

## 連携記事

## シェービングを支えるカミソリ替刃材

## Razor Blade to Support Shaving

福本賢太郎

Kentaro Fukumoto

(株) プロテリアル

安来工場 冶金研究所

研究員

## 1 はじめに

カミソリの起源は古く、有史以前とされている。人類は、旧石器時代には石や貝殻、骨、歯などを加工した刃物を作り、髭や頭髪などの体毛を剃っていたと言われている。新石器時代には黒曜石を研いだ刃物を使っていたと推定されている。有史時代に移り、古代エジプトでは金や銅製のカミソリで顎の髭や頭髪などの体毛を剃り<sup>1)</sup>、古代バビロニアでは髭を剃って整えていたとされている。日本にカミソリが伝わったのは、飛鳥時代と言われ、もともとは僧侶が頭髪を剃る際に用いる法具として使われた<sup>1)</sup>と言われている。戦国時代においては、僧侶のみならず武士階級にも髪を剃る習慣が生まれ、男性は兜を被った際に頭が蒸れるのを抑えるために前頭部から頭頂部の頭髪を剃り、女性は眉や襟足の手入れのためにカミソリを用いたとされる<sup>2)</sup>。江戸時代になると、片刃のカミソリが髭剃りの道具として一般化し、明治時代の文明開化以降に西洋のカミソリが日本に伝わったとされている。

現在市販されているカミソリは、替刃を柄と一体化させた使い捨てのディスポーザブルと替刃の部分が使い捨てのカートリッジ式で交換可能な替刃式があり、1903年頃にK. C. Gilletteによって製品化されたT型安全カミソリ（以後、カミソリとする）が原型とされている<sup>3)</sup>。以来100年以上にわたり、インジェクター方式や複数刃化、横滑り防止の安全機構、首振りやサスペンション機構の導入<sup>4)</sup>、また刃の前後のすべりを良くする水溶性樹脂素材の層を付加したものや、肌を抑え体毛を起こすためのローラーや軟質樹脂製の突起が付与されたもの<sup>5)</sup>など、デザインや刃先などに改良が行われてきた。最近では潤滑性に優れたシェービングジェルを付加したものや電動の振動機構など更なる剃り味の追及に加え、体毛を温めるヒーターを備えたものまで登場してきており、今なおカミソリメーカーの不断の努力によってシェービングを支える

技術は日々進化し続けている。

このように、カミソリの剃り味を向上するための継続的な取り組みがなされ、剃り味に影響を与える主要な因子はある程度特定されているものの、その影響度については明確になっていない<sup>6,7)</sup>。本稿では、カミソリの剃り味に影響を与える因子のうち、カミソリの刃（以後、カミソリ替刃材）に関するものに限定し、剃り味を向上させるために必要な材料特性や組織制御の考え方について解説する。

## 2 カミソリ替刃材

## 2.1 カミソリ替刃材の材料

カミソリ替刃材の材料は、古くはC（炭素）量を約1.2%含む高炭素鋼（SK）が用いられてきたが、1963年頃から耐食性の向上を目的にCr（クロム）量を約13%含む高炭素のマルテンサイト系ステンレス鋼が主流となった。当初は約1%のC量を含有した成分系であったが、粗大な炭化物が多く、使用時に刃欠けと呼ばれる刃先の損傷が起こり、それに伴う剃り味の劣化が問題視されたと言われている<sup>3)</sup>。これらの課題を解決するために、C量の適正化が検討され、現在は約0.6～0.7%含有したマルテンサイト系ステンレス鋼が主流となっている。当社では、1964年頃からカミソリ替刃材の素材の量産が開始され、以後60年間に渡り、国内外の多くのカミソリメーカーに供給している。

## 2.2 カミソリ替刃材の製造工程とマイクロ組織

カミソリ替刃材の素材は、当社においては溶解プロセス、熱間加工プロセス、冷間加工プロセス、熱処理プロセスなどを経て、最終的には厚さが約70～100 $\mu$ mの薄さまで圧延加工して製造される。その後、顧客からの要望に応じた幅や長さによりスリット加工し、コイルの状態出荷される。電子

顕微鏡で観察した出荷段階のカミソリ替刃材の素材のSEM (scanning electron microscope) 像を図1に示す。濃い灰色で識別される相が基地のフェライトであり、薄い灰色で識別される球状の相がCr炭化物であり、球状のCr炭化物はフェライト基地中に均一に分散している。Cr炭化物は硬質であるものの、基地のフェライトは軟質であるため、カミソリ替刃材の素材は硬度が低い状態で出荷される。

その後、カミソリメーカーでプレス機によって穴が開けられた後に、焼入れ、サブゼロ処理さらに焼戻しが行われ<sup>6)</sup>、焼戻しマルテンサイトと不可避免的に残留するオーステナイト(以後、残留オーステナイト)、未固溶のCr炭化物からなるミクロ組織を有する高硬度のカミソリ替刃材が得られる。市販のカミソリ替刃材のSEM像を図2に示す。濃い灰色で識別される相が基地の焼戻しマルテンサイトであり、薄い灰色で識別される球状の相がCr炭化物である。図1の素材とは同一ロットではないが、図1と比較して、サイズの小さいCr炭化物の割合は少なくなり、サイズの大きいものはある程度残存しており、焼入れ焼戻しによってサイズの小さいCr炭化物が基地に固溶したことが示唆される。また、焼戻しマルテンサイト中で白く識別される薄い板状の相は焼戻し炭化物である。焼戻し炭化物は、焼入れ後に比較的高い温度で焼成された際に析出したもので、素材から存在するCr炭化物とは生成過程も構造も異なる。なお、残留オーステナイトは焼戻しマルテンサイト中に存在するものの非常に微細であるため、本SEM像では確認できない。

そして、高硬度のカミソリ替刃材は、刃角度を鋭利に加工するための回転砥石による刃付け工程や、刃先に硬さや耐食性を付与するためのコーティング工程、組み立て工程などを経て、鋭い刃角度を有するカミソリへと仕上げられる<sup>7)</sup>。

### 3 剃り味とは

現在市販されているT型安全カミソリには様々な工夫が施されており、我々は個々に合った様々なタイプのカミソリを使用することができる。日々のシェービングの中で様々なタイプのカミソリを使うと、髭などの体毛の剃りやすさがカミソリによって異なることに気が付く。これがいわゆる剃り味である。味という言葉がつくように、カミソリの剃り味は個人によって評価が分かれる。これは、それぞれの使用環境(湿度、シェービングジェル)や使い方(順剃り、逆剃り)が異なることや、体毛の太さや生え方に個人差があることなどに由来すると考えられるが、詳細は定かになっていない<sup>6,7)</sup>。

このため、剃り味の良いカミソリを一括りで定義することは非常に難しいものの、カミソリ替刃材に限定すれば、刃角度が鋭角であり、かつ刃先に局所的な変形や錆が少ないほどの、剃り味が良いことは容易に想像できる。刃角度については、鋭利であるほどシェービング時の切断抵抗力は小さく、小さい力で体毛を切断できるため最も重要な因子と考えられる。しかし、いかに刃角度が鋭利であっても、刃先に変形・錆が存在すると、それらが抵抗となり切断抵抗力は増すため、剃り味は悪くなると考えられる。ここで、刃先の変形とは、ユーザーが使用する度に生じる刃先の局所的な曲がりや刃欠け、摩耗、そして刃付け工程で形成される局所的な刃先の刃がえり(以後、バリ)<sup>7)</sup>をさし、また刃先の錆とはユーザーが使用する度に生じる刃先の局所的な錆をさす。

### 4 カミソリ替刃材に求められる材料特性

カミソリ替刃材の刃角度を鋭利にし、それを維持するためには、高硬度・高延性・高耐食といった材料特性が必要と考

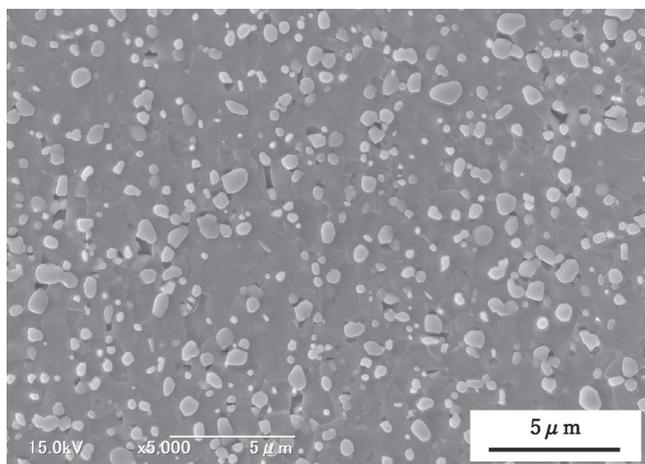


図1 カミソリ替刃材素材のSEM像

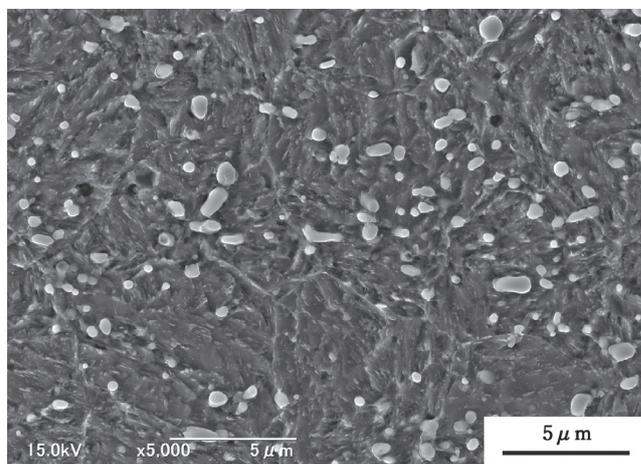


図2 市販のカミソリ替刃材のSEM像

えられる。前述のとおり、刃先に局所的な変形（曲がり、刃欠け、摩耗、バリ）が存在すると剃り味は悪化する。局所的な曲がりは、体毛を剃る際に刃先に加わる力が材料固有の降伏強度を上回り、材料が塑性変形することで生じるものと考えられる。一般に降伏強度が高い材料ほど硬度は高いため、刃先の曲がりを抑制するには、高硬度という材料特性が求められる。局所的な摩耗が起こる原因については定かではないが、曲がりの延長線上の考えで、体毛を剃る際に加わる力が材料固有の強度（抗折強度）を上回り、刃先のごく一部の領域が破断するために起こるものと推測する。よって、局所的な摩耗に対しても、曲がりと同様に高硬度という材料特性が求められる。

一方、局所的な刃欠けについては、刃先のごく一部の延性の低い領域（例えば、硬度に差異がある部分の境界やCr炭化物と基地の界面など）から微小クラックが入り、それが進展してマイクロボイドとなり、刃先から材料が微視的に欠落することで起こると言われている<sup>8)</sup>。一般に、材料の延性は硬度が高いほど低く、延性の低い高硬度の材料ほど刃欠けは起こりやすいと考えられる。よって、局所的な刃欠けという観点からは高延性という材料特性が求められ、総じてカミソリ替刃材には、高硬度だけでなく、高延性という材料特性も同時に求められると考えられる。

また、刃先のバリについては、カミソリメーカーでカミソリ替刃材の刃角度を鋭利に加工するための刃付け工程において、回転砥石で段階的に研磨加工する際に生成すると言われている<sup>7)</sup>。この段階では焼入れとサブゼロ処理、そして低温焼戻しが行われており、カミソリ替刃材の硬度は非常に高く、延性が低い状態となっていると推測できる。ここで、材料の硬度が低い場合、一般に延性は高いため、カミソリ替刃材の刃先が回転砥石に挟まれることで先端が伸延し、バリが生成されることで、刃角度が工程設計値より局所的に鈍くなる可能性が懸念される。一方、カミソリ替刃材の硬度が高すぎると延性は極端に低いため、回転砥石に挟まれる際に刃先が局所的に欠け、剃り味が悪くなるのが懸念される。材料の硬度が適度に高い場合は、生成したバリが適度に千切れることで刃先の伸延を抑制でき、工程設計値どおりの鋭利な刃角度を得ることができると考えられる。よって、カミソリ替刃材の刃角度を鋭利に加工するためには、刃先のバリを抑制できる高硬度と刃欠けを抑制するための適度な延性が求められる。なお、刃付け工程の研磨加工後に皮砥による仕上研磨にて刃先のバリを除去するプロセスを行っている場合もあり<sup>7)</sup>、必ずしも刃付け時の硬度が剃り味に影響するわけではないことを記載しておく。

最後に、刃先の局所的な錆は切断抵抗力の悪化を招くため、高耐食という材料特性が求められると推測する。現在市

販されているカミソリ替刃材の多くは、マルテンサイト系ステンレス鋼が使用されている。マルテンサイト系ステンレス鋼はCrを13%含むため、錆には強く、またカミソリの構造上の様々な工夫によって錆の発生を抑制しているが、湿潤環境や汗などの塩分を含む限られた使用環境下においては局所的に発錆することもある。生成する錆は主に水酸化鉄であり、刃先の表面粗さを大きくすることに加え、カミソリ替刃材であるマルテンサイト系ステンレス鋼から脱離し、刃先の形状を変化させる。これにより、切断抵抗力が大きくなるので、剃り味が悪化するものと考えられる。なお、コーティングについてはシェービング時の潤滑性を高めるだけでなく、カミソリ替刃材の硬度<sup>5)</sup>と耐食性<sup>7)</sup>を付与するとされている。

## 5 プロテリアルのごだわり

### 5.1 ミクロ組織へのごだわり

ユーザーが快適にシェービングできるように、そしてカミソリメーカーがより良いカミソリを製作できるように、プロテリアルはカミソリ替刃材の素材に対して2つのごだわりを持っている。

最初のごだわりは、カミソリ替刃材を高硬度・高延性・高耐食化させるために、その素材のミクロ組織（マルテンサイト組織と炭化物）を微細化している点である。カミソリ替刃材の素材は、前述のとおり、軟質なフェライトと著しく硬度の高いCr炭化物からなるミクロ組織を有し、コイルの状態のカミソリメーカーに供給された後にカミソリメーカーで焼入れ焼戻しが行われ、焼戻しマルテンサイトと残留オーステナイト、未固溶のCr炭化物からなる高硬度のカミソリ替刃材が得られる。（残留オーステナイトとは、焼入れ保持温度においてフェライトはオーステナイトに相変態するが、種々の要因でオーステナイトが安定化し、焼入れ時にマルテンサイトに変態せずに一部不可避に残ったものである。）

焼戻しマルテンサイト組織の微細化は、焼入れ保持がごく短い場合においては、素材のフェライト結晶粒およびCr炭化物を微細化することで達成できると考えられる。これは、焼入れ保持の際にフェライトはオーステナイトへ変態し、焼入れによる冷却によってオーステナイトはマルテンサイトに変態するが、焼入れ保持がごく短時間で行われる場合は素材のフェライトが微細であるほどオーステナイトが微細となり、それによって生成するマルテンサイト組織（ブロックサイズ）も微細になる<sup>9)</sup>と考えられるためである。また、Cr炭化物は焼入れ保持の際にオーステナイトに逐次固溶していくものの、ごく短時間の焼入れ保持においては、粒界ピンニング効果によってオーステナイトの粒成長を抑制する<sup>10,11)</sup>と考えられている。よって、素材のCr炭化物が微細に分散することは、焼

入れ保持における未固溶のCr炭化物の微細化に繋がり、オーステナイトの粒成長が抑制されることで、マルテンサイト組織（ブロックサイズ）を微細化することができる。これらブロックサイズの微細化は、Hall-Petch則に示される粒界強化（結晶粒強化）によって、材料の強度（硬度）を高めつつ、延性や靱性の維持につながるものと考えられる。さらに、Cr炭化物には耐食性に有用なCrが含まれているので、Cr炭化物の微細化は焼入れ保持の際にCrの基地への固溶を促進する。このため、短時間の焼入れ保持で優れた耐食性が期待できる。

プロテリアルでは、溶解プロセス、熱間加工プロセス、冷間加工プロセス、熱処理プロセスを適切に組み合わせ、そして制御することで、カミソリ替刃材の素材のマイクロ組織を微細に作り込んでいる。

## 5.2 材料スペックへのこだわり

もう1つのこだわりは、材料スペックを拡充している点である。カミソリ替刃材の材料は、1960年代に高炭素鋼（SK）からCrを13%含むマルテンサイト系ステンレス鋼へ置き換わったが、プロテリアルではそれ以降も様々な材料を開発している。表1に各材料の概略の成分を示す。GIN<sup>®</sup>5（銀5）はC量が約0.6~0.7%の材料であり、カミソリ替刃材のみならず高級刃物や医療用製品などにも国内外問わず広く使用されている主力材料である。GIN<sup>®</sup>7（銀7）はC量を約0.5%として、Moを約1%添加することで耐食性を高めた材料であり、GIN<sup>®</sup>6（銀6）はC量を約0.4%として、耐食性と疲労強度をさらに高めた材料である。YBS<sup>™</sup>（Yasugi-Blade-Steel）1,2は、GIN5とGIN7をベースにプロテリアルが2019年に開発した高い硬度と耐食性を兼備する新材料である。YBSシリーズについては6章で詳しく解説する。

# 6 材料特性

## 6.1 硬度

YBSシリーズは、当社が刃物用途として開発した高い硬度と耐食性を兼備する新材料である。本章では、YBSシリーズ

表1 カミソリ替刃材の成分

材料	C	Cr	Mo
GIN5(銀5)	0.6~0.7	13	-
GIN6(銀6)	0.4	13	1
GIN7(銀7)	0.5	13	1
YBS1	0.6	Developed Grade	
YBS2	0.8	Developed Grade	

※成分値は概略となります。

の材料特性（硬度、耐食性、延性の代用特性である曲げ性）を既存のGIN5、GIN7と比較することで紹介する。

まず、焼入れ時の保持時間と硬度の関係を図3および図4に示す。供試材は、厚さ0.1mmの試料を用い、焼入れ条件は1150℃とし、焼入れ後に直ちにサブゼロ処理を実施した。続いて、低温焼戻しを実施し、最後にコーティングのPTFE（フッ素樹脂）を焼成する工程を模擬した比較的高温での焼戻しを実施した。硬度はカミソリメーカーでの刃付け性に影響すると考えられる「低温焼戻し硬さ」、そしてユーザー使用時の変形に影響すると考えられるPTFE焼成温度における「焼成硬さ」の2水準で評価している。YBS1については、いずれの焼入れ保持時間においても低温焼戻し硬さ、焼成硬さともに、GIN5やGIN7より高い。また、焼入れ保持時間を10s程度とすることで、低温焼戻し硬さは約820HV、焼成硬さは約720HVとなり、総じて硬度の高い材料である。また、YBS2については、特に低温焼戻し硬さがGIN5やYBS1よりも明確に高く、焼成硬さについてもGIN5より高い。また、焼入れ保持時間を10s程度とすることで、低温焼戻し硬さは約

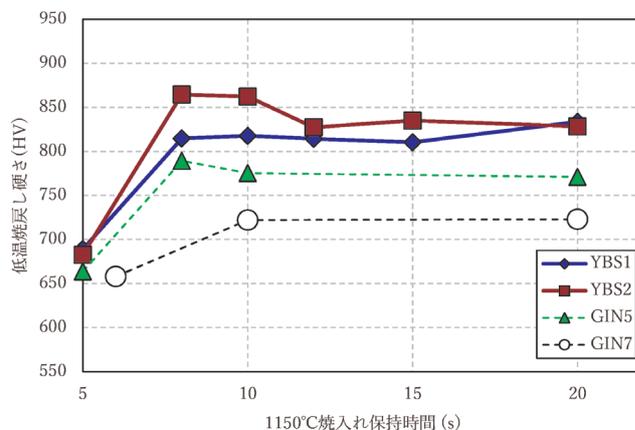


図3 低温焼戻し硬さ (Online version in color.)

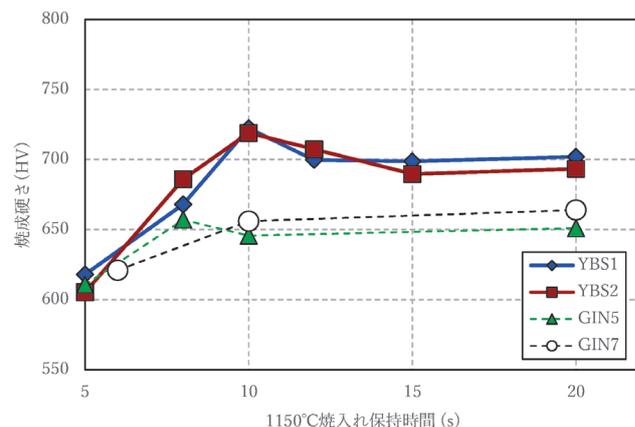


図4 焼成硬さ (Online version in color.)

860HV、焼成硬さは約720HVとなり、総じて非常に硬度の高い材料である。

続いて、YBSシリーズが高い硬度を実現する主な理由について解説する。YBSシリーズは前述の通り、焼戻しマルテンサイトとCr炭化物、残留オーステナイトから成り、析出硬化に寄与する金属間化合物などは析出しないため、硬度は主に残留オーステナイト量とマルテンサイトに固溶するC量(以後、固溶C量)に依存すると考えられる。各材料の残留オーステナイト量と固溶C量を表2に示す。残留オーステナイト量は、X線回折法で得られたマルテンサイト(2ピーク)とオーステナイト(3ピーク)の積分強度を計6通り(3×2通り)で算出し、それぞれの組み合わせごとにオーステナイトの体積率(vol%)を計算し、その平均値にて算出したものである。また、固溶C量は機器分析では計測が困難であるため、統合型熱力学計算ソフトウェアThermo-Calcにて計算した1100℃の平衡状態において、オーステナイトに固溶するC量で代用している。なお、熱力学パラメータはTC-FE9を用いた。

残留オーステナイト量については、YBS1で10.3vol%、YBS2で14.2vol%であり、GIN5の5.8vol%やGIN7の3.6vol%より高い。残留オーステナイトは基地の焼戻しマルテンサイトに比べて、硬度が非常に低いので、残留オーステナイト量が多いほど材料の硬度は低いと予想されるが、実際にはYBSシリーズの硬度は、GIN5やGIN7より高い。このため、YBSシリーズにおいては、残留オーステナイト量が低いことに起因した現象ではない。一方、固溶C量については、YBS2が0.735mass%と最も高く、次いでYBS1が0.620mass%、GIN5が0.541mass%、GIN7が0.470mass%と最も低い。図3より、低温焼戻し硬さはYBS2が最も高く、次いでYBS1、GIN5が高く、GIN7が最も低い。ここで、マルテンサイトの硬度は、マルテンサイトに固溶するC量が高いほど高くなることが知られており、これはC量が高いほど固溶強化量が大きく、導入される転位密度が高く、さらにブロックサイズが微細になるため<sup>12)</sup>と言われている。このため、YBS1、YBS2が高硬度である理由は、固溶C量が高いことに由来すると考えられる。

表2 各材料の残留オーステナイト量と固溶C量

材料	残留オーステナイト量	固溶C量(計算値)
YBS1	10.3(vol%)	0.620(mass%)
YBS2	14.2(vol%)	0.735(mass%)
GIN 5	5.8(vol%)	0.541(mass%)
GIN 7	3.6(vol%)	0.470(mass%)

## 6.2 耐食性

各材料の耐食性(発サビ面積率)を図5に示す。耐食性は、コーティングのPTFE焼成温度において焼成(比較的高温で焼戻し)した試料を対象として、35℃、5%中性食塩水を用いた塩水噴霧試験(JIS Z 2371:2015)を行い評価した。耐食性は、塩水噴霧試験開始より12時間後の発錆の状態を発サビ面積率として定量評価した。

YBS1については、焼入れ保持時間が10s未満の場合、GIN5より発サビ面積率が大きい。焼入れ保持時間が10s以上の場合については、GIN5より発サビ面積率が小さい。このため、焼入れ保持時間が10s以上の場合は、高い耐食性を有する材料であると言える。一方、YBS2については、焼入れ保持時間に依らず、GIN5より発サビ面積率が大きく、耐食性が高い材料とは言えないが、非常に高硬度という点で特徴的な材料であると言える。

## 6.3 曲げ性

各材料の曲げ性(延性の代用特性)を図6に示す。本来は引張試験で材料同士の延性を比較するべきではあるが、供

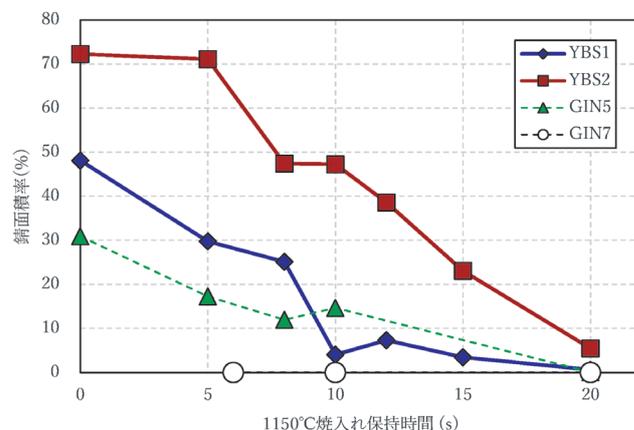


図5 塩水噴霧試験で発生する錆の面積率 (Online version in color.)

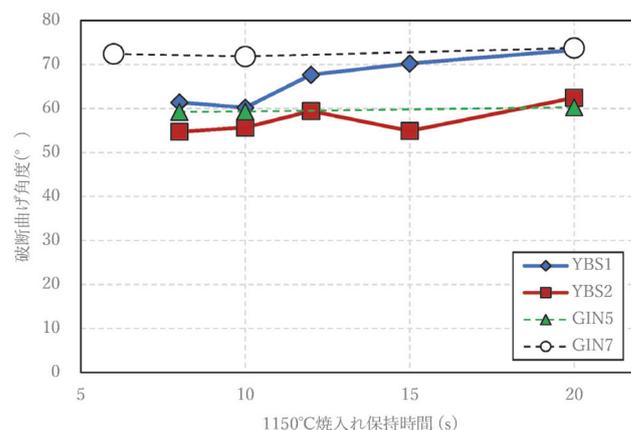


図6 破断曲げ角度 (Online version in color.)

試材の厚さが非常に薄く、また形状的な制約もあり、JIS Z 2241:2022で規定される引張試験片の加工が困難であるため、当社独自の曲げ試験を用いて、延性の代用特性として曲げ性を評価している。曲げ性は、コーティングのPTFE焼成温度において焼成（比較的高温で焼戻し）した試料を対象として、一定の角速度で曲げる際に試料が破断する角度を破断曲げ角度として評価している。つまり、破断曲げ角度が大きいほど、曲げる際に折れにくいので、曲げ性（すなわち延性）が良好な材料となる。YBS1については、いずれの焼入れ保持時間においても破断曲げ角度はGIN7より小さいものの、GIN5よりは大きく、延性が高い材料と言える。一方、YBS2については、いずれの焼入れ保持時間においても、破断曲げ角度がGIN5よりも小さく、延性が高い材料と言えない。しかし、同一材料においては、硬度が高いほど延性が低下することは一般的であり、硬度が明確に高いYBS1、YBS2は曲げ性において不利である。そこで、同一硬度で比較するために焼入れ保持温度を1100~1200℃とした場合の焼成硬さと破断曲げ角度の関係を図7に示す。同一硬度で比較した場合、YBS1、YBS2の破断曲げ角度は、GIN5より大きく、曲げ性が高い材料と言える。

#### 6.4 特性まとめと応用例

YBSシリーズの材料特性（硬度、耐食性、曲げ性）を総括する。YBS1は適切な条件で焼入れ焼戻しを行うことで、高い硬度と耐食性、曲げ性を兼備することができ、GIN5の上位互換材となりうる材料である。この変形しにくく、折れにくい、そして錆びにくいという材料特性を利用することで、より鋭利な刃角度を得ることができ、カミソリ替刃材のさらなる剃り味の向上に寄与することが期待される。さらに、耐食性が良好なことを活かし、カミソリ替刃材のみならず、医療用メスなどへの応用が期待される。一方、YBS2は、適切な条件で焼入れ焼

戻しを行うことで、非常に高い硬度を得ることができるが、耐食性や曲げ性はGIN5に比べ劣る材料である。この耐食性と曲げ性の欠点をカミソリの構造で補うことができれば、YBS1以上に剃り味の良好なカミソリ替刃材が実現するかもしれない。さらに、炭素鋼に匹敵する高い硬度を利用して、調理用刃物や工業用刃物などへの応用も期待される。

## 7 おわりに

K.C.GilletteがT字型安全カミソリを製品化して120年が経ち、今なおカミソリメーカーの不断努力によって、カミソリは日々進化し続けている。当社では、この弛まぬ進化に合わせて製造プロセスだけでなく材料そのものにもこだわりをもち、良好な剃り味を実現できるカミソリ替刃材の開発に取り組んできている。皆さんの日々のシェービングをより良いものとするために、我々素材メーカーもさらなる努力でシェービング技術の向上を支えていきたいと考える。最後に、本稿ではカミソリ替刃材の剃り味を構成する因子と、それをより良いものにするための材料特性や組織制御の考え方について解説してきたが、剃り味を構築する要素や材料特性についてはいまだ不明な部分が多く、十分な解説ができなかったことをお詫びする。

#### 参考文献

- 1) 朝倉健太郎：身近な刃物・日本刀・隕鉄 驚きの真実，アグネ承風社，(2018)。
- 2) GROOMING CLUB，日本カミソリの歴史，<https://groomingclub.jp/museum/273>，(参照日 2023-09-12)。
- 3) 藤原義行：特殊鋼，65 (2016) 6，3。
- 4) 大谷泰夫：NSSTつうしん，37 (2002)。
- 5) 日本鉄鋼協会：ふえらむ，13 (2008) 2，69。
- 6) 山田克明，玉置司：日本機械学会2013年度年次大会講演論文集，(2013) 13-1。
- 7) 山田克明，宮崎宏明：精密工学会誌，54 (1988) 11，2048。
- 8) G. Rosioli, S.M. Taheri-Mousavi and C. Tasan：Science，369 (2020) 7，689。
- 9) 泉田寛，河部望，山尾憲人，村井照幸：バネ論文集，49 (2004)，21。
- 10) 土山聡宏，高木節雄，中村定幸：鉄と鋼，80 (1994) 12，938。
- 11) 土山聡宏，高木節雄，中村定幸：鉄と鋼，81 (1995) 2，147。
- 12) 大村孝仁，津崎兼彰：鉄と鋼，92 (2006) 5，295。

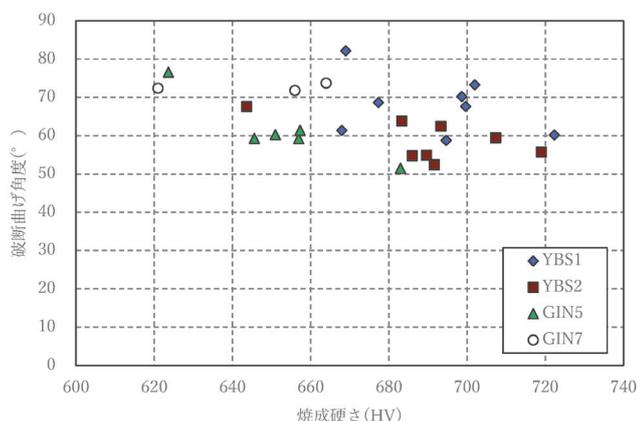


図7 焼成硬さと破断曲げ角度の関係 (Online version in color.)

(2023年9月29日受付)