

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of tested steels.

Materials	Chemical compositions									Mechanical properties			
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	σ_y (kg/mm ²)	σ^B (kg/mm ²)	ϵ (%)	
Mild steel	0.17	0.06	0.77	0.015	0.02					28	45	33	
60 kg/mm ² high strength steel	0.12	0.43	1.09	0.014	0.006	0.01	0.17	0.03	0.20	57	67	25	
80 kg/mm ² high strength steel	0.14	0.26	0.86	0.015	0.005	0.01	0.85	0.29	0.05	Mo 0.45	84	90	23
18-8 stainless steel	0.07	0.83	1.45	0.03	0.010	8.50	18.3				63	73.6	

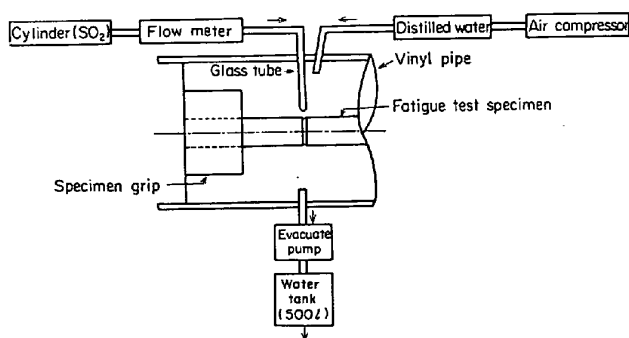


Fig. 1. Schema of experimental apparatus.

ス、(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)、(硫化水素ガス+湿った空気)、蒸留水および濃硫酸(50%および98%)である。亜硫酸ガスおよび硫化水素ガスの純度はそれぞれ99.9%以上および99.0%以上で、これらのガスはつねに試験片の中央部の切欠にあたるように送給された。湿った空気はコンプレッサーからの空気を蒸留水を通して送給することによって作製した。湿った空気の相対湿度は約60~80%で湿った空気と亜硫酸ガスの混合ガス中の亜硫酸ガスの濃度は約1.0%であった。硫酸および蒸留水はビューレットにより0.25cc/minでつねに切欠部にあたるように滴下した。試験機の各部にはエポキシ樹脂を塗布し、ガスによる腐食を防止するとともに、

吸込ポンプによる排気ガスは500lの水道水を満たしたタンクを通して処理した。

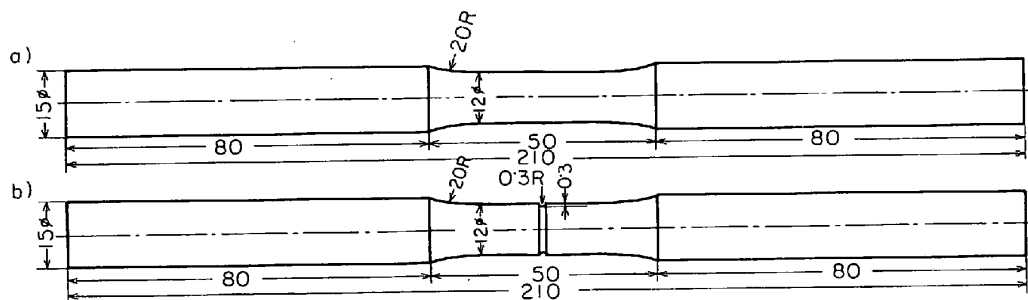
また、種々の雰囲気中での破断面の観察は光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いて行なった。

なお、本実験での疲れ試験結果はS-N曲線が直線であると仮定し、すべて最小二乗法で計算し、整理した。

3. 実験結果

1) 種々の鋼材の疲れ強さにおよぼす雰囲気の影響

Fig. 3は種々の雰囲気中での軟鋼切欠試験片についてのS-N曲線である。大気中での疲れ強さに比べ、乾燥亜硫酸ガス雰囲気中での疲れ強さはやや増大して、したがって疲れ強さにおよぼす乾燥亜硫酸ガスの影響は認められない。しかしながら(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)の雰囲気中では大気中に比較し、疲れ強さが低下していることが認められる。しかし、(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)雰囲気中での疲れ強さに比較し、湿った空気中での疲れ強さは幾分か減少して、軟鋼の疲れ強さにおよぼす亜硫酸ガスの影響はほとんど認められないように思われる。また、すべての雰囲気において、高応力よりも低応力(疲れ限度を除く)で雰囲気の影響が幾分強いようである。



a) Plain bar specimen, $\alpha=1.0$, b) round notched bar specimen, $\alpha=2.5$

Fig. 2. Rotating bending fatigue test specimen.

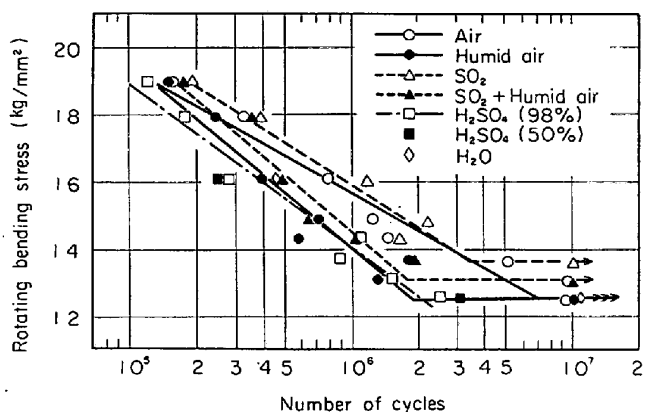


Fig. 3. Effect of various atmospheres on fatigue strength of mild steel (round notched specimen, 3 000rpm).

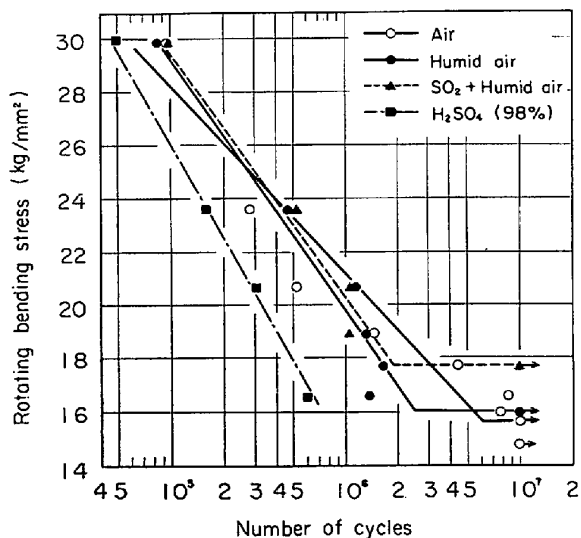


Fig. 4. Effect of various atmospheres on fatigue strength of 60 kg/mm² high strength steel (round notched specimen, 3 000rpm).

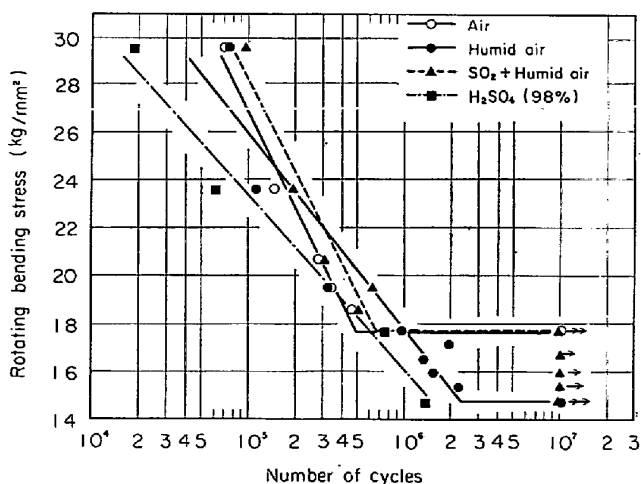


Fig. 5. Effect of various atmospheres on fatigue strength of 80 kg/mm² high strength steel (round notched specimen, 3 000rpm).

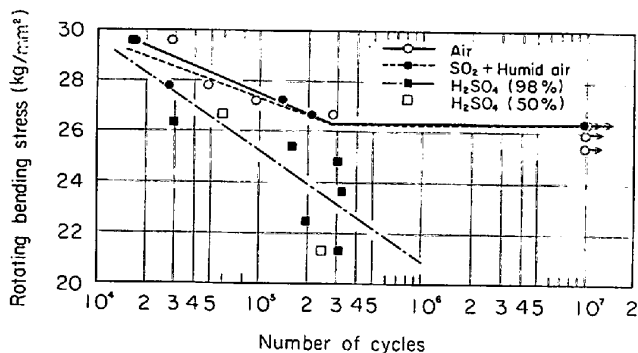


Fig. 6. Effect of various atmospheres on fatigue strength of 18-8 stainless steel (round notched specimen, 3 000rpm).

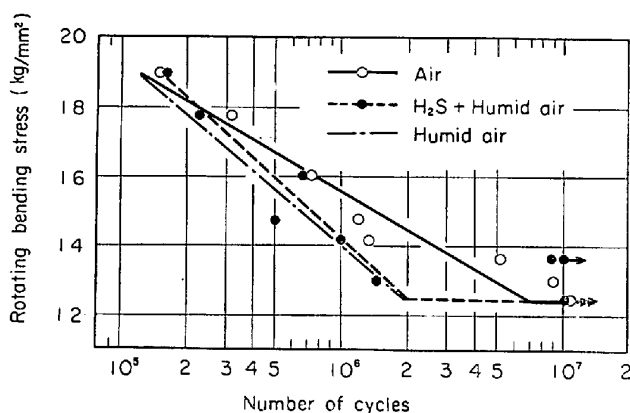


Fig. 7. Effect of H₂S gas on fatigue strength of mild steel (round notched specimen, 3 000rpm).

Fig. 4 および Fig. 5 は 60 kg/mm² 級および 80 kg/mm² 級高張力鋼についての結果である。両鋼ともに繰返し曲げ応力約 18 kg/mm² 以上では湿った空気および(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)の影響は認められない。しかし、繰返し曲げ応力約 18 kg/mm² 以下では湿った空気の影響が認められるのに比較し、(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)の雰囲気の影響はまったく認められない。

一般に耐食性の良好な 18-8 ステンレス鋼の場合には、Fig. 6 に示すように、大気中での結果と比較して(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)雰囲気の影響はほとんど認められていない。

上記以外の雰囲気については、(硫化水素ガス+湿った空気)の雰囲気でも軟鋼切欠試験片の疲れ試験を行なった。その結果、Fig. 7 に示すように、Fig. 3 で述べた亜硫酸ガスの場合と同様に、大気中と比較し、(硫化水素ガス+湿った空気)の影響の程度は、湿った空気の場合とほぼ等しい。したがって、軟鋼の疲れ強さにおよぼす硫化水素ガスの影響は認められないように思われる。

Table 2. Fatigue strength of various steels in different atmospheres.

Specimens	Atmospheres	Cycles	Fatigue strength (kg/mm ²)	Ratio of fatigue strength
Mild steel	Air	10 ⁶	15.5	1.00
	Humid. Air	//	13.9	0.90
	Dry SO ₂	//	15.8	1.02
	SO ₂ +humid. Air	//	14.5	0.94
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	13.9	0.90
	H ₂ S+humid. Air	//	14.2	0.91
60 kg/mm ² high strength steel	Air	6 × 10 ⁵	21.9	1.00
	Humid. Air	//	22.4	1.02
	SO ₂ +humid. Air	//	22.8	1.04
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	17.0	0.78
80 kg/mm ² high strength steel	Air	4 × 10 ⁵	18.8	1.00
	Humid. Air	//	21.0	1.12
	SO ₂ +humid. Air	//	20.5	1.09
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	19.0	1.01
18-8 stainless steel	Air	10 ⁶	27.4 ⁵	1.00
	SO ₂ +humid. Air	//	27.2 ⁵	0.99
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	25.1 ⁸	0.92

Note : Ratio of fatigue strength means ratio of fatigue strength in various atmospheres to that in air.

Table 3. Fatigue life of various steels in different atmospheres.

Specimens	Atmospheres	Stress (kg/mm ²)	Fatigue life (× 10 ⁵ cycles)	Ratio of fatigue life
Mild steel	Air	16.0	7.2	1.00
	Humid. Air	//	4.2	0.59
	Dry SO ₂	//	9.4	1.31
	SO ₂ +humid. Air	//	5.4	0.75
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	3.7	0.52
	H ₂ S + Humid. Air	//	4.8 ⁷	0.69
60 kg/mm ² high strength steel	Air	20.6	5.3 ⁶	1.00
	Humid. Air	//	11.5	2.14
	SO ₂ +humid. Air	//	10.7	1.99
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	3.0 ⁶	0.57
80 kg/mm ² high strength steel	Air	19.4	3.4	1.00
	Humid. Air	//	3.2 ⁶	0.95
	SO ₂ +humid. Air	//	6.2	1.81
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	3.2	0.57
18-8 stainless steel	Air	27.0	1.4 ⁸	1.00
	SO ₂ +humid air	//	1.3	0.88
	H ₂ SO ₄ (98%)	//	0.3 ⁸	0.26

Note : Ratio of fatigue life means ratio of fatigue life in various atmospheres to that in air.

濃硫酸滴下の影響は Fig. 3 ~ Fig. 6 に示したように、いずれの鋼においても著しく認められた。また、鋼についての静的な腐食では濃硫酸濃度約 50% で腐食減量が最大になるといわれているので⁸⁾、軟鋼および 18-8 ステンレス鋼について、濃度 50% でも疲れ試験を行なった。しかし、Fig. 3 および Fig. 6 に示したように、濃度 98% の場合に比較し、疲れ寿命に大差は認められなかった。

なお、軟鋼について行なった蒸留水中での結果は Fig.

3 に示したように、湿った空気中での結果と同程度であった。

以上の結果を時間強さ、疲れ寿命および疲れ限度について一括して Table 2, Table 3 および Table 4 に示す。各表の右端に、空気中での値を 1 とした場合の各雰囲気での値の比を示してある。Table 2 および Table 3 より、軟鋼の場合には、大気中での疲れ強さおよび疲れ寿命に比較し、乾燥亜硫酸ガスの場合を除いた他の雰囲気の影響が認められ、これらの雰囲気は疲れ強さよりも

Table 4. Fatigue limit of various steels in different atmospheres.

Specimens	Atmospheres	Fatigue limit (kg/mm ²)	Ratio of fatigue limit
Mild steel	Air	12.4	1.00
	Humid. Air	12.4	1.00
	Dry SO ₂	13.5	1.08
	SO ₂ + humid. Air	13.0	1.04
	H ₂ S + humid. Air	12.4	1.00
60 kg/mm ² high strength steel	Air	15.6	1.00
	Humid. Air	15.9	1.01
	SO ₂ + humid. Air	17.7	1.14
80 kg/mm ² high strength steel	Air	17.7	1.00
	Humid. Air	14.7 ⁵	0.83
	SO ₂ + humid. Air	17.7	1.00
18-8 stainless steel	Air	26.3	1.00
	SO ₂ + humid. Air	26.3	1.00

Note : Ratio of fatigue limit means ratio of fatigue limit in various atmospheres to that in air.

疲れ寿命により強く影響を与えている。60 kg/mm² 級高張力鋼、80 kg/mm² 級高張力鋼および 18-8 ステンレス鋼の場合には、濃硫酸の影響を除いては、他の雰囲気の影響はほとんど認められないことがわかる。また、Table 4 より、80 kg/mm² 級高張力鋼におよぼす湿った空気の影響を除いては、雰囲気が疲れ限度にはほとんど影響を与えていないことも認められる。なお、ここでは、大気中を除く他の雰囲気でも 10⁷ 回の繰返し数の後破断しない応力を疲れ限度として取り扱っている。

2) 試験片形状、亜硫酸ガス濃度および試験速度の影響

試験片形状におよぼす亜硫酸ガスの影響をみるために、軟鋼平滑試験片を用いて大気中と（乾燥亜硫酸ガス+湿った空気）の雰囲気中で疲れ試験を行なった。その結果、Fig. 8 に示すように、Fig. 3 の切欠試験片での結果に比べて、10⁷ 回での結果を除いては、（亜硫酸ガス+湿った空気）の影響は幾分少ないようである。

別に行なったアルミニウム合金の場合⁹⁾に Al-Mg-Cu 系合金の疲れ寿命が（亜硫酸ガス+湿った空気）中での亜硫酸ガス濃度約 1~2% で低下するとの結果を得た。そこで、軟鋼の疲れ寿命におよぼす湿った空気中での亜硫酸ガスの濃度の影響をみるために、湿った空気中の亜硫酸ガスの濃度を 0~2% に変化させた雰囲気中で疲れ試験を行なった。しかし、亜硫酸ガスの濃度変化による疲れ寿命の相違は認められなかった。

また、試験速度の影響をみるために、回転数 1500rpm で大気中と（乾燥亜硫酸ガス+湿った空気）中で疲れ試験を行なったが、比較的高応力で行なったためか、雰囲気による相違は認められなかった。

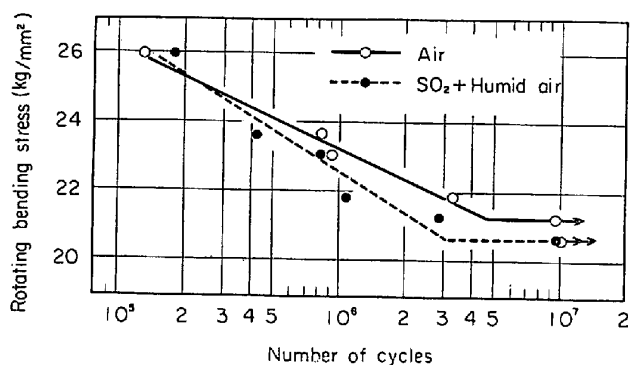
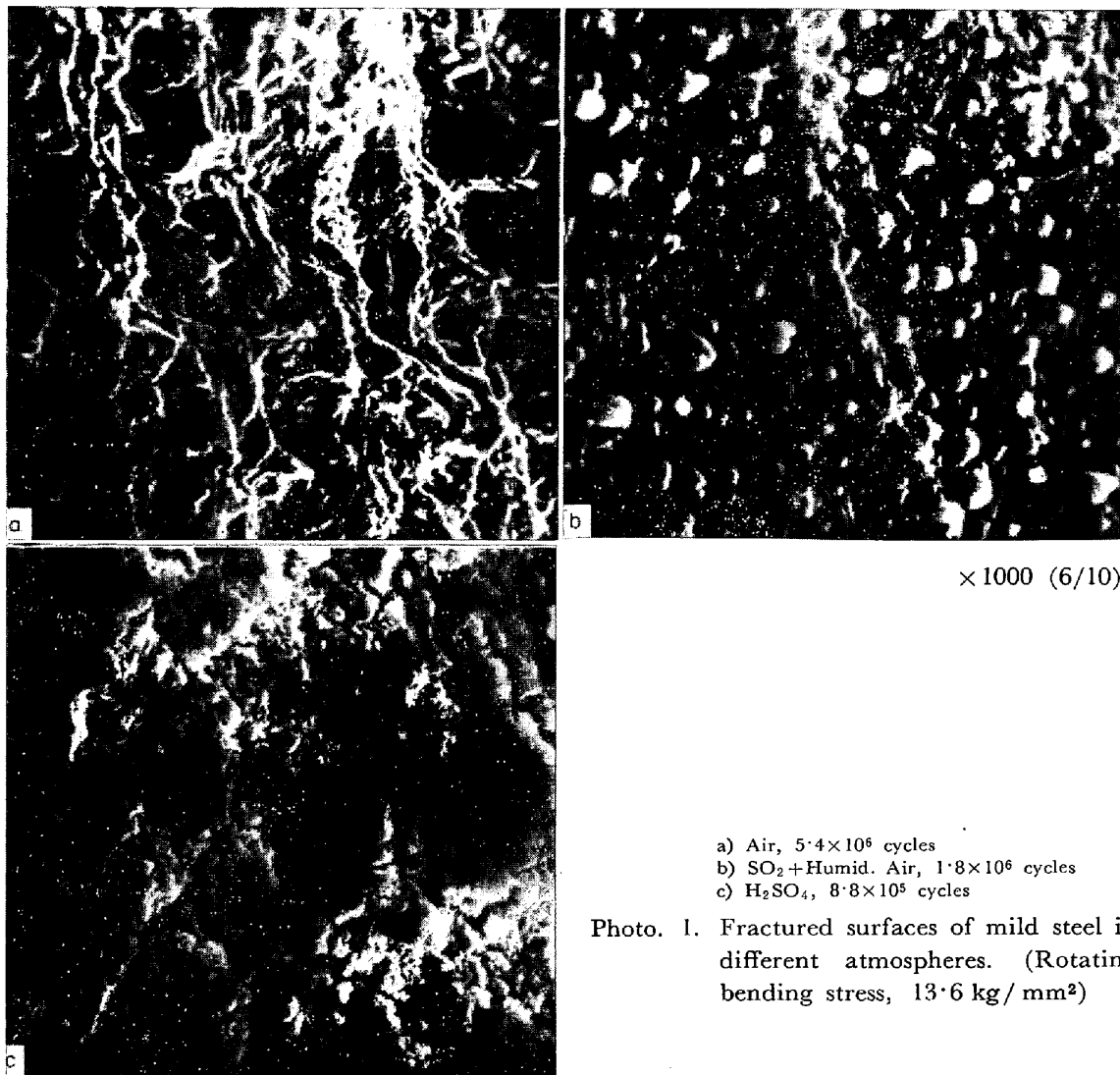


Fig. 8. Effect of the mixed gas of SO₂ gas and humidified air on fatigue strength of mild steel (plain bar specimen, 3000rpm).

3) 破断面の観察

種々の雰囲気中で破断した軟鋼試験片の肉眼による外観観察では、大気中での破面に比較し、（乾燥亜硫酸ガス+湿った空気）の雰囲気中での破面はほとんどの場合茶褐色を呈していた。走査型顕微鏡による観察の結果、（乾燥亜硫酸ガス+湿った空気）雰囲気中での破面 (Photo. 1 b) は硫酸中での破面 (Photo. 1 c) に類似し、大気中での疲れ破面 (Photo. 1 a) とはまったく異なっていることが認められた。また、種々の雰囲気中で破断した軟鋼試験片の破面に垂直な面の光学顕微鏡による疲れき裂の進展径路の観察も行なったが雰囲気による顕著な相違を認めることはできなかった。

Fig. 3 に示したように、軟鋼の疲れ強さにおよぼす乾燥亜硫酸ガス単独の影響は認められず、乾燥亜硫酸ガスに湿った空気を加えた雰囲気では疲れ強さが低下することがわかった。このことは鉄についての VERNON¹⁰⁾の静



- a) Air, 5.4×10^6 cycles
 b) SO_2 + Humid. Air, 1.8×10^6 cycles
 c) H_2SO_4 , 8.8×10^5 cycles

Photo. 1. Fractured surfaces of mild steel in different atmospheres. (Rotating bending stress, 13.6 kg/mm^2)

的腐食の結果とよく一致している。すなわち、VERNONは鉄についての大气腐食に関する研究から、鉄の腐食には臨界湿度(約60%)が必要で、また、亜硫酸ガスが存在すると腐食量がさらに増加することを明らかにした。たとえば、0.01% SO_2 を含む大气雰囲気中での鉄の常温での腐食量は相対湿度が約60%以上で急激に増加する。

しかし、疲れに関する本実験では(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)中での疲れ強さは湿った空気中での疲れ強さと同程度であり、軟鋼の疲れ強さにおよぼす亜硫酸ガスの影響はS-N曲線からは認められないように思われる。しかしながら、肉眼および走査型電顕による観察の結果、(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)雰囲気中での破面はほとんど茶褐色を呈し、また硫酸中での破面と類似していて、亜硫酸ガスと軟鋼との疲れ試験中における何らかの反応を想像させている。

焼入れ焼戻し鋼についてのソヴィエトでの実験では、

相対湿度が100%に近い湿った空気に0.27%の SO_2 を加えた雰囲気中で2800C/minで繰返し曲げ疲れ試験を行なった結果、大气中での疲れ強さに比べ約50%疲れ強さが低下したことが報告されている¹¹⁾。しかしながら、亜硫酸ガスを含んだ湿った空気と、湿った空気雰囲気での疲れ強さの比較がされていないので亜硫酸ガスがどの程度疲れ強さに影響を与えたのかは不明である。

60 kg/mm²級および80 kg/mm²級高張力鋼の場合には湿った空気の影響が認められたのに比較し、(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)雰囲気の影響はまったく認められなかった。このことは、工場地帯における低合金高張力鋼の大气腐食減量が炭素鋼の腐食減量に比べて非常に少ないという実験結果¹²⁾と類似しているように思われる。すなわち、何らかの合金元素の影響が想像される。

18-8ステンレス鋼の場合には(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)の雰囲気は疲れ強さにまったく影響を与えなかったが、別の実験でも同鋼の疲れ強さが大气中の酸素お

よび湿度の影響を受けないことは確かであり¹³⁾ 18-8 ステンレス鋼の疲れ強さにおよぼす亜硫酸ガスの影響が認められないことがわかる。

大気中の湿度が鋼材の疲れ強さを低下させる機構についてはまだ明らかにされていないが、湿度が疲れき裂の進展を促進し、疲れ強さを低下させることは実験的に明らかにされている^{2)~6)}。本実験の場合のように、湿った空気中に亜硫酸ガスが存在する場合には、静的腐食に関する研究でこれまでにいわれているように^{14)~17)}、軟鋼の表面に SO_2 が吸着し大気中の酸素との酸化現象によつて腐食性の強い H_2SO_3 、あるいは H_2SO_4 が生じ、軟鋼と何らかの反応を起こして疲れ強さを低下させることが想像される。

本実験での亜硫酸ガス濃度約1%は、静的腐食の場合に軟鋼に対して最も腐食減量の増大した SANYAL ら¹⁵⁾の実験値約0.9%に近いが、実際の大気中での亜硫酸ガス濃度は約 10^{-2} ~ 10^{-5} % なので、限られた低濃度での実験が必要であると思われる。また、一部で行なつた1500 rpmの場合を除いて本実験で用いた繰返し数はほとんどの場合に3000rpmであつたが、今後はさらに繰返し数を減少させ、試験時間を長くした実験が必要であると思われる。

4. 結 論

軟鋼 60 kg 級, 80 kg 級 高張力鋼および 18-8 ステンレス鋼の切欠試験片の 3000rpm の回転曲げ疲れ試験における雰囲気の影響を調べつぎの結果を得た。

1) 軟鋼の疲れ強さにおよぼす乾燥亜硫酸ガスの影響は認められない。

2) 軟鋼の疲れ強さにおよぼす(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)の影響は顕著であるが、その程度は湿った空気のみとの影響とほぼ等しい。したがつて、軟鋼の疲れ強さにおよぼす亜硫酸ガスの影響はほとんど認められないように思われる。しかしながら、疲れ破面の観察からは何らかの亜硫酸ガスの影響が想像される。

3) 60 kg/mm² 級および 80 kg/mm² 級高張力鋼の場合には、湿った空気の影響が認められたにもかかわらず、(乾燥亜硫酸ガス+湿った空気)の影響はまったく

認められない。

4) 18-8 ステンレス鋼の場合には、湿った空気および亜硫酸ガスの影響はまったく認められない。

5) いずれの鋼においても濃硫酸滴下の影響は顕著である。

本実験に使用した鋼材の一部および亜硫酸ガスと硫化水素ガスは新日本製鉄株式会社および製鉄化学工業株式会社のご厚意によるものである。とくに記して謝意を表す。また、学部学生小田村順司君と森繁晴君の熱心な協力にも感謝の意を表したい。

文 献

- 1) たとえば遠藤: 第13回強度と破壊国内シンポジウム集録 (1968), p. 47~58
- 2) たとえば P. E. DAHLBERG: Trans. ASM. 58 (1965), p. 46~53
- 3) 益本, 上田, 江原: 溶接学会誌, 39 (1970) 8, p. 61~68
- 4) 益本, 江原, 上田: 溶接学会誌, 39 (1970) 9, p. 74~80
- 5) I. MASUMOTO, R. EBARA, and K. UEDA: Metal Const. and Brit. Weld. J., 2 (1970), p. 423~426
- 6) H. J. GOUGH and D. G. SOPWITH: Journal of the Institute of Metals, 72 (1964), p.415~421
- 7) 西田: 応力集中, p. 42 [森北出版] (1967)
- 8) 遠藤: 日本金属学会誌, 2 (1935), p.483~492
- 9) 江原: 未発表
- 10) H. W. J. VERNON: Trans. Faraday Soc., 31 (1935), p. 1668~1700
- 11) ANON: Corrosion Prevention and Control, 2 (1955), p. 37
- 12) C. P. LARRABEE: Corrosion, 9 (1953), p. 259 271
- 13) 益本, 江原: 溶接学会誌, 41 (1972) 3, p. 64~69
- 14) U. R. EVANS: Nature, 206 (1965), p.980~982
- 15) B. SANYAL, G. K. SINGHANIA, and D. V. BHARDWAR: Proc. of the third Inter. Cong. on Metallic Corrosion, 4 (1965), p. 454~464 (Moscow)
- 16) K. BARTON, J. HONZAK, and Z. BARTONOVA: Proc. of the fourth Inter. Cong. on Metallic Corrosion, (1972), p. 425~428, NACE
- 17) J. R. DUNCAN, D. J. SPEDDING, and E. E. WHEELER: Corrosion Science, 13 (1973), p. 69~71