

新型ガスケットレスフランジの応用

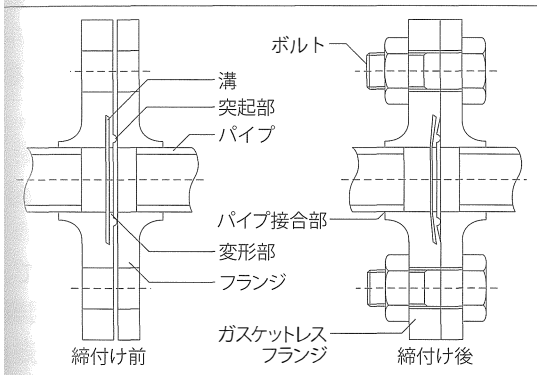
野田尚昭・九州工業大学工学部機械知能工学科教授
 山田真裕・九州工業大学大学院工学研究科
 平田敏也・九州工業大学工学部機械知能工学科
 名川政人・大喜工業技術顧問
 白石文隆・大創技術開発室室長

流体輸送を目的とする工業用配管は、工業プラントや機械構造物などの至るところに用いられている。これらにはいずれも、接続のための手段である工業用配管継手が不可欠である。このような配管継手は、継手部分からの流体漏れを防ぐために、継手間に必ずガスケットを挿入して用いられる。ガスケットは多くの場合に経年劣化を伴うため、継手部から漏れが発生することが避けられず、定期的な点検と保守を必要としている。その損失と補修に膨大な費用と手間が発生している。本稿で取り扱うガスケットレスフランジ(以下 GL フランジ)は、このような従来のガスケットの欠点を補うために考案された¹⁾。

1. ガスケットレスフランジ (GLフランジ)

GL フランジは、図表-1 に示すようにフランジに突起と溝を設けることにより、継手締結

図表-1 ガスケットレスフランジ

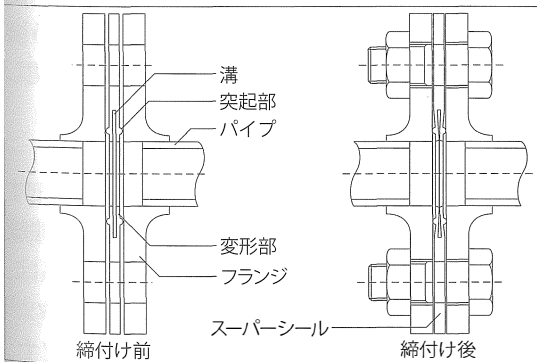


時に主として弾性変形を利用して面粗さなどを吸収し、均一の当たり面によるシール効果を発揮するように工夫されている^{2), 3)}。

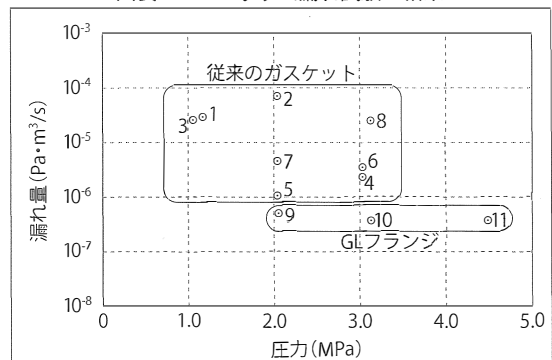
また、GL フランジの原理を応用したスーパーシール(図表-2)も考案され、注目されている。これは従来ガスケットを使用していたところに、溶接も不要で容易に挿入することを可能にしたものである。図表-3 に JIS Z 2331⁴⁾に基づいて行ったヘリウム漏れ試験の結果を示す⁵⁾。

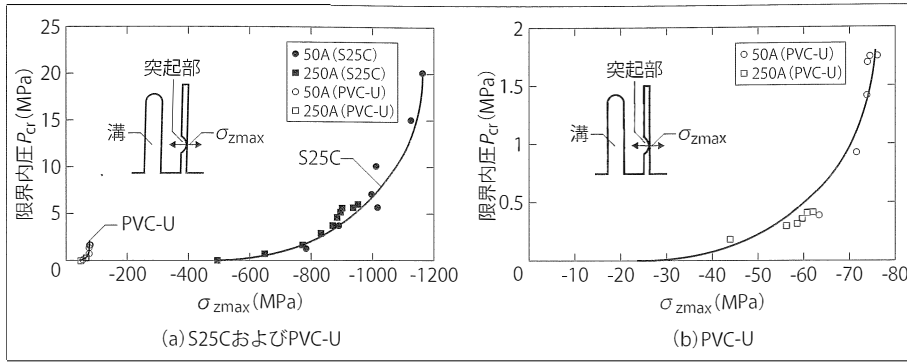
図表-3 に示すように、従来のガスケットを用いたフランジの漏れ量は、試験合格基準値である $1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度であるのに対して、GL フランジでは、漏れ量が 1×10^{-7} から $1 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ あたりと非常に少ない値を示している。すなわち、GL フランジはヘリウムのよ

図表-2 スーパーシール



図表-3 ヘリウム漏れ試験の結果





図表—4
軸方向最大垂直応力と
限界内圧の関係

うな気体に対しても、従来のガスケットに比べ漏れ量が1オーダー以上少なく、また劣化による漏れもないため、明らかにシール効果が優れているといえる。

これまでのGLフランジの研究では、材料としてS25CおよびPVC-Uを用いてきた^{5)~9)}。先の研究で、漏れが生じる限界内圧 p_{cr} が、管の呼び径にかかわらず主として突起部に生じる軸方向最大垂直応力 σ_{zmax} により支配されることが明らかとなっている(図表—4参照)。

本稿ではGLフランジの他の応用例として、食品、飲料などを搬送するパイプ継手部にSUS304製サニタリーGLフランジを用いることを検討した結果を述べる。

2. 食品用サニタリーGLフランジ

食品関係の配管はバクテリアの発生を抑えるため、薬品、熱水、蒸気などによる殺菌が毎日定期的(2~3時間)に行われている。また、香りの違う多品種の食品や飲料などの生産を同じプラントで行うため、プラント内に付着している残った香りを除去する行程が必要であり、このための洗浄も頻繁に行われる。

また構造上、継手部はガスケットとの段差やすき間があり、この部分に食物の残滓が付着しやすいために、殺菌や洗浄の面で細心の注意を払う必要がある。一方、頻繁な殺菌や洗浄のためにガスケットが劣化しやすく、継手部からの漏れやガスケット片の製品への混入が生じる。そのため、その防止策としてプラントを停止し

て、定期的にガスケットを交換する作業に多大の労力と費用を要している。

これまでのGLフランジの研究では、継手“内周”に溝を切った構造を取り扱ってきた。しかし、食品、飲料などの産業プラントにおいては、配管内部に段差やすき間がなく、単一材料でプラントを構成することや、食品衛生上搬送流体の流れがスムーズとなることが望まれている。

そこで、本稿ではサニタリー用配管材料として通常用いられるSUS304を取り上げ、食物の残滓が付着することを防ぐため、継手“外周”に溝を切ったサニタリーGLフランジのシール機構が有効に働く条件や、継手の最適形状を有限要素法(FEM)解析と実験により検討する。

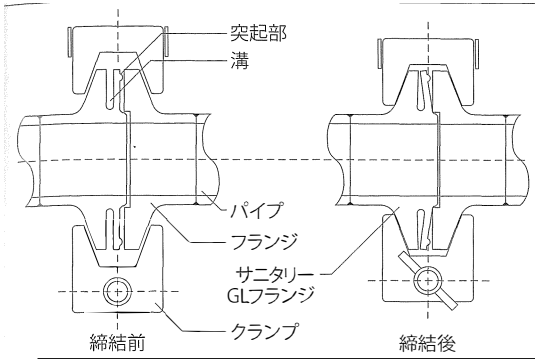
(1) FEM解析方法および結果

図表—5、6にサニタリーGLフランジの寸法図を示す。

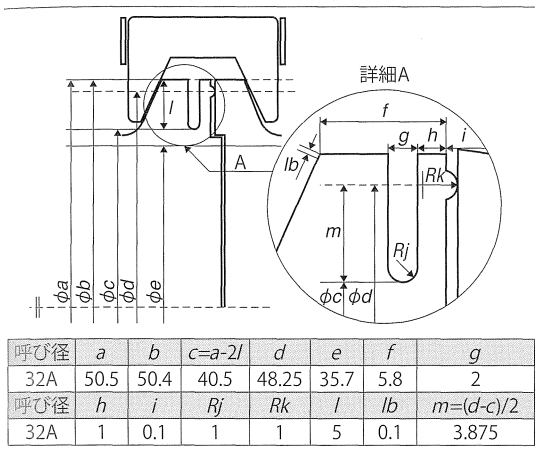
解析は四辺形4節点軸対称要素を用いて、FEMで弾塑性解析した。要素分割の例を図表—7に示す。溝の底と突起部において、応力集中や接触の影響で応力およびひずみに大きな勾配が生じるので、隣接する節点間においての応力、ひずみの値が大きく変化しないよう要素の大きさに配慮した。突起部での接触に関して摩擦は無視できるものと仮定した。

モデル化に当たり、総締付け力を P とし、一様分布締付け力 q ($q = P/\pi b l_b$)が環状に分布するものとする。また、荷重の増分は材料の非線形性を考慮して与えた。応力ひずみの関係は、図表—8に示す室温のSUS304のデータ¹⁰⁾を用いて解析を行った。図表—8には便宜上、

サニタリー GL フランジ

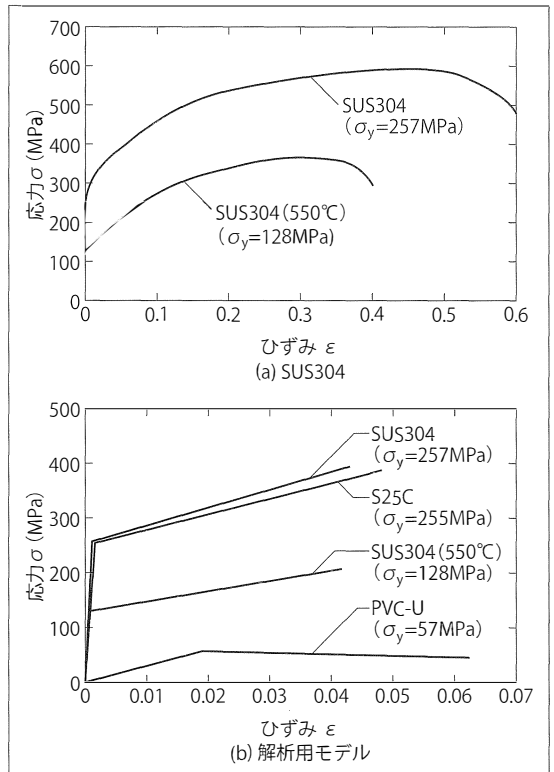


図表-6 寸法図



図表-7 有限要素メッシュ

図表-8 応力-ひずみの関係



後述する SUS 304 の 550℃ の応力ひずみ関係と、先に報告した S25C および硬質塩化ビニルの関係も合わせて示す。

円周方向単位長さ締付け力 $\pi l_b q$ と、突起部に生じる軸方向最大垂直応力 σ_{zmax} の関係を図表-9 に示す。同図表から、同じ円周方向単位長さ締付け力に対して、突起の曲率半径 Rk の小さい方が高い σ_{zmax} が得られる。これは Rk が小さい方が、突起の接触面積が小さくなるためである。

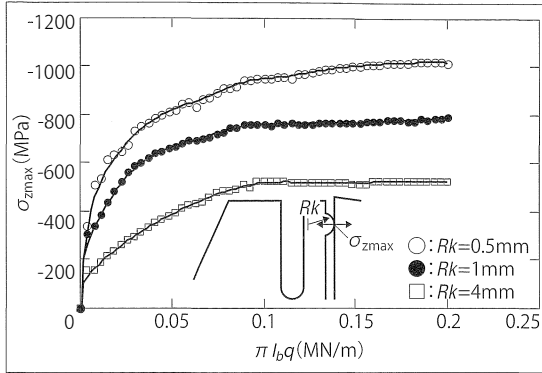
(2) 水圧漏れ試験方法および結果

ここでは、突起の曲率半径 Rk の影響を調べた。図表-10 に実験装置を示す。フランジの締付けは、食品プラントで一般的に用いられているクランプをトルクレンチを用いて行った。また水圧は、同図表に示す装置(キョーワ製キョウワテスター)を用いて負荷した。テスト時間

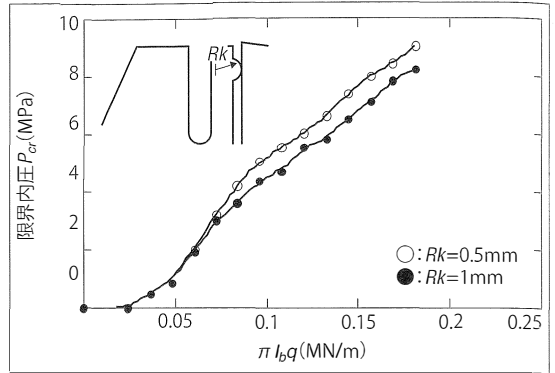
は 10 分で、この間圧力の低下を観察して、圧力の低下が生じない場合には水圧を 0.5MPa ずつ上昇させ、その値を超えると漏れが生じる限界の内圧 p_{cr} を締付け力を変化させて求めた。

図表-11 に、実験によって得られた円周方向単位長さ締付け力 $\pi l_b q$ と、漏洩が生じる限界

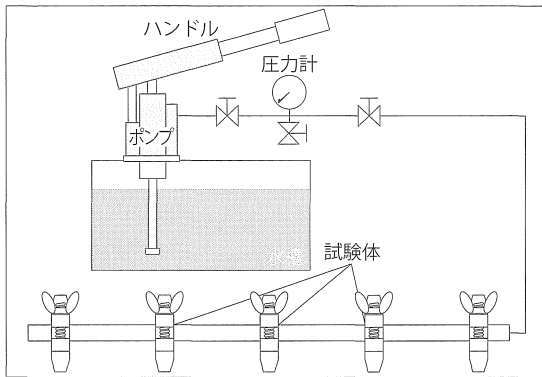
図表—9 円周方向単位長さ締付け力と軸方向最大垂直応力の関係



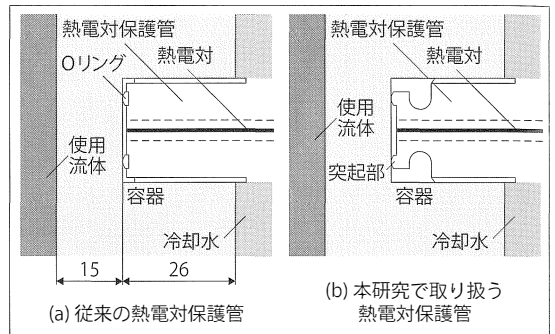
図表—11 円周方向単位長さ締付け力と限界内圧の関係



図表—10 実験装置(水圧漏れ試験)



図表—12 熱電対保護管



内圧 p_{cr} の関係を示す。

$\pi l_b q \leq 0.075 \text{ MN/m}$ 程度までは Rk の影響は見られなかった。これは、低い締付け力では突起の様な接触状態が得られていないためと考えられる。一方、 $\pi l_b q \geq 0.075 \text{ MN/m}$ 程度の締付け力が作用した後は、 $Rk = 0.5 \text{ mm}$ の方が高い水圧までシール効果が得られる。

さらに、クランプをいったん取り外した後、再度締結して繰り返し $\pi l_b q - p_{cr}$ 関係を求めた。しかし、合計3回測定した結果はまったく同じであった。すなわち、繰り返し使用してもシール効果に影響は認められなかった。また、洗浄度試験でも良好な結果を示した¹¹⁾が、誌面の都合上省略する。

3. GLフランジの熱電対保護管への応用

熱電対保護管は、図表—12(a)に示すように、高温流体を含んだ容器内の温度を自動制御す

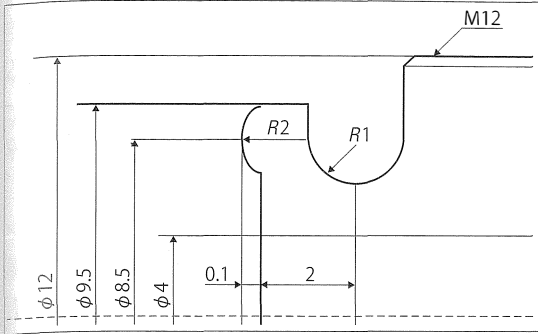
る際に必要とされる。また、容器自体を冷却するために冷却水(図表—12参照)が使用される。それら条件は以下のとおりである。

- ・使用流体：溶銅
- ・流体温度：1000℃
- ・冷却水温度：室温

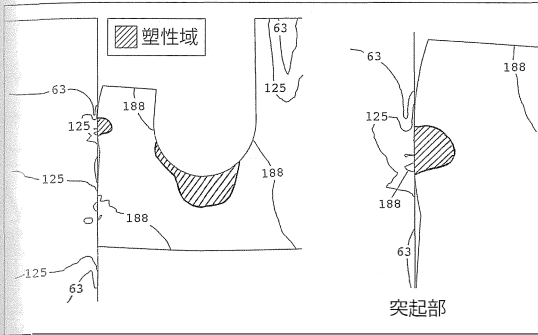
しかしながら、従来の熱電対保護管では容器が高温であるため、ガスケットが変質する。その結果、冷却水が熱電対保護管内に浸入して温度測定が不能となり、自動制御が行えなくなる。本稿で取り扱う熱電対保護管は、図表—12(b)に示すように突起と溝を設けて冷却水の浸入を防いでいる。すなわち、この場合には管の外部にある流体を内部に浸入させないことを目的として、図表—1の通常の場合と異なり、溝と突起部が外側に設けられている。

現在のところ、熱電対保護管の突起部あたりの正確な温度は把握していない。しかしながら、冷却水が循環して、本体を常に冷却するため熱電対保護管本体の温度はさほど上昇しないと考

図表—13 熱電対保護管の寸法図



図表—14 熱電対保護管のミーゼス応力状態



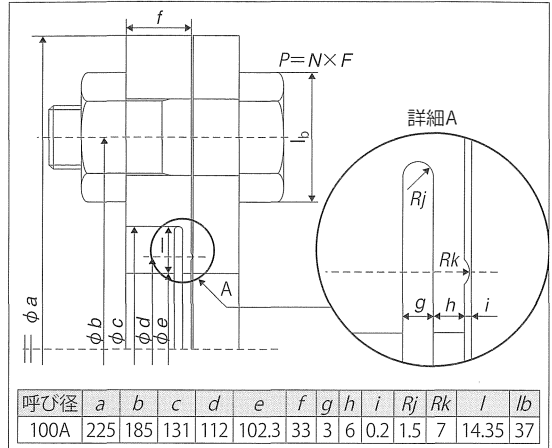
えられる。そこで本稿では、まず簡単にするため、図表—8に示す室温のSUS 304のデータを用いて解析を行った。図表—13に、本稿で取り扱う熱電対保護管の寸法図を示す。

図表—14に、この熱電対保護管を締め付け力7.84kNで締め付けたときのミーゼス応力状態を示す。図表—14から突起部でのミーゼス応力状態を見ると、ある程度の塑性域をもっていることがわかる。この場合、突起部での軸方向最大垂直応力は、 $\sigma_{zmax} = -1261\text{MPa}$ である。図表—4(a)から、これは鉄鋼材料では十分なシール効果の得られる値と考えられる。この熱電対保護管は現在実際に使用中であり、良好なシール効果が得られている。

4. ステンレス製GLフランジを用いた実証実験および結果

鋼線の熱処理には550℃の溶融塩が用いられる。その容器であるソルトバスに溶融塩を搬送するパイプにはステンレス鋼が使用される。その条件を以下に示す。

図表—15 寸法図



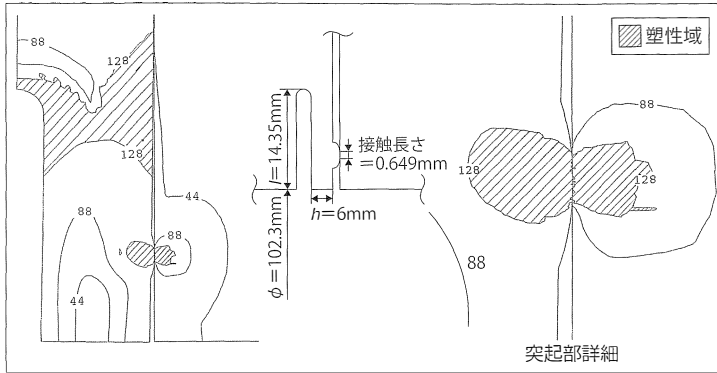
- ① 使用流体：溶融塩(硝酸ナトリウム(NaNO_3)と硝酸カリウム(KNO_3)の混合物)
- ② 流体温度：約550℃
- ③ 使用圧力：0.98MPa
- ④ 使用条件：10日間/月連続して溶融塩を圧送し、他の期間は使用を停止して室温に戻す
フランジ間にはシールのためメタルガスケットが挿入されるが、高温のためガスケットが劣化し、1カ月程度の使用で漏れが生じることが多い。

そこで、本稿では管の呼び径100AのSUS 304製GLフランジを用いて、実際に製鉄所において上記の条件で試験を行い、その実用性を検討した。図表—15にSUS 304製GLフランジの寸法を示す。

実際に先の条件で実証試験を行った結果、6カ月程度の使用で漏れは生じなかった。ここでは、FEM解析によってGLフランジの応力状態を解析し、先のS25C、PVC-Uの結果と比較する。図表—16は、SUS 304製GLフランジを使用時の締め付け力218kNで締め付けた際のミーゼス応力状態を示す。

図表—16から、突起部である程度の塑性域をもっており、相手フランジとの接触面で十分な密着効果が得られていると考えられる。突起部での軸方向最大垂直応力は、 $\sigma_{zmax} = -608\text{MPa}$ である。SUS 304(550℃)では、現在のところまだ十分に実験を行っていないので、

図表一 16 SUS 304 製 GL フランジのミーゼス応力状態 (550°C)



$\sigma_{zmax} - p_{cr}$ の関係を求めるまでには至っていない。しかし、図表一 8 の応力ひずみの関係から、S25C と PVC-U の中間程度の性質を有することが予想できる。したがって、先の S25C と PVC-U の $\sigma_{zmax} - p_{cr}$ の関係を用いて SUS 304 のシール効果を検討する。

図表一 4(a)に示すように、 $\sigma_{zmax} = -608\text{MPa}$ は、材料が S25C であれば、 $p = 0.98\text{MPa} > p_{cr}$ であり漏れが生じる。しかし、材料が PVC-U であれば、 $p = 0.98\text{MPa} < p_{cr}$ で漏れは生じない。高温クリープなどによって、永久に漏れが生じないかどうかは今後さらに検討する余地がある。しかし、従来のガスケットより良好なシール効果が得られる可能性は十分と考えている。

本稿では、先に提案した GL フランジの使用がとくに各分野で期待されていることを考慮して、その種々の応用を考察した。結論をまとめると以下ようになる。

- ① S25C 製 GL フランジを用いて、ヘリウム漏れ試験を行い、その実用性を検討した。その結果、GL フランジは液体だけでなく、ヘリウムのような気体に対しても、従来のガスケットに比べて漏れ量が 1 オーダー以上少なく、また劣化もないことから、明らかにシール効果が優れていることを確認した⁵⁾
- ② サニタリー GL フランジも従来の GL フランジと同様に、その限界内圧 p_{cr} は主として突起部に生じる軸方向最大垂直応力 σ_{zmax} によ

り支配されると考えられる。同じ締付け力を与えた場合、突起の曲率半径 Rk を小さくすることで σ_{zmax} を上昇させることができる。このため、高い限界内圧 p_{cr} を得ることができる

- ③ 熱電対保護管に、GL フランジのように突起と溝を設けた構造について考察した。この熱電対保護管を、締付け力 7.84kN で締め付けたときの突起部での

軸方向最大垂直応力は、 $\sigma_{zmax} = -1261\text{MPa}$ である。これは鉄鋼材料では十分なシール効果が得られる値と考えられる。この熱電対保護管は現在実際に使用中であり、良好なシール効果が得られている

- ④ ソルトバスに約 550°C の溶融塩を搬送するパイプ継手部に SUS304 製 GL フランジを用い、実証実験を行った。その結果、6 カ月程度の使用で継手間から漏れは生じなかった

参考文献

- 1) たとえば、日刊工業新聞(1998、12、2) 37
- 2) 尾辻啓志、名川政人：管継手、特許番号 2849345
- 3) たとえば、山根一真、メタルカラーの時代 vol.5、74-81、小学館
- 4) JIS Z 2231(1992)
- 5) 野田尚昭・名川政人・白石文隆・井上暁史：Sealing Performance of New Gasket-less Flange、Trans.ASME Journal of Pressure Vessels Technology、124(2002)、239-246
- 6) 野田尚昭・武内健一郎・高瀬康・尾辻啓志：新型ガスケットレスフランジおよび弾性変形を利用するガスケットに関する基礎的研究、日本機械学会論文集、66-643、C(2000)、966-971
- 7) 野田尚昭・武内健一郎・名川政人・白石文隆：新型ガスケットレスフランジのシール効果における限界内圧ならびに異なる呼び径の影響について、日本機械学会論文集、66-650、C(2000)、3469-3474
- 8) 野田尚昭・井上暁史・名川政人・白石文隆：硬質塩化ビニル製新型ガスケットレスフランジのシール効果について、日本機械学会論文集、68-674、C(2002)、3069-3075
- 9) 野田尚昭・井上暁史・名川政人・白石文隆：The effect of material difference and flange nominal size on the sealing performance of new gasketless flanges、International Journal of Pressure Vessels and Piping、79(2002)、807-818
- 10) たとえば、ステンレス協会編、ステンレス便覧(第 3 版)、1432
- 11) 平成 13 年度(第 1 次補正予算)即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業「食品用サニタリー新型ガスケットレス管継手と締結装置の開発」、成果報告書(平成 15 年 3 月)、委託者 九州経済産業局、委託先 財団法人飯塚研究開発機構