

ボルト締付け方法が大口径管フランジ締結体の密封特性に及ぼす影響について

1. はじめに

ガスケット付き管フランジ締結体は様々な産業の圧力容器や配管締結部に多数使用されている。締結部の密封特性は、ガスケット特性だけでなくガスケットを圧縮するボルトの締結方法も影響することが知られている。高圧ガス保安協会によると¹⁾、ガスケット締結部からの漏えい事故の約67%はボルト締付け不良によるものと報告されている。締付け不良の要因の一つとして、ボルト締付けの際に生じる弾性相互作用が挙げられる。多数のボルトを締結する際に相互に影響する現象であり、各ボルト軸力が目標ボルト軸力より低下し、更に個々のボルト軸力がばらつく。この結果、適切なボルト軸力を発生させられないため、密封に必要なガスケット圧縮力が得られず漏れが生じることがある。この弾性相互作用の影響をゼロにすることは困難であり、締付け周回数を多くする、あるいはボルトを対角で締め付けるなど、その影響を低減するための対策が行われている。しかしながら、いずれも経験に基づいたものであり、十分な技術的検討がなされているとは言えない^{2)~5)}。

このような背景のもとで、近年では適切なボルト軸力を達成するためのボルト締付け方法が各規格で提案されている。米国ではASME PCC-1⁶⁾ Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assemblyが2000年に提案され、2013年及び2019年には改定されている。日本ではJIS B 2251⁷⁾ “フランジ継手締付け方法”が2008年に発行され、2018年には中国で“フランジ方法取付技術仕様書”も公表されている。しかしながら、これら規格で指標とされているのは最終のボルト軸力であり、実際に必要な締結体の密封特性については扱われていない。

前報のValqua Technology News Vol.37ではASMEクラス150 4インチの小口径とASMEクラス300 24インチの大口径管フランジ締結体を用いASME PCC-1⁶⁾とJIS B 2251⁷⁾の締付け方法が密封特性に及ぼす影響を検討評価し、いずれも十分な密封特性を発揮する為に適切な方法であるこ

とを明らかにしている⁸⁾。しかしASME PCC-1⁶⁾でもいくつかのボルト締付け方法が示されているが、これらの締付け方法が締結体の密封特性に及ぼす影響は検討されていない。

本報ではASMEクラス300 24インチ締結体を用い、ASME PCC-1⁶⁾に新たに追加されたAlternative #1、#2、#3も合わせた締付け方法がボルト軸力のばらつき、密封特性、ボルト締付け時間及びレンチ移動距離に及ぼす影響を検討することを目的としている。ここでは対象ガスケットを当社製品の高機能ガスケットNo.GF300及び膨張黒鉛フィラーうず巻形ガスケットNo.6596Vとする。

2. 試験方法

2-1) 試験装置

Figure1は本研究で用いたガスケット付き管フランジ締結体である。寸法はASME規格の中で最大呼び径である24インチとし、圧力レートはクラス300、形状はW/N、座はRF、材質はSUS304である。管の有無によってフランジ締結体の力学的挙動が変わることが知られており、本研究では約800mmの管を有した装置を用いることで実機に近い条件での検討を行う。

ボルトはSNB7製とし、呼び寸法M39の六角ボルトを24本用いている。各ボルト胴部には2枚のひずみゲージを貼り付けており、全てのボルトの軸力が測定出来るようにしている。なお、各ボルトのひずみゲージは予め校正されており、ボルト、ナットのねじ部及び座面には二硫化モリブデンを塗布している。

試験ガスはヘリウムガスを用い、内圧は2MPaとしている。締結体の漏れ量は圧力降下法で測定した。圧力計で圧力変化を測定し、次の式(1)により算出する。

$$L=1atm \times \frac{MV}{\rho tRT_1c} \left(P_1 - \frac{T_1}{T_2} P_2 \right) \quad (1)$$

ここでは

- L : ガasketの外周あたりの漏れ量、 $[Pa \cdot m^3 / (s \cdot m)]$
- M : モル質量、 $[mg/mol]$
- V : 管フランジ締結体の内容積、 $[ml]$
- ρ : 試験気体密度、 $[mg/ml]$
- t : 測定時間、 $[s]$
- R : 気体定数 ($=8.314$)、 $[J/mol \cdot K]$
- T_1 : 試験開始時の絶対温度、 $[K]$
- T_2 : 試験終了時の絶対温度、 $[K]$
- P_1 : 試験開始時の絶対内圧、 $[MPa]$
- P_2 : 試験終了時の絶対内圧、 $[MPa]$
- c : ガasketの接触外径周長、 $[m]$
- atm : 標準気圧 ($=0.101325$)、 $[MPa]$

Figure2は管フランジ締結体の締付け作業の写真を示し、ボルト締付けはトルクを指標にトルクレンチを用いて行う。目標ガスケット面圧をガスケットNo.6596Vでは40MPa、ガスケットNo.GF300では25MPaとし、以下の式(2)から目標トルク値 T を決定した。Table1は目標ガスケット応力とトルクを示している。

$$T = K \frac{\sigma_g}{N} A_g d \quad (2)$$

ここでは

- T : トルク、 $[N \cdot m]$
- K : トルク係数、($=0.135$)
- σ_g : 目標ガスケット応力、 $[MPa]$
- A_g : ガasket接触面積、 $[mm^2]$
- N : ボルト数、 $[本]$
- d : ボルト呼び径、 $[m]$

実験では締付け周回毎にボルト軸力とフランジ隙間を測定する。



Figure1 実験に用いたASME クラス300 24インチ管フランジ締結体装置の写真



Figure 2 締付け作業の写真

Table1 目標トルク、目標ボルト軸力及びガスケット面圧

フランジ締結体寸法	Class300 24B	
	No.6596V	No.GF300
推奨締付け面圧 [MPa]	50	35
目標ガスケット応力 [MPa]	40	25
目標ボルト軸力 [kN]	98.4	85.6
目標トルク [N·m]	520	451

2-2) 使用ガスケット

本研究に用いるガスケット寸法は、No.GF300では $\phi 612 \times \phi 772 \times t 3.0$ 、No.6596Vでは $\phi 603.2 \times \phi 628.6 \times \phi 685.8 \times \phi 717.6 \times t 4.5$ である。いずれもASMEクラス300 24インチの径寸法である。

3. 締付け方法

本研究では7種類のボルト締付け方法により締結体のボルト軸力のばらつき、密封特性及び締付け時間の比較を行った。Table2は各締付け方法を示し、以下に各締付け方法の概略を述べる。

3-1) JIS B 2251 による締付け方法⁷⁾

JIS B 2251 フランジ継手締付け方法⁷⁾では、4b) 項に「フランジボルト本数が12本以上の場合は、指定された締付けトルクの110%を目標締付けトルクとする。」と述べられており、本研究では目標トルクを100%に加えて110%とした場合も測定及び検討する。5.3b) 4) 項には「うず巻形ガスケットを用いる場合は、ガスケット幅が狭いので片締めが生じやすく、これを防止するために仮締付けの最後に、すべてのボルトに対し、締付けトルクを目標締付けトルクの50%として、時計回り又は反時計回りの締付け手順によって1周の締付けを行う」と記述されているため、うず巻形ガスケットNo.6596Vとシートガスケット

No.GF300では締付け方法が異なる。また、JIS B 2251⁷⁾では場合によっては増締めを提案されており、本研究でも増締めを実施した。

JIS B 2251による締付け方法⁷⁾の大きな特徴は、4本だけ(ボルト本数が24本以下の場合)を先に仮締めし、本締めでは全てのボルトを周回締めすることである。本締めは単純な周回締めであるため、時間短縮と締忘れなどのミス防止が期待出来る。

3-2) ASME PCC-1 による締付け方法⁶⁾

ASME PCC-1⁶⁾ではJIS B 2251⁷⁾とは異なりガスケット種類によって締付け方法が変わることはない。本研究では従来から提案されているLegacy、及び2013年から新たに追加されたAlternative #1、#2、#3を対象としている。

Legacyは全てのボルトを対角締めする方法で、最も広く採

用されている締付け方法であるが、多くの時間を要するという課題が指摘されている。

Alternative #1及び#2はStep1とStep2では4本ずつ異なるボルトに対して段階的にトルクを上げることで序盤のステップにおいて締結ボルト本数を低減する方法である。

Alternative #3はJIS B 2251⁷⁾と同様に4本だけを仮締めした後に周回締めという単純な締付け方法となっている。

ASME PCC-1⁶⁾の4種類の締付け方法の最終ステップは、いずれも「ナットが回らなくなるまで」とされており、Table2に記載されている締付け周回数は本実験でナットが回らなくなった周回数の結果である。

3-3) 3 Rounds 締付け方法

JIS B 2251及びASME PCC-1の締付け方法に加えて、段階的に対角締めを3周する簡便な方法も検討する。

Table2 本研究で用いたボルト締付け方法

	目標トルク	ガスケット		Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	計
JIS B 2251 110%	110%	No.6596V	ボルト数	4	24	24	24	232 bolts
			締付け周回数	4	1	6	2	
			順序	対角	周回	周回	周回	
		No.GF300	ボルト数	4	24	24	—	208 bolts
			締付け周回数	4	6	2		
			順序	対角	周回	周回		
JIS B 2251 100%	100%	No.6596V	ボルト数	4	24	24	24	232 bolts
			締付け周回数	4	1	6	2	
			順序	対角	周回	周回	周回	
		No.GF300	ボルト数	4	24	24	—	208 bolts
			締付け周回数	4	6	2		
			順序	対角	周回	周回		
ASME Legacy	100%	No.6596V No.GF300	ボルト数	24	24	24	—	216 bolts
			締付け周回数	3	3	3		
			順序	対角	周回	周回		
ASME Alt.#1	100%	No.6596V No.GF300	ボルト数	4	16	24	24	120 bolts
			締付け周回数	2	1	1	3	
			順序	対角	対角	対角	周回	
ASME Alt.#2	100%	No.6596V No.GF300	ボルト数	4	16	24	24	120 bolts
			締付け周回数	2	1	1	3	
			順序	対角	対角	対角	周回	
ASME Alt.#3	100%	No.6596V No.GF300	ボルト数	4	24	—	—	108 bolts
			締付け周回数	3	4			
			順序	対角	周回			
3rounds	100%	No.6596V No.GF300	ボルト数	24	—	—	—	72 bolts
			締付け周回数	3				
			順序	対角				

4. 実験結果

4-1) フランジ面間隙間分布

Figure3は7種類の方法で締め付けた場合のフランジ面間隙間分布を示している。組み込んだガスケットがNo.GF300の結果は実線、No.6596Vの結果は破線で示されている。ガスケットがNo.GF300の場合、締め付け方法の影響は軽微であった。一方でNo.6596Vの場合、JIS B 2251⁷⁾とASME PCC-1⁶⁾の規格に基づく方法ではほぼ同様の結果が得られたが、3rounds方法では少し隙間が大きく、圧縮量が小さいという結果であった。

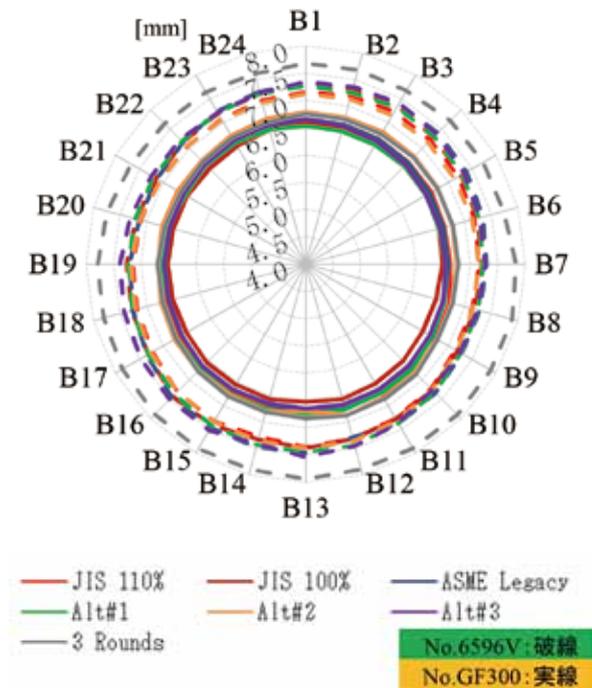


Figure3 フランジ面間隙間分布

4-2) ボルト軸力分布

Figure4及びFigure5はガスケットをNo.GF300とした場合のそれぞれ最終ボルト軸力分布及び軸力のばらつきを示している。いずれの締め付け方法でも弾性相互作用によって軸力のばらつきが見られる。特に3 Rounds方法ではばらつきが大きく、締め付け係数 $Q (=F_{max}/F_{min})$ は2.62であった。最小ボルト軸力 F_{min} については弾性相互作用の影響により全ての締め付け方法で目標ボルト軸力85.6kNを達成出来なかった。これによると、JIS110% (Table2)で Q の値は1.31であり、Alt#3の場合が $Q=1.33$ となり一番小さい値を示している。

Figure6及びFigure7はガスケットをNo.6596Vとした場合のそれぞれ最終ボルト軸力分布及び軸力のばらつき結果を示している。No.GF300の場合と同様に3 Rounds方法ではばらつきが著しく、3本に1本はボルト軸力がゼロであった。Figure7において、 Q の値はJIS110%で $Q=1.47$ となり一番小さい値を示している。さらに Q の値はNo.6596Vの締め付けの方がNo.GF300の締め付けより大きいことを示している。

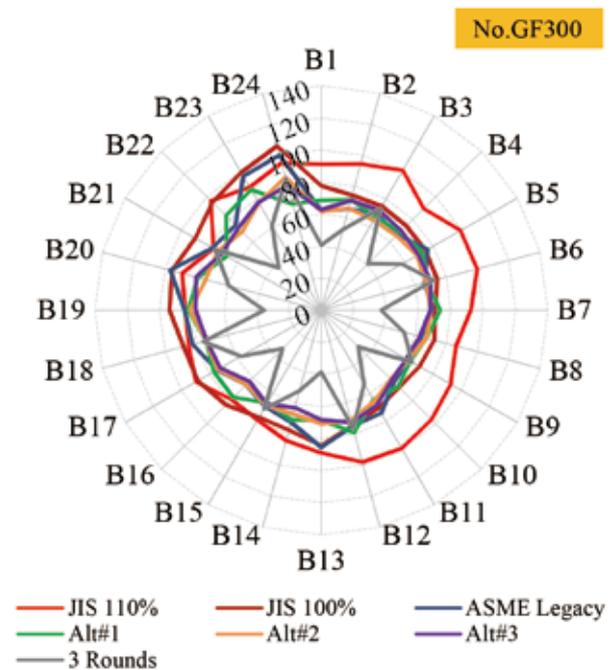


Figure4 ボルト軸力分布 (No.GF300)

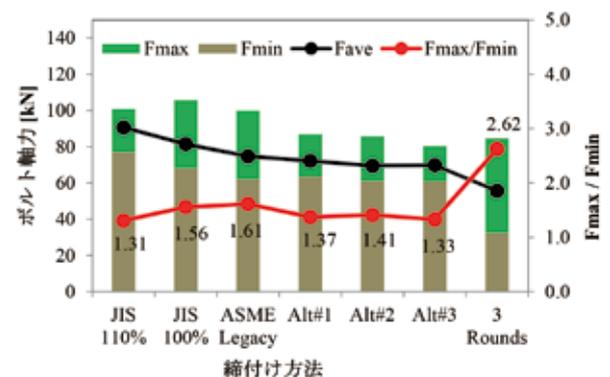


Figure5 ボルト軸力のばらつき (No.GF300)

No.6596V

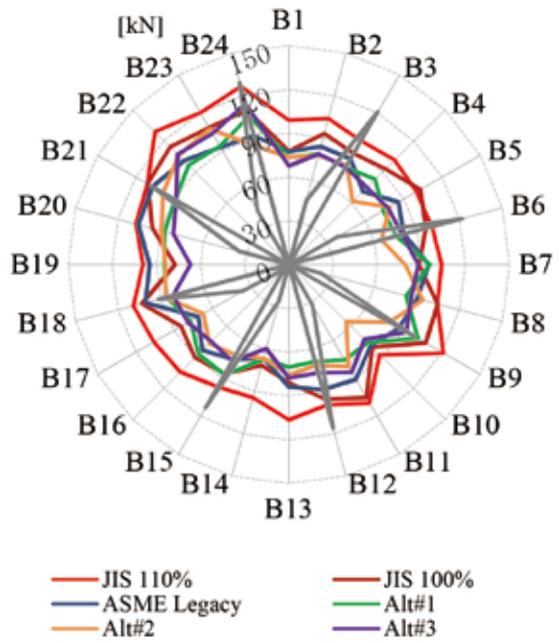


Figure6 ボルト軸力分布 (No.6596V)

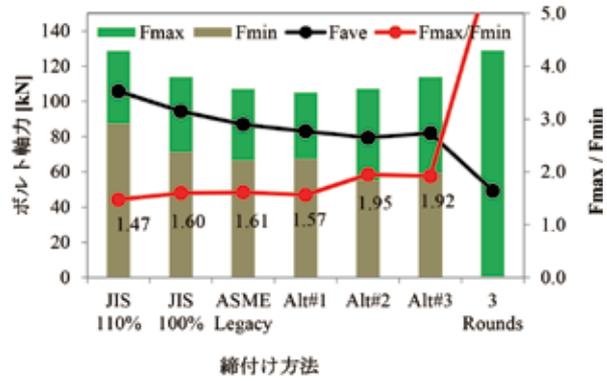


Figure7 ボルト軸力のばらつき (No.6596V)

4-3) 密封特性

Figure8は各方法で締め付けた管フランジ締結体の漏れ量の測定結果を示している。いずれの締付け方法でもガスケットがNo.GF300の場合の締結体の方が、No.6596Vの場合の締結体よりも漏れ量が小さかった。また、同図には24本の最小ボルト軸力 F_{min} も併記している。各締付け方法による漏れ量を比較すると、最小ボルト軸力が大きいほど、漏れ量が小さくなるのが分かる。逆に言えば最小ボルト軸力が小さいほど局所的にガスケット接触応力がより小さくなり漏れ量が大きくなる。すなわち最小のガスケット接触応力が漏れ量に及ぼす影響が大きいことを示している。ガスケット付き管フラン

ジ締結体においては、一部でもボルト軸力が低い場合はその付近のガスケット接触面から漏れが生じやすくなると考えられる。密封特性向上のためには最小ボルト軸力を出来るだけ大きくすることが重要であることが示されている。

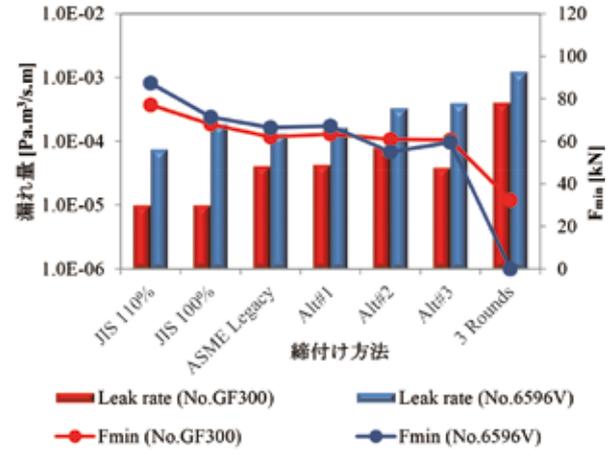


Figure8 密封特性

4-4) レンチの移動距離

Figure9は6種類の締付け方法における締結時のレンチの移動距離を示す。移動距離はボルト穴間の直線距離ではなく、円周に沿った最短距離で計算している。JIS B 2251及びASME Alt#3は比較的移動距離が短かった。3 Rounds方法は締結ボルト数が最も少ないにもかかわらず移動距離が長かった。周回締めが多い締付け方法では移動距離が短くなり、対角締めが多い締付け方法では移動距離が長くなる傾向と言える。

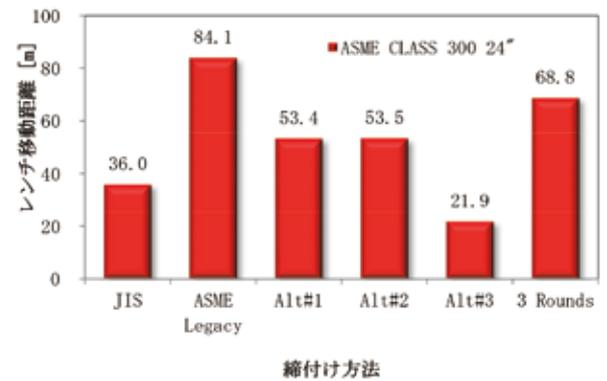


Figure9 レンチの移動距離

4-5) 締付け時間

Figure10は6種類の締付け方法のそれぞれに要した締付け時間を示す。本実験では締付け作業中にフランジ面間隙間を測定しているが、Figure10の結果は隙間測定時間を

含まないものとする。締付けボルト数が多いJIS B 2251⁷⁾及びASME PCC-1⁶⁾ Legacyは締付け時間がより長く、締付けボルト数が少ない3 Rounds締付け方法は最も短い締付け時間となった。ここではトルクレンチを用いたが、油圧レンチ、トルクテンショナーなど、工具及び現場の環境によって締付け時間は大きく変わると考えられる。

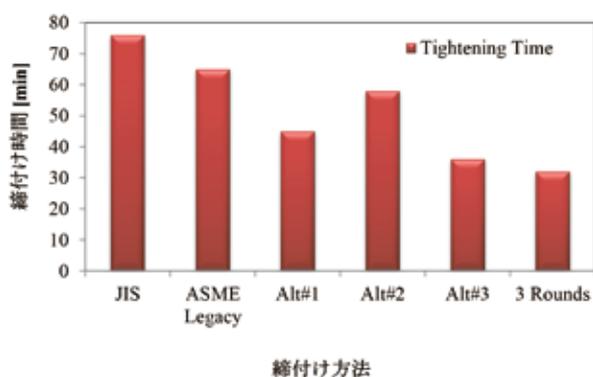


Figure10 締付け時間

5. まとめ

本報では、大口径管フランジ締結体を用い、No.GF300及びNo.6596Vの2種類のカセットに対し、7種類の締付け方法で締め付けた際の密封特性、フランジ隙間、ボルト軸力、トルクレンチの移動距離及び締付け時間を測定し、以下の結果が得られた。

- (1) いずれの締付け方法を用いてもフランジ隙間分布に大きな差異は見られなかった。
- (2) 管フランジ締結体の密封特性は締付け方法に影響され、JIS B 2251⁷⁾ 110%締付け方法が最も漏れ量が少なかった。ついでJIS B 2251⁷⁾ 100%であった。3 Rounds締付け方法は簡便であるが密封特性が劣ることが示された。
- (3) 管フランジ締結体の密封特性は最小ボルト軸力に影響されることを示し、最小ボルト軸力をできるだけ大きくすることが密封特性向上に重要であることが示された。
- (4) 締付け方法は、対角締めが多いとトルクレンチの移動距離が長くなる傾向にあり、締付け回数が多い締付け方法は締付け時間が長くなる傾向にある。
- (5) JIS B 2251⁷⁾ 及びASME PCC-1⁶⁾ Legacy、Alt#1は漏れ量が比較的少ないが、多くの締付け時間が必要となる。3 Rounds方法は比較的漏れ量が大きかったものの、JIS B 2251⁷⁾に比べると締付け時間は半分以下である。

6. おわりに

米国機械学会(ASME)では締付け効率 η (assembly efficiency)なる因子を導入している。 η は達成された全ボルト軸力と目標ボルト軸力の比であり、値は1より小さい。すなわち実際の設計施工ではボルト軸力の目標値に更に $1/\eta$ を掛けて大きめに設定する。JIS B 2251⁷⁾ 110%の基本的考え方は10%大きめに締め付けることである。しかしこれはボルト軸力基準であり、必ずしも適切ではないことが知られ、漏れ量基準の締付け効率を用いることも提案されている⁹⁾。求めるガスケット締結体の密封特性を指標とする、より効率的な締付け方法へと改良の余地があると考えられる。本研究がプラントの締付け作業の一助になれば幸いである。

なお、本実験に関しては三菱ケミカル株式会社の森本更一氏より御助言を賜った。記して感謝の意を表したい。

7. 参考文献

- 1) 村松 晃, “体験型シール施工研修センターシールトレーニングセンター”, Valqua Technology News Vol. 33, (2017)
- 2) H. Lejeunt, Y. Birembaut, Alexander Riedl, Arne Schunemann, “Investigation on Different Tightening Procedures on Several Bolted Flange Types, dimensions and Their Associated Gasket Types”, PVP2011-57525, Proceeding of ASME PVP 2011 Conference, (2011)
- 3) H. Gong, Russell R. Flocken, “Study of Bolt Tightening Methods Using Load Indicating Bolts”, PVP2016-63723, Proceeding of ASME PVP 2016 Conference, (2016)
- 4) H. Gong, Wesley Pudwill, Elysia J. Sheu, “Study of Alternative Assembly Patterns Using Finite Element Analysis and Lab Tests”, PVP2018-84465, Proceeding of ASME PVP 2018 Conference, (2018)
- 5) W. Brown, “Efficient Assembly of Pressure Vessel Bolted Joints”, PVP2004-2635, PVP-Vol. 478, Analysis of Bolted Joints, (2004)
- 6) ASME PCC-1, “Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly”, (2013)
- 7) Japanese Industrial Standards. JIS B 2490 “フランジ継手締付け方法”, (2008)
- 8) 藤原隆寛, “密封特性に対する締付け手順の影響”, Valqua Technology News Vol. 37, (2019)

9) X. Zheng, K. Sato, T. Fujihara, Y. Akamatsu, T. Sawa, "Effect of Tightening Procedure on the Sealing Performance of Bolted Gasketed Pipe

Flange Connections", PVP2019-93497, Proceedings of ASME PVP 2019 Conference, (2019)



鄭 興
中国総合研究所
シールエンジニアリング開発チーム



佐藤 広嗣
研究開発本部
第1商品開発部



藤原 隆寛
研究開発本部
第1商品開発部



澤 俊行
広島大学 名誉教授