

(技術資料)

9%Ni鋼板への大入熱溶接適用に向けた検討

川野晴弥*¹・橋本直樹*¹

Investigating the Application of High-Heat Input Welding of 9% Ni Steel Plates

Haruya KAWANO・Naoki HASHIMOTO

要旨

脱炭素社会の実現に向け、代替燃料として需要が増加する液化天然ガス（LNG）の貯蔵用タンクには9%Ni鋼が使用されているが、今後数多くの燃料タンクが必要とされる中、その溶接施工効率向上は喫緊の課題である。そこで、船用燃料タンクの立向溶接施工にエレクトロスラグ溶接を適用した際の溶接熱影響部（HAZ）のじん性改善に向けた課題を抽出し、その改善策を検討した結果、母材へのMo添加およびSi低減が有効であることを見出した。これにより、母材強度・じん性はもとより、大入熱溶接後でも優れたHAZじん性を有する9%Ni鋼の商品化につながる知見を得ることができた。

Abstract

Driven by the global shift toward a decarbonized society, demand for Liquefied Natural Gas (LNG) as an alternative fuel is surging, making 9% Ni steel a critical material for storage tanks. Given the projected need for production of a large number of fuel tanks, enhancing welding productivity is becoming a matter of urgency. This study investigates the challenges of improving Heat-Affected Zone (HAZ) toughness when applying electro slag welding to vertical joints in marine fuel tanks. Our research demonstrates that optimizing the base metal, specifically by adding Mo and reducing Si, is an effective means of improving toughness. These findings offer a path toward the commercialization of 9% Ni steel that maintains exceptional strength and HAZ toughness even under high-heat input conditions.

検索用キーワード

9%Ni鋼, LNGタンク, エレクトロスラグ溶接, 溶接熱影響部

ま え が き = 脱炭素社会の実現に向けてエネルギー転換が進む中、移行燃料として、重油に比べCO₂および環境汚染物質の排出が少ない天然ガスの需要が増加している¹⁾。

天然ガスは-162℃で液化した状態で貯蔵されるため、液化天然ガス（以下、LNGという。）のタンクには極低温じん性と高強度を両立できる9%Ni鋼が適用されている。LNGタンクの突き合わせ溶接部には母材と同等の極低温じん性が求められるため、従来は入熱を抑えた多パス溶接施工が実施されてきたが、今後LNG燃料の需要増加に伴いタンクの需要も増加すると想定される中において、タンクの建造工程を律速する溶接施工の効率化は大きな課題である。

これに対し、主に建設分野での施工効率化に貢献しているエレクトロスラグ溶接（以下、ESW: Electroslag weldingという。）の9%Ni鋼溶接への適用が検討され始めており、すでに溶接手法や溶接材料の開発が進んでいる^{2), 3)}。

そこで今回、船用LNG燃料タンクの立向溶接へのESW適用により大きな溶接熱影響を受ける母材側の極低温じん性に関し、課題抽出と改善に向けた検討を行った。

1. 大入熱溶接適用における9%Ni鋼の課題

9%Ni鋼に大入熱溶接を適用する際の課題を明らかにするために、既存の9%Ni鋼板を用いて立向1パスESW継手を作製し、溶接熱影響部（以下、HAZ: Heat affected zoneという。）における試験温度-196℃でのシャルピー衝撃試験を実施した。供試した9%Ni鋼板の成分を表1に示す。溶接入熱量を2水準に変化させたESW継手と従来の低入熱溶接継手のHAZじん性を比較したところ、入熱量増加に伴いHAZの広い範囲でじん性の低下が見られた（図1）。Fusion Line（以下、FLという。）付近では入熱量36.0 kJ/mmにおいて、FLから離れた位置では22.2 kJ/mmでも大幅な低下が見られた。

じん性低下の要因を明らかにするため、じん性が低位であったHAZの破壊形態およびマイクロ組織を調査した結果、FL付近は溶融温度近傍まで加熱されることにより、粗粒HAZ（以下、CGHAZ: Course Grained HAZという。）と呼ばれる粗大な組織が形成される領域であり、

表1 既存9%Ni鋼の化学成分
Table 1 Chemical composition of conventional 9% Ni steel

| Chemical composition (wt.%) | | | | | |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Ni |
| 0.05 | 0.22 | 0.67 | 0.002 | 0.001 | 9.16 |

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部

その破面には粒界破壊が生じていた(図2)。粒界破壊はPの偏析による粒界のぜい化が主な要因であることが知られているが、入熱量増加による組織粗大化に伴い粒界面積が減少したことで単位面積あたりのP偏析濃度が上昇したこと、また、冷却速度の低下によりぜい化温度域での滞留時間が増加しPの偏析量が増加したことが原因と考えられる。

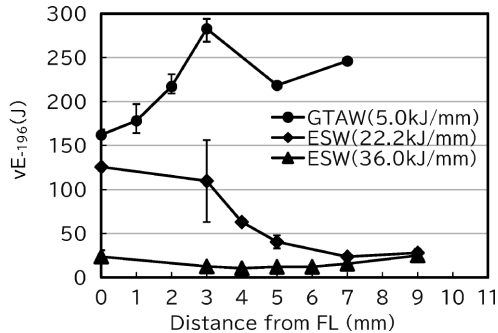


図1 既存9%Ni鋼の溶接継手じん性

Fig.1 Toughness of welded joints in conventional 9% Ni steel

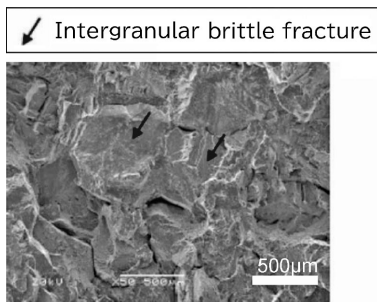


図2 CGHAZのシャルピー破面

Fig.2 Fracture surface of Charpy specimen of CGHAZ

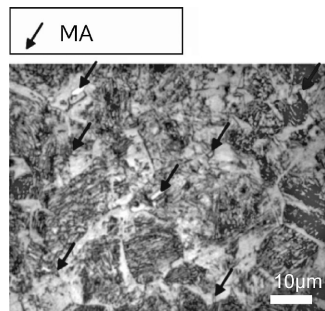


図3 ICHAZのマイクロ組織

Fig.3 Microstructure of ICHAZ

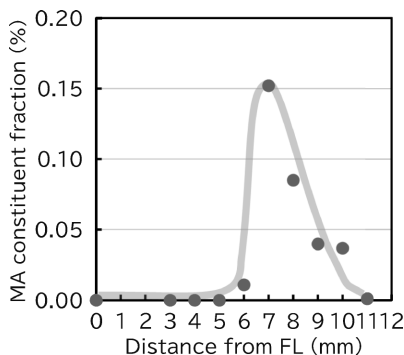


図4 HAZ位置とMA生成量

Fig.4 Amount of MA constituent in HAZ

いっぽう、FLから離れた位置は二相域HAZ(以下、ICHAZ: Intercritical HAZという。)と呼ばれるフェライト(α)とオーステナイト(γ)の二相域に再加熱される領域であり、そのマイクロ組織にはぜい性破壊の起点になることで鋼材のじん性を劣化させる島状マルテンサイトと呼ばれるMA(Martensite-Austenite constituent)の生成が見られた(図3)。 $\alpha + \gamma$ 二相域に加熱されるICHAZでは部分的に逆変態した γ にCが濃縮することにより γ が安定化するため、冷却後にMAとして残存しやすくなる。入熱量が増加すると逆変態温度域での滞留時間の増加に加え、冷却速度の低下によるC濃縮量増加がMA生成を促進すると考えられる。図4にHAZの各位置に対するMA生成量を示す。MA生成位置がじん性劣化位置とおおむね一致していることから、MA生成がICHAZでのじん性劣化の主な要因と考えられる。

2. 大入熱溶接継手のHAZじん性における成分影響

2.1 CGHAZでの影響

じん性劣化の主要因と考えられるPの偏析を低減し、粒界ぜい化を抑制できる元素を第一原理計算⁴⁾に基づいて検討した。図5に、粒界における各元素とPとの相互作用エネルギーを示す。相互作用エネルギーが負となる元素はPと斥力作用が働くことを示しており、その作用が大きいMoの添加がPの粒界偏析抑制に有効であると推定できる。図6にCGHAZ相当の再現熱サイクルを与えた鋼材のシャルピー衝撃試験におけるMo添加量と

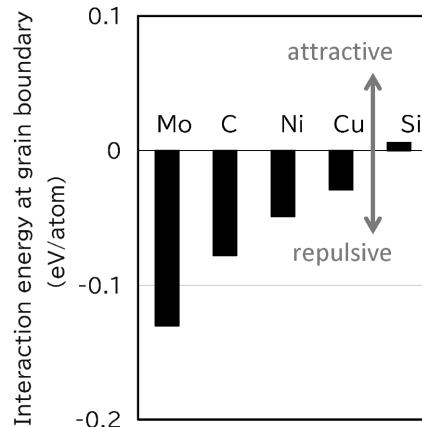


図5 各元素とPとの相互作用エネルギー

Fig.5 Interaction energy between each element and P

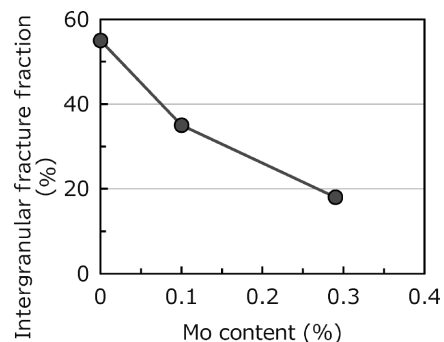


図6 Mo添加による粒界ぜい化抑制

Fig.6 Effect of Mo on grain boundary embrittlement resistance

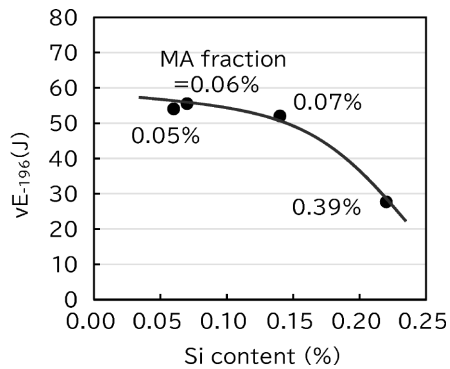


図7 Si添加量とHAZじん性およびMA面積分率の関係 (ICHAZ相当の再現熱サイクル付与)

Fig.7 Effect of Si addition on toughness and MA fraction (simulated ICHAZ)

粒界破面発生率の関係を示す。Mo添加により粒界ぜい化が抑制されることが確認できた。

2.2 ICHAZでの影響

セメントイト析出を抑制するSiは、ICHAZにおいて冷却時に $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態を抑制しMA生成を促進するため、添加量を低減することでMA生成を抑制できると考えられる。図7に、Si添加量を変化させてICHAZ相当の再現熱サイクルを与えた鋼材のMA生成量とじん性を示す。Si量低減に伴いMA生成量が低減することによりHAZじん性が改善することが確認できた。

3. 大入熱溶接継手のHAZじん性改善結果

前章の検討を反映してMoを添加、Siを低減した表2に示す成分の9%Ni鋼を試作した結果、母材強度・じん性が目標とする日本海事協会(NK)規格KL9N60を満足したことを確認した(表3)。図8に、一例として板厚30mmの突き合わせ溶接を1パスで施工できるよう溶接条件を適正化した立向ESW継手のHAZじん性を示す。FL付近およびFLから離れた位置まで母材の目標値を十分に超える良好なじん性が確認できた。

表2 試作鋼の化学成分の一例

Table 2 Example of chemical composition of prototype steel

| Chemical composition (wt.%) | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Ni | Mo |
| 0.05 | 0.05 | 0.65 | 0.002 | 0.001 | 9.26 | add. |

表3 試作鋼の母材特性

Table 3 Mechanical properties of prototype steel plate

| Thick. (mm) | Heat treatment | Tensile property | | | Charpy impact property | |
|--------------|----------------|------------------|----------|-----------|------------------------|-----------|
| | | YP (MPa) | TS (MPa) | El. (%) | vE-196(J) | |
| 30 | QT | 702 | 735 | 21 | 220, 197, 205 | 207 |
| KL9N60 Spec. | | 590 \leq | 690-790 | 15 \leq | 19 \leq | 27 \leq |

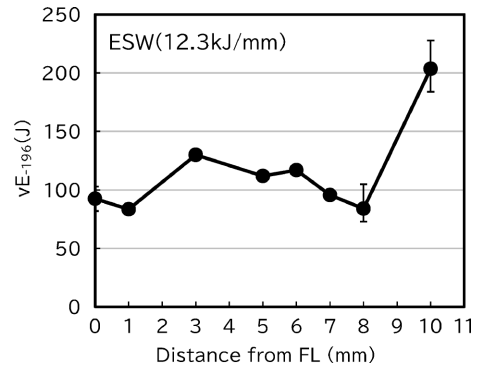


図8 試作鋼のESW継手じん性

Fig.8 Toughness of ESW welded joint in prototype steel

むすび = 9%Ni鋼を使用したLNG燃料タンク建造の施工効率改善に資する大入熱溶接(立向1パスESW)の適用に向け、最適な化学成分を検討した。その結果、Mo添加およびSi低減により優れた極低温じん性が実現できることを確認した。今後は、実物件への適用に向けて構造安全性の検証などを進め、高効率施工の実現のため尽力していく。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁 資源・燃料部. 2030年/2050年を見据えた石油・天然ガス政策の方向性(案). 総合資源エネルギー調査会 資源・燃料分科会 石油・天然ガス小委員会(第13回). 2021, 40p.
- 2) 北川良彦. 溶接学会誌, 2022, Vol.91, No.4, p.233-237.
- 3) 本田幸也ほか. 溶接学会2025年度秋季全国大会講演概要. 2025-9-24/26, 溶接学会, 2025, Vol.117, p.130-131.
- 4) 森田晋也. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.3-7.