九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ブラスト処理による溶接止端部の疲労強度向上効果の検証

藤井，壽裕
株式会社 大島造船所

岡田，公一
長崎総合科学大学大学院工学研究科

出口，純一
株式会社相浦機械

後藤，浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

https://hdl.handle.net/2324/4794834

出版情報：日本船舶海洋工学会論文集. 33, pp.97-106, 2021. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

ブラスト処理による溶接止端部の疲労強度向上効果の検証

正会員　藤　井　壽　裕*　　正会員　岡　田　公　一**
正会員　出　口　純　一***　　正会員　後　藤　浩　二****

A Study on Improvement of Fatigue Performance by Shot Blasted Surface Treatment

by　Toshihiro Fujii, *Member*　Koichi Okada, *Member*
Jun-ichi Deguchi, *Member*　Koji Gotoh, *Member*

Summary

Recently, the strength of the hull structure including fatigue strength has seen significant improvement because of application of IACS CSR (Common Structural Rules). Various methods which can increase the fatigue strength at welded joints are suggested, since the damage morphology on the recently welded structures was observed to be primarily fatigue failure. In Shipbuilding industry, smoothening of the welding bead toe by grinding is the method that is customarily adopted to improve the fatigue performance. Recently, many peening treatment methods at the welding bead has also been proposed. These peening processes produce a compressive residual stress field near the peening location. In addition, the peening process smoothes the toe shape of the weld bead and reduces stress concentration. In case of generating compressive residual stress by impact, the same effect could be expected by shot blasting, which is the steel surface preparation for painting.

In this study, the condition of the residual stress generated at welding toe by shot blasting was investigated, and then from results of the fatigue test, the increase in fatigue strength due to residual stress is verified. In addition, referring to the S-N curve based on the fatigue test results, the effect of the fatigue strength improvement effect due to blasting on the fatigue design of the hull structure was investigated, and the possibility of hull weight reduction was confirmed.

1. 緒　　言

国際船級連合（IACS）に加盟するすべての船級協会では，船長 90m 以上のばら積貨物船及び船長 150m 以上の二重船殻油タンカーに対して共通構造規則 [1]（CSR BC & OT，以下では単に CSR と称する）を統一的に運用している．CSR 適用前は，ばら積貨物船及びタンカーに関する船体構造の船級規則は各船級協会が独自に決めていたが，CSR により統一化され，船級間での船体構造に関する規則の差は無くなった．

CSR では，設計条件が厳しく設定されたことに加えて多くの箇所に対して極詳細メッシュの疲労解析の実施が要求されたこともあり，以前の同種船に対する船級規則に比べて一層安全側の構造強度確保が要求される．そのため，過去に同種船において損傷実績の無い部位に対しても，大幅な補強が必要とされる場合もある．すなわち，CSR を満足する船体構造設計の結果，構造強度の観点では過剰品質ともいえる船体の建造が必要となることが懸念される．

最近の溶接構造物の損傷形態としては疲労が大半であることから，種々の疲労強度改善手法が提案されている．船体建造の現場で比較的適用される疲労強度改善対策としては，グラインダーによる溶接止端部の整形が一般的である．同手法により疲労寿命は 2 倍程度に向上出来ると CSR[1]でも規定されている．また，溶接止端部近傍のピーニング処理もグラインダーと同等の効果として設計することが一般的である．加えて近年では HFMI 手法 [2]と総称される高周波の溶接止端打撃による疲労強度改善に関する研究も盛んである．

溶接止端部近傍に対するピーニング処理による疲労強度改善のメカニズムは，止端部形状整形による応力集中の緩和と打撃により圧縮残留応力場を発生させることとの相乗効果である．ここで，打撃による圧縮残留応力を発生させる効果に着目すると，船体建造の塗装前処理工程の一つであるブラスト処理工程も同様の効果を生じうることが期待される．IMO で 2006 年に採択された新塗装性能基準 [3]（PSPC）及びこれを強制化させる SOLAS 条約 II-1 章 3-2 規則の改正に対応するため，バラストタンク内のブラスト施工が必要となった．加えて，バラストタンク以外でもホールド区画などでブラスト処理が広く適用されるようになった．ブラスト処理

*　株式会社 大島造船所
**　長崎総合科学大学 大学院工学研究科
***　株式会社 相浦機械
****　九州大学 大学院工学研究院 海洋システム部門

原稿受理 令和 xx 年 xx 月 xx 日

では細かい粒子で塗装面を打撃することから，ピーニングと同等の効果が得られることが期待される．特に溶接ビードに対しては入念なブラスト処置が要求されているため，疲労強度改善に寄与するレベルの圧縮残留応力場が溶接止端部に形成されていると推察される．

上記のような塗装工程からの要求に対処する結果，溶接止端部近傍にはかなりの圧縮残留応力場が形成され，自ら疲労強度も溶接ままの継手以上に改善されていると推察される．すなわち，ブラスト処理効果を疲労強度評価に算入していない現在の規則は，結果的に耐疲労強度に対して過剰品質を要求していることが懸念される．このような塗装前のブラスト処理が疲労強度改善に及ぼす影響については，Hensel ら[4]や Gericke ら[5]による検討が報告されている．

本研究では，溶接継手に対してのピーニング処理影響と同様にブラスト処理においても疲労強度が改善するかについて検証を行った．はじめに溶接部近傍の残留応力がブラスト処理，ピーニング処理を施工する事によりどのように変化するのかを，溶接ままの継手と比較した．ブラスト処理により溶接止端部に圧縮残留応力場が形成されることを確認した後に，疲労試験を実施して疲労強度向上効果を検証した．検証した溶接継手の種類は，すみ肉溶接による T 継手と，突合せ溶接継手とした．加えて，疲労試験により確認した疲労強度改善効果を考慮して，船体構造に対する疲労照査を行い，ブラスト処理効果を考慮することが船体構造設計に及ぼす影響について考察した結果を報告する．

2.　ブラスト処理による溶接止端部の残留応力

2. 1　測定対象及び試験方法

ブラスト処理により誘起される残留応力の程度を他手法と比較することを目的に，ブラスト処理をした継手に加えて，溶接ままの継手及びエアー式ニードルピーニング装置（Portable Pneumatic needle-Peening）[6]を溶接ビード上下止端部前線に施工した継手の 3 種類について，T 継手と突合せ継手に対して準備し，それぞれの継手から試験片を採取した．ブラスト処理は，実船建造で使用しているブラスト工場に持ち込み，実船へのブラスト処理を担当している熟練工員が実船と同様の処理時間・方法で施工した．ブラスト処理施工仕様は Table 4 に示す．ピーニング施工は機器メーカーの施工要領書に従い，すみ肉溶接部では母材に対して 60°～80°の角度になるようにピーニングヘッドのニードルの先端を溶接止端部押し当てて，ピーニングヘッドを左右に往復運動させながら 0.3m/min の速度で施工した．ピーニングヘッド先端はニードル径ϕ3mm，ニードル先端曲率半径 1.5 mm の半球状であり，駆動空気圧 0.6MPa にて施工した．突合せ溶接部は板に対して垂直に押し当ててすみ肉溶接と同様の速度で施工した．ブラスト及びピーニングの施工品質確認は実際に現場で行っているように目視により実施した．品質確認を行った後に溶接止端部近傍の残留応力を計測した．

T 継手は，供試鋼板として基板には造船用軟鋼 KA 及び造船用高張力鋼 KA36，板厚は 15mm と 25mm の 2 条件で製作した．立板は KA 材 15mm を使用した．使用した鋼板の特性は Table 1 に示す．Fig.1 に示すように溶接長 1,000mm の T 継手を製作後，長手方向 200mm ピッチで切断して試験片とした．T 継手製作時の溶接条件を Table 3 に示す．試験片製作後にブラストやピーニング処理を実施した．Table 5 に溶接ままと，ブラスト，ピーニングの試験片の溶接止端部半径を計測した結果を示す．この結果からピーニングでは溶接止端部半径が他のものにくらべ大きくなっていることがわかる．また，溶接ままとブラストでは溶接止端部半径は同程度であることからブラストによる溶接止端部の整形効果は無いことが確認された．

突合せ継手の試験片は長さ 1,500mm，幅 200mm，板厚 15mm の KA 材と KA36 材を用いて製作した．使用した鋼板の材料特性を Table 2，溶接条件を Table 7，溶接部の開先形状を Fig.2 に示す．その部材を長手方向で 3 分割にし，それぞれ溶接まま，ブラスト処理，ピーニング処理に割り当てた．その後に長手方向に 60mm ピッチで切断して Fig.3 に示す試験片とした．

Table 1　Mechanical properties of applied materials. (T-shaped joint)

Grade (Thickness)	Yield strength [N/mm^2]	Tensile strength [N/mm^2]	Elongation [%]	Charpy energy at 0 °C [J]
KA (15mm)	293	442	31	-
KA (25mm)	331	463	27	-
KA36 (15mm)	411	530	22	192
KA36 (25mm)	383	520	25	244

Table 2　Mechanical properties of applied materials. (Butt welded joint)

Grade (Thickness)	Yield strength [N/mm^2]	Tensile strength [N/mm^2]	Elongation [%]	Charpy energy at 0 °C [J]
KA (15mm)	315	449	28	-
KA36 (15mm)	452	567	21	184

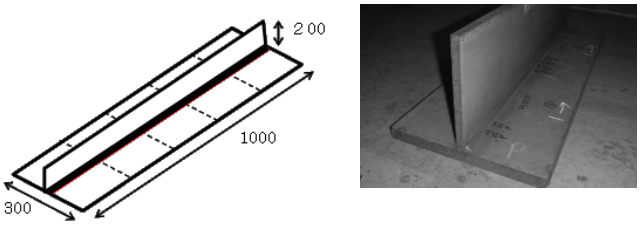


Fig.1 T-shaped joint.

Table 3 Welding conditions for manufacturing T-shaped joint.

Position and type of joint:	Flat position, fillet welding
Welding method:	CO_2 Arc welding with automatic welding carriage
Welding wire	PL-22 (wire dia. 1.4mm) (Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.)
Current:	280 A
Voltage:	32 V
Travel speed:	35 cm / min
The number of weld pass:	1

Table 4 Shot Blast specification

Steel Grid:	SB HYVALUE GRIT G-7HV (Sintokogio,Ltd.)
Steel Grid size:	0.5mm (50%) / 0.7 mm (50%)
Average amount speed:	10 kg/min
Distance to welding bead:	abt. 20 cm
Blast shooting area	abt. 28cm^2 (circle abt. 6cm across)
Travel speed:	3~5 cm/sec
Target surface roughness	Sa2.5

Table 5 Welding toe radius

Treatment	Measurement number	Welding toe radius [mm]		
		Ave.	Max.	Min.
as Weld	6	0.53	0.86	0.36
Blasting	6	0.47	0.53	0.39
Peening	4	1.03	1.52	0.77

Table 6 Fatigue test specimens taken from the T-shaped joint.

ID	Name	Treatment	Steel grade	Base Plate Thickness
1	M15W-T	As welded	KA	15 mm
2	M15B-T	Blasting	KA	15 mm
3	M15P-T	Peening	KA	15 mm
4	H15W-T	As welded	KA36	15 mm
5	H15B-T	Blasting	KA36	15 mm
6	H15P-T	Peening	KA36	15 mm
7	M25W-T	As welded	KA	25 mm
8	M25B-T	Blasting	KA	25 mm
9	M25P-T	Peening	KA	25 mm
10	H25W-T	As welded	KA36	25 mm
11	H25B-T	Blasting	KA36	25 mm
12	H25P-T	Peening	KA36	25 mm

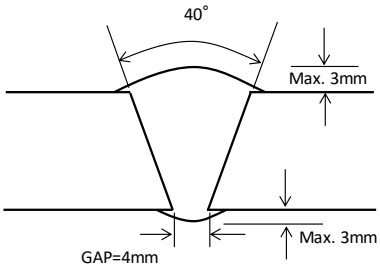


Fig.2 Welding bevel configuration.

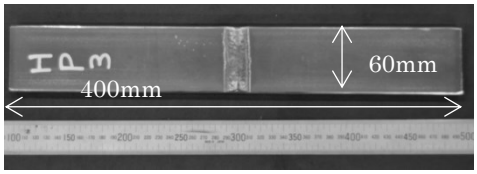


Fig.3 Welded joint and specimen configuration used.

Table 7 Welding conditions for manufacturing butt welded joint.

Position and type of joint:	Flat position, butt welding
Welding method:	MAG (CO_2) welding with automatic welding carriage (one side welding with backing plate)
Welding wire	PL-22 (wire dia. 1.4mm) (Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.)

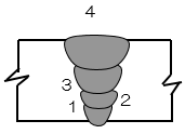
Weld. Pass No.		Current (A)	Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)
	1	220	26	20
	2	280	30	35
	3	280	30	30
	4	260	30	25

Table 8 Fatigue test specimens taken from the butt welded joint.

ID	Name	Treatment	Steel grade
1	M15W-B	As welded	KA
2	M15B-B	Blasting	KA
3	M15P-B	Peening	KA
4	H15W-B	As welded	KA36
5	H15B-B	Blasting	KA36
6	H15P-B	Peening	KA36

2. 2　残留応力計測結果

残留応力の計測には，X 線回折法の単一入射法（cos α法）を測定方法とするポータブル型 X 線残留応力測定装置（パルステック工業，μ-X360s）[7] を使用した．計測は金属ブラシにて丁寧に清掃することでスケールを除去した後に，標準設定（コリメータ径：1.0 mm）にて実施した．

T 継手は Table 6 に示す 12 個の試験片，突合継手は Table 8 に示す 6 個の試験片に対して Fig.4，Fig.5 に示す位置にて計測を実施した．例として T 継手 15mm（KA）の溶接ままブラスト処理，ピーニング処理の試験片の計測結果を Fig.6 に示す．計測は基板の中央部溶接ビード止端部から 100mm で実施した．横軸はビードからの距離を示し，縦軸は残留応力を示す．

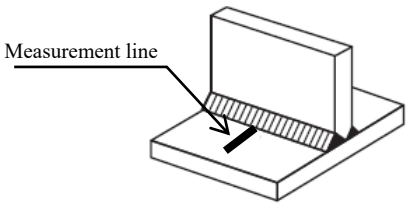


Fig.4 Measurement position of fillet weld specimens.

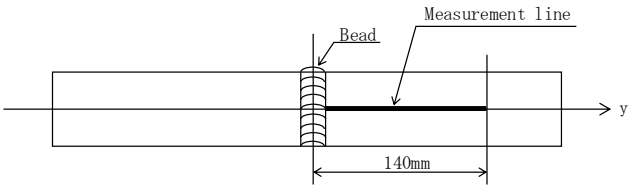
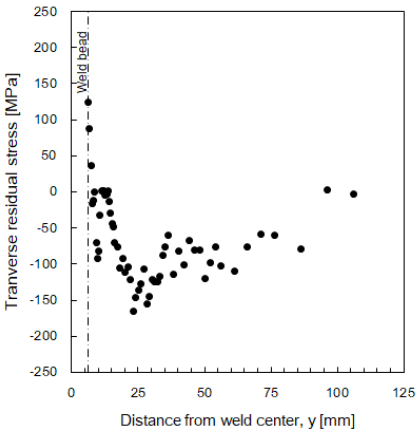
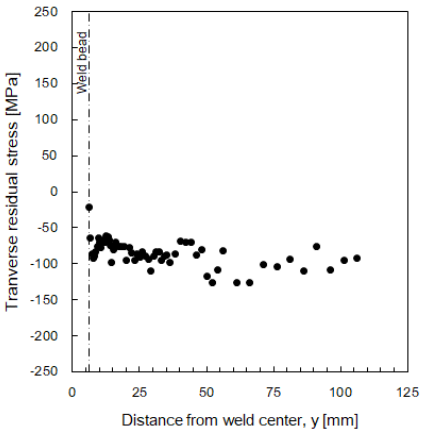


Fig.5 Specimen to measure residual stress and fatigue strength.

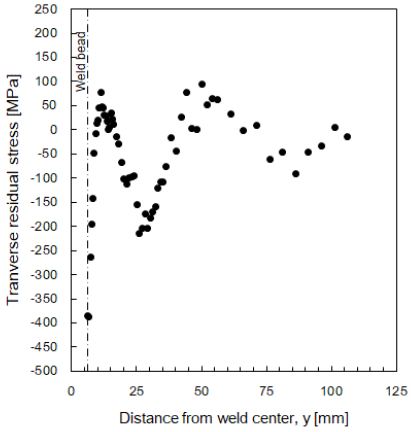
Fig.6(a)~(c)に示した一連の結果より，溶接ままの試験片では溶接止端部の近傍では引張の残留応力が発生している．これに対してブラスト処理した試験片の溶接止端部極近傍では圧縮残留応力場が形成されていることが確認できる．加えて，溶接ままの試験片，ピーニング処理した試験片と異なり溶接止端部から離れた箇所では同程度の圧縮残留応力場となっている事が確認できる．一方，ピーニング施工した継手では，溶接止端部近傍に大きな圧縮残留応力場が形成されている．



(a) Specimen M15W-T, as welded, KA, 15 mm.



(b) Specimen M15B-T, Blasted, KA, 15 mm.



(c) Specimen M15P-T, Peening, KA, 15 mm.

Fig. 6 Examples of measured residual stress distribution.

以上のような残留応力場の相違から，ブラスト処理された試験片の疲労強度は，溶接まま試験片に比べ向上していると推測される．加えて，溶接止端部近傍から離れた領域でも全体的に圧縮残留応力が形成されているため，疲労亀裂進展に関しても溶接まま材よりも遅延する効果が生じると推察される．

またピーニング処理を行った試験片の溶接止端部には大きな残留応力場が生じていることから，溶接まま、ブラスト処理を行った試験片に比べて疲労強度は大きく向上していることが推察される．

その他の試験片でも同様な結果を得た．

3. 疲労試験

3. 1 試験片

ブラスト処理を行った溶接継手の疲労強度は溶接ままの試験片よりも疲労強度が改善しているとの推察を検証するため，疲労試験を実施した．

T 継手については，残留応力測定時に用いた試験片製作時に同時にもう一組の試験片を準備し，ブラスト処理及びピーニング処理も同時に施工し，その後溶接線方向 30 mm 間隔で Fig. 7 に示す試験片を採取して三点曲げ疲労試験を実施した．T 継手の疲労強度に及ぼす残留応力成分は溶接線直角方向の成分であり，これは溶接線直角方向に垂直な断面の力の平衡条件だけを考慮すれば決定できる [8]ため，ブラストやピーニング処理前後で，溶接線直角方向残留応力の疲労試験片として取り出す前後の変化量は十分に小さいと考えた．

突合継手については，残留応力を計測した Fig. 3 に示す試験片を用いて，軸力繰返しによる疲労試験を実施した．

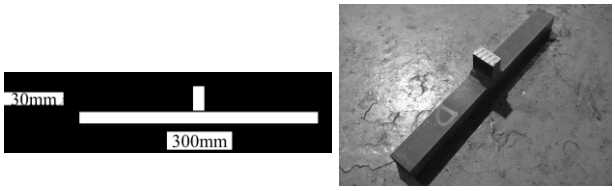


Fig. 7 Fatigue test specimen used (unit in mm).

3. 2　疲労試験方法

いずれの試験片に対しても，サーボ油圧式疲労試験機を用いて三点曲げ疲労試験及び軸力疲労試験を行った．三点曲げ疲労試験では公称応力範囲 100 MPa~350 MPa，応力比 0.05，繰返し回数 10^7 回打ち切りで行った．ここでの三点曲げの公称応力とは材料力学的に算出される立て板がないと仮定した平板に曲げ応力を加えた際の平板の溶接止端部位置での表裏面応力のことする．軸力疲労試験は，公称応力範囲 150MPa~350MPa，応力比 0.1，繰り返し数は試験に要する時間を考慮して $2x10^6$ 回にて打ち切りとして実施した．その他の試験方法全般は ISO/TR 14345:2012[9]に準拠して実施した．

3.3　試験結果

疲労試験後の試験片の例を Fig.8 及び Fig.9 に示すが，疲労亀裂はすべての部材において溶接止端部で発生したことを確認した．ここでの疲労試験片は 2 章で残留応力を測定した試験片を切断して作成しており，残留応力計測位置と亀裂発生部位と異なっている可能性は考えられる．

Fig. 8 Examples of broken specimen of fillet welding

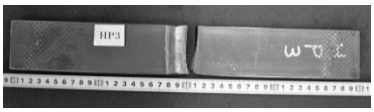
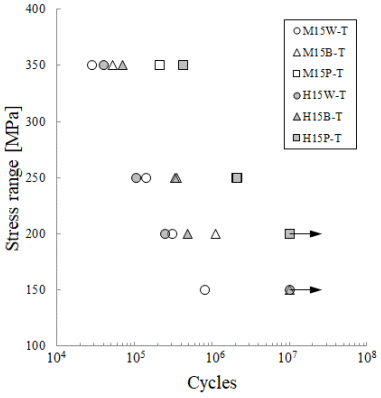


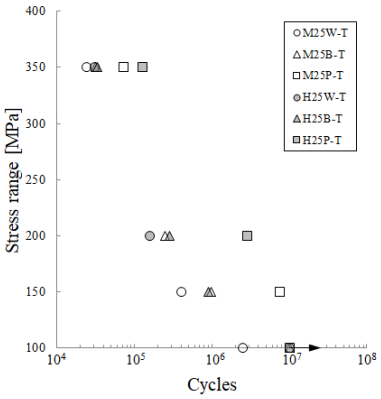
Fig.9 An example of broken specimen of butt welding

三点曲げ疲労試験から得られた S-N 曲線を Fig.10 に示す．Fig.10 の縦軸は公称応力範囲，横軸は繰り返し数を示す．Fig.10 に示す結果は，試験数は少ないが疲労強度はピーニング処理試験片，ブラスト処理試験片，溶接まま試験片の順で高かった．この傾向は残留応力の計測において引張残留応力の大きさと同様の傾向である．また，材質や基板板厚による傾向の相違無いことも確認できる．これらの結果ではブラスト処理試験片は，溶接まま試験片より良好な疲労強度を有することが明らかになった．一方，設計段階ではこの現象は考慮されていないため，ブラスト処理された部材は設計段階で想定される以上の疲労寿命を有していると推測される．

軸力疲労試験から得られた S-N 曲線を Fig.11 に示す．Fig.11 の縦軸は公称応力範囲，横軸は繰り返し数を示す．Fig.11 に示す結果から，T 型継手に対する結果と同様に，ブラスト処理試験片は溶接まま試験片よりも疲労強度が高いことが確認された．この結果から，荷重伝達タイプの突合せ継手に対しても，ブラスト処理により設計段階で想定される以上に疲労寿命の改善効果を発揮していると推測される．

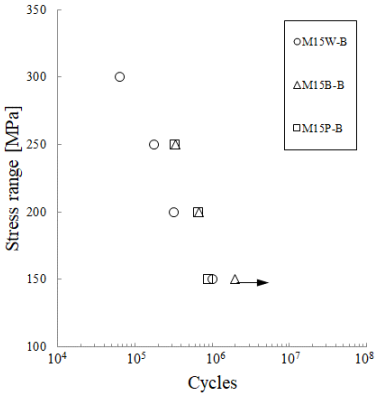


(a) Base Plate thickness 15mm, KA, KA36

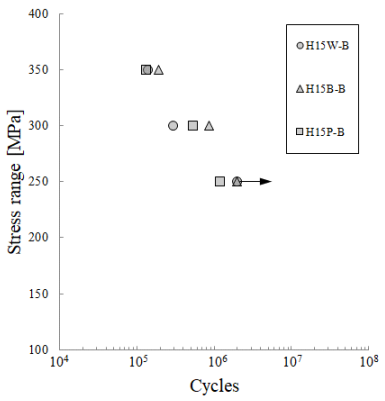


(b) Base Plate thickness 25mm, KA, KA36

Fig. 10 S-N curves of fillet welding specimens.



(a)　Base Plate thickness 15mm, KA



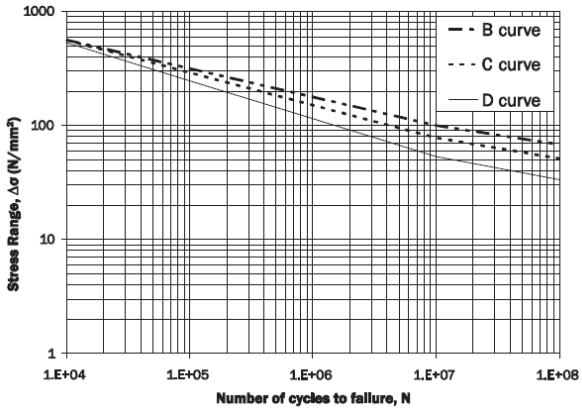
(b) Base Plate thickness 15mm, KA36
Fig. 11 S-N curves of butt welded specimens.

一方でピーニング処理試験片は，KA 材で 250MPa と 200MPa, KA36 材で 350MPa と 300MPa では溶接まま試験片より高い疲労強度が確認されたが, それ以外では溶接まま試験片よりも疲労強度が低かった．これは，三点曲げ疲労試験により得られた, 全ての応力範囲においてピーニング処理試験片の疲労強度が優れていた結果とは異なる傾向である. 一方, ブラスト処理以上に溶接止端近傍に大きな圧縮応力場が付与されたピーニング処理試験片が最も高い疲労強度を示すことが自然と思われるため, 今回の原因はピーニング施工管理に不具合があった可能性が推察される.

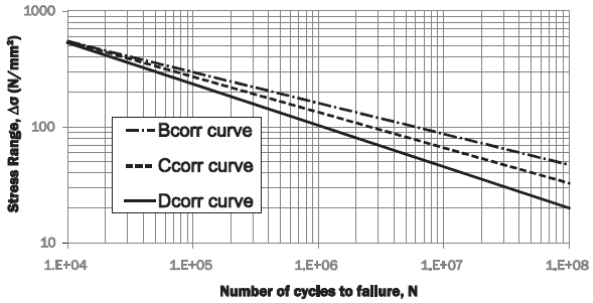
4. 影響評価

4.1 CSR の SN 線図との比較

CSR で用いられる S-N 線図は Den 1990 [10]及び HSE 1995 [11]に基づいている. 各部材は一定期間塗装により保護される環境にあるため大気環境と腐食環境における S-N 線図が定義されている．これらの図を Fig.12 に示す. 溶接継手の疲労評価を行う場合は D 級の S-N 線図を用い，自由端の疲労評価を行う場合は B 級または C 級の S-N 線図を用いる.

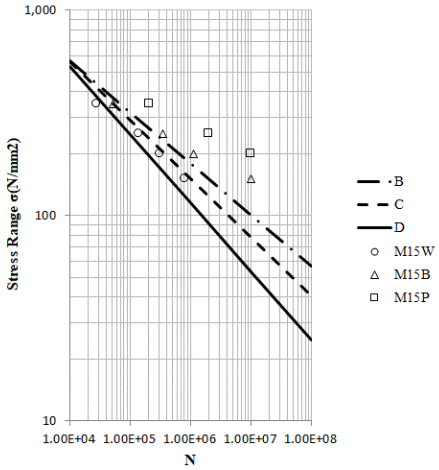


(a) In-air environment

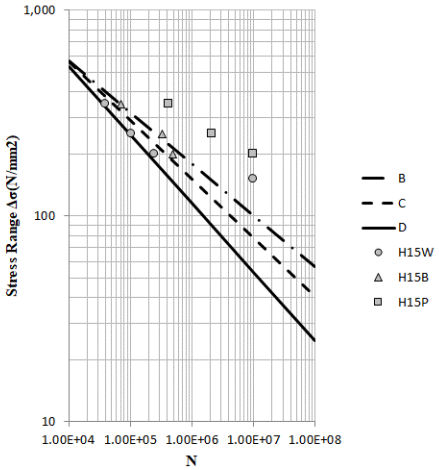


(b) Corrosive environment
Fig.12 Basic S-N design curves

今回実施した疲労試験の結果を CSR の S-N 線図にプロットすることで，溶接まま，ブラスト処理，ピーニング処理の溶接止端部における疲労強度の差が CSR の標準設計 S-N 線図においてどの程度であるか検証した．比較例として T 継手（基板板厚 15mm）及び突合せ継手（板厚 15 mm）から採取した試験片による疲労試験結果を Fig. 12 (a)に示した CSR の大気中の標準設計 S-N 線図にプロットしたものをそれぞれ Fig.13，Fig.14 に示す.



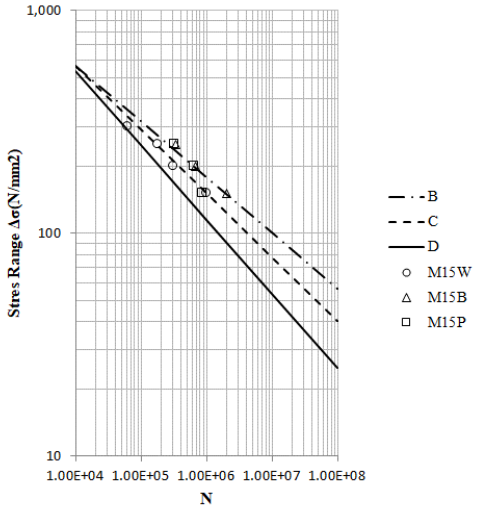
(a) KA



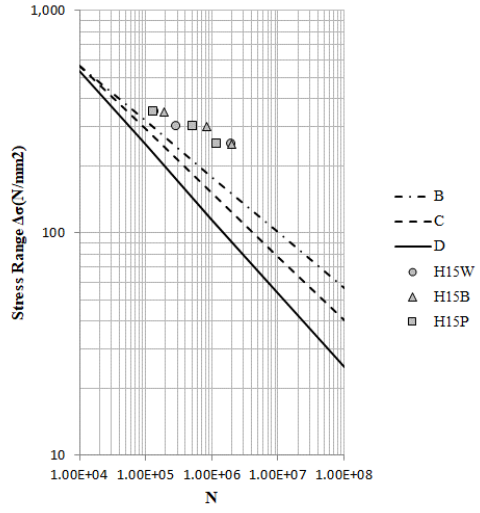
(b) KA36

Fig.13 Fatigue test results of fillet welding specimens with base plate thickness 15mm plotted on CSR S-N curves in-air environment.

Fig.13 (a)を参照すると，溶接ままの疲労試験結果に比べるとブラスト処理を施工した結果は，CSR の標準設計 S-N 線図において D カーブと C カーブ程度の差があることが確認できる．また Fig,13 (b)から KA36 材においても同程度の差があることがわかる．ピーニング処理を施工した結果はブラスト処理を施工した結果より更に 1 ランク分の疲労強度の差があることを確認した．



(a) KA



(b) KA36

Fig.14 Fatigue test results of butt welding specimens with base plate thickness 15mm plotted on CSR S-N curves in-air environment.

Fig.14 (a)および Fig.14 (b)は突合継手の結果をプロットしたものである．Fig.14 (a)の KA 材の比較から，T 継手から採取した試験片と同様に溶接ままの結果よりブラスト処理を施工した結果がおおよそ 1 ランク分の疲労強度向上が見られる．一方，Fig.14 (b)に示す KA36 材の比較では，ブラスト処理を施工した結果の方が溶接ままの結果より高くなっているものの 1 ランク分の差はないようにみられる．しかしながら KA36 材は KA 材に比べ疲労強度が非常に向上していることがわかる．これらのことから，通常溶接止端部では D カーブを使って疲労評価を行っているがブラスト処理を施工している箇所に関しては実際には 1 ランク疲労強度が高い C カーブを用いて評価することが適切ではないかと考えられる．

4.2 実船を対象とする評価例

上述のように CSR の標準設計 S-N 線図において，ブラスト処理された溶接継手では従来よりも 1 ランク分疲労強度向上が見込まれるとすれば，CSR に従った船体構造設計において疲労強度により寸法が決まる部材はブラストの効果により，従来の部材寸法より小さいサイズでも同様の強度が確保出来，船体の鋼材重量軽減に寄与できる可能性があるのではないかと考えられる．

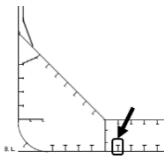
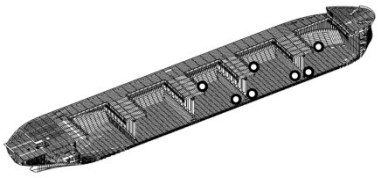
そこで，実船でどの程度影響が生じるかについて，疲労強度が部材寸法を支配するする箇所の一部を対象に検証した．評価対象船型及び評価部位などについて，Table 9 に示す．

CSR では，不規則な波浪荷重における疲労評価を行い，その評価は Palmgren-Miner の線形累積被害則を仮定した設計 S-N 線図に基づいている．設計寿命は 25 年と定められており，ネット寸法を用いることにより腐食を考慮している．各部材は塗装により一定期間は腐食から保護される環境にあるため一定期間は空気中における S-N 線図（Fig.12 (a)）を適用して評価を行い，残りの期間は腐食環境下の S-N 線図（Fig.12 (b)）を適用して評価を行う．評価対象としている船底ロンジは CSR に規定される簡易算式を適用し，内底板とホッパータンク・下部スツールとの交差部は極詳細メッシュ疲労解析により疲労評価を実施した．

まず現状の規則計算結果と S-N 線図の C カーブを使って評価した場合の疲労寿命の比較を行い，次に C カーブで設計した場合の部材寸法を算出して鋼材重量軽減効果について検証を行った．通常 CSR の疲労強度計算では塗装により部材が腐食環境から保護されている期間がバラストタンク及びホールドの下部などでは 15 年とされており，その期間を大気中の S-N 線図を用いて計算を行う．それ以降を腐食環境下での S-N 線図を用いて計算を行うこととなっている．本研究では大気中だけでブラスト処理やピーニング処理に付随する疲労強度改善効果の確認をしているが，腐食環境下では処理効果を有する表層部が経年に伴う腐食衰耗により消失することから大気中ほどの改善効果は得られないことが懸念される．一方，PSPC による塗装要求への対応のためブラスト処理部には丁寧な塗装が施されることを考慮すれば，特にブラスト処理部の経年に伴う腐食衰耗の程度は緩やかなものであると期待される．このような背景も考慮しつつ，ブラスト処理やピーニング処理に付随する疲労強度改善効果が船体の疲労強度設計に及ぼす影響の度合いを確認することを目的として，腐食環境下でも溶接ままと比較してこれ

らの処理による改善効果が同程度得られるものと仮定した下で比較検討を実施した.

Table 9 Principal particular and fatigue reference location of evaluated ship.

Type of ships:	Bulk carrier, 99,000DWT
Principal dimensions:	245m (L) x 43m (B) x 18.5m (D)
Evaluation reference of fatigue strength:	No.1 ~ No.3 Hold
Evaluation member and location:	(1) Longitudinal attached on the bottom plate  (2) Cross points between inner bottom and hopper tank / lower stool 

4.2.1 疲労寿命の比較

船底ロンジは，Table 9 内に示す図に矢印で示す箇所において比較した. 内底板とホッパータンクと下部スツールとの交差部は Fig.16 に示す①～⑦の箇所にて比較した.

Table 10 と Table 11 の疲労寿命の比較から，C カーブを用いて疲労評価を行うと疲労寿命が約 2 倍～4 倍程度向上していることがわかる.

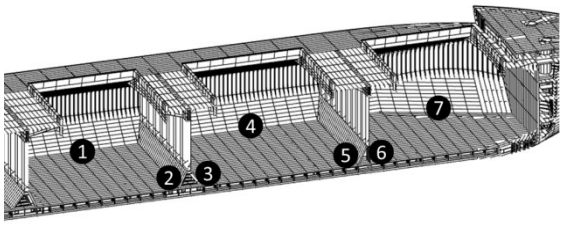


Fig.16 Fatigue evaluation position for the cross points on the inner bottom.

Table 10 Fatigue life comparison for bottom longitudinal stiff.

Stiffener Size	D curve (year)	C curve (year)
Face 350 x 15 Web 200 x 22 (KA36)	25.3	70.1

Table 11 Fatigue life comparison for the cross point on inner bottom.

Position	Plate thickness (mm)	D curve (year)	C curve (year)
①	23.5	25.1	65.3
②	25.5	25.5	68.5
③	25.5	32.6	96.7
④	30.5	26.5	72.5
⑤	23.0	55.4	198.7
⑥	23.0	119.1	520.7
⑦	23.0	28.3	81.1

* Plate material: KA36

4.2.2 部材寸法の差による重量影響

C カーブと D カーブを用いた疲労寿命の比較から，ブラスト処理を施工した箇所に関して, 現状の部材寸法よりも小さい寸法で同じ疲労強度を確保出来ると考えられる. これにより鋼材重量の軽減が可能となる. この重量軽減がどの程度になるかを前節と同じ部材で検討した. 船底ロンジに関する結果を Table 12 に，内底板とホッパータンクと下部スツールとの交差部に関する結果を Table 13 にそれぞれ示す．なお，この試計算では材料を KA36 と設定している.

検証の結果，船底ロンジ及び内底板とホッパータンク，下部スツールの交差部ではいずれも C カーブで評価した場合，今回の評価対象部材は疲労強度に対する補強が不要であることが確認された．この結果は，ブラスト処理を施工する事で S-N 線図が 1 ランク上げて評価出来るのであれば，耐疲労設計において過剰品質を改善し, 船殻重量の軽減を期待できることを示唆している.

Table 12 Comparison of bottom longitudinal scantling due to difference of applied S-N curves for fatigue strength.

Hold No.	D curve		C curve		Weight
	Stiffener size	Fatigue life	Stiffener size	Fatigue life	impact (ton)
2	F: 350 x 15 W: 200 x 22	25.3	F: 350 x 11 W: 125 x 16	50.8	28.4
3	F: 420 x 15 W: 200 x 22	25.1	F: 350 x 11 W: 125 x 19	42.6	47.9
4	F: 350 x 11 W: 200 x 19	25.7	F: 350 x 11 W: 125 x 19	42.5	47.1

(Note)
- Plate material: KA36
- F: Face, W: Web
- Unit in stiffener size and fatigue life are mm and year, respectively.

Table 13 Comparison of Inner bottom scantling due to difference of applied S-N curves for fatigue strength.

Hold No.	D curve		C curve		Weight
	Plate thickness	Fatigue life	Plate thickness	Fatigue life	impact (ton)
1	23.5	25.1	23.0	62.0	1.3
2	25.5	25.5	23.0	52.5	5.8
3	25.5	32.6	23.0	96.7	6.2
4	30.5	26.5	23.0	38.4	38.1
5	23.0	55.4	23.0	198.7	0
6	23.0	119.1	23.0	520.7	0
7	23.0	28.3	23.0	81.1	0

(Note)
- Plate material: KA36
- Unit in inner bottom plate thickness and fatigue life are mm and year, respectively.

5. 結言

本研究で得られた知見の要旨を以下に示す.

(1) ブラスト処理をすることにより T 継手の溶接止端部近傍の残留応力は，溶接ままのものよりも圧縮側となる.

(2) ピーニング処理をした溶接止端部では残留応力が大きく圧縮側となるが, ピーニング処理をした近傍のみであり, ある程度離れた位置ではブラスト処理した試験片の方が残留応力は圧縮側であった.

(3) T 継手及び突合継手の疲労試験結果より, ブラスト処理により溶接ままよりも疲労強度が向上することを確認した．また軟鋼（KA）と高張力鋼（KA36）で傾向の相違は無い.

(4) T 継手及び突合継手の疲労試験結果より, 溶接ままとブラスト処理を施工した疲労強度は，CSR の標準設計 SN 線図の D カーブと C カーブ程度の差が見られた.

(5) 実船の設計で疲労強度が厳しい部材について D カーブを C カーブに変えて疲労強度評価を行うと疲労寿命に 2～4 倍の差が見られた.

(6) 疲労強度により寸法が決まっている部材に対して, 疲労強度評価を C カーブで行うと重量軽減が見込めることがわかった．なお，この結果は腐食環境中でも大気中と同等の疲労強度改善効果が得られるとした仮定の下で得られたものであることに留意する必要がある.

3.に示した疲労試験では，疲労亀裂の発生箇所を特定していない上, 疲労試験に供した T 継手試験片では, 残留応力計測後に溶接線長方向の一定間隔で切断して疲労試験片としており, この切断による残留応力の変化の程度は検証していない．そのため，残留応力と疲労寿命の定量的な関係を示すには至っていないことに留意する必要があろう. しかしながら，2.に示した溶接まま継手と，ブラスト処理やピーニング処理を施した溶接継手の残留応力分布の傾向も考慮すれば, 溶接後にブラストやピーニング処理を施すことで, 溶接まま継手よりも疲労寿命を改善できると期待される.

本研究で示したブラスト処理の有効性を実船設計に展開するためには，今後，以下の問題について検証を行う必要がある.

(1) 試験片の数や評価対象の継手様式を増やすなどして，S-N 線図の精査の実施.

(2) 長期腐食環境下での疲労強度改善効果の検証.

(3) ブラスト処理の管理レベルに対する品質の差による疲労強度向上効果の影響の検証.

(4) 疲労試験片単位で残留応力を測定し，かつ試験時に細かいピッチで観測を行い，処理ごとに疲労亀裂の発生及び伝播領域における残留応力分布と疲労寿命の関係を定量的に評価する.

(5) 実船で嵐に遭遇した際に過大荷重を受け止端部が局所的に塑性化し、ブラスト処理やピーニング処理により導入された残留応力が緩和される現象 [12]に関する検証として，実船においてこれらの処理を施した箇所に対する残留応力分布の経年変化を測定するとともに，疲労損傷が生じていた場合は，損傷形態を調査し，経年変化した残留応力分布との関係を定量的に評価する.

(6) 実船での部材寸法の影響評価は，今回の疲労試験の結果から得られた効果で S-N 線図を仮定して評価しているため，実際の構造での適切な効果の検証.

謝　辞

疲労試験に際してご協力を頂きました, 長崎総合科学大学の岸川良治技術員，九州大学の村上幸司技術専門職員，九州大学大学院修士課程の山﨑真尚氏（現日立製作所）及び山口絢也氏に御礼申し上げます.

参 考 文 献

1) IACS: Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2014.

2) Marquis, G.B. and Barsoum, Z.: IIW Recommendations for the HFMI treatment for improving the fatigue strength of welded joints, 2016.

3) IMO: Resolution MSC.215(82), PERFORMANCE STANDARD FOR PROTECTIVE COATINGS FOR DEDICATED SEAWATER BALLAST TANKS IN ALL TYPES OF SHIPS AND DOUBLE-SIDE SKIN SPACES OF BULK CARRIERS, 2006.

4) Hensel, J., Nitschke-Pagel, T., Eslami, H. and Dilger, K.: Fatigue strength enhancement of bull welds by means of shot peening and clean blasting, IIW Document XIII-2733-18, 2018.

5) Gericke, A., Glienke, R. and Henkel, K.M.: Improvement of Fatigue Strength of Welded Details through Blast Cleaning – Effects, Results and Quality Assurance, IIW Document XIII-2737-18, 2018.

6) https://toyoseiko.co.jp/product/portable-pneumatic-needle-peening/ (accessed on 26th May 2020).
7) https://www.pulstec.co.jp/product/x-ray/ (accessed on 26th May 2020).
8) Matsuoka, K., Takahashi, I., Yoshii, T., Iidaka, H. and Fujii, E.: Influence of plate thickness and heat input on fatigue strength of non-load-carrying fillet weld joints., Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168, 1990, pp.507-517.
松岡 一祥, 高橋 一比古, 吉井 徳治, 飯高 洪男, 藤井 英輔：荷重非伝達すみ肉継手の疲労強度に及ぼす板厚と入熱量の影響, 日本造船学会論文集, Vol. 168, 1990, pp. 507-517.
9) ISO/TR 14345: 2012, Fatigue -Fatigue testing of welded components –Guidance, https://www.iso.org/standard/24112.html (accessed on 25th May 2020).
10) UK DEn, Offshore installations: guidance on design, construction and certification, 4th edition, January 1990.
11) HSE, Offshore installations: guidance on design, construction and certification, 4th edition, February 1995.
12) For example, Hara, J., et al.: A study on Fatigue Strength Improvement for Ship Structures by Ultrasonic Peening (Part 1), Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 10, 2010, pp.599-602.
例えば，原純哉他：船体構造における超音波ピーニングを用いた疲労強度改善に関する研究（第 1 報），日本船舶海洋工学会講演会論文集，Vol.10，2010，pp.599-602.