

## 究極の構造材・日本刀、材料科学と構造力学に与える 新機軸：究極の強靱材料を目指して

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 井上 忠信  
Tadanobu INOUE

Key Words: 日本刀、強靱化、積層構造、複合構造、延性破壊

### 1. はじめに

「鉄は国家なり」という言葉がある。これは、鉄鋼生産量が国力を示す重要な指標であり、鉄鋼が国の基幹産業であるという意味を指す。戦後の我が国の復興・繁栄における鉄鋼の寄与は多大であり、自動車産業、造船業、インフラ・エネルギー産業などの製造業の発展に大きく貢献してきた<sup>1)</sup>。鉄鋼は、合金成分と加工熱処理を組み合わせることで約200 MPa (1 MPa とは、1平方センチメートルに10 kg の力が作用する場合の圧力) という低強度から4000 MPa という超高強度までの広範囲の引張強度をカバーできる普遍的かつ特殊な材料であり、製造業の中心を担っている。

一般に、炭素量や合金量が増えると鋼の強度は向上する。一つの例として、東京タワー (1958年竣工、高さ333 m) で使用された鉄鋼量は約4200 t であり、これはほぼ同じ高さのエッフェル塔 (1889年竣工、高さ324 m) で使用された鉄鋼量よりも40 %以上少ない<sup>2)</sup>。この理由は、東京タワーで用いられた材料の平均強度がエッフェル塔で用いられたものの約2倍に向上したためである。さらに、その54年後に建造された東京スカイツリー (2012年竣工、高さ634 m) では、従来よりも3倍以上の強度を持つ鉄鋼材料が適材適所で使用されている<sup>3)</sup>。“より高強度の材料が製造できれば、より高いタワーを建てることができる”と思うかもしれない。しかし、材料の強度が向上するとねばさの指標となる靱性や延性は低下する。材料の強度を上げて壊れやすくなっては元も子もない。強度と靱性および延性は二律相反の関係にあり、両特

性を同時に向上させる方策が課題であるが、従来型の合金化主体の材料設計手法 (合金添加、不純物除去、均一組織設計) では限界が見えていた。これを打破する技術として、2000年以降、鋼を構成する結晶粒を1  $\mu\text{m}$  まで微細化することで強度を向上できる、結晶粒微細化が期待されていた。しかし、単に結晶粒を微細化するだけでは、強度と靱性のバランスが向上しないことが明らかになってきた<sup>4)</sup>。つまり、既存材料の特性限界を打破するためには、従来の設計思想とは異なる新たな視点からのアプローチが必要であった。

### 2. なぜ日本刀？

現在の材料科学技術をもってすれば、高強度化それ自体は難しいものではない。しかし、強さとしなやかさを両立させることは容易ではない。一部では、物性の異なる複数の材料 (例えば、鋼とアルミニウム合金など) を接合して使用するマルチマテリアル化が検討されている。しかし、この方法は接合プロセスの技術と共に異材界面という不連続な物性変化を持つため、残留応力などの問題が内在し、かつリサイクル性に問題がある。そこで、材料素材のヒントとして、古来より我が国の伝統工芸品である日本刀に着目した。日本刀は、1千年以上の歴史を通じて「折れず、曲がらず、よく斬れる」を追求したものであり、“強靱化”の代表作である。さらに、折返し鍛錬で層状組織化した炭素量が少なく軟らかい心鉄を炭素量が高く硬い皮鉄でくるむという、まさに適材適所の設計思想で刀の強靱化がなされている (図-1)。し

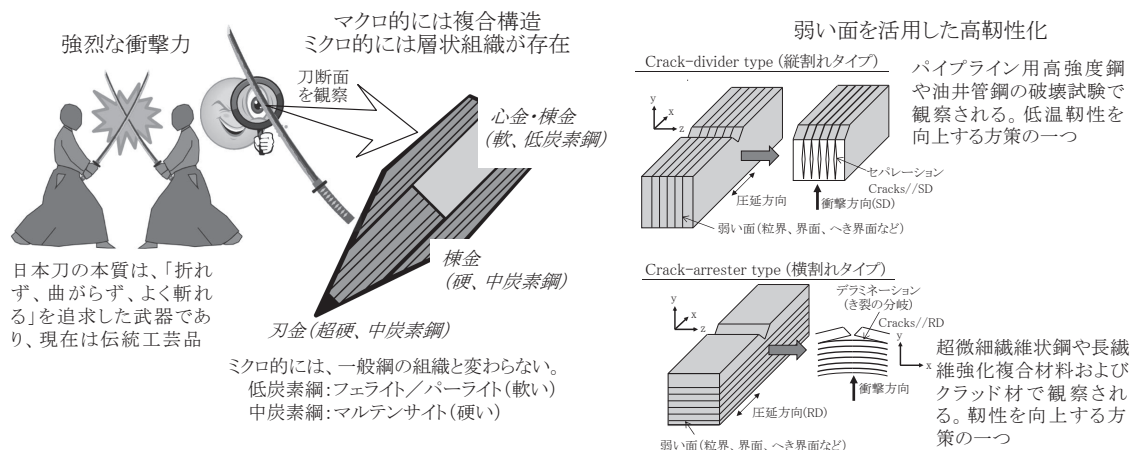


図-1 日本刀の本質と断面の特徴および想定される高靱化設計

かし、長年もの間そう伝えられながらも実際に日本刀素材の特性試験を実施した報告は少なく、既存構造用金属材料との比較や強靱化の科学的解明および積層構造の最適化は行われていない。もし、日本刀のような積層構造を自動車用材料に展開させることができれば、日本独自の技術（日本刀型鋼板など）を取り入れた車として面白いのではないか。鋼同士であるため、異材界面も存在せず、良好な接合強度を有し、リサイクル性も問題ない。さらに、高強度化に有効な高炭素鋼の利用技術としても注目に値する。炭素量の異なる鋼の造り込みを薄鋼板の作製に利用するとすれば、どのような層構造が適当なのだろうか。薄鋼板で所望される特性は刀とは異なるため、その積層構造は日本刀のごとく心鉄が軟質層である必要はないのかもしれない。そこで、低炭素鋼と中炭素鋼からなる積層鋼を、その層構成を変化させて試作し、その引張特性を明らかにすることにより、延性などが求められる薄鋼板に適切な層構成の設計指針を得ることから研究をスタートさせてみた<sup>5)</sup>。

### 3. 圧縮材の断面組織と硬さ分布

まず、低炭素鋼として0.05 % C 鋼 (C : 0.05 %, Si : 0.30 %, Mn : 1.45 %, bal. Fe) および中炭素鋼として0.44 % C 鋼 (C : 0.44 %, Si : 0.30 %, Mn : 1.46 %, bal. Fe) を対象にした。各鋼において、板幅25 mm × 長さ45 mm で、1 mm から4 mm までの板厚を有する板片を準備した。板厚中心部に軟質の0.05 % C 鋼を配置し、表層部に硬

質の0.44 % C 鋼を添えた軟芯材および逆の配置を有する硬芯材を作製した。層構造は板厚中心に関して対称であり、板厚  $t_c$  (1 mm から4 mm) を有する中心板片の裏表両面に板厚  $(6 - t_c)/2$  を有する表層材を配置し、三層合わせて板厚6 mm とした。積層後、10 mm 幅のアンビルを用いた平面ひずみ圧縮により接合を試みた。平面ひずみ圧縮は、真空チャンバー内に高周波誘導加熱コイルとアンビルの備えた加工熱処理シミュレータ（富士電波工機(株)製）を用いて行った。真空度が $1 \times 10^{-1}$  Pa のチャンバー内にて、積層材を昇温速度20 °C/s で1000 °Cまで加熱し、均熱のため60sec 保持した後、ひずみ速度0.1/s にて板厚1.5 mm (圧縮率75 %) まで圧縮した。圧縮後3sec 保持した後に、窒素ガスを吹き付け急冷した。温度800 °C から500 °Cの間の平均冷却速度は35 °C/s であった。冷却後、圧縮部を研磨し表面の付着物を除去し、板厚を1.2 mm ( $\pm 0.2$  mm) とした。比較のため、板厚6 mm の0.05 % C 鋼および0.44 % C 鋼に対しても前記と同じ加工履歴を施した試料を作製した。

図-2に圧縮後の材料断面を光学顕微鏡で観察された組織を示す。硬芯材 ((a) - (c)) の場合、板厚方向 (ND) に白色層、黒色層、白色層の順番で積層順に対応した構造が観察された。白色層 (0.05 % C 鋼層) はフェライト ( $\alpha$ ) ・ パーライト (P) 組織であり、黒色層 (0.44 % C 鋼層) は主としてマルテンサイト (M) を示す。また層界面は板表面にはほぼ平行であり、接合欠陥は認められなかった。軟芯材 ((d) - (f)) では板厚方向の層構成が硬芯材と逆になっており、各層は硬芯材と同

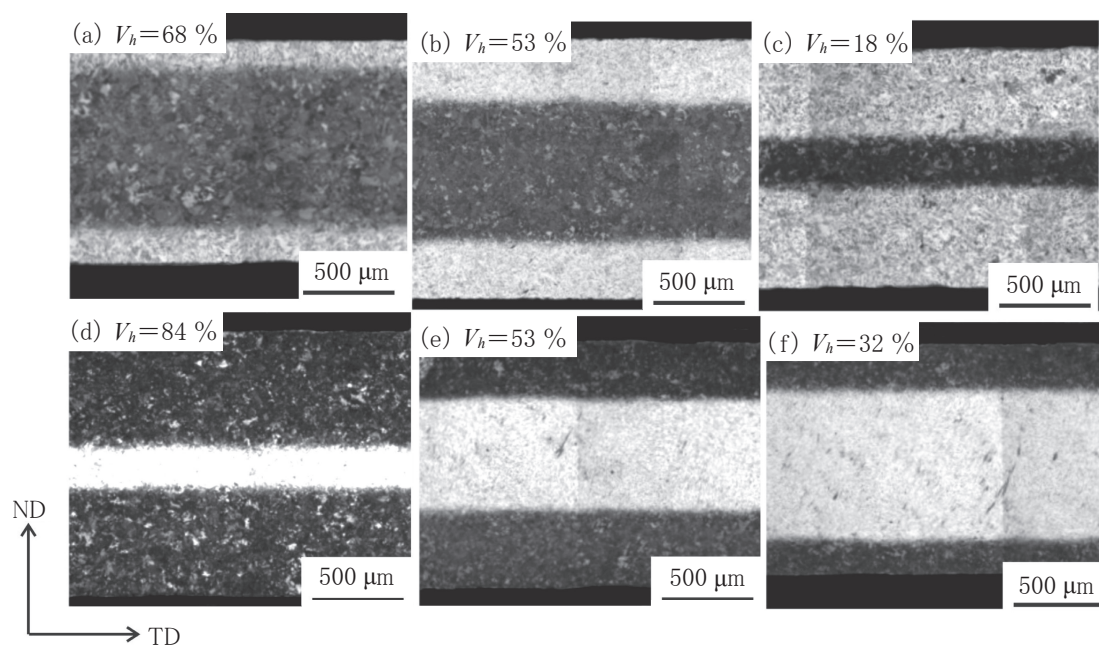


図-2 硬質層の体積率  $V_h$  における ((a) - (c)) 硬芯材と ((d) - (f)) 軟芯材の断面写真 硬質層 (黒) の組織はマルテンサイト (M)、軟質層 (白) の組織はフェライト ( $\alpha$ )/パーライト (P) である

様の組織を示した。光顕組織より0.44 % C 鋼層の厚さを測定し、全板厚に対する割合を硬質層体積率  $V_h$  として算出した。その結果を各組織写真の左上に示している。これらの体積率は圧縮前の0.44 % C 鋼の占める割合とほぼ同じであった。これは、圧縮を行った温度ではいずれも比較的高温のオーステナイトであり、その変形抵抗が0.05 % C 鋼と0.44 % C 鋼で大きく変わらないことによる。

接合界面近傍の組織を明らかにするために、軟芯材 ( $V_h=81$  %) の接合界面近傍の電子線後方散乱回折測定 (EBSD) を行った。その局所結晶方位マップを図-3に示す。M が観察される0.44 % C 鋼層の部分では、大角境界で囲まれた矩形形状を有する領域が多く観察され、その内部には多量の小角境界が存在した。接合界面近傍には種々の形態を有するバウンダリが存在しており、組織観察のみでは明確な界面位置は特定できなかった。

図-4に各種硬芯材および軟芯材のNDのビッカース硬さの分布を示す。硬芯材の場合、板厚中心部の0.44 % C 鋼層が観察された部分に対応して280 HV 程度の硬質層が存在していた。一方で、表層部の0.05 % C 鋼層の硬さは160 HV 程度であった。硬質層・軟質層の硬さは  $V_h$  に依らず大きく変化しない。これは、圧縮中または圧縮後にオーステナイト域で回復・再結晶が生じやすい高温・低速を圧縮条件としたため、板厚方向に沿った組織

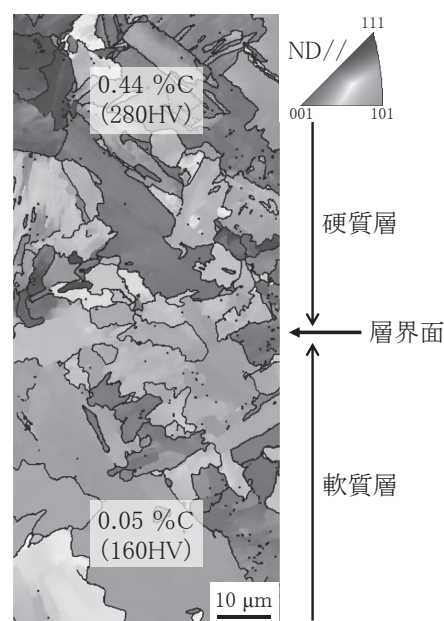


図-3 接合界面近傍における局所結晶方位マップ

の不均一が生じにくく、冷却中により生じる拡散変態・無拡散変態が個々の層が有する組織の主要なメカニズムであることを示唆している。また、接合界面近傍には硬さの測定値が遷移する領域はほとんど見られなかった。

#### 4. 圧縮材の引張特性

圧縮で積層した材料を評価するため室温引張試験を実施した。引張試験片は、板幅方向 (TD) が引張軸と並行となるように圧縮部よりを切り出した。

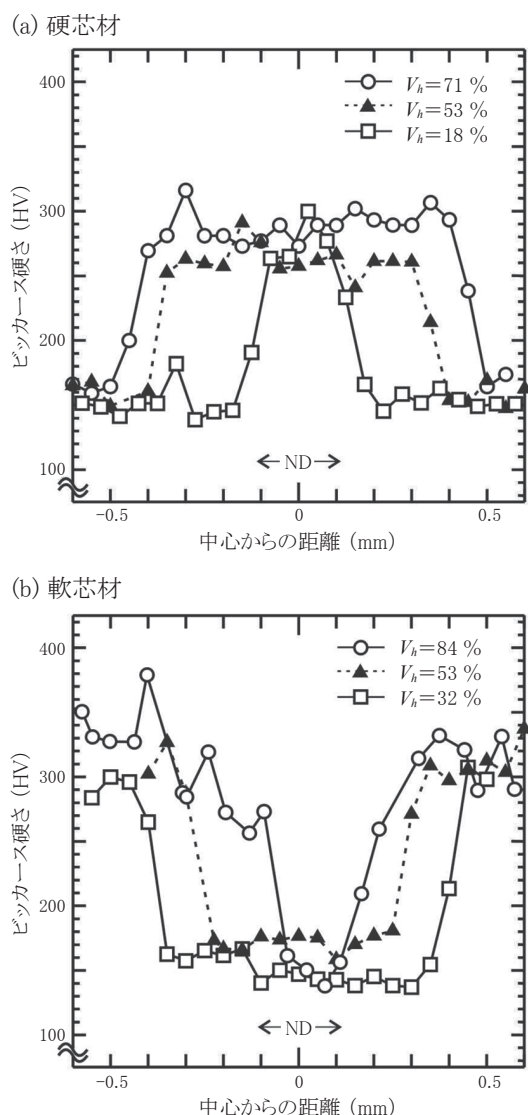


図-4 (a) 硬芯材と (b) 軟芯材の断面上におけるビッカース硬度の変化

試験片のゲージ部は、板幅3 mm × 長さ15 mm の大きさを有し、型部曲率半径は3 mm とした。引張試験は室温にて変位速度を0.5 mm/min と一定（初期ひずみ速度： $5.6 \times 10^{-4}$ /s）として実施した。また、引張試験により破断した試験片の破面を走査型電子顕微鏡（SEM）にて観察した。観察面は引張軸と垂直とし、破断面投影面積  $S$  を測定して、初期断面積  $S_0$  からの減面率  $(S - S_0)/S_0$  を得た。

図-5に種々の硬質層体積率を有する硬芯材および軟芯材の降伏応力と引張強さを示す。降伏応力および引張強さはともに、積層材の構成によらず、それぞれ一つの曲線でその推移を示すことができる。しかしそれらの曲線は、点線で示したそれぞれの構成層がもつ強度を体積率に応じて線形加算して得られる複合則とは異なる挙動を示す。すなわち、硬質層体積率が50 %を超えた付近より、降

伏応力および引張強さは複合則から予測される値より大きくなり、硬質層体積率が75 %を超えると、硬質層単層材よりも大きな値を示すようになる。興味深いことに、積層化したことで複合則を超える強度が発現した。また、硬芯材や軟芯材の強度はその積層方法によらず、硬質層の体積率で決定する。

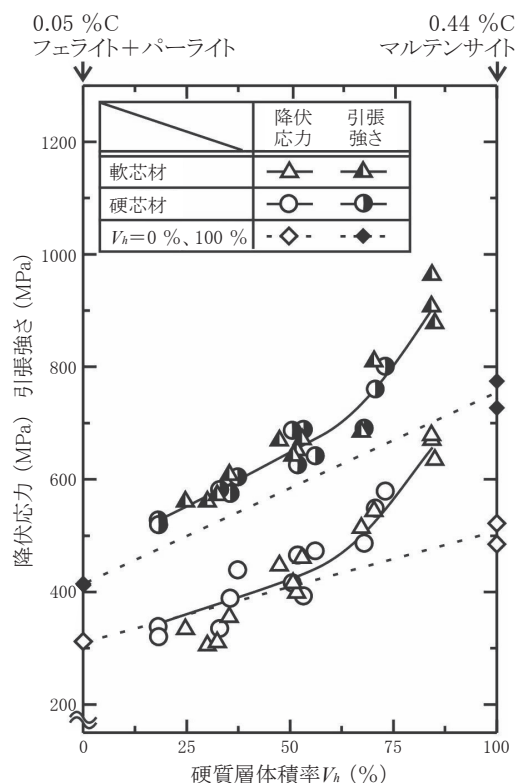


図-5 硬質層の体積率  $V_h$  における硬芯材と軟芯材の降伏応力と引張強さの変化

一方、破断時の減面率は、 $V_h$  によらず硬芯材の方が大きな値を示した。すなわち、硬芯材表面に塑性変形能に優れた軟質層が比較的薄く配置されたものが、強度と延性のバランスに優れることがわかった。これが意味するところを考察するために破面観察を行った。図-6に0.05 % C 鋼単層材 (a)、0.44 % C 鋼単層材 (b)、硬芯材 (c) および軟芯材 (d) の破断面 SEM 像を示す。硬芯材と軟芯材はその構成比がほぼ1対1であるものをそれぞれの代表例として示している。また図中の点線は破面端部を示している。単層材では0.44 % C 鋼と比較して、0.05 % C 鋼は特に厚さ方向に大きくくびれて破断していた。これは0.05 % C 鋼は塑性変形限界が大きいことを示している。硬芯材と軟芯材には各層の接合界面では割れなど観察されておらず、十分な接合が達成されていることが示唆さ

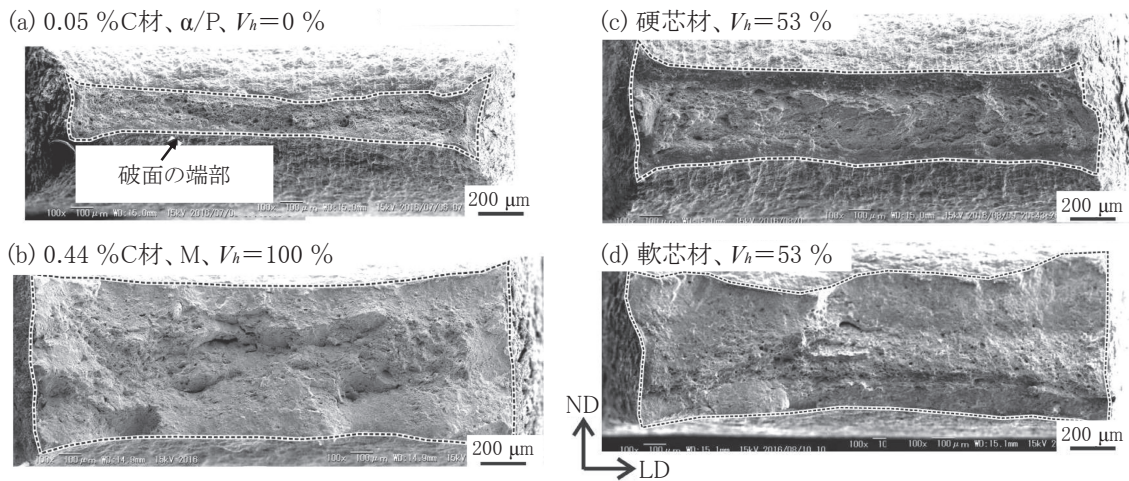


図-6 ((a)、(b)) 単層材と ((c)、(d)) 積層材の引張試験後の破断部の SEM 写真

れた。点線で示された破断面の形状に関しては、層構成が変化すると、特に板厚が大きく変化していることがわかる。また、硬芯材では各層の微細形状が異なり層の違いを識別し易い。具体的には、内部の硬質層では等軸ディンプルが観察されるのに対して、表層の軟質層では大きく伸長したディンプルが観察された。軟芯材では破面形状は均一で各構成層を見分けることは困難であった。

破面の微細形状観察結果より、硬芯材の大きな減面率の生成理由を次のように考えることができる。厚さ方向にくびれると、切り欠き形状が形成され、切り欠き底には局所的に応力集中が生じ、応力三軸度が高い部分が形成される。これらの応力状態はディンプルの生成・成長を促進する。すなわち、くびれた場合、延性破壊は表面近傍から優先的に生じる。そのため、表面に大きな塑性破壊限界を有する軟質層がある方が破壊が生じにくく、より大きな応力を得るために大きく局所変形をすることができたと推測される。

## 5. おわりに

本研究では日本刀を参考にして、サブミリメートルオーダーの積層・複合構造が鋼板の引張特性に及ぼす影響を調べ、層構成制御が強度や延性破壊に前向きな改善をもたらす可能性を示した。その後、更なる特性向上を狙い、意図的に接合界面を波形に変化させ、種々の検討を繰り返し行っているが、応力集中の影響で早期破断する逆効果となった。失敗を恐れることなく、まずはやってみ

る精神で、日本刀以外にも視野を広げ、究極材料を目指して研究を継続しているところである。

世の中には日本刀のほかにも、種々の伝統的な製法・工芸品がある。また、図-1に示したように、材料に内在する弱い面を逆利用した高靱化設計も一部で活用されている。日本刀鋼板の研究を始めた2016年頃、ある先輩から“紹介したい方がいる”と声をかけられた。それは、茨城県で約30年ぶりに誕生した刀匠の方だった(当時国内の刀匠は300人程と言われていたが、現在は170人程まで減少している<sup>6)</sup>)。私が勤める研究所から車で15分程の場所に筑波鍛刀場があり、宮下正吉刀匠はそこで日々作刀している<sup>7)</sup>。日本刀を通じて究極材料を目指している旨を伝え、彼も究極の日本刀(ここでいう究極は、刀匠自身が納得いくもの)を目指しており、すぐに意気投合し、一緒に行動する機会が多くなった。武器としての機能を極限まで追求した結果、美術品としての価値が高まった日本刀であるが、実際に作刀工程を体感し、刀匠の大変さを知っている人は少ないと思う。覚悟がなければ継続できない作業(=仕事)である。日本刀の源泉を見聞きするために、宮下刀匠とともに島根県の和鋼博物館(玉鋼の原料となるけら(鉾)を見学)を訪れ、その玉鋼を唯一製造する「日当保たたら」で村下(むらげ)に会い、そして宮下刀匠の師匠である宮入法廣刀匠(長野県無形文化財)にも会い、歴史や先人の知恵から学ぶことの大切さを教えられたことを思い出す。我が国が国際的な厳しい競争に晒され、経済発展に貢献する技術革新や新素材誕生<sup>8)~10)</sup>が強く求められるから

こそ、未来に向けてこれまでを振り返り、より過去の英知を積極的に利用する姿勢が必要と思われる。長い歴史の中に埋もれた技術は山のようにあるはずである。

## 参考文献

- 1) 日本学術振興会 将来加工技術第136委員会編：“ハイテク五十年史に学ぶ将来加工技術”、日本工業出版 (2019)
- 2) 津山青史：“厚板技術の100年 — 世界をリードする加工熱処理技術 — ”、鉄と鋼、**100**(1)、pp. 71-81 (2014)
- 3) “新ランドマークを支える鉄鋼材料”、特殊鋼、**62**(2)、pp. 2-13 (2013)
- 4) 井上忠信、木村勇次：“超微細粒組織を活用した低炭素鋼の強靱化”、日本機械学会論文集 (A 編)、**79**(804)、pp. 1226-1238 (2013)
- 5) 上路林太郎、井上忠信：“日本刀型鋼板における層構成が及ぼす引張変形特性への影響” 塑性と加工、**58**(675)、pp. 323-329 (2017)
- 6) ビジネス eye、“ファン急増中の日本刀がいまピンチな状況”、<https://businessseye369.com/business/543/> (2025年9月17日)
- 7) 刀剣作家 宮下正吉、<https://tsuchiura.web.fc2.com/miyashita/index.html> (2025年9月17日)
- 8) 長谷川慶太郎、泉谷渉：“素材は国家なり”、東洋経済新報社 (2011)
- 9) Newton 別冊：“社会を一変させる新材料100注目のスーパーマテリアル”、ニュートンプレス (2014)
- 10) 浅川基男：“日本のものづくりはもう勝てないのか!?”、幻冬舎 (2021)



いのうえ ただのぶ  
井上 忠信  
国研物質・材料研究機構

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1  
TEL : 029-859-2148  
E-mail : inoue.tadanobu@nims.go.jp