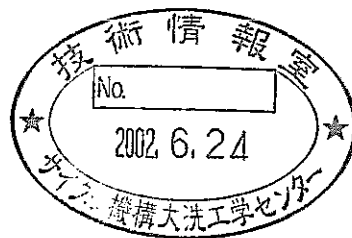




# 高速炉燃料ピン束変形解析コード“BAMBOO”の開発

—ピンディスページョンモデルの開発と検証—

(研究報告)



2002年3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。

〒319-1184 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-ken 319-1184,  
Japan

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

2002

## 高速炉燃料ピン束変形解析コード“BAMBOO”の開発

## -ピンディスページョンモデルの開発と検証-

## (研究報告)

上羽智之\* 鵜飼重治\* 浅賀健男\*

## 要 旨

BDI(Bundle Duct Interaction)は高速炉燃料の寿命を制限する因子の一つである。BDI が進行するとワイヤの位置ずれなどによって燃料ピンの配列乱れ (ディスページョン) が発生すると考えられる。本研究では、BDI 解析コード“BAMBOO”を用いてディスページョンがバンドルの変形に及ぼす影響を評価した。得られた結果を以下に示す。

- (1) BAMBOO コードにおいて燃料ピンを構成する梁要素の節点以外で接触条件を考慮する機能を追加することにより、ワイヤの位置ずれによって発生するピンディスページョンを表現できるようになった。
- (2) ディスページョンが発生した炉外バンドル圧縮試験結果を用いてコードを検証した結果、ピン-ダクト間距離とピン-ピン間距離についてコードの解析結果は試験結果と概ね一致した。従って、コードはディスページョンを考慮したバンドルの変形を適切に解析できると考えられる。
- (3) ディスページョンが発生したバンドルでは、ディスページョンが発生しない場合に比較してピン-ピン間距離のバラつきが大きくなった。また、ピン-ダクト間の最小距離は大きくなる場合もあったが小さくなる場合もあった。これより顕著なディスページョンの発生はバンドルの熱的健全性に影響する可能性がある。

Development of a FBR Fuel Pin Bundle Deformation Analysis  
Code "BAMBOO"  
-Development of a Dispersion Model and its Validation-

Tomoyuki Uwaba<sup>✽</sup>, Shigeharu Ukai<sup>✽</sup>, Takeo Asaga<sup>✽</sup>

Abstract

Bundle Duct Interaction (BDI) is one of the life limiting factors of a FBR fuel subassembly. Under the BDI condition, the fuel pin dispersion would occur mainly by the deviation of the wire position due to the irradiation.

In this study the effect of the dispersion on the bundle deformation was evaluated by using the BAMBOO code and following results were obtained.

- (1) A new contact analysis model was introduced in BAMBOO code. This model considers the contact condition at the axial position other than the nodal point of the beam element that composes the fuel pin. This improvement made it possible in the bundle deformation analysis to cause fuel pin dispersion due to the deviations of the wire position.
- (2) This model was validated with the results of the out-of-pile compression test with the wire deviation. The calculated pin-to-duct and pin-to-pin clearances with the dispersion model almost agreed with the test results. Therefore it was confirmed that the BAMBOO code reasonably predicts the bundle deformation with the dispersion.
- (3) In the dispersion bundle the pin-to-pin clearances widely scattered. And the minimum pin-to-duct clearance increased or decreased depending on the dispersion condition compared to the no-dispersion bundle. This result suggests the possibility that the considerable dispersion would affect the thermal integrity of the bundle.

---

✽Nuclear Fuel Research Group System Engineering Technology Division, OEC

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	ピンディスパージョン現象	2
2. 1	ディスパージョンの発生機構 (炉外バンドル圧縮試験)	2
2. 2	炉内でのディスパージョン	3
3.	ピンディスパージョンモデルの開発	4
3. 1	接触・分離解析方法	4
3. 2	中間接触解析機能の追加	5
4.	検証解析	7
4. 1	炉外バンドル圧縮試験	7
4. 2	BDI 量の定義	7
4. 3	解析条件	8
4. 4	解析結果	9
4. 4. 1	ワイヤずれ無しバンドル	9
4. 4. 2	ワイヤずれ有りバンドル	10
5.	検討	12
5. 1	ワイヤずれの設定パターン	12
5. 2	解析結果	13
6.	まとめ	14
7.	謝辞	15
8.	参考文献	16

## 図表リスト

表 4.1	炉外バンドル圧縮試験のバンドル仕様	17
図 1.1	BDIが発生したバンドルの変形状態	18
図 2.1	ディスパージョンが発生したバンドル横断面の様子	19
図 2.2	ワイヤずれ有りバンドル内の接触位置	20
図 3.1	BAMBOO コードの解析モデル	21
図 3.2	中間接触解析の概念図	22
図 4.1	ワイヤずれピン配置図	23
図 4.2	炉外バンドル圧縮試験体におけるワイヤ配置	24
図 4.3	炉外バンドル圧縮試験体の BAMBOO コード解析モデル	25
図 4.4	(模擬) ピン扁平化特性	26
図 4.5	ピン-ダクト最小間距離と BDI 量との関係 (ワイヤずれ無しバンドル)	27
図 4.6	ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI 量=1.0dw)	28
図 4.7	ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI 量=1.5dw)	29
図 4.8	ピン-ピン間距離と BDI 量との関係 (ワイヤずれ無しバンドル)	30
図 4.9	バンドル横断面図 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI 量=2.0dw)	31
図 4.10	バンドル縦断面図 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI 量 =2.0dw)	32
図 4.11	バンドル横断面図 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI 量 =2.0dw)	33
図 4.12	バンドル縦断面図 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI 量 =2.0dw)	34
図 4.13	バンドル縦断面図 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI 量 =2.5dw)	35
図 4.14	ピン-ダクト最小間距離と BDI 量との関係 (ワイヤずれ有りバンドル)	36

図 4.15	ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI 量=1.0dw) . . . . .	37
図 4.16	ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI 量=1.5dw) . . . . .	38
図 4.17	ピン-ピン間距離と BDI 量との関係 (ワイヤずれ有りバンドル) . . . . .	39
図 4.18	ピン-ピン間距離の相対度数分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI 量=1.0dw) . . . . .	40
図 4.19	ピン-ピン間距離の相対度数分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI 量=1.8dw) . . . . .	41
図 5.1	ピン-ダクト間最小距離と BDI 量との関係 . . . . .	42
図 5.2	ピン-ピン間距離の相対度数分布 (ワイヤずれ無しバンドル、ワイヤずれ有りバンドル ; BDI 量=1.8dw) . . . . .	43
図 5.3	対角ピン列の偏平化量 (BDI 量=1.5dw) . . . . .	44

## 1. はじめに

ワイヤスペーサ型の高速炉燃料集合体では、燃料ピン束（バンドル）と集合体ラッパ管（ダクト）との間の機械的相互作用である BDI (Bundle Duct Interaction) が寿命制限因子の一つになっていると考えられ、燃料の高燃焼度化を達成する上での課題となっている。BDI は、照射中の燃料被覆管とダクトとの温度条件の違いによって被覆管のスエリングがダクトよりも大きくなると、バンドル全体の膨れがダクトを上回るために発生する現象である。図 1.1 に BDI が発生したバンドルの変形状態を模式的に示す。BDI が発生した集合体ではワイヤを介したピン-ピン間、ピン-ダクト間の接触によりピンがワイヤに沿って湾曲すると同時に、被覆管断面の偏平化が生じることが炉外バンドル圧縮試験の結果や高燃焼度燃料集合体の照射後試験結果から分かっている<sup>1)2)3)</sup>。ピンが湾曲するとダクトと最外層に位置する燃料ピンとの間隔が減少するため、被覆管の熱的健全性が問題となる。サイクル機構では、BDI が生じたバンドルの変形を予測する解析コード“BAMBOO”を開発しており、バンドルの主要な変形機構として燃料ピンの湾曲と偏平化挙動をモデル化している。

一方、炉内では燃料ピンが不規則に変位するピンディスパージョン（以下、ディスパージョン）が生じることが想定される。炉外バンドル圧縮試験の結果から、ディスパージョンはバンドル変形挙動に有意な影響を及ぼすことが分かっている<sup>4)</sup>。

燃焼度が進み BDI が発生した集合体バンドルでは、被覆管の冷却性を確保する観点からバンドル最外層のピンとダクトとの接触を防止する必要があると考えられる。バンドルの変形に対するディスパージョンの影響は不確かさが大きいですが、BDI 発生集合体の健全性限界評価のためには、BDI の進行に伴うピン-ダクト間距離の変化に対するディスパージョンの影響を把握しておく必要がある。

本研究では、有限要素法における節点間の中間接触解析手法を応用したディスパージョンモデルを新たに開発し、BAMBOO コードに導入した。また、このディスパージョン解析機能を炉外バンドル圧縮試験結果により検証するとともに、ディスパージョンがバンドルの変形に及ぼす影響についてコードの解析結果を基に評価した



## 2. ピンディスパージョン現象

### 2. 1 ディスパージョンの発生機構 (炉外バンドル圧縮試験)

図 2.1 にディスパージョンが発生したバンドルの様子を模式的に示す。米国の FFTF で照射された 316 系オーステナイト鋼の燃料被覆管とラップ管を用いた燃料集合体 (燃焼度：約 100GWd/t) からラップ管を取り外しバンドルの変形状況を観察すると、ピンによってその湾曲状態に違いが認められ、実際にディスパージョンが発生したことが伺える<sup>2)</sup>。また JNC は 316Ti オーステナイト鋼の被覆管とラップ管を用いた Phenix の高燃焼度集合体バンドルの照射後試験結果 (燃焼度：約 100GWd/t) を用いて、燃料ピンの扁平化が生じた軸方向位置を整理した結果、ピンによってその位置が変化していることを報告している<sup>3)</sup>。このようなバンドル内の隣接ピン間のワイヤを介した接触位置のバラツキがあったことは間接的にディスパージョンが発生した可能性を示唆していると考えられる。

ディスパージョンがバンドルの変形に及ぼす影響については、米国 GE 社や JNC において炉外バンドル圧縮試験結果に基づいて評価が行われている<sup>1,4)</sup>。

これらの炉外バンドル圧縮試験では、一定量だけワイヤの巻きずれを有したピンを規則的配したバンドルを用いることによりディスパージョンを発生させている。また、ワイヤの巻きずれが存在するとワイヤずれがないバンドルに比較してピンとダクト間の距離が大きくなる結果、ピン-ダクト接触の開始時期が遅れるという結果が報告されている。ただし、この結果はワイヤずれを規則的に配置させたバンドルという特殊なケースについてであり、ディスパージョンが発生したバンドルに対して一般的に言える結果ではないと考えられる。従って、ディスパージョンがバンドルの変形にどのように影響するのかを把握するためには、ディスパージョン自体の不確かさを考慮した評価が必要であると考えられる。

ワイヤのずれによってディスパージョンが発生するメカニズムは、炉外バンドル圧縮試験結果から次のように考えられている<sup>1)</sup>。

BDI が進行すると、ワイヤずれピンのワイヤを介して隣接ピンへ荷重が伝達される。図 2.2 に示すようにあるピン列に着目すると荷重はピン毎のワイヤのずれに対応して変化していく方向位置で伝わっていく。接触点

の軸方向位置がピンによって変化するのでピン毎に変位の方向がバラつくため、バンドル全体としてディスパージョンが発生する。  
つまり、炉外バンドル圧縮試験では、ワイヤの巻きずれがピンのディスパージョンを発生させる直接原因となっている。

## 2. 2 炉内でのディスパージョン

炉内においてディスパージョンが発生するメカニズムを考えてみる。実際の集合体では、定められた設計精度のワイヤピッチ誤差範囲内で燃料ピンを製造するため、初期のワイヤの巻きずれはほとんどない。従って、ワイヤは照射中に徐々にずれていくと考えられる。

照射中にワイヤの位置がずれていく原因としては以下のようなことが考えられる。

- ① 被覆管のスエリングによるピンの伸び
- ② ワイヤのスエリングによるゆるみ
- ③ 隣接ピンあるいはダクトとの接触荷重

実際の集合体では、これらが複合的にワイヤのずれに影響していると考えられる。さらに以下のこともピンの変位に影響すると考えられる。

- ④ 被覆管の周方向温度分布によるピンの自己湾曲

以上のことから、実際の集合体では燃焼度が進んでいくとディスパージョンが生じる可能性は高いと考えられる。

### 3. ピンディスパージョンモデルの開発

#### 3. 1 接触・分離解析方法

ディスパージョンの主要因はワイヤの巻きずれであると考え、BAMBOO コードの改良では、ワイヤ軸方向位置のずれに対応した接触位置の変化をコードが行なう接触・分離解析で考慮できるようにすることによりディスパージョンを解析する機能追加を行なった。BAMBOO コードではピン-ピン間、あるいはピン-ダクト間の接触・分離解析の定式化を次式により行なっている。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{B}_c \\ \mathbf{B}_c^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda \\ \delta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ここで、

$\mathbf{K}$ =バンドル剛性マトリクス

$\mathbf{B}_c$ =接触拘束マトリクス

$\Delta \mathbf{u}$ =変位増分ベクトル

$\Delta \lambda$ =接触荷重増分ベクトル

$\mathbf{P}$ =外荷重ベクトル

$\mathbf{R}$ =応力と等価な荷重ベクトル

$\lambda$ =接触荷重ベクトル

$\delta$ =オーバーラップベクトル

である。

図 3.1 に BAMBOO コードのバンドル解析モデルを示す<sup>3)</sup>。コードでは、燃料ピンを 1/12 ワイヤピッチの梁要素を直列結合しモデル化している。

節点は梁要素の両端の 2 箇所にある。ワイヤのずれを考慮しない場合、ワイヤは節点位置で考慮しているので軸方向位置が上昇するに従って、ワイヤ方向は反時計回りに 30° 毎に回転する。節点の軸方向位置は全ピンに共通しており、ワイヤがダクトに直交する方向に位置する面（ノーマルプレーンと呼ぶ）とワイヤが隣接ピン間に挟まれる方向に位置する（ピンチプレーンと呼ぶ）のいずれかになる。BAMBOO コードでは、燃

料ピン同士、あるいは燃料ピンとダクトとの接触判定を、梁要素の節点位置（ノーマルプレーンとピンチプレーン）において行い、接触拘束マトリクスを作成していた。ワイヤは接触・分離解析においてオーバーラップベクトルを算出する際にその直径分について考慮されている。

### 3. 2 中間接触解析機能の追加

本改良では、ワイヤを節点位置からある量だけ軸方向にずらし、ずれた位置でワイヤ径を考慮した接触判定を行い、接触拘束マトリクスを作成する。発生する接触荷重は、両端の節点に分配する。接触判定を行なう位置は要素の両端の節点位置を線形補間することにより求める。この方法を中間接触解析と呼ぶ<sup>5)</sup>。単純な2本のピンの接触モデルを用いた中間接触解析の概念を図3.2に示す。単純モデルの場合の接触拘束マトリクス  $\mathbf{B}_c$  は以下のように記述できる。

#### (1) 節点と節点との接触

節点位置  $i$  における接触拘束マトリクス

$$\begin{array}{cccc} \mathbf{u}_{ai} & \mathbf{u}_{aj} & \mathbf{u}_{bi} & \mathbf{u}_{bj} \\ \text{Contact point } i : \mathbf{B}_c = [ & -1 & , & 0 & , & 1 & , & 0 & ] \end{array} \quad (3.2)$$

#### (2) 中間接触

節点  $ij$  を  $\alpha : 1-\alpha$  に内分する中間点  $m$  における接触拘束マトリクス

$$\begin{array}{cccc} \mathbf{u}_{ai} & \mathbf{u}_{aj} & \mathbf{u}_{bi} & \mathbf{u}_{bj} \\ \text{Contact point } m : \mathbf{B}_c = [ & -(1-\alpha) & , & -\alpha & , & 1-\alpha & , & \alpha & ] \end{array} \quad (3.3)$$

ここで、 $\mathbf{u}$  は節点変位ベクトルである。添字はピンと節点番号を表す。中間点  $m$  は節点  $ij$  を  $\alpha : 1-\alpha$  に内分する位置にあることから、式(3.3)は節点  $ij$  の変位ベクトルを  $\alpha : 1-\alpha$  に線形補完することにより中間点  $m$  の変位ベクトルを求め、接触条件を作成することを意味している。

従って、中間接触を考慮する場合は、式(3.3)のマトリクスを用いて式(3.1)を解くことにより、中間点  $m$  において接触条件を満たすように荷重が節点  $i$  と  $j$  に分配される。

式(3.1)は以下の手順で収束計算により解く。

- ① 接触荷重増分ベクトル $\Delta \lambda$ をゼロと仮定して、節点変位増分ベクトル $\Delta \mathbf{u}$ を計算する。

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1} \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{R} + \lambda) \quad -(3.4)$$

- ②  $\Delta \mathbf{u}$ を用いて接触判定を行い $\mathbf{Bc}$ を更新し、 $\Delta \lambda$ とオーバーラップベクトル $\delta$ を計算する。接触判定位置でオーバーラップが生じていなければ、その位置に対応した $\mathbf{Bc}$ 成分をゼロとする。

$$\Delta \lambda = (\mathbf{Bc}^T \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{Bc})^{-1} \cdot (\mathbf{Bc}^T \cdot \Delta \mathbf{u} - \delta) \quad -(3.5)$$

$$\delta = \mathbf{Bc}^T \cdot \Delta \mathbf{u} \quad -(3.6)$$

- ③ 接触荷重ベクトル $\lambda$ を更新する。

$$\lambda = \lambda + \Delta \lambda \quad -(3.7)$$

ワイヤ径を考慮したオーバーラップ量が誤差範囲内に収まるまで①～③を繰り返す。

今回導入した中間接触モデルは、接触条件のみを節点から軸方向にずれた位置で作成し、接触荷重は節点で評価する。つまり、接触条件を考慮する位置が節点からずれることによって、節点における接触荷重の大きさも変化するので燃料ピンのディスパージョンを解析できるというものである。

この方法の問題は、ワイヤがずれると節点では接触条件が考慮されなくなるという点にある。節点間でのオーバーラップを許容することになるため、ワイヤのずれ量が顕著な場合は節点間でピン同士の一部が重なる場合や、ピンの一部がダクトからはみ出してしまう場合が生じる可能性があることに留意する必要がある。

#### 4. 検証解析

中間接触機能によるディスパージョンモデルの検証を炉外バンドル圧縮試験の結果を用いて行なった。

##### 4. 1 炉外バンドル圧縮試験

検証に用いたのは JNC で実施した炉外バンドル圧縮試験である。この試験はワイヤの巻きずれが無いバンドルとワイヤの巻きずれがあるバンドルの2種類について行われた<sup>1)</sup>。この炉外バンドル圧縮試験のバンドル仕様を表 4.1 に示す。ピンは中空の被覆管に所定のピッチでワイヤを巻き付けた模擬ピンである（燃料ペレットは装荷されていない）。ワイヤの巻きずれがあるバンドルでは、図 4.1 に示すように、ワイヤの初期の巻きずれがある72本のピンを規則的に分散させている。ワイヤの巻きずれピンは、ワイヤピッチはワイヤずれ無しピンと同一であるが、巻き付け開始位置の角度が20度反時計回りにずらしてある。バンドル圧縮試験体における軸方向位置とワイヤ位置との関係は図 4.2 に示す通りである。

この炉外バンドル試験では、X線CTによるバンドル横断面図を撮影しており、更に画像データの数値化処理によりピン-ダクト間距離、ピン-ピン間距離などのデータを取得している。また、ダクトを模擬した圧縮板の内面に塗布した塗料の上のピン接触跡の有無を確認することにより、ピン-ダクト間接触時期を確認している。更に、圧縮試験後はバンドルを解体し、ピンの外径寸法測定を実施している。

##### 4. 2 BDI量の定義

BDIの厳しさを定量的に表す指標としてBDI量が用いられる。BDI量は次式で定義される<sup>1,3)</sup>。

$$\text{BDI量} = (B - D) / dw \quad \text{-(4.1)}$$

ここで、

B：バンドルの対面方向の寸法

D：ダクトの内対面間距離

dw : ワイヤ径

である。

バンドルの対面方向寸法 B は次式により求まる。

$$B=2(N-1) \cdot (D+dw)\cos 30^{\circ} +D+2dw \quad -(4.2)$$

ここで、

N : リング数

D : ピン外径(mm)

である。

式(4.1)に示すように BDI 量は無次元量であるが、BDI の厳しさをワイヤ径単位で表すことを明確にする観点から、通常は dw を付けて表現している。

#### 4. 3 解析条件

図 4.3 に BAMBOO コードのバンドル圧縮試験体の解析モデルを示す。軸方向位置とワイヤ方向は実際の試験体とほぼ同様になっている。ワイヤずれ有りバンドルでは、実際の試験体と同じ配置にワイヤずれピンを配置させてある。解析上でのワイヤのずれピンは、ワイヤ位置が正規の軸方向位置から 17mm だけ下方にずらしたピンである。このずれ量は、角度で見た場合、正規位置から  $20^{\circ}$  ( $=17\text{mm}/305\text{mm} \cdot 360^{\circ}$ ) 反時計回りのずれに相当する。BDI が発生するとワイヤを介した接触荷重によって被覆管の断面が偏平化する。この偏平化はピン-ダクト管距離の減少を抑制する BDI 緩和の主要な機構であるため、バンドル変形解析においてピン偏平化剛性が重要である。

このピンの偏平化剛性にはワイヤ付被覆管圧縮試験の結果を用いた<sup>6)</sup>。この試験は、疲労試験機を用いて一本のワイヤ付被覆管試験片を径方向に圧縮し、荷重と偏平化量との関係を測定するものである。試験片に巻き付けたワイヤは巻きピッチを考慮して付けられているので、偏平化剛性の大きさを決める因子の一つであるワイヤピッチの影響が適切に考慮

されている。図 4.4 にこの試験で得られたピン偏平化特性を示す。ピン偏平化剛性は図に示す変位-荷重特性の弾性領域における傾きで与えられる。

BAMBOO コードでは、このピン偏平化剛性と接触荷重から偏平化量（弾性変形寄与分）を計算する。炉外バンドル圧縮試験後のピン寸法測定結果から、塑性変形による偏平化は発生しなかったため<sup>1)</sup>、BAMBOO の解析は弾性解析とした。

#### 4. 4 解析結果

解析評価対象位置は、図 4.2 のピン下端から 825.4mm の圧縮板の軸方向中心近傍のピンチプレーンとした。この軸方向位置は BAMBOO コードでは図 4.3 に示すモデルのレベル 33 に相当する。今回開発した中間接触解析機能をワイヤずれ有りバンドルの解析に適用した。

##### 4. 4. 1 ワイヤずれ無しバンドル

図 4.5 に評価軸方向位置における BDI 量とピン-ダクト間距離（最小値）の関係についてコードの解析結果と試験結果を比較して示す。BDI 量が 0.5dw 以上では、解析結果は試験の CT 画像数値処理の誤差範囲内（±0.2mm）で一致していることが分かる。試験結果では、BDI 量=0dw におけるピン-ダクト間距離が 0.841mm と小さいが、この原因はワイヤ巻き付け時のワイヤ張力によりピンがワイヤピッチに沿って湾曲したためであると考えられている<sup>1)</sup>。

図 4.6、図 4.7 に BDI 量=1.0dw、1.5dw におけるピン-ダクト間距離のバンドル周方向分布についてコードの解析結果と試験結果比較したものをそれぞれ示す。バンドル内の外周ピン位置とワイヤ方向の関係はこれらの図の右隣りに示す通りである。これらの図よりコードの解析結果は試験結果に対して若干小さくなっている部分があるが全体としては、概ね一致していることが分かる。

次に、BDI 量の増加に伴うピン-ピン間距離の変化について、コード解析結果と試験結果を比較する。図 4.8 にピン-ピン間距離の平均値と最小値について比較した結果を示す。両者ともコードの解析結果と試験結果は概ね一致していることが分かる。

以上の結果から、ワイヤ付被覆管の圧縮試験結果から評価した偏平化



剛性を用いることによって BAMBOO コードはワイヤずれ無しバンドルの変形を適切に解析できていると考えられる。

#### 4. 4. 2 ワイヤずれ有りバンドル

図 4.9～図 4.12 に BDI 量=2dw におけるコードが出力した評価軸方向位置におけるバンドル横断面図と縦断面図を、ワイヤずれ無しバンドルとずれ有りバンドルと比較して示す。更に、図 4.13 にはワイヤずれ有りバンドルについての BDI 量=2.5dw の場合のバンドル横断面図を示す。これらの図から、ディスパージョンモデル用いることによってワイヤずれ有りバンドルの解析においてピン配列の乱れが表現できていることが分かる。

図 4.14 に評価軸方向位置における BDI 量とピン-ダクト間距離（最小値）との関係についてコード解析結果と試験結果を比較したものを示す。

炉外バンドル圧縮試験では、ワイヤずれ有りバンドルのピン-ダクト間距離はワイヤずれ無しバンドルに比較して大きくなったが、コードの解析においても同様になっている。更に、BDI 量が 0.5dw 以上において、コードの解析結果は CT 画像数値処理の誤差範囲内(±0.2mm) で試験結果と一致している。図 4.15、図 4.16 に BDI 量=1.0dw と 1.5dw におけるピン-ダクト間距離のバンドル周方向分布をそれぞれ示す。炉外バンドル圧縮試験ではワイヤのずれによってピン-ダクト間距離の変動が大きくなっているが、コードの解析においてもその傾向が現われており試験結果と概ね一致している。

次に、ピン-ピン間距離についてコードの解析結果と試験結果を比較する。図 4.17 にピン-ピン間距離（平均値と最小値）と BDI 量との関係について比較した結果を示す。図より、ピン-ピン間の平均距離についてはコードの解析結果と試験結果は概ね一致しているが、最小距離に関しては一致せず、解析結果が試験結果よりも小さくなっている。ワイヤずれ有りバンドルでは、ピンのディスパージョンによってピン-ピン間距離のバラつきが大きくなるが、コードでは解析モデル上ワイヤが軸方向に離散的に配置されピン-ピン間の空隙部分が実際のバンドルよりも大きくなるため、ピン-ピン間距離が小さくなる部分がバンドル内で発生しやすくなると考えられる。そこで、評価軸方向位置におけるピン-

ピン間距離についてバンドル内の分布を統計評価した結果を、試験結果と解析結果で比較してみた。図 4.18、図 4.19 は、ワイヤずれ有りバンドルについて、BDI 量=1.0dw と 1.8dw でのピン-ピン間距離の相対度数分布を比較したものである。これらの図から、ピン-ピン間距離の相対度数分布の全体的な傾向は解析結果と試験結果で近くなっているが、解析結果の方が分布の幅が若干広がっている。これは上述したように、解析ではピン-ピン間距離が小さくなる（あるいは大きくなる）部分が局所的に存在しやすくなっていることを意味している。ただし、ピン-ピン間距離相対分布の全体的な傾向は試験結果と解析結果で一致しているので、バンドル全体として見ればコードはピン-ピン間距離の変化を適切に解析できていると考えられる。

## 5. 検討

ここでは、ピンのディスパージョンがバンドルの変形にどのように影響するか検討するため、BAMBOO コードを用いてピン-ダクト間距離の変化に対するディスパージョンの影響に着目した評価を行なった。「4.」での評価では、ワイヤずれ有りバンドルではピンのディスパージョンが発生しピン-ダクト間距離は大きくなる結果となった。しかしながら、この結果は、ワイヤのずれ方が同じピンをバンドル内に規則的に分布させた特定のケースについてのものであり、ピンのディスパージョンによって常にピン-ダクト間距離が大きくなる傾向になることを示すものではない。バンドルの変形に対するピンのディスパージョンの影響を一般的に考察するためには、複数のディスパージョンについてバンドルの変形を評価する必要があると考えられる。そこで、コードの解析ではワイヤのずれ方に複数のパターンを設定し、ディスパージョンがピン-ダクト間距離に及ぼす影響を評価することとした。

### 5. 1 ワイヤずれの設定パターン

以下のようなワイヤずれのパターンを設定し、BAMBOO による炉外バンドル圧縮変形解析を行なった。バンドルの基本仕様はワイヤのずれ方以外は「4.」で実施した解析の表4. 1のバンドル仕様と同様である。

- ①ケース 0: ワイヤずれが無いケース（「4.」で解析したワイヤずれ無しバンドルと同じケース）
- ②ケース 1: ワイヤずれピンがバンドル内に規則的に存在するケース（「4.」で解析したワイヤずれ有りバンドルと同じケース）
- ③ケース 2~5: ワイヤの初期ずれを全ピンについてランダムに与えた場合  
ただし、軸方向ずれ量の範囲：-17mm~17mm (-20° ~ 20° )とする。ワイヤずれの発生の仕方をランダムに4通り与えることとする。
- ④ケース 6: 全ピンについてランダムに与えた初期ずれが BDI 量に比例して大きくなっていくケース  
ただし、軸方向ずれ量の範囲：-17mm~17mm (-20° ~20° )

であり、BDI 量=2dw で最大ずれ量が、±17mm に到達するようにする。

## 5. 2 解析結果

ケース1～6について解析し、ピン-ダクト間最小距離を BDI 量で整理した結果を図 5.1 に示す。図より、ケース2とケース6ではピン-ダクト間距離はワイヤずれのないケース0よりも小さくなった。ケース3～ケース5ではピン-ダクト間距離はケース0よりも大きくなったが、ケース1ほどは大きくならなかった。これらの結果から、ピンがディスパージョンするとピン-ダクト間距離が大きくなる場合も小さくなる場合もあることを示している。つまり、ディスパージョンはピン偏平化のようにピン-ダクト間距離の減少を抑制する BDI 緩和機構にはならないことが分かる。

「4.」での評価から、ディスパージョンが発生すると、ピン変位がバラつくことによってピン-ピン間距離もバラツキが大きくなりバンドル内で局所的にピン-ピン間が狭まったり、広がったりする傾向が現われると考えられる。図 5.2 に、BAMBOO よるワイヤずれ有りバンドル（ケース2）とワイヤずれ無しバンドル（ケース0）の炉外バンドル圧縮試験解析における BDI 量=1.0dw の時のピン-ピン間距離の相対度数分布を示すが、ワイヤずれのあるバンドルの方が分布の広がり大きいことからこのことが伺える。

ディスパージョンのピン偏平化への影響を検討する。図 5.3 に評価対象軸方向位置で BDI 量=1.5dw の時の AF-CD コーナー間における対角列ピン17本の偏平化量（被覆管外径減少量）についてケース0～6までの解析結果を比較して示す。これらの結果は弾性変形によるものである。図よりディスパージョンが発生する場合の偏平化量（ケース1～6）はディスパージョンが発生しない場合（ケース0）に比べて小さくなっていることが分かる。これより、ディスパージョンが発生するとバンドル内の接触荷重を緩和するようにピン配置がずれていくと考えられる。

ディスパージョンが発生すると、ピン-ピン間距離のバラつきが大きくなること、またピン-ダクト間最小距離に関してはいつも大きくなるとは限らず小さくなる場合もあることから、顕著なディスパージョンはバンドルの熱的健全性に影響する可能性があると考えられる。

## 6. まとめ

BDI が発生した集合体バンドルにおけるピンのディスパージョンを解析するモデルを開発した。このモデルを BDI 解析コード”BAMBOO”に導入し、バンドル変形挙動に対するディスパージョンの影響を解析評価した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 節点と節点の中間で接触条件を作成する中間接触解析手法を応用しワイヤずれによるピンのディスパージョンを解析するモデルを開発した。このモデルによって BAMBOO コードの解析で BDI 発生時のディスパージョンを表現できるようになった。
- (2) ワイヤずれによってディスパージョンが発生した炉外バンドル圧縮試験の結果を用いて本解析機能を検証した結果、ピン-ダクト間距離、ピン-ピン間距離について、コードの解析結果は試験結果と概ね一致した。これより、本解析コードはディスパージョンが生じたバンドル変形を適切に解析できると考えられる。
- (3) ディスパージョンがバンドル変形に及ぼす影響を BAMBOO コードで解析した結果、ピン湾曲変位のバラつきが大きくなりピン-ピン間距離もバラつきが大きくなった。ピン-ダクト間最小距離に関しては大きくなる場合も小さくなる場合もあった。これより、顕著なディスパージョンの発生はバンドルの熱的健全性に影響する可能性があると考えられる。

## 7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、BAMBOO コードの解析を実施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。また、炉外バンドル圧縮試験を実施していただいた燃料材料試験部 照射燃料集合体試験室の関係者の方に感謝の意を表します。

## 8. 参考文献

- 1) 田中康介、山本祐二、永峰 剛、前田宏治  
炉外圧縮試験による高速炉燃料ピンバンドル変形挙動解析評価-FFTF 炉  
条件-  
JNC TN9400 2001-022, (2000)
- 2) Alvia E. Bridges, Alan E. Waltar, Robert D. Leggett Jerry L. Ethridge  
A Liquid-Metal Reactor Core Demonstration Experiment Using HT-9  
Nuclear Technology Vol.102 June 1993 ,p.353
- 3) 上羽智之、水野朋保、浅賀健男  
高速炉燃料ピン束変形解析コード”BAMBOO”によるバンドル照射変形解  
析(その1) -Phenix 照射試験結果による検証評価-  
JNC ZN9400 98-006, (1998)
- 4) S.Kaplan and J.R.Punches  
The Response of Various Wire-Wrap Assemblies to Bundle-To-Duct Interaction  
GEFR-00056 UC-79b,February 1977
- 5) Bahram Nour-Omid and Peter Wriggers  
A Two-Level Iteration Method for Solution of Contact Problems  
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 54(1986) 131-144  
North-Holland
- 6) Tomoyuki Uwaba and 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 vol.136 OCT.2001

表4.1 炉外バンドル圧縮試験のバンドル仕様

項目	仕様
ピン本数 (本)	217
ワイヤピッチ (mm)	305
ピン外径/内径 (mm)	5.84/5.08
ワイヤ径 (mm)	1.32
ピン全長 (mm)	1900
圧縮板内面形状	平板



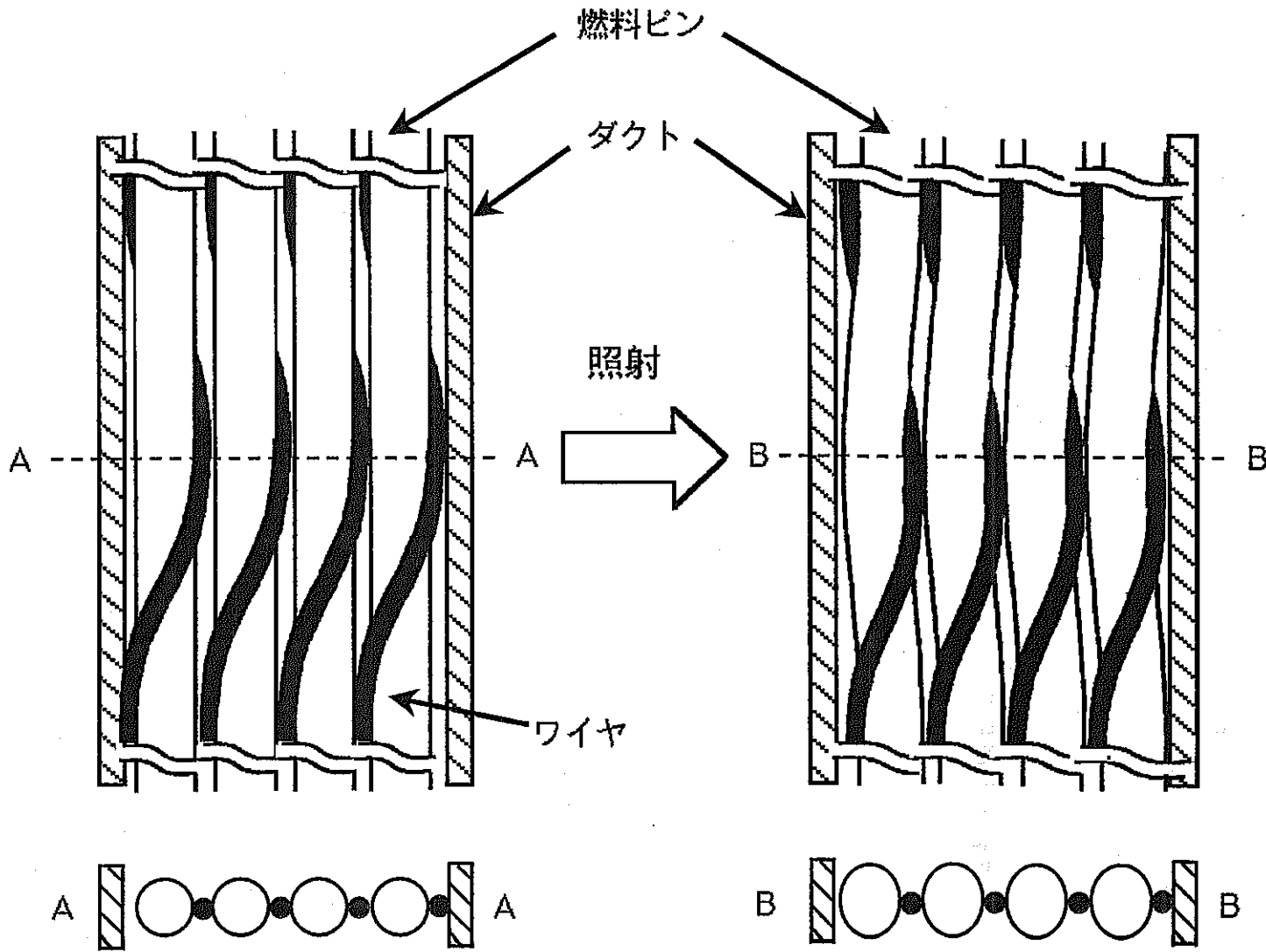


図1.1 BDIが発生したバンドルの変形状態

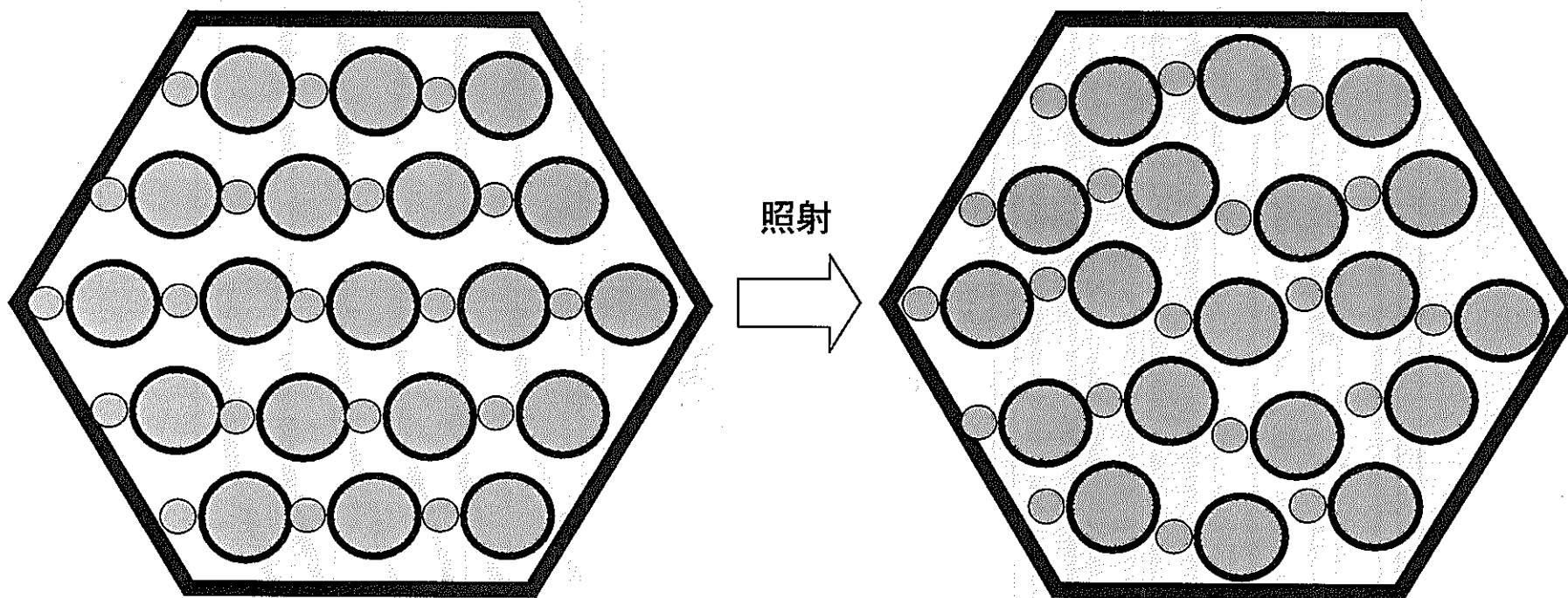


図2.1 ディスパーションが発生したバンドル横断面の様子

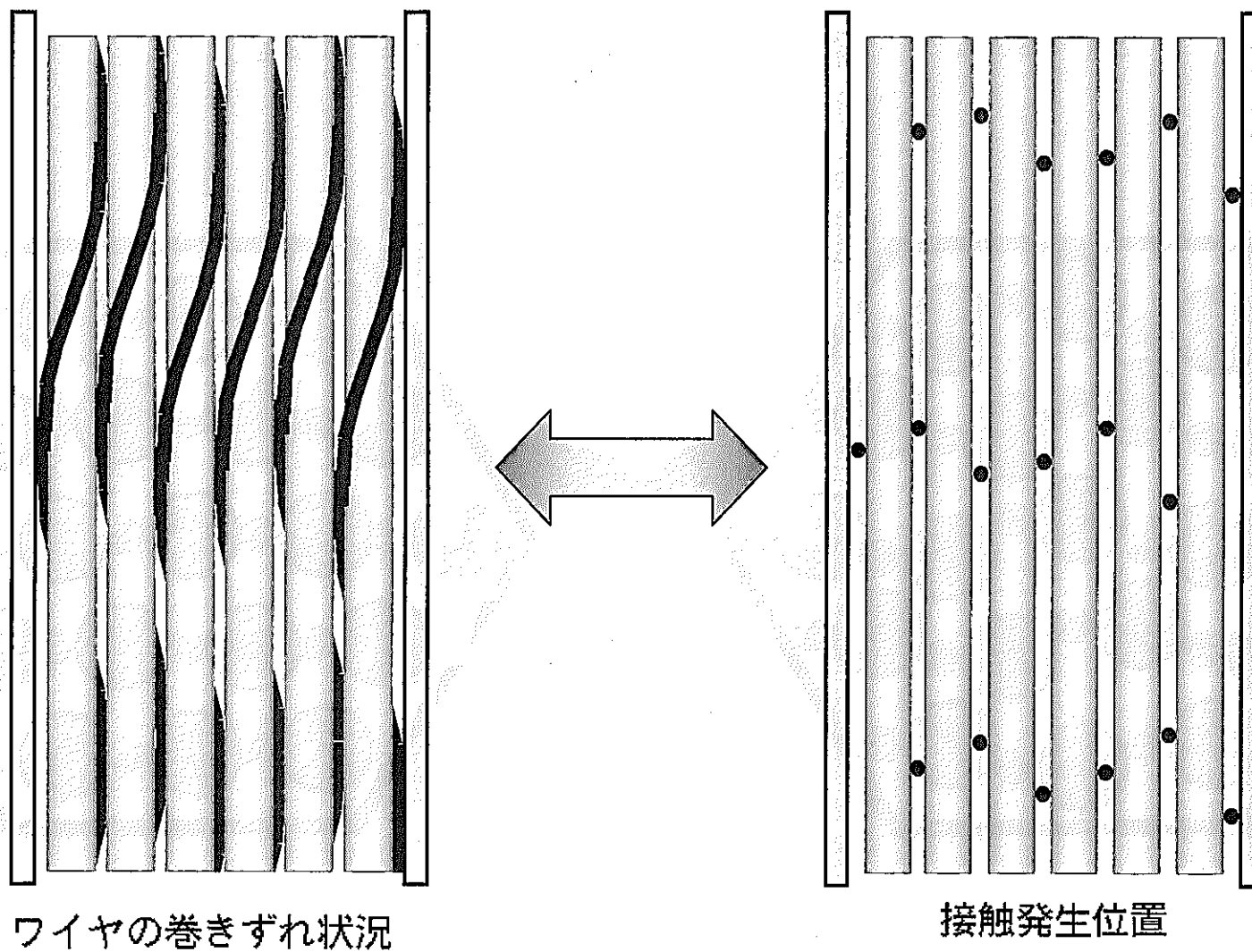


図2.2 ワイヤずれ有りバンドル内の接触位置

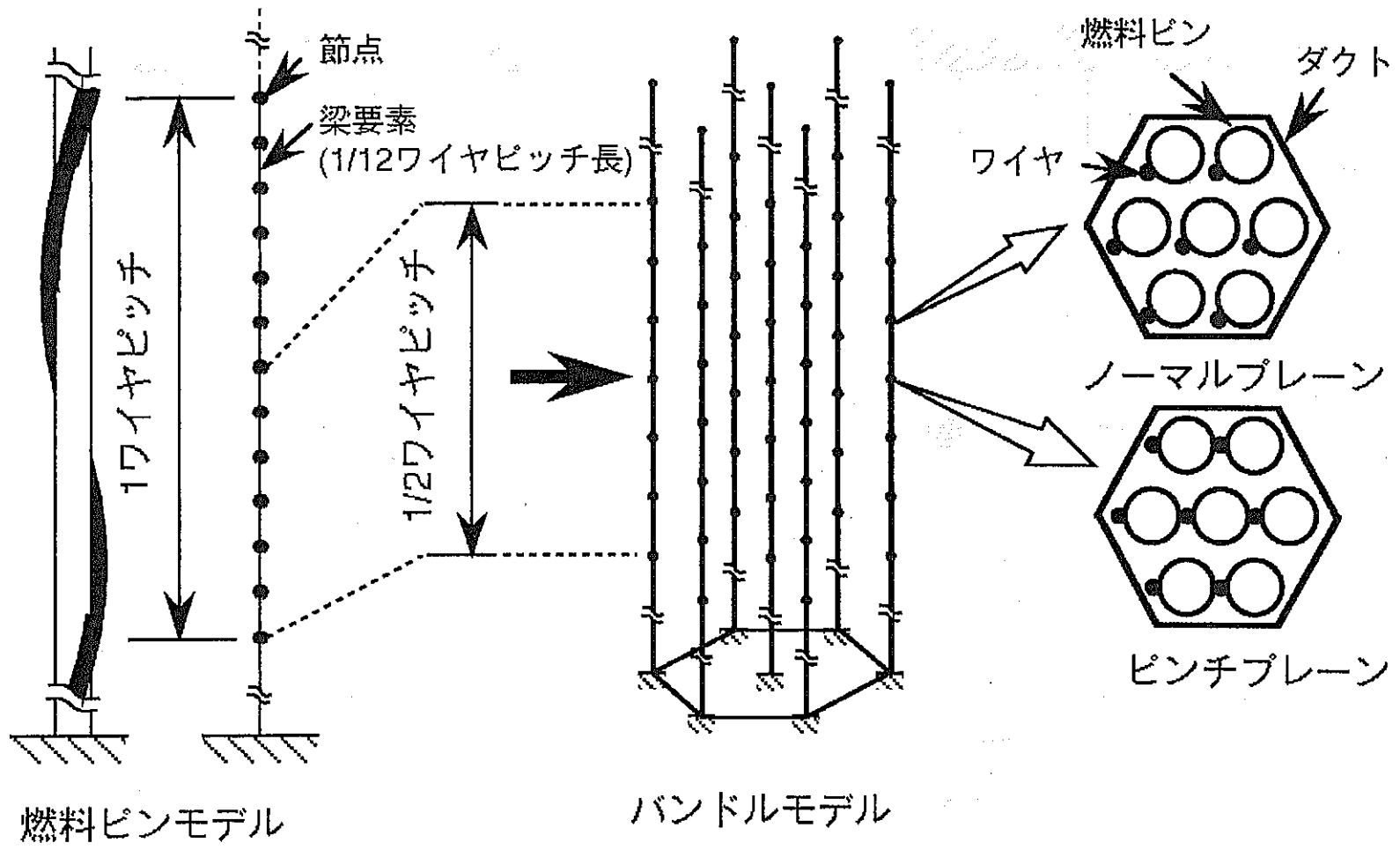


図3.1 BAMBOOコードの解析モデル

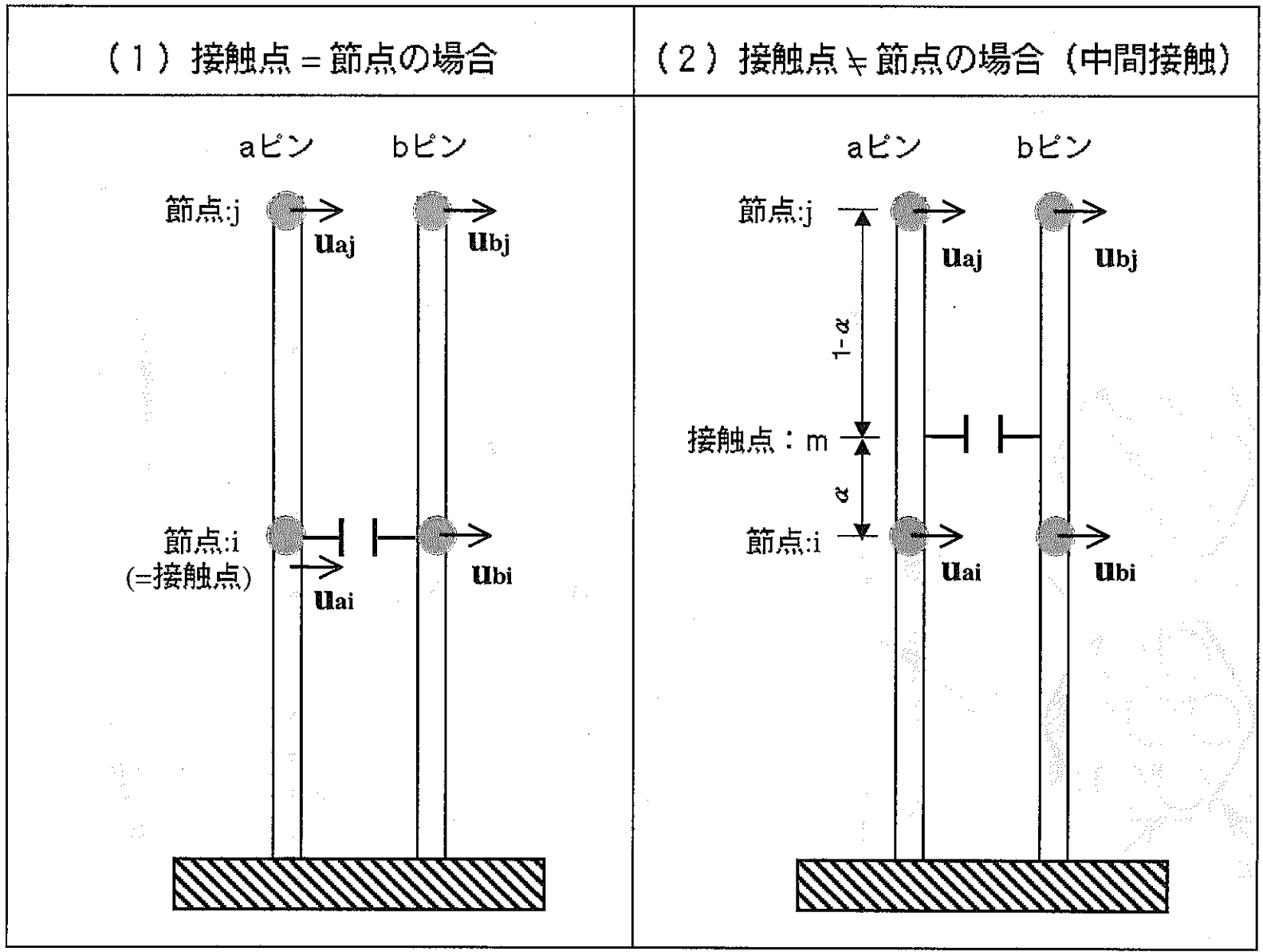


図3.2 中間接触解析の概念図

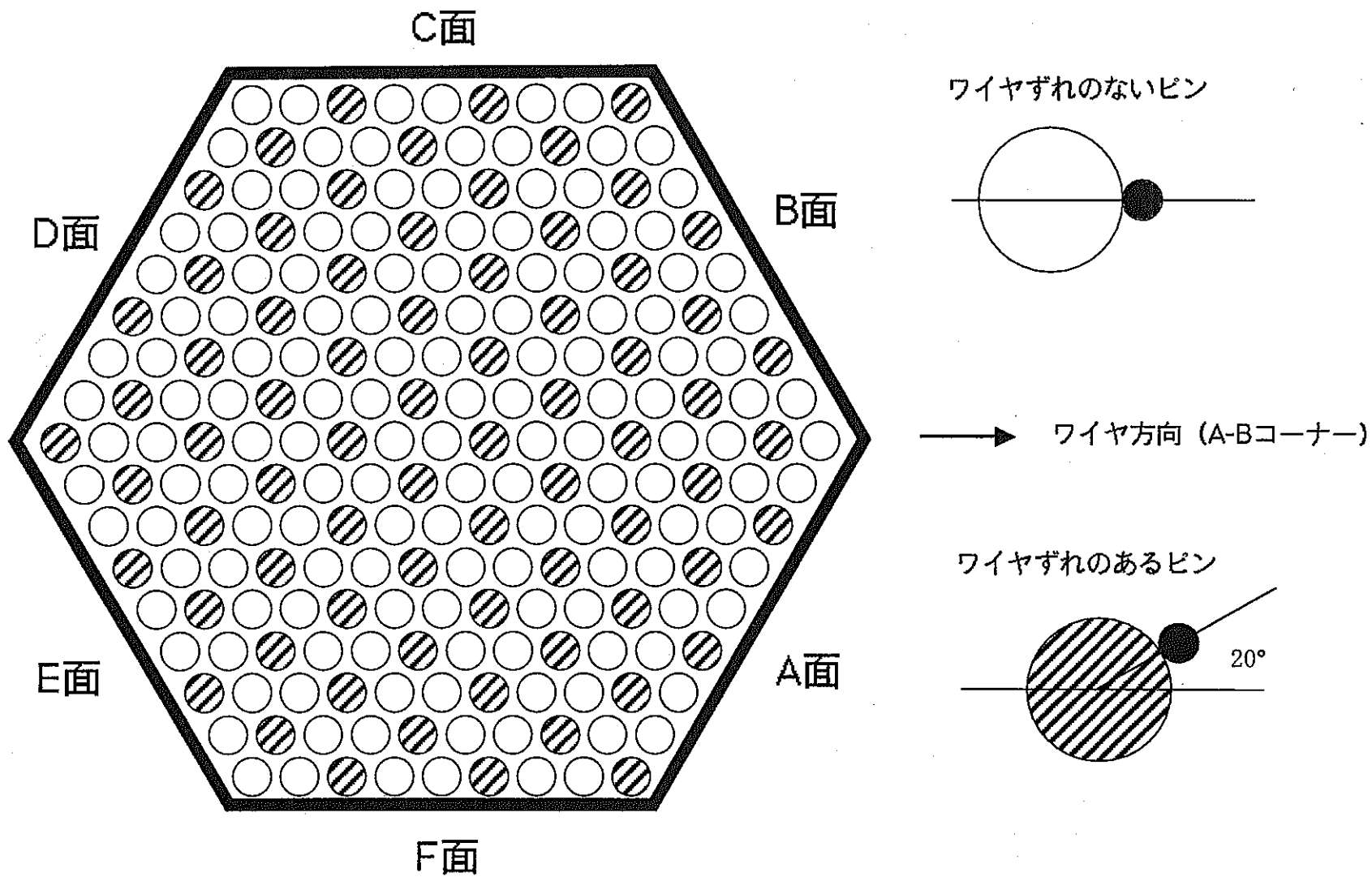


図4.1 ワイヤずれピン配置図

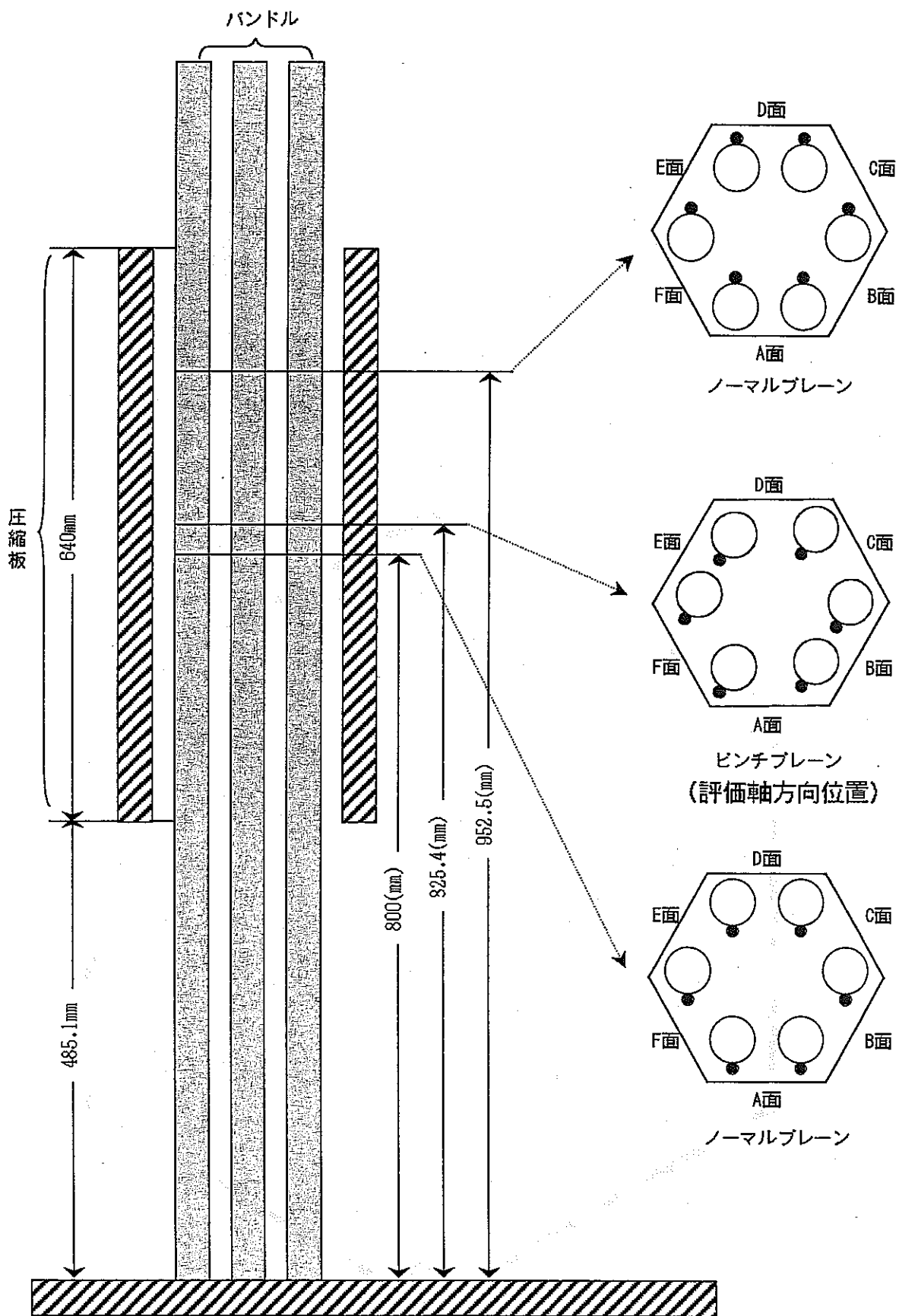


図4.2 炉外バンドル圧縮試験体におけるワイヤ配置

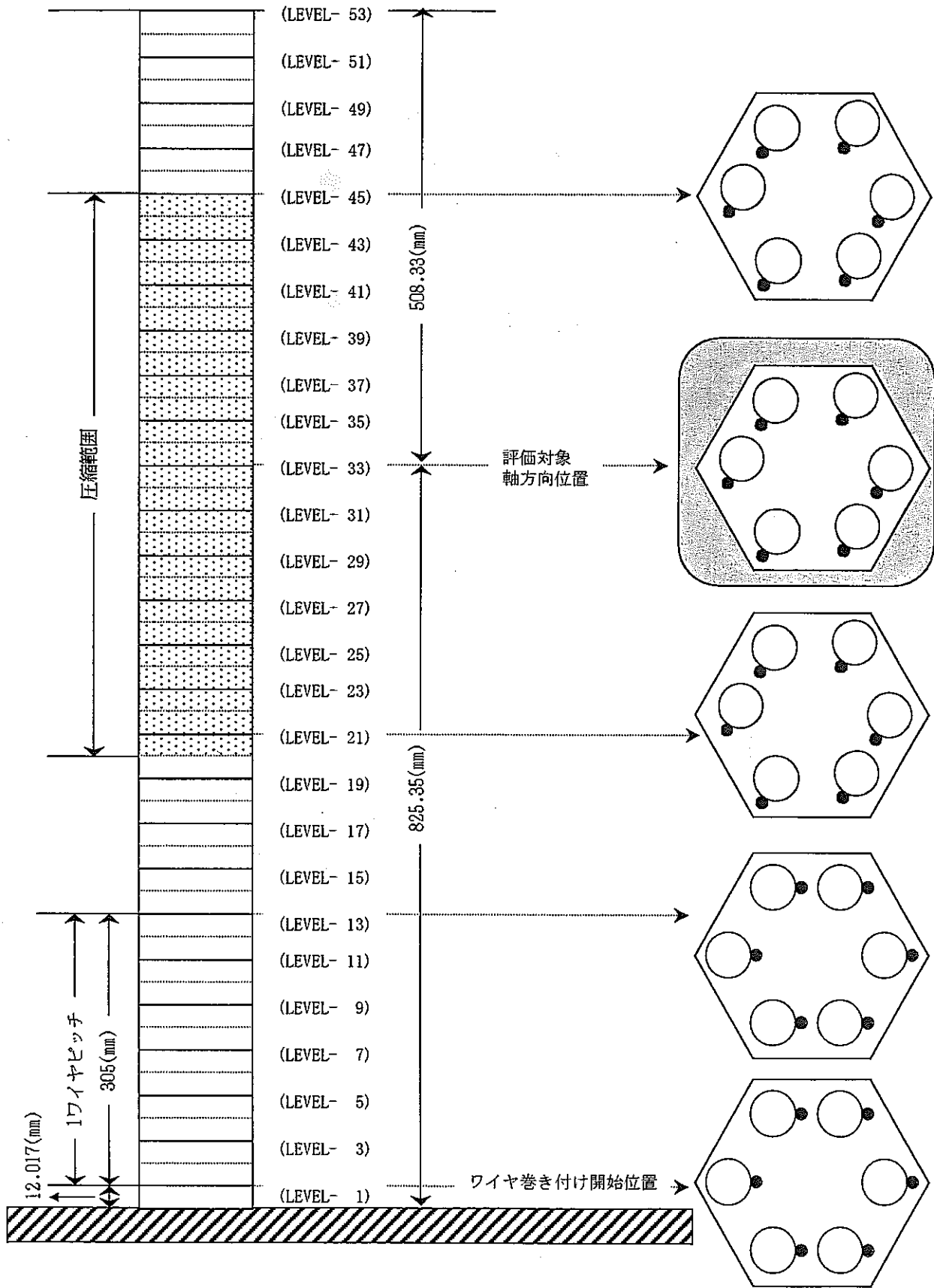


図4.3 炉外バンドル圧縮試験体のBAMBOOコード解析モデル



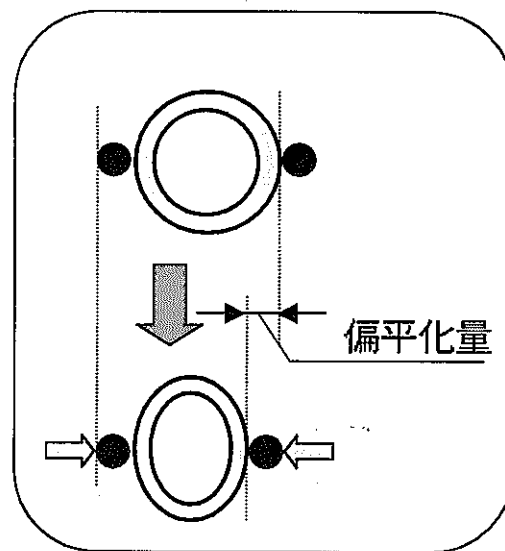
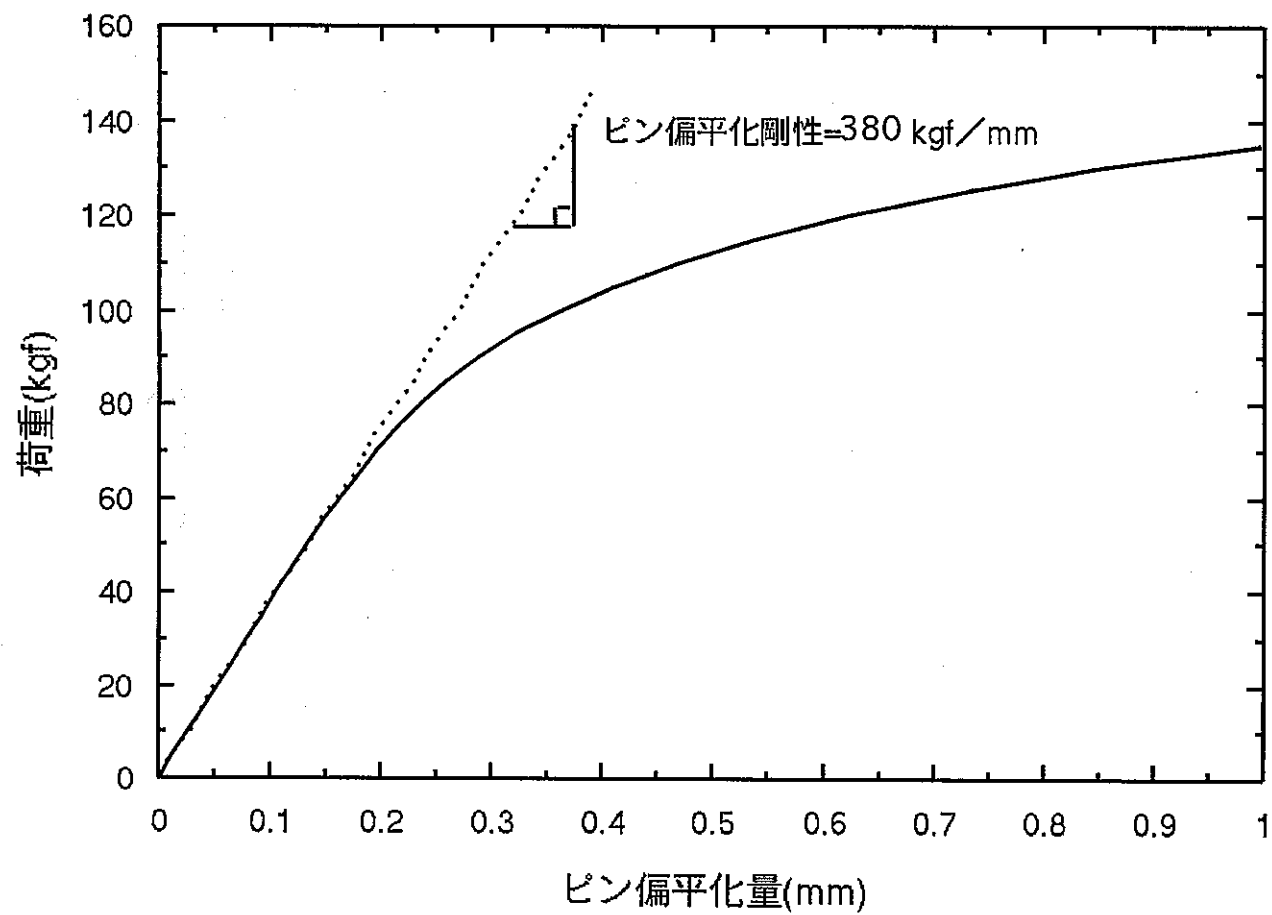


図4.4 (模擬) ピン扁平化特性

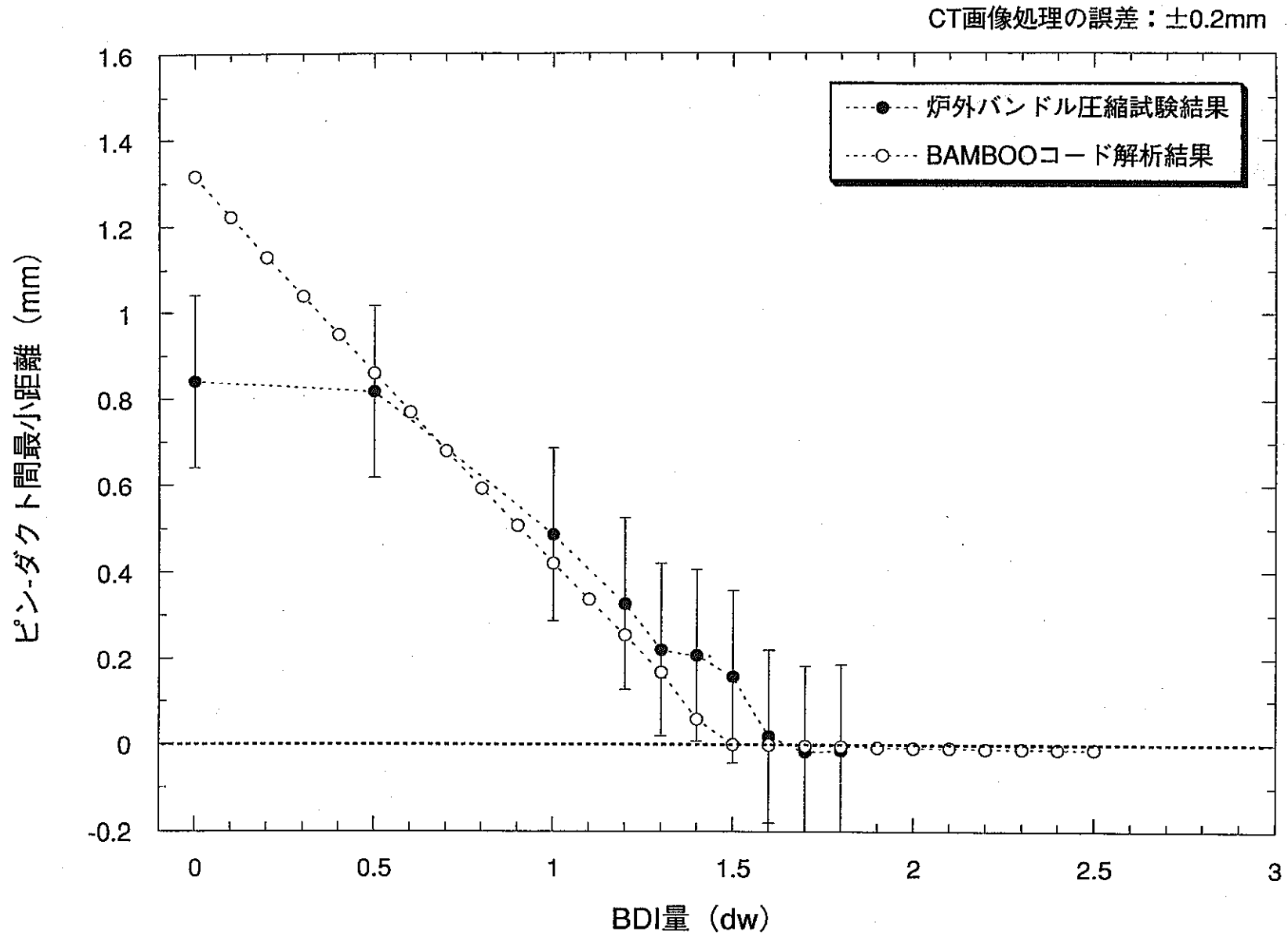


図4.5 ピン-ダクト間最小距離とBDI量との関係 (ワイヤずれ無しバンドル)

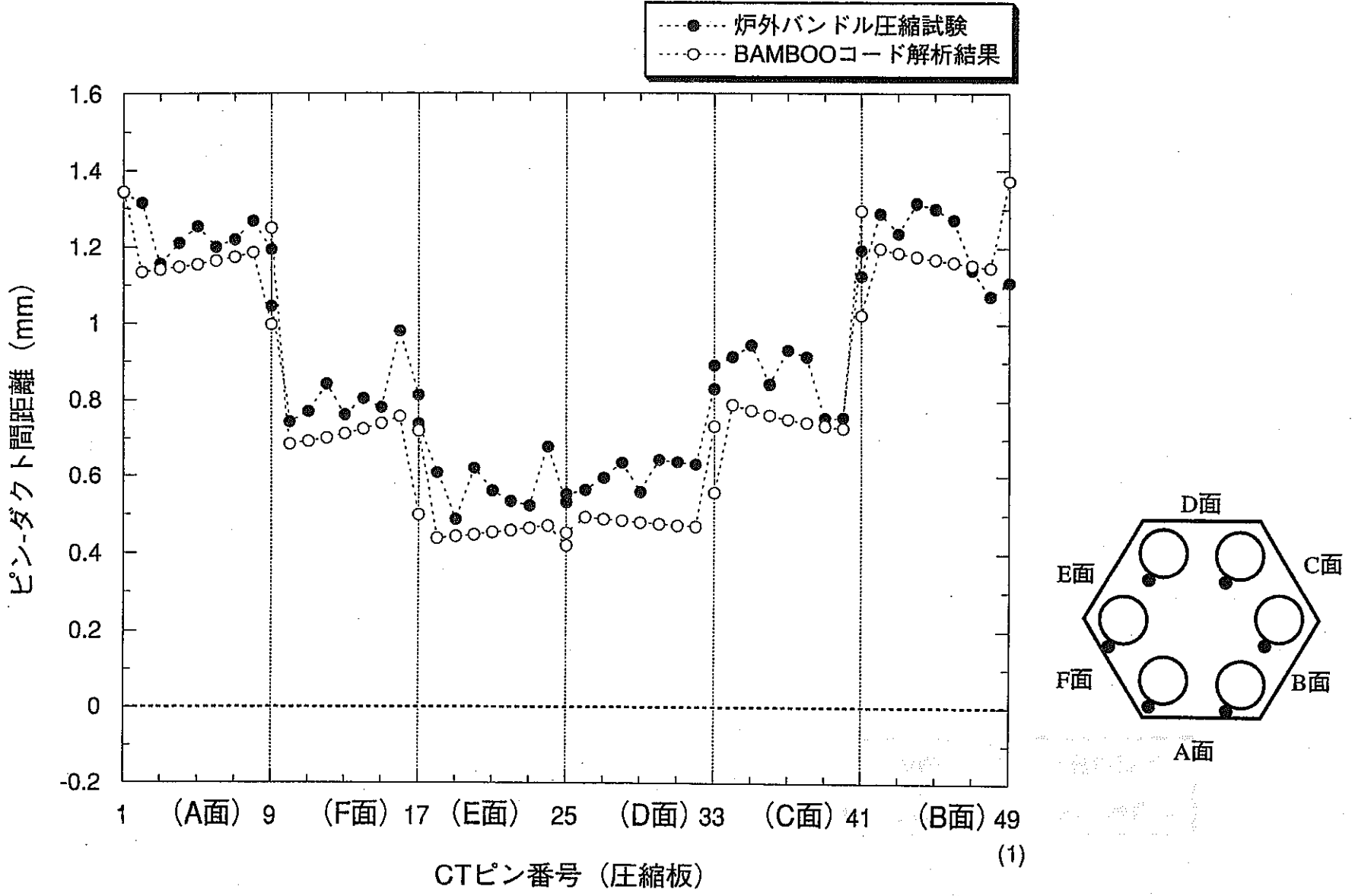


図4.6 ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI量=1.0dw)

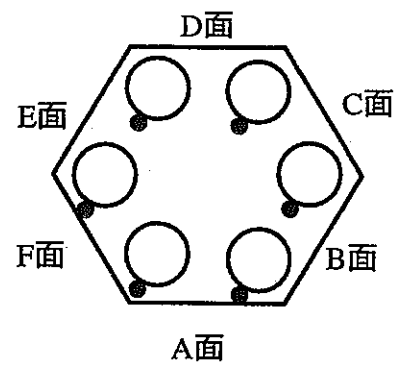
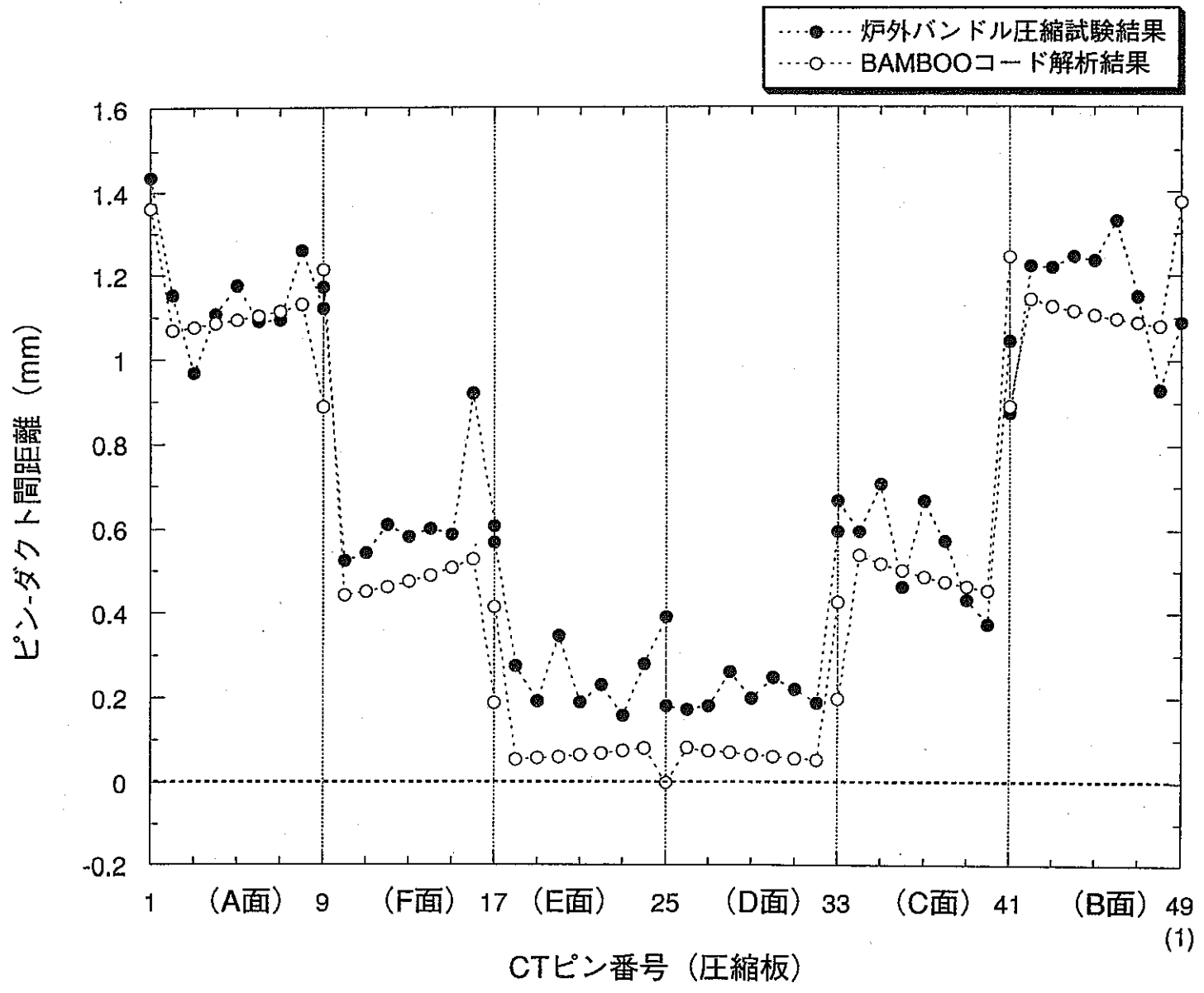


図4.7 ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI量=1.5dw)

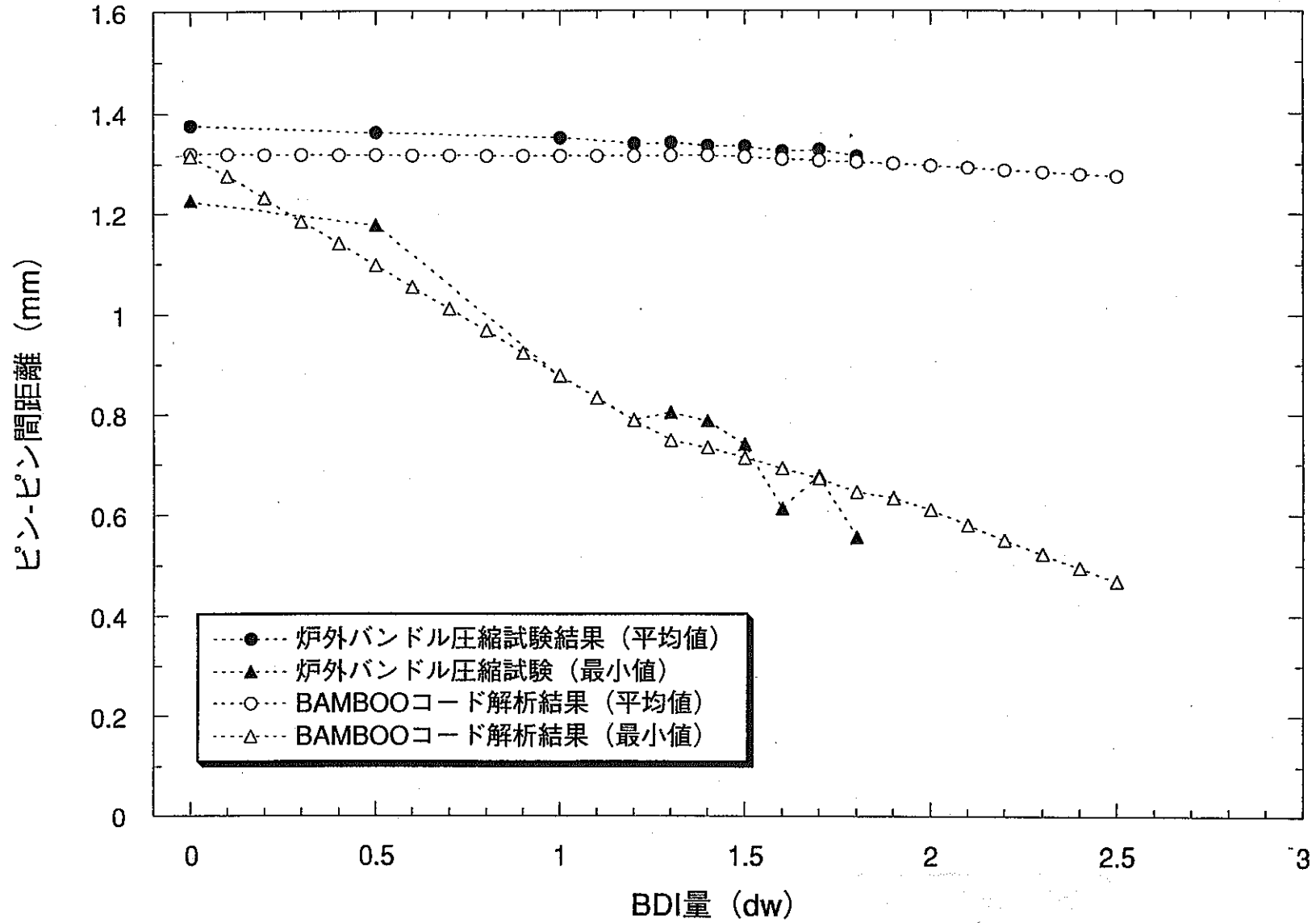


図4.8 ピン-ピン間距離とBDI量との関係 (ワイヤずれ無しバンドル)

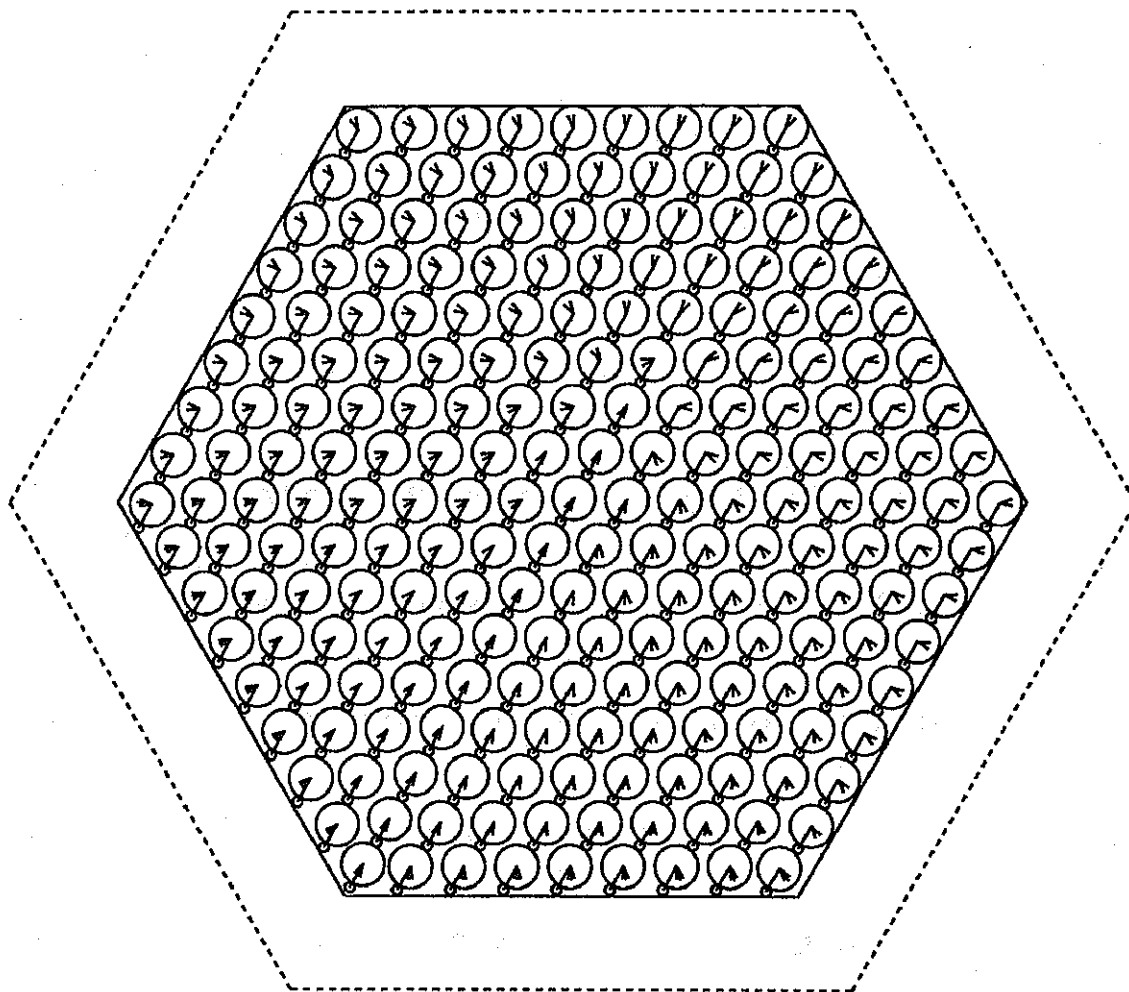


図4.9 バンドル横断面図 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI量=2.0dw)

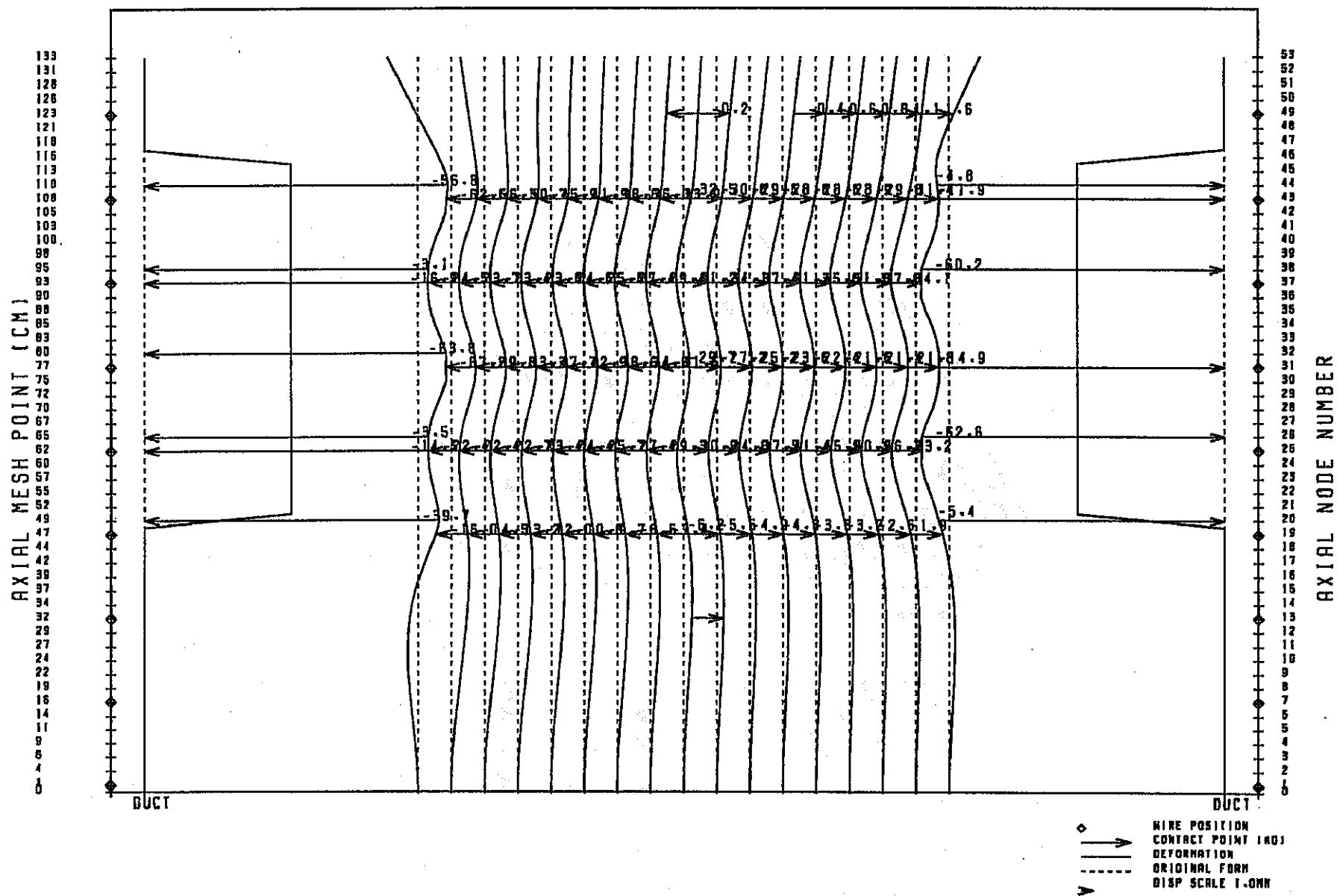


図4.10 バンドル縦断面図 (ワイヤずれ無しバンドル; BDI量=2.0dw)

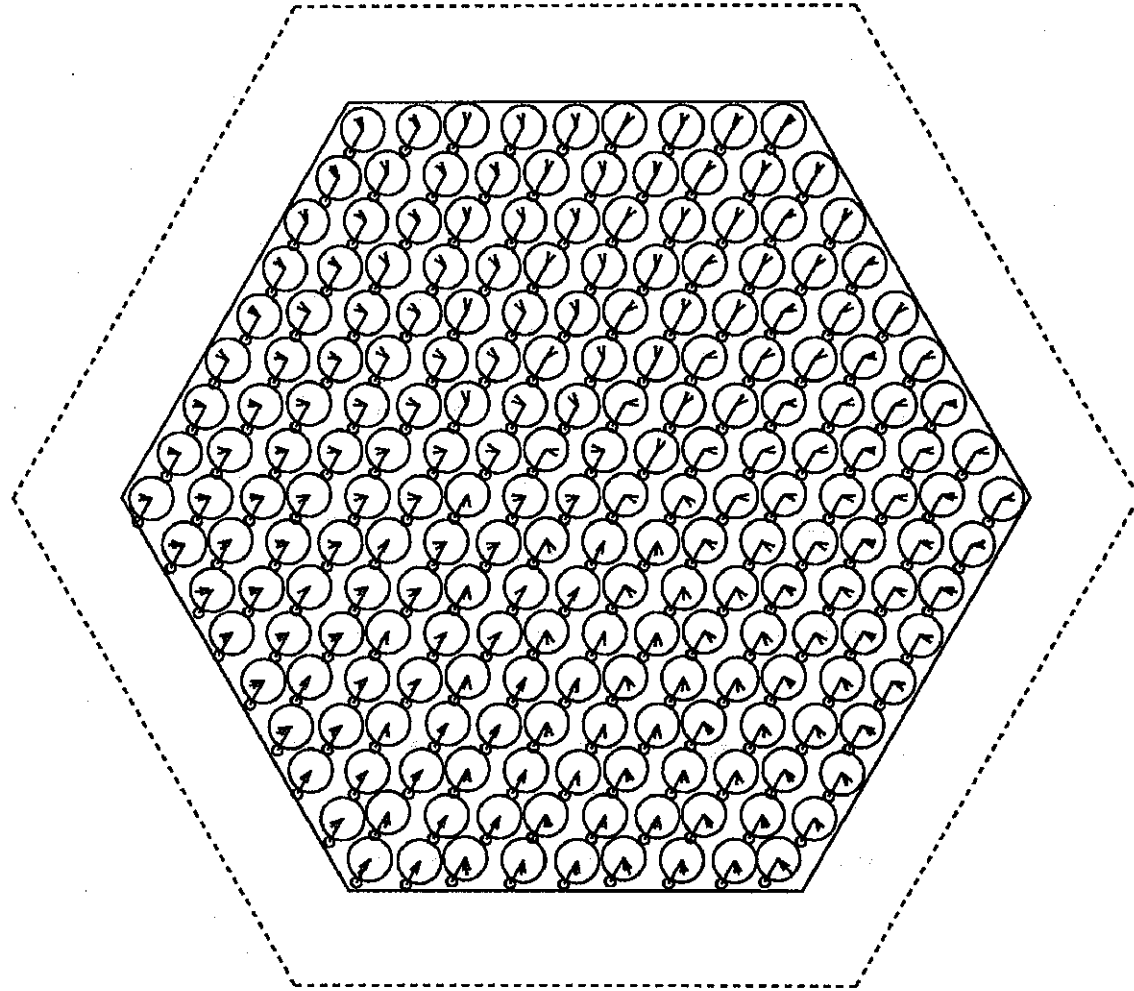


図4.11 バンドル横断面図 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=2.0dw)



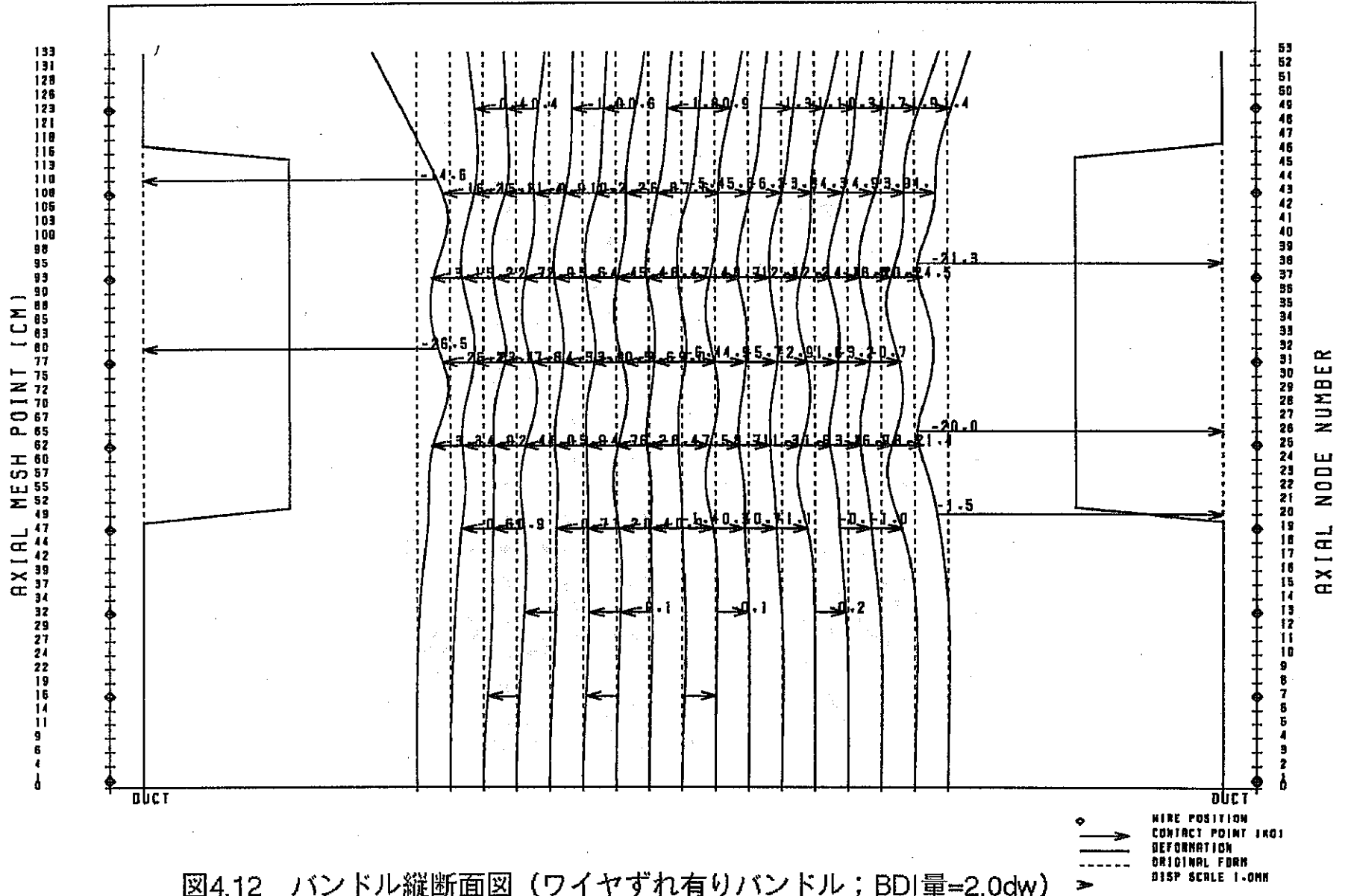


図4.12 バンドル縦断面図 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=2.0dw)

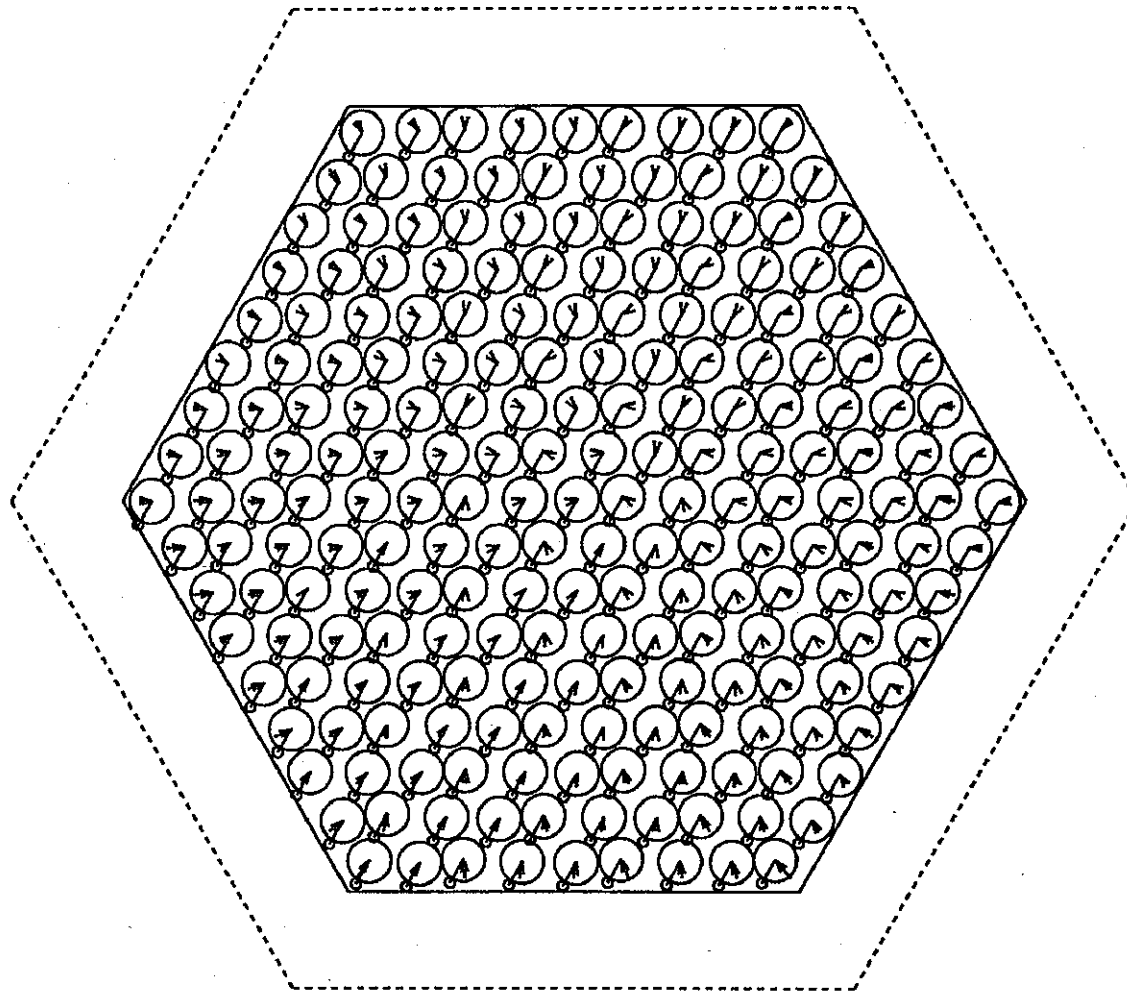


図4.13 バンドル横断面図 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=2.5dw)

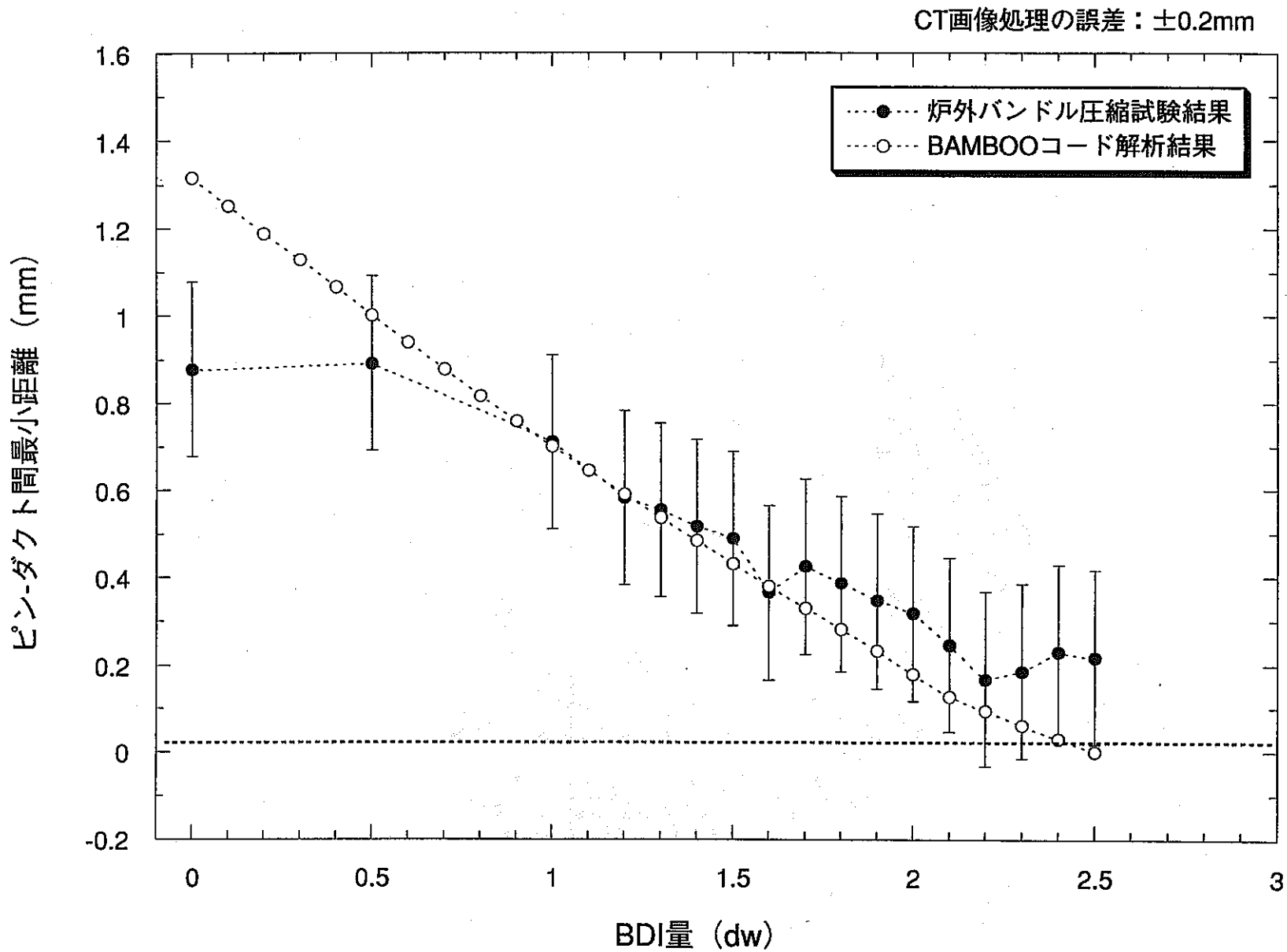


図4.14 ピン-ダクト間最小距離とBDI量との関係 (ワイヤずれ有りバンドル)

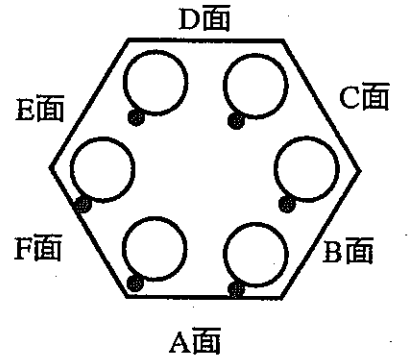
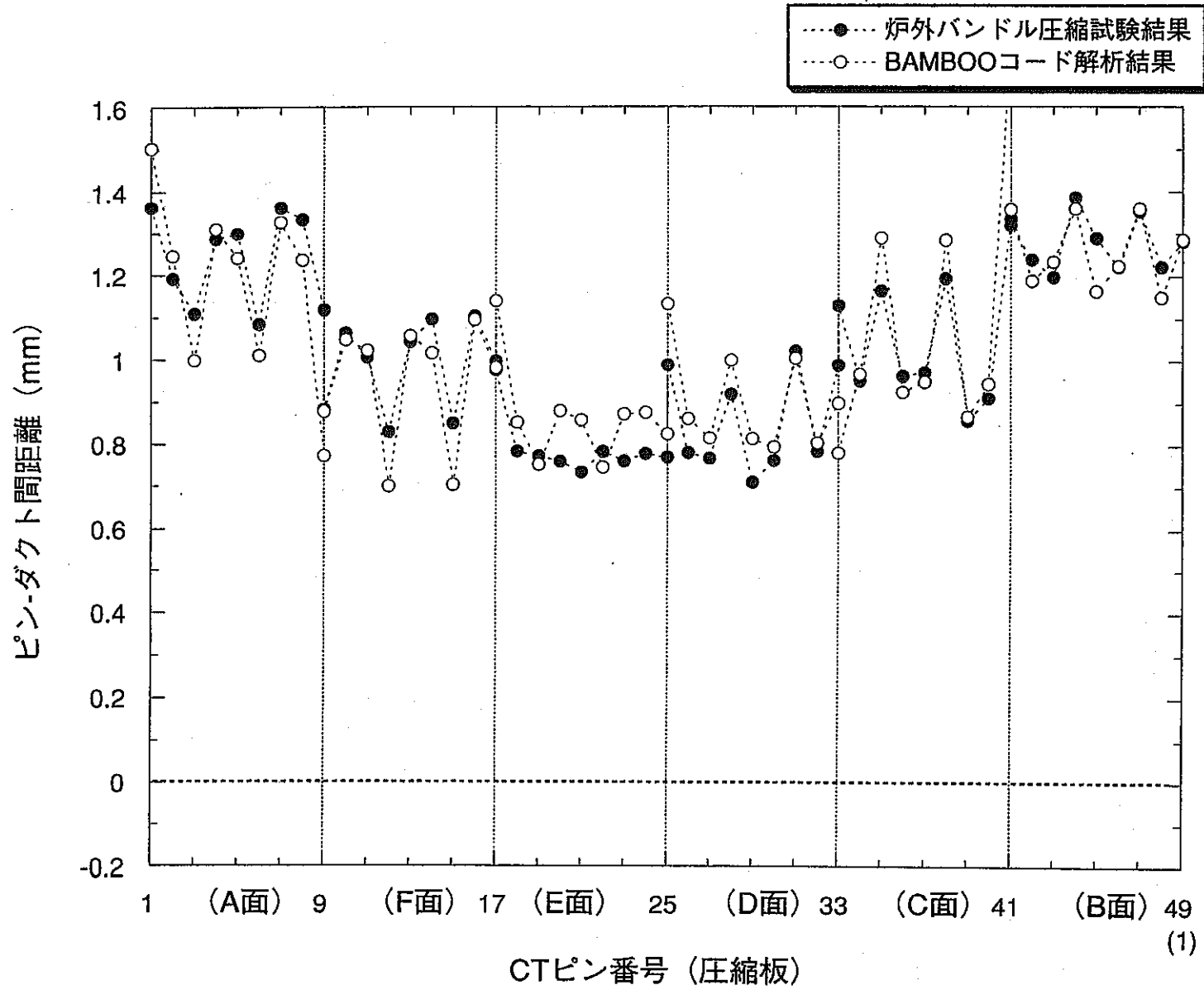


図4.15 ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=1.0dw)

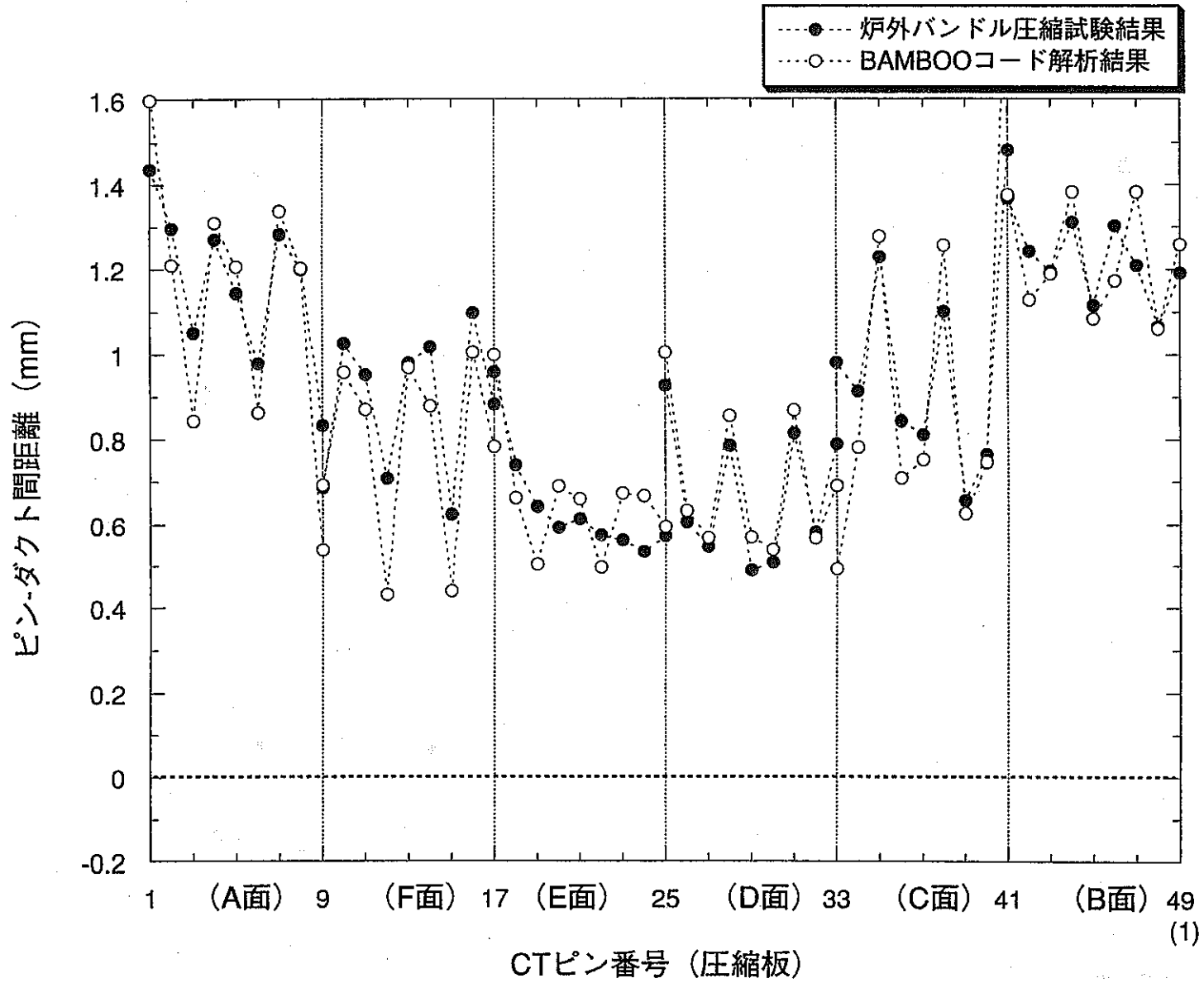


図4.16 ピン-ダクト間距離の周方向分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=1.5dw)

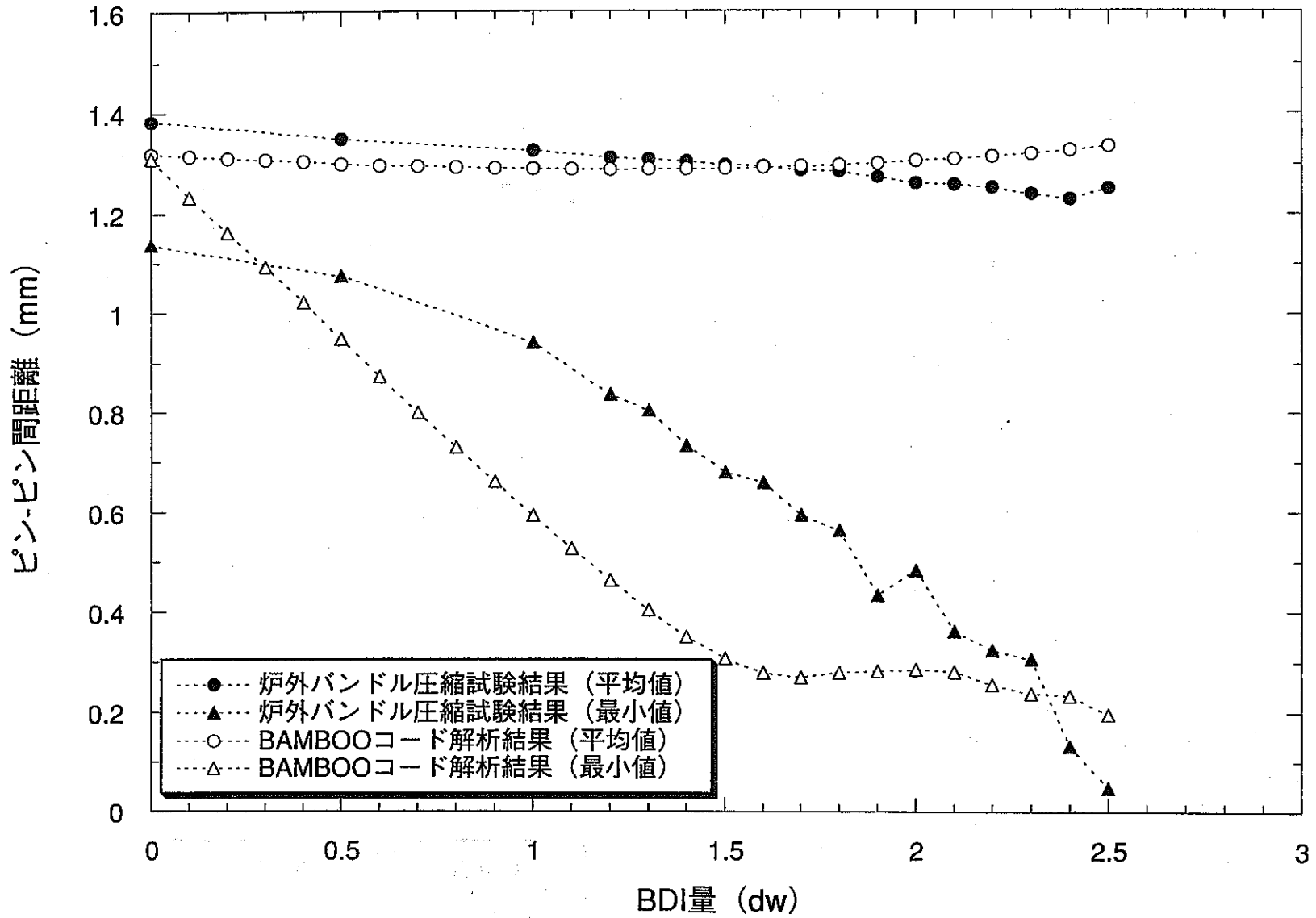


図4.17 ピン-ピン間距離とBDI量との関係 (ワイヤずれ有リバンドル)

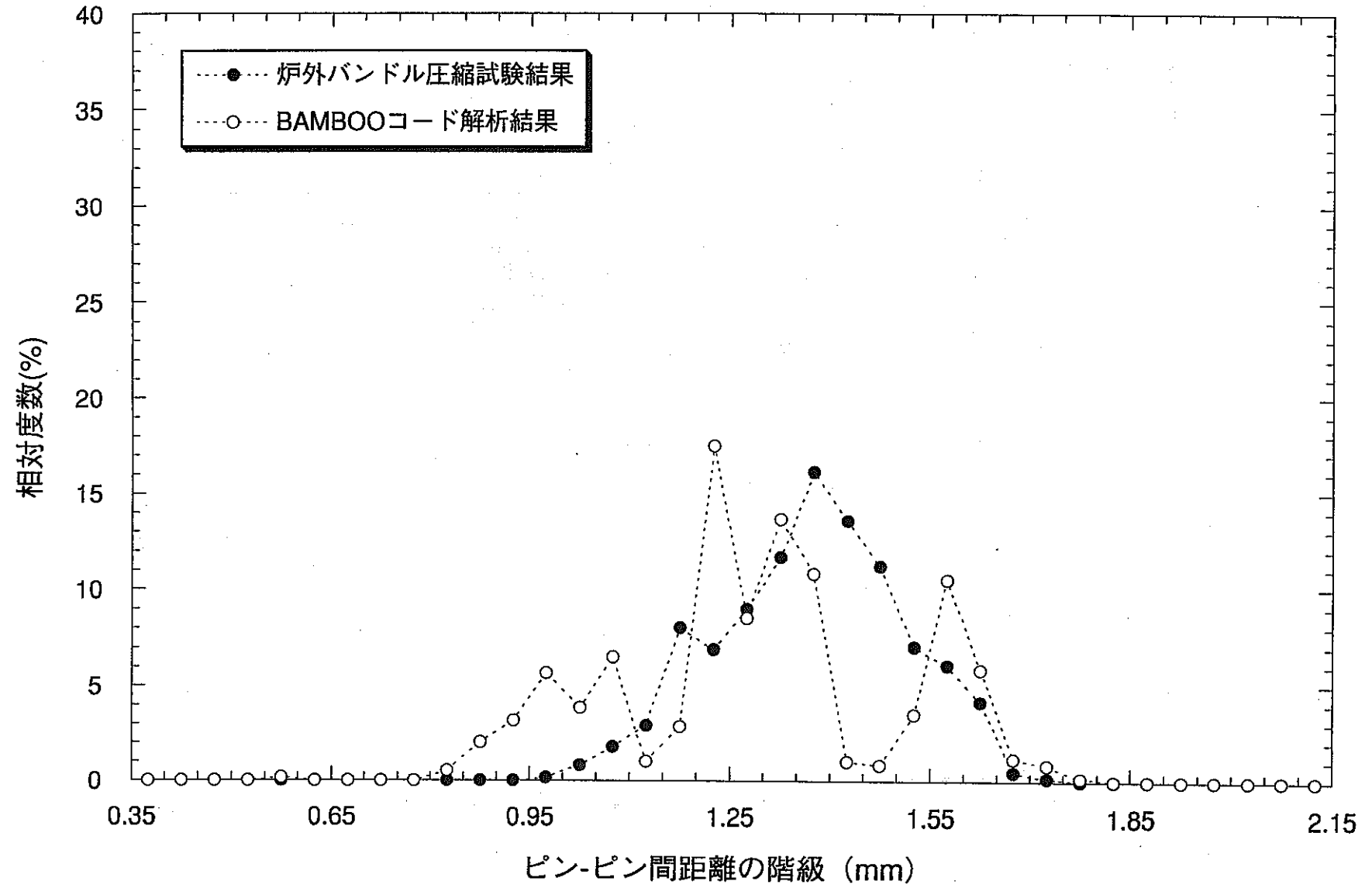


図4.18 ピン-ピン間距離の相対度数分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=1.0dw)

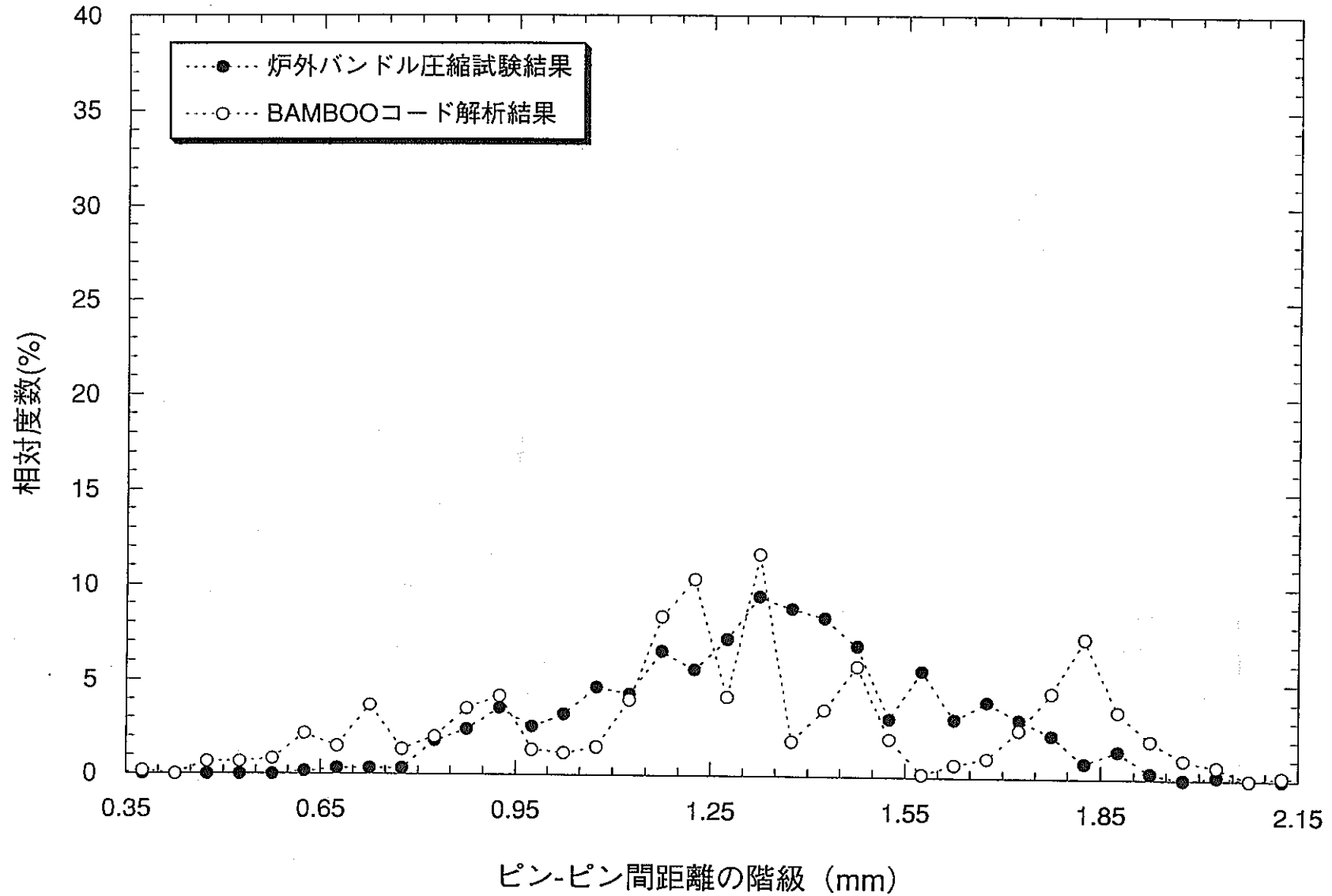


図4.19 ピン-ピン間距離の相対度数分布 (ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=1.8dw)



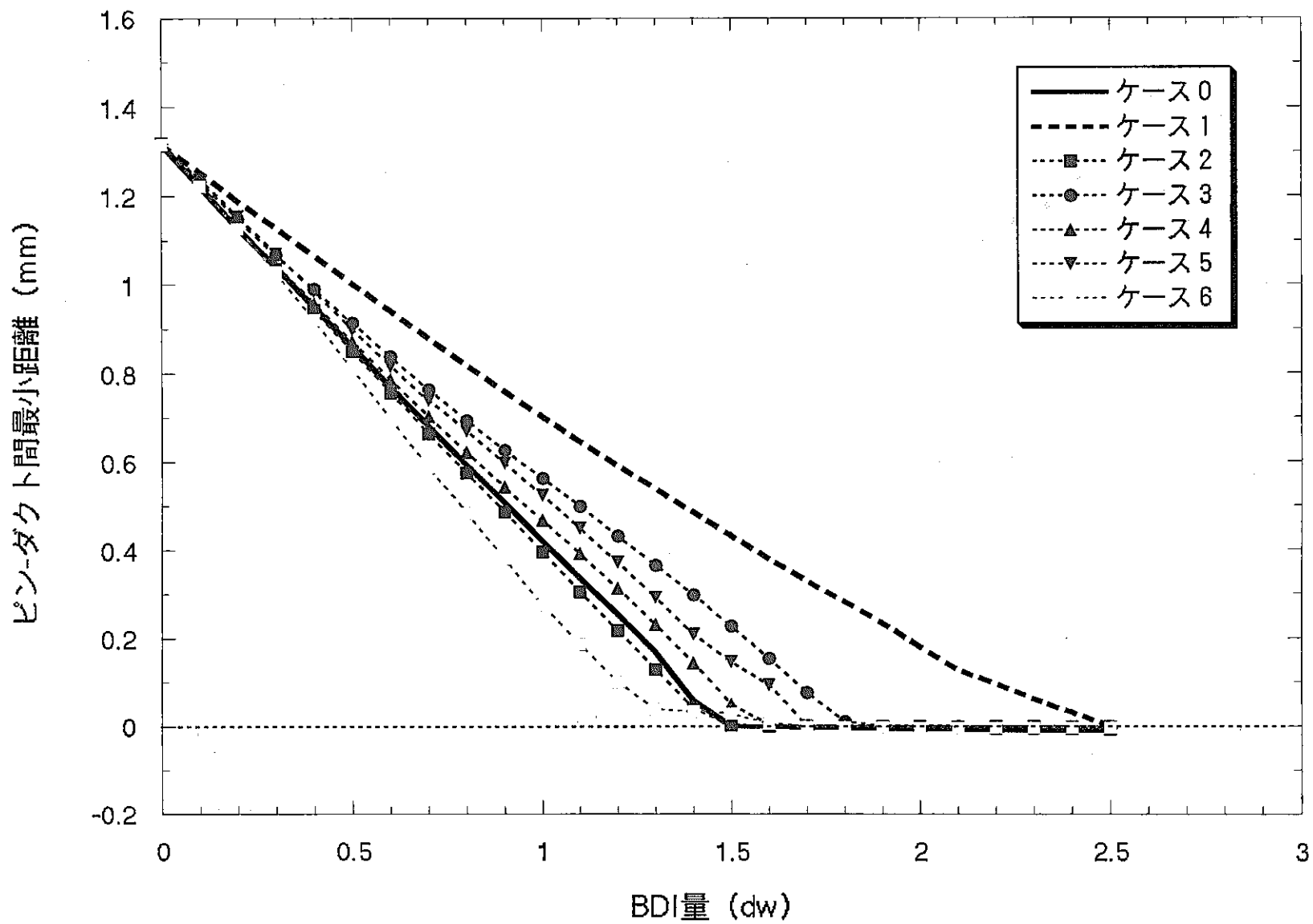


図5.1 ピン-ダクト間最小距離とBDI量との関係

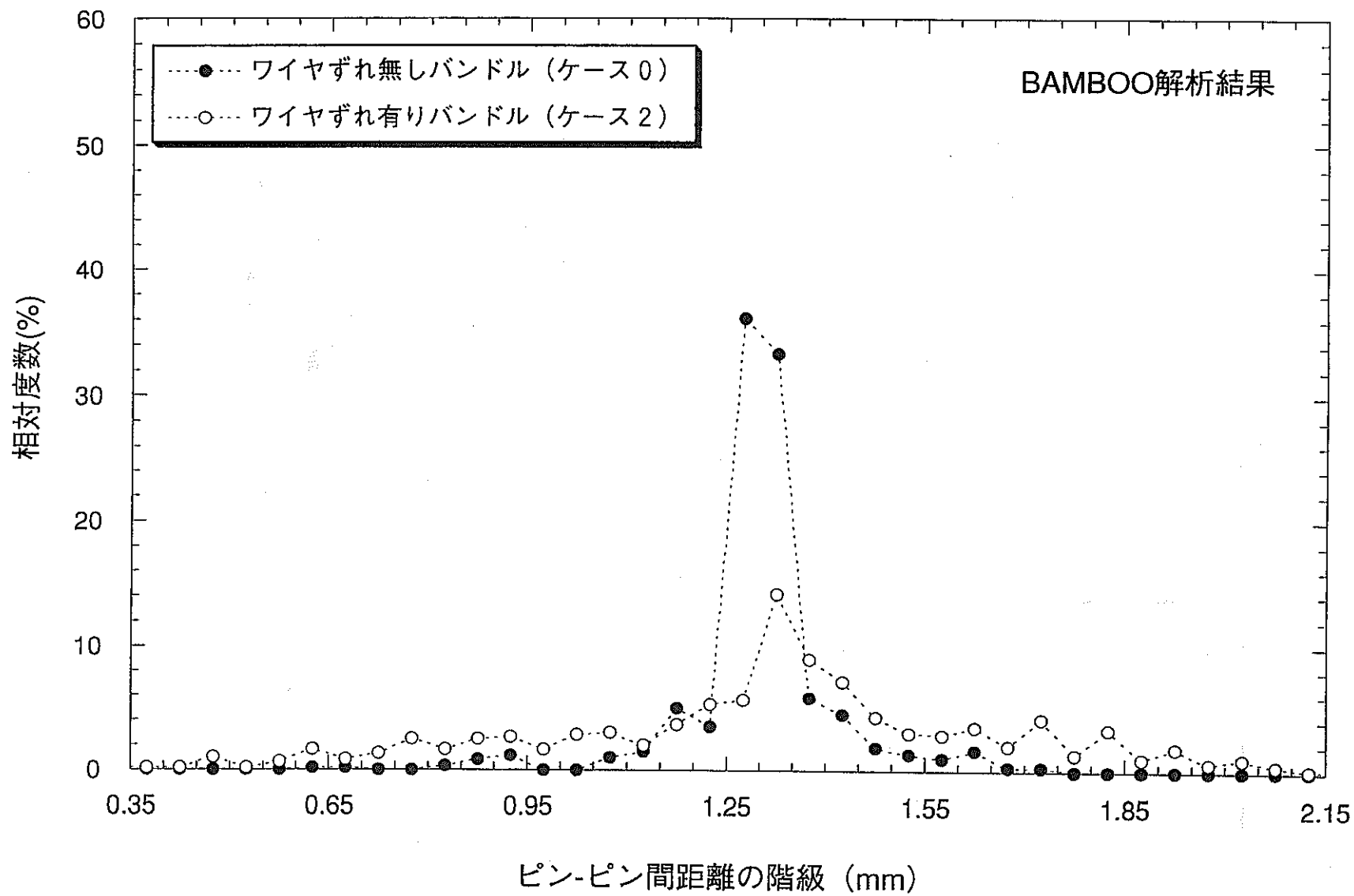


図5.2 ピン-ピン間距離の相対度数分布 (ワイヤずれ無しバンドル、ワイヤずれ有りバンドル; BDI量=1.8dw)

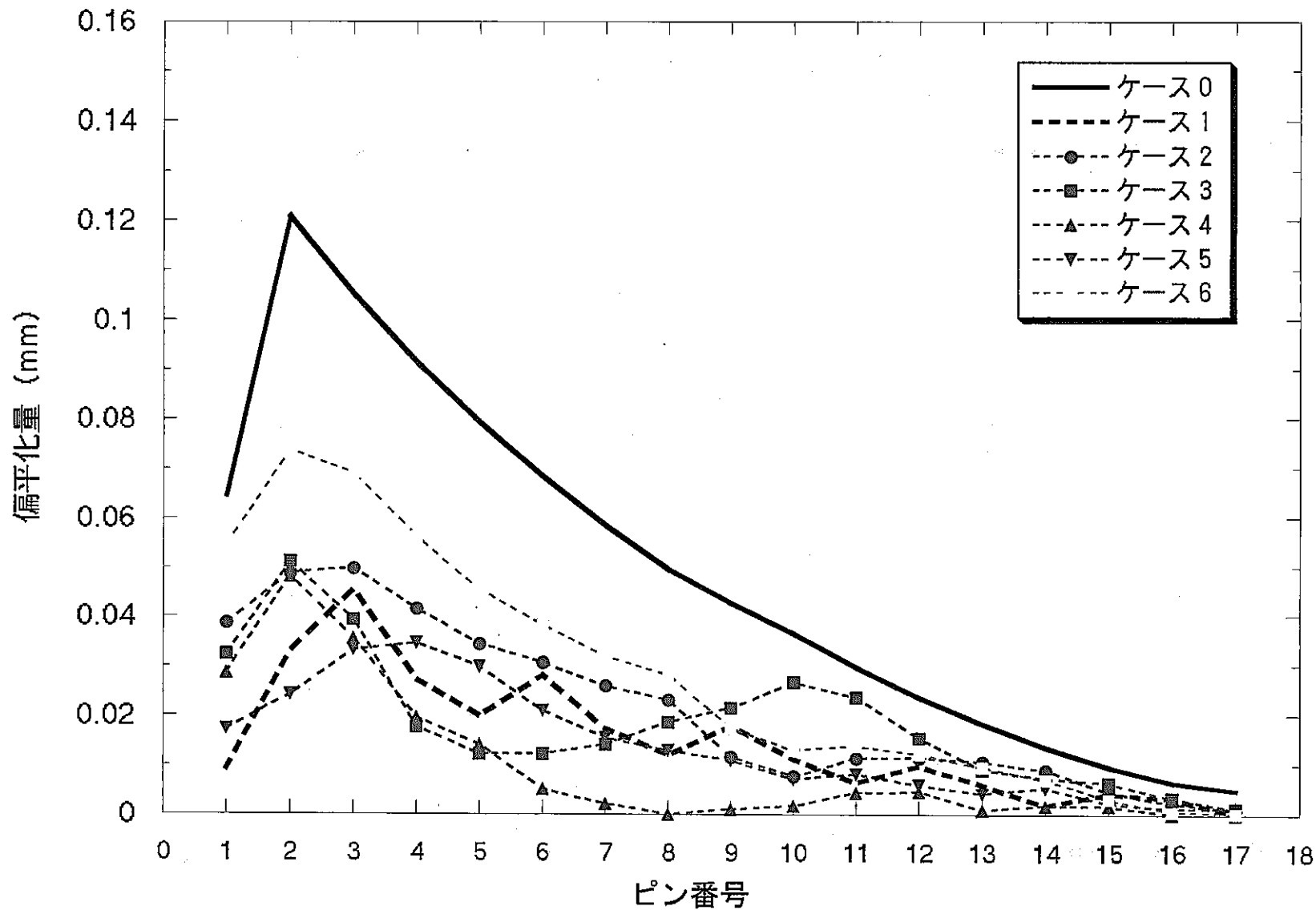


図5.3 対角ピン列の偏平化量 (BDI量=1.5dw)