

## 低温焼戻しされた炭素鋼マルテンサイトにおける固 溶炭素の挙動に関する研究

浦中, 祥平

<https://hdl.handle.net/2324/6787556>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 浦中 祥平

論 文 名 : 低温焼戻しされた炭素鋼マルテンサイトにおける  
固溶炭素の挙動に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

焼入れしたマルテンサイト鋼に施される焼戻しのうち、473 K 以下で施される低温焼戻しは、鋼の強度の低下を抑えつつ延性・靱性を向上させることができるため、高強度・耐摩耗性が必要とされるシャフトや工具等の機械構造用鋼に古くから適用されてきた熱処理である。しかし、低温焼戻しにおいては焼入時に導入された高密度の転位や微細な下部組織が残存しているため、機械的性質に及ぼす組織的因子の評価は容易ではない。また、マルテンサイト鋼の機械的性質には固溶炭素量が大きく影響することが知られているが、マルテンサイト鋼における炭素は、八面体空隙に過飽和に固溶した炭素以外にも、転位や粒界に偏析した炭素や、炭化物として析出した炭素等、様々な状態で存在しており、それらを区別することが困難であることから固溶炭素量と機械的性質の関係について定量的な調査がなされた例は少ない。さらに近年では、一般的な低炭素鋼においてもマルテンサイトラス界面にフィルム状の残留オーステナイトが存在することが知られており、残留オーステナイトが存在する場合には焼戻しに伴いマルテンサイトから残留オーステナイトへの炭素分配が生じる可能性もある。この場合、炭化物の析出量だけではなくマルテンサイト中の固溶炭素量の変化にも影響が現れると考えられるが、低温焼戻しにおける残留オーステナイトの影響を調査した例はほとんどない。本論文では、マルテンサイト中の固溶炭素の定量評価手法を開発し、これを適用することでマルテンサイト鋼の硬さに及ぼす固溶炭素量の影響について明らかにした。さらに、残留オーステナイトが低温焼戻し時の固溶炭素の挙動に及ぼす影響についても調査を行い、低温焼戻しされたマルテンサイト鋼の延性・靱性に及ぼす固溶炭素量の影響について明らかにした。

第1章では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、添加炭素量を 0~0.6% まで変化させた Fe-2%Mn-0.5%Si-C 合金を用いて、マルテンサイト鋼の比抵抗に及ぼす固溶炭素の影響について調査した。添加炭素量の増加に伴ってマルテンサイト鋼の比抵抗は上昇するが、この比抵抗の上昇には固溶炭素以外にも転位、大角粒界、残留オーステナイト等が影響する。そこで、添加炭素量の変化による固溶炭素以外の影響を分離評価して実測値から差し引くことで、マルテンサイト鋼の比抵抗に及ぼす固溶炭素の影響を定式化した。固溶炭素がマルテンサイト鋼の比抵抗に及ぼす影響は、転位や大角粒界等の格子欠陥の影響と比較して著しく大きいことが明らかとなった。また、添加炭素量を 0~0.9% まで変化させた Fe-2%Mn-0.5%Si-10%Ni-C 合金を用いて、残留オーステナイトの比抵抗に及ぼす固溶炭素の影響についても調査した。比抵抗の複相モデルを適用することで実測比抵抗から残留オーステナイトの比抵抗を分離評価し、固溶炭素が残留オーステナイトの比抵抗に及ぼす影響を定式化した。そのようにして得られたマルテンサイトおよび残留オーステナイトの比抵抗に及ぼす固溶炭素の影響の式を利用することで、低温焼戻しに伴う固溶炭素量変化の挙動を、連続的に高い精度で捉えることが可

能になった。

第3章では、添加炭素量を0.3~0.6%まで変化させたFe-2%Mn-0.5%Si-C合金を用いて、第2章で定式化したマルテンサイト中の固溶炭素量と比抵抗の関係式を適用することで、マルテンサイト鋼における固溶炭素が硬さに及ぼす影響について調査した。添加炭素量の減少に伴って自己焼戻しによる炭化物析出量は増加し、結果的に焼入材における添加炭素量に対する固溶炭素量の割合は低下することが明らかとなった。転位強化、結晶粒微細化強化、析出強化、残留オーステナイトによる軟化といった他の硬化因子を差し引くことで、焼入材および焼戻材の炭素による固溶強化量を見積もり、固溶炭素量と硬さとの関係を定式化した。回復による転位密度の低下がほとんど生じない673 K以下での焼戻しでは、硬さ変化が添加炭素量にかかわらず固溶炭素量によってほぼ説明でき、他の硬化因子の影響は比較的小さいことが明らかとなった。

第4章では、Fe-2%Mn-0.5%Si-0.3%C合金およびFe-2%Mn-0.5%Si-10%Ni-0.3%C合金を用いて、炭素鋼マルテンサイトの低温焼戻しに伴う組織および硬さの変化に及ぼす残留オーステナイトの影響について調査した。残留オーステナイトは低温焼戻しにおけるマルテンサイト中の準安定炭化物析出を抑制することが明らかとなった。また、残留オーステナイトはマルテンサイト中の固溶炭素の有効な吸収サイトとして作用することで、低温焼戻しに伴う固溶炭素量の減少速度を加速させ、軟化を促進させることが明らかとなった。一方、低温焼戻しにおいては残留オーステナイト中の炭素の拡散速度が遅く、残留オーステナイト中に分配した炭素は(マルテンサイト/オーステナイト)界面に偏在していることを明らかにした。

第5章では、第4章で使用した二合金を用いて、炭素鋼マルテンサイトの低温焼戻しに伴う機械的性質の変化を調査した。473 K以上での焼戻しでは棒状セメンタイトの析出に起因した低温焼戻脆化が発現するが、残留オーステナイトが存在する場合には焼戻しに伴うセメンタイト析出量が減少することで脆化が抑制された。また、セメンタイトが析出しない373 Kでの焼戻しでは、固溶炭素量の低下に伴う強度の低下が延性・韌性に大きく影響し、残留オーステナイトの存在によって焼戻しに伴う固溶炭素量の減少速度が大きい場合には、焼戻しを施すことで優れた延性・韌性が得られることが明らかとなった。

最後に、第6章で各章の研究成果を総括した。

〔作成要領〕

1. 用紙はA4判上質紙を使用すること。
2. 原則として、文字サイズ10.5ポイントとする。
3. 左右2センチ，上下2.5センチ程度をあげ，ページ数は記入しないこと。
4. 要旨は2,000字程度にまとめること。  
(英文の場合は，2ページ以内にまとめること。)
5. 図表・図式等は随意に使用のこと。
6. ワードプロ浄書すること（手書きする場合は楷書体）。  
この様式で提出された書類は，「九州大学博士学位論文内容の要旨及び審査結果の要旨」  
の原稿として写真印刷するので，鮮明な原稿をクリップ止めで提出すること。