液体金属ナトリウムによるサーマルストライピング下の き裂進展停留挙動[†]

福田 嘉 男* 佐 藤 善 美**
安 部 英 昭*** 間 所 学****

Crack Propagation and Arrest Behavior under Thermal Striping in Liquid Sodium

by

Yoshio FUKUDA*, Yoshimi SATOH**, Hideaki ABE***
and Manabu MADOKORO****

As a part of the development of a rational structural design method and in order to formulate a strength evaluation method for high-cycle thermal shock (thermal striping) in the high temperature structure, we have developed an original experimental facility which can provide cyclic thermal load with liquid sodium at a frequency of $\omega=0.01$ to 2.0 Hz between a maximum temperature $T_{\max}$ of 550°C and a minimum temperature $T_{\min}$ of 250°C. The following results are obtained.

(1) The thermal behavior test using this facility for Type 304 S. S. has revealed that the temperature fluctuating region is limited near the surface and within 0.8 mm from the metallic surface under a cycling rate of $\omega=0.5$ Hz or greater.

(2) With the thermal striping condition of $T_{\max}=550^{\circ}\text{C}$, $T_{\min}=250^{\circ}\text{C}$, and $\omega=0.5$ Hz, the spaces of the dry clay-like cracks vary from 1 to 2 mm, and the cracks are arrested at a depth of approximately 1.6 mm after 2.0×10^6 cycles.

(3) The above mentioned test verifies that the depth of the arrested crack can be roughly estimated by the linear elastic fracture mechanics of edge cracks distributed by a certain pitch.

Key words: Thermal striping, Crack propagation, High-cycle thermal fatigue,
Fracture mechanics crack-arrest, Thermal stress, Stress intensity factor

1 緒 言

サーマルストライピングの研究は、高速増殖炉(FBR)の炉心上部構造(UIS)を対象として、UISの強度信頼性の向上および合理的な構造設計法の開発を目的として実施されてきた。これまでの研究はUISにかかる熱衝撃条件を明らかにするための熱流動に関する実験および解析^{1,2)}、サーマルストライピングをシミュレートした構造物の部分モデルの実証的試験およびサーマルストライピングに対する構造材料の強度およびき裂進展の研究が液体金属ナトリウム(LNa)や水の熱衝撃で実施されている³⁾⁻⁵⁾。

しかし、サーマルストライピングによる破壊の研究に関しては温度などの負荷条件が複雑となるため、構造合理化を実現するために必要な実験および解析の両面から詳細に力学的に検討した研究は少ない⁶⁾⁻⁹⁾。

そこで本研究ではFBRのUISで考えられる十分

に速い速度の単純化した温度波形のLNa熱衝撃試験を実施し、金属表面近傍に繰返される温度分布の挙動およびき裂の発生とその進展挙動を測定し、ごく表面に発生する応力により発生した表面き裂の停留深さなどの応力拡大係数に基づく検討を実施し、サーマルストライピングに対する強度評価法を提案した。

2 試 験 方 法

2・1 試験装置

(1) ナトリウムループ

試験体の表面を急加熱し、その後急冷却するのに液体金属ナトリウム(LNa)を使用する方式を採用した。LNaはアルゴンガスで充填した100ℓの貯蔵タンクに貯えられた。サーマルストライピング試験は試験タンクの中で試験体を回転し、加熱器にて最大550°Cに加熱された高温LNaと冷却器により250°Cに冷された低温LNaをノズルより噴射することで熱サイク

† 原稿受理 平成5年4月12日 Received Apr. 12, 1993

* 正 会 員 (株)日立製作所機械研究所 〒317 日立市幸町, Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi Ltd., Saiwai-cho, Hitachi, 317

** (株)日立製作所機械研究所 〒317 日立市幸町, Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi Ltd., Saiwai-cho, Hitachi, 317

*** 正 会 員 (株)日立製作所エネルギー研究所 〒319-12 日立市大みか町, Energy Res. Lab., Hitachi Ltd., Ohmika-cho, Hitachi, 319-12

**** (株)日立製作所日立工場 〒317 日立市幸町, Hitachi Works, Hitachi Ltd., Saiwai-cho, Hitachi, 317

ルが付与される。ノズル口径は 3.5×6.0 mm のだ円、ノズル先端から試験体までの距離は 15.0 mm で、照射領域の幅は約 12~15 mm である。LNa は電磁ポンプ（容量：10 l/分）によりループ内を循環し、その流量は電磁流量計にて監視できるようにした。試験時の LNa 流量は高温 LNa および低温 LNa 共に 1.5 l/分程度とした。LNa は試験前に純度精製器にて精製して試験に用いた。ナトリウムループの詳細は別報に記した。

(2) 試験部構造

試験タンク上部の試験部構造を Fig. 1 に示す。試験体の最大寸法は直径 250 mm で板厚 30 mm の円板である。試験体を保持するクレビスが固定された回転軸をかさ歯車にて回す構造とし、回転駆動にはモータを使用した。回転軸内部には負荷軸が設けられ、油圧シリンダにて曲げ用軸荷重を 5 kN まで負荷できる。負荷荷重はロードセルにて検出された。

回転する試験体の温度はシース熱電対で計測し、その出力は負荷軸の中心孔を通り、スリップリングを介し、回転状態で最大 20 点まで計測可能である。試験

Fig. 1. Thermal stripping test facility.

Fig. 2. Schematic diagram of test section.

Fig. 3. Location of temp. measurement.

タンク内のアルゴンガスおよびナトリウムベーパーが回転軸および負荷軸より漏れるのを防止するため、配管ベローズとオイルシールを用いた構造とした。試験状況の模式図を Fig. 2 に示す。

2・2 温度計測試験

開発したサーマルストライピング試験装置が適切な試験条件を提供するかどうかを明らかにするために、試験体の温度計測を実施した。Fig. 3 は試験体に取付けた熱電対の位置を示す。熱電対は外表面（E；LNa 照射面）と内表面（F）および板厚方向に 4 点埋設した。使用した熱電対は直径 1.0 mm のマイクロシース型熱電対であり、取付け位置は板厚方向に深さ $d = 0.3$ mm（熱電対 A）、 0.5 mm（B）、 0.8 mm（C）および 1.8 mm（D）である。試験体は直径 250 mm、板厚 30 mm の SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼の突合せ溶接継手付き円板を用いた。

温度挙動試験は高温 LNa を 550°C 、低温 LNa を 250°C の一定とし、回転速度 ω のみを 0.01 Hz~ 2.0 Hz の範囲で変化した条件で行った。 $\omega = 0.01$ Hz の遅い繰返し速度でも板厚方向深さ $d = 1.8$ mm（熱電対 D）での ΔT は約 30°C であり、試験体板厚 30 mm に比較し、極表面でのみ温度変化するサーマルストライピング現象の特徴を良く表している。

3 実験結果

3・1 深さ方向の温度分布

Fig. 4 は回転速度 $\omega = 0.1$ Hz の比較的遅い条件での熱電対の出力温度の挙動を示す。外表面（LNa に直接さらされる面）では最低温度が 280°C 、最高温度が 530°C で、約 250°C の温度変動範囲を示すが、板厚方向の深さが大きくなるに従って温度変動範囲 ΔT が急速に小さくなり、内表面（裏面）では $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ となり、約 410°C の一定温度となっている。

Fig. 5 は上限温度と下限温度の板厚方向の分布につ

Fig. 4. Temperature transient behaviors in hot and cold shock at different depth.

いて試験速度 ω を種々変化させた場合の試験結果を示す。温度が大きく変動している領域は $\omega=0.1$ Hz では約 2 mm 以内、1.0 Hz では約 1 mm 以内、2 Hz では約 0.5 mm 程度である。実際の FBR のサーマルストライピングは $\omega=0.1$ 数 Hz の現象と想定されており、温度変動領域は本試験結果からの推定では 1 mm 以内であると思われる。

Fig. 6 は試験速度 ω を変えた場合の温度変動幅 ΔT の挙動を、表面および深さ $d=0.3, 0.5, 0.8$ mm について示したものである。いずれの深さの温度変動幅 ΔT も試験速度 ω の増加に伴って減少する。試験速度 ω と SUS304 ステンレス鋼の表面の温度変動範囲 ΔT の関係は、高温 LNa の温度 $T_{\max}$ と低温 LNa の温度 $T_{\min}$ の温度差 $\Delta T_{\text{Na}} (=T_{\max}-T_{\min})$ を用いて示すと次のようになる。

$$\omega=0.5 \text{ Hz で } \Delta T \div 1/2 \Delta T_{\text{Na}} = 1/2 (T_{\max} - T_{\min})$$

$$\omega=1.0 \text{ Hz で } \Delta T \div 1/3 \Delta T_{\text{Na}} = 1/3 (T_{\max} - T_{\min})$$

Fig. 5. Max./min. temperature distributions at different cycle rates.

Fig. 6. Temperature fluctuation ranges at different cycle rates.

$$\omega=2.0 \text{ Hz で } \Delta T \div 1/5 \Delta T_{\text{Na}} = 1/5 (T_{\max} - T_{\min})$$

FBR での ΔT_{Na} を約 160°C と想定し、繰返し速度 ω を 2 Hz と仮定すると金属表面の温度変動幅 ΔT は $\omega=2.0$ Hz で約 32°C ($1/5 \Delta T_{\text{Na}}$)、 $\omega=1$ Hz で 53°C ($1/3 \Delta T_{\text{Na}}$)、 $\omega=0.5$ Hz で 80°C ($1/2 \Delta T_{\text{Na}}$) である。以後のサーマルストライピング試験の条件は Fig. 5, Fig. 6 の結果を考慮して決めた。

3・2 サーマルストライピング試験

製作した試験装置を用いてサーマルストライピング試験を実施した。試験条件は高温 LNa 温度 $T_{\max}$ を 550°C、低温 LNa 温度 $T_{\min}$ を 250°C、繰返し速度 ω を 0.5 Hz とした。試験体は前出の温度分布挙動試験に用いた板厚 30 mm、外径 250 mm の中央部に突合せ溶接継手を有する SUS304 ステンレス鋼の円板である。

Fig. 7 は繰返し数 $N=2.0 \times 10^6$ 回における試験部表面のカラーチェックにより検出したマクロき裂形状

Fig. 7. Appearance of thermal striping crack.

Fig. 8. Enlarged photograph of replication of thermal striping crack.

(Fig. 7(a)), 表面および断面のマクロエッチングの拡大写真 (Fig. 7(b)) を示す. ナトリウム熱衝撃を受けた試験部は幅約 10 mm の円環の帯状となり熱衝撃に特有の亀甲状のき裂が試験部全領域に渡って一様に発生した. また, Fig. 7(b) より試験片表面およびき裂の近傍の結晶粒内にはすべり線が観察される. Fig. 8 は繰返し数 $N=5.0 \times 10^5$ 回および 1.0×10^6 回で試験片母材部からき裂のレプリカを採取し, それを 10 倍に拡大した写真を示す. 亀甲状のき裂が連続的に発生し, その一辺が連結して巨視的にはほぼ直線的なき裂を形成するものと推察される. 亀甲部の大きさは 1.0~2.0 mm であり, $N=5.0 \times 10^5$ 回と 1.0×10^6 回で大きさの変化は見られない. ただし, き裂線の太さは $N=5.0 \times 10^5$ から 1.0×10^6 回の間に約 3 倍 (写真から測定して約 10 μm から 30 μm) 程大きくなっている. これらのことより, サーマルストライピング下のき裂はき裂発生時にその亀甲状の大きさが決定され, その後大きさに変化はなく, き裂深さのみが増大する挙動を示すものと思われる. またき裂面はアルゴンガス中か LNa 環境中かのため酸化がなく試験前の金属の光沢を保持することと, き裂の幅が細いため, 深さが約 1.6 mm のき裂でも目視ではき裂の存在を判定することが難しいことが分かった.

4 熱応力および応力拡大係数の解析結果

サーマルストライピングで発生する応力および応力拡大係数は FEM による弾性熱応力解析で求めた. 解析は Fig. 2 に示す円板形試験片をモデル化し, Fig. 9 に示す要素分割および境界条件で実施した. モデル化に当り, 表面で観察されるき裂間隔は 2 mm 以下であるが, 必ずしもすべてのき裂が等しい深さに成長するとは限らないことを懸念し, 厳しい側の条件として, 2~3 個のき裂がサブき裂となった場合を仮定し, 6 mm の周期境界条件とした.

またき裂の境界条件は Fig. 9 の左の拡大図に示すように X 方向の節点変位の拘束を解除することにより

Fig. 9. Analysis model for thermal stress and stress intensity factor.

Fig. 10. Comparison of experimental with analytical results of temperature distribution.

与えられた.

ホットショックおよびコールドショック時の温度分布の解析結果の一例を実験結果と比較して Fig. 10 に示した. 温度および熱応力解析に使用した材料定数は Table I に示した. ここで熱伝達係数は $\alpha=24.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ とした.

Fig. 11 は高温 LNa 温度 $T_{\text{max}}=550^\circ\text{C}$, 低温 LNa 温度 $T_{\text{min}}=250^\circ\text{C}$ で, 温度変動を Sine 波と仮定した場合と, 実験で実際に負荷された波形を模擬したパルス状波形の場合につき, 繰返し速度 ω を変えた場合のコールドショック時の熱応力分布を示す. 熱応力は

Table I. Material constants of Type 304 S. S. for temperature and stress analysis.

Temp. (°C)	Heat cond λ (W/m · K)	Specific heat c (J/kg · K)	Density ρ (g/mm ³)	Th. ex. coeff. β (1/K)	Young's M. E (GPa)	Poisson's ratio ν
20	1.45×10^{-6}	448	8.03	1.64×10^{-5}	194	0.260
100	1.56	490	8.00	1.71	191	0.270
200	1.70	523	0.95	1.79	184	0.278
300	1.82	544	7.90	1.86	176	0.284
400	1.97	553	7.86	1.93	169	0.292
500	2.11	565	7.81	2.02	160	0.300
550	2.17	574	7.79	2.05	155	0.304
600	2.24	582	7.77	2.09	150	0.308

ω が大きい程小さくなり、応力が 0 になる深さも小さくなる傾向にある。上記温度変動が繰返される応力場において一様なき裂深さ a の分布縁き裂が有る場合のき裂深さ a と応力拡大係数 $K_{\max}$ の関係を Fig. 12 に示す。応力拡大係数 $K_{\max}$ はき裂成長の初期にはき裂深さ a の増大に伴って増大し、 ω に依存して表面から $a=0.4 \sim 0.8$ mm の深さのき裂に対して最大値を示し、その後応力減少の寄与がき裂深さの増大の寄与を上まわり、き裂の成長に伴って減少し、あるき裂深さでき裂進展下限界応力拡大係数 $K_{\max, th}$ 以下になる。つまりサーマルストライピングで発生したき裂はある深さで停留することが推定できる。つぎに $\omega=0.5$ Hz の実験での LNa の温度挙動を模擬し、LNa 温度を

Fig. 12. Relationship between stress intensity factor and crack depth.

Fig. 11. Thermal stress distribution caused by temperature transient of sine and pulse wave forms.

保持時間 0.06 秒、立上り時間 0.006 秒のパルス状波形とした場合の熱応力分布および応力拡大係数の分布をそれぞれ Fig. 11 および Fig. 12 に破線で示した。Fig. 11 から同じ繰返し速度に対して Sine 波形とパルス状波形とで発生する応力は表面近傍では大差はないが深さ $d=0.2 \sim 1.6$ mm の間では Sine 波形の方が大きい値になっている。しかし、Sine 波形では約 12.0 mm、パルス状波形では約 14.0 mm 以上の深さでは応力は 0 となることが分かる。Fig. 12 には大気中のデータ¹⁴⁾および Na 中のき裂進展データの外挿値を参考に¹⁵⁾して求めた $K_{\max, th}$ の概略の推定値も示した。この図より、 $\omega=0.5$ Hz の実験ではき裂は 1.4~1.7 mm の深さで停留することが推定できる。

5 サーマルストライピング下なき裂進展挙動

サーマルストライピングにより発生したき裂の進展挙動をき裂深さ a と繰返し数 N の関係で Fig. 13 に示した。この図の初期の 2 つのデータのき裂深さは試験片表面で測定した表面き裂長さ $2c$ の半分とした。ごく表面に発生する応力により成長するき裂のアスペクト比 a/c はき裂の成長に伴い著しく小さくなり、き裂形状を半円とする $a=c$ の仮定は誤差が大きくなるので、後半の 3 つのデータは所定の繰返し数で試験を中止し、その後、室温疲労で分離破断した破断面よ

Fig. 13. Crack growth behavior under thermal striping.

り直接き裂深さ a を測定した。また、2点間の平均き裂進展速度を図中に示した。

サーマルストライピングにより進展するき裂はき裂の成長に伴い急速に減少し、Fig. 13の曲線の接線の勾配から求めたき裂進展速度 da/dN は $N=2.5 \times 10^5$ ではおよそ $da/dN=2.2 \times 10^{-6}$ mm/cycle であるが、 $N=2.0 \times 10^6$ ではおよそ $da/dN=4.2 \times 10^{-8}$ mm/cycle となり、 $N=2.0 \times 10^6$ ではき裂はほとんど停留状態にあると考えられる。一方、前章で求めたき裂深さ a と最大応力拡大係数 K_{max} の関係において $K_{max} \leq \Delta K_{max, th}$ となるき裂深さは $a \geq 1.7$ mm となることが分かる。したがって Fig. 12 の関係を求めた条件下ではき裂は $a=1.7$ で停留することになる。この値を Fig. 13 に示した。この図より前章で記述した解析により求めたき裂深さは実験値とほぼ一致することが分かった。換言すれば、サーマルストライピングにより発成長したき裂の停留挙動は、き裂が分布して発生することを考慮して決めた周期境界条件の線形破壊力学で評価できることが明らかとなった。

6 結 言

サーマルストライピングによる損傷を評価する技術を開発するため液体金属ナトリウム LNa を使用した熱衝撃試験装置の開発および SUS304 ステンレス鋼のサーマルストライピング試験を実施し以下の知見を得た。

(1) 最大 LNa 温度 550°C, 最小 LNa 温度 250°C の範囲内で、繰返し速度 $\omega=0.01 \sim 2$ Hz の範囲で可変可能なサーマルストライピング試験装置を開発した。

(2) 本装置によりサーマルストライピング下の SUS304 ステンレス鋼の板厚方向の温度分布挙動を明らかにした。Na 温度差が 300°C でも繰返し数が 1 Hz 以上では大きな温度変動域は金属表面から 1 mm 程度であり、サーマルストライピングは極表面近傍での温度変化現象であることが確認できた。

(3) 本試験装置にてサーマルストライピング試験を高温 LNa 550°C, 低温 LNa 250°C, 繰返し速度 $\omega=0.5$ Hz の条件で、繰返し数 $N=2.0 \times 10^6$ 回まで実施した。サーマルストライピングき裂は亀甲状となり、その大きさは 1~2 mm である。また、このき裂の大きさはき裂発生時に決定され、その後の繰返しで大きさは変化することなく、深さのみを増大し、深さ約 1.7 mm で停留する挙動を示す。

(4) サーマルストライピング下で発生したき裂はある深さで停留する挙動を示す。またこの時の停留き裂深さは亀甲状のき裂を分布する縁き裂と見なし、板厚方向の温度分布より周期境界条件で求めた応力から線形破壊力学で推定可能であることが明らかとなった。

(平成 4 年 12 月 3 日 日本材料学会第 30 回高温強度記念シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) T. Moriya and H. Ninokata, Proc. ANS Winter Meeting, San Francisco, USA (1991).
- 2) 村松寿晴, 二ノ方 寿, 日本機械学会論文集, B-57, p. 228 (1991).
- 3) K. Bethge, D. Munz and H. Stamm, Fatigue. Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 11, No. 6, p. 467 (1988).
- 4) EPRI, Interim Report, NP-2672 (1982).
- 5) A. M. Clayton and N. M. Irvine, ASME PVP Conf., Vol. 98 (1985).
- 6) D. Green and K. Bethge, ASME, PVP-Vol. 135, p. 59 (1988).
- 7) 高橋由紀夫, 武 浩司, 三浦直樹, 新田明人, 矢野和隆, 宇野昌嘉, 島川貴司, 日本材料学会第 27 回高温強度シンポジウム前刷集, p. 92 (1989).
- 8) 島川貴司, 毛利憲介, 藤下健一, 高橋由紀夫, 武 浩司, 三浦直樹, 新田明人, 日本材料学会第 27 回高温強度シンポジウム前刷集, p. 97 (1989).
- 9) G. J. Lloyd and D. S. Wood, Int. J. Pressure Vessel and Piping, Vol. 8, No. 4, p. 255 (1980).
- 10) L. Gruter and W. Huget, Int. J. Pressure Vessel and Piping, Vol. 10, No. 5, p. 335 (1982).
- 11) A. G. Miller, Int. J. Pressure Vessel and Piping, Vol. 8, No. 4, p. 15 (1980).
- 12) T. Shimakawa, K. Take, M. Uno, S. Takamatsu, Y. Takahashi and N. Miura, Nuclear Engineering and Design, 138, p. 283 (1992).
- 13) 安部英昭, 横田憲克, 佐藤善美, 福田嘉男, 材料, 42, 1312 (1993).
- 14) L. A. James and R. L. Knecht, Metallurgical Transactions A, 6A, 1 (1975).
- 15) 西川 出, 後藤 剛, 三好良夫, 小倉敬二, 日本機械学会論文集, A-57, 993 (1987).