

学 位 論 文 要 旨

題名

溶接構造用炭素鋼の機械的特性に及ぼす炭素の存在状態
の影響に関する研究

Title

Study on the effect of states of carbon on mechanical
properties in carbon steels for welded structure use

金沢大学大学院 自然科学研究科
機械科学 専攻
次世代鉄鋼総合科学 講座

吉村 信幸

Synopsis :

Carbon steels applied to welded structures such as shipbuilding, offshore structures and line pipes requires to satisfy not only high strength, but also toughness, ductility and fatigue property. As the required strength levels in various markets have increased in recent years, it is essential to understand the relationship between mechanical properties and microstructures such as bainite and martensite.

In this study, we firstly verified the fracture mechanism of tempered upper bainitic steel, and confirmed that the C-enriched area near the prior austenite (γ) grain boundaries was the initiation site of brittle fracture.

Then, toughness, ductility, and fatigue characteristics were systematically evaluated using a ferritic steel containing 0.017mass% C, wherein the state of C was changed to a solid solution, transgranular cementite, and intergranular cementite. In intergranular cementite steel with significantly inferior toughness, the coarse intergranular cementite lead to dislocation pile-up, initial crack formation, and macroscopic brittle fracture. It is inferred that the fine transgranular cementite had a minor effect on the crack initiation and dislocation mobility. On the other hand, the toughness of solute C steel was slightly deteriorated, which is assumed to be caused by the decrease in dislocation mobility.

The tensile test results of solute C steel showed remarkable work hardening and inferior post-uniform elongation, which are caused by the occurrence of dynamic strain aging. The steel with fine transgranular cementites exhibited excellent post-uniform elongation. The steel with coarse intergranular cementite lead to impair post-uniform elongation presumably owing to the void formation in the cementite/matrix interface or the fracture of cementite.

The fatigue limit ratio (fatigue strength/ultimate tensile strength) under the constant stress amplitude conditions was the highest for the solute C steel, followed by the transgranular cementite and intergranular cementite steels. The solute C steel exhibited a prominent vein dislocation structure and the highest dislocation density, whereas the transgranular cementite and intergranular cementite steels showed tangled and cellular dislocation structures, respectively.

The results obtained in this basic study are expected to contribute to the guiding principle for microstructure control for high-strength steels.

船舶や建築物、橋梁、ラインパイプ、タンク、海洋構造物等の溶接構造物に適用される溶接構造用炭素鋼には、強度に加えて優れた低温靱性が求められる。さらに近年、施工効率や運用効率の向上を目的とした構造物の大型化に伴い、鋼材にはよりいっそう高い強度が求められる傾向にある。一般的に強度と低温靱性は相反する特性であるため、これらを両立させることは容易ではなく、より高度な金属組織の制御技術が課題である。すなわち、ベイナイトやマルテンサイト組織などの高強度組織について、低温靱性に関わる組織因子と、その制御指針を深く理解することが求められる。なお、溶接構造用炭素鋼の適用分野によっては、延性や疲労特性が要求される場合もあるため、これらの機械的特性に関する制御指針を得ることも課題である。

上部ベイナイトやマルテンサイト組織鋼の脆性破壊メカニズムについては、従来から数多くの研究がある。具体的には、ほぼ結晶方位の同じベイニティックフェライトやマルテンサイトラスの集団で構成される有効結晶粒径により靱性が整理できること、さらには基地よりも硬質な MA (Martensite-Austenite Constituent) やセメンタイトを包含する疑似パーライト等の脆化組織がき裂発生の起点となることが判明している。特に上部ベイナイト組織鋼は、有効結晶粒径が粗大化しやすく、さらにベイニティックフェライトのラス間で粗大な MA が形成するため、フェライト/セメンタイト組織鋼やマルテンサイト組織鋼と比較し、靱性確保が困難であることが知られている。これらの靱性メカニズムは、定性的にはフェライト/セメンタイト鋼の靱性メカニズムの知見と一致するものであり、またその延長線上のものである。一方で、上部ベイナイトやマルテンサイト組織固有のマイクロ組織因子が靱性に及ぼす影響に関しては、必ずしも明らかとなっていない。すなわち、ベイニティックフェライトのラス内および界面上に形成する炭化物の形態やサイズ、基地中に残存する固溶 C、変態時に導入される転位やラス境界などについて、それぞれの組織因子が靱性に及ぼす影響は議論の余地が残されている。この原因は、複雑なマイクロ組織を持つ鋼においては、特定の組織因子による効果を定量化することが困難であるためである。

そこで本研究では、ベイナイトやマルテンサイト組織から成る鋼の脆性破壊メカニズムを解明すること、および強度と靱性を大きく変化させる C の存在状態を制御したフェライト鋼を用いて機械的特性向上のための C の制御指針を得ることを目的とした。まず、脆性破壊メカニズムの解明については、上部ベイナイト組織やマルテンサイト組織とした 0.2C-2.0Mn-1.5Ni-0.0010B 鋼で、マイクロ組織の解析を行うとともに、強度靱性バランスを評価した。さらに、実用鋼で生成しやすい焼戻し上部ベイナイト組織鋼の脆性破壊

メカニズムを把握するために、破壊起点部の脆化組織を調査した。つづいて、高強度組織鋼の脆化組織と機械的特性との関係を基礎的に理解し、さらなる高機能化の基本指針を得るために、モデル鋼を用いた検討を行った。すなわち、フェライト単相組織鋼を用いて、靱性に及ぼす C の存在状態のみを変化させ評価した。供試鋼は、700℃でのフェライト単相域で固溶可能な 0.017%の C を含む鋼を出発材にして、熱処理により C の存在状態を固溶、粒内析出、粒界析出と変化させることとした。この供試鋼を用いて、強度、靱性を評価するとともに、その脆性破壊メカニズムを解明するために破断サンプルの解析を試みた。さらに、同じ供試鋼を用いて、延性、疲労特性を評価するとともに、転位下部組織の形成や破断挙動に及ぼす C の存在状態の影響を考察した。

本論文は以下の 6 章から構成される。

第 1 章

溶接構造用炭素鋼の適用分野、要求特性、製造方法などを概説した。さらに、要求される機械的特性を達成するためのマイクロ組織制御とマイクロ組織中の C の役割、特にその存在状態の影響について従来知見をまとめた。そして、溶接構造用炭素鋼の高強度化を実現する組織制御指針の構築に向けた本研究の目的を述べた。

第 2 章

上部ベイナイトやマルテンサイトなどの高強度組織を有する 0.2C-2.0Mn-1.5Ni-0.0010B 鋼について、結晶粒径や脆化相の質を変化させて強度靱性バランスを評価するとともに、脆性破壊メカニズムを解明することを目的とした。強度靱性バランスは、焼入れ焼戻し条件によって大きく変化し、焼戻しマルテンサイト鋼が最も優れ、つづいて焼戻し上部ベイナイト鋼、上部ベイナイト鋼の順であった。この強度靱性バランスの変化は、有効結晶粒径のみでは整理できず、むしろ破壊発生起点となる脆化組織がより重要な因子である可能性が示唆された。最も強度靱性バランスが劣位である上部ベイナイト組織鋼では、MA が破壊発生起点となることが従来知見において報告されている。一方で、MA が分解される焼戻し上部ベイナイト組織鋼の破壊発生起点については従来知見が乏しいため、脆性破壊起点の特定を試みることにした。き裂発生起点断面の EPMA および EBSD 解析の結果、起点直下には旧 γ 粒界に隣接する焼戻しを受け分解した MA が存在することを確認した。このことから、焼戻し上部ベイナイト鋼においても、フェライト/セメンタイト鋼と同様に、特定の有効結晶粒界近傍のセメンタイトを内包する組

織が、初期き裂発生起点として働き、マクロな破壊につながる可能性がある」と推測した。

第3章

第2章で確認したようにCが濃化した脆化組織では、焼入れ焼戻し条件によってCの存在状態が変化し、それに伴い靱性も大きく変化する。高強度組織鋼の組織制御指針を構築するために、靱性に及ぼすCの存在状態の影響について基礎的に調査した。0.017mass%のCを含むフェライト鋼に種々の熱処理を付与し、Cの存在状態を固溶、粒内析出セメンタイト、粒界析出セメンタイトと変化させた。これらの鋼種の靱性を評価した結果、Cを粒内セメンタイトとして析出させた鋼で最も優れ、つづいて固溶の状態、粒界セメンタイトの状態の順となる傾向を確認した。靱性が著しく劣位である粒界析出の場合は、へき開破壊の起点は粒界セメンタイトであると推定され、粒界セメンタイトの周辺で転位のピルアップによる応力集中に起因しクラックが生じる可能性をSEM, TEM観察により確認した。一方、靱性が最も良好であった粒内セメンタイトの場合は、へき開破壊起点は、変形双晶に起因する延性破面領域であり、微細な粒内セメンタイトや微細な粒界セメンタイトは脆性破壊の起点になりにくいと考えられる。Cが固溶状態の場合、約0.002%までは粒界強化により靱性を向上させるが、それ以上は靱性をやや低下させる傾向である。これは固溶Cの存在により転位の易動度が低下し双晶の発生が助長された結果、変形双晶起因のへき開破壊が生じ易くなったためと推論した。

第4章

第3章と同一の鋼種を用いて、延性に及ぼすCの存在状態の影響と、塑性変形に伴う転位下部組織の形成挙動について調査することを目的とした。固溶Cを含む鋼種では、加工硬化が顕著に生じ強度と一様伸びのバランスに優れるが、局部伸びが著しく低下する。これらは、固溶Cによって生じる動的ひずみ時効による転位密度の増加とくびれの促進に起因すると考えられる。また、粒界セメンタイトを含む場合は局部伸びを低下させるが、粒内セメンタイトは均一伸びがやや低下するものの局部伸びは向上することを確認した。これらは、ボイドの形成及び合体の観点で、約1 μm 未満の微細粒内セメンタイトは無害であるが、2 μm を超える粗大セメンタイトは有害となるためと考えられる。引張ひずみ量の増加に伴う転位密度の増加、すなわち加工硬化は、固溶Cを含む鋼種で顕著であり、これは動的ひずみ時効により刃状転位の易動度が低下することに起因すると考えられる。固溶C鋼は、転位セル構造の形成を遅らせる傾向があり、粒内がほ

ば純鉄でセル化が進行しやすい粒界セメンタイト鋼とは対照的な転位下部組織を発達させることを X 線回折と TEM 観察により確認した。

第 5 章

第 3 章、第 4 章と同一の鋼種を用いて、疲労特性に及ぼす C の存在状態の影響、および疲労試験中の転位下部組織の発達について調査することを目的とした。疲労試験の結果、固溶 C 鋼で疲労限度比（疲労強度/引張強度）が最も高く、つづいて粒内セメンタイト鋼、粒界セメンタイト鋼の順に高いことを確認した。疲労限近くの転位下部組織は、固溶 C 鋼においては顕著なベイン構造を示した。一方、粒内セメンタイト鋼では粒内セメンタイトに転位がタングルした転位構造を、また粒界セメンタイト鋼の粒内では明瞭なセル構造を確認した。これらの転位下部組織を構成する転位の性格を X 線ラインプロファイル解析により明らかとした。固溶 C 鋼のベイン構造は刃状転位が主体であるのに対し、粒界セメンタイト鋼のセル構造は主にらせん転位が主体であることが明らかとなった。

第 6 章

得られた知見について総括した。本研究では、溶接構造用炭素鋼における更なる高強度化に向けた組織制御指針の構築を目的として、主に C の存在状態を固溶あるいは異なる形態をもつ析出物に制御し、基礎的な研究を行った。具体的には、低温靱性、延性、疲労特性に及ぼす固溶 C、粒内セメンタイト、粒界セメンタイトの影響をフェライト組織鋼で評価し、機械的特性の発現機構を考察した。その結果、高強度鋼の C の存在状態を制御する基本指針として、系統的かつ基盤的な知見が得られた。一方で、実際の高強度組織においては、C の量や存在状態はさらに多様であり、さらにはベイナイト鋼やマルテンサイト鋼における階層組織や変態転位の影響についても考慮する必要がある。今回得られた知見や検討手法を発展させることで、今後の組織制御指針の構築が進むことが期待される。また、今回のようにシンプルなマイクロ組織での評価について、シミュレーション解析などを適用することで、物理モデルの構築に寄与することも期待される。今後、これらの残された研究課題に取り組んでいくことで、溶接構造用炭素鋼のさらなる高強度化に貢献する。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

溶接構造用炭素鋼の機械的特性に及ぼす炭素の存在状態の影響に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 吉村 信幸

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、令和4年1月28日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に審査した。同日に口頭発表の後、第2回学位論文審査委員会を開催し慎重に協議の結果、以下の通りの判定をした。

船舶、建築物や橋梁などに用いられる溶接構造用炭素鋼（厚鋼板）には、強度に加えて優れた低温靱性が求められる。本学位論文は、高強度のベイナイト鋼やマルテンサイト鋼における脆性破壊機構、およびフェライト鋼における靱性、延性および疲労特性におよぼす炭素の存在状態の影響について系統的に取り組み、組織制御の基本指針を提案した。1) 上部ベイナイト鋼における MA (martensite-austenite constituent) は脆性破壊発生起点として働く。焼戻しにより MA は分解するが、その領域のセメンタイトは初期き裂発生起点として有害である。2) 靱性は、炭素を微細な粒内セメンタイトとして制御することが最も好ましく、続いて固溶状態、粗大な粒界セメンタイトの順となる。これらの制御指針は、粗大セメンタイトおよび変形双晶起因の脆性破壊応力により支配されることを解明した。3) 局部伸びは炭素を微細粒内セメンタイトに、また一様伸びは固溶炭素に制御することが望ましい。4) 疲労特性は、固溶炭素を含む鋼で向上する。

以上のように、本論文は、溶接構造用炭素鋼における機械的性質に及ぼす炭素の影響を系統的かつ多面的に研究したものであり、変形と破壊の学理に基づく基本指針を提示している。学術的にも工業的にも極めて価値の高い論文であり、博士（工学）に十分値すると判断した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）