

汎用二相ステンレス鋼のケミカルタンカーへの適用 に際しての溶接施工上の問題に関する研究

四塚, 卓之

<https://hdl.handle.net/2324/4475072>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

汎用二相ステンレス鋼の
ケミカルタンカーへの適用に際しての
溶接施工上の問題に関する研究

2020年 11月

四塚卓之

目次

第1章 序論

| | |
|-------------|-----|
| 1.1. 本研究の背景 | 1-1 |
| 1.2. 本研究の目的 | 1-2 |
| 1.3. 本研究の構成 | 1-3 |

第2章 ケミカルタンカーの構造と建造について

| | |
|--------------------------|------|
| 2.1. 緒言 | 2-1 |
| 2.2. ケミカルタンカーの特徴 | 2-1 |
| 2.2.1. ケミカルタンカーの構造 | 2-1 |
| 2.2.2. ケミカルタンカーの建造上の注意点 | 2-2 |
| 2.2.3. カーゴタンク内面の建造上の注意点 | 2-4 |
| 2.3. カーゴタンクに用いられる鋼材 | 2-6 |
| 2.3.1. ステンレス鋼の種類 | 2-6 |
| 2.3.2. ステンレスクラッド鋼板の特徴と利点 | 2-9 |
| 2.4. ケミカルタンカーに用いる溶接材料 | 2-10 |
| 2.5. 二相ステンレス鋼の特徴と課題 | 2-15 |

第3章 汎用二相ステンレス鋼同士の継手の静的強度評価

| | |
|------------------------------|------|
| 3.1. 緒言 | 3-1 |
| 3.2. 評価用溶接継手の製作 | 3-1 |
| 3.3. KSUS329J3L 同士の継手の静的強度評価 | 3-7 |
| 3.3.1. 断面マクロ観察 | 3-7 |
| 3.3.2. 化学成分分析 | 3-8 |
| 3.3.3. フェライト量およびマイクロ組織 | 3-9 |
| 3.3.4. 引張試験 | 3-14 |
| 3.3.5. 表・裏曲げ試験 | 3-15 |
| 3.3.6. シャルピ衝撃試験 | 3-17 |
| 3.3.7. 硬さ試験 | 3-19 |

| | | |
|---|------------------------|------|
| 3.4. | 結言 | 3-24 |
| 第4章 汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレス鋼 から構成される異材継手の静的強度評価 | | |
| 4.1. | 緒言 | 4-1 |
| 4.2. | 評価用溶接継手の製作 | 4-1 |
| 4.3. | 異材継手の静的強度評価 | 4-8 |
| 4.3.1. | 断面マクロ観察 | 4-7 |
| 4.3.2. | 化学成分分析 | 4-9 |
| 4.3.3. | フェライト量測定 | 4-10 |
| 4.3.4. | 引張試験 | 4-11 |
| 4.3.5. | 表・裏曲げ試験 | 4-13 |
| 4.3.6. | シャルピ衝撃試験 | 4-15 |
| 4.3.7. | 硬さ試験 | 4-17 |
| 4.4. | 結言 | 4-18 |
| 第5章 汎用二相ステンレス鋼同士の継手の疲労強度評価 | | |
| 5.1. | 緒言 | 5-1 |
| 5.2. | 評価用溶接継手の製作 | 5-2 |
| 5.3. | 汎用二相ステンレス鋼同士の継手の疲労強度評価 | 5-3 |
| 5.4. | 標準設計 S-N 曲線との比較 | 5-7 |
| 5.5. | 結言 | 5-9 |
| 第6章 種々の鋼材と二種類の溶接材料の組み合わせで製作した 溶接継手の耐食性能評価 | | |
| 6.1. | 緒言 | 6-1 |
| 6.2. | 耐食性能評価の方法 | 6-1 |
| 6.3. | 粒界腐食試験 | 6-2 |
| 6.4. | 耐孔食性試験 | 6-5 |
| 6.5. | 結言 | 6-7 |

| | |
|------------|-----|
| 第7章 結論 | |
| 7.1. 総括 | 7-1 |
| 7.2. 今後の展望 | 7-3 |
| 参考文献 | i |

第1章 序論

1.1. 本研究の背景

いわゆるケミカルタンカーと称される商船は化学薬品等の腐食性の強い製品を安全に運ぶことを目的として運用されており，そのカーゴタンクには主に SUS316LN 等のオーステナイト系ステンレス鋼およびオーステナイト系ステンレスクラッド鋼が用いられる．最近ではオーステナイト系ステンレス鋼よりも耐力，耐食性に優れ，かつ高価な Ni の含有量を減少させた汎用二相ステンレス鋼を用いる場合¹⁾もあるが，汎用二相ステンレス鋼を用いたクラッド鋼に関しては船級承認を得た製品が上市されて日も浅いこともあり，特に大型のケミカルタンカーへの適用実績はまだ1隻²⁾にとどまっている．加えて，船体構造のような大きな構造体の建造に必要な量の調達が必ずしも容易ではない場合もある．このため，材料調達や建造コストが重視される一般商船において汎用二相ステンレス鋼を適用する機運は十分とは言い難いことから，これに必要とされる溶接継手の健全性評価を始めとする構造強度健全性評価に関する公知の研究成果も少なく，緒方，勝田，矢島らの研究グループ³⁾⁻⁶⁾による溶接部の破壊靱性，疲労強度，クラッド界面強度および溶接性に関する報告，Zhou ら⁷⁾によるケミカルタンカーのカーゴホールド構造の最適化に関する報告，Kaya ら⁸⁾による船体用軟鋼と二相ステンレス鋼を爆発圧接により接合した異材継手の強度評価に関する報告程度にとどまっている．なお，Kaya らが評価した爆発圧接による継手製造は，一般商船建造現場での適用が設備，作業者の安全確保，製造コスト，施工可能な接合線長さなどの観点から，国内造船所において適用することは非現実的な施工法である．

したがって，大型のケミカルタンカー建造に際してステンレスクラッド鋼を用いる必要がある場合は，オーステナイト系ステンレスクラッド鋼を用いる場合も考えられる．この場合，一つの船体構造中に汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼が相当数存在することとなる．一方，これまでのケミカルタンカー建造では，オーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料（例えば，日本海事協会鋼船規則 M 編 6 章⁹⁾で規定される溶接材料 KW309MoL）を用いることで船体中のオーステナイト系ステンレス鋼と通常鋼から構成される異材継手の構造強度健全性を確保してきた多数の実績がある．ケミカルタンカーのカーゴタンクに汎用二相ステンレス鋼を適用することになっても，船体構造中にはオーステナイト系ステンレス鋼と通常鋼を使う箇所が

相当数存在するため、それぞれの材料の組み合わせに応じて溶接材料を使い分ける必要が生じ、建造時に溶接材料誤使用のリスクを抱えることになる。仮に溶接材料の消費量などから誤使用の可能性が指摘されても、施工後にこれを現場レベルですぐに確認することは困難なため、誤使用の「懸念」の段階で、その作業区画において誤使用が懸念される全溶接部の除去と再溶接という対応を執らざるを得ない。

そこで視点を変え、汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼の混在する区画内で使用する溶接材料を統一すれば、上記のような大幅な後戻り工程は不要となることに加え、特別に溶接材料の混在に対する対策を講じることも不要となるため、建造コストの観点からは好ましい。しかしながら種々のステンレス鋼板と種々のステンレス鋼用溶接材料の組み合わせによる溶接金属部の評価に関しての報告はほとんどない。前述の緒方、勝田、矢島らの研究グループの報告でも、評価対象は汎用二相ステンレス鋼板に汎用二相ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作した継手であり、汎用二相ステンレス鋼板にオーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作した継手、およびオーステナイト系ステンレス鋼板に汎用二相ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作した継手での評価は考慮されていない。

1.2. 本研究の目的

本研究では、汎用二相ステンレス鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板を用いた大型ケミカルタンカーの貨物倉構造の建造工程を対象に、これら材料の組み合わせによる溶接継手において使用する溶接材料の統一のために評価が必要な項目について調査し、溶接材料を統一できる可能性を検証した結果を報告する。本研究は船体構造を対象とすることから、日本海事協会規格を満たす材料を適用した。すなわち、汎用二相ステンレス鋼としては同規格の KSUS329J3L を、オーステナイト系ステンレスクラッド鋼としては KSUS316LN を使用した。また KSUS329J3L 鋼板向けの溶接材料には KW2209 規格を満たしているものを、KSUS316LN 鋼板向けの溶接材料としては、すでに多数のケミカルタンカー建造実績を有している KW309MoL 規格を満たしているものを使用した。

1.3. 本研究の構成

本論文は全7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、ケミカルタンカーの構造、船体建造に用いられる鋼材および溶接材料の種類について、建造面の観点を含め述べる。

第3章では、汎用二相ステンレス鋼同士の継手に、汎用二相ステンレス鋼用の溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作した試験片の静的強度評価の結果について述べる。

第4章では、汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼から構成される異材継手に、汎用二相ステンレス鋼用の溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作した試験片の静的強度評価の結果について述べる。

第5章では、汎用二相ステンレス鋼同士の継手に、汎用二相ステンレス鋼用の溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作した継手の疲労強度評価の結果について述べる。

第6章では、汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼から構成される異材継手に、汎用二相ステンレス鋼用の溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作した継手の耐食性を評価した結果について述べる。

第7章では、本研究を総括して結論を述べるとともに、今後の展望を示す。

第2章 ケミカルタンカーの構造と建造について

2.1. 緒言

本章では、現状のケミカルタンカーで採用されている船体の構造様式と、建造に用いられる鋼材および溶接材料について説明する。

2.2. ケミカルタンカーの特徴

2.2.1 ケミカルタンカーの構造

いわゆるケミカルタンカーと呼ばれている商船は化学薬品等の腐食性の強い製品を安全に運ぶことを目的として運用されており、腐食性の強い積荷から船体を保護するためカーゴタンクにはステンレス鋼を使用している。ケミカルタンカーの内部構造の一例を Fig. 2-1 に示す。

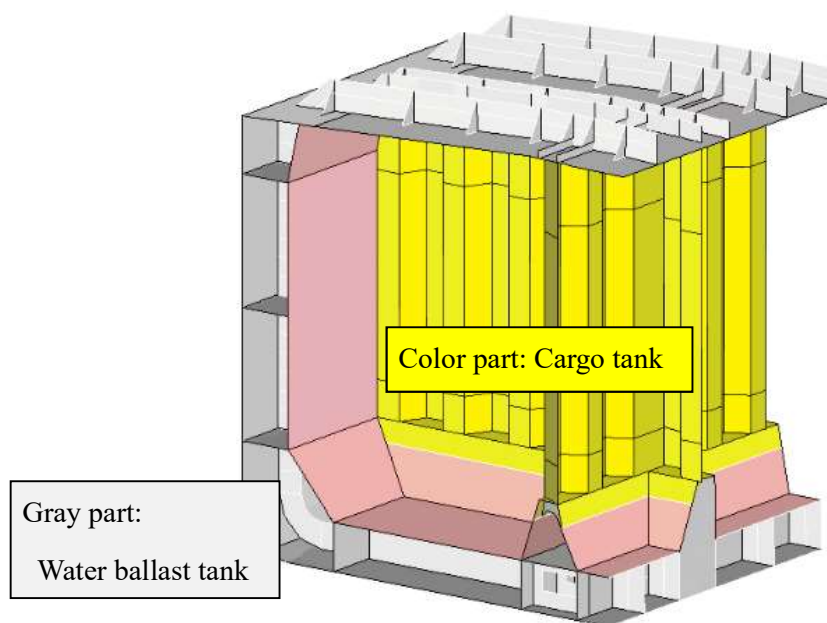


Fig. 2-1 Schematic illustration of the internal structure of a chemical tanker.

ケミカルタンカーは船底部、船側部が二重船殻構造となっており、カーゴタンクの底面、側面はバラストタンクと接している。またカーゴタンクの天井面は外部と接しており、内部は壁によって複数のカーゴタンクに分割されている。

カーゴタンク内面は積荷の荷揚げ後の荷溜まり防止、および荷揚げ後に実施するカーゴタンク内面の洗浄作業の効率化を図る目的で、可能な限り構造材を排したシンプ

ルな構造を採用することが求められている。そのためカーゴタンクを仕切る壁には板自体に剛性を持たせた波型隔壁を採用し、防撓材をなくしている。

またカーゴタンクの天井面にも部材を取り付けることはなく、縦通防撓材、横桁は上甲板上に配置される。

2.2.2 ケミカルタンカーの建造上の注意点

一般にケミカルタンカーは、輸送される危険化学品の輸送ロットが小さいため、同時に複数の液体貨物を輸送することを想定し、比較的小さなカーゴタンクを多数有して設計されるのが普通である。そして積荷によっては隣のカーゴタンクに違う種類の積荷を積載することが禁じられることもあり、そのため積荷を積みつける方法は多岐に亘る。また積荷によって比重と積載量も異なることより、設計段階で船体各部における詳細な構造検討をすることは難しい。そのため状況によっては船体局部に繰り返し発生する応力による疲労損傷が発生し、積荷が漏洩することが考えられるし、実際に発生もしている。そこで船体が損傷することを防止するために気を付けるべきいくつかの事柄について述べる。ケミカルタンカーに発生する損傷は概ね波型隔壁基部の隅肉溶接継手に集中している。積荷の積み付け高さとは比重、そして気象条件によってはその部位に繰り返しの高応力が長時間発生することになるが、まず気を付けなければならないのは波型隔壁と内底板もしくはスツールトップ板を挟んで相対する裏部材との目違いである。目違いの状態だと、繰り返し応力を受ける波型隔壁基部には Fig. 2-2 に示すような損傷が発生する可能性がある。そこで目違いの発生を防止するため、著者が所属する造船所では、スツールトップにあらかじめ裏部材の位置と、そこから 100mm 離れた位置に罫書きをしておき、波型隔壁を搭載した時に波型隔壁鋼板表面と 100mm 離れた罫書き線の距離を差し金で計測しながら 100mm になるように位置決めをする基準を整備し、励行している。また、位置決め時の計測結果も記録として残すことで、全ての箇所が目違いが存在しないことを担保している。

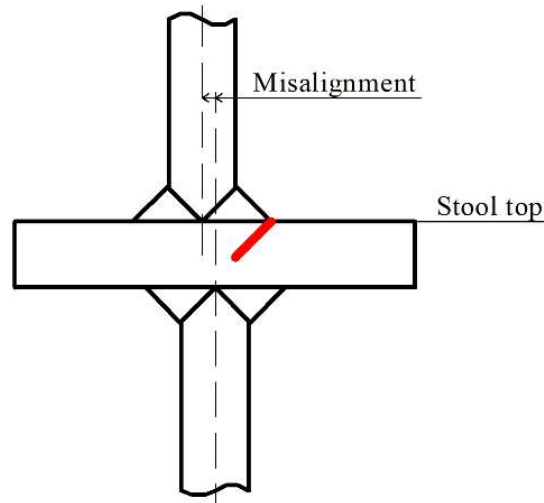


Fig. 2-2 Example of damage that is expected to occur due to misalignment of the corrugated bulkhead.

この部位の溶接作業に関しては、ルート部からの疲労亀裂の進展を抑止するために、規則上¹⁰⁾でも完全溶け込み溶接にすることを求められている。そこで当該部位については片側からの溶接作業と反対側の裏はつり作業が完了した時点で、はつり部に浸透探傷試験を実施し、溶け込み不良、スラグ等の異物の噛みこみを完全に除去できていることを確認している。確認後ははつり部の溶接作業を実施し、完了後は超音波探傷試験にて完全溶け込み溶接が実現できていることを確認し、その記録を残している。

波型隔壁基部の角部は平坦部と比べて特に発生する応力が高くなることより、溶接部は特に滑らかに仕上げるよう図面上で指示が出ており、この部位の溶接ビードはグラインダ、もしくはTIG溶接にて仕上げている。

また設計上の問題ではないが、かつてブロックを吊るためのピースを設置した位置の不良で波型隔壁基部の溶接端部に割れが発生した事例がある。Fig. 2-3 に損傷時の写真と模式図を示す。

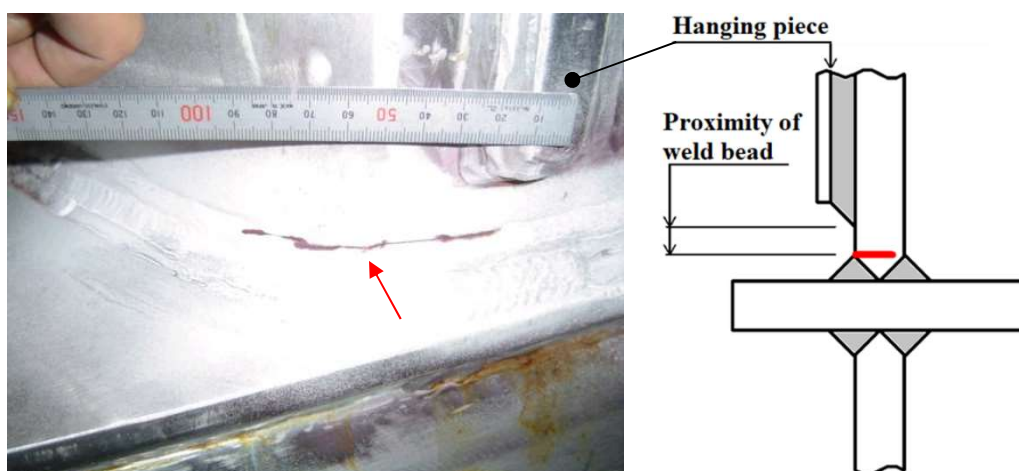


Fig. 2-3 Crack occurrence situation and schematic illustration due to hanging piece.

これは吊りピースの隅肉溶接と、波型隔壁基部の隅肉溶接のビード間距離が近接したため、引張の残留応力の影響で波型隔壁基部の隅肉溶接ビード端に疲労亀裂が発生したと考えられる。その対策として著者が所属する造船所では、吊りピースの位置を上方に 100mm 程度移動させたことで以後同様の損傷は発生していない。

このように、造船所ではケミカルタンカーの建造を通じて貴重な経験を積んでいる。同じ過ちを繰り返すことが無いよう、管理者は細心の注意を払いながら現場管理に努めなければならないし、後継に伝承していくこともまた重要である。

2.2.3. カーゴタンク内面の建造上の注意点

ケミカルタンカーのカーゴタンク内面を工事する際に留意すべき点について述べる。

カーゴタンク内面は荷溜まりを防止する観点から溶接ビードも可能な限り滑らかに仕上げるのが求められている。内底板では液体の流動を妨げることがないように溶接ビードの余盛高さを制限し、立向上進の継手ではビードのうろこ部に積荷が溜まらないようグラインダ等でうろこ部を削除している。また突合せ継手でもすみ肉継手でもアンダカット、オーバラップが発生しないような溶接施工要領の励行と、誤って発生した場合には TIG 溶接によるドレッシングビードを追加する。立向上進突合せ継手のうろこビードの一例を Fig.2-4 に示す。溶接品質を評価する観点での外観検査では問題ないが、これらのビードは溶接後にグラインダにて凸凹のない滑らかな表面に仕上げられる。



Fig. 2-4 Examples of scale beads for butt weld joints produced by vertical upward welding

カーゴタンク内面は全面がステンレス鋼板で覆われることになるが、建造中の様々な作業を通じてステンレス鋼板表面が傷つくことがある。一番の問題は発錆であり、放置するとステンレス鋼板表面の耐食性が劣化するため、「錆びさせない」、「錆びたら確実に除去する」、という管理を確実に実行する必要がある。錆びさせない方法としては、鉄粉の飛来を防止するためのフィルム、水溶性溶剤等による養生、土足禁止と靴カバー着用の徹底、カーゴタンク内の足場架設時にビニールコーティングされた「なまし番線」を利用する、等に対応している。またグラインダの掛けすぎ、打撃痕による凹みもステンレス鋼の腐食につながる恐れがあるため避けなければならない。

ケミカルタンカーは他船種とは異なる部分で細心の注意を払いながら建造を進めなければならないため、管理者には相当の管理能力が求められる建造の難しい船種と言える。

2.3 カーゴタンクに用いられる鋼材

2.3.1 ステンレス鋼の種類

ステンレス鋼とは「Cが1.2%以下でCrを10.5%以上含む合金鋼」と定義されており、鋼の表面の薄くて緻密なCrの酸化皮膜が鋼にはない耐食性を実現している。ステンレス鋼板には多数の種類が存在しているが、ケミカルタンカーに使用されるステンレス鋼板は積荷の腐食性に応じて適宜最適な種類を選択しなければならない。また必要な強度、加工性についても考慮する必要がある。Table 2-1 に日本海事協会発行の鋼船規則¹¹⁾に記載されているステンレス鋼板の種類と化学成分について、一部抜粋したものを示す。

Table 2-1 Types of rolled stainless steels and its chemical composition specified in Rules for the survey and construction of steel ships, Part K Materials established by ClassNK (Partial excerpt).

| Stainless steel grade | Chemical composition [wt%] | | | | |
|-----------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | C | Ni | Cr | Mo | N |
| KSUS304 | 0.08 max. | 8.00~10.50 | 18.00~20.00 | - | - |
| KSUS304L | 0.03 max. | 9.00~13.00 | | | |
| KSUS316 | 0.08 max. | 10.00~14.00 | 16.00~18.00 | 2.00~3.00 | - |
| KSUS316L | 0.03 max. | | | | |
| KSUS316LN | | | 10.50~14.50 | 16.50~18.50 | 2.00~3.00 |
| KSUS317 | 0.08 max. | 11.00~15.00 | 18.00~20.00 | 3.00~4.00 | - |
| KSUS317L | 0.03 max. | | | | |
| KSUS317LN | | | | | |

Table 2-1 に記載したステンレス鋼板は、一般的にオーステナイト系ステンレス鋼と呼ばれる種類のものである。オーステナイト系ステンレス鋼とは常温以下の温度域でも鋼の組織がオーステナイト（面心立方結晶）組織を維持している鋼のことで、フェライト（体心立方結晶）組織よりも靱性、延性、溶接性が優れているため、ケミカルタンカーを建造するには最適の鋼種であるといえる。表中の各種オーステナイト系ステンレ

ス鋼は添加元素の種類と量で区分されているが、一般に添加元素量が多いほど耐食性は向上する。ステンレス鋼板の耐孔食性を、含有している化学成分から評価できる指標として、式 (2.1) で規定される PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) が広く使用されており、PREN が大きいほど塩化物環境 (海水等) における耐孔食性が向上するとされている。

$$\text{PREN} = \text{Cr} + 3.3 \text{ Mo} + 16 \text{ N} \quad (2.1)$$

[Note] unit of each elemental component is the value in % of weight ratio

式 (2.1) より、主に Cr と Mo の添加量を増やすほど耐孔食性は向上することが分かる。ただし Cr と Mo は鋼の組織をフェライト組織にする傾向がある。逆に Ni と N は鋼の組織をオーステナイト組織にする傾向がある。オーステナイト系ステンレス鋼の耐食性を向上させるために Cr と Mo の添加量を増やすほど、オーステナイト組織を維持するに足りる量の Ni と N を配合する必要がある。また Ni には塩化物環境での孔食の進展速度を遅らせる効果もある¹²⁾とされている。

Table 2-2 に KSUS316LN を基準として各種オーステナイト系ステンレス鋼の PREN の比較の一例を示す。

Table 2-2 Results of comparing the PREN of various austenitic stainless steels using the PREN of KSUS316LN as a reference value.

| Stainless steel grade | Relative value of PREN with KSUS316LN value as 1 |
|-----------------------|--|
| KSUS304L | 0.61 |
| KSUS316L | 0.80 |
| KSUS316LN | 1.00 |
| KSUS317LN | 1.15 |

304 系よりも 316 系、316 系よりも 317 系の方が含有している化学成分が多いために耐孔食性は向上している。ただし Cr, Ni 等の含有量を増やせば増やすほど鋼材費用は上昇することとなる。特に Ni については過去に価格が暴騰し、原料の価格暴騰に比例してステンレス鋼材の価格も高騰したことがあるほど、価格影響力の大きい元素とい

える。

次に日本海事協会が規定しているステンレス鋼板の種類と機械的性質について、一部抜粋したものを Table 2-3 に示す。

Table 2-3 Types of rolled stainless steels and its mechanical properties specified in Rules for the survey and construction of steel ships, Part K Materials established by ClassNK (Partial excerpt).

| Stainless steel grade | Minimum value of 0.2% proof stress [N/mm ²] | Minimum value of Tensile strength [N/mm ²] | Elongation [%] | Maximum value of Vickers hardness [HV] |
|-----------------------|---|--|----------------|--|
| KSUS304 | 205 | 520 | 40 | 200 |
| KSUS304L | 175 | 480 | 40 | 200 |
| KSUS316 | 205 | 520 | 40 | 200 |
| KSUS316L | 175 | 480 | 40 | 200 |
| KSUS316LN | 245 | 550 | 40 | 220 |
| KSUS317 | 205 | 520 | 40 | 200 |
| KSUS317L | 175 | 480 | 40 | 200 |
| KSUS317LN | 245 | 550 | 40 | 220 |

材料記号の末尾の L は C の含有量を削減させたものであることを意味しており、溶接性に優れる材料である。材料記号の末尾の N は、耐力を向上させるために N を添加していることを意味しており、N を添加することで耐力が大幅に向上する。

どの種類のステンレス鋼を選択するかは最終的には船主側が判断することとなるが、造船所は耐食性を担保しつつステンレス鋼材の購入費用が最少となる種類の鋼材を船主側に提案することが一般的である。現在国内の造船所で建造されているケミカルタンカーには KSUS316LN 鋼板が広く使用されている。この鋼板は KSUS317LN と同程度の耐食性をより少ない合金元素添加量で実現していること、また N 添加で高耐力であることから、ケミカルタンカーに用いる場合にはベストバランスの鋼材であると評価されている。KSUS316LN 鋼板を用いたケミカルタンカーでは濃硫酸、希硫酸、粗製リ

ン酸等を含む 700 種類以上の工業製品に対応しているといわれているが、これは KSUS 317LN と変わらない。

2.3.2 ステンレスクラッド鋼板の特徴と利点

Fig. 2-1 に示したように、カーゴタンクの周囲にはバラストタンク等のカーゴタンクとは違う区画があり、壁一枚隔てて隣接している。また、カーゴタンク内面は全面がステンレス鋼板で覆われている必要がある。ここで、カーゴタンクとバラストタンクの仕切りにステンレス鋼板を用いる時に生じる、種々の建造上の問題について説明する。

一点目は、バラストタンク内部にステンレス鋼板表面が暴露されることで生じる問題である。バラストタンク内部には船体強度を確保するための種々雑多な部材が存在しており、これらの部材をステンレス鋼板に溶接する際にはステンレス鋼用の溶接材料を用いる必要があるため、同じバラストタンク内で炭素鋼用とオーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料の二種類の溶接材料を使い分ける必要が生じるため、誤使用のリスクがある。

二点目は、バラストタンク内面は IMO 塗装性能基準¹³⁾ (Performance Standard for Protective Coatings for dedicated seawater ballast tanks on all new ships and double-side skin spaces of bulk carriers ; PSPC) に基づいて厳密に塗装作業を行う必要があるが、バラストタンク内面に軟鋼板とステンレス鋼板が混在している状況において PSPC を満足することには非常に困難が伴うことである。加えて、軟鋼板と比較してステンレス鋼板は高価であるという材料調達上の問題がある。

そこでこれらの問題を回避するため、国内の造船所ではステンレスクラッド鋼が広く用いられている。ステンレスクラッド鋼とは、炭素鋼板に厚さ 3mm 程度の薄いステンレス鋼板を貼り合せた鋼板で、炭素鋼とステンレス鋼を張り合わせた後に圧延、熱処理することで製作される。ステンレスクラッド鋼板を用いることで、バラストタンク内にステンレス鋼板表面が暴露することはなくなることから、PSPC への対応も容易に可能となり、また鋼板単価についても、鋼板全体がステンレス鋼であるステンレスソリッド鋼とステンレスクラッド鋼の単価は、添加する化学成分の量におおよそ比例するため、ステンレス鋼の耐食性を実現するために必要な添加元素量が少ないステンレスクラッド鋼を使用したほうが建造コストを抑制できる。Fig. 2-1 に示したカーゴタンクの内部構造において、波型隔壁の部分は作用する応力等を考慮しつつ必要最小限の板厚

で済ませるために板厚を下から上に向かって薄くするなど、ステンレスクラッド鋼板を用いる以外にも高価なステンレス鋼の使用量を最小とする努力を払っている。

Fig. 2-5 にケミカルタンカーにおけるステンレス鋼板、ステンレスクラッド鋼板および炭素鋼板の部位ごとの使い分けの模式図を示す。

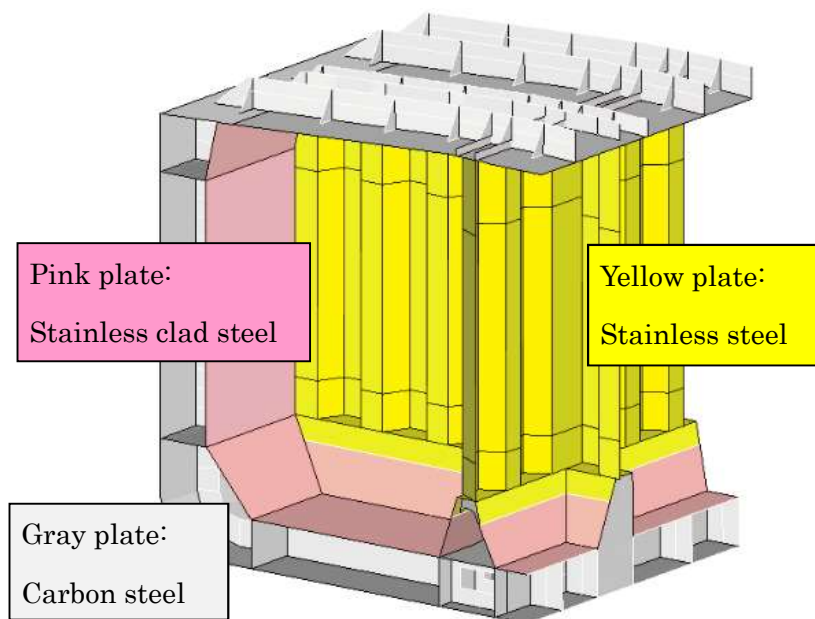


Fig. 2-5 Schematic illustration of the use of steels inside a cargo tank.

2.4 ケミカルタンカーに用いる溶接材料

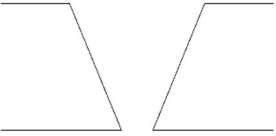
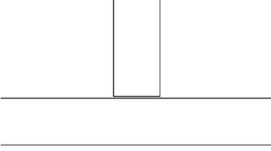
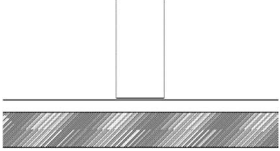
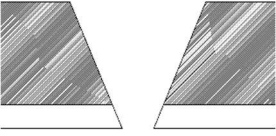
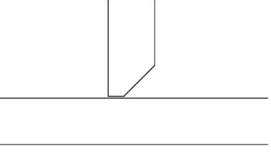
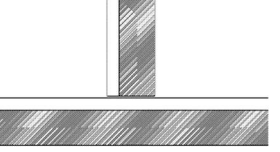
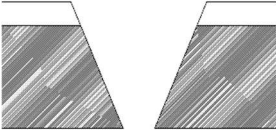
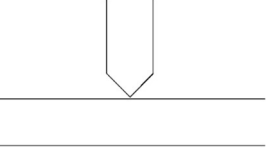
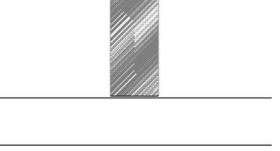
船体建造時（ブロック同士の接合時）には炭酸ガスアーク溶接法が適用される。ステンレス鋼板の接合に用いられる溶接材料は耐食性、継手の強度を確保するために、ステンレス鋼板の種類に応じたものを使用する必要がある。適切な溶接材料を選定していることを保証するため、船級協会の溶接施工承認試験を受験し、あらかじめ船級協会から認定を取得する必要がある。また溶接材料は船級協会から認定を受けた製品しか使用出来ない。カーゴタンク内の溶接箇所を Fig. 2-6 に示す。

| | | |
|--|---------------|---|
| | Color | Applied steel types |
| | Yellow plates | Stainless steels |
| | Pink plates | Stainless clad steels |
| | Gray plates | Carbon steels |
| | Green lines | Stainless plate and stainless plate welded joints |
| | Red lines | Stainless clad plate and stainless clad plate welded joints |
| | Purple lines | Stainless plate and stainless clad plate welded joints |

Fig. 2-6 Schematic illustration of the welding line inside a cargo tank.

Fig. 2-6 の緑線の箇所はステンレス鋼板同士の継手，赤線がステンレスクラッド鋼同士の継手，紫線はステンレス鋼板とステンレスクラッド鋼板の継手である．継手形状と鋼板の組み合わせを Table 2-4 に示す．

Table 2-4 Combination of joint shape and steel plate found inside the cargo tank.

| Butt welded joint | T-shaped joint | |
|---|---|--|
| <p style="text-align: center;">SUS×SUS</p>  | <p style="text-align: center;">SUS×SUS</p>  | <p style="text-align: center;">SUS×CLAD</p>  |
| <p style="text-align: center;">CLAD×CLAD</p>  | <p style="text-align: center;">SUS×SUS</p>  | <p style="text-align: center;">CLAD×CLAD</p>  |
| <p style="text-align: center;">CLAD×CLAD</p>  | <p style="text-align: center;">SUS×SUS</p>  | <p style="text-align: center;">MS×SUS</p>  |

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接性について説明する。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属の組織は溶接材料、溶接条件により種々変化する。例えば溶接金属組織がほぼオーステナイト単層組織の場合は高温割れが発生しやすいなど、溶接金属の組織の中には有害なものもある。そのため溶接金属の組織を有害なものとしなないことが必要となる。そこで、溶接金属の組織を溶接材料の化学成分から推定する必要が生じるが、これには Fig. 2-7 に示すシェフラーの組織図が広く利用されている。

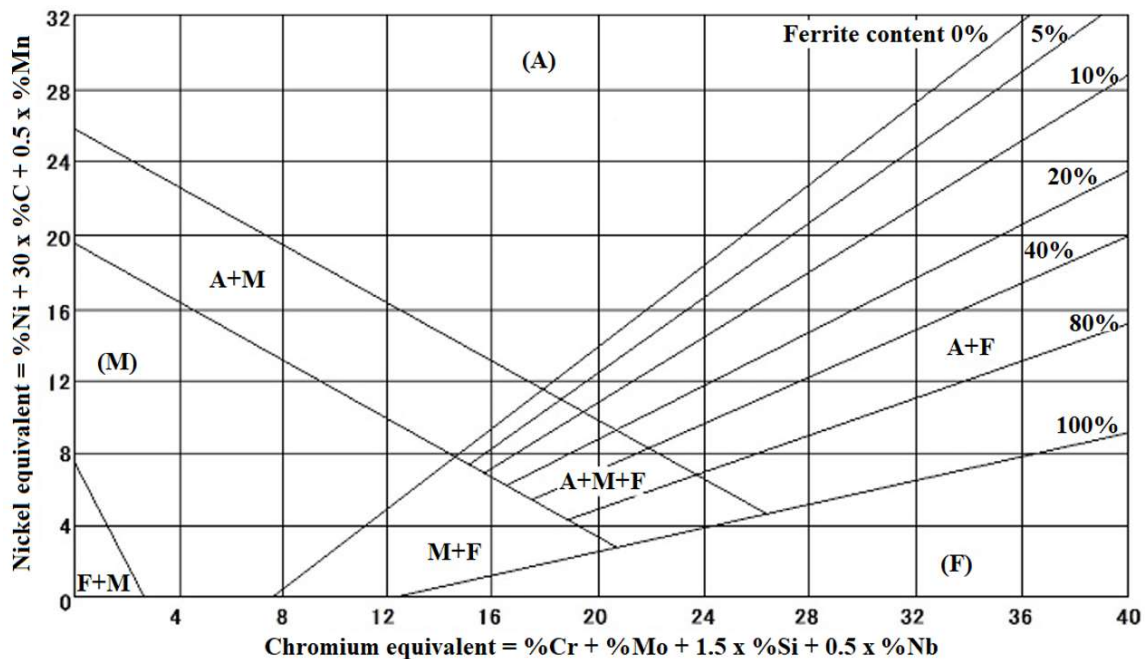


Fig. 2-7 Schaeffler's diagram.

シェフラーの組織図の利用方法は、オーステナイト系ステンレス鋼板およびオーステナイト系ステンレス鋼用溶接材料それぞれの化学成分から Cr 当量と Ni 当量を算出し、プロットした点から溶接金属の組織を推定する。結果が A の範囲であればオーステナイト組織であり高温割れの高リスクが高い、M の範囲であればマルテンサイト組織であり低温割れが発生しやすい、F の範囲であればフェライト組織であり加熱による脆化リスクが高まる。そのため溶接金属はこれらの危険範囲から外れた安全域にとどめる必要があり、溶接材料はそのため成分設計されている。また溶接条件についても溶接入熱の大小による母材希釈量の変化が溶接金属の組織形成に影響を与えるため、適正範囲での溶接施工を求められることになる。

またシェフラーの組織図はオーステナイト系ステンレス鋼と軟鋼の溶接という異材継手の際にも利用される。Fig. 2-8 にオーステナイト系ステンレス鋼の SUS316LN と軟鋼 SS400 の突合せ継手に対して、鋼船規則にてオーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料として規定されている KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いた炭酸ガスアーク溶接の際の、溶接金属の組織の推定結果を示す。

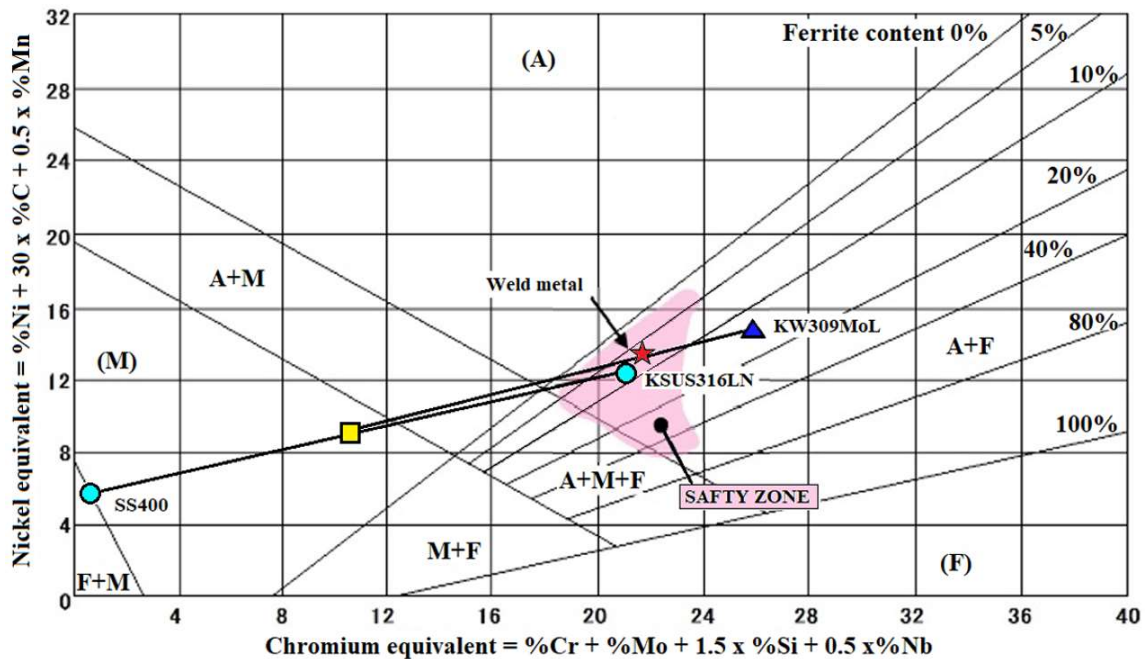


Fig. 2-8 Estimation the microstructure of weld metal by Schaeffler's diagram.

オーステナイト系ステンレス鋼板を溶接する際には高温割れ対策と脆化対策が必要となる。高温割れに対しては溶接金属組織に数%のフェライト層を含有させることで防止できることが分かっているため、オーステナイト系ステンレス鋼用溶接材料は 10%程度のフェライトが含まれるように成分設計されている。

SUS316LN 鋼板と SS400 鋼板をプロットしたのが青丸となり、お互いに希釈量が等しいと仮定した点が緑四角となる。溶接材料の KW309MoL をプロットした点が青三角であるが、緑四角と青三角を結んだ線上に溶接金属がプロットされる。線上のどこにプロットするかは母材希釈量に関係しており、Fig. 2-8 中の星印では約 30%の母材希釈量とした場合を示している。この場合溶接金属の組織は安全域に位置していることから、溶接材料の化学成分と溶接条件は適正であると評価される。

船体建造時にはステンレス鋼板、ステンレスクラッド鋼板、炭素鋼の三種類の鋼板が用いられているが、溶接に使用される溶接材料は KW309MoL 規格を満たすもの一種類だけである。これは、シェフラーの組織図による検討と溶接施工承認試験で性能を確認した結果として実現している。また船体建造時には下向、立向の溶接方向が発生するため、用いる溶接材料には全姿勢溶接での作業性、ビード形状の安定性が良好なものが求められる。

2.5 二相ステンレス鋼の特徴と課題

ケミカルタンカーの建造コストを抑制するためには、単価の高いステンレス鋼板の使用量を減らすことが有効であることは前述した。つまり、高価な合金元素の添加量がより少ない鋼種であれば鋼材単価が下がり、また、より高強度のステンレス鋼板であれば減厚による重量低減効果が期待できる。日本海事協会で規定しているステンレス鋼板の種類と機械的性質について、追加で抜粋したものを Table 2-5 に示す。

Table 2-5 List of Duplex Stainless Steel and mechanical properties entered in NK Rules Part-K Chapter-3.

| Stainless steel grade | Minimum value of 0.2% proof stress [N/mm ²] | Minimum value of Tensile strength [N/mm ²] | Minimum value of Elongation [%] | Maximum value of Vickers hardness [HV] |
|-----------------------|---|--|---------------------------------|--|
| KSUS329J1 | 390 | 590 | 18 | 292 |
| KSUS329J3L | 450 | 620 | 18 | 320 |
| KSUS329J4L | 450 | 620 | 18 | 320 |

表中の鋼材は一般的に汎用二相ステンレス鋼と呼ばれている。汎用二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼と比べて伸びは低下するが耐力が向上していることが分かる。特に KSUS329J3L は KSUS316LN よりも耐力が 1.8 倍程度向上している。また日本海事協会で規定している二相ステンレス鋼の種類と化学成分について、抜粋したものを Table 2-6 に示す。

Table 2-6 List of Duplex Stainless Steel and chemical composition entered in NK Rules Part-K
Chapter-3.

| Stainless steel grade | Chemical composition [wt%] | | | | |
|--------------------------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| | C | Ni | Cr | Mo | N |
| KSUS329J1 | 0.08 max. | 3.00~6.00 | 23.00~28.00 | 1.00~3.00 | - |
| KSUS329J3L | 0.03 max. | 4.50~6.50 | 21.00~24.00 | 2.50~3.50 | 0.08~0.20 |
| KSUS329J4L | 0.03 max. | 5.50~7.50 | 24.00~26.00 | 2.50~3.50 | 0.08~0.30 |

二相ステンレス鋼の化学成分面での特長は、オーステナイト系ステンレス鋼と比べて Ni 含有量を大幅に低減していることにある。代わりに Cr は若干増加しているが、鋼材単価への影響力が強い Ni を低減しているため、同程度の耐食性を有しているオーステナイト系ステンレス鋼よりも鋼材費用は安価になるといわれている。つまりケミカルタンカーに汎用二相ステンレス鋼を用いることで、高強度を活かして板厚減少できると、鋼材単価減少の両方で、建造コスト低減の可能性が出てくることになる。

ここで二相ステンレス鋼について説明する。金属組織はフェライト相とオーステナイト相がほぼ半分ずつの形態となっており、物理的性質である密度、ヤング率、熱膨張係数および熱伝導率についてもフェライト系ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の中間の性質を示す。耐食性については Cr 含有量を増やしているため PREN が十分確保されていることより、オーステナイト系ステンレス鋼以上の耐孔食性を示す。特筆すべきは強度の大幅な向上である。フェライト相とオーステナイト相の組織が半分ずつという形態であるが、組織そのものが微細であることと、N を含有しているためオーステナイト系の約 2 倍の耐力を示すことが可能となっている。

Table 2-7 に各種汎用二相ステンレス鋼の PREN の KSUS316LN 鋼との比較の一例を示す。

Table 2-7 Results of comparing the PREN of various duplex stainless steels using the PREN of KSUS316LN as a reference value.

| Stainless steel grade | Relative value of PREN with KSUS316LN value as 1 |
|-----------------------|--|
| KSUS316LN | 1.00 |
| KSUS329J1 | 0.86 |
| KSUS329J3L | 1.16 |
| KSUS329J4L | 1.27 |

Table 2-7 より，現状ケミカルタンカーに用いている KSUS316LN 鋼を二相ステンレス鋼に置き換えるためには，KSUS329J1L 鋼では同程度の耐食性を担保できないため，KSUS329J3L 鋼を用いる必要があることが分かる。

ここまでの，現状ケミカルタンカーに KSUS316LN 鋼を用いている場合に，これを汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 鋼に置き換えると，耐力向上による板厚減少効果と Ni 使用量低減による鋼材費用低減効果で，ケミカルタンカーの建造コストを圧縮することが可能となることが想像できるが，一つ大きな問題がある。それは汎用二相ステンレス鋼のクラッド鋼の製造が難しいということである。クラッド鋼はステンレス鋼と普通鋼を張り合わせた後に圧延，熱処理を施すが，汎用二相ステンレス鋼と普通鋼では適切な熱処理温度域が異なるため，ソリッド鋼と同等の品質を確保することが難しいと言われている。しかしながら近年製造方法を工夫することで KSUS329J3L 鋼を合わせ材としたクラッド鋼板の供給も開始されており，近い将来国内では全二相ステンレス鋼のケミカルタンカーが主流になる可能性がある。

ケミカルタンカーに汎用二相ステンレス鋼を用いた場合，構造としては二種類が考えられる。一つは貨物倉に面する全ての部分に汎用二相ステンレスソリッド鋼を用いる場合と，コルゲート隔壁のみに汎用二相ステンレスソリッド鋼板を使い，その他の部分はオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板を用いる場合である。前者は汎用二相ステンレス鋼の高強度と高耐食性の特長を活かした設計が可能であるが，工作上と建造コストの面で不利である。後者についてはオーステナイト系ステンレス鋼を用いるため積荷の種類は既存のケミカルタンカーと同様だが，建造コストを従来よりも低減す

ることが可能となる。ただし工作上大きなリスクを含んでいる。それは一つの貨物倉内において、汎用二相ステンレスソリッド鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板が混在しているため、適切な溶接材料を現場で使い分ける必要が出てくることである。汎用二相ステンレスソリッド鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の両方を用いたケミカルタンカーの、現場での溶接材料の使い分けの概略を Fig. 2-9 に示す。

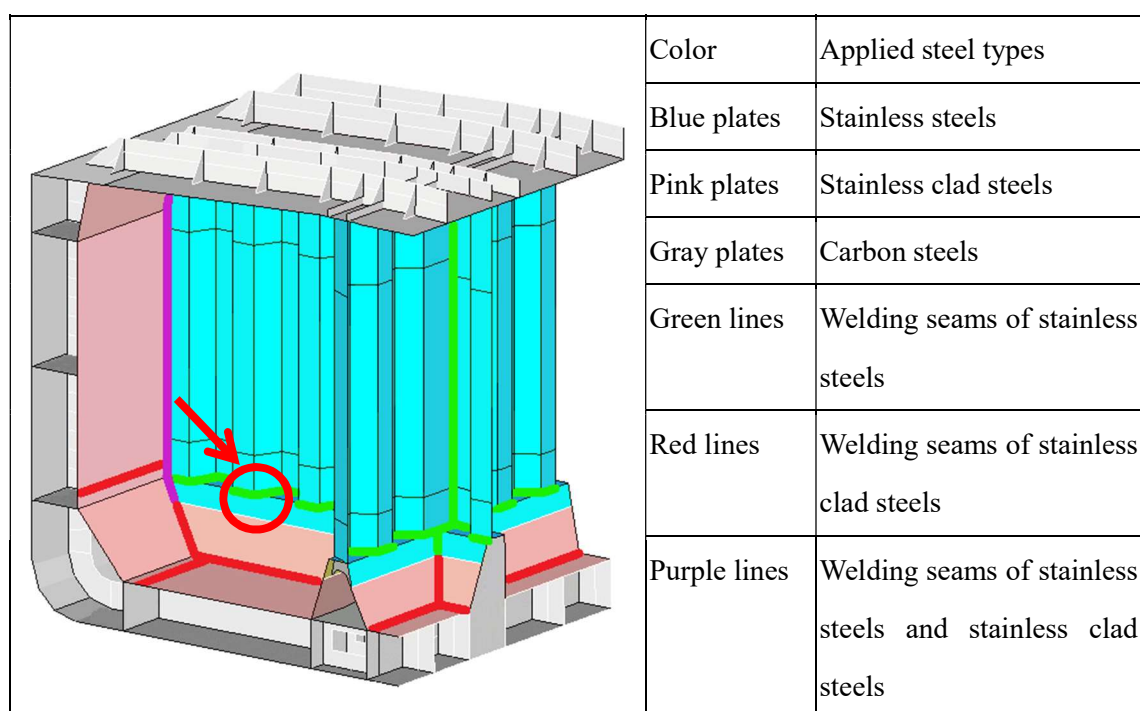


Fig. 2-9 Schematic illustration of chemical cargo tanker hold applying duplex stainless steels and austenitic stainless cladding steels.

日本海事協会の二相ステンレス鋼の溶接に関するガイドライン¹⁴⁾では、母材に合わせて溶接材料を使い分けるように規定されている。すなわち KSUS329J3L 鋼板同士の接合には KW2209 規格を満たす溶接材料を、KSUS316LN 鋼板同士の接合には KW316L もしくは KW309MoL 規格を満たす溶接材料を、KSUS329J3L 鋼板と KSUS316LN 鋼板の接合には KW2209 もしくは KW309MoL 規格を満たす溶接材料のいずれかを用いることとされている。

Fig. 2-9 の通り、カーゴタンク内での溶接作業には最低二種類の炭酸ガスアーク溶接用溶接材料が必要となる。現場で溶接作業後に適切な溶接材料を使用したかどうかの

確認は不可能であり、もし溶接材料の誤使用が発生すると全ての溶接部を補修する必要に迫られる恐れがある。そうなる则大幅な後戻り作業が発生し、工程通りに建造することが難しくなり、建造コストも上昇することが懸念される。

第3章 汎用二相ステンレス鋼同士の継手の静的強度評価

3.1. 緒言

汎用二相ステンレス鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の、両方を混在させたケミカルタンカーを建造する際には、汎用二相ステンレス鋼向けとオーステナイト系ステンレス鋼向けの二種類の溶接材料を、鋼板の種類に応じて使い分けなければならないと日本海事協会では規定している。本研究の目的は、溶接材料の統一のために評価が必要な項目について調査し、溶接材料を統一できる可能性を検証することであるが、本章ではまず、ケミカルタンカーに使用することが想定されている汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 規格の鋼板に対して、日本海事協会が KSUS329J3L 用の溶接材料として認定している KW2209 規格を満たす溶接材料と、ケミカルタンカーに通常使用されている KSUS316LN 鋼用の溶接材料である KW309MoL 規格を満たす溶接材料の、二種類の溶接材料を用いて製作した継手の静的強度について確認した結果を報告する。

3.2. 評価用溶接継手の製作

静的強度評価は日本海事協会鋼船規則 M 編 3 章⁹⁾および K 編 2 章、3 章¹⁰⁾に沿って実施した。溶接方法は同一の継手で溶接入熱をコントロールしやすく、かつ Fig.2-9 赤丸部に示す溶接線方向も考慮して、炭酸ガスアーク溶接による片面突合せ立向上進溶接とした。

試験に供した鋼板の化学成分を Table 3-1，機械的性質を Table 3-2 に、また試験に供した溶接材料の全溶着金属の化学成分を Table 3-3 に、機械的性質を Table 3-4 に示す。SF-DP8 と DW-329AP は汎用二相ステンレス鋼 KSUS329J3L 向けのもので、日本海事協会規格では KW2209 に分類される。DW-309MoL はオーステナイト系ステンレス鋼向けの溶接材料であり、日本海事協会規格では KW309MoL に分類される。以上示した鋼材と溶接材料を用いて、Table 3-5 に示す組み合わせで溶接継手を製作した。Table 3-5 内の (Symbol) は、後に示す種々の強度試験結果に関する図の表示に対応する。溶接ワイヤ直径はいずれの溶接材料も 1.2 mm である。

Table 3-1 Chemical composition of applied materials. (wt%)

| Material | Chemical composition (wt%) | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | N |
| KSUS329J3L | 0.017 | 0.54 | 1.81 | 0.024 | 0.000 | 5.74 | 22.55 | 3.06 | 0.17 |

Table 3-2 Mechanical properties of applied materials.

| Materials | 0.2% Proof stress [N/mm ²] | Tensile strength [N/mm ²] | Elongation [%] |
|------------|---|--|-------------------|
| KSUS329J3L | 580 | 769 | 34 |

Table 3-3 Chemical composition of applied welding consumables. (wt%)

| Material | Chemical composition [wt%] | | | | | | | | |
|-----------|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | N |
| SF-DP8 | 0.040 | 0.44 | 1.14 | 0.019 | 0.006 | 8.80 | 23.50 | 3.10 | 0.13 |
| DW-329AP | 0.024 | 0.63 | 0.88 | 0.020 | 0.005 | 9.11 | 22.99 | 3.40 | 0.13 |
| DW-309MoL | 0.023 | 0.72 | 0.61 | 0.019 | 0.002 | 12.61 | 22.28 | 2.70 | 0.03 |

Table 3-4 Mechanical properties of applied welding consumables.

| Materials | 0.2% Proof stress [N/mm ²] | Tensile strength [N/mm ²] | Elongation [%] |
|-----------|---|--|-------------------|
| SF-DP8 | 640 | 806 | 24 |
| DW-329AP | 638 | 819 | 29 |
| DW-309MoL | 521 | 690 | 30 |

Table 3-5 Applied combination of base metal and welding consumable.

| Joint ID (Symbol) | Base Materials | | Welding consumables | Target heat input [kJ/cm] |
|----------------------|----------------|------------|--------------------------|------------------------------|
| W11-1-1 (○) | KSUS329J3L | KSUS329J3L | KW2209 (SF-DP8) | 35 max. |
| W11-1-2 (○) | | | KW2209 (SF-DP8) | 35 min. |
| W11-2-1 (○) | | | KW2209 (DW-329AP) | 35 max. |
| W11-2-2 (○) | | | KW2209 (DW-329AP) | 35 min. |
| W11-3-1-1 (●) | | | KW309MoL (DW-309MoL)* | 35 max. |
| W11-3-1-2 (●) | | | KW309MoL (DW-309MoL)* | 35 max. |
| W11-3-2-1 (●) | | | KW309MoL (DW-309MoL)* | 35 min. |
| W11-3-2-2 (●) | | | KW309MoL (DW-309MoL)* | 35 min. |

Note) *: This welding consumables are not recommended in ClassNK Guidelines on welding of duplex stainless steels.

表中で*を付した溶接材料は、日本海事協会の二相ステンレス鋼の溶接に関するガイドライン¹⁴⁾において組み合わせが推奨されていないものであるが、*を付した溶接材料の適用性に支障が無いことを確認できれば、鋼材の組み合わせに関わらず溶接材料を統一できる可能性があるため、検討候補に加えた。

溶接継手の健全性は、日本海事協会ガイドライン及びこれが引用する日本海事協会鋼船規則に準じて評価した。また日本海事協会ガイドラインでは溶接入熱を 5~35 kJ/cm の範囲に収めるように規定している。これは過大な溶接入熱量は低温 HAZ 領域におい

て 475 °C脆化およびシグマ相脆化が懸念されるためであり、逆に過小な溶接入熱量は高温 HAZ 領域においてフェライト量過多となり、耐食性・靱性の劣化が懸念されるためである。しかしながら特に板厚が厚い場合には実施工時に不可抗力的に溶接条件が変動し、溶接入熱が局所的に 35 kJ/cm を超える場合が生じることも懸念される。そこで、溶接入熱が規定値上限を超えた場合の継手健全性についても調査するため、規定値を超える溶接条件で施工した溶接継手も準備した。Fig. 3-1 に継手の開先形状を示す。作業要領書では標準のギャップ量は 6 mm であるが、一部の継手では溶接入熱量を 35 kJ/cm 以上にするためにギャップ量を 12 mm にした。Table 3-6 , Table 3-7 に溶接条件を示す。いずれの試験においても 475 °C脆化およびシグマ相脆化を防止するためパス間温度は 150 °C未満になるように施工した。なお、これらの表には以下に示す種々の強度試験結果に関する図の表示に対応する記号も示している。

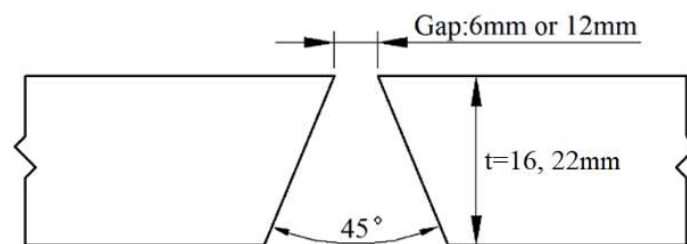


Fig. 3-1 Groove configuration.

Table 3-6 Welding conditions.

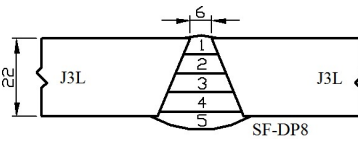
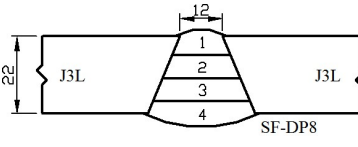
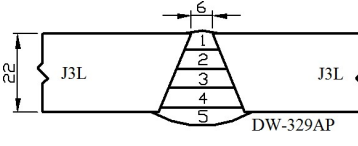
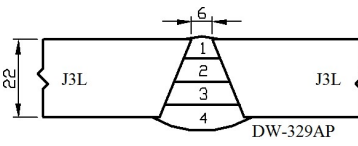
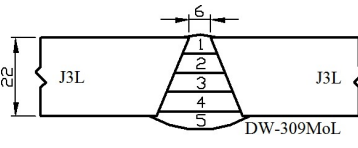
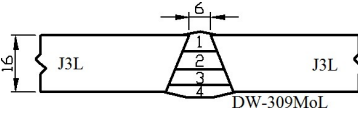
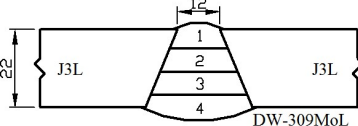
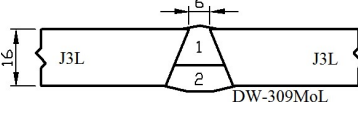
| Joint ID (Symbol) | Combination of base metal and welding consumables | Pass | Current [A] | Voltage [V] | Travel speed [cm/min] | Heat input [kJ/cm] |
|----------------------|---|--------------------|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| W11-1 -1 (○) |  | 1 | 140 | 23 | 7.7 | 25.1 |
| | | 2 | 150 | 24 | 9.4 | 23.0 |
| | | 3 | 150 | 24 | 9.1 | 23.7 |
| | | 4 | 150 | 24 | 10.0 | 21.6 |
| | | 5 | 150 | 24 | 7.4 | 29.2 |
| | | Average heat input | | | | |
| W11-1 -2 (○) |  | 1 | 140 | 24 | 3.3 | 61.1 |
| | | 2 | 140 | 24 | 5.3 | 38.0 |
| | | 3 | 150 | 24 | 5.4 | 40.0 |
| | | 4 | 150 | 24 | 4.5 | 48.0 |
| | | Average heat input | | | | |
| W11-2 -1 (○) |  | 1 | 130 | 23 | 6.5 | 27.6 |
| | | 2 | 140 | 23 | 10.0 | 19.3 |
| | | 3 | 140 | 24 | 8.1 | 24.9 |
| | | 4 | 140 | 24 | 7.0 | 28.8 |
| | | 5 | 130 | 24 | 5.1 | 36.7 |
| | | Average heat input | | | | |
| W11-2 -2 (○) |  | 1 | 140 | 24 | 3.5 | 57.6 |
| | | 2 | 140 | 24 | 5.9 | 34.2 |
| | | 3 | 150 | 24 | 5.4 | 40.0 |
| | | 4 | 150 | 24 | 3.6 | 60.0 |
| | | Average heat input | | | | |

Table 3-7 Welding conditions.

| Joint ID (Symbol) | Combination of base metal and welding consumables | Pass | Current [A] | Voltage [V] | Travel speed [cm/min] | Heat input [kJ/cm] |
|----------------------|---|--------------------|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| W11-3 -1-1 (●) |  | 1 | 130 | 27 | 6.7 | 31.4 |
| | | 2 | 140 | 26 | 10.4 | 21.0 |
| | | 3 | 140 | 26 | 9.8 | 22.3 |
| | | 4 | 140 | 26 | 9.1 | 24.0 |
| | | 5 | 140 | 27 | 6.7 | 33.9 |
| | | Average heat input | | | | |
| W11-3 2-1 (●) |  | 1 | 160 | 25 | 7.1 | 33.8 |
| | | 2 | 160 | 25 | 12.8 | 18.8 |
| | | 3 | 160 | 25 | 10.7 | 22.4 |
| | | 4 | 160 | 25 | 10.8 | 22.2 |
| | | Average heat input | | | | |
| W11-3 -1-2 (●) |  | 1 | 140 | 24 | 3.2 | 63.0 |
| | | 2 | 140 | 25 | 5.0 | 42.0 |
| | | 3 | 140 | 25 | 3.8 | 55.3 |
| | | 4 | 150 | 24 | 4.1 | 52.7 |
| | | Average heat input | | | | |
| W11-3 -2-2 (●) |  | 1 | 160 | 25 | 4.8 | 50.0 |
| | | 2 | 160 | 25 | 6.4 | 37.5 |
| | | Average heat input | | | | |

3.3. KSUS329J3L 同士の継手の静的強度評価

3.3.1. 断面マクロ観察

Table 3-5 に示す継手の溶接金属部に対して、JIS G0553「鋼のマクロ組織試験方法」¹⁵⁾に基づき、継手断面を塩酸にてエッチング後に溶接部断面のマクロ観察を行った。撮影したマクロ断面写真を Fig. 3-2 に示す。いずれの継手においても融合不良等の異常は確認されなかった。

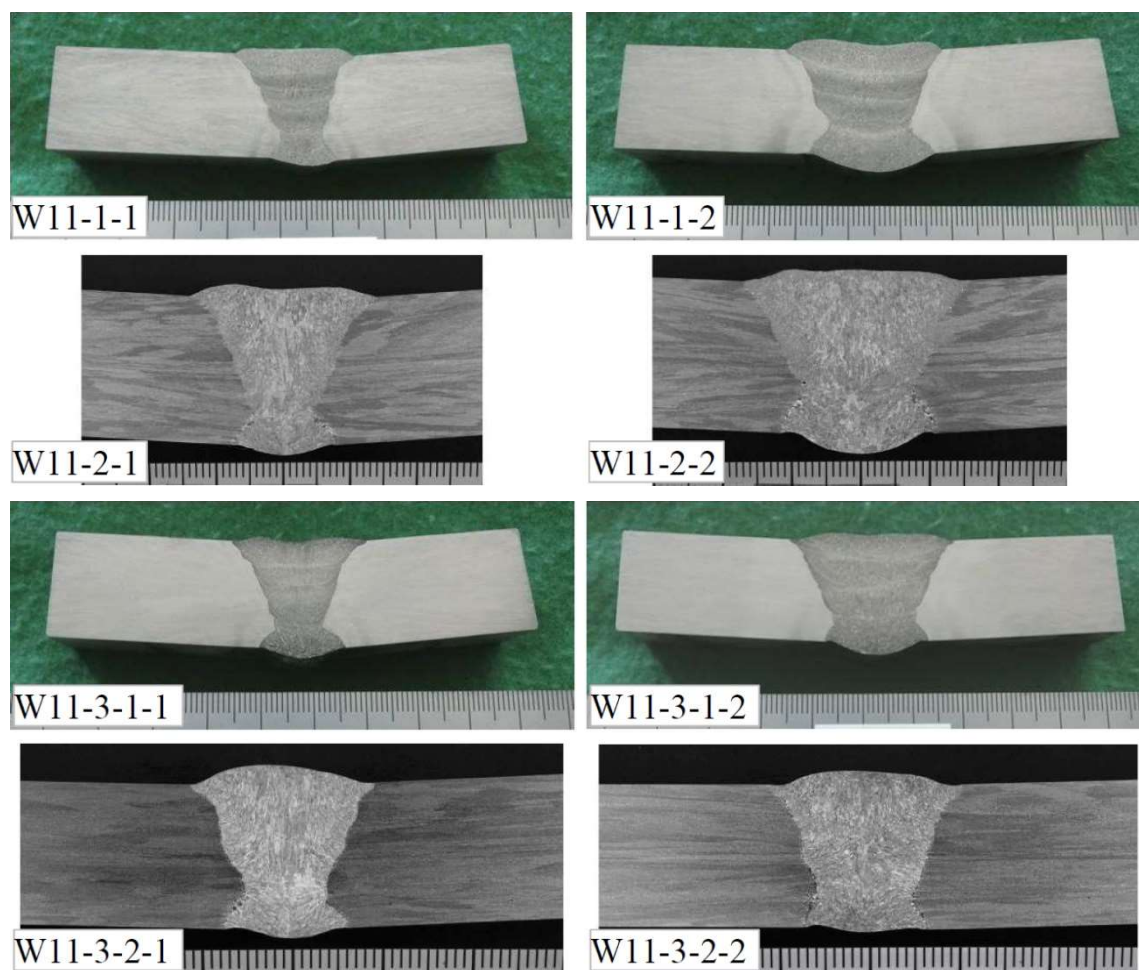


Fig. 3-2 Macroscopic observation photographs of welded joint made of KSUS329J3L stainless steel.

3.3.2. 化学成分分析

Table 3-5 に示す継手の溶接金属部に対して、化学成分分析を実施した。分析にはスパーク放電発光分光分析法（カントバック）を用いた。結果を Table 3-8 に示す。

Table 3-8 Chemical composition of weld metal made of KSUS329J3L stainless steel.

| Weld consumables | Joint ID | Chemical composition [wt%] | | | | | | | | |
|------------------|-----------|----------------------------|------|------|-------|-------|------|------|-----|------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | N |
| KW2209 | W11-1-1 | 0.031 | 0.60 | 1.51 | 0.018 | 0.004 | 7.7 | 22.8 | 3.1 | 0.13 |
| | W11-1-2 | 0.026 | 0.62 | 1.45 | 0.018 | 0.004 | 7.9 | 23.0 | 3.1 | 0.13 |
| | W11-2-1 | 0.023 | 0.62 | 0.65 | 0.022 | 0.003 | 8.8 | 22.9 | 3.5 | 0.14 |
| | W11-2-2 | 0.024 | 0.60 | 0.63 | 0.022 | 0.003 | 8.8 | 22.7 | 3.5 | 0.14 |
| KW 309MoL | W11-3-1-1 | 0.031 | 0.62 | 0.71 | 0.020 | 0.003 | 11.8 | 22.3 | 2.8 | 0.04 |
| | W11-3-1-2 | 0.026 | 0.70 | 0.64 | 0.019 | 0.002 | 12.2 | 22.2 | 2.8 | 0.04 |
| | W11-3-2-1 | 0.017 | 0.83 | 0.72 | 0.017 | 0.002 | 11.6 | 22.8 | 2.7 | 0.04 |
| | W11-3-2-2 | 0.021 | 0.81 | 0.72 | 0.017 | 0.002 | 11.8 | 22.7 | 2.7 | 0.04 |

Table 3-8 より、KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手は、KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手よりも Ni の含有量が高いことが確認された。Ni には金属組織をオーステナイト化する傾向があると言われていたが、この測定結果は、後述する KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手のフェライト量が低下する現象を裏付けるものと言える。

3.3.3. フェライト量およびマイクロ組織

Table 3-5 に示す継手の溶接金属部に対して、フェライト量測定とマイクロ組織観察を実施した。フェライト量測定とマイクロ組織観察を実施した部位を Fig. 3-3 に示す。フェライト量の測定は日本海事協会鋼船規則 M 編に準じて溶接金属部で 3 か所、HAZ 部で 3 か所の計 6 か所についてそれぞれ 5 回ずつ測定し、その中の最高値を測定結果とした。測定にはフェライトスコープ（Fischer 社製 FERITSCOPE FMP30）を使用した。

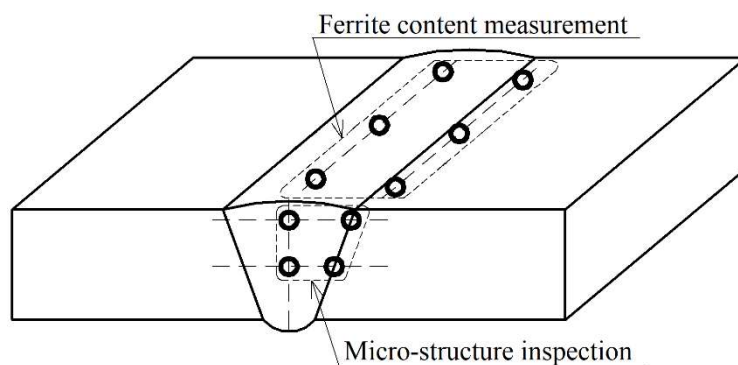


Fig. 3-3 Positions of the ferrite content measurement and microstructure of weld metal inspection.

日本海事協会ガイドラインでは二相ステンレス鋼の溶接部（溶接金属と溶接熱影響部）表面のフェライト量を 30～70%の範囲に収めるように規定されている。換言すると、溶接部表面のフェライト量が規格値に収まっていれば溶接部が母材と同様二相ステンレス鋼の性能を有していることを担保していると言える。

Fig. 3-3 に示す 6 点のフェライト量を測定した結果を、溶接金属部表面と溶接熱影響部（HAZ）表面に分けて Fig. 3-4 に示す。

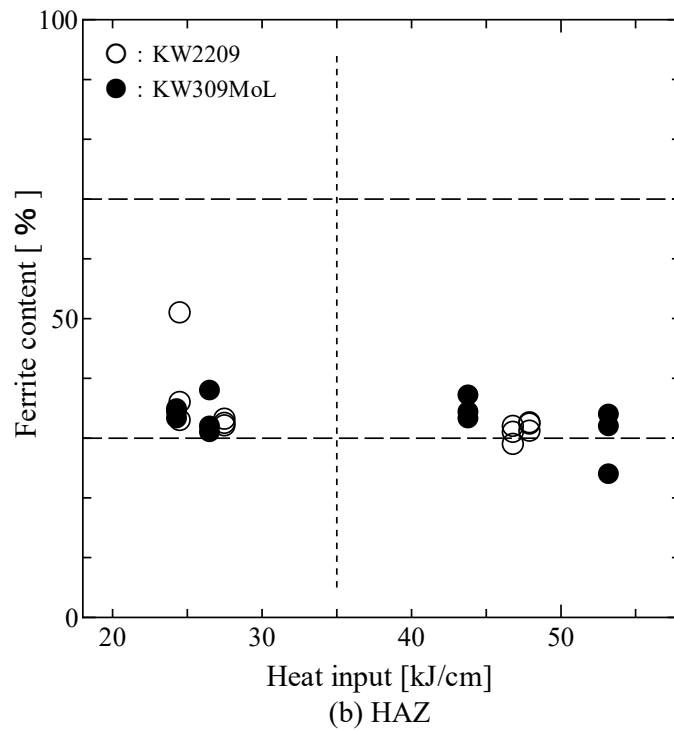
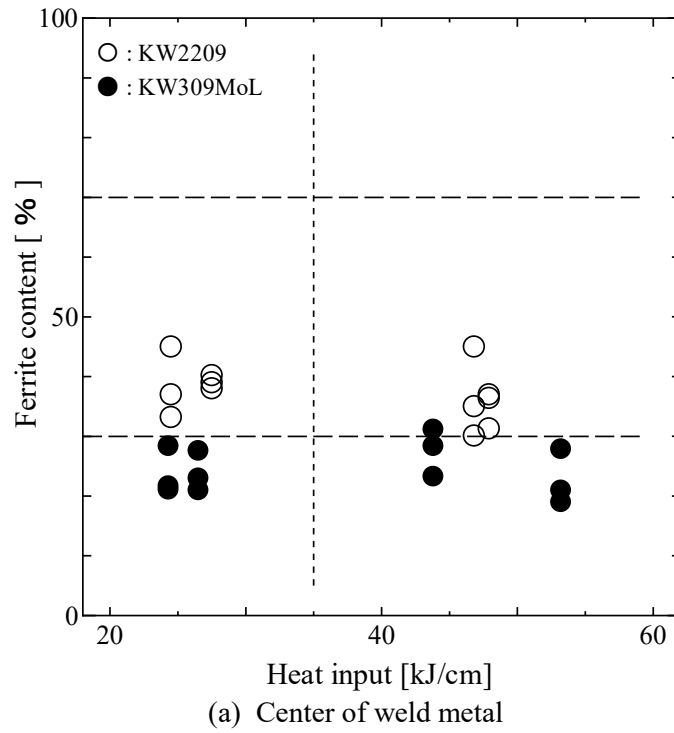


Fig. 3-4 Measured ferrite content in weld metals made of KSUS329J3L stainless steel.

Fig. 3-4 (a) に示す溶接金属部表面に対する測定結果を見ると、KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手では、溶接入熱量が 35 kJ/cm を超える場合も含め、鋼船規則で規定されているフェライト量の範囲を満足していることを確認した。ただし、KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手ではフェライト量が 30 %以下であった。これは溶接金属中の Ni 含有量が KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手よりも多いため、溶接金属がオーステナイトに近い組織で構成されているためだと考えられる。一方、Fig. 3-4 (b) に示す継手表面の HAZ 領域のフェライト量測定結果は、いずれの溶接材料を用いても全体的に少なめであるが、一部の計測結果を除いてガイドラインの要求値をほぼ満足できていることを確認した。フェライト量が規定値を下回る場合の問題点は耐食性であるため、定期検査により腐食状況を確実にチェックすることで船体構造の健全性は担保できるものと考えられる。

上述のように、継手表面のフェライト量は問題ないことは確認したが、継手の健全性を担保する上では HAZ を含めて溶接内部のフェライト量の状況を確認しておくことも有用であると考え、KSUS329J3L 鋼板同士の継手に推奨されている溶接材料を用いて、かつ溶接入熱も規格内に収めた溶接条件にて製作した継手を対象に、溶接部断面のフェライト量を確認することで傾向を掴むこととした。測定対象の継手番号は W11-2-1 であり、溶接部断面の板厚中央部を 1mm ピッチで 5 回ずつ測定し、その中の最高値を測定結果とした。結果を Fig. 3-5 に示す。この結果より、溶接部断面の板厚中央部でのフェライト量は試験片の幅方向の全域で船級の規格値を満足していること、および、溶接金属部だけが一様にフェライト量が低下していること、また HAZ でのフェライト量の低下があまり見受けられないことを確認した。

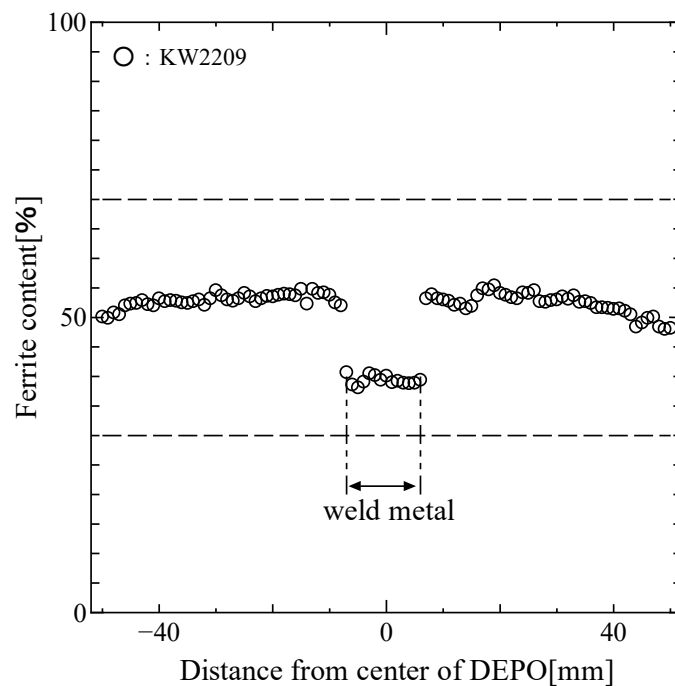


Fig. 3-5 Measured ferrite content over center of plate thickness of weld metals made of KSUS329J3L stainless steel.

溶接金属部および HAZ のオーステナイト組織とフェライト組織の比率を確認するため、マイクロ組織観察を実施した。対象の継手番号は W11-1-1, W11-1-2, W11-3-1-1, W11-3-2-1 の 4 体で、溶接部表面の溶接金属と母材の境界部分を観察した。

Fig. 3-6 に観察結果を示すが、いずれの継手においても金属間化合物等の有害な組織は確認されなかった。ただし汎用二相ステンレス鋼板に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手では、フェライト組織が減少していることも確認できた。

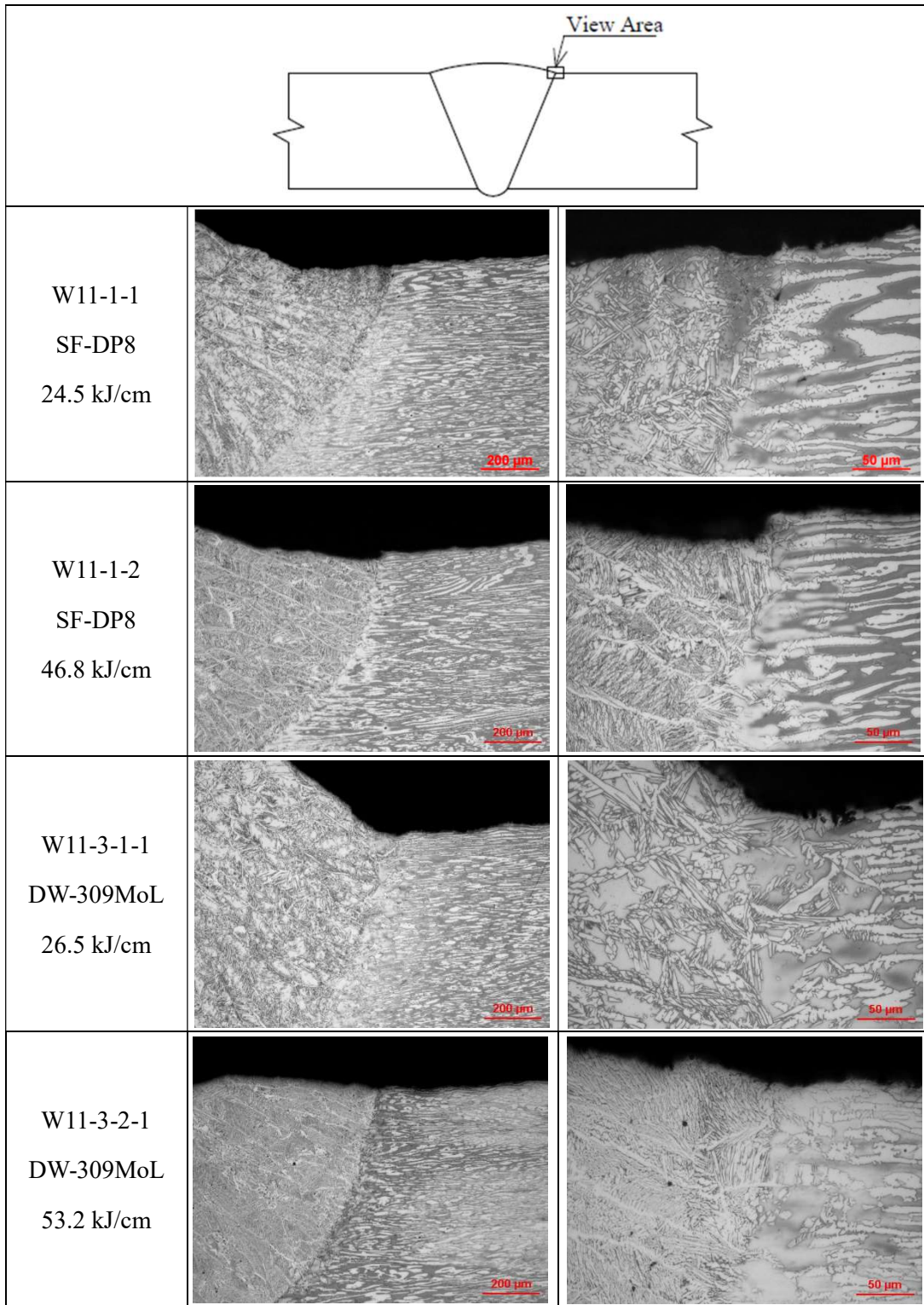


Fig. 3-6 Photographs of microstructure of weld metals made of KSUS329J3L stainless steel.

3.3.4. 引張試験

Table 3-5 に示す継手に対して，日本海事協会鋼船規則 M 編 3 章⁹⁾にて規定されている U2B 号に加工した後に引張強度試験を実施した．結果を Fig. 3-7 に示す． Fig. 3-7 において，KW2209 規格を満たす溶接材料である SF-DP8 および DW-329AP を用いて製作した継手（継手番号：W11-1-1，W11-1-2，W11-2-1，W11-2-2）を○印で，KW309MoL 規格を満たす溶接材料である DW-309MoL を用いて製作した継手（継手番号：W11-3-1-1，W11-3-2-1，W11-3-2-2）を●印で示している．

いずれの溶接材料を用いても，また溶接入熱量が 35 kJ/cm を超えていた場合も含め，全ての試験片において船級規格（620 N/mm²）を満足することが確認された．また，破断位置であるが，溶接材料として KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した試験片は母材部で破断したが，DW-309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した全ての試験片が溶接金属部で破断したことも確認した．

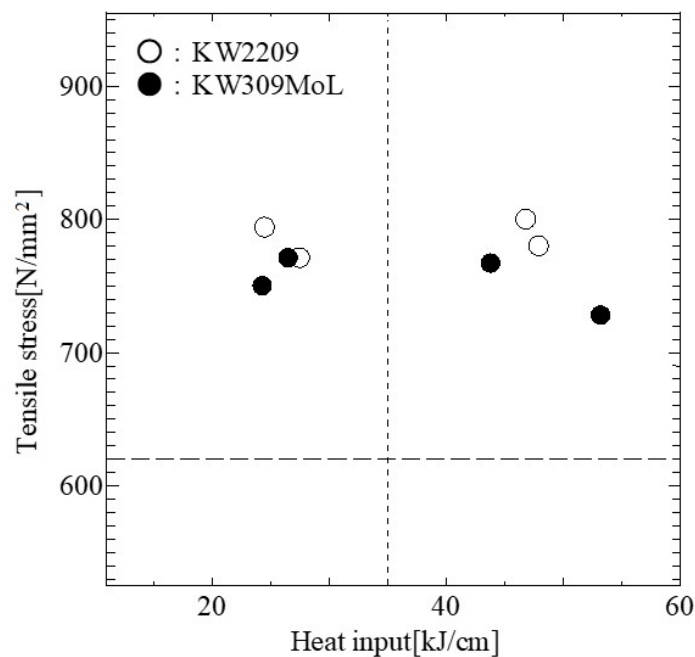


Fig. 3-7 Tensile strength of welded joints made of KSUS329J3L stainless steel.

引張試験片の破断位置を Fig. 3-8 に示す.



Fig. 3-8 Photograph of specimens made of KSUS329J3L stainless steel after tensile tests.

3.3.5. 表・裏曲げ試験

Table 3-5 に示す継手に対して、溶接金属内部の健全性を確認するため表・裏曲げ試験を実施した。試験片形状は日本海事協会鋼船規則 M 編 3 章⁹⁾にて規定されている UB-1 号である。いずれの試験片においても規格上不合格となる割れ，融合不良のような欠陥は見受けられなかった。結果を Fig. 3-9 に示す。

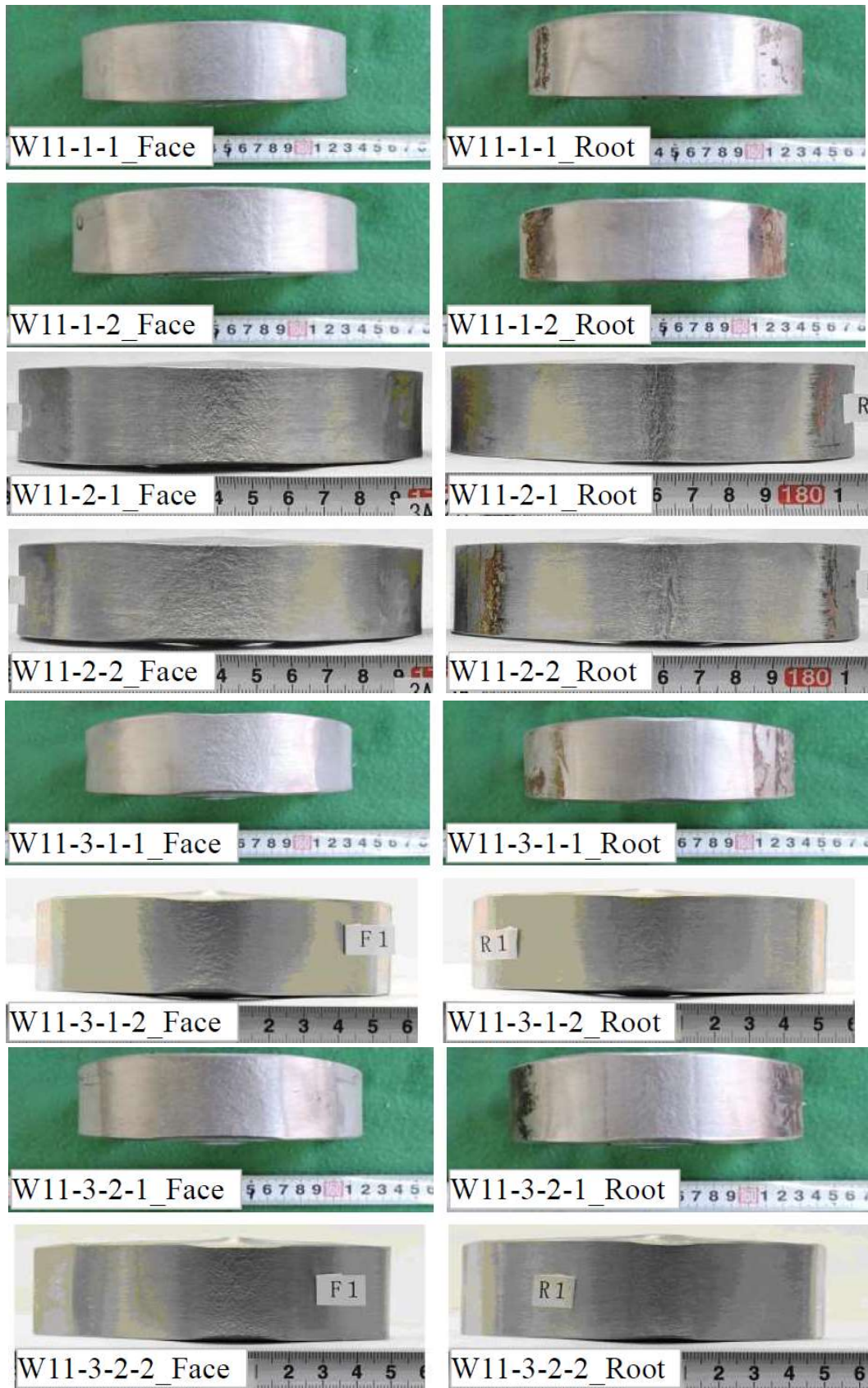


Fig. 3-9 Photograph of specimens made of KSUS329J3L stainless steel after bending tests.

3.3.6. シャルピ衝撃試験

鋼船規則ではステンレス鋼板同士の溶接継手の試験において衝撃試験は必須とはされていないが、溶接部の健全性を確認するために、Table 3-5 に示す継手に対してシャルピ衝撃試験を実施した。目標とする性能は鋼船規則では規定されていないため、他船級の規格¹⁶⁾を参考にして、鋼船規則 K 編 2 章¹¹⁾にて規定されている U4 号試験片（10 mm フルサイズ，V 型 2 mm ノッチ）を用いて、試験温度-20 °Cにおいて 27 J 以上とした。Fig. 3-10 にシャルピ衝撃試験の試験片採取位置を示す。ノッチ位置は、本研究では溶接材料の違いによる溶接金属部の性能を確認することが目的であることより、溶接金属中央部のみとした。

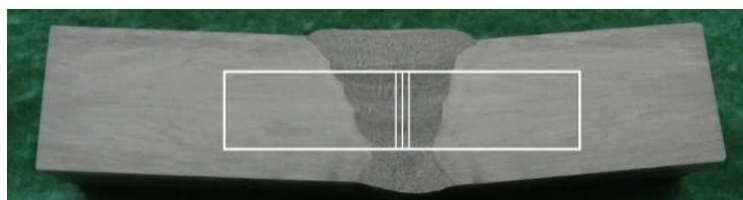


Fig. 3-10 Collection position of Charpy impact test specimen.

KSUS329J3L 鋼板同士の継手のシャルピ衝撃試験結果を Fig. 3-11 に示す。いずれの溶接材料を用いても、また溶接入熱量が 35 kJ/cm を超えていた場合も含め、全ての継手において目標を満足していることを確認した。

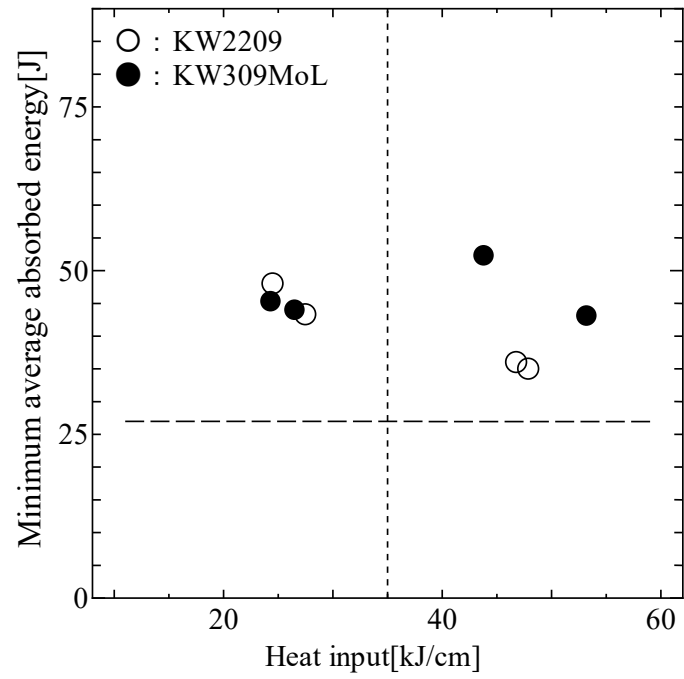


Fig. 3-11 Absorbed Charpy impact energy of welded joints made of KSUS329J3L stainless steel.

3.3.7. 硬さ試験

鋼船規則ではステンレス鋼板同士の溶接継手の試験において硬さ試験は必須とはされていないが、溶接部の健全性を確認するために、Table 3-5 に示す継手に対してビッカース硬さ試験を実施した。目標とする性能は、溶接金属部においては鋼船規則で規定されていないため、KSUS329J3L 鋼材について規定している 320 HV 以下とした。測定は 1 mm ピッチで Fig. 3-12 に示す位置にて実施した。

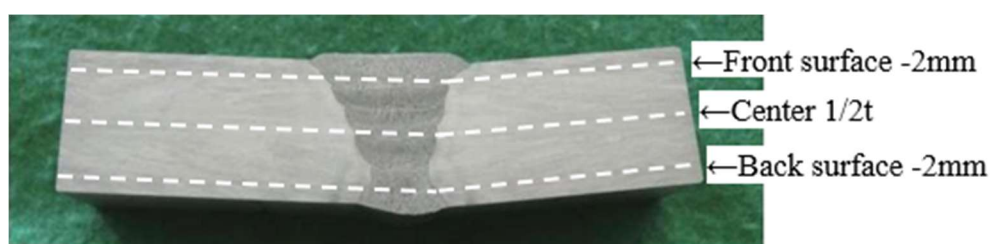


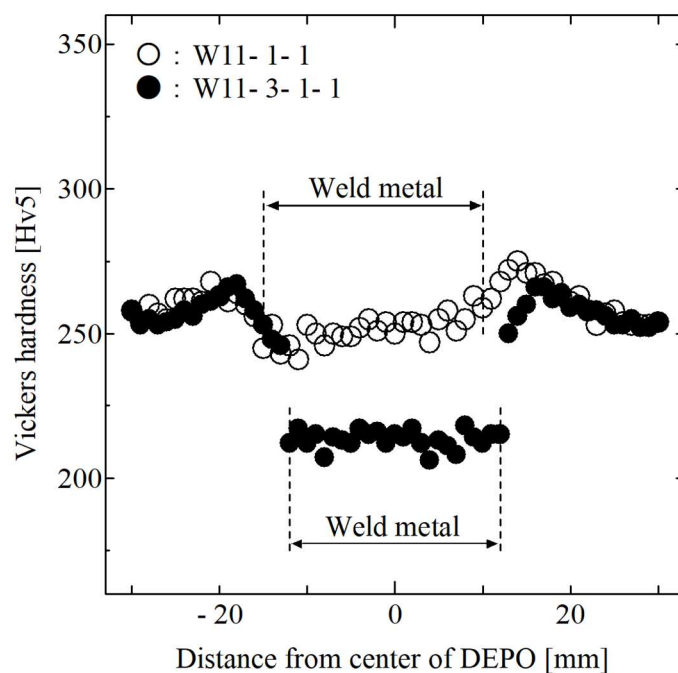
Fig. 3-12 Measured positions of Vickers hardness test.

溶接材料の違いによる硬さ試験結果の比較を容易にするため、Fig. 3-13 には溶接入熱を 35 kJ/cm 以下に抑えた継手番号 W11-1-1 および W11-3-1-1 の結果を、また、Fig. 3-14 には溶接入熱を 35 kJ/cm 以上とした継手番号 W11-1-2 および W11-3-1-2 の結果を示す。

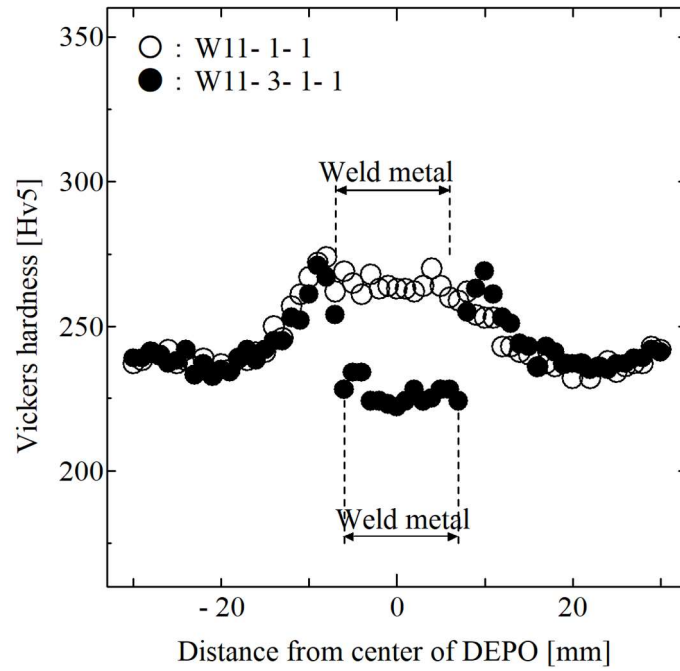
いずれの継手についても、HAZ を含め 320 Hv 以下の目標値を満足していることを確認した。併せて、KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手の溶接金属部は、母材である KSUS329J3L より軟化していることも確認した。

また、溶接入熱量が 35 kJ/cm を超えることによる金属組織硬さをはじめとした、静的強度への影響については、今回の試験では見出すことはできなかった。汎用二相ステンレス鋼の溶接作業において、溶接入熱量が高くなるほど溶接金属部および HAZ への悪影響が懸念されるのは、溶接入熱量が高くなるほど溶接金属部の冷却速度が低下することで、 σ 相、 α' 固溶体、Cr 炭化物、Cr 窒化物等の有害成分が析出する危険な温度域を通過する時間が長くなることだと言われている。今回の試験では、溶接入熱量を 35 kJ/cm 以上にするため、あえて開先ギャップ量を 12 mm に広げた継手も評価対象としたが、これらの継手の溶接金属部および HAZ への悪影響が見出せなかったという今回の試験結果は、実際にケミカルタンカーを建造する際の管理面、施工面における安心材料になり得る、有意義な結果であったと言える。無論溶接入熱量の制限を無視して施工しても良

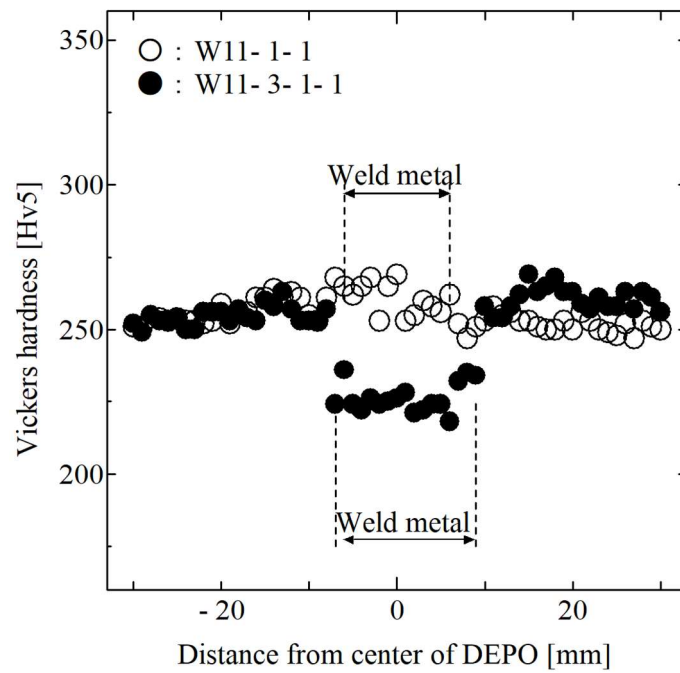
いということではなく、あくまで何かしら不具合が発生した時の保険という意味合いであることは言うまでもない。また今回の試験では検証していないが、溶接金属部およびHAZへの悪影響についてはパス間温度も影響度が大きいと推察される。短い溶接線に対して連続で複数パス溶接した場合には危険な温度域にさらされる時間が長くなること容易に想像できるため、このような溶接法は厳に慎まなければならない。



(a) Front surface -2mm



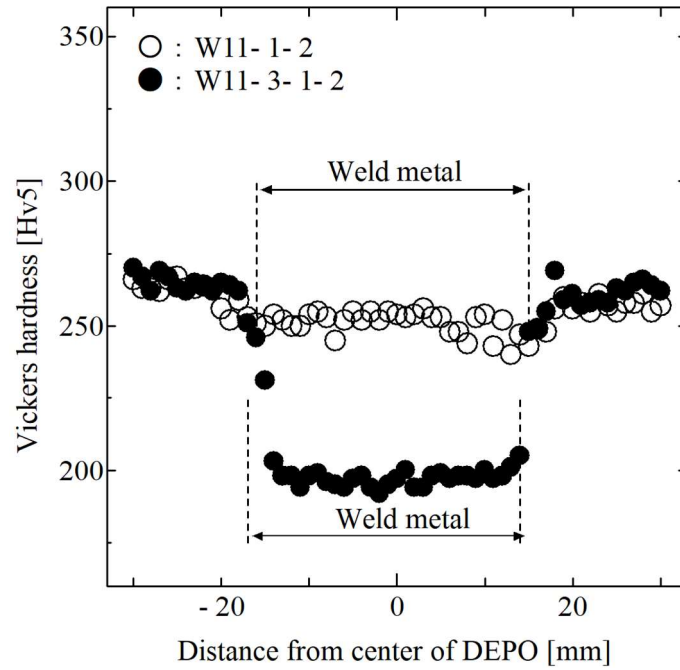
(b) 1/2t



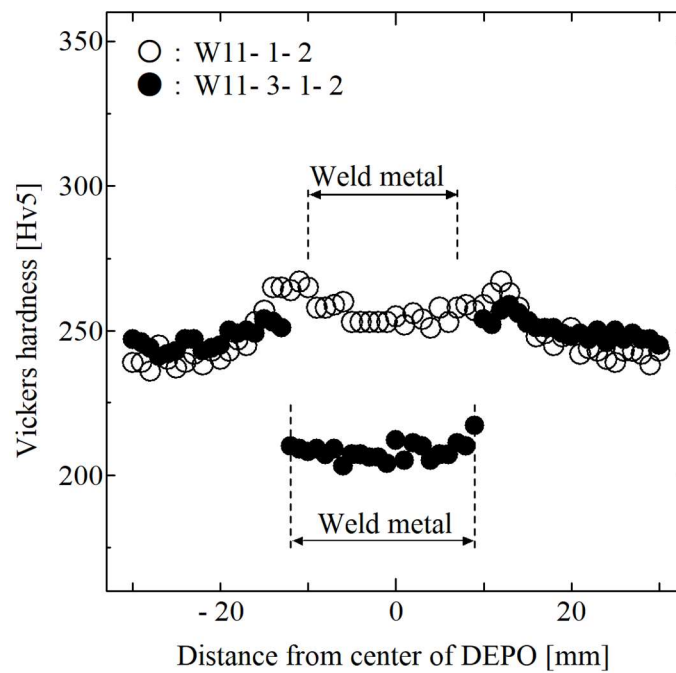
(c) Back surface -2mm

Fig. 3-13 Vickers hardness distributions of welded joints made of KSUS329J3L stainless steel.

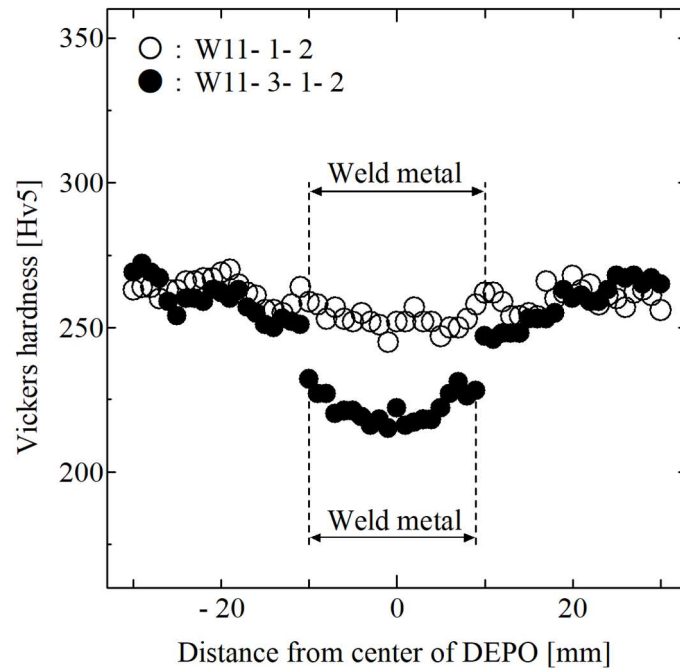
(Heat input less than 35 kJ/cm)



(a) Front surface -2mm



(b) 1/2t



(c) Back surface -2mm

Fig. 3-14 Vickers hardness distributions of welded joints made of KSUS329J3L stainless steel.

(Heat input over 35 kJ/cm)

3.4. 結言

KSUS329J3L 鋼板同士の接合に、KW2209 規格を満たす溶接材料と KW309MoL 規格を満たす溶接材料の、両方の溶接材料を用いて製作した継手の静的強度評価を実施した。

KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手については、溶接入熱量が 35 kJ/cm を超える溶接条件の継手も含め、すべての評価項目で船級の求める性能を有していることを確認した。一方、KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手については、継手表面の溶接金属部においてフェライト量が規格値下限の 30%を下回っていたこと、引張試験においては結果が規格値を十分満足しているものの溶接金属部で破断したこと、硬さ試験では溶接金属部が KSUS329J3L 鋼板母材部よりも軟化していることをそれぞれ確認した。

KSUS329J3L 鋼板同士の継手に対して KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手の引張試験において示した引張強度は、728～771 N/mm² の範囲であった。かたや試験に供した母材の引張強度は 769 N/mm²、試験に供した KW309MoL 規格を満たす溶接材料の全溶着金属の丸棒引張強度は 690 N/mm² であることより、KSUS329J3L 鋼板同士の継手に対して KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて溶接した継手の溶接金属部の強度特性は、KSUS316LN 鋼板に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて溶接した継手と、KSUS329J3L 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて溶接した継手との、中間の性能を有していると言える。

以上より、KSUS329J3L 鋼板に対して KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いてケミカルタンカーを建造することは、たとえ静的強度評価の結果が規則を満足していたとしても、その部分が汎用二相ステンレス鋼の特徴である高強度を活かした設計が出来ないため、KW309MoL 規格を満たす溶接材料の使用を検討する必要はないと結論付けた。

第4章 汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステン

レス鋼から構成される異材継手の静的強度評価

4.1. 緒言

本章では、汎用二相ステンレス鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の、両方を混在させたケミカルタンカーを建造することを想定して、KSUS329J3L 鋼板、KSUS316LN クラッド鋼板、炭素鋼板を組み合わせ、日本海事協会がKSUS329J3L 用の溶接材料として認定しているKW2209 規格を満たす溶接材料と、ケミカルタンカーに通常使用されているKSUS316LN 鋼用の溶接材料であるKW309MoL 規格を満たす溶接材料の、二種類の溶接材料を用いて製作した継手の静的強度について確認した結果を報告する。

4.2. 評価用溶接継手の製作

静的強度評価は第3章と同様の項目、継手製作要領にて実施した。

試験に供した鋼板の化学成分をTable 4-1 に示す。試験に供した溶接材料は、第3章で示したものと同一のため説明は割愛する。鋼材と溶接材料はTable 4-2 に示す組み合わせで継手を製作した。Table 4-2 内の (Symbol) は、後に示す種々の強度試験結果に関する図の表示に対応する。なお、オーステナイト系ステンレス鋼と炭素鋼の組み合わせに対して、KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作する継手は、一般的なケミカルタンカーの建造で既に実績があるため評価対象から除外している。

Table 4-1 Chemical composition of applied materials. [wt%]

| Material | | Chemical composition [wt%] | | | | | | | | |
|---------------------|-------|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | N |
| KSUS329J3L | | 0.017 | 0.54 | 1.81 | 0.024 | 0.000 | 5.74 | 22.55 | 3.06 | 0.17 |
| KSUS316LN | | 0.013 | 0.71 | 0.66 | 0.029 | 0.000 | 10.75 | 18.13 | 2.85 | 0.17 |
| KSUS316LN (Clad) | (SUS) | 0.012 | 0.45 | 1.22 | 0.025 | 0.001 | 10.76 | 17.59 | 2.88 | 0.15 |
| | (MS) | 0.16 | 0.19 | 0.64 | 0.014 | 0.006 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 |
| SM490A | | 0.16 | 0.35 | 1.30 | 0.008 | 0.001 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 |

Table 4-2 Applied combination of base metal and welding consumable.

| Joint ID (Symbol) | Base materials | | Welding consumables | Target heat input [kJ/cm] |
|----------------------|---|---|---|---------------------------------|
| W13-3-1 (▲) | KSUS329J3L | KSUS316LN Clad (Front surface: Clad) | KW309MoL (DW-309MoL) * | 35 max. |
| W15-2-1 (▽) | KSUS329J3L | SM490A | KW2209 (SF-DP8) * | 35 max. |
| W15-3-1 (▼) | KSUS329J3L | SM490A | KW309MoL (DW-309MoL) * | 35 max. |
| W22-2-1 (□) | KSUS316LN | KSUS316LN | KW2209 (DW-329AP) * | 35 max. |
| W22-2-2 (□) | KSUS316LN | KSUS316LN | KW2209 (DW-329AP) * | 35 min. |
| W25-2-1 (◇) | KSUS316LN | SM490A | KW2209 (DW-329AP) * | 35 max. |
| W25-2-2 (◇) | KSUS316LN | SM490A | KW2209 (DW-329AP) * | 35 min. |
| W33-2-1 (◁) | KSUS316LN Clad (Front surface: Clad) | KSUS316LN Clad (Front surface: Clad) | 1 st ,2 nd pass:DW-100 3 rd ,4 th pass:KW2209 (DW-329AP)* | 35 max. |
| W35-2-1 (⊗) | KSUS316LN Clad (Front surface: Clad) | SM490A | KW2209 (DW-329AP) * | 35 max. |
| W44-2-1 (▷) | KSUS316LN Clad (Back surface: Clad) | KSUS316LN Clad (Back surface: Clad) | KW2209 (DW-329AP) * | 35 max. |

Note) *: This welding consumables are not recommended in ClassNK Guidelines on Welding of Duplex Stainless Steels.

表中の溶接材料は全て日本海事協会ガイドラインにおいて組み合わせが推奨されていないものであるが、今回の試験の結果を通して溶接材料の適用性に支障が無いことを確認できれば、鋼材の組み合わせに関わらず溶接材料を統一できる可能性がある。

溶接継手の健全性は日本海事協会ガイドライン及びこれが引用する日本海事協会鋼船規則に準じて評価した。溶接入熱は5~35 kJ/cm の範囲に収めることを標準とするが、一部の継手では35 kJ/cm を超える条件でも施工した。なおいずれの継手もパス間温度は150 °C未満としている。

Fig. 4-1 に継手の開先形状を示す。著者が所属している造船所の作業要領書では、標準のギャップ量は6 mm であるが、一部の継手では溶接入熱量を35 kJ/cm 以上にするためにギャップ量を12 mm にした。Table 4-3 , Table 4-4 , Table 4-5 に溶接条件を示す。なお、これらの表には以下に示す種々の強度試験結果に関する図の表示に対応する記号も示している。

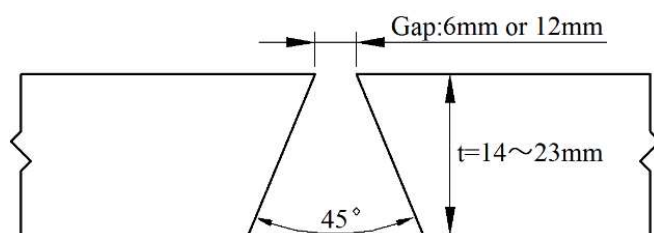


Fig. 4-1 Groove configuration.

Table 4-3 Welding conditions.

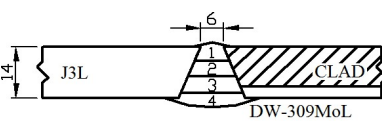
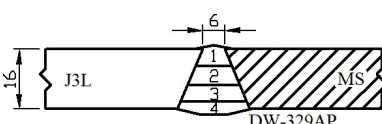
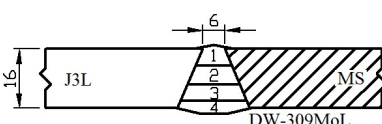
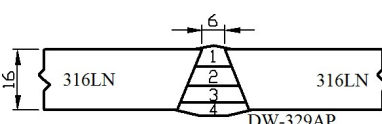
| Joint ID (Symbol) | Combination of base metal and welding consumables | Pass | Current [A] | Voltage [V] | Travel speed [cm/min] | Heat input [kJ/cm] |
|----------------------|---|--------------------|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| W13-3 -1 (▲) |  | 1 | 160 | 25 | 7.0 | 34.3 |
| | | 2 | 160 | 25 | 10.3 | 23.3 |
| | | 3 | 160 | 25 | 9.1 | 26.4 |
| | | 4 | 160 | 25 | 8.6 | 27.9 |
| | | Average heat input | | | | |
| W15-2 -1 (▽) |  | 1 | 200 | 24 | 8.7 | 33.1 |
| | | 2 | 200 | 24 | 17.0 | 16.9 |
| | | 3 | 160 | 25 | 11.7 | 20.5 |
| | | 4 | 160 | 25 | 12.1 | 19.8 |
| | | Average heat input | | | | |
| W15-3 -1 (▼) |  | 1 | 160 | 25 | 9.8 | 24.5 |
| | | 2 | 160 | 25 | 14.2 | 16.9 |
| | | 3 | 160 | 25 | 12.7 | 18.9 |
| | | 4 | 160 | 25 | 11.7 | 20.5 |
| | | Average heat input | | | | |
| W22-2 -1 (□) |  | 1 | 160 | 26 | 10.5 | 23.8 |
| | | 2 | 160 | 26 | 12.8 | 19.5 |
| | | 3 | 160 | 26 | 10.9 | 22.9 |
| | | 4 | 160 | 26 | 12.9 | 19.3 |
| | | Average heat input | | | | |

Table 4-4 Welding conditions.

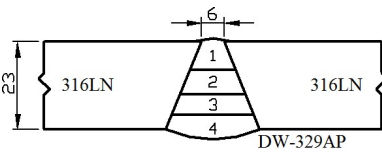
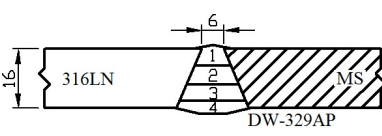
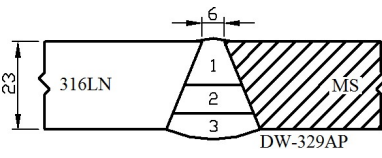
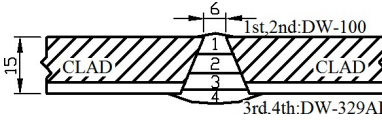
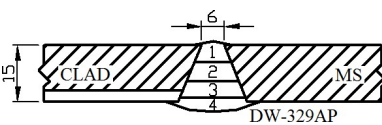
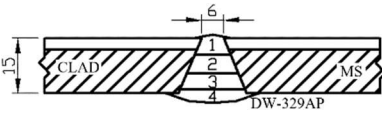
| Joint ID (Symbol) | Combination of base metal and welding consumables | Pass | Current [A] | Voltage [V] | Travel speed [cm/min] | Heat input [kJ/cm] | |
|----------------------|---|--------------------|---|----------------|-----------------------------|--------------------------|------|
| W22-2 -2 (□) |  | 1 | 160 | 26 | 6.9 | 36.2 | |
| | | 2 | 160 | 26 | 7.1 | 35.2 | |
| | | 3 | 160 | 26 | 7.0 | 35.7 | |
| | | 4 | 160 | 26 | 7.1 | 35.2 | |
| | | Average heat input | | | | | 35.6 |
| W25-2 -1 (◇) |  | 1 | 160 | 26 | 10.4 | 24.0 | |
| | | 2 | 160 | 26 | 12.9 | 19.3 | |
| | | 3 | 160 | 26 | 11.1 | 22.5 | |
| | | 4 | 160 | 26 | 12.9 | 19.3 | |
| | | Average heat input | | | | | 21.3 |
| W25-2 -2 (◇) |  | 1 | 160 | 26 | 6.9 | 36.2 | |
| | | 2 | 160 | 26 | 6.9 | 36.2 | |
| | | 3 | 160 | 26 | 7.4 | 33.7 | |
| | | Average heat input | | | | | 35.6 |
| | | W33-2 -1 (△) |  | 1 | 200 | 24 | 10.9 |
| 2 | 200 | | | 24 | 17.4 | 16.6 | |
| 3 | 160 | | | 25 | 12.7 | 18.9 | |
| 4 | 160 | | | 25 | 14.8 | 16.2 | |
| Average heat input | | | | | 19.5 | | |

Table 4-5 Welding conditions.

| Joint ID (Symbol) | Combination of base metal and welding consumables | Pass | Current [A] | Voltage [V] | Travel speed [cm/min] | Heat input [kJ/cm] |
|--------------------------------|--|--------------------|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| W35-2 -1 (\otimes) |  | 1 | 160 | 25 | 9.2 | 26.1 |
| | | 2 | 160 | 25 | 17.1 | 14.0 |
| | | 3 | 160 | 25 | 13.2 | 18.2 |
| | | 4 | 160 | 25 | 13.0 | 18.5 |
| | | Average heat input | | | | |
| W44-2 -1 (\triangle) |  | 1 | 160 | 25 | 12.0 | 20.0 |
| | | 2 | 160 | 25 | 17.4 | 13.8 |
| | | 3 | 160 | 25 | 16.4 | 14.6 |
| | | 4 | 160 | 25 | 15.3 | 15.7 |
| | | Average heat input | | | | |

4.3. 異材継手の静的強度評価

4.3.1. 断面マクロ観察

Table 4-2 に示す継手の溶接金属部に対して、JIS G0553「鋼のマクロ組織試験方法」¹⁵⁾に基づき、継手断面を塩酸にてエッチング後に溶接部断面のマクロ観察を行った。撮影した断面マクロ写真を Fig. 4-2 に示す。いずれの試験片においても融合不良等の異常は確認されなかった。

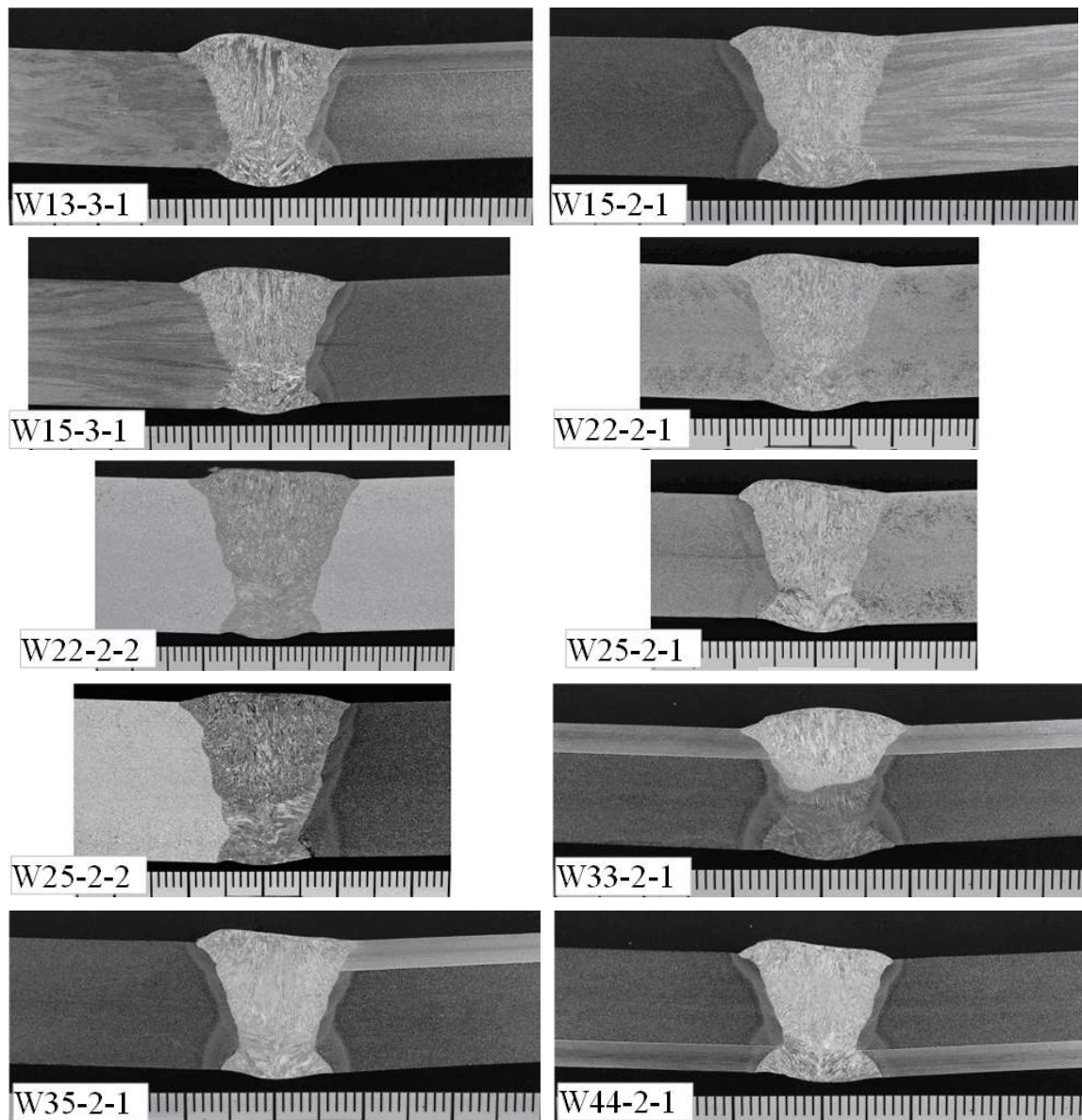


Fig. 4-2 Macroscopic observation photographs of welded joint made of various combinations of base metals.

4.3.2. 化学成分分析

Table 4-2 に示す継手の溶接金属部に対して、化学成分分析を実施した。分析にはスパーク放電発光分光分析法（カントバック）を用いた。結果を Table 4-6 に示す。

Table 4-6 Chemical composition of weld metal made various combinations of base metal.

| Weld consumables | Joint ID | Chemical composition (wt%) | | | | | | | | |
|------------------|----------|----------------------------|------|------|-------|-------|------|------|-----|------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | N |
| KW2209 | W15-2-1 | 0.037 | 0.55 | 0.69 | 0.020 | 0.003 | 8.3 | 21.1 | 3.4 | 0.13 |
| | W22-2-1 | 0.030 | 0.60 | 0.62 | 0.024 | 0.003 | 9.6 | 22.3 | 3.6 | 0.14 |
| | W22-2-2 | 0.024 | 0.63 | 0.61 | 0.023 | 0.003 | 9.7 | 22.9 | 3.5 | 0.14 |
| | W25-2-1 | 0.039 | 0.57 | 0.66 | 0.020 | 0.003 | 9.0 | 21.7 | 3.3 | 0.12 |
| | W25-2-2 | 0.026 | 0.60 | 0.62 | 0.019 | 0.004 | 9.3 | 22.4 | 3.5 | 0.13 |
| | W33-2-1 | 0.029 | 0.53 | 0.70 | 0.019 | 0.004 | 7.9 | 19.0 | 3.0 | 0.12 |
| | W35-2-1 | 0.038 | 0.51 | 0.64 | 0.020 | 0.003 | 8.4 | 20.5 | 3.3 | 0.12 |
| | W44-2-1 | 0.037 | 0.52 | 0.62 | 0.020 | 0.004 | 8.3 | 20.3 | 3.3 | 0.12 |
| KW | W13-3-1 | 0.024 | 0.79 | 0.72 | 0.016 | 0.003 | 11.8 | 22.2 | 2.7 | 0.03 |
| 309MoL | W15-3-1 | 0.030 | 0.79 | 0.69 | 0.015 | 0.003 | 11.6 | 21.7 | 2.6 | 0.03 |

Table 4-6 の結果より、溶接材料に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いた継手の溶接金属部は、KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手よりも Ni の含有量が低く、N の含有量が高いことが確認された。また、KSUS316LN 鋼板同士に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手（継手番号：W22-2-1, W22-2-2）と、3 章で示した、KSUS329J3L 鋼板同士に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手の、化学成分分析結果とを比較するとほぼ同様の結果であったが、前者の方が Ni 含有量が若干高いことが確認された。Ni には金属組織をオーステナイト化する傾向があると言われていることより、KSUS316LN 鋼板同士に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いた場合には、フェライト量が低下することが想定される。

4.3.3. フェライト量測定

評価対象に汎用二相ステンレス鋼が含まれていないため実施する意味合いはないのだが、KSUS316LN 鋼板同士、および KSUS316LN 鋼板と炭素鋼板の組み合わせにおいて、KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて溶接した継手の、溶接金属部表面のフェライト量測定を参考として実施した。部位を Fig. 4-3 に示す。フェライト量の測定は参考値ということで溶接金属部の 1 か所のみとし、5 回測定した。測定にはフェライトスコープ（Fischer 社製 FERITSCOPE FMP30）を使用した。結果を Table 4-7 に示す。

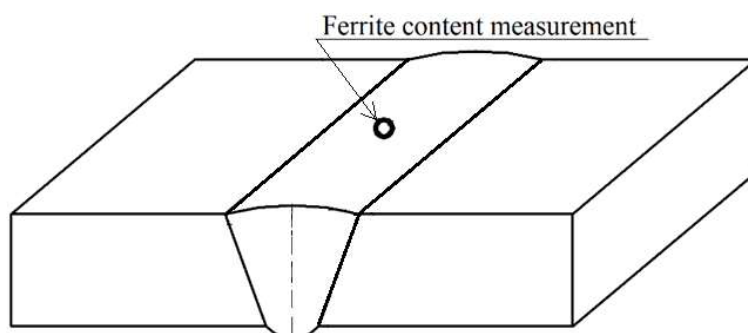


Fig. 4-3 Positions of the ferrite content measurement.

Table 4-7 Measured ferrite content in weld metals made of KSUS316LN stainless steel.

| Joint ID | Ferrite content (%) | | | | |
|----------|---------------------|------|-------------|-------------|-------------|
| | W22-2-1 | 28.8 | 27.4 | 29.3 | 28.2 |
| W22-2-2 | 28.8 | 27.1 | 28.6 | 27.5 | 26.5 |
| W25-2-1 | 24.7 | 29.1 | 31.0 | 28.3 | 25.4 |
| W25-2-2 | 26.4 | 27.3 | 26.8 | 28.3 | 29.3 |

Table 4-7 の結果より、KSUS316LN 鋼板同士、および KSUS316LN 鋼板と炭素鋼の組み合わせにおいて KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて溶接した継手の溶接金属部表面のフェライト量は、日本海事協会の規格下限値である 30%を若干下回る結果であった。これは 4.3.2 で示した通り、溶接金属部の化学成分のうち Ni の含有量が若干高くなっていることが関係していると推察される。

4.3.4. 引張試験

Table 4-2 に示す継手に対して、日本海事協会鋼船規則 M 編 3 章⁹⁾にて規定されている U2B 号に加工した後に引張強度試験を実施した。結果を Fig. 4-4 に、引張試験片の写真を Fig. 4-5 に示す。図中の記号は Table 4-2 内の (Symbol) と共通である。いずれの継手でもそれぞれの鋼材の規格値を満足していることと、破断位置が母材であることを確認した。

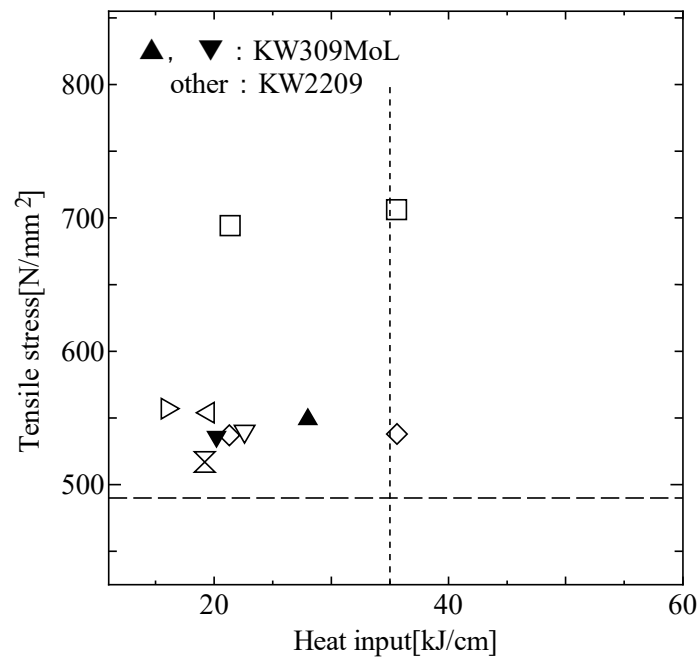


Fig. 4-4 Tensile test results of various combinations of base metal.

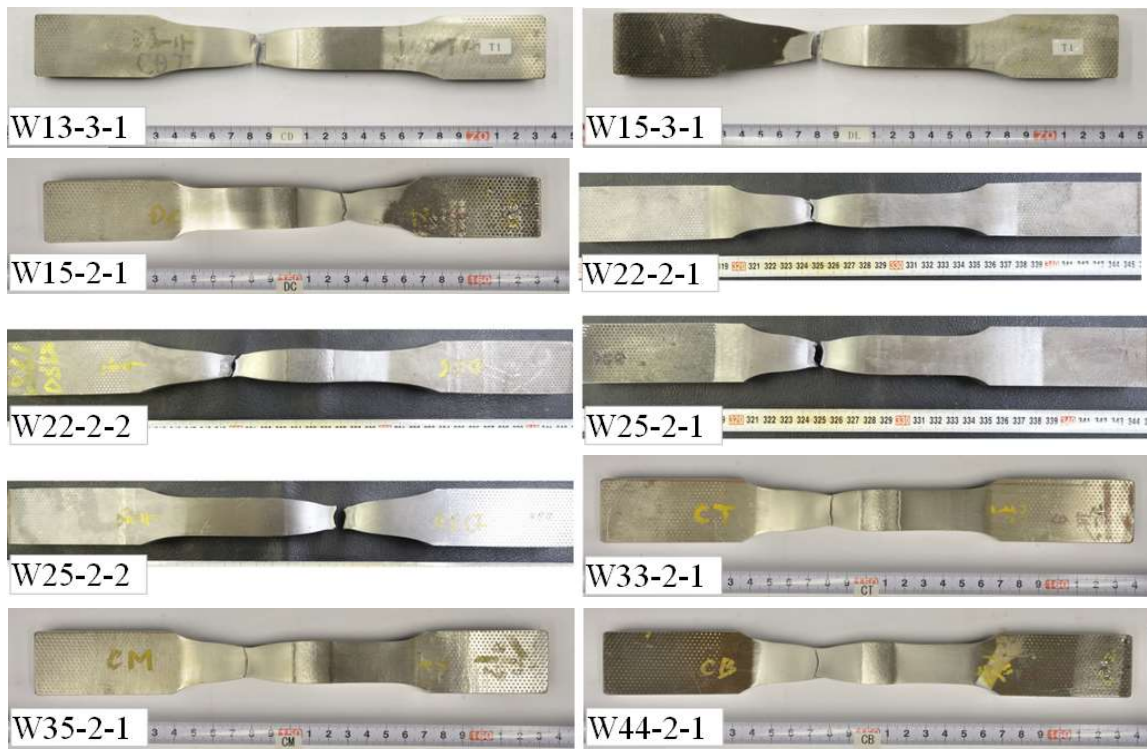


Fig.4-5 Photograph of specimens made of various combinations of base metal after tensile tests.

4.3.5. 表・裏曲げ試験

溶接金属内部の健全性を確認するため、Table 4-2 に示す継手に対して、表・裏曲げ試験を実施した。試験片形状は日本海事協会鋼船規則 M 編 3 章にて規定されている UB-1 号である。いずれの試験片においても規格上不合格となる割れ，融合不良のような欠陥は見受けられなかった。結果を Fig. 4-6 に示す。

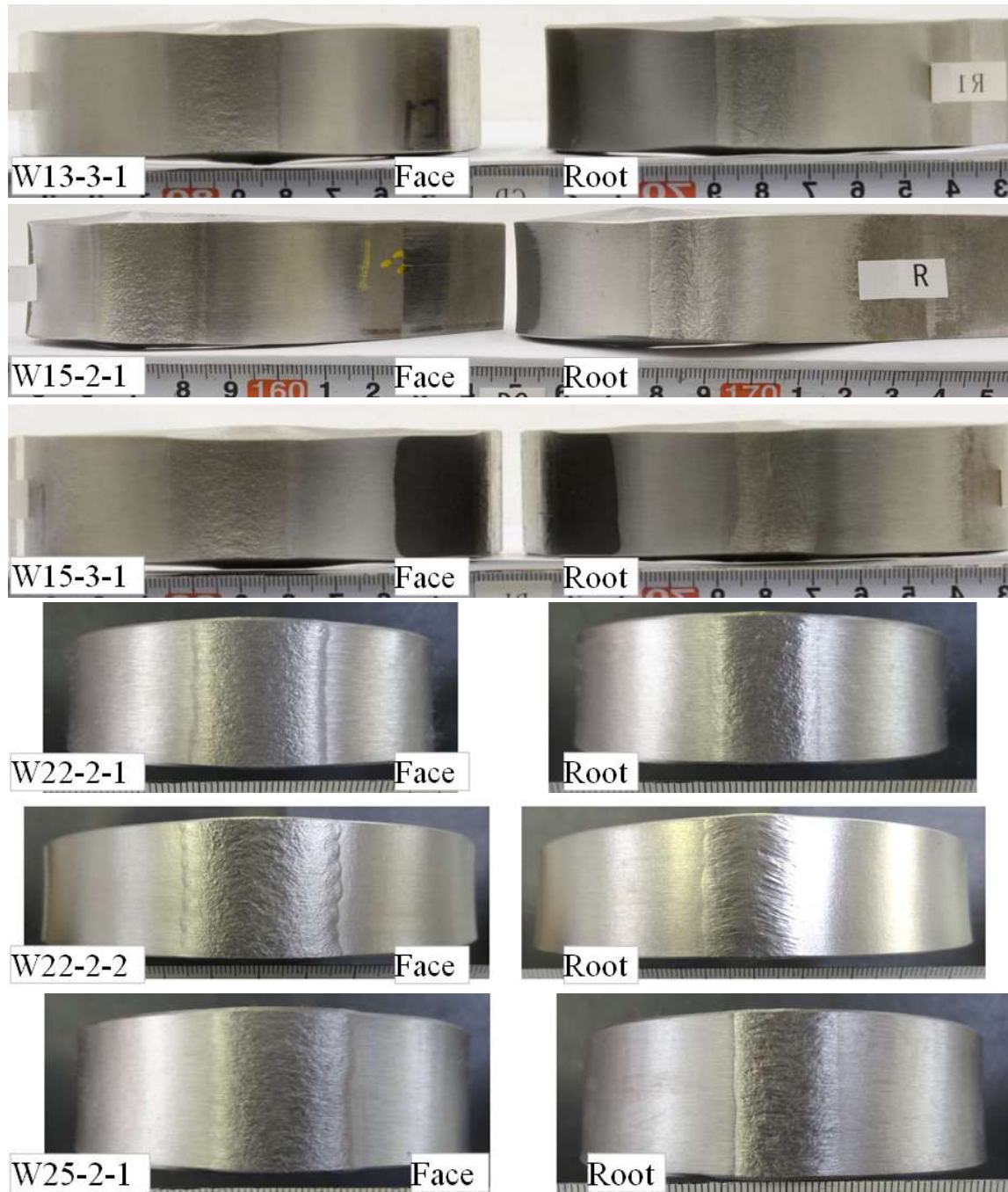




Fig. 4-6 Photograph of specimens made of various combinations of base metal after bending tests.

4.3.6. シャルピ衝撃試験

鋼船規則ではステンレス鋼板の溶接継手の施工法承認試験において衝撃試験は必須とはされていないが、溶接部の健全性を確認するために Table 4-2 に示す継手に対して、シャルピ衝撃試験を実施した。目標とする性能は鋼船規則では規定されていないため、他船級の規格¹⁶⁾を参考にして、鋼船規則 K 編 2 章にて規定されている U4 号試験片 (10 mm フルサイズ, V 型 2 mm ノッチ) を用いて試験温度 -20 °C において 27 J 以上とした。Fig. 4-6 にシャルピ衝撃試験の試験片採取位置を示す。ノッチ位置は、本研究では溶接材料の違いによる溶接金属部の性能を確認することが目的であることより、溶接金属中央部のみとした。

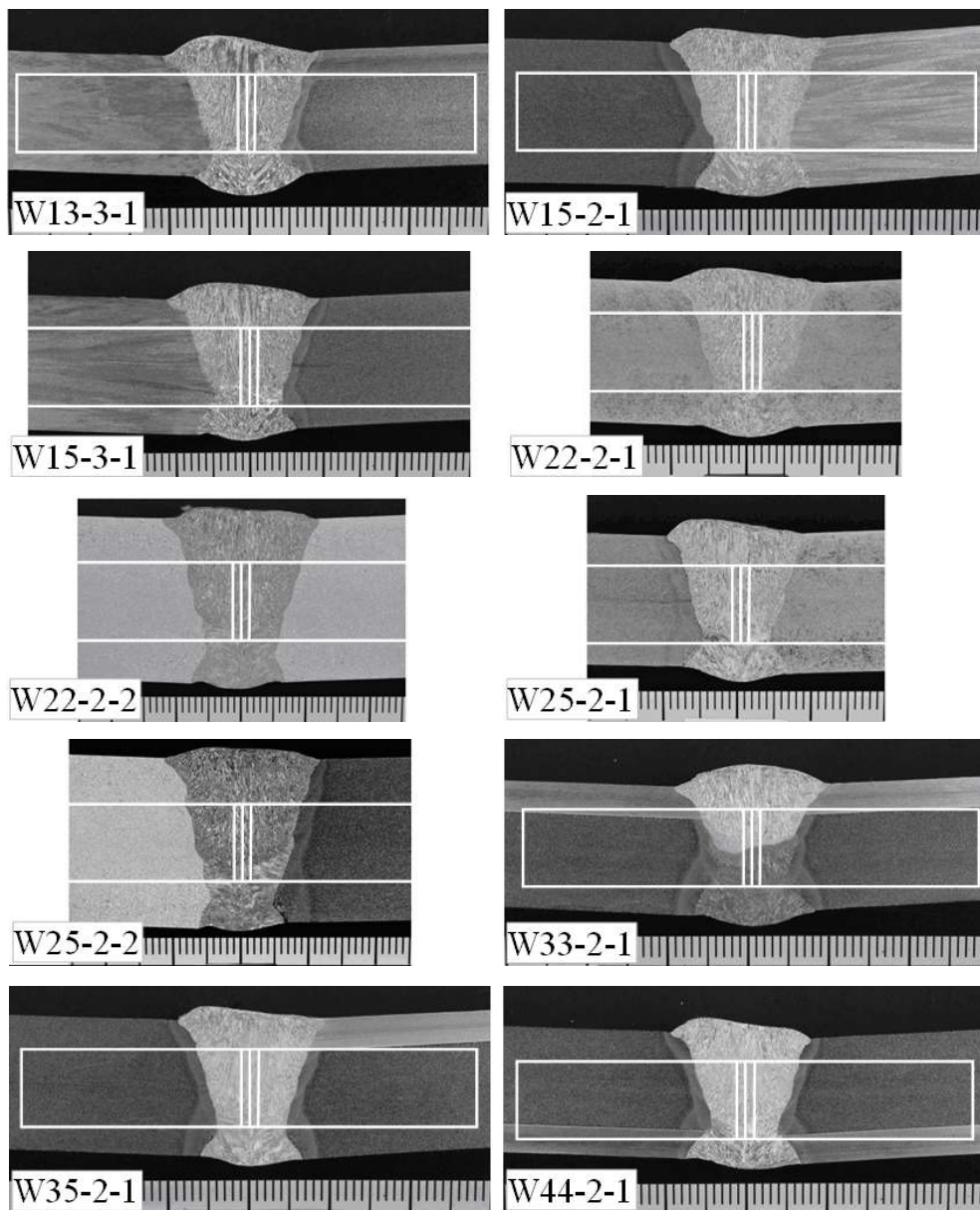


Fig. 4-7 Collection position of Charpy impact test specimen.

Fig. 4-7 に試験結果を示す。図中の記号は Table 4-2 内の (Symbol) と共通である。W33-2-1 の試験片を除いて目標である 27 J (試験温度-20 °C) を十分に満足していることが分かった。W33-2-1 の試験片は KSUS316LN クラッド鋼同士で、開先を合わせ材側に設けたものである。この場合初層の裏波溶接と二層目の溶接には炭素鋼用の溶接材料を用いることになるため、シャルピ衝撃試験片の半分が炭素鋼となり、試験温度の-20 °C まで冷却した際に脆化したことが原因であると考えられる。

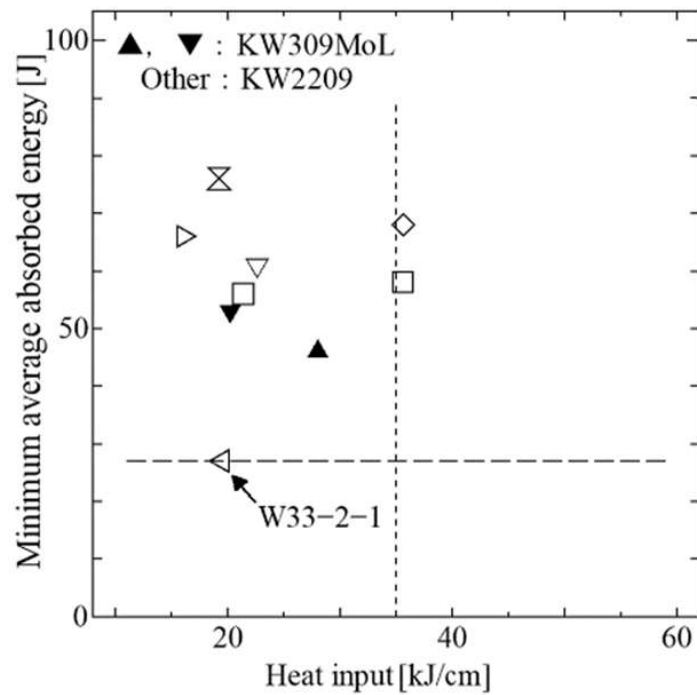


Fig. 4-8 Charpy absorbed energy of various combinations of base metal welded joint fabricated under multiple heat input conditions.

4.3.7. 硬さ試験

鋼船規則ではステンレス鋼板の溶接継手の施工法承認試験において硬さ試験は必須とはされていないが、溶接部の健全性、特に異常に硬い組織の有無を確認するために Table 4-2 に示す継手に対して、ビッカース硬さ試験を参考として実施した。測定は 1 mm ピッチで Fig. 3-10 に示す位置と同じ個所で実施した。

Fig. 4-8 に種々の鋼材と二種類の溶接材料を用いて製作した継手のビッカース硬さ試験結果を示す。図中の記号は Table 4-2 内の (Symbol) と共通である。すべての試験片において HAZ を含め異常に硬い組織の存在を確認することはできなかった。

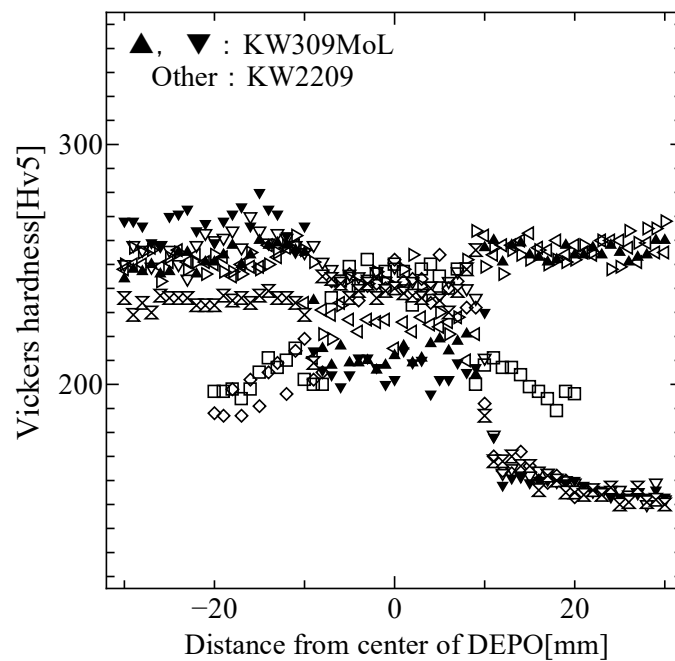


Fig. 4-9 Measured Vickers hardness distribution of various combinations of base metals.

4.4. 結言

汎用二相ステンレス鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の、両方を混在させたケミカルタンカーを建造することを想定して、KSUS329J3L 鋼板, KSUS316LN 鋼板, KSUS316LN クラッド鋼板, 炭素鋼板を組み合わせ、日本海事協会認定規格 KW2209 を満たす KSUS329J3L 鋼向け溶接材料と、日本海事協会認定規格 KW309MoL を満たすオーステナイト系ステンレス鋼向け溶接材料の両方を用いて製作した異材継手の、静的強度について評価した。

この場合、溶接金属部が汎用二相ステンレス鋼と同等の強度、耐食性を保有している必要性はないのだが、KW2209 規格を満たす溶接材料と KW309MoL 規格を満たす溶接材料のいずれの溶接材料を用いても、すべての評価項目において異常な結果は見られなかった。

溶接材料統一の観点から評価すると、種々の鋼板を組み合わせた溶接個所が相当数発生することが考えられるケミカルタンカーの建造時において、KW2209 規格を満たす溶接材料と KW309MoL 規格を満たす溶接材料の、いずれの溶接材料も使用できることを確認した。

第5章 汎用二相ステンレス鋼同士の継手の疲労強度評価

5.1. 緒言

前章までに汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 鋼板同士の突合せ溶接継手、および KSUS329J3L 鋼板とオーステナイト系ステンレスである KSUS316LN クラッド鋼板もしくは炭素鋼板との異材溶接継手の静的強度評価を行い、溶接材料として KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作したいずれの継手においても、鋼船規則の定める要件や目標を満足することを確認した。しかしながらケミカルタンカーに発生する損傷の多くは、波浪変動外力等に起因する繰返し荷重を受けることで、カーゴタンク内部、特に Fig. 2-9 に赤丸で例示する波型隔壁基部の溶接部に発生する疲労損傷である。疲労損傷を抜本的に解決することは容易なことではないことは、多くの溶接構造物における疲労損傷事故の報告からも理解できる。そのため、ケミカルタンカーにおいても、疲労損傷が発生する度に継手様式や板厚等の構造詳細を見直し、応力の低減に努めている。鋼船規則のばら積貨物船及び油タンカーのための共通構造規則 (CSR-B&T) 編が適用される、石油精製品を運ぶことも想定されているケミカルタンカーにおいては、船殻構造設計段階において有限要素法による構造解析を実施¹⁾することで、以前と比べて疲労損傷の発生頻度は減少しているものの、これらは主にオーステナイト系ステンレス鋼である KSUS316LN 鋼板同士で構成され、同ステンレス鋼用の溶接材料を用いて製作された溶接継手に対する結果であり、静的強度レベルが異なる汎用二相ステンレス鋼板 (KSUS329J3L) を用いた場合にも同様であるとは限らない。板厚選定などの設計的要因はあるものの、炭素鋼でも母材強度が改善したにも関わらず溶接継手の疲労強度は改善しないということは広く知られている。

本研究は、溶接材料の混用による強度健全性に対する懸念の払しょくを目的としているため、汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 鋼板を母材とし、溶接材料として同鋼向けのもの、オーステナイト系ステンレス鋼向けのもの、両方の溶接継手の疲労強度を定量的に検証しておくことが必要であろう。そこで本章では、この問題に対して疲労試験の結果に基づき検討した。

5.2. 評価用溶接継手の製作

試験には溶接材料の違いによる疲労強度の影響を確認するため、船級規則において KSUS329J3L 鋼向けとして規定されている KW2209 規格を満たす DW-329AP と、オーステナイト系ステンレス鋼向けとして規定されている KW309MoL 規格を満たす DW-309MoL の、二種類の溶接材料を用いて溶接継手を製作し、これらから疲労試験を抽出した。試験に供した鋼板は加振機の負荷能力の関係で板厚を 10 mm とした。鋼板の化学成分を Table 5-1 に、機械的性質を Table 5-2 に示す。

Table 5-1 Chemical composition of applied materials. [wt%]

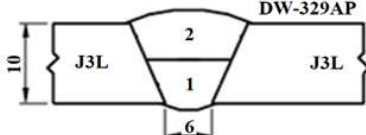
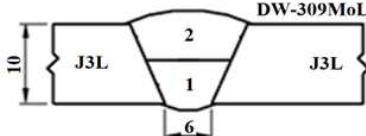
| Material | Chemical composition [wt%] | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|------|------|-------|-------|-----|------|-----|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | N |
| KSUS329J3L | 0.026 | 0.34 | 0.96 | 0.026 | 0.000 | 5.2 | 22.7 | 3.1 | 0.18 |

Table 5-2 Mechanical properties of applied materials.

| Materials | 0.2% Proof stress [N/mm ²] | Tensile strength [N/mm ²] | Elongation [%] |
|------------|--|---------------------------------------|----------------|
| KSUS329J3L | 587 | 769 | 36 |

試験片の寸法は幅 600 mm, 長さ 500 mm, 溶接法はいずれも同じ溶接入熱にするために簡易溶接台車を利用した炭酸ガスアーク溶接による下向片面突合せ溶接とした。開先形状, 積層法および溶接条件を Table 5-3 に示す。475 °C脆化およびシグマ相脆化が疲労試験に影響を与える懸念を払しょくするため, パス間温度は 150 °C以下とした。

Table 5-3 Applied combination of base metal and welding consumable.

| Joint ID | Combination of base metal and welding consumables | Pass | Current [A] | Voltage [V] | Travel speed [cm/min] | Heat input [kJ/cm] |
|-----------------|---|--------------------|-------------|-------------|-----------------------|--------------------|
| A-series (○) |  | 1 | 220 | 27 | 23 | 15.5 |
| | | 2 | 250 | 30 | 24 | 18.8 |
| | | Average heat input | | | | |
| M-series (●) |  | 1 | 220 | 27 | 23 | 15.5 |
| | | 2 | 250 | 30 | 24 | 18.8 |
| | | Average heat input | | | | |

溶接後の試験片は溶接したままで長さ方向に 25 mm ピッチで短冊状に切断した。DW-329AP を使用して製作した疲労試験片を A シリーズ、DW-309MoL を使用して製作した疲労試験片を M シリーズとし、それぞれ 12 本ずつ切り出して疲労試験に供した。なお、日本機械学会基準「統計的疲労試験方法」¹⁸⁾によれば、8 体の試験結果から破壊確率 50% の S-N 曲線の傾斜部を求めることが可能であり、本試験では傾斜部の範囲に含まれる 200 万回時間強度の程度までを比較範囲とするため、試験数は適切であると判断できる。

5.3. 汎用二相ステンレス鋼同士の継手の疲労強度評価

疲労試験は 100 kN 電気油圧式疲労試験機を使用し、ISO/TR14345¹⁹⁾に準拠して、室温、大気中、繰返し速度 20 Hz、応力比 R=0.1 の 4 点曲げにて実施した。疲労試験片の断面寸法と荷重の負荷要領を Fig. 5-1 に示す。

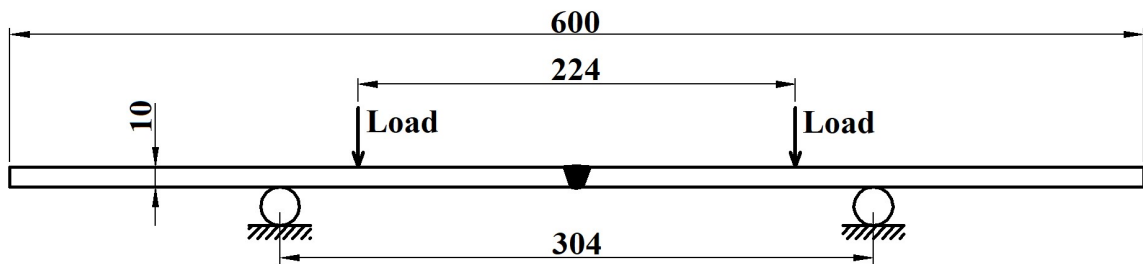


Fig. 5-1 Test condition of fatigue structure test.

A シリーズの疲労試験結果を Table 5-4, M シリーズの疲労試験結果を Table 5-5, 破断位置の代表例を Fig. 5-2, 応力範囲 $\Delta\sigma$ と破断繰返し数 N_f との関係を Fig. 5-3 に示す. A シリーズと M シリーズで 200 万回時間強度程度までは寿命差はないと判断できる.

Table 5-4 Fatigue structure test result of A-series

| Specimen number | Number of cycles to failure N_f (Cycles) | Minimum Stress σ_{\min} (N/mm ²) | Maximum Stress σ_{\max} (N/mm ²) | Stress Range $\Delta\sigma$ (N/mm ²) | Remark |
|-----------------|--|---|---|--|--------|
| A1 | 7.36×10^5 | 33.4 | 334.2 | 300.7 | |
| A3 | 7.01×10^6 | 28.8 | 288.3 | 259.5 | |
| A4 | 3.45×10^5 | 45.2 | 452.1 | 406.9 | |
| A5 | 1.08×10^5 | 48.9 | 488.7 | 439.8 | |
| A6 | 6.50×10^5 | 31.3 | 312.6 | 281.3 | |
| A7 | 5.68×10^5 | 31.2 | 311.6 | 280.5 | |
| A8 | 2.30×10^5 | 38.8 | 388.3 | 349.5 | |
| A9 | 1.34×10^5 | 44.6 | 445.6 | 401.0 | |
| A10 | 9.52×10^4 | 49.0 | 490.4 | 441.3 | |
| A11 | 4.87×10^5 | 29.0 | 289.5 | 260.6 | |
| A12 | 1.10×10^6 | 22.4 | 223.7 | 201.3 | |
| A13 | 3.87×10^5 | 28.9 | 289.3 | 260.4 | |

Table 5-5 Fatigue structure test result of M-series

| Specimen number | Number of cycles to failure N_f (Cycles) | Minimum Stress σ_{\min} (N/mm ²) | Maximum Stress σ_{\max} (N/mm ²) | Stress Range $\Delta\sigma$ (N/mm ²) | Remark |
|-----------------|--|---|---|--|---------|
| M2 | 6.70×10^5 | 33.3 | 333.4 | 300.1 | |
| M3 | 8.01×10^5 | 28.9 | 289.2 | 260.3 | |
| M4 | 1.65×10^5 | 44.5 | 445.3 | 400.7 | |
| M5 | 5.81×10^4 | 49.0 | 490.4 | 441.4 | |
| M6 | 1.24×10^6 | 24.4 | 244.3 | 219.8 | |
| M7 | 1.00×10^7 | 20.1 | 200.6 | 180.6 | Run out |
| M8 | 2.17×10^5 | 38.8 | 388.4 | 349.6 | |
| M9 | 1.07×10^5 | 48.9 | 488.7 | 439.9 | |
| M10 | 5.14×10^5 | 28.8 | 288.1 | 259.3 | |
| M11 | 1.20×10^6 | 22.3 | 222.8 | 200.5 | |
| M12 | 1.19×10^6 | 20.0 | 199.8 | 179.8 | |
| M13 | 1.31×10^6 | 21.1 | 211.3 | 190.2 | |

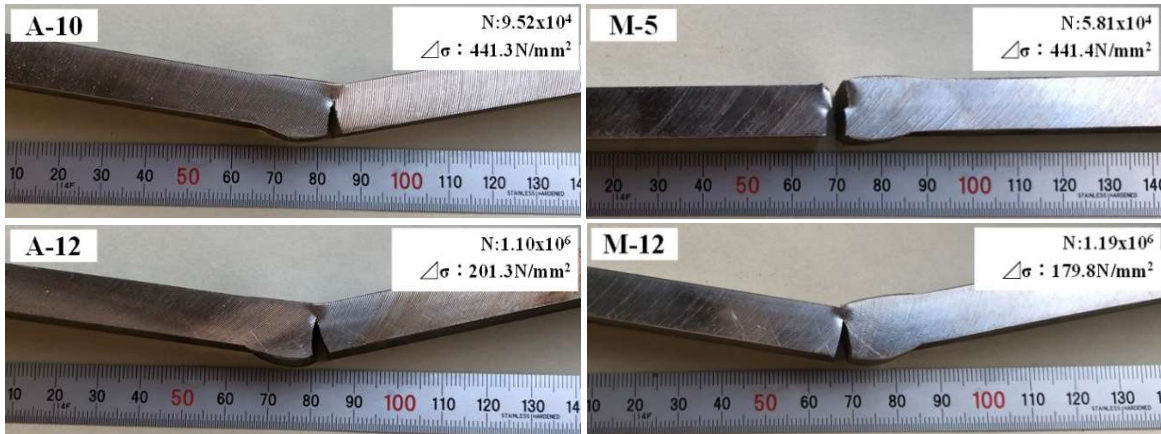


Fig. 5-2 Typical examples of breaking position.

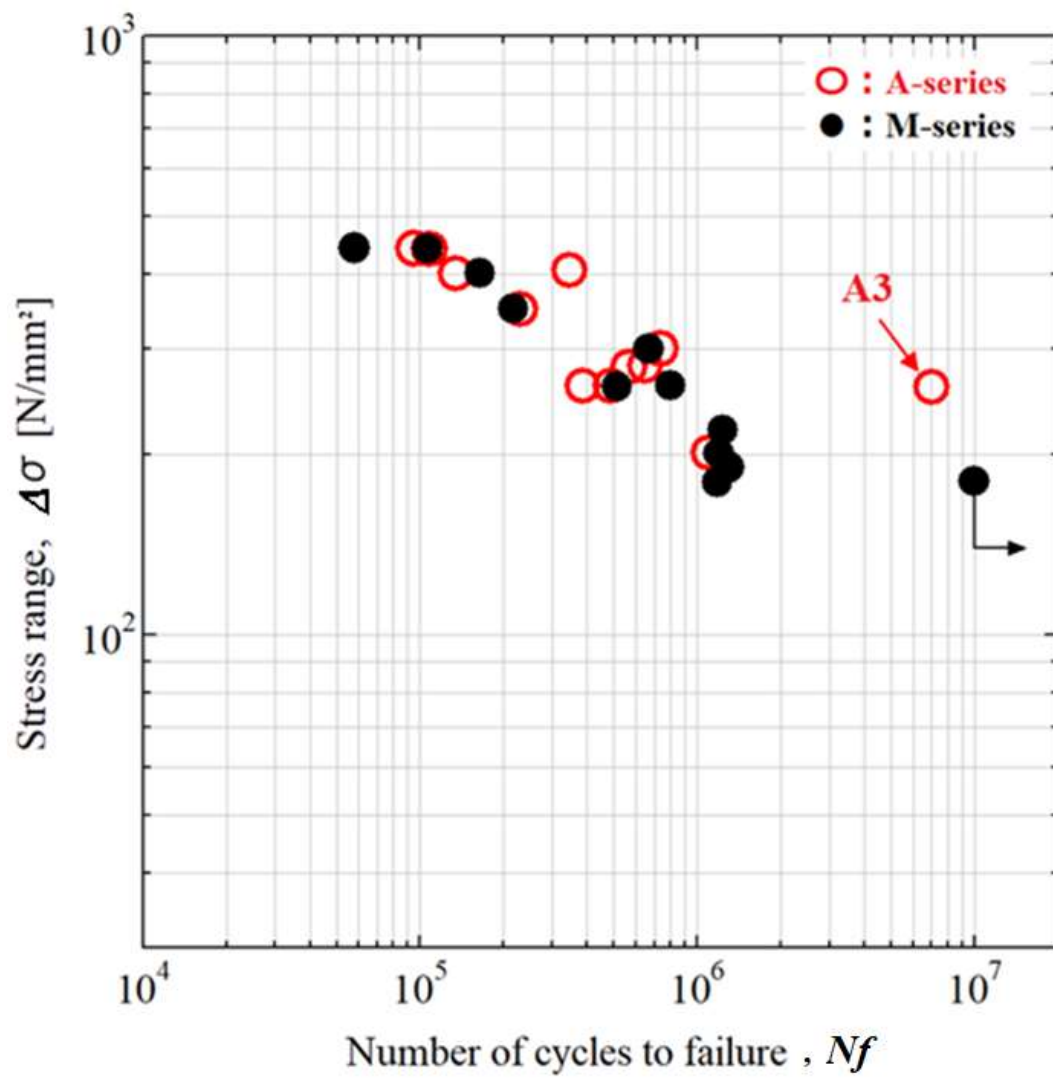


Fig. 5-3 Test result of fatigue structure test.

5.4. 標準設計 S-N 曲線との比較

前節で示した結果と、船級協会が規定する標準設計 S-N 曲線との対比から、汎用二相ステンレス鋼板の溶接部の基本的な性能を確認する。疲労強度について日本海事協会では、ばら積貨物船及び油タンカーのための共通構造規則（CSR-B&T）編 9 章 3 節¹⁷⁾にて規定しているが、その中で大気中の標準設計 S-N 曲線が Fig. 5-4 のように示されている。

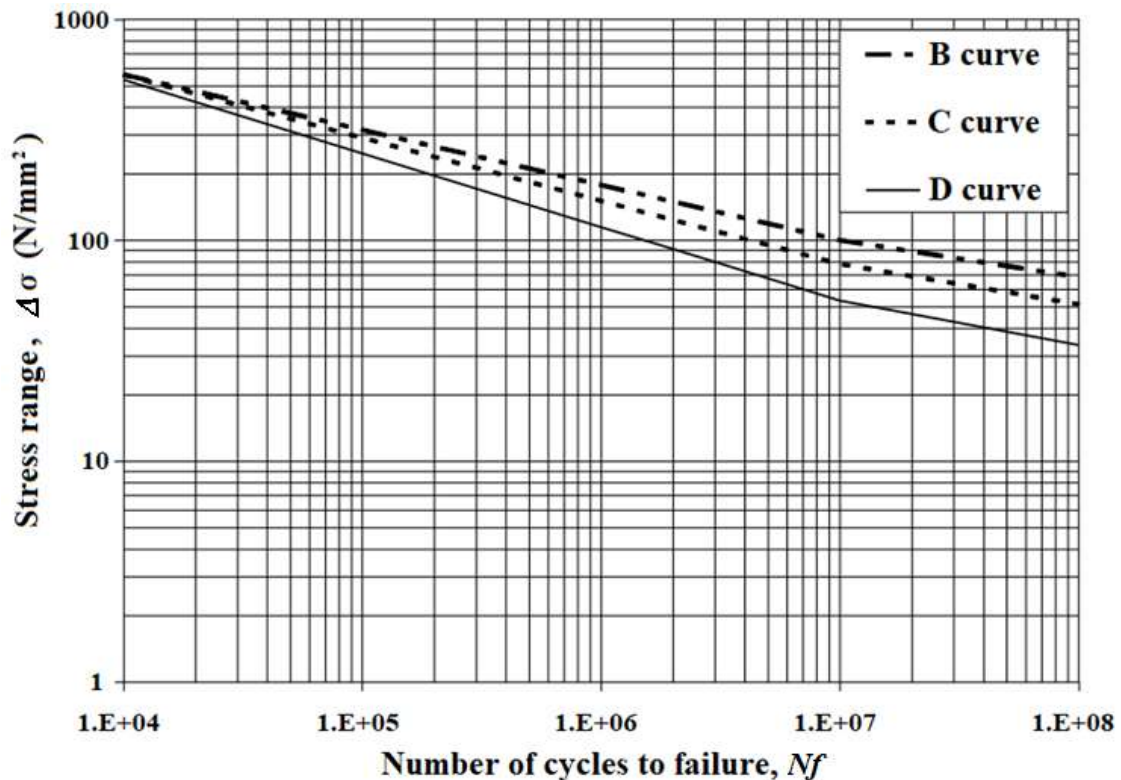


Fig. 5-4 Basic design S-N curves, In-air environment.

Fig. 5-4 には B 級, C 級, D 級の 3 本の線が記されているが、溶接継手の疲労評価には D 級の S-N 曲線を用いることとされている。またこの線図を適用できる鋼種は、軟鋼及び最小規格降伏応力が 390 N/mm² までの高張力鋼との但し書きが付されている。

この D 級の標準設計 S-N 曲線と試験結果を比較した結果を Fig. 5-5 に示す。なお、標準設計 S-N 曲線の各線は非破壊確率が 97.7%のものであり、Fig. 5-5 中の 50%の点線は非破壊確率 50%の試験結果、97.7%の実線は非破壊確率 97.7%の試験結果である。また、A-series のうち 700 万回程度で破断した A3 の試験片 (Fig. 5-2 赤矢印) については、考慮すると安全側に評価することになるため、評価からは除外している。

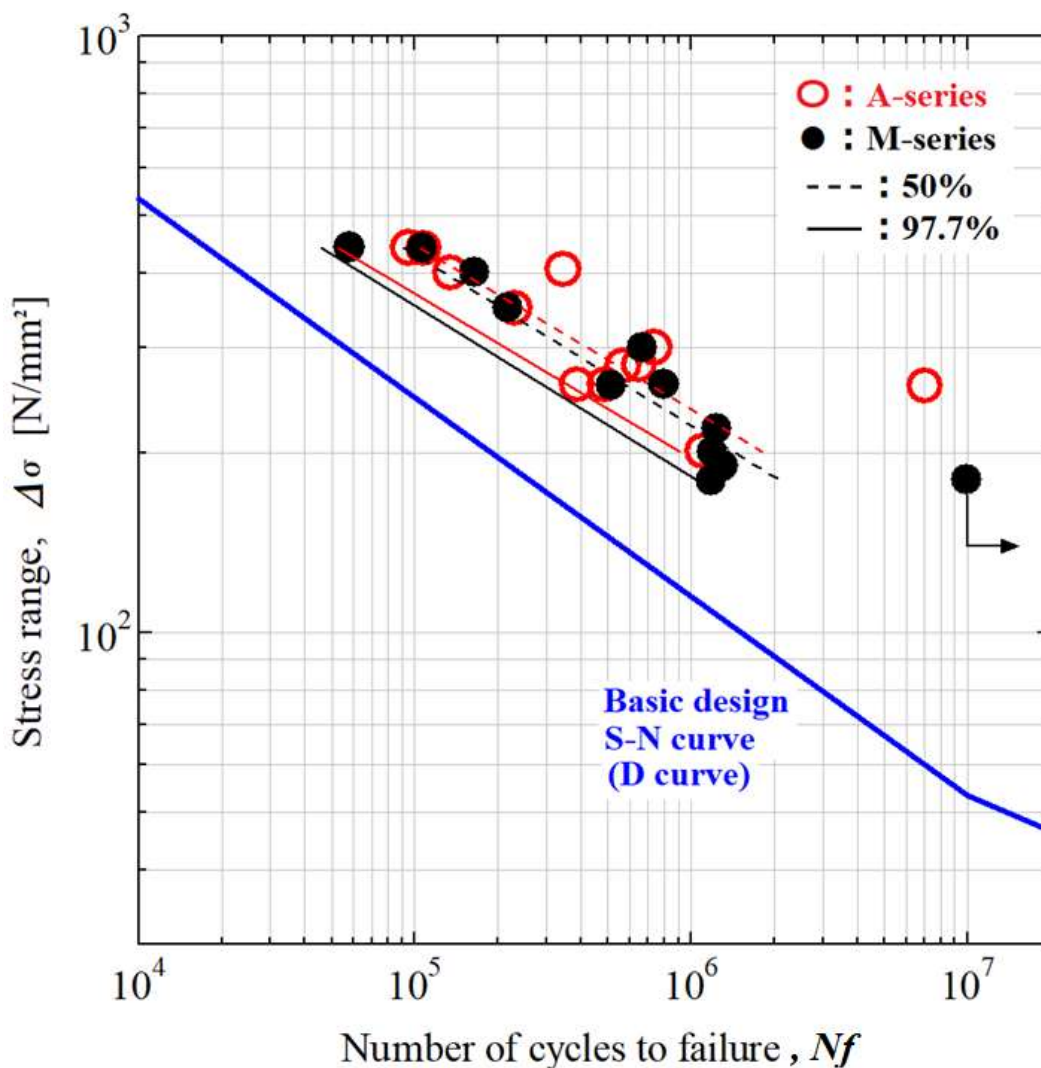


Fig. 5-5 Test result of fatigue structure test.

Fig. 5-5 より，試験結果は D 級の標準設計 S-N 曲線よりも上方に位置していることが確認できる。つまり，KSUS329J3L 鋼板の突合せ継手に，DW-329AP 及び DW-309MoL の二種類の溶接材料を用いて製作した試験片の疲労強度は，軟鋼及び最小規格降伏応力が 390 N/mm² までの高張力鋼の溶接継手よりも疲労強度が高いと言える。

この結果から，汎用二相ステンレス鋼板を用いてケミカルタンカーを設計するにあたり，疲労強度を考慮して特別に増厚する等の手当てをする必要がないことを確認できた。

5.5. 結言

KSUS329J3L 鋼板同士の組み合わせに対して、KW2209 規格を満たす溶接材料と、KW309MoL 規格を満たす溶接材料の二種類の溶接材料を用いて溶接した継手の疲労強度を確認した。結果として 200 万回時間強度程度までは両者に寿命差はないことを確認した。また両者ともに、軟鋼及び最小規格降伏応力が 390 N/mm^2 までの高張力鋼の溶接継手よりも疲労強度が高いことも確認した。このことは、いずれの溶接材料を用いても、疲労強度の面で設計上特別な配慮をする必要がないことを意味している。

溶接材料統一の観点から疲労試験結果を評価すると、KSUS329J3L 鋼板同士の組み合わせに対して、KW2209 規格を満たす溶接材料と、KW309MoL 規格を満たす溶接材料の、いずれの溶接材料も使用できることを確認した。

第6章 種々の鋼材と二種類の溶接材料の組み合わせで 製作した溶接継手の耐食性能評価

6.1. 緒言

汎用二相ステンレス鋼と、オーステナイト系ステンレスクラッド鋼の組み合わせでケミカルタンカーを建造する際に、溶接材料として KW2209 規格を満たすものを用いることで、静的強度と疲労強度の面で問題ないことを述べた。本章では、汎用二相ステンレス鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板の組み合わせでケミカルタンカーを建造することを想定して、発生し得る全ての組み合わせにおいて、KW2209 規格を満たすものと KW309MoL 規格を満たすものの二種類の溶接材料を用いて製作した継手の耐食性を評価した結果について述べる。また、その評価結果と、オーステナイト系ステンレス鋼板に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて建造されているケミカルタンカーのカーゴタンクとの耐食性の比較についても報告する。

6.2. 耐食性能評価の方法

耐食性の評価は主に粒界腐食試験にて実施した。また、母材が KSUS329J3L 同士で、溶接材料として KW2209 規格を満たすものを用いて製作した継手に対しては、溶接入熱が 35 kJ/cm を超える範囲も含めて耐孔食性試験も実施した。耐食性の評価に供した継手は、静的強度評価に供した継手のうち母材に炭素鋼を用いていない継手だけを用いた。耐食性評価に供した継手と、実施した試験の一覧を Table 6-1 に示す。

Table 6-1 Applied combination of base metal and welding consumable for corrosion tests.

| Weld consumables | Joint ID | Base metal | | Intergranular corrosion test | Ferric chloride test |
|------------------|-----------|---|---|------------------------------|----------------------|
| | | | | | |
| KW2209 | W11-2-1 | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Do | Do |
| | W11-2-2 | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Do | Do |
| | W22-2-1 | KSUS316LN | KSUS316LN | Do | - |
| | W22-2-2 | KSUS316LN | KSUS316LN | Do | - |
| | W33-2-1 | KSUS316LN Clad (Front surface: Clad) | KSUS316LN Clad (Front surface: Clad) | Do | - |
| | W44-2-1 | KSUS316LN Clad (Back surface: Clad) | KSUS316LN Clad (Back surface: Clad) | Do | - |
| KW 309MoL | W11-3-1-2 | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Do | - |
| | W11-3-2-2 | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Do | - |
| | W13-3-1 | KSUS329J3L | KSUS316LN Clad (Front surface: Clad) | Do | - |

6.3. 粒界腐食試験

Table 6-1 に示した継手の全てに対して、粒界腐食試験を実施した。試験はロイド船級の材料に関する規則 2 章 9 節²⁰⁾に準拠して実施した。腐食試験片は継手表層部の母材と溶接金属を含む形で採取し、板厚 2.5 mm x 幅 30 mm x 溶接線方向長さ 80 mm に加工し、試験片表面を研磨紙 #600 を用いて湿式研磨した。試験片の採取要領を Fig. 6-1 に示す。なお、鋭敏化処理は実施していない。

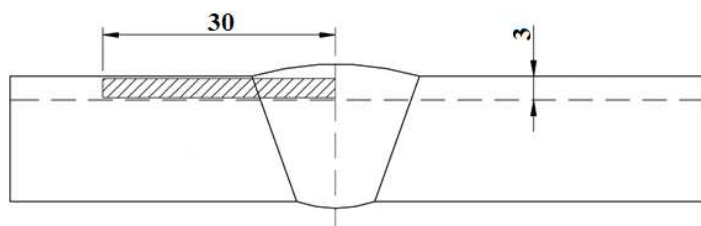


Fig. 6-1 Cut out procedure of the corrosion test specimen.

試験片を硫酸・硫酸銅溶液中で 24 時間浸漬後，曲げ半径 $R=5$ mm. 曲げ角度 180° で試験片を曲げ，粒界腐食による割れの有無を観察した．観察結果を Table 6-2 及び Table 6-3 に示す．併せて，24 時間浸漬後に減少した試験片重量も記載しているが，いずれの試験片においても，曲げ後に粒界腐食による割れは見られなかった．

Table 6-2 Test result of intergranular corrosion test.



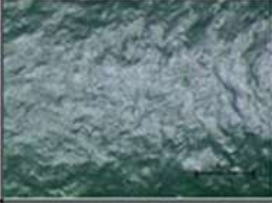
















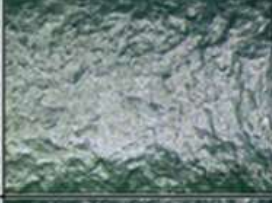





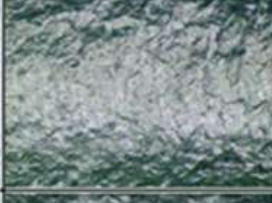
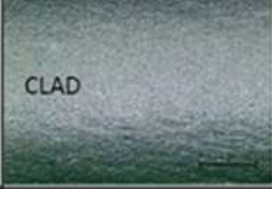
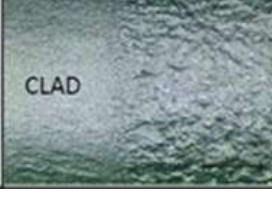

| Joint ID | Photographs of the specimens after bending | | | Loss weight due to corrosion [g/m ² · h] |
|----------|---|---|--|--|
| | Base metal | HAZ | Weld metal | |
| W11-2-1 |  |  |  | 0.053 |
| W11-2-2 |  |  |  | 0.054 |
| W22-2-1 |  |  |  | 0.032 |
| W22-2-2 |  |  |  | 0.035 |

Table 6-3 Test result of intergranular corrosion test.

| Joint ID | Photographs of the specimens after bending | | | Loss weight due to corrosion [g/m ² · h] |
|-----------|---|---|--|--|
| | Base metal | HAZ | Weld metal | |
| W33-2-1 |  |  |  | 0.06 |
| W44-2-1 |  |  | | 0.093 |
| W11-3-1-2 |  |  |  | 0.026 |
| W11-3-2-2 |  |  |  | 0.028 |
| W13-3-1 | J3L  | J3L  |  | 0.019 |
| | CLAD  | CLAD  |  | 0.064 |

6.4. 耐孔食性試験

継手番号が W11-2-1, W11-2-2 の二つの継手に対して耐孔食性試験を実施した。試験は JIS G0578, B 法²¹⁾に準拠して、塩酸酸性 6%塩化第二鉄溶液中に 72 時間連続浸漬した。腐食試験片は継手表層部の母材と溶接金属を含む形で採取し、板厚 2.5 mm x 幅 30 mm x 溶接線方向長さ 15 mm に加工し、試験片表面を研磨紙 #600 を用いて湿式研磨した。試験片の採取要領を Fig. 6-2 に示す。

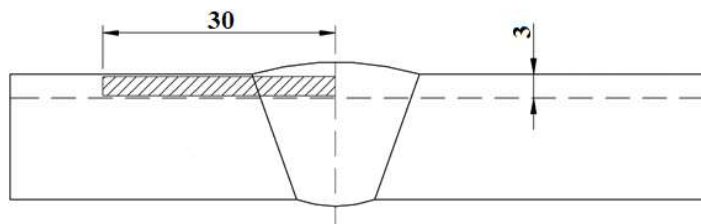


Fig. 6-2 Cut out procedure of the corrosion test specimen.

溶液温度 50 °Cから試験を開始し、そこから 5 °Cずつ溶液温度を下げながら最終的に試験片表面に 0.025 mm 以上の深さの孔食が発生する最低の溶液温度である臨界孔食温度 (Critical pitting temperature : CPT) を求めた。試験結果を Table 6-4 に示す。

Table 6-4 Test result of ferric chloride test.

| Joint ID | CPT [°C] | Location of pitting corrosion |
|----------|----------|-------------------------------|
| W11-2-1 | 35°C | Weld metal |
| W11-2-2 | 35°C | Weld metal |

緒方, 勝田, 矢島らの研究グループによる研究報告³⁾において, KSUS329J3L クラッド鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を, KSUS316LN クラッド鋼板に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した突合せ継手の耐孔食性試験結果が示されている。それによると, KSUS316LN クラッド鋼板の CPT は最高でも 10 °Cであったが, KSUS329J3L クラッド鋼板の CPT は 40 °Cであった。今回の KSUS329J3L 鋼板の試験でも CPT は 35 °Cであったことより, KSUS329J3L 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した溶接継手は, KSUS316LN 鋼板に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手よりも耐孔食性は高い。

鋼板と溶接材料の違いによる耐孔食性能の違いについて, 2.3.1.にて記述している耐孔食性指数 (Pitting Resistance Equivalent Number : PREN) を用いて検証した結果を Table

6-5 に示す。ただし、PREN を算出するために用いた溶接継手の化学成分は、KSUS329J3L 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した溶接継手の化学成分は Table 3-8 の結果を、SUS316LN クラッド鋼板に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した溶接継手の化学成分は、緒方、勝田、矢島らの研究グループによる研究報告の結果を用いている。また孔食性能試験は実施していないが、KSUS316LN クラッド鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手（継手番号：W33-2-1, W44-2-1）の化学成分を Table 4-3 の結果から引用し、PREN を算出した結果も併記する。

Table 3-8 Pitting resistance equivalent number of KSUS329J3L plate and SUS316LN-CLAD plate welded joint.

| Base metal | Joint ID | Heat input [kJ/cm] | CPT [°C] | Chemical composition of weld metal [wt%] | | | PREN* |
|-------------------|----------------------|-----------------------|-------------|---|------|------|-------|
| | | | | Cr | Mo | N | |
| KSUS329J3L | W11-2-1 | 27.5 | 35 | 22.9 | 3.5 | 0.14 | 36.7 |
| | W11-2-2 | 47.9 | 35 | 22.7 | 3.5 | 0.14 | 36.5 |
| SUS316LN -CLAD | Referenced result | 20 | 10 | 22.03 | 2.87 | 0.02 | 31.8 |
| | | 40 | ≤5 | 21.37 | 2.87 | 0.02 | 31.2 |
| | W33-2-1 | 19.5 | - | 19.0 | 3.0 | 0.12 | 30.8 |
| | W44-2-1 | 16.0 | - | 20.3 | 3.3 | 0.12 | 33.1 |

* : $PREN = Cr + 3.3 Mo + 16 N$

この結果より、KSUS329J3L 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した溶接継手の化学成分分析から算出した PREN は、KSUS316LN 鋼板のそれよりも明確に高いことから、耐孔食性も高いと判断できる。

KSUS316LN 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手の溶接金属部の PREN と、過去の研究結果から算出した、KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手の溶接金属部の PREN は、おおむね同程度の結果であった。このことから、KSUS316LN 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて建造されるケミカル

タンカーの耐食性は、KSUS316LN 鋼に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いる一般的なケミカルタンカーと同程度であることを確認した。

6.5. 結言

汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレス鋼から構成される異材継手を対象に、KW2209 規格を満たす溶接材料と KW309MoL 規格を満たす溶接材料の二種類の溶接材料を用いて製作した継手の耐食性を評価した。

粒界腐食試験においては、試験に供した全ての試験片において粒界腐食による割れが発生しなかったことを確認した。

耐孔食性試験においては、KSUS329J3L 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した溶接継手は、他の継手よりも明確に耐孔食性が高いことを確認した。また、KSUS316LN 鋼板に KW2209 規格を満たす溶接材料と KW309MoL 規格を満たす溶接材料の二種類の溶接材料を用いて製作した継手の耐孔食性能が同程度であることも確認できた。

以上の結果から、溶接材料統一の観点から耐食性能を評価すると、溶接材料として KW2209 規格を満たす溶接材料を用いることで、現在運用されているケミカルタンカーと同等以上の耐食性を担保可能であることが確認できた。

第7章 結論

7.1. 総括

汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼および炭素鋼が混在するケミカルタンカーの建造現場において、それぞれの鋼材に合わせた溶接材料を用いたために発生が懸念される溶接材料誤使用の問題を根本的に解決することを目的として、汎用二相ステンレス鋼用の溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料のいずれかの溶接材料に統一することの可能性について検証した。

以下に、本論文の各章で得られた成果を示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、ケミカルタンカーの構造と、船体建造に用いられる鋼材および溶接材料の種類について、建造面の観点を含め述べた。特にケミカルタンカーにおいては波型隔壁基部の疲労損傷を防止する観点から、部材同士の目違いの防止、完全溶け込み溶接の実施とその確認、すみ肉溶接ビードのドレッシングが重要であることを示した。また建造中のステンレス鋼板の発錆対策についても述べた。また、オーステナイト系ステンレス鋼と比較すると、汎用二相ステンレス鋼は高強度、高耐食性、安価であり、ケミカルタンカーに採用することでメリットは大きい。オーステナイト系ステンレスクラッド鋼と組み合わせた場合に溶接材料誤使用の懸念があることを説明した。

第3章では、汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 鋼板同士の組み合わせに対して、KSUS329J3L 鋼向けの KW2209 規格を満たす溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼向けの KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手の静的強度評価について示した。この中で、KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手に関しては、溶接入熱量が 35 kJ/cm を超える溶接条件の継手も含め、日本海事協会鋼船規則 M 編 3 章、K 編 2 章及び 3 章に沿って実施した静的強度評価のすべての項目において、規格値を満足することを確認した。ただし KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手に関しては、溶接金属部のフェライト量が規格下限値を下回っていたことと、溶接金属部が KSUS329J3L 母材よりも軟化していたことを確認し、その理由が溶接金属部の化学成分分析の結果、KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手よりも Ni 含有量が多いことが原因であることを示した。この検証の結果、汎用二相ステンレス鋼板同士の組み合わせに対して KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いることは、たとえ静的強度評価の結果が規則を満足していたとしても、汎用二相ステンレス鋼の性能を活かした設計が出来ないため、検討する必要はないと結論付けた。

第4章では、汎用二相ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼および炭素鋼を組み合わせて、KSUS329J3L 鋼向けの KW2209 規格を満たす溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼向けの KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて製作した異材継手の静的強度評価について示した。この中で、KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手に関しては、日本海事協会鋼船規則 M 編 3 章、K 編 2 章及び 3 章に沿って実施した静的強度評価のすべての項目において、規格値を満足することを確認した。以上の検証の結果より、KSUS329J3L 鋼板と KSUS316LN クラッド鋼板から構成される異材継手に関しては、KW2209 規格を満たす溶接材料と KW309MoL 規格を満たす溶接材料の、いずれの溶接材料も使用できると結論付けた。

第5章では、汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 鋼板同士の組み合わせに対して、KSUS329J3L 鋼向けの KW2209 規格を満たす溶接材料と、オーステナイト系ステンレス鋼向けの KW309MoL 規格を満たす溶接材料の、両方の溶接材料を用いて製作した継手の疲労強度について検討した。疲労試験の結果より、いずれの溶接材料も 200 万回時間強度程度までは寿命差はないことを確認した。また、いずれの溶接材料も軟鋼及び最小規格降伏応力が 390 N/mm^2 までの高張力鋼の溶接継手よりも疲労強度が高いことも確認した。このことは、いずれの溶接材料を用いても、疲労強度の面で設計上特別な配慮をする必要がないことを意味している。溶接材料統一の観点も含めて疲労試験結果を評価すると、KSUS329J3L 鋼板同士の組み合わせに対して、KW2209 規格を満たす溶接材料と、KW309MoL 規格を満たす溶接材料の、いずれの溶接材料も使用できると結論付けた。

第6章では、汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 鋼板と、オーステナイト系ステンレス鋼である KSUS316LN クラッド鋼板を用いてケミカルタンカーを建造する際に発生することが想定される鋼材の組み合わせに対して、主に KSUS329J3L 鋼向けの KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて製作した継手の耐食性能評価について示した。KSUS329J3L 鋼板と KSUS316LN クラッド鋼板から構成される異材継手の粒界腐食試験においては、想定される鋼種と溶接材料の組み合わせで製作した全ての継手において、粒界腐食による割れが見受けられなかったことを確認した。また耐孔食性試験においては、KSUS329J3L 鋼板と KW2209 規格を満たす溶接材料の組み合わせで製作した継手の CPT が $35 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、過去の同様の研究結果が示す、KSUS316LN クラッド鋼と KW309MoL 規格を満たす溶接材料の組み合わせで製作した継手よりも良好な結果であったことを示した。また、KSUS316LN クラッド鋼に KW2209 規格を満たす溶接材料と、KW309MoL 規格を満たす溶接材料の二種類の溶接材料を用いて製作した継手の、耐孔食性能が同等であることも確認した。これらの結果から、KSUS329J3L 鋼板と、

KSUS316LN クラッド鋼板に対して、KW2209 規格を満たす溶接材料を用いて建造したケミカルタンカーのカーゴタンクの耐食性は、KSUS316LN 鋼板に KW309MoL 規格を満たす溶接材料を用いて建造したケミカルタンカーのカーゴタンクと同等以上の耐食性を担保できていることを確認した。

以上の検証結果を一覧にまとめたものを Table 7-1 に示す。

Table 7-1 List of test results

| Test method | Base materials | | Welding consumables | |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------------|-----------------|
| | | | KW2209 | KW309MoL |
| Static strength test | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Good | Not recommended |
| | KSUS329J3L | KSUS316LN-Clad | - | Good |
| | KSUS329J3L | Carbon steel | Good | Good |
| | KSUS316LN | KSUS316LN | Good | Proven |
| | KSUS316LN | Carbon steel | Good | Proven |
| | KSUS316LN-Clad | KSUS316LN-Clad | Good | Proven |
| | KSUS316LN-Clad | Carbon steel | Good | Proven |
| | KSUS316LN-Clad | KSUS316LN-Clad | Good | Proven |
| Fatigue structure test | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Good | Good |
| Intergranular corrosion test | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Good | Good |
| | KSUS316LN | KSUS316LN | Good | - |
| | KSUS316LN-Clad | KSUS316LN-Clad | Good | - |
| | KSUS329J3L | KSUS316LN-Clad | - | Good |
| Ferric chloride test | KSUS329J3L | KSUS329J3L | Better than KW309MoL | - |

以上の検証結果から、種々の鋼板を組み合わせた溶接個所が相当数発生することが考えられる、汎用二相ステンレス鋼である KSUS329J3L 鋼板と、オーステナイト系ステンレス鋼である KSUS316LN クラッド鋼板を用いたケミカルタンカーの建造時において、KW2209 規格を満たす溶接材料で統一出来ることを確認した。

7.2. 今後の展望

今回の研究では確認することが出来ていなかったが、実際に現場で作業する際に気を付けなければならないと思われる点がいくつかあるので、実建造前には確認しておく必要があると考えている。一つ目はパス間温度の管理である。短い溶接長を複数回積層するような溶接方法では低温 HAZ 領域において有害なシグマ相、 α' 固溶体が生成される危険な温度帯に長時間曝される懸念があるため、例えば次パス溶接開始までの待ち時間を設定する等の管理要領を新規に設定する必要性が考えられる。二つ目は、軽微な溶接修正に伴うショートビードの管理である。この場合、高温 HAZ 領域において Cr 窒化物析出による Cr 欠乏相の生成に起因して耐食性が劣化する恐れがあるため、例えば手直し溶接の最低ビード長さを規定する等の対策が求められる。三つ目は、溶加材を用いない TIG 溶接、いわゆる舐めつけ溶接の防止である。舐めつけ溶接は溶接ビードの整形に多用されている溶接法だが、二相ステンレス鋼に適用した場合、溶接材料からの合金元素の添加が行われないことから溶接金属部がフェライト量過多となりやすい。対策としては、強力なオーステナイト生成元素である窒素をシールドガスから添加する方法を検討することが考えられる。

また、本研究の対象鋼材は KSUS329J3L 鋼であったが、現在は KSUS316LN 鋼と同程度の耐食性を有しつつ、KSUS329J3L 鋼よりも Ni の含有量を更に低減させた KSUS329J1 鋼をケミカルタンカーに利用する検討が進み始めている。またこの鋼材を合わせ材としたクラッド鋼材の開発も進められているとのことだが、KSUS329J3L 鋼のクラッド鋼材と同様入手性に難があることも想定される。これらの状況を考慮すれば、本研究と同様に汎用二相ステンレス鋼板とオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板を用いたケミカルタンカーの建造を検討する場合もあり得るが、その際は本研究と同様の評価をする必要があるため、本研究の知見を活かして取り組む所存である。

参考文献

- 1) 例えば, JFE スチール : ケミカルタンカー用 TMCP 型 KSUS329J3L クラッド鋼板, JFE 技報, 46, 2020, pp.78-79.
- 2) <http://usukiship.co.jp/2019/06/05/>, (accessed on June 18, 2014)
- 3) 緒方洋典, 堺田和昌, 春山雄介, 深井英明, 黒沼洋太, 勝田順一, 岡田公一, 矢島浩, 安藤翼, 福井努 : 二相ステンレスクラッド鋼板のケミカルタンカーへの適用に関する基礎研究, 日本海事協会誌, 332 (I), 2018, pp.151-164.
- 4) 緒方洋典, 堺田和昌, 篠崎賢二, 山本元道, 谷野忠和, 福井努, 矢島浩 : 二相ステンレス鋼板・オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察, 圧力技術, 55(3), 2017, pp. 8-16.
- 5) 山下晋, 勝田順一, 緒方洋典, 春山雄介, 深井英明, 黒沼洋太, 矢島浩 : ケミカルタンカー用二相ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察, 溶接学会九州支部講演論文集, 15, 2018, pp. 31-37.
- 6) 勝田順一, 山下晋, 緒方洋典, 春山雄介, 深井英明, 黒沼洋太, 矢島浩 : ケミカルタンカー用二相ステンレスクラッド鋼板接合界面の破壊靱性および疲労亀裂伝播特性, 圧力技術, 57(1), 2019, pp.4-12.
- 7) Zhou, M., Gao, M., Li, C. and Wang, L. : Cargo Hold Structure Optimization of Small and Medium-Sized Duplex Stainless Steel Chemical Tankers, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 25(3), 2020, pp340-351.
- 8) Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A. and Gülenç, Behçet : Investigation of the Microstructural, Mechanical and Corrosion Properties of Grade A Ship Steel-Duplex Stainless Steel Composites Produced via Explosive Welding, Metallurgical and Materials Transactions A., 48(8), 2017, pp.3721-3733.
- 9) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK) : Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part M-Welding, 2019.
- 10) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK) : Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part CSR-B&T-Common structural rule for bulk carriers and oil tankers Part 1-General hull requirements, Chapter 12-Construction, 2019.
- 11) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK) : Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part K-Materials, 2019.
- 12) 例えば, 梶村治彦 : ステンレス鋼活用の基礎知識 -歴史, 特性, 耐食性-3. ステンレス鋼の耐食性, 材料, Vol.60, No.9, 2011, pp.862-867.
- 13) IMO: Guidelines for Performance Standard for Protective Coatings, Resolution MSC.215(82), 2006.
- 14) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK) : Guidelines on Welding of Duplex Stainless Steels, 2014.
- 15) Japan Industrial Standards, JIS G0553, Steel – Macroscopic examination by etching, 2008.
- 16) 例えば, Bureau Veritas : Rules on materials and welding for the classification of marine units Chapter 5-Welding, 2019.
- 17) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK) : Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part CSR-B&T-Common structural rule for bulk carriers and oil tankers Part 1-General hull requirements, Chapter 9-Fatigue, 2019.
- 18) Japan society of mechanical engineers : Standard method of statistical fatigue testing, JSME S002, 1994.
- 19) ISO/TR14345 : Fatigue – Fatigue testing of welded components –Guidance, 2012.
- 20) Lloyd's Register, Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, Chapter 2, Section 9 - Corrosion tests, 2020
- 21) Japanese standards association : Method of ferric chloride tests for stainless steels, JIS G0578, 2000.

謝辞

本論文は、九州大学大学院海洋システム工学部門教授 後藤 浩二 博士の多大なご指導とご教授を賜り、まとめたものであります。また後藤教授には、私が船舶の建造に携わるようになった直後より、特に溶接関連の規則、技術、管理面につきまして幾度となく丁寧にご指導いただき、その結果溶接管理技術者としての視野を広げることができました。併せてここに、深く感謝の意を表し、心より深甚の謝意を表します。

本論文の審査にあたり、ご多忙中にもかかわらず丁寧なご指導を賜りました、九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門教授 篠田 岳思博士、柳原 大輔 博士に心より御礼申し上げます。

本研究の実施にあたり、新日鐵住金ステンレス株式会社 鈴木 亨 様、山本 洋一 様、橋本 剛志 様、渡邊 宏章 様、(現 日鉄ステンレス株式会社)、株式会社神戸製鋼所 久保 祐也 様、山下 賢 様には、静的強度試験及び腐食試験にご協力頂きました。九州大学 工学部 技術室 村上 幸治 様には疲労試験にご協力いただきました。皆々様に改めてここに厚く御礼申し上げます。

また、私の博士後期課程への編入学に際し、快く許可していただきました株式会社新来島どつく 海宝 幸雄 常務執行役員、数々のご助言をいただきました技術設計本部 田中 義男 本部長、造船設計部 内村 秀之 副部長、溶接継手の製作にご協力をいただきました品質保証部 新納 栄二 副室長、遠藤 祐介 係長、並びに私の大学院編入学に力強く後押しをしていただきました技術設計本部 藤井 一申 副本部長(当時)に、深く感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。