

大型コンテナ船用高強度鋼板の開発と新規船体構造設計

Development of Yield Point 47kgf/mm² Class Higher Strength Steel Plate and New Hull
Structure Design for Large Container Ships新日本製鐵株式會社
三菱重工業株式會社

1. 研究開発の背景と目標

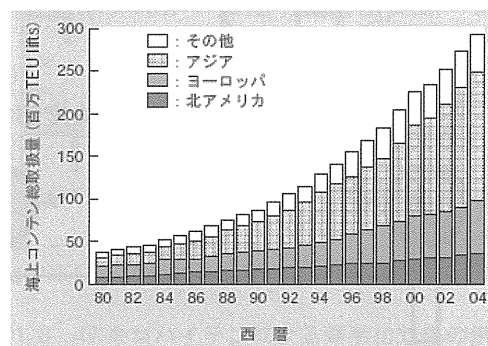
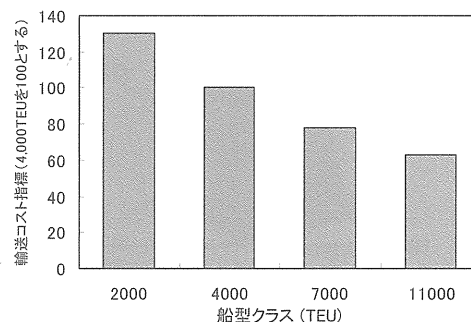
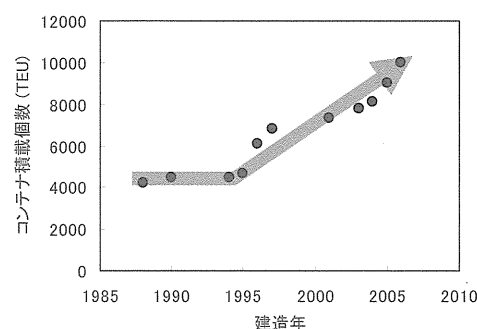
(1) 国際海上コンテナ物流の動向

港湾荷役の効率化や海陸一貫輸送の実現、輸送時間・コストの削減等を目指して1960年代に開始された海上コンテナ輸送は、その後急速に発展した。現在では世界の主要な定期航路のほとんどがコンテナ化され、世界の貿易・経済を支える主要な輸送手段となっている。

近年、中国をはじめとする東アジア諸国における急速な経済成長、国際的な水平分業や世界最適地調達・生産の進展等により、海上コンテナ貨物取扱量が飛躍的に増大している(図1.1)。これに呼応して、主要港はコンテナ物流基地(ハブ港)としての位置づけを確保すべく戦略的に港湾機能の強化にも取り組んでいる。

(2) コンテナ船の技術動向

国際的な運賃競争の中で優位になるための対応の一つがスケールメリットを狙ったコンテナ船の大型化であり(図1.2)、グローバル・アライアンスによる合理化と併行して船型大型化が促進されている。従来、主要航路はパナマ運河を通過していたため船型に制約があり、コンテナ積載個数約4,000個(4,000TEU^{*1})に抑えられていたが、輸送コスト低減メリットを重視する傾向が強まり、1990年代に入ってパナマ運河を航海しない航路の比重が高まったため、船型大型化が急速に促進された(図1.3)。2007年8月現在、積載個数が

図 1.1 世界の地域別コンテナ貨物取扱量¹⁾図 1.2 1TEU 当たりの海上輸送コストの船型による違い²⁾図 1.3 コンテナ船の大型化傾向³⁾

^{*1} コンテナ船のサイズは、TEU (twenty-foot equivalent unit、20 フィートコンテナ換算個数) という単位で表される。例えば、4,000TEU は 20 フィートコンテナであれば 4,000 個積める積載能力の意。1TEU はおよそ 39 m³。

10,000TEU を超える大型コンテナ船も計画され、発注残は既に 120 隻を超えている。

(3) 開発課題と目標

コンテナ船はコンテナを積載するために上甲板に大開口を有することから（図 1.4）、船体全体を曲げようとする荷重（縦曲げ）を受け止める構造部材が少ない。よって、必然的に上甲板の負担が大きく、必要な縦曲げに対する船体強度（縦強度）を確保するため、船体用としてはこれまで最も強度の高い降伏点 390N/mm^2 （40 キロハイテン）の厚手鋼板が縦強度部材に使用されてきた（図 1.5）。最近の、船体の大型化は縦曲げの増加をもたらし、それに対処するために、縦強度部材の板厚も増加を続けている状況にある（図 1.6）。しかしながら厚手鋼板の使用においては、圧下比（鋳片厚／製品厚）の減少にともなう鋼材靱性低下による耐脆性亀裂安全性の低下、溶接作業の難度化、船体重量の増加や船体重心の上昇による復原低下等に十分な配慮がなされなければならない。

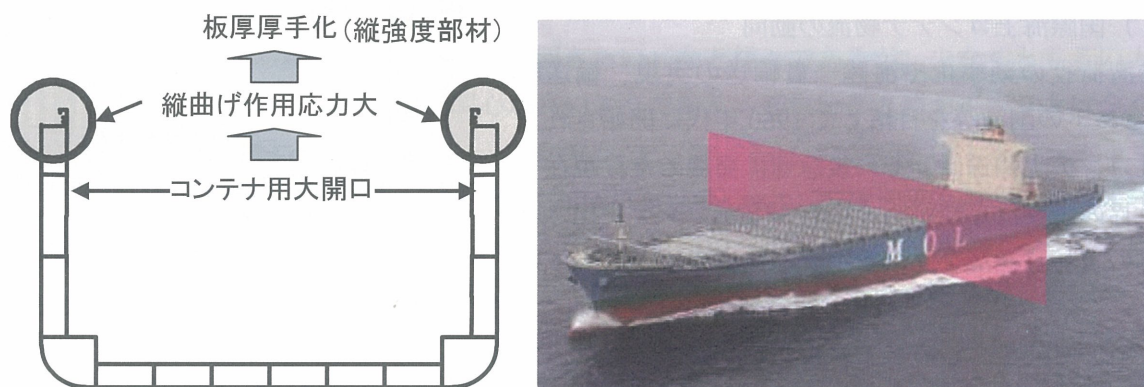


図 1.4 コンテナ船の構造上の特徴

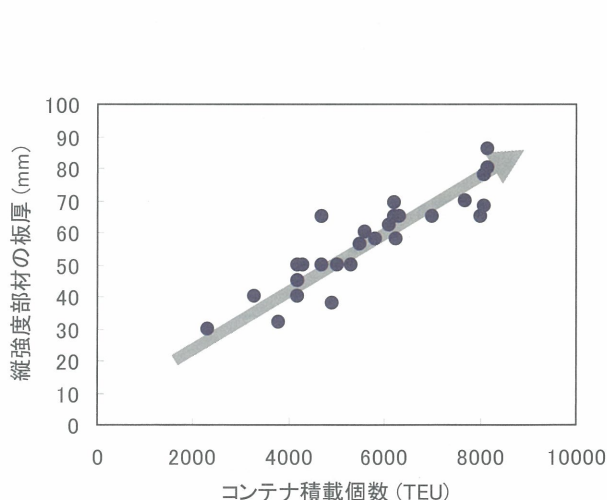


図 1.5 コンテナ船大型化にともなう縦強度部材の厚手化³⁾

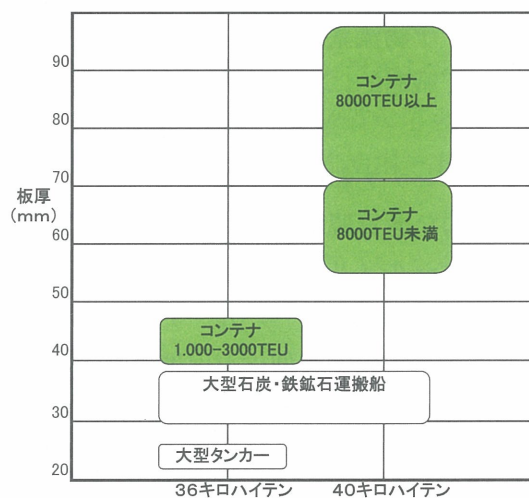


図 1.6 船種による鋼材強度・板厚の違い

これらの課題解決のため、①縦強度部材の厚手化を抑えるための鋼材の高強度化、すなわち高強度高靱性鋼材（以下 47 キロハイテン）の開発、②高強度化に対応しかつ造船現場施工にも配慮した、高度な溶接性、溶接部靱性を有する溶接・施工技術の開発、③これらの鋼材および溶接関連技術を活用した船体構造設計技術開発に取り組んだ。これによって安全（脆性亀裂発生抑制およ

び亀裂伝播停止による損傷防止)かつ高性能(船体が軽量化・低重心化されることによる、高貨物積載効率および省燃費・速度向上等の高経済性)な大型コンテナ船の実現を目指した。

まず、強度レベルの目標設定であるが、商船の船体に使用される鋼板の最高強度は、降伏強度 32 キロ、36 キロ、40 キロと都度概ね 10%の高強度化(ハイテン化)が進められてきた(図 1.7)。1990 年代以降 40 キロハイテンが最高強度鋼として長く使用されてきており、大型のコンテナ船においては 40 キロハイテンを用いた設計が標準である。これに対し、降伏強度で従来比 20%アップとなる 47 キロを開発目標とすることで厚手化を回避し、板厚を薄手化し、より一層靱性を向上させることで、脆性亀裂伝播停止性能(アレスト性 Kca 値^{*1})に代表される耐脆性亀裂安全性を格段に向上する設計コンセプトを採用した。例えば積載個数で 8,000TEU 級のコンテナ船では、縦強度部材に 47 キロハイテンを適用することで、従来の 40 キロハイテンに対し、板厚を 70mm から 50~60mmに抑えた設計が可能となる(図 1.8)。

さらには、47 キロへの高強度化に際して、溶接性、疲労強度、軽量化効果といった様々な性能を総合的に判断し、高い次元で経済性と信頼性を両立する開発目標を設定した(図 1.9)。

2. 研究開発の経過

将来的なコンテナ船の大型化トレンドを見越し、2000 年末に研究開発に着手した。ターゲットは積載個数で 7,000 から 12,000TEU 級とした。以降、鋼材の開発(～'02 年)と改善(～'05 年)および溶接材料の開発(～'03 年)と改善(～'05 年)、大型試験による脆性亀裂伝播停止性能の改善(～'05 年)を実施した。この大型試験の知見により、アレスト性を優先して確保する船体構造設計コンセプト(～'02 年)を確定、板厚 50mm をターゲットとした。その後、詳細設計(～'06 年)、造船ヤードでの溶接施工確認(～'06 年)、船級協会(日本海事協会)の承認取得(鋼材承認、溶接材料承認、構造図面承認、施工承認)を経て、2006 年に実船建造を開始、2007 年に開発鋼を適用したシリーズ船第一番船の就航に至った。主な経過の概年表を図 2.1 に示す。開発内容の詳細は 3 章に述べる。(財)日本海事協会は、開発当初から共同開発に参画し、船体用の新しい鋼材として、新規格の策定、各種承認を行った。

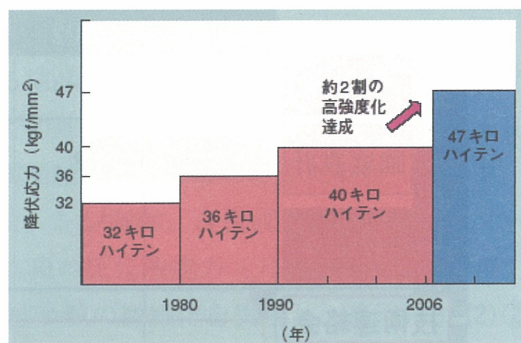


図 1.7 一般商船の船体に使用される高張力鋼板の最高強度の推移³⁾

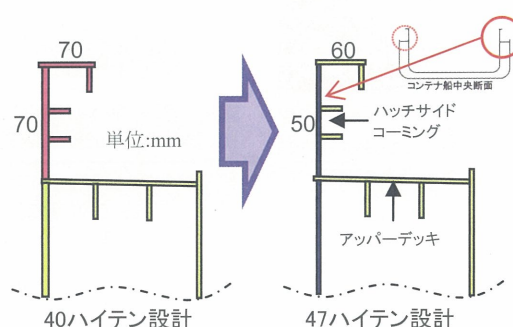


図 1.8 47 キロハイテンによる薄手化効果の例

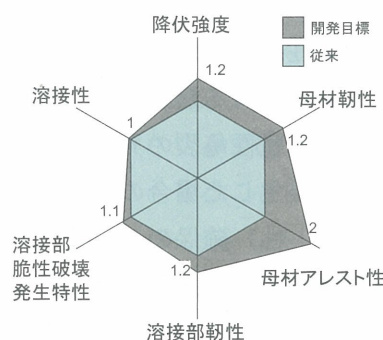


図 1.9 研究開発目標としての鋼板総合性能(従来を 1 とする)

^{*1} 脆性亀裂を停止する性能のこと。単位は $\text{kN/mm}^{1.5}$ で表される。

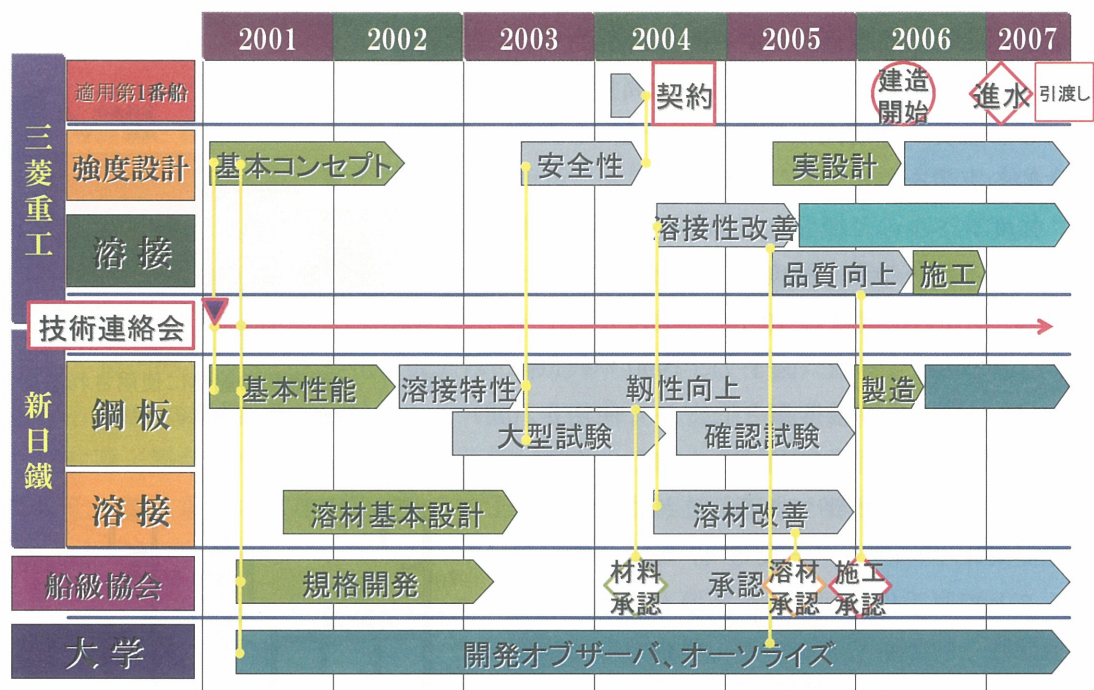


図 2.1 研究開発年表

3. 研究開発の内容と特徴

前節にて述べた通り、鋼材開発においては高強度化と同時に、脆性亀裂に対する安全性の確保が第一に求められた。脆性亀裂による構造物の大規模破壊防止には、脆性亀裂の発生防止と、万一亀裂が発生した場合の伝播停止性能（アレスト性）確保の二段階があるが、これら両方の性能を確保する（二重安全性）ことで、対象船の安全性をより一層高める設計思想を採用している。脆性亀裂コントロールの基本となる考え方を図 3.1 に示す。

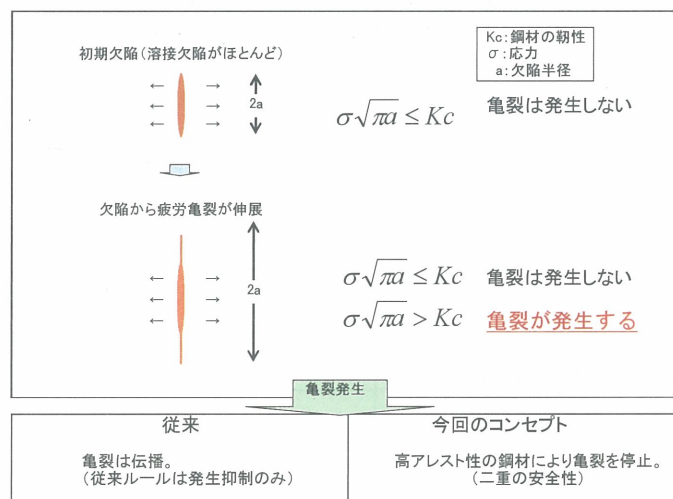


図 3.1 構造物安全性向上の考え方

実際の開発過程においては、亀裂の発生・停止において新たな知見が見出され、その解決のための研究開発を積み重ねていった。

(1) 鋼材開発、鋼材製造技術開発

図 1.9 に示した研究開発目標に対し、強度のみであれば、合金成分設計、TMCP^{*2}の適正化で達成可能であるが、単純に高強度を図ることは他の性能を低下させることにつながるため総合的な特性を向上させることは容易ではない。以下に開発した鋼材性能の特徴を述べる。

^{*2} Thermo-Mechanical Control Process 鋼板の圧延後、速やかに水冷することにより、強度と靱性を向上させる技術。

1) 母材アレスト性

厚手鋼板のアレスト性向上には鋼板全厚にわたる結晶粒の微細化が必要である。そのためには鋼板製造時、より低温（およそ 700～800℃）での圧延が有効であるが、低温すぎると圧延中に相変態（フェライト変態）が生じることで結晶粒が粗大となり、逆に靱性、アレスト性を低下させてしまう。これに対し、圧延温度の狭レンジ制御、合金成分最適化によるオーステナイト/フェライト変態温度の低温化、世界最大級の圧延機能力（大分製鐵所、最大反力 10,000 トン）を活用した大圧下圧延を駆使して、結晶粒の微細化を実現し、後述（3. (2) ②<2>）するように大型構造モデル試験で亀裂を停止できる優れたアレスト性を得た。図 3.2 に開発鋼のミクロ組織を示す。開発鋼の結晶粒は従来鋼と比較して顕著に微細化されている。

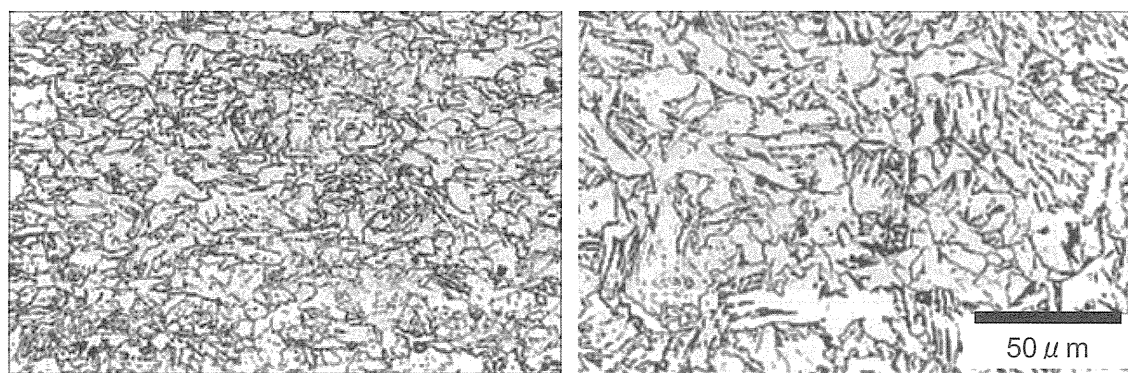


図 3.2 鋼板のミクロ組織比較 左：開発鋼、右：比較従来鋼

2) 溶接部靱性

厚手鋼板において高強度化を図るためには最低限の強化元素の添加が必要となるが、一般的に析出強化、固溶強化に寄与する元素の添加は溶接部靱性を低下させる要因となる場合が多いことから、厚手鋼板において高い強度と高い溶接部靱性を両立させることは困難をともなう。

その解決技術としては溶接部組織の細粒化が有効であり、従来、溶接部靱性の改善を図るためのオーステナイト粒粗大化抑制には TiN^{*3}の分散が有効とされてきた。しかし、TiN は溶融部近傍の高温域では分解固溶するため、そのオーステナイト粒粗大化抑制効果が減少する。特に本鋼材のように一度の溶接で溶接を完了(1 パス溶接)する場合の入熱量は著しく大きく、広範囲の溶接部が高温に長時間さらされるため、細粒化にとっては不利になる。この課題に対し、高温でも安定な酸化物を活用した結晶粒粗大化抑制技術「HTUFF (Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure imparted by Fine Particles)」を活用してオーステナイトの細粒化を実現した。

これに加え、オーステナイト内部に生成するフェライトの細粒化も追及した。これは、フェライトの核生成場所となる析出物を微量添加元素の最適化により数多く分散させることで、実現した。図 3.3 には溶接部の組織を示す。開発鋼は比較鋼に対し、オーステナイト粒（図中点線）が細粒になっている。加えてオーステナイト内の組織単位が微細に分断されており、比較鋼で見られる粗大な組織単位（図中網掛け部）は極めて少ない。

^{*3} 窒化チタン。これを鋼中に微細に分散させ、障害物とすることにより、溶接熱による結晶粒の粗大化を防止するが、およそ 1400℃を超えると分解固溶し、オーステナイト粗大化抑制効果が低下する。

また、鋼材は高強度になると溶接時に発生する割れ（溶接割れ）を防ぐため、予熱・後熱といった溶接作業での熱処理が必要となる場合があるが、本開発鋼は溶接割れを助長するような合金成分を極力低減し、予熱・後熱が不要な従来の造船用鋼板と同等の溶接性を前提に開発されていることも大きな特徴である。

表 3. 1 に開発した 47 キロハイテンの母材および溶接部の機械的性質を示す。小型試験（引張試験、シャルピー衝撃試験）において、当初の目標鋼材仕様を満足する良好な値が得られた。本鋼材を用いて、3. (2) 節以降の大型試験による耐脆性亀裂安全性に関する調査を実施した。

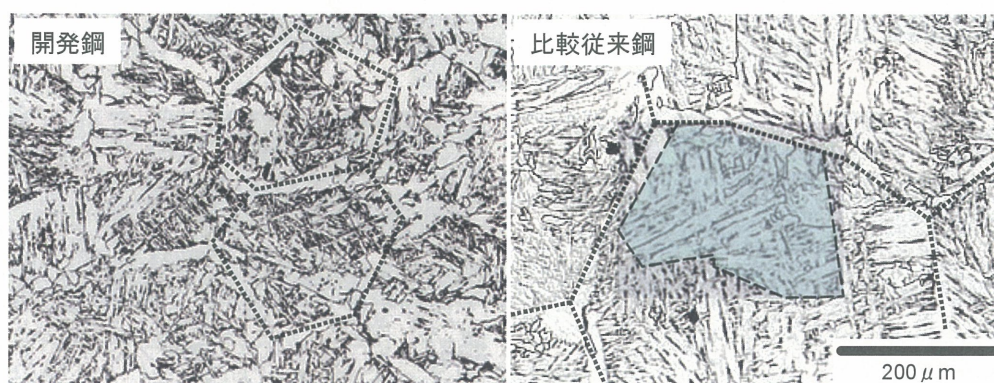


図 3. 3 開発鋼の溶接部マイクロ組織

表 3. 1 47 キロハイテン開発材の機械的性質

	板厚 (mm)	母材						溶接部
		引張試験			シャルピー衝撃試験			シャルピー衝撃試験
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び(%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー(J) 平均値	破面遷移温度 (°C)	吸収エネルギー(J) FL 平均値
開発材	70	513	614	25	-40	230	-45	110
目標	70	≥460	570~720	≥17		≥53**	—	≥53**

(**：吸収エネルギーの目標は船体の設計により異なる)

3) 溶接技術、溶接材料開発

① 高能率溶接法の採用

47 キロハイテンの立向突合せ溶接を、高能率の 1 パス溶接で、かつ高レベルの溶接部靱性を確保するため、2 電極 VEGA (**V**ibratory **E**lectro **G**as **W**elding) 溶接を採用した。2 電極 VEGA 溶接は、図 3. 4 に示すように、板厚方向に溶接トーチ（電極）を 2 本配置し、これを板厚方向にオシレートさせながら溶接トーチが自動上昇する溶接法である。開先表面にはシールドガス供給口を備えた摺動銅板を、開先裏面にはセラミック製の裏当材を配置する。本溶接法は、板厚 70mm までの厚板溶接において十分な施工実績を有しており、47 キロハイテンの溶接法としてもこれを採用した。2 電極 VEGA 溶接は、図 3. 5 に示すように従来の 1 電極溶接法に比べ約 2 倍の溶接速度が得られ、溶接入熱量を 1 電極溶接法の 85 ～90%まで低減させることができる。つまり、本溶接法は溶接能率の大幅な向上だけでなく、溶接部の高靱性化に寄与するものである。

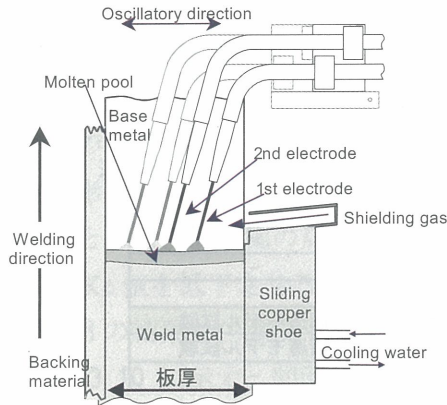


図 3.4 2 電極 VEGA 溶接法概要

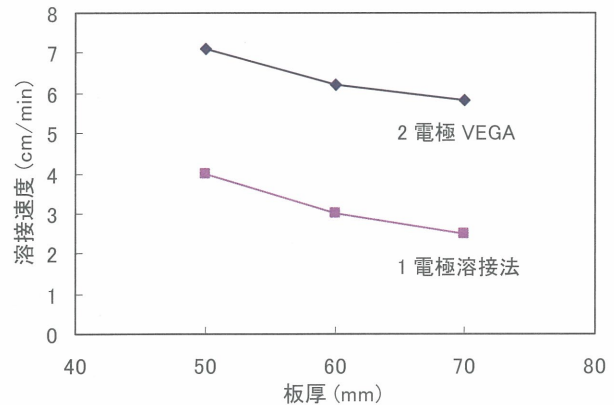


図 3.5 1 電極法と 2 電極法の溶接速度の比較
(表面開先幅=25mm、ルートギャップ=10mm)

②溶接材料開発

後述 (3. (2) ①<2>) するように、溶接部の脆性破壊発生特性 (Kc 値^{*4}) を確保するためには、溶接金属の硬さ低減が必要であることを見出した。一般的に、溶接金属の強度とシャルピー衝撃試験には強い相関があり、図 3.6 に示すように、溶接金属が硬い(=高強度)ほどシャルピー衝撃吸収エネルギーが向上する傾向がある。これに対し、本溶接材料開発では、軟らかい溶接金属で高いシャルピー衝撃吸収エネルギーを達成する技術開発に取り組んだ。

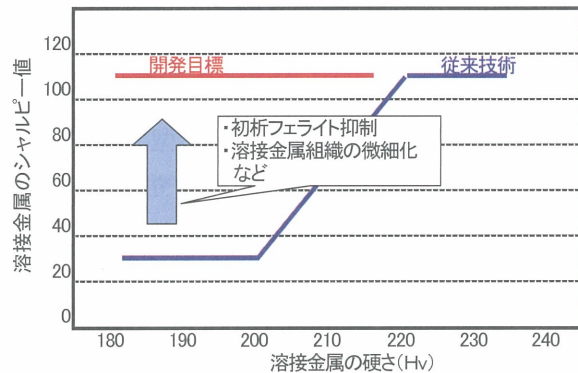


図 3.6 新溶接材料の開発目標

溶接金属の強度が低い場合に、溶接金属の靱性が低下する原因のひとつが溶接金属組織内に生成する初析フェライトなどの粗大組織の存在である。溶接金属の焼入れ性が十分確保されていると初析フェライトの生成は抑制されるため靱性が向上するが強度も上昇する傾向となる。そこで、この相反する特性を制御するための溶接材料設計として、低炭素化、Ni などの合金量低減による強度上昇の抑制、ボロンの積極的な活用による溶接金属組織の微細化、さらには不純物である硫黄の徹底低減化による靱性の向上によって溶接金属の硬さを抑えながらも高靱性を得ることに成功した (図 3.6)。これにより、1 パス大入熱溶接部の高靱性を確保しつつ優れた脆性破壊発生特性を実現した。

(2) 高強度厚手溶接構造の脆性破壊に対する安全性の検証

溶接構造の脆性破壊に対する安全性検証に関し、表 3.2 に示す試験を行った。先に述べた通り 47 キロハイテンでは、高い耐脆性破壊特性を有することが開発目標である。そこで、8,000 トン

*4 脆性亀裂を発生させない性能のこと。応力拡大係数(単位は $N/mm^{1.5}$)で表される。例えば図 3.7 に示す試験により測定する。

大型引張試験機を用いた実構造をモデル化した実物大試験をはじめとする一連の大型試験により、高強度厚手溶接部の脆性破壊に対する課題を明確化すると共に、開発鋼の耐脆性破壊特性の性能検証を行なった。

表 3.2 溶接構造の脆性破壊に対する安全性検証のための大型～実物大試験方法

特性	部位	大型試験	実物大試験
亀裂発生特性	母材	ディープノッチ試験	-
	溶接部	ディープノッチ試験	-
	溶接金属	ディープノッチ試験	-
亀裂停止特性	母材	アレスト (ESS0) 試験	構造モデル試験
	溶接部	-	構造モデル試験
	溶接金属	-	-

黄色網掛けは開発ポイント

①脆性破壊発生特性

〈1〉課題

船体構造に適用される溶接継手部の脆性破壊発生特性を評価するために、中央切欠付き広幅試験（ディープノッチ試験）が、造船分野では従来から用いられている。標準的なディープノッチ試験片形状を図 3.7 に示す。この試験方法は、船体溶接構造と同様の溶接残留応力が試験片において存在しているため、他の破壊靱性試験である CTOD 試験などよりも、より現実的で安全側の評価が与えられるといわれている。この試験結果によって得られた溶接部の破壊靱性値（Kc 値）と、小型で簡易なシャルピー試験によって得られる溶接部のシャルピー値との間に相関関係が成り立つことから、従来は、「溶接部のシャルピー値を船級協会が鋼船規則で定める要求値以上とする」ことで、脆性破壊発生特性である「溶接部の Kc 値も定められた破壊靱性要求値を満足できる」との論理により、船体の安全性が担保されてきた。

板厚 50mm の 47 キロハイテンを用いて、Kc 値とシャルピー特性の相関関係が成立することを確認するため、溶接部のディープノッチ試験、およびシャルピー試験を実施した。ディープノッチ試験により求めた Kc 値をシャルピー値から従来の相関式を用いて予測した Kc 値と比較して図 3.8 に示す。その結果は二つのグループに分かれ、従来の相関式が成立せず、溶接部の破壊靱性値である Kc 値が、溶接部のシャルピー値で推定できない場合があることが判明した。すなわち、溶接部のシャルピー値が要求値を満足しても、脆性破壊の発生特性である破壊靱性値を保証することはできない場合があることを示しており、脆性破壊発生特性を保証するための新たな条件を見出す必要が生じた。

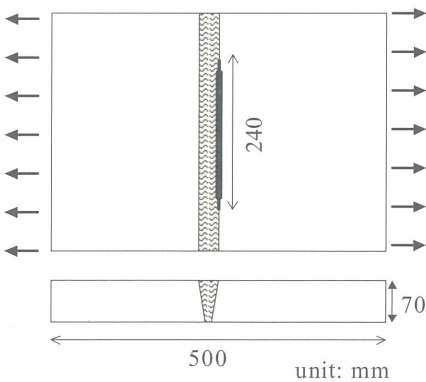


図 3.7 中央切欠付き広幅試験片（ディープノッチ試験片）

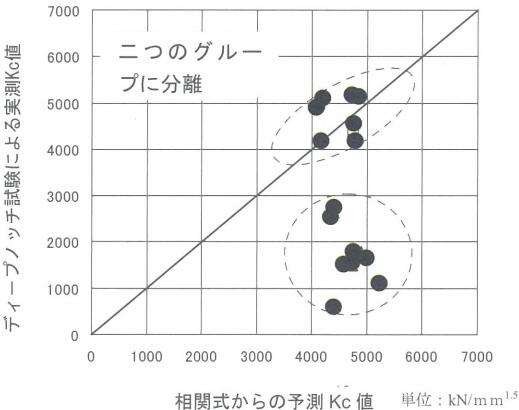


図 3.8 Kc 値の予測値と実測値との相関

〈2〉課題の解決

図 3.8 において、高い Kc 値を示した試験片、低い Kc 値を示した試験片を詳細に調査した結果、溶接金属の硬さが異なっていることを見出した。そこで、溶接部における鋼材と溶接金属との強度マッチングに関して詳細に検討するため、溶接部局所応力におよぼす溶接金属強度の影響について FEM 解析を実施した。その結果、同一荷重下であっても溶接金属硬さの上昇とともに溶接部の局所応力が増加し、それが臨界破壊応力に達することにより溶接継手部の Kc 値を低下させる機構を明らかにした（図 3.9）。

図 3.8 の結果を、強度マッチングの観点から溶接金属と母材の硬さ比によって整理した結果を図 3.10 に示す。同図から、溶接部の強度マッチングが造船用鋼材の脆性破壊発生特性 Kc 値に大きな影響をおよぼすことが明らかである。つまり、 α （溶接金属硬さ/母材硬さ）が 1.2 以下であれば、Kc 値との相関が良好で、シャルピー値を脆性破壊発生特性の判断に用いることができると言える。それに対し、 α が 1.2 超ではシャルピー値と Kc 値との相関が成立せず、シャルピー値では判断できないことを示している。すなわち、適正な Kc 値を確保するためには、溶接部のシャルピー値を確保するだけでは不十分であり、溶接部の強度マッチングを適正に制御する必要があることを見出した。

開発鋼では、溶接金属と母材との硬さマッチングを硬度比 1.2 以下とし、シャルピー値を 53J 以上とすることで、溶接部の脆性破壊発生特性である Kc 値の確保を可能としている。

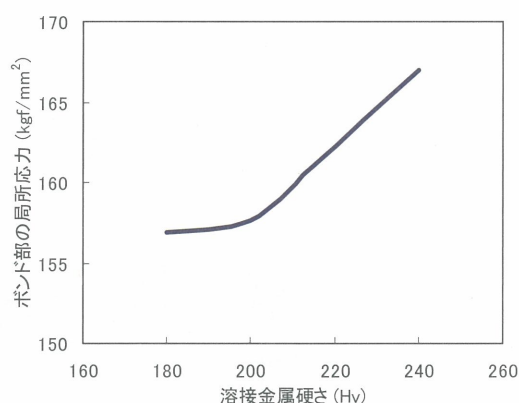


図 3.9 局所応力におよぼす溶接金属硬さの影響

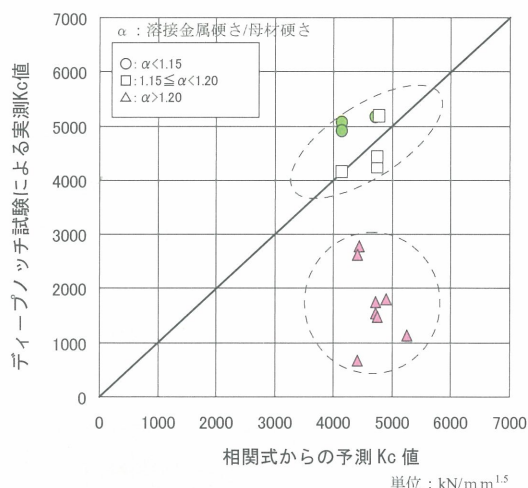


図 3.10 厚手造船用鋼の Kc とシャルピー値との相関における強度マッチングの影響

②脆性破壊亀裂伝播停止特性

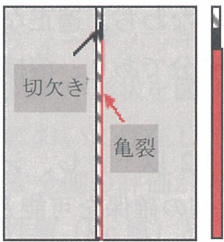
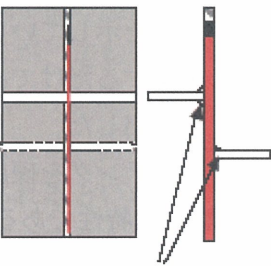
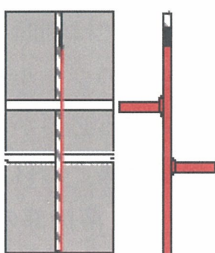
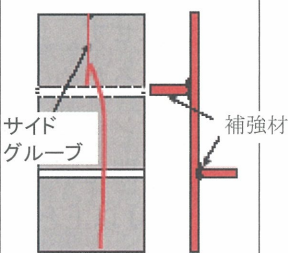
〈1〉課題

溶接継手の脆性破壊亀裂伝播停止特性（アレスト性）を確認するため、8,000 トン大型引張試験機を用いた体系的な検討を実施した。幅 2.3m、ピン間距離 7.2m の大型引張試験であり、概ねコンテナ船の実構造を再現した試験が可能である。得られた試験結果を表 3.3 に示す。

試験体-1 は、ハッチサイドコーミングどうしの溶接部であり、溶接部で発生させた亀裂は、継手から母材に逸れることなく直進し破断した。これは従来考えられてきた、溶接部に比べアレスト性の良い母材に亀裂が逸れて停止するという想定シナリオと異なる結果であった。

また、実船では溶接部に縦通骨材（補強材）が配置されていることを考慮した、試験体-2、試験体-3においても、骨材による脆性亀裂伝播に対する抑制効果は小さく、いずれも亀裂は直進して破断した。以上から、万一溶接継手に脆性亀裂が発生した場合、亀裂は溶接部に沿って長距離伝播する可能性があることが明らかとなった。

表 3.3 8,000 トン大型破壊試験結果

試験体	試験体 1	試験体 2	試験体 3	試験体 4
狙い	溶接部アレスト	溶接部アレスト (骨材の効果)	溶接部アレスト (骨材の効果、剪断破壊対策)	母材アレスト
構造	平板	スチフナ	スチフナ	スチフナ
試験温度	温度勾配	-10℃	-10℃	-10℃
試験応力	36kgf/mm ²	286kgf/mm ²	24kgf/mm ²	28kgf/mm ²
試験結果	伝播	伝播	伝播	伝播
亀裂の伝播状況				

この実験結果を受け、万一の場合の脆性亀裂が伝播する経路となる溶接線の配置が不連続（バットシフトと呼ぶ、図 3.11 参照）となるよう、構造設計にて配慮した。これにより、溶接線を伝播してきた脆性亀裂は、図 3.11 に示すとおり、ハッチコーミング/アッパーデッキの接続部において母材に伝播すると考えられるため、母材でのアレスト性確保を前提とした検討が可能となる。

まず、従来鋼のアレスト性を確認する目的で、板厚 65mm の 40 キロハイテン母材を用いて試験を行った（試験体-4）。シャルピー値が-40℃で 170J と、E 級鋼（-40℃で 46J という、一般船体用鋼板で最も厳しいシャルピー値を要求される鋼）の規格値を大きく上回る鋼板母材であっても、脆性亀裂は停止せずに試験片を貫通伝播した。この鋼板はアレスト靱性値 Kca 値が 2,800kN/mm^{1.5}であったことが確認されており、これはこの程度の Kca 値では亀裂の伝播を停止できないこと、および一般にシャルピー値と Kca 値に相関はあると言われているものの、極厚板においては、規則の要求するシャルピー値を満足しても十分なアレスト性を有していない場合があることを示している。

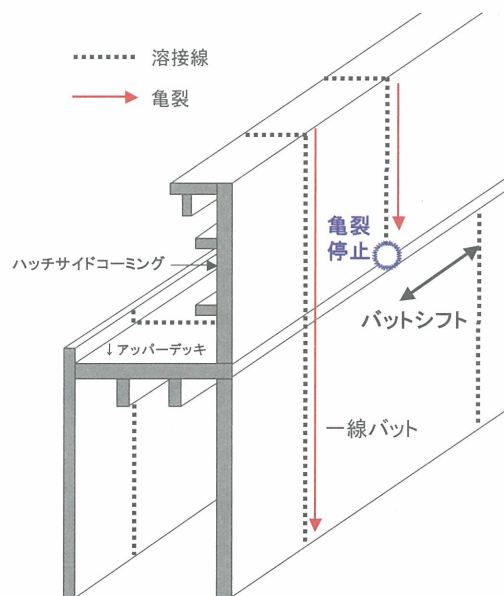


図 3.11 バットシフト模式図

〈2〉課題の解決

脆性き裂の発生防止に加え、アレストによる二重安全性を実現するためには、大型構造モデル試験を通じた必要アレスト値（Kca 値）の調査と、その達成が必要である。この、ほぼ実構造を模擬した大型試験体を用い、実船の応力、板厚にて、脆性亀裂の伝播を停止できることを実証した。以降、その詳細を示す。

船体の溶接部として、ハッチサイドコーミングとデッキプレートとの間でバットシフトされ、脆性亀裂が母材に伝播することを前提に、以下の構造モデル試験を行った。

- ① ハッチサイドコーミングから伝播してきた亀裂をデッキプレートで停止する。
- ② デッキプレートから伝播してきた亀裂をハッチサイドコーミング母材で停止する^{*5}。

試験に用いた鋼板は、本鋼材の最初の実船適用例として想定されていた、(株)商船三井 殿向け積載個数で 8,100TEU 級コンテナ船のハッチサイドコーミングとデッキプレートとを想定し、50mm 厚さの 47 キロハイテン、および 60mm 厚さの 40 キロハイテンとした。鋼材は前述 (3. (1) 1) したように、従来以上の優れたアレスト性を付与したものである。

図 3.12 はハッチサイドコーミングからの亀裂をデッキプレートで停止させるための構造モデル試験で、ハッチサイドコーミング想定試験体上部から進展した亀裂が、それと垂直に配置されたデッキプレート想定部材に突入後、約 30mm 位置で停止した。図 3.13 はデッキプレートからの亀裂をハッチサイドコーミング母材で停止させるための構造モデル試験で、デッキプレート想定試験体上部から進展した亀裂が、その下に配置されたハッチサイドコーミング想定部材に突入後、約 20mm の位置で停止した。

なお、図 3.13 の写真は亀裂停止後、試験片を取り出すことを目的に過大応力を加え強制的に破断させたため、試験体が分断されているものである。

一連の大型構造モデル破壊試験の結果、板厚 50mm 以上の厚手溶接構造体であっても、従来の約 2 倍の Kca 値を有するアレスト性能を確保した鋼板を適正に配置することにより、万一の場合の脆性亀裂の伝播を停止させうることを確認した（図 3.14）。これにより、先に述べた脆性亀裂の発生特性の確保（発生防止）と併せ、二重の安全性を実現した。

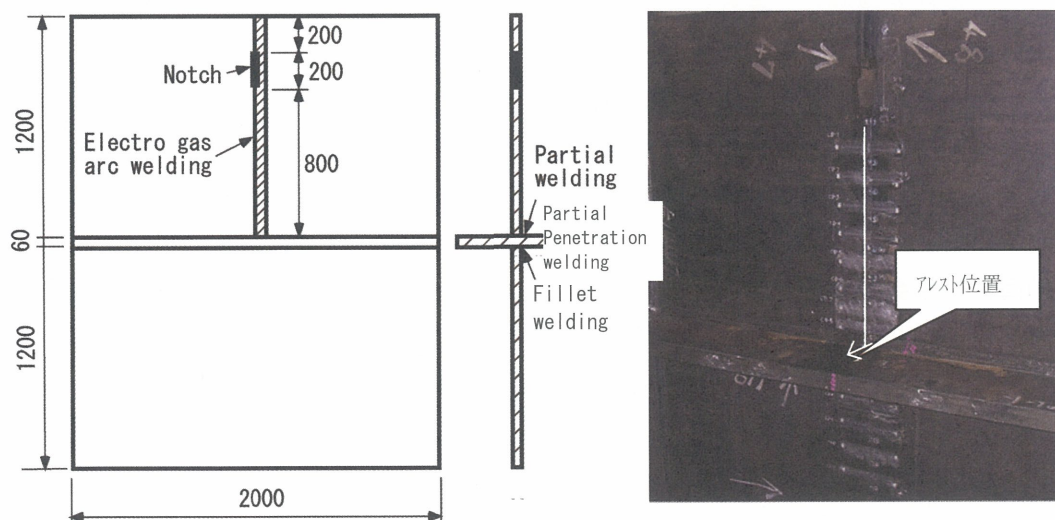


図 3.12 ハッチサイドコーミングーデッキプレートモデル試験

^{*5} 実際の構造はL型となるが、試験機の構造上対応できないため、I型に展開してある。

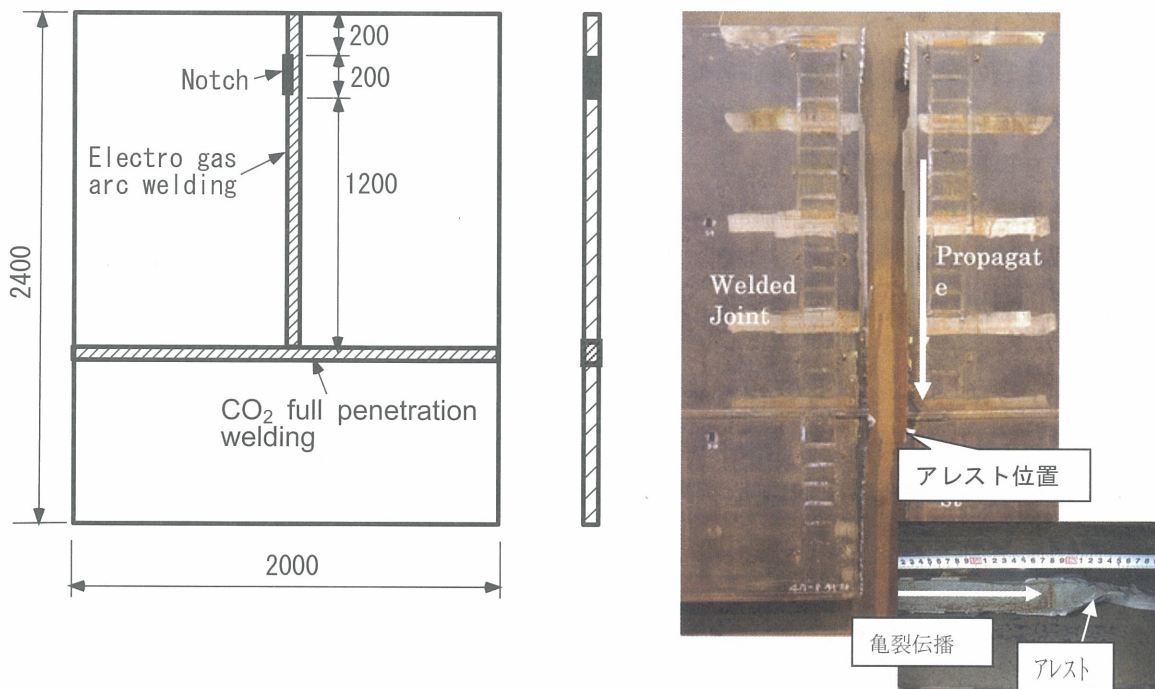


図 3.13 デッキプレートーハッチコーミングモデル試験

なお、その後 47 キロハイテンの板厚 70mm でも脆性亀裂のアレストできる製造技術の開発に成功し、より厚い板の必要性が高い、積載個数で 10,000TEU 超級といった大型コンテナ船への適用を検討中である。

高強度厚手溶接構造の脆性破壊に対する安全性について 8,000 トン試験機を用いた大型構造モデル試験を実施する過程で、上述の現象を種々把握し、それらの新知見を国内外の学協会へ公表することで、急速に進みつつある大型コンテナ船への適用板厚

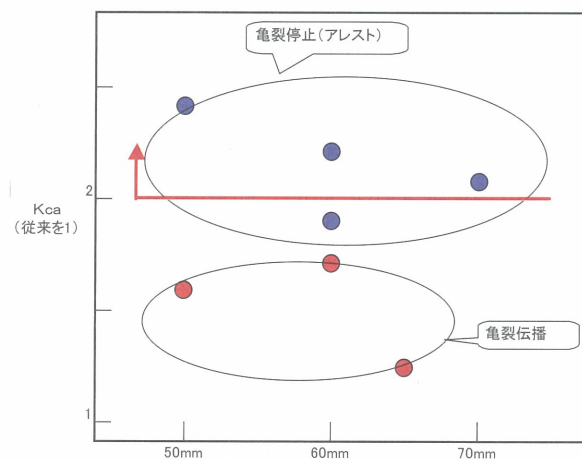


図 3.14 要求アレスト値

拡大に対する安全性の懸念を示した。同時に、日本海事協会は「大型コンテナ船アレスト設計研究委員会」を招集し、アレスト設計に必要な検討項目に関し大型試験を含めた検討を開始するに至った。また、脆性破壊発生特性と非破壊検査を含めた幅広い検討の必要性が日本船舶海洋工学会から提示され、上記委員会も含めた形で再構成されることとなった。現在、国家プロジェクト「超大型コンテナ船構造安全対策検討委員会」として国土交通省海事局、学識経験者（東京大学、九州大学、横浜国立大学、長崎総合科学大学、上智大学）、高炉 4 社、海運業界（日本郵船、商船三井、川崎汽船）、造船業界（三菱重工業、アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド、三井造船、他）、各国船級協会、公的機関（日本船舶技術研究協会、海上技術安全研究所）により研究が行われている。

以上のように、本鋼板の開発において明らかになった厚手ハイテン鋼の安全性に関する諸問題は、本開発によりひとつの解決策が提示されるとともに、国家プロジェクトレベルで安

全性を調査するきっかけとなった。本鋼材の開発によって生じたこれらの動きは、将来造船・海運業界の安全性向上に大きく寄与するものである。

4. 研究開発の成果

(1) 適用船

47 キロハイテンを世界で初めて適用した積載個数で 8,100TEU 級コンテナ船”MOL CREATION”は、(株) 商船三井殿の発注により三菱重工業株式会社長崎造船所にて建造され、2007 年 6 月に引渡された同クラス 6 隻シリーズの第 1 番船である。本船の概略配置を図 4.1 に、主要目を表 4.1 に示す。本船は船主殿および三菱重工業にとって最大船型のコンテナ船であり、就航後はアジア/欧州航路に投入される予定となっている。

本船は、本稿の主題である 47 キロハイテンの採用を含め、随所に最新技術を採用している。その概要は次のとおりである。

- 1) 主機に最新型電子制御方式の三菱スルザー 11RT-flex96C を採用している。電子制御の採用により回転数に応じた最適な燃料噴射制御を実現しており、NO_x(窒素酸化物)や PM(煤塵)の排出抑制に高い効果を得ている。
- 2) 推進性能については、同クラスコンテナ船では最小の 11 気筒低燃費主機を採用しながらも、高度な船型開発技術により運航速力 25.25kn を達成している。
- 3) 積載性は、比較的幅広な船型の採用および 47 キロハイテンの採用による、軽量化/低重心化により、実入りコンテナ数の増加およびバラスト水搭載量の低減を図り、採算性・運航利便性を向上している。
- 4) 全ての燃料・油タンクに二重船殻（ダブルハル）配置を採用し、海洋汚染防止に配慮した構造としている。
- 5) 全てのホールドに危険物の積載が可能であり、特に No.1～7 ホールドは燃料を搭載した自動車も積載可能である。

以上のとおり、本船は 47 キロハイテンを初めとした種々の最新技術の投入により、環境負荷の低減と安全性の向上を高い次元で実現した、最新鋭コンテナ船である。

表 4.1 主要目

全長	約 316 m	コンテナ数	8,110TEU
船幅	45.6 m	主機関	MITSUBISHI-SULZER 11RT-flex96C
満載喫水	14.5 m		
載貨重量	90,678 t	最大出力	62,920 kW×102rpm
総トン数	86,692	航海速力	25.25 kn

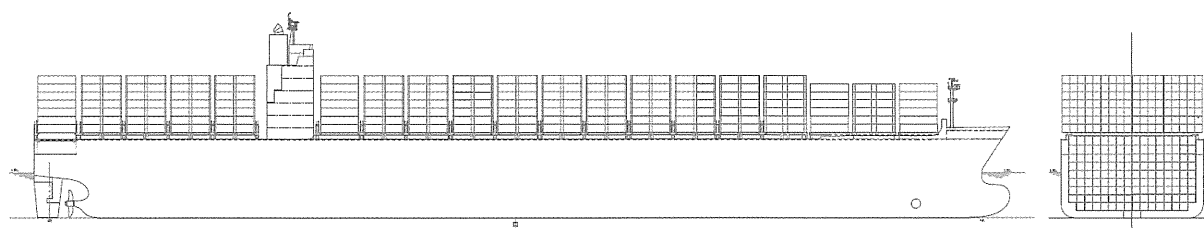


図 4.1 概略配置図

(2) 47 キロハイテンの経済性

前項に記載の通り、本船では縦強度部材に 47 キロハイテンを使用することにより、従来の 40 キロハイテンを使用した場合と比べ、船体の軽量化による鋼材コスト減、排水量減による積載個数増、燃費改善等の経済性の向上を達成している。

ここでは、47 キロハイテンの経済効果を試算するため、仮に 40 キロハイテンと同じ板厚(同じ断面性能(Z))で 47 キロハイテンを適用し、許容応力を上昇させた場合のコンテナ積数増加を計算した。40 キロハイテンを 47 キロハイテンに変更した場合、縦強度設計許容応力(σ_{all})の増加は、降伏応力比であれば約 20%の増加が可能ということになるが、実際の設計許容応力寄与度の設定にあたってはマージンを取り、高強度化効果を半分と規定しており、約 10%の上昇となる。船体の縦強度に関連する荷重は大きく二つに分類することができ、一つは波浪に誘起される波浪縦曲げモーメント(Mw)であり、もう一つは浮力と船体および積み荷の不均一重量分布により発生する静水中縦曲げモーメント(Ms)である。すなわち、船体の強度設計は下記の式で表されるが、断面性能(Z)が同じで 47 キロハイテンを採用した場合、許容応力の増加に応じて、(Mw+Ms)を 10%増すことができる。

$$(Mw+Ms) / Z < \sigma_{all}$$

Mw と Ms の比率を仮に 50:50 と仮定する。波浪縦曲げモーメントは船体の形状、寸法に依存するため、今回の計算条件では 40 キロハイテンと 47 キロハイテン設計で変化が無く、47 キロハイテンの採用により許容静水中縦曲げモーメントを 20%増すことができる。(図 4.2)

特にコンテナの単位重量が軽めの航路(アジア→北米など)においては、許容静水中縦曲げモーメント上昇による積みつけ方法の自由度改善及びそれによるコンテナ積み数増加効果が高く、約 2~3%のコンテナ積み個数を増やすことができ、輸送効率の向上に大きく貢献できる。(図 4.3)

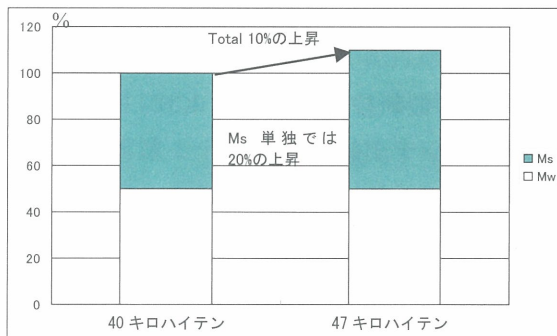


図 4.2 47HT 採用による許容縦曲げモーメントの上昇

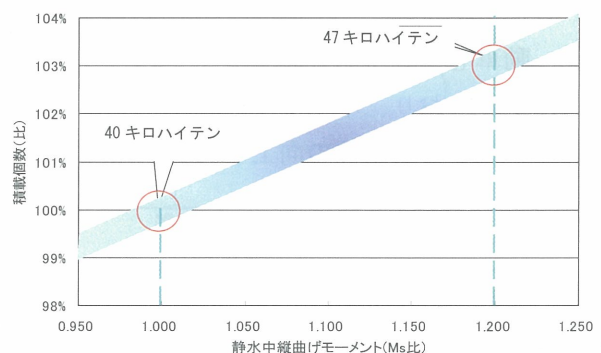


図 4.3 静水中縦曲げモーメントと積載個数の関係

なお、ここでの経済性については本船(積載個数で 8,000TEU)クラスの場合における状況を示したが、より大型船の場合は、47 キロハイテンを使用することによる効果はさらに大きくなる。上述のとおり、47 キロハイテンはコンテナ船の商品価値を大きく高める事ができるが、この輸送効率向上は環境負荷低減としての効果も大きい。同サイズのコンテナ船が一年間に排出する CO₂ 量はおおよそ 30,000ton/隻であるが、輸送効率が 3%改善すると年間約 1,000ton/隻の CO₂ 排出低減効果となる。

<引用文献>

- 1) 三菱重工技報 Vol.41、No.6 (2004)
- 2) 北澤壮介 平成 16 年度国土技術政策総合研究所 講演会資料
- 3) 三菱重工技報 Vol.44、No.3 (2007)

5. 学会発表、特許等

(1) 主な学会発表および論文等

- 1) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩: 超大型コンテナ船の開発—新しい高強度極厚鋼板の実用—, 咸臨, 第 3 号, 2005, pp.70.
- 2) 井上健裕, 石川忠, 今井嗣郎, 小関正, 廣田一博, 多田益男, 山口欣弥, 松本俊之, 矢島浩: 厚手造船用鋼における長大脆性き裂伝播挙動, 日本船舶海洋工学会講演大会, 2006
- 3) Inoue, T, Ishikawa, T, Imai, S, Koseki, T, Hirota, K, Tada, M, Kitada, H, Yamaguchi, Y and Yajima, H (2006), "Long Crack Arrestability of Heavy-Thick Shipbuilding Steels," *Proc. of the 16th ISOPE Conf.*, pp. 132, 2006
- 4) Takehiro Inoue, Tadashi Ishikawa, Shiro Imai, Tadashi Koseki, Kazuhiro Hirota, Masuo Tada, Yoshiya Yamaguchi, Toshiyuki Matsumoto and Hiroshi Yajima, "Long crack arrest concept in heavy-thick shipbuilding steels," *Proc. of the 17th ISOPE Conf.*, 2007
- 5) Tadashi Ishikawa, Takehiro Inoue, Hiroshi Shimanuki, Shiro Imai, Jun Otani, Kazuhiro Hirota, Masuo Tada, Yoshiya Yamaguchi, Toshiyuki Matsumoto and Hiroshi Yajima, "Fracture toughness in welded joints of high strength shipbuilding steel plates with heavy-thickness," *Proc. of the 17th ISOPE Conf.*, 2007
- 6) 廣田一博, 中川隆, 武田信玄, 橋吉美, 多田益男: 世界初の船体用降伏応力 47 kgf/mm² 級高張力鋼の開発と実船適用, 三菱重工技報, 第 44 巻, 第 3 号, 2007
- 7) 井上健裕, 石川忠, 今井嗣郎, 小関正, 廣田一博, 多田益男, 山口欣弥, 松本俊之, 矢島浩: 厚手造船用鋼における長大脆性き裂伝播挙動, 日本造船学会秋季講演大, ポスターセッション原稿, 2004

(2) 特許

本件に関連する特許は現時点で 44 件出願済である。主な特許を以下に挙げる。

海外出願は 5 件である。

- 1) 大谷潤、皆川昌紀、矢島浩他、特開 2004-232052 ('03.01.32 出願)
- 2) 石川忠、大谷潤、島貫広志他、特開 2005-111501 ('03.10.03 出願)
- 3) 島貫広志、井上健裕、小関正、特開 2005-329461 ('04.04.21 出願)
- 4) 石川忠、大谷潤、多田益男他、特開 2006-88184 ('04.09.22 出願)
- 5) 石川忠、井上健裕、小関正他、特開 2006-75874 ('04.09.10 出願)
- 6) 石川忠、井上健裕、島貫広志他、特開 2005-144552 ('04.10.15 出願)
- 7) 石川忠、橋場裕治、大北茂他、特開 2005-125348 ('03.10.22 出願)
- 8) 石川忠、大北茂、井上健裕他、特開 2005-279743 ('04.03.30 出願)
- 9) 大北茂、橋場裕治、石川忠他、特開 2005-330578 ('05.03.08 出願)
- 10) 石川忠、橋場裕治、大北茂他、特開 2005-305514 ('04.04.22 出願)

- 11) 大北茂、橋場裕治、石川忠他、特開 2005-329460 (’05.03.08 出願)
- 12) 石川忠、井上健裕、島貫広志他、特開 2005-131708 (’04.10.05 出願)
- 13) 石川忠、橋場裕治、大北茂他、特開 2005-113204 (’03.10.08 出願)
- 14) 井上健裕、石川忠、小関正他、特開 2005-296986 (’04.04.09 出願)
- 15) 石川忠、橋場裕治、大北茂、特開 2005-111520 (’03.10.08 出願)
- 16) 小関正、井上健裕、島貫広志他、特開 2005-319516 (’05.03.29 出願)
- 17) 伊藤実、児島明彦、田中洋一他、特開 2005-320624 (’05.03.31 出願)
- 18) 皆川昌紀、小関敏彦、石田浩司、特許第 3502805 (’00.03.31 出願)
- 19) 白幡浩幸、皆川昌紀、小関敏彦他、特許第 3502809 (’00.05.16 出願)
- 20) 皆川昌紀、小関敏彦、船津裕二他、特許第 3502822 (’00.09.27 出願)
- 21) 皆川昌紀、長谷川俊永、秦知彦他、特許第 3502842 (’01.03.01 出願)
- 22) 白幡浩幸、皆川昌紀、長谷川俊永他、特許第 3502850 (’01.04.11 出願)
- 23) 皆川昌紀、白幡浩幸、秦知彦他、特許第 3502851 (’01.04.17 出願)
- 24) 皆川昌紀、白幡浩幸、石田浩司、特許第 3541021 (’01.06.19 出願)
- 25) 皆川昌紀、永原政明、船津裕二、特開 2003-3228 (’01.06.19 出願)
- 26) 伊藤実、児島明彦、田中洋一他、特開 2005-307261 (’04.04.20 出願)
- 27) 伊藤実、児島明彦、特開 2005-320564 (’04.05.07 出願)
- 28) 児島明彦、伊藤実、田中洋一他、特開 2005-256161 (’04.09.29 出願)
- 29) 廣田一博、白木原浩、多田益男他、特開 2006-131056 (’04.11.04 出願)

6. 今後の展望

コンテナ船の大型化は明らかで、積載個数で 10,000～12,000TEU 級の建造も予定されている。これは、前述したように、大型化による輸送コストの追求と、それに応じた港湾整備によるものであり、海運会社、荷主、顧客、環境負荷低減を目指す社会の要請に叶うものでもある。

47 キロハイテンはこれらのより大型のコンテナ船でももちろん有効であり、耐脆性亀裂性能を確保するために最大板厚が制限されるケースでは、大きな鋼材重量低減効果を発揮することができる。加えて 47 キロハイテンの採用による安全性・信頼性の向上は、人命、海洋汚染の防止、経済リスクの回避の観点からも重要である。以上のことから、47 キロハイテンはコンテナ船の大型化にとって、極めて重要な役割を果たすものである。

また、47 キロハイテンは積載個数で 7,000TEU 級以上のコンテナ船をターゲットに開発したものであるが、最近はやより小型の積載個数で概ね 4,000TEU 級(パナマックス級)や 1,000～3,000TEU 級までのいわゆるフィーダーコンテナ船(ハブ港と地方港間の輸送船)での引き合いも増加している。これらは比較的狭幅船型で、重心が高くなりやすいため、その改善策として 47 キロハイテンによる船体上部の軽量化を目的としたものである。

国内外の大手造船所の関心が高いばかりでなく、海運会社によっては造船所に 47 キロハイテンを使用して船舶を設計するよう指示を出すケースも見られる。

さらに、その大きな高強度化効果が注目され、他の船種でも適用検討が進んでいる。例えば、昨今の船舶に対する規則強化に伴い、非常時における最終強度や残存強度を担保するケース等では、特にその高強度効果を生かすことができると考えられる。

このように、47 キロハイテンは当初予測した大型コンテナ船だけでなく、様々な応用が考えら

れており、今後、需要は更に拡大していくものと考えられる。

また、港湾インフラ整備を含めて海上コンテナ輸送はわが国の技術・経済競争力強化の政策上の主要な柱として意義を有するものである。高強度で安全性に優れた鋼板開発と適切な設計との組み合わせによって軽量化と船体の信頼性を同時に達成しており、今後の各種船舶を開発・製造するうえでの世界的な標準となるものである。

表 6.1 に、以上述べた本開発によって得られる効果をまとめた。

表 6.1 本開発による効果整理

	項目	効果
高強度鋼板	軽量化・復原性の向上 鋼材重量の削減 燃費の向上	積載量・積載効率の向上 建造工期の短縮 建造コストの削減 環境負荷の低減
優れた破壊靱性	安全性・信頼性の向上	海洋汚染の防止 経済リスクの低減