

〈技術レポート〉

大口径グラシールボルテックスガasketの 圧縮曲線の説明

浜松研究所 MD部門 シール材分野 花島完治

内外輪付大口径グラシールボルテックスガasketの圧縮荷重について検討した結果、フープ材の厚さ、フィラー材の密度、内輪の幅が圧縮荷重に大きく影響を与え、圧縮曲線は4段階に分かれることが分かった。そして、フィラー材の密度、内輪の幅、ガasketサイズを段階的に変更した実験を行い、圧縮荷重をフィラー材の密度、内輪の幅、ガasketサイズ及び厚さの関数として表し、圧縮試験を実施できない大口径のガasketの圧縮曲線を推定することが可能となった。

1. はじめに

電力、石油・石油化学等で用いられる熱交換器・反応容器は、近年、性能・効率を上げるために大型化し、使用条件も高温・高圧化している。これらに用いられるガasketとしては、高温・高圧の内部流体をシールすることができ、フランジ変形への追随性が良く、ガasketの交換作業も容易な膨張黒鉛を使用した内外輪付うず巻形ガasket（弊社グラシールボルテックスガasket）が選定されることが多くなってきている。しかし、うず巻形ガasketは大口径（φ600以上）になると締め付け時の面圧が低下する傾向があり、シール可能な面圧を確保できない場合がある。

そこで、弊社の大口径内外輪付グラシールボルテックスガasketについて、圧縮荷重に影響を与える要因の解明と実験式の算出を行い、これらの結果を基に圧縮荷重の大きい製品仕様を確立することができたので、ここに報告する。

2. グラシールボルテックスガasketの構造

内外輪付グラシールボルテックスガasketの構造を図1、図2に示す。

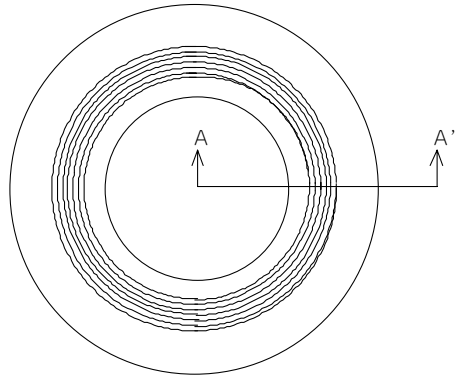


図1 内外輪付グラシールボルテックスガasket

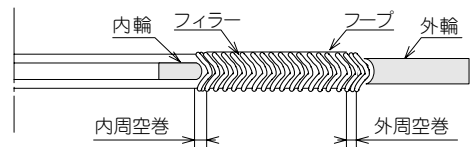


図2 A-A' 断面図

3. 圧縮試験

3.1 試験装置

試験は、写真1に示す10MNまで圧縮可能な油圧式圧縮試験機に、外径1,600mmの上部フランジと下部フランジを取り付けて行った。なお、両試験フランジには、実際のフランジと同様にボルト穴に相当する箇所に直径50mmの丸穴が32ヶ所開けられている。

3.2 試験方法

試験は図3に示すように、ガスケットを下部フランジの上に置き、ボルトに相当する直径50mmのSUS304製の丸穴に丸棒を入れ、その上に上部フランジを載せ、圧縮試験機で圧縮することによって行った。このとき、圧縮荷重と、圧縮試験機の外側に取り付けられた変位計で圧縮量を測定することによって、ガスケットの圧縮曲線を求めた。試験条件を表1に示す。



写真1 10MN油圧式圧縮試験機

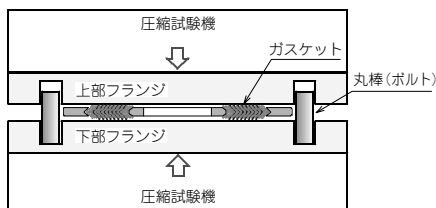


図3 試験フランジと圧縮試験機

4. 圧縮荷重に影響を与える要因の検討

圧縮荷重に影響を与える要因として、フープ材（テープ状の金属製薄板）の厚さ、フィラー材（膨張黒鉛）の密度、空巻数（内周）、内輪の幅を取り上げ、それぞれ条件を変更して圧縮試験を実施した。

4.1 試料

圧縮試験を行った試料の仕様を表2に、検討した因子を表3に示す。

表1 試験条件

項目	内容
ボルト	SUS304 50の丸棒
上部フランジ	S45C 1600 表面粗さ 12.5S
下部フランジ	S45C 1600 表面粗さ 12.5S
圧縮速度	2MN/min
圧縮量	ガスケット厚さ4.0mmまで圧縮

表2 試料の仕様

項目	内容
試料	1300 内外輪付グラシールボルトテックスガスケット
試料寸法	1292(本体内径)× 1342(本体外径)× 6.4(厚さ)
フープ材	SUS304 幅8mm, 厚さ0.2mm, 0.3mm
フィラー材	膨張黒鉛 密度1.2g/cm ³ , 1.7g/cm ³
内周空巻	3周, 9周
外周空巻	3周
内輪	SUS304 厚さ4mm, 幅12.5mm, 25mm, 30mm, 50mm
外輪	SUS304 厚さ4mm, 幅30mm

表3 検討した因子

No.	フープ厚さ	フィラー密度	内周空巻	内輪幅
1	0.2mm	1.2g/cm ³	3周	30mm
2	0.3mm	1.2g/cm ³	3周	30mm
3	0.2mm	1.7g/cm ³	3周	30mm
4	0.2mm	1.2g/cm ³	9周	30mm
5	0.3mm	1.2g/cm ³	3周	12.5mm
6	0.3mm	1.2g/cm ³	3周	25mm
7	0.3mm	1.2g/cm ³	3周	50mm

4.2 試験結果

1) フープ材の厚さ

0.2tの厚さのフープ材を用いた試料1と0.3tの厚さのフープ材を用いた試料2の面圧-変位曲線を図4に示す。フープ材の厚さを0.2mmから0.3mmに変更すると、ガスケットの厚さが5~6mmのところの面圧が高くなった。フープ材の厚さを厚くすることによりガスケットの圧縮荷重を大きくすることができる。

2) フィラー材の密度

フィラー材の密度を1.2g/cm³とした試料1と、フィラー材の密度を1.7g/cm³とした試料3の面圧-変位曲線を図5に示す。フィラー材の密度を1.2g/cm³から1.7g/cm³に上げると、面圧が著しく高くなり、ガスケットの圧縮荷重の改善に最も効果があることが分かる。

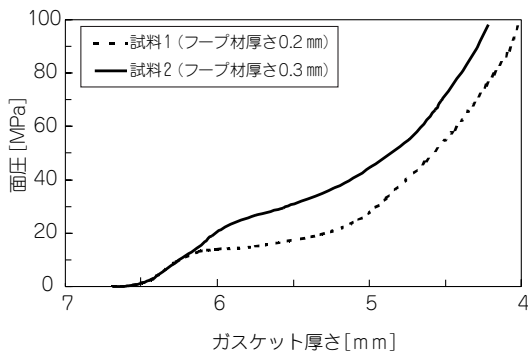


図4 圧縮曲線（フープ材の厚さの影響）

3) 内周の空巻数

内周の空巻を3周にした試料1と9周にした試料4の面圧-変位曲線を図6に示す。内周の空巻を3周から9周に変更しても面圧にはほとんど変化が認められない。

4) 内輪の幅

内輪の幅を12.5, 25, 50mmにした試料5, 6, 7の面圧-変位曲線を図7に示す。

内輪の幅は圧縮時の厚さが5mm以下の場合に面圧に大きく影響する。

以上の検討結果から、大口径内外輪付グラシールボルトテックスガスケットの圧縮荷重に影響する要因は、フープ材の厚さ、フィラー材の密度、内輪の幅であることが理解できる。

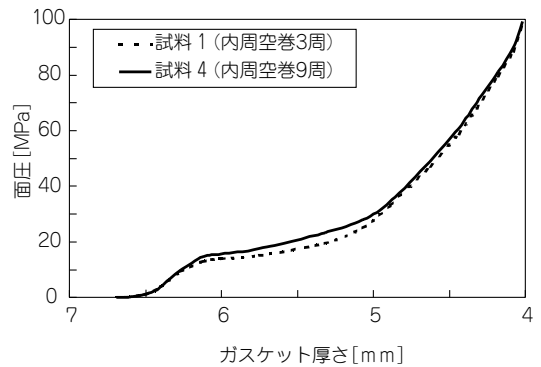


図6 圧縮曲線（内周の空巻数の影響）

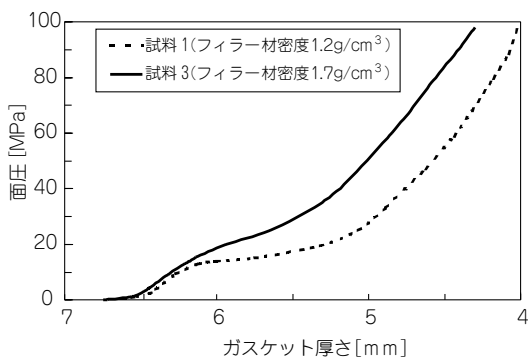


図5 圧縮曲線（フィラー材の密度の影響）

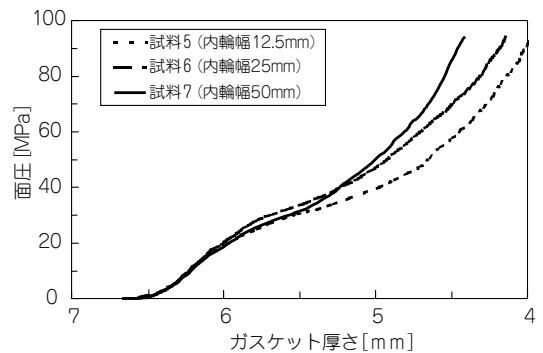


図7 圧縮曲線（内輪幅の影響）

5. 圧縮曲線に関する考察

前章の実験の結果，大口径内外輪付グラシールボルテックスガasketの圧縮曲線は図8のような4つの変曲点があり5段階に分けることができる。

また，ガasketの圧縮荷重に影響を与える3因子のうち，フープ材の厚さを0.3mmとすることは特に問題はないが，フィラー材の密度を上げるとは製造上の問題があり，また，内輪幅を大きくすることはコストが高くなるという問題がある。そこで，フィラー材の密度と内輪幅の圧縮荷重に与える影響を定量的に把握し，図8の圧縮曲線の各段階を，フィラー材の密度 x (g/cm^3)，内輪幅 y (mm)を変数とする実験式で近似することで最適化を試みた。

5.1 試料

圧縮試験を行った試料の仕様を表4に示す。フィラー材の密度，内輪幅は表5に示すようにそれぞれ4水準，3水準とし，それらを掛け合わせた12通りの試料を用いた。

5.2 試験結果

それぞれの試料の圧縮曲線（図示省略）から，図8に示すように圧縮曲線を4段階の直線①，②，③，④で近似した時の傾き a と，厚さが4.5mmの時の切片 b を求め，平均を計算すると以下のようになった。

- 第1段階： $a = -6.2$ ， $b = 12.4$
- 第2段階： $a = -63.4$ ， $b = 114.8$
- 第3段階： $a = -19.7$ ， $b = 56.5$
- 第4段階： $a = -76.1$ ， $b = 82.2$

5.3 結果の考察

各段階別にガasketに生じる現象について考察した。

1) 第1段階は，図4～7に示すように厚さが約6.4mmのところまで終わり，面圧も小さいことから，ガasket本体のそり及び厚さのバラツキを矯正する段階である。傾き a ，切片 b とも絶対値が小さく，差もそれ程大きくないので，第1段階における傾き，切片としては，それぞれの平均をとつ

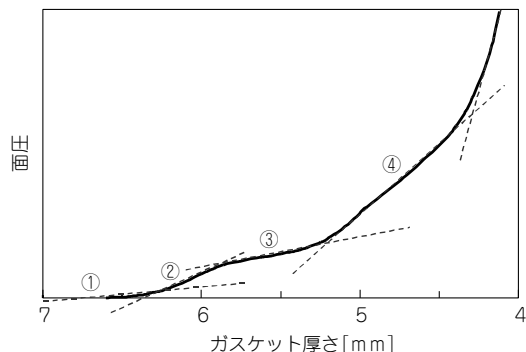


図8 内外輪付グラシールボルテックスガasketの圧縮曲線モデル

表4 試料の仕様

項目	内容
試料	1300 内外輪付グラシールボルテックスガasket
フープ	SUS316 厚さ：0.3t
フィラー	膨張黒鉛 厚さ：0.25mm
内外輪材質	SUS304 外輪幅：30mm
内外周空巻	3周

表5 フィラー材の密度と内輪幅の水準

項目	水準			
	1	2	3	4
フィラー材の密度 X [g/cm^3]	1.20	1.35	1.50	1.65
内輪幅 Y [mm]	30	40	50	-

て $a = -6.2$ ， $b = 12.4$ が得られた。

2) 第2段階は，図4に示すようにフープ材の厚さが厚くなると第3段階への移行が遅くなり，図5に示すようにフィラー材の密度が大きくなると傾きが大きくなり，また，図4～7に示すように厚さが6.4～6.0mmのところまで起こることから，ガasketの本体部分が圧縮され厚さが薄くなる段階である。この段階では内輪の幅の影響は小さいため，一定であるとして，傾き，切片は，フィラー材の密度 x の関数として $a = -30.1x - 20.5$ ， $b = 66.4x + 20.2$ となる。

3) 第3段階は，図4に示すようにフープ材の厚さが厚くなると高い値で始まり，図5に示すようにフィラー材の密度が大きくなると傾きが大きくなり，さらに図7に示すように内輪の幅も多少影響

していることから、本体部分がさらに圧縮されるとともに、内輪が本体からの側圧を受けてねじれ変形を起こす段階であると考えられる。しかしながら、フィラー材の密度が大きくなるほど切片が大きくなる傾向が見られるが、内輪幅の影響は明確でない。そこで、第3段階の傾き、切片としては、切片だけがフィラー材の密度 x の影響をうけるとして $a = -19.7$, $b = 27.3x + 17.5$ が得られる。

4) 第4段階は、図7の内輪の幅が最も大きく影響することから、内外輪がねじれて圧縮試験機の上・下面に当たり、ねじれが強制的に戻されるとともに、内輪が収縮する段階と考えられる。フィラー材の密度が大きくなるほど切片が大きくなり、内輪の幅が大きくなるほど、傾きと切片が大きくなる傾向が見られる。従って第4段階の傾き、切片としては、フィラー材の密度 x , 内輪の幅 y に影響されるとして $a = -0.970y - 37.3$, $b = 60.0x + 0.772y - 33.1$ が得られる。

以上の結果をまとめると、圧縮曲線の各段階毎のガスケットの状態は表6のようになり、また、各段階別の圧縮荷重 σ [MPa] は、フィラー材の密度を x [g/cm³], 内輪の幅を y [mm], 圧縮時のガスケット厚さを t [mm] とすると表7のよう

になる。

フィラー材の密度が 1.5g/cm³, 内輪の幅が 50mm のガスケットについて圧縮試験を行い、圧縮曲線の推定式と実験値を図9に示した。これより、推定式と実験値はよく一致することが確認できた。

6. ガスケットサイズと圧縮曲線

前章での検討から、φ1300内外輪付グラシールボルテックスガスケットの圧縮曲線をガスケットの仕様から予測し、実験値とほぼ一致することを確認した。しかしながら、実際に使われるガスケ

表7 各段階の圧縮曲線

段階	圧縮曲線
1	$= -6.2(t - 4.5) + 12.4$ $= -6.2t + 40.3$
2	$= (-30.1x - 20.5)(t - 4.5) + 66.4x + 20.2$ $= -(30.1x + 20.5)t + 202x + 112$
3	$= -19.7(t - 4.5) + 27.3x + 17.5$ $= -19.7t + 27.3x + 106$
4	$= (-0.970y - 37.3)(t - 4.5) + 60.0x + 0.772y - 33.1$ $= -(0.970y + 37.3)t + 60.0x + 5.14y + 135$

表6 各段階ごとのガスケットの状態

段階	略図	状態	影響する項目
①		本体のそり及び厚さのバラツキの矯正	・本体のそり ・厚さのバラツキ
②		本体部分（フープ材とフィラー材）の圧縮	・フープ材の強度 ・フィラー材の密度
③		本体部分の側圧による内外輪のねじれ変形	・フープ材の強度 ・フィラー材の密度 ・内外輪の強度・幅・厚さ
④		内外輪のねじれ変形の戻りによる面圧上昇	・フィラー材の密度 ・内外輪の強度・幅・厚さ

表8 試料の仕様

項目	内容
試料	内外輪付グラシールボルトテックスガスケット
ガスケットサイズ	400, 700, 1000, 1300
フープ	SUS316 厚さ: 0.3mm
フィラー	膨張黒鉛 厚さ: 0.25mm 密度: 1.2g/cm ³ , 1.65g/cm ³
内外周空巻	3周
内外輪	SUS 304 外輪幅: 30mm 内輪幅: 30mm, 50mm

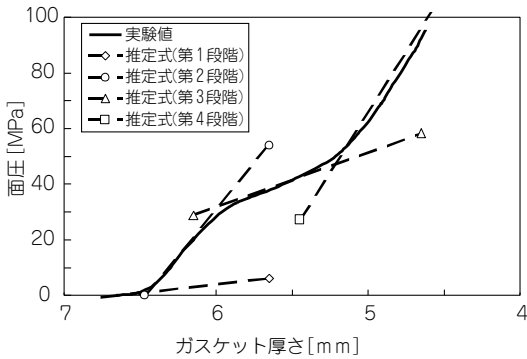


図9 圧縮曲線の推定式と実験値

ットは各種のサイズのものがあり、特にφ1300以上のものは圧縮試験機の寸法上の制約から実験することが困難であるため、そのような大口径品の圧縮曲線を予測する必要がある。

そこで、ガスケットサイズの圧縮曲線に与える影響を把握するために、4種類のガスケットサイズの試料を用いて圧縮試験を行った。

6.1 試料

試料は、ガスケットサイズ、フィラー材の密度、内輪の幅を変動させたものを用いた。試料の仕様を表8に示す。

6.2 試験結果

それぞれの試料の圧縮曲線（図示省略）から前章と同様に各試料の圧縮曲線を4段階に分け、それぞれを直線に近似した時の傾き a と厚さが4.5mmの時の切片 b を求め、平均値を計算すると以下ようになる。

- 第1段階: $a = -7.3, b = 16.2$
- 第2段階: $a = -89.1, b = 177.3$
- 第3段階: $a = -32.0, b = 84.7$
- 第4段階: $a = -86.8, b = 143.0$

6.3 結果の考察

本体のそり及び厚さのばらつきを矯正する第1段階は、ガスケットサイズが小さくなるほど矯正するのに必要な面圧が大きくなるため、傾き・切片は大きくなっている。本体部分を圧縮する第2段階は、ガスケットサイズによる明確な影響は認

められなかった。内外輪がねじれて変形する第3段階は、ガスケットサイズが小さくなるほど傾き・切片が大きくなる傾向が認められる。内外輪のねじれ変形の戻りが生じる第4段階も同様にガスケットサイズが小さくなるほど傾き・切片が大きくなっているが、特にガスケットサイズがφ400の時に著しく大きくなっている。以上のことから、各段階の傾き a 、厚さが0mmの時の切片 b_0 とガスケットサイズ z の関係を以下のように求めた。

- 第1段階: $a = -5.85 \times 10^3/z + 1.09$
 $b_0 = 3.93 \times 10^4/z - 7.10$
- 第3段階: $a = 6.76 \times 10^{-3}z - 37.8$
 $b_0 = -5.11 \times 10^{-2}z + 272$
- 第4段階: $a = -1.93 \times 10^7/z^2 - 39.1$
 $b_0 = 1.08 \times 10^8/z^2 + 266$

また、フィラー材の密度と内輪幅についても、第5章と同様の傾向が見られ、フィラー材の密度が第2段階の傾き・切片、第3段階の切片、第4段階の切片に、内輪の幅が第4段階の傾き・切片に大きく影響することが確認できた。

以上の結果をまとめると、各段階別の圧縮荷重 σ [MPa] は、フィラー材の密度を x [g/cm³]、内輪幅を y [mm]、ガスケットサイズを z [mm]、圧縮時のガスケット厚さを t [mm] とすると、表9のような関係が得られた。

以上の検討結果から、圧縮試験を実施できない大口径のガスケット、例えば、φ4000の内外輪付グラシールボルトテックスガスケットについて、

表9 各段階の圧縮曲線

段階	圧縮曲線
1	$= [- 5.83 \times 10^3 (1/z - 1/1300) - 6.2] t + 3.93 \times 10^4 (1/z - 1/1300) + 40.3$ $= (- 5.83 \times 10^3/z - 1.70) t + 3.93 \times 10^4/z + 10.1$
2	$= -(30.1x + 20.5) t + 202x + 112$
3	$= [6.76 \times 10^{-3} (z-1300) - 19.7] t + 27.3x - 5.11 \times 10^{-2} (z-1300) + 106$ $= (6.76 \times 10^{-3} z - 28.5) t + 27.3x - 5.11 \times 10^{-2} z + 172$
4	$= [- 0.970y - 1.93 \times 10^7 (1/z^2 - 1/1300^2) - 37.3] t + 60.0x + 5.14y + 1.08 \times 10^8 (1/z^2 - 1/1300^2) + 135$ $= (- 0.970y - 1.93 \times 10^7/z^2 - 25.9) t + 60.0x + 5.14y + 1.08 \times 10^8/z^2 + 71.0$

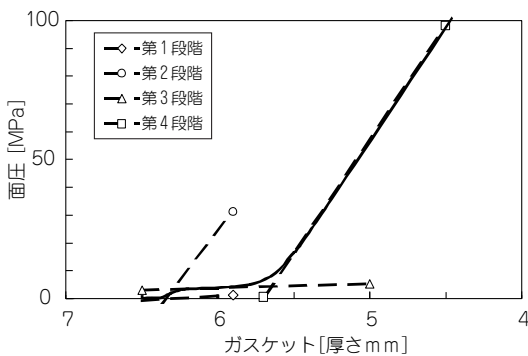


図10 φ4000内外輪付グラシールボルテックスガスケットの圧縮曲線の推定

4.5tまで締め付けた時にシール性を保証できるガスケット面圧を98MPaとすると、フィラー材の密度を1.65g/cm³、内輪の幅を55.8mmにする必要があることが分かり、このときの圧縮曲線は図10のように推定できた。

7. おわりに

本報では、大口径内外輪付グラシールボルテックスガスケットの圧縮曲線に影響を与える因子を解明し、試験が実施できない大口径サイズのガスケットの圧縮曲線を推定する方法を解説した。

これによって、必要十分な圧縮荷重を有する大口径内外輪付グラシールボルテックスガスケットの仕様を容易に決定することができるようになり、ユーザーのご要求に迅速に対応できるようになったものと確信している。ユーザー各位よりのご意見、ご要望などをお寄せいただければ幸いです。

筆者紹介



花島 完治

浜松研究所 MD部門 シール材分野
チームリーダー