

土木研究所資料

リーン系二相ステンレス鋼の溶接性および 溶接部の耐食性に関する実験的研究

—河川・ダム施設を例にして—

平成29年1月

国立研究開発法人 土木研究所
先端材料資源研究センター材料資源研究グループ

Copyright © (2017) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

リーン系二相ステンレス鋼の溶接性および 溶接部の耐食性に関する実験的研究

－河川・ダム施設を例にして－

先端材料資源研究センター

材料資源研究グループ

上席研究員 西崎 到

主任研究員 富山 禎仁

交流研究員 岡田 修幸

要 旨

河川・ダム施設における鋼構造物のメンテナンスを効率化・省力化することが求められており、そのための防食技術の確立が必要とされている。近年開発が進んでいるリーン系二相ステンレス鋼は、河川・ダム施設の耐食性向上に寄与することが期待されている、新しいタイプのステンレス材料である。本報告書は、リーン系二相ステンレス鋼を河川・ダム施設に適用するために必要なデータの収集を目的として行った、溶接性試験および屋外暴露試験結果をとりまとめたものである。

キーワード：河川・ダム施設、鋼構造物、防食、二相ステンレス鋼、溶接性試験、屋外暴露試験

はじめに

河川・ダム施設は、洪水調整や灌漑用水・飲料水の確保並びに発電など、多目的に河川水を有効利用したり制御するための重要な施設である。

河川・ダム施設の鋼構造物は、複雑な構造をした多くの部材で構成されているものが多く、機能を維持するためのメンテナンスも、施設の運用上、限られた期間で行うことが求められるなど制約条件も多い。

このため、河川・ダム施設では早くからメンテナンスを軽減するため、ステンレス材料などの耐食材料が比較的多く使用されている。

しかしながら、ステンレス材料は適切に使用されないと、かえって周囲の鋼構造物などに悪影響を与えてしまう場合や、ステンレス材料自身が腐食することがあることも明らかになってきた。土木研究所では、これまでに河川・ダム施設ステンレス材料の利用実態を調査（土木研究所資料第 2909 号）し、ステンレス材料の淡水環境における腐食挙動（土木研究所資料第 3165 号）を明らかにした。

一方で、自然災害の激甚化が深刻な社会問題となっている。地球温暖化の影響で、震災や集中豪雨の被害が従来の想定をはるかに超えるケースが出ており、設計前提の厳格化に伴いゲートの素材にも、より高強度が求められるケースが出ている。

この状況下にあって、高強度・高耐食性を特徴とする二相ステンレス鋼は、今後のゲート設備に求められる特性を高い次元で満足できる素材として注目されている。

二相ステンレス鋼の歴史は古く、SUS329J4L がその代表鋼種であるが、一般に性能は良いものの高価格で、更に溶接など施工性の面で課題が多いとされており、汽水環境に常時接水するゲート戸当りなど、一部の用途に限定利用されてきた。

しかし最近、国内でリーン系二相ステンレス鋼などの新鋼種の開発が進んでおり、状況は変化しつつある。リーン系が従来の二相ステンレス鋼と異なるのは、モリブデンやニッケルなど高価な合金元素を節約しつつ、広く用いられているオーステナイトステンレス鋼と同等以上の性能を確保した点である。SUS304 の代替とされる SUS821L1 や、上位鋼種である SUS316L 相当の耐食性を有する SUS323L など、国内で入手可能なリーン系二相ステンレス鋼のバリエーションも増えており、リーン系二相ステンレス鋼が河川設備の主要鋼材に採用される事例も出てきている。更に、モリブデンを殆ど含まないことで、二相ステンレス鋼の弱点とされてきた、溶接性にも有利とされ、厚板の使用が多い大形の水門で、長期的な耐久性の向上に加えて軽量化のメリットが期待される。

今後、リーン系二相ステンレス鋼のゲートへの適用検討が本格的に進むものと期待されているが、JIS 規格化されたものの歴史は浅く、ダム・堰施設技術基準（案）などの現行技術基準にも記載はない。本研究にて、その諸特性を明らかにすると共に、利用加工の性能上の課題についても整理するものである。

目 次

はじめに

1. 概要	1
1.1 ステンレス鋼	1
1.1.1 ステンレス鋼とは	1
1.1.2 ステンレス鋼の種類と用途	1
1.1.3 ステンレス鋼の金属組織	2
1.2 リーン系二相ステンレス鋼	2
1.2.1 特徴	2
1.2.2 化学成分	3
1.2.3 力学的性質	4
1.2.4 物理的性質	5
1.2.5 耐食性	6
1.3 リーン系二相ステンレス鋼の適用にあたり明確化すべき課題	7
2. ステンレス新材料の溶接性および溶接部の耐食性に関する室内試験	8
2.1 試験目的	8
2.2 溶接性および溶接部の耐食性に関する基礎試験	8
2.2.1 概要	8
2.2.2 供試材料	8
2.2.3 溶接試験	9
2.2.4 耐食性試験	11
2.3 河川・ダム施設への適用を想定した厚板の溶接性および溶接部の耐食性に関する室内試験	14
2.3.1 概要	14
2.3.2 供試材料	14
2.3.3 溶接試験方法	14
2.3.4 評価項目	15
2.3.5 非破壊検査	16
2.3.6 断面マクロ・ミクロ組織観察	17
2.3.7 継手引張試験	19
2.3.8 シャルピー衝撃試験	21
2.3.9 硬さ試験	23
2.3.10 側曲げ試験	25
2.3.11 耐食性試験	26

2.4	室内試験まとめ	30
3.	ステンレス新材料の溶接部の耐食性に関する屋外暴露試験	31
3.1	試験目的	31
3.2	試験片の準備	31
3.2.1	試験片の種類	31
3.2.2	試験片の加工	31
3.2.3	暴露試験片組立	48
3.2.4	試験片寸法測定	50
3.2.5	暴露試験片取付方法	51
3.3	暴露試験	53
3.3.1	暴露場所	53
3.3.2	暴露試験調査計画	55
3.4	暴露試験の開始	56
3.4.1	調査対象試験片	56
3.4.2	水質調査	58
3.5	暴露試験片の回収	60
3.6	暴露試験片の評価	61
3.6.1	評価方法	61
3.6.2	評価結果	63
3.7	屋外暴露試験（1年目）結果のまとめ	74
4.	まとめ	75

1. 概要

1.1 ステンレス鋼

1.1.1 ステンレス鋼とは

ステンレス鋼は、JIS G 0203 : 2009「鉄鋼用語（製品および品質）」において Cr を 10.5%以上含む合金鋼と定義されている。Cr の他にも、用途に適した特性を得るために Ni や Mo 等を添加した鋼種が多数開発されている。鋼種数は JIS 規格だけでも 66 種類あり、その用途も土木分野に限らず極低温配管や容器、耐熱材料等、非常に多岐にわたるのが特徴である。

1.1.2 ステンレス鋼の種類と用途

ステンレス鋼は、主成分として Cr のみを含む Cr 系ステンレス鋼と、Cr と Ni を共に含む Cr-Ni 系ステンレス鋼に大別される。Cr 系ステンレス鋼は、金属組織によりマルテンサイト系とフェライト系（ α 系）に分類される。厚板では溶接性に課題があるとされており、薄板として使用される場合が多い。Cr-Ni 系ステンレス鋼は、金属組織により二相系（ $\alpha + \gamma$ 系）とオーステナイト系（ γ 系）に大別され、溶接性に優れるため厚板用途に適性がある。表 1.1.1 にステンレス鋼の分類と各々の代表鋼種を示す。

ゲート施設のような大型の構造物には Cr 系ステンレス鋼が使用される事例はほとんどなく、これまでは 18%の Cr と 8%の Ni を主成分とする SUS304 に代表される溶接性の良い Cr-Ni 系ステンレス鋼が使用されている。

表 1.1.1 ステンレス鋼の分類

分類	Cr 系ステンレス鋼 (JIS 4**番)		Cr-Ni 系ステンレス鋼 (JIS 3**番、8**番)		
	マルテンサイト	フェライト (α)	オーステナイト (γ)	二相 ($\alpha + \gamma$)	リーン系二相 ($\alpha + \gamma$)
代表鋼種	SUS 410	SUS 430	SUS 304	SUS 329J4L	SUS 821L1
主成分	12% Cr	17% Cr	18% Cr- 8% Ni	25% Cr- 7% Ni-3% Mo	21% Cr- 2% Ni
特徴	焼入硬化	軟質	高耐食・高延性	高強度・高耐食	高強度・高耐食
用途例	刃物 ボルト	厨房・家電 自動車	建材・化学プラント 土木・原子力	化学プラント 海水淡水化	海水淡水化

1.1.3 ステンレス鋼の金属組織

フェライト系ステンレス鋼の代表鋼種である SUS430 はフェライトと呼ばれる組織を持ち、結晶格子が bcc（体心立方格子）構造なのに対し、オーステナイト系の代表鋼種である SUS304 はオーステナイトと呼ばれる組織を持ち、結晶格子は fcc（面心立方格子）構造である。二相ステンレス鋼は、フェライト組織とオーステナイト組織がほぼ 1 対 1 の割合で微細に分散した組織を有している。写真 1.1.1 に二相ステンレス鋼の組織の代表例を示す。写真中では、フェライト組織を灰色、オーステナイト組織を白色にそれぞれ着色している。これらの異なる組織が微細に混在することで変形に強く、高強度が特徴となっている。

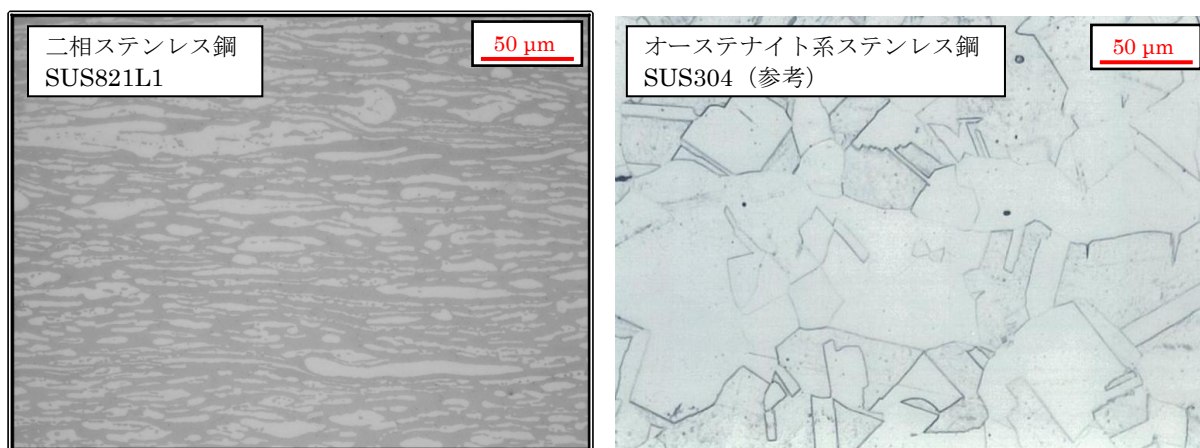


写真 1.1.1 二相ステンレス鋼の組織

河川の水門には、SUS304 などのオーステナイト系ステンレス鋼が使用されている。オーステナイト系ステンレス鋼は SM400 など一般構造用鋼と比較して強度が小さいものの、小型水門には、塗装が不要となるなどメンテナンス性の面から置き換えが進展している。一方大型水門の場合、鋼材コストが大きく増加することに加え、強度が低く扉体重量が大きくなり付帯設備の能力アップが必要となるため、初期投資が膨らみ採用に至らない場合が多い。

また、従来型の SUS329J4L などの二相ステンレス鋼は、強度および耐食性に優れるが、一般に高価である。そのため海水が流入する河川の水門戸当り面など、特に優れた耐食性や強度が要求される用途に限定的に使用されているのが現状である。

1.2 リーン系二相ステンレス鋼

1.2.1 特徴

リーン系二相ステンレス鋼は、従来型の二相ステンレス鋼と比較して、Ni や Mo などの高価で価格変動の大きい合金元素を節約していることが特徴であり、平成 27 年 9 月に JIS G 4304:2015「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」および JIS G 4305:2015「冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」に SUS821L1 と SUS323L の 2 鋼種が登録された。耐食性の面でみれば、SUS821L1 は SUS304 相当、上位鋼種である SUS323L は SUS316L 相当と言われている。これら、同等の耐食性を有する鋼種同士で比較した場合、リーン系二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼より高強度であり、更に価格安定性にも優れている。

1.2.2 化学成分

JIS 規格に登録されているリーン系二相ステンレス鋼の化学成分の規格値を表 1.2.1 に示す。下段には比較用にオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304、SUS316L と、従来型二相ステンレスの SUS329J3L、SUS329J4L の成分規格値を記載した。SUS821L1 は、耐食性の面では SUS304 の代替として開発された鋼種であるが、化学成分の特徴は Ni の含有量を 2%程度に抑えた点である。また、従来型の二相ステンレス鋼である SUS329J3L や SUS329J4L と比較した場合、Mo 含有量が低く抑えられている。

表 1.2.1 リーン系二相ステンレス鋼の化学成分の JIS 規格値（下段は比較用）

鋼種	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu
SUS821L1	≦	2.00	≦	≦	≦	20.50	1.50	≦	0.15	0.50
	0.030	~ 4.00	0.040	0.020	0.75	~ 21.50	~ 2.50	0.60	~ 0.20	~ 1.50
SUS323L	≦	≦	≦	≦	≦	21.50	3.00	0.05	0.05	0.05
	0.030	2.50	0.040	0.030	1.00	~ 24.50	~ 5.50	~ 0.60	~ 0.20	~ 0.60
SUS304	≦	≦	≦	≦	≦	18.00	8.00	—	—	—
	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	~ 20.00	~ 10.50	—	—	—
SUS316L	≦	≦	≦	≦	≦	16.00	12.00	2.00	—	—
	0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	~ 18.00	~ 15.00	~ 3.00	—	—
SUS329J3L	≦	≦	≦	≦	≦	21.00	4.50	2.50	0.08	—
	0.030	2.00	0.040	0.030	1.00	~ 24.00	~ 6.50	~ 3.50	~ 0.20	—
SUS329J4L	≦	≦	≦	≦	≦	24.00	5.50	2.50	0.08	—
	0.030	1.50	0.040	0.030	1.00	~ 26.00	~ 7.50	~ 3.50	~ 0.30	—

1.2.3 力学的性質

JIS規格に登録されているリーン系二相ステンレス鋼の力学的性質の規格値を表1.2.2に示す。下段には比較用にオーステナイト系ステンレス鋼のSUS304、SUS316Lと、従来型二相ステンレス鋼のSUS329J3L、SUS329J4Lの成分を記載した。SUS821L1は、一般構造用鋼の降伏点に相当する0.2%耐力値での比較ではSUS304の約2倍の高強度が保障されている。引張強さで比較する場合には15%程度の向上となる。硬さはJIS規格では上限値のみの規制となっている。二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼よりも硬さが大きい傾向がある。

表 1.2.2 リーン系二相ステンレス鋼の力学的性質の JIS 規格値

鋼種	0.2%耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	硬さ上限値 HBW
SUS821L1	400 以上	600 以上	厚さ 2.0mm 以下 20 以上 厚さ 2.0mm を超えるもの 25 以上	290
SUS323L	400 以上	600 以上	厚さ 2.0mm 以下 20 以上 厚さ 2.0mm を超えるもの 25 以上	290
SUS304	205 以上	520 以上	40 以上	187
SUS316L	175 以上	480 以上	40 以上	187
SUS329J3L	450 以上	620 以上	18 以上	302
SUS329J4L	450 以上	620 以上	18 以上	302

1.2.4 物理的性質

リーン系二相ステンレス鋼の物理的性質を表1.2.3に示す。SUS821L1、SUS323LはSUS304、SUS316Lと比較して熱膨張率が低い特徴がある。これは溶接時の角変形の抑制につながり、矯正作業が減少する。ただし高強度であることから矯正に必要な加工力が増大するため、溶接施工の面で両者を比較した場合は一長一短である。

表 1.2.3 リーン系二相ステンレス鋼の物理的性質¹⁾

鋼種	密度 (R.T.) g/cm ²	比熱 (R.T.) kJ/kg/°C	熱伝導率 (R.T.) W/m・°C	平均熱膨張係数 (R.T.~100°C) ×10 ⁻⁶ /°C	縦弾性係数 (R.T.) N/mm ²	電気抵抗率 (R.T.) ×10 ⁻² Ω・m	磁性
SUS821L1	7.80 ²⁾	0.5 ²⁾	16.0 ²⁾	13.0 ²⁾	200 ²⁾	80 ²⁾	有 ²⁾
SUS323L	7.80 ²⁾	0.5 ²⁾	16.0 ²⁾	13.0 ²⁾	200 ²⁾	80 ²⁾	有 ²⁾
SUS304	7.93	0.5	16.3	16.3	193 ³⁾	72	無
SUS316L	7.98	0.5	16.3	16.3	193 ³⁾	72	無
SUS329J3L	7.80	0.5	16.0	13.0	200	80	有
SUS329J4L	7.80	0.5	16.0	13.0	200	80	有

1.2.5 耐食性

海岸近傍の自然環境下で使用されるインフラ設備は、一般に海塩粒子などに由来する塩化物イオンによる腐食が問題となるケースが多く、それに対する耐食性が求められる。ステンレス鋼の塩化物イオンに対する耐食性は、一般にCrの含有量に比例して向上すると言われている。特に、接する溶液の液性が中性に近く、塩化物イオンを多く含む環境下での耐食性には、PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) と称される指標による比較で素材の優劣が議論されるケースが多い¹⁾。PRENは一般に下記の式(1)で整理され、図1.2.1に示すように実験室的な耐食性評価に用いられる孔食電位の値と高い相関を示すことが知られている。

$$\text{PREN} = \text{Cr}\% + 3.3\text{Mo}\% + 16\text{N}\% \quad \text{式(1)}$$

孔食電位は塩化物イオン等を含み局部腐食を発生させうる溶液中で、材料に孔食が発生および成長する臨界電位とみなすことができ、孔食電位が貴、すなわち値が大きいほど優れた耐食性を有すると考えられる。ステンレス鋼の孔食電位測定方法の一例はJIS G 0577:2005「ステンレス鋼の孔食電位測定方法」に記載されている。

しかし実際には鋼材に含まれる他の元素も耐食性に影響を及ぼす他、環境によって耐食性の優劣が異なる場合もあるため、暴露試験のデータなどを収集し、実環境下での耐食性に関する知見を集積していく必要があると考える。

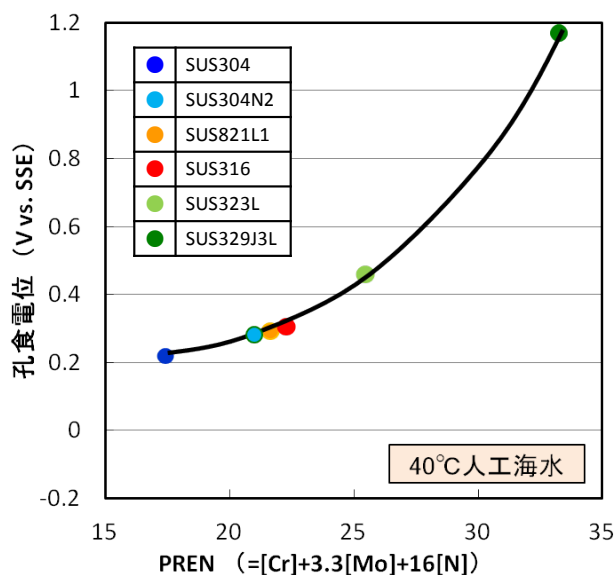


図 1.2.1 PREN と耐食性（孔食電位）の関係

1.3 リーン系二相ステンレス鋼の適用にあたり明確化すべき課題

新しいリーン系二相ステンレス鋼の河川・ダム施設への適用にあたり明らかにすべき事項としては、溶接性および実環境における耐食性評価により、最適な適用方法を明確にしていくことが挙げられる。従来のステンレス材料のこれらの特性は、土木研究所資料⁴⁾にまとめられている。本研究では新しいリーン系二相ステンレス鋼について、従来と同様の手法により溶接部を含めた試験片による暴露試験を行い、適用性を明確にする。

(参考文献)

- 1) ステンレス協会編、日刊工業新聞社：ステンレス鋼便覧 第3版、1995年1月
- 2) 新日鐵住金ステンレス株式会社：二相ステンレス鋼カタログ、2011年9月
- 3) 国土交通省：ダム堰施設技術基準、2009年6月
- 4) 土木研究所：土木研究所資料第3558号「ダム施設における鋼構造物の防食に関する調査報告書（その1）」、1998年1月

2. ステンレス新材料の溶接性および溶接部の耐食性に関する室内試験

2.1 試験目的

ステンレス鋼の溶接部は、局所的な熱影響を受け、母材と異なる特性を有する場合がある。そこでリーン系二相ステンレス鋼の河川・ダム施設への適用にあたり、溶接金属および溶接熱影響部（HAZ: Heat Affected Zone、以降 HAZ と略す）を含む溶接継手の特性を把握するため、溶接性および溶接部の耐食性の評価を行った。

2.2 節では、板厚 12mm のリーン系二相ステンレス鋼を用いた溶接試験によって溶接材料の溶接性を把握するとともに、耐食性試験によって溶接条件と溶接部の耐食性の相関把握を行った。

2.3 節では、厚板 40mm（実機で想定される板厚）のリーン系二相ステンレス鋼を用いて溶接を行い、継手の健全性を確認するとともに、耐食性試験により一般的なステンレス鋼（SUS304）の継手の耐食性と比較することで、本鋼種の性能を確認した。

2.2 溶接性および溶接部の耐食性に関する基礎試験

2.2.1 概要

溶接材料の溶接性を把握するとともに、耐食性と組織の相関関係を把握し、適正溶接条件範囲を明確にすることを目的に、溶接試験および耐食性試験を行った。

2.2.2 供試材料

母材材質 : SUS821L1

母材寸法 : 板厚 12 mm×幅 160 mm×長さ 250 mm

溶接材料 : SF-DP8

2.2.3 溶接試験

(1) 試験方法

溶接試験の対象とする溶接法は、一般的に広く使用されるフラックスコアードーク溶接（FCAW：Flux Cored Arc Welding、以降 FCAW と略す）とした。また、母材はリン系二相ステンレス鋼とし、溶接材料は従来より二相ステンレス鋼の溶接に用いられている SUS329J3L 用材料を用いた。なお、すべての溶接試験において、パス間温度は二相ステンレス鋼の溶接において一般的な 150℃以下とした。試験方法の概要を下記に示す。

- 溶接法 : FCAW
- 開先形状 : 50° V 開先 (図 2.2.1 参照)
- 溶接条件 : 溶接電流 160~240A、溶接速度 14~50cm/min (表 2.2.1 参照)
- パス間温度 : 150℃以下
- シールドガス : CO₂ ガス
- 溶接姿勢 : 下向 (供試材を平置きし、溶接方向を水平とした。図 2.2.1 参照)

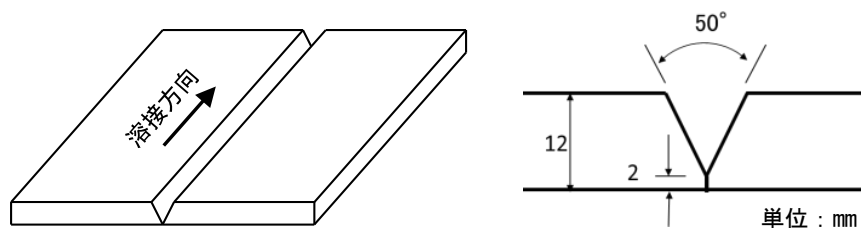


図 2.2.1 試験体形状および開先形状

表 2.2.1 溶接試験条件

溶接姿勢	溶接条件			
	溶接電流 A	溶接電圧 V	溶接速度 cm/min	入熱量 kJ/cm
下向	200	32	50	7.7
	200	32	36	10
	200	32	25	15
	200	32	20	19
	200	32	14	27
	240	38	25	22
	160	28	25	11

(2) 試験結果

下向姿勢溶接の溶接後の外観の一例を図 2.2.2 に示す。いずれの条件においてもスパッタ発生量は少なく、ビード止端部形状も良好であった。また、スラグ剥離についても良好であり、溶接した範囲においては、非常に良好な溶接が可能であることが分かる。このことから、下向姿勢溶接については、従来のオーステナイト系ステンレス鋼と同様に比較的広い条件範囲で溶接が可能と考えられる。

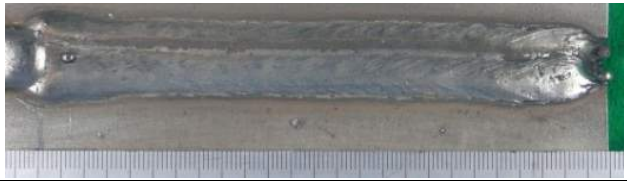
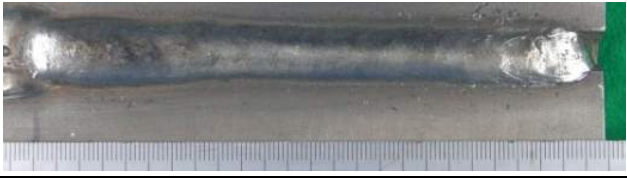
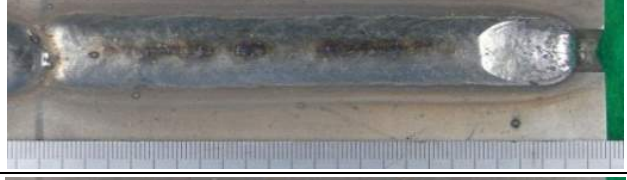


姿勢	溶接条件	外観写真 (溶接方向：紙面左から右)
下向	電流：200 A 電圧：32 V 溶接速度：50 cm/min 入熱：7.7kJ/cm	
	電流：200 A 電圧：32 V 溶接速度：36 cm/min 入熱：10 kJ/cm	
	電流：200 A 電圧：32 V 溶接速度：25 cm/min 入熱：15 kJ/cm	
	電流：200 A 電圧：32 V 溶接速度：20 cm/min 入熱：19 kJ/cm	
	電流：200 A 電圧：32 V 溶接速度：14 cm/min 入熱：27 kJ/cm	

図 2.2.2 下向姿勢溶接ビード外観

2.2.4 耐食性試験

(1) 試験方法

2.2.2 項の溶接試験で製作した溶接継手から腐食試験片を採取し、JIS G 0578 : 2000「ステンレス鋼の塩化第二鉄腐食試験方法」を参考にした腐食試験によって耐食性を評価し、溶接条件との相関関係を把握した。腐食試験条件を表 2.2.2 に示す。評価箇所は、図 2.2.3 に示すように溶接金属部とボンド部（母材部を含む）とした。図 2.2.4 に試験片の詳細および試験状況を示す。図 2.2.4 に示すように、試験片を腐食液中に吊り下げるために、試験片に径 3~4 mm の穴をあけた。また、試験片表面は溶接ままとし、裏面、端面は研磨してから試験に供した。

表 2.2.2 腐食試験の概要

試験方法	JIS G 0578 参考
試験片形状	L 15 mm × W 10 mm × t 3 mm
試験箇所	溶接金属部、ボンド部(母材部を含む)
試験片数量	各 1 個
腐食液	0.05 mol/L 塩酸 + 6%塩化第二鉄水溶液
浸漬時間	24 時間
試験温度	35℃
評価	腐食度 (浸漬前後の重量差より算出)

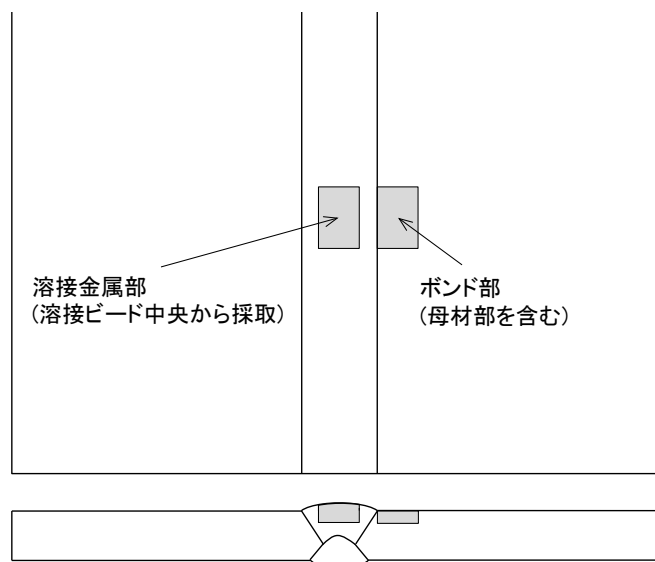
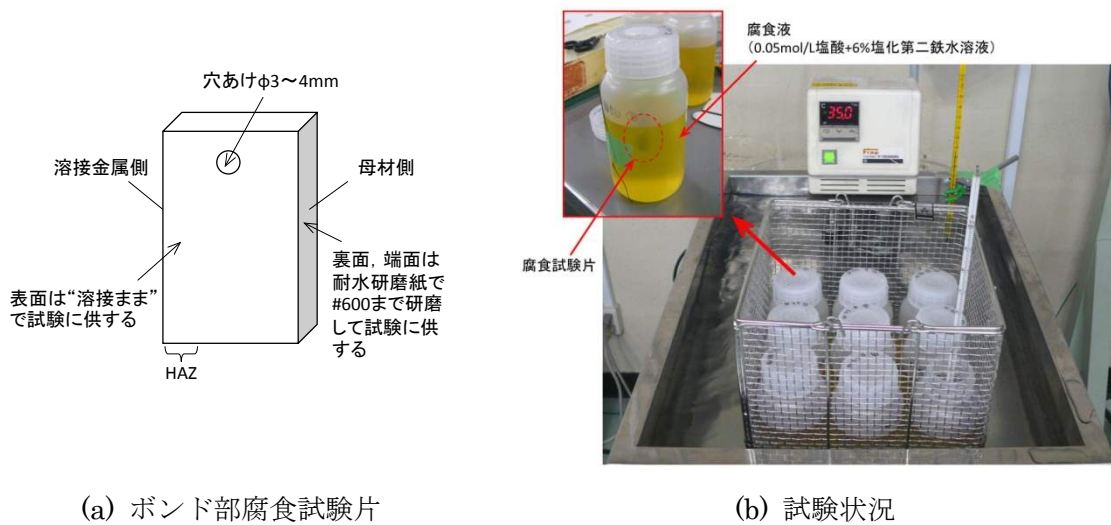


図 2.2.3 試験片採取位置 (模式図)



(a) ボンド部腐食試験片

(b) 試験状況

図 2.2.4 塩化第二鉄腐食試験

(2) 試験結果

入熱量と腐食度の関係を図 2.2.5 に示す。溶接金属部については、入熱量が大きくなるに従い、腐食度は小さくなることわかる。一方、ボンド部については、入熱量が大きくなるに従い、腐食度は一旦低下した後、増加しており、溶接金属部とは異なる傾向を示す。

腐食試験後の試験片の外観および孔食の実体顕微鏡観察結果の一例を図 2.2.6 に示す。腐食試験後の試験片を観察した結果、孔食はボンド部腐食試験片の主に HAZ に発生していた。

二相ステンレス鋼の耐食性は、フェライト分率と相関があり、一般にフェライト分率が高いほど耐食性が低下する。溶接部では溶接の温度履歴によりフェライト分率が変化し、冷却速度が大きくなる小入熱で溶接するほど、溶接金属部はフェライト分率が高くなり耐食性が低下する。一方、HAZ は最高到達温度や温度履歴などによりフェライト分率が変化するとともに、クロム炭窒化物が析出することで耐食性が低下する場合もあり、溶接入熱に対する耐食性の変化はより複雑なものとなる。

図 2.2.6 に示した溶接金属部の耐食性の変化は、上述の傾向とよく一致している。すなわち、小入熱での腐食度は大きくなっており耐食性が低下しているが、入熱が大きくなるに従って腐食度は小さくなり良好な耐食性を示している。一方、ボンド部の耐食性変化は溶接金属部のそれと異なる傾向を示しており、クロム炭窒化物が析出している可能性も考えられる。

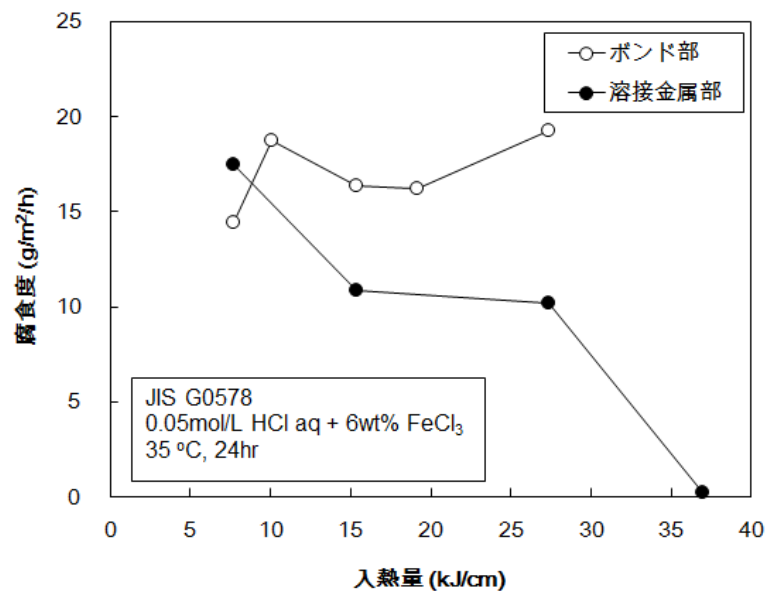
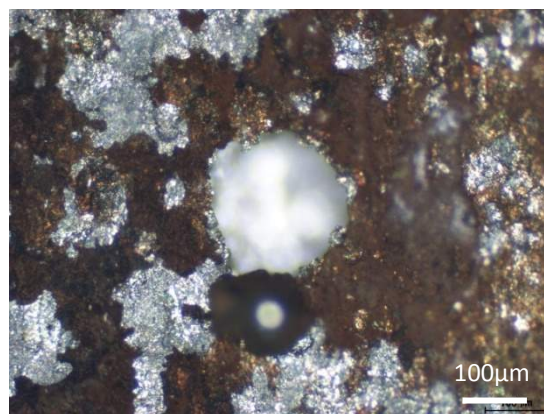
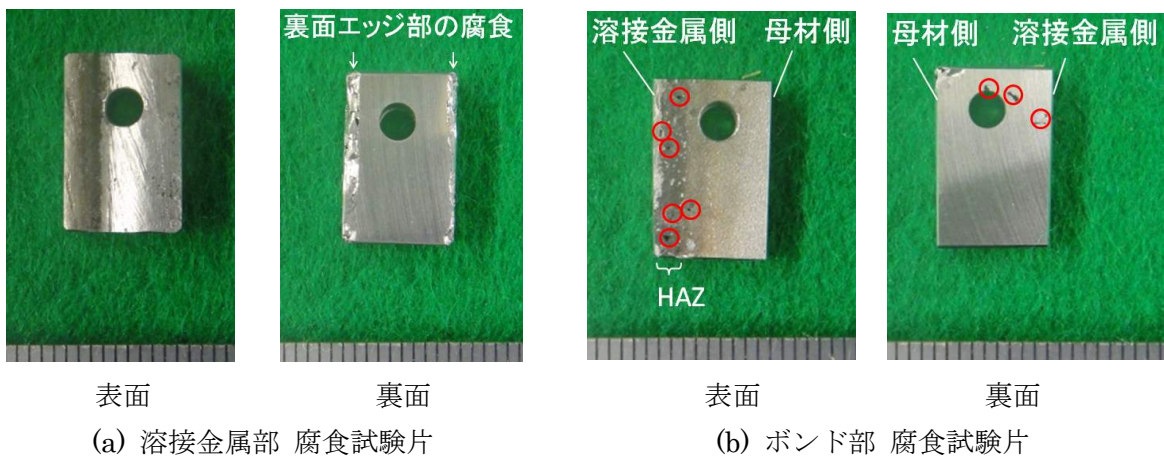


図 2.2.5 入熱量と腐食度の関係



(c) ボンド部に発生した孔食の一例

図 2.2.6 試験後の試験片 (○: 主な孔食位置)

2.3 河川・ダム施設への適用を想定した厚板の溶接性および溶接部の耐食性に関する試験

2.3.1 概要

河川・ダム施設への適用を想定し、板厚 40 mm のリン系二相ステンレス鋼の突合せ溶接継手を作製し、非破壊検査、機械試験、腐食試験を実施した。なお、溶接姿勢は実機を想定して、下向および立向姿勢とした。また、従来ステンレス鋼の溶接継手と耐食性を比較するために、下向姿勢にて SUS304 の継手を併せて作製し、同様の試験を行った。

2.3.2 供試材料

母材材質 : SUS821L1

SUS304 (比較用、下向姿勢のみ)

母材寸法 : 板厚 40 mm × 幅 300 mm × 長さ 400 mm

溶接材料 : SUS821L1 (SF-DP8)

SUS304 (DW-308)

2.3.3 溶接試験方法

溶接法 : FCAW

開先形状 : X 開先 (図 2.3.1 参照)

溶接条件 : 表 2.3.1 参照

パス間温度 : 150°C 以下

シールドガス : CO₂ ガス

溶接姿勢 : 下向および立向 (上進) (図 2.3.2 参照)

溶接手順 : 1st 側溶接 → 裏はつり → 2nd 側溶接

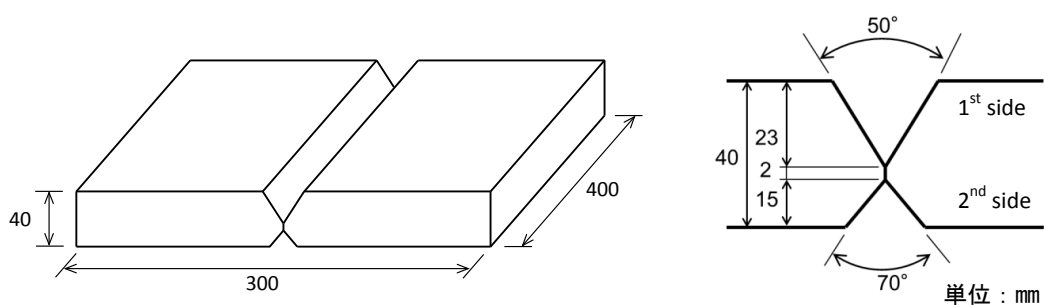


図 2.3.1 試験体形状および開先形状 (下向、立向姿勢共通)

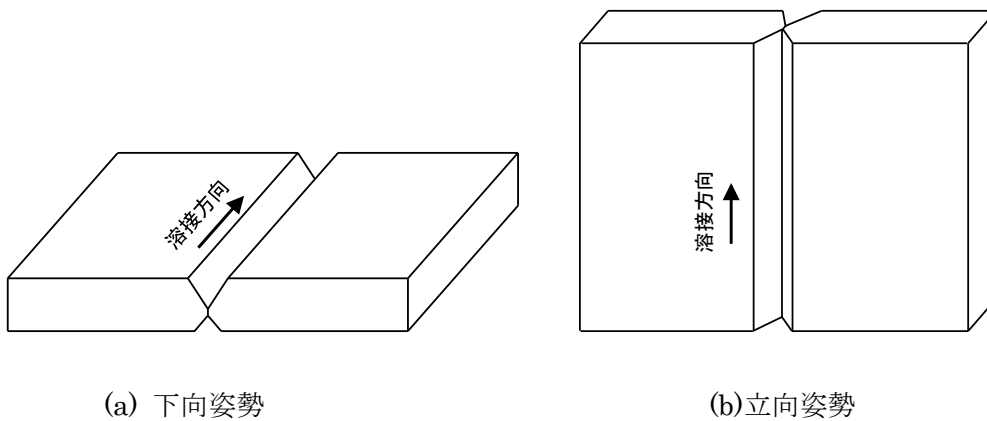


図 2.3.2 溶接姿勢

表 2.3.1 本試験の溶接条件

溶接姿勢	パス間温度 ℃	溶接電流 A	溶接電圧 V	溶接速度 cm/min	入熱量 kJ/cm
下向 (F)	≦150	180~230	32~35	17~30	13~26
立向 (V)	≦150	124~138	24~25	4~7	27~47

2.3.4 評価項目

製作した溶接継手の健全性を確認する目的で、JIS Z 3040 : 1995「溶接施工方法の確認試験方法」を参考に、以下に示す試験を実施した。耐食性試験では一般的なステンレス鋼 (SUS304) の継手の耐食性と比較することで、本鋼種の性能を確認した。

- ①非破壊検査 (2.3.5)
 - ・浸透探傷試験
 - ・放射線透過試験
- ②断面マクロ・ミクロ組織観察 (2.3.6)
- ③継手引張試験 (2.3.7)
- ④シャルピー衝撃試験 (2.3.8)
- ⑤硬さ試験 (2.3.9)
- ⑥側曲げ試験 (2.3.10)
- ⑦耐食性試験 (2.3.11)
 - ・定電位保持試験

2.3.5 非破壊検査

(1) 試験方法

図 2.3.3 に、製作した溶接試験体のビード外観を示す。いずれの試験体においても、ビード止端端部にオーバーラップやアンダカットなどは認められず、良好なビードが得られた。これらの試験体に対して、JIS Z 2343 : 2001「非破壊検査—浸透探傷試験—」および、JIS Z 3104 : 1995「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」に準拠した非破壊試験を実施し、溶接部の健全性の確認を行った。

(2) 試験結果

リーン系二相ステンレス鋼溶接試験体の浸透探傷試験結果を表 2.3.2 に、放射線透過試験結果を表 2.3.3 に示す。いずれの試験においても欠陥などは認められず、良好な溶接継手が得られた。



(a) リーン系二相ステンレス鋼溶接試験体 下向姿勢



(b) リーン系二相ステンレス鋼溶接試験体 立向姿勢

図 2.3.3 ビード外観

表 2.3.2 リーン系二相ステンレス鋼溶接試験体の浸透探傷試験結果

試験体	浸透指示模様 単位 mm	
	位置-分類-大きさ (JIS Z 2343)	判定
下向姿勢-表面	無	合格
-裏面	無	合格
立向姿勢-表面	無	合格
-裏面	無	合格

表 2.3.3 リーン系二相ステンレス鋼溶接試験体の放射線透過試験結果

試験体	許容区分	きずの有無	きずの分類 (JIS Z 3104)				判定
			種別	大きさ (mm)	点数	分類	
下向姿勢溶接	6.6 mm 以下	無	-	-	-	1 類	合格
立向姿勢溶接	6.6 mm 以下	無	-	-	-	1 類	合格

2.3.6 断面マクロ・ミクロ組織観察

(1) 試験方法

断面マクロ組織は耐水研磨紙による機械研磨後、しゅう酸腐食により現出し、溶接部の溶け込み状況および割れなどの欠陥有無を確認した。

断面ミクロ組織は耐水研磨紙による機械研磨後、バフ仕上げを行い、約 10%の水酸化カリウム水溶液による電解研磨にて現出させたのち、金属顕微鏡を用いて観察した。

(2) 試験結果

リーン系二相ステンレス鋼溶接試験体の断面マクロ・ミクロ観察結果を図 2.3.4 に示す。マクロ組織観察では欠陥などは認められない。ミクロ組織観察では、溶接金属部において、小入熱条件である下向姿勢溶接の粒内にオーステナイト組織が微細に析出している。一方、立向姿勢溶接では、粗大化した結晶粒に沿ってオーステナイト組織の析出が確認できるものの、粒内での析出は比較的少ない。立向姿勢溶接の結晶粒の粗大化は、大入熱溶接により冷却速度が遅くなったことで、粒成長が促進される高温域での保持時間が増加したためであると考えられる。また、大入熱溶接のため冷却速度が遅いにもかかわらず、粒内のオーステナイト組織の析出が少なかった理由としては、結晶粒の粗大化により粒界が減少したことで、粒界に析出したオーステナイト組織を起点に粒内方向へ析出するオーステナイト組織が減少したためであると考えられる。

HAZ については、入熱量による違いは認められず、ボンド部近傍が高フェライト組織となっていることが確認できる。

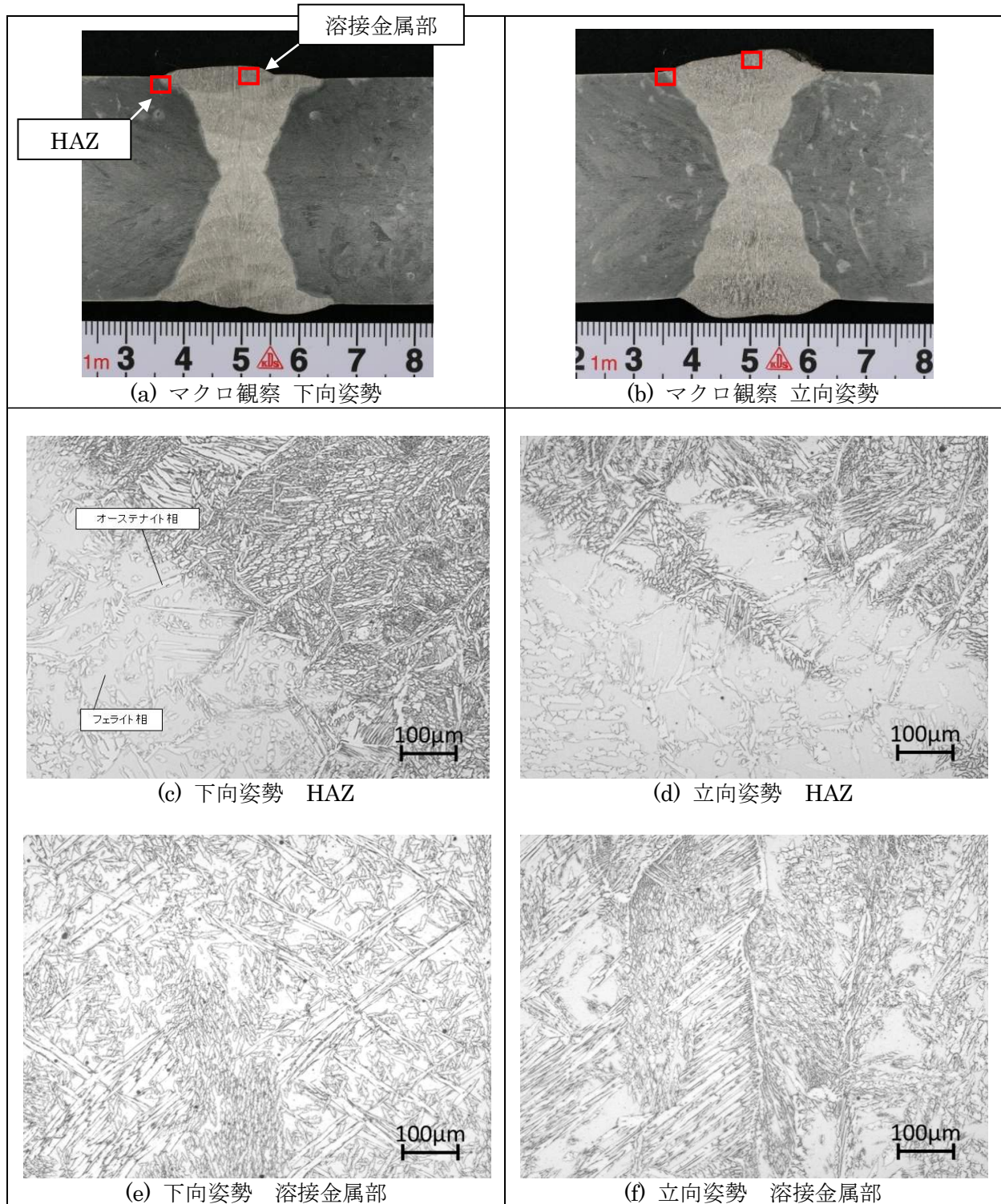


図 2.3.4 断面組織観察結果 (□ : ミクロ観察位置)

2.3.7 継手引張試験

(1) 試験方法

一般に二相ステンレス鋼は非常に強度が高く、板厚 40 mm での継手引張試験が難しいことから、下向、立向姿勢それぞれの溶接試験体の板厚中央から JIS Z 2241:2011「金属材料引張試験方法」に準拠した 14A 号試験片（比例試験片）を採取し、継手引張試験を実施した。図 2.3.5 に試験片採取位置を示す。

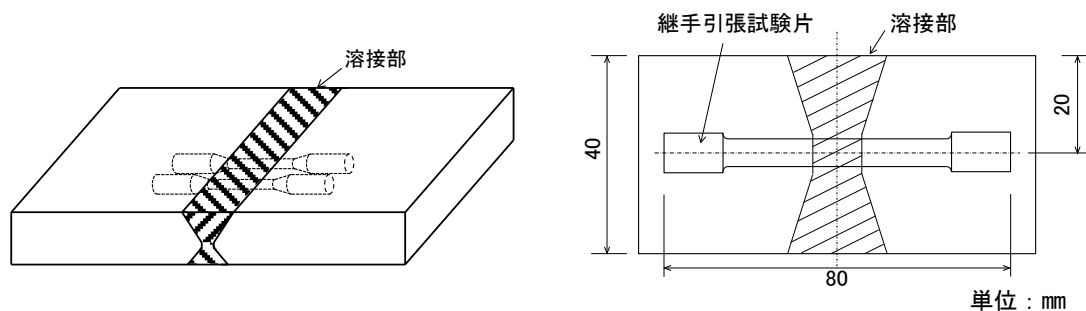


図 2.3.5 引張試験片採取位置（模式図）

(2) 試験結果

試験結果を表 2.3.4 に、試験後の試験片外観を図 2.3.6 に示す。いずれも破断位置は母材であり、引張強さは、母材規格値を満足する非常に高い値であることを確認した。

表 2.3.4 継手引張試験結果

溶接姿勢	試験片番号	引張強さ N/mm ²	破断位置
下向	1	726	母材
	2	724	母材
立向	1	741	母材
	2	740	母材
(参) 母材 規格値		≥600	—
(参) SUS304 規格値		≥515	—
(参) 溶接金属 データ		810	—



(a) 下向姿勢 1



(b) 下向姿勢 2



(c) 立向姿勢 1



(d) 立向姿勢 2

図 2.3.6 引張試験後の試験片外観 (▼ : 破断位置)

2.3.8 シャルピー衝撃試験

(1) 試験方法

JIS Z 3128 : 1996「溶接継手の衝撃試験方法」を参考に、下向、立向姿勢それぞれの溶接試験体の板厚中央からシャルピー衝撃試験片を採取し、JIS Z 2242 : 2005「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」に準拠してシャルピー衝撃試験を実施した。なお、ノッチ位置は溶接金属部およびHAZ（ボンド部から1 mm、図 2.3.7 参照）とし、試験片の個数は各切欠き位置ごとに3個ずつとした。また、試験温度は河川・ダム施設への適用を想定して-10℃とした。

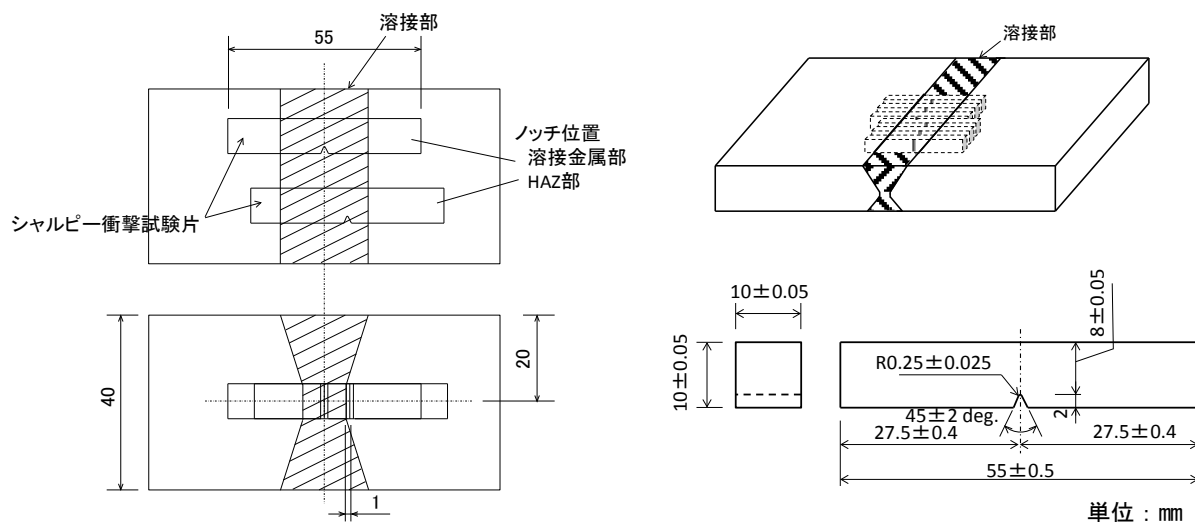


図 2.3.7 シャルピー衝撃試験片採取位置および試験片形状

(2) 試験結果

表 2.3.5 および図 2.3.8 に試験結果を、試験後の破面を図 2.3.9 に示す。溶接金属部の吸収エネルギーに及ぼす溶接条件の影響はほとんど認められない。一方 HAZ について、大入熱条件の場合に吸収エネルギーが若干減少する傾向が認められた。一般にステンレス鋼に対して、JIS 規格にシャルピー吸収エネルギーは規定されていない。そこで、河川・ダム施設で一般的に使用される SM400B (JIS G 3106 : 2008「溶接構造用圧延鋼材」で規定) の規格値である 0℃での吸収エネルギー ≥ 27 J を準用した。一般にステンレス鋼のシャルピー吸収エネルギーは試験温度が低いほど低下する傾向を有している。SUS821L1 の-10℃における吸収エネルギーは 27J を満足しており、0℃でも十分満足すると推測される。

表 2.3.5 シャルピー衝撃試験結果

溶接姿勢	ノッチ位置	試験温度 ℃	吸収エネルギー J	平均値 J
下向	溶接金属	-10	45, 46, 53	48
	HAZ	-10	58, 72, 53	61
立向	溶接金属	-10	46, 50, 49	48
	HAZ	-10	36, 42, 40	39

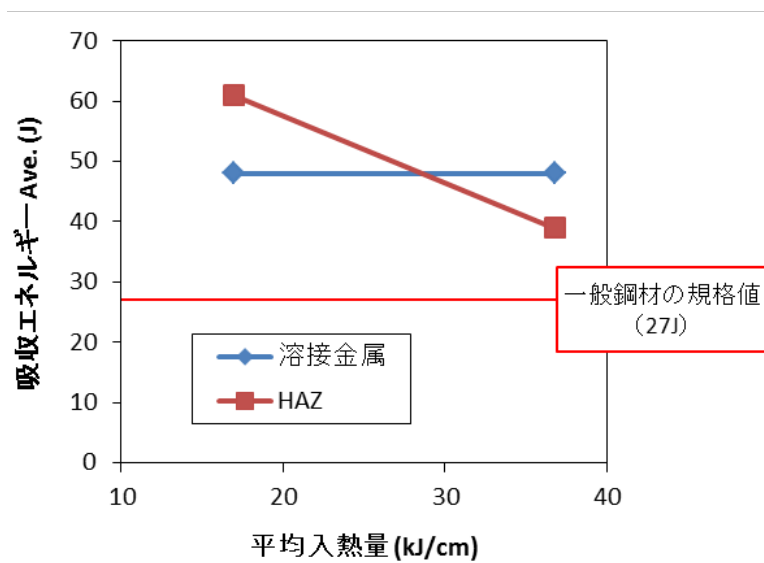
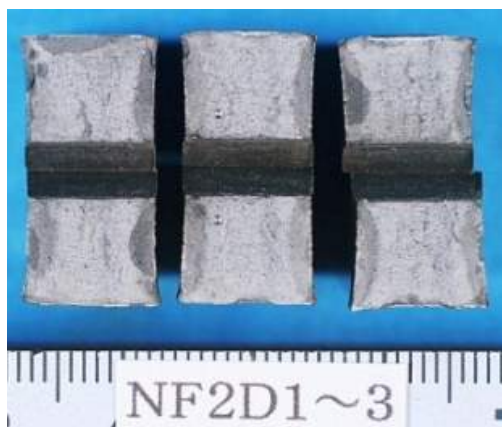
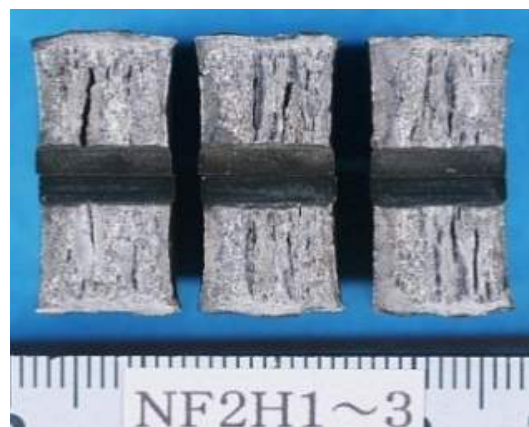


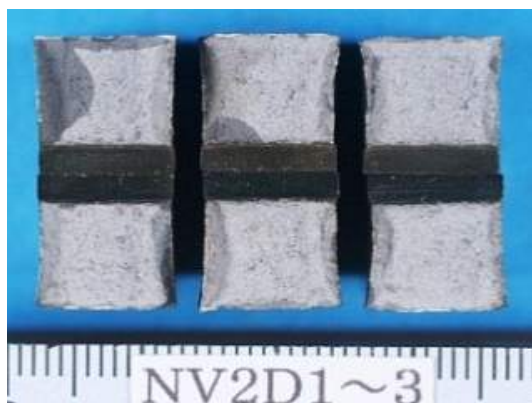
図 2.3.8 吸収エネルギーと入熱量の関係



(a) 下向姿勢-溶接金属部ノッチ



(b) 下向姿勢-HAZ ノッチ



(c) 立向姿勢-溶接金属部ノッチ



(d) 立向姿勢-HAZ ノッチ

図 2.3.9 シャルピー衝撃試験片の破面

2.3.9 硬さ試験

(1) 試験方法

下向、立向姿勢それぞれの試験体の溶接部断面に対して、JIS Z 2244 : 2009 「ビッカース硬さ試験—試験方法」に準拠した硬さ試験を実施した。評価位置について、図 2.3.10 に示すように試験体の表面から 2 mm と板厚中央の 2 ラインとし、1 mm ピッチで硬さを計測した。試験力は 9.8 N とした。

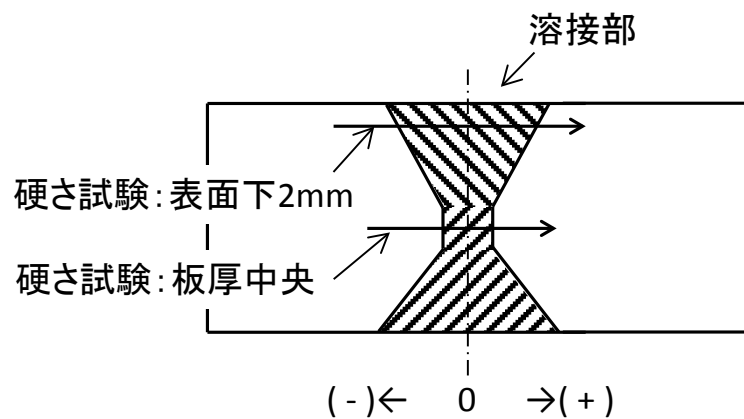


図 2.3.10 硬さ評価位置

(2) 試験結果

図 2.3.11 に結果を示す。表面 2 mm の結果から、溶接金属部は母材部よりも 25HV 程度硬化する傾向が認められる。また、HAZ は軟化する傾向が認められ、その幅は 5 mm～7 mm 程度である。一方、板厚中央の結果から、溶接金属部は表面 2 mm よりも若干硬化する傾向が認められる。また、HAZ の軟化部の幅は表面側に比べて小さくなっている。このように、硬さは位置によって種々変化するものの、いずれの評価位置においても、異常な軟化や硬化は認められなかった。

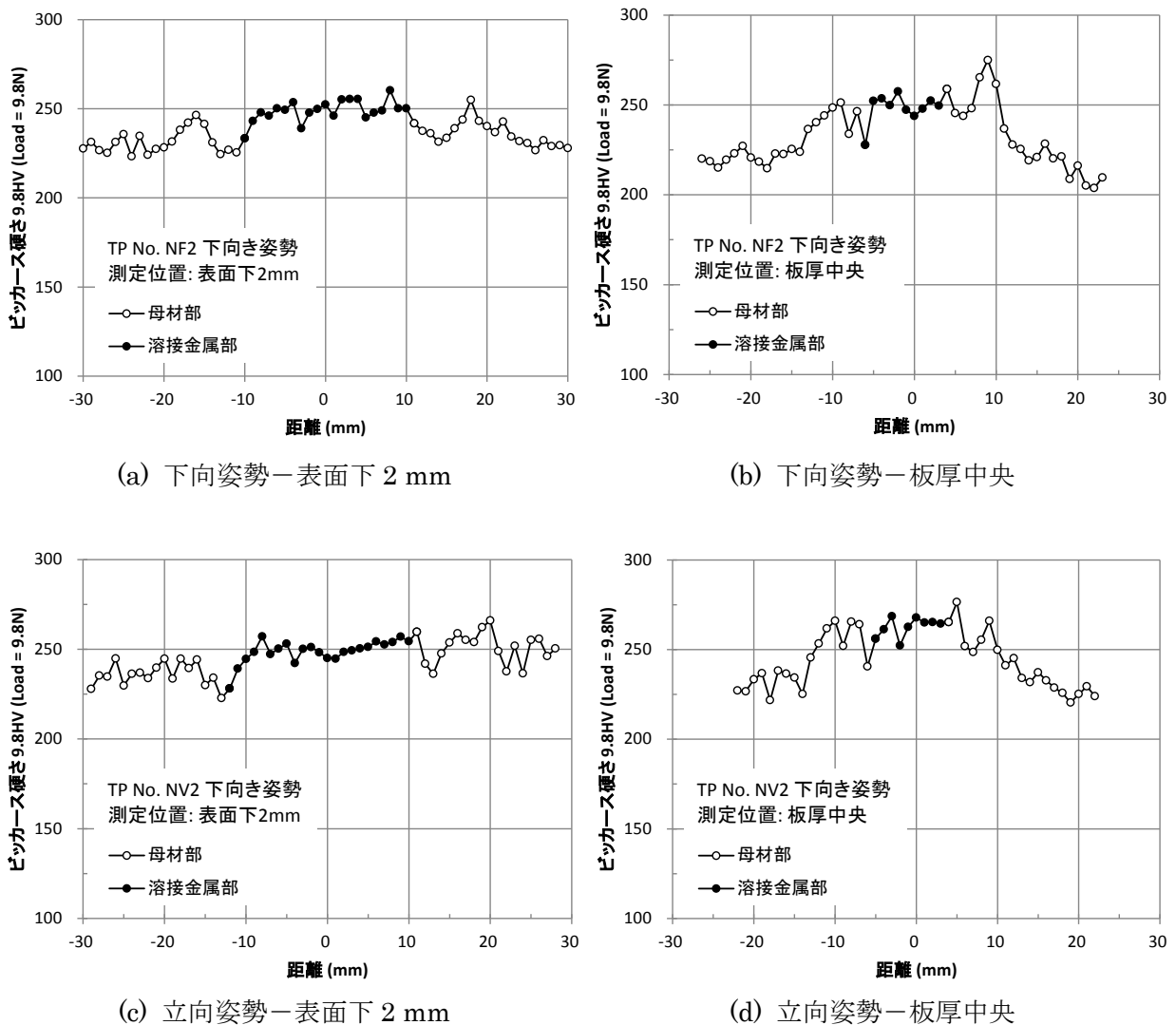


図 2.3.11 硬さ試験結果

2.3.10 側曲げ試験

(1) 試験方法

下向、立向姿勢それぞれの試験体から側曲げ試験片（図 2.3.12）を採取し、JIS Z 3122 : 2013 「突合せ溶接継手の曲げ試験方法」に準拠した、側曲げ試験を実施した。試験片の個数は各試験体につき 2 個ずつとし、試験条件は、曲げ半径 20mm ($R = 2t$) の 180° 曲げとした。

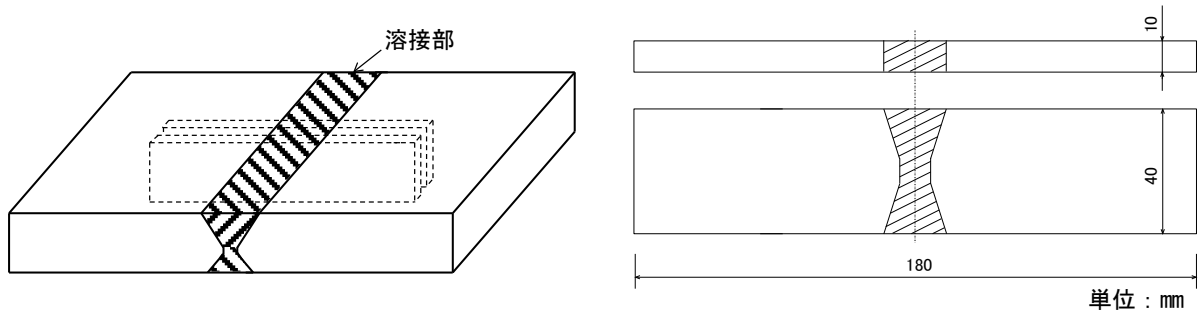


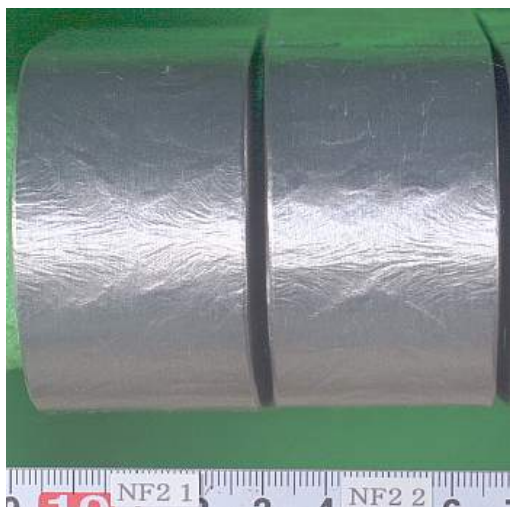
図 2.3.12 試験片形状

(2) 試験結果

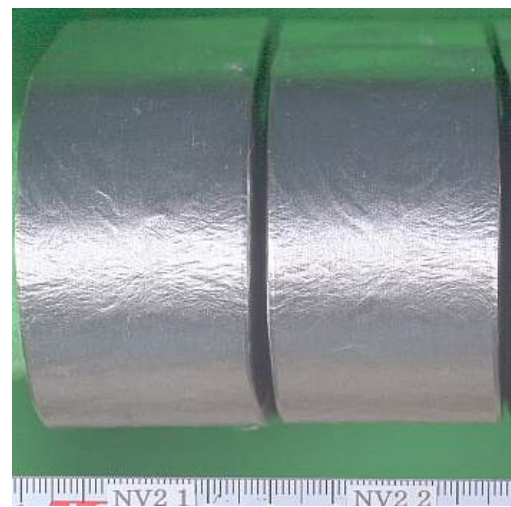
表 2.3.6 に結果を、図 2.3.13 に試験後の外観を示す。いずれの試験片も欠陥は認められず、良好な継手であることを確認した。

表 2.3.6 側曲げ試験結果

溶接姿勢	試験片番号	結果	判定
下向	1	欠陥なし	合格
	2	欠陥なし	合格
立向	1	欠陥なし	合格
	2	欠陥なし	合格



(a) 下向姿勢



(b) 立向姿勢

図 2.3.13 側曲げ試験後の試験片溶接部の外観

2.3.11 耐食性試験

(1) 試験方法

継手における耐食性を評価することを目的に、定電位保持試験を実施した。また、比較材として従来ステンレス鋼 SUS304 継手をあわせて試験した。定電位保持試験は、中性塩化物環境中に試験片を定電位で保持することで孔食を発生させ、腐食の進展性を評価する試験である。表 2.3.7 に腐食試験条件を示す。図 2.3.14 に試験状況を示す。試験液は 3.5 mass% の NaCl 水溶液 (pH 5~6) とした。試験温度は室温とし、試験時間は 24 hr とした。電位は、孔食が発生し、かつ、すき間腐食ができるだけ発生しにくいよう +250 mV vs. SCE で保持した。試験中の電流を計測することで、腐食状況を評価した。

表 2.3.7 定電位保持試験

試験液	3.5 mass% NaCl 水溶液 (pH 5~6)
試験温度	室温 (大気解放)
試験片形状	溶接金属部および母材部表面 (ボンドラインから 10 mm までを露出)
試験環境	30 min. の自然浸漬電位測定後に +250 mV vs. SCE に保持
浸漬時間	24 hr.

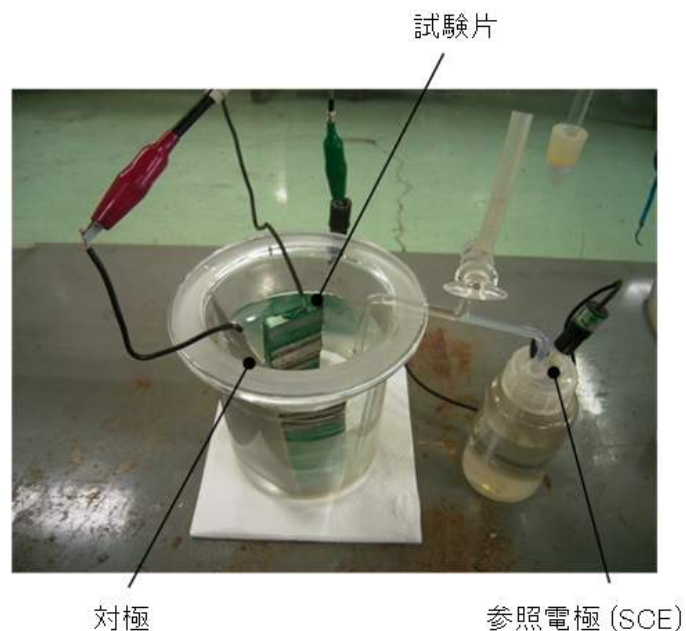


図 2.3.14 腐食試験状況

(2) 試験結果

図 2.3.15 に 自然浸漬電位の測定結果を示す。自然浸漬電位は SUS304 継手で -0.3 V vs. SCE 、リーン系二相ステンレス鋼継手で約 -0.4 V vs. SCE であった。

定電位保持試験中の電流の変化を図 2.3.16 に示す。リーン系二相ステンレス鋼継手の電流値は SUS304 継手のそれよりも小さな値となっている。これは、塩化物水溶液中での孔食成長速度が SUS304 継手よりもリーン系二相ステンレス鋼継手の方が小さいことを示している。また、溶接姿勢の異なる 2 種類のリーン系二相ステンレス鋼継手の電流を比較すると、立向姿勢の方が下向姿勢よりも大きい値となった。

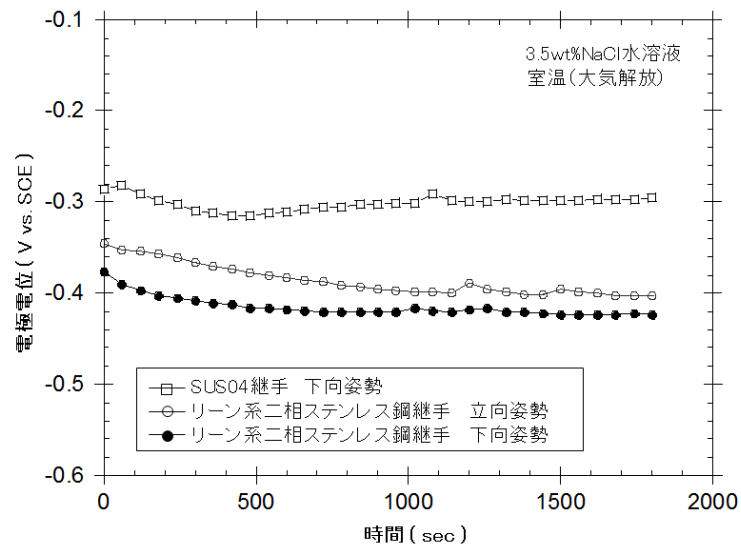


図 2.3.15 各試験体の自然浸漬電位の確認

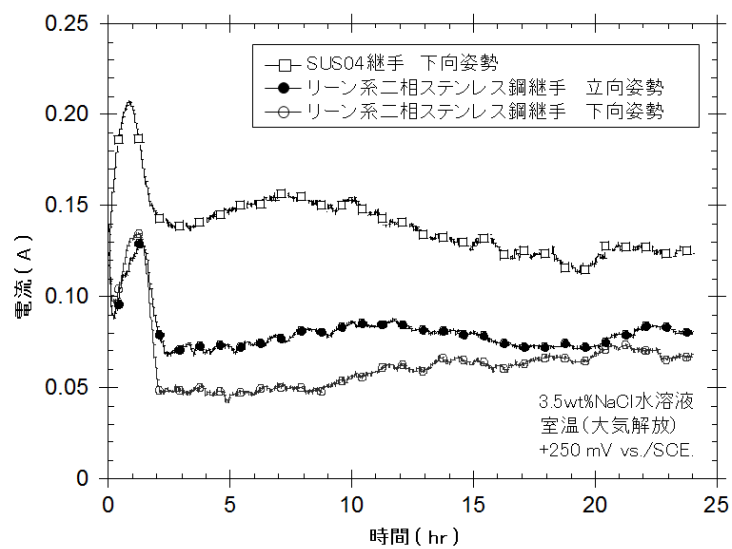
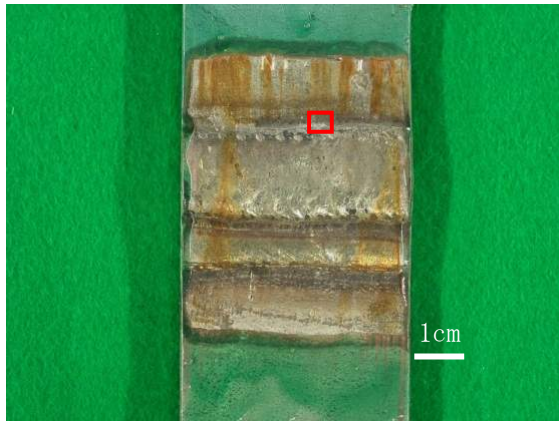


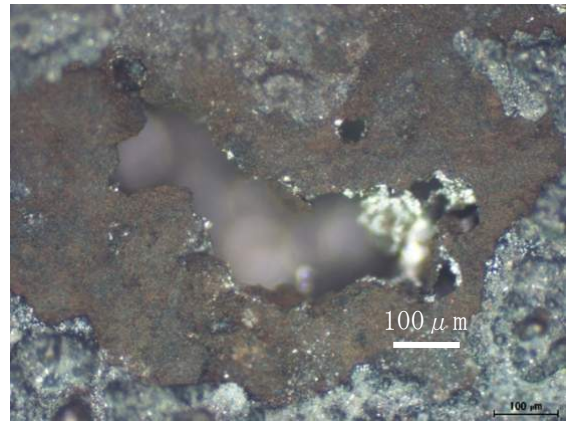
図 2.3.16 定電位保持試験中の電流変化

図 2.3.17 に試験後の試験体の外観および孔食の実体顕微鏡観察の結果を示す。リーン系二相ステンレス鋼継手および SUS304 継手の両方ともに、孔食は HAZ での発生が顕著であった。また、孔食同士が合体して成長したと思われるものも確認された。SUS304 継手ではボンドラインから 5~6 mm 位置にも孔食があり、リーン系二相ステンレス鋼継手よりも広い範囲で孔食が発生していた。HAZ における孔食の発生範囲および大きさなどから孔食の程度を比較したところ、SUS304 継手の孔食が最も顕著であり、次いで、リーン系二相ステンレス鋼継手—立向姿勢、同一下向姿勢であった。

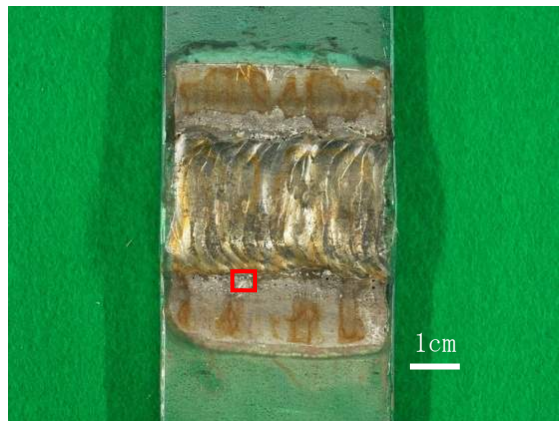
定電位保持試験における電流挙動と、発生した孔食の観察より、リーン系二相ステンレス鋼継手の耐食性は姿勢によらず SUS304 継手より高いことが確認された。なお、リーン系二相ステンレス鋼において溶接姿勢によって耐食性に差が生じた理由として、立向姿勢の方が溶接速度が遅く入熱量が大きいため、フェライト組織の割合の大きい HAZ の領域が若干広くなり、耐食性に悪影響を及ぼした可能性が考えられる。



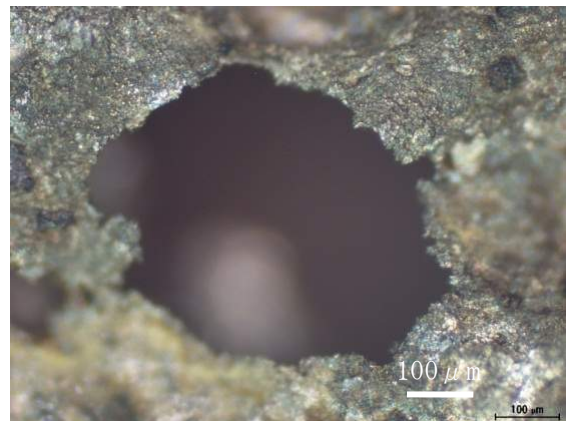
(a) リーン系二相ステンレス鋼継手
下向姿勢



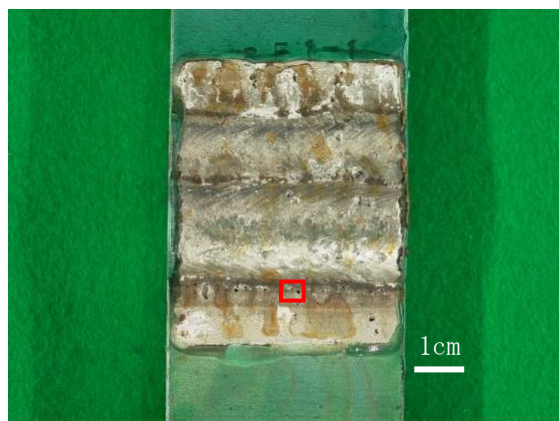
(b) 左図□部拡大



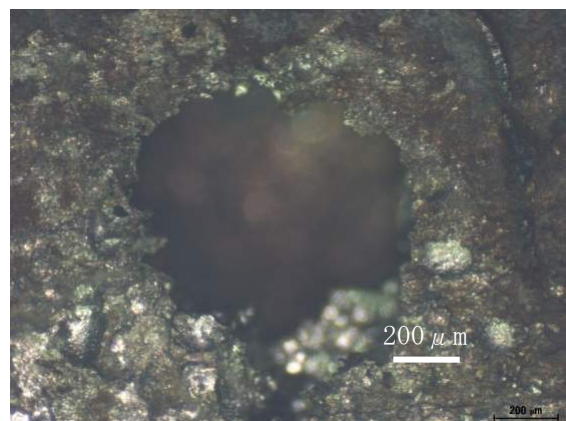
(c) リーン系二相ステンレス鋼継手
立向姿勢



(d) 左図□部拡大



(e) SUS304 継手
下向姿勢



(f) 左図□部拡大

図 2.3.17 腐食試験後の試験体の外観 (□ : 拡大部)

2.4 溶接試験まとめ

河川・ダム施設へのリーン系二相ステンレス鋼の適用に向け、溶接性に関する種々の検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 溶接性

板厚 40 mm のリーン系二相ステンレス鋼を用い、下向、立向姿勢にて溶接継手の作製を行った。溶接後の非破壊検査の結果、欠陥はなく、良好な継手が得られていることが確認された。

(2) 力学的特性

作製した継手について、引張試験、シャルピー衝撃試験などの物性試験を実施した結果、いずれも十分な力学特性を有していることが確認された。

(3) 耐食性

入熱量と腐食速度の関係を調査するため、入熱量を変えて板厚 12 mm の溶接継手を製作し、溶接金属部およびボンド部（母材部を含む）から腐食試験片を採取して腐食試験を実施した結果、溶接金属部では、入熱量が大きくなるに従い腐食度は小さくなった。一方で、ボンド部では入熱量が大きくなるに従い、腐食度は一旦低下した後、増加する傾向を示した。

板厚 40 mm の溶接継手を下向、立向姿勢で製作し、継手の腐食試験を実施した結果、大入熱条件となる立向姿勢で溶接した場合、耐食性が低下する傾向を示したが、SUS304 鋼継手に比べ、大入熱条件の場合でもリーン系二相ステンレス鋼継手の方が耐孔食性に優れることが確認された。

3. ステンレス新材料の溶接部の耐食性に関する屋外暴露試験

3.1 試験目的

前章に述べたように、実験室での試験によりリーン系二相ステンレス鋼の溶接部は従来鋼の溶接部と比較して良好な耐食性を示すことが確認された。実際の施設への最適な適用方法の検討のためには、河川・ダム施設を想定した実環境における長期的な耐久性の確認が必要である。そこで、実環境における暴露試験を実施することで、リーン系二相ステンレス鋼の耐食性能を従来鋼と比較評価することを目的とした。

3.2 試験片の準備

3.2.1 試験片の種類

暴露試験に使用した試験片の鋼種は初回試験片 4 種類（SUS821L1、SUS323L、SUS304、SUS316L）と追加試験片：3 鋼種（SUS821L1、SUS323L、SUS329J3L）および溶接構造用圧延鋼材 SM400B（溶接なし）である。

3.2.2 試験片の加工

試験片は溶接部を含むものとする。裏当て材を用い片側より下向き溶接し継手（約 W 150 mm × L 300 mm × t 8~12 mm）を製作した。各鋼種の溶接継手番号を表 3.2.1 に、試験体形状および開先形状を図 3.2.1 に示す。追加設置分の溶接材外観を写真 3.2.1~3.2.3 にそれぞれ示す。写真中の、向かって横方向の矢印は試験片の圧延方向を示す。また、縦方向の矢印はごく軽微なブローホールを示す。これらの溶接材について、マクロ・ミクロ組織観察を実施した。観察結果をそれぞれ写真 3.2.4~3.2.6 および写真 3.2.7~3.2.15 に示す。なおミクロ組織観察は写真 3.2.4~3.2.6 に赤枠で示した位置で実施した。マクロ組織観察の結果、溶接部およびその近傍にはポイドなどの欠陥は見られず、溶接状態は非常に良好であった。ミクロ組織観察の結果、母材部は超微細組織となっている。HAZ ではフュージョンラインのごく近傍で組織の成長が見られるが、二相ステンレス鋼の HAZ で一般に生じる組織であり目立った欠陥は見られなかった。溶接金属部はデンドライト組織となっていた。良好なミクロ組織を有しており、特に問題は確認されなかった。なお、初回設置の時点では試験片加工後の記録のみで良いとし、加工前の溶接継手の外観の記録は行っていない。

表 3.2.1 暴露試験片の鋼種および溶接継手番号

設置区分	鋼種	溶接継手番号			
初回設置分	SUS821L1	試験片のみ番号付与したため 継手番号なし			
	SUS323L				
	SUS304				
	SUS316L				
	SM400B				
追加設置分	SUS821L1	1-1	1-2	1-3	1-6
	SUS323L	2-1	2-2	2-3	2-4
	SUS329J3L	3-1	3-2	3-3	3-4

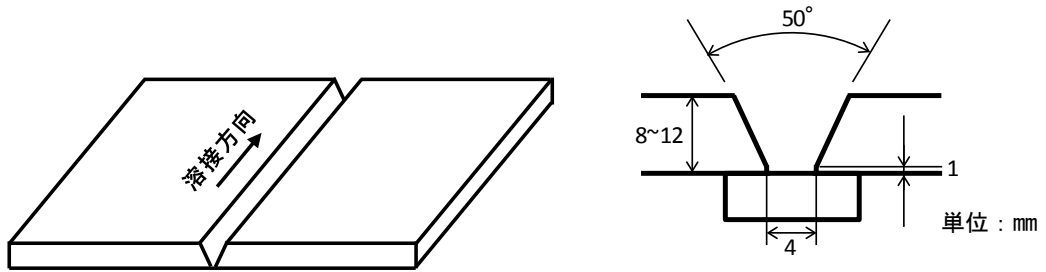


図 3.2.1 溶接継手形状および開先形状



写真 3.2.1 SUS821L1 追加設置分溶接材外観



写真 3. 2. 2 SUS323L 追加設置分溶接材外観

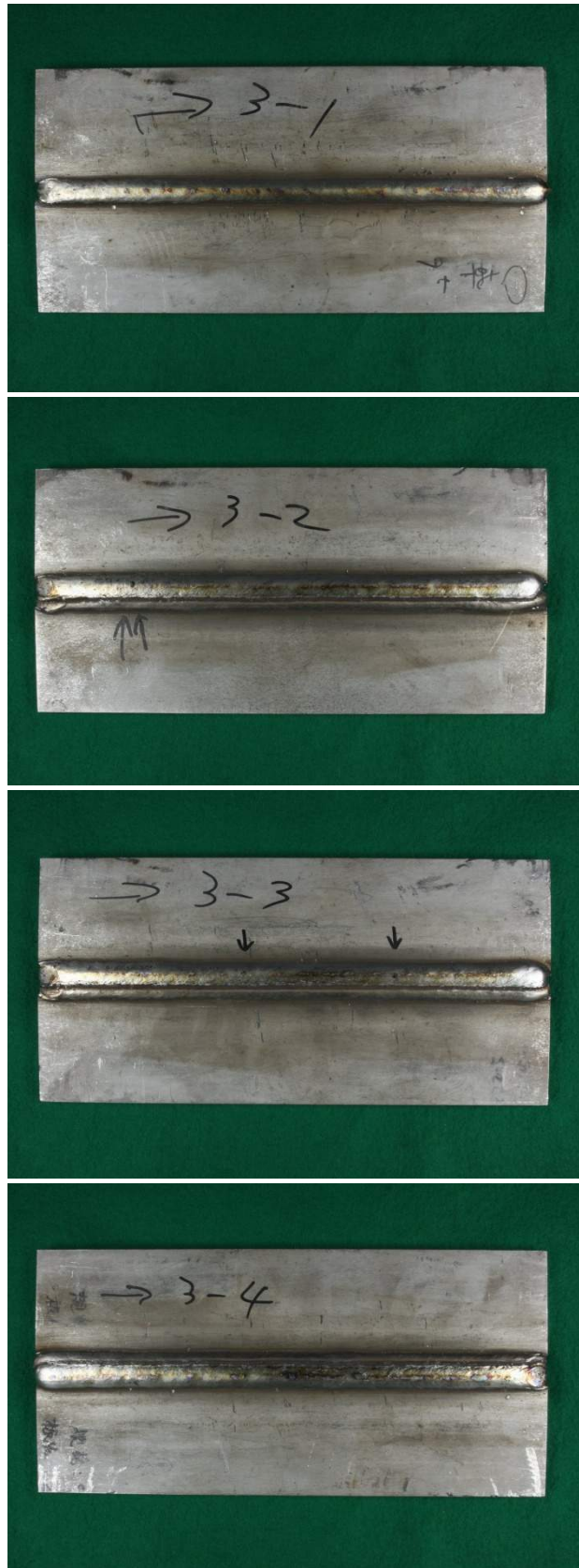
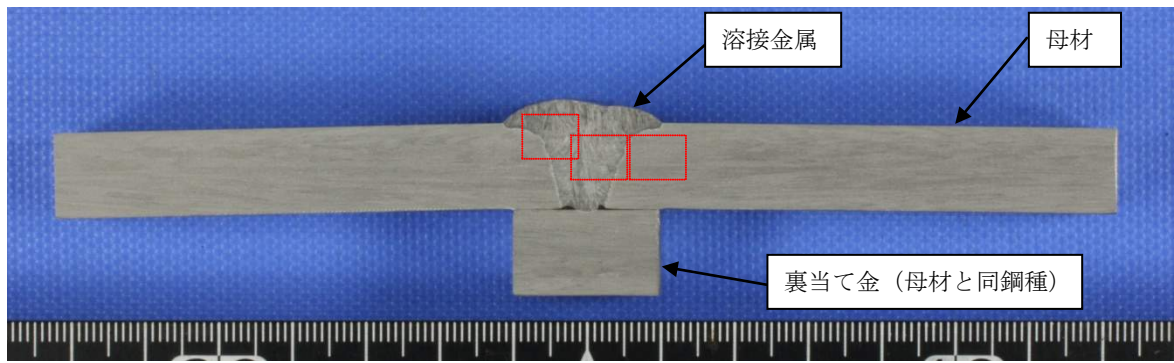
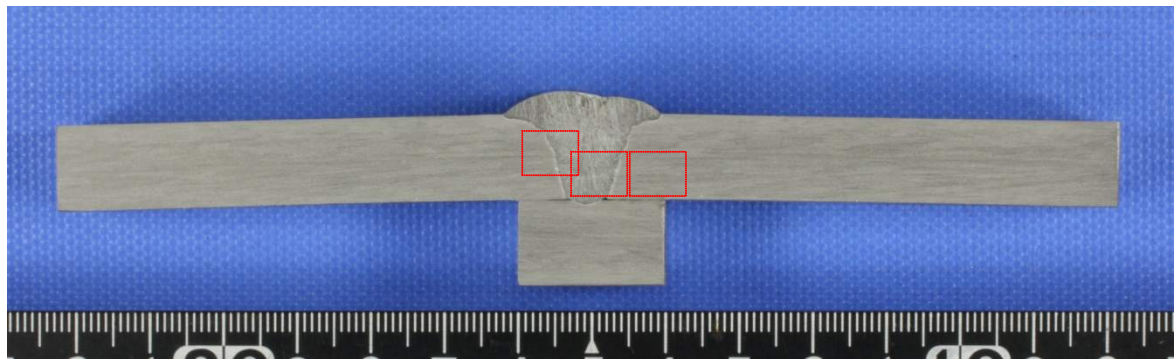


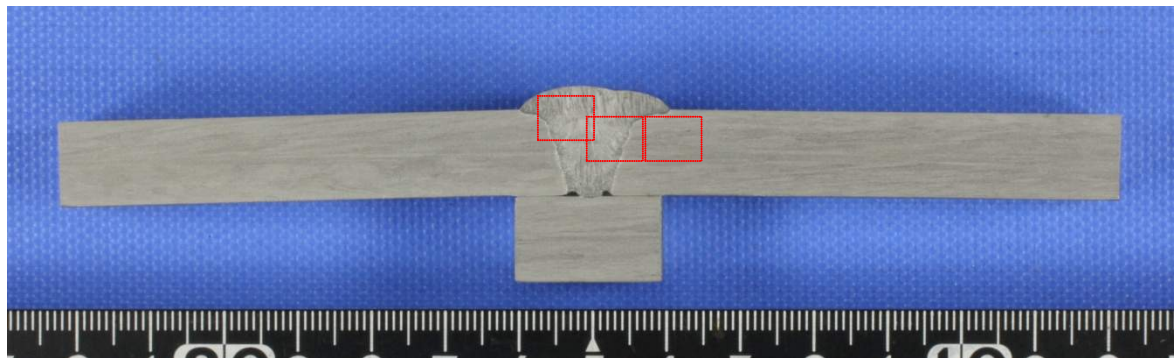
写真 3.2.3 SUS329J3L 追加設置分溶接材外観



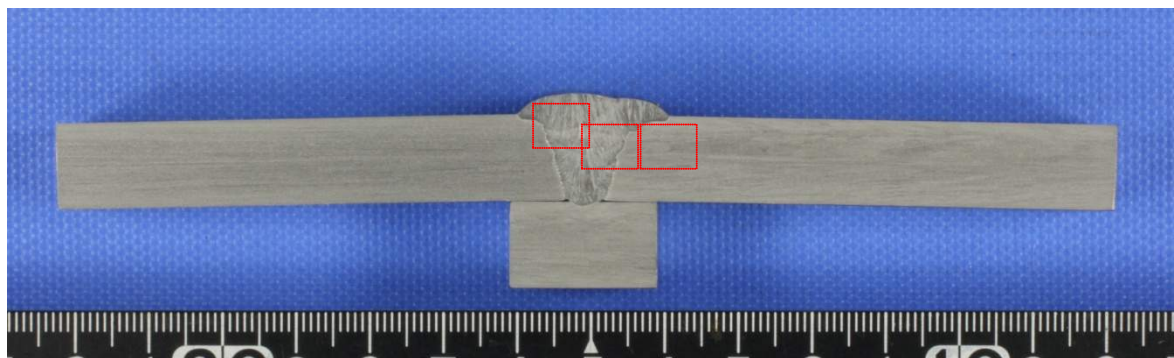
溶接継手番号：1-1



溶接継手番号：1-2

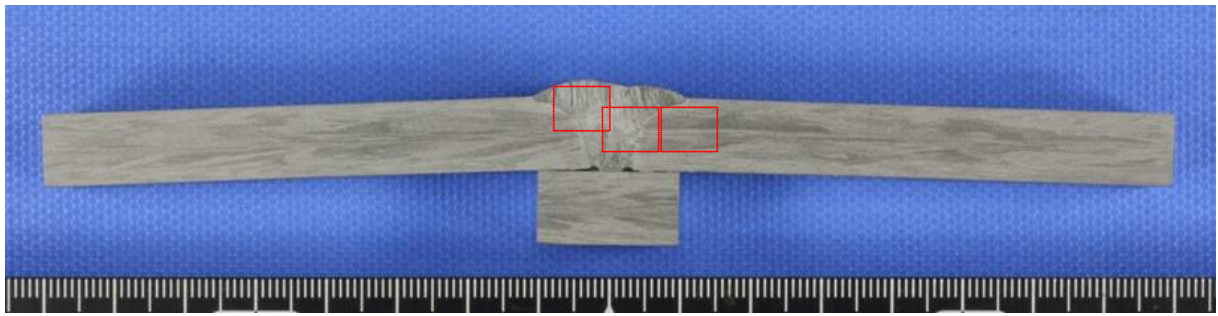


溶接継手番号：1-3

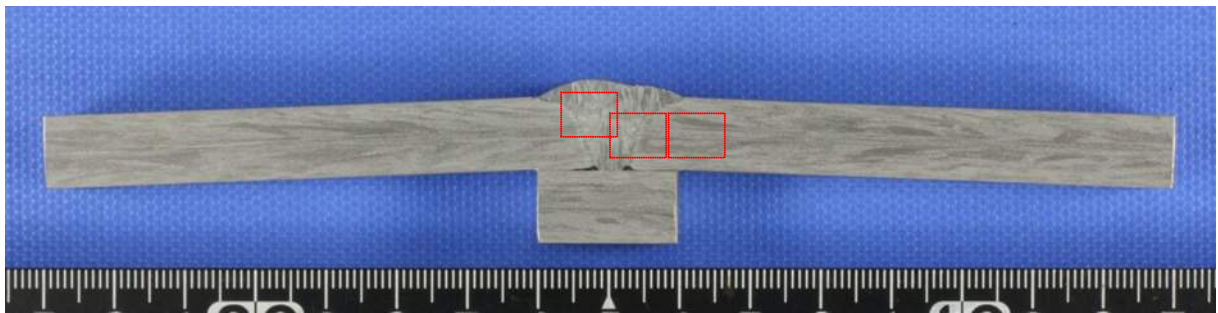


溶接継手番号：1-6

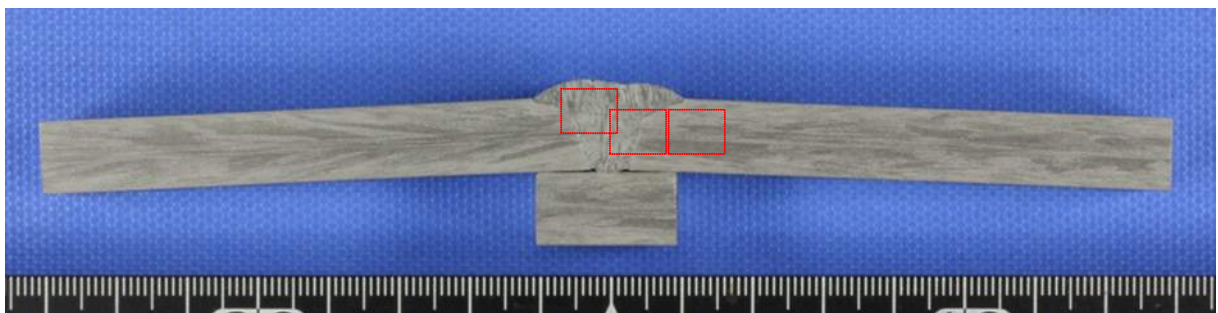
写真 3.2.4 SUS821L1 追加設置分溶接材断面マクロ組織写真（赤枠位置でミクロ観察実施）



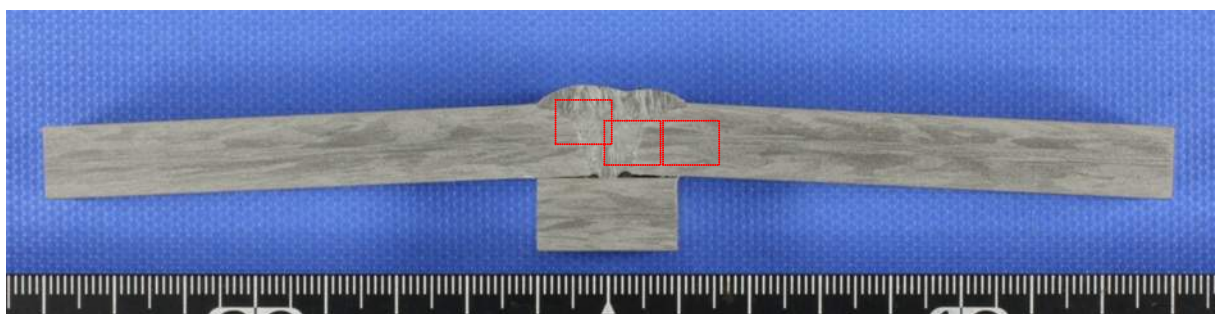
溶接継手番号：2-1



溶接継手番号：2-2

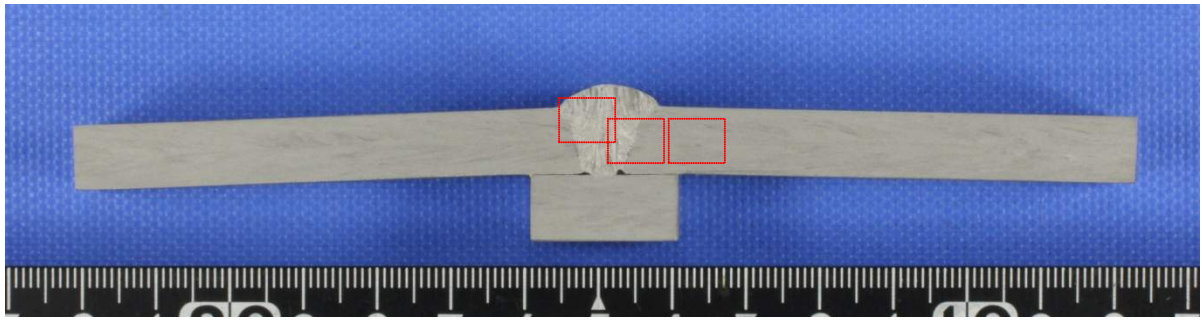


溶接継手番号：2-3

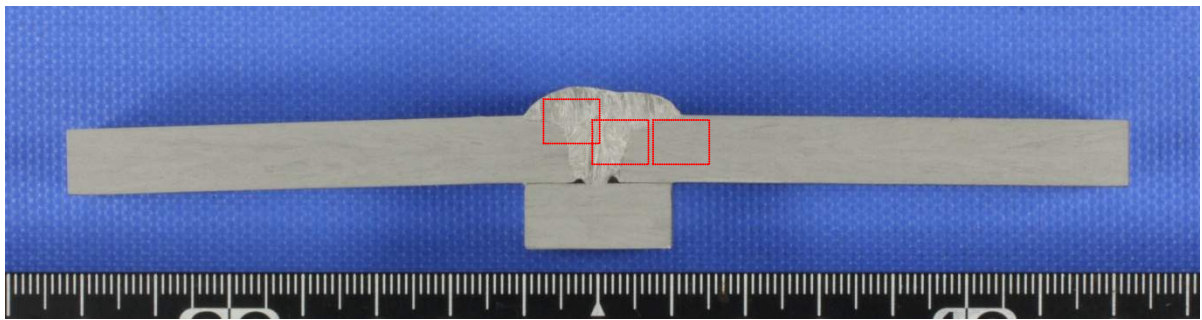


溶接継手番号：2-4

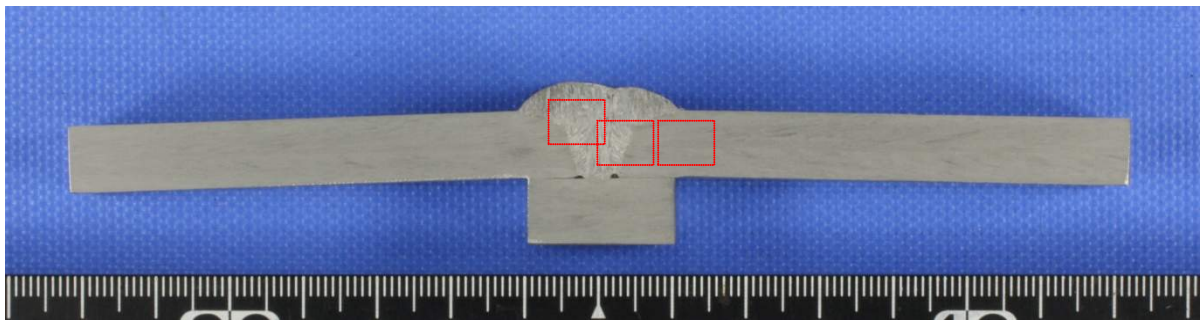
写真 3. 2. 5 SUS323L 追加設置分溶接材外観断面マクロ組織写真（赤枠位置でミクロ観察実施）



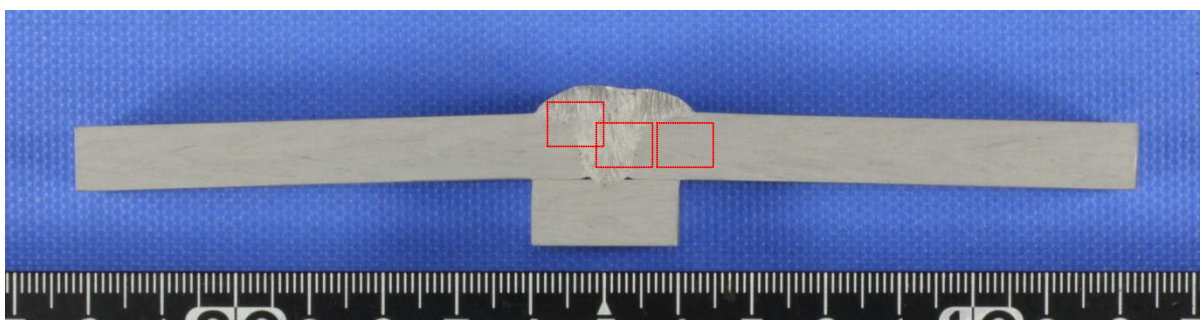
溶接継手番号：3-1



溶接継手番号：3-2



溶接継手番号：3-3



溶接継手番号：3-4

写真 3.2.6 SUS329J3L 追加設置分溶接材断面マクロ組織写真（赤枠位置でミクロ観察実施）

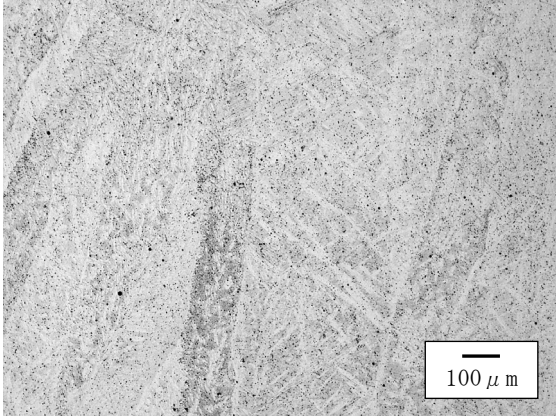
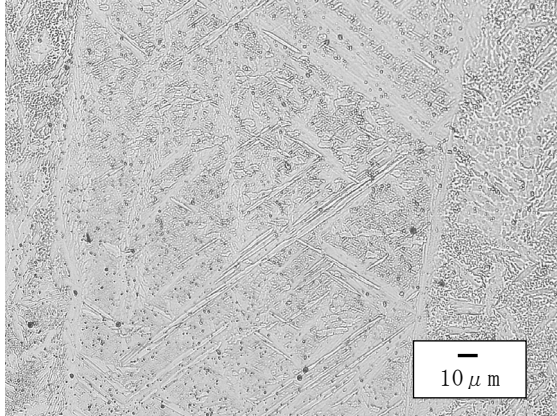
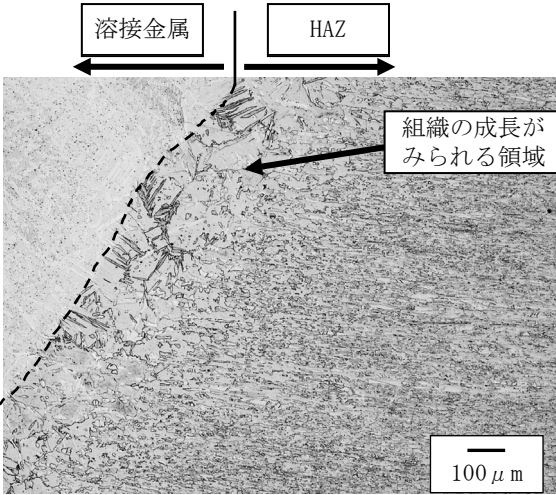
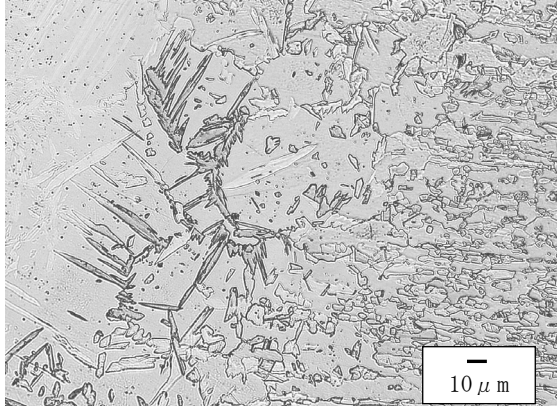
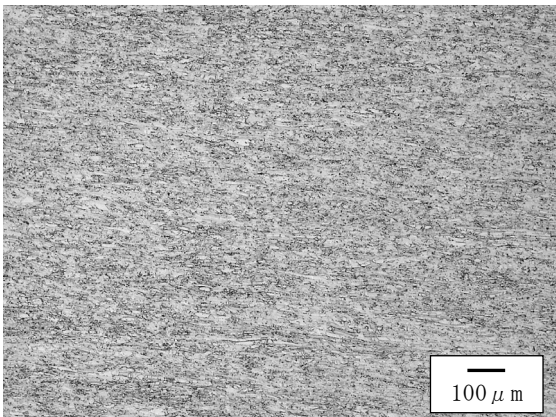
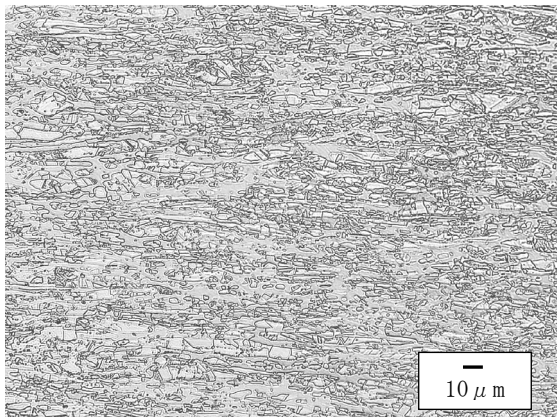
		SUS821L1	
		1-1 (低倍率)	1-1 (高倍率)
溶接金属部			
HAZ		 <p>溶接金属</p> <p>HAZ</p> <p>組織の成長がみられる領域</p>	
母材部			

写真 3. 2. 7 SUS821L1 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

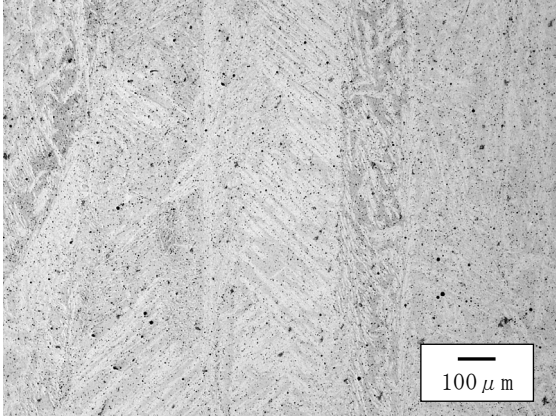
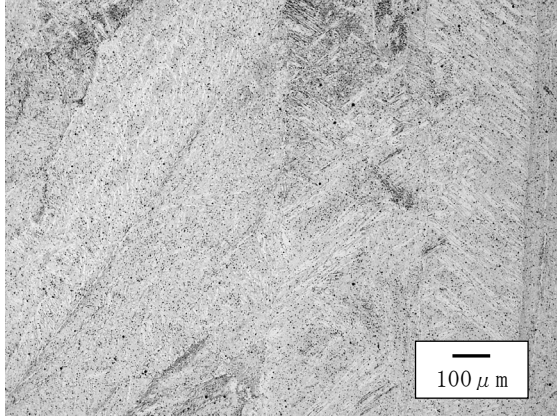
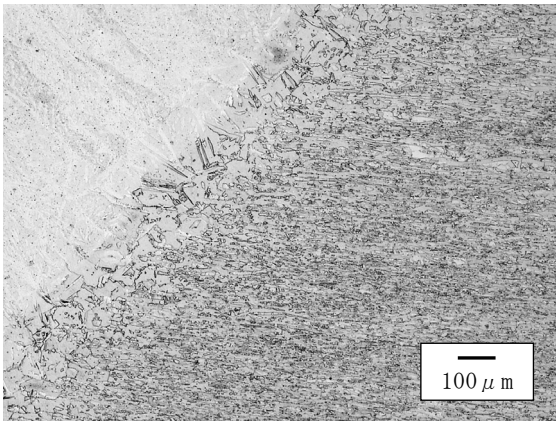
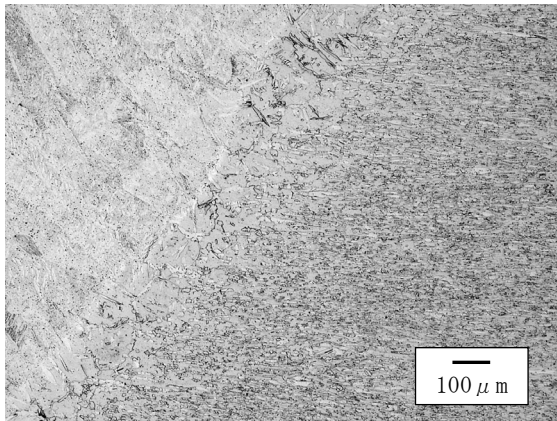
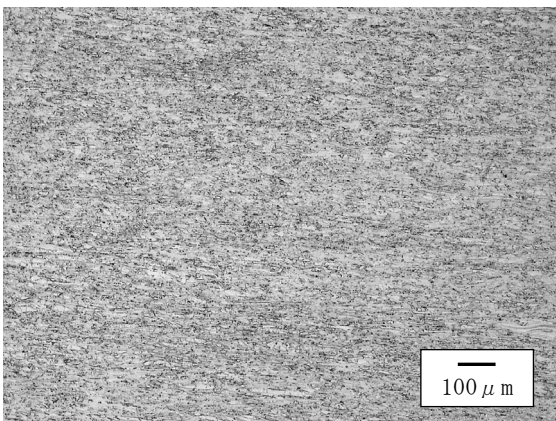
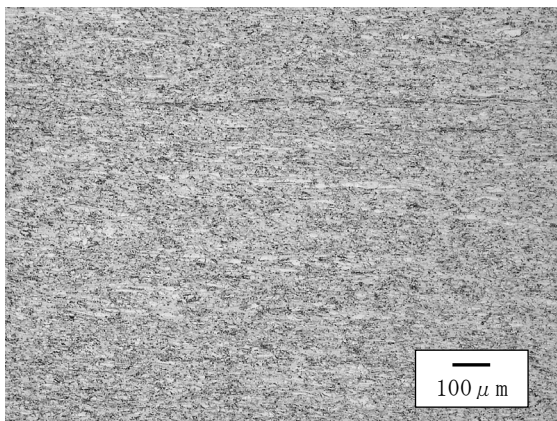
		SUS821L1	
		1-2	1-3
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 8 SUS821L1 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

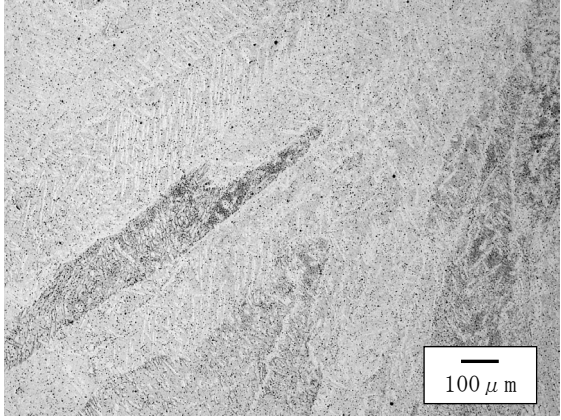
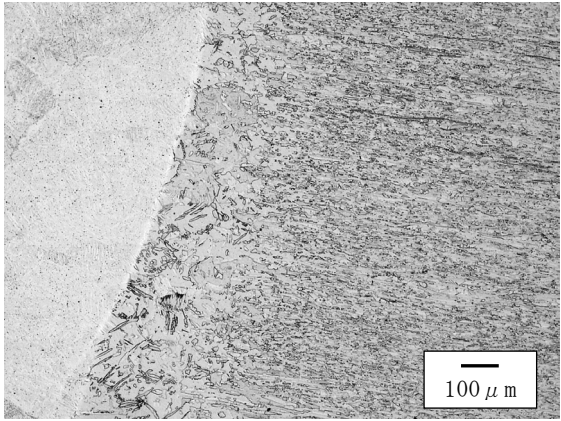
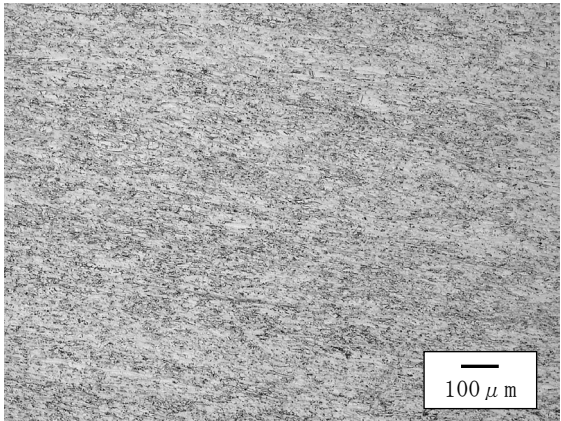
		SUS821L1	
		1-6	
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 9 SUS821L1 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

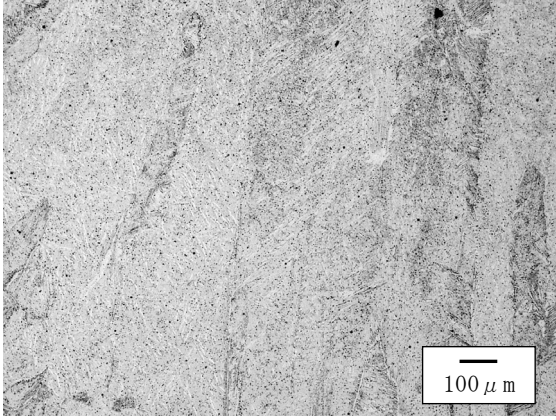
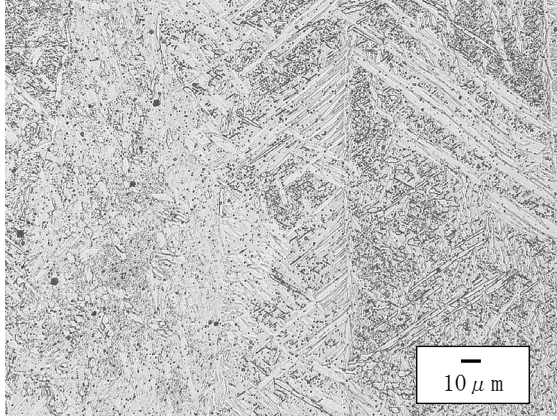
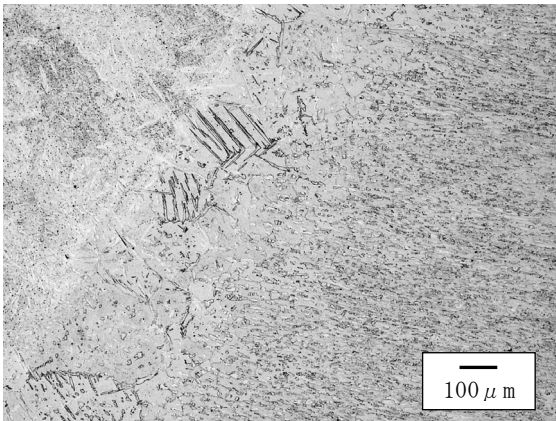
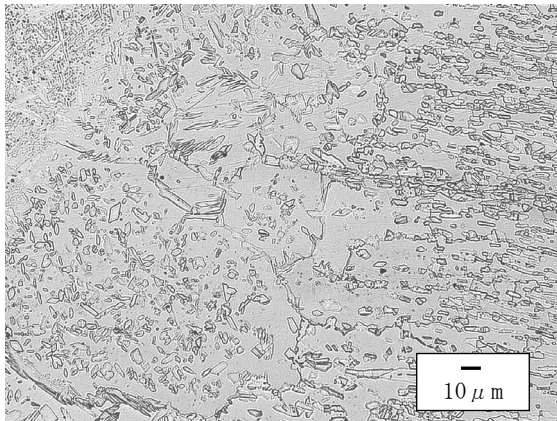
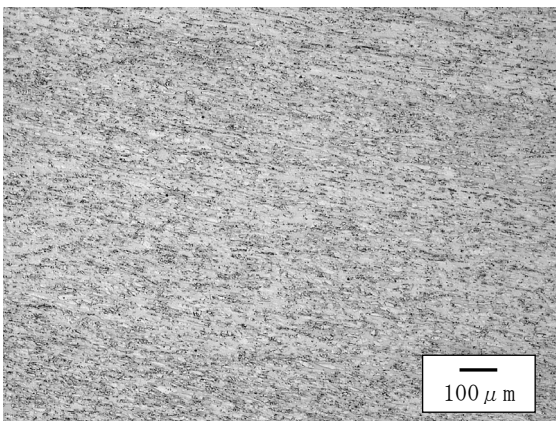
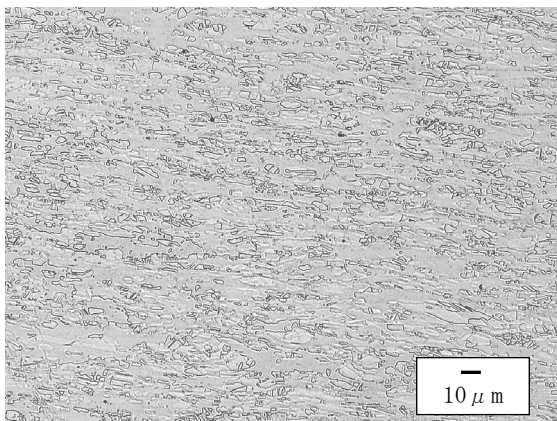
		SUS323L	
		2-1 (低倍率)	2-1 (高倍率)
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 10 SUS323L 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

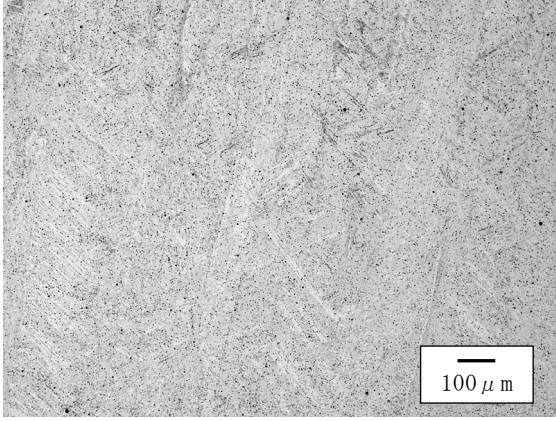
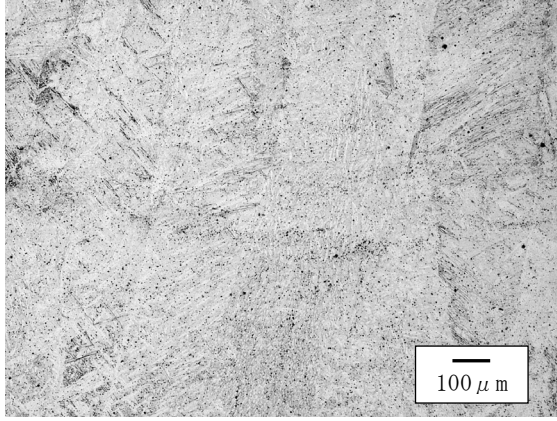
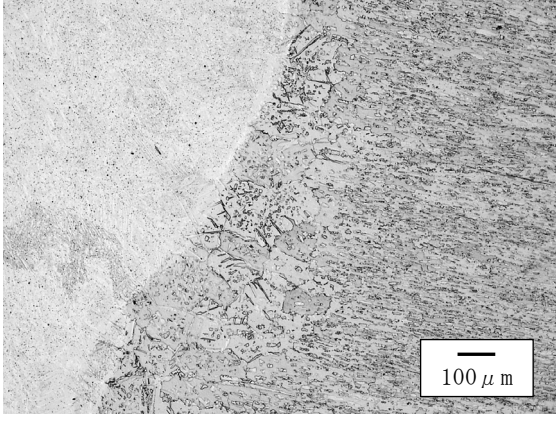
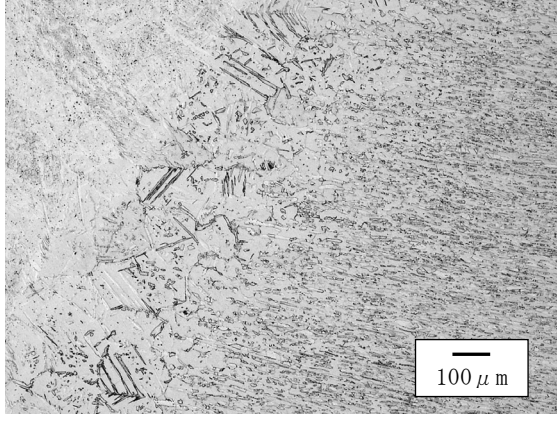
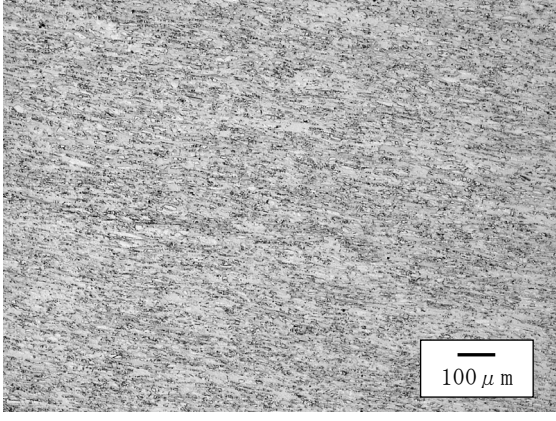
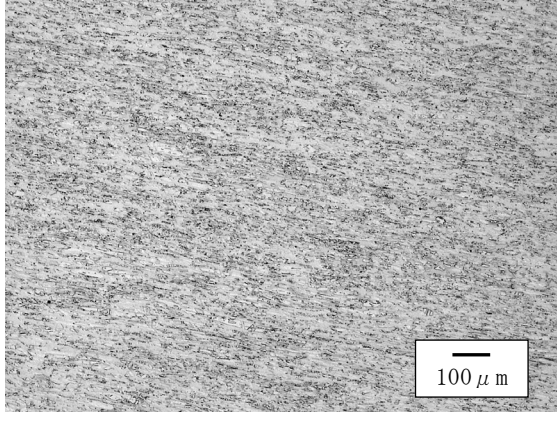
		SUS323L	
		2-2	2-3
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 11 SUS323L 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

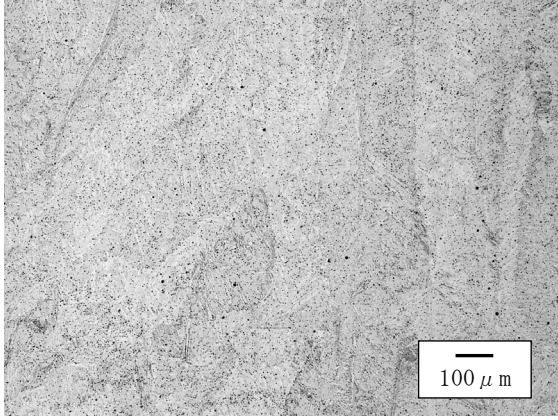
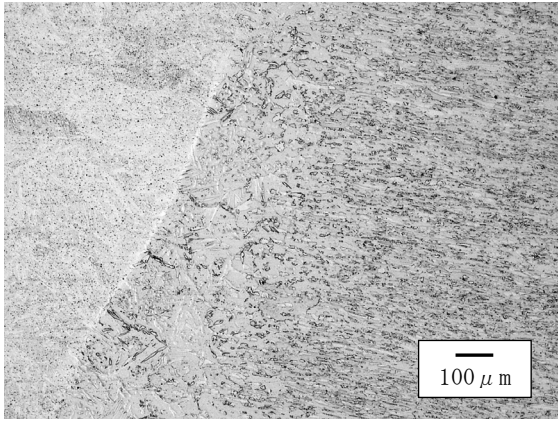
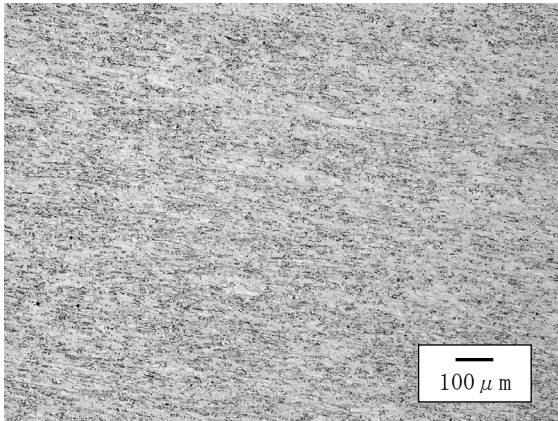
		SUS323L	
		2-4	
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 12 SUS323L 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

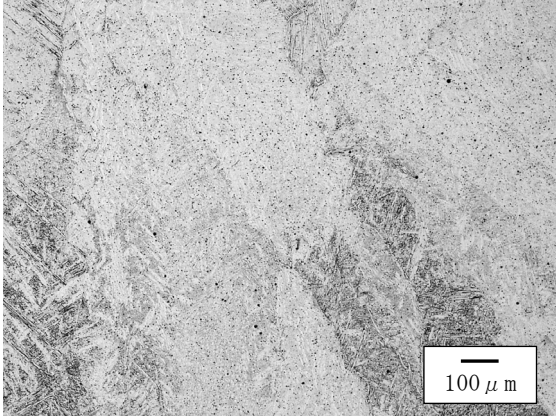
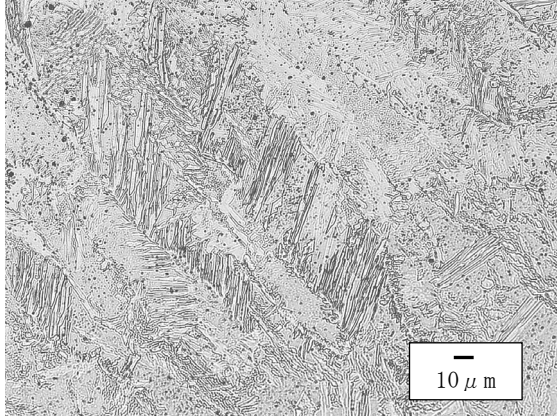
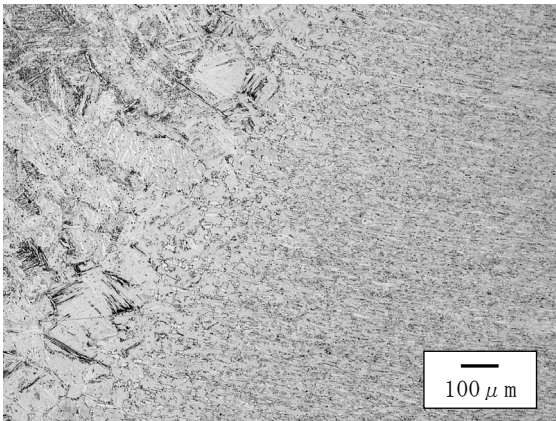
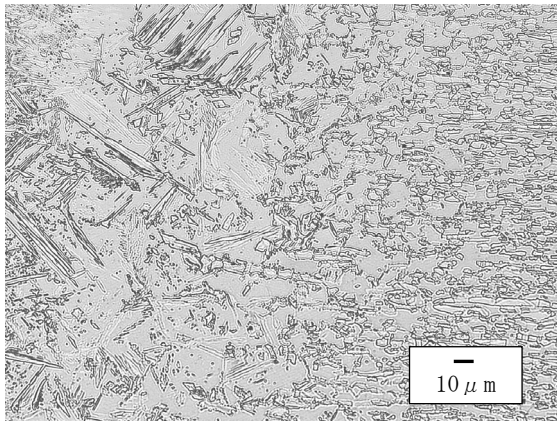
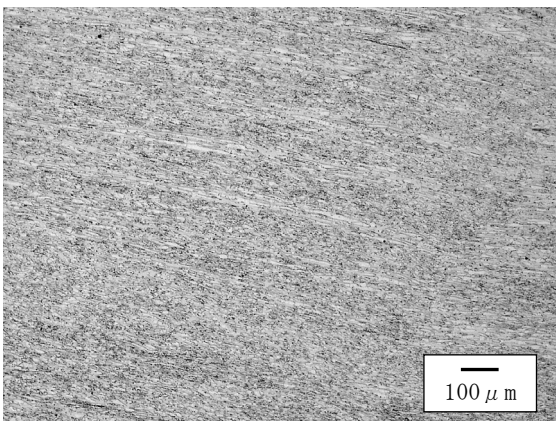
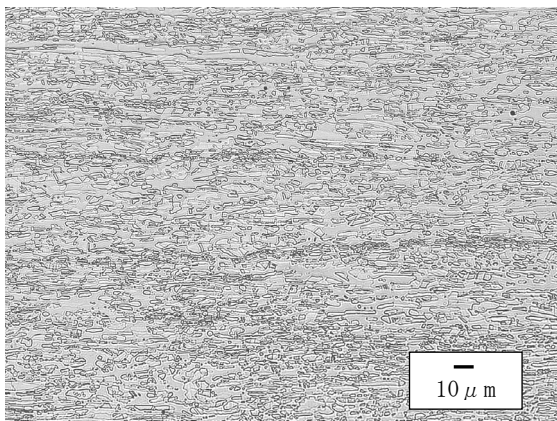
		SUS329J3L	
		3-1 (低倍率)	3-1 (高倍率)
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 13 SUS329J3L 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

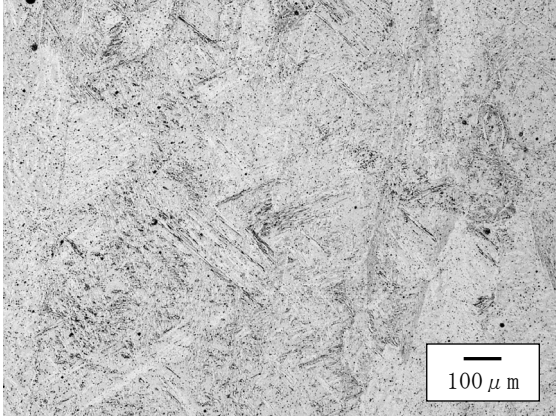
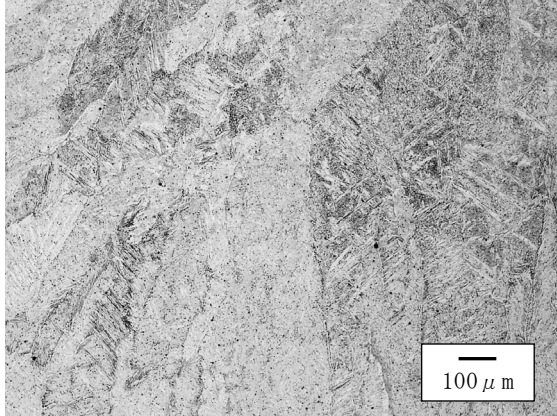
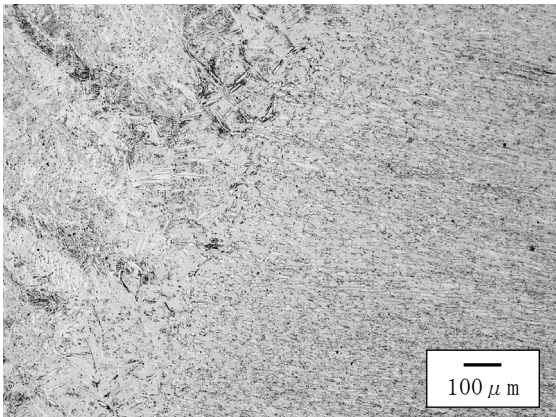
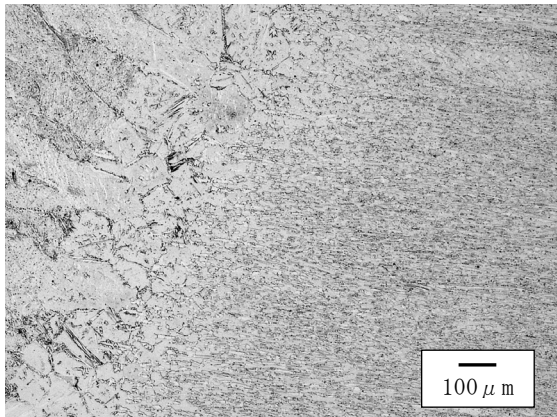
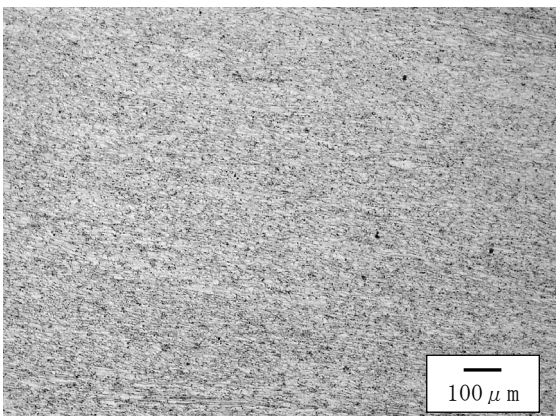
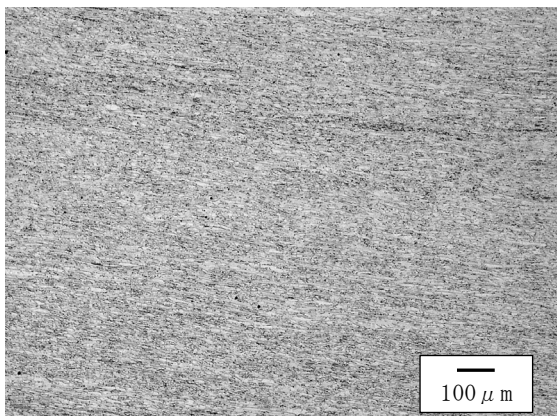
		SUS329J3L	
		3-2	3-3
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 14 SUS329J3L 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

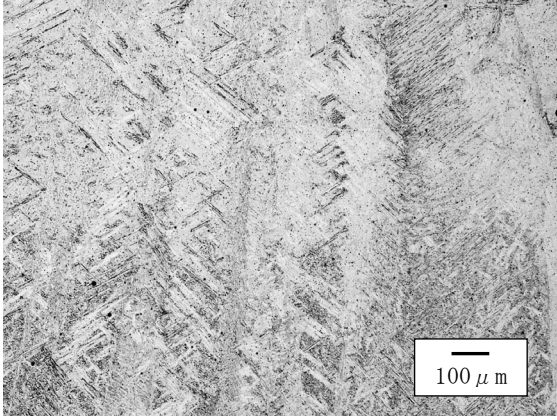
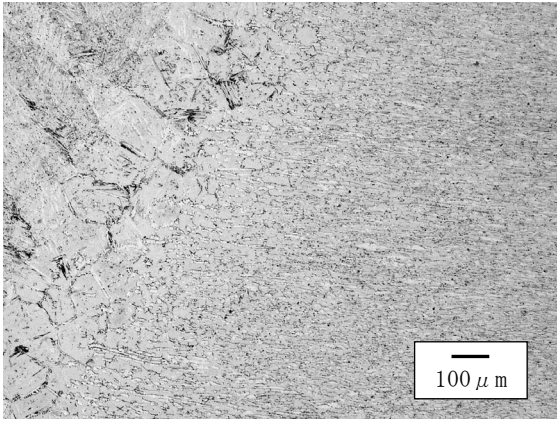
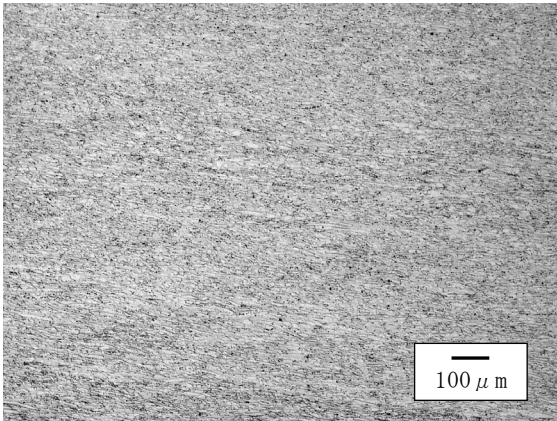
		SUS329J3L	
		3-4	
溶接金属部			
H A Z			
母材部			

写真 3. 2. 15 SUS329J3L 追加設置分溶接材断面ミクロ組織写真

これらの溶接継手から、継手 1 本につき 2 枚の試験片 (W 100 mm×L 100 mm×t 5 mm) を、
 図 3.2.1 に示すように溶接線を含むように切り出して暴露試験片とした。溶接金属幅はおよそ
 15mm 程度とした。試験片表面仕上げは全面#600 湿式研磨仕上げとした。

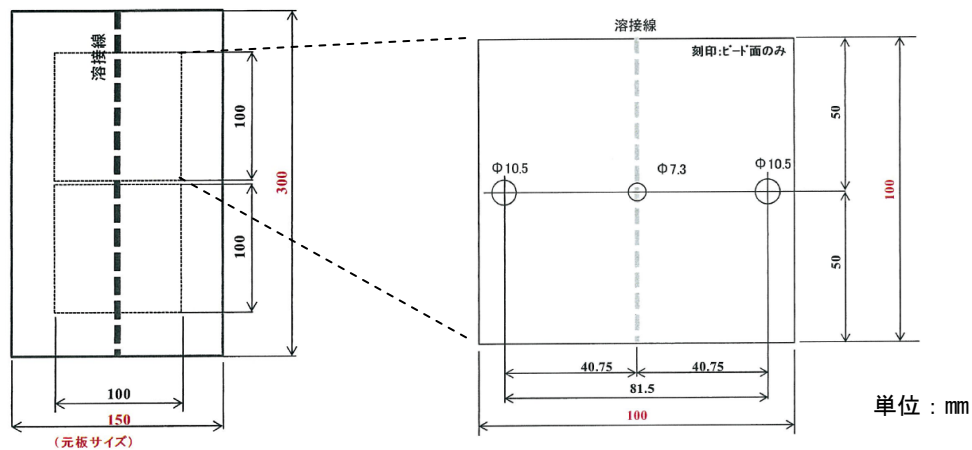


図 3.2.2 溶接試験材からの試験片加工仕様

3.2.3 暴露試験片組立

図 3.2.1 に示した暴露試験片に対し、溶接部を含むようにすき間治具を図 3.2.3 に示す位置に
 取り付けた。すき間治具は ASTM G78 のすき間形成材を使用した。すき間治具の締め付けトルク
 は 8.5 N·m とした。詳細を図 3.2.4 に示す。

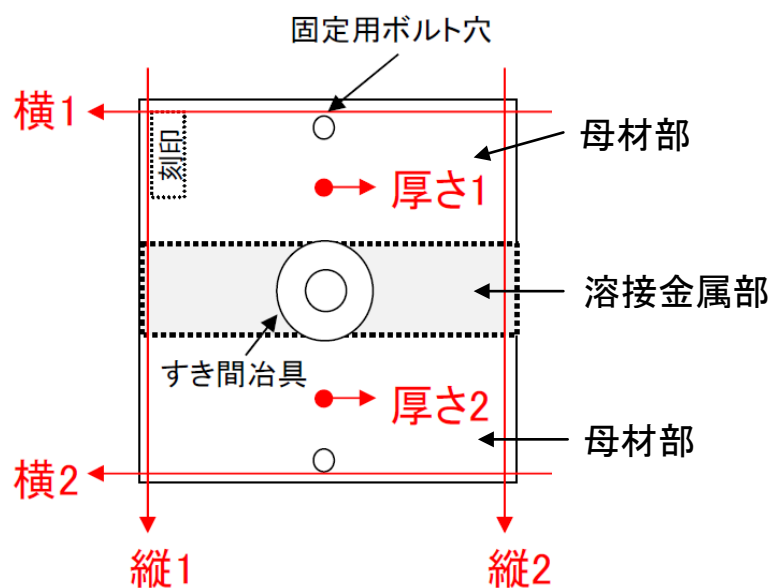
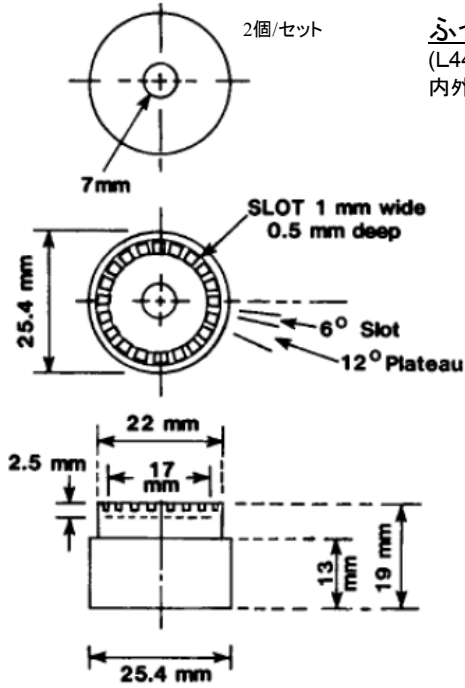


図 3.2.3 すき間治具取付状況

ASTM G78:すき間治具(ポリスルホン樹脂)

M6 × L60, Ti製 Bolt Nut



ふっ素樹脂チューブ
(L44, Dout<7.0, Din>6.0
内外径はここに収まるもの)

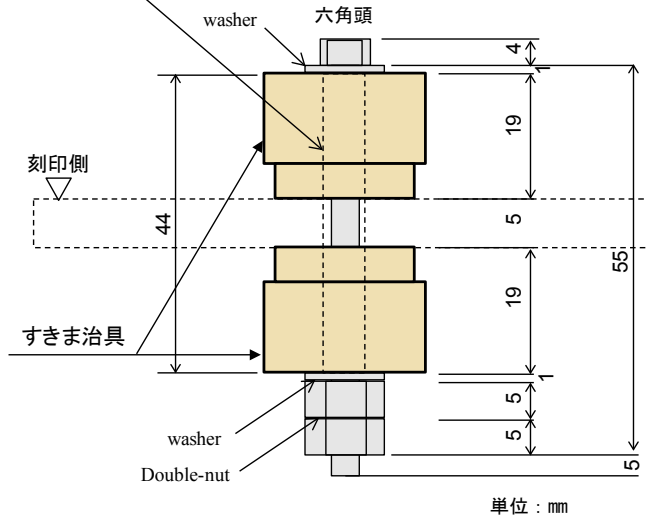


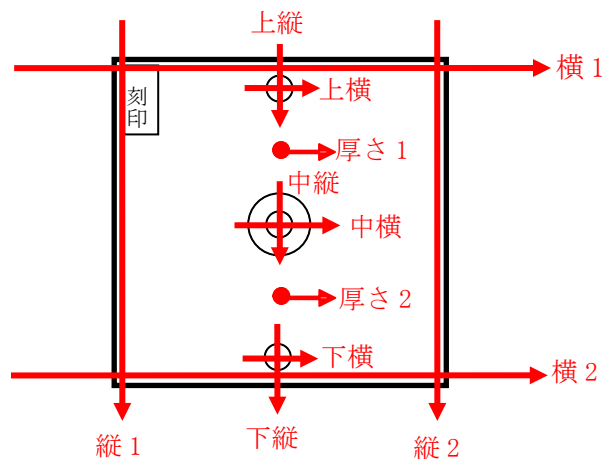
図 3.2.4 すき間治具詳細

3.2.4 試験片寸法測定

既設暴露試験片の初期寸法および初期重量測定結果を表3.2.2に示す。

表 3.2.2 試験片初期寸法および初期重量測定結果

刻印	長さ(mm)						孔内径(mm)						重量(g)
	縦1	縦2	横1	横2	厚さ1	厚さ2	上縦	上横	中縦	中横	下縦	下横	
N1	99.93	99.97	99.96	99.96	4.996	4.979	10.81	10.81	7.38	7.37	10.74	10.84	377.949
N2	99.90	99.98	99.98	99.98	4.943	4.969	10.72	10.74	7.34	7.35	10.80	10.80	375.422
N3	99.96	99.96	99.96	99.96	4.979	4.985	10.69	10.71	7.32	7.32	10.72	10.76	377.670
N4	99.97	99.95	99.98	99.93	4.963	4.955	10.71	10.77	7.35	7.34	10.73	10.70	375.381
N5	99.96	100.00	99.95	99.97	3.223	3.188	10.80	10.80	7.38	7.35	10.80	10.81	243.622
N6	99.94	99.94	100.00	99.84	2.981	3.017	10.86	10.85	7.34	7.34	10.80	10.82	227.933
N7	99.99	99.95	99.89	99.98	3.349	3.344	10.81	10.82	7.35	7.33	10.75	10.72	251.652
N8	99.89	99.95	99.95	99.91	1.878	1.886	10.81	10.77	7.41	7.42	10.86	10.85	139.842
U1	99.95	99.97	99.94	99.94	4.980	4.985	10.79	10.81	7.34	7.36	10.68	10.74	376.509
U2	100.00	99.98	99.98	99.96	4.964	4.993	10.81	10.79	7.38	7.36	10.77	10.83	375.833
U3	99.93	100.01	99.96	99.98	4.979	4.968	10.75	10.74	7.35	7.35	10.78	10.80	375.244
U4	99.94	99.97	99.95	99.97	4.973	4.969	10.79	10.77	7.36	7.34	10.71	10.72	375.785
U5	99.90	99.88	99.97	99.93	1.978	1.999	10.79	10.80	7.39	7.34	10.79	10.79	148.136
U6	99.87	99.89	99.88	99.90	1.940	1.937	10.78	10.79	7.38	7.38	10.66	10.77	147.515
U7	99.95	99.98	99.93	99.96	4.314	4.305	10.64	10.64	7.36	7.37	10.66	10.77	325.668
U8	99.99	99.96	100.01	99.89	4.203	4.224	10.69	10.68	7.35	7.33	10.77	10.77	317.681
B1	99.97	99.99	99.98	99.97	5.005	5.008	10.78	10.83	-	-	10.80	10.85	385.161
B2	99.96	99.96	99.98	100.04	5.002	5.016	10.82	10.85	-	-	10.80	10.82	385.112
B3	99.99	99.98	99.98	100.05	5.019	5.024	10.84	10.80	-	-	10.80	10.84	385.914
B4	99.94	99.97	100.01	100.00	5.024	5.021	10.86	10.81	-	-	10.81	10.84	386.081
41	99.65	99.58	99.86	99.98	4.460	4.456	10.79	10.80	7.41	7.39	10.78	10.76	342.923
42	99.65	99.63	99.97	99.93	4.207	4.157	10.78	10.77	7.36	7.35	10.77	10.79	322.199
43	99.62	99.70	99.76	99.92	3.897	3.872	10.77	10.77	7.35	7.32	10.75	10.76	296.796
44	99.66	99.69	99.94	99.89	4.881	4.888	10.82	10.83	7.36	7.39	10.79	10.80	376.381
61	99.93	99.95	99.95	99.91	4.942	4.947	10.83	10.81	7.40	7.40	10.80	10.82	383.703
62	99.95	99.96	99.97	99.96	4.360	4.376	10.83	10.83	7.38	7.37	10.81	10.80	338.991
63	99.98	99.99	99.97	99.95	4.559	4.571	10.80	10.79	7.39	7.39	10.82	10.80	354.894
64	99.91	99.91	99.93	99.96	3.504	3.486	10.78	10.80	7.34	7.32	10.79	10.78	272.018



3.2.5 暴露試験片取付方法

暴露試験片は、締結プレートに取り付け、さらに暴露用枠に固定した。図 3.2.5 に締結プレートおよび暴露用枠の形状を、図 3.2.6 に試験片取付後の状況を示す。図 3.2.7、図 3.2.8、表 3.2.3 に試験片締結部の詳細を示す。

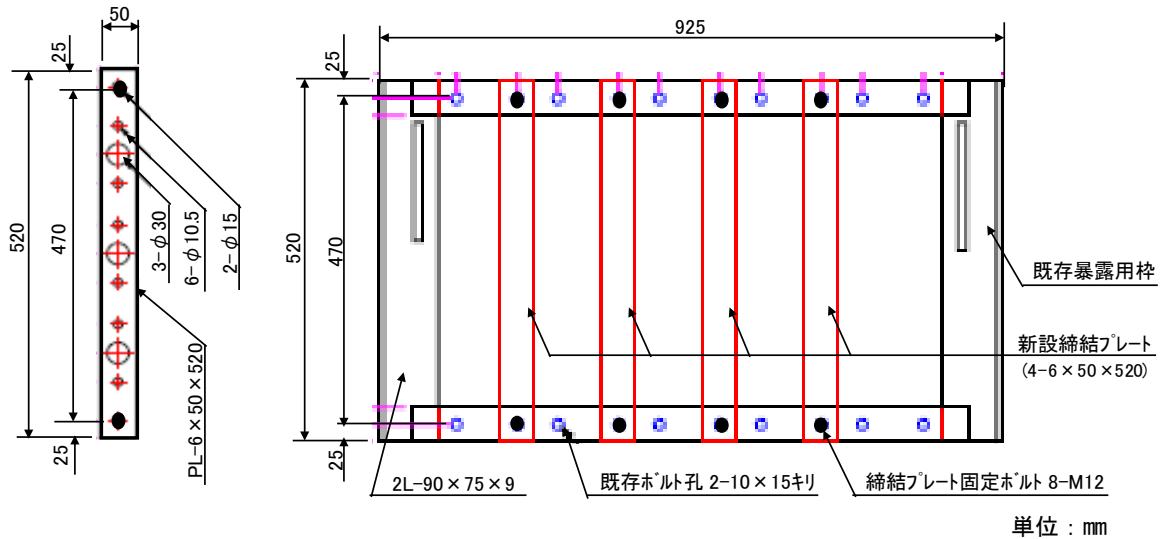


図 3.2.5 締結プレートおよび暴露用枠形状

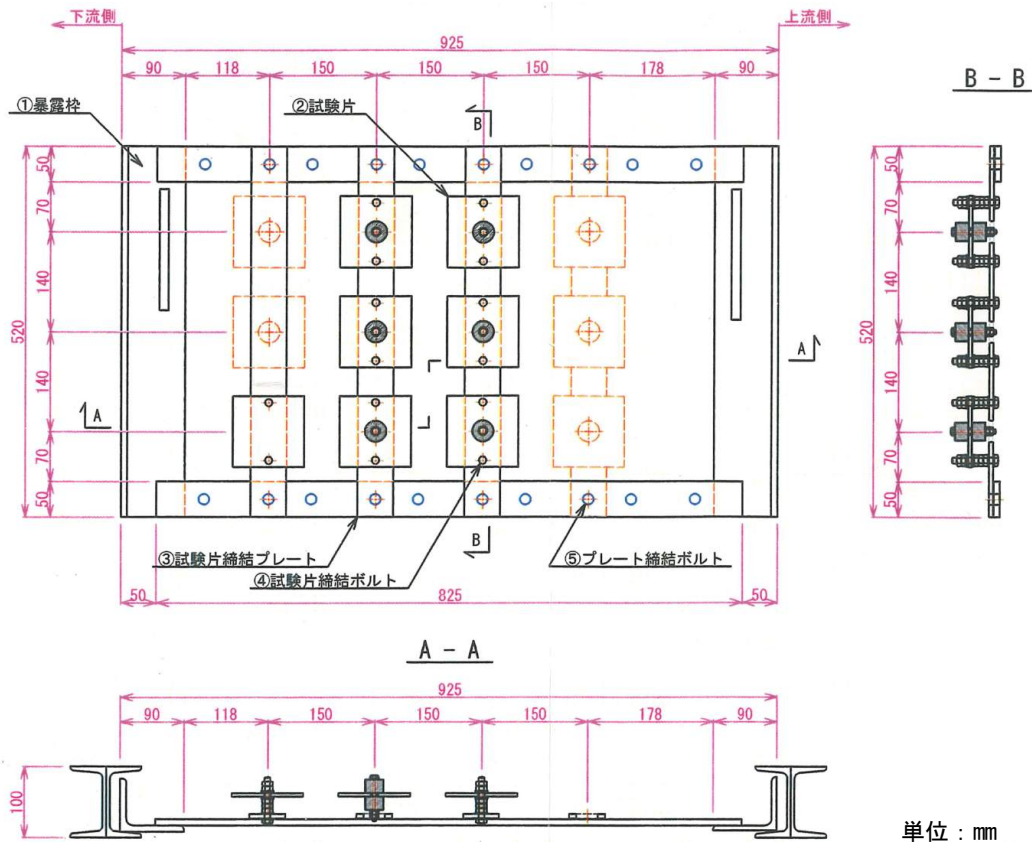
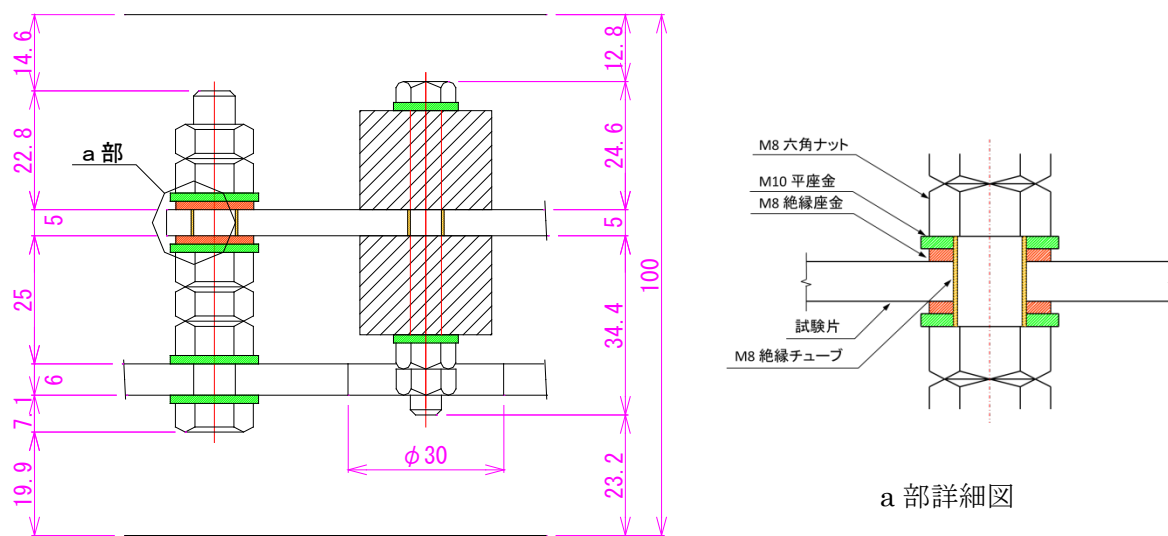


図 3.2.6 暴露用枠への試験片取付後の状況



単位 : mm

図 3.2.7 試験片締結部構造

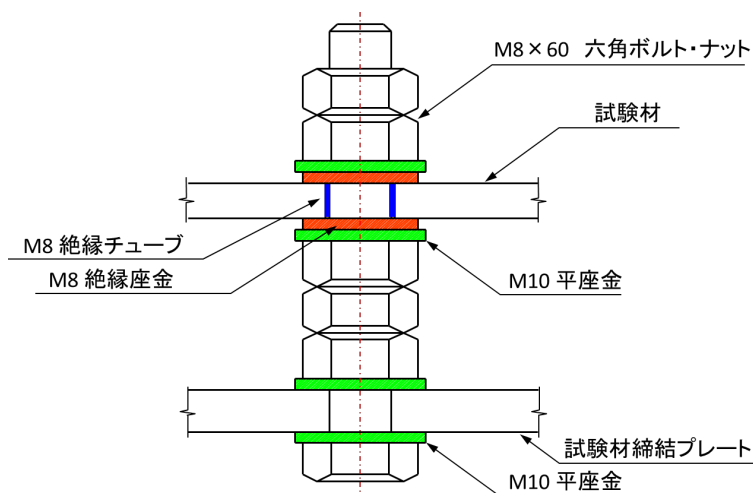


図 3.2.8 試験片締結部ボルト・ナット

表 3.2.3 試験片締結部 1 組当たり数量

名 称	数 量	備 考
M8×60 六角ボルト	1	SUS304 全ネジ
M8 平座金	2	SUS304
M10 平座金	2	SUS304
M8 六角ナット	5	SUS304
M8 絶縁座金	2	エポキシ系 FRP (ボルト孔 φ 10.5)
M8 絶縁チューブ	1	熱収縮ポリオレフィン樹脂

3.3 暴露試験

3.3.1 暴露場所

暴露試験は国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所江戸川河口出張所で実施した。写真 3.3.1 に江戸川水門下流の暴露試験場および試験架台の外観を示す。図 3.3.1 に暴露架台の配置図を、図 3.3.2 に架台の断面図を示す。この架台に、図 3.2.5 に示す暴露試験片および暴露用枠を取り付けた。



写真 3.3.1 江戸川水門下流の暴露試験場および試験架台外観

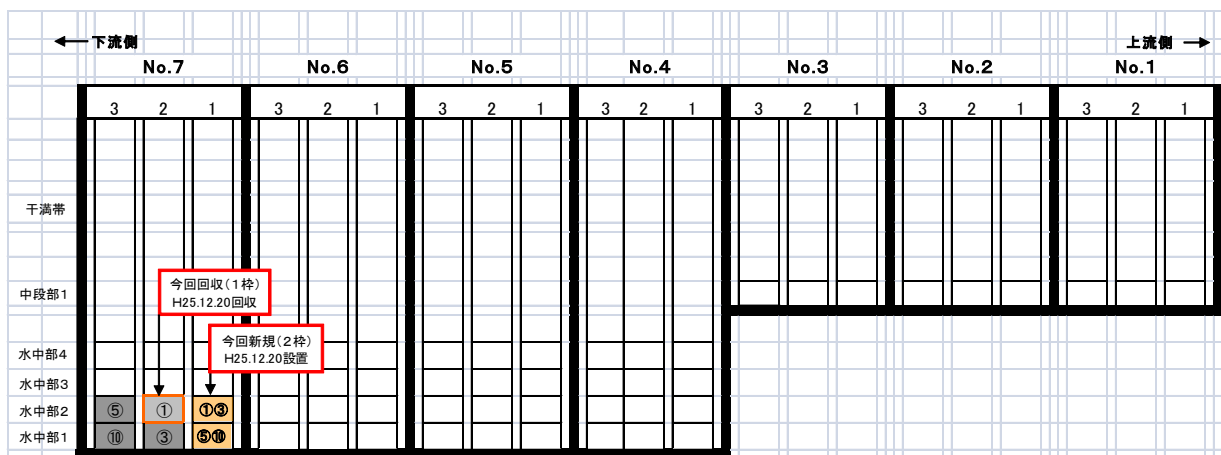


図 3.3.1 暴露試験架台配置図

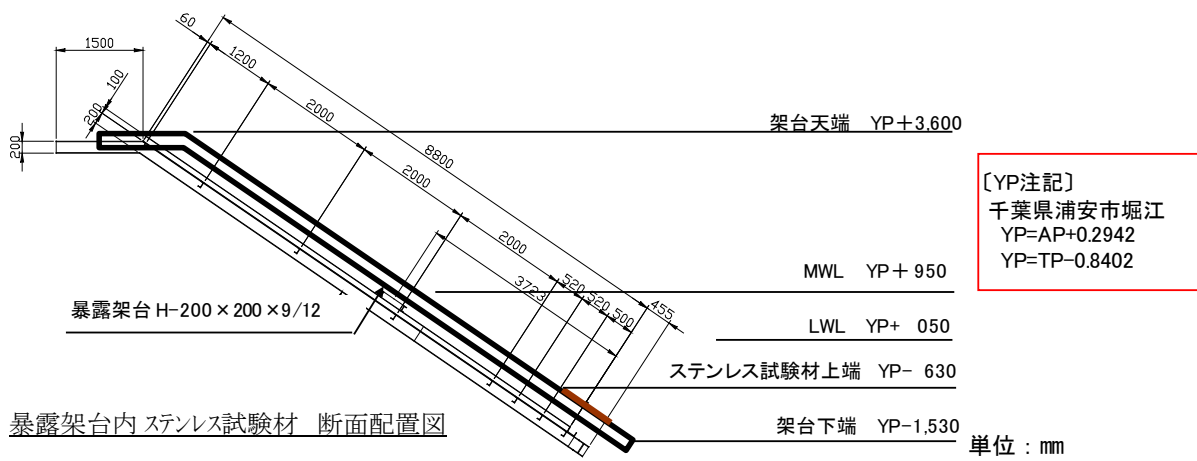


図 3.3.2 暴露試験架台断面図

3.3.2 暴露試験調査計画

表 3.3.1 に暴露鋼種を、表 3.3.2 に調査日程をそれぞれ示す。

表 3.3.1 暴露鋼種

暴露鋼種	初回設置分 H24年12月20日設置	追加設置分 H25年12月20日設置
リーン二相系	SUS821L1 SUS323L	SUS821L1 SUS323L
比較材	SUS304 SUS316L SM400B	SUS329J3L

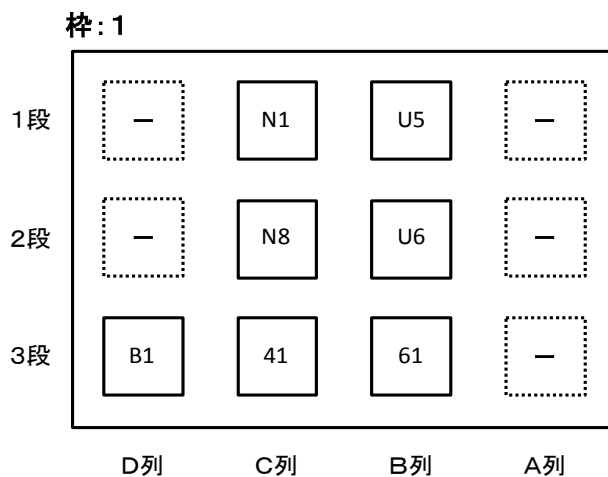
表 3.3.2 調査日程

調査年		初回設置分	追加設置分
H24年	2012年	暴露開始 12月20日	
H25年	2013年	1年目調査 12月20日	暴露開始 12月20日
H26年	2014年		1年目調査 12月24日
H27年	2015年	3年目調査 12月18日	
H28年	2016年		3年目調査
H29年	2017年	5年目調査	
H30年	2018年		5年目調査
H31年	2019年		
H32年	2020年		
H33年	2021年		
H34年	2022年	10年目調査	
H35年	2023年		10年目調査

3.4 暴露試験の開始

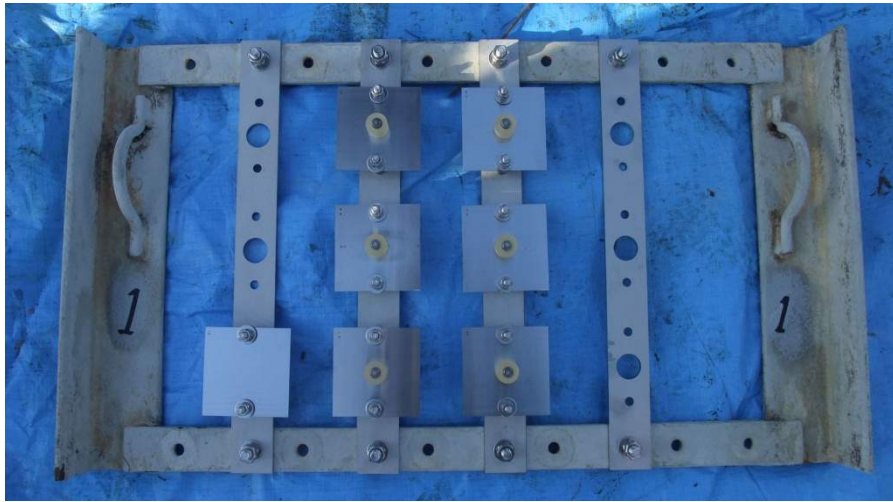
3.4.1 調査対象試験片

今回は図 3.3.1 中に示す枠：1 にて 1 年間暴露した試験片について調査した。枠：1 の試験片配列・鋼種別配列・マークを図 3.4.1 に、試験片外観写真を写真 3.4.1 に示す。



	D 列	C 列	B 列	A 列
1 段	—	N1 (SUS821L1)	U5 (SUS323L)	—
2 段	—	N8 (SUS821L1)	U6 (SUS323L)	—
3 段	B1 (SM400B)	41 (SUS304)	61 (SUS316L)	—

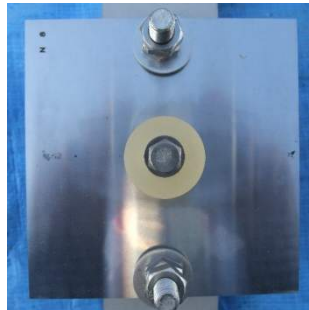
図 3.4.1 試験片配列・鋼種別配列図



N1 (SUS821L1)



U5 (SUS323L)



N8 (SUS821L1)



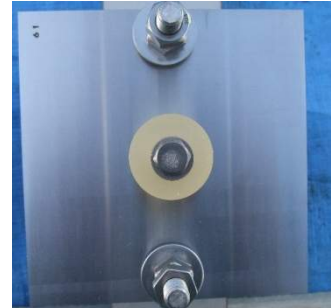
U6 (SUS323L)



B1 (SM400B)



41 (SUS304)



61 (SUS316L)

写真 3. 4. 1 暴露開始時の試験片配置状況

3.4.2 水質調査

暴露試験にあたって、暴露場現地の河川水を採水し水質調査を実施した。干満により暴露場に海水が侵入し、水質が変化すると考えられるため、平成 25 年 12 月 20 日の満潮時、中潮時、干潮時の 3 回にわたって採水した。図 3.4.2 に採水時の潮汐図を示す。採水は、表層～300 mm の範囲から行った。水質調査は、表 3.4.1 に示す項目と方法により行った。

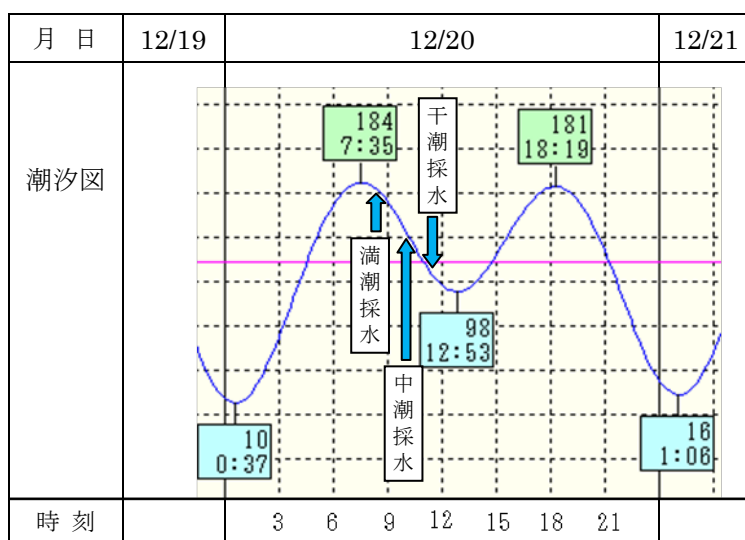


図 3.4.2 暴露場河川水採水時の潮汐図

表 3.4.1 水質調査項目および方法

項目	方法	項目	方法
① Cl ⁻	衛生試験法・注解 ¹⁾	⑥ Na ⁺	JIS K 0102 : 2013 48.2
② 電気伝導率	JIS K 0102 : 2013 13	⑦ Ca ²⁺	JIS K 0102 : 2013 50.3
③ 溶存酸素	JIS K 0102 : 2013 32.1	⑧ Mg ²⁺	JIS K 0102 : 2013 51.3
④ SO ₄ ²⁻	JIS K 0102 : 2013 41.3	⑨ 化学的酸素要求量	JIS K 0102 : 2013 17
⑤ NO ₃ ⁻	JIS K 0102 : 2013 43.2.5	⑩ 生物化学的酸素要求量	JIS K 0102 : 2013 21

調査結果を表 3.4.2 に示す。特に満潮時に Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の濃度および電気伝導率が大きくなっており、河川に海水が浸入した影響が見られる。また、河川の化学的酸素要求量並びに生物化学的酸素要求量から判断すると、比較的清浄な水質と言える。

表 3.4.2 水質調査結果

項目	単位	分析結果		
		満潮時	中潮時	干潮時
① Cl^-	mg/L	1700	390	310
② 電気伝導率	mS/m	540	150	120
③ 溶存酸素	mg/L	11	12	12
④ SO_4^{2-}	mg/L	290	94	81
⑤ NO_3^-	mg/L	11	11	12
⑥ Na^+	mg/L	940	220	170
⑦ Ca^{2+}	mg/L	61	35	34
⑧ Mg^{2+}	mg/L	120	30	25
⑨ 化学的酸素要求量	mg/L	4	4	4
⑩ 生物化学的酸素要求量	mg/L	2	2	2

3.5 暴露試験片の回収

平成 24 年 12 月 20 日～平成 25 年 12 月 20 日の 1 年間暴露試験を行い、回収した試験片（枠：1）の外観写真を写真 3.5.1 に示す。



N1 (SUS821L1)



U5 (SUS323L)



N8 (SUS821L1)



U6 (SUS323L)



B1 (SM400B)



41 (SUS304)



61 (SUS316L)

写真 3.5.1 暴露 1 年後の試験片（枠：1）の外観写真

3.6 暴露試験片の評価

3.6.1 評価方法

(1) 外観観察

回収した暴露試験片の外観を回収後、水洗後、脱スケール後の3回それぞれで撮影する。

(2) すき間腐食評価

すき間治具部におけるすき間腐食の発生率および腐食深さの測定を行う。測定箇所を図 3.6.1 に示す。

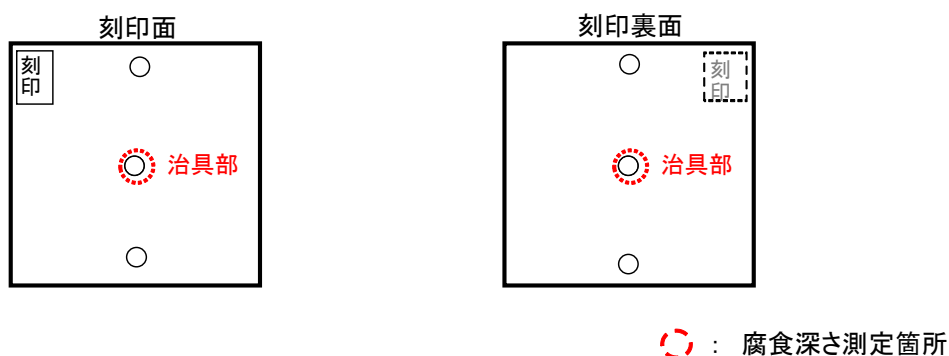


図 3.6.1 回収試験片腐食深さ測定箇所概要図

(3) 自然電位

測定方法

- ・ 電位計 : 内部抵抗 $10^{11} \Omega$ 以上の精密電位差計
- ・ 参照電極 : KCl 飽和 銀/塩化銀基準電極
- ・ 試験片接触端子 : ビニル絶縁被覆銅線

測定開始前に、電位計のゼロ点を調整した。試験片を取り付けた固定枠を、汲み上げた江戸川河川水で満たした容器内に浸漬させる。水温を測定した後、試験片接触端子を試験片に押し付けて導通を取る。溶液抵抗の影響を小さくするため、参照電極はできる限り測定箇所に近づけた。電位の表示値が安定した後に、値を読み取り記録する。

測定位置は、図 3.6.2 に示す母材部 2 カ所・溶接部 2 カ所、計 4 カ所とする。

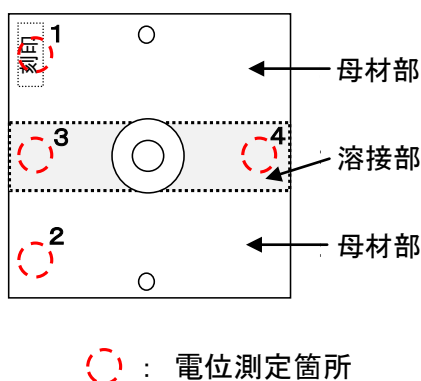


図 3.6.2 試験片電位測定箇所概要図

(4) 腐食減量および寸法測定

回収した各試験片をクエン酸水素二アンモニウム溶液を用いて除錆後、重量を測定し、初期値との比較から腐食減量および腐食速度を算出する。また、併せて図 3.6.3 に示す位置で暴露試験後の寸法を測定する。

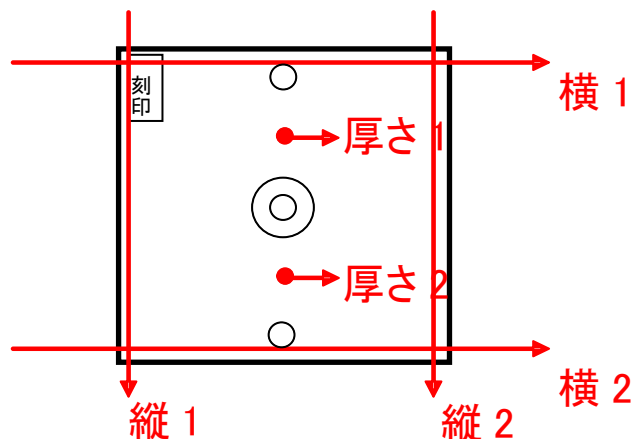


図 3.6.3 回収試験片寸法測定箇所概要図

(5) 普通鋼に生じたさび分析

回収した SM400B 試験片に生成したさびを採取し、ZnO 内部標準法を用いた X 線回折法によりさびの定量を行う。X 線回折装置は理学電機株式会社製 RINT2500H-PC 型を用い、Co ターゲットにて $2\theta = 10 \sim 70^\circ$ の範囲を 0.02° ピッチ（走査速度 $1^\circ / \text{min}$ ）で回折線を測定する。試料調製は、採取したさびサンプルに ZnO 粉末を加え、約 25 mass% ZnO となるように調製した後、乳鉢にて均一になるよう粉碎・混合する。

定量は強度- 2θ パターン結果により、表 3.6.1 に示す位置をピーク位置とするスペクトルと標準 ZnO スペクトルの積分強度との比較により既製検量線を用いて定量する。定量できる物質以外（非晶質さび）は Others として整理した。物質の同定に用いた角度は公的基準カード(JCPDS)の値を基にする。

表 3.6.1 定量した物質名および X 線回折法による同定に用いた角度の値

物質名	2θ (Others を除く)
α -FeOOH	$24.71^\circ \pm \text{範囲}(1 \sim 3^\circ)$
β -FeOOH	$13.90^\circ \pm \text{範囲}(1 \sim 3^\circ)$
γ -FeOOH	$16.43^\circ \pm \text{範囲}(1 \sim 3^\circ)$
Fe ₃ O ₄	$35.09^\circ \pm \text{範囲}(1 \sim 3^\circ)$
ZnO	$37.07^\circ \pm \text{範囲}(1 \sim 3^\circ)$
Others	$100\% - (\alpha\text{-FeOOH} + \beta\text{-FeOOH} + \text{Fe}_3\text{O}_4)$

3.6.2 評価結果

(1) 外観観察

回収後および水洗・脱スケール後の外観腐食状況を写真3.6.1～3.6.7に示す。回収後の試験片は全面が茶褐色の藻と貝で覆われていた。特に、試験片裏側の方が貝の付着量が大きかった。水洗・脱スケール後、試験片腐食状況を観察したところ、全てのステンレス鋼試験片において固定ボルトの穴の周囲に変色が見られた。SM400B試験片は全面がさびに覆われていた。


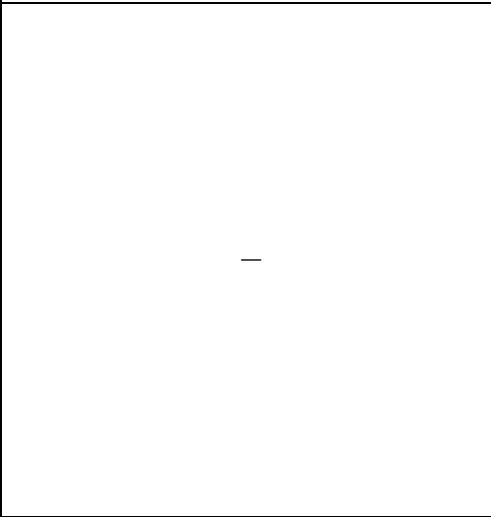



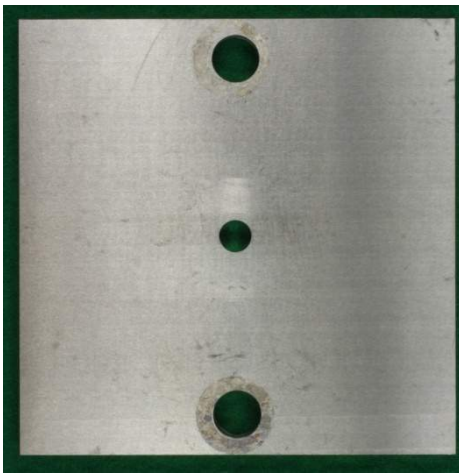
		N 1 (SUS821L1)	
		表面	裏面
回収後			
水洗後			
付着物・さび除去後			

写真 3.6.1 暴露 1 年後のすき間腐食試験後の腐食状況（マーク：N 1）
 (H24/12/20～H25/12/20)


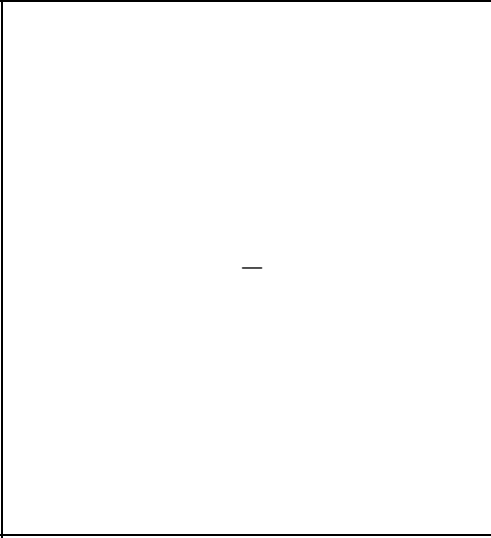
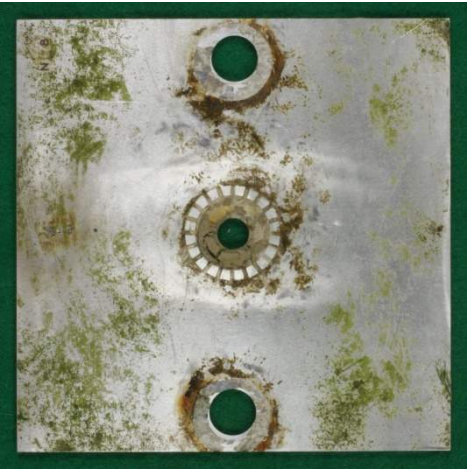
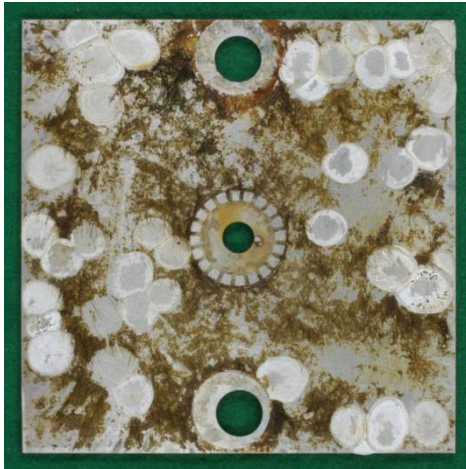
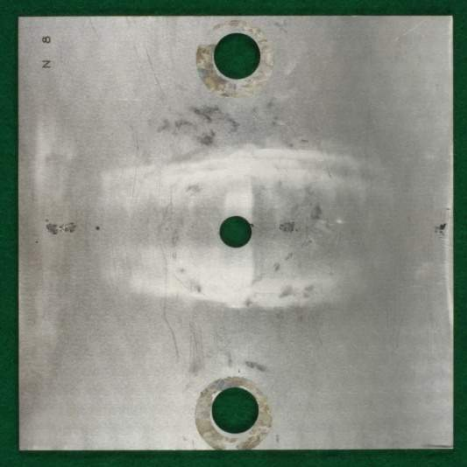
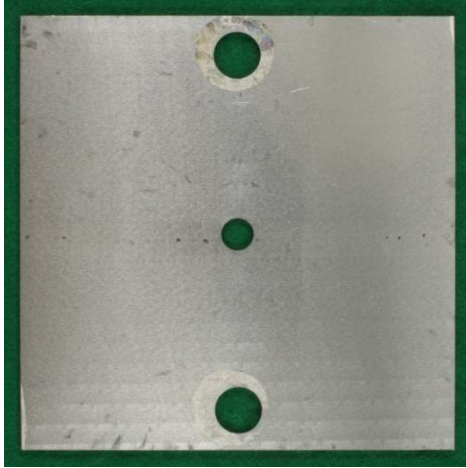
		N 8 (SUS821L1)	
		表面	裏面
回収後			
水洗後			
付着物・さび除去後			

写真 3.6.2 暴露 1 年後のすき間腐食試験後の腐食状況（マーク：N 8）
 (H24/12/20～H25/12/20)



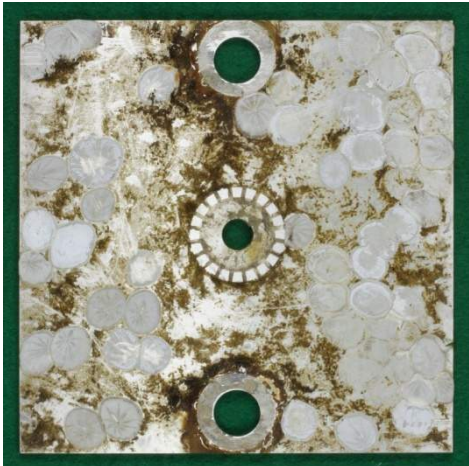

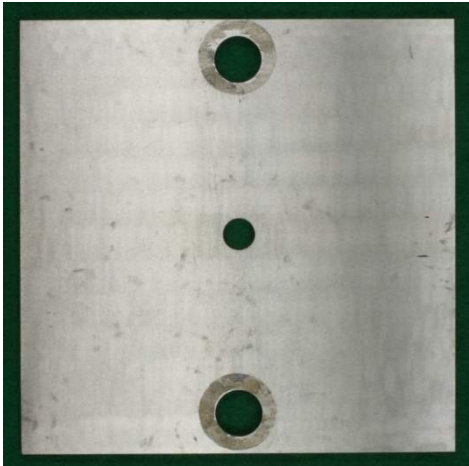
		U 5 (SUS323L)	
		表面	裏面
回収後			—
水洗後			
付着物・さび除去後			

写真 3. 6. 3 暴露 1 年後のすき間腐食試験後の腐食状況（マーク：U 5）
 (H24/12/20～H25/12/20)





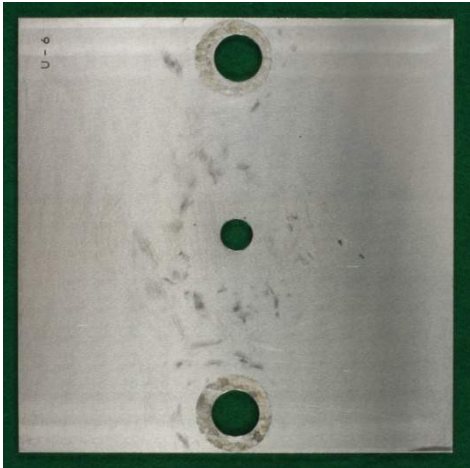
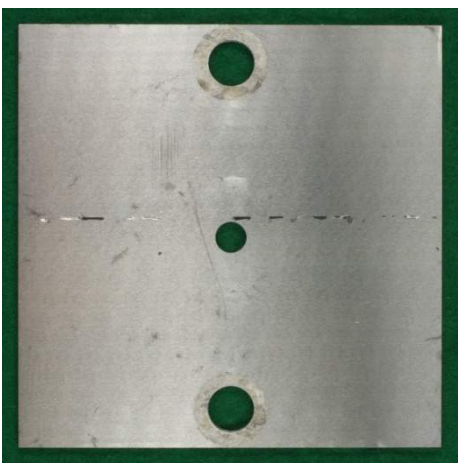
		U 6 (SUS323L)	
		表面	裏面
回収後			
水洗後			
付着物・さび除去後			

写真 3.6.4 暴露 1 年後のすき間腐食試験後の腐食状況（マーク：U 6）
 (H24/12/20～H25/12/20)

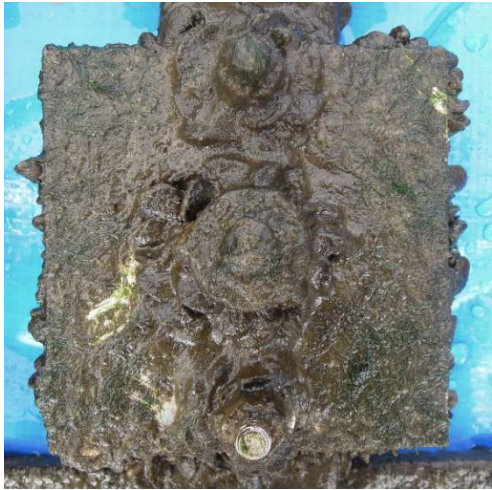


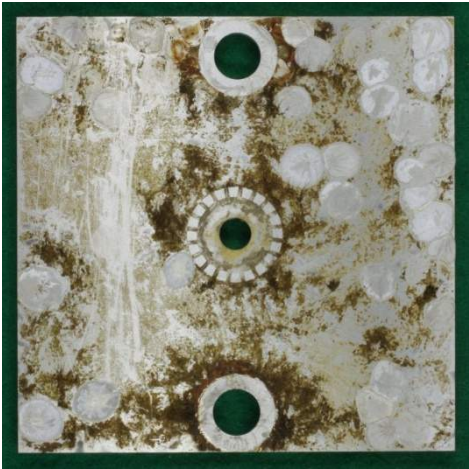


		4 1 (SUS304)	
		表面	裏面
回収後			
水洗後			
付着物・さび除去後			

写真 3.6.5 暴露 1 年後のすき間腐食試験後の腐食状況（マーク：4 1）
 (H24/12/20～H25/12/20)


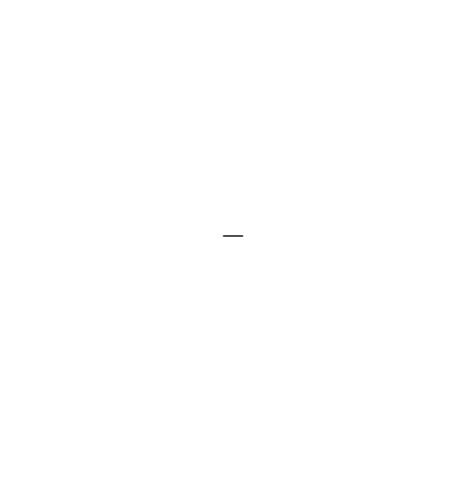




		6 1 (SUS316L)	
		表面	裏面
回収後			
水洗後			
付着物・さび除去後			

写真 3. 6. 6 暴露 1 年後のすき間腐食試験後の腐食状況 (マーク : 6 1)
(H24/12/20~H25/12/20)







		B 1 (SM400B)	
		表面	裏面
回収後			
水洗後			
付着物・さび除去後			

写真 3.6.7 暴露 1 年後のすき間腐食試験後の腐食状況（マーク：B 1）
 (H24/12/20～H25/12/20)

(2) すき間腐食評価

全ての試験片において、すき間治具部（ポリスルホン樹脂）におけるすき間腐食の発生は見られなかった。ただし全ての試験片において固定ボルトの穴の周囲に軽微な腐食による変色が見られたが、この部位は絶縁材として用いている FRP ワッシャー（エポキシ樹脂）によるすき間構造となる。腐食がこの部位でのみ発生した原因として、すき間治具とワッシャーの材質の影響が考えられる。また、FRP ワッシャーは周囲が切断面となっており、すき間治具と比較して吸水しやすいとみられる。これらの影響については、今後の原因調査が待たれる。

(3) 自然電位測定

江戸川河川水中での自然電位測定結果を表 3.6.2 に示す。電位測定時の水温は 8.5℃であった。暴露 1 年後のステンレス鋼試験片の自然電位は、初期値と比較して全て貴側にシフトしていたが、いずれも 100 mV vs. SSE と比較的卑な値を示している。この原因として、冬季であるため微生物の活動が活発ではなく、電位が貴化しにくいことが考えられる。また、上述の軽微な腐食により電位が卑化している可能性がある。自然電位の挙動については、今後も継続した調査が必要である。

一方、SM400B は上述の通り全面に腐食がみられており、自然電位も卑側にシフトしていた。

表 3.6.2 暴露 1 年後の江戸川暴露試験片自然電位測定結果

鋼種	設置位置 (列-段)	刻印	自然電位 (mV vs. SSE)							
			母材部				溶接部			
			1	2	平均	初期値	3	4	平均	初期値
SUS821L1	C-1	N1	-2	-8	-5	-102	-6	-10	-8	-102
	C-2	N8	30	27	29	-100	7	14	11	-100
SUS323L	B-1	U5	17	11	14	-93	3	1	2	-93
	B-2	U6	-88	-70	-79	-94	-73	-63	-68	-94
SUS304	C-3	41	17	14	16	-57	14	15	15	-58
SUS316L	B-3	61	-9	-3	-6	-43	-3	-4	-4	-46
SM400B	D-3	B1	-640	-640	-640	-447	-640	-640	-640	-445

(4) 腐食減量および寸法測定

腐食速度の算出に使用した試験前後での各試験片の寸法を表 3.6.3 および表 3.6.4 に示す。また、試験前後の重量および腐食速度を表 3.6.5 に示す。腐食速度は試験前後での重量減を暴露期間と試験片表面積で除すことにより求めた。侵食度は腐食度をそれぞれの鋼材の密度で除すことにより求めた。SM400B の暴露 1 年間の腐食速度 (侵食度) は 0.176 mm/yr であった。

表 3.6.3 江戸川暴露試験前平均寸法 (H24/12/20~H25/12/20)

刻印	平均寸法 (mm)			平均孔内径 (mm)			表面積 (mm ²)
	縦	横	厚さ	上	中	下	
N1	99.95	99.96	4.988	10.81	7.38	10.79	21978.23
N8	99.92	99.93	1.882	10.79	7.42	10.86	20439.73
U5	99.89	99.95	1.989	10.80	7.37	10.79	20492.50
U6	99.88	99.89	1.939	10.79	7.38	10.72	20455.81
41	99.62	99.92	4.458	10.8	7.40	10.77	21640.51
61	99.94	99.93	4.945	10.82	7.40	10.81	21947.99
B1	99.98	99.98	5.007	10.81	-	10.83	21965.90

表 3.6.4 暴露 1 年後の江戸川暴露試験後寸法 (H24/12/20~H25/12/20)

刻印	長さ (mm)						孔内径 (mm)					
	縦 1	縦 2	横 1	横 2	厚さ 1	厚さ 2	上縦	上横	中縦	中横	下縦	下横
N1	99.93	99.97	99.96	99.96	4.993	4.979	10.76	10.72	7.31	7.32	10.72	10.80
N8	99.90	99.95	99.97	99.92	1.840	1.858	10.80	10.74	7.40	7.42	10.88	10.83
U5	99.93	99.88	99.96	99.94	1.980	2.000	10.75	10.75	7.33	7.30	10.74	10.78
U6	99.88	99.89	99.91	99.91	1.936	1.932	10.74	10.76	7.36	7.37	10.63	10.75
41	99.71	99.60	99.96	99.98	4.453	4.445	10.72	10.74	7.39	7.32	10.70	10.72
61	99.93	99.92	99.95	99.92	4.943	4.947	10.81	10.79	7.40	7.34	10.77	10.76
B1	99.81	99.62	99.79	99.74	4.646	4.701	10.78	10.80	-	-	10.77	10.84

表 3.6.5 暴露 1 年後の江戸川暴露試験片腐食減量測定結果 (H24/12/20~H25/12/20)

刻印	初期重量 (g)	脱スケール後重量 (g)	腐食減量 (g)	腐食速度	
				腐食度 (g/m ² ·yr)	浸食度 (mm/yr)
N1	377.949	377.469	0.480	21.8	0.003
N8	139.842	139.424	0.418	20.5	0.003
U5	148.136	147.778	0.358	17.5	0.002
U6	147.515	147.202	0.313	15.3	0.002
41	342.923	342.749	0.174	8.1	0.001
61	383.703	383.637	0.066	3.0	<0.001
B1	385.161	354.863	30.298	1379.3	0.176

(5) 普通鋼に生じたさび分析

SM400B に生じたさびの X 線回折による回折パターン測定結果を図 3.6.4 に、定量結果をまとめたものを表 3.6.6 に示す。さび組成の傾向としては、 α -FeOOH が最も多く、次いで β -FeOOH、 Fe_3O_4 、 γ -FeOOH の順であった。 β -FeOOH が比較的多く、Cl の影響を大きく受けたさびであると考えられる。

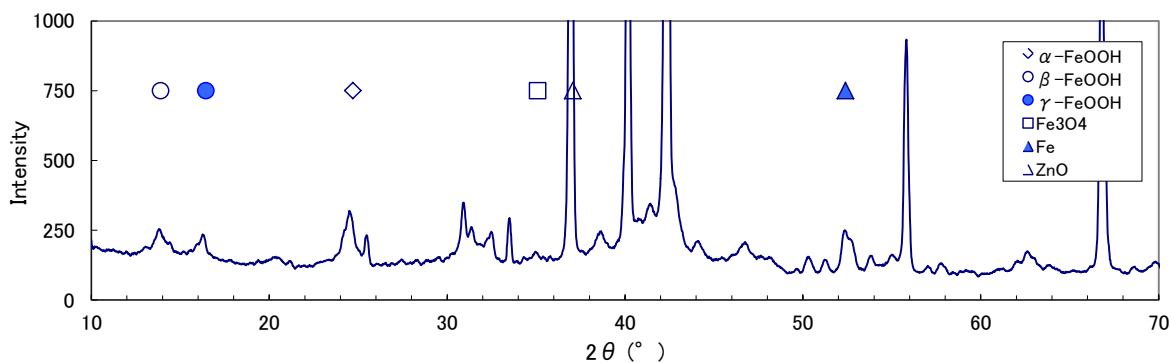


図 3.6.4 暴露 1 年後の SM400B に生じたさびの X 線回折パターン

表 3.6.6 X 線回折による暴露 1 年後の SM400B のさび組成の定量結果 (mass%)

α -FeOOH	β -FeOOH	γ -FeOOH	Fe_3O_4	Others
5.8	4.1	1.9	2.0	86.0

※Others は X 線回折では定量できない物質(非晶質さび)を示す。

3.7 屋外暴露試験（1年目）結果のまとめ

（1）追加試験材製作

溶接試験材のマクロ観察およびミクロ観察の結果、ポイドなどの溶接欠陥は認められず、一般的な溶接部および HAZ 組織を有しており、溶接施工は良好であった。

（2）回収材外観観察

試験片は茶色の藻で覆われ、裏面には貝が多く付着していた。ステンレス鋼試験片では固定ボルト穴の周囲（FRP ワッシャー/試験片すき間）に変色が確認された。

（3）自然電位測定

ステンレス鋼試験片の自然電位は比較的卑な値を示しており、微生物の活動が活発でないこと等の影響が考えられる。

（4）すき間腐食評価

ステンレス鋼試験片全てについて、すき間形成樹脂によるすき間腐食は観察されなかった。

（5）腐食減量

普通鋼（SM400B）の暴露1年間の江戸川暴露試験後の腐食速度（侵食度）は 0.176 mm/yr であった。

（6）普通鋼に生じたさびの分析

α -FeOOH が最も多く、次いで β -FeOOH、 Fe_3O_4 、 γ -FeOOH の順であった。 β -FeOOH が比較的多く、腐食は Cl の影響を大きく受けているとみられる。

（参考文献）

- 1) 日本薬学会編、金原出版株式会社：衛生試験法・注解、2010年1月

4. まとめ

ステンレス新材料の溶接性および溶接部の耐食性に関する室内試験により、リーン系二相ステンレス鋼がオーステナイト系ステンレス鋼と同等以上の良好な特性を有する事が確認された。また溶接部の耐食性に関する屋外試験では、汽水環境における1年間の暴露試験において、リーン系二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼と同様に、すき間形成樹脂によるすき間腐食が生じていないことが確認された。

今後の課題として、暴露試験の継続調査などによりデータの蓄積を図るとともに、リーン系二相ステンレス鋼が長期間腐食環境におかれた際の腐食挙動を明確にし、河川・ダム施設への適用方法を最適なものにしていく必要がある。また、種々の環境におけるリーン系二相ステンレス鋼の耐久性に関する知見をさらに蓄積し、他の設備への活用可能性の探索が望まれる。

謝辞

本研究の暴露試験の実施にあたり、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所江戸川河口出張所のご協力をいただいた。また、本研究の実施にあたり、河川・ダム施設の防食技術研究会ステンレス材料分科会の委員各位よりご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

河川・ダム施設の防食技術研究会
ステンレス材料小ワーキンググループ

西崎 到	国立研究開発法人土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ	上席研究員
富山禎仁	同	先端材料資源研究センター材料資源研究グループ主任研究員
岡田修幸	同	先端材料資源研究センター材料資源研究グループ交流研究員
鈴木 亨	新日鐵住金ステンレス(株)商品開発部	担当部長
江目文則	同	商品開発部部長代理
及川雄介	同	研究センター製鋼・厚板・棒線研究部主任研究員
松岡和巳	日鉄住金テクノロジー(株)	
田中成人	日鉄住金防蝕(株)エンジニアリング事業部	技術部
南 孝男	元日鉄住金テクノロジー(株)尼崎事業所	材料評価部専門主幹
朝倉 亮	日鉄住金テクノロジー(株)尼崎事業所	材料評価分材料機能評価室
林 俊克	(株)IHIインフラシステム	理事・水門技術部部長
福島憲明	同	水門技術部設計課課長
笠原竜介	同	水門技術部企画課
松岡孝昭	(株)IHI技術開発本部生産技術センター	溶接技術部溶接基礎グループ主任研究員
鳥形啓輔	同	技術開発本部生産技術センター溶接技術部溶接基礎グループ

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No. 4349 January 2017

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754