

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
総合研究報告書

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。ナット及びボルト頭部の減肉に対して、ステレオ写真から画像処理により 3D データに変換する非接触 3D 計測技術を確立した。現地調査でサンプリングした減肉ボルト・ナットに対して、3D 計測技術を適用し、残存体積を計測し、円錐台状減肉の減肉許容基準と比較して合否判定を実施することができた。臨海コンビナートにおけるねじ部品の減肉速度は、炭素鋼同士の組合せの締結体において 0.26 mm/y、異種金属で構成される締結体において 0.3 mm/y を見込めばよいことから、この数値に基づき余寿命評価を行うことが可能である。以上より、ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から供用適性評価までの一連の工程の妥当性を検証した。

研究分担者氏名・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、臨海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

し、ガイドラインの骨格となる検査から供用適性評価までの一連の工程の妥当性を検証する。

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、平成 29 年度～令和元年度の 3 年計画で、東京電機大学で実施した。年度を追って各研究項目の研究方法を示す。

平成 29 年度：

ねじ部品減肉許容基準の検討として、汎用 FEM 解析ソフトウェア Abaqus を用い、減肉モデルの非線形有限要素解析より、ボルト・ナット系の破壊モードを明らかにし、減肉の許容範囲を提案した。減肉の計測技術の検討として、スタッドボルトを採り上げた。ボルトの強度は軸部の最小断面積に

支配されるため、デジタルノギスにより減肉部外径を測定することとし、減肉ボルトの実態調査を実施した。

腐食解析技術については、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旨として、実態調査で入手したスタッドボルトの腐食生成物の分析、腐食反応の計測を行った。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)、微小部分での腐食反応を酸化反応により生じる金属の電位変化から微小領域について計測できる走査型電気化学顕微鏡 (SECM) を分析手段として用いた。

平成 30 年度：

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破壊モードに基づき提案した。ナットの減肉のモデル化は、円錐台形状を含む 4 通りである。各モデルでの減肉許容限界を求めるとともに、ボルト・ナット系の剛性低下に伴う締付け力低下及び締結性能の評価を試みた。

ねじ部品の腐食減肉状況の現地調査は、国内の代表的なコンビナート地区であり、立地環境が大きく異なる鹿島地区、京葉地区、水島地区の各地区を対象として実施した。減肉ねじ部品について、寸法、形状を測定するとともに、腐食解析のための試料として入手した。

腐食解析技術の検討については、昇温脱離法 (TDA) による水素分析を、現地調査で入手した設置後 15 年経過した減肉ボルトと減肉ナットに対して適用した。

令和元年度

減肉速度の予測モデルの構築については、試料の局所的な腐食特性を測定するために SECM に直径 10  $\mu\text{m}$  の白金電極微小プローブ電極を取り付け用いた。ボルト・ナット締結体を 3% NaCl 水溶液に浸漬し、ボルトとナットの上端面での電流分布、ならびにエレクトロメータ法によって自然電位を測定した。試験用ボルト・ナット締結体として、炭素鋼ねじと炭素鋼被締結体、ステンレス鋼ねじとステンレス鋼被締結体、炭

素鋼ねじとステンレス鋼被締結体の組合せという 3 種類を用意した。

3D 計測技術の検査への適用では、3 次元サーフェイス立体画像 DEM 作成ソフトウェア (Mex 6.1) を用い、ねじ部品減肉計測を支援する画像処理手法を検討し、減肉ナットの断面プロファイル、残存体積の非接触計測を目指した。

供用適性評価手法の妥当性については、現地調査を行った中で最も腐食減肉が進んでいた鹿島地区の設置後 15 年経過した冷却塔ボトム配管のフランジ継手の呼び径 M12 の減肉ボルト・ナットをサンプルとして 3D 計測技術を適用、サンプルの残存体積を計測し、減肉評価を試行した。評価には、実際の形状に近い円錐台状減肉の減肉許容基準を適用する。

上記の試行によって、ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から評価までの一連の工程の妥当性を検証した。

(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：減肉の実態の把握

現地調査した鹿島地区、京葉地区、水島地区の各コンビナート地区のうち、鹿島地区における腐食減肉の進行が顕著であった。ただし、鹿島地区でも事業所全体でねじ部品の腐食が進行していることはなく、特定の環境下で著しい腐食減肉が認められた。最も腐食減肉が進んでいたのは、図 1 に示す冷却塔のボトム配管のフランジ継手であり、常時、霧状の水滴が舞っている環境であり、2003 年の設置から 15 年経過している設備である。他に腐食が進んでいたのは、排水設備の配管フランジ継手、鋼製猿梯子などの基礎ボルト、保温材下のバルブのフランジ継手などである。

冷却塔のボトム配管のフランジ継手のボルト・ナットについては、腐食解析のため



図1 現地調査でのフランジ継手



図2 サンプルとした減肉ボルト・ナット

に取り外し、サンプルとした。図2にサンプルとした減肉ボルト・ナットを示す。

## 2：検査・計測技術の開発

ねじ部品の3Dデータを作成するための画像データとして、ねじの軸線方向の0°及び±3°の傾斜角からデジタルカメラにより撮影した3枚のステレオ写真を用いる。撮影における傾斜角、ワーキングディスタンスは、計測精度、ステレオ写真の死角領域の縮小などを考慮して決定した。図3に示すように、撮影した写真は3次元サーフェイス立体画像作成ソフト(Mex 6.1)で画像処理を行い、DEM形式による3Dデータとした。3Dデータ化ソフトウェアでの1サンプルの体積計算に要する時間は、ノー



図3 現地調査で収集した減肉ねじ部品のサンプル(左)と3DデータによるDEM表示(右)(採取位置：下1ボルト)

トPCによって平均6分であり、検査手法としての実用性を確認した。以上の手法により、現地調査でサンプリングしたボルト・ナットの3Dデータ化を行い、減肉ナットの特徴量として体積を求めた。

## 3：腐食解析技術の検討

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に関する実態調査を実施し、減肉データを収集した。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を採取し、XRDによる分析を行った。腐食生成物はマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )であった。

現地調査において鹿島地区で採取した減肉ボルト・ナットのサンプルについて、昇温脱離分析法(TDA)により水素分析を行った。分析にあたっては、散水配管のフランジに使用されたナット、ボルトの嵌合部、および外部に露出したナット、ボルトを切断して、それぞれ各部を分析して比較する。TDAにおける真空中での昇温は時間あたり100°Cで行い、この間の放出水素を測定する。水素分析によって、嵌合部のナット、ボルトともに水素は微量であること、外部露出した部分のナットに関して水素は微量であるが、ボルトへの水素は多量であることを明らかにし、水素量は部位によって異なる。これは、外部露出した状態においてボルト、ナットともに鉄の酸化反応が生じるが、ボルトとナットの位置関係で、より内側にあるボルト側での水素の発生が優勢に生じていることを示す。

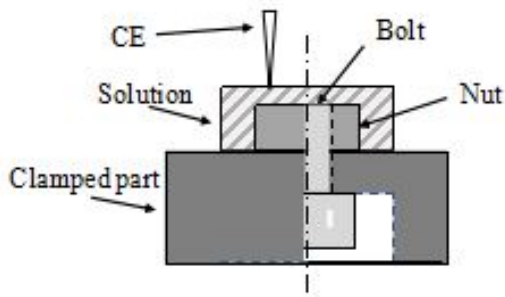


図4 SECMのプローブと試験体の配置

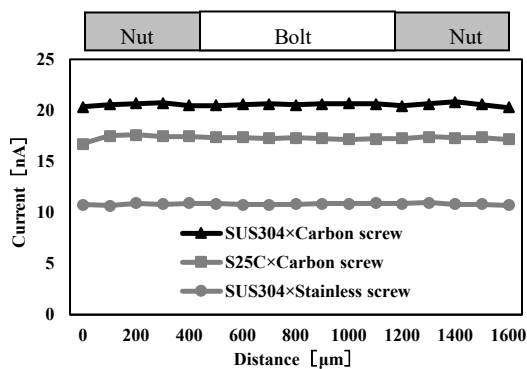


図5 走査させたプローブの電流変化

#### 4：減肉の予測モデルの構築

SECMの微小プローブ電極によって、半球上に広がる試料表面の酸化還元反応を検出する。溶液をメディエータとして使用するため、試料表面上に還元反応が起こるところでは大きなプローブ電流が検出される。図4に示すように、測定溶液に浸漬した3種類の試験体に対して、微小プローブ電極を走査速度 100 μm/s で水平に走査させ電流を測定した。また、3種類の試験体のボルトまたはナットの上端面の自然電位の経時変化を測定した。図5に3種類の試験体の測定結果を比較して示す。

結果をまとめると、ナットはボルトより自然電位が低く、電流値もわずかに高く腐食しやすいことが確認できた。炭素鋼ねじとステンレス鋼の被締結体の組合せでは、ねじと締結体で異種金属接触腐食が起き、同種の組み合わせより電流が高く、自然電位が低い値を示した。

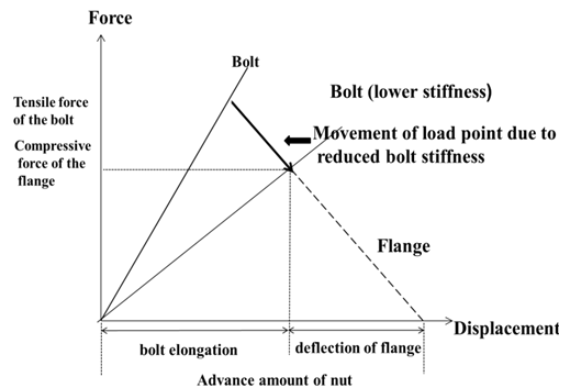


図6 締付け線図による締付け力低下の予測方法

#### 5：ねじ部品の減肉許容基準の開発

弾塑性有限要素解析により、ボルト又はナットが塑性崩壊せずに、減肉のないボルトの降伏応力の50%又は70%の軸力を負荷できる減肉形状を許容限界と新たに定義した。軸力のレベルは、実際の締付け力を想定して設定した。ナットの減肉のモデル化は、高さ又は外径の減肉、高さとお径が同時に減肉する場合、円錐台形状に減肉する場合である。減肉許容限界を求めるとともに、ボルト・ナット系の荷重-変位関係、及びボルト・ナット系の剛性と減肉による剛性低下率を求めた。

さらに、ボルト・ナット系の剛性低下が締結性能に及ぼす影響の評価に関し、図6に示す締付け線図を応用した締付力低下の図式解法を提案した。

#### 6：供用適性評価手法の妥当性の検証

ねじ部品の減肉評価を、現地調査でサンプリングしたボルト・ナットを対象として実施する。3Dデータによる減肉ナット体積（嵌合部ボルト体積を含む）の新品のねじ部品に対する割合が、体積比 31.1%という減肉許容基準を満足するかによって減肉評価を行った。この減肉許容基準は、弾塑性有限要素解析により得られた成果であり、ボルト又はナットが塑性崩壊せずに健全なボルトの降伏軸力の70%の軸力を負荷できるという基準に基づき、実際の減肉ナッ

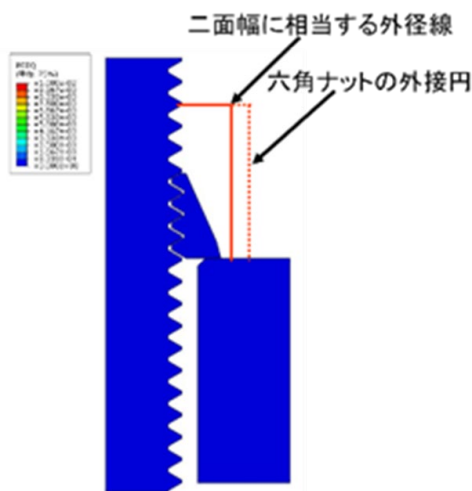


図7 体積比 31.1%の軸対称有限解析モデル

表1 減肉ナットの体積比と合否  
減肉許容基準：31.1%

名称	体積 mm <sup>3</sup>	体積比 %	合 否	注記
新品	5768	100.0	○	基準
上2ナット	3443	59.7	○	切断痕
上3ナット	3076	53.3	○	切断痕
上4ナット	3241	56.2	○	
下2ナット	3570	61.9	○	
下3ナット	2690	46.6	○	
下4ナット	2578	44.7	○	
上1ボルト	661	11.5	×	
上2ボルト	417	7.2	×	
上3ボルト	439	7.6	×	
上4ボルト	434	7.5	×	
下1ボルト	1540	26.7	×	
下2ボルト	2596	45.0	○	
下3ボルト	2136	37.0	○	
下4ボルト	1614	28.0	×	

トの形状に近い円錐台状減肉の減肉許容基準が体積比として与えられている。図7に円錐台状減肉の体積比 31.1% (ボルト嵌合部体積を含む) の非線形有限要素解析モデルを示す。

表1に現地調査でサンプリングしたボルト・ナットの体積計測結果と体積比を示し、

さらに体積比に基づき減肉が許容されるか合否判定を行った結果を示す。

現地調査を行ったフランジ継手のボルト・ナット8組は、2019年3月に新品に交換された。その後、定期的にボルト・ナットを1組ずつ抜き取り、減肉の追跡調査を実施している。5ヶ月経過、9ヶ月経過後に取り外したボルト・ナットでは、体積比は、最も低いもので99%であった。

#### D. 考察

##### 1：減肉の実態の把握

現地調査した各コンビナート地区のうち、鹿島地区における腐食減肉の進行が顕著であったが、腐食状況は飛来海塩粒子量と関連づけることができた。鹿島地区は飛来海塩粒子量の年平均量が 29 mg NaCl/m<sup>2</sup>・d であるのに対し、水島地区や京葉地区では 6 mg NaCl/m<sup>2</sup>・d 未満である。この飛来海塩粒子量の差により、外面腐食深さの比は4倍になるとされている。

腐食が進行しているねじ部品は、呼び径で M16 以下であり、ナットの腐食が進行する一方で、ボルトの軸（おねじ）の減肉は少ない。ナット座面があたる面が水平で上側の場合に腐食が顕著であり、これは雨水等が溜まりやすいためと推測される。基礎ボルトのナットの腐食も同様の理由と考えられる。フランジ継手のねじ部品の腐食速度は、周囲の配管と比較して顕著に高いこと、ナットとボルト頭部が選択的に減肉することが確認された。

ナットの腐食では、錆の体積は元の10倍に膨らむので、そのままの外観から減肉量を判断することはできない。後日、ケレンで錆を除去して減肉量を確認した。ケレン前のナットには錆の浮き上がりによる特有の外観が見られ、これらは「菊割れ」、「菊開き」、「花咲き現象」と呼ばれている。

##### 2：検査・計測技術の開発

体積比という1つの特徴量によって容易に定量的な合否判定を行うことができる。実際のねじ部品の減肉評価において、様々

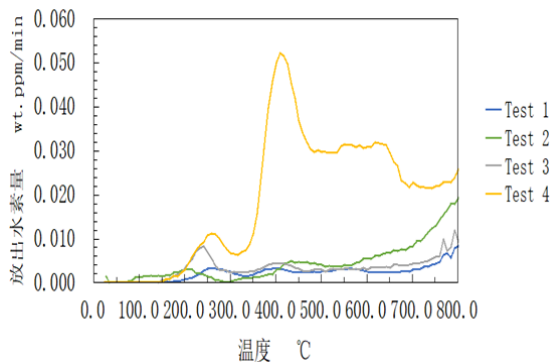


図8 現地調査したボルト・ナットの部位別の水素量 (水素放出プロファイル)

表2 現地調査したボルト・ナットの部位別の水素量

記号	採取部位	水素
Test 1	ナット (嵌合部)	微量
Test 2	ボルト (嵌合部)	微量
Test 3	ナット (外部露出)	微量
Test 4	ボルト (外部露出)	多量

な減肉形状が想定されるが、ナット高さ、ナット幅 (高さの関数) などの多数のパラメータを利用するより、実用性に優れる。

### 3：腐食解析技術の検討

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では、腐食で生成しているのはマグネタイトであった。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、SECMを用いたモデル試験によれば、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。

実態調査において採取した15年経過の減肉ボルト・ナットに対し、TDAによる水素分析を行った。ボルトの非拡散性水素量と腐食度合いに相関性が認められた。図8にTDAにより得られた各部位の放出水素を、表2に水素の詳細分布を整理して示す。水素の詳細分布からは、構造上で、より内

表3 各条件の腐食速度 [mm/y]

Flange×Screw	SUS304×Carbon	S25C×Carbon	SUS304×Stainless
Nut	0.304	0.260	0.143
Bolt	0.303	0.255	0.142

側にある部材は水素発生が優勢となり、より外側にある部材およびその部材自体の外側にある部分を加速的に腐食させるものと考えられる。

追跡調査のボルト・ナットについて水素分析を同様に実施し、経過時間が短いにも拘わらず、非拡散性水素量が増加しているケースを確認している。腐食しやすい部位を早期に特定する技術につながると考えられるが、サンプル数と経過時間が少ないことより、信頼性を高めるために、追跡調査を継続する。

### 4：減肉の予測モデルの構築

単位面積当たりの腐食速度は腐食電流密度に比例する。各鋼の腐食速度の金属換算係数  $k_w, k_L$  による換算式を用いて、腐食電流密度から腐食速度を求めた。表3に結果に示すが、海水中の炭素鋼の定常腐食速度  $0.1 \text{ mm/y}$  に対して、ねじ部品の腐食速度は異種金属で3.0倍、炭素鋼同士で2.6倍と大幅に増加することを明らかにした。ここで、海岸または工業地帯での炭素鋼の腐食速度は飛来海塩粒子量に依存し、ばらつきはあるものの  $0.1 \text{ mm/y}$  以下とされている。

以上の知見より、臨海コンビナートにおけるねじ部品の減肉速度は、炭素鋼同士の組合せの締結体において  $0.26 \text{ mm/y}$ 、異種金属で構成される締結体において  $0.3 \text{ mm/y}$  を見込めばよい。地中埋設の場合、及びCUIが関与する事象は、現時点では対象外とする。

### 5：ねじ部品の減肉許容基準の開発

減肉の許容限界をボルトの降伏応力の50%又は70%の軸力を負荷できる場合と定義することにより、塑性崩壊の破壊モードの変化によって定義するよりも大きな減肉

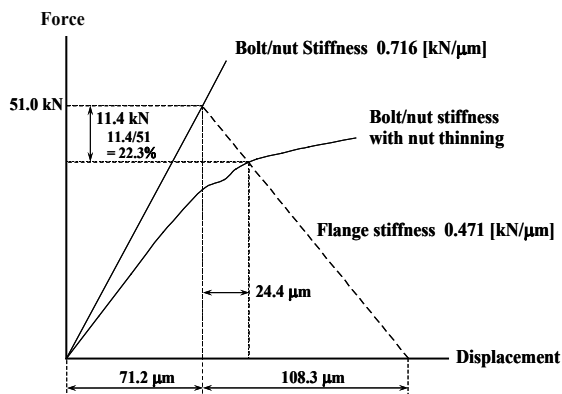


図9 JPI フランジ継手における締付け力低下の予測

を許容できる。ボルト頭部についてもナットと同一の許容限界とできる。ボルト・ナットが JPI フランジ継手において使用されることを想定して、ナット高さと同面幅の同時減肉に対する許容限界の場合について、ボルト・ナット系の剛性率低下率に伴う締付け力低下が 22.3%となることを締付け線図に基づき示した。図9に本評価の締付け線図を示すが、塑性変形を伴う非線形問題に対しても本方法の有用性を示すことができた。締付け力低下 22.3%は、締付け時の締付け力のばらつきと同程度以下である。フランジ継手の場合に当てはめると、締付け力低下に伴い密封性能が初期組立状態より若干低下するとしても、いわゆる漏洩につながることは無い。一般の締結体においても締結性能に及ぼす影響は小さいと予想される。

#### 6：供用適性評価手法の妥当性の検証

ねじ部品の減肉許容基準、減肉の予測モデル、及び 3D 計測技術による検査結果に基づく供用適性評価を実施することによって、ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から評価までの一連の工程の妥当性を検証できた。ナットの減肉速度、表面積及び残存体積から余寿命または検査周期を決めることも原理的に可能である。

#### E. 結論

臨海コンビナート地区における設備のねじ部品の減肉の実態の把握、検査・計測技術の開発、減肉速度の予測モデルの構築、減肉許容基準・余寿命評価の開発、減肉評価ガイドライン作成に関する研究を実施し、以下の成果を得た。

減肉の実態の把握については、各コンビナート地区のうち、鹿島地区における腐食減肉の進行が顕著であり、飛来海塩粒子量と関連づけられる。ねじ部品の腐食は周囲の鋼構造物に比べて進行が速く、ナットとボルト頭部が選択的に減肉する。減肉ボルト・ナットの元素分析より、ボルトの元素量と腐食度合いに相関性があることを示した。腐食しやすい部位を早期に特定する技術につながるため、追跡調査を実施、継続する。

検査・計測技術の開発としては、現場でのナット及びボルト頭部の減肉の検査を可能とする、ステレオ写真から画像処理によって 3D データに変換する 3D 計測技術を確立した。画像処理は汎用ノート PC で実行可能である。減肉ナットの外形プロフィール、残存体積等を非接触で計測できる。

減肉の予測モデルの構築については、SECM などの電気化学的手法により、ボルト・ナット締結体の腐食特性を種々の条件で詳細に解析した。ボルト頭部及びナットの腐食速度は、海水中の炭素鋼の定常腐食速度 0.1 mm/y を基準として、ボルト・ナットと被締結体が炭素鋼同士の組合せの締結体において 2.6 倍、炭素鋼製ボルト・ナットと SUS304 製被締結体の組合せの場合において 3.0 倍と大幅に増加することを明らかにした。これらの腐食特性は、現地調査での腐食状況とも一致する。臨海コンビナートにおけるねじ部品の減肉速度は、炭素鋼同士の組合せの締結体において 0.26 mm/y、異種金属で構成される締結体において 0.3 mm/y を見込めばよい。

ねじ部品の減肉許容基準については、実際の締付け力レベルに対応し、また現実的な減肉形状に対する減肉許容限界を示した。締付け線図を用いて、ナット減肉によるボルト・ナット系の剛性低下に伴う締付け力低下を評価する方法を提案した。締付け力

の低下量は、初期締付け力のばらつきと同程度以下であり、締結性能は維持されると考えられる。

供用適性評価手法の妥当性の検証については、現地調査で入手した減肉ボルト・ナットをサンプルとして実施した。実際の減肉ナットの形状に近い円錐台状減肉の体積比による減肉許容基準を適用した。3D 計測技術を適用し、減肉ナットサンプルの残存体積を計測し、円錐台状減肉の減肉許容基準と比較して合否判定を実施することができた。ナットの減肉速度、表面積及び残存体積から余寿命または検査周期を決めることも原理的に可能であることを示した。

臨海コンビナートにおけるねじ部品の減肉に着目した研究全体の成果として、減肉の実態の把握、減肉速度の予測モデルの構築、減肉の許容基準の設定、余寿命評価方法の提案において、所期の研究目標を達成し、ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から評価までの一連の工程の妥当性を検証した。

現在、学協会において、非接触 3D 計測装置を利用するための 3D 検査技術の規格化、検査員養成の準備が進行している。導入の環境を整えることにより、臨海コンビナートの各種設備の維持管理の高度化及び作業員の労働安全衛生に貢献できる。

## F. 研究発表

### 1. 論文発表

菊池務，辻裕一，鶴見大地：ボルト締めフランジ締結体のシール性能に及ぼす限界ナット高さと二面幅の評価，圧力技術，Vol.58, No.2, P.101-109, 2020.

T. Kikuchi, H. Tsuji, D. Tsurumi: Effect of Nut thinning due to Corrosion on the Sealing Performance

in Bolted Flange Joints under Internal Pressure, ASME PVP 2018 Conference, PVP2018-85064, 2018.

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

### 2. 学会発表

菊池務，新村稔，辻裕一：腐食減肉した高力ボルト・ナットの 3次元計測と軸力評価に基づく合否判定，非破壊検査協会 2019 年度第 2 回保守検査ミニシンポジウム，2019.

斉藤翔太，齋藤博之，辻裕一：日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス M&M2019, PS12, 腐食減肉したねじ部品への水素侵入挙動の評価，2019.

斉藤翔太，辻裕一，菊池務：山梨講演会講演論文集, No.180-3, YC2018-088: ねじ部品の減肉許容基準の検討 —ボルト頭部減肉の場合—, 2018.

## G. 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