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

井 上 達 雄*

1. はじめに

日本刀の美しさ、妖しさとは何だろう。日本刀は、武器としての実用性のほかに、昔からその美しさが、いわゆる名刀としての価値の基準になっていることはよく知られたことである。なぜ、ある刀は国宝であって、別のものは重要文化財か、さらに骨董品屋で安く売られているのだろうか？

名刀と言われる理由には次のものがある。ひとつは「すがた」、すなわち長さ方向にどのように反りがあり、幅、厚さに変化しているかであるといわれる。また、肌^{はもん}の美しさ、焼入れによって生じる刃文^{にえ}(波紋とは言わない)の形、それに、波文がどのように肌とかわかっているか(これを煮^{にえ}、沸^{わき}という)、金筋、などなど、好事家の興味は尽きない。

図1を見ていただきたい。これは真鍋純平刀匠から提供いただいた作品である⁽¹⁾。白く見える刃先部の波状のマルテンサイトの部分が、それより上すなわち棟に、なだらかに溶け込んでいる。また、全体に細かい縞模様が見えるのは、後述の折返し鍛錬の跡であって、肌といわれる。このような、微細な模様の美しさは、素材とその不純物の状態、鍛錬の程度と方法、焼入れに際しての冷却速度の違いなどによるといわれるが、どのように条件を設定したら、美しい肌や煮、沸が出るかは理論的には解明されていないし、それが刀匠の腕に依存する美術性、芸術性に関係する。

ここでは、焼入れによって生じる組織についての考察と、マクロな立場からの波文の形成、反りと応力についてのコンピュータシミュレーションの結果について述べ、伝承技術とのかかわりを考察してみたい。

2. 日本刀と外国の刀—その素材と鍛錬

刀の科学的研究に少しかかわっていると⁽²⁾⁻⁽⁷⁾、日本刀と外国の刀とはどう違うか、なぜ日本刀は優れているかと聞かれることがある。

(a) 互ノ目乱 (真鍋純平作)

(b) 重花丁字乱 (備前清光作)

(c) 逆丁字乱 (杉田善昭作)

図1 刃文と肌(真鍋純平刀匠提供)。

まず、素材についてみてみよう。現在の鉄鋼は鉄鉱石から作られることは常識であり、歴史的に見ても刀の素材としての鉄鋼は諸外国では、鉄鉱石と木炭で作られた。しかし、わが国には、鉄鉱石がほとんどないため、砂鉄から作られてきたことは広く知られていることである⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

山から採取した砂には、5%程度の砂鉄しか含まれていないが、これを川に流して、鉄穴流^{かんる}と呼ばれる比重選鉱で50-60%に濃縮する。その後、たたら炉に木炭とともに燃焼し、還元する。当然ながら細かい砂鉄にははじめから不純物が少ない。たたらで作られる鋳は始めから優れていることは

* 福山大学工学部教授；機械システム工学科(〒729-0292 福山市学園町1)

Japanese Sword—the Beauty, Comparison with Foreign Swords and Metallo-thermo-mechanical Simulation of Quenching; Tatsuo Inoue (Department of Mechanical Systems Engineering, Fukuyama University, Fukuyama)

Keywords: Japanese sword, quenching, simulation, metallo-thermo-mechanics

2008年3月6日受理

(a)

(b)

図2 ヨーロッパ(a)と日本(b)の鍛冶.

図3 ダマスカス鋼の weld pattern⁽¹³⁾.

明らかであろう。図2はヨーロッパと日本の鍛錬の様子である⁽¹⁰⁾。向槌を打つところなど、両者は酷似していて面白い。日本刀の特徴は、折返し鍛錬にあるといわれる。これは、金床で、鍛え伸ばした鉄片に鋳で切込みを入れて折返す操作をいう。折返して、槌でたたくと、火花とともに表面の酸化物や不純物が飛散して、折返した面が清浄になり、メカニカルアロイングによって原子的に接合される。この過程で、化学成分が調整されることは、実験的に確認されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この折返しを10回程度繰返すと、表面には肌として図1のような模様が見られる(波文はよく見るものの、肌は細かいので博物館のガラス越しには見えにくい、観察をお勧めしたい。懐中電灯の光を当てるとなおよい)。

異なる組成の鋼片を重ねて鍛造してつくるダマスカス鋼に見られるように、ヨーロッパでも、類似の操作によって weld pattern と呼ばれる組織が得られる。図3は、その典型的な例⁽¹³⁾であるが、細く伸ばした棒をたたいて捻じることが多い。外国の刀は、日本刀と違って、精巧な研ぎをしないため、日本刀の肌のような細かい模様を議論することはないが、Dr. S. Maeder(現、東京芸術大学)は、わざわざ日本の研師に弟子入りして、ヨーロッパ刀の観察を行っている。その例が図4であって⁽¹⁴⁾、日本刀と同様な模様が見られることを確認している。

図4 西洋刀の肌⁽¹⁴⁾.

3. 焼刃土と日本刀の焼入れ

刀に限らず、包丁、ナイフ、鎌などでも、鍛錬された刃物は、洋の東西を問わず作刀の最後の段階で、焼入れが施される。このとき、刃先は硬いマルテンサイト、棟ないし内部には靱性の大きいパーライト+フェライト組織になっている⁽¹⁵⁾。日本刀では、この効果を促進するために、刃先には0.5%C以上の高炭素鋼を刃鉄として用い、内部にはそれより炭素含有量の少ない心鉄を組合せる[造込み]。さらに、水による冷却速度を変えるために、本来断熱材である焼刃土を表面に塗布する。これは、木節粘土、松炭の粉、砥石の粉を水で溶いて作られる。これを棟には1mm程度と厚く、刃先には薄く塗り[土置き]、その境界を直線や波型にするほかに竹のへらで切り込みを入れて、土の厚さを部分的に変える。

後述のシミュレーションに用いる熱伝達係数の基礎データを得るために、表面に塗る焼刃土の厚さによって、水冷したときの熱伝達係数がどのように変わるかを知る実験を行った⁽¹⁶⁾。このとき得られた冷却曲線を図5に示す。土を塗らない場合($t=0$ mm)の曲線からわかるように、はじめは、表面に薄い空気膜が生じて冷却速度が小さいが(膜沸騰段階)、その後この空気膜が破れて気泡となって激しく上昇し、固体と冷却剤が直接接触するため急冷される(核沸騰)。明らかに、試料に土を厚く塗ると冷却は緩やかになる。ところが、土の厚さを極めて薄くすると(図の $t=0.01-0.15, 0.2-0.3$ mmの線)、膜沸騰段階がなくなって、はじめから急激に冷却されることがわかる。すなわち、冷却曲線の形が大きく変化し、焼刃土を薄く塗布すると、何も塗らない場合より急冷されるという逆説的な現象が起きるわけである⁽¹⁷⁾。図5の結果から逆解析によって熱伝達率を求めて解析に導入した。

いよいよ焼入れである。高炭素の備前伝(一種の流派)では780°C、低炭素の相州伝では800°C程度と、いずれも A_{cl} 変態点(760°C)以上に加熱し、前者では常温から40°C、後者ではやや高めで80°C以下の水に焼入れる。

低炭素でできた内部はフェライト+パーライトで延性や靱性が大きく、急冷される刃先はマルテンサイトから内部や棟にいくに従って、トルースタイト、ソルバイトとなっている⁽¹⁸⁾。刃の部分すなわち、マルテンサイト部は研ぎ加減と

図5 焼刃土の厚さによる表面温度変化の相違。

光の乱反射のため白く見えるため、図1のような刃文ができるわけである。

100℃またはそれ以上で焼きもどしの後、棟に加熱した銅のブロックをあてがって形状を整える[銅かぶせ]。あとは、刀匠自身が鍛冶研をして、樋を切ったり、^{なかごじたて}茎仕立といって束に入る部分にやすりで目たてや銘をいれ、目釘穴をあける。専門の研師が研磨をした後、場合によっては刀匠自身または専門家が刀身彫刻をして完成する。

4. 焼入れの変態・熱・力学シミュレーション

焼入れ過程では、物体内部には温度分布が生じるから、表面では急冷されてオーステナイトはマルテンサイトになるが、除冷される中心部では、パーライト+フェライトに変態する。温度差による熱応力は、表面では引張り、内部では圧縮となるが、逆に、マルテンサイトになると体積が膨張するから、そこでは圧縮の変態応力が生じる。これらの応力によって塑性変形をすると、内外部で複雑な残留応力分布が生じる。すなわち、焼入れの過程では、温度分布が変わるとともに、変態による組織変化が起こり、応力/ひずみの変化と、変形(焼入れひずみ、すなわち反り)が起きることになる。

ところが、逆にこのような変態による組織変化が起きると、変態潜熱のために温度分布が変化する。温度が変わると、先の熱応力や変態応力に影響を及ぼす。このように、複数の現象が相互作用をすることを連成(coupling)というが、相変態を伴う現象における温度(伝熱学)、応力-ひずみ(弾塑性力学)と物質の組織変化(材料学)の連成を考慮した現象⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を、連続体熱力学⁽²¹⁾⁽²²⁾の立場から取扱おうとする理論体系を、筆者は変態・熱・力学(metallo-thermo-mechanics)とよんでいる⁽²³⁾⁽²⁴⁾。普通は、熱伝導解析、応力解析、変態のカイネティックスの式を解けばよいのだが、これらが連成すると、どうしても連続体熱力学の立場からのエネルギー全体の考察と定式化が必要になる。

詳細は省略するが、熱力学の第一法則(エネルギー保存則)と第二法則(非負のエントロピー生成, Clausius-Duhem 不等式)⁽²¹⁾⁽²²⁾を用いると、結局以下のような3種の場の支配方程式が得られる⁽²³⁾⁽²⁴⁾。

① 応力-ひずみ構成式

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^t + \dot{\epsilon}_{ij}^m + \dot{\epsilon}_{ij}^p = \sum_x \dot{\epsilon}_{ij}^x = \sum_{x=1}^N \dot{\epsilon}_{ij}^x \quad (1)$$

$$\text{弾性ひずみ速度: } \dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu_I}{E_I} \left(\dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu_I}{1+\nu_I} \delta_{ij} \dot{\sigma}_{kk} \right) \quad (2)$$

$$\text{熱ひずみ速度: } \dot{\epsilon}_{ij}^t = \alpha_I \delta_{ij} \dot{T} \quad (3)$$

$$\text{変態ひずみ速度: } \dot{\epsilon}_{ij}^m = \beta_I \delta_{ij} \dot{\xi}_I \quad (4)$$

$$\text{塑性ひずみ速度: } \dot{\epsilon}_{ij}^p = A_I \frac{\partial F_I}{\partial \sigma_{ij}},$$

$$F_I = F_I(\sigma_{ij}, T, \epsilon_{ij}^p, \kappa_I, \zeta_I) \quad (5)$$

② 熱伝導方程式

$$\rho c \dot{T} + \rho \sum_{j=1}^N l_I \dot{\xi}_I + \rho \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

③ 相変態のカイネティックス

パーライトの分率: 修正 Johnson-Mehl の式

$$\xi_P = 1 - \exp(-v_e), \quad v_e = \int_0^t f(T, \sigma_m)(t-\tau)^3 d\tau \quad (7)$$

マルテンサイトの分率; 修正 Magee の式

$$\xi_M = 1 - \exp[\phi(M_S - T) + \psi \sigma_{kk}] \quad (8)$$

以上の理論に基づいて、熱処理における温度、組織、力学場の解析をするために、筆者らは、1992年に株式会社CRC総合研究所の助力を得て熱処理シミュレーションソフトHEARTSを開発した⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。その後熱処理、表面処理用のソフトCOSMAPを開発した⁽²⁷⁾⁻⁽²⁹⁾。このソフトは、有限会社IDEAMAPから頒布し、NPO法人—MTM研究協会⁽³⁰⁾の協力のもと多くの機関で、各種機械部材の熱処理、表面処理のシミュレーションツールとして利用されるに至っている。

また、この解析を行うにあたっては、温度に依存する力学的特性データ(ヤング率、応力-ひずみ線図、変態塑性係数など)、熱物性データ(熱伝導率、比熱、密度、線膨張係数)、変態物性データ(変態のカイネティックスに関するパラメータ、変態膨張係数)などを必要とする。このために、日本材料学会では、熱処理用材料特性データベースMATEQを構築し⁽³¹⁾⁽³²⁾、一般に頒布している。

5. 刀における温度、組織、反りと応力の変化

実際の日本刀(脇差因州兼先)に近い化学成分と焼刃土の条件を与えてシミュレーションを行った結果を図6に示す。図のアニメなどは、筆者のURL⁽³³⁾でもご覧いただける。

図6はシミュレーション結果のまとめである。図6(a)は800℃から冷却したときの温度分布の変化、図6(b)は長さ方向の応力、図6(c), (d)は、マルテンサイトとパーライト組織の体積分率である。また、刀ははじめはまっすぐなものとし、左に示した時間経過とともに、焼入れひずみ=反りが変化する様子を重ねてある。

図6(a)は、表面温度の変化を表している。焼入れを開始すると、まず鋭い角度をもつ刃先から急激な冷却が始まる。そのため刃先側のみが熱収縮し、焼入れ開始1s後には、日本刀が本来もっている反りとは逆向きの反り(逆反り、逆伏

図6 日本刀の焼入れのシミュレーション結果.

せ)が生じる. このときには図6(c)に示すように, 刃先にわずかのマルテンサイトが生じているだけで, ほとんどの部分はオーステナイトのままである. この後, 冷却は刃先側から進み, 棟側は焼刃土が厚く塗ってあるために冷却はかなり遅れる. 図6(c)に示すように, 焼入れ開始1.5 s後までに刃先ではマルテンサイト変態が起こる. このときの刃先側のマルテンサイト変態による体積膨張のために, 先ほど現れていた逆反りが緩和され, 反りがほとんどない状態となる.

焼入れ開始約2 s後には図6(d)のように, 棟側のオーステナイトがパーライト+フェライトに変態する. この変態も体積膨張を伴うため, 再び大きな逆反りが生じる. この後, 棟側の冷却がさらに進むにしたがって熱収縮が生じ, 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.

図6(b)の応力分布から, ほぼ2 sのあたりで, 大きな引張り応力が切先や鍋^{しのぎ}近くに表れる. これが刀鍛冶泣かせの焼割れにもとになる.

6. む す び

日本刀の材料と鍛錬は伝承技術として長い歴史を持つが,

本稿では, 外国の刀と比較しながら, 現代科学の目からその優れた技術を考察してみた. とくに焼入れ過程のコンピューターシミュレーションを通じて理解できることは, 伝承技術が科学的合理性に裏付けられていること, それゆえに, 長い歴史に耐えてきたことが理解される. 残念ながら, 煮, 沸などの美術的な詳細については, 未解決の問題も多いが, 先端的な計測, 評価技術を駆使して, ミクロ, ナノオーダーの分析, 解析がなされることを期待したい.

本稿を草するにあたって, 多くの方の助言, 協力を得た. とくに, 真鍋純平³⁴⁾には, 自作の刀の肌の写真(スキャナーで収録³⁴⁾)をいただいた. また, 埼玉工業大学先端研究所向井竜二氏には, COSMAPによるシミュレーションについて, 多大な尽力をいただいた. 記して謝意を表するものである.

文 献

- (1) <http://www.eonet.ne.jp/~sumihira/>
- (2) 井上達雄: 機械学会誌, **97**(1994), 132-135.
- (3) 井上達雄: バウンダリー, **11**(1995), 36-41.
- (4) 井上達雄: まてりあ, **35**(1996), 174-178.
- (5) 井上達雄: 日本機械学会誌, **107**(2004), 130-132.

- (6) 井上達雄：工業加熱，**42**(2005)，5-11，同**42**(2005)，3-9。
(7) T. Inoue: Mater Sci. Res. Int., **3**(1997), 193-203.
(8) 日本鉄鋼協会たたら製鉄復元計画委員編：たたら製鉄復元計画委員会報告，鉄鋼協会(1971)。
(9) 鈴木卓夫：たたら製鉄と日本刀の科学，雄山閣(1993)。
(10) L. ベック：鉄の歴史（中沢護人訳），2巻，第2分冊(1978)たたら書房。
(11) 村川義行，岸田民也，佐藤 豊，三宅博士，鈴木卓夫，木原明，久保善博：1998年秋期社会鉄鋼工学部会シンポジウム論文集，鉄鋼協会，(1998)，77-88。
(12) 佐々木直彦：桃野 正，鐵と鋼，**93**(2007)，792-798。
(13) A. K. Antein: Dmaskaja Stal w Stranach Basiejna Baltijskowo Moria, Zinatne, Latvia, (1972)。
(14) Stefan Maeder, Stähle, Steine und Schlangen—Ein Beitrag zur Kulturgeschichte von Schwertklingen des frühen Mittelalters (Swords: Steels, Stones and Snakes. Dissertation zur Enlangung des Doktorgrades der philosophischen Fakultät der Humboldt Universität zu Berlin, (2001)。
(15) 俵 国一：日本刀の科学的研究，日立評論社(1953)。
(16) 上原拓也，井上達雄：材料，**44**(1995)，309-31518。
(17) 菊池義弘：熱処理，**46**(2006)，359-366。
(18) 鈴木卓夫：作刀の伝統技法，理工学社(1996)。
(19) T. Inoue, S. Nagaki, T. Kishino and M. Monkawa: Ingenieur-Archiv, **50**(1981)，315-327。
(20) 井上達雄：材料，**44**(1995)，974-980。
(21) 井上達雄：伝熱研究，**33**(1994)，22-29。
(22) 井上達雄，水野 衛訳：塑性変形と破壊の熱・力学(G. M. Maugin, The Thermo-mechanics of Plasticity and Fracture)(2000)，現代工学社。
(23) G. Totten, M. Howes and T. Inoue, Handbook of Residual Stress and Distortion in Steel, (2003) ASM-International 296-311。
(24) 井上達雄：材料，**56**(2007)，352-356。
(25) T. Inoue, K. Arimoto and D-Y. Ju: Proc. 1st Int. Conf. on Quenching and Control of Distorsion, Chicago, (1992)，205-
- 512。
(26) 井上達雄，有本享三：材料，**44**(1995)，103-109。
(27) 巨 東英，井上達雄：IMS プロジェクト平成16年度研究成果報告集，IMS センター(2005)。
(28) T. Inoue, Y. Watanabe, K. Okamura, M. Narazaki, H. Shichino, D-Y. Ju, H. Kanamori and K. Ichitani: Proc. 1st Int. Conf. on Distortion Engineering, Bremen (2005)，133-140。
(29) D-Y. Ju and T. Inoue: Key Engineering Materials, **345**(2007)，955-958。
(30) http://homepage3.nifty.com/npo-mtm/
(31) T. Inoue and K. Okamura: Proc. 5th Int. Sym. on Quenching and Distortion Control, ASM, St Louis, (2000)，753-760。
(32) 材料学会 塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会：材料，**51**(2002)，350-355。
(33) http://www.fukuyama-u.ac.jp/gakubu/mecha/mecha1.html
(34) 真鍋純平，清水宏一：情報処理学会研究報告，**2004**(2004)，55-60。
-

井上達雄
- ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1967年 京都大学大学院工学研究科博士課程機械工学専攻中途退学
京都大学工学部機械工学科助手，助教，教授を経て
1996年 京都大学大学院エネルギー科学研究科教授
2003年 京都大学，定年退官
この間，日本材料学会会長，材料の力学的挙動国際機関会長・同名誉会長などを歴任，
2003年 福山大学工学部教授(機械システム工学科)
現在に至る
- 専門分野：Metallo-Thermo-Mechanics (変態・熱・力学)の理論の構築と相変態を伴う工学過程のシミュレーション
変態を伴う過程の非弾性構成式の理論と実験，温度・力学場・組織の連成を考慮した連続体熱・力学的理論の構築とそれによるコンピュータコードの開発に従事。ここで紹介した日本刀のシミュレーションはその応用例のひとつである。
- ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

井上達雄

専門分野: MetalloThermo-Mechanics (変態・熱・力学)の理論の構築と相変態を伴う工学過程のシミュレーション

変態を伴う過程の非弾性構成式の理論と実験, 温度・力学場・組織の連成を考慮した連続体熱・力学的理論の構築とそれによるコンピュータコードの開発に従事. ここで紹介した日本刀のシミュレーションはその応用例のひとつである.

★★