作したラッピング盤の構造、ラップ歯車形状および加工実験結果について報告する。

## 2. ラッピング法および試作ラッピング盤の構造

本ラッピング法では、図 1(a)に示すように駆動ラップ歯車①およびブレーキラップ歯車②をワーク歯車③と適当なバックラッシュを与えてかみ合わせて回転させる。駆動ラップ歯車をモータにより回転させると、ワーク歯車お

よびブレーキラップ歯車に回転が伝わる。ねじ歯車の状態でかみ合っている両ラップ歯車歯面には、歯形、歯すじ両方向にすべりが生じる上にブレーキラップ歯車軸のブレーキによって歯面に荷重が作用するため、砥粒を介在させることにより除去作用が行われ、ワーク歯車両歯面が同時に仕上げられる。その際、ワーク歯車に上向きの力が作用するのでガイド歯車④によって支える。また、図 1(b)のようにワーク歯車は両側面をそれぞれ4個の回転リングで支持し、送り装置によって歯幅方向に往復運動を与えて歯面全体を加工する。表 1 に本研究において用いるワーク歯車、ラップ歯車およびガイド歯車の諸元を示す。試作したラッピング盤は図 2 のようにベッド、主軸台を備えた2つのコラム、ガイド歯車台、ワーク歯車保持装置、往復送り装置およびラップ剤供給装置からなる。加工可能な内歯車の基準ピッチ円径を 110~210mm、歯幅を 40mm までとし、コラム間隔およびガイド歯車高さを容易に変更できるようにした。駆動軸は  $3600\text{min}^{-1}$  まで無段階に変速できる。駆動ラップ歯車軸およびブレー

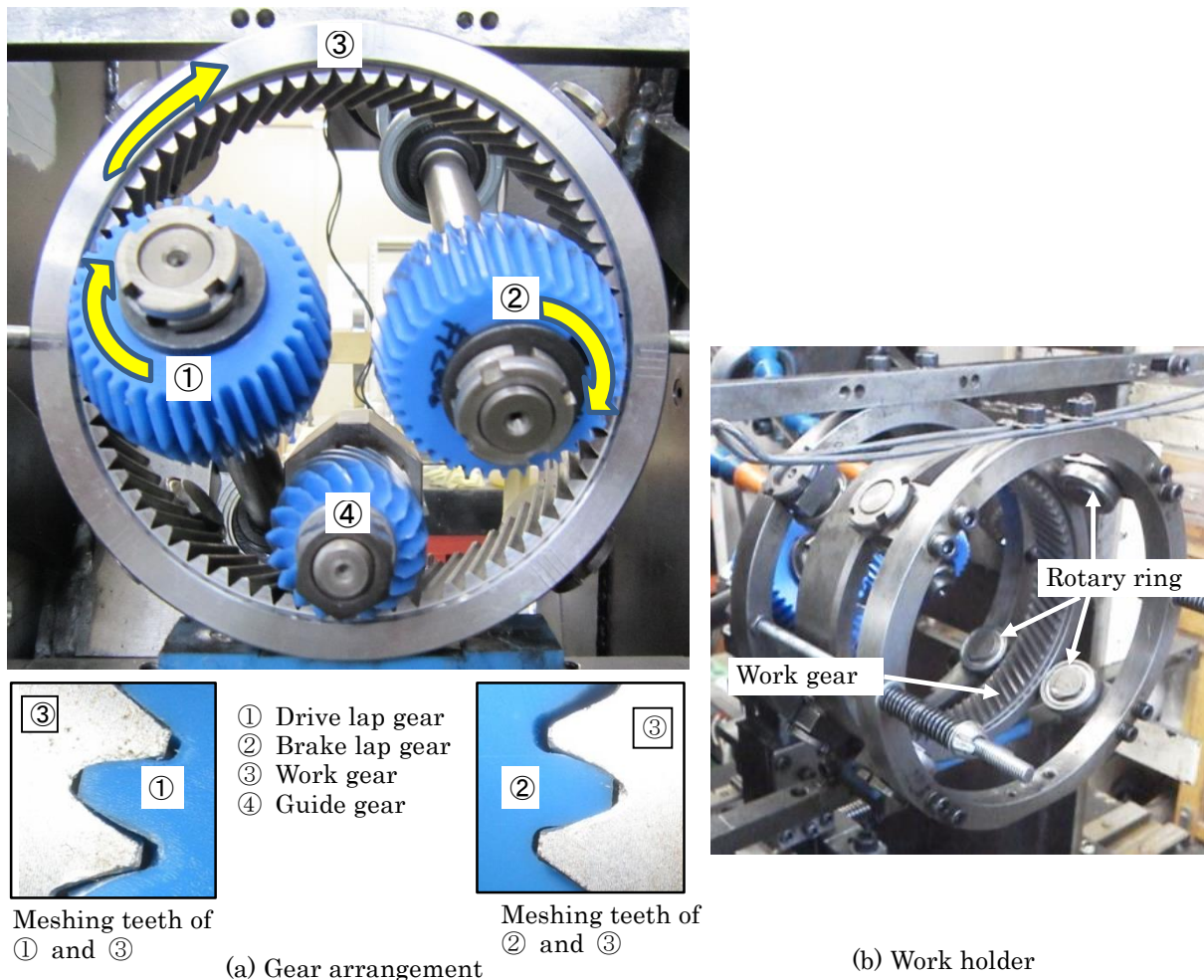


Fig. 1 Gear arrangement and work holder

キラップ歯車軸の角度は $\pm 35^\circ$ まで旋回可能で、各種ねじれ角のはずば歯車に対応できる．負荷装置にはヒステリシスブレーキを用いた．

ワークの往復送り装置にはボールねじを用いた電動アクチュエータを使用し、ストローク位置および送り速度を容易に変更できるようにした．ラップ剤は攪拌装置を備えた容器からポンプによってチューブを介して両歯車かみ合い部へ供給され、供給量はポンプ回転数を変えて調整した．

### 3. ラップ歯車の形状

ワーク歯車のはずば内歯車であるからラップ歯車を標準平歯車とすれば両歯車のかみ合いにおいて歯面間に干渉が起こる．そこで、両歯車の歯形輪郭座標を求めて干

Table 1 Specifications of gears

	Work gear	Lap gear	Guide gear
Type	Helical internal	Spur	Helical
Module	1.55		
Number of teeth	70	36	19
Helix angle deg.	27.0 (LH)	0	27.0 (LH)
Pressure angle deg.	20		
Tooth depth mm	3.0	3.805	
Face width mm	20	40	
Material	JIS SCM420 (56-60HRC)	MC nylon	

渉量を計算し、それに基づいて干渉を避けることのできるラップ歯車歯すじ修整量を検討した．

#### 3.1 ワーク歯車歯面との干渉

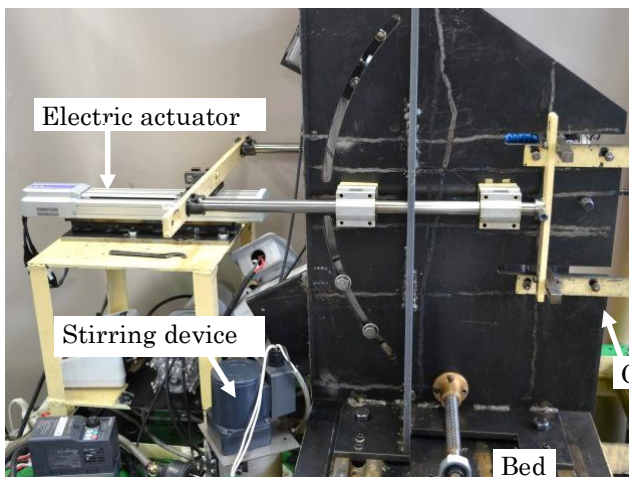
図 3 に示すように両歯車軸の共通垂線上のかみ合いピッチ点でかみ合っているものとする．ラップ歯車中心軸を  $z_L$  軸，原点  $O_1$  のラップ歯車軸直角座標を  $x_L y_L z_L$  座標，ワーク歯車中心軸を  $z_w$  軸，原点  $O_2$  のワーク歯車軸直角座標を  $x_w y_w z_w$  座標とし、それを交差角だけ回転した歯直角座標を  $XYZ$  座標とする．まず、両歯車の軸直角座標上の任意の半径における歯形輪郭座標  $(x_L, y_L)$  と  $(x_w, y_w)$  をそれぞれ式(1)および(2)により計算した．

$$\left. \begin{aligned} x_L &= r_1 \sin(\theta_1 + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{sb1}) \\ y_L &= r_1 \cos(\theta_1 + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{sb1}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

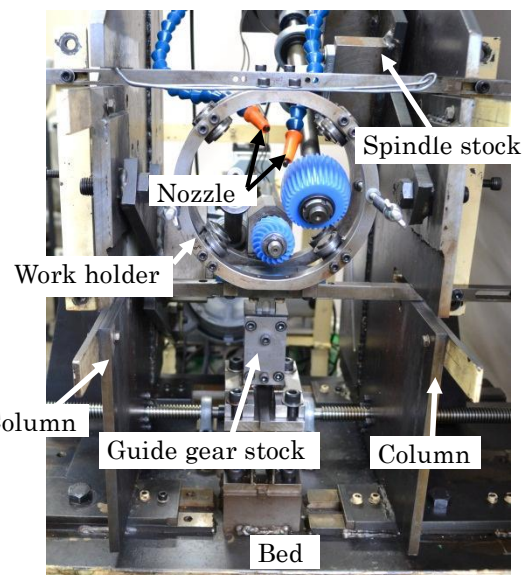
$$\left. \begin{aligned} x_w &= r_2 \sin(\theta_2 + \phi + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{sb2}) \\ y_w &= r_2 \cos(\theta_2 + \phi + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{sb2}) \\ \phi &= \frac{z_w \tan \beta_{g2}}{r_{g2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $r_1, r_2$  はそれぞれラップ歯車およびワーク歯車の任意の半径、 $\theta_1, \theta_2$  はかみ合いピッチ点からの回転角、 $\alpha$  は任意の半径における圧力角、 $\alpha_{sb1}, \alpha_{sb2}$  は正面かみ合い圧力角、 $\beta_{g2}$  はワーク歯車基礎円筒上ねじれ角、 $r_{g2}$  は基礎円半径である．なお、ラップ歯車は平歯車であるから  $z_L$  が変化しても  $x_L, y_L$  は同じである．

次に、上記で求めた両歯車の歯形輪郭座標をワーク歯車歯直角座標に変換した各  $Z$  断面における歯形輪郭座標  $(X, Y)$  を式(3)および(4)から求めた．



(a) The side view



(b) The front view

Fig.2 The lapping machine for internal gear

ワーク歯車歯形輪郭座標：

$$\left. \begin{aligned} X &= x_w \cos \Sigma - z_w \sin \Sigma \\ Y &= y_w \\ Z &= z_w \cos \Sigma + x_w \sin \Sigma \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ラップ歯車歯形輪郭座標：

$$\left. \begin{aligned} X &= x_L \\ Y &= y_L + A \\ Z &= z_L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\Sigma$ は軸交差角、 $A$ は軸間距離である。

計算例としてかみ合いピッチ点でかみ合っている（この場合、 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ ）両歯車の  $Z = -10 \sim 10$  における輪郭を図示したのが図 4 である。これらの図においてワーク歯車  $X$  座標  $>$  ラップ歯車  $X$  座標となる領域が干渉を起こすと考え、両輪郭の  $X$  座標の差から干渉量を求めた。図中の●印で示した領域が干渉を生じている部分である。図 5

は図 4 の各  $Z$  断面から求めた最大干渉量を示したものである。中央( $Z=0$ )から離れるほど干渉量が大きくなっており、かみ合い点で接触する前に両端部が接触してしまうことがわかる。両歯車の回転角  $\theta_1, \theta_2$  を変えて同様の計算を行ったが、最大干渉量は図 5 より小さくなった。

### 3.2 ラップ歯車歯すじ修整と歯当たり

上記のようにラップ歯車を標準平歯車とした場合は歯面間に干渉が生じる。干渉を避けるために、図 5 に示す計算によって得られた最大干渉量より大きな歯すじ修整を施したクラウニング型ラップ歯車を試作した。図 6(a)(b)にその形状および各位置の歯すじ修正量の計算値を示す。図からわかるように外形も干渉を避けるために樽型とした。なお、ラップ歯車の歯すじ形状を測定して修整量が計算値と一致していることを確認した。

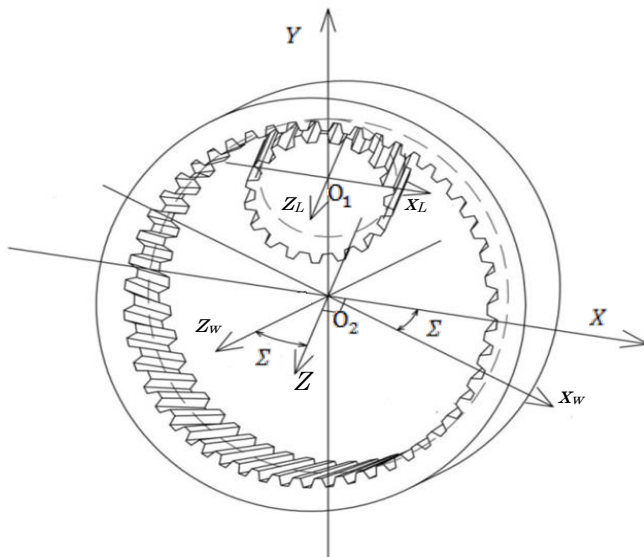


Fig.3 The coordinate systems of gears in mesh

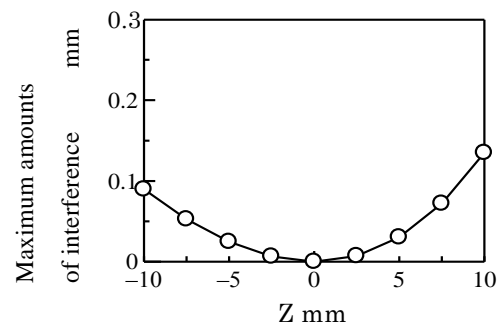


Fig.5 Maximum amounts of interference in each

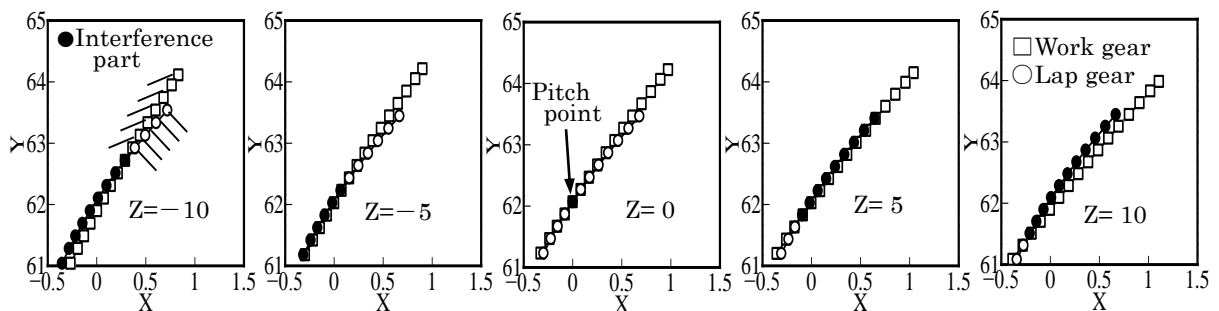
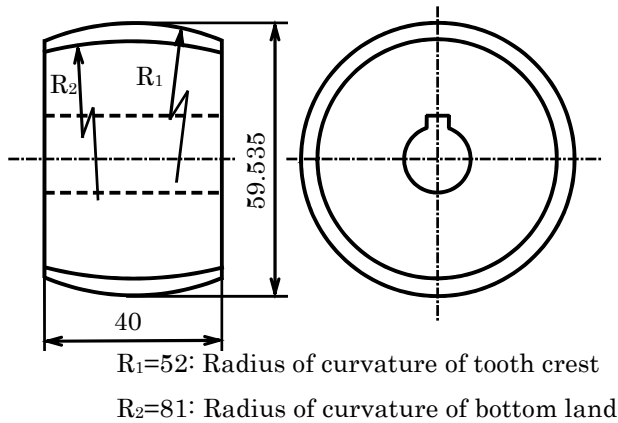
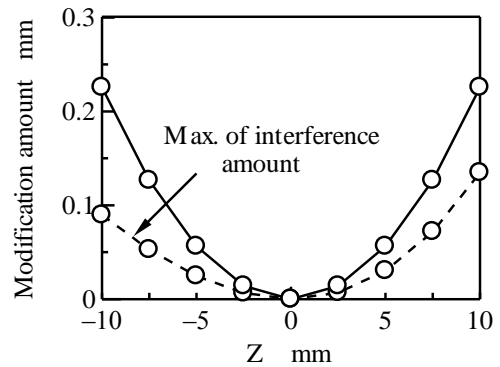


Fig.4 Profiles of work gear and lap gear in each section





(a) Shape



(b) Modification amounts on tooth trace

Fig.6 Shape and modification amounts of a lap gear

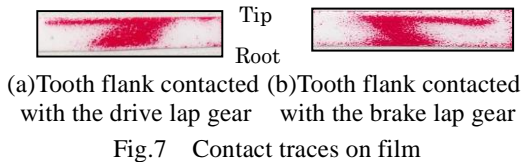


Fig.7 Contact traces on film

加工痕においてはその部分に接触痕が見られず，このことから，この領域では歯面間の接触は生じていないがその隙間がフィルム厚さより小さいためにフィルムが加圧されて変色したものと判断した。

Table 2 Lapping conditions

Spindle speed	2000min <sup>-1</sup>	Stroke	20.5 mm
Brake torque	495Nmm	Abrasive grain	WA1000, WA500
Feed rate	5 mm/s	Quantity of lapping fluid	17 g/min

ワーク歯車と試作ラップ歯車の歯面接触状態を実際に確認するために圧力測定用フィルムを用いて歯当たりを調べた。このフィルムは厚さが約 180 $\mu$ m で歯面間に挿入して回転させると加圧された部分が赤色に変わるもので、測定可能圧力が 0.2~0.6MPa である。ワーク歯車には熱処理を施していない精度の良いものを用いた。ラッピング盤上で両歯車をかみ合わせ、歯面間にフィルムを挿入してブレーキトルク 394Nmm を作用させた状態で駆動ラップ歯車軸を手回した。ただし、ラップ剤は使用せず、ワーク歯車およびラップ歯車の各歯幅中央でかみ合うようにして、送りは停止した状態で行った。両歯車の中心軸交差角は 27.5°とした。図 7 はフィルムに残された変色領域を示す。両端部に変色部は見られず、干渉は起こっていないことがわかる。また、ワーク歯車の往復送り運動は停止したままラップ剤を供給しながら負荷をかけてラップ歯車をモータ駆動した。歯面に残された加工痕がラップ歯車との接触領域が歯当たり結果と同様の接触領域を示した。なお、図 7 では歯先に変色部が見られるが、

#### 4. 加工実験の結果および考察

上記のラッピング盤およびラップ歯車を用いて加工実験を行い、除去量、ワーク歯車の歯面粗さ・形状精度の変化を調べた。ブローチによって歯切りした後、浸炭焼入れを施した内歯車をワーク歯車とした。ラッピング前にワーク歯車の質量、歯面粗さ、歯形誤差、歯すじ誤差を測定した。歯面粗さは約 90°離れた 2 歯左右歯面について、歯形方向は歯幅中央とその上下の 3 箇所を、歯すじ方向は歯幅中央ピッチ点付近を触針式表面粗さ測定機を用いて測定した。歯形誤差および歯すじ誤差は、ワーク歯車約 90°毎の 4 歯左右歯面のピッチ点あるいは歯幅中央部を歯車測定機により測定した。いずれも平均処理を行って測定値とした。各種条件の下で 4~8 ストローク加工毎に加工前と同様の測定を行い、それぞれの変化を調べた。ラップ剤は砥粒 5g に対してラッピングオイル(動粘度 4.7 mm<sup>2</sup>/s) 200 cm<sup>3</sup> の割合で混ぜたものを使用し、滴下量は約 17g/min とした。駆動ラップ歯車回転数 2000min<sup>-1</sup>、送り速度 5mm/s、ブレーキトルク 495Nmm (ワーク歯車ピッチ円上の円周荷重 17.7N)、ストローク 20.5mm、軸交差角 27.5°一定の下で WA500 および WA1000 のラップ剤を用いて加工した。表 2 にラッピング条件を示す。

##### 4.1 除去量および加工精度

図 8 は上記条件の下でラッピングした時のワーク歯車

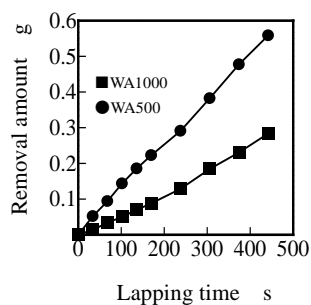


Fig.8 Change of Removal amount by lapping

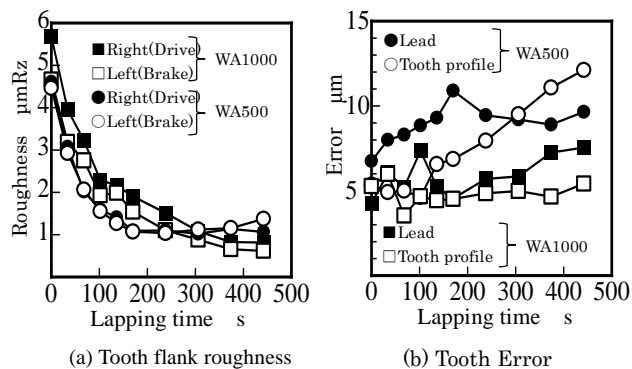


Fig.9 Accuracy of lapped gears

の質量差から求めた除去量の変化を示したものである。いずれのラップ剤の場合も直線的に増加しており、WA500の方が単位時間当たりの除去量は2倍程多いことがわかる。図9(a)(b)にそれぞれワーク歯車両歯面の歯面粗さ（最大高さ）および駆動側歯面の歯形・歯すじ誤差の推移を示す。図(a)よりいずれの場合も初期粗さは4～6 $\mu\text{mRz}$ であるが、徐々に減少して約5分間で1 $\mu\text{mRz}$ 以下まで低下することがわかる。また、WA500に比べてWA1000の方が除去率は低い、最終粗さはより滑らかになる。図(b)から、いずれも加工時間が長くなると誤差が増加する傾向が見られるが、WA1000の方が精度低下は生じにくい。

#### 4.2 歯形および歯すじ形状の変化

図10にはWA1000の砥粒を用いて52ストロークラッピングした時の歯形方向の粗さ曲線を加工前と比較して示す。これにより、両歯面の大きな凹凸部が取り除かれ、滑らかに仕上げられていることがわかる。図10と同じワーク歯車の駆動側歯面の歯形および歯すじの形状を加工前後で比較したものを図11に示す。図より、ワーク歯先や歯の両端における誤差の増加が見られる。歯すじ両端のだれは特に問題となるものではないが、歯形のピッチ点付近の凹みは生じないようにする必要がある。

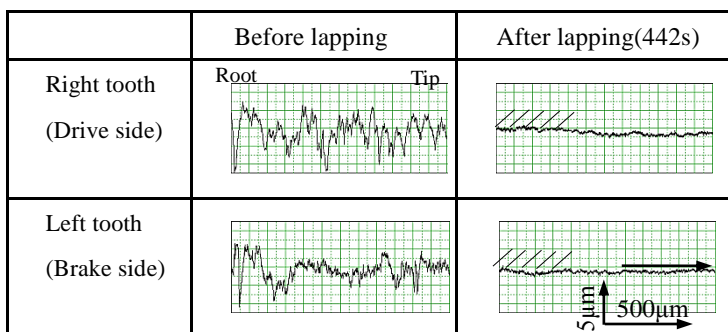


Fig.10 Comparison of tooth flank roughness on tooth profile

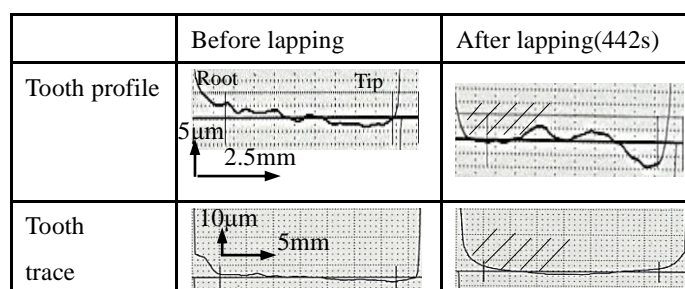


Fig.11 Comparison of tooth errors(Drive side)

#### 5. 結 言

以上の研究から次のことがわかった。

- (1) 計算によって求めた干渉量より大きく歯すじ修整を施したラップ歯車は干渉を起こすことなく、ワーク歯車とかみ合う。
- (2) 試作ラッピング盤を用いてラッピングすることによって、浸炭焼入れされた内歯車の歯面粗さを1 $\mu\text{mRz}$ 以下に仕上げることができる。
- (3) 砥粒 WA500 を用いると単位時間当たりの除去量は多くなるが、WA1000の方が形状誤差に与える影響は少なく、歯面粗さもより滑らかにすることができる。
- (4) 本機を実用化するには加工に要する時間の短縮および精度低下防止の必要がある。

#### 謝 辞

本研究を行うに当たり、実験・計算にご尽力頂いた当時佐世保高専専攻科生の岡本健人君に厚く御礼申し上げます。また、ワーク歯車、ラップ歯車等をご提供いただいた（株）カシフジ殿に感謝申し上げます。

#### 文 献

- (1) 中西 勉, 有浦 泰常, 上野 拓, “高硬度歯車の負荷能力に関する研究（歯面強さに及ぼす粗さの影響）”, 日本

機械学会論文集 C 編 , Vol.52, No.477(1986), pp.1649-1655.

(2)石橋 彰, 穂屋下 茂, 江副 覚, 陳 勇, 園田 計二,  
“鏡面研削と歯形修整による平歯車の騒音と振動の低減”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.56, No.532(1990), pp.3410-3415.

(3)内田 二郎, 大門 守, 石川 忠幸, 築地 義弘, 庄田 弘,  
“CBN 砥石を用いた CNC 大型内歯車研削盤”, 精密機械 , Vol.49, No.3(1983), pp.395-399.

(4)柳瀬吉言, 越智政志, 中路慶弘, 西村幸久, 芹沢祐二,  
“世界初量産用内歯車研削盤 ZI120A の開発”, 三菱重工技報, Vol.46, No.3(2009), pp.7-11.

(5)小林 慶紀, “内歯車の仕上げ加工「インターナルシェーピング加工システム」”, 不二越テクニカルレポート, Vol.21B1(2010), pp.1-7.

(6)中江道彦, 日高一憲, 松波俊宣, 小原正男, 森川浩次,  
“ホブ切り調質歯車のラッピング仕上げとその効果”, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.72, No.715(2006), pp.969-974.

(7)Nakae, M., Hidaka, K., Morikawa, H., Torii, T., and Sao, S.,  
“ Development of the Center-Less Gear Lapping Machine and the Lapped Gears”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.5, No.3, 2011, pp.160-170.