チタン製成形ベローズの機械・真空特性*

西場 健博^{*1}・原田 洋祐^{*1}・川原 政春^{*2}
能勢 正章^{*1}・齊藤 芳男^{*3}

(受理2001年11月22日, 掲載決定2002年5月11日)

Mechanical and Vacuum Properties of Hydroformed Titanium Bellows
Takehiro NISHIBA^{*1}, Yousuke HARADA^{*1}, Masaharu KAWAHARA^{*2},
Masaaki NOSE^{*1} and Yoshio SAITO^{*3}

^{*1}Nippon Valqua Industries, Ltd., 9-13 Akasaka 1-chome, Minato-ku, 107-0052 Tokyo

^{*2}Valqua Seiki, Ltd., 8-52 Honguhdoh-aza Kawada, Shinshiro-shi, 441-1347 Aichi

^{*3}KEK-High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, 305-0801 Ibaraki

(Received November 22, 2001, Accepted May 11, 2002)

Titanium is expected as a material of the hydroformed bellows. We investigated mechanical and gas desorption properties of titanium and conventional stainless steel bellows. The titanium bellows has much flexibility, that spring constant is 30 to 40% lower than that of the stainless steel one. The endurance test shows that the fatigue life of the titanium bellows is roughly equal to that of the stainless steel one with the same displacement. The gas desorption rate of the titanium bellows is about 60% of the stainless steel one.

1. はじめに

ベローズは、真空配管の継ぎ手や真空中への運動導入機の駆動シールとして用いられる重要な構成部品である。ベローズには溶接ベローズと成形ベローズの2種類があり、用途により使い分けされている。ベローズの材料にはステンレス鋼が広く使われており、ニッケル合金やアルミニウムなども用いられている。

成形ベローズは溶接部が少なく単純な構造のため、扱いやすい利点がある。最近、溶接ベローズのようにやわらかく、しかも軽量で扱いやすい成形ベローズが求められている。軽量という点ではアルミニウム成形ベローズが優れるが、アルミニウムは傷が付き易いため取扱性が悪く、さらにバネ特性も劣る。上記の性能を満たす材料として、我々はチタンに着目した。

チタンは、ステンレス鋼よりも軽量で耐腐食性が高く、線膨張係数や透磁率が低い。また、アルミニウムよりも硬度及び引張強度が高い。更に加速器や宇宙分野のような特殊な環境において材料が放射能化された場合でも、長寿命の同位体元素が生成されないため、残留放射能が早く減衰する利点がある。

ここでは、チタン成形ベローズ (Ti ベローズ) の機械特性及び真空特性について、ステンレス鋼成形ベローズ (SUS ベローズ) との比較を交え、報告する。

2. 実験方法と実験結果

2.1 試料

同一寸法の成形ベローズを、チタン (JIS 1 種) 及びステンレス鋼 (SUS 316L) を用いて製作した。ベローズサンプルとして、小口径 (内径44 mm×外径58 mm×板厚0.2 mm×8 山) と大口径 (内径200 mm×外径245 mm×板厚0.2 mm×7 山) の2種類を用意した。

2.2 バネ特性

Ti ベローズのバネ特性を評価するため、Ti 及び SUS

* 平成13年10月18日 第42回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 日本バルカー工業㈱ (〒107-0052 東京都港区赤坂 1-9-13)

^{*2} バルカーセイキ㈱ (〒441-1347 愛知県新城市川田字本宮道 8-52)

^{*3} 高エネルギー加速器研究機構 (〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1)

Fig. 1 Relation between load and displacement of I.D.44×O.D.58×8 convolutions hydroformed bellows.

Table 1 The spring constants per one convolution of hydroformed bellows. Calculated values are given with parentheses.

Bellows size	Spring constant per convolution (N/mm)		Ratio of Ti to SUS316L
	Ti	SUS316L	
I.D.44×O.D.58	154 (148)	213 (254)	72.3% (58.3%)
I.D.200×O.D.245	24.5	39.2	62.5%

(): calculated value

ペローズの荷重と変位量の関係を調べた。試料を引張・圧縮試験機に据え付け、一定の変位速度で軸方向に荷重をかけ、伸縮させた。一連の変位量（縮み量）と荷重の関係を記録し、ペローズのバネ定数及びヒステリシスを求めた。

Fig. 1に、小口径成形ペローズの荷重と変位量の関係を示す。この図より、TiペローズはSUSペローズに比べてバネ定数が低いことがわかる。今回の測定範囲において、材料の違いによるヒステリシスの差は、見られなかった。また、どちらの材料のペローズも、バネの線形性が保たれていることを確認した。

Fig. 2 The displacement endurance diagram of I.D.44×O.D.58×8 convolutions hydroformed bellows.

Fig. 3 Schematic diagram of desorption rate measurement apparatus.

Table 1に、ペローズ1山あたりのバネ定数の測定値及び計算値を示す。計算値は有限要素法解析ソフトウェアANSYSにより求めた。

2.3 疲労寿命特性

小口径のTi及びSUSペローズに、繰り返し変位を与え、疲労寿命を測定した。試料を耐久試験機に取り付け、ペローズ内部を真空引きし、内部の圧力を10 Pa以下とした。その後、内部真空により大気圧から受ける圧縮方向の負荷を考慮した設計上の変位比率、すなわち圧縮方向に60%、引張り方向に40%となるような正弦波変位を繰り返し与えた。ペローズが破損し、内部の真空度が低下した時点での繰り返し回数を疲労寿命回数とした。負荷条件を変えるため、変位量を6～12 mmの範囲で変え、各変位量での疲労寿命回数を測定した。

Fig. 2に測定結果を示す。TiとSUSペローズは、ほぼ同等の寿命であった。

2.4 ガス放出特性

チタン及びステンレス鋼にて製作し、脱脂洗浄のみを施した大口径タイプの成形ペローズを用い、150℃ベーキング後のガス放出速度の変化を、スループット法により測定した。四重極形質量分析計(QMS)を用い、残留ガス成分比を測定した。装置模式図をFig. 3に示す。ペローズを除く実験系は、あらかじめ200℃ベーキ

Table 2 Residual gas signal ratio of Ti to SUS316L hydroformed bellows after 150°C baking

	Residual gas signal ratio of main species (25°C)					Total gas
	m/e=2	m/e=16	m/e=18	m/e=28	m/e=44	
SUS316L	1	1	1	1	1	1
Ti	0.67	0.69	0.66	1.70	0.85	0.79

Fig. 4 Gas desorption rate of I.D.200×O.D.245 hydroformed bellows.

ングを300時間行った。ベローズを取り付け室温で排気し、100時間後、150°Cベーキングを24時間行った。再び室温に戻して排気を続け、ガス放出速度の変化を測定した。

つづいてベーキングなし時のガス放出速度を、スループット法により測定した。先の実験にてQMSのフィラメントにより10～20%程度圧力が上昇することが判明したため、始めから Fig. 1 の実験系から QMS を取り外して測定している。

Fig. 4 に、ベーキングあり、ベーキングなし時のガス放出速度の経時変化を示す。どちらの場合も Ti ベローズのガス放出速度は、SUS ベローズの約55～60%であった。

Table 2 に、150°Cベーキングが終了してから140時間後の Ti 及び SUS ベローズの、主な残留ガスの相対比率を示す。ここでは、ステンレス鋼の各残留ガスのイオン電流強度を1に規格化している。Ti ベローズでは $m/e=$

Fig. 5 Distributions of thickness and Vickers hardness of I.D.44×O.D.58 hydroformed bellows.

28のガス成分が高かった。その他の残留ガス成分は、ほぼ同程度の割合で Ti ベローズの値が低かった。Ti と SUS ベローズいずれにおいても H_2 ($m/e=2$) と H_2O ($m/e=18$) の成分比に差は見られなかった。

3. 考 察

3.1 機械強度に関する考察

3.1.1 成形性

チタンとステンレス鋼の成形性について、小口径ベローズにて比較を行った。Ti と SUS ベローズの成形条件をそろえ、成形限界を確認したところ、Ti ベローズは SUS よりも10～30%低い拡張率（ベローズ外径÷内径）で成形限界に至った。この理由として、チタンの加工硬化性が低いことが考えられる。

Fig. 5 にベローズ断面における板厚とビッカース硬度の分布を示す。チタンの硬度は、成形前の138 Hv に対して変化は小さく、加工硬化はほとんど見られなかった。また、板厚の変化も、成形前の板厚0.2 mm に対し僅かであった。

成形途中に局所的なくびれが生じた場合、くびれ部の真応力は増大する。ステンレス鋼の場合、真応力の増大に伴い加工硬化が誘起され、引張強度が上昇する。したがって、くびれの成長は抑制され、材料は成形圧により伸び続ける。一方チタンの加工硬化は僅かであるため、

Fig. 6 The stress endurance diagram of I.D.44 × O.D.58 × 8 convolutions hydroformed bellows.

引張強度は変化しない。したがって、くびれは抑制されることなく局所的に成長し続け、ステンレスよりも低い成形圧で破損に至ったと考えられる。

なお、SUS ベローズの加工硬化が強い部位（ベローズ山側）では、金属組織が大きく変化しているため、耐腐食性低下の要因や、真空中での気体放出源となる可能性がある。

3.1.2 パネ特性

Table 1 より、解析から得られた小口径の Ti 及び SUS ベローズにおけるパネ定数の比は58.3%であり、チタンとステンレス鋼のヤング率の比55.1%を反映した計算結果となっている。しかし、測定したパネ定数の比は72.3%と計算結果とのずれが大きい。これは、以下に示すような SUS ベローズの板厚による影響と考えられる。

Fig. 5 によると、SUS ベローズでは、外径の山の板厚は内径の谷よりも16%薄くなっており、加工硬化が顕著に現れている。板厚が薄くなるとパネ定数が小さくなるため、板厚均一の仮定に基づいた計算値とずれが生じたものと推測される。一方、Ti ベローズの板厚変化は5%以内に収まっており、計算値と実測値はほぼ一致している。チタンは塑性異方性が $r=5.28$ （ステンレス鋼は $r=1.01$ ）と極めて大きい²⁾。そのため、成形時にベローズ半径方向に大きく伸ばされても、板厚の変化は小さく、外径の山の板厚が薄くならなかったと考えられる。

大口径成形ベローズにおいては、Table 1 より Ti ベローズ一山あたりのパネ定数は24.5 N/mm となり、SUS ベローズ39.2 N/mm のパネ定数の62.5%であった。大口径ベローズは山と山の間隔が広く、かつ山の断面曲率半径が大きいため、外径の山の板厚変化が小さい。そのため、外径の山におけるパネ定数の低下は小さくなり、Ti と SUS ベローズのパネ定数の比が、ヤング

率の比55.1%に近づいたと考察される。

3.1.3 疲労寿命特性

Ti と SUS ベローズの疲労寿命がほぼ同等である理由は、以下に示す疲労応力と引張強度の関係と、Ti ベローズの柔軟性により説明される。

Fig. 6 に、疲労曲線図を示す。EJMA の式³⁾により、Fig. 2 の変位を応力に変換して得られた図である。ここに現れる応力は、大気圧による曲げ応力と膜応力、変位による曲げ応力と膜応力とを合成した値である。

ベローズに伸縮運動を与えると、材料に繰り返し応力が加わる。この応力は、ベローズ山の曲げモーメントが最大となる材料表面に加わり、破損は引張応力が加わる内径の谷のベローズ内側面又は外径の山のベローズ外側面から生じる。この部位の引張強度により疲労寿命は左右されると考えられる。

同一寿命回数における Ti と SUS ベローズの疲労応力の比は、Fig. 6 の右軸に示すとおり50～55%である。材料の引張試験により得られたステンレス鋼に対するチタンの引張強度の比は53.8%であり、疲労応力と引張り強度の比はほぼ一致した。よって今回の測定範囲内では、疲労寿命は材料の引張強度に比例することがわかった。引張強度の低い Ti ベローズは、疲労応力で評価すると SUS ベローズに比べ寿命は短くなる。

一方、実用上問題となるのは、Fig. 2 に示すベローズの寿命と変位量の関係である。Ti ベローズはパネ定数が低いため、SUS ベローズよりも少ない荷重で同等の変位を得ることが可能である。よって同一の変位を与えた時、材料に加わる応力も Ti ベローズのほうが少なく、引張強度がステンレス鋼より低くても破損には至らない。したがって変位を基に疲労寿命を評価すると、Fig. 2 のように Ti と SUS ベローズの寿命はほぼ同等となる。

3.2 真空特性に関する考察

Ti ベローズのガス放出速度は、ベーキングの有無にかかわらず SUS ベローズの約60%程度であった。チタン材はロール成形後、アニール処理を施され、Ar 雰囲気中で冷却される。その後酸洗処理を行うため、材料出荷状態で表面に緻密な酸化膜が形成されている。この酸化膜が材料内部からのガスの放出を抑え⁴⁾、表面への水の吸着を抑えるため、ガス放出速度が SUS ベローズよりも低くなったと考えられる。

Ti ベローズは $m/e=28$ のガス成分が高かった。QMS あるいは B-A ゲージのフィラメントによる CO ガスの発生が考えられるが、Ti ベローズのみ CO の比率が高くなった要因は不明である。実験精度を高めた詳細な調査が必要である。

4. ま と め

純チタン (JIS1 種) とステンレス鋼 (SUS316L) にて同一サイズの成形ペローズを製作し、バネ特性、疲労寿命特性及びガス放出特性について比較を行った。

- (1) バネ定数は、SUS ペローズの約60~70%となった。Ti ペローズは成形時の板厚変化が小さいため、バネ定数の設計値との差は小さかった。
- (2) Ti ペローズの寿命は、SUS ペローズと同程度であった。同一変位を与えた場合、Ti ペローズの材料表面に加わる応力は SUS ペローズの約半分程度であるため、引張り強度がステンレス鋼より低くても、同程度の寿命が得られた。
- (3) Ti ペローズのガス放出速度は、150°Cベーキングの有無にかかわらず SUS ペローズの55~60%であった。Ti ペローズの残留ガスは、SUS ペローズと比較し、 $m/e=28$ の残留ガス成分比が高かった。その他のガス成分比に大きな差異はなかった。

純チタンには、JIS1 種に対し約120%の引張強度を有する JIS2 種があり、疲労寿命の向上が期待される。この2種類の純チタン材の比較は興味深く、今後評価を行う価値は充分あるものと考えられる。

謝辞

日本原子力研究所の金正倫計博士には本研究に関する議論を通して貴重なコメントを頂き、心から感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) R. Thomas and G. R. Stevenson: *Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators*, (Technical Report Series No. 283, IAEA Vienna, 1988) p. 107.
- 2) 鈦チタニウム協会編：チタンの加工技術，(日刊工業新聞社，1992) p. 69.
- 3) Expansion joint manufacturers association: *Standards of the expansion joint manufacturers association, Inc.*, (1980).
- 4) 湊 道夫，伊藤好男：真空，41 (1998) 335.