

高速圧縮機用弁板の応力計測

Stress Measurement of Thin Valve Plate

倉林 昭* 進 士 豊* 国井好勝*
Akira Kurabayashi Yutaka Shinji Yoshikatsu Kunii

要 旨

空調、冷凍機用圧縮機に使われる弁板の強度の問題に関連し、実機冷媒運転時での弁板応力を把握(はあく)するために、「応力塗料法」「ひずみゲージ法」および「銅めっき法」の三つの計測法についてその適用範囲、問題点などにつき検討しこれらの計測技術の確立を試みた。さらにこれらを実際の圧縮機に適用し各種弁板につき弁各部の応力値、応力分布などを計測した。

1. 緒 言

空調機、冷凍機などに使用される圧縮機は、近年小形高速化が進められ、ますますきびしい運転条件下におかれてきている。この圧縮機に用いられている吸入弁、吐出弁の実機運転時での応力状態の適確な把握は、弁性能、弁板強度の問題に関連し、大きな課題であった。

従来、この弁板強度については、断片的になされた二、三の報告⁽¹⁾⁽²⁾があるが、系統的になされておらず、弁板の応力計測技術の確立、および弁板の応力解析など一連の研究が強く要望されている。そこでまず、弁板応力の現状を正しく把握するために、弁板のような薄板の応力計測の観点から「応力塗料法」「ひずみゲージ法」「銅めっき法」の三つの計測法について、その適用範囲、問題点などについて検討し、これらの計測技術の確立を試みた。さらにこれを実際の圧縮機に適用し、各種弁板につき、弁各部の応力値、応力分布などを計測した。

2. 弁板応力の計測法

ここで対象とする弁板は、機種ならびに使用目的に応じて種々の形状がとられている。またその板厚は0.3~0.5mm程度とかなり薄く通常の機械要素あるいは構造物などの応力計測に適用される方法がそのまま適用されるとはいえない。すなわち複雑な形状をした薄板の応力計測としてかなりの制約をうける。さらに冷媒運転時の実機での計測ということになるとその技術はいっそう限定されることになる。

これらの条件を考え、以下の三つの計測法を採り上げた。これらの技術を確立し、目的あるいは用途に応じてこれらを使いわけるとは、かなり過酷な制約を受ける弁板応力の計測および解析に有効なはずである。

表1に、本報で採り上げた三つの計測法、すなわち「応力塗料法」「ひずみゲージ法」および「銅めっき法」の特長を比較して示した。「応力塗料法」は単に被測定面に塗料を塗布するだけの操作で複雑な形状をした弁板の主応力の方向(ひずみゲージ接着位置の推定可能)や応力集中などの定性的な判断に役立ち、これの定量化は「ひずみゲージ法」で可能である。さらに「銅めっき法」によれば冷媒にも侵されず、かつリード線が不要であるところから冷媒での実機運転時の計測が可能になる。

3. 実験機および供試弁

実験機として空調機用2.2kW 2極全密閉形圧縮機を使用し、供試弁としてはそれに使われている吸入用リング弁を選んだ。供試弁の組立て構造は図1に示すとおりであり、リング弁である弁板は、

* 日立製作所機械研究所

表1 三つの計測法

計測法		応力塗料法	ひずみゲージ法	銅めっき法
特 長	長所	○ 応力分布の観測に便利 ○ 主応力方向の判定可	○ 動的ひずみ(応力波形)の測定が容易 ○ 定量化, 高精度	○ 実機冷媒運転の測定に最適 ○ せまい個所の測定容易
	短所	○ 定量化不可 ○ 変動応力の測定不可	○ リード線必要(接続に工夫を要す)	○ めっき作業に熟練が必要
適 用	応力分布 応力集中	◎	×	○
	定 量 化	×	◎	○
	冷媒運転	×	○	◎

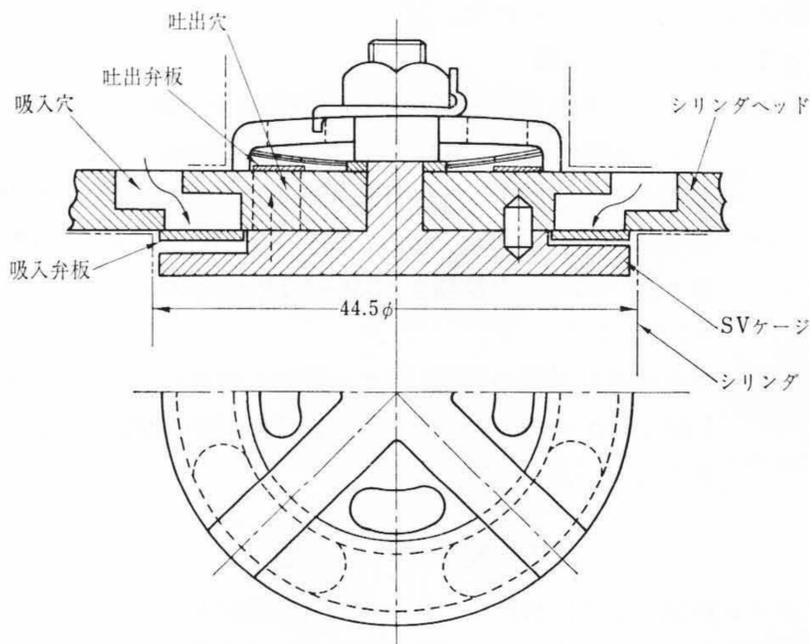


図1 供試弁の構造

十字形のSVケージでシリンダヘッドとの間に支持され、弁揚程はSVケージの先端に設けた切欠き深さにより制限されている。この切欠きの深さは、十字の相対する部分が等しく他の直角方向が異なる構造からなり、弁自身にバネ作用を持たせるようにしたものである。

4. 応力塗料法

応力塗料のき裂は引張主応力に直角の方向に発生するから、き裂の模様を観察することによって主応力の方向や、応力集中の状況を知るとともに標準片との比較から定量化も可能である。しかし、き裂が発生し始めるひずみ感度は塗膜の厚さ、温、湿度によって左右されるため定量的な測定は困難であり、むしろ主応力の方向や応力集中など定性的な測定に有用といえる。

応力塗料は、アメリカ Magnaflux 社製のストレスコートが使用

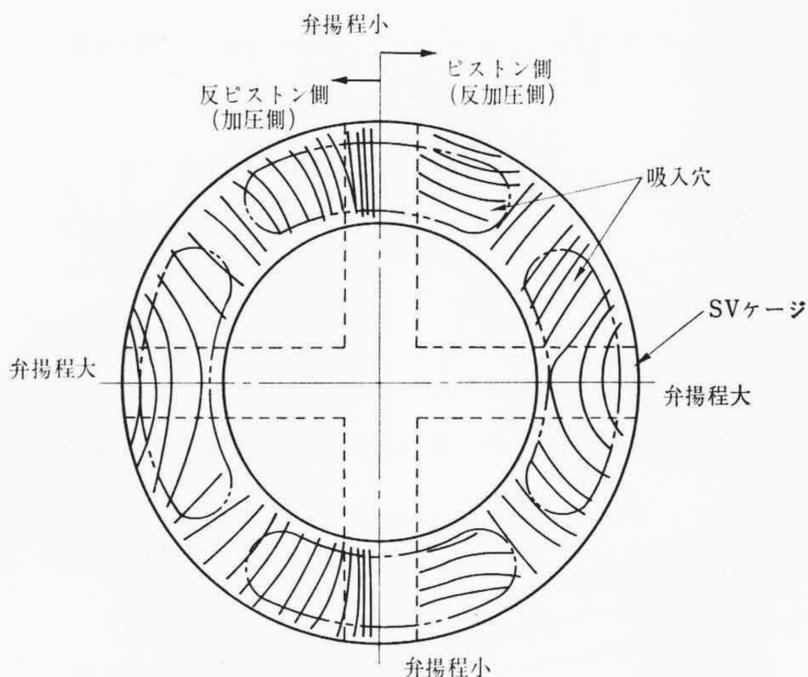


図2 応力測定結果 (応力塗料法)

されている。塗料そのものはきわめてもろいため供試弁の実機への組込みは不可能であるから、ここでは塗装および乾燥を行なった弁板を図1のように組み込みこれを水平風管内に取り付けて、その前方から、空気を圧送し負荷を加え、き裂の検出観察をする。

図2は実験結果を示したものである。き裂の様子は左右対称であったので、ピストン側と反ピストン側において同一図上に示してある。反ピストン側において弁揚程小のSV ケージとの接触部に応力の集中が認められる。また、この位置における主応力はほぼ円周方向であり、弁揚程小から大の方向へと曲げが作用していることがわかる。

5. ひずみゲージ法

ひずみゲージについては、これまでもかなり多くの報告⁽³⁾があり、また線材そのものの進歩改良もめざましく、これを用いた管理用の計測器も出現⁽⁴⁾して、かなりの精度で応力の定量化が可能になってきている。

ここでは、圧縮機用弁板にひずみゲージを適用するという観点から、薄板の曲げ応力測定の場合の測定精度に及ぼすひずみゲージのベース厚、接着層厚さの影響についての検討および実機冷媒運転における応力計測結果についてのべる。

5.1 薄板の曲げひずみの計測

薄板の曲げ応力の測定にひずみゲージを使用した場合ゲージ素線に生じたひずみ(指示ひずみ)をもって、その被測定母材表面のひずみ(真のひずみ)とみなすことの誤差について考察する。

ゲージの接着された状態を図3のようにモデル化し、ゲージ素線は線径に相当する厚みを持った平板であると考える。中立軸位置 y_1 については、図3から

$$y_1 + y_2 = 2t_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y_4 = y_2 + t_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$y_3 = y_2 + t_3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

一方、力の平衡条件から

$$\begin{aligned} \frac{M}{2} &= \int_{-y_1}^0 E_1 \epsilon b_1 y dy \\ &= \int_0^{y_2} E_1 \epsilon b_1 y dy + \int_{y_2}^{y_3} E_2 \epsilon b_2 y dy + \int_{y_3}^{y_4} E_2 \epsilon b_2 y dy \\ &\quad + E_3 \epsilon b_2 t_4 y_3 \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 E_1 : 母材の縦弾性係数
 E_2 : 接着層、ゲージベースの縦弾性係数
 E_3 : ゲージ素線の縦弾性係数

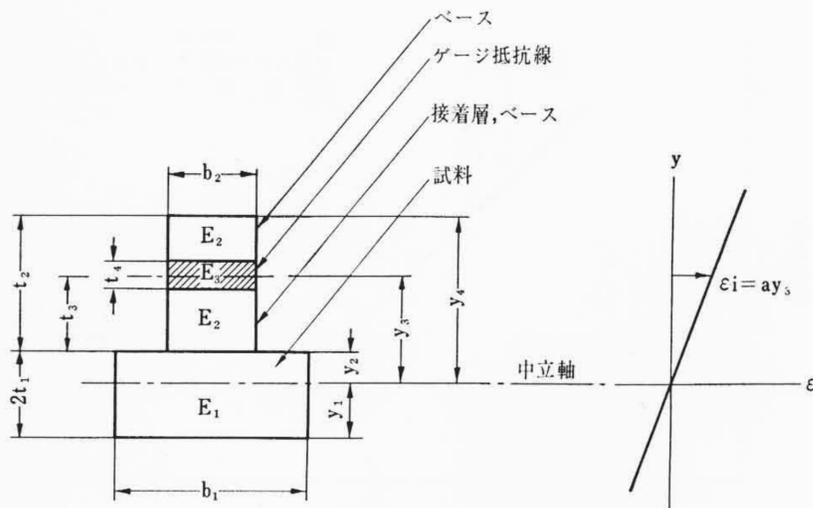


図3 ひずみゲージのモデル図

- b_1 : 母材の幅
- b_2 : ゲージベース、素線および接着層の幅
- t_4 : 素線の厚さ(径)
- y : 中立軸からの距離
- ϵ : ひずみ
- M : 曲げモーメント

$$\epsilon = ay \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 a : 中立軸からの距離とひずみの関係を表わす定数(4),(5)式より a を計算し指示ひずみ ϵ_i を求めると次式のようになる。

$$\epsilon_i = ay_3 = \frac{3}{2} \cdot \frac{My_3}{b_1 E_1 y_1^3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、ひずみゲージを接着しない状態の母材表面の真の曲げひずみ ϵ_t を求めると、前述と同様に

$$\frac{M}{2} = \int_0^{t_1} E \epsilon b_1 y dy \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\epsilon_t = at_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{b_1 E_1 t_1^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 ϵ_t : 試料表面の真の曲げひずみ
 $2t_1$: 試料の板厚

求める誤差すなわちゲージベース厚さおよび接着層の厚さによる誤差 δ は(6),(8)式より次式のように計算される。

$$\delta = \frac{\epsilon_i - \epsilon_t}{\epsilon_t} \times 100 = \frac{y_3}{y_1^3} \cdot t_1^2 - 1 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (9)$$

また(1)~(4)式から次の三次方程式を得て、 y_1 すなわち中立軸の位置が計算され、(9)式よりここで求める誤差が計算できる。

$$\begin{aligned} &2b_1 E_1 y_1^3 - \{6t_1(b_1 E_1 - b_2 E_2) + 3b_2 E_2(2t_1 + t_2) + 3b_2 E_3 t_4\} y_1^2 \\ &+ \{12t_1^2(b_1 E_1 - b_2 E_2) + 3b_2 E_2(2t_1 + t_2)^2 + 6b_2 E_3 t_4(2t_1 + t_3)\} y_1 \\ &- \{8t_1^3(b_1 E_1 - b_2 E_2) + b_2 E_2(2t_1 + t_2)^3 + 3b_2 E_3 t_4(2t_1 + t_3)^2\} = 0 \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

以上の解析結果を確認するために、片持ばりで先端に任意の荷重が加えられる実験装置を製作し検討した。供試ひずみゲージとしては、圧縮機用弁板への適用という点から、長期安定性、耐熱性にすぐれるといわれているベークライトゲージ(ベース厚約0.05mm)と、最近ゲージベースを薄くしたことを特長として市販されているエポキシベースのハクひずみゲージ(ベース厚約0.015mm)の二種を選んだ。また、接着剤としてはフェノール系接着剤(接着層厚さ実測約0.01mm)と、シアノアクリレート系接着剤(実測約0.02mm)の二種を用いこれらを組み合わせて実験した。

図4,5は実測結果で横軸に供試材板厚を、縦軸に誤差を表わしている。また(9)式からの計算結果を図中に実線で示してある。実測結果は計算結果とかなりよい一致を示しており、弁板のような薄い板の曲げ応力の測定にひずみゲージを使用する場合の問題点を示唆

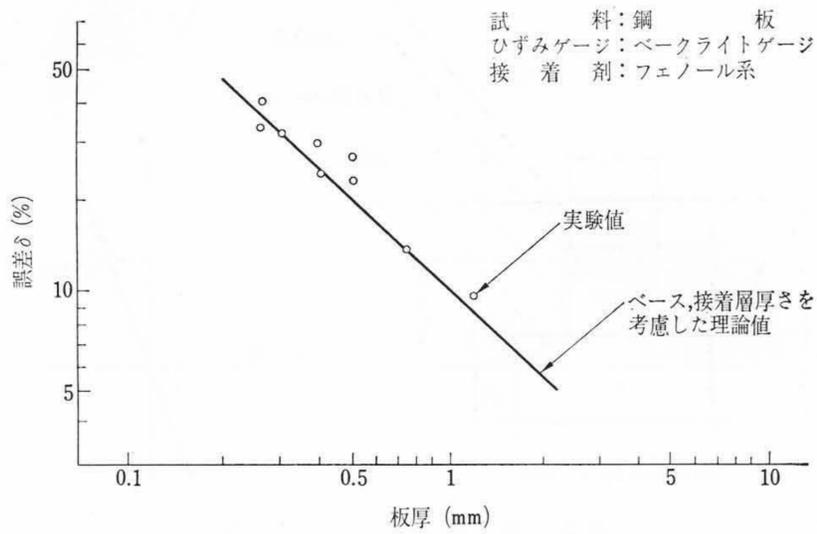


図4 薄板の曲げひずみの測定精度(1)

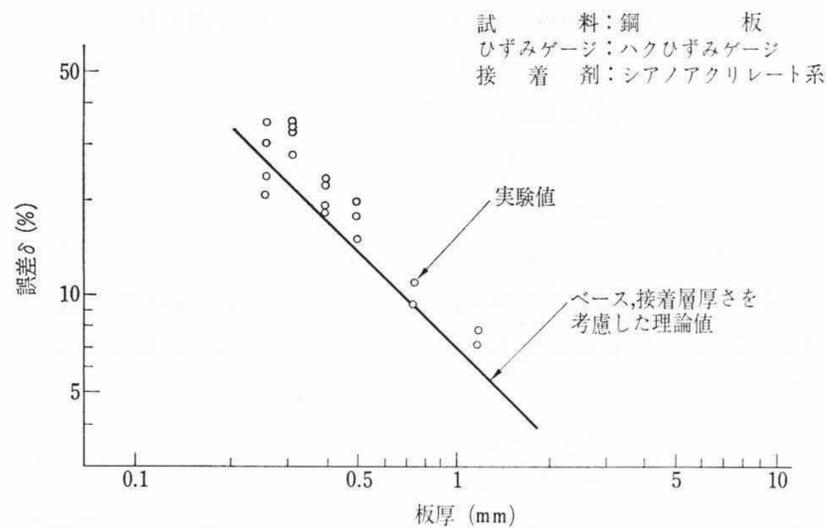


図5 薄板の曲げひずみの測定精度(2)

しており、実際にはこれだけの補正が必要になることがわかる。

5.2 冷媒実機運転における応力計測

ひずみゲージを接着した弁板を圧縮機に組み込み、冷媒運転で弁板応力を計測した結果の一例は図6に示すとおりである。図6の結果は、応力塗料法の結果から最も応力が大きいと推定された弁揚程小のSVゲージとの接触部付近で内側端から1.2mmの位置の応力波形である。弁の開口とともに最大応力に達しその後振動をとまないうちに閉じている状況が観察された。なお、ひずみゲージには耐熱、耐冷媒性の点からベークライトゲージを、接着剤にはフェノール系接着剤を使用した。図中の応力値は前節の誤差補正後の値である。

ひずみゲージによる応力計測の場合、ある程度の接着面積を要するため、応力集中個所での計測は不可能であるが、応力の定量化および波形の観察という点では最も有効である。

6. 銅めっき法

銅めっき法はリード線が不要であり、回転体とか狭いすき間における測定が容易であるところから特にここで対象とするような小形高速圧縮機用弁板の実機冷媒運転における応力計測、特に応力集中個所の定量化には最適の方法と考えられる。しかしその反面、従来応力の定量化に際して必ずしも満足した測定精度が得られず、筆者らの実験でも時にひずみゲージで計測した値の10~30%大きな応力値になることがあった。

銅めっき法に関しては大久保教授らによりかなり多くの文献⁽⁵⁾⁽⁶⁾が発表されているが、圧縮機用弁板の場合周囲温度が高く、かつ変動荷重が作用するという特殊の問題があり、これらの影響についてはあまり明確でないように思われる。そこで圧縮機応力の定量化を行なう際の問題点と考えられる諸点につき検討した。

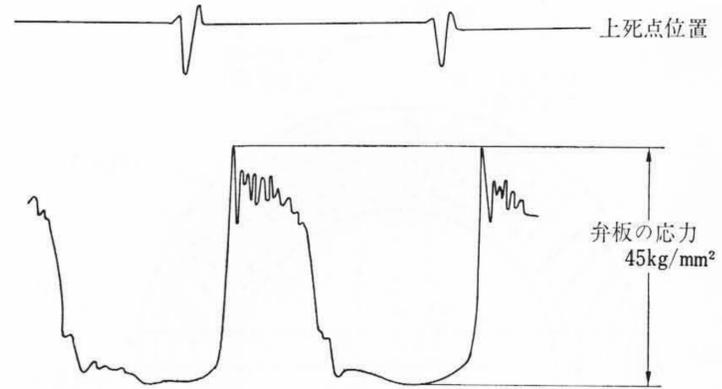


図6 冷媒実機運転での弁の応力波形(ひずみゲージ法)

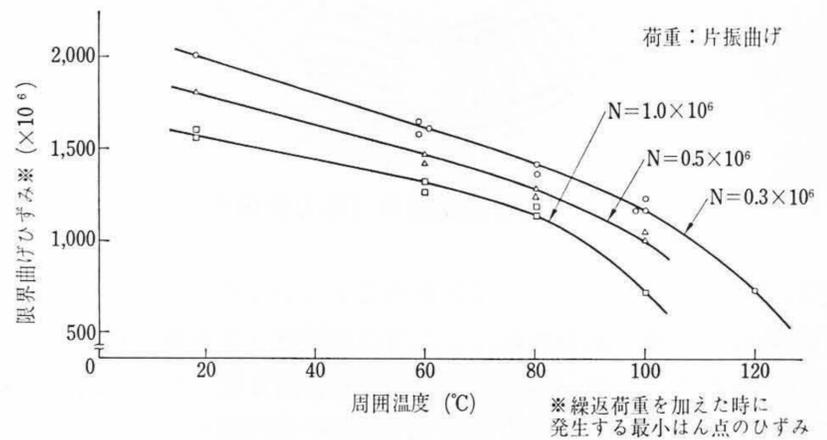


図7 繰返荷重時の温度の影響

6.1 繰返し荷重時の温度による影響

実機運転中の弁板近傍の温度は約60°Cである。従来繰返し荷重時の温度の影響をあまり考慮せず、常温における校正試験片の結果をもとに定量化を行っていた。しかし、はん点の発生は温度により影響するものと推察される。そこで繰返し荷重時の周囲温度を変え限界曲げひずみ(はん点が発生する最小ひずみ)との関係を検討した。実験は片持ばりの疲れ試験機を使用し油中で繰返し片振り曲げ試験により行なわれ、油中に投込みヒータをそう入して油温の調節が行なわれた。

実験結果は図7に示すとおりで、図からわかるように周囲温度が高くなると限界曲げひずみは小さくなり、はん点の発生は温度により大きく影響することがわかる。たとえば繰返し回数 1.0×10^6 の場合、18°Cにおける限界曲げひずみは $1,600 \mu\epsilon$ であるが、60°Cになると $1,300 \mu\epsilon$ と約25%小さくなる。すなわち、定量化ははん点の密度により行なわれることから、60°Cにおけるはん点を18°Cにおける校正試験片を基に定量化すると25%大きく定量化することになる。従来、銅めっき法で計測した値がひずみゲージの計測値よりも10~30%大きくなることがあったのも、この辺に大きな原因があったと推察される。

6.2 繰返し回数と応力値の関係

繰返し回数を増せばはん点は密に発生する。また常温における繰返し回数と限界曲げひずみとの関係はすでに発表されているが、ここでは周囲温度が変わった場合この関係がどうなるかを検討した。繰返し荷重時の温度を18°C、60°C、80°Cと変えての実験結果は図8に示すとおりである。図からわかるように、各温度とも繰返し回数が増せば増すほど、はん点は密に発生し限界曲げひずみは小さくなる。その関係は

$$\epsilon^m \times N = K \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 ϵ : 限界曲げひずみ m : 定数

N : 繰返し回数 K : 定数

定数 m は繰返し荷重時の温度により相違し、18°Cで $m=2.1$ 、60°Cで $m=1.6$ 、80°Cで $m=1.3$ である。上式の関係は金属材料の疲れ被害法則と同様であり、銅めっき法における定量化の基本となる。

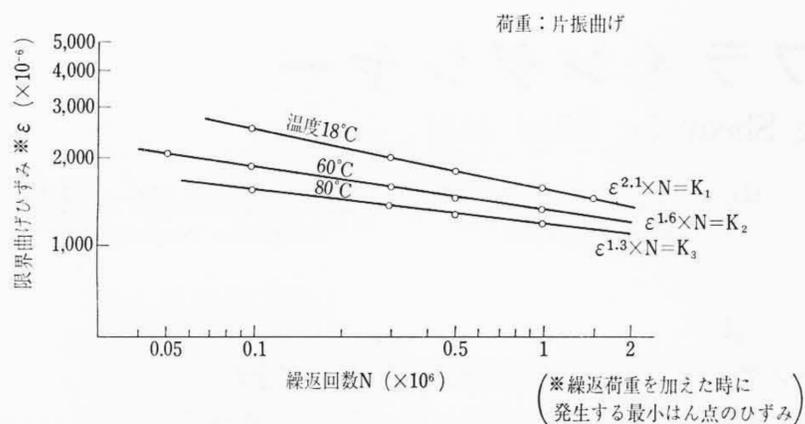


図8 温度と限界曲げひずみの関係

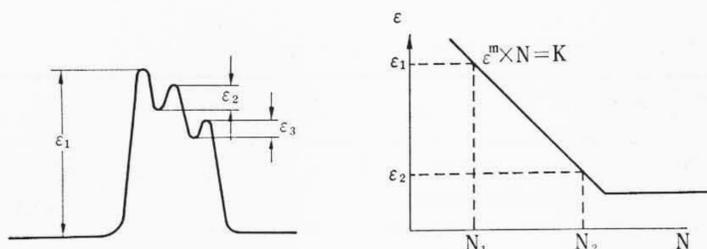


図9 等価繰返し回数の説明図

るはん点の発生は疲労と同一の関係にあることがわかる。

6.3 応力波形の相違による影響

校正試験片に加えた単一振動数の繰返し荷重に比べ、冷媒実機運転における弁板の応力状態は図6に示したようになりかなり複雑な変動荷重が働いている。応力の定量化に際しこの影響の補正は重要である。

前節の結果からはん点の発生は疲れ被害法則と同様な関係にあることがわかったから波形の相違による影響については疲労の累積被害法則を適用すればよいものと考えられる。

いま、一サイクル中に発生するひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ がおのおの n_1, n_2, \dots, n_n 回あるとすると(図9参照)実働ひずみ ϵ_1 の等価繰返し回数 n_{eq} は

$$n_{eq} = n_1 + n_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} + n_3 \cdot \frac{N_1}{N_3} + \dots + n_n \cdot \frac{N_1}{N_n}$$

$$= n_1 + n_2 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)^m + n_3 \cdot \left(\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1}\right)^m + \dots + n_n \cdot \left(\frac{\epsilon_n}{\epsilon_1}\right)^m \dots \dots \dots (12)$$

変動荷重が働くことにより繰返し回数は右辺の第2項以下の影響が加わり、繰返し回数 n_1 より大きくなる事がわかる。すなわち、第2項以下に相当する繰返し回数を補正する必要がある。

6.4 冷媒実機運転における応力計測

前述した検討結果をもとに、銅めっきを施した弁板を圧縮機に組み込んで冷媒運転で弁板応力を計測した。

表2は弁板の形状が異なりその応力波形が相違すると思われる2種類の弁板についてひずみゲージ法と銅めっき法との計測結果を比較したものである。周囲温度補正および応力波形の相違による等価繰返し回数 n_{eq} を考慮することにより両計測法による結果はほぼよい一致を示すことがわかる。なおこの場合の銅めっき法における定量化ははん点発生限界法で行なわれた。

図10は供試リング弁の冷媒実機運転における銅めっき法での計測結果である。応力塗料法による計測結果(図2)とひずみゲージ法による計測結果(図6)とを比較するときわめてよい一致を示しており、弁揚程小のSVゲージとの接触部に応力集中が認められる。特に銅めっき法の場合、ひずみゲージでは計測困難な応力集中個所の定量化、あるいは応力分布の計測が可能である。

表2 ひずみゲージ法と銅めっき法の比較

弁板の形状	ひずみゲージ法	銅めっき法
		41kg/mm²
		34kg/mm²

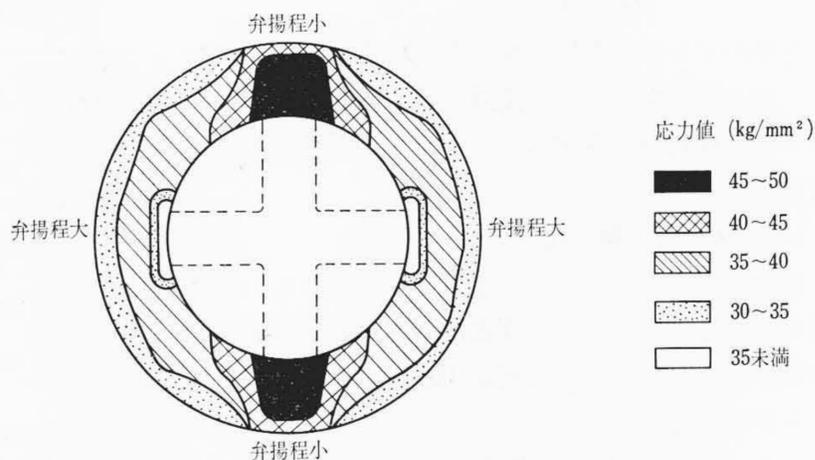


図10 応力分布計測結果(銅めっき法)

7. 結 言

小形高速の空調、冷凍用圧縮機の弁を対象にその実働応力の計測を目的として、「応力塗料法」「ひずみゲージ法」「銅めっき法」の三つの計測法につきその適用範囲、問題点などを検討した。その結果を要約すると次のとおりである。

- (1) これらの計測法にはそれぞれに特長があるので、目的、条件などを考慮のうえ、使いわけることが弁板応力の計測にはきわめて有効である。すなわち、主応力の方向の検討には「応力塗料法」を、実機冷媒運転時の応力波形観察(これは弁の閉じ遅れなど弁性能の検討に有効)および応力の定量化には「ひずみゲージ法」を、さらに応力分布、集中応力の定量化には「銅めっき法」を使用するのが適している。
- (2) 板厚1mm以下の薄い板の応力計測にひずみゲージを適用する場合、板厚、使用ゲージ、接着剤などに応じて(9)式に示す誤差を検討し補正する必要がある。
- (3) 圧縮機弁板の計測に銅めっきを適用する場合、周囲温度および応力波形の相違による等価繰返し数の補正を施すことによりひずみゲージによる計測結果とかなりよい一致を示すことを確認した。

終わりにのぞみ、本研究の過程で適切なお助言をいただいた日立製作所清水工場塩貝部長、二渡主任技師ならびに機械研究所富田主管研究員、鯉淵主任研究員、藤芳主任技師に厚く謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 川平, 田中: 冷凍, 38, 430 (昭38-8)
- (2) R. Gluck, P. R. Ukrainetz: ASHRAE Transactions.
- (3) 例えば富田, 藤芳: 機学誌, 66, 1219 (昭38-9)
- (4) 倉林: 計測と制御, 6, 25 (昭42-6)
- (5) 大久保: 銅メッキ応力測定法, (昭41-10) 朝倉書店
- (6) 鈴木: 機学誌, 71, 199 (昭43-2)