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3報, 歯部のひずみ発生機構)

武 田 信 男**

Distortions of Comparatively Small-Sized Gears
Caused by Induction Hardening

(3rd Report, On the Mechanism of Distortion of Teeth)

by Nobuo TAKEDA

The mechanism of distortion of gear teeth due to induction hardening was studied. Conspicuous plastic deformations take places on the teeth during this treatment and it is very difficult to make these deformations clear analytically.

In the 2nd report it was stated for the induction-hardened small gears that the changes of the pressure-angles on both sides of teeth were different from each other and that the undulations of teeth traces occurred.

In the present report, the causes of these distortions were considered experimentally and an example of improved induction hardening coil was shown from this consideration. Further, the mechanisms of the distortions in width and thickness of teeth were considered and some explanations for the results of measurements of distortions, stated in previous reports, were given.

1. ま え が き

小形歯車の高周波焼入れによって生ずるひずみの測定結果を第1, 2報⁽¹⁾に述べた。第3報においては, これらのうち, 歯部のひずみの発生機構について述べる。高周波焼入れの際に歯部に生ずる変形は, きわめて複雑でしかも塑性的であるので, これに対して解析を行なうことは困難であり, 実験的に考察するか, 定性的に説明を試みるより他に方法がない。

2. 歯形変化および圧力角変化の
左右歯面についての差異

高周波焼入れによる歯形誤差曲線の変化および圧力角の変化は, 前報に述べたとおりであり, 円形コイルを用い, 歯車を回転しつつ焼入れた場合, 回転方向に面する歯面における圧力角増加量が, その背面におけるものより大となった。これは焼入時の回転の影響と考えられるので, 前報の実験の場合と反対方向の回転を歯車に与えて焼入れを試みた。この結果は第1図に示したとおりであり, この場合も回転方向に面するR側歯面のほうが圧力角増加量大となった。したがって

焼入時の回転によって歯の倒れを生ずることは明らかである。第1図の焼入れの際の噴出冷却水の水速線図は第2図のとおりであり, 相対速度 w をもって水が歯にあたるため, 左右歯面で冷却に遅速を生ずる。図の場合, R側歯面が先にマルテンサイト化して膨張し, 歯が左に傾いた形となり, 引続きL側歯面がマルテンサイト化して膨張し, 歯が右方に傾きなおるが, このときには右歯面はすでに硬化しているので, 歯の傾斜は回復しきれず, 焼入後に歯が少しく左に傾いた形のまま止まるものと考えられる。したがって, 第2報に述べたように, 回転速度の大なるほど, 歯の倒れは著しくなる。

なお, 焼入後, 焼入層を調査した結果では, 左右歯面についての硬化深さならびにかたさの差(一発加熱焼入れの場合)は認められなかった。したがって, これらは歯の倒れに関係がない。

歯の倒れの原因としては, 熱ひずみをも考慮しなければならないが, 第1報に示した結果からわかるように, これによる歯の倒れは著しくない(純鉄歯車では歯先部につぶれを生じているが, これは歯の倒れとは別問題である)。

上のことから, 歯の倒れに対しては, マルテンサイト化による焼入ひずみが支配的であり, 硬化時期の左右歯面での差によって倒れを起すことが明らかである。

* 昭和32年10月13日 東京秋期講演大会において講演, 原稿受付 昭和36年5月23日。

** 正員, 東北大学工学部(仙台市桜小路)。

第 1 図 歯形誤差曲線

第 2 図 噴出水の速度線図

第 3 図 歯断面の温度上昇過程
焼入温度まで加熱される部分が時間経過とともに歯先および歯面から $a_1, a_2, a_3; b_1, b_2, b_3$ のように進行する。

第 4 図 歯すじのうねり (純鉄材)

3. 歯すじのうねり

歯すじの中央部が焼入れによっておう(凹)入する傾向が表われることを第2報に述べた。この原因を考察する。

加熱の際の歯断面の温度上昇過程は、第3図のように、最初歯先中央部の温度が上昇し、時間経過とともに歯すじにそっての加熱深さが一様に近くなってくる。このことは、加熱時間を種々に変えて焼入れを行ない、いちいち歯の断面をとってこれを腐食し、硬化層形状を検することによって知られる。かような温度上昇過程が歯すじのうねりを生ずる可能性が考えられるが、第1報で述べたように、高周波加熱後空冷した歯車には、歯すじのうねりが表われない。したがって、うねりは加熱時には生ぜず、水冷時に生ずるものであることがわかる。

(1) 水冷によって生ずる熱ひずみ 第1報に測定結果の例をあげたが、さらに詳細な測定を試みた。純鉄歯車の歯すじのうねりを、左右歯面について測定した結果は第4図のとおりである。矢印は噴出冷却水のあたる位置を示したものである。噴出水孔は第1報に示したように、コイル内面に3個と2個とを交互に設けたので、これらを実線と点線で示した。これを見ると、歯面-Lがとつ(凸)出し、歯面-Rがおう入する顕著な傾向が表われている。この原因は、冷却水の歯

にあたる相対速度の方向が、歯車の中心に向かわないためであると考えられる。第5図において、水が歯に対して左上方から相対速度 w で噴出するものとする。このとき、まずL側が急冷されて収縮しようとするが、R側はこれが遅れるから、相互に力を及ぼし合い、L側は引張られて伸び、R側は圧縮されて縮む。急冷初期のこの変形は、温度の高い状態において起るから塑性的である。この時期にはL側がわずかにおうとなるものと考えられる。しかし、その後完全冷却までの温度降下量は、R側がL側より大となるため、R側のほうが収縮量大となり、結局常温まで冷却後には、図に鎖線で示したようにL側がとつとなり、第4図のうねりを生ずることとなる。丸棒を全体加熱し、この円柱面の片側から注水して冷却する場合の熱ひずみも上と同様となることが知られている⁽²⁾。

(2) 水冷によって生ずる焼入ひずみ 歯すじの

第5図 うねりの発生

第6図 歯すじのうねり (S45C材)

第7図 歯すじのうねり (S45C材)

第8図 従来行なわれている焼入れ

第9図 焼入れによるうねり発生の説明

うねりを左, 右歯面について測定した結果を第6図に示す。これをみると, 両歯面ともに中央部がおう入し, R側はことにおう入量が大である。第7図は水孔の数の少ないコイルを用いて焼入れた結果であり, この場合は, 純鉄歯車におけると同様の傾向が認められるが, さらに水のあたる部分がおう入する傾向が加わっていることがわかる。

従来, 普通に使用されている焼入コイルは, 第8図に示すものであって, 周波数 450 kc 程度の場合は, 歯すじにそっての焼入深さを一様にするために, $a \cong b$ とする。したがって, 冷却水は図に示したように, 歯幅中央のある範囲に噴出されて後, ただちにコイルと歯車との間に充満し, 全体を冷却して焼入れを終る。したがって, 歯幅中央部よりも両端部が焼入れに一瞬遅

第10図 焼入れによる円板の外周および端面のうねり

れを生ずることとなる。ただし, これは焼入かたさや硬化深さに影響を及ぼすほどの遅れとはならない。しかし, 変形に対しては影響するものと考えられる。第9図において, l の範囲の冷却が先行したとすると, この部が先にマルテンサイト化して膨張し, まだ硬化しない l' 部を歯の端面に向かって圧縮する。この結果, l' 部は歯すじに直角方向にはり出し, 引続きこの部がマルテンサイト化する。したがって, 初めに歯すじに直角方向にはり出した影響は, 焼入後に歯すじのうねりとして表われることとなる。

歯先および歯底は とつ となる。円板の外周を焼入れた場合もこれと同様になる。第10図は円板について測定した結果を示す。図示のうねりを生ずる原因は, 外周がマルテンサイト化して膨張する際, 焼入境界の mn 面では軸方向への膨張を拘束されているため, 鎖線で示した変形を起す結果である。

短時間加熱焼入れの場合, 誘導電流分布を歯すじにそって一様にすることは実際上困難であり (ことに周波数の高い場合), 歯断面の硬化深さに波打ちを生ず

ることは、第1報に示したとおりである。これも歯すじのうねりに影響をもつはずである。マルテンサイトの比体積の大きいことのみから考えれば、硬化層の深い歯すじ中央付近と端部付近とでとっ出しなければならない(硬化層形状については第1報参照)。しかるに歯すじのうねり測定結果は中央がおうとなつてゐる。したがってこの場合、焼入深さの不均衡よりも前述の冷却時期不同のほうが、うねり発生に対して支配的であることがわかる。

4. 歯の幅、歯の厚さ、歯のたけ等の変化

(1) 熱ひずみ うず電流損とヒステリシス損とは、加熱初期には表面のうすい層に集中して生じ、表層の温度を急激に上昇する。うず電流損は $\sqrt{\rho\mu}$ に比例する。ここに、 ρ および μ はそれぞれ鋼の電気抵抗および透磁率である。 ρ は初めは温度上昇とともに著しく増加してゆくが、オーステナイト状態となると増加がゆるやかになる。 μ は温度上昇とともにしだいに急速に減少して、 A_2 変態点では $\mu \approx 1$ となる。その結果、うず電流損は初めは温度上昇とともにその値を増すが、やがて最大値に達し、 A_2 変態の温度で急に減少して、その後はあまり変化しなくなる。ヒステリシス損も温度上昇とともに減少し、 A_2 変態点に達すると零となる。かくして、温度上昇速度は加熱初期には表層部において大であるが、この部の温度が高くなると、温度上昇速度最大の位置が内方に移行してゆく⁽³⁾。したがって、温度変化に伴って生ずる熱応力と熱ひずみは、加熱の初期と後期とで、その大きさが変わるばかりでなく、符号も変化する。

加熱後、外周に冷水を噴出させて急冷するが、この際の熱応力、熱ひずみの変化もきわめて複雑である。

かような複雑な過程を追って、ひずみ発生機構を説明することは困難である。ただ、歯部ひずみ測定結果のうち、とくに顕著な変化である歯幅増加に関しては、次のように考えることができる。

外周より水冷すると、外層の冷却が内方部よりも先行する。冷却初期には、外層が歯の輪郭に沿って引張られて変形する。また外層の収縮の際、その内側の温度がなお高い場合は、この部が歯すじ方向に押出される。冷却の最も初期には、外層の輪郭にそつての変形が主として起り、外層の温度が下がり弾性限度が高まると、温度降下の遅れる内層部の押出しが起るものと考えられる。この内層部の押出しは、加熱層の深い場合に著しく、実験結果の示すとおりである。空冷歯車においては歯車の幅が各部ほぼ一様に増加しており、

水冷歯車におけるように歯部においてのみ著しい増加を示すことがないことから、上の推論の妥当であることがわかる。

なお、かような歯幅増加に伴って、歯のたけが減少している。

(2) 焼入ひずみ 焼入ひずみのうち、ことに注目すべきものは、歯の厚さが歯先で小となり、歯元で大となることである。かようなひずみを生ずる機構は、次のように考えられる。

歯が外周から冷却されて、第11図に示した表層Pがまずマルテンサイト化して伸びる。このとき、遅れて冷却するQ層はなお比較的高温にあって降伏しやすく、しかも冷却収縮過程にある。したがって、表層が伸びるには、図に破線で示したように変形しなければならない。引続き、内層部も Ac_1 ないし Ac_3 を越えて加熱された部(たとえば図のQ層)はマルテンサイト化して膨張し、図に鎖線で示した形に変形する。歯の厚さの歯先および歯元における変化機構は、定性的に上のよう説明することができる。

5. 歯部ひずみの少ない焼入法の選定

高周波焼入れによって生ずるピッチ誤差の変化は第2報⁽¹⁾に示したようにきわめて小さい。また、歯幅の変化、歯のたけの変化、歯端面のうねりは、歯車の性能に対して重要な影響をもたない場合が多い。歯の厚さの変化も小さい。

結局問題とすべきものは、歯すじに生ずるうねり、

第11図 歯の厚さの変化

第12図 改良したコイル

第 13 図 歯形誤差曲線 (S45C 材)

第 14 図 歯すじのうねり (S45C 材)

歯形曲線および圧力角の変化である。そこで、ここでは、これらに関して述べる。なお、外平歯車の外周を1個の焼入コイル中にいだし、全歯同時焼入れを行なう場合に限定することとする。

焼入れによって歯が傾く原因はすでに述べたとおりであり、これを防ぐには、両歯面の冷却速度が等しくなるように焼入冷却法を選ばよいことが推定できる。歯すじがうねりを生ずる機構も上に述べた。これを防ぐには、歯面の冷却速度が歯すじにそって一様であり、かつ両歯面が等しく冷却されるように焼入冷却法を選ばよい。そこで焼入コイルを改良し、噴出冷却水の歯に対する相対速度が歯車の中心に向かい、かつ、冷却水が歯すじ全体に同時にあたるように、第12図のものを作製した。

これを用いて焼入れた歯車の歯形誤差曲線測定結果を第13図に例示した。これを見ると、左右歯面について傾きの変化がほぼ等しくなっている。第14図は歯すじのうねり測定結果であり、うねりを生じていない。第15図は純鉄歯車について歯すじを測定したもので、熱ひずみとしてのうねりも生じていないことがわかる。

6. む す び

焼入時の水冷の部分的遅速が、歯の倒れと歯すじのうねりとを生ずるものであることを明らかにした。また、歯の幅および厚さの変化機構を説明した。さらに、歯の倒れと歯すじのうねりを生じない焼入法選定について述べ、これによって焼入コイルを改良し、よい結果をえた実例を示した。

この報告は、歯部のひずみのみに関して述べたのであり、歯車母体のひずみ発生機構については、後報で取扱う。

本研究を行なうにあたり、御指導を賜った成瀬政男教授、御協力をいただいた日本電子光学研究所、日本電子工業会社、御助力下された菊地 寛氏に深く感謝する次第である。

文 献

- (1) 武田, 機械学会論文集, 27-182 (昭36-10), 1585, 1595.
- (2) Hattori, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 18 (1929), 665.
- (3) G. Babat & M. Losinsky, *J. Inst. Elect. Engr.*, 86 (1940), 161.