

泊鉈の熱処理工程と金属組織 — 経験則的鍛冶技術の調査 —

Microstructure of the Tomari-Hatchet

● 長柄毅一、中村滝雄／富山大学芸術文化学部

Takekazu Nagae, Takio Nakamura / The Faculty of Art and Design, University of Toyama

● Key Words: Hatchet, Microstructure, Quench, Ferrite, Pearlite, Martensite, Non-Metallic Inclusion

1. はじめに

富山県下新川郡朝日町在住の大久保中秋氏によって製作されている泊鉈は、長い刀身が刃側に湾曲し、その先端に鳶の嘴に似た形状の突起（以下、トンビと記す。）を持つ独特の形状をしており、同じ北陸の越前や能登で作られる鉈とは異なる特徴を有している。この泊鉈については、2008年より作業場、製作道具、製作工程についての調査を進めており、その成果の一部は富山大学芸術文化学部紀要に発表した。このたび、経験則的鍛冶技術による製作工程の内、焼入れ、焼戻しの製品温度変化を赤外線放射温度計（サーモトレーサー）によって調査したので、本稿ではその結果を記す。また、この泊鉈を切断し、断面の金属組織や硬度について詳細に調査した結果を併せて報告する。

2. 調査方法

2.1 熱処理工程の温度測定

泊鉈製作工程における焼入れ・焼戻し工程について、熱処理中の温度管理状況についてサーモトレーサー（NEC三栄製TH9100）を用いて調査した。放射率は0.77として測定したが、予備実験により熱電対温度との比較をあらかじめ行っており、次式①により試料の実質温度を算出した。本稿における試料温度は補正後の温度 T_r である。

$$T_r = T_m * 0.89 + 27 \quad \cdots \cdots \text{①}$$

T_r ：試料温度 T_m ：測定温度

温度測定にあたっては、できるだけ作業を中断することなく実際の作業のなかで実施したが、焼入れだけは作業のスピードについていくことができなかったため、別途作業を中止し、温度測定を行った。後の焼戻しの温度測定、硬さ測定や組織観察用の試料はもちろんこの試料ではなく、無作為に選択した通常の工程で製作されたものである。

2.2 泊鉈の金属組織と硬さ分布測定

調査対象の泊鉈から柄をはずしたのち、組織観察ならびにEPMAによる分析などを行うため、ウォータージェットマシンによって鉈を7箇所切断した。数字によってその位置を図1に示す。また、切断位置4における断面マクロ組織を図2に示す。地金となる鋼に割り込みで刃金となる炭素鋼が鍛接されている様子が見られる。この炭素鋼素材について、酸素気流中燃焼-赤外線吸収法を測定原理とする炭素硫黄同時分析装置により含有炭素量を分析したところ、0.42%であった。これは機械構造用炭素鋼鋼材S45Cの下限值であり、高炭素鋼を用いずにS45C相当材を使用していることが分かる。断



図1 分析のための7箇所切断した位置と泊鉈の名称

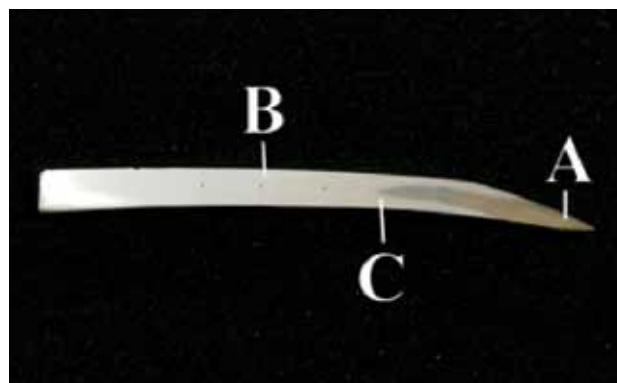


図2 断面のマクロ組織

A (刃金)、B (地金)、C (境界) はミクロ組織観察箇所を示す。

面については、ビッカース硬度計による硬さ試験と金属顕微鏡による組織観察を行った。組織観察用のサンプルは、断面を1ミクロンのダイヤモンド砥粒を用いた研磨工程後、5%ナイトールによりエッチングして作成した。また、鍛接部分をより詳細に調査するために、EPMAによる面分析、点分析（定量）を行った。定量分析は炭素量について検量線法により行った。なお、このEPMA観察用としては、定量結果に影響しないよう、ナイトールによるエッチングを行わず、鏡面研磨したサンプルを用いた。

※図3～15は右側のサーモトレーサーによる熱画像を理解しやすくするため、左側に実画像を配置し、同じ工程内容に対応させて示した。ハイスピードで行われる焼入れは、画像処理に時間がかかるため、実画像が同時に記録できなかった。従って、ビデオ撮影による左側の実画像は視点と倍率が熱画像と同一ではない。

3. 調査結果

3.1 熱処理工程における温度変化

図3は焼入れ温度に加熱した鉋片の熱画像である。焼入れが必要な刃の部分の平均温度は815℃であった。前述のように、刃の部分は高炭素鋼ではなく、S45C相当材を用いており、焼入れ温度としては適正であるといえる。なお、この焼入れ温度は本調査のためにあえて工程を止めて測定したものであり、形状はもちろんのこと加熱も刃先のみ行なったものである。また、この熱画像のみ一連の工程のなかで測定したものではないことを断っておく。

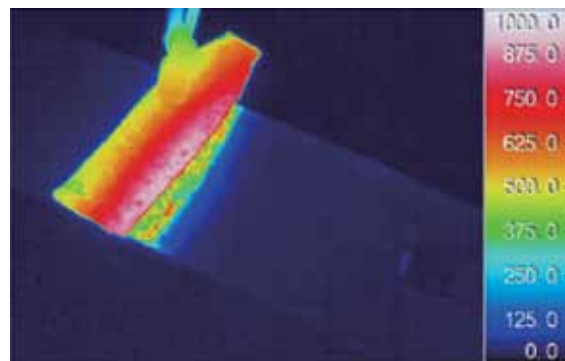


図3 焼入れ前の熱画像
仮の未完成鉋片を加熱し、刃先の温度を測定した。向かって右側を刃先に設定した。その平均温度は815℃（補正温度）であった。



図4 焼入れ $t = 0.0 \text{ s}$
ミネから約20mm残した刀身と刃先を冷却水に約1.5秒投入している。冷却水から出ているミネ部分の温度は610℃（補正温度）であった。

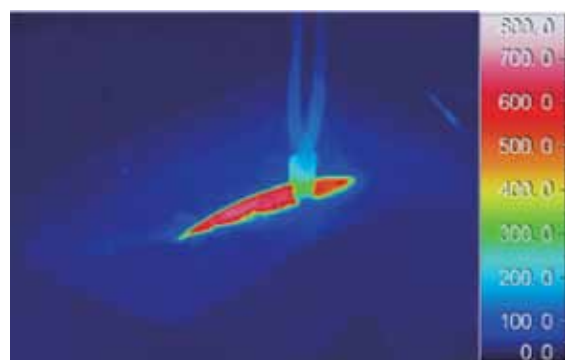
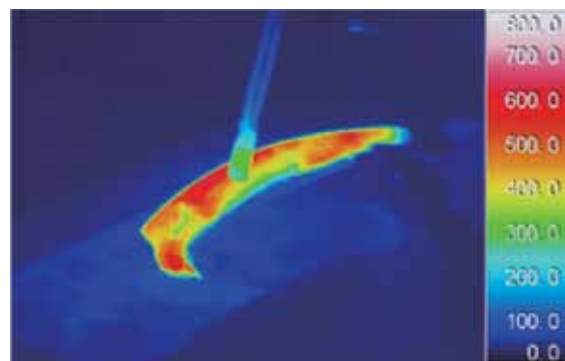


図5 刀身の温度観察（焼入れ後、冷却水から引き上げ時） $t = 3.0 \text{ s}$
刃金の部分は冷却され、地金の部分が高い温度を示している。特にミネの中央、トンビ、ナカゴの部分が高く（赤色）、温度のムラが観察できる。赤い部分：570℃、黄色い部分：350℃（補正温度）



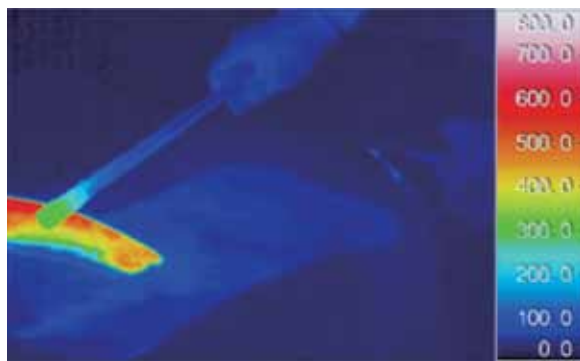


図6 ナカゴ部分の冷却 $t = 4.4 \text{ s}$
他の部分より先行してナカゴに近い刃金の部分に熱が伝導しないようナカゴ部分を冷却水に投入し、冷却する。

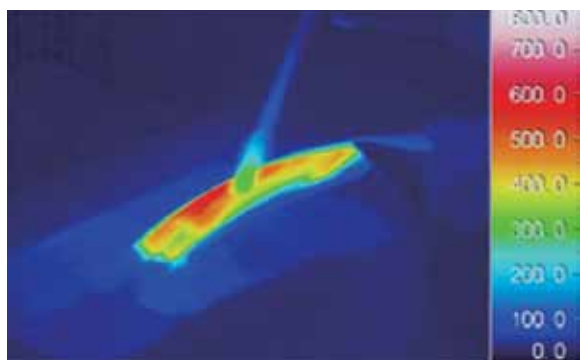


図7 トンビ部分の冷却 $t = 5.0 \text{ s}$
次にトンビ部分を水に投入して冷却を行い、トンビ付近の刃金の温度が先行して上がらないよう熱の伝導を止める。
ミネの赤い部分：480℃（補正温度）

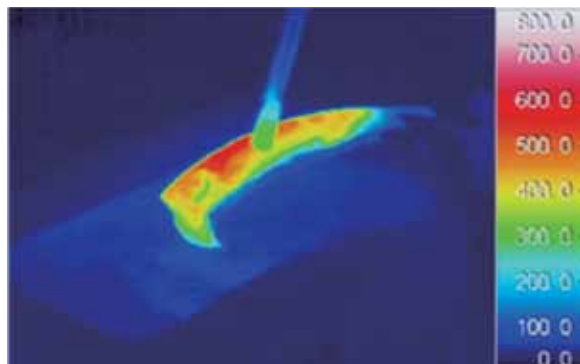


図8 刀身の温度観察（冷却水から引き上げ時） $t = 6.8 \text{ s}$
図5と比較すると、ナカゴ部分やトンビ部分が冷却され温度が低下している。

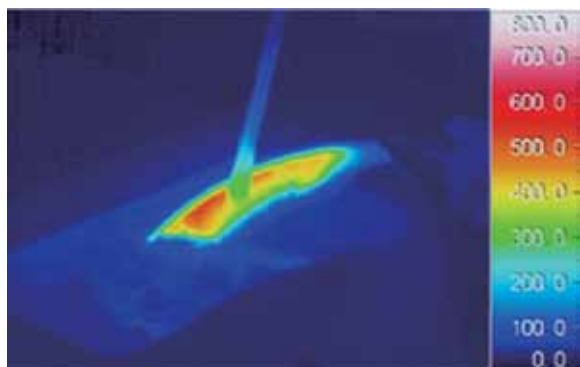


図9 刀身先の部分の冷却 $t = 7.2 \text{ s}$
刀身先の温度が高いため冷却水に投入し、刀身全体の温度バランスを調整するため冷却する。

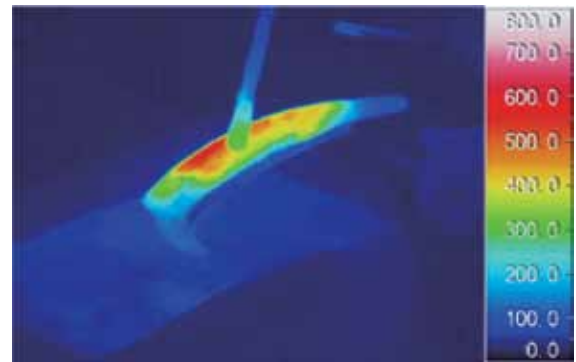


図 10 刀身の温度観察（冷却水から引き上げ時） $t = 8.2 \text{ s}$
刀身先の部分が冷却され、トンビ部分は約 120°C （補正温度）になった。刀身裏側に現れる酸化色（テンパカラー）の移動の観察によって熱の伝導を把握する。

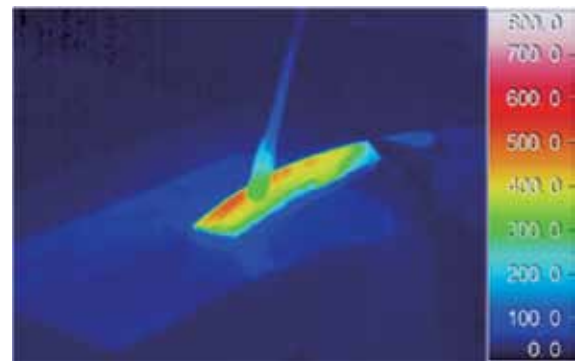


図 11 刀身先の部分を冷却水に再投入 $t = 9.8 \text{ s}$
ミネの部分の熱がまだ刀身先に残っているため、冷却水に再投入した。

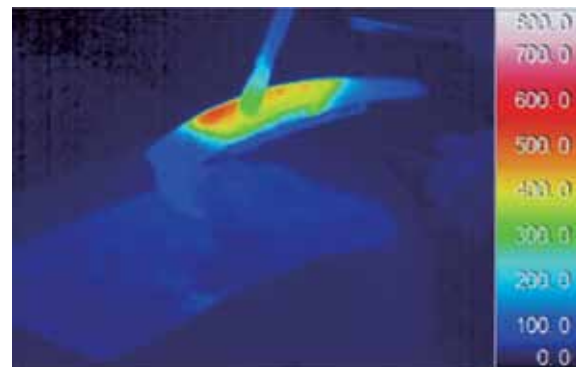


図 12 再投入後の温度観察 $t = 12.6 \text{ s}$
温度の高い部分は刀身ミネ部中央のみの状態になり、平均温度が 380°C （緑から橙色）になる。刃金中央部分は平均温度： 110°C 、刃先の温度： 96°C （補正温度）になる。大久保氏は酸化色の移動を見極める

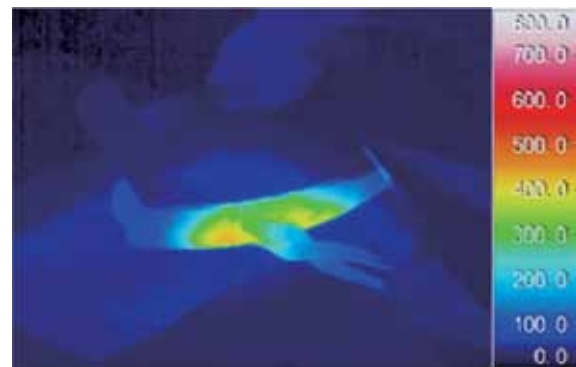


図 13 刃先の冷却 $t = 19.2 \text{ s}$
金鍔によって刃金に水を付け、刃金全体（刃の全長）にかけて温度のバランスを取ると同時に、刀身全体の温度低下と焼戻し温度の伝導を待つ。

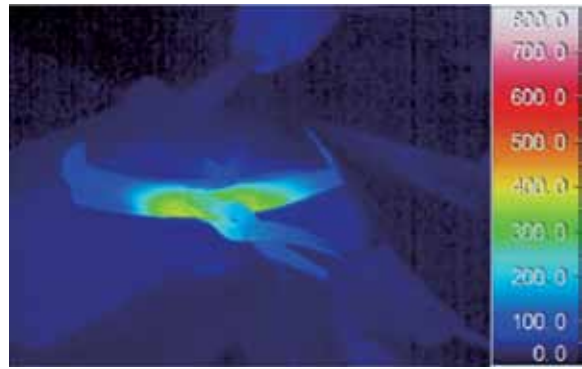


図 14 刃先の冷却 $t = 25.2 \text{ s}$

焼戻し温度（123℃）を確認した後、金鎚によって刃金に水を付けて焼戻し温度を維持し、刀身全体の温度低下を待つ。後に温度が低下した時、冷却水に投入するなどして、刀身から熱の伝導を完全に止めて焼戻しを終了する。

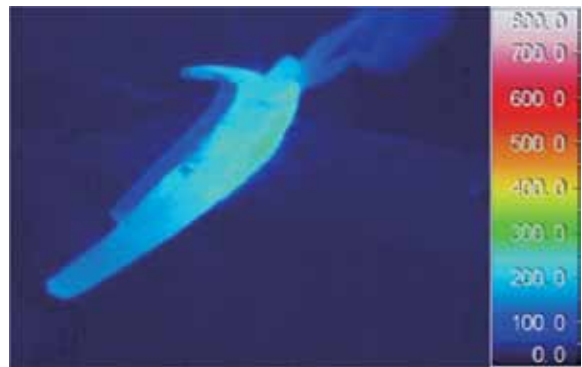


図 15 刀身の歪修正 $t = 57.6 \text{ s}$

焼戻しの後、刀身が完全に冷却する前に、焼入れの時に生じた歪（刀身の曲がり）を金鎚で叩いて修正する。

図4～図15には、無作為に選択したひとつづきの熱処理工程における冷却水に投入（焼入れ）直後から焼戻し後の歪修正までの鉈の熱画像とその実画像を示す。なお、図4の熱画像取得時をスタート時とし、経過時間 t （s）をそれぞれの図に示した。

焼入れは鉈全体を水中に投入せず、ミネから約20mm残した地金の一部と刃金の部分を水に入れ、刀身全体を完全に冷却しない。それは、ミネ部分に残された地金の熱で焼戻しを行う特殊な方法（止め焼き法）を用いているからである。また、硬さに大きな差がでないよう刀身の部分的な冷却（図6、7、9、11）、あるいは金鎚で掬った水によって刃金（地金から露出している刃部）の部分的な冷却（図13、14）を行いながら、焼戻しが均一になるよう地金や刃金の温度をコントロールしている。

なお焼入れの時、約1.5秒間水中に投入し、刃金を平均131℃（約3.0秒後^{*1}）に冷却した。

3.2 硬度試験の結果

3. 1節で述べたように、泊鉈の熱処理工程においては、焼入れの際に冷却されずに高温のまま残った地金（ミネ部）の熱によって焼戻しが行われる。そこで、焼戻しが刃の全長にわたって均一にコントロールされているかを確認するため、ビッカース硬度の分布を調べた。

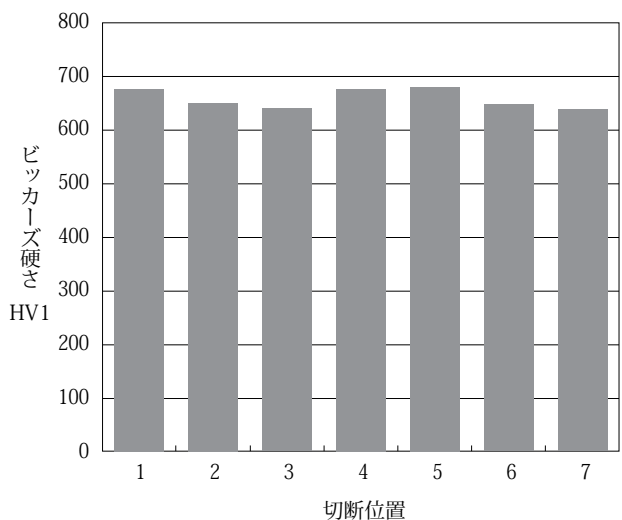


図 16 各切断位置（図 1-1 ～ 7）における刃金の硬さ

表 1 北陸の各鉈の平均硬度

	ビッカース硬度 (HV10)	
	刃 金	地 金
泊 鉈	658	154
能 登 鉈	826	117
越 前 鉈	825	107

硬度測定は、図1に示す切断箇所1～7において、それぞれ刃先から1、2、3mmの位置で行った。図16にそれぞれの位置における刃金の硬さの平均値を示す。硬さは

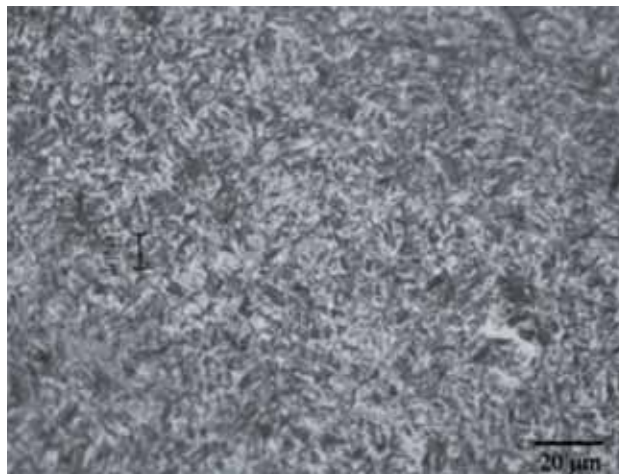


図 17 泊鉈刃先 (図 2-A 部) の金属組織 (マルテンサイト)

638～678HVの間に分布しており、若干のばらつきがみられ、必ずしも一様ではなかった。

表1に泊鉈の平均硬度を示す。比較対象として、能登

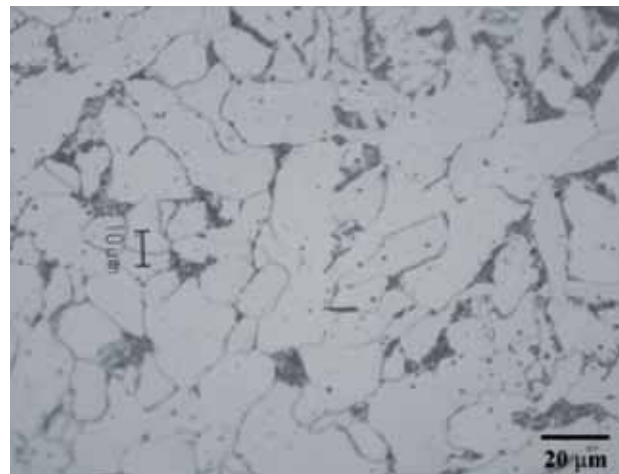


図 18 地金 (図 2-B 部) の金属組織 (フェライト-パーライト)

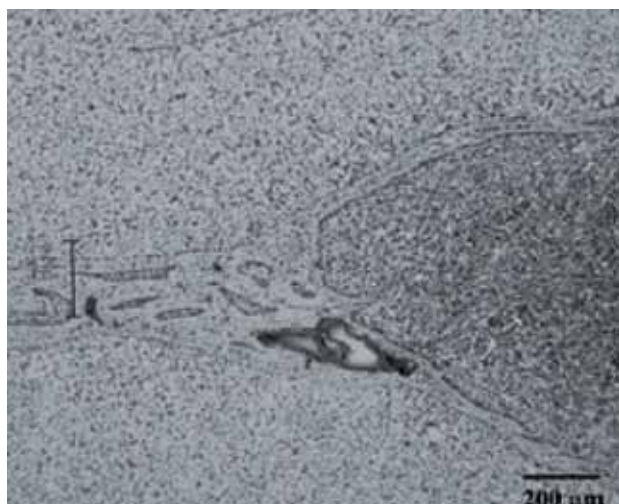


図 19 境界部 (図 2-C 部) の金属組織

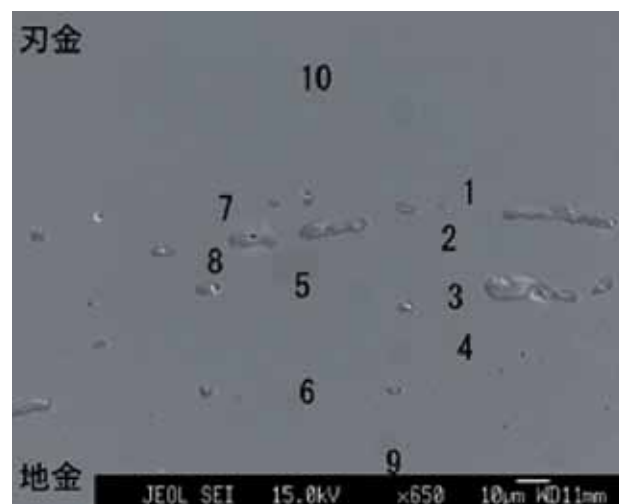


図 20 境界部の二次電子像 (数字は定量分析箇所を示す)

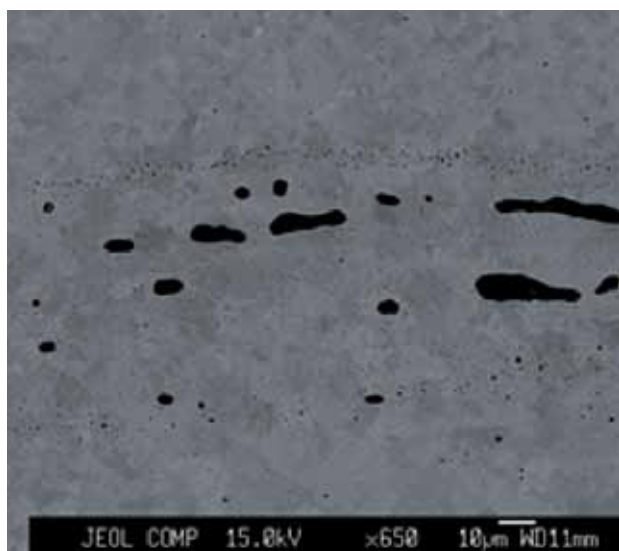


図 21 境界部の組成像

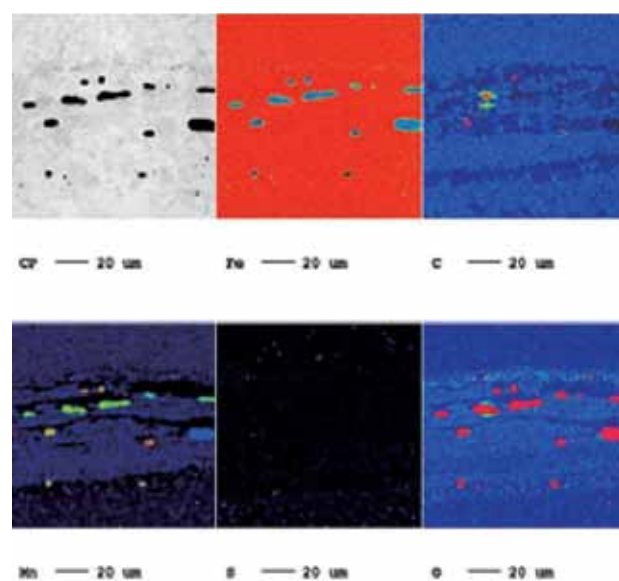


図 22 境界部のX線像

鉈および越前鉈についても同様の試験を行った。刃金については、能登鉈や越前鉈が825HV以上あるのに対し、泊鉈が平均658HVと低い。能登鉈については、EPMAによる定量分析を行い、刃金の材料として含有炭素量が0.8%以上の高炭素鋼を用いていることを確認した。硬度が高いのはそのためと考えられる。越前鉈については分析していないが、おそらく高炭素鋼を用いているものと考えられる。また、地金はSS400相当材を使用しており、北陸の他の2地域の鉈とくらべて硬さが154HVと高い値を示した。

3.3 金属組織

泊鉈の刃金（炭素鋼、図2-A部）は、図17に示すようなマルテンサイトと呼ばれる焼入れ組織となっている。一方、図18は地金（図2-B部）の金属組織である。こちらはフェライトと少量のパーライトからなる組織であった。図19は地金と割り込まれた刃金の境界（三重点、図2-C部）のミクロ組織である。刃金の炭素鋼もこの部分では焼きが入っておらず、図17のようなマルテンサイトではなく、フェライトとパーライトからなる組織であった。なお、地金-地金境界や地金-刃金境界にフェライトが主相となる筋状の境界領域が見られ、鍛接時に脱炭した可能性がある。この境界部分について、EPMAにより詳細に調査を行った。

図20は、泊鉈の刃金と地金境界部分の二次電子像であり、図21はその組成像である。写真の上部側が刃金部分であり、境界部を挟んで下側が地金である。境界部には多くの非金属介在物が見られ、その多くは鉄やマンガンの化合物である。この部分について、面分析を行った。図22はFe、C、Mn、S、OのX線像である。境界部分における各元素の分布を知ることができる。MnとOが介在物の部分に種として分布しており、MnOとして存在していると考えられる。地金や刃金の部分にはこのような介在物はないので刃金中のMnが、（S45CであればJIS規格では0.30～0.90%含まれる）鍛接時に酸化してできたものであろう。Sは境界部分には殆どないため、この部分の非金属介在物は硫化物ではない。なお、

表2 境界部近傍において行った炭素含有量の測定結果

分析位置	炭素量 (wt%)	分析位置	炭素量 (wt%)
1	0.44	6	0.23
2	0.41	7	0.29
3	0.29	8	0.42
4	0.40	9	0.17
5	0.17	10	0.40

※ 1～8は境界部、9は地金、10は刃金部分。

CのX線像から、Cの分布が筋状になっている様子が見られる。これらの分布はMnやOの存在箇所とは必ずしも一致しない。境界部近傍において行った炭素含有量の測定結果を表2に示す。なお、分析位置は図20に示した番号、1～10を中心にした直径10μmの領域である。これらのうち、1～8までが境界領域における分析値であり、0.17～0.44%の範囲内にある。

鍛接の際、刃金となるS45Cの脱炭や酸化、接合部における拡散や再結晶などが起こっていると考えられるが、非金属介在物を有するとはいえ、これらが積層して折り重なっていることから接合部は強固に結びついていると考えられる。

4. まとめ

経験則的鍛冶技術により製作される泊鉈を、焼入れと焼戻し（止め焼き法）の熱処理について材料学的な観点から調査した。泊鉈の刃金（炭素鋼）はS45Cの下限值であり、越前鉈や能登鉈（C：0.8%以上、825HV）に比べると、炭素量が0.42%であると共に熱処理後のマルテンサイト組織になっている刃金の硬度が低く、平均658HVであった。しかし、地金はSS400相当材が使用されており、その硬度は北陸における他の2地域の鉈の平均値112HVより高い154HVを示した。これらから、切れ味を重視する一般の刃物（鉈も含む）とは異なって、叩くように切断する鉈として、刃金に強靱性、地金に耐衝撃性を与えると共に、泊鉈の薄い刀身が平曲がりし難い強さを保持させる為の材料を選択していると考えることができる^{※2}。

また、熱処理における特徴的な止め焼き法は、前述のように一回の加熱によって焼入れ-焼戻しを連続して行う方法であり、焼入れの時にミネに残した熱を刃先に伝導させる方法である。この熱処理方法について、7箇所の切断面で刃先硬度を測定した結果、多少のばらつきはあるものの、極端な差が生じていない事が分かった。また、長い刃の中間部（図1-4）の切断面における刃金硬度を刃先から3箇所計測した結果、刃先が658HV、刃金中央部が657HVであり、地金から露出している部分はほぼ同じ値を示した。しかし、刀身中央部つまり刃金の境界部（割込まれている端、図2-C付近）が急に低い339HVであり、刃金内の硬度に違いを観察した。これらから、止め焼き法が刃金内の硬度を変化させることによって更に靱性を与え、衝撃などによる割れや欠けを防止できる刃金に仕上げる方法であると考えている。

なお、刀身裏側に出現する焼戻しの温度（状態）を示す酸化色（テンパカラー）の位置が地金と露出する刃金の境目に近く、刃先から平均して約13.5mmで刃先ラインと平行であり、地金と刃金の境目約12.0mmに達して

いない。この関係は複数の試料で概ね同じ測定結果が得られ、大久保氏が意図的にその境目を目安として焼戻ししている事が分かる^{※3}。

また、焼入れごとに刀身が異なる温度分布を示す状況で、長い刃（刃金）の焼戻し温度を均一にすることは難しい。しかし、無作為に選択した上記の熱処理工程についてサーモトレーサーで観察した結果、焼入れ直後（約3.0秒）の冷却水から引き上げた温度は、地金と刃金の境目が焼入れに十分な平均131℃に急冷され、さらに薄い刃先がそれよりも低い値平均96℃を示した。一方、刀身地金の温度はトンビ、ミネ、ナカゴ付近が高くてその中間部が低い値であるなどムラが生じていた。その対策として、前後に長い刃金の硬度に差が出ないように、また刃先からの硬度に変化をつけるため、酸化色の移動を手掛かりに高温部分を随時冷却水に入れる、あるいは金鉋で水を掬い付けるなどの行為によって適宜部分的に冷却した。これらの操作によって、地金から露出している刃金の温度を12.6秒後の観察で平均97℃、そして25.2秒後にミネから熱を伝導させて焼戻し温度である平均124℃に上げ、熱処理を適正に行っていることが分かった。

謝辞

本調査は、科学研究費補助金（基盤研究C、課題番号20500872）による成果の一部である。

また、鉋の金属組織観察、硬さ試験を行った富山大学芸術文化学部学生 of 奥田ひとみさん、桶谷藍子さん、窪田綾乃さん、是石菜美子さん、寶田良春君、矢島なつみさん、山口はるなさんに感謝する。

注釈

- ※1 冷却水に投入して焼入れに要した実時間は約1.5秒である。ここで示した時間あるいは文中や図中の時間は、図4の画像を起点としたものである。
- ※2 鉋は刀身が他の鉋に比べて薄く、シノギ部の厚さが3.7－4.0mmである。その実測の詳細は参考文献『北陸における鉋製作について』に掲載されている。
- ※3 鉋の裏側に出現する酸化色（テンパカラー）は、止め焼き法における刃金の温度を判断する重要な現象であり、参考文献『鉋の製作工程ならびに経験則的鍛冶技術の調査』に詳細に記されている。

参考文献

1. 『北陸における鉋製作について』中村滝雄、ペルトネン純子、長柄毅一、河原雅典、富山大学芸術文化学部紀要第4巻、p.146-153、2009

2. 『鉋の製作工程ならびに経験則的鍛冶技術の調査』中村滝雄、長柄毅一、ペルトネン純子、河原雅典、富山大学芸術文化学部紀要第5巻、p.82-93、2010
3. 『鉋製作の作業場ならびに道具に関する調査』中村滝雄、ペルトネン純子、長柄毅一、河原雅典、富山大学芸術文化学部紀要第5巻、p.126-133、2010