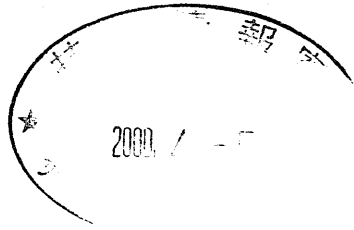
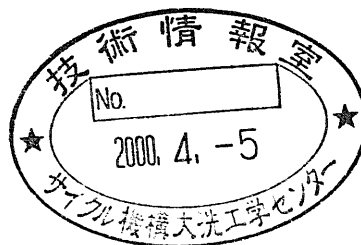


分置



被覆管スエリング肉厚方向勾配による応力誘起の解析 (研究報告書)

1999年11月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
してください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

被覆管スエリング肉厚方向勾配による応力誘起の解析

(研 究 報 告)

上羽 智之*、鵜飼 重治*、浅賀 健男*

要 旨

高速炉の被覆管は照射によってスエリングするが、被覆管温度の肉厚方向勾配によってスエリングに肉厚方向差が生じ、被覆管に二次応力が発生すると考えられる。燃料高燃焼度化に伴い被覆管のスエリングが顕著になると、このような二次応力が燃料ピンの健全性に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、スエリング肉厚方向勾配を取り入れた被覆管の照射変形解析を有限要素法解析コード FINAS を用いて実施し、この二次応力を評価した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) スエリング肉厚方向差による二次応力は、主としてスエリングの潜伏期間の肉厚方向勾配によって発生する。この二次応力はスエリングで促進される照射クリープによって照射末期には十分緩和される。
- (2) 試行的に二次応力を含めた照射中の被覆管応力計算値の最大値を PNC316 の設計引張強さと比較した結果、前者は後者を十分に下回った。
- (3) 応力依存性を考慮したスエリング式を用いて、被覆管の応力がスエリングを促進する場合の二次応力を解析した。その結果、応力によってスエリングは促進するが、同時に照射クリープによる緩和が有効に働き、スエリングに応力依存性が無い場合と到達応力レベルには差がない。

Analysis of the secondary stress in the fuel pin cladding due to the swelling gradient through the direction of its thickness

Tomoyuki Uwaba*, Shigeharu Ukai* ,Takeo Asaga*

Abstract

In the fast reactor the swelling of the fuel cladding occur due to the irradiation. Under the irradiation, the temperature gradient of the cladding through the direction of its thickness causes the swelling gradient and this will cause the secondary stress.

In this study, we analyzed this secondary stress using the finite element model of the irradiation induced deformation of the cladding by FINAS code. The result of this analysis is summarized as follows.

- (1) The secondary stress is mainly caused by the gradient of the incubation period of the swelling. The secondary stress becomes very small at the end of irradiation due to the relieving of the stress by the irradiation creep deformation accelerated by the swelling.
- (2) The calculated maximum stress including the secondary stress under the irradiation is compared with the design value of the ultimate tensile strength for PNC316 for trial. The calculated value are lower than the design value.
- (3) The effect of the swelling accelerated by the stress is analyzed using the correlation between the swelling and the stress. The result shows that the increasing of the secondary stress due to the acceleration of the swelling is very small because the irradiation creep deformation relieves the stress more effectively by the acceleration of the irradiation creep rate due to the swelling.

被覆管スエリング肉厚方向勾配による応力誘起の解析

目次

1.	はじめに	1
2.	解析条件	1
3.	被覆管応力解析モデル	1
3.1	FINAS解析モデル	1
3.2	温度とFluxの被覆管肉厚方向分布の設定	2
3.3	照射履歴の設定	2
3.4	被覆管スエリング式と照射クリープ歪式	2
3.5	被覆管外径変化率計算結果	4
4.	解析ケース	4
5.	被覆管応力解析結果	4
5.1	解析ケース1	4
5.2	解析ケース2	5
5.3	解析ケース3	6
5.4	解析ケース4	8
6.	被覆管周方向応力最大値と応力制限値との比較	8
7.	検討	9
7.1	スエリング肉厚方向勾配による二次応力の履歴	9
7.1.1	解析条件	9
7.1.2	解析ケース	9
7.1.3	解析結果	9
7.2	スエリングの応力効果	12
7.2.1	応力依存スエリング簡易式	12
7.2.2	解析条件	12
7.2.3	解析結果	13
8.	まとめ及び今後の課題	14
9.	謝辞	15
10.	参考文献	16

図リスト

図 3.1	FINAS 解析モデル	17
図 3.2	ピン内圧履歴	18
図 3.3	被覆管温度履歴	18
図 3.4	Flux 履歴	18
図 3.5	スエリング履歴	19
図 3.6	スエリング潜伏期間の肉厚方向分布	20
図 3.7	定常スエリング速度の肉厚方向分布	20
図 3.8	照射クリープ歪式の照射量比例項 $A(T, \sigma)$ の温度 T 、相当応力 σ 依存性	21
図 3.9	照射クリープ歪式のスエリング比例項 $B(T, \sigma)$ の温度 T 、相当応力 σ 依存性	21
図 5.1	被覆管外面における周方向応力の履歴 (解析ケース 1)	22
図 5.2	被覆管肉厚中心における周方向応力の履歴 (解析ケース 1)	23
図 5.3	被覆管内面における周方向応力の履歴 (解析ケース 1)	24
図 5.4	被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 2)	25
図 5.5	被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 2)	26
図 5.6	被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 2)	27
図 5.7	被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 3)	28
図 5.8	被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 3)	29
図 5.9	被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 3)	30
図 5.10	周方向応力及びスエリングの被覆管肉厚方向分布 (解析ケース 3、Step200)	31
図 5.11	周方向応力及びスエリングの被覆管肉厚方向分布 (解析ケース 3、Step300)	32
図 5.12	被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 4)	33
図 5.13	被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 4)	34
図 5.14	被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 4)	35
図 5.15	周方向応力及びスエリングの被覆管肉厚方向分布 (解析ケース 4、Step200)	36
図 7.1	被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 5)	37
図 7.2	被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 5)	38
図 7.3	被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 5)	39
図 7.4	被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース 6)	40

図 7.5	被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 6）	41
図 7.6	被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 6）	42
図 7.7	被覆管外面における周方向応力の履歴（解析ケース 5、解析ケース 6）	43
図 7.8	被覆管内面における周方向応力の履歴（解析ケース 5、解析ケース 5'）	44
図 7.9	被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 3、解析ケース 7、解析ケース 8）	45
図 7.10	被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 3、解析ケース 7、解析ケース 8）	46
図 7.11	被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 3、解析ケース 7、解析ケース 8）	47
図 7.12	被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 3、解析ケース 9）	48
図 7.13	被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 3、解析ケース 9）	49
図 7.14	被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース 3、解析ケース 9）	50

1. はじめに

高速炉では照射によって被覆管のスエリングが発生するが、被覆管の肉厚方向温度勾配が原因でスエリングに肉厚方向差が生じることに伴い、被覆管内に二次応力が発生すると考えられる。高速実験炉「常陽」や米国の FFTF で比較的高い照射量（～100dpa 程度）まで燃料ピン照射された PNC316 鋼被覆管について照射後の微細組織観察を行った結果、ボイドの発達程度が被覆管の肉厚方向位置で異なっていたことが分かっている。

¹⁾ 燃料の高燃焼度化に伴い被覆管のスエリングが顕著に増加するとスエリングの肉厚方向勾配も増加すると考えられるので、これに伴う二次応力が照射中の被覆管の健全性に及ぼす影響を評価しておく必要がある。

本研究では、有限要素法解析コード FINAS を用いて、典型的な高速炉燃料の照射条件でのスエリング肉厚方向勾配を考慮した被覆管の照射変形解析を実施し、被覆管に発生する二次応力を評価した。

2. 解析条件

解析対象とする被覆管の寸法は仏国の高速炉である Phenix の燃料の仕様を参考に設定した。照射条件（温度および照射量）についても同様に高速炉の照射条件を参考にし、特に炉心中心部で被覆管のスエリングが顕著（15 vol.%程度）となるための照射量を設定した。従って、以下の仕様および照射条件は解析コードによる被覆管二次応力解析のための仮想的なものである。

- ・ 被覆管外径／肉厚 ： 6.55mm／0.45mm
- ・ 照射温度（被覆管肉厚方向勾配） ： 被覆管内面を 505℃、外面を 465℃ する。中間部分の温度は被覆管内面および外面の温度を直線内層した温度とする。
- ・ 高速中性子照射量 ： 104dpa（照射末期）

3. 被覆管応力解析モデル

3.1 FINAS 解析モデル

図 3.1 に FINAS 解析モデルの概念図を示す。このモデルの使用要素は一般化平面歪要素の QPLAN9 である。このモデルでは軸方向に対し一般化平面歪近似を用いているので軸方向メッシュ分割をしていない。肉厚方向には 50 要素にメッシュ分割してある。この解析モデルでは被覆管の周方向に対して図に示すような拘束条件を与えることにより、円筒管の一部をモデル化している。この解析モデルを用いて、照射変形（弾性＋スエリング＋照射クリープ）解析を実施し、照射中に被覆管に生じる応力履歴を解析した。

3.2 温度と Flux の被覆管肉厚方向分布の設定

この解析モデルには、温度と Flux の被覆管肉厚方向温度分布を与えることができる。被覆管肉厚方向温度分布は「2.」で設定した温度勾配とした。Flux の被覆管肉厚方向分布は一定とした。

3.3 照射履歴の設定

解析の照射履歴として設定したピン内圧、被覆管温度、中性子照射量の履歴を図 3.2～図 3.4 に示す。これらの履歴を以下で説明する。

1Step で 0.23MPa のピン内圧と 386.5℃ の温度（冷却材温度であり被覆管肉厚方向一定とする）と設定高速中性子束を与える。2Step で被覆管の温度を設定温度にまで上昇させる。設定温度および設定高速中性子束は照射期間中（2Step～422Step）一定とする。ピン内圧はシャットダウン直前に相当する 422Step で 10MPa にまで上昇させる。422Step で中性子照射量は 104dpa に達する。その後、高速中性子束をゼロにし（423Step）、温度を 386.5℃ まで低下させた後（428Step）、ピン内圧を 4.45MPa、温度を 20℃ に下降させる（433Step）。

3.4 被覆管スエリング式と照射クリープ歪式

本解析に用いた被覆管のスエリング式と照射クリープ歪式は次の通りである。以下の式 (3.1) および式 (3.3) は Phenix 燃料の BDI (Bundle-Duct Interaction) 解析用に仏国 CEA より JNC に提示された式を本解析用にパラメータ等を若干修正したものである。²⁾

① スエリング式 1

$$\Delta V/V = R(T) \cdot (\phi t - \tau(T)) \quad \text{-(3.1)}$$

$$R(T) = R_0 / \exp(((T - T_R)/A)^2)$$

$$\tau(T) = \tau_0 / \exp(((T - T_\tau)/B)^2)$$

ここで、

$\Delta V/V$:スエリング量 (vol.%)

R :定常スエリング速度 (vol.%/dpa)

τ :潜伏期間 (dpa)

ϕt :中性子照射量 (dpa)

T :照射温度 (℃)

$R_0, T_R, A, \tau_0, T_\tau, B$ はパラメータであり、値は以下の通りである。

$$R_0 = 0.221, T_R = 491.0, A = 62.4, \tau_0 = 77.06, T_\tau = 515.45, B = 51.797$$

このスエリング式では、スエリング量 $\Delta V/V$ は、定常スエリング速度 R に照射量

とスエリング潜伏期間 τ との差を乗じた値である。また、 R と τ は温度の関数である。図 3.5 に温度 500℃ の場合のスエリング履歴を示す。この式では、スエリングの立ち上がりの曲率がないため、照射量がスエリング潜伏期間を過ぎると同時に定常スエリング速度でスエリングが増加する。図 3.6、図 3.7 にスエリング式 1 のスエリング潜伏期間 τ および定常スエリング速度 R の被覆管肉厚方向分布を示す。設定した肉厚方向温度分布では、被覆管外面側でスエリング潜伏期間が短く、内面側で長くなっている。定常スエリング速度は被覆管の外面側が小さく、肉厚中心よりも少し内面側で最大となっている。

② スエリング式 2

スエリング式 1 のスエリング潜伏期間を一定値としたスエリング式である。

③ スエリング式 3

スエリング式 1 にスエリング立ち上がりの曲率を持たせたスエリング式であり、以下の通りである。

$$\Delta V/V = R \cdot \left[\phi t + 1/\alpha \cdot \ln \left\{ (1 + \exp(\alpha (\tau - \phi t))) / (1 + \exp(\alpha \tau)) \right\} \right] \quad -(3.2)$$

ここで、

$\Delta V/V$:スエリング (vol.%)
ϕt	:中性子照射量 (vol.%/dpaF)
R	:定常スエリング速度 (dpaF)
τ	:潜伏期間 (dpaF)
α	:スエリングの立ち上りの曲率

である。

R と τ はスエリング式 1 と同様である。曲率 α を変化させることによりスエリングの立ち上がり方が変わるようになり、 α が小さいほどスエリングの立ち上がり方が緩やかとなる。図 3.5 には、温度 500℃ の場合のスエリング式 3 のスエリング履歴をスエリング式 1 の場合と比較して示してある。今回の解析では、 $\alpha = 0.5$ とした。

(2) 照射クリープ歪式

本解析に使用した照射クリープ歪式は以下の通りである。

$$\Delta \varepsilon = (2 \cdot K \cdot \alpha \cdot \sigma + K) \cdot \Delta \phi t \cdot \sigma + \alpha \cdot \sigma \cdot \Delta S \quad -(3.3)$$

ここで、

ε	:照射クリープ歪増分 (--)
ΔS	:スエリング量増分 (vol.%)
$\Delta \phi t$:中性子照射量増分 (dpa)
σ	:相当応力 (MPa) である。

K と α は以下の値である。

$$K=1.3 \cdot 10^6 + 2.547 \cdot 10^5 \cdot \exp(-23794/(T+273))$$

$$\alpha = \text{MIN} \left[(7.872 \cdot 10^2 \cdot \exp(-9199/(T+273))), (5.443 \cdot 10^2 \cdot \exp(-1759/(T+273))) \right]$$

T は照射温度 (°C) である。また、MIN [] と MAX [] は、[] 内の値を比較する関数を意味するものであり、例えば $X > Y$ という条件で $Z = \text{MAX} [X, Y]$ では $Z = X$ となり、 $Z = \text{MIN} [X, Y]$ では $Z = Y$ となる。

この照射クリープ歪式では、照射クリープ歪 ϵ は応力 σ の二乗の項を含む 2 次関数であり、照射量に比例する項とスエリングに比例する項からなっている。また、これらの項は温度の関数となっている。式 (3.3) の第一項目の照射量比例項を $A(T, \sigma)$ 、第二項目のスエリング比例項を $B(T, \sigma)$ とし、460～540°C におけるこれらの項の照射温度および相当応力依存性を図 3.8、図 3.9 にそれぞれ示す。

3.5 被覆管外径変化率解析結果

スエリング式 1 を用いた場合の照射後被覆管外径変化率 (スエリング+内圧クリープ) を解析した結果、約 7% (スエリング寄与分は約 5%) となった。照射末期の被覆管のスエリングが 15 vol.% 程度あれば、照射中のスエリング肉厚方向勾配による二次応力は有意なレベルになると考えられるので、この二次応力が被覆管の破損を生じさせるレベルかどうかを検討することは可能であると考えられる。この検討は「6.」で行う。

4. 解析ケース

解析は以下の 4 ケースを実施した。いずれの解析ケースも「3.2」、「3.3」にて設定した照射条件を用いた。これらの各解析ケースでは使用したスエリング式が以下の通りとなっている。

- 解析ケース 1 被覆管スエリングが発生しないケース
- 解析ケース 2 スエリング式 2 を用いたケース
- 解析ケース 3 スエリング式 1 を用いたケース
- 解析ケース 4 スエリング式 3 を用いたケース

5. 被覆管応力解析結果

5.1 解析ケース 1

ここでは、スエリングが発生しない場合の解析を実施した。図 5.1～図 5.3 に、被覆管の外表面、肉厚中心、内面における周方向応力の履歴を示す。これらの図より、照射の初

期に周方向応力が比較的急激に変化しており、この変化により被覆管外面では引張方向、内面では圧縮方向になっている。この周方向応力の変化は被覆管の肉厚方向に温度分布が発生したことによるものである。図 3.6 に示すような被覆管の肉厚方向温度分布に対応して被覆管の肉厚方向に熱膨張歪の分布が生じる。この熱膨張歪は被覆管内面側で大きく、外面側で小さくなるため、外面側では、内面側のより大きな膨張によって引っ張られて周方向応力は引張方向となるが、内面側では外面側に拘束されることにより、周方向応力は圧縮方向となる。これより、被覆管肉厚方向の周方向応力分布としては外面側が引張方向で、内面側が圧縮方向となる。このような熱膨張歪の被覆管肉厚方向分布によって生じた周方向応力は照射クリープによって緩和され、比較的初期 (約 Step100) において、周方向応力は、被覆管内面、肉厚方向、外面で同程度 (約 17MPa) となる。その後はピン内圧の上昇により周方向応力は緩やかに増加していくが、シャットダウン直前まで、被覆管内面、肉厚方向、外面で周方向応力に差はほとんど生じていない。次に、シャットダウン時 (Step422~433) での周方向応力の履歴を見ると、被覆管内面では Step422~428 で周方向応力は増加し、Step428~433 で減少している。Step422~428 での周方向応力の変化は被覆管の温度が肉厚方向に一定になることによって生じるものである。Step428~433 での周方向応力の減少は、被覆管温度が室温に低下することに伴いピンの内圧が減少することによるものである。

5.2 解析ケース 2

ここでは、スエリング式 2 を用いることにより、定常スエリング速度の温度依存性を変化させずに (式 (3.1) の定常スエリング速度を用いる) スエリング潜伏期間の温度依存性がない場合の解析を実施した。この場合、スエリング潜伏期間は被覆管の肉厚方向で一定となるので、スエリングの被覆管肉厚方向勾配は定常スエリング速度の温度依存性によって生じるものとなる。定常スエリング速度の被覆管肉厚方向分布は図 3.7 に示すように、被覆管の外面側が低く、肉厚中心よりもやや内面側で最大となっている。被覆管外面、肉厚中心、内面における周方向応力履歴をスエリング履歴とともに図 5.4 ~ 図 5.6 に示す。図よりスエリング潜伏期間を温度に関係なく一定としているため、発生時期は肉厚方向のどの位置においても同時期 (約 240Step) である。また、照射初期 (Step1~Step100) を除き、周方向応力はピン内圧の増加に伴い増加していくが、スエリングが発生すると同時に、比較的短期間に周方向応力が変化しているのが分かる。この周方向応力の変化は、被覆管の外面側では増加 (引張方向に変化) し、肉厚中心と内面では減少 (圧縮方向に変化) している。このように、スエリング発生時に被覆管の肉厚方向位置によって周方向応力の変化の仕方が異なるのは、定常スエリング速度の温度依存性があるためである。すなわち、肉厚中心から内面側では、定常スエリング速度が被覆管外面側に比較して高いために被覆管の外面側の部分から拘束されて周方向応力は圧縮方向になるが、逆に、被覆管外面側は内面側の部分から引っ張られ周方向応力は引張方向となる。このような定常スエリング速度の被覆管の肉厚方向差によって生じる周方向応力の変化は照射クリープによって比較的短期間に緩和される。その後は周方向応

力は照射末期まで緩やかに続くようになる。

解析ケース1と解析ケース2とで周方向応力履歴解析結果を比較する。まず、解析ケース2でスエリングが発生するまでは、周方向応力の履歴は、両ケースで全く同じである。解析ケース2でスエリング発生直後に短期間に生じる周方向応力の変化が生じた後は、周方向応力は緩やかに上昇していくが、解析ステップ数の増加に対する応力増加の度合いは両ケースで同程度である。これより、解析ケース2のスエリング発生後の周方向応力の緩やかな増加はピン内圧の上昇によるものが主であり、定常スエリング速度の肉厚方向差はほとんど影響していないことが分かる。

5.3 解析ケース3

ここでは、スエリング式1を用いて解析を実施した。被覆管外面、肉厚中心、内面における周方向応力履歴をスエリング履歴と合わせて図5.7～図5.9に示す。

(1) スエリング発生前

スエリング発生前における被覆管の周方向応力履歴は解析ケース2と同様である。すなわち、照射初期において生じる被覆管肉厚方向温度分布に伴い熱膨張歪みが内面側で大きく、外面側で小さくなるため、周方向応力は内面側で圧縮、外面側で引張りとなる。その後は、照射クリープの発生により応力は緩和され、内圧の上昇に伴い応力は比較的緩やかに増加する。

(2) スエリング発生後

① 被覆管外面

図3.6のスエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向分布より、スエリングは被覆管外面から発生する。外面でスエリングが発生する(約120Step)と外面での周方向応力は急激に圧縮方向に変化する。これは、この時点で被覆管外面よりも内側ではスエリングが発生していないため、被覆管外面でのスエリングの発生により、外面が内側の部分から拘束されるためである。スエリング発生後は、照射クリープと内側の部分でのスエリングの発生によってこの周方向応力は緩和される。被覆管内面のスエリングが発生する約300Step以降の周方向応力履歴は解析ケース2の被覆管外面の周方向応力履歴と同様となる。

② 被覆管肉厚中心

被覆管外面側でスエリングが発生する期間(約120Step～約220Step)では、このスエリングの発生によって被覆管肉厚中心は引っ張られるため周方向応力は引張方向に変化する。被覆管肉厚中心でスエリングが発生する(約220Step)と、周方向応力は急激に減少し圧縮方向に変化する。スエリング発生後は、照射クリープと被覆管の内面側におけるスエリングの発生によって周方向応力は緩和される。被覆管内面でスエリングが発生する約Step300以降の周方向応力履歴は解析ケース2の被覆管肉厚中心の周方向応力履歴と同様となる。

③ 被覆管内面

被覆管肉厚方向で、スエリング発生時期が最も遅いのは被覆管内面である。被覆

管内面よりも外面側でスエリングが発生する期間(約 Step120～約 Step300)では、このスエリングの発生によって被覆管内面は引っ張られ、被覆管内面における周方向応力は引張方向に増加して行く。被覆管内面でスエリングが発生する約 Step300 の直前で周方向応力は最大(約 325MPa)となる。この周方向応力は、シャットダウン時の 422Step～428Step での応力増加時の周方向応力極大値(約 127MPa)よりも大きく、照射中に被覆管内に発生する最大の引張周方向応力である。被覆管内面でスエリングが発生すると周方向応力は急激に減少するが、その後の周方向応力の履歴は解析ケース 2 の被覆管内面の周方向応力履歴と同様となる。

次に、周方向応力の被覆管肉厚方向分布を見てみる。図 5.10 に、200Step での周方向応力の被覆管肉厚方向分布をスエリングの肉厚方向分布とともに示す。図より、この時点では、スエリングは、被覆管の肉厚中心より若干外面側から外面において生じている。周方向応力に着目すると、スエリングが生じている領域では周方向応力は圧縮方向であり、スエリングが生じていない領域では周方向応力は引張方向である。この周方向応力はスエリングが発生する境界である肉厚中心より若干外面側で急激に変化している。更に時間が経過した時点(300Step)での周方向応力の肉厚方向分布を見てみる。図 5.11 にこの時点での周方向応力とスエリングの被覆管肉厚方向分布を示す。この時点では、被覆管内面でスエリングが発生した直後であるが、その他の被覆管肉厚方向領域では既にスエリングは発生している。また、内面付近で周方向応力は急激に引張方向に増加している。また、この時点では被覆管肉厚方向全域において周方向応力は引張方向となっている。周方向応力肉厚方向分布がスエリング発生境界部付で急激に変化するの、スエリングが発生していない部分では周方向応力は引張方向であるが、スエリング発生部では照射クリープによる応力緩和が働き周方向応力は圧縮方向に一定になるため、スエリング発生境界部で周方向応力の方向が変化するためである。

以上の解析ケース 3 の結果をまとめると、スエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向差が周方向応力履歴に及ぼす影響は以下の通りである。

- ・着目する被覆管肉厚方向位置(着目位置)におけるスエリング潜伏期間よりもスエリング潜伏期間が短い肉厚方向位置でスエリングが発生している期間は、このスエリングによって、着目位置での周方向応力は引張方向に増加する。更に、着目位置でスエリングが発生すると、着目位置での引張方向の周方向応力は減少し、圧縮方向に変化する場合がある。その後は、照射クリープと着目位置よりもスエリング潜伏期間が長い肉厚方向位置におけるスエリングの発生により周方向応力は緩和される。このようなスエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向差に起因して生じる周方向応力の極大値は照射末期時の応力を上回り照射中に被覆管に発生する周方向応力の最大値となる場合がある。被覆管肉厚方向全域でスエリングが発生した後は、周方向応力は、ピン内圧の上昇により緩やかに増加する。

5.4 解析ケース 4

ここではスエリングの立ち上がりの曲率を持たせたスエリング式 3 を用いて被覆管の応力履歴を解析した。被覆管外面、肉厚中心、内面における周方向応力の履歴を図 5.12～図 5.14 に示す。これらの図より、解析ケース 3 の結果と比較すると、スエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向差に起因する周方向応力の変化が緩やかである。また、解析ケース 3 と同様に、この周方向応力の変化に伴い周方向応力が最大となる位置は被覆管内面であり、その時期は被覆管内面でスエリングが発生する直前であるが、この周方向応力最大値は解析ケース 3 の値よりも小さい。これは、図 3.5 に示すようにスエリング式 3 ではスエリングの立ち上がりに曲率があるため、スエリングが潜伏期間よりも若干早くから発生し、スエリング潜伏期間を過ぎて定常スエリング速度になるまで緩やかにスエリング速度が増加するためである。すなわち、解析ケース 3 ではスエリング潜伏期間が終了するまでスエリングは発生しないので、スエリング潜伏期間が終了するまで周方向応力は引張方向に増加するが、スエリング潜伏期間を過ぎると定常スエリング速度でスエリングが増加し始め、周方向応力は急激に減少する。一方、解析ケース 4 では、スエリング潜伏期間が終了する少し前からスエリングが発生するため、周方向応力はそこで増加しなくなり、その後はスエリングの増加によって周方向応力は減少する。しかし、スエリング速度は潜伏期間を過ぎて定常スエリング速度に達するまでの間は緩やかに増加していくため、解析ケース 3 に比較して周方向応力の減少の仕方は緩やかである。次に、Step200 における周方向応力の被覆管肉厚方向分布をスエリング分布とともに図 5.15 に示す。図より、スエリングが発生している部分では周方向応力は圧縮方向に生じており、スエリングが発生していない部分では周方向応力は引張方向に生じている。被覆管肉厚方向においてスエリングが発生する境界の肉厚中心の近傍において周方向応力は変化しているが、図 5.10 の解析ケース 3 の解析結果と比較すると、この周方向応力の変化は緩やかである。

以上より、スエリング式がスエリング潜伏期間を過ぎると定常スエリング速度でスエリングが生じるような特性である場合、スエリングの立ち上がり方が緩やかな特性である場合に比較して、スエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向差に起因して生じる周方向応力の変化は急激になることが分かる。またこの変化に伴い生じる周方向応力の極大値は前者のスエリング特性の場合の方が後者よりも大きくなることが分かる。

6. 被覆管周方向応力最大値と応力制限値との比較

スエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向差によって生じる周方向応力の極大値は、解析ケース 3 の被覆管内面において最大(約 325MPa)となった。ここでは、試行的に、この周方向応力が被覆管に破損を生じさせるレベルにあるかどうかについて簡易的に検討を行った。この検討では、応力最大値と PNC316 鋼の環境効果を取り入れた設計引張強さ Su^* との比較を行った。被覆管内面温度は約 510℃である。この温度での設計引張強さ

に環境効果による強度補正が考慮され、 $Su^*=510\text{MPa}$ となる。図 5.9 の周方向応力の極大値 (約 325MPa) はこの値を十分に下回っている。更に、このピーク応力発生時期は Step 約 300 で発生しており、その後、照射クリープにより十分緩和しており (これについては「7.1」にて検討する。) 照射末期 (Step 約 430) では、二次応力は発生していない。これより、本解析上は、この二次応力によって照射中に被覆管に破損が生じる可能性は低いと考えられる。

7. 検討

7.1 スエリング肉厚方向勾配による二次応力の履歴

これまでの解析結果から、スエリング肉厚方向勾配によって生じる応力の変化について分かったことは、着目位置でスエリングが発生するまでは、それ以外の位置におけるスエリングの発生により着目位置では周方向応力は増加し、着目位置でスエリングが発生すると周方向応力は急激に減少するということである。これは以下で検討するように照射クリープによる応力緩和のためである。このようにスエリングの発生に伴い周方向応力が急激に変化する要因の検討を行った。この検討では、スエリング潜伏期間の肉厚方向勾配により生じる二次応力のみを評価するため、以下のような解析条件を設定した。

7.1.1 解析条件

- (1) ピン内圧をゼロとする。
- (2) 被覆管の熱膨張歪をゼロとする。(ただし、肉厚方向温度分布は持たせる。)
- (3) 被覆管スエリングの定常スエリング速度を一定値とする。

その他の解析条件は、「3.1」～「3.3」で設定した条件と同様とした。

解析に用いたスエリング式は式 (3.1) のように、中性子照射量がスエリング潜伏期間 τ よりも高くなると定常スエリング速度 R でスエリングが発生するスエリング式とした。また、スエリング潜伏期間 τ はスエリング式 1 の τ と同様とした。

7.1.2 解析ケース

解析は以下の 2 ケースを実施した。

- 解析ケース 5. 照射クリープ変形が発生するケース。
- 解析ケース 6. 照射クリープ変形が発生しないケース。

7.1.3 解析結果

- (1) 解析ケース 5.

被覆管外面、肉厚中心、内面における周方向応力履歴をスエリング履歴と合わせて図 7.1～図 7.3 に示す。これらの図よりスエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向差に起因して発生する二次応力の変化は、被覆管の外面でスエリングが発生する約

120Step から被覆管の内面でスエリングが発生する約 300Step の間で生じていることが分かる。被覆管の肉厚方向全域でスエリングが発生する約 300Step 以降では周方向応力はゼロとなっている。これは、300Step 以降では、被覆管の肉厚方向全域で定常スエリング速度が同じになり、被覆管スエリングの肉厚方向勾配が一定となるため、照射クリープによる緩和で応力がゼロになるまで減少するからである。

(2) 解析ケース 6.

被覆管外面、肉厚中心、内面における周方向応力履歴をスエリング履歴と合わせて図 7.4～図 7.6 に示す。図 7.4 より、被覆管外面における周方向応力は、約 120Step でスエリングが発生すると圧縮方向に急激に変化するが、時間の経過に伴い内面側でスエリングが発生していくことにより、この圧縮方向への応力変化の割合は時間の経過とともに小さくなっていく。300Step 以降では、被覆管の肉厚方向全域で同じ定常スエリング速度となるため被覆管スエリングの肉厚方向勾配は変化しない。従って、300Step 以降では、被覆管肉厚方向各位置で周方向応力は一定となる。次に、被覆管内面における周方向応力履歴を見てみる。図 7.6 より、被覆管内面では、120Step～300Step では被覆管内面よりも外面側におけるスエリングの発生により、周方向応力は引張方向に増加する。300Step 以降では内面においてスエリングが発生することにより、周方向応力は引張方向に一定値（約 3,500MPa）となる。最後に、被覆管肉厚中心における周方向応力の履歴を見てみる。図 7.5 より、被覆管肉厚中心において 120Step～220Step では、被覆管肉厚中心よりも外面側におけるスエリングの発生により、周方向応力は引張方向に増加していくが、Step220～300 では、被覆管肉厚中心から内面におけるスエリングの発生により、周方向応力は減少していく。Step300 以降では、周方向応力はゼロ一定となっている。ここで、この FINAS による応力解析の妥当性を確認する。この確認は 300Step 以降での周方向応力の被覆管内外面差の値が妥当であるかどうかにより行うこととする。

被覆管の肉厚方向歪勾配が生じた場合、この歪勾配と弾性的に平衡状態となる応力勾配は弾性力学によって導出される以下の関係式により解析的に表せる。³⁾

$$\Delta \sigma = E \cdot \Delta \epsilon / (1 - \nu) \quad \text{-(7.1)}$$

ここで、

- E : ヤング率 (MPa)
- ν : ポアソン比 (--)
- $\Delta \epsilon$: 周方向歪内外面差 (--)
- $\Delta \sigma$: 周方向応力内外面差 (MPa)

である。

解析ケース 6 で、300Step 以降のスエリング歪の被覆管内外面差は約 0.033(--) である。これを式 (7.1) の $\Delta \epsilon$ に代入し、 $\nu = 0.3, E = 150,000(\text{MPa})$ とすると $\Delta \sigma =$ 約 7,000MPa となり、解析ケース 6 の 300Step 以降の周方向応力の被覆管内外面差の

FINAS 解析結果（約 7,200MPa）に近い値となる。これより、FINAS 解析での 300Step 以降の周方向応力の内外面差のレベルは妥当であると考えられる。

被覆管外面における周方向応力履歴を解析ケース 5 と解析ケース 6 で比較する。図 7.7 に、100Step～140Step における両ケースの周方向応力履歴を示す。図より、両ケースとも約 120Step から周方向応力は圧縮方向に急激に変化しているが、解析ケース 5 で Step120 を過ぎてからまもなく照射クリープの発生による応力緩和が開始するまでの間で両ケースの周方向応力履歴は一致している。これより、被覆管外面においてスエリングが発生すると周方向応力が圧縮方向に急激に変化するのは、スエリングが発生した被覆管外面が、これよりも内側におけるスエリングが生じていない部分から拘束を受けることによるものであることが分かる。

次に、解析ケース 5 で、図 7.3 に示すように被覆管内面では約 300Step でスエリングが発生すると周方向応力が急速に減少することについて検討する。図 7.4～図 7.6 より、解析ケース 6 の照射クリープが生じない場合は、300Step 以降ではスエリングの被覆管肉厚方向勾配が一定になるため周方向応力も一定となる。これより、周方向応力の減少は照射クリープの発生による緩和によって生じることが分かる。ここで、この照射クリープによる応力緩和の度合を見るため、解析ケース 5 で 298Step 以降、照射クリープ歪み式の歪み速度に定数ファクタ (=0.1) を乗じた場合の解析を行い、298Step 以降の周方向応力履歴を評価した。この定数ファクタ 0.1 を照射クリープ歪式の歪み速度に乗じて解析したケースを解析ケース 5' とする。

図 7.8 に被覆管内面における周方向応力の履歴を解析ケース 5 と 5' とで比較して示す。図より、300Step を過ぎると、解析ケース 5' では周方向応力の減少が解析ケース 5 に比較して緩やかであることが分かる。これは解析ケース 5' では照射クリープ歪式の歪み速度が解析ケース 5 の 0.1 倍となっていることにより、照射クリープによる応力緩和の速度が解析ケース 5 よりも小さいためである。照射クリープ歪速度は式 (3.3) に示すように、スエリング比例項を含んでいるためスエリングの発生によって加速されるようになる。従って、被覆管内面における約 Step300 での周方向応力の急激な減少は照射クリープ歪速度がスエリングによって加速され、応力緩和が急速に生じたことによるものであることが分かる。

ここでの検討から被覆管スエリング潜伏期間の肉厚方向勾配に起因して発生する二次応力の履歴について以下のことが分かる。

- ・スエリングの発生時期が早い部分では、スエリングが発生すると、まだスエリングが発生していない部分から拘束を受ける結果、周方向応力が圧縮方向に急激に変化するが、照射クリープの発生によって緩和され、被覆管全域で一定の定常スエリング速度になると応力はゼロに近づいていく。スエリングの発生時期が遅い部分では、スエリングが発生するまでは、既にスエリング発生している部分に引っ張られて周方向応力は引張方向に変化していく。スエリングが発生すると、照射クリープがそのスエリングによって加速されるが、それによって緩和によって応力は急速に減少し、被覆管全域で一定の定常スエリング速度になると応力はゼロに近づいていく。

7.2 スエリングの応力効果

製造時に発生する被覆管内の残留応力、及び照射時の熱応力やスエリング差による二次応力がスエリングを加速する可能性が指摘されている。ここでは、被覆管に生じる応力がスエリングを促進する場合のスエリングと応力の解析を行った。

7.2.1 応力依存スエリング簡易式

スエリングに及ぼす応力効果のモデリングにおいては、一般に用いられている Bi-liner のスエリング式において、定常スエリング速度 (R) と潜伏期間 (τ) に応力効果を取り入れたアプローチが採用されている。^{4),5)}

$$R(T, \sigma_n) = R_0(T) \cdot (1 + p \cdot \sigma_n) \quad -(7.2)$$

$$\tau(T, \sigma_n) = \tau_0(T) - q(T) \cdot \sigma_n \quad -(7.3)$$

ここで、 $R_0(T)$ 、 $\tau_0(T)$ はそれぞれ応力がゼロの時の定常スエリング速度と潜伏期間である。 σ_n として、従来は静水圧応力成分 (平均応力) が用いられていたが、本解析では、応力発生下でスエリングが促進される効果を検討するため相当応力に置き換えた。p と q はパラメータである。

7.2.2 解析条件

この解析では、定常スエリング速度 R の応力依存性およびスエリング潜伏期間 τ の応力依存性の影響を個別に評価するため、それぞれの影響を分離して考慮することとした。従って、式 (7.2) で表される定常スエリング速度の応力依存性の式のみ使用するケースと式 (7.3) で表される潜伏期間の応力依存性の式を使用するケースを設定した。その応力には上述した様に相当応力を用いることとした。従って、前者のケースでは、被覆管に応力が発生している場合は定常スエリング速度は必ず増加する。また、後者のケースでは、潜伏期間が必ず短くなる。

式 (7.2) のパラメータ p の取る値については、これまでに報告されている文献による 20%CW Type316 に対する以下の範囲を試行的に採用することとした。⁴⁾

$$p: 0.0016 \sim 0.0038 \text{MPa}^{-1}$$

式 (7.3) のパラメータ q の取る値についても同様に、文献による 20%CW Type316 に対する以下の式を採用することとした。⁵⁾

$$q: 0.015 + 2 \times 10^{14} \text{EXP}(-66,000/RT) (\text{n/cm}^2, E > 0.1 \text{MeV}) \quad -(7.4)$$

ここで、

$R=1.987$, T :照射温度 (°C) である。

この式では、照射温度が 550°C 以下の場合、

$$q=0.06\sim 0.07\text{dpa} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

となる。

解析は、以下の 3 ケースを実施し、スエリングの応力依存性を考慮していない解析ケース 3.の結果との比較を行った。

解析ケース 7 解析ケース 3 で使用したスエリング式 1 の定常スエリング速度に応力依存性があるケースで、パラメータ: $p=0.0016\text{MPa}^{-1}$ とした場合。

解析ケース 8 解析ケース 3 で使用したスエリング式 1 の定常スエリング速度に応力依存性があるケースで、パラメータ: $p=0.0038\text{MPa}^{-1}$ とした場合。

解析ケース 9 解析ケース 3 で使用したスエリング式 1 のスエリング潜伏期間に応力依存性がある場合。(式 (7.3) を用いた場合。)

7.2.3 解析結果

解析結果は、被覆管外面、肉厚中心、内面における周方向応力履歴とスエリング履歴に着目した。まず、定常スエリング速度が応力に依存する場合の解析結果を示す。図 7.9～図 7.11 に 3 つの解析ケース (解析ケース 3,7,8) の周方向応力履歴とスエリング履歴を比較して示す。まず、照射末期のスエリング量に着目すると、被覆管外面、肉厚中心、内面とも、式 (7.2) の定常スエリング速度に対する相当応力の影響を考慮するパラメータ p の値が大きい方がスエリング量は大きくなっていることが分かる。また、このスエリング量に対する p の影響は、被覆管外面が大きく、内面側に行くほど小さくなっているが、これは、スエリングが早期に発生する被覆管外面側ほど、スエリング肉厚方向勾配に伴い発生する二次応力が定常スエリング速度に影響する期間が長くなるからである。次に、周方向応力履歴に着目する。周方向応力履歴の定性的な傾向は、3 つの解析ケースの間で同様である。被覆管外面、肉厚中心、内面とも、周方向応力の極値にはパラメータ p の影響が若干ではあるが現れており、 p が大きい方がその絶対値も少し大きくなるが、今回の解析で設定した p の値の範囲においては顕著な差はない。

次に、スエリング潜伏期間が応力に依存する場合の解析結果を示す。図 7.12～図 7.14 に解析ケース 3,9 の周方向応力履歴とスエリング履歴を比較して示す。これらの図から、スエリング潜伏期間が応力によって短縮されるため、二次応力の発生時期が早まっていることが分かる。外面でスエリング潜伏期間が短縮されるのは、熱膨張差によって生じる二次応力と内圧で生じる一次応力によるものである。肉厚中心と内面では、解析ケース 9 の二次応力の増加率が解析ケース 3 よりも大きくなっているが、これは、解析ケース 9 ではそれぞれの着目位置の外面側でスエリングが解析ケース 3 より早期に発生している影響によるものと考えられる。ただし、解析ケース 9 ではこれらの位置でも他の位置と同様にスエリングの発生がより早期となるため、スエリン

グの発生と同時にこれによる照射クリープの促進によって二次応力が緩和されている。これによって、解析ケース9の照射中の周方向応力最大値は解析ケース3よりも若干ではあるが小さくなっている。

以上より、応力によりスエリングは促進するが、同時に照射クリープによる緩和がより有効に働き、到達応力レベルには顕著な差はないことが分かる。

8. まとめ及び今後の課題

燃料ピンの健全性評価の一環として、被覆管の肉厚方向スエリング勾配による二次応力の解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 照射中の被覆管に生じる周方向応力は、スエリング潜伏期間の被覆管肉厚方向差によるスエリング勾配に伴う二次応力の発生によって次のように変化する。スエリング発生時期が遅い（スエリング潜伏期間が長い）肉厚方向位置では、スエリングが発生するまでその周囲で発生するスエリングによって周方向応力が増大する。スエリング発生直後に照射クリープによる緩和によって周方向応力は急速に減少する。この周方向応力最大値は、スエリングが開始する照射末期では、照射クリープにより二次応力十分は緩和されている。
- (2) 試行的に、被覆管に生じる二次応力を含めた周方向応力の最大値を、環境効果を取り入れたPNC316の設計引張強さと比較した結果、前者は後者を十分に下回った。
- (3) 応力依存性のあるスエリング式を用いて応力が被覆管のスエリングを促進する場合の被覆管応力履歴を解析した。その結果、応力によりスエリングは促進するが、同時に照射クリープにより緩和がより有効に働き、到達応力レベルは差がないことが分かった。
- (4) (2)、(3)より、スエリング勾配による被覆管の二次応力が燃料ピンの健全性に及ぼす影響は小さいと考えられる。顕著なスエリングが発生した燃料ピンの健全性に及ぼす影響としてスエリングによる強度や伸びの低下も考えられるので、今後はこれらに着目した検討を行っていくことが必要である。

9. 謝辞

本研究を実施するにあたり、FINAS コードの解析を実施していただいた原子力システム（株）の伊藤昌弘氏に感謝の意を表します。

10. 参考文献

- 1) N.Akasaka, I.Yamagata and S.Ukai
Effect of temperature gradient on void formation of modified 316 stainless steel
ICFRM 9 Colorado Springs 1999
- 2) Private-communication between CEA and JNC
- 3) 中原一郎
材料力学（下卷）
養賢堂
1973年9月10日
- 4) J.L.Boutard et al.
Proc.Intr.Conf. on Irradiation Behavior of Metallic Materials for Fast Reactor Core
Components,Ajaccio,France,1979
- 5) F.A.Garner,E.R.Gilbert and D.L.Porter
ASTM STP 725,1981

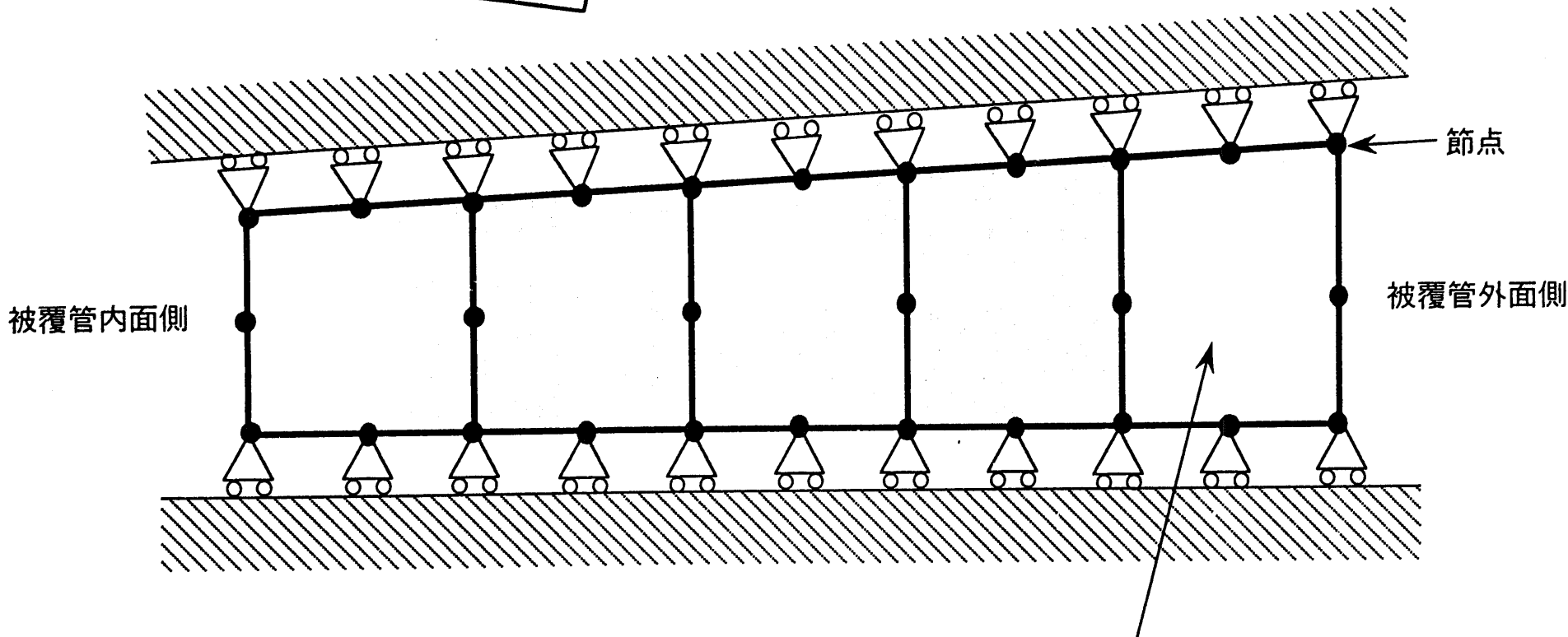
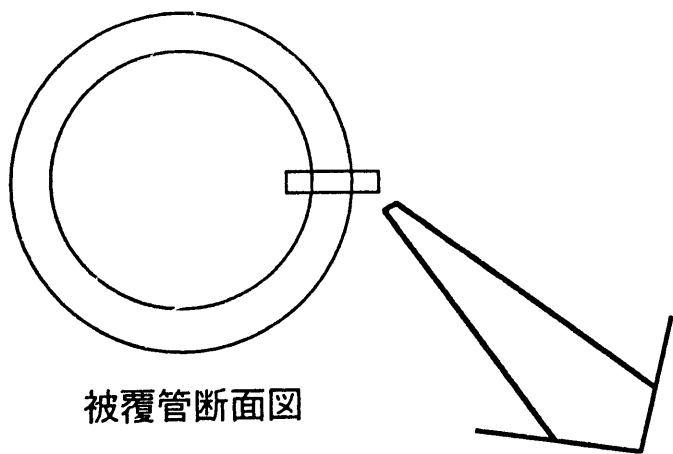


図3.1 FINAS解析モデル

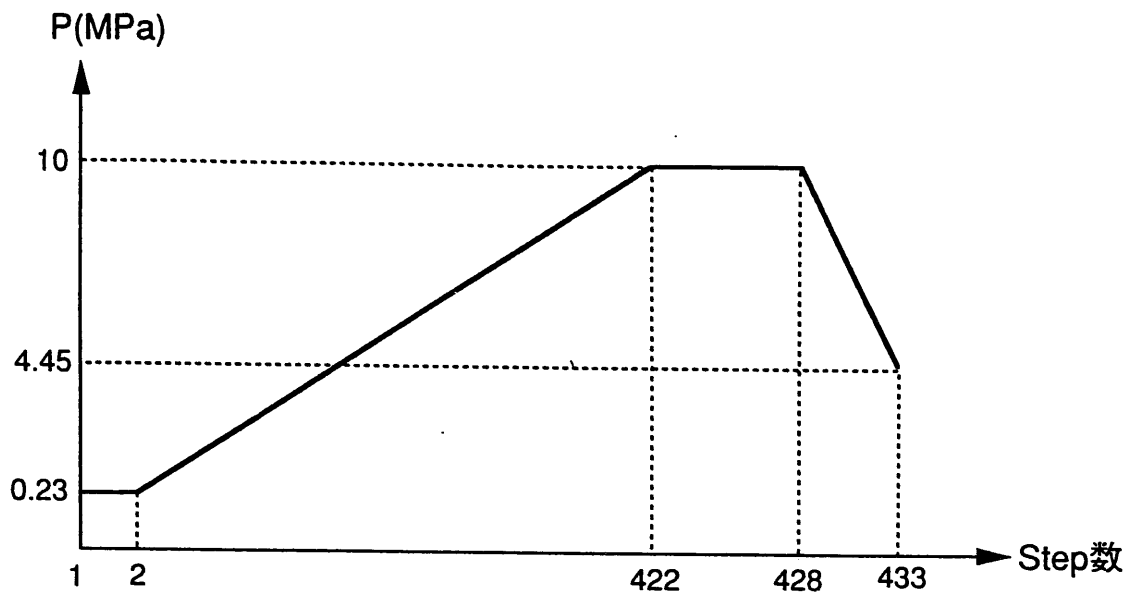


図3.2 ピン内圧履歴

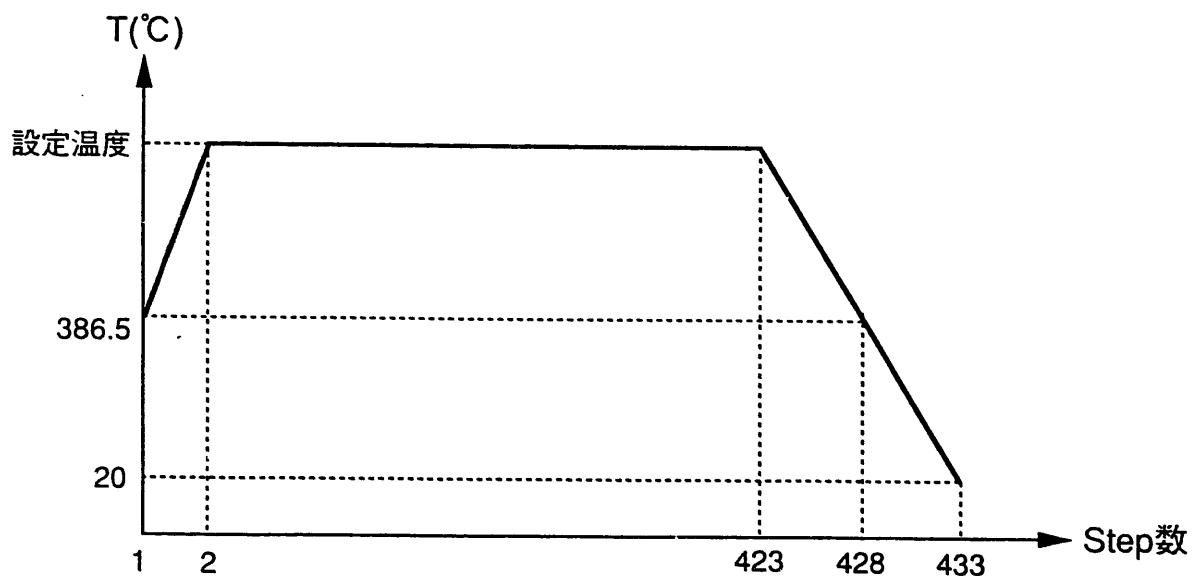


図3.3 被覆管温度履歴

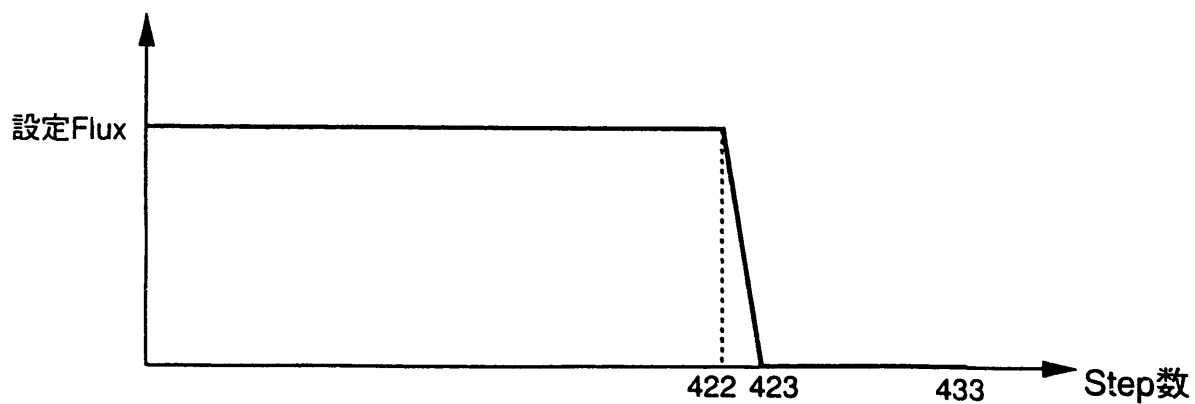


図3.4 Flux履歴

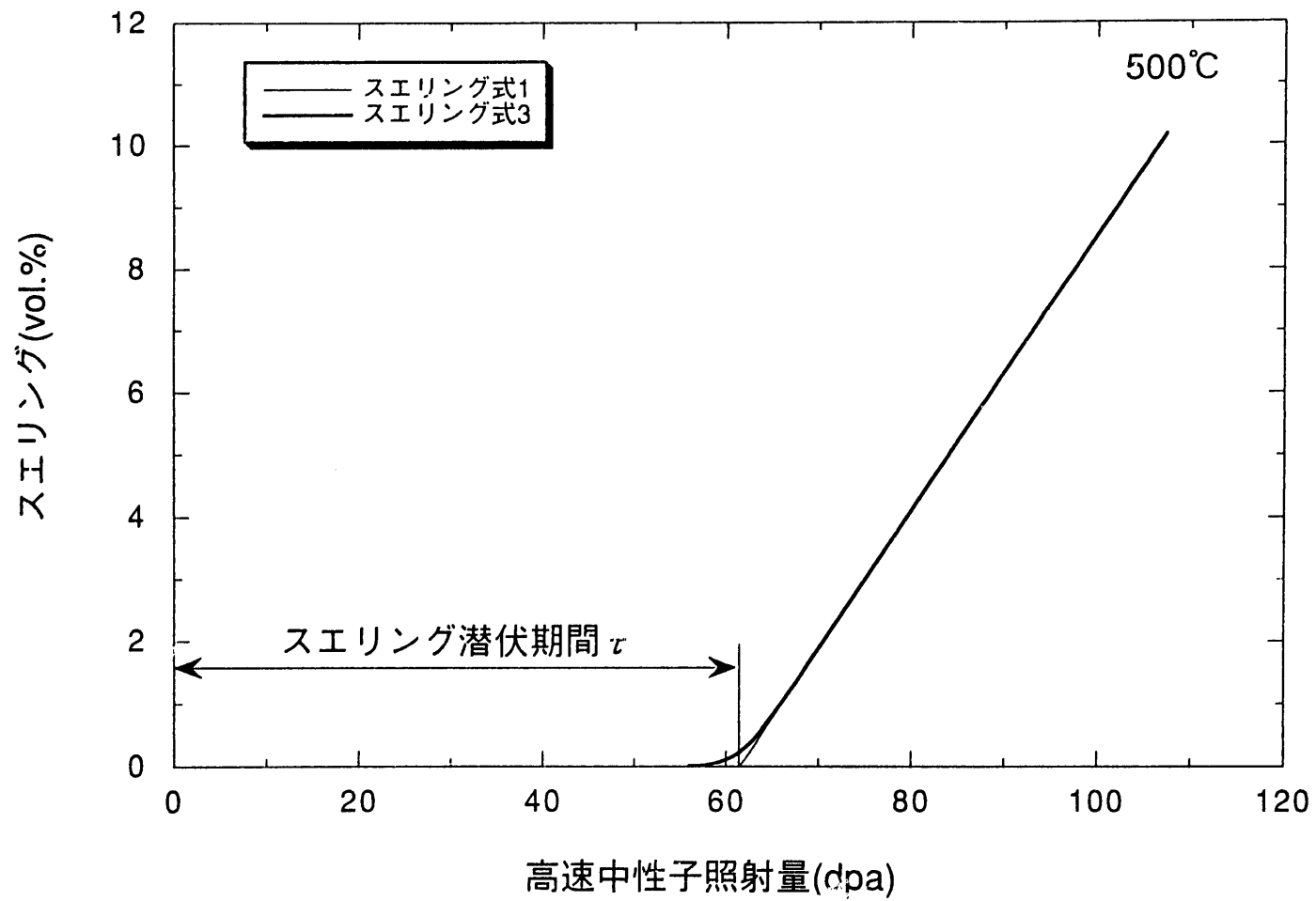


図3.5 スエリング履歴

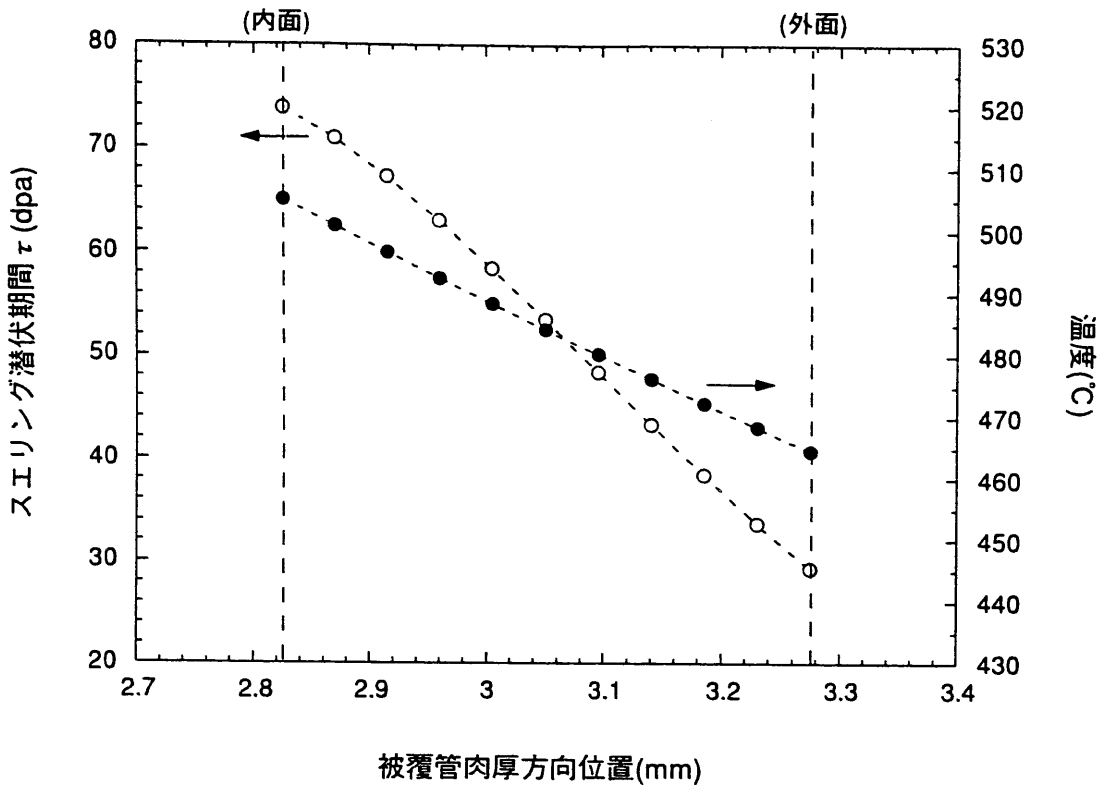


図3.6 スエリング潜伏期間の肉厚方向分布 (スエリング式1)

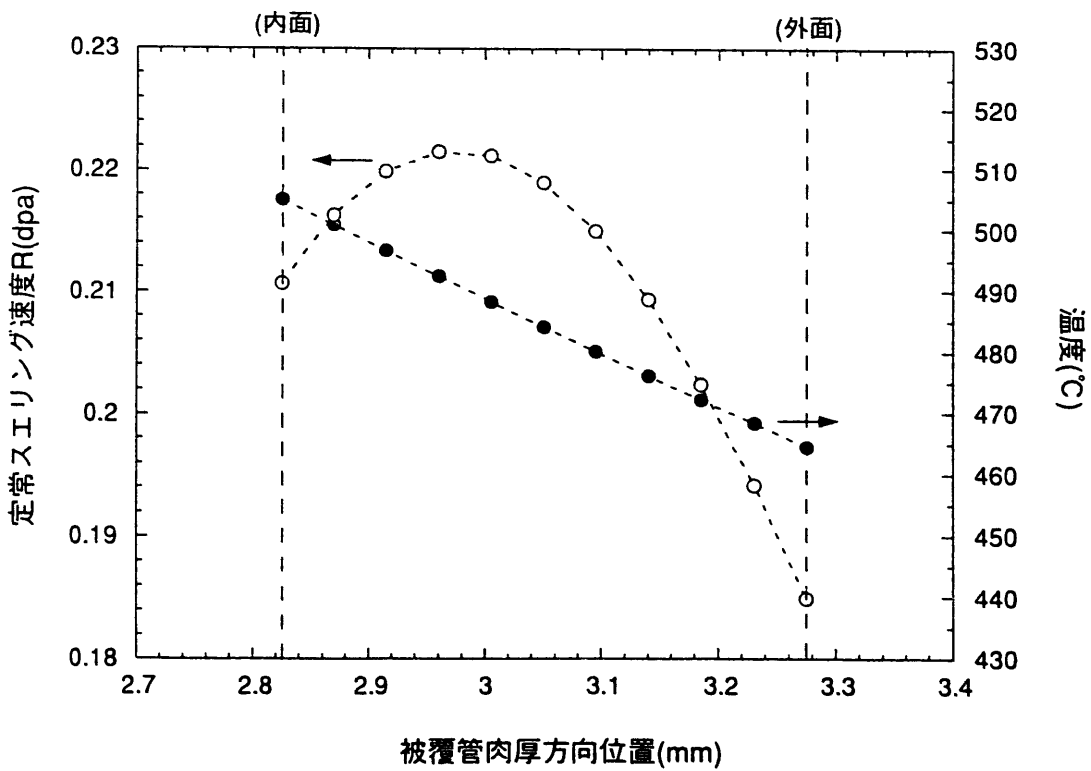


図3.7 定常スエリング速度の肉厚方向分布 (スエリング式1)

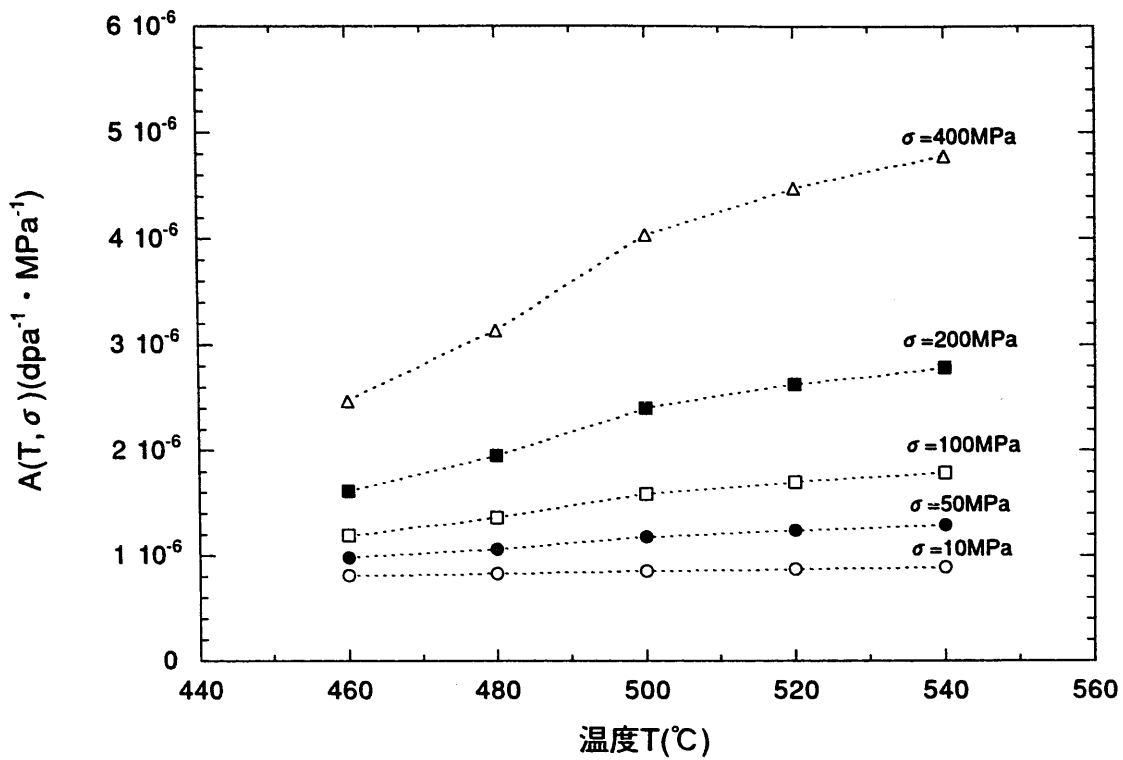


図3.8 照射クリープ歪式の照射量比例項 $A(T, \sigma)$ の温度 T 、相当応力 σ 依存性

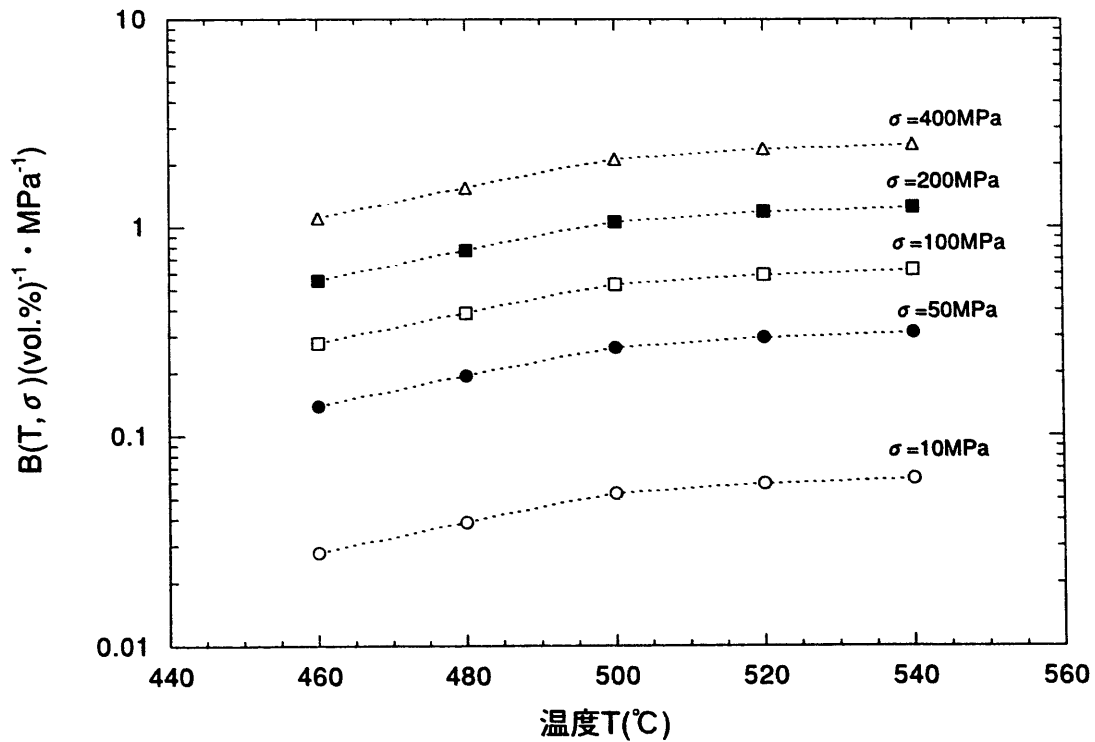


図3.9 照射クリープ歪式のスエリング比例項 $B(T, \sigma)$ の温度 T 、相当応力 σ 依存性

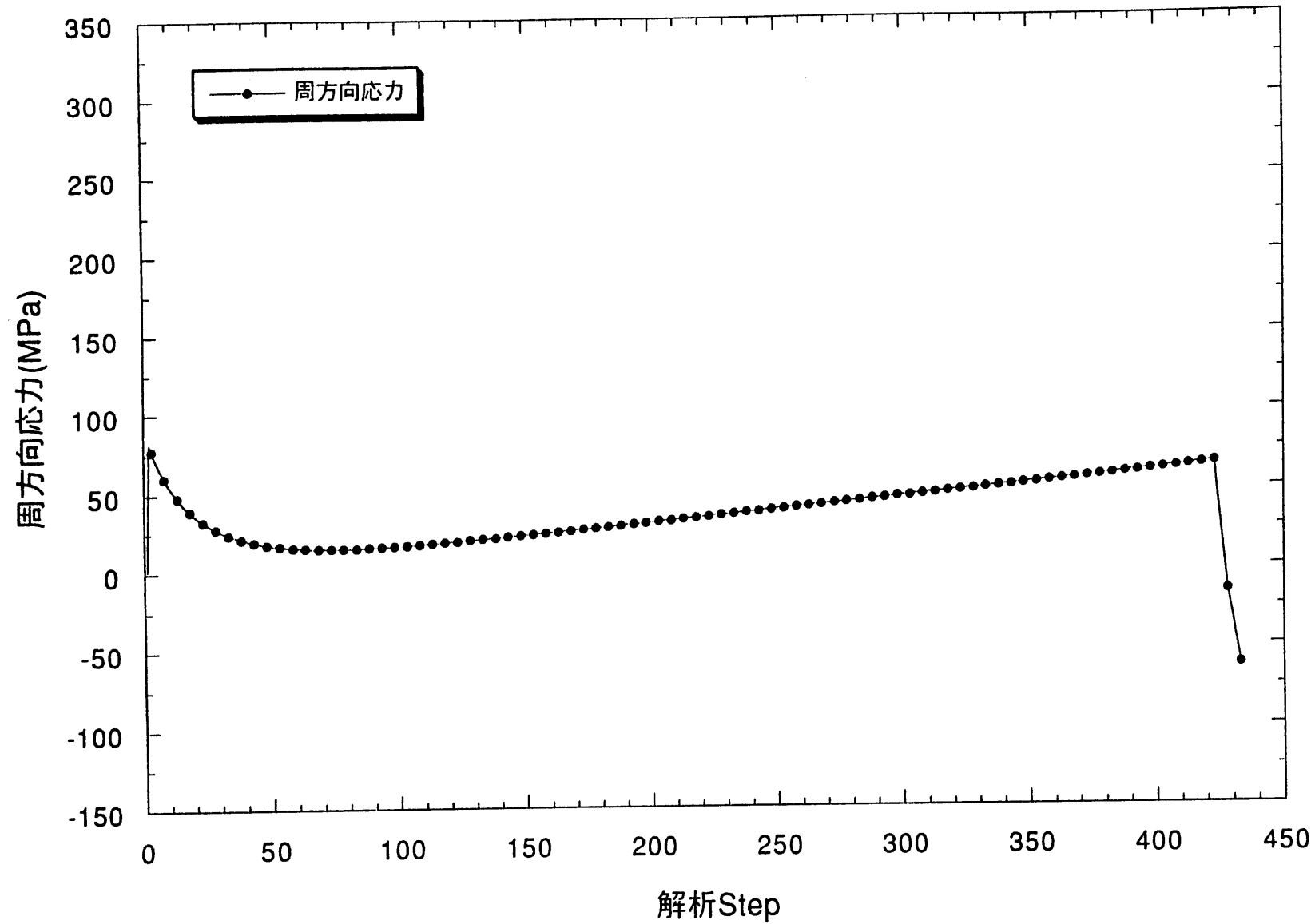


図5.1 被覆管外面における周方向応力の履歴 (解析ケース1)

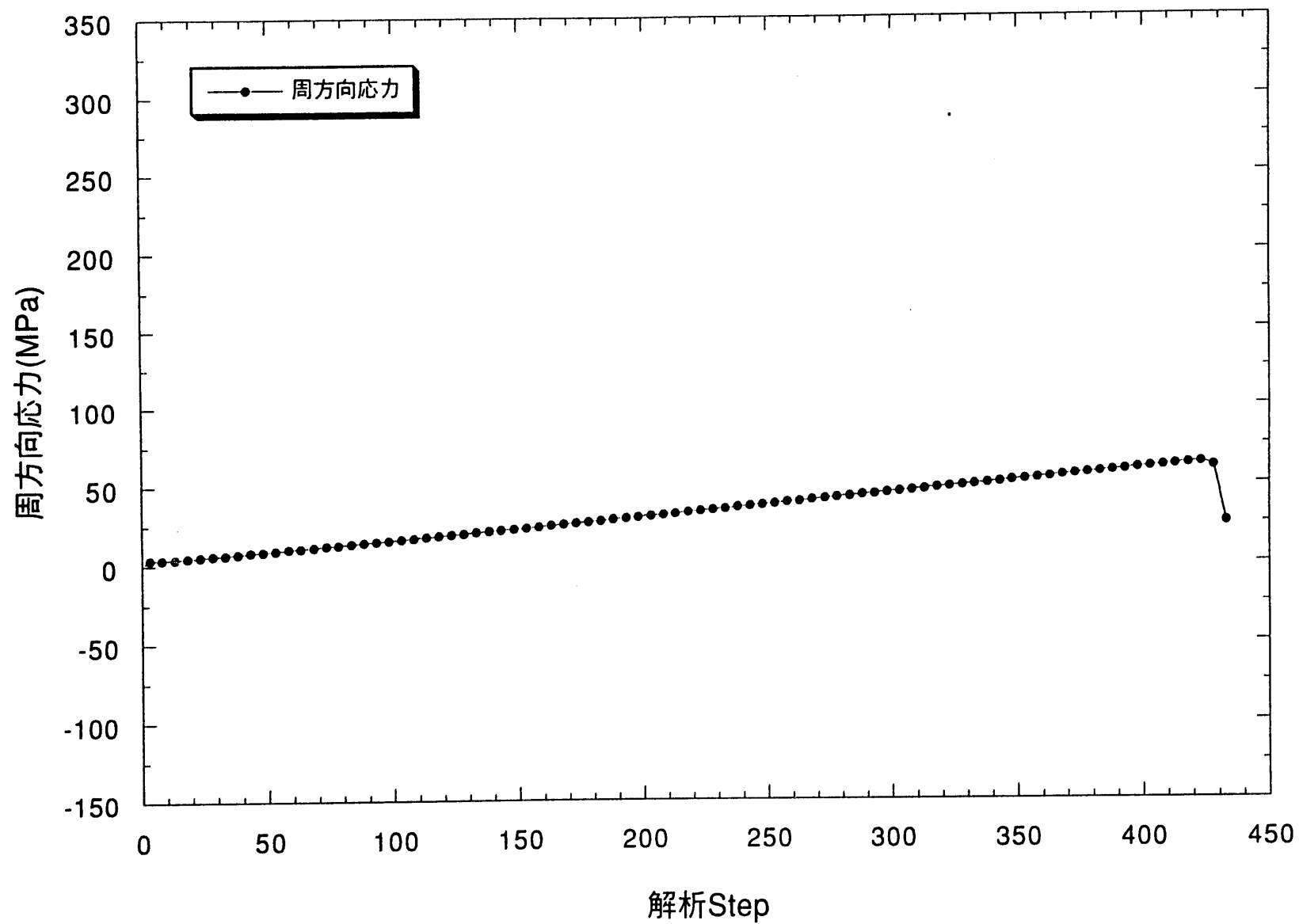


図5.2 被覆管肉厚中心における周方向応力の履歴 (解析ケース1)

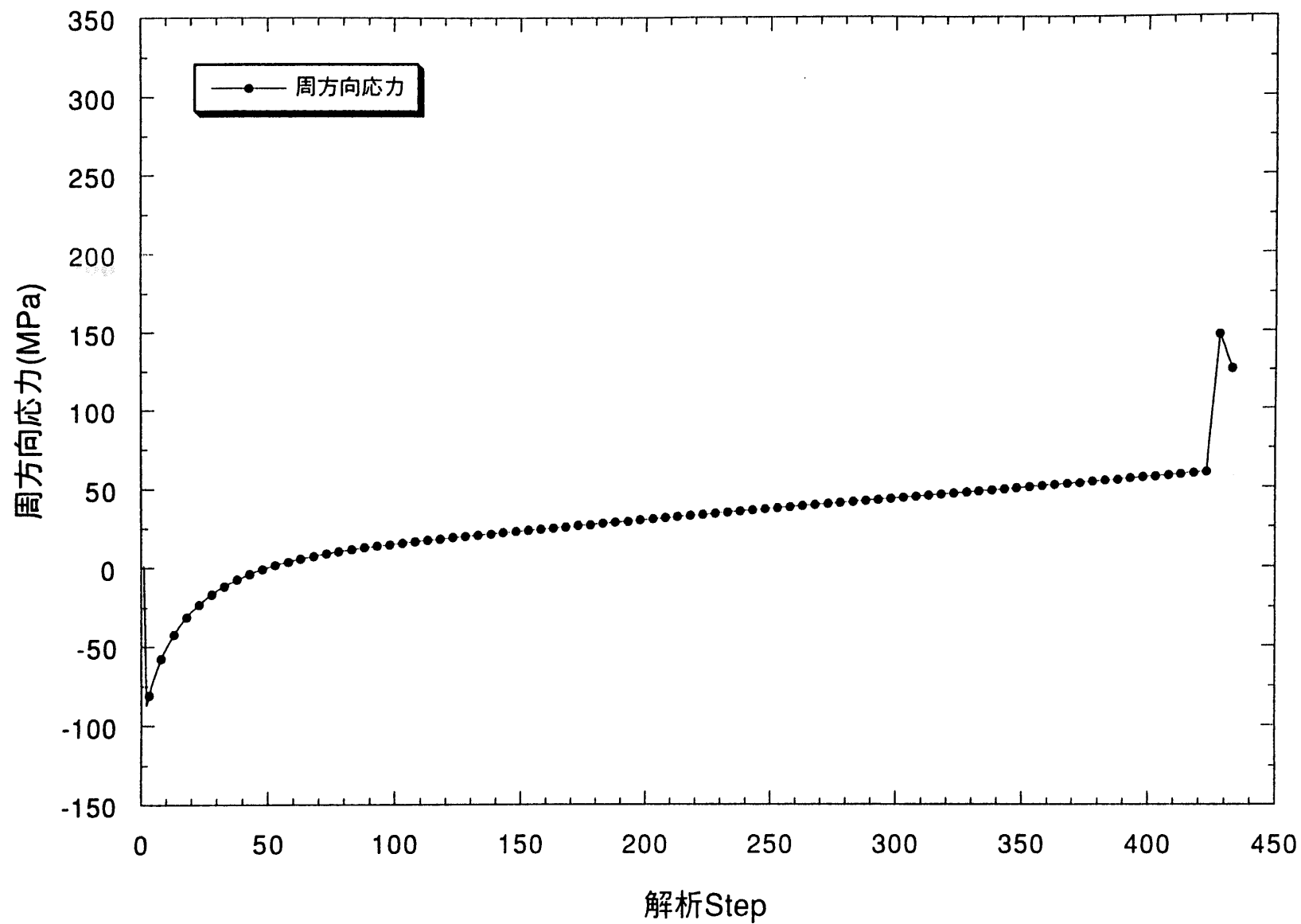


図5.3 被覆管内面における周方向応力の履歴 (解析ケース1)

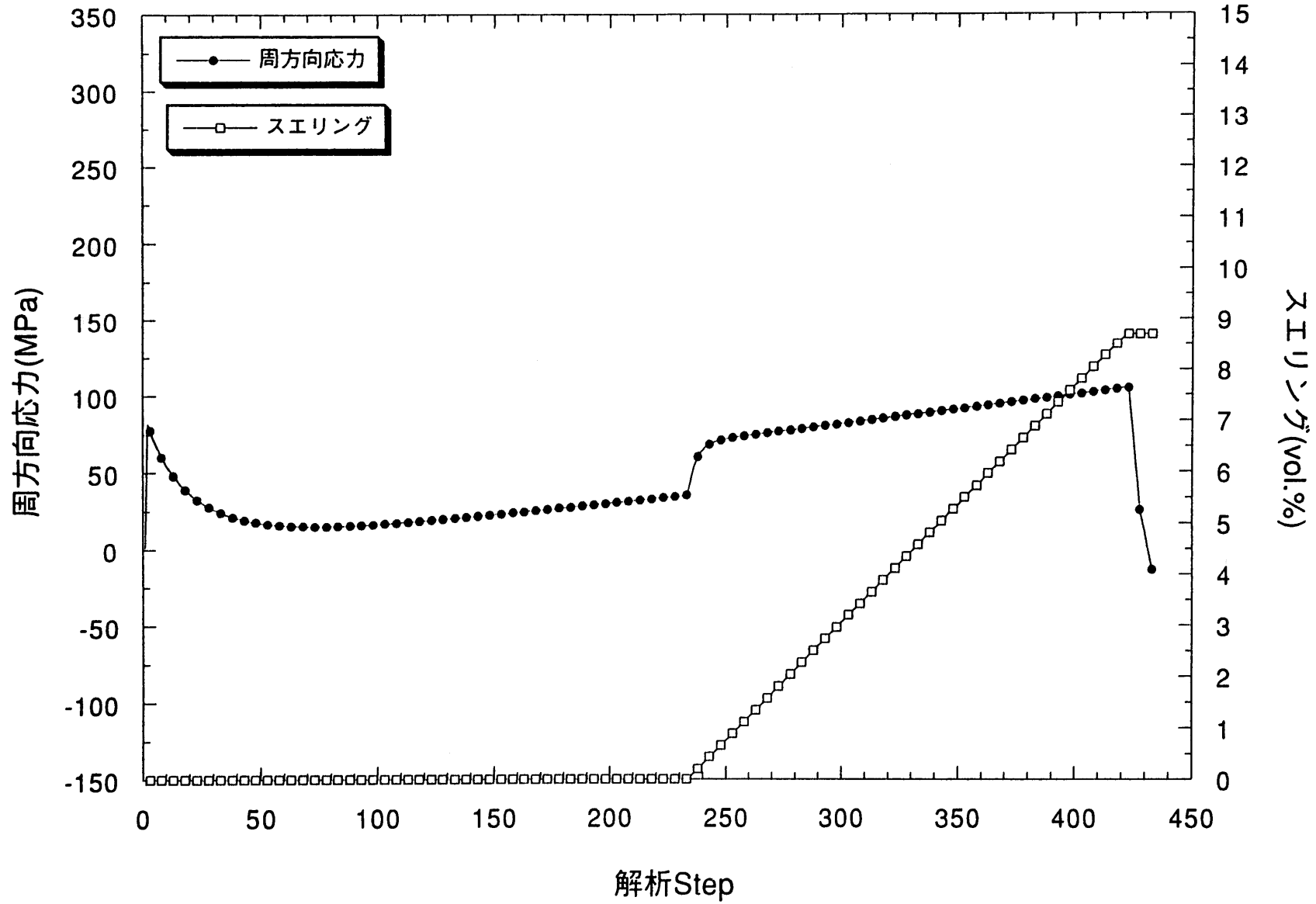


図5.4 被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース2)

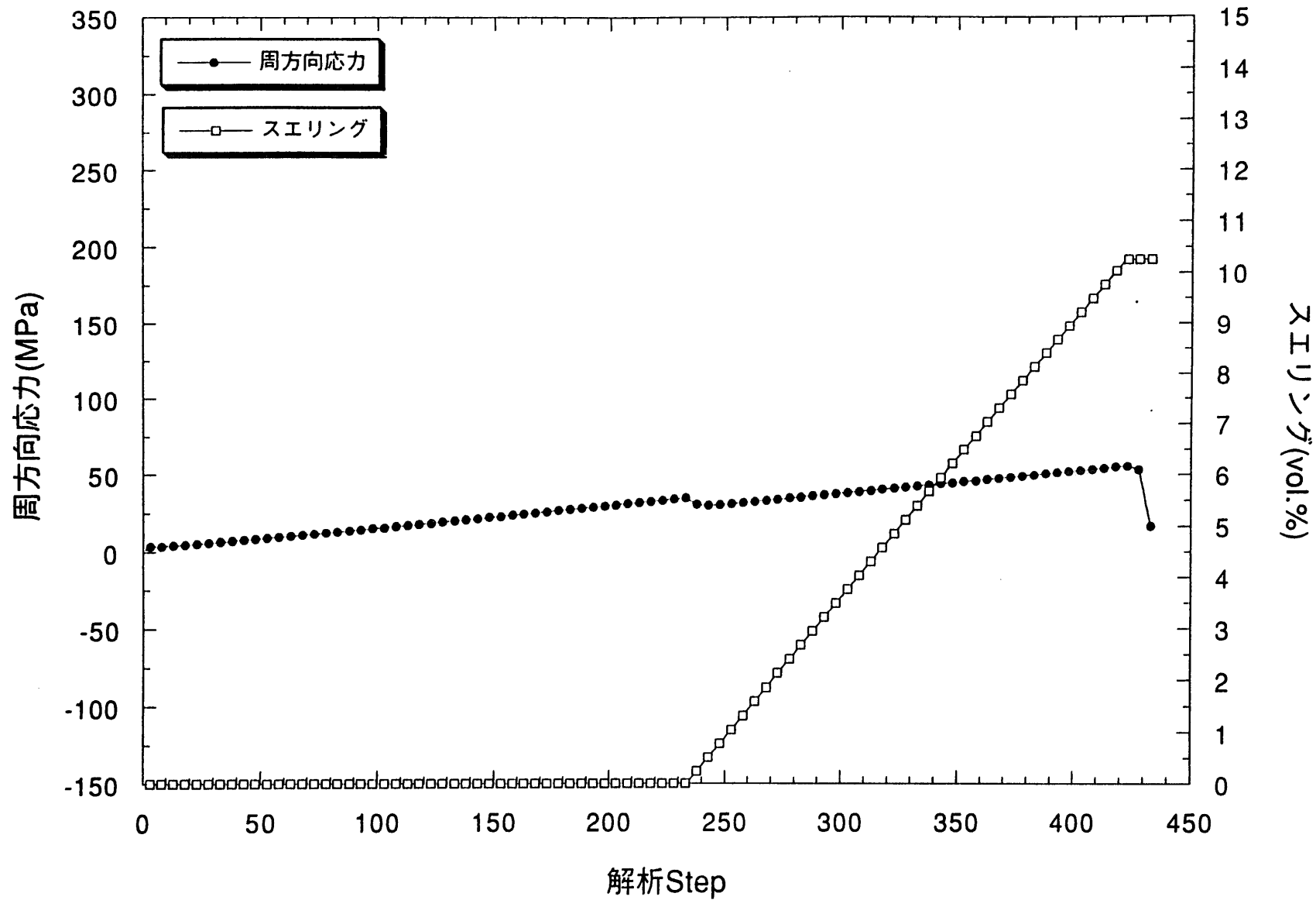


図5.5 被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース2)

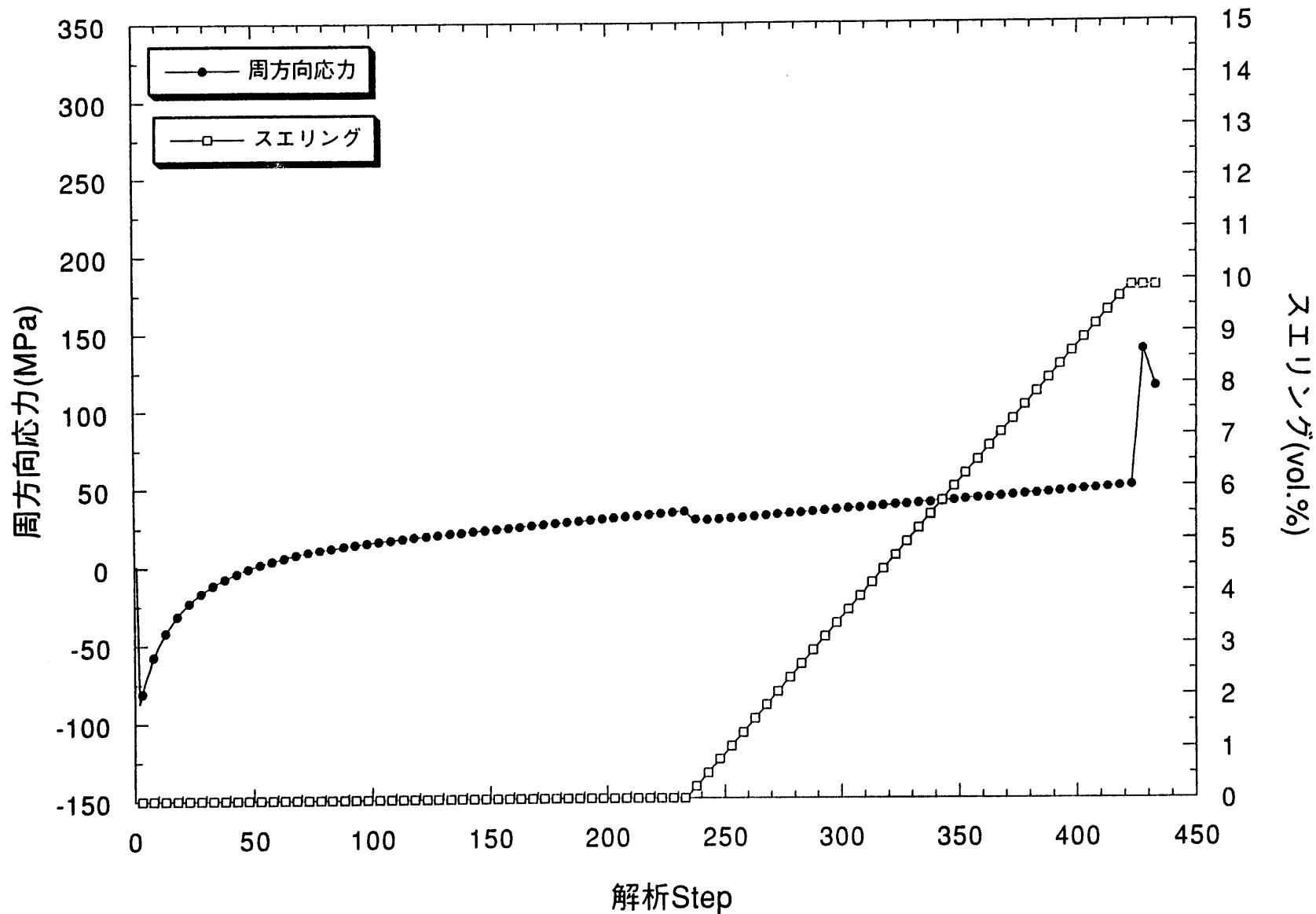


図5.6 被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース2)

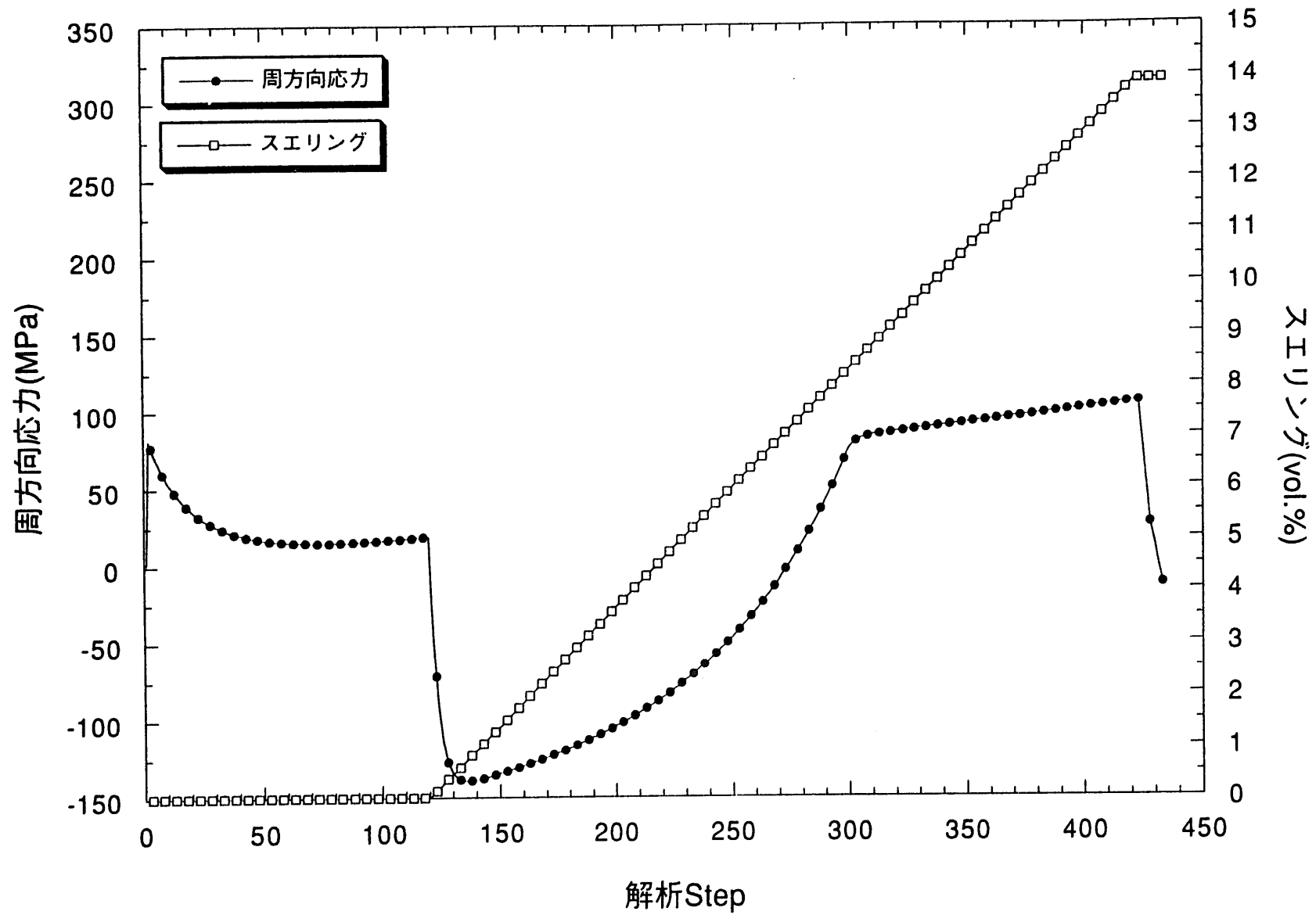


図5.7 被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース3)

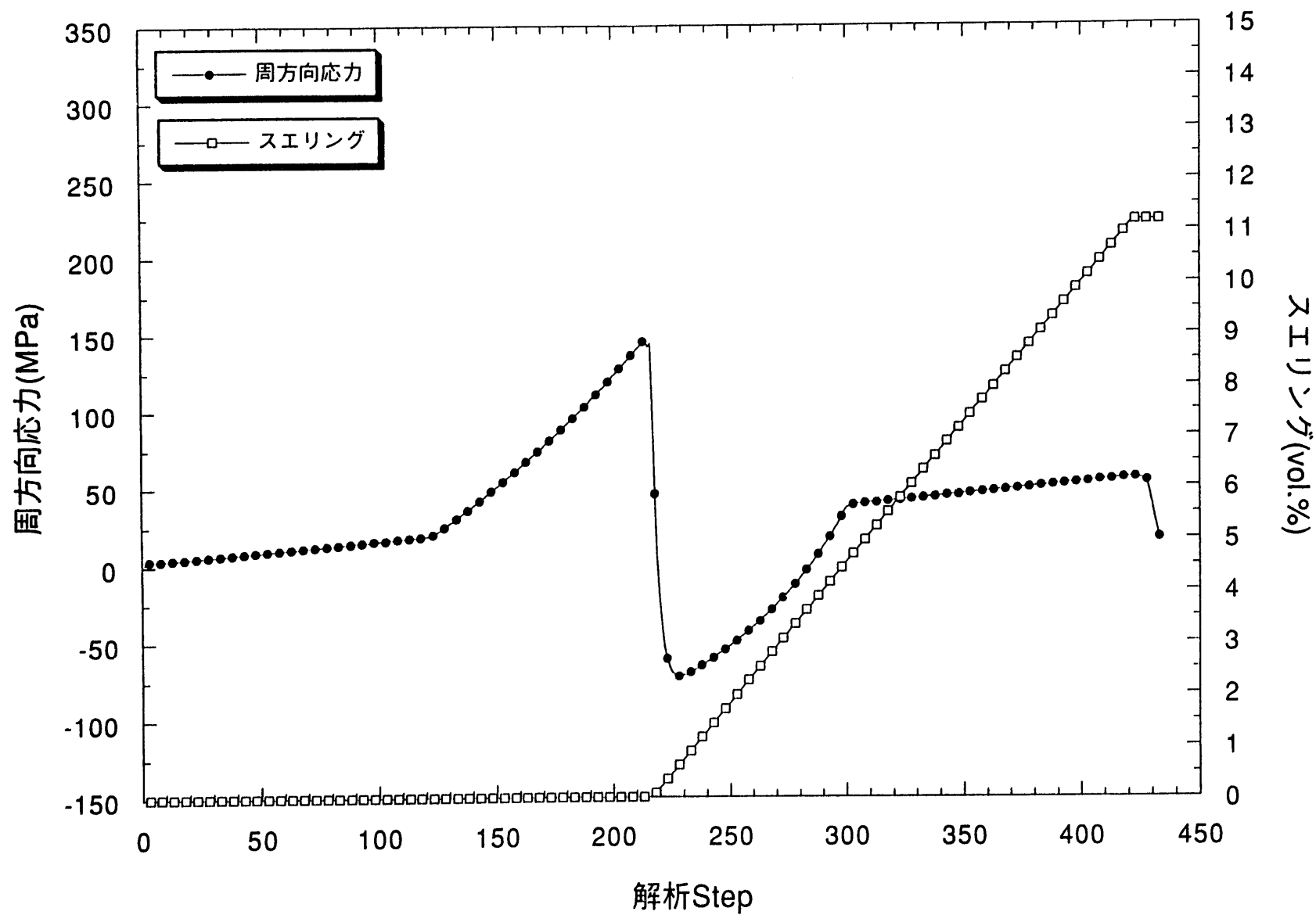


図5.8 被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース3）

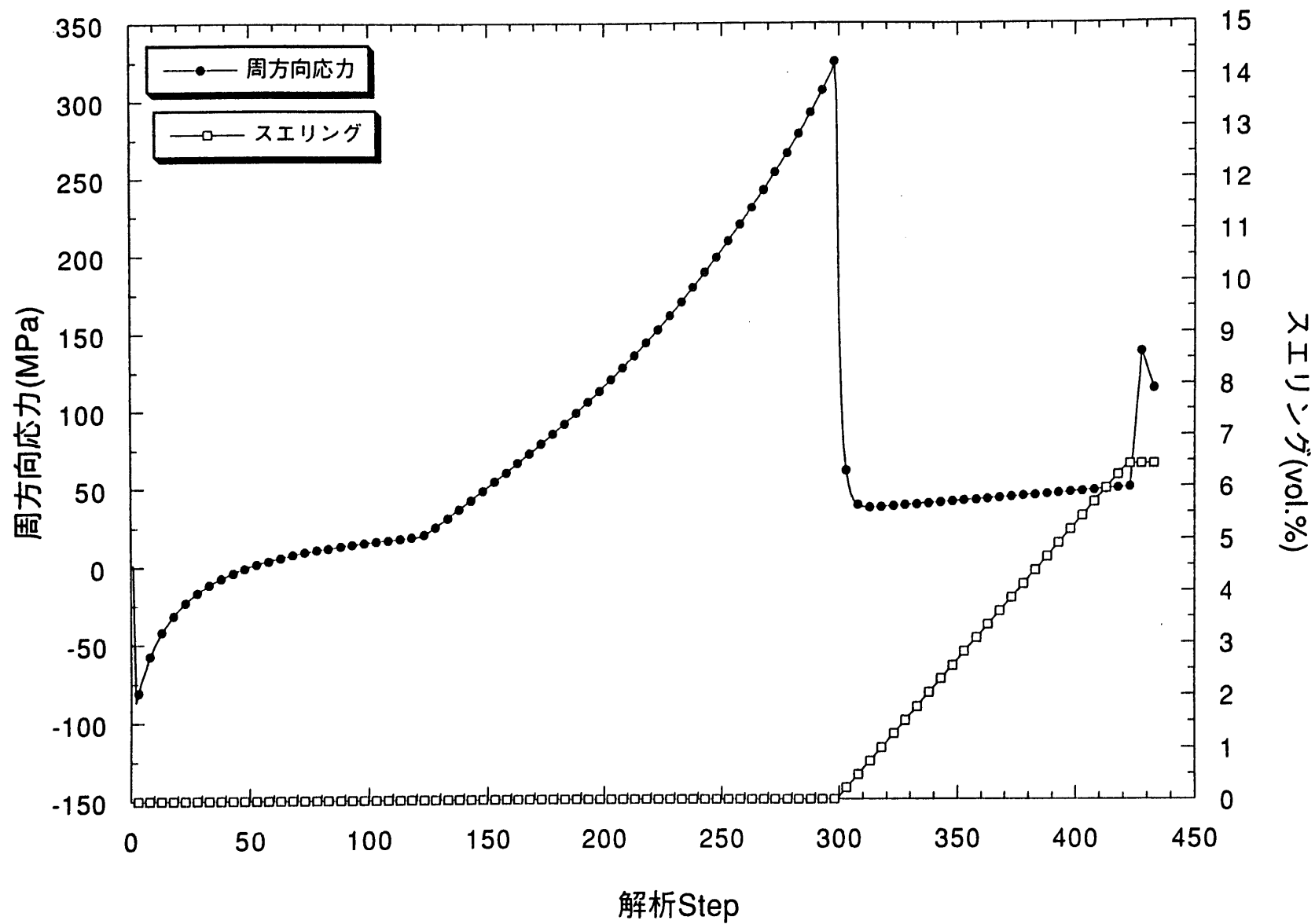


図5.9 被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース3)

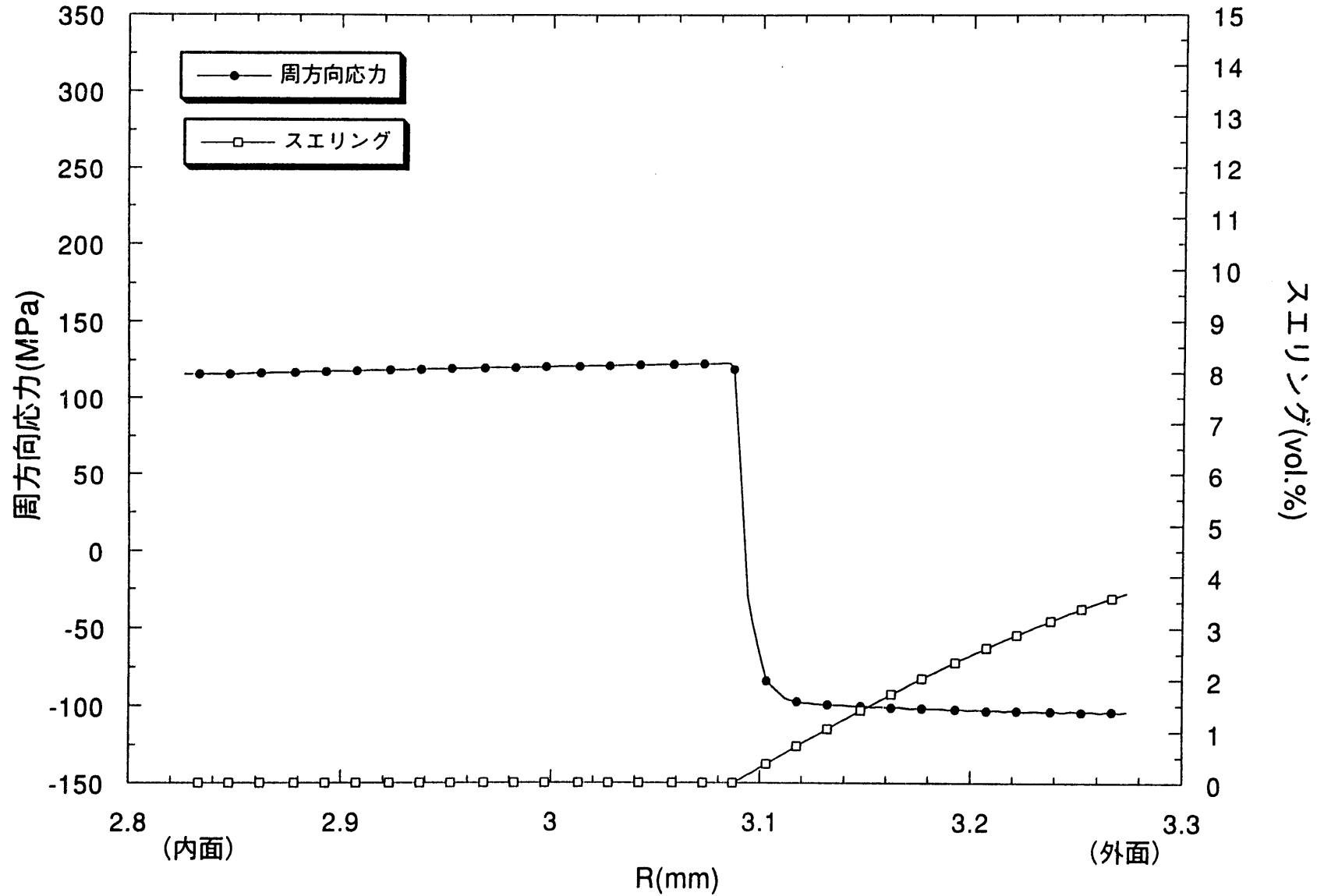


図5.10 周方向応力及びスエリングの被覆管肉厚方向分布 (解析ケース3、Step200)

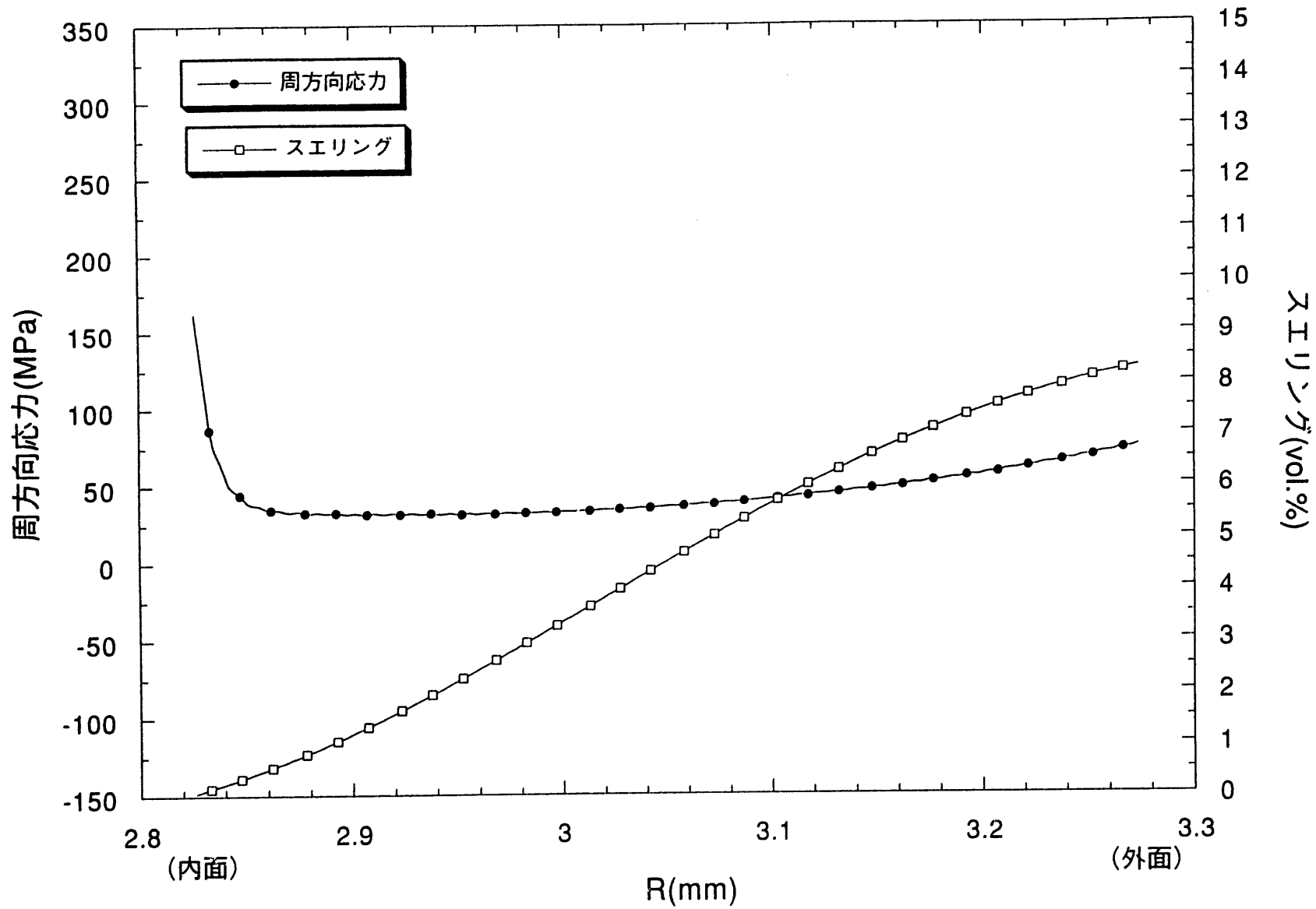


図5.11 周方向応力及びスエリングの被覆管肉厚方向分布 (解析ケース3、Step300)

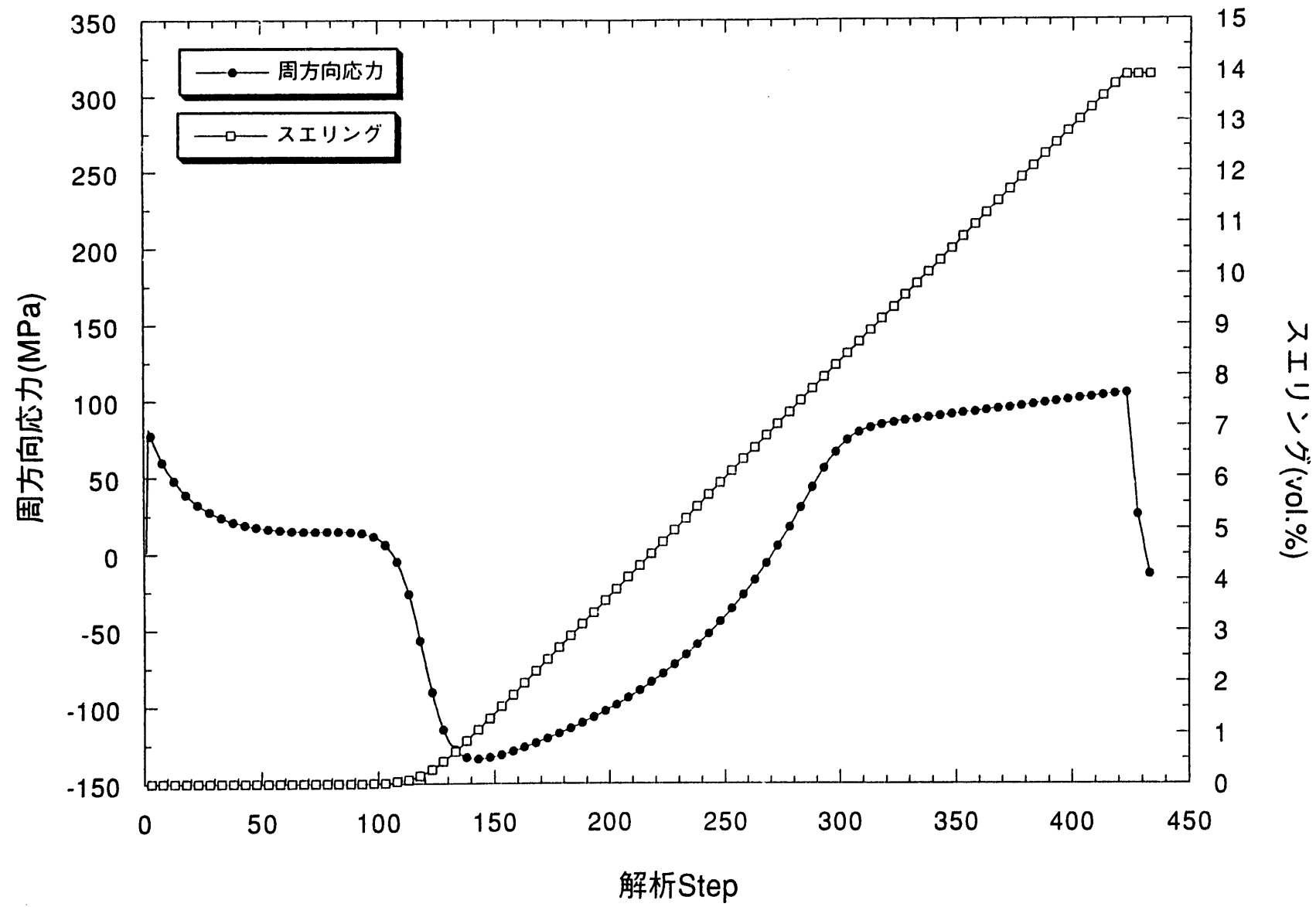


図5.12 被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース4)

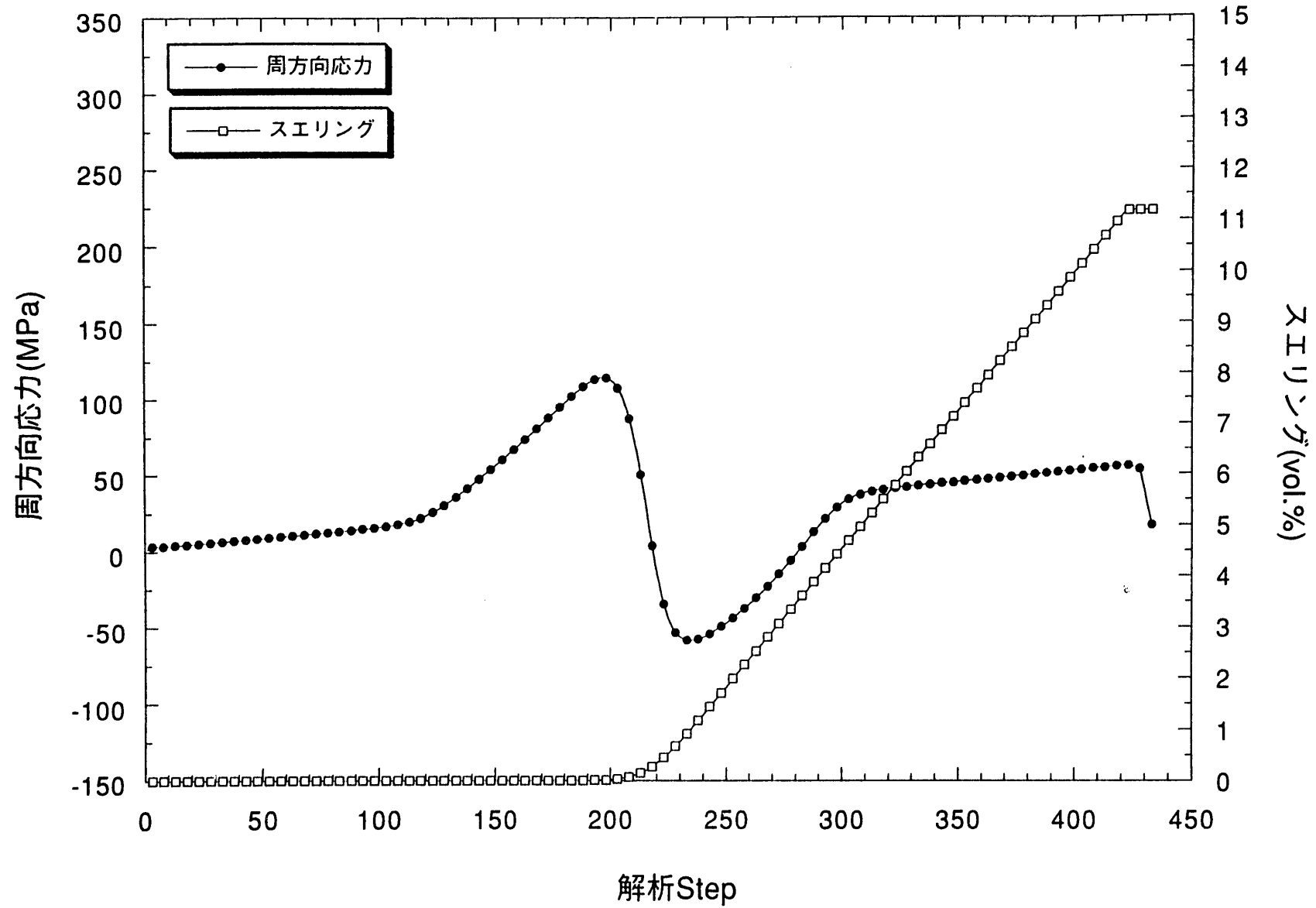


図5.13 被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース4）

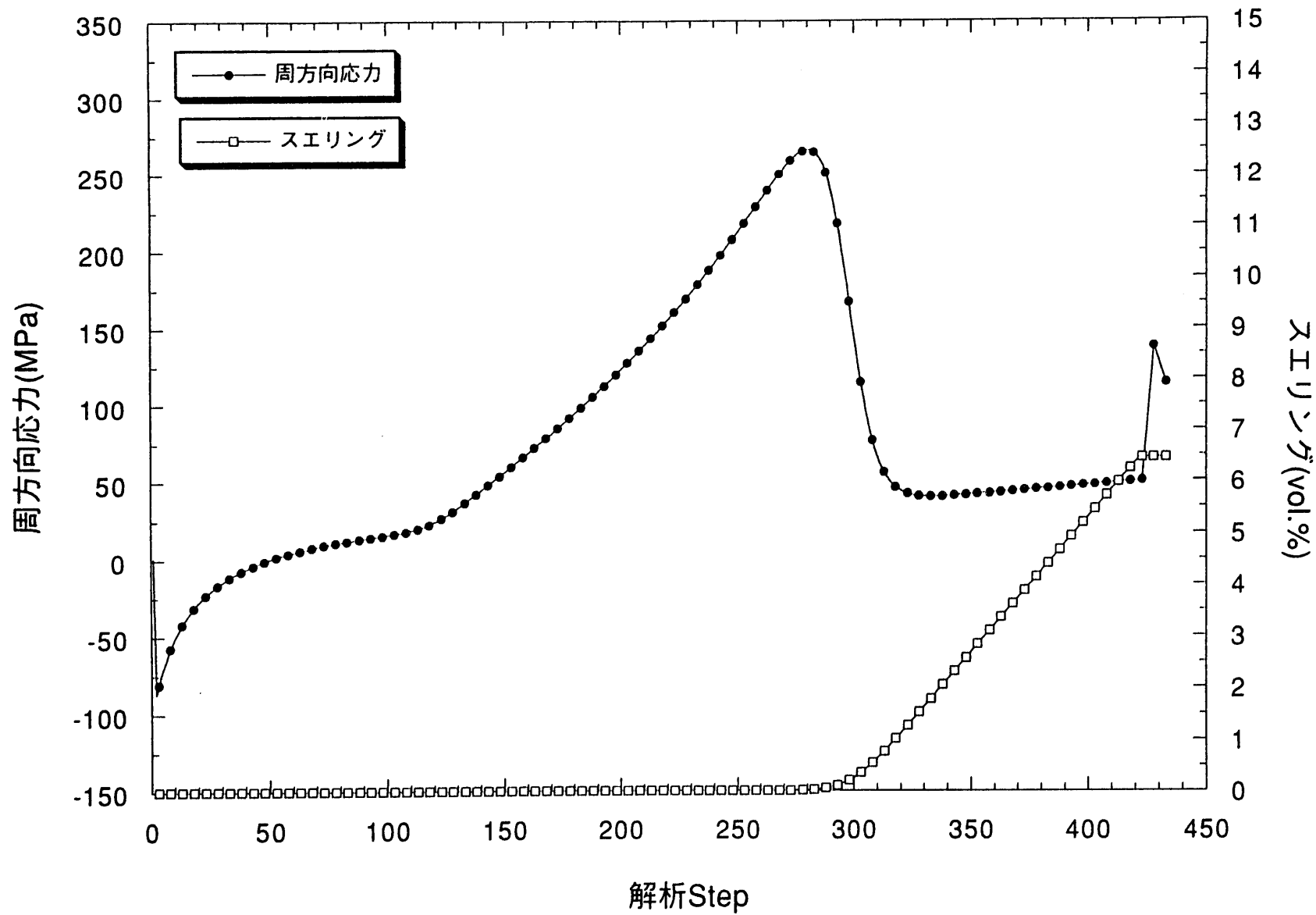


図5.14 被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース4)

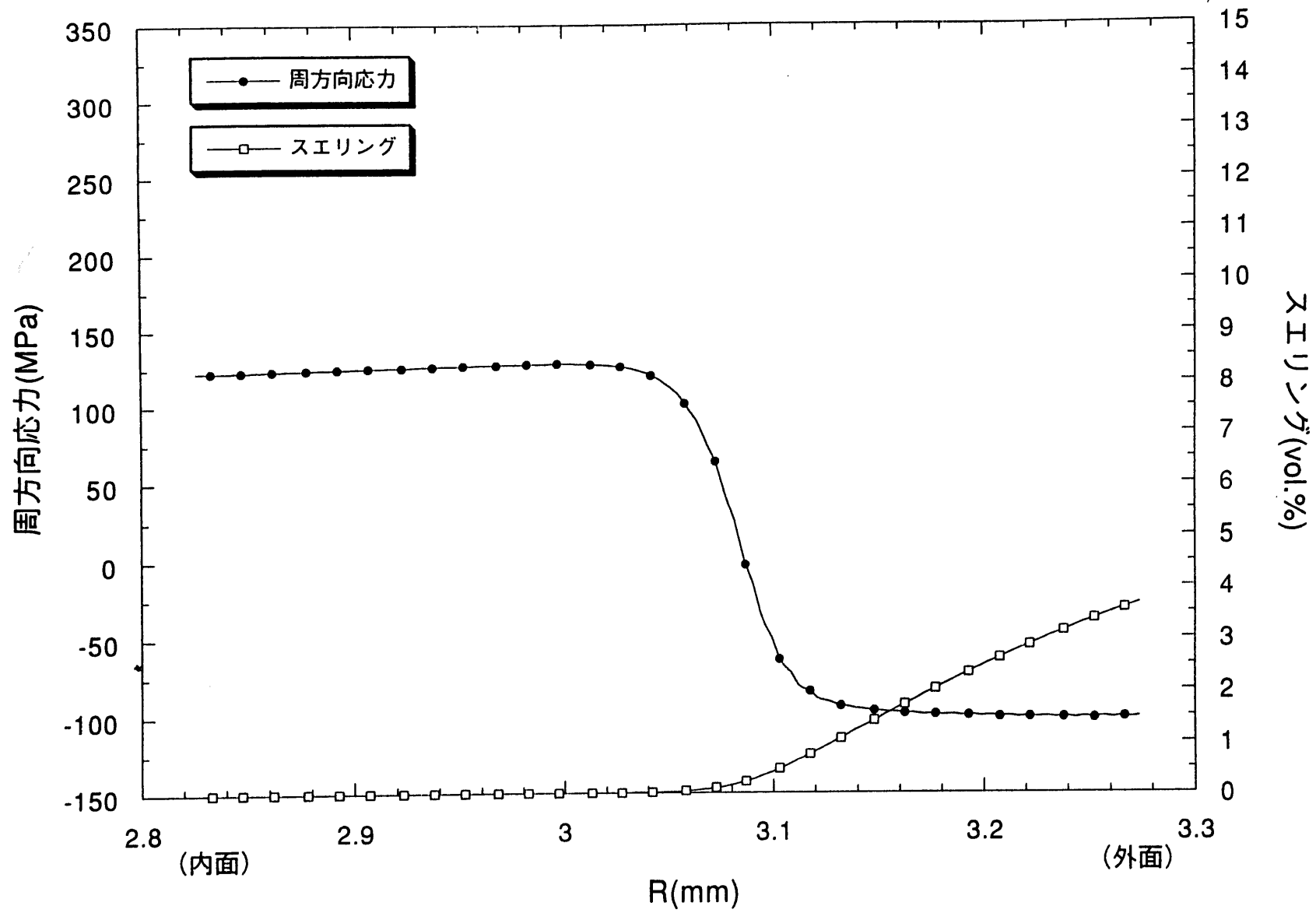


図5.15 周方向応力及びスエリングの被覆管肉厚方向分布 (解析ケース4、Step200)

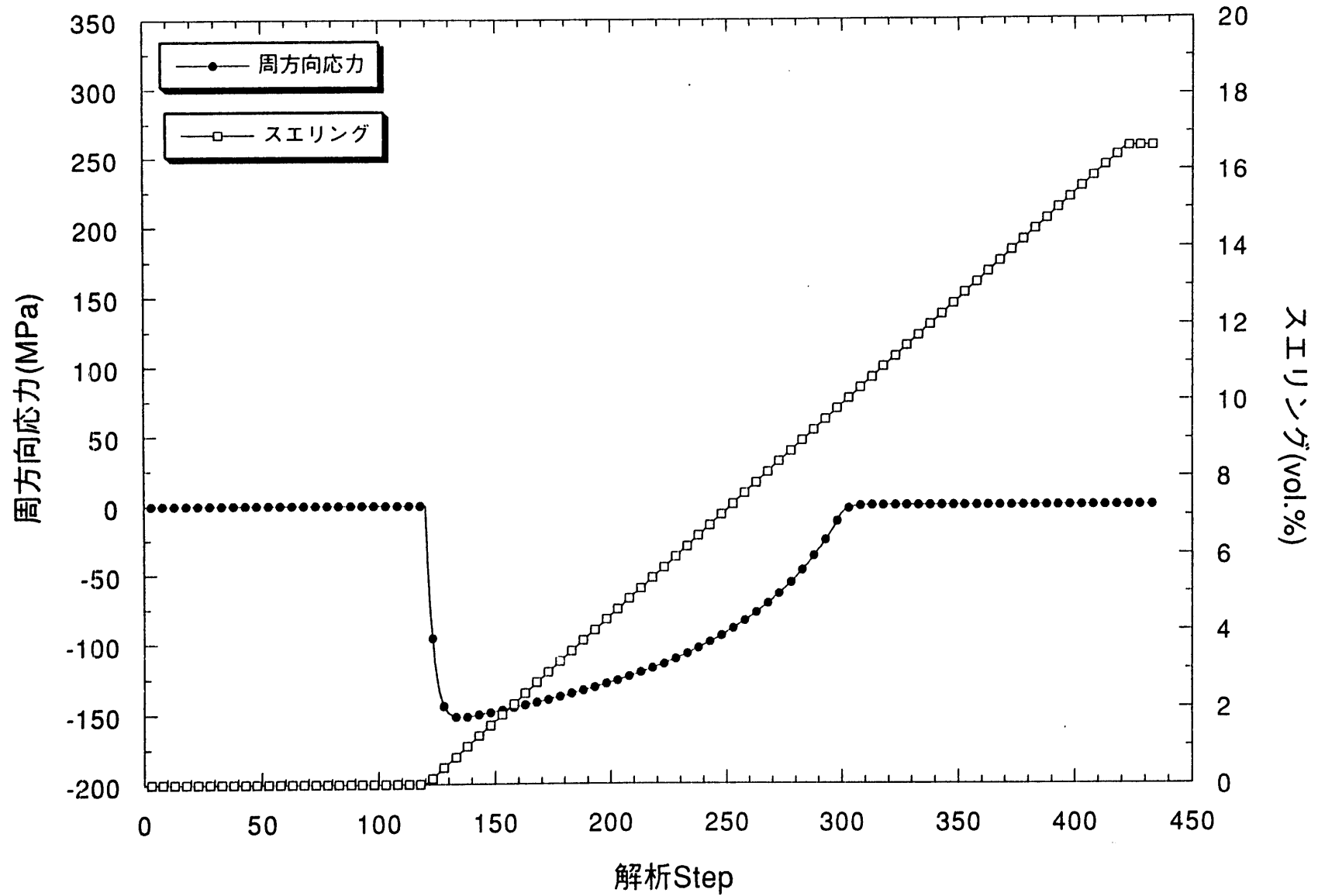


図7.1 被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース5）

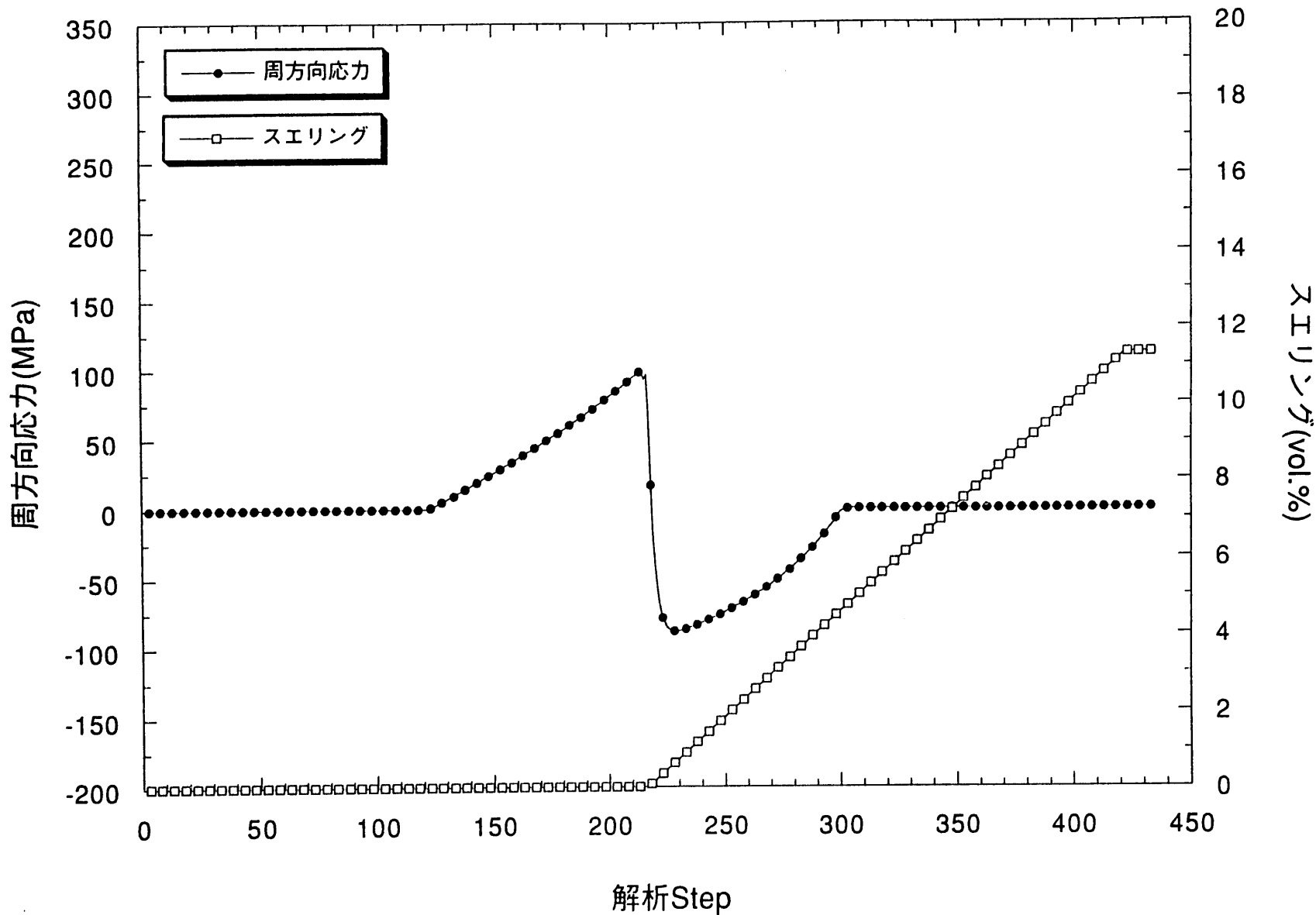


図7.2 被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース5)

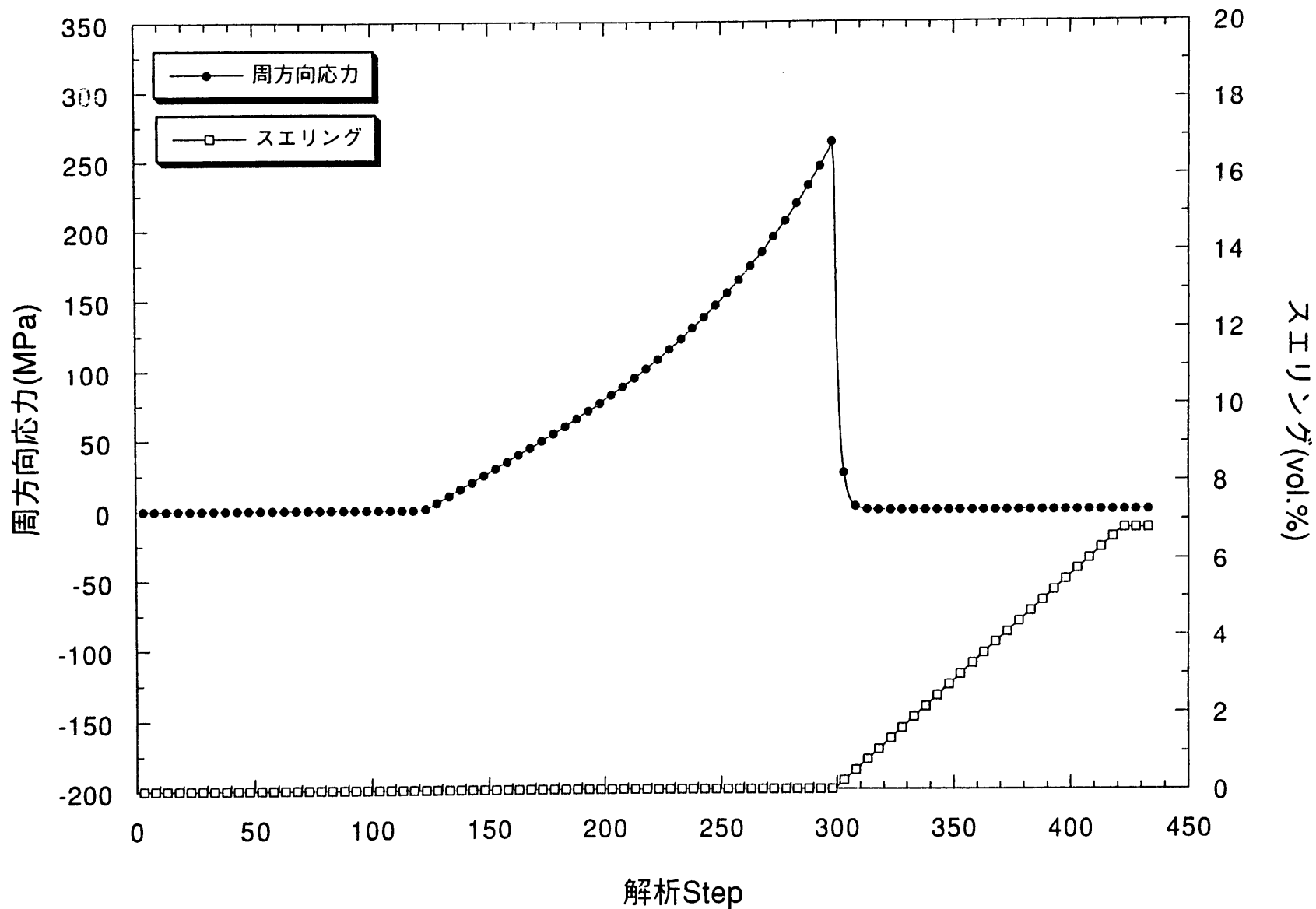


図7.3 被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース5)

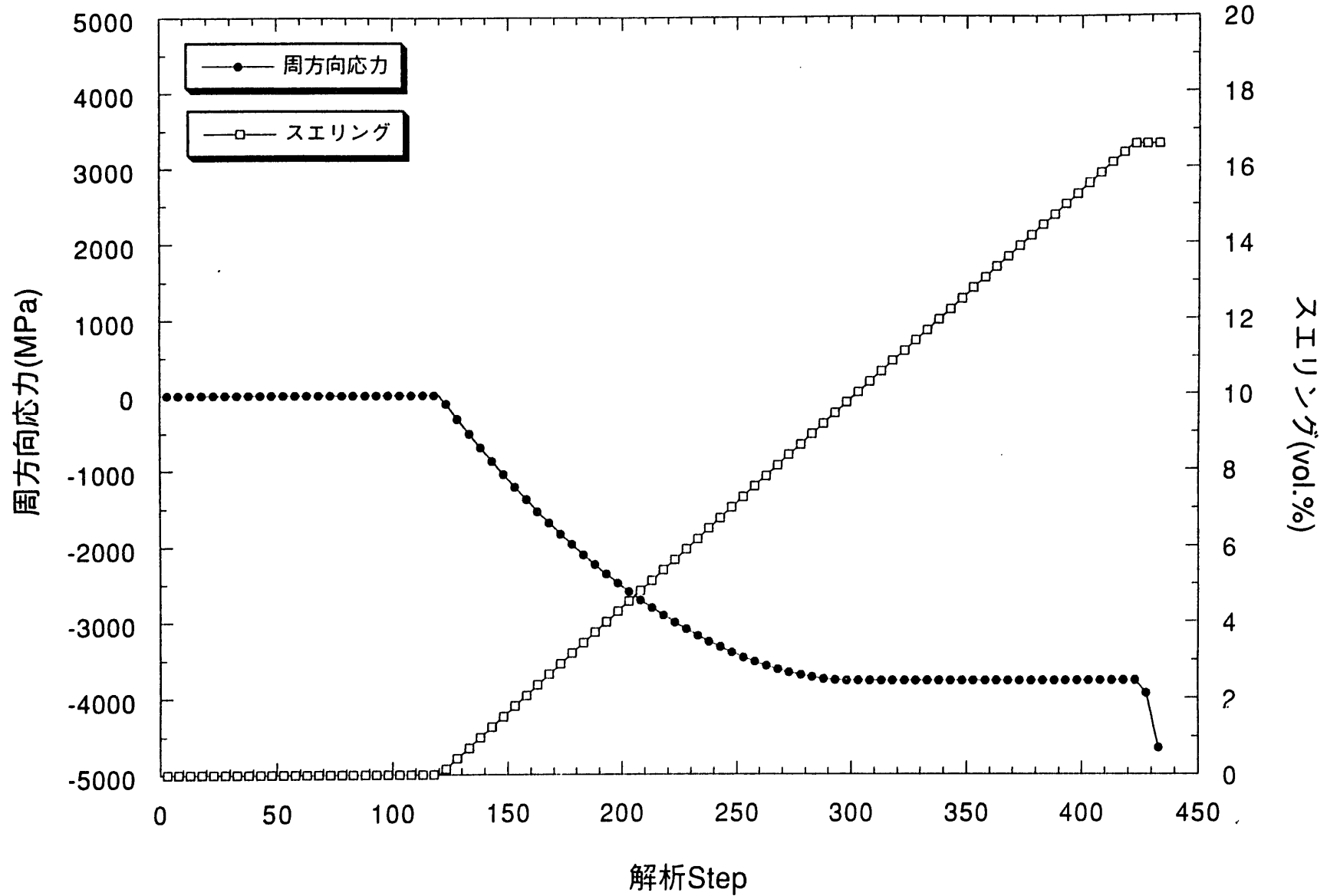


図7.4 被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース6)

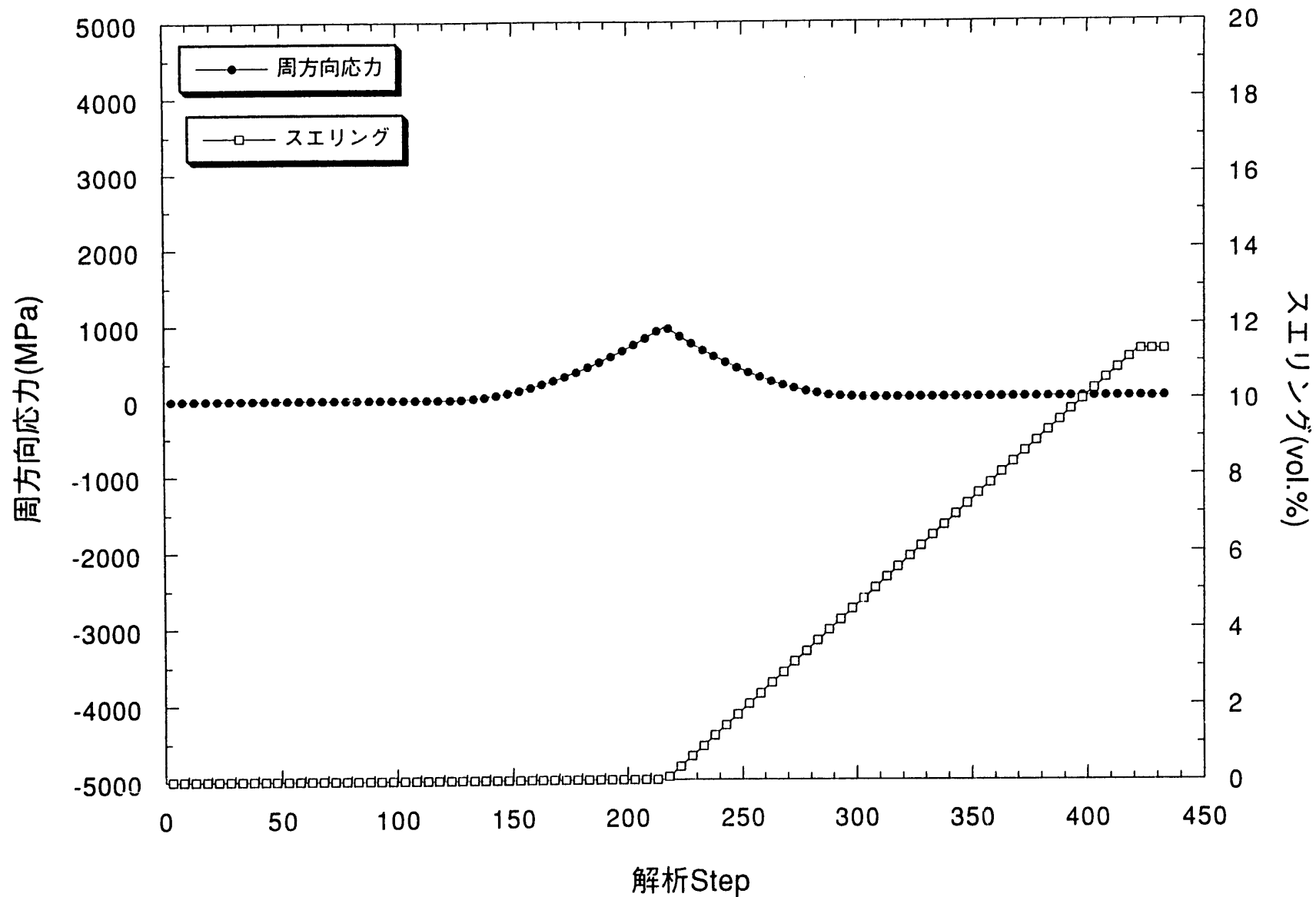


図7.5 被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース6)

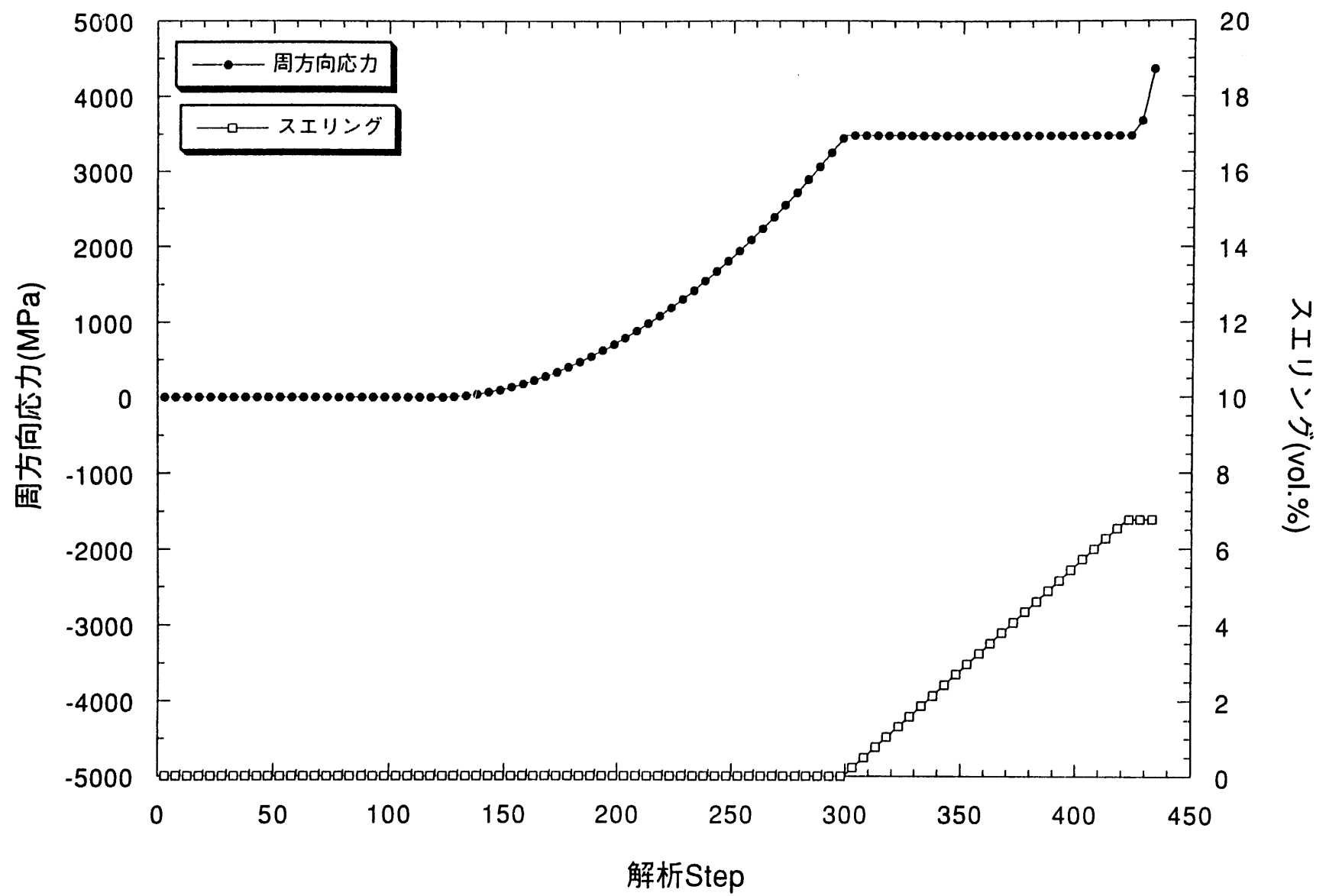


図7.6 被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース6)

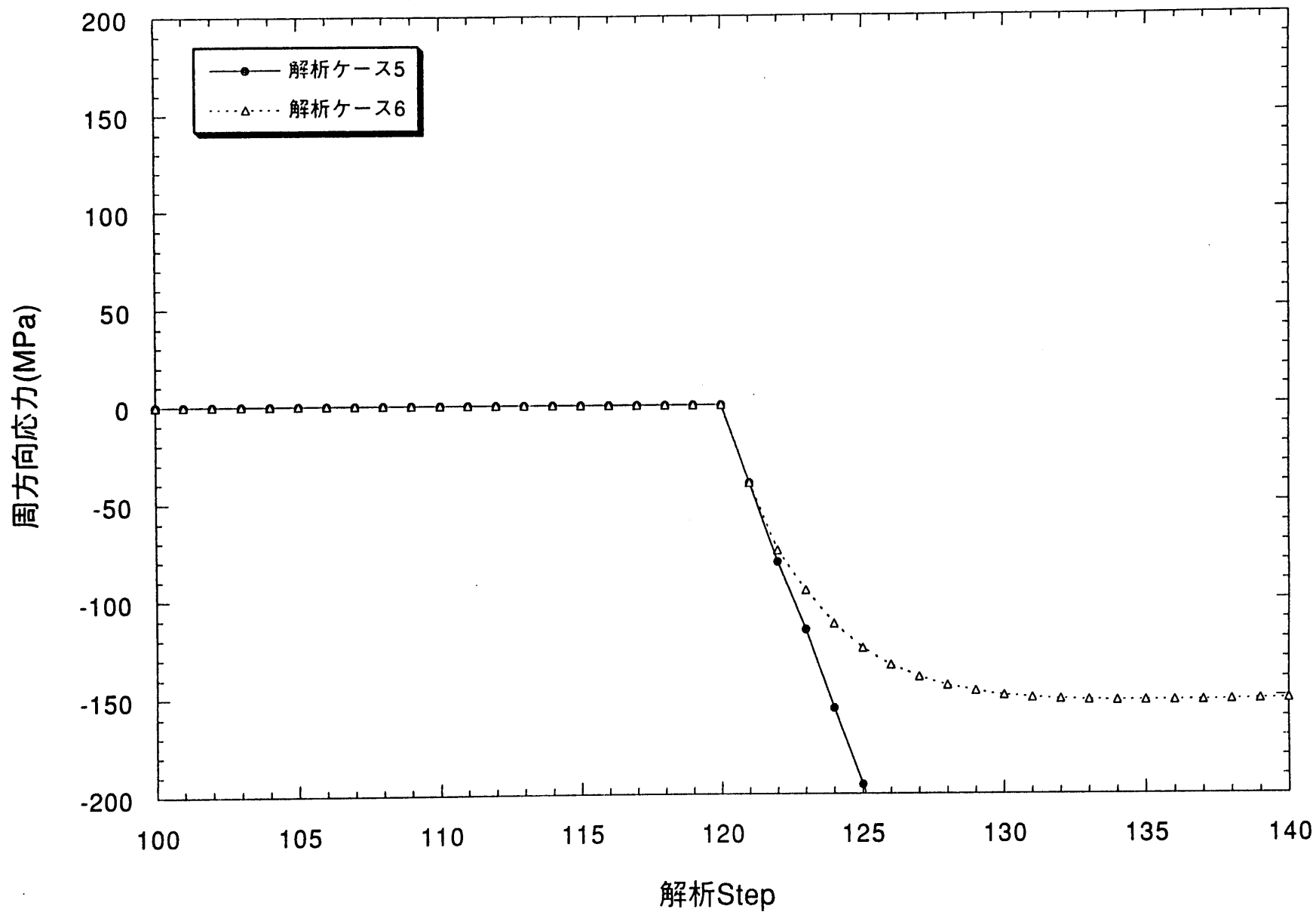


図7.7 被覆管外面における周方向応力の履歴（解析ケース5、解析ケース6）

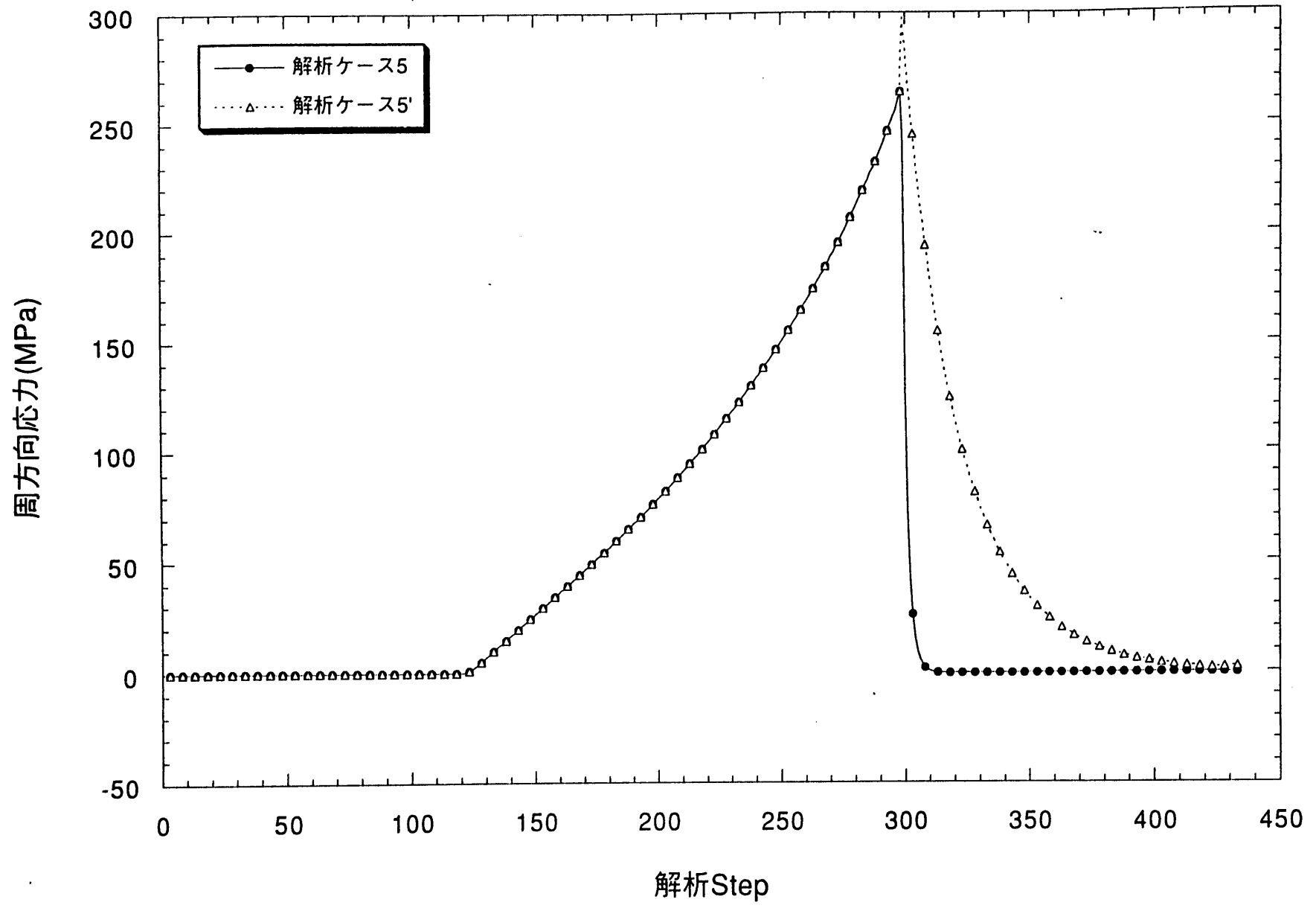


図7.8 被覆管内面における周方向応力の履歴 (解析ケース5、解析ケース5')

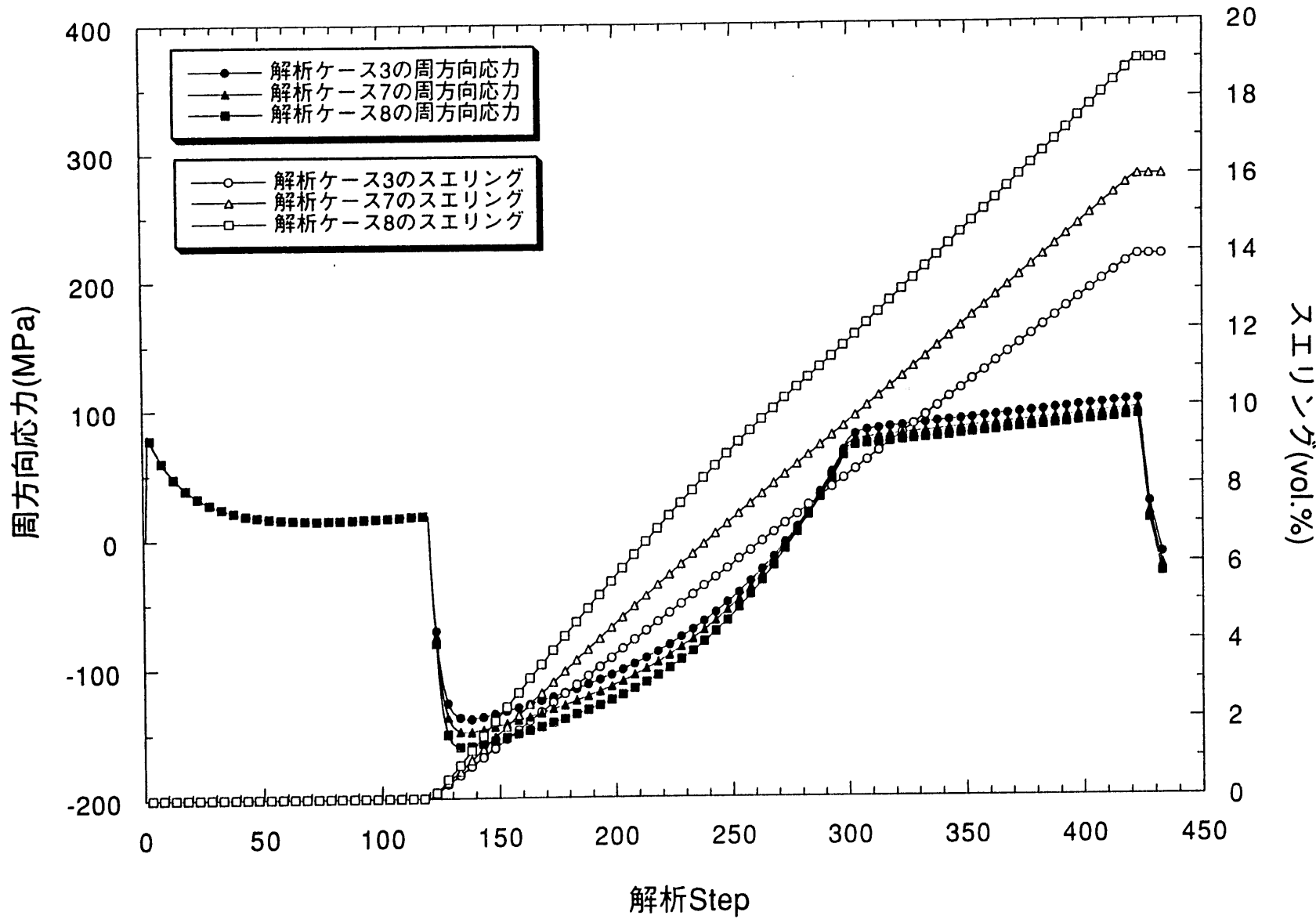


図7.9 被覆管外面における周方向応力の履歴（解析ケース3、解析ケース7、解析ケース8）

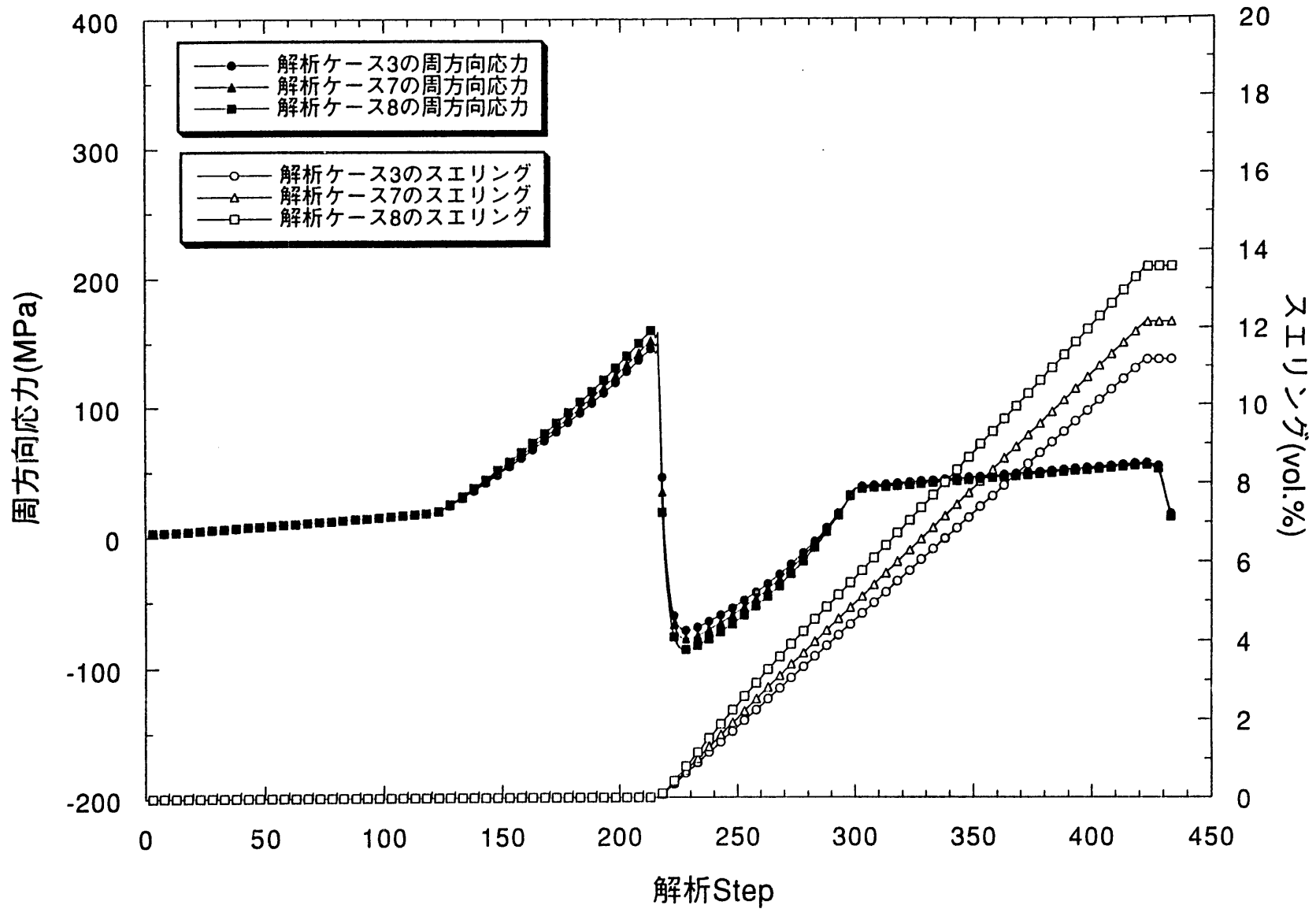


図7.10 被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース3、解析ケース7、解析ケース8)

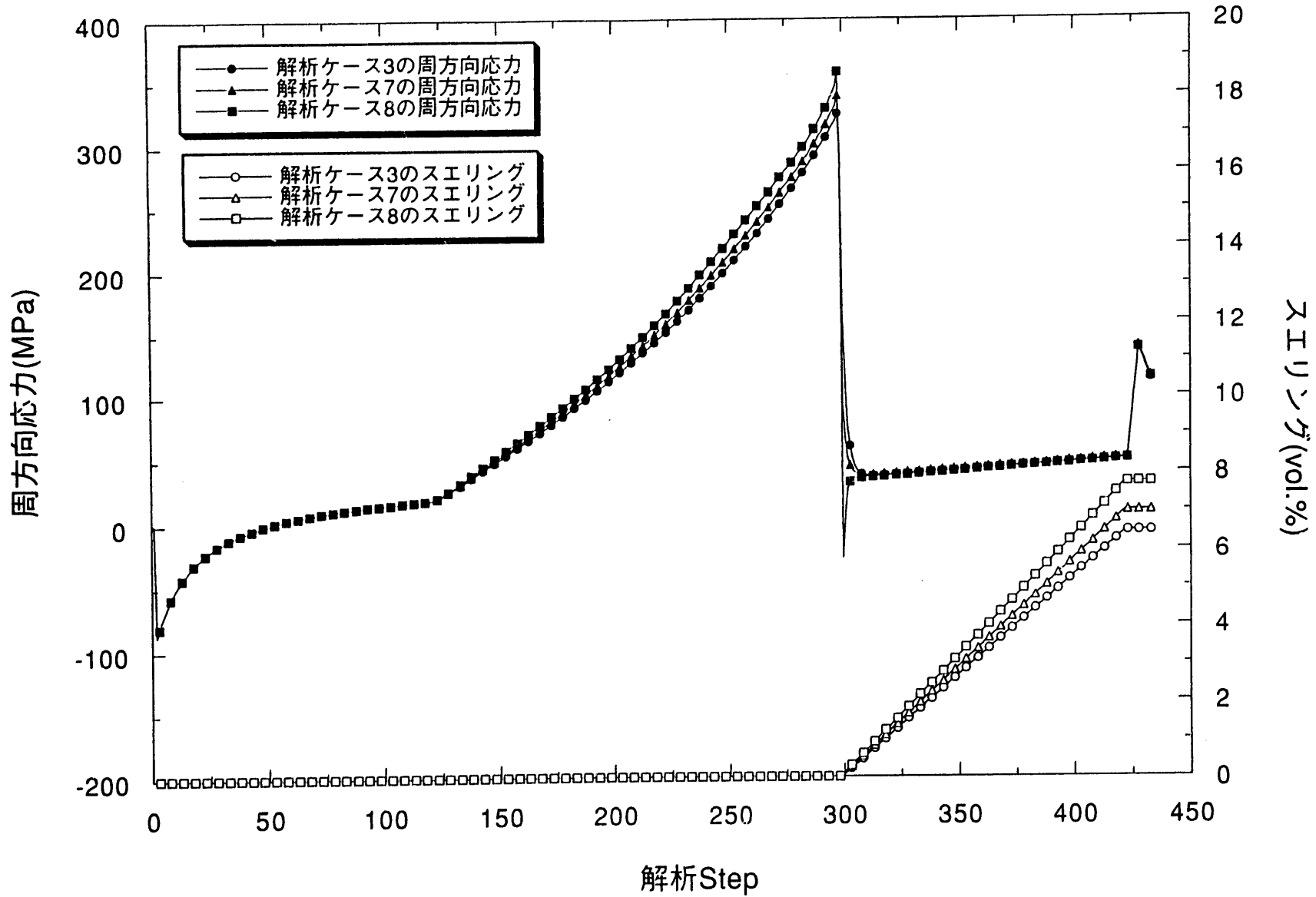


図7.11 被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴（解析ケース3、解析ケース7、解析ケース8）

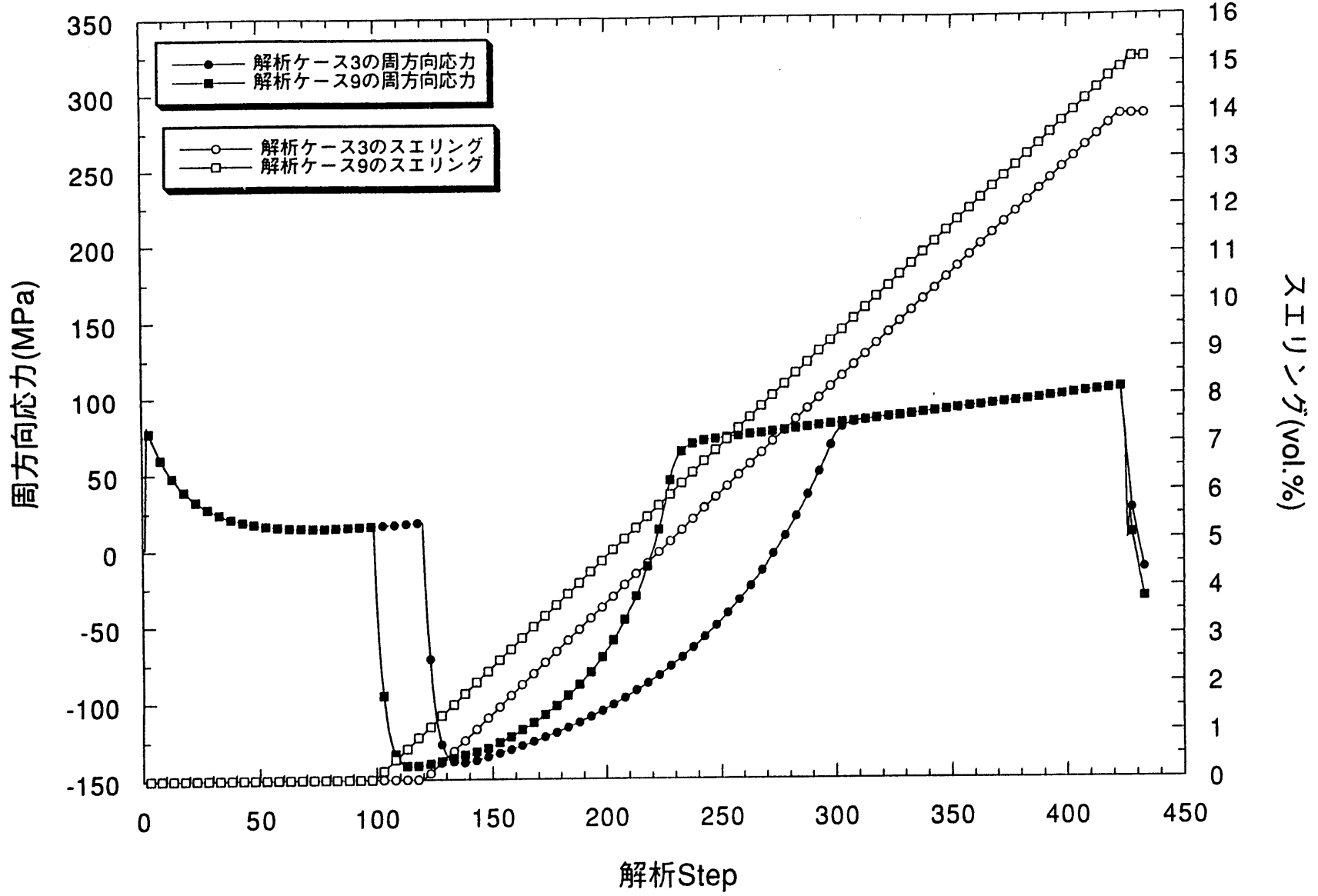


図7.12 被覆管外面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース3、解析ケース9)

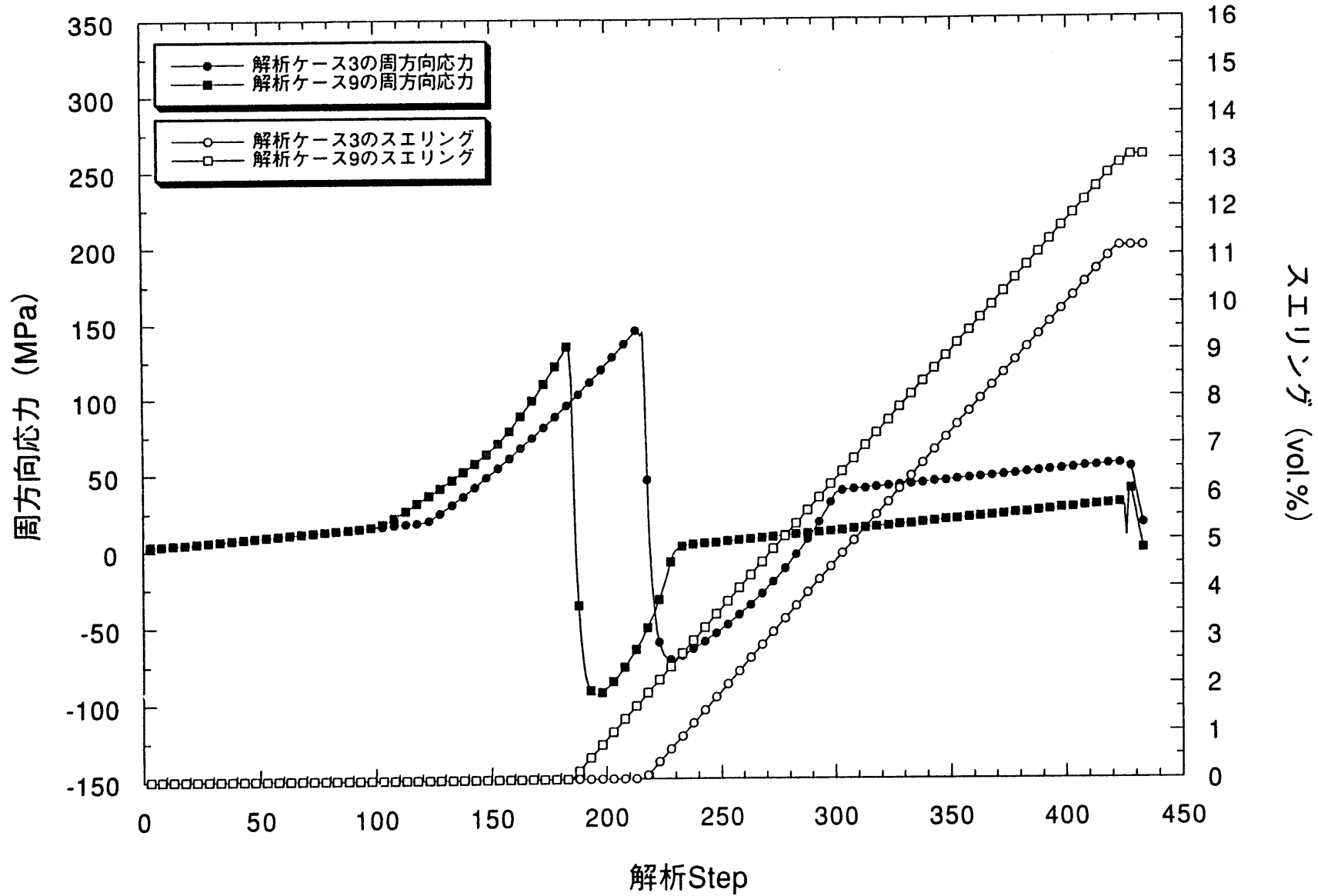


図7.13 被覆管肉厚中心における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース3、解析ケース9)

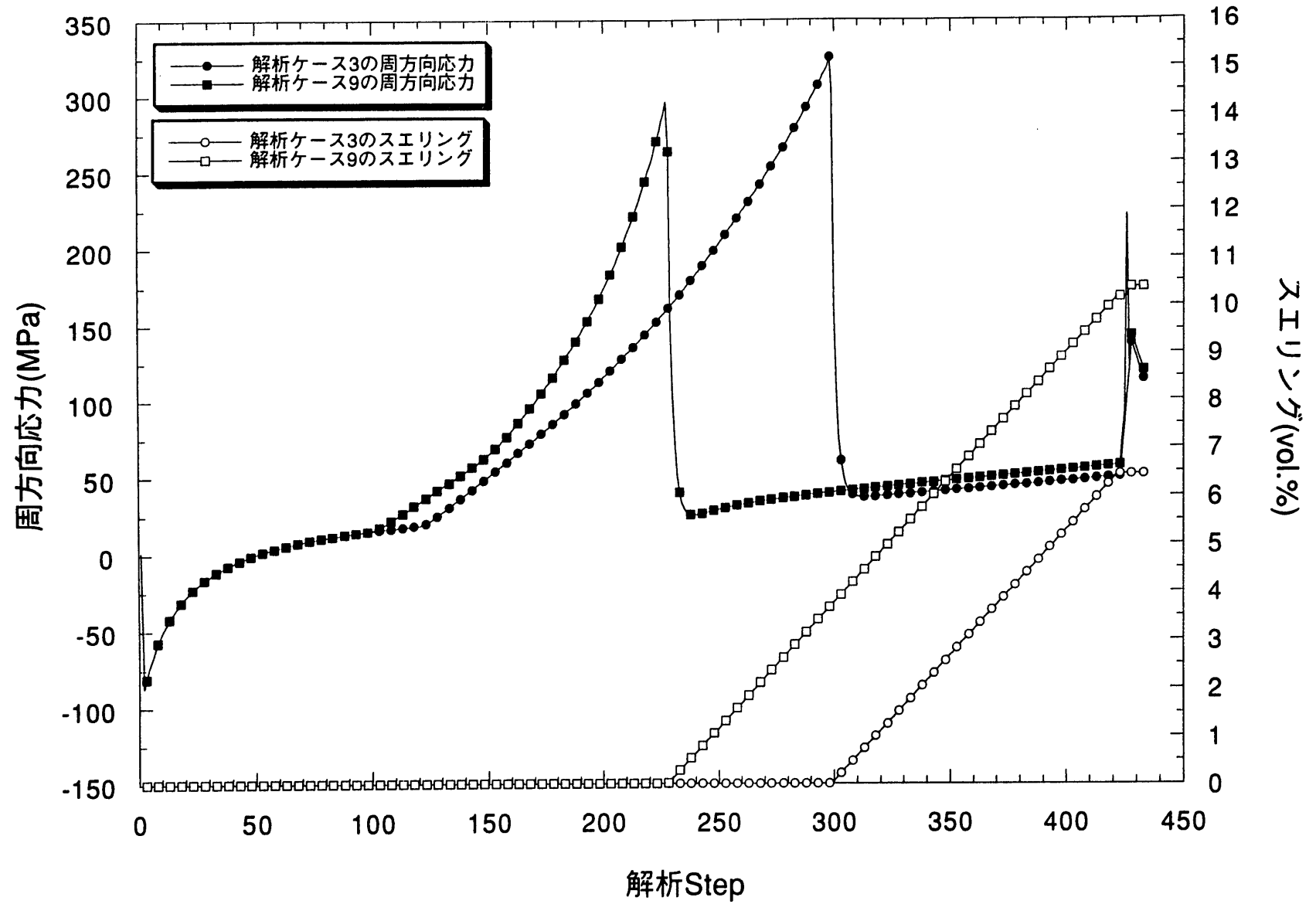


図7.14 被覆管内面における周方向応力とスエリングの履歴 (解析ケース3、解析ケース9)