

「船舶（設計編）」*

谷 明 紀**



Ship (Design)*

by TANI Akinori**

キーワード コンテナ運搬船の大型化, 船体縦曲げモーメント, 疲労破壊, 脆性破壊, 船級協会

1. はじめに

日本は島国にあって、貿易による輸出入は7割程度を海上輸送に頼っているとされている。そのような環境の下で、日本近海では様々なタイプの商船が往来しているのを見ることができる。商船には様々な船種があるが、代表的な船種といえば、ばら積み運搬船、オイルタンカー、コンテナ運搬船、自動車運搬船、液化ガス運搬船等が挙げられる。その中でも今回はコンテナ運搬船にスポットを当てて解説する。

1950年代にアメリカで登場したコンテナ運搬船は、海上輸送からトラック・鉄道等の陸上輸送へのスムーズな荷物の受け渡しを実現し、物流革命をもたらした。コンテナ運搬船の登場から半世紀以上が経過した今でも世界の物流の根幹を支えている。ここ近年、中国やインド、ブラジル等の新興国の経済成長が牽引役となって世界経済が拡大していることは周知の事実であり、世界経済活動の拡大に伴って物流量の増加が右肩上がりであることはニュースや新聞でもよく耳にする話である。コンテナ運搬船は上記を背景とした海上荷動き量の増加に伴って、ここ数十年の大型化が最も著しい船種である。世界初のコンテナ運搬船は1956年に就航した“Ideal-X”で、このときのコンテナ搭載数は58個積みであった。それから年を追うごとにコンテナ運搬船の大型化が進み、現在では10,000TEUを超えるコンテナを搭載可能なコンテナ運搬船も次々就航している(図1参照)。コンテナ運搬船の大きさはTEU(Twenty-foot Equivalent Units)という国際規格で定められた20フィートコンテナ1個の大きさを基準単位として、そのコンテナが何個搭載できるかで表される。本文では、当社で設計され現在建造中の13,000TEU積みのコンテナ運搬船を例

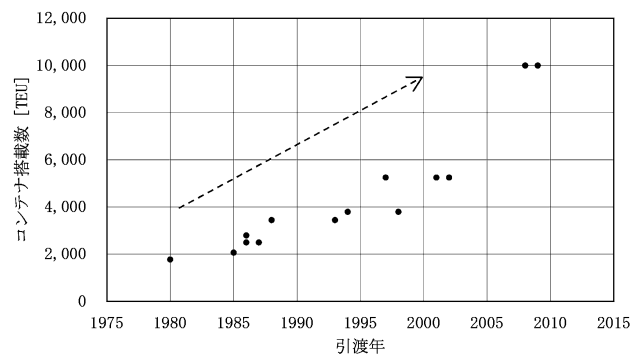


図1 コンテナ運搬船大型化の歴史

に挙げて船体構造設計を解説するとともに、建造時における溶接方法やその適用箇所、および溶接部に要求される性能について解説する。

2. 製品概要

今回解説に用いるコンテナ運搬船の概略図を図2に、主要目を表1に示す。コンテナ運搬船の船倉内にはセルガイドと呼ばれるガイドレールが上下方向に設けられており、コンテナはセルガイドに沿って荷役されるが、本船は船倉内に9段のコンテナを積載することができる。これは、コンテナ自身の強度を考慮して積み上げることができる最大積載段数である。また、本船の特徴的な区画配置として“ツインアイランド形式”と呼ばれるレイアウトが挙げられる。これは操舵室や船員の居住空間を船体後部機関室部分のファンネル(煙突)から離し、船体中央部に配置する方法であり、居住区とファンネルが二つの島に見えることからこの名称が用いられる。“ツインアイランド形式”の採用により操舵室を前方に配置して視界を確保し、さらに居住区の後方に搭載するコンテナの積み高さを高くすることにより、操舵室が船体後方に配置された場合に比べて上甲板に搭載可能なコンテナ数を増加させることが可能と

*原稿受付 平成24年3月23日

** 川崎重工業(株) 船舶海洋カンパニー 技術本部 基本設計部 構造計画課
Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Structure Planning Section
Initial Design Department Engineering Division
Ship & Offshore Structure Company.

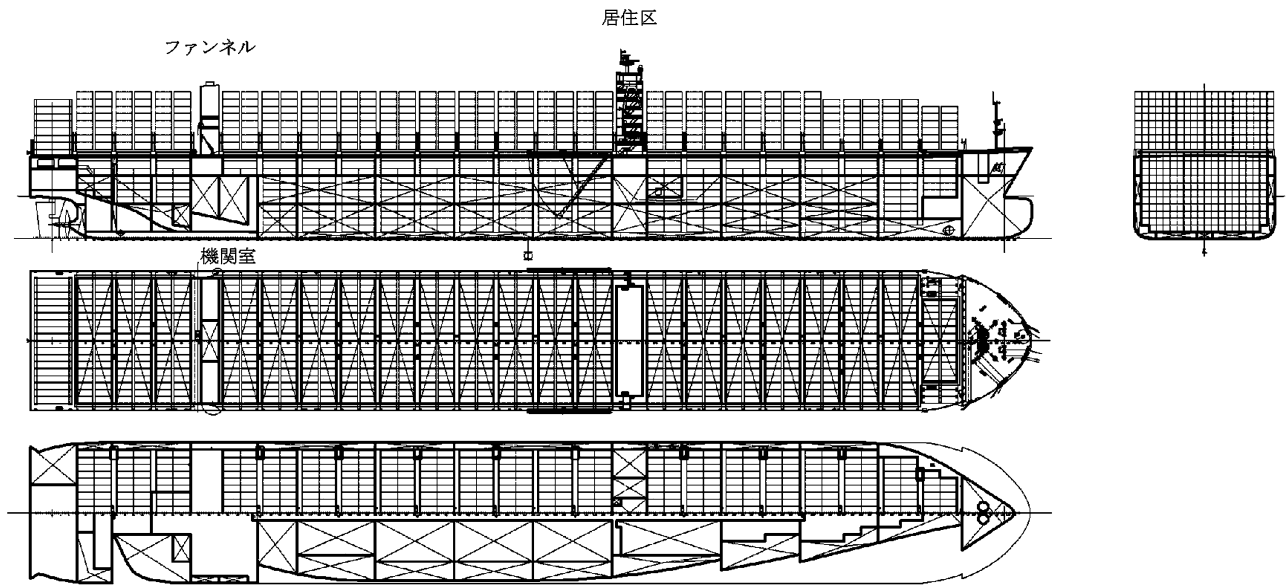


図2 13,000 TEU 搭載コンテナ運搬船

表1 13,000 TEU 搭載コンテナ運搬船の主要目

全長	366.00	[m]
型幅	51.20	[m]
型深さ	29.85	[m]
夏期満載喫水	15.5	[m]

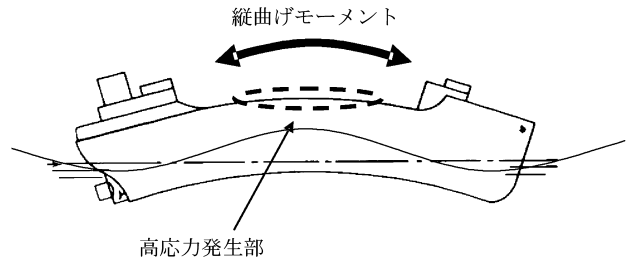


図3 船体縦曲げモーメントによって発生する曲げ応力

なった。図2に示すコンテナ運搬船は現在建造段階で、2012年度中に一番船を竣工し、2014年末までに計8隻の姉妹船を建造する予定である。

3. 溶接構造物としての設計思想

3.1 船体に作用する荷重

船体に働く荷重は船体構造を構成する基本要素である板からスチフナ（小骨、肋骨材）に伝達され、トランスと呼ばれる大骨（桁材）を介して、外板などの主板や縦通隔壁板に伝わる。基本要素を構成する板やスチフナの強度は局部強度、トランスなどの横骨材の強度は横強度、船体全体の強度を縦強度という。縦強度を評価する場合、船体縦曲げモーメントが用いられる。船体縦曲げモーメントは船体に搭載されている貨物や液体による荷重と浮力から生じる静的な縦曲げモーメントと、航行時に受ける波浪により船体の長手方向に浮力の差が発生して生じる動的な縦曲げモーメントの2種類がある。船体を海上に浮かぶ一本の大きな梁として捉えたときに、上記の船体縦曲げモーメントが船体の長手方向に渡って分布し、船体に曲げ応力が発生する（図3参照）。また、船体縦曲げモーメントは船体の長さの2乗に比例するので、船体が長大化する程発生する船体縦曲げモーメントは大きくなる。したがってコンテナ運搬船の船長が長大化するのに伴って、船体に作用する縦曲げ応力が大きくなる傾向にあると言える。

3.2 船体断面形状

商船は運搬する貨物に合わせて最適な貨物スペースの

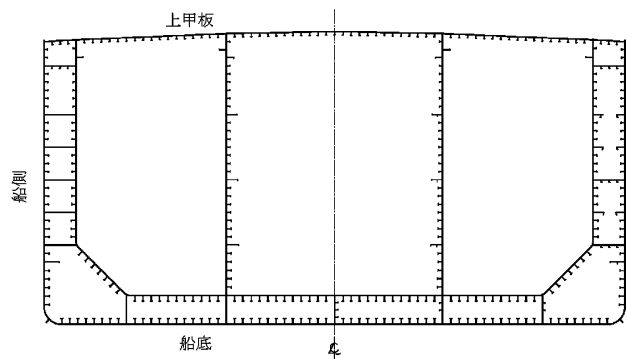


図4 大型オイルタンカーの船体断面形状

大きさや形状が採用されている。例えば、大型のオイルタンカーの場合は重油を漏洩させること無く安全に輸送する必要があるため、船体断面形状は図4に示すように上甲板を張り詰めた形状である。また、万が一船体が損傷したときに重油の流出を防止するために、船倉の外側を船底、船側ともに二重船殻構造としており、この二重船殻部は船体の姿勢やバランスを保つための海水を搭載するバラストタンクとして用いられる。一方、コンテナ運搬船の場合、オイルタンカーと同様に二重船殻構造となっており、バラストタンクやパイプ導設区画が設けられているが、コンテナの積み下ろしを行うために上甲板に巨大な開口を設けているので、前述した大型のオイルタンカーとは異なり船

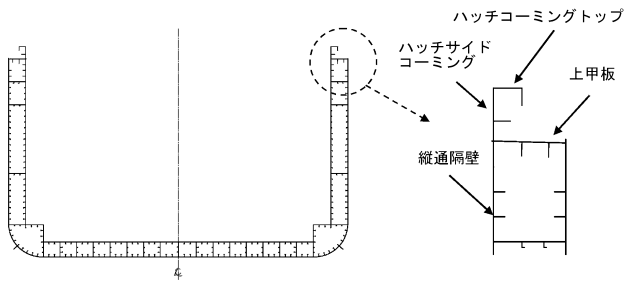


図5 13,000 TEU 搭載コンテナ運搬船の船体断面形状

体の上甲板を張り詰めることができない。また、コンテナをできる限り多く搭載するために、船倉内に広大な搭載スペースを設けている。図5に13,000TEU搭載コンテナ運搬船の船体断面形状を示す。図4と図5を比較すると、コンテナ運搬船は上甲板の断面積が極端に少ないので、オイルタンカーの場合に比べて上甲板やハッチコーミングに比較的厚い鋼板を用いることで船体断面剛性を確保している。

3.3 船体構造設計

船は海洋上という過酷な環境下で航行するため、他の輸送機器と比較して外環境から受ける影響が大きい。例えば、嵐に遭遇し荒れ狂う洋上を航行することや、太平洋の赤道直下で直射日光が照りつける中を航行することもあれば、逆に海上に氷が浮かぶような氷点下の氷海域を航行する船もある。そのような過酷な条件下において船体構造に作用する様々な荷重に対して、船体構造が十分な強度を有する必要があり、強度評価の際には4つの基本強度（降伏強度・座屈強度・疲労強度・破壊強度）を満足させる必要がある。ここでは4つの基本強度のうち、疲労強度と脆性破壊強度について紹介する。

3.3.1 疲労破壊の対策

疲労破壊は大規模な事故に繋がる恐れがあり、これを防止することが設計上重要である。船体構造部材が応力の繰り返しを受けることによって疲労破壊を引き起こすが、船体構造の疲労破壊の原因となる荷重として、船体が繰り返し受ける波浪荷重、積荷の積み下ろしによる荷重変動、機関やプロペラを起振源とした振動などさまざまな要因があり、3.1で述べた船体縦曲げモーメントも疲労破壊の一因となる。そのため、船体内に種々存在する構造様式の中で、疲労が懸念される箇所すなわち構造上応力が集中する部位の溶接部に対してはFEM解析等により応力を算出し、その応力を参照して疲労強度の評価を行う。その結果に基づいて、板厚を厚くすることや、構造補強を行って応力集中を緩和する構造改善を行うことや、溶接止端部にグラインダー施工を行って応力集中を緩和するといったような改善策が施される。

上記に加えて、高張力鋼の適用方法にも注意を払っている。船体の構造設計においては軟鋼（降伏応力235 [MPa]）やHT32級鋼板（降伏応力315 [MPa]）、HT36級鋼板（降伏応力355 [MPa]）、HT40級鋼板（降伏応力390 [MPa]）等の通常鋼板や、低温用鋼板を使用する。仮に高張力鋼を採用すれば、高い許容応力を設定することができ、その分板厚を薄くすることで軽量化を達成することができる。しかし

ながら、高張力鋼を採用する場合には発生する応力レベルが高くなる可能性があるため、ソフトトウと呼ばれる滑らかな形状のブラケット等の構造改善や、溶接止端部へのグラインダー施工により、応力集中を緩和し、疲労強度により配慮した設計を行っている。

3.3.2 脆性破壊の対策

船舶の脆性破壊の損傷例として有名な事例に第二次世界大戦中にアメリカで起きたリバティ号船の損傷事故がある。この損傷事故では、5,000隻の標準船のうち1,000隻あまりの船体において応力集中部や溶接欠陥から脆性破壊が発生した。そのうち200隻以上が沈没するか航行不能という事態に陥ったと言われている。現在ではこの脆性破壊発生メカニズムは良く知られており、脆性破壊を防止するためには、

- ① 溶接部および母材部に適切な靱性を有する鉄鋼材料を使用する材料上の配慮
- ② 構造上の不連続を極力避けて、応力集中を緩和する構造設計上の配慮
- ③ 割れやその他の溶接欠陥を含まない溶接施工を確保する工作上の配慮
- ④ 非破壊検査手法、精度向上による品質上の配慮

等の配慮がなされている。

3.1項にて記述した通りコンテナ運搬船の長大化に伴って船体縦曲げモーメントは大きくなることから、限られた船体断面の形状で船体縦曲げモーメントに対する船体剛性を確保するために、ハッチコーミングや上甲板において板厚は厚くなり、50 [mm] を超える厚板が用いられるようになってきた。鋼板は板厚が厚くなると靱性が低下する傾向にあり、脆性破壊に対する評価が必要となる。以下に脆性破壊が発生するシナリオを記述する。

船舶は溶接構造物であるため多数の溶接継手が存在し、船体縦曲げモーメントによって比較的大きな引張応力が繰り返し発生するハッチコーミングや上甲板においても、船長方向に対して直角方向の溶接継手が設けられている。万が一この溶接継手の内部あるいは表面に初期欠陥（初期亀裂）が存在した場合、船体縦曲げモーメントによって生じる繰り返し応力により、初期欠陥が成長して限界亀裂長さになったときに脆性亀裂が発生する恐れがある。

超大型コンテナ船に用いられる60 [mm] や70 [mm] といったような極厚板鋼板は材料や溶接部の靱性値が薄板に比べて低下する傾向があるため、適用鋼材も含めて溶接部の脆性破壊強度に配慮した構造設計が行われている。13,000TEU積みコンテナ運搬船の場合、脆性破壊強度も考慮に入れながらHT40よりもさらに高強度な鋼材であるHT47級鋼（降伏応力460 [MPa]）を採用し、ハッチコーミングの板厚を低減した。加えて、3.3.1で述べた疲労破壊に対しても強度解析を実施して入念な検討を実施し、十分な疲労強度を有することを確認している。

脆性破壊に対しては、さらなる対策を実施している。1つは建造時に対象となる突合せ溶接継手に対して非破壊検査を実施し、脆性亀裂発生の原因となる初期欠陥がないことを確認する。これは、溶接継手に内在する初期欠陥の大きさが一定以上の大きさであった場合、就航期間中に受ける船体縦曲げモーメントによる繰り返し荷重によって

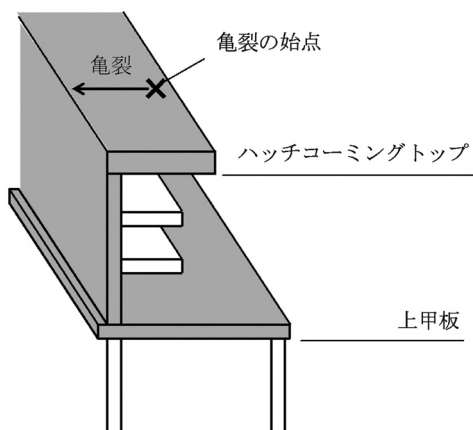


図6 亀裂の伝播①

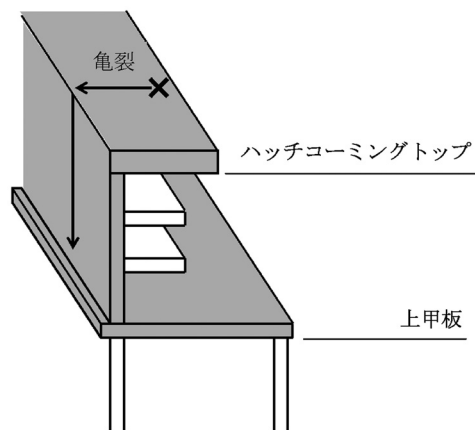


図7 亀裂の伝播②

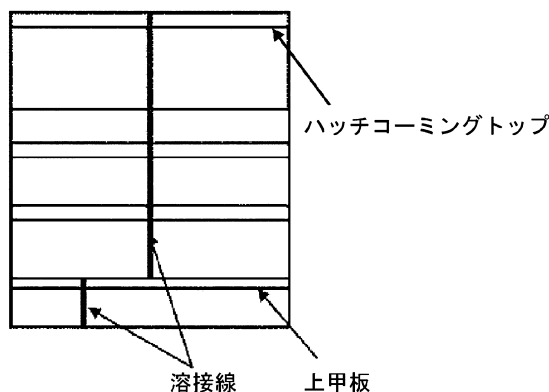
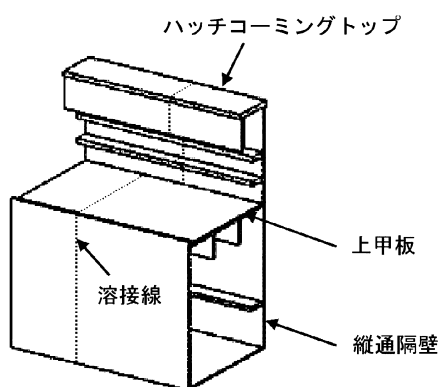


図8 バットシフト

亀裂が発生・進展する可能性があるため、事前の品質検査によって脆性破壊を防止するというものである。加えて、構造設計時にバットシフトという設計思想を導入した。従来、溶接線に沿って進展していた脆性亀裂は溶接線から逸れて母材に進入し、亀裂が停止すると考えられていた。しかし最近の研究では、極厚板の脆性破壊においては亀裂が母材に逸れない実験例も報告されており、溶接線が船体を垂直方向に一線で配置された場合は脆性亀裂による船体損傷の危険性が高まる。コンテナ運搬船においてはハッチコーミングトップから脆性亀裂が万が一発生した場合、脆性亀裂は溶接継手を伝ってハッチサイドコーミングに至る(図6参照)。その後、ハッチサイドコーミングから船体下部に向かって進展して上甲板に至り(図7参照)、さらに上甲板から船体縦通隔壁を伝って船体を二分するように亀裂が伝播するというシナリオが考えられる。上記のような脆性破壊の発生防止策として、ハッチサイドコーミングの脆性亀裂が上甲板に達したとき、脆性亀裂の伝播を阻止するために、図8に示すように溶接継手の位置をハッチコーミング側と上甲板側でずらしている。これがバットシフトと呼ばれる亀裂進展防止策である。また、靱性値が高い母材を適用することにより、脆性亀裂進展に対する抑止策としている。これらにより、万が一ハッチコーミングで脆性亀裂が発生した場合でも、重大損傷に陥る前に上甲板で亀裂の進展を食い止めることができる。

4. 溶接継手の特徴と要求性能

4.1 商船建造に適用する溶接方法

商船に適用する溶接継手は一般的に隅肉溶接か突合せ溶接のどちらかに大別される。またその溶接方法は要求される継手性能や建造効率を考慮して適切な箇所に適切な溶接方法を適用している。ここでは、船体の建造に適用している代表的な溶接方法を概説する。

4.1.1 CO₂ (炭酸ガス) 溶接

CO₂溶接は商船を建造する際、最も一般的に適用される溶接方法である。CO₂溶接はシールドガスに炭酸ガスを用い、半自動的に連続的に溶接ワイヤやシールドガスを供給するMAG (Metal Active Gas) 溶接の一種である。CO₂溶接は、作業者が手作業で溶接する他、自動溶接としても適用され(図9参照)、T型鋼等の比較的小型の構造部材を形成する際にも適用する。船体は“ブロック工法”と呼ばれる手法により建造しているが、これは船体構造を数百個のブロックに分割してそのブロックを組み立ててゆく手法である。ブロックの結合においてもCO₂溶接が多数適用され、隅肉溶接についてはほとんどがCO₂溶接で行われている。

4.1.2 サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接法とは粒状のフラックスを溶接線の上に散布し、自動で送り込まれるワイヤによってフラックス中でアークを発生させる溶接方法である。溶接ワイヤ

を走行台車に搭載し、レールの上を自走しながら効率的に突合せ溶接を行うことができる(図10)。鋼板の板継突合せ溶接に適用されるサブマージアーク溶接には両面溶接と片面溶接があるが、溶接対象物が大きくなるブロック組立工程以降では片面サブマージアーク溶接が適用されている。片面サブマージアーク溶接の溶接方法としてFCB法とRF法、FAB法を、両面サブマージアーク溶接としてKX法を概説する。

FCB (Flux Copper Backing) 法™

FCB法は鋼板の上に裏当てフラックスを散布し、エアホースの圧力で鋼板裏面と密着させて溶接を行う。図11に溶接部の概念図を示す。FCB法は厚板への適用が多く、裏ビードの均一性に優れているが、溶接による歪が大きい薄板への適用は難しい。3電極や4電極等、多電極化することにより、厚板でも効率良く施工でき、コンベアラインと組み合わせて平板ブロックの組立工場に適用されることが多い。

RF (Resin Flux) 法™

RF法は裏当てフラックスの下に耐火フラックスを敷いてエアホースの圧力で鋼板裏面と密着させて溶接を行う(図12参照)。突合せの鋼板の板厚差や歪みに対して安定した施工能力があるが、厚板の溶接に対しては適用が難しい。



図9 CO₂自動溶接



図10 サブマージアーク溶接装置

FAB (Flux Asbestos Backing) 法™

FCB法やRF法で用いた裏当て材の代替材として、FAB法は手持ちによる運搬が容易なマグネットの押さえ具とテープ状の裏当て材を用いて溶接する。裏当て材の汎用性が高いために、船体の湾曲した外板(船体の船首船尾部)の溶接に適用されることが多い。

KX 法™

KX法は多電極サブマージアーク溶接で、先行電極を大電流、低電圧、高速度にして深溶込みを確保し、後行電極の電流値と極間距離を適正に選定して深溶込みを可能にした溶接法である。開先におけるルート面の幅を極めて大きくすることができ、比較的小入熱で深溶込み溶接を行う両面各一層盛溶接法である。厚板の船体上甲板や外板における突合せ溶接に用いられることが多い。

4.1.3 セグアーク溶接™

セグアーク溶接はエレクトロガスアーク溶接の一種で開先の裏面にセラミック等の裏当て材を固定し、表面には水冷銅板を密着させて溶接を行う。セグアーク溶接は図13に示す Gondola を使用して船体垂直方向に溶接を行う。レ

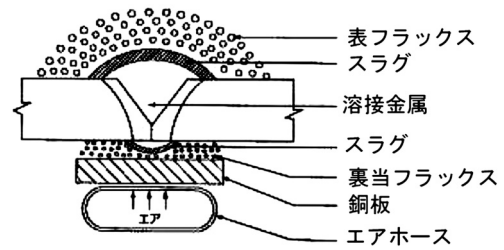


図11 FCB法の概念図

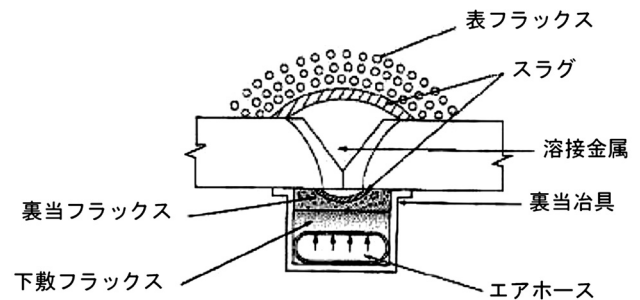


図12 RF法の概念図

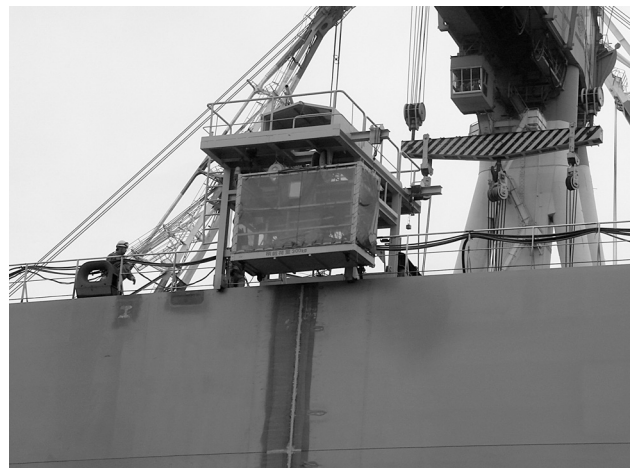


図13 セグアーク溶接時に使用する Gondola

ールの設置等、溶接に係る付帯作業が多いという施工上の難点があるものの、板厚 50 [mm] 程度まで 1 パスで施工できることから、立向姿勢の溶接としては非常に高効率な溶接法である。入熱量が比較的大きいため、大入熱用の鋼板が必要である等の制約条件があるが、曲がりの少ない船体外板のブロック溶接（立向姿勢の突合せ溶接）に適用される。

注) FCB 法, RF 法, FAB 法, セグアーク溶接は株式会社神戸製鋼所の商標

KX 法は株式会社 JKW の商標

4.2 溶接の要求性能

溶接の要求性能について説明する前に、船舶の承認機関について解説する。船舶を建造し、保有・運行するためには船体構造を含め、船舶が国際的に定められた一定の基準を満たす必要があり、事前に船級協会の審査を受けなければならない。船級協会は船体の図面承認や商船建造時の検査を行う審査機関である。そのような船級協会は世界に 50 以上存在するが、その中でも主要な船級協会として日本海事協会 / Class NK (日本), American Bureau of Shipping / ABS (アメリカ), Det Norske Veritas / DNV (ノルウェー), Lloyd's Register of Shipping / LRS (イギリス), Bureau Veritas / BV (フランス) が挙げられる。商船一隻に対して承認を受ける船級協会は基本的に 1 つの船級協会であり、商船の設計は各船級協会の規則やガイドラインにて要求される強度式や強度評価手法に則って図面審査が行われる。船級規則やガイドラインは建築業界での建築基準法のようなものであると解釈してもらえば良い。船舶の構造設計を行う際は基準である船級規則要件を満足した上で、造船会社独自の経験やノウハウを活かして船体の構造設計を行う。但し、各船級協会における船級規則はそれぞれ独自の規則を定めており、要件によって強度要件が異なることもある。これは各船級協会の経験や研究成果の違い、独自性が存在するために生じるものである。(但し、ばら積み運搬船とオイルタンカーは船級規則が統一され、どの船級においても強度要件は同じである。)

船体の構造設計時に要求される強度要件に加えて、建造時の溶接施工法に対しても船級協会の審査・承認が必要である。一般的な溶接施工法承認試験の溶接継手に対する試験項目を以下に示す。

- ・引張試験
- ・曲げ試験
- ・衝撃試験
- ・硬さ試験
- ・マクロ試験
- ・外観検査
- ・非破壊検査

上記の試験項目はどの船級協会でも要求される試験項目であるが、船級協会によって判定基準値が異なる項目もある。

また、特殊な鋼板や新規開発した鋼板等には船級協会と協議の上で、別途マイクロ試験や CTOD 試験などの特別な試験を実施することもある。

承認試験は工場単位で行われ、同じ造船会社であっても工場が異なる場合、別途承認試験を受けなければならない。しかし、溶接施工法承認試験は個船毎に受けるものではないため、一度承認を取得するとその工場において承認された溶接方法を継続して使用することができる。また、溶接施工法承認試験に合格した溶接手法は、適用板厚に制限が定められている。日本海事協会の承認試験を例にとり、下向姿勢における突合せ溶接（多層盛り）の場合、溶接施工法承認試験に使用した鋼材の板厚 t [mm] に対して $0.5t$ [mm] 以上 $2t$ [mm] 以下の板厚範囲で承認済みの溶接方法を適用することができる。

5. おわりに

リーマンショック以降、世界経済は不況の様相を呈しており、先行きの長いトンネルはいつ抜けることができるかわからない。しかし、大局的な視点から見た世界経済は新興国を牽引役として今後も確実に成長を続け、海上輸送による荷動き量も今後再び増加の一途を辿るものと考えられる。それを象徴するかのようここ近年のコンテナ船の大型化は目覚ましいものがあるが、本文では 13,000 TEU 搭載のコンテナ運搬船を例に取り、溶接部に起こりうるリスクや建造時に適用される溶接方法について紹介した。船体における構造設計の観点からは、商船において疲労や亀裂進展破壊等の繰り返し荷重に起因する損傷防止に注意を払う必要があることと、それらの原因や対策について述べた。また、工作の観点からは造船所にて適用される溶接手法について紹介し、それらは船舶が安全に航行するために必要な条件を満足した上で溶接工事を施工していることを述べた。上記のように現在まで設計面・施工面で入念に検証して商船を建造している流れを引き継ぎ、安全性の高い船体の構造設計を行うことによって社会に貢献してゆきたい。

参考文献

- 金沢武, 越賀房夫共著: 破壊力学と材料強度講座-8 脆性破壊 2 = 破壊靱性試験, 培風館
- 財団法人日本海事協会: “脆性亀裂アレスト設計指針” 2009年 9月
- 財団法人日本海事協会: 2011鋼船規則 鋼船規則検査要領 M 編 長谷薫, 幸村正晴共著: “造船の建造方法を変えた片面サブマージアーク溶接法の開発と発展” 神戸製鋼技報 Vol. 50 No.3 (Dec. 2000)
- 赤秀公造, 浮辺輝男, 阿草一男, 坪井潤一郎共著: “低温用アルミキルド鋼の高効率溶接法” 川崎製鉄技報 Vol.10 No.1 (昭和52年 6月)