

# 円柱焼入れ中の過渡応力と焼割れ発生の関係

正員 福谷理明\*\*\*  
今村博行\*\*

正員 寺崎俊夫\*  
藤田敦\*\*

Relation between Transient Stress and Quenching Crack in Cylinders Generated by Quenching

by Michiaki Fukuya, *Member*  
Hiroyuki Imamura

Toshio Terasaki, *Member*  
Atsushi Fujita

## Summary

The correlation between the quenching crack and the tensile stress was clarified and the quantitative evaluation method of the quenching crack generated by quenching was established. First of all, the influence of the dimension of cylinders test material on the quenching crack was clarified by using the steel material which shows the martensitic transformation in quenching process. Next, it was shown that the residual stress distribution of the small cylinder test piece used for the quenching crack experiment was able to analyze accuracy good. Finally, the correlation between the transient tensile stress generated in the quenching process by numerical analysis and the quenching crack presence was examined followed by the clarification of criterion for the stress that causes the quenching crack was clarified. The quenching crack occurs on the side wall of the cylinder test piece because of circumferential stress when the ratio of the diameter size to axially length of the cylinder is adjusted to 1:3. Moreover, the quenching crack presence can be evaluated by both the quenching crack test results when the diameter size of cylinder is changed and the maximum circumferential tensile stress of the transient stress in quenching process. Thus, the stress which causes quenching crack in the martensitic structure can be clarified.

Key words : quenching crack, residual stress, transient stress, martensite, finite element method

## 1. 緒言

前報<sup>1)3)</sup>までの報告において、円柱焼入れにおける温度上昇の精度良い数値解析方法並びに残留応力分布の実験値を数値解析で推定する上での重要な材料定数の温度依存性と計算方法の注意点を明確にした。

本報告では確立した数値解析方法を用い、円柱焼入れ時に発生する焼割れと引張応力の相関関係を検討した。焼入れ時の重要な課題は、1)目標とする材料特性を得るための冷却速度で製品を適切に冷却すること、2)焼割れの発生を防ぐことの2点である。焼入れにより、焼入れ応力とひずみが発生し、これらが原因で起こる致命的問題として焼割れがあるが、これを防ぐための技術が確立されていないため、現場作業者の暗黙知である実績や経験に頼るしかなく、予期せぬ割れを発生させたり、或いは割れを回避するために必要以上の熱処理を実施しているのが現状である。焼割れが発生した場合その

製品の多くは廃却となる。焼割れ発生を未然に防止するためには熱処理中に発生する応力と焼割れの現象を定量的に評価できる技術が重要となる。しかし焼割れに関する論文<sup>4)9)</sup>は幾つか存在するが、焼割れの発生を焼入れ中の過渡応力に注目して定量的に評価した論文はほとんどない。

本報告では焼入れ過程でマルテンサイトの相変態を生じる材料を用い、焼割れの実験結果と有限要素法を用いた焼入れ中の過渡応力の解析結果から、焼割れ発生と過渡応力の相関関係を検討し、焼割れ発生応力が過渡応力にて評価できることを明らかにした。まず始めに円柱試験材を用い、焼入れにより焼割れが発生する焼入れ温度を明確にするとともに、焼割れの破壊形態と焼割れ発生時期について検討した。次に、前報<sup>1)3)</sup>までに確立した数値解析方法を用い、焼入れ中の過渡応力変化が精度良く解析できていることを傍証するため、焼割れ実験に用いた小形円柱試験材の残留応力分布の実験値と数値解析値を比較した。最後に、実験により焼割れに及ぼす試験材形状の影響を明らかにし、焼割れ発生の実験結果と数値解析により求めた焼入れ中の過渡引張応力の相関関係から、焼割れを発生させる応力の定量値を検討した。

\* 九州工業大学工学部物質工学科

\*\* 九州工業大学工学研究科学生

\*\*\* 日本鑄鍛鋼株式会社

## 2. 焼割れ実験

焼割れは過去の経験並びに多くの文献より<sup>10)-12)</sup>マルテンサイト変態が生じる場合に発生し易いと考えられている。これはマルテンサイト変態の相変態温度が低く(機械的性質が脆く塑性変形能も低い条件)かつ変態膨張量が他の相変態組織よりも大きく体積膨張に伴い大きなひずみが発生し易いため<sup>13)</sup>と考えられている。また焼割れは、コーナー部並びに切欠き(欠陥)などの応力集中部の存在を除くと、熱処理中に発生する応力と材料特性の因子が相互影響を及ぼしていると考えられているが<sup>14)</sup>、その発生メカニズム等は未だ明確になっていない。焼割れの発生と焼入れにより発生する応力の定量的評価を行うためには、焼割れ発生時期(温度範囲)を明らかにし、その時期で発生する過渡応力を検討する必要がある。そこで単純試験材形状にて焼入れによりマルテンサイト変態を生じる鋼を用い、種々の焼入れ条件下で焼割れを発生させることができれば、焼割れの破壊形態から焼割れ発生時期が特定できると考えた。本章では小形円柱試験材を用い、焼割れに及ぼす焼入れ温度の影響を調べるとともに、焼割れの破面観察から焼割れ発生時期を検討した。

### 2.1 実験方法

本研究の焼割れ実験では焼入れによりマルテンサイト変態を生じる高Cr鋼を供試材とした。実験に使用した供試材の化学成分をTable 1示す。焼割れの実験では直径30mm、軸長30mmの円柱試験材を用い、950℃から1175℃までの各加熱温度で炉中に2時間保持し、炉出し後水冷した。また同一の加熱条件で焼入れを行う試験材の個数は3個とし、焼割れの判定は目視にて行った。実験に使用した試験材形状をFig.1に示す。なお、以下では円柱試験材の端面箇所をedge、円柱試験材の側面箇所をsideとして表記する。

Table 1 Chemical composition of steel used (mass%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0.12	0.04	0.56	0.62	10.26	1.43

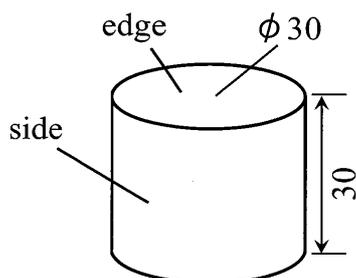


Fig.1 Shape of specimen

### 2.2 実験結果

焼割れ発生有無の実験結果をTable 2に示す。試験材に焼割れが発生した場合は●印、焼割れが発生しなかった場合は○印にて示す。1000℃以上の加熱温度からの焼入れにおいて、焼割れが発生することが分かる。代表的な試験材の焼割れの外観写真をFig.2に示す。焼割れの発生状況についてはFig.2に示すように円柱sideの表面に発生し、主に円周方向応力と軸方向応力が作用したと考えられる2種類の割れ形態があった。またそれ以外の割れでも円柱edgeを起点に割れた形態も確認でき、必ずしも焼割れ発生の方向(箇所)が一定でないことが明らかになった。

Table 2 Quenching crack examination results

Quenching Temperature $T$ (°C)	Experimental results ● ; Crack ○ ; No Crack
950	○, ○, ○
1000	●, ●, ○
1050	●, ●, ○
1100	●, ●, ○
1125	●, ●, ●
1150	●, ●, ●
1175	●, ●, ●

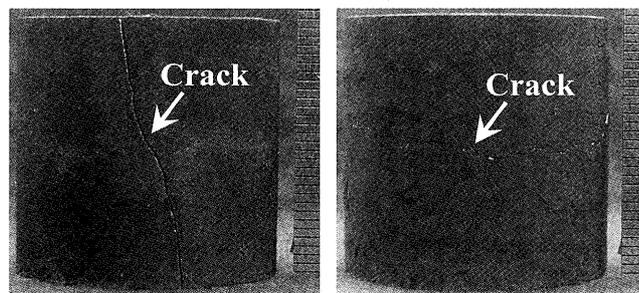


Fig.2 Photographs of quenching crack

### 2.3 焼割れの破壊形態と焼割れ発生時期

Table 2の焼割れが発生した試験材を用い、焼割れの破面観察を行った。Fig.3に割れの断面を光学顕微鏡にて観察した結果を示す。焼割れは円柱sideの表面側に発生し割れの形態は粒界割れであることが分かった。またFig.4に割れ破面の試験材表面側をSEMにて観察した結果を示す。破面においても割れは粒界割れを呈していることが分かった。

以上の結果より、焼割れは試験材表面側に発生し、コーナー部及び切欠き(欠陥)などの応力集中部の存在が無い場合、強度的に脆い粒界を起点に発生する。また焼割れの破面が粒界割れを呈していたことは本来材料が有する強度以下にて

焼割れが発生するものと考えられる。

供試材の Ms 温度(マルテンサイト変態開始温度)は 330°C であり, Mf 温度(マルテンサイト変態終了温度)は 180°C であった。焼入れ中の焼割れ発生時期については, マルテンサイト変態開始前の  $\gamma$  相(オーステナイト相)の状態では焼割れが発生することは考え難く, また焼割れの破面が粒界割れを呈していたことから, 焼割れは相変態終了後(Mf 温度以下)の温度域で発生したものと考えられる。したがって, Mf 温度以下で発生する引張応力が焼割れ発生に起因するものと考えられる。これにより, 数値解析で焼入れ中の温度・応力過渡変化を求め, 円柱表面にて Mf 温度以下で発生する引張応力を精度良く求めることができれば, 焼割れと応力の定量的評価が可能であると考えた。

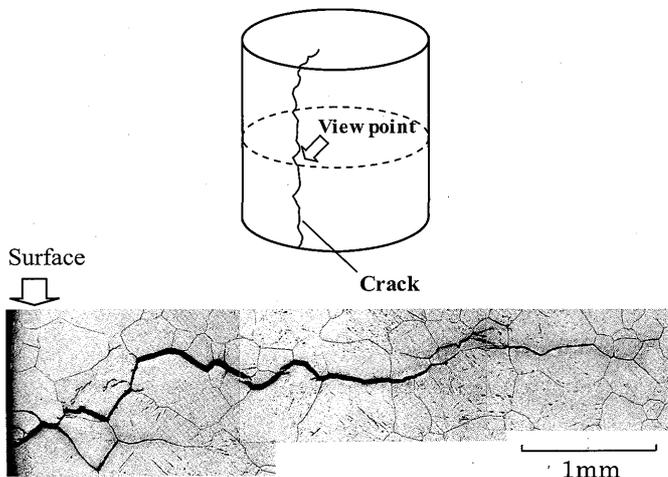


Fig.3 Optical micrograph of quenching crack after water quenching

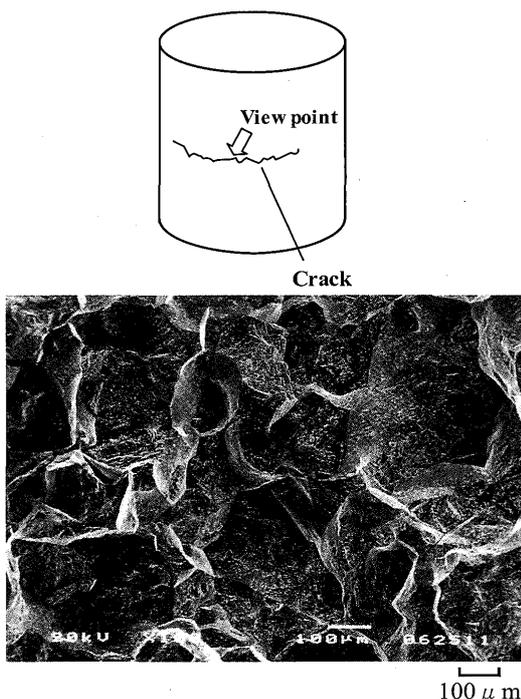


Fig.4 SEM microstructure of quenching crack after water quenching

### 3. 残留応力分布の実験値と数値解析値の比較

焼割れ発生と応力の定量的評価を行うためには, 焼入れ中に発生する応力の過渡変化を精度良く解析する必要がある。特に焼入れ中に円柱試験材表面にて, Mf 温度以下で発生する引張応力を精度良く数値解析にて求めることが, 焼割れ発生と応力の定量的評価を行う上で重要となる。しかし焼入れ中に発生している時々刻々の応力変化を実験で求めるのは非常に困難である。そのため焼入れ後の残留応力分布と変形形状が精度良く解析できれば, 焼入れ中の応力変化も精度良く解析できていると考えた。そこで焼入れ中の過渡応力変化が精度良く解析できているかを間接的に検証するため, 前報<sup>1)3)</sup>までに確立した焼入れ後の残留応力分布・変位を精度良く求めることができる数値解析方法を用い, 焼割れの実験で使用する小形円柱試験材にて, 焼入れ後の残留応力分布の実験値と数値解析値の比較検討を行った。なお焼割れが発生した試験材では残留応力分布の確かな実験値を得ることはできない。焼入れ後の残留応力分布を精度良く測定するため, 試験材の焼入れ温度は Table 2 の実験結果を考慮し, 焼割れが発生しない 950°C とした。

また前報<sup>2)</sup>にて焼入れ後の残留応力分布及び変形を精度良く解析するためには, 相変態ひずみを考慮した線膨張係数と降伏応力の温度依存性の値が重要であると述べた。そこで本章では数値解析が必要となる供試材の相変態ひずみと降伏応力の温度依存性についても検討を行った。

#### 3.1 実験方法

Fig.5 に実験に使用した円柱試験材を示す。直径 30mm, 軸長 90mm の円柱を用い, 炉中で 950°C に 2 時間保持し, 炉出し後水冷した。水冷後の残留応力分布は試験材軸長さ中央箇所(端面より 45mm 箇所)を Sachs 法<sup>15)</sup>にて測定した。2.3 節より焼割れは円柱表面で発生することを考慮すると, 以後の焼割れと応力の定量的評価を行うためには円柱表面の応力分布が重要となる。そのため Sachs 法のみでは円柱表面の応力が測定し難いため, X 線残留応力測定にて表面残留応力分布を測定した。

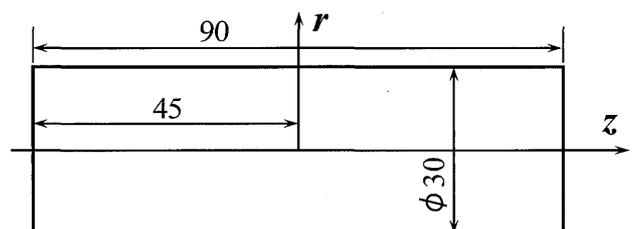


Fig.5 Specimen for measuring residual stress

### 3.2 供試材の相変態ひずみ

前報<sup>2)</sup>にて相変態により生じる応力変化及び膨張・収縮を精度良く解析するためには相変態ひずみを考慮した線膨張係数が重要であると述べた。ここでは供試材の相変態ひずみについて検討した。供試材の加熱及び冷却過程の膨張量を測定した。試験材は $\gamma$ 域の1000°Cに加熱後、100°C/minの等速にて冷却しマルテンサイト変態が生じる場合の膨張量を測定した。膨張量の実験結果より求めた相変態ひずみは、加熱過程で相変態ひずみ $\varepsilon_{tr}$ (マルテンサイト $\rightarrow\gamma$ 相)0.0018であり、冷却過程で相変態ひずみ $\varepsilon_{tr}$ ( $\gamma$ 相 $\rightarrow$ マルテンサイト)0.0077であった。この値を用いて線膨張係数を求め、試験材の加熱及び冷却過程の膨張量の変化を数値解析にて求めた。実験値と解析値の膨張量を比較した結果をFig.6に示す。前報<sup>2)</sup>同様に相変態ひずみを考慮した線膨張係数を用いて数値解析を行うと、実験値の膨張・収縮の挙動を精度良く解析できることが分かる。

またマルテンサイト変態の相変態ひずみに及ぼす冷却速

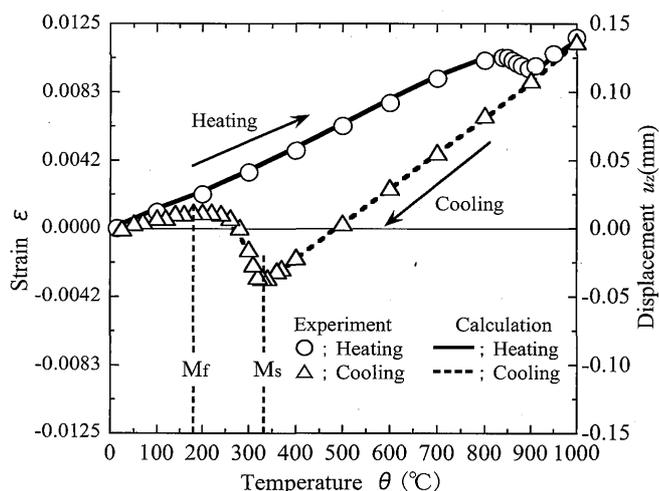


Fig. 6 Expansion curve of High-Cr steel

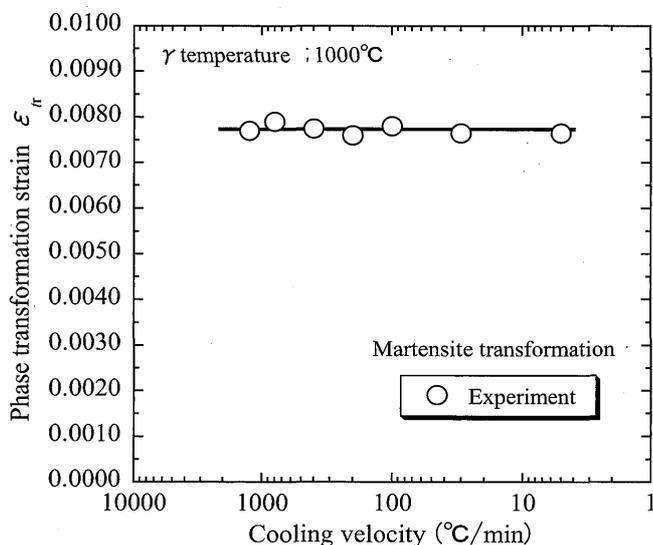


Fig. 7 Relation between cooling velocity and phase transformation strain

度の影響を調べた。加熱温度は前述同様に1000°Cとし、等速冷却速度は最大1250°C/minから最小5°C/minまでの範囲でマルテンサイト変態の膨張量から相変態ひずみを求めた。実験より求めた相変態ひずみと冷却速度の関係をFig.7に示す。マルテンサイト変態によって生じる相変態ひずみは、冷却速度の影響をほとんど受けないことが明らかになった。したがって以後の数値解析では円柱全体で同じ相変態ひずみの値を用いて解析を行った。

### 3.3 供試材の降伏応力

前報<sup>2)</sup>より、相変態により生じる応力を数値解析にて精度良く求めるためには加熱・冷却過程で相を考慮した確かな降伏応力の値が重要であると述べた。ここでは供試材の降伏応力を実験により求めた。供試材の加熱・冷却過程の降伏応力の値をFig.8にそれぞれ○、●印で示す。冷却過程の降伏応力は引張試験片を1000°Cの $\gamma$ 相まで加熱し、その後所定の温度に冷却して引張試験を行い、冷却過程の $\gamma$ 相及びマルテンサイト相の降伏応力を求めた。前報<sup>2)</sup>にて $\gamma$ 相の降伏応力の温度依存性はオーステナイト系ステンレス鋼のSUS304の値が代用できることを明らかにした。そこで冷却過程における $\gamma$ 相の降伏応力(△印)はSUS304の値を用いた。加熱・冷却過程では降伏応力の値が大きく異なること、また冷却過程における相変態中の降伏応力の温度依存性の挙動については前報<sup>2)</sup>同様にMs温度(330°C)以下にて直ぐに降伏応力の値は上昇せず約250°Cの温度域まで低い降伏応力の値を推移していることが分かる。

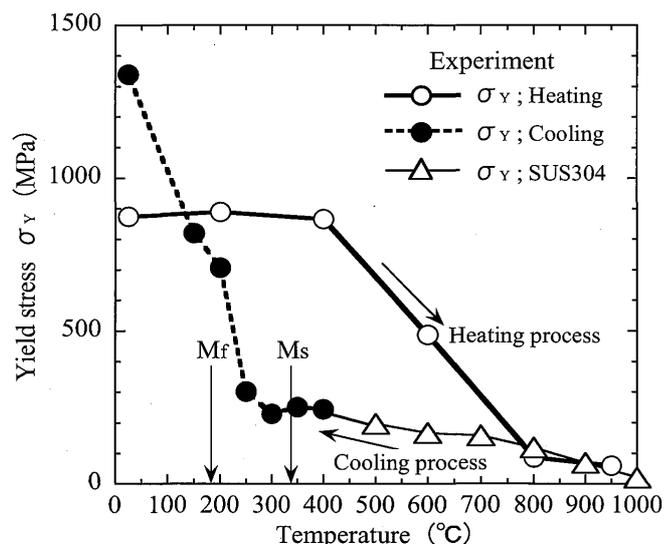


Fig. 8 Experimental result of yield stress of High-Cr steel

### 3.4 残留応力分布の実験値と数値解析値の比較

解析は4節点1要素とし、実験に使用した円柱寸法の軸対称1/4モデルを用いた。解析モデルの要素分割をFig.9に示

す. 前報<sup>1)</sup>で確立した要素分割方法を用い, 軸長端面の要素分割も温度変化の精度を考慮した要素分割方法を使用した. なお数値解析は熱弾塑性解析ソフト COSMOSM を使用した. 焼入れ過程の温度を数値解析するのに必要な比熱, 熱伝導率の温度依存性は前報<sup>2)</sup>の方法と文献値<sup>16)</sup>を使用した. 弾塑性解析に使用したヤング率( $E$ )の温度依存性は文献の値<sup>17)</sup>を使用した.

Fig.10 に残留応力分布の実験値と数値解析値の比較図を示す. 図中の○, △, □, ▲, ■印は実験値であり, 実線, 破線, 粗い破線は数値解析結果である. 記号○, △, □印は Sachs 法による実験値, ▲, ■印は X 線残留応力測定による実験値である. 残留応力分布は半径方向応力( $\sigma_r$ ), 軸方向応力( $\sigma_z$ ), 円周方向応力( $\sigma_\theta$ )の 3 軸方向全てにおいて概ね実験値と解析値は一致している.

以上の結果より前報<sup>1-3)</sup>で述べた数値解析方法を用いれば, 小形の円柱試験材でも精度良く焼入れ後の残留応力分布が

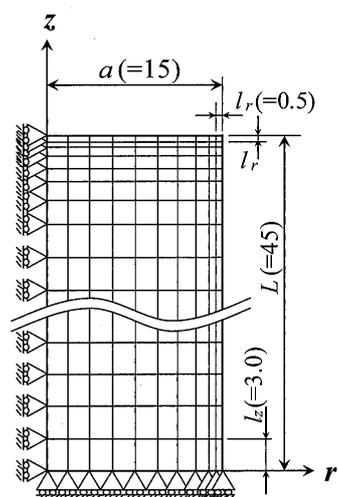


Fig.9 Analysis model and element division

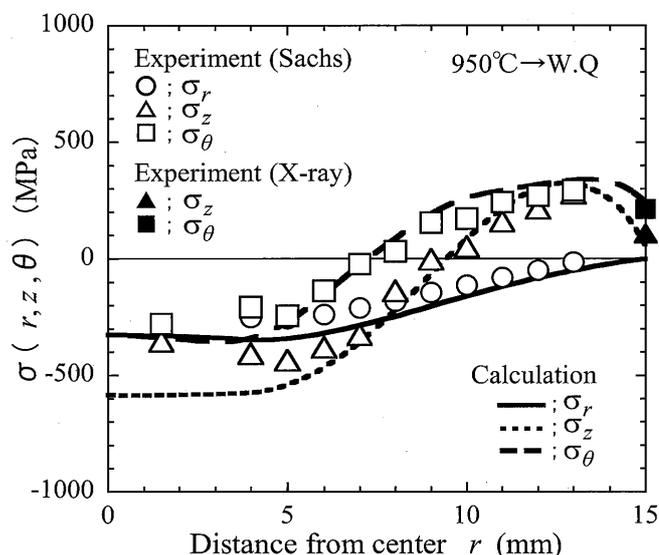


Fig.10 Residual stress distribution

解析できている. 焼入れ中の過渡応力変化を実験で求めるのは困難であるので, 数値解析により焼入れ中の過渡応力変化を推定した.

#### 4. 焼割れに及ぼす試験材寸法の影響について

試験材寸法は焼入れにより生じる過渡応力の発生に大きく影響を及ぼす. したがって, 試験材寸法と焼割れ発生の関係が明確にできれば, 過渡応力と焼割れの相関関係が検討できると考えた. この章では, 焼割れに及ぼす試験材寸法の影響を実験により調べた.

##### 4.1 焼割れに及ぼす軸方向長さの影響について

2.2 節の焼割れ実験結果では, 同じ試験材形状及び同じ焼入れ条件でも焼割れの発生方向(箇所)は一定ではなく種々様々であった. 試験材寸法と焼割れの相関関係が明確になれば, 焼割れの発生状況から焼割れを発生させる応力の特定が可能となり, 焼割れの定量的評価が容易に行えると考えた. ここでは焼割れに及ぼす軸方向長さ寸法の影響について検討を行った.

実験に用いた試験材形状を Fig.11 に示す. 試験材は直径寸法( $D$ )を  $\phi 30\text{mm}$  一定とし, 試験材軸方向長さ( $L$ )を  $20\text{mm}$  から  $150\text{mm}$  まで変えて 2.1 節同様に焼割れの実験を行った. また焼入れ温度は, Table 2 の実験結果より明らかになった焼割れが発生する温度である  $1150^\circ\text{C}$  とした. 焼割れ発生有無の実験結果を Table 3 に示す. 試験材に焼割れが発生した場合は●印, 焼割れが発生しなかった場合は○印にて示す. 実験では全ての試験材寸法にて焼割れが発生した.

軸方向長さ  $L$  が  $20\text{mm}$  ( $L/D=0.7$ ) の試験材については side を起点とした焼割れは発生せず,  $\phi 30\text{mm}$  の edge に焼割れが発生した. したがって焼割れを発生させた応力は円周方向応力( $\sigma_\theta$ )及び半径方向応力( $\sigma_r$ )であると考えられる.

軸方向長さ  $L$  が  $30\text{mm}$  ( $L/D=1.0$ ) の試験材の焼割れは 2.2 節で述べたように複雑であり, side にて軸方向長さに平行, または軸方向長さに直角に焼割れが発生し, それぞれ円周方向

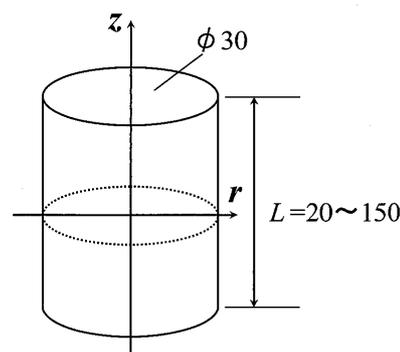


Fig.11 Shape of specimens

Table 3 Quenching crack examination results

Length $L$ (mm)	$L/D$ $\phi D=30$ (mm)	Experimental results ● ; Crack ○ ; No Crack	Surface place of quenching crack	Principal stress of quenching crack
20	0.7	●, ●, ●	edge	$\sigma_r, \sigma_\theta$
30	1.0	●, ●, ●	edge, side	$\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$
45	1.5	●, ●, ○	side	$\sigma_\theta$
60	2.0	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
75	2.5	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
90	3.0	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
120	4.0	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
150	5.0	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$

応力( $\sigma_\theta$ )並びに軸方向応力( $\sigma_z$ )により焼割れが発生したと考えられる。また一部、円柱端面の edge にて円周方向応力( $\sigma_\theta$ )及び半径方向応力( $\sigma_r$ )によって生じた焼割れも確認できた。

軸方向長さ $L$ が45mmより大きな試験材( $L/D \geq 1.5$ )の焼割れは side のみに発生し、割れの方も常に一定な軸方向長さに平行であり、焼割れを発生させる応力は円周方向応力( $\sigma_\theta$ )のみであると考えられる。

以上の結果より、焼割れには円柱直径寸法( $D$ )と軸方向長さ( $L$ )との相関関係があり、直径寸法( $D$ )と軸方向長さ( $L$ )の比が $L/D \geq 1.5$ を満足する時、円柱の side に軸方向長さに平行な焼割れが発生し、割れを発生させる主な応力は円周方向応力( $\sigma_\theta$ )のみであることが明らかになった。

#### 4.2 焼割れに及ぼす円柱直径寸法の影響について

本節では4.1節の実験結果をもとに、円柱試験材の side に円周方向応力のみにより焼割れが発生する試験材形状を用い、焼割れに及ぼす試験材直径寸法の影響を検討した。

円柱 side に円周方向応力により焼割れを発生させるため軸方向長さ( $L$ )と円柱直径寸法( $D$ )の関係が常に $L/D=3.0$ を満足するように、円柱直径寸法( $D$ )を $\phi 4\text{mm}$ から $\phi 30\text{mm}$ まで変えた試験材を作成し、4.1節同様に $1150^\circ\text{C}$ からの焼入れ実験を行った。実験に用いた試験材形状を Fig.12 に示す。ま

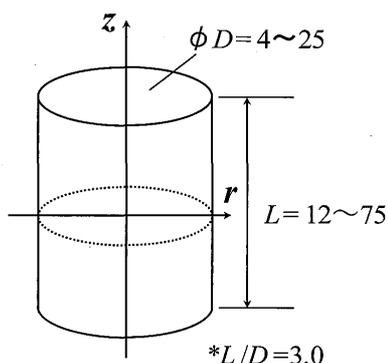


Fig.12 Shape of specimens

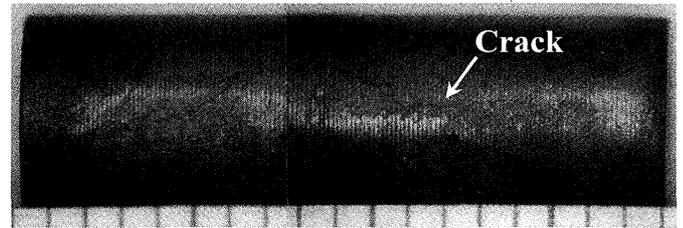
Fig.13 Photograph of quenching crack  
(Specimen size ;  $\phi 6 \times L18$  (mm))

Table 4 Quenching crack examination results

Diameter $\phi D$ (mm)	Length $L$ (mm)	Experimental results ● ; Crack ○ ; No Crack	Surface place of quenching crack	Principal stress of quenching crack
4	12	○, ○, ○	-	-
5	15	○, ○, ○	-	-
6	18	●, ○, ○	side	$\sigma_\theta$
7	21	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
8	24	●, ●, ○	side	$\sigma_\theta$
9	27	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
10	30	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
11	33	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
12	36	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
15	45	●, ●, ○	side	$\sigma_\theta$
17	51	●, ●, ○	side	$\sigma_\theta$
20	60	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
25	75	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$
30	90	●, ●, ●	side	$\sigma_\theta$

た焼割れ発生有無の実験結果を Table 4 に示す。試験材に焼割れが発生した場合は●印、焼割れが発生しなかった場合は○印にて示す。

焼割れは全て円柱試験材の side に発生し、円周方向応力によって発生したと考えられる軸方向長さに平行な割れが生じた。Fig.13 に円柱直径寸法 $\phi 6\text{mm}$ で焼割れが発生した試験材の外観写真を示す。実験結果より円柱直径寸法 $\phi 6\text{mm}$ 以上の試験材に焼割れが発生し、 $\phi 5\text{mm}$ 以下の試験材には焼割れは発生しなかった。したがって試験材の直径寸法 $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 6\text{mm}$ で発生する引張円周方向応力の相違が、マルテンサイト変態を生じる供試材の焼割れ発生応力の Criterion を示唆しているものと考えられる。

#### 5. 焼入れ中の過渡応力の最大値と焼割れの関係について

本章では焼割れ発生の実験結果と数値解析により求めた焼入れ中の過渡引張応力から、焼割れと過渡引張応力の相関関係並びに焼割れを発生させる応力の定量値を検討した。

##### 5.1 過渡応力による最大引張応力の求め方

焼割れの定量的評価を行うためには、過渡応力変化より焼入れ中に発生する最大引張応力を求める必要がある。3章に

て確立した数値解析条件を用い種々の直径寸法で、Mf 温度以下で円柱表面に発生する最大引張応力を数値解析にて求めれば、焼割れの発生と引張応力の関係が明確になり、焼割れ発生応力の Criterion を求めることができる。ここでは円柱焼入れ中の過渡応力から最大引張応力を求める方法について説明する。一例として円柱直径寸法  $\phi 10\text{mm}$ 、軸方向長さ  $L=30\text{mm}$  の円柱試験材を  $1150^\circ\text{C}$  から焼入れした場合の応力解析結果を以後に示す。Table 4 の実験結果から焼割れを発生させた応力は円周方向応力であると考えられるため、焼入れ後に円柱側面 side で最も高い引張円周方向応力が残留する箇所を特定し、その箇所の焼入れ中の過渡応力・過渡温度変化を求めた。過渡応力並びに過渡温度変化の解析結果を Fig.14 に示す。また Fig.14 には円柱中心の過渡温度変化も合わせて示す。解析結果より焼入れ後には、円柱 side に高い引張応力が発生するのが分かる。また円柱中心部の過渡温度変化より、表面の引張応力が最も高くなるのは、中心部のマルテンサイト変態が終了した時であり、これは中心部の相変態による膨張の影響を受け表面に引張応力が作用するためと考えられる。2.3 節よりマルテンサイト変態開始前の  $\gamma$  相の状態では焼割れが発生することは考え難く、また焼割れの破面が粒界割れを呈していたことから、焼割れは相変態終了後 (Mf 温度以下) の温度域で発生したものと考えられた。したがって円柱表面が相変態終了後 (Mf 温度以下) に最大引張応力を示す、焼入れ開始 10 秒後の応力 (630MPa) が焼割れに影響を及ぼす最大引張応力であると考えられる。

以後は確立した数値解析条件を用い Table 3, Table 4 に示す各試験材寸法にて、 $1150^\circ\text{C}$  から焼入れした場合の応力解析を行った。そして円柱表面に発生する過渡応力の解析結果から各試験材寸法で発生する最大引張応力を求め、焼割れ発生と引張応力の相関関係を検討した。

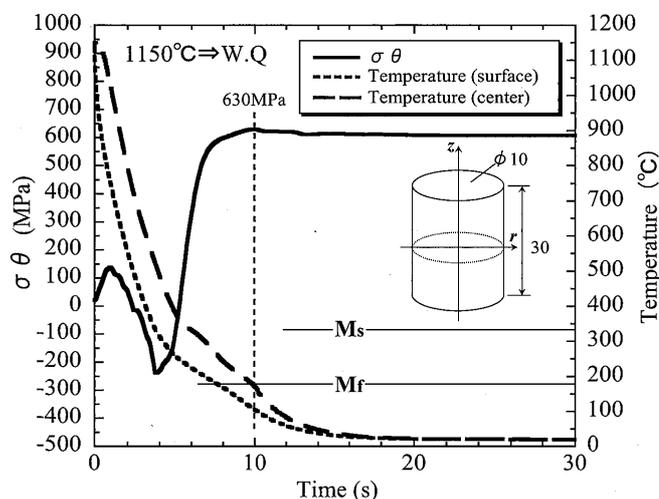


Fig.14 Relation between time and circumferential stress

## 5.2 最大引張応力と軸方向長さの関係

Table 3 の実験結果をもとに、円柱直径寸法  $\phi D=30\text{mm}$  一定とし、軸方向長さ  $L$  を  $20\text{mm}$  から  $150\text{mm}$  まで変えた試験材の焼入れ中の過渡応力を求め、5.1 節同様に Mf 温度以下で発生する最大引張応力の値を数値解析より求めた。Table 3 の実験結果では  $L/D \leq 1.0$  の試験材では円柱 side 以外に円柱 edge でも焼割れが発生した。したがって円柱 side に発生する応力以外に edge で発生する最大引張応力も求めた。なお焼割れには全ての条件で円周方向応力が関与していると考えられたため、side 及び edge とともに最大引張円周方向応力にて評価した。各試験材寸法にて焼入れ中に発生する最大引張円周方向応力と焼割れの相関図を Fig.15 に示す。Table 3 の結果より side と edge に焼割れが発生した条件を ●, ▲印、焼割れが発生しなかった条件を ○, △印にて示す。

軸方向長さ ( $L=20\text{mm}$ ) が短く  $L/D=0.7$  の条件では円柱 side に焼割れは発生せず edge に焼割れが発生したが、解析結果でも side に発生する引張応力は小さく、edge に発生する引張応力が高いことが分かる。また  $L/D=1.0$  の条件では焼割れは side 並びに edge の両箇所に発生した。解析結果でも両箇所共に高い引張応力が発生しているのが分かる。 $L/D \geq 1.5$  の条件では焼割れは円柱 side にのみ発生した。 $L/D \geq 1.5$  の解析結果では発生する最大引張応力は円柱 side が edge より常に高いことが分かる。したがって、過渡応力より求めた引張円周方向応力の最大値は焼割れ発生箇所の実験結果と良い相関関係が認められ、過渡応力により求めた引張応力が高い箇所に焼割れが発生していることになる。

以上より Mf 温度以下の過渡応力における最大引張応力は焼割れ発生の原因と考えられる。

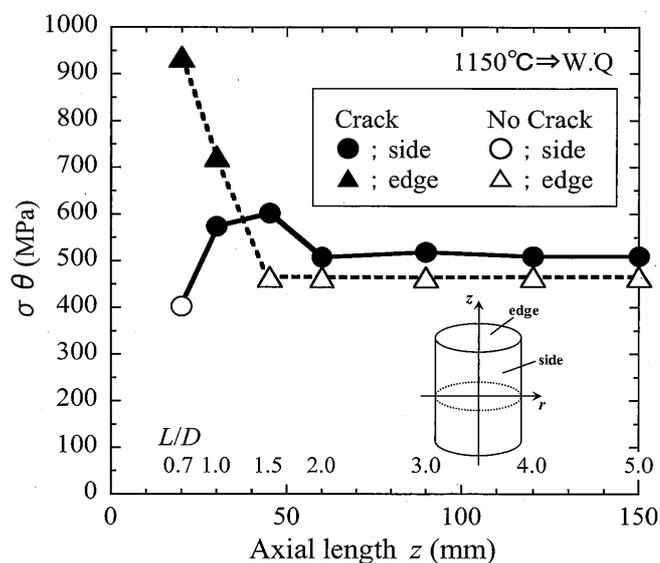


Fig.15 Relation between maximum tensile stress and axial length

### 5.3 最大引張応力と円柱直径寸法の関係

Table 4の実験結果をもとに、円柱直径寸法を変えた試験材の焼入れ中の過渡応力を求め、円柱 side に発生する最大引張円周方向応力を数値解析より求めた。焼入れにより発生する最大引張円周方向応力と円柱直径寸法との相関図を Fig.16 に示す。Fig.16 の図中に Table 4 の実験結果をもとに、焼割れが発生した条件( $\phi$  6mm 以上)を●印、焼割れが発生しなかった条件( $\phi$  5mm 以下)を○印にて示す。高い引張応力が発生している条件にて焼割れが発生しており、数値解析にて求めた過渡応力の最大引張応力は、焼割れの実験結果と良い相関関係が認められる。また Fig.16 より、約 500MPa 前後以上の引張応力が作用した条件にて焼割れが発生していることが分かる。Fig.8 の降伏応力の温度依存性の実験結果では、 $M_f$  温度以下にて約 700MPa 以上の降伏応力を有している。つまり焼割れ発生応力の 500MPa は  $M_f$  温度以下の降伏応力の値よりも小さい。この原因について以下に考察する。

Fig.8 で示される降伏応力は本来材料が保有する各温度での強度を示している。しかし 2.3 節で述べたが、焼割れの破面は引張試験で得られる延性・脆性破面と異なり粒界割れを呈していた。焼割れの破面と引張試験で得られる破面とは破壊の形態が異なること、また粒界割れが生じれば本来の材料が有する強度以下にて破断することを考慮すれば、材料が本来有する降伏応力よりも焼割れ発生応力は低くなると考えられる。

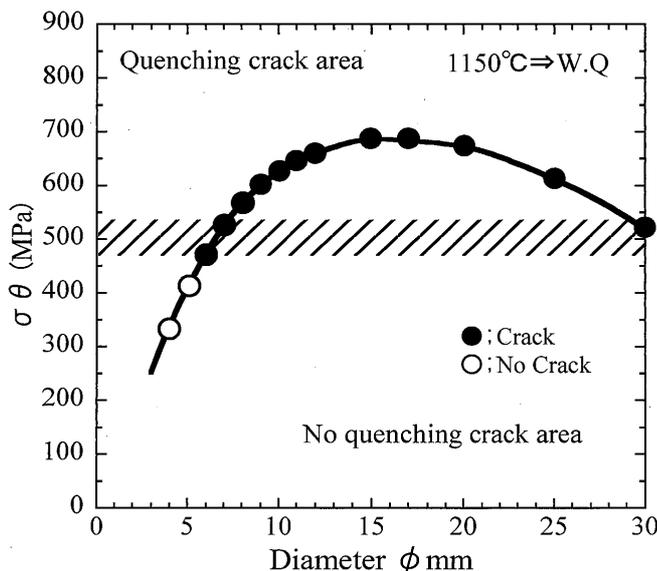


Fig.16 Circumferential stress for quenching crack

## 6. 大形円柱鋼材の焼入れ

5章で明らかになった供試材の焼割れ発生応力の Criterion をもとに、大形円柱鋼材の焼入れが可能かどうかを検討した。

### 6.1 実験方法

Fig.17 に実験に使用した大形円柱鋼材の試験材形状を示す。直径 490mm、軸長 670mm、重量約 1t の円柱材を用い、Table 1 と同様の化学成分を有する材料を供試材とした。試験材は炉中で 1000°C に 10 時間保持し、炉出し後水冷した。焼入れ後目視にて焼割れが発生したかどうかを確認した。また焼割れ発生有無の検討以外に大形円柱鋼材においても精度良く残留応力分布が解析できているかどうかも検討した。焼入れ後の残留応力分布の測定は X 線残留応力測定を用い、円柱試験材の軸長中央箇所から軸端面までの 5 箇所の表層残留応力分布を測定した。ここでは残留応力分布の検討以外に焼入れにより生じる変形も検討するため、熱処理前後の試験材の直径寸法を測定した。なお試験材には焼入れ後、全周にスケールが生成していた。そのため焼入れ後、スケールを除去しスケールが無い状態での試験材の直径寸法を測定するとともに、除去したスケールの厚みをマイクロメーターにて測定した。スケールの厚みは 0.30mm であった。数値解析ではスケールが円柱鋼材の全周囲に均一に付着していたと仮定し測定したスケール厚みを熱処理前後の変位の数値解析結果に考慮した。

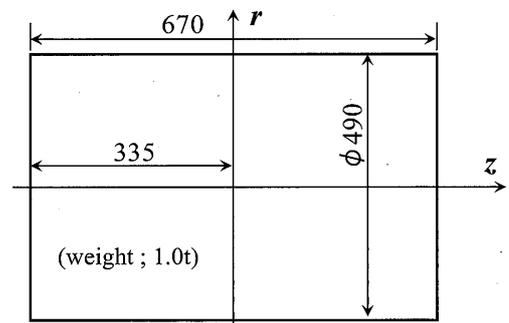


Fig.17 Specimen for measuring residual stress

### 6.2 大形円柱鋼材の焼入れ中の過渡応力解析結果

大形円柱鋼材の焼入れを行う前に 3 章にて確立した数値解析条件を使用し、1000°C から焼入れを行った場合の残留応力分布を解析した。また大形円柱鋼材の焼入れ時の温度変化を解析した結果、円柱中心部の相変態温度区間(330°C ~ 180°C)の冷却速度は 5°C/min であった。Fig.7 の結果より円柱全体でマルテンサイト変態が生じていること、及び円柱全体で同じ相変態ひずみの値を用いて解析できることが分かる。大形円柱鋼材の軸方向長さ(L)と円柱直径寸法(D)の L/D は 1.37 のため、Fig.15 の結果より円柱 side と edge の焼割れが懸念された。そこで円柱 side 及び edge の両箇所の焼入れ中の過渡応力を求めた。過渡応力並びに過渡温度変化の解析結果を Fig.18 と Fig.19 に示す。Fig.18 は焼入れ開始から 90 秒

までの解析結果を示す。また Fig.19 は焼入れ開始から 3 時間までの解析結果を示し、図中には円柱中心の温度変化も併せて示す。

Fig.18 より焼入れ開始直後、円柱表面側には side 並びに edge とともに熱収縮による引張応力が発生するが最大引張応力は約 220MPa 程度であり焼割れ発生応力である約 500MPa より低い。また最大引張応力が発生する時期も Ms 温度直前であり、この時の組織は  $\gamma$  相であるため引張応力が発生したとしても焼割れが発生するとは考え難い。

Fig.19 の解析結果では、円柱表面において Mr(マルテンサイト変態終了)温度以下の時に焼割れ発生応力である約 500MPa 以上の引張応力は発生しない。Fig.14 では円柱内部の相変態膨張の影響により円柱表面に高い引張応力が発生した。しかし Fig.19 では円柱内部の相変態膨張による影響が円柱表面側の応力変化に作用するが、温度差によって生じた熱応力の効果が大きいいため、円柱表面に高い引張応力を発

生させるには至っていない。したがって大形円柱鋼材を焼入れしても表面から焼割れは発生しないと考えられる。また円柱鋼材内部に発生する最大引張応力の値も過渡応力より求めたが、最大引張応力は約 430MPa であり、内部においても焼割れ発生応力以上の引張応力は発生しない。

以上の結果より、大形円柱鋼材を 1000°C から焼入れしても表層及び内部共に焼割れ発生応力の約 500MPa 以上の引張応力は発生しないため、マルテンサイト変態を生じる大形円柱鋼材の焼入れは可能であると考えた。

### 6.3 残留応力分布・変位の実験値と数値解析値の比較

6.2 節の検討結果より、大形円柱鋼材の焼入れを行った。1000°C から焼入れを行い約 4h 後、水中から引上げ目視にて焼割れ発生有無を調べたが、焼割れは発生しなかった。焼割れが発生しなかったため、円柱表面の残留応力分布を測定し、また焼入れ前後の円柱直径寸法の測定から焼入れによる直径寸法の変位を求めた。焼入れ後の残留応力分布の実験値と数値解析値を比較した結果を Fig.20 に示す。焼入れ前後での直径寸法の変位の実験値と数値解析値を比較した結果を Fig.21 に示す。残留応力分布並びに変位ともに実験値と数値解析値は概ね一致した。これにより Fig.19 の過渡応力解析

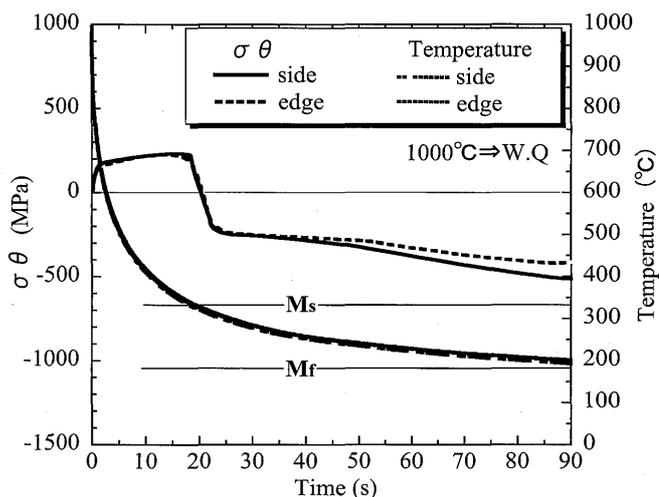


Fig.18 Relation between time and circumferential stress

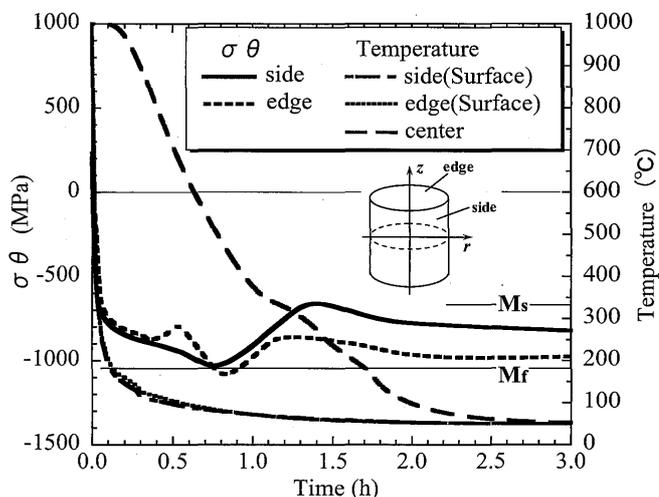


Fig.19 Relation between time and circumferential stress

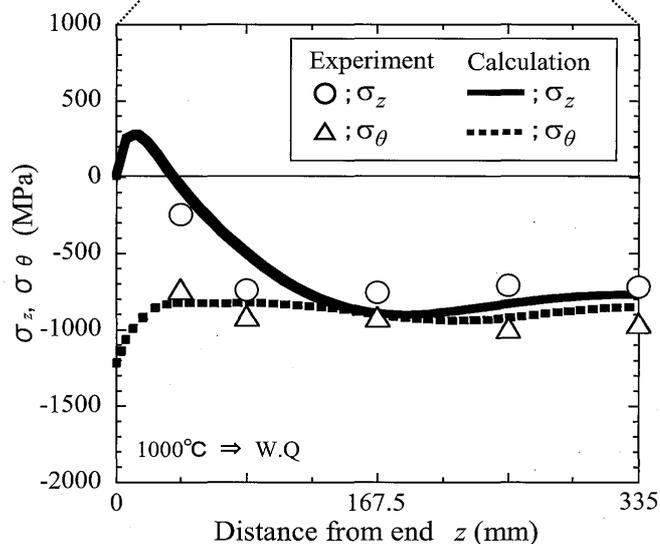
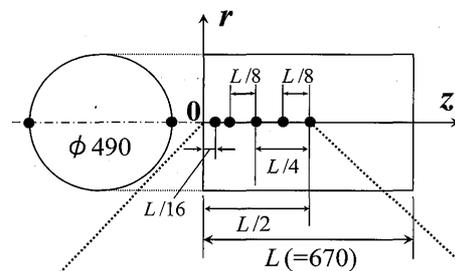


Fig.20 Residual stress distribution

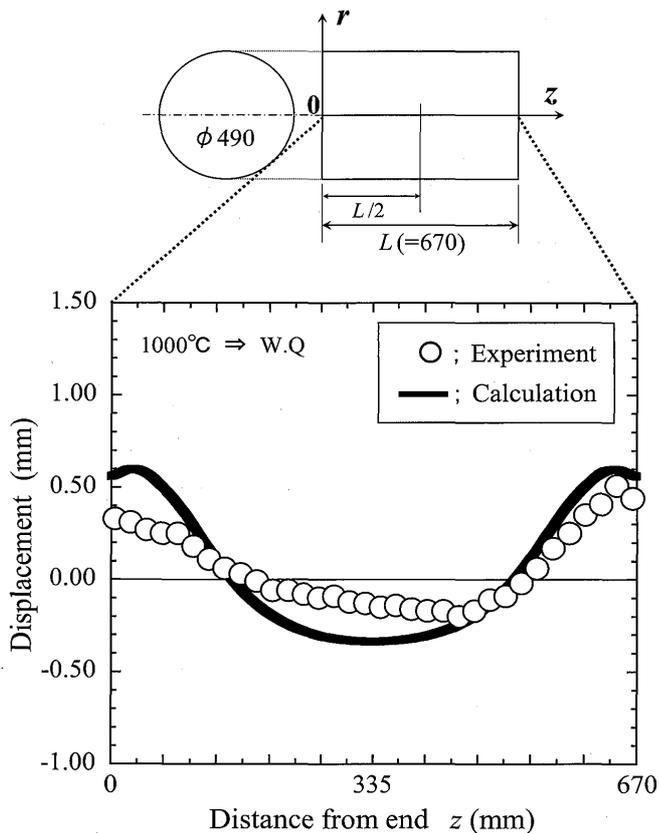


Fig.21 Radial displacement distribution

結果の妥当性が証明されマルテンサイト変態を生じる大形円柱鋼材でも焼割れ発生応力以上の応力が発生しない限り、焼割れが発生しないことを実証できた。また本解析手法を用いれば小形の円柱材のみならず大形の円柱材でも比較的精度良く残留応力分布を解析できることが明らかになった。

## 7. 結論

本論文では、焼入れ過程でマルテンサイトの相変態を生じる材料を用い、焼割れの実験結果と有限要素法を用いた焼入れ中の過渡応力の解析結果から、焼割れ発生と過渡引張応力の相関関係を明確にするとともに、焼割れ発生応力の定量的評価方法を明らかにした。得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 焼割れは試験材表面側に発生し、コーナー部及び切欠き(欠陥)などの応力集中部の存在が無い場合、強度的に脆い粒界を起点に発生する。また焼割れの破面が粒界割れを呈していたことから、焼割れは相変態終了後の温度域で発生している。
- (2) 小形の円柱材のみならず大形の円柱材においても本解析手法を用いれば精度良く残留応力分布を解析できる。
- (3) 円柱の直径寸法と軸方向長さの比は焼割れ発生箇所並びに焼割れの発生方向に大きな影響を与える。また焼入

れ中の過渡応力の最大引張応力から焼割れの発生箇所並びに焼割れ発生方向は概ね推定できる。

- (4) 試験材の直径寸法と軸方向長さの比を 1:3 とし、焼入れの実験を行うと焼割れは試験材側面に円周方向応力により発生する。また円柱直径寸法を種々変えて焼入れの実験を行うと焼割れが発生する試験材寸法と発生しない試験材寸法を明らかにすることができる。これは試験材寸法により過渡応力の最大引張応力が異なるためである。
- (5) 焼割れ発生の有無を過渡応力の最大引張応力にて評価することができ、マルテンサイト組織の焼割れ発生応力の Criterion を求めることができることを示した。
- (6) 焼割れの実験結果と数値解析より明らかにした焼割れ発生応力の Criterion を考慮すれば、マルテンサイト変態を生じる大形円柱鋼材でも焼入れは可能であることを示した。

## 参考文献

- 1)寺崎俊夫, 長谷川弘毅, 福谷理明, 北村貴典, 円柱の焼入れにより生じる残留応力について 第1報 焼入れ過程で生じる温度分布の数値解析方法について, 日本造船学会論文集, 第196号(2004), 17-23
- 2)寺崎俊夫, 福谷理明, 川上博己, 長谷川弘毅, 円柱の焼入れにより生じる残留応力について 第2報 相変態で生じる応力の数値解析方法について, 日本船舶海洋工学会論文集, 第2号(2005), 169-177
- 3)寺崎俊夫, 福谷理明, 川上博己, 長谷川弘毅, 円柱の焼入れにより生じる残留応力について 第3報 相変態しない材料の残留応力分布の支配因子と系統的整理, 日本船舶海洋工学会論文集, 第4号(2006), 71-80
- 4)内田富士夫, 後藤正治, 進藤亮悦, 永田新, 熱処理シミュレーションを活用した低合金鋳鋼材の焼割れ発生の解析, 鑄造工学, 第77巻, 第7号(2005), 437-444
- 5)奈良崎道治, 田中浩和, 白寄篤, 淵澤定克, 梅崎敦, 焼入応力シミュレーションによる鋼の焼割れ発生についての検討, 第51回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集(2000), 3-4
- 6)三木田嘉男, 中林一朗, 高炭素クロム軸受鋼の焼割れに関する研究 第1報 焼割れに及ぼすオーステナイト化温度およびポリマー液特性の影響, 日本機械学会論文集(A編), 53巻489号(1987), 884-889
- 7)三木田嘉男, 中林一朗, 高炭素クロム軸受鋼の焼割れに関する研究 第2報 焼割れに及ぼす引き上げ焼入れと遅ら

- せ焼入れの影響, 日本機械学会論文集(A 編), 53 巻 490 号  
(1987), 1007-1011
- 8)大和久重雄, 鋼の焼割れ研究部会報告, 熱処理 29 巻 4 号  
(1988), 239-243
- 9)奈良崎道治, 淵澤定克, 小河原稔, 鋼の焼割れに及ぼす表面粗さおよび表面微細形状の影響, 熱処理 33 巻 1 号(1993),  
56-63
- 10)大和久重雄, 焼割れを考える, 鑄鍛造と熱処理, Vol.37,  
No.5(1984), 25-27
- 11)坂本卓, 熱処理現場改善事例(2), 鑄鍛造と熱処理, Vol.37,  
No.2(1984), 37-44
- 12)山本誠次, 形状不均衡の金型と焼割れの関係は, プレス  
技術, Vol.19 No.10(1981), 25-27
- 13)鋼の焼割れ, 金属材料, Vol.17 No.9(1977), 66-67
- 14)阿部隆, 三瓶哲也, 大鈴弘忠, 焼割れに及ぼす冶金的因  
子の影響, 鉄と鋼, Vol.69, No.5(1983), 641
- 15)磯村良蔵, 鋼の熱処理と残留応力, アグネ技術センター  
(1996), 7-38, 52
- 16)鉄鋼熱計算用数値, 日刊工業新聞社 (1996), 15, 49
- 17)金属材料の弾性係数, 日本機械学会 (1980), 67
-