

以下の予稿の原稿 (有本 享三)

有本 享三, 伊與田 宗慶, 吉井 聡一:

日本熱処理技術協会, 第 87 回春季講演大会 (2019), 33-34.

# 日本刀焼入れ時の反りのシミュレーションによる説明

## 1 はじめに

日本刀の反りは, 熱処理変形の発生理由を説明するための事例としてしばしば用いられるにもかかわらず, それに対する系統的な実験がなされてこなかった<sup>(1)</sup>. 筆者らは切先がなく断面一様の日本刀試験片の焼入れ実験を実施し, その過程で生じる反りや温度の変化, ミクロ組織, 残留応力についてすでに報告した<sup>(2)</sup>. 本研究では, この実験に対してシミュレーションを適用し, 得られた結果と実験結果との比較の後, 軸方向の各種ひずみの分布状態を分析することによって反りの発生メカニズムを明らかにする.

## 2 実験とその条件

日本刀の反り実験のため, 以下に示す切先がなく断面一様の 2 種類の試験片を製作した<sup>(2)</sup>.

- (1) 日本刀(JS)試験片: 日本刀と同じ鋼種で伝統的な形状を持つ. 刀匠が伝統的な工法で製作.
- (2) 模擬日本刀(MJS)試験片: S55C 製(MJS-S55C)および SUS304 製(MJS-SUS304)で, 筆者らによって JS 試験片とほぼ同じ形状に機械加工で製作.

上記の試験片は, いずれも長さが 280 mm, 断面の高さと最大幅がそれぞれ 30 と 8 mm である. 片側の端面には熱電対挿入のための穴を 3 箇所設けた. いずれの試験片の表面にも, 刀匠が焼刃土を伝統的な手法で塗布した. その後, 刀匠が加熱した試験片をアクリル容器中の水に浸漬することで焼入れた. 冷却中の試験片に生じる反り現象をビデオカメラで撮影し, 熱電対による温度変化データについても記録した.

## 3 熱処理シミュレーションと反り説明のためのシミュレーションひずみ法

試験片の反り現象に対して熱処理シミュレーションを適用し, そこで発生するミクロ組織, 温度, 変形, 応力, ひずみなどの変化を求めた. 本研究でのシミュレーションには DEFORM<sup>TM</sup>-HT<sup>(3)</sup>を用いた. 変形と応力の発生理由の説明には, 以下の関係式に基づく“シミュレーションひずみ法 (Simulated-strain based approach)<sup>(4)</sup>”を適用する.

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

ここに,  ${}^t\varepsilon_{ij}$ ,  ${}^t\varepsilon_{ij}^E$ ,  ${}^t\varepsilon_{ij}^{TH}$ ,  ${}^t\varepsilon_{ij}^{TR}$ ,  ${}^t\varepsilon_{ij}^P$  および  ${}^t\varepsilon_{ij}^{TP}$  は, それぞれ時間  $t$  における全ひずみ, 弾性ひずみ, 熱ひずみ, 相変態ひずみ, 塑性ひずみおよび変態塑性ひずみである. 式(1)の右辺のひずみは, 弾性ひずみを除き, 初期時間から  $t$  までの時々刻々の発生量を加算することによって得られる. なお, 本研究では, 簡便化のために熱ひずみと相変態ひずみを加算し, それを膨張ひずみと呼ぶ.

## 4 シミュレーションの条件

シミュレーションで用いた試験片モデルの形状・寸法を図 1 に示す. 試験片の対称性を利用した 1/2 モデルとなっており, 長手方向メッシュ分割数を 140 とした. その断面でのメッシュ分割状況を図 2 に示す. JS 試験片断面の炭素濃度分布を島津製作所 EPMA1610 で測定し, モデルに指定した.

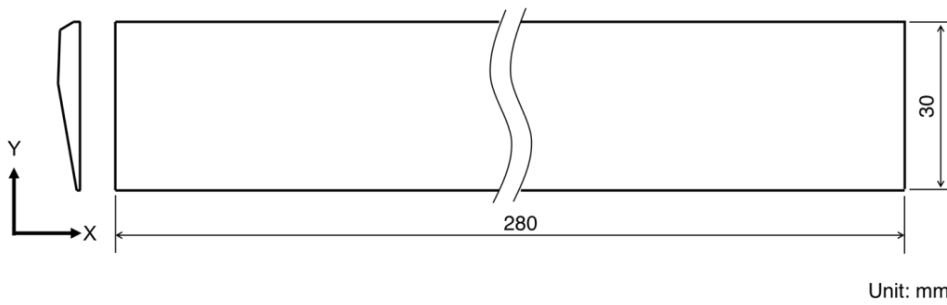


図1 シミュレーションモデルの形状・寸法

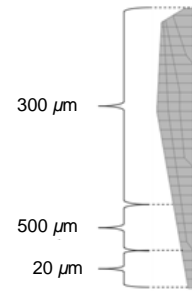


図2 JS試験片断面モデル

SUS304の機械的特性と熱伝導特性には、原子炉圧力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集<sup>(5)</sup>に含まれるSUS304母材のデータを用いた。S55Cと日本刀鋼については、熱処理技術協会の関連の研究部会において収集したデータから設定した。

焼刃土厚さの測定データに基づいて試験片表面を図2に示すように3領域に区分し、それぞれには図3に示す3種の水冷却の熱伝達係数を指定した。このデータは、焼刃土を塗布した銀棒プローブ(直径10 mmで長さ30 mm)の中心での冷却曲線<sup>(6)</sup>に集中熱容量法を適用し、さらに調整を加えることによって設定したものである。シミュレーションは試験片の加熱温度を800 °C、そして冷却水の温度を20 °Cとして実施した。

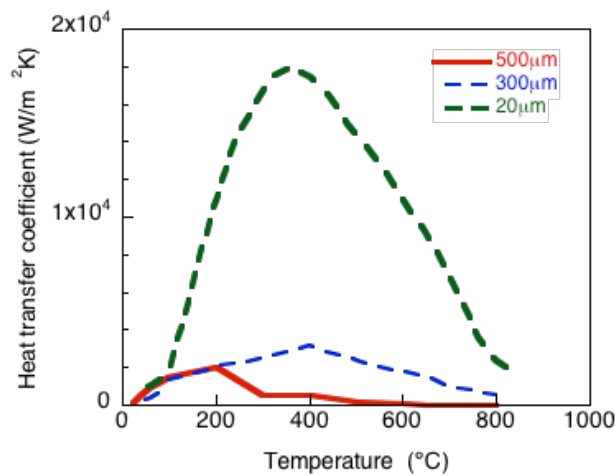


図3 焼刃土厚さ依存の熱伝達係数

## 5 シミュレーション結果とひずみ分析による反りのメカニズム

試験片に設置した熱電対から得られた冷却曲線<sup>(2)</sup>とシミュレーションによるものとは、十分に一致していると見なすことができた。3種の試験片における反り曲率の時間変化については、測定値とシミュレーションの結果の傾向が一致した。なお、この測定値はビデオ画像から得た値である。

図4には、JS試験片の長手中央断面でのy軸方向(刃先から棟)の膨張、弾性、塑性、変態塑性および全の各ひずみ(z軸方向)の分布の時間変化を描いた。線形の全ひずみ分布は反りが円弧の一

部であることを意味する。5 sでの右肩上がりの分布は逆反り、その後の大きな右肩下がりには日本刀本来の反りに対応する。

全ひずみの分布の発生には膨張ひずみや塑性ひずみなどが寄与する。たとえば、0.8 sで膨張ひずみが刃先側の急冷によって低下するが、同じ領域で塑性ひずみが発生することでこの効果は打ち消される。5 sになると、膨張ひずみにおける低下部分は冷却によって棟方向へ進行し、マルテンサイト変態による膨張の効果が明確になる。変態塑性ひずみは、マルテンサイトだけでなくパーライトへの変態による寄与が顕著となる。以上の効果が合わさって全ひずみは右肩上がりの分布となり、これが逆反りに対応する。

冷却が終了した100 sでは膨張ひずみはマルテンサイトの膨張により刃先側で0.002程度、一方、棟側で0となる。塑性ひずみについては刃先側で0.006程度の上昇となる。さらに弾性ひずみと変態塑性ひずみの効果が加わることで、全ひずみにおける右肩下がり分布が発生し、これが最終の反り<sup>(2)</sup>に対応する。

MJS-S55C試験片のひずみ分布はJS試験片のそれと同様の傾向となったが、逆反りに相当する全ひずみの分布は得られなかった。MJS-SUS304試験片の場合には変態ひずみが生じないため、最終の膨張ひずみはフラットな分布となった。一方、塑性ひずみがJS試験片の場合と同様に刃先側に生じ、これが全ひずみの右肩下がり分布に寄与した。これは実験で得られた軽度の反り<sup>(2)</sup>に対応している。なお、残留応力についても実験とシミュレーションの結果を比較・検討したが、その内容については割愛する。

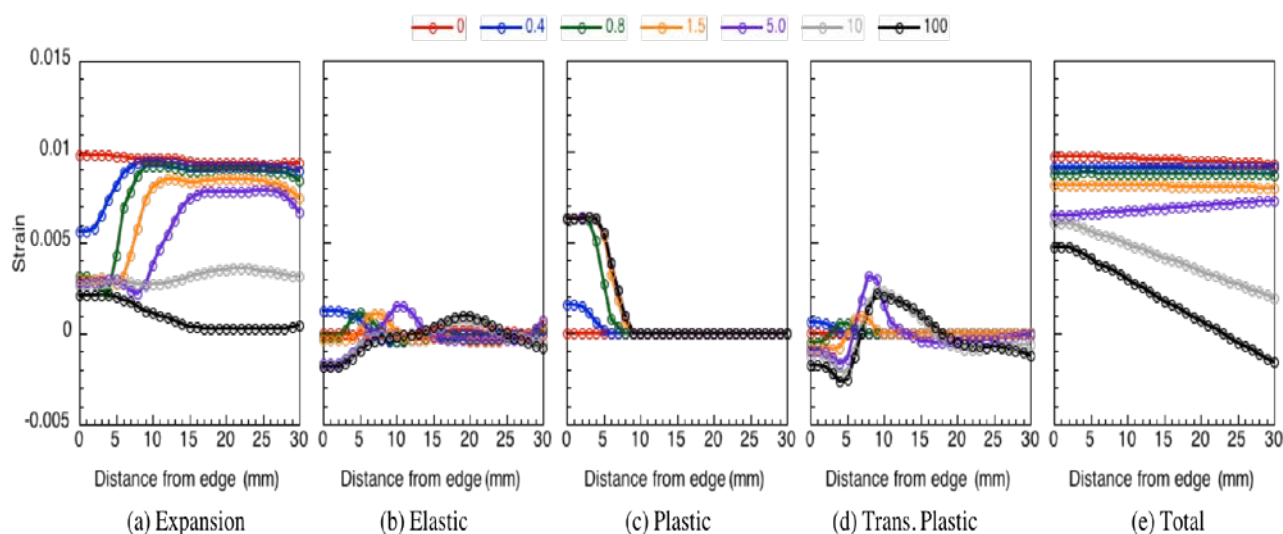


図4 JS試験片における各種ひずみの時間変化に関するシミュレーション結果

## 6 まとめ

日本刀試験片による焼入れ実験に熱処理シミュレーションを適用し、両者の傾向が良好に一致することを確認した。さらに、断面の各種ひずみ分布変化を分析し、反りの発生メカニズムを明らかにした。なお、本研究は、日本熱処理技術協会“熱処理シミュレーション実用化研究部”の活動の一環として実施された。

## 参考文献

- (1) 井上達雄, "日本刀の科学," 日刊工業新聞社 (2017)
- (2) K. Arimoto and M. Iyota: "Study on Blade Curving Caused by Quenching of the Japanese Sword," *Materials Performance and Characterization*, Vol. 8(2), pp. 305-319 (2019)
- (3) K. Arimoto, G. Li, A. Arvind, and W. T. Wu: "The modeling of heat treating processes," *Proceedings of the 18th Heat Treating Conference*, pp. 23-30 (1998)
- (4) K. Arimoto: "Thermally-Processed Steels: Residual Stresses and Distortion," In *Encyclopaedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, Taylor and Francis, New York, Published online, pp. 3605-3633 (2016)
- (5) 原子力安全基盤機構, "複雑形状部機器配管健全性実証 (IAF) 事業: 原子炉压力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集," JNES-RE-2012-24 (2013)
- (6) 奈良崎道治, 淵沢定克, 武田信男, "高温金属の水焼入れにおける冷却特性に及ぼす表面被覆層の影響," *熱処理*, Vol. 28 (5), pp. 279-285 (1988)