

塗装品質と船殻工作品質の関係に関するプロジェクト研究委員会

概要報告書

平成 21 年 5 月 14 日

社団法人 日本船舶海洋工学会

目 次

はじめに.....	1
1. 塗膜性能と船殻工作品質の關係に係る諸問題.....	4
1.1. 緒言.....	4
1.2. IMO/PSPC 船殻工作関連要求.....	4
1.3. 技術的課題抽出.....	4
1.4. 塗膜性能と船殻工作品質の關係に係る諸問題.....	5
1.4.1. エッジ処理.....	5
1.4.2. ブラスト処理.....	6
1.4.3. 溶接ビードのグラインダ処理.....	6
1.5. 結言.....	6
1.6. 参考文献.....	6
2. 実エッジ形状に適応したエッジ膜厚保持率計測法の開発.....	7
2.1. 緒言.....	7
2.2. エッジ形状差影響と再現性向上.....	7
2.3. 対称噴霧法 (M 法).....	8
2.3.1. 試験片および試験治具.....	8
2.3.2. 塗装手順.....	9
2.3.3. エッジ膜厚保持率 (ERR) 算出法.....	9
2.4. 現場再現法 (P 法).....	9
2.4.1. 試験片および治具.....	10
2.4.2. 塗装手順.....	10
2.4.3. エッジ膜厚保持率 (ERR) 算出法.....	11
2.5. M 法および P 法の検証.....	11
2.5.1. 塗装条件.....	12
2.5.2. 試験結果.....	12
2.5.3. M 法および P 法による評価対象.....	15
2.6. 結言.....	16
2.7. 参 考 文 献.....	16
3. 不完全 R 形状のエッジ膜厚保持率に及ぼす形状パラメタの影響.....	17
3.1. 緒 言.....	17
3.2. 測定対象形状.....	17
3.2.1. R 止まり形状.....	17
3.2.2. 複合 R 形状.....	17
3.2.3. 参照形状.....	17
3.3. 試験条件.....	18
3.3.1. 塗装条件.....	18
3.3.2. 塗装手法.....	18
3.3.3. 膜厚計測.....	19

3.4.	試験結果	19
3.4.1.	面膜厚（電磁膜厚計による計測）	19
3.4.2.	エッジ膜厚保持率（ERR）計算	20
3.5.	R 止まり Bevel angle と ERR	21
3.6.	最小曲率半径 と ERR	21
3.7.	結 言	22
3.8.	参 考 文 献	22
4.	フリーエッジ形状とエッジ膜厚保持率の關係の数值解析	23
4.1.	緒言	23
4.2.	数值計算	23
4.3.	計算条件	23
4.4.	結果と考察	24
4.5.	結言	24
4.6.	参考文献	24
5.	船体構造用型鋼エッジ R 部の膜厚保持性能について	26
5.1.	緒 言	26
5.2.	R 仕様型鋼エッジ形状の現状調査	26
5.2.1.	調査対象および調査方法	26
5.2.2.	調査結果	26
5.2.3.	型鋼エッジ形状の統計的性質	27
5.3.	最小曲率半径とエッジ膜厚保持性能の關係	27
5.3.1.	試験対象	27
5.3.2.	エッジ膜厚保持性能試験	28
5.3.3.	実験結果および考察	28
5.4.	型鋼エッジ形状の仕様	28
5.5.	結言	28
5.6.	参 考 文 献	29
	おわりに	32

はじめに

本概要報告書は、(社)日本船舶海洋工学会が平成19年4月～平成21年5月の期間に設置した「塗装品質と船殻工作品質の関係に関するプロジェクト研究委員会」(以下で、本委員会とよぶ)の活動成果を発表した、日本船舶海洋工学会平成21年度春季講演会OSの講演内容を取りまとめたものである。

2006年12月にIMO/PSCが制定され、高いバラストタンク塗装品質が義務付けられるなど、塗装品質の高度化を求める圧力が日増しに高まっている。これに伴い、船殻の工作品質に対し、塗装品質の観点からJSQS等の従来規則・標準より厳しい要求がなされる場合が急増している。

この事態に対処するため、中立的・客観的立場から、船殻工作品質と塗膜性能の関係を調査して、高い塗装品質を確保できる鋼船工作精度標準・施工指針を新たに定め、船主側との交渉において造船所側の主張を裏付ける技術情報として提示できるよう準備する必要が生じた。

本委員会は、日本船舶海洋工学会という中立的な立場から、上記の精度標準・施工指針を定めるための客観的・学術的な技術的検討を行うことを目的に設置された。本委員会の主旨に対しては(社)日本造船工業会殿からも賛同いただき、学会・業界間で緊密な連携をとって研究を遂行した。

本委員会の活動の結果、IMO/PSPC適用船の建造で問題になると予想される、エッジ形状のPSPC適合度を客観的に判定する手法が確立できた。本手法は、今後開発が予想される代替エッジ処理装置で作成される擬似2R形状の性能評価に応用されることが期待される。また、(財)日本船舶技術研究協会における「IMO塗装性能基準に対応した塗装前鋼材表面処理基準」写真集の編纂にあたって、(社)日本船舶海洋工学会の立場から編纂作業に参加した。今後は、付着ヒューム除去、火の粉焼損補修など、エッジ処理以外の2次表面処理のPSPC適合度を客観的に判定する手法の開発が望まれ、これらを検討は(財)日本船舶技術研究協会における調査研究で実施される予定である。

幹事会名簿(順不同、敬称略)

委員長	大沢直樹	大阪大学
幹事長	安原 弘 [雨宮俊幸]	住友重機械マリンエンジニアリング(株)
幹事	長野雅治	三菱重工業(株)
幹事	楠山政一 [八尾康正]	(株)川崎造船
幹事	高田篤志	(独)海上技術安全研究所
幹事	三溝敬史	住友重機械マリンエンジニアリング(株)
幹事	矢嶋宏行	(株)アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
幹事	武田清隆	ユニバーサル造船(株)
幹事	佐々木政實	三井造船(株)
幹事	佐々木高幸	(株)アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
幹事	宇宿行史 [松井敏友]	(財)日本海事協会
幹事	富澤 茂	(社)日本中小型造船工業会
事務局	泉 耕広 [向井 亨]	函館どつく(株)

(注)[]内は前任者を示す。

WG1 名簿（順不同，敬称略）

WG 長	長野雅治	三菱重工業（株）
幹事	楠山政一 [八尾康正]	(株) 川崎造船
幹事	高田篤志	海上技術安全研究所
委員	林 隆之	(株) 川崎造船
委員	吉田和正	内海造船（株）
委員	本屋裕之	尾道造船（株）
委員	富上 毅	(株) 大島造船所
委員	原田好朋	(株) 名村造船所
委員	櫻井哲治	ツネイシホールディングス（株）
委員	神田俊介	今治造船（株）
委員	岡 繁美	幸陽船渠（株）
委員	長山和宏	(株) 新来島どつく
オブザーバ	大沢直樹	大阪大学

(注)[]内は前任者を示す。

WG2 名簿（順不同，敬称略）

WG 長	安原弘 [雨宮俊幸]	住友重機械マリンエンジニアリング（株）
幹事	三溝敬史	住友重機械マリンエンジニアリング（株）
幹事	矢嶋宏行	(株) アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
幹事	武田清隆	ユニバーサル造船（株）
幹事	佐々木政實	三井造船（株）
幹事	富澤 茂	日本中小型造船工業会
委員	小山清文	ユニバーサル造船（株）
委員	泉 耕広 [向井 亨]	函館どつく（株）
委員	下村研二	佐世保重工業(株)
委員	服部 潔	(株) 豊橋造船
委員	蛭田雅人	(株) サノヤス・ヒシノ明昌
委員	新納栄二	(株) 新来島どつく
オブザーバ	佐々木高幸	(株) アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
オブザーバ	宇宿行史 [松井敏友]	(財) 日本海事協会
オブザーバ	大沢直樹	大阪大学

(注)[]内は前任者を示す。

WG 3 名簿（順不同，敬称略）

WG 長	武田清隆	ユニバーサル造船（株）
幹事	佐々木政實	三井造船（株）
委員	向井 亨	函館どつく（株）
委員	下村研二	佐世保重工業(株)
委員	西本直樹	（株）アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
委員	三溝敬史	住友重機械マリンエンジニアリング（株）
委員	塩崎吉純	三井造船（株）
委員	小山清文	ユニバーサル造船（株）
オブザーバ	松井敏友	日本海事協会
オブザーバ	佐々木高幸	（株）アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
オブザーバ	大沢直樹	大阪大学

WG 4 名簿（順不同，敬称略）

WG 長	大沢直樹	大阪大学
幹事	佐々木高幸	（株）アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
幹事	高田篤志	（独）海上技術安全研究所
委員	金子仁	東海大学
委員	塗谷紘宣	日本大学
委員	戸澤秀	（独）海上技術安全研究所
委員	山上和政	（株）アイ・エイチ・アイアムテック
委員	畑田成久	ツネイシホールディングス（株）
委員	山下賢晃	（株）川崎造船
委員	相川久雄	中国塗料（株）
委員	立岡正吉	日本ペイントマリン（株）

1. 塗膜性能と船殻工作品質の係に係る諸問題

1.1. 緒言

近年、塗装品質の高度化を求める圧力が日増しに高まっている。これに伴い、船殻の工作品質に対し、塗装品質の観点から JSQS 等の従来規則・標準より厳しい要求がなされる場合が急増してゐる。船舶海洋工学会に設置された「塗装品質と船殻工作品質の係に関するプロジェクト研究委員会」(以下本委員会と称す)は、高い塗装品質の確保につながる船体工作法の改善に必要な技術的課題を抽出する目的で、全国の造船所で問題点の实地調査を行った。本講では、この調査結果を紹介するとともに、解決を要する技術課題について論ずる。また、IMO/PSPC の船殻工作関連要求内容についても、その内容を調査し具体的な判断基準を示す等が必要と考えられる技術課題についても論ずる。

1.2. IMO/PSPC 船殻工作関連要求

2006 年 12 月に「すべてのタイプの船舶の専用海水バラストタンク及びばら積貨物船の二重船側部に対する塗装性能基準」(Performance Standard for Protective Coatings for dedicated seawater ballast tanks on all new ships and double-side skin spaces of bulk carriers; 一般的にこの基準を PSPC と呼び、以下 PSPC と称す)が、IMO 決議 MSC.216 (82) として採択された。IMO 決議 MSC.215 (82) に技術要件が具体的に示されている。PSPC 要求のなかから船殻関連の下地処理に関する基準を抜粋して表 1-1 に示す。

PSPC にて要求される船殻関連下地処理については、要求があるがその具体的な内容が明確に示されていない項目がある。

表 1-1 : PSPC Requirement for Surface Preparation

一次表面処理 ^{*1*2} : プラスト処理及び粗度 Sa 2 1/2 : 30-75 μ m ^{*1} ISO 8501-1 (1988/Suppl: 1994. Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness) ^{*2} ISO 8503-1/2 (1988. Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Surface roughness characteristics of blast - cleaned steel substrates)
二次表面処理 ^{*3} : 鋼材状態 鋼材表面は、選択した塗装が、要求される公称乾燥膜厚となるよう均一な分布が得られ、かつ、十分な付着力を確保できるようにするため、シャープエッジの除去、溶接ビートのグラインダ処理並びに溶接スパッタ及びその他の表面の汚れの除去を行うこと。塗装前に、最低 2mm ラウンドエッジ又は 3 パスグラインディング、若しくは同等以上の方法でエッジ処理すること。 ^{*3} ISO 8501-3 (2001 (grade P2). Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness)

1.3. 技術的課題抽出

本委員会では、PSPC 要求に対する検討とは別に、現状での塗膜性能と船殻工作品質の係について、全国の 20 造船所を対象にアンケート調査を行い、塗装担当者から見た一般的な要望を調査した。その結果を、表 1-2 に示す。アンケートにより集計された要望事項 223 項目を分類した結果、船殻に対する要望、塗装検査に対する要望、設計仕様に対する要望、道具など作業環境に対する要望の順で要望が多

く示され、船殻に対する要望、塗装検査に対する要望の合計で全体の過半数を超える要望となっている。下地処理に関しては、エッジ処理、溶接ビートのグラインダ処理、溶接スパッタ及びその他の表面の汚れの除去を行うこと等の要望が示された。塗装検査に関しては、感覚的な判断から定量的な判断への変更、過剰品質の回避、検査基準の統一等の要望が示された。また、設計仕様への要望では、プラストあるいは塗装のしやすい船体構造（ブラケット、スカラップ、ドレンホール形状等を含む）を望む内容が多く示された。作業環境についての要望では、フリーエッジ処理ツール、工具の軽量化、ブロック継手用小型軽量プラスト装置等の開発への期待が示された。

表 1-2 : Requests to Improve Coating Performance

要望内容	要望件数
船殻（下地処理等）	60
塗装検査	53
設計仕様	41
道具等作業環境	29
その他	40
合計	223

1.4. 塗膜性能と船殻工作品質の係りに係る諸問題

PSPC にて要求される船殻関連下地処理に関連した具体的な内容が不明確な事項及び造船所アンケートに示された塗装からみた船殻下地処理への一般的要望事項を検討した結果、以下の項目が塗装性能と船殻工作品質の係りに係る解決すべき技術課題として取り上げられた。

1.4.1. エッジ処理

(1) 形鋼

PSPC では、表 1-1 に示すようにエッジ処理に関して「塗装前に、最低 2mm ラウンドエッジ又は 3 パスグラインディング、若しくは同等以上の方法でエッジ処理すること。」との規定がある。ミルメーカーで製造される形鋼のエッジ形状が「最低 2mm ラウンドエッジ」という規定を満足していない場合には、形鋼製造後にエッジ部にグラインダー処理を行わなければならない。このため、現在製造されている形鋼のエッジ形状が PSPC 要求を満足した形状となっていることを確認することが検討課題としてあげられる。PSPC 要求を満足できない場合には、ミルメーカーに対する要望としてエッジ仕様についての要望を提示することも考慮する必要がある。

(2) 3 パスグラインディング

3 パスグラインディングに関しては、同等以上の方法でエッジ処理することが可能となっているが、3 パスグラインディング同等以上の方法が具体的にどのような方法となるかについては具体的な判定基準は示されておらず、同等性を確認するための基準等を考慮する必要がある。

(3) 鋼材切断加工

造船所で切断加工を行なう鋼材の端部等についても、PSPC 要求から切断面のグラインダー処理が必要であり、切断時のエッジ形状が PSPC 規則要求を満足できているような切断装置の開発というニーズもあったが、日本船舶技術研究協会での研究開発項目として取り上げられていたことから、本委員会での検討課題としては取り上げなかった。

1.4.2. ブラスト処理

ブラスト処理には、ISO 8501-1 (1988/Suppl: 1994. Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness)及び ISO 8503-1/2 (1988. Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Surface roughness characteristics of blast - cleaned steel substrates)が参照規格として示されているが、ブラスト処理のグレード Sa 2 1/2 は目視判定となるため、Sa 2 1/2 のブラスト処理グレードを明確に示すことが検討課題として取り上げられた。本課題については、日本船舶技術研究協会での研究開発項目としても取り上げられたことから、本委員会との合同での検討課題として実施し、下地処理写真集の作成を行った。なお、写真集は日本船舶技術研究協会より、“Standard for the Preparation of Steel Substrates for PSPC-2008(SPSS for PSPC)”として2008年6月に刊行された。

1.4.3. 溶接ビードのグラインダ処理

溶接ビードのグラインダ処理には、ISO 8501-3 (2001 (grade P2). Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness)が参照規格として示されているが、強度的に問題ない溶接形状や溶接欠陥・形状不良に対して、塗装品質の観点から JSQS 等の従来規則・標準より厳しい要求がなされる可能性がある事例（余盛高さ、軽微なアンダーカット、小傷など）がないか調査を行った。溶接ビード形状と塗装品質との関係についてニーズがある事は事実であるが、PSPC での塗装要求として溶接ビード形状について JSQS 等の従来規則・標準を上回る要求項目は見当たらないことから、具体的な項目についての検討は行わなかった。

1.5. 結言

今後、専用海水バラストタンクに PSPC を適用した船舶の建造を進めていく上で、塗装品質向上のために必要な船殻工作品質についての課題をまとめた。

1.6. 参考文献

- 1) ISO 8501-1 (1988/Suppl: 1994. Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness)
- 2) ISO 8503-1/2 (1988. Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Surface roughness characteristics of blast - cleaned steel substrates)
- 3) ISO 8501-3 (2001 (grade P2). Preparation of steel substrate before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness)
- 4) IACS Recommendation No.47 Shipbuilding and Repair Quality Standard (Rev.3, Nov.2006)
- 5) JSQS Japan Shipbuilding Quality Standard (Hull Part), The Society of Naval Architects of Japan Research Committee on Shipbuilding, 2004
- 6) Standard for the Preparation of Steel Substrates for PSPC-2008(SPSS for PSPC), 日本船舶技術研究協会, 2008

2. 実エッジ形状に適応したエッジ膜厚保持率計測法の開発

2.1. 緒言

2008年7月に発効したバラストタンク塗装性能基準（以下、PSPC）においては、塗装性能を向上させるために鋼材処理等についても細かく規定されている。フリーエッジ部の処理については、円弧形状の2R形状もしくは3パスグライディング、または、それらと同等なものとされている。しかしながら、実際の造船の現場で使用されている鋼材では、R処理されたエッジであっても完全なR形状をしているわけではない。これらの擬似的なR形状をもつものがPSPCに適合しているか、どのような基準をもって3パスもしくは2Rと同等とするのかと言った判定基準も明確に定まっているわけではない。このためエッジの形状が塗装性能に与える影響を評価し、こういった形状が2Rもしくは3パスと同等かどうかを検討する必要がある。

この様な現状をふまえ、エッジの形状の差違が膜厚保持率に与える影響を評価出来るエッジ膜厚保持率（Edge retention rate：ERR）の計測方法を検討した。

2.2. エッジ形状差影響と再現性向上

MIL-REF-23236C法¹⁾などの船用塗料用の規格に規定される既存のERR評価法およびPSPCの規定では、加工した試験片もしくは鋼材自体をブラスト処理した後に、塗装を実施している。塗料そのものの性能を評価するMIL-REF-23236C法のような規格では、より実際の鋼材に近い状態で評価を行うことは、意義が大きいと考えられるが、ブラスト処理を行うと、エッジ部形状の微妙な差違がブラストにより削れてしまい、形状が変化してしまう。今回は、エッジ形状の差違のERRへの影響を評価することを目的としているので、ブラスト処理を行うことによりエッジ形状の差違が変化してしまったのでは、評価の目的を達成できない。このため、加工した試験片エッジ形状を保つため、加工ままのエッジを持つ試験片に塗装を行うこととした。

同様な理由から、ショッププライマーを塗布せず、直接鋼材にメインのエポキシ塗料を塗装することとした。塗装回数については、PSPCでは320 μm の膜厚をエッジ部でも確保するため、鋼材のフリーエッジ部は、2回のストライブコートと2回の塗装することが規定されているが、今回の検討では、エッジ形状の差違による膜厚保持率の差を検討することを目的としているので、320 μm と言う膜厚には囚われずにより差が出やすいよう1コートの塗装とした。

また、塗膜の均一性を確保するため人間の手による塗装ではなく機械による自動塗装を導入した。塗装方法は、図2-1に示すようにエアレススプレー用のスプレーガン装置に固定し、塗装される試験片をコンベアによりスプレーガンの下を一定速度で移動させ塗装を行うこととした。予備試験として、この方法により70 \times 150mmの平板の試験片を塗装したところ試験片内で電磁膜厚計により9点の膜厚を計測した結果、平均膜厚190.2 μm 、標準偏差2.4 μm 、変動係数0.013と非常にばらつきの少ない良好な塗膜が得られた。

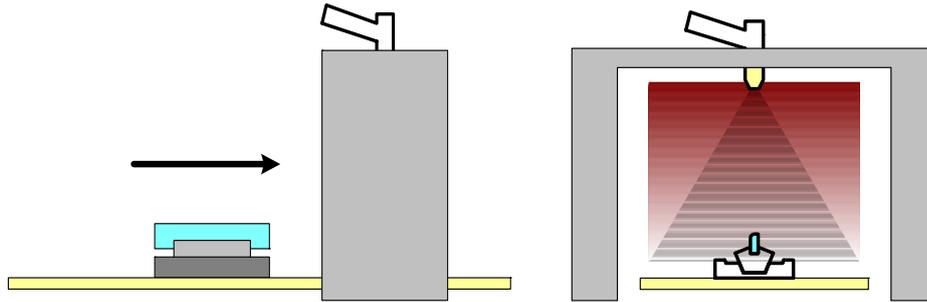


図 2-1 : Automatic painting apparatus

2.3. 対称噴霧法 (M 法)

MIL-REF-23236C 法を参照し、左右対称形状のエッジを持つ試験片を対象とした試験法 (対称噴霧法: 以下, M 法) を開発した。今回開発した試験法は、エッジ形状の差の膜厚保持率に対する影響を評価することを目的としているので、前述したように試験片にはブラスト処理を行わず、塗装手順についても予備試験を行い、よりエッジ形状の差の影響が見やすい手順とした。併せて、効率的に塗装を行えるような治具も新たに開発した。

2.3.1. 試験片および試験治具

試験片および今回新たに開発した治具を、図 2-2 に示す。試験片は、 $20 \times 20\text{mm}$ の菱形断面をしており、頂点のエッジ部に試験対象となるエッジが加工されている。

MIL-REF-23236C 法および今回開発した M 法ともに試験片をエッジ直上方向および両側面に 90° の方向の 3 方向から塗装を行うが、3 つの治具を用いることにより、試験装置に固定されたスプレーガンで、3 方向からの塗装を行う事が可能となる。

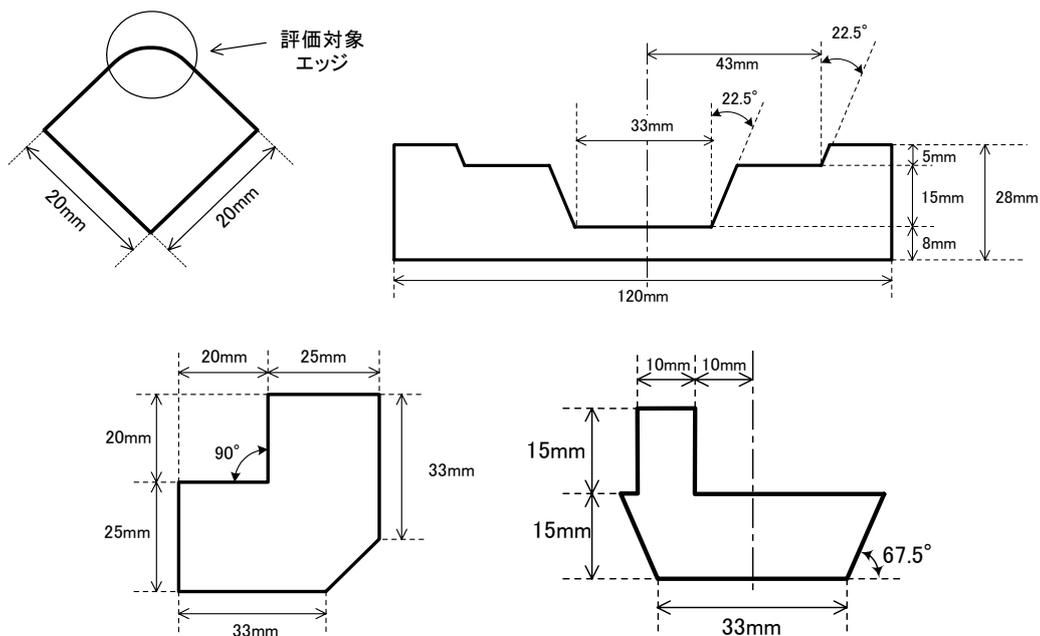


図 2-2 : Test specimen, Specimen's holder (M-Method)

2.3.2. 塗装手順

塗装手順を決めるために、予備試験を行い、ブラスト処理をしていないエッジ部周辺に良好な塗料の付着を得るため、試験片を塗装する際の3方向から塗装順を、図 2-3 にあるように治具を組み合わせ、「エッジ直上方向 側面 側面」の順とした。この際、左右側面の膜厚に若干の差異が生じるが、その差は小さく4～9%程度であった。

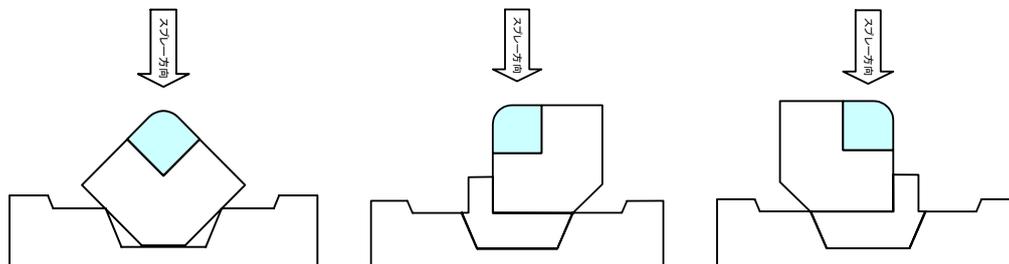


図 2-3 : Paint application (M-method)

2.3.3. エッジ膜厚保持率 (ERR) 算出法

エッジ膜厚保持率 (ERR) を算出するため、以下のように膜厚計測を側面平坦部およびエッジ部で行うこととした。

側面平坦部：電磁膜厚計(ElectroPhysik MiniTest2100)を用いて各平面4点を計測。

エッジ部：試験片より切り出した4～6断面を光学顕微鏡(KEYENCE VH-800)を用いて50倍(一部30倍)に拡大し計測。

エッジ部膜厚保の計測位置(図 2-4 参照)：

円弧形状及び擬似円弧形状等：側面(2点)、側面R端部(2点)、エッジR部中央の5点計測。

3パス形状：側面(2点)、側面エッジ角(2点)、中央部エッジ角(2点)、中央部の7点計測。

エッジ膜厚保持率 (ERR) は、式(1)を用いて計算を行う。

$$\% ERR = \frac{DFT (edge)}{DFT (flat)} \times 100 \quad (1)$$

DFT(edge)：エッジ部膜厚の平均

DFT(flat)：電磁膜厚計で計測された平坦部膜厚の平均

また、光学顕微鏡を用いて5点もしくは7点計測されたエッジ部膜厚のうち、どの位置の膜厚を評価とするのかは、目的とする評価対象形状を考慮にいれ、実際の断面写真を見て決めることとした。

2.4. 現場再現法 (P法)

MIL-PRF-23236C や3章で記述したM法ではエッジ頂点について対称な方向から塗装をしてエッジ膜厚の計測を行うが、エッジ頂点に対して非対称なエッジ形状では、

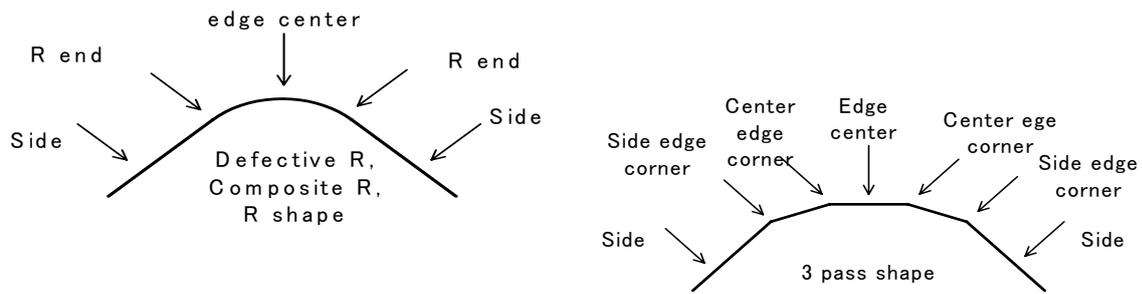


図 2-4 : DFT (edge) measurement point

左右の側面から対称にスプレーしたとしても、左右の両面において計測対象エッジとスプレー噴流との関係が変わってしまいエッジのどこの点を評価対象にするのかによって評価が変わってしまう。そこで、基準となる面を決め、その基準面から一定の角度で塗装を行う手法を検討した。

2.4.1. 試験片および治具

試験片および今回新たに開発した治具を、図 2-5 に示す。試験片は、12×30mm の長方形断面をしており、コバ面の片側のエッジ部に試験対象となるエッジが加工されている。

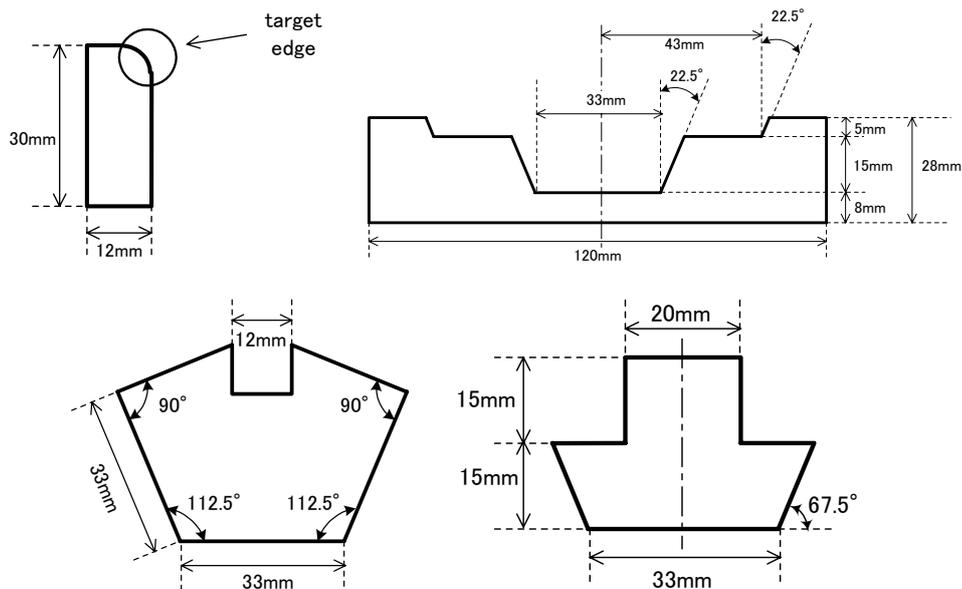


図 2-5 : Test specimen, Specimen's holder (P-Method)

基準面を試験片側面とし、基準面とスプレーのなす角度を現場の意見を参考に、基準面法線から約 20° 方向と決めた。上記治具を使用することにより、装置に固定されたスプレーガンでの塗装が可能となる。

2.4.2. 塗装手順

予備試験を実施し、コバ面、側面の両面になるべく同程度の膜厚が付着するように、図 2-6 に示す塗装順とした。

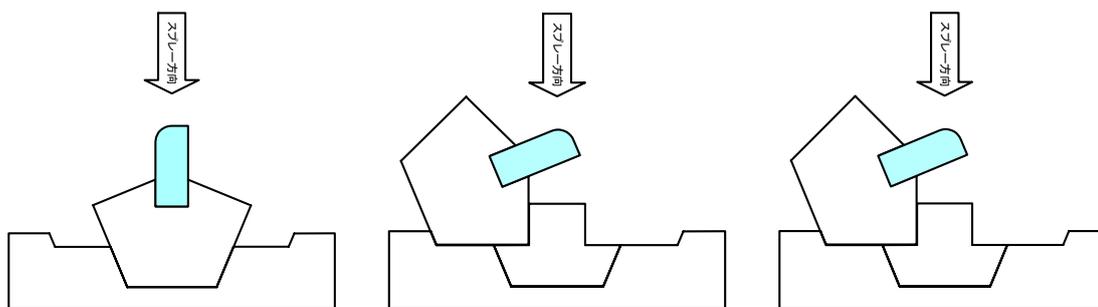


図 2-6 : Paint application (P-method)

上記手順で塗装を行った予備試験では、15本の試験片を塗装したところ、15本の試験片のコバ面の平均膜厚 230.5 μm、側面の平均膜厚が 250.6 μm であった。

2.4.3. エッジ膜厚保持率 (ERR) 算出法

エッジ膜厚保持率 (ERR) を算出するための膜厚計測手法は、M 法と同様に平坦部膜厚は電磁膜厚計を使用して計測し、エッジ部は、切り出した断面を光学顕微鏡で拡大して計測を実施した。エッジ断面での膜厚計測位置も M 法と同様に、円弧形状や擬似円弧形状では、5 点 3 パス形状では、7 点の計測とした。

円弧形状及び擬似円弧形状等：コバ面、コバ面エッジ角または R 端部、エッジ R 部中央、側面エッジ角または R 端部、側面の 5 点計測。

3 パス形状：コバ面、コバ面エッジ角、中央部エッジ角(2 点)、中央部、側面エッジ角、側面の 7 点計測。

エッジ膜厚保持率 (ERR) も、式(1)を用いて計算を行うが、コバ面と側面で基本的に膜厚が同じにならない P 法では、左右両側面膜厚の平均値を平坦部膜厚として用いた M 法と異なり、評価対象に応じて、側面もしくはコバ面のみの膜厚の平均値を用いることとした。例えば、側面の膜厚を用いる場合には、式(2)を用いて評価することとした

$$\% \text{ SideERR} = \frac{DFT(\text{edge})}{DFT(\text{flat})} \times 100 \quad (2)$$

DFT(edge)：エッジ部膜厚の平均

DFT(flat)：電磁膜厚計で計測された側面の平坦部膜厚の平均

また、M 法同様、光学顕微鏡を用いて 5 点もしくは 7 点計測されたエッジ部膜厚のうち、どの位置の膜厚を評価とするのかは、目的とする評価対象形状を考慮にいれ、実際の断面写真を見て決めることとした。

2.5. M 法および P 法の検証

2008 年 1 月および 2009 年 2 月に行った図 2-7 に示すエッジが R 形状 (R=1.0,1.5,2.0mm) および理想 3 パス形状をした試験片での試験結果をもちいて M 法および P 法の検証を行う。

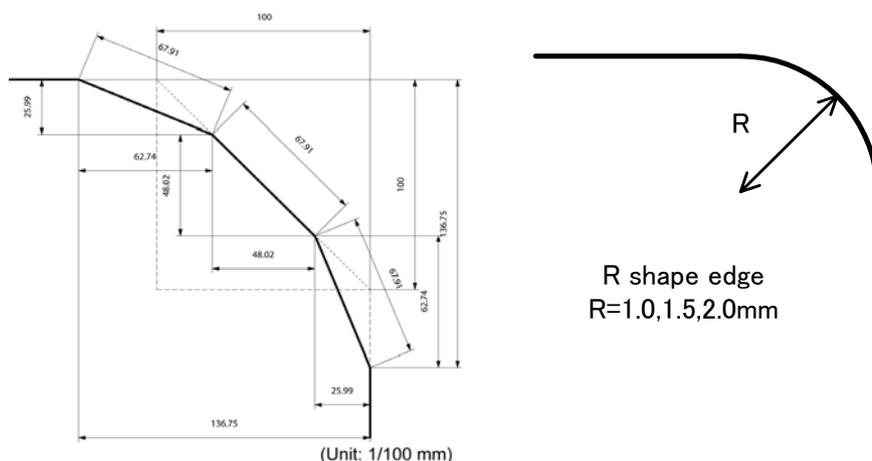


図 2-7 : edge shape (3pass, round shape)

2.5.1. 塗装条件

塗装条件は以下の通り .

供試塗料 : 変性エポキシ塗料 (NOVA200QD 赤さび)

シナ-希釈 : 7% (重量) , 塗料粘度 : 1.7Pa・s

塗装方法 : コンベア式塗装機による自動塗装

コンベア速度 : 40 ~ 50cm/sec,

試験片-スプレーチップ距離 : 37cm

エアレススプレー : 圧力比 30:1,

1次圧 : 0.3 ~ 0.4MPa, 2次圧 : 9 ~ 12MPa

チップ : GRACO #521

塗装環境条件 :

2008年1月 : 気温 7.2 ~ 10 , 相対湿度 42 ~ 61.1%

2009年2月 : 気温 14 ~ 15 , 相対湿度 56 ~ 58%

2.5.2. 試験結果

図 2-8 および図 2-9 に塗装された試験片断面の写真を示す .

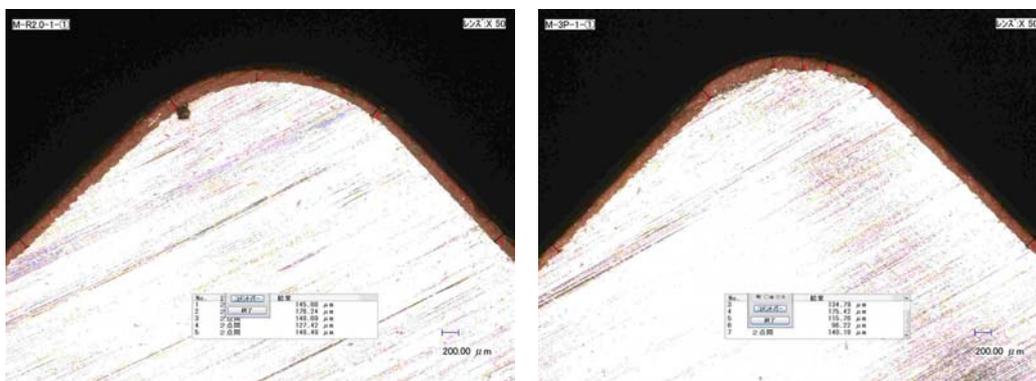


図 2-8 : Example of cross section views of specimens (M-method: Left: R shape(R=2.0mm), Right: 3pass)

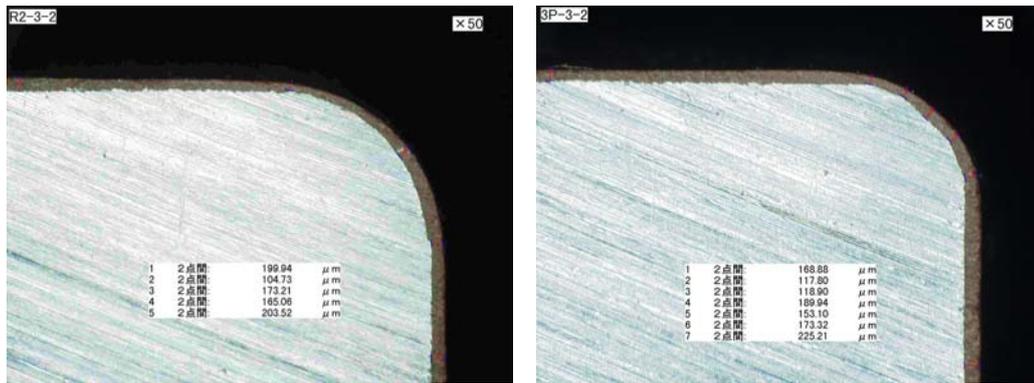


図 2-9 : Example of cross section views of specimens (P-method: Left: R shape(R=2.0mm), Right: 3pass)

図 2-8 より M 法を用いた塗装では,左右に若干の膜厚の差が生じていることが判る .このため,評価を行う際には,エッジの頂点を軸に左右対称な評価点で得られる膜厚の値の平均値を用いて評価を行うこととした .また,図 2-9 より P 法を用いて塗装を行った場合には,エッジ形状内でコバ面方向から側面方向に向かって,徐々に膜厚が変化していることが見て取れる .

評価対象として,R 形状エッジでは R 部頂点,3 パス形状では,2 つある中央エッジ角の平均値を用いた .また,P 法による ERR の算出には,側面の平均膜厚を用いた .図 2-10 に M 法の結果を図 2-11 に P 法の結果を示す .

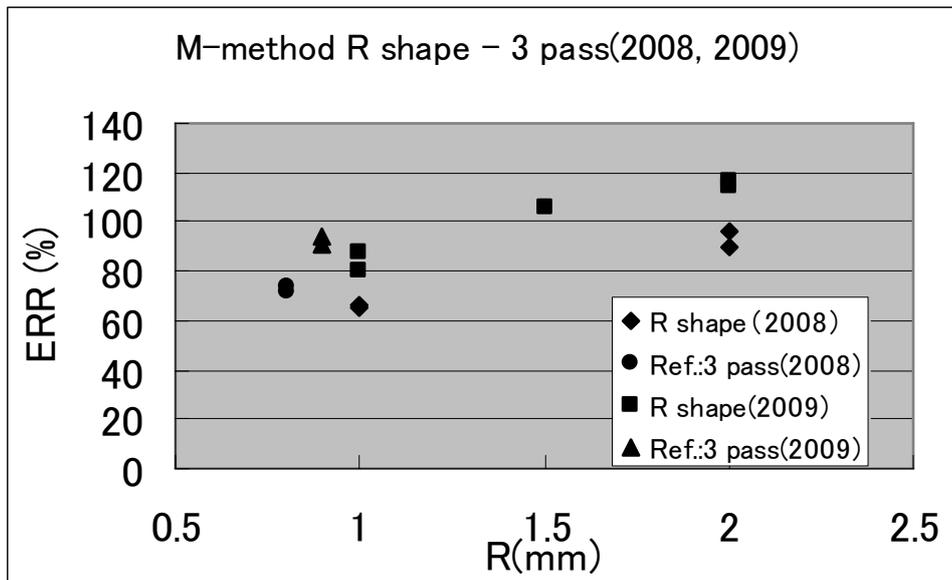


図 2-10 : M-method result

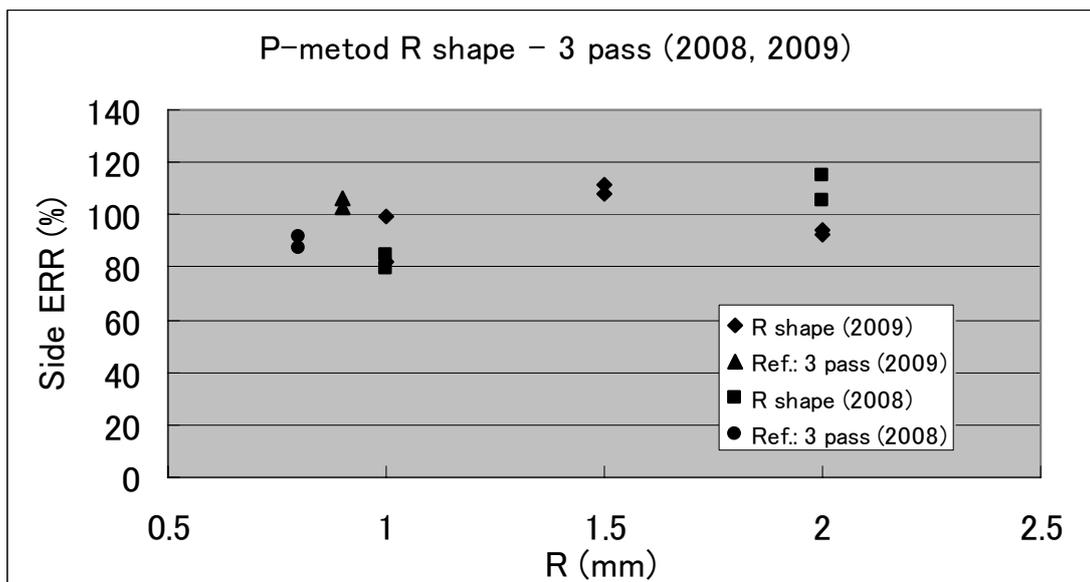


図 2-11 : P-method result

図 2-10 ,図 2-11 とともに半径 R の増加とともに ERR が単調に増加しており,半径 R の変化が ERR に敏感に反映されていることが判る .また,同時に塗装した 2 本の試験片の結果のばらつきも少なく再現性も高いことがわかる .

しかしながら,2008 年の結果と 2009 年の結果とでは,ERR そのものの値は,異なっている .そこで,各年の 2 本ある 3 パスエッジ形状試験片の結果の平均値で各々の結果を割り各形状と 3 パスとの比をとって見る . その結果を図 2-12 , 図 2-13 に示す .

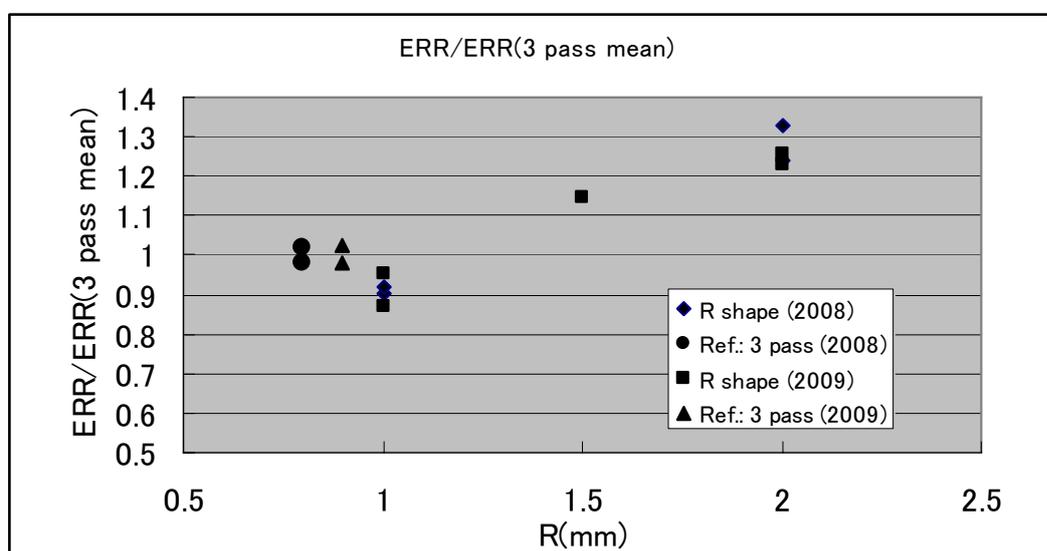


図 2-12 : Ratio of ERR/ERR(3pass mean), M-method

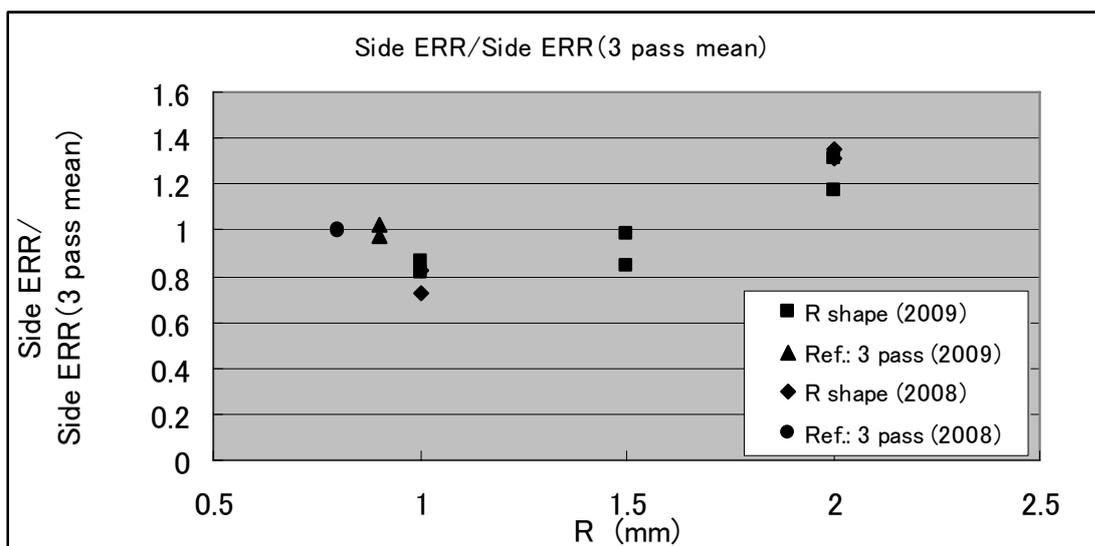


図 2-13 : Ratio of ERR/ERR(3pass mean), P-method

M 法, P 法とも 3 パスとの比の値は,試験時期にかかわらず良い再現性を持っていることがわかる。つまり,ERR の値の大きさそのものは,試験時の環境条件等により,変化するが,両手法とも,各形状間の相対的な差異に関しては,再現性良く評価できていることが判る。

2.5.3. M 法および P 法による評価対象

図 2-8 から見て取れるように左右の側面において若干の膜厚のばらつきが生じる事がある。しかしながら上記の R 形状や 3 パス形状の評価のように,エッジ頂点に対して対称な形状では,左右対称に存在する評価点の平均値を用いて評価を行うことによりばらつきの影響はキャンセルできる。

また,図 2-14 に 2008 年の実験の際に同時に塗装した R 形状,3 パス形状,非対称 1 パス形状の塗装断面の社しいを示す。写真より,R 形状と 3 パス形状の断面では,コバ面から側面に向かって同じような膜厚の変化を示しているが,1 パス形状の断面では,より多くの塗料が側面側に流れて,他の 2 形状の膜厚分布とかなり異なる分布をしている。例えば,評価対象として,側面のエッジ角部の評価を考えるような場合には,3 パスと 1 パス形状では,局所的な形状は非常に似通っているが,かなり異なる結果となることがわかる。エッジ全体の形状としては,その包絡線が R 形状に近い 3 パス形状では,むしろ局面と平面で構成されている R 形状に近い結果になると予想される。

このように,P 法自体は,評価対象点の形状差異が敏感に ERR に反映される手法ではあるが,用いる場合には,エッジ全体の形状の考慮する必要があるといえる。実際に高田ら²⁾は,P 法を用いて,2 R 形状をしたエッジの一部が欠けた R 止まり形状を P 法により評価し,3 パス形状断面の試験片と比較することにより有用な結果を導いている。

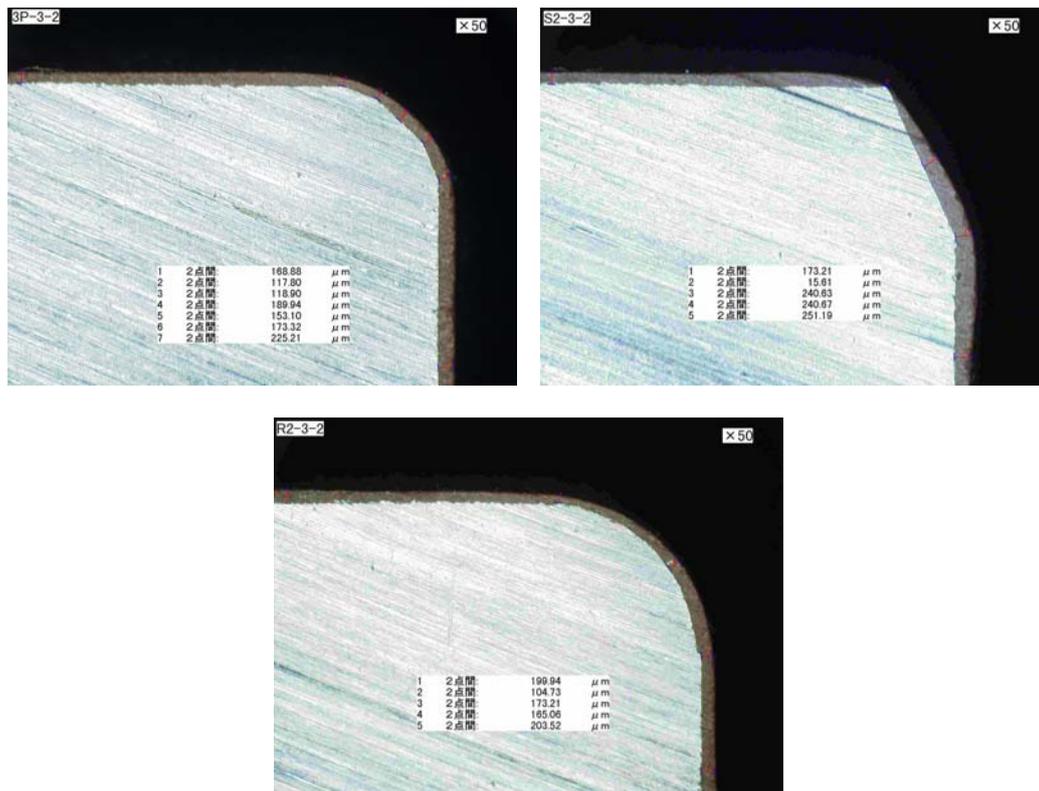


図 2-14 : Example of cross section views of P-method specimens (Left: 3pass, Right: 1pass, down: R shape)

2.6. 結言

エッジの形状が塗装性能に与える影響を評価するために、エッジ形状の差異がエッジ膜厚保持率に反映される評価法を検討した。

その結果、エッジ形状の差異が評価できるエッジ膜厚保持率（ERR）評価法をあらたに開発した。また、新たに開発した評価法に適した治具の開発も行った。

開発された2つの試験法（M法、P法）ともエッジ形状の差異を敏感に反映するとともに高い再現性を持つことが判った。

特に形状差によるERRの相対的な差異については、実験時の条件によらず高い再現性を持つことがわかったので、適切な参照試験片を選定し、評価対象エッジ形状に対して適切な手法（M法もしくはP法）を適用すれば、エッジ形状の差異がERRに与える影響を良く評価できることが判った。

2.7. 参考文献

- 1) MIL-PRF-23236C Standard, "Performance Specification: Coating Systems for Ship Structures", 2003.
- 2) 高田ほか：不完全R形状のエッジ膜厚保持率に及ぼす形状パラメーターの影響，日本船舶海洋工学会，H21年度春季講演会講演集，2009，

3. 不完全 R 形状のエッジ膜厚保持率に及ぼす形状パラメタの影響

3.1. 緒 言

2008 年 7 月に発行したバラストタンク塗装性能基準(PSPC)では、鋼材のフリーエッジの処理に関して、”2R or 3-path grinding equivalence”に処理することが規定されている。R カッターや R 処理されたエッジを持つ型鋼を使用することにより、造船の現場での工数削減が期待できるが、実際に処理された型鋼が完全な R 形状を持っているわけではない。このため、実際の造船現場で現れる擬似 R 形状が、”2R or 3-path grinding equivalence”に該当するか否かの検討が必要となる。

そこで、造船の現場で現れる擬似 R 形状として、R カッターの使用などでかなりの頻度で現れる R 形状の局面部と側面の協会において曲面側の接線が側面に一致しないいわゆる R 止まり形状と R 処理された型鋼において見られるエッジ全体としては、2R 以上の円弧形状をしているが、その円弧上に部分的な大曲率部を有している複合 R 形状に関して、長野ら¹⁾が提案するエッジ膜厚保持率(Edge retention rate :ERR)計測法を用いて、2 つの擬似 R 形状に関して検討を行ったのでその結果について報告する。

3.2. 測定対象形状

3.2.1. R 止まり形状

R 止まり形状を図 3-1 に示す。半径 R の円弧の中心がずれた形状、 $d=0$ のとき R 止まりなし、 d/R が大きいほどエッジ角度が大きくなる。表 3-1 に採用した d/R および Bevel angle の値を示す。

3.2.2. 複合 R 形状

円弧形状中に部分的な大曲率をもつ複合 R 形状を図 3-2 に示す。部分的な大曲率をもつ複合 R 形状は、通常の R 形状より尖った形状をしていることが判る。そこで、複合 R 形状の尖り具合を、以下に定義するパラメーター λ および θ を用いて、 λ で特徴付ける。

λ : 部分的な大曲率部をもつエッジ形状が半径 R の円弧形状から張り出している距離。

θ : 90° の角度を持つシャープエッジ形状のときの λ の値、($\lambda = 2 - 1$) $\times R$)

λ/R : 尖り度 (完全な円弧形状で 0、シャープエッジで 1 となり、値が大きくなるほどより尖った形状を現す。)

図 3-2 は、上記パラメーターを見やすくするため誇張されて描かれている。図 3-3 に実際に試験に用いたエッジ形状の断面と表 3-2 に各エッジ形状とそれを特徴付けるパラメーターを示す。

3.2.3. 参照形状

比較対象として用いた参照エッジ形状を図 3-4 に示す。参照形状としては、機械加工された理想 3pass 形状および円弧形状 (R 形状 : $R=1.0\text{mm}$, 1.5mm , 2.0mm) を用いた。

表 3-1 : Cross section parameter of defective R

shape

d/R	Bevel angle
0.02	168.5°
0.10	154.2°
0.20	143.1°
0.30	134.4°

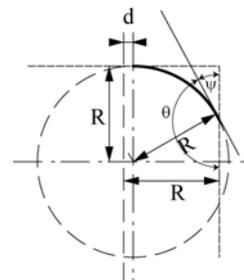


図 3-1 : defective R shape

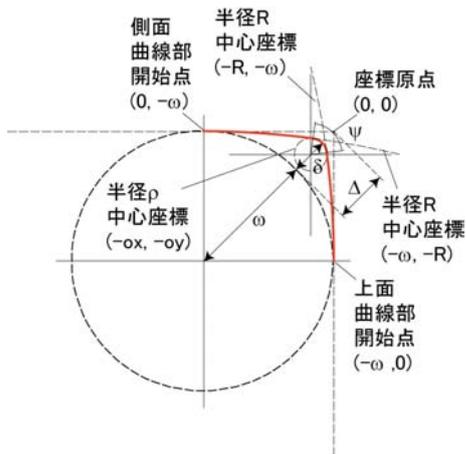


図 3-2 : Featuring parameter of composite R shape

表 3-2 : Edge shape parameter

edge shape	(mm)	R(mm)	(deg.)	(mm)	(mm)	/
1.0-06-30	1.0	6.0	30	4.170	0.366	21.17%
1.0-08-45	1.0	8.0	45	4.212	0.577	33.06%
1.0-12-60	1.0	12.0	60	4.222	0.804	46.00%
1.0-19-60	1.0	19.0	60	6.272	1.316	50.67%
1.5-04-30	1.5	6.0	30	4.353	0.329	18.25%
1.5-06-30	1.5	9.0	30	6.255	0.548	21.17%
1.5-08-45	1.5	12.0	45	6.317	0.865	33.06%
1.5-12-60	1.5	18.0	60	6.333	1.207	46.00%

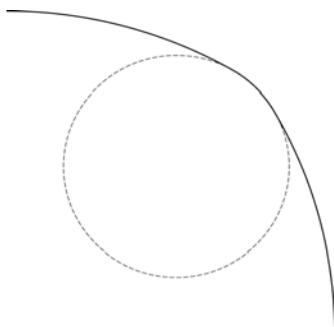


図 3-3 : Composite R shape (test specimen)

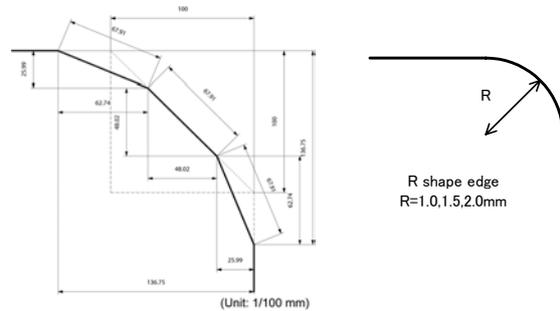


図 3-4 : Reference edge shape (3pass, round edge)

3.3. 試験条件

3.3.1. 塗装条件

ERR を評価する手法として、従来から塗料の性能試験として実施されてきた MIL-REF-23236C²⁾等があるが、R 止まり形状、複合 R 形状、参照形状ともに、エッジの形状差が ERR に与える影響を評価するため、長野ら¹⁾が提案する ERR 測定手法を用いることとし、試験片はプラスト加工せずに機械加工のままとし、ショッププライマーの塗装も行わなかった。R 止まり形状の塗装は 2008 年 1 月に、複合 R 形状の塗装は、2009 年 2 月に実施した。塗装時の条件は、以下の通り。

供試塗料：変性エポキシ塗料（NOVA200QD 赤さび）シナー希釈：7%（重量），塗料粘度：1.7Pa・s

塗装方法：コンベア式塗装機による自動塗装，コンベア速度：40～50cm/sec，

試験片-スプレーチップ距離：37cm

エアレススプレー：圧力比 30:1，

1 次圧：0.3～0.4MPa，2 次圧：9～12MPa

チップ：GRACO #521

塗装環境条件：

R 止まり形状：気温 7.2～10 ， 相対湿度 42～61.1%

複合 R 形状：気温 14～15 ， 相対湿度 56～58%

3.3.2. 塗装手法

図 3-1 および図 3-3 に示されているように R 止まり形状は非対称、複合 R 形状は対称形状であることを

考慮し、塗装は、長野ら¹⁾が提案する手法のうち、R 止まり形状では P 法を用い、複合 R 形状の評価では M 法を用いた。

P 法では、最初に試験片コバ面より塗装を行い、ついで側面より約 20° の一定方向から 2 回塗装を行った。M 法では、エッジ頂点の直上方向から 1 回、左右の両側面に直角方向からそれぞれ 1 度塗装を行った。図 3-5 に P 法における塗装順を、図 3-6 に M 法における塗装順を示す。

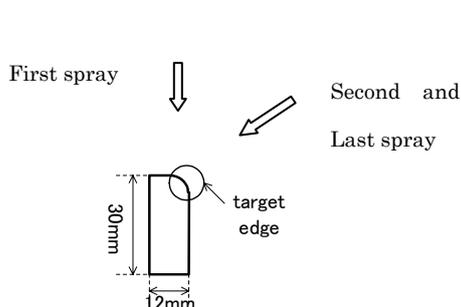


図 3-5 : Paint application (P-method)

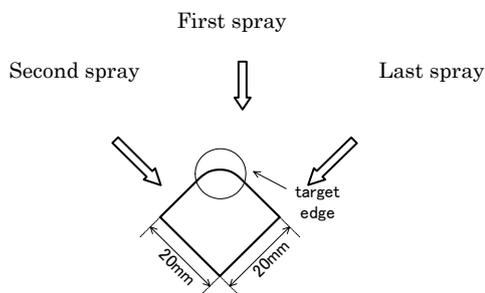


図 3-6 : Paint application (M-method)

3.3.3. 膜厚計測

ERR を算出するため、エッジ部の膜厚および試験片平坦部の膜厚を以下のように計測した。

- ・試験片平坦部膜厚：電磁膜厚計(ElectoroPysik MiniTest2100)を用いて各平面 4 点を計測。
- ・エッジ部膜厚：試験片より切り出した 4 断面を光学顕微鏡(KEYENCE VH-800)を用いて 50 倍（一部複合 R においては、30 倍）に拡大して計測。

また、エッジ部における膜厚計測箇所は、図 3-7 に示す以下の場所の計測を行った。

- ・R 止まり形状、複合 R 形状および円弧 (R) 形状：側面(2 点)、側面 R 端部(2 点)、エッジ R 部中央の 5 点計測。
- ・3 パス形状：側面(2 点)、側面エッジ角(2 点)、中央部エッジ角(2 点)、中央部の 7 点計測。

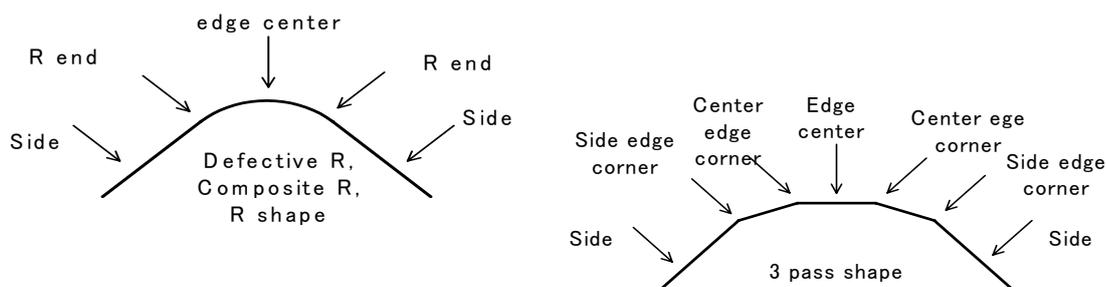


図 3-7 : DFT (edge) measurement point

3.4. 試験結果

3.4.1. 面膜厚（電磁膜厚計による計測）

P 法で塗装された R 止まり試験片および参照試験片の側面およびコバ面の膜厚は、全ての試験片の平均で側面平均 200.5 μm 、コバ面平均 177.6 μm （変動係数：側面 0.021、コバ面 0.021）とほぼ均一な膜厚が得られた。

また、M 法で塗装された複合 R 形状試験片および参照試験片の側面の膜厚は、全ての試験片の平均値で、139.3 μm （変動係数 0.041）でこちらもほぼ均一な膜厚が得られている。

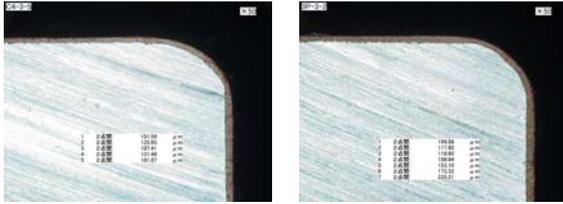


図 3-8 : Example of cross section views of defective R shape specimens (Left: defective R(134.43°), Right: 3pass)

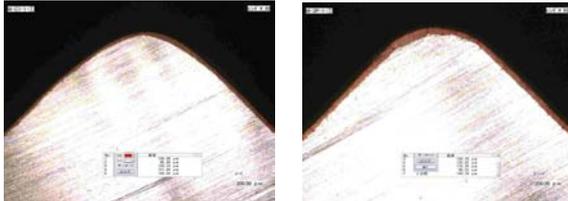


図 3-9 : Example of cross section views of composite R shape specimens (Left: composite R(R=1.0mm), Right: 3pass)

表 3-3 : Side ERR of defective R shape edge

Edge shape	DFT	DFT	ERR
Bevel angle θ (°)	side (μ m)	edge (μ m)	(%)
168.52	203.5	210.5	103.5
	201.9	199.7	98.9
154.16	203.1	177.5	87.4
	202.5	181.1	89.4
143.13	205.4	192.2	93.6
	193.5	138.0	71.3
134.43	192.7	121.7	63.2
	201.5	125.7	62.4
3pass (157.5)	199.1	160.5	80.6
	202.2	154.4	76.4
R=1.0mm	199.4	114.5	57.4
	199.1	128.8	64.7
R=2.0mm	197.7	157.3	79.6
	196.4	165.9	84.5

表 3-4 : Center ERR of Composite R shape edge

Edge shape		DFT	DFT	ERR
ρ	δ / Δ (%)	side (μ m)	edge (μ m)	(%)
$\rho=1.0$ mm	21.7	140.2	133.4	95.2
		138.5	127.1	91.8
$\rho=1.0$ mm	33.1	144.6	138.3	95.6
		134.1	109.6	81.8
$\rho=1.0$ mm	46.0	146.4	124.1	84.7
		139.3	104.9	75.4
$\rho=1.0$ mm	50.7	143.7	127.2	88.5
		135.6	116.2	85.7
$\rho=1.5$ mm	18.3	135.1	160.5	118.9
		134.8	154.4	114.6
$\rho=1.5$ mm	21.2	134.2	147.8	110.2
		133.3	151.0	113.3
$\rho=1.5$ mm	33.1	137.4	139.9	101.8
		138.1	144.6	104.8
$\rho=1.5$ mm	46.0	141.9	147.8	104.2
		139.6	133.5	95.7
3pass		143.0	127.8	89.4
		135.1	129.4	95.8
R=1.0mm		142.3	114.5	80.5
		146.5	128.8	87.9
R=1.5mm		141.5	149.7	105.8
		—	—	—
R=2.0mm		138.2	157.3	113.9
		142.5	165.9	116.5

3.4.2. エッジ膜厚保持率 (ERR) 計算

エッジ部膜厚の計測に用いたエッジ部断面の写真を図 3-8 (R 止まり形状断面 : P 法) および図 3-9 (複合 R 形状断面 : M 法) に示す。

長野ら¹⁾の検討の結果をもとに、エッジ膜厚保持率(ERR)を以下の式(1)で定義し ERR の評価を行った。

$$\% ERR = \frac{DFT (edge)}{DFT (flat)} \times 100 \quad (1)$$

DFT(edge) : エッジ部膜厚の平均

DFT(flat) : 電磁膜厚計で計測された平坦部膜厚の平均

エッジ部膜厚は,R 止まり形状の評価では,R 止まり形状の R 止まり部,3 パス形状では,3 パスの側面側の側面エッジ部を使用した(側面 ERR)。複合 R 形状の評価では,複合 R 形状ではエッジ中央部膜厚を,3 パス形状では,2 つあるエッジ中央部膜厚の平均値を評価に用いた(中央 ERR)。

ERR を算出した結果を表 3-3 および表 3-4 に示す。

3.5. R 止まり Bevel angle と ERR

R 止まり形状と 3 パス形状および R 形状について P 法による R 止まり部および側面エッジ部の Bevel angle と側面 ERR の関係を図 3-10 に示す。

図 3-10 より,3 パスの ERR は,Bevel angle がほぼ等しい R 止まり形状の ERR より僅かに小さい。また,2R 形状は,R 止まりシリーズの延長上にあり,最良の ERR を示す。1R 形状は,3 パス形状より ERR が小さくなる。

以上の結果から,曲率半径 2mm の R 止まり形状では,R 止まり部の Bevel angle が 150° より大きいと 1R 形状より大きく,理想 3 パス形状とほぼ等しい ERR が得られると推定できる。

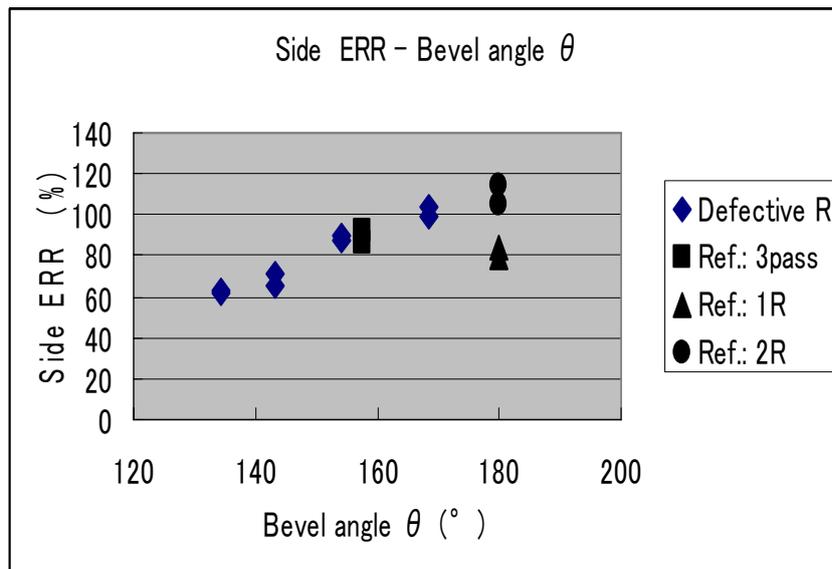


図 3-10 : Side ERR - Bevel angel (Defective R shape)

3.6. 最小曲率半径 と ERR

複合 R 形状と 3 パス形状および R 形状試験片の M 法によるエッジ中央部の ERR と尖り度との関係を図 3-11 に示す。

図 3-11 より,見かけ上の曲率半径が R=2mm 以上ある複合 R 形状では,部分的な大曲率部の最小曲率半径が =1.5mm のエッジは,エッジの尖り方の形状の如何にかかわらず,3 パスの ERR より大きな ERR を示す。=1.0mm のシリーズでは,尖り方の割合により 3 パスの ERR より良い結果だったり悪い結果だったりする。R 形状では,1R<3 パス<1.5R<2R の関係があることがわかる。

以上の結果より,見かけ上の曲率半径が R=2mm 以上ある複合 R 形状では,部分的な大曲率部の最小曲率半

径 =1.5mm 以上ある場合には,理想 3 パスより良い ERR が得られると推定できる .

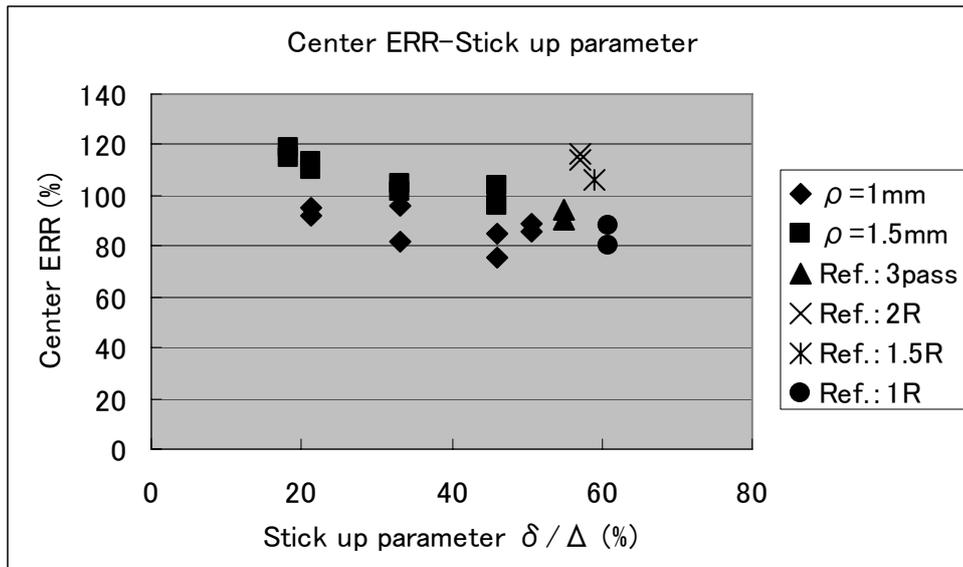


図 3-11 : Center ERR - Stick up parameter (Composite R shape)

3.7. 結 言

R 止まり形状や複合 R 形状といった実際の造船の現場で見られる擬似的 R 形状について,長野ら¹⁾の提案しているエッジ膜厚保持率 (ERR) 計測法を用いて,IMO/PSPC で求められているエッジ処理グレード”2R or 3-path grinding equivalence”との適合性を評価した . その結果,以下のことがわかった。

- ・長野らの提案している ERR 計測法は,R 止まり形状および複合 R 形状の評価において,エッジ形状の差異が敏感に ERR に反映される手法である .
- ・曲率半径 2mm の R 止まり形状では,側面 R 止まり部の Bevel angle が 150° より大きいと理想 3 パスと同等かそれ以上の性能が期待できる .
- ・見かけ上の曲率半径が 2mm 以上ある複合 R 形状では,部分的な大曲率部の最小曲率半径が 1.5mm 以上であれば,理想 3 パスと同等かそれ以上の性能が期待できる .

3.8. 参 考 文 献

- 1) 長野ほか : 実エッジ形状に適應したエッジ膜厚保持率計測法の開発, 日本船舶海洋工学会, H21 年度春季講演会講演集, 2009,
- 2) MIL-PRF-23236C Standard, "Performance Specification: Coating Systems for Ship Structures", 2003.

4. フリーエッジ形状とエッジ膜厚保持率の関係の数値解析

4.1. 緒言

近年、船殻の塗装品質の高品質化の要求が高まっている。2006年12月に採択されたIMO/PSPCには形鋼のエッジ処理に関する規程があり、現在、造船所で使用されている形鋼がこのIMO/PSPCの基準を満足した塗装膜厚を有しているかを確認する必要がある。そのためには、市販フリーエッジ形状とエッジ部の塗装膜厚の関係を調査する必要がある。本論では、現在流通している形鋼のフリーエッジ形状部に多く見られる部分的に大曲率を有する円弧状フリーエッジのエッジ膜厚保持率(ERR: Edge Retention Ratio)を数値解析により求め、エッジ部形状とERRの関係の調査を試みた。

4.2. 数値計算

本論では異なる曲率半径をもつ円弧状の不浸透面上の塗装膜の流れを考える(図4-1)。塗膜はニュートン流体とし、膜厚は薄く、膜の運動は遅く、そして塗膜の自由表面は不浸透面とほぼ平行とみなせると仮定する。不浸透面に沿った座標系 $s-z$ を考える。この時、膜の厚み $h(s, t)$ は以下の式で表せる(詳細は参考文献 1), 2), 3)を参照)。

$$\text{数式 4-1: } h_t = -\frac{\sigma}{3\mu} \left[h^3 (h_{sss} + \kappa_s) \right]_s$$

ここで、 t は時間、 σ は液体の表面張力、 μ は粘性係数、 κ_s は不浸透面の曲率で s の関数 (s) となる。数値計算は有限差分法により実施する。空間方向の離散化には中心差分を用い、時間方向にはクランクニコールソン法を用いる。ただし非線形項 h^3 はいつも旧時間ステップの値で評価する。そして、式(1)を初期膜厚一定(式(2))、膜両端の境界を対象条件(式(3))のもとで解く。

$$\text{数式 4-2: } h(s, 0) = h_0$$

$$\text{数式 4-3: } h_s(0, t) = h_{sss}(0, t) = h_s(L, t) = h_{sss}(L, t) = 0$$

式(1)からわかるように、本論の計算は流体の蒸散や表面張力変化の影響は含まれていない。

4.3. 計算条件

現在市販されている形鋼のエッジ形状のすべてが、完全にIMO/PSPCの基準を満足したものではなく、その一部はフリーエッジ部に部分的に大曲率を有する。本論ではこのような複合R仕様形鋼を想定し、数式4-1の κ_s をある位置 s で変えることにより、市販Rエッジ形状を表現した。計算は不浸透面のエッジ部において曲率変化がない完全R形状 $R=0.20\text{ cm}, 0.15\text{ cm}$ 、そして 0.10 cm (R は曲率半径)の3種類とエッジ部の一部に大曲率部をもつ複合R形状 $[R1=0.51\text{ cm}, R2=0.02\text{ cm}]$ 、 $[R1=0.32\text{ cm}, R2=0.01\text{ cm}]$ の2種類($R1$ は全体曲率半径、 $R2$ は局部曲率半径)の計5種類を実施した。図4-2に計算に用いたフリーエッジ部の形状の概略図を示す。実際のR処理された形鋼は図4-2に示すような形状パラメータで表現できることが調査されている。

材料特性は実際の塗膜のものではなく、本計算では $\sigma=30\text{ dynes/cm}$ 、 $\mu=1\text{ pose}$ とした。従って本計算結果から定量的な膜厚の評価はできない。本論ではエッジ形状の変化によるエッジ部の塗装膜厚の影響の定性的な議論を行う。数値計算に用いた空間格子は等分布とした。計算時間は $t=1.0\text{ s}$ とした。フリーエッジ形状はエッジの頂点に対して線対称となるため、計算領域は図4-2に示す領域の半分(不浸透面の平行部からエッジ中心まで)とした。空間格子間隔は $\Delta s=0.002\text{ cm}$ 、時間間隔は $\Delta t=0.00001\text{ s}$ 、初期膜厚は $h_0=0.02\text{ cm}$ とした。ただし、複合R形状のうち $[R1=0.317\text{ cm}, R2=0.01\text{ cm}]$ の計算のみ不等間隔格子を用いた。最小格子間隔は $\Delta s_{\min}=0.0001\text{ cm}$ とし、時間間隔は $\Delta t=0.0000001\text{ s}$ とした。

4.4. 結果と考察

図 4-3 に計算結果を示す。縦軸は塗装膜厚の無次元値(h/h_0)、横軸は s 座標の無次元値(s/L) を表す。 L は計算の不浸透面の長さで(不浸透面の平行部からエッジ中心までの距離)、図 4-3 の $s/L=1$ はエッジ中心、 $s/L=0$ は円弧状エッジと形鋼平行部との接点から平行部(側面側へ)0.02cm の位置となる(図 4-2 参照)。塗装膜厚がエッジ遠方の平行部で $h = h_0$ になると考えると、図 4-3 の縦軸の無次元値 h/h_0 は各 s 座標での膜厚保持率(ERR) を示しているといえる。従って、本論でのエッジ膜厚保持率は $s/L=1$ での図 4-3 の縦軸の値とする。図 4-3 の $R(\cdot)$ は完全 R エッジの結果である。 (\cdot) 内の数値はエッジ部の曲率半径を示す。 $R1(\cdot)$ - $R2(\cdot)$ は複合 R エッジの結果である。 (\cdot) 内の数値はエッジ部の全体曲率半径と局部曲率半径を示す(図 4-2 参照)。

完全 R エッジのエッジ膜厚保持率(ERR) は、曲率半径が $R=0.20\text{cm}$ の時 98%、 $R=0.15\text{cm}$ の時 93%、そして、 $R=0.10\text{cm}$ の時 87%となる。曲率半径が小さくなるとエッジ膜厚保持率は低下する。これは実測値と同様の傾向を示している。しかしながら、完全 R エッジのエッジ膜厚保持率はいずれも 85%以上となり、高い膜厚保持率性能をもつ。特に $R=0.20\text{cm}$ 完全 R エッジの塗膜保持率に至っては、エッジの形状影響が非常に小さく、保持率もほぼ一定の値(ほぼ 100%)を示す。

一方、複合 R エッジのエッジ膜厚保持率は、 $[R1=0.51$ - $R2=0.02]$ の時 72%、 $[R1=0.32$ - $R2=0.0]$ の時 91%となる。 $[R1=0.51$ - $R2=0.02]$ の場合、図 4-2 の図で示すように、エッジ中央部においてエッジ領域全体(計算領域)に対する局部曲率部($R2$ の円弧の長さ)が大きく、塗装膜厚はこの局部曲率部の影響を受けたと推測でき、その結果、膜厚保持率は非常に低くなる。 $[R1=0.32$, $R2=0.01]$ の場合、局部曲率部($R2$ の円弧の部分)が非常に小さく膜厚に対する局部曲率部の影響が小さく、90%以上の高い膜厚保持率を持つ。以上の結果から、複合 R エッジのエッジ膜厚保持率は局部エッジ半径の大きさだけでなく、局部エッジの張り出し度合いなども影響すると考えられる。

4.5. 結言

数値計算により部分的に大曲率を有する円弧状フリーエッジのエッジ膜厚保持率(ERR) を求めた。そして、エッジ形状とエッジ膜厚保持率の関係について考察した。本論により得られた知見は以下となる。

(1) 完全 R エッジのエッジ膜厚保持率は高い膜厚保持率性能をもち、曲率半径が大きくなると膜厚保持率は高くなる。

(2) 複合フリーエッジのエッジ膜厚保持率は曲率半径の大きさにより大きく異なり、エッジ形状とエッジ膜厚の関係は局部曲率半径の大小だけでなく、その他のエッジ形状パラメタを考慮する必要がある。

(3) 数値計算により複合フリーエッジのエッジ形状と膜厚保持率の関係を明らかにするには、局部曲率半径だけでなくその他の形状パラメタを変えた計算が必要である。

4.6. 参考文献

- 1) L.W.SCHWARTZ and D.E.WEIDNER: Modeling of coating flows on curved surface, Journal of Engineering Mathematics, 29, 1995, pp.91-103
- 2) J.A.Moriarty, L.W.Schwartz and E.O.Tuck: Unsteady spreading of thin liquid films with small surface tension, Phys.Fluids, A 3 (5), 1991, pp.737-742
- 3) D.E.Weidner, L.W.Schwartz and R.R.Eley: Role of Surface Tension Gradients in Correcting Coating Defects in Corners, Journal of Colloid and Interface Science, 179, 1996, pp.66-75

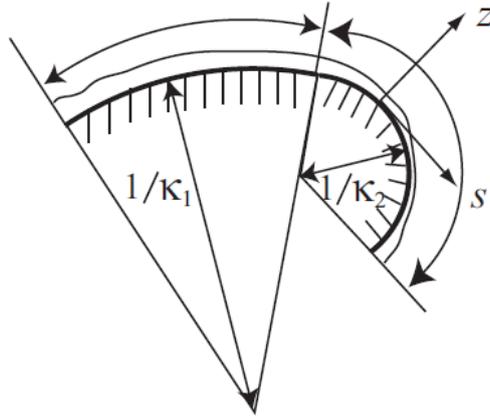


図 4-1 : 2つの円弧からなる表面形状上の座標系 .

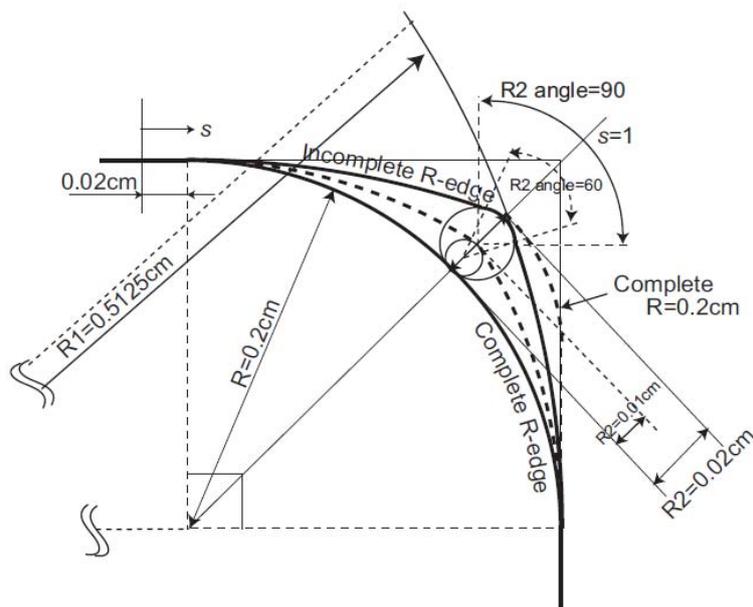


図 4-2 : 完全 R 形状および複合 R 形状の形状モデル .

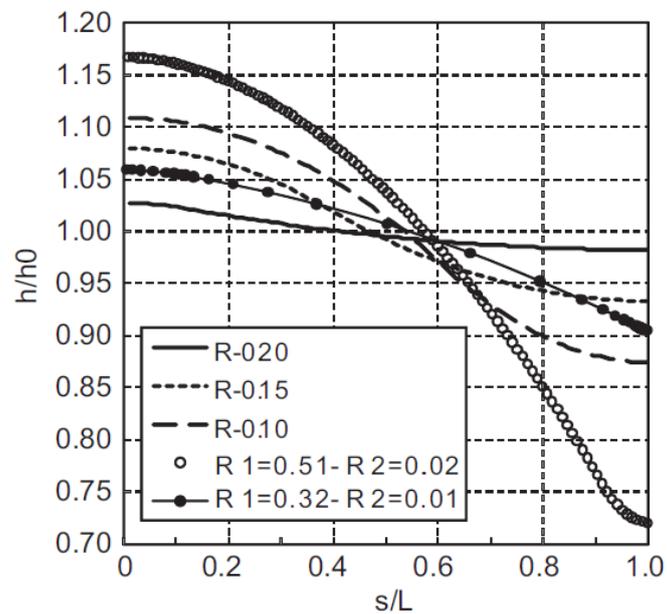


図 4-3 : 完全 R 形状および不完全 R 形状のエッジ膜厚保持性能の計算結果 .

5. 船体構造用型鋼エッジ R 部の膜厚保持性能について

5.1. 緒 言

2006 年の IMO MSC82 で、タンカーバラストタンクおよびバルクキャリア二重船殻・バラストタンクの塗装基準"Performance Standard for Protective Coatings" (IMO/PSPC)が採択された。IMO/PSPC では、バラストタンク内のフリーエッジ部に“2R 処理(半径 2mm 以上の円弧形状)、3 パスグライディングまたは同等以上の処理”(以下でエッジ処理基準とよぶ)という高品位な施工を要求しており、これに対応して、エッジ部が R 加工された型鋼を船体構造に使用する頻度が高まっている。しかし、市販型鋼のエッジ R 部は完全な円弧形状ではなく、これらが 2R または 3 パスグライディングと同等以上の膜厚保持性能を有するかは明らかでない。

船舶海洋工学会”塗装品質と工作品質の関連に関するプロジェクト研究委員会”(以下で塗装 PJ 委員会とよぶ)は、現在造船所で使用されている R 仕様型鋼を調査してそのエッジ形状の特徴を明らかにするとともに、型鋼エッジを模擬した複合 R 形状試験片の膜厚保持性能試験を実施して、膜厚保持性能を支配する形状パラメータを特定した。本報では、塗装 PJ 委員会の調査結果を報告するとともに、型鋼エッジの IMO/PSPC 適合性を保証するための形状仕様を提案する。

5.2. R 仕様型鋼エッジ形状の現状調査

5.2.1. 調査対象および調査方法

塗装 PJ 委員会参加造船所(18 社)に型鋼を納入している、型鋼メーカー 9 社(A 社, B 社, C 社, D 社, E 社, F 社, G 社, H 社, I 社)の平鋼(FB), 不等辺不等厚材(IA), 不等辺材(UA)を対象に、エッジ形状を計測した。計測では、キーエンス製レーザ変位計 LJ-G080 で対象エッジの輪郭を記録し、専用ソフト KS-Analyzer により、全体曲率半径 R および最小曲率半径 R_{min} を測定した。全体曲率半径 R は、KS-Analyzer に表示されたエッジ輪郭線上で、以下の作業により決定した。

- エッジ両側面の接線(左右各 1 本)を描画する。
- 2 本の接線の交点を定める。以下で、この交点をシャープエッジ頂点とよぶ。
- シャープエッジ頂点を通りエッジ 45 度方向に概ね平行な直線と、R 部輪郭線の交点を定める。以下で、この交点を R 部頂点とよぶ。
- エッジ輪郭線が接線から離れた点(左右各 1 点)を定める。以下で、この点を R 部開始点とよぶ。
- R 部頂点と左右の R 部開始点の合計 3 点を通過する円弧を描画し、この半径を R とする。

最小曲率半径 R_{min} は、R 部の曲率が最も大きな部分の輪郭線上に 3 点を取り、これら 3 点を通過する円弧を描画し、この半径として決定した。R および R_{min} の計測例を図 5-1 に示す。有効な R, R_{min} が計測できた断面数は、A 社 140 断面、B 社 46 断面、C 社 68 断面、D 社 42 断面、E 社 63 断面、F 社 40 断面、G 社 58 断面、H 社 33 断面、I 社 152 断面、の総計 642 断面である。

5.2.2. 調査結果

計測した 642 断面で、エッジ部に明瞭なエッジは観察されなかった R が 2mm を超える断面の多くで、R 部の曲率半径は一定でなく、エッジ中に 1 箇所以上の大曲率部が存在した。一方、R が 2mm 以下の断面では、R と R_{min} の差が小さい場合が多かった。

全メーカーの R と R_{min} の平均、標準偏差、68%信頼区間上下限 $\mu+\sigma$, $\mu-\sigma$ を表 5-1 に示す。表では、A, D, H 社では $R < 2\text{mm}$ を満たさない場合が多数あること、B, E, F 社では $R > 2\text{mm}$ は概ね満足するが、 $R_{min} < 2\text{mm}$

を満たさない場合が多数あること、C, G, I社では $R > 2\text{mm}$, $> 2\text{mm}$ をともに満足していることが示されている。

図 5-2~図 5-4 に R と の関係の例を示す。図 5-2 では大部分で $R < 2\text{mm}$ であり、ほとんどの場合 R が成立している。図 5-3 では大部分で $R > 2\text{mm}$ であるが と R の差が大きく、相当数で $< 2\text{mm}$ となっている。図 5-4 では R , とも 2mm を大きく上回るが、 と R の差がより顕著になり、R の最大値は 10mm に達する。

5.2.3. 型鋼エッジ形状の統計的性質

本節では、R の 68%信頼区間下限($\mu - \sigma$)が概ね 2.0mm を上回る 6 社の製品のみを対象に、および R の統計的性質を調べる。データ総数は 427 である。

6 社の製品の全データについて、と R の関係を図 5-5 に示す。図では、R が の 2 倍以上になる場合が多数あることが示されている。と R の統計量を表 5-2 に示す。

R の頻度分布を図 5-6 および図 5-7 に示す。ヒストグラムのビン幅は、で $340.7\mu\text{m}$, R で $462.25\mu\text{m}$ である。ヒストグラムの縦軸は、頻度(発現個数)をデータ総数とビン幅で除して正規化してある。

の頻度は対数正規分布で近似できる。 $\ln()$ の平均、標準偏差は $8.012, 0.359$ である。図 5-6 に、これらを母数とする対数正規分布を示す。図では、の極小値近傍の分布がこの対数正規分布で良好に近似できていることが示されている。この対数正規分布で計算した $\text{Pr} [< 1.5\text{mm}]$ は 2.6% になる。

以上の結果は、現在造船所に納品されている型鋼のうち、全体曲率半径 R の 68%信頼区間下限($\mu -$) が 2.0mm を上回る製品に限れば、R 処理型鋼エッジの が 1.5mm を下回る確率は 3% 以下と非常に小さいことを意味する。よって、型鋼エッジ R 部が、全体としては 2mm 以上の曲率半径を有するが、その一部に最小 1.5mm の部分的曲率半径を有する場合のエッジ膜厚保持性能が 2R または 3 パスと同等以上であることが証明できれば、R の $\mu -$ が 2.0mm 以上であるような型鋼エッジは IMO/PSPC の定めるエッジ処理基準に相当し、追加のエッジ処理なしでバラスタンク内構材に使用できるといえる。

5.3. 最小曲率半径とエッジ膜厚保持性能の関係

塗装 PJ 委員会は、全体的曲率半径 R が 2mm 以上であるが、局所的に最小曲率半径 が 2mm を下回る大曲率部を有する複合 R 形状のエッジ膜厚保持性能を実験的に調べた¹⁾²⁾。本章では、この実験結果の概要を紹介する。

5.3.1. 試験対象

実験では、 2mm 以上の曲率半径をもつ緩曲 R 形状の中央に部分的な大曲率部が存在する、図 5-8 に示す複合 R 形状のエッジ膜厚保持性能を評価した。

緩曲部、大曲率部の曲率半径は各々 R , であり、大曲率部の挟み角を , 側面と緩曲部の境界 (R 部開始点) と、両側面接線の交点 (シャープエッジ頂点) の距離 (= R 部幅) を と表す。図 5-8 に示すように、大曲率部頂点は、両側面に接する半径 の円弧から だけ外側に位置する。シャープエッジ頂点と半径 の円弧の距離を とすると、 δ/Δ が 0 のときエッジは単純 R 形状 (真円弧) になり、 $\delta/\Delta = 100\%$ のときシャープエッジになる。以下で、 δ/Δ を”尖り度”とよぶ。

実験は、実際の型鋼エッジで観察された R 部形状に相当する、 $\rho = 1.0\text{mm}, 1.5\text{mm}$ 、 $\delta/\Delta = 18\% \sim 46\%$ ($\Psi = 30, 45, 60 \text{ deg.}$) の複合 R 形状と、図 5-9 に示す理想 3 パス形状について実施した。

5.3.2. エッジ膜厚保持性能試験

自動塗装装置によって、MIL-23236C³⁾に準ずる方法で試験片のエッジにバラストタンク用塗料を塗布し、

$$ERR\% = DFT(\text{edge}) / DFT(\text{flat}) \quad (1)$$

で定義するエッジ膜厚保持率 (ERR) を評価した。実験では、機械加工でエッジを整形した試験片にバラスト処理なしで自動スプレー装置により塗料を吹付け、乾燥後に試験片を切断してエッジ膜厚を計測した。DFT(edge)、DFT(flat)は、エッジ部および側面の乾燥塗膜厚である。3パスグライディング形状のDFT(edge)は、図 5-10 の2つの「中央エッジ角」における膜厚の平均値とした。R形状の場合のDFT(edge)はR形状の中央位置の膜厚とした。

5.3.3. 実験結果および考察

図 5-11 に、理想3パス形状と複合R形状のERRの比較結果を示す。マークは $r = 1.5\text{mm}$ である複合R形状の、マークは $r = 1.0\text{mm}$ である複合R形状のERRを表しており、横軸はエッジ形状の尖り度 δ/Δ である。これらの図では、以下が示されている。

- 見かけ上の曲率半径が2mm以上で、かつ、部分大曲率部をもつ複合R形状でその大曲率部の最小曲率半径 $r = 1.5\text{mm}$ のエッジは、3パス形状よりも膜厚保持性能が良い。
- 全体曲率半径が2mm以上で、かつ、部分大曲率部をもつ複合R形状でその大曲率部の最小曲率半径 $r = 1.0\text{mm}$ のエッジでは、尖り度 δ/Δ が20%程度までは、3パスと同等もしくはそれ以上の膜厚保持性能を持っているといえる。

以上より、「型鋼エッジR部が、全体としては2mm以上の曲率半径を有するが、その一部に最小1.5mmの部分的曲率半径を有する場合のエッジ膜厚保持性能が3パス形状と同等以上である」との結論を導くことができる。

5.4. 型鋼エッジ形状の仕様

以上の議論より、型鋼エッジR部が、全体としては2mm以上の曲率半径を有するが、その一部に最小1.5mmの部分的曲率半径を有する場合のエッジ膜厚保持性能が3パス形状と同等以上であることが証明された。よって、型鋼エッジ形状が以下の仕様を満足していればIMO/PSPCのエッジ処理基準に相当することがわかった。

- 全体曲率半径Rが2mm以上であること
- R部に部分的大曲率部を有するときは、最小曲率半径 r が1.5mmを下回らないこと

第2項の要件は、全体曲率半径Rの68%信頼区間下限が2.0mmを下回らなければ、自動的に達成される。

5.5. 結言

造船所で使用されているR仕様型鋼のエッジ形状の特徴を調査し、型鋼エッジを模擬した複合R形状試験片の膜厚保持性能を実施して膜厚保持性能を支配する形状パラメタを特定した。そして、型鋼エッジのIMO/PSPC適合性を保証するための形状仕様を提案した。本研究で得られた知見は以下のように要約できる。

(1) 調査対象の型鋼メーカー9社のうち、全体曲率半径Rの68%信頼区間下限が2.0mmを大幅に下回るメーカーが3社あった。これ以外のメーカーの製品でも、最小曲率半径 r が2.0mmを下回る場合が多数

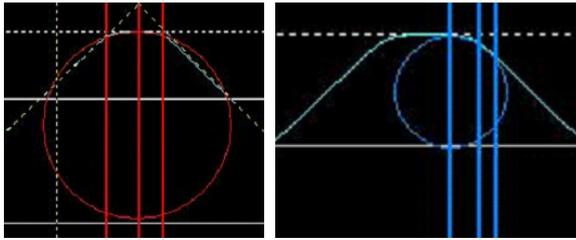
あった。

(2) エッジ膜厚保持率試験を実施し、エッジ R 部が、全体としては 2mm 以上の曲率半径を有するが、その一部に最小 1.5mm の部分的曲率半径を有する場合のエッジ膜厚保持性能が 3 パス形状と同等以上であるとの結果を得た。

(3) IMO/PSPC のエッジ処理基準に相当する型鋼エッジ形状の仕様として、「全体曲率半径 R が 2mm 以上であり、部分的な大曲率部を有するときは最小曲率半径 が 1.5mm を下回らないこと」を提案した。

5.6. 参考文献

- 1) 長野雅治ほか, “実エッジ形状に適応したエッジ膜厚保持率計測方法の開発”, 日本船舶海洋工学会講演論文集, No. 8 (2009) 印刷中。
- 2) 高田篤志ほか, “不完全 R 形状のエッジ膜厚保持率に及ぼす形状パラメタの影響”, 日本船舶海洋工学会講演論文集, No. 8 (2009) 印刷中。
- 3) MIL-PRF-23236C Standard, “Performance Specification: Coatings Systems for Ship Structures” (2003).



(a) R (b) ρ
 図 5-1 Measurements of R and ρ .

表 5-1 : Statistics on R and ρ for all makers.

	R (μm)				ρ (μm)		
	mean	stdev	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$	mean	stdev	$\mu - \sigma$
A社	1418.6	323.5	1095.1	1742.1	1386.0	313.7	1072.3
B社	2445.4	477.8	1967.6	2923.2	2193.6	498.0	1695.6
C社	2875.8	152.2	2723.6	3028.0	2843.7	173.5	2670.1
D社	1864.3	749.7	1114.6	2614.0	1615.0	758.9	856.1
E社	2738.1	639.7	2098.4	3377.8	2320.8	595.1	1725.6
F社	4343.7	1486.4	2857.3	5830.1	2245.9	517.7	1728.2
G社	3038.4	404.0	2634.4	3442.4	2862.2	430.7	2431.6
H社	1948.6	342.7	1605.9	2291.3	1583.8	381.4	1202.4
I社	6910.1	1727.4	5182.7	8637.5	4438.5	1218.8	3219.6

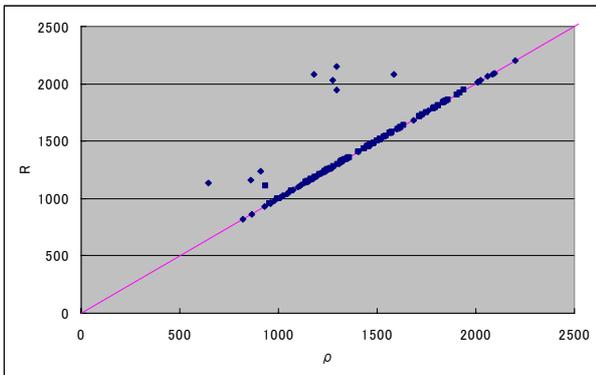


図 5-2 : Relationship between R and ρ for the case where most samples have R larger than 2mm (unit: μm).

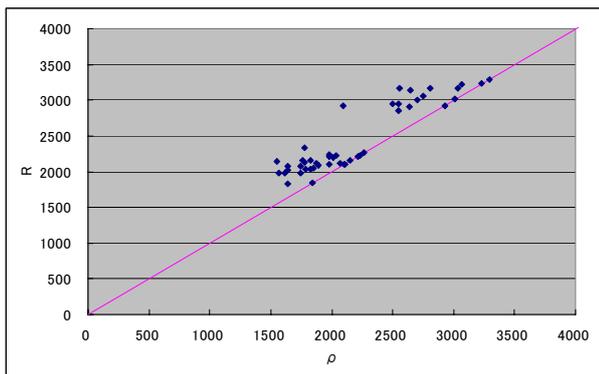


図 5-3 : Relationship between R and ρ for the case where samples have R larger than 2mm but not a few samples have ρ smaller than 2mm. (unit: μm).

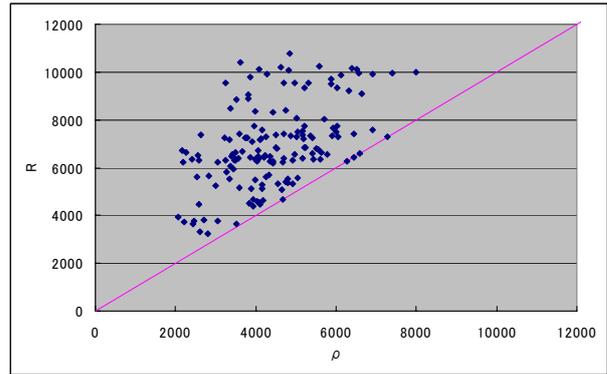


図 5-4 : Relationship between R and ρ for the case where most samples have R and ρ larger than 2mm. (unit: μm).

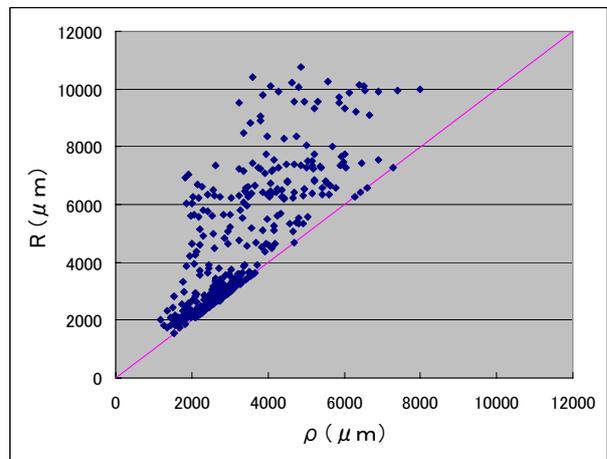


図 5-5 : Relationship between R and ρ for the cases where the lower bound of 68% confidence interval of R is larger than 2mm. (unit: μm).

表 5-2 : Statistics on R and ρ for all makers for the cases where the lower bound of 68% confidence interval of R is larger than 2mm.

R (μm)				ρ (μm)		
mean	stdev	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$	mean	stdev	$\mu - \sigma$
4413.4	2246.9	2166.5	6660.4	3224.4	1236.1	1988.2

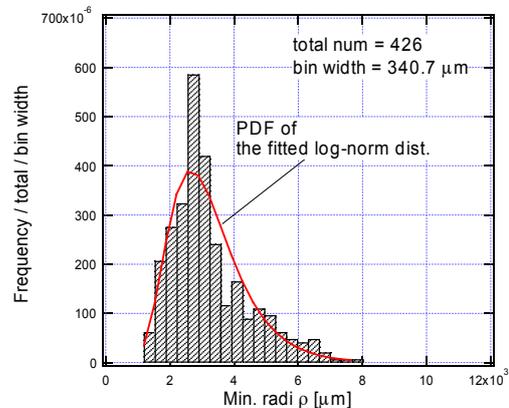


図 5-6 : Statistical analysis of ρ for the cases where the lower bound of 68% confidence interval of R is larger than 2mm.

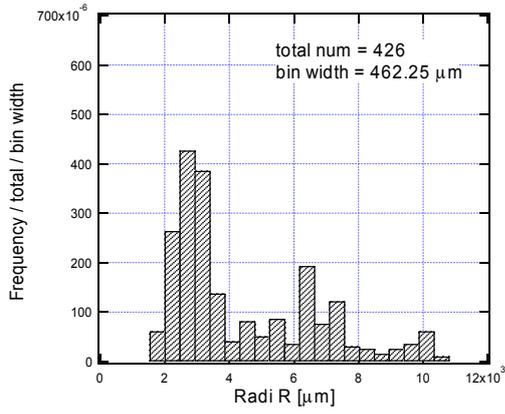


图 5-7 : Statistical analysis of R for the cases where the lower bound of 68% confidence interval of R is larger than 2mm.

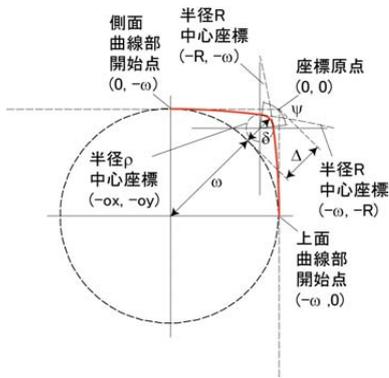


图 5-8 : Compound R shape.

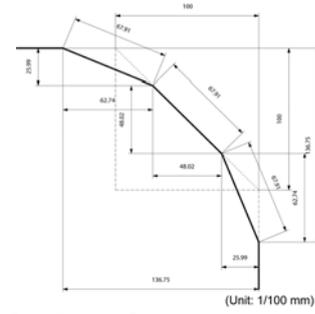


图 5-9 : Ideal 3-path grinding edge

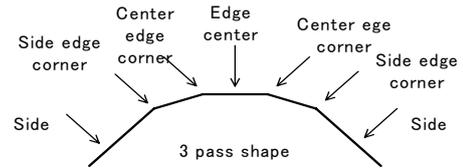


图 5-10 : DFT measurement points of 3-path grinding edge.

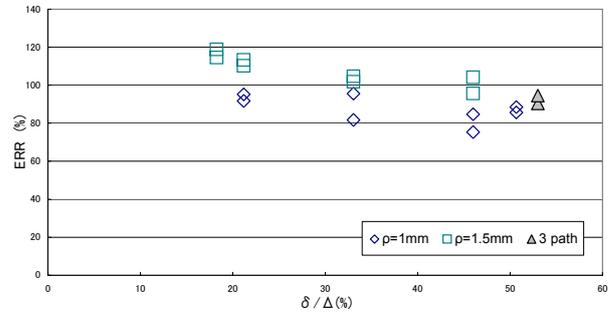


图 5-11 : Comparison of edge retention ratios of compound R shape and 3-path grinding edges.

おわりに

本委員会では、(社)日本造船工業会会員各社の船殻・塗装両部門の専門家に参集いただき、中立的・客観的立場から、船殻工作品質と塗膜性能の関係を調査して、高い塗装品質を確保できる鋼船工作精度標準・施工指針を新たに定め、船主側との交渉において造船所側の主張を裏付ける技術情報を準備するための研究を実施した。

本委員会の活動にあたり、(社)日本造船工業会より活動費の一部を補助いただいた。WG1のエッジ膜厚測定試験では、中国塗料(株)研究開発本部長・船舶塗料技術センター所長 原田伸氏、同防食技術部部長 宮地幸夫氏、同防食技術部 古本悟氏をはじめとする皆様に多大なご協力を賜った。型鋼エッジ計測にあたっては、住重試験検査(株)横須賀事業所長 鈴木隆久氏をはじめとする皆様に多大なご協力を賜った。塗布流動数値解析の実施にあたっては、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻助教 澤村淳司博士のご教示・ご助力を賜った。型鋼エッジ計測結果の解析では、大阪大学工学部地球総合工学科 4 回生 菊澤遼平氏にご協力いただいた。おわりにのぞみ、関係各位に厚く御礼申し上げます。

平成 21 年 5 月

日本船舶海洋工学会「塗装品質と船殻工作品質の関係に関するプロジェクト研究委員会」
委員長 大沢直樹