

|         |  |
|---------|--|
| 称号及び氏名  | 博士（工学） 今井 順二                               |
| 学位授与の日付 | 2008年3月31日                                 |
| 論文名     | 早剃りを目指した電気カミソリ用刃材プロセスの最適化に関する基礎研究          |
| 論文審査委員  | 主査 東 健司<br>副査 間渕 博<br>副査 奥田 修一<br>副査 瀧川 順庸 |

## 論文要旨

髭を剃る道具は、安全カミソリと電気カミソリに大別される。安全カミソリでは、髭は肌により根元を拘束され、そこに刃先がくい込むことで切断される。弾性の大きな肌で拘束された髭を切断するため刃先は非常に鋭利である。それ故、安全カミソリの刃寿命は1週間程度である。また、鋭利な刃先が肌に接触するため、髭剃りには石鹸などの潤滑剤の存在が不可欠である。安全カミソリでは刃が肌に接触する部分はすべて刃先であるので、十分な切断能力があれば、確実にその範囲にあるすべての髭を切断することが可能である。

一方、電気カミソリは髭を外刃の開口部に導入し、外刃の刃先と内刃の刃先とで鋏み切ることで、髭を切断している。そのため、刃先は基本的に肌に接触しないので、肌を傷める可能性は低い。また、外刃の肌に接触する部分は刃先ではないので、潤滑剤を必要としない。さらに、外刃を肌に押し当てることで、髭の毛根部を圧迫し、髭を絞り出すことができ、髭を肌表面より深い位置で切断することが可能である。さらに、外刃と内刃で鋏み切る切断機構であるため刃の寿命は半年以上と非常に長い。しかし、外刃は網目状で、開口率が低い場合は、髭の導入が阻害される。さらに、刃の構造に起因する工法上の制約から、刃先は安全カミソリと比較すると、鋭利さに欠けるので、その切断能力は不十分で、外刃への髭の導入の阻害とも合わさって、髭の剃り残しが発生し易い構造になっている。この問題を解決するため、電気カミソリは回転刃から往復刃へ、往復刃の数も複数刃へ、さらに、通常の外刃では導入困難な長い髭を対象を絞ったスリット刃を含めた刃ブロック構造へと変化している。

このように、電気カミソリの刃ブロック構造は進化してきたが、刃材としての素材は電気カミソリの出現以来ほとんど変化していない。その結果、安全カミソリと比較して、使用性では優れているが、高級電気カミソリでは本体価格が 10 倍近く高価なものとなっている。さらに、早剃りが困難であるという課題は残されており、その解決としての対策も未着手のままである。そこで、本研究では、強度と成形性のトレードオフバランスを目指し、金属の強化理論に基づき、早剃りを達成できる電気カミソリ用の刃材の作製プロセスを検討し、その最適化プロセスを提案することを目的とした。加えて、最適化プロセスの有効性を商品レベルで検証した。

本論文は、5 章で構成されるもので各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、早剃りの達成に必要な電気カミソリの外刃および内刃の問題点を概説し、その構造上の目標値を設定した。さらに、刃形状に依存する技術的制約を考慮して、材料として必要な目標値を明確にした。また、その目標達成のための刃の実用的製造法や材料的制約を考慮して研究開発の方向性を提示し、最終的には本研究課題の位置づけを明確にした。

第 2 章では、現在の電気カミソリ刃用材料である Fe-13.5 mass% Cr-1.3 mass% Mo-0.4 mass% C の組成のマルテンサイト系ステンレス鋼にたいして、拘束型高歪導入法を用いることで母相に格子欠陥を高密度に導入し、材料の硬度上昇に及ぼす結晶粒微細化および炭素固溶量増大の効果について検討した。拘束型高歪導入法としては、Equal-Channel Angular Extrusion (ECAE) を用い、歪除去の熱処理を施した鋳塊に 623 K で 90° 屈曲、8 パスにより 7.2 程度の相当歪を導入し、回復熱処理、硬化熱処理（焼入れ）した組織および物性の変化を検証した。その結果、ECAE によるフェライト相の微細化は達成されなかった。しかし、ECAE を施した試料に回復熱処理（973 K）、焼入れ（1323, 1373 K）を施すことで、マルテンサイト組織となり、鋳塊や通常の冷間圧延材に同様の熱処理を施した場合と比較して、0.5  $\mu\text{m}$  以上の粗大クロム炭化物の粒子数（析出量）が減少した結果、1373 K からの焼入れ材においてビッカース硬度で約 20 % 上昇した。このプロセスでは、粗大クロム炭化物の完全固溶は達成できなかったが、目標の硬さ（ $H_v \geq 700$ ）は得ることができた。

第 3 章では、同組成のマルテンサイト系ステンレス鋼にたいして超急冷凝固法を用いることで、鋳造時の冷却速度を大きくして、材料の硬度上昇に及ぼす結晶粒微細化および炭素固溶量増大の効果について検討した。超急冷凝固法として、水冷銅鋳型（断面形状： $\phi 3 \text{ mm}^2$ 、 $1 \times 5 \text{ mm}^2$ ）および回転銅ロール（ロール周速：5、10、20、40 m/s）を用いた。0.5  $\mu\text{m}$  以上の粗大クロム炭化物の析出状態の冷却速度依存性を検討した結果、最も冷却速度が遅いと考えられる  $\phi 3 \text{ mm}^2$  の水冷銅鋳型で作製した試料のみに析出が確認された。この結果および良好な超急冷薄帯が安定して得られた条件を考慮して、これ以降の組織観察や特性評価は周速 10 m/s の回転銅ロールにて得られた試料で実施した。まず、前述したプロセスで作製された試料の組織は、マルテンサイトと残留オーステナイトから構成され、クロム炭化物は確認されなかった。組織のそれぞれの粒

径は、旧 $\gamma$ 相粒径が  $20\ \mu\text{m}$ 、ブロックマルテンサイトが  $2\ \mu\text{m}$ （長径： $8\ \mu\text{m}$ 、短径： $0.5\ \mu\text{m}$ ）、ラスマルテンサイトの幅が  $30\ \text{nm}$  であった。次に、この試料を  $973\ \text{K}$  で焼戻した組織は、焼戻しマルテンサイトになったが、その旧 $\gamma$ 相粒径は変化しなかった。また、電気カミソリ外刃形状へのプレス成形加工が可能となる硬度 ( $H_v \leq 350$ ) まで軟化した。さらに、この焼戻した試料に、 $1323\ \text{K}$  で焼入れを施すことにより、組織はマルテンサイトと残留オーステナイトから構成され、クロム炭化物は確認されなかった。組織のそれぞれの粒径は、旧 $\gamma$ 相粒径が  $10\ \mu\text{m}$ 、ブロックマルテンサイトが  $2\ \mu\text{m}$ （長径： $8\ \mu\text{m}$ 、短径： $0.5\ \mu\text{m}$ ）、ラスマルテンサイトの幅が  $30\ \text{nm}$  で、前述した超急冷凝固直後の試料と比較して、旧 $\gamma$ 相粒径のみ微細化していた。この焼入れ材は、超急冷凝固直後の試料と比較して、硬度がさらに上昇すると同時にその延性も改善していた。この特性の向上は、旧 $\gamma$ 相粒径の微細化に起因するものである。これらの結果より、クロム炭化物が完全固溶することで、通常の冷間圧延材に焼鈍処理を施し、その後同様の焼入れした試料と比較して、ビッカース硬度で約  $40\ \%$  上昇することを確認した。

以上の成果を基に、現状の電気カミソリ用マルテンサイト系ステンレス鋼を用い、その溶湯を回転銅ロールに噴出して作製した超急冷凝固薄帯を  $973\ \text{K}$  で焼戻し処理することで、冷間プレス成形での形状確保を達成することが可能となり、さらに、冷間プレス成形に続く焼入れ処理において、添加炭素が完全に固溶した結果、目標値以上の硬さを達成できた。このプロセスを応用することで、目標枚幅で髭剃り可能な外刃を試作することが可能になった。

第4章では、 $\text{Fe-33.5 mass\% Cr-21.0 mass\% Ni-6.7 mass\% Al-0.3 mass\% Zr}$  の組成のステンレス鋼を用いた電気カミソリ内刃として必要な特性を付与する材料プロセスの最適化を検討した。ここで、内刃材に求められる特性は、研削バリ形成を抑制できる表面硬度 ( $H_v \geq 1000$ ) と外刃との摺動磨耗を抑制できる母材硬度 ( $H_v \geq 500$ ) である。また、電気カミソリ刃形状への冷間プレス成形が可能となる硬さ ( $H_v \leq 350$ ) が同時に必要とされる。研削バリ形成の抑制に必要な表面硬度は、合金成分である Al の大気中での高温保持による表面での選択酸化（アルミナ層形成）によって達成できることが既にわかっている。

本論文における課題は、その必要に応じた硬さ変化を同一組成の試料において連続的に達成できるプロセスを構築することである。まず、試料を種々の高温で保持後、空冷による組織と硬度変化を検討した結果、保持温度の上昇と共に硬度が上昇し、 $2\ \mu\text{m}$  程度の Ni-Al 系 B2 相粒子が消滅することがわかった。ここで、 $1523\ \text{K}$  で保持後空冷することにより外刃との摺動による磨耗が問題にならない硬度を得ることができた。また、この硬化機構を検討するためにマイクロ組織を詳細に観察した結果、 $2\ \mu\text{m}$  程度の Ni-Al 系 B2 相粒子の間にナノオーダーの2種類の微細な Ni-Al 系 B2 相粒子（ $500\ \text{nm}$  以下の微細粒子および  $10\ \text{nm}$  以下の超微細粒子）の存在が確認された。これらの微細な B2 相粒子の析出分散が硬化に寄与していると仮定し、Ansell-Lenel の理論に基づき解析した結果、その硬度の予測値は実測値と良い一致を示した。その結果、この硬化

機構は非常に微細な Ni-Al 系 B2 相粒子の析出分散に起因するものと結論できた。

それ故、刃形状へのプレス成形が可能となるまで硬度を下げるためには、この微細な Ni-Al 系 B2 相粒子の減少が有効と判断することができた。微細な B2 相粒子を減少させる方法として、固溶 Al および Ni が充分拡散、移動できる猶予時間を与えるため、高温保持からの冷却速度を小さくする方法を検討した。その結果、1373 K からの徐冷により微細な B2 相粒子が減少し、プレス成形可能な硬度まで硬度を低下できることが明らかになった。これらの成果によって、本合金での研削バリの無い鋭角刃先の内刃の達成できるプロセスを最適化することができた。

第 5 章では、本研究で得られた主要な成果と今後の展開をまとめた。

超急冷凝固法を用いた高強度材を適用する外刃の製造プロセスは現在量産技術を開発中である。また、第 4 章での成果を基に新規に開発したアルミクラッドステンレスによる鋭利内刃を搭載した電気カミソリは早剃り技術を革新することができた。最後に、本論文での成果を展開した商品は、市場で高い評価を受けている。

## 審査結果の要旨

電気剃刀の刃先は、刃の構造に起因する工法上の制約から鋭利さに欠けるので、その切断能力は不十分である。外刃への髭の導入の阻害とも合わさって、髭の剃り残しが発生し易い構造になっており、早剃りが困難である。そこで、本研究では、強度と成形性のトレードオフバランスを目指し、金属の強化理論に基づき、早剃りを達成できる電気剃刀用の刃材の作製プロセスを検討し、その最適化プロセスを提案することを目的とした。

本論文では、以下に述べるような研究成果を得ている。

- ① **Equal Cannel Angular Extrusion** を用い、マルテンサイト系ステンレス鋼の母相に格子欠陥を高密度に導入し、材料の硬度上昇に及ぼす結晶粒微細化および固溶炭素量の効果について検討した結果、フェライト相は微細化できなかったが、回復および焼入れの熱処理を施すことでマルテンサイト組織となり、目標の硬さ ( $H_v \geq 700$ ) が得られることを明らかにした。
- ② マルテンサイト系ステンレス鋼の超急冷薄帯の硬度変化に及ぼす結晶粒微細化および固溶炭素の効果について検討した結果、1323 K での焼入れ材の組織がクロム炭化物を含まないマルテンサイトと残留オーステナイトから構成されていることを示した。また、各々の粒径は旧  $\gamma$  相粒径が 10  $\mu\text{m}$ 、ブロックマルテンサイトが 2  $\mu\text{m}$ 、ラスマルテンサイトの幅が 30 nm であり、超急冷凝固直後の組織と比較して旧  $\gamma$  相粒径のみが微細化していることを明らかにした。さらに、この超急冷凝固薄帯を 973 K で焼戻し処理することで、冷間プレス成形での形状確保を達成する

ことが可能となり、冷間プレス成形に続く焼入れ処理後において、添加炭素の完全固溶による目標値以上の硬さ ( $H_v \geq 1000$ ) を達成できることを示した。

- ③ **Fe-Cr-Ni-Al-Zr** 組成のステンレス鋼を用いて内刃用プロセスの最適化を検討した結果、**1523 K** で保持後空冷することにより外刃との摺動による磨耗が問題とならない硬度 ( $H_v \geq 500$ ) が得られることを示した。また、この硬化機構が微細な Ni-Al 系 **B2** 相粒子の析出分散に起因することを明らかにした。さらに、**1373 K** からの徐冷により微細な **B2** 相粒子が減少し、プレス成形可能な硬度 ( $H_v \leq 350$ ) が得られることを明らかにした。

以上の研究成果は、高強度ステンレス鋼を適用する剃刀刃の製造プロセスを確立すると共に、早削り技術の革新を担う成果であり、材料強度に関する材料学的な本質的理解およびその高強度材料の応用に役立つ知見と考えられる。この成果は、工業的にも大いに期待できる有益な技術であり、材料技術の一層の高度化に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。