

## 過去 50 年の熱処理技術の流れ

# 熱処理シミュレーション(第 2 回)

## —システムの開発と適用—

有本 享三

### Heat Treatment Simulation (Part 2)

#### —Development of the System and Its Applications—

Kyozo ARIMOTO

Key words: Simulation, Numerical Model, Distortion, Residual Stress

## 4. 熱処理シミュレーションのシステム開発

熱処理シミュレーションの研究は、初期の段階では研究者が自らシステムを開発することによって進められた。今日では、実用化の過程を経て、一般の技術者が熱処理条件、部品形状、材料特性などのデータを入力すればシミュレーションの結果が得られる形の商用システムが出現している。

### 4.1 研究用システムの開発

Maurer と本多一広根の研究を起源とする熱処理残留応力に関する解析的手法は、その後改良がなされたが、単純形状に対する適用にとどまった<sup>(12)</sup>。しかし、コンピュータ技術の進展に伴って 1950 年代に開発された有限要素法により、新たな発展の方向性が見いだされることになる。1970 年代に入ると、有限要素法は、当初の弾性構造問題から熱伝導や熱・弾塑性・クリープなどの解析へと拡張された<sup>(14)</sup>。さらに相変態の予測、複合則、複数現象の連成機能などを付加することにより、熱処理のような相変態を伴う問題に適用するための研究が各国で行われるようになった<sup>(12)(107)</sup>。

有限要素法の熱処理現象への適用に関する初期の研究が一応の落ち着きを見た 1984 年に、この分野におけるはじめての国際会議が、17ヶ国から約 100 名が参加してスウェーデンの Linköping で開催された<sup>(12)</sup>。日本からは井上<sup>(108)(109)</sup>、利岡<sup>(110)</sup>、鎌本<sup>(111)</sup>の発表があった。会議の名称は“Calculation of internal stresses in heat treatment of metallic materials”であり、このことから当時の研究は熱処理変形よりも残留応力に重点がおかれていたことがわかる。会議の議事録の総括には、実験と計算の結果を良好に一致させるには、弾塑性解析に変態塑性の効果を加味する必要があるとの主張が記されている。

### 4.2 変態塑性の考慮

初期の研究用システムの開発では、その検証のために無限長円柱における残留応力分布の測定データとの比較が取り上げられた。そして、現象が単純なマルテンサイト変態のみが生じる完全焼入れでの測定との比較が優先された。結果として、以下の事例に示すように、残留応力分布に対する変態塑性の寄与が明らかにされた。

Denis<sup>(112)</sup>は、完全焼入れのケースとして、60NCD11 鋼の円柱(直径 35 mm, 長さ 105 mm)の水焼入れをシミュレーションとの比較の対象に用いた。円柱の中心付近において測定された残留応力の軸方向成分は圧縮であったが、シミュレーションでは変態塑性を考慮すれば圧縮、そうでなければ引張の状態となることが明らかにされた。

一方、Rammerstorfer<sup>(113)</sup>は、水焼入れした Fe- 11.6 % Ni 合金の円柱試験片(直径 50 mm, 長さ 300 mm)の残留応力を Sachs 法により測定した。この合金では、焼入れの冷却速度に関係なく拡散型変態は

生じない。シミュレーションにより、変態塑性を考慮すれば応力分布が測定結果に近づくことが確認された。

なお、浸炭焼入れのケースではあるが、Sjöström<sup>(114)</sup>は SIS2511 鋼円柱(直径 17 mm)の残留応力を測定し、変態塑性を考慮したシミュレーションはこの測定結果に接近することを明らかにした。

### 4.3 熱処理変形の予測

熱処理シミュレーションに対する初期の研究では、その検証として残留応力の分布との比較が注目され、熱処理変形が取り上げられることがまれであった。すなわち、システムの検証には、すでに述べたように主に円柱に生じた残留応力の測定結果が用いられた。そして、残留応力だけの計算であれば、加熱過程を省略し、高温の無応力状態を初期条件とする簡略化が可能となる。

事例は少ないが、1970 年代および 1980 年代においても、熱処理シミュレーションが変形の予測に適用されている。S38C 鋼および SNCM8 鋼の円柱試験片(直径 200 mm, 長さ 500 mm)の水焼入れで生じる熱処理変形に対し、利岡<sup>(115)(116)</sup>はシミュレーションを適用した。SNCM8 鋼円柱については、実験とシミュレーションから得られた直径の変化率が軸方向に沿って比較され、両者の傾向の一致が確認された。一方、歯車の熱処理変形に対しては、藤尾ら<sup>(117)(118)</sup>によるシミュレーションの適用事例がある。なお、利岡と藤尾らのシミュレーションでは変態塑性は考慮されていない。

変態塑性の熱処理変形に対する寄与は、Thuvander<sup>(119)</sup>による浸炭焼入れリングの実験とシミュレーションに基づく研究において明らかにされた。

### 4.4 システムの実用化

1990 年代に入ると、熱処理シミュレーションの実用化に対する機運が生じてきた<sup>(12)</sup>。このころ、すでにフランスには商用ソフト SYSWELD が存在していた。国内では、井上らの研究をベースとした実用化ソフトの開発が開始された。同時期に、米国では国の支援を得て、主に同様のソフトウェアの開発を目標としたプロジェクトが始動した。この他にも実用化に対する取り組みがなされ、現在では数種の商用ソフトが利用できる段階にまで至っている。なお、はん用有限要素法ソフトにユーザサブルーチンを付加することで、熱処理シミュレーションを実現しているケースが見うけられる。

## 5. 熱処理シミュレーションの適用

1990 年代以降は、商用ソフトを用いた熱処理シミュレーションの事例が報告されるようになった。一方、熱処理変形に関する研究プロジェクトが、商用ソフトの利用を前提として計画されるようになった。以下では、焼入れプロセスへのシミュレーションの適用事例について述べるが、井上<sup>(12)</sup>や奈良崎<sup>(26)</sup>が報告している国内の事例は割愛し、主として米国とドイツでのプロジェクトに関係するものについてとりまとめることにする。一方、窒化のシミュレーションについては、国内ではそのレビューが見あたらないため、この機会に研究と開発の経緯を含めて概説する。

### 5.1 焼入れ

#### 5.1.1 米国

1990 年代に入ると米国においても熱処理変形の研究への取り組みの機運が高まり、1992 年には ASM International の主催により焼入れと変形の制御に関する国際会議が開催された。この会議の米国からのシミュレーションに関する発表テーマは、Colorado School of Mines<sup>(120)</sup>による片側浸炭板の曲り、Wyman-Gordon<sup>(121)</sup>による航空機部品の焼入れ変形などであった。一方で、冷却時の熱伝達係数の熱伝導逆計算による推定に関する研究が報告された<sup>(122)(123)</sup>。

米国では、同時期に熱処理変形に関するプロジェクトが NCMS (National Center for Manufacturing Sciences)の主宰によって開始された。そのメンバーは、エネルギー省傘下の 4 個所の国立研究所 (Los Alamos, Lawrence Livermore, Oak Ridge および Sandia), Ford, GM, Torrington, Deformation Control Technologies, MSC, IIT Research Institute, J. P. Industries, そして Colorado School of Mines であった<sup>(124)</sup>。

NCMS プロジェクトでは、熱処理シミュレーションのシステムを汎用プログラム ABAQUS にユーザサブルーチンを付け加えることによって開発し、浸炭歯車の変形予測に適用した<sup>(125)</sup>。また、一方で、ソフトの機能については、すでに Colorado School of Mines で行われた片側浸炭板の変形と残留応力に関する実験などに基づいて検証した<sup>(126)</sup>。プロジェクトの成果であるシステムは、現在では商用ソフト DANTE として流通している。

米国では、鍛造シミュレーションの分野でのソフトの開発会社 SFTC が、そのシステムの機能を熱処理の分野へ拡張することによって DEFORM-HT を開発した。ソフト開発の過程での検証と適用の事例が、ASM International の会議において報告されている<sup>(127)-(130)</sup>。その後、このソフトはグローバルな普及によって適用事例を増やしている<sup>(62)(131)(132)</sup>。

### 5.1.2 ドイツ

ドイツ Bremen の IWT (Foundation Institute of Material Science)では、熱処理変形に関するプロジェクト<sup>(133)</sup>が、2001 年から 9 年を掛けて実施された。この目的は、熱処理だけではなくそれに連なる複数のプロセスからも変形の要因が生じることに着目し、その解明と制御手法を開発することであった。実験とシミュレーションに基づいて広範な研究テーマが設定されたが、このような総合的な取り組みは変形工学(Distortion Engineering)と名づけられた。

一方、ドイツでは、Robert Bosch の提案により C.A.S.H. (Computer Aided Simulation of Heat treatment)プロジェクト<sup>(134)(135)</sup>が組織された。他のメンバーは DaimlerChrysler, ALD Vac. Tech., ESI, Kistler-IGel, SHU, IWK および IWT であり、実際の複雑形状部品に対する商用ソフト SYSWELD と DEFORM-HT の適用に関する実現性が確認された。

IWT プロジェクトの成果は、2005 年と 2008 年に開催された変形工学に関する国際会議において報告されている。一方でこの会議は、IWT プロジェクトに直接関係のない研究に対しても、その成果を報告するための機会を与えている。たとえば、C.A.S.H プロジェクトの成果は 2005 年の会議で報告されている。以下では、この国際会議で発表されたシミュレーションに関連する研究について紹介し、ドイツおよびヨーロッパにおけるこの分野の状況について取りまとめる。

まず、2005 年の会議で報告された研究事例について述べる。基礎的な研究として、3 種の熱間工具鋼で製作した円柱(直径 100, 長さ 100mm)の真空炉加熱・ガス冷却後の変形、残留応力、硬さに対する測定値と DEFORM-HT によるシミュレーション結果との比較が、Böhler Edelstahl の Schützenhöfer<sup>(136)</sup>らによって報告された。一方、浸炭焼入れの基礎研究として、鋼円板試験片の片側浸炭による変形と SYSWELD によるシミュレーションとの比較が IWT の Acht ら<sup>(137)</sup>によって発表された。

ガス冷却による変形の基礎研究として、IWT の Frerichs ら<sup>(138)</sup>は、寸法の異なるオーステナイトステンレス鋼円柱での変形とそれに対する SYSWELD によるシミュレーションとの比較について報告した。一方、ガス焼入れによる変形の解析のため、LSG2M の Douce ら<sup>(139)</sup>は、SYSWELD と流体解析の商用ソフト FLUENT を組み合わせたシステムを用いた。炉内の円柱試験片周りの流れ状態を PIV(Particle Image Velocimetry)法によって測定し、それを FLUENT による結果と比較した。そして、流れの情報に基づく熱伝達係数を SYSWELD に適用し、変形シミュレーションを行った。

BIAS の Pretorius ら<sup>(140)</sup>は、熱処理変形の制御のため、その前段階で生じた残留応力の状態をレーザービームの局部照射で調整する可能性について確認した。歯車の一歯を単純化した試験片に対する実験結果が、SYSWELD によるシミュレーションと比較された。

実際的な事例の発表であるが、真空浸炭・ガス冷却後における歯車の変形に関する実験とシミュレーションが KIMAB の Thuvander<sup>(141)</sup>によって報告された。シミュレーションには ABAQUS をベースに

したソフトを用い、歯切り前のリングおよび歯車が比較の対象とされた。歯車については、その各面に対する熱伝達係数の見積りの重要性が指摘されている。ALD Vac. Tech.の Heuer と Löser<sup>(142)</sup>による熱伝達と物質移動のアナロジーを用いた手法が紹介されているが、この研究への適用が間に合わなかったとの記載がある。

その他、IWT の Surm ら<sup>(143)</sup>は、52100 鋼のベアリングリングの熱処理変形の予測を精密化するため、熱処理前の応力状態を仮想的な熱ひずみによって設定し、SYSWELD を用いて切削後と次の加熱過程における応力状態の予測を試みた。

次に 2008 年の会議であるが、まずは基礎的な研究事例について述べる。LSG2M の Mangin ら<sup>(144)</sup>は、鋼円筒の炉中加熱の過程における曲り変形を測定し、SYSWELD と FLUENT を組み合わせたシステムによるシミュレーション結果と比較した。その結果、不均一な加熱によって生じる曲りが、定量的に把握できることが示された。Frerichs ら<sup>(138)</sup>の研究に対する追加計算が Zagreb 大学の Landek ら<sup>(145)</sup>によって行われ、円柱の長さの変化を表現するための近似式が導出された。

実際の事例として、SKF の Burtchen ら<sup>(146)</sup>は、52100 鋼ベアリングリングのソルト焼入れに対し、SYSWELD を適用した結果について報告した。リングは外形：120mm、厚さ：10mm、高さ：46mm であり、冷却中におけるその中心での温度上昇が指摘された。前回の国際会議で報告された Surm ら<sup>(143)</sup>のベアリングリングの加熱過程における変形の研究に対し、IWT の Surm と Hoffmann<sup>(147)</sup>は、クランピングの状況を考慮したシミュレーションを追加した。やはり前回の国際会議で報告された Pretorius ら<sup>(140)</sup>の熱処理の前段階での残留応力調整の研究は、BIAS の Pretorius と Vollertsen<sup>(148)</sup>により、実際の歯車の一歯モデルに対する SYSWELD のシミュレーションにまで進展した。そして、冷間ダイス鋼 D2 を TiN-CVD 処理し、さらに局部的にレーザー焼入れすることで生じた残留応力の SYSWELD によるシミュレーションが、IWT の Rose ら<sup>(149)</sup>によって報告された。

## 5.2 窒化

窒化の数値計算に関する研究は、1980 年代になって報告されるようになった。それ以前にも、拡散、平衡状態図、窒化物の析出などに関する理論的研究はあったが、これらを総合して窒化現象に適用するには、コンピュータによる数値計算手法の進展が必要であった。なお、ここでは変形と応力の含む手法を便宜上“窒化シミュレーション”と呼ぶことにする。以下では、窒化の数値計算とシミュレーションの研究開発の流れについて概説する。

### 5.2.1 拡散と析出

純鉄の窒化では、表面に化合物層が生成するまでは窒素の拡散現象のみが生じる。化合物層が生じるまでの潜伏期に対する数値計算は、1983 年に Rozendaal ら<sup>(150)</sup>によって報告された。その際、環境から純鉄への窒素の移動には、Grabke<sup>(34)</sup>による物質移動係数およびアンモニア-水素ガスと平衡する鉄中の窒素濃度に基づくモデル式が適用された。実験から得られた窒化による硬さの上昇と数値計算による窒素濃度については、それぞれの分布の傾向が一致することが示された。

低合金鋼に対するプラズマ窒化の数値計算が、1997 年に Sun と Bell<sup>(151)</sup>によって報告された。その研究のためのシステムの開発では、Bongartz ら<sup>(152)</sup>による炭化物の析出を考慮した浸炭の数値計算の研究成果が用いられている。プラズマ窒化プロセスにおける  $\gamma'$  層の成長とスパッタリング現象に関しては、Marciniak<sup>(153)</sup>のモデルが適用されている。そして、固体表面からの窒素の侵入は、実験によって求めた流束<sup>(154)</sup>の直接指定によって取り扱っている。拡散層での TiN, VN, CrN などの窒化物の析出は、Pearson と Ende<sup>(155)</sup>の溶解度積モデルを用いて予測している。Cr 鋼および Cr-Ti 鋼のプラズマ窒化に対する予備的な数値計算結果、そして実用鋼(En40B, En19, Nitrap)の窒化後における窒素濃度分布に対する実験結果と数値計算との比較が報告されている。

ガス窒化の数値計算として、Schacherl ら<sup>(156)</sup>は、Fe-Cr 合金での CrN の析出を考慮した拡散現象を取り扱った。一方、高 V 合金鋼のガス窒化に対する数値計算が、Larsson と Ågren<sup>(157)</sup>により商用ソフト

DICTRA を用いて行われた。この数値計算では、7種の元素(Fe, C, Cr, Mo, W, V および N)およびフェライト, M(C,N), M<sub>6</sub>C などの相が考慮されている。4種の合金鋼に対する数値計算と実験との比較が報告されている。

平岡と井上<sup>(158)</sup>は、多成分鋼のガス軟窒化における現象の解明のため、窒素の拡散と窒化物の析出を考慮した数値計算手法を開発した。一方で S40C をベースにして Si, Ni, Cr, Mo, V, W, Co の7元素の量を系統的に変化させた15種の合金を作製し、これらのガス軟窒化後における硬さ、窒素濃度などの分布状態の差異を調べている。この実験結果は数値計算と比較されている。

窒化物の析出における核生成と生長の過程を考慮した数値計算が、楠見ら<sup>(159)</sup>によって報告された。このシステムは、Ti 添加の極低炭素鋼(0.001%C)における短時間窒化に対して適用されている。TiN の析出における核生成の頻度には、転位密度、母相と TiN 間の界面エネルギー、Ti の拡散係数などが考慮されている。析出物の成長は、そこに流入する Ti の質量バランスに基づく微分方程式を解くことによって予測されている。

Auinger と Rohwerder<sup>(160)</sup>は、マルチフィジックス解析の有限要素法商用ソフト COMSOL と熱力学の商用ソフト FactSage を連成させることにより、結晶粒と粒界の効果および多成分の拡散を考慮した窒化の数値計算システムを実現した。これを 5110 鋼の窒化に適用することにより、CrN, Cr<sub>3</sub>C などの化合物だけでなく、ε や γ' 層の進展が予測できることを示した。

オーステナイトステンレス AISI 316 鋼を 445°C でガス窒化した際の数値計算が Christiansen ら<sup>(161)</sup>によって試みられ、窒素濃度分布が図 10 に示すように求められた。ここで、N1, N2 と N3 の条件は、窒化ポテンシャル  $K_N$  が 0.293, 2.49 と ∞ のケースに対応している。 $K_N$  が 1.41 の場合のみの実験データが示されている。なお、図の縦軸の  $y_N$  は副格子濃度である。この窒化により表層には拡張オーステナイトが生じるとされているが、その生成は Schacherl ら<sup>(156)</sup>の CrN の析出を伴う拡散モデルに準じて取り扱われた。図 10 には、筆者らによる結果<sup>(162)</sup>をマーカーで示した。凡例中の(M)は拡散中の窒素の濃度であり、(M+I)はトラップによって拡散が停止した状態の窒素の濃度を加算したものである。

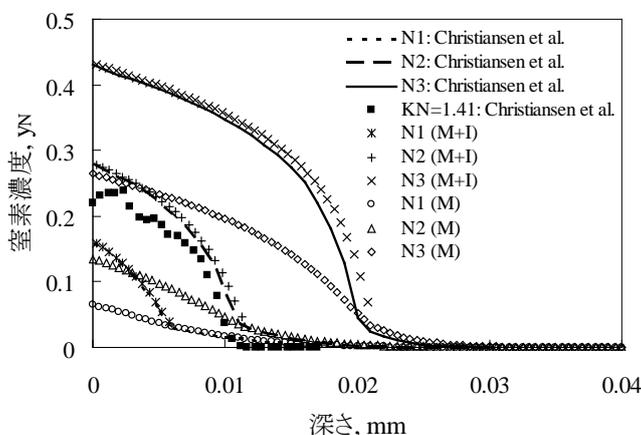


図 10 窒化ステンレス鋼における深さ方向の窒素濃度分布

### 5.2.2 残留応力

Kolozsvary のレビュー<sup>(163)</sup>では、窒化による残留応力を予測するためのシミュレーションとして Oettel と Schreiber による成果が紹介されている。その応力計算のモデルでは、弾性ひずみ、窒化物析出による膨張ひずみおよびクリープひずみが考慮されている。Fe-Al-C 合金の 590°C 窒化による残留応力分布に対し、実験とシミュレーションとの結果が比較されている。

プラズマ窒化による残留応力の予測のために Buchhagen と Bell<sup>(164)</sup>はシミュレーションシステムを開発したが、使用したのは基本的に Oettel と Schreiber の手法であると記している。そのシステムは Cr 鋼のプラズマ窒化に適用され、X線測定による残留応力値と比較されている。

Daves と Fischer<sup>(165)</sup>は、商用の有限要素法はん用ソフト ABAQUS にユーザサブルーチンを追加することにより、窒化による残留応力のシミュレーションを実現した。応力とひずみのモデルでは、弾性、熱、塑性の他に、クリープ、変態塑性、拡散の各種ひずみを考慮している。50CrMo4 鋼円柱の 4h 窒化による残留応力に対し、測定とシミュレーションとの結果が比較されている。

### 5.2.3 変形

窒化によって生じる変形は他の熱処理プロセスに比べて一般的に小さいのではあるが、精密部品ではこれを無視することができない場合がある。そのため、古くから実験的手法による研究が行われている。一方、この変形に対し、鈴木ら<sup>(166)</sup>は有限要素法に基づく簡易的な弾性計算を試みているが、本格的なシミュレーションに関する報告はほとんど見いだせない状況にあった。

有限要素法に基づく熱処理シミュレーションソフトに対して機能追加を行うことで、筆者ら<sup>(162)</sup><sup>(167)</sup>は窒化による変形と残留応力の予測が可能なシステムを開発した。その際、窒化物の析出に対しては Sun と Bell<sup>(151)</sup>が用いたものと同様のモデルを適用した。

このシステムの検証のためには、Mailänder<sup>(168)</sup>による 1%Al-1.3%Cr 鋼の円柱(直径 4 から 24 mm, 長さ 120mm)のガス窒化(500°Cで 96h)で生じる変形の測定結果が用いられた。なお、有限要素モデルには、無限長円柱の仮定に基づく 2次元軸対称要素を用い、窒化中には CrN と AlN の析出を考慮した。

Mailänder<sup>(168)</sup>は、図 11 に示すように、窒化前後での鋼円柱の長さや直径の変化が、その直径の違いによって影響を受けることを実験によって明らかにした。シミュレーションの結果も、同じ図中に示すように同様の傾向を示した。一方、円柱の表面部と中心部における軸方向残留応力(平均値)に対しても直径の違いによる影響が調べられているが、実験とシミュレーションとの結果の傾向は図 12 に示すように一致した。

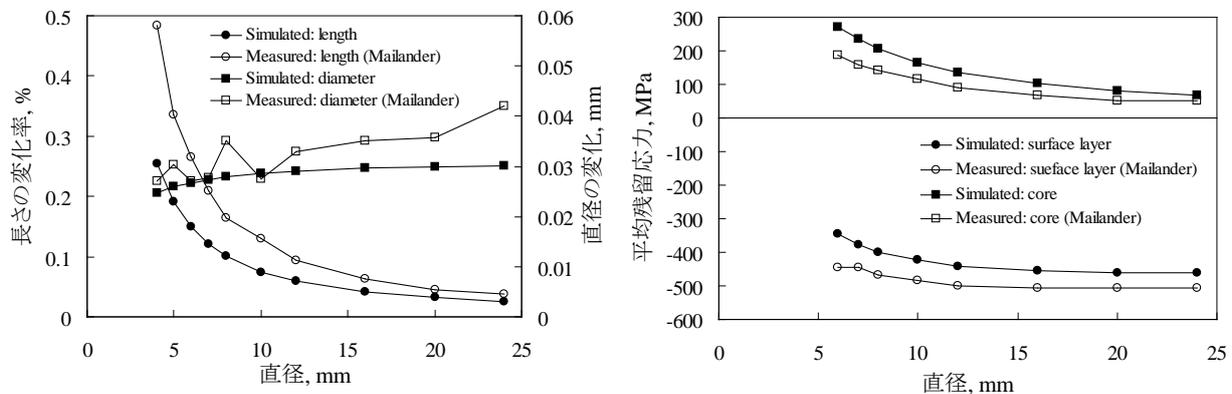


図 11 直径が異なる窒化円柱における長さや直径の変化 図 12 直径が異なる窒化円柱における平均残留応力

なお、ステンレス鋼の低温窒化における窒化層の進展については、すでに述べたように、筆者ら<sup>(162)</sup>と Christiansen ら<sup>(161)</sup>との計算結果の一致が確認されている。同様の実験に対し、Christiansen<sup>(169)</sup>は窒化後の残留応力を測定しており、それに対しても筆者らのシミュレーションは妥当な結果を予測した<sup>(162)</sup>。さらに、Sienz ら<sup>(170)</sup>による片側窒化ステンレス鋼薄板の曲りのその場測定に対しても筆者らのシミュレーションが適用され、同様の傾向が予測できることが確認された<sup>(162)</sup>。

## 6. 熱処理現象のメカニズムの解明

どのような問題でも、その本質の理解あるいはメカニズムの解明により、解決策への到達が容易となる。熱処理変形と残留応力についても、古くからその発生理由に対する説明が試みられてきた。たとえば、第2章で紹介した1939年の日本金属学会の専門部会における討論において谷村は、日本刀の反りに対し“一部だけ刃になる所だけをマルテンサイトとしまして、背中の方は焼きが十分入っておりません。そこでこのAr<sub>2</sub>”膨張によって刃になっているところが多く伸びます。それで刀は焼入れすると必ず反るものであります”と解説している。

谷村は、単に変態ひずみのみをその解説のよりどころとしているが、今日ではシミュレーションから弾性、塑性、変態塑性などのひずみが得られ、それぞれの変形への寄与を確認することが可能となっている。確かに、熱処理シミュレーションは数値実験の道具として有効であるが、筆者は出力結果を分析することによって熱処理現象に対するメカニズムの解明に利用できることを確認した。以下では、逆硬化現象、焼割れ、熱処理変形、残留応力の発生メカニズムの解明に適用した事例について述べる。

### 6.1 逆硬化現象

高炭素鋼円柱の普通焼入れでは、通常、冷却速度の速い表面側はマルテンサイトとなり硬さが上昇する。しかし、清水と田村<sup>(171)</sup>は、ベアリング鋼の油焼入れにおいてそれとは逆の硬さ分布の発生があることを指摘し、これを逆硬化現象と呼んだ。さらに、ベアリング鋼円柱を一定時間空冷した後に食塩水冷却すれば、この逆硬化現象が常に発生することを確認した。

逆硬化現象のメカニズムを解明するため、空冷後食塩水焼入れの鋼円柱に対してシミュレーション<sup>(172)</sup>の一部の機能が適用された。その結果、空冷中に表面側が先にパーライト変態し、その潜熱によって円柱の温度が上昇に転じ、それが円柱内部での相変態を遅らせることが示された。したがって、食塩水冷却により、その時点でのオーステナイトが速やかにマルテンサイトに変態することで、内部の方がマルテンサイトの体積分率が高くなる。空冷中に温度の上昇が生じることは、実験によって確認されている<sup>(173)</sup>。

### 6.2 焼割れ

焼割れについても、熱処理シミュレーションによってその現象に対する理解が深まってきている。2%Cr鋼段付き円柱(直径100mmで長さ100mmの円柱が直径50mmで長さ20mmの円柱に連なる)を1200°Cから水焼入れすると、段の表面に円周状の焼割れが生じることが井上ら<sup>(174)</sup>によって報告されている。すなわち、図13における点3の付近で焼割れが生じたことになる。

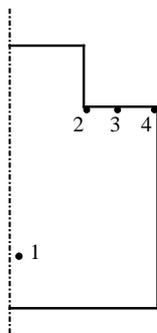


図13 Cr鋼段付き円柱の形状と評価点

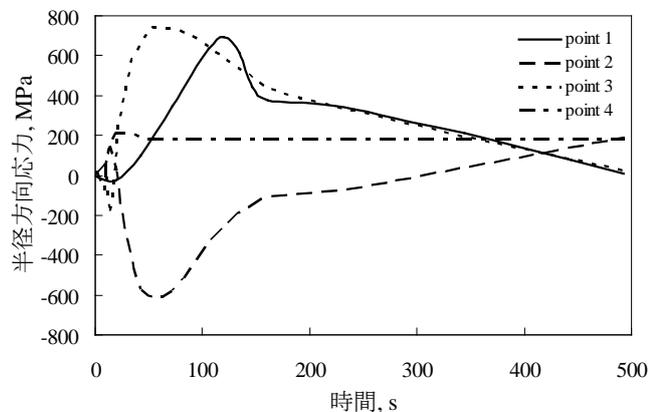


図14 Cr鋼段付き円柱の評価点での半径方向応力の変化

この焼割れにはシミュレーション<sup>(129)</sup>が適用され、図 13 の 4 個所の点での半径方向応力の変化が図 14 に示すように求められた。焼割れの発生位置に近い点 3 では、焼入れ後 54 s の時点で半径方向応力に引張のピークが生じている。また、この位置では、焼割れの時点でマルテンサイト変態の完了が予測されている。以上の結果から、引張応力のピークと円周状の焼割れとの関係が示唆されている。

偏心穴付きの SK4 鋼円板試験片(直径 30 mm で厚さ 10 mm)が、焼割れ発生 of 基礎的研究のために用いられた<sup>(130)</sup>。偏心穴は直径 10 mm で、円板の中心から 8 mm ずれた位置に設けられている。この試験片を水焼入れすると、冷却開始から約 5 s 後に偏心穴付近で焼割れが生じた。この現象に対するシミュレーションからは、焼割れ位置近くの点ではその発生時刻においてマルテンサイト変態が十分に進展し、しかも引張の主応力が極大になるという結果が得られた。

### 6.3 熱処理変形と残留応力

典型的な熱処理変形として、長尺部品の焼曲りがある。キー溝付き鋼軸の焼曲りについては、その挙動がビデオ撮影によって記録され、さらにシミュレーション結果から得られた断面での各種のひずみに対する分析がなされた<sup>(176)(177)</sup>。図 15 に示すように、軸方向の塑性ひずみは最終的にキー溝側で正、その反対側でいくぶん負となるが、この線形に近い分布が最終曲りの要因であることが明らかにされた。なお、このケースでは全体がマルテンサイトに変態するので、変態ひずみは最終曲りには寄与しない。

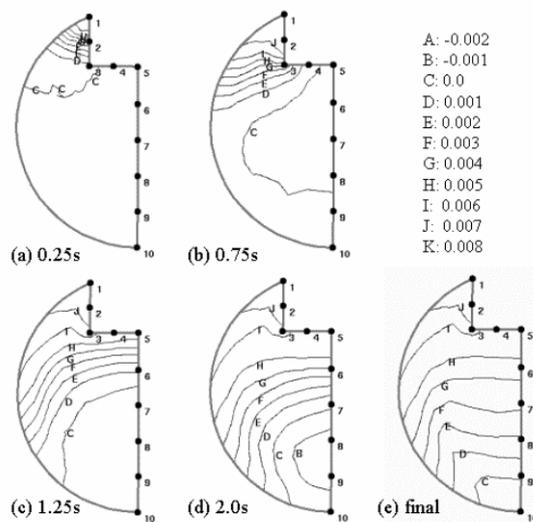


図 15 キー溝付き鋼軸断面における軸方向塑性ひずみ分布の変化

鋼円柱に生じる熱処理変形および残留応力分布については古くから測定が繰り返され、各種条件に対するそれぞれの特徴が把握されている<sup>(103)–(106)</sup>。しかし、個々の特徴がなぜ生じるかを明確に説明することはできなかった。熱処理シミュレーションにより、キー溝付き鋼軸と同様、各種のひずみを分析することでその発生メカニズムの解明がなされるようになってきている。たとえば、完全焼入れと不完全焼入れの鋼円柱<sup>(13)</sup>、炭素濃度の異なる Cr 鋼円柱<sup>(178)</sup>などの事例がある。リング形状の部品についても、浸炭焼入れ<sup>(179)</sup>、高周波焼入れ<sup>(180)</sup>の場合に対する同様の事例が報告されている。そして、窒化における変形と残留応力についても、その発生のメカニズムが調べられている<sup>(162)(167)</sup>。

## 7. おわりに

この記事では、Maurer と本多一広根の研究を起源とする熱処理シミュレーションの技術の流れを駆け足でたどった。新しいと思われている分野が、脈々と受け継がれてきた伝統の上に構築されているということを感じ取っていただけたならば幸いである。

熱処理の変形と残留応力に関する理論的研究は、世界各国の関係者のたゆまぬ努力により、複数の商用ソフトが利用できるまでに成長した。一般の技術者にとっては、その利用方法を理解すれば、現実の多様な熱処理の現象やプロセスに適用できるようになっている。ただし、単なる数値実験だけに用いるのではなく、本文で指摘したように、その結果を十分に分析することで現象の本質的な理解を得るために活用することも可能である。今後は、このシミュレーションが、各種の不具合による経済損失を軽減させることや部品の信頼性を向上させるという点で、重要な役割を果たしていくものと考えらる。

すでに奈良崎<sup>(181)</sup>が示したロードマップにはこの分野のあるべき姿が示されているが、グローバルな商用ソフトの開発拠点が国内には存在しない点については十分に認識しておく必要がある。一方、モデルの信頼性の向上や利用技術の高度化のためには、基礎的な検証、特性データの収集などが地道に実行されねばならない。本文で述べたドイツ Bremen の IWT では、このような目的で変形工学に関する研究が継続されるものと考えらる。しかし、顧みると国内には IWT に相当する機関は存在しない。

このつたない記事を終えるにあたり、今回の執筆の過程で気づいた IWT と本協会との交流の事跡について触れさせていただく。本協会の理事であった河上を団長とする欧米視察団は、1968年に IWT(当時は Institut für Härtereitechnik)を訪問し<sup>(182)</sup>、その2年後、協会は10周年の行事に当時の研究所長である Schaaber 博士を日本に招待した<sup>(31)</sup>。博士を迎えるにあたって河上は本誌に随筆を寄稿し<sup>(183)</sup>、そこでは1950年に設立された Bremen の研究所について“敗戦の痛手からようやく再起に向けたその時期にこのような研究所が設置されていることに注目すべきではなかろうか”と述べている。続けて“われわれは少なくとも今後の10年間にこの種の研究所をわが国のどこかに実現せしめたいと祈っている”とその心情を披露している。Bremen の国際会議で二度の発表の機会を得た筆者には、河上のこの一文は得難い発見となった。

## 参考文献

- (107) A. J. Fletcher: Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment, Elsevier Applied Science (1989).
- (108) T. Inoue and Z. Wang: Mats. Sci. Tech., 1, p. 845 (1985).
- (109) T. Inoue, Z. Wang and T. Yamaguchi: Mats. Sci. Tech., 1, p. 872 (1985).
- (110) Y. Toshioka: Mats. Sci. Tech., 1, p. 883 (1985).
- (111) S. Kamamoto, T. Nishioka and S. Kinoshita: Mats. Sci. Tech., 1, p. 798 (1985).
- (112) S. Denis, E. Gautier, A. Simon and G. Beck: Mats. Sci. Tech., 1, p. 805 (1985).
- (113) F.G. Rammerstorfer, D. F. Fischer, W. Mitter, K. J. Bathe and M. D. Snyder: Computer & Structures, 13, p. 771 (1981).
- (114) S. Sjöström: Mats. Sci. Tech., 1, p. 823 (1985).
- (115) 利岡靖継: 熱処理, 15, p. 128 (1975).
- (116) 利岡靖継: 鉄と鋼, 62, p. 1756 (1976).
- (117) 藤尾博重, 会田俊夫, 増本雄治: 日本機械学会論文集, 42, p. 4026 (1976).
- (118) 藤尾博重, 会田俊夫, 秋園純一: 日本機械学会論文集, 44, p. 3950 (1978).
- (119) A.Thuvander: Calculation of Distortion during Case Hardening of Ring Samples of Steel DIN16MnCr5," Swedish Institute for Metals Research, Report IM-2671 (1990).
- (120) M. Henriksen, D. B. Larson and C. J. Van Tyne: Proc. 1st Int. Quenching and Distortion Control, ASM Int., p. 213 (1992).
- (121) R. I. Ramakrishnan: Proc. 1st Int. Quenching and Distortion Control, ASM Int., p. 235 (1992).
- (122) J. V. Beck and A. M. Osman: Proc. 1st Int. Quenching and Distortion Control, ASM Int., p. 147 (1992).

- (123) B. H. Hernandez-Morales, J. K. Brimacombe, E. B. Hawbolt and S. M. Gupta: Proc. 1st Int. Quenching and Distortion Control, ASM Int., p. 155 (1992).
- (124) W. Dowling, D. Shick, T. Pattok, Y. Helen Gu, B.L. Ferguson, and M.A. Howes: Proc. 2nd Int. Conf. on Quenching and the Control of Distortion, ASM Int. p. 349 (1996).
- (125) C. Anderson, P. Goldman, P. Rangaswamy, G. Petrus, B.L. Ferguson, J. Lathrop and D. Nikkel Jr.: Proc. 2nd Int. Conf. on Quenching and the Control of Distortion, ASM Int. p. 377 (1996).
- (126) V. C. Prantil, M. L. Callabresi, J. F. Lathrop, G. S. Ramaswamy, M. T. Lusk: ASME J. Eng. Mater. Tech., 125, p.116 (2003).
- (127) K. Arimoto, D. Lambert, G. Li, A. Arvind and W. T. Wu: Proc. 18th Heat Treating Conference, ASM International, p. 639 (1998).
- (128) D. Lambert, W. T. Wu, K. Arimoto and J. Ni: Proc. 18th Heat Treating Conference, ASM International, p. 93 (1998).
- (129) K. Arimoto, G. Li, A. Arvind and W. T. Wu: Proc. 18th Heat Treating Conference, ASM International, pp. 23 (1998).
- (130) K. Arimoto, K. Lee, D. Lambert, and W. T. Wu: 19th Heat Treating Conference, ASM International, p.425 (1999).
- (131) N. Takasaki, Y. Fujiwara, Y. Aoyama and T. Kozuka: Proc. 20th Heat Treating Conference, ASM International, p.680 (2000).
- (132) 河野正道: 電気製鋼, 76, p. 293 (2005).
- (133) H. W. Zoch: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 3 (2005).
- (134) J. Schwarzer, M. Ehlers and J. Güttler: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 261 (2005).
- (135) C. Franz, T. Lübben, J. Lütjens, F. Streicher, N. Trapp and M. Vogel: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 281 (2005).
- (136) W. Schützenhöfer, C. Redl, H. Schweiger, I. Siller, N. Dickinger and R. Schneider: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 65 (2005).
- (137) C. Acht, B. Clausen, F. Hoffmann and H. W. Zoch: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 251 (2005).
- (138) F. Frerichs, D. Landek, T. Lübben, F. Hoffmann and H. W. Zoch: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 415 (2005).
- (139) J. F. Douce, J.P. Bellot, S. Denis, P. Lamesle, F. Gouhinec, F. Chaffotte and G. Pellegrino: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 437 (2005).
- (140) T. Pretorius, G. Habedank, J. Woitschig and F. Vollertsen: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 381 (2005).
- (141) A. Thuvander: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 243 (2005).
- (142) V. Heuer and K. Löser: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 105 (2005).
- (143) H. Surm, O. Kessler, F. Hoffmann and H. W. Zoch: 1st Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 195 (2005).
- (144) L. Mangin, B. Dussoubs, S. Denis and J. P. Bellot: 2nd Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 181 (2008).
- (145) D. Landek, D. Lisjak, F. Frerichs, T. Lübben, F. Hoffmann and H. W. Zoch: 2nd Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 237 (2008).
- (146) M. Burtchen, M. Hunkel, T. Lübben, F. Hoffmann and H. W. Zoch: 2nd Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 247 (2008).
- (147) H. Surm and F. Hoffmann: 2nd Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 189 (2008).
- (148) T. Pretorius and F. Vollertsen: 2nd Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 219 (2008).
- (149) A. Rose, N. Sotirov, M. Hunkel, O. Kessler and H. W. Zoch: 2nd Int. Conf. on Distortion Eng., Bremen, Germany, p. 507 (2008).
- (150) H. C. F. Rozendaal, E. J. Mittemeijer, P. F. Colijn and van P. J. der Schaaf: Met. Trans. A., 14A, p. 395 (1983).
- (151) Y. Sun and T. Bell: Materials Science and Engineering, A224, p. 33 (1997).
- (152) K. Bongartz, W. J. Quadackers, R. Schulten and H. Nickel: Metall. Trans., 20A, p. 1021 (1989).
- (153) A. Marciniak: Surface Engineering, 1, p. 283 (1985).
- (154) Y. Sun, C. Newby, E. Strobach and T. Bell: Conf. Environ. Energy Efficient Heat Treat. Tech., Beijing, China, p. 46 (1993).
- (155) J. Pearson and U. J. C. Ende: J. I. S. I., Sep., p. 52 (1953).
- (156) R. E. Schacherl, P. C. J. Graat and E. J. Mittemeijer: Metall. and Mater. Trans., 35A, p. 3387 (2004).
- (157) H. Larsson and J. Ågren: Metall. and Mater. Trans. A, 35A, p. 2799 (2004).
- (158) 平岡 泰, 井上 幸一郎: 電気製鋼, 78, p. 307 (2007).
- (159) 楠見和久, 瀬沼武秀, 末広正芳, 杉山昌章, 松尾征夫: 鉄と鋼, 86, p. 682 (2000).
- (160) M. Auinger and M. Rohwerder: European Conf. on Heat Treatment 2010, Aachen, Germany p. 233 (2010).
- (161) T. Christiansen, K. V. Dahl and M. A. J. Somers: Defect and Diffusion Forum, Vols. 258-260, p. 378 (2006).

- (162) K. Arimoto, F. Ikuta, S. Yamanaka and K. Funatani: *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, 5, p. 386 (2010).
- (163) Z. Kolozsvary: in Totten G. E., Howes M. and Inoue T., Eds. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM International, pp. 209 (2002).
- (164) P. Buchhagen and T. Bell: *Comp. Mater. Sci.*, 7, p. 228 (1996).
- (165) W. Daves and F. D. Fischer: *Material Science Forum Vols. 163-165*, p. 713 (1994).
- (166) 鈴木信一, 星野 薫, 横溝 学, 谷 健二: *熱処理*, 34, p. 151 (1994).
- (167) K. Arimoto, F. Ikuta, S. Yamanaka: *European Conf. on Heat Treatment 2010*, Aachen, Germany p. 111 (2010).
- (168) R. Mailänder: *Archiv Eisenhutten.*, 10, p. 257 (1936).
- (169) T. Christiansen: *Low Temperature Surface Hardening of Stainless Steel*, Ph. D. Thesis, Technical University of Denmark, p. 217. (2004).
- (170) S. Sienz, S. Mandl and B. Rauschenbach: *Surface & Coatings Technology*, 156, p. 185 (2002).
- (171) 清水信善, 田村今男: *鉄と鋼*, 61, p. 3129 (1975).
- (172) K. Arimoto, D. Huang, D. Lambert, and W. T. Wu: *20th Heat Treating Conference*, ASM International, p.737 (2000).
- (173) K. Arimoto, C. Jin, S. Tamura, K. Funatani, M. Tajima: *14th Congress of IFHTSE*, p. 465 (2004).
- (174) 井上達雄, 原口賢一, 木村茂人: *材料*, 25, p. 521 (1976).
- (175) K. Arimoto, K. Lee, D. Lambert, and W. T. Wu: *19th Heat Treating Conference*, ASM International, p.435 (1999).
- (176) K. Arimoto, H. Kim, M. Narazaki, D. Lambert and W. T. Wu: *19th Heat Treating Conference*, ASM International, p.144-151 (2001).
- (177) 有本享三, 奈良崎道治: *熱処理*, 42, p. 346 (2002).
- (178) K. Arimoto, T. Horino, F. Ikuta, C. Jin and S. Tamura: *ASM Heat Treating Society Conference*, p. 253 (2005).
- (179) K. Arimoto, S. Yamanaka and K. Funatani: *Journal of ASTM Int. Selected Technical Papers STP1523*, p. 352 (2010).
- (180) T. Horino, F. Ikuta, K. Arimoto, C. Jin and S. Tamura: *Journal of ASTM Int. Selected Technical Papers STP1523*, p. 398 (2010).
- (181) 奈良崎道治: *熱処理*, 50, p. 110(2010).
- (182) 河上益夫: *熱処理*, 9, p. 146 (1969).
- (183) 河上益夫: *熱処理*, 10, p. 191 (1970).