

熱処理変形発生メカニズム解明の進展： 日本刀の反りを例として

有本享三

Progress of Understanding Heat Treatment Distortion Mechanism
- Using Blade Curving in the Japanese Sword as an Example

Kyozo ARIMOTO

1. はじめに

熱処理によって処理対象物に変形が生じることは古くから認識されていたことであるが、近年、部品の精密化により、その低減に対する要求が厳しくなっている。通常、現場では試行錯誤でこの問題の解決に対処しており、そのために多大な時間とコストが費やされている。一方、今日では、熱処理変形に関する研究を集大成した商用のシミュレーションソフトが、問題解決のために利用できるようになってきている。

熱処理変形の原因究明のための研究も古くから行われており、その発生理由の説明が単純形状の試験片による実験やそれに対する理論的研究に基づいて試みられてきた。特に現象が単純な長尺部品の曲りや反りの発生については、初心者向けの解説で取り上げられることが多い。さらに国内では日本刀に生じる反りが親しみのある事例となる。服部⁽¹⁾は日本刀の反りを材料力学の立場から 1920 年代の終わりに論じているが、これが筆者の知る範囲でもっとも古い報告となる。

本解説では熱処理変形の発生メカニズムを理解するうえで必要となる古くからの材料力学に関する知見を整理した後、日本刀の反りに関係する実験的研究の経緯についてまとめる。続いて、熱処理シミュレーションの概要と日本刀の反りに関連するその適用事例について述べることにより、熱処理変形の発生メカニズム解明に関する進展の一端を紹介する。

2. 変形と応力・ひずみに関する研究の流れ

機械や建造物に何らかの理由で生じる変形と応力・ひずみを解析することは、学問的には材料力学の範疇とされている。その歴史を取り扱った著作として Timoshenko⁽²⁾の“材料力学史”が知られている。そこには、19 世紀のはじめに弾性ひずみと応力の概念が主としてフランスの研究者によって見出された経緯が記されている。さらに、塑性ひずみについての研究はその世紀の中ごろに現れたとの記載がある。塑性ひずみを解析的に求めることができたことで残留応力の理論的な研究がはじまったとされており、Neumann が 1843 年に発表した急冷ガラス球に生じる残留応力についての研究が紹介されている。

その後の塑性現象に対する研究として、Timoshenko は、4 点曲げ状態のほりて断面の一部に降伏が生じる場合に対する Wöhler⁽³⁾の 1860 年の研究報告を取り上げている。Wöhler の曲げ試験は日本刀などの長尺物の熱処理による変形と残留応力について考察する場合に有益となる。言い換えると、このような単純な弾塑性現象のメカニズムが関係者に十分認識されていないことが、熱処理での応力・ひずみ現象の理解を妨げているのではないかとと思われる。さらには、この試験について理解することにより、熱処

理後の長尺物に曲げを负荷した場合の応力・ひずみ状態の評価に必要な知見が得られるものとする。

図1はWöhlerの4点曲げ試験装置の正面図に各部の名称を追加したものである。この試験装置の図は大南が編纂した著作⁽⁴⁾に転載されており、その内容については“弾性限度を精度よく測定する”，“塑性曲げによる残留応力の問題を取り扱った”といった程度の説明がなされている。

4点曲げの試験で用いる試験片は長方形断面の棒鋼で、図1に示すようにaとa'の位置で架台から吊り下げられた金物によって支持されている。一方、荷重はbとb'の位置に設けた金物で下方向に加えられる。この二本の荷重金物は荷重はりに接続されており、そこには重りが吊り下げられている。そして、試験片に加わる荷重は、荷重はりの両端に設けられたねじ機構によって調整が可能となっている。なお、aとa'の間の距離については“5 Fuß 6 Zoll”と記されており、これは当時の単位での“5 フィート 6 インチ”であると思われる。

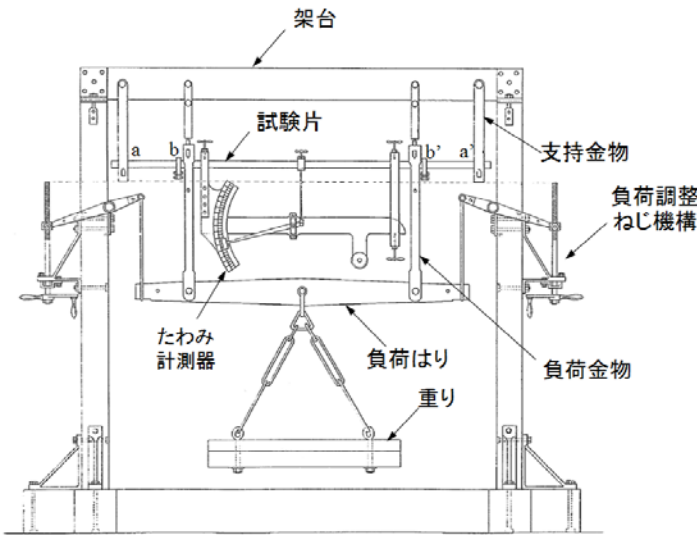


図1 Wöhlerの4点曲げ試験装置

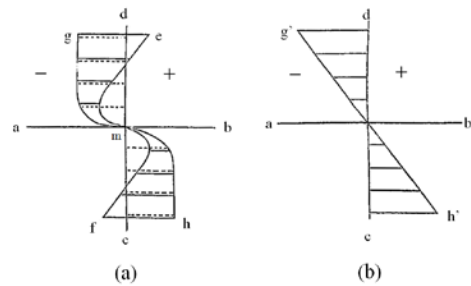


図2 Wöhler試験片の断面における応力分布
(a: 荷重時と除荷時の応力分布, b: 完全弾性体を仮定した場合の荷重時の応力)

試験片には荷重時に上から見て凹の曲りが発生する。その中央でのたわみは、試験片に設置された梘子の機構を用いた計器で検出している。異なる材料と断面形状を持つ3種の試験片を用いた実験により、荷重がある範囲内であれば荷重時に生じるたわみは除荷時のスプリングバック現象により消滅するが、限界を超えると永久たわみが発生することが見出された。Wöhlerは、荷重を段階的に増大させることにより、荷重たわみと永久たわみの変化を調べた。そして、荷重たわみと永久たわみから得た弾性たわみを用いて鋼材のヤング率を推定した。

以上の実験からの知見に基づき、Wöhlerは試験片断面における荷重時と除荷時の応力分布を模式図として示した。図2はそれを筆者が描き直したものである。図2(a)においてラインabは曲げの中立軸、そしてラインgmhは永久たわみが生じる荷重状態での応力分布の想定曲線である。Wöhlerは、h側には引張応力、そして反対のg側には圧縮応力が生じると述べている。応力の分布が線形ではなく、中立軸からある程度離れると一定値に落ち着くのは、その部分で生じる塑性現象を考慮しているためである。この状態で除荷することにより、ラインemfの残留応力分布が生じるとの記載がある。

さて、残留応力分布emfの求め方であるが、Wöhlerは応力分布gmhから図2(b)に示す線形の応力分

布 $g'h'$ を差し引くことで得たと記している。そして、分布 $g'h'$ については完全弾性体を仮定した場合に負荷状態で断面に生じる応力であると述べている。 $g'h'$ を差し引くことは、応力が除荷時にはそれとは逆符号に変化することを意味している。たとえば、図 2(a)において、試験片の上面の応力は負荷時に点 g の負の値であったのが、除荷によって点 e の正の値に移動する。この際の応力変化は、図 2(b)の応力 g' の符号を逆にした値に等しいことが了解できる。点 e 以外の板厚方向の位置においても、同様の差し引き処理を行うことによって emf の分布が得られる。

3. 日本刀の反りに関する研究の経緯

3.1 反りの観察

日本刀が焼入れによって反ることは古くから認識されていた。たとえば、俵はその著作“日本刀の科学的研究”⁽⁵⁾において古文書の“撰刀記”に以下の反りに関する記述があることを紹介している。

“剣は両刃なので焼入れによって反りは出ないが、刀は形態が違うので水や湯に投入すれば自ずと反りが付くものである。反りが出ないようにしたければ前かがみに作って焼入れすればよい。たとえ前かがみに作り置いて焼入れても、反りの程度についての確証は得られない。このことは、太刀や刀を焼入れたことのないものに言っても理解が困難であり、自ら焼入れしなくともその作業を見て納得すべきである。”(現代語訳は筆者による、原文は縦書きで句読点なし)

一方で俵は、11 振りの日本刀に対し、腰部と中央における反りの曲率半径を測定して報告している⁽⁵⁾。俵が表形式で示した日本刀の反りデータを読者に簡潔に伝えるため、筆者は中央での反りの曲率半径データ(極端な一振りについての値を除外)を用い、その平均値: 2.53 m, 最大値: 3.91 m および最小値: 1.45 m を得た。

俵の研究グループのメンバーで実際に日本刀の製作に関わった岩崎⁽⁶⁾は、日本刀の焼入れの過程で生じる反りについて以下のように表現している。

“刀をこの水の中に突込むと、水の沸騰する大きな音が仕事場にひびき、刀鍛冶が一瞬息を飲む。沸きかえる湯の中から、切尖がグウツト反りあがってくる。焼を入れる前は刀は真直ぐなもので、それが、この焼入れによって刀特有の湾曲を自然に生ずるのである。”

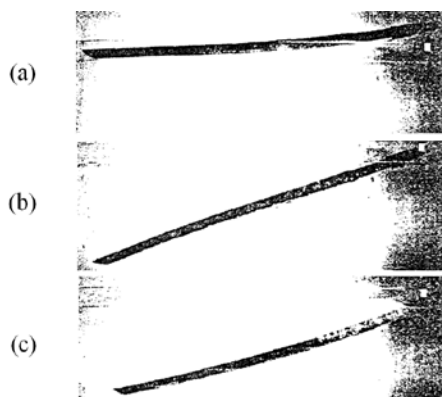


図3 日本刀の焼入れ過程における反りの変化
(a: 焼入れ前, b: 焼入れ後 1.2s, c: 焼入れ後 5.4 s)

時代が下り、藤原と英⁽⁷⁾は日本刀をアクリル製水槽中で焼入れ、その際の反りの変化を高速度カメラ(300コマ/s)で撮影した。その報告には撮影映像から抽出された三枚の写真が掲載されており、ここではそれらを転載して図3に示す。図3の(a), (b)および(c)は、それぞれ焼入れ前、焼入れ後1.2s、および5.4sでの状態を示している。1.2sでは刀身に逆反りが発生するが、5.4sで本来の反り状態となることが見て取れる。

3.2 円柱の焼入れ実験に基づく日本刀反りの考察

服部^(1,8)は異なる鋼種の円柱を片側冷却によって焼入れ、そこに生じた曲りを評価することによって刀の反りの発生理由を考察した。試験片の製作に用いた鉄鋼材料は、以下のO, AおよびTの三種であり、その化学組成の分析値を表1に示す。

O : Armco 鉄, 1 in 丸

A : 高炭素鋼 : 東郷電気製鋼壺番鋼, 5/8 in 角 (スエーデン Gysinge)

T : 特殊工具鋼 : Jonas & Colver's Intra Steel, 7/8 in 丸 (low-tungsten finishing steel)

表1 試験片に用いた鋼材(O, A および T)の化学組成

記号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	W	Ni
O	0.015	0.010	0.032	0.003	0.030	0.013			
A	1.46	0.099	0.208	0.024	0.023		0.361		0.081
T	1.03	0.215	0.997	0.033	0.042		0.102	1.02	0.110

服部は、上記の鋼材を用いて円柱試験片(直径15mm, 長さ160mm)を製作した。焼入れ温度については、O, A および T の鋼に対してそれぞれ800, 780 および 840°Cに設定した。焼入れは、加熱した鋼円柱を図4に示すように箸で挟み、厚さ1mmの噴出水(温度18°Cで流速0.5m/s)中に差し入れることで、上面からのみの水冷却で実施した。

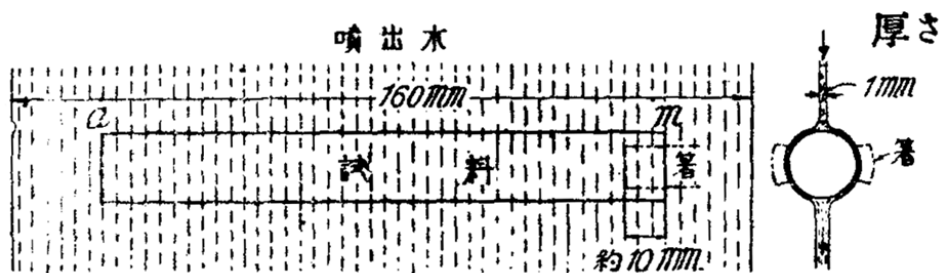


図4 噴出水による鋼円柱の上面からの冷却

服部は Armco 鉄の試験片の焼入れ時における挙動について以下のように記している。

“試験片ははじめ急冷側が内に曲り、冷却のかなり進んだころから逆に曲がりかけて全部冷却後は急冷側が外にはなはだしく曲がった。ゆえに試験片は冷却の初期に主として急冷側が延伸、反対側が短縮の永久ひずみを受けたのである。”

上記の説明における試験片の“内”と“外”の曲り状態は、それぞれ上方から観察した際の“凹”と“凸”の形状に対応する。一方、服部は、焼入れ中に永久ひずみが発生するか否かを、その間に材料が降伏する可能性の有無の検討によって確認している。すなわち、まず、鋼球の急冷状態での表面の引張応力が、

熱膨張係数 α 、ヤング率 E および球の内外の温度差 ΔT の積で簡便に求められるとした。たとえば、 $\alpha : 0.000014$ 、 $E : 15,000 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\Delta T : 300 \text{ }^\circ\text{C}$ とすることで応力 : 63 kg/mm^2 を得た。この応力は、温度が高いときには“十分にその降伏点に達して永久ひずみを起す”値であると評価している。

服部は焼入れと焼もどし後の円柱試験片を軸回りに回転させ、その振れを長さ方向に対する 12 分割の位置でダイヤルゲージ(1/100mm 目盛)によって測定した。そして振れの 1/2 を“曲りの高さ”と呼び、それを試験片の軸方向に沿ってグラフ化した。図 5 は服部の報告から転載した曲り高さの分布図である。図 5 の(a), (b)および(c)はそれぞれ Armco 鉄(O)、高炭素鋼(A)および特殊工具鋼(T)での結果に対応している。実線と破線は焼入れ後と焼もどし後の状態に対応しており、それぞれの焼入れと焼もどしの温度については図中の凡例に示されている。

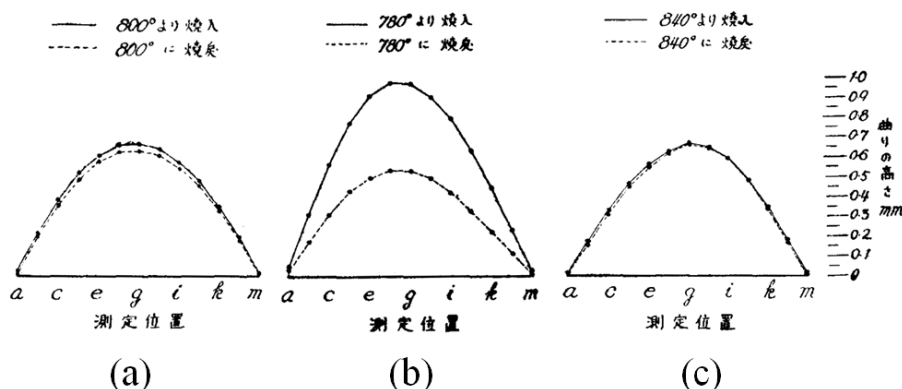


図 5 焼入れ鋼円柱における曲り高さの分布
(a : Armco 鉄(O), b : 高炭素鋼(A), c : 特殊工具鋼(T))

図 5 では焼もどしを焼入れ温度で実施した場合の結果が示されている。しかし、服部は焼もどしを複数の温度レベル(100 から 400°Cの間は 50°C, 400°C以上では 100°Cおき)で行っている。そして、鉄鋼材料 O と A の試験片については、その中央での焼もどし後の曲り高さや焼もどし温度の関係を報告している⁽⁸⁾。なお、焼もどしは、200°C以下が油槽中、250°C以上が真空炉中で実施したとの記載がある。

Armco 鉄(O)の試験片の中央での曲り高さは図 5(a)によると 0.65 mm 程度であり、これが 800°Cの焼もどしによって 0.6 mm 程度に低下することがわかる。服部は Armco 鉄では組織の変化はないが、はなはだしい変形の発生には“熱ひずみ”が寄与していると推定している。そして、焼もどし温度が 400 から 500°Cとなると残留応力は消滅するので、その後の曲りは永久ひずみによるものであると考察している。なお、“熱ひずみ”は当時の用語であり、詳しくは後で述べるが、今日では熱膨張・収縮に関係した“弾性ひずみ”と“塑性ひずみ”の加算量とすべきである。また、“永久ひずみ”は“塑性ひずみ”に対応し、焼もどしの際にはさらに“クリープひずみ”が含まれると解釈すべきである。

一方、図 5(b)に示した高炭素鋼(A)の試験片では、焼入れ後の中央での曲り高さが 0.95 mm 程度となり、Armco 鉄の場合とはかなり異なることが明らかにされた。一方で、それが 780°Cでの焼もどし後には 0.55 mm 程度に下がり、Armco 鉄と同程度となる。この試験片の場合、急冷側だけにマルテンサイトが生じたことが硬さ測定によって確認されている。服部はこの試験片の曲り高さに対し、焼もどしで“組織の変化による曲り”(マルテンサイトの膨張の効果)と“弾性熱ひずみ”が消滅し、残った曲りは“永久熱ひずみ”が寄与したものであると考察している。逆に焼入れ後の状態では、消滅したとされる効果が存在していたことになる。なお、“弾性熱ひずみ”と“永久熱ひずみ”は、今日の用語ではそれぞれ熱膨張・収縮に関

係した“弾性ひずみ”と“塑性ひずみ”に対応する。

特殊工具鋼(T)の試験片では、図 5(c)に示す曲り高さの分布が報告された。この鋼ではマルテンサイト変態が A 鋼に比べてより低温で開始し、そして全断面にわたって進展する。すなわち完全焼入れとなったのであるが、このことについては硬さ測定によって確認がなされている。焼入れと焼もどし後における中央の曲り高さはいずれも 0.65 mm 程度であることが図から読み取れる。服部は、このケースでの焼曲りの要因は最終状態がマルテンサイト単相であるので“主として熱ひずみによる”と説明している。なお、“熱ひずみ”は、熱膨張・収縮に関係した“弾性ひずみ”と“塑性ひずみ”の加算量である。

服部は以上の結果について述べた後、いくぶん唐突の感があるが、次のように日本刀の反りの発生理由についてコメントしている。

“これらの結果を総合すれば工具の焼曲りにも熱ひずみが多く影響することは明らかであって、刀剣の焼入れにおいて刃の方が外に曲がるのは組織の相違のみならず熱ひずみの影響も大であると考えられる。”

服部の報告^(1,8)には、以上の焼曲りに関する研究だけではなく、5種の鋼で製作した寸法の異なる9種の直方体と10種の円柱の試験片を用い、水あるいは油によって焼入れ・焼もどした後の変形の測定結果が含まれている。これらの試験結果に基づき、鋼種の違いによる変形の傾向に対する考察がなされている。なお、服部は報告の最後において本多光太郎からの助言に対して謝辞を表している。

3.3 刀匠による反り調整法の紹介

服部の報告からほぼ10年が経過した1939年、福岡市博多商工會議所において、日本金属学会の専門部会“鋼(炭素鋼、特殊鋼)の熱処理と歪、焼割れその他”が開催された。その会での討論の記録⁽⁹⁾には、日本刀の反りに関する谷村の発言が残されている。谷村は図6に転載した模式図を示し、日本刀のそりについて以下の説明を行った。

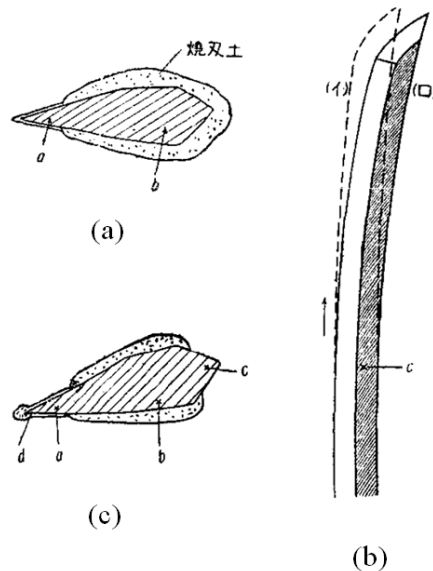


図6 日本刀の反りとその調整法

“日本刀は御承知の様にこの図(a)のごとく土をつけて焼入れる。するとこの土の厚い所がトルースタイトないしソルバイト、aの薄い所がマルテンサイトとなります。

其の結果図(b)の(イ)の反りのものが(ロ)の形になります。又刀工は刀の焼きがよく入ったか入らぬかは此の反りを見て判断すると申して居ります。”

また、日本刀が反る理由について次のように述べた。

“日本刀は細長い格構をして居りまして、一部だけ刃になる所だけをマルテンサイトとしまして、背中の方は焼きが充分入って居りません。そこでこの Ar”膨脹によって刃になって居る所が、多く伸びます。それで刀は焼入れすると必ず反るものがあります。”

一方、以下のように刀匠が行っている反りの調整法について紹介している。

“或刀工は第(c)図の如き土取りをして居ました。此の様に棟即ち c の部分の土を削り取って焼入れしますと反り方が第(a)図の場合に比し少くなります。反りの少い刀を作ろうと思う場合にはこの様に土を塗れば後に錆地をたたいて反りを減らす手数が少くてすみます。反りの足りない場合には棟に真赤に焼けた銅のブロックをあてて熱しますと反りが増します。”

この討論会の記録には本多を含めて 26 名の発言が含まれているが、過去に服部が示唆した日本刀の反りの発生理由について紹介したものは見当らない。しかし、同じ専門部会での本多の講演録⁽¹⁰⁾からは、以下の引用に示すように本多が会場で服部の研究成果^(1,8)について紹介したことがわかる。

“立方体、正方体、角盤、円板、短かい円柱の如き試片を焼入によって急冷する場合に就ては計算によって熱歪、変態歪等を求めることは困難であるが実験によって大盤歪及び歪力の分布を求めることが出来る。下記は服部傳三郎君の実験結果を総括したものである。”

なお、本多の講演録には、服部による日本刀の反りの起源についての説明は含まれていない。

3.4 日本刀の反りに対する大和久の解説

大和久は熱処理技術に関する一般技術者向けの解説書を多数著したことで知られている。当然ながら、日本刀の反りに関する以下の記述が含まれた著作⁽¹¹⁾がある。

“日本刀は刃先は肉薄で冷却が早く、背は肉厚で冷却が遅いので、焼入れすると早く冷えた刃の方が凸となり、これが日本刀の反りとなるのである。日本刀の反りはこの冷却のムラ、つまり焼曲りを利用したテクニックということになる（もちろん、刃先のマルテンサイトによる膨脹も加算される）。”

このように大和久は、日本刀の反りを焼曲りとマルテンサイトによる膨脹の効果が加算されたものとして捉えている。なお、焼曲りの発生がどのような理屈によるものかについては、別の著作で以下のように説明している⁽¹²⁾。

“冷却された瞬間は早く冷えた側が縮まるので凹んで、反対の熱い側を据え込む（アプセット）。このため冷え切ると、反対側がこの分だけ縮んで、結局早く冷えた側が凸となるのである。”

ここで“アプセット”という用語であるが、服部⁽¹⁾が Keller の研究⁽¹³⁾を紹介した際に用いている。その部分には“Keller は焼入れによる変形が温度の高い部分のすくめられる事(upsetting)によると称し”との記述があり、大和久はこの説明を参考にした可能性がある。なお、大和久は“焼曲り”を今日でいう塑性ひずみのみが寄与したものと考えているようであるが、筆者はこれを後で述べるように複数の異なるひずみが寄与したものとして捉えている。

4. 熱処理シミュレーションと日本刀の反り

4.1 熱処理シミュレーションの概要

近年、商用ソフトとしての利用が可能となってきた熱処理シミュレーションであるが、その理論については長い歴史を経て進展してきたものである。すでに、このシミュレーションの概要と開発の経緯に関して筆者は解説⁽¹⁴⁻¹⁵⁾を試みており、したがってここでは以下の説明で必要となる基本事項のみを再び記させていただく。なお、本多が指導した研究にシミュレーション理論の萌芽期の成果として位置づけられるものが存在することを、ここで再び指摘しておきたい⁽¹⁴⁾。

熱処理では、その対象物において温度、相、形状、応力などが変化する。このような現象を予測するため、熱処理シミュレーションには有限要素法に基づく温度、拡散および応力・ひずみ(変形)の解析、さらには相変態予測と特性データの複合則に関するモジュールが用意されている。熱処理対象物の変形、温度と濃度(炭素、窒素など)の変化および相変態は、図7の概念図に示すようにその微小部分に生じる各種のひずみと応力に関係している。なお、これらの現象の発生には部品の形状と拘束条件が影響を及ぼす。

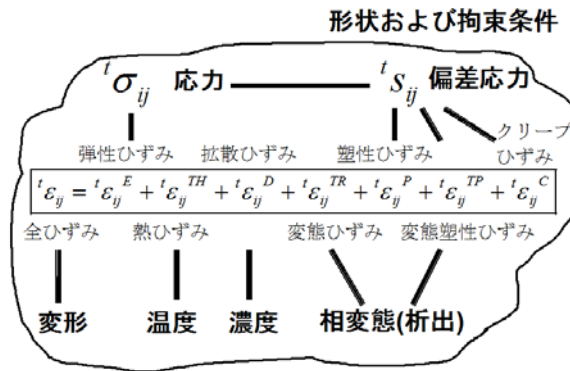


図7 変形・温度と濃度・相変態と各種のひずみ・応力の関係

図7には、任意の時点(時刻 t)における各種のひずみの釣合い式が含まれている。まず、全ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}$ であるが、これを対象物にわたって総合したものはその変形として出現する。一方、弾性ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^E$ は応力と直に関係して変化する。応力が降伏点を超えると塑性ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^P$ が偏差応力に関係して生じる。熱ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^{TH}$ と拡散ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^D$ は、それぞれ温度変化および金属格子間への侵入原子(炭素、窒素など)による固体の膨張を表現する。相変態に関係するのは変態ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^{TR}$ と変態塑性ひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^{TP}$ であり、前者は相変態による膨張、後者は応力下で相変態中に生じる塑性現象に対応する。この他、高温でクリープ現象が生じる場合には、クリープひずみ ${}^t\varepsilon_{ij}^C$ を考慮する必要がある。

なお、筆者は、各種のひずみをグラフ化する際、熱ひずみ、変態ひずみと拡散ひずみを加算したものを“膨張ひずみ”とすることで図の種類を減らしている。なお、膨張ひずみから拡散ひずみを差引いた量は、CCT試験から得られる温度・伸び線図における伸びに対応するので、両者を比較する際に用いると便利である。

4.2 変形・応力・ひずみに関する用語の確認

熱処理の過程では、すでに図7に示したように多種のひずみが発生する。まず、そこに含まれている“熱ひずみ”は、過去に服部が用いたものとは異なる内容のものであることを指摘しておく。材料力学におい

て熱ひずみは固体の微小部分の熱膨張の程度を表すための量であり、具体的には熱膨張係数に温度変化を乗じることによって得られる。一方、服部⁽¹⁾が用いた“弾性熱ひずみ”と“永久熱ひずみ”は、それぞれ熱膨張の効果で生じる“弾性ひずみ”と“塑性ひずみ”を意味している。また、両者を加算したものは服部のいう“熱ひずみ”に対応する。

一方、熱処理の分野では応力の発生理由の説明で古くから“熱応力”と“変態応力”という用語が使用されてきている。これらは実験的研究で用いられてきた概念^(16,17)である。すなわち、いずれについても残留応力であり、相変態がなく温度変化のみで発生するものが“熱応力”，それに対して温度変化が緩やかな状態でおもに相変態の効果で生じるものが“変態応力”と呼ばれてきた。

熱処理シミュレーションでは上記のそれぞれの効果に対応する応力を分離して求めることは困難である。しかし、応力そのまま“応力”として認識したとしても、その発生理由の説明には後で述べるようにシミュレーションから得られる各種のひずみを用いればことが足りる。かつては変形と残留応力が現象の説明におけるよりどころであったが、現在ではシミュレーションからの各種ひずみの出力が利用できるため、より合理的な議論が可能である。

“熱処理ひずみ”と“熱処理変形”という用語についても、ここで確認しておくことにする。この場合、“ひずみ”と“変形”はいずれも“distortion”の訳語として用いられている。問題となるのは、熱処理ひずみを単に“ひずみ”と呼ぶ状況であり、その場合には“strain”に対応する“ひずみ”と混同される可能性がある。参考までであるが、田中は 1949 年の報告書⁽¹⁸⁾では“熱処理歪”，その後の 1969 年の記事⁽¹⁹⁾では“熱処理変形”を用いている。

さらに付け加えると、過去には熱処理後の変形が“変寸”と“変形”に分けて解説されている場合がある。たとえば、大和久⁽¹²⁾は以下のように述べている。

“変寸というのは伸び、縮み、太り、細りなどの寸法の変化を総称し、変形は曲り、反り、ねじれ、など形状の変化をいいます。変寸は主として、マルテンサイトによる膨張、残留オーステナイトによる収縮の合算によるものです。”

“変寸”と“変形”は、それぞれが“size distortion”と“shape distortion”⁽²⁰⁾に対応する用語であると思われる。しかし、実際の複雑形状の部品で熱処理変形を“変寸”と“変形”に分離することは困難である。“変寸”の効果については、今日では“変態ひずみ”の分布を評価することで、その熱処理変形に対する寄与を考察する方が合理的である。

4.3 Whöler の 4 点曲げ試験での曲げ挙動に対する考察

熱処理変形の発生メカニズムの解明において各種のひずみの分析が役立つことを示す前に、ここではこの考え方をより現象が単純な 4 点曲げ試験での曲げ挙動に適用してみる。すでに述べた Wöhler の試験では、試験片に弾性ひずみ、塑性ひずみおよび全ひずみの三種のひずみと応力が生じる。すなわち、この現象では、図 7 のひずみの釣合い式において上記の三種のひずみのみを考慮することになる。全ひずみの分布状態は試験片の曲りに直に対応する。このような曲り現象は、古典的なはり理論を塑性域にまで拡張することによって取り扱うことができる⁽²¹⁾。

図 8 は、曲げ試験の過程における試験片中央断面での各種ひずみの分布状態を、筆者が模式的に描いたものである。試験片の材料には弾完全塑性体を仮定している。負荷後の弾性範囲内では図 8(a)に示すように線形分布の弾性ひずみが生じ、これが同時に全ひずみの分布となる。さらに曲げモーメントを増加させると表面側から塑性現象が進行し、図 8(b)に示す塑性ひずみの分布が発生する。弾完全塑性体であるので塑性ひずみが発生した部分では弾性ひずみは一定値を保つ。

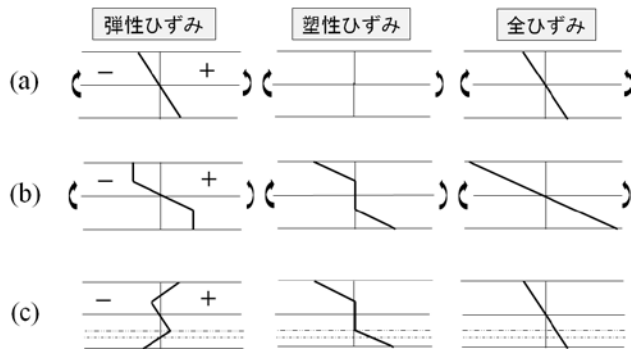


図 8 Wöhler の 4 点曲げ試験の過程における断面での各種ひずみの分布

(a : 弾性域, b : 最大負荷時, c : 除荷後)

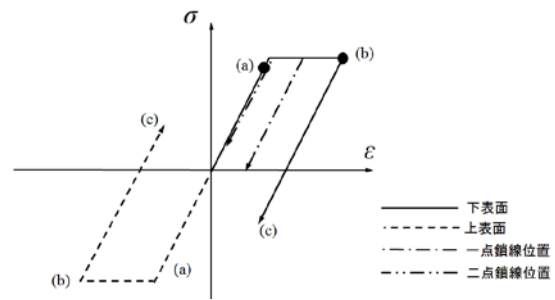


図 9 Wöhler の 4 点曲げ試験の過程における断面での応力・全ひずみ関係の軌跡

図 8(b)の状態が最大負荷時であるとし、そこから除荷するとスプリングバック現象が生じ、試験片の形状は元の直線状ではなくたわみが残った状態となる。この残留たわみを概念的に示したのが図 8(c)の全ひずみ分布であり、図 8(b)よりも傾きが小さな線形分布状態に移行したことになる。ここでは、使用した材料では除荷の間に塑性ひずみの分布に変化が生じないものと仮定する。したがって、弾性ひずみの分布状態は、残留した塑性ひずみ分布および全ひずみの線形分布保持の条件によって決まる。さらには、弾性ひずみにヤング率を乗じたものを応力と見なし、除荷後の残留応力分布のつり合い、そしてその分布からは曲げモーメントが発生しないことを確認する。なお、全ひずみが線形分布となるのは、いわゆる長尺物の曲げにおける断面の平面保持の効果による。

図 8(c)の弾性ひずみと図 2(a)の応力の分布状態を比較すると、その形状の傾向が一致していることは明らかである。Wöhler は図 2(a)の残留応力の分布を推定する際、図 2(b)に示した完全弾性体を仮定することで得た応力分布を持ち出した。この応力分布について図 8(b)で確認しておく。まず、この状態の弾性ひずみにヤング率を乗じることによって応力分布が得られるが、これがこの負荷時での曲げモーメントと釣り合う。そして、Wöhler はこの曲げモーメントによって完全弾性体に生じる応力の分布を求めたことになる。この応力の分布をヤング率で除すことで完全弾性体での弾性ひずみの分布が得られるが、その符号を逆にして図 8(b)の全ひずみ分布に重ねたのが図 8(c)の全ひずみ分布である。そして、この全ひずみ分布から塑性ひずみ分布を差し引くことで、除荷後の弾性ひずみの分布状態が得られる。

Wöhler の応力分布だけの議論は一見簡単なように思えるかもしれないが、筆者は弾性・塑性・全ひずみを吟味しなければ現象の総合的な理解に到達するのは難しいのではないかと考える。特に、残留たわみや残留応力には、塑性ひずみの分布が寄与していることを認識しておく必要がある。

さらに、曲げ試験時における応力とひずみの関係の理解を容易にするため、試験片断面での応力と全ひずみの軌跡を図 9 の模式図に示した。ここでは、試験片の下表面と上表面、そして図 8(c)に示した一点鎖線と二点鎖線の内部位置における軌跡を描いている。試験片の下表面と上表面で除荷後に逆符号の応力が生じることを意味が、この図の軌跡によって明瞭に示されることになる。一点鎖線の位置では除荷後に残留応力は生じないが、一点鎖線から二点鎖線の位置の範囲では引張応力が発生する。なお、図 9 では、状態(b)から(c)の除荷時において弾性挙動が生じるとしているが、材料の応力・ひずみ特性によっては一部が塑性域に入る場合が生じる。

4.4 藤原と英による日本刀の反りに関する研究

藤原と英⁽⁷⁾が、日本刀の焼入れ時の反りの変化を図 3 の写真を用いることで明確にしたことについて

はすでに述べた。これに引き続き、同じ報告には日本刀の焼入れ過程に非定常熱弾塑性有限要素法を適用した結果が示されている。解析モデルの対象としたのは、100×20×4 mm の SK3 材であると記されている。使用したシミュレーションソフトについてはその内容が明確ではなく、そして温度分布やマルテンサイト変態の状況は外部から指定したとの記載がある。結果に対するまとめとして、“焼入れ時の曲率の動的な変化が刃先部とその他の部位の間の熱収縮とマルテンサイト変態による膨張の時間的、場所的相違に基づくものであることが確認できた”との記述がある。

4.5 井上による日本刀焼入れ過程のシミュレーション

井上は節 4.1 で述べた熱処理シミュレーション手法をはじめて日本刀の焼入れ過程に適用した。その 1994 年の報告⁽²²⁾には、刀の時系列の変形状態に重ねて温度の状態を色分けして表示した図、そして焼入れ後の応力(長さ方向)とマルテンサイトの体積分率を同様に変形図に重ねたものが掲載されている。ただし、実験との比較は示されておらず、熱ひずみ、変態ひずみおよび塑性ひずみなどのひずみに関する出力図は省略されている。そして、日本刀の反りについては、上記の図の説明に関連して以下の記述がある。

“温度の低下とともに、薄い刃先がまず冷却されて収縮し、下側に反る(逆反りという)。やがて、刃先に比体積の大きなマルテンサイトが生じるため、普通の反りができる様子がよく表現できている。”

井上の 2008 年の報告⁽²³⁾では、時系列の変形状態に対して温度だけでなく、長さ方向応力、マルテンサイトとパーライトの分率の分布を重ねた図が掲載されている。シミュレーションの結果から、逆反りが二度、すなわち刃先の熱収縮だけでなく棟側のパーライト+フェライト変態によるものが生じると評している。そして、“最終的にはマルテンサイト変態時の膨張がパーライト変態に比べてかなり大きいため、日本刀の本来の反りが得られるという結果になる”と述べている。

上記の井上のシミュレーションでは焼刃土の厚さを考慮した熱伝達データが使用されている。この焼刃土の効果に関する実験結果は、上原と井上⁽²⁴⁾によって報告されている。なお同種の実験的研究は、古くは佐藤⁽²⁵⁾そしてその後には奈良崎ら⁽²⁶⁾によって実施されている。

4.6 キー溝付き鋼円柱の焼曲り

熱処理シミュレーションをキー溝付き S45C 鋼円柱(直径：10 mm、長さ：100 mm)の水焼入れでの焼曲り現象に適用した結果が、筆者ら⁽²⁷⁻²⁹⁾によって報告されている。キー溝(幅：4.0 mm、深さ：2.5 mm)は鋼円柱の全長に渡って加工されており、これが前述の服部⁽¹⁾の実験と同様に断面に対して非軸対称の冷却現象を発生させる。この鋼円柱は完全焼入れ状態となったため、生じた現象は服部の特殊工具鋼を用いたケースに類似するものと考えられる。

キー溝付き円柱試験片の 860°C からの水焼入れでは、その形状が図 10(a)に示すように時々刻々と変化した。なお、この図ではキー溝は円柱の左側に位置している。シミュレーションから得られた形状の変化は図 10(b)に示されており、これは実験結果とよく一致した。冷却初期の段階 A (0.25 s)では、円柱にキー溝側から見て凹の曲りが生じる。この曲りは次の段階 B (0.75 s)で最大となる。その後、曲りが逆向きとなり、段階 C (1.0 s)で中立位置、そして段階 D (1.7 s)で凸の最大の曲りを示した後、最終冷却の段階 E ではいくぶん中立方向にもどされた。円柱全体がマルテンサイト化することは断面の硬さ分布測定によって確認された。また、鋼円柱の変形曲線が円弧に極めてよく一致することが明らかにされた。

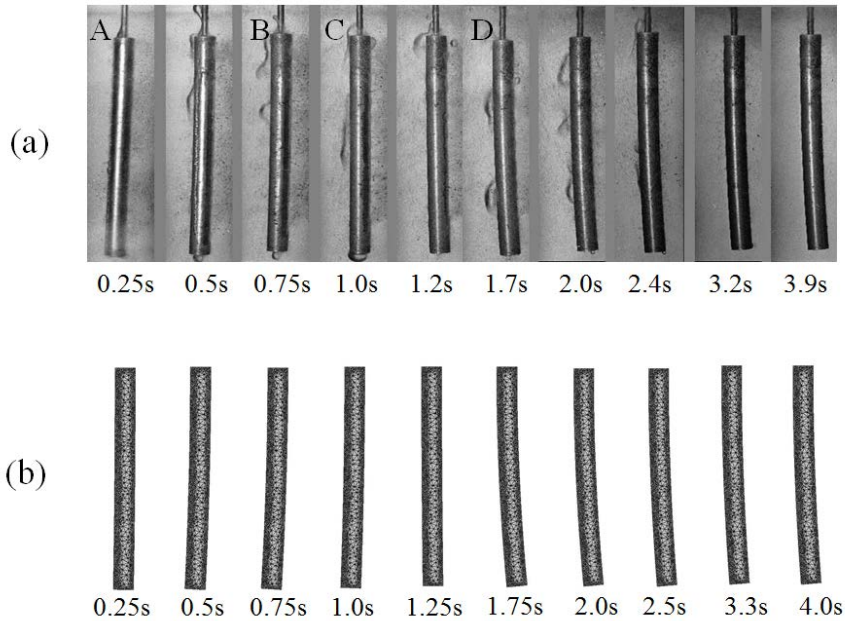


図 10 キー溝付き円柱試験片の水焼入れ過程での形状の変化

(a : ビデオ画像からの抽出写真, b : シミュレーション結果)

シミュレーションから得た水焼入れ中の試験片断面での温度、相の体積分率、軸方向塑性ひずみおよび応力分布の時間変化の図⁽²⁹⁾が報告されている。温度の低下はキー溝側の突起部から始まり中心部に向かって進行する。マルテンサイト変態は温度が M_s まで低下すると生じるので、温度とマルテンサイト体積分率の分布の変化には相似性が現われている。軸方向の塑性ひずみについては、キー溝側が正、その反対側が小さな負の値となる分布が得られた。

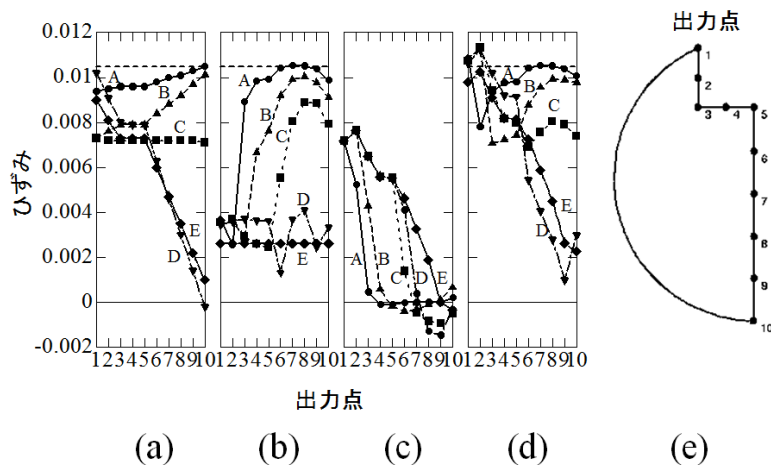


図 11 キー溝付き円柱試験片での軸方向ひずみ分布のシミュレーション結果

(a : 全ひずみ, b : 熱ひずみ+変態ひずみ, c : 塑性ひずみ, d : 熱ひずみ+変態ひずみ+塑性ひずみ, e : 断面の出力点)

シミュレーションから得られた各種の軸方向ひずみを分析するために、その分布図が図 11 に示すように描かれている。図(a)から(d)は、それぞれが全ひずみ、熱ひずみ+変態ひずみ、塑性ひずみ、そして熱ひずみ+変態ひずみ+塑性ひずみに対応する。横軸の出力点は、図(e)に示す円柱断面の点 1 から 10 で

ある。なお、本来は弾性ひずみと変態塑性ひずみを表示すべきであったが、当時使用したソフトはこれらの結果を出力することができなかった。一方、熱ひずみ、変態ひずみおよび全ひずみの出力も得られない状態であったが、これらについては他の出力データを用いて推定した。

焼入れ直前での熱ひずみ+変態ひずみの分布は、図(b)の破線で示すように 0.0104 の水平線で表される。次の段階 A では、キー溝側の突起部が急冷されることにより、熱ひずみ+変態ひずみが出力点 1 と 2 においてそれぞれ 0.0037 および 0.0026 程度まで減少する。出力点 2 に比べて出力点 1 の値が大きいのは、出力点 1 ではマルテンサイト変態が開始して変態膨張が発生したためである。出力点 3 から 10 では温度の低下がまだ顕著ではなく、熱ひずみに関してはそれほど大きな減少は見られない。

すでに述べたように、円柱のような長尺物においては断面に平面保持条件が課せられるので、軸方向の全ひずみが線形分布となるように制約が加えられる。したがって、冷却の初期には、キー溝側の突起部で熱ひずみ+変態ひずみが局部的に低下するが、全ひずみは全面的にこれに追従することはできない。そこで、熱ひずみ+変態ひずみの突起部での局部的な低下は、まず弾性ひずみの増加によって補われることになる。

以上のことを図 7 のひずみの釣合い式で確認すると、熱ひずみ+変態ひずみ： $\epsilon_{ij}^{TH} + \epsilon_{ij}^{TR}$ が低下しても、全ひずみ： ϵ_{ij} は上記の理由で完全に追従できないので、弾性ひずみ： ϵ_{ij}^E が増加せざるをえないということになる。弾性ひずみに対応して生じる引張応力によって材料が降伏点に達すると、その後は塑性ひずみ： ϵ_{ij}^P も熱ひずみ+変態ひずみの減少分を補償するために寄与することになる。すでに説明した 4 点曲げ試験では外部からの曲げモーメントによって塑性ひずみが生じたが、このキー溝付き鋼円柱ではその発生が主として温度分布の変化によるところが異なる。服部の実験でも同様であるが、外部から荷重を加えていないのに塑性現象が生じる可能性があることについては、十分に理解しておく必要がある。

段階 B から C、さらに D へと焼曲り現象が進行するにつれて、熱ひずみ+変態ひずみは、図 11(b)に示すようにキー溝側からその反対側に向かって低下する。そして、最終冷却状態 E では 0.0026 程度の水平分布となるが、このことは全断面が室温に達したこと、そして全体がマルテンサイトに相変態したことを意味している。

塑性ひずみは、図 11(c)に示すように、その正の領域が冷却の進行に伴いキー溝の反対側に拡大し、最終冷却状態 E では右下がりの直線に近い分布となる。この最終の塑性ひずみ分布に対し、上述した熱ひずみ+変態ひずみの 0.0026 を一律に加算すると、図 11(d)に示す最終冷却状態 E での熱ひずみ+変態ひずみと塑性ひずみの加算量の分布が得られる。この分布には、弾性ひずみと変態塑性ひずみが含まれていないが、図 11(a)に示す全ひずみと比較すると、両者の分布には同様の傾向が生じていることが見てとれる。

以上のように、このケースでは全ひずみの時間変化が、熱ひずみ+変態ひずみ、塑性ひずみなどからの寄与によって発生することが明らかとなった。全ひずみの勾配は焼曲りの曲率に対応するので、全ひずみ分布の発生挙動が明瞭になったことは、焼曲りの発生メカニズムが解明されたことを意味する。

5. まとめ

日本刀の反りという日本人にとって興味のあるテーマに沿い、熱処理変形のメカニズム解明の進展に関して不十分ながら解説することができた。本来は日本刀の断面を持つ試験片を伝統的な手法で焼入れた際の反りの変化を観察し、さらにその現象のシミュレーションを行えば、より説得力のある説明ができるのではないかと思う。なお、このような実験の一部はすでに本協会の焼割れシミュレーション研究

部会の活動において実施されているので、その成果は追って報告されるものとする。

今後は、各種のひずみの分析により熱処理変形メカニズムを解明するアプローチが、日本刀の反りの本質の解明のためにも適用されることを期待したい。このような誰もが関心を持つテーマに対する理解の深まりが、現場での問題解決にも寄与するのではないかと考える。なお、ここで述べたメカニズム解明のアプローチは、すでに円柱、リングなどの試験片の普通焼入れ、浸炭焼入れおよび高周波焼入れ過程に適用されている。さらには窒化での変形の解明に対しても適用が試みられている。

服部傳三郎氏の研究を知ったことがこの解説を執筆することの動機の一つであるので、最後に服部氏の経歴について紹介しておくことにする。氏の履歴書は金沢大学資料館に保管されており、そこに記載された以下の情報が関係者の好意によって筆者の元に伝えられた。

服部傳三郎(1893-1937)：三重県出身；名古屋高等工業学校機械科卒業(1914)；
東西製作所入社(1917)；明石製作所入社(1920)；金沢高等工業学校の講師そして
教授(1923-1937)。

参考文献

- (1) 服部傳三郎：機械學會誌, **32**, p. 41 (1929)
- (2) Timoshenko, S. P.: History of Strength of Materials, McGraw-Hill (1953), 最上武雄監訳, 川口昌宏訳：材料力学史, 鹿島出版会(1974)
- (3) Wöhler, W.: Zeitschrift für Bauwesen, **10**, p. 583 (1860)
- (4) 大南正瑛編：材料強度学総論, オーム社(1984)
- (5) 俵 國一：日本刀の科学的研究, 日立評論社(1953).
- (6) 岩崎航介：刃物の見方, 三条金物青年会(1969).
- (7) 藤原晴夫, 英 崇夫: 徳島大学工学部研究報告 **38**, p.1 (1993)
- (8) Hattori, D.: Science Reports of Tohoku University, **18**, p. 665 (1929)
- (9) 日本金属學會第3回専門部會“鋼(炭素鋼, 特殊鋼)の熱処理と歪, 焼割れその他”の討論：日本金属学会誌,**4**, p. A109 (1940)
- (10) 本多光太郎：日本金属学会誌,**2**, p. 79(1940)
- (11) 大和久重雄：熱処理技術マニュアル, 増補改訂版, 日本規格協会(2001)
- (12) 大和久重雄：熱処理のお話し, 日本規格協会(1982)
- (13) Keller, J. F.: Trans. Am. Soc. Steel Treat., **9**, p. 373.
- (14) 有本享三：熱処理, **51**, p. 212 (2011)
- (15) 有本享三：熱処理, **51**, p. 265 (2011)
- (16) Bühler, H. Scheil, E.: **6**, p. 283 (1933). 田中 実 訳, 工作機械ニ関スル資料, **6**, p. 29 (1943)
- (17) 磯村良蔵：鋼の熱処理と残留応力, アグネ技術センター(1996)
- (18) 田中 実：東京工業大学学報 特別号(精密機械研究所報第2号), p. 1 (1949)
- (19) 田中 実：電気製鋼, **40**, p. 328 (1969)
- (20) Lement, B. S.: Distortion in Tool Steels, American Society for Metals (1956)
- (21) 山内 弘：塑性変形と加工, 日刊工業新聞社(1953)
- (22) 井上達雄: 日本機械學會誌, **97**, p.132 (1994)
- (23) 井上達雄: までりあ, **47**, p.359 (2008)
- (24) 上原拓也, 井上達雄: 材料, **44**, p. 309-315, (1995)
- (25) 佐藤清吉: 金属の研究, **10**, p. 63 (1933)

- (26)奈良崎 道治, 淵澤定克, 武田信男:熱処理, **28**, p. 279 (1988)
- (27)Huang, D.; Arimoto, K.; Lee, K.; Lambert, D.; Narazaki, M.: Proc. 20th ASM Heat Treating Conf., ASM International, 2000, 708-712.
- (28)Arimoto, K.; Kim, H.; Narazaki, M.; Lambert, D.; Wu, W. T.: Proc. 21st Heat Treating Conf., ASM International, 2001, 144-151.
- (29)有本享三, 奈良崎道治: 熱処理, **42**, p. 346 (2002)