ねじれを吸収する溶接ベローズに関する研究*

津 金 洋 之** 清 水 広 幸*** 深 沢 裕 史*** 香 月 克 洋***
三 柴 隆*** 若 松 英 士† 吉 岡 正 人†

Study on a Twistable Vacuum Bellows

Hiroyuki TSUGANE, Hiroyuki SHIMIZU, Hiroshi FUKASAWA, Katsuhiko KATSUKI,
Takashi MISHIBA, Eiji WAKAMATSU and Masato YOSHIOKA

A vacuum bellows assembly that can follow a twisted displacement around the axis is newly developed. It consists of 36 convolutions with a core whose inner circle is eccentric to the outer one. The deformation of the bellows is analyzed by means of a finite element method (FEM), while a torsional moment is applied to the bellows. From the analytical result, it is explained that the new bellows can be twisted much easier than a traditional bellows. Besides, it is experimentally shown that the newly developed bellows with a total length of 86 mm, an inner diameter of 40 mm and an outer diameter of 70 mm is able to be twisted quite smoothly up to about 5°.

Key words: twistable bellows, twisted displacement, finite element method (FEM), eccentric core

1. 緒 言

米国で溶接ベローズが開発されたのは1955年頃、日本では遅れて1963年に真空用溶接ベローズの製造、販売が開始された。それ以降、半導体製造装置を始めとする真空産業の発展と共に溶接ベローズの需要も急増し、現在では真空システムを構築する上で欠かせない要素部品としてその地位を確立している。

溶接ベローズは、材質の選択性が広いことや、内外径の寸法に対する自由度が大きいなどの理由により、様々な形状のものが、使用目的に合わせて開発されてきた¹⁾。

従来、ベローズの変位は次の3種類であると考えられてきた。軸方向に対する伸縮変位、円周上の一部分が伸縮した場合の曲げ変位、曲げ変位の合成による軸直角方向への変位である。これらの変位に対しては、従来の標準形状ベローズでも容易に対応できるが、軸を中心とするねじりモーメントがベローズに加わるねじり変位に対しては構造上対応が困難である。そのため、ねじり変位に対応できるベローズは、これまでいくつか考案されてきたものの、実用できるものは極めて限られていた。その一つとして株式会社ミラプロにより開発された3連式ベローズ²⁾がある。しかしながら、この3連式ベローズは内径40mmのもので、最短でも170mm以上の長さを必要とするため、それ

より短い距離に対応でき、しかもねじれを吸収することができる単式のコンパクトなベローズの開発が求められてきた。

そこで本研究では、ベローズ軸周りのねじれを吸収できる単式溶接ベローズの開発を目標として、新たなベローズの設計・試作を行った。そのベローズに必要とされる主な仕様を以下に示す。

- (1) 搬送機器や粒子加速器のビームチャンバー、放射光ビームラインなどに応用することを想定して85mm程度の短い距離に対応でき、且つ、ねじれを吸収することができる一連式のコンパクトなベローズとする。
- (2) ベローズの内部は、シャフトやビームの光軸が通るのを妨げないように、中空状態とする。
- (3) 超高真空に対応させるため、全て金属製として400℃に対する高温ピーキングを可能とする。
- (4) ねじり変位と同時に、伸縮変位、曲げ変位、軸直角変位に対しても対応ができるものとする。
- (5) ねじり変位の大きさは、常用 $\pm 5^\circ$ 、最大 $\pm 10^\circ$ を目標値とする。

以上の要求仕様にあうベローズとして、偏芯したコアを組み立ててベローズ構造とした偏芯ベローズを考案した³⁾。

以下に、偏芯ベローズの概念とねじれを吸収する原理をFEMシミュレーションによる解析結果などを用いて概説し、次いで、ねじり角度に対するトルクの測定結果を従来型ベローズと比較して、試作したベローズの有効性を検証する。

* 原稿受付 平成15年5月6日
** 学生会員 山梨大学大学院(現、(株)ミラプロ；
山梨県北巨摩郡須玉町穴平1100)
*** (株)ミラプロ
† 正会員 山梨大学工学部(甲府市武田4-3-11)

Fig.1 Eccentric core of twistable bellows(1 convolution)

Fig.2 Bird-eye view of twistable bellows

2. 新開発偏芯ベローズの概略

考案した偏芯ベローズ 1 山分の形状を図 1 に示す。ベローズは、図に示すように外径円に対して偏芯した内径円を持つ 1 対の円輪（コア）で構成されており、内側円周部（内径円）を溶接して 1 山とする。次に第 1 の山に対して内径円の偏芯方向を 10° ずらして 2 山目を配置して外周部を溶接する。このとき、第 1 の山に対して第 2 の山が手前側にくるように配置し、第 2 の山を第 1 の山に対して反時計回りに回転させるようにする。この手順を繰り返し、36 山で 1 周となるように構成しているところが大きな特長である。

このようにして作成された 36 山のベローズ概形図を図 2 に示す。偏芯量の最適値は不明であるが、様々な試行錯誤の結果、最終的に外径円直径 70mm に対して内径円中心を 2mm（約 3%）を偏芯させた。ベローズ部の長さは 86mm、内径円直径は 40mm である。ベローズの材質はステンレス AM350、板厚 0.15mm とし、ベローズフランジ部には SUS304 を使用した。製作方法としては、精密にプレス成形したコアの内径、外

Fig.3 FEM analytical model(10 convolutions)

Table 1 Mechanical properties of material for bellows

Material	Stainless Steel AM350
Young's Modulus	202 GPa
Poisson's Ratio	0.3

径をそれぞれへり継ぎ手方式により、YAG レーザによって自動的に溶接し組み立てる。その工程については、自動的に 1 山ごとに偏芯方向を 10° ずつずらして配置する以外は、通常のベローズを製作する工程と全く同じである。また、開発したベローズは、材質選択性が広く、寸法の自由度が高いと共にその安定性もよい等、従来ベローズの持っている総合的に優れた性能を有していることも特長の 1 つである。ベローズは、軸心に対して直角方向に“ひだ”を持っているが、一般的にこの断面形状を模して、溶接部を山及び谷と称する。従来のベローズが各山のピッチ及び周方向の全体にわたって、伸縮方向の変位について均一性を求めてきたのに対して、本案では外径に対して内径の中心を相対的に偏芯させることによって、コアにおける周方向各位置の伸縮変位を連続的に変化させることにより、ベローズ全体における回転方向のねじれ成分を変化吸収させようとするものである。この吸収量は、1 山ではごく微小なねじれ量であるが、これを必要山数分乗することによって、実用的に必要なねじり変位量を確保することができるものと想定される。以上のことを検証するために、第 3 章において、10 個の山を持つ偏芯ベローズモデルに対してねじれを加えたときの変形状態

Fig.4 Displacement in X direction

を、有限要素法（FEM）解析によって求める。

3. ねじれ変形の理論解析

3.1 10山偏芯ベローズモデルに対する解析

新しく考案したベローズにねじりモーメントを加えたときの変形状態を力学的に検討するために、10山偏芯ベローズモデルに対する解析を行なった。実際のベローズは36山により構成されているが、解析計算に多大な時間がかかり収束させることが困難であったため、実際のモデルよりも少ない山数の10山ベローズモデルを使用した。図3に使用した10山ベローズモデルを示す。片側外周円A上の外径円中心を原点とする円A面をXY平面とし、その法線方向をZ軸とした。また、円A面上においてX軸と外周円及び内周円との交点をそれぞれa', b'及びd', c'とした。同様にして、他端外周円B面上にa, b, d, c点を設定した。解析では、10山ベローズモデルの片側外周円Aを固定し、この円Aと円Bとを平行に保ちながらZ軸の回りにねじり変位を加える。与えたねじり角は 1.5° である。本解析で使用した材質及びその機械的特性は、全ての部分において同一とし、表1に示す値を使用した。また、変形はすべて弾性変形範囲内として取り扱い、解析には有限要素法プログラムANSYS Ver. 6.0を用いた。全要素数は154000個である。解析は、偏芯ベローズのみならず、結果の比較のため、同じ山数を持つ通常ベローズ（同芯ベローズ）に対しても行った。尚、解析にあたっては、溶接部も他の部分と同じ性質を持つものとして取り扱った。

3.2 解析結果

図4に、偏芯ベローズの各部分の初期状態からの変形形状を示す。図中の色は、ベローズ各部分の半径方向（X方向）変位の向きを表しており、初期位置に比べて中心軸に近づく部分（一方向変位）を青色、遠ざかる部分（+方向変位）を赤色、初期位置から変化しない部分（ゼロ変位）を緑色として、色別表示した。また、各部分の変位量は実際の10倍に誇張して表示してある。図3に示したように、ねじり変位を与える前は、各山の外径円を結んだ外径包絡線a-a'及びd-d'は、z軸に平行な直線であった。しかし、図4にわずかに認められるように、両端円A, Bを平行に保ちながらねじれを加えると、この外径包絡線a-a'及びd-d'は点線で示すように湾曲してくる。

図中d-d'間の曲線が外径包絡線の半径方向外側の“張り出し量”を示している。この包絡線の張り出しが固定円A面に対して各山の傾きを生じさせる。既に報告されている3連式ベロ

(a) Twistable bellows

(b) Normal bellows

Fig.5 Displacement of the core in Z direction

ズ²⁾では、軸方向に対して傾斜角を持つ“ひだ（コア）”をベローズに組み込むことにより、ねじれが吸収されるメカニズムが数学的に証明されている。前述の結果より、ベローズの形状は既に提案されている“傾斜ひだ（コア）”を持つベローズ²⁾に近くなり、偏芯ベローズの弾性変形域においてねじれを吸収させる要因になっているものと推察できる。図5に、偏芯ベローズ及び同芯ベローズのZ軸方向変位を色分けして示す。すなわち、Z方向変位が変形前と比べて増加している部分（上向き変位）を赤色、減少している部分（下向き変位）を青色として表示した。ここでも図4と同様に各山の変位量を解析結果の10倍として誇張表示し、さらにベローズ全体の長さを3倍に拡大して表した。図5(a)は偏芯ベローズ、(b)は同芯ベローズに対するものである。図から、偏芯ベローズでは内径円中心を偏芯させた幅広側の山と山の間隔 ω' が広がり、幅狭側の間隔 ω は狭くなっている。一方、同芯ベローズではコアの傾きは全く見られない。

偏芯ベローズにおいて、各山の傾きを生ずるメカニズムとして、以下のことが考えられる。図6に示すように内径円中心を

Fig.6 Schematic diagram of displacement due to different elastic modulus in twistable bellows (1 convolution)

(a) Viewed in Y direction

(b) Viewed in Z direction

Fig.7 Change of position of the inner circle with twist

偏芯させたことにより、同一山内にあっても、幅広側と幅狭側部分においてバネ定数に差異が生じ、バネ定数が小さくなった幅広側がより大きな伸縮変位をとることが可能になり、各山に傾きを生じさせる。また同時に、山と山との間隔が大きい幅広側部分(図5中w部)が、半径方向に対して外側に変位しており、逆に間隔の小さい幅狭側部分(図5中 ω' 部)が内側に変位することがわかった。一方、内径円の包絡線 c-c' は、図2に示したようにねじり変位を加える前は湾曲しているが、ねじり変位後は湾曲の程度が小さくなることがわかった。このことを詳細に示したものが図7である。図7にはねじり変形前後の内径円

(a) Twistable bellows

(b) Normal bellows

Fig.8 Distribution of equivalent stress generated by twisted displacement

中心のらせん状軌跡を示してあるが、この軌跡は、ねじり変形後の方がわずかながら直線に近づいている。ただし、図中変形後軌跡の変形前に対する変位量は、10倍に拡大して表示してある。以上のことから、両端を平行に保ったまま偏芯ベローズにねじれを加えると、力学的安定性を保つために、変形前の内径円包絡線の湾曲が小さくなり、同時に外径円包絡線が湾曲し、山間隔は幅広側で大きく、幅狭側で小さくなる。その結果、コアの各面が両端面に対して傾斜する。この変形により、前ページで述べたメカニズムによって、ねじれを吸収しやすくなるものと思われる。

図8に、ねじれを与えた場合のベローズ各部の相当応力分布を、偏芯、通常ベローズの両方について示す。応力ゼロの状態を青色で表し、応力値が高くなるにつれて黄色から赤色の色分布で示した。偏芯ベローズの相当応力は通常ベローズよりも一般に低く、同一のねじり変位に対して容易に追従できるものと思われる。実際、同一のねじり角 1.5° に対する接点反力から求めたねじりトルクは偏芯ベローズ、通常ベローズに対してそれぞれ 102.7Nm 、 131.2Nm であり、偏芯ベローズの方が容易にねじり変位を与えることが出来ることが確認できた。当然のことながら、通常ベローズでは、回転変位(ねじれ)に対して各山に傾きが生じず、平行な状態を維持しているために高い相当応力値が生じている。

Fig.9 Deformation of twistable bellows

4. ねじり角に対するトルクの測定結果

第2章で説明した試作偏芯ベローズに対して、ねじりモーメントを徐々に増加しながら変形させた。図9にその際の変形状態を示す。図中(a)はねじれを加えない場合、図中(b)は約4°ねじれを加えた場合の写真である。前節の解析結果から予測されたように、各山が傾き、コアの部分が異なった量だけ伸縮してねじれを吸収している様子が見られる。図10には、通常(同芯)ベローズ及び偏芯ベローズの軸回りの反時計方向のねじり角度に対するトルクの測定結果を示す。測定は、ベローズ両端面が平行で且つ全体の長さが一定の状態で行った。ベローズの一端を固定し、反対側の端にねじれを与え、島津製作所製オートグラフによりトルクを測定した。今回の測定では、特に精密機器用としての用途が期待される5°までのねじり角度について連続的に測定した。図のように、偏芯ベローズのトルクは約1°までほぼ直線的に緩やかに増加し、それ以降も連続的な緩やかカーブを描いている。また、全体的に同芯ベローズに比べると同一ねじり角に対するトルクの値は低くなっている。

一方、同芯ベローズは偏芯ベローズに対して初期トルクが高く、急激なトルク上昇を生じるとともに、ねじり変位約0.4°付近において、応力-ひずみ曲線における降伏現象に類似した急激なトルクの減少(A点)が見られる。これは、部材の弾性変形によるねじり変形から、ねじれ座屈領域への移行に対応すると考えられる。そのような理由により、ねじれに対して、実用上同芯ベローズを使用することは難しいと考えられてきた。ところが、偏芯ベローズでは、ねじり変位を与えると同時にベローズの各山がスムーズに傾きはじめるため、このねじれ座屈

Fig.10 Torque for twisted displacement

現象は見られなかった。従って、少なくともねじり角5°までは、なめらかなトルク-ねじり角の関係が得られたものと考えられる。これらの結果より、ごくわずかな振動にも影響を受けやすい精密測定機器においては、通常のベローズに比べて連続的で且つ緩やかなトルク増加特性を持つ、偏芯ベローズを使用することの優位性が確認された。

5. 結 言

軸方向に対するねじれを吸収する能力の大きい真空ベローズとして、外径の中心に対して内径の中心を偏芯させたコアを組み合わせた新たな方式のベローズを開発した。この偏芯ベローズに対してねじれを加えた場合の変形状態および応力分布を、有限要素法により解析的に求めた。その結果に基づいて、偏芯ベローズがねじれを吸収する力学的メカニズムについて検討した。さらに、試作したステンレス製偏芯ベローズ(長さ86mm、外径70mm、内径40mm)を用いて、長さ一定の条件下で、最大ねじり角5°の範囲でトルクとねじり角の関係を求めた。この結果、偏芯ベローズは従来型の同芯ベローズに比べて同一ねじり角に対するトルク値が低く、ねじり角の増加に対するトルクの増加がなめらかに行われることが明らかになった。以上により、本ベローズは、従来型ベローズに比べてねじれを吸収する能力が高く、ねじり変形への対応が十分可能であることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 三柴隆：真空機器に使用するベローズ，真空，26，10，(1983) 757.
- 2) 末次祐介，白石雅光，三柴隆，大野雄一：ねじれを吸収できる真空ベローズの開発，真空，41，10 (1998) 870.
- 3) 特願 2001-295737.