

研究論文

熱処理 CAE ソフトウェアを活用した低合金鋳鋼材の焼割れ発生シミュレーション

内田 富士夫,* 進藤 亮悦,* 鎌田 健一,** 後藤 正治**

Simulation of Quenching Crack Generation in Low Alloy Cast Steel
by Using Heat-treatment CAE Software

Fujio UCHIDA[†], Ryoetsu SHINDO[†], Ken-ichi KAMADA^{††} and Shoji GOTO^{††}

In order to understand the quenching crack phenomenon in cast steel, a disk shaped low alloy cast steel specimen having a opening was quenched in water at 1123 K. The behavior of a quench crack was investigated by microstructure observation and analyzed by the Heat treatment CAE software. The results obtained are as follows. (1) The quench cracking easily occurred as the volume of specimen increased. The mass effect for quenching crack was significant. (2) The quench cracking was due to time lag in martensitic transformation at surface side and inner side of the quenched specimen, but not due to the thermal stress in the specimen. (3) The behavior of a quenching crack was able to be predicted by the Heat treatment CAE software. (4) Therefore, the Heat treatment CAE software is useful for a counterplan preventing the quenching crack.

Key Words : low alloy steel casting, heat treatment, water quenching, quenching crack, heat treatment CAE software

1. 緒言

鋼や鋳鋼の焼入れ・焼もどし処理は、機械部品等に高強度や高耐摩耗性を付与する方策として、一般的に広く用いられている。また、焼入れ性の向上や質量効果の改善を目的に、種々の合金元素の添加が行われている。しかし、一般には焼入れには必ず焼入れ応力、歪みが伴い種々の欠陥が発生する。熱処理条件や部品形状によっては部品に焼割れが発生する場合がある。この中でも焼割れは他の欠陥と異なり修復することが非常に困難であるため、材料および製造工程上のコスト損失が極めて大きい。

一方、焼入れ時の冷却媒体を水から油等に変更することによって焼割れを防止する対策が図られている。しかし、冷却媒体を変更しても製品材質・形状等の影響から焼割れが発生したり、仕様条件として要求される製品硬さが十分に得られない等の問題が発生することが多く、従来からトライアンドエラーを繰り返すことによる焼入れ条件の最適化を行ってきた。

近年では、鋳鋼品の高品質化、省力化、低コスト化の弊害となる熱処理欠陥などの問題を解決するために熱処理 CAE ソフトウェアによる熱処理応力解析の実用化がされつつある¹⁾⁴⁾。

しかし、これまで熱処理 CAE ソフトウェアを活用した熱処理時の焼入れ変形現象等のシミュレーション手法についての研

究は行われているが、焼割れ現象のシミュレーション手法についての研究は少ないのが現状である。

そこで、本研究では鋳鋼における焼割れ現象を明らかにし、かつ焼割れに対する熱処理 CAE ソフトウェアの有効性を確認することを目的として、低合金鋳鋼材の水焼入れ処理における焼割れ原因と焼割れ発生時間について実験と解析の両面から検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

焼割れ実験に用いた試験片（以後「焼割れ試験片」と略す）はアーク炉により 0.45 mass% C をベースに数種の合金を少量添加し溶製した低合金鋳鋼材（規格 SCM440 相当）とし、鑄造時の偏析をなくすために函型電気炉（炉内寸法 400 W × 400 H × 700 L mm, 最高温度 1373 K）を使用し、試験片を 1203 K にて 2 時間等温保持後、炉冷（303 K/h）する焼鈍処理を行った。その後、放電加工等により Figure 1 に示すような質量と形状の異なる 2 種類の寸法に加工仕上げを行った。なお、本試験片形状は「日本熱処理技術協会焼割れ研究部会」にて焼割れ試験片として採用されている試験片⁵⁾を参考に焼割れが発生し

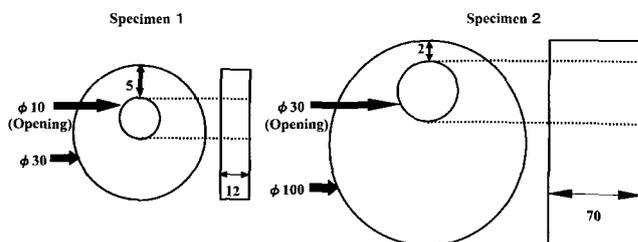


Figure 1 Shape of specimens for quenching crack tests.

平成16年3月22日受付;平成16年8月20日受理

* 秋田県工業技術センター

〒010-1623 秋田市新屋町字砂奴寄 4-11

** 秋田大学工学資源学部 材料工学科

〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

† Akita Prefectural Industrial Technology Center, 4-11 aza Sanuki Araya-machi Akita city 010-1623 Akita prefecture Japan

†† Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-cho Akita City 010-8502 Akita prefecture Japan

やすいように内径10 mm の偏心孔を設けた外径30 mm, 厚さ12 mm の円盤試験片 (以後「焼割れ試験片 1」と略す) と内径30 mm の偏心孔を設けた外径100 mm, 厚さ70 mm の円盤試験片 (以後「焼割れ試験片 2」と略す) とした。また, 焼入れ過程における試験片の冷却温度の測定は, Figure 2 に示すような A 点 (偏心孔上端表面) と B 点 (偏心孔下端と試験片下端との中央に深さ 5 mm) を代表点に選び, 熱電対を A 点に溶着し, B 点には挿入して行った。

2.2 実験手順

焼入れ処理における冷却媒体を298 K の水 (水道水) とし, 焼入れ加熱には函型電気炉を使用した。試験片は, 試験片温度1123 K にて2時間等温保持後, Figure 3 に示すポンプ (流速8 L/min) により攪拌を行っている水槽中 (液温298 K, 液量200 L) に浸漬して完冷を行った。なお, この際の冷却過程における焼割れ試験片の冷却温度測定は Figure 2 に示す試験片表面に溶着および内部に挿入した2本の熱電対によって函型電気炉より取り出した直後からの温度の時間的変化を動歪み解析装置 (㈱共和電業製 EDX-1500) を用いてサンプリング周期100 Hz で記録して行った。

次に実体顕微鏡を用いて試験片表面における焼割れ発生状況を観察するとともに, ロックウェル硬さ試験機を用いて表面および断面硬さを測定した。

また, 倒置型金属写真顕微鏡, 電界放射走査電子顕微鏡を用いて試験片の表面および内部の金属組織を観察し, 焼割れ発生

と組織の関係について検討した。さらに熱処理 CAE ソフトウェア (クオリカ㈱製 GRANTAS[®]) を用いて焼割れ発生状況について評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 水焼入れ処理実験結果

質量の異なる2種類の焼割れ試験片を各々水焼入れ処理を行った結果を Figure 4 に示す。体積 (質量) の小さい焼割れ試験片 1 では全く焼割れは発生しなかったのに対し, 質量の大きい焼割れ試験片 2 では図に示すように焼き割れが孔内面に左右対称状に発生した。孔内面中央部では長さ7 mm 程まで割れが進展していたが, 試験片表面までには達していなかった。これにより焼割れは, 孔内面中央部から発生し表面近傍に向かって伝播したと考えられる。孔内面中央部にみられる焼割れ状況の一例を Figure 5 に示す。

焼入れ試験片 2 の表面および内部における金属組織の観察結果を Figure 6 に示す。試験片表面から内部にかけて全てマルテンサイト組織を呈していた。また試験片における観察位置による組織の違いは認められなかった。従って, 試験片は焼入れによって全て均一にマルテンサイト組織に変態したものと判断される。Figure 7 は焼割れ試験片 2 の中央部における円周方向から中央内部にかけて (Figure 2 参照) ロックウェル硬さ測定を行った結果である。硬さは平均約54 HRC であり, ほぼ均一な値を示していることがわかる。以上の結果より, 本実験における水焼入れ処理が十分に行われ, マルテンサイト変態が十分に行われていたことが言える。

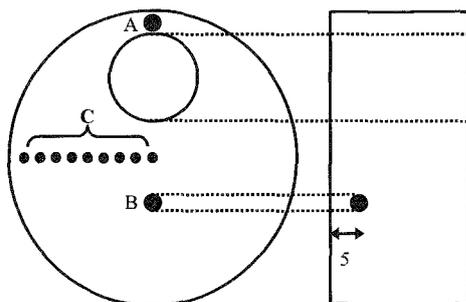


Figure 2 Setting positions of thermocouples (A, B) in the quenching crack test specimen. Solid circles show the position for measuring Rockwell hardness (C).

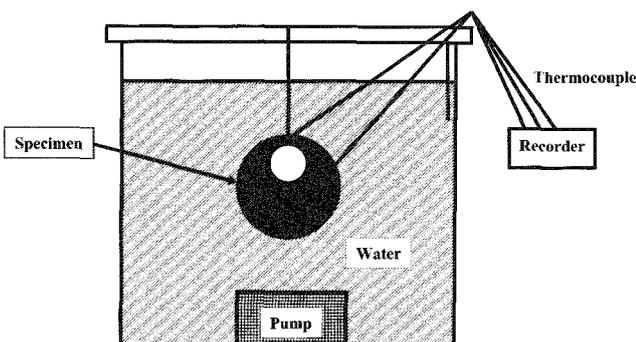


Figure 3 A schematic view of the water quenching tank equipment.

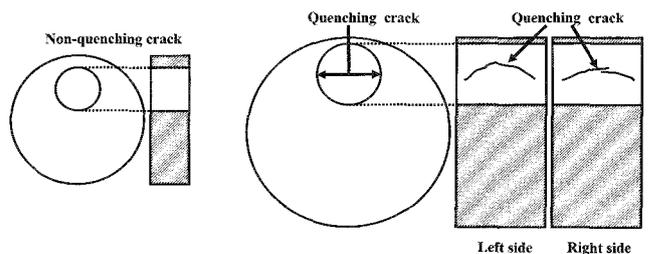


Figure 4 Schematic views of quenching cracks in the specimens.

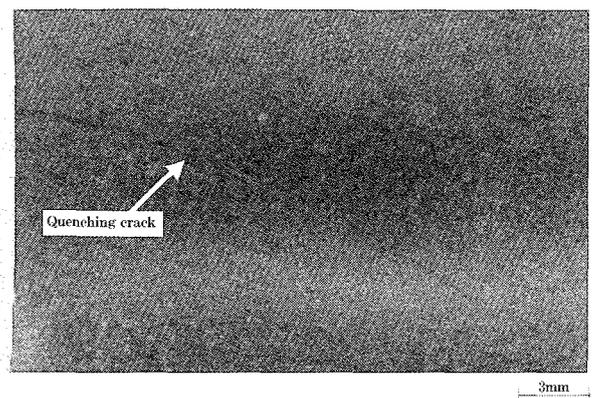


Figure 5 A quenching crack in the opening surface region of specimen 2.

このように焼割れ試験片1では焼割れが発生しなかったのに対し、焼割れ試験片2では発生したことから低合金鋼材の水焼入れ処理では質量が大きくなることによって焼割れが発生しやすいと考えられる。

すなわち焼割れの発生原因としては、試験片質量が大きくなると表面と内部におけるマルテンサイト変態に時間的な遅れ(差)が生じ、その変態応力の緩和がスムーズに行われなかったためと考えられる。

3.2 熱処理 CAE ソフトウェア解析による評価

熱処理 CAE ソフトウェアによる焼入れ処理中の温度変化、焼入れ組織、応力集中箇所等について検討を行うとともに焼割れが発生する原因がマルテンサイト変態であるか否かについて検討した。

なお、今回焼割れの評価として用いた熱処理 CAE ソフトウェアは、熱処理過程で生じている物理現象を有限要素法 (FEM) による拡散解析、熱伝導解析および熱弾塑性解析に熱処理特有の現象である金属組織変態現象を考慮することにより、炭素濃度、温度、冷却速度、金属組織、硬度、応力およびびずみの予

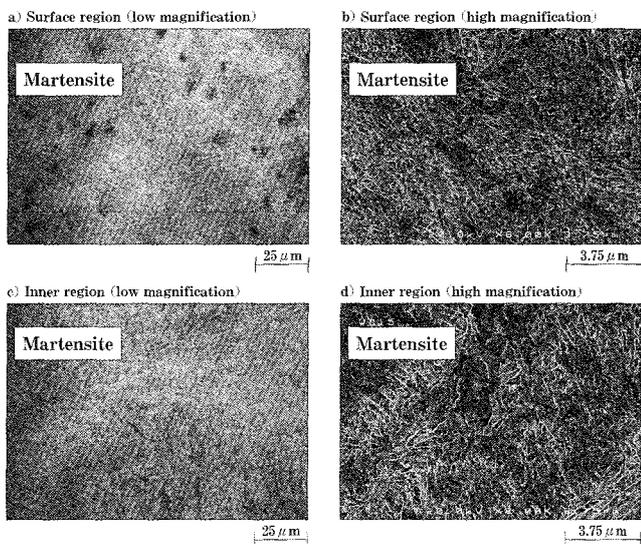


Figure 6 Microstructure of the specimen 2 after water quenching.

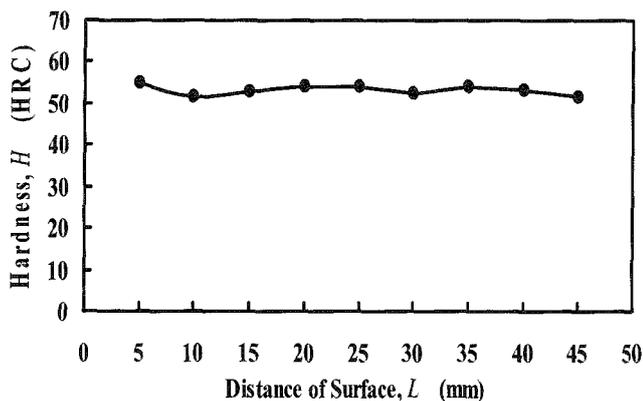


Figure 7 Profile of Rockwell hardness in the surface of specimen 2 after water quenching.

測が可能なソフトウェアであり、172種類もの鋼材データベースを備えているのが特徴である。

Figure 8 に熱処理 CAE ソフトウェアに使用した解析モデルを示す。解析モデルは解析時間の短縮を図るために焼割れ試験片2の形状の1/4 (要素数13500) とし、inside には対象条件、surface には熱境界条件をそれぞれ設定した。使用する鋼材データは熱処理 CAE ソフトウェアのデータベース内にある SCM440 のデータを採用した。さらに、水焼入れ処理パターン (2.2 実験手順参照) を入力し、試験片温度が常温 (298 K) になるまでの焼入れ処理中の温度変化、焼入れ組織、熱応力、および熱応力と組織変態を考慮した応力 (以後「変態応力」と略す) 等について解析を行った。

Figure 9 に熱処理 CAE ソフトウェアによる温度解析結果を示し、Figure 10 に水焼入れ処理における焼割れ試験片2の2箇所 (Figure 2 参照) での実測温度および熱処理 CAE ソフトウェアによる温度解析結果を示す。このように測定点 A と B における実測温度と熱処理 CAE ソフトウェアによる解析温度結果がほぼ一致した。さらに、完冷後の焼入れ組織は実観察および熱処理 CAE ソフトウェアによる解析結果は共に全てマルテンサイト組織であり、この結果についても一致した。以上のように熱処理 CAE ソフトウェアによる解析結果は焼入れ処理における冷却過程を忠実にシミュレーションすることが可能であると考えられる。

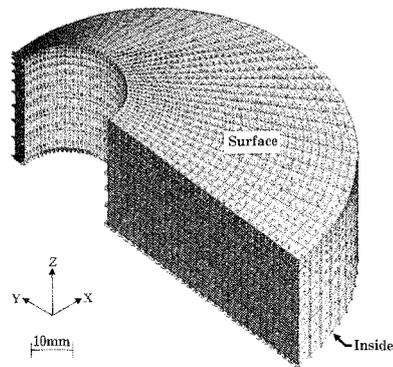


Figure 8 A quarter side model for the Heat treatment CAE software.

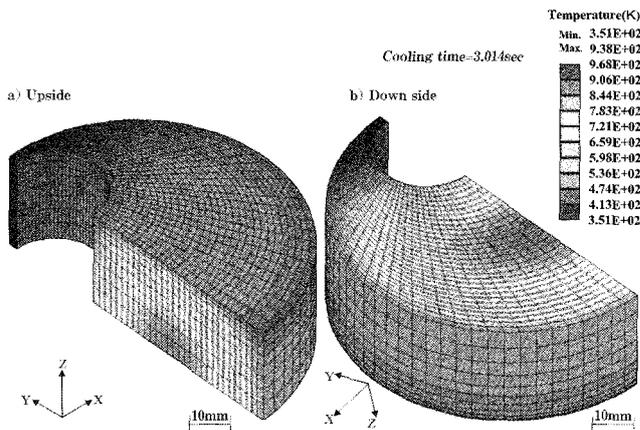


Figure 9 Temperature profile analyzed by the Heat treatment CAE software for the quarter side specimen at 30 sec after water quenching.

そこで、熱処理 CAE ソフトウェアを用いて水焼入れ処理の時点で発生した焼割れの過程について検討した。Figure 11 に水焼入れ冷却過程における熱応力解析結果を示し、また Figure 12 に変態応力を考慮した解析結果を示す。なお、解析結果の応力は主応力で表示している。

これらから示されるように応力集中箇所は焼割れ試験片の孔内面中央部に集中しており、孔内面中央に近いほどの応力値が高い結果が得られた。この結果を Figure 13 に示す焼割れ試験片 2 の焼割れ箇所と比較するとほぼ一致していると言える。

Figure 14 に熱処理 CAE ソフトウェアによる焼割れ試験片 2 の孔内面中央部の冷却時間に対する解析温度、熱応力、変態応力および熱処理 CAE ソフトウェアの鋼材データベース内にある低合金鋼材 (SCM440) の各温度に対する降伏応力を示す。

これより、焼割れ試験片 2 の孔内面中央部に発生する熱応力、変態応力は冷却開始直後に引張応力として発生し、その後応力が緩和され冷却時間とともに緩やかに応力値が上昇している。これは、冷却直後試験片表面がマルテンサイトに変態したことにより引張応力が発生し、その後冷却による収縮およびマルテ

ンサイト変態が開始していない試験片内部への変態応力緩和が働いたため、引張応力が小さくなったものと考えられる。

また、低合金鋼材の降伏応力値より焼割れ試験片 2 に発生する主応力値の方が大きい値を示した時、焼割れが発生すると

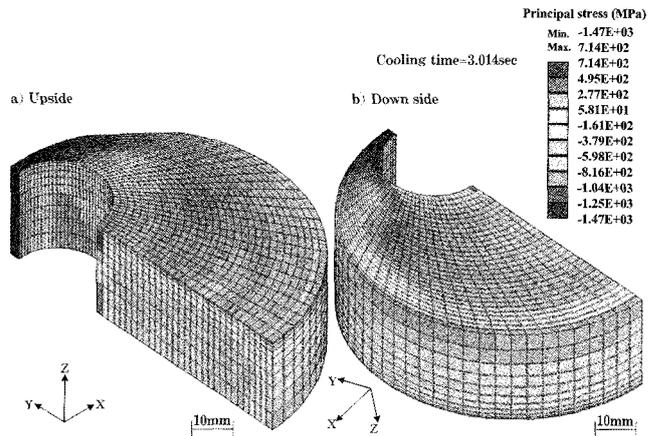


Figure 12 Transformation stress profiles analyzed by the Heat treatment CAE software for the quarter side specimen at 30 sec after water quenching.

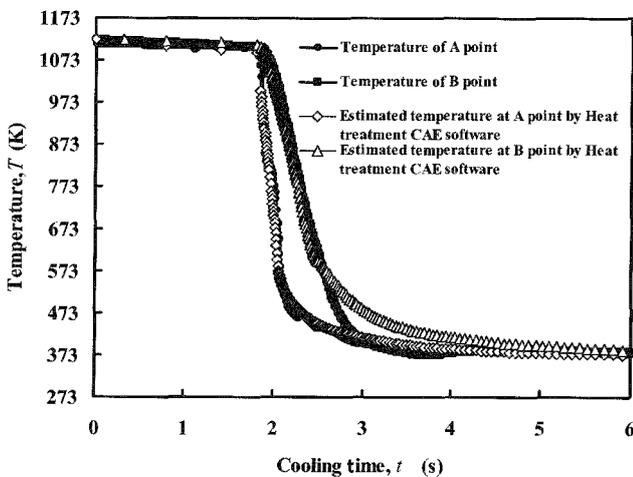


Figure 10 Temperature profiles in the experimental measurement and analysis by the Heat treatment CAE software for the cooling process of specimen 2.

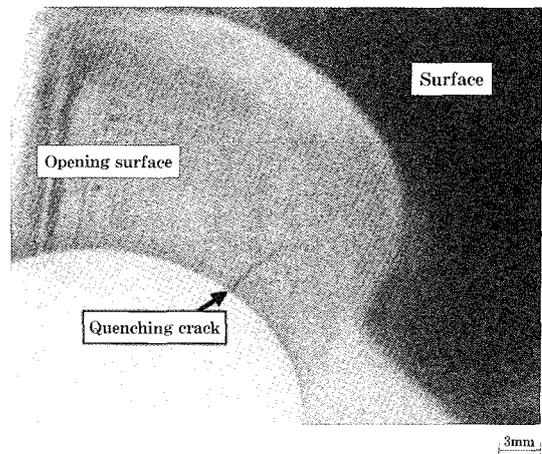


Figure 13 Scanning electron micrograph of a quenching crack in specimen 2.

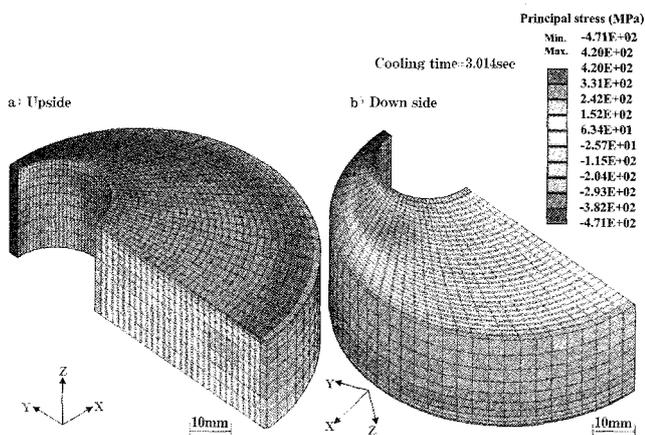


Figure 11 Thermal stress profiles analyzed by the Heat treatment CAE software for the quarter side specimen at 30 sec after water quenching.

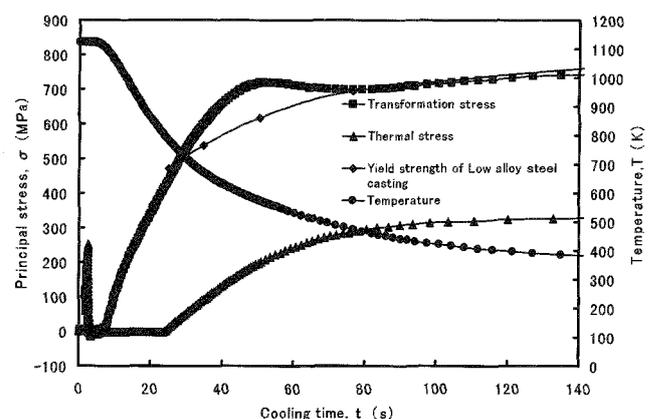


Figure 14 Profiles of temperature, thermal stress and transformation stress at the quenching crack point for the quenching process of specimen 2.

考えられる。すなわち本解析の結果、熱応力は降伏応力値より低い値を示していることから、熱応力では焼割れが発生しないと判断できる。この結果に対し、変態応力では冷却時間約30 sec 後約534 MPa であり、低合金鋳鋼材の降伏応力値490 MPa より高い値を示している。このことより冷却時間30 sec 後付近で焼割れが発生した可能性が高いことが判る。以上の結果、焼割れの発生原因は熱処理時の熱応力ではなくマルテンサイト変態によるものであることが明らかとなった。

4. まとめ

鋳鋼の焼割れ現象の解析に対する熱処理 CAE ソフトウェアの有効性を確認することを目的として、低合金鋳鋼材を1123 K からの水焼入れ処理における焼割れ原因と焼割れ発生時間について検討した結果、以下のことが判った。

1. 低合金鋼材は質量が大きくなることによって焼割れが発生しやすい。
2. 熱処理 CAE ソフトウェアの活用によって低合金鋳鋼材における焼割れの発生原因は、熱応力によるものではなく表面と内部におけるマルテンサイト変態に時間的な遅れ（差）が生じ、その変態応力の緩和がスムーズに行われなかったためであることが確認できた。
3. 熱処理 CAE ソフトウェアの活用によって焼割れが発生する時期を把握することが可能である。
4. 熱処理 CAE ソフトウェア活用によって焼割れ原因と焼割れ発生時期の把握が可能であることから、焼割れ防止対策には熱処理 CAE ソフトウェアの活用が有効である。

参考文献

- 1) 門河昌弘, 長岐 滋, 井上達雄, 鋼の焼入れと低温焼もどしにおける組織変化と応力の解析, 材料, 29巻, 327号 (昭和55年12月) 1173-1179.
- 2) 王志剛, 井上達雄, 相変態の応力依存性を考慮した鋼の焼入れにおける温度, 組織および応力の解析, 材料, 32巻, 360号 (昭和58年9月) 991-996.
- 3) Tatsuo Inoue and Kyouzo Arimoto, Development and Implementation of CAE System "HEARTS" for Heat Treatment Simulation based on Metallo-thermo-mechanics, J.Materials Engineering and Performance, ASM International, vol.6, No1 (1997-1) 51-60.
- 4) 井上達雄, 有本享三, 変態・熱。力学に基づいた熱処理シミュレーション用 CAE システム "HEART" の開発と応用, 材料, 44巻, 496号, (1995-1) 103-109.
- 5) 大和久重雄: 鋼の焼割れ研究部会報告, 熱処理, 29,239 (1989).
- 6) Y.Nagasaka et.al, Mathematical Model of Phase Transformations and Elasto-Plastic Stress in the Water spray Quenching of Steel Bars, METALLURGICAL TRANSACTIONS A, 1993, VOL.24A, 795-808.