



JAEA-Technology

2025-002

DOI:10.11484/jaea-technology-2025-002

燃料ピンバンドル変形解析コード“BAMBOO”への 被覆管局所変形モデルの導入

Introduce of Pin-indentation Deformation Model into
Fuel Pin Bundle Deformation Analysis Code “BAMBOO”

上羽 智之 伊藤 昌弘 石谷 行生

Tomoyuki UWABA, Masahiro ITO and Ikuo ISHITANI

大洗原子力工学研究所

燃料材料開発部

Fuels and Materials Department

Oarai Nuclear Engineering Institute

June 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)
は、下記までお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department,
Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

燃料ピンバンドル変形解析コード“BAMBOO”への被覆管局所変形モデルの導入

日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所 燃料材料開発部

上羽 智之、伊藤 昌弘*、石谷 行生*

(2025年2月28日受理)

ワイヤスペーサ型の高速炉燃料集合体では、バンドル-ダクト相互作用 (Bundle-Duct Interaction; BDI) が厳しくなると、ワイヤを介して被覆管に加わる接触荷重によって被覆管断面の扁平化が生じるようになる。特に、バンドル最外周のピンは、ワイヤを介してダクトから被覆管に加わる荷重が大きくなって、この扁平化が顕著になることがある。この場合、扁平化はワイヤが被覆管にめり込んで被覆管が局所的に窪む状態となる。このような被覆管の局所変形をモデル化し、BDI 解析コード“BAMBOO”のピンバンドル変形解析において被覆管の局所変形を考慮できるようにした。炉外バンドル圧縮試験では、バンドル最外周ピンとダクトの間にワイヤが存在するにもかかわらずピンとダクトの隙間がワイヤ径を下回ることが確認されているが、被覆管の局所変形モデルを組み込んだ BAMBOO コードによるバンドル圧縮試験の解析においても、バンドル最外周ピンの被覆管の局所変形によってバンドル圧縮試験結果と同様の傾向を再現できた。

Introduce of Pin-indentation Deformation Model into Fuel Pin Bundle Deformation Analysis Code “BAMBOO”

Tomoyuki UWABA, Masahiro ITO* and Ikuo ISHITANI*

Fuels and Materials Department
Oarai Nuclear Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 28, 2025)

In spacer wire-type fast reactor fuel assemblies, when the bundle-duct interaction (BDI) becomes severe, contact loads applied to claddings via wires cause oval-deformation of the cladding cross-sections. The cladding oval-deformation may become significant especially in the pins at the outermost periphery of the bundle because they are subjected to a large load from the duct via their wires. In this case the cladding oval-deformation occurs in such a manner that the wire is partially sinking into the cladding, and as a result the cladding is locally dented. We developed a model to simulate such cladding local deformation and integrated the model into the BDI analysis code "BAMBOO". In the out-of-pile bundle compression tests, the gaps between pins and the duct became smaller than the wire diameter when the bundle was compressed despite the existence of a wires between the bundle outermost pins and the duct. The bundle compression test analyses by BAMBOO equipped with the model showed that the local deformation of claddings of outermost pins reproduced the similar trend to the compression test results.

Keywords: Pin Bundle, Bundle-duct Interaction, Cladding Local Deformation,
Bundle Compression Test

* NESI Inc.

目 次

1.はじめに	1
2. 被覆管局所変形モデルの導入	1
2.1 BAMBOO コードの接触・分離解析手法	1
2.2 被覆管局所変形モデル	2
3. テスト解析	4
3.1 バンドル圧縮試験解析	4
3.2 照射変形解析	5
4. まとめ	6
参考文献	6

付録

BAMBOO コードの解析で被覆管の局所変形モデルを適用する手順	24
----------------------------------	----

Contents

1. Introduction	1
2. Introduce of cladding local deformation model	1
2.1 Contact and separation analysis method of BAMBOO	1
2.2 Cladding local deformation model	2
3. Test analysis	4
3.1 Out of pile bundle compression test analysis	4
3.2 Analysis of bundle deformation under irradiation	5
4. Summary	6
References	6

Appendix

Procedure to consider Pin-indentation deformation model in the BAMBOO code analysis	24
--	----

表リスト

表 1	バンドル圧縮試験に供した試験体の寸法	7
表 2	照射変形解析の条件	7

図リスト

図 1	BAMBOO コードフローチャート	8
図 2	ピン-ダクト間およびピン-ピン間のオーバーラップ	9
図 3	被覆管の扁平化モデル	9
図 4	バンドル圧縮試験におけるピン-ダクト（圧縮板）間距離周方向分布	10
図 5	被覆管の局所変形モデル	10
図 6	被覆管の局所変形モデルにおけるワイヤ径補正の定義	11
図 7	バンドル圧縮試験体と BAMBOO コード解析モデル	12
図 8	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 I、BDI 量=0.1 dw）	13
図 9	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 I、BDI 量=0.5 dw）	13
図 10	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 I、BDI 量=0.9 dw）	14
図 11	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 I、BDI 量=1.5 dw）	14
図 12	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 I、BDI 量=1.8 dw）	15
図 13	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 II、BDI 量=0.1 dw）	15
図 14	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 II、BDI 量=1.0 dw）	16
図 15	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 II、BDI 量=2.0 dw）	16
図 16	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 II、BDI 量=3.0 dw）	17
図 17	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 III、BDI 量=0.1 dw）	17
図 18	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 III、BDI 量=1.0 dw）	18
図 19	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 III、BDI 量=2.0 dw）	18
図 20	ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 III、BDI 量=3.0 dw）	19
図 21	照射変形テスト解析モデル	20
図 22	冷却材温度の集合体径方向分布	21
図 23	照射末期における高速中性子照射量軸方向分布	21
図 24	照射末期における BDI 量軸方向分布	22
図 25	照射末期におけるピン-ダクト間距離周方向分布（BDI 量最大軸位置）	22
図 26	照射末期における最外周ピンの被覆管扁平化量（BDI 量最大軸位置）	23

1. はじめに

高速炉で使用されるワイヤスペーサ型の炉心燃料集合体は、燃焼が進むと燃料ピンとダクトとの相互作用：BDI (Bundle-Duct Interaction) が発生する。BAMBOO コードは、ワイヤスペーサ型炉心燃料集合体の BDI 発生下における燃料ピンバンドルの変形を有限要素法によって解析するコードであり、隣接するピン同士や燃料ピンとダクトとの間に生じる接触荷重による燃料ピンの湾曲や被覆管の扁平化などの現象を取り扱っている¹⁾。一方、BDI は炉外のバンドル圧縮試験によって模擬することができる。日本原子力研究開発機構 (JAEA) で実施したバンドル圧縮試験では、試験中に撮像したバンドル横断面の X 線 CT 画像を画像解析した結果、ダクトを模擬した圧縮板に対してワイヤが直交方向に向く軸位置で最外周ピンとダクトとの距離がワイヤ径よりも小さくなることが確認された²⁾。これはダクトから荷重を受けたワイヤが被覆管にめり込んで、被覆管が窪んだことによるものと考えられる。このようなワイヤが被覆管にめり込んで被覆管が局所的に変形するモデルを開発し、BAMBOO コードのピンバンドル変形解析機能に組み込む整備を実施した。

2. 被覆管局所変形モデルの導入

2.1 BAMBOO コードの接触・分離解析手法

BAMBOO は、ワイヤスペーサ型炉心燃料集合体内の全ての燃料ピンを 1/12 ワイヤピッチの 2 節点梁要素でモデル化し、節点間 (ピン-ピン間およびピン-ダクト間) に生じる接触荷重と変位の力学的な平衡状態を接触・分離解析により求めている。これは次式により定式化している³⁾。

$$\begin{bmatrix} [K] & [Bc] \\ [Bc]^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\Delta u\} \\ \{\Delta \lambda\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{P\} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \{Q\} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{R\} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \{\lambda\} \\ \{\delta\} \end{bmatrix} \quad \dots(1)$$

ここで、

- [K] : 剛性マトリクス
- [Bc] : 接触拘束マトリクス
- {P} : 外荷重ベクトル
- {R} : 残差荷重ベクトル
- {Q} : 照射クリープ疑似荷重ベクトル
- {λ} : 接触荷重ベクトル
- {Δu} : 変位増分ベクトル
- {Δλ} : 接触荷重増分ベクトル
- {δ} : オーバーラップベクトル

式(1)は以下のように変位増分の式と接触荷重増分の式に分離し、繰返し計算の中で変位増分と接触荷重増分を相互に参照し、荷重と変位の力学的な平衡状態に収束させている。図1に、このフローチャートを示す。図中の変位増分は、先ず接触力増分をゼロとして次式により求める。

$$\{\Delta u\} = [K]^{-1} \cdot (\{P\} + \{Q\} - \{R\} + \{\lambda\}) \quad \dots(2)$$

変位増分により生じるピン-ピン間およびピン-ダクト間のオーバーラップ (図2) を計算し、接触拘束マトリクスとオーバーラップベクトルを作成する。接触荷重増分は、変位増分により生じたオーバーラップを打ち消す反力として次式により求める。

$$\{\Delta \lambda\} = ([Bc]^T \cdot [K]^{-1} \cdot [Bc])^{-1} \cdot \{\delta\} \quad \dots(3)$$

式(3)によって求めた接触荷重増分を用いて接触荷重を更新し、式(2)で変位増分を計算する。以降、オーバーラップが規定値以下となるまで(2)と(3)を繰り返す。

2.2 被覆管局所変形モデル

BAMBOO コードは、燃料ピンの変形機構としてピン-ピン間あるいはピン-ダクト間に生じた接触荷重による被覆管の扁平化を接触・分離解析の過程で計算している。被覆管の扁平化は図3に示すようにピンに発生する接触荷重によりピン外径が減少するモデルとなっており、ワイヤがダクトに対して直交方向に向く断面の最外周ピンとダクトとの距離は、ワイヤ径1本分の隙間が存在する結果になる。

図4にバンドル圧縮試験で撮影されたバンドル横断面 X 線 CT 画像を画像解析して得られたピン-ダクト (圧縮板) 間距離の周方向分布を示す²⁾。これはダクトを模擬した6枚の圧縮板を初期の位置からそれぞれワイヤ径1本分内側に変位させた燃料ピンバンドルの状態である。圧縮板を内側に変位させたことにより、全体的にピン-圧縮板間距離は減少しているが、最外周ピンと圧縮板間にワイヤが存在する面 (F 面) の距離もワイヤ径よりも減少していることが確認できる。この減少は図5に示すようにワイヤがダクト (圧縮板) から受ける荷重によって被覆管にめり込んで被覆管が窪んだ影響によるものと考えられる。BAMBOO コードでは燃料ピンを梁要素でモデル化している都合上、ワイヤがピン (被覆管) にめり込んで被覆管が局所的に変形する状況を直接扱うことができないため、このような被覆管の局所変形をワイヤ径の減少に置き換えることで模擬し、コードの接触・分離解析において考慮できるようにした。

被覆管局所変形モデルは図6に示すようにオーバーラップ計算においてワイヤ径に対して以下の式(4)に示す補正を施し、ダクトからの接触荷重によってワイヤが被覆管にめり込む現象を取り扱うこととした。

$$d'_w = d_w - \frac{\Delta d_p}{2} \times f \quad \dots(4)$$

ここで、

- Δd_p : 被覆管の扁平化によるピンの外径（直径）減少量（mm）
- d_w : 補正前のワイヤ径（mm）
- d'_w : 補正後のワイヤ径（mm）
- f : ワイヤ径の補正にかかるファクタ（-）

ワイヤ径とはワイヤの直径を指す。ワイヤの被覆管めり込み変形量は、被覆管の扁平化によるピン径減少量の 1/2 として定義している。ファクタ f はワイヤの最外周ピンの被覆管へのめり込みの程度を調整するための係数であり、 f が大きいほどめり込みの程度が大きくなる。 $f = 0$ ではワイヤのめり込みがモデル化されず、通常は $f = 1$ としている。 f は入力によって変更することができる。ワイヤ径の補正の対象はノーマルプレーン（ワイヤがダクトに対し直交方向に向く軸位置）のワイヤを介してダクトと接触するピンのワイヤ径である。ピンに扁平化が生じれば照射変形解析においても処理の対象とした。接触・分離解析においてピン-ダクト間のオーバーラップ量は図 6 の左側に示すように、変位後のピンの位置（中心位置）とダクト内面との距離と被覆管の扁平化を考慮したピン外径とワイヤ径から次式によって計算している（ワイヤの被覆管へのめり込み（被覆管局所変形）がない場合）。

$$\delta = V + \frac{d_p - \Delta d_p}{2} + d_w \quad \dots(5)$$

ここで、

- δ : ピン-ダクト間のオーバーラップ量（mm）
- V : 変位後のピン中心位置とダクト内面との距離（mm）
- d_p : ピン外径（直径）（mm）
- Δd_p : 被覆管の扁平化によるピンの外径（直径）減少量（mm）
- d_w : 補正前のワイヤ径（mm）

ワイヤの被覆管へのめり込み（被覆管局所変形）を考慮する場合、そのオーバーラップ量は図 6 の右側に示すように、式(5)のワイヤ径を式(4)で計算した補正後のワイヤ径に置き換えることによって計算する。

$$\delta' = V + \frac{d_p - \Delta d_p}{2} + d'_w \quad \dots(6)$$

ここで、

- δ' : ワイヤの被覆管めり込み変形を考慮したオーバーラップ量（mm）
- d'_w : 補正後のワイヤ径（mm）

式(6)で算出したオーバーラップ量を式(1)のオーバーラップベクトル $\{\delta\}$ に適用して接触・分離解析を行い、ワイヤのめり込みを疑似的に考慮するピンバンドル変形を解析する。

3. テスト解析

3.1 バンドル圧縮試験解析

BAMBOO コードに組み込んだ被覆管の局所変形モデルの機能を確認するため、127 本のバンドル圧縮試験解析を実施した。バンドル圧縮解析は、ダクトを圧縮板としてモデル化し、ダクトをバンドルの内側の方向に強制変位させることで生じる BDI を解析するものであり、表 1 および図 7 に示す体系で実施した。

BDI の程度を示す指標として BDI 量を用いる。BDI 量は以下に示す式で定義される。

$$\text{BDI 量} = (B - E)/dw \quad \dots(7)$$

B	: 燃料ピンバンドル対面方向距離 (mm)
E	: ダクト (圧縮板) 内対面間距離 (mm)
dw	: 補正前のワイヤ径 (mm)

B は次式の様に計算する。

$$B = 2(N - 1) \cdot (d_p + dw) \cdot \cos 30^\circ + D_p + 2dw \quad \dots(8)$$

d_p	: ピン外径 (mm)
N	: バンドルリング数 (127 本ピンバンドルの場合は $N = 7$)

式(7)の右辺は無次元となるが、BDI の程度をワイヤ径で相対化して評価することを明確に示すため、以下では「 dw 」を BDI 量の単位とする。

最外周ピンと圧縮板間の距離について、バンドル圧縮試験のバンドル横断面 CT 画像を数値処理した結果と、BAMBOO コードで解析した結果を比較した。バンドル圧縮試験を実施した BDI 量 (圧縮量) は表 1 に示すように試験体 I で 5 ケース、試験体 II、III でそれぞれ 4 ケースあるため、同じ BDI 量の解析結果と比較した。比較する軸方向ノード位置は、図 7 に示すようにワイヤが F 面方向を向くノーマルプレーン (BAMBOO モデルではノード番号 36) とした。以降、ワイヤの最外周ピンの被覆管へのめり込みを考慮する処理を「めり込み処理」と呼称する。

図 8～図 20 に、最外周ピン-圧縮板間距離の分布について、めり込み処理なしの解析結果をグレー、めり込み処理を考慮した解析結果を黒、X 線 CT 画像の測定結果を白抜きで比較して示す。めり込み処理におけるワイヤ径の補正にかかるファクタは 1.0 とした。

F 面にはピンと圧縮板間にワイヤが存在する。F 面の最外周ピン-圧縮板間距離は、めり込み処理がない解析では、ワイヤ径 1 本分で BDI 量が増加しても変化しないが、めり込み

処理がある解析では、F面の最外周ピン-圧縮板間距離は、BDI量が増加するに伴ってワイヤ径を下回って減少していき、バンドル圧縮試験の結果と同様の傾向を示した。また、F面と隣り合うA面とE面においても、最外周ピン-圧縮板間距離はめり込み処理のある解析の方がめり込み処理がない解析よりも小さくなり、バンドル圧縮試験結果に近くなった。

図12から分かるように、試験体Iは、BDIによるF面側での最外周ピン-圧縮板間距離の減少の程度が試験体II、IIIに比べて小さい。これは試験体Iのワイヤピッチが307mmと長いためである（試験体II、IIIのワイヤピッチは200mmと短い）。ワイヤピッチが長いと被覆管の扁平化剛性が大きくなるため扁平化が生じにくくなる（扁平化剛性が大きくなるのはワイヤを介した被覆管への接触荷重の分布範囲が軸方向に広がるからである）。最外周ピンの被覆管扁平化が小さければワイヤのめり込みの程度（被覆管局所変形の程度）も小さくなるため、試験体IではF面側でのピン-圧縮板間距離が、試験体II、IIIに比べて減少しにくかったと考えられる。

3.2 照射変形解析

照射変形解析における被覆管局所変形モデルの機能を確認するため、表2および図21に示す条件でテスト解析を実施した。この条件はFFTFで照射したMFA-2集合体の条件であり、温度分布は、ASFRE-IVコードによる熱流動解析結果を用いた⁴⁾。図22に冷却材温度分布を示す。図23に照射末期の高速中性子照射量の軸方向分布を示す。照射末期の高速中性子照射量は最大で $23.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)に達する。図24に照射末期におけるBDI量の軸方向分布を示す。BDI量はピン下端から610mm ($X/L=0.45$ 、ノーマルプレーン)の軸位置で最大1.95 dwとなる。図25にBDI量最大軸位置における照射末期のピン-ダクト間距離周方向分布を示す。めり込み処理を行わない解析結果をグレー、めり込み処理を行った場合の解析結果を黒でプロットしている。めり込み処理におけるワイヤ径補正にかかるファクタは1.0とした。図25に示すようにこの軸位置のワイヤ方向はF面方向を向く配置となっており、めり込み処理を行った場合のピン-ダクト間距離はめり込み処理を行わない場合の結果よりも小さいが、その差は僅かであった。これは、MFA-2集合体のワイヤピッチが試験体Iと同じ307mmと長いことに加え、ピン外径が6.5mmと細いため、被覆管の扁平化剛性が極めて大きく、被覆管の扁平化が非常に生じにくいためである（炉内での被覆管扁平化は照射クリープ変形によるものが主体となるが、扁平化剛性が大きいと照射クリープ変形による扁平化も生じにくくなる）。図26に図25と同じ軸位置のダクトF面とワイヤを介して接触している被覆管の扁平化量を示す。図に示すようにピン番号36の扁平化量は約0.06mmであり、他のピンはこれよりも扁平化量は小さい。このように被覆管の扁平化が非常に小さいため、めり込み処理によるピン-ダクト間距離への影響の度合いが僅かなものになったと考えられる。

4. まとめ

ダクトから受ける接触荷重を受けてワイヤが被覆管にめり込んで窪むという被覆管の局所変形をモデル化し、ワイヤスペーサ型燃料ピンバンドル変形解析コード“BAMBOO”のピンバンドル変形解析機能に組み込む整備を実施した。被覆管の局所変形モデルは、ワイヤがダクトあるいは圧縮板に直交方向に向く軸位置での最外周燃料ピンにおけるワイヤの被覆管へのめり込みをワイヤ径の減少に置き換えて模擬するものである。被覆管の局所変形は、これを模擬したワイヤ径の減少を、接触・分離解析で評価するピン-ダクト間のオーバーラップ量に反映することにより、燃料ピンバンドル変形の解析に被覆管の局所変形の影響を考慮できるようにした。

機能確認のため、ワイヤのめり込みによる被覆管の局所変形を考慮したバンドル圧縮試験解析と照射変形解析を実施した。バンドル圧縮試験解析では、圧縮板-最外周ピン間距離をバンドル圧縮試験の測定結果と解析結果を比較し、ワイヤが圧縮板に直交方向に向く面とその隣接する面の距離が測定結果に近くなることを確認した。照射変形解析においてはワイヤピッチが長いこと等により被覆管の局所変形は小さくピン-ダクト間距離への影響も少ない結果となった。

参考文献

- 1) Tomoyuki Uwaba, Kosuke Tanaka, “Development of a fast breeder reactor fuel bundle-duct interaction analysis code-BAMBOO: Analysis model and validation by the out-of-pile compression test”, Nuclear Technology, 136, pp. 14-23 (2001).
- 2) 上羽 智之、市川 正一、勝山 幸三、“炉外バンドル圧縮試験による太径ピンバンドルのBDI評価”, JAEA-Research 2013-039 (2014) 25p.
- 3) Tomoyuki Uwaba, Masahiro Ito, Shigeharu Ukai, Michel Pelletier, “Development of a FBR fuel bundle-duct interaction analysis code-BAMBOO: Analysis model and verification by Phenix high burn-up fuel subassemblies”, Journal of Nuclear Science and Technology, 42, pp. 608-617 (2005).
- 4) Tomoyuki Uwaba, Masahiro Ito, Tomoyasu Mizuno, “Irradiation performance of Fast Reactor MOX fuel assemblies irradiated to high burnups”, Journal of Nuclear Science and Technology, 45, pp. 1183-1192 (2008).

表 1 バンドル圧縮試験に供した試験体の寸法

	試験体 I	試験体 II	試験体 III
ピン本数	127	127	127
ピン径 (mm)	8.5	8.5	10.4
ピン肉厚 (mm)	0.5	0.5	0.71
ワイヤ径 (mm)	1.3	1.3	1.0
ワイヤピッチ (mm)	307.0	200.0	200.0
ピン全長 (mm)	1,296	868	868
試験実施 BDI 量 (dw)	0.1	0.1	0.1
	0.5	1.0	1.0
	0.9	2.0	2.0
	1.5	3.0	3.0
	1.8		

材質：オーステナイトステンレス鋼冷間加工材

表 2 照射変形解析の条件

燃料ピン本数	169
燃料ピン外径 (mm)	6.5
被覆管肉厚 (mm)	0.47
ワイヤ径 (mm)	1.32
ワイヤピッチ (mm)	307.0
ダクト内対面間距離 (mm)	104.6
ダクト板厚 (mm)	3.0
集合体総発熱量 (MW)	3.664
冷却材流量 (kg/s)	14.226
冷却材入口温度 (°C)	360.0
ピン全長 (mm)	2,372.36
照射日数	1,004.7
高速中性子束 (n/m ² /s, E>0.1MeV) (最大)	2.738×10 ¹⁹

材質：オーステナイトステンレス鋼冷間加工材

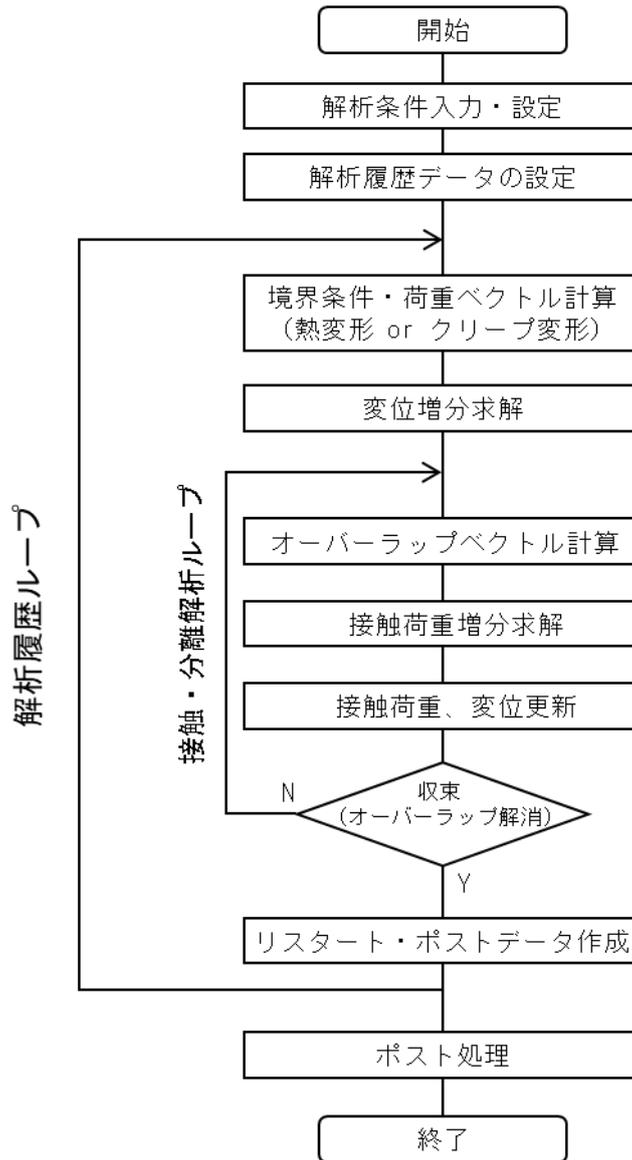


図 1 BAMBOO コードフローチャート

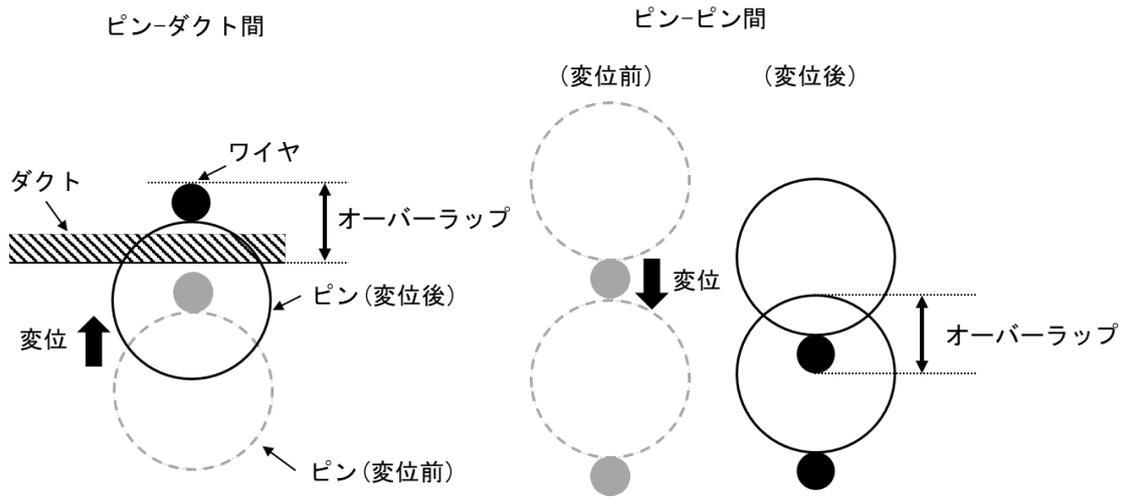


図2 ピン-ダクト間およびピン-ピン間のオーバーラップ

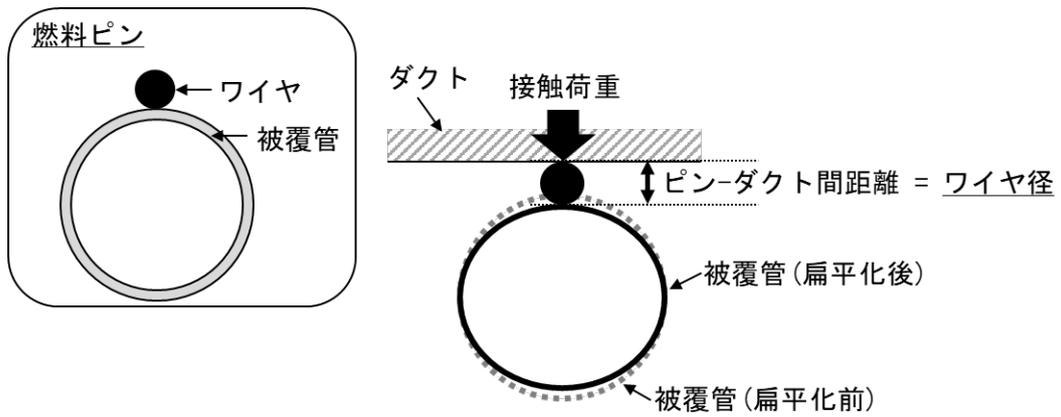


図3 被覆管の扁平化モデル

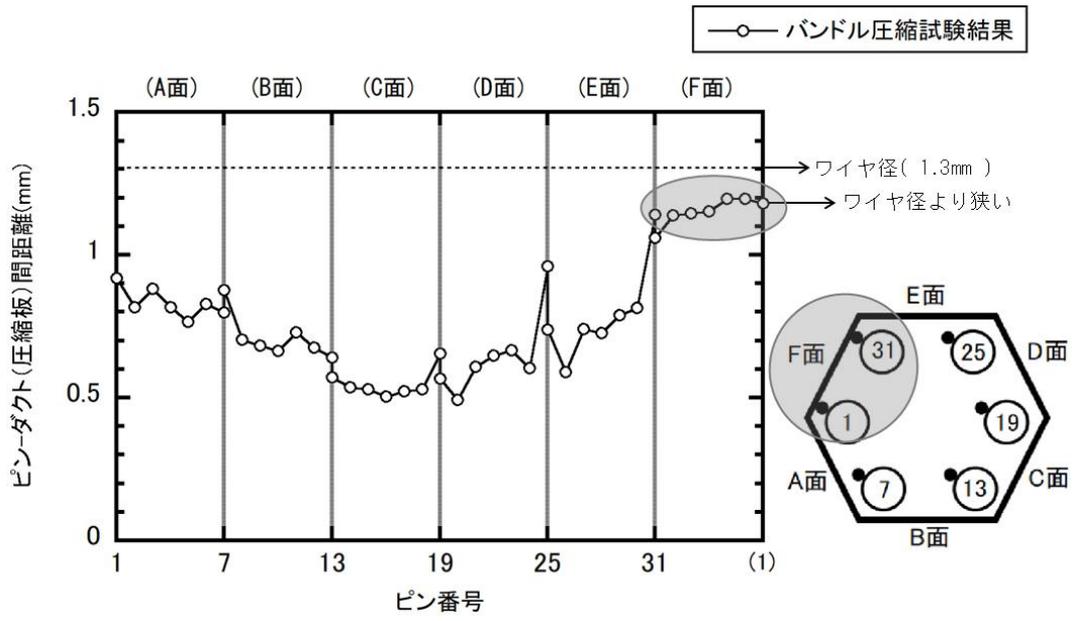


図4 バンドル圧縮試験におけるピンダクト（圧縮板）間距離周方向分布

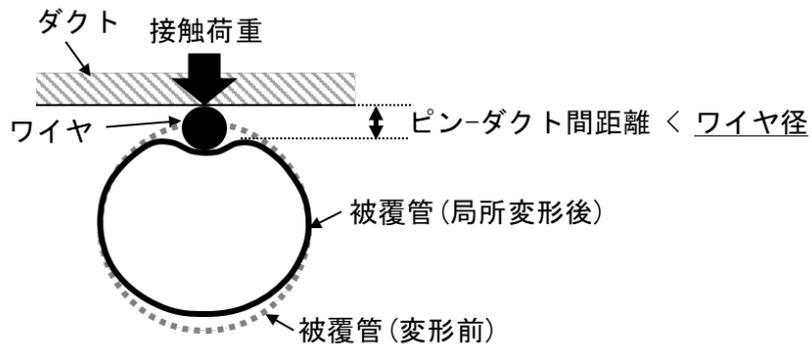


図5 被覆管の局所変形モデル

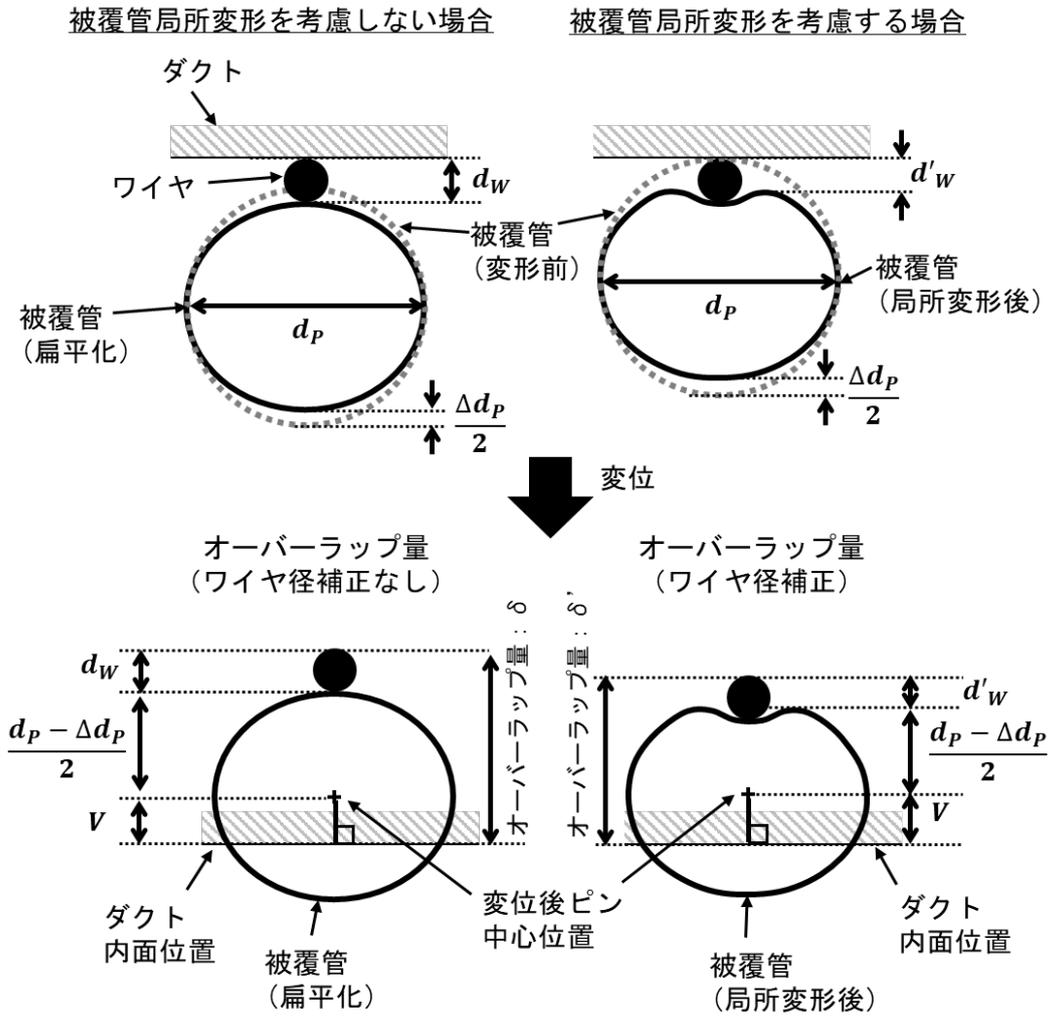


図6 被覆管の局所変形モデルにおけるワイヤ径補正の定義

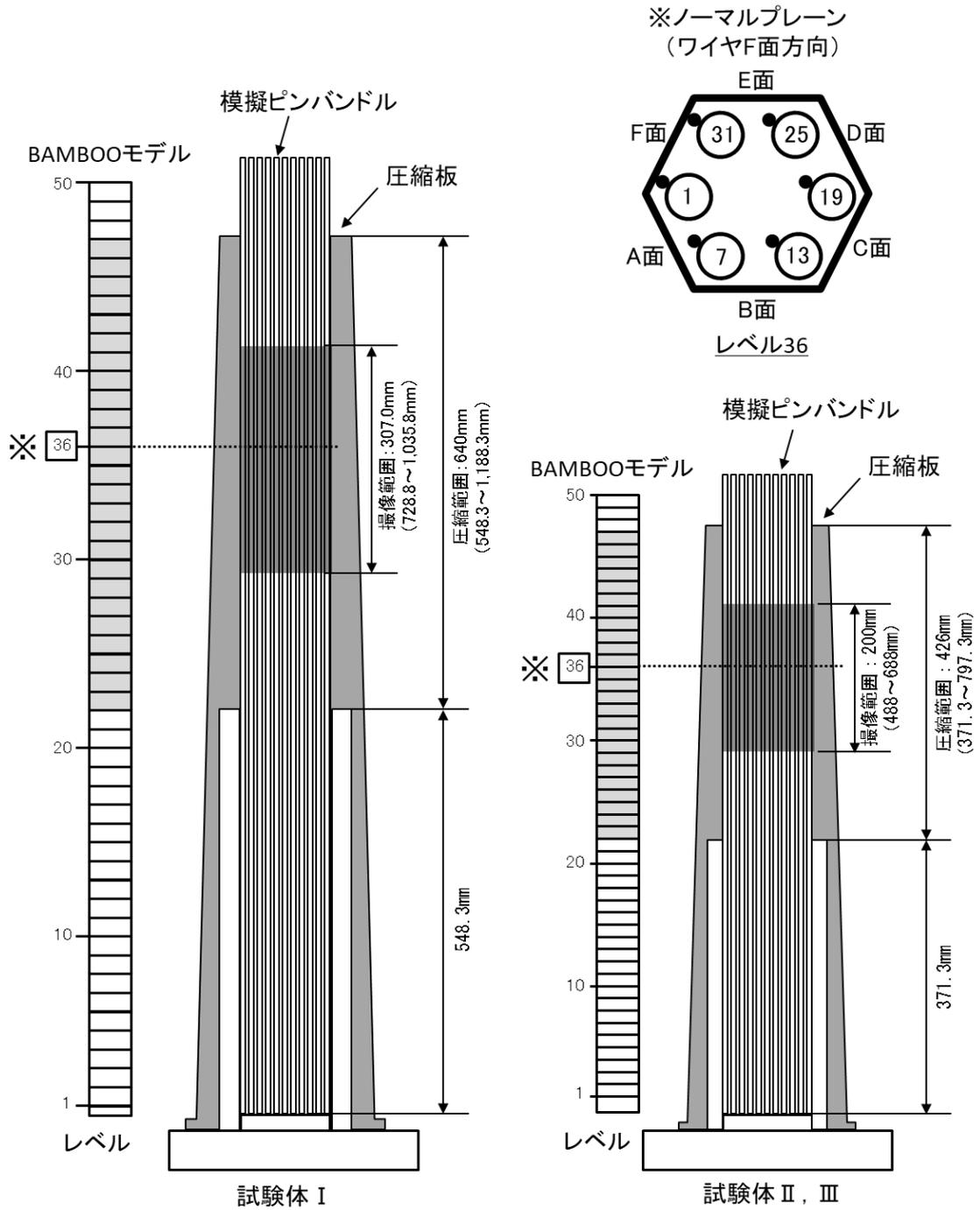


図7 バンドル圧縮試験体と BAMBOO コード解析モデル

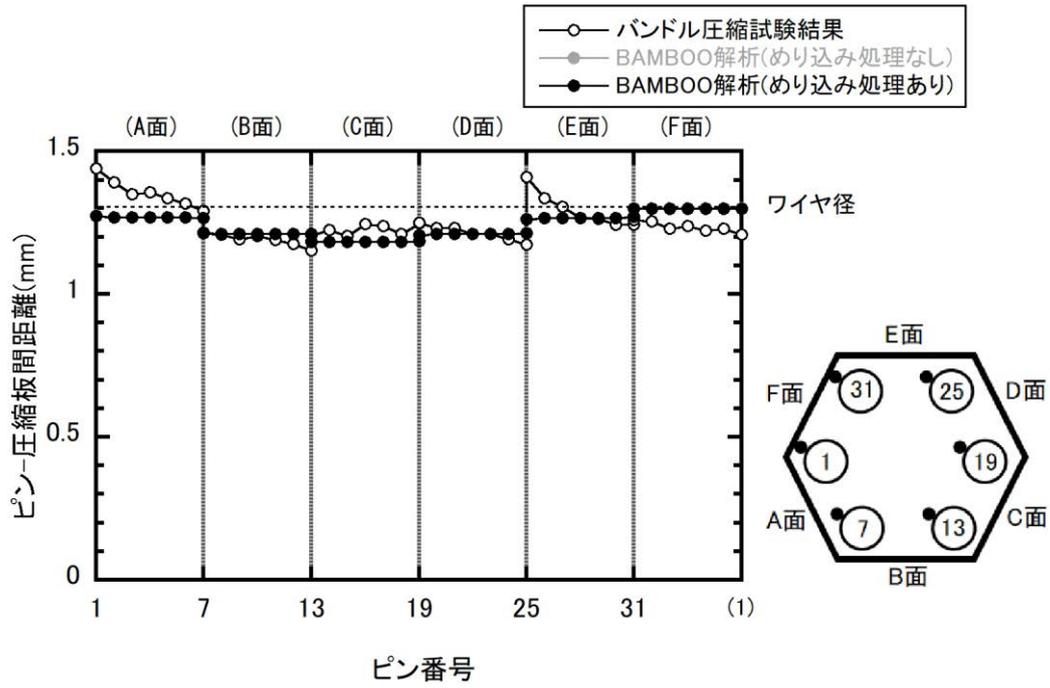


図8 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 I、BDI 量=0.1 dw）

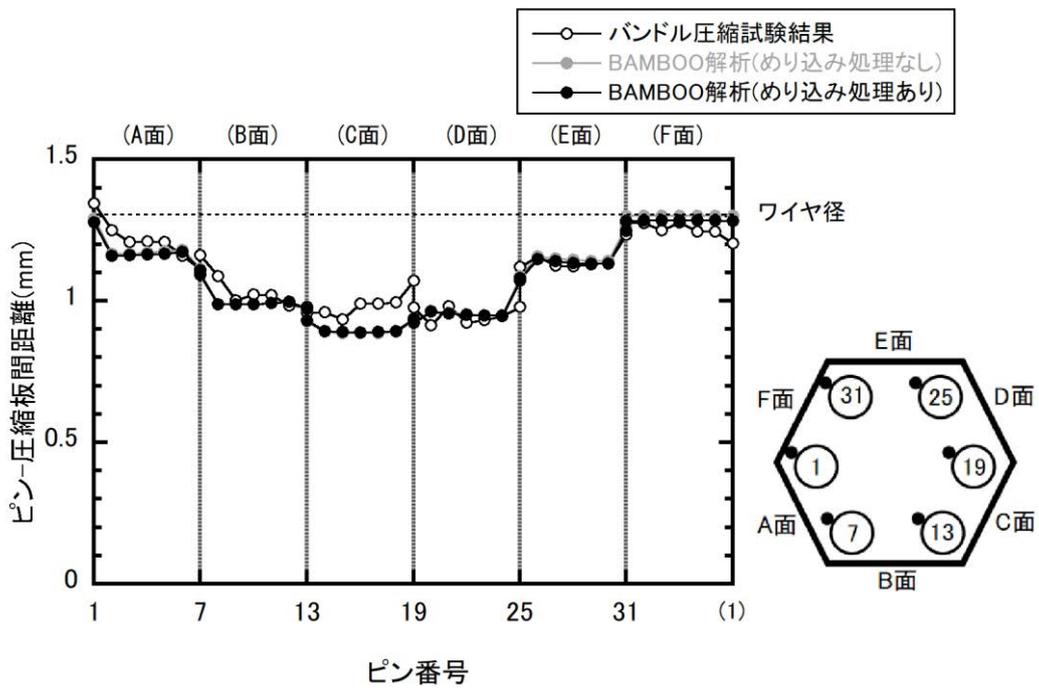


図9 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較（試験体 I、BDI 量=0.5 dw）

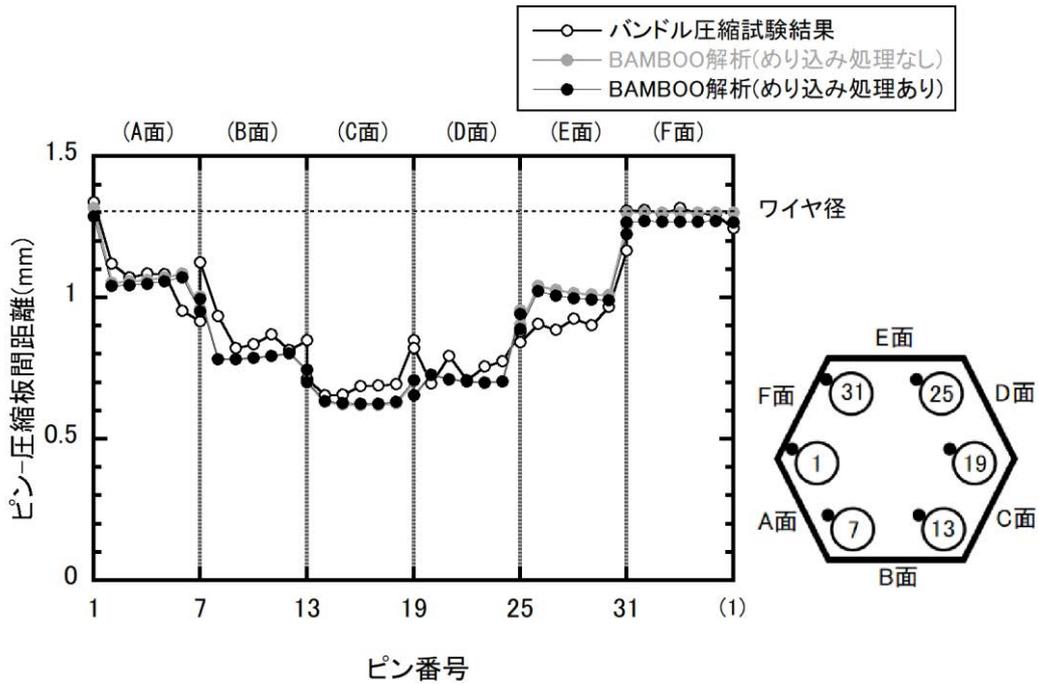


図 10 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体 I、BDI 量=0.9 dw)

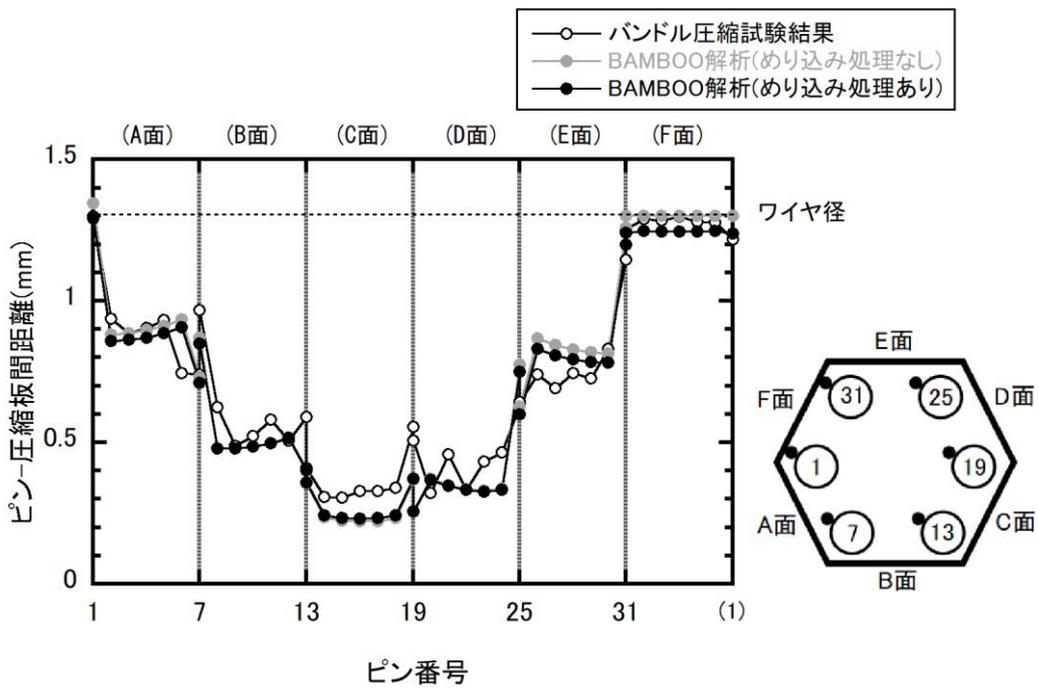


図 11 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体 I、BDI 量=1.5 dw)

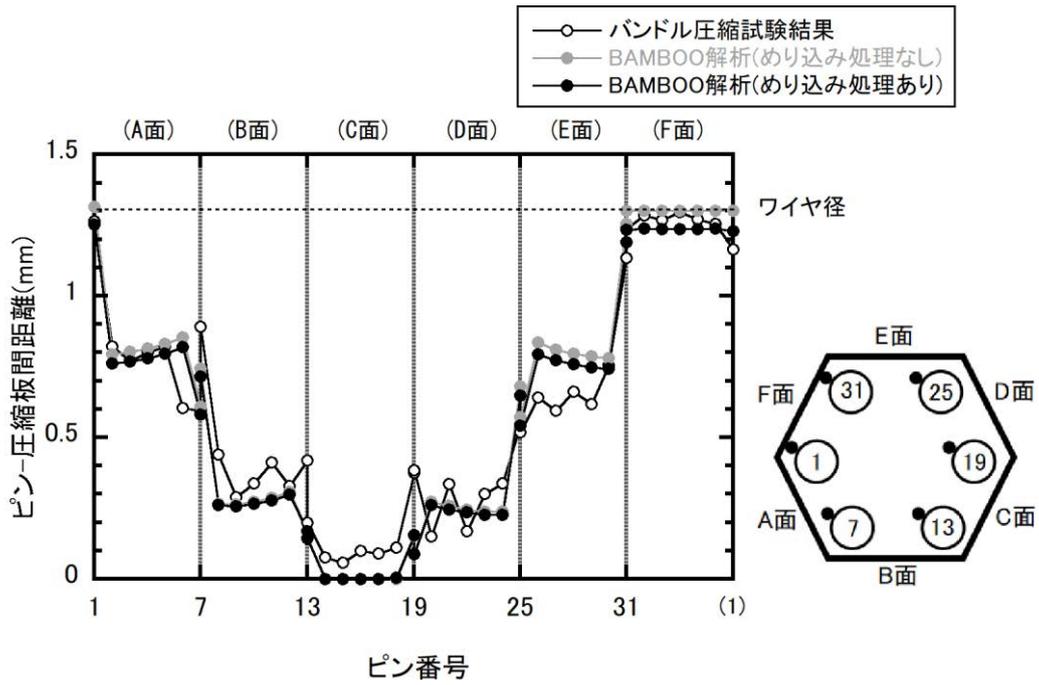


図 12 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体 I、BDI 量=1.8 dw)

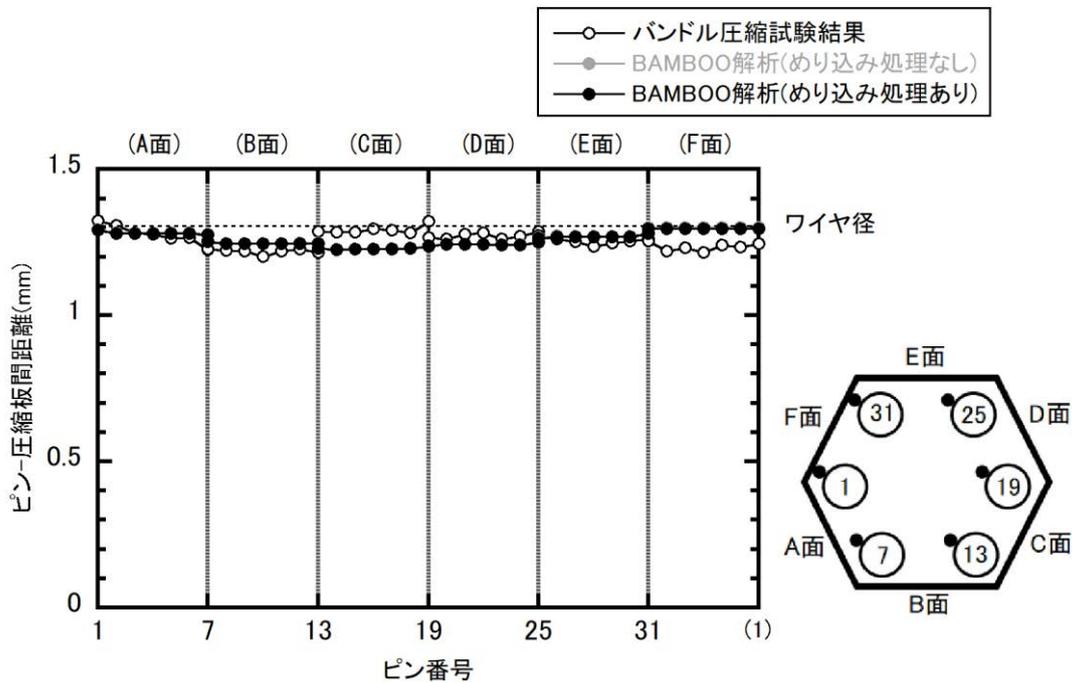


図 13 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体 II、BDI 量=0.1 dw)

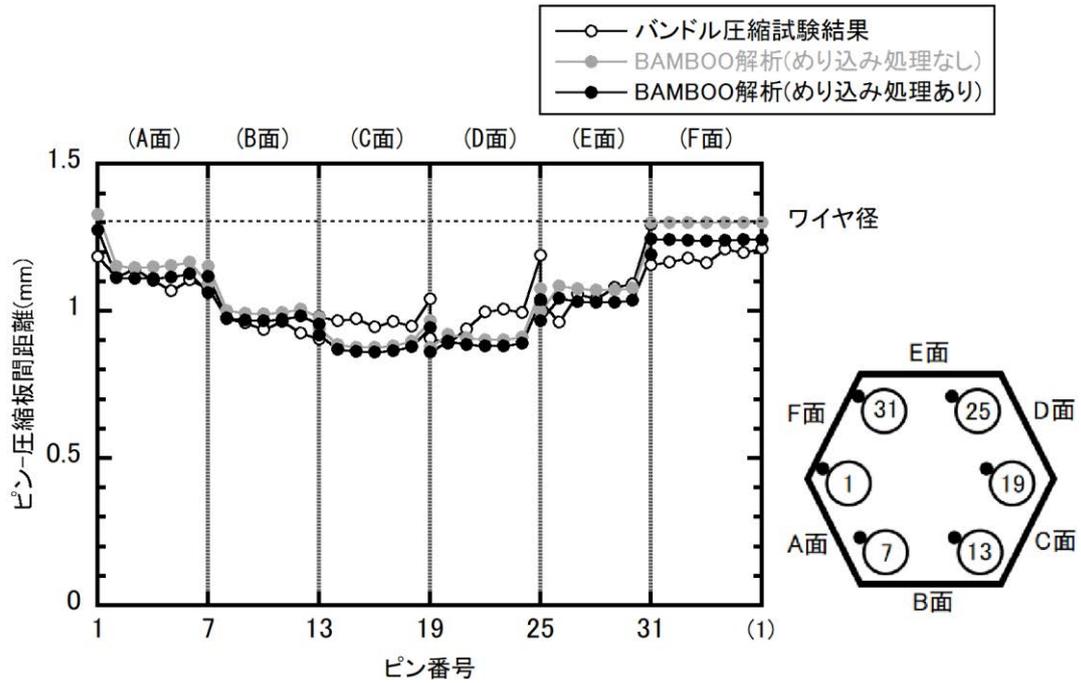


図 14 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体 II、BDI 量=1.0 dw)

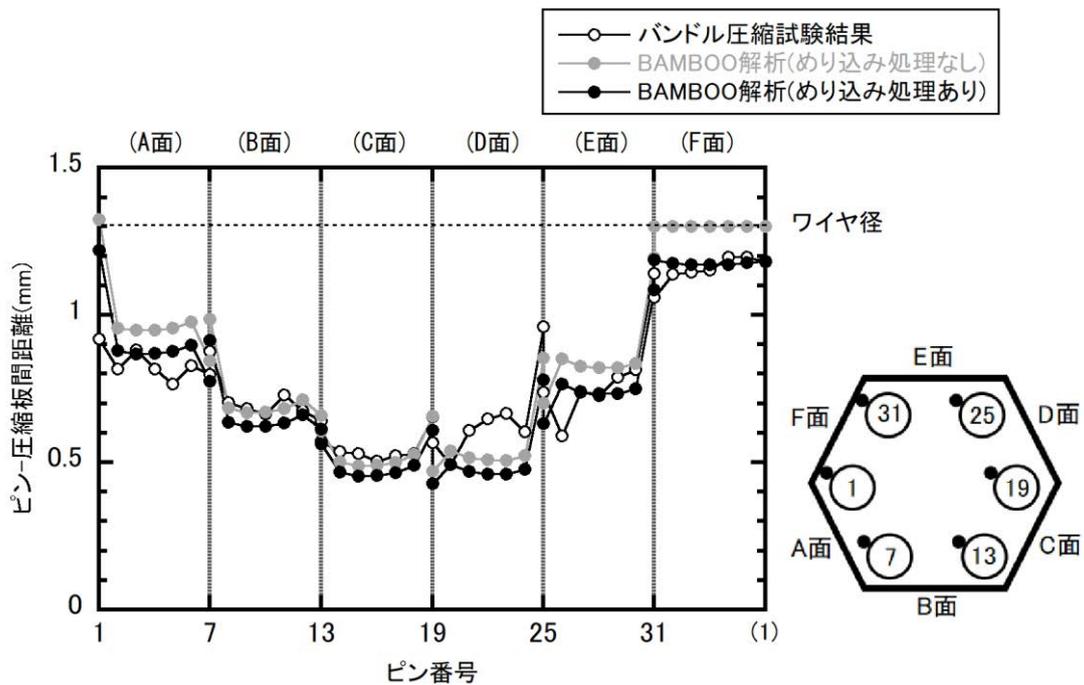


図 15 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体 II、BDI 量=2.0 dw)

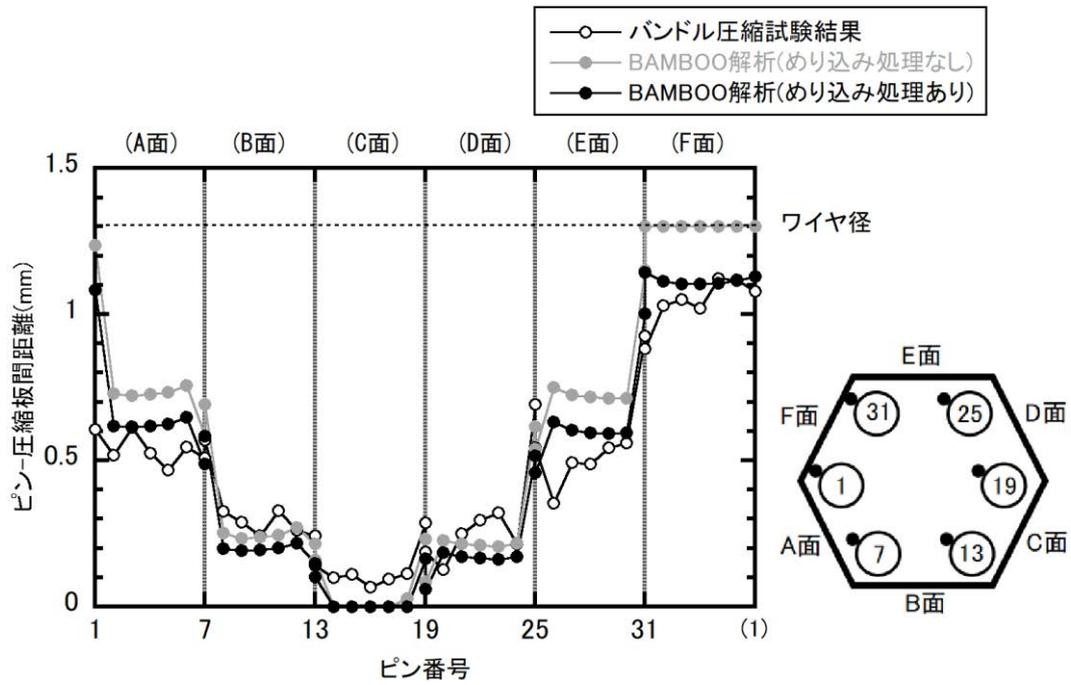


図 16 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体Ⅱ、BDI量=3.0 dw)

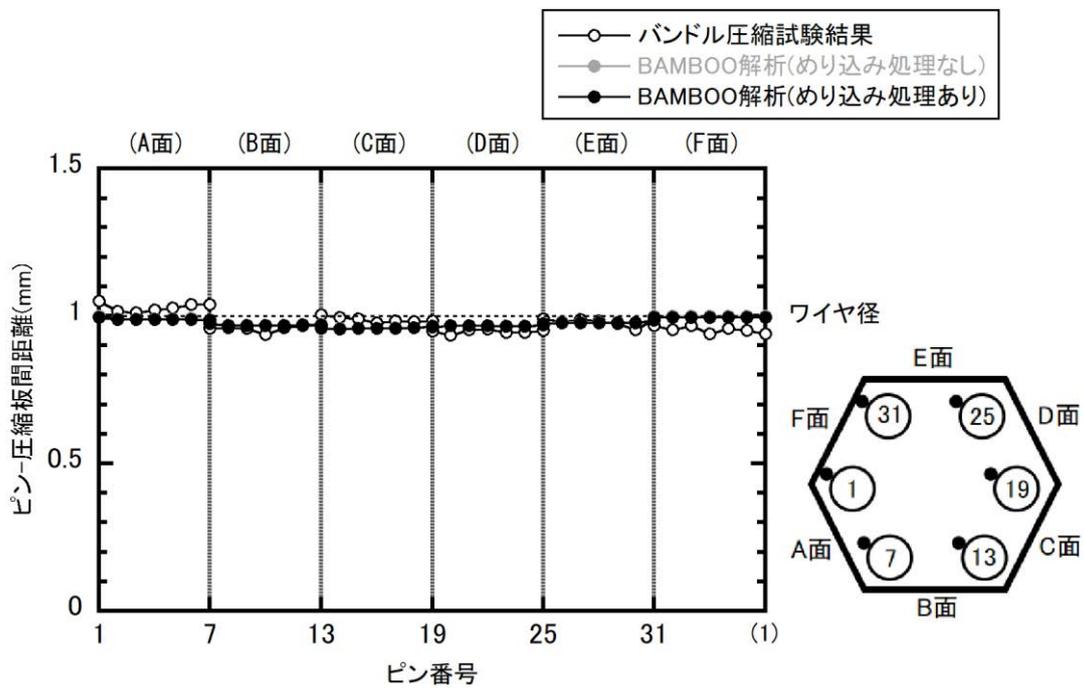


図 17 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体Ⅲ、BDI量=0.1 dw)

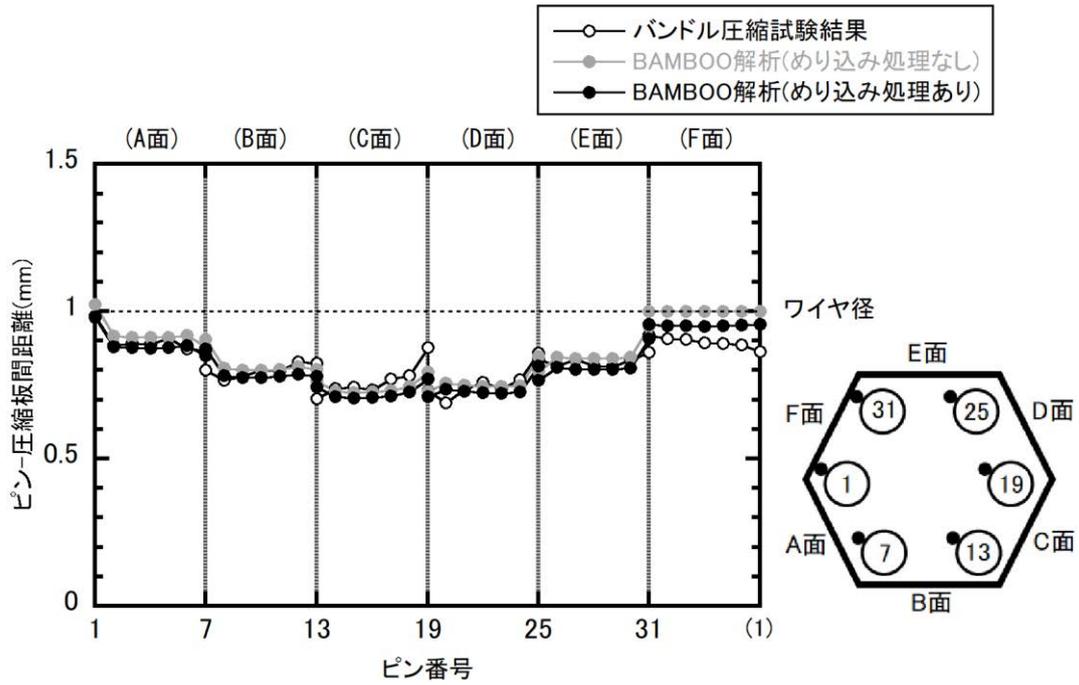


図 18 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体Ⅲ、BDI 量=1.0 dw)

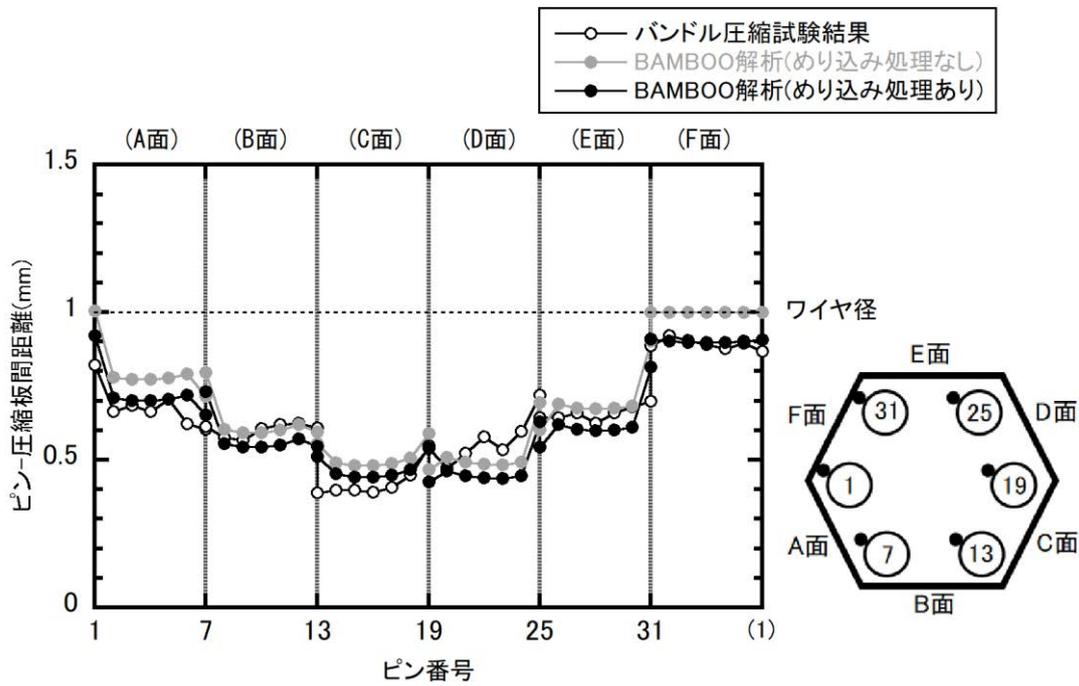


図 19 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体Ⅲ、BDI 量=2.0 dw)

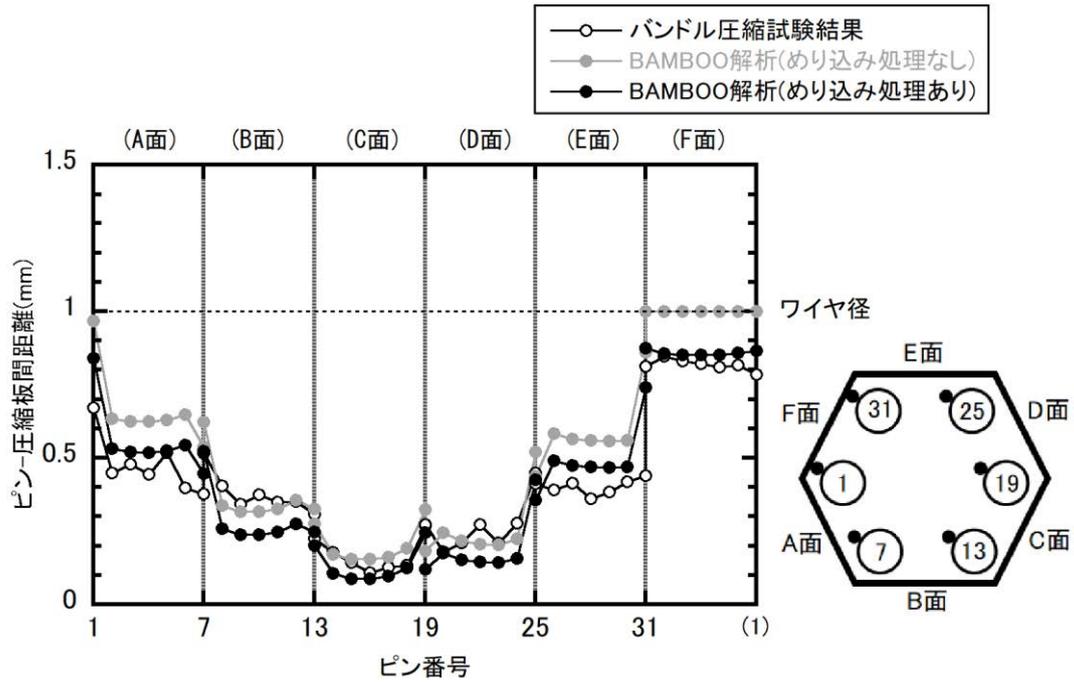


図 20 ピン-圧縮板間距離周方向分布比較 (試験体Ⅲ、BDI 量=3.0 dw)

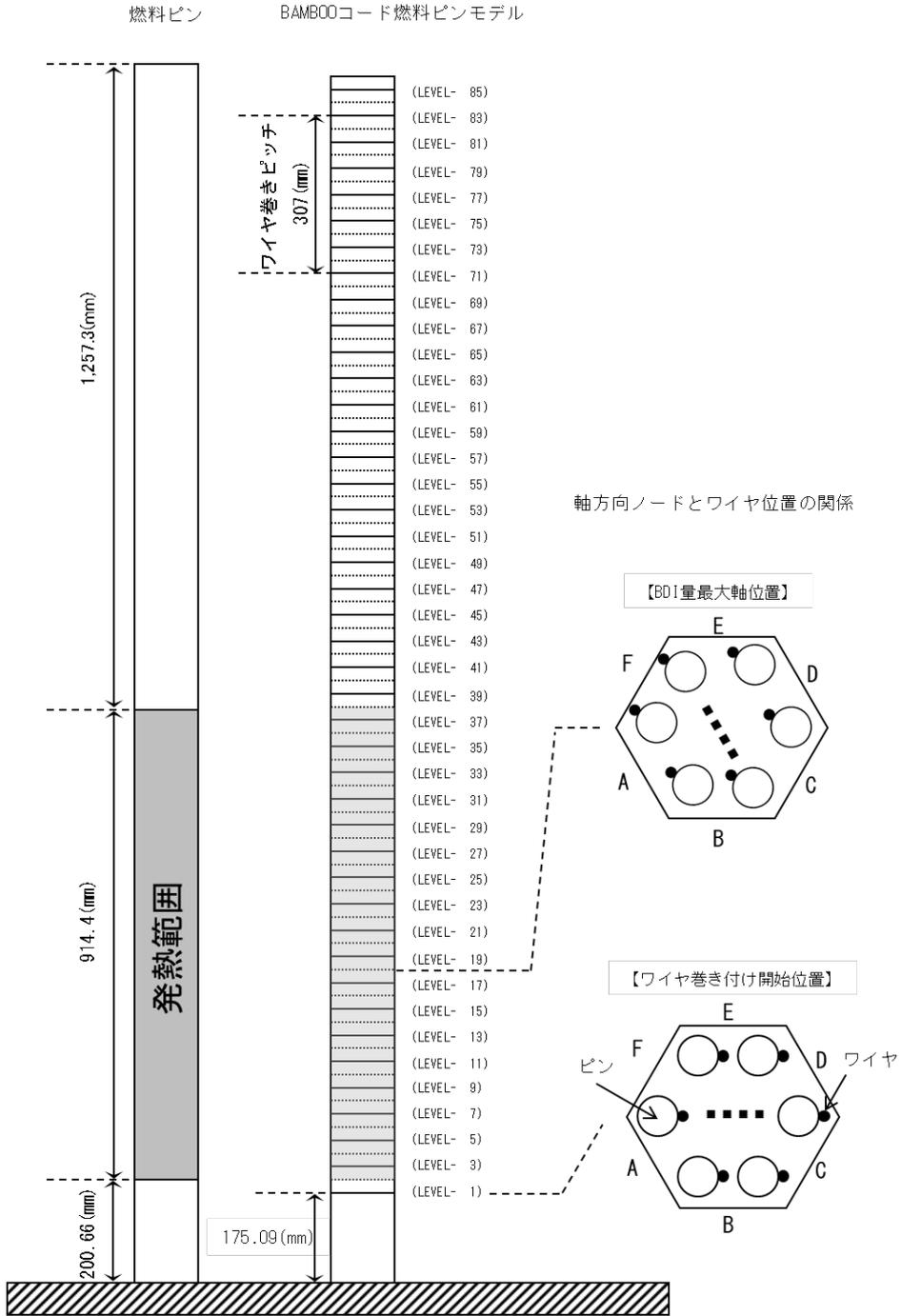


図 21 照射変形テスト解析モデル

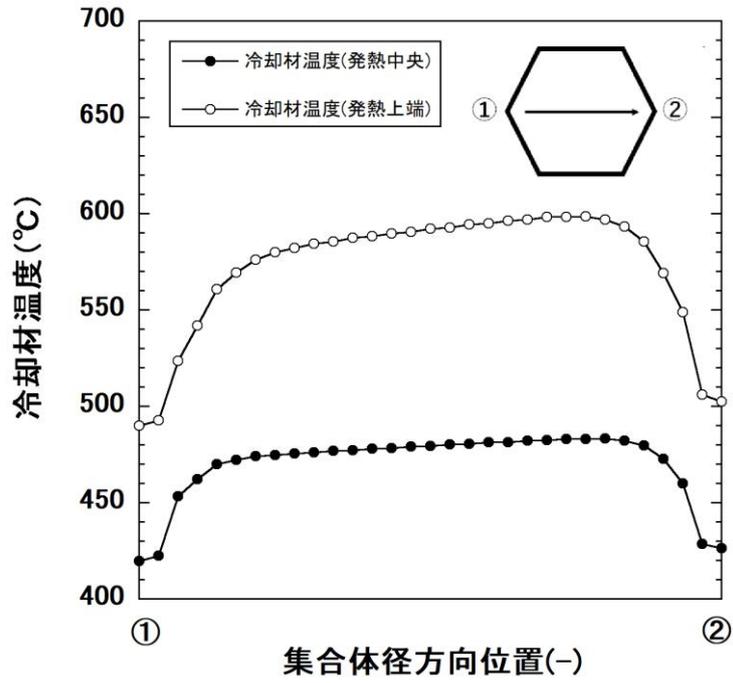


図 22 冷却材温度の集合体径方向分布

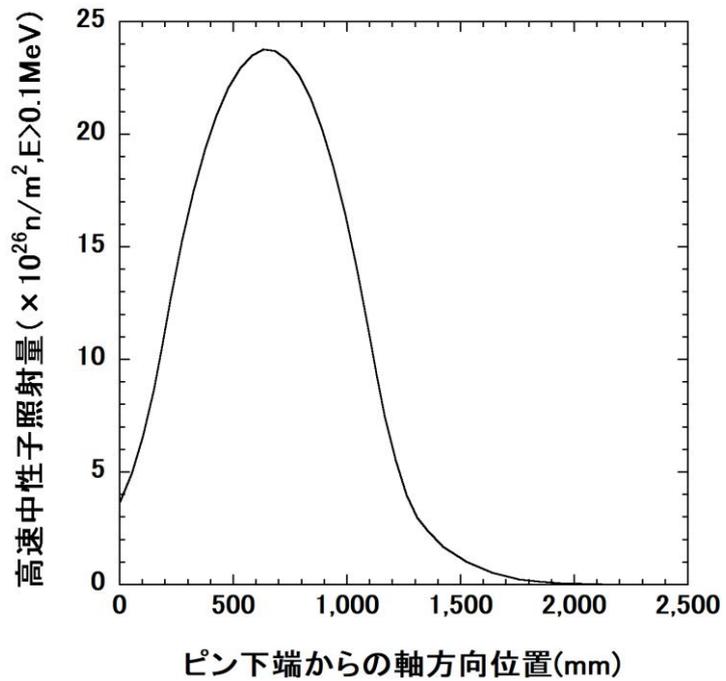


図 23 照射末期における高速中性子照射量軸方向分布

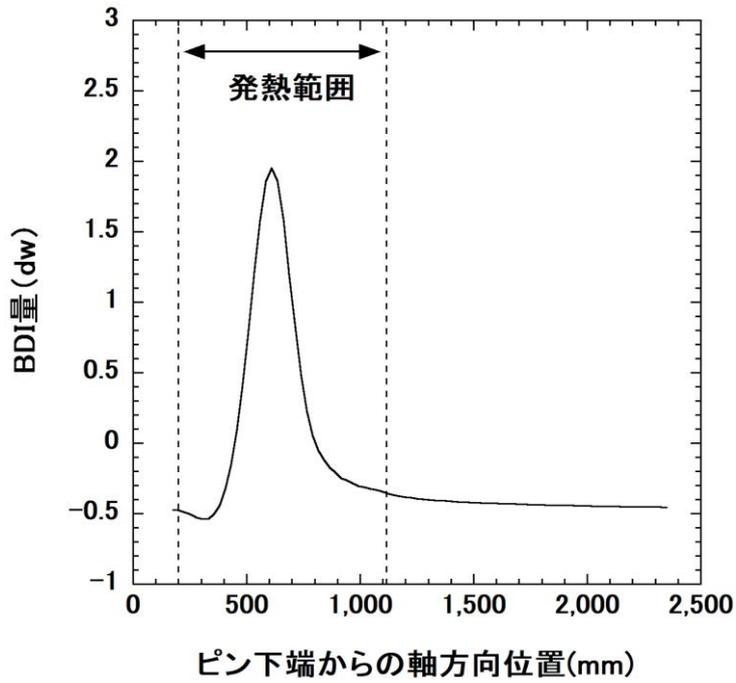


図 24 照射末期における BDI 量軸方向分布

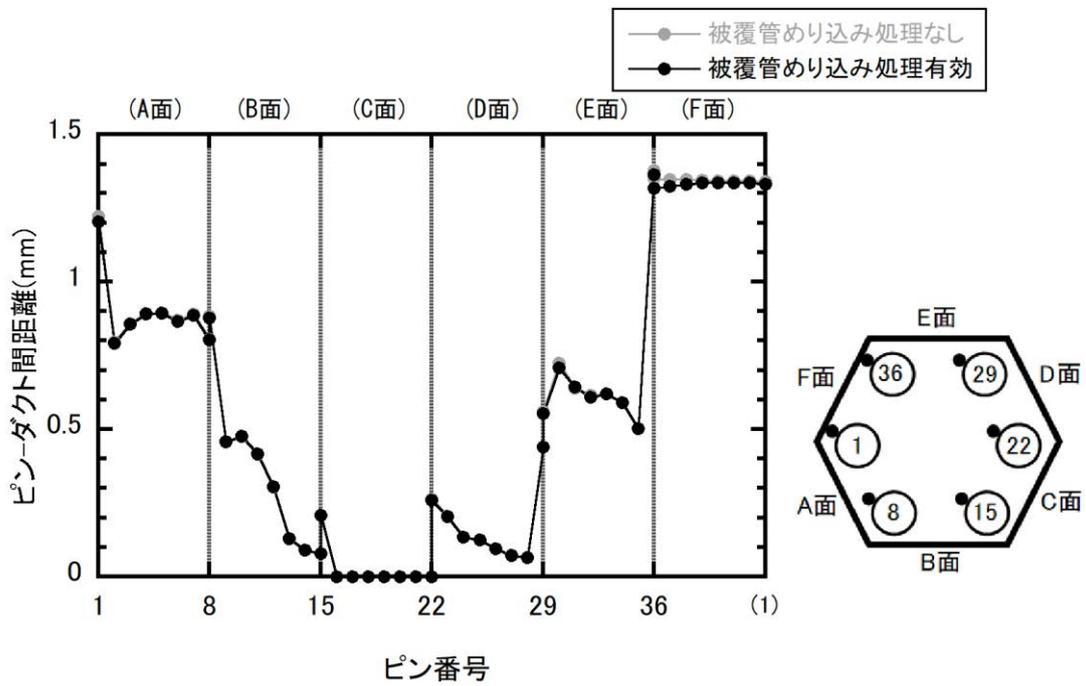


図 25 照射末期におけるピンダクト間距離周方向分布 (BDI 量最大軸位置)

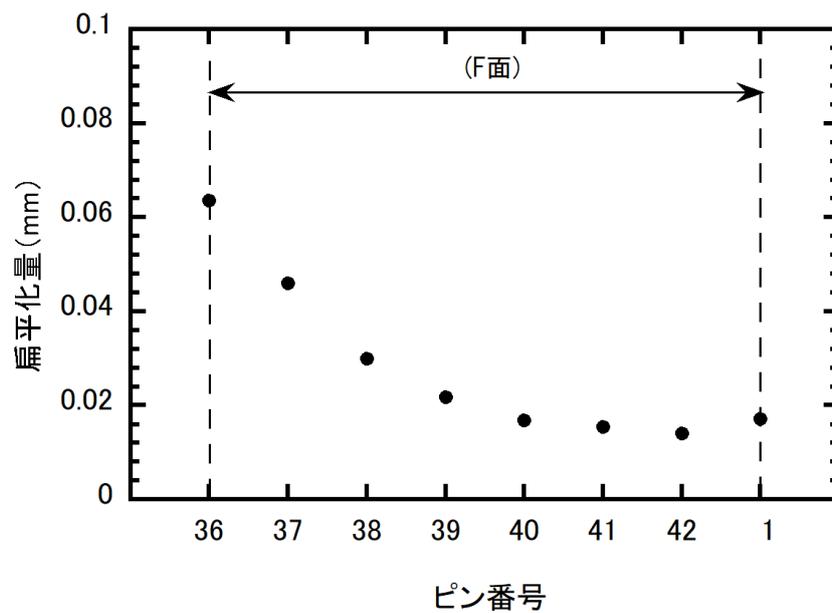


図 26 照射末期における最外周ピンの被覆管扁平化量 (BDI 量最大軸位置)

付録 BAMBOO コードの解析で被覆管の局所変形モデルを適用する手順

1.概要

BAMBOO コードの燃料ピンバンドル変形解析において、被覆管局所変形モデル（ワイヤめり込み変形）を適用する手順について述べる。

2.入力データへの記述方法

ワイヤめり込み変形を考慮する場合は、入力データの\$SYSDBG データに以下のように記述する。

●\$SYSDBG データ記載例

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
BDI                DFLT OFF
$SYSDBG  19  2  1.000
TITLE    === COMPRESS DATA ===
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
    
```

\$SYSDBG データは、機能を選択するためのオプション番号などのパラメータを設定するために用いられるデータである。燃料ピンバンドル変形解析でワイヤめり込み変形を考慮する場合は 11~15 カラムにオプション番号「19」を指定し、16~20 カラムに機能を選択するパラメータ番号「2」および 21~30 カラムにワイヤ径補正にかかるファクタ値を入力する。以下に、\$SYSDBG データの書式を記載する。

●\$SYSDBG データ

.....1.....+.....2.....+.....3.....+.....4.....+.....5.....+.....6.....+.....7.....+.....8

A	\$SYSDBG	iadrs	iprm	fprm	
---	----------	-------	------	------	--

レコードの種類	カラム	FORMAT	変数	内容	無記入の場合
A	1~7	A5	---	\$SYSDBG と記入	---
	11~15	I5	iadrs	「19」と入力する	0
	16~20	I5	iprm	機能を選択するパラメータ* =0: ワイヤめり込み変形を考慮しない =1: ポスト処理のピン-ダクト間距離の算出過程でワイヤめり込み変形を考慮する =2: 接触・分離解析でワイヤめり込み変形を考慮する	0
	21~30	F10.0	fprm	ワイヤ径補正にかかるファクタfを入力する	1.0

※オプション番号 19 の機能について

iadrs	iprm	内容
19	0	デフォルト(ワイヤめり込み変形は考慮しない)
	1	ポスト処理のピン-ダクト間距離の算出において、ノーマルプレーンの最外周ピンとダクトがワイヤを介して接触している面のピンに対してワイヤめり込み変形を模擬する（接触・分離解析には影響しない）。
	2	<p>接触・分離解析に用いるオーバーラップ量の算出において、ノーマルプレーンの最外周ピンとダクトがワイヤを介して接触している面のピンに対してワイヤめり込み変形を以下の定義によるワイヤ径の補正によって模擬する。</p> $d'_w = d_w - \frac{\Delta d_p}{2} \times f$ <p>ここで、 Δd_p : 扁平化によるピンの外径減少量 (mm) d_w : 補正前のワイヤ径 (mm) d'_w : 補正後のワイヤ径 (mm) f : ワイヤ径補正にかかるファクタ (-)</p> <p>fは、fprm によって入力する。省略した場合は 1.0 となる。</p>

\$SYSDBG データの記載を省略した場合は、ワイヤめり込み変形を考慮せずに燃料ピンバンドル変形解析を行う。

This is a blank page.

