繰返し内圧を受ける円筒の疲れ強さに及ぼす圧力媒体の影響*
(軟鋼, ステンレス鋼, マンガン鋼, アルミニウム合金, 銅の円筒の場合)

長 尾 光 雄**, 菅 野 宗 和***

The Effect of the Pressure Medium on Cylinder Fatigue Strength under
Repeated Internal Pressure
(In the Case of Metallic Materials of Mild Steel, Stainless Steel,
Manganese Steel, Aluminium Alloy and Copper)

by Mitsuo NAGAO and Munekazu KANNO

A thin cylinder of ductile materials was subjected to internal pressure by various media, and the fatigue strength of the materials was determined experimentally as the effect of different media. The metallic materials of the thin cylinder were mild steel, stainless steel, manganese steel, aluminium alloy and copper metal. Various kinds of actuating pressure media —water, 3 percent saltwater, turbine oil and castor oil— were used to test the cylinder. S-N curves for the pressure medium show inherent fatigue strength in combination of the medium and metallic materials. On the surface of the ferrous metal, marks peculiar to corrosion fatigue were observed in the inner cylinders. Free energy change given ΔG by Gibbs is adopted as a parameter of reactivity in the relation metal and environments of medium. The fatigue strength of thin cylinder for pressure medium is correlated to the free energy of metal.

Key Words: Fatigue, Metallic Materials, Pressure Vessel, Internal Pressure, Environment, Corrosion Fatigue, Free Energy

1. 緒 言

一般に金属材料が繰返し応力を受ける際に、周囲の環境により疲れ強さは多少の影響を受けることが知られている⁽¹⁾。この環境効果に関する研究は⁽²⁾試験片の外部の環境を取扱ったものがほとんどであり、また試験片に与える負荷形式は引張り、圧縮、回転曲げあるいはねじりの繰返しの場合が中心となっている。これに対して円筒形の容器を試験片として、この中に充てん(填)する液体の媒体に繰返し内圧を与えた場合の円筒の疲れ強さに及ぼす内部環境の影響についてはまだ十分なる資料に乏しいように思われる。

本研究においては⁽³⁾⁽⁴⁾、圧力媒体として水、3%食塩水のほかに油脂系の環境としてタービン油、ひまし油⁽⁵⁾の4種類の場合を設定した。これらの媒体を用い正弦波の繰返し内圧を円筒に与えて、主に時間強度域の疲れ強さの変化を調べた。円筒の金属材料は鉄系として軟鋼、ステンレス鋼、マンガン鋼、さらに非鉄系としてアルミニウム合金、銅の5種類からなる延性材

料を用いた。これらの金属材料の疲れ強さに及ぼす圧力媒体の影響を実験的に求めたところ以下に示すような興味ある結果を得ることができた。これは、工学的に応用面の広い設計上の基礎資料になるものと考えられる。

2. 実験方法

2・1 実験材料と円筒の形状 実験に用いた材料は、フェライト・パーライト組織の軟鋼(0.44% C)、オーステナイト系ステンレス鋼(24.76% Cr-19.49% Ni)とマンガン鋼(1.51% Mn, 0.42% C)、さらにアルミニウム合金(4.60% Mg)と銅(>99.90% Cu)の金属材料である。実験材料の機械的性質は表1に示すとおりである。また、試験円筒はこれらの材料から製作した円筒形の容器で形状と寸法を図1に示す。試験円筒は外径 $d_0=12$ mm, 内径 $d_1=10$ mmとした比較的薄肉な円筒を、1本の丸棒と同一軸に旋盤により切削加工したものである。

内圧を受けた薄肉円筒に働く円周応力 σ_h は⁽⁶⁾、次式により求めた。

$$\sigma_h = \frac{1}{\kappa_0 - 1} P$$

ただし、

* 昭和60年6月22日 東北支部郡山地方講演会において講演、原稿受付 昭和60年1月7日。

** 准員、日本大学工学部(〒963 郡山市田村町徳定字中河原1)。

*** 正員、日本大学工学部。

表 1 実験材料と材料の機械的性質

Material	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Reduction of area ϕ (%)	Vickers hardness HV
Mild steel (S45C)	$\sigma_y=392$	726	13	47	208
Stainless steel (SUS310S)	207	521	67	75	169
Manganese steel (SMn443H)	394	801	21	56	239
Aluminium alloy (A5056BDS-H14)	145	366	18	44	102
Copper (C1100BD-1/2H)	164	261	31	74	94.2

 σ_y : Yield stress

図 1 試験円筒の形状と寸法

 σ_h : 円周方向の引張応力 (MPa) P : 繰返し圧力の最大値 (MPa)(試験圧力範囲 $P=20\sim 90$ MPa) λ_0 : 円筒の外内径比 ($\lambda_0 = d_0/d_1$)

2・2 圧力媒体の種類 実験に用いた圧力媒体は、液体性の媒体で表 2 に示すような水、3% 食塩水、さらにタービン油、ひまし油の 4 種類である。また媒体の粘性は表 2 より明らかなように、水と 3% 食塩水は媒体の中で最も小さく、ひまし油は最も大きい粘性を示す。さらに表 2 には水の粘性を ν_0 として各媒体の粘性比 ν/ν_0 を求め同表に示した。3% 食塩水の媒体は、水に NaCl を溶解した 3% NaCl 溶液とした。タービン油は工業用潤滑油 (ISO, VG 32) を用い、ひまし油は一級試薬用のものを使用した。

円筒内の媒体を交換する際に、前に用いた媒体が混入しないように実験装置 (図 2) を洗浄してから次の媒体を円筒に充てんした。また、実験中の媒体の温度は試験圧力の範囲において、室温から $40\pm 5^\circ\text{C}$ の範囲である。

2・3 実験装置 試験円筒に異なる圧力媒体により繰返し内圧を与える実験装置の概略を図 2 に示す。

クランク機構による圧力発生装置 (A) からの繰返し圧力 P は、媒体変換部 (B) で試験媒体に伝達され試験円筒 (T) に繰返し内圧として与えられる。試験円筒

表 2 圧力媒体の種類と粘性 (約 40°C)

Medium	Kinematic viscosity (mm^2/s)	Viscosity ratio ν/ν_0
Water	0.7	1
3% saltwater		
Turbine oil	32	46
Castor oil	244	349

取付け部 (D) は、試験圧力が高压の繰返し圧力になることから円筒の両端に金属製のパッキンを 2 枚の円板で押し付けて圧力媒体の漏れを防ぐ構造とした。円筒内の媒体の圧力は、厚肉円筒で作られた圧力測定部 (C) から求めた。測定位置は、試験円筒から前方 $L=200$ mm に設けた厚肉円筒の外周方向へ張り付けたひびきゲージ (E) より測定した。また媒体変換部 (B) は、中央にゴム製の仕切り板を設けて発生装置 (A) の作動流体と実験に用いた媒体との混入を避けるようにした。

次に圧力測定部 (C) の圧力波形を図 3 に示す。この圧力波形は、 $P=80$ MPa、圧力媒体としてタービン油を用いた時の電磁オシログラフで求めた圧力波形である。この圧力波形は試験圧力の範囲において安定な近似正弦波となる繰返し内圧を円筒に与えることができた。繰返し圧力の周期は、毎分 $f=250$ cpm 一定で連続した繰返し圧力を与え、最大繰返し数は $N_f=1\times 10^6$ 回までとした。

3. 実験結果

3・1 試験円筒と圧力測定部の圧力差 円筒内の圧力は、前述したように圧力測定部 (C) の圧力を測定

図 2 内圧繰返し実験装置の概略

図 3 圧力測定部(C)の圧力波形

して試験円筒の繰返し応力 σ_n を求めた。実験に用いた媒体は、表 2 に示したように水を基準とした粘性比 ν/ν_0 が最大で約 350 となる広範囲の粘性を持つ媒体を用いている。これより試験円筒に与えられた圧力が、媒体の粘性の影響を受けて圧力測定部との間に生ずる圧力差 ΔP を実験的に調べた。

実験は、図 2 に示した試験円筒 (T) と圧力測定部 (C) との間が $L=200$ mm の一定距離で行った。この長さ L を 1000 mm (5 倍)、2000 mm (10 倍)、4000 mm (20 倍) と変化させ、圧力測定部と同一形状に製作した厚肉円筒と圧力測定部との圧力差 ΔP をひずみゲージより測定した。圧力媒体は水、タービン油、ひまし油を用い、圧力測定部の圧力を 20 MPa と 80 MPa の 2 段階について行い圧力波形の最大値の差を求め、これらの実験結果を図 4 に示す。圧力差 ΔP は、長さ L と媒体の粘性によりそれぞれ変化し、粘性の大きいひまし油の場合は圧力差が最も大きく、水の場合はほとんど圧力差が認められなかった。これらの実験結果から本実験の圧力測定部の長さ $L=200$ mm における繰返し応力 σ_n に対する圧力の低下は、最大で 0.50 % ($P=20$ MPa, $\Delta P=0.1$ MPa)、最小で 0.25 % ($P=80$ MPa, $\Delta P=0.2$ MPa) となる。これより、本実験における試験円筒と圧力測定位置の圧力差はほとんど無視してもよいと思われる。

以上の予備実験より、圧力測定部で測定した圧力を

図 4 圧力測定位置と媒体の粘性による圧力差

試験円筒の圧力とみなして以下の実験を進めた。

3・2 軟鋼 (S45C) の $S-N$ 曲線 軟鋼円筒の疲れ強さを表す $S-N$ 曲線を図 5 に示す。圧力媒体の違いによる疲れ強さは、水と 3% 食塩水の場合が最も低下した。またひまし油は最上位になり中間にタービン油の疲れ強さとなる 3 本の曲線で整理された。一方、大気中における塩水の疲れ試験 (回転曲げ) の研究では⁽¹⁾⁽⁷⁾、水の場合より早期に破壊することが知られているが、この内圧の疲れ試験では両者の違いが表れていない。また疲れ強さの順位は、表 2 で示した媒体の粘性の序列と同じ傾向を示した。円筒の疲れ強さに及ぼす圧力媒体の影響を表すために同一繰返し数 N_f の上限と下限の媒体における応力差の平均値を $\Delta \bar{\sigma}_n$ として整理すれば、軟鋼の場合は $\Delta \bar{\sigma}_n=50$ MPa の応力差となる。

3・3 ステンレス鋼 (SUS 310 S) の $S-N$ 曲線

ステンレス鋼の $S-N$ 曲線を図 6 に示す。この円筒の疲れ強さは、水系と油脂系媒体の 2 本の直線で整理された。油脂系媒体は、軟鋼円筒のようにタービン油とひまし油の粘性の違いが疲れ強さに表れていない。

水と3%食塩水の疲れ強さは、軟鋼円筒の場合と定性的に同じとなった。また、この円筒の媒体の違いによる応力差は $\Delta\bar{\sigma}_h=24\text{ MPa}$ となり軟鋼の約1/2である。

3.4 マンガン鋼 (SMn 443 H) の S-N 曲線

マンガン鋼の S-N 曲線を図7に示す。媒体の違いによる円筒の疲れ強さの傾向は、軟鋼の円筒の場合と同じ順位となり媒体の粘性の大きさと比例して表れた。マンガン鋼も鉄系金属材料であることから、圧力媒体の影響が軟鋼の場合と類似した特性を示したもののと思われる。また、ひまし油と水の疲れ強さの応力差は試験金属材料の中で最も大きく平均値が $\Delta\bar{\sigma}_h=88\text{ MPa}$ である。

3.5 アルミニウム合金 (Al-Mg 系) の S-N 曲線

圧力媒体によるアルミニウム円筒の S-N 曲線を図8に示す。疲れ強さは、図に示されるように3本の曲線で整理された。最も上位の S-N 曲線となった媒体は油脂系のタービン油とひまし油で、この傾向はステンレス鋼の場合と定性的に類似している。ところが、3%食塩水を媒体とした場合の疲れ強さは水よりもさらに下方に位置し、応力差を3%食塩水と油脂系の媒体とについて求めると $\Delta\bar{\sigma}_h=63\text{ MPa}$ となった。前

述のステンレス鋼とアルミニウム合金の実験から円筒の疲れ強さの順位は、軟鋼やマンガン鋼で見られたように媒体の粘性の大小に支配されているのではないことを示している。

3.6 銅 (タフピッチ銅) の S-N 曲線

銅の円筒の疲れ強さを図9に示す。図より明らかなように S-N 曲線は1本の直線として整理され、媒体の違いによる疲れ強さの変化は全く表れなかった。この現象は他の金属材料では見られない傾向を示しており、これは回転曲げや平面曲げにおける銅金属の疲れ強さが水や食塩水または大気中で行った場合に、大きな差が表

図5 軟鋼の圧力媒体による疲れ強さ

図6 ステンレス鋼の圧力媒体による疲れ強さ

図7 マンガン鋼の圧力媒体による疲れ強さ

図8 アルミニウム合金の圧力媒体による疲れ強さ

図9 銅の圧力媒体による疲れ強さ

れないという報告⁽¹⁾と同質の現象と思われる。すなわち、銅金属の円筒は圧力媒体による環境の変化に対して試験金属材料の中で最も安定した結果を示した。これより応力差は明らかに $\Delta\sigma_h=0(\text{MPa})$ と示される。また、銅金属は一般に腐食に対して優れていることが知られているので液体の媒体と金属との関係は、単に応力のみならず化学的な面から考慮しなければならないことを示唆している。

4. 考 察

4.1 円筒の内側表面の観察 内圧の繰返し試験によって疲れ破壊した軟鋼円筒の内側表面を観察した。この時の写真を図 10(a)と(b)に示す。前者は媒体が水の場合であり、後者はひまし油を媒体とした時のもので、いずれの場合も開口き裂周辺の表面である。表面には腐食疲れによって表れたと思われる主応力と直角方向に、結晶粒界の境界線が強調された網目状の表面パターンが⁽⁸⁾観察された。これは例えば⁽⁹⁾、海水中で船舶用のスクリュウ軸が腐食疲れによって表れたクロスマークのパターンと類似したものである。同

様に図 10(c)と(d)に示すステンレス鋼の円筒の表面にも軟鋼円筒の表面と同じパターンが観察された。また、マンガン鋼の内側表面にも腐食作用によって発生したと思われる表面パターンが観察された。

4.2 金属材料の自由エネルギーと応力差 圧力媒体による $S-N$ 曲線は、円筒の金属材料との組合せによってそれぞれ固有の疲れ強さが表れることがわかった。前項の表面観察の結果に基づき、円筒の疲れ強さに及ぼす圧力媒体の影響を腐食疲れの観点から整理した。すなわち、金属材料が周囲の環境と反応するかどうかを表す指標として、界面反応で用いられる Gibbs の自由エネルギーを適用させ本実験の現象を整理した。この結果を図 11 に示す。

各金属材料の自由エネルギー変化 $\Delta G^{(10)}$ (Tomashov 氏が水素発生による各金属材料の腐食試験で求めた測定値を引用した) と、液体環境が疲れ強さに及ぼす効果を媒体の違いによって表れた応力差 $\Delta\sigma_h$ で代表させて求めた関係である。応力比 $\Delta\sigma_h/\sigma_y$ とは、図 5 から図 9 の $S-N$ 曲線の中で上限と下限の応力差 $\Delta\sigma_h$ を表 1 で示した実験材料の耐力または降伏応力 σ_y で求

図 10 疲れ破壊した円筒の内側表面における開口き裂周辺の表面パターン

図 11 金属材料の自由エネルギー変化と応力差

めた応力比である。また、単一金属材料でない合金組成を持つステンレス鋼やマンガン鋼、さらにアルミニウム合金については、それぞれの成分である金属の ΔG を求め自由エネルギー変化にその範囲をとって示した。銅や軟鋼は単一金属材料として表した。

図 11 から明らかなように自由エネルギーの減少量の大きい金属材料ほど腐食反応の傾向が活発で、液体環境によって表れる応力差は大きくなる。特に、アルミニウム合金はその傾向をよく表している。一方、 ΔG が減少しない銅金属は $\Delta\sigma_h=0(\text{MPa})$ となり液体環境の影響を受けにくいことを示している。このように、圧力媒体の違いによる金属材料の疲れ強さは、円筒を構成している金属材料の自由エネルギーと相関性があることを示している。

5. 結 論

本研究は、延性材料からなる円筒形の容器に液体の圧力媒体で繰返し内圧を与え、圧力媒体の違いによっ

て円筒の疲れ強さがどのように変化するかを実験的に求めた。実験の結果を要約すると次のようになる。

(1) 銅金属を除く他の金属材料は、疲れ強さの傾向は異なるがいずれも圧力媒体の影響を受ける。すなわち、各金属材料と圧力媒体の組合せによる疲れ強さを、それぞれの $S-N$ 曲線で明らかにした。

(2) 軟鋼やマンガン鋼の疲れ強さは、圧力媒体の影響が粘性の大きさに比例して表れたが、他の金属材料では粘性の大きさとは無関係な $S-N$ 曲線となる。

(3) 軟鋼やステンレス鋼、さらにマンガン鋼などの鉄系金属材料からなる円筒の内側表面には、いずれも腐食作用により形成された表面パターンが観察された。

(4) 金属材料と液体環境の組合せにより表れた円筒の疲れ強さの媒体による違いは、金属の腐食反応の傾向を示す自由エネルギー変化量と関連することを明らかにした。

最後に、本研究の遂行にあたり有益なご意見と討論をいただいた日本大学工学部・佐藤和郎教授並びに依田満夫助教授に謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば、日本機械学会、金属材料 疲れ強さの設計資料 III, (昭 49)。
- (2) Rebinder, P. A. ほか 2 名, *Effect of a Surface-Active Medium on the Deformation of Metals*, Dep. Sci. Ind. Res., London, (1958)。
- (3) 菅野・長尾, 機講論, No. 841-1(昭 59-6), 110。
- (4) 菅野・長尾, 第 28 回材研連前刷集, (昭 59-9), 1。
- (5) 佐藤・森, 材料科学, 15-1(昭 53), 50。
- (6) 佐藤, 機論, 25-151(昭 34), 117。
- (7) 例えば、増田・ほか 3 名, 機論, 50-453, A(昭 59)1019。
- (8) 遠藤・宮尾, 機論, 24-139(昭 33), 167。
- (9) 原, 造船協会論文集, 97 号(昭 30)。
- (10) 伊藤, 腐食化学と防食技術, (昭 54), 37, コロナ社。