

討18 沸騰水型原子炉模擬環境中におけるステンレス鋼の応力腐食割れ寿命の確率分布

石川島播磨重工業 技術研究所 明石正恒 見城孝雄 川本輝明

はじめに

金属材料の応力腐食割れ (SCC) 挙動が本質的に確率的性質を持っていることから、装置材料の信頼性評価のためには確率論的立場からのアプローチが必要と考えられている。従来、SCC寿命は対数正規分布を用いて解析される場合 [1] が多かったが、近年、ワトブル分布を用いて解析する試みもなされ、ステンレス鋼/[MgCl₂]系のSCC寿命は柴田ら [2] によりワトブル分布を用いて詳細に解析されている。一方、最近の沸騰水型原子炉 (BWR) 環境における鋭敏化ステンレス鋼の粒界SCCについては、対数正規分布を用いて解析 [3, 4] およびワトブル分布を用いて解析 [4, 5] がなされている。

本稿では、BWR模擬環境中における鋭敏化304鋼の粒界SCCについて、その割れ深さ分布の時間依存性および割れ寿命の分布を検討する。

実験方法

(1) CBB試験

供試材より 2T × 10W × 50L (mm) の寸法の短冊型試験片を採取し、既報 [6] の方法でCBB試験を実施した。すなわち、図1に示す試験治具に試験片を固定することにより、約1%の変形 ($\epsilon_{app} \approx 1.05\%$) およびグラファイト・ファイバ・ウールの人工きまを付与し、20 ppm 溶存酸素を含む 250°C 純水中にありて種々の時間浸漬試験を行った。試験後の試験片断面の光学顕微鏡観察により、割れ深さを測定した。なお、本試験により生じた割れは全て粒界SCCであった。

(2) 単軸定荷重試験

供試材より丸棒もしくは平板引張試験片を採取し、CBB試験と同一の環境で単軸定荷重試験を実施した。試験片平行部にはグラファイト・ファイバ・ウールによりCBB試験と同等の人工きまを付与した。また、応力負荷は台形波による 1 cycle / 90 min のくり返し条件による。なお、本試験におけるSCCは全て粒界型であった。

割れ深さ分布の試験時間依存性 [7]

鋭敏化 (600°C / 40 h) 304鋼より試験片を採取し、290°C 純水中で100時間のCBB試験を行った結果を、一例として、図2に示す如く、割れ深さ (a) 分布は、深さ 50 μm 以下のものを除いて、正規分布に良く適合する。

同時に鋭敏化熱処理した多数の304鋼試験片について、種々の浸漬試験時間の、大きな試験片より

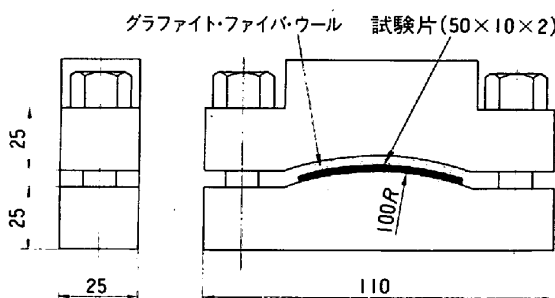


図1 CBB試験治具

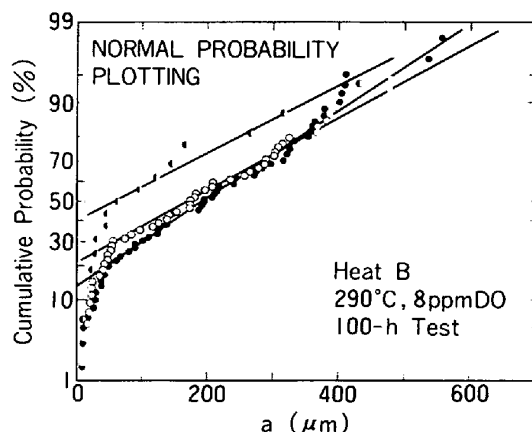


図2 各試験片に生じた全SCCの深さ(a)分布の正規確率プロット

返し数のCBB試験を実施し、試験片ごとの最大割れ深さ (a_{max}) の分布の試験時間依存性を調べた結果の例を、図3~6に示す。 a_{max} の分布は正規分布(図3)にも、二重指数(最大値)分布(図4)にも適合し、深さ50 μm を越えると割れは定率的に成長する。正規分布による解析の場合、平均値(\bar{a}_{max})は試験時間とともに直線的に増大し、標準偏差(σ)は定常成長期には一定に保たれる。また、二重指数分布による解析の場合、中央値(\tilde{a}_{max})は試験時間とともに直線的に増大し、尺度パラメータ(α)は定常成長期には一定に保たれる(図5, 6)。両解析では等しい割れ成長速度が得られる。他のヒート/熱処理材についても同様な挙動が見られる。

試験片数の不足のため、どちらの分布により適合するかは明らかでないが、 a の分布が正規分布に似、 a_{max} の分布が最大値の分布であることから、二重指数分布の如き極値統計による解析がより合理的であると考えられる。

SCC 寿命分布

CBB試験、単軸定荷重(UCL)試験($\sigma_{app} = 1.04\sigma$ および 1.30σ)、実パイプ試験[8]、U-バンド試験[9]および実環境における損傷解析[10]のSCC寿命データを解析した。最大割れ深さ分布の形状が試験時間

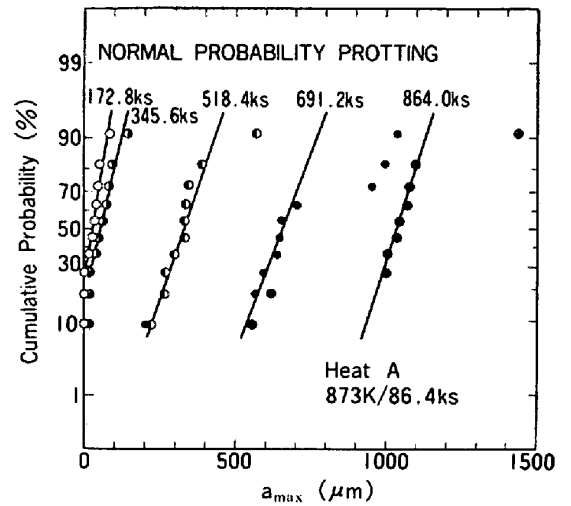


図3 最大割れ深さ分布の試験時間依存性

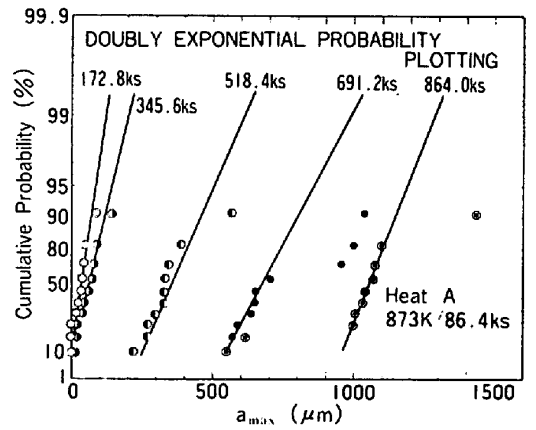


図4 最大割れ深さ分布の試験時間依存性

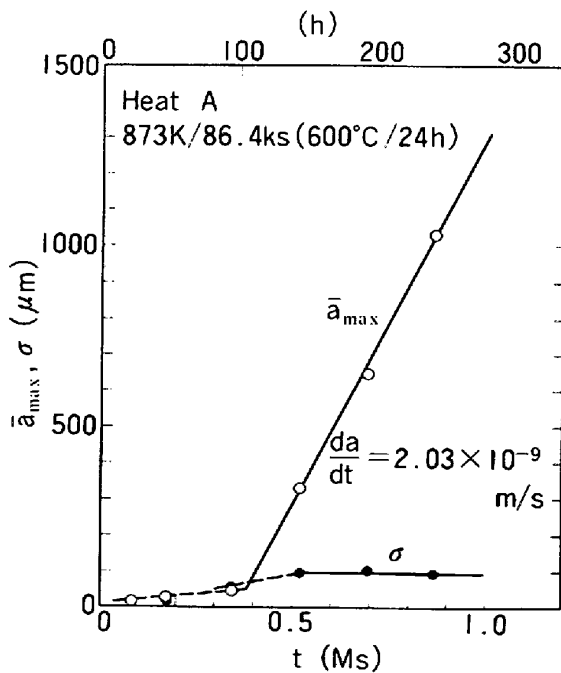


図5 SCC成長曲線(正規分布による解析)

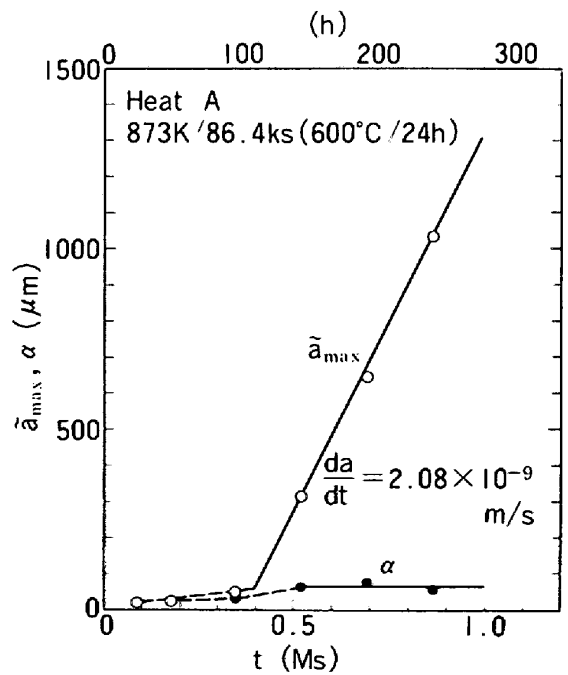


図6 SCC成長曲線(二重指数分布による解析)

に対して変化しなると、割れ成長速度が平均的には一定であること、および割れ成長に費やされる時間が割れ発生までに費やされる時間に比して短いことから、図7および8に示すモデルを近似できる。すなわち、ある試験時間における最大割れ深さ分布が正規分布であれば、割れ発生までの時間および破断時間の分布は正規分布となり、ある試験時間における最大割れ深さ分布が最大値の極値分布に従えば、割れ発生までの時間および破断時間の分布は最小値の極値分布に従うと予想される。

種々のSCC試験における寿命分布を正規分布を用いて解析した結果も図9および10に示す。SCC寿命分布は正規分布に一定適合する。標準偏差(σ)は平均寿命(μ)が大きくなる程大きくなり、変動係数(σ/μ)は μ に対してほぼ一定である。これは、この系のSCC寿命を対数正規分布で解析した場合に σ が μ に対して一定であること[4]の対応を示唆する。

上述のように、極値統計を用いての最大割れ深さ分布の解析がより合理的であると考えられることから、図8のモデルより、SCC寿命データも二重指数(最小値)分布もしくはワイブル分布の如き極値統計により解析することがより合理的と考えられる。

図11に示すように、各種SCC試験におけるSCC寿命データに二重指数分布をあてはめることができる。この場合、CBBデータを除いていずれも折れ曲った2本の直線で表現され、長寿命側(高F ω 側)の直線の傾きは、平均寿命の延長とともに小さくなる(尺度パラメータ(α)が大きくなる)傾向が認められる。

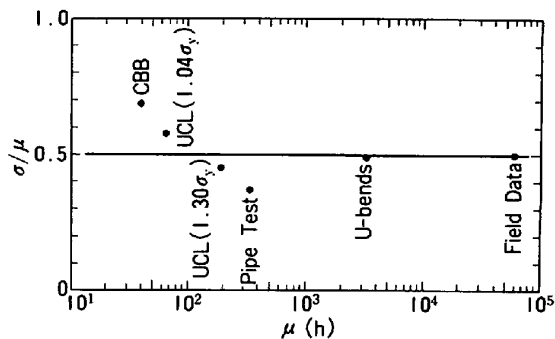


図10 SCC寿命の正規プロットにおける平均寿命(μ)と変動係数(σ/μ)との関係

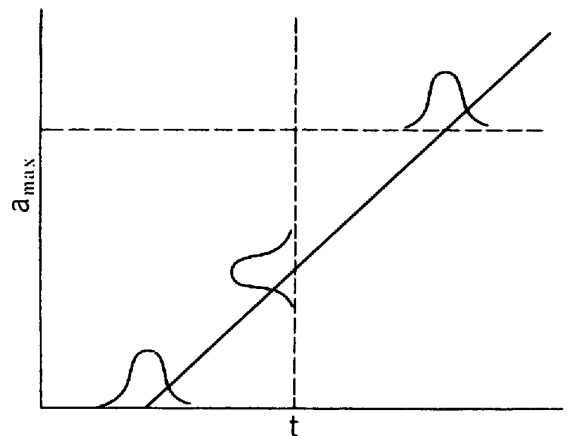


図7 最大割れ深さ分布と寿命分布との関係

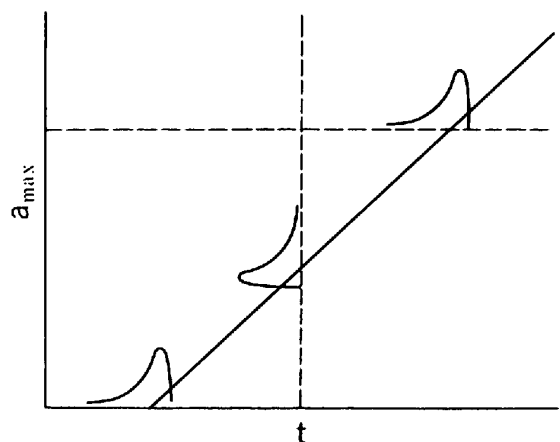


図8 最大割れ深さ分布と寿命分布との関係

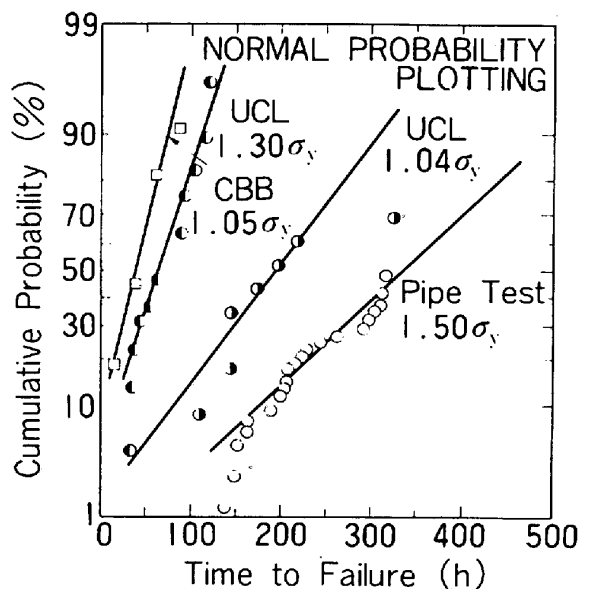


図9 SCC寿命の正規確率プロット

図12に示すように、各種SCC試験におけるSCC寿命データはワイブル分布にも適合する。この場合、CBBデータを除いてそれぞれ折れ曲った2本の直線で表現され、長寿命側(高 F 側)の直線の傾きの大きさから形状パラメータ(m)の値は1.0に近い。これらの挙動はステンレス鋼/[$MgCl_2$]系のSCC[2]で認められたものと同様である。

まとめ

BWR模擬環境中における鋭敏化304鋼の粒界SCCに付いて、その割れ深さ分布の試験時間依存性および割れ寿命の分布を検討した。

最大割れ深さ分布は最大値の極値分布に適合し、分布の形状が試験時間に対して変化しないこと、および割れ成長速度が平均的には一定であることから予想される如く、SCC寿命の分布は最小値の極値分布を用いて解析された。

引用文献

- 1) ASTM G16
- 2) 柴田俊夫, 竹山太郎: 鉄と鋼, 66, 693 (1980)
- 3) R. Post, J. Lemair & W. Walker: EPRI WS-79-174, Vol.1, Paper No.15 (1980)
- 4) 国谷治郎 et al: 防食技術, 31, 261 (1982)
- 5) 菊地英二 et al: 第27回腐食防食討論会予稿集, p.137 (1980)
- 6) M. Akashi & T. Kawamoto: 防食技術, 27, 165 (1978)
- 7) 明石正恒, 見城孝雄, 川本輝明: 腐食防食協会'82 春期學術講演大会講演予稿集, p.150 (1982)
- 8) 有井 満 et al: 第9回日科技連信頼性・安全性シンポジウム4, Session A5-2 (1979)
- 9) 浜田幾久 et al: 私信
- 10) H.H. Klepfer et al: General Electric Company Report, No. NEDO-21,000-1 (1975)

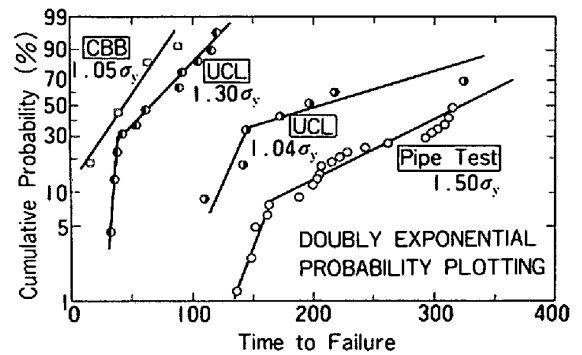


図11 SCC寿命の二重指数確率プロット

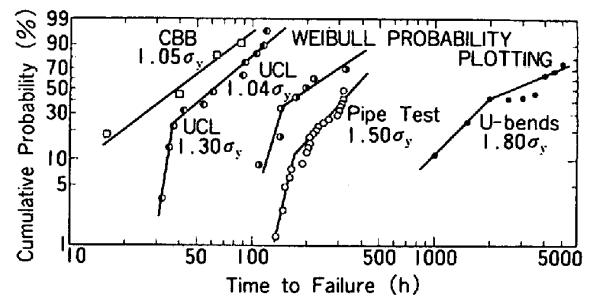


図12 SCC寿命のワイブル確率プロット