

【整番 SE-15-TM-009】	【標題】 高温フランジ締結ボルトのリラクゼーションの検討
分類：構造(FLG 継手)／種別：技術メモ	作成年月：H9.11／改訂：Ver.0.0 (R02.9)
	作成者：N. Miyamoto

全 9 枚

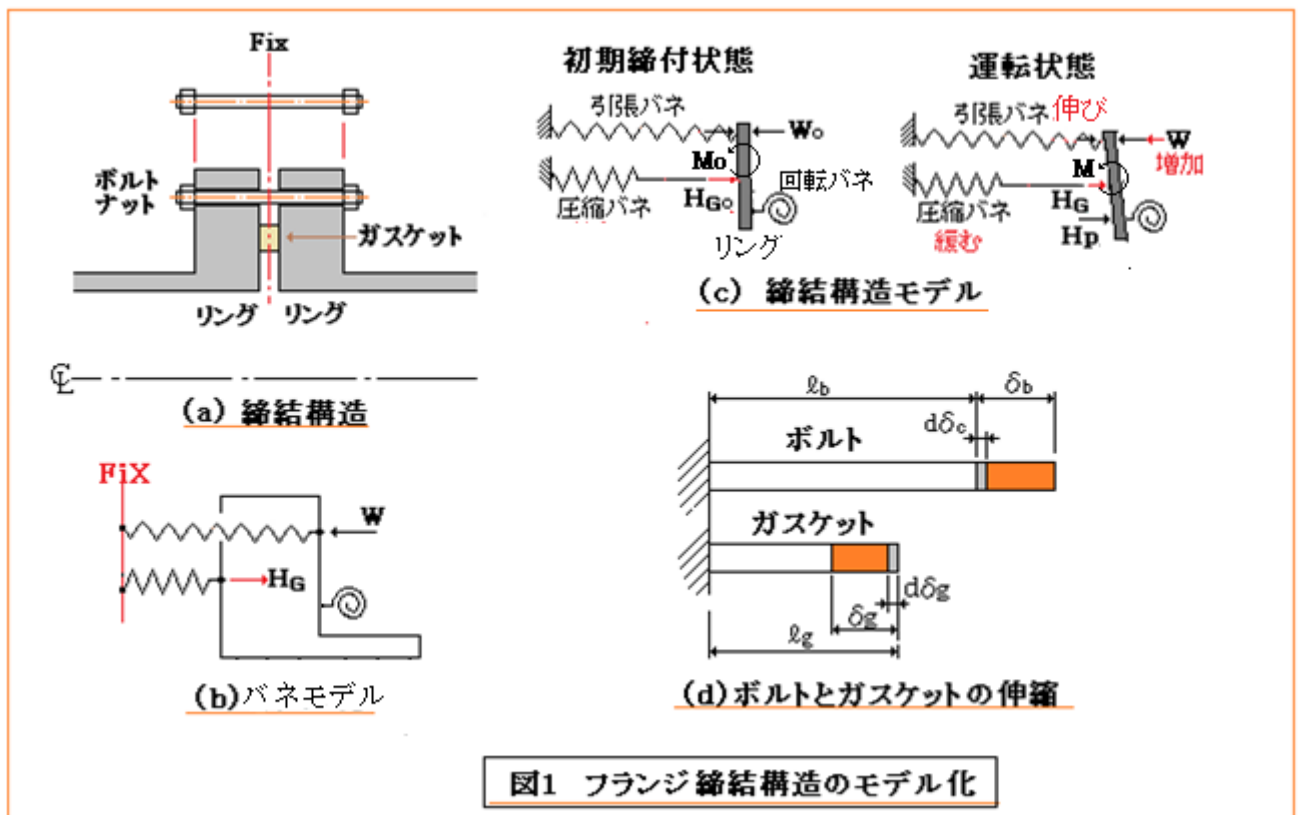
<はじめに>

リフォーマやタービン等の高温機器ではクリープ問題について幾つかの課題がある。クリープリラクゼーション(クリープ緩和)もその課題の一つである。リフォーマチューブ入口に設けた触媒交換用のフランジ継手(4BJPI600)の締付ボルト(SNB16材)について

BS4882(1973)によれば、ボルトの応力緩和によって本継手の内部流体温度 $\sim 530^{\circ}\text{C}$ では1000hr 後、初期応力の $\sim 10\%$ まで低下することになる。ボルト材質の変更を含め検討方…という顧客依頼があった。BS 規格にいう応力緩和は定みずみ下のクリープ緩和(?) であって、2次応力的なボルト応力には不適と思われたので、クリープによるボルト荷重変化とガスケット面圧の変化を関連付けて顧客依頼を検討してみたことがある。以下、参考としてその内容を記す。

1. ボルト応力緩和 \rightarrow ガスケット面圧低下に関する予備的考察

フランジの締結は2つの対になったフランジリングをボルトで締め付けることで、モデル的には図1のように表現できる。



(a)図に示すようにフランジリングはボルト・ナットとガスケットの組合せで外向きと内向きの移動が拘束されているが、外力/外乱が加えられたとき、両者とも弾性バネとして機能する。(b)図のようにシール保持のためナットを締め込むとボルトは伸び変形しそのバネ力でリング躯体に外力 W が加わりリングの移動によってガスケットが圧縮され反力 H_G が生じて外力 W とバランスする。これは基本形であって、実際は初期締付状態と運転状態で多少違ってくる。(c)図左は初期締付状態で、外力として W_0 、反力として H_{G0} 、偶モーメントとして M_0 が作用している。この状態でボルトは伸び変形し、ガスケットは圧縮変形し、リングはねじれ変形する。(c)図右は運転状態で、外力 W /反力 H_G 以外に内圧による外力 $H_p (=H_D+H_T)$ が加算される。 H_p の加算によってリングは外向きに押されガスケット

の反力は低下し圧縮変形は緩み H_G は減少し、 $(H_p + H_G)$ としてボルト荷重 W は増減しボルトの伸び変形は変化する。また偶モーメント M も増加し各変形に影響を及ぼす。

以上は通常の運転状態であるが、運転温度が高くなると時間的にクリープの影響が加わる。即ち(d)図のように、ボルトの伸び変形 δ_b がクリープ変形 $d\delta_c$ だけ失われて W が低下し、これに伴い圧縮変形量 δ_g とガスケット反力 H_G が低下する。更に H_G の低下は W の減少を引き起こす。この繰返しによってフランジのシール機能が低下してゆく。関連をごく単純化すると、

$$W + H_G = 0 \rightarrow \sigma_b A_b + \sigma_g A_g = 0 \rightarrow E_b \{(\delta_b - d\delta_c)/\ell_b\} A_b + E_g \{(\delta_g - d\delta_g)/\ell_g\} A_g = 0$$

ここで、 E = 縦弾性係数、 A = 作用面積、 ℓ = 長さ(厚さ)、 δ = 変位、 b, g → ボルト, ガスケットの意、 $E_b(\delta_b/\ell_b)A_b + E_g(\delta_g/\ell_g)A_g = 0$ なので、 $-E_b(d\delta_c/\ell_b)A_b - E_g(d\delta_g/\ell_g)A_g = 0$ 即ち

$$d\delta_g = - (E_b A_b / E_g A_g) (\ell_g / \ell_b) d\delta_c$$

一般に $E_b A_b \gg E_g A_g$ 、 $\ell_g \ll \ell_b$ なので、ガスケットの微小ひずみ量が微小クリープひずみ量から大きく増幅されることはないようであるが、累積によってその限界に達する。

(*) フランジもクリープ変形するが、ここでは剛体と見なされるのでボルト/ガスケットの伸縮への影響は無視できると思う。

2. 緩和シミュレーションの方法

Rodabaugh らは文献(1)で、下記のようなボルト-ガスケット並びの寸法関係式を与えている(*)。

$$(1 + \alpha_b T_b) \ell_o + q_b W = (1 + \alpha_g T_g) V_o + 2\{1 + 0.5 \alpha_f (T_{fg} + T_{fb})\} t_o - q_g H_G - 2h_g (q_f M + q_p P + q_t \Delta) \quad \text{---- (a)}$$

ここで、 W = ボルト軸力、 M = リング偶モーメント、 H_G = ガスケット反力、 P = 内圧、 T = 温度差、 Δ = リング-胴の温度差、 α = 線膨脹係数、 h_g = ガスケット反力モーメントアーム、 ℓ_o = 初期仮想ボルト長さ、 V_o = ガスケット初期厚さ、 t_o = リング初期厚さ、 q = 変形係数
サフィックス f, b, g, t, p → フランジ, ボルト, ガスケット, 温度, 内圧の意

この式は寸法関係式というより荷重-変位関係式であって、図 1(c)の左に相応する。クリープひずみを反力を持たない永久ひずみと考えるときは、(a)式の右辺第 1 項に $(1 + \varepsilon_c)$ を乗じればよい。

$$(1 + \varepsilon_c)(1 + \alpha_b T_b) \ell_o + q_b W \\ = (1 + \alpha_g T_g) V_o + 2\{1 + 0.5 \alpha_f (T_{fg} + T_{fb})\} t_o - q_g H_G - 2h_g (q_f M + q_p P + q_t \Delta) \quad \text{----- (b)}$$

ここで、 ε_c = 高温/応力作用下で材料に生じるクリープひずみ

$(1 + \varepsilon_c)$ の加算で、ボルト軸力 W , ガスケット反力 H_G および H_G を含むモーメント M は変化する、すなわち(a)式の W , H_G , M よりも低下する。

(b)式において、クリープひずみ ε_c は一般に非線形的に変化して時間経過とともに累積する。またガスケットの変形係数 q_g はひずみの進行とともに変化する。従って (a)式は時間に関係なく解くことができるが、(b)式は時間刻みで解く必要がある。式に含まれるガスケット反力 H_G (→ ガスケット面圧) の時間変化を追うことで、リーク発生を予測することができる。

(*) 詳しくは、SE-15-TM-006 「フランジ継手のボルト荷重変化シミュレーション」 参照のこと。

3. 緩和シミュレーションの手順

(1) クリープ緩和シミュレーションは次のステップで行う。

- ステップ 1) 計算用パラメータ(寸法/物性/荷重条件/温度条件/クリープデータ/変形係数)などを準備する。
- ステップ 2) (a)式で $H_G=W$ とおいて締付け前の初期ボルト長さ l_0 など、初期条件を求める。
- ステップ 3) (a)式から運転状態のガスケット反力 H_G とボルト荷重 W を求め、クリープ前のガスケット面圧(ガスケット応力)やボルト応力などの値をセットする。
- ステップ 4) クリープの進行によるボルト応力やガスケット面圧の緩和を時間的にフォローする。即ちボルト応力の変化からクリープひずみの時間累積を求め、(b)式から各時刻の W, H_G や応力、面圧を求める。なおガスケット面圧変化に伴う変形係数を更新する。
- ステップ 5) シミュレーション結果をまとめ、応力/面圧変化をプロットする。

まずステップ 1について。荷重条件については設備仕様ないし FLG 規格による。温度条件は温度分布解析によらざるを得ないが十分な保温があるなら一様温度とみて無視してもいいかと思われる。クリープデータについては NIMS データ/文献式などによる。変形係数 [q_b, q_g, q_f, q_p, q_t] の定義は別途 TS[SE-15-TM-006]などを参照されたし。通常リングモーメントによる変形に較べ内圧/熱膨脹差による変形は小さいので q_p, q_t を無視しても実質的な影響は少ないと思われる。

ステップ 2について。計算は締付け前のボルト長さ l_0 が基点になるので、初期締付状態における (a)式を変形した式から l_0 を求める。この場合、初期ボルト荷重は設備仕様や規格の定義による。

ステップ 3について。この場合、ワンショット的なガスケットの見掛けヤング率(縦弾性係数) E_g を仮定して、ガスケットの変形係数 $q_g \rightarrow$ ガスケット反力 $H_G \rightarrow$ ガスケット応力 σ_g を求め、ガスケットデータから得られるひずみと仮定の見掛けヤング率から得られるひずみが一致するまでこの仮定計算を繰り返してガスケット反力とボルト荷重を Fix する。

ステップ 4について。クリープひずみの時間累積を除いて、基本的にはステップ 3 に同じである。クリープひずみは時間積分 $\epsilon_c = \int \dot{\epsilon}_c dh$ (ここで $\dot{\epsilon}_c$ = ひずみ速度、 dh = 微小時間) から求める。ひずみ速度は、ガスケット面圧に対して与えられる(NIMS データなどによる)。計算結果は一定周期で出力して確認できるようにする。

なおこの緩和シミュレーションでは、ホットボルティングは考慮していない。ボルトの締付けは運転前の 1 回限りと仮定している。

- (2) 具体的なシミュレーション手順を次頁以降のチャート 1 に示す。なお、運転状態のガスケットの応力 - ひずみ曲線としては、実際の線膨脹差/温度分布を考えて、復元曲線ではなく圧縮曲線の方を採用し、明らかにガスケット応力が低下しひずみが減少するクリープ進行過程では復元曲線の方を採用している。またガスケットの応力 - ひずみ曲線を $\sigma_g = A \epsilon_g - B$ [$\rightarrow \epsilon_g = (\sigma_g + B)/A$] で直線近似している(直線近似できない場合はグラフ読取りになる)。

チャート1 FLGのクリープ緩和シミュレーション手順

ステップ1

寸法: V_o , t_o , h_G , h_D , h_T ,
 ボルト: A_b , E_{b0} , E_{b1} , α_b , ガスケット: A_g , α_g
 フランジ: q_{f0} , q_{f1} , q_p , q_t , α_f ,
 荷重: W_o , H_D , H_T , T_{fb} , T_{fg} , T_g , T_b , Δ , p
 係数: A_{c0} , B_{c0} , A_{c1} , B_{c1} , A_{r1} , B_{r1} ,
 設定値: ΔE_g , Δt , t_s , t_e , クリープ速度データ

ステップ2 伸び無し初期ボルト長さ(ℓ_o)の算定

$$q_{g0} = \{(W_o/A_g + B_{c0})/A_{c0}\}(V_o/W_o) \quad (*1)$$

$$E_{g0} = V_o/(q_{g0}A_g), \quad \sigma_{g0} = W_o/A_g, \quad \varepsilon_{g0} = \sigma_{g0}/E_{g0}, \quad \sigma_{b0} = W_o/A_b \quad (*2)$$

$$\ell_o = (V_o + 2t_o - q_{g0}W_o - 2q_{f0}h_G^2W_o) / \{1 + W_o/(E_{b0}A_b)\} \quad (*2)$$

ステップ3. 運転状態のボルト荷重/ガスケット反力の算定

$$V_o = (1 + \alpha_g T_g)V_o, \quad t_o = \{1 + 0.5 \alpha_f (T_{fg} + T_{fb})\}t_o, \quad \ell_o = (1 + \alpha_b T_b)\ell_o$$

$$q_b = \ell_o / (E_{b1}A_b)$$

$$E_g = E_{g0}$$

$$q_g = V_o / (E_g A_g)$$

$$H_G = \{1 / (q_b + q_g + 2q_{f1}h_G^2)\} \{ (V_o + 2t_o - \ell_o) - q_b(H_D + H_T) - 2q_{f1}h_G(H_D h_D + H_T h_T) - 2h_G(q_p P + q_t \Delta) \} \quad (*3)$$

$$\sigma_g = H_G / A_g$$

$$\varepsilon_{g'} = \sigma_g / E_g, \quad \varepsilon_g = (\sigma_g + B_{c1}) / A_{c1}$$

$$E_g = E_g + \Delta E_g$$

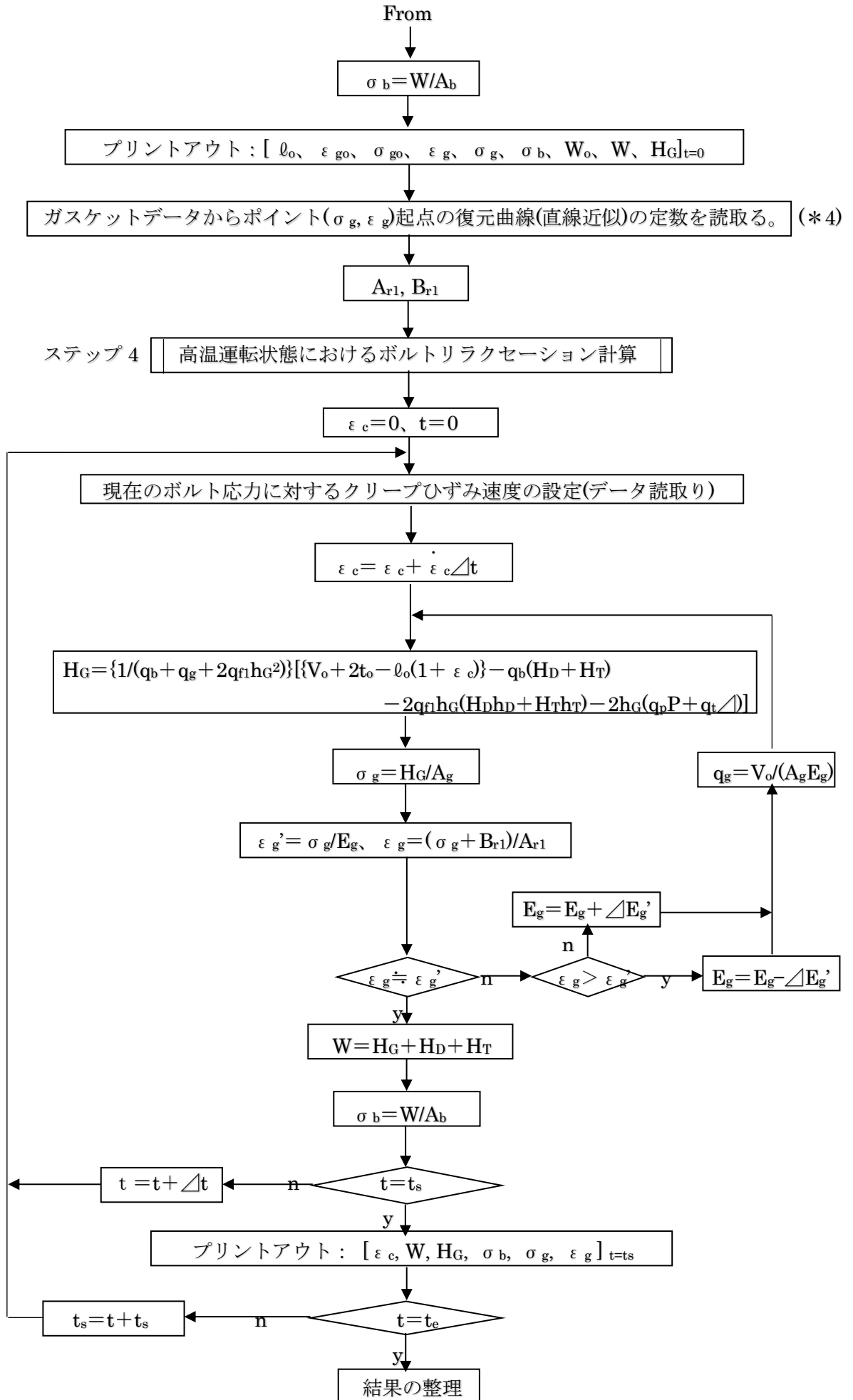
$$\varepsilon_g \stackrel{?}{=} \varepsilon_{g'}$$

$$\varepsilon_g > \varepsilon_{g'}$$

$$E_g = E_g - \Delta E_g$$

$$W = H_G + H_D + H_T$$

Next



【 チャートの記号説明 】 (*5)

V_o =ガスケットの圧縮無し厚さ(mm)、 t_o =フランジリングのオリジナル厚さ(mm)、
 h_G =ガスケット反力作用アーム(mm)、 h_D =オープニングフォース作用アーム(mm)、
 h_T =オープニングフォース作用アーム(mm)、 l_o =伸び無し初期ボルト長さ(mm)、
 A_b =ボルトの全断面積(mm²)、 A_g =ガスケットの全接触面積(mm²)、
 E_{bo} =常温のボルト材の縦弾性係数(kgf/mm²)、 E_{b1} =運転温度のボルト材の縦弾性係数(kgf/mm²)、
 E_{go} =初期締付け時のガスケットの見掛け縦弾性係数(kgf/mm²)、
 E_g =運転時のガスケットの見掛け縦弾性係数(kgf/mm²)、
 $\Delta E_g, \Delta E_g' = E_g$ の計算ステップ変化(kgf/mm²)、
 α_b =ボルト材の平均熱膨張率(°C⁻¹)、 α_g =ガスケットの平均熱膨張率(°C⁻¹)、
 α_f =フランジ材の平均熱膨張率(°C⁻¹)、 σ_b =ボルト軸方向平均応力即ちボルト応力(kgf/mm²)、
 σ_g =ガスケット平均応力即ちガスケット面圧(kgf/mm²)、
 W_o =初期ボルト荷重(kgf)、 W =運転時のボルト荷重(kgf)、 H_G =ガスケット反力(kgf)、
 H_D =規格定義のオープニングフォース(kgf)、 H_T =規格定義のオープニングフォース(kgf)、
 T_{fg} =ガスケット位置における FLG リングの据付時と運転時の温度差(°C)、
 T_{fb} =ボルト位置における FLG リングの据付時と運転時の温度差(°C)、
 T_g =ガスケットの据付時と運転時の温度差(°C)、 T_b =ボルトの据付時と運転時の温度差(°C)、
 P =内圧(MPa)、 Δ =FLG ネックにおけるリング～管胴の温度差(°C)、
 ε_{g*} =ガスケットの見掛けひずみ(-)、 ε_g =ガスケットの実際ひずみ(-)、 ε_c =クリープひずみ(-)、
 $\dot{\varepsilon}_c$ =クリープひずみ速度(hr⁻¹)、 q_b =ボルトの変形係数(mm/kg)、
 q_{go} =常温時のガスケットの変形係数(mm/kg)、 q_g =運転時のガスケットの変形係数(mm/kg)、
 q_{fo} =常温時の FLG リングの変形係数(rad./kgf-mm) (*6)、
 q_{f1} =運転時の FLG リングの変形係数(rad./kgf-mm) (*6)、
 q_p =内圧による変形係数(rad./MPa) (*7)、 q_t =温度差に依る変形係数(rad./°C) (*8)、
 A_{co}, B_{co} =常温における圧縮曲線におけるガスケットひずみ式 [$\varepsilon_g = (\sigma_g + B_{co})/A_{co}$] の定数、
 A_{c1}, B_{c1} =運転温度における圧縮曲線におけるガスケットひずみ式 ($\varepsilon_g = (\sigma_g + B_{c1})/A_{c1}$) の定数、
 A_{r1}, B_{r1} =運転温度における復元曲線におけるガスケットひずみ式 ($\varepsilon_g = (\sigma_g + B_{r1})/A_{r1}$) の定数
 t =高温経過時間(hr)、 Δt =高温経過時間の増分(hr)、
 t_s =計算結果出力の累積周期(hr) (→ Δt の整数倍とする)、
 t_e =全高温運転時間即ち全計算時間(hr) (→ t_s の整数倍とする)、

【 チャートの補注 】

(*1) ガスケットの応力-ひずみ関係からガスケットに発生するひずみは $\varepsilon_g = (\sigma_g + B)/A$ になるが
 初期締付け時のガスケット面圧は $\sigma_g = H_G/A_g = W_o/A_g$ なので $\varepsilon_{go} = (W_o/A_g + B_o)/A_o$ で与えられる。
 ここで変形係数 q_{go} を用いれば、ガスケットひずみを $\varepsilon_{go} = \Delta V_o/V_o = q_{go} W_o/V_o$ と定義できるので
 これらの ε_{go} を等置すれば、ガスケットの変形係数 $q_{go} = \{(W_o/A_g + B_o)/A_o\} (V_o/W_o)$ が得られる。

(*2) ガスケットの見掛け縦弾性係数 E_{Go} は次のように得られる。

$$E_{Go} = \sigma_g / \varepsilon_{go} = (H_{Go}/A_g) / (\Delta V_o/V_o) = (H_{Go}/A_g) / (q_{go} H_{Go}/V_o) = V_o / (q_{go} A_g)$$

また初期ボルト長さ ℓ_0 は、(a)式で内圧と温度差を零、 $H_G=W=W_0$ 、 $M=h_GW_0$ 、 $g_b=\ell_0/E_{b0}A_b$ と
 おいて、 $\ell_0+(\ell_0/E_{b0}A_b)W_0=V_0+2t_0-q_gW_0-2h_G(q_{f0}h_GW_0) \rightarrow \ell_0$ 式

- (*3) この H_G 式は(a)式において $W=H_G+H_D+H_T$ とにおいて得られる。この式を内圧零/温度差零/常温
 すなわち初期締付けベースにすれば、 $H_G=(V_0+2t_0-\ell_0)/(q_{b0}+q_{g0}+2q_{f0}h_G^2)=H_{G0}$ になるので
 この H_G 式は、 H_{G0} を一般化したものと云える。 H_G 式は更に次のように書ける。

$$H_G=(1/f)\{1/(q_{b0}+q_{g0}+2q_{f0}h_G^2)\}\{(V_0+2t_0-\ell_0)-q_b(H_D+H_T) \\ -2q_{f1}h_G(H_Dh_D+H_T h_T)-2h_G(q_p P+q_t \Delta)\}$$

係数 f は運転時と締付け時の変形係数の比を絡げて表現したもので $f \geq 1$ である。従って
 運転時の H_G は、締付け時の H_G から H_D 、 H_T 及び温度の加算に依る降下量を差し引き、更に
 運転時の昇温による降下率($1/f$)を考慮したものである。 H_G は H_{G0} と分離していない(念為)。

- (*4) リラクゼーション過程ではガスケット面圧は低下するので面圧は復元曲線上にあるとして
 ガスケット反力を計算する。この場合、ガスケットの見掛けの縦弾性係数 E_g を徐々に変えて
 行ってマッチポイントを探す。
- (*5) パラメータ h_G 、 h_D 、 h_T 、 A_b 、 A_g 、 W_0 、 H_G 、 H_D 、 H_T についてはFLG規格(例えばJIS
 B 2205)の定義に準じる。なお W_0 については設備仕様に基づき規格に依らない場合もある。

- (*6) FLG リングの変形係数 q_f は次式による(別途TS[SE-15-TM-007]参照)。

$$q_f=(a'/a)\{1/(2\pi c)\}\{1/(2\beta D)\}\{1/[1+\beta t_0/2+\{(1-\nu^2)/(2\beta c k)\}(t_0/t_p)^3 \ln(d/c)]\}$$

ここで d =リング外半径(mm)、 c =リング内半径(mm)、 g =ガスケット反力円の半径(mm)

a =リング平均半径 $[(c+d)/2]$ (mm)、 a' =平均半径 $[(e+g)/2]$ (mm)、

e =ボルトピッチ円の半径(mm)、 t_0 =リング厚さ(mm)、 t_p =管胴の厚さ(mm)、

E =管胴材の縦弾性係数(kgf/mm²)、 β =シェル定数 $[\{3(1-\nu^2)/(r_m^2 t_p^2)\}^{0.25}]$ (mm⁻¹)、

D =板剛性 $[=Et_p^3\{12(1-\nu^2)\}]$ (kg-mm)、 ν =ポアソン比(-)、 r_m =管胴平均半径(mm)

k =モーメント補正係数(下記)

$d/c=1.1\sim 1.2$	$d/c=1.2\sim 1.5$	$d/c=1.6\sim 2.0$	$d/c=2.0\sim 3.0$	$d/c=3.0\sim 4.0$
$k=1.0$	$k=1.06$	$k=1.10$	$k=1.12$	$k=1.16$

なお、 q_{f0} 、 q_{f1} は次のように定義される。

常温における縦弾性係数 E を用いて計算したとき $\rightarrow q_{f0}$

運転温度における縦弾性係数 E を用いて計算したとき $\rightarrow q_{f1}$

- (*7) 内圧に関する変形係数 q_p は次式による。別途TS[SE-15-TM-006]を参照のこと。

$$q_p=\{1/(\beta D)\}\{Y_1/(X_{12}X_{21}-X_{11}X_{22})\}\{X_{21}-X_{22}/(2\beta)\}$$

ここで $X_{11}=1/(2\beta^3 D)$ 、 $X_{12}=1/(2\beta^2 D)$ 、 $Y_1=\{(1-\nu/2)/(Et_p)\}(c^2+t_p/2)^2$

$X_{12}=1/(2\beta^2 D)-6c\{Et_0^2 \ln(d/c)\}$ 、 $X_{22}=1/(\beta D)+12c\{Et_0^3 \ln(d/c)\}$

β 、 D 、 t_p 、 t_0 、 c 、 d 、 E 、 ν などの記号は上記 q_f 式に同じ。

- (*8) 熱膨脹差に関する変形係数 q_t については別途TS[SE-15-TM-006]による。

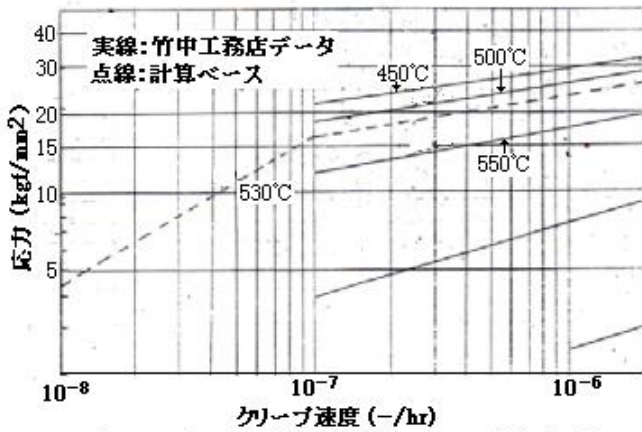


図2a ボルト材(SNB16)のクリープ速度データ

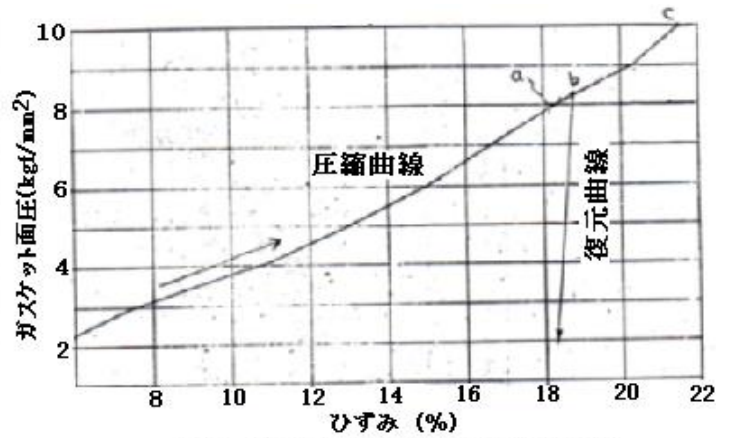


図2b ガasketの面圧-ひずみ関係

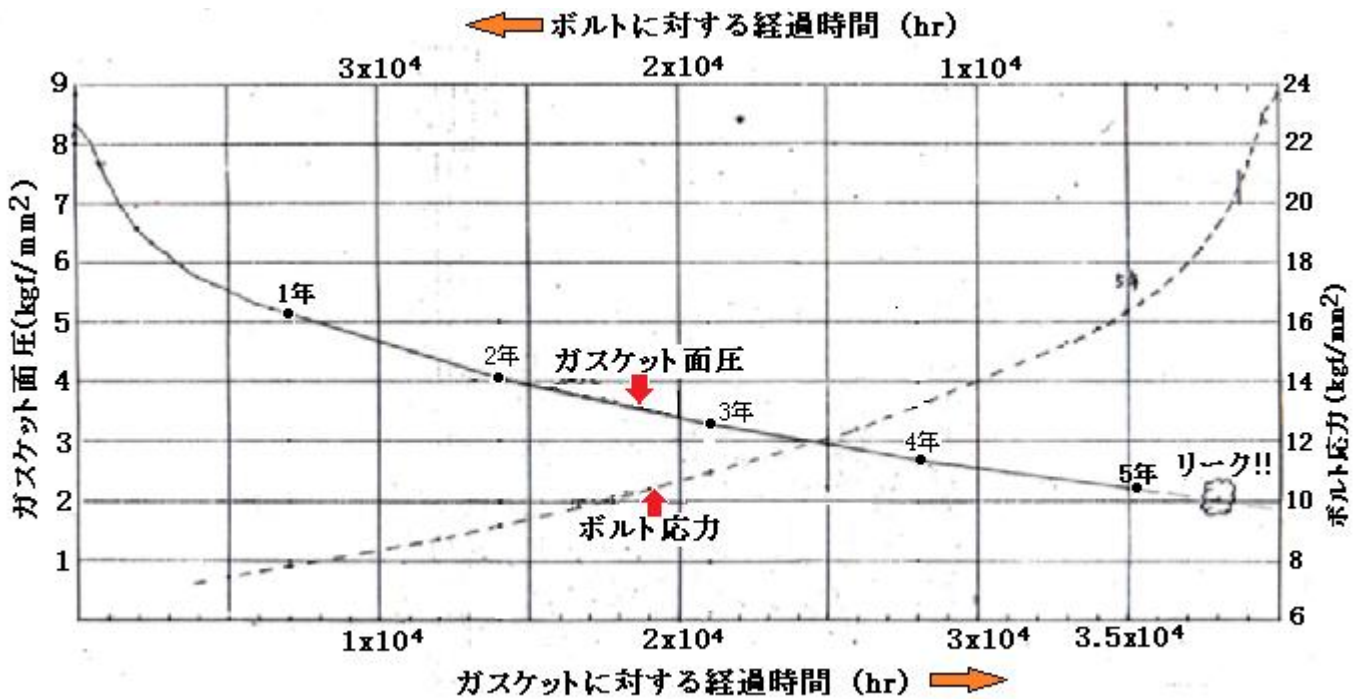


図3 ボルト/ガスケットのリラクゼーション解析結果

4. 緩和シミュレーションの結果

下記の高温 FLG 継手につきボルト/ガスケットの緩和傾向を大雑把に見積もる。

フランジ：4B サイズ クラス 600 SUSF321/SFVAF

ボルト：8-谷底径 19.2 SA193-B16(SNB16 eq)

ガスケット：t4.5 グラファイト系ボルテックス

検討条件) $V_o=4.5$ 、 $t_o=48$ 、 $h_G=40$ 、 $h_T=45$ 、 $h_D=50$ (mm)、 $q_{f1}=1.3 \times 10^{-9}$ rad./kg-mm、

$A_b=2310 \text{ mm}^2$ 、 $E_{bo}, E_{b1}=21000, 13000$ (kgf/mm²)、 $A_g=6104 \text{ mm}^2$

$W_o=48800$ kg f、 $H_D=2930$ kg f、 $H_T=1130$ kgf、 A_{co} 、 $B_{co}=A_{c1}$ 、 $B_{c1}=54.05$ 、 1.89 、

$A_{r1}, B_{r1}=1333$ 、 236 、 $\Delta E_g=2$ kgf/mm²、 $\Delta t=10$ hr、 $t_s=100$ hr、 $t_e \sim 35000$ hr、

$T_g=T_b=T_f=530^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_f=Av.17 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $\alpha_g=10 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $\alpha_b=14.4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、

運転温度=530°C、温度分布無し(均一 530°C)、内圧による変形は無視、

検討で使用したクリープひずみ速度及びガスケット応力-ひずみ線図を図 2a、図 2b に示す。

なお、ガスケットの $\sigma_g - \varepsilon_g$ 曲線の温度依存性は無視できるとしている。

検討結果) 検討結果を図 3 に示す。実験ではグラファイト系ボルテックスは 2kgf/mm^2 でリークが起きるので、この場合約 5 年を過ぎた辺りでリークが起きることになる。従って裕度を見て 3~4 年間に一回は増し締めが必要と思う。一方、ボルト応力は初期 24kgf/mm^2 から 7kgf/mm^2 程度までダウンする。またクリープひずみは 3 年経過後 0.274% 、恐らくボルトの更新は必要ないと思われる。

(なお運転開始時のガスケット面圧(応力)が圧力負荷にもよらず初期締付時の 8kgf/mm^2 からアップしているのはフランジの線膨脹係数がボルトのそれより高いためである。ボルト応力も然り。)

引用文献)

- (1) ORNL-5035 “Flange :Computer Code for the analysis of Flanged Joint and Ring type Gasket”
by E.C.Rodabaugh and S.E.Moore (Jan.1976)