

P-42 「PSPC 適用船の施工のための裏焼け防止の検討」研究委員会

最終報告書

2018年2月9日

日本船舶海洋工学会「PSPC 適用船の施工のための裏ヤケ防止検討」研究委員会

九州大学 篠田 岳思

## 1. 研究プロジェクト概要

### 1.1 プロジェクトの目的

PSPC 適用船の施工に伴い、艀装品の塗装後取付による裏ヤケへの対応に苦慮している。裏ヤケとは、鋼板に対する艀装品取付の施工面の裏側が取付工事による溶接入熱により焼損する現象を指す。PSPC 適用に伴い、カーゴタンク/バラストタンクなどの塗装面は塗装後の焼損箇所を面積管理する必要が生じ、規定値を超えると塗膜除去後に再塗装となり、造船所にとっては大損失となることがある。

艀装品による塗装面の裏ヤケを防止する方法として、塗装前に艀装品取付を行う先行艀装と艀装品取付箇所にダブリングプレートを設置し、部分的に入熱箇所の板厚を増す方法が一般的であるが、一方でダブリングプレートの設置条件については設計者の経験知以外に共通の基準はなく、ダブリングプレートによる艀装品取付箇所は裏ヤケの有無を目視で確認しなければならない。本研究は、溶接条件、ダブリング厚さを変数とする温度上昇のチャートを作成することにより、ダブリングの最適形状の選定、温度上昇の評価を行えるようにすることを目的とする。

### 1.2 プロジェクト研究成果

本研究では実験による考察と数値シミュレーションに考察と双方によりアプローチすることとして、研究項目を以下の様に設定して取組み、検討を行った。

- 1) 鋼板表面での溶接による鋼板の裏面温度の計測には、金属の放射率の影響から取得が困難であったが、計測方法を検討し実験方法の確立が行えた。
- 2) 実験により、鋼板に溶接により入熱した際の鋼板の裏面の最高到達温度の把握が可能となった。
- 3) 数値シミュレーションについて3次元非定常熱輸送モデルとして検討を行い計算による鋼板の裏面温度推定手法の確立について検討した。
- 4) 複数パターン of 鋼板として、母材のみ、ダブリングプレートを取付けた母材、削り出し材について検討して、溶接入熱による鋼板裏面到達温度のチャート化について検討した。

また、研究には実験や数値計算があり研究資金を必要とするが、日本海事協会の「業界要望による共同研究」に応募して採択された。

### 1.3 活動期間と活動場所

活動期間 : 2014 年 4 月 - 2017 年 3 月

主な活動場所 : 数値計算と実験結果の整理 : 九州大学、実験 : (株)名村造船所

## 2. 研究のまとめ

溶接施工に関する裏ヤケ防止を目的としたダブリングプレートに関して実験とシミュレーションの実施を通して、考察をまとめると、以下のように述べられる。

1) 溶接施工点をダブリングプレートの中央に取ったとしても、裏面の中央部は必ずしも、最大温度にはならない場合もあり、熱電対による計測方法により最大温度を取得するには限界があることから、動画によるサーモビューワーによる計測について検討を行った。

2) サーモビューワーを利用した計測方法では、放射率の取得が問題となるが、一般に金属の放射率は小さいため、鋼板からの熱計測には適さないことが多い。ここでは、グラファイトスプレーを塗布して、この問題の解決を図った。また、鋼板の放射率は、鋼材温度により異なるため数値について精査する必要があるが、研究では、放射率を変化させて、熱電対による温度計測値とサーモビューワーによる温度計測値が一致した際の放射率を読みとり補正を行った。また、鋼材温度の計測にサーモビューワーを広く用いて行くには補正值のチャートを作成して検討する必要がある。

3) ダブリングプレートの実験のための試験体制作には、治具を製作して一定の圧力によりダブリングプレートを母材に圧着して溶接施工したが、母材とダブリングプレートとのわずかな空隙により、最高到達温度が異なるため、空隙を模擬した削り出し材による試験体を製作して実験した。

4) 母材板厚およびダブリングプレート板厚を変えた最高温度到達の目安を見出すチャートを作成した。数値は一定条件により実験実施から得られた結果であり目安である。溶接運用時には以下を留意する必要がある。

- ・溶接裏焼け実験の到達温度の評価としては、溶接裏面の最高到達温度を採用しているが、これには、外気温の影響があるため、初期温度を考慮して裏焼け発生について評価を行う必要がある。

- ・入熱条件として、溶接設定電流・電圧値としては、電圧 25.4 V と電流 230 A として設定を基にして実験を検討しているため、入熱が多い場合には注意を要する。

- ・一般塗料の裏焼け温度は 100℃として考察しているが、裏焼けが発生する温度については、塗料メーカーに確認する必要がある。

5) シミュレーション上の課題として、以下が上げられる。

- ・溶接による裏焼けのための数値計算モデルを熱拡散方程式により解いてもある程度の推定は可能であるが、更に精度向上には、熱伝導率の非線型性や、空気への熱伝達等考慮する必要があるため、流体固体熱連成解析モデルとして実施する必要がある。

- ・溶接金属の溶融池状態を固体状態としてモデル化しているが、この仮定の十分性を把握する必要がある。

・母材とダブリングプレートとの間の微少な空隙について検討を加える場合に、計算モデルのためのメッシュについて検討する必要がある。

また、成果報告として、1.2 研究成果の内容のうち 1)から 3))についての一部をまとめて、2017 年春季講演会において、「PSPC 適用船の艀装品取付時の裏焼け防止対策に関する研究」として発表したものを添付する。

# PSPC 適用船の艙装品取付時の裏焼け防止対策に関する研究

正会員 篠田 岳思\*  
小池 亮介\*\*\*  
趙 曉光\*\*\*\*

上中 邦央\*\*  
内野 一成\*\*

Measure to Burn out at the Back Side of Deck under Construction of Outfitting Equipment

by Takeshi Shinoda, Member      Kunio Uenaka  
Ryosuke Koike                      Issei Uchino  
Xiaoguang Zhao

**Key Words:** Burn out at the Back Side, Outfitting Equipment, PSPC

## 1. 緒言

PSPC（国際海事機関 IMO で定めるバラストタンク等の塗装性能基準）の適用船の施工に伴い、造船所では艙装品の塗装後の取付による裏焼けへの対応が課題となっている。裏焼けとは、艙装品を溶接により取付ける際に甲板の施工面の裏側の塗装皮膜発生する焼損を指す。本研究では、溶接条件、ダブリング厚さを変数とする温度上昇のチャートを作成することにより、現場で裏焼けを予測できるようなツール作りや、溶接による裏焼けシミュレーションによる裏焼け発生の評価法について検討する。

## 2. 溶接時の裏焼け実験

### 2.1 溶接時の裏焼け実験の方法

溶接時の裏焼け実験では、溶接器、溶接器支持治具、試験体の水平保持治具、温度計測装置からなる実験装置を構成して、溶接試験体に溶接熱を加え、試験体裏面に現れる溶接熱を計測する。試験体にはダブリングプレート施工する母材は縦横 1m x 1m とし、母材のみの場合、ダブリングプレートを接合した場合、ダブリングプレートを接合させた際の形状を模擬した削り出し材にの3種を検討した。

溶接時の電源の電流は標準的な 230A、電圧 25.4 V、アークタイムは 60 sec.、30 sec.、15 sec とした。温度計測には熱電対を用いて温度を多点計測してデータロガー（江藤電気社製、CADAC3）に記録した。また面全体の温度変化を把握するために温度カメラ（アルゴ社製、サーモカメラ IP400）を用いた。放射率が低い鋼材ではサーモカメラによる計測が難しいため、グラファイト塗料を塗布した試験体裏面の温度の経時変化を取得して、熱電対による計測結果と照合して放射率を定めた。

### 2.2 試験体裏面の最高温度計測結果

試験体を母材のみとした場合に、板厚による鋼材裏面の中央に現れる最高温度の違いについて、熱電対およびサーモカメラによる計測結果を Fig. 1 に示す。なお、初期温度の影響は補正のために 0°C にしている。溶融池の温度は計測によると 1,500°C あるが、母材 10mm の場合には試験体裏面の温度は 1,080°C にも達する。また、板厚を増厚して実験を行った場合には急速に温度上昇が和らぎ、

\* 九州大学大学院工学研究院

\*\* 株式会社 名村造船所

\*\*\* ヤンマー株式会社（研究当時 九州大学大学院工学府）

\*\*\*\* Class NK 上海（研究当時 九州大学大学院工学府）

原稿受付（学会にて記入します）

春季講演会において講演（学会にて記入します）

© 日本船舶海洋工学会

45mm を超えた付近からは塗膜焼けの限度値 100°C 以下になって行く。また、熱電対およびサーモカメラによる計測には、大きな差が無く計測できた。

ダブリング材を取付ける場合には、僅かに鋼板とダブリング材の間に空隙が生じる。この空隙を最小にするために治具を使い溶接を施工しているが、鋼材とダブリング材の双方の塗膜から 60 μm 程度の空隙が生じる。この空隙影響を調査するために、鋼材をダブリング材が取り付けられた形状を模擬して削り出し加工を行い、空隙の無い状態を作り出し空隙影響について検討する。

Fig. 2 には試験体に削り出し材の場合に板厚やダブリング材を模擬した際の厚みの違いによる鋼材裏面の中央の最高温度の違いを示している。ここでは、溶接時間の違いも示している。例えば、母材 10mm にダブリング部 13mm を増厚しただけで、母材のみの場合の約 830°C から約 450°C に減少できる。また、ダブリング部の板厚の増厚に伴い、裏面の中央の最高温度は減少し、ダブリング部による減少効果は母材が薄い物ほど大きい。また、溶接時間の影響は入熱時間に依りて温度の減少が大きい。

### 2.3 形状による熱拡散の違い

Fig. 3 に総板厚は 32mm とし、試験体を母材のみ、ダブリング材、削り出し材とした時の中央の温度の経時変化を示す。この図によると総板厚は 32mm であるが中央温度の隠し検体の経時変化の経路が異なる。これは母材のみの場合では溶接による熱拡散は板厚効果が大きく働き、削り出しの場合には、表面に凸部があるため、熱拡散に形状効果の影響が現れ、熱拡散状態は母材のみの場合と比べて相対的に小さくなり、さらにダブリング材の場合には、削り材の熱拡散の現象に塗膜層や空気層

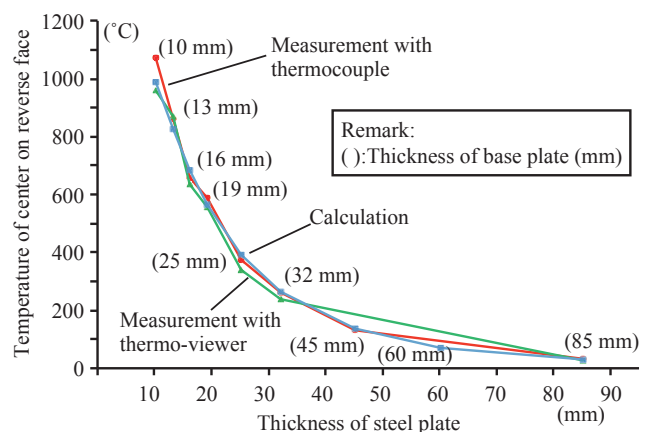


Fig. 1 Maximum achieving temperature on experimentation and calculation for base plate.

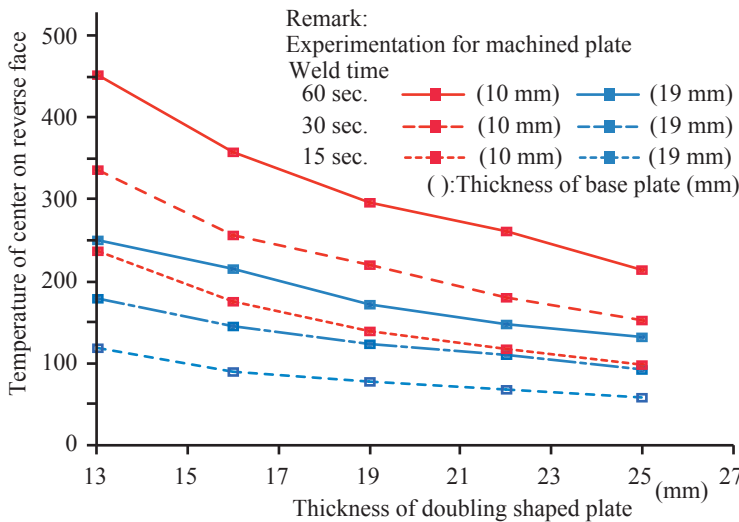


Fig. 2 Maximum achieving temperature on experimentation for doubling shaped plate.

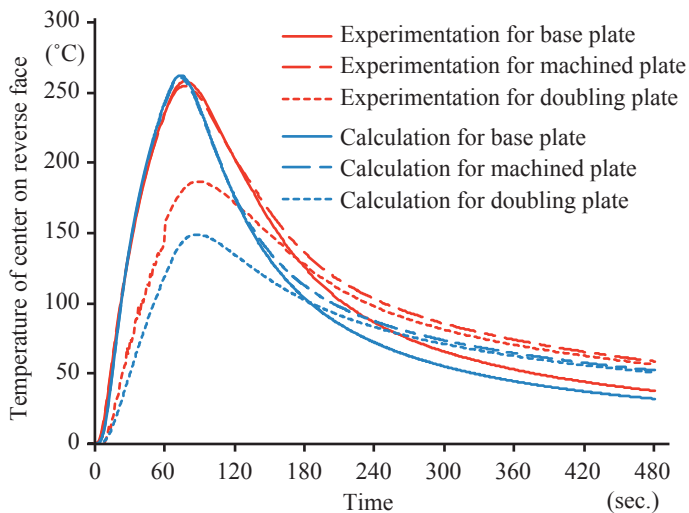


Fig. 3 Change of temperature on tree types of experimentation and calculation (total thickness 32 mm).

の効果が加わり、熱拡散がさらに小さくなりダブリング材がさらに高温化する等、違いが現れた。

### 3. 溶接時の裏焼けのシミュレーション

#### 3.1 有限体積法

領域を有限個のコントロールボリューム (Control Volume) に分割し、各ボリュームに対して積分形の物理量の保存方程式を適用する。シミュレーションには汎用熱流体解析ソフト PHOENICS を用いた。溶接による裏焼けのための数値計算モデルについて、ここでは、流体固体熱連成モデルとして計算により解析を検討する。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{B} \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \mathbf{u} \cdot \nabla T &= \lambda \nabla^2 T + q \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $T$ : 温度 (K)、 $\mathbf{u}$ : 空気の流れベクトル (m/s)、 $t$ : 時間 (sec.)、 $\rho$ : 密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\nu$ : 動粘性係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $p$ : 圧力 (Pa)、 $\mathbf{B}$ : 単位体積当たりの体積力であり  $x$  方向と  $y$  方

向は  $0$  とし  $z$  方向は浮力を考慮、 $c$ : 比熱 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )、 $\lambda$ : 熱伝導率 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )、 $q$ : 単位時間当たりの入熱量 ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) である。

#### 3.2 シミュレーションの計算条件

1) 計算モデルには熱伝導方程式を周囲には空気があり、空気への熱伝達は対流により放熱される。また、空気の外側の境界条件には熱を流出させる。また、空気や鋼材の初期温度条件には実験時の計測値を用いる。

2) 計算メッシュは、 $x$ - $y$  平面 (金属平面方向) をそれぞれ 50 分割し、 $z$  方向は板厚方向であり板厚に合わせて、金属部分は 1 メッシュあたり 1.0 mm に分割し、空気部分は 30 分割とした。

3) 実験によるとビード寸法にはバラツキがあるが直径 40(mm)、高さ 9(mm) の円筒形として設定する。計算では、溶接ビード部のメッシュは全て直交座標での分割立方体の計算メッシュとして表すため、円筒形ビードもこれに倣い直交座標により近似する。

4) 溶接時には実験により計測した溶接金属の熔融温度  $1500^\circ\text{C}$  とし、溶接による入熱量  $q$  の付与は、ビード上部に解析ソフトのプレート機能である厚みを持たない 2D 形状をしたオブジェクトを設定する。

5) 計算に用いる熱伝導率は物質の設定では解析ソフトにある金属ライブラリーより 111STEEL を用いる。用いた諸量は密度  $7,800 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 、比熱  $473 (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$  である。また熱伝導率は温度依存性を考慮するため、解析ソフトの INFORM 機能を利用して軟鋼の  $20^\circ\text{C}$ 、 $100^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$  と  $1200^\circ\text{C}$  における熱伝導率からデータの間で線形補完して用いる。

6) 数値計算での時間ステップ  $0.5(\text{sec.})$  とする。

#### 3.3 シミュレーションと実験値の比較

Fig. 1 には試験体を母材のみとした場合の鋼材裏面の中央の最高温度の板厚による違いを計算値と実験値を比較したものを示す。板厚の上昇に伴う裏面中央の最高温度の減少を良く捉えており、また、最高温度も差があるものの大凡傾向を捉えられることが分かった。

Fig. 3 には 3 種の試験体である、母材のみの場合、ダブリングプレートを接合した場合、削り出し材の場合について鋼材裏面の中央の温度経時変化を示している。母材のみと削り出し材の温度上昇は、実験値と良く一致しているが、溶接後の温度の下降域に差があるものの傾向を良く捉えている。また、ダブリングプレートの計算では、最高温度に差があるが、温度の経時変化は大凡性質を捉えていることが分かった。

## 4. 結言

PSPC 適用船の艀装品取付施工のための裏焼け防止対策としてダブリングプレートの効果を実験とシミュレーションにより検討した。実験では削り出し材を用いて空隙が無い場合について検討を行った。温度計測方法としては熱電対による接触式以外のサーモグラフィによる非接触式温度計測方法について検討を行った。また、溶接による鋼板での熱拡散のメカニズムの違いを把握した。簡易計算法について検討を行い、計測値と違いがあるものの大凡傾向を捉えられることが分かった。

## 謝辞

本研究は一般財団法人、日本海事協会の「業界要望による共同研究」の助成を受けたものである。