

特集論文

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World's First Application of 47 kgf/mm² Higher Tensile Strength Steel for Large-Scale Container Ships and Realization of Safety Design to Respond to Trend for Supersizing

廣田 一博*¹
Kazuhiro Hirota

中川 隆*²
Takashi Nakagawa

武田 信玄*³
Shingen Takeda

橋 吉美*⁴
Yoshimi Hashi

多田 益男*⁵
Masuo Tada

コンテナ船は著しく大型化が進んでおり、その船体に使用される鋼材の厚手化が進んでいる。一般に鋼材は板厚が厚くなると、靱性（ねばり）が低下するため、脆性破壊に対する配慮がより必要となる。このため、当社では、一般商船の船体用鋼材として従来材と比較して2割程度強度を高めた降伏強度 47 kgf/mm² 級鋼板を新日本製鐵(株)と共同で開発した。本開発鋼は高強度と高靱性を兼ね備えており、その特性をいかした板厚低減と適切な鋼材配置設計により、超大型コンテナ船の脆性破壊に対する船体構造信頼性を大幅に向上している。併せて、重量低減効果による推進性能・貨物積載効率の向上にも寄与している。本鋼は、当社にて建造の 8100TEU コンテナ船において世界に先駆けて実船適用済みであり、お客様から安全・性能の両面で高い評価を頂いている。

1. はじめに

コンテナ船は図1に示すとおり、ここ10年で著しく大型化が進み、使用される鋼材も船体の大型化による荷重増加に対応し、厚手化が進んでいる。一般に鋼材は厚手化により靱性が低下、脆性亀裂に対する抵抗が低下する傾向にある。当社と新日本製鐵(株)では、信頼性の高い超大型コンテナ船の船体構造開発に取り組み、従来に比べ2割程度強度を高めた降伏応力 47 kgf/mm² 級鋼板（47 キロハイテン）を世界に先駆けて開発、実船適用した。また、規格開発において、(財)日本海事協会も参画した。本稿では、適用船の概要、

続いて鋼材の特性および船体構造の安全設計コンセプト、最後に溶接法について紹介する。

2. 最新鋭 8100TEU コンテナ船の紹介

47 キロハイテンを世界で初めて適用した 8100TEU クラスコンテナ船 "MOL CREATION" は、(株)商船三井の発注により当社長崎造船所にて建造し、2007年6月に引渡した同クラス6隻シリーズの第1番船である。本船の概略配置を図2に、主要目を表1に示す。本船は船主殿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。

TEU: Twenty feet Equivalent Unit, 20 feet コンテナ換算個数

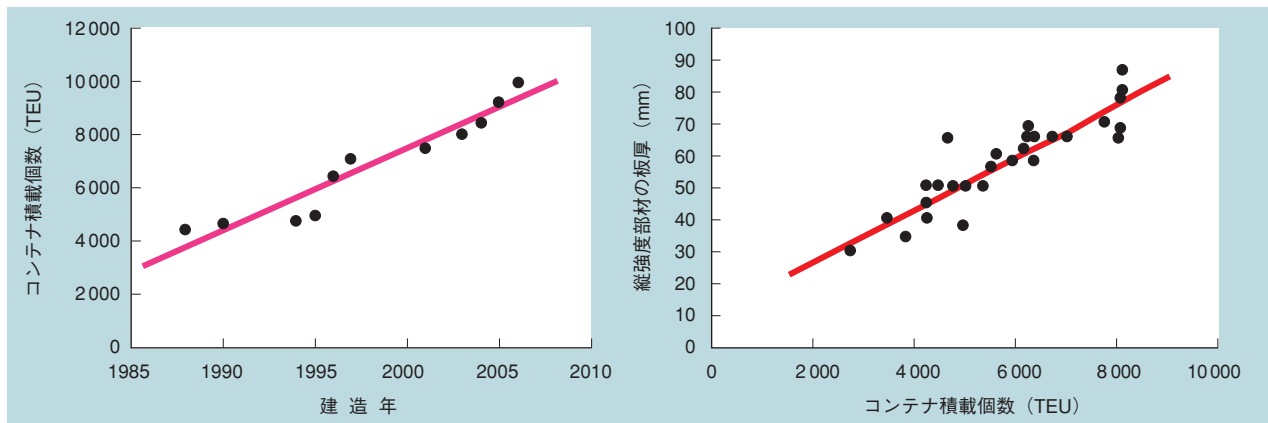


図1 コンテナ船の大型化と縦強度部材の厚手化

*¹ 長崎造船所造船設計部船殻設計課 工博

*² 長崎造船所造船設計部船殻設計課 主席

*³ 長崎造船所造船設計部計画課

*⁴ 長崎造船所立神工作部工事計画グループ

*⁵ 技術本部長崎研究所強度研究室 主席 工博

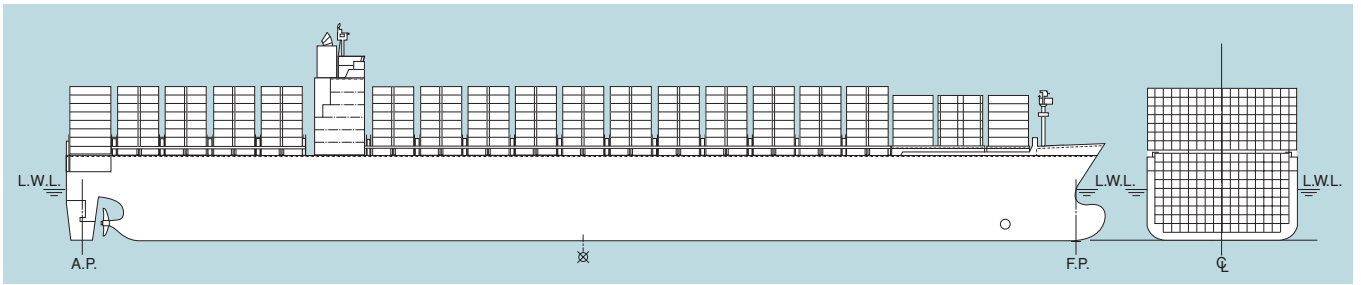


図2 概略配置図

表1 主要目

全長 (m)	約316	コンテナ数 (TEU)	8110
船幅 (m)	45.6	主機関	MITSUBISHI-SULZER 11RT-flex 96C
満載喫水 (m)	14.5		
載貨重量 (t)	90678	最大出力	62920kW × 102rpm
総トン数	86692	航海速度 (kt)	25.25

本船は、本稿の主題である47キロハイテンを含め、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、NOx（窒素酸化物）やPM（ばいじん）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度25.25kt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。

3. 降伏強度47 kgf/mm²級鋼板の適用と安全性の向上

3.1 材料特性

船体構造用鋼板の高強度化の歴史は図3に示すとおり

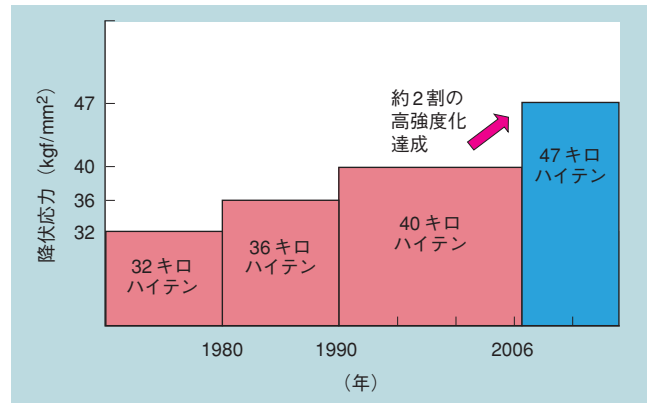


図3 一般商船の船体に使用される高張力鋼板の最高強度の推移

りで、これまでのコンテナ船には、40 kgf/mm²級の鋼板が標準的に用いられているが、47キロハイテンの開発により、およそ2割の大幅強度向上が実現した。鋼材の開発にあたっては、高強度化と、3.2～3.3節にて述べる脆性き裂伝播停止特性を両立させ、さらに造船用鋼板としての高い溶接性を確保するため、加熱・圧延・冷却条件のち密な制御による金属組織の細粒化により対処している（図4）。

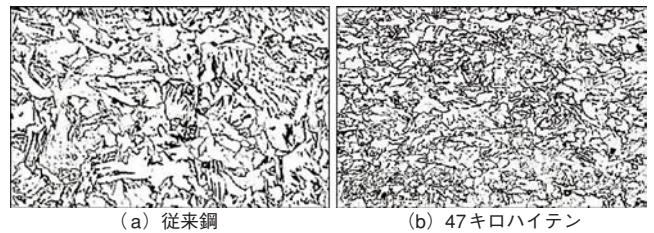


図4 ミクロ組織（光学顕微鏡組織）の比較

3.2 構造設計

コンテナ船は図5に示すとおり、コンテナを搭載するための大きな開口が船体の上甲板に設けられており、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、必然的に船体上部の負担が大きく、一般的に65mm程度の厚い板が従来より用いられている。さらに、船体の大型化による縦曲げの増加が重畳するため、図1に示したとおり一

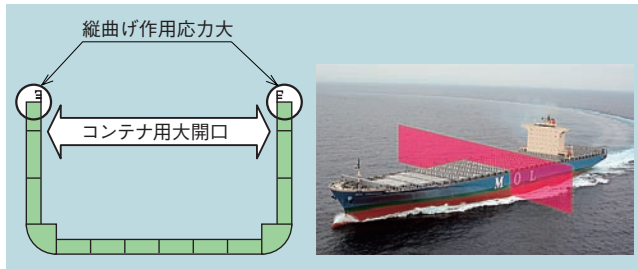


図5 コンテナ船の構造上の特徴（中央横断面）

層の厚手化（80 mm ～ 100 mm）が進行することになるが、厚手化は鋼材の靱性低下を招き、船体構造の信頼性を損なう恐れがある。そこで、船体構造の板厚と靱性のバランスに配慮し、万一脆性き裂が発生した場合でもこれを停止できる船体構造設計としている。そのコンセプトは次のとおりであり、有効性確認のため、次節（3.3）で述べる大型モデル試験を実施している。

- (1) 47 キロハイテン採用により板厚を低減し、靱性を確保しやすくする。
- (2) 特別に靱性に配慮した鋼板を、船体構造に適切に配置する。

なお、建造時には徹底した非破壊検査により、脆性き裂の起点となりうる初期溶接不具合を排除している。

47 キロハイテンの適用範囲は図6に示すとおりで、最も縦曲げによる負荷の大きい船体中央部のハッチコーミングに適用している。その高強度化効果は当然ながら船体構造の重量低減にも寄与し、特に船体上部の重量低減による低重心化により、有効コンテナ積個数の増加を達成している。

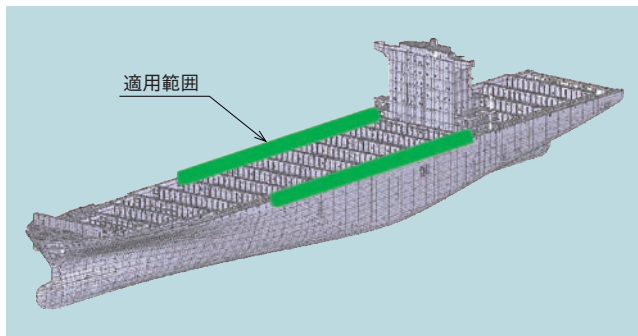


図6 47 キロハイテンの適用範囲

3.3 脆性き裂伝播停止特性

万一発生した脆性き裂を停止するためには、靱性の高い鋼板が必要であるが、特に脆性き裂伝播停止特性（アレスト性）に優れている必要がある。そこで、できるだけ実際の船体構造に近づけた大型試験体

による、脆性き裂の伝播停止試験を実施した。使用した8000 tonfの引張り試験機と試験体を図7に示す。試験体は高さが約2.5 m、荷重ピン間距離が7.2 mと最大級のサイズを採用した。本大型試験では、試験体の上部に破壊の起点となる欠陥を設け、左右方向に船体の設計応力に相当する荷重を負荷し、同時に温度を下げ、欠陥に打撃荷重を与えることで、人工的に脆性き裂を発生させる。この脆性き裂を供試鋼板に伝播させ、き裂突入後の伝播・停止挙動から、鋼板の脆性き裂停止性能を確認する。棚板型の試験結果を図8に、更に脆性き裂伝播停止試験としては、より厳しい条件の混成 ESSO 型の試験結果を図9に示すが、3.2節で述べた設計コンセプトを採用することで、いずれの試験でも脆性き裂を停止できることを確認し、必要な脆性き裂伝播停止特性を有することを実証した。

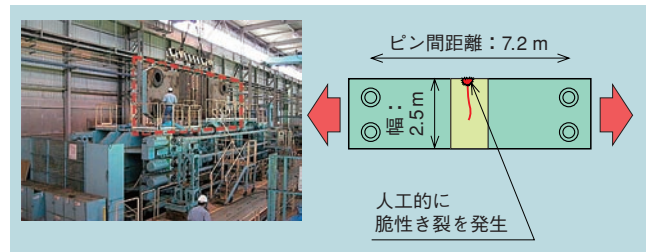


図7 大型脆性き裂伝播停止試験機と試験体

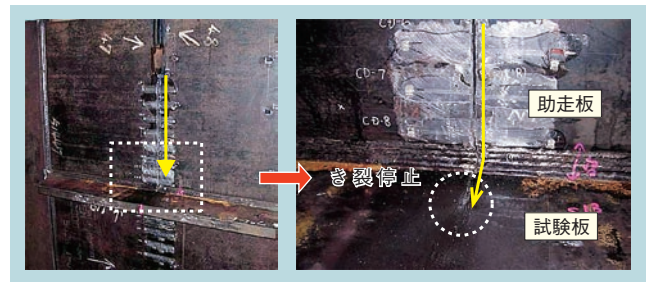


図8 大型脆性き裂伝播停止試験結果（棚板）

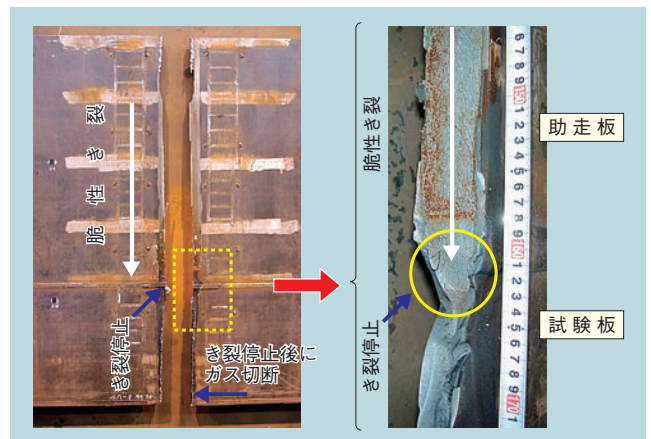


図9 大型脆性き裂伝播停止試験結果（混成 ESSO）

4. 溶 接

4.1 溶 接 法

47キロハイテンの立向突合せ溶接には、2電極VEGA (Vibratory Electro-gas Arc Welding) 溶接を採用した。2電極VEGA溶接は、日鐵溶接工業(株) (現日鐵住金溶接工業(株))、新日本製鐵(株)と当社で共同で開発した溶接技術であり、図10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、40キロハイテン、板厚65mm以下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11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

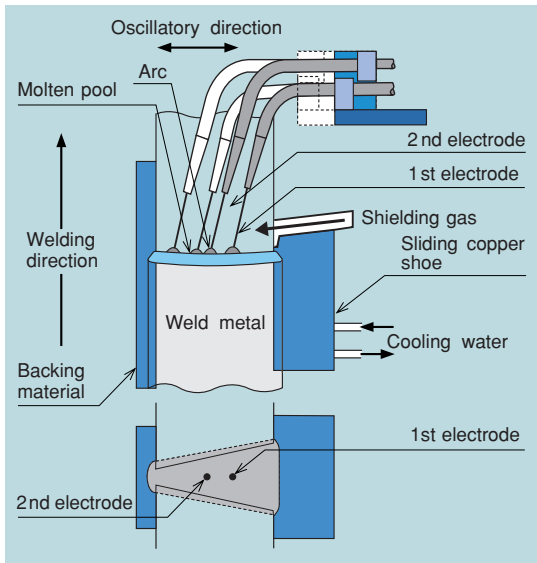


図10 2電極VEGA溶接法概要図

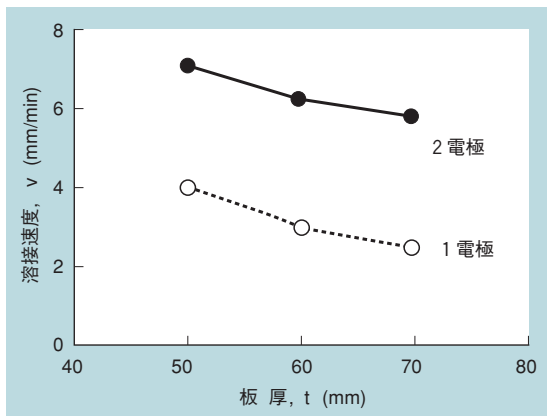


図11 溶接速度と板厚との関係

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。これにより、溶接能率の向上と溶接熱影響部(HAZ)の靱性劣化抑制を達成した。また、溶接材料は、4.2節で述べる溶接金属強度と母材強度のマッチングを適正化できる溶接ワイヤ(EG-47T)を開発、実船に適用している。

4.2 溶接部特性

極厚高強度鋼板溶接継手の破壊靱性(Kc)は、溶接金属の強度(硬さ)と母材の強度(硬さ)のマッチングの影響を受ける。

溶接継手のFusion lineに切欠きを設けた中央切欠付広幅引張試験(幅400mm、機械切欠き長さ240mm、試験温度-20℃)の結果(Kc(-20℃)実験値)とそのFusion line部シャルピー衝撃試験結果から推定した-20℃でのKc値(Kc(-20℃)推定値)との関係を図12に示す。図12では、供試した溶接継手の溶接金属の硬さ(HV(WM))と母材の硬さ(HV(BM))の比($\alpha = HV(WM)/HV(BM)$)でデータを分類し、 α が1.2を越えるデータ群では実験値と推定値が一致しない(実験値が推定値よりも明らかに低い)場合があることを示した。これは、シャルピー衝撃試験で表される切欠き靱性が同一であっても破壊靱性が低下している可能性があり、シャルピー衝撃試験のみで極厚高強度鋼板溶接継手の靱性を評価することは危険であることを示している。

極厚高強度鋼板溶接継手の品質確保のためには、前記した溶接金属と母材の強度(硬さ)のマッチングが重要であり、この破壊靱性に及ぼす強度マッチングの影響を考慮して、4.1節で述べた2電極VEGA溶接ワイヤ(EG-47T)を開発した。

開発ワイヤ(EG-47T)を用いた47キロハイテン2電極VEGA溶接継手の2mmV-ノッチシャルピー衝

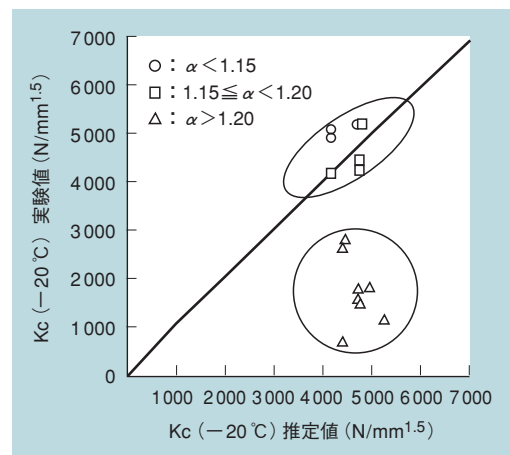


図12 溶接金属と母材の硬さのマッチングと破壊靱性値との関係

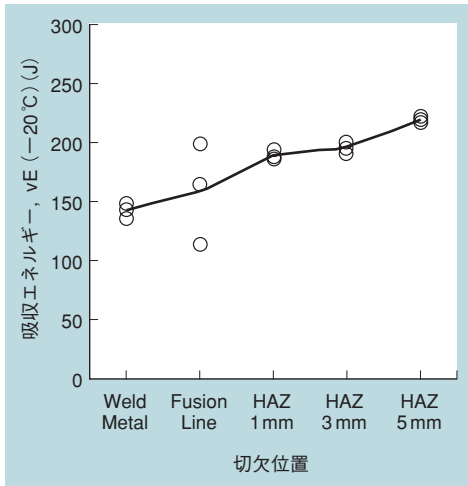


図 13 シャルピー衝撃試験結果

撃試験結果の例を図 13 に示す。-20℃での吸収エネルギー (vE (-20℃)) 平均値は何れの切欠き位置においても 100 J 以上であり、優れたシャルピー衝撃特性をも有している。また、当該継手に対して中央切欠付広幅引張試験を実施し、十分な破壊靱性が確保できていることを確認した。

図 14 には、溶接熱影響部の低温割れ性の評価を目的として実施した、HAZ 最高硬さ試験 (JISZ3101) の結果を示す。47 キロハイテンの HAZ 最高硬さは、溶接ビード長さ 10 mm においても、JSQS⁽¹⁾ による低温割れ発生防止硬さ基準 (400 HV) 以下であり、十分な低温割れ防止性能を有していることが判る。これにより、47 キロハイテンの低温割れ性は、従来の造船用鋼板と同等以上の性能であり、現場工作における欠陥 (低温割れ) 発生防止に対して十分な信頼性が確保できていることを確認した。

5. ま と め

コンテナ船の大型化に対応した、47 キロハイテンを世界に先駆けて開発し、実船に適用した。その特徴は以下のとおりである。

(1) 高強度効果による薄手化と、鋼材の高靱性化を組み合わせ、万一の脆性き裂特性を高め、船体の信頼

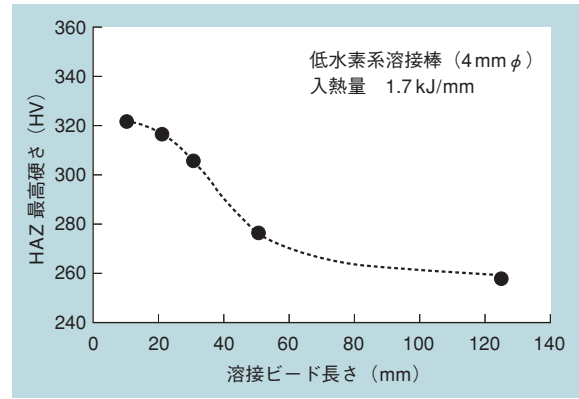


図 14 HAZ 最高硬さ試験結果

性を向上した。

(2) 高強度効果による重量低減により、貨物積載量を増加し、推進性能・燃費向上にも寄与した。

(3) 以上により、お客様のニーズである、安全性向上、環境負荷低減にマッチした製品の提供を実現した。

47 キロハイテンは、単なる高強度鋼板ではなく、適切な設計と組み合わせることで、軽量化と船体の信頼性向上を同時に達成しており、この考え方は、今後の超大型コンテナ船を開発・建造する上で、世界的な標準となっていくと考えている。

参 考 文 献

(1) 日本鋼船工作法精度標準 JSQS (1985)



廣田一博



中川隆



武田信玄



橋吉美



多田益男