ノート

析出硬化型合金鍛造品の内部割れ発生に関する研究

諸橋　春夫*　柳　和彦*　本田　崇*　藤岡　智裕**

Study on Internal Crack Formation of Precipitation Hardening Alloy Forgings.

MOROHASHI Haruo*, YANAGI Kazuhiko*, HONDA Takashi* and FUJIOKA Tomohiro**

1. 緒　　言

析出硬化型合金である SUH660（A286）は，時効処理によりγ’相（Ni_3（Al，Ti））が析出し，高温強度が著しく向上する耐熱鋼である。耐熱材料の中では比較的安価であり，700℃程度までの高温強度に優れているため，航空機，ガスタービンなど多様な分野に用いられており，また，常温での強度も高く，主要な用途として新幹線などの車両モーター用保持環などもある。

タンレイ工業（株）では，SUH660 材の熱間リングローリング加工（以下リング鍛造）を行っているが，この加工で作製した鍛造品を超音波探傷検査したところ，内部割れが確認されるケースがあった。

そこで本研究では，内部割れが確認された鍛造品内部の観察および成分分析を行うとともに，空冷時の伝熱と成形時のシミュレーションにより割れ発生の原因を検討した。

2. リング鍛造

本研究では，SUH660 の丸棒を素材とするリング鍛造品を対象とした。リング鍛造の工程は，荒地成形，空冷後の再加熱，リングローリング，熱処理である。その概要を図 1 に示す。なお，荒地成形前の予熱温度は 1080℃，空冷後の再加熱温度は，1100℃である。

また，熱処理は固溶化処理，時効処理を行っている。その条件を図 2 に示す。固溶化処理は，鍛造工程時に析出した炭化物が固溶する 985℃とし，時効処理は高強度が得られる 720℃である。

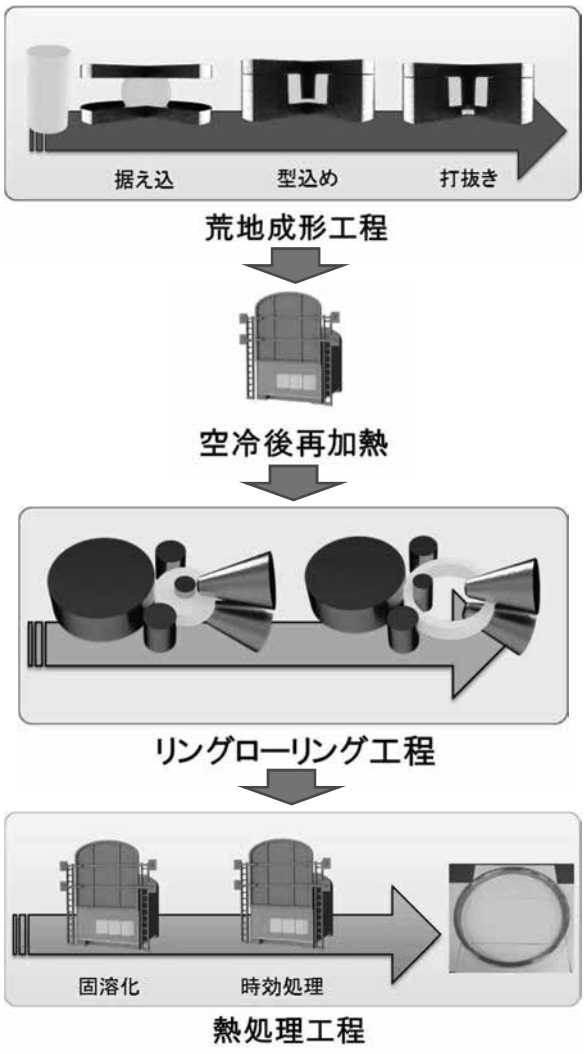


図 1　リング鍛造の工程

*　下越技術支援センター
**　タンレイ工業株式会社

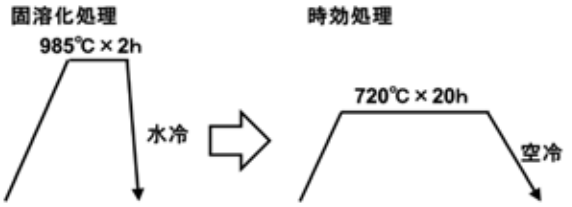


図 2　熱処理条件

3.　研究内容および結果

3.1　鍛造品内部の観察および分析

前述の加工条件で得られたリング鍛造品に関して超音波探傷検査を行った結果，リングの幅の中央部にて内部欠陥が検出された。そこで，内部欠陥が検出された鍛造品について，幅および厚さ方向の中央部を異常部，幅の端部かつ厚さ方向の中央部を正常部として切り出し，これらを分析サンプルとした（図 3)。

この分析サンプルについて，日本電子（株）製 X 線マイクロアナライザーJXA-8100 を用いて，走査型電子顕微鏡（SEM）観察および析出物の定性分析を行った。

正常部の SEM 観察結果を図 4 に，異常部の SEM 観察結果を図 5，6 に示す。正常部では割れは確認されなかったが，異常部では内部割れが観察できた。析出物は，正常部と異常部のどちらにも存在していたが，割れ部に析出物が存在している箇所も観察できた（図 6)。

また，図 7 に示されている析出物について X 線マイクロアナライザーによる定性分析を行った。その半定量結果を表 1 に示す。この結果から構成元素の主成分は C，Ti であり，その存

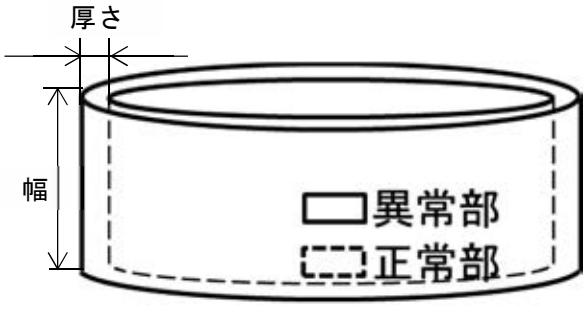


図 3　分析サンプル採取位置

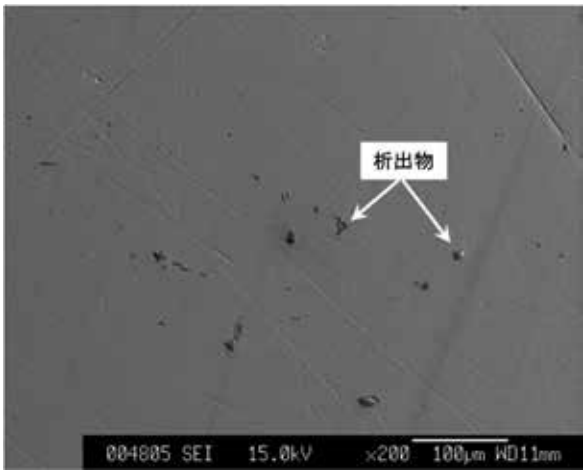


図 4　二次電子像（正常部）

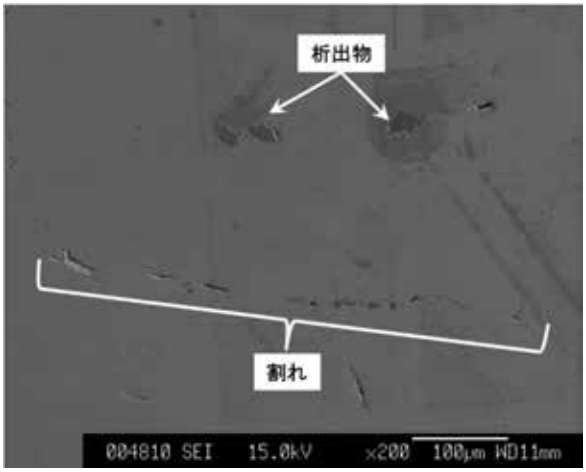


図 5　二次電子像（異常部 1）

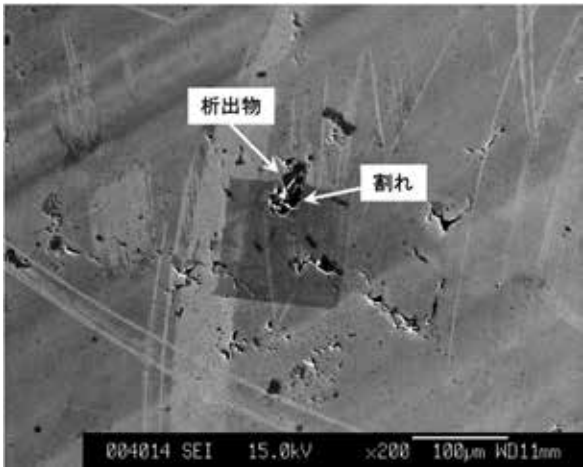


図 6　二次電子像（異常部 2）

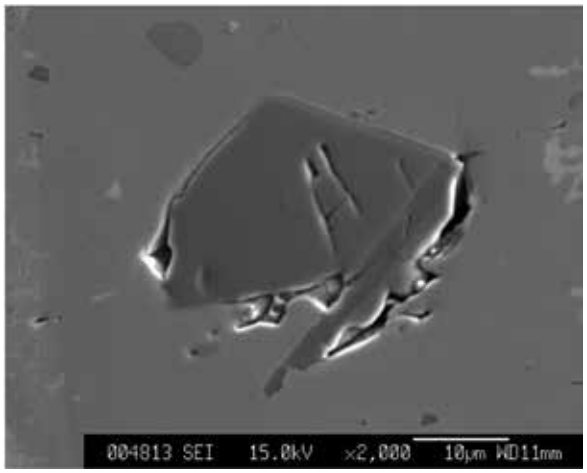


図 7　二次電子像（析出物）

表 1　析出物の半定量結果

Element	Mass(%)	Atom(%)
C	18.1	48.0
Ti	73.7	49.0
Cr	0.3	0.2
Fe	0.6	0.3
Nb	2.2	0.8
Mo	5.1	1.7
Total	100.0	100.0

在比率が約 1 : 1 であることが分かった。以上のことから，析出物の主成分は TiC であると判断される。

3. 2　空冷時の温度の評価

3.1 節の SEM 観察の結果，サンプルには大きな析出物があり，また析出物の周りには空隙が確認できた。空隙は圧延時の変形により生じたものであるから，析出物はリングローリング工程前に析出したものと考えられる。リングローリング工程前にワークが高温となるのは，荒地成形後の空冷と圧延前の再加熱である。特に荒地成形後のワークは厚いため，素材内に発生する温度分布と温度変化は，析出物の生成に影響を与える可能性がある。

そこで，この空冷を模擬した伝熱シミュレーションを実施してワークの温度の変化を調べた。シミュレーションには，サイバネット（株）製 ANSYS Workbench16.2 を用いた。

シミュレーションモデルを図 8 に示す。空冷時の状況を模擬して，ワークを載せる SUS310 製パレットとパレットが設置されるコンクリートの床をモデル化した。形状の対称性からワークを 1/4 とした。また，ワークの配置の対称性から，パレットのサイズを決定した。

ワーク，パレットについては，温度の変化が大きいため，温度依存性を考慮して熱伝導率，比熱を設定した [1]。図 9，10 にそれぞれの特性を示す。コンクリートについては，温度の変化が小さいことから，熱伝導率，比熱を一定値とした。熱的特性を表 2 に示す。

計算の条件を表 3 に示す [2]。荒地成形後のワーク内部の温度は均一と仮定して初期値を与え，計算を行った。

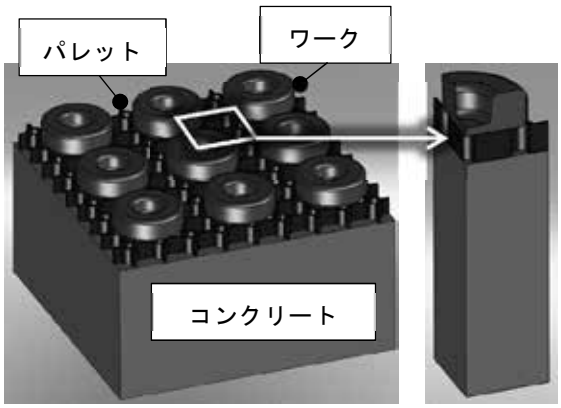


図 8　伝熱シミュレーションモデル

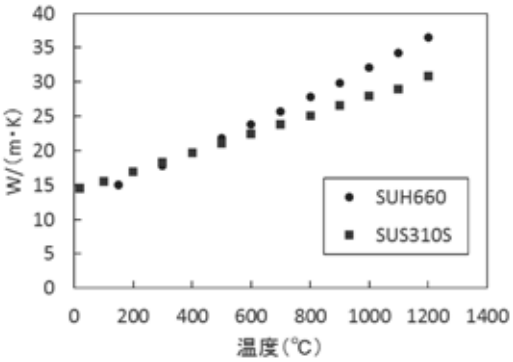


図 9　熱伝導率

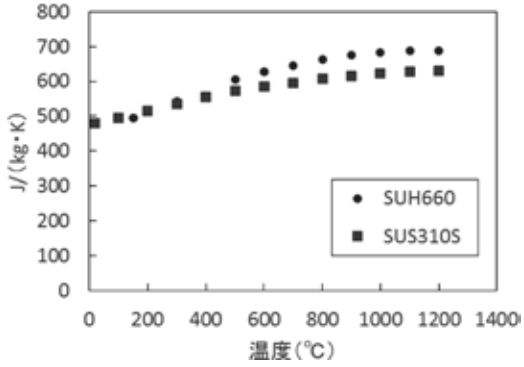


図 10　比熱

表 2　熱的特性

材料名	熱伝導率 (W/(m･K))	比熱 (J/(kg・K))	密度 (kg/m³)
SUH660	温度依存	温度依存	7940
SUS310S	温度依存	温度依存	7820
コンクリート	1	880	2000

表 3　計算条件

設定条件		設定値
初期温度（℃）	ワーク	1200
	パレット	22
	コンクリート	22
冷却条件	熱伝達係数 (W/m²)	10
	周囲温度（℃）	22
	放射率	0.7

ワーク内の最高および最低温度の点における時間履歴を図 11 に，また約 550 秒，1450 秒における温度分布を図 12(a)(b)に示す。ワークの熱容量は大きく，1400 秒以上の間，680℃以上の温度が保たれていることが確認できた。ここで，析出物による強度の上昇の効果を十分に得るには，時効処理のように 20hr 程度の保持時間が必要である。ただし，加熱初期には急激に硬さが上がることから，空冷と再加熱における時効処理温度を通過する時間において析出がおこっている可能性は十分あると考えられる [3]。

次に，温度分布に着目すると，時効処理温度を通過する間，ワーク内には常に温度分布が発生しており，幅中央部の温度は上下端面より 50℃以上高い。これは，中央部ほど時効処理通過時間が長いといえる。再加熱時には中の温度は温まりにくいことから，この場合にも時効処理温度を通過する時間が長くなる。よって，空冷，再加熱ともに，中央部の析出物が成長しやすい状態にあると考えられる。

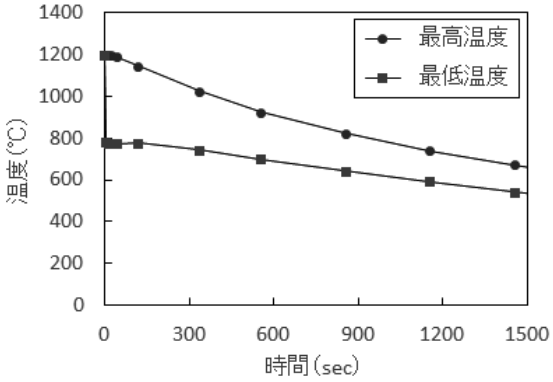
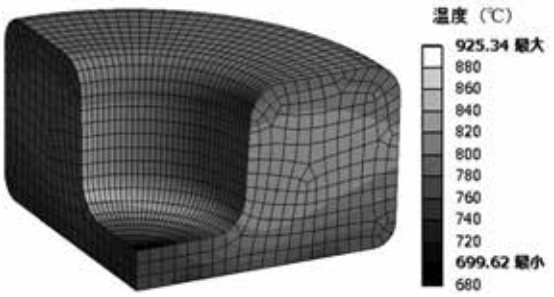
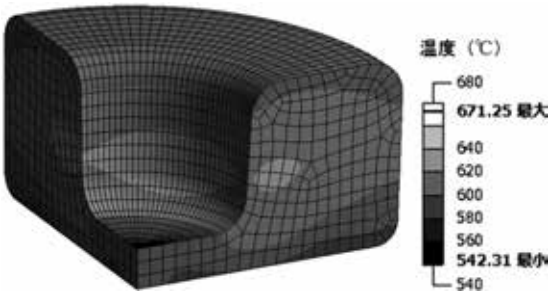


図 11　ワークの温度履歴



(a) タイミング①（約 550 秒）



(b) タイミング②（1450 秒）

図 12　ワークの温度分布

3.3　成形時の応力の評価

3.1 節の観察の結果，正常部，異常部ともに析出物が確認された。ただし，異常部の析出物の周りのみ空隙が発生しており，この空隙が欠陥につながると考えられる。そこで，リング鍛造を模擬した成形シミュレーションを実施して，加工時に発生する応力分布を調べた。

成形シミュレーションモデルを図 13 に示す。圧延時の各治工具は変形の生じない剛体とした。また，SUH660 の高温材料特性は不明であることから，SUS304 の高温特性で代替した。材料特性が異なるため，SUH660 の応力値は計算できないものの，材料が変わっても応力分布の傾向は十分把握できると考えられる。

ここで，圧延で発生する応力の向きに着目すると，拡大される周方向に最も大きな主応力が発生する。また，ワークは回転しながら部分的に圧延される。よって，本研究では，ワークの特定の断面を観察面として，圧延前後のタイミングにて最大主応力の評価を行った。観察のタイミングを図 14(a)に，それぞれのタイミングで観察面に生じる最大主応力を図 14(b)～(d)に示す。

ワークの位置によって応力分布は変化しており，圧延直前のタイミングで異常部に大きな引張応力が発生している。一方，圧延時，主ロール軸通過後には，異常部に引張応力は発生していない。また，図 14(b)より，主ロール通過前に発生する引張応力については，位置によって差があり，異常部が最も大きく，正常部に近づくにつれ引張応力は小さくなっている。よって，圧延を繰り返すことで，異常部には圧縮と引張が繰り返されることが確認できた。

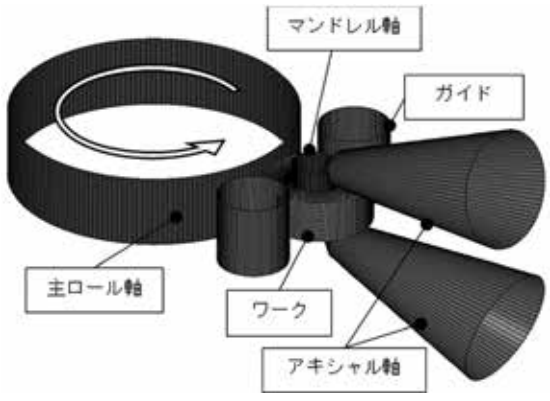
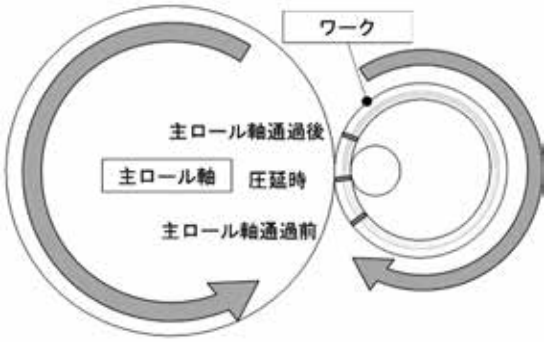
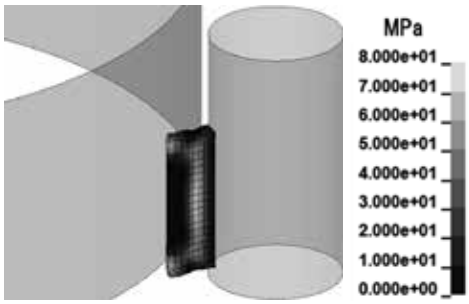


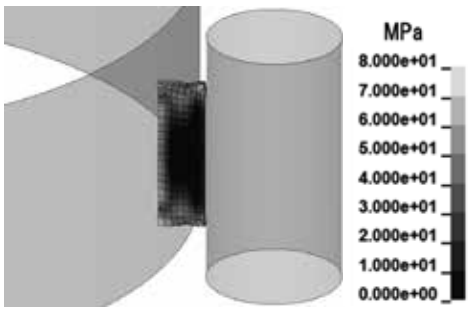
図 13　成形シミュレーションモデル



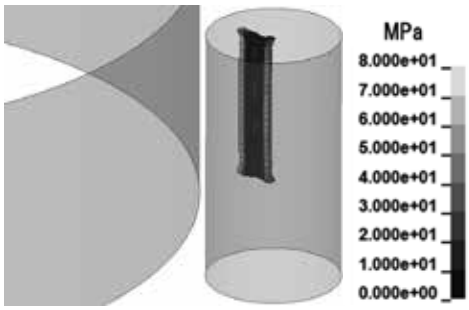
(a) 観察のタイミング



(b) 主ロール軸通過前



(c) 圧延時



(d) 主ロール軸通過後

図 14　観察面に生じる最大主応力

4. 考　察

SEM 観察，分析およびシミュレーションの結果から，割れの原因を考察した。

成形シミュレーションの結果から，リングローリング工程において，図 3 の異常部は正常部に比べて大きな引張応力が繰り返し発生することがわかった。ただし，異常部の SEM 観察から，20μm 以上の析出物の周辺に空隙が確認されており（図 6，7），割れは母材の破断ではなく，この空隙が起点と考えられる。よって，割れは加工時に発生する引張応力だけでなく，大きな析出物があることが発生原因と考えられる。

また，伝熱シミュレーションの結果から，時効処理温度を通過する際，ワークの異常部は正常部より 50℃以上高く，通過時間も長いことがわかった。再加熱時にも同様に，通過時間が長いことが想定される。このことから，荒地成形工程後の空冷および再加熱時において，異常部では析出物（TiC）が成長しやすい状態であり，大きな析出物が発生する原因と考えられる。

上記の考察に基づく内部割れの対策には，加工中に発生する引張応力の低減，また，析出物の大きさを小さくすることが挙げられる。ただし，径を拡大するリングローリング圧延の加工の様式から，加工中周方向に引張応力を発生させなくすることは困難である。したがって，リング鍛造の割れの対策では，析出物の大きさの抑制が重要であると考えられる。そこで，析出物が成長すると考えられる空冷をやめ，加工後の高温状態を活用して再加熱時間も最小限になるよう工程の改善を検討した。改善の結果，内部割れが発生しなくなり，温度管理の重要性を確認することができた。

5. 結　言

（1） SUH660 のサンプルついて，SEM 観察を行った結果，正常部，異常部ともに析出物が観察された。X 線マイクロアナライザーによる定性分析を行った結果，析出物の主成分は TiC と考えられる。

（2）正常部と異常部を比較すると，異常部の析出物の方が大きく，また大きな析出物の周囲に空隙も観察された。この空隙が割れの起点と考えられる。

（3） 伝熱シミュレーションの結果，異常部は正常部に比べて空冷時の温度が高く，時効処理温度を通過する時間も長いことから，析出物が成長しやすい状態と考えられる。

（4）成形シミュレーションの結果，異常部は正常部に比べて繰り返し大きな引張応力が発生していることが確認できた。

（5）割れ発生の考察に基づき，析出物が成長しないよう工程を検討した結果，割れを防止することができた。

参考文献

1）岸正彦，"有限要素法実践ハンドブック"，森北出版（株），2006，pp.253-255.

2）J.P.ホールマン，"伝熱工学<上>"，1987，p.13.

3）ナス鋼帯（株）HP，"特色製品 NAS660"，http://www.nas-kotai.co.jp/leaflet/660.html 2017 年 3 月 30 日閲覧.