

ダイナミックベローズ® の設計指針及び設計トラブルとその対策

1. はじめに

金属溶接ベローズであるダイナミックベローズ® (以下、ベローズ) の役割の多くは、気密性を保ちながらFigure1に示す軸方向変位や軸直角方向変位、曲げ方向変位を吸収することである。ベローズを選定するにあたり、軸方向変位を吸収するためのベローズについてはカタログから選定することが容易であるが、軸直角方向変位や曲げ方向変位については困難な場合が多い。

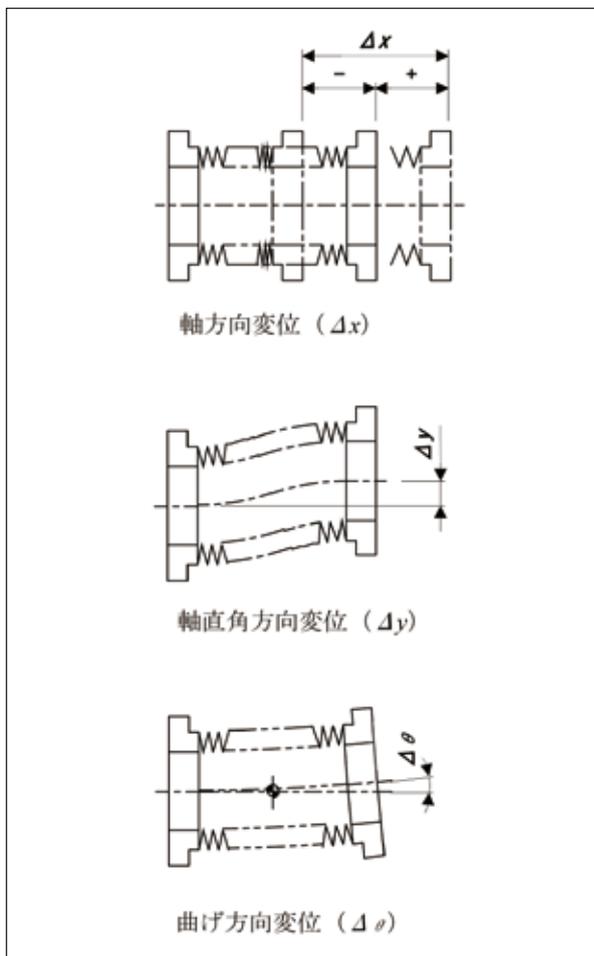


Figure1 変位の種類

また、気密を保つ際にベローズの内側の圧力が外側の圧力より高くなる場合はFigure2に示す座屈が生じることがあり、変形や破損に至る危険があるので設計に注意が必要である。

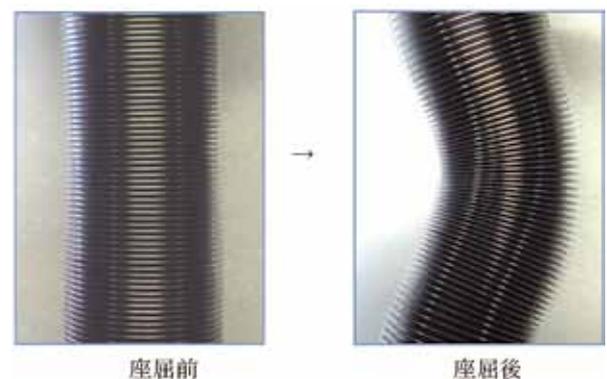


Figure2 ベローズの座屈

更に、ベローズを水平に取り付けた場合、Figure3に示す自重による水平たわみが生じるので座屈と同様に注意が必要である。

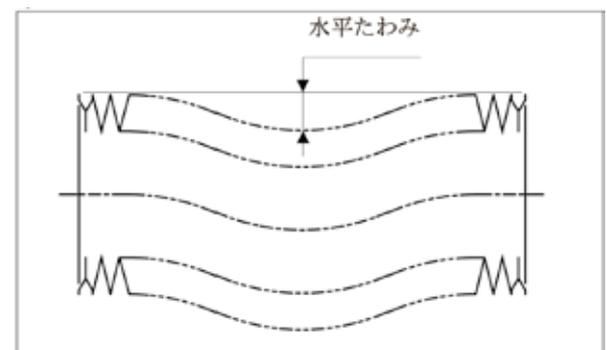


Figure3 ベローズの水平たわみ

本報では当社の標準品であるVシリーズ(カタログNo. PC08)において軸直角方向変位を吸収する場合の選定方法と座屈及び水平たわみに関する設計上の注意について解説する。

2. ベローズの設計指針

2-1) 軸直角方向変位の考え方

ベローズの軸直角方向変位を検討する場合は、軸直角方向変位量を軸方向変位量に換算し検討する。

その計算式は次式で表される。

$$\Delta x(y) = \frac{3 \times D \times \Delta y}{L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta x(y)$: 軸方向変位量換算値(mm)

D : ベローズの外径(mm)

Δy : 軸直角方向変位量(mm)

L : ベローズの長さ(mm)

また、許容できる軸方向変位量換算値が判っている場合は、その変位量から許容できる軸直角方向変位量を求めることが出来る。

その計算式は次式で表される。

$$\Delta y(\max) = \frac{\Delta x(y) \times L}{(3 \times D)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\Delta y(\max)$: 許容軸直角方向変位量(mm)

2-2) 軸方向変位と軸直角方向変位の組み合わせ

前項は軸直角方向変位のみが与えられる場合であるが、一般的には軸方向変位と組み合わせて使用する場合が多い。式(1)からはLが小さいほど軸方向変位量換算値 $\Delta x(y)$ が大きくなることが判るので、軸方向変位によって最小長となる長さで計算する必要がある。

その場合の式(1)は

$$\Delta x(y) = \frac{3 \times D \times \Delta y}{(L - \Delta x)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2)は、

$$\Delta y(\max) = \frac{\Delta x(y) \times (L - \Delta x)}{(3 \times D)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 Δx : 縮み側軸方向変位量(mm)となる。

2-1), 2-2) 項共に注意すべき点は、軸直角方向変位を与えられたベローズはFigure4に示すような形状になり、伸びと縮みの組み合わせになるため、軸方向変位量換算値 $\Delta x(y)$ は伸び側と縮み側の各々に許容範囲を設ける必要がある。

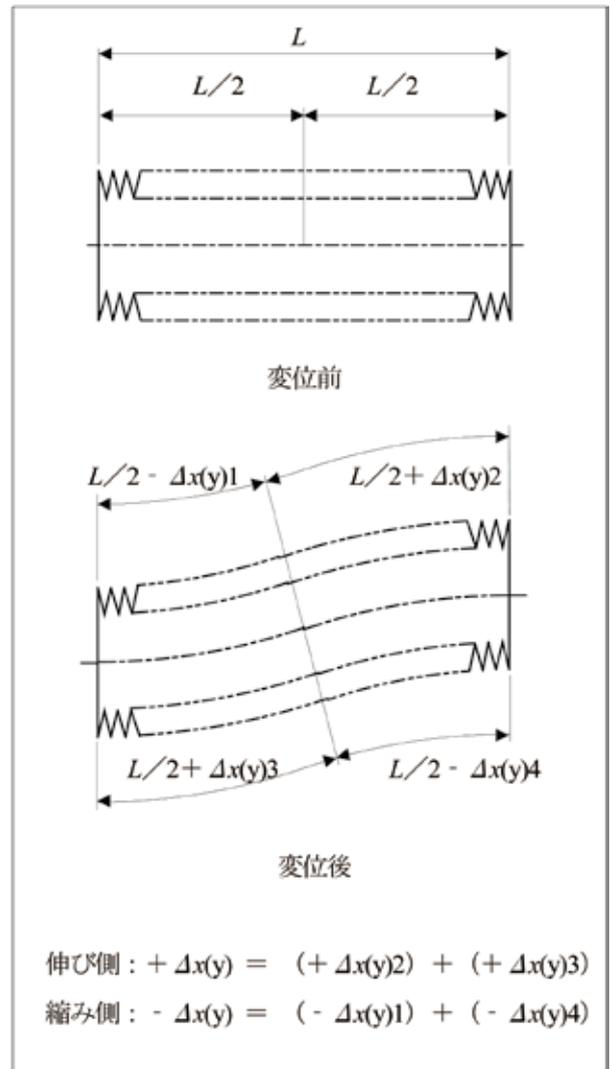


Figure4 軸直角方向変位形状

従って、長さLのベローズは $+\Delta x(y)$ と $-\Delta x(y)$ が与えられる。

3. Vシリーズの選定手順

3-1) 軸直角方向変位のみ

以上の設計指針に基づきVシリーズ(カタログNo.PC08)の選定例を紹介する。カタログと併せてご覧いただきたい。

選定の流れをFigure5に示す。なお、各Stepの詳細については以降に示す。

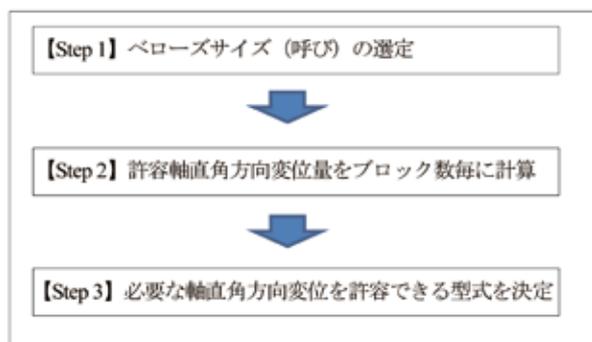


Figure5 Vシリーズの選定手順

【Step 1】ベローズサイズ(呼び)の選定

ベローズを取り付ける機器などのスペースからベローズサイズ(呼び)を選定する。ここではV20を選定した事例を紹介する。

V20のカタログ数値(1ブロック仕様)

内径:20mm、外径:40mm

伸縮量:10mm、伸長:15mm、縮長:5mm

【Step 2】許容軸直角方向変位量をブロック数毎に計算

選定したサイズ(呼び)について、許容できる軸直角方向変位量をブロック数毎に計算する

- 1ブロックの場合 -

伸縮量:10mm、伸長:15mm、縮長:5mm

ベローズ長さL=10mm、 $\Delta x = \pm 5\text{mm}$ とする。

式(2)より、

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{5 \times 10}{(3 \times 40)} \approx 0.4\text{mm}$$

- 2ブロックの場合 -

伸縮量:20mm、伸長:30mm、縮長:10mm

ベローズ長さL=20mm、 $\Delta x = \pm 10\text{mm}$ とする。

式(2)より、

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{10 \times 20}{(3 \times 40)} = 1.6\text{mm}$$

同様にブロック数を増やしていき計算しTable1にまとめる。

Table1 V20のブロック数と変位量

| ブロック数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| L (mm) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Δx (mm)± | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Δy (max) (mm) | 0.4 | 1.6 | 3.7 | 6.6 | 10.4 |

【Step 3】 必要な軸直角方向変位を許容できる型式を決定

必要な軸直角方向変位を許容できるブロック数を選定し、型式を決定する。

例えば軸直角方向変位量が5mm必要であった場合、

Table1 からブロック数は4ブロックとなり、型式はV20-111-4となる。

なお、ベローズ長さLは両端のフィッティングを含まない長さであるため注意する必要がある。V20-111-4の場合は両端のフィッティングの長さが各3mmなので全長は46mmとなる。

3-2) 軸方向変位を伴う軸直角方向変位

軸方向変位を伴う場合は、2-2)項で説明したように軸方向変位によって最小長となる長さで計算する必要がある。

選定の流れはFigure5と同様である。

【Step 1】ベローズサイズ(呼び)の選定

ベローズを取り付ける機器などのスペースからベローズサイズ(呼び)を選定する。ここではV30を選定した事例を紹介する。

V30のカタログ数値(1ブロック仕様)

内径:30mm、外径:50mm

伸縮量:10mm、伸長:15mm、縮長:5mm

【Step 2】許容軸直角方向変位量をブロック数毎に計算

選定したサイズ(呼び)について、軸方向変位量に対して許容できる軸直角方向変位量をブロック数毎に計算する。ここでは必要な軸方向変位量が10mmであった場合、1ブロックでは軸方向変位量換算値 $\Delta x(y)$ は0となるため、最低2ブロックは必要である。

- 2ブロックの場合 -

伸縮量:20mm、伸長:30mm、縮長:10mm、

ベローズ長さL=20mm、軸方向変位量のみの場合 $\Delta x = \pm 10\text{mm}$ まで許容できる。

必要な軸方向変位量10mmを $\Delta x = \pm 5\text{mm}$ とすると、軸直角方向変位により許容できる軸方向変位量換算値 $\Delta x(y)$ は10mm-5mm=5mmとすることができる。式(4)より、

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{5 \times (20-5)}{(3 \times 50)} = 0.5\text{mm}$$

- 3ブロックの場合 -

伸縮量:30mm、伸長:45mm、縮長:15mm、

ベローズ長さL=30mm、軸方向変位量のみの場合 $\Delta x = \pm 15\text{mm}$ まで許容できる。

必要な軸方向変位量10mmを $\Delta x = \pm 5\text{mm}$ とすると、軸直角方向変位により許容できる軸方向変位量換算値 $\Delta x(y)$ は15mm-5mm=10mmとすることができる。式(4)より、

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{10 \times (30-5)}{(3 \times 50)} = 1.6\text{mm}$$

同様にブロック数増やしていき計算しTable2にまとめる。

Table2 V30のブロック数と軸方向変位量, 軸直角方向変位量

| ブロック数 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| L (mm) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| Δx (mm)± | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Δx (y) (mm)± | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Δy (max) (mm) | 0.5 | 1.6 | 3.5 | 6.0 | 9.1 |

[Step3]必要な軸直角方向変位を許容出来る型式を決定

必要な軸直角方向変位を許容出来るブロック数を選定し、型式を決定する。

例えば、必要な軸直角方向変位量が5mm必要であった場合、Table2からブロック数は5ブロックとなり、型式はV30-111-5となる。なお、両端のフィッティングを含む長さは56mmである。

4. 設計トラブルとその対策

4-1) ベローズの座屈の検討

ベローズの設計上のトラブルのひとつにベローズの座屈が挙げられる。ベローズは柱やスプリングと同じように圧縮力によって座屈現象を生じ真直性を失う。Figure2参照。

この座屈限界値は、一般的に用いられるオイラーの公式により近似することができる。

$$F_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times EI}{L^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 F_{cr} : 座屈限界荷重 (N)
 EI : ベローズの曲げ剛性 (N・mm²)
 L : ベローズの長さ (mm)

※ EI についてはバルカーレビュー第40巻第1号を参照¹⁾。

4-2) ベローズの座屈圧力

ベローズが内圧を受けた場合に座屈が始まる限界圧力すなわち座屈圧力は、ベローズの有効面積に受ける圧力により発生する推力が座屈荷重に相当するものとして計算できる。

$$P_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times EI}{(A \times L^2)} \dots\dots\dots (6)$$

$$A = \left(\frac{d+D}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 P_{cr} : ベローズの座屈圧力 (MPa)
 A : ベローズの有効面積 (mm²)
 d : ベローズの内径 (mm)
 D : ベローズの外径 (mm)

ここで、ベローズ長さ L は長いほど座屈圧力は小さくなり、座屈に対する強さが低下するので計算するときは使用上の最大長さ(伸長)で計算する。

この限界圧力を大きく超えるとベローズは座屈し、伸縮しなくなり、結果として変形・寿命低下・早期破損に至る場合がある。

Figure6は座屈による破損事例である。



Figure6 ベローズの座屈による破損

4-3) Vシリーズの座屈検討

当社の標準品であるVシリーズ(カタログNo.PC08)における座屈について検討する。カタログと併せて参照いただきたい。

カタログのブロック数制限を記載している欄は、Vシリーズの許容圧力である0.1MPaの圧力が外圧の場合と内圧の場合のブロック数制限を記載している。この内、内圧の場合のブロック数制限は前項の座屈圧力から決定している。

以下に座屈圧力の計算事例を紹介する。

例1) V20のブロック数制限である4ブロックの計算式(6)より、

$$P_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times 15477}{(706.86 \times 60^2)} = 0.24 \text{ MPa}$$

ここで、ベローズの長さ L は伸長で計算する。

EI の詳細については割愛させていただく。

4ブロックの場合の L は、伸長15mm×4ブロック=60mmである。

ベローズの有効面積 A は式 (7) より、

$$A = \left(\frac{20+40}{2} \right)^2 \times \frac{\pi}{4} = 706.86 \text{ mm}^2$$

例2) V100のブロック数制限である6ブロックの計算式 (6) より、

$$P_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times 485068}{(10386.89 \times 90^2)} = 0.22 \text{ MPa}$$

ここで、ベローズの長さ L は6ブロックの場合は伸長 $15\text{mm} \times 6\text{ブロック} = 90\text{mm}$ となる。

ベローズの有効面積 A は式 (7) より、

$$A = \left(\frac{100+130}{2} \right)^2 \times \frac{\pi}{4} = 10386.89 \text{ mm}^2$$

以上の計算結果より内圧 0.1MPa は、座屈圧力を越えないので座屈は発生しない。

必要な軸方向変位量に使用できるブロック数を選定したときにこのブロック数制限を超えた場合は、カタログに記載しているガイドを設ける必要がある。次項より紹介する。

4-4) 座屈防止対策

ブロック数制限を超えた場合はガイドを設ける必要があるが、その構造事例を紹介する。

【例1】ベローズの内部にシャフトがある場合

Figure7が多く実施される事例である。

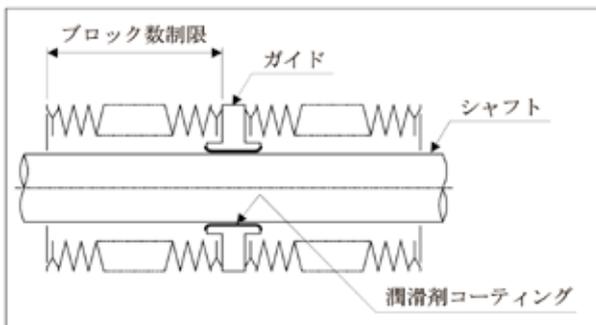


Figure7 ガイド内面に潤滑剤コーティング

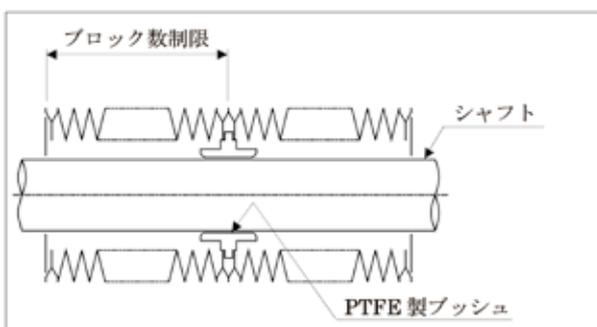


Figure8 ガイド内面にPTFE製ブッシュ

【例2】ベローズの内部にシャフトがない場合

構造が複雑になりガイドロッド位置の精度確保が必要となる。

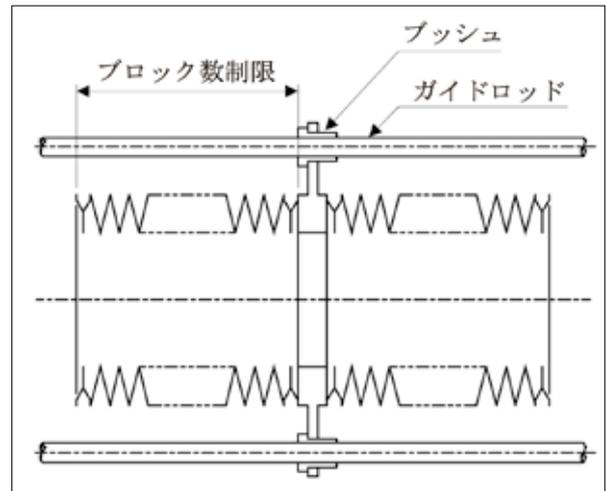


Figure9 周囲にガイドロッドを設置

以上のようにブロック数制限以下毎にガイドを設ける必要がある。

なお、軸直角方向変位がある場合はガイドを設けることが出来ないため、ブロック数制限を超えるような軸直角方向変位は許容出来ない。

4-5) 外圧によるブロック数制限

Vシリーズのブロック数制限は外圧 0.1MPa の場合も記載している。この場合は座屈圧力ではなくベローズの水平たわみ (Figure3参照) が 1mm を超えないように決定している。

その計算式は次式で表される。

$$y(\max) = \frac{9.8 \times W \times L^3}{384 \times EI} \quad \dots (8)$$

ここで、 $y(\max)$: ベローズの水平たわみ (mm)

W : ベローズの重量 (kg)

L : ベローズの長さ (mm)

EI : ベローズの曲げ剛性 ($\text{N} \cdot \text{mm}^2$)

なお、この計算式は外圧の影響は考慮していない。外圧が加わった場合はベローズのたわみ量は小さくなると思われるので、ここではベローズの内部・外部とも大気圧の場合の値を求めることにしている。

例1) V20のブロック数制限である9ブロックの計算

式(8)より、

$$y(\max) = \frac{9.8 \times 0.13 \times 135^3}{(384 \times 15477)} = 0.53 \text{ mm}$$

ここで、ベローズの長さ L は伸長で計算する。

EI の詳細については割愛させていただく。

9ブロックの場合の L は、伸長 $15\text{mm} \times 9$ ブロック $=135\text{mm}$ である。また、ベローズの重量 W は 0.13kg である。

例2) V210のブロック数制限である20ブロックの計算

式(8)より、

$$y(\max) = \frac{9.8 \times 5.32 \times 300^3}{(384 \times 5653926)} = 0.65 \text{ mm}$$

ここで、20ブロックの場合の L は、伸長 $15\text{mm} \times 20$ ブロック $=300\text{mm}$ 、また、ベローズの重量 W は 5.32kg である。

4-6) 水平たわみ防止対策

ブロック数制限と超えた場合はガイドを設ける必要があるが、その構造例は4-4)座屈防止対策と同様である。

5. おわりに

本報にて当社の標準品であるダイナミックベローズ®Vシリーズ(カタログNo.PC08)における、軸直角方向変位を吸収する場合の選定方法と、ブロック数制限に関する設計上の注意について紹介した。

文中にも述べたが、ブロック数制限を越えたまま使用すると変形や寿命低下、破損に至る危険があるので十分な注意が必要である。

本報がVシリーズを選定する際の設計上のトラブル回避に繋がれば幸いである。

6. 参考文献

- | | | |
|------------|---------|-----------|
| 1)バルカーレビュー | 第39巻第4号 | シール講座(23) |
| | 第39巻第5号 | シール講座(24) |
| | 第39巻第6号 | シール講座(25) |
| | 第39巻第7号 | シール講座(26) |
| | 第40巻第1号 | シール講座(27) |
| | 第40巻第9号 | シール講座(28) |



伊奈 正文

営業本部
テクニカルソリューショングループ