

水素・燃料アンモニアに適したプラント用材料の溶接技術の研究（第1報）

Research Regarding Welding Techniques for Plant Materials Compatible with Hydrogen and Fuel Ammonia (1st Report)

電子・機械技術部 機械・加工科 渡邊孝康 富永隼輔

材料技術部 金属・物性科 橋本政靖 丸田淳央

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 穴澤大樹

水素・アンモニア環境下に適合する耐食性の高い材料として注目されている二相ステンレス鋼の薄板のビードオンプレート溶接について検討した。熱履歴の実測とシミュレーションの比較を行った結果、裏当て材を用いない場合では実測との差は最大で 58[°C] だった。また、薄板の板突合せ溶接試験を行いフェライト量測定と金属組織観察を行った結果、板突合せ溶接では溶接材料を用いない溶接で推奨入熱範囲でもフェライト量が 80[%]、溶接材料を用いた溶接でもビード表面 100[μm] にフェライト量 80[%] の相ができることが分かった。

Key words: 溶接、シミュレーション、金属組織、二相ステンレス鋼、入熱

1. 緒言

近年、脱炭素・カーボンニュートラル社会への変革の流れが一段と強まり、化石燃料に替わる次世代燃料として、水素およびアンモニアに注目が集まっている。福島県では福島新エネ社会構想¹⁾の実現に向け様々な取り組みを進めており、当所では関連した技術の研究開発を行っている。特に、令和5年度から水素・アンモニア環境下など過酷な環境で使用される金属加工部、特に溶接部の適合性を安価、短期間で評価する技術開発に取り組んでいる^{2)、3)}。一方、水素・アンモニア環境下に適合する耐食性の高い材料として注目されている二相ステンレス鋼は、溶接条件によって耐食性等の性能が大きく劣化することが知られている。溶接部のフェライト量の増加による耐食性劣化や σ 相析出によるじん性の劣化に注意が必要である。そのため、フェライト量の測定を行うことについて、一般社団法人日本溶接協会から溶接施工要領書（以下、WPS）の例が示されているが⁴⁾、条件の幅が広く実際に溶接作業を受注するには溶接施工法確認試験記録（以下PQR）を作成し、健全な溶接が可能であることを示す必要がありハードルが高い。そこで当所で溶接実験と評価を一貫して行い、健全な溶接施工技術を確認するとともに、これまで開発した水素・アンモニア適合性評価試験方法と併せて、県内企業の関連産業への参入を支援する目的で研究を行う。また、二相ステンレス鋼は、金属組織の相比の管理が重要であり、入熱範囲の制限が示されているが、実際の構造物における溶接入熱による金属組織の変態を調べるのは困難であることから、溶接シミュレーションによる予測にも取り組む。研究の対象とするのは二相ステンレス鋼の中でも耐食性が高く特に化学プラントで今後普及が期待される SUS329J4L とした。一年目の今年度は、ビードオンプレート溶接を対象とした熱履歴の実測とシミュレーションの比較を行った。また、板突合せ溶接試験を行いフェライト量測定と金属組織観察を行ったので報告する。

2. 実験

2. 1. ビードオンプレート溶接を対象とした熱履歴の実測とシミュレーションの比較

二相ステンレス鋼は、強度や耐応力腐食割れ性が高く、加工性溶接性にも優れるなど、その特性により近年活用が進む一方、オーステナイトとフェライトの混合組織であり、炭化物や窒化物、 σ 相などの生成が問題となるため、溶接入熱の管理が重要となる。溶接金属組織制御のため、施工時には投入熱量の検討やパス間温度管理、裏当て材の利用等による冷却の制御を考慮する必要がある。理想的には、熱電対等により温度測定を行い、狙い通りの入熱、冷却曲線が得られているか確認できれば、金属組織の良否を判断できる。だが、実際の現場では、埋め込み式の熱電対による温度測定は難しい。また二相ステンレス鋼では特に多層溶接において溶融部金属だけでなく熱影響部（以下、HAZ）の相比が耐食性に大きく影響するが、溶融金属部や高温 HAZ に関しては非常に高温になるため温度実測が不可能であり組織予測は現実的でない。そのため、溶接施工時には都度、WPS と PQR の作成が不可欠で負担となっている。シミュレーションで溶融金属部、HAZ 部の金属組織の予測ができれば大きな負担軽減が見込まれるが、二相ステンレス鋼の多層溶接を含む実構造物を対象に溶接シミュレーションによる組織予測に取り組んだ例は少ない。

そこで、本研究では、溶接シミュレーションを用いて、実際には温度測定が困難な溶融金属部や HAZ の熱履歴を計算し、CCT 線図等から相比や析出物の予測に取り組む。今年度は、ビードオンプレート溶接を対象に実測とシミュレーションを行い比較し、予測精度向上につながるモデル作成、解析条件設定を検討した。

2. 1. 1 ビードオンプレート溶接の熱履歴測定

ビードオンプレート溶接を行い熱電対による温度測定を行った。溶接は6軸溶接ロボットで行った。溶接法は突合せ溶接で安定した裏波ビードが得られ、高品質な溶接結果が得られるティグ溶接法を用いた。溶接ロボットと溶接電源の諸元を表1に、溶接ロボットの外観を図1に示す。

表1 溶接ロボットと溶接電源の諸元

メーカー	ダイヘン
溶接ロボット型式	FD-V6
位置繰返し精度[mm]	±0.08
溶接トーチ型式	MWXC-3501
溶接電源型式	DA-300P
トーチ冷却方式	水冷
定格出力電流[A]	300
定格付加電圧[V]	20~22
定格使用率[%]	40



図1 溶接ロボット外観

本実験では、溶加材を用いない溶接（以下、ノンフィラ溶接）で、熱履歴を変化させる目的で裏当て材を用いない溶接（以下、BOP-1）、と用いる溶接（以下、BOP-2）について試験を行った。試験条件を表2に示す。用いた供試材の詳細を表3、溶接条件を表4に示す。溶接位置は板長さ方向中央75[mm]の位置とし、温度測定位置は溶接位置から13[mm]、23[mm]の二か所とした。測定位置には貫通穴を開け、K型熱電対を差し込み、隙間には銅線を差し込むことで熱の伝達を確保した。試験体形状を図2、実験状況を図3に示した。溶接時は0.5[ms]ごとに電流と電圧を記録した。試験後は試験片の変形量をSHINING 3D社製の3D デジタイザで測定し裏当て材による変形抑制効果を確認した。形状測定の条件は表5のとおり。変形量は溶接前の板材を基準とし、溶接後の試験片の測定データとベストフィット法で位置合わせて評価した。またシミュレーションでの熱源形状補正効果の確認のため、BOP-1 について、マクロ観察を行った。

表2 ビードオンプレート試験条件

条件名	条件
BOP-1	1パス ノンフィラ溶接
BOP-2	1パス ノンフィラ溶接 - 裏当て材

表3 ビードオンプレート溶接供試材の詳細

材料規格	SUS329J4L (JISG4305)									
板寸法[mm]	板厚 3×幅 100×長さ 150									
化学成分[%]										
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	N	Co
0.0	0.	0.	0.0	0.0	6.	24.	3.	0.	0.	0.
15	32	71	31	00	38	56	29	13	17	14

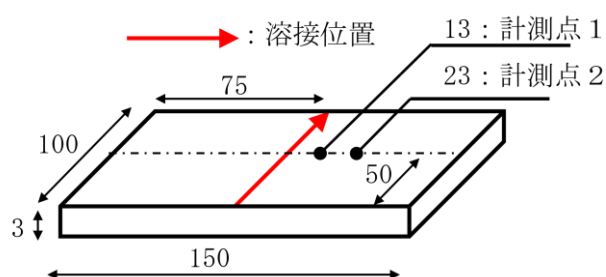


図2 ビードオンプレート溶接試験体形状

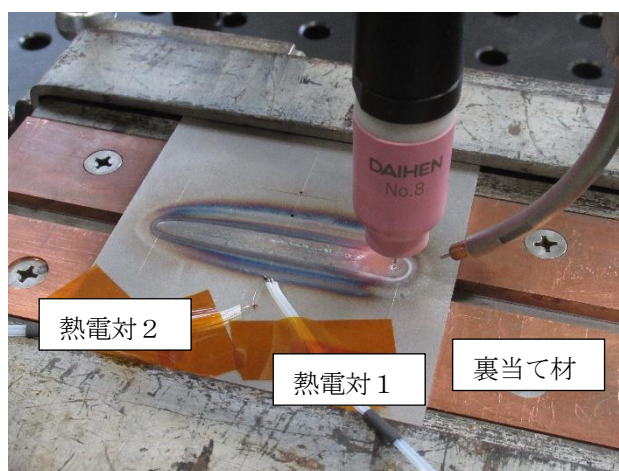


図3 ビードオンプレート溶接実験状況

2. 1. 2. シミュレーション

2. 1. 2. 1. 概要

シミュレーションにはMSC 社製「Simufact.Welding」を用いた。本ソフトは溶融現象を考慮せず、固体力学の範疇でのみ計算を行うことが特徴的である。溶融池内に投入されるエネルギー分布を熱源として入力することで、間接的に溶融池での流れの効果などを考慮する。マクロ観察結果を用いた熱源形状から実現現象に近いモデルの作成ができることを強みとしている。熱構造計算が可能で、温度、変形、残留応力などが計算で

表4 ビードオンプレート溶接条件

溶接法	ティグ
溶接姿勢	下向き
溶接ワイヤの種類	MG329J4L (タセト)
溶接ワイヤ径[mm]	1.2
平均電流[A]	80
平均電圧[V]	11.0
電流/極性	直流
溶接速度[cm/min]	5
溶接入熱[kJ/mm]	1.06
シールドノズル形状 ※ガスレンズ使用	内径 12.7[mm]
シールドガス	Ar
トーチシールド流量 [L/min]	8.0
バックシールドガス	Ar
バックシールド流量 [L/min]	5.0
電極種類	2%セリウム入りタン グステン
電極形状	φ2.4[mm] 先端角度 60[°]
電極突き出し長さ[mm]	10
電極-母材間距離 L[mm]	3
トーチ角度	進行方向に 90[°]
裏当て材の材質 ※BOP-2 のみ	銅板

表5 外観形状測定条件

メーカー	SHINING 3D
型式	Free Scan Combo+
測定範囲[mm]	520×510
測定精度[mm]	0.02
点間ピッチ[mm]	0.5

きる。本研究では、本ソフト使用の目的を、任意の箇所の温度履歴から、組織を予測することとしているため、熱計算のみ行った。また、「Simufact.Welding」用の材料データベース作成、二相ステンレス鋼の材料状態図やCCT線図作成のために、熱力学計算ソフトとして、Sente Software 社製の「JmatPro」を用いた。「JmatPro」では、各元素組成の数値入力を行うことで、平衡状態図、CCT線図、TTT線図、熱的特性、機械的特性などの各種計算が可能である。ミルシートに基づいた組成入力を行い、「Simufact.Welding」へのデータ出力を行うことで、より精度の高いシミュレーションが可能になる。

2. 1. 2. 2. 解析モデルの作成と条件設定

実験に基づき作成した解析モデルを図4に示す。銅

当て金の有無による温度履歴を解析するため治具と裏当て材もモデル化、解析を行った。この時、熱伝達を正確に表現するため、治具と裏当て板も要素化し、熱計算に含めた。メッシュは「Simufact.Welding」により溶接部付近が自動細分化し、基本のメッシュサイズは4[mm]、細分化された要素は1[mm]とした。治具と裏当て板のメッシュサイズは10.0[mm]とした。また、対流熱伝達係数 $h[W/(m^2 \cdot K)]$ は一般的な自然対流を想定し 4.0、接触伝達係数 $\alpha[W/(m^2 \cdot K)]$ は各材料の熱伝導率の中間的な値 30.0 とした。温度履歴取得位置は、実験と併せて溶接中心から13[mm]、23[mm]の二か所とした。材料物性値の作成は「JmatPro」で行い、元素組成は表3の母材とし、母材部でオーステナイト相とフェライト相の比が1：1とする条件で計算を行った。

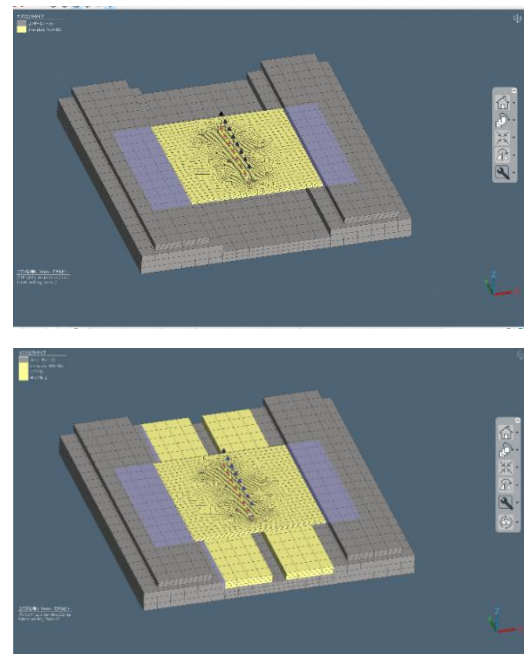


図4 解析モデル（上：裏当て材無し、下：裏当て材あり）

2. 1. 2. 3 熱源形状補正

熱源形状は溶融池へのエネルギー分布を数学的に表現したものである。「Simufact.Welding」では、溶融現象は計算に含めず、熱源の形状によって間接的に考慮する。ソフトでは、トーチの送り速度や電流、電圧等の溶接条件から熱源の形状を推定できるが、解析精度向上のためには、マクロ観察結果から熱源形状を補正することが推奨されている。そこで、今回の解析では溶接試験片のマクロ観察結果から熱源形状を補正し、解析を行った。補正を行う熱源形状パラメータを図5に示す。 a_f が熱源前部長さ、 a_r が熱源後部長さ、 b が熱源幅、 d が熱源深さを表している。なお、ロボット溶接のため入熱量が一定になると想定し、熱源形状にはBOP-1（裏当て材無し）のマクロ観察結果のみを用いた。マクロ観察結果を図6に示す。

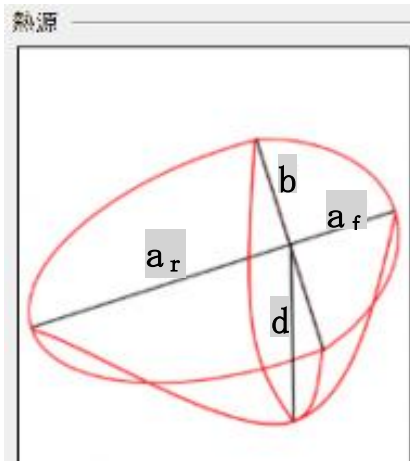


図5 熱源形状パラメータ

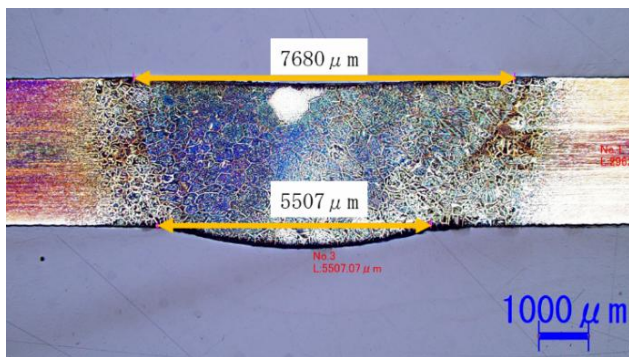


図6 BOP-1マクロ観察結果

熱源形状を補正する作業には、「Simufact.Welding」の溶接モニター機能を用いた。図7には補正作業により、マクロ観察結果と溶融領域寸法が一致した後の溶接モニター画面を示す。図7中の赤い領域が液相線以上の温度、黄色い領域が液相線以下、固相線以上の温度を示している。赤い領域の形状が図6のマクロ観察結果の溶融金属部と合致するよう熱源形状や熱効率などのパラメータを補正している。なお、マクロ観察結果の結晶粒が著しく粗大な領域を溶融金属部とした。表6に熱源形状の設定条件を示す。補正後は、推定値よりも幅が広く浅い熱源形状となり、熱効率は0.73だった。ガウスパラメータMは熱源の広がりを表す無次元数で、今回の解析では、標準の3.0とした。

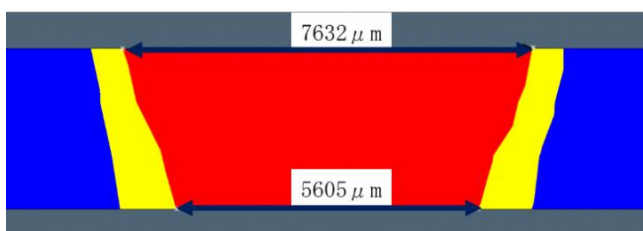


図7 熱源形状補正後の溶融領域

表6 熱源形状パラメータ

条件	a_f [mm]	a_r [mm]	b [mm]	d [mm]	M [-]
熱源形状 補正前	2.99	11.95	4.18	8.70	3.0
熱源形状 補正後	3.6	12.0	6.0	3.0	3.0

2. 2. 板の突合わせ溶接試験

板厚3[mm]の板材について、「JISZ3821 ステンレス鋼溶接技術検定における試験方法及び判定基準」の基本級下向き（以下、TN-F）を参考に板の片面下向きの完全溶込み突合せ溶接を行った。通常、TN-Fは2パス溶接が行われるが、溶接ロボットでは手溶接と異なり、トーチ高さ、溶接速度、ワイヤ供給速度が一定であるため、溶接条件の再現性が高く、安定した高入熱溶接が可能である。そこで今回は、溶接ロボット特有の1パス溶接と手溶接を模擬した2パス2種類の条件で溶接を行った。溶接条件の設定は、文献の推奨入熱範囲を参考にした。溶接条件名と概要を表7、共通の溶接条件を表8、供試材の条件を表9、溶接材料の条件を表10、溶接条件により異なる条件を表11に示す。試験体形状と開先形状を図8、実験状況を図9に示す。2パス溶接では、パス間温度を100[°C]以下とした。試験後は外観観察と溶接部のフェライト量測定、金属組織観察を行った。フェライト量はフィッシャー・インストルメンツ製FERITSCOPE DMP30で10回測定し、平均値、標準偏差、繰返し範囲を算出した。金属組織観察は試験片から切り出し、研磨とエッチング後に行った。エッチングにはベラハ試薬を用いた。

表7 試験条件名と概要

条件名	概要
TNF-1	1パスノンフィラー溶接
TNF-2	1パス1層完全溶け込み-1
TNF-3	1パス1層完全溶け込み-2、溶加材多め
TNF-4	2パス2層完全溶け込み

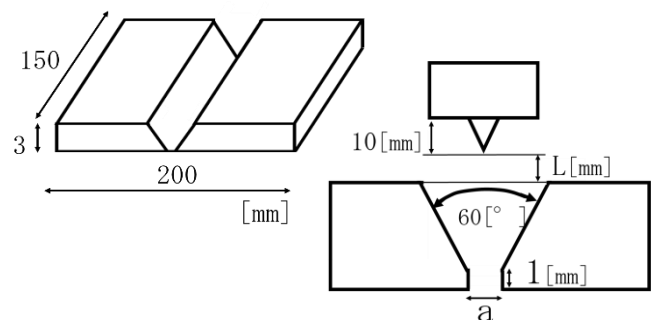


図8 試験体形状及び開先形状

表 8 板突合せ溶接 共通の溶接条件

溶接法	ティグ
溶接姿勢	下向き
溶接ワイヤの種類	MG329J4L (タセト)
溶接ワイヤ径[mm]	1.2
電流/極性	直流
シールドノズル形状 ※ガスレンズ使用	内径 12.7[mm]
シールドガス	Ar
シールドガス流量[L/min]	トーチ 8 バックシールド 5
電極種類	2%セリウム入りタン グステン
電極形状	φ2.4[mm] 先端角度 60[°]
トーチ角度	進行方向に 90[°]
裏当て材	なし

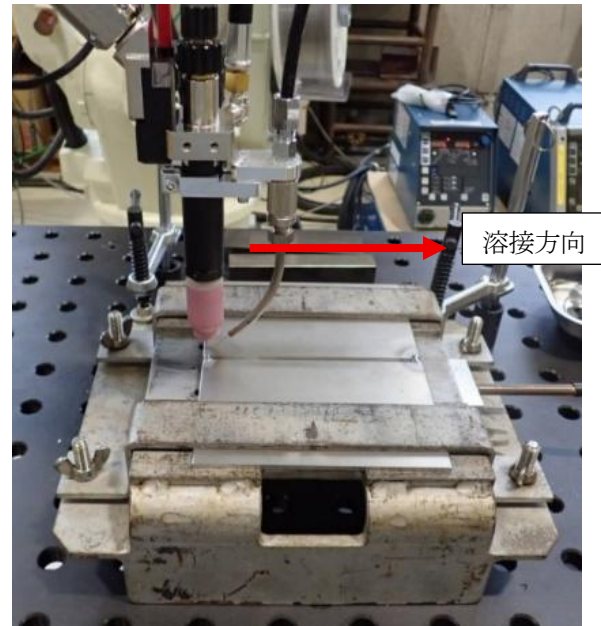


図 9 板突合せ溶接実験状況

表 9 板突合せ溶接供試材の詳細

材料規格	SUS329J4L(JIS G 4305)											
板寸法[mm]	板厚 3×幅 100×長さ 150											
化学成分[%]	水準名	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	N	Co
	TNF-1	0.016	0.34	0.71	0.03	0.000	6.28	24.62	3.22	0.12	0.17	0.14
	TNF-2	0.014	0.38	0.75	0.031	0.000	6.46	24.63	3.22	0.13	0.17	0.16
	TNF-3	0.014	0.29	0.71	0.030	0.000	6.36	24.59	3.21	0.12	0.17	0.11
	TNF-4	0.015	0.32	0.71	0.031	0.000	6.38	24.56	3.29	0.13	0.17	0.14

表 10 板突合せ溶接 溶接材料の詳細

規格	YS329J4L(JIS Z 3321)										
化学成分[%]	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	N	Co
	≤0.03	≤0.90	0.5～ 2.5	≤0.03	≤0.03	8.0～ 11.0	23.0～ 27.0	3.0～ 4.5	—	0.08～ 0.30	—

表 11 板突合せ溶接 個別の溶接条件

試験 条件	パス 数	平均 電流 [A]	平均 電圧 [V]	溶接 速度 [cm/min]	ワイヤ 送球速度 [cm/min]	溶接 入熱 [kJ/mm]	電極-母 材間距 離 L[mm]	ルート 間隔 a [mm]	溶接動作
TNF-1	1	60	9.6	4	0	0.86	3	0	ストリング
TNF-2	1	80.5	10.6	5	30	1.02	1	S:1 E:2	ストリング
TNF-3	1	80	10.8	4	40	1.30	2	S:1 E:2	ストリング
TNF-4	1	65	10.7	4	15	1.04	3	1.5	ウィービング 幅 0.5[mm] 周波数 0.5[Hz] 両端停止 0.2[s]
	2	60	10.0	4	25	0.9	3	—	//

3. 結果と考察

3. 1. ビードオンプレート溶接を対象とした熱履歴の実測とシミュレーションの比較

3. 1. 1. 溶接試験結果

溶接後の試験片外観を図10、図11に示す。裏当てなし、裏当てありともにビード幅は約8[mm]だった。また、溶接時の電流-電圧の記録を図12に示す。

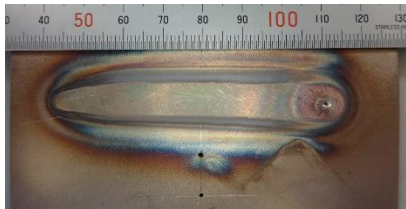


図10 BOP-1（裏当て材無し） 溶接後外観

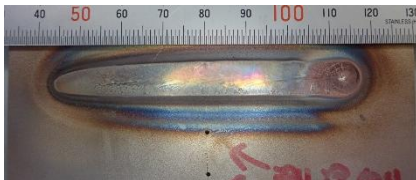


図11 BOP-2（裏当て材あり） 溶接後外観

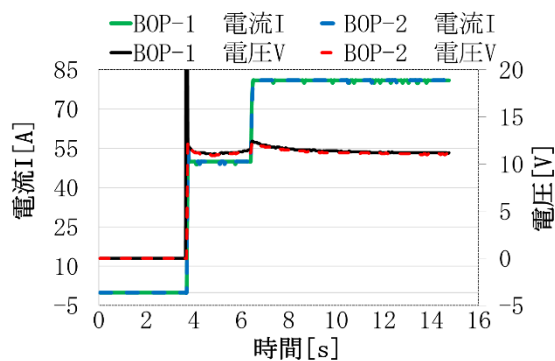


図12 BOP溶接時 電流と電圧

電流と電圧は溶接時に一定だった。ティグ溶接は定電流特性でトーチ高さが変化すると電圧が変化するが、ロボット溶接によりトーチ高さが安定したため、電圧も変化なく一定となった。また、裏当ての有無で電流と電圧に変化はなかった。このことから裏当て材にかかわらず、入熱量は一定と考えられる。

3. 1. 2. 溶接試験体の形状測定

形状測定の結果を図13、図14に示す。共通して横収縮、縦収縮及び板厚方向の熱収縮量の差による曲がり変形がみられるが、BOP-1（裏当て材なし）の変形が大きい。入熱量が同じであっても、裏当て材による冷却効果で変形が抑制された。

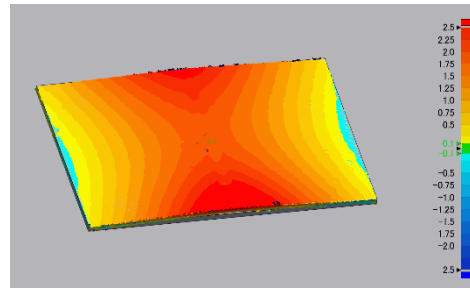


図13 BOP-1（裏当て材なし）形状測定結果

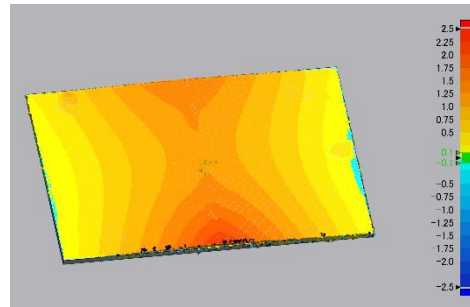


図14 BOP-2（裏当て材あり）形状測定結果

3. 1. 3. 熱履歴実測結果

測定した熱履歴を図15、図16に示す。裏当てあり、裏当て無しで最高到達温度が200[°C]異なっており、裏当て材による冷却効果を示している。

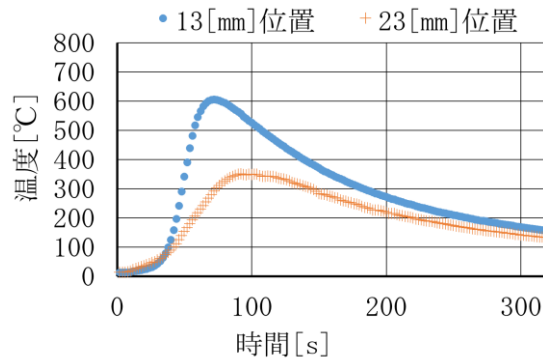


図15 BOP-1（裏当て材無し）熱履歴結果

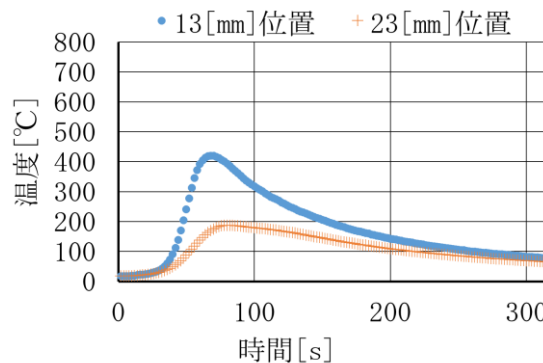


図16 BOP-2（裏当て材あり）熱履歴結果

3. 1. 4. BOP-1を対象とした実測とシミュレーションの比較結果

BOP-1（裏当て材なし）のシミュレーション結果を図17、実測値との比較を図18に示す。実測値で比較すると、加熱、冷却時のカーブはよく一致しており、23[mm]の位置では最高温度の差が12[°C]と良い計算結果が得られている。一方で、溶接中心から13[mm]の位置では、実測値よりシミュレーション解析の方が58[°C]高い温度となっている。実験では、板に空けた穴に熱電対を差し込み、銅線により伝熱を確保しているが、完全接触は難しく、一部の空気層により伝熱が阻害されて温度が低く測定されている可能性がある。また、薄板への溶接であるため、相対的に熱電対自体の熱容量が大きく、測定温度が下がっている可能性もある。また、シミュレーションではバックシールドガスによる冷却を考慮できていないため、シミュレーション結果がやや過剰と考えることもでき、真の値はシミュレーション結果と実験値の間にあると想定される。

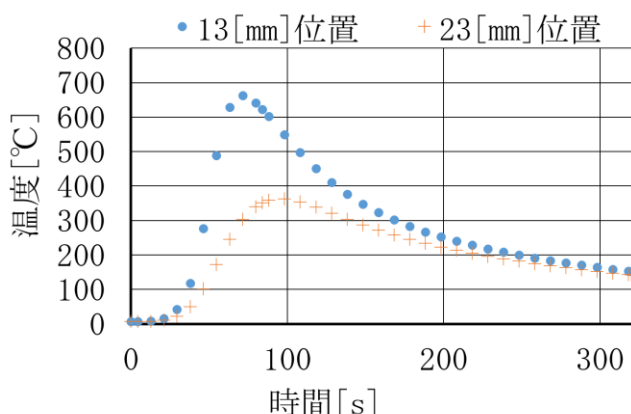


図17 BOP-1シミュレーション結果 熱源補正後

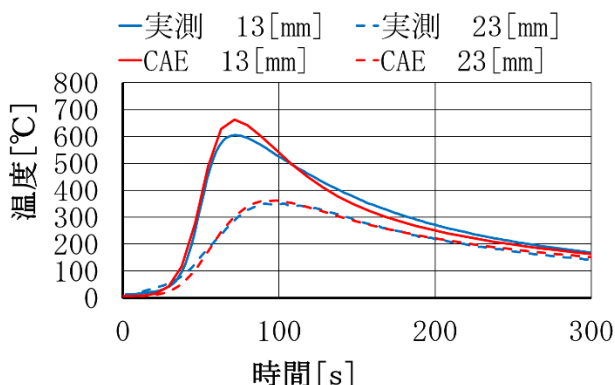


図18 BOP-1 実測とシミュレーションの比較

3. 1. 5. BOP-2を対象とした実測とシミュレーションの比較結果

BOP-2（裏当て材あり）のシミュレーション結

果を図19、BOP-2の実測とシミュレーションの比較を図20に示す。シミュレーションでは実験値に比べ、特に13[mm]位置での最高到達温度が260[°C]低い結果となった。接触熱伝達係数が過剰であることが主な原因と考えられる。解析モデルでは、溶接板と裏当て材が理想的な完全接触と定義しているが、現実には、板のそり、表面粗さやひずみの影響で部分的にしか接触していないため、実測では冷却効果が限定的と考えられる。以上から、裏当て材を含んだシミュレーションには注意が必要である。

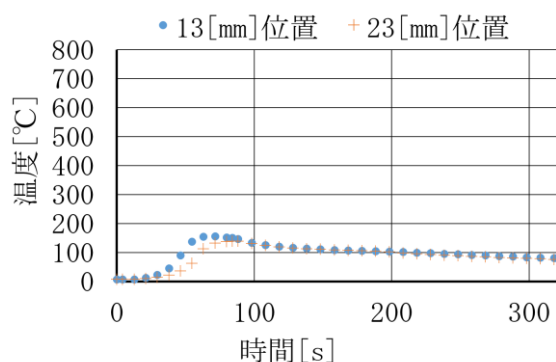


図19 BOP-2シミュレーション結果 熱源補正後

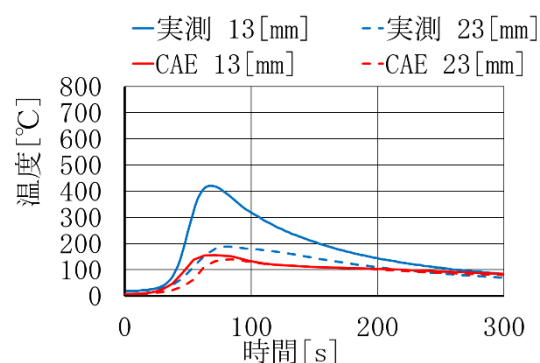


図20 BOP-2 実測とシミュレーションの比較

3. 2. 板の突合わせ溶接試験結果

3. 2. 1. 外観観察

板突合わせ溶接試験後の外観を図21に示す。ノンフイラ溶接のTNF-1では、GAPがないことも影響し裏波ビードができていない。TNF-2、TNF-3、TNF-4は裏波ビードが確認でき完全溶け込みとなっている。TNF-2とTNF-3はストリンガビードで入熱も大きいため波目模様が形成されなかった。入熱量とワイヤ供給量が多いため裏波ビードの幅も大きかった。TNF-3は余盛高さを得るために溶接速度を落としワイヤ供給量を増やしたが、余盛高さは低いため1パス溶接ではこれ以上の余盛高さを得るのは難しいと考えられる。TNF-2、TNF-3、TNF-4は金属光沢があり、表面酸化もなく適切な溶

接となった。

3. 2. 2. フェライト量測定

測定結果を表12に示す。フェライトスコープはフェライト量が増えると非線形誤差が大きくなることが知られており、標準片のFe88[Fe%]や平均値80[Fe%]に近いと標準偏差も大きくなっている。裏ビードではいずれも繰返し範囲と標準偏差が大きくなった。センサ先端のφ2[mm]が凸形状に接触している形状効果の影響と思われる。

溶接材料を添加していないTNF-1ではフェライト量が多い結果となっており、TNF-2、TNF-3の表ビードでは違いがみられず70[Fe%]程度となった。TNF-4の表ビードでは52.4[Fe%]と最も良い比率となった。一般的に30～70[Fe%]が適正範囲とされている⁴⁾ため、表ビードに関してはTNF-4の溶接条件が適正に近いと考えられる。一方、裏ビードでは、TNF-2、TNF-3及びTNF-4で60～70[Fe%]で、特に表ビードでは52.4[Fe%]だったTNF-4でも高くなっており、表ビードと裏ビードで金属組織が異ったと考えられる。

表12 フェライト量測定結果

試験体	平均値 [Fe%]	繰返し範囲 [Fe%]	標準偏差
標準片 Fe88%	86.7	3.8	1.3
標準片 Fe32.9%	32.8	0.2	0.1
TNF-1 表ビード	79.8	6.5	2.0
TNF-1 母材	49.7	6.3	2.2
TNF-2 表ビード	70.3	4.4	1.4
TNF-2 裏ビード	59.9	10.7	3.2
TNF-2 母材	44.7	4.7	1.7
TNF-3 表ビード	69.2	18.9	6.3
TNF-3 裏ビード	66.5	22.4	7.0
TNF-3 母材	46.1	3.1	1.0
TNF-4 表ビード	52.4	8.5	3.3
TNF-4 裏ビード	70.1	16	5.6
TNF-4 母材	53.4	3.1	1.0

3. 2. 3. 金属組織観察

マクロ観察結果を図22、ミクロ組織観察結果を図23から図26に示す。今回は着色エッチングを行ったため、着色部がフェライトで白色部がオーステナイトである。マクロ組織では、溶接材料を添加していないTNF-1では母材より余盛が低くなっているが、溶け

込み不良はなくTNF-2、TNF-3、TNF-4でも溶け込み不良はない。TNF-2では余盛高さが1[mm]に満たないが、TNF-3でワイヤ供給量を増やしたことで余盛高さは1[mm]程度高くなっている。熱影響部はいずれの条件でも2[mm]程度となった。

ミクロ組織観察の結果では、母材組織が粒径1[μm]程度に対し、溶接部では粒径が200～500[μm]程度に粗大化した。

溶接条件による違いでは、TNF-1が最も粒径が小さく入熱量が小さい。そのため、オーステナイトが成長する時間がなく、最もフェライトの面積が大きくフェライトスコープの結果とも一致している。入熱量は推奨範囲内となっているが、熔融金属にNiなどのオーステナイト促進元素が添加されていない影響が表れており、ノンフィラ溶接には注意が必要であることを示している。TNF-2、TNF-3、TNF-4では溶接金属中央部では粒径とフェライト量に大きな違いは見られず、ミクロ組織サンプル⁴⁾と比較して、フェライト量は60～70[%]程度と考えられ、フェライトスコープの結果ともよく一致している。一方、溶接金属の表ビード表面部と裏ビード表面部では違いがみられた。裏ビード表面100[μm]でいずれもオーステナイト組織が少なくフェライト量が80[%]以上となっている。これは、ティグ溶接時に母材中の窒素が蒸発しオーステナイトの成長速度が遅いためと考えられる。一方、表ビード表面では、TNF-2、TNF-3では同様にビード表面100[μm]でいずれもオーステナイト組織が少なくフェライト量が80[%]以上となっているが、TNF-4ではオーステナイト組織が十分に成長しており、溶接材料の添加による影響と考えられる。ティグ溶接ではアルゴンガスに若干の窒素ガスを添加することが推奨されているため、次年度以降、追加実験を行う予定である。また、裏ビードに対してもシールドガスに窒素ガスを使用した実験を行う予定である。相比改善のための溶接条件としては、推奨入熱範囲の上限を狙うことが考えられるが、入熱が大きくなるとビード幅や熱変形、表面酸化にも悪影響があり、実際の製造現場で適用できるか、次年度改めて実験を行う予定である。また、ビード表面のフェライト相についてEPMA分析を行っていく予定である。

今回、TN-Fを参考に入熱範囲内の溶接を行ったが、特に裏ビード表面でフェライト量が想定よりも高かった。溶接入熱の管理以外の手法で相比を適正にしていくな必要が示唆された。

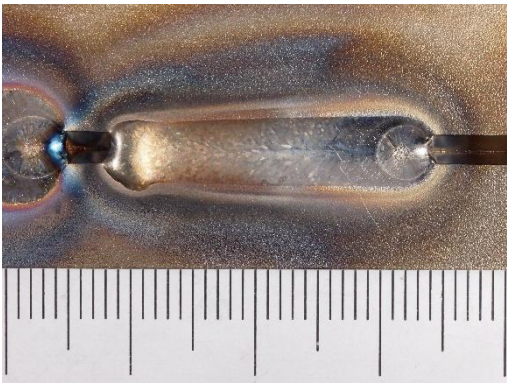
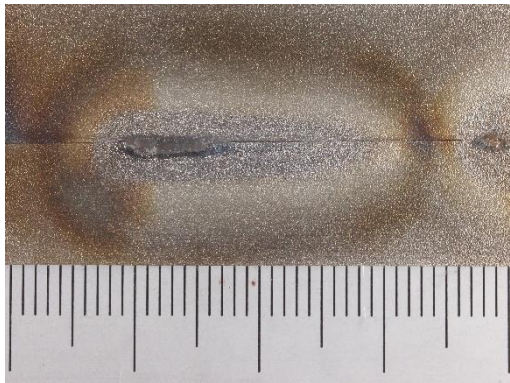
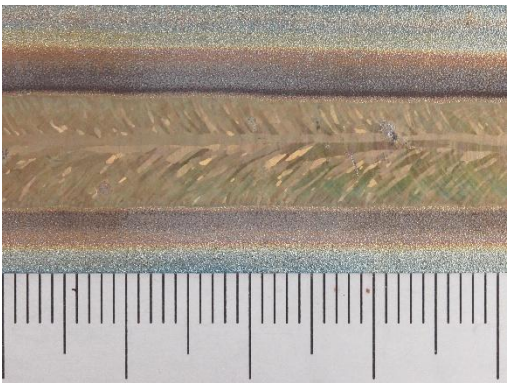
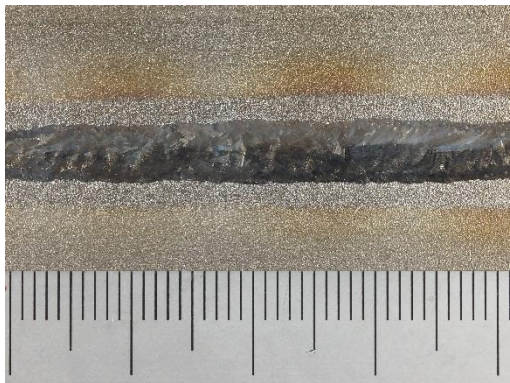
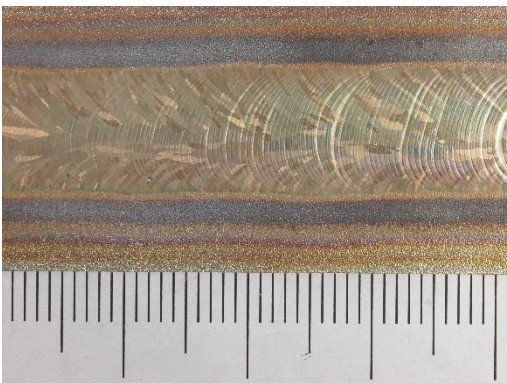
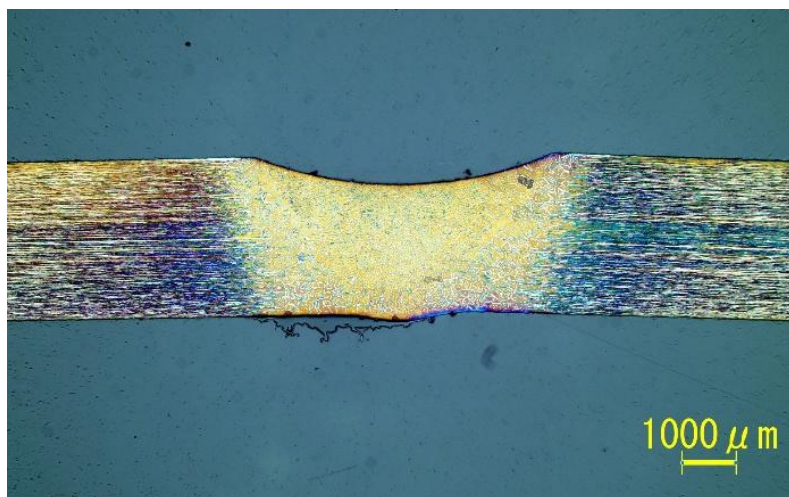
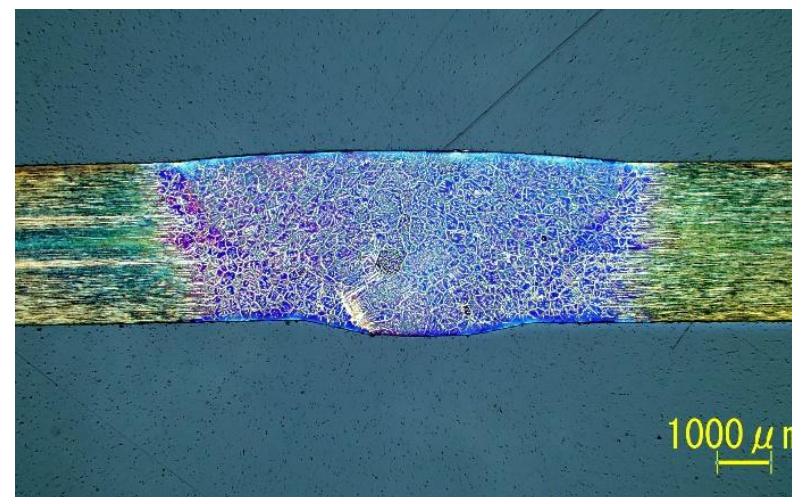
条件名	表側	裏側
TNF-1	 Front view of the TNF-1 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.	 Back view of the TNF-1 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.
TNF-2	 Front view of the TNF-2 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.	 Back view of the TNF-2 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.
TNF-3	 Front view of the TNF-3 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.	 Back view of the TNF-3 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.
TNF-4	 Front view of the TNF-4 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.	 Back view of the TNF-4 butt joint weld. The weld is a smooth, elongated, and slightly raised bead. The base metal is a dark, textured material. A ruler is visible at the bottom for scale.

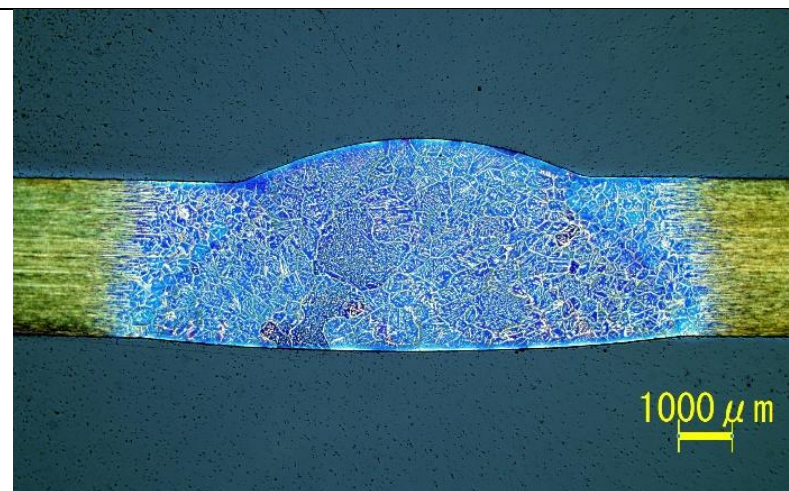
図 2 1 板突合せ溶接 外観写真



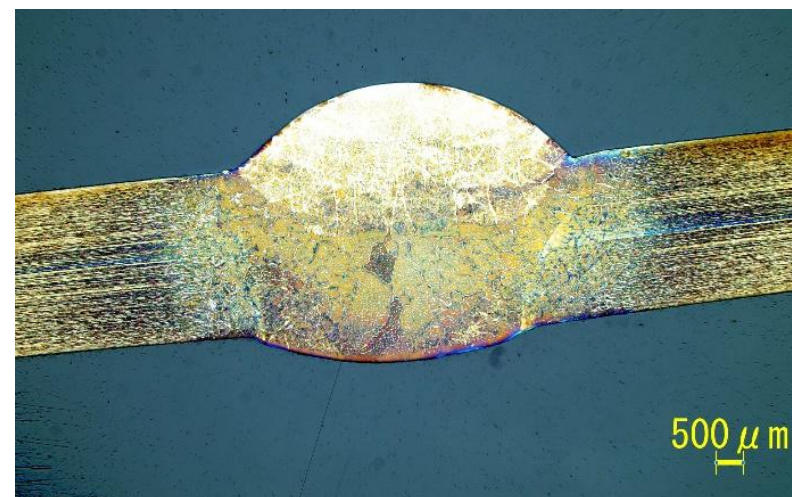
TNF-1



TNF-2



TNF-3



TNF-4

図 2 2 板突合せ溶接 マクロ観察写真

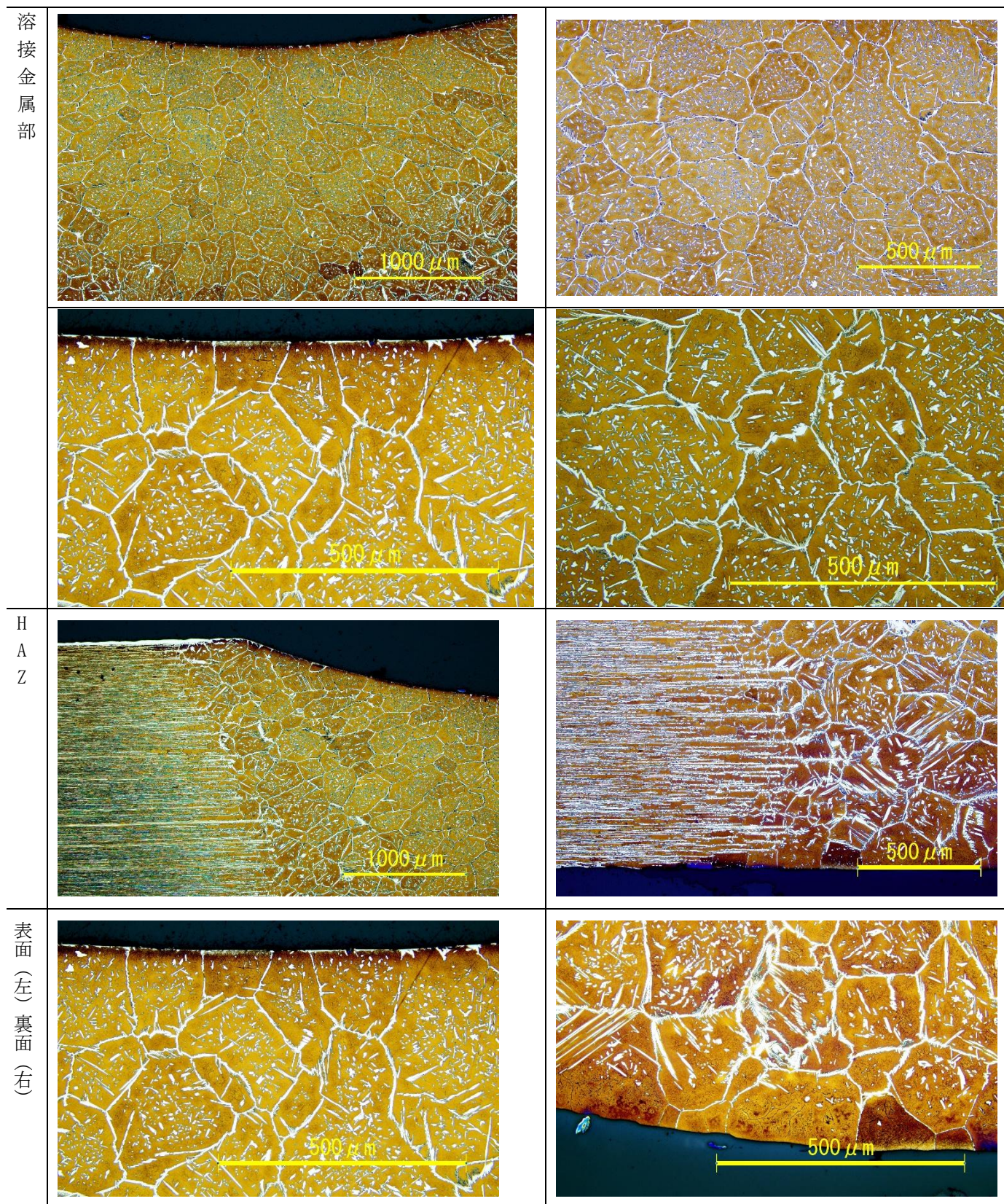


図 2 3 TNF-1 板突合せ溶接 ミクロ組織観察写真

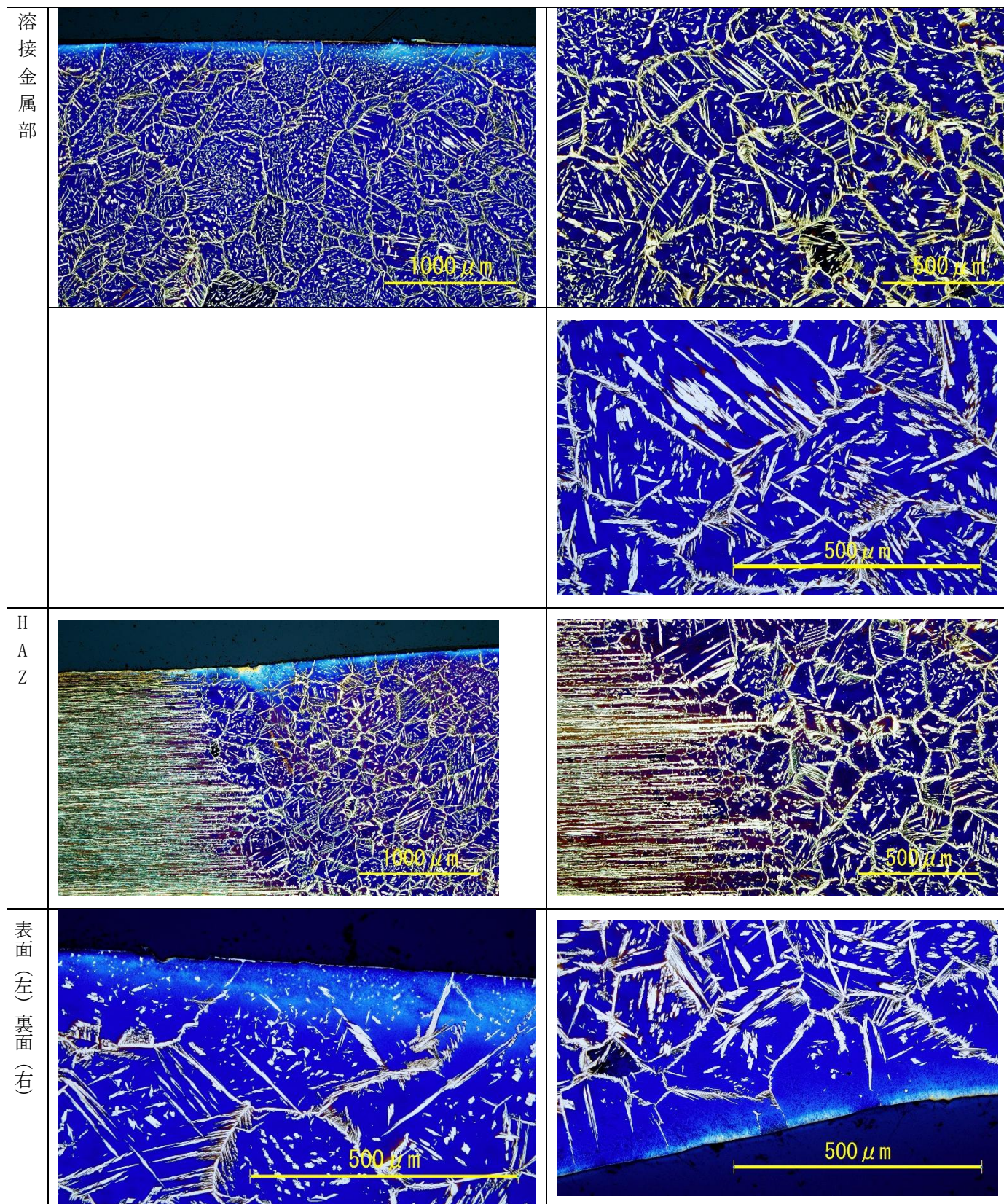


図 2 4 TNF-2 板突合せ溶接 ミクロ組織観察写真

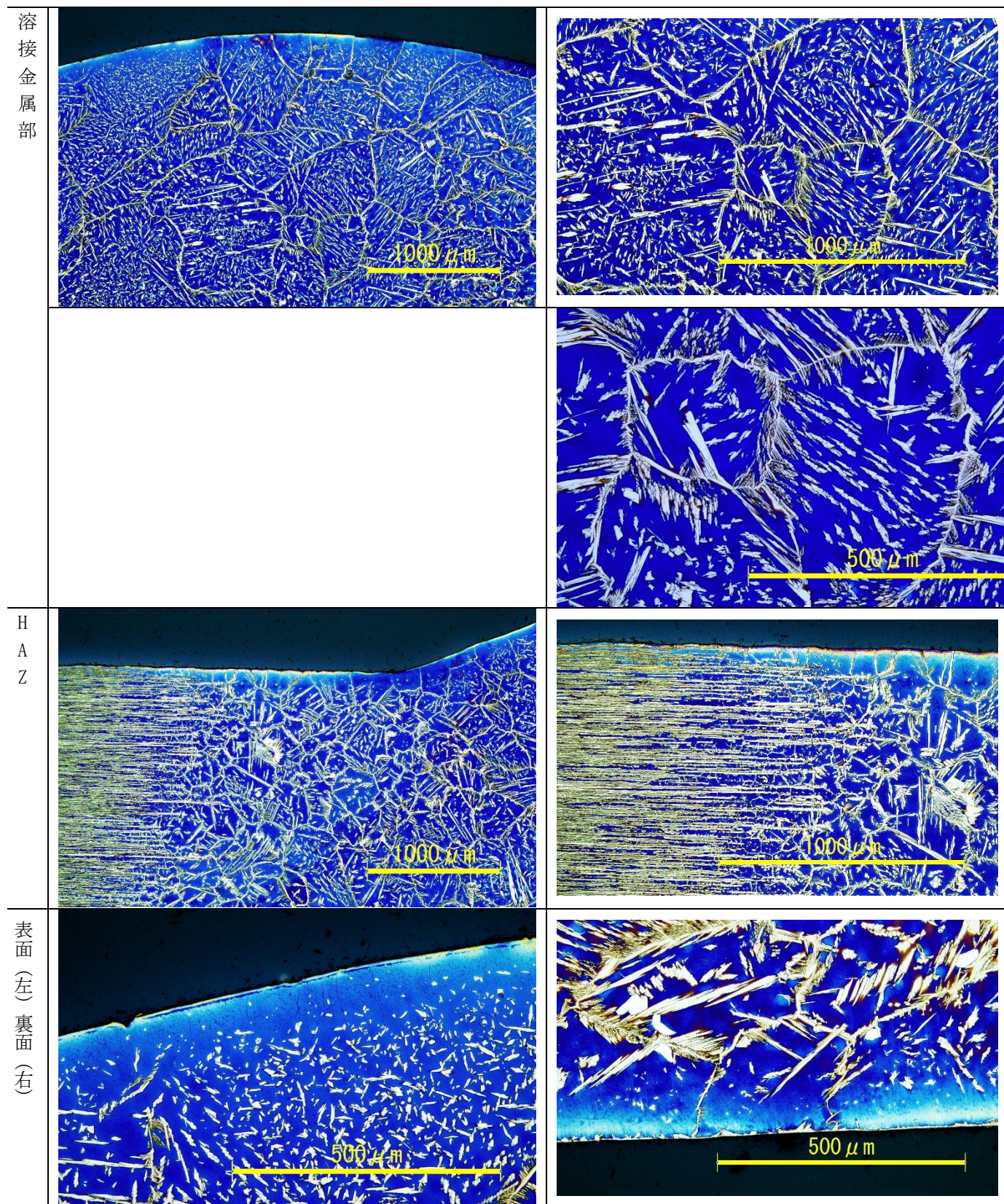


図 2 5 TNF-3 板突合せ溶接 ミクロ組織観察写真

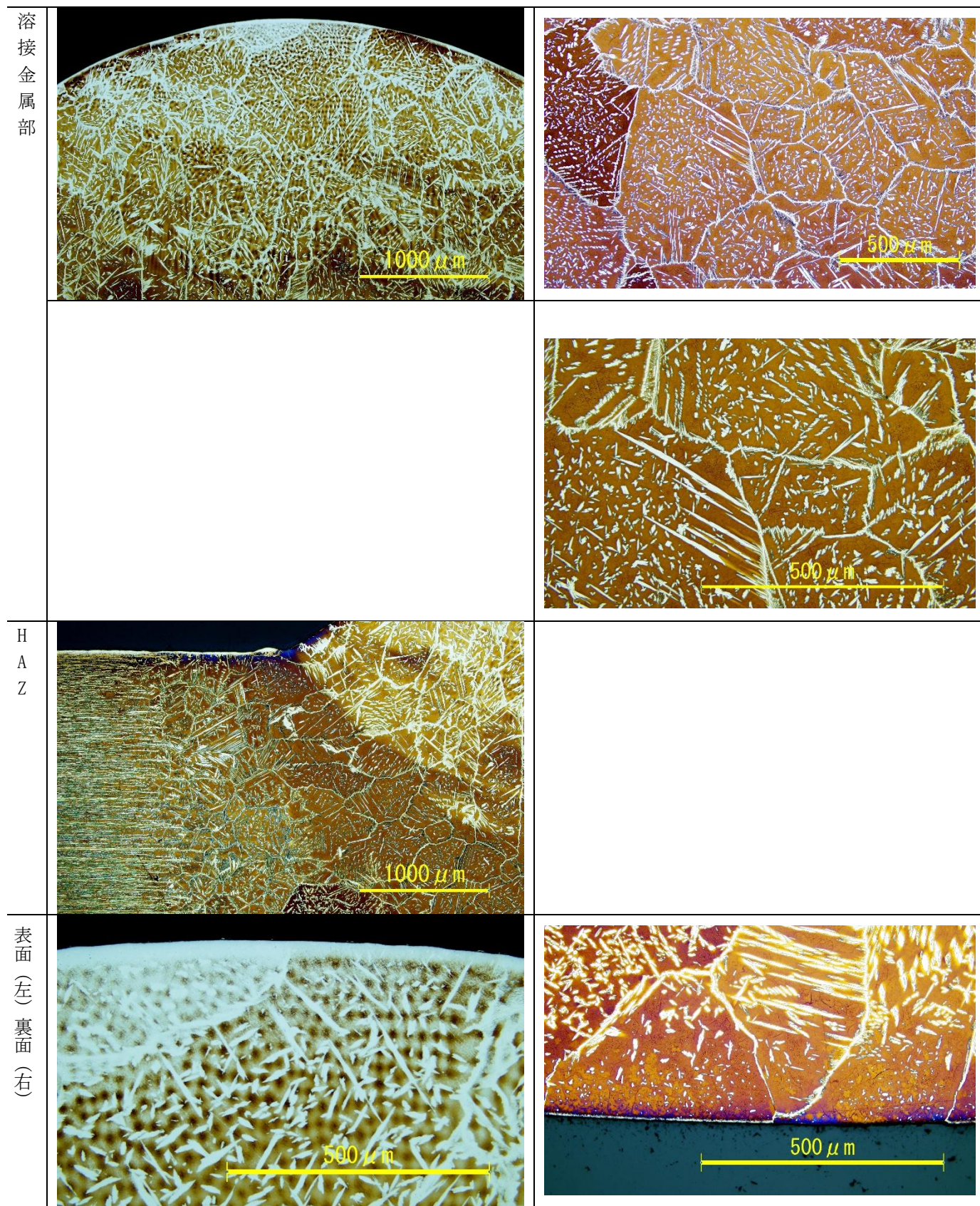


図 2 6 TNF-4 板突合せ溶接 ミクロ組織観察写真

4. 結言

今年度は耐食性が高く特に化学プラントで今後普及が期待される SUS329J4L を対象に、ビードオンプレート溶接を対象とした熱履歴の実測とシミュレーションの比較を行った。また、板突合せ溶接試験を行いフェライト量測定と金属組織観察を行い以下の結論を得た。

- (1) ビードオンプレート溶接を行い裏当て材による冷却効果と変形の抑制を確認した。
- (2) ロボットによるティグ溶接では電流と電圧が安定し実験が可能なことを確認した。
- (3) ビードオンプレート溶接で裏当て材を用いない実験では、シミュレーションと実測の差は、最大で 58[°C] だった。
- (4) ビードオンプレート溶接で裏当て材を使用した実験では、シミュレーションと実測の差は 260[°C] だった。
- (5) 板突合せ溶接試験の結果、溶接材料を用いない溶接では推奨入熱範囲でもフェライト量が大きくなることが分かった。
- (6) 板突合せ溶接試験の結果、1 パス溶接では溶接材料の供給を増やしてもフェライト量の改善は見られなかった。
- (7) 板突合せ溶接試験の結果、溶接材料を用いた溶接で推奨入熱範囲であっても、再表面にビード表面 100[μm] でいずれもオーステナイトが少なくフェライト量が 80[%] 以上となった。

次年度は、中厚板の多層溶接等に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) “福島新エネ社会構想について”. 経済産業省資源エネルギー庁.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/fukushima_vision/, (参照 2026-2-27) .
- 2) 工藤弘行, 丸田淳央, 伊藤弘康. 金属加工部材の水素・アンモニア利用環境適合性評価技術の確立 (第 1 報). 令和 5 年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2024.
- 3) 工藤弘行, 丸田淳央, 伊藤弘康. 金属加工部材の水素・アンモニア利用環境適合性評価技術の確立 (第 2 報). 令和 6 年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2025.
- 4) 一般社団法人溶接協会化学機械溶接研究委員会. 二相ステンレス鋼の溶接施工の勘どころ. 初版. 産報出版株式会社. 2024. 213 頁.