

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 —
Footprints of the Relationship Between Humans and Heat (Part 7)
- Study of Heat Transfer in Making of the Japanese Sword -

芹澤 良洋（日本製鉄）
 Yoshihiro SERIZAWA (NIPPON STEEL CORPORATION)
 e-mail: serizawa.sb5.yoshihiro@jp.nipponsteel.com

1. はじめに

日本刀は、日本固有の武器として約 1000 年の歴史があり、鋭い切れ味を保持するための硬さと容易に折れないための高い靱性を有する高機能製品である。また、高機能製品を作る匠たちの技術が生んだ美しさは、日本を代表する伝統工芸品として、その美術的価値は高く評価されている。加えて、最近では、その美しさと歴史的エピソードがデジタルゲーム化され、若い層にもその人気は広まり、多くの関連書籍が出されるとともに、改めて製造技術が注目されている。

本報では、まず、日本刀の製造技術に関して工学の他分野からその特徴を示す。そして、その特徴を起点とした伝熱研究の展開について概観し、現代の技術研究の発展にもつながっていることを示す。

2. 「日本刀」高度製造技術の特徴とその解明

日本刀は、その機能性の高さと美しさから、製品とその製造プロセスに関して、近代以降多くの研究がなされてきている。金属工学における研究の初期[1]では、ドイツ留学した俵、本多により製造工程の調査、日本刀金属組織の観察、成分・硬度の測定[2]、西洋刀との切れ味比較[3]がなされており、西洋刀との比較では、日本刀の刃の硬度が高いことが示されている。昭和に入ってから谷村の研究[4]により、次の 2 点が明らかにされた。すなわち、①日本刀の鉄では炭素以外の微量金属、燐、硫黄などの不純物含有が現代の工業用鋼に比較して極めて低く、介在物が少ないために鍛錬が可能なこと、②日本刀は図 1[5]に示すように炭素量の異なる鋼を組み合わせているために、武器として刃が硬く切れ味が鋭いにも関わらず、刀身としては脆性がなく折れない特性を持つことの 2 点である。

表 1 に日本刀の製造工程を示す[6]。日本刀は「た

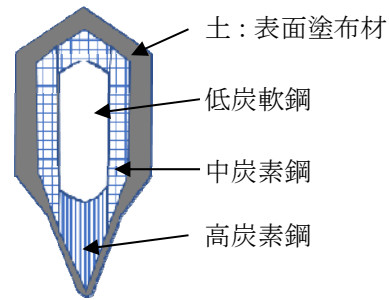


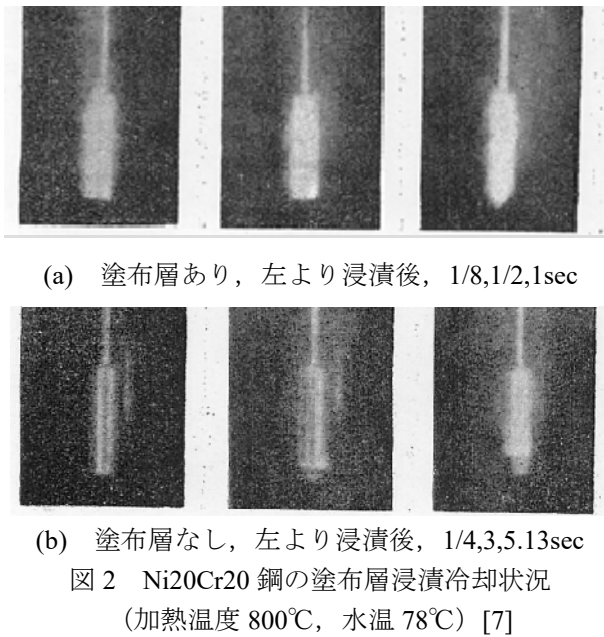
図 1 刀身断面鋼材組合せと焼き入れ時の「土」塗布状況

表 1 日本刀の製造工程

工程	製造内容
たたら製鉄	玉鋼製造, 部位別素材分別
鍛錬	部位ごとに折り返し鍛錬
造り込み	素材組合, 刀身形状作成
焼き入れ	土置き(表面調整), 焼き入れ
研磨・仕上	鍛冶研ぎ, 銘切り

たら製鉄」工程で高純度の鉄が造られ、炭素量により異なる硬さの素材をそれぞれ繰り返し折り返しては鍛え延ばす「鍛錬」を行ったのち、刀身を組み立て再度加熱して「造り込み」を行い、形状を整えてから「焼き入れ」、「研磨・仕上」を行う。

先に述べた初期の研究では、伝熱工学の研究対象である焼き入れについて、刀身の表面に図 1[5]のように厚さの異なる「土」を塗布したのち、加熱して水温を調整した水槽で焼き入れる技術が秘伝とされて、刀の切れ味、刀身の折れない強さ、さらには刃文の美しさに寄与していることは一般の刃物業者にも知られていたが、技術的意味合いについては未解明であった。焼き入れに関して、筆者が把握している最初の研究は、1933 年の金属工学に携わる佐藤による金属面への塗布材有無時の冷却速度測定及び撮影[7]である。この研究では、塗布材の配合も高温加熱後水冷されるという大きい温度衝撃下でも剥離しない困難な条件を満たす必要があること、図 2 に示すように塗布材により



冷却初期の金属裸面で発生する「蒸気の袋」(膜沸騰)が発生しないために冷却速度が速くなることを示している。

3. 伝熱工学における表面塗布層関連研究

佐藤の研究ののち，伝熱工学における表面層による沸騰冷却時の速度制御に関する成果は奈良崎[8]，Kikuchi[9]，西尾[10]の研究で知られているように，海外で始まっている．Cowley (1960)ら[11]の液体窒素での研究，Butler (1970)ら[12]の液体ヘリウムにおける超電導での伝熱向上，Moreaux (1975)ら[13]の冷却速度制御を狙った研究である．図3にMoreauxらの結果を示すが，表面層厚みにより冷却速度が変化し，ある厚みを超えると表面

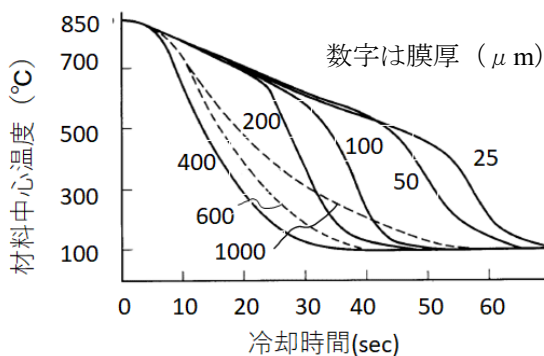


図3 ニッケル円柱の酸化ジルコニウム塗布時の冷却曲線 (加熱温度 850℃，水温 100℃)

層が断熱層として冷却速度を低下させることが示されている．その後，菊池，西尾，の研究では，表面層による極小熱流束点変化の研究が極小熱流束点そのものの発生現象の研究へとつながり，さらに，測定技術，観察技術の発展も伴って，最近の永井[14]，門出・光武[15]，酒井ら[16]の研究に続いている．なお，これらの研究は近年，CO₂削減を意図した薄肉高強度化が進む工業用鋼材の製造における冷却技術において，表面に発生する鉄酸化層の影響による温度予測技術として貢献している。

以上のように，日本刀における焼き入れ時の秘伝の技術の効果は明らかにされてきたと考える．すなわち，刃の部分は塗布層を薄くして冷却速度を高めて硬度を上げて切れ味を鋭くし，刀身部は塗布層を厚くして冷却速度を低下させて柔らかく粘り強い，折れない刀としているのである．因みに，刃の部分の炭素含有量が 0.6%の場合[17]に，その 90%以上を硬度の高いマルテンサイト組織にするための冷却速度は刃部分が 300℃に到達するまで約 300℃/sec となる[18]．刃部分がいかに肉厚が薄いとはいえ，焼き入れ槽が噴流を使えないプール沸騰であることを考えると，必要冷却速度の達成は非常に難しいと推定される．このように，日本刀の匠たちの製造技術は，西洋刀，あるいは現代の知識と比較しても世界でも類を見ない高いレベルであることが示されている。

4. おわりに

近年では，刀匠でもある佐々木ら[17]により，刃断面の硬度分布，鍛錬工程における鋼材内炭素量制御と鍛錬回数との関係が明らかにされ，製造工程の合理性が示されている．また，上原ら[19]は塗布層の伝熱条件を実験的に求め，焼き入れ時の鋼材の組織変態，刀身の反り変形と温度を錬成させたシミュレーションに導入して，刀身の焼き入れ時の変形挙動，組織分布などを解析して刀身の反り形状の発生について理論的に示している．このように長い伝統を持つ日本刀の製造技術の詳細については不明な部分も多く，その解明は現代の汎用鋼材の高度化のヒントになることも，また，他産業の発展に役立つこともあるであろう．

古来の伝承技術の中には，その未解明な伝承の奥に合理的かつ高度な技術が潜んでいる事例があ

ると思われ、今は研究が難しくても次代に役立たせることを期待して、確実に保存していきたい。

参考文献

- [1] Notis, M. R., *Mater Char.*, 45 (2000) 253.
 [2] 俵國一, 鉄と鋼, 6 (1920) 337.
 [3] 本多光太郎, 高橋金之助, 奈良七三郎, 金属の研究, 3 (1940) 10.
 [4] 谷村熙, 鉄と鋼, 67 (1981) 497.
 [5] Takaishi, S., *Steel Res.*, 72 (2001) 380.
 [6] 臺丸谷政志, 日本刀の科学, SB クリエイティブ, (2016).
 [7] 佐藤清吉, 金属の研究, 10 (1933) 63.
 [8] 奈良崎道治, 淵澤定克, 第 18 回伝熱シンポジウム, (1981) 421.
 [9] Kikuchi, Y., Hori, T. and Michiyoshi, I., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28 (1985) 1105.
 [10] 西尾茂文, 第 17 回伝熱シンポジウム, (1980) 223.
 [11] Cowley, C. W., Timson, W. J. and Sawdye, J. A., *Adv. Cryogen. Engng.*, 7 (1962) 385.
 [12] Butler, A. P., James, G. B., Maddock, B. J. and Norris, W. T., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 13 (1970) 105.
 [13] Moreaux, F., Chevrier, J. C. and Beck, G., *Int. J. Multiphase Flow*, 2 (1975) 183.
 [14] 永井二郎, 第 57 回伝熱シンポジウム, G214 (2020).
 [15] 門出政則, 光武雄一, 第 57 回伝熱シンポジウム, G221 (2020).
 [16] 酒井涼太, 河野正道, 高田保之, 第 57 回伝熱シンポジウム, G213 (2020).
 [17] 佐々木胤成, 堀井胤匡, 桃野正, 日本製鋼所技報, 60 (2009) 60.
 [18] 上野正勝, 伊藤亀太郎, 鉄と鋼, 74 (1988) 1073.
 [19] 上原拓也, 井上達雄, 材料, 44 (1995) 309.

【謝 辞】

本稿は本学会“熱の科学技術史研究会”から、かねてよりこの方面にご造詣の深い芹澤良洋氏にお願いしてご執筆頂いたものである。我が国の日本刀の製造工程における伝熱技術の関わりについて、このように興味深い記事をご執筆頂いたことに心から感謝する。(熱の科学技術研究会)