

日本刀の反り現象に関する研究の変遷

アリモテック 有本 享三

1 はじめに

刀匠は古くから日本刀が焼入れによって反ることを認識していた。その理由については、鉄鋼に関する研究がある程度進展した段階で、この分野で日本刀に関心のある研究者から提示されることになる。着想の時期は明らかではないが、反りは刃先に生じるマルテンサイトの膨張によって発生するというものである。その後、日本刀の反りにはマルテンサイトの膨張だけではなく熱ひずみ(弾性ひずみと塑性ひずみ)の発生による効果も含まれるとの説が、1929 年に服部によって提唱された^[1]。これは円柱試験片の片側焼入れ実験の結果と材料力学に基づく考察から導かれたものである。服部の説は限定的な評価は得たが関係者に浸透するまでには至らなかった。

その後は目新しい説が出現しない状況が長く続くが、1990 年代の中ごろに実用化された熱処理シミュレーションが日本刀の焼入れ現象に適用されたことで、新たな方向性が見いだされることとなった。このシミュレーションでは焼入れ中の相変態、熱伝導、応力・ひずみの変化を予測することで、時々刻々の反りを含む各種の現象を追跡することができる。日本刀に対する最初の適用例ではシミュレーションから得られる各種のひずみの評価が不十分であり、したがって服部の説の妥当性を議論するまでには至らなかった。なお、熱処理シミュレーションの応力・ひずみ解析では、弾性ひずみ、熱ひずみ、塑性ひずみ、変態ひずみ、クリープひずみ、変態塑性ひずみなどの各種のひずみの変化を取り扱っている。ここで、熱ひずみの用語は過去には異なる意味で用いられていたことに注意する必要がある^[2]。

精密部品に生じる熱処理変形の低減が産業界では話題となるが、その変形の発生理由を初心者に解説する際には日本刀の反りが事例として持ち出されることが多い。一般にマルテンサイト膨張説が紹介され、さらにはマルテンサイト変態のないオーステナイトステンレス鋼製の日本刀は焼入れしても反らないという推論が披露されることもある。この服部の説と矛盾する説明を筆者は疑問に思っていたが、刀匠や関係者の協力を得て日本刀の反りに関する実験的研究を実施することができた。その際にはオーステナイトステンレス鋼製の日本刀模擬試験片も焼入れ実験の対象としたので、上記の推論の妥当性については一応の答えを得ることができた。以下では最後にこの実験の一部について紹介するが、主には日本刀の反りに関する研究の変遷についての筆者の調査を後進のためにまとめておく。

2 日本刀の反り現象に関する認識

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”^[3]において、古文書の“撰刀記”に“劍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・・・(中略)・・・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(原文の現代語訳は筆者による)”との記載があることを紹介している。また、俵は江戸後期の水心子正秀の“刀劍辨疑”^[4]から、図 1 に示す日本刀の反りと円の関係図を転載する

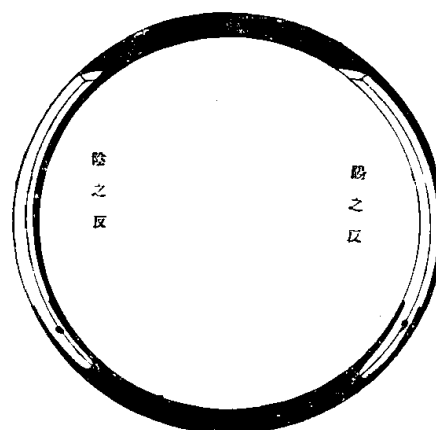


図 1 日本刀の反りと円

ことで、当時の反りに関する知見について示唆した。

一方、同書には、11 振りの日本刀の腰部と中央における反りの曲率半径の測定値が報告されている^[3]。筆者がそこから中央での曲率半径を選択し、さらに極端な一振りの値を除外して平均値、最大値および最小値を求めると、それぞれが 2.53, 3.91 および 1.45 m となった。なお、“日本刀の科学的研究”は俵の 1906 年から 1924 年の間における研究報告を集約した著作である。俵はその序において研究の目的を“古來日本刀の形状、特色を調べ、殊に刀身上に現はれます種々の模様を科学的に調査してその由来する原因を明にすること”，そして“その結果を実際に製造法に應用しまして刀匠に試作して貰ひ、各傳に見らるる特徴を得ること”と記している。

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^[5]は、日本刀の焼入れの過程で生じる反りについて、“刀をこの水の中に突込むと・・・(中略)・・・沸きかえる湯の中から、切尖がグウツ反りあがってくる・・・(中略)・・・焼を入れる前に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が自然に生ずるのである”と述べている。

時代が下り、藤原と英^[6]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。その報告には図 2 に示すように撮影映像から抽出された三枚の写真が掲載されている。図(a), (b)および(c)はそれぞれ焼入れ前、焼入れ後 1.2s, および 5.4 s

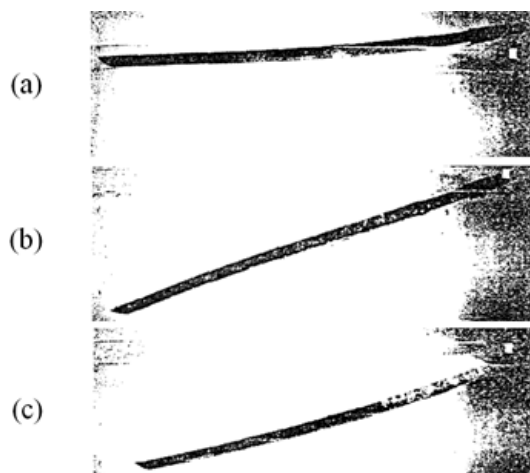


図 2 日本刀の焼入れにおける反りの変化

での状態であり、1.2s では刀身の逆反り、5.4s では本来の反りが観察できる。焼入れの前後での日本刀の姿を捉えた画像の報告は少ないが^[7, 8]、図 3 は刀匠が短刀の輪郭を木炭片でなぞって紙に写し取った線画である。

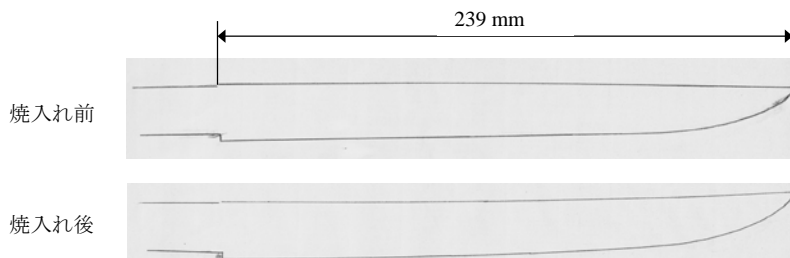


図 3 焼入れ前後での日本刀の輪郭
(真鍋純平鍛刀場：2014 年 10 月 4 日)

3 マルテンサイトによる膨張説

19 世紀の終わりのころ、Osmond は鋼の焼入れによる硬化は硬い β 鉄が急冷によって常温にもたらされるためであるとの説を唱えた^[9]。その後マルテンサイトが認知されたため、今日ではこのような説を知る人は少ない。鉄鋼に関する学説はこのような変遷を経て確立してきたものである。菊田は 1933 年に出版された著作^[10]で、当時の鉄鋼学の知見に基づき日本刀が反る理由についての見解を披露している。なお、この著作には本多光太郎が序を寄せている。

菊田の著作では、 A_1 変態については“オーステナイトより先づマルテンサイトに變わり、その中に含まれる炭素をして容易に α 鉄原子と化合物セメントイトを作り易き形態にして後、パーライトに變化する”と記されている。そして、各相の比容積は“オーステナイト < マルテンサイト > パーライト”であるとし、マルテンサイトのそれが他に比して大であるとした。なお、この A_1 変態に関する説明は本多の焼入れについての著作^[11]においても見られる。

次に、菊田は本多の考案になる焼入試験器^[11]から得られた図4の0.9% C鋼試験片での膨張と温度の関係を紹介している。図イに示す炉中冷却時の A_{r1} 変態での膨張は加熱曲線を超えるが、これはパーライト変態の前に一時的にマルテンサイトに変化するためであると説明している。図ロの冷水中冷却では200℃付近の A_{r1} 変態でのマルテンサイトは著しく膨張し、一方、図ハの温湯中冷却でのマルテンサイトは A'_{r1} で出現したものはトルースタイトに変わるが、 A''_{r1} で生じたものは室温までもたらされると解説している。

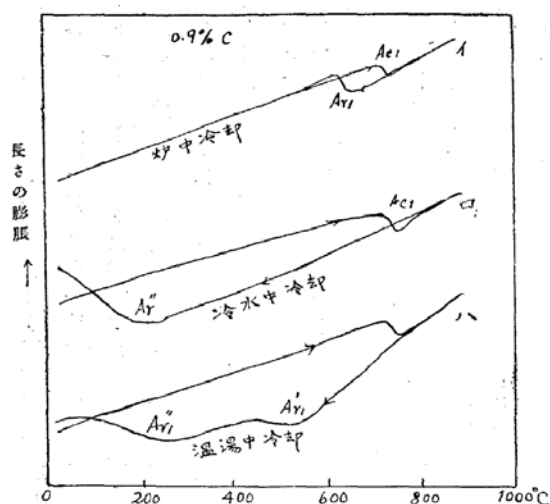


図4 0.9% C鋼の長さの膨張と温度

日本刀の反りについて、菊田は“初め真直なものは反りが出来、初め幾分反りを持たせたものは尚一層反る様になる”と記している。

反る理由については、上記の実験による知見を踏まえて“焼刃の方はマルテンサイト組織となり、地鉄及び棟部はトルースタイト組織で、刃部の方が幾分膨張する為めである”と述べている。なお焼入れ鋼の方が若干比重の小さいことは実測値を示すことによって明確にしている。

日本刀の焼入れに関連し、菊田は焼刃土の冷却効果に関する佐藤の研究^[12, 13]について紹介している。論文の謝辞から、この研究は本多の指導によるものであったことが分かる。さらに、菊田は日本刀の焼入れ中に発生する焼割れについても触れているが、本多の著作^[11]の方ではこの現象に関する一般的な説明のみが含まれている。

上記の A_1 変態に関する説のその後について記しておく。1944年に岩瀬^[14]は“マルテン化は A_1 変態ではなくて A_3 格子変態であるからパーライトの生成はマルテンサイトを經由せず”との記載を含む記事を投稿した。これに対して本多^[15]は自説を擁護する記事を掲載した。この議論の経緯については小岩による解説がある^[16]。

4 服部による二要因説

服部は多様な形状の試験片を化学組成の異なる複数の鋼で製作し、焼入れ前後での形状変化を調べて報告した^[11, 17]。この中には、異なる鉄鋼の円柱を片側冷却により焼入れ、そこに生じる曲りを評価したのものがある。この円柱試験片の材料は Armco 鉄、高炭素鋼および特殊工具鋼の三種であり、これらの化学組成は表1に示すように報告されている。

表1 試験片に用いた鉄鋼材料の化学組成

種類	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	W	Ni
Armco 鉄	0.015	0.010	0.032	0.003	0.030	0.013			
高炭素鋼	1.46	0.099	0.208	0.024	0.023		0.361		0.081
特殊工具鋼	1.03	0.215	0.997	0.033	0.042		0.102	1.02	0.110

円柱試験片の寸法は直径と長さがそれぞれ15と120mmであった。焼入れは、図5に示すように加熱した円柱を箸で挟み、厚さ1mmの噴出水(温度18℃で流速0.5



図5 円柱鋼試験片の片側冷却試験

m/s)中に差し入れて上面から冷却することで実施した。

服部は Armco 鉄の試験片の焼入れ時における挙動を上方から観察し、はじめは凹に曲り、冷却のかなり進んだころから逆方向の曲りが開始し、最終的には凸形状になると述べている。一方、焼入れ中における永久ひずみの発生については、その間に材料が降伏する可能性の有無を簡便に検討・評価している。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 の積で得られると仮定した。そして、たとえば、 $\alpha: 0.000014$ 、 $E: 15,000 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\Delta T: 300 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合には応力が 63 kg/mm^2 となるので、焼入れ時の温度では十分に降伏点に達すると述べている。

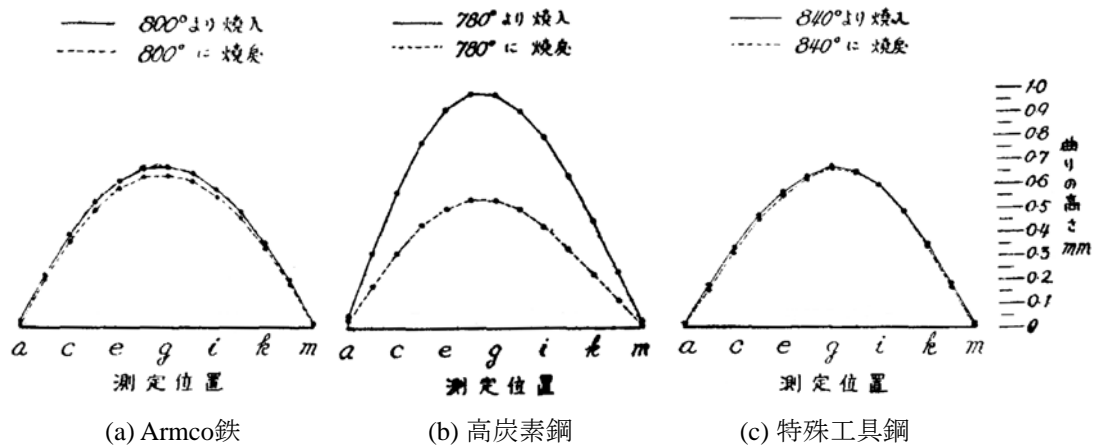


図 6 焼入れ円柱試験片における曲り高さの分布

服部は、焼入れと焼もどし後の円柱試験片の曲り変形(曲りの高さ)を、図 6 に示すように長手方向に沿う 13 点(a から m)で測定してグラフ化した。なお、実線と破線は焼入れと焼もどしの処理後の状態に対応し、それぞれの処理の温度は図中に示す値であった。ここでの“焼もどし”は、焼入れ温度まで加熱して 30 分間の保持後に炉冷するという普段は実施しない処理である。

Armco 鉄の試験片の中央の曲り高さは図 6(a)に示すように 0.65 mm 程度であり、これが焼もどしによって 0.6 mm 程度に低下した。服部は組織に変化のない Armco 鉄では、永久熱ひずみ(塑性ひずみ)と弾性熱ひずみ(弾性ひずみ)が変形の発生に寄与したものと推定している。さらに、焼もどしによる応力除去が変形に影響するとの考察がある。なお、ここで服部が単に“熱ひずみ”の用語を用いる場合、これは塑性ひずみと弾性ひずみを加算したものを意味する。

一方、高炭素鋼の試験片では、図 6(b)に示すように中央の曲り高さが 0.95 mm 程度となる。これが焼もどし後には 0.55 mm 程度に低下して Armco 鉄と同程度となる。なお、この試験片ではマルテンサイトが急冷側のみに生じたことが、硬さ測定によって確認されている。そこで、服部は、焼もどしによる試験片曲りの減少はマルテンサイトの消滅によるものであり、残った曲りについては塑性ひずみの寄与によるものと考察した。なお、焼入れ直後の曲りに対しては、マルテンサイトの膨張と熱ひずみの二種の寄与が示唆されている。

特殊工具鋼の試験片では図 6(c)に示す曲り高さ分布が生じ、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 程度であった。この鋼円柱では全断面がマルテンサイトに変態し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はマルテンサイトの膨張ではなく、熱ひずみの寄与によるものであると説明している。

服部は以上のように結果について述べた後、いくぶん唐突であるが、日本刀の焼入れによる反りは“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”と述べている。服部

この報告^[1]には本多からの助言に対する謝辞が記されているので、服部の日本刀の反りに関する二要因説は本多から菊田にも伝えられた可能性が高いのではないかと考える。

5 服部の説の評価と大和久によるその継承

服部説の発表からほぼ 10 年が経過したころ、日本金属学会の“鋼(炭素鋼, 特殊鋼)の熱処理と歪, 焼割れその他”に関する専門部会が開催された。この会での討論が記録^[18]されており、そこ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 7 に転載した模式図を示し、“日本刀は・・・(中略)・・・土の厚い所がトルースタイトないしソルバイト, 薄い所がマルテンサイトとなり, 図(b)の(イ)の反りのものが(ロ)の形になります”と述べた。さらに、日本刀が反る理由については、“日本刀は・・・(中略)・・・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であります”と語った。

一方、数名の刀工の作業について調べた結果として、反りの調整法について“第(c)図の如き土取りをし・・・(中略)・・・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)図の場合に比し少なくなります”と紹介し、“反りの少ない刀を作ろうと思う場合にはこの様に土を塗れば後に鎊地をたたいて反りを減らす手数が少なくてすみませ”と説明を加えている。さらに、“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”との知見を紹介している。谷村は以上の反り調整法がどのような原理に基づくものであるかについて出席者に教えを乞うているのであるが、それに対する回答は記録には含まれていない。

この討論会では本多を含めて 26 名の発言が残されているが、日本刀の反りに関する服部説を紹介したものは見当らない。一方、同じ専門部会での本多の講演録^[19]には、自らの発表内容に対し、“服部傳三郎君の実験結果を総括したものである”と記し、続いて“焼入歪は温度の差及び組織の不均一なる二つの原因の合成効果である”,そして“鋼を焼入する場合には先づ熱歪を生じ後変態歪を生ずるものと考えることが出来るから結果は略(ほぼ)熱歪に麻留田化による一様な膨脹を加へたものに等しい”,などの服部の成果を列記している。ただし、そこには日本刀の反りに関する服部説は紹介されていない。なお、本多は海外の研究から示唆を受け、1935 年に焼入れ時の発生応力の計算を実施して広根との共著^[20]として発表している。ただし、この計算には塑性ひずみは考慮されていない。

服部説のその後であるが、筆者はこの説が引用された著作の存在を確認できていない。しかし、この“二要因説”のあらまは、大和久による熱処理技術者向けの解説書に含まれている。大和久の著作^[21]には、“日本刀は刃先が肉薄で冷却が早く、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”,さらに“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)”との記述がある。

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説明している。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^[22]で、“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

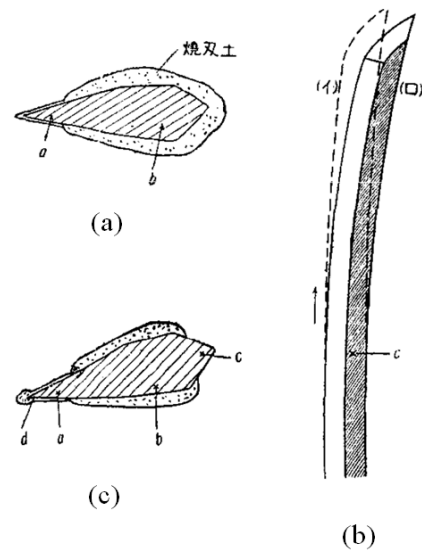


図 7 日本刀の反りとその調整法

るのである”と説明している。

この“アプセット”という用語であるが、服部^[1]が Keller の研究^[23]を紹介した際、“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”と記している。したがって大和久はこの服部の記述を参考にした可能性が高い。なお、大和久の焼曲りについての説明であるが、その現象は“反対の熱い側を据え込む”といったものではないことが、後述するシミュレーションの事例から明らかとなっている。大和久の解説が普及しなかったのは、服部の実験に対する紹介を省略したこと、そしてアプセットや焼曲りについての説明が十分でなかったためであると考えられる。

6 シミュレーションによる説明

井上は熱処理シミュレーションを日本刀の焼入れ過程に初めて適用した。その 1994 年の報告^[24]には、時系列の刀の変形図に温度、そして焼入れ後の変形図に応力(長さ方向)とマルテンサイトの体積分率を重ねた図を掲載した。なお、実験との比較は示されておらず、熱ひずみ、変態ひずみ、塑性ひずみなどの出力結果は省略されている。図 8 は井上の別の報告^[25]から転載したもので、反りと温度の変化が重ねられている。

井上は反りのシミュレーションの結果を、“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)”,そして、“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”と評している。

井上の 2008 年の報告^[26]では、時系列の変形に対して温度だけでなく、長さ方向の応力、マルテンサイトとパーライトの分率の分布を重ねた図を掲載している。

そこには、シミュレーション結果が二度の逆反り、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を予測したとの指摘がなされている。そして、成果のまとめとして、“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に、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水冷却の熱伝達特性データ^[27]が使用されている。焼刃土の冷却効果に関する実験的研究は、古くはすでに述べた佐藤^[12]、そしてその後には奈良崎ら^[28]によって実施されている。

服部の円柱焼入れ試験の内、特殊工具鋼円柱に類似した条件で発生する曲り現象のメカニズムは、筆者によって 1999 年から 2001 年の間にシミュレーションを用いて調べられた^[29-31]。すなわち、図 9 に示すキー溝付き S45C 鋼円柱(直径: 10 mm, 長さ: 100 mm)の水焼入れでは、試験片の全長に渡って加工されたキー溝(幅: 4.0 mm, 深さ: 2.5 mm)により、前述の服部^[1]の実験と同様に片側からの冷却現象が引き起こされる。さらに、この鋼円柱が完全焼入れ状態となったことが硬さ測定から確認できているので、そこに生じる曲げ現象は服部の特殊工具鋼円柱のケースに類似するものであると評価した。

キー溝付き円柱試験片を 860°C から水焼入れすることで、その形状は図 10(a)に示すように時々刻々と変化した。なお、キー溝はこの図において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

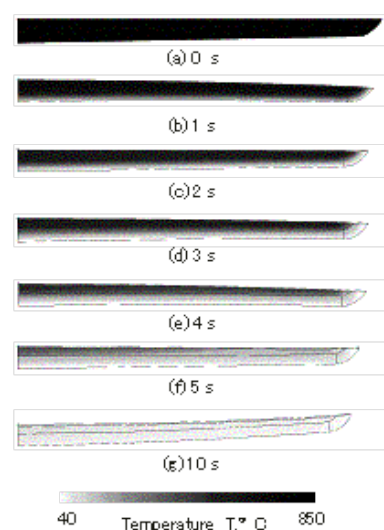


図 8 シミュレーションによる日本刀の反りと温度の変化

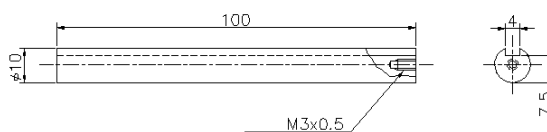


図 9 キー溝付き鋼円柱試験片

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、曲り方向が逆向きとなり、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っている。なお、鋼円柱の変形曲線が円弧に極めてよく一致することが画像の分析より確認された。

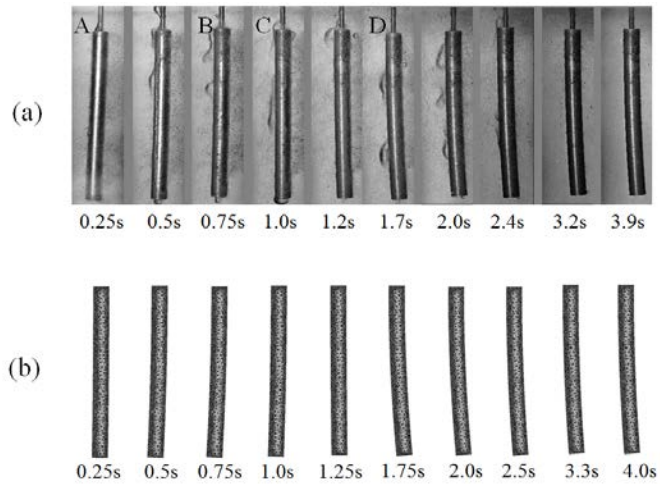


図 10 キー溝付き円柱試験片の水焼入れ過程での形状の変化 (a: ビデオ画像からの抽出写真, b: シミュレーション結果)

シミュレーションから得られ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が報告されている^[31]。温度の低下はキー溝側の突起部から開始し、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る。一方、軸方向の塑性ひずみは、最終的にキー溝側が正、その反対側が小さな負の値となる分布を示した。

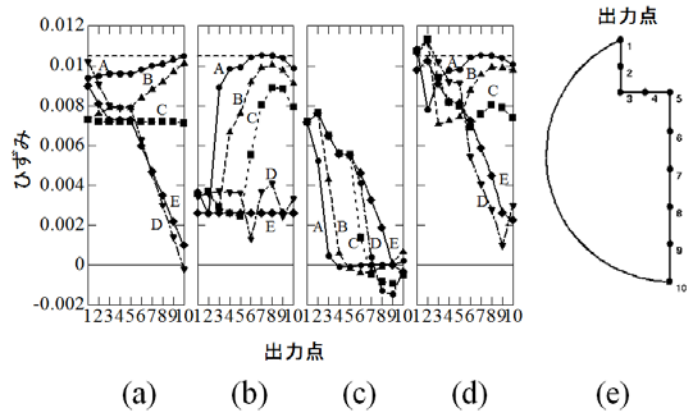


図 11 キー溝付き円柱試験片での軸方向ひずみ分布のシミュレーション結果 (a: 全ひずみ, b: 熱ひずみ + 変態ひずみ, c: 塑性ひずみ, d: 熱ひずみ + 変態ひずみ + 塑性ひずみ, e: 断面の出力点)

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、その分布図を図 11 に示すように描いた。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ているためである。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低減は見られない。

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。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、全ひずみはこれに追従することはない。そこで、熱ひずみ + 変態ひずみのこの局部的な低下は、まず正の弾性ひずみの増加によって補われることになる。この弾性ひずみに対応する引張応力が材料の降伏点に達すると、その後は塑性ひずみも熱ひずみ + 変態ひずみの減少分を補うために寄与する。この場合、塑性ひずみは外部荷重がなくても生じることになる。

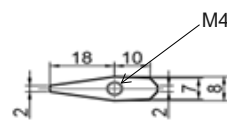
段階 B から C、さらに D へと現象が進行するにつれ、熱ひずみ + 変態ひずみは、図 11(b)に示すようにキー溝側からその反対側に向かって低下する。そして、最終冷却状態 E では 0.0026

程度の水平分布となるが、これは全体が室温に到達してマルテンサイト化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ヤ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 を一律に加算することで、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。この分布に弾性ひずみと変態塑性ひずみを加算したものが図 11(a)に示す全ひずみの分布であり、これが図 10 における試験片の最終の曲り状態に対応する。図 6(c)に示した服部の特殊工具鋼の曲り現象でも、上記と同様に各種ひずみには変化が生じたものと考えられる。

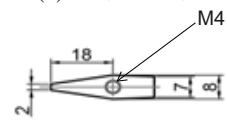
7 日本刀試験片を用いた焼入れ実験

日本刀の反りに関する問題点を明確にするため、刀匠の支援を得て焼入れ実験を実施した^[32]。以下で述べる 2 種類の試験片を用い、鍛刀場で焼入れ中の変形状態を撮影し、同時に温度の変化を測定した。

- (1) 日本刀試験片：作刀の伝統に基づき刀匠が製作
- (2) 日本刀模擬試験片：炭素鋼 (S55C) とオーステナイトステンレス鋼 (SUS304) を用い、日本刀に類似した断面形状に機械加工さらに将来のシミュレーションの



(a) 日本刀試験片



(b) 日本刀模擬試験片

図 12 試験片断面の形状・寸法

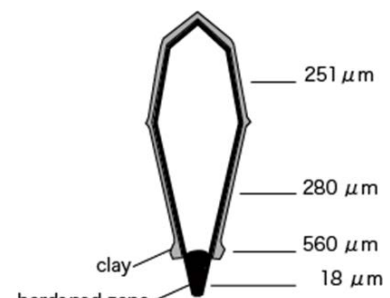
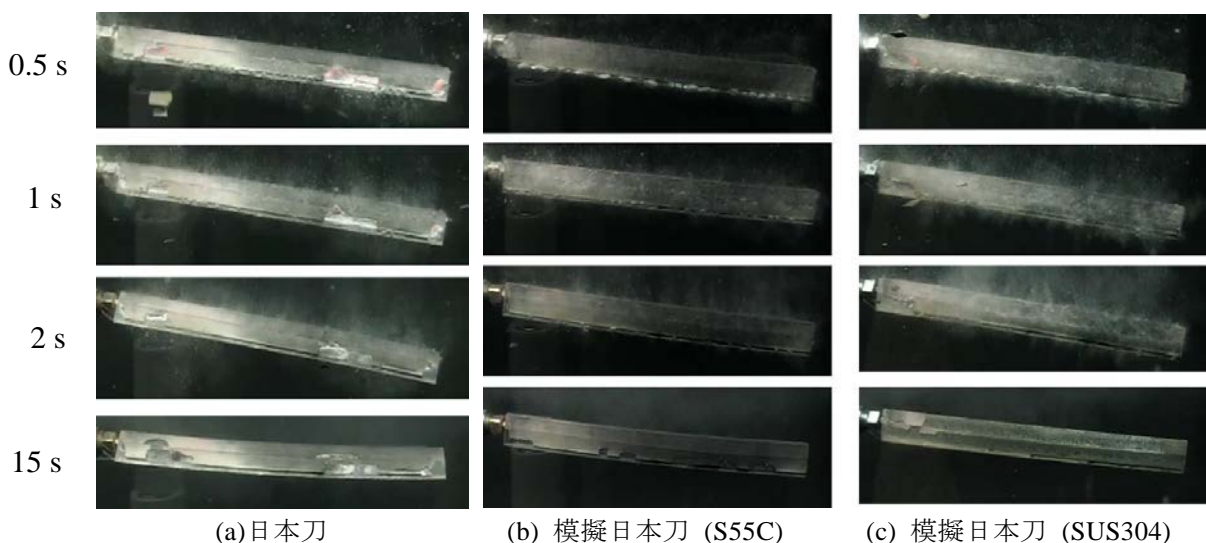


図 13 焼刃土の塗布状態

ため、硬さと残留応力の測定および金属組織の観察を実験室で実施した。なお、試験片の長さはいずれも 280mm で、その断面は図 12 に示す形状であった。M4 のねじ穴は試験片の保持器具との接続用に設けられた。温度計測のため、試験片の片方の断面の 3 カ所には径 1.1 mm で深さ 30 mm の穴を設けて熱電対を挿入した。焼入れ前には刀匠により試験片に焼刃土が塗られた。図 13 には焼刃土の塗布状況とその厚さの測定値を示す。



(a) 日本刀 (b) 模擬日本刀 (S55C) (c) 模擬日本刀 (SUS304)

図 14 日本刀試験片と日本刀模擬試験片における反りの変化

焼入れは、刀匠が加熱した試験片を透明アクリル容器中の水に浸漬することによって実施し

た。焼入れ時のみ試験片に照明を当て、その反りの変化をビデオカメラで撮影した。図 14 では三種の試験片での反りの変化をビデオから抽出した画像によって示す。日本刀試験片では 2s において逆反りの発生が確認できるが、他の試験片ではそうではない。いずれの試験片においても焼刃土の脱落が見られた。

焼入れ後 1 年半の間そのままの状態に放置していた三種の試験片の外観をスキャナで取り込

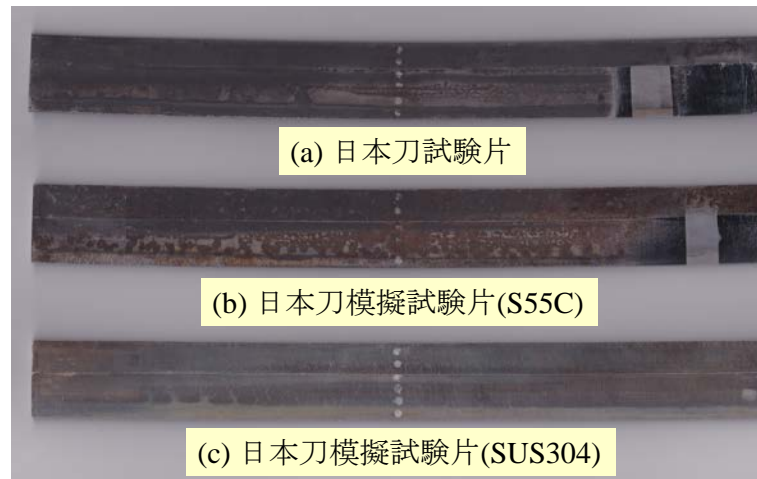


図 15 焼入れ試験片の外観

むことで、図 15 に示す画像が得られた。この現寸図から、日本刀試験片、その模擬試験片(S55C)と(SUS304)の反りの曲率半径を測定すると、それぞれ 3.5, 4.5 および 8.9 m が求められた。日本刀試験片とその模擬試験片(S55C)の右側の一部については、図 15 に示すように研磨して Nital エッチングで処理することにより、マルテンサイトの範囲を識別することができた。なお、この画像からも明らかなように、日本刀試験片とその模擬試験片(S55C)では表面に別種のさびが生じていることが確認できる。

図 15 の各試験片の中央に見える数個の白点は X 線残留応力測定のための研磨の痕である。この測定により、いずれの試験片においても刃の部分の軸方向残量応力は圧縮であることが確認できた。一方、焼入れ試験片の断面における硬さの測定により、日本刀試験片とその模擬試験片(S55C)では焼が入った刃の部分の硬さは同程度で、その分布は同様の状態であることが明らかとなった。なお、模擬試験片(SUS304)の硬さには焼入れによる変化は生じなかった。

8 まとめ

日本刀が反る理由についての過去の説、そしてそれが提唱された背景についてたどることができた。当然ながら完全なレビューとは言い難く、新たな発見に期待したいところである。この調査のモチベーションの一つとなったのは服部傳三郎の研究を知ったことにある。その実験の一部の条件が筆者の過去に実施したシミュレーションにおけるものと類似していたことが、服部の日本刀の反りに対する二要因説の重要性の再認識につながったと考えている。服部の履歴書は金沢大学資料館に保管されており、関係者の好意によって筆者の元には、“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)”という情報がもたらされた。

一方、服部説の確認のために日本刀試験片による焼入れ実験を実施するという計画は、真鍋純平刀匠の支援がなければ実現は困難であった。また、試験片の製作や計測では大阪工業大学の伊與田宗慶氏にお世話になった。今後も同種の実験による反り現象の確認が、別の場所においても行われることを期待したい。なお、服部が行った焼もどし処理は、今回の試験片では設備の都合で実施しなかったことを付け加えておく。一方、得られた実験についてはシミュレーションの適用が予定されているので、その結果として反り現象に対するより厳密で明確な説明が可能になるものと考えられる。なお、今回の日本刀試験片の焼入れ実験は、日本熱処理技術協会の“焼割れシミュレーション研究部会”の活動(2014 年から 2016 年)の一環として実施されたものである。

参考文献

- [1] 服部 傳三郎, “工具鋼の焼入に依る變形の原因に就て”, 機械學會誌, Vol. 32, No. 127, 1929, pp. 41-57.
- [2] 有本享三, “熱処理變形發生メカニズム解明の進展: 日本刀の反りを例として”, 熱処理, Vol. 56, No. 3, 2016, pp. 106-114.
- [3] 俵 國一, “日本刀の科学的研究”, 日立評論社, 1953.
- [4] 川口陟 編, “水心子正秀全集”, 南人社, 1926, 国会図書館デジタルコレクション, <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/1020678>
- [5] 岩崎航介, “刃物の見方”, 三条金物青年会, 1969.
- [6] 藤原晴夫, 英 崇夫, “日本刀の科学的研究序論--その反りと残留応力について”, 徳島大学工学部研究報告, Vol. 38, 1993, pp.1-7.
- [7] 佐々木 直彦, “伝統的鍛錬工程における日本刀素材の炭素量変化とそのメカニズム”, 室蘭工業大学博士論文, 2008.
- [8] 齋藤 努, 坂本 稔, 高塚秀治, “刀匠が継承する伝統技術の自然科学的”, 国立歴史民俗博物館研究報告, Vol. 177, 2012, pp. 127-178.
- [9] 中澤護人, “鉄のメルヘン”, アグネ, 1975.
- [10] 菊田多利男, “鉄鋼學上より見たる日本刀”, 有文堂, 1933.
- [11] 本多光太郎, “鋼の焼入”, 大日本図書出版, 1921, 国会図書館デジタルコレクション, <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/961209>
- [12] 佐藤清吉, “焼入試料の表面に施す塗付物の効果に就て”, 金属の研究, Vol. 10, No.2, pp. 63-70.
- [13] 報知新聞, “鋼鉄王国の東北帝大で武器製作に大発見, 鉄鋼焼入れの科学的研究: 佐藤清吉博士の功績”, 1931.12.3, 新聞記事文庫 製鉄業(11-061), 2001.7, 神戸大学附属図書館, http://www.lib.kobe-u.ac.jp/das/jsp/ja/ContentViewM.jsp?METAID=00052978&TYPE=IMAGE_FILE&POS=1
- [14] 岩瀬慶三, “A1 變態の再検討”, 日本金属學會誌, Vol. 8, No. 10, 1944, pp. 551-559.
- [15] 本多光太郎, “鋼の A1 變態の機構に就いて”, 日本金属學會誌, Vol. 9, No. 11, 1945, pp. 1-4.
- [16] 小岩昌宏, “本多光太郎の足跡をたどる-その 2”, 金研物語, Vol. 62, 2010, http://www.imr.tohoku.ac.jp/media/files/public/archive/kinken_story/mono-63.pdf
- [17] Hattori, D., “On the Cause of Quenching Deformation in Tool Steels”, Science Reports of Tohoku University, 1929, Vol. 18, pp. 665-698.
- [18] 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, Vol. 4, No.2, 1940, pp. A109-A117.
- [19] 本多光太郎, “鋼の徐冷及び急冷に伴ふ歪に就て”, 日本金属学会誌, Vol. 4, No. 2, 1940, pp. A79-A79
- [20] 本多光太郎, 広根徳太郎, “鋼材の冷却による熱的内部歪について”, 理研彙報, Vol. 14, 1935, pp. 525-534.
- [21] 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.
- [22] 大和久重雄, “熱処理のお話し”, 日本規格協会, 1982.
- [23] Keller, J. F., “Why metal warps and cracks”, American Society for Steel Treating, Vol. 9, 1926, pp. 378-402.
- [24] 井上達雄, “たたらと日本刀 - 伝承技能における先進科学と技術”, 日本機械学会誌, Vol. 97, No. 903, 1994, pp. 132-135.
- [25] Inoue, T., “Science of Tataru and Japanese Sword - Traditional Technology viewed from Modern Science”, The 1st International Conference on Business & Technology Transfer, Technology and Society Division, Japan Society of Mechanical Engineers, Kyoto, Japan, Oct, 2002, [A website reference: <https://www.jsme.or.jp/tsd/ICBTT/conference02/TatsuoINOUE.html>]
- [26] 井上達雄, “日本刀: その美, 外国刀との比較と焼入れの変態・熱・力学シミュレーション”, までりあ, Vol. 47, No. 7, 2008, pp. 359-363.
- [27] 上原拓也, 井上達雄, “日本刀の焼入れにおける焼刃土の効果”, 材料, Vol. 44, No. 498, 1995, pp. 309-315.
- [28] 奈良崎 道治, 淵澤定克, 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, No. 5, 1988, pp. 279-285.
- [29] Huang, D., Arimoto, K., Lee, K., Lambert, D., Narazaki, M., “Prediction of Quench Distortion on Steel Shaft with Keyway by Computer Simulation”, In Proceedings of the 20th ASM Heat Treating Conference; ASM International, Oct. 2000, St. Louis, pp. 708-712.
- [30] Arimoto, K., Kim, H., Narazaki, M., Lambert, D., Wu, W.T., “Mechanism of Quench Distortion on Steel Shaft with Keyway”, In Proceedings of the 21st Heat Treating Conference; ASM International, Nov. 2001, Indianapolis, pp. 144-151.
- [31] 有本享三, 奈良崎道治, “熱処理シミュレーションによる鋼軸焼曲りメカニズムの解明”, 熱処理, Vol. 42, No. 5, 2002, pp. 346-352.
- [32] Arimoto, K. and Iyota, M., “An Experimental Study on Blade Curving due to Quenching in the Japanese Sword”, In Proceedings of the Heat Treating Conference 2017, ASM International, Oct. 2017, Columbus, (発表予定)