

# 高周波焼入れした鋼中空試験片の腐食疲れ強さ

—高周波焼入れ鋼の疲れ強さの一検討—

Corrosion Fatigue Strength of the Cylindrical Hollow Steel Bar Hardened by High Frequency Induction Heating  
—A Study on Fatigue Strength of the Steel Hardened by High Frequency Induction Heating—

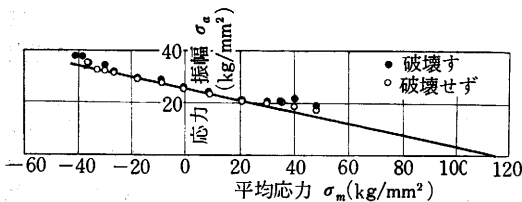
北川英夫・堀内正明・細井清忠

## 1. 高周波焼入れによる強度向上の検討

腐食疲れによる鋼材の強度低下を十分に阻止し、さらに進んで疲れ限度をも得ることはかなりむずかしい問題である<sup>1)</sup>。この問題に対する数少ない解答の一つとして、高周波焼入れが有効であることは筆者らがすでに指摘したところである<sup>1),2)</sup>。

その著しい強度向上の効果の機構については、き裂の発生および進行に及ぼす軸方向残留応力の影響と、繰返し荷重下でその残留応力を維持しうるだけの金属組織上の改善との2点を基礎として一応の説明を試みておいた<sup>2)</sup>。しかし、現段階ではまだ種々疑問が残されている。たとえば(1)その残留応力ははたして繰返し応力に耐えて維持されたか、(2)平均応力の影響に関する既知の諸法則が残留応力に関してもそのまま適用できるのか、(3)硬化はそのまま疲れ強さの向上につながるのか、(4)硬化と軸方向圧縮残留応力以外の第3の要因を考えなくてもよいのか等々である。

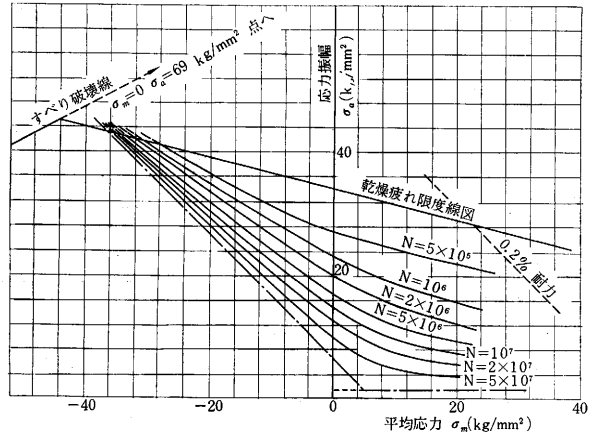
今かりに、単純に硬化と残留応力で強度向上が説明できるものとしよう。平均応力が平滑材の疲れ強さに与える影響を示すものとして  $\sigma_m \sim \sigma_a$  図からなる疲れ限度線図が曲げに対してもしばしば使われるが、この関係が高周波焼入れ鋼にも成立するものとする、その傾斜はたとえば第1図<sup>3)</sup>のようにあまり大きくない。したがって



第1図 炭素鋼の疲れ限度線図 (西原・桜井)

今、平均応力たる残留応力を自由に変えたとしても、その変化がかなり顕著でなくては、疲れ限度に見るべき変化が生じないはずである。しかも圧縮残留応力を高め過ぎるとかえって疲れ強さを弱めるおそれもある。

腐食疲れの場合は、特に腐食作用が弱くないときは、時間疲れ強さ線図はたとえば第2図<sup>4)</sup>のように圧縮例では急傾斜になり、圧縮残留応力の大小はただちに疲れ強さの大小、または疲れ寿命の長短に顕著な変化をもたらすはずである。したがって平均応力としての圧縮残留応力の効果の抽出は、腐食疲れ実験では、乾燥疲れ実験の



第2図 レール鋼の食塩水腐食疲れ時間強さ線図  
〔き裂発生限界線と、き裂進行限界線とを漸近線とする双曲線群で表わすことができる〕

場合に比べてかなり容易になるものと思われる。

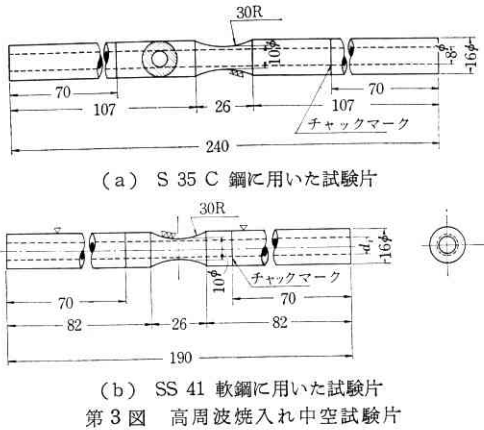
## 2. 中空円筒試験片の採用と実験方法

上記の諸点を検討する方法の一つとして、中空円筒試験片による疲れ試験がある。中空であることにより、焼入れによる残留応力の解放または発生の制限が可能であると同時に、材質の硬化は十分達せられるので、残留応力の影響と硬化の影響を分離抽出できる可能性がある。

中空試験片による実験においては(イ)試験片製作の困難さ、(ロ)円筒内面(孔表面)よりの破壊開始、(ハ)試験片円周方向にそっての残留応力の分布の均一性の保証、(ニ)偏平化、(ホ)剛性低下による実験精度の低下などの諸点が問題になるものと思われるが、全体としては比較的信頼度の高い実験方法であろう。

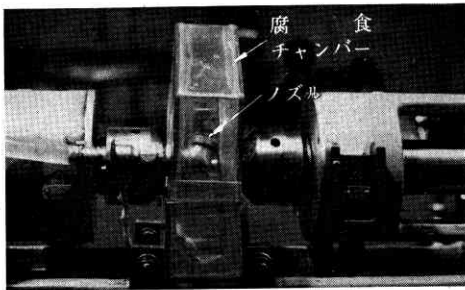
(イ)の点に関しては、今回のわれわれの実験では、あらかじめ作った中空試験片を高周波焼入れして使用した。そのおもなる理由は、予備的な諸検討の結果、腐食疲れ実験に必要な長さの試験片を焼入れ後かなりの精度および仕上条件で中空に仕上げることが、われわれの使用できる試験機容量との関係で、十分には保証できないと判断したためである。

(ロ)の点は、腐食液を外表面に降霧状にして与えることにより外表面からのき裂発生を促進している、円孔内表面の条件が外表面に比べてかなり悪い場合でも、少なくとも腐食疲れに関しては、心配は少ないものと思われる。腐食液は地下水を主とする生研の水道水である



(a) S 35 C 鋼に用いた試験片

(b) SS 41 軟鋼に用いた試験片  
第 3 図 高周波焼入れ中空試験片



第 4 図 腐食用チャンパ (b) の中空試験片用に作った。ノズルからチャンパの天井に吹付けて降霧を作る。

が、高周波焼入れ鋼に対してはかなり強い腐食液であると推定される。

試験片の形状は (ニ)(ホ) と、ある程度 (ハ) と (イ) を考慮して第 3 図 (a), (b) のように選んだ。(b) の試験片の使用時にはこれに合わせて従来より小形に第 4 図のように改造した腐食用チャンパを用いた。S 35 C 用の試験片 (a) は内径  $d_i$  を 7, 6 および 5 mm に変えたものも作ったが、それ以外は (a) の S 35 C 用、(b) の SS 41 用を通じて  $d_i = 8$  mm である。(a) の試験片は孔の表面の仕上げはドリルのままであるが、(b) の SS 41 用試験片はリーマ仕上げしこの方は試験部断面における円孔中心の心出しも十分満足すべき程度に製作した。

材料は納入のままの軟鋼 SS 41 板材から切出した丸

第 1 表 高周波焼入れ条件

発振方法	真空管方式
加熱電流周波数	400 kc
入 力	27~34 kW
目標表面温度	{950~960°C (S 35 C) {1100°C (SS 41)
加熱時間	10~20 sec
冷 却	水噴射 (水温 20°C 前後)
そ の 他	(1) 固定焼き (2) SS 41 では 1 回焼きと 2 回焼きとがあり、後者ははじめに 1100°C 加熱後空冷しこれを 1100°C に再加熱して水噴射焼入れ

棒と、同じく納入のままの S 35 C 棒鋼とである。SS 41 は前回実験<sup>2)</sup>に使用したものと同じである。

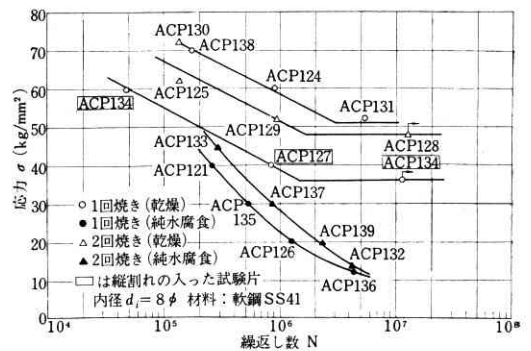
熱処理(高周波焼入れ)条件は第 1 表のごとくである。

(ハ)の点を考慮し、試験片を垂直に保持し回転させながら焼入れを行なったがその成果に関してはまだ確認されていない。焼入れ後の焼もどしは行っていない。焼入れ後磁気探傷を行なった結果 SS 41 の 1 回焼き試験片中には、長手方向に沿って走る顕著な焼きわれき裂が表面から検出されたものが数本あった。第 5 図に疲労破断後の焼われ試験片を示す。

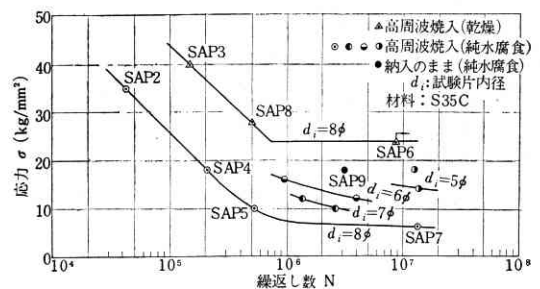
試験機は小野式で繰返し速さは 1500 c/min である。



第 5 図 縦われき裂の入った試験片 (軟鋼)



第 6 図 軟鋼 SS 41 高周波焼入れ中空試験片の乾燥疲れおよび水道水腐食疲れ S-N 曲線

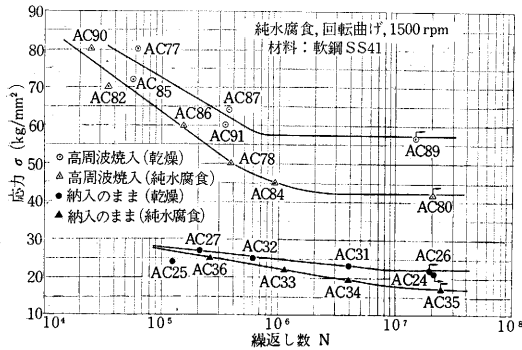


第 7 図 炭素鋼 S 35 C 高周波焼入れ中空試験片乾燥疲れおよび水道水腐食疲れ S-N 曲線

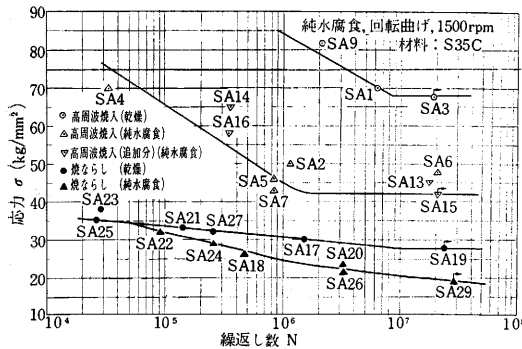
### 3. 実験結果と中空の効果

得られた乾燥疲れおよび腐食疲れの S-N 曲線を、SS 41 については第 6 図、S 35 C については第 7 図にそれぞれ一括して示す。比較のため既報<sup>2)</sup>の高周波焼入れ中実試験片および焼入れしない中実試験片の S-N 曲線を

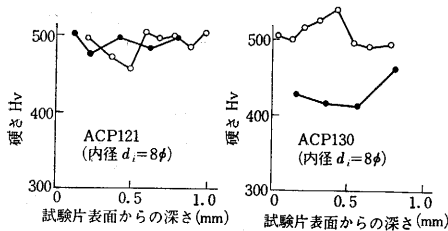
研究速報



第8図 軟鋼 SS 41 の中実試験片の乾燥疲れおよび水道水腐食疲れ S-N 曲線



第9図 炭素鋼 S 35 C の中実試験片乾燥疲れおよび水道水腐食疲れ S-N 曲線



○と●とは同一断面のたがいに軸対称の位置における実験

第10図 SS41 中空試験片断面の硬さ分布測定例

SS 41 と S 35 C とにつきそれぞれ第8図と第9図に示す。ただし、この場合、S 35 C に関しては第7図と第9図とで材料はまったく同じではない。また第8、9図では腐食液は生産技術研究所千葉実験場の水道水が用いられた。次に SS 41 および S 35 C の中空試験片の

マイクロビッカースによる断面硬さ分布の測定例をそれぞれ第10図と第11図に示す。

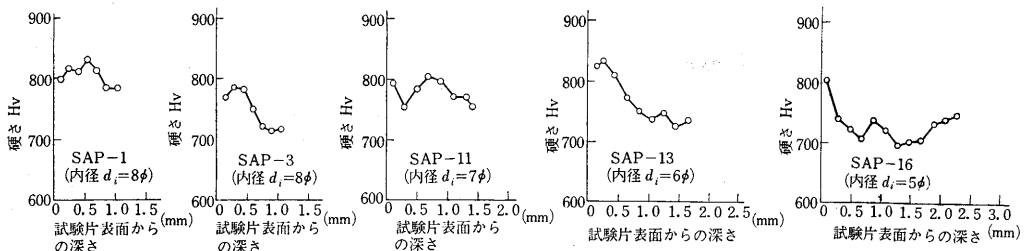
軟鋼 SS 41 中空試験片の実験結果によると乾燥時疲れ限度は約 48 kg/mm<sup>2</sup>、10<sup>7</sup> 回腐食疲れ強さは 7~12 kg/mm<sup>2</sup> 程度である。この値は、中実試験片に関してはそれぞれ 57 kg/mm<sup>2</sup> および 42 kg/mm<sup>2</sup> と得られている。したがって、中空であることにより乾燥時疲れ限度は約 10 kg/mm<sup>2</sup> (20%) 低下し、10<sup>7</sup> 回腐食疲れ強さは 1/3~1/6 に低下した。両者の低下率の差は顕著で、当初の予想にたがわなかった。このうち乾燥時疲れ限度のみについては、すでに試みられた類似の実験<sup>6),7)</sup>においても今回と大体同程度(12~20% 低下)の低下が見られた。ただしそれらの実験では高周波表面焼入れした中実試験片に焼入れ後孔を明けたものを使用している。この方法によると中空にした後も外周表面にまだかなり大きな残留応力が残ることがありうるようである<sup>8)</sup>。

S 35 C の実験結果は、上記とかなり異なり、中空試験片では乾燥時疲れ限度が 24 (~27)kg/mm<sup>2</sup>、10<sup>7</sup> 回腐食疲れ強さが 6 kg/mm<sup>2</sup> であるのに対し、中実試験片ではこれらの値がそれぞれ 68 kg/mm<sup>2</sup> および 42 kg/mm<sup>2</sup> である。中空材の強さは中実材の強さに比べて乾燥疲れで 35~40%、腐食疲れで 14% (1/7) であり、中空であるための低下率は、SS 41 の場合に比べると、この実験では特に乾燥時疲れ限度の低下率が著しい。10<sup>7</sup> 回以上の腐食疲れ強さは SS 41 の場合と大体同程度である。

S 35 C では、孔の内径  $d_i$  を 8 mm のほか 7 mm、6 mm または 5 mm にした試験片も腐食疲れ試験に供し

第2表 中実および中空高周波焼入れ鋼の疲れ試験結果

材料	孔の有無	外径 (mm)	内径 (mm)	疲れ限度 (kg/mm <sup>2</sup> )	水道水腐食疲れ強さ (N=10 <sup>7</sup> ) (kg/mm <sup>2</sup> )	断面硬さ (H <sub>v</sub> )
SS 41	中実	8	—	57	42	300~400
	中空	10	8	48	7~12	450~500
S 35 C	中実	8	—	68	42	600~700
	中空	10	8	24~27	6	800
		10	7	—	8.5	
		10	6	—	11	
		10	5	—	14	



第11図 S 35 C 中空試験片断面の硬さ分布測定例

たが、 $10^7$  回腐食疲れ強さの推定値はそれぞれ 6, 8.5, 11, 14 kg/mm<sup>2</sup> と得られ  $d_i$  の減少はそのまま疲れ強さの向上になるようであり、これも当初の推定にたがわなかった。

なお、SS 41 の実験結果中には 1 回焼きで軸方向にき裂の入った試験片によるものもあるが、第 6 図に示すように、縦き裂による強度の低下は既知のもの<sup>12)</sup> よりは大きいようである。以上の結果を一括して第 2 表に示す。

4. 強度の解釈に関する若干の試み

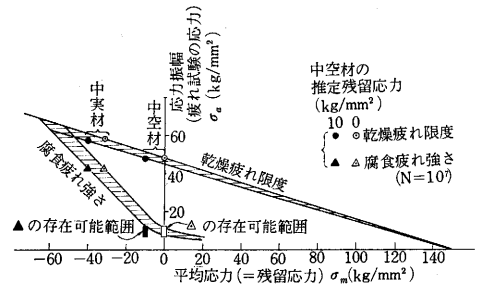
SS 41 中空試験片の断面硬さ  $H_v$  は 450~500 で、硬化深度は肉厚に等しいと考えてよいようである。この硬さに相当する、0.2% 炭素鋼の高周波焼入れのまま(焼もどしなし)の中実試験片の推定引張強さは 140~165 kg/mm<sup>2</sup> である<sup>5)</sup>。一般に、 $\sigma_B=140\sim165$  kg/mm<sup>2</sup> の非耐食鋼のやや強い腐食条件下での  $10^7$  回回転曲げ腐食疲れ強さは 7~14 kg/mm<sup>2</sup> で<sup>9)</sup>、第 2 表の 7~12 kg/mm<sup>2</sup> とよい一致を示す。

若干の測定値から、中空試験片では残留応力が 0~10 kg/mm<sup>2</sup> 程度しか生じていなかったものと仮定し、推定引張強さ 150 kg/mm<sup>2</sup> が真破断力に大体等しいものとする、SS 41 の高周波焼入れ材については第 12 図の疲れ強さ線図が書ける。この場合、中実材の残留応力は (-31)~(-40) kg/mm<sup>2</sup> で腐食疲れ強さ線は -45° の傾斜をもち既知の事実<sup>4),9)</sup> と一致する。この場合(高周波焼入れ鋼)+(淡水)が(普通の炭素鋼)+(食塩水)に近いものと考えるのである。

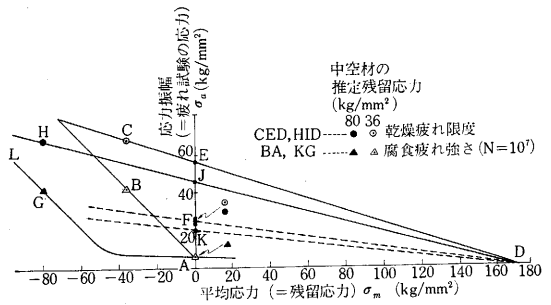
S 35 C の場合は、硬さ  $H_v$  は 800 で、相当引張強さは  $\sigma_B=170\sim190$  kg/mm<sup>2</sup> であり<sup>5)</sup>、一般にこの  $\sigma_B$  に対応する回転曲げ疲れ限度  $\sigma_{WB}$  は合金鋼まで含めると  $\sigma_{WB}=55$  kg/mm<sup>2</sup>、普通の炭素鋼では  $\sigma_{WB}=35\sim45$  kg/mm<sup>2</sup> と推定される<sup>13)</sup>。

SS 41 の第 12 図と同様な傾向が S 35 C の高周波焼入れ鋼についても成立するものとするれば、第 13 図に示すように、腐食疲れ時間強さ線 AB と乾燥時疲れ限度線 CD が求められる。作図順序は A→B→C→D である。この場合中実試験片の残留応力は -36 kg/mm<sup>2</sup> で、両振り疲れ限度は E より 56 kg/mm<sup>2</sup> と求められる。-36 kg/mm<sup>2</sup> はやや低い、56 kg/mm<sup>2</sup> は一応無理のない値である。しかし、従来の経験を基として、中実試験片の残留応力を -80 kg/mm<sup>2</sup> と想定すると AGLHJD が得られる。この J から、両振り強さが 46 kg/mm<sup>2</sup> と得られ、この方が 56 kg/mm<sup>2</sup> よりなお適当な値である。

この 46 kg/mm<sup>2</sup> が、見かけの両振り曲げ疲れ限度 24~27 kg/mm<sup>2</sup> に低下するにはなにかの要因を想定しなければならない。たとえば、(1)もし、円周方向の十分大きなき裂が存在するならば、J の 46 kg/mm<sup>2</sup> から F の 24~27 kg/mm<sup>2</sup> への低下は切欠き係数  $\beta=2$  に相当するからこれは従来からの知識と矛盾しない<sup>10)</sup>。しかし磁気探傷の結果および試験片表面と破断面の観察結果からでは、そのようなき裂はまだ発見されていない。(2)孔内表面を切削したままであることがもし強度低下の主要因



高周波焼入れした軟鋼 SS 41 の疲れ強さ線図  
第 12 図 実験結果の説明図



高周波焼入れした炭素鋼 S 35 C の疲れ強さ線図  
第 13 図 実験結果の説明図

であるとすると、この硬さの材料では表面係数  $m$  の平均値が 0.65~0.70 程度になる可能性が十分あり<sup>11)</sup>、 $m$  のばらつきが大きいから、疲れ限度がかなり低下して 24~27 kg/mm<sup>2</sup> を与えることもありえないとは言えない。ただし、この場合の低下は実際には J から F へではなく J から K へである。OK=OF×0.8。ただし、0.8 は内外径比。かかる条件によるこのような著しい強度低下は中実では見られず、中空で初めて現われると考えてよいだろう。(3)実際にはこの(1)と(2)の中間条件が起きているのであろう。その他の強度低下要因については、また別の機会に報告したい。たとえば、特に硬化された薄肉中空円筒は特に強度低下を招く可能性がある。

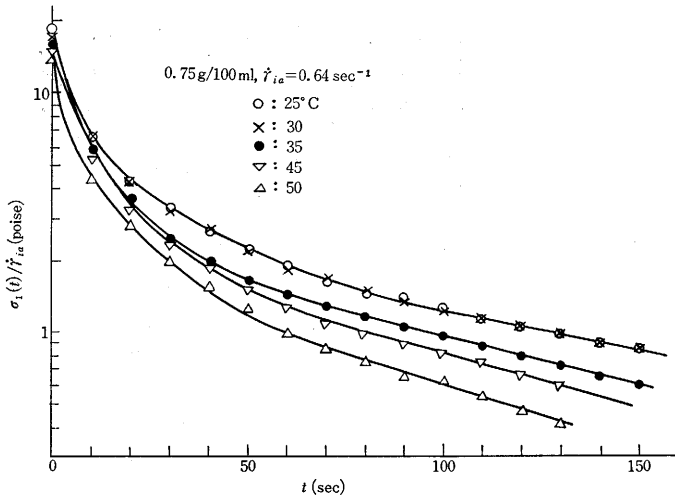
5. あとがき

この研究は、鉄研中村宏氏、高周波熱練藤田真氏、高橋秀雄氏、理学電機関田純一郎氏と共同で行なっている高周波焼入れ鋼の強さと残留応力に関する一連の研究の一部をなすもので、残留応力の測定その他が終われば逐次また報告する予定である。(1965年7月27日受理)

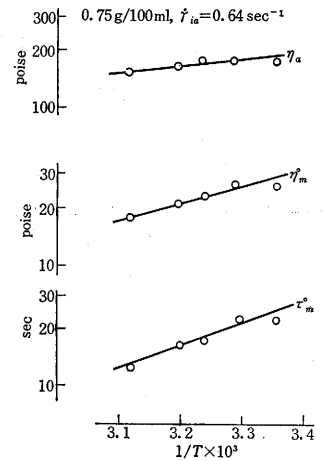
文 献

- 1) 北川英夫, 鋼材等の腐食疲れ対策について, 生産研究, 14, 10 (昭 37-10) 323
- 2) 北川英夫, 中村宏, 高橋秀雄, 堀内正明, 高周波焼入れした鋼材の腐食疲労強度, 材料試験, 11, 111 (昭 37-12) 762
- 3) 西原利夫, 桜井忠一, 繰返引張圧縮応力を受ける鋼の強さ, 日本機械学会論文集 5, 18 (昭 14-2), 25
- 4) H. Kitagawa, T. Morohashi, Some Behaviors of Structural Steel Subjected to Corrosion Fatigue (The 4th Report) — Influence of Mean Stress—Proc. 10th Jap. Nat. Cong. Appl. Mech. (1960-3), 155 (24 ページへつづく)

研究速報



第5図 応力緩和の温度変化



第6図 最長緩和時間の温度依存性

リスチレン溶液に対する尾崎ら<sup>9)</sup>の実験結果およびその解釈とまったく対立する。

第3図によれば  $\dot{\gamma}_{ia} \rightarrow$  小のとき  $\eta_a$  と  $\eta_m^\circ$  とは漸近する傾向にあり、 $\dot{\gamma}_{ia} \rightarrow 0$ ,  $\eta_a \rightarrow \eta$  (zero shear viscosity) のとき、 $\eta$  を支配するものが  $\tau_m^\circ$  の機構のみであり、

$$\eta = \tau_m^\circ G_m^\circ \equiv \eta_m^\circ \quad (8)$$

のような理論的予想<sup>9)</sup>と、よく一致しているように見受けられる。

第4図は  $\eta_m^\circ$  をズリ応力  $\sigma_m(0)$  と  $\dot{\gamma}_{ia}$  に分解した流動曲線である。最長緩和機構の粘性のズリ速度依存性は極めて特徴的で、 $\sigma_m(0)$  が  $\dot{\gamma}_{ia}$  に無関係に一定している部分と、 $\dot{\gamma}_{ia}$  を増すと逆に減少する部分とが認められる。極端な非ニュートン粘性の例であるといえよう。

$\sigma_m(0)$  一定の部分に対しては、粘性機構の存在密度がズリ速度(したがって、ズリ破壊の頻度因子)に逆比例すると考えると都合がよく、理論的にもおもしろい。

(3)  $\tau_m^\circ$  の温度依存性

0.75%,  $\dot{\gamma}_{ia} = 0.64 \text{ sec}^{-1}$  の場合の応力緩和曲線の温度変化を第5図に示す。Frenkel の式<sup>10)</sup>に従って  $\tau_m^\circ$  を  $T$  に対してプロットすると第6図となる。直線と見なして、活性化エネルギー  $\Delta H$  を求めると  $\Delta H \approx 7 \text{ Kcal/Mol}$  を得た。 $\Delta H$  は zero shear viscosity  $\eta$  の見かけの活性化エネルギーに等しいと考えられるが、7 Kcal/Mol は既往の文献値<sup>11)</sup>に一致する。また 7 Kcal/Mol はギ酸、酢酸の水素結合エネルギー<sup>12)</sup>にほぼ一致し、Na-PAA 溶液における分子間相互作用が主として、カルボキシル基間の水素結合によるのではないかという推定が成り立つ ( $\text{Na-PAA} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H-PAA} + \text{NaOH}$  は当然考えられる)。

第6図には  $\eta_a$ ,  $\eta_m^\circ$  の温度変化も比較図示した。

文 献

- 1) 黒岩, 中村: 高化 22, No. 7 (1965)
- 2) " " : " 掲載予定
- 3) T.G. Gox: "Rheology" 1, p. 431, ed. F. Eirich, Acad. Press (1956)  
T.G. Brodnyan: Trans. Soc. Rheol. 7, 125 (1963)
- 4) P.E. Rouse: J. Chem. Phys. 21, 1272 (1953)
- 5) J.D. Ferry: J. Appl. Phys. 26, 359 (1955)  
" : J. Colloid Sci 12, 400 (1957)
- 6) Ferry 著, 祖父江, 村上, 高橋訳: "高分子の粘弾性" (1964)
- 7) たとえば, A.R. Mathieson: J. Polymer Sci. 21, 463 (1956)
- 8) 黒岩・中村: 日化 14 年会講演 (1965)
- 9) たとえば "高分子の物理学" 高分子学会編 (昭 38)
- 10) 戸田: "液体理論" 河出書房 (昭 22)
- 11) E.L. Kelley et al: "Progress in International Research on Thermodynamic and Transport Properties" Acad. Press. N.Y. (1962) p. 729~737
- 12) L. Rauling 著, 小泉訳 "化学結合論"  
(19 ページよりつづく)
- 5) 高橋秀雄, 未発表
- 6) 中村宏, 高周波熱処理と疲労強度(昭 38), 日刊工業新聞社, 80
- 7) 中村宏, 甘粕達雄, 吉武博之, 高周波焼入れの疲れ強さに関する影響についての一実験(その6), 日本機械学会講演前刷集 No. 106, (昭 39-4), 9
- 8) 北川英夫, 堀内正明, 高橋秀雄, 高周波焼入れ材の X 線応力測定について, 日本非破壊検査協会第4分科会, NDI 資料 4204 (昭 40-4)
- 9) 北川英夫, 星野次郎, 材料の疲れにおける表面効果整理資料, 5, 腐食, ふん囲気の疲れ強さに及ぼす影響, 日本機械学会誌, 67, 546 (昭 39-7), 1029
- 10) 石橋正, 金属の疲労と破壊の防止 (昭 29), 養賢堂, 133
- 11) 榎本信助, 材料の疲れにおける表面効果整理資料, 2. 表面仕上の疲れ強さに及ぼす影響, 日本機械学会誌 67, 543 (昭 39-4), 596
- 12) 星野次郎, 材料の疲れにおける表面効果整理資料, 3. き裂および表面欠陥の疲れ強さに及ぼす影響, 日本機械学会誌 67, 543 (昭 39-4), 608
- 13) 日本機械学会, 金属材料疲れ強さの設計資料 (昭 36)