

日本バルカー工業株式会社 研究開発部 シール開発グループ 野々垣 肇 山邊 雅之 三菱化学株式会社 水島事業所 設備技術部 機械2グループ 森本 吏一

Asbestos-related regulations have virtually eliminated asbestos from gasket products and the industry is now transitioning to mastering safer and more efficient uses of non-asbestos gaskets.

To ensure safety in the long-term use of non-asbestos gaskets, control methods for using non-asbestos gaskets safely and techniques to evaluate and estimate the long-term performance of gasket connections must be developed, compensating for actual data.

In this report, we make predictions on long-term variations in the contact pressure of gasket connections according to stress relaxation tests for flange connections. In addition, we simulate and discuss the advantages of retightening and the effects of uneven clamping.

Keywords: non-asbestos gasket, relaxation, retightening, uneven clamping

バルカー技術誌 Winter 2011

1. はじめに

石綿規制によるガスケットの非石綿化もほぼ完了し、非石 綿ガスケットをより安全に、効率よく使いこなすステップに移行 しつつある。しかしながら、従来石綿ガスケット製品が、長年 にわたる使用実績により長期使用に対する信頼性を得てい たのに対して、非石綿ガスケットの使用実績は未だ乏しく、ま た、石綿ガスケットとは異なる挙動を示すことがあり、これまで と違った管理方法が必要とされる。非石綿ガスケットの長期 使用における安全性に対する信頼を得るには、実績に代わ るガスケット締結体の長期性能を評価、推定する技術を構築 するとともに、非石綿ガスケットを安全に使用するための管理 手法が必要である。

本報では石綿ジョイントシートガスケットの代替品として、広 く使用され始めている PTFE 系シートガスケットにおいて、フ ランジ締結体の応力緩和試験によって、長期的なガスケット 締結体の面圧変動の予測を行うとともに、増締めや片締め の模擬実験を行い、それぞれの効果、影響について確認、 考察した。

供試ガスケットとしては、当社の特殊充填材入り PTFE ガ スケットであるバルカーNaGF300(以下、GF300)と、二軸延 伸 PTFE ガスケット(以下、延伸 PTFE)とした。

2. 気密開始面圧と常温応力緩和試験

ガスケット締結体は高温での使用や長期使用において、 応力緩和およびクリープ現象による面圧低下が生じ、初期締 付力を維持することができない。面圧がシールを保持し得る 最低面圧(気密限界面圧)を下回れば漏洩を生じることに なり、そこがガスケットの寿命であると考えることができる。初 期締付力が高いほど、残留面圧は高く長寿命となるが、フラ ンジやボルト強度をいたずらに高めることは経済的な負担も 大きくなり、またガスケットの耐圧壊荷重にも限界があるため、 最適な締付力の見極めが必要となる。

ここではシールを確保する最小限の面圧(気密開始面 圧)を初期締付面圧とし、面圧とシール特性の経時変化の 確認を行った。



Fig.1 気密開始/常温応力緩和試験概要図

Table.1 気密開始/常温応力緩和試験条件

試験方法	JIS 10K 50A RF
試験温度	常温
ガスケット	GF300,延伸PTFE 厚さ:1.5mm
フランジ	材質:SS400 シール面粗度:Rz=14.4µm(Ave.)
ボルト (ひずみゲージ付)	寸法:M16×4本 材質:SS400
気密試験	石鹸水発泡法(10min) 流体:N2 ガス 内圧:1.0MPa

Fig.1 に試験概要図を、Table.1 に試験条件を示す。締 結ボルトに取り付けたひずみゲージにより、ボルト軸力を測定 し、ガスケット面圧とした。これにより、初期締付力の測定、お よび面圧変動を測定した。まず、ガスケット面圧 20MPaとな るように JIS B 2251- (2008)¹¹に従いボルト締結を行った(以 下、ボルト締結は同規格準拠とする)。次に、窒素ガス内圧 1.0MPaを負荷し、石鹸水発泡法にてシール試験を行った。 発泡が見られた場合は2.5MPaごとの増締めを行った。発 泡が見られなくなった面圧を気密開始面圧とし、面圧(ボルト 軸力)の経時変化を確認する応力緩和試験に移行した。ま た24時間、96時間、200時間経過後にシール試験を行い、 シール特性の経時変化も確認した。

Table.2 気密開始面圧確認試験結果

ガスケット面圧	漏洩状況	
	GF300	延伸PTFE
20.0 MPa	Leak	Leak
22.5 MPa	Leak	Seal
25.0 MPa	Seal	Seal



Fig.2 常温応力緩和試験結果

Table.2 に気密開始面圧測定結果を、Fig.2 に常温応力 緩和試験結果を示す。気密開始面圧は GF300 が 25.0MPa、 延伸 PTFE は 22.5MPa であった。しかしながら、Fig.2 に 示すように GF300 は 200 時間経過後も漏洩は生じなかった のに対し、延伸 PTFE は面圧低下が大きく、24 時間経過後 に漏洩が生じたため、応力緩和試験時における延伸 PTFE の初期締付面圧は、GF300 と同じ 25.0MPa とした。

3. 高温応力緩和試験

3-1) 熱サイクルによる影響

ガスケット締結体の応力緩和およびクリープによる面圧低 下は、高温下でより大きくなり、熱サイクルが負荷されることに よってさらに加速される。ここでは、200℃条件における面圧 挙動、および熱サイクル負荷による挙動の変化を確認すると 同時に、シール特性についても確認を行った。



Fig.3 高温応力緩和試験/気密試験装置概要図

Fig.3に試験概要図を、Table.3に試験条件を示す。まず、 気密開始面圧である 25.0MPa にてガスケットをフランジにボ ルト締結した。面圧はボルトに取り付けたひずみゲージにて、 ボルト軸力として確認した。次に、N2ガスを1.0MPaの内圧 で負荷し、シール試験を行った。シール試験は N2 ガス内圧 供給側にマスフローメーターを取り付け、内圧を一定に保つ ことで、ガス供給流量=漏洩量として測定を行った。シールの 基準としては、JIS B 2490- (2008) 2)を参考に、1.7×104Pa・ m³/s (0.1cc/min) 以下の漏洩量のときにシールとした。これ は石鹸水発泡法による検知感度と同等であるとされている。 漏洩のないことを確認したのち、電気炉にて200℃の加熱を 行い、ガスケット面圧の経時変化を測定した。加熱条件とし て、200℃一定に加熱し続けた場合と、200℃-常温の熱サイ クルを負荷した場合とで、熱サイクルによる面圧低下の影響 を確認した。また、熱サイクル負荷時に最も面圧の低下した タイミングで、サイクルごとにシール試験を実施した。なお、熱

試験方法	JIS 10K 50A RF
試験温度	200℃ (24時間サイクル)
ガスケット	GF300,延伸PTFE 厚さ:1.5mm
フランジ	材質:SS400 シール面粗度:Rz=14.4µm(Ave.)
ボルト (ひずみゲージ付)	寸法∶M16×4本 材質∶SS400
気密試験	マスフローメーター 漏洩感度:1.7×10 ⁻⁴ Pa·m ³ /s 流体:N₂ ガス 内圧:1.0 MPa

サイクルは 24 時間で 1 サイクルとし、昇温が約 2 時間、降温 (冷却)が約 3 時間とした。

Fig.4 に熱サイクル応力緩和試験結果を示す。常温に比べて面圧低下が大きいことがわかる。また、熱サイクルが負荷されることによって、さらに面圧低下が大きくなっている。

熱サイクルにおいて、冷却時に大きな面圧低下が確認された。これは、加熱時にフランジ、ボルト、およびガスケットが 熱膨張し、熱応力がガスケットに負荷されていた状態から、 冷却時の収縮により熱応力が低下するが、ガスケットは 100%復元せず、圧縮永久歪が残るため、結果としてガスケッ ト面圧が低下したものと考えられる。再加熱した時に、熱応 力によりガスケット面圧は再び上昇したが、冷却前の面圧ま では回復しなかった。これはサイクルを繰り返すほど、面圧低 下が大きくなっていくことを示しており、頻繁に熱サイクルがか かる条件では注意が必要である。

また、各サイクルにおいて最も面圧低下の大きい、冷却時 (常温)にてシール試験を行ったが、いずれにおいても基準 である 1.7×10⁴ Pa·m³/s を上回る漏洩は見られなかった。



Fig.4 熱サイクル応力緩和試験結果

No.20

3-2) 気密限界面圧の確認

ガスケット面圧が低下していくと気密を保持できなくなり漏 洩する。この気密を保持しうる最低面圧を気密限界面圧と し、気密限界面圧と応力緩和特性を比較検討することで、ガ スケットの使用限界時期(寿命)を推定することが可能となる と考えられる。ここでは、気密限界面圧を確認する。

前項で実施した熱サイクル試験後に常温に冷却した締結 体において、その残留面圧を100%として、80%、60%、40%、 20%、10%となるよう、段階的にボルト締結を緩めていき、面圧 段階ごとにマスフローメーターによる気密試験を実施した。気 密限界面圧試験結果をTable.4に示す。

面圧 段階 [%]	GF300		延伸PTFE	
	残留面圧 [MPa]	漏洩量 [Pa•m³/s]	残留面圧 [MPa]	漏洩量 [Pa•m³/s]
100	14.5	Seal	5.3	Seal
80	11.6	Seal	4.3	2.0×10 ⁻⁴
60	8.7	Seal	3.2	2.3×10 ⁻³
40	5.8	3.5×10 ⁻⁶	2.1	Over
20	2.9	2.1×10 ⁻⁴	1.1	_
10	1.5	Over	0.5	_

注1) Seal: 1.7×10⁻⁵ Pa·m³/s 以下、Over: 1.7×10⁻³ Pa·m³/s 以上

気密限界面圧は、Table.2 に示した気密開始面圧に比較 してかなり小さな値となった。これは、締結によってガスケット とフランジに "なじみ" が形成され、一旦形成された "なじみ" は低面圧下にて内圧によって破られるまで気密を維持してい るためであると考えられる。また、熱履歴によるガスケットの軟 化により、さらにフランジとの密着性が向上し、"なじみ"がよ くなっていることが考えられる。

ここで、気密限界面圧と、Fig.4 に示した熱サイクル負荷 時の残留面圧を比較検討すると、運転中の残留面圧は気 密限界面圧を大きく上回っており、比較的長期の使用、例え ばプラントの定修工事期間内に使用限界(寿命)を迎えるこ とはないと考えられる。ただし、運転停止時の面圧低下は大 きく、場合によっては気密限界面圧を下回ることも考えられる。 実際にも運転停止後の再起動時に漏洩が発生したケースも いくつか報告されており、この場合は増締めなどの対策が必 要になる。

3-3) 増締め効果の確認

前項で示したように、ガスケット締結体は加熱や熱サイクル の付与によりガスケット面圧が低下することは以前から知られ ており、その対策として増締めが行われてきている。

増締めには運転初期の加熱状態で行うホットボルティング と、運転停止時、再起動前の常温時に行うコールドボルティン グがある。ここではホットボルティングおよびコールドボルティン グの面圧低下に対する効果を確認した。なお、ここでの増締 めは初期締付面圧まで締め直すことを指す。Table.5 に試験 条件を、Fig.5、Fig.6 に増締め試験結果を示す。

Table.5	増締め試験条件
able.J	自和的政策不可

試験方法	JIS 10K 50A RF
試験温度	200℃
ガスケット	GF300,延伸PTFE 厚さ:1.5mm
フランジ	材質:SS400 シール面粗度:Rz=14.4µm(Ave.)
ボルト (ひずみゲージ付)	寸法:M16×4本 材質:SS400
増締めタイミング	ホットボルティング 加熱24時間後(高温状態) コールドボルティング 加熱24時間後冷却時(常温)



Fig.6 延伸PTFE増締めによる面圧変動

ホットボルティングおよびコールドボルティングによる増締めを 実施した場合、増締めを実施しない場合に比べて残留面圧 が高くなり、増締めによる面圧保持の効果が確認された。ま た、ホットボルティングとコールドボルティングを比較した場合、 ホットボルティングによる増締めの場合が、より残留面圧が高 い結果となった。これは、コールドボルティングによる増締めは 常温で行うため、可加熱時の温度変化によりガスケットの剛性 低下が起こり、フローすることによって、ボルト軸力の低下が大 きくなったと考える。一方、ホットボルティングは、高温状態にて 増締めを行うため、剛性低下したガスケットを締付けることに なり、フローさせながら締付けを行うため、増締め後のフロー が少なく、応力緩和が小さくなったものと推測する。

以上のように、ホットボルティングによる増締めが、熱履歴に よる面圧低下に対して、より効果的であるという結果を得た。 しかしながら、ホットボルティングはガスケットが剛性低下(軟 化)した状態での増締めであるため、過剰締付によるガスケッ ト破壊に十分注意し、トルク管理にて行うことを推奨する。ま た、面圧が最も下がるのは冷却時であり、この時点でコールド ボルティングによる増締めを実施することで、再起動時の漏洩 を防止する効果が高いものと考えられる。

3-4) 初期締付時のボルト軸力分布(片締め)の影響

多数本ボルトからなる締結体であるフランジ継手の締付け には、トルク法が広く用いられているが、トルクレンチを注意深 く使用しても、ネジ部品各部の摩擦係数のばらつきなどにより、 締付力のばらつき(片締め)が生じる。JIS B 2251 - (2008) では、少なく見積もっても±15%の締付力のばらつきが生じる としている。



※ガスケット面圧25MPaとなるボルト軸力(27.0kN)を 100%とし、±20%の片締めを与えた

Fig.7 フランジ締結体片締めボルト締付

本項では、Fig.7 に示すように ±20%の片締めにて締付け たフランジ締結体のボルト軸力挙動の経時変化を評価し、片 締めによる応力緩和挙動への影響を確認した。主な試験条 件を Table.6 に示す。

Table.b 万御の試験余作

試験方法	JIS 10K 50A RF
試験温度	常温
ガスケット	GF300,延伸PTFE 厚さ:1.5mm
フランジ	材質:SS400 シール面粗度:Rz=14.4µm(Ave.)
ボルト (ひずみゲージ付)	寸法:M16×4本 材質:SS400
初期締付ボルト軸力 および軸力分布	Fig.7参照 ガスケット面圧25MPaとなる ボルト軸力(27.0kN)を100%とし、 ±20%の片締めを与えた

Fig.8、Fig.9に初期締付時にボルト軸力分布(片締め)を 与えた場合の軸力変動経時変化を示す。比較として片締め なしの結果を併記する。締付時に片締めを行ったフランジ締 結体のボルト軸力の挙動は、初期軸力が大きいボルトほど、 その後の軸力低下が大きくなる傾向となった。ただしボルト軸 力大小の順位列は変わることはなく、これは一般的なガスケッ トの応力緩和挙動と同傾向であった。また、軸力を100%とし たボルトは、片締めなしの場合の軸力挙動と一致しており、ボ ルト軸力分布に影響されないことが確認された。



すなわち、初期締付において片締めが生じた場合は、その 最も小さいボルト軸力がガスケット寿命を左右すると考えられ、 初期締付力を十分に与えることが肝要となる。 No.20



Fig.9 延伸PTFE片締め時のボルト軸力変動

4. 今後の展開と課題

ガスケット締結体の諸条件における面圧挙動を、比較的 簡便な実験手法において明らかにすることができた。さらに 実機で想定されるさまざまな条件、現象を模擬し、実験して いくことで、非石綿ガスケットを安全に使用、管理する手法を 構築していくことができるものと考える。 しかしながら、実機にて使用される温度、圧力、流体など の条件は多種多様であり、すべてを網羅することは現実的 ではない。また、大口径の実験は困難であるなど、実験手法 にも制限がある。これらの問題については、有限要素解析 (FEA)によるガスケット締結体の長期特性予測手法の開発 が進んでおり³⁾、これらと組合せることによってより確度の高 い有益なデータを示すことができるものと考えられる。

本稿は日本工業出版社「配管技術誌」 第52巻第7号 (通巻 696 号)に掲載された論文を転載したものである。

5. 参考文献

- 1) JIS B 2251 (2008) フランジ継手締付方法
- JIS B 2490 (2008) 管フランジ用ガスケットの密封特性試 験方法
- 3) 佐藤 広嗣, 野々垣 肇, 黒河真也, 出口 聡美, バルカー 技術誌, No.17, 2-7, (2009).

No.20