

特集：溶接構造物の破壊防止 –アレスト性**アレスト設計と溶接-1：船体構造-1
(コンテナ船、材料アレスト)**

日鉄テクノロジー株式会社 井上 健裕

1. 船舶のぜい性破壊防止

造船分野でのぜい性破壊事故防止の取り組みは、鋼材の破壊研究の端緒にもなった戦時標準船の破壊事故調査に遡る。米国の戦時標準船は、第二次世界大戦中に軍事物資の輸送強化のため短工期で大量の船舶が必要になり建造された T2-タンカー、リバティ船といった船を指す。戦時標準船は約 5,000 隻が建造され、そのうち約 1,000 隻の船舶に損傷が生じ、折損事故は 20 数隻に及んだと言われている。当時米国船体構造委員会にて、この戦時標準船のぜい性破壊事故調査が行われた。この検討は事故船の鋼板毎亀裂の発生・伝播・停止を、現在でも鋼材の出荷試験で用いられている V ノッチシャルピー衝撃試験結果で整理することによって行われ、鋼板のシャルピー要求値が定められた。

その後、本格的な造船分野での破壊力学研究は、ロバートソン試験、ESSO 試験、二重引張試験等の大型試験の開発後行われた。日本では、ぜい性破壊発生特性を評価できるディープノッチ試験および、ぜい性亀裂伝播停止（ぜい性亀裂アレスト）特性を評価できる温度勾配型二重引張試験（または温度勾配型 ESSO 試験）が開発され、造船用鋼材のぜい性破壊特性が検討された。造船用鋼材としては、TMCP 鋼の実用化を目的として造船研究協会（SR）にて幅広く検討された。この造船研究協会の委員会では、造船用鋼材の必要特性が検討され、当時板厚 40 mm 以下の高張力鋼板では、重要部位に E 級鋼を使用することにより、ぜい性亀裂の発生を抑制するとともに、万が一溶接部でぜい性亀裂が発生しても亀裂が母材にそれ停止することが期待できるとの結論を得て、船舶の安全性向上に大きく寄与する成果を導いた。

ぜい性破壊事故防止に関しては、ぜい性亀裂の発生を防止するのが第一ではあるが、実施工での環境や種々のバラツキや構造物の受ける想定外の条件を考慮すると、万が一ぜい性亀裂が発生した場合でもぜい性亀裂を停止することができれば構造物の安全性を向上できることが期待される。このような要求をぜい性亀裂のアレスト（英語の「逮捕する」が原義、ぜい性亀裂の伝播を停止させることを Brittle Crack Arrest という）と呼び、低温貯槽や水圧鉄管など、安全性が特に重視される大型構造物でしばしば要求され、発生とアレストの要求を両立することにより、二重の安全性が確保できると考える。

2. コンテナ船とアレスト設計

中国、ブラジル、インド等の経済規模の拡大により海上輸送のニーズが高まり、1990 年頃まではパナマ運河の航行が可能な大きさ以下が主流であったコンテナ船に、より多くのコンテナを積み込むため、パナマ運河を航行できない巨大なコンテナ船が 1990 年代後半から建造されるようになっていった。図 1 にコンテナ船の大型化の実績を示す¹⁾。横軸は建造年、縦軸はコンテナ積載能力で、コンテナ積載能力は 20 フィートコンテナ相当量 (TEU) で表す。

コンテナ船はタンカー等と比較するとデッキ部にコンテナの積み下ろしのための大きな開口を有する特殊な構造になっている。船舶は航行中船全体が曲げられる力が掛り、それが設計において重要である。コンテナ船はこの開口部の影響で、前述の縦曲げに対する強度を支えるための断面が小さくなるため、その分を開口部の周囲にハッチサイドコーミングという厚鋼板を配して分担する必要がある。そのため、このハッチサイドコーミングと上甲板（アッパーデッキ）は船体構造で最も厚く強度も高い鋼板が用いられ、コンテナ船の大きさとともに板厚、強度も上昇する。2005年のデータではあるが、**図2**にコンテナ船のサイズとハッチサイドコーミングの板厚の関係を示す²⁾。**図1**と併せてみると、1990年以降コンテナ船の大型化に伴い急激に極厚材の使用が進んでいることがわかる。

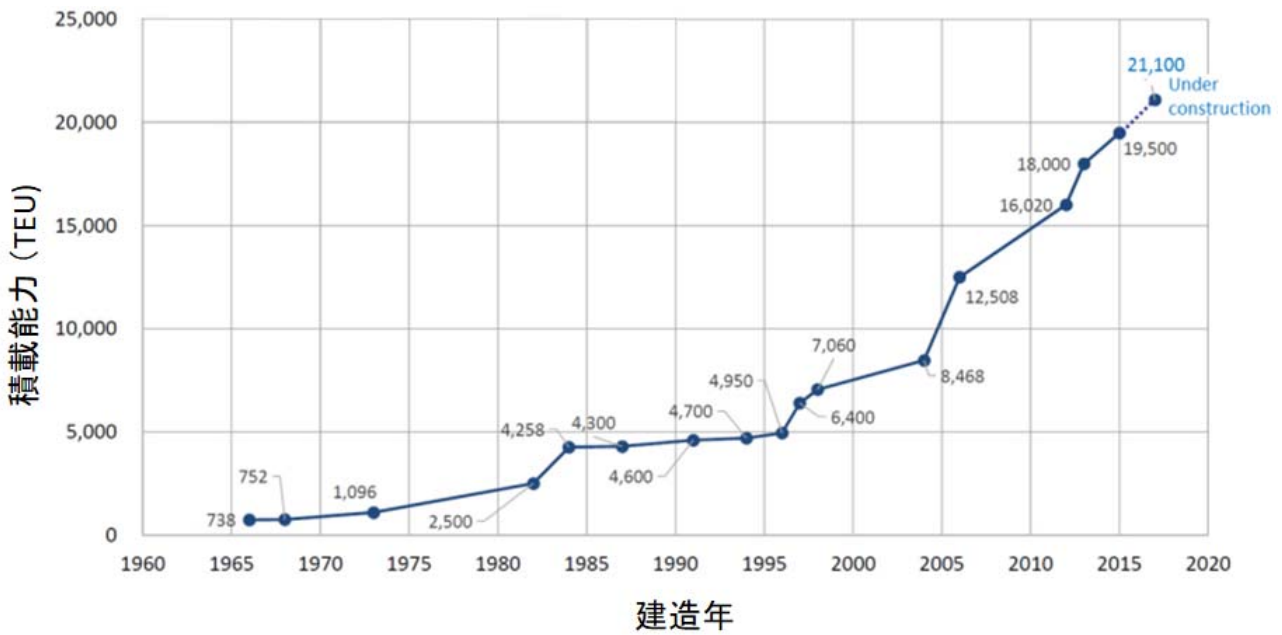


図1 コンテナ船の大型化（最大サイズの変遷）

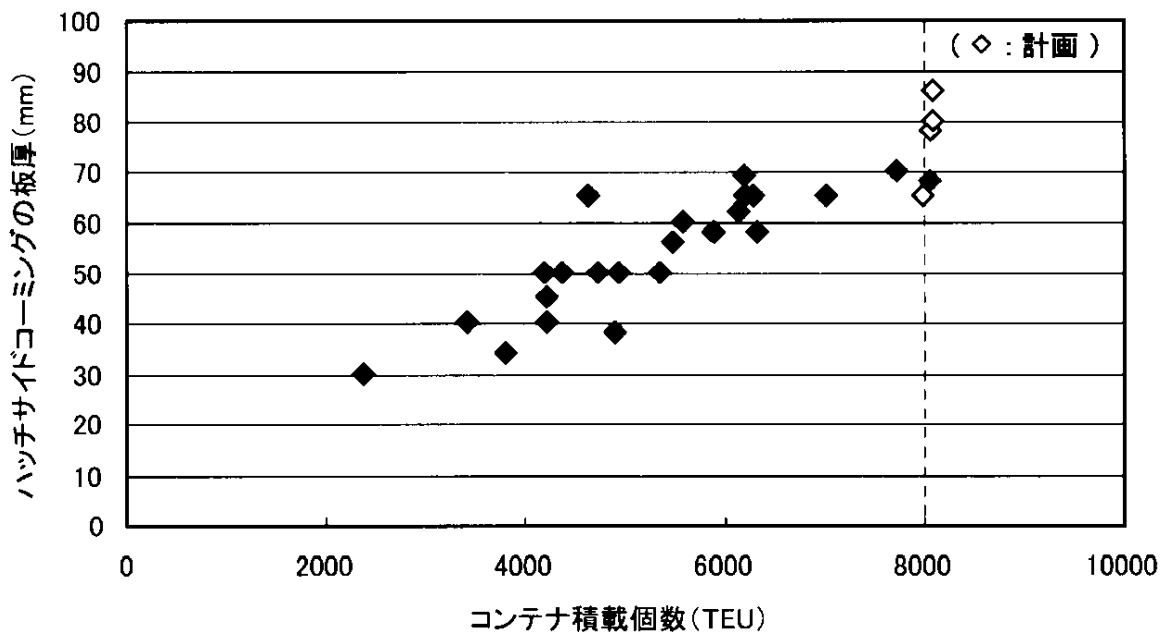
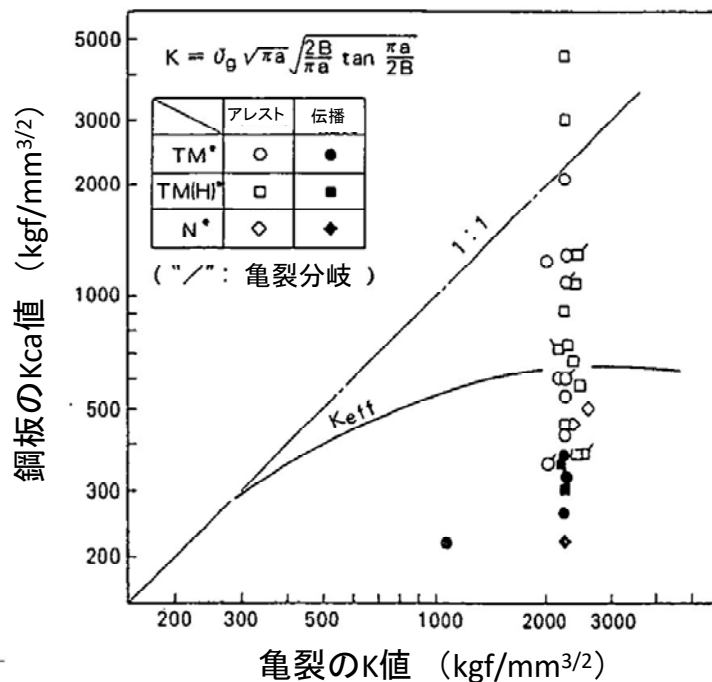


図2 ハッチサイドコーミング板厚の極厚化²⁾

それでは、このように巨大化してきたコンテナ船に用いられる極厚高張力鋼において、前記一連の SR 委員会の結果は成り立つのであろうか？この疑問はその後実験的に確かめられることになるが、まずは、SR の結論について確認してみる。

造船用鋼を含め大型構造物の安全性の検証には、大型試験装置による大型破壊試験が用いられてきた。特に厚鋼板を製造する国内鉄鋼メーカーでは、1970 年代に 5000 トン以上の大型横型破壊試験装置が導入され、SR の共同研究委員会の大型アレスト試験にも用いられた。SR 委員会の第一の重要な結論を図 3 に示す。ぜい性亀裂のアレストじん性は、破壊力学の K 値をもって表すことができる。K 値は線形弾性体の無限平板中では $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ で表され、亀裂長さの 1/2 乗で増加する。ところが亀裂が長いアレスト試験を行うと駆動力の K 値は単調に増加するはずであるが、材料の持つアレストじん性値 Kca (アレストじん性を K 値で表した限界値) より低い K 値で亀裂がアレストする。これは長大亀裂問題と呼ばれており、図 3 はこの現象を示した実験結果である。図 3 の横軸は破壊の駆動力を示す K 値であり縦軸はその鋼材の Kca 値であるが、長大亀裂では K 値が 2000kgf/mm^{3/2} (約 20000N/mm^{3/2}) であっても、伝播とアレストの境は Kca=400 kgf/mm^{3/2}~600 kgf/mm^{3/2} (約 4000 N/mm^{3/2}~6000 N/mm^{3/2}) であるように、長大亀裂であたかも K 値が飽和するかのような挙動を示す。このことから Kca=400 kgf/mm^{3/2}~600 kgf/mm^{3/2} 以上 (約 4000 N/mm^{3/2}~6000 N/mm^{3/2}) の Kca 値が有れば亀裂の伝播停止が可能であることが明らかになった³⁾。この現象は K 値が大きくなることにより塑性緩和が起り、拘束が低下することを考慮すると理解できることが近年提案されている⁴⁾。なお、この Kca は温度勾配型の二重引張試験または ESSO 試験により評価されてきたが、長い間溶接協会 WES 3001 に簡易な記述があるのみであったが、後に述べるように日本国内の活動の成果として、WES 2815 および ISO 20064 として規格化されている。



注) TM: TMCP鋼
 TM(H): 大入熱溶接用TMCP鋼
 N: 焼ならし鋼

図 3 超広幅試験結果と K 値飽和現象³⁾

SR 委員会のもう一つの重要な結論を図 4 に示す⁵⁾。図より溶接部を伝播する亀裂は、横軸の伝播部のじん性の谷間が小さく、縦軸の負荷応力が大きい場合は真っ直ぐ伝播するが、図 4 実線境界より右側の領域では亀裂が逸れて母材で停止しうることが明らかにされた。

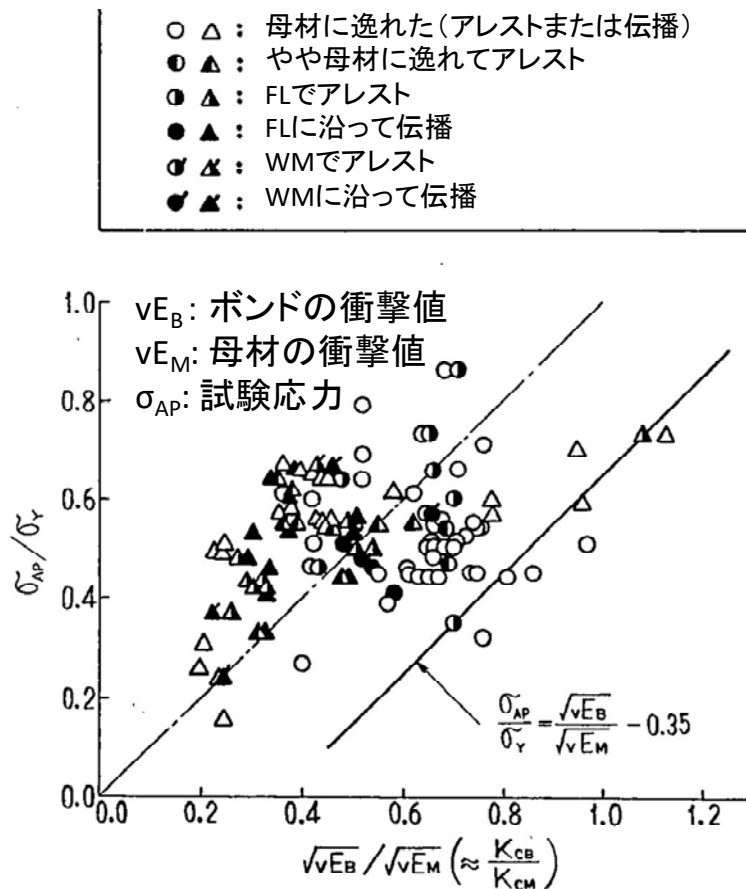


図 4 大型伝播試験結果とシャルピー衝撃値の関係⁵⁾

以上のことから、次のようなぜい性亀裂伝播停止の考え方が提案された。①長大亀裂のアレストにはぜい性亀裂伝播停止じん性 K_{ca} として $4000 \text{ N/mm}^{3/2} \sim 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ が必要である。②溶接継ぎ手部に沿った伝播亀裂は、入熱にかかわらず継手じん性が十分であれば、長距離伝播する間に母材に逸れて伝播停止することが期待できる。実際の船舶では継手のじん性を確保するべく鋼板、溶接材料、溶接条件が選択されるので、継手でのじん性の谷間は大きくはなく、②の条件は満足されて、ぜい性亀裂は逸れると考えられる。また、重要部材にはじん性の良い E 級鋼や EH 級鋼が使用されており、 K_{ca} は $4000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上であると考えられることから、前述の通り継手から母材に逸れたぜい性亀裂は、母材は①の条件を満たしているのでアレストし、船舶のぜい性破壊による大規模損傷は防止されると結論付けられた。

以上の結果は、板厚 40 mm 以下（その多くが板厚 25 mm）の YP40 以下のグレードの鋼板を用いた実験結果から導き出されたものであるが、この結論から重要部材に造船 EH グレード鋼材等の高じん性鋼材を配置すれば、ブロック建造による溶接線が一直線上にあっても、万が一のぜい性破壊事故に際し亀裂の伝播停止が期待できることから、沈没に至る最悪の事故は回避されることが考えられた。

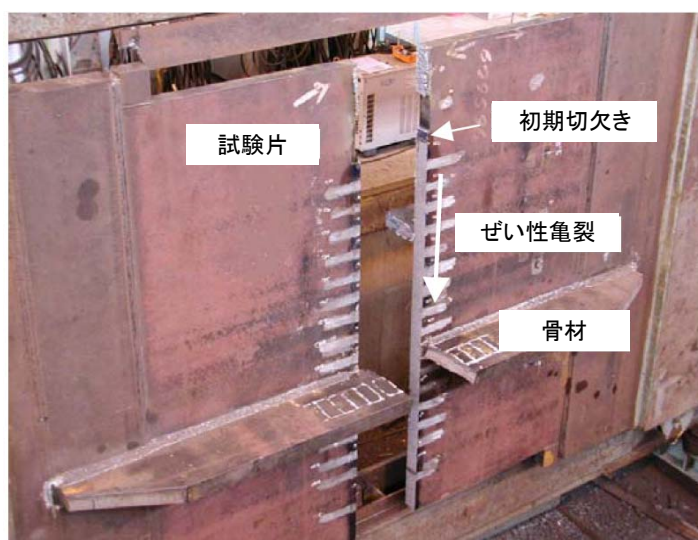
3. コンテナ船アレスト設計への取り組み

3.1 ぜい性亀裂アレスト設計指針

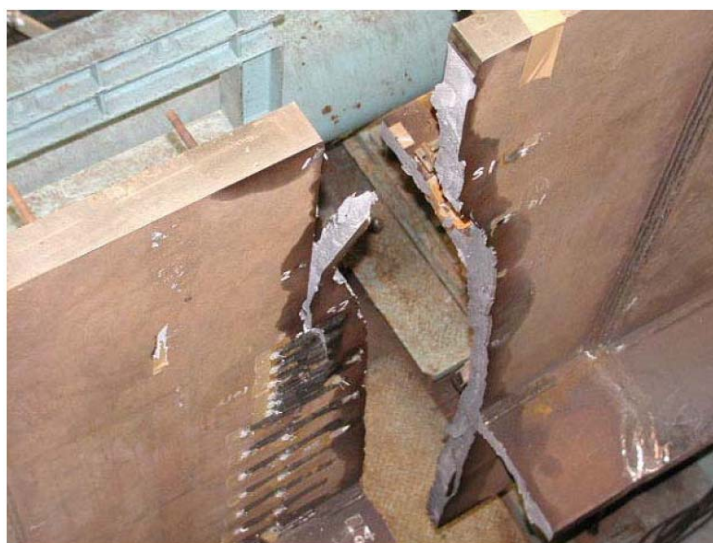
21 世紀に入り、コンテナ船は急激に大型化した。中国の経済発展に伴う、海上物流の増加ニーズによるものであるが、2000 年頃までは 5000 TEU (TEU: 20 フィートのコンテナの積載個数) 程度であったものが、最近では 20000 TEU を超えるコンテナ船も建造され就航している。

前述の通りコンテナ船は、コンテナの積み下ろしのために大きな開口部を有する特殊な構造の船である。そのため、開口部周辺に配置されるハッチサイドコーミングには極厚の高強度鋼が用いられる。図 2 は 2005 年のデータで、コンテナ船のサイズとハッチサイドコーミングの板厚の関係を示した図である。両者はほぼ比例関係にあり、10000 TEU 超になると 100 mm を超える板厚の鋼板が必要になってくることがわかるが、最近の大型コンテナ船では板厚が抑制されるようになってきている。

一方、前述の造船材のぜい性亀裂アレストに関する過去の知見は、板厚 40mm 以下で確立された知見であった。極厚の場合のぜい性亀裂アレストについては、65 mm~70 mm の板厚の鋼板を用いた大型アレスト実験が実施され報告された⁶⁾。結果を図 5 示す。



(a) 溶接継手を直進伝播 (スティフナーのアレスト効果なし)



(b) EH グレード鋼の母材を伝播

図 5 極厚造船材 (板厚 65 mm~70 mm) の大型アレスト試験結果⁶⁾

この報告結果から、極厚材では、ぜい性亀裂がボンドから逸れる現象が確認できないことが明らかになった。また、板厚 65 mm の極厚材母材の実験結果では、シャルピー衝撃値が良好でも、ぜい性亀裂のアレスト特性が不十分でぜい性亀裂が止められないことが有ることを実証した。

この報告は、従来の船舶設計で想定しているぜい性亀裂伝播停止の考え方が極厚材では成立しないことを示唆しており、50mm 以下の鋼板と同様の鋼材要求・設計を取る限り、万が一ぜい性亀裂が発生した場合には、溶接線に沿って亀裂が伝播し、最悪の場合船体が破断し沈没する恐れがあることを示唆するものであった。

この研究をきっかけに、日本国内で大型アレスト試験に関する共同研究が始まった。この共同研究は、日本海事協会が、国内鉄鋼会社および国内造船会社を組織して実施したもので、その研究結果が報告されている⁷⁾。図 6 にその結果を示す。この共同研究では、先の SR の委員会でも実施された超広幅混成 ESSO 試験と呼ばれる平板での大型アレスト試験に加え、実構造に近い構造でハッチサイドコーミングからアップーデッキに突入する大型モデル試験も実施している。試験部位は、YP40 と YP47 の溶接継手部の近傍なので、試験条件は YP40 鋼の許容応力である 257 N/mm² の応力下で、一般商船の最低設計温度である-10℃で行っている。大型試験の結果は大型実験でのアレストには Kca=6000 N/mm^{3/2} 以上が必要であること（前述 SR 委員会での Kca=600 kgf/mm^{3/2} とほぼ同一）ことが明らかにされた。

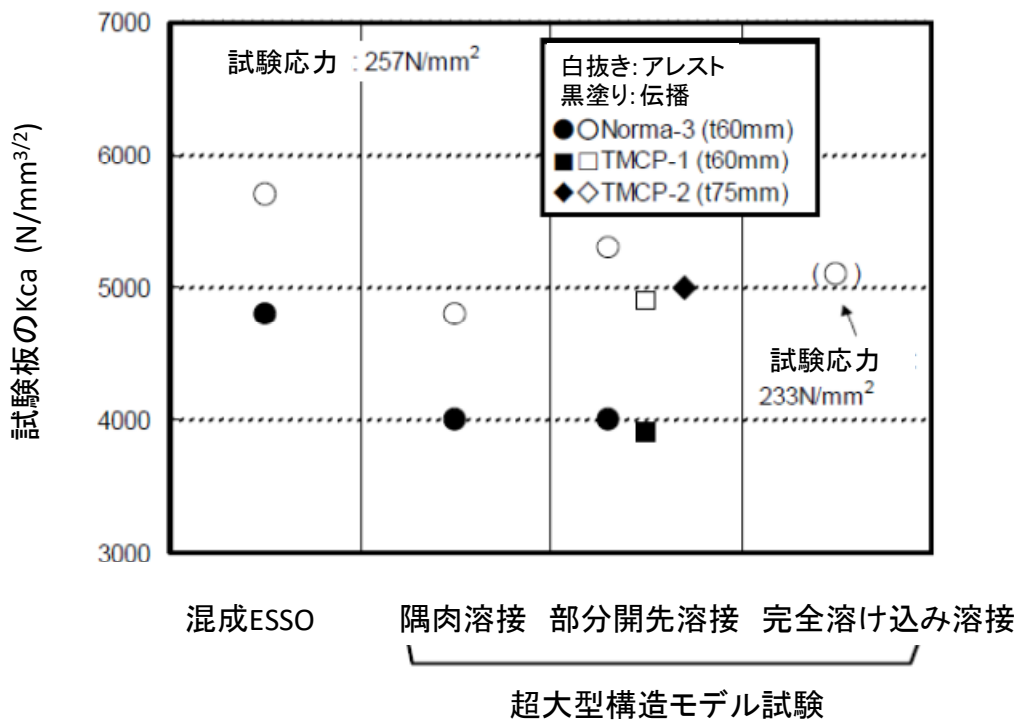


図 6 日本海事協会共同研究での大型試験結果のまとめ⁷⁾

日本海事協会ではこの共研成果を反映させ、ぜい性亀裂アレスト設計指針⁸⁾を発行した。同指針はハッチサイドコーミングまたはアップーデッキの板厚が 50 mm を超え 75 mm までのコンテナ船のアレスト設計について以下のように規定している。

想定されるアレストを図 7 に示すように、ハッチサイドコーミングの溶接部を伝播するぜい性亀裂がアップーデッキに突入する際にアレストさせるシナリオ 1 と、アップーデッキの溶接部を伝播

するぜい性亀裂がハッチサイドコーミングに突入する際にアレストさせるシナリオ 2 に分けて⁷⁾、その両方を要求している。さらに鋼板母材のアレストじん性でぜい性亀裂を停止するため、ハッチサイドコーミングとアップパーデッキの突合せ溶接を 300 mm 以上離すことを要求している（図 8）。さらに、ぜい性亀裂をアレストするのに必要なアレストじん性値 Kca をシナリオ 1、シナリオ 2 共通で -10°C で $6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ と規定し、その試験方法である温度勾配型 ESSO 試験法も指針中に規定した。

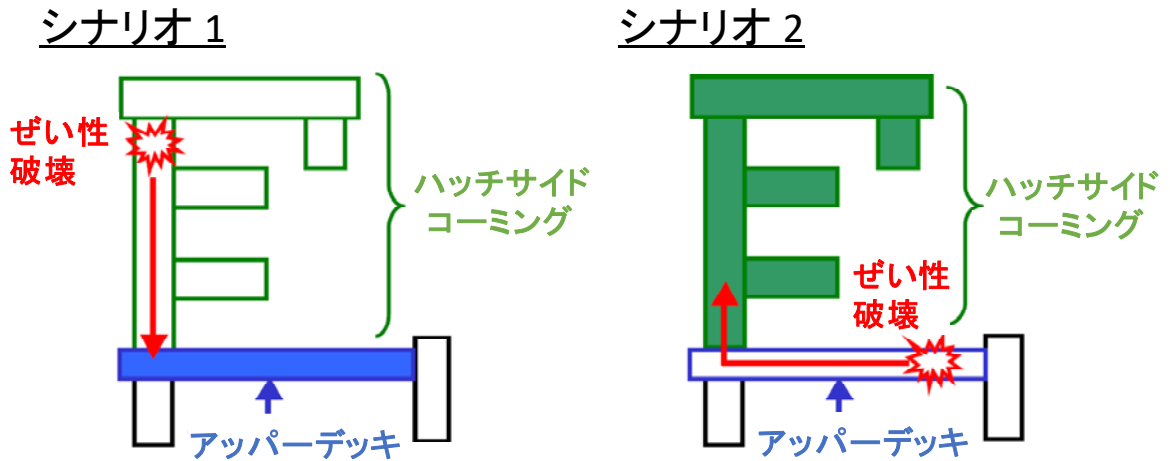


図 7 アレスト設計において想定される 2 つのシナリオ⁷⁾

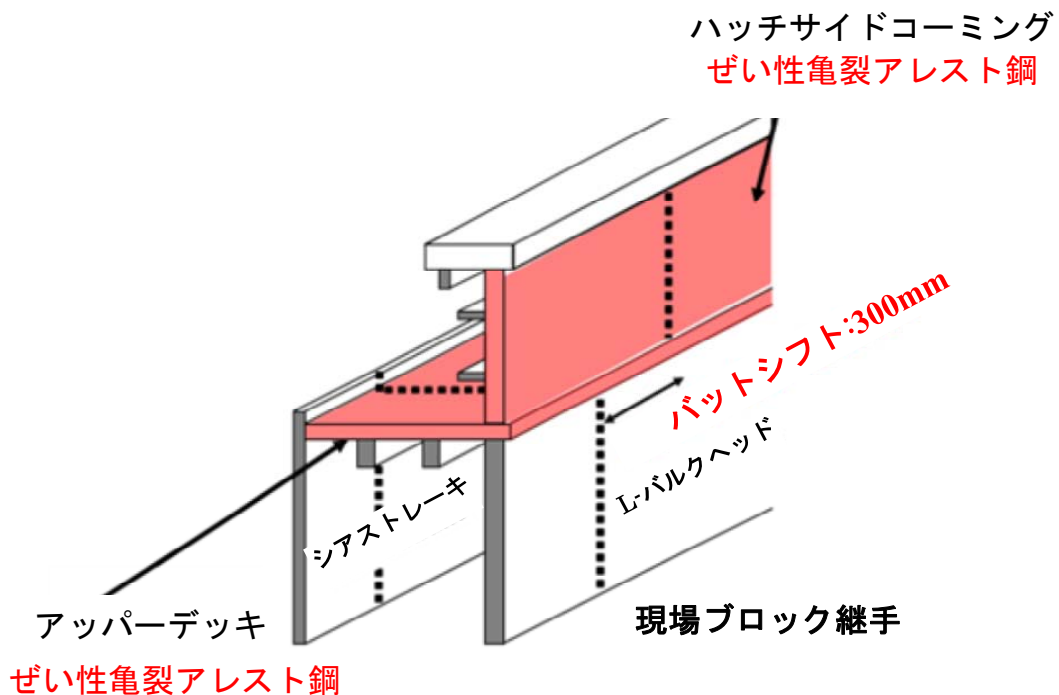


図 8 バットシフトに関する要件⁹⁾

この指針のアレスト設計の考え方は、ヨーロッパで主流であった英国溶接研究所（TWI: The Welding Institute）で開発された CAT 試験を併記し、板厚範囲を 80 mm まで広げた上で、2013 年に IACS（国際船級協会連合）の UR（Unified Requirement）の S33 に設計要件、W31 に ESSO 試験法と材料要件が取り入れられている。

3.2 板厚 80mm 超の必要 Kca の検討

日本海事協会が設置したアレスト設計委員会は、その後日本溶接協会の ATS 委員会として日本溶接協会内に設置され、板厚 100 mm まで広げたアレストじん性 Kca の要求値の検討を進めた。同委員会は Kca を調査するための ESSO 試験法を WES 規格 (WES 2815) とするワークを並行して実施した。これはその後 ISO 規格 (ISO 20064) にも取り入れられているが、これについては当該規格を参照されたい。

ATS 委員会では板厚 100 mm の造船用鋼材を用いて、シナリオ 1 とシナリオ 2 の必要 Kca 値について構造モデル試験により検討された。ATS 委員会での大型試験の特徴は、コンテナ船構造のモデル試験として助走部の溶接方法、溶接材料、溶接条件を実際に適用されるものを採用し、実構造のモデル化とした点である。それ以前の大型アレスト試験では助走部で確実にぜい性亀裂が伝播するように、大入熱溶接やじん性の低い溶接継手が用いられることが多かったが、ATS 委員会の試験では溶接姿勢や施工の手順もなるべく実船に準拠したため、溶接残留応力についてもシミュレートできていると考えられる。これらの委員会成果は国際会議で報告されている¹⁾。ATS 委員会の大型構造モデル試験の試験片形状を図 9、図 10 に示す。

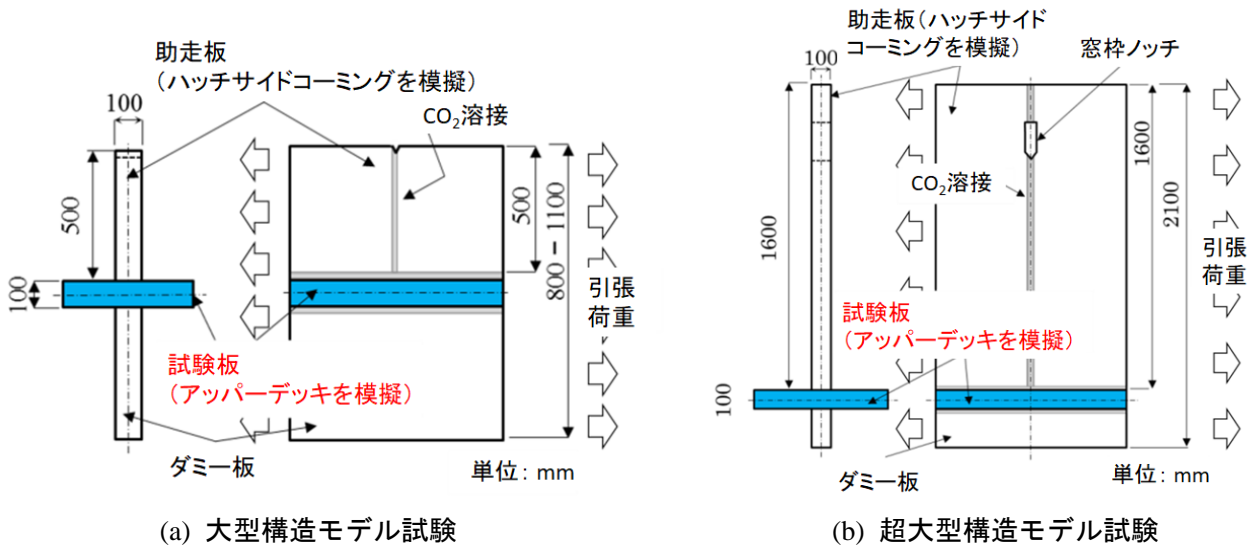


図 9 シナリオ 1 の構造モデルアレスト試験片形状¹⁾

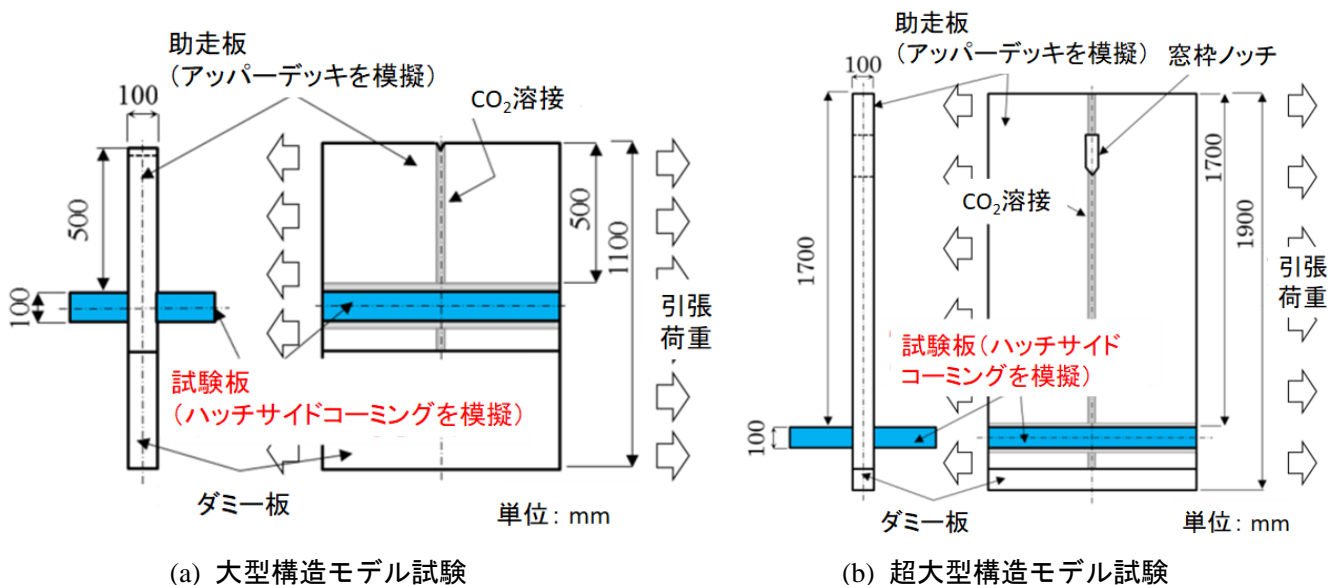


図 10 シナリオ 2 の構造モデルアレスト試験片¹⁾

ATS 委員会の構造モデル試験のシナリオ 1 の結果を表 1 に、シナリオ 2 の結果を表 2 に示す。シナリオ 1 では板厚 100mm でも板厚 80 mm 以下の場合と同様、 $K_{ca}=6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ でぜい性亀裂はアレスト可能であったが、シナリオ 2 では板厚が 100 mm になると $K_{ca}=7000 \text{ N/mm}^{3/2}$ でもぜい性亀裂はアレストせず、ぜい性亀裂アレストには K_{ca} が $8000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上が必要であることが明らかにされた。これらの結果は、IACS の材料・溶接のエキスパートグループへの業界からの報告の形で、日本溶接協会から報告を重ねており、板厚 80 mm 超 100 mm までのアレスト設計要件が 2019 年 12 月、IACS の UR S33 及び W31 に取り入れられた。

表 1 板厚 100mm のシナリオ 1 構造モデルアレスト試験結果¹⁾

試験片記号	タイプ	溶接方法	試験温度での Kca値 ($\text{N/mm}^{3/2}$)	試験結果
Test 1-1	大型	部分溶け込み	6,000	アレスト
Test 1-2		完全溶け込み	6,000	アレスト
Test 1-3	超大型	部分溶け込み	7,000	アレスト
Test 1-4			6,000	アレスト

表 2 板厚 100mm のシナリオ 2 構造モデルアレスト試験結果¹⁾

試験片記号	タイプ	溶接方法	試験温度での Kca値 ($\text{N/mm}^{3/2}$)	試験結果
Test 2-1	大型	隅肉	6,000	アレスト
Test 2-2			7,000	アレスト
Test 2-3		部分溶け込み	7,000	伝播
Test 2-4	超大型	部分溶け込み	8,000	アレスト

4. おわりに

大型コンテナ船のアレスト設計については、日本が世界をリードして規格化を推進してきた。日本国内の委員会の成果として、日本海事協会のぜい性亀裂アレスト設計指針が世界に先駆けて制定され、設計要件や板厚 80 mm までの鋼板へのアレストじん性要求等が定められ、その後 IACS(世界船級協会連合)の UR (共通要求) に反映された。2019 年 12 月には 100 mm までのコンテナ船のアレスト設計に関する要件が UR に反映されている。

参考文献

- 1) K. Matsumoto 他, Proc. of ISOPE2018, p.91 (2018)
- 2) 山口他, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN (咸臨) 第 3 号, p.70(2005)
- 3) (一社) 日本造船研究協会 研究資料 No.374 SR193 研究部会報告書(1984)
- 4) 栗飯原他, 日本船舶海洋工学会論文集 第 16 号, p.109(2012)
- 5) (一社) 日本造船研究協会 日本造船研究協会報告 第 87 号 SR147 研究部会(1978)
- 6) T. Inoue 他, Proc. of ISOPE2006, p.132 (2006)

- 7) T. Handa 他, Proc. of ISOPE2010, p.88 (2010)
- 8) (一社) 日本海事協会, 脆性亀裂アレスト設計指針(2009)
- 9) (一社) 日本海事協会誌No.317, P13 (2016)

<略歴>

井上 健裕 (いのうえ たけひろ)

1981年 東京大学 工学部 物理工学科 卒業

1983年 東京大学 大学院 工学系研究科 物理工学専攻 修了

1983年 新日本製鐵株式会社 入社 厚板条項研究センター破壊力学 Gr 配属

2003年～2012年 破壊力学グループ総括

2017年 新日鐵住金退職、日鉄住金テクノロジー入社

(2008年 ノルウェー工科大学(NTNU)より学位 (PhD) 授与)

現在に至る