

【整番】 SE-14-TM-010	【標題】 補強リング付き伸縮継手のタンジェント構造について(調査)
分類：構造(伸縮継手)／種別： Q&A	作成年月：H22.1／改訂：Ver0.0(22.1)
	作成者：N.Miyamoto

全 15 枚

熱交胴に設けるベローズ継手構造について質問を受けたが、問題点をヒアリングする所に意図があつて特に予習をしておらず、雑談的な応答に終始してしまつた。その後、手が空いたので問題内容を思い出し関連資料を調べて、下記のように回答を作ってみました。何かの参考になれば幸いです。

- Q：① 熱交胴ベローズ端部(タンジェント部)の胴側端面は図1のようにベローズ補強も兼ねてハブ付きフランジ状になっている。この構造の健全性を確認したいが如何？
- ② 胴側端面にテーパがついているが、この意味/具体的寸法は？
- ③ 半割りになった補強リングの接続部分の構造を気にしている。如何？

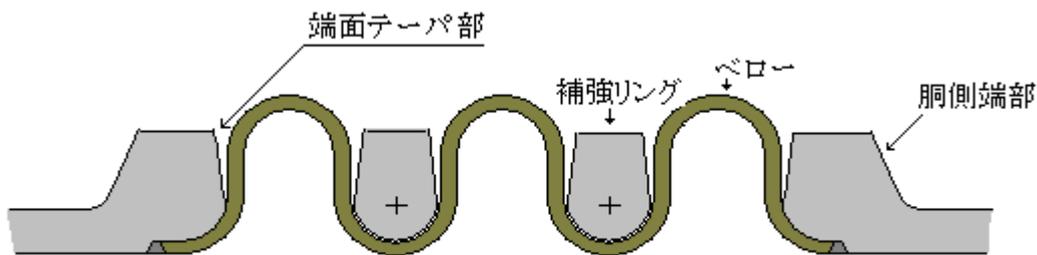


図1 熱交胴の伸縮継手の構造

A： この場合、補強リングは図2(a)で示すように、コントロールリング(or equalizing ring)の上部をカットした形になっている。また、胴側端面も補強リングと似た輪郭(特に傾斜面)を持っている。ベローコンボリューション(山谷)の円環谷部とタンジェント部は、補強リングまたは胴側端面に接触しているため、常に外部からバックアップされている。チューブ温度<シェル温度の場合、運転状態では図2(b)に示すように、ベローコンボリューションは胴側の熱膨張分を吸収して収縮変形するので、傾斜面で接触が増加して、補強リングと胴側端面からさらに強いバックアップを受けることになる。

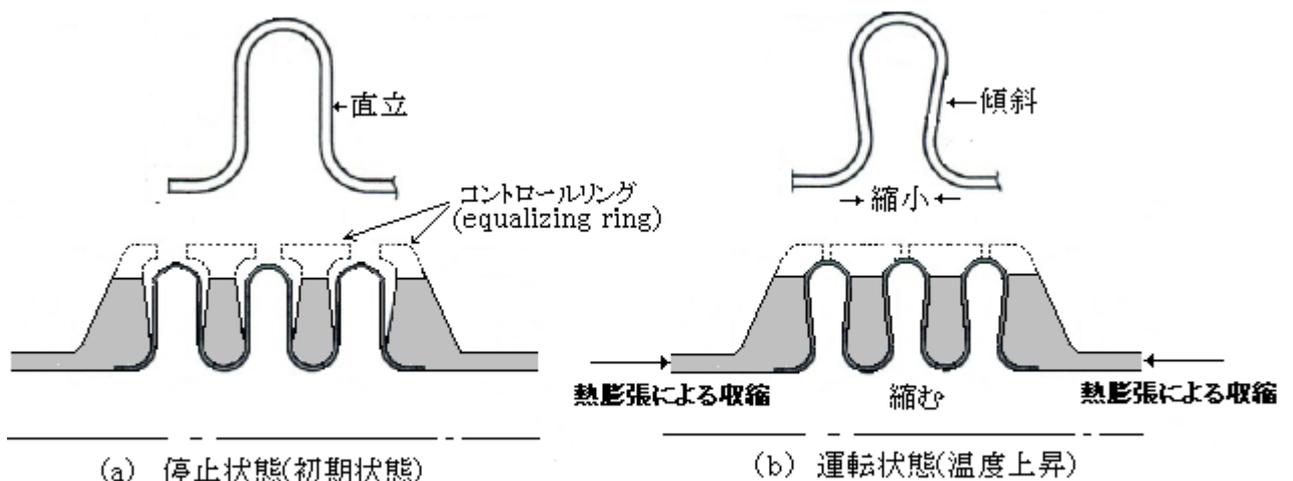


図2 伸縮継手の状態

さて、①について。いわゆるタンジェント部のベロー躯体は、胴側端面のハブ付きフランジと密着

してフランジ側からバックアップされているので、内圧荷重に関しては、ベローズ躯体の応力はごく小さく殆ど無視できる。反面、端フランジ側は、ベローズが支えきれない分を全て支えなければならない。即ち、**図3**のように、半径方向の内圧(左端着色部)に由る周方向の引張力(H.T)と、長手方向の加重分布(右端)に因るリング付根のモーメント/フォース(M,F)が作用する。

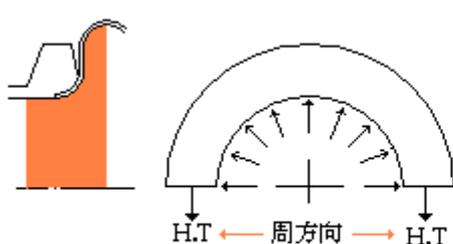


図3 胴端面に作用する力

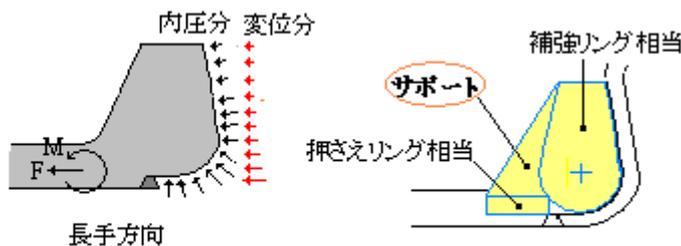


図4 端面フランジ部分の骨格

現状の端面構造は、**図4**のように薄肉ベローズ躯体をバックアップする[補強リング+押さえリング]相当部分とこれをサポートする傾斜部分から構成されており、**図3**のような荷重の作用に対して、一応、**理に合った形**になっている。

しかし**JIS規格**(JISB8277)では、このような端面構造は含まれておらず、わずかに押さえリングの周方向応力式があるだけである。また**EJMA**には補強リング+押さえリングに対する周方向応力式があるが、これは、あくまでも拘束のないリングの断面平均の応力を求めるもので、本ケースのようにベローズや円胴と一体化した構造で、かつ長手方向の力に対しサポート部分を持つ構造に対する応力式ではない(**添付5**参照)。従って**規格計算外の構造**ということになる。

現状構造をみるに、規格による強度チェックができないままに、必要以上に厚肉になっているのではないかと思う。確かにこの”リング”部分を厚肉にするとリング周断面の捩れが小さくなって長手方向の力から生じる接合部のモーメントは減少するが、これは本来2次応力的なので、何もコントロールリング状に盛り上げなくても、下図のような円柱(丸棒)補強リング構造で済むケースもあるのではないかと思う。

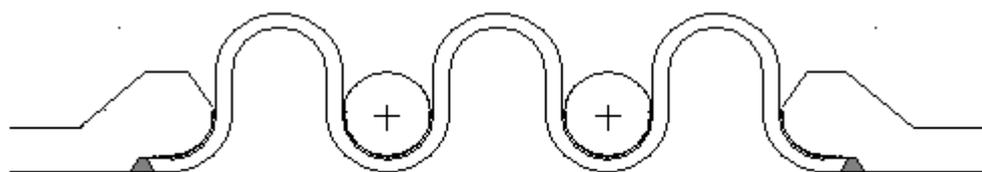


図5-1 胴部の伸縮継手構造案

JIS計算で注目すべきは、内圧によるベローズの子午線方向応力については、コントロールリングが実質上円柱(丸棒)で扱われている点である。何故なら応力式が次のようになっているからである。

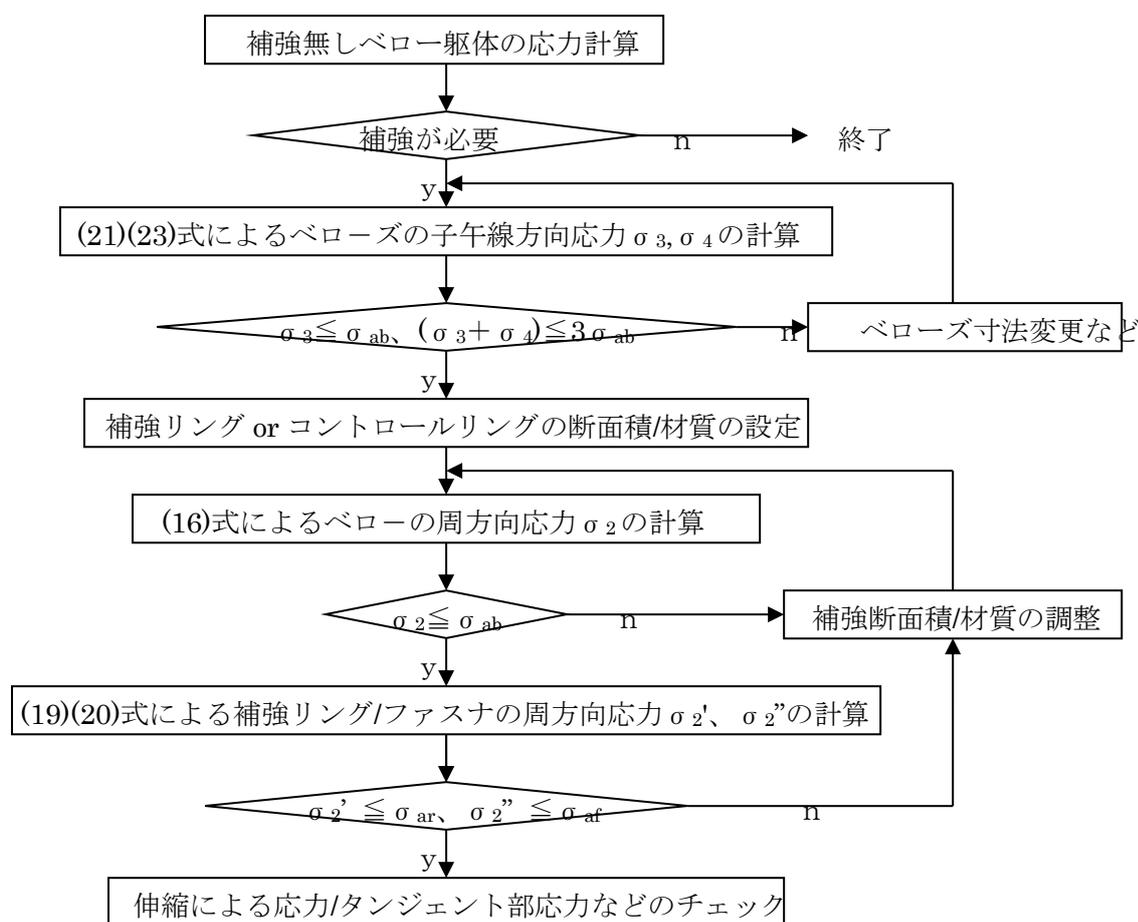
$$\text{ベローズの子午線方向応力: } \sigma_3 + \sigma_4 = P(w - 4Kr_0)/(2nt_p) + \{P/(2n)\} \{(w - 4Kr_0)/t_p\}^2 C_p$$

添付6で述べるように、 $(w - 4kr_0)$ は、内圧に対して何の支えもない部分である。そして、 $4Kr_0$ は円柱がベローズに接触している部分で、 $(0.8 \sim 1.2)r_0$ になるので、略々、円環半径 r_0 分がコンボリューション高さ w から差し引かれていることになる。コントロールリングの場合、接触部分はもっと長くなるが、それはこの式では考慮されていないから、実質上、**円柱扱い**になる。

従って、内圧子午線応力でベロー肉厚が決まってくる場合は、丸棒補強リングの代わりにコントロールリングを用いるのは無意味になる。また周方向応力で決まる場合もリング断面積によっては丸棒の補強リングでも構わないこともありうる。

更に JIS 計算で注目すべきは、ベローズ及び補強リング(or コントロールリング)の周方向応力が、ベローズとリングの接触面積で決まるのではなく、ベローズとリングの剛性の割合、端的には断面積の割合で決まることである。

参考に JIS の内圧応力計算の流れを下記にしめす。



この流れからも、「**JIS は、コントロールリング両サイドの傾斜部分とベロー躯体の接触状態による内圧応力の低減効果は認めておらず、単に補強リングに比べ断面積が増加することによる補剛効果のみが認めていること**」がわかる。この考えは、**面接触の不確かさ**を考えれば当然である。

添付 1~4 によれば、通常、コントロールリング即ちイコーライジングリングの機能は、

- ・ 運転時の高圧に対し、内圧強度/座屈強度を保持する、
- ・ 熱収縮変位が任意ベローに偏らないように、各山谷に収縮量を均分する(イコーライジング)

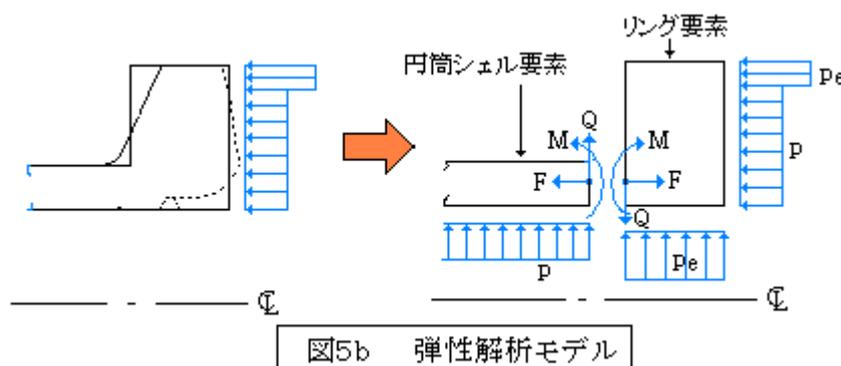
ことにある。おそらく、後者の偏り変位が熱交胴部に起こるとは思えないから、図 1 のコントロールリング状の補強リングを用いた継手構造は、前者の運転時の内圧強度/座屈強度の向上を狙ったものではないかという推定もできる。然るに、前述の如く規格計算では、コントロールリングの接触面拡大効果による内圧強度のアップは無視されているので、コントロールリング状補強リングの使用は、あくまで

顧客ないし製造者のオプションということになる。従って設計に際してはこの辺を十分の顧客に確認する必要があると思う。

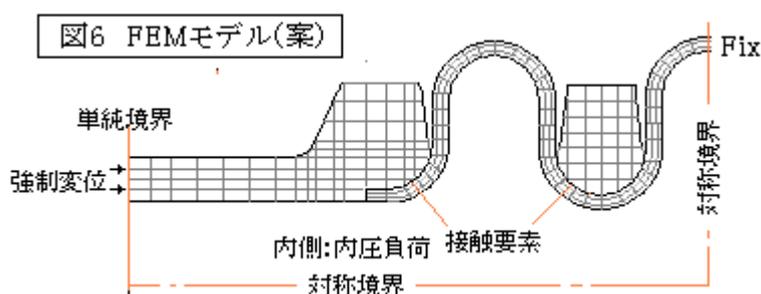
[さて、タンジェント構造から全体構造の方に話しを流してしまったので、話しをもとに戻す。]

ともあれ、部分的ながら何の根拠もなく圧力容器の構造を決めるのは、本来許されることではないので、何らかの方法で当該タンジェント構造が、強度的に問題ないことを証明する必要がある。

その場合、下図のように簡易モデルを用いて理論解析をすることは可能である。ただ形状/荷重分布は簡略化せざるを得ないので、計算結果は近似的なものになる。



計算結果の信頼性、形状変更に対する融通性を考えれば FEM 解析が適している。その場合、胴端面/補強リングとベローズは一体ではなく接触構造なので、接触を考慮した FEM を用いたい。FEM 解析のイメージを図 6 に示す。このモデルでは、ベローズ/補強部分も含まれるので、伸縮継手全域の応力と変形をみることができる。評価は JISB6250 の圧力容器構造規格に準じて行う。



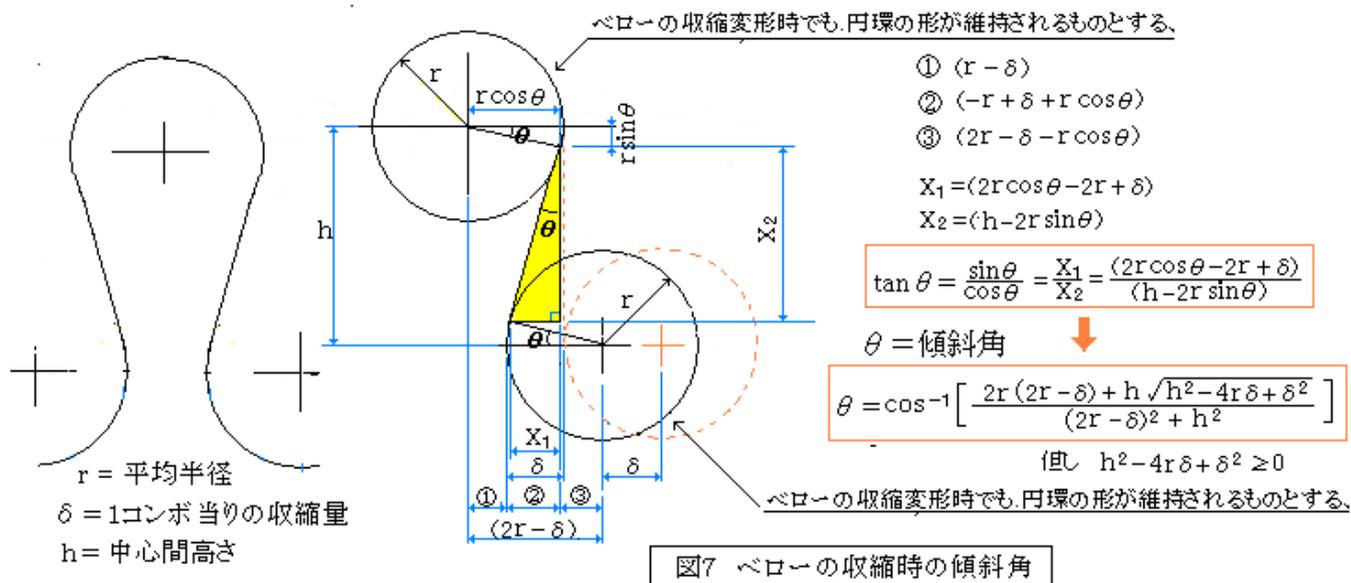
FEM 解析は、信頼性確認やコストダウン/設計合理化のツールとして盛んに使われている。複雑な構造物が正確に扱え、その変形/移動や応力分布が目視できるからである。

現状の端面構造/補強リング形状はかなり強固なイメージがあるので、顧客からクレームはでることはないのかもしれない。しかしそれは気分的なもので定量的ではない(実証性がない)。

FEM 解析の適用は、構造をより合理化し顧客に安心を与えるので、是非お勧めしたい。

次に②について。端面テーパは、ベローズが収縮して変形した時に障害にならないようにカットしたものである。前述の議論によれば、顧客のオプションがなく JIS に従う場合、**コントロールリング**は **断面積 A_r のみ**が有効で、特に接触はなくてもよい。図 1 の端面構造やコントロールリング状の

補強リングでも然り。ただ、どの程度のけぞらせておけば？という話がある。下図にごく単純な例を示すが、これはベローコンボリューションの丈が高くて変位量が小さい時に、多少のマーヅンをとって使用できると思う(チェック願ひ)。



顧客のオプションで、完全接触の(かつベロー変位を阻害しない)コントロールリングが要求される場合正確にコンボリューションの変形を求めるのは難しい。何故なら変形計算は応力計算の裏返しのものであるからである。この場合、**FEM解析**を行えば、正確にこの変形を求められる。

[容易に変形計算ができないことも、コントロールリングの接触効果がJISで認められない理由の一つではなからうか?]

次に③について。現状の補強リングの構造は多分、**図8**のようになっている(と思う)。半割りになった補強リングの接続部分は、接続面の溶接と接続ジグの溶接によって繋がっているが、溶着断面が外周に偏っているため、**図9**のように接続部が偏心していることになる。ベロー内側の内圧によって、ベロー躯体/補強リングには周方向の引張力 F_2 が働いているから、リング形状に偏心があると、 $[M = F_2 \cdot e]$ なる偏心モーメントが接続部に発生し、余分な曲げ応力が発生する。接続断面の近似的な応力は、

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_b = F_2/A_c + M/Z_c$$

ここで、 $\sigma_m, \sigma_b =$ 接続断面の膜応力、曲げ応力、 $F_2 =$ 補強リングの周方向引張力[添付-6を参照]、

$A_c =$ 接続有効断面積、 $Z_c =$ 接続有効断面の断面係数、 $e =$ 断面中心の偏心量

許容応力は S_y 以上では補強の意味がなくなるので、 S_y 以下にすべきだと思う(S_y は降伏応力)。

ここでも、**FEM解析**ならばより正確に計算できるので有利である。

なお接続面は**図8**に示すように非常にシャープな切り欠きになっているはずであるから疲労し易い。使用条件によっては**疲労解析**が必須だと思う。また切り欠き形状の排除を図る。

[コントロールリングの半割り接続はJISにもあるようにボルト止メになっている。座面が球面状でピン結合になっているのなら、締結ボルトは曲げを受けないので有利である。但し、接続金具には偏心モーメントが働いている。]

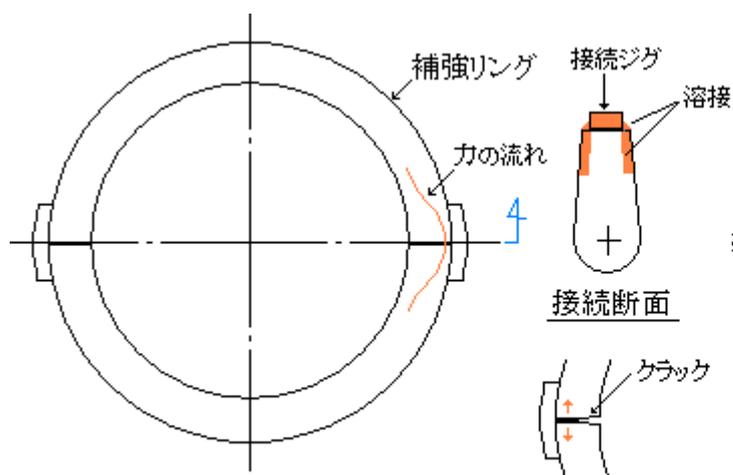


図8 補強リング構造

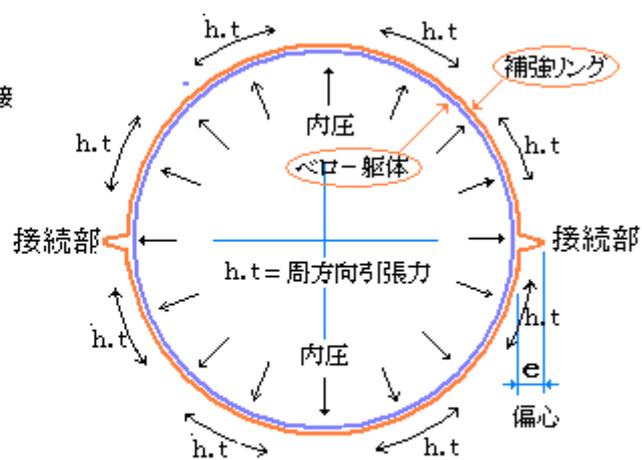


図9 ベローズの断面モデル

以上で議論したベローズの補強構造(特に補強リング/コントロールリング)に関連して、手持ちの文献資料を漁って、参考になりそうな箇所をピックアップしたので、次頁以下に添付する。また補強リング付きベローズの規格計算についても当方の観察を記している(何かの参考になるのかも知れない)。

添付-1 コントロールリングの機能など【「ベローズ伸縮継手概論」石井(配管と装置1968年4月)】

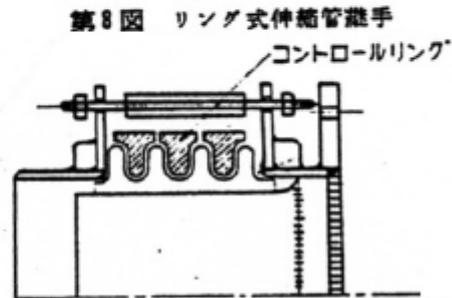
2-3 **リング式ベローズ形伸縮管継手** リング式Ex.Jは第8図に示す様に構造的にはコントロールリングがロット式Ex.Jに付属されたものである。

ロット式Ex.JはEx.J自体の伸縮量を調整することはできるが、ベローズ1山1山の動きを制限することはできない。この点リング式Ex.Jはコントロールリングによってベローズ各山毎の伸縮量も調整できるので1山に集中的に伸縮が集るといことがきけられる。

コントロールリングの材質、強さによって高圧、超高圧のEx.Jも設計することができるのである。

つまりリング式Ex.Jは軸方向伸縮吸収用Ex.Jであり高圧流体用に設計されており、ベローズ1山1山の作動がある一定限度に調整でき、また、Ex.J全体としても最大、最小の伸縮範囲が定めてあり、Ex.Jとしては最

も理想的な構造となっていることになる。長期の寿命を確実に要求する場合には低圧であってもリング式Ex.Jを採用することが常道であり、ベローズ形Ex.Jとしては経済的を抜きにした場合すべてこの型式のEx.Jに統一することが望ましいのである。



第8図 リング式伸縮管継手

1-8 コントロールリング(Control or Reinforcing Rings)

コントロールリングは第1図⑦の如くベローズ谷部の形状に合せたリングのことであり、コントロールリング自体の形は第3図の如く多様多様な形状のものがある。コントロールリングの使用目的は、内部流体の圧力に対してベローズ谷部の保護をすると同時に、ベローズ各山の伸縮作用を各山毎に均一に作動される調整の役もしているのである。保護とは強度保持の意と思う。

- ①内圧によるベローズ谷部の保護
- ②伸縮作用によるベローズの保護
- ③内圧によるベローズ保護と伸縮によるベローズ保護とベローズ各山の等伸縮。

大別すると①②③の目的をもってコントロールリングは存在しており、その使用目的によってコントロールリングの形状が大別できるのである。

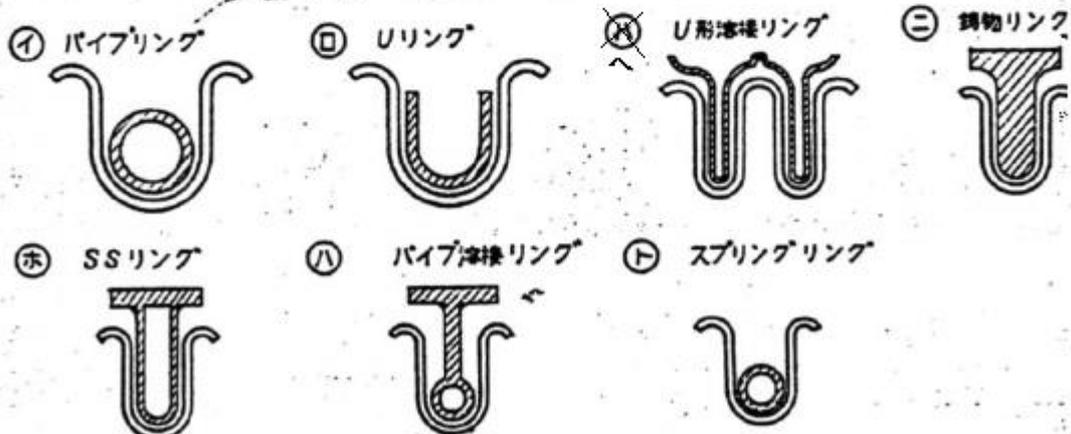
第3図⑦⑧⑨は①の内圧によるベローズ谷部の保護のみの目的で製作されたものである。第3図④⑤⑥は②③の目的を同時に果すことができる形状のコントロール

リングである。第3図④⑤⑥の上部にベローズ1山のピッチより伸縮量を差し引いた幅の押え板がベローズが縮みを生じた時1山1山がこの押え板に障害を受けその寸法以上に縮み作用ができなくなるためにベローズ各山が等伸縮するのである。本文図7のベースになる。

第3図①はスプリングリングでありこれは②のコントロールリングは普通鈎物(鈎鋼、アルミ合金)パイプ(SGP、STPGまたはSUST)板(SS、SUS板)によって製作されておりベローズ谷部の形状に合せてベローズとは別に製作されており、Ex.J完成時に二つの繋りにしてベローズ谷部へ嵌め込むものと、ベローズ成形時成形治具と同時にリング状に製作したコントロールリングを取り付けそのまま製作するものと二種類ある。

コントロールリングの材質選定は、流体の温度および圧力によって変化すると同時に流体の状態つまり振動および、ウォーターハンマー脈動等のあるなしによって定めるべきである。

第3図 コントロールリングの断面形状図



添付-2 補強リング/コントロールリングの耐圧座屈性能

「図解 配管の力学」西野(配管技術2002年9月)抜粋

6. ベローズ型伸縮管継手自体の坐屈

JISB2352では、調整リングつきベローズ以外のベローズ型伸縮継手では、伸縮継手自体の坐屈(第17図のようになる)を防止するため、下記のような限界圧力を設け、その値を最高使用圧力以上とすること、としている。

補強リングなしベローズの場合

$$P_c = 0.3\pi \cdot f_m / (Nq) \quad \dots \text{(式2-9)}$$

補強リング付きベローズの場合

$$P_c = 0.3\pi \cdot f_m' / (Nq) \quad \dots \text{(式2-10)}$$

ここに

P_c : 坐屈条件による設計限界圧力 Mpa

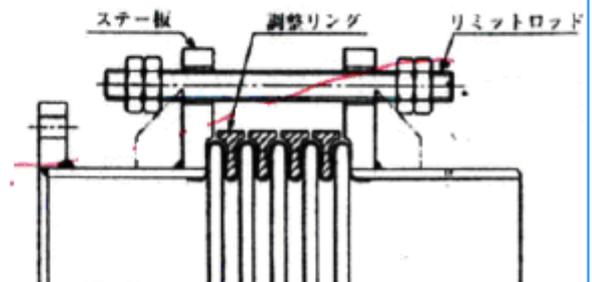
f_m : 補強リングなしベローズの理論上の毎山ばね常数 N/mm (JISB2352による)

f_m' : 補強リング付きベローズの理論上の毎山ばね常数 N/mm (JISB2352による)

N : 1ヶのベローズの山数 q : ベローズの山のピッチ mm

補強リング(第18図参照: JISB2352より)はベローズの耐圧性能を上げるために設けられる。

また調整リング(第19図参照: JISB2352より)はベローズの耐圧性能を上げると同時にベローズの各山の伸縮を配分する機能を持つもので、内圧によりベローズが坐屈して蛇行するのを防ぐ。調整リング付きベローズは、上記の計算を必要としない。



添付-3 コントロールリングの特性など

【 M.W.Kellogg「Design of Piping System」 7.5 】

Angular and offset movements, as well as axial movement may be accommodated, although two or more bellows assemblies are usually used for offset since, if a spool piece of sufficient length separates the assemblies, the offset attained by this means greatly reduces the required bellows length. Such double bellows joints should be provided with external constraint to assure distribution of the axial movement between the assemblies, and to remove the weight of the spool pieces from the bellows.

Means to equalize extreme expansion movement in a bellows assembly, and in addition to provide some measure of support to the elements against internal pressure loading, is generally considered desirable since it guards against lateral distortion (squirming). For corrugated-type bellows, this usually consists of rings suitably contoured to fit in the spaces between the convolutions, as shown on the joint of Fig. 7.5. By such arrangement, compressive deflections are definitely limited for each individual element. The support rings may be connected externally to further insure some equalization of element movement in all positions; this provision may be combined with other motion-constraining or overall limiting devices described in Section 7.6. As a support for the bellows against internal pressure effects, the equalizing rings occupy a role similar to that of the casing of a pneumatic tire in containing its inner tube. Obviously, they are most effective for this purpose in the fully compressed position.

Rings are sometimes cast and sometimes fabricated by welding. They are usually split into 180° sections and assembled with bolted joints; where used for substantial pressure one-piece construction is necessary.

The expansion bellows is fragile in comparison with the pipe and is often covered for protection against damage during installation or subsequent service. External sleeves at the same time provide some measure of operator protection in the event of a blowout, but must be arranged so as not to interfere with the joint movement and should be removable for inspection of the bellows.

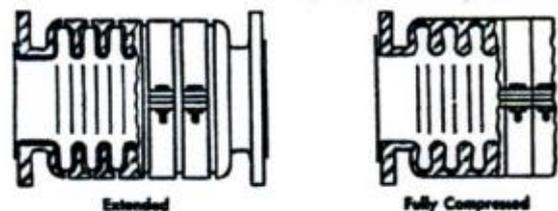


FIG. 7.5 Self-equalizing expansion joint

For U-shaped bellows having equalizing rings which provide support against internal pressure only along inner edge:²

$$S_R = \frac{1.5Et\Delta}{\lambda^{0.5}w^{1.5}N_d} + \frac{p_{io}}{t} \quad (7.6)$$

変位応力 内圧応力

力がより小さくなる。

添付3 Kellogg資料の和訳(参考)

軸方向変位と同様に角変位やオフセット変位も吸収できる。その場合、通常、2つ以上のベローズを用いてオフセットを行う。中間スプールを長くすれば必要山数は少なくて済む。そんなダブルベローズ継手にはベローズ間の軸方向変位の配分を確実にするため、またスプール重量の影響をベローズに及ぼさないために外部からの拘束を設けるべきである。即ち、各ベローズ継手内の変位を均分化し、内圧に対しベローエレメントをバックアップするような手段が望まれる。何故なら横方向の歪み(スクワミング)が防止できるからである。 座屈?

コルゲーションタイプのベローズでは、これは、Fig.7.5に示されるように、コンボリューション間のスペースにフィットするような輪郭を持ったリングによって達成される。即ちこのリングを配置することで個々のベローの圧縮撓みは一定量に制限できる。各リングは全ての位置でベローの動きを確実にするため、更に外部で連結される。なお、Sect.7.6で述べるように別のモーションの拘束、あるいはオーバーオールな制御装置と連結されることもある。

内圧に対してベローをバックアップする上で、イコーライジングリングは、自転車のチューブに対するタイヤのような役割を演じる。明らかにベローズが圧縮されてリングと密着した状態において、それは最も効果的である。リングは鋳物や溶接で作られる。それは180°に分割され、圧力負荷に対し一体になって機能するようにボルトで連結される。密着していないときは耐圧機能ダウン

伸縮継ぎ手はパイプに比べてもろいので、据付中あるいは使用中、ダメージを受けないようにカバーされる。また、リング+外部スリーブの形で、流体噴出しに対し運転員の保護を図ることもある。その場合継手の動きを拘束しないようにアレンジする必要がある。また検査のために取り外しができるようにする。

添付-4 コントロールリングの耐圧強度

[解説 原子力設備の技術基準(電力新報社) P262]

継手に図 28.6 のようなコントロールリングを用いる場合には、(28.8) 式は、次のとおりとなる。

$$\sigma = \frac{Ph}{100t} + \frac{1.5Et\delta}{p^{0.5}h^{1.5}N} \dots\dots\dots(28.9)$$

Kelloggの式 (JISの簡易式に同じ)

実験によると、図28.7のように、圧力が低い場合には、実験値と計算値は近似し、圧力が高い場合には、実験値は計算値より小さくでている。これは、内圧力による影響が小さいことによるものである。

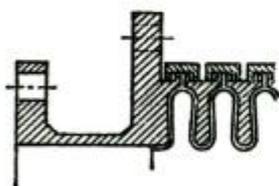


図 28.6 コントロールリングのある伸縮継手

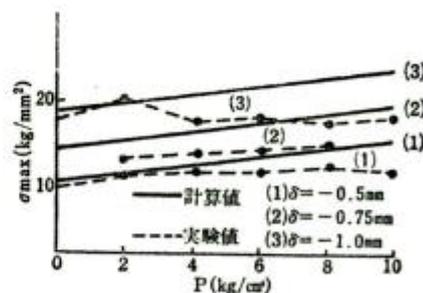


図 28.7 実験値と計算値との比較

なお、(28.8) 式及び (28.9) 式は、 $\frac{h}{3} \leq P < h$ の範囲内においては、実用的な誤差範囲内におさまり、一般のU形伸縮継手の強度計算式としては適切な式といえる。

添付-5 EJMA標準

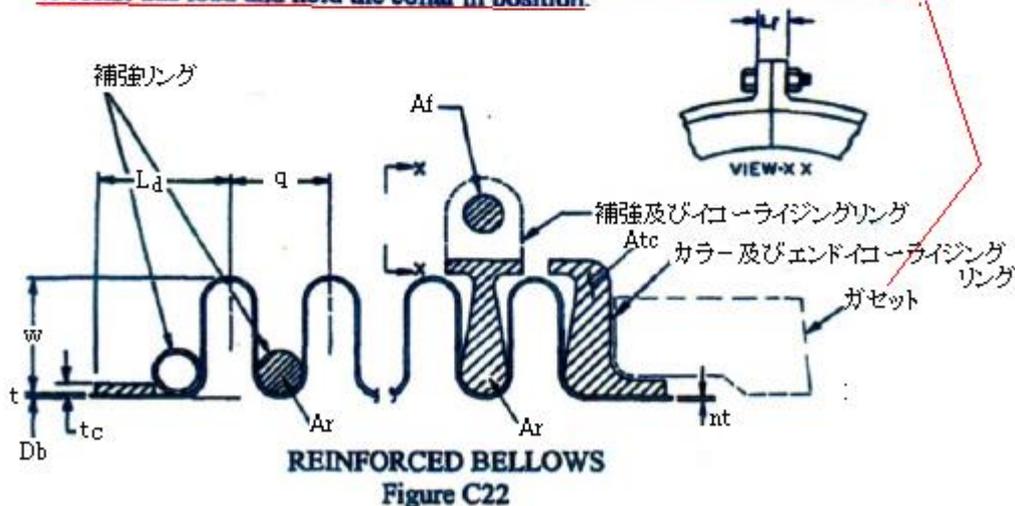
[Standards of the Expansion Joint Manufacturers Assoc. Inc.]

C-4.1.2 REINFORCED BELLOWS

The equations for reinforced bellows are based on those shown in Atomic International Report NAA-SR-4527 "Analysis of Stresses in Bellows, Part 1, Design Criteria and Test Results," with modifications and additions by the Association to reflect the experience of the members. These equations are based on elastic shell theory and consider the parameters involved for bellows of the "U" shaped configuration.

The equations shown in section C-4.2.2 are based on the Atomic International Report for unreinforced bellows. Equations (C-32), (C-33), (C-34), (C-35) and (C-38) reflect the increased strength and stiffness of the convolution due to the reinforcing member. Equations (C-30a), (C-30b), (C-31a), (C-31b), (C-31c), (C-32) and (C-33) as modified may be used to calculate stresses which can be directly compared to the bellows material allowable stress at design temperature published in the ASME/ANSI Piping Codes and the ASME Boiler and Pressure Vessel Codes. The system designer **MUST** identify the specific design code to the Expansion Joint manufacturer, as required in Appendix A, line 18d. Contact the Expansion Joint manufacturer for designs governed by other codes. A reinforced bellows is shown in Figure C22. An externally reinforced bellows with external pressure shall be treated as an unreinforced bellows.

Pressure on the convolution sidewall will apply an axial load on the end collar tending to push the collar away from the convolutions. This force will be equal to the internal pressure times the area difference between the bellows mean diameter and the bellows inside diameter. External restraints must be provided to resist this load and hold the collar in position.



(注記) EJMA 規定と JIS 規定(≒ASME 規定)を比較すると次のようになる。

- ① タンジェント部(ベローズ端部)の内圧によるベローズの周方向膜応力、押さえリングの周方向膜応力の式は異なっている。また JIS ではコントロールリングが除外(?)されているが EJMA には含まれているようだ(?)。また押さえリングの周方向曲げ応力は JIS にはないが、EJMA には含まれる。
- ② タンジェント以外の内圧によるベローズの周方向応力/子午線方向膜及び曲げ応力あるいは補強リング及び止め金具の周方向応力あるいは伸縮によって生じる子午線方向膜及び曲げ応力は、JIS、EJMA と同じ。バネ反力式も同じ。
- ③ 内圧応力(1次応力)の膜+曲げ応力制限は、JIS と EJMA では異なる。

添付-5 (続き)

C-4.2.2 DESIGN EQUATIONS FOR REINFORCED BELLOWS**Bellows Tangent Circumferential Membrane Stress Due to Pressure**

$$S_1 = \frac{P(D_b + nt)^2 L_d E_b}{2[(nt L_r + A_r/2)E_b(D_b + nt) + A_r E_c D_c]} \quad (\text{C-30a})$$

Collar Circumferential Membrane Stress Due to Pressure

$$S'_1 = \frac{P(D_c)^2 L_d E_c}{2[(nt L_r + A_r/2)E_b(D_b + nt) + A_r E_c D_c]} \quad (\text{C-30b})$$

Collar Circumferential Bending Stress Due to Pressure

$$S''_1 = \frac{F_g n_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \quad (\text{C-30c})$$

Bellows Circumferential Membrane Stress Due to Pressure

$$S_2 = \frac{H}{2A_r} \left(\frac{R}{R+1} \right) K, \quad (\text{C-31a})$$

 $R = R_1$ for integral reinforcing members $R = R_2$ for reinforcing members joined by fasteners (*1)

Note: In the case of reinforcing members which are made in sections and joined by fasteners in tension, this equation assumes that the structure used to retain the fastener does not bend so as to permit the reinforcing member to expand diametrically. In addition, the end reinforcing members must be restrained against the longitudinal annular pressure load of the bellows.

Reinforcing Member Circumferential Membrane Stress Due to Pressure

$$S'_2 = \frac{H}{2A_r} \left(\frac{1}{R_1 + 1} \right) K, \quad (\text{C-31b}) \quad (*2)$$

Note: In the case of equalizing rings, this equation provides only the simple membrane stress and does not include the bending stress caused by the eccentric fastener location. These stresses can be determined by elastic analysis and/or actual tests.

Fastener Membrane Stress Due to Pressure

$$S''_2 = \frac{H}{2A_r} \left(\frac{1}{R_2 + 1} \right) K, \quad (\text{C-31c})$$

Bellows Meridional Membrane Stress Due to Pressure

$$S_3 = \frac{.85P(w - 4C_r r_m)}{2nt_p} \quad (\text{C-32})$$

Bellows Meridional Bending Stress Due to Pressure

$$S_4 = \frac{.85P}{2n} \left(\frac{w - 4C_r r_m}{t_p} \right)^2 C_p \quad (\text{C-33})$$

Note: The above stresses should be evaluated for pressure capacity as follows:

添付-5 (続き)

C-4.2.2 (continued)

$$S_1 \& S_2 \leq C_{wc} S_{ab} \quad S'_2 \leq C_{wc} S_{ar} \quad S'_1 + S_1'' \leq K_1 C_{wc} S_{ar}$$

$$S'_1 \leq C_{wc} S_{ar} \quad S''_2 \leq S_{ar}$$

$$S_3 + S_4 \leq C_m S_{ab} \quad (\text{Below the Creep Range}) \quad \checkmark$$

$$S_3 + (S_4/1.25) \leq S_{ab} \quad (\text{In the Creep Range})$$

Bellows Meridional Membrane Stress Due to Deflection

$$S_5 = \frac{E_b t_p^2 e}{2(w - 4C_r r_m)^3 C_f} \quad (\text{C-34})$$

Bellows Meridional Bending Stress Due to Deflection

$$S_6 = \frac{5E_b t_p e}{3(w - 4C_r r_m)^2 C_d} \quad (\text{C-35})$$

Note: Modulus of elasticity, E_b in Equations (C-34) and (C-35) is at room temperature.

Fatigue Life

$$N_c = \left(\frac{c}{S_t - b} \right)^a \quad (\text{C-36})$$

where: a, b and c are material and manufacturing constants,
 $S_t = 0.7 (S_3 + S_4) + (S_5 + S_6)$. See Figure C28 for fatigue curve for austenitic stainless steel.

Limiting Internal Design Pressure Based on Column Instability for Single Bellows with Reinforcing Rings (both ends rigidly supported). Refer to Section C-4.1.6. For bellows with equalizing rings see Figure C22 and consult the manufacturer.

$$P_x = \frac{0.3\pi C_g f_r}{N^2 q} \quad (\text{C-37})$$

For universal expansion joints, N = total number of convolutions in both bellows for calculation of P_x

Bellows Theoretical Axial Elastic Spring Rate per Convolution

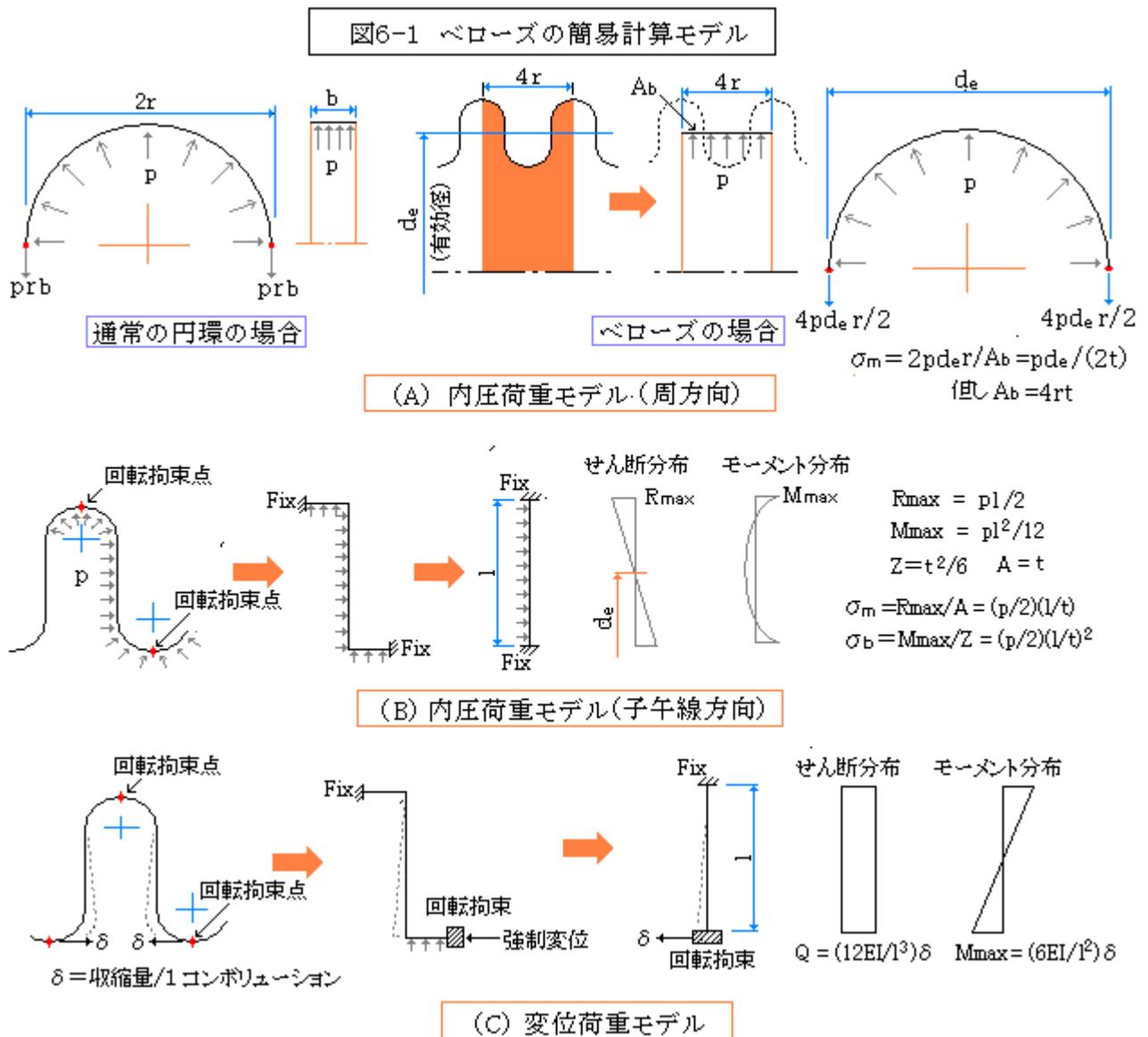
$$f_r = 1.7 \frac{D_m E_b t_p^3 \pi}{(w - 4C_r r_m)^3 C_f} \quad (\text{C-38})$$

- (*1) 分割して作られテンションファスナーで接合された補強材(リング)の場合、この式はファスナーを保持するためのジグが曲がらず径方向に補強材が膨張することを前提にしている。加えて端部の補強材はベロー長手方向に作用する環状の圧力荷重に耐えるように拘束されなければならない。
- (*2) イコーライジングリング(均衡化リング)の場合、この式は単純な膜応力をあたえるもので、偏心したファスナー配置により生じる曲げ応力は含まれない。曲げ応力などは、弾性解析または実地テストによって得られる。

添付-6 JIS の応力式について

1. テキスト類によく使われるベローズの簡易計算モデルを下図に示す。(A)は周方向の内圧モデルで、単純な円筒モデルで近似している。全断面で平均化され膜応力で扱われている。実際には曲げによる応力分布があるが補正されていない。(B)は子午線方向の内圧モデルで、梁で近似している。実際は板-シェルなので、JIS(ASME)/EJMA では、曲げ応力は補正係数 C_p で補正されて使用される。(C)は子午線方向の変位モデルで同じく梁で近似している。同じく板-シェルなので、JIS(ASME)/EJMA では、応力は補正係数 C_f, C_d で補正されて使用される。

これら簡易モデルから、ベローズに発生する応力の傾向が、おおよそ推測できるので、実際の応力計算ではこれらのイメージを念頭におけばよい。



2. 以上は補強リング無しの場合である。補強リング付きの場合、補強効果が含まれるので、その分、各応力式は変化してくる。

まず、内圧の周方向応力からみる。図6-2(a)のように、フープテンション $F = 4pd_e r/2$ は、ベロー

躯体と補強リングに F_1, F_2 という風に分担されて支持される。即ち

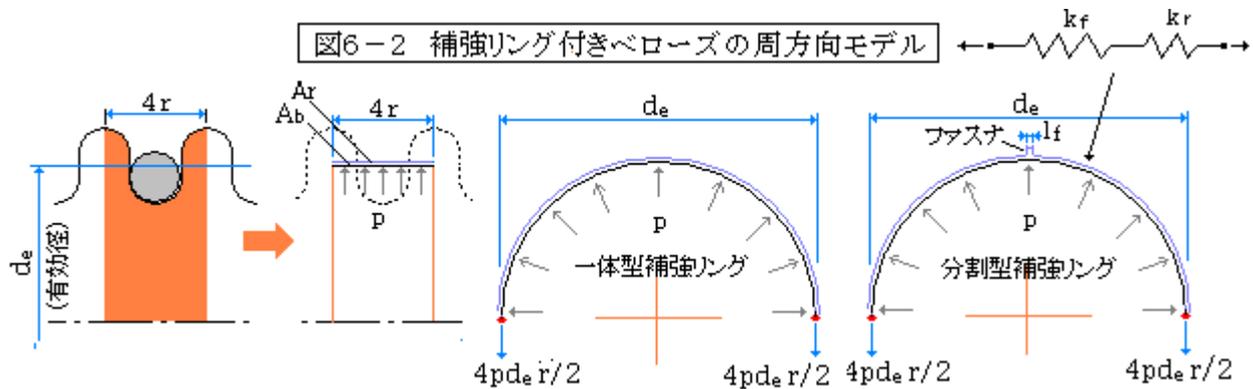
$$F = F_1 + F_2 \rightarrow F_1 = F \{ F_1 / (F_1 + F_2) \} = F \{ (F_1 / F_2) / \{ (F_1 / F_2) + 1 \} \}$$

$$F_2 = F \{ F_2 / (F_1 + F_2) \} = F \{ 1 / \{ (F_1 / F_2) + 1 \} \}$$

ここで $F_1 = \sigma_b A_b$ 、 $F_2 = \sigma_r A_r$ 、 $F = H/2 (= 4p d_e r/2)$ 、 $F_1/F_2 = R$ とすれば

$$\text{ベロー躯体の周方向平均応力: } \sigma_b = \{ H / (2A_b) \} \{ R / (R + 1) \} \rightarrow (16)\text{式に合致}$$

$$\text{補強リングの周方向平均応力: } \sigma_r = \{ H / (2A_r) \} \{ 1 / (R + 1) \} \rightarrow (19)(20)\text{式に合致}$$



以上のやり方で、JIS(16)(19)(20)式は導出されている。以下この導出過程を示す。

まず、補強リングが分割されず一体で製作されている場合は、

$$F_1 = A_b \sigma_b = A_b E_b \varepsilon_{tb} \quad , \quad F_2 = A_r \sigma_r = A_r E_r \varepsilon_{tr}$$

周方向の歪み ε_{tb} 、 ε_{tr} はおおよそ等しいので

$$R = F_1 / F_2 = A_b E_b / (A_r E_r) \rightarrow (17)\text{式に合致する。}$$

次に補強リングが2分割されファスナを用いて連結される場合は、図6-2の右上のように、補強リングを2つのバネの連結とみなせば、

$$F_2 = (1/k_f + 1/k_r)^{-1} \delta = k \delta \quad \delta = \text{伸び量}$$

ここで $F_r = E_r A_r (\delta_{rr}/r) = (E_r A_r / r) \delta_{rr} = k_r \delta_{rr} \rightarrow k_r = (E_r A_r / r) = (2E_r A_r / d_e)$ 、

また、 $F_f = E_f A_f \{ \delta_{rf} / (0.5l_f) \} = (2E_f A_f / l_f) \delta_{rf} = k_f \delta_{rf} \rightarrow k_f = (2E_f A_f / l_f)$ 、

半径方向変位 $\delta_{rr} = \delta_{rf}$ であるから $k = 2 \{ l_f / (E_f A_f) + d_e / (E_r A_r) \}^{-1}$ 、 $\delta = \delta_r$

また上記と同じく $F_1 = A_b E_b \varepsilon_{tb} = A_b E_b (2 \delta_r / d_e)$ であるから、

$$R = F_1 / F_2 = A_b E_b (2 \delta_r / d_e) / [2 \{ l_f / (E_f A_f) + d_e / (E_r A_r) \}^{-1} \delta_r] = (E_b A_b / d_e) \{ l_f / (E_f A_f) + d_e / (E_r A_r) \}$$

ここで $d_e = d_p$ であるから この式は(18)式に合致する。

[なおリングのファスナの偏心に伴う曲げ応力の計算に用いる引張力 F_2 は $F_2 = F \{ 1 / (R + 1) \}$ から求める。]

このように、JISの(16)~(20)式が導かれる。タンジェント部分の(14)(15)式も、上記と全く同様に導かれる。

JISの(14)(15)式は、タンジェント部に円筒形の押さえリングを設けた場合、ベロー躯体とリングに生じる応力をカウントしている。これらの式は、ベローのストレートな接続部分のみに有効であって、例えば、コントロールリングをベローに直付けした場合には適用できない。これは内圧フープの扱いが

単純でないからである。

一方 EJMA には、エンドのコントロールリングも含めた式[C30a,C30b]が与えられている(添付 5 参照)。これらの式は JIS の(14)(15)に似ているが、内圧フープを処理するために複雑になっている。残念ながら式は追いきれないが、JIS の(14)~(20)式と同種の式であることは間違いない。即ちペロー躯体及びペロー躯体とは分離したリング単体の平均化された応力(膜応力)を与えるもので、それ自身、長手荷重に対しガセットで支えられていることを前提にしている。従って、本ケースには適用できない。

次にペローコンボリューションの内圧子午線方向応力について(なお補強リングには長手荷重が働かないので子午線応力分布はない)。補強リング無しの場合、

$$\text{膜応力: } \sigma_3 = Pw/(2nt_p), \quad \text{曲げ応力: } \sigma_4 = (P/2n)(w/t_p)^2 C_p$$

この式の由来は、前述の通り。

補強リング付きの場合は、図 6-3 のように補強リング両側で接触があって、リングが固定化するとともに、接触によってペローズの支持スパン w が減少する。そこで規格では、

$$w \rightarrow (w - 4Kr_o)$$

としている。この場合、 $K = 0.3 - [100\{0.6(145P)^{1.5} + 320\}]^2$ であるから、 $P=0$ のとき $K=0.2$ 、また $P=\infty$ のとき $K=0.3$ であるから、 $4Kr_o = (0.8 \sim 1.2)r_o$ である。これは概ね円柱の補強リングの接触面積と合致する。この式は EJMA から転用されたものである。そのオリジナルは板シェル理論によるようであるが詳しくはわからない。とにかく、式としては簡明でよく理解できる。ここで注意すべきは、100%コントロールリングの場合、収縮変形したペローズは全面、リング壁に囲われるので $w=0$ になるが、これは EJMA でも採用されていない。おそらく、金属温度が運転温度に達していなければ収縮量が不足してペローズとリングの間には隙間ができ、 $w=0$ になることはないため、安全側に円柱リングの場合を採用したものと思われる。

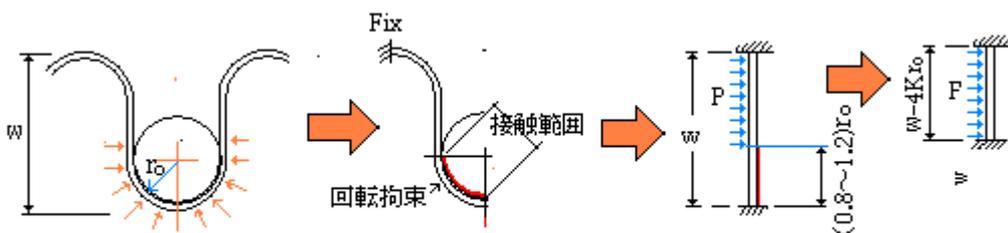


図6-3 子午線方向の接触と内圧分布

一方、Kellogg 社の式は、100%コントロールリングの内圧応力を $\sigma_m = Pw/(nt)$ でカウントしており(添付 3, 4 参照)、これは JIS の付属書 1 の簡易設計法に採用されている。この式の根拠はわからない。補強リング無しのペローズの膜応力の 2 倍になっているが、JIS に比べ少ないのでは？

このコンボリューションの有効高さ w の変化は、ペロー変位による応力にも影響を与える。JIS でも補強無しペローズの w を $(w - 4Kr_o)$ に変更した変位応力の式(24)(25)が与えられている。

以上