

日本刀焼刃土の冷却効果に関する研究の変遷

— 反り発生メカニズムの解明に向けて —

アリモテック 有本 享三

1 はじめに

日本刀製作プロセスの研究は，工業技術の発展にとって有用であるとの指摘がなされている [1,2]。その一環として，筆者は日本刀の焼入れで生じる反りに関する研究の変遷について報告した [3]。そこでは，日本刀鋼，炭素鋼 (S55C)，およびオーステナイトステンレス鋼 (SUS304) で製作した日本刀形状の棒状試験片を用いた焼入れ実験について紹介した。この実験では試験片に反りが生じたが，吉井ら [4] はその発生のメカニズムをシミュレーションひずみ法によって解明した。

日本刀の焼入れに先立ち，刀身には焼刃土が塗布されることは良く知られている。この焼刃土が冷却に及ぼす効果についても，反りの発生メカニズムと同様，古くから関心が持たれていた。焼刃土の塗布は土置きとも呼ばれ，その起源は明確ではなく，伝来の技術との指摘もなされている [5]。焼刃土の冷却効果は，佐藤 [6] が熱処理冷却剤の冷却特性を調べるための試験装置を用いて研究し，1933 年にその成果を報告した。そこには，この冷却の効果が鋼円柱プローブから得られる冷却曲線の形状の変化として示されている。この種の研究の進展によって得られた焼刃土の効果を考慮した熱伝達係数は，日本刀焼入れのシミュレーションに用いられた。一方，産業向けの技術に対し，焼刃土と同様の効果をもたらす手法を適用した事例が出現している [7]。

この報告では，焼刃土の製法と塗布法に関する文書，そして，熱処理冷却剤の冷却特性試験装置を用いた焼刃土の冷却効果に関する研究について紹介する。さらに，焼刃土の冷却効果を考慮したシミュレーションの結果に基づき，日本刀反りの発生メカニズムをシミュレーションひずみ法で解明した成果について概説する。

2 焼刃土の製法と塗布法に関する文書

俵 [8] の著作には，当時 200 種の刀剣書を閲覧した結果，これらがすべて徳川期に著されたもので，そこに刀製作に関する情報が含まれるのは数種であったと記されている。その数種の内で“研究に最も有力にして中心となるべきもの”として，水心子正秀の剣工秘伝志 [9-11] が挙げられている。剣工秘伝志の巻の下には焼き刃土製法の記述があり，以下はその部分に対する筆者の現代語訳である。

焼刃土は山城の国深草山，あるいは稻荷山の土といわれているが，場所には関係なく真土でねばりのあるものが良い。私が使用していた土は，山形城下より二里東にある棒原村の土である。山形鍛冶が羽口を作る際に用いている土である。ただし，黄色で小石が混じっている。製法・調合については以下の通りである。

土，一合 (180 ml)，山形棒原の土

荒砥の粉，一合五勺 (270 ml)，ただし砥石は肥前唐津またはおれくい

炭の粉，一合二勺 (216 ml)，松炭でも栗炭でもよい

以上の三種を葉研 (やげん) でおろし，絹ふるいに掛て，水で練り，陶器に入れて必要な際に取り出して使用する。

ここで，“真土”については，鈴木 [12] が，“鑄物の世界にあつてはこれを‘まね’と読み，鑄型をつくるときに用いる土のこと”であると解説している。水心子は上記の説明の後，別の調合法や状況に応じての微調整法について細かく記している。

“鉄の技術と歴史”研究フォーラム，第28回公開研究発表会，
東京工業大学，2023年7月8日

水心子は、焼き刃土の塗布法について、“棟側は一段厚く塗り、刃の部分は肌が見えなくなる程度の薄さに塗る”と記している。なお、焼き刃土塗布の説明にはへら台の図が含まれており、これを図1に転載した。

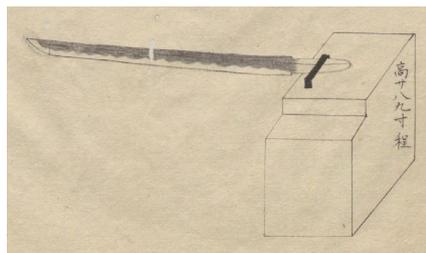


図1 へら台

時代が下って、俵[8]は、焼き刃土の塗布法を説明するために図2の模式図を示している。そして、“層の厚みは4耗(mm)に達することもあり、刃部は極めて薄く塗ることで1耗以下とする”と記している。さらに、“焼き刃土は、砥石の粉、粘土の粉、木炭粉末の三種を混合したもので、目的は、適当なる熱伝導率を与えて、焼入れ時の刀身における冷却速度を加減し、また木炭末で加熱中の刀身の炭素の減却を防ぐことにある”と述べている。

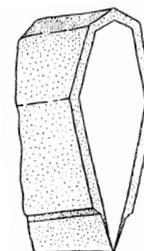


図2 焼き刃土の置き方

昭和の刀匠7名の焼き刃土の調合法について、岩崎[13]は、“流派および刀の種類によって独自の方法”が用いられているとしている。筆者が関係した日本刀焼入れ実験[3,4]において試験片に焼き刃土を塗布した真鍋純平刀匠は、自らの塗布手法について以下のように説明している[1].

粘土、粉炭、砥の粉をそれぞれ等分に混合し、そこにホウ酸ナトリウムと酸化鉄の粉末を少々加える。刃先に近い部分用には粉炭を多くする。乳鉢にこれらの粉を入れ、お湯を加えて1日よく練り合わせる。これを数日寝かせたものを保管し、必要に応じて使用する。

日本刀の刃文の形は焼き刃土の塗布法に依存するとの指摘がなされているが[1,5,8,12,13]、このテーマに対する紹介は割愛する。

3 冷却剤特性試験による焼き刃土の研究

焼入れ冷却剤の冷却特性に関する研究は、1920年代より、各国で研究者ごとに独自の装置を用いることで実施されてきている[14]。佐藤[6]は、この種の試験装置を焼き刃土の冷却効果について調べるために用いた。この研究については、佐藤の研究と同時期に出版された菊田の著作[15]において紹介されている。

佐藤の装置は図3に示す外観を持ち、図中に示された記号F, C, T, Mの個所は、それぞれ、炉、炉の蓋、冷却槽、冷却剤攪拌用モーターに対応する。炉の蓋Cの左側に位置する20%Cr-20%Ni鋼円柱プローブ（直径6mmで長さ70mm）は、炉Fをこの位置に移動することで800℃に加熱される。その後、プローブは90度下向きに回転させられ、冷却槽T中の冷却剤に浸漬される。冷却中のプローブ熱収縮量が測定され、これを温度に変換することで冷却曲線が描かれた。この装置が、機械工作に長けた佐藤によって製作されたことが口承されている[16].

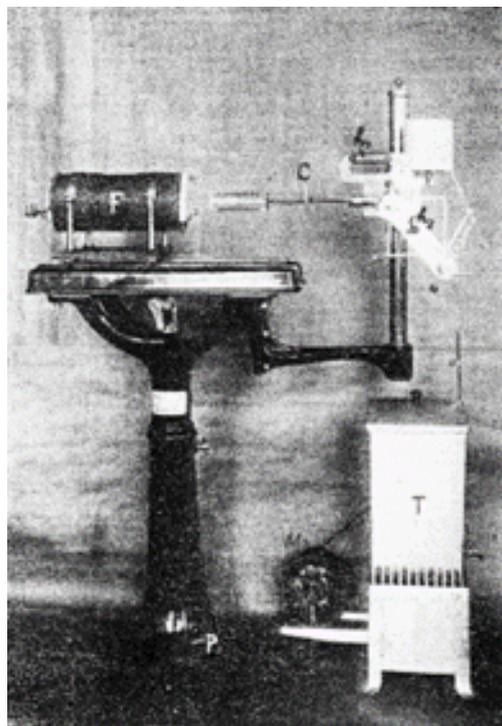


図3 佐藤の冷却特性試験装置

“鉄の技術と歴史” 研究フォーラム, 第 28 回公開研究発表会,
東京工業大学, 2023 年 7 月 8 日

佐藤は, 表面に粘土, 黒鉛粉, 研磨粉, 硼砂を水で練った泥を塗布したプローブを加熱し, 各種温度の水, グリセリン, 数種の油に浸漬した. そして, 塗布物の有無が冷却曲線の形状に与える効果を調べた. 塗布物は, 一部の油を除き, 冷却時間を短縮させることが報告されている. このことは, 図 4 に転載された, 塗布物の有無の条件に対し, 異なる温度の水への焼入れで得られた冷却曲線の比較から明らかとなる.

図 5 のプローブ外観写真は, 直径 13mm, 長さ 51mm のプローブの 20 °C 水焼入れ過程の映画撮影から得られたものである. 佐藤は, この図に関連して, 塗布物なしの場合には冷却後しばらくはプローブが蒸気膜に覆われるが, 塗布物ありの場合には冷却の初期から表面に細かい蒸気の泡が盛んに発生すると記している.

1931 年の第二十回理研講演会における佐藤の発表が取材され, 新聞記事が残されている[17]. そこには, この研究が“刀工によって伝家の秘法とされて居る鍛刀法にヒントを得た”もので, “この発見の鉄工業界に及ぼす貢献は誠にはかり難きものがある, 殊に鉄冑, 銃砲身, 軍艦の甲板等堅牢を絶対条件とする武器製作に一時代を画する国家的発見である”と記されている. 以下には, 記事に含まれる焼き刃土の冷却効果に関する記述を転載する.

古来刀鍛冶が刀紋を出すために刀身に置土を施して焼入れを行っているが, この場合置土は本来冷却を妨げるための意味を有するものであるから土の層は可なり厚くするのであるが, 土の層の極めて薄い場合にはこれと全然意味を

同じゅうするか如何かは明かでない. いずれにしてもこのような熱の不良導体の被覆を施せば一見品物の冷却は妨げられそうに考えられながらもかかる被覆剤の薄層が何故焼入れに好結果を及ぼすか, この一見矛盾と思われるなぞを解いて見ようと決心したことに私の研究は始ったのです.

次に如何なる被覆剤を塗ったらいいかということに着目して研究した結果, 木炭末, トノコ, 生節粘土の混合物あるいは火山灰, カオリンの混合物を得ました. この研究において焼入れには六百度から五百度の間の急冷が絶対条件であり被覆剤を塗らない場合の不成功はこの間の冷却が緩慢であったことに基因するという事実を発見し, な

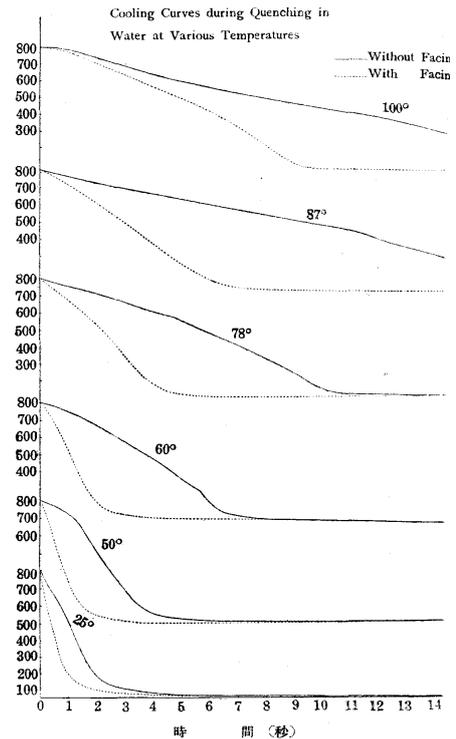


図 4 塗布物による冷却曲線の違い

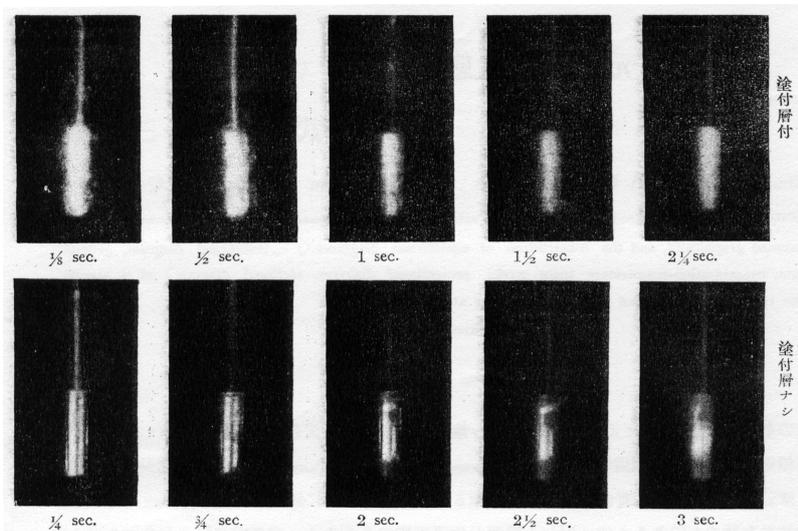


図 5 20 °C 水への焼入れ過程におけるプローブ外観

“鉄の技術と歴史”研究フォーラム，第28回公開研究発表会，
東京工業大学，2023年7月8日

お被覆剤が冷却を促進する理由を活動写真によって明かにしました。このことはいまだ一般工業界の注目する所となつて居ないし，殊に大砲等武器の焼入れは随分粗末な方法を取つて居るようですから，これの研究を充分利用して戴きたいと思つて居ります。

その後，鋼の酸化膜も同様の冷却効果を持つことが，Peter[18]によって1950年に報告された。この研究では直径19および40mmの軟鋼球を60℃蒸留水中に焼入れ，その際に厚さ0.08～0.1および0.2～0.25mmの酸化皮膜が冷却速度に及ぼす影響が調べられた。得られた結果は，多賀谷と田村[19]によって図6に示すように紹介されている。

時代が下つて，佐藤と同様の研究を奈良崎[20]が実施し，その成果は1998年に報告された。この研究では銀円柱プローブ（10mm径で30mm長さ）が用いられ，その中心に挿入した熱電対によって冷却曲線が得られた。使用した塗布物は，多孔質で表面の凹凸が大きい珪藻土を主成分とする粘土質被覆材，そして表面の滑らかなガラス質被覆材であったが，以下では前者の結果のみを紹介する。

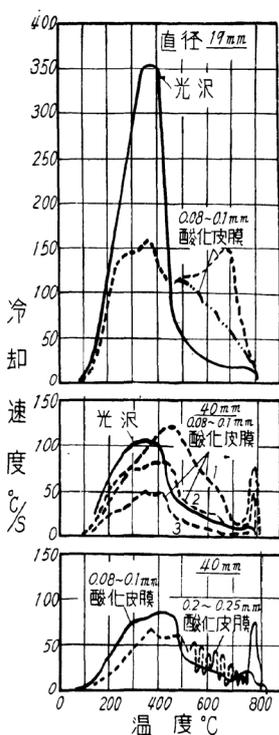
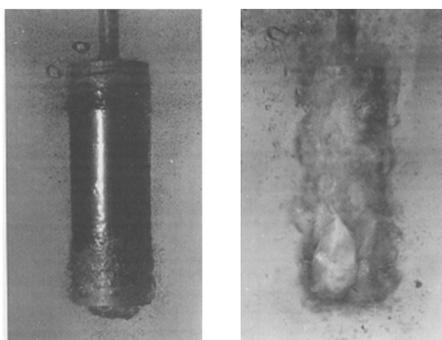


図6 酸化プローブの冷却特性



(a) 被覆なし (b) 被覆あり
図8 プローブの冷却時における外観

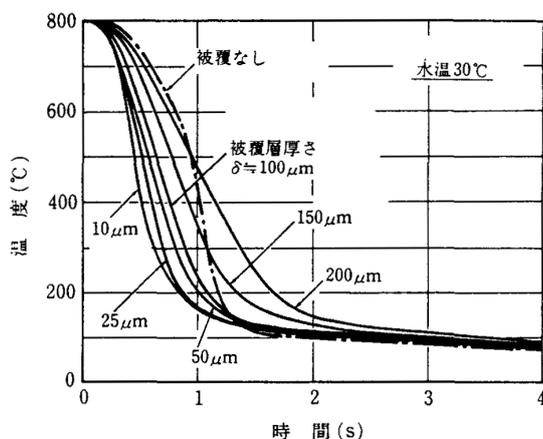


図7 珪藻土被覆の冷却曲線

珪藻土被覆材を必要な厚さまで繰り返し塗布されたプローブは，電気炉中で加熱焼成されたとの記載がある。

図7には，奈良崎が異なる塗布厚さのプローブを30℃の水で冷却した際に得た冷却曲線を転載した。この図には，塗布厚さが冷却曲線の形状に与える影響が示されている。図中の塗布厚さの測定には，高周波膜厚計およびマイクロメータが用いられたとの記載がある。プローブの冷却時の外観（珪藻土被覆の有無）については，図8に示す写真が報告されている[21]。

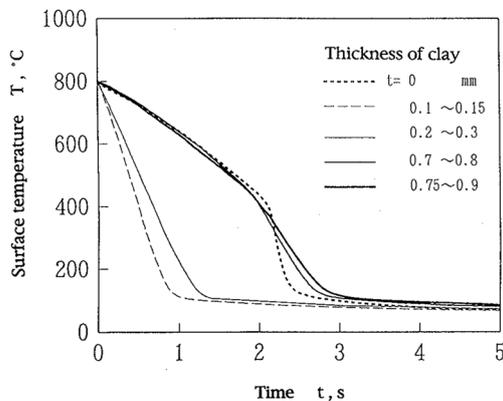


図9 焼刃土被覆プローブの冷却曲線

その後，上原と井上[22]は，日本刀の熱処理シミュレーションに用いる目的で，焼刃土の冷

“鉄の技術と歴史” 研究フォーラム，第 28 回公開研究発表会，
東京工業大学，2023 年 7 月 8 日

却特性について調べた。この研究では，JIS K2242（熱処理油剤）に規定された銀円柱プローブが用いられた。図 9 は結果として得られた冷却曲線を転載したもので，焼刃土厚さが 0.2~0.3 mm に対応する曲線の形状は，奈良崎による図 7 の厚さ 200 μm のものと大きく異なる。

芹澤[7]のレビューによると，薄い焼刃土の熱伝達特性向上メカニズムは，近年の CO₂ 削減を意図した薄肉高強度化鋼材の製造において，その表面に発生する鉄酸化層を制御するための温度予測技術の開発に貢献しているとのことである。

4 焼刃土効果の実験とシミュレーションによる確認

吉井ら[4]は，日本刀鋼，炭素鋼（S55C），およびオーステナイトステンレス鋼（SUS304）で製作した日本刀形状の棒状試験片の焼入れ実験を刀匠に依頼し，その条件に対して焼刃土の冷却効果を考慮したシミュレーションを実施した。これら三種の試験片は，それぞれは，JS，MJS-S55C，および MJS-SUS304 の名称によって識別された。

焼入れの前には，刀匠が伝統的手法に基づいて，いずれの試験片にも同様に焼刃土を塗布した。図 10 には，塗布プロセスの典型的な 6 段階に対応する写真を示す。ここでは刃文が直刃となる単純な土置きが選択された。焼刃土の塗布後の厚さは，奈良崎ら[20]が用いたものと同じ膜厚計によって測定された。図 11 では，得られた値を試験片断面の指定領域に対応させて示した[4]。焼刃土の厚さは，刃先とその他の領域では大きく異なることが明らかにされた。

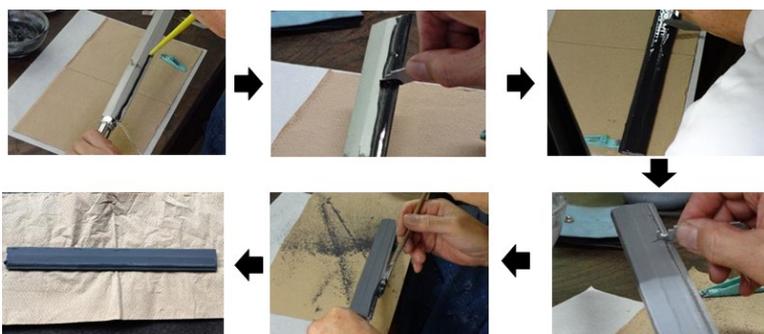


図 10 焼刃土の試験片への塗布プロセス

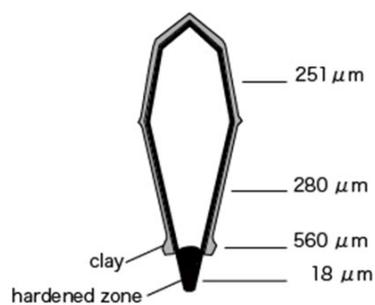


図 11 焼刃土の塗布状態

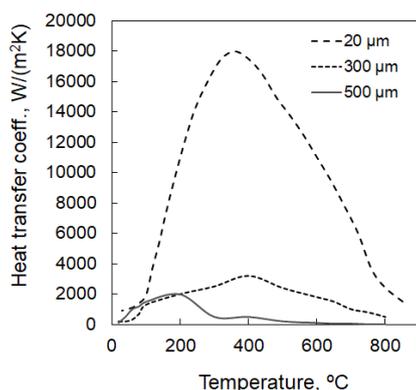


図 12 焼刃土の影響を考慮した熱伝達係数

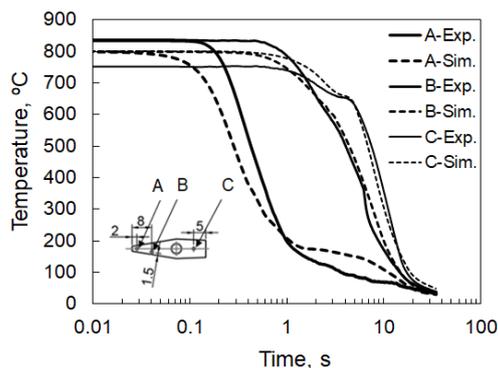


図 13 日本刀試験片の温度変化

シミュレーションモデルには，図 12 に示す焼刃土厚さ依存の熱伝達係数が指定された。この係数は，基本的に，奈良崎ら[20]が得た図 7 の冷却曲線に集中熱容量法を適用することで求められた。焼入れの条件は，試験片の加熱温度が 800 $^{\circ}\text{C}$ ，そして冷却水の温度が 20 $^{\circ}\text{C}$ に設定された。シミュレーションから得られた MJS-S55C 試験片の点 A，B，C における冷却曲線は，図 13 に示すように実験によるものと妥当な範囲で一致した。JS と MJS-SUS304 の試験片における同様の比較においても，同程度の一致が得られることが確認された。

“鉄の技術と歴史” 研究フォーラム，第 28 回公開研究発表会，
東京工業大学，2023 年 7 月 8 日

図 13 によると，点 A の温度は焼入れ後から 1 秒の間にほぼ 200 °C まで低下する．芹澤[7]は，0.6 %C 鋼では 300 °C に到達するまでの冷却速度が約 300 °C/sec であれば，マルテンサイトの体積分率が 90 % 以上となると記している．この条件は，刃先から点 A，そしてそこからいくぶん棟部方向に入った範囲で満たされる．なお，図 14 は試験片の外観の一部を示したものであるが，研磨後にナイトール腐食させた面，そしてその右側の刃先部でマルテンサイトが生じた範囲を識別することができる．



(a) JS (b) MJS-S55C
図 14 試験片のマルテンサイト範囲

シミュレーションからは，3 種の試験片での反り曲率の時間変化が図 15 に示す曲線として得られた．曲率の符号は，正が通常の日本の反り，そして負が逆反りの状態に対応する．図中には，試験片の形状測定から得られた反り曲率を矢印で示した．この図からは，マルテンサイトが発生しない SUS304 鋼試験片においても，最終冷却状態において正の反り曲率が得られることを確認することができる．

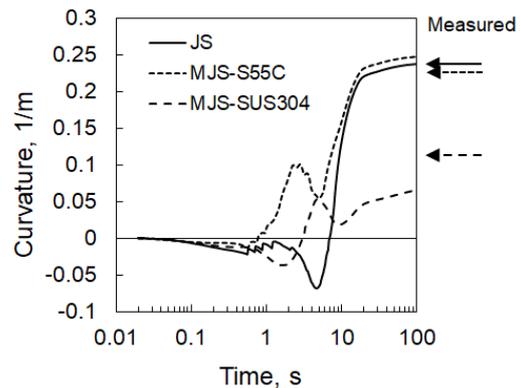


図 15 試験片の反り曲率の変化

この実験における試験片の反り発生メカニズムを，吉井ら[4]はシミュレーションから得られた軸方向の膨張ひずみ（熱ひずみ+変態ひずみ），弾性ひずみ，塑性ひずみ，変態塑性ひずみ，そしてこれらを加算した全ひずみの時間変化に基づいて説明している．ここでは，吉井らの説明を補足するために図 16 の模式図を作成し，最終冷却状態での各種ひずみと反りを関係づける．全ひずみの分布は刃先が 0.005 で棟が -0.002 の直線形状である．この分布の発生には，膨張ひずみと塑性ひずみの刃先側で生じた正の領域が寄与している．この膨張ひずみの分布は，熱ひずみが最終冷却状態では消滅しているため，刃先に生じたマルテンサイトによる変態ひずみによってもたらされる．一方，塑性ひずみの刃先における正の範囲の発生には，この部分が焼刃土の効果によって冷却開始から 1.5s 程度の間は急冷されることが関係する．すなわち，この局部には負の熱ひずみ，そしてこれに対抗する正の弾性ひずみが生じる．このことは引張応力が発生することを意味し，その値が弾

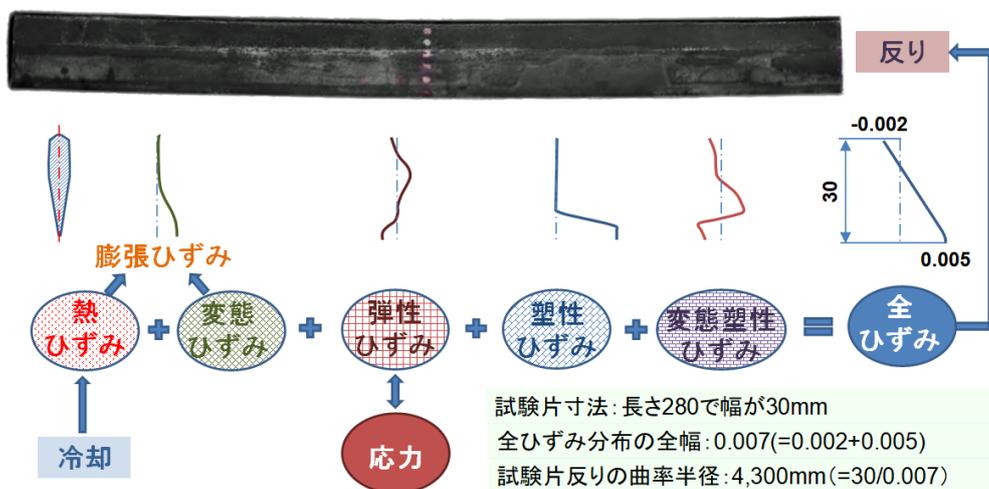


図 16 日本刀 JS 試験片の反りをシミュレーションひずみ法で説明するための模式図

“鉄の技術と歴史” 研究フォーラム，第 28 回公開研究発表会，
東京工業大学，2023 年 7 月 8 日

性範囲を超えることで正の塑性ひずみが蓄積する．同様の塑性ひずみは，マルテンサイトの発生がないオーステナイトステンレスの試験片 (MJS-SUS304) においても生じる．この塑性ひずみの発生が，MJS-SUS304 試験片でも反りが生じることの理由となる．なお，図 16 に示された変態塑性ひずみは相変態中のみ発生する塑性現象であり，刃先側では反りを低下させ，そのいくぶん内部の範囲では反りを増加させる方向に寄与する．

図 16 には，日本刀反りの曲率半径の値を全ひずみ分布の全幅から得るための手順が示されている．すなわち，反りの曲率半径 4,300 mm は，試験片の幅 (30 mm) を全ひずみ分布の全幅 (0.007) で除することで得られる．この場合の曲率は 0.23 m^{-1} となり，図 15 に示した結果と一致する．

この曲率半径を求めるための式は，試験片に円弧状の曲がりが生じた状態を描いた図 17 から導出することができる．試験片の中央に破線で描かれた繊維においては， nn_1 の距離は曲がり発生によって変化しないものとする．一方，破線から距離 y の位置にある繊維は ss_1 の距離が ss' となり，その変化は $s's_1$ である．したがって，距離 y の位置での繊維における全ひずみ ε は，この状態での円弧の曲がりにおける曲率半径が r で，試験片内部の面 mk と pl の成す角が θ であるとする，関係式

$$\varepsilon = \frac{ss' - ss_1}{ss_1} = \frac{s's_1}{nn_1} = \frac{y\theta}{r\theta} = \frac{y}{r} \quad (1)$$

によって得られる．

試験片の幅を h とすると，試験片の上面と下面における中央破線からの距離は，それぞれ， $y = -h/2$ と $h/2$ となる．そして，上下の面で生じる全ひずみ $\varepsilon(-h/2)$ と $\varepsilon(h/2)$ は，それらの絶対値を ε^{abs} とすれば，式(1)を用いることにより，関係式

$$\varepsilon\left(-\frac{h}{2}\right) = -\varepsilon^{\text{abs}} = -\frac{h}{2r}, \quad \varepsilon\left(\frac{h}{2}\right) = \varepsilon^{\text{abs}} = \frac{h}{2r} \quad (2)$$

で得られる．上式から，曲率半径 r は，上下面での全ひずみ絶対値 ε^{abs} と試験片幅 h から，関係式

$$r = \frac{h}{2\varepsilon^{\text{abs}}} \quad (3)$$

によって得られる．

日本刀試験片の場合，図 16 に示した最終冷却状態での全ひずみは，上面で -0.002，下面で 0.005 の直線分布となる．したがって，全ひずみ分布の全幅は 0.007 であり，これが $2\varepsilon^{\text{abs}}$ に対応する．この状態での反りの曲率半径 r は，式 (3) において試験片幅 ($h=30\text{mm}$) を用いれば，

$$r = \frac{h}{2\varepsilon^{\text{abs}}} = \frac{30}{0.007} = 4300 \quad (4)$$

として得られる ($r=4,300 \text{ mm}$)．

5 おわりに

日本刀の反りと刃文がその焼入れの過程で生じることは古くから知られており，このことに対する焼刃土の効果を示唆されてきた．反りについては刃先に生じるマルテンサイトが関係す

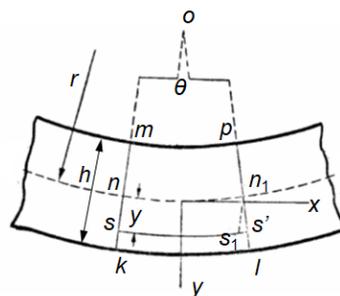


図 17 円弧状曲がり発生試験片での寸法変化と曲率半径の関係

“鉄の技術と歴史”研究フォーラム，第28回公開研究発表会，
東京工業大学，2023年7月8日

るとされ，その後，塑性現象も同時に寄与するとの説が唱えられた．しかし，オーステナイトステンレスで製作した刀は焼入れても反りが生じないという推論が，熱処理シミュレーションが日本刀に適用された後でも消滅することはなかった．工業界は日本刀の製作プロセスから学ぶべきとの声があるが，一方，精密工業部品の熱処理ゆがみの制御はいまだにこの分野における残されたテーマとなっている．

ようやく，日本刀の熱処理シミュレーションの結果から，反りの発生メカニズムと曲率半径の算出について説明する報告が出現した．このシミュレーションでは焼刃土の冷却効果を考慮しており，この土が冷却を巧妙に制御することで，日本刀に独特の反りが発生する経緯が明らかとなった．作刀プロセスには未解明の現象が残されているが，これらについても実験とシミュレーションを適用することで明らかにされるものと考えられる．その成果が工業技術のさらなる高度化に寄与することを期待したい．

参考文献

- [1] 井上達雄，“日本刀の科学”，日刊工業新聞社，2017.
- [2] 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.
- [3] 有本享三，“日本刀の反り現象に関する研究の変遷”，“鉄の技術と歴史”研究フォーラム，第22回公開研究発表会 論文集，東京工業大学，2017年7月22日，pp. 61-70.
- [4] 吉井聡一，伊與田宗慶，有本享三，“シミュレーションひずみ法による日本刀の焼入れ時反り発生メカニズムの解明”，熱処理，Vol. 63, No. 2, 2023, pp. 76-82.
- [5] 小笠原信夫，“日本刀の歴史と鑑賞”，講談社，1989.
- [6] 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, 1933, pp. 63-70.
- [7] 芹澤良洋，“人と熱との関わりの足跡(その7) - 「日本刀」における伝熱技術とその研究”，伝熱，Vol. 59, No.249, 2020, pp. 34-36.
- [8] 俵 國 一 ， “ 日 本 刀 の 科 学 的 研 究 ” ， 日 立 評 論 社 ， 1953. (<https://dl.ndl.go.jp/pid/2464306/1/249>)
- [9] 川部正秀，“劍工秘傳志，巻の下”，1823 (文政6)，国会図書館デジタルコレクション，<https://dl.ndl.go.jp/pid/11038569/1/1>
- [10] 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>
- [11] 黒江二郎，“水心子正秀とその一門”，雄山閣，2021.
- [12] 鈴木卓夫，“作刀の伝統技法”，理工学社，1994.
- [13] 岩崎航介，“刃物の見方”，三条金物青年会，1969.
- [14] Arimoto, K., “An Overview of Researches, Standardization Activities, and Developing Prototypes on Test Systems for Quenchant Characterization”, ECHT 2021 and QDE 2021, April 27th - 28th, 2021, pp. 34-44.
- [15] 菊田多利男，“鉄鋼學上より見たる日本刀”，有文堂，1933.
- [16] 私信，田中良平.
- [17] 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
- [18] Peter, W., “Der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit des Härtungsgutes auf den Abkühlungsvorgang in flüssigen Härtemitteln (焼入れ対象物の表面状態が冷却剤による冷却過程に及ぼす影響について),” Arch. Eisenhüttenwes., Vol. 21, 1950, pp. 395-402.
- [19] 多賀谷正義，田村今男，“焼入冷却剤について”，金属表面技術，Vol. 13, No. 5, 1962, pp. 181-192.
- [20] 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.
- [21] 奈良崎 道治，“被覆焼入れ”，金属 臨時増刊号，6月，1990, pp. 9-13.
- [22] 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.