軸方向に温度分布移動を受ける円筒の熱ラチェット変形の推定法*

和田 宏^{*1}, 猪狩敏秀^{*2}, 北出正司^{*2}Prediction Method for Thermal Ratcheting of a
Cylinder Subjected to Axially Moving Temperature Distribution

Hiroshi WADA, Toshihide IGARI, and Shoji KITADE

A prediction method was proposed for plastic ratcheting of a cylinder, which was subjected to axially moving temperature distribution without primary stress. First, a mechanism of this ratcheting was proposed, which considered the movement of temperature distribution as a driving force of this phenomenon. Predictive equations of the ratcheting strain for two representative temperature distributions were proposed based on this mechanism by assuming the elastic-perfectly-plastic material behavior. Secondly, an elastic-plastic analysis was made on a cylinder subjected to the representative two temperature distributions. Analytical results coincided well with the predicted results, and the applicability of the proposed equations was confirmed.

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

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^{(1)~(3)}, その評価は高温原子力機器の設計を行ううえで、クリープ疲労寿命の評価と並んで重要な課題である⁽⁴⁾. 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⁽⁵⁾があり、一定の一次応力と繰返し二次応力の組合せに対してラチェットが起きる条件が規定されている。また、Roche ら⁽⁶⁾はこのラチェット現象について有効一次応力の概念を提案し、ラチェット評価法を提案している。

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⁽⁷⁾. また、Ponter ら⁽⁸⁾はこの現象について shake down 理論の立場より検討を加えている。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起因する熱応力を受ける場合についてのものである。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ものに対応しており、その構造設計を行ううえでラチェットメカニズムの解明が望まれている。

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系統的な実験あるいは理論的検討が十分になされておらず、なぜ一次応力がないのにラチェットが起きるのが明確にされていない。温度分布の移動の有無、あるいは温度分布の移動方向がラチェット変形に及ぼす影響が明確にされていない。また、ラチェットひずみの発生限界の議論⁽⁸⁾はあるものの、発生するラチェットひずみの推定式は提案されていない。

本論文では、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、ラチェットメカニズムの考え方の提案を行うとともに、このラチェットメカニズムに基づくラチェットひずみ推定法の提案を行う。引き続き、解析的検討を行うことにより、提案した方法の妥当性を検討する。

* 昭和63年11月18日 第954回講演会において講演、原稿受付 昭和63年6月27日。

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

^{*2} 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. 液面熱ラチェット問題の概要

本論文では、軸対称の薄肉円筒が円周方向に均一でかつ、図1(a), (b)に示す2種類の軸方向温度分布を受ける場合を基本と考えることにする。図1中には温度分布に対応する円周方向弾性膜応力 $\sigma_{\theta,el}$ も模式的に併記している。なお、板厚方向には温度こう配はないものとしている。

まず、図1(a)の階段状温度分布についての応力分布は文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾に詳しいので詳細は省くが、材料特性の温度依存性を考えない場合 $\sigma_{\theta,el}$ は低温側と高温側で絶対値が等しく、逆の符号となっている。この値の最大値および最小値は縦弾性係数を E 、線膨張係数を α 、温度差を ΔT として

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta,el} &= 0.5E\alpha\Delta T & (\text{低温側}) \\ \sigma_{\theta,el} &= -0.5E\alpha\Delta T & (\text{高温側}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

と表せる。また、軸方向の曲げ応力 $\sigma_{z,el}$ の表面での最大値は、ポアソン比 $\nu=0.3$ として、約 $0.29 E\alpha\Delta T$ である。

一方、図1(b)の直線折曲げ温度分布は、2箇所の温度分布の折曲げ点の距離が薄肉円筒の減衰長さ $\beta^{-1} = \{3(1-\nu^2)/(r^2 t^2)\}^{-1/4}$ 、 r : 円筒の平均半径、 t : 板厚] に比べて十分長く、一方の温度折曲げ点での事象が、他の温度折曲げ点での事象に影響を及ぼさない温度分布である。低温側の温度折曲げ点に正の、また、高温側の温度折曲げ点に負の $\sigma_{\theta,el}$ が生じ、その最大値および最小値は次のように表せる⁽⁹⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta,el} &\approx 0.19\sqrt{rt}(\Delta T/\Delta Z)E\alpha & (\text{低温側}) \\ \sigma_{\theta,el} &\approx -0.19\sqrt{rt}(\Delta T/\Delta Z)E\alpha & (\text{高温側}) \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで、 $\Delta T/\Delta Z$ は温度こう配である。また、 $\sigma_{z,el}$ は温度折曲げ位置で最大となり、その値は、約 $0.35 \sqrt{rt}(\Delta T/\Delta Z)E\alpha$ である。

液面熱ラチェットにおいて問題となる温度分布の代表として、これらの温度分布を考えた。すなわち、現実には、実験あるいは高速増殖炉の主容器などで発生する軸方向温度分布は、これらの二つの温度分布の中間の

(a) 階段状温度分布 (b) 直線折曲げ温度分布

図1 階段状温度分布および直線折曲げ温度分布

ものであると考えられ、温度こう配の大きい側の極限として階段状温度分布が、また、温度こう配の緩やかな側の極限として直線折曲げ温度分布があると考えた。また、これらの温度分布の負荷形態として、移動なしで繰返し負荷される場合 (stationary cycling)、円筒全体が加熱される側への温度分布の移動、すなわち、図1の温度分布の左側への移動が繰返される場合 (hot front cycling)、および、円筒全体が冷却される側への移動、すなわち、図1の温度分布の右側への移動が繰返される場合 (cold front cycling) の三つの場合を考えた。

3. ラチェットメカニズムの検討

温度分布の移動の有無がラチェット変形発生に及ぼす影響を模式的に図2および図3のように考えた。材料特性としては簡単のため降伏応力の温度依存性を無視した剛塑性体を仮定し、円周方向膜応力のみを考えて軸方向曲げ応力を無視している。温度分布としては図1(a)の階段状温度分布を例にとり、移動方向としては半径 r_0 の円筒が高温の状態から冷却されていく cold front cycling を考え、温度分布の移動距離が十分長い場合を考えている。

3.1 温度分布の移動がない場合 図2(a)に示すように、薄肉円筒全体が一様温度 T_{max} に加熱された状態から、微小区間 $0 \leq Z \leq \Delta Z$ が T_0 に冷却された場合を考える。 $Z = \Delta Z$ の位置で生じた $\alpha\Delta T$ の熱ひずみ差のため、この微小区間が $Z \geq \Delta Z$ の高温部により円周膜ひずみで $\alpha\Delta T$ だけ引張りの塑性変形を受ける。温度分布が除荷された場合、図2(b)に示すように、逆にこの微小区間は $Z \geq \Delta Z$ の低温部により、円周方向膜ひずみで $\alpha\Delta T$ だけ圧縮側の塑性変形を受ける。図2(c), (d)に示すように、2サイクルめについて

(c) 2サイクルめ (No. 1) (d) 2サイクルめ (No. 2)

図2 温度分布移動がない場合 (Stationary cycling) の塑性変形挙動の模式図

でも1サイクルめと同様の現象が起こる。すなわち、この負荷形式においては、 $0 \leq Z \leq \Delta Z$ の微小区間の塑性変形が $Z \geq \Delta Z$ の部分の熱膨張収縮に支配される、いわゆるひずみ制御形のヒステリシスループを描くことになり、ラチェット変形は生じない。

3.2 温度分布が移動する場合 一様温度 $T_{\max}$ の薄肉円筒の $0 \leq Z \leq \Delta Z$ の微小区間が T_0 に冷却される図3(a)の過程から、図3(b)に示すように、 $\Delta Z \leq Z \leq 2\Delta Z$ の部分も T_0 に冷却されるように温度分布が移動する場合を考える。 $0 \leq Z \leq \Delta Z$ の部分は図3(a)の段階での塑性変形により $\alpha \Delta T$ の円周方向塑性膜ひずみを受けており、一方、 $Z \geq 2\Delta Z$ の部分は熱ひずみ $\alpha \Delta T$ を受けているため、 $\Delta Z \leq Z \leq 2\Delta Z$ の部分は左右より拘束を受け、 $\alpha \Delta T$ だけの円周方向塑性膜ひずみを生じる。このようにして温度分布が十分遠方に移動した後は、図3(c)に示すように円周方向塑性膜ひずみで $\alpha \Delta T$ だけ膨らんだ円筒が残っていることになる。つまり、1回の温度分布の移動で $\alpha \Delta T$ のラチェットひずみが生じることになる。2サイクルめも $Z=0$ から温度分布が移動することにより、図3(d)に示すように、同様に $\alpha \Delta T$ のラチェットひずみが生じることになる。

一方、これとは逆に、全体が T_0 の状態から、階段状温度分布の移動により円筒全体が $T_{\max}$ に加熱されていくような hot front cycling の場合、これと全く逆の現象が起こり、サイクルごとに円周方向膜ひずみで $\alpha \Delta T$ だけ径が縮んでいくようなラチェット変形が生じることになる。

温度分布の移動距離は十分長いと仮定しているため、温度分布が通り過ぎた後の円周方向の残留応力は零と考えられる。温度分布通過の際には、ひずみ制御

図3 温度分布移動がある場合 (cold front cycling) の塑性変形挙動の模式図

型の負荷を受け、温度分布が十分遠くへ去った後は応力が零の状態となり、ヒステリシスループが閉じないことがラチェット変形発生につながっていると考えられる。つまり、温度分布の移動がラチェット変形の駆動力になると考えられる。

なお、図1(b)の直線折曲げ温度分布についても、温度分布の移動の有無によるラチェット変形発生の有無は階段状温度分布の場合と同様である。ただし、直線折曲げ温度分布の場合、温度折曲げ点に対して $\sigma_{\theta,el}$ が対称形状であるため、温度分布移動方向の差によるラチェット変形挙動の差はなく、 $\sigma_{\theta,el}$ が正の低温側折曲げ点の場合、移動方向によらず、径の膨らむラチェットが生じ、一方 $\sigma_{\theta,el}$ が負の高温側折曲げ点の場合、移動方向によらず径の縮むラチェットが生じることになる。

4. ラチェットひずみ推定式の提案

ここでは、平均半径 r 、板厚 t の円筒が階段状温度分布および直線折曲げ温度分布の移動を受ける場合について、3章のラチェットメカニズムを反映したラチェットひずみ推定法を提案する。ここでのラチェットひずみ推定法は次の仮定に基づいている。

- (1) 材料は完全弾塑性体とし、材料特性の温度依存性は考慮しない。
- (2) 軸方向曲げ応力は円周方向膜応力・ひずみ挙動に影響を及ぼさない。
- (3) 温度分布は一定の分布形状を保って十分長い距離を移動する。

4.1 階段状温度分布の移動の場合 図4(a)の ΔT の温度変化を有する階段状温度分布が Z の正の方向に移動していく場合、すなわち、cold front cycling の場合を考える。図4(a)中にはこの温度分布に対応した変形状態を模式的に示しており、記号 A-D は、この変形状態の位置を示している。

なお、図4(a)中の破線は温度分布形状を表すとともに、温度による自由熱膨張量 ($= \alpha \Delta T$) の表現もかねている。Aは温度変化部から十分遠方の応力の発生していない部分であり、高温部の自由熱膨張に等しい変形となっている。一方、Dは温度変化部から十分遠方の、塑性変形を終了した部分であり、3章に示したメカニズムで発生した正の塑性変形により、低温部の自由熱膨張よりも膨らんだ変形パターンとなっている。また、BおよびCは温度変化部分の直前および直後の部分である。温度分布の移動により、円筒の各部は $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ の履歴を受けることになる。ここでは、このような場合の変形挙動を次のように考え

た。

- (1) Aにおいては円周方向膜応力 σ_θ および熱ひずみを除く円周方向膜ひずみ ϵ_θ が共に零である。
- (2) B→Cの過程において $\alpha\Delta T$ の ϵ_θ が生じる。
- (3) Dにおいては σ_θ が零である。
- (4) A→Bの過程で生じる ϵ_θ は C→Dの過程で生じる ϵ_θ に等しい。

このとき、 σ_θ と ϵ_θ の応力ひずみヒステリシスループは図4(b)のようになり、1サイクルあたりのラチェットひずみ ϵ_θ^R は降伏応力を σ_y として次式で与えられる。

$$\epsilon_\theta^R = \alpha\Delta T - 2\sigma_y/E \quad (3)$$

あるいは、式(1)の関係を考慮して、次式で定義される円周方向弾性応力範囲 $\Delta\sigma_{\theta,el}$ を考えると、

$$\Delta\sigma_{\theta,el} = 2\sigma_{\theta,el} = E\alpha\Delta T \quad (4)$$

式(3)は次のようにも表現できる。

$$\epsilon_\theta^R = (\Delta\sigma_{\theta,el} - 2\sigma_y)/E \quad (5)$$

なお、温度分布の移動方向が逆方向の hot front cycling の場合、式(5)と同量の負のラチェットひずみが生じることになる。

4.2 直線折曲げ温度分布 図5(a)に示す T_0 の一様な温度分布が、 $Z=Z^*$ の位置で温度こう配 $k(=\Delta T/\Delta Z)$ に折り曲げられ、 Z の正の方向に移動し

(a) 温度分布と変形

(b) 円周方向膜応力と円周方向膜ひずみ

図4 階段状温度分布に対する変形と応力ひずみ挙動の仮定

ていく場合、すなわち、cold front cycling の場合を考える。図5(a)中にはこの温度分布に対応した変形状態を実線で模式的に示しており、記号A～Cはこの変形状態の位置を示している。なお、図5(a)中の破線は温度分布形状を表すとともに温度による自由熱膨張量 $(=\alpha\Delta T)$ の表現もかねている。

Aは温度折曲げ部から十分遠方の応力の発生していない部分であり、自由熱膨張に等しい変形となっている。一方、Cは温度折曲げ部から十分遠方の、塑性変形を終了した部分である。3章でふれたように、図5(a)の温度折曲げ部での $\sigma_{\theta,el}$ は正であり、正の塑性変形が発生しているため、自由熱膨張より膨らんだ変形パターンとなっている。また、Bは温度折曲げ点の部分である。温度分布の移動により、円筒各部はA→B→Cの履歴を受けることになる。ここでは、このような場合の変形挙動を次のように考えた。

- (1) Aにおいては円周方向膜応力 σ_θ および熱ひずみを除く円周方向膜ひずみ ϵ_θ が共に零である。
- (2) Cにおいては σ_θ が零である。

- (3) 自由熱膨張変形の温度折曲げ位置 D' とAを結ぶ線と、Cを通り Z 軸に平行な直線が交わる位置をDとする場合、 $D' \rightarrow D$ への平行移動を行うことにより、この温度分布に対する弾性変形〔図5(a)一点鎖線〕と弾塑性変形〔図5(a)実線〕が重なる。なお、図5中の ΔZ^* は D' とDの軸方向の距離を表している。

円筒の $Z < Z^*$ の部分の弾性解析による変位 y (自

(a) 温度分布と変形

(b) 円周方向膜応力と円周方向膜ひずみ

図5 直線折曲げ温度分布に対する変形と応力ひずみ挙動の仮定

由熱膨張からの変位)は図5中に示す軸方向座標系 x に対し, 前出の薄肉円筒の減衰長さ β^{-1} を用いて

$$y = F \exp(-\beta x) \cdot (\cos \beta x - \sin \beta x) \cdots \cdots (6)$$

と表せる⁽⁹⁾. ここで, 係数 F は次のように表せるものである.

$$F = akr / (4\beta) \cdots \cdots (7)$$

実線の弾塑性変形パターンにおいて ε_θ が最大となる B 点から C 点への移行の間に生じる円周方向膜ひずみは, 上記②により $-\varepsilon_y (= -\sigma_y/E)$ である. 弾塑性変形と弾性変形形状の類似性を考え, $X = \Delta Z^*$ の弾性変形上の点を B' とすると B' から C' (C に対応する弾性変形上の点) への移行の間に生じる円周方向ひずみも $-\varepsilon_y$ であるから,

$$\varepsilon_y = F/r \exp(-\beta \Delta Z^*) (\cos \beta \Delta Z^* - \sin \beta \Delta Z^*) \cdots \cdots (8)$$

と表せる. $\beta \Delta Z^*$ が十分小さいという条件を考えると ΔZ^* は次のように表せる.

$$\Delta Z^* = 1/(2\beta)(1 - r/F \cdot \varepsilon_y) \cdots \cdots (9)$$

したがって 1 サイクルあたりのラチェットひずみ ε_θ^R は次式で表せる.

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta^R &= ak\Delta Z^* = 2(F/r - \varepsilon_y) \\ &= 2(\sigma_{\theta,el} - \sigma_y)/E \cdots \cdots (10) \end{aligned}$$

ここで $\sigma_{\theta,el}$ は $X=0$ における最大値を表している. なお, 図5(a)のような温度分布では, 円周方向弾性膜応力が温度折曲げ点に関して対称形状となっており, 最大値が正であるため, 温度分布移動方向によらず径が膨らむラチェットが生じ, 1 サイクルあたりのラチェットひずみは式(10)で推定できる. 一方, 図1(b)中の高温側での折曲げ点の場合には, 絶対値最大の円周方向弾性膜応力が負であるため, 移動方向によらず径が縮むラチェットとなり, その値は式(10)の符号を変えることにより推定できる.

5. 弾塑性解析

5.1 解析の目的および方法 ここでは, 図1(a)の階段状温度分布および図1(b)の直線折曲げ温度分布の2ケースの温度分布が移動する場合について, 本論文で提案したラチェットメカニズムの考え方およびラチェットひずみ推定法の検証のため弾塑性解析を行った. ただし, 図1(b)の直線折曲げ温度分布は, 2箇所温度折曲げ部での事象が独立であるため, 1箇所のみの温度折曲げを考えることとした.

解析対象は図6に示すように, 平均半径が8475 mm, 板厚が50 mm, 全長8000 mmの円筒である. 用いたプログラムはABAQUSであり, 要素としては2節点の軸対称シェル要素(板厚方向積分点は9個)を

用いている. 要素数は階段状温度分布の場合400, 直線折曲げ温度分布の場合160であり, 軸方向に等分割している. 材料特性としては温度依存性を考えず, 縦弾性係数 $E=1.47 \times 10^5$ MPa, ポアソン比 $\nu=0.3$, 降伏応力 $\sigma_y=147$ MPa とし, 塑性硬化係数 $H(=d\sigma/d\varepsilon_p)$ としてはなるべく完全弾塑性体に近い数値とするため, $H=E/10^4$ とした. 線膨張係数は $\alpha=18.54 \times 10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ とした. 温度分布形状については, 表面での弾性応力強さ $\Delta S \{=|\Delta(\sigma_{z,el} - \sigma_{\theta,el})|\}$, Δ は符号を含めた変動幅を表す}が600 MPa程度となるように設定した.

まず, 階段状温度分布については, 温度差 $\Delta T=210^{\circ}\text{C}$, 温度こう配としては, ほぼ階段状とみなせるような値 $\Delta T/\Delta Z=3.5^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ とし, 図6に示すように, 初期一様温度 0°C の状態から温度分布を負荷し, cold front cycling を考えて3940 mm 移動させた後, 円筒全体を 0°C にもどすサイクルを1サイクルとし, 2サイクル分の解析を行った.

一方, 直線折曲げ温度分布の場合, 初期一様温度 0°C の状態から $\Delta T/\Delta Z=0.8^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ まで温度こう配を付け, 階段状温度分布の場合と同一方向に4000 mm 移動した後, 温度を 0°C の状態にもどすサイクルを2サイクル分解析した.

5.2 解析結果 階段状温度分布に対する弾性応力解析結果を図7(a)に示す. 円筒外表面での弾性応力強さ ΔS は587 MPa, 円周方向弾性膜応力 $\sigma_{\theta,el}$ は ± 264 MPa であった. 直線折曲げ温度分布に対する弾性応力解析結果を図7(b)に示す. 円筒外表面での弾性応力強さ ΔS は598 MPa, 温度折曲げ点での $\sigma_{\theta,el}$ は250 MPa であった. なお, これらの値はすべて要素重心での値である. また, ここでは板厚中央部での円周方向応力を円周方向膜応力とみなしている.

弾塑性解析による, 温度分布移動中の板厚中央部での円周方向ひずみの変化の様子を, 階段状温度分布の場合について図8に示す. 図8(a)の温度分布の負荷時に比べて, 温度分布移動が生じると, 図8(b)に示すようにひずみの最大値が上昇し, 図8(d)の温度分

図6 弾塑性解析モデル

布移動終了時点まで、そのひずみの最大値はほとんど変化しない。図 8 (c), (d) から、温度分布の移動につれて、ひずみのピークの後方に正の残留ひずみが生じてきている様子がわかる。図 9 (a) に階段状温度分布の移動の 1 サイクル終了後の板厚中央部での円周方向ひずみの残留パターンを示す。移動区間の中央部付近で平坦な部分を有する台形状の形状となっている。図 9 (a) 中には 2 サイクル終了後の残留ひずみパターンも併記しているが、1 サイクルめと類似の形状で、かつ、台形の山の高さは 1 サイクルめのものの 2 倍程度となっている。図 9 (b) には直線折曲げ温度分布の場合の残留ひずみパターンを示している。図 9 (a) と定性的には類似の結果であるが、1 サイクルあたりのラチェットひずみは階段状温度分布の場合に比べて小さい。

階段状温度分布および直線折曲げ温度分布の場合の移動区間中央部の板厚中心部での σ_θ と ε_θ のヒステリシスループを図 10 に示す。図 10 (a) の階段状温度分布および図 10 (b) の直線折曲げ温度分布とも、1 サイクルめと 2 サイクルめで同程度のラチェットひずみを生じ、 ε_θ が正の方向に、すなわち、円筒が膨らむ方向に変形していく様子がわかる。

6. 考 察

6.1 ラチェットメカニズムの検討 弾塑性解析 で得られた温度分布の移動方向とラチェット変形パタ

(a) 階段状温度分布

(b) 直線折曲げ温度分布

図 7 階段状温度分布および直線折曲げ温度分布に対する弾性解析結果

図 8 温度分布移動中の板厚中央部の円周方向ひずみ分布 (階段状温度分布の場合)

(a) 階段状温度分布

(b) 直線折曲げ温度分布

図 9 温度分布移動終了後の残留ひずみパターン (板厚中央部での円周方向ひずみ)

ーンの関係は、提案したラチェットメカニズムと対応している。また、図10のヒステリシスループは、直線折曲げ温度分布の場合の圧縮側の弾性挙動に若干の差はあるものの、基本的に図4および図5に示すヒステリシスループの考え方と対応しており、ラチェットひずみ推定式の基礎となる応力ひずみ挙動の仮定の妥当性を示している。

なお、図7で、階段状温度分布については、温度変化部に関し左右逆対称の、一方、直線折曲げ温度分布については、温度折曲げ部に関し左右対称の円周方向弾性膜応力分布となっている。したがって、hot front cycling の場合、階段状温度分布については図9(a)とは符号が逆の、径が縮むラチェット変形となり、一方、直線折曲げ温度分布については、図9(b)と全く同じラチェット変形となると考えられる。

Ponter ら⁽⁸⁾は、軸力と階段状温度分布を受ける円筒のラチェット発生限界について検討しており、軸力がない場合でも温度分布の移動があるとラチェット変形が生じ、温度分布の移動がないとラチェット変形が生じにくいことを示しているが、そのメカニズムは具体的に示されていない。また、Ponter らは、cold front cycling の実験では円筒が膨らむラチェット変形が生じ、一方、hot front cycling の実験では円筒が縮むラチェット変形が生じることを示している。しかし、彼らの理論検討で説明できるのは円筒が縮むラチェット変形のみであり、円筒が膨らむラチェット変形は説明できないとしている。

本論文で提案したラチェットメカニズムの考え方は、温度分布の移動の有無および移動方向の差と、ラチェット変形挙動の対応を説明できる点で、より現実に近いものと考えられる。

なお、円筒が一定の内圧と板厚方向温度こう配による繰返し熱応力を受ける場合の、いわゆる“Bree タイプ”のラチェットのメカニズムは、2本棒モデルの考え方により説明されることが多い⁽¹⁰⁾。これと同様に、

本論文で対象とした、一次応力がない状態で温度分布移動を受ける場合のラチェットメカニズムは長さが等しくなるように制御された3本棒において、3本の棒の温度を順次変えていくことによっても説明できることを付記しておく。

6・2 ラチェットひずみ推定式の検討 5章の弾塑性解析結果に対して、解析に用いた材料特性を用いて式(5)および式(10)による推定を行った。推定結果を弾塑性解析結果と対比して表1に示す。解析結果は1サイクルめの値を示しているが2ケースとも比較的良好に合っている。

本報の推定式は完全弾塑性体を仮定したものであり、完全弾塑性体に近い挙動を仮定した弾塑性解析結果とよく一致していることで、ラチェットひずみ推定法として有効であることが示された。

また、式(5)および式(10)はラチェットひずみ推定式であると同時に、ラチェット変形の発生限界を示している。すなわち、式(5)および式(10)が正となる条件は

$$\Delta\sigma_{\theta,el} \geq 2\sigma_y \quad (\text{階段状温度分布})$$

$$\sigma_{\theta,el} \geq \sigma_y \quad (\text{直線折曲げ温度分布})$$

であり、これがラチェット変形発生限界であると考えられる。なお、階段状温度分布については、降伏応力の温度依存性を考えない場合の、Ponter ら⁽⁸⁾によるものと一致している。

本論文では、従来明らかでなかった、一次応力が零の条件での液面熱ラチェット現象のメカニズムおよびラチェットひずみ推定式を提案しており、工学的に有用な結果を得ていると考えられるが、次のような検討により、さらに高度な推定式の展開が可能と考えられる。すなわち、

(1) 材料特性(縦弾性係数および降伏応力)の温度依存性の考慮

(2) 材料の加工硬化および繰返し硬化(軟化)の

表1 1サイクルあたりのラチェットひずみに
関する弾塑性解析結果と推定結果の比較

No.	Temperature distribution	Ratcheting strain in a cycle		Note
		Analytical results	Predicted results	
1	Step change	0.17%	0.16%	$E = 1.47 \times 10^5 \text{ MPa}$ $\sigma_y = 147 \text{ MPa}$ $\Delta\sigma_{\theta,el} = 528 \text{ MPa}$ Equation(5)
2	Linear change	0.13%	0.14%	$E = 1.47 \times 10^5 \text{ MPa}$ $\sigma_y = 147 \text{ MPa}$ $\sigma_{\theta,el} = 250 \text{ MPa}$ Equation(10)

図10 移動区間中央部の板厚中央部での円周方向
応力ひずみヒステリシスループ

考慮などである。実験結果との対比を含めた検討を今後行っていく予定である。

7. ま と め

従来、明らかでなかった、一次応力がない場合の液面熱ラチェットに関し、ラチェットメカニズムおよびそれに基づくラチェットひずみ推定法を提案するとともに、解析的検討を加えた。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 軸方向温度分布の移動が液面熱ラチェットひずみ発生の駆動力であり、一次応力なしの条件でもラチェットが生じ得る。

(2) 軸方向温度分布の移動の有無および移動の方向の差によるラチェット挙動の差は、薄肉円筒の円周方向膜応力を基にしたラチェットメカニズムで説明できる。

(3) 代表的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、弾塑性解析結果と対比したところ、よい対応が見られた。

文 献

- (1) 鶴戸口・朝田・三橋・広江, 機論, 42-359 (昭51), 1982.
- (2) 井上・猪狩・田中・吉川, 材料, 24 (昭50), 170.
- (3) 白鳥・池上・吉田・ほか2名, 機論, 47-416, A (昭56), 441.
- (4) 安藤・岡林, 原子力プラントの構造設計, (昭52), 76, 東京大学出版会.
- (5) Bree, J., *J. Strain Anal.*, 3 (1968), 122.
- (6) Roche, R. L., ほか2名, *Nucl. Eng. Des.*, 71 (1982), 51.
- (7) Gokhfeld, D. A. and Cherniavsky, O. F., *Limit Analysis of Structures at Thermal Cycling*, (1980), 450, Sijthoff & Noordhoff.
- (8) Karadeniz, S. and Ponter, A. R. S., ほか1名, *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technol.*, 109 (1987), 387.
- (9) Roark, R. J., ほか1名, *Formulas for Stress and Strain*, (1975), 460, McGraw Hill.
- (10) 例えば, Ponter, A. R. S. and Karadeniz, S., *J. Appl. Mech.*, 52 (1985), 877.

討 論

〔質問〕 鈴木章彦

(石川島播磨重工業(株)技術研究所)

(1) 液面熱ラチェットを考える場合、温度分布パターンが振動的に移動する、すなわち Hot front と Cold front が交互に生ずる場合を対象とするのが一般的と思うが、本論文で取扱った温度変化パターンは実機との対応を考えてのことか。

(2) 図4(b)に示されたラチェットメカニズムの説明図において、B点でマイナス側の塑性ひずみが生じていないのはなぜか。図1(a)の応力分布からみるとB点とC点において同量の符号の異なる塑性ひずみが生ずると考えたほうが自然と思うがいかがか。

〔回答〕 (1) ご指摘のように、実機では Hot front と Cold front が交互に生じたり、また、Hot front と Cold front で応力の大きさも異なるなど複雑な負荷条件となっている。本論文の目的はこのような複雑な実機の負荷条件に対する検討の第一歩として、単純化した温度分布形状や移動方式に対する基本的ラチェット挙動を明らかにすることにある。実機への適用のためには、本論文で得られた知見をもとにして、より複雑な温度分布形状や移動方式に対する検討を行う必要がある。

(2) 温度分布の移動がある場合の弾塑性変形と弾性変形を対比して回答する。Cold front の場合の温度と弾塑性変形を示した図4(a)中に弾性変形を一点鎖

線で併記したものを付図1に示す。弾性変形の場合、EFの温度変化部から十分離れたAおよびD'はともに自由熱膨張量(破線)に等しい変形となっており、円筒上の一点は温度分布の移動に伴ってA→B'→C'→D'の履歴を経験する。図1(a)からもわかるように、A→B'の過程で $-0.5\alpha\Delta T$ 、B'→C'の過程で $\alpha\Delta T$ 、C'→D'の過程で $-0.5\alpha\Delta T$ の円周方向膜ひずみが生じるため、弾塑性変形のB点に対応するB'点ではご質問にあるように降伏ひずみを越える負のひずみとなる。しかし、弾塑性変形の場合、図3に示すようなメカニズムで温度分布移動による膨張のラチェットひずみがD点に生じ、弾性変形の場合とは異なる変形となる。すなわち、本文中でも示したように、Dでは円周方向膜応力 σ_θ が零であり、C→Dの過程は降伏応力

付図1 Cold front cyclingでの温度と変形
(階段状温度分布の場合)

からの除荷過程であることを考えると、CD間で生じるひずみは降伏ひずみに等しい。高温部(AB)を縮める力と低温部(CD)を膨張させる力のバランスから、AB間とCD間で生じるひずみが等しいと考えているので、AB間で発生するひずみは降伏ひずみに等しく

なる。したがって、図4(b)に示すように、B点は降伏応力に留まり、塑性変形は発生しない。図4(b)の応力ひずみ挙動は図10(a)とよく対応しており、その妥当性は検証されたと考えている。