

## 審査の結果の要旨

氏名 山本研一

循環型社会の確立に向けて、スクラップ利用促進によるトランプ元素の蓄積がもたらす鋼の品質低下が懸念されており、その抑制技術の開発は重要な課題である。本論文は、鋼中トランプ元素の代表である Cu が引き起こす赤熱脆性の抑制を念頭に、MnS 介在物を利用した不均質核生成による Cu の無害化について取り組まれた研究であり、全 7 章からなる。

第 1 章では、省エネルギー、省資源、CO<sub>2</sub> 排出抑制の観点からスクラップリサイクルの重要性とそれにより引き起こされるトランプ元素濃化の問題点とともに、本研究の目的として、鋼中非金属介在物 MnS を用いた不均質核生成による Cu の無害化に取り組むことが述べられ、概要が示されている。

第 2 章では、高温酸化雰囲気中で液体 Cu が生成し熱間脆性が発現する現象を、Fe-液体 Cu 共存領域で模擬できるものとして、Cu の析出挙動に及ぼす MnS 介在物の影響が調査された。Fe-10mass%Cu 系合金への Mn および S の添加により、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介在物を析出核としていた Cu が MnS 介在物と複合して析出することが、共焦点走査型レーザー顕微鏡によるその場観察で確認された。これは、別途測定した固体 MnS-液体 Cu の濡れ角を用いて推算された不均質核生成頻度から説明される。また、等温保持することで連続冷却よりも、Cu が約 90 K 高温側から析出することが明らかにされている。

第 3 章では、合金中 Cu 濃度をトランプ元素レベルにした高 Sn 濃度の Fe-C-Sn 鋼をベースに、Sn および Cu の高温析出挙動が検討されている。0.3mass%Sn 鋼においても MnS 介在物により、析出物の個数密度がより高温で増加することが明らかにされ、本組成の鋼においては効果が小さくなるものの、MnS 介在物による不均質核生成の促進が認められた。

第 4 章では、Fe-10mass%Cu-0.5mass%Sn 系合金における MnS 介在物の影響が検討された。得られた計算状態図から、0.5mass%Sn の存在で Fe-Cu 擬 2 元系における液相領域の拡大が示され、Cu の熱間脆性の悪化が確認された。また、MnS 介在物の存在により、より高温で析出物の個数密度が増加することが明らかにされた。第 2 章で見られた Fe-Cu 2 元系での高温析出挙動よりも Cu

の析出は抑制され、析出温度も低下したが、0.5mass%Sn の存在下での MnS 介在物による Cu の不均質核生成促進効果は確認された。

第 5 章では、MnS 介在物自体が鋼の材質特性に及ぼす影響について、特に自動車車体に適用される高強度鋼板で重要な穴抜け性（局部延性）に及ぼす影響について検討を行っている。鋼中 S 濃度が 60ppm を超えると、アスペクト比が 10 以上、長さ  $20\mu\text{m}$  程度に伸長した MnS 介在物が観察され、このように伸長した MnS 介在物が多くある場合には、ない場合に較べて引張試験片の破断部近傍のボイドの生成量が大きく、絞り値(局部延性)に与える影響が大きいことが明らかにされた。 $5\mu\text{m}$  を超える伸長した MnS 介在物が及ぼす絞り値への影響は  $4\mu\text{m}$  以下の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介在物が及ぼす影響よりも大きいことが分かった。このことから、MnS 介在物を Cu の析出核として利用する場合、 $5\mu\text{m}$  を超えない微細な析出物とする必要があることが示された。

第 6 章では、Cu による熱間脆性が鋳片表面の現象であることから、表層に Ni を添加する鋼の表面改質新プロセスを提案するとともに、第 5 章までに得られた好ましい形態の MnS 介在物を用いた Cu の不均質核生成と表面改質新プロセスと組み合わせる手法について検討が行われている。DC プラズマアークに交流磁場を付与して大面積を連続的に溶融して、Ni を表層部にのみ添加した鋳片に熱間圧延を施したところ、熱間脆性の抑制が認められた。熱延後の 1.0%Cu 含有鋼の表層に 0.65%Ni 含有処理層厚みが  $80\mu\text{m}$  存在することで熱間脆性は抑制され、その処理層中に存在する MnS 介在物により、熱間脆性がさらに抑制されることから、MnS 介在物の利用は Ni による Cu 固溶限拡大抑制技術と並行して行えることが示された。鋳片表層のみへの Ni 添加と MnS 介在物による脆化抑制で、Ni 使用量削減の可能性が見出された。

第 7 章は総括である。

以上のように、本論文では、鋼中非金属介在物である MnS を利用した Cu の析出制御の可能性が示されるとともに、表層溶融 Ni 添加技術および同プロセスでの MnS 介在物による熱間脆性の抑制効果が明らかにされている。これらの知見はスクラップ中に蓄積するトランプエレメント Cu の無害化技術に対して極めて重要な指針を与え、新たな材料組織制御プロセス開発という点で材料工学分野における貢献も大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。