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 5 報, 冷却の際の内径ひずみ発生機構)

武 田 信 男**

Deformation of Comparatively Small-Sized Gears Caused
by Induction Hardening

(5th Report, On the Mechanism of Distortion of Inner Diameter Due to Quenching)

by Nobuo TAKEDA

In the 4th report, the mechanism of inner diameter deformation caused by induction heating was studied, but heating is immediately followed by quenching in actual induction hardening. The deformation in such case has been considered in the present paper. The temperature distribution has been solved graphically, and the thermal stress as well as inner diameter deformation have been calculated for several induction hardening conditions. From these results, the explanations are given for the mechanisms of the deformation presented in 1st and 2nd reports experimentally. Further, the stress and the deformation due to martensite formation are also considered.

Thus, the mechanisms of the deformation have been made clear and it became possible to select the induction hardening condition that causes less distortion.

1. ま え が き

前報告⁽¹⁾において, 高周波加熱の際の内径ひずみ発生機構を考察した。高周波焼入れにおいては, 加熱後直ちに急冷が行なわれる。本報告では, この際の内径ひずみ発生機構を考察する。

2. 外周より水冷の際の温度分布

加熱後高周波電流を切り, 直ちに外周にむけて冷却水を噴出させ急冷する。この際の応力計算を行なうために, 本節で温度分布を求める。この場合の温度変化, 応力変化は, 歯車と円板とは相違するものと考えられるが, 前報告⁽¹⁾で述べたように, 内径ひずみは両者で同程度であり, 歯から離れた内周側の応力およびひずみの発生傾向を種々の熱処理条件について比較する目的に対しては, 歯車のかわりに円板を考えてもさしつかえない。

冷却中の温度分布変化を求めるには, 加熱の際と同様に, 図式解法⁽¹⁾によった。第 1 図において, 折線

1 P 2 R……で表わされる温度分布まで加熱された後, 外周に向けて噴出される冷却水によって急冷されるものとする。冷却開始の初期温度分布を 1' P 2 R……とする。冷却水の温度を T_Q , 表面伝熱率を α とすると, 表面から外部へ Δt 時間内に流出する熱流量は $\alpha(T_1' - T_Q)\Delta t$ であり (T_1' は点 1' の温度), これと物体内部の 1' P 間の熱流量が等しくなければならぬから

$$\alpha(T_1' - T_Q)\Delta t = \lambda \frac{T_P - T_1'}{\frac{\Delta x}{2}} \Delta t$$

第 1 図 図式解法の説明

* 昭和 34 年 4 月 1 日 第 36 期通常総会講演会および昭和 35 年 11 月 5 日 仙台地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 37 年 7 月 23 日。

** 正員, 東北大学工学部 (仙台市片平丁)。

$$\therefore \frac{T_{1'} - T_Q}{T_P - T_{1'}} = \frac{\frac{\lambda}{\alpha}}{\frac{\Delta x}{2}}$$

したがって、第1図で表面から外方へ $\delta = \lambda/\alpha$ なる距離に、温度 T_Q を表わす点 Q をとり、 P と Q を結ぶと、これと表面との交点が点 $1'$ と合致し表面温度をあたえることとなる。時間 $\Delta t = c\gamma/\lambda(\Delta x/2)^2$ ほどの内部温度分布を求めてゆく手順は、第4報におけると同様である。なお、円筒の場合、横軸は対数目盛とする。

図式解法の一例を第2図に示す。0.45% C鋼の諸定数の値として 400° におけるものを取り、これを一定とした。表面伝熱率 α は温度による変化が大きい、これも一定と仮定した。これらの値を図中に示した。図で a-b は加熱温度分布を折線で表わしたものである。横軸は対数目盛とし、表面熱抵抗をあたえる $\delta = \lambda/\alpha$ を外周付近の尺度でとり、図示の作図法によって Δt 秒ごとの刻々の温度分布変化を求めることができる。冷却初期に外周部の温度が急激に降下し、内周側の温度は熱伝導を受けて上昇する。

3. 外周より水冷の際の応力およびひずみ発生機構

歯車の内周部を対象とすることとし、ここでも円板について考える。

焼入れによって硬化する場合は、熱応力、熱ひずみとともに、マルテンサイト化の際の体積膨張のための応力、ひずみをも生ずる。

初めに、熱応力と熱ひずみについて考察する。これらの計算を行なうことはきわめて煩雑である。外周から冷却すると、高温に加熱されて塑性状態であった部が弾性状態になってゆく。この場合の応力を求めるには、刻々の履歴を追って遷移状態についての計算をしてゆくべきである。材料の機械的および物理的定数の値は温度とともに変化する。また、外周にむけて噴出された水の一部は実際には円板面にも及ぶので、温度分布がいくぶん変化を受ける。かように複雑な過程をへるので、計算によって定量的結果を正しく求めることはむずかしい。しかしながらここでは複雑な弾塑性変化をする外周部から離れた部分を考えることにしており、この部の応力とひずみの発生機構を考察しう程度の半定量的計算を行なうにとどめた。すなわち、冷却途中の温度分布変化過程を3段階に分け、各段階の間での履歴はこれを省略して計算することとした。

初めの応力が存在する(高周波加熱による)状態からの温度変化であるから、この場合の応力計算を行なうには前報告で導いた式を改めなければならない。

初めに存在する応力を σ_t' , σ_r' とする。バウシנגー効果は無視する。

3.1 内・外周ともに塑性変形をおこす場合 弾性域に生ずる熱応力の式は次のようになる。

$$\sigma_t = C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \alpha E \left\{ \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr - \theta \right\} + \sigma_t' \dots (1)$$

$$\sigma_r = C_1 + \frac{C_2}{r^2} - \alpha E \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr + \sigma_r' \dots (2)$$

第2図 冷却時の温度分布図式解

記号は前報⁽¹⁾に述べたとおりである。

C_1 , C_2 を求める式は前報におけるとほぼ同様にして

$$C_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_{k0}^2}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \sigma_0(r_{k0}) \sin\left(\varphi(r_{k0}) - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_{ki}^2}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \sigma_0(r_{ki}) \sin\left(\varphi(r_{ki}) - \frac{\pi}{6}\right) \\ + \frac{\alpha E}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \int_{r_{ki}}^{r_{k0}} \theta r dr - \frac{r_{k0}^2}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \sigma_r(r_{k0})' + \frac{r_{ki}^2}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \sigma_r(r_{ki})' \dots\dots\dots (3)$$

$$C_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_{k0}^2 r_{ki}^2}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \left\{ \sigma_0(r_{ki}) \sin\left(\varphi(r_{ki}) - \frac{\pi}{6}\right) - \sigma_0(r_{k0}) \sin\left(\varphi(r_{k0}) - \frac{\pi}{6}\right) \right\} \\ - \frac{r_{ki}^2}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \alpha E \int_{r_{ki}}^{r_{k0}} \theta r dr + \alpha E \int_{r_i}^{r_{ki}} \theta r dr + \frac{r_{k0}^2 r_{ki}^2}{r_{k0}^2 - r_{ki}^2} \left\{ \sigma_r(r_{k0})' - \sigma_r(r_{ki})' \right\} \dots\dots\dots (4)$$

弾塑性境界 r_{k0} , r_{ki} を求める式は

$$\sigma_0(r_{ki}) \sin \varphi(r_{ki}) - \sigma_0(r_{k0}) \sin \varphi(r_{k0}) \\ = \frac{1}{2} \alpha E \left\{ \theta(r_{k0}) - \theta(r_{ki}) \right\} - \frac{1}{2} \left\{ \sigma_t(r_{k0})' + \sigma_r(r_{k0})' \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \sigma_t(r_{ki})' + \sigma_r(r_{ki})' \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$r_{ki}^2 \sigma_0(r_{ki}) \cos \varphi(r_{ki}) - r_{k0}^2 \sigma_0(r_{k0}) \cos \varphi(r_{k0}) \\ = \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha E \left\{ \theta(r_{k0}) r_{k0}^2 - \theta(r_{ki}) r_{ki}^2 \right\} - \sqrt{3} \alpha E \int_{r_{ki}}^{r_{k0}} \theta r dr \\ + \frac{\sqrt{3}}{2} r_{ki}^2 \left\{ \sigma_t(r_{ki})' - \sigma_r(r_{ki})' \right\} - \frac{\sqrt{3}}{2} r_{k0}^2 \left\{ \sigma_t(r_{k0})' - \sigma_r(r_{k0})' \right\} \dots\dots\dots (6)$$

3.2 外周のみが塑性変形をおこす場合 弾性域に生ずる応力の式は

$$\sigma_t = C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \alpha E \left\{ \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr - \theta \right\} + \sigma_t' \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_r = C_1 + \frac{C_2}{r^2} - \alpha E \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr + \sigma_r' \dots\dots\dots (8)$$

C_1 , C_2 を求める式は

$$C_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_{k0}^2}{r_{k0}^2 - r_i^2} \sigma_0(r_{k0}) \sin\left(\varphi(r_{k0}) - \frac{\pi}{6}\right) + \frac{\alpha E}{r_{k0}^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_{k0}} \theta r dr \\ - \frac{r_{k0}^2}{r_{k0}^2 - r_i^2} \sigma_r(r_{k0})' \dots\dots\dots (9)$$

$$C_2 = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_{k0}^2 r_i^2}{r_{k0}^2 - r_i^2} \sigma_0(r_{k0}) \sin\left(\varphi(r_{k0}) - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{r_i^2 \alpha E}{r_{k0}^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_{k0}} \theta r dr \\ + \frac{r_{k0}^2 r_i^2}{r_{k0}^2 - r_i^2} \sigma_r(r_{k0})' \dots\dots\dots (10)$$

弾塑性境界 r_{k0} を求める式は

$$\frac{2}{\sqrt{3}} r_{k0}^2 \sigma_0(r_{k0}) \cos \varphi(r_{k0}) - 2 r_i^2 \sigma_0(r_{k0}) \sin \varphi(r_{k0}) \\ = 2 \alpha E \int_{r_i}^{r_{k0}} \theta r dr - (r_{k0}^2 - r_i^2) \alpha E \theta(r_{k0}) - \sigma_r(r_{k0})' (r_{k0}^2 + r_i^2) + \sigma_t(r_{k0})' (r_{k0}^2 - r_i^2) \dots\dots\dots (11)$$

3.3 内周のみが塑性変形をおこす場合 弾性域の応力の式は

$$\sigma_t = C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \alpha E \left\{ \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr - \theta \right\} + \sigma_t' \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma_r = C_1 + \frac{C_2}{r^2} - \alpha E \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr + \sigma_r' \dots\dots\dots (13)$$

C_1, C_2 を求める式は

$$C_1 = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_{ki}^2}{r_0^2 - r_{ki}^2} \sigma_0(r_{ki}) \sin\left(\varphi(r_{ki}) - \frac{\pi}{6}\right) + \frac{\alpha E}{r_0^2 - r_{ki}^2} \int_{r_{ki}}^{r_0} \theta r dr \\ + \frac{r_{ki}^2}{r_0^2 - r_{ki}^2} \sigma_r(r_{ki})' \dots\dots\dots (14)$$

$$C_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_0^2 r_{ki}^2}{r_0^2 - r_{ki}^2} \sigma_0(r_{ki}) \sin\left(\varphi(r_{ki}) - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{r_{ki}^2}{r_0^2 - r_{ki}^2} \alpha E \int_{r_{ki}}^{r_0} \theta r dr \\ + \alpha E \int_{r_i}^{r_{ki}} \theta r dr - \frac{r_0^2 r_{ki}^2}{r_0^2 - r_{ki}^2} \sigma_r(r_{ki})' \dots\dots\dots (15)$$

弾塑性境界 r_{ki} を求める式は

$$\frac{2}{\sqrt{3}} r_{ki}^2 \sigma_0(r_{ki}) \cos \varphi(r_{ki}) - 2 r_0^2 \sigma_0(r_{ki}) \sin \varphi(r_{ki}) \\ = -2 \alpha E \int_{r_{ki}}^{r_0} \theta r dr + (r_0^2 - r_{ki}^2) \alpha E \theta(r_{ki}) - \sigma_r(r_{ki})' (r_0^2 + r_{ki}^2) - \sigma_t(r_{ki})' (r_0^2 - r_{ki}^2) \dots\dots\dots (16)$$

なお、塑性域の式は前報告の加熱の場合と同じでよい。

以上の諸式を用いて、焼入条件の数例について応力と内径ひずみの発生機構を考察する。

【例-1】 材料強さが異なる場合の内径ひずみの差について

まず、実験結果をあげておく。

C 0.50% 炭素鋼を用いて、第3図に示した試験片を作製した。これに前熱処理として、次の三とおりの処理をほどこした。仕上加工は焼ならし後に行なった。

1. 焼ならし, $H_{RC} 15$
2. 焼ならし, 塩浴加熱水中焼入れ, 500°C 焼もど

第3図 試 験 片

第1表 円板外周の高周波焼入れによる内径変化測定結果

試 片 No.	前熱処理	高 周 波 加 熱 条 件				冷 却	内 径 変 化			硬化深さ mm
		E_p kV	I_p A	I_g A	t s		1	2	3	
1	焼 なら し	8.0	2.9	0.7	9.2	外周より 噴出水冷	-0.010	-0.017	-0.016	1.6
2		"	"	"	9.0		-0.011	-0.012	-0.014	1.6
3	焼 入 れ 500°C 焼もど	"	"	"	9.1	"	-0.020	-0.017	-0.017	1.8
4		"	"	"	"		-0.019	-0.017	-0.016	1.7
5	焼 入 れ 300°C 焼もど	"	"	"	"	"	-0.039	-0.030	-0.034	1.6
6		"	"	"	"		-0.030	-0.035	-0.034	1.7

上表中, t は加熱時間

内径変化は3方向につき日本光学製万能測定器を用いて測った。これを1, 2, 3で示した。

し, $H_{RC} 24$

3. 焼ならし, 塩浴加熱水中焼入れ, 300°C 焼もどし, $H_{RC} 30$

これらの円板外周に高周波焼入れをほどこしたものの内径変化測定結果を、焼入条件とともに第1表に示す。これをみると、調質を行ない、かたさ、したがって強さを増したものが、焼ならしのものよりも内径減少量が多くなっている。

次に、この理由について述べる。

第4報⁽¹⁾において、焼なまし材および焼入焼もどし材の、外径60 mm、内径25 mmなる円板を、 $E_p=8.0$ kV, $I_p=2.9$ A, $I_g=0.7$ A, 周波数450 kc, 加熱時間9.0秒なる加熱条件で加熱した場合に、円板に生ずる応力分布を計算した結果を示した。これを、さらに外周より水冷した場合について計算する。

図式解法で求めた温度分布を第4図の3段階に分け各段階の間での履歴を省略して応力分布を計算する。素材は第4報に示した焼なまし材と焼入焼もどし材とする。

加熱時に A_{c1} 点をこえて加熱された部分は、その後冷却された場合、元と異なった強度をもつこととな

るはずであるが、ここでは、焼なまし材は元の強度にもどるものとし、焼入焼もどし材はオーステナイト状態まで加熱された後には、焼入焼もどしの効果を消失して焼なまし材と同じ性質のものとなると仮定する。焼なまし材と焼入焼もどし材とで内径変化に差を生ずる理由の説明を行なう目的には、上の仮定はさしつかえない。焼入焼もどし材の焼もどし温度以上まで加熱された部分は、オーステナイト域まで達しなくとも組織に変化をおこしているはずであるが、きわめて短時間の加熱であるからこの組織変化は無視してよい。

冷却時の熱応力分布を、前熱処理が焼なましのものと、焼入焼もどしのものについて計算*した結果を第 5, 6, 7 図に示す。第 5 図の焼入焼もどし材では塑性域の曲線に段を生じている。段の右側は A_{c3} 点以上に加熱された部、左側は A_{c1} 点まで達しない部、段の途中は A_{c1} と A_{c3} の間の温度まで加熱された部であり、降伏点が異なるために曲線に段を生ずるのである。第 7 図が常温における応力分布である。な

お、加熱時の応力分布状態から、冷却第 1 段の応力分布状態に移る際の変化は除荷過程であり、単に σ_t' , σ_r' を加えた (7), (8) 両式から出発して導いた (11) 式によって r_{k0} を決定することは正しくない。しかしながら、第 3 図でみられるように、弾塑性境界付近での温度が、加熱と冷却第 1 段とで大差がないので、近似的に上の式を用いた。

図のように、常温における内周部の残留応力計算結果はいずれも圧縮となり、第 1 報の内径変化実測結果の傾向と一致する。

次に、内径ひずみを求める。

まず、焼なまし材の内周部が塑性変形をおこす冷却第 2 段について、焼なまし材と焼入焼もどし材との内径ひずみを計算する。

塑性域における応力-ひずみ関係式を次のようにおく。

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr} = \phi \left(\sigma_r - \frac{\sigma_t}{2} \right) + \alpha \theta \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\epsilon_t = \frac{u}{r} = \phi \left(\sigma_t - \frac{\sigma_r}{2} \right) + \alpha \theta \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 ϵ_r , ϵ_t : それぞれ半径方向、切線方向の小さなひずみ、 ϕ : 塑性関数、全ひずみをとることとし、塑性変形、弾性変形ともに体積一定のもとでおこるものと仮定して一括する。 α : 線熱膨張係数、 θ : 温度変化量

ひずみの適合条件

$$r \frac{d\epsilon_t}{dr} = \epsilon_r - \epsilon_t \quad \dots\dots\dots (19)$$

上の 3 式より

$$r \frac{d}{dr} \left\{ \phi \left(\sigma_t - \frac{\sigma_r}{2} \right) + \alpha \theta \right\} = \frac{3}{2} \phi (\sigma_r - \sigma_t)$$

冷却第 2 段では内周付近の温度がほぼ一定であるので

$$\frac{d\theta}{dr} = 0$$

したがって

$$\begin{aligned} r \frac{d}{dr} \phi \left(\sigma_t - \frac{\sigma_r}{2} \right) \\ = \frac{3}{2} \phi (\sigma_r - \sigma_t) \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

塑性域の応力の式⁽¹⁾

$$\sigma_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right)$$

第 4 図 計算に用いた温度分布

焼なまし材 焼入焼もどし材

第 5 図 冷却第 1 段における応力分布

* 実際の計算手順については、前報⁽¹⁾で説明した。

$$\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)$$

および力の平衡の式⁽¹⁾ (ただし温度一定であるから, σ_0 は一定)

$$r \frac{d}{dr} \left\{ \sigma_0 \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) \right\} = \sigma_0 \cos \varphi$$

を(20)式に入れて整理すると次式をえる。

$$\frac{d\psi}{d\varphi} = -\sqrt{3} \psi \dots\dots\dots(21)$$

$$\text{ここに } \psi = \phi \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)$$

よって

$$\begin{aligned} \psi &= C_0 e^{-\sqrt{3}\varphi} \\ \phi &= \frac{C_0 e^{-\sqrt{3}\varphi}}{\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)} \dots\dots\dots(22) \end{aligned}$$

$$\varepsilon_r = -C_0 \sigma_0 \frac{e^{-\sqrt{3}\varphi} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)}{\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)} + \alpha \theta \dots\dots(23)$$

$$\varepsilon_t = C_0 \sigma_0 e^{-\sqrt{3}\varphi} + \alpha \theta \dots\dots\dots(24)$$

C_0 は弾塑性境界で弾性ひずみと塑性ひずみとが等しいという条件から決定される。

上式を用いて、焼なまし材の冷却第2段における内周部のひずみ ε_t を求めると

$$\varepsilon_t = -1.26 \times 10^{-3} + \alpha \theta \quad (\theta = 422^\circ\text{C})$$

内半径変化は

$$\Delta r_i = -0.016 \text{ mm} + 0.075 \text{ mm}$$

(第2項は熱膨張)

焼入焼もどし材の内周部は弾性的であって、冷却第2段における内周部のひずみと内半径変化は次のようになる。

$$\varepsilon_t = -1.67 \times 10^{-3} + \alpha \theta$$

$$\Delta r_i = -0.021 \text{ mm} + 0.075 \text{ mm}$$

(第2項は熱膨張)

冷却第3段では全域が弾性的であって、結局常温まで冷却したときのひずみを求めると次のようになる。

$$\text{焼なまし材: } \varepsilon_t = -0.52 \times 10^{-3}$$

$$\Delta r_i = -0.007 \text{ mm}$$

$$\text{焼入焼もどし材: } \varepsilon_t = -0.93 \times 10^{-3}$$

$$\Delta r_i = -0.012 \text{ mm}$$

これによって、内径減少量は、強度の低い焼なまし材よりも、強度の高い焼入焼もどし材のほうが多くなることがわかる。

[例-2] 予熱後高周波焼入れを行なったものは、一発高周波焼入れのものよりも内径減少量が少なくなることについて

この結果は、第1, 2報⁽²⁾の実験によって求められたものである。この理由を考察する。

第4報において、外径60 mm, 内径25 mmの円板を500°Cに予熱後、外周を高周波加熱した場合の応力分布計算結果を示した。これをさらに外周より水冷するとき生ずる応力を、冷却段階を第8図の3段階に分けて計算する。

応力分布の計算結果は第9図に示したとおりである。これから、常温における内周部の応力はきわめて小さくなることがわかる。この部の熱ひずみ ε_t を計算すると次のとおりである。

$$\varepsilon_t = 0.045 \times 10^{-3}$$

焼なまし材 焼入焼もどし材
第6図 冷却第2段における応力分布

焼なまし材 焼入焼もどし材
第7図 冷却第3段における応力分布 (常温)

$$\Delta r_i = 0.0005 \text{ mm}$$

この場合は内径がごくわずかな増加となった。

上の結果は一発加熱焼入れの場合との差を傾向的によく示している。

【例-3】 第 4 報に内・外径の異なる円板を種々の電力密度をもって高周波加熱したときの応力分布計算結果をあげたが、これらを外周より急冷後の熱応力分布を求めたものを第 10 図に示す。図には常温まで冷却後の熱応力分布を、加熱時の温度分布、熱応力分布とあわせて示した。

これらをみると、内周部の σ_t はいずれも圧縮であり、内径が減少することがわかる。

(a) と (b) を比較する。(a) は (b) より入力大で加熱時間短く、外周側の温度こう配が急しゅんである。焼入れ後、内周部に残留する圧縮熱応力 σ_t の大きさを両者について比較すると、(a) よりも (b) が大となっている。ただし、予熱後焼入れの場合の結果から推定すると、(b) よりもさらに入力小で加熱時間長く、加熱時の温度こう配がゆるやかとなると、内周部の圧縮熱応力 σ_t の大きさは逆に小となってくると考えられる。すなわち、加熱時の温度こう配がある状態の場合に、焼入れ後の内周部の σ_t の値が最大、したがって内径減少量最大となり、加熱時の温度こう配がこの状態より急でもゆるやかでも、焼入れ後の内周部の σ_t の値が小、したがって内径減少量が小となるものと考えられる。

(c) と (d) を比較する。両者の加熱条件は同様に温度こう配急しゅんであり、内径のみが異なる。この場合の焼入れ後の内周部の σ_t の値は同程度となっている。

(e) と (f) を比較する。両者の加熱条件は同様に温度こう配ゆるやかであり、内径のみが異なる。この場合の焼入れ後の内周部の σ_t の値は内径の大きい (f) のほうがかなり小となっている。

かように、これらの結果から、加熱時の温度分布が焼入れ後の熱応力したがって内径ひずみに著しく影響することがわかる。

後に、実験によって、(a)~(f) の傾向を確かめ、また、熱ひずみのみならず外周部のマルテンサイト化の影響をも含めて、硬化深さ、加熱温度分布、内径ひずみの間の関連について明らかにすることができた⁽⁸⁾。これらについては後の報告で述べる。

歯車の大きさが与えられ、これに対して全歯同時高周波加熱焼入れをほどこす場合、内径ひずみを小さくするには、次の方法をとるべきことが考えられる。

(1) できる限り大なる入力をえらび加熱時間を短

第 8 図 計算に用いた温度分布

第 9 図 冷却時の応力分布
(500°C 予熱後焼入れ)

縮し、急しゅんな温度こう配をもつ状態から焼入れる。

(2) きわめて小なる入力をえらび加熱時間を長くし、平たんに近い温度こう配をもつ状態から焼入れる。

(3) 全体を適当な温度に一樣に予熱後短時間高周波加熱焼入れを行なう。

以上のうち、(2)によると歯車の歯部が全体焼入状態となり、(3)によれば浸炭焼入等におけると同様の輪郭焼入れを行なうことができる。

なお、外径等しく内径の異なる歯車においては、加熱温度こう配が急しゅんな場合には、内径ひずみが同程度(内径変化量は内径の大なるもののほうが大)となり、加熱温度こう配がゆるやかな場合には内径ひずみは内径大なるもののほうが小(内径変化量は必ずしも小とはならない)となることがわかる。

以上は熱応力と熱ひずみについて述べたものであるが、実際の焼入れにおいては変態による応力およびひずみをも生ずる。A₁, A_s変態による体積変化は小さいからこれを無視し、A_r'変態のみを考えることとす

る。中炭素鋼が焼入れにより過冷オーステナイトからマルテンサイトに変態するときには長さで1%程度膨張する⁽⁴⁾。このために外周部に焼がはいれば、内周側には円周方向および半径方向に引張力を生じ、内径が増大する。

いま、外径60mm、内径25mmの円板の外周が、2mmの深さまで完全にマルテンサイト化したものとし、これのみによって生ずる応力の大きさを、円板を弾性体として計算すると第11図のようになる*。内周部の σ_t は、当然焼入深さの深いほど大となる。この場合の内径ひずみ ϵ_r および内半径増加 Δr_i を計算すると

$$\epsilon_r = 1.55 \times 10^{-3}$$

$$\Delta r_i = 0.020 \text{ mm}$$

円板外周に高周波焼入れをほどこすと、硬化層の深い場合には、A_r'変態による内径増加が熱ひずみによる内径減少を打消して内径が大となることがあることは、すでに実験によって知られている^{(5)**}。

歯車においても、歯底部の焼入深さを深くすれば、円板の場合と同様に焼入れによって内径の増加することが起りうる。ただし、一発加熱で歯車全周を同時に焼入れる場合は、歯底部の硬化層を深くすると歯部が全体焼入状態となるのを避けられない。適切な急速加熱焼入れによると、すぐれた機械的性質をもった焼入組織がえられる⁽⁶⁾、焼入深さがある程度深くても全体としてのひずみは炉中加熱焼入れによるよりも少なくできることが期待されるので、これらの特長を生かす意味で歯部を全体焼入れとすることもあがあるが、一般には、心部のじん性をきかせる(心部の強度やじん性の

第10図 加熱時および冷却後の応力分布(その1)

* 温度変化がないものとし、外周のマルテンサイト化のみによる体積膨張によって生ずる応力を、円板を弾性体として計算したものである。これは円板の熱応力の式

$$\sigma_t = C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \alpha E \left\{ \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr - \theta \right\},$$

$$\sigma_r = C_1 + \frac{C_2}{r^2} - \alpha E \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r \theta r dr$$

において、熱膨張 $\alpha\theta$ のかわりにマルテンサイト化による膨張をおきかえて求めることができる。ただし、マルテンサイト化はM_s点からの温度降下につれて進行するものであり、その過程においては、未変態過冷オーステナイトおよび焼入硬化されない内層部の塑性変形が起ることが期待され、弾性体として計算することは正しくなく、上の結果は、単に傾向を示すにとどまるものである。実際にはさらに温度変化も加わるわけで、非常に複雑である。これについての定量的議論は実験に基いて行なわれなければならないものと思う。本報告は、熱応力と熱ひずみをおもな対象として論じており、マルテンサイト化の影響は後に実験を行なった上で検討することとし、ここでは参考的に傾向を示す程度とした。

** ただし、この種の実験で、硬化深さを変えるために加熱時間を変化させると、温度分布も変るが、このことを考慮に入れて硬化深さと内径ひずみとの関係を考察したものはないようである。これに関しては後報⁽⁸⁾で述べる。

第 10 図 加熱時および冷却後の応力分布 (その 2)

歯の動的強度に対する影響についてはなお多くの問題を残している現状ではあるが) ためと、ひずみになるべく少なくするため、および過熱による焼割れ発生を避けるために、歯部に硬化されない心部を残すように焼入れを行なうのが普通である。本研究の実験⁽²⁾⁽³⁾はすべてかような焼入状態のものについて行なったもので、一発加熱焼入れのものはいずれも内径が減少している。歯車の一発全歯同時高周波焼入れで普通多く行なわれているような歯底硬化層の比較的浅い焼入れ法においては、内径変化に対して熱ひずみが支配的であり、内径は減少するとみてよい。しかし、その内径減少量は上述のように加熱温度分布によって変り、温度こう配の急しゅんな場合の内径減少量が少ない。また、もし予熱後高周波焼入れを採用するならば、内径減少を非常に小さくすることができ、内径を増加させるこ

第 11 図 マルテンサイト化によって生ずる応力

とも可能である。なおこの場合は硬化層が歯形にそう輪郭焼入れをえられる利点もある。

4. む す び

歯車のひずみのうち、重要なものの一つは、軸にかん合すべき内周部のひずみである。内径ひずみの発生機構を考察するには歯車のかわりに円板を考えてさしつかえないので、円板について高周波焼入れによって生ずる熱応力および内径ひずみを求めた。また、外周がマルテンサイト化するための体積変化によって生ずる応力およびひずみについても簡単な考察を行なった。

以上の考察によって高周波焼入れによる内径ひずみ発生機構が明らかとなり、第 1, 2 報の測定結果をよく説明することができ、またこれに基いて内径ひずみの少ない焼入れ法を選定することが可能となった。

本研究を行なうにあたっては、成瀬教授のご教示を賜わり、棚沢教授、門間教授、竹山教授、酒井教授のご批判、ご指導をいただいた。また日本電子会社、日本電子工業会社、菊地 寛氏の多大のご協力を受けた。記して深く感謝する次第である。

文 献

- (1) 武田, 機械学会論文集, 29-200 (昭 38-4), 729.
- (2) 武田, 機械学会論文集, 27-182 (昭 36-10), 1585, 1595.
- (3) 武田・ほか, 第 40 期通常総会講演会前刷集, No. 88 (昭 38-4), 125.
- (4) 川村, 日本金属学会誌, 4-2 (昭 15-2), 97.
- (5) たとえば 石田・ほか, 東京都立工業奨励館報告, 第 2 号 (昭 28).
- (6) 中村・ほか, 機械学会論文集, 24-143 (昭 33-7), 475.

アイソトープ工業利用の実態 (その 3)

使用される対象は鉄鋼素材、鋼管、バルブ、ポンプその他複雑な形状の鉄鋼製品、溶接箇所などである。

ラジオグラフィーの代替法としては超音波や X 線が広く使われているが、欠陥の種類が判定し難いとか、厚物や複雑な形状のものの検査が困難であるなどの欠点がある。これに対して RI を利用するものでは小形で、また同時に多数の試料の検査が可能であるなどの長所があるため、しだいに普及しつつある。

トレーサとしては流体、固体、またはイオンの移動の追跡、反応や生体の代謝機能、摩耗および侵食、分析などである。

3. RI の研究開発=97 社が RI 関係の研究に投資している。このうち原子力専業が 14 億 7 400 万円 (38%) で最も多く、以下電気機械 9 億 2 800 万円 (24%), 繊維業 3 億 8 800 万円 (10%), 化学工業 3 億 3 900 万円 (9%), 造船造機業 1 億 9 900 万円 (5%) などが多い。

投資部の大きいものは主として Co 60 照射施設やトレーサ実験室に要したものである。

RI の特許は 44 社から合計 576 件の出願があり、そのうち 187 件が公告されている。

4. RI 関係従業者=約 3 460 名と推定される。これは 1 社当り 173 名であり、1 事業所当り 10.8 名である。また、第 1 種放射線取扱主任有資格者は 453 名、第 2 種は 126 名、合計 579 名である。

5. 経済効果=▽ゲージング: 厚み計の採用は原料の節約、品質向上、労賃節約などの形で認められており、中には数千万円の純利益があがっているとしているものがある。

▽ラジオグラフィー: 1 000 万円~2 000 万円の利益を計上しているものが 4 件あった。

▽トレーサ: 経済的効果の算出はきわめてむずかしいが、工程の改善や研究成果が評価されている。

(服部敏夫)