621. 785. 545. 45:621. 833. 036

小形歯車の高周波焼入れによって生ずるひずみ*

(第 1 報, 主として熱ひずみについて)

武 田 信 男**

Distortions of Comparatively Small-Sized Gears
Caused by Induction Hardening

(1st Report, Mainly on Thermal Distortions)

by Nobuo TAKEDA

It is usually accepted that steel parts surface hardened by induction heating generally exhibit less total distortion. However, the induction hardening of small-sized gears is a matter of recent years and we have as yet very little information on the results concerning the systematic measurements of the distortions of them.

In this investigation spur gears of 10 diametral pitch, were induction hardened with various heating conditions, and distortions, generated by thermal changes as well as by quenching transformations, were measured in detail. In the 1st report, the results of measurements of distortions, caused by thermal changes only, were described. Materials of gears were pure iron. Items of measurements were as follows: outer diameter, inner diameter, width, whole depth, radius of root circle, thickness of tooth, undulation of tooth trace, and tooth profile.

1. ま え が き

高周波焼入れ法の特長の一つは、加熱部分が表面のうすい層にとどまるから、全体としてのひずみ発生量が少ないことであるとされている。しかしながら、小形歯車の高周波焼入れは近年の技術であり、ひずみに関する詳細な実験結果の発表されたものは少なく、不明のことがらが多い。K. Bürger⁽¹⁾, W. Malmberg⁽²⁾, 成瀬⁽³⁾らの報告にひずみ測定結果が述べられているが、これらは主として機械要素としての歯車の性能を検査する立場から測定を行なっているようであり、測定項目少なく、また焼入ひずみから熱ひずみを分けて考察することに欠けている。ひずみは変態ひずみと熱ひずみとよりなるが、これらは焼入操作のいかんによって変ってくるものであり、上記の高周波焼入れの特長を十分に発揮するためには、この際のひずみ発生機構を明らかにしておくことが必要である。著者は、これに対する資料をえるために、小形平歯車に種々の条件で高周波焼入れをほどこし、ここに発生する熱ひずみおよび焼入ひずみを詳細に測定して、およそ所期の目的を達した。

2. 供 試 歯 車

小形歯車の高周波焼入れに対しては、通常全歯同時焼入れ法が採用される。この方法に適し、しかも需要の多い歯車は、モジュール 2～3 のものである。本実験に供した歯車の諸元を第 1 図に示す。素材組成は第 1 表のとおりである。純鉄材は熱ひずみのみを求める目的で使用した。直径 70 mm の圧延棒を焼ならし後、旋盤仕上でギヤ・ブランクを削り出し、ホブ切り後、加工残留応力除去の目的で 500°C で 3 h 焼なましした。S45C 材は直径 50 mm の圧延棒を直径 70 mm にすえ込み後、850°C より炉中冷却焼なましし、これより仕上しろ 0.3 mm を残したギヤ・ブランクを削り出した。これに 850°C 塩浴中加熱、油中焼入れ、600°C/h 焼もどしなる調質をほどこした後、正規寸法のギヤ・ブランクを研削仕上し、ホブ切りとシェービングとを行なった。

第 1 表 素材の組成

名 称	C %	Si %	Mn %	P %	S %
純 鉄	0.012	0.05	0.02	0.010	0.015
S 45 C	0.45	0.28	0.76	0.024	0.025

* 昭和 32 年 9 月 27 日 仙台地方講演会において講演，原稿受付
昭和 36 年 5 月 16 日。

** 正員，東北大学工学部（仙台市桜小路）。

3. 高周波焼入れ

小形歯車に対して、従来適当と考えられている周波数 450 kc の真空管式高周波焼入れ装置を用いて焼入れを行なった。

焼入コイルは第2図のものを用いた。これは工場等で普通に採用されている形式のもので、これが最適か否かについては検討の余地があるが、本実験ではいちおうこれを用い、結果をみて改良すべきところがあればこれを改める方針をとった。歯車とコイル間のギャップおよび歯車幅とコイル幅との寸法関係は、予備実

DP 10, 歯数 24, 圧力角 20°, 標準インボリュート平歯車, 歯面はシェービング仕上, 他は全面研摩

第1図 供試歯車

(a) 円形コイル

(b) 歯形コイル

第2図 焼入コイル

験により、歯すじ方向の硬化深さが一様となる条件を求めて決定したものである。歯車は円形コイル使用の場合は回転しつつ、歯形コイル使用の場合は固定して焼入れられた。歯形コイルは、歯に輪郭焼入れをほどこす目的でこれを用いたが、効果は不十分であった。

硬化層形状およびかたさ分布は後に示す。

4. 歯車のひずみ測定事項とその方法

測定位置を示すために、第3図のように歯車端面に細線をけがき歯の番号を定めた。測定項目とその方法は次のとおりである。測定は熱処理の前後に行なって両者の差を求めた。

(1) 外径変化 マイクロメータを用い、歯番号 3-15, 7-19, 11-23 の3方向について、歯幅の中央位置で測定した。マイクロメータの測定精度をブロックゲージで検定した結果を第4図に示す。これより、図示の検定寸法範囲（焼入前後の外径寸法はこの範囲にはいる）においては、2 μ 程度の精度をもって測定できることがわかる。なお、このマイクロメータを用い、同一歯車の外径に対して数十回の反復測定を試みた結果この場合も同程度の精度で測定できることを確

第3図 測定位置

第4図 外径寸法付近におけるマイクロメータ測定精度検定結果ならびに測定値に及ぼす室温の影響

かめえた。ただし測定にあたっては、被測定物とマイクロメータとが等しい温度であること、測定圧を一定すること（マイクロメータのラチェット回転をきわめて静かに行ない、かつその回転速さと回転数とを各測定に対してそろえる）、同一人が同姿勢ですべての測定を行なうこと等に注意をはらった。また、この図に室温変化の影響をも示した。これを見ると測定値に影響が表われていない。これはマイクロメータと被測定物との熱膨張係数の差が小さいためである。したがって、とくに恒温室内での測定を必要としなかった。

(2) 内径変化 1/100 mm 目盛のインサイド・インジケータを使用し、外径と同じ 3 方向について歯幅の中央位置で測定した。測定にあたってはマイクロメータ使用の場合と同様、十分な注意をはらった。

(3) 幅の変化 歯車の一端面から他端面までの寸法を幅とよぶこととする。マイクロメータを用い、第 3 図に×印で示した位置で測定した。

(4) 歯の厚さの変化 ここに厚さとは、ピッチ円上の歯厚に限らず、ピッチ円上下部における厚さをも含めてよぶものとする。直径 1/8 in, 5/32 in, 3/16 in, 7/32 in, 1/4 in の 5 種類の鋼球を第 5 図のように歯みぞに入れ、寸法 M を、マイクロメータを用い、60° ほどの 3 方向につき、歯幅の中央位置および歯車端面より約 0.2 mm 内方の位置で測定した。 M の変化を次のようにして歯の厚さ方向の変化になおすことができるから、これより歯の厚さの変化を知ることができる。歯数偶数の標準インボリュート歯車では、次式が成立する。

$$\text{inv } \varphi = \text{inv } \alpha_0 + \frac{d}{mZ \cos \alpha_0} - \frac{\pi}{2Z} - \frac{p}{mZ} \dots (1)$$

$$M = d + \frac{mZ \cos \alpha_0}{\cos \varphi} \dots (2)$$

ここに、 α_0 : ピッチ点における圧力角, m : モジュール, Z : 歯数, d : 球の直径, p : 背げき, φ : 第 5 図に示した角度

第 5 図 オーバーボール測定

M が焼入前後で ΔM だけ変わったとすると、円周方向への変化はほぼ $\Delta M/2 \cdot \tan \varphi$ となる。ただし、焼入後、圧力角、歯形等がわずかに変化するが、この影響は小さな値となるので無視する。球と歯面との接触点を P とすると、

$$\overline{OP}^2 = \overline{OO'}^2 + \frac{d^2}{4} - d \cdot \overline{OO'} \cdot \sin \varphi \dots (3)$$

5 種類の球をあてて測定した結果から求めた円周方向への変化をそれぞれの $\overline{OP}$ の値に対して示せば、これを歯先円径および歯底円径の変化と総合することによって、歯の厚さの変化と歯形の変化とを知ることができる。

(5) 歯のたけの変化 歯先と歯底とに 1/100 mm 目盛のインジケータをあて、その読みの差からこれを求めた。測定は歯番号 3, 7, 11, 15, 19, 23 の 6 枚について歯幅の中央位置で行なった。

(6) 歯すじのうねり 第 6 図のように軸を水平においた歯車の歯面上 2, 3 の位置および歯先にフィーラをあて、歯車を水平に移動させて、このときのフィーラの動きを 1/1000 mm 目盛のインジケータで読んだ。フィーラの先端半径は 0.5 mm であった。

(7) 歯車端面のうねり 歯すじのうねり測定と同様の方法で、第 7 図の位置で測定した。

(8) 歯形誤差の変化 歯車測定器を使用し、歯番号 3, 7, 11 の両側歯面について歯形誤差曲線を記録させた。

(9) 歯車内周面の軸方向のうねり とくに必要と思われる場合にのみ、これを第 6 図と同様の方法で測定した。

(10) 偏心および真円度 歯車測定器を用い、歯幅の中央位置で歯先、歯みぞおよび歯底に測定子をあてそれぞれにおける偏心を 1/1000 mm 目盛のインジケータで測定した。歯みぞにあてた測定子の先端は直径 4.23 mm の球であった。

偏心の読みから真円度を次の方法で求めた。歯車を少量の偏心の存在する仮中心のまわりに回転し、外周

第 6 図 歯すじのうねり測定

第 7 図 端面のうねり測定位置

にインジケータをあてて、角度位置 θ に対するインジケータの読み $\varepsilon(\theta)$ をとると、 $\varepsilon(\theta)$ は θ についての周期関数となり、これを次式の形で表わすことができる。

$$\varepsilon(\theta) = a_0 + a_1 \cos \theta + \sum_{n=2}^{\infty} a_n \cos n\theta + b_1 \sin \theta + \sum_{n=2}^{\infty} b_n \sin n\theta \dots\dots\dots (4)$$

この式で右辺の a_0 はインジケータの定位によって定まり、 $a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta$ は仮中心の偏心による影響を示し、残りが真円度を表わす項となる。真円度を表わす項を $\varepsilon'(\theta)$ とすると、

$$\varepsilon'(\theta) = \varepsilon(\theta) - \{a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta\} \dots\dots (5)$$

円周を n 等分して $\varepsilon(\theta)$ を測定したとすると a_0, a_1, b_1 は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{n} \sum \varepsilon(\theta) \\ a_1 &= \frac{2}{n} \sum \varepsilon(\theta) \cos \theta \\ b_1 &= \frac{2}{n} \sum \varepsilon(\theta) \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

読み $\varepsilon(\theta)$ の値をこれらに入れて a_0, a_1, b_1 を求め、これらを(5)式に入れば偏心を分離した真円度を求めることができる。

(a)

(b)

(c)

歯中央断面

歯底断面

歯中央断面

歯底断面

歯中央断面

歯底断面

焼入条件

周波数 450 kc, 素材 S45C

記号	E_p kV	I_p A	I_g A	加熱時間 t s	冷却
a	13.8	8~6	0.6~0.8	1.1	噴出水冷
b	"	"	"	1.4	"
c	"	"	"	500° に予熱後 0.5	"

E_p, I_p, I_g はそれぞれプレート電圧, プレート電流, グリッド電流

第8図 焼入硬化層

(11) ピッチ誤差 法線ピッチの変化を歯幅の中央位置で求めた。

(12) かみあい試験 カール・マール形中心距離変化式かみあい試験機を使用し、代表的歯車数個について試験した。

焼入ひずみ測定完了後、荷重 500 g でマイクロビッカースかたさを測定してその分布を求め、最後に歯車を切断し、端面および断面のマクロ検査および顕微鏡組織検査を行なった。

5. 焼入硬化状況

供試歯車程度の寸法のものに、一発加熱焼入れをほどこして、歯部を全体焼入状態とすることなく歯底を硬化するには、発振器の周波数を高く、出力を大にして、短時間加熱をしたほうがよい。ただし、焼入組織

中のフェライト残留を防ぐためには、加熱時間短縮に制限がある。著者が行なった予備実験では、焼ならし S45C 材は加熱時間 2 s で焼入れたものに組織むらとかたさのむらとを生じたが、ソルバイト状態に調質した S45C 材においては加熱時間 1 s で焼入れてもむらが表われず、曲げ強さも満足すべき結果がえられた。なお 500°C 予熱後焼入れを行なった場合は、前組織ソルバイトのものは加熱時間 0.4 s で十分な結果がえられた。加熱の最高温度を極度に高くすれば加熱時間を著しく短縮できるが、これは焼割れ発生および焼入組織粗大化によって制限をうける。

歯車端面および断面をマクロエッチし、硬化層形状を現わしたものを第 8 図に示す。予熱後焼入れのものを除き硬化層は深めである。これは、歯底硬化のためには歯部の焼入れを深くする心要があったためであ

焼入条件

歯 車	E_p kV	I_p A	I_g A	焼入時の回転速度 rpm	加熱時間 s	冷 却
a	13.8	8~6	0.6~0.8	300	1.4	噴出水冷
b	"	"	"	"	1.5	"

第 9 図 かたさ分布 (一発加熱焼入れ)

り、焼入れが深いとひずみが強調されて、ひずみ発生傾向をみるのに好都合でもあった。予熱後焼入れによれば輪郭焼入れがえられる。

かたさ測定結果は、第9図のように妥当な値をえた。しかし第10図に示したように、予熱後焼入れの場合に、予熱後焼入れまでの経過時間の長いものでは歯底かたさは十分であるが、歯先かたさが低くなる場合があった。また焼入時の回転方向に面する歯面かたさが幾分低くなる傾向が表われた。

顕微鏡組織は第11図のとおりであり、良好なマルテンサイト組織がえられた。ただし予熱後焼入れの場合には、かたさに表われた結果と同様のことが顕微鏡組織にも表われ、わずかに不完全焼入状態となったものもあった。

6. 熱ひずみ測定結果

純鉄は $A_{r''}$ 変態を起さない。 A_1 および A_3 変態は起るが、これらによる変形量は熱ひずみにくらべて小さい。したがって、純鉄材歯車を用いて焼入れを行えば熱ひずみをおよそ知ることができる。熱ひずみ量に対しては素材の機械的性質も影響し、これについては別報告で述べるが、ひずみ発生の傾向を知る目的に対しては機械的性質の多少の差は考慮しなくてもよい。

第2表に示した条件で高周波焼入れをほどこした。

純鉄歯車の場合には、その加熱された状況を第8図のように硬化層形状で示すことはできないが、S45C材と純鉄材とを同条件で高周波加熱した場合の温度上昇過程の両者についての差は小さいので、第8図によって純鉄歯車の加熱状況をも推定してよい。

焼入条件						
歯 車	E_p kV	I_p A	I_g A	焼入時の回転速度 rpm	加 熱 時 間 s	冷 却
a	13.8	8~6	0.6~0.8	300	500° 炉中予熱後 0.5	噴出水冷
b	"	"	"	"	約500°高周波予熱後 0.5	"

第10図 かたさ分布(予熱後焼入れ)

記号	焼入条件				加熱時間 s
	E_p kV	I_p A	I_g A		
a	13.8	8~6	0.6~0.8		1.4 500° 炉中予熱, 炉より取出し30 秒後 0.5 秒高周波加熱
b	"	"	"	"	

第 11 図 顕微鏡組織 ×386

焼入前後の外径変化, 内径変化, 幅の変化, 歯のたけの変化, 歯底円半径の変化を求めた結果を第3表に示す. 表中, 1組の3点ずつがそれぞれ1個の歯車について求めた結果である. これより次のことがわかる.

外径変化: (a) すべて減少した. (b) 空冷のものは水冷のものよりも減少量がやや少ないようである. (c) 水冷のものは加熱時間の長いほうが外径減少量が大きくなった. (d) 予熱を行なったものは外径減少量が小となった.

内径変化: (a) すべて減少した. (b) 空冷のものは水冷のものよりも減少量がやや大となった. (c) 水冷のものは加熱時間の長いほうが内径減少量がわずかに少ないようであるが, ほとんど差はない. (d) 予熱を行なったものは内径減少量が小となった.

幅の変化: 1個の歯車につき, 表中に示した3部分において測定し(それぞれ中心に関して対称の2点

で測定して平均をとった), 焼入れによって生じた変化量を記入してある. これより, (a) 空冷のものは内周部から歯先部まではほぼ一様に増加している. (b) 内周部と中央部との幅はすべてわずかに増加している. (c) 水冷したものの歯先部の幅は加熱時間の短いものでは減少しているが, 加熱時間の長いものでは増加している. (d) 予熱を行なったものは歯先部の幅が減少している.

歯のたけの変化: 1個の歯車につき, 表中に示した番号の6枚の歯を測定して, 中心に関して対称位置の2枚ずつの歯について平均を取り, この焼入れによる変化量を記入してある. これより, (a) すべて減少した. (b) 空冷のものは水冷のものよりも減少量が小であった. (c) 水冷のものは加熱時間の長いほうが減少量が大きくなった. (d) 予熱を行なったものは減少量が小となった.

第2表 高周波焼入条件(純鉄歯車)

歯 車 No.	熱 処 理 条 件								
	コイル	予 熱	E_p kV	I_p A	I_g A	t s	回転方向	毎分回転数	水量 cc/s
1	円 形	な し	13.8	8~6	0.6~0.8	1.4		300	空 冷
2	"	"	"	"	"	0.8	"	"	460
3	"	"	"	"	"	1.1	"	"	"
4	"	"	"	"	"	1.3	"	"	"
5	"	"	"	"	"	1.4	"	"	"
6	"	"	"	"	"	1.5	"	"	"
7	"	500° 炉中予熱	"	"	"	0.5	"	"	"
8	"	500° 高周波予熱	"	"	"	0.5	"	"	"
9	"	な し	13.6	"	"	1.3	"	"	空 冷
10	"	"	"	"	"	1.3	"	"	460
11	"	"	"	"	"	1.3	"	"	"

上表で

500° 炉中予熱: 500° に保持した炉中で歯車全体を 500° に均熱

500° 高周波予熱: 短時間の高周波加熱を熱拡散の時間をおいて繰返し, 歯車全体を約 500° に加熱

E_p , I_p , I_g : それぞれ発振管のプレート電圧, プレート電流, グリッド電流

回転方向, 毎分回転数: 焼入時の歯車の回転方向, 回転速度

水 量: 焼入れの際にコイルから歯車へ向かって噴出させる冷却水量

t : 高周波加熱時間(予熱時間を含まない)

第3表 熱ひずみ測定結果(外径, 内径, 幅, 歯のたけ, 歯底円半径の変化)

歯底円半径の変化： 1 個の歯車につき 60° ごとの 3 方向について測定し、これの焼入れによる変化量を表に記入してある。これより、(a) 一発加熱のものは減少した。(b) 空冷のものは水冷のものよりも減少量が大きくなった。(c) 水冷のものは加熱時間の長短で減少量にほとんど差がないようである。(d) 予熱を行なったものではほとんど変化がない。

オーバーボールを用いて求めた歯の厚さの変化を整

理した結果を第 12 図に示す。前述の方法によって第 13 図 (a) の①～⑤を求める。さらに、焼入れ前後の歯先を合わせるように歯を移動すれば第 13 図 (b) のようになる。第 12 図はかような表わし方をしたものである。これより次のことがわかる。

歯の厚さの変化： (a) すべて増加している。(b) 空冷のものは水冷のものよりも変化量がやや少ないようである。(c) 水冷のものは加熱時間の長い

第 12 図 歯の厚さの変化 (焼入れ前後の歯先と歯の中心線とを重ね合わせて示したもの)

第 13 図 歯の厚さの変化の表わし方

曲線が傾斜しているのは、測定の際の歯車移動方向を軸に対して傾けたためであり、歯すじが傾いていることを意味するものではない。曲線の図における位置の上下および傾斜は意味がなく、おうとつのみが意味をもつ。

第 14 図 歯すじのうねり

ほうが変化量が多い。(d) 予熱を行なったものは変化量が少ない。(e) 歯形はその傾きが幾分大となる。

歯すじのうねりの測定結果を第14図に示す。これをみると、

歯すじのうねり：(a) 空冷のものではうねりの変化は起らない。(b) 水冷のものでは歯先および歯先より2mmのところでの歯すじがおう(凹)となっている。

歯形誤差曲線を測定した結果は第15図のとおりである。これをみると、

歯形誤差曲線の変化：(a) 歯先付近での変化が左右歯面で著しく異なり、左側がとっ出し右側がおう入している。(b) 圧力角の変化は歯によって増加しているものと減少しているものがあるが、これには測定時の偏心も影響し焼入れによる変化は明らかでない。(c) 歯先部を除けば左側歯面のほうが右側歯面よりも圧力角増加の傾向が幾分大きいようであるが明らかでない。

純鉄材歯車に対しては上にあげた以外の測定項目、すなわち偏心、ピッチ誤差等の測定を行なわなかった。S45C材歯車に対しては後報で述べるように全項目の測定を行なった。

7. む す び

供試歯車の製法ならびに素材、高周波焼入方法、焼入硬化状況、歯車のひずみ測定事項とその方法について述べ、ひずみ発生機構の考察に資する目的で行なった熱ひずみ測定結果を記した。第2報において、焼

第15図 歯形誤差曲線測定結果
入ひずみ測定結果を述べる。

本研究を行なうにあたっては東北大学 成瀬政男教授の御指導を賜わり、実験に関しては日本電子光学研究所、日本電子工業会社より多大の御協力をいただき、また今野克雄氏の熱心な御助力をえた。記して深く感謝する次第である。

文 献

- (1) K. Bürger, *Fachtagung Zahnradforschung* (1950), 80.
- (2) W. Malmberg, *Schriftenreihe Antriebstechnik*, 16 (1955), 176.
- (3) 成瀬他, 高周波熱処理専門委員会 (大阪) 研究報告, 第3報 (昭31), 62.

通産省・産業車両製造業合理化計画発表

通産省では、このほど昭和38年度末を目標とする標記の合理化計画を発表した。

さて、運搬、荷役の合理化が近年、すべての産業において重要視せられ、急速に歩進発展を示しつつあり、これにともないフォークリフトトラック、ショベルトラックの需要もますます増大の傾向にあるが、これらの機種は国産化以来10年を経過したにすぎず、急増する国内需要にこたえとともに、貿易の自由化にそなえて輸出振興をはかるため、いっそうの強化策が必要となった。

わが国のフォークリフトトラック、ショベルトラックの製造を行なう主要企業は8社で小松製作所、神鋼電機、日産自動車、日本輸送機、中島運搬機、豊田自

動織機、末広車両、東洋運搬機などである。

そして昭和35年における生産額はフォークリフトトラックは5164台、65億円、ショベルトラックは1267台、32億円である。

さて、昭和38年度末における目標としては生産を現在の2倍とし、品質性能は国際水準の精度性能をもつようにし、生産コストの低減は小形において10%、大形およびショベルトラックは20%とした。

また、性能の向上をはかり業界の基盤を確立するために機種の専門化をはかり、専門生産体制を育成することになった。また、標準化も不十分であるので、とくにその推進をはかり量産体制を確立することになった。

(服部 敏 夫)