



面形状が安定して生成できること、および作業環境に問題が生じないことが確認された。

### 3. R 処理機能付切断機で切断面の膜厚保持性能

#### 3.1 非対称エッジ形状に適した膜厚保持率試験

Fig. 2 に示すように、NC 切断面上縁エッジのベベル角は、IMO/PSPC が規定する 3 パスグライディングと同等以上の値を示す。しかし、NC 断面エッジの片側（コバ面側）は曲率半径が 1mm 以下の曲面である。Kharlamov et al<sup>2)</sup>の研究は、エッジ両側が平板の場合を想定しているので、Fig. 2 の断面が 3 パスグライディング以上のエッジ膜厚保持率(ERR)を示すかは明らかでない。NC 切断面エッジの IMO/PSPC 適合度は、膜厚保持率試験により検証される必要がある。

船舶用塗装のエッジ膜厚性能試験規格として MIL-PRF-23236C<sup>3)</sup>がある。この規格では、アルミ製直角アングルに、エッジの頂角について対称な方向から塗装をしてエッジ膜厚を計測する。R 止り形状などの、頂角について非対称なエッジに 45 度方向からスプレーを噴射すると、ベベル角によってスプレー噴流とエッジ頂点のなす角度が変わり、ERR とエッジ形状の関係の精密な議論が難しくなる。長野ら<sup>4)</sup>は、この問題を克服し、非対称エッジ形状でも ERR へのエッジ形状影響を感度良く測定できる新しい試験法を開発した。この方法では、スプレー圧と、スプレーチップ・試験体間距離を一定に保ってトップコート塗布する。塗料は、Fig. 3 に示すように、板の法線方向から 20 度コバ面に傾いた方向から 2 回（初回、2 回目）、コバ面の垂直方向から 1 回（3 回目）の合計 3 回、1 分以内にスプレーされる。これにより、板の側面、コバ面で概ね等しい塗膜厚が得られる。

塗料吹付け後試験片を切断し、光学顕微鏡により側面エッジの乾燥膜厚 dft(edge on the plate face)を計測すると同時に、板表面のエッジから十分離れた点で、電磁膜厚計により乾燥膜厚 dft(flat)を計測する。ERR は次式により評価する。

$$\% \text{Retention} = \frac{\text{dft}(\text{edge on the plate face})}{\text{dft}(\text{flat})} \times 100 \quad (1)$$

以下で、式(1)で評価した膜厚保持率を「側面 ERR (Side ERR)」とよぶ。高田ら<sup>5)</sup>は、R 止り形状のエッジ膜厚保持性能を調べ、長野ら<sup>4)</sup>の手法により ERR に及ぼすベベル角の影響を精密に評価できることを示した。開発切断機による切断面エッジは R 止り形状に類似しているため、本研究では長野ら<sup>4)</sup>の試験方法を採用した。

#### 3.2 計測対象

本研究に参加した切断機メーカー 2 社（A 社、B 社）が個別に開発した切断機で、板厚 8mm、12mm、16mm のショッププライマ鋼板を切断して試験片を作成し、これに長野ら<sup>4)</sup>の試験方法に従ってバラスタック用変性エポキシ塗料を塗付して、式(1)の側面 ERR を評価した。試験片作成時の切断速度は、各板厚でのメーカー推奨値を基準として、-10%減（記号 V1）、推奨値（記号 V2）、推奨値+10%（記号 V3）の 3 とおりを設定した。以下で、試験片に社名記号+板厚+速度記号+試験片番号で固有名を与え、例えば A 社製試験機、板厚 8mm、速度±0%、同一条件 2 本目の試験片は、“A08V2-2”とよぶ。また、開発機で切断した切断面上縁のみを 1 回グライダが

けした試験片も作成した。以下で、例えば、A 社製試験機、板厚 8mm、速度±0%で切断、上縁グライダ処理、同一条件 1 本目の試験片を、“A08V2G-1”とよぶ。

さらに、開発機の実証試験を担当した造船所（C 造船所、D 造船所）で、手作業により 3 パスグライディング試験片を作成した。以下で、例えば、C 造船所製 3 パスグライディング試験片の 1 本目は、“C3P-1”とよび、その試験片の i 番目の断面を“C3P-1-i”とよぶ。

各試験体にプラストを打つとエッジ上縁形状の差が不明確になる<sup>6)</sup>。また、実施工でエッジに当たるプラストの量も定量的に定めることは困難である。よって、本研究では、プラストによるプライマ除去を省略し、ショッププライマに直接上塗りを行った。

#### 3.3 試験条件・計測項目

供試塗料、塗装装置、スプレー仕様などを Table 1 に示す。平面部 DFT は、側面についてはエッジから 10mm 位置で、コバ面については板厚中央線上で、電磁膜厚計 MiniTest2100 (Elektro Physik 社製)により各 4 点計測した。

断面膜厚は、1 試験片から 4 断面を切出し、砥石で研磨して KEYENCE VH8000 光学顕微鏡で 50 倍拡大写真を撮影して計測した。

#### 3.4 計測結果

Fig. 4 および Fig. 5 に、3 パス試験片 C-3P-2 と NC 切断試験片 B12V3-1 の断面写真を示す。図では、3 パス試験片では同一試験片内で断面形状が大きく変化しているのに対し、NC 切断試験片では試験片内でほぼ同一の断面形状が得られていることが示されている。

よって、本研究では、3 パス試験片では 4 断面ごと個別に ERR を評価する一方、NC 切断試験片では試験片ごとの平均値として ERR を評価した。すなわち、式(1)の分子として、3 パス試験片では各断面の上縁角膜厚を、NC 切断試験片では 4 断面の上縁角膜厚の平均値を用いた。Dft(flat)には、3 パス試験片、NC 切断試験片ともに、電磁膜厚計で測定した板表面膜厚の平均値を用いた。

3 パス試験片では、エッジ角部に塗料の吹溜りが生じて、側面 ERR が 100%を超える場合があったが、この現象は本研究の考察対象外であるので、データから除外した。この結果、3 パス試験片断面のデータ数は 11 となった。NC 切断試験片のデータ数は 22、NC 切断+1 パスグライディング試験片のデータ数は 6 である。

NC 切断試験片の側面 ERR 計測値で、切断機メーカー別、板厚、切断速度による顕著な差は見られなかった。図 6~8 に NC 切断試験片、3 パス試験片、NC 切断+1 パス試験片の側面 ERR 相対頻度度数を示す。図 6~8 のヒストグラムで階級間隔は 2.5%であり、相対度数は当該階級に属するデータ個数を有効データ総数で除して計算した。図 6~8 には、各グループの計測データを正規分布に回帰した分布密度関数も示してある。各グループ計測データの統計量（平均  $\mu$ 、標準偏差 および 95%信頼区間下限  $\mu - 2\sigma$ ）を表 5 に示す。これらの図表では、NC 切断試験片は、平均値 75.4%を中心に概ね正規分布で近似できる頻度分布を示し、 $\mu - 2\sigma$ が 60.9%であること、および、3 パス試験片の平均値は 81.9%と NC 切断試験片より大きい、最大値・最小値近傍にデータが偏在する傾向があり、 $\mu - 2\sigma$ が 60.6%と NC 切断を下回ること、および、NC 切断+1 パス試験片の平均値は 86.2%、 $\mu - 2\sigma$ が

68.2%と全体的に高いERRを示すことが示されている。

よって、本研究の実験条件では、側面ERRの平均値は小さい順でNC切断、3パス、NC切断+1パスの順になるが、95%信頼区間下限は、NC切断が3パスより僅かに大きくなるとの結果が得られた。

#### 4. R処理機能付NC切断面のIMO/PSPC適合度

膜厚不足を原因とする塗膜劣化は、膜厚が局所的に薄くなった箇所を選択的に始まる。よって、エッジの塗膜性能を論じる場合は、膜厚保持率の平均値でなく下限値に着目すべきである。この下限値としては、IMO/PSPCに適合した形状で測定した膜厚保持率の95%信頼区間下限 ( $\mu-2\sigma$ ) を採用するのが適当である。

本研究で使用した3パス試験片はIMO/PSPCに適合しており、その側面ERR95%信頼区間下限は60.6%である。NC切断試験片の側面ERR95%信頼区間下限は60.9%であり、3パス試験片の下限値60.6%より僅かに大きい。これは、本研究で開発したR処理機能付NC切断機による切断が、IMO/PSPCが規定する“2R処理(半径2mm以上の円弧形状)または3パスグラインディングまたはこれらと同等以上の処理”に相当するエッジ処理であることを意味する。

NC切断+1パス試験片で計測した側面ERRは、95%信頼区間下限、平均値とも3パス試験片を大幅に上回る。これは、通常3回必要な表面エッジグラインディングの1/3の工数で、IMO/PSPCの要求性能を大幅に上回るエッジ膜厚保持率を達成できることを意味する。

#### 5. 結言

(財)日本船舶技術研究協会の「NC切断時のエッジ処理技術に関する研究開発」で開発したR処理機能付NCプラズマ切断機の概要を紹介するとともに、NC切断試験片とハンドグラインディングで作成した3パス試験片の膜厚保持性能を比較した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 既存プラズマ切断機を改良して、上縁ベベル角が155°以上のR形状エッジが生成できるR処理機能付NC切断機を開発した。

(2) 長野らが提案した試験方法により、R処理機能付NC切断機切断面のエッジ膜厚保持率を評価した結果、NC切断面の側面ERR95%信頼区間下限は、3パスグラインディング試験片のERR信頼区間下限と同等以上の値になることがわかった。

(3) 本研究で開発したR処理機能付NC切断機で切断した鋼材の切断面上縁エッジは切断までIMO/PSPCに適合している。NC切断+1パスグラインディングは、IMO/PSPCの定める3パスグラインディングを大幅に上回るエッジ膜厚保持性能を示す。

#### 謝辞

本研究は(財)日本財団の助成事業「総合的な防食性能向上のための研究開発」の一環として実施された。また、本研究の塗装試験は、中国塗料(株)大竹研究センターで実施され、実験・計測にあたって古本悟氏(中国塗料(株))および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研究委員会”WG1委員各位のご助力を賜った。本論文の終わりにのぞみ、関係各位に

厚く御礼申し上げる。

#### 参考文献

- 1) WES2801:1980 Standard, “Quality Standard for Gas Cut Surface”, The Japan Welding Engineering Society (1980).
- 2) Kharlamov, IV, Koshin, II “Corrosion Protection of the Members (Elements) of Steel Structures with Different Bevel Angles and Radii of Curvature of the Edges”, Izvesiya VUZ, No. 8 (1976) pp. 17-22.
- 3) MIL-PRF-23236C Standard, “Performance Specification: Coatings Systems for Ship Structures” (2003).
- 4) 長野雅治ほか, “実エッジ形状に適應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。
- 5) 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。
- 6) Yun, JT, Kwon, TK, Kang, TS, Kim, KL, Kim, TK, Han JM, “A Critical Study on Edge Retention of Protective Coatings for a Ship Hull”, Proc. Corrosion2005 (2005) Paper No. 05016.

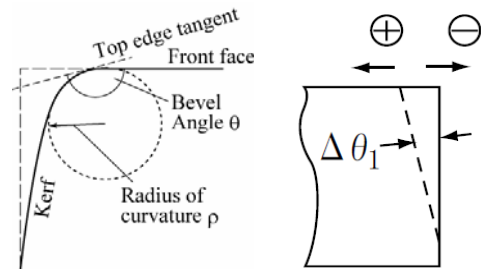
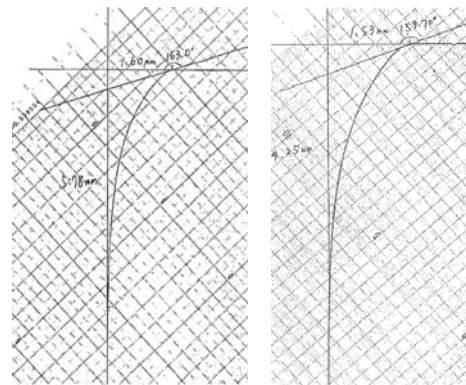


Fig. 1: Geometric features of the kerf generated by PAC and the bevel angle defined in WES2801:1980.



(a) PCA machine maker A (b) PCA machine maker B  
Fig. 2: Kerfs generated by the developed EPPAC systems (Left: kerf, Up: front face).

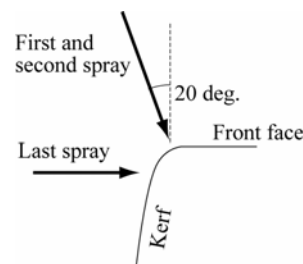


Fig. 3: Paint application in Nagano's retention test method.

Table 1: Information of applied coating material, painting variables and spray equipment.

Applied coating material	
Type of binder	modified epoxy
Viscosity	1.7 Pa·s
automatic painting apparatus	
Airless pump pressure (the 2nd stage)	90~120 MPa(g)
Working distance	370 mm
Trip transfer velocity	450 mm/sec
Spray nozzle tip	#521

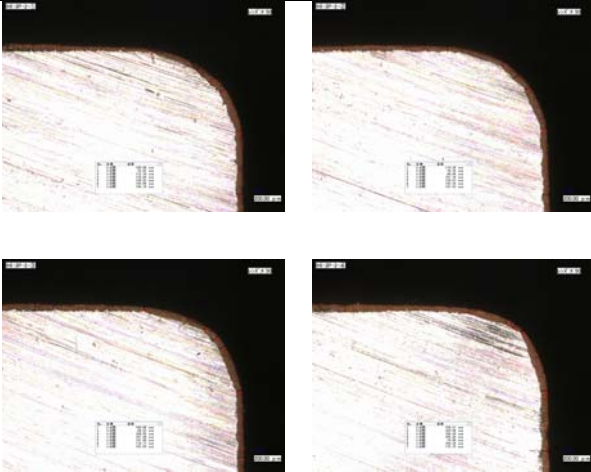


Fig. 4: Examples of cross-section views of 3-path specimens (specimen C3P-2-1 ~ 4, Up: kerf, Right: front face).

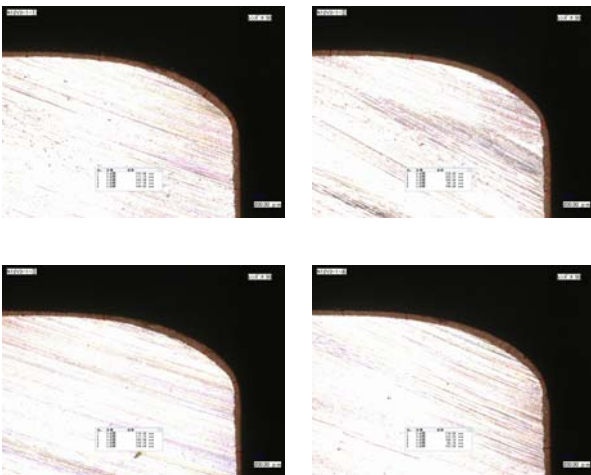


Fig. 5: Examples of cross-section views of EPPAC specimens (specimen B12V3-1, Up: kerf, Right: front face).

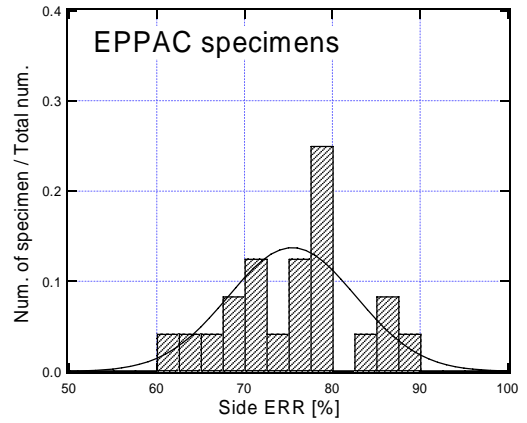


Fig. 6: Statistical analysis of edge retention behavior of EPPAC specimens.

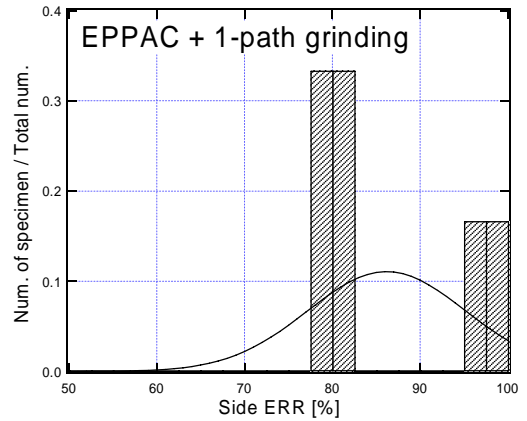


Fig. 7: Statistical analysis of edge retention behavior of EPPAC and 1-path grinding specimens.

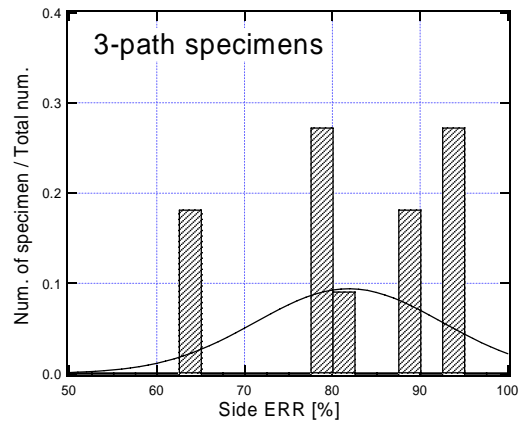


Fig. 8: Statistical analysis of edge retention behavior of 3-path grinding specimens.