

空気作動弁駆動用ダイアフラム材の寿命予測

Life prediction of diaphragm material for air operation valve drive

三上 雅生 (Masao Mikami)*¹ 清水 泰貴 (Yasutaka Shimizu)*²

要約 原子力発電所を含む各種プラントでは、流体制御のため配管各部に多くの弁が取り付けられており、それらのうち空気式駆動弁では駆動部内部にゴム製のダイアフラムが組み込まれているものがある。ダイアフラムは加圧空気を送り込んだ際に変形して弁を駆動しつつ密封性を維持する役目を担っているが、周辺環境温度や駆動部の繰り返し変形により劣化していくため、その機能が失われる前の適切な時期に取り替えることが重要である。本研究では、クロロプレン（CR）ゴム製ダイアフラムを取り上げ、さまざまな使用条件下で精度良い寿命予測ができる手法を検討した。評価手法はまず、CRゴムの試料について加熱促進劣化試験の劣化データにアレニウス則を適用して温度と切断時伸び残率の関係を得た。次に、加熱期間を変え、異なる程度に劣化をさせたダイアフラムを試験用の弁駆動部に取付け、き裂が貫通するまで繰り返し動作させることにより、熱による劣化状態とき裂貫通までの繰り返し回数関係を求めた。これら2種類の試験によって得られた使用条件と劣化（き裂発生）の関係から寿命評価法を開発した。また、駆動試験はフルストロークで実施したが、実際の弁では中間開度位置において短いストロークで運用されているものが多い。そこで、ストロークによる劣化の違いについて評価するため、ダイアフラムの変形に伴う応力の変化について有限要素法を用いた数値解析を行い、実機適用を可能とした。

キーワード 空気作動弁, ダイアフラム, クロロプレン, 寿命予測, アレニウス則, 切断時伸び, 応力挙動, 数値解析

Abstract In various plants including nuclear power plants, many valves are attached in each part of piping for fluid control, among those the diaphragm made of rubber is included in the inside of drive part with air operated valve. Although the diaphragm bears maintaining sealing performance with changing itself when pressurization air is charged, it is important to exchange at suitable time before its function is lost, since it deteriorates by circumference environmental temperature and repetitive transformation of drive part. In this research, a diaphragm made of Chloroplene (CR) rubber was taken up, and a technique having the ability to perform accurate life prediction under various operating conditions was examined. First, the Arrhenius rule was applied to the data of heat accelerated degradation examinations about sample of CR rubber, and a relation between temperature and elongation at break rate was obtained. Next, relation between number of repetition times and degradation state by heat was obtained by attaching the diaphragms, which were aged to various degrees by changing heat periods, to the valve drive part and carrying out repetition operation until a crack penetrated. The life assessment method was developed from the relation between the operating condition acquired by these two kinds of examinations, and degradation (crack). Moreover, although the operation test was carried out at full stroke, many valves are actually used with much what is employed by short stroke in the position of opening of a degree in the middle with the actual valve. Then, in order to evaluate about the difference in degradation by length of stroke, numerical analysis which used the finite element method about change of the stress accompanying modification of a diaphragm was performed, and it was assumed that we could apply the technique to an actual machine.

Keywords air operated valve, diaphragm, Chloroplene, life prediction, Arrhenius rule, elongation at break, stress action, finite element method, numerical analysis

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在関西電力(株)

1. はじめに

発電所や工場など各種プラントには、ほぼ例外なく水、空気、ガス、蒸気等の流体を通すための配管が設置されている。そしてこれら流体の通過、しゃ断を行ったり、あるいは流量、圧力などを調整するための手段として、配管の途中に弁が設けられていることが多い。これらの弁のうち、空気作動弁とは弁の動力源として圧縮空気をういている弁を総称しており、駆動部にかかる空気圧を制御して流体の流量、圧力などを制御する機能を持っている。原子力発電所においても、流体の制御手法の一つとして各種の空気作動弁が多数採用されている。

空気作動弁は、駆動方式の違いによりダイヤフラム式とシリンダー式に大別できる。これらには、それぞれダイヤフラムとリングと呼ばれるゴム製品が使われており、いずれも駆動部にかかる空気圧に対して気密性を維持しつつ弁を駆動する機能を持っている。ダイヤフラム式空気作動弁のダイヤフラムを介した空気圧による弁の駆動力の伝達を図1に示す。

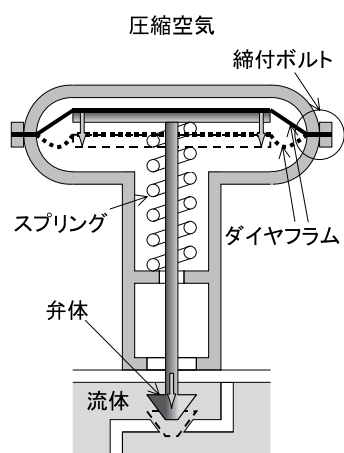


図1 ダイヤフラム式空気作動弁の断面模式図

ダイヤフラムのようなゴム製品は、使用に伴い経年的な硬化や伸縮性の低下といった物性の変化が生じる。これがある程度まで進行すると、き裂や永久歪みといった性状が現れて、機能が劣化し故障に至る。従ってダイヤフラムが劣化して機能を十分果たせなくなる(寿命)前の適切な時期にこれを取り替えることは安全上重要である。

こうしたゴム製品の取替周期を決める際、取替時期を延長すると設備稼働に対する信頼性が低下し、逆に取替え時期が短すぎると過剰メンテナンスとな

ることから、その取替周期は設備保守の観点から重要な意味を持つ。しかしながら、ゴムの劣化は材質や使用環境などによって多種多様な様相を呈するため、個々の状況を踏まえた経年劣化特性を求めることは困難である。また、これに関する研究報告例をみても、素材や配合による耐久性の比較等の報告はあっても、製品の状態で寿命評価はメーカーの技術的なノウハウもあり、公開されている研究報告例は極めて少ない^{(1)~(5)}。従って、ユーザーはメーカー推奨値を基準に弁の重要性を考慮した取替え間隔を設定するに留まっているが、メーカーは厳しい条件でも信頼性を確保出来るよう一般に画一的で短期間の取替え間隔の推奨値を提示している。

そこで本研究では、ゴムの劣化を熱酸化反応によるものと、弁駆動時の屈曲による疲労の組み合わせによりき裂が発生するものの二つと考え、これら環境条件に応じた劣化予測を精度良く行う手法の開発を行った。具体的な方法としては、まず熱によるゴムの劣化程度を表す指標を予備試験結果から切断時伸びとして、加熱促進劣化試験を実施した。また、ゴムの劣化に伴うダイヤフラム寿命末期は屈曲に伴うき裂貫通であるとして、模擬弁による駆動試験を行いき裂限界を求めた。これら、加熱促進劣化試験で得た温度と切断時伸びの関係と、劣化ダイヤフラムの特性値と駆動回数から、使用環境(温度、動作頻度)に合わせた寿命予測を、マイナー則を用いて評価することとした。

また、駆動試験はフルストロークで実施したが、実際の弁では中間開度位置において短いストロークで運用されているものが多い。そこで、ストロークによる劣化の違いについて評価するため、ダイヤフラムの変形に伴う応力の変化について有限要素法(FEM)を用いた数値解析を行った。

2. 実験による寿命予測

2.1 実験試料(ダイヤフラム)

関西電力の原子力発電所での使用実績が最も多いN社製空気作動弁直径約330mm厚さ3mmの駆動部ダイヤフラムを試験対象とした。図2に示すようにダイヤフラムの形状は皿形をしており、補強布(ナイロン)の両面に厚さ1~2mmのクロロプレン(CR)を貼り付けた構造となっている。

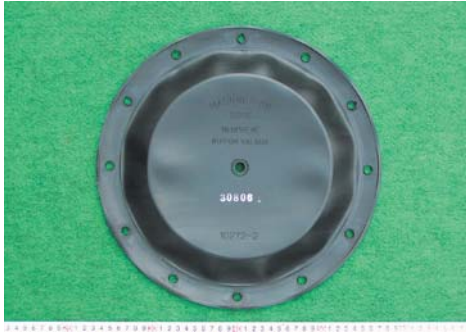


図2 駆動部ダイアフラム全体写真

2.2 促進劣化試験

ダイアフラムを円周方向に20等分に切り分け、扇形にしたものを恒温槽で加熱処理した。温度はゴム材質CRの一般的な使用最高温度(80)を考慮して70, 80, 90と100の恒温槽で加熱した。その状況を図3に示す。各所定日数加熱後の各ダイアフラム切片から補強布をはがし、そのゴム層からダンベル状7号形に準拠した試験片(平行部分幅、長さ2×12mm)を3個作成し、加熱後の切断時伸びを引張試験器により測定した。その結果に基づいてゴムの温度による劣化予測において、一般に用いられるアレニウス則⁽²⁾を適用した。これによれば、化学反応、拡散などの現象において以下の式が成り立つ。

$$K = A \times \exp(-E/RT) \quad (1)$$

$$\ln K = -(E/R) \times (1/T) + \ln A \quad (2)$$

ここに K : 速度定数

A : 反応定数 (頻度因子)

R : 気体定数

T : 絶対温度

E : 活性化エネルギー



図3 恒温槽で加熱されるダイアフラム切片

2.3 駆動試験

空気作動弁駆動部に、100 でそれぞれ90日間、80日間、70日間、60日間熱劣化させたダイアフラムを装着し、駆動部を全閉から全開を繰り返す試験装置を製作した。これら3台を図4のように並列に使用した。

試験では15秒毎に弁を開閉(1日5,760回)させ、2日毎に空気の漏洩有無を確認した。また、ダイアフラム取り外し後に目視で、屈曲部のき裂の有無を確認した。

き裂に至るまでの変形量と変形の回数については、アレニウス則を温度以外にも拡張したアイリングモデル⁽²⁾が適用でき、次式(3)が与えられる。

$$K = (K_B T/h) \cdot \exp(-E/K_B T) \cdot S^n \quad (3)$$

ここに、 K_B : ボルツマン定数

h : プランクの定数

n : 定数

S : 温度以外のストレス (応力)

式(3)の両辺の対数をとる

$$\ln K = -E/RT + n \ln S \quad (4)$$

温度が一定の場合、式(4)は

$$\ln K = -E/RT + n \ln S \quad (5)$$

と変形され、ここで温度以外のストレスとして繰り返し応力を、またこの時の繰り返し回数をNとした場合に次式(6)が得られる。

$$\ln N = -E/RT + n \ln S \quad (6)$$

ただし、ここではK-Nの関係が成り立つとしている。



図4 空気作動弁実験装置

2.4 促進劣化試験結果

促進劣化試験サンプルに対し行った引張試験の結果を、横軸を劣化日数、縦軸を切断時伸びの変化で

ある切断時伸び残率 E_b としてプロットしたものを図5に示す。加熱温度での傾向をみると、これが高いほど切断時伸び値が減少しており、CRの一般的な性質⁽³⁾が認められる。また、図中に近似曲線を表示しているが、指数関数を用いた曲線式(7)により近似している。

$$E_b = 100 \times \exp(K'D) \quad (7)$$

ここに D : 加熱日数

K' : 温度によるパラメータ

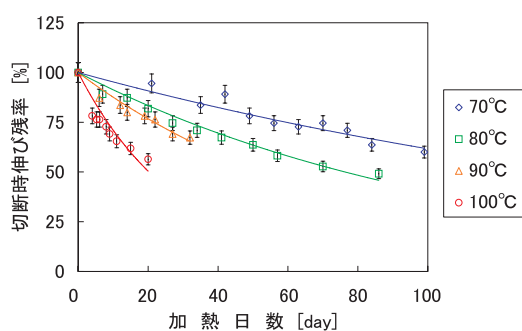


図5 加熱日数に対する切断時伸び変化

切断時伸び残率 E_b にアレニウス則を適用してプロットした結果を図6に示す。図は70 から100 の4温度の絶対温度標記の逆数に対し、劣化日数の逆数の自然対数をプロットしており、4点は直線によく近似できている。図6から傾き(-)を直接読み取り、気体定数 $R = 8.31$ [J/mol · K] (1.98×10^{-3} [kcal/mol · K]) より活性化エネルギー E を求めると以下のようになった。

$$E = - \times R = 6.39 \times 10^4 \text{ [J/mol]} \\ (15.3 \text{ [kcal/mol]})$$

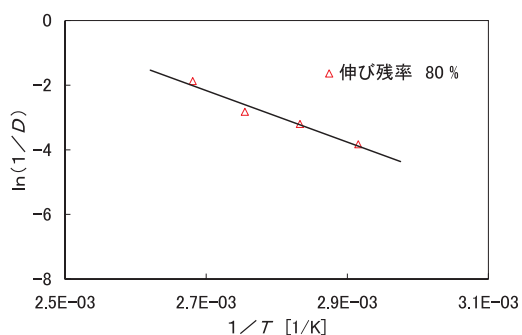


図6 切断時伸び残率80%のアレニウスプロット

式(1)に上記 E を代入することにより、任意の雰囲気温度 T (ただし一定) において、参照する切断時伸び残率 E_b に到達するまでの日数が求められる。この近似式で得られたデータの組み合わせを、劣化開

始からの経過日数を横軸に、切断時伸び残率を縦軸のグラフにプロットすると式(7)と同様な近似式で近似できる。プロット結果は図5と横軸の目盛は異なるが、同様の図7となる。

$$E_b = 100 \exp(-9.68 \times 10^{-5} \times D) \text{ at } 20 \quad (7')$$

$$E_b = 100 \exp(-2.30 \times 10^{-4} \times D) \text{ at } 30 \quad (7'')$$

$$E_b = 100 \exp(-5.18 \times 10^{-4} \times D) \text{ at } 40 \quad (7''')$$

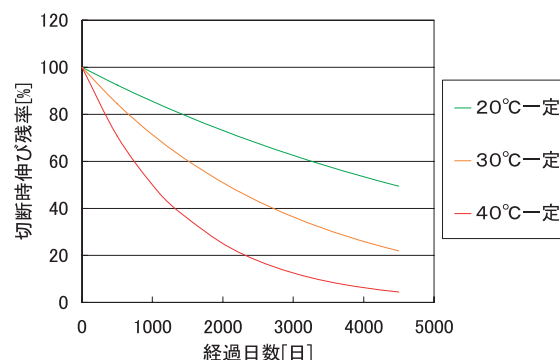


図7 経過日数に対する切断時伸び残率

2.5 駆動試験結果

実動作による繰り返し開閉試験では、90日加熱品は18,000回前後にて貫通漏洩に至り、80日加熱品は80,000回から140,000回弱、70日加熱品は290,000回から400,000回で、60日加熱品は1,700,000回動作しても漏洩には至らなかった。詳細を表1に示す。き裂漏洩に至ったダイアフラムは図8に示すように屈曲部のほぼ全周にき裂が確認出来た。

表1 駆動試験き裂漏洩までの開閉回数

加熱日数 [日]	No 1弁 [回]	No 2弁 [回]	No 3弁 [回]
90	17,853	17,923	17,901
80	138,873	119,694	82,497
70	*1	393,686	287,478
60	*2	*2	*2

*1 : 約30 [万回] で打ち切り、試験終了、漏れなし

*2 : 約170 [万回] で打ち切り、試験終了、漏れなし

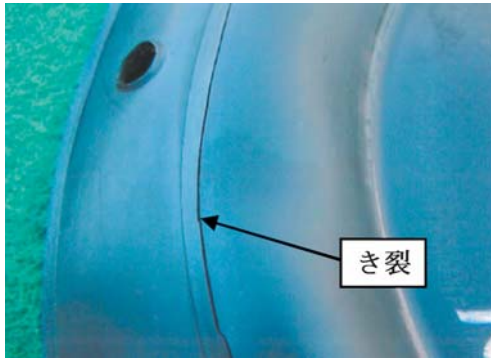


図8 駆動試験で漏洩した屈曲部拡大写真

2.6 寿命予測

劣化しながら繰り返し開閉を繰り返している空気作動弁駆動部のダイアフラムの寿命を式(6)に示されるような関係から予測する。駆動試験により、き裂貫通までの回数は入手できるが、そのときの応力については、未知のままである。そこで、それに変わるものとして、ダイアフラムの物性値からそれに近い応力を考えてみた。加熱促進試験より得られた試料の50%伸び時の引張応力 M_{50} 及び100%伸び時の引張応力 M_{100} について、切断時伸び残率 E_b との関係を図9に示す。50%伸び時の引張応力 M_{50} のデータ数は少ないものの、同じ100% M_{100} と同様に指数関数により切断時伸び残率より近似出来る。

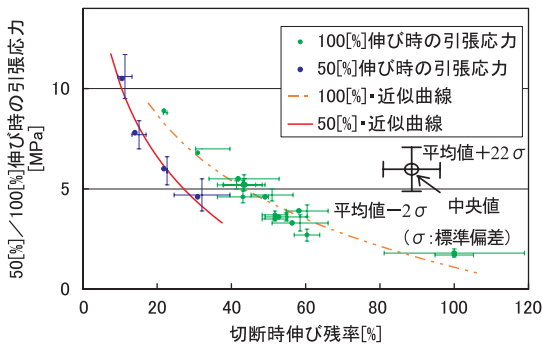


図9 切断時伸び残率と引張応力の関係

図中に近似曲線を示しているが、50%伸び時の引張応力 M_{50} と切断時伸び残率の関係は、実験式として次式(8)が得られる。

$$M_{50} = \mu + \sigma \times \ln E_b \quad (8)$$

ここに M_{50} : 50%伸び時の引張応力

E_b : 切断時伸び残率

μ, σ : 定数

次に表1の結果と各加熱日数で得られた試料の特性

試験結果から、横軸を開閉回数の常用対数、縦軸に50%伸び時の引張応力 M_{50} をプロットし、近似直線を表示した結果を図10に示す。

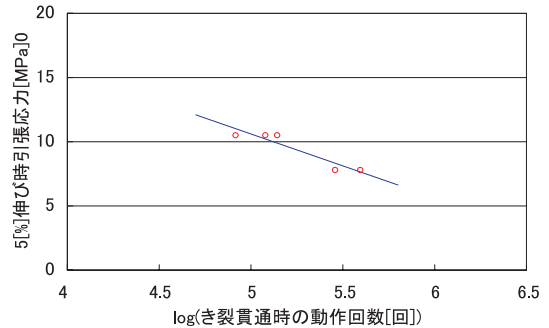


図10 50%伸び時の引張応力 M_{50} とき裂漏洩回数

この実験式近似から、次式(9)が求められる。

$$M_{50} = \mu + \sigma \times \log_{10} N \quad (9)$$

前述した式(8)、(9)の左辺 M_{50} を消去すると、切断時伸び残率 E_b と機能喪失までの全ストローク動作回数 N の関係として次式(10)が得られる。

$$\ln E_b = \mu' + \sigma' \times \log_{10} N \quad (10)$$

ここで μ' と σ' は定数であり、

$$\mu' = (\mu - \sigma) / \sigma, \quad \sigma' = \sigma / \sigma$$

式(10)により、機能喪失までの全ストローク動作回数 N は、切断時伸び残率 E_b (劣化度) から求められる。

繰り返し疲労による破壊を取り扱うとき、広く適用される経験則に寿命消費率という概念を用いたマイナー則⁽²⁾がある。それは次式(11)で表される。

$$(n_i / N_i) = 1 \quad (11)$$

ここで N_i : 応力 S_i における破損時繰返し数

n_i : 応力 S_i の繰返し荷重を受けた回数

このマイナー則を対象ゴムの各劣化状態でのゴムの応力と開閉回数に用いた場合、それぞれの50%伸び時引張応力での開閉回数の積算値が1となる時、き裂貫通に至ると考えられる。

いま、関西電力の原子力発電所で用いられている空気作動弁の動作を調査したところ、約半数の弁が、出力運転中はほとんど動作せず、駆動試験などで年間10回程の開閉しかしないことが分かった。そこで上記手法により対象弁の環境温度に対する寿命を求めため、温度と年間開閉回数10回を用いて寿命を予測した。予測結果をまとめてこれらの空気作動弁の寿命予測をプロットすると、図11となる。

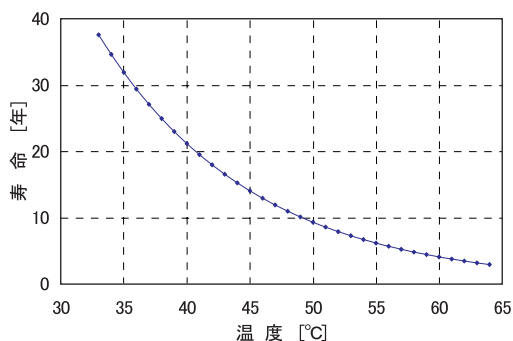


図11 弁温度と寿命の関係

開閉が年間10回程度のダイヤフラムは、温度が40程度であれば、約20年の寿命を有することとなる。現地調査の結果では、年間を通じて40以下の空気作動弁は少なくない。

一方、プラント運転中において、弁が中間開で数%の摺動を繰り返している弁も半数近くあり、それを評価する手法を検討する必要がある。そこで以下のFEM数値解析による弁挙動のシミュレーションを実施して、中間開度での発生応力の推移を確認することとした。

3. FEM解析

3.1 解析モデルと解析コード

解析モデルとしては、周囲をボルト結合されたダイヤフラム部とした。このダイヤフラムは3層構造であり、表裏のゴム材の中に糸材をサンドイッチしている構造となっている。解析の対象はダイヤフラムの上下運動であり、解析モデルは図12に示すような軸対称とした。モデル化については、ゴム部に軸対称ソリッド要素、糸部に曲げ剛性を持たない軸対称膜要素を使用した。また、ダイヤフラムプレート及び、ダイヤフラムケースを軸対称シェル要素(剛体)にてモデル化し、ダイヤフラムとの接触を考慮した。

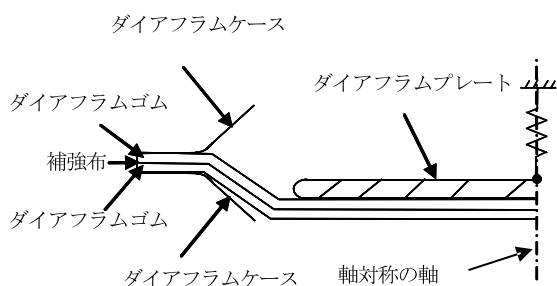


図12 FEM解析モデル図

さらに、スプリングの動きをモデル化する為、ダイヤフラムプレートには、接地バネを接続した。また、圧力加重は下側から空気圧がかかるため分布加重とした。圧力値は1秒間に2.5気圧まで線形増加させ、ダイヤフラムプレートをストローク分移動させた。

また解析条件としては、ダイヤフラムケースを完全拘束、ダイヤフラムプレートをz方向並進自由度のみフリー、ダイヤフラム中心軸を軸対称軸としてr方向並進自由度およびrz面内回転自由度拘束とした。これらの条件の下で構造解析コードABAQUS⁽⁷⁾により解析を行った。

3.2 ゴム製品に対するFEM

ゴム製品のFEMではヤング率をひずみエネルギー密度関数の形で入力するのが一般的⁽⁶⁾⁽⁷⁾であるが、今回のように、低変形(30%伸び以下)時には、弾性的でHooke則に従うとされているので、低変形(10%)時の引張応力からヤング率を求めた。

3.3 解析結果

変形前後のメッシュ図を図13に示す。この図中の下部が変形前(全閉時)のメッシュで、上部が変形後(全開時)のメッシュである。この場合メッシュの歪は大きくなく、ひずみ量はダイヤフラムケース側屈曲部で最大で約19%であった。

ダイヤフラム未劣化品の解析結果の応力等高線(コンター)図を図14~17に示す。図14は下部から流入する空気圧が上昇し始めてダイヤフラムを膨らませ始めたところであり、図15はさらに空気圧上昇し上部のダイヤフラムプレートごと押し上げ始めるところである。

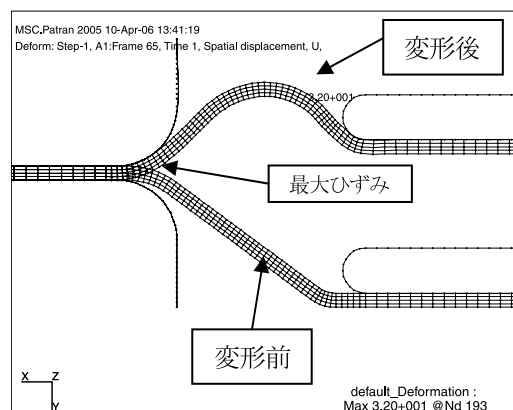


図13 変形前後のメッシュ図

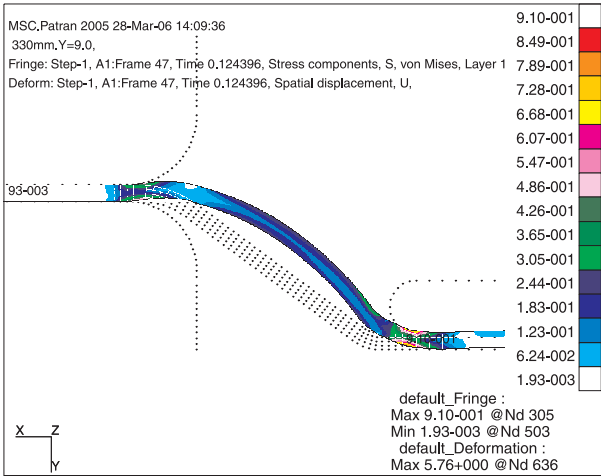


図 14 ダイアフラム膨らみ始め

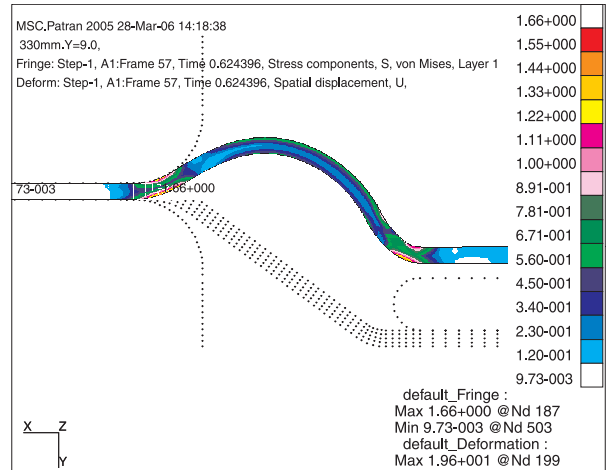


図 16 弁中間開度

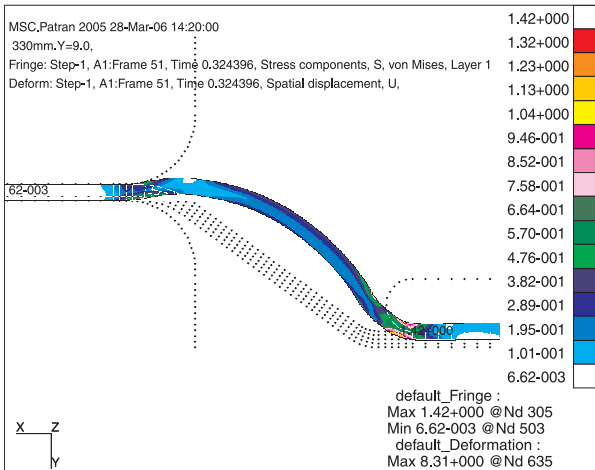


図 15 弁開き始め

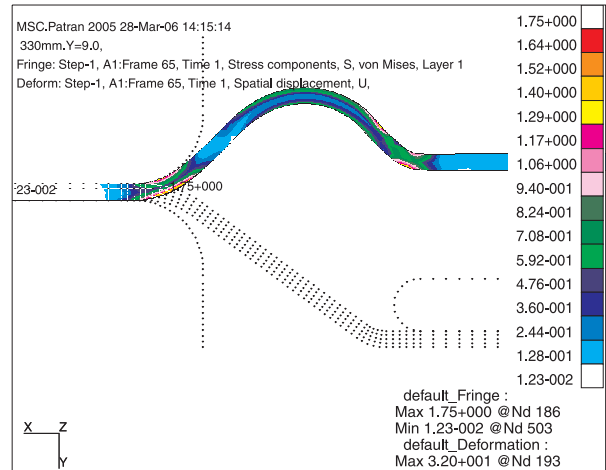


図 17 弁全開状態

さらに図 16 ではダイアフラム上のバネ力より大きくなり弁ストロークが0%からプレートを押上げ約50%開度になったところである。図 17 で100%開度のときのミーゼス応力コンター図である。いずれの図もそれぞれ右側のフリンジ相当の色分けをしており、最大箇所を赤色で表示するとともに、最大値を右下に表示している。

図 14 と図 15 ではダイヤフレームプレート近くの屈曲部の応力が高いが、図 16 と図 17 ではダイアフラムケース側の屈曲部が高くなっていることが分かる。また、漏洩ダイアフラムの断面写真を図 18 に示す。この図から屈曲箇所円形内で割れが生じていることが確認でき、応力コンター図での応力が高い場所と同一位置であることがわかる。

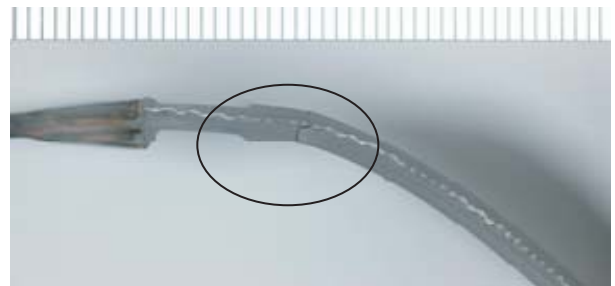


図 18 漏洩ダイアフラム断面

3.4 解析結果の検証

前項の解析結果が正しいかどうか、通常ダイアフラムケース内は確認出来ないが、実験用の空気作動弁駆動装置の上部ダイアフラムケースの一部を切り落とし、内部のダイアフラムの動きが確認出来るようにした。さらに、図 19 に示すように開口部上部からレーザー変位計により空気圧加圧時のダイアフラ

ムの一点の移動量を測定し、解析値と比較することで確認することとした。弁ストロークについてはMitutoyo製のリニアスケールで計測した。



図19 ダイアフラム定点の移動量測定

測定結果と前項の解析結果を比較した結果を図20に示す。弁ストロークはダイアフラム圧が約50[KPa]が開き始めとなっていて、圧力上昇とともに開度を増して全開のストロークに到達している。測定結果と解析値は非常によく一致している。また、ダイアフラムの移動量は加圧初期の10[KPa]以下を除き測定結果と解析値はよく合っており、数値解析はダイアフラムの挙動をほぼ正確に再現していると言える。ただ、ダイアフラムの膨らみ始めの移動量については解析値と少し異なっているが、これはレーザー変位計での反射光を検出して変位を測定しているため、今回の測定誤差と考えられる。

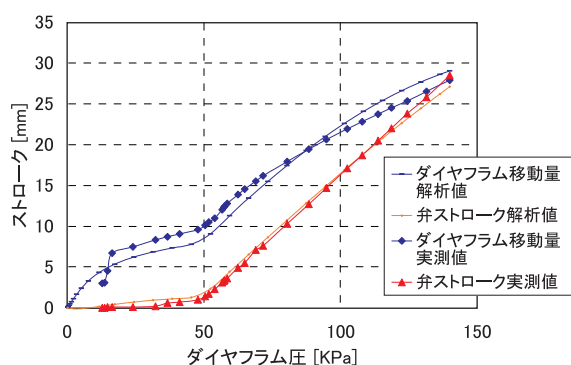


図20 ダイアフラムの移動量測定結果と解析値の比較

3.5 摺動しているダイアフラムの寿命予測

FEM解析手法は未劣化ダイアフラムの弁開閉時の挙動を良く再現したので、表2のヤング率を入力し、解析を実施した。いずれも図14から図17と同様のミー

ゼス応力コンター図が得られた。これら各々の解析結果から弁開度と最大応力の関係を求めた。未劣化品、100 60日、70日加熱品の結果を図21に示す。

表2 駆動試験用ダイアフラムの推定ヤング率

試料名	10%伸び時引張応力 [MPa]	推定ヤング率 [MPa]
未劣化品	0.849	9.0
100 60日熱劣化品	3.098	32.8
100 70日熱劣化品	5.017	53.2
100 80日熱劣化品	6.246	66.2
100 90日熱劣化品	7.787	81.5

いずれも60%開から100%開までの間では、応力の値は飽和する傾向にある。原子力発電所実機の空気作動弁の開度状況は一律ではないが、一般に開き始めから40%までの小開度では流量変動が大きく制御不安定であり制御範囲にないと考えられる。よって図21の40%から100%間の応力変化を考えると、全閉と全開間の変動値と比例すると考えるのは安全側であると言える。

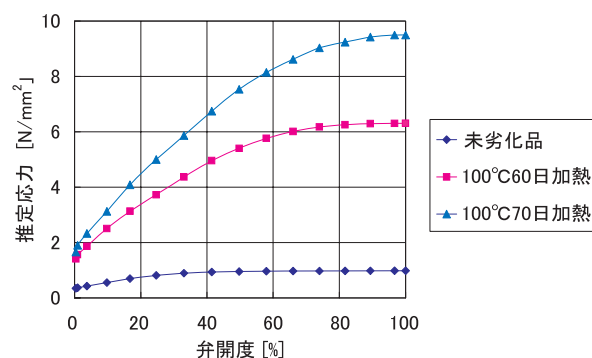


図21 弁開度と応力

2.6項にて年間開閉回数10回を用いた寿命予測をおこなっており、上記の考え方を適用して中間開での摺動を繰り返している弁にも適用する。例えば実機調査でもっともよく摺動していた空気作動弁は、1回当たり3秒周期で3%変動しており、このような弁の環境温度に対するダイアフラムの寿命予測を行うと、図11と同様に図22で表せる。

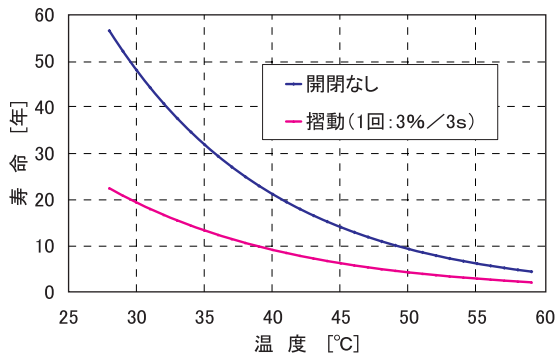


図22 弁温度と寿命の関係

この結果から摺動頻度が3秒周期で3%変動している弁で、弁温度40では9年、50だと4年強で、き裂漏洩が起こり得ると予測される。当該弁のダイヤフラム室の年間平均温度は別途測定結果30以下であり、き裂漏洩だけを考慮するとダイヤフラム寿命は20年と予測される。

4. まとめ

空気作動弁駆動部用CRゴム製ダイヤフラムについて、温度、摺動を考慮した使用条件下で、精度良く寿命予測ができる手法を検討した。まず第1に、CRゴムのサンプルについて加熱促進劣化試験の劣化データにアレニウス則を適用して温度と切断時伸び残率の関係を得た。次に、加熱期間を変え、異なる程度に劣化をさせたダイヤフラムを試験用の弁駆動部に取付け、き裂が貫通するまで繰り返し動作させることにより、熱による劣化状態とき裂貫通までの繰り返し回数関係を求めた。これら2種類の試験によって得られた使用条件と劣化(き裂)の関係から寿命評価法を開発した。また、駆動試験はフルストロークで実施したが、実際の弁では中間開度位置において短いストロークで運用されているものが多い。そこで第3に、ストロークによる劣化の違いについて評価するため、ダイヤフラムの変形に伴う応力の変化についてFEMを用いた数値解析を行った。以上により、実機空気作動弁の寿命を温度と動作状況により評価する関係を導出し、実機に適用可能とした。今後はN社以外の空気作動弁駆動部のダイヤフラムの寿命評価を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たり貴重なご意見、ご指導をいただきましたアキバリサーチ代表秋葉光男氏に謝意を表します。

文献

- (1) 藤井有蔵, 満田安正, "空気駆動シリンダーのシール用NBR製Oリング寿命評価手法の検討", "INSS Journal, Vol.10, p.99 (2003).
- (2) 田村優編, "ゴム・樹脂製品における故障解析と寿命予測", "株式会社日本テクノセンター (2002).
- (3) 秋葉光雄, 林茂吉, "ゴム・エラストマーの劣化と寿命予測", "新ポリマー選書1, ラバーダイジェスト社 (2000).
- (4) 深堀美英, "設計のための高分子の力学", "技報堂出版株式会社 (2000).
- (5) 川村敏雄, "Oリングの寿命と信頼性", "バルカーレビュ.第26巻, 第6号, pp.1-8 (1982).
- (6) 平島禎, Sherif Rashed, "キーボード用ゴム製ダイヤフラムの挙動解析", "電子情報通信学会論文誌C-, Vol.J74-C-.No.8, pp.635-641 (1991).
- (7) ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL VOLUME Version 6.5, ABAQUS (2005).