

熱処理シミュレーションによる 鋼軸焼曲りメカニズムの解明

有本 享三・奈良崎 道治

Explanation of Quench Distortion Mechanism on Steel Shaft by the Heat Treating Simulation

[概要]

キー溝付き鋼軸には、焼曲りが生じやすいことが知られている。すでに、焼曲り特性の把握のためにキー溝付き鋼軸試片が提案されており、その試片での焼曲り現象はシミュレーション手法によって予測されている。本報告では、シミュレーション結果として得られた試片断面ひずみ分布を分析することによって、焼曲り発生メカニズムの解明を試みた。また、冷却剤の特性が焼曲り挙動に及ぼす影響についても考察を加えた。

Key words: quench distortion, simulation, cooling characteristics

1. 緒言

熱処理変形の制御には、変形発生メカニズムに対する理解が不可欠である。現在までに残留応力の発生メカニズムについては多数の報告がなされているが⁽¹⁾、変形に関するものは、丸棒の水焼入れ⁽²⁾、リングの高周波焼入れ⁽³⁾、リングの浸炭焼入れ⁽⁴⁾、クランクシャフトの高周波焼入れ⁽⁵⁾などが散見されるのみである。

熱処理変形の一典型として鋼軸の焼曲りがあり、特にキー溝付きの軸においては、この現象が顕著となることが知られている。すでに、このような焼曲り特性の把握のためにキー溝付き鋼軸試片が提案されており、その焼曲り現象はシミュレーション手法を用いて予測されている⁽⁶⁾。

シミュレーションによりキー溝付き鋼軸試片の断面におけるひずみ分布が得られるが、本報ではこの分布の時間変化を分析することにより、焼曲り発生メカニズムの解明を行った。さらにこの結果をふまえ、冷却剤の違いが焼曲り挙動に及ぼす影響についても考察を加えた。

2. 熱処理変形について

固体の変形は、一般に、その内部での結晶のゆがみ、転位による滑りなどの微視的な要因によって発生する。熱処理では、さらに温度変化による原子間距離の変動、および相変態による結晶構造の変化をも考慮する必要がある。このような固体内部での微視的な変形を、連続体力学では、ひずみという巨視的な量によって取り扱う。ひずみは、微視的な変形の要因に対応させて、弾性ひずみ、熱ひずみ、塑性ひずみ、変態ひずみなどとして分類される。

固体の実際の変形に直接対応するのが、各種ひずみをすべて加算した全ひずみである。すなわち、固体内部における全ひずみを総合したものが、測定可能な表面のゆがみとして現れることになる。

熱処理中の時刻 t において固体の任意の点で発生する全ひずみを ${}^t\varepsilon_{ij}$ とすると、これは以下に示すように各種ひずみを加算することによって求められる⁽⁷⁾。

$${}^t\varepsilon_{ij} = {}^t\varepsilon_{ij}^E + {}^t\varepsilon_{ij}^{TH} + {}^t\varepsilon_{ij}^{TR} + {}^t\varepsilon_{ij}^P + {}^t\varepsilon_{ij}^{TP} \quad (1)$$

ここに、 ${}^t\varepsilon_{ij}^E$ 、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TH}$ 、 ${}^t\varepsilon_{ij}^{TR}$ 、 ${}^t\varepsilon_{ij}^P$ および ${}^t\varepsilon_{ij}^{TP}$ は、それぞれ熱処理中の時刻 t における弾性ひずみ、熱ひずみ、変態ひずみ、塑性ひずみ、および変態塑性ひずみである。

時刻 t から微小時間 dt が経過すると、冷却条件の変化に伴って、各種のひずみには増減が生じる。熱ひずみ、変態ひずみ、塑性ひずみ、および変態塑性ひずみについては、その時点でのひずみ速度を以下で述べるように導出することができる。全ひずみの増分については、固体全体での荷重と変位に関する非線形の平衡方程式を解くことによって求められる。なお、時刻 t における各種ひずみは、それぞれの刻々の増分を熱処理前の初期状態から時刻 t まで累積することによって得られる。

熱処理中の時刻 t における応力 ${}^t\sigma_{ij}$ は、その時点の弾性ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^E$ と次の線形式によって関係づけられる。

$${}^t\sigma_{ij} = {}^tC_{ijkl} {}^t\varepsilon_{kl}^E \quad (2)$$

ここに、 ${}^tC_{ijkl}$ は時刻 t における弾性係数テンソルである。固体における応力の存在は、以下に述べるように、変態、塑性および変態塑性の各ひずみ速度に対して影響を及ぼす。

熱処理中、固体には顕著な温度変化が生じる。温度の時間変化 \dot{T} と瞬間の線膨張係数 ${}^t\alpha_i$ より、熱ひずみ速度 ${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^{TH}$ は次式のように得られる。

$${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^{TH} = {}^t\alpha_i \dot{T} \delta_{ij} \quad (3)$$

熱処理中の相変態によって生じる膨張・収縮は、変態ひずみとして扱われる。時刻 t での変態ひずみ速度 ${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^{TR}$ は、以下のように求めることができる。

$${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^{TR} = \beta_{IJ} {}^t\dot{\xi}_{IJ} \delta_{ij} \quad (4)$$

ここに、 β_{IJ} は変態膨張係数で、その時点の温度で組織 I のすべてが J へ瞬時に変態すると仮定した場合の、単位長さ当たりの長さの変化量である。また、 ${}^t\dot{\xi}_{IJ}$ はその時点での変態(組織 I から J)の体積分率の時間変化量であり、これは応力に依存する量となる。

固体の応力がある限界以上になると、そこには塑性ひずみが発生する。塑性ひずみ速度 ${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^P$ は、次式に示すように偏差応力 ${}^t s_{ij}$ と関係づけることができる。

$${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^P = {}^t\Lambda {}^t s_{ij} \quad (5)$$

ここに、 ${}^t\Lambda$ は流れ則から求められる正の係数である。なお、式(5)は等方硬化則が適用される際にのみ成立する。

変態中に応力が存在すると、その応力の偏差応力成分の方向には、非圧縮で不可逆のひずみが生じることが知られている。この現象は塑性域に達しないような応力状態においても生じ、変態塑性と呼ばれている。また、結果として生じるひずみは変態塑性ひずみと呼ばれる。

組織 I から J への変態において，変態塑性ひずみ速度 ${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^{TP}$ を求めるのに，以下の関係式が提案されている⁽⁸⁾．

$${}^t\dot{\varepsilon}_{ij}^{TP} = \frac{3}{2} K_{IJ} h'({}^t\xi_{IJ}) {}^t\dot{\xi}_{IJ} {}^t s_{ij} \quad (6)$$

ここに， K_{IJ} ， ${}^t\xi_{IJ}$ および ${}^t s_{ij}$ は，それぞれ変態塑性係数，変態の体積分率および偏差応力，また， $h'({}^t\xi_{IJ})$ は，

$$h'({}^t\xi_{IJ}) = 2(1 - {}^t\xi_{IJ}) \quad (7)$$

である．

なお，複雑な形状の固体における応力，各種のひずみおよび変形の計算は，実際的には有限要素法を用いることによって可能となる⁽⁷⁾．

3. キー溝付き鋼軸試片の焼入れ実験とシミュレーション条件

3.1 実験条件

キー溝付き鋼軸試片の形状を Fig. 1 に示す．直径 10 mm，長さ 100 mm の軸には，その全長に渡って幅 4.0 mm，深さ 2.5 mm のキー溝が加工されている．軸試片の鋼種は S45C で，その化学成分は Table 1 に示す値であった．

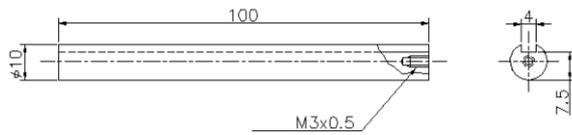


Fig. 1 Specimen shape and dimensions

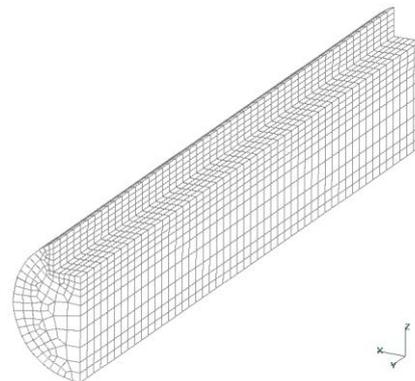


Fig. 2 Finite Element model of 1/4 specimen

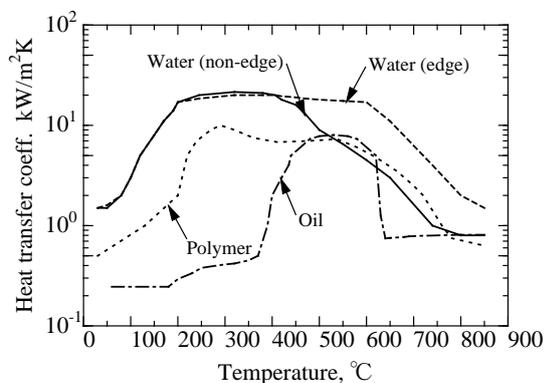


Fig. 3 Heat transfer coefficient of 3 types of quenchants

Table 1 - Chemical composition of S45C steel

Steel	C	Si	Mn	S	P
S45C	0.44	0.2	0.77	0.15	0.24
	Cu	Ni	Cr	Mo	
	0.01	0.03	0.15	--	

電気炉中において、860°Cで20分間保持された軸試片は、水道水、10%ポリマー焼入れ液あるいは熱処理油(JIS 1種2号油)の三種の静止冷却剤中で焼入れられた。

3.2 シミュレーション条件

試験片の1/4部分に対し、Fig. 2に示すように6面体要素を用いた有限要素モデルを作成した。要素数および節点数は、それぞれ5550および6834であった。モデルはオーステナイト域まで一様に昇温の後、Fig. 3に示す水、ポリマーおよび油に対する熱伝達率⁽⁶⁾⁽⁹⁾を試片表面にそれぞれ指定することによって室温まで冷却された。なお、シミュレーションにはDEFORM-HTTMを使用した⁽⁶⁾。

4. 焼曲りメカニズムに関する考察

4.1 焼曲りとその曲率

キー溝付き鋼軸試片には、焼入れ後、いずれの冷却剤を用いても顕著な曲りが発生した。Fig. 4に示すようにキー溝と反対側で鋼棒の変位測定を行なった結果、得られた変形曲線が円弧に極めてよく一致していることを確認した。これは、軸の曲り状態を単に曲率で代表することが可能であることを意味する。なお、曲率は、Fig. 4に示す曲り状態のように、キー溝側が膨張する場合を正と約束する。

Fig. 5には、シミュレーションの結果として得られた、焼入れ中の曲率の時間変化を示す。水焼入れに関しては、実験のビデオ画像より得られた曲率との比較が可能であり、両者は一部の区間を除きよく一致することが明らかである。

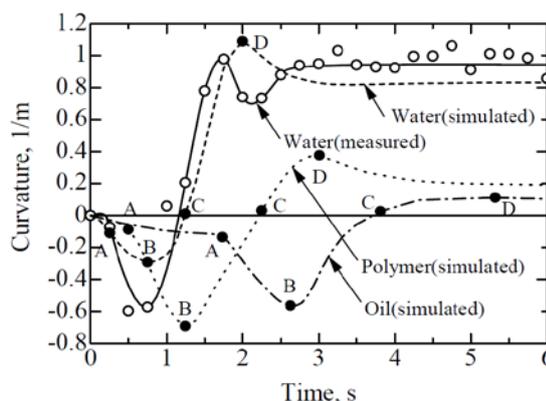
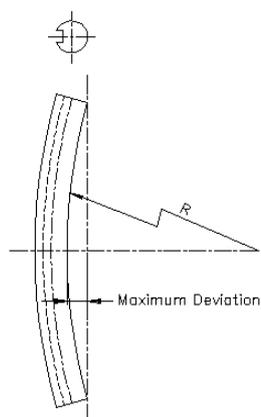


Fig. 4 Typical bending mode and definition of curvature Fig. 5 Curvature of bending during quenching by 3 types of quenchants

いずれの冷却剤においても曲率は、冷え始めが負で、極小点を通過の後に、曲率ゼロの中立点、さらには極大点を経て、冷却完了時にはいくぶん絶対値を減じるが正にとどまる。曲率の極小点、中立点、極大点などの現象の変化点は、水、ポリマー、油焼入れの順に早い時刻に出現する。また、最終冷却状態における曲率は、水焼入れでの値が最大で、ポリマー、油焼入れの順に小さくなる。

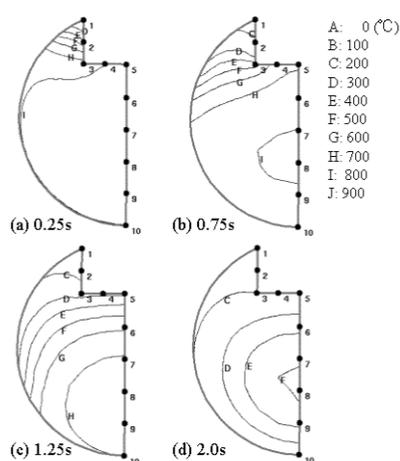


Fig. 6 Temperature distribution in cross section of specimen during water quenching

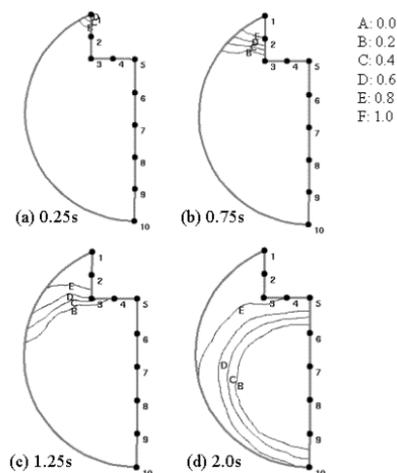


Fig. 7 Martensite volume fraction distribution in cross section of specimen during water quenching

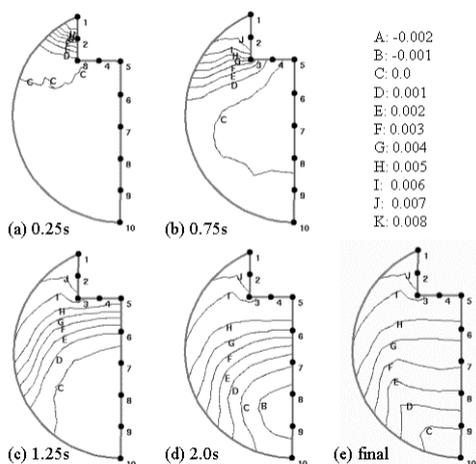


Fig. 8 Axial plastic strain distribution in cross section of specimen during water quenching

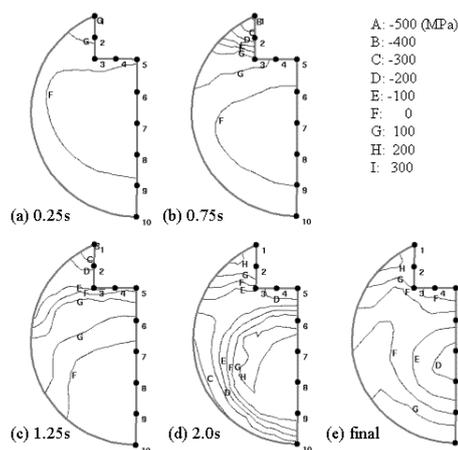


Fig. 9 Axial stress distribution in cross section of specimen during water quenching

以降の節では、このような曲率に関する挙動を、シミュレーションの結果を用いて解明していくことにする。なお、Fig. 5に示すように、冷却の初期段階、極小点、中立点および極大点には、便宜上それぞれ A から D までの記号を設けておくことにする。また、最終冷却状態を記号 E で表すことにする。

4.2 温度、組織および塑性ひずみの分布

曲率変化のメカニズムについて述べる前に、水焼入れ中の試片断面での温度、金属組織、塑性ひずみおよび応力分布の時間変化について確認しておくことにする。

シミュレーションによって得られた、温度およびマルテンサイト分布の時間変化を、それぞれ Fig. 6 および Fig. 7 に示す。温度の低下は、Fig. 6 より明らかなようにキー溝側の突起部から始まり、中心部に向かって進行する。基本的に、温度がある限界値まで低下するとマルテンサイト変態が生じることになるので、温度とマルテンサイト体積分率の等高線分布には共通性が見られる。

軸方向塑性ひずみ分布の時間変化を示したのが Fig. 8 である。冷却の初期 (0.25s) において、キー溝側の突起部に引張の塑性ひずみが発生している。その後、引張の塑性ひずみの領域がキー溝の反対側に向かって拡大し、最終冷却状態においてはキー溝側が引張、その反対側が若干の圧縮となる。

軸方向応力の断面分布の時間変化は、Fig. 9 に示すように塑性ひずみの分布に比べさらに複雑である。たとえば、キー溝側突起部において 0.25s では応力が引張であるが、0.75s, 1.25s では圧縮、そして 2.0s および最終冷却状態では引張にもどる。

なお、Fig. 6 から Fig. 9 には、1 から 10 までの番号を持つ点を設けた。これらの位置での計算値は、次節以降において断面分布をより定量的に分析する際に用いられる。

4.3 全ひずみ分布の時間変化

古典的なはり理論では、曲げ状態ではりの断面が平面を保持すると仮定されている⁽¹⁰⁾。断面の平面保持は、全ひずみの軸方向成分が線形に分布するということを意味している。そこで、キー溝付き試片の焼曲りについても、全ひずみ軸方向成分の分布状態について、確認しておくことにする。

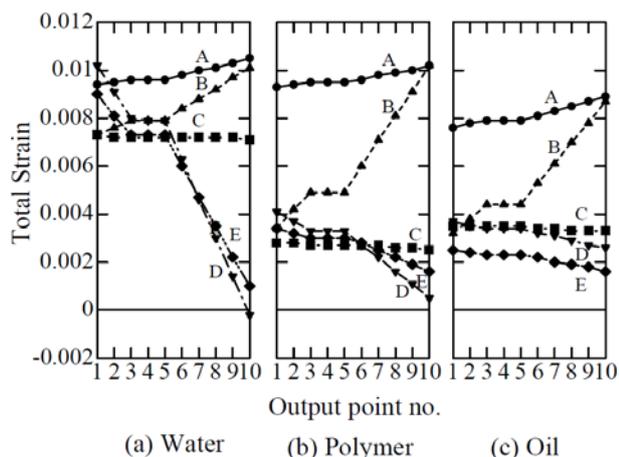


Fig. 10 Axial total strain distribution along output points during quenching by 3 types of quenchants

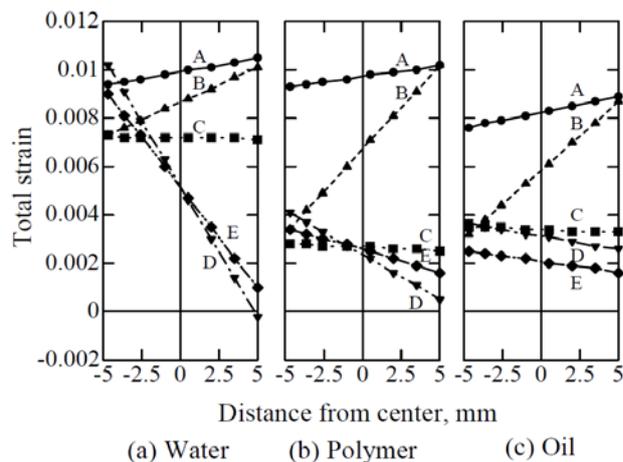


Fig. 11 Axial total strain distribution along radial axis during quenching by 3 types of quenchants

Fig. 6 から Fig. 9 中に示した 1 から 10 の各位置での全ひずみの軸方向成分を、水、ポリマーおよび油焼入れごとに Fig. 10 に示すようにプロットした。各ひずみ分布に設けた A から E までの記号は、それぞれ初期冷却段階、極小点、中立点、極大点および最終冷却状態に対応している。なお、Fig. 10 中に示した一定値 0.0104 の破線は、冷却開始直前の 860°C における全ひずみの分布を示している。この全ひずみは、室温から 860°C までの間で生じた熱ひずみとオーステナイト変態による収縮ひずみが累積された結果として得られる。

Fig. 11 は、Fig. 10 の横軸を軸中心から各点までの半径距離として描き直したものである。これによって、各冷却段階での全ひずみ分布が、すべて直線に変換されることが明らかとなった。したがって、メカニズムが複雑な焼曲り現象においても、シミュレーションの結果としてではあるが、古典的なはり理論の場合と同様に全ひずみが線形分布を持つことが確認できた。

Fig. 11 中に破線で示された冷却開始直前の全ひずみ分布は、直後の初期冷却段階 A で左下がりの直線となる。これは軸試片のキー溝側が収縮し、したがって負の曲率の曲りが生じたことを意味している。その後、極小点 B で左下がり勾配が最大となるが、中立点 C では分布が水平にもどされる。中立点以降では分布が右下がりであり、これは曲率が正であることに相当している。直線の正の勾配は極大点 D で最大になり、最終冷却状態 E ではそれがやや低減する。このように、全ひずみ分布の勾配は焼曲りの曲率に直接対応しており、その時間変化はすでに Fig. 5 に得られている。

Fig. 11 から明らかなように、全ひずみ分布の時間変化には冷却剤の違いが大きく影響を及ぼしている。冷却剤の違いによる全ひずみ分布勾配への影響は、Fig. 5 の曲率の時間的変化を観察することによってさらに明瞭となる。また、軸中心における全ひずみの値は軸の単位長さ当たりの平均伸縮量に相当しており、Fig. 11 より明らかなように、この時間変化に対しても冷却剤の違いが大きく影響を及ぼ

している。なお、最終冷却状態において、ポリマーと油焼入れでの軸の平均伸び量が、水焼入れに比べて小さな値となっている。

4.4 全ひずみと各種ひずみの関係

全ひずみは、すでに式(1)に示したように、熱、変態、塑性などの各種ひずみと関係づけられる。したがって、全ひずみ分布の時間変化のメカニズムを明らかにするために、ここでは各種ひずみの分布挙動について調べることにする。

Fig. 12 の(a), (b), (c)および(d)には、それぞれ水焼入れにおける全ひずみ、熱+変態ひずみ、塑性ひずみおよび熱+変態+塑性ひずみに対する軸方向成分の分布を比較して示した。ここで、横軸は、Fig. 6 から Fig. 9 中に示した 1 から 10 の各位置とした。Fig. 12 (d)の熱+変態+塑性ひずみ分布に対して、さらに弾性ひずみと変態塑性ひずみを加算すれば、式(1)に示したように全ひずみ分布が得られることになる。

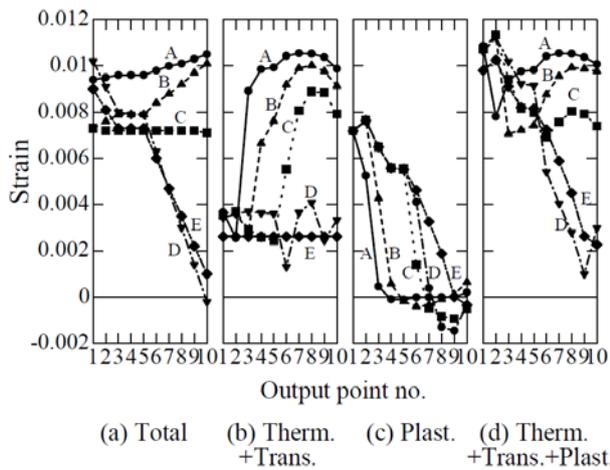


Fig. 12 Axial strains distribution along output points during water quenching

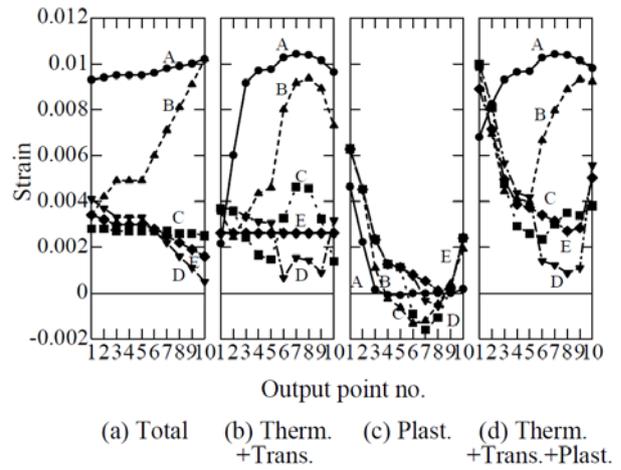


Fig. 13 Axial strains distribution along output points during polymer quenching

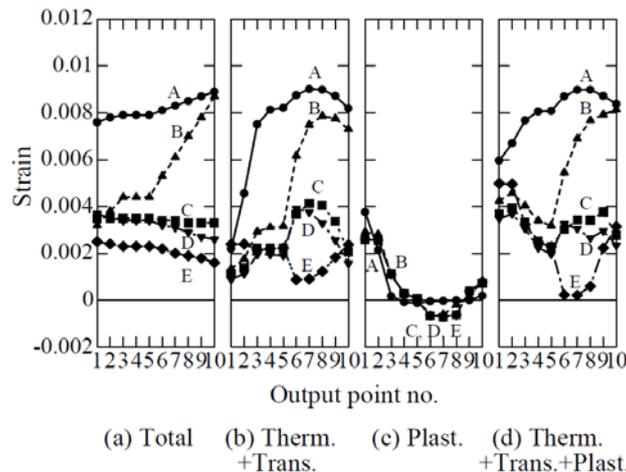


Fig. 14 Axial strains distribution along output points during oil quenching

焼入れ直前の熱+変態ひずみ分布は、Fig. 12(b)における破線で示すように一定値 0.0104 の水平線で表される。次の初期冷却段階 A ではキー溝側の突起部が急冷され、位置 1 と 2 における熱+変態ひずみがそれぞれ 0.0037 および 0.0026 まで減少する。位置 1 の方の値が大きいのは、Fig. 7(a)に示したよう

に、その点でマルテンサイト変態が開始しているためである。位置 3 から 10 では、温度の低下がまだ顕著ではないので、熱ひずみにはそれほどの減少は見られない。

さて、すでに述べたように、軸の焼曲りにおいては断面の平面保持条件が課せられる。これによって、軸方向全ひずみが直線分布となるように制約が加えられる。そこで、キー溝側の突起部に生じた熱+変態ひずみの局所的な低下が、まずは弾性ひずみによって補われることになる。すなわち、式(1)において $\epsilon_{ij}^{TH} + \epsilon_{ij}^{TR}$ が低下するが、左辺の全ひずみ ϵ_{ij} には制約条件によってあまり変化が生じないため、弾性ひずみ ϵ_{ij}^E が増加することになる。

弾性ひずみが発生すると式(2)の関係に基づいて応力が生じ、これはすぐに降伏域に達する。その後は塑性ひずみが式(5)に基づいて発生することによって、熱+変態ひずみの低下が補われていくことになる。

たとえば、初期冷却段階 A の位置 1 では、熱+変態ひずみが、焼入れ直前の 0.0104 から初期冷却段階の 0.0037 まで 0.0067 だけ減じる (Fig. 12(b))。これに対して、塑性ひずみが Fig. 12(c)に示すように 0.0072 であり、熱+変態ひずみの低下が塑性ひずみの発生でほぼ補われたことが分かる。

曲率の極小点 B、中立点 C、さらに極大点 D へと冷却が進むにつれて、Fig. 12(b)に示すように熱+変態ひずみはキー溝側からその反対側に向かって減少し、最終冷却状態 E では 0.0026 の水平分布となる。なお、シミュレーション結果によると、最終冷却状態で全断面がマルテンサイトに変態するが、このことは断面の硬さ分布の測定によって実証されている⁽⁶⁾。

塑性ひずみの正の領域は、Fig. 12(c)に示すように冷却の進行に伴いキー溝の反対側にいくぶん進展し、最終冷却状態 E での分布は右下がりの直線に近づく。この最終塑性ひずみ分布に上述した熱+変態ひずみの 0.0026 を一律加算したものが、Fig. 12(d)に示す最終冷却状態 E での熱+変態+塑性ひずみの分布である。この分布には弾性ひずみと変態塑性ひずみが含まれていないが、Fig. 12(a)に示す全ひずみの分布と比較すると良い一致が認められる。

以上のように、全ひずみ分布の時間的変化は、熱+変態ひずみ、塑性ひずみの分布およびそれらの合計ひずみ分布の時間変化と密接に関連していることが明らかとなった。

4.5 冷却特性の焼曲り挙動に及ぼす影響

すでに Fig. 5 に示したように、冷却剤の違いが焼曲り曲率の挙動に影響を与えることが明らかになっている。その理由について考察するため、水焼入れに関する Fig. 12 と同様の図を、ポリマーおよび油焼入れに対して作成し、それぞれ Fig. 13 および Fig. 14 に示した。

冷却剤の違いが全ひずみ分布の時間変化に及ぼす影響については、すでに節 4.3 で触れている。ここで Fig. 12(a)、13(a)および 14(a)の比較によって再確認を行なうと、全ひずみ分布に関しては、極小点 B での左下がり勾配、中立点 C でのひずみ量、および極大点 D あるいは最終冷却状態 E での右下がり勾配において、冷却特性による影響が顕著に現れることが分かる。

次に、各冷却剤における熱+変態ひずみ分布の時間変化を、Fig. 12(b)、13(b)および 14(b)によって比較する。初期冷却段階 A での熱+変態ひずみ分布については、冷却剤の違いによる差は明確ではない。しかし、極小点 B、中立点 C では、水焼入れの場合には他の焼入れに比べ、凸形状分布の範囲がより広く、またそのピーク値も大きいことが分かる。特に中立点 C においては、この特徴が顕著である。

このような熱+変態ひずみにおける分布の特徴によって、刻々の塑性ひずみの発生量が影響を受けることになる。たとえば、極小点 B においては、Fig. 12(c)、13(c)および 14(c)から明らかのように、水焼入れでは他の焼入れに比べ、キー溝側により大きな引張りの塑性ひずみが生じる。さらに中立点 C に達しても、水焼入れでは塑性ひずみがさらに増加するが、これは熱+変態ひずみに大きな凸形状分布が残存しているためである。

以上の考察によって、冷却特性の違いが直接的には熱+変態ひずみ挙動の相違として現れること、さらにはこれが塑性ひずみ分布の発生挙動に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

5. 結 言

熱処理シミュレーションにより、キー溝付き鋼軸試片の焼曲りメカニズムを解明し、以下の結果を得た。

- (1) 鋼軸の焼曲りは、軸断面での軸方向全ひずみの傾斜分布によって生じる。
- (2) 軸方向全ひずみ分布の時間変化は、熱+変態ひずみおよび塑性ひずみの挙動により説明することができる。
- (3) 冷却特性の違いは熱+変態ひずみ挙動の相違として現れ、さらにはこれが塑性ひずみ分布の発生挙動に影響を及ぼしている。

なお、本報告で用いた鋼軸の焼曲りメカニズムに対する分析手法は、他の熱処理変形を解明する際にも有効であると考えられる。

参考文献

- (1) Fletcher, A. J.: Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment, Elsevier Applied Science, (1989)
- (2) 利岡靖継：鉄と鋼，**62**，p.1756 (1976).
- (3) 有本享三，生田文昭，井上達雄：熱処理，**34**，p.332 (1994).
- (4) 山中 茂，坂之上隆行，吉井聡一，井上達雄：材料，**48**，p.733 (1999).
- (5) 猪狩敏秀，紀博徳，森田鴻司，下河内寛子：三菱重工技報，**35**，p.306 (1998) .
- (6) Huang, D., Arimoto, K., Lee, K., Lambert, D., and Narazaki, M.: Proc. of 20th ASM Heat Treating Society Conference , St. Louis, Missouri, p.708 (2000)
- (7) Inoue, T. and Wang, Z. G.: Computational Plasticity, edited by Inoue, T., Kitagawa, H. and S. Shima, Elsevier Applied Science, p.75 (1990)
- (8) Denis, S., Gautier, E., Simon, A. and Beck, G.: Material Science and Technology, **1**, p.805 (1985)
- (9) 奈良崎道治，小口 睦，小河原 稔，白寄 篤，淵澤定克：第 53 回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集（2000年12月），p.43
- (10) Timoshenko, S., (鶴戸口英善，国尾 武 訳)：材料力学（上），東京図書，p.88 (1957)