

オーステナイトステンレス鋼溶接金属部における 組織形態と耐食性の関係



特集
接合科学研究所
産学連携シンポジウム

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 研究員 青木 聡氏
大阪大学 接合科学研究所 准教授 門井 浩太氏
大阪大学 接合科学研究所 教授 井上 裕滋氏

1. はじめに

オーステナイトステンレス鋼は、耐食性が良好であることに加え、機械的特性、加工性、および溶接性が良好であり総合的にバランスのとれた材料である。このことから、発電プラントや化学プラントなどの様々な社会基盤構造物において使用されている。一方で構造物の製造では、使用される条件に従って適切な材料選定がなされており、様々な材料が組み合わさることで構造物が製造されている。すなわち、構造物の製造では異種材料の溶接接合が必要不可欠である。概して構造物の健全性は溶接部の特性に依るところが大きく、その特性を向上させることは構造物の信頼性を高める上で極めて重要である。現在も更なる高機能化、最適化を目指した新たな材料開発・用途開発が精力的に行われており、構造物に用いられる材料も多様化している。しかし、異種材料溶接部の特性を化学組成の変化に基づき系統的に評価した研究はこれまでほとんど行われていない。

本稿では、オーステナイトステンレス鋼の種々の化学組成における異種材料溶接部の組織形態および耐食性を評価することで、適切な溶接条件を定めるための基礎的な知見を獲得し、溶接部の特性および信頼性を向上させることを目的とした研究成果について紹介する。

2. 異材溶接金属の組織形態

本研究ではCrおよびNi当量を系統的に変化させた試料として、溶接材試料はSUS304Lをベースとした試料3種、およびSUS347をベースとした試料2種の計5種をワイヤ溶接により作製し試験に用いた。溶接材には複数のステンレス鋼やNi合金の添加ワイヤを用い、溶接条件等の制御によって、Cr, Ni, Mo, およびNb等の含有量を変化させた。それぞれNo.1 (18Cr), No.2 (18Cr-0.5Nb), No.3 (21Cr-0.9Mo-0.6Nb), No.4 (19Cr-3.1Mo), およびNo.5 (20Cr-3.4Mo-0.4Nb) とした (すべてmass%)。

またこれら試料の孔食指数 Pitting Index (PI = %Cr + 3.3×%Mo + 16×%N) を併せて算出した。

凝固過程における組織発展や、室温組織形態を観察し (図1)、化学組成や溶接条件と組織形成・形態との関係を明らかにした。Nbを添加したNo.2, No.3, およびNo.5の試料では、樹枝状晶間領域に第2相が認められた。形状は、粒状、あるいは一部膜状のものも観察された。Moを添加したNo.5試料では樹枝状晶間領域にCrおよびMoの明確な濃化が認められた。そして、No.2およびNo.5両試料においてNbおよびCが同じ個所で濃化していることが観察された。したがって、第2相の形状も考慮するとその大部分はNbCであることが示唆された。

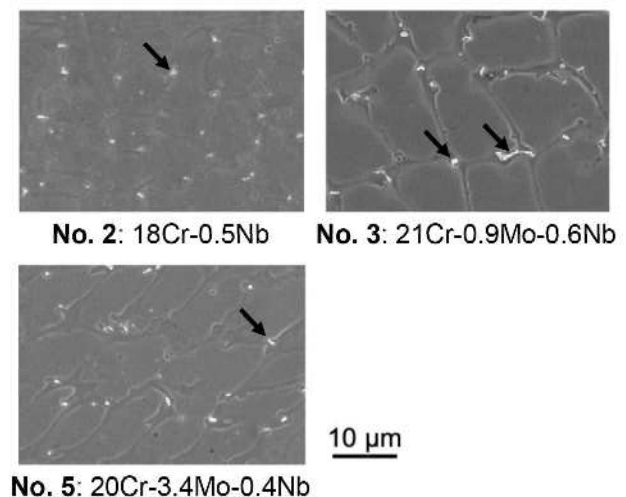


図1 溶接金属試料のSEM観察像¹⁾
(黒矢印：樹枝状晶間領域の第2相)

3. 異材溶接金属の耐食性評価

耐食性評価では、電気化学的再活性化率測定および孔食電位測定を実施した。それぞれの測定はJISに規格化されており、それらJIS法を参考にした。電気化学的再活性化率測定はステンレス鋼の粒界の鋭敏化度、あるいは粒界腐食の感受性を評価する方

法であり、チオシアン酸を含む硫酸溶液中にて往復アノード分極を行い、往路と復路の最大のアノード電流密度の比から再活性化率 R を算出した。孔食電位測定は孔食の発生に対する耐性を評価するもので、塩化物を含んだ溶液中にてアノード分極を行った。また孔食電位測定において、微細組織と孔食の発生起点との関係を明確にするために、電流密度が $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ に達した時点で試験を停止した試料の SEM 観察 / EDS 分析を併せて実施した。

電気化学的再活性化率測定では、Cr および Mo を多く含有している試料の再活性化率 R が低い値となった。再活性化率とは活性溶解領域から一度不働態領域で不働態化させ、再び活性溶解領域に戻した際にどれ程活性溶解するかを示している。すなわち保護性の高い良好な不働態皮膜が形成されるほど再活性化率は低くなる。このことから溶接金属においても Cr および Mo は不働態皮膜を安定化し耐食性が向上したと考えられた。

孔食電位は孔食指数が大きな試料ほど、すなわち Cr および Mo を多く含有している試料ほど貴な電位となり (図 2)、試料の耐孔食性は孔食指数の序列に従う結果となった。このことから、これらの溶接金属試料においても耐食性向上に及ぼす Cr および Mo の効果が大きく、耐孔食性を増大させていると考えることができる。高い耐孔食性を示した No.4 および No.5 の孔食電位測定後の試料観察では、成長した食孔がデンドライトコア部に多く認められた。EPMA 分析から、これらの試料ではデンドライトセル境界において Cr および Mo の濃化が認められており、相対的に Cr および Mo 濃度の低いデンドライトコア部で優先的に孔食が成長したと考えられた。

また孔食の発生起点と組織との関係を明らかにするため、電流密度が $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ に達した時点で試験を停止し試験面の観察を行った (図 3)。No.1 試料ではデンドライトセル内において多くの孔食起点が観察された。当該試料では凝固偏析によってデンドライトセル境界の Cr 濃度が増大しているため、相対的に Cr 濃度の低いデンドライトセル内が優先的に孔食の発生起点になったと考えられた。一方で、No.2 試料ではデンドライト境界の Nb を含有した第 2 相周辺から孔食が発生していた。No.5 試料においても一部の孔食はデンドライト境界の Cr, Mo

および Nb を含有した炭化物である第 2 相から発生していることが認められた。第 2 相が Cr および Mo を含有して形成されるため周辺の Cr および Mo 濃度が低下していると考えられ、そのような局所的に耐孔食性が低い箇所では孔食が発生したものと考えられた。また第 2 相のサイズがサブミクロン程度であるため母材素地と第 2 相との間に物理的不整合部が生じ、そのような不整合部の耐食性が低く孔食の発生起点になった可能性も考えられる。このような溶接金属の孔食発生機構を明らかにするためには第 2 相あるいはそれらと母材素地との不整合部の溶解挙動に関してさらなる詳細な解析を要する。

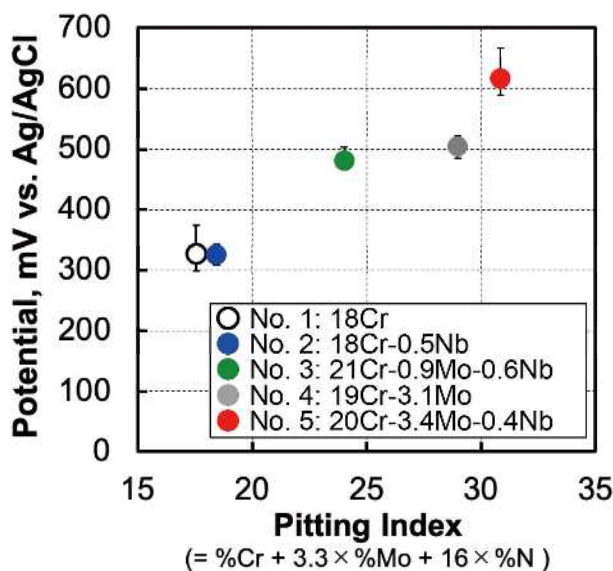


図 2 孔食電位と孔食指数 (P.I.) の関係¹⁾

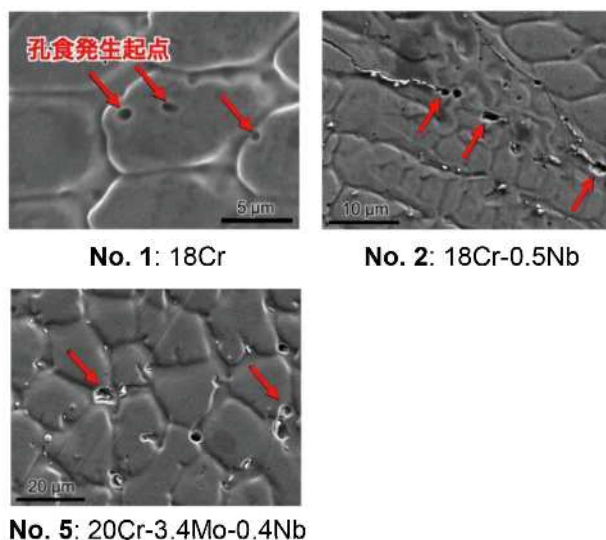


図 3 孔食発生起点の SEM 観察像¹⁾

4. おわりに

溶接金属試料のマクロな試料全体の耐食性は、CrおよびMoを多く含有するほど向上しており、溶接金属試料においても耐食性向上に及ぼすCrおよびMoの効果が大きかった。一方で、ミクロ組織観察では凝固偏析による、あるいは第2相生成による化学組成不均一が生じ、その結果CrおよびMo濃度が低下した領域が優先的に腐食発生起点になったと考えられた。

参考文献

- 1) S. Tokita, K. Kadoi, S. Aoki, H. Inoue, *Corrosion Science*, 175, 108867 (2020).

