

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

Structural integrity assessment of corroded high strength bolt / nut based on 3D measurement and axial force evaluation

bolt

(株)セイコーワープ 新村 稔／東京電機大学 辻 裕一
岩手県立大学 土井 章男／ 株IMC 小林 大祐

1. はじめに

過大な静的引張負荷が作用するねじ結合体の破壊モードは、①ボルト軸の破断、②ボルトのねじ山のせん断破壊、③ナットのねじ山のせん断破壊の3種類に分類される。これらの破壊モードのうち、1山当たりのせん断面積はボルトよりナットの方が大きいため、同一な材料強度を持つボルトとナットの組合せでは、ボルト側のねじ山がせん断破壊する。橋梁および石油精製・石油化学装置の配管や圧力容器に用いられるフランジ締結体においても、多くの場合ボルトとナットとの材料強度は、ほぼ同等としてある。

ただし、締付け時には引張荷重の他にねじりも付加されるので、降伏荷重や引張破断荷重も低下し、せん断破壊荷重も同時に低下する。

この様な状況下、腐食等で、ナット本体の高さが低くなり、はめあいねじ部が少なくなれば、はめ合いねじ部でねじ山のせん断破壊が生じる恐れがあるため、設備管理上、限界ナット高さやナットの二面幅を把握しておくことは、重要である。写真1は実際のナット外面腐食例を示す。

しかしながら、現行基準ではナット高さやナット二面幅の限界値の基準がなく、さらにナットの減肉がフランジ締結体の強度・性能に及ぼす影響に関する研究は少ない。圧力設備の老朽化が進む中、このようなナット減肉に関しては、早急に合否判定基準を策定しなければならない課題といえる。

本稿では、弾塑性有限要素法により、ナット高さやナット二面幅を変えた場合のフランジ締結体の応力解析を行い、減肉したナットの破断挙動、ねじ山谷底部の応力分布の観点から、ナットの供用適性評価を行えることを明らかにし、併せて開発した事例も紹介する。

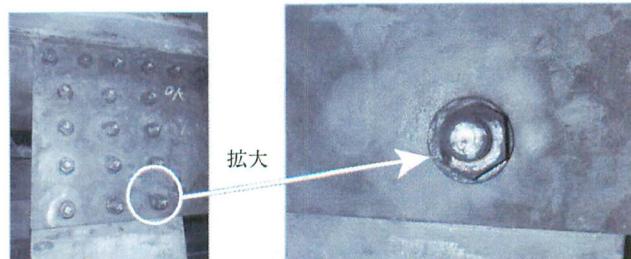
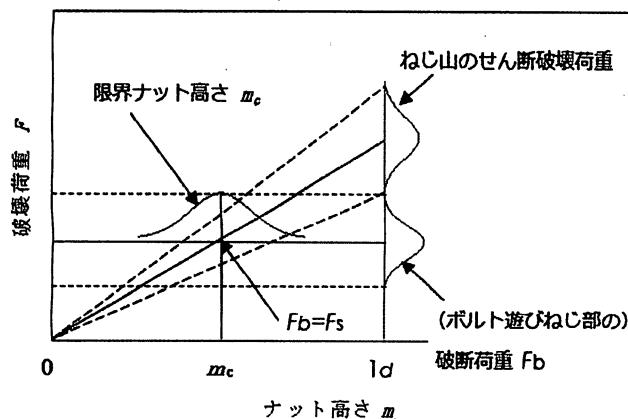


写真1 腐食減肉したナットの外観例

2. Alexander理論に関して⁽¹⁾

従来、確立されているAlexanderの理論を概括し、この理論が本研究に適用できるかを、まず検証した。Alexanderは、ナット高さとせん断破壊荷重の関係をISOナットを用いて静的破壊モードおよび破壊荷重を推定し、必要なナット高さを決める計算式を提案している。

第1図はAlexanderが示したナット高さと破壊荷重の関係を示す。横軸mがナットの高さ、1dはボルト呼びねじ径、縦軸が破壊荷重Fを示す。ねじ山のせん断面積は、かみ合い山数に比例して増加するため、十分なナット高さ（第1図では1d）があれば、ねじ山のせん断破壊は起こらない。この状態からナット高さmを徐々に減少させると、せん断破壊荷重F_sはボルト遊びね



第1図 ナット高さと破壊荷重の関係

じ部の破断荷重 $F_b (=R_m \cdot A_s)$ まで減少する。この時点のナット高さを限界ナット高さ m_c としている。Alexanderは、このような限界ナット高さ m_c の分布を利用して、ボルトとナットのせん断破壊荷重を次式の(1)および(2)で提案している。

$$F_{sb} = 0.6 \cdot R_{mb} \cdot A_{sb} \cdot C_1 \cdot C_2 \quad \dots(1)$$

$$F_{sn} = 0.6 \cdot R_{mn} \cdot A_{sn} \cdot C_1 \cdot C_3 \quad \dots(2)$$

ここで、

係数0.6は、

せん断強さと引張強さの比

F_{sb}/F_{sn} : ボルト／ナットのせん断破壊荷重

R_{mb}/R_{mn} : ボルト材料／ナット材料の引張強さ

A_{sb}/A_{sn} : ボルトねじ山／ナットねじ山のせん

断面積（これらのせん断面積は、1
山当たりの面積に山数を乗じて求める）

C_1 : ナットの膨張による修正係数

C_2 : ボルトねじ山の曲げによる修正係数

C_3 : ナットねじ山の曲げによる修正係数

Alexander理論における限界ナット高さ m_c について、二面幅が減少する場合には、その影響を大きく見積もりすぎるため、計算結果に大きな誤差を生じてしまうとの報告⁽²⁾がある。さらに、Alexander理論により求めた限界ナット高さ m_c は、規定のナット高さより20%程小さい値となると記載⁽³⁾されているが、写真1に示したように20%以上減肉しても破断は生じていない。また、著者らの保全経験（45年）からも、本理論はかなりの安全裕度を有しているといえる。

3. 検討・研究内容

ナット高さや二面幅の減肉がフランジ締結体の強度・性能に及ぼす影響を明らかにすることで、設備の信頼性向上が図れる。著者らはナットの減肉がフランジ締結体の密封性能に及ぼす影響について研究^{(4)～(8)}を行ってきたが、現場ではナット高さやナット二面幅が単独で減肉することではなく複合減肉するので、今回はこれらを考慮した供用適性評価を行った。

4. 有限要素法応力解析

4-1 解析条件

第1表に示すボルト・ナット仕様と第2図に示すボルト・ナットの寸法を用いてモデル化した。

第1表 ナットとボルトの仕様

ナット		ボルト	
強度区分	8	呼び径	5/8 inch
形状	六角ナット	形状	ユニファイ並目ねじ
材質	S45C (JIS G 4051)	材質	SNB7 (JIS G 4107)
ナット高さ	16mm	[機械的性質]	
二面幅	26mm	引張強さ	860N/mm ²
山数／1インチ当り	11	降伏点	725N/mm ²
ピッチ	2.3091mm	首下長さ	90mm
谷の径	15.875mm		
おめじ有効径	14.266mm		
めねじ有効径	14.376mm		

おねじとめねじの有効径はそれぞれの公差範囲の中央値を用いた。数値詳細は日本産業規格、ユニファイ並目ねじ、JIS B 0206、(2014)⁽⁹⁾ユニファイ並目ねじの許容限界寸法および公差、JIS B 0210、(2014)⁽¹⁰⁾および六角ナット、JIS B 1181、(2014)⁽¹¹⁾によった。

計算を行うソルバーは、有限要素法の非線形構造解析プログラムAbaqus CAE R2017を用い、解析条件は第2表に示した弾塑性解析条件を用いた。締付け力は106kN（この力は引張強度860MPaで締め付けた場合の値）。塑性崩壊の判断は、計算が収束せず発散した時とした。

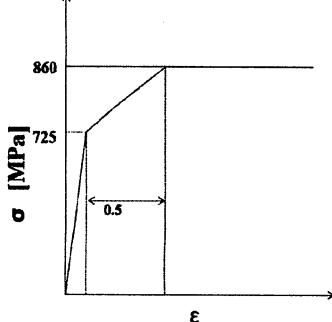
第2表 解析条件

解析法	弾塑性FEM
要素タイプ	軸対称要素
継弾性係数	206 GPa
ポアソン比	0.3
摩擦係数	0.15
降伏点	725N/mm ²
引張強さ	860N/mm ²
ひずみ硬化	折れ線(トリ・リニア)近似

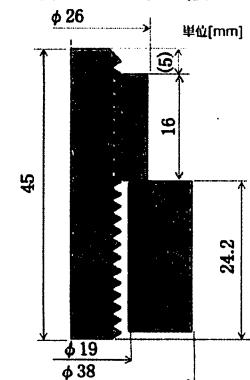
ボルトはJIS G 4107⁽¹²⁾より降伏応力725N/mm²と引張強さ860N/mm²を用いた。ナットはJIS G 4051⁽¹³⁾では降伏応力の記載がないのでISO 898より保証荷重応力として860N/mm²を引張強さと規定し、降伏応力はボルトと同一とした。

弾塑性解析における応力-ひずみ関係は第2図の解析モデルを用いた。

材質のモデル



解析モデルの寸法



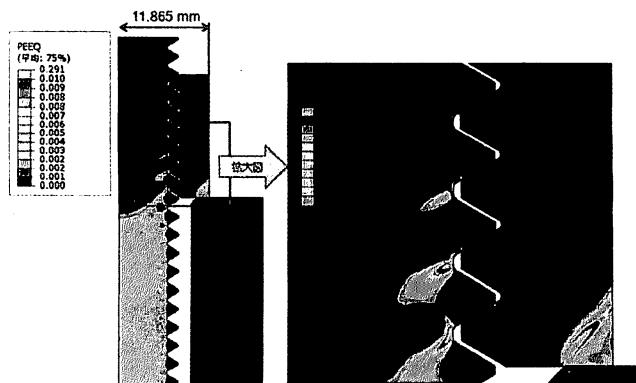
第2図 解析用モデルの材質と寸法

4-2 解析結果

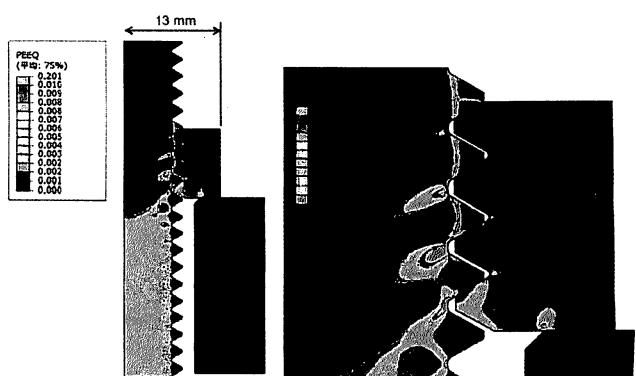
(1) 限界ナット高さとナット二面幅

第3図にナット高さを一定としナット二面幅だけ減少させていく、トライ＆エラー方式で計算し、限界値を求めた結果を示した。ナット二面幅の限界値は91.27%となった。これ以上ナット二面幅が減少すると、ナットとフランジの接触部のコーナーから圧壊した。

破断位置の詳細はPEEQ（相当塑性ひずみ；Plastic strain Epsilon Equivalent）分布を参照。

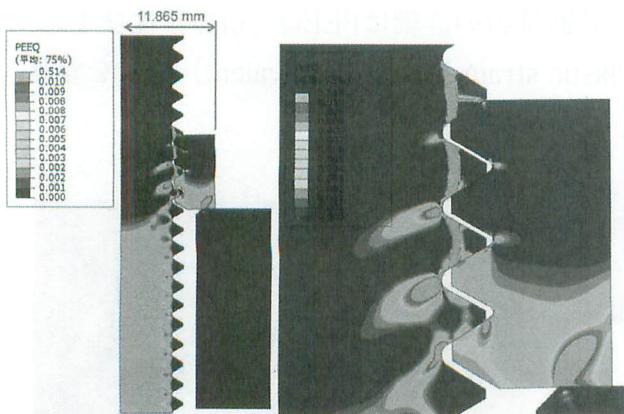
第3図 ねじ山の応力分布
(ナット高さ100%、ナット二面幅91.27%の場合)

第4図にナット二面幅を一定としナット高さだけ減少させていく、トライ＆エラー方式で計算し、限界値を求めた結果を示した。ナット高さの限界値は55%（約4山）となった。これ以上ナット高さが減少すると、ボルトのねじ山の谷底を結ぶラインに沿ってせん断破壊（ストリッピング）を起こした。

第4図 ねじ山の応力分布
(ナット高さ55%、ナット二面幅100%の場合)

第5図にナット高さと二面幅の両方を減少させていき、トライ&エラー方式で計算して限界値を求めた結果を示した。ナット高さの限界値は55%、ナット二面幅は91.27%となった。

この様に、ナット高さとナット二面幅の限界値は単独で減少させた値と同じになり、相互作用は無いことを新たに示した。

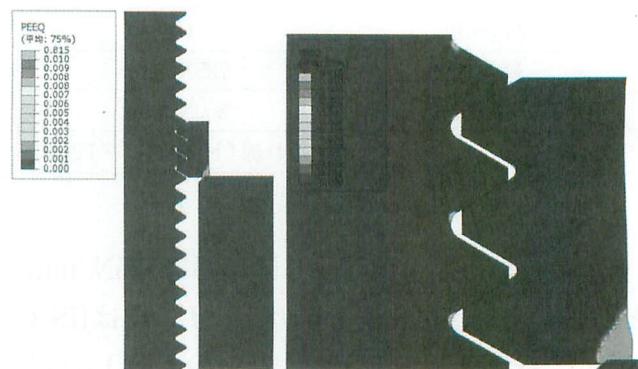


第5図 ナット高さ55%、ナット二面幅91.27%の場合

の耐力（ボルト断面積×ボルトの許容応力度）、滑り強度はボルトの設計軸力×0.4 or 0.45としている。ここで、ボルト耐力は900N/mm²、高力ボルトの場合は摩擦接合なので、限界値は滑り強度となる。

以上の条件を考慮し、ボルト材の締付け応力を変化させてナット減肉がフランジ締結体の強度・性能に及ぼす影響を調べた。

例えば、第6図は降伏応力の50%で締め付けた場合、ナット高さと二面幅の両方を減少させていき、トライ&エラー方式で計算して限界値を求めた結果を示した。ナット高さの限界値は43.12%、ナット二面幅は82.92%となった。これ以上減肉が進行すると、ナットとフランジの接触部のコーナーからの圧壊、またはボルトねじ山のせん断破壊が生じる。



第6図 ナット高さ43.12%、ナット二面幅82.92%の場合

(2) 限界ナット高さとナット二面幅

現場では、通常、フランジ締結体のボルト締付けは、手締めの場合が多い。手締めの場合のボルト締付応力値 σ は各種基準では以下のようにになっている。呼び径3インチフランジのケースでは、ボルト谷径 $d=14.376\text{mm}$ として、

- ASME Sec. VIII、Div. 1、Appendix Sでは、
 $\sigma = 310/\sqrt{d}/25.4 = 412\text{N/mm}^2$
- EN1591-1 Annex Cでは、
 $\sigma = 1000/\sqrt{d} = 264\text{N/mm}^2$
- ASME PCC-1では、 $\sigma = 345\text{N/mm}^2$

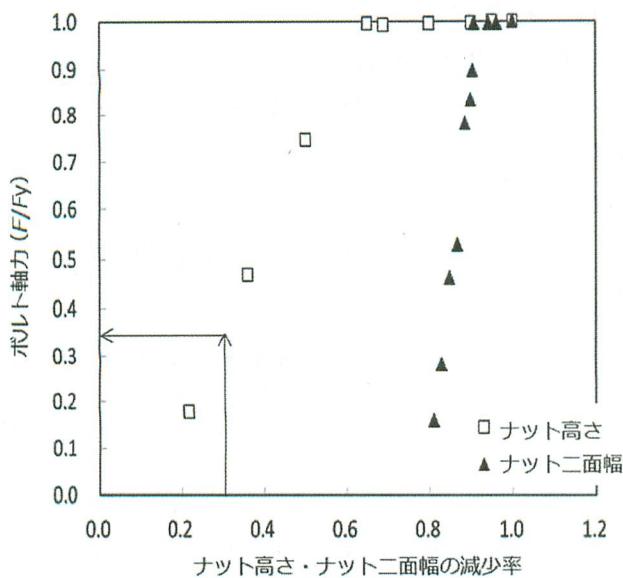
と記載されている。

また、手締めによるフランジ締付トルクの設定の試み⁽¹⁴⁾と題して実験が行われているが、片口めがねレンチ（柄の長さ280mmL）で135～296N/mm²、やとい付片口めがねレンチ（柄の長さ450mmL）で322～534N/mm²程度の締付けとなることが示されている。

橋梁等ではボルトの設計軸力は0.75×ボルト

第7図に引張強さで締め付けた場合と締付け力を変化させて締め付けた場合をまとめて、ナット高さとナット二面幅の減肉比と締付け軸力比との関係を示した。

縦軸の軸力比は引張強度 F_y と締付け力 F の比、横軸はオリジナル寸法との比を示す。□印はナット高さ、▲印はナット二面幅を示す。例えば、ナット高さがオリジナル高さの30%まで減肉した時のボルト軸力は引張強さの35%まで低下することがわかり、強度・性能評価も容易にできることになる。



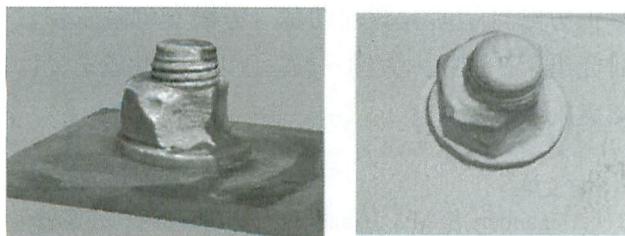
第7図 ナット高さ・ナット二面幅減少率とボルト軸力比の関係

5. デジタル数値処理による計測と判定

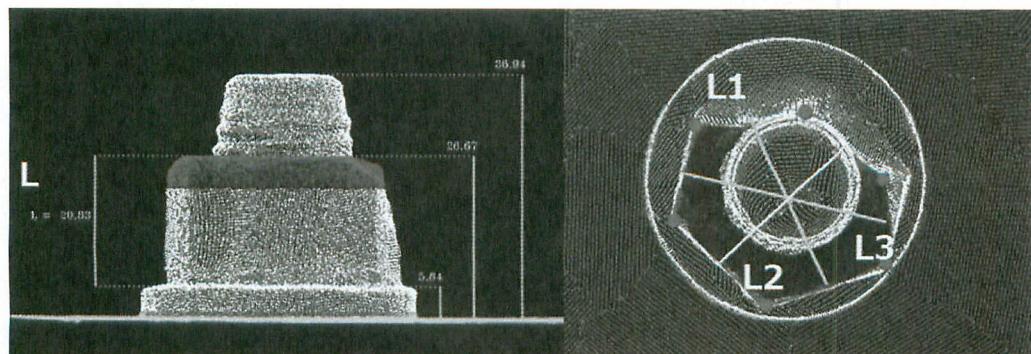
5-1 3D計測システムによる

ナット寸法の測定

写真1に掲示した減肉ナットを、セイコーウェーブの計測装置3DSL-Rhinoを使って3D計測した結果の画像を、第8図に示す。



第8図 減肉したナットの3次元計測データのスクリーンショット



第9図 点群処理ソフトウェアによるナット高さと最小二面幅の抽出

第8図左の画像は、表面のテクスチャ情報を反映した画像、右の画像は、テクスチャ情報をオフにして、形状（3次元座標）のみ抽出した画像である。

第9図は、岩手県立大学の土井研究室によって開発された点群処理ソフトウェアを使い、ボルト・ナット寸法と最小二面幅を抽出した結果の画像である。第10図にその抽出結果の数値を示す。この結果の数値を、第11図に示すウェブベースソフトウェアに代入することで、合否判定が可能となる。

ナットの減肉高さ $L = 20.830475$
 $L_1 = 28.477370$
 $L_2 = 26.778950$
 $L_3 = 32.237148$
 最短線分(黄色線分)は $L_2 = 26.778950$

第10図 抽出結果（減肉ナット高さL、最小二面幅L2）

5-2 理論に基づく合否判定

減肉したナットにおいて、減肉していない部分の二面幅計測値は32.24mm（第10図L3）であり、最小二面幅計測値は26.78mm（第10図L2）なので減肉比は、 $26.78/32.24 = 83.1\%$ 。よって、第10図からボルト軸力比は約35%と読み取れる。

- ボルトの降伏軸力は、

$$245\text{mm}^2 \times (\text{M20の有効断面積}) \times 900\text{N/mm}^2$$

$$(F10Tの耐力)$$

$$= 220 \text{ kN}$$

- ボルトの必要締付け軸力、F10Tの場合、耐力に0.75（補正係数）を考慮するので、
 $0.75 \times 245\text{mm}^2$ (有効断面積) $\times 900\text{N/mm}^2$ (耐力)
 $= 165\text{kN}$

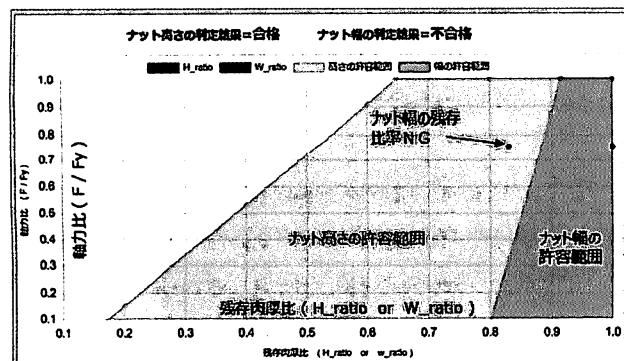
以上の結果から、減肉による残存軸力は、

$220\text{kN} \times 0.35 = 77.0\text{kN} < \text{必要締付け軸力 } 165\text{ kN}$
であることから、本ケースは「不合格」と判定された。

5-3 判定ソフトウェアに基づく合否判定
 (株)IMCにより、上記の理論を取り入れた判定ソフトウェアが開発された。それを用いた判定結果図を第11図、第12図に示す。第11図において、必要なボルト・ナットの諸元や計測数値を代入し、計算を実行することで、第12図の判定結果を得られる。このソフトウェアは近日公開予定である。

必要データリスト	
▶ ナット使用場所：	Aフランジ/B位図
▶ ナット材質：	S45C
▶ ボルト材質：	S45C
▶ ナット設計高さ[mm]：	20
▶ ナット設計幅[mm]：	32.24
▶ ナット高さの最小計測値[mm]：	20
▶ ナット幅の最小計測値[mm]：	26.78
▶ ボルト詳細情報は既知であるか? <input checked="" type="checkbox"/> (Yes)	
ボルトの耐力 "S" [N/mm ²]	900
ボルト規格 [ユニファイ or メートル]	ユニファイ(united) ▼
ボルト外径の基準寸法 "d1" [mm]	19.91
25.4mmあたりのボルトの山数 "n"	
11	

第11図 パラメータ入力画面



第12図 判定画面

6. おわりに

本研究は呼び径3Bフランジ締結体のナット高さや二面幅が減肉した時の影響を弾塑性FEM応力解析より探究し、ナットの破断挙動、ねじ山谷底部の応力分布および密封性能確保の観点から、ナットの供用適性評価を行い、以下の結果が得られた。

- ① ナット高さと二面幅を変化させ、合格限界となるナット高さ比およびナット二面幅比と、締付け軸力比との相関を明らかにした。
- ② 締付け線図によって、ナットが減肉した時の締付け力低下を表すことができることを新たに示した。
- ③ 3D計測システムを利用し、ナット高さと二面幅を測定し、ウェブベースの評価ソフトウェアに抽出した数値を入れることで、容易に合否判定ができるることを示した。

〔謝辞〕

本研究の実現に尽力いただいた菊池務氏（工学博士、元、出光興産㈱）兼 出光エンジニアリング（株）に謝意を表する。また、本研究の一部は、厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業：H29-労働-般-001）の助成を受け実施された。

〔参考文献〕

- (1) Alexander, E. M. : "Analysis and Design of Threaded Assemblies", SAE Technical papers No.770420 (1977)
- (2) 萩原正弥・伊藤修二・近藤伸一：“ボルト・ナット結合体の負荷特性－ステアケース法による限界ナット高さ及ぼす影響－”，日本ねじ研究協会誌，Vol.27, No.12, pp. 251-256 (1996)
- (3) 日本ねじ研究協会出版委員会編：“新版 ねじ締結ガイドブック” (2004)
- (4) 菊池 務・人見光夫・澤 俊行・大宮裕也：“ナットの減肉が内圧を受けるフランジ締結体の強度と密封性能に及ぼす影響”，圧力技術，Vol.48, No.3, pp.122-131 (2010)
- (5) Tsutomu Kikuchi, Yuya Omiya, Toshiyuki Sawa : "Effects of Nut Thinning due to Corrosion on the Strength Characteristics and the Sealing Performance of Bolted Flange Joints Under Internal Pressure", PVP 2011-57445 (2011)
- (6) Tsutomu Kikuchi, Toshiyuki Sawa : "Effect of Nut thinning on the Bolt Load Reduction in Bolted Flange

- Joints under Internal Pressure and Bending Moments", PVP2013-97191 (2013)
- (7) Tsutomu Kikuchi, Hirokazu Tsuji, Daichi Tsurumi : "Effect of Nut thinning due to Corrosion on the Sealing Performance in Bolted Flange Joints under Internal Pressure", PVP2018-85064 (2018)
- (8) 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, pp.101-109 (2020)
- (9) 日本産業規格, ユニファイ並目ねじ, JIS B 0206 (2014)
- (10) 日本産業規格, ユニファイ並目ねじの許容限界寸法および公差, JIS B 0210 (2014)
- (11) 日本産業規格, 六角ナット, JIS B 1181 (2014)
- (12) 日本産業規格, 高温用合金鋼ボルト材, JIS G 4107 (2007)
- (13) 日本産業規格, 機械構造用炭素鋼鋼材, JIS G 4051 (2016)
- (14) 近藤康治：“手締めによるフランジ締付けトルク設定の試み”, 日本高圧力技術協会セミナー, シーリングテクノロジー (2008)

【筆者紹介】

新村 稔

(株)セイコーワークス 三鷹本社
代表取締役



辻 裕一

東京電機大学
工学部機械工学科 教授



土井章男

岩手県立大学
ソフトウェア情報学部 教授



小林大祐

(株)IMC
船舶ソリューション事業本部
ITシステム部

