



アラカト

# 現代の和釘の機械的性質とはいかなるものか

Mechanical Properties of a Japanese Nail in the Present Day

梅澤 修 独立行政法人物質・材料研究機構  
 材料技術研究所 材料創製研究グループ  
 Osamu Umezawa 主任研究員

## はじめに

奈良薬師寺の伽藍再現における復元工事の一環で、1991年から廻廊の再建が進められた。その際、木材とともに釘にも1000年の命が求められた。日本鋼管(株)の採算を度外視した協力、井垣謙三東北大学名誉教授のご尽力の結果、1990年10月にNKK-SLCMと名付けられた良質の鋼(約6トン)が製造された。このSLCM棒鋼(直径19mm)の一部は、松山市在住の白鷹幸伯(二代目興光)鍛冶の手で鍛造され、現代の和釘約6,000本となった<sup>1)</sup>。その後の薬師寺大講堂(1976年再建)大改修に際しても、SLCM棒鋼を用いた白鷹鍛冶の手による和釘が製造された。その経緯等、詳しくは白鷹鍛冶の著書<sup>2)</sup>をお読みいただきたい。故西岡常一棟梁、飛鳥の釘、白鳳の釘、薬師寺大講堂に使う釘、錆鉄について紹介されている。

白鷹鍛冶のまとめられた和釘(構造材用)一連<sup>3)</sup>の概要を図1に示す。大陸文化の流入期、開花期、そして国風文化の

完成期以後で、釘の形状・太さ・頭部構造などが大きく変化している。白鷹鍛冶は、その変遷を単に釘のみの変化でなく、木造建築に携わる者の変化、時代の背景、軒を支える機構的変遷と歩を同じくしていると考えられている。白鳳型(奈良時代前期)は、頭部に段(セギリ)をつけ、すっきりとした角頭であり、首部(全体の頭部側1/3)をやや細めて釘裂けを防止している。図2(a)は、白鷹鍛冶の手でSLCM素材から鍛造された和釘の例である(折返し鍛錬ではない)。図2(b)は、同鍛冶の手になる出刃包丁である。図3は折返し鍛錬の過程、図4は和釘の多方向自由鍛造過程の一コマを示している。

この度、志村史夫静岡理工科大学教授を通じ、白鷹鍛冶の手で試験的に鍛造された釘素材の金属組織および機械試験を行う機会を得た。白鷹鍛冶、鋼管計測(株)の関係者に協力を仰ぎ、第1次調査ともいべき基本的知見の把握に努めた。調査はSLCM素材を含む複数の材料を対象としたが、本稿では表1に示すSLCM材の結果について紹介したい。分析内

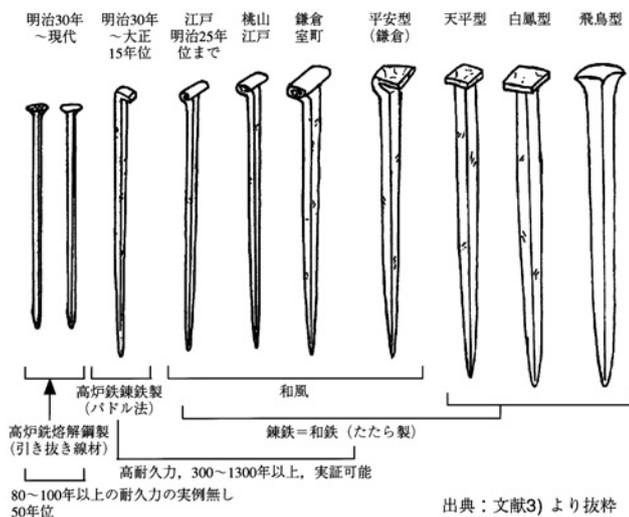
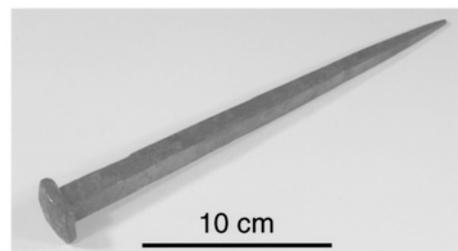


図1 構造材用釘



(a)



(b)

図2 NKK-SLCM材から鍛造された釘(a)と出刃包丁(b)



図3 鍛錬過程

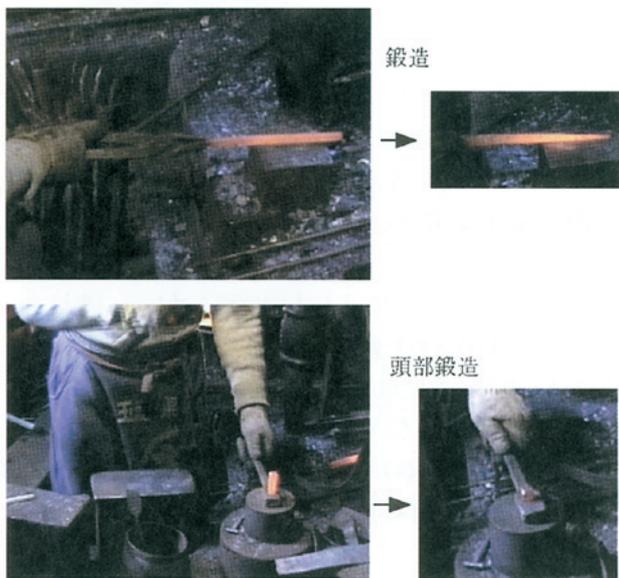


図4 和釘の鍛造過程

容は、化学成分分析、マクロ組織観察、ミクロ組織観察、非金属介在物観察、引張試験、硬さ試験、靱性試験と破面観察である。主として折返し鍛錬の有無に注目した。

## 2 分析試料と組織観察

表2に化学成分分析結果を示す。薬師寺用SLCM素材(鋼板: 143138)のレドール値を参考として同表に示す。折返し鍛錬材は分析のサンプリング位置により異なる組成を有すると予測されることから、サンプリングした試料を均一に混ぜることにより、出来るだけ平均的組成を得るようにした。

表1 供試材

試料名	形状	備考
NK00	丸棒 (19 mm φ)	NKK-SLCM 棒鋼
NK01	角棒 (8.5 mm □)	NKK-SLCM 鍛造材・折返し無し
NK64	角棒 (8 mm □)	NKK-SLCM 鍛造材・折返し6回

表2 化学成分分析結果 (mass%)

試料名	C	Si	Mn	P	S	soLAI	Ntotal	Ototal
SLCM*	0.086	0.01	0.01	0.001	0.002	0.009	0.0042	0.0029
NK00	0.08	0.01	0.01	<0.001	0.001	0.009	0.004	0.002
NK01	0.09	0.01	0.01	0.001	0.001	0.009	0.004	0.002
NK64	0.08	0.01	0.01	0.001	0.001	0.006	0.005	0.05

\* 薬師寺用NKK-SLCM素材(鋼板 143138) レドール値

NK00、NK01 およびNK64 は薬師寺用SLCMと同様の組成を有することが分かる。ただし、酸素量はNK64(折返し材)が多い。NK01の酸素含有量が0.002mass%であるのに対し、NK64の酸素含有量は0.05mass%と10倍以上である。

図5にマクロ組織、図6にミクロ組織を示す。NK00およびNK01は、均一なマクロ組織を呈し、フェライト+パーライト組織である。また、C系介在物が僅かに認められた。一方、折返し鍛錬を施したNK64は層状組織を呈し、同じくフェライト+パーライト組織である。この場合、A系介在物が多数検出された(図6(d))。

以上より、酸素含有量の違いは、折返し鍛錬時に素材表面の氧化物(スラグ)が内部に折り込まれたために生じたものと考えられる。現代の鋼は溶鋼から製造され、マクロな組成の均一化と組織の均一化を施した素材として提供される。そうであるがゆえに、現代の鋼を鍛接するには、鍛接面にフラックスを用いざるをえない(図3)。フラックスは、鍛錬の過程において外部に排斥されるが、一部は折り込まれた素材内部に取り込まれ、介在物となる(図6(d))。したがって、現代の鋼を用いた折返し鍛錬は、素材そのものが本来含有していない介在物を多く取り込む機会を与えており、鍛錬材の低純度化と機械的特性への悪影響が懸念される。すなわち、同一の加工ひずみを与える場合、折返し無し鍛造の方が優れた特性を示すに他ならず、折返し鍛錬に有利さを見いだせない。

一方、たたら製の鋼はスラグを内在している。鍛接温度に加熱されると、“沸く”という言葉に象徴されるように、内在していたスラグが溶融して表面を濡らす。このため、フラックスの塗布は不要である。さらに、折返し鍛錬によって、スラグの排斥と化学成分等の素材均質化が得られる。鍛造時の加圧能力が小さい昔の時代にあつては、たたら鉄(錬鉄)の折返し鍛錬は合理的手法であることが理解できる。

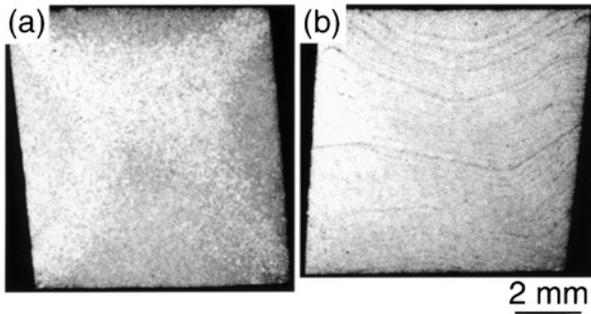


図5 マクロ組織 (T断面)  
(a) NK01、(b) NK64

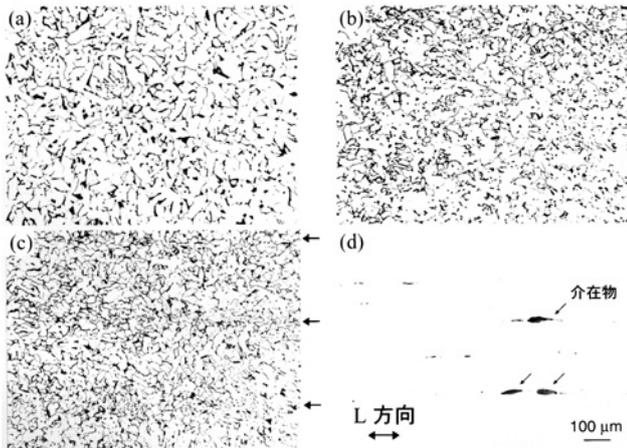


図6 ミクロ組織 (L断面)  
(a) NK00、(b) NK01、(c) NK64 (矢印は折返し接合部を示す)、(d) NK64 (矢印は介在物を示す)

### 3 強度

#### 3.1 引張試験

引張試験をクロスヘッド速度0.5mm/minで実施した。試験結果を表3にまとめる。鍛造の結果、棒材 (NK00) に比較して高強度が得られる。鍛錬による結晶微細化の効果と考えられる。NK64は、優れた強度-延性バランスを示す。基本的に、引張特性における折返し鍛錬の有無の違いは顕著には認められないものの、折返し鍛錬材 (NK64) の方が良好な延性を示している。

#### 3.2 硬さ試験

硬さ試験は、組織観察後のL方向断面について、板厚方向のビッカース硬さ分布を測定した。板厚方向ビッカース硬さ分布を図7に示す。

高炭素鋼と低炭素鋼を積層した折返し鍛錬材では、層状組織等に対応した硬さの変化が顕著に認められるのであるが、低炭素鋼の同一素材を折返したNK64では、NK01と比較して顕著な違いは認められない。フェライト+パーライト組織の影響を反映した硬さ分布と考えられる。

表3 引張試験結果

試料名	上降伏点 (MPa)	下降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
NK00	204	195	325	37	75
NK01	372	365	441	24	71
NK64	291	289	382	39	73

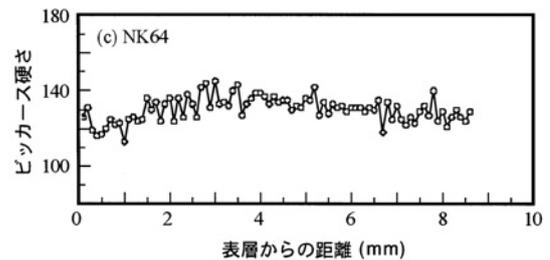
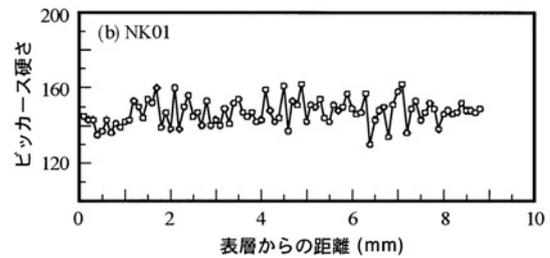
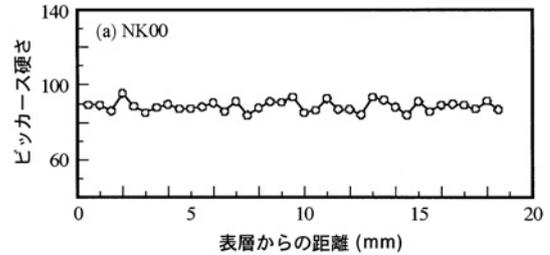


図7 板厚方向硬さ分布  
(a) NK00 (HV200gf、0.5mmピッチ)、(b) NK01 (HV50gf、0.1mmピッチ)、(c) NK64 (HV50gf、0.1mmピッチ)

### 4 靱性

#### 4.1 CTOD\*試験

折返し鍛錬の有無による靱性の比較を行うため、疲労ノッチを導入せず、機械ノッチままの試験片で3点曲げ小型CTOD試験 (CTOD\*試験) を実施した。CTOD\*試験は、BS7448: Part1: 1991に規定されるCTOD試験に準じて実施したが、ノッチ深さ・形状等の条件を一定にする目的で、疲労ノッチの導入無し (機械加工まま) の状態で行ったためにCTOD\*試験と表記している。供試材は、NK01およびNK64とした。供試材の板厚方向がき裂進展方向と直角な方向に一致するように試験片を採取した。CTOD\*値と試験温度の関係を図8に示す。図8より、NK01のCTOD\*値と温度の関係にはばらつきが認められるものの、CTOD\*値および

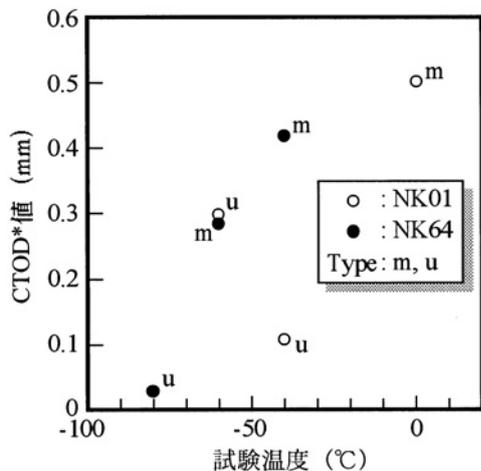


図8 CTOD\*値と試験温度の関係

破壊Typeから、折返し無しのNK01より折返し鍛錬製のNK64の方が高い靱性を有すると判断される。図中のUは安定き裂成長量大きい時の破壊、mは最大荷重域に最初に達した点、を意味する。安定き裂成長量が無いあるいは小さい、また、有効ポップインは認められなかった。

#### 4.2 断面組織観察

CTOD\*試験後、試験片を液体窒素に浸漬させて冷却し、強制破断により破面を現出させた。破断試料の一方について、破面を板厚中心において板面に平行に半切し、断面の組織観察を行った。マクロ組織およびき裂先端マイクロ組織を、図9に示す。同一試験温度で変形量を比べると、折返し鍛錬有りの方がより大きいことが認められる。この傾向は、上述のCTOD\*値と破壊Typeに対応している。また、母材の結晶粒は、NK01の方が若干粗粒となっている。

#### 4.3 破面SEM観察

破断試料のもう一方について、破面のSEM観察を行った。破面SEM観察結果を図10に示す。CTOD\*試験において脆性破壊が発生するまでのき裂先端での塑性変形量に対応するストレッチゾーンの幅は、NK64の方が大きく、CTOD\*試験において靱性が高いことに対応している。また、強制破断による脆性破面部を比較すると、破面単位(ファセットサイズ)は、折返し鍛錬製のNK64の方が小さく、マイクロ組織観察における結晶粒の大きさの傾向に対応している。NK64の破面には、板面に平行な開口部が認められるが、ディンプルが観察されることから折返し鍛錬による層が延性的に剥離したものと判断される。

以上の結果をまとめると、CTOD\*値および破壊のTypeから、折返し鍛錬材の方が高い靱性を有することが示された。引張試験では折返し鍛錬の有無で顕著な相違が認められな

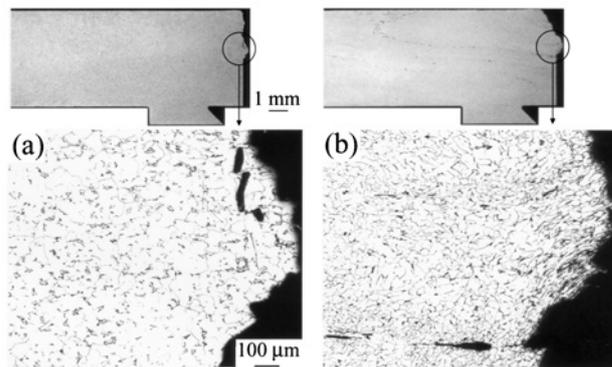


図9 CTOD試験片断面写真(-40°C)  
(a) NK01、(b) NK64

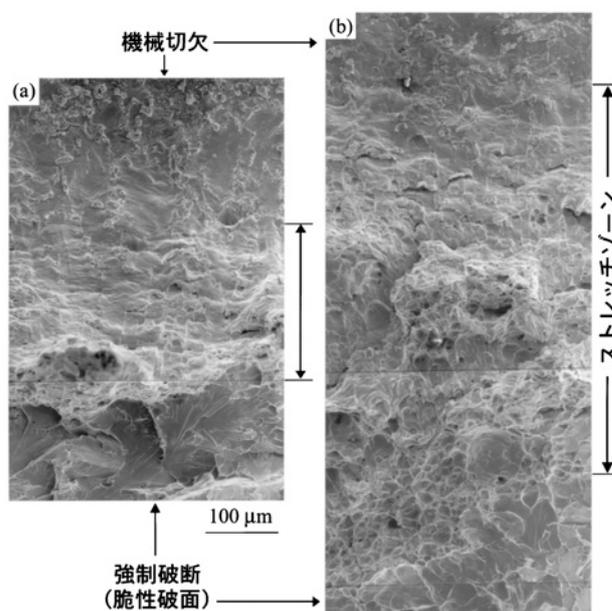


図10 CTOD試験破面写真(-60°C)  
(a) NK01、(b) NK64

ったこと、そして、マイクロ組織や破面の観察結果からは、結晶粒および破面単位の寸法が折返し鍛錬材の方が小さかったことから判断すると、主に結晶粒の大きさ、あるいは結晶方位分布の違いが、靱性に影響していると考えられる。

## 5 おわりに

薬師寺大講堂の大改修にあたり、釘素材として用いられたNKK-SLCM材について、折返し鍛錬の有無による違いを検討するため、それらの化学分析、顕微鏡組織観察、引張試験、硬さ試験、3点曲げ小型CTOD試験および破面観察を実施した。折返し鍛錬材では、層状のマクロ・マイクロ組織が認められることが特徴であるが、折返し時に表面酸化物を取り込むために酸素含有量が多く、素材の清浄性は低下する。引張特性では、折返し鍛錬の有無による顕著な違いは認められな

った。しかし、CTOD試験では、折返し鍛錬の方が高い靱性を有することが示された。

古代冶金技術者の手になる金属製品の解析は、対象が大抵国宝であり宗教上信仰的であることから、試料を得にくい問題がある。特に試料の破壊をとまなう金属組織解析や特性試験は不可能であるのが現状である。今回の調査は、折返し鍛錬の影響についての系統的調査に至っていない。しかしながら、例えば、法隆寺の古代釘の解析<sup>4)</sup>といった研究成果など、機会をとらえつつ積み上げていくことが重要と思う。

謝辞

本稿の執筆を奨めていただいた志村史夫静岡理工科大学教授、ご指導くださった白鷹幸伯鍛冶をはじめ、調査の機会を

与えてくださった岡田雅年元金属材料技術研究所所長、高良和武東京大学名誉教授、分析に協力いただいた鋼管計測(株)に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 志村史夫：古代日本の超技術，講談社ブルーバックス，(1997)
- 2) 白鷹幸伯：鉄、千年のいのち，草思社，(1997)
- 3) 白鷹幸伯：第21回建築技術に関する講習会テキスト，全国建設技術協会，(1997)，1.
- 4) 西村秀雄，青木信美：古文化財の科学，(1956) 12，1.

(2001年6月22日受付)

## ブックレビュー

### 現代語訳 鉄山必用記事

館 充 訳

日本鉄鋼協会 社会鉄鋼工学部会前近代における鉄の歴史フォーラム

「鉄山必用記事研究会」監修

2001年6月 丸善(株)発行(Tel. 03-3272-0521)

A5判 230頁 定価4,000円(消費税別)

本書は、日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会・前近代における鉄の歴史フォーラムの活動の一環(鉄山必用記事研究会)として、現存する2種類の写本と戦前の解説書を基に、東京大学名誉教授・館充先生が中心となって当用漢字による現代語訳として刊行された貴重な文献である。

本書の全体的な概要は、これまでに「ふえらむ」誌上\*でも紹介されており内容を知る機会があったが、本書の刊行によってその全文を現代語訳で読めるようになった。現代の鉄鋼の事業と技術に携わっている我々読者にとって至福の限りと言えよう。

原著者は伯耆の国(現鳥取県)の鉄山師、下原重仲で、本書は江戸天明期(1784)の「たたら」製鉄事業の全般にわたって書かれている。その内容は全8巻から構成され、鉄山の立地と原燃料の調達、たたら作業で歌われるたたら歌、たたららの操業準備と操業及び製品の加工、建物を含む主要設備の解説、鉄山経営のための管理(技術、労務、帳票)など、近世たたら製鉄の全般にわたっている。

特に、筆者が興味深かったのは本書の巻末に付けられた原著者の「追加」と「跋」の2つの文章であった。「追加」では、火災発生時に対処するための非常用木材の確保と材木の再利用について述べられているが、これは現代におけるリスクマネジメントと資源のリサイクルに通ずる思想である。

また、原著者が本書を執筆する動機として触れている、口伝えや聞き覚えの内容の文書記録の意義と重要性は、現代でも技術伝承や人材育成に関わる重要な問題である。さらに、「跋」では鉄の事業の社会的意義が述べてられている。すなわち、鉄という材料の有用性、鉄の生産と自然環境との調和、鉄生産による地域の振興と雇用の確保など、原著者の経営の目は営利を越えて確かである。ただ、当時も近年の風潮として人の気質の下落と拝金主義がはびこっている傾向を憂えてもおり、いつの時代でも良いものを守り育てていくという姿勢は変わってはならない真理であろう。

本書は、鉄鋼技術史に関心のある研究者はもとより、鉄鋼業及び関連する事業に携わる経営者、技術者の教養書としても、ぜひ読んでいただきたい一冊である。

\*館 充：「ふえらむ」Vol.4 (1999)No.3，140.

(住金コスモプランズ(株) 佐藤 駿)

この本のご注文は販促情報サービス(株) (Tel. 045-592-9396)でも取り扱っております。