

京都大学エネルギー科学研究科 ○大塚貴之 上原拓也 井上達雄

1. 緒言

日本刀は、鋼の焼入れ時に起きる相変態の特性を最大限利用して作られる。この過程を科学的に考察するために、筆者らは、変態・熱・力学の立場から、日本刀の焼入れ過程の解析を行った^{1,2)}。焼入れ過程では材料の成分が温度変化、組織、応力などに影響を及ぼす。また、日本刀の焼入れ過程は熱処理の典型的な例である。したがって、焼入れ過程の解析では以上の相互作用を考慮した解析が特に有効である。そこで本研究では、材料学会塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会が新たに構築した“熱処理シミュレーションのための材料データベース”^{3,4)}を用いて、日本刀の焼入れ過程についてシミュレーションを行い、焼入れ後の組織、残留応力に及ぼす材料成分の影響を考察した。

2. 日本刀の焼入れ解析

2・1 対象モデル 解析対象とした短刀の形状と寸法を Fig.1 に示す。ただし、形状の対称性を考慮して、全体の半分のみを対象とする。解析には SFTC 社の DEFORM-HTTM を用い、8 節点 6 面体要素の 3 次元解析を行う。モデルの全節点数は 3008 で、全要素数は 2085 である。

2・2 解析条件 S20C, S45C, S58C, SK6, 0.8%C の 5 種類の鋼種を用い、800℃ で一様にオーステナイト化された初期状態から、40℃ の水中に対象物を投入するという条件を設定する。それぞれの材料の化学成分を Table I に示す。

熱伝達係数については、実際には焼刃土の厚さを変化させることによって制御している。したがって、本研究では実際に刀鍛冶が設定した値（刃先部分；0.2-0.3mm、棟部分；1.0-1.5mm）を用いる。また、焼刃土の厚さと熱伝達係数との関係は実測値^{1,2)}を入力データとする。

3. 解析結果

各鋼種について、焼入れ終了時におけるマルテンサイトの体積分率を Fig.2 に示す。また、S20C について、

長手方向の応力の時間変化を Fig.3 に、各鋼種について、残留応力を Fig.4 にそれぞれ示す。

Fig.2 から、材料成分がマルテンサイトの生成量に与える影響が大きいことがわかる。

理想臨界直径⁵⁾ (ideal critical diameter) は炭素と結晶粒径からなる $D_{I\text{ base}}$ と各材料からなる焼入れ性倍率 f との積で表される。つまり、 D_I は以下の式で表される。

$$D_I = D_{I\text{ base}} \cdot f_{Mn} \cdot f_{Si} \cdot f_{Cr} \cdot f_{Mo} \cdot f_V \cdot f_{Cu} \quad (1)$$

各鋼種について、式(1)を用いて理想臨界直径を求めると、S20C； $D_I=21.8$ 、S45C； $D_I=27.2$ 、S58C； $D_I=29.7$ 、SK6； $D_I=22.5$ 、0.8%C； $D_I=28.9$ となり、Fig.2 で与えられるマルテンサイト分布と定性的傾向がほぼ一致する。

S20C 材の短刀の長手方向の応力の変化を表す Fig.3 から、まず刃先側は熱収縮によって引張応力が生じ、その後、マルテンサイト変態に伴う膨張によって、刃先側の引張応力が緩和され、逆に圧縮応力へと変化し、

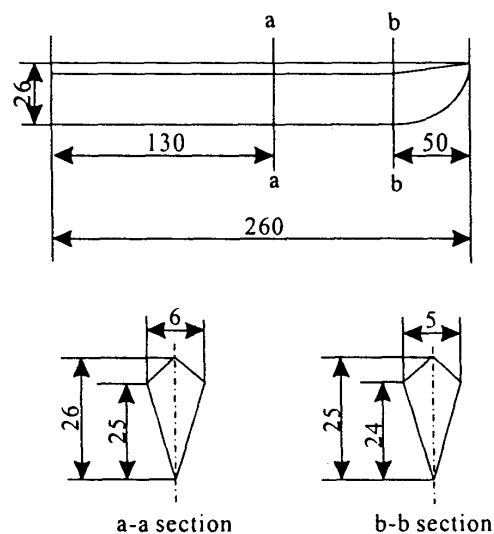


Fig.1. Shape and dimension of the Japanese sword.

Table I. Chemical components of each material.

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Ti	Sn	As	Cu
S20C	0.17	—	0.92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S45C	0.44	0.22	0.66	0.02	0.03	—	0.15	—	0.02	—	—	—	—	—
S58C	0.63	—	0.87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SK6	0.76	0.22	0.29	0.01	0.01	0.07	0.11	0.02	0.02	—	—	—	—	0.17
0.8%C	0.79	—	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

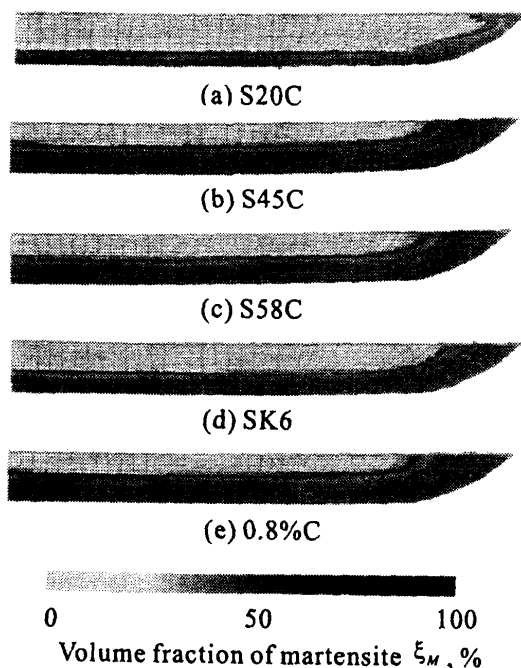


Fig.2. Volume fraction of martensite of each material.

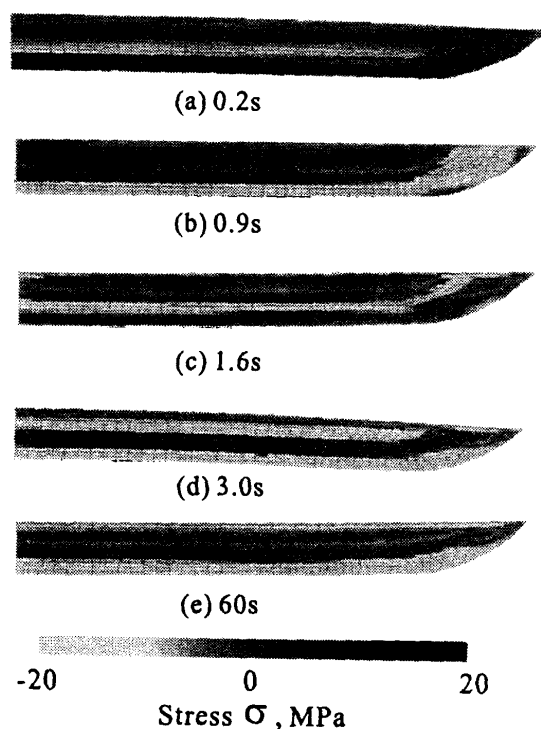


Fig.3. Variation of stress of S20C.

同時に棟側には引張応力が生じる。その後、パーライト変態に伴う膨張と共に棟側に圧縮応力が生じる。その後、棟側は熱収縮によって圧縮応力が緩和される。最終的には、棟側は引張り、刃先側は圧縮の応力が残留する。また、Fig.2, Fig.4 から、生成されたマルテンサイトの量、分布が残留応力と密接に関係していることがわかる。マルテンサイトの生成量が微量である S20C は、マルテンサイト生成部とパーライト生成部との境界に大きな圧縮応力が残留している。一方、0.8%C

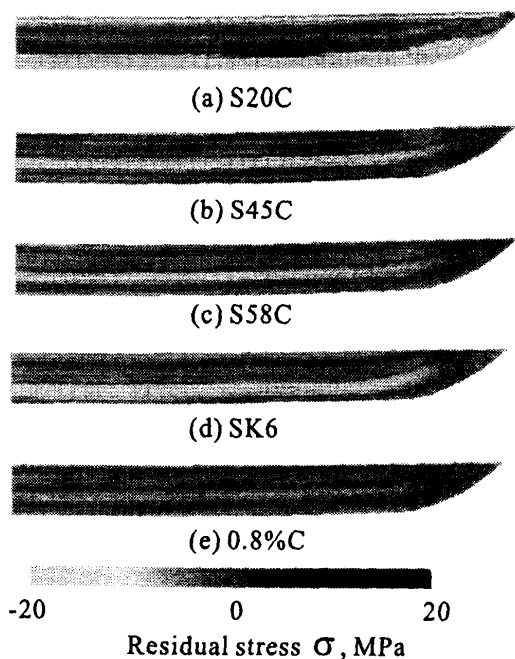


Fig.4. Residual stress distribution of each material.

などのマルテンサイトが多く生成された鋼材については、刃先側に引張応力が残留している。

また、Fig.2, Fig.4 から、鋼種の違いが最終的な短刀の反りに変化を与えることがわかる。

以上から、焼入れ終了時における、マルテンサイトの体積分率と残留応力、反りとは互いに密接な関係があることがわかる。

4. 結言

以上の結果から、それぞれの鋼材の含有元素量から算出される理想臨界直径、焼入れ後のマルテンサイトの体積分率、残留応力には以下の定性的傾向があることがわかった。つまり、理想臨界直径が大きくなるにしたがい、焼入れ後のマルテンサイトの体積分率は大きくなり、パーライト生成部とマルテンサイト生成部との境界付近に生じる引張りの残留応力は逆に小さくなる。

終わりに、熱処理シミュレーションコード DRFORM-HT™ の便宜を与えて頂いた SFTC 社の Dr. W. T. Wu に深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 上原, 井上, 材料, 44, 309 (1995)
- 2) T. Inoue, 20th ASM Heat Treating Conference Proceedings, 761 (2000)
- 3) T. Inoue and K. Okamura, 20th ASM Heat Treating Conference Proceedings, 753 (2000)
- 4) 材料学会塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会, 材料, (投稿中)
- 5) G.E. Totten, C.E. Bates and N.A. Clinton, Quenchants and Quenching Technology, ASM International, (1993)