

带No.GF300的24英寸管法兰连接体的力学特性与密封性评价

1. 前言

装有密封垫片的管法兰连接体被大量应用于石油化学工厂成套设备、发电工厂成套设备、制铁工厂成套设备等之中。石棉密封垫片因其高耐热性、密封性、高强度和易用性以及廉价而被广泛使用，也进行了石棉密封垫片的相关研究^{1)~3)}。相关研究一直都是欧美国家在推动，但日本也从2000年左右开始，由于对人体的健康危害的大量报告而对石棉密封垫片采取了管制，从2008年开始，石棉密封垫片在日本被禁止使用⁴⁾。

石棉垫片分为石棉填料缠绕式密封垫片和压缩板石棉压缩板密封垫片两种，缠绕式密封垫片由膨胀石墨填料代替后，没有产生大的问题。另一方面，关于压缩板石棉压缩板密封垫片的替代品，研发了加入芳纶纤维的无石棉压缩板密封垫片、膨胀石墨板材密封垫片、含PTFE板材密封垫片⁵⁾。芳纶压缩板密封垫片由于橡胶含量较多，有在高温环境下会硬化破裂、无法进行螺栓追加紧固等问题；膨胀石墨板材密封垫片则出现了容易受伤而操作不便的问题。出于这一背景，含PTFE密封垫片在日本得到了广泛应用。PTFE有着优异的耐热性、耐化学品性和密封性，蠕变较大的问题也通过配方调和及制造方法的改良而大幅改善。但是，含PTFE密封垫片缺少以往石棉密封垫片那样的成绩，需要理论方面的特性研究数据。到目前为止，笔者们正在对装有本公司的含PTFE密封垫片No.GF300的管法兰连接体进行常温下、高温环境下及配管弯曲作用下的带密封垫片管法兰连接体的力学行为调查相关的研究^{6)~8)}。

带密封垫片管法兰连接体有各种公称尺寸，如果公称直径不同则其特性也不同。据说尤其是公称直径越大，则连接体的密封性越低。但是，由于费用和时间的问

题，截止到目前的带密封垫片管法兰连接体的研究几乎都是以2~6英寸的较小口径尺寸为对象的，大口径法兰连接体的特性仍有很多不明确的地方。

Sawa等使用20英寸的管法兰连接体查明了带缠绕式密封垫片连接体的特性，揭示了其与小口径管法兰连接体的特性差异和密封性的下降^{9)~13)}。但是，ASME规格中规定了公称直径更大的24英寸法兰尺寸，且装有被广泛使用的含PTFE密封垫片的大口径管法兰连接体的力学特性和密封性的研究尚未开展，因而需要对使用此类密封垫片的管法兰连接体进行研究。

本研究的目的是通过FEM分析和实验，对待No.GF300的24英寸管法兰连接体的力学特性进行评价。首先，我们依据JIS B 2490，对No.GF300密封垫片的基础特性进行了调查¹⁴⁾。将这些基础数据输入到FEM分析中，计算螺栓轴力变动和密封垫片接触应力分布。另外，我们利用通过FEM分析计算出的密封垫片接触应力分布和通过实验获得的泄漏量-密封垫片应力关系，推断来自管法兰连接体的泄漏量。为了说明FEM分析的合理性，我们进行了实验，并对实验结果与FEM分析结果进行了比较研讨。通过实验对来自管法兰连接体的泄漏量和螺栓轴力变动进行测量。本研究使用的管法兰连接体为ASME class300 24英寸的连接体。

本研究中使用的以No.GF300为代表的本公司含PTFE高性能板材密封垫片因其耐热性、耐化学品性、密封性和使用性优异而被广泛使用。另外，由于不含任何橡胶成分，因此在300℃以下的温度和长时间使用后不会出现材料老化，在本研究中，可以得出其具有高精度力学特性的评价。

2. 实验方法

Figure1 所示为用于测量螺栓轴力变动及泄漏量的带 No.GF300 密封垫片管法兰连接体装置。管法兰连接体尺寸为 ASME class300 24 英寸，材料为 SUS304。我们知道管的有无会大幅改变连接部的特性，本装置采用具有与实机相同长度管道的法兰。密封垫片的尺寸也为 ASME class300 24 英寸，厚度为 3.0mm，螺栓公称直径为 M39。

所有 24 颗螺栓的轴部均贴上了应变规，通过与应变仪连接，可以测量并记录螺栓轴力。并且所有的应变规都事先经过了校准。来自连接体的泄漏量采用压降法，根据以下公式(1)进行测量。

$$L = \frac{MV}{tRT_1} \left(P_1 - \frac{T_2}{T_1} P_2 \right) \quad (1)$$

此处，L：泄漏量、M：摩尔质量、V：装置的内部容积、t：测量时间、R：气体常量、T1：测量开始时的温

度、T2：测量结束时的温度、P1：测量开始时的内压、P2：测量结束时的内压。

初始内压 P1 为 2MPa，实验在常温下进行。紧固时承受与密封垫片平均压力 10、20、30 及 40MPa 相当的 34.2、68.5、102.7 及 136.9kN 的初始螺栓轴力。紧固后，从钢瓶流入氦气，测量泄漏量。

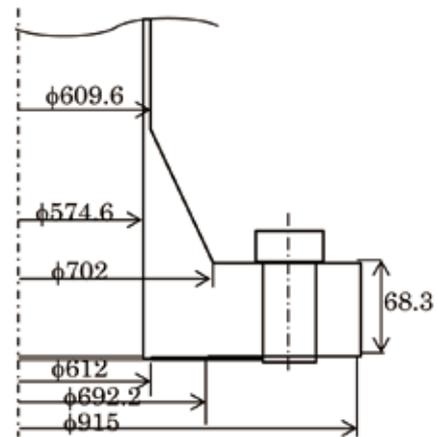


Figure2 24英寸管法兰连接体的尺寸



Figure1 24英寸管法兰连接体的实验装置

3. 密封垫片特性

事先通过实验测量 No.GF300 密封垫片的压缩特性及泄漏量-密封垫片应力关系，将测量值用于 FEM 分析。

3-1) 压缩特性

使用 Figure3 所示实验装置，首先测量 No.GF300 密封垫片在常温下的压缩特性。压缩用的压板拥有 JIS 10K50A 尺寸的凸面。将密封垫片夹在一对压板之间，使用材料试验机进行压缩，测量此时的压缩量。Figure4 所示为通过材料试验获得的应力-压缩量关系(压缩特性)。

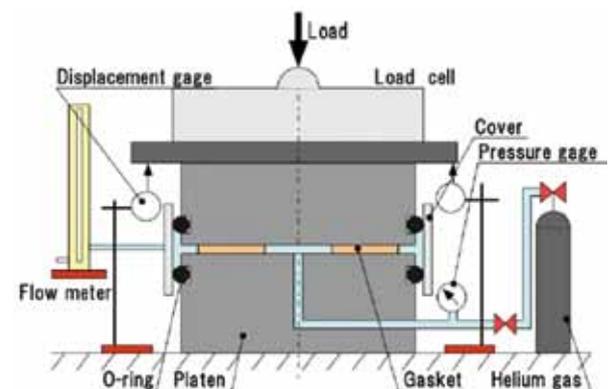


Figure3 密封垫片特性测量装置

压缩及恢复曲线显示出非线性和滞后性。FEM 分析时会考虑到这些举动而进行计算。

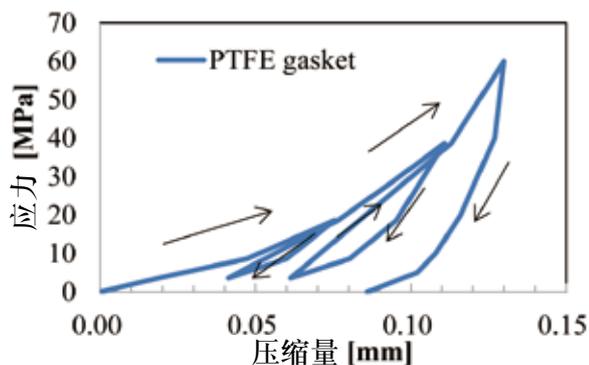


Figure4 密封垫片的压缩特性

3-2)密封性

与测量压缩特性时一样使用Figure3所示压板装置，依据JIS B 2490来测量密封垫片的泄漏量-密封垫片应力关系。使用材料试验机进行阶段性的压缩，测量负荷氮气2MPa时的泄漏量。通过橡胶O形圈和套管来回收从密封垫片部泄漏的气体，使用皂膜流量计进行测量。Figure5所示为测得的泄漏量-密封垫片应力关系。纵轴表示泄漏量的对数，横轴表示密封垫片应力。由此可知，密封垫片应力越大，则泄漏量越少。密封垫片应力在30MPa以上时，泄漏量少到难以测量，因此未显示数据。

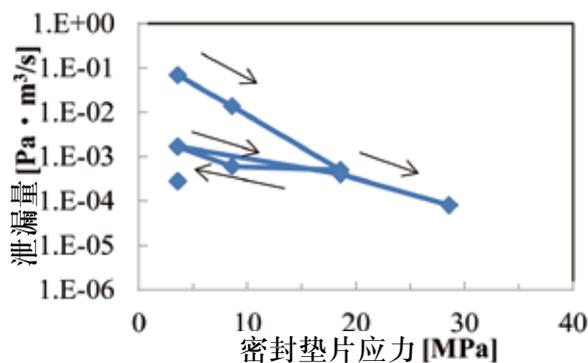


Figure5 密封垫片的泄漏量-应力关系

4. FEM分析

Figure6所示为24英寸尺寸的带密封垫片管法兰连接体的FEM分析模型。分析采用通用代码ABAQUS，元素数为2695，节点数为4408。考虑到连接体的对称性，采用1/96模型(圆周方向1/48、轴方向1/2)。本模型中，将六角形形状的螺母简化为截面积等效的圆形，并省略了螺丝。Figure7所示为FEM分析的边界条件。所有元素在对称边界面上各方向受到束缚。通过螺栓模型承受轴向负荷来施加初期紧固力，负荷内压时受到束缚。内压作用于法兰及管内面。

法兰及螺栓的模型使用弹性元素，密封垫片则使用ABAQUS密封垫片元素。该ABAQUS密封垫片元素可以将非线性和滞后性纳入考虑。FEM分析时，会计算螺栓轴力的变动和密封垫片接触应力分布。

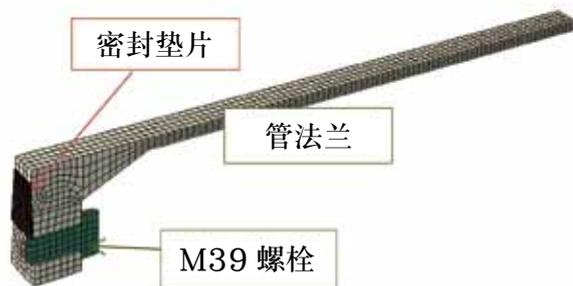


Figure6 管法兰连接体的FEM分析模型

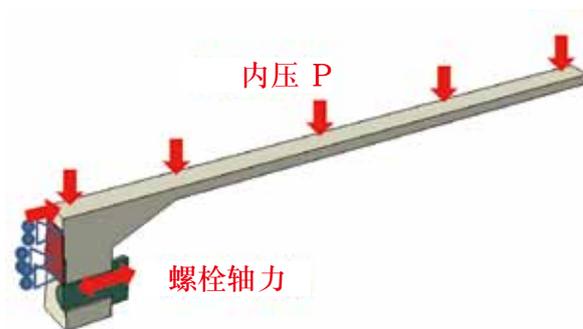


Figure7 FEM分析的边界条件

5. 实验及FEM分析结果

5-1) 螺栓轴力

Figure8所示为通过实验和FEM分析获得的内压作用时的螺栓轴力变动的结果。横轴为内压，纵轴为螺栓轴力，实线表示实验结果，虚线表示FEM结果。实验结果的螺栓轴力为24颗螺栓的平均值。初期紧固采用与密封垫片接触应力10、20、30及40MPa相当的螺栓轴力34.2、68.5、102.7及136.9kN。在所有条件下，内压越大则螺栓轴力越低。这可能是因为内压导致法兰旋转增大，螺栓轴发生收缩造成的。实验结果与FEM分析结果相当一致，说明了FEM分析的合理性。

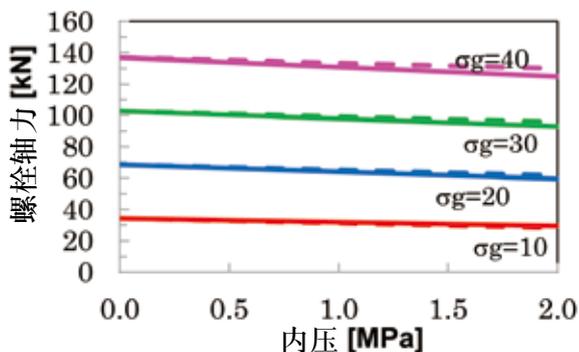


Figure8 内压作用时的螺栓轴力变动

5-2) 密封垫片接触应力和泄漏量

Figure9所示为通过FEM分析获得的紧固时及内压2MPa作用时的密封垫片接触应力分布。初期紧固时的密封垫片接触应力为10、20、30及40MPa。在获得的所有等值线图中，可以发现密封垫片外缘部分离开法兰凸面，不与法兰接触，接触应力为零。看初期紧固时的数据可知，法兰旋转导致越靠近外缘侧，接触应力越大。此外，即使在密封垫片平均接触应力较大时，内径侧的密封垫片接触应力也为零。这是因为法兰旋转导致密封垫片内径侧与法兰分离，形成非接触。另外还发现，密封垫片接触应力的圆周方向的分布变化极小。在内压作用时，轴向的推力使密封垫片接触应力的总和减小。

此处，由通过FEM分析获得的密封垫片接触应力分布及通过实验获得的Figure4所示泄漏量-密封垫片应力关系，推断来自管法兰连接体的泄漏量^{11)、12)}。Figure10所示为实验时测得的泄漏量与推断泄漏量的比较。纵轴是将总泄漏量除以密封垫片接触外周长度而获得的单位

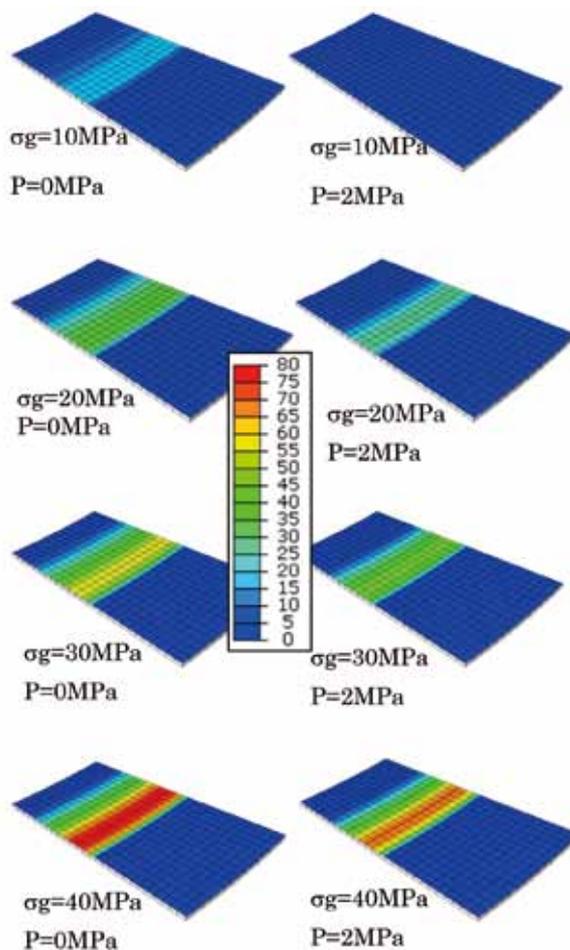


Figure9 通过FEM分析获得的密封垫片接触应力分布

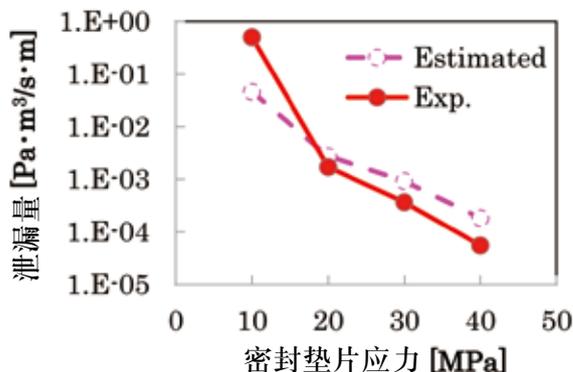


Figure10 来自密封垫片的泄漏量测量值与推断值的比较

长度泄漏量。由此可知，密封垫片接触应力越大，则泄漏量越少。另外，推断泄漏量与实验结果相当一致，说明了泄漏量推断的方法和FEM分析的合理性。

6. 考察

6-1) 管法兰连接体的公称直径对螺栓轴力变动的影响

Figure11所示为通过FEM分析计算出的装有No.GF300密封垫片的2、4、8、12、16、20及24英寸管法兰连接体承受内压作用时的内力系数的值。

目标密封垫片接触应力的平均值为20MPa,内压为2MPa。纵轴所表示的内力系数是受到外力(此时为内压)时的螺栓轴力的增量比例,正值表示螺栓轴力增加,负值则表示螺栓轴力减少。可以看到管法兰公称直径越大,则内力系数越小的趋势。这是因为管法兰公称直径越大则法兰的弯曲刚性越小,在内压作用时容易助长法兰旋转,结果导致螺栓容易收缩。Figure12所示为各管法兰公称直径尺寸的密封垫片接触应力分布。横轴为相对于密封垫片宽度的比率,并进行了无量纲化。在任何尺寸条件下,内压作用时密封垫片接触应力均会降低,但在公称直径越大时越显著。这可能是因为公称直径越大则内压的受压面积越大,推力增大及内力系数的值为负数,导致密封垫片接触应力衰减比率越大。

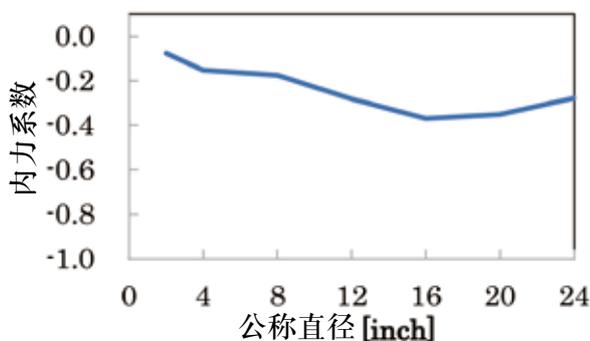


Figure 11 管法兰公称直径对内力系数的影响

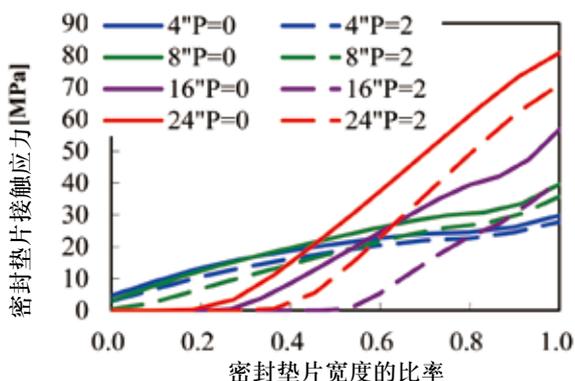


Figure 12 各管法兰公称直径连接体的半径方向的密封垫片接触应力分布

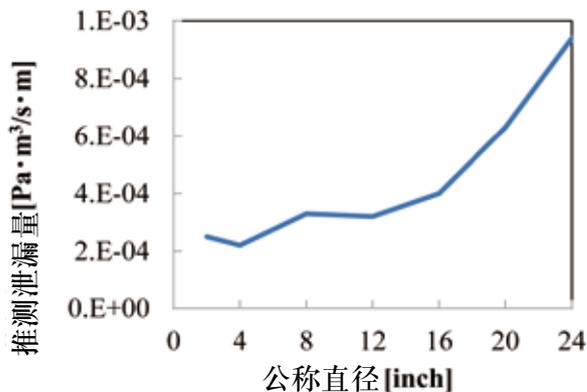


Figure 13 管法兰公称直径对单位长度泄漏量的影响

Figure13表示以2~24英寸管法兰连接体为对象,以与Figure10的结果相同的方法推断出的泄漏量。目标密封垫片接触应力的平均值为30MPa,泄漏量采用总泄漏量除以密封垫片接触外周长度的单位长度泄漏量。

管法兰公称直径越大则单位长度的泄漏量随之增加,但纵轴是线性显示而非对数显示,因此实际差异并没那么大。

6-2) 使用No.GF300与膨胀石墨填料密封垫片

No.6596V的各管法兰连接体的密封性比较

Figure14所示为使用No.GF300与膨胀石墨填料密封垫片No.6596V的管法兰连接体的单位长度泄漏量与密封垫片接触应力的关系。与此前一样,管法兰连接体尺寸为ASME class300 24英寸,内压为2MPa。对使用No.6596V的管法兰连接体也进行了FEM分析和实验的比较,确认了FEM分析手法的合理性。密封垫片接触应力更小的泄漏量较大,但密封垫片接触应力较大时,则使用No.6596V的管法兰连接体的密封性比使用No.GF300的管法兰连接体优异。No.6596V的填料材料采

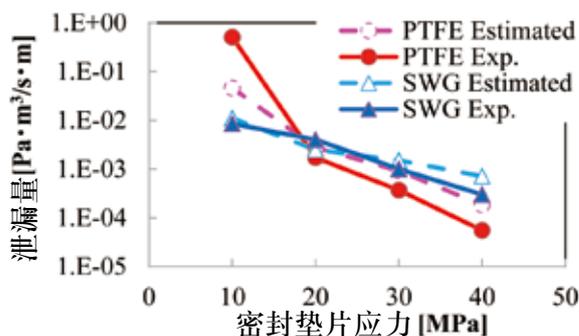


Figure 14 使用No.GF300与No.6596V的各管法兰连接体的密封性比较

用了膨胀石墨, 连接体在较小的应力下也能发挥良好的密封性。另一方面, No.GF300在应力较小时无法贴合法兰面, 但当密封垫片接触应力增大的情况下, 可与法兰面贴合, 并且在受到压缩后会变得高密度化, 从而发挥更高的密封性。

通过强度计算可知, 无法使用缠绕式密封垫片的管法兰连接体在使用No.GF300时, 可以获得比使用缠绕式密封垫片时更好的密封性。

7. 结语

本研究以带No.GF300的ASME class300 24英寸管法兰连接件体为对象, 通过实验和FEM分析调查其力学特性, 得出以下结论。

- (1) 依据JIS B 2490, 对No.GF300的压缩特性、泄漏量-密封垫片接触应力进行了测量。
- (2) 根据上述密封垫片特性和通过FEM分析获得的密封垫片接触应力分布结果, 对来自管法兰连接体的泄漏量进行了推断。另外, 与实验进行比较, 两项结果相当一致, 体现了推断方法的合理性。
- (3) 通过FEM分析和实验表明, 内压作用于带No.GF300 24英寸管法兰连接体时, 法兰旋转会导致螺栓的轴力降低。另外, FEM分析与实验结果相当一致。
- (4) 使用FEM分析和密封垫片基础数据, 可以发现管法兰公称直径越大, 则内力系数越小、泄漏量越大的趋势。
- (5) No.GF300在负荷推荐面压35MPa时, 可以发挥比使用膨胀石墨填料缠绕式密封垫片更高的密封性。通过强度计算可知, 无法运用缠绕式密封垫片的管法兰连接体在使用No.GF300时, 可以获得比使用缠绕式密封垫片时更好的密封性。

8. 参考文献

- 1) T. TAKAKI, K. SATO, Y. YAMANAKA, T. FUKUOKA, "Effects of Flange Rotation on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections", ASME PVP Vol.478, (2004), pp.121-128.
- 2) T. SAWA, N. OGATA, T. NISHIDA, "Stress Analysis and Determination of Bolted Preload in Pipe Flange Connections with Gasket under Internal pressure", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.124, (2002), pp.22-27.
- 3) T. KOBAYASHI, T. NISHIDA, Y. YAMANAKA, "Effect of Creep-Relaxation Characteristics of Gaskets on the Bolt Loads of Gasketed Joints", ASME PVP Vol.457, (2003), pp.111-118.
- 4) 厚生劳动省“对劳动安全卫生法施行令等进行部分修订的法令”, 政令第349号,(2008).
- 5) 日本华尔卡工业株式会社“密封垫片”, 产品目录 No.YC08,(2016).
- 6) 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).
- 7) K. SATO, T. SAWA, T. KOBAYASHI, "FEM STRESS ANALYSIS of Long-term Sealing Performance for Bolted Pipe Flange Connections with PTFE Blended Gaskets under Elevated Temperature", PVP2016-63372, Proceeding of ASME PVP 2016 Conference, (2016).
- 8) K. SATO, T. SAWA, R. MORIMOTO, T. KOBAYASHI, "FEM Stress Analysis and Mechanical Characteristics of Bolted Pipe Flange Connections with PTFE Blended Gaskets Subjected to External Bending Moments and Internal Pressure", PVP2017-65332, Proceeding of ASME PVP 2017 Conference,(2017).
- 9) Y. TAKAGI, T. SAWA, H. TORII, Y. OMIYA, "Effects of Scatter in Bolt Preload on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections Under Internal Pressure (Case Where the Nominal Diameter of Pipe Flange Connection is 20")", PVP PVP2010-25499, Proceeding of ASME PVP2010 Conference, (2010).
- 10) Y. TAKAGI, T. SAWA, H. TORII, Y. OMIYA, "Effects of Scatter in Bolt Preload on the Sealing Performance of Pipe Flange Connections Under Internal Pressure (Case Where the Nominal Diameter of Pipe Flange Connection is 20")", PVP2010-25499, Proceeding of ASME PVP2010 Conference, (2010).
- 11) Y. OMIYA, T. SAWA, Y. TAKAGI, "Stress Analysis and Design of Bolted Flange Connections under

Internal Pressure”, PVP2014-28606, Proceeding of ASME PVP 2014 Conference, (2014).

- 12) Y. OMIYA, T. SAWA, “Stress Analysis and Sealing Performance Evaluation of Bolted Pipe Flange Connections with Smaller and Larger Nominal Diameter under Repeated Temperature Changes”, PVP2014-28730, Proceeding of ASME PVP 2014 Conference, (2014).
- 13) 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).
- 14) Japanese Industrial Standards. JIS B 2490 “Test method for sealing behavior of gaskets for pipe flanges”, (2008).
- 15) ANSI/ASME B 16.5, “Pipe Flanges and Flanged Fittings”, (1996).



佐藤 广嗣
研究开发本部
第1商品开发部



郑 兴
中国综合研究所
密封工程开发小组



泽 俊行
广岛大学 名誉教授