

燃料ピンバンドル変形解析コード“BAMBOO”への 摩擦モデルの導入

Introduce of Friction 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

高速炉・新型炉研究開発部門

大洗研究所

高速炉サイクル研究開発センター

燃料材料開発部

Fuels and Materials Department

Fast Reactor Cycle System Research and Development Center

Oarai Research and Development Institute

Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

May 2023

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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

燃料ピンバンドル変形解析コード“BAMBOO”への摩擦モデルの導入

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所
高速炉サイクル研究開発センター 燃料材料開発部

上羽 智之、伊藤 昌弘*、石谷 行生*

(2023 年 3 月 23 日受理)

日本原子力研究開発機構で開発している BAMBOO コードは、高速炉用のワイヤスペーサ型炉心燃料集合体における燃料ピンバンドルの変形を解析するコードである。本研究では、燃料ピンとダクトとの相互作用により生じた隣接する燃料ピン同士や最外周の燃料ピンとダクトとの接触部に対して摩擦を考慮するモデルを開発した。これは、BAMBOO の接触・分離解析の中で摩擦力を考慮するモデルであり、摩擦が生じた場合に解析が数値的に不安定になる状況を避けるため、収束計算によって摩擦力を徐々に変化させていき確定するようにした。モデルの解析機能確認の結果、現実的な摩擦係数を適用した場合、ピン-ダクト接触時期やピンバンドル内の変位の方向について摩擦の影響が僅かに認められた。

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

Tomoyuki UWABA, Masahiro ITO* and Ikuo ISHITANI*

Fuels and Materials Department
Fast Reactor Cycle System Research and Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 23, 2023)

The BAMBOO code developed by the Japan Atomic Energy Agency is a computer code to analyze fuel pin bundle deformation in a fast reactor wire-spaced type fuel pin bundle subassembly. In this study we developed an analysis model to consider friction at the contact points between adjacent fuel pins, and at these between outermost fuel pins and a duct that are due to bundle-duct interaction. This model deals with friction forces at contact points in the contact and separation analysis of the code, and employs a convergent calculation where contact forces are gradually determined to avoid numerical instability when the friction occurs. Analyses of BAMBOO with the model showed very slight effects on the onset of contact between outer most pins and a duct, and on directions of pin displacements, within the range of practical friction coefficients.

Keywords: Fuel Pin Bundle Subassembly, Bundle-duct Interaction, Contact and Separation Analysis, Friction Force

* NESI Inc.

目 次

1. はじめに	1
2. 摩擦力の導入	1
2.1 BAMBOO の接触・分離解析手法	1
2.2 接触・分離解析における摩擦力モデル	2
2.3 ディスパージョンと照射変形への摩擦力の適用	5
3. テスト解析	6
3.1 炉外バンドル圧縮試験解析	6
3.2 照射変形解析	7
3.3 摩擦係数の影響	8
4. まとめ	8
参考文献	9

付録

BAMBOO コードの解析で摩擦を考慮する手順	35
-------------------------------	----

Contents

1. Introduction	1
2. Implementation of friction force	1
2.1 Contact and separation analysis method of BAMBOO	1
2.2 Friction force model in contact and separation analysis	2
2.3 Application of friction force to dispersion and irradiation deformation	5
3. Test analysis	6
3.1 Out of pile bundle compression test analysis	6
3.2 Analysis of bundle deformation under irradiation	7
3.3 Effect of friction coefficient	8
4. Summary	8
References	9

Appendix

Procedure to consider friction in the BAMBOO code analysis	35
--	----

表リスト

表 1	摩擦管理テーブルの仕様	10
表 2	摩擦テーブルの仕様	10
表 3	炉外バンドル圧縮試験解析の摩擦モデルテスト条件 (ワイヤディスパージョンなし)	11
表 4	炉外バンドル圧縮試験解析の摩擦モデルテスト条件 (ワイヤディスパージョン有り)	11
表 5	照射変形解析の摩擦モデルテスト条件	12

図リスト

図 1	BAMBOO コードフローチャート	13
図 2	BAMBOO コードの摩擦モデル	14
図 3	拘束力と最大摩擦力の関係	14
図 4	摩擦距離の定義	15
図 5	摩擦距離の計算方法 (ピン-ダクト接触の場合)	15
図 6	摩擦距離の計算方法 (ピン-ピン接触の場合)	16
図 7	摩擦距離増分の定義	16
図 8	摩擦を考慮する場合の BAMBOO コードフローチャート	17
図 9	初回ステップで保存する変形前ピン座標の定義 (炉外バンドル圧縮試験解析の場合)	18
図 10	軸方向ワイヤディスパージョンモデルの摩擦力への適用	19
図 11	炉外バンドル圧縮試験解析モデル	20
図 12	炉外バンドル圧縮試験解析結果 (バンドル横断面図)	21
図 13	摩擦力と最大摩擦力の関係 (Case-1f)	22
図 14	ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1a～1c の比較)	23
図 15	ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1a～1c の比較)	23
図 16	ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1d～1f の比較)	24
図 17	ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1d～1f の比較)	24
図 18	ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2a～2c の比較)	25

図 19	ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2a～2c の比較)	25
図 20	ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2d～2f の比較)	26
図 21	ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2d～2f の比較)	26
図 22	ピン-ダクト間距離周方向分布 (Case-1 と Case-1a～1c の比較)	27
図 23	ピン-ダクト間距離周方向分布 (Case-1 と Case-1d～1f の比較)	27
図 24	照射変形テスト解析モデル	28
図 25	冷却材温度の集合体径方向分布	29
図 26	照射末期における BDI 量軸方向分布	29
図 27	照射末期におけるバンドル縦断面図	30
図 28	照射末期における発熱中央部のバンドル横断面ピン変位ベクトル図	31
図 29	ピン-ダクト間最小距離履歴 (摩擦係数 $\mu=0.0\sim2.0$)	32
図 30	ピン-ダクト間距離周方向分布 (摩擦係数 $\mu=0.0\sim2.0$)	32
図 31	照射末期におけるバンドル縦断面図	33
図 32	照射末期における発熱中央部のバンドル横断面ピン変位ベクトル図	34

1. はじめに

BAMBOO コードは、ワイヤスペーサ型炉心燃料集合体の BDI (Bundle-Duct Interaction : 燃料ピンバンドル-ダクト機械的相互作用) 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る¹⁾。BDI によって、隣接する燃料ピン同士や燃料ピンとダクトとがワイヤを介して接触し燃料ピンが変形するが、この接触時に発生する摩擦も燃料ピンの変形に影響を及ぼすと考えられる。このため摩擦力を考慮する接触・分離解析手法の検討を行い BAMBOO に導入する整備を実施した。

2. 摩擦力の導入

2.1 BAMBOO の接触・分離解析手法

BAMBOO は、一体の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）の接触・分離解析を行うことにより、荷重と変位の力学的な平衡状態を求めている。これは次式により定式化している¹⁾。

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

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
$\{\lambda\}$	: 接触荷重ベクトル
$\{\Delta u\}$	: 変位増分ベクトル
$\{\Delta \lambda\}$	: 接触荷重増分ベクトル
$\{\delta\}$	: 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、先ず接触荷重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。

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

(3)式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、(2)式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 接触・分離解析における摩擦力モデル

BAMBOO の解析で考慮する摩擦力 F は図 2 に示すように静止摩擦力として定義する。

$$F \leq \mu \cdot N \quad \dots(4)$$

ここで μ は摩擦係数である。 N は摩擦が働く節点（接触点）に対して垂直な力（垂直抗力）であり、ピン-ピン間およびピン-ダクト間に発生する接触荷重と同義である。

摩擦力はゼロから最大摩擦力（ $= \mu \cdot N$ ）まで変化する。図 3 に示すように、摩擦力は接触荷重の方向と垂直な方向に、動き出そうとする方向と逆の向きに変位を妨げる力として働く。ここで、接触が発生した節点で接触方向に垂直方向の変位が生じた場合、その変位を打ち消すように節点に加える仮想的な荷重を「拘束力」と定義する。

拘束力が最大摩擦力よりも小さい場合は、節点に作用する摩擦力は拘束力と同じになるため、節点の変位が生じない。一方、拘束力が最大摩擦力を超えた場合は節点の変位が生じるが、節点に最大摩擦力が作用し、その分変位が小さくなる。後述するが、BAMBOO の処理では、拘束力自体は計算せず、その増分を計算して摩擦力を求めている。

接触が生じた節点に摩擦がない場合に、その節点の接触方向に対して垂直方向に移動する距離（変位）を「摩擦距離」と定義する（図 4）。

ピン-ダクト間接触における摩擦距離の算出手順を図 5 に示す。灰色の丸い図形は変形前のピンを表し、黒色の丸い図形は摩擦がない場合の変形後のピンを表す。変形前のピン中心座標を (x_0, y_0) 、摩擦がない場合の変形後のピン中心座標を (x, y) とする。変形前のピンの中心からダクトの面に垂直に向かう方向を接触方向とし、全体座標 $x - y$ の x 軸となす角度を θ とする。 θ に直交する角度： $\theta + \pi/2$ だけ時計回りに回転した時の変形前のピン中心座標を (x'_0, y'_0) 、摩擦がない場合の変形後のピンの中心座標を (x', y') とすると、

$$\begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \pi/2) & \sin(\theta + \pi/2) \\ -\sin(\theta + \pi/2) & \cos(\theta + \pi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad \dots(5)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \pi/2) & \sin(\theta + \pi/2) \\ -\sin(\theta + \pi/2) & \cos(\theta + \pi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \cdots(6)$$

となる。摩擦方向のピンの中心位置は変形前が x'_0 、変形後が x' であることから、摩擦距離： d は次式で計算できる。

$$d = |x' - x'_0| \quad \cdots(7)$$

次に、ピン-ピン間接触における摩擦距離の算出手順を図 6 に示す。対象ピン (i ピン) と隣接ピン (j ピン) が接触しているものとする。灰色の丸い図形は変形前のピンを表し、黒色の丸い図形は摩擦がない場合の変形後のピンを表す。変形前の i ピンと j ピンの中心座標をそれぞれ (x_{i0}, y_{i0}) 、 (x_{j0}, y_{j0}) 、摩擦がない場合の変形後の i ピンと j ピンの中心座標をそれぞれ (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) とする。変形前の i ピンの中心から変形前の j ピンの中心の向かう方向を接触方向とし、全体座標 $x-y$ の x 軸となす角度を θ とする。これら中心座標を θ 方向に時計回りで回転した時のピンの中心座標として、i ピン、j ピンの中心座標の変形前をそれぞれ (x'_{i0}, y'_{i0}) 、 (x'_{j0}, y'_{j0}) 、変形後をそれぞれ (x'_i, y'_i) 、 (x'_j, y'_j) とすると、

$$\begin{bmatrix} x'_{i0} \\ y'_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i0} \\ y_{i0} \end{bmatrix} \quad \cdots(8)$$

$$\begin{bmatrix} x'_{j0} \\ y'_{j0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{j0} \\ y_{j0} \end{bmatrix} \quad \cdots(9)$$

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad \cdots(10)$$

$$\begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} \quad \cdots(11)$$

となる。摩擦方向の i ピンの中心位置は変形前が y'_{i0} 、変形後が y'_i 、j ピンの中心位置は変形前が $y'_{j0}(= y'_{i0})$ 、変形後が y'_j であることから、図 6 に示すように摩擦距離： d は次式で計算できる。

$$d = |(y'_j - y'_{j0}) + (y'_{i0} - y'_i)| = |y'_j - y'_i| \quad \cdots(12)$$

BAMBOO コードの接触荷重は「2.1」で述べたように接触・分離解析によって変位増分と接触荷重増分の解析を繰返し計算することで求めている。摩擦力 F も同様に摩擦距離の増分から拘束力の増分を求め、繰返し計算の中で F を更新していくことで計算する。このため、図 7 に示すように(7)式、(12)式から前回ステップ (Step N-1) の摩擦距離 d_{N-1} と今回ステップ (Step N) の摩擦距離 d_N をそれぞれ求め、その差から今回ステップの摩擦距離増分 Δd を計算する。

$$\Delta d = d_N - d_{N-1} \quad \cdots(13)$$

以上の摩擦距離増分の計算を摩擦計算対象となる全ての接触点で行い、摩擦距離増分ベクトル $\{\Delta d\}$ を作成する。拘束力増分ベクトル $\{\Delta B_F\}$ は摩擦距離増分を打ち消す反力として、(3)式の接触荷重求解ソルバーを応用し、以下の計算によって求める。

$$\{\Delta B_F\} = ([Bc]^T [K]^{-1} [Bc])^{-1} \{\Delta d\} \quad \cdots(14)$$

求めた $\{\Delta B_F\}$ を用いて摩擦力ベクトル $\{F\}$ を更新する。摩擦力は、接触点毎に設定された最大摩擦力 ($F_{max} = \mu \cdot N$) を超えることはできないため、更新時に最大摩擦力以下となるような摩擦力更新ファクタ (K_{min}) を計算し、 $\{\Delta B_F\}$ に乗じる。

$$\{F_{new}\} = \{F_{old}\} + \{\Delta B_F\} \times K_{min} \quad \cdots(15)$$

ここで $\{F_{old}\}$ は更新前の摩擦力ベクトル、 $\{F_{new}\}$ は更新後の摩擦力ベクトルである。

摩擦力更新ファクタ (K_{min}) は、以下の計算で求める n 個の $K_{(i)}$ ($i = 1 \sim n$) の中の最小値として定義する。

$F_{old(i)}$ と $\Delta B_{F(i)}$ が同じ向きの場合

$$K_{(i)} = \frac{|F_{max(i)}| - |F_{old(i)}|}{|\Delta B_{F(i)}|} \quad (i = 1 \sim n) \quad \cdots(16)$$

$F_{old(i)}$ と $\Delta B_{F(i)}$ が逆の向きの場合

$$K_{(i)} = \frac{|F_{max(i)}| + |F_{old(i)}|}{|\Delta B_{F(i)}|} \quad (i = 1 \sim n) \quad \cdots(17)$$

ここで、 n は摩擦が生じた節点数（摩擦ベクトル成分数）、 $F_{old(i)}$ は節点 i ($i = 1 \sim n$) における更新前の摩擦力である。摩擦力更新ファクタの最小値を適用するのは、摩擦力を考慮した接触・分離解析を数値的に安定して実行するためである。

図 8 に摩擦力を解析する場合の BAMBOO のフローチャートを示す。図に示すように接触・分離解析と摩擦解析を交互に繰り返し、接触荷重と変位および摩擦力を解いている。摩擦解析で更新した摩擦力ベクトル ((15)式) は、次回繰り返し計算の接触・分離解析で外荷重ベクトルに加える。摩擦力解析では、前回最大摩擦力となった接触点の摩擦力は確定したものと扱い、残りの接触点における拘束力増分を計算する。以降、摩擦力更新ファクタが 1.0 かつ摩擦力更新前後で接触状態に変化がなくなるまで接触・分離解析と摩

擦力解析を交互に繰り返す。現状、繰返し回数の上限を 10,000 回としている。10,000 回を超えた場合は強制的に次の解析ステップに進むようにしている。この手順により、各接点では、摩擦力=拘束力（拘束力 $\leq$ 最大摩擦力の場合）または、摩擦力=最大摩擦力（拘束力 $>$ 最大摩擦力の場合）の状態にほぼ収束するようになる。

各解析ステップの開始時に摩擦距離増分を計算するための変形前情報として、前回解析ステップで確定した変位と摩擦力情報を記憶する。この際、炉外バンドル圧縮試験解析の初回解析ステップの場合は、図 9 に示すように BDI 量=0 dw に相当するピン配置を変形前情報として記憶する。照射変形解析の初回解析ステップ（熱変形解析）の場合は、ピン-ピン間またはピン-ダクト間のワイヤを介した接触が初めて生じた時点の変形情報を記憶する。摩擦力の情報は、表 1、2 に示す摩擦力管理テーブルと摩擦力テーブルで管理し、接触・分離解析の接触情報を基に以下の条件で作成する。

- ・接触が発生した節点は摩擦力テーブルに加える（上端ノード以外）
- ・分離した節点は摩擦力テーブルから削除する
- ・繰返し計算中に摩擦力テーブルへの追加と削除（接触と分離）を規定数以上（現状 10 回）繰り返した節点は、接触が生じても接触荷重自体が非常に小さく摩擦はほとんど生じないと見なし、対象ステップでの摩擦評価対象外とする
- ・前回ステップで接触していた節点が分離し、繰返し計算中に再び接触した場合は、前回ステップの摩擦情報を考慮して摩擦力テーブルに追加する

この摩擦力テーブルと摩擦力管理テーブルを基に接触拘束マトリクスと摩擦距離増分ベクトルを作成する。

BDI が厳しくなると、被覆管とダクトがワイヤを介さずに接触することが有り得るが、その接点に対しても摩擦が考慮される。隣接するピンの被覆管同士がワイヤを介さずに接触する場合はほとんどないが、その場合にも接点に摩擦が考慮される。

2.3 ディスパーションと照射変形への摩擦力の適用

接触拘束マトリクスと摩擦距離増分ベクトルを作成するにあたり、ワイヤディスパーション（軸方向ワイヤずれ）を扱う場合は、梁要素（1/12 ワイヤピッチ長）の上下 2 節点の間で接触を考慮できるようにする中間接触モデルを採用している²⁾。これは、図 10 に示すように梁要素（1/12 ワイヤピッチ長）に対する要素節点からのワイヤずれ量の割合（ $=\alpha$ ）に応じて、上下節点への接触荷重を配分するモデルである。ワイヤディスパーションに対して摩擦力を考慮する場合、接触荷重と同様の配分により該当する要素の上下節点に摩擦力を配分する。

照射変形解析では、境界条件としてスエリングや内圧クリープによるピンの変形を計算するとともに、接触荷重により弾性変形した変位からピンに働く軸方向の応力を計算

する。この応力を用いて解析対象となるピンの照射クリープ特性に応じた照射クリープひずみを計算する。この照射クリープひずみから照射クリープ疑似荷重ベクトルを作成し、外荷重ベクトルに加えて接触・分離解析を行うことにより、照射変形下での接触荷重の変化を解析している³⁾。照射変形解析で摩擦を考慮する場合は、接触荷重と摩擦力によって弾性変形した変位からピンに働く軸方向の応力を計算し、この応力から照射クリープひずみを計算して照射クリープ疑似荷重ベクトルを作成し同様に接触・分離解析を行う。

3. テスト解析

3.1 炉外バンドル圧縮試験解析

BAMBOO コードに組み込んだ摩擦モデルの機能を確認するため、127 本ピンバンドルの炉外バンドル圧縮試験解析（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ピンバンドルとダクトの機械的相互作用を解析するものであり、表 3 および図 11 に示す体系で実施した⁴⁾。摩擦係数 $\mu = 0$ （摩擦なし）とした弾性解析をベース（Case-1）とし、ステンレス鋼同士の静止摩擦係数の測定結果⁵⁾から、機能確認のため摩擦係数 μ を $\mu = 0.1 \sim 0.6$ の範囲で設定した Case-1a $\sim$ 1f の解析を実施した。また、ワイヤディスパージョン機能を用いた場合の摩擦の影響を確認するため、表 4 に示すように軸方向最大ワイヤずれ量を 3 mm、摩擦係数 $\mu = 0$ とした弾性解析をベース（Case-2）として、摩擦係数を Case1 と同様に変更した Case-2a $\sim$ 2f の解析を実施した。図 12 に Case1 と 2 のバンドル横断面図を示す。Case-2 のワイヤディスパージョン機能は軸方向に最大 3 mm のワイヤ巻きずれが、各ピンにランダムに発生する条件で設定しており、横断面図の各ピンのワイヤ角度は正規位置から最大で 5.4° ($=3/200 \times 360^\circ$) ずれている。

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。

$$\text{BDI 量} = (B - E)/dw \quad \cdots(18)$$

B	: 燃料ピンバンドル対面方向距離 [mm]
E	: ダクト内対面間距離 [mm]
dw	: ワイヤ直径 [mm]

B は次式の様に計算する。

$$B = 2(N - 1) \cdot (D_p + dw) \cdot \cos 30^\circ + D_p + 2dw \quad \cdots(19)$$

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(18)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、慣用的に「 dw 」を BDI 量の単位とする。

図 13 に Case-1f の BDI 量=3.0 dw における摩擦力と最大摩擦力の関係を示す。隣接ピン間の接触点に発生する摩擦力を灰色の丸、最外周ピンとダクトとの接触点に発生する摩擦力を黒丸でプロットした。これより、いずれの接触点に発生した摩擦力も最大摩擦力を超えない値で解析されていることが確認できる。

図 14～21 にピン-ダクト間最小距離の履歴を比較して示す。整理した軸方向位置は図 11 に示すピンチプレーン（ワイヤがダクトコーナー方向）とノーマルプレーン（ワイヤがダクト面方向）のノード（圧縮範囲の中央部近傍）である。最外周ピンとダクトとの接触点のみに摩擦を考慮した解析（図 14、15、18、19）では、Case-1、2 とも摩擦係数を大きくしていくとピン-ダクト接触時期が早まる結果となった。一方、隣接ピン間の接触点に対しても摩擦を考慮した解析（図 16、17、20、21）では、Case-1、2 とも $\mu=0.1$ 、0.3 としたケースではピン-ダクト接触時期が遅れる結果となった。 $\mu=0.6$ のケースではワイヤディスパージョンを考慮した解析（Case-2f）のピンチプレーン以外ではピン-ダクト接触時期が早まる結果となった。

図 22、23 に BDI 量=3.0 dw におけるノーマルプレーンの軸位置でのピン-ダクト間距離の周方向分布を示す。図 22 は最外周ピンとダクトとの接触点のみに摩擦を考慮した解析（Case-1a、1b、1c）の結果、図 23 は隣接ピン間の接触点に対しても摩擦を考慮した解析（Case-1d、1e、1f）の結果であり、それぞれに対し摩擦なしの解析結果（Case-1）と比較している。整理した軸位置ではワイヤを介して接触している 6 面方向のピン-ダクト間距離は変化がないが、その他の面でのピン-ダクト間距離には摩擦の影響が表れている。

3.2 照射変形解析

照射変形解析における接触点の摩擦の影響を確認するため、表 5 および図 24 に示す条件でテスト解析を実施した⁶⁾。集合体の温度は、ASFRE-IV コードによるバンドル変形が生じていない状態の熱流動解析結果を用いた。図 25 に冷却材温度分布を示す。摩擦係数はピン-ピン間接触、ピン-ダクト間接触とも、摩擦の影響を評価できるように、 $\mu=0.6$ とした。比較のため、ピン-ピン間接触、ピン-ダクト間接触とも $\mu=0$ として摩擦を考慮しない条件での解析も実施した。 $\mu=0$ での解析を Case-3a、 $\mu=0.6$ での解析を Case-3b とする。

図 26 に照射末期の BDI 量軸方向分布、図 27 に照射末期のバンドル縦断面図を示す。BDI 量は最大で $-0.86 dw$ と負の値であるが、Case-3a、Case-3b とも周方向に温度差が

あるため熱膨張差によりピンが外側に湾曲し、最外周ピンとダクトとの接触、隣接ピン同士の接触が生じた。図 27 からは、Case-3a、Case-3b に違いがほとんど見られない。図 28 に発熱中央部におけるバンドル横断面のピンの変位ベクトルを示す。Case-3a と Case-3b のピンの変位ベクトルを比較すると、摩擦を考慮した Case-3b では隣接するピンが同じ方向に変位することで変位方向のバラつきが小さくなる傾向が僅かにみられ、ピン変位の仕方に摩擦の影響が現れていることが確認できた。

3.3 摩擦係数の影響

摩擦の影響を明確に確認できるように、摩擦係数を極端に大きな値に設定したバンドル変形解析（バンドル圧縮試験解析、照射変形解析）を実施した。

バンドル圧縮試験解析は「3.1」で実施した Case-1（ワイヤディスパージョンなし）の条件で摩擦係数のみを $\mu=1.0$ 、 1.5 、 2.0 に設定した解析をそれぞれ実施した。図 29 にノーマルプレーン（圧縮範囲の中央部近傍）のピン-ダクト間最小距離を比較して示す。摩擦係数を大きくしていくとピン-ダクト接触時期は早期化していき、 $\mu=2.0$ のケースでは 2.5 dw で接触した。図 30 に同じ軸位置の BDI 量 $=3.0 \text{ dw}$ におけるピン-ダクト間距離の周方向分布を示す。ワイヤを介して接触している 6 面方向以外の面でピン-ダクト間距離に摩擦の影響が現れており、3 面（6 面の対面側）に着目すると、摩擦なしの場合は面中央に位置するピンの距離が最小値を示しているが、摩擦係数を大きくした場合はコーナー寄りのピンとダクトとの距離が最も小さくなった。

照射変形解析では「3.2」で実施した解析と同じ照射条件で摩擦係数のみを $\mu=2.0$ として実施した。図 31 に照射末期のバンドル縦断面図を摩擦なしの解析結果と比較して示す。ピンの周方向温度差による熱膨張歪み差でピンが湾曲し、隣接ピン間およびピンとダクト間に接触荷重が生じるが、摩擦の影響により接触荷重が生じる節点や接触荷重の大きさに違いが確認できる。図 32 に発熱中央部における照射末期のバンドル横断面のピンの変位ベクトルを摩擦なしの解析結果と比較して示す。摩擦なしの変位ベクトルには、ピン毎の周方向温度差や接触荷重の違いによる変位方向のバラつきがあるが、 $\mu=2.0$ の場合は、ピン毎の変位方向のバラつきが小さくなり、隣接するピンが同じ方向に変位する傾向が $\mu=0.6$ （図 28）よりも明確になっているのが確認できた。これは摩擦の影響により隣接ピン間および最外周ピンとダクト間の接触部に拘束力が働き、ピンの変位が生じにくくなったものと考えられる。

4. まとめ

ワイヤスペーサ型燃料ピンバンドル変形解析コード"BAMBOO"の接触・分離解析で接触部の摩擦力を考慮するモデルを開発した。摩擦モデルは静止摩擦力として定義し、燃料ピンバンドルの隣接ピン間およびピン-ダクト間に発生した接触点での摩擦力を解析す

るものである。本モデルの解析機能はワイヤディスパージョンによるピン軸方向のワイヤずれを考慮する解析や照射変形解析においても適用可能となるように整備を行った。

機能確認のため、炉外バンドル圧縮試験解析および照射変形解析を実施し、それぞれの解析で摩擦の影響を評価した。機能確認解析の結果、ピン-ダクト接触時期やピンバンドル内の変位方向について摩擦の効果が僅かに認められ、燃料ピンバンドル解析における摩擦の影響を確認することができた。

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、鵜飼 重治、浅賀 健男、“高速炉燃料ピン束変形解析コード“BAMBOO”の開発 -ピンディスパージョンモデルの開発と検証-”, JNC TN9400 2002-002 (2002) 49p.
- 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) 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.
- 5) 西浦 建夫、島崎 雄司、堀切 守人、“炉外変形解析技術開発試験－第 1 報 ラッパ管基本力学特性試験－（試験報告書）”, JNC-TN9430 99-002 (1998) 129p.
- 6) Tomoyuki Uwaba, Hiroyuki Ohshima, Masahiro Ito, “Analyses of deformation and thermal-hydraulics within a wire-wrapped fuel subassembly in a liquid metal fast reactor by the coupled code system”, Nuclear Engineering and Design, 317, pp. 133-145 (2017).

表 1 摩擦力管理テーブルの仕様

IFRCTB(1,I)	評価対象のピン番号：I (I=1,2,...,ピン本数)
IFRCTB(2,I)	評価対象ピンIの隣接ピン番号またはダクト番号：J (Jが正数の場合はピン、負数の場合はダクトを表す)
IFRCTB(3,I)	軸方向ノード番号
IFRCTB(4,I)	接触方向番号 (1～6) ※1
IFRCTB(5,I)	表2-2の摩擦力テーブルで参照する摩擦力テーブルのアドレス
IFRCTB(6,I)	摩擦状態フラグ (0:未確定、1:確定)

(I：1～摩擦力評価節点数)

※1 ピンIからのピンJの方向

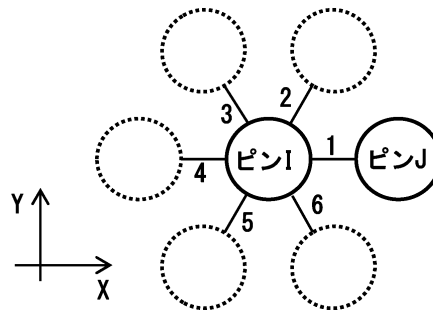


表 2 摩擦力テーブルの仕様

FRCTBL(1,IAD)	最大摩擦力 (摩擦係数×接触荷重)
FRCTBL(2, IAD)	摩擦距離増分
FRCTBL(3, IAD)	摩擦力の正弦
FRCTBL(4, IAD)	摩擦力の余弦
FRCTBL(5, IAD)	摩擦力
FRCTBL(6, IAD)	軸方向ワイヤディスパーション配分率
FRCTBL(7, IAD)	接触角度
FRCTBL(8, IAD)	前回解析ステップの摩擦距離
FRCTBL(9, IAD)	未使用
FRCTBL(10, IAD)	未使用

(IAD：プログラム内で管理する摩擦テーブルのアドレス)

表 3 炉外バンドル圧縮試験解析の摩擦モデルテスト条件（ワイヤディスページョンなし）

	Case-1	Case-1a	Case-1b	Case-1c	Case-1d	Case-1e	Case-1f
バンドルピン本数 (本)	127	←	←	←	←	←	←
ピン径 (mm)	10.4	←	←	←	←	←	←
ピン肉厚 (mm)	0.71	←	←	←	←	←	←
ワイヤ径 (mm)	1.0	←	←	←	←	←	←
ワイヤピッチ (mm)	200.0	←	←	←	←	←	←
ピンの摩擦係数： μ (-)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6
ダクトの摩擦係数： μ (-)	0.0	0.1	0.3	0.6	0.1	0.3	0.6

表 4 炉外バンドル圧縮試験解析の摩擦モデルテスト条件（ワイヤディスページョン有り）

	Case-2	Case-2a	Case-2b	Case-2c	Case-2d	Case-2e	Case-2f
バンドルピン本数 (本)	127	←	←	←	←	←	←
ピン径 (mm)	10.4	←	←	←	←	←	←
ピン肉厚 (mm)	0.71	←	←	←	←	←	←
ワイヤ径 (mm)	1.0	←	←	←	←	←	←
ワイヤピッチ (mm)	200.0	←	←	←	←	←	←
軸方向 最大ワイヤずれ量 (mm)	3.0	←	←	←	←	←	←
ピンの摩擦係数： μ (-)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6
ダクトの摩擦係数： μ (-)	0.0	0.1	0.3	0.6	0.1	0.3	0.6

表 5 照射変形解析の摩擦モデルテスト条件

	Case-3a	Case-3b
バンドルピン本数(本)	127	←
ピン外径(mm)	5.5	←
ピン肉厚 (mm)	0.35	←
ワイヤ径 (mm)	0.9	←
ワイヤピッチ (mm)	209	←
ダクト内対面間距離 (mm)	74.7	←
ダクト内圧 (mm)	1.9	←
集合体総発熱量(MW)	2.038	←
冷却材流量 (kg/s)	8.85	←
照射日数	327	←
ピンの摩擦係数： μ (-)	0.0	0.6
ダクトの摩擦係数： μ (-)	0.0	0.6

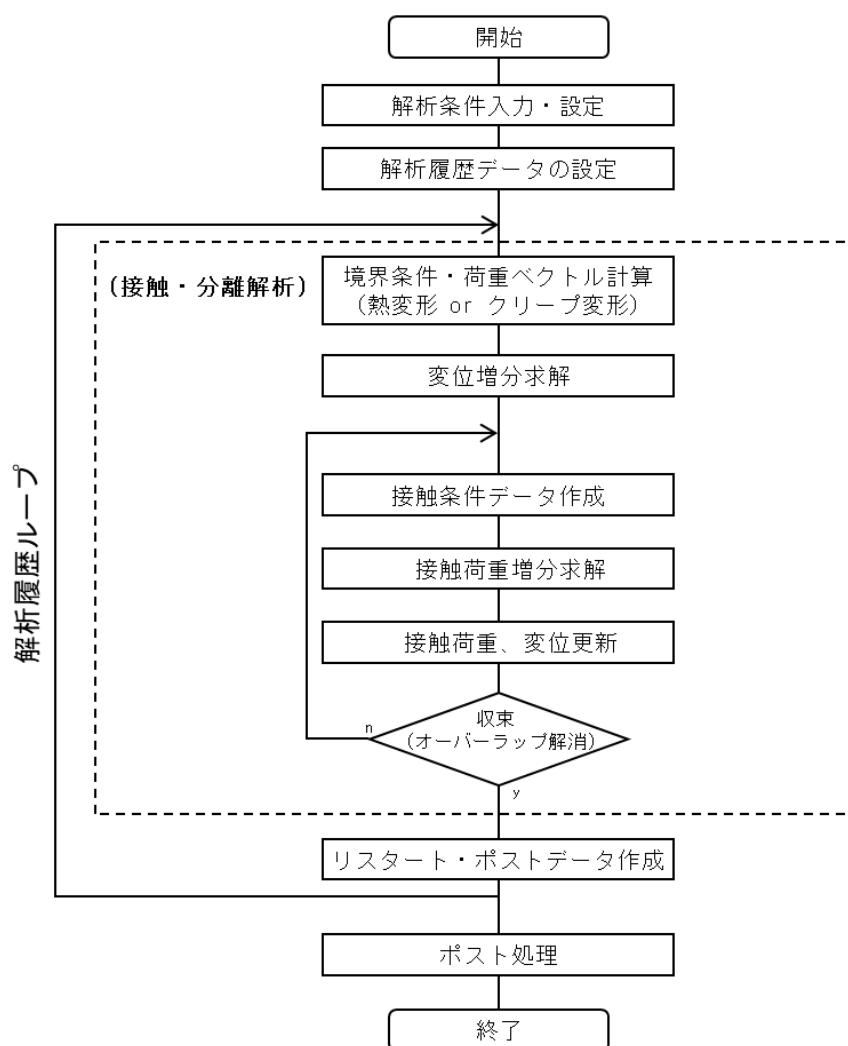


図 1 BAMBOO コードフローチャート

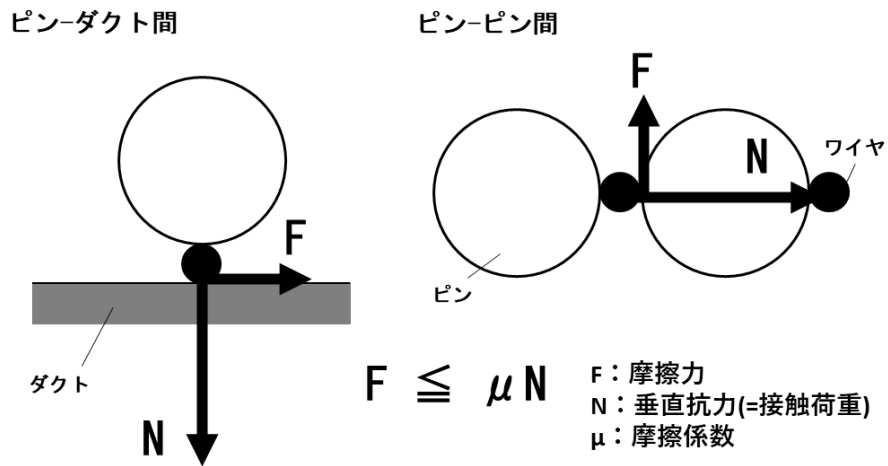


図 2 BAMBOO コードの摩擦モデル

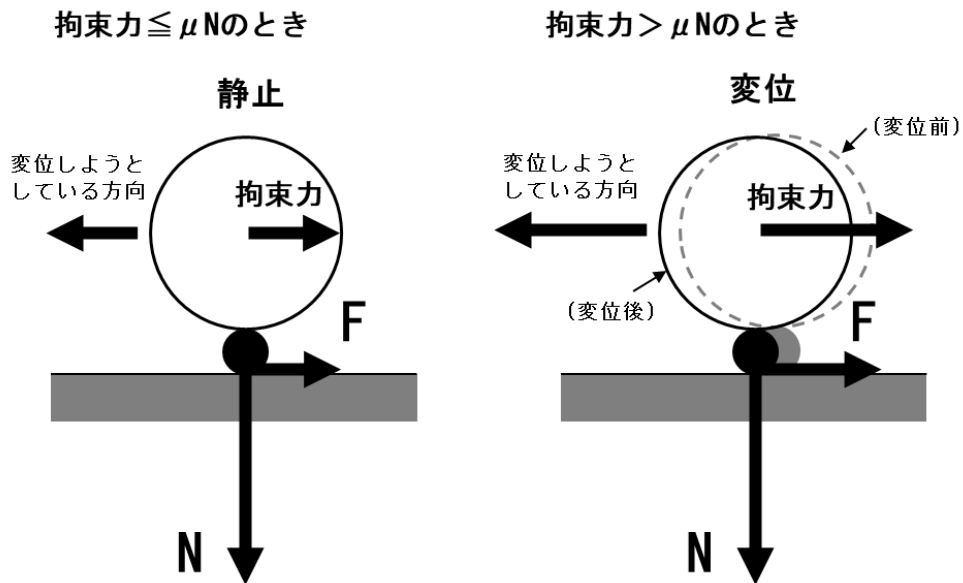


図 3 拘束力と最大摩擦力の関係

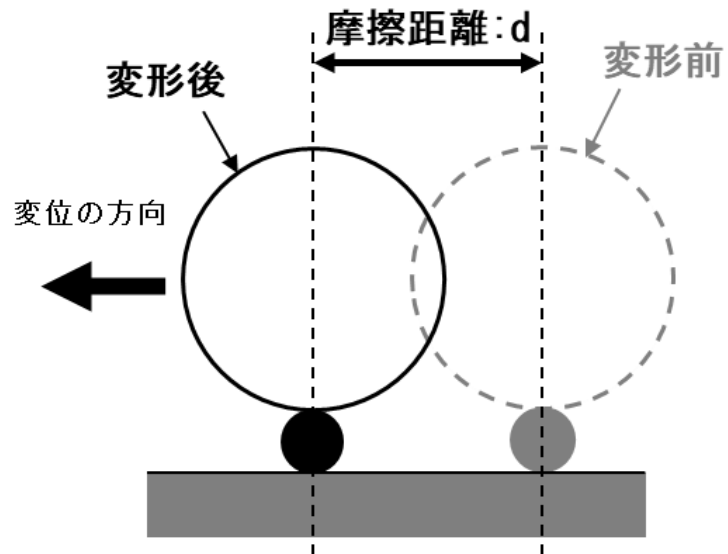


図 4 摩擦距離の定義

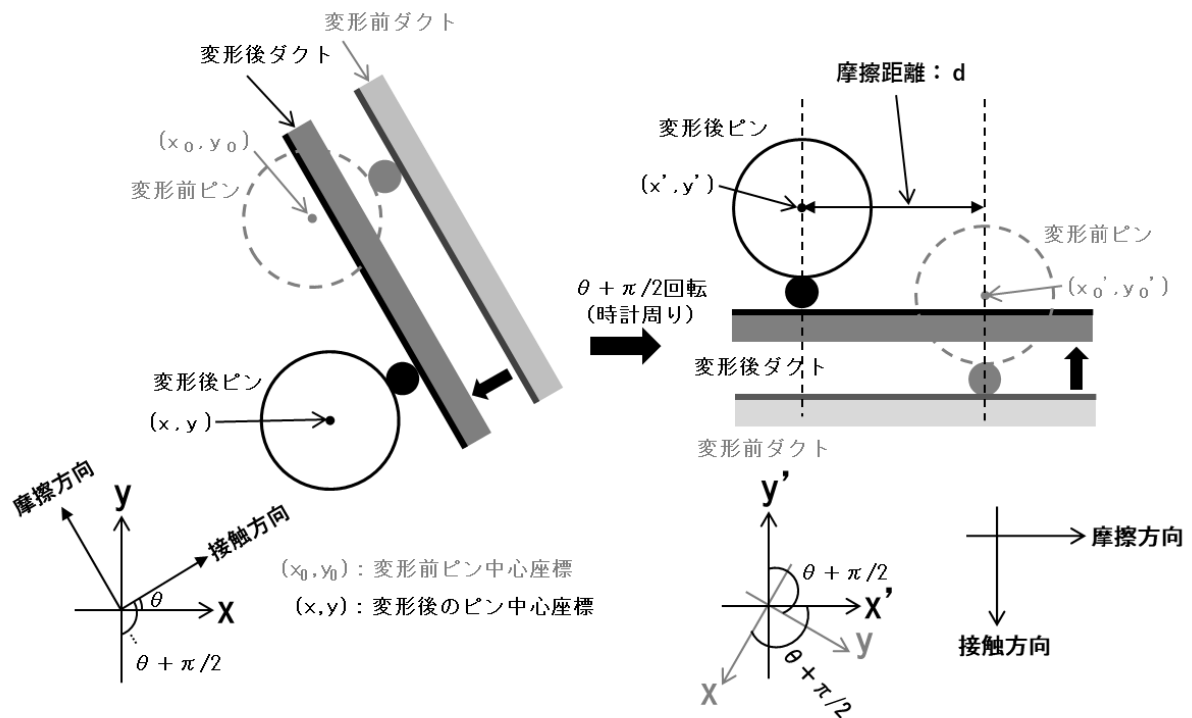
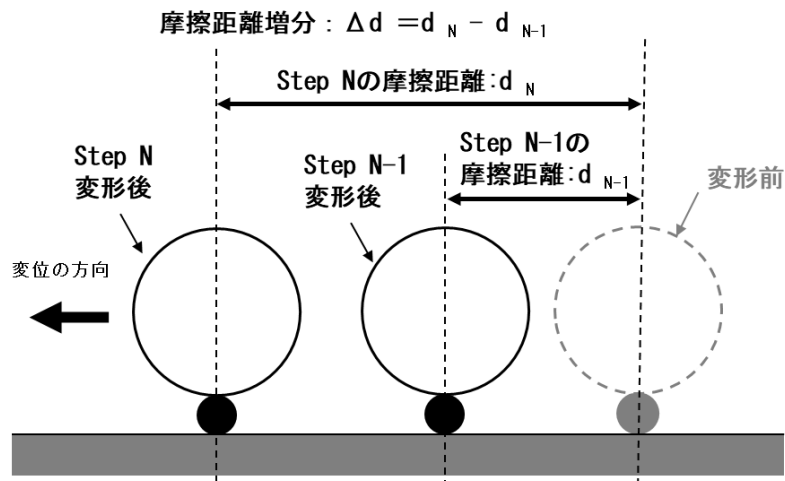
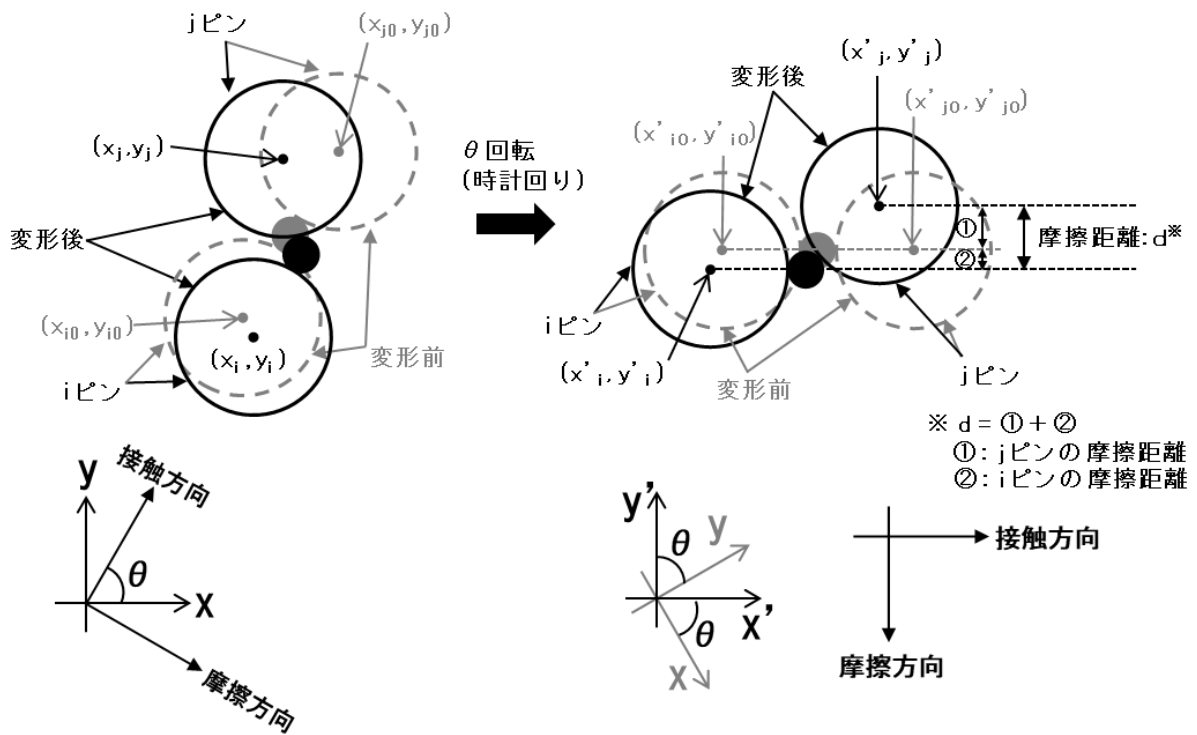


図 5 摩擦距離の計算方法（ピン-ダクト接触の場合）



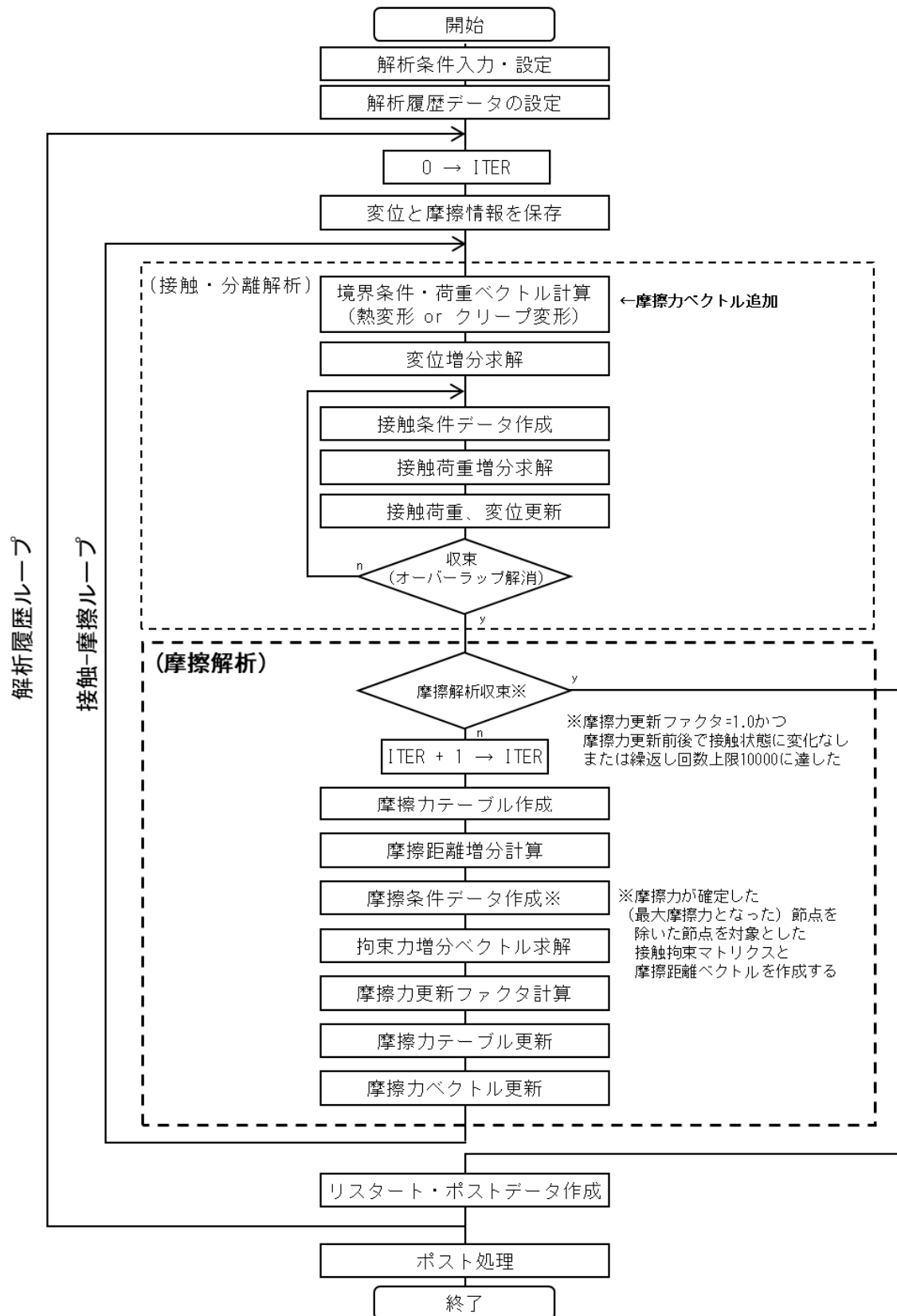
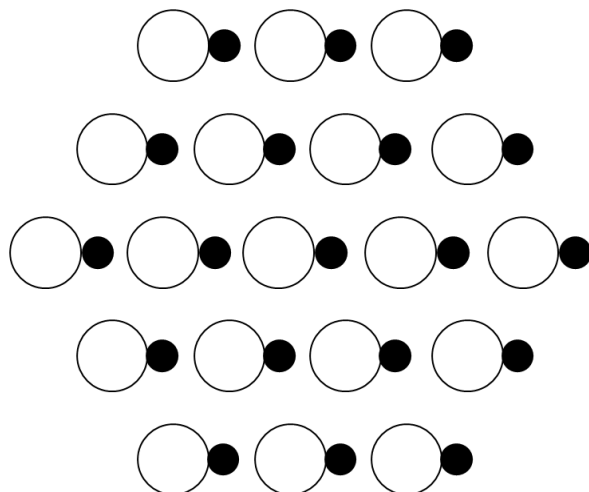


図8 摩擦を考慮する場合の BAMBOO コードフローチャート

モデル作成時のピン配置（ピン配列ピッチにより配置）



ピン-ピン間の隙間を詰めたピン配置（0 dw時に相当するピン配置）

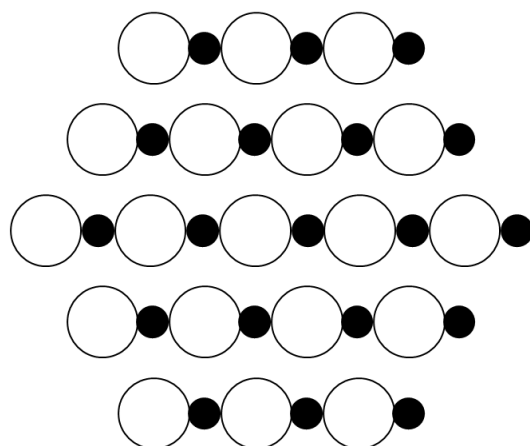


図 9 初回ステップで保存する変形前ピン座標の定義
(炉外バンドル圧縮試験解析の場合)

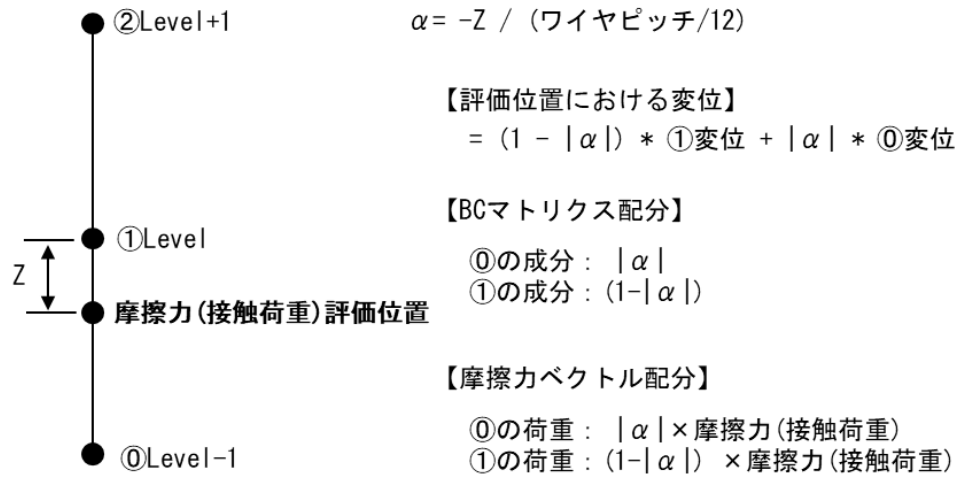


図 10 軸方向ワイヤディスパージョンモデルの摩擦力への適用

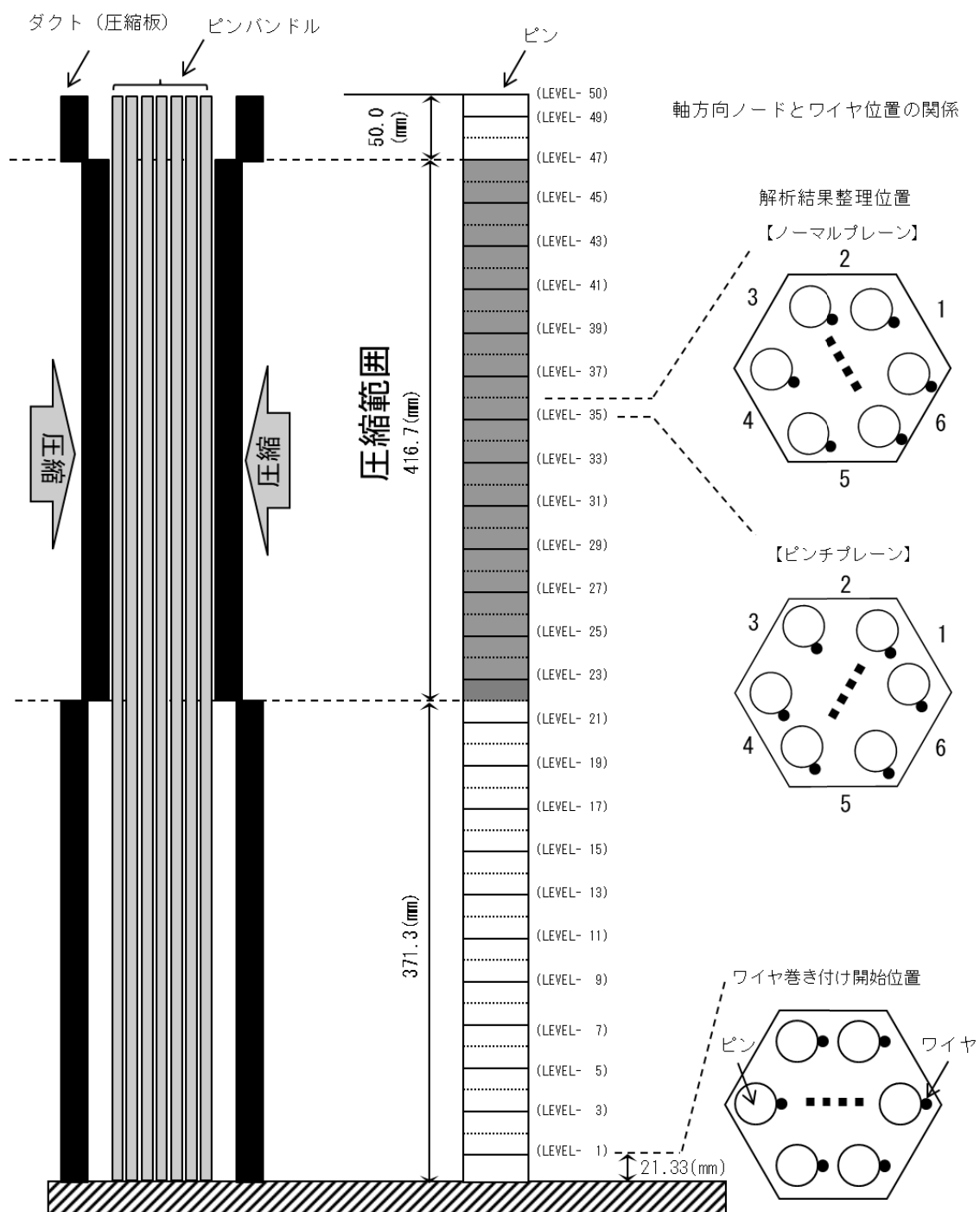
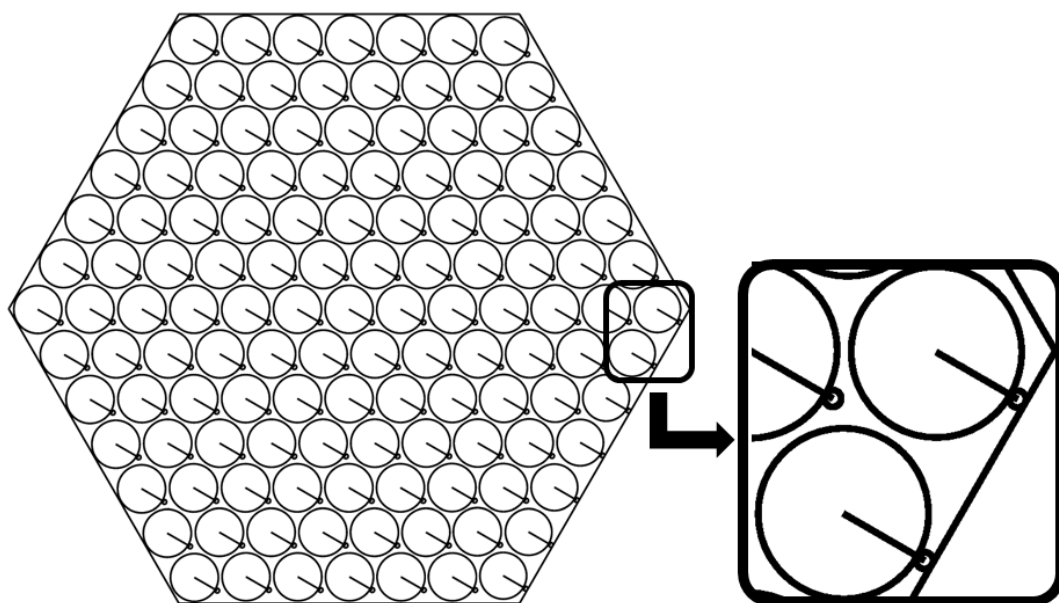


図 11 炉外バンドル圧縮試験解析モデル

Case-1 (ワイヤディスパージョンなし)



Case-2 (ワイヤディスパージョン有り)

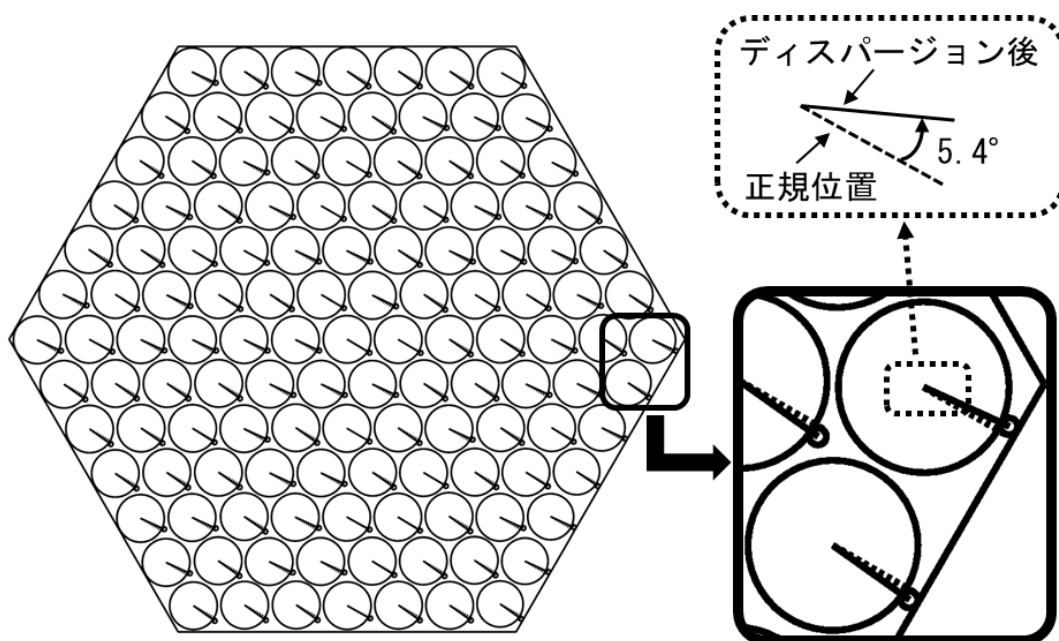


図 12 炉外バンドル圧縮試験解析結果 (バンドル横断面図)

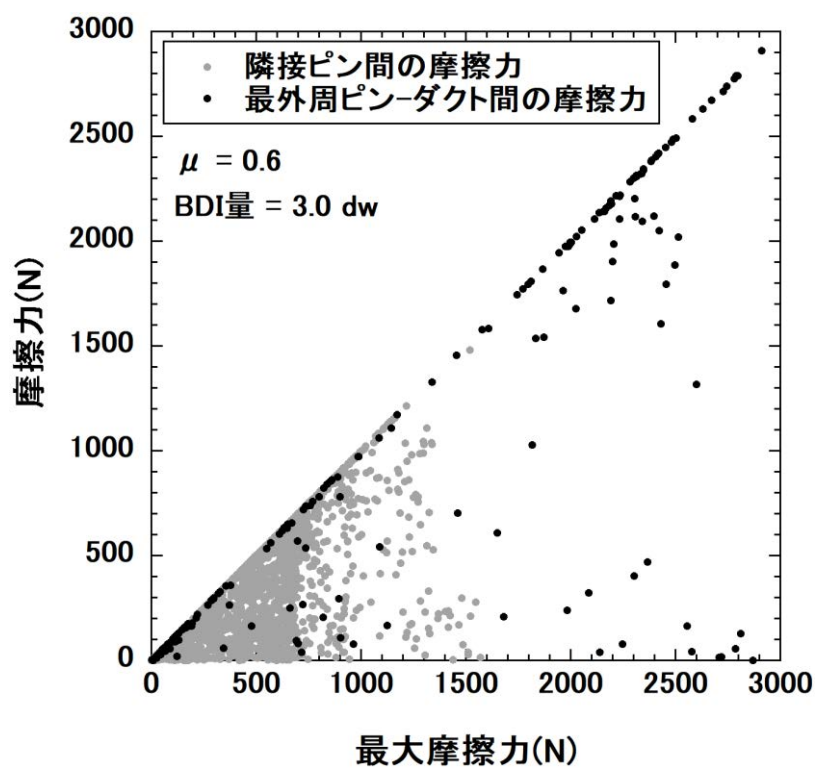


図 13 摩擦力と最大摩擦力の関係 (Case-1f)

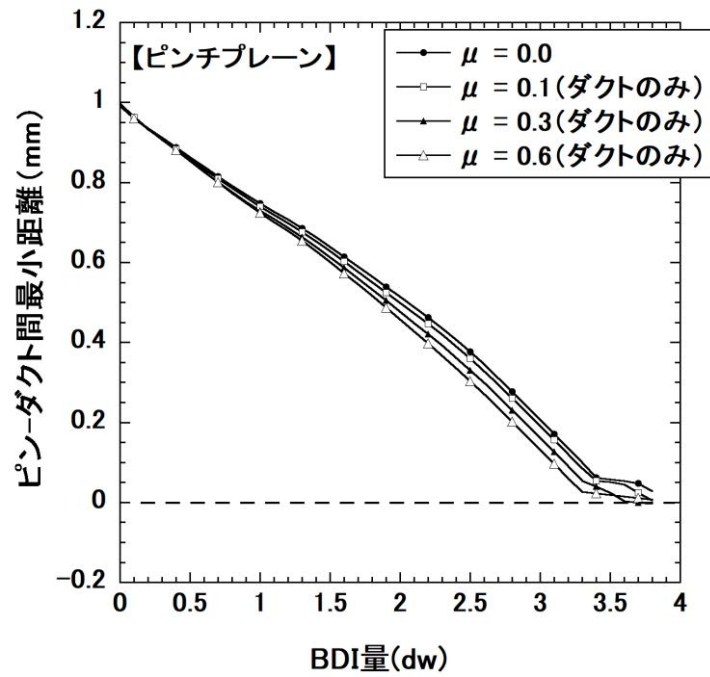


図 14 ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1a～1c の比較)

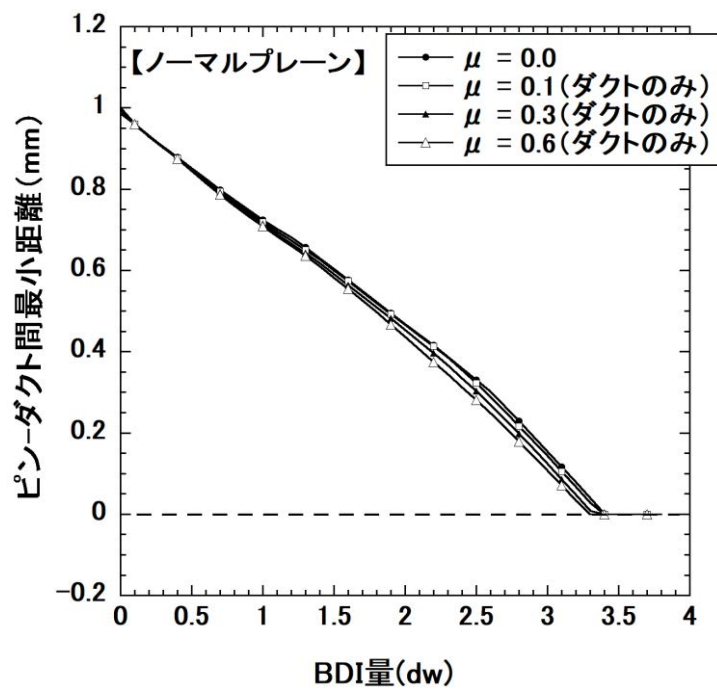


図 15 ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1a～1c の比較)

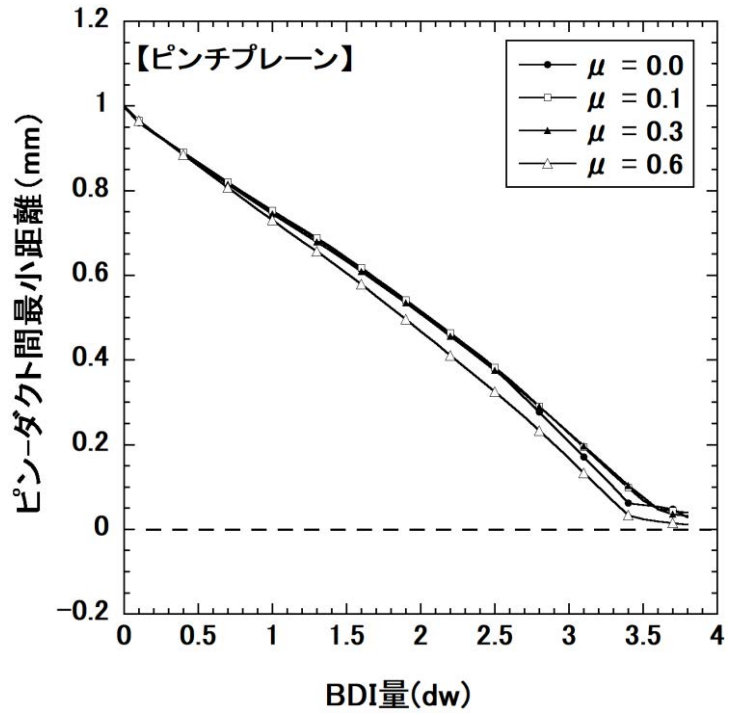


図 16 ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1d～1f の比較)

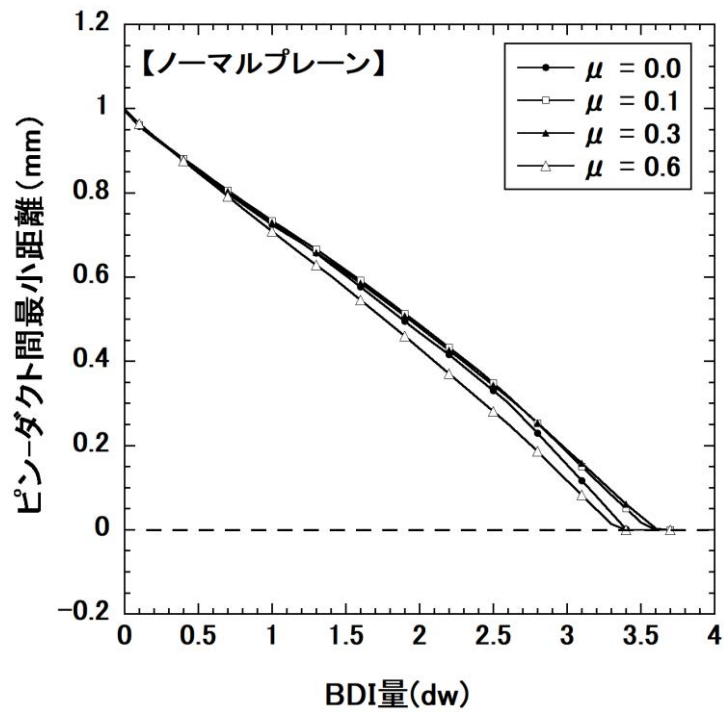


図 17 ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-1 と Case-1d～1f の比較)

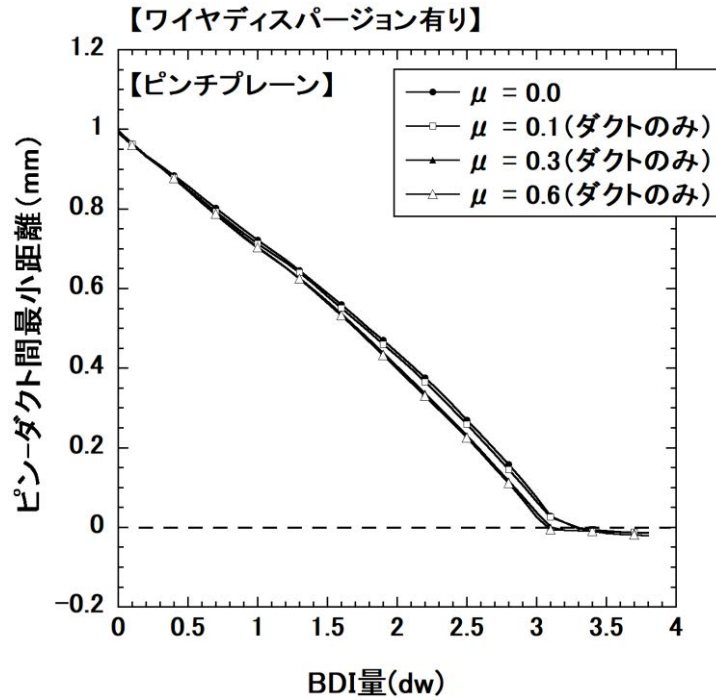


図 18 ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2a～2c の比較)

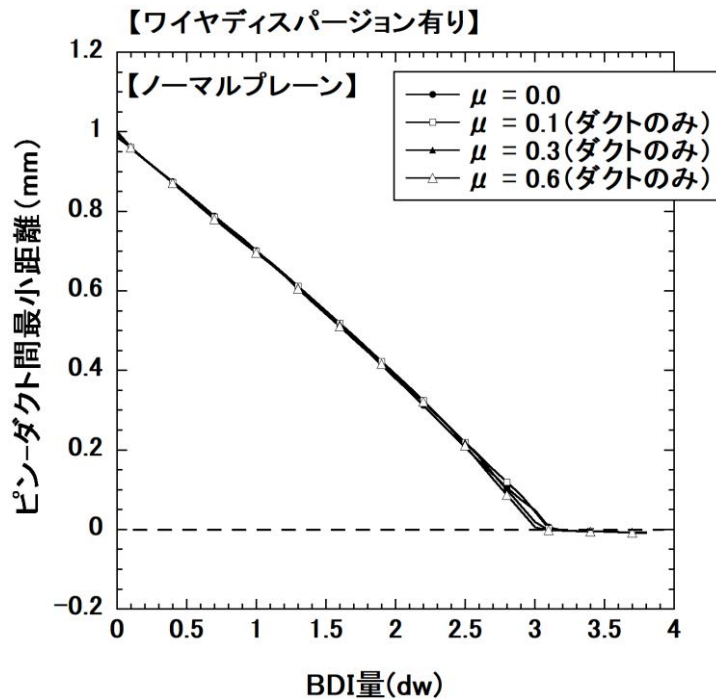


図 19 ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2a～2c の比較)

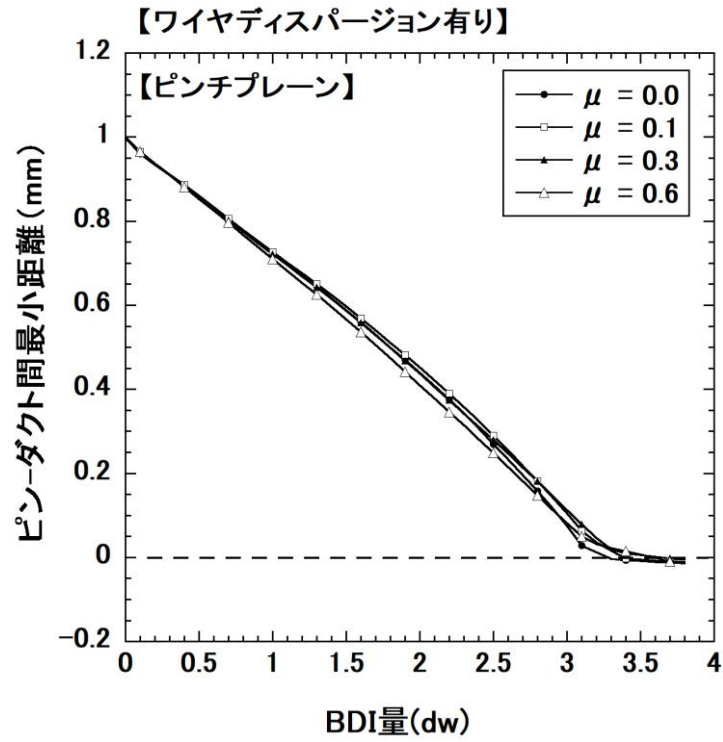


図 20 ピンチプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2d~2f の比較)

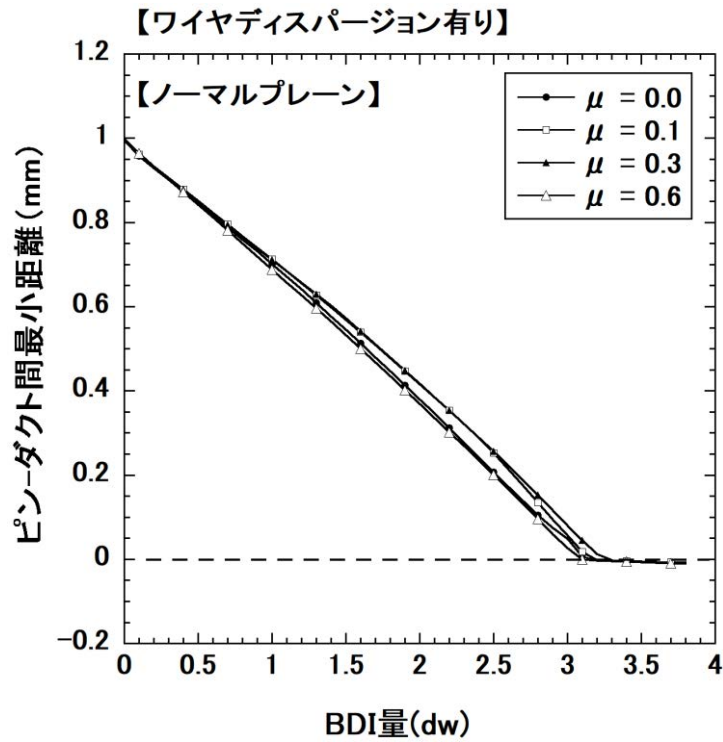


図 21 ノーマルプレーンにおけるピン-ダクト間最小距離履歴 (Case-2 と Case-2d~2f の比較)

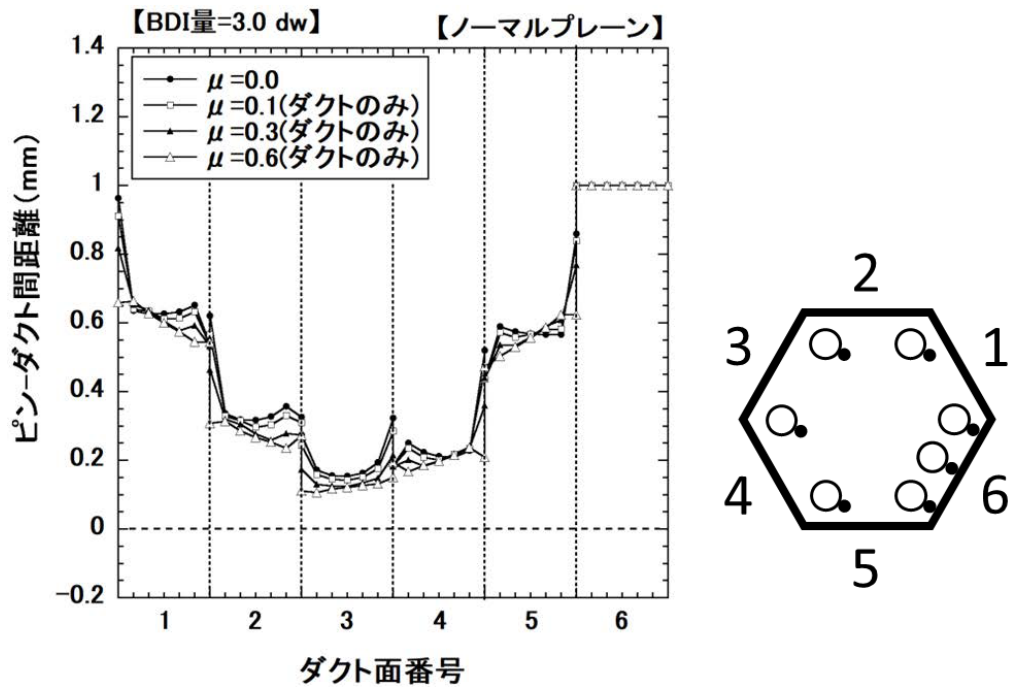


図 22 ピン-ダクト間距離周方向分布 (Case-1 と Case-1a~1c の比較)

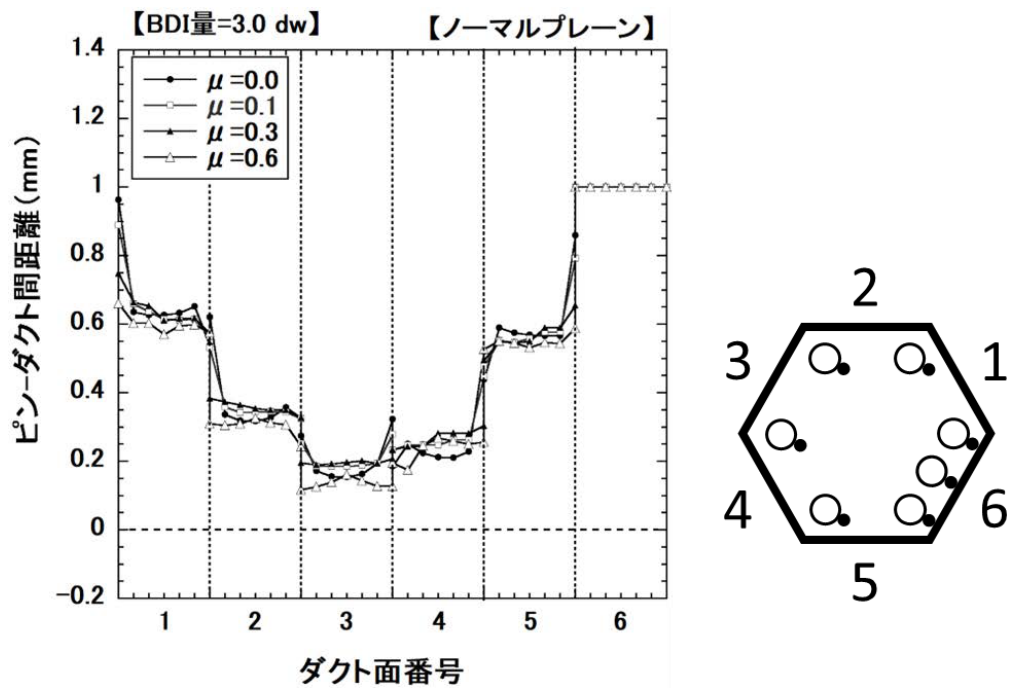


図 23 ピン-ダクト間距離周方向分布 (Case-1 と Case-1d~1f の比較)

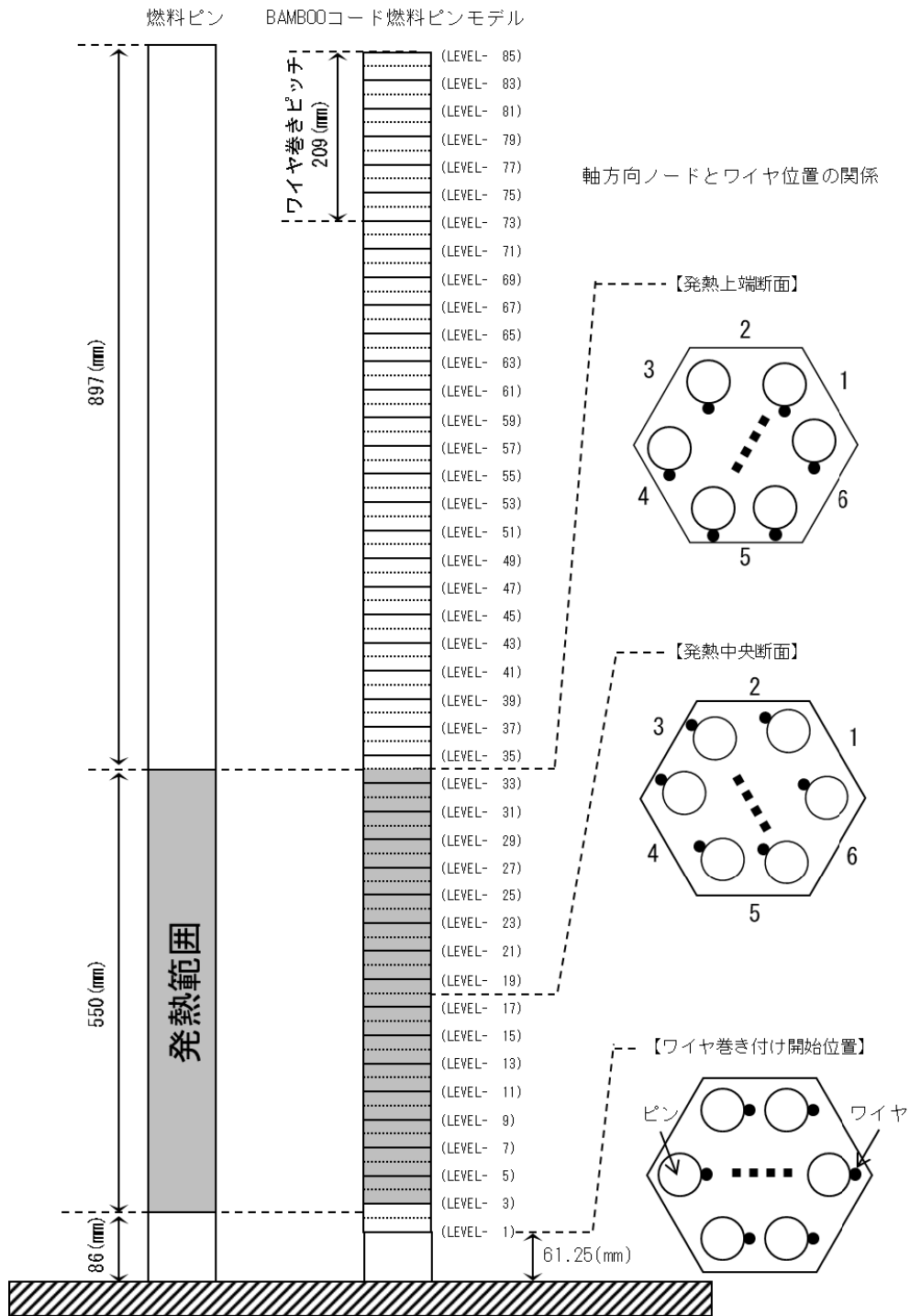


図 24 照射変形テスト解析モデル

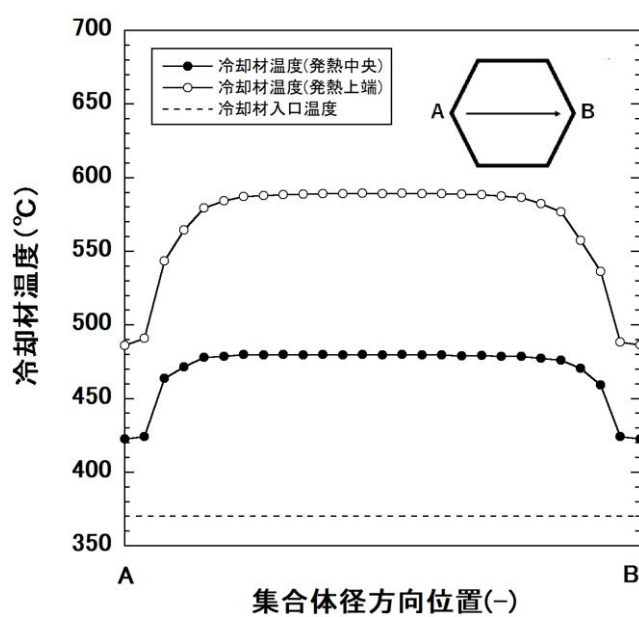


図 25 冷却材温度の集合体径方向分布

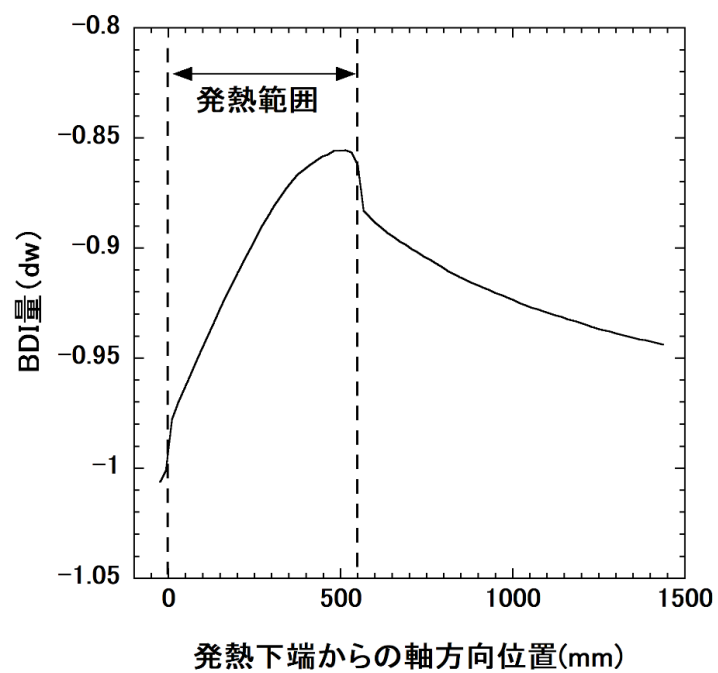


図 26 照射末期における BDI 量軸方向分布

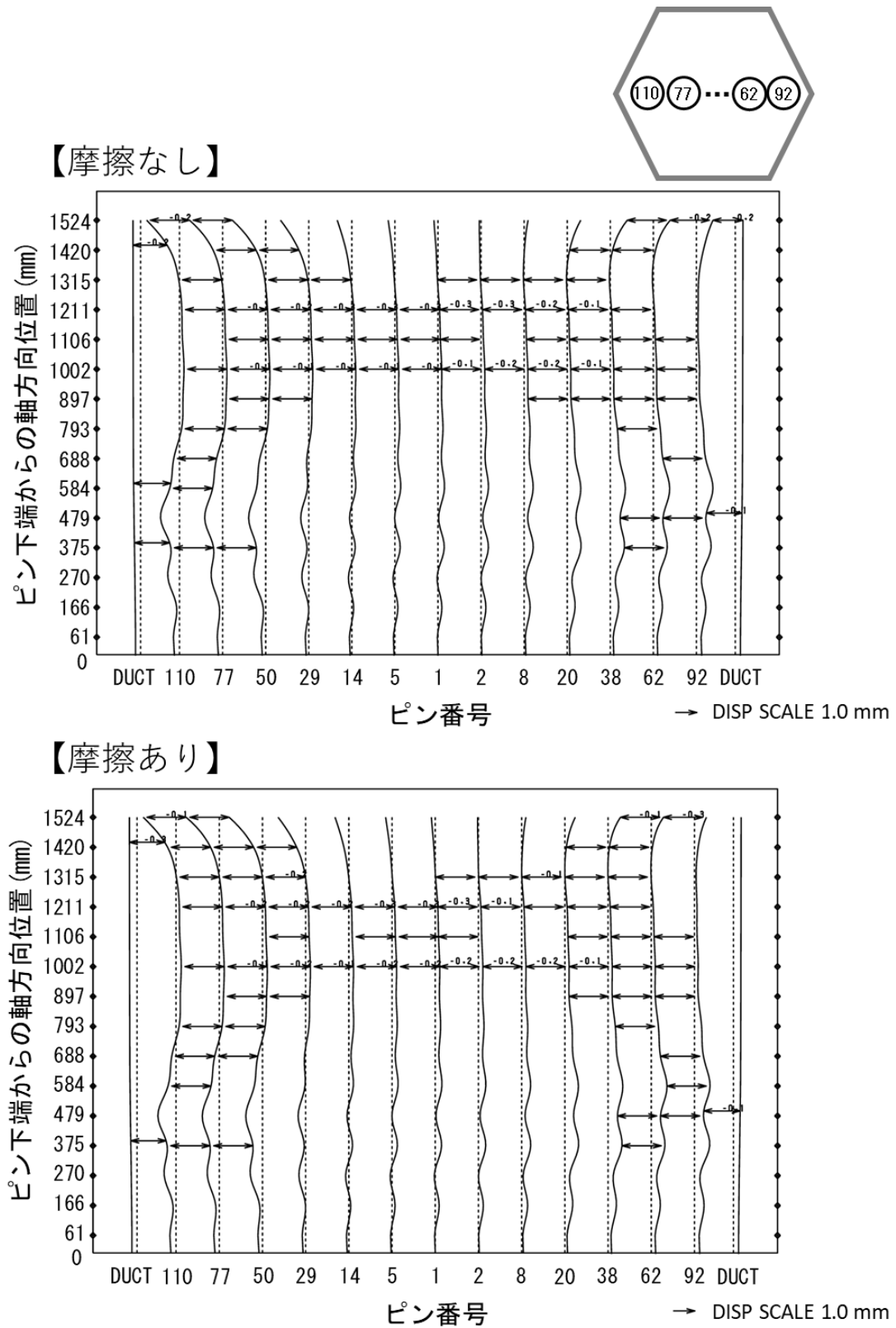


図 27 照射末期におけるバンドル縦断面図

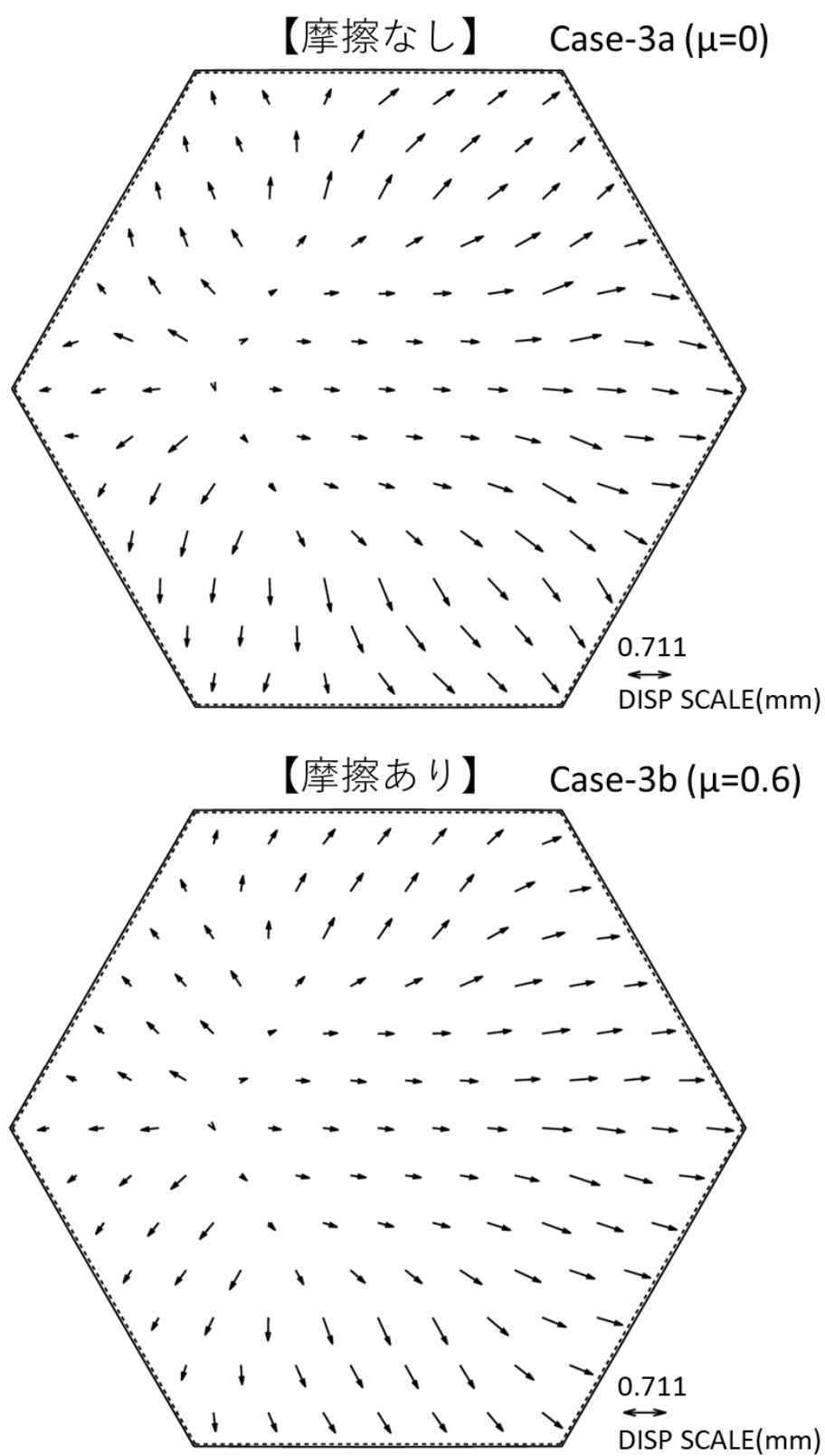
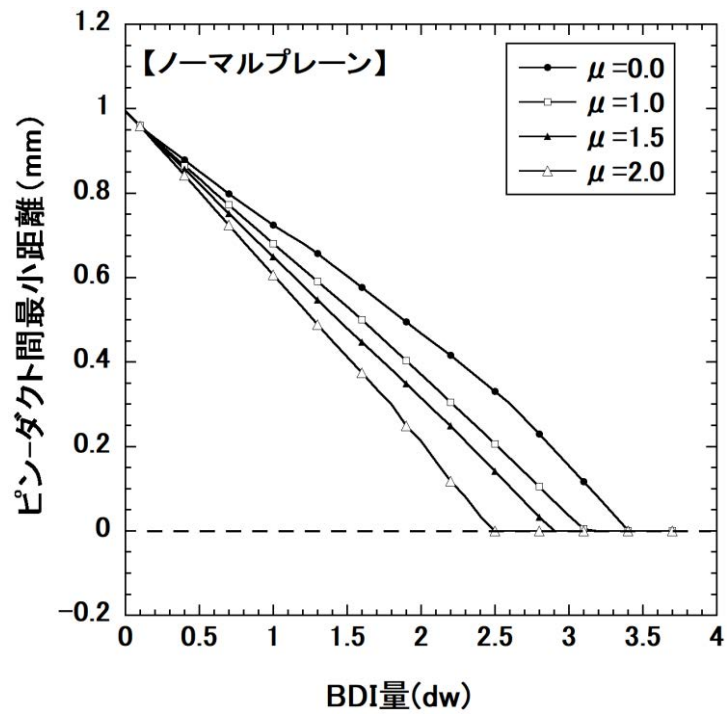
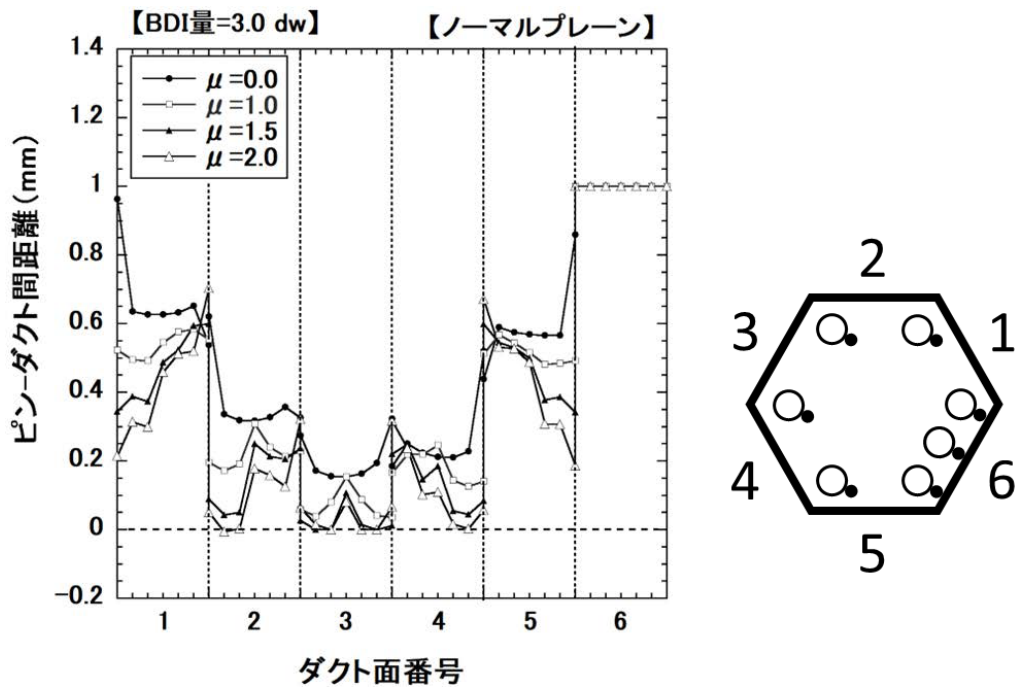


図 28 照射末期における発熱中央部のバンドル横断面ピン変位ベクトル図

図 29 ピン-ダクト間最小距離履歴 (摩擦係数 $\mu=0.0\sim2.0$)図 30 ピン-ダクト間距離周方向分布 (摩擦係数 $\mu=0.0\sim2.0$)

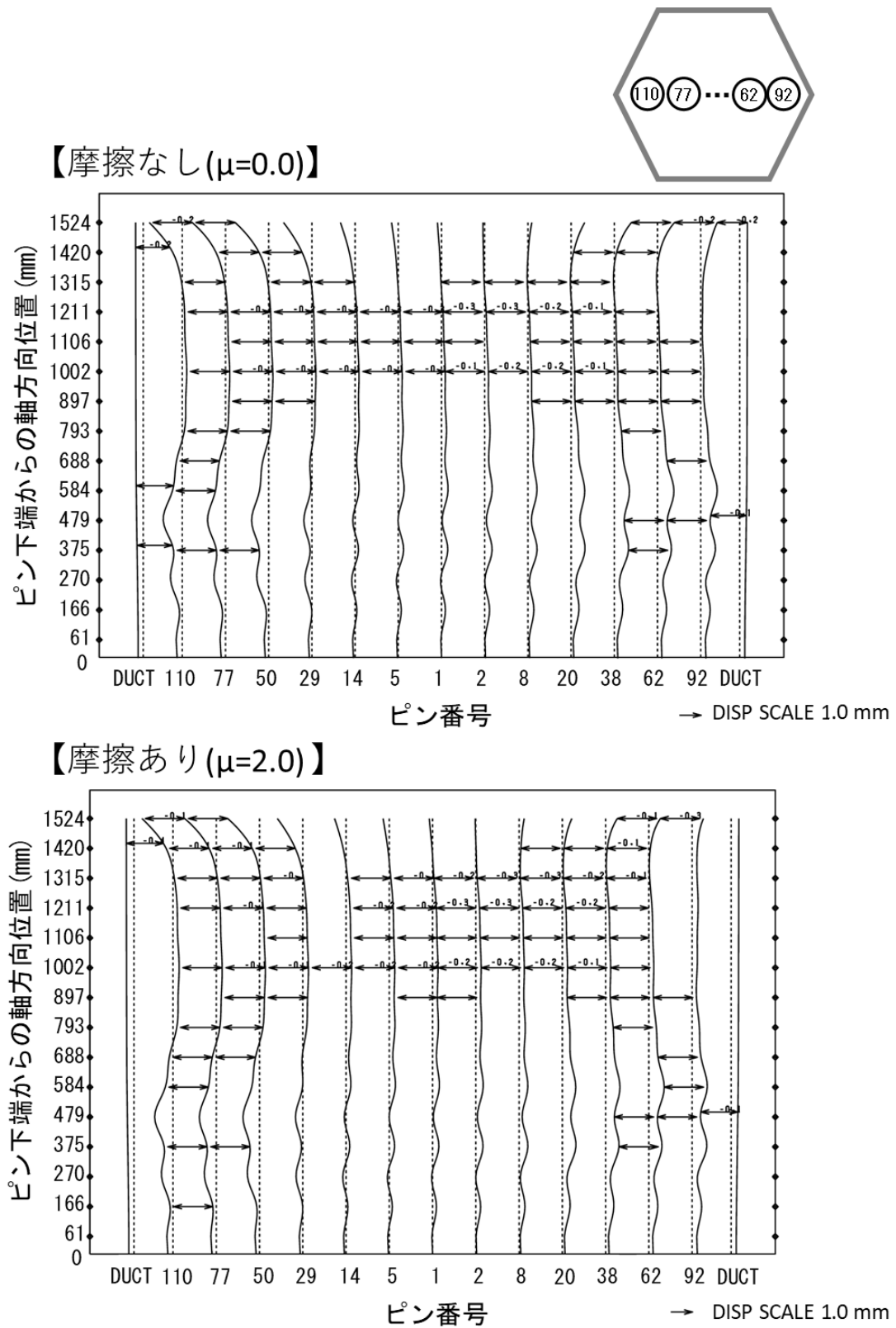


図 31 照射末期におけるバンドル縦断面図

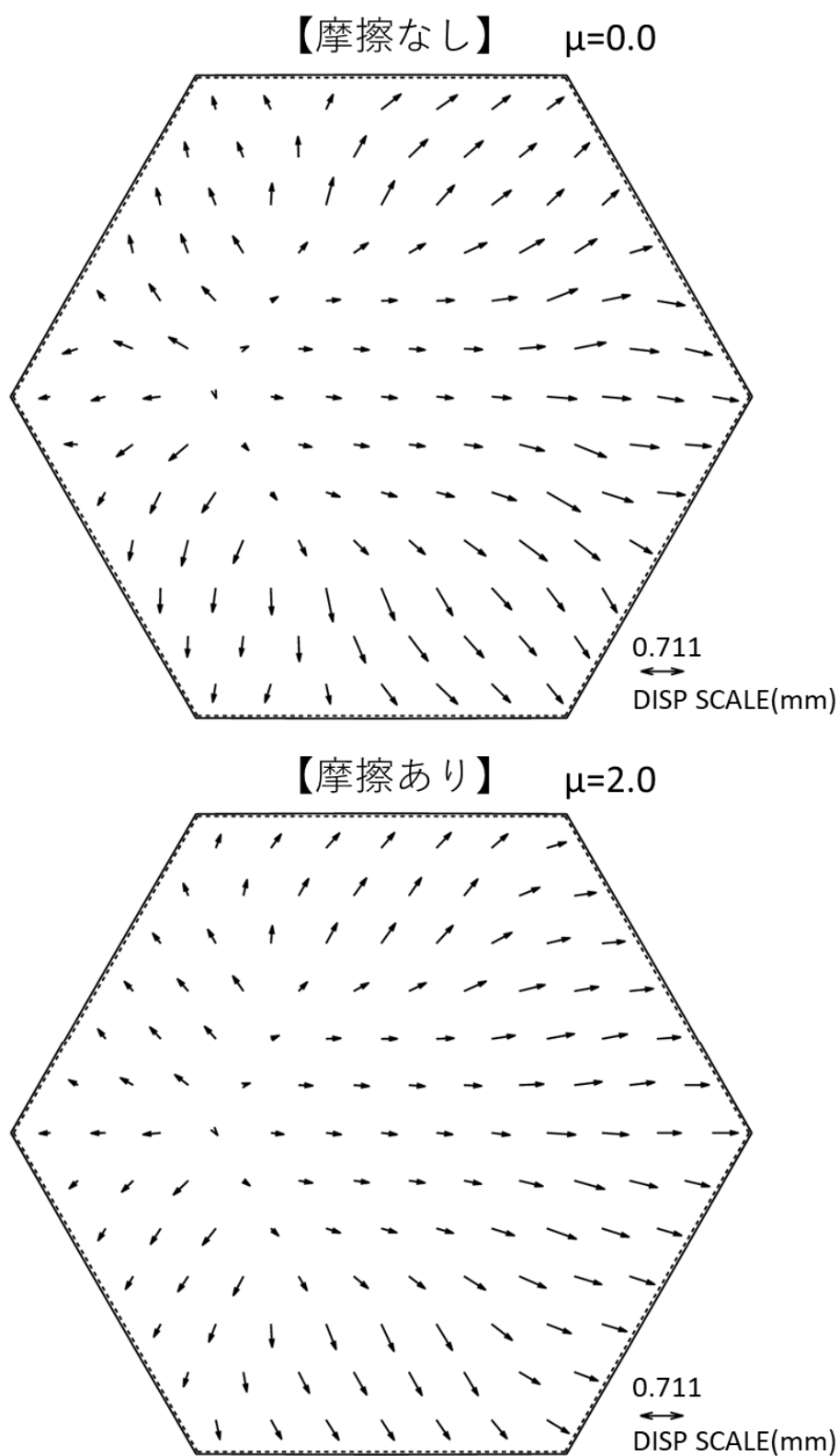


図 32 照射末期における発熱中央部のバンドル横断面ピン変位ベクトル図

付録 BAMBOO コードの解析で摩擦を考慮する手順

1.概要

BAMBOO コードの燃料ピンバンドル変形解析において摩擦を考慮する手順について述べる。

2.入力データへの記述方法と解析結果出力例

入力データの WIRE データに摩擦係数を記述する。摩擦係数は、ピンの摩擦係数とダクトの摩擦係数を分けて入力することができる。

●WIRE データ記載例

\$	+	1	+	2	+	3	+	4	+	5	+	6	+	7	+	8
WIRE		1		200.0		321.606000		10.00								
		1	127	1	3	1.00		0.0		0.1		0.3				
		2		3.000		0.000		11								
\$	+	1	+	2	+	3	+	4	+	5	+	6	+	7	+	8

上記記載例のように WIRE データの 2 行目 51～60 カラムにピンの摩擦係数、61～70 カラムにダクトの摩擦係数を記入する。摩擦を考慮しない場合はゼロを記入する。

解析した摩擦力を出力するためには、入力データのポスト処理部に LCONT データを記述する。LCONT データは接触荷重の出力を制御するデータであるが、摩擦を考慮した場合は、接触荷重の出力の後に続いて摩擦力の出力を行う。

ピンの変位情報をバンドル横断面ベクトル図に出力するには入力データのポスト処理部に PVEC データを記述する。

●LCONT データ、PVEC データ記載例

BDIPLT																
LEVEL		1		2												
		18		34												
PLOT																
STEP		1		26		0		1								
\$	+	1	+	2	+	3	+	4	+	5	+	6	+	7		
LCONT																
\$	+	1	+	2	+	3	+	4	+	5	+	6	+	7		
FORM 1																
\$	+	1	+	2	+	3	+	4	+	5	+	6	+	7		
PVEC 1																
==																
		7.0		0		0										
END BDIPLT																

上記記載例の PVEC データの 1 行目 11 カラムの「1」は出力する断面の軸方向ノードの識別番号となっている。識別番号「1」は LEVEL カードで定義しており、上記例ではノー

ド 18 と 34 を指定している。PVEC データの 3 行目 11～20 カラムはベクトルの倍率を記述する。例では 7 倍としている。ピンの変位情報のみをプロットするため、21～25 カラムと 26～30 カラムには「0」を記述する。

●LCONT データ出力例

CONTACT FORCE STEP= 26 0 1									
NCP 1490									
IPIN	JPIN	NODE	FORCE (KG)	ANGLE (DEG)	IPIN	JPIN	NODE	FORCE (KG)	ANGLE (DEG)
1	3	51	-4.042E-03	60.00	1	6	51	-8.664E-04	-120.00
1	4	53	-1.052E-01	120.00	1	7	53	-9.908E-02	-59.99
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
略	略	略	略	略	略	略	略	略	略
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
126	DUCT	84	-3.629E-01	-30.00	127	DUCT	24	-8.881E-02	-30.00
127	DUCT	36	-8.362E-02	-30.00	127	DUCT	84	-3.289E-01	-30.00
MAX IPIN 57									
JPN 58									
NODE 73									
FORCE -5.253E-01									
ANGLE 0.4									
FRICION FORCE STEP= 26 0 1									
NFRC 1437									
IPIN	JPIN	NODE	FORCE (KG)	ANGLE (DEG)	IPIN	JPIN	NODE	FORCE (KG)	ANGLE (DEG)
80	114	9	1.687E-04	150.62	81	115	9	5.671E-05	330.59
86	120	9	3.189E-05	150.00	85	120	11	2.580E-04	210.82
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
略	略	略	略	略	略	略	略	略	略
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

接触荷重を出力

摩擦力を出力

●PVEC データ出力例

