熱応力のみを受ける円筒のラチェット変形挙動*

猪狩 敏 秀^{*1}, 山内 雅 文^{*1}, 北出 正 司^{*1}
川崎 和 行^{*2}, 和田 宏^{*3}, 神島 吉 郎^{*4}Ratcheting Behavior of a Cylinder Subjected
to Thermal Stress AloneToshihide IGARI, Masafumi YAMAUCHI, Shoji KITADE,
Kazuyuki KAWASAKI, Hiroshi WADA, and Yoshio KAMISHIMA

An experimental study on the thermal ratcheting of a cylinder subjected to axially moving temperature distribution was performed in this paper in order to verify both the ratcheting mechanism and the predictive equations for the ratcheting strain which the authors had proposed. Hollow cylinders, which were made of SUS 304 steel, were subjected to axisymmetric temperature distribution with the maximum temperature of 650°C. Three kinds of movement of this temperature distribution were considered, that is, stationary cycling without moving, hot-front cycling and cold-front cycling with opposite moving directions. As a result of the experiment, little ratcheting occurred in stationary cycling. On the contrary, remarkable ratcheting occurred in the cases of hot-and cold-front cycling. An expansion of the diameter of the cylinder was observed in the case of cold-front cycling, and a contraction was observed in the case of hot-front cycling. These phenomena coincided well with the prediction, and the validity of the proposed ratcheting mechanism was verified. Conservative prediction of the ratcheting strain by using the predictive equations was possible at the large number of cycles where the work hardening and/or the cyclic hardening was involved in the experiment.

Key Words: Plasticity, Elevated Temperature, Ratcheting, Thermal Stress, Cylinder, SUS 304

1. は じ め に

ラチェット現象は一定の一次応力と繰返し二次応力を受ける部材が二次応力の繰返しに伴って一定の一次応力の方向に永久変形していく現象として知られ、その評価はクリープ疲労寿命の評価と並んで高温原子力機器の構造設計を行う上で重要な課題である。この現象の評価法としてよく知られているものに、ASME Boiler and Pressure Vessel Codeにも採用されている Bree の方法⁽¹⁾や、有効一次応力の概念に基づく Roche らの方法⁽²⁾がある。一方、一定の一次応力が無視できる条件で繰返し二次応力のみによってラチェットが生じることが知られている⁽³⁾。これらのラチェットは、軸対称の薄肉円筒が円周方向に均一で、かつ軸方向にこう配を有する温度分布による熱応力を受ける場合のものである。この条件は高速増殖炉の高温ナトリウムを収める主容器の液面近傍の状態に対応してお

り、その構造設計を行う上でラチェットメカニズムの解明が望まれていた。このラチェットを液面熱ラチェットと呼ぶことにする。この液面熱ラチェットについては理論的検討および系統的な実験がなされておらず、そのメカニズムの解明はなされていなかった。すなわち、一次応力がないのになぜラチェットが起こるのか、また、温度分布の移動の有無あるいは移動方向の差によりラチェット変形がどのように異なるのかが明確にされていなかった。

著者らは前報⁽⁴⁾において、クリープの影響がない場合の液面熱ラチェットについて理論的検討を加え、円筒の円周方向膜応力・膜ひずみ挙動に基づくラチェットメカニズムを提案するとともに、弾完全塑性体を仮定した場合について、代表的な2種類の温度分布に対するラチェットひずみ推定式を提案した。

本報は、液面熱ラチェットに関する著者らの上記提案について実験的検討を行ったものである。すなわち、温度分布の移動の有無あるいは温度分布の移動方向の差によるラチェット挙動の差について、提案したラチェットメカニズムの妥当性の検証を行うとともに、実験で得られるラチェットひずみの推定の可能性について検討を加えた。さらに、負荷応力レベルや温度分布の移動距離とラチェットひずみの関係についても検討

* 平成元年11月10日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年5月19日。

^{*1} 正員、三菱重工業(株)長崎研究所(〒850-91 長崎市飽の浦町1-1)。

^{*2} 三菱重工業(株)長崎研究所。

^{*3} 三菱重工業(株)神戸造船所(〒652 神戸市兵庫区和田崎町1-1)。

^{*4} 三菱原子力工業(株)(〒105 東京都港区芝公園2-4-1)。

を加えた。

2. ラチェットメカニズムの概要

液面熱ラチェットのメカニズムについて、著者らは以下のような提案を行った⁽⁴⁾。まず、図1に示す代表的な二つの温度分布すなわち、階段状温度分布および直線折曲げ温度分布を受ける無限長さの薄肉円筒を想定し、温度分布が十分に長い距離を移動する場合について、円筒の円周方向膜応力・膜ひずみに基づくラチェットメカニズムを考えた。まず、温度分布が移動なしで繰返し負荷される場合、熱応力による塑性変形は生じるものの、基本的にはひずみ制御形のヒステリシスとなり、ラチェット変形は進行しない。一方、温度分布が移動する場合、温度分布が通過する際には熱応力によりひずみ制御形の塑性変形を生じるが、温度分布が十分遠方に去った後は円周方向の膜応力の残留応力は零となって、ヒステリシスループが閉じなくなり、これがラチェット変形の原因となるとするものである。すなわち、温度分布の移動がラチェット変形の駆動力であるとする考え方である。移動方向とラチェット変形の関係については、図1に併記した弾性解析による円周方向膜応力 $\sigma_{\theta,el}$ を考えて、階段状温度分布については、温度変化部が低温側へ移動する Hot front の移動の場合は円筒の収縮の、また温度変化部が高温側へ移動する Cold front の移動の場合は円筒の膨張のラチェット変形となる。一方、直線折曲げ温度分布については、 $\sigma_{\theta,el}$ が正となる低温側折曲げ点は Hot front、Cold front いずれの場合も円筒の膨張の、また、 $\sigma_{\theta,el}$ が負となる高温側折曲げ点の場合、Hot front、Cold front いずれの場合も円筒の収縮のラチェットが生じる。

これらのラチェットメカニズムに基づき、二つの温度分布に対し、材料特性の温度依存性を無視した弾完全塑性体を仮定して、下記のような1サイクル当たりのラチェットひずみの推定式を提案した。

$$|\epsilon_{\theta}^R| = (\Delta\sigma_{\theta,el} - 2\sigma_y)/E = 2(|\sigma_{\theta,el}| - \sigma_y)/E$$

(階段状温度分布) (1)

図1 階段状温度分布と直線折曲げ温度分布

$$|\epsilon_{\theta}^R| = 2(|\sigma_{\theta,el}| - \sigma_y)/E$$

(直線折曲げ温度分布) (2)

ここで、 ϵ_{θ}^R は円周方向膜ひずみで考えた1サイクル当たりのラチェットひずみ、 $\Delta\sigma_{\theta,el}$ は弾性解析による円周方向膜応力範囲、 $\sigma_{\theta,el}$ は弾性解析による円周方向膜応力の極大あるいは極小値であり、 σ_y および E はそれぞれ降伏応力および縦弾性係数である。これらのメカニズムの考え方およびラチェットひずみ推定式の妥当性は、弾完全塑性体を仮定した円筒の弾塑性解析により検証された。

3. 液面熱ラチェット実験

3.1 実験の目的 ここでの実験は、次の三つの項目の検討のために実施した。

- ①提案したラチェットメカニズムの実験的検証、すなわち、ラチェット挙動に及ぼす温度分布移動の有無および温度分布移動方向の差の影響の検討。
- ②ラチェット挙動に及ぼす発生熱応力レベルおよび温度分布移動距離の影響の検討。
- ③ラチェットひずみ推定式の有効性の検討。

3.2 供試材および供試体 図2に用いた供試体の形状を示す。試験部は外径 140 mm、肉厚 1 mm の薄肉円筒で、外径 165.2 mm、肉厚 18.2 mm の SUS 304 素管 (JIS SUS 304 TP) から機械加工により削り出した。本供試材の機械的性質を表1に示す。

3.3 実験装置および方法 実験装置の概要を模式的に図3に示す。上記供試体が軸方向の剛性が無視できるような伸縮継手を介して疲労試験機に装着されている。供試体の内面には冷却用の水を流してあり、水面の高さは一定に保たれている。供試体の外面には高周波加熱用コイルが設置され、この高周波加熱用コ

図2 供試体形状寸法

イルと供試体内部の冷却水の両者により図3中に模式的に示すような、最高温度が650°Cで最大75°C/mmの軸対称形状の軸方向温度こう配を発生させている。なお、水面付近での板厚方向の温度差は内外面で最大10°C程度であった。供試体内部の冷却水の水面と供試体外部の加熱コイルの位置は固定されているため、疲労試験装置により供試体が上下に動くと、供試体に対して温度分布が相対的に上下に動くことになる。

3.4 実験条件

3.4.1 ラチェットメカニズムの検証のための条件

最高温度が650°Cで軸方向温度こう配が75°C/mmの場合の温度分布を、それに対する弾性解析による円筒内外面の軸方向応力分布および円周方向応力分布と対比して図4に示す。温度分布は円筒の内外面の温度計測結果をもとに推定した板厚中心での値を用いている。応力分布は既報⁽⁴⁾と同様汎用プログラムABAQUSのシェル要素を用い、縦弾性係数、ポアソン比および線膨張係数の温度依存性⁽⁷⁾を考慮して算出したもので、移動距離が十分長い場合の外表面の弾性応力強さ $S_n (= \Delta(\sigma_z - \sigma_\theta))$ は1037 MPa、円周方向膜応力の正の極値は299 MPa、負の極値は-186 MPaであり、それぞれ125°C程度および550°C程度の温度で発生している。図4の温度分布は図1に示したような典型的温度分布とは異なる形状をしているが、円周方

向膜応力分布の形状より判断して、階段状温度分布に比較的近い形状であると考えられる。すなわち、図4の弾性解析による円周方向膜応力は、低温側に生じる引張側の極値、および高温側に生じる圧縮側の極値ともに、それぞれの温度の0.2%耐力(文献データ⁽⁶⁾)に示される温度依存性と表1の結果をもとに125°Cで215 MPa、550°Cで142 MPaと推定した)を超えており、低温側および高温側の両方で塑性変形が生じ得ること、また、正および負の極値が生じる位置の間の距離が円筒シェルの減衰長さ $\pi/\beta [\beta = \{3(1-\nu^2)/(r^2 t^2)\}^{1/4}]$ 、 r : 平均半径、 t : 板厚、 ν : ポアソン比] に比べて短いことを考え合わせると、階段状温度分布に対するラチェットメカニズムの検討が可能であると考えて、下記の3条件の実験を行うこととした。

Case 1: 図4の温度分布が移動なしで繰返し負荷される場合 (Stationary cycling)

Case 2: 図4の温度分布の Hot front 移動が繰返される場合 (Hot front cycling)

Case 3: 図4の温度分布の Cold front 移動が繰返される場合 (Cold front cycling)

Case 1~Case 3は S_n 値が1000 MPa 前後となるように条件を設定している。Case 1は温度分布の負荷および除荷を1サイクルとし、Case 2およびCase 3は供試体が室温の状態から温度分布を負荷し、定常状態

表 1 供試材の機械的性質

Temp. (°C)	0.2% yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
RT	258	592	69.5	81.8
650	134	310	46.4	77.6

図 3 実験装置の概要

図 4 温度分布と弾性応力分布の例 (Case 1)

になった後移動し、温度分布を除荷して室温に戻した後、供試体を初期の位置に戻す過程を1サイクルとしている。また、Case 2およびCase 3において、温度分布移動距離は、ラチェットメカニズム検証の観点から十分長く取る必要があるが、ここでは、図4の円周方向弾性膜応力の正負の極値を経験する部分の長さを薄肉円筒の減衰長さ π/β に比べて十分長くとるため、温度分布の移動距離を60 mmとした。温度分布の移動速度は、移動中に定常的温度分布形状が得られるように6 mm/minとした。また、繰返し数は最大100サイクルとした。実験条件およびそれに対する弾性応力を併記したものを表2のCase 1~3に示す。

3・4・2 応力レベルおよび温度分布移動距離の影響
 の検討のための条件 応力レベルを変化させる場合、最高温度と最低温度の差 ΔT あるいは、温度こう配 $\Delta T/\Delta Z$ を変化させることが考えられる。ここではその例として次の2条件を考えた。

Case 4: 図4の温度分布から温度こう配 $\Delta T/\Delta Z$ を低下させることにより外表面での S_n を800 MPa程度とした条件、Hot front cyclingで移動距離は60 mmとしている。

Case 5: 図4の温度分布から ΔT を小さくすることにより外表面での S_n を800 MPa程度とした条件、最高温度 $T_{\max}$ は550°Cで、Cold front cyclingとし、移動距離は60 mmとしている。

一方、移動距離の影響はCase 3のCold front cyclingで移動距離を小さくすることによって考え(Case 6)、その移動距離を10 mmとした。Case 4~Case 6の実験条件および弾性応力を表2中に併記している。

3・5 実験結果 Case 1~Case 3の各条件について、温度分布と代表サイクル終了後の残留変形分布を併記して図5~図7に示す。またCase 1~Case 3について、繰返しに伴う半径方向変位の最大値 $\delta_{\max}$ の変化の様子を図8に示す。Case 4~Case 6についても繰返しに伴う $\delta_{\max}$ の変化の様子を図8に併示している。なお、ラチェット変形の計測は円周上の3箇所で行っており、図5~図7は代表個所での値であり、図8

は3箇所の平均値である。Case 1~Case 3の比較に関し、次のことがわかる。

- ①温度分布移動がないCase 1の場合、ほとんどラチェット変形が生じない。一方、温度分布の移動があるCase 2およびCase 3の場合、繰返しに伴い顕著なラチェット変形が進行する。
- ②温度分布移動の方向によりラチェット変形の方向が異なる。すなわち、Case 2のHot front cyclingの場合、円筒の径が収縮するラチェット変形となり、一方、Case 3のCold front cyclingの場合、円筒の径が膨張するラチェット変形となる。
- ③Case 1では半径方向の変形量 $\delta_{\max}$ が100サイクルでも最大0.2 mm程度であった。これは円周方向膜

図5 Case 1における残留変形分布

図6 Case 2における残留変形分布

図7 Case 3における残留変形分布

表2 実験条件

Case No.	$T_{\max}$ (°C)	Loading pattern	l (mm) (βl)	S_n (MPa)	$\sigma_{\theta c}$ (MPa)	$\sigma_{\theta H}$ (MPa)	Maximum cycle $N_{\max}$
1	650	Stationary	0	1037	299	-186	100
2		Hot front	60 (5.60)	1053	321	-195	50
3		Cold front		1002	288	-181	
4	550	Hot front		786	246	-95	100
5		Cold front	10 (0.93)	844	263	-143	
6				1031	292	-205	

ひずみ $\varepsilon_\theta (= \delta_{\max}/r)$ に換算して 0.3 % 程度である。Case 2 と Case 3 では定量的には差が見られ、Case 2 では $\delta_{\max}$ が 100 サイクルで 1.0 mm 程度で円周方向膜ひずみに換算して 1.4 % 程度でほぼ飽和しているのに対し、Case 3 では 50 サイクルで $\delta_{\max}$ が 2.9 mm 程度であり、円周方向膜ひずみに換算して 4.2 % 程度の量となった。

一方、Case 4～Case 6 についてはすべて膨張するラチェット変形となった。半径方向の変形量 $\delta_{\max}$ は 100 サイクルにおいて Case 4 で 0.14 mm、Case 5 で 0.46 mm 程度であり、円周方向膜ひずみに換算してそれぞれ 0.2 % および 0.7 % 程度であった。Case 6 は $\delta_{\max}$ が 0.2 mm で円周方向膜ひずみに換算して 0.3 % 程度であった。

50 サイクルでのラチェットひずみ ε_θ^R を S_n に対して図 9 に示す。この図から次のようなことがわかる。

- ① 顕著な応力依存性が見られること。すなわち、 S_n が 1000 MPa 程度では 1 % 以上のラチェットひずみとなるが、 S_n が 800 MPa 程度になると 1 % 以下のラチェットひずみとなること。
- ② 移動距離の影響が大きいこと。同程度の S_n に対し、移動距離が 60 mm の場合、1 % 以上のラチェットひずみとなるが、10 mm 程度になると 0.2 % 程度となること。

4. 考 察

4.1 ラチェットメカニズムの検討 Case 1～Case 3 を比較した場合、Case 1 では軸方向曲げ応力による塑性変形は生じているものの、円筒が一樣に膨張・収縮するようなラチェット変形は生じて

いない。一方、Case 2 および Case 3 については飽和傾向などを含めて量的な差はあるものの、Hot front では収縮の、また Cold front では膨張のラチェット変形が生じている。この意味で、本試験範囲において提案したラチェットメカニズムの考え方は妥当であると考えられる。

一方、Case 4 および Case 5 のように応力レベルを低下させると、引張側と圧縮側の円周方向膜応力の大きさと降伏応力との関係が問題となってくる。低温側および高温側の円周方向膜応力がともに降伏応力を越えているときは、階段状温度分布のラチェットメカニズムに従うが、Case 4 および Case 5 のように、高温側の円周方向膜応力が降伏応力より低い場合には低温側の円周方向膜応力のみにより塑性変形が発生するため、見かけ上図 1 の直線折曲げ温度分布の場合と同様になり、移動方向によらず膨張のラチェット変形となっている。つまり、円周方向膜応力と降伏応力との対比でラチェット変形の予測を行う必要があることがわかる。なお、Case 5 については高温側の円周方向膜応力は 500°C 程度の温度で発生しており、500°C での降伏応力 (0.2 % 耐力) を 147 MPa 程度と考えた。

移動距離の短い Case 6 の場合、類似の条件である Case 3 より小さいラチェット変形となっている。Case 6 の場合の温度と残留変形分布を図 10 に示すが、ほぼ同一の応力条件の Case 3 に比べて変形の分布が異なっている。すなわち移動距離が長い Case 3 では、特に繰返し初期で顕著であるが、台形状の変形分布となっているのに対し、Case 6 ではこの台形状の平坦部が生じておらず、むしろ、同程度の応力で温度分布の移動を伴わない Case 1 に近い形状となっている。

図 8 繰返しに伴うラチェット変形の進行

図 9 弾性応力強さと 50 サイクルでのラチェットひずみの関係

Case 6 は移動距離が短いため、Case 1 と Case 3 の中間的な挙動となっており、移動距離の十分長い場合の既報⁽⁴⁾のラチェットメカニズムに従わないため、Case 3 よりも小さなラチェットひずみとなっているものと考えられる。なお、図 10 は、円周上の 3 箇所で行った変形計測結果の代表例である。

4・2 ラチェットひずみの予測 実際の材料は弾完全塑性体ではないが、式(1)および式(2)のラチェットひずみ推定式が、どの程度実際に使えるかを検討する意味でラチェットひずみの推定を行い、実験結果と比較した。まず、降伏応力の温度依存性の考え方について明らかにしておく必要がある。直線折曲げ温度分布は、温度の折曲げ点間の距離が十分長く、折曲げ点間の事象が独立なため、低温側の折曲げ点の移動については低温側の降伏応力 σ_{yL} を、また、高温側の折曲げ点の移動については高温側の降伏応力 σ_{yH} を用いて式(2)によりラチェットひずみの推定が可能と考えられる。すなわち

$$|\epsilon_{\theta}^R| = 2(|\sigma_{\theta,el}| - \sigma_{yL})/E \quad \text{..... (3)}$$

(低温側折曲げ点)

$$|\epsilon_{\theta}^R| = 2(|\sigma_{\theta,el}| - \sigma_{yH})/E \quad \text{..... (4)}$$

(高温側折曲げ点)

一方、階段状温度分布の場合は、高温側および低温側での降伏応力 σ_{yH} および σ_{yL} の使い分けに加えて、移動方向との関連で検討が必要となる。

図 11 および図 12 に温度分布移動のない場合およびある場合の変形をそれぞれ模式的に対比して示す。破線は温度分布形状を表すと同時に自由熱膨張量 $\alpha \Delta T$ をも示している。ここで、 α は線膨張係数である。図中の A および D は温度変化部から十分離れた円筒上の点であり、E、B および F、C はそれぞれ温度変化部をはさむ高温部および低温部である。降伏応力の温度依存性がない場合、図 11(a) に示すように高温側と低温側の剛性が等しいため、高温側で発生するひずみの絶対値 ϵ_{AE} と低温側で発生するひずみの絶対値 ϵ_{FD} はとも

に等しく、

$$\epsilon_{AE} = \epsilon_{FD} = (1/2)\alpha \Delta T \quad \text{..... (5)}$$

である。一方、降伏応力の温度依存性を考えると図 11(b) に示すように低温側に比べて高温側の剛性が小さいため、

$$\epsilon_{AB} > (1/2)\alpha \Delta T \quad \text{..... (6)}$$

$$\epsilon_{CD} < (1/2)\alpha \Delta T \quad \text{..... (7)}$$

$$\epsilon_{AB} + \epsilon_{CD} = \alpha \Delta T \quad \text{..... (8)}$$

の関係がある。一方、温度分布の移動がある場合の例として Cold front の場合の変形図を図 12 に示す。Cold front の移動により低温側には ϵ_{θ}^R の正のラチェットひずみが生じている。A~F の記号の意味は図 11

(a) Case with temperature-independent yield stress

(b) Case with temperature-dependent yield stress

図 11 階段状温度分布の Stationary cycling における弾塑性変形の模式図

(a) Case with temperature-independent yield stress

(b) Case with temperature-dependent yield stress

図 12 階段状温度分布の Cold front における弾塑性変形の模式図

図 10 移動距離が短い場合 (Case 6) の残留変形

の場合と同じである。図 12(a)は降伏応力の温度依存性なしの場合、図 12(b)は降伏応力の温度依存性ありの場合である。温度依存性のない場合、

$$\epsilon_{AE} = (1/2)(\alpha\Delta T - \epsilon_0^R) \cdots \cdots (9)$$

$$\epsilon_{FD} = (1/2)(\alpha\Delta T - \epsilon_0^R) \cdots \cdots (10)$$

一方、温度依存性ありの場合、

$$\epsilon_{AB} > (1/2)(\alpha\Delta T - \epsilon_0^R) \cdots \cdots (11)$$

$$\epsilon_{CD} < (1/2)(\alpha\Delta T - \epsilon_0^R) \cdots \cdots (12)$$

$$\epsilon_{AB} + \epsilon_{CD} + \epsilon_0^R = \alpha\Delta T \cdots \cdots (13)$$

の関係がある。温度依存性なしの場合、F から D への過程は降伏応力から応力零への除荷過程であり⁽⁴⁾、

$$\epsilon_{FD} = \sigma_y/E \cdots \cdots (14)$$

であるから、式(10)より、

$$\epsilon_0^R = \alpha\Delta T - 2\sigma_y/E \cdots \cdots (15)$$

の関係が得られる。ここで、式(15)と式(1)は対応しており、熱ひずみ $\alpha\Delta T$ は $\Delta\sigma_{\theta,el}/E$ あるいは $2|\sigma_{\theta,el}|/E$ と等しい。一方、温度依存性がある場合、

$$\epsilon_{CD} = \sigma_{yc}/E \cdots \cdots (16)$$

の関係と、式(11)および式(13)より、

$$\epsilon_0^R < \alpha\Delta T - 2\sigma_{yc}/E \cdots \cdots (17)$$

の関係式が得られる。つまり、Cold front の場合、

$$\epsilon_0^R = \alpha\Delta T - 2\sigma_{yc}/E \cdots \cdots (18)$$

により実際より大きめの、すなわち安全側のラチェットひずみ推定ができる。一方、Hot front の場合、低温側では降伏が生じないため

$$\epsilon_0^R = -(\alpha\Delta T - 2\sigma_{yH}/E) \cdots \cdots (19)$$

により、ラチェットひずみの推定ができると考えられる。

Cold front および Hot front の場合のヒステリシスループを模式的に図 13 に示す。Cold front の場合、AB 間で生じる塑性ひずみ量は未定であるため、これを零とし、AB 間で σ_{yc}/E の弾性ひずみが生じるとした場合が式(18)に相当する。式(18)および式(19)は階段状温度分布に対して降伏応力の温度依存性を考えた Goodman⁽⁵⁾の考え方と対応している。

ここでは移動距離が十分長い Case 2～Case 5 についてラチェットひずみ推定を行った。用いたラチェットひずみ推定式は以下のとおりである。

$$|\epsilon_0^R| = 2(|\sigma_{\theta,el}| - \sigma_{yH})/E \cdots \cdots \text{Case 2} \quad (20)$$

$$|\epsilon_0^R| = 2(|\sigma_{\theta,el}| - \sigma_{yc})/E \cdots \cdots \text{Case 3, Case 4, Case 5} \quad (21)$$

円周方向膜応力の負の極値の絶対値が σ_{yH} より小さい Case 4 および Case 5 は直線折曲げ温度分布とみなして式(2)と同じ形の式(21)を用いた。正および負の円周方向膜応力の極値がともに降伏応力を越える

Case 2 および Case 3 は基本的には階段状温度分布に近いと考えられるため、式(1)と同じ形の式(20)あるいは式(21)式を用いた。つまり、Cold front の場合、円周方向膜応力の正の極値が、また、Hot front の場合、円周方向膜応力の負の極値がラチェット変形に寄与すると考えた。

降伏応力である σ_{yH} および σ_{yc} としては、それぞれ 550°C での 0.2% 耐力である 142 MPa および 125°C での 0.2% 耐力である 215 MPa を用いた。これは前述のように表 1 の室温および 650°C での引張試験結果をもとに既存データ⁽⁶⁾の温度依存性も参考にして推定したものである。また縦弾性係数 E としては 125°C と 550°C の平均的な値として 1.72×10^5 MPa を用いた。

これらのすべてのケースを同じ様式で比較するため、次の形の無次元表示を用いる。

$$|\epsilon_0^R|/(\sigma_y/E) = 2(|\sigma_{\theta,el}|/\sigma_y - 1) \cdots \cdots (22)$$

図 14 に、最初の 3 サイクルの平均値として得られる 1 サイクル当たりのラチェットひずみ増分および 50 サイクルでの累積ラチェットひずみに対する推定結果を実験値と対比して示す。図 14(a)のラチェットひずみ増分については Case 3 が若干大きめの実験値となっているが、全般に良好な推定結果となっている。一方、50 サイクルでの累積ラチェットひずみについては全般に推定値のほうが大きな値となっている。これは推定式が弾完全塑性体を仮定しているのに対し、実験値のほうには加工硬化や繰返し硬化の影響が含まれており、繰返しとともに 1 サイクル当たりのラチェットひずみ増分が減少するためと考えられる。

なお、図 8 で見られた Case 2 (Hot front) と Case 3 (Cold front) のラチェットひずみの量の差については、式(2)によるラチェットひずみの値が、Case 2 よりも Case 3 のほうが大きいことから定性的には理解できるものの、定量的な解釈については、加工硬化や繰返し硬化を含めた構成式による非弾性解析の面からの検

図 13 降伏応力の温度依存性を考えた場合のヒステリシスループ

図 14 ラチェットひずみの実験結果と推定結果の比較

討が必要であり、今後の課題の一つと考えている。

5. ま と め

軸方向に温度分布移動を受ける中空円筒のラチェット変形について実験的に検討を加えた結果、以下のことがわかった。

討 論

〔質問〕 井上達雄〔京都大学工学部〕

著者らが前報で提案したラチェットのモデルを実験的に検証するための巧みな実験をされたことに敬伏する。

(1) 理論ではいくつかの仮定をされており、実験と合致しないものがあるが、とくに、円筒の長さ、弾完全塑性体の仮定などの影響はどのようになるか。

(2) 図4(b)の軸方向応力は、円筒の内外の温度差によるものと思われる。緒言で述べられたラチェットの定義の一次、二次応力はこの場合どれに対応するのか。または、一次応力は零の場合を扱ったのか。

〔回答〕 (1) 今回用いた円筒試験体の平行部長さや移動距離が、無限長さの円筒および十分長い温度分布移動距離という前報の仮定を満たしているかどうかについては、本報の3・4・1項に示した薄肉円筒の減衰長さの観点から検討する必要がある。薄肉円筒の減

(1) 温度分布の移動がない場合、ラチェット変形がほとんど生じないのに対し、温度分布の移動がある場合、顕著なラチェット変形が生じる。また、Hot frontとCold frontではラチェット変形の方法が異なる。これらの実験事実により、提案したラチェットメカニズムが妥当であることがわかった。

(2) 繰返し初期の1サイクル当たりのラチェットひずみ増分に対する推定結果は実験結果とよく一致した。一方、繰返しが進んだ段階での累積ラチェットひずみについては、提案した推定式により安全側の推定が可能であることがわかった。

なお、ラチェットひずみの推定に関しては日本原子力発電(株)の一宮正和氏に討論いただいた。記して感謝する。

文 献

- (1) Bree, J., *J. Strain Analysis*, 3 (1968), 122.
- (2) Roche, R. L., ほか2名, *Nucl. Eng. Des.*, 7 (1982), 51.
- (3) Gokhfeld, D. A. and Cherniavsky, O. F., *Limit Analysis of Structures at Thermal Cycling*, (1980) 450, Sijthoff & Noordhoff.
- (4) 和田・猪狩・北出, 機論, 55-512, A (1989), 985.
- (5) Goodman, A. M. (Stanley, P., 編), *Non-Linear Problems in Stress Analysis*, (1977), 317, Applied Science Pub.
- (6) 例えば, ASME, *Boiler and Pressure Vessel Code*, Case N-47.
- (7) 日本機械学会, 非弾性解析の設計への適用方法に関する研究(II), J 254-81-01 (1981), 294.

衰長さ π/β は約 20 mm であり、温度分布移動距離 60 mm はこれより十分長いので、移動区間の中央部付近には、移動始終端の影響を受けない様な膨張・収縮の部分があると考えられる。これは、図6および図7の $N=1\sim3$ の残留変形が軸方向に台形状となっていることからうかがえる。この台形の様な山の部分が、前報のラチェットメカニズムに対応する部分である。また、円筒の平行部長さ 150 mm もこの観点からは十分長いものとなっている。したがって、本報の試験条件は、前報のラチェットメカニズムを検証するのに適切なものとなっていると考えられる。

一方、弾完全塑性体の仮定については次のように考えている。すなわち、加工硬化を示す現実の材料の場合、 σ_0 と ε_0 のヒステリシスループは図13のものとは若干異なるものの、ラチェットメカニズムについては弾完全塑性体と同様であると考えている。ラチェット

ひずみ推定式の観点からは、降伏応力の選び方が重要となる。比例限等の低い降伏応力を用いた場合の検討を行うことも可能ではあったが、ここでは工学的に一般によく用いられる 0.2%耐力を用いた場合のラチェットひずみ推定を行い、その推定精度を検討した。

(2) 緒言で述べた一次応力は、内圧、自重あるいは外力などの、いわゆる荷重制御形の応力であり、一方、二次応力は、熱応力等のいわゆる変位制御形の応力を指している。ここでの試験条件は、軸方向温度分

布による熱応力のみを受ける場合のものである。軸方向温度分布により発生する熱応力(二次応力)は、図 4 (b)の軸方向応力と図 4 (c)の円周方向応力の 2 種類となっている。前報で示したラチェットメカニズムは、この軸方向応力の影響を無視し、円周方向膜応力・ひずみに基づいて検討したものであった。なお、板厚方向の温度差は 10°C 程度であり、これに基づく軸方向応力は図 4 (b)のものに比べて十分小さい。