

ハイポイドギヤの熱処理変形に関する研究* (熱処理変形の検出とそれを見込んだ歯切法の提案)

川崎 一正^{*1}, 田村 久司^{*1}

Heat-Treatment Distortion of Hypoid Gears (Detection of Heat-Treatment Distortion and Proposal of Corrective Gear Cutting Method)

Kazumasa KAWASAKI and Hisashi TAMURA

In this paper, a corrective gear cutting method is proposed to compensate the errors resulting from heat treatment. The heat-treatment distortion of hypoid gears is detected and treated as included in the error with gear cutting. The coordinates of many points on the heat-treated gear tooth surface are measured using a coordinate measuring machine. A theoretical gear tooth surface expressed as a function of the machine settings on a Gleason hypoid generator is estimated by the method of least squares so that the surface can fit the data of coordinate measurements. The errors caused by the heat treatment are taken as includible in the deviations of the estimated machine settings from the designed settings. The corrective cutting method was proved to be valid because the dimension of the gear surface after heat treatment lay in close proximity to that of the designed surface.

Key Words: Measurement, Gear, Heat Treatment, Hypoid Gear, Heat-Treatment Distortion, Method of Least Squares, Machine Setting Error, Gleason Hypoid Generator, Coordinate Measuring Machine

1. 緒 言

ハイポイドギヤは歯切り後、熱処理を行い適当な硬さにして使用される⁽¹⁾。しかし、熱処理したハイポイドギヤには熱処理変形が生じ、かみあわせたとき片寄った歯当たりとなったり、異常な騒音が発生することが多い。このような熱処理変形に対処するため、現在、歯車のオフセットや組立距離をわずかに変えて歯当たりを歯面の端から端まで移動させるVH試験⁽²⁾を行い、熱処理前後のVH試験値を熱処理変形と関係づけ、それを参考にして修正歯切りをしている。この方法は現実に即した簡便な方法であろうと考えるが、現場技能者が歯当たり模様を観察しつつ歯切りを行うことになるから、結局は経験と勘に基づく現場技能に依存していることになる。そして、この点に不満が残る。

ところで、ハイポイドギヤを歯切りするとき工具を決められた位置・姿勢に取付けるが、普通その取付けには誤差を伴う。既報⁽³⁾では、ハイポイドギヤの歯面上の多数点の座標を三次元座標測定機で測定し、その測定値群から歯切りの際の工具取付誤差を検出する方法を示した。そして、その方法によって工具取付誤差

を検出し、その誤差を修正して歯切りを行った結果、設計どおりのハイポイドギヤ歯面を得ることができた。

本研究は、ハイポイドギヤの熱処理変形を歯切り時の工具取付誤差に含めて取り扱うことができるものとみなして検出すれば、熱処理変形を見込んだ歯切りが可能になるであろうと考え、この考え方の有効性を確かめたものである。

2. 検出すべき誤差要因

本研究では、既報⁽⁴⁾の歯切法によるハイポイドギヤを熱処理し、その熱処理変形を調べる。このハイポイドギヤは、(リング)ギヤおよびピニオンを正しく製作すれば必然的に歯当たりが指定した位置に得られる歯車対である。したがって、平歯車と同じようにギヤおよびピニオンの個々の歯車を正しく製作することを心掛けるべきであって、従来のハイポイドギヤのように歯車対としての歯当たりを得ようとする必要はない。

このハイポイドギヤでは、ギヤは成形歯切りした曲がり歯傘歯車であり、ピニオンはこのギヤと等価な工具歯車で直接創成歯切りされる。ピニオン歯面には歯面修整が施されている。図1にギヤの歯切方法を示す。 $O_m-x_my_mz_m$ は歯切盤に設定した座標系で、 O_m はマシ

* 原稿受付 平成6年7月5日。

*1 正員, 新潟大学工学部 (☎950-21 新潟市五十嵐二の町 8050)。

ンセンタ, x_m, y_m, z_m の各座標軸はそれぞれ V, H , クレードル軸に一致している。 z_c 軸はカット軸であり, クレードル軸に平行である。 O_c はカット中心でその位置は $(V_g, H_g, 0)$ にある。 z_g 軸はギヤ軸で, O_g はギヤ歯底円すい頂点, λ_{gr} はギヤ歯底円すい角である。環状フライスカッタの内・外両切れ刃は, グリーソン方式では直線であるが, 本研究のギヤおよび既報のギヤの歯切りでは, 内・外切れ刃は曲率半径の大きな円弧である。円弧切れ刃の曲率半径を r , カッタに固着した座標系 $O_c-x_c y_c z_c$ で $x_c=0$ なる平面内の円弧曲率中心の座標を y_0, z_0 とする(図1)。

ギヤ歯面は成形歯切りされるから, 切れ刃の形成する回転面そのものが転写される。よって, ギヤ凸歯面歯切り時に誤差が生じるであろうと考えられる要因は, $V_g, H_g, \lambda_{gr}, y_0, z_0$ などである。既報⁽³⁾では, これらのうちカット中心の座標 V_g, H_g に関しては特に, 動径に相当するラジアルセッティング $R_{sg} (= \sqrt{V_g^2 + H_g^2})$ と偏角に相当するカット中心旋回角 $A_{sg} [= \tan^{-1}(H_g/V_g)]$ とで表すことにし, $R_{sg}, A_{sg}, \lambda_{gr}, y_0, z_0$ などを誤差要因にした。

誤差要因の誤差は歯面上の点の座標測定値群から最小二乗法によって求めるが, すべての誤差要因の誤差を同時に求めることは要因間の独立性の問題⁽⁴⁾などもあり困難であるから, それらを別々に求める。また, 同時に測定値群と理論歯面との不一致度を示す適合精度も求める⁽⁵⁾。この適合精度 Δt が小さいということは測定値群によく適合する理論歯面が推定されたことを意味するから, 上述の誤差要因 $R_{sg}, A_{sg}, \lambda_{gr}, y_0, z_0$ などのうち Δt が最も小さくなる要因の誤差をまず検出すべきである。そして, 誤差を含めたその要因の値のもとで他の各要因についてそれぞれの誤差と Δt の値を求める。もし, Δt の値がより小さくなった場合には, 誤差を含めたその要因の値を用いれば推定した理論歯面は測定値群にさらによく一致することになるから,

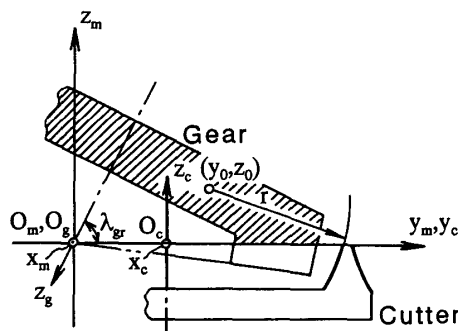


図1 リングギヤの歯切り

その要因も検出対象の誤差要因にする。 Δt がより小さくならなければ, 最初に Δt が最も小さくなった要因以外の要因には誤差がないとしてよい。

このように, 誤差要因の誤差を別々に求めたり, 最初に Δt が最も小さくなる誤差要因を見出し, 次に誤差を含めたその要因の値のもとで他の要因の誤差を検出できたりするのは, すなわち二つの誤差要因の重ね合わせができるのは, 各誤差は, それが小さいために, 誤差の二乗和の最小値に対して線形であるとみなすことができるからである。

ピニオン歯面についてもギヤ歯面の場合と同じ考え方で検出すべき誤差要因を決める。

3. 熱処理方法

材質が SCM420 の表1に示す諸元のハイポイドギヤを歯切りした後, 熱処理した。熱処理方法はガス浸炭である。ギヤについては, 図2に示すように 920°C の浸炭ガス雰囲気中に 200 分間保持し, その後 840°C まで冷却しその温度で 5 分間保持した。そして, 焼入れをするために歯車を 150°C の油中に投入して 5 分間保持した。その後再加熱して 165°C で 120 分間保持し, 焼戻し処理を行った。ピニオンのガス浸炭も同じ方法で行ったが, 浸炭深さを深くするために浸炭ガス雰囲気中の温度を 930°C とした。

4. 熱処理変形の検出

4.1 ギヤ歯面の熱処理変形 ギヤ凸歯面の熱処

表1 ハイポイドギヤの諸元とラジアルセッティング

	Gear	Pinion
Number of teeth	41	7
Spiral angle	$33^\circ 01'$	$47^\circ 47'$
Radial setting R_{sg}, R_{sp}	70.342mm	70.592mm
Module	3mm	
Pinion offset	18mm	

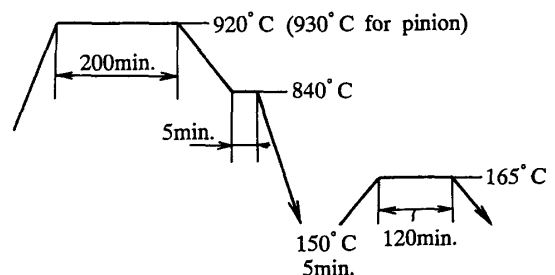


図2 リングギヤの熱処理過程

理変形を調べた。本研究では、熱処理変形のばらつきも調べるため、No.1~No.5までの5個のギヤを測定し、また1個のギヤについて41枚の歯面のうち6枚おきに6枚の歯面を測定した。すなわち、5個のギヤで計30枚の歯面を測定した。また、これらの歯面の測定は熱処理前と後で行った。熱処理変形を歯切り誤差に含めて検出しようとする本研究の目的からすれば、熱処理前の歯面測定は必要ないが、歯切り誤差と熱処理変形を区別して検出するために熱処理前の歯面の測定も行った。1枚の歯面の測定には、測定中の偶然誤差の影響を小さくするため測定点数を20点以上とし、歯面の座標測定値群からできるだけ正確な理論歯面を推定できるようにした。

ところで、どの要因の誤差を検出すべきかを決定するため、ギヤ凸歯面のうち任意の歯面1枚を選び、熱処理前と後で歯面の座標測定値群より各要因の誤差と適合精度 Δt の値を求めた。表2は熱処理前の結果を示したものである。表中の Z_g はカッタ中心 O_c の z 座標であり、設計値は零である。表2に掲げた要因のうち、 Δt の値が最も小さくなっている要因はラジアルセッティング R_{sg} である。ところで、この計算では R_{sg} 以外の要因は設計値どおりであるとして R_{sg} の誤差を求めている。したがって、他の要因に誤差があるかどうかは不明である。そこで、 $R_{sg}=70.342$ (表1) + 0.079 (表2) = 70.421 mm として他の要因 A_{sg} , Z_g , λ_{gr} , y_0 , z_0 の誤差とそれぞれの要因に対応する適合精

度 Δt の値を求めてみた。その結果を表3に示す。 Δt の値はすべて表2の R_{sg} の Δt とほとんど変わっていない。このことは表2の R_{sg} の場合と同じで、表3に示す誤差要因はすべて設計値どおりであることを意味する。すなわち、 $R_{sg}=70.421$ mm で、他の要因が設計値どおりであるときの理論歯面が測定値群に最もよく適合することになる。これより、本研究のギヤ凸歯面に関する限り、熱処理前は R_{sg} だけを検出すべき誤差要因にすればよいことになる。

表4は熱処理後の歯面の座標測定値群より各誤差要因の誤差と適合精度 Δt の値を求めた結果である。表4より、 Δt の値が最も小さくなっている要因は熱処理前と同じ R_{sg} であることがわかる。そこで、 $R_{sg}=70.342+0.082=70.424$ mm として、他の要因の誤差とそれぞれの Δt の値を求めた。その結果を表5に示す。 Δt の値はすべて表4の R_{sg} の Δt とほとんど変わっていない。これより、熱処理後も R_{sg} だけを検出すべき誤差要因にすればよいことになる。

そこで、30枚のギヤ凸歯面を熱処理前後に測定し、それぞれについて R_{sg} の値と Δt の値を求めた。検出した R_{sg} に対する Δt の値は、熱処理前で $2.3\sim 4.7$ μm 、熱処理後で $1.9\sim 5.4$ μm の範囲にあった。適合精度 Δt の値がすべて 6 μm 以下であるという結果から、予測どおりどの歯面についても R_{sg} のみで歯切り誤差および熱処理変形が評価できると考えてよいであろう⁽³⁾。図3に R_{sg} の検出結果を示す。図には熱処理前と

表2 熱処理前に求めた誤差要因の誤差と Δt

Error factor	Error	$\Delta t(\mu\text{m})$
R_{sg}	0.079mm	2.3
A_{sg}	$0^\circ 45'$	8.3
Z_g	0.461mm	3.0
λ_{gr}	$0^\circ 58'$	8.5
y_0	-0.142mm	3.0
z_0	0.462mm	3.0

表3 熱処理前に $R_{sg}=70.421$ mm として求めた誤差要因の誤差と Δt

Error factor	Error	$\Delta t(\mu\text{m})$
A_{sg}	$-0^\circ 3'$	2.3
Z_g	0.009mm	2.3
λ_{gr}	$0^\circ 5'$	2.2
y_0	0.001mm	2.3
z_0	0.010mm	2.3

表4 熱処理後に求めた誤差要因の誤差と Δt

Error factor	Error	$\Delta t(\mu\text{m})$
R_{sg}	0.082mm	3.2
A_{sg}	$1^\circ 2'$	7.3
Z_g	0.482mm	3.5
λ_{gr}	$1^\circ 14'$	7.9
y_0	-0.147mm	3.9
z_0	0.483mm	3.5

表5 熱処理後に $R_{sg}=70.424$ mm として求めた誤差要因の誤差と Δt

Error factor	Error	$\Delta t(\mu\text{m})$
A_{sg}	$-0^\circ 3'$	3.2
Z_g	0.003mm	3.2
λ_{gr}	$0^\circ 7'$	3.0
y_0	0.002mm	3.2
z_0	0.005mm	3.2

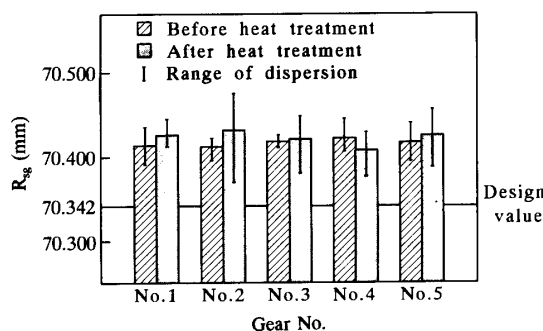
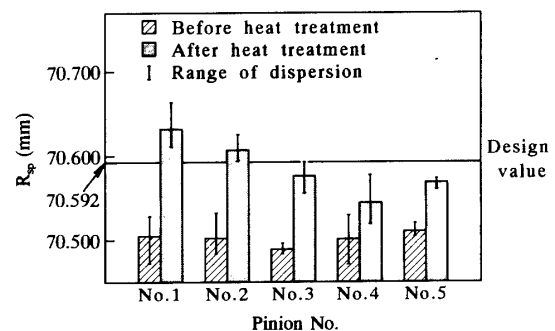
後で No. 1~No. 5 までの 5 個のギヤについてそれぞれ 6 枚の歯面の R_{sp} の平均値とばらつきの最大幅を示してある。図 3 から、熱処理前はどのギヤについても同一ギヤでは R_{sp} の歯面間のばらつきは小さく、またギヤ間のばらつきも小さいことがわかる。測定した 5 個のギヤの全歯面についての R_{sp} の平均値は、70.417 mm であった。これより、 $R_{sp}=70.342$ mm で歯切りすべきところ、実際には 0.075 mm 大きい $R_{sp}=70.417$ mm で歯切りされていたことになる。これに対して、熱処理後に検出した R_{sp} の平均値は 70.422 mm で、熱処理前の 70.417 mm と比較してほとんど変わっていない。すなわち、ギヤ凸歯面に関しては熱処理変形は平均的にはほとんど生じていないと考えてよい。しかし、歯面間の熱処理変形のばらつきは大きくなっている。特に No. 2 のギヤで大きくなっているが、これは偶発的な異常変形によるものと思われる。熱処理後の No. 2 のギヤを除いた残りの全測定歯面の R_{sp} のばらつきの最大幅は熱処理前で 0.054 mm、熱処理後で 0.079 mm、標準偏差は熱処理前で 0.013 mm、熱処理後で 0.022 mm であった。すなわち、 R_{sp} の 5 個のギヤ全体としてのばらつきの最大幅と標準偏差はともに熱処理によって 1.5 倍程度に大きくなっている。

4.2 ピニオン歯面の熱処理変形 ピニオン凹歯面の熱処理変形を調べた。ピニオンの歯数は 7 枚であり、1 枚おきに 4 枚の歯面を測定した。すなわち、5 個のピニオンで計 20 枚の歯面を測定した。そして、これらの歯面のうちから任意の歯面 1 枚を選び、どの誤差要因の誤差を検出すべきかを調べた結果、熱処理前後ともにラジアルセッティング R_{sp} だけを検出すべき誤差要因にすればよいことがわかった。

そこで、20 枚のピニオン凹歯面を熱処理前後に測定し、それぞれについて R_{sp} の値と Δt の値を求めた。検出した R_{sp} に対する Δt の値は熱処理前で 3.6~9.1 μm 、熱処理後で 5.5~9.7 μm の範囲にあった。大きくねじれているピニオン歯面、すなわち変化の激しい歯

面で Δt の値がすべて 10 μm 以下であるという結果から、どの歯面についても熱処理前後の歯面の変形は R_{sp} のみで評価できると考えてよいであろう⁽³⁾。図 4 に R_{sp} の検出結果を示す。図 4 から、熱処理前はどのピニオンについても同一ピニオンでは R_{sp} の歯面間のばらつきは小さく、またピニオン間のばらつきも小さいことがわかる。測定した 5 個のピニオンの全歯面についての R_{sp} の平均値は、70.501 mm であった。これより、 $R_{sp}=70.592$ mm (表 1) で歯切りすべきところ、実際には 0.091 mm 小さい $R_{sp}=70.501$ mm で歯切りされていたことになる。ところが、熱処理後の R_{sp} の平均値は 70.585 mm で、熱処理前のそれに比べて 0.084 mm 大きくなったが、結果としては偶然にも設計値に近い値になった。一方、 R_{sp} のばらつきは同一ピニオンでは熱処理前後であまり変わらないが、ピニオン間のばらつきは熱処理によって大きくなっている。測定した全歯面の R_{sp} のばらつきの最大幅は熱処理前で 0.061 mm、熱処理後で 0.144 mm、標準偏差は熱処理前で 0.020 mm、熱処理後で 0.036 mm であった。すなわち、 R_{sp} の 5 個のピニオン全体としてのばらつきの最大幅と標準偏差はともに熱処理によって 2 倍程度に大きくなっている。

ところで、ハイポイドギヤの熱処理変形は一般に、(1)ねじれ角が小さくなるように生じ、(2)その変形量はギヤよりもピニオンのほうが大きいといわれている^{(6)~(8)}。本研究のハイポイドギヤの熱処理変形は、すでに述べたようにラジアルセッティングの大きくなるように変形するが、その変形量は平均的にはギヤ歯面で無視できるほど小さく、ピニオン歯面で 0.084 mm であった。これより、本研究のハイポイドギヤの熱処理変形は(2)と同じ傾向にあると言える。しかし、(1)と同じ傾向にあるかどうかはただちに判断することはできない。そこで、ピニオン歯面上の中央部の一点でラジアルセッティング R_{sp} が 70.501 mm から 70.585 mm に変化したときねじれ角がどのように変

図 3 R_{sp} の検出結果図 4 R_{sp} の検出結果

化するかを数値計算によって調べてみた。その結果、ねじれ角が角度で二分ほど小さくなり、本研究のハイポイドギヤの熱処理変形はピニオンに関しては(1)と同じ傾向にあることがわかった。

5. 検出誤差の歯切り作業へのフィードバック

熱処理後に設計歯面に近いハイポイドギヤ歯面を得るため、熱処理後の歯車について検出したラジアルセ

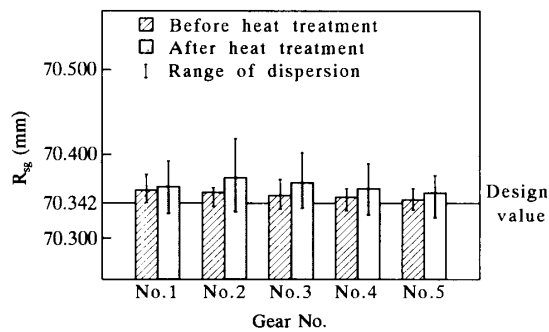
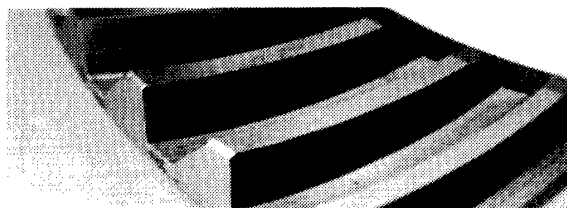


図5 修正歯切りした後の R_{sg} の検出結果

ッティングの平均値と設計値との差を歯切り誤差とみなし、これを修正して歯切りを行った。

ギヤ凸歯面については、熱処理後の R_{sg} の平均値が設計値より 0.080 mm 大きくなったので、 R_{sg} を 0.08 mm 減少させて新たに 5 個のギヤを修正歯切りした。そして、30 枚の歯面を熱処理前後に測定し、それぞれについて R_{sg} の値と Δt の値を求めた。 Δt の値は修正歯切り前と同じ程度に小さく、熱処理前後の歯面の変形は R_{sg} のみで評価できることが確認できた。図5に修正歯切りした後の R_{sg} の検出結果を示す。図5より、予測どおり、熱処理によって R_{sg} のばらつきは大きくなるが、熱処理変形はほとんど生じていないことがわかる。熱処理後の全測定歯面の R_{sg} の平均値は 70.362 mm であり、設計値との差は 0.020 mm とわずかである。これより、全体としては熱処理後に設計歯面に近いギヤ凸歯面が得られたと考えてよく、熱処理変形を見込んだ修正歯切りの効果が見える。

ピニオン凹歯面に関しては、偶然にも歯切り誤差と熱処理変形が相殺しあい、熱処理後に設計歯面に近い歯面が得られており、修正歯切りの必要はない。

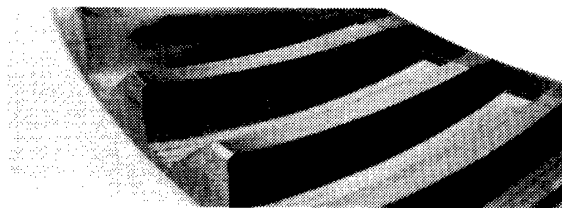


(a)

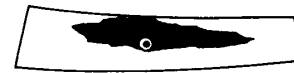


(b)

図6 修正歯切りしないギヤ凸歯面上での歯当たり



(a)



(b)

図7 修正歯切りしたギヤ凸歯面上での歯当たり



(a)



(b)

図8 狂いの最も大きい歯車対のギヤ凸歯面上での歯当たり

さて、設計歯面に近い熱処理後のピニオンと修正歯切りしない熱処理後のギヤおよび修正歯切りした熱処理後のギヤとをそれぞれかみあわせてみた。かみあわせた歯車はラジアルセッティングの狂いの最も小さいものを選んだ。すなわち、熱処理したピニオンが図4のNo.2、修正歯切りしない熱処理ギヤが図3のNo.4、修正歯切りした熱処理ギヤが図5のNo.5である。図6に修正歯切りしない熱処理ギヤ凸歯面上での歯当たりを示す。(a)が歯当たり写真、(b)が歯当たりスケッチ結果である。図6(b)中の黒丸印で示した点は歯の中央部に定めた設計上の歯当たりの中心点である。図7に修正歯切りした熱処理ギヤの歯当たりを図6と同様に示す。修正歯切りした場合の歯車では歯当たりが歯の中央部に移っており、その効果のあることがわかる。

以上より、熱処理変形を見込んだ修正歯切りの有効性が確かめられたものと考えられる。

6. 熱処理変形のばらつきに関する考察

5章までで、熱処理変形を見込んだ歯切りが可能であることがわかったが、その変形量を評価するラジアルセッティングは当然のことながらばらついている。6章では、このばらつきについて考察する。

本研究のハイポイドギヤは、ピニオン歯面に歯面修整が施されわずかな非共役性を示す歯車対であり、計算によればその最大回転角伝達誤差は約13秒である⁽⁴⁾。非共役な歯車対では、歯切り誤差や組立誤差があっても、歯当たり模様が変化せず、場合によっては回転角伝達誤差も小さくできる⁽⁹⁾。したがって、熱処理変形のばらつきの程度が歯車対のわずかな非共役性の程度に比べてより小さければ、特に問題はないと考えられる。

本研究の歯車対の非共役性が熱処理変形のばらつきを吸収できるかどうかを調べるため、熱処理後のラジアルセッティングの狂いの最も大きい図5のNo.2のギヤと図4のNo.4のピニオンとをかみあわせ、ギヤ凸歯面上での歯当たりを調べた。その結果を図6、7

と同様に図8に示す。図8の歯当たりは、図7の狂いの最も小さい歯車対のものと比較してほとんど差異はみられない。これより、本研究で用いたハイポイドギヤの非共役性は熱処理変形のばらつきを吸収できるものであることがわかる。

7. 結 言

ハイポイドギヤの熱処理後の歯面には熱処理変形が生じ、設計歯面とは異なった歯面になっていると考えられる。本研究は、熱処理前後のハイポイドギヤ歯面を三次元座標測定機で測定し、その測定値から熱処理変形を検出したものである。その結果を要約すると以下ようになる。

(1) 本研究のハイポイドギヤ歯面の熱処理変形は歯切り時の工具取付誤差に含めて取扱うことができる。

(2) したがって、歯切り誤差と熱処理変形を総合した誤差を歯切り誤差に含めて検出し、これを修正して歯切りを行えば、各歯車間、各歯面間で熱処理変形のばらつきはあるものの、熱処理後に設計歯面に近いハイポイドギヤ歯面を得ることができる。

(3) 本研究で用いたハイポイドギヤ⁽⁴⁾では、その非共役性を利用して熱処理変形のばらつきを吸収することができる。

終わりに、熱処理・歯切実験にご協力いただいたスズキ(株)の竹内慎一課長、羽田芳智主任ならびに(株)長岡歯車製作所の市野之彬部長にお礼申し上げる。

文 献

- (1) 上野, 歯車工学, (1977), 102, 共立出版.
- (2) 例えば, 歯車便覧編集委員会編, 歯車便覧, (1962), 1139, 日刊工業新聞社.
- (3) 川崎・田村, 機論, 59-567, C(1993), 3513.
- (4) 川崎・田村, 機論, 59-564, C(1993), 2544.
- (5) 田村・ほか2名, 機論, 60-575, C(1994), 2450.
- (6) Gleason Works, *How to Test Bevel Gears*, (1955).
- (7) Townsend, D. P., *Dudley's Gear Handbook*, 2nd ed., (1991), 23-29, McGraw-Hill.
- (8) 仙波, 歯車, 2(1975), 232, 日刊工業新聞社.
- (9) 大泉・酒井, 機論, 49-444, C(1983), 1426.