

厚生労働科学研究研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

臨海コンビナート設備のねじ接合部の腐食減肉に関する
供用適性評価技術の開発

平成29年度 総括・分担研究年度報告書

研究者代表者 辻 裕一

平成30（2018）年 5月

目 次

I. 総括研究報告		
臨海コンビナート設備のねじ接合部の腐食減肉に関する 供用適性評価技術の開発	-----	1
辻 裕一		
II. 分担研究報告		
1. ねじ部品の減肉許容基準の提案	-----	5
辻 裕一		
2. 腐食解析技術の検討	-----	8
齋藤 博之		
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----	11

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総括研究報告書

臨海コンビナート設備のねじ接合部の腐食減肉に関する
供用適性評価技術の開発

研究者代表者 辻 裕一 東京電機大学工学部教授

研究要旨 本研究は、臨海コンビナートにおけるフランジ継手、鋼構造物のねじ部品の減肉の実態の把握、減肉速度の予測モデル、減肉許容基準・余寿命評価の開発と減肉評価ガイドライン作成を目的とする。初年度である平成29年度は、ねじ部品の減肉許容基準の検討を進めると共に電気化学的な腐食解析技術の検討を開始し、以下の成果を得た。破壊モードに基づくナットの減肉許容基準を提案した。減肉ボルトの計測方法を検討し、漏えいが発生した保温タンクの保温材下のスタッドの腐食の実態調査を実施した。ボルト・ナット系を模擬した異種材料接合部の腐食電位の二次元分布を測定した。次年度以降は、実態調査を実施すると共に製造現場で容易に適用可能な汎用性のある減肉評価方法の検討、及び腐食解析技術の検討を進め、減肉速度の予測モデルを構築し、余寿命評価を可能とするねじ部品減肉評価ガイドラインの作成を目指す。

分担研究者氏名・所属機関名及び所属機関
における職名
齋藤 博之・東京電機大学工学部教授

A. 研究目的

臨海コンビナートのプラントでの腐食減肉では、フランジ継手等に使用されるねじ部品の減肉が現実には発生しているにも拘わらず、定量的評価は行われていない。フランジ継手の締結状態は漏洩に直接影響するが、ねじ部品の減肉に関する合否判定基準が国内のみならず海外にも無い。ねじ部品の減肉は、デッキ、プラットホーム、サポートなどの屋外鋼構造物にも多く見られる。ねじ部品の破壊は直ちに重大な事故・災害に結びつく。

本研究では、コンビナートにおけるねじ部品の減肉に着目し、減肉の実態の把握、減肉速度の予測モデル、減肉の許容基準・余寿命評価方法の開発を行う。成果を踏まえ、ねじ締結部の供用適性評価を行える減肉評価ガイドライン作成を最終目標とする。本年度は、ねじ部品の減肉許容基準の提案、ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調

査、及び腐食解析技術の検討を行う。

成果は、ボイラー及び圧力容器安全規則、あるいは高圧ガス保安法で規制される設備に係わる事業所の設備の維持管理技術の高度化につながることを期待される。作業員が接近する鋼構造物のねじ部品も対象とするので、労働安全衛生全般にも貢献できる。

B. 研究方法

本研究は3年計画で、東京電機大学で実施する。初年度である平成29年度は、次に示す方法で研究を実施した。

まず、ねじ部品の減肉許容基準については、非線形有限要素解析により得られるボルト・ナット締結モデルの塑性崩壊までの挙動に基づき提案する。解析コードとして **Abaqus R2017** を用い、軸対称要素による弾塑性解析を行った。解析では、ボルト又はナットの塑性崩壊によって解が収束しなくなるまでボルトの引張力を漸増させることによって、塑性崩壊荷重を決定する。ナットの減肉のモデル化は、①高さのみ減肉、②外径のみ減肉、③高さと外径が同時に減肉、の3通りである。高さと外径の減肉の

影響、及び両者の相互作用を調査する。

ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調査については、建設から40年の漏えいが発生した経年保温タンクの保温材下のスタッドボルトの腐食の事例を取り上げた。スタッドボルトについては、軸部の最小断面積が強度を支配するため、デジタルノギスにより減肉部外径を測定することとし、実態調査を実施した。

腐食解析技術の検討については、減肉が発生する主要因となる腐食の発端および進展を明確にすることをめざして、腐食生成物の分析、腐食反応（酸化・還元反応）の計測を行う。腐食生成物の分析、腐食反応（酸化・還元反応）の計測にあたっての手法としては、いくつかのものが考えられる。このうち、平成29年度は、腐食生成物の結晶構造から物質同定が可能なX線回折法（XRD）、微小部での腐食反応（酸化反応）を腐食により生じる金属の電位変化から微小範囲で計測できる走査型電気化学顕微鏡（SECM）を分析手段としてとりあげた。

実態調査を行ったタンクのスタッドボルトについて、これに付着していた腐食生成物を採取し、XRDにより分析することにより腐食の進行にともなう腐食反応の推定を行った。この過程において、ボルトに複数の腐食反応（酸化）が生じる懸念が生じたことから、今回はモデル的に腐食電位が異なる2相が同時に存在する状態のサンプルを金属種を変えて作成し、その場合の腐食反応（酸化反応）をSECMにより分析・検討した。

（倫理面への配慮）

本研究の実施によって、生体及び環境へ影響を及ぼすことは無いので、倫理面への問題は無いと考える。

C. 研究結果

1：ねじ部品の減肉許容基準の提案

ボルト・ナットのモデルの塑性崩壊では図1に示す3通りの破壊モードが現れる。

モード1は、ボルトの遊びねじ部が引張りにより塑性崩壊を起こす場合であり、減肉のない規格ナットでは、このモードが現れる。モード2は、はめ合いねじ部のおねじ側のねじ山にせん断の塑性崩壊が生じ、ストリップングを起こす場合であり、ナット高さが減肉により不足する場合に現れる。モード3は、ナットの座面外周側に圧壊が生じる場合であり、ナット外径が減肉している場合に現れる。ナット高さ及びナット外径の減肉により、破壊モードが変化する条件をそれぞれ求めた。また、ボルト・ナットがJPIフランジにおいて使用されることを想定してボルト・ナット系の剛性と減肉による剛性低下率を求めた。

2：ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調査

スタッドボルト約600本の減肉データを取得した。減肉は、片側ないし偏心して発生しているため、ねじ部の外径を直交する2方向を測定し、それぞれ楕円の短軸と長軸として、残存の断面積を計算し、評価に用いた。なお、最小径がねじの谷径を下回っていない場合には、ねじの強度は確保されているため、減肉がないと見なすこととした。

3：腐食解析技術の検討

スタッドボルトについて、代表的な2本をXRD分析した。このうちの1本は、保温タンクの海岸に向かう側（海側）に使用されていた典型的な1本であり、もう1本は、その反対側（陸側）に使用されていた典型的な1本である。

海側に使用された場合も、陸側に使用された場合も、主要な腐食生成物はマグネタイト（ Fe_3O_4 ）である点は共通している。また、海から飛来すると予想される塩化物（Cl）は分析により検出されなかった。

マグネタイトにおける鉄の酸化数は2価と3価の混合状態であり、マグネタイトがさらに酸化する腐食反応とボルトに残存する鋼が酸化する腐食反応とが競合して、二種の電位を駆動力とする腐食が発生する可

能性がある。そのため、今年度はモデル的に電位差のある二種の金属（アルミニウム Al とタングステン W）をクラッド化して、その界面での腐食状況を SECM により分析・調査して、二種の電位を駆動力とする腐食挙動は電位の低い腐食反応のみが進行して腐食生成物を増大させることを見出した。

D. 考察

1：ねじ部品の減肉許容基準の提案

減肉のないナットでは、モード1でボルト遊びねじ部が塑性崩壊するように規格が作られている。従って、破壊モードがモード2、またはモード3となる減肉は、ナットが所定の性能を満たしていないと考えれば、許容できない。この判定基準より、ナット高さ60%、ナット外径93.65%までの範囲がナットの減肉の許容範囲であることが明らかになった。ナット減肉が高さ60%、外径93.65%まで同時に生じている場合、モード1で塑性崩壊するため、高さと外径の減肉の許容範囲には相互作用がない。

ナットの減肉の許容限界におけるボルト・ナット系の剛性の低下率は、いずれの場合も10%未満であり、ボルト締付け力低下など締結性能に及ぼす影響は小さいことが予想される。

2：ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調査

タンクのスタッドボルトの減肉量の影響因子について検討した。タンクの下部より上部で減肉が顕著である。上部から雨水が浸入することと、タンク外板の温度分布が影響している。タンクの海側、陸側という方角の影響は認められない。

3：腐食解析技術の検討

XRD, SECM の双方の腐食解析技術で腐食の発端および進展の過程（酸化反応）を分析できる可能性が示された。

通常の大気中で鋼上に生成する腐食生成物は熱力学的な安定性から考えると Fe_2O_3

のはずであるが、実際の環境では XRD 分析によるとマグネタイト (Fe_3O_4) が生成していることから、保温材下では、鉄の酸化数が2価と3価の混合であり耐食的な状況と推定される。この理由のひとつとしては酸素の供給が大気開放中よりも制限されているからと考えられる。塩化物は海岸への向きによらずに検出されなかったが、保温材により塩化物の飛来が制限されたと考えられる。

このような環境の腐食生成物がマグネタイト (Fe_3O_4) であることから、マグネタイト中の2価の鉄の酸化が3価に進む腐食反応と、残っているボルト肉厚を構成する鋼の鉄が参加される腐食反応が同時に生じる懸念があるが、今年度を実施したアルミニウムとタングステンのクラッド品について SECM 測定した結果からすると、電位のより低い金属の側のみが腐食することから、マグネタイトと鋼が競合して腐食する場合にも、いずれか電位の低いほうのみが腐食すると想定される。

ただし、実際の作製には技術的課題が残るが、マグネタイトおよび鋼のそれぞれの純粋なサンプルを作成し、その電位測定、およびマグネタイトと鋼が共存するサンプルでの SECM 測定を行い確認することにより、腐食反応がより確実となる。

E. 結論

平成29年度の研究により、以下の結論を得た。

ねじ部品の減肉許容基準の提案については、ボルト・ナット系の破壊モードは3種類あること、破壊モードの変化を基準とするとナット高さ60%、ナット外径93.65%までがナットの減肉の許容範囲であること、ナット減肉によるボルト・ナット系の剛性低下率は、たかだか10%未満であることを明らかにした。

ねじ部品の減肉の実態調査については、漏えいが発生した経年保温タンクの保温材下のスタッドボルトの腐食の事例を取り上げた。スタッドボルトの減肉測定にはデジ

タルノギスを用い、ねじ部の外径を直交する2方向を測定し、それぞれ楕円の短軸と長軸として、残存の断面積を計算し評価に用いた。スタッドボルト600本の減肉データを収集、分析を実施した。XRD、SECMによる分析は腐食生成物に適用可能であり、腐食で生成しているのはマグネタイト(Fe_3O_4)であった。なお、マグネタイトの再度の酸化を腐食速度の中に考慮する必要はないと考えられる。

今後は、ボルト頭部の減肉の許容限界、及びボルト・ナット系の剛性低下が締結性能に及ぼす影響について検討を進める必要がある。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

T. Kikuchi, H. Tsuji, D. Tsurumi, R. Zhou: Effects of Nut thinning due to Corrosion on the Sealing Performance in Bolted Flange Joints under Internal Pressure, ASME PVP 2017 Conference, PVP2017-65160, 2017.

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

ねじ部品の減肉許容基準の提案

研究者代表者 辻 裕一 東京電機大学工学部教授

研究要旨 ねじ部品が腐食により減肉した場合、ねじの締結機能が失われる恐れがある。本研究では、非線形有限要素法による解析より、減肉したナットがナットとしての機能を損なわずに使用できる範囲を調査し、減肉の許容基準を提案している。また、ナットの減肉によるボルト・ナット系の剛性低下を検討し、締結性能に及ぼす影響は小さいことを示している。

A. 研究目的

ボルト、ナット等のねじ部品は、機械、構造物の締結に広く用いられている。ねじ部品が長期間の使用によって腐食し減肉を生じると、ねじの締結機能が失われ、事故、災害につながる恐れがある。ナットの高さの減肉の影響は次のように説明できる。規格ナットの高さは、Alexander 理論によって、はめ合いねじ部においてねじ山がストリップングを起こさないように、破断はボルト軸部から生じるように決められている。従って、減肉によってナット高さが不足すれば、ストリップングを生じるとともにねじ締結体の負荷能力は減少すると考えられる。

本研究では、ナットに着目し、減肉ナットの挙動を非線形有限要素解析により明らかにする。減肉したナットがその機能を損なわずに使用できる範囲を調査し、これに基づき、ナットの減肉許容基準を提案することを目的とする。

B. 研究方法

非線形有限要素解析のためのモデル化は、以下による。JPI フランジに用いられるユニファイ並目めじを対象とし、ねじの呼び 5/8-11 UNC であり、ボルトは材質 SNB7 である。ナットは高さ 10 割、二面幅 26mm、材質は S45C である。ナットはφ26mm の円筒にモデル化する。解析コードとして

Abaqus R2017 を用い、軸対称要素による弾塑性解析を行った。

解析では、ボルト又はナットの塑性崩壊によって解が収束しなくなるまでボルトの引張力を漸増させることによって、塑性崩壊荷重を決定する。ナットの減肉のモデル化は、①高さのみ減肉、②外径のみ減肉、③高さと外径が同時に減肉、の3通りである。高さと外径の減肉の影響、及び両者の相互作用を調査する。

（倫理面への配慮）

本研究の実施によって、生体及び環境へ影響を及ぼすことは無いので、倫理面への問題は無いと考える。

C. 研究結果

ボルト・ナットのモデルの塑性崩壊では図1に示す3通りの破壊モードが現れる。モード1は、ボルトの遊びねじ部が引張りにより塑性崩壊を起こす場合であり、減肉のない規格ナットでは、このモードが現れる。モード2は、はめ合いねじ部のおねじ側のねじ山にせん断の塑性崩壊が生じ、ストリップングを起こす場合であり、ナット高さが減肉により不足する場合に現れる。モード3は、ナットの座面外周側に圧壊が生じる場合であり、ナット外径が減肉している場合に現れる。

ナット高さ及びナット外径の減肉により、

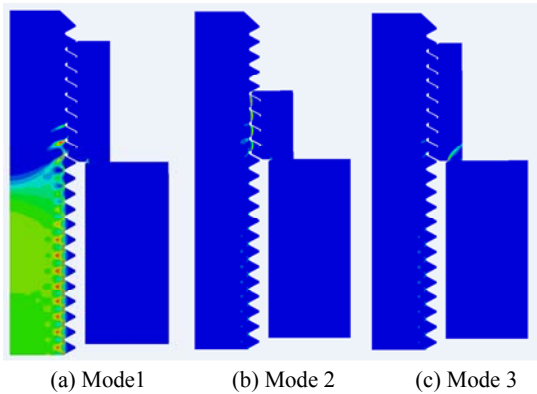


図1 ボルト・ナットの破壊モード

破壊モードが変化する条件をそれぞれ求めた。また、ボルト・ナットが JPI 80A, Class 150 フランジにおいて使用されることを想定してボルト・ナット系の剛性と減肉による剛性低下率を求めた。

D. 考察

減肉のないナットでは、モード1でボルト遊びねじ部が塑性崩壊するように規格が作られている。従って、破壊モードがモード2、またはモード3となる減肉は、ナットが所定の性能を満たしていないと考えれば、許容できない。この判定基準より、ナット高さ 60%、ナット外径 93.65%までの範囲がナットの減肉の許容範囲であることが明らかになった。ナット減肉が高さ 60%、外径 93.65%まで同時に生じている場合、モード1で塑性崩壊するため、高さとお径の減肉の許容範囲には相互作用がない。

また、表1にナットの減肉の許容限界におけるボルト・ナット系の剛性の低下率を

示す。低下率はいずれの場合も 10%未満であり、ボルト締付け力低下など締結性能に及ぼす影響は小さいと予想される。

今後は、ボルト頭部の減肉の許容限界、及びボルト・ナット系の剛性低下が締結性能に及ぼす影響について検討を進める予定である。

E. 結論

ねじ部品の減肉の許容限界を明らかにすることを目的に、ナット減肉に対する非線形有限要素解析を行った。以下に得られた成果を示す。

- (1) ボルト・ナット系の破壊モードは、3種類ある。
- (2) 破壊モードの変化を基準とすると、ナット高さ 60%、ナット外径 93.65%までの範囲がナットの減肉の許容範囲である。
- (3) ナット減肉によるボルト・ナット系の剛性低下率は、たかだか 10%未満である。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表

T. Kikuchi, H. Tsuji, D. Tsurumi, R. Zhou: Effects of Nut thinning due to Corrosion on the Sealing Performance in Bolted Flange Joints under Internal Pressure, ASME PVP 2017 Conference, PVP2017-65160, 2017.

表1 ボルト・ナット系の剛性の比較

ナット高さ	ナット外径	締付け長さ [mm]	伸び [mm]	剛性 [kN/ μ m]	剛性低下率
100%	100%	25.0658	0.0658	0.707	-
60%	100%	25.0703	0.0703	0.662	6.8%
100%	93.65%	25.0674	0.0674	0.690	2.4%
60%	93.65%	25.0709	0.0709	0.656	7.8%

H. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

1. 特許取得
無し
2. 実用新案登録
無し
3. その他
無し

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

腐食解析技術の検討

研究分担者 齋藤 博之 東京電機大学工学部教授

研究要旨 減肉の主要因となる腐食の発端および進展を明確にすることをめざして、腐食生成物の分析、腐食反応の計測を行っている。実態調査を行ったタンクのスタッドボルトに付着していた腐食生成物の XRD 分析より腐食の進行に伴う腐食反応の推定を行った。腐食生成物はマグネタイトであることから、保温材下では酸素の供給が制限される耐食的な環境であったと推定される。この過程において、ボルトに複数の腐食反応（酸化）が生じる懸念より、モデル的に腐食電位が異なる 2 相が共存するサンプルを金属種を変えて作成し、酸化反応を SECM により分析した。電位のより低い金属の側のみが腐食することから、マグネタイトと鋼が競合して腐食する場合にも、いずれか電位の低いほうのみが腐食すると想定される。

A. 研究目的

臨海コンビナートのプラントでの腐食減肉について、減肉の実態の把握、減肉速度の予測モデル、減肉の許容基準・余寿命評価を行ううえで、腐食生成物の分析と腐食反応（酸化反応・還元反応）の計測を行うことが欠かせない。腐食減肉が発生する発端である腐食の発生、および、その進展を明確にすることは、予測モデルや余寿命評価の確立と不可分だからである。

腐食生成物の分析と腐食反応（酸化反応・還元反応）の計測にはいくつかのものがあるが、本研究の平成 29 年度の研究では次の手法に着目して検討を行う。

すなわち、腐食生成物の結晶構造から物質同定が可能な X 線回折法（XRD）と、微小部での腐食反応（酸化反応）を腐食により生じる金属の電位変化から微小範囲で計測できる走査型電気化学顕微鏡（SECM）である。腐食反応のうち還元反応で生じる水素を検出する試みは平成 30 年度以降に扱う。

本研究では、上述の XRD および SECM を実際に腐食生成物の検出に適用することを第一の目標とし、次いで実際に XRD およ

び SECM を用いて、建設から 40 年の漏えいが発生した経年保温タンクの保温材下のスタッドボルトの腐食事例についての分析を行った。

B. 研究方法

X 線回折法（XRD）は粉末化した腐食生成物に銅をターゲットとした X 線を照射して、その回折角から物質を同定した。作業については NTT アドバンステクノロジー株式会社分析センタに委託して実施した。粉末にする試料は、建設から 40 年の漏えいが発生した経年保温タンクの保温材下のスタッドボルトのうちの 2 本のそれぞれから採取した腐食生成物を乳鉢で粉末にすりつぶしたものである。なお、これらのボルトのうちの 1 本は、保温タンクの海岸に向かう側（以下では、海側）に使用されていた典型的な 1 本であり、もう 1 本は、その反対側（以下では、陸側）に使用されていた典型的な 1 本である。

走査型電気化学顕微鏡（SECM）による観察は、あらかじめ作成したモデル試料を塩化物溶液（3%NaCl）に浸し、直径 10 μm の微小電極で電位計測することにより行っ

た。電位の基準は飽和銀塩化銀電極 (SSE) として 600mV に設定した。モデル試料は、本来は完全に酸化が完了していない腐食生成物とボルトの鋼材を用意すべきであるが、完全に酸化が完了していない腐食生成物を化学的に作製して鋼と機械的に接合することが技術的に難しいため、今回は標準電極電位に差がある二種の金属 (タングステンとアルミニウム) をクラッド化して SECM 測定を行って原理的な確認のみを行うこととし、完全に酸化が完了していない腐食生成物に関する測定は次年度以降の課題とした。

(倫理面への配慮)

本研究の実施によって、生体及び環境へ影響を及ぼすことは無いので、倫理面への問題は無いと考える。

C. 結果

表1にXRDにより得られた結果を示すが、海側に使用された場合も、陸側に使用された場合も、塩化物は検出されず、主要な腐食生成物はマグネタイト (Fe_3O_4) である。この化合物は $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ と書き直すことができ、鉄の2価イオンと3価イオンが混在する状態である。これは保温材下の条件で酸素の供給が制限されている耐食的な条件が生じていることによるものと考えられるが、通常の大気中で熱力学的に安定な酸化物は Fe_2O_3 であるから、マグネタイト (Fe_3O_4) はさらに酸化される懸念がある。

図1にSECMによりタングステンとアルミニウムのクラッドの境界付近を分析・解析した結果を示す。もともとの標準電極電位が高いタングステン側から低いアルミニウムに一方的に電流が生じている。このため、このクラッドではアルミニウム側が一方的に腐食している。図2にその発生を観察した結果を示す。図の茶色の部分が腐食して生成物により盛り上がった形状である。

D. 考察

XRD, SECM とも腐食に関する分析・解析を行うことができる。

このうちのXRDによる腐食生成物の同定結果をみると、保温材下での腐食で生成するのはマグネタイト (Fe_3O_4) であり、一部の鉄の酸化が2価のまま3価に酸化される余地がある。そうするとマグネタイトと残存している鋼の腐食が並行して生じる余地がある。

しかし、SECMで行ったモデル試験によれば、標準電極電位の高い物質は酸化されず低い物質が優先的に酸化される。この点については、今後マグネタイトと鋼の組合せでモデルの成立を確認する必要性が残るものの、マグネタイトを生じた鋼材でもマグネタイトがさらに酸化されるより鋼中の鉄の酸化が優先すると考えられる。

減肉による断面の減少は鋼材の酸化による消耗によるが、腐食生成物としてマグネタイトが生じているボルトでも、その後の腐食の進行は鋼中の鉄の酸化により生じると考えればよいことがわかった。逆に言えば、マグネタイトの再度の酸化を腐食速度の中に考慮する必要はないと考えられる。

E. 結論

腐食生成物の分析に関して、下記の結論が得られた。

- (1) XRD、SECMによる分析は腐食生成物に適用可能である。
- (2) ボルトの保温材下で生じる主要な腐食生成物はマグネタイト (Fe_3O_4) である。
- (3) マグネタイトは熱力学的にはさらに酸化が進行しうるが、マグネタイトの再度の酸化を腐食速度の中に考慮する必要はないと考えられる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

(発表誌名巻号・頁・発行年等も記入)

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む。）

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

表 1 XRD で同定された化合物

化合物名	海側	陸側
マグネタイト Fe_3O_4	○	○
ゲータイト $\alpha\text{-FeOOH}$	○	○
シリカ SiO_2	○	○
硫黄 $\text{S}(\text{S}_8)$	○	×
塩化ナトリウム NaCl	×	×

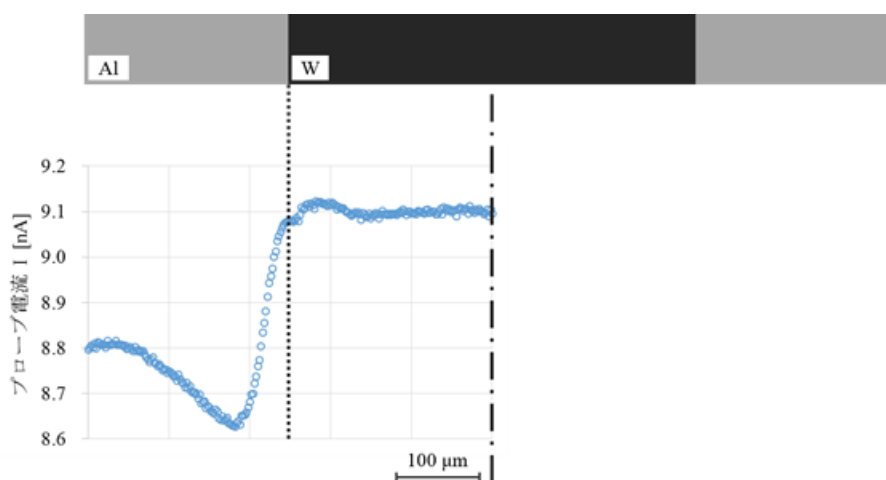


図 1 モデル試験材の界面近傍での腐食電流挙動

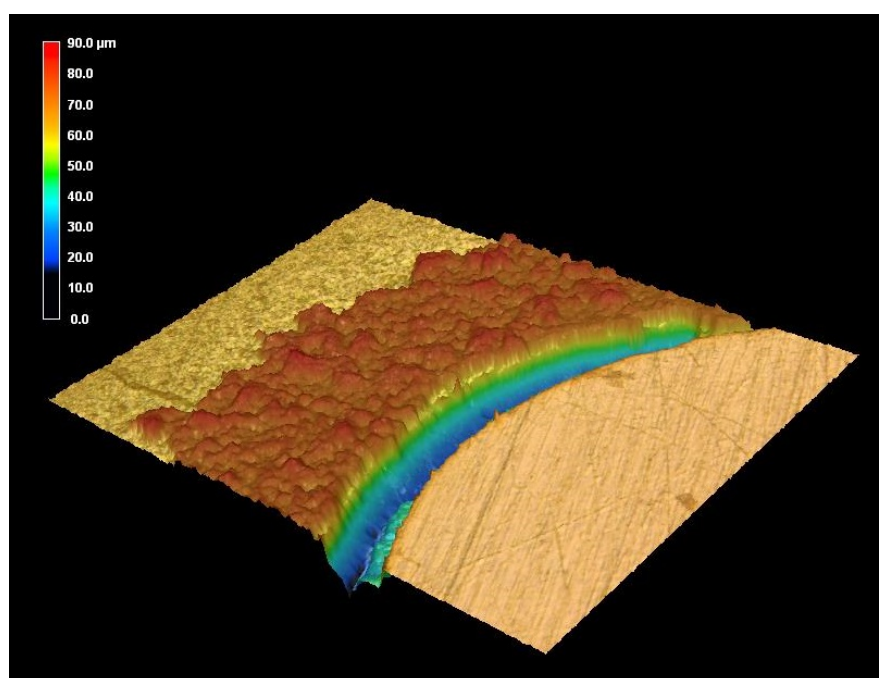


図 2 モデル試験材の界面付近の腐食生成物堆積

研究成果の刊行に関する一覧表

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
T. Kikuchi, H. Tsuji, D. Tsurumi, R. Zhou	Effects of Nut thinning due to Corrosion on the Sealing Performance in Bolted Flange Joints under Internal Pressure	ASME PVP 2017 Conference	PVP2017-6 5160		2017