The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	低炭素鋼低酸素溶接金属の粒内変態に関する研究
Author(s)	本間, 竜一
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/88050
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（本間　竜一　）	
論文題名	低炭素鋼低酸素溶接金属の粒内変態に関する研究

論文内容の要旨

本研究では，電子ビーム溶接による低炭素鋼の低O溶接金属が高靭性を得るための粒内フェライト生成を対象として，粒内フェライト生成に対する添加元素の影響を系統的に調査し，有効な酸化物の形成挙動とその酸化物を変態核とした粒内フェライト生成機構の解明，すなわち，粒内フェライト生成機構を明確にすることにより，溶接金属の粒内フェライトの生成を最大化し，高靭化のための微細な金属組織を得るための合理的な成分設計指針を得ることを主たる目的とした．そこで本研究では，Si，S，Ti，Alといった主要な添加元素が低O溶接金属の粒内フェライト生成に及ぼす影響を系統的に調査している．次に，これらの影響を理解した上で，酸化物にMnSが生成して複合酸化物となる場合と酸化物にMnSが生成しない酸化物単体となる場合とに分類し，粒内フェライトの生成機構について検討している．さらに，粒内フェライト生成促進に影響が極めて大きいTiについては高温状態を急冷凍結することにより，溶接金属の凝固直後からフェライト変態温度付近までのTi酸化物の状態変化を明らかにすることで，従来の研究手法では不明であった酸化物形成挙動と粒内フェライト生成機構との関係について検討を行った．本論文は以下の７章により構成される．

第１章は緒論であり，研究背景とその問題点，および本研究の必要性ならびに目的について述べた．

第２章では，低炭素鋼の低O溶接金属の粒内フェライト生成に関する研究の現状を述べ，その問題点を指摘するとともに，本研究の着眼点を明確にした．

第３章では，低O溶接金属の粒内フェライト生成ならびに溶接金属中の酸化物の変化に及ぼすSi，S，Ti，Alの影響ついて検討した．最も粒内フェライト面積率が高いのはSi，S，Tiを同時に添加した溶接金属であり，Si，S，Tiは粒内フェライト生成の促進に対して加算的な効果あるいは相乗的な効果を有することが示唆された．低O溶接金属の粒内フェライトの生成に対しては，酸化物の化学組成の影響が相対的に大きく，特にSi-Mn酸化物やSi-Mn-Ti酸化物とMnSの複合酸化物が粒内フェライトの生成に有効に作用すると考えられた．

第４章では，酸化物にMnSが生成する場合の粒内フェライト生成機構に及ぼす酸化物とMnSの複合酸化物の影響を調査している．SiとSを添加した溶接金属においては，非晶質のSi-Mn酸化物とMnSの複合酸化物の周囲で最大0.6%程度のMDZが確認された．このことから，MDZの形成に伴い酸化物周囲の変態点が上昇したことが主な粒内フェライト生成機構と考えられた．Si添加はMDZ形成の効果を高めると考えられた．S添加は複合酸化物の粗大化や複合酸化物数の増加を通じて核生成サイトを増加させる効果があると考えられた．

第５章では，酸化物単独で粒内フェライト変態核となる場合において，酸化物からの粒内フェライト生成について調査している．Si-Mn添加鋼にTiを添加すると，溶接金属の粒内フェライト面積率が上昇し，Alを添加すると粒内フェライト面積率が大幅に低下した．非晶質Si-Mn酸化物，$(Ti,Mn)_2O_3$を主体とする複合酸化物と母相との界面の母相側にはそれぞれ明瞭なMDZが観察され，Al_2O_3と母相との界面の母相側にはMDZの形成が認められなかった．各鋼の溶接金属中の酸化物周囲で形成するMDZの差に起因した粒内フェライト生成能の違いが粒内フェライト面積率に影響したと考えられた．

第６章では，低O溶接金属中の酸化物を核とした粒内フェライト生成促進の機構であるMDZの形成について，溶接時の高温状態を急冷凍結し，低O溶接金属中の酸化物の構造および酸化物／母相界面のMn濃度分布を調査している．加えて，熱力学計算により冷却中の酸化物の挙動を明らかにし，拡散計算結果を援用して，酸化物形成挙動とMDZ形成機構を検討した．その結果，複合酸化物を構成する$(Ti,Mn)_3O_5$，$(Ti,Mn)_2O_3$，Slag（液相酸化物：Si，Mn，Ti，Sを含有）の平衡Mn濃度が冷却過程で増加すること，かつ，熱力学的に安定な相が平衡Mn濃度の低い$(Ti,Mn)_3O_5$ から平衡Mn濃度の高い$(Ti,Mn)_2O_3$に変化することにより，これを駆動力として母相から酸化物へMnの拡散が生じることにより，複合酸化物の周囲全体にMDZが形成されると考えられた．

第７章では，本研究で得られた結果を総括した．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　本間　竜一　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	井上　裕滋
	副 査	教授	才田　一幸
	副 査	教授	伊藤　和博
	副 査	准教授	門井　浩太

論文審査の結果の要旨

本論文は、高強度厚鋼板の高効率溶接技術に対する開発ニーズが高まっていることを背景として、深い溶け込みが得られる高エネルギー密度溶接の中でも代表的な電子ビーム溶接に着目し、その溶接金属特性の課題である低靭性を克服するために溶接金属組織の細粒化機構を検討したものである。従来から、鋼溶接金属の細粒化には、粒内フェライトの活用が有効であり、また、粒内フェライトの生成には変態核としての酸化物の存在が重要であることが知られている。しかしながら、電子ビーム溶接は真空中で行われるため，溶接金属中の酸素濃度は極めて低く、酸化物を核とした粒内フェライトの生成は困難となる。そこで、本論文では、電子ビーム溶接による低炭素鋼低酸素溶接金属の粒内フェライト生成を対象として、粒内フェライト生成に及ぼす添加元素の影響を調査するとともに、粒内フェライト生成に有効な酸化物の形成挙動、および、その酸化物と母相界面の性状を詳細に調査することにより、低酸素下において酸化物を変態核とする粒内フェライトの生成機構を明らかにしたものである。本論文で得られた結果は以下の通りである。

(1) Si、S、Ti の添加により粒内フェライトは増加し、これらの元素を同時添加した場合に粒内フェライトは最も増加する。粒内フェライトの生成は、酸化物の化学組成に大きく影響を受け、Si 濃度の高い Si-Mn 酸化物、Si-Mn-Ti 酸化物およびこれら酸化物と MnS の複合酸化物が粒内フェライトの生成に有効であることを明らかにしている。

(2) Si-Mn 酸化物と MnS の複合酸化物の周囲では明瞭な Mn 欠乏層（MDZ）が確認され、MDZ の形成に伴い酸化物周囲の変態点が上昇したことにより粒内フェライトが生成する。また、Si 添加は、サルファイドキャパシティの高い SiO_2 濃度を増加させることにより、MnS の生成量を増加させ、それにより、MDZ の形成効率を高めて、粒内フェライト生成を促進することを明らかにしている。

(3) Ti を添加した場合の粒内フェライトの核となる酸化物は、$(Ti,Mn)_2O_3$ を主体として非晶質 Si-Mn 酸化物、非晶質 Si 酸化物、MnS、$(Ti,Mn)_3O_5$ のいずれか複数が生成した複合酸化物であり、これら複合酸化物と母相との界面の母相側には、明瞭な MDZ が形成され、これにより粒内フェライトの生成が促進することを明らかにしている。

(4) Ti 添加鋼溶接金属の急冷凍結実験により酸化物の冷却中の構造変化を精細に調査し、固相線直下の 1720 K では $(Ti,Mn)_3O_5$、$(Ti,Mn)_2O_3$、Slag の複合酸化物、フェライト変態前の 1275 K では $(Ti,Mn)_2O_3$、MnS，非晶質 Si 酸化物の複合酸化物が存在するとともに、冷却に伴い MDZ の幅が大幅に拡大することを明らかにしている。

(5) 複合酸化物を構成する各酸化物相の平衡 Mn 濃度が冷却過程で増加すること、かつ、熱力学的に安定な相が平衡 Mn 濃度の高い相に変化することにより、これを駆動力として母相から酸化物へ Mn の拡散が生じ、複合酸化物の周囲全体に MDZ が形成されることを明らかにしている。

以上のように、本論文は鉄鋼材料の低酸素溶接金属における靭性向上に資する粒内フェライト生成機構に関し、新たな極めて有用な知見を多く含んでおり，金属組織微細化のための合理的な成分設計指針を提示するとともに、今後の新しい鉄鋼材料および溶接技術の開発に大きく寄与できることが期待できる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。