

(技術資料)

プレス成形性に優れた潤滑プレコートチタン板

Pre-coated Titanium Sheet with Excellent Press Formability



藤田皓久*
Akihisa FUJITA



逸見義男*
Yoshio ITSUMI



中元忠繁**
Tadashige NAKAMOTO



山本佳代**
Kayo YAMAMOTO

The PHE (Plate type Heat Exchanger) is one of the main applications for commercially pure titanium. The titanium plate, with a complex corrugated pattern created by press-forming, is directly linked to high performance such as in thermal conductivity for the PHE. We have, therefore, developed an excellent new press-formable pre-coated titanium, which is designed to have a lubricant layer that is easily removed by alkaline cleansing.

まえがき＝化学プラントや発電設備、大形輸送船舶などでは、冷却媒体として海水を大量に使用するプレート式熱交換器 (Plate type Heat Exchanger, 以下 PHE という) が使用されている。このため、PHE のプレートや配管などの主要部材には海水に対して極めて優れた耐食性を示すチタンが数多く採用されており、PHE は今やチタンの主要用途の一つになっている¹⁾。PHE の原理を図 1 に示す。PHE は、チタンプレートを挟んで温水と海水とを互いに逆方向に流すことによって熱交換を行う装置であり、熱の授受はこのチタンプレートを通して直接行われる。このため、チタンプレートは複雑な波板形状に加工されており、その形状が熱交換器の伝熱性能を左右するとともに、PHE の高圧化に向けたプレート素材の高強度化が必要とされる。

従来の軟質チタンがもつ良好な成形性を維持しつつ高強度化が実現できれば、より高圧用途への適用拡大が図れるとともに、薄肉化による重量削減も可能である。このように、PHE プレートの素材に対しては、より良好な

プレス成形性と高強度が同時に求められている。

強度と成形性は、材料面においてトレードオフの関係にある。このため、まず当社では成形性向上手法として表面潤滑に着目し検討した。潤滑法には様々な方法が知られており、たとえば、潤滑シートをてん付して成形する方法²⁾が一般的であるが、実生産ではシートのてん付、引きはがしに手間やコストがかかる。また、表面を酸化あるいは窒化させる方法も報告³⁾されているが、厳しいプレスパターンでは表層が硬質で延性がないためき裂が発生しやすく、皮膜が伝熱性を阻害する要因にもなる。そこで当社では、プレス成形後のアルカリ脱脂による脱膜を前提にした潤滑プレコートを実施方法を考案した。この方法により、従来の JIS 1 種よりも高強度な JIS 2 種を使用しても従来並みのプレス成形が可能なチタン板の開発を行った。

本稿では、まず PHE プレートのプレス成形性を数値的に適切に評価できるよう独自に開発した評価手法を紹介する。さらに、その評価手法を用いて開発した潤滑プレコートチタン板について紹介する。

1. 当社独自のプレス成形性評価方法

プレス成形中に割れが発生する部位は流路部またはガasket部と呼ばれる部分が多く、これらの部分の変形様式は 2 軸の張出し成形に近い^{4), 5)}。このため、単純なプレス成形性指標としてはエリクセン値が挙げられる。しかしながら、実際には張出しだけではなく深絞りなどの変形様式が混成した成形となっているため、実態に即した定量的なプレス成形性の評価方法を確立しておく必要がある。

そこで、PHE プレート伝熱部において頻繁に見られる魚の骨を模した形状、いわゆるヘリンボーン形状を模擬し、簡易的な評価が可能な小形金型、および実際の PHE

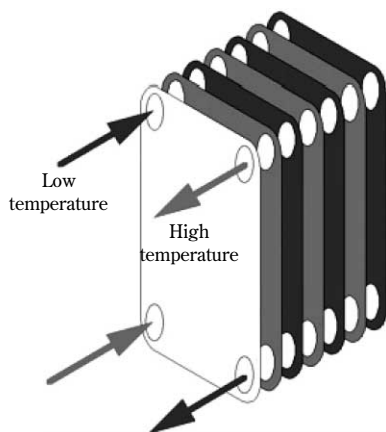


図 1 PHE の原理

Fig. 1 Principle of plate type heat exchanger

*鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン研究開発室 **鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部

のサイズに近い大形の金型をそれぞれ製作し、以下の方法でプレス後の割れやネッキングに点数を付けることによってプレス成形性を数値化することを試みた。

ただし、本プレス成形性評価方法は実成形との相関が取れていないなどの課題もあるため、さらなる検討を行い評価精度向上に努めていく。

1.1 小形金型での評価方法

小形金型の形状は以下のとおりである。

- ・サイズ：160mm□（成形部 100mm□）
 - ・稜間ピッチ：10.0mm
 - ・稜高さ：4.0mm
 - ・各稜の半径 R ：0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.4, 1.8 (mm)
- 6本

試験片サイズは160mm□とし、プレスは80ton油圧プレス機を用いた。稜部の成形高さは、JIS 1種と2種で割れ、状態に明瞭な差が生じる3.4mmとした。

プレス試験後、特定の部位における割れおよびネッキングの有無でランク付けし、数値化した。すなわち、プレス成形試験後のサンプル（図2）において、割れの起

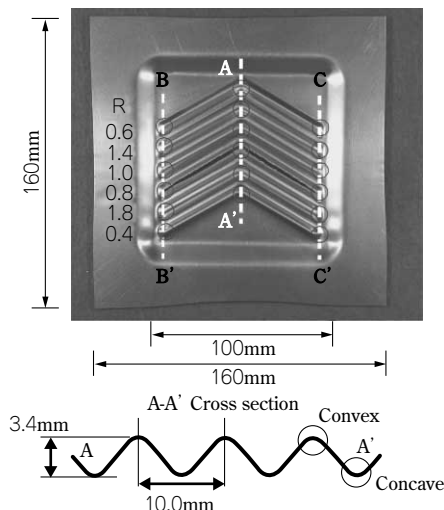


図2 小形金型によるプレス成形評価形状と割れ有無の評価位置
Fig. 2 Pressed test shape and positions for scoring in order to evaluate the pressformability using compact size test die

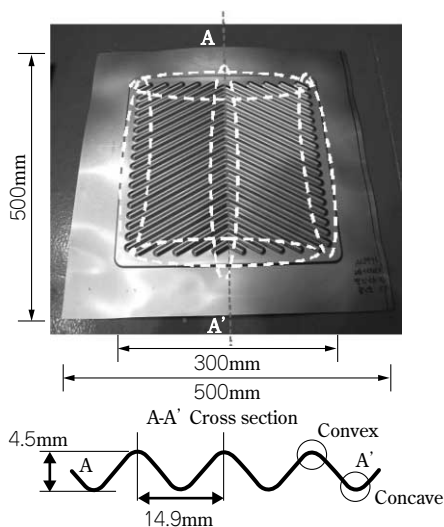


図3 大形金型によるプレス成形評価形状と割れ有無の評価位置
Fig. 3 Pressed test shape and positions for scoring in order to evaluate the pressformability using large size test die

点となる稜部と3本の破線（A-A', B-B', C-C'）上の凸部（ただし、A-A'のみ凹部でも割れが生じるため凹も対象とした）の計24部位を測定箇所とし、以下の採点方法を用いてそれぞれの箇所の評価を行った。

- ・割れなし(健全)：4点
- ・弱いネッキング：3点
- ・明瞭なネッキング：2点
- ・小割れ：1点
- ・大割れ：0点

総合評価として、上記の評点を用いて

$$\text{スコア}(\%) = (\sum(E/R)) / (\sum(4/R)) \times 100 \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 E は各測定箇所の点数、 R は各測定箇所での稜の半径(mm)とした。全く割れない場合は100%、全てが割れていれば0%となる。 R で除したのはその稜での R による曲げ変形効果を考慮するためである。

1.2 大形金型での評価方法

大型金型の形状は以下のとおりである。

- ・サイズ：500mm□（成形部 300mm□）
- ・稜間ピッチ：14.9mm
- ・稜高さ：8.1mm
- ・各稜の半径 $R=3.4$ (mm)

試験片サイズは500mm□で、プレスは1,000tonサーボプレス機を用いた。稜部の成形高さは小形金型と同様の基準で4.5mmとした。測定箇所は図3に示すように破線で囲った稜端部、稜中央部（凸部、凹部）の計92箇所であり、小形金型と同様の手法で評点を付けた。また、製品と同様の形状とするため R は一定としている。

$$\text{スコア}(\%) = \sum E / (4 \times 92) \times 100 \quad \dots\dots(2)$$

2. 潤滑プレコートチタン板の特徴

成形性が良い潤滑シートとプレス油潤滑による変形の違いを確認するため、小形金型にてプレス試験後サンプルのおおのの稜線 ($R=0.8, 1.0, 1.8$) における潤滑シート、およびプレス油（スギムラ化学工業株式会社製サンプル S-304）潤滑でのプレス後の断面をそれぞれ観察した（図4）。点線の丸で囲んだ箇所は板厚が周囲よりも減少している部位である。潤滑シートは、プレス油潤滑と比較して割れおよびくびれの箇所が少ないことがわかる。プレス油潤滑では、成形が進むにつれて金型と板が局部的に接触して拘束され、動けなくなる一方で、その間も全体としては成形加工が続けられるため、動けなく

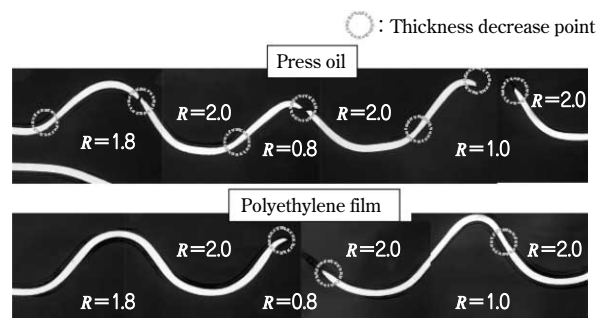


図4 プレス油とポリシート潤滑におけるプレス成形後のサンプル断面形状比較

Fig. 4 Comparison between cross sections of pressed samples using press oil and polyethylene film as lubricant

なった部分との間で伸びてくびれが生じ、さらには割れが生じることになる。一方、潤滑シートにおいては、シートが破れない限り金型と板が直接接触することはなく、板の流動性が保たれて周囲から材料が供給される。その結果、プレス油潤滑と比べてマクロ的に均一変形が保たれると考えられる。したがって、高成形性を得るためには、摩擦力を極力抑えることが重要と考えられる。

そこで潤滑性、とくに動摩擦係数の低減を目的とした潤滑プレコート板を作製した。潤滑プレコート皮膜の組成を表1に示す。アクリル樹脂は板との密着性が高く、変形にも十分に追従できる特性を有しており、かつアルカリで容易に脱膜できることからベース樹脂として選定した。コロイダルシリカは皮膜を硬化させ、また、ポリオレフィンワックスは金型との潤滑性を高める効果を有し、プレコート皮膜の動摩擦係数を低減させることを目的に添加した。

潤滑性の違いによるプレス成形性を確認するため、表2に示す特性を有するJIS 2種純チタン板にプレス油(スギムラ化学工業株式会社製サンプレス S-304)、潤滑プレコート組成からポリオレフィンワックスを除いた皮膜(アクリル樹脂+コロイダルシリカ)、および潤滑プレコート皮膜を塗布した3種の板を作製した。皮膜はロールコータを用いて塗布し、恒温槽で乾燥させて1.0 μ mの膜とした。

膜厚は、プレコート溶液の固形分濃度を变化させることによって調整した。また、蛍光X線装置(島津製作所製「MIF-2100」)を用いて皮膜中のSi元素量を定量化し、下記式(3)により求めた皮膜付着量(g/m²)から式(4)で換算することによって皮膜厚(μ /m)を求めた。

皮膜付着量(g/mm²)=Si \times 60 \times 100/28 \times C \times 1000... (3)
ここで、Siは皮膜中のSi元素量(mg/m²)、Cは表面処理組成物中のSiO₂の添加濃度(%), 28はSiの元素量, 60はSiO₂の分子量である。

$$\text{皮膜厚}(\mu/\text{m}) = (\text{皮膜付着量} \times 0.1/2.2) + (\text{皮膜付着量} \times 0.9/1.0) \dots\dots (4)$$

ここで、皮膜中には比重2.2のSiO₂が10%、比重1.0の樹脂とワックスが90%含まれていることより式(4)を用いている。

プレス成形性は、1.1で紹介した小形金型を用いた方法によって数値化し、評価した。また、動摩擦係数は、

表1 潤滑プレコートの皮膜成分
Table 1 Composition of pre-coated layer

	mass%	Contents
Resin	80	・ Acrylic resin consisted of alkylacrylate-methacrylate copolymer
Colloidal silica	10	・ Amorphous SiO ₂ ・ Alkali Na ₂ O
Wax	10	・ Polyolefin wax

表2 JIS 2種純チタンの引張特性
Table 2 Tensile properties of JIS Class-2 titanium sheet

Tensile direction	0.2% Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
L direction	243	396	31
T direction	288	389	29

試験荷重 500g, 摺動(しゅうどう)速度 100mm/min, 摺動距離 40mm, 測定方向L方向として新東科学社製 HEIDON を用いて計測した。相手材は ϕ 10.0mmのSUSボール, 評価金型は小形金型を使用した。

作製したプレコート板の動摩擦係数とプレス成形性の関係を図5に示す。試験点数は少ないが、素材の動摩擦係数は樹脂とコロイダルシリカで構成された皮膜を塗布することによって減少し、これにポリオレフィンワックスを添加することによってさらに低減させることができる。さらに、それに伴って成形性が向上することが確認された。

プレス成形に最適なプレコート膜厚を選定するため、表2に示した特性をもつJIS 2種純チタン板を用いてプレス成形性に及ぼすプレコート膜厚の影響を調査した。その結果を図6に示す。膜厚0.5 μ mまでは膜厚の増加に伴って成形性が向上し、それ以上の厚さでは飽和している。これにより、本試験の変形範囲であれば0.5 μ m程度の非常に薄い膜で十分であることがわかった。

本潤滑プレコートはPHEにそのまま適用可能であるが、皮膜を介しての熱伝達になるため、伝熱性能の低下は避けられない。その対策として、一般的なアルカリ脱

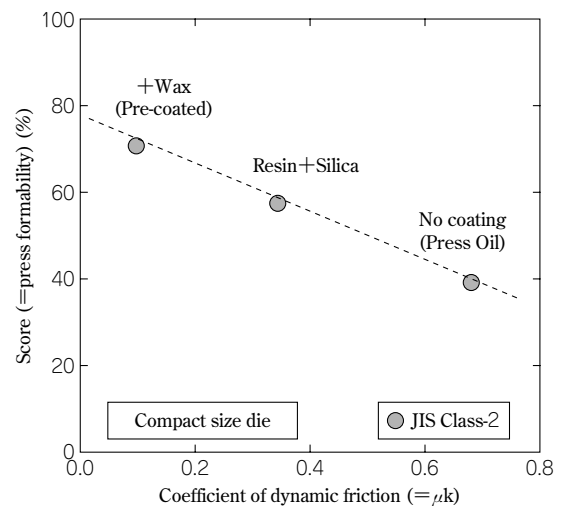


図5 成形性に及ぼす動摩擦係数の影響
Fig. 5 Effect of coefficient of dynamic friction on press formability

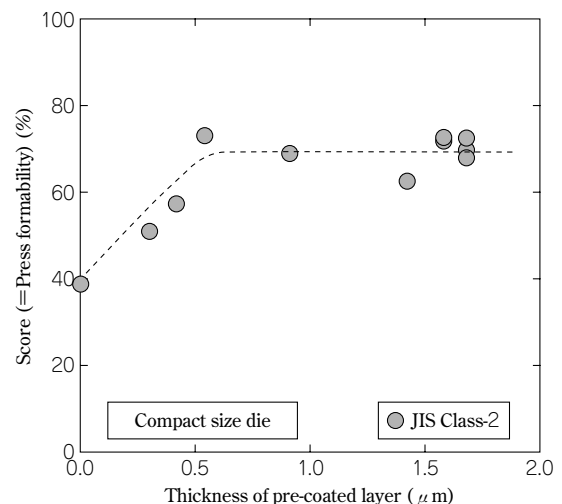


図6 成形性に及ぼす皮膜厚さの影響
Fig. 6 Effect of thickness of pre-coated layer on press formability

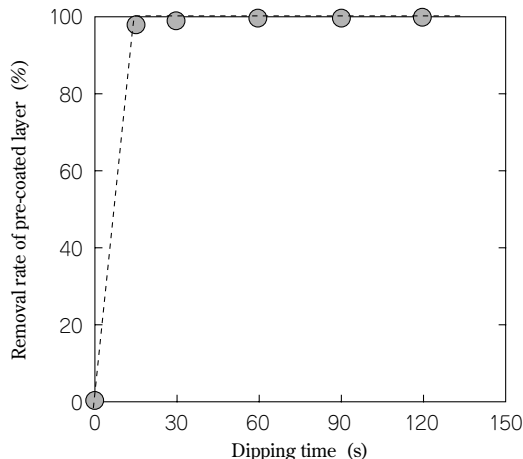


図7 プレコート皮膜のアルカリ溶液浸漬による脱膜性
Fig. 7 Removability of pre-coated layer by dipping in alkaline cleaner bath

脂で簡単に脱膜できるように設計した。また脱膜性を確認する以下のような試験を行った。

潤滑皮膜の付着量を測定した後、一般的に推奨されているチタンの脱脂液に所定の時間浸漬し、さらに水洗・乾燥した後、皮膜付着量を測定した。なお、脱脂液は弱アルカリの日本パーカライジング株式会社製ファインクリーナー 4368 製を用い、濃度：20g/L、浴温：60℃に調整した。皮膜の脱膜率は式 (6) により求めた。

脱膜率(%) = $100 \times (V_0 - V_1) / V_0$ (6)
ここで、脱脂前および脱脂後の付着量をそれぞれ V_0 (g/m²)、 V_1 (g/m²) とした。

図7に脱膜率とアルカリ溶液浸漬時間の関係を示す。浸漬開始直後に皮膜が除去され、60秒の浸漬で完全に脱膜できていることがわかる。一般的なアルカリ脱脂時間は1～3分程度であることから、本皮膜は十分に脱膜可能であると考えられる。

3. 潤滑プレコートチタン実機試作板のプレス成形性

種々の引張特性を有する純チタンに潤滑プレコート皮膜を実機塗工したプレコート板のプレス成形性を、プレス油潤滑、および潤滑シートと比較して図8に示す。より実際のプレス成形に近い条件における成形性を評価するため、評価金型は大形金型を使用した。同図より、潤滑プレコートにより潤滑シートに近い良好な成形性が得

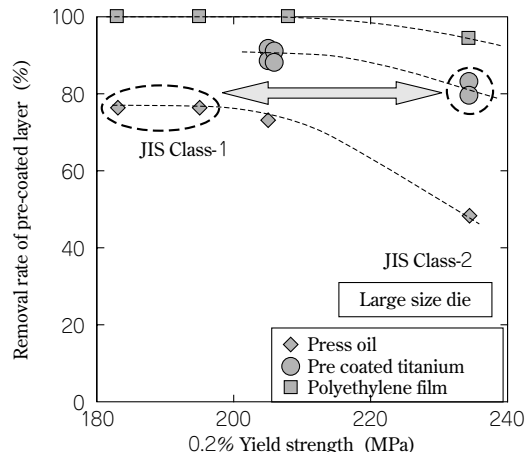


図8 潤滑プレコート板のプレス成形性
Fig. 8 Press formability of pre-coated JIS Class-1 and JIS Class-2, compared with using press oil and polyethylene film as lubricant

られていることがわかる。また、JIS 1種よりも15%高強度なJIS 2種でもJIS 1種のプレス油潤滑並みのプレス成形性が得られることがわかった。

むすび＝当社は、純チタンの主要用途であるPHEをターゲットに従来のJIS 1種よりも高強度なJIS 2種で従来材プレス油潤滑並みのプレス成形性が得られる潤滑プレコートチタン材を開発し、本稿でその特性を紹介した。本皮膜は環境にも十分配慮した上で設計されており、皮膜そのものも薄く、プレス油を使用した場合に比べ脱脂処理量や残渣(ごんさ)も少なく安心してお使いいただけるものと思う。また、PHEに限らず様々なプレス成形品への適用が可能であり、幅広くご使用していただけることを期待している。

参考文献

- 1) 草道英武ほか：日本のチタン産業とその新技術，(1996)，p.18，株式会社アグネ技術センター。
- 2) (社)チタニウム協会：チタンの加工技術，(1992)，pp.82-86。
- 3) Kazuhiro Takahashi et al. : Development of High Lubricity Titanium Sheet with Excellent Press Formability, (2007), pp.1079-1082, Ti-2007 Science and Technology.
- 4) 森口康夫ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.32, No.1(1982)，pp.24-27。
- 5) 石山成志：工業用純チタン板のプレス成形性に対する双晶変形の影響に関する研究，東北大学，1993年，博士論文，pp.13-78。