

# 管フランジ締結体における締付け効率の評価

## 1. はじめに

管フランジ締結体において、ガスケット密封性能が正常に作動するためには、必要ガスケット接触応力が保持されるためのフランジ締結体のボルト締付けが重要である。フランジの締付け手順を示した規格として、米国機械学会 (American Society of Mechanical Engineers, ASME) の ASME PCC-1<sup>1)</sup> Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly が刊行されており、日本では JIS B 2251<sup>2)</sup> “フランジ継手締付け方法” が 2008 年に制定されている。JIS B 2251 は、効率的かつより正確に目標ボルト軸力を達成することを目的としたボルト締付け方法であり、この規格に則って締め付けることが推奨されている。

管フランジ締結体の締付け作業では、片締めなどを防ぎ、より均等にボルトを締め付けることを目的に、段階的に各ボルト軸力を上げることが推奨されている。加えて、目標締付けトルクで複数回にわたって周回締めを行う手順も重要である。

管フランジ締結体のように複数ボルトを順に締め付ける場合、他のボルトを締め付けている間に、締結体の弾性相互作用やガスケットのクリープなどの材料特性により、ボルト軸力が低下する。しかしながら、複数回にわたって周回に各ボルトを締め付けることで、徐々にボルト軸力は目標ボルト軸力に近い値に収束する<sup>3)</sup>。この締結体の弾性相互作用やガスケットのクリープ特性が各ボルト軸力変動に及ぼす影響は、ガスケットの種類や締結体の呼び径によって異なるが、いくつかの研究<sup>4) 5) 6)</sup> がなされているものの、その挙動は十分に明らかにされていないと思われる。特に最近の管フランジ締結体の漏れ量基準の設計の方向に対して、初期ボルト締付け力のより均一な確保と目標ボルト軸力の確保が必要とされている。このため初期ボルト締付け力が目標ボルト軸力に達するののかという問題に対して、締付け効率 $\eta$  (得られた初期ボルト軸力の平均値/目標ボルト軸力) が重要な因子であり、各ガスケットの種類と管フランジの呼び径に対して、この締付け効率を求めておくことが必要である。更にこの締付け効率に

して、ボルト軸力が各ボルトによりばらつくため、締結体の漏れ量に変化する。このためまず、初期ボルト締付け時におけるボルト軸力変動を調べる必要もある。

本報では、初期ボルト締付け過程でのボルト軸力変動が重要な因子であると考え、各ボルト締付け過程での目標ボルト軸力に対する実際のボルト軸力の割合を「締付け効率 ( $\eta$ )」と定義し、ガスケットの種類や呼び径を変えた場合の締付け効率 $\eta$ を実験と有限要素法 (FEM) で求め比較する。また、周回数による締付け効率の変化も評価する。この締付け効率 $\eta$ の値が求められると、目標ボルト軸力の値を  $1/\eta$  倍することにより、目標ボルト軸力の値を大きくし、軸力変動を加味した目標ボルト軸力が得られる。なお最近では、目標許容漏れ量に対する実際の漏れ量の比を締付け効率とする考え方も提唱されており、いくつかのガスケットの場合に対して、JIS B 2251 及び ASME PCC-1 のボルト締付け方法による漏れ量基準の締付け効率を検討した研究<sup>7) 8)</sup> もなされている。

## 2. 実験方法

### 2-1) ガスケット

Table1 は実験及び FEM 解析で用いたガスケットの種類と管フランジの呼び径を示す。ガスケットは、膨張黒鉛をフィラー材としたうず巻形ガスケット (No.6596V)、ジョイントシート

Table1 実験及び FEM 解析に用いた管フランジの呼び寸法とガスケットの種類

	実験	FEM
JPI Class300 4inch	No.6500 No.6596V No.7020 No.N7030(N)	No.6500 No.6596V No.7020 No.N7030 (N)
JPI Class300 5inch		No.6500 No.7020 No.N7030 (N) No.6596V (Class300、600、1500)
JPI Class300 24inch	No.6500 No.6596V No.7020 No.N7030(N)	No.6500 No.7020

(No.6500)、充填材入りふっ素樹脂圧延シート(No.7020)及びふっ素樹脂ジャケットガスケット(No.N7030(N))の4種類とする。実験に用いた管フランジの呼び寸法はJPI Class300 4inch及びJPI Class300 24inchとしている。

FEM解析の妥当性は、JPI Class300 4inch及びJPI Class300 24inch締結体における実験結果とFEM解析結果との比較より示す。そのFEMモデルを用いてJPI Class300 5inch締結体の締付け効率をFEM解析にて求める。またNo.6596Vガスケット付き締結体については、管フランジの圧力クラスが締付け効率に及ぼす影響を調べるために、5インチ管フランジ締結体における圧力クラス300、600及び1500の締付け効率をFEM解析により求め、各値を比較検討する。

## 2-2) 実験条件

Figure1及びFigure2は本報告で使用した試験装置を示す。管フランジ締結体にガスケットを組込み、目標ガスケット面圧になるようにボルトを締め付けた時のボルト軸力を軸部に貼られたひずみゲージにより測定した。なお、ボルト軸部にはひずみゲージを2枚貼り付け、予め校正している。Table2は使用する各ガスケットの目標ボルト軸力の値を示す。目標ガスケット面圧は各ガスケットで異なり、Table2に示すようにガスケットNo.6500及びNo.7020がガスケット面圧30MPa、No.6596Vがガスケット面圧60MPa、No.N7030(N)はガスケット面圧20MPaとしている。

締付け方法はJIS B 2251に基づいて実施する。ボルト締付け作業は事前に管フランジ締結体ごとに、締付けトルク  $T$  に対するボルト軸力  $F$  を測定し、トルク係数  $K$  を実験的に算出し、締付けトルク  $T$  を指標にして行った。なお、 $T=KFd$  で求める。ここで、 $F$  は目標ボルト軸力、 $d$  はボルトの呼び径である。Table3は本報で用いたボルト締付けの周回数と締付けトルクを示す。Table3に示すように、JPI Class300 24inch締結体はボルト本数が24本であり、規格に指定された締付けトルクの110%を目標締付けトルクとしている。

また、ガスケットNo.7020及びNo.N7030(S)を用いた締結体については、クリープの影響を評価するため、締付け完了から4時間経過後に周回締め(2周)の増締めを行う。Figure3はボルトを増締め後の締付け効率評価のためのボルト軸力測定時の経過時間を示す。ボルト軸力はFigure3に示すように増締めから24時間経過後まで測定する。

式(1)は締付け効率の定義を示し、締付け効率は目標ボルト軸力と実際に測定する各ボルト軸力から算出する。目標ボルト軸力は、各ガスケットの目標面圧から算出したボルト軸力

である。実際のボルト軸力は、各ボルトのボルト軸力の実測値を平均した値としている。24インチ管フランジ締結体の場合、締付けトルクの110%を目標締付けトルクとしているため、締付け効率は、110%目標軸力に基づいた締付け効率①と100%目標軸力に基づいた締付け効率②の2通りにて算出する。

$$\text{締付け効率}(\eta) = \frac{\text{ボルト軸力平均値}}{\text{目標ボルト軸力}} \quad (1)$$

注) 24インチ管フランジ締結体の場合110%目標軸力に基づいた締付け効率①及び100%目標軸力に基づいた締付け効率②の2通りを算出する。



Figure1 JPI Class300 4inch 管フランジ締結体の試験装置



Figure2 JPI Class300 24inch 管フランジ締結体の試験装置

Table2 2種類の管フランジ締結体に各ガスケットを使用するときの目標ボルト軸力

ガスケット種	目標面圧 [MPa]	目標ボルト軸力 [kN]		
		4インチ	24インチ (110%)	(参考) 24インチ (100%)
No.6500	30	33.2	113	103
No.6596V	60	30.9	153	139
No.7020	30	33.2	113	103
No.N7030(N)	20	17.5	65	59

Table3 ボルト締付けの周回数と締付けトルク

フランジ寸法	JPI Class300 4inch	JPI Class300 24inch
ボルト呼び径	M20	M39
ボルト本数	8本	24本
最大締付け周回数	4周	6周
締付けトルク	目標値の100%	目標値の110%

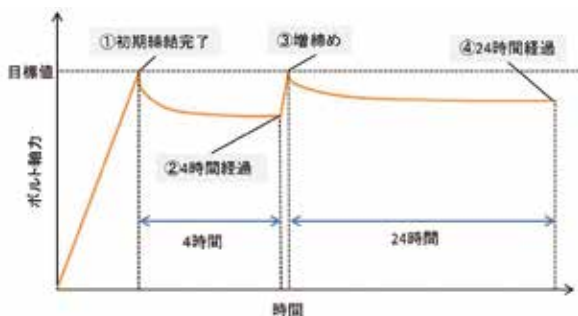


Figure3 増締め後のボルト軸力測定時の経過時間

### 3. 実験結果

#### 3-1) 初期締付け過程での締付け効率

Figure4及びFigure5は段階的に対角締めを行う手順と周回締めの手順における各締付け過程の締付け効率を示す。横軸は各段階を示し、左の縦軸が締付け効率(式(1))であり、右の縦軸はボルト軸力を示す。横軸は、目標トルク0%から100%までが段階的な対角締め、ラウンド1からラウンド6が周回締めである。Figure4の結果がJPI Class300 4inch締結体、Figure5の結果がJPI Class300 24inch締結体である。JIS B 2251の締付け方法では、24インチ管フランジ締結体は仮締付けボルトが4本である。仮締付けでは、締め付けているボルトと締め付けていないボルトがあるため、締付け効率は算出していない。また、24インチ管フランジ締結体については、110%目標軸力及び100%目標軸力に対しての締付け効率を示している。

Figure4及びFigure5より、周回締めの初期にあたるラウンド1及び2では目標トルクで締付けているにもかかわらず、締付け効率は低い。これは、締結体の弾性相互作用などにより、ボルト軸力が低下してしまうためと考えられる。

しかしながら、周回締めを繰り返すことで、弾性相互作用の影響は収まり、4インチ管フランジ締結体ではラウンド3、24インチ管フランジ締結体ではラウンド4あたりから締付け効率の変化は少なくなり一定値にほぼ収束する。また、ガスケットの種類で締付け効率に大きな違いは見られない。ガスケットNo.7020及びNo.N7030(N)を用いた締結体はガスケットNo.6500及びNo.6596Vを用いた締結体と比較すると応力緩

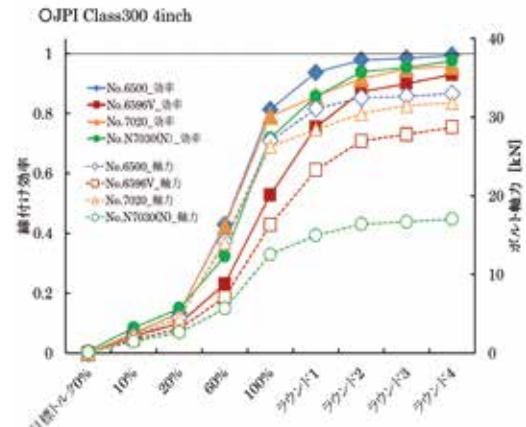


Figure4 初期締付け過程での締付け効率(JPI Class300 4inch)

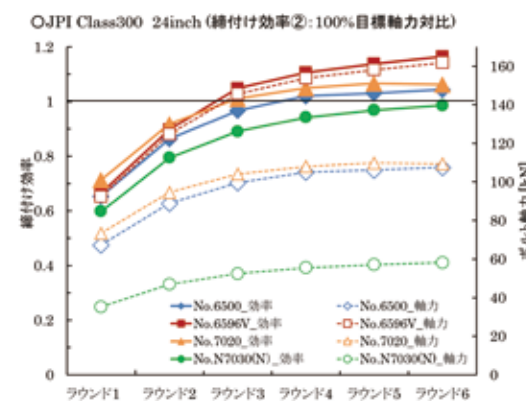
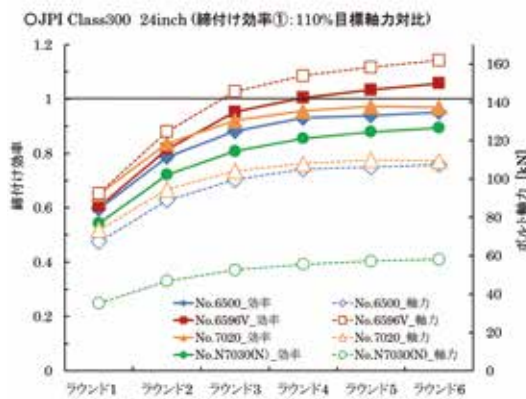


Figure5 初期締付け過程での締付け効率(JPI Class300 24inch)

和が大きいが、初期締付け時においては応力緩和の影響は少なく、同じ締付け方法で問題ないと考えられる。

なお、24インチ管フランジ締結体の締付け効率において、4インチ管フランジ締結体と同様に100%目標軸力対比で締付け効率を算出すると、4インチ管フランジ締結体の締付け効率より高くなった。管フランジの呼び寸法が大きいと弾性相互作用などの影響も大きくなるため、JIS B 2251の締付け方法では、ボルト本数が12本以上の場合、指定された締付け



トルクの110%を目標締付けトルクとしている。目標締付けトルクを110%とすることで、24インチ管フランジ締結体においても締結体の弾性相互作用によるボルト軸力低下を補えることがわかる。

また、110%目標軸力対比の場合でも、ガスケットNo.6596Vで締付け効率が1以上となっているが、トルク係数を各ボルトの平均値としているためと考えられる。110%目標軸力対比でも、各ガスケットとも締付け効率は0.8以上あるが、この結果は各ボルトの平均値であるため、全てのボルトが安定的に高い締付け効率を得るためには、管フランジの呼び寸法が大きい場合は目標値の110%を目標締付けトルクにすることが推奨される。

### 3-2) 増締め後のボルト軸力挙動

次にFigure6は、ガスケットNo.7020及びNo.N7030(N)を用いた締結体について、初期締付け後のボルト軸力の経時変化を示す。縦軸は初期締付け完了時のボルト軸力に対するボルト軸力残留率であり、4インチ管フランジ締結体ではラウンド4、24インチ管フランジ締結体ではラウンド6におけるボルト軸力からの変化を示している。

Figure6より、初期締付け完了後はボルト軸力が時間とともに減少している。4時間後に増締めを行うことで、ボルト軸力は初期値近くまで回復し、その後のボルト軸力低下もゆるやかとなっている。

これらの結果より、増締めはボルト軸力の回復に有効な手段であることがわかる。特にふっ素樹脂系のシートガスケットは、初期締付け後、ボルト軸力が大きく低下するため、初期締付けから一定時間(4時間以上)経過後に増締めを行うと、より効果的と考えられる。

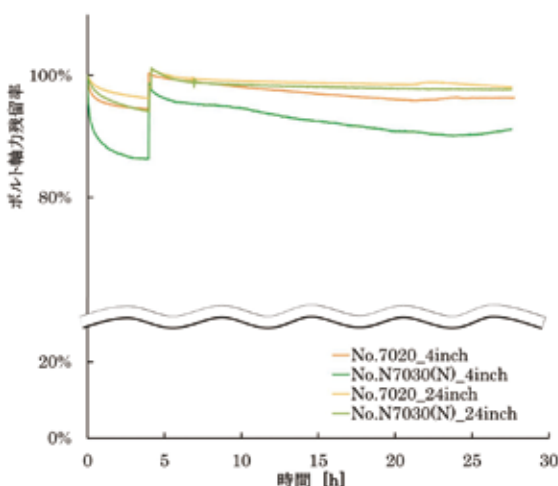


Figure6 使用した各ガスケットに対する締結体の増締め後のボルト軸力残留率

また4インチ締結体と24インチ締結体を比較すると、4インチ締結体のボルト軸力がより低下している。管フランジ締結体全体で考えた場合、フランジ厚さに対するガスケット厚さが4インチ締結体と24インチ締結体で異なる。4インチ締結体の方がフランジ厚さに対するガスケット厚さの割合が大きいいため、クリープ特性の影響も大きくなり、ボルト軸力がより低下していると考えられる。

### 3-3) 各ボルトの締付け効率のばらつき

同じトルクで締付けを行った場合でも、ボルトごとのトルク係数などのばらつきにより、各ボルトの締付け効率にも差が生じる。Figure7、Figure8及びTable4は初期締付け完了時(ラウンド4もしくはラウンド6完了後)の各ボルトの締付け効率を示す。Figure7がJPI Class300 4inch締結体の結果、Figure8がJPI Class300 24inch締結体の100%目標軸力対比における結果である。Table4は各ガスケットの最大値、最小値及び平均値をまとめたものである。

Figure7、Figure8及びTable4より、各ボルトのばらつきは寸法の大きい24インチ管フランジ締結体が大きい結果となった。ボルト本数が多いことと弾性相互作用が大きいことが影響していると考えられる。

しかしながら、24インチ管フランジ締結体の場合でも100%目標軸力対比で考えると、各ボルトの締付け効率は0.85以上である。JIS B 2251では目標締付け力の達成率85%を基準としており、各ボルトでこの達成率は満たされている。

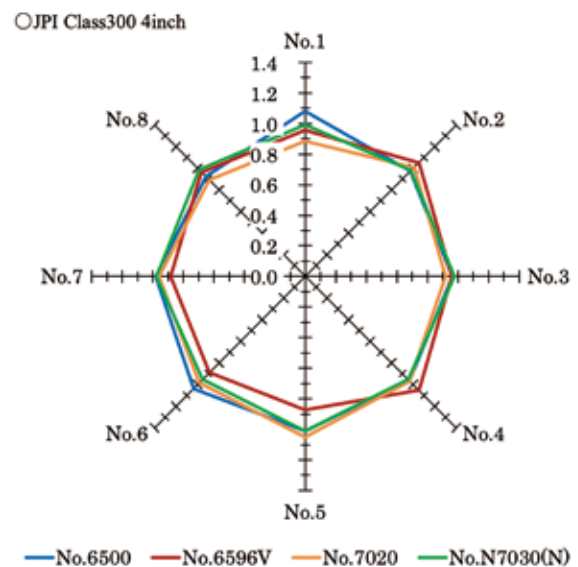


Figure7 各ボルトの締付け効率 (JPI Class300 4inch)

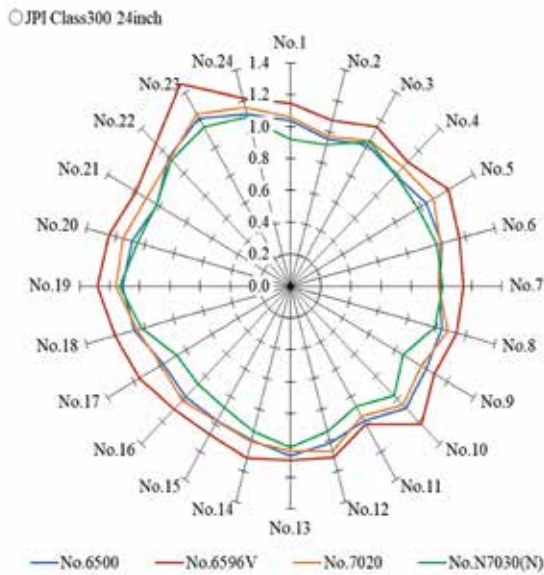


Figure 8 各ボルトの締付け効率 (JPI Class300 24inch・締付け効率②: 100%目標軸力対比)

Table4 各ボルトにおける締付け効率のばらつき

寸法	JPI Class300 4inch			
	No.6500	No.6596V	No.7020	No.7030 (N)
最大値	1.08	1.05	1.05	1.01
最小値	0.92	0.87	0.89	0.95
平均値	0.99	0.95	0.96	0.98
最大-最小	0.16	0.18	0.16	0.06

締付け効率① (110%目標軸力対比)

寸法	JPI Class300 24inch			
	No.6500	No.6596V	No.7020	No.7030 (N)
最大値	1.11	1.33	1.13	1.04
最小値	0.87	0.91	0.86	0.78
平均値	0.95	1.06	0.97	0.90
最大-最小	0.24	0.42	0.27	0.26

締付け効率② (100%目標軸力対比)

寸法	JPI Class300 24inch			
	No.6500	No.6596V	No.7020	No.7030 (N)
最大値	1.22	1.46	1.24	1.15
最小値	0.95	1.00	0.94	0.86
平均値	1.04	1.16	1.06	0.99
最大-最小	0.27	0.46	0.30	0.29

#### 4. 有限要素法 (FEM) 解析

JPI Class300 4inch及びJPI Class300 24inch締結体のボルト締付け実験を行い各ガスケットの締付け効率を求めたが、種々のガスケット及び寸法に対する締結体を用いた実験を行うことは難しい。そのため、有限要素法(FEM)解析を用いて締付け効率を求める方法を確立する。

管フランジ締結体におけるFEM解析は、円周方向の対称モデルを作成し、全てのボルトを同時に締付けすることが多い。その場合、締結体の弾性相互作用を考慮することが出来ない。今回は円周方向において全てのモデルを作成し、各ボルトを順番に締め付ける手法を用いる。

まず、FEM解析に用いるため、室温でのガスケットの圧縮における応力-ひずみ関係を測定する。Figure9は圧縮試験装置を示す。プラテンにガスケットを挟み、材料試験機によって圧縮する。Figure10及びFigure11は室温におけるガスケットの応力-ひずみ関係を示す。Figure10は実験から得られたガスケットNo.6500における、ガスケット寸法JPI Class300 4inch及びJPI Class300 18inchの応力-ひずみ関係である。Figure11はガスケットNo.6596Vにおける、ガスケット寸法JPI Class300 4inch、JPI Class600 4inch、及びJPI Class1500 4inchの応力-ひずみ関係である。ひずみの値は3つの変位計の平均値から得られた圧縮量を初期厚さで除したものである。実験で得られた応力-ひずみ関係のうち、FEM解析には、再圧縮を除く圧縮曲線及び除荷曲線を用いる。

Figure12は管フランジ締結体のFEMモデルを示す。上下対称の1/2モデルとしている。ボルト・ナット部のねじは省略し、ナットも六角形から同じ断面面積の円に簡略化しボルトとナットは一体としている。各対称面を拘束し、各ボルトに軸力に相当する引張り力を与えている。フランジ及びボルトは弾性要素、ガスケットはABAQUSガスケット要素によってモデリングする。このモデルに使用した要素数は57,034、及び節点数は86,010であり、六面体要素を用いた。対象ボルトを締め付ける際、他のボルトは全方向の位置を固定することで弾性相互作用の影響を考慮している。JIS B 2251に基づいた締付け方法でボルトに荷重を負荷する。FEM解析では、各ボルトのボルト軸力をラウンドごとに算出し、締付け効率を求める。

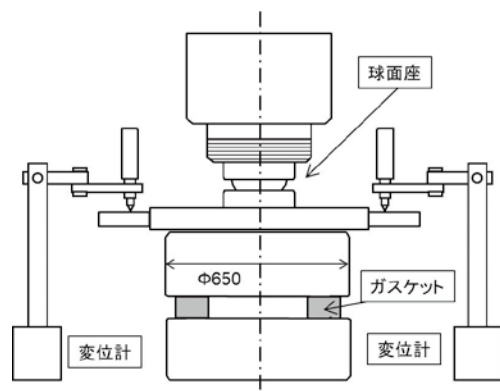


Figure9 圧縮試験装置

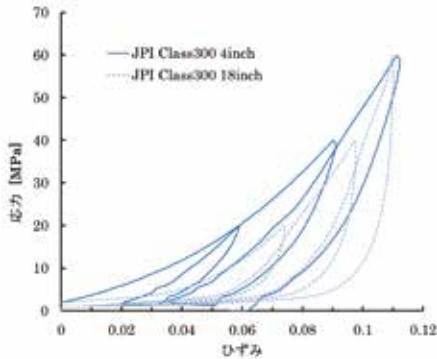


Figure10 No.6500のガスケットの応力-ひずみ関係

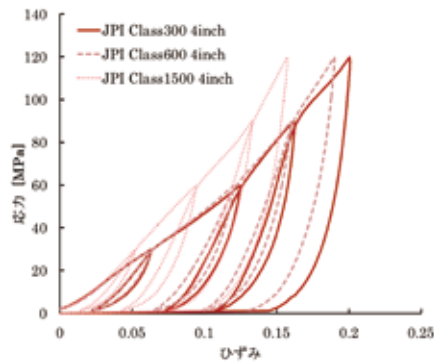


Figure11 No.6596Vのガスケットの応力-ひずみ関係

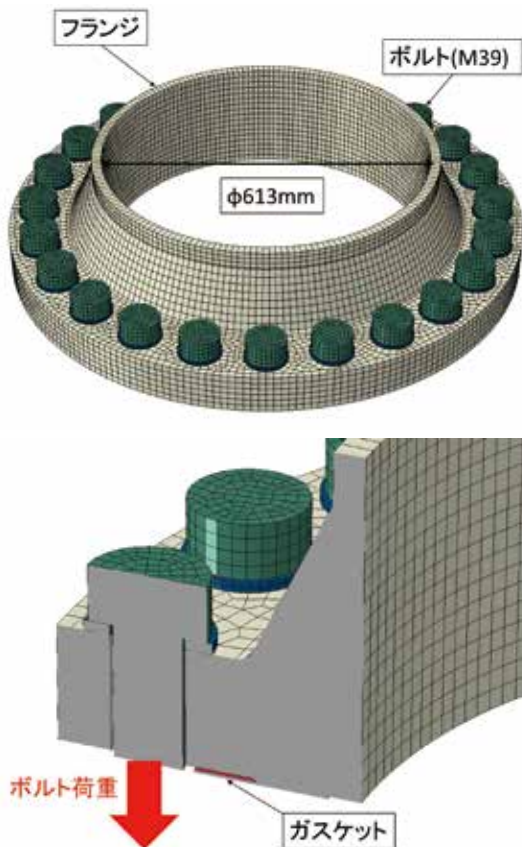


Figure12 管フランジ締結体のFEMモデル

## 5. FEM解析結果と実験結果

### 5-1) ボルト軸力

Figure13は、FEM解析にて得られたガスケットNo.6500及びNo.7020のJPI Class300 24inch締結体における各ボルトのボルト軸力変化を示す。ボルト軸力は、JIS B 2251における本締付けのラウンド1(破線)、ラウンド6(実線)の抜粋となる。

Figure13の結果より、ラウンド1後のボルト軸力は目標ボルト軸力より小さい。また、各ボルトのボルト軸力値にも差があり、No.24ボルト締付け時にNo.1ボルトのボルト軸力が大きく低下しており、FEM解析で締結体の弾性相互作用の影響が示されている。ラウンド6の結果が示すように、周回締めを繰り返すことで、各ボルトのボルト軸力の差はほとんどなくなっている。

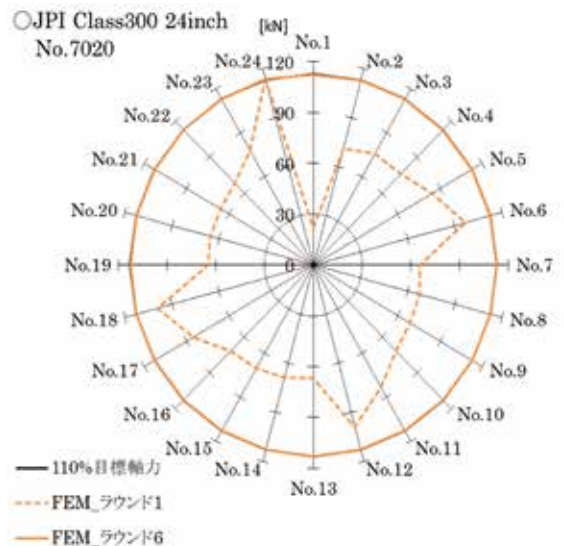
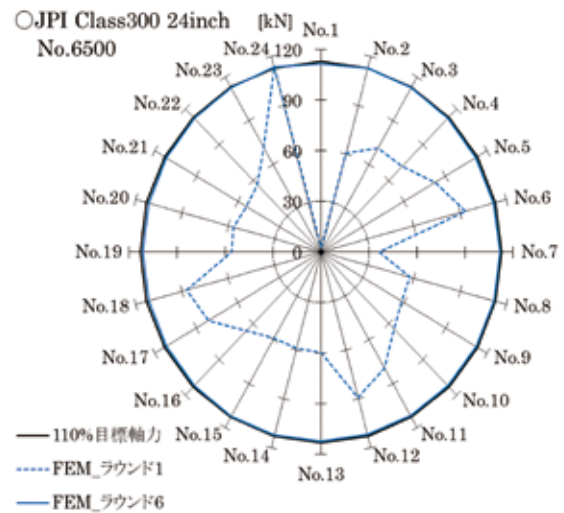


Figure13 ボルト軸力変化のFEM解析結果



5-2) 締付け効率

Table5はJPI Class300 4inch締結体におけるFEM解析と実験結果との比較結果を示す。Table5は周回締めめのラウンド3と4の結果の抜粋である。Table5より、各ガスケットの締付け効率の実験結果とFEM解析結果との差は最大でも7%であり、FEM解析の妥当性が示されている。

また、Figure14はJPI Class300 24inchにおけるガスケットNo.6500、及びNo.7020を挿入した締結体の締付け効率の実験結果とFEM解析結果の比較を示す。ガスケットNo.6500及びNo.7020の締結体に対するFEM解析結果と実験結果はかなりよく一致しており、JPI Class300 24inch締結体においてもFEM解析の妥当性が示された。特に締結体の弾性相互作用が大きいラウンド1～3の締付け効率についても両者はかなり精度よく一致している。

次にこのFEM解析手法を用いて、他の管フランジの呼び寸法における締付け効率を求める。Table6は圧力クラス300において目標締付けトルクが100%から110%に変わる手前のJPI Class300 5inch締結体のFEM解析結果を示す。Table7は、ガスケットNo.6596Vにおいて圧力クラス300、600及び1500の締結体の締付け効率を求めたFEM解析結果を示す。

Table5 FEM解析と実験から得られた締付け効率の比較

ガスケット種	締付け効率 (JPI Class300 4inch)		
	周回数	解析	実験
No.6500	ラウンド3	1.01	0.98
	ラウンド4	1.01	0.99
No.6596V	ラウンド3	0.84	0.90
	ラウンド4	0.94	0.95
No.7020	ラウンド3	1.01	0.95
	ラウンド4	1.01	0.96
No.N7030 (N)	ラウンド3	1.02	0.95
	ラウンド4	1.03	0.98

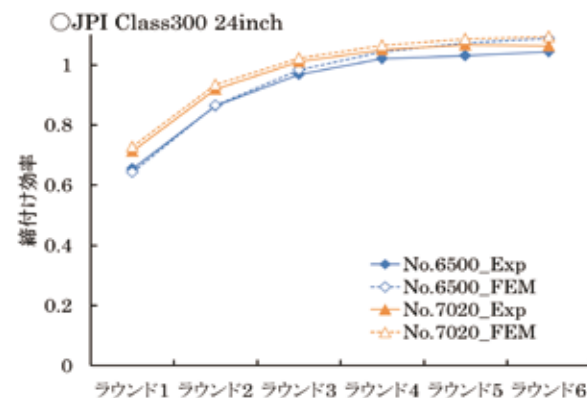


Figure14 FEM解析と実験から得られた締付け効率の比較

Table6より、5インチ締結体のラウンド4後の締付け効率は、各ガスケットとも1.0程度であり、目標締付けトルクは目標値の100%で問題ないと考えられる。またTable7より、圧力クラスによって締付け効率に大きな違いは見られず、圧力クラスが締付け効率に及ぼす影響は小さいことがわかる。

Table6 締付け効率のFEM解析結果

ガスケット種	締付け効率 (JPI Class300 5inch)	
	周回数	解析
No.6500	ラウンド3	1.01
	ラウンド4	1.01
No.6596V	ラウンド3	0.89
	ラウンド4	0.97
No.7020	ラウンド3	1.01
	ラウンド4	1.01
No.N7030 (N)	ラウンド3	0.99
	ラウンド4	1.00

Table7 締付け効率のFEM解析結果 (No.6596Vの圧力クラスの影響)

圧力クラス	締付け効率 (No.6596V 5inch)	
	周回数	解析
クラス300	ラウンド3	0.89
	ラウンド4	0.97
クラス600	ラウンド3	0.98
	ラウンド4	1.01
クラス1500	ラウンド3	0.85
	ラウンド4	0.94

6. おわりに

本報では、ジョイントシート(No.6500)、うず巻形ガスケット(No.6596V)、充填材入りふっ素樹脂圧延シート(No.7020)、ふっ素樹脂ジャケットガスケット(No.N7030 (N))を、JPI Class300 4inch及びJPI Class300 24inch管フランジに挿入した締結体において、締付け時のボルト軸力挙動、締付け効率 $\eta$  ((平均ボルト軸力) / (目標ボルト軸力))を実験及びFEM解析にて検討し、以下の結論を得た。

- 1) JPI Class300 4inch及びJPI Class300 24inch管フランジ締結体において、各ガスケットを挿入した締結体の締付け効率を測定し、FEM解析と比較した。FEM解析結果と実験結果はかなりよく一致することが示された。その結果、いずれのガスケットを挿入した締結体も周回締め初期の締付け効率は低いが、周回締めを繰り返すことで、一定値にほぼ収束した。

- 2) 充填材入りふっ素樹脂圧延シート、ふっ素樹脂ジャケットガスケットを挿入した締結体の最終的な締付け効率はジョイントシートやうず巻形ガスケットの締付け効率の値と比較して大きな差異はなく、同じ締付け方法で問題ないと推測される。
- 3) 初期締付け後、ふっ素樹脂系のガスケットを挿入した締結体では、ボルト軸力が大きく低下するが、締付けから4時間以上経過後に増締めを行うことにより、ボルト軸力の低下が抑制出来ることが示された。
- 4) FEM解析にて求めた締付け効率は実験結果とかなり良く一致しており、FEM手法の妥当性が示された。このため、FEM解析にて他の呼びの管フランジ締結体(5インチ)にガスケットを挿入した場合の締付け効率 $\eta$ を求めた。その結果、最終的な締付け効率 $\eta$ の値はほぼ $\eta=1.0$ 付近に収束することが示された。
- 4) 渡邊芳和, 山口篤志, 金田忍, 辻祐一, “JISフランジ継手締付け方法の適用範囲拡大(延伸PTFEガスケットの締付けシミュレーション)”, 山梨講演会講演論文集, 152-153 (2009)
- 5) K. SATO, A. MURAMATSU, T. KOBAYASHI, T. SAWA, “FEM Stress Analysis and Sealing Performance of Bolted Flanged Connections using PTFE Blended Gaskets under Internal Pressure”, PVP2015-45268, Proceeding of ASME PVP 2015 Conference, (2015) .
- 6) A. MURAMATSU, K. SATO, M. U. KHAN, T. SAWA, “FEM Stress Analysis and the Sealing Performance evaluation of Bolted Pipe Flange Connections with Large Nominal Diameter Subjected to Internal Pressure”, PVP2016-63407, Proceeding of ASME PVP 2016 Conference, (2016) .
- 7) 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) .
- 8) 鄭 興, “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”, Valqua Technology News, Vol.32, p3-9, (2020)

## 7.参考文献

- 1) ASME PCC-1, “Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly”, (2013)
- 2) JIS B2251, フランジ継手締付け方法(2008)
- 3) 高木知弘, “有限要素解析による管フランジ締結体の締付けおよび力学的特性の評価に関する研究”, 神戸商船大学博士論文(2013)



澤 俊行  
広島大学  
名誉教授



高橋 聡美  
研究開発本部



M.U.KHAN  
研究開発本部



藤原 隆寛  
研究開発本部