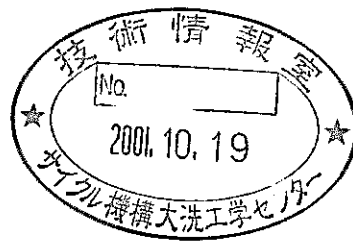


# 炉外圧縮試験による高速炉燃料ピンバンドル変形挙動評価 (研究報告)



2001年6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

Inquires 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, 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

## 炉外圧縮試験による高速炉燃料ピンバンドル変形挙動評価

### (研究報告)

田中康介\* 山本祐二\* 永峯 剛\* 前田宏治\*

#### 要 旨

高速炉燃料集合体の寿命制限因子の一つであり、燃料の高燃焼度化を達成する上での課題となっている燃料ピン束（バンドル）と集合体ラッパ管（ダクト）との間の機械的な相互作用（Bundle Duct Interaction : BDI）について、その挙動を把握することを目的として、原型炉燃料の短ワイヤピッチ仕様及び短ワイヤピッチ太径仕様のバンドルについて X 線 CT 技術を利用した炉外圧縮試験を実施し、過去に取得している複数仕様のバンドルにおける炉外圧縮試験結果とあわせて BDI 発生時におけるバンドル変形挙動を検討した。得られた結果は以下の通り。

- (1) 短ワイヤピッチバンドルでは長ワイヤピッチバンドルに比べて、より高い BDI 量でピン-圧縮板接触が発生する傾向を示した。これは短ワイヤピッチピンの湾曲剛性が高いことに起因すると考えられる。
- (2) 長ワイヤピッチバンドルでは外径肉厚比の違いによりピン-圧縮板接触時期に明確な差異は認められないが、短ワイヤピッチバンドルでは外径肉厚比の大きい仕様において、より高い BDI 量でピン-ダクト接触時期が発生する結果となった。これは長ワイヤピッチピンでは同一荷重に対する扁平量が小さいため、外径肉厚比で決まる扁平化剛性の影響が現れなかったのに対し、短ワイヤピッチピンでは扁平化の寄与が大きいため、ピン仕様に対応する扁平化剛性の差がピン-ダクト間距離の減少程度の差として現れたと考えられる。
- (3) BDI 量の増加に伴うワイヤディスパージョン及びピンディスパージョンの発生状況を検討した結果、ワイヤピッチが長いほど発生が早期化し、その程度も大きくなることがわかった。
- (4) 長ワイヤピッチバンドルにおいては弾性変形範囲内の扁平化とピン及びワイヤディスパージョンの発生により BDI が緩和されることがわかった。一方、短ワイヤピッチバンドルにおける BDI 緩和機構は被覆管の扁平化が支配的であり、同一ワイヤピッチであるバンドルでは BDI の緩和程度の差はそれぞれのバンドルを構成する各ピンの扁平化剛性の差で決まるものと考えられる。
- (5) 燃料ピン被覆管の外径軸方向プロファイルにおけるワイヤピッチの 1/6 ごとの規則的なオーバーリティの発現は、BDI 荷重の存在を示唆するものであると考えられる。

## Evaluation of Bundle Duct Interaction by Out-of-Pile Compression Test of FBR Fuel Pin Bundles

Kosuke Tanaka<sup>※</sup>, Yuji Yamamoto<sup>※</sup>, Tsuyoshi Nagamine<sup>※</sup>, Koji Maeda<sup>※</sup>

### Abstract

Bundle duct interaction (BDI) caused by expansion of fuel pin bundle is a main factor to limit the fuel lifetime. Therefore, it is important for the design of fast reactor fuel assembly to understand the fuel pin deformation behavior under BDI condition. In order to understand the fuel pin deformation behavior under BDI condition, out-of-pile compression tests were conducted for FBR fuel pin bundle by use of X-ray CT equipment. In these compression tests, two kinds of fuel pin bundles were conducted. One was the fuel pin bundle with the short wire-pitch and the other was the fuel pin bundle with the short wire-pitch and large diameter claddings. The general discussions were also performed based on the results of out-of-pile compression tests obtained by use of X-ray CT equipment in the previous work. Following results were obtained.

- 1) The occurrence of the pin-to-duct contact depends on the wire-pitch. In the fuel pin bundle with large wire-pitch, the pin-to-duct contact occurred at the early stage of BDI. The reason of this result is due to the low bowing rigidity of the fuel pins with long wire-pitch.
- 2) The value of the ovalation stiffness strongly depends on the geometry of cladding (diameter, thickness) and especially on wire-pitch. This result in this work revealed that the occurrence of the pin-to-duct contact depends on the value of the ovalation stiffness.
- 3) The occurrence of wire dispersion and dispersive displacement of pins depends on the wire-pitch strongly. In the fuel pin bundle with the long wire-pitch, the occurrence of the above-mentioned suppression mechanism to BDI is remarkable.
- 4) The suppression mechanism to BDI of the fuel pin bundle with the long wire-pitch is elastic oval deformation of cladding, wire dispersion and dispersive displacement of pins. On the other hand, the elastic and plastic oval deformation of cladding is the major suppression mechanism to BDI in the fuel pin bundle with the short wire-pitch.
- 5) The appearance of periodic (1/6 of wire-wrap pitch) cladding ovalities at the postirradiation profilometry suggests a sign of the occurrence of BDI under irradiation.

---

※ Fuels Monitoring Section, Fuels and Material Division, Irradiation Center, OEC

## 目次

1. 緒言 .....	1
2 試験内容 .....	3
2. 1 試験概要 .....	3
2. 2 バンドル仕様 .....	4
2. 3 試験方法 .....	5
2. 3. 1 圧縮試験 .....	5
2. 3. 2 X線 CT 画像撮影 .....	5
2. 3. 3 圧縮板内面観察 .....	5
2. 3. 4 ピン寸法測定 .....	6
2. 3. 5 CT 画像数値化処理 .....	6
2. 3. 6 評価対象データ .....	6
3 試験結果 .....	7
3. 1 圧縮試験結果 .....	7
3. 1. 1 CT 画像 .....	7
3. 1. 2 圧縮板内面観察によるピン-圧縮板接触時期の確認 .....	7
3. 2 CT 画像数値処理結果 .....	8
3. 2. 1 ピン-圧縮板間距離 .....	8
3. 2. 2 ピン-ピン間距離 .....	8
3. 2. 3 ピンオーバーリティ .....	8
3. 2. 4 ワイヤ位置の変化 .....	9
3. 2. 5 ピン変位量の変化 .....	9
3. 3 ピン寸法測定結果 .....	10
3. 3. 1 ワイヤピッチ .....	10
3. 3. 2 曲がり .....	10
3. 3. 3 外径 .....	10
4 考察 .....	12
4. 1 BDI 緩和機構 .....	12
4. 1. 1 BDI の緩和 .....	12
4. 1. 2 ピンディスパージョン発生時期の推定 .....	12
4. 1. 3 オーバリティ .....	13
4. 2 「もんじゅ」短ワイヤピッチ及び 高度化仕様におけるバンドル変形挙動 .....	15

4. 3	炉外圧縮試験によるバンドル変形挙動評価 .....	16
4. 3. 1	バンドル変形挙動に及ぼすピン仕様の影響 .....	16
(1)	BDI 量の増加に伴うピン-圧縮板間距離の変化 .....	16
(2)	ワイヤディスパージョン及びピンディスパージョンの発生挙動 .....	17
(3)	BDI 緩和挙動 .....	18
4. 3. 2	バンドル変形挙動に及ぼす圧縮板形状の影響 .....	18
4. 4	ピン変形挙動 .....	19
4. 4. 1	曲がり変形挙動 .....	19
4. 4. 2	軸方向におけるオーバリティの発現周期 .....	19
5	まとめ .....	21
6	謝辞 .....	22
7	参考文献 .....	23

表リスト

表 2.1	試験体のバンドル仕様	25
表 3.1	圧縮板全長でのピン-圧縮板接触有無	26
表 3.2	評価面でのピン-圧縮板接触有無	26
表 3.3	ピン-圧縮板接触状況 (短ワイヤピッチ平板)	27
表 3.4	ピン-圧縮板接触状況 (短ワイヤピッチバルジング)	28
表 3.5	ピン-圧縮板接触状況 (高度化平板)	29
表 3.6	ピン-圧縮板接触状況 (高度化バルジング)	30
表 3.7	圧縮後のピン最大曲がり量 (短ワイヤピッチ仕様)	31
表 3.8	圧縮後のピン最大曲がり量 (高度化仕様)	31
表 4.1	炉外圧縮試験を実施したバンドル仕様	32
表 4.2	炉外圧縮試験を実施したバンドルを構成するピンの ワイヤピッチ及び外径肉厚比	33

## 図リスト

図 2.1	試験フロー	34
図 2.2	バルジング形状と圧縮面曲線方程式	35
図 2.3	X線 CT 撮像位置とワイヤ方向の関係	36
図 2.4	CT 画像上でのピン, 圧縮板の関係	37
図 2.5	寸法測定対象ピン	38
図 2.6	模擬ピンの角度定義及び各圧縮面との関係 (Top view)	39
図 3.1	ピン-圧縮板間距離の分布 (短ワイヤピッチ平板: CD コーナワイヤ位置)	40
図 3.2	ピン-圧縮板間距離の分布 (短ワイヤピッチバルジング: CD コーナワイヤ位置)	41
図 3.3	BDI の増加に伴うピン-圧縮板間距離の変化 (短ワイヤピッチ: CD コーナワイヤ位置)	42
図 3.4	ピン-圧縮板間距離の分布 (高度化平板: CD コーナワイヤ位置)	43
図 3.5	ピン-圧縮板間距離の分布 (高度化バルジング: CD コーナワイヤ位置)	44
図 3.6	BDI の増加に伴うピン-圧縮板間距離の変化 (高度化: CD コーナワイヤ位置)	45
図 3.7	BDI 量の増加に伴うピン-ピン間距離の変化 (短ワイヤピッチ仕様: CD コーナワイヤ位置)	46
図 3.8	BDI 量の増加に伴うピン-ピン間距離の変化 (高度化仕様: CD コーナワイヤ位置)	47
図 3.9	対角ピン列におけるオパリティ分布 (短ワイヤピッチ平板: CD コーナワイヤ位置)	48
図 3.10	対角ピン列におけるオパリティ分布 (短ワイヤピッチバルジング: CD コーナワイヤ位置)	49
図 3.11	対角ピン列におけるオパリティ分布 (高度化平板: CD コーナワイヤ位置)	50
図 3.12	対角ピン列におけるオパリティ分布 (高度化バルジング: CD コーナワイヤ位置)	51
図 3.13	規定位置からのワイヤ位置変化の標準偏差と BDI 量の関係 (短ワイヤピッチ仕様: CD コーナワイヤ位置)	52
図 3.14	規定位置からのワイヤ位置変化の標準偏差と BDI 量の関係 (高度化仕様: CD コーナワイヤ位置)	53
図 3.15	対面ピン中心間距離の変化 (短ワイヤピッチ仕様: CD コーナワイヤ位置)	54
図 3.16	対面ピン中心間距離の変化 (高度化仕様: CD コーナワイヤ位置)	55
図 3.17	BDI 量の増加に伴う対角ピン中心間距離の変化 (短ワイヤピッチ仕様: CD コーナワイヤ位置)	56



図 3.18	BDI 量の増加に伴う対角ピン中心間距離の変化 (高度化仕様：CD コーナワイヤ位置)	57
図 3.19	圧縮前後のワイヤピッチ変化 (短ワイヤピッチ平板)	58
図 3.20	圧縮前後のワイヤピッチ変化 (短ワイヤピッチバルジング)	59
図 3.21	圧縮前後のワイヤピッチ変化 (高度化平板)	60
図 3.22	圧縮前後のワイヤピッチ変化 (高度化バルジング)	61
図 3.23	圧縮後のピン曲がり軸方向プロファイル (短ワイヤピッチ仕様)	62
図 3.24	圧縮後のピン曲がり軸方向プロファイル (高度化仕様)	63
図 3.25	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチ平板：No. 29)	64
図 3.26	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチ平板：No. 33)	64
図 3.27	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチ平板：No. 49)	65
図 3.28	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチ平板：No. 119)	65
図 3.29	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチバルジング：No. 29)	66
図 3.30	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチバルジング：No. 33)	66
図 3.31	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチバルジング：No. 49)	67
図 3.32	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (短ワイヤピッチバルジング：No. 119)	67
図 3.33	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (高度化平板：No. 25)	68
図 3.34	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (高度化平板：No. 28)	68
図 3.35	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (高度化平板：No. 42)	69
図 3.36	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (高度化平板：No. 93)	69
図 3.37	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (高度化バルジング：No. 25)	70
図 3.38	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (高度化バルジング：No. 28)	70
図 3.39	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向	

	(高度化バルジング：No.42) .....	71
図 3.40	外径軸方向プロファイルとワイヤ方向 (高度化バルジング：No.93) .....	71
図 3.41	対角ピン列における圧縮後のオーバーリティ分布 (短ワイヤピッチ仕様：CDコーナワイヤ位置) .....	72
図 3.42	対角ピン列における圧縮後のオーバーリティ分布 (高度化仕様：CDコーナワイヤ位置) .....	73
図 4.1	理想的なピン配列状態のバンドル .....	74
図 4.2	BDI の増加に伴うバンドルサイズの変化 .....	75
図 4.3	ピンディスパージョン発生時期推定方法の考え方 .....	76
図 4.4	ピンディスパージョン発生時期の推定 .....	77
図 4.5	ワイヤ空隙部への湾曲 .....	78
図 4.6	ピン-圧縮板間最小距離の変化 (平板) .....	79
図 4.7	ワイヤピッチと外径肉厚比の関係 .....	80
図 4.8	ピン-圧縮板間最小距離の変化 (バルジング) .....	81
図 4.9	ワイヤディスパージョン発生時期 .....	82
図 4.10	ワイヤ巻き付け力とピン仕様との関係 .....	83
図 4.11	ワイヤピッチとワイヤ巻き付け力の関係 .....	84
図 4.12	ピンディスパージョン発生時期の推定 .....	85
図 4.13	模擬的な BDI 発生時の被覆管の変形 .....	86
図 4.14	BDI 発生時の被覆管外径軸方向プロファイル (模式図) .....	87
図 4.15	米国 FFTF 炉で $17 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ まで照射された SUS316 鋼製 燃料ピンの外径プロファイル .....	88

## 写真リスト

写真 3.1	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 0dw)	89
写真 3.2	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 0.5dw)	89
写真 3.3	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 1.0dw)	90
写真 3.4	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 1.5dw)	90
写真 3.5	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 2.0dw)	91
写真 3.6	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 2.4dw)	91
写真 3.7	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 0dw)	92
写真 3.8	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 0.5dw)	92
写真 3.9	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 1.0dw)	93
写真 3.10	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 1.5dw)	93
写真 3.11	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 2.0dw)	94
写真 3.12	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 2.5dw)	94
写真 3.13	X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 2.6dw)	95
写真 3.14	X線 CT 画像 (高度化平板 : 0dw)	96
写真 3.15	X線 CT 画像 (高度化平板 : 0.5dw)	96
写真 3.16	X線 CT 画像 (高度化平板 : 1.0dw)	97
写真 3.17	X線 CT 画像 (高度化平板 : 1.5dw)	97
写真 3.18	X線 CT 画像 (高度化平板 : 2.0dw)	98
写真 3.19	X線 CT 画像 (高度化平板 : 2.5dw)	98
写真 3.20	X線 CT 画像 (高度化平板 : 2.6dw)	99
写真 3.21	X線 CT 画像 (高度化バルジング : 0dw)	100
写真 3.22	X線 CT 画像 (高度化バルジング : 0.5dw)	100
写真 3.23	X線 CT 画像 (高度化バルジング : 1.0dw)	101
写真 3.24	X線 CT 画像 (高度化バルジング : 1.5dw)	101
写真 3.25	X線 CT 画像 (高度化バルジング : 2.0dw)	102
写真 3.26	X線 CT 画像 (高度化バルジング : 2.5dw)	102
写真 3.27	X線 CT 画像 (高度化バルジング : 2.9dw)	103

## 1. 緒言

高速炉の燃料集合体では燃料の高燃焼度化に伴い主に被覆管のスエリングに起因する燃料ピン束(バンドル)とラップ管(ダクト)との間の機械的な相互作用(Bundle Duct Interaction: BDI)が発生する。顕著なBDIの発生は、冷却材流路の変形に伴う被覆管の局所的な温度上昇及びワイヤを介して被覆管に加わる接触荷重の増大を引き起こし、燃料ピンの健全性に影響を及ぼす可能性がある。このため、BDIは高速炉燃料集合体の寿命制限因子の一つと考えられており、BDI挙動を精度良く予測する手法の確立は高速炉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挙動を予測・解析するツールとして、JNCでは3次元有限要素法を用いた高速炉燃料ピン束変形解析コード「BAMBOO」の開発を進めている。このBAMBOOコードにおける解析モデルの検討及び解析結果の検証に必要なバンドル変形データを取得する目的で、JNCではX線CT技術を用いた炉外バンドル圧縮試験も併せて実施している。この試験は、ダクト部分を内側に変位させてバンドルを圧縮することでBDIの発生を模擬し、高エネルギーX線CT技術によりBDI発生時のバンドルの変形挙動を把握するものである。炉外バンドル圧縮試験は短時間でデータが取得できる、試験パラメータを自由に選定できる、コールド試験のため試験操作が容易である、BDI量の変化に伴うバンドル変形挙動の把握が可能である、等の照射試験では取得困難である有益なデータが得られるメリットがあり、BDI発生時のバンドルの変形挙動を詳細に把握し、BDI挙動を評価する有効な手段である<sup>1)~6)</sup>。

X線CT技術を用いた炉外バンドル圧縮試験によりBDI発生時におけるバンドル変形挙動を把握し、BAMBOOコードの整備及び高燃焼度炉心の設計に反映するためのバックデータを拡充しようとする計画が平成7年度に策定され、試験体の製作及び試験の実施が継続的に行われてきた。炉外圧縮試験の実施が計画されたのは現行の「もんじゅ」燃料仕様及びその短ワイヤピッチ燃料仕様、さらに高燃焼度炉心を想定した太径・短ワイヤピッチ燃料仕様の模擬バンドルと、海外炉燃料(「Phenix」及び「FFTF」)仕様の模擬バンドルである。これらのうち、現行「もんじゅ」、「Phenix」及び「FFTF」仕様については試験が終了し、その結果は既に報告されている<sup>7)~9)</sup>。それによると、現行の「もんじゅ」仕様及び「Phenix」仕様の模擬バンドルにおける試験結果<sup>7)~8)</sup>から、ダクトの形状がBDI挙動に強く依存し、スエリング及び照射クリープによるダクトのバルジング変形はBDIを緩和することが実験的に明らかとなっている。また、ワイヤピッチの短い「Phenix」バンドルではワイヤピッチの長い現行の「もんじゅ」バンドルに比べピン-ダクト接触時期が遅れる結果が得られている。さらに、米国で炉外圧縮試験を実施したFFTF仕様<sup>1)~2)</sup>とほぼ同じバンドルに対し、初期ワイヤずれの有無に着目した圧縮試験を実施した結果、初期のワイヤずれが大きいバンドルでは主にワイヤ及びピンディスパージョンの発生により、著しくBDIが緩和されることが明らかとなっている<sup>9)</sup>。

ワイヤピッチ依存性については、現行の「もんじゅ」仕様と「Phenix」仕様の試験結果から、その傾向は把握できた。しかし、これら二つのバンドルにおけるピンの仕様が異なるため、純粋にワイヤピッチの長短のみで議論できないという欠点があり、同一バンドルにおいてワイヤピッチのみ変化させた仕様についての圧縮試験の実施が望まれていた。また、被覆管の外径についてもバンドル変形挙動に影響を与える可能性があると考えられるが、X線CT技術を用い

た圧縮試験により詳細なデータは得られていない。そこで、高燃焼度炉心設計評価及び燃料健全性評価に対するバックデータの拡充を図るとともに、BDI 発生時のバンドル変形挙動を把握し、BAMBOO コードの整備に反映することを目的として、現行の「もんじゅ」仕様に対してワイヤピッチを 307mm から 200mm に変更した仕様（「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様）のバンドルと、「もんじゅ」高燃焼度炉心燃料仕様候補の一つである外径が 7.7mm、ワイヤピッチが 200mm である仕様（「もんじゅ」高度化仕様）のバンドルについて X 線 CT 技術を利用した炉外圧縮試験を実施することでバンドル変形挙動を検討した。さらに、過去に取得している複数の仕様のバンドルにおける炉外圧縮試験結果も含めて検討することで、BDI 挙動の総合的な評価を実施した。

## 2 試験内容

### 2.1 試験概要

炉外バンドル圧縮試験装置により模擬バンドルを所定の BDI 量まで圧縮する。X 線 CT 検査装置により、バンドル圧縮時におけるピン配列状況の CT 画像を取得し、バンドルの変形状況を確認する。さらに、取得した CT 画像データを数値化処理することで、ピンやワイヤ位置の変化、ピン-圧縮板間距離等を求める。CT 画像の取得後、試験装置を解体し、あらかじめ圧縮板内面に塗布した塗料の状況を観察することで、ピンと圧縮板の接触の有無を確認する。また、模擬ピンの寸法測定を実施することで、圧縮によるピンの変形量を把握する。一連の試験フローを図 2.1 に示す。

## 2. 2 バンドル仕様

圧縮試験に供したバンドルは、ピン外径/肉厚が 6.5mm/0.47mm、ワイヤ径が 1.32mm、ワイヤピッチが 200mm の模擬ピンを 169 本束ね、現行の「もんじゅ」燃料集合体のワイヤピッチを短くしたスペック（以下、「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様という。）であるバンドルと、ピン外径/肉厚が 7.7mm/0.50mm、ワイヤ径が 1.32mm、ワイヤピッチが 200mm の模擬ピンを 127 本束ね、現行の「もんじゅ」燃料集合体とバンドル径が同等でピン径を太くしたスペック（以下、「もんじゅ」高度化仕様という。）であるバンドルの 2 種類である。これらのバンドルを 2 組ずつ製作した。各バンドルの仕様を表 2.1 に示す。

模擬ピンへのワイヤの巻き付けは大洗工学センター照射装置組立検査施設（IRAF）のワイヤ巻き付け装置を使用し、巻き付け荷重を 10kgf にて実施した。ワイヤ巻き付け後の模擬ピンは巻き付け誤差が  $\pm 10\text{mm}$  以下であることを検出できるワイヤピッチ測定用治具を用いて全数確認した。さらに、バンドル組立時でのワイヤずれの有無を確認するため、圧縮開始前に X 線 CT 検査装置において断層画像を撮像し、後述する CT 画像数値化処理システムにより全ピンの初期ワイヤずれ角度が巻き付け誤差範囲内（ $\pm 18^\circ$ ：ワイヤ巻き付け誤差である  $\pm 10\text{mm}$  に相当する横断面のワイヤ角度）にあることを確認した。

## 2. 3 試験方法

### 2. 3. 1 圧縮試験

BDI は照射中にダクト内でバンドルが膨れるために生じる事象であるが、炉外バンドル圧縮試験は逆にダクト部分を内側に変位させてバンドルを圧縮することで BDI を模擬するものである。模擬バンドルの圧縮は照射燃料集合体試験施設 (FMF) の炉外バンドル圧縮試験装置<sup>7)</sup>~<sup>8)</sup>により実施した。六枚の移動圧縮板はワイヤピッチが 200mm のバンドルを圧縮できる平板タイプとバルジングタイプのを新たに製作した。バンドルを圧縮する範囲は 640mm であり、その構造は前報<sup>7)</sup>と同様にはめ込み式を採用した。バルジングタイプとはスエリング及び照射クリープによるダクトのバルジング変形を模擬した圧縮板であり、前回<sup>7)</sup>使用した圧縮板と同一の内面形状 (最大くぼみ量 0.4mm, バルジング範囲 60.4mm) とした。図 2.2 にバルジングタイプの圧縮板の模式図を示す。なお、試験開始前に圧縮量の精度が $\pm 0.1\text{mm}$ 以内であることを確認した。低 BDI 量における圧縮量は 0.5 または 0.3dw づつとしたが、CT 画像の目視観察による定性的な判断から被覆管と圧縮板の接触の可能性が認められた BDI 量からは 0.1dw づつとした。圧縮は全六面でピン-圧縮板接触が発生した時点で終了した。なお、本報告書において、「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様のバンドルを平板タイプの圧縮板を用いて圧縮した試験を「短ワイヤピッチ平板」、同バンドルをバルジングタイプの圧縮板を用いて圧縮した試験を「短ワイヤピッチバルジング」、同様に「もんじゅ」高度化仕様のバンドルについても圧縮板形状ごとに「高度化平板」、「高度化バルジング」とそれぞれ呼ぶこととする。

### 2. 3. 2 X線 CT 画像撮影

BDI 発生時におけるバンドルの状況を把握する目的で、FMF 第 2 試験セルに設置されている X 線 CT 検査装置<sup>10)</sup>を用いて、バンドルの断層画像データ (CT 画像) を取得した。X 線はライナック加速器により発生し、「もんじゅ」炉心燃料集合体に相当する鉄換算厚さ約 200mm の透過能を有する<sup>10)</sup>。所定の BDI 量まで圧縮後、特定の軸位置において X 線 CT 画像の撮影を行った。なお、取得したデータの 1 画素サイズは 0.3mm である。図 2.3 に CT 撮像位置を示す。

バンドルを構成する各ピンに対し、「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様では 1 から 169 の数字、「もんじゅ」高度化仕様では 1 から 127 の数字を用いて ID を設定した。また、6 枚の圧縮板には A から F のアルファベットを用いて ID を設定した。撮影した CT 画像におけるピン及び圧縮板とそれぞれの ID との対応関係を図 2.4 に示す。

### 2. 3. 3 圧縮板内面観察

BDI が進行してピンと圧縮板が接近し、X 線 CT 画像上からピンと圧縮板との間の空隙が認識不能になった時点で圧縮試験装置を解体し、移動圧縮板内面に塗布した塗料の状態によってピンと圧縮板の接触状況を確認した。接触発生時には、接触したピンの同定及び接触跡の軸位置と長さの確認を行った。接触状況確認後、圧縮板内面に再度塗料を塗布し、圧縮試験装置を組立てて圧縮試験を継続した。



### 2. 3. 4 ピン寸法測定

圧縮試験の実施に先立ち、一部のピンにおいてワイヤピッチの測定を実施した。また、圧縮試験終了後にはワイヤピッチの測定とともに、曲がり、6方向(30° 間隔)の外径測定を行った。寸法測定を実施したピンを図 2.5 に示す。

ピン寸法測定は、FMF 第 2 試験セル内に設置されているピン試験装置 2 を用いた。本試験装置による寸法測定は非接触レーザー方式を採用しており、ワイヤピッチ： $\leq 4\text{mm}$ (測定再現性)、外径： $\leq \pm 5\ \mu\text{m}$ 、曲がり量： $\leq \pm 0.5\text{mm}$ の測定精度を有している。ワイヤピッチ及び曲がり測定は 2 方向( $0^\circ - 180^\circ$ ,  $90^\circ - 270^\circ$ )において、外径測定は 6 方向( $0^\circ - 180^\circ$ ,  $30^\circ - 210^\circ$ ,  $60^\circ - 240^\circ$ ,  $90^\circ - 270^\circ$ ,  $120^\circ - 300^\circ$ ,  $150^\circ - 330^\circ$ )において実施した。なお、今回実施したピン寸法の測定方向(角度)は図 2.6 に示すように、下部端栓のワイヤ出口方向を  $0^\circ$  とし、ピン上側から見て時計方向へ  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  …と定義した。

### 2. 3. 5 CT 画像数値化処理

CT 画素の輝度データを数値処理することにより、ピン及び圧縮板の位置や形状等の幾何学的データを取得できる高速炉燃料集合体バンドル断面 CT 画像数値処理システム<sup>11)</sup>を利用して CT 画像データを数値化し、BDI 挙動評価上きわめて重要であるピン-圧縮板間距離やピン-ピン間距離等のバンドル変形データを取得した。解析精度はノイズがきわめて小さい状態においてピン寸法で $\pm 0.05\text{mm}$ 程度、圧縮板寸法で $\pm 0.1\text{mm}$ の不確かさがある<sup>11)</sup>。なお、バンドル全体を撮影した場合には透過面積が大きくなるために X 線検出器でノイズを多く拾うことが予想されるため、解析精度が低下すると考えられる。

### 2. 3. 6 評価対象データ

今回用いた炉外バンドル圧縮試験装置は、バンドルを構成している各ピンの下端は固定支持されており、上端は自由となっている。このような構造であるため、圧縮変形時にピン湾曲量が圧縮板の上下端側で大きくなる軸方向依存性が生じる。本報告書における評価では、ピン上下端の拘束条件の影響が比較的少ない圧縮板の軸方向中心位置のピンチプレーン(CD コーナーワイヤ位置：ピン下端から 812.0mm)のデータを用いた。以下この軸位置における横断面を評価面という。

### 3 試験結果

#### 3.1 圧縮試験結果

##### 3.1.1 CT画像

写真 3.1~3.6 に短ワイヤピッチ平板における CD コーナーワイヤ位置での CT 画像の一例を示す。0dw では、ほぼ正規に配列している。1.0dw では A 面及び F 面におけるピン-圧縮板間距離は若干減少しているものの配列状態に有意な変化は見られない。1.5dw になると A 面及び F 面でピン-圧縮板接触が懸念されるようになる。しかし、ピン位置の変化はほとんど無く、ワイヤ位置の変化についてもコーナー部で若干見られる程度である。2.4dw まで圧縮するとピン-圧縮板の間隙はほとんど確認できないが、ピン-ピン間距離の変化は少ない。

写真 3.7~3.13 に短ワイヤピッチバルジングにおける CD コーナーワイヤ位置での CT 画像の一例を示す。0dw から 1.5dw までのピン及びワイヤの配列状況に変化はないが、2.0dw まで圧縮すると BC コーナー付近にピン-ピン間距離の減少及びワイヤ位置の変化を示す部分が観察される。2.5dw では A 面及び F 面の一部でピン-圧縮板の間隙が確認できなくなる。

写真 3.14~3.20 に高度化平板における CD コーナーワイヤ位置での CT 画像の一例を示す。0dw から 2.0dw までのピン及びワイヤ位置の変化はほとんど認められない。2.5dw から CD コーナー付近に位置する No. 93 及び 99 ピンに被覆管の偏平化が観察されるが、ピン-ピン間距離の顕著な減少は見られない。また、この BDI 量において A 面及び F 面の一部でピン-圧縮板の間隙が確認できない部分が観察される。

写真 3.21~3.27 に高度化バルジングにおける CD コーナーワイヤ位置での CT 画像の一例を示す。0dw から 2.0dw までは、高度化平板と同様にピン及びワイヤの配列状況に変化はみられない。2.5dw では高度化平板と同様に被覆管の偏平化が観察される。また、BC コーナー及び DE コーナーでピン-ピン間距離の顕著な減少が観察される。さらに、F 面の一部のピンについてピン-圧縮板の間隙が確認できなくなる。

##### 3.1.2 圧縮板内面観察によるピン-圧縮板接触時期の確認

圧縮板内面に塗布した塗料の状態を観察することで、ピンと圧縮板の接触時期を確認した。表 3.1 に圧縮板全長でのピン-圧縮板接触の有無を、表 3.2 に評価面におけるピン-圧縮板接触の有無をそれぞれ示す。また、表 3.3~3.6 に圧縮板内面観察により測定した接触跡の発生位置及び長さを示す。表 3.2 から短ワイヤピッチ平板で 2.1dw, 短ワイヤピッチバルジングで 2.5dw, 高度化平板で 2.3dw, 高度化バルジングで 2.6dw において、それぞれピン-圧縮板接触が開始していることがわかる。圧縮板形状の違いによるピン-圧縮板接触時期の差は 0.3~0.4dw である。各圧縮板において接触跡が発生している軸位置は対面方向にワイヤが向いた位置でのピンチプレーン及びノーマルプレーンがほとんどである。

### 3. 2 CT 画像数値処理結果

#### 3. 2. 1 ピン-圧縮板間距離

図 3.1 及び 3.2 に短ワイヤピッチ平板及び短ワイヤピッチバルジングの代表的な BDI 量におけるピン-圧縮板間距離の分布を示す。ワイヤ方向である C 面及び D 面においては、BDI 量の増加に伴うピン-圧縮板間距離の変化は少ないが、ワイヤと逆向きに位置する F 面及び A 面ではピン-圧縮板間距離の減少が著しい。これは圧縮によりワイヤを介してピンに横方向の荷重が加わることで各ピンが湾曲し、その結果としてピンの集合体であるバンドルが変形することを意味している。バルジングタイプについても平板と同様の傾向を示すが、圧縮板形状に対応して山型に分布している。

図 3.3 に BDI 量の増加に伴うピン-圧縮板間距離の最小値と平均値の変化を示す。ここでの平均値とは、ピン-圧縮板接触に直接関係する A 面及び F 面に位置するピンについてのものである。ピン-圧縮板間距離の平均値、最小値とも BDI 量の増加に伴って直線的に減少しており、減少率も同程度である。

図 3.4 及び 3.5 に高度化平板及び高度化バルジングの代表的な BDI 量におけるピン-圧縮板間距離の分布を示す。短ワイヤピッチ仕様とほぼ同じ傾向を示すが、高 BDI 量での分布の乱れは小さい。図 3.6 に BDI 量の増加に伴うピン-圧縮板間距離の最小値と平均値の変化を示す。高度化仕様についても短ワイヤピッチ仕様とほぼ同じ傾向を示しているが、短ワイヤピッチ仕様と比べ、ピン-圧縮板間距離の減少率が若干緩やかである。

#### 3. 2. 2 ピン-ピン間距離

図 3.7 に短ワイヤピッチ平板と短ワイヤピッチバルジングにおける BDI 量の増加に伴うピン-ピン間距離の最小値と平均値の変化を示す。平均値は平板、バルジングともに BDI 量の増加とともに直線的に減少しているが、最小値においては  $2.0dw$  以降で減少が顕著である。しかし、最終圧縮時の BDI 量である  $2.6dw$  においてもピン同士の接触はない。

図 3.8 に高度化平板と高度化バルジングにおける BDI 量の増加に伴うピン-ピン間距離の最小値と平均値の変化を示す。高度化仕様についても短ワイヤピッチ仕様と傾向は同じであるが、最小値での減少率は、高度化仕様の方が若干緩やかである。

#### 3. 2. 3 ピンオーバリティ

図 3.9 に短ワイヤピッチ平板における代表的な BDI 量での対角ピン列方向のオーバリティ分布を示す。 $1.5dw$  までは BDI 量の増加に伴う系統的な変化は見られないが、これを超えると荷重を受ける自己ワイヤ方向である CD コーナー付近の偏平が著しくなり、特にコーナーピンに隣接するピン (No.119) の偏平が顕著になる。これは、後述するピン寸法結果とも一致する。短ワイヤピッチバルジングにおいても、図 3.10 に示すように短ワイヤピッチ平板と同様の傾向を示す。

図 3.11 及び図 3.12 に高度化平板及び高度化バルジングの対角ピン列における代表的な BDI 量でのオーバリティ分布を示す。高度化平板、高度化バルジングともに  $1.5dw$  以上の BDI 量に

なると CD コーナー側のピン偏平量が大きくなる。また、コーナーピンに隣接するピン (No. 93) の偏平が特に顕著であり、当該ピンは高 BDI 量になると CT 画像上でも偏平化変形の様子が観察されている。

短ワイヤピッチ仕様と高度化仕様では、高度化仕様の方がより低い BDI 量から偏平する傾向が認められる。

### 3. 2. 4 ワイヤ位置の変化

図 3.13 に短ワイヤピッチ仕様の各 BDI 量における規定位置からのワイヤ位置変化の標準偏差を示す。平板、バルジングともに 1.5dw 程度までは BDI 量の増加に伴う顕著な変化は見られないが、その後徐々に標準偏差が大きくなる。また、圧縮板形状の違いによる明確な差異は認められない。

図 3.14 に高度化仕様の各 BDI 量における規定位置からのワイヤ位置変化の標準偏差を示す。0dw 時において、平板とバルジングとの間で若干の巻き付け誤差が生じているが、BDI 量の増加に伴う標準偏差の変化は同様の傾向を示している。いずれのバンドルも BDI 量の増加に伴うワイヤ位置の変化は少ないと言える。短ワイヤピッチ仕様と高度化仕様を比較すると、高度化仕様の方がワイヤ位置の変化は小さい。

### 3. 2. 5 ピン変位量の変化

図 3.15 に短ワイヤピッチ仕様における 0dw から 2.4dw まで圧縮した時の、図 3.16 に高度化仕様における 0dw から 2.6dw まで圧縮した時の、対面関係にある最外周ピン同士のピン中心間距離 (以下、対面ピン中心間距離という) の変化をそれぞれ示す。両仕様とも BDI 量の増加とともに対面ピン中心間距離が減少している。0dw 時における平板とバルジングの対面ピン中心間距離の差は高 BDI 量においても大きな変化は見られない。

図 3.17 に短ワイヤピッチ仕様における対角関係にある CD コーナーピンと FA コーナーピンの中心間距離 (以下、対角ピン中心間距離という) と BDI 量の関係を示す。両バンドルとも BDI の増加と共にほぼ直線的に対角ピン間距離が減少している。また、圧縮板形状の違いによる減少率の差異は認められない。高度化仕様についても、図 3.18 に示すように短ワイヤピッチ仕様と傾向は全く同様である。

図 3.15~3.17 の結果から、BDI 量の増加に伴うピン変位量の変化は、平板とバルジングで顕著な差異は認められないことがわかる。

### 3. 3 ピン寸法測定結果

#### 3. 3. 1 ワイヤピッチ

図 3.19～3.22 は各バンドルの 0° 方向における圧縮に伴うワイヤピッチの変化を示したものである。数本のピンにおいてワイヤピッチの増加または減少が見られるものの、全体としては大きな変化は認められない。180° 方向における結果についても同様の傾向である。

#### 3. 3. 2 曲がり

表 3.7 に短ワイヤピッチ仕様の各ピンにおける圧縮試験終了後の最大曲がり量，最大曲がり軸位置及び最大曲がり方向を示す。またこれらのうち，最大曲がり量が 4.5mm を超えるピンについての軸方向曲がりプロファイルを図 3.23 に示す。短ワイヤピッチ平板及び短ワイヤピッチバルジングにおいて最大の曲がり量を示すのは，いずれも No. 29 ピンである。これは CD コーナーに位置するピンである。また，他のコーナーに位置するピンにおいても大きな曲がりが観察される。さらに，プロファイルの中に，ほぼワイヤピッチに対応した間隔で変曲点が見られる。

表 3.8 に高度化仕様の各ピンにおける圧縮試験終了後の最大曲がり量，最大曲がり軸位置及び最大曲がり方向を示す。またこれらのうち，最大曲がり量が 4.5mm を超えるピンについての軸方向曲がりプロファイルを図 3.24 に示す。高度化仕様でも短ワイヤピッチ仕様と同様にコーナーに位置するピンの曲がりが大きい。

#### 3. 3. 3 外径

代表的な外径軸方向プロファイルとして，各バンドルにおけるコーナーピン，コーナー部でない外周ピン，バンドルの中心に位置するピン及びコーナーピンの対角ピン列方向に隣接するピンについての測定結果を図 3.25～3.40 に示す（ピン装荷位置は図 2.5 参照）。

コーナーピンでは，ワイヤが圧縮板と対向する軸位置（ノーマルプレーン）において顕著なオーバリティの発現が認められる。例えば図 3.25 に示す短ワイヤピッチ平板の No. 29 ピンでは，ワイヤが C 面を向く軸位置（595.3mm, 795.3mm, 995.3mm）付近で 30° - 210° 方向の外径が減少し，それと直交する 120° - 300° 方向の外径が増加している。また D 面を向く軸位置（628.6mm, 828.7mm, 1028.7mm）付近で 150° - 330° 方向の外径が減少し，それと直交する 60° - 240° 方向の外径が増加している。また，ワイヤが CD コーナーを向く軸位置（ピンチプレーン）で 0° - 180° 方向の外径が若干減少しているが，これは後述する対角ピン列方向への荷重伝達の結果生じたものと考えられる。

コーナー部でない外周ピンについては，例えば図 3.26 に示す短ワイヤピッチ平板の No. 33 ピンのように自己ワイヤが圧縮面と対向する軸位置においてオーバリティの発現が認められ，圧縮板から垂直に荷重を受け扁平している状況が伺える。

バンドルの中心に位置するピンでは，例えば図 3.27 に示す短ワイヤピッチ平板の No. 49 ピンのようにオーバリティの発現はほとんど認められない。

コーナーピンの対角ピン列方向に隣接するピンについては、ワイヤがコーナーを向く軸位置（ピンチプレーン）でオーバーリティの発現が認められる。例えば図 3.28 に示す短ワイヤピッチ平板の No.119 では、ワイヤが CD コーナーを向く軸位置（612.0mm, 812.0mm, 1012.0mm）付近で  $0^{\circ}$  -  $180^{\circ}$  の外径が減少し、それと直交する  $90^{\circ}$  -  $270^{\circ}$  の外径が増大している。これは、C 面及び D 面からワイヤを介してコーナーピンに伝達された荷重が合成され、両面にワイヤが対向する軸位置の中間にあるピンチプレーンにおいて対角ピン列方向に向かって荷重の伝達が行われていることを示唆する結果である。またこのピンでは、ワイヤが BC コーナー及び DE コーナーへ向くピンチプレーン軸位置でも若干のオーバーリティが見られる。なお、それ以外に見られる局部ピークはピン表面に付着したほこり等の情報を拾ったものと思われる。以上述べてきたオーバーリティの発現状況は短ワイヤピッチバルジング、高度化平板及び高度化バルジングにおいても同様である。

図 3.41～3.42 は各バンドルの CD コーナーワイヤ位置における対角ピン列方向のオーバーリティ分布を示したものである。なお、ここでのオーバーリティ量は、軸位置が 812mm における  $90^{\circ}$  -  $180^{\circ}$  方向の外径値から、同軸位置における  $0^{\circ}$  -  $180^{\circ}$  方向の外径値の差を使用している。これらの図からピンのオーバーリティはコーナー隣接ピンで最大を示した後、内側に向かうにつれて減少し、中心ピンではほとんどオーバーリティの発現が認められないことがわかる。これは、図 3.9～3.12 で示した圧縮時における CT 画像の数値化処理結果により得られたオーバーリティ分布と一致する傾向である。

なお、図 3.25～図 3.42 で示した外径軸方向プロファイル及び対角ピン列方向のオーバーリティ分布において、短ワイヤピッチと高度化のいずれの仕様も、バルジングの外径変化が顕著である結果が得られているが、これは外径寸法測定時の圧縮量が平板とバルジングで異なる（図 2.1 参照）ことに起因しているものであり、圧縮板形状の違いによる本質的な外径変化量の差を示すものではないと考えられる。ただし、同じ BDI 量まで圧縮した短ワイヤピッチバルジングと高度化平板を比べると（例えば図 3.32 と図 3.36 の比較）、高度化平板の外径増加率のほうが大きい値を示している。

## 4 考察

### 4.1 BDI 緩和機構

#### 4.1.1 BDI の緩和

BDI 量が  $0d_w$  である燃料集合体が理想的なピン配列を示している状態においては、図 4.1 に示すようにバンドルとダクトの間にワイヤ径に相当する間隙が存在する。バンドルがピンの湾曲のみで変形する場合には、このワイヤ径がバンドル変形の許容量となることから、バンドルとダクトの寸法上の不整合量がワイヤ一本分、すなわち BDI 量が  $1d_w$  になると最外周ピンとダクトが接触する。今回のバンドル圧縮試験では全てのバンドルにおいて、この  $1d_w$  よりも高い BDI 量でピンと圧縮板の接触が認められている。さらに、バンドルを外側から強制変位させる炉外圧縮試験においてバンドルがピンの湾曲のみで変形する場合には、特定の横断面に注目すると、見かけ上のピンの変形がなくピンとワイヤの位置関係が変化しないことから、図 4.2 のように最外周ワイヤを除いたバンドルの大きさ（以下、バンドルサイズという）は BDI 量によらず初期状態と同じとなる。3.2.5 で示した対面ピン中心間距離及び対角ピン中心間距離は、実質的にバンドルサイズを意味していると考えられるが、今回の試験結果では図 3.15～3.18 のように、全てのバンドルで、そのサイズが減少している。これはバンドルサイズが減少することで、BDI によるタイトさを吸収していることを意味する。バンドル内でワイヤを介して伝達する BDI 荷重が吸収されると、その荷重伝達のロスが大きくなり、ワイヤと逆方向に位置する最外周ピンの湾曲量が小さくなることから、ピンと圧縮板が接触する BDI 量は高い値となる。この BDI によるタイトさの吸収は「BDI の緩和」と呼ばれている。この BDI の緩和のメカニズムにはピンディスパージョン、ワイヤディスパージョン、オーバリティが挙げられる。ワイヤディスパージョン及びピンディスパージョンとは、それぞれワイヤ位置の変化及びピン配列の乱れのことであり、これらのディスパージョンが発生すると、BDI 荷重の伝達が直線的に行われなことから、BDI 荷重のタイトさが減少する。また、オーバリティが発生すると、BDI による荷重が被覆管の偏平化変形に消費されることから、BDI が緩和される。

#### 4.1.2 ピンディスパージョン発生時期の推定

図 3.13 及び図 3.14 のように、各 BDI 量における全てのピンのワイヤ位置を求め、それらに統計処理を施すことで BDI の進行に伴うワイヤディスパージョンの変化を把握できるが、ピンディスパージョンの発生状況を定量的に把握するのはきわめて困難である。ここでは、ピン及びワイヤの位置関係が明確であり、バンドル変形状況を明瞭に反映しているワイヤと被覆管が一行に並ぶ対角ピン列に着目し、対角ピン中心間距離と隣接する各ピンの中心間距離の関係でピンディスパージョンの発生状況を評価した。

図 4.3 にピンディスパージョン発生時期推定方法の考え方を示す。ディスパージョンが発生していない場合には図 4.3(a) のように対角ピン中心間距離 ( $L$ ) と隣接する各ピンの中心間距離 ( $l_i$ ) の和 ( $\sum l_i$ ) は一致する。しかし、ディスパージョンが発生し、ピン列の乱れが生じると図 4.3(b) のように対角方向に隣接する各ピンの中心間距離の和が、対角ピン中心間距離を上回るることとなる。このように、対角方向（両端ピン中心を結ぶ直線）からのずれを

ピンディスパージョンと定義する。図 4.4 は上記考え方をもとに、今回実施したバンドルにおける試験結果においてピンディスパージョンの発生時期の推定を試みたものであり、横軸が BDI 量であり、縦軸が対角ピン列方向に平行する全てのピン列ごとに隣接ピン中心間距離の和と両端ピン中心間距離の差を求め、これらを平均した値 ( $[\sum |l_i - l|]_{av.}$ ) である。図 4.3 の考え方から、図 4.4 の縦軸は対角方向からの各ピンのずれ、つまりピンディスパージョンの発生を意味するものである。これを見ると、全ての仕様において 1.5dw 程度からピンディスパージョンが発生していることがわかる。ピンディスパージョンの発生程度については、短ワイヤピッチの方が高度化仕様よりも顕著である。また、平板とバルジングでは、ほぼ同じ挙動を示している。

#### 4. 1. 3 オーバリティ

上記ディスパージョンの他に重要な BDI 緩和機構として、被覆管の偏平化であるオーバリティの発生が挙げられる。BDI の初期段階における被覆管のオーバリティは、弾性変形範囲内程度であるが、更に BDI が進行すると塑性変形領域に達し、圧縮試験終了後もオーバリティの残留が見られるようになる。本試験結果では圧縮試験後に明確なオーバリティの発生が認められている。従来、オーバリティの測定は圧縮試験後に実施したものであるため、圧縮中におけるオーバリティ状況は推察によっていた。今回の圧縮試験では圧縮後の被覆管外径寸法測定結果から、塑性変形領域にまで達するオーバリティの発生が認められているが、それに加えて圧縮中における弾性変形範囲内のオーバリティについても BDI を緩和していることが推測される。

圧縮中における数値化処理結果である図 3.9~3.12 と圧縮試験後におけるピン寸法測定結果である図 3.41 及び 3.42 を比較すると、対角ピン列方向におけるオーバリティの発現傾向が類似する BDI 量は 1.0~1.5dw 以降である。この値より高い BDI 量ではオーバリティの発生が示唆されるが、ピンの外径変化に対する弾性歪と塑性歪の寄与についての分別は困難である。一方、0dw~1.0dw 程度の低い BDI 量においては明確なオーバリティ分布が生じていないことから、この範囲におけるピンの外径変化は数値化処理の解析精度以下である可能性が高い。したがって、数値化処理により各ピンにおける微小なオーバリティ量を一本単位で直接は求められない。そこで、ピン列全体でのオーバリティ量に着目し、バンドル変形挙動に対するオーバリティの寄与を検討する。4. 1. 1 で述べたように、BDI 発生時には主にオーバリティ、ワイヤディスパージョン、ピンディスパージョンの三機構により BDI が緩和されてバンドルサイズが減少すると考えられる。これらの三機構が同時に発生している場合には、それぞれの緩和機構の寄与を把握することはきわめて困難であるが、単一の機構のみ作用している場合には、バンドルサイズの減少量からその機構の寄与を評価することができる。図 3.13、図 3.14 及び図 4.4 で示したようにバンドルの変形初期の段階ではワイヤ及びピンディスパージョンは発生していない。この変形初期のワイヤ及びピンディスパージョンが発生していない領域におけるバンドルサイズの減少分がオーバリティによる寄与であるとみなすことができる。さらに、このような変形初期のオーバリティは弾性域内の変形により生じたものと考えられる。

炉外バンドル圧縮試験で用いる模擬ピンは燃料ペレットが装荷されていない中空ピンであ



るが、炉内でBDIが発生するような場合には、被覆管がスエリングすることで燃料と被覆管の機械的相互作用は発生していないと考えられることから、ピンの機械的特性に燃料が与える影響は少ないと考えられる。

:

#### 4. 2 「もんじゅ」短ワイヤピッチ及び高度化仕様におけるバンドル変形挙動

上記4. 1にて述べたBDI緩和機構に対する検討結果を踏まえ、バンドルの変形挙動を検討する。なお、この検討は先に述べたように、ピン及びワイヤの位置関係が明確であり、且つバンドルの変形状況を明瞭に反映する対角ピン列に着目して実施する。

##### ①0dw～1.5dw

図3.13、図3.14及び図4.4で示したように、各バンドルにおいては1.5dw程度まではワイヤディスパージョンとピンディスパージョンの発生は認められないが、図3.17及び3.18のように対角ピン中心間距離は減少している。4. 1. 3の考え方から、この領域におけるBDIの緩和は主にオーバリティの発生により行われたものと考えられる。バンドルがピンの湾曲とオーバリティにより変形する場合にはピン-圧縮板間距離が直線的に減少することが知られている<sup>12)</sup>が、今回の結果もこれと一致する。

##### ②1.5dw以降

図3.13、図3.14及び図4.4よりワイヤディスパージョンが開始する1.5dwから1.8dwにかけてピンディスパージョンの発生も認められる。このため、ワイヤディスパージョンとピンディスパージョンはほぼ同時期に発生したものと考えられる。ワイヤディスパージョンが発生すると、ワイヤを介して伝達する荷重の方向が変化し、ピン列の乱れが発生する可能性が高いことから、このピンディスパージョンは、主にワイヤディスパージョンに起因して発生したものと考えられる。ワイヤディスパージョンの発生はまた、図4.5のようにワイヤ位置の変化により生じる空隙に隣接ピンが対角方向へ変位することで対角方向ピン-ピン間距離の減少が促進されると考えられる。したがって、全バンドルの1.5dw以降においては、ワイヤディスパージョンに起因したピンディスパージョン及び対角方向のピン-ピン間距離の減少によりBDIが緩和されたものと考えられる。

このようなバンドル変形挙動は圧縮板形状によらず、平板、バルジングともほぼ同じ傾向を示している。

#### 4. 3 炉外圧縮試験によるバンドル変形挙動評価

今回実施した「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様及び「もんじゅ」高度化仕様バンドルの試験結果を含め、過去に取得している複数の仕様のバンドルにおける炉外圧縮試験結果をもとに、BDI 発生時におけるバンドル変形挙動を評価する。表 4.1 に炉外圧縮試験を実施したバンドルの仕様を示す。

##### 4. 3. 1 バンドル変形挙動に及ぼすピン仕様の影響

###### (1) BDI 量の増加に伴うピン-圧縮板間距離の変化

図 4.6 に X 線 CT 技術を利用した炉外バンドル圧縮試験結果の数値化処理により得られた平板における BDI 量とピン-圧縮板間最小距離の関係を示す。短ワイヤピッチバンドルである「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様及び「もんじゅ」高度化仕様では長ワイヤピッチバンドルである現行「もんじゅ」仕様及び FFTF 仕様と比べて、ピン-圧縮板間距離の減少割合が緩く、ピンと圧縮板が接触する BDI 量は高い値を示した。これは短ワイヤピッチピンではワイヤピッチスパンの湾曲剛性が高く、同一荷重でも湾曲変位が生じにくいことに起因すると考えられる。また、「もんじゅ」仕様と FFTF 仕様ではピン径の違いにより明確な差異は認められないが、「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様と「もんじゅ」高度化仕様では太径バンドルである「もんじゅ」高度化仕様のピン-圧縮板接触時期が遅れる結果となった。これは被覆管の偏平化剛性の差異により理解できる。

上羽ら<sup>13)</sup>~<sup>14)</sup>は、ワイヤを巻き付けた被覆管 1 本を模擬した試験片の圧縮試験を実施し、その結果を踏まえて BDI 発生時の被覆管偏平化変形を線荷重近似モデルにより解析している。それによると、ワイヤピッチが長いほど同一荷重に対する偏平量が小さく、外径/肉厚比が大きいほど偏平化しやすい傾向があることが報告されている。つまり、ワイヤピッチが短く、外径/肉厚比が大きいピンほど偏平化剛性が低い性質を示すこととなる。

表 4.2 及び図 4.7 は各バンドルを構成するピンのワイヤピッチと外径/肉厚比を示したものである。ワイヤピッチが長い「もんじゅ」仕様と FFTF 仕様の外径肉厚比には明確な差異が認められ、FFTF 仕様の外径肉厚比が大きい。同様に、ワイヤピッチの短い「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様と「もんじゅ」高度化仕様との比較においても外径肉厚比に差があり、「もんじゅ」高度化仕様の方が大きい値を示す。さらに、「もんじゅ」仕様と「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様ではワイヤピッチの長さのみが異なる構造であるため、外径肉厚比は同じ値を示すが、FFTF 仕様と「もんじゅ」高度化仕様についてもほぼ同じ外径肉厚比を示している。このバンドルを構成するピンの仕様と線荷重近似モデルによる偏平化解析の結果<sup>13)</sup>~<sup>14)</sup>から、ピン仕様によるピン-圧縮板間距離の減少程度の差異は説明でき、長ワイヤピッチピンでは偏平量が小さく、外径と肉厚の比で決まる偏平化剛性の影響が現れなかったのに対し、短ワイヤピッチピンでは偏平化の寄与が大きいため、ピンの仕様に対応する偏平化剛性の差がピン-圧縮板間距離の減少程度の差として現れたものと考えられる。バルジングにおける BDI 量とピン-圧縮板間最小距離の関係についても、図 4.8 に示すように、平板で見られた傾向と同様であるが、ピンと圧縮板の接触が開始する BDI 量は平板に比べて高い値を示している。

## (2) ワイヤディスパージョン及びピンディスパージョンの発生挙動

図 4.9 は BDI 量の増加に伴うワイヤディスパージョンの発生状況を示したものである。若干のバラツキが認められるが、ワイヤディスパージョンの発生にはワイヤピッチ依存性があり、ワイヤピッチが 300mm 強の「もんじゅ」仕様及び FFTF 仕様では低 BDI 量から発生しているのに対し、ワイヤピッチが 200mm である「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様及び「もんじゅ」高度化仕様、さらにワイヤピッチが 150mm である「Phenix」仕様と、ワイヤピッチが短くなるにつれてワイヤディスパージョンが発生する BDI 量が増加しその発生程度が小さくなっている。これは、初期のワイヤ巻き付け時におけるワイヤ巻き付け力の差異で理解できる。図 4.10 は被覆管とワイヤの関係を模式的に示したものである。図中の軸方向の微小範囲  $dz$  におけるワイヤと被覆管の相互作用を検討すると、ワイヤ巻き付け力  $dFr$  は次式のように与えられる。

$$dFr = F \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2 \cdot \pi}{P} \cdot dz \quad (4.1)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{P} \right) \quad (4.2)$$

$$H = \frac{Dc + Dw}{2} \quad (4.3)$$

ここで、 $Dc$  は被覆管外径、 $Dw$  はワイヤ径である。

図 4.11 は上記式に各バンドルの仕様を代入し、単位長さ当たりの巻き付け力を計算した結果とワイヤピッチとの関係を示したものである。図 4.11 からワイヤ巻き付け力はワイヤピッチに強く依存し、ワイヤピッチが長いほどワイヤ巻き付け力が小さいことがわかる。ワイヤピッチが長いバンドルではワイヤの巻き付け力が小さいために BDI 荷重によるワイヤ位置の変化が容易に起こるため、ワイヤディスパージョンが発生しやすいものと考えられる。

図 4.12 は BDI 量の増加に伴うピンディスパージョンの発生状況を示したものである。それぞれのバンドルのピンディスパージョン発生時期はワイヤディスパージョンの発生時期とほぼ対応している。これはワイヤディスパージョンの発生によりワイヤを介した荷重の伝達が直線的に行われなため、各ピンの湾曲方向に異方性が生じることで、結果としてピンディスパージョンの発生に至ったものと考えられる。なお、ワイヤディスパージョンの発生時期がほぼ同じである「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様及び「もんじゅ」高度化仕様において、ピンディスパージョンの発生時期についてはほぼ同じであるが、その後の発生程度に明確な差異が認められ、「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様の方が顕著である。これは、両バンドルの偏平化剛性の差で理解できる。4.3.1(1)で述べたように、「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様では「もんじゅ」高度化仕様に比べて相対的に偏平化しにくいいため、ワイヤを介して伝達される BDI 荷重がピンの湾曲に消費されると考えられるが、一方の「もんじゅ」高度化仕様では相対的に偏平化しやすいため、ピンの変形に対する湾曲の寄与が小さいものと考えられる。異方的な BDI 荷重に起因したピンの湾曲は、特定横断面上でのピン列の乱れ、つまりピンディスパージョンの発生として現れることから、ピン変形に対する湾曲の寄与が大きい短ワイヤピッチ仕様においてピンディスパージョンの発生が顕著であったものと考えられる。

### (3) BDI 緩和挙動

全てのバンドルにおいてピン-圧縮板接触は  $1dw$  を超えて発生している。これは全てのバンドルで BDI の緩和が生じたことを意味するものである。上記考察を整理し、ワイヤピッチの長短に分けて BDI 緩和挙動を検討すると、長ワイヤピッチバンドルである現行「もんじゅ」仕様及び FFTF 仕様においては、バンドルを構成するピンの寸法仕様上、ワイヤピッチスパンの湾曲剛性が低いため、潜在的にピン-圧縮板接触が発生しやすい。しかし、この寸法仕様上では同一荷重に対する偏平化の寄与が小さく、さらに BDI 量の増加に伴いワイヤ位置の変化やピン配列の乱れが大きくなる。このため、長ワイヤピッチバンドルにおいては弾性変形範囲内の偏平化とピン及びワイヤディスパージョンの発生によりバンドル内で BDI を吸収し、ピン-圧縮板接触に関与する最外周ピンの湾曲が抑制されたものと考えられる。

一方、短ワイヤピッチバンドルである「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様、「もんじゅ」高度化仕様および「Phenix」仕様においては、バンドルを構成するピンの寸法仕様上、ワイヤピッチスパンの湾曲剛性が高く、潜在的にピン-圧縮板接触が生じにくい。また、この寸法仕様ではワイヤ位置の変化やピン列の乱れは少ないが、同一荷重に対する偏平化の発生寄与が大きい。このため、短ワイヤピッチバンドルにおける BDI 緩和機構は被覆管の偏平化が支配的であり、被覆管の外径と肉厚の比で決まる偏平化剛性の差がピン-圧縮板接触に関与する最外周ピンの湾曲量の差として現れるものと考えられる。

#### 4. 3. 2 バンドル変形挙動に及ぼす圧縮板形状の影響

現行「もんじゅ」仕様、「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様及び「もんじゅ」高度化仕様のいずれのバンドルにおいても、バルジングのピン-圧縮板接触時期は平板に比べて遅れる傾向を示している。さらに、その遅れ量はバンドル仕様によらずほぼ同程度であり、平板とバルジングの形状に対応した幾何学的な寸法差よりも  $0.1dw$  程度遅れている。過去の炉外圧縮試験の結果における定性的な解釈から、バルジングがその形状に対応した幾何学的寸法差以上に BDI を緩和する効果があるとの可能性が指摘されていた<sup>7)~8)</sup>。しかし、数値化処理結果を用いてバンドル変形状況を定量的に検討した結果、対角ピン間距離（バンドルサイズ）、ワイヤディスパージョン、ピンディスパージョンの発生時期とその程度等、バンドル全体としての変形挙動としては圧縮板形状による明確な差異は認められず、BDI 発生時にはほぼ同じふるまいを示す結果となった。上記類似性と 2. 3. 1 で示した圧縮試験機の圧縮精度（約  $\pm 0.1\text{mm}$  [ $\pm 0.1\text{mm}/1.32\text{mm} = \pm 0.08dw$ ]) を考慮すると、平板とバルジングでピン-圧縮板接触時期の差が生じる原因は、バルジング形状に対応する初期のピン-圧縮板間距離に対応しているものと考えられる。つまり、バルジングでは平板に対する幾何学的な寸法差分だけ BDI を緩和するものと考えられる。図 3.1~3.2 及び図 3.4~3.5 に示す最外周ピンと圧縮板との距離の分布が圧縮板形状とほぼ対応していることも、上記考察を裏付ける結果である。

#### 4. 4 ピン変形挙動

##### 4. 4. 1 曲がり変形挙動

図 3.23 及び 3.24 で示したように、各ピンの軸方向曲がりプロファイルには、ほぼワイヤピッチと対応した間隔で変曲点が認められる。この変曲点の発生軸位置は、両バンドルともピンの装荷位置で類似しており、No. 29 ピンでは D 面及び C 面にワイヤが向く位置とほぼ同じである。一方、No. 8 ピンではワイヤが F 面及び A 面を向く位置で変曲点が見られる。つまり、変曲点が認められる軸位置はワイヤからの荷重を直接受ける軸位置とほぼ一致している。このことは、この変曲が BDI 荷重により生じたことを示唆するものである。コーナーピンにおいて特に顕著な曲がりが発生していることも、二つの圧縮板から大きな BDI 荷重を受けたためであると考えられる。

表 3.7 及び 3.8 で示した最大曲がり方向を整理すると、各ピンの曲がり方向は、それぞれのピン装荷位置を基準にした時のバンドルの中心方向とほぼ一致していることがわかる。照射後試験により得られる最外周ピンの曲がり方向は、バンドルの外側へ向いていることが報告されている<sup>16)</sup> が、今回の炉外試験の結果はこれと逆の傾向である。このバンドル内側方向へピンが曲がる傾向は、バンドルを外側から圧縮する炉外圧縮試験特有のものなのか、BDI 発生時の残留曲がりの特徴なのかは現状では明確でない。今後、後述のオーバリティの発現状況とともに、ピンの曲がり挙動についても高燃焼度燃焼集合体の照射後試験で確認していく必要がある。

##### 4. 4. 2 軸方向におけるオーバリティの発現周期

図 3.25～64 で示したように「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様及び「もんじゅ」高度化仕様における圧縮試験後のピン寸法測定結果には、軸方向に対し規則的なオーバリティの発現が観察されており、その発現周期は、ノーマルプレーン及びピンチプレーンの軸方向間隔と対応する。特に、コーナーピンの対角ピン列方向に隣接するピンにおいては、ピンチプレーン位置におけるオーバリティが顕著である。このことは、ピンチプレーンにおける荷重伝達に対応してオーバリティが発現した結果であると考えられる。ここでは、模擬的な BDI 発生状況を想定し、被覆管の変形状況を検討する。

図 4.13 は軸方向全てにわたって BDI が発生している状態を模擬した時の被覆管の外径変化を模式的に示したものである。BDI による荷重の伝達は、ピンチプレーンにおいて行われ、この 60° (1/6 ワイヤピッチ) ごとに現れるピンチプレーン上において被覆管のオーバリティが発生する。しかし、ピンチプレーン以外の軸位置においては荷重伝達経路がないことから、被覆管のオーバリティは発生しない。その結果、特定方向における外径軸方向プロファイルは図 4.14 のようにワイヤピッチの 1/6 ごとに小さなピークを持ち、ワイヤピッチの 1/2 ごとに大きなピークを示すような周期で変化する。このような変形は、ダクト六面全ての方向から BDI 荷重を受けるようなピン（例えば、リング数が 2 である模擬バンドルに対して炉外圧縮試験を実施した際の中心ピン）において認められるものと考えられる。

一方、リング数が大きいバンドルにおけるピンチプレーンの対角ピン列方向では、荷重伝達の起点となる圧縮板から 2 番目に位置するピンのオーバリティが最も大きく、圧縮板から離れ

るにつれてその程度が減少するオーバリティ分布を示すことが知られている<sup>15)</sup>。この場合、荷重伝達の起点となっている圧縮板の反対側に位置するピンではほとんどオーバリティが認められない。図 3.41 及び 3.42 のように本試験のオーバリティの結果についても同様の傾向が認められている。つまり、これら二つの傾向から、リング数の多いバンドルにおいて BDI が発生すると、荷重伝達の起点となる圧縮板と対応するピンチプレーンではワイヤピッチの 1/6 ごとにオーバリティが認められ、それ以外の軸位置ではオーバリティの発現が認められないことを意味する。さらに、バンドル中心ピンでは、どの方向からも BDI 荷重が小さく、塑性変形を与えるほどの変形は認められないこととなる。本試験の結果はこれとも一致する。

炉外バンドル圧縮試験後の場合、ワイヤピッチの短い仕様のバンドルについては塑性歪分の変形がピン外径プロファイルとして現れるが、ワイヤピッチの長いバンドルでは、圧縮後のピン寸法測定結果からはピンの変形情報は得られない。しかし、BDI 発生時には弾性変形範囲内のオーバリティを生じさせる荷重分布は生じていると考えられる。実際に照射したバンドルで BDI 荷重が発生すると、その荷重は照射クリープにより緩和され、荷重分布に対応する変形をするものと考えられる。図 4.15 は米国 FFTF 炉で  $17 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$  まで照射された SUS316 鋼製の燃料ピンの外径プロファイル<sup>17)</sup> を示したものである。これを見ると、ほぼ 1/6 ワイヤピッチごとにオーバリティが発生していることがわかる。このプロファイルにおけるオーバリティ発現周期の規則性は圧縮試験により得られた結果と類似するものである。このような外径変化は、上記のように照射クリープで緩和された結果であることが予想されるため、必ずしも被覆管の健全性に影響を及ぼすものではないと考えられるが、高速炉燃料の高燃焼度化に伴う健全性評価には、詳細な弾塑性解析が必要である。しかし、PIE の外径軸方向プロファイルにワイヤピッチの 1/6 ごとにオーバリティが現れていれば、照射中において BDI 荷重が存在したことを意味するものであると考えられる。

## 5 まとめ

「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様及び「もんじゅ」高度化仕様バンドルについて X 線 CT 技術を利用した炉外圧縮試験を実施し、過去に取得している複数の仕様のバンドルにおける炉外圧縮試験結果とあわせて BDI 発生時におけるバンドル変形挙動を検討した。得られた結果は以下の通り。

- (1) 短ワイヤピッチバンドルでは長ワイヤピッチバンドルに比べて、より高い BDI 量でピン-圧縮板接触が発生する傾向を示した。これは短ワイヤピッチピンの湾曲剛性が高いことに起因すると考えられる。
- (2) 長ワイヤピッチバンドルでは外径肉厚比の違いによりピン-圧縮板接触時期に明確な差異は認められないが、短ワイヤピッチバンドルでは外径肉厚比の大きい仕様において、より高い BDI 量でピン-ダクト接触時期が発生する結果となった。これは長ワイヤピッチピンでは同一荷重に対する偏平量が小さいため、外径肉厚比で決まる偏平化剛性の影響が現れなかったのに対し、短ワイヤピッチピンでは偏平化の寄与が大きいため、ピン仕様に対応する偏平化剛性の差がピン-ダクト間距離の減少程度の差として現れたものと考えられる。
- (3) BDI 量の増加に伴うワイヤディスパージョン及びピンディスパージョンの発生状況を検討した結果、ワイヤピッチが長いほど発生が早期化し、その程度も大きくなることがわかった。
- (4) 長ワイヤピッチバンドルにおいては弾性変形範囲内の偏平化とピン及びワイヤディスパージョンの発生により BDI が緩和されることがわかった。一方、短ワイヤピッチバンドルにおける BDI 緩和機構は被覆管の偏平化が支配的であり、同一ワイヤピッチであるバンドルでは BDI の緩和程度の差はそれぞれのバンドルを構成する各ピンの偏平化剛性の差で決まるものと考えられる。
- (5) 燃料ピン被覆管の外径軸方向プロファイルにおけるワイヤピッチの 1/6 ごとの規則的なオーバリティの発現は、BDI 荷重の存在を示唆するものであると考えられる。



## 6 謝辞

本研究を遂行するにあたり、検査開発（株）の久保宏明氏、照沼謙一氏、三澤進氏及び原子力技術（株）の大谷昭氏には試験の実施、データ処理等において多大なご協力をいただきました。また、核燃料工学グループの浅賀健男グループリーダー及び上羽智之副主任研究員、並びに炉心燃料工学グループの水野朋保研究主幹には多大なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 7 参考文献

- 1) S.Kaplan and J.R.Punches,  
「The Response of various Wire-Wrap Assemblies to Bundle-to-Duct Interaction」,  
GEFR-0046, VC-768, February 1977, GE, Sunnyvale, CA
- 2) R. J. Jackson, S. Kaplan and A. Schwallie,  
「Experimental Fuel Subassembly Irradiation Experience in EBR-II」  
Int. Conf. on Fast Breeder Reactor Fuel Performance Monterey ,  
California , March 1979
- 3) 鶴飼重治, 瀬下一郎, 森田浩司, 野村茂雄, 鹿倉栄,  
「高速炉大型バンドルの炉外圧縮試験によるピン束変形挙動評価 (I)」,  
PNC ZN 9410 90-076, (1990)
- 4) 鶴飼重治, 瀬下一郎, 森田浩司, 鹿倉栄,  
「高速炉大型バンドルの炉外圧縮試験によるピン束変形挙動評価 (II)」,  
PNC ZN 9410 91-184, (1991)
- 5) 瀬下一郎, 鶴飼重治, 鹿倉栄,  
「高速炉大型集合体のピン束変形挙動評価」,  
動燃技報 79 (1991) , 75
- 6) 上羽智之, 水野朋保, 中江延男,  
「高速炉燃料集合体バンドル変形挙動の評価 (炉外バンドル圧縮試験の評価)」  
(社) 日本原子力学会 1995 秋の大会
- 7) 内海貴志, 田中康介, 岡崎哲治, 永峯 剛, 中村保雄, 浅賀健男,  
「炉外圧縮試験による高速炉燃料ピンバンドル変形挙動評価-原型炉燃料  
及び Phenix 炉燃料条件-」,  
PNC ZN9410 96-234, (1996)
- 8) 田中康介, 内海貴志, 岡崎哲治, 永峯 剛, 中村保雄, 浅賀健男,  
「炉外圧縮試験による高速炉燃料ピン束変形挙動評価」,  
(社) 日本原子力学会 1997 秋の大会
- 9) 田中康介, 山本祐二, 永峯 剛, 前田宏治,  
「炉外圧縮試験による高速炉燃料ピン束変形挙動評価-FFTF 炉燃料条件-」,  
JNC TN9400 2001-022, (2000)
- 10) 岡崎哲治, 永峯 剛, 中村保雄,  
「燃料ピン束変形測定用 X線 CT 装置の開発」,  
動燃技報 99 (1996) , 93
- 11) 上羽智之, 水野朋保,  
「高速炉燃料集合体バンドル断面 CT 画像数値処理システムの開発」,  
PNC TN9410 97-078, (1997)

- 1 2) 水野朋保, 上羽智之, 浅賀健男,  
「高速炉燃料集合体バンドル変形挙動の評価(Ⅱ) (炉外バンドル圧縮試験における  
模擬燃料ピン変位の評価)」,  
(社) 日本原子力学会 1998 春の年会
- 1 3) 上羽智之, 水野朋保,  
「BDI 発生時の被覆管偏平化変形解析モデルの検討」,  
PNC ZN9410 96-107, (1996)
- 1 4) 上羽智之, 水野朋保, 中江延男,  
「BDI 発生時における被覆管偏平化変形解析モデルの検討」,  
(社) 日本原子力学会 1996 秋の大会
- 1 5) 上羽智之, 水野朋保,  
「高速炉燃料ピン束変形解析コード” BAMBOO” によるバンドル変形解析」,  
PNC TN9410 97-067, (1997)
- 1 6) 鶴飼重治, 西野入賢治, 秋山 隆, 加納洋一, 瀬下一郎,  
「常陽」MK-II 炉心燃料の挙動評価 (中間報告) —第 5 分冊: 燃料集合体挙動—」,  
PNC ZN9410 91-237
- 1 7) B. J. Makenas,  
「Performance of Titanium Stabilized D9 Cladding and Ducts」,  
Proceedings of ANS International Conference on Reliable Fuels for Liquid Metal  
Reactors, 3-52, (1986)

表2.1 試験体のバンドル仕様

試験体	「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様		「もんじゅ」高度化仕様	
ピン本数(本)	169		127	
ワイヤピッチ(mm)	200		←	
ピン外径(mm) /肉厚 (mm)	6.50/0.47		7.70/0.50	
ピン全長(mm)	1296.2		←	
ワイヤ径(mm)	1.32		←	
圧縮板内面形状	平板	バルジング	平板	バルジング
バンドル圧縮部の軸方向範囲 [D.F.P.B.:mm] (バンドル圧縮部の軸方向長さ[mm])	485.1~1125.1 (640.0)	←	←	←

表3.1 圧縮板全長でのピン-圧縮板接触有無

バンドルタイプ	ワイヤピッチ (mm)	圧縮板		BDI量(dw)																		
		形状	面	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9		
短ワイヤピッチ仕様	200	平板	A	—	—	—	—	—	×	×	×	○	○	○	○	■	■	■	■	■	■	
			B	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	■	■	■	■	■	■	■
			C	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	○	■	■	■	■	■	■	■
			D	—	—	—	—	—	×	×	×	○	○	○	○	■	■	■	■	■	■	■
			E	—	—	—	—	—	×	×	×	○	○	○	○	■	■	■	■	■	■	■
			F	—	—	—	—	—	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		バルジング	A	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	■	■	■	■
			B	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	■	■	■	■
			C	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
			D	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			E	—	—	—	—	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			F	—	—	—	—	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
高度化仕様	200	平板	A	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	
			B	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	
			C	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
			D	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
			E	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
			F	—	—	—	—	—	—	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		バルジング	A	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
			B	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
			C	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
			D	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
			E	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			F	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○

○:接触有り    ×:接触なし    —:内面観察未実施    ■:圧縮試験未実施

表3.2 評価面でのピン-圧縮板接触有無

バンドルタイプ	ワイヤピッチ (mm)	圧縮板		BDI量(dw)																	
		形状	面	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	
短ワイヤピッチ仕様	200	平板	A	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	○	○	■	■	■	■	■	■
			F	—	—	—	—	—	×	×	×	○	○	○	○	■	■	■	■	■	■
		バルジング	A	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	○	○	■	■	■	■
			F	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	○	○	■	■	■	■
高度化仕様	200	平板	A	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
			F	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
		バルジング	A	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
			F	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○

○:接触有り    ×:接触なし    —:内面観察未実施    ■:圧縮試験未実施

表3.3 ピン-圧縮板接触状況 (短ワイヤピッチ平板)

圧縮量	圧縮板No	外周ピンNo	A面								F面								E面									
			1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	15	16	17	18	19	20	21	22		
1.9dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.0dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.1dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.2dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.3dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.4dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										

圧縮量	圧縮板No	外周ピンNo	D面								G面								B面									
			22	23	24	25	26	27	28	29	29	30	31	32	33	34	35	36	36	37	38	39	40	41	42	1		
2.1dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.2dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.3dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										
2.4dw		上端																										
		下端																										
		接触長さ																										
		接触長さ																										

\*上端、下端の数値は、圧縮板接触痕から算出したピン下端からの距離を示す

表 3.4 ピン-圧縮板接触状況(短ワイヤピッチバルジング)

圧縮量	圧縮板No. 外周ピンNo.	A面								F面								E面										
		1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	15	16	17	18	19	20	21	22			
2.2dw	上端															1007	994									945		
	下端															993	986									928		
	接触痕長さ															14	8									17		
	上端																											
	下端																											
2.3dw	上端																1003									948		
	下端															991										924		
	接触痕長さ															12										24		
	上端															603	596											
	下端															594	581											
2.4dw	上端																1008	1011								971	945	
	下端															986	1004									957	923	
	接触痕長さ															22	7									14	22	
	上端															609	597										736	
	下端															591	577										729	
2.5dw	上端																1007	1015								973	953	
	下端															984	1001									956	908	
	接触痕長さ															23	14									17	45	
	上端			864												839	818											
	下端			853												820	805											
2.6dw	上端																1010	1019	1011	1008	1013	1014	994	1025	989	948	980	946
	下端															979	999	999	992	992	983	988	997	948		939	949	914
	接触痕長さ															31	20	12	16	21	31	6	28	21		9	31	32
	上端			868												838	809											
	下端			853												819	798											

圧縮量	圧縮板No. 外周ピンNo.	D面								C面								B面										
		22	23	24	25	26	27	28	29	29	30	31	32	33	34	35	36	36	37	38	39	40	41	42	1			
2.2dw	上端																										829	
	下端																										820	
	接触痕長さ																										9	
	上端																										634	
	下端																										624	
2.3dw	上端																										832	
	下端																										816	
	接触痕長さ																										16	
	上端																										635	
	下端																										620	
2.4dw	上端																										830	
	下端																										820	
	接触痕長さ																										10	
	上端																										663	631
	下端																										658	620
2.5dw	上端																										826	
	下端																										814	
	接触痕長さ																										12	
	上端			938																							670	630
	下端			919																							653	615
2.6dw	上端																										870	826
	下端																										858	810
	接触痕長さ																										14	16
	上端			739																							674	628
	下端			727																							649	613

\*上端、下端の数値は、圧縮板接触痕から算出したピン下端からの距離を示す





表3.6 ピン-圧縮板接触状況 (高度化バルジング)

圧縮量	圧縮板No. 外周ピンNo.	A面							F面						E面							
		1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13	13	14	15	16	17	18	19
2.3dw	上端																					945
	下端																					930
	接触痕長さ																					15
2.4dw	上端																					945
	下端																					929
	接触痕長さ																					16
2.5dw	上端																					950
	下端									1005				1016	994							929
	接触痕長さ									983				996	982							21
	上端														607	594						745
	下端														590	589						727
	接触痕長さ														17	5						18
2.6dw	上端																					979
	下端									1007				1019	994							950
	接触痕長さ									983				998	983							925
	上端														814							8
	下端														797							25
	接触痕長さ														17							
2.7dw	上端																					749
	下端									594				609	594							724
	接触痕長さ									584				589	588							25
	上端									10				20	6							977
	下端									1006	998			1020	994							953
	接触痕長さ									981	991			993	984							926
2.8dw	上端																					977
	下端																					953
	接触痕長さ									25	7			27	10							926
	上端														815							11
	下端														795							27
	接触痕長さ														20							
2.9dw	上端																					747
	下端									596				608	594							723
	接触痕長さ									580				587	587							24
	上端														21	7						986
	下端									1010	1008			1003	1025	994						951
	接触痕長さ									975	978			983	992	980						960
2.8dw	上端																					924
	下端																					924
	接触痕長さ									35	30			20	33	14						26
	上端																					27
	下端									827					797							
	接触痕長さ									817					778							
2.9dw	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ									10					19							
	上端									629					618							
	下端									620					618							
	接触痕長さ									9					18							
2.9dw	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					
	上端									832					833	815						
	下端									811					815	804						
	接触痕長さ									21					18	11						
2.8dw	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					
	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					
2.9dw	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					
	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					

圧縮量	圧縮板No. 外周ピンNo.	D面							C面						B面							
		19	20	21	22	23	24	25	25	26	27	28	29	30	31	31	32	33	34	35	36	37
2.7dw	上端															884						
	下端															868						
	接触痕長さ															16						
2.8dw	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					
	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					
2.9dw	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					
	上端																					
	下端																					
	接触痕長さ																					

\*上端、下端の数値は、圧縮板接触痕から算出したピン下端からの距離を示す

表3.7 圧縮後のピン最大曲がり量 (短ワイヤピッチ仕様)

ピン番号	最大曲がり量(mm)		最大曲がり軸位置(mm)		最大曲がり方向(°)	
	平板	バルジング	平板	バルジング	平板	バルジング
No.8	5.4	4.8	687.4	692.4	345.7	350.2
No.106	3.7	1.7	706.8	715.2	318.7	0.4
No.91	0.5	0.6	693.6	713.6	320.0	38.9
No.72	0.2	0.2	477.0	770.5	224.5	294.1
No.49	0.4	0.4	587.4	631.9	294.9	224.2
No.36	5.3	3.4	756.2	763.5	239.9	244.3
No.35	3.2	1.8	793.7	803.6	202.9	225.1
No.153	0.3	0.5	693.1	799.4	359.0	164.6
No.132	0.4	0.2	522.3	457.5	13.7	36.3
No.34	—	2.1	—	775.3	—	201.6
No.33	3.5	1.3	789.1	798.1	209.3	222.2
No.134	0.2	0.3	718.0	608.8	106.9	159.7
No.125	0.5	0.4	618.9	607.3	221.4	86.7
No.117	0.3	0.2	322.2	515.8	79.3	305.5
No.32	—	1.2	—	788.3	—	216.6
No.126	0.3	0.2	343.5	93.2	34.0	327.2
No.118	0.4	0.5	623.1	429.8	116.1	2.6
No.31	3.0	1.9	793.6	778.1	224.7	210.3
No.119	1.1	2.0	814.7	638.1	188.7	189.5
No.30	3.2	3.0	798.4	788.8	211.5	217.0
No.29	5.7	7.0	646.2	782.5	169.8	181.9

注) —:未測定

表3.8 圧縮後のピン最大曲がり量 (高度化仕様)

ピン番号	最大曲がり量(mm)		最大曲がり軸位置(mm)		最大曲がり方向(°)	
	平板	バルジング	平板	バルジング	平板	バルジング
No.7	6.7	7.9	693.1	696.7	353.2	0.6
No.82	1.0	2.1	716.1	711.3	10.5	357.3
No.61	0.5	0.2	552.0	748.3	222.8	58.5
No.42	0.8	0.5	662.7	566.0	182.7	194.1
No.31	5.4	8.1	755.7	758.3	243.7	239.0
No.30	3.8	6.6	781.5	789.2	202.5	208.3
No.114	0.6	0.8	607.0	637.1	195.7	275.3
No.105	0.5	0.3	586.3	367.6	233.8	38.6
No.29	4.8	4.2	794.0	760.4	194.6	201.1
No.106	0.6	0.2	630.2	75.5	161.2	10.9
No.98	0.7	0.3	708.7	638.1	196.1	244.6
No.91	0.5	0.4	554.8	793.9	147.3	173.6
No.28	5.1	2.4	776.4	783.5	197.8	198.6
No.99	0.4	0.6	816.6	562.1	187.0	166.2
No.92	0.6	0.9	577.7	579.3	136.7	179.9
No.27	4.8	3.7	786.2	781.0	214.3	201.0
No.93	1.2	3.0	808.7	811.3	178.5	194.7
No.26	6.4	4.0	779.9	779.6	199.3	205.4
No.25	4.5	6.0	636.1	776.4	177.8	179.2

表4.1 炉外圧縮試験を実施したバンドル仕様

バンドルタイプ	ダクト形状	ピン本数	リング数	ワイヤピッチ (mm)	ピン外径 (mm)	肉厚 (mm)	ワイヤ径 (mm)
「もんじゅ」	平板	169	8	307	6.5	0.47	1.32
	バルジング	169	8	307	6.5	0.47	1.32
Phenix	バルジング	217	9	150	6.55	0.45	1.15
FFTF	平板	217	9	305	5.84	0.38	1.32
「もんじゅ」短ワイヤピッチ	平板	169	8	200	6.5	0.47	1.32
	バルジング	169	8	200	6.5	0.47	1.32
「もんじゅ」高度化	平板	127	6	200	7.7	0.5	1.32
	バルジング	127	6	200	7.7	0.5	1.32

表4.2 炉外圧縮試験を実施したバンドルを構成するピンのワイヤピッチ及び外径肉厚比

バンドルタイプ	ワイヤピッチ (mm)	ピン外径 (mm)	肉厚 (mm)	外径/肉厚
「もんじゅ」	307	6.5	0.47	13.83
Phenix	150	6.55	0.45	14.56
FFTF	305	5.84	0.38	15.37
「もんじゅ」短ワイヤピッチ	200	6.5	0.47	13.83
「もんじゅ」高度化	200	7.7	0.5	15.40

**短ワイヤピッチ:平板**

**短ワイヤピッチ:バルジング**

**高度化:平板**

**高度化:バルジング**

ワイヤピッチ測定

ワイヤピッチ測定

ワイヤピッチ測定

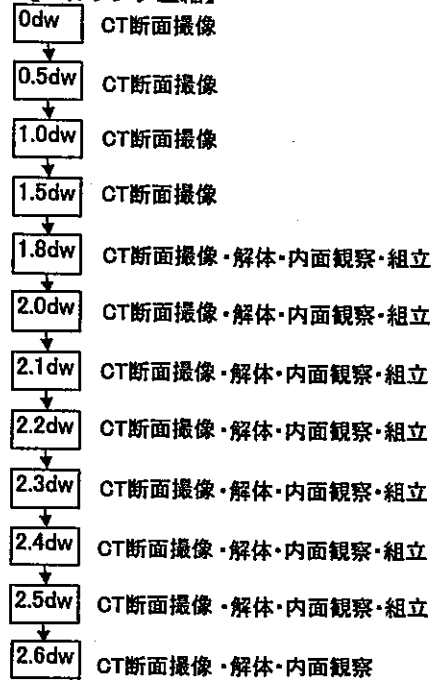
ワイヤピッチ測定

【平板圧縮】

【バルジング圧縮】

【平板圧縮】

【バルジング圧縮】



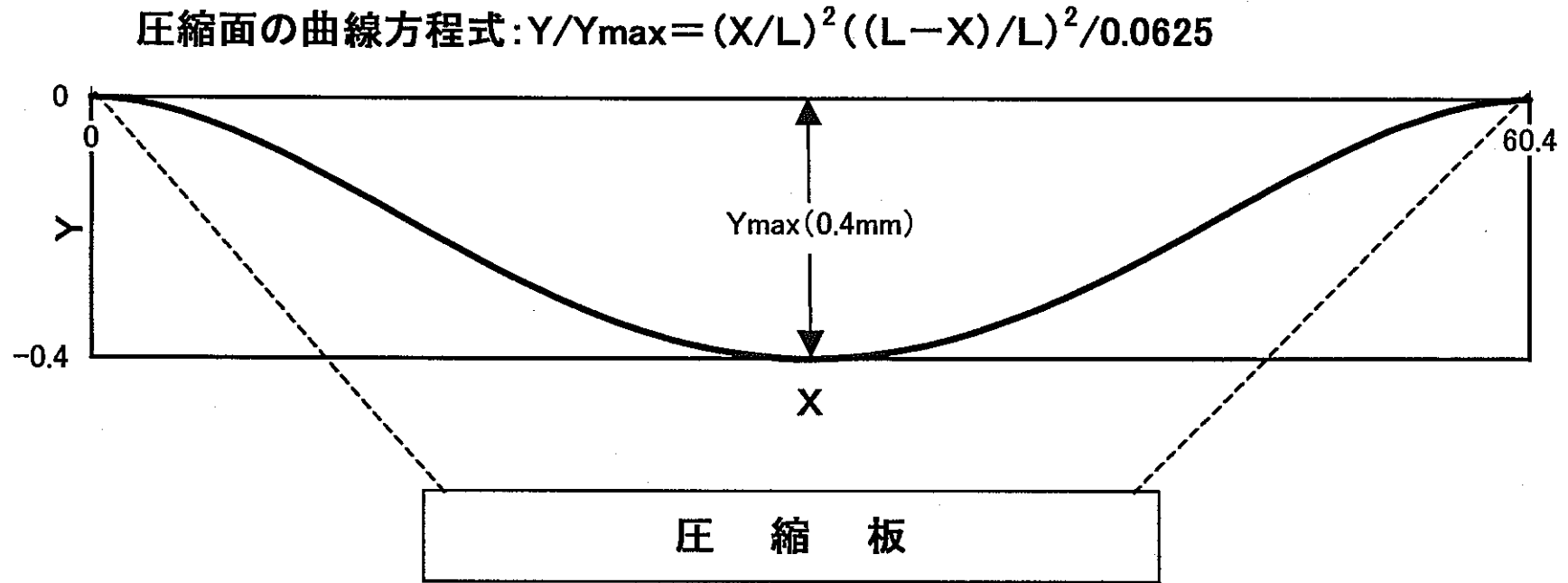
ワイヤピッチ・外径・曲がり測定

ワイヤピッチ・外径・曲がり測定

ワイヤピッチ・外径・曲がり測定

ワイヤピッチ・外径・曲がり測定

図2.1 試験フロー



- Y : 内面くぼみ量(mm)
- $Y_{\max}$  : 最大内面くぼみ量(mm)
- X : 着目面左端からの距離(mm)
- L : 着目面横方向スパン長(mm)

図2.2 バルジング形状と圧縮面曲線方程式

ワイヤ方向	ピン下端からの距離(mm)
	(上部非圧縮領域)
	1125.1(圧縮板上端)
F面	1095.3
E-Fコーナー	1078.6
E面	1062.0
D-Eコーナー	1045.3
D面	1028.7
C-Dコーナー	1012.0
C面	995.3
B-Cコーナー	978.7
B面	962.0
A-Bコーナー	945.3
A面	928.7
F-Aコーナー	912.0
F面	895.3
E-Fコーナー	878.7
E面	862.0
D-Eコーナー	845.3
D面	828.7
C-Dコーナー	812.0
C面	795.3
B-Cコーナー	778.6
B面	761.9
A-Bコーナー	745.3
A面	728.6
F-Aコーナー	711.9
F面	695.3
E-Fコーナー	678.6
E面	661.9
D-Eコーナー	645.3
D面	628.6
C-Dコーナー	612.0
C面	595.3
B-Cコーナー	578.6
B面	562.0
A-Bコーナー	545.3
A面	528.6
F-Aコーナー	512.0
F面	495.3
	485.1(圧縮板下端)
	(下部非圧縮領域)


 :CT撮像位置

図2.3 X線CT撮像位置とワイヤ方向の関係

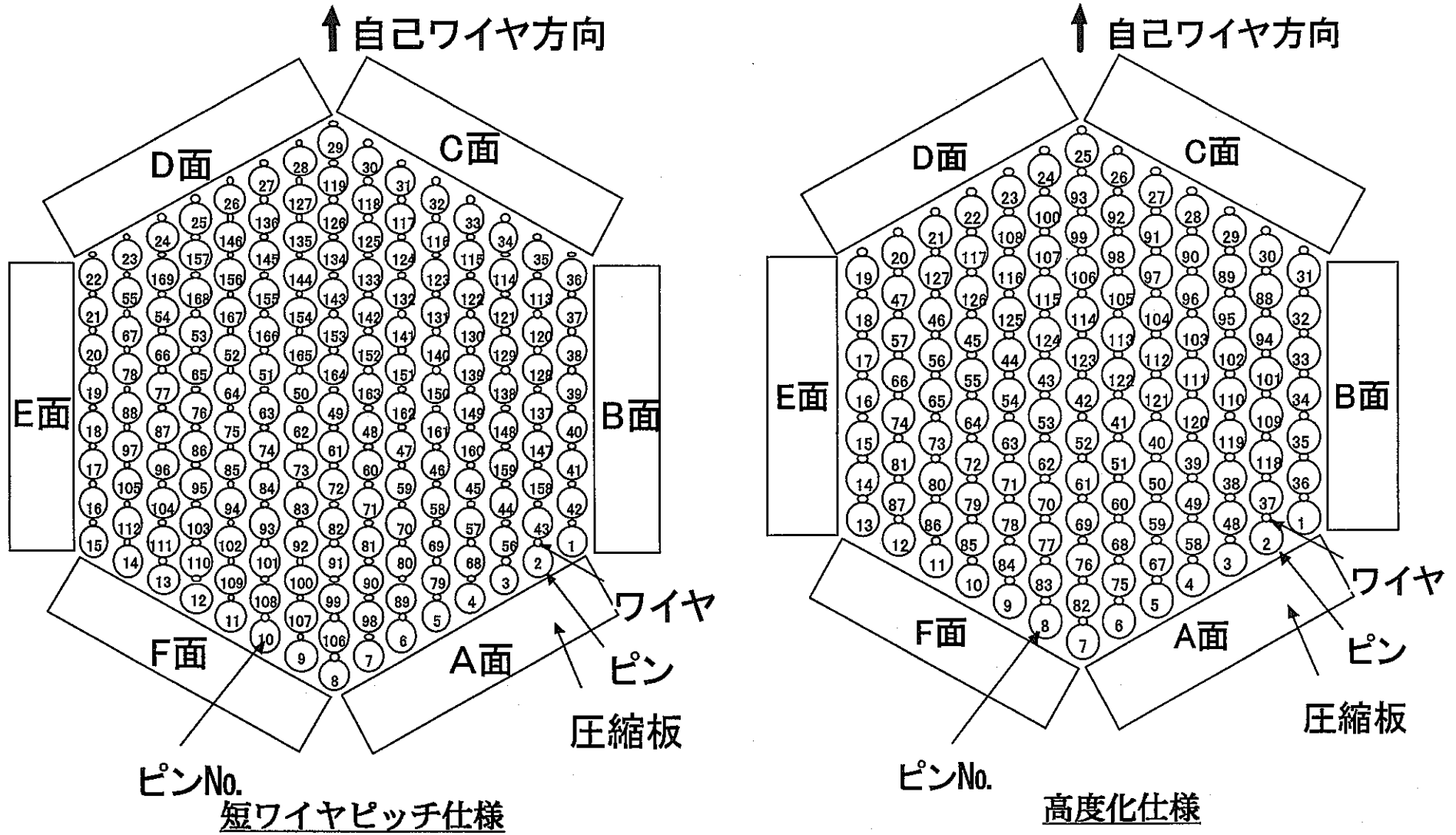


図2.4 CT画像上でのピン，圧縮板の関係



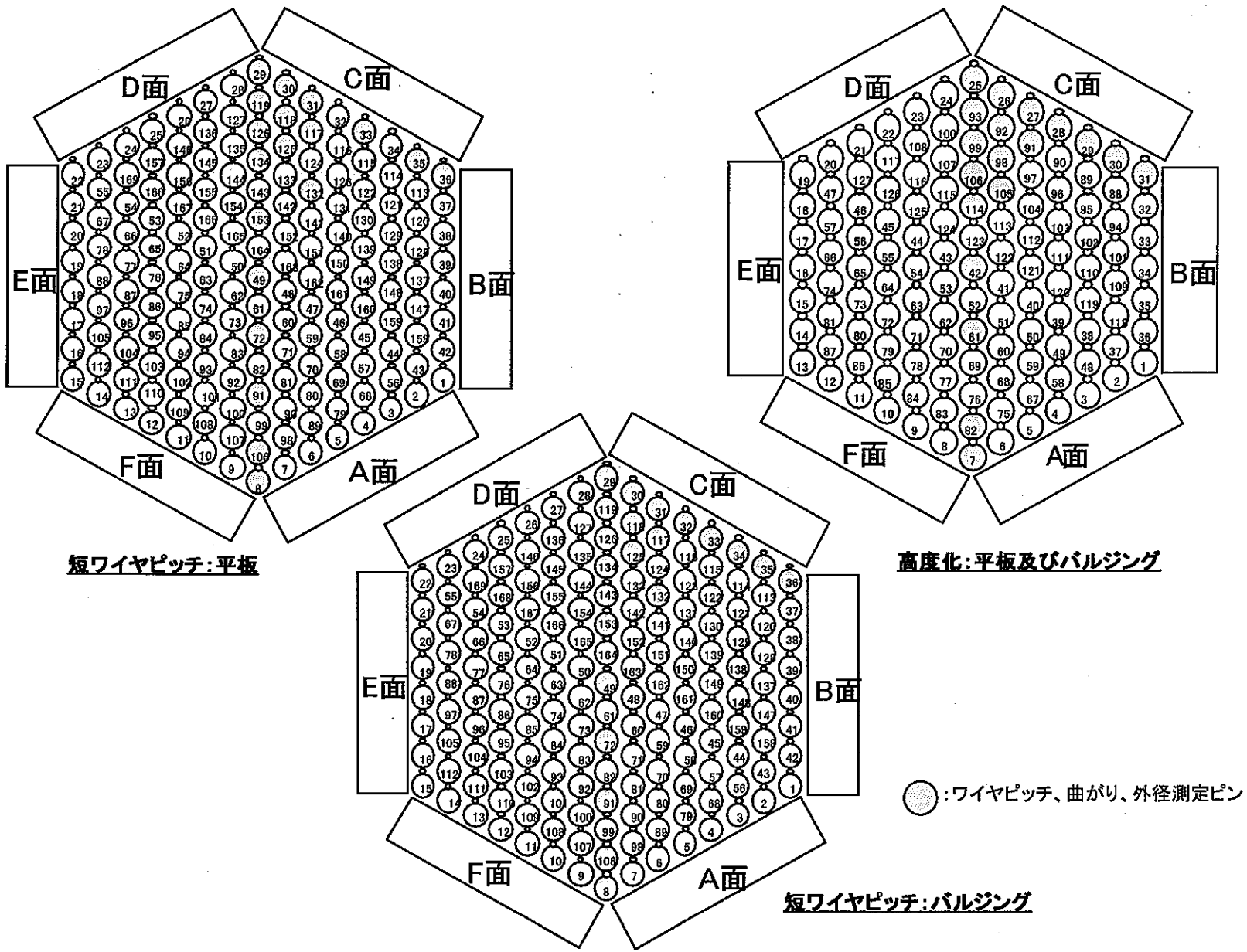


図2.5 寸法測定対象ピン

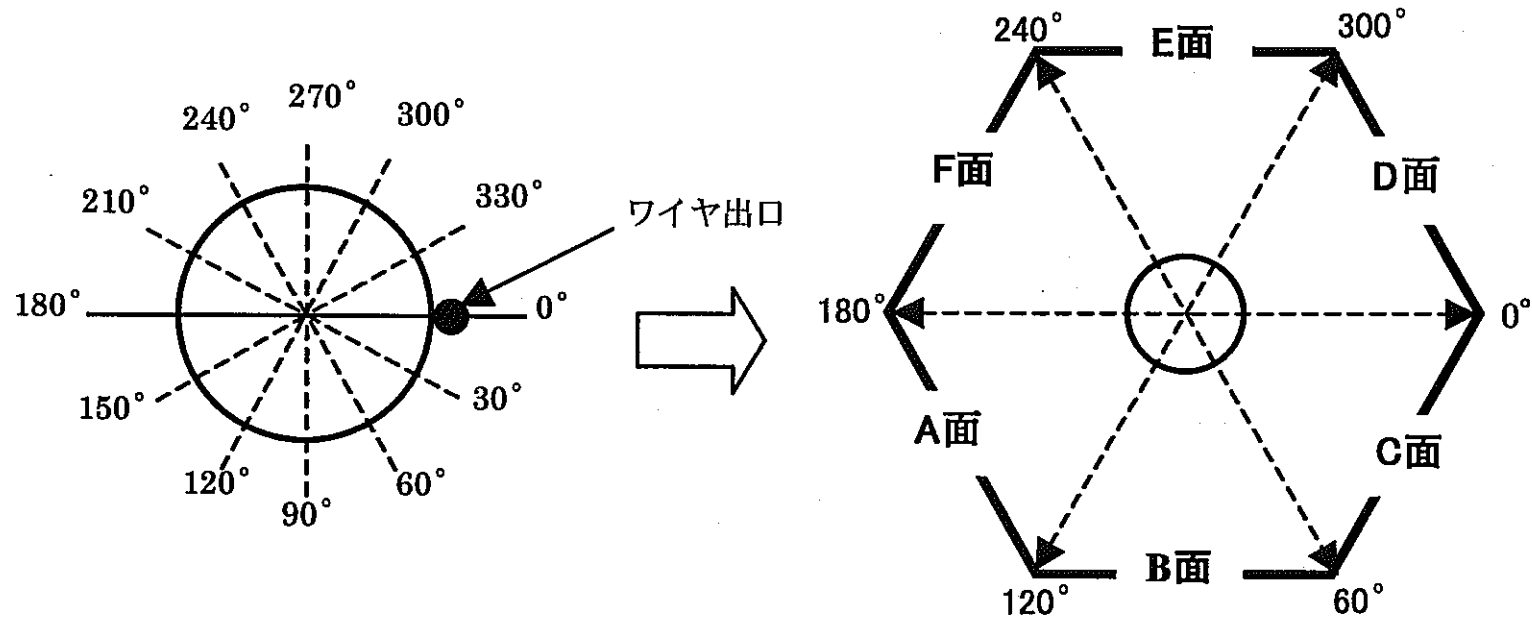


図2.6 模擬ピンの角度定義及び各圧縮面との関係 (Top view)

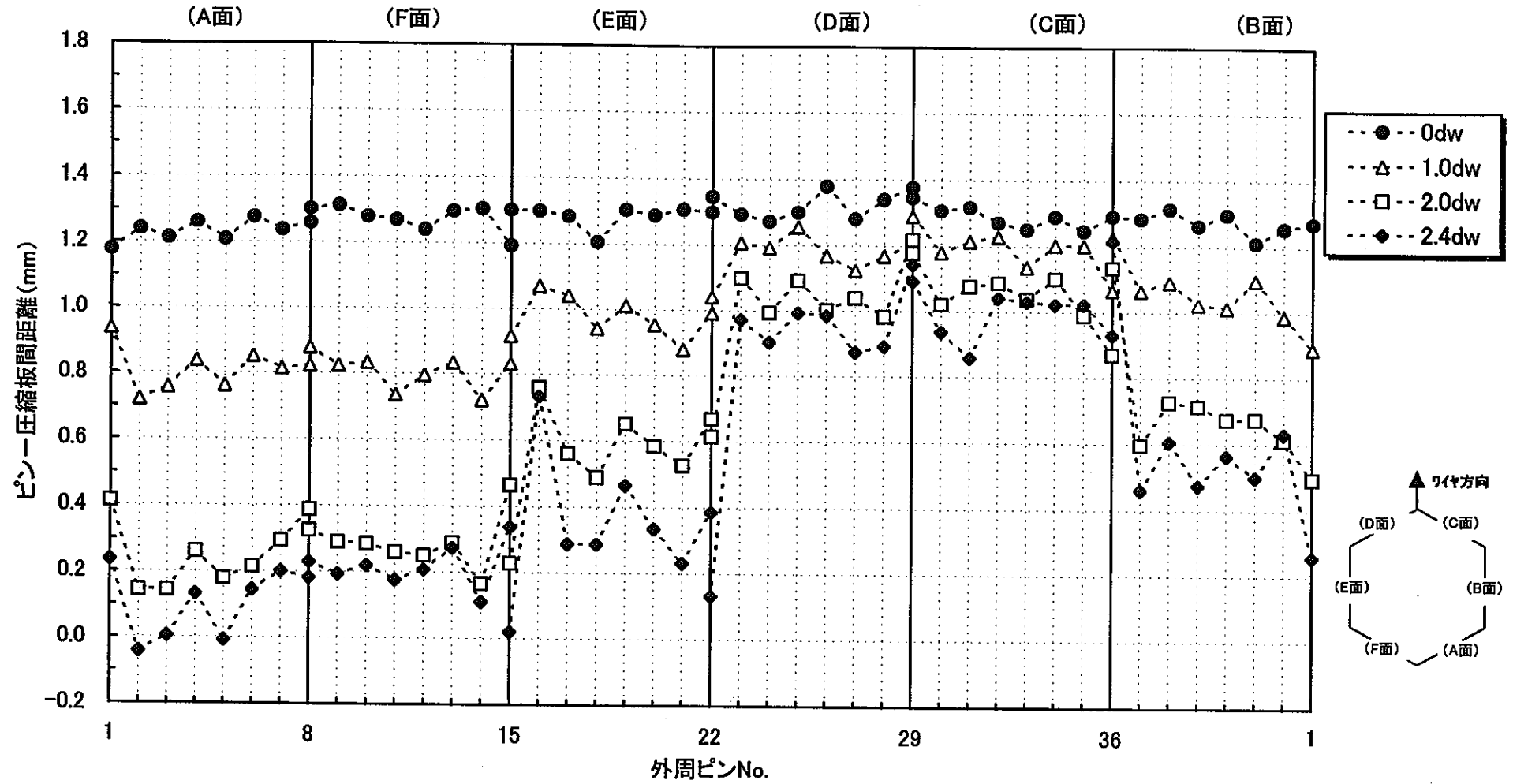


図3.1 ピン-圧縮板間距離の分布 (短ワイヤピッチ平板: CDコナ-ワイヤ位置)

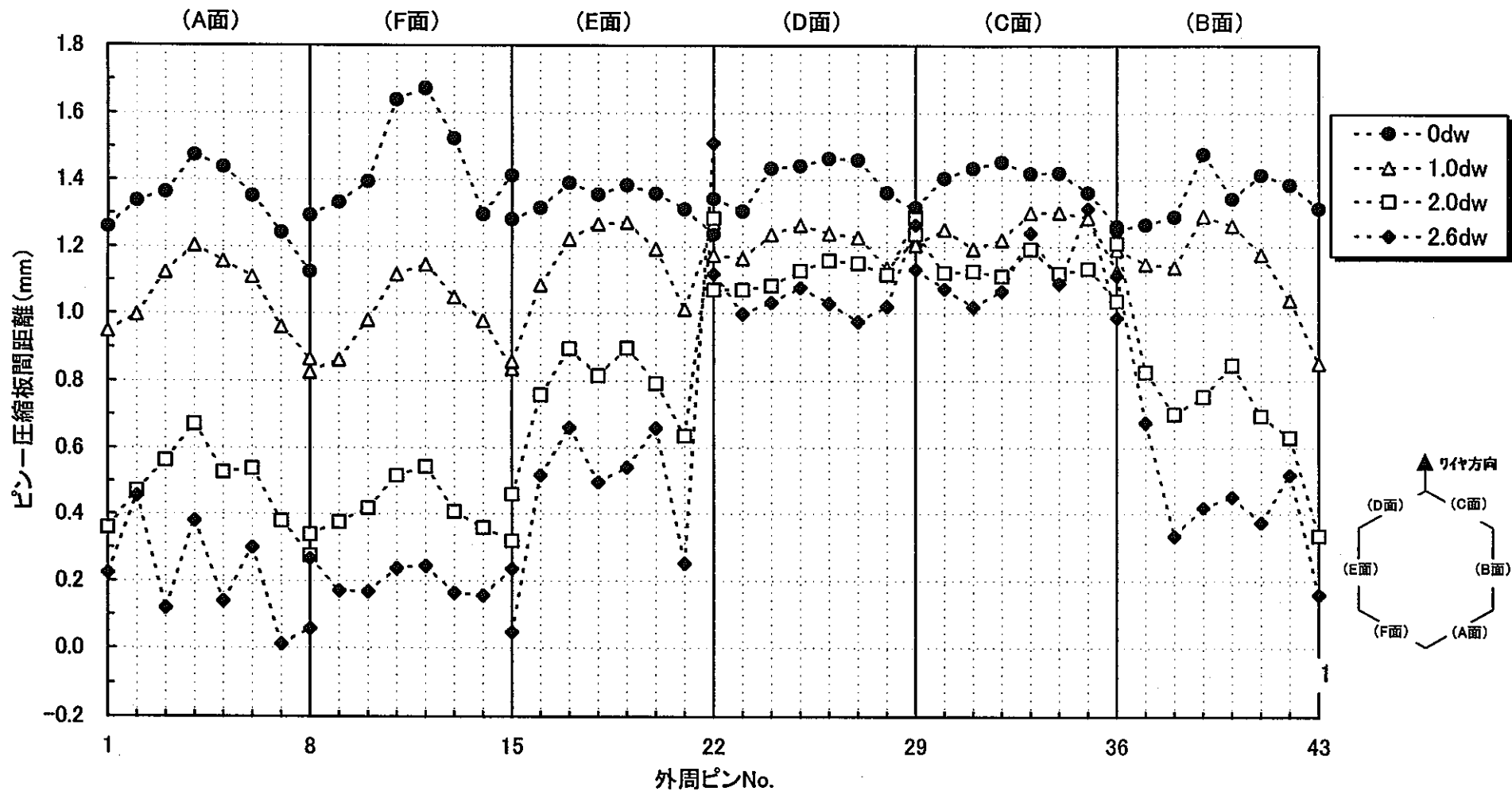


図3.2 ピン-圧縮板間距離の分布 (短ワイヤピッチバルジング：CDコナワイヤ位置)

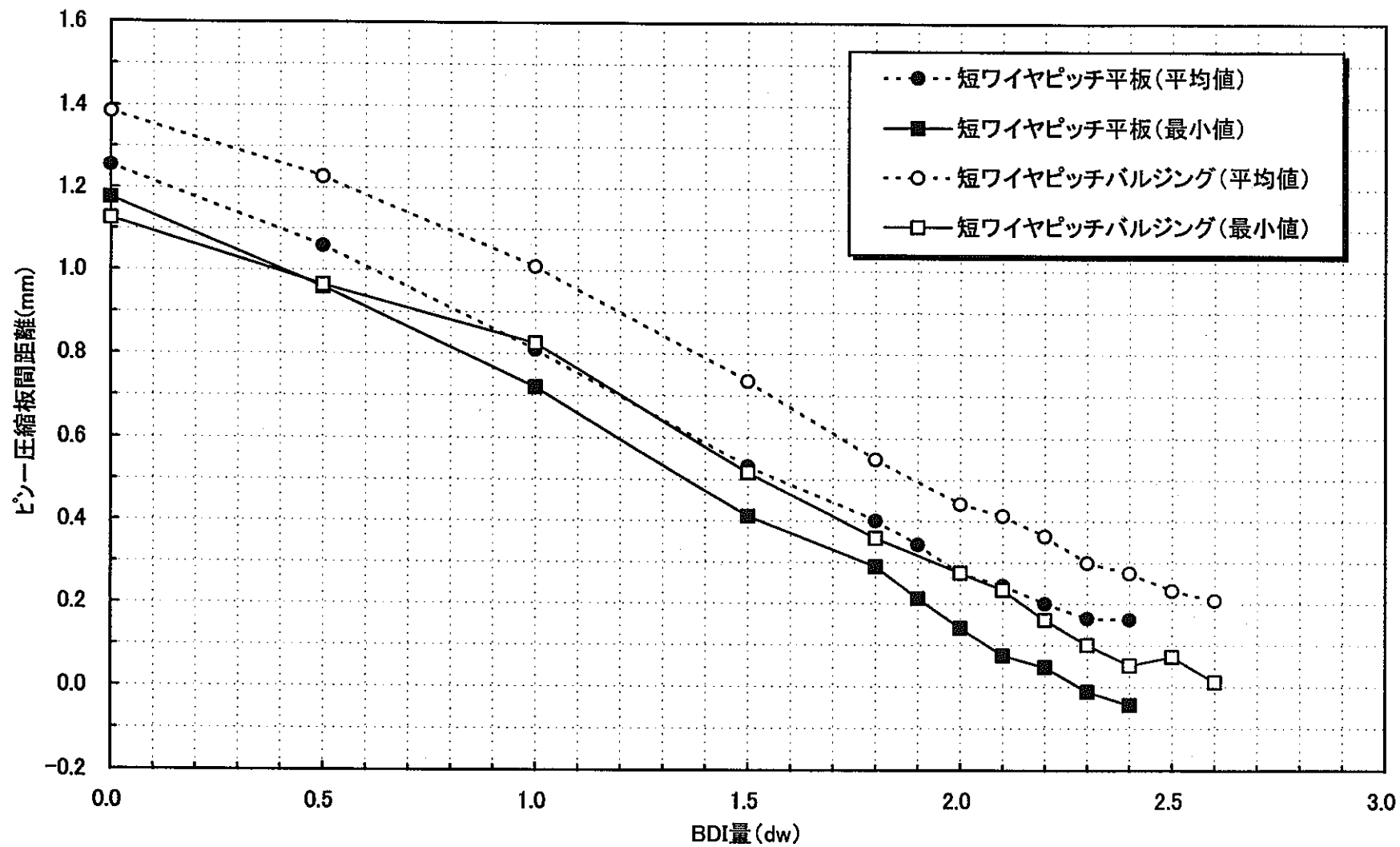


図3.3 BDIの増加に伴うピン-圧縮板間距離の変化 (短ワイヤピッチ: CDコナーワイヤ位置)

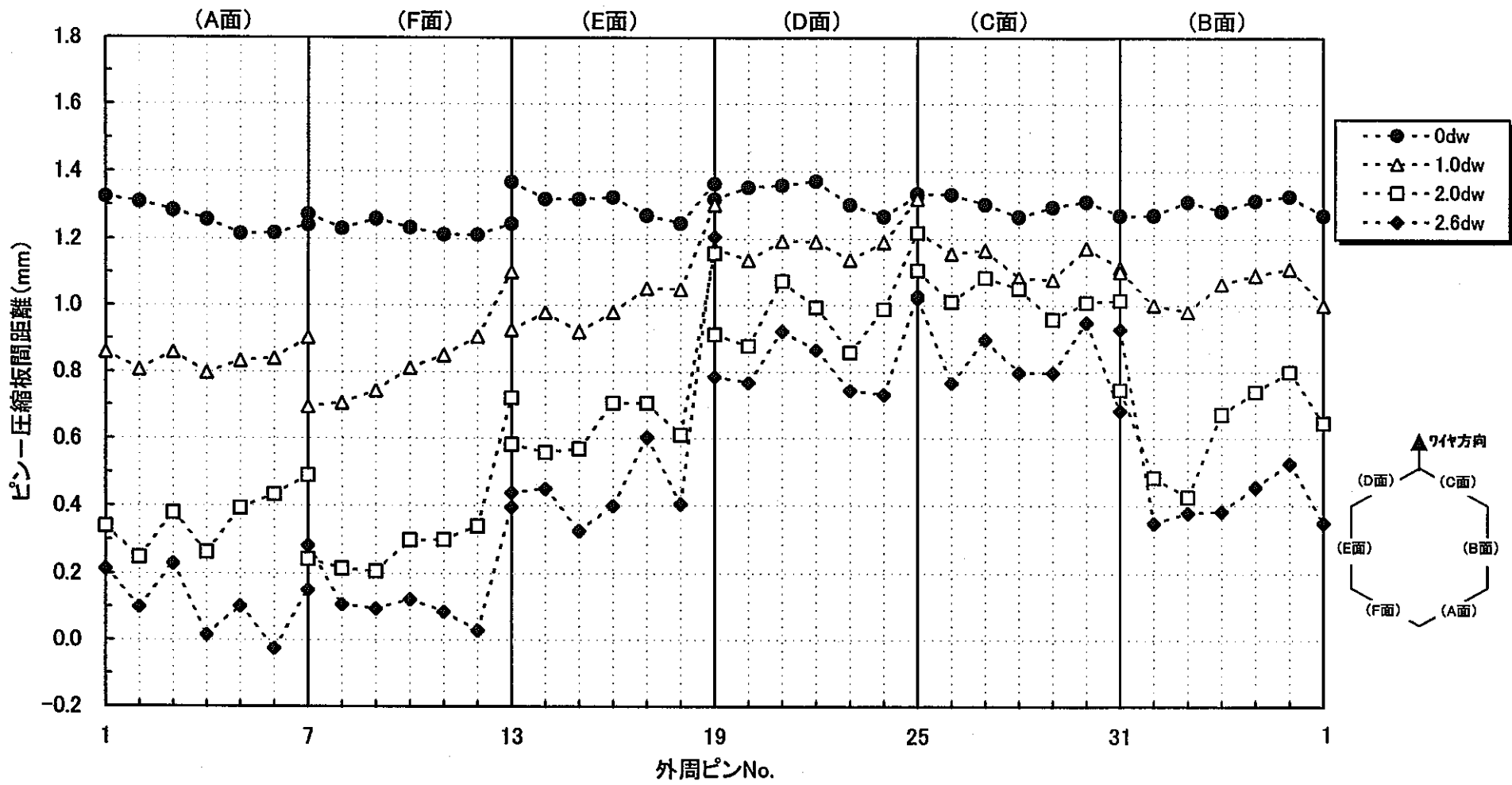


図3.4 ピン-圧縮板間距離の分布 (高度化平板: CDJ-ナワイヤ位置)

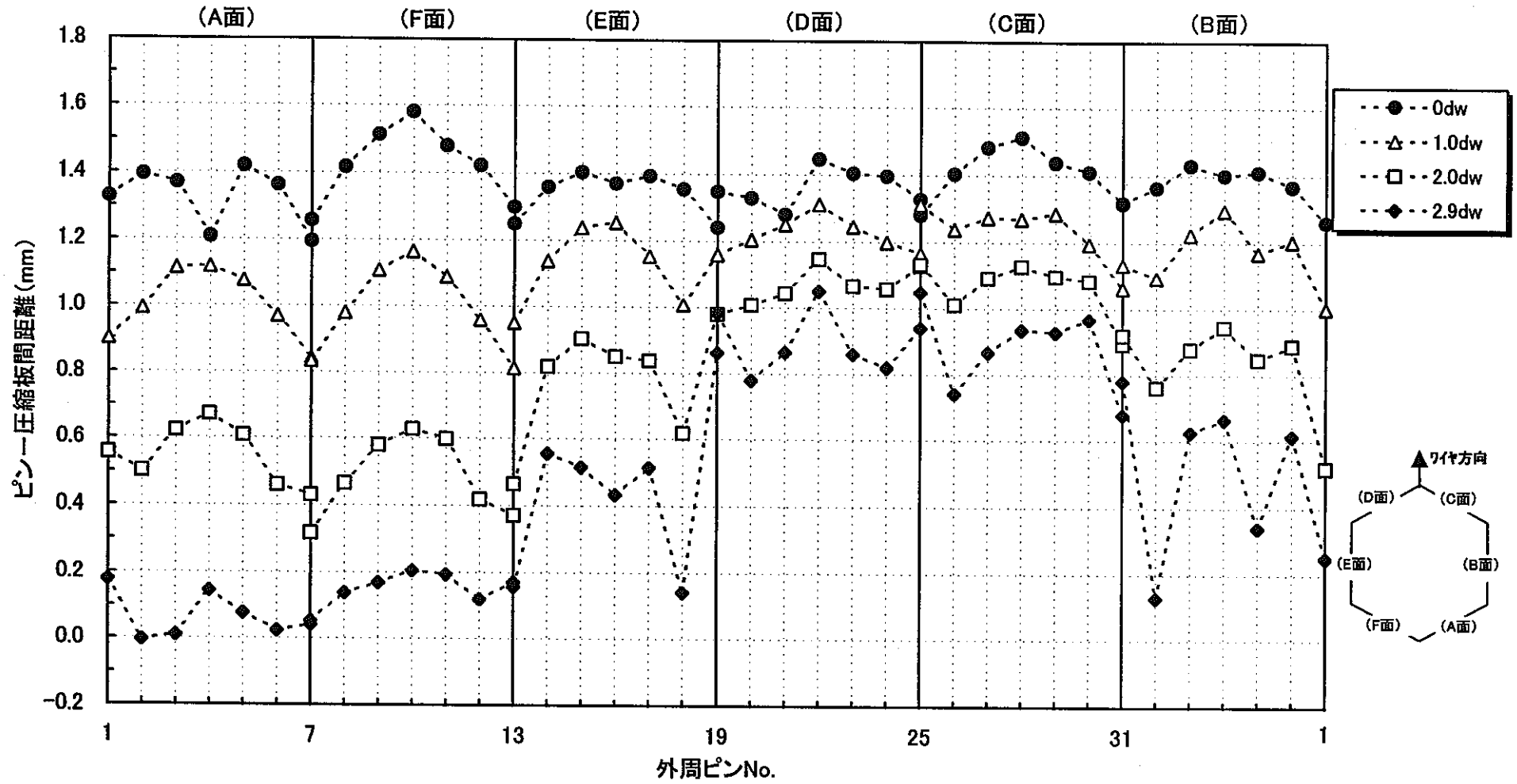


図3.5 ピン-圧縮板間距離の分布 (高度化バルジング : CDコナーワイヤ位置)

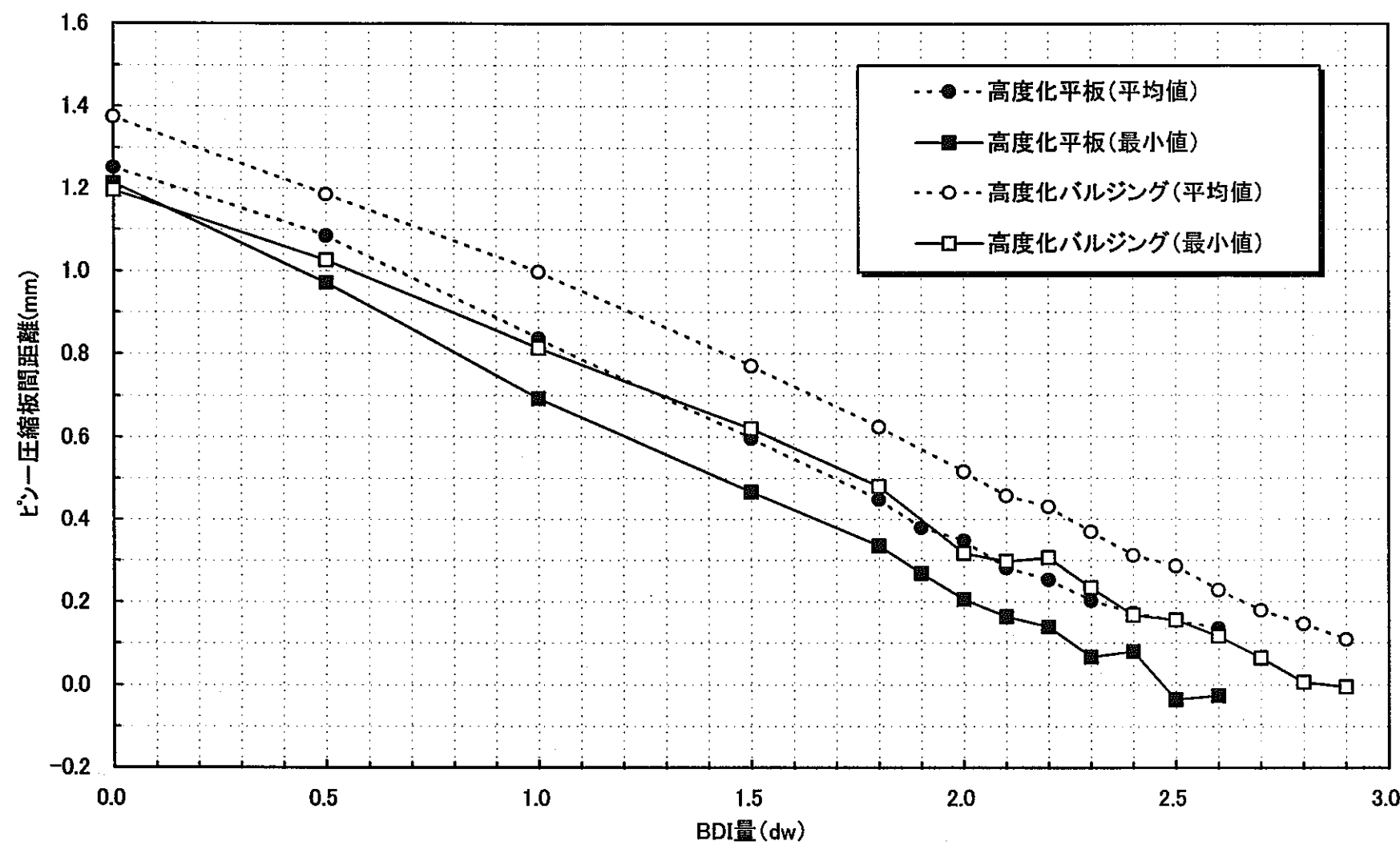


図3.6 BDIの増加に伴うピン-圧縮板間距離の変化 (高度化: CDコーナワイヤ位置)



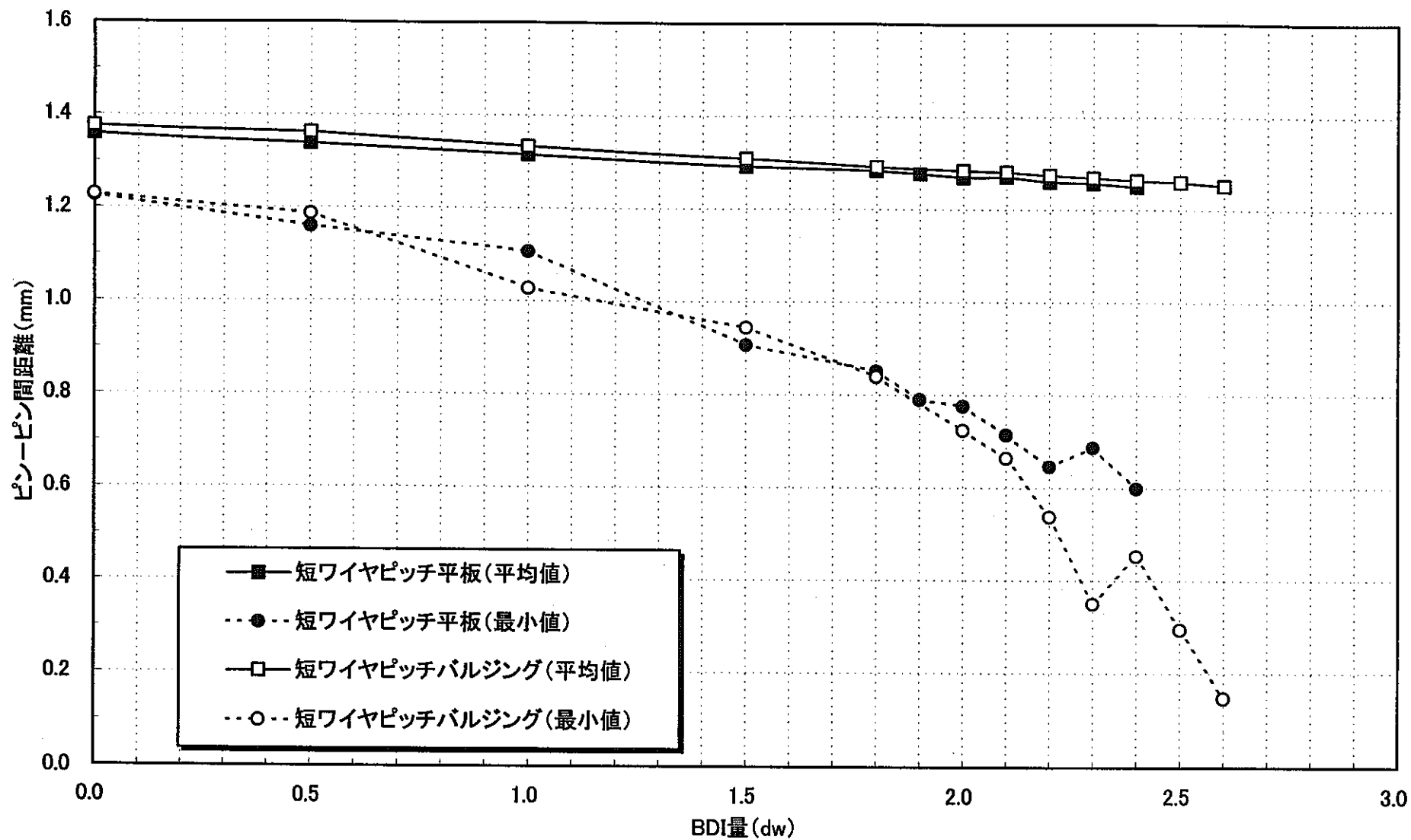


図3.7 BDI量の増加に伴うピン-ピン間距離の変化 (短ワイヤピッチ仕様: CD1-ナワイ位置)

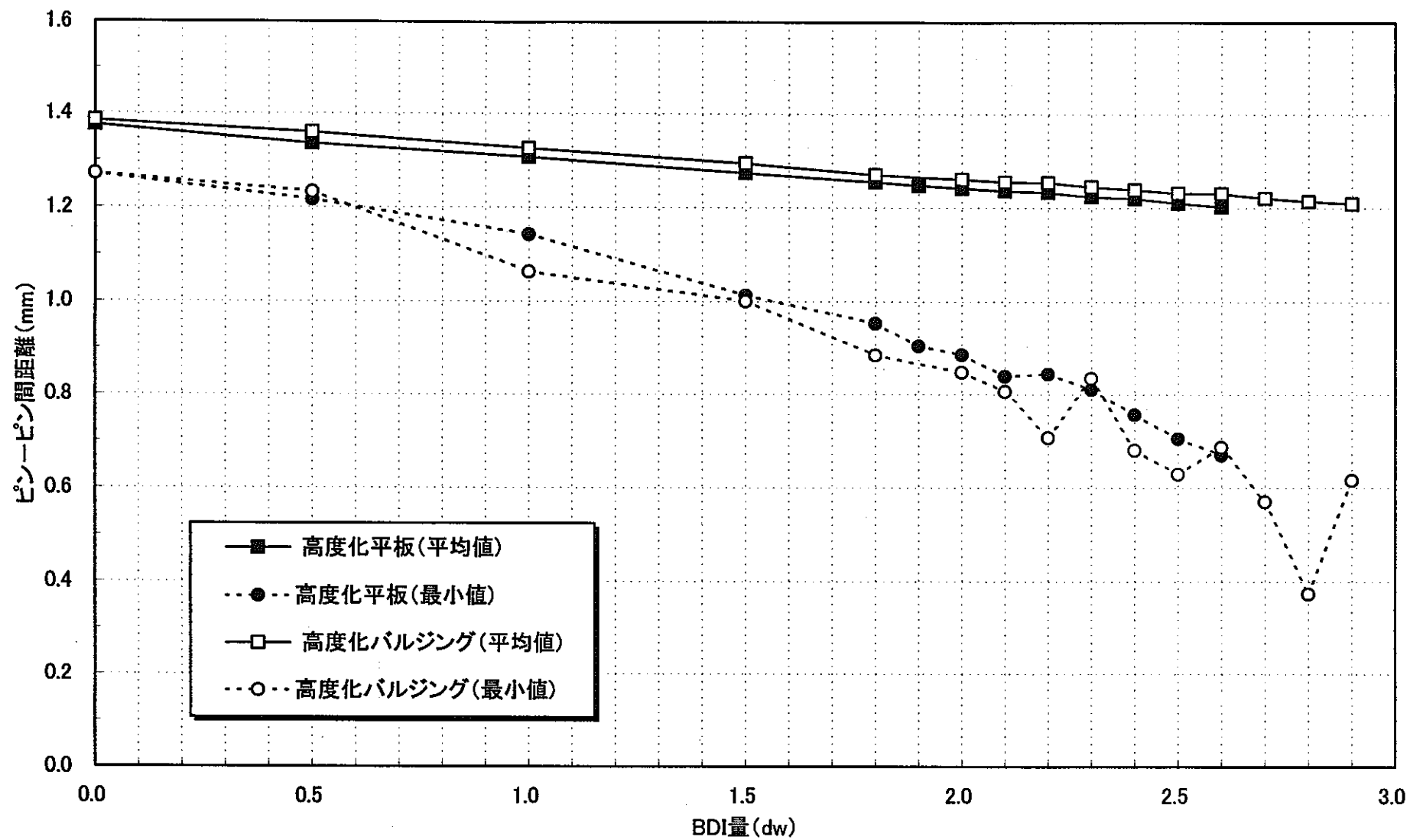


図3.8 BDI量の増加に伴うピン-ピン間距離の変化 (高度化仕様: CD1-ナ-ワヤ位置)

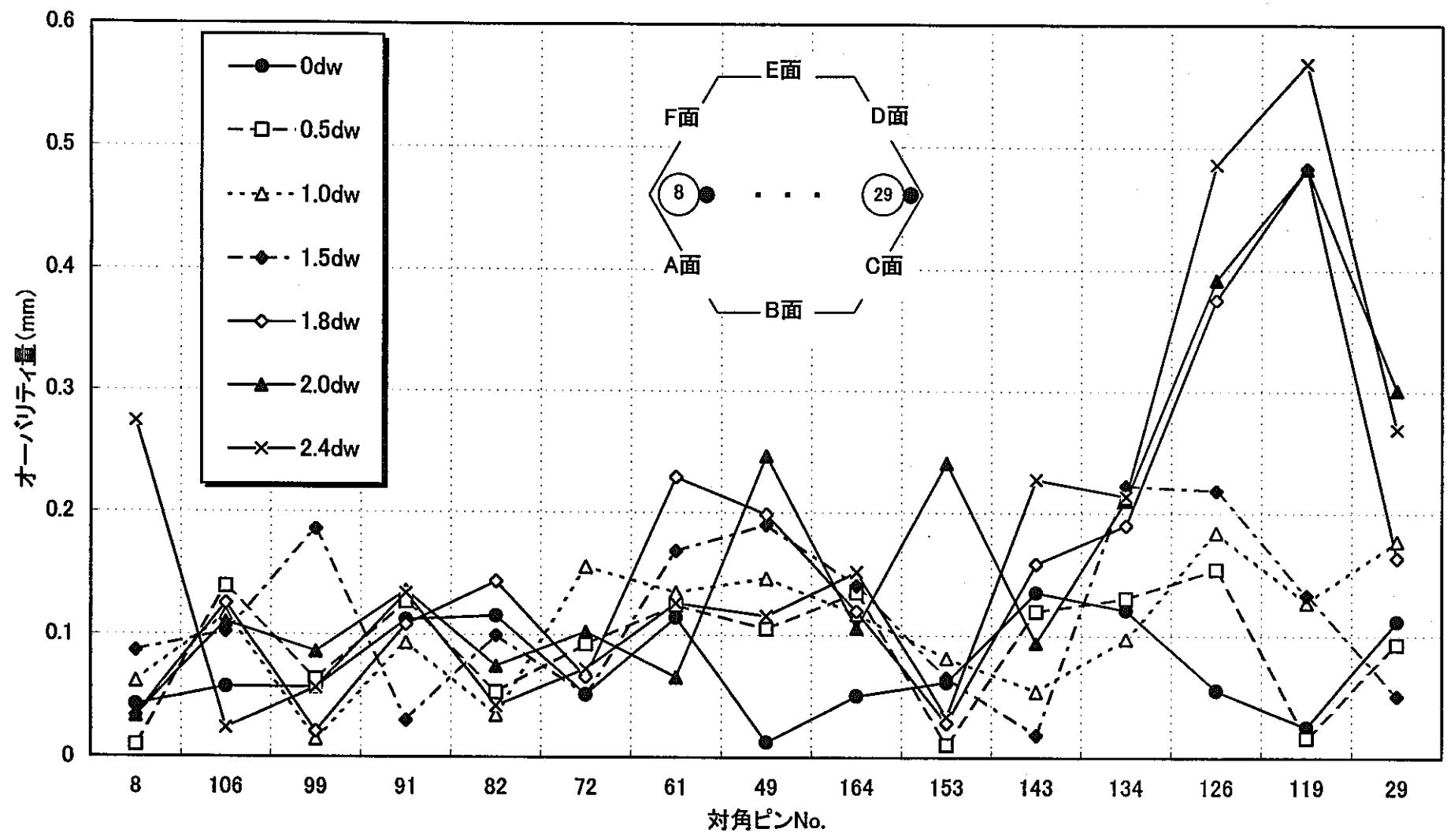


図3.9 対角ピン列におけるオーバリティ分布  
(短ワイヤピッチ平板：CDJ-ナ-ワヤ位置)

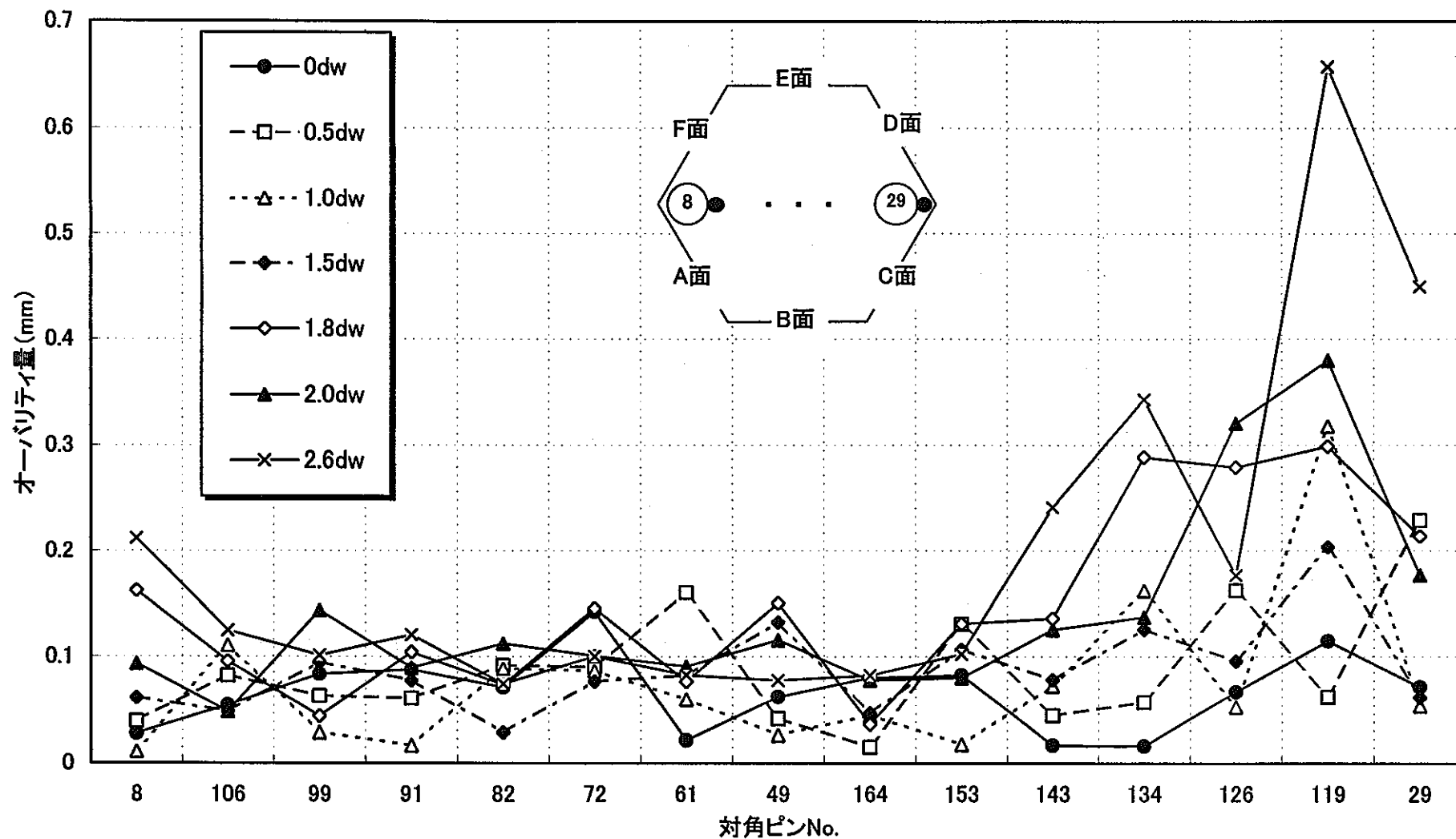


図3.10 対角ピン列におけるオーバーラップ分布  
(短ワイヤピッチバルジング：CDコナワイヤ位置)

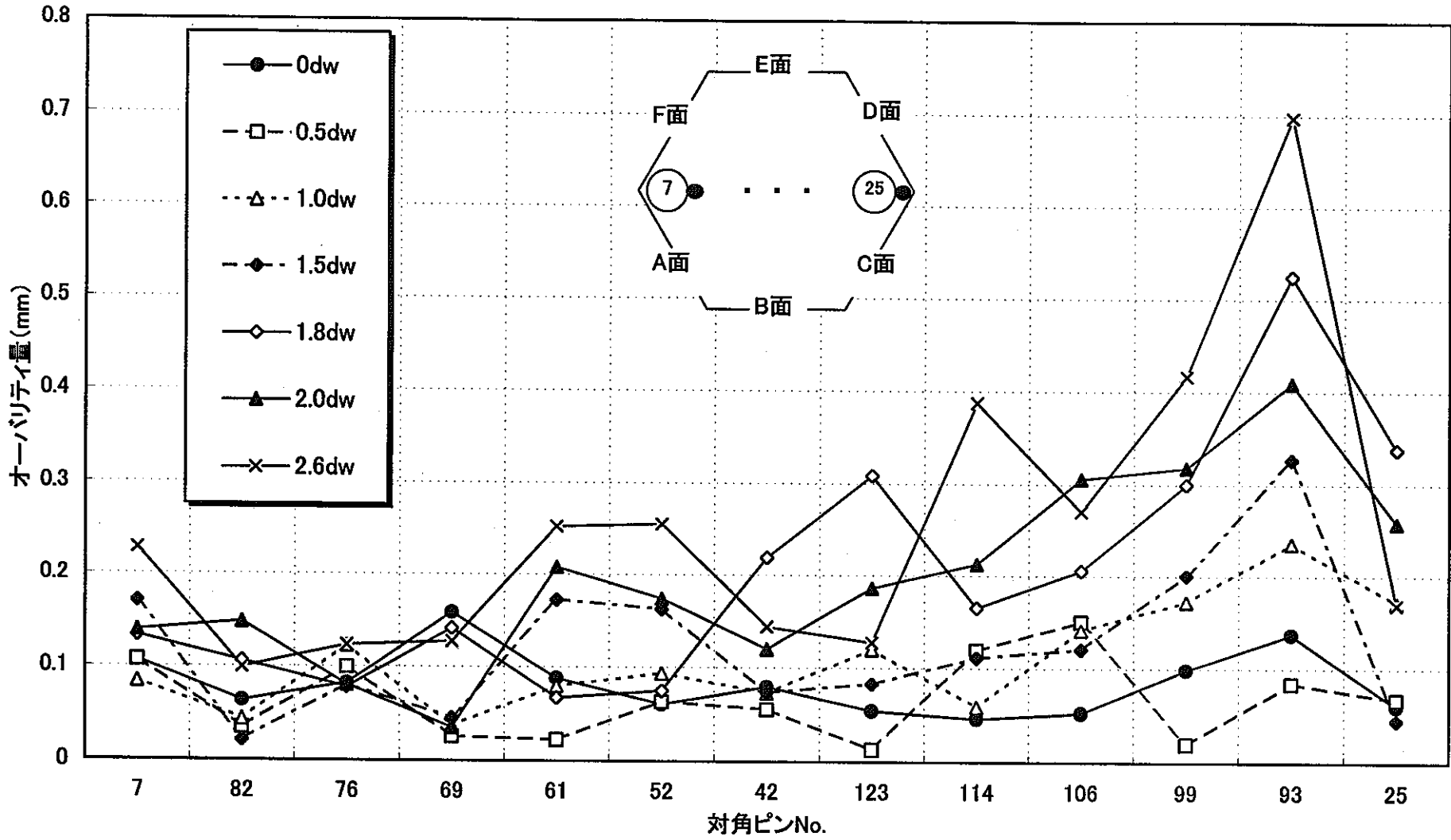


図3.11 対角ピン列におけるオーバーラップ分布 (高度化平板: CDコナリヤ位置)

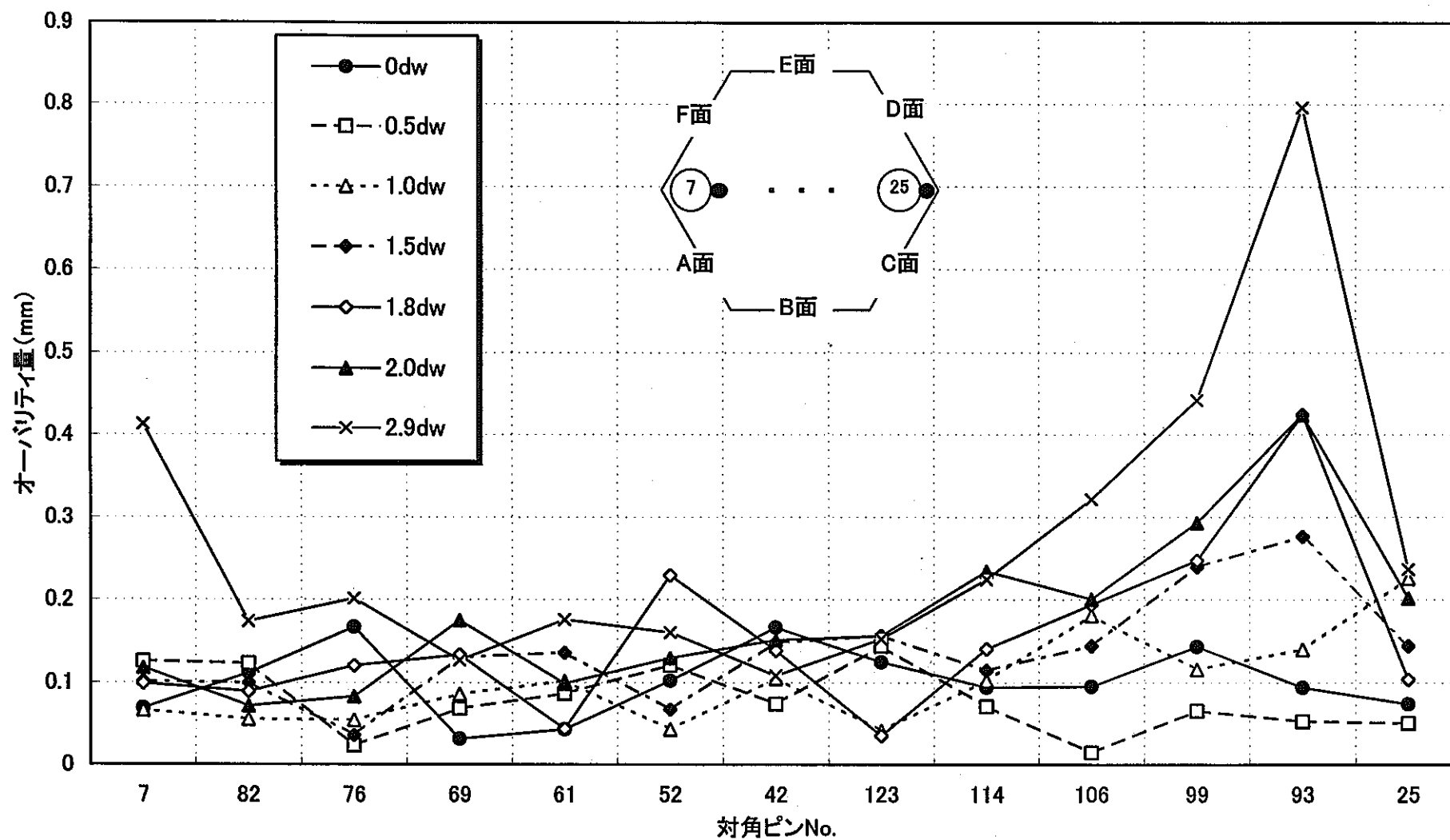


図3.12 対角ピン列におけるオーバリティ分布（高度化バルジング：CDコーナワイヤ位置）

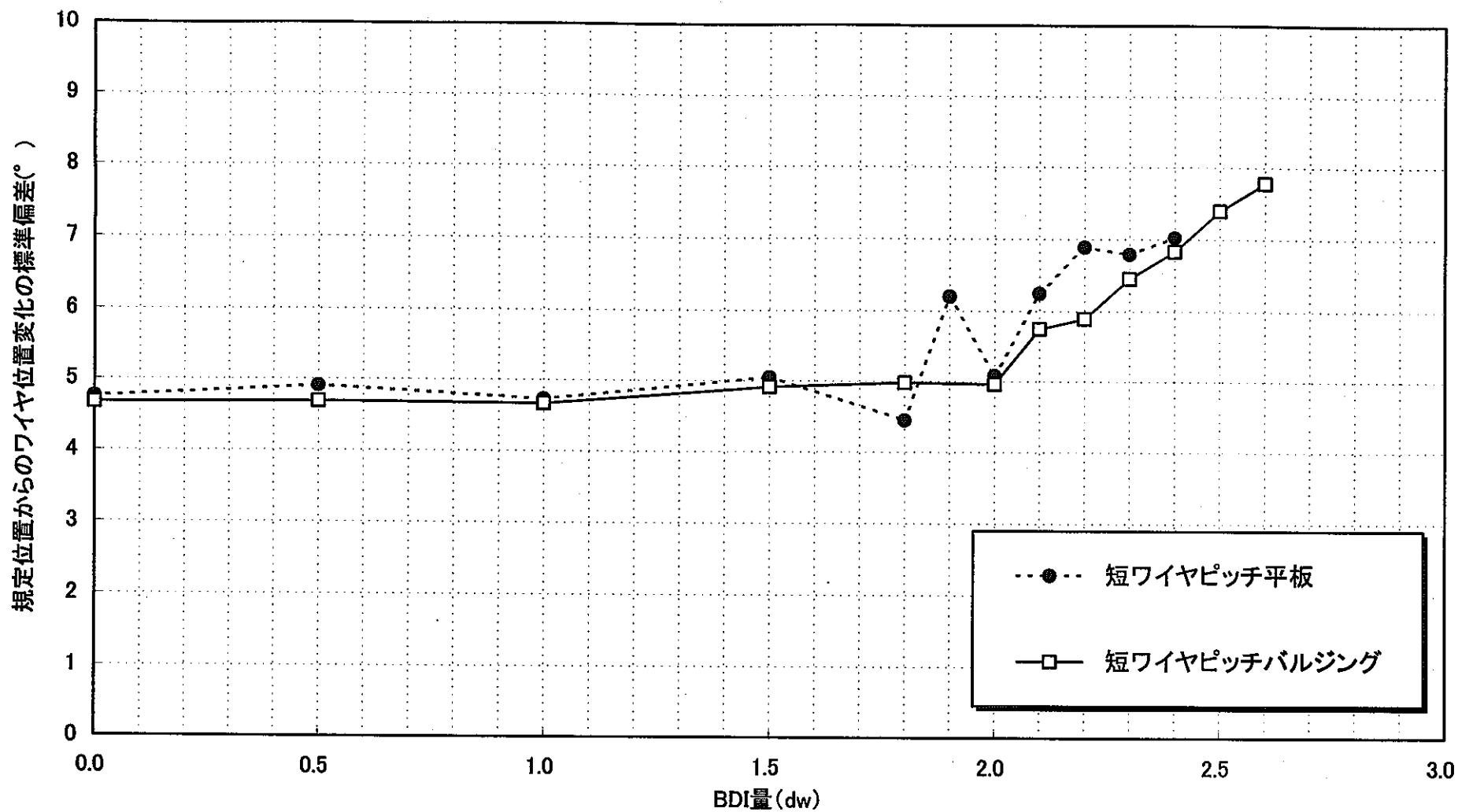


図3.13 規定位置からのワイヤ位置変化の標準偏差とBDI量の関係  
(短ワイヤピッチ仕様：CDコナリワイ位置)

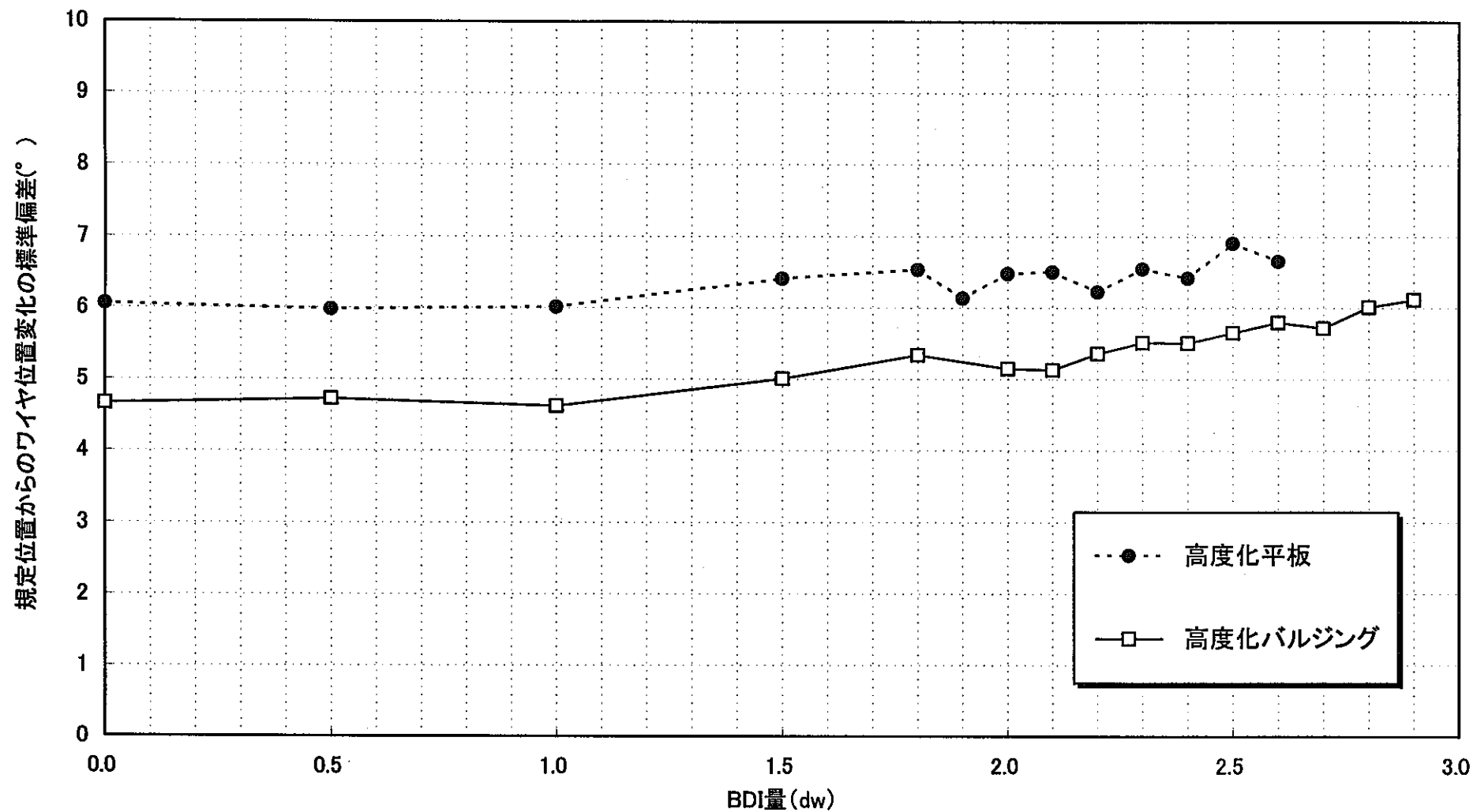


図3.14 規定位置からのワイヤ位置変化の標準偏差とBDI量の関係  
(高度化仕様：CDコーナ-ワイヤ位置)



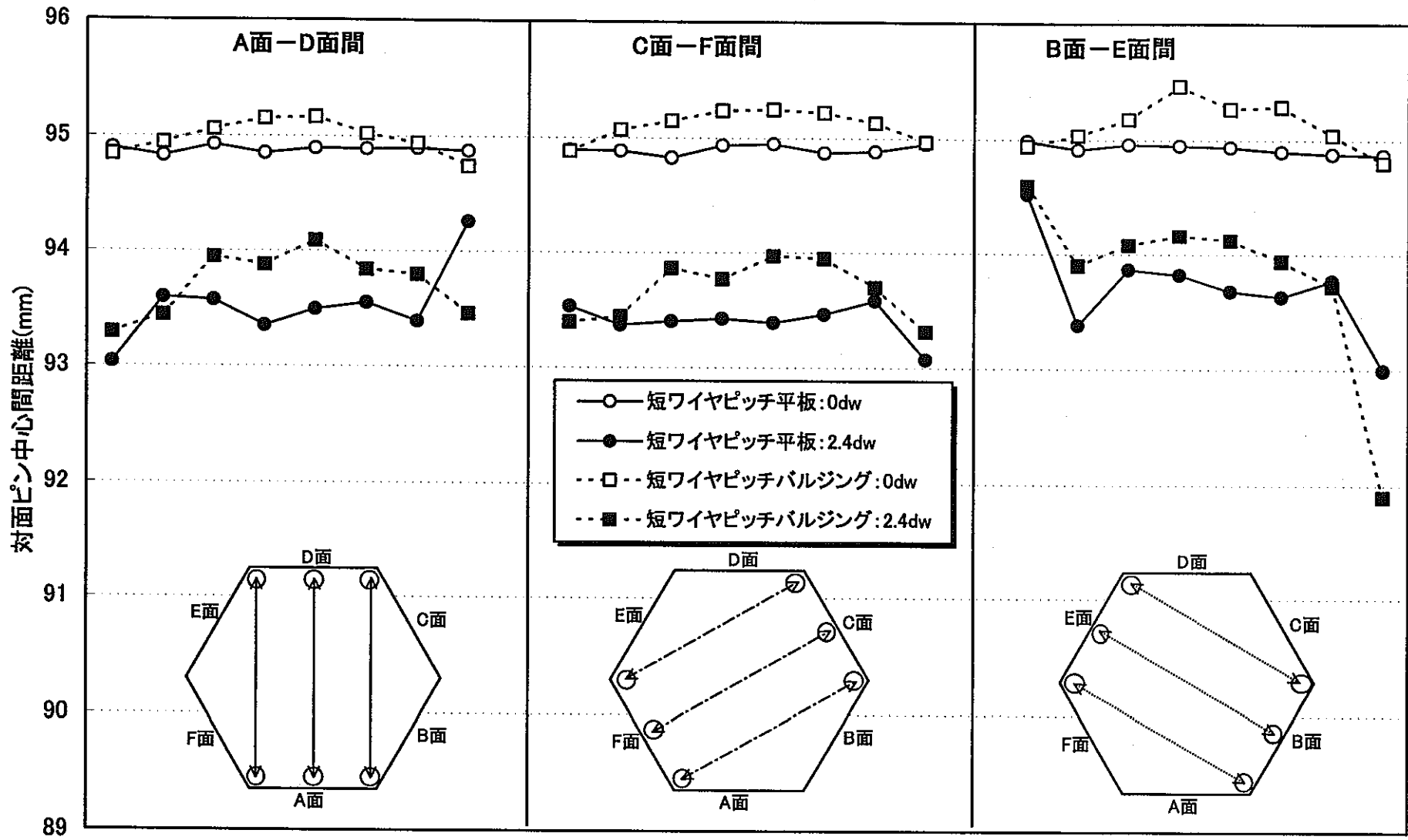


図3.15 対面ピン中心間距離の変化 (短ワイヤピッチ仕様: CDコーナワイヤ位置)

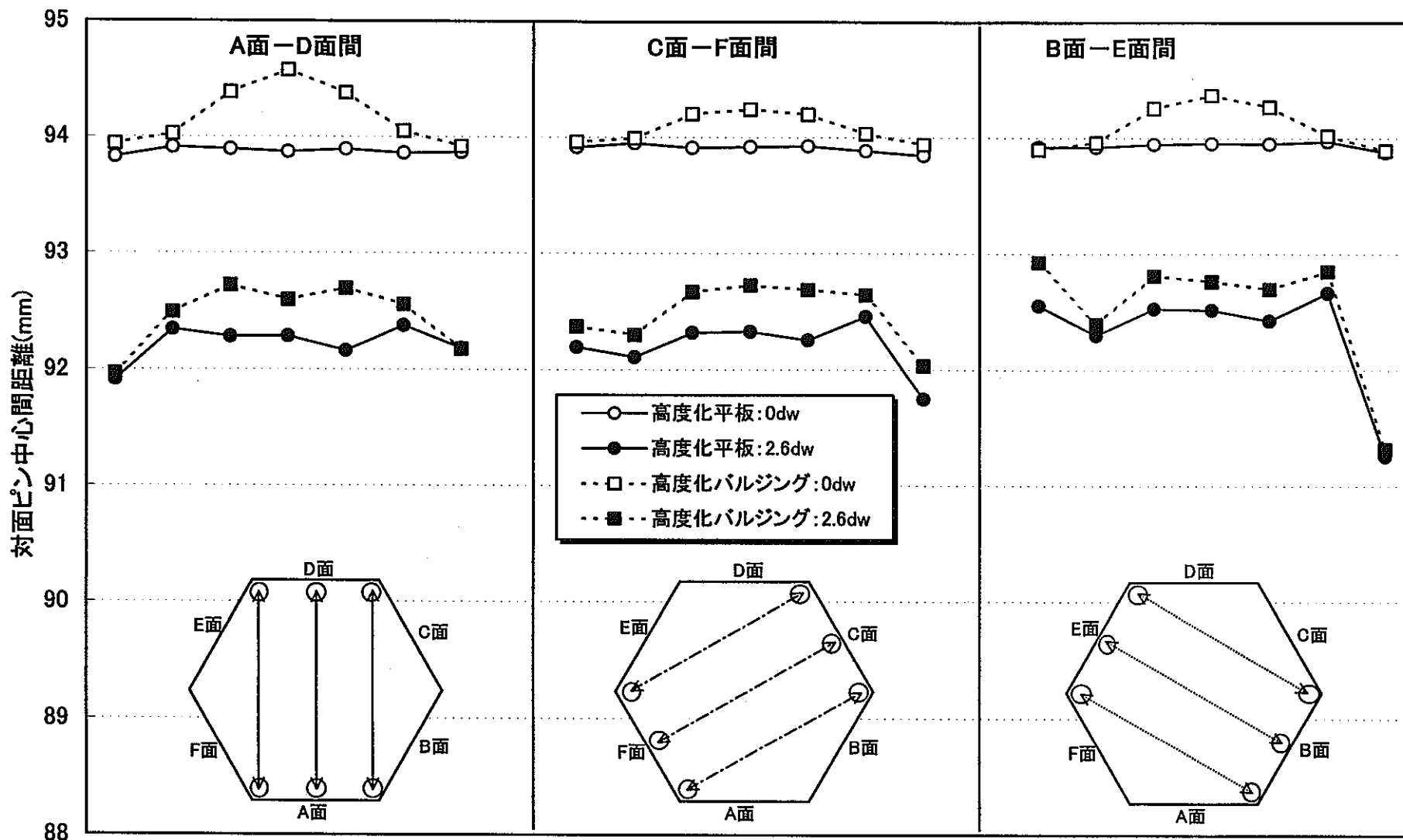


図3.16 対面ピン中心間距離の変化 (高度化仕様: CDコナー位置)

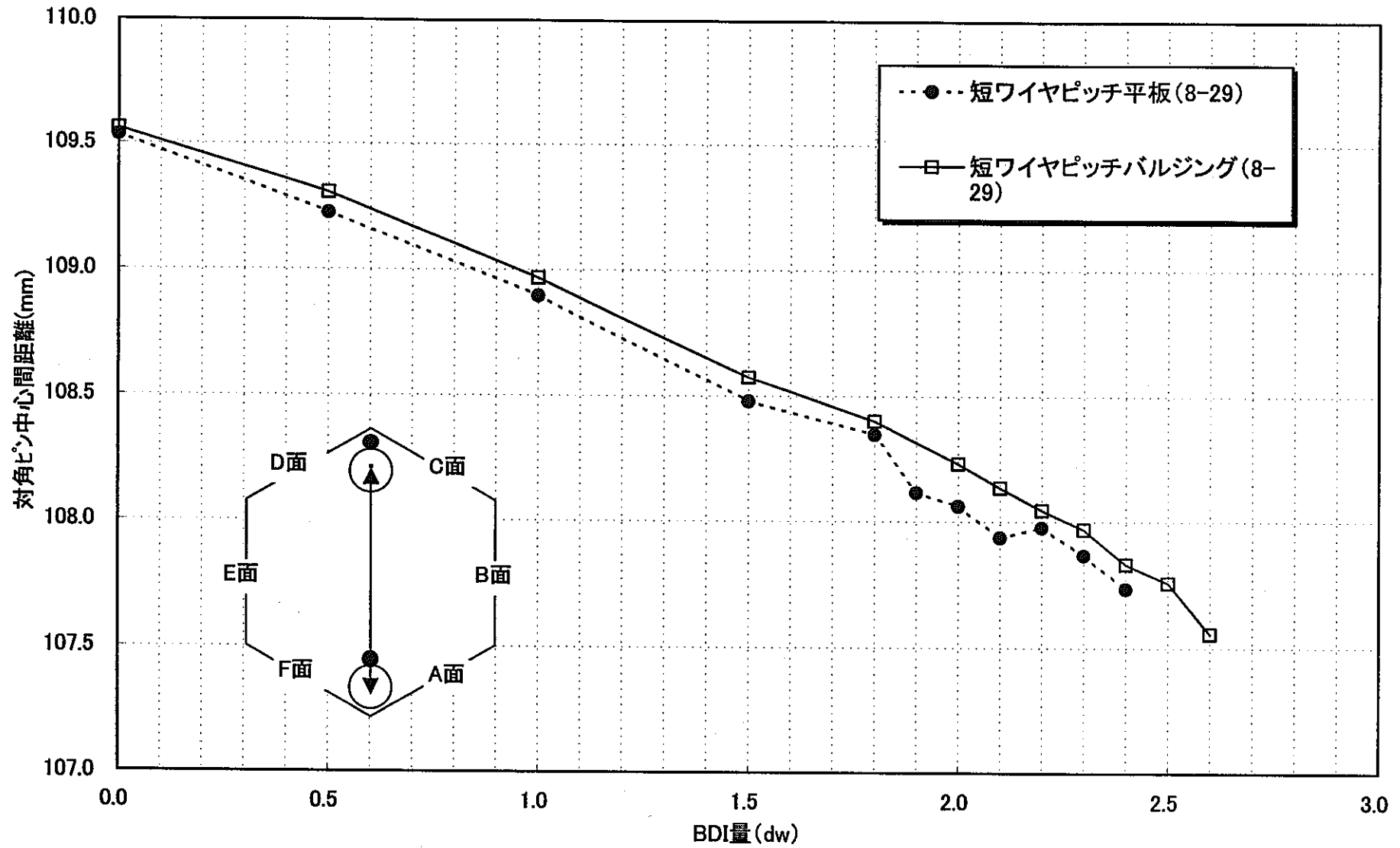


図3.17 BDI量の増加に伴う対角ピン中心距離の変化  
(短ワイヤピッチ仕様：CDコーナーワイヤ位置)

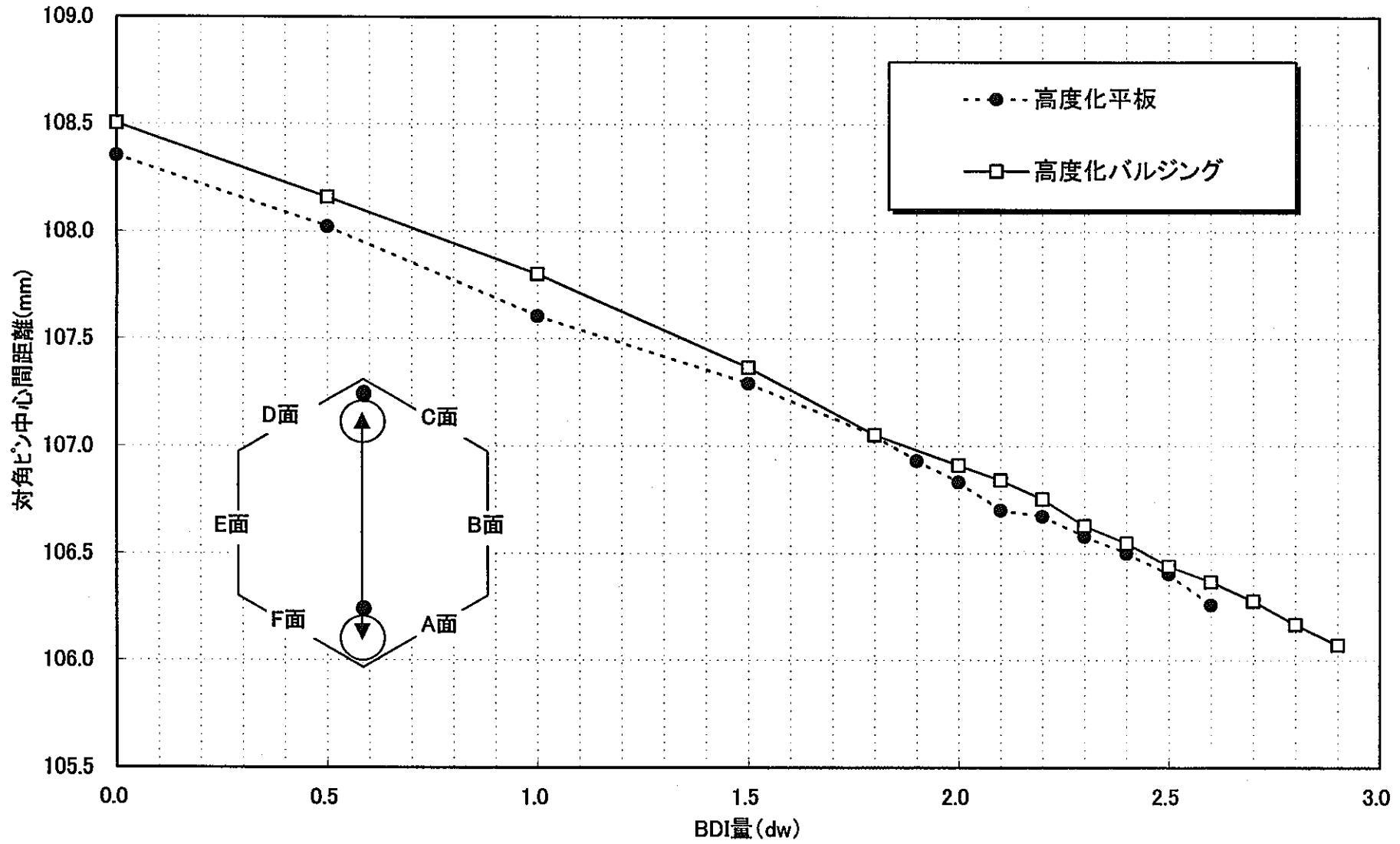


図3.18 BDI量の増加に伴う対角ピン中心距離の変化 (高度化仕様: CD1-ナ-ワヤ位置)

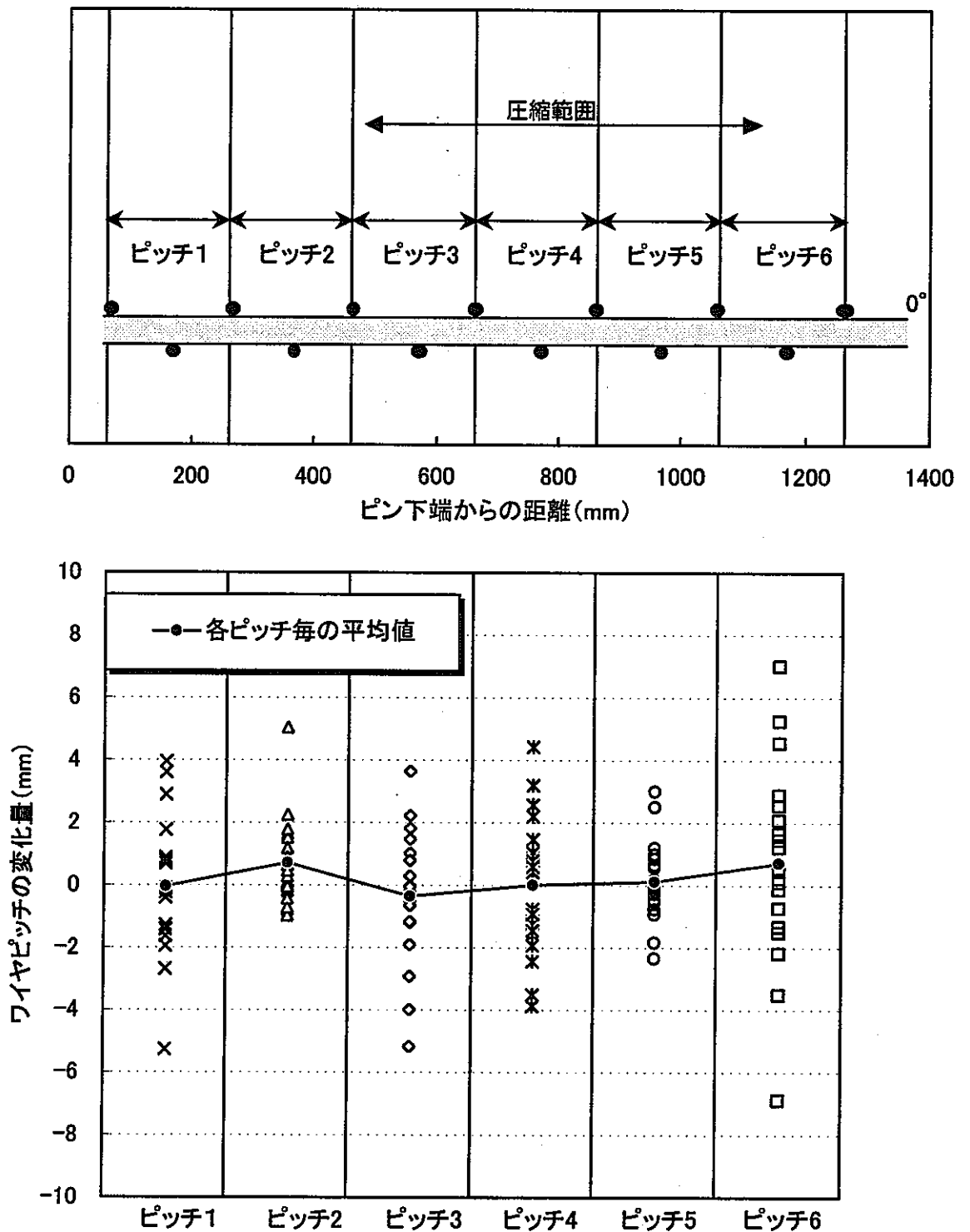


図3.19 圧縮前後のワイヤピッチ変化 (短ワイヤピッチ平板)

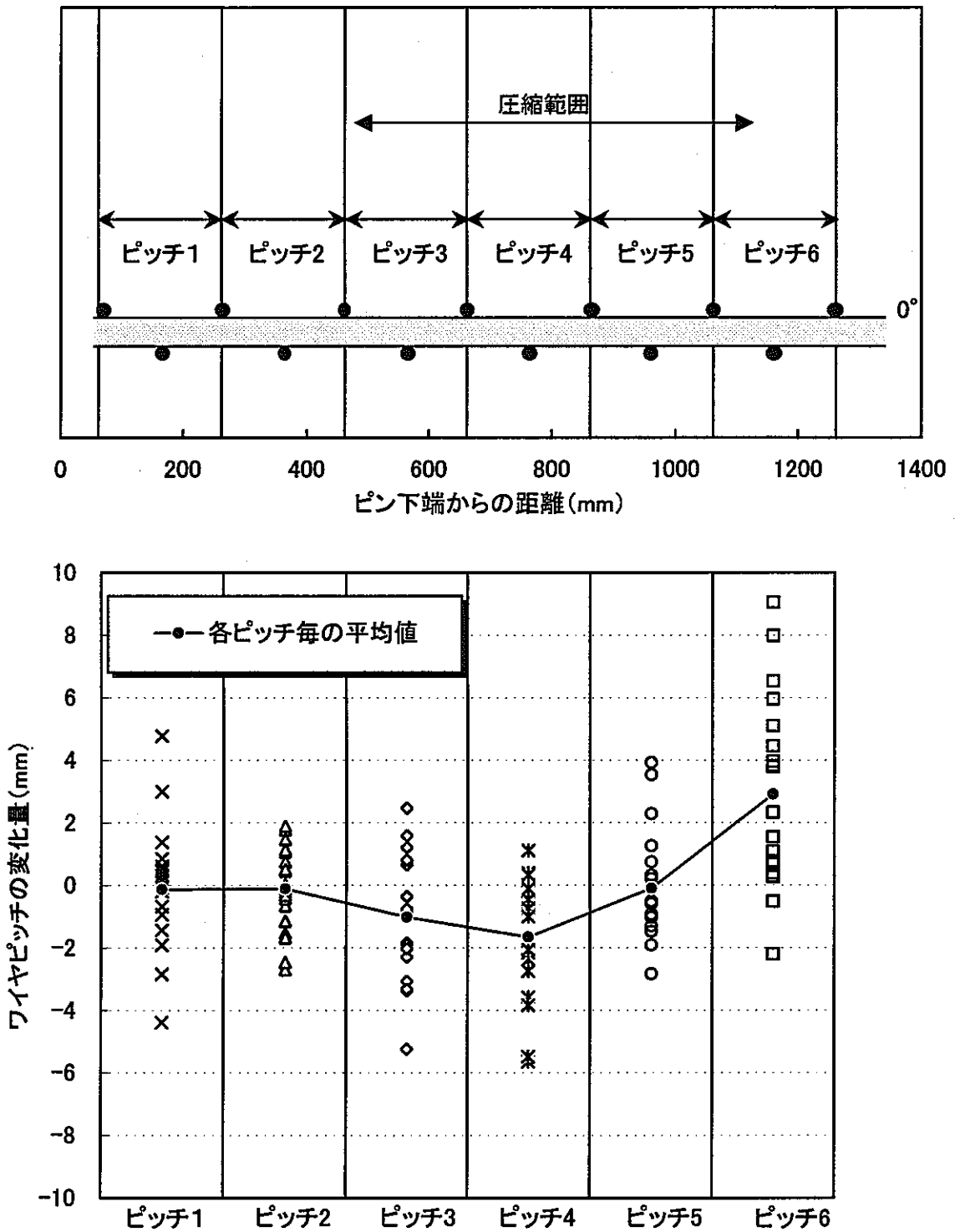


図3.20 圧縮前後のワイヤピッチ変化  
(短ワイヤピッチバルジング)

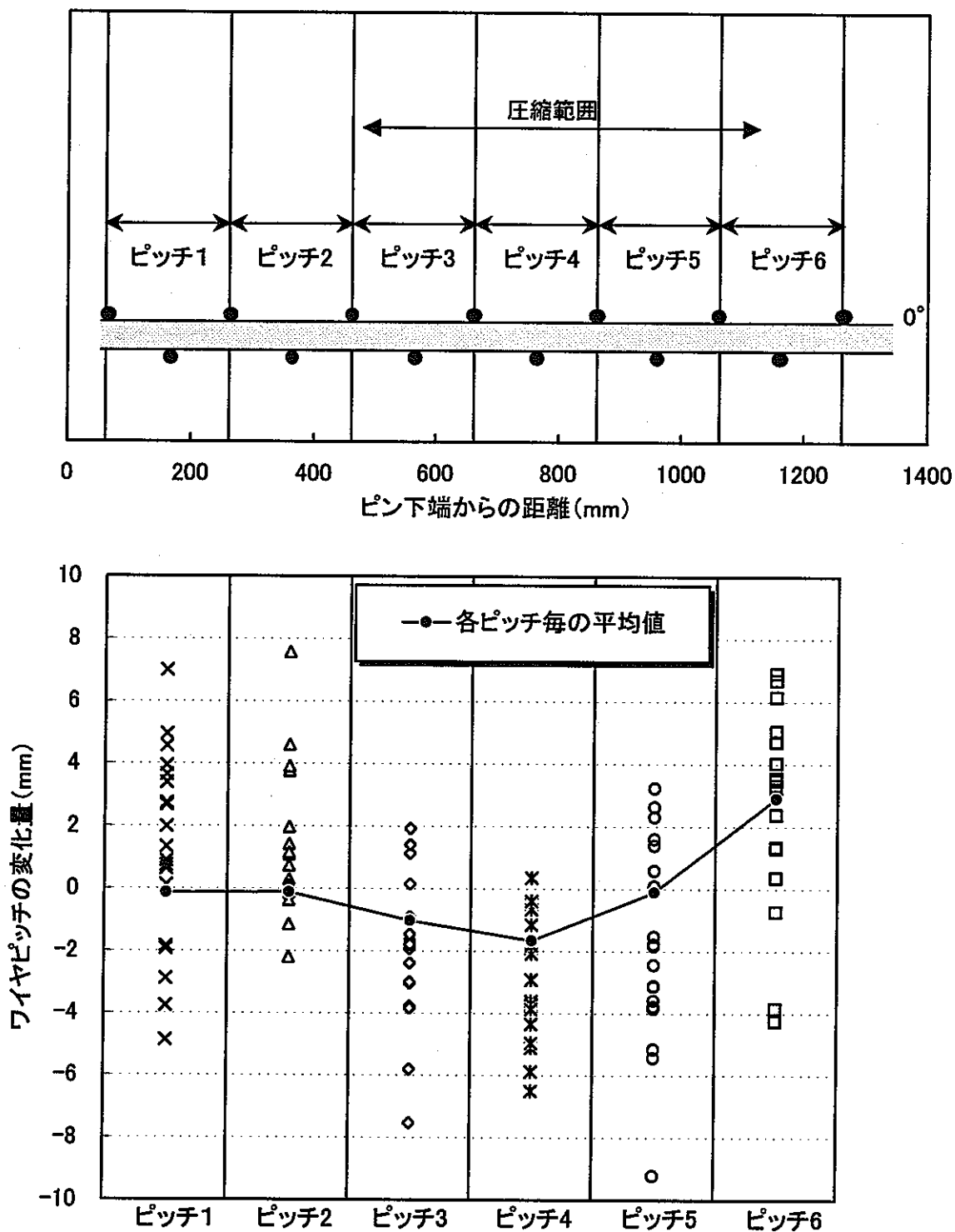


図3.21 圧縮前後のワイヤピッチ変化 (高度化平板)

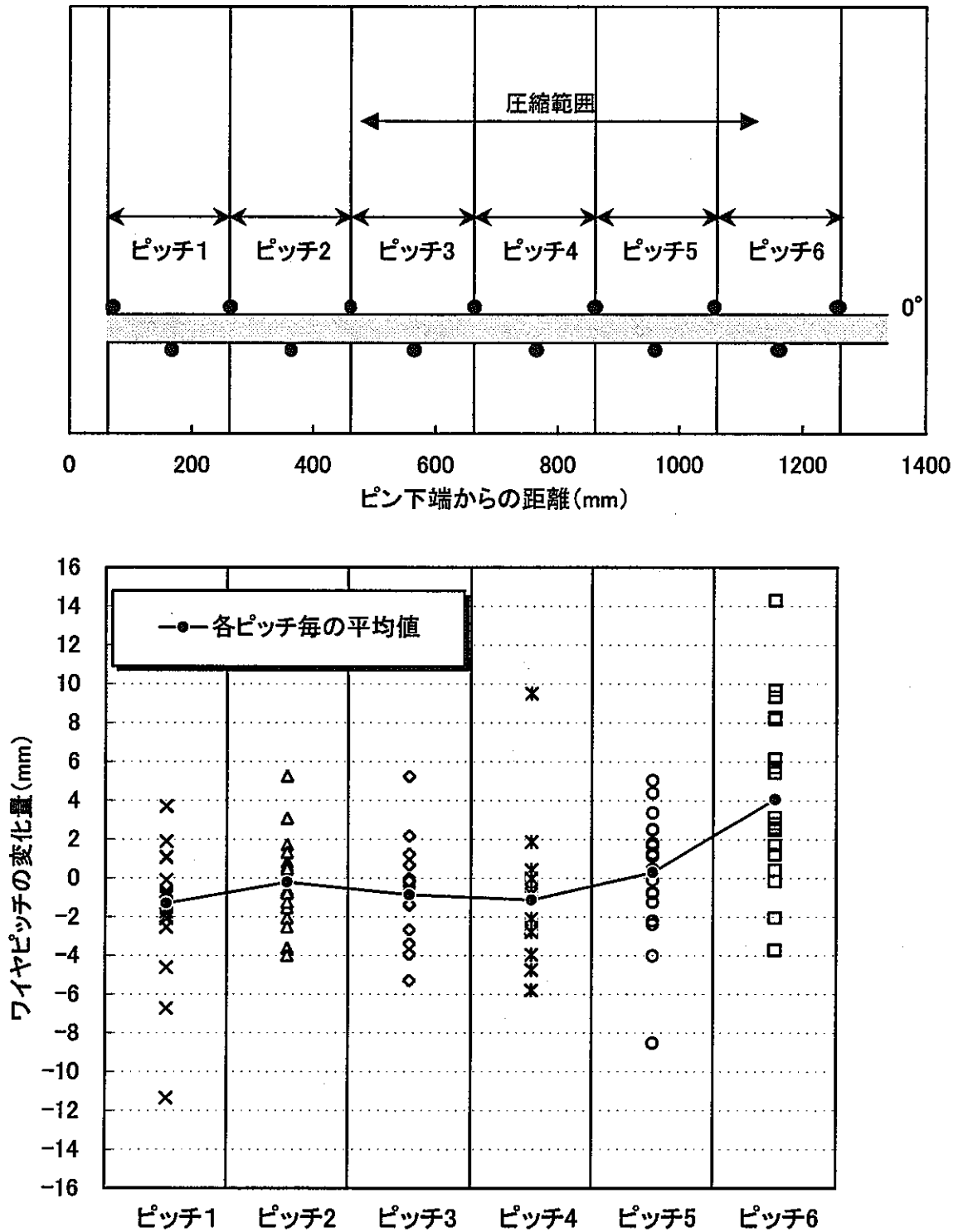


図3.22 圧縮前後のワイヤピッチ変化 (高度化バルジング)



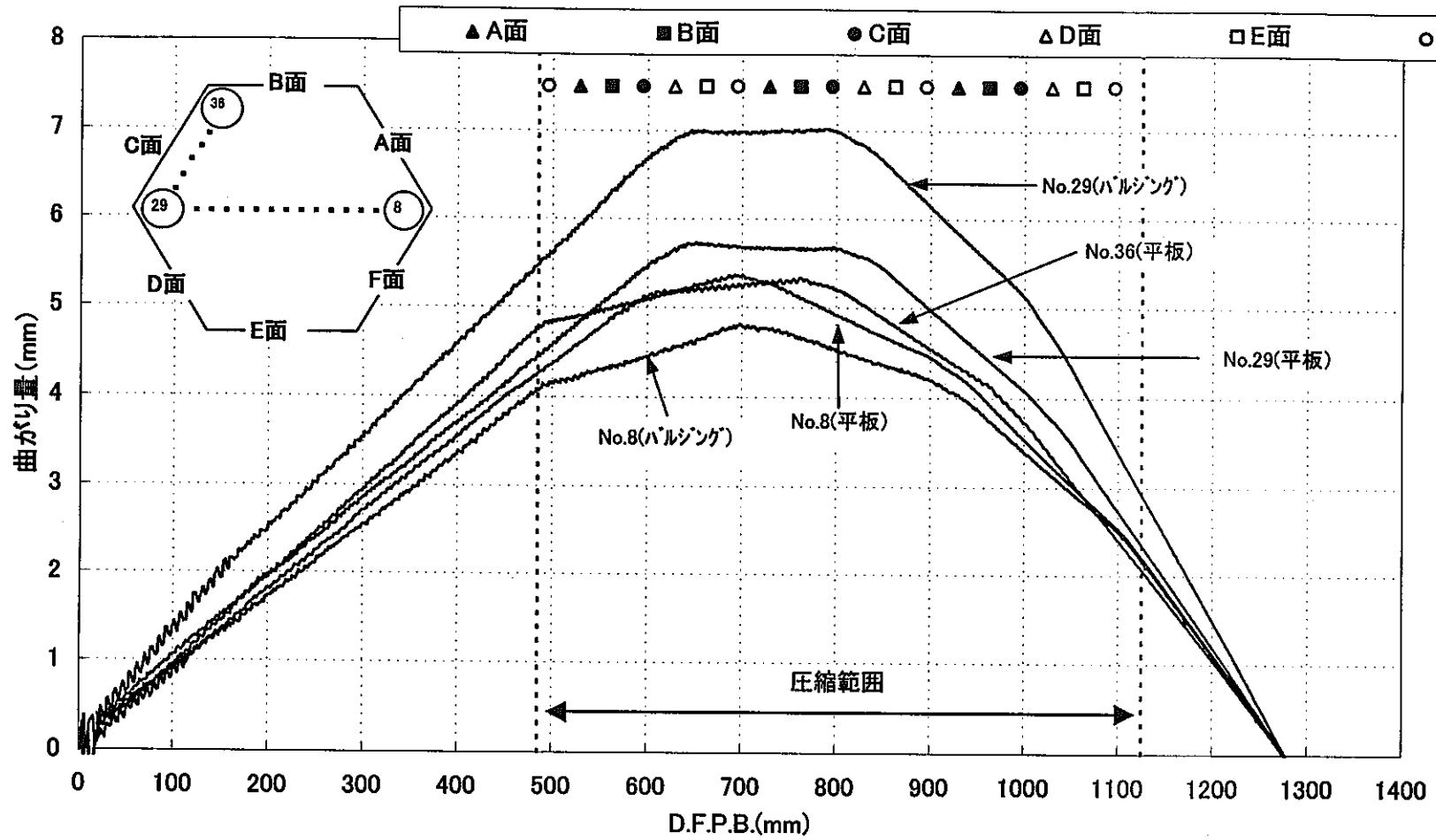


図3.23 圧縮後のピン曲がり軸方向プロファイル (短ワイヤピッチ仕様)

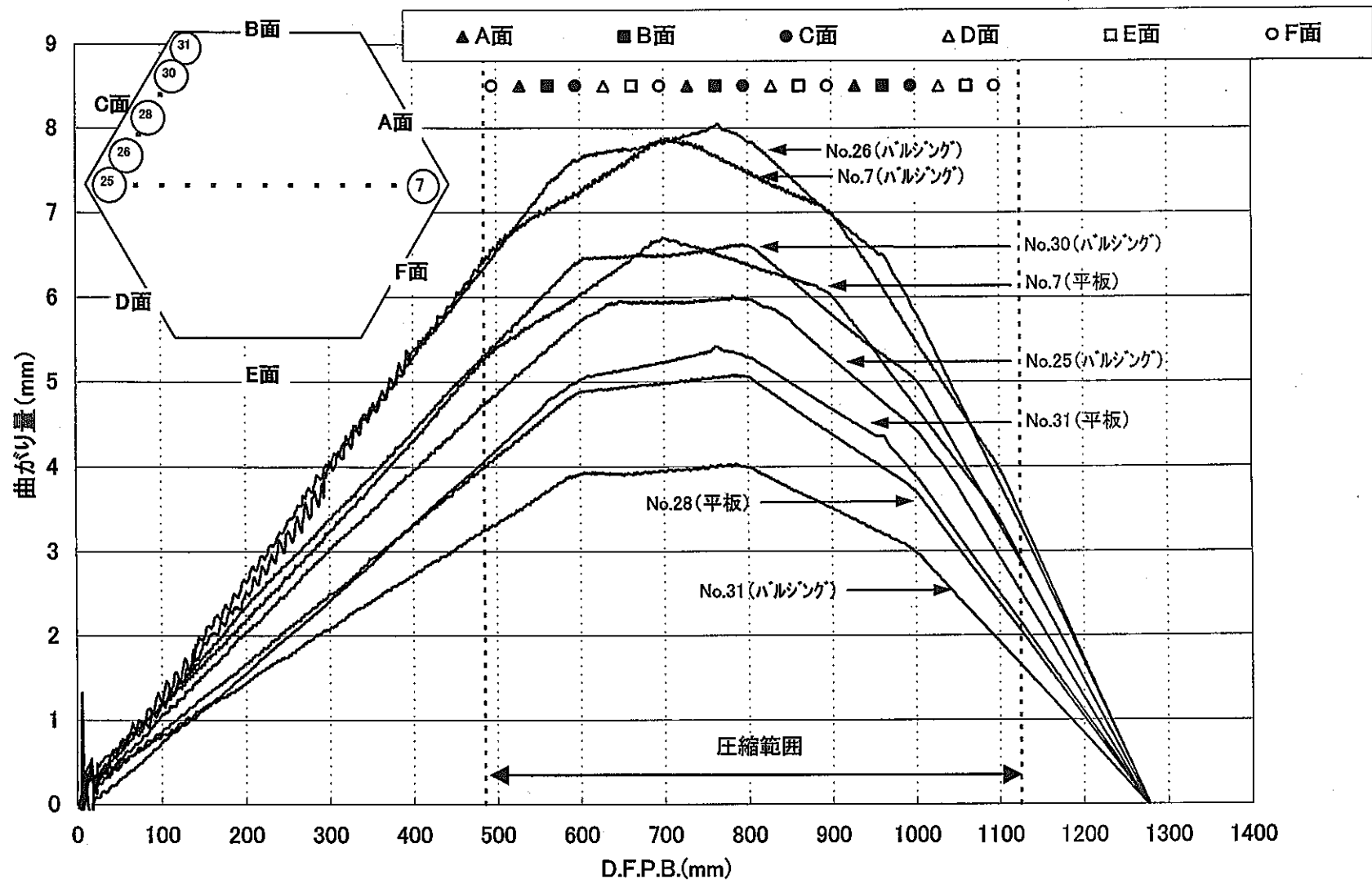


図3.24 圧縮後のピン曲がり軸方向プロファイル (高度化仕様)

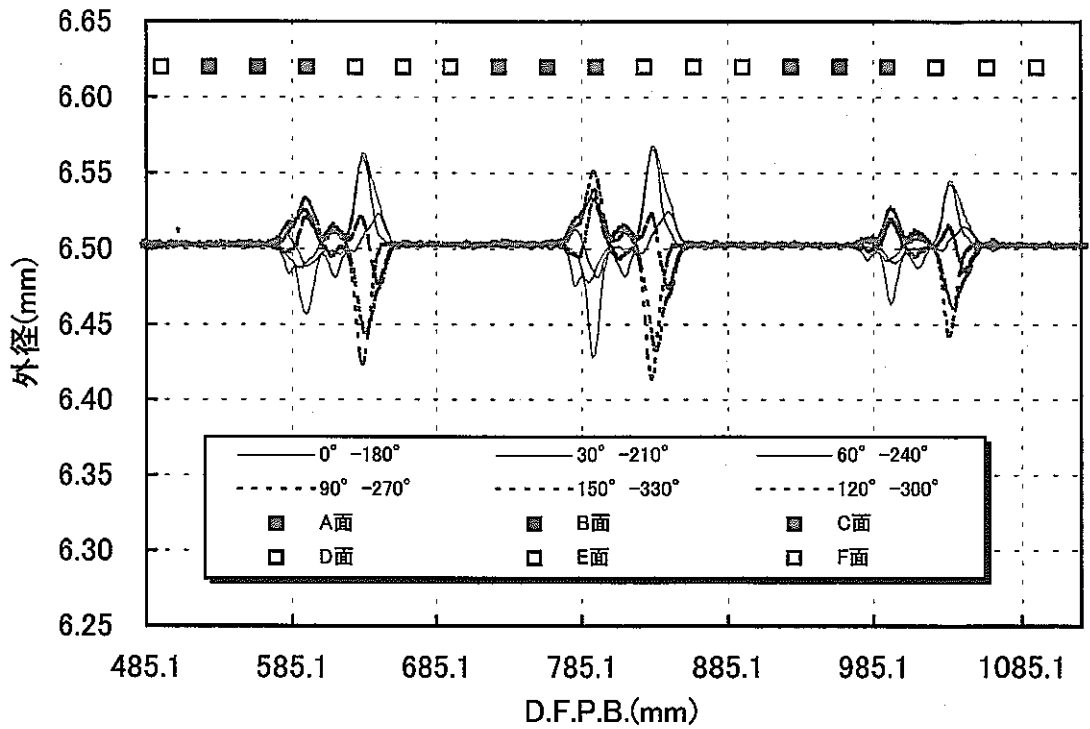


図3.25 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチ平板：No. 29)

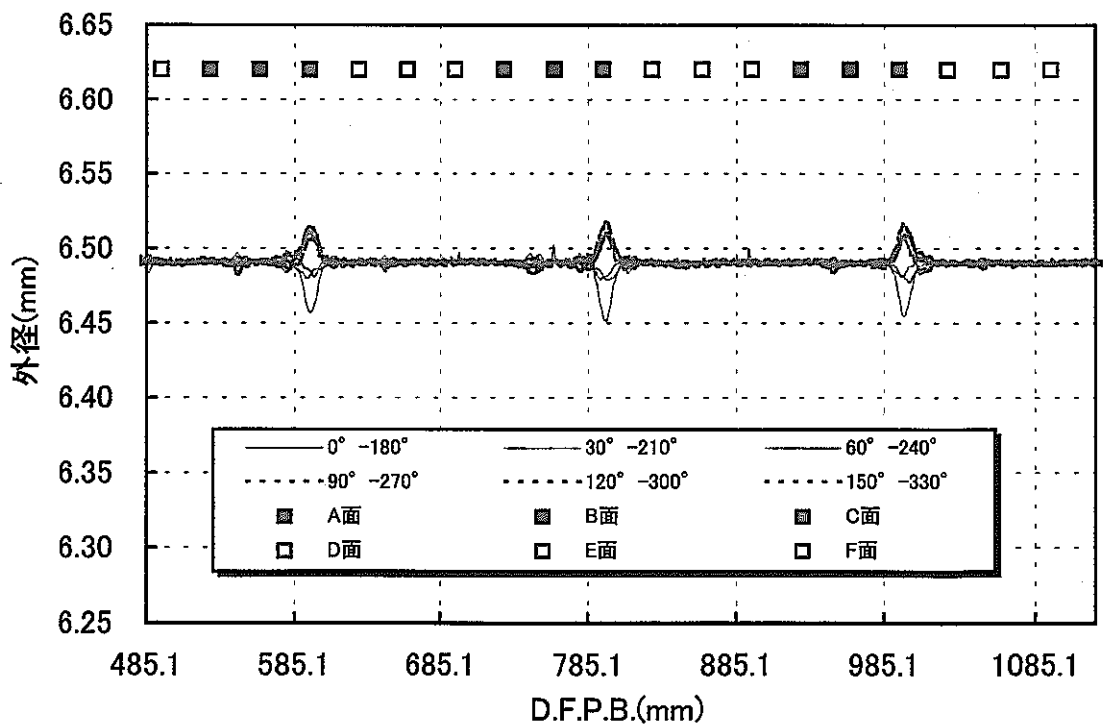


図3.26 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチ平板：No. 33)

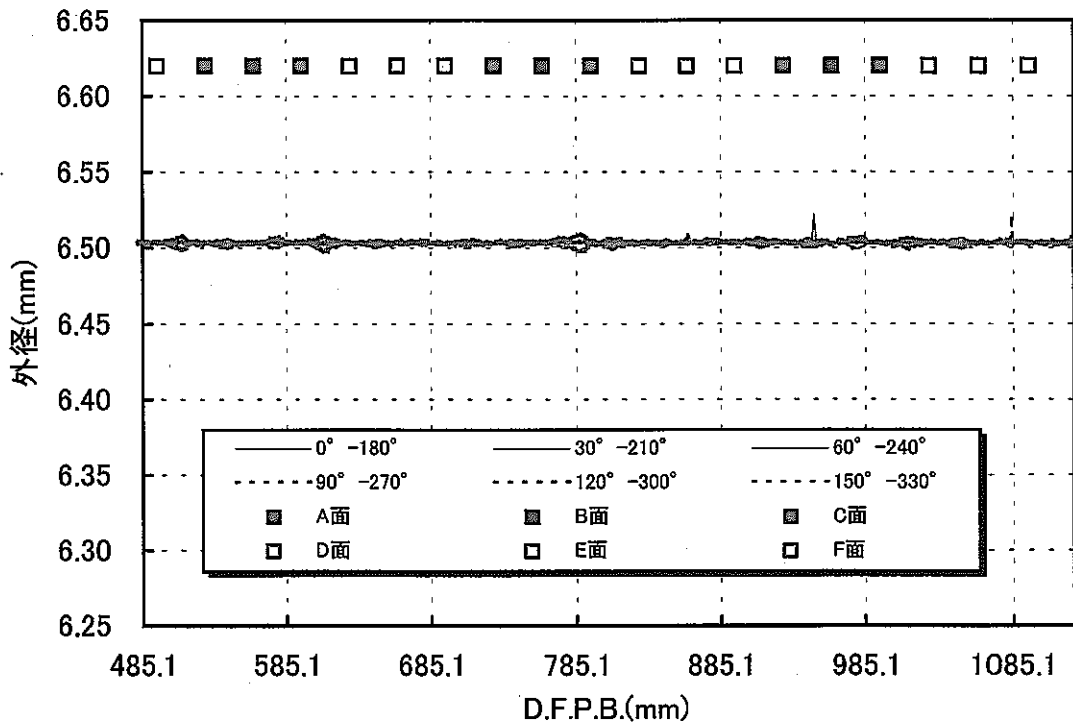


図3.27 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチ平板: No. 49)

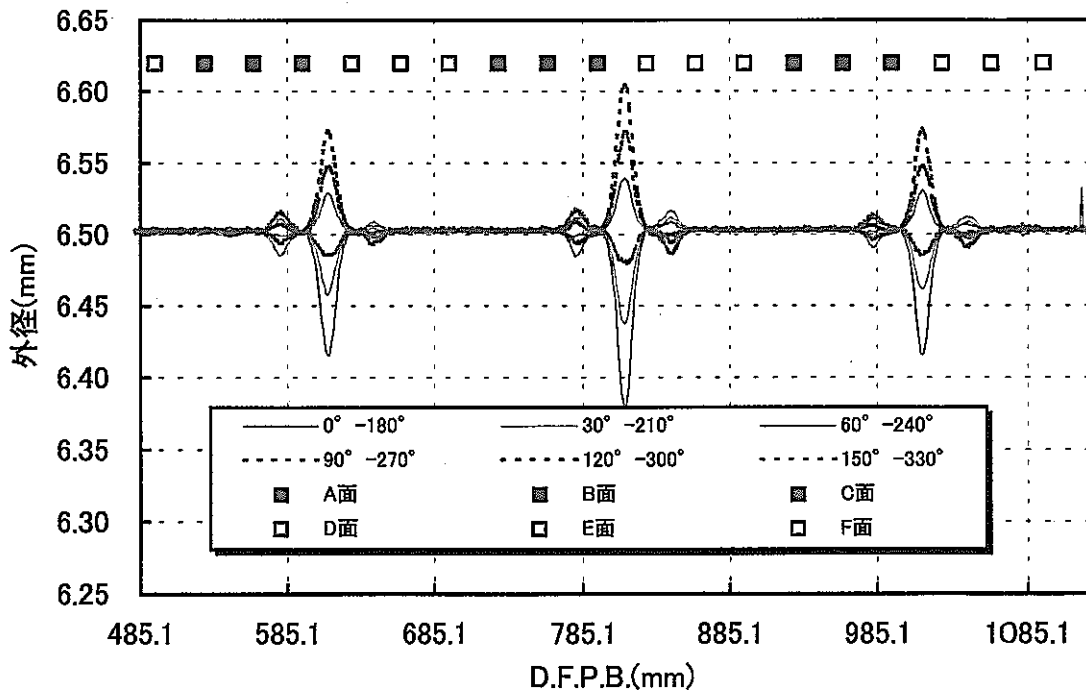


図3.28 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチ平板: No. 119)

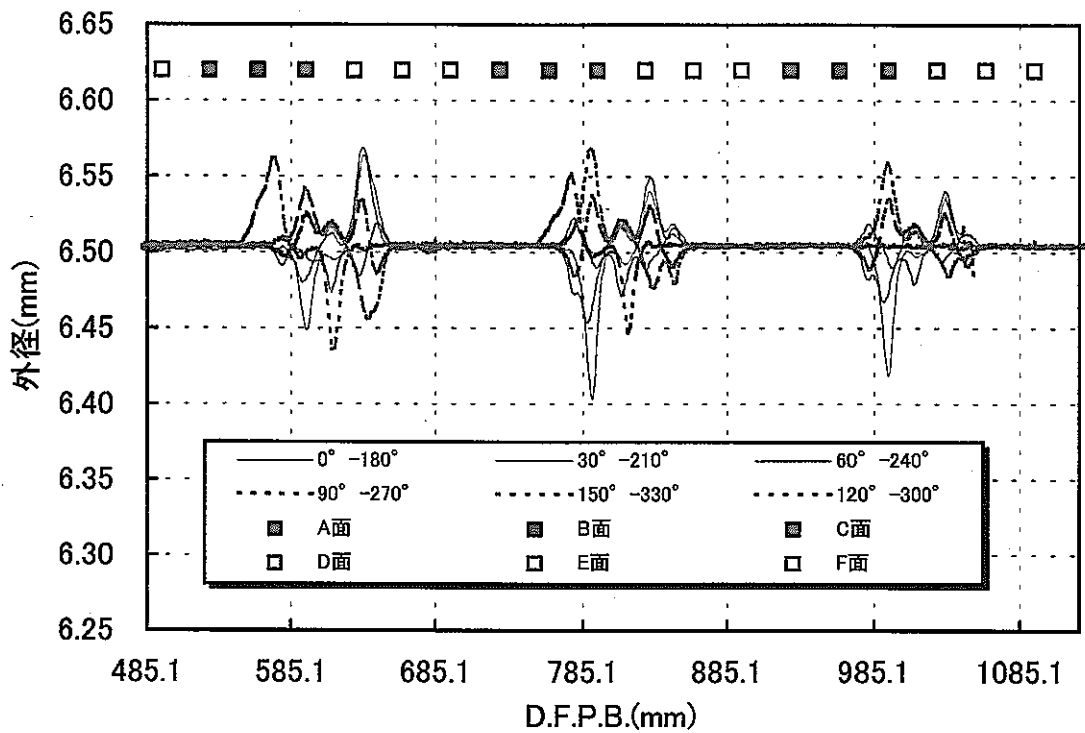


図3.29 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチバルジング : No.29)

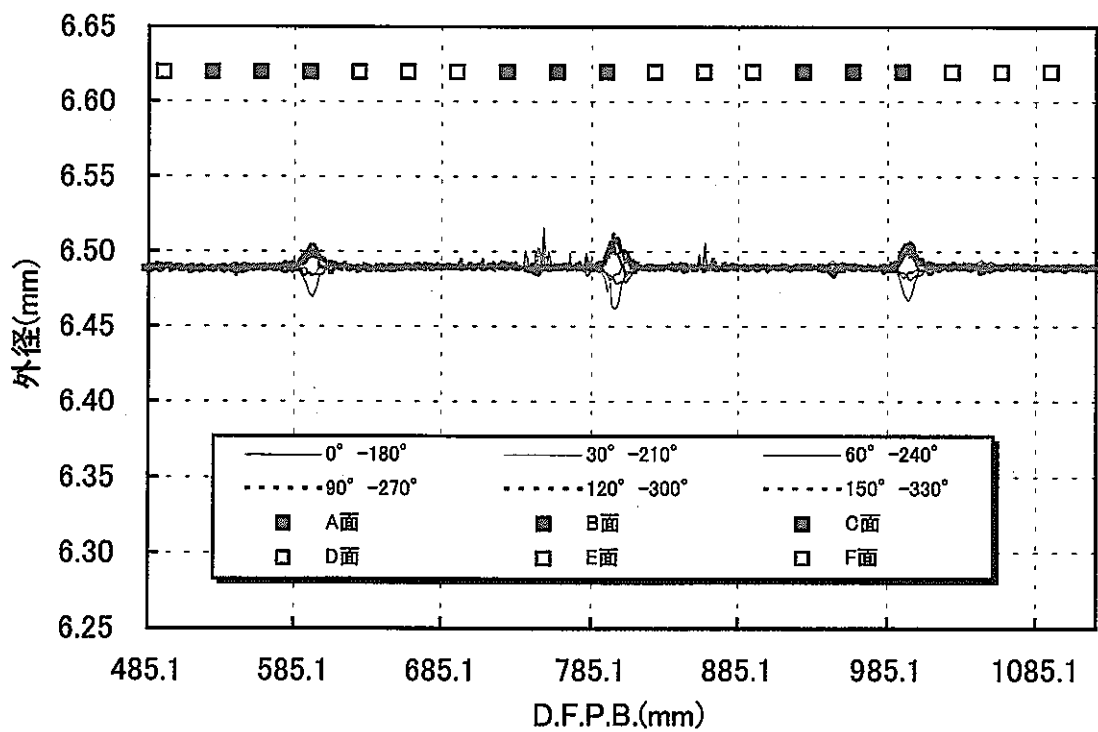


図3.30 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチバルジング : No.33)

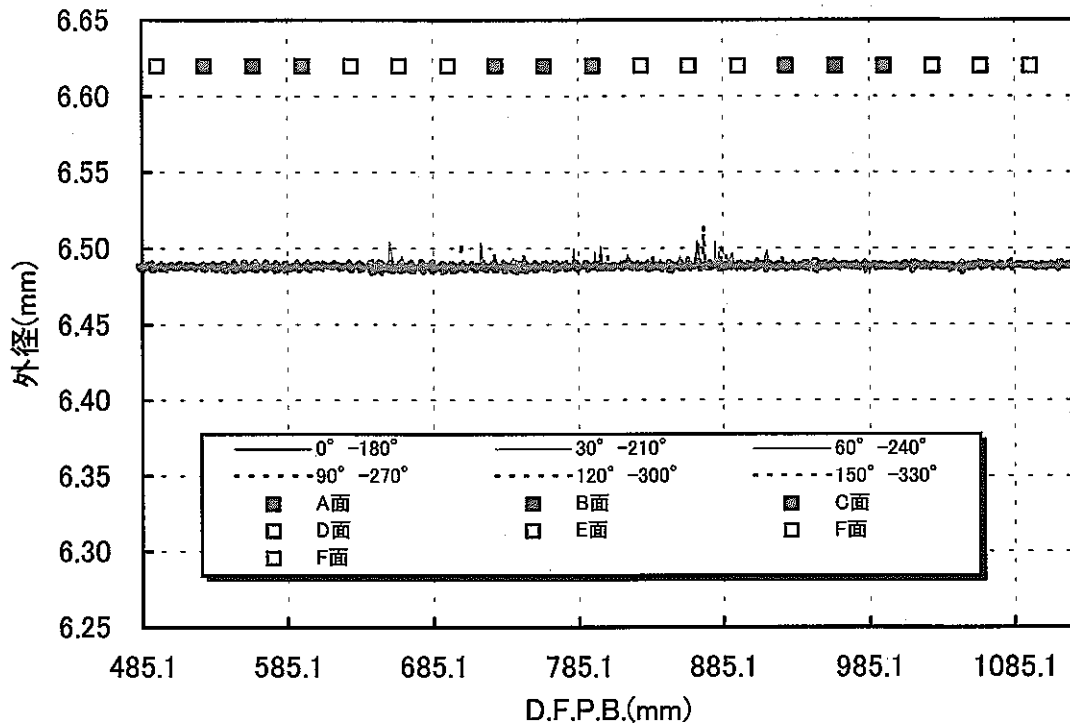


図3.31 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチバルジング：No.49)

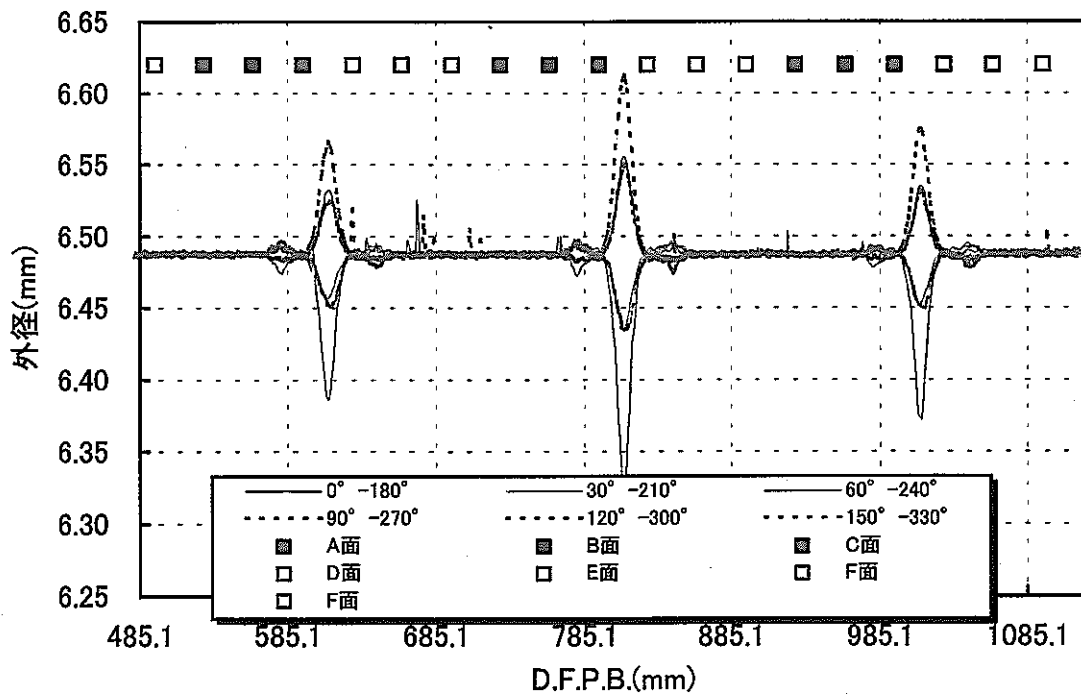


図3.32 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(短ワイヤピッチバルジング：No.119)

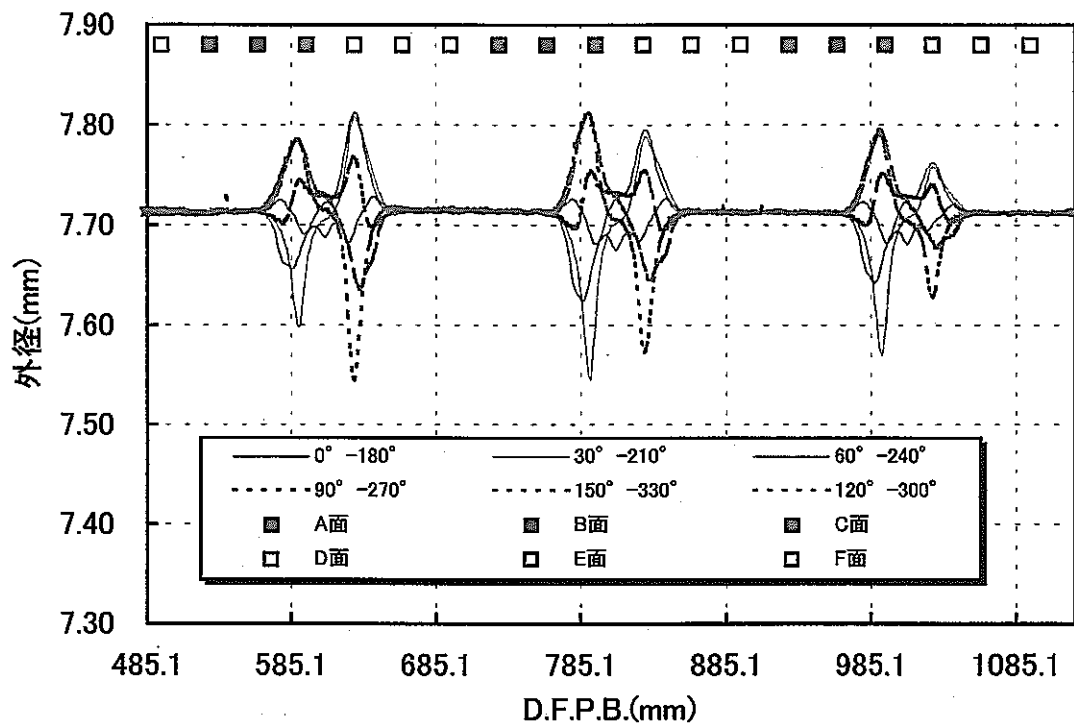


図3.33 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化平板：No.25)

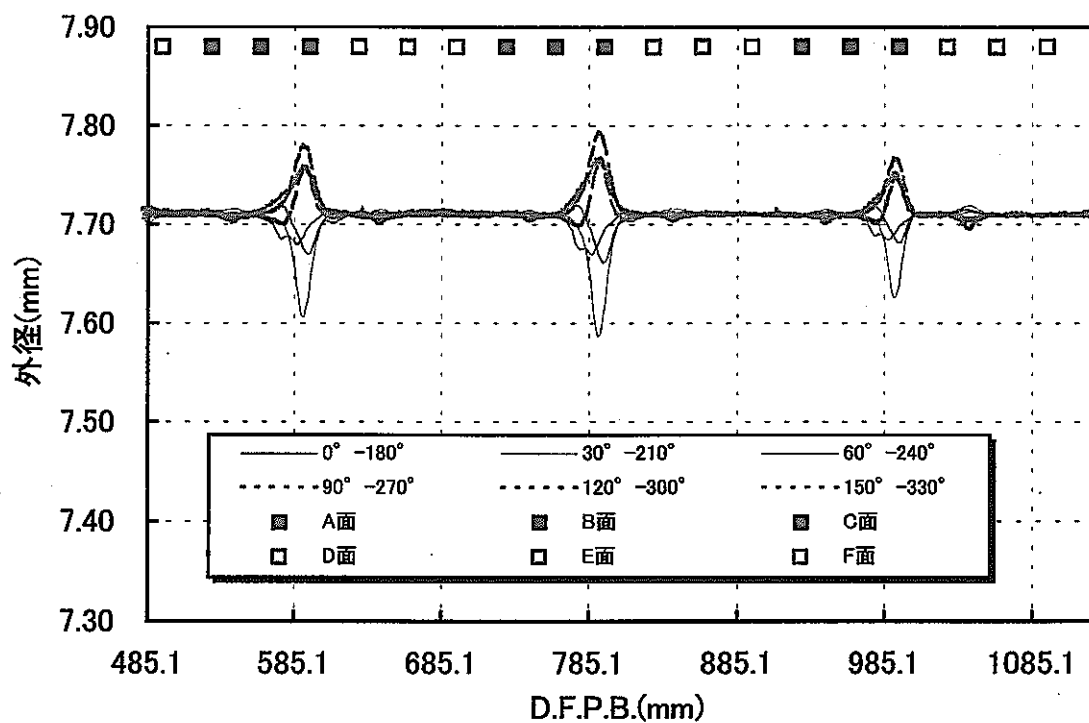


図3.34 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化平板：No.28)

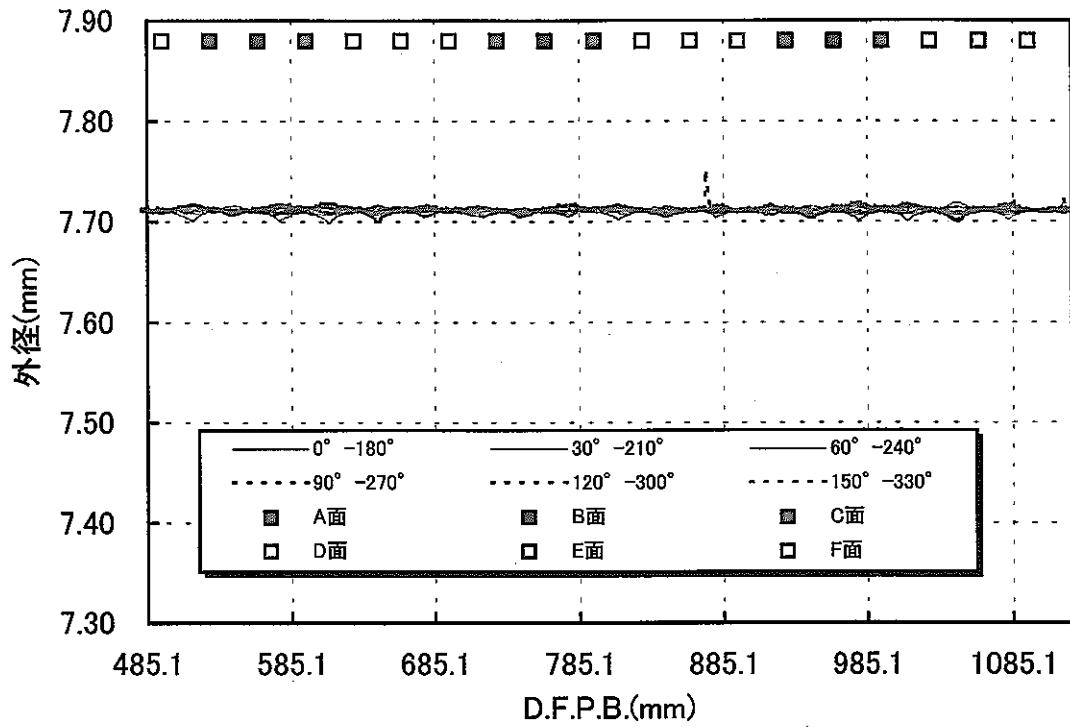


図3.35 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化平板：No. 42)

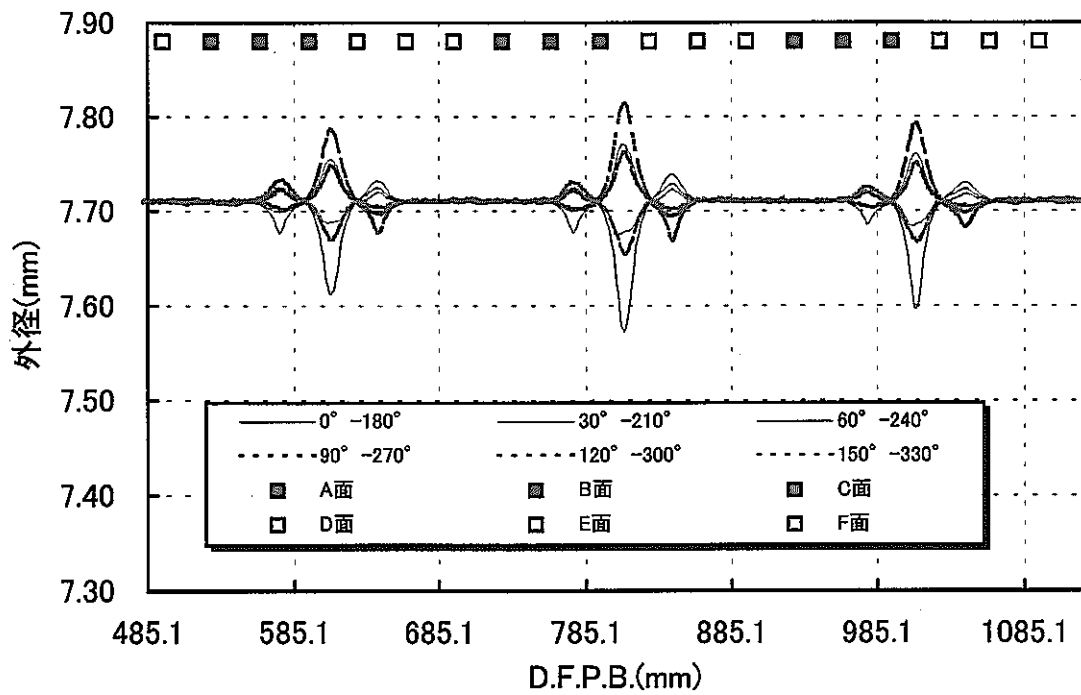


図3.36 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化平板：No. 93)



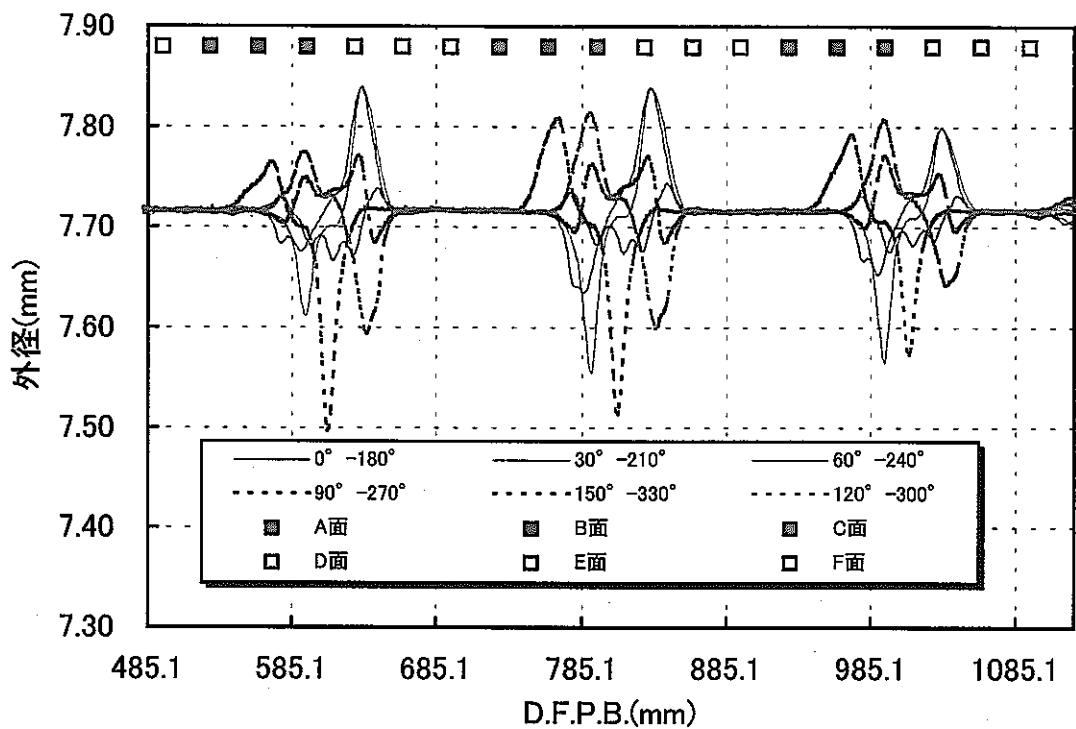


図3.37 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化バルジング：No. 25)

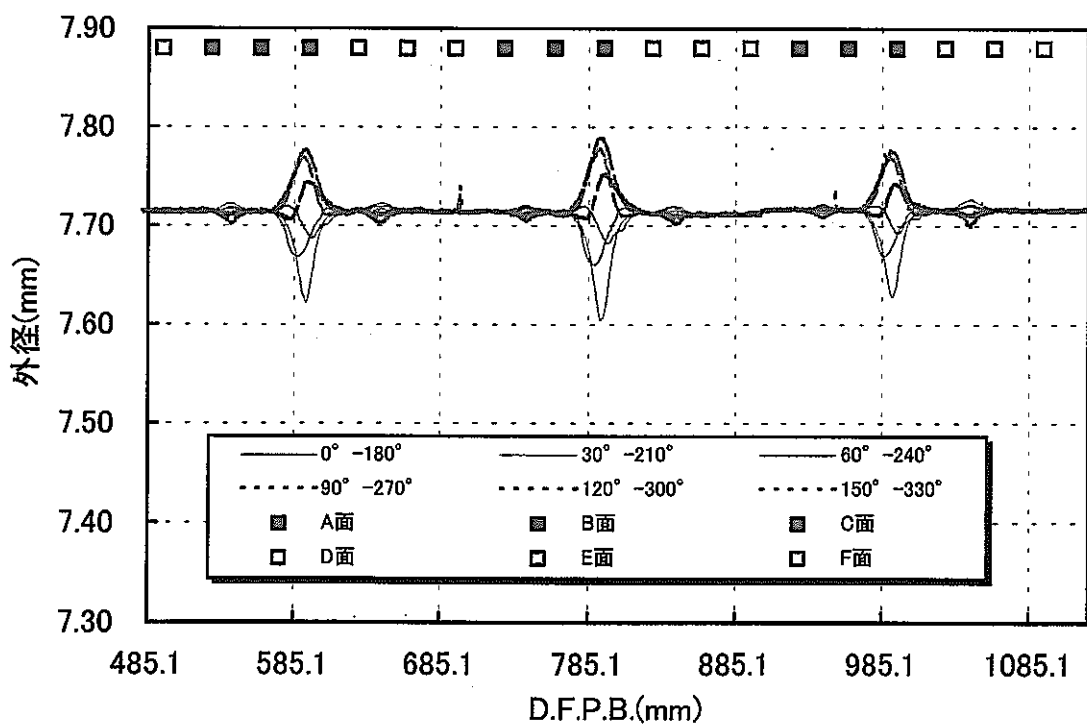


図3.38 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化バルジング：No. 28)

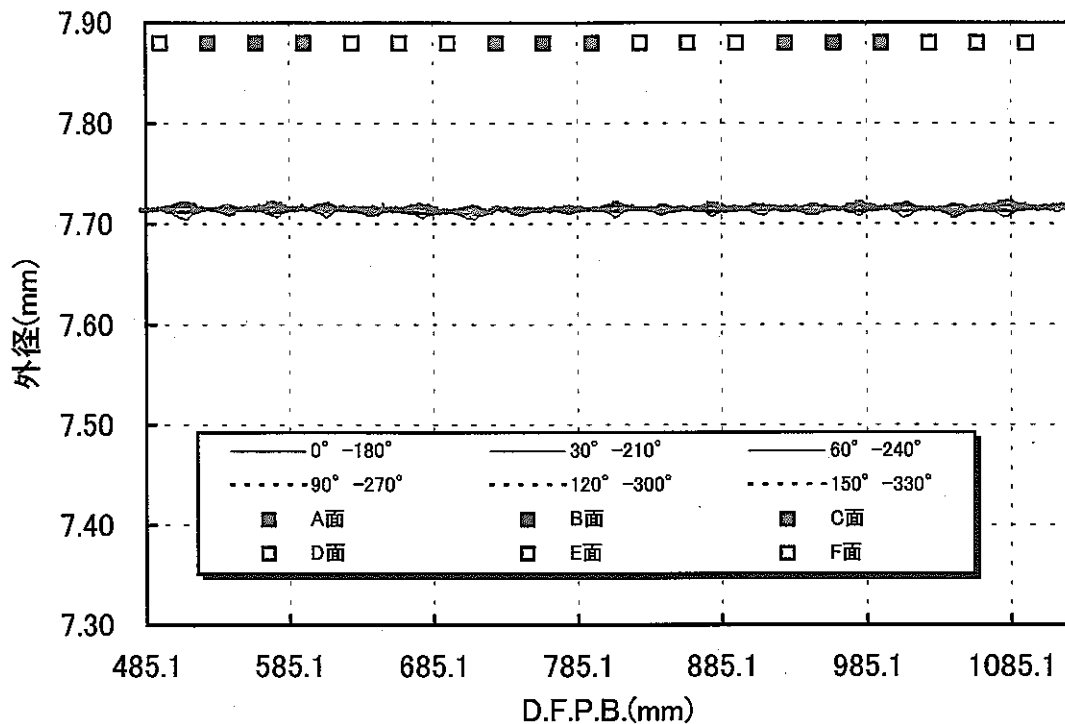


図3.39 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化バルジング : No.42)

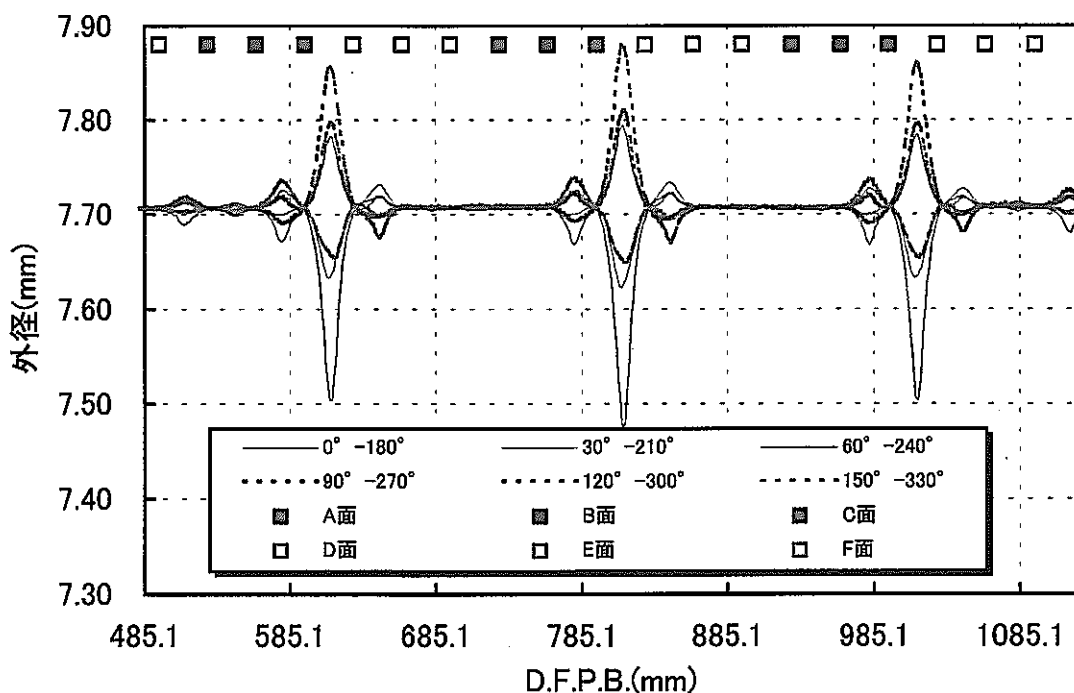


図3.40 外径軸方向プロファイルとワイヤ方向  
(高度化バルジング : No.93)

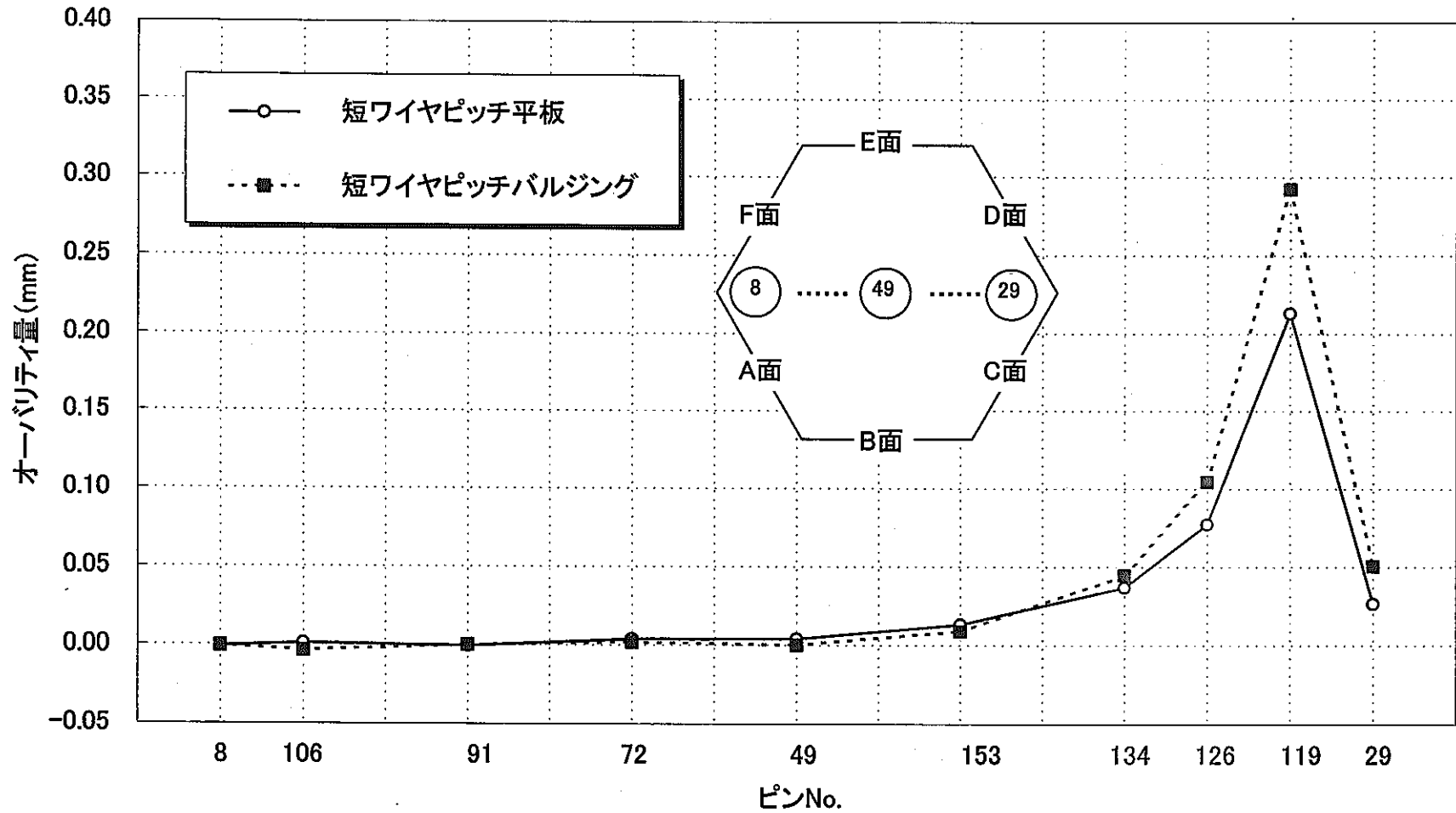


図3.41 対角ピン列における圧縮後のオーバービティ分布  
(短ワイヤピッチ仕様：CDJ-ナワイヤ位置)

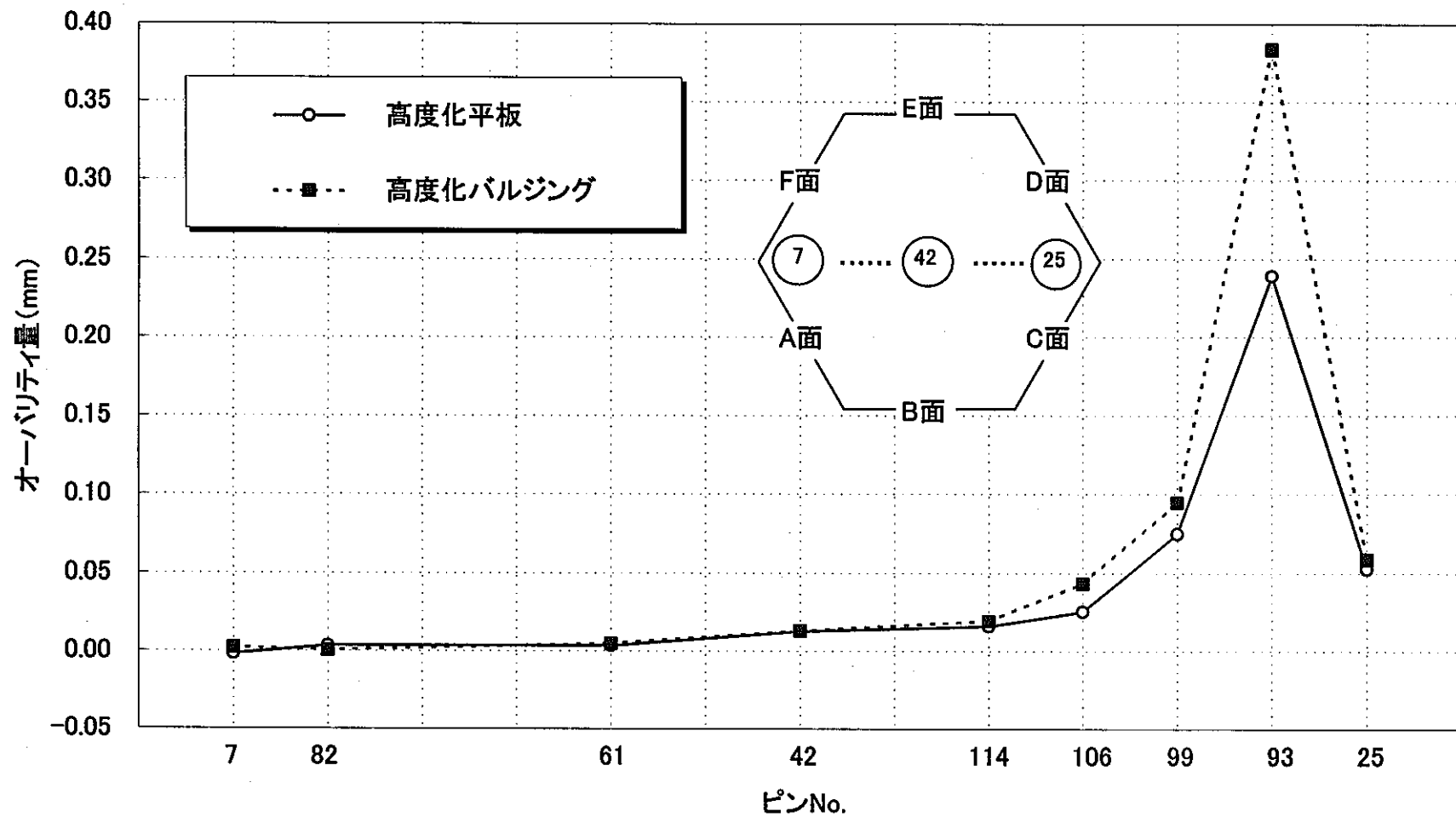


図3.42 対角ピン列における圧縮後のオーバープレィ分布  
(高度化仕様：CDコ-ナワヤ位置)

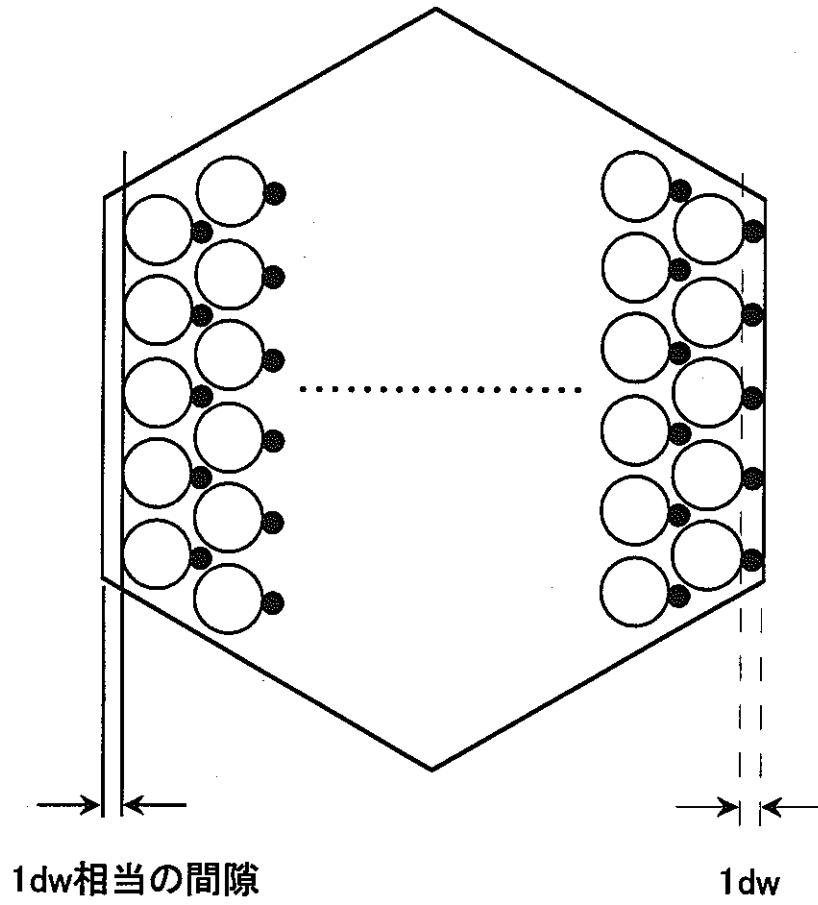
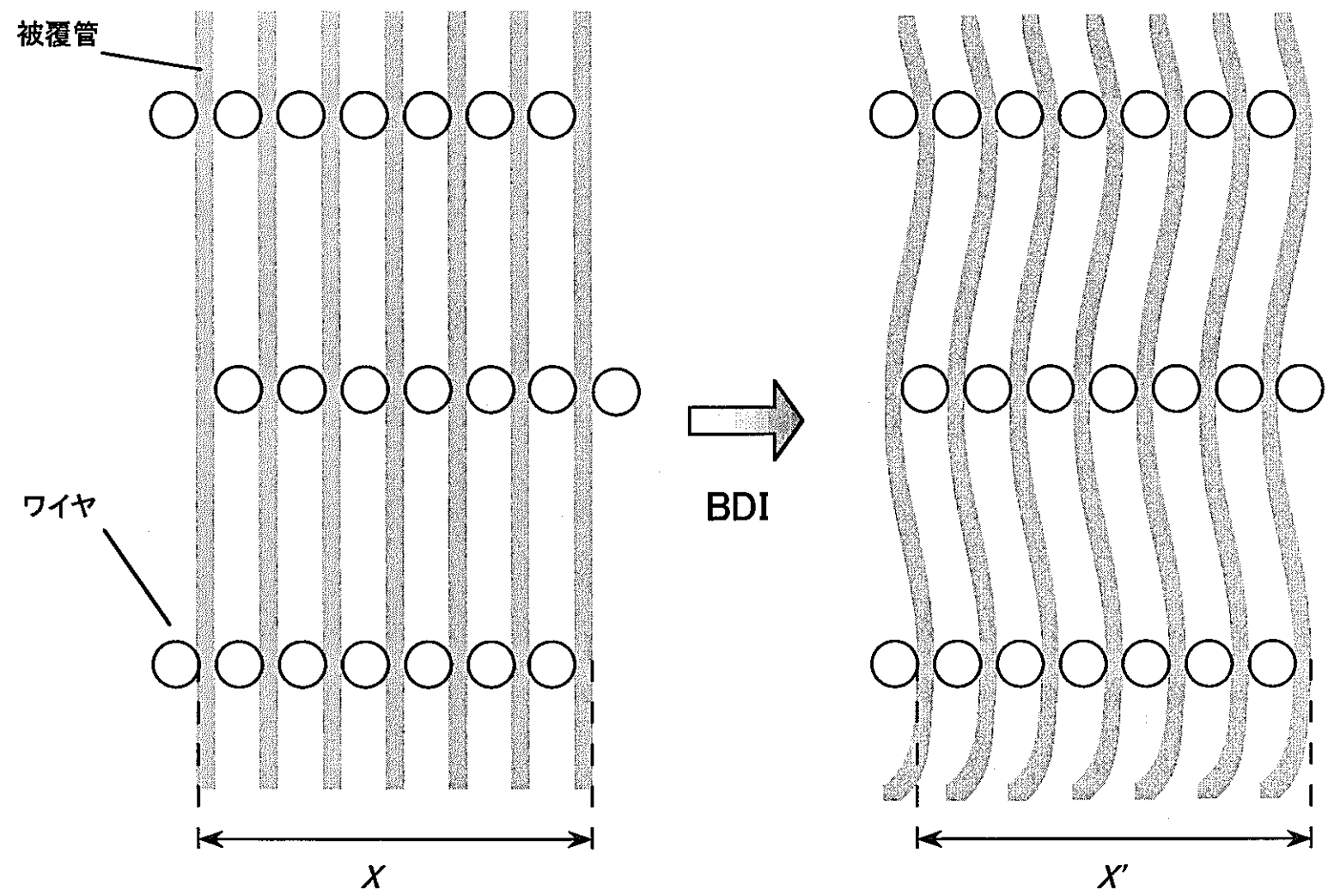


図4.1 理想的なピン配列状態のバンドル



バンドルがピンの湾曲のみで変形する場合:  $X = X'$   
BDIの緩和が発生する場合:  $X > X'$

図4.2 BDIの増加に伴うバンドルサイズの変化

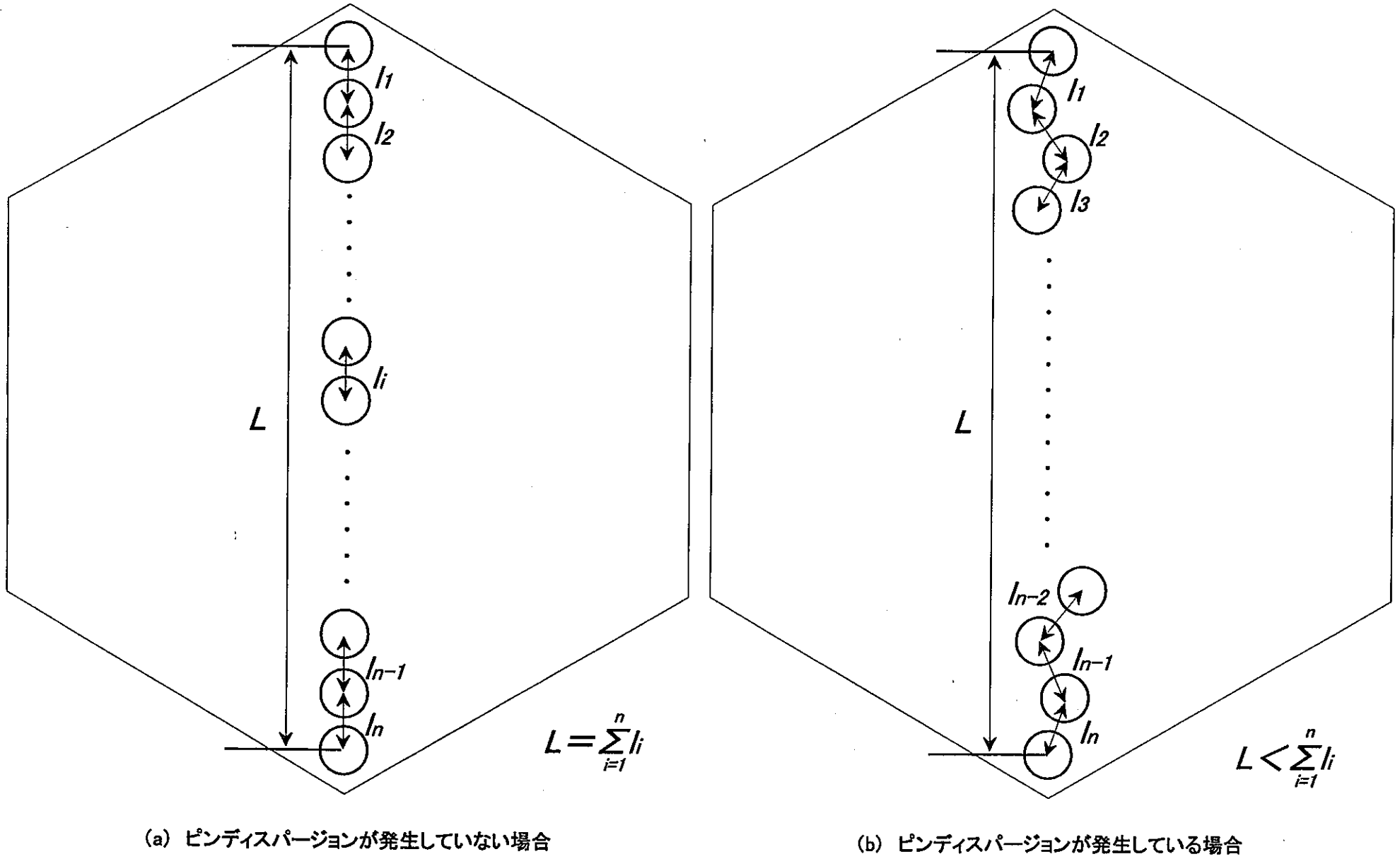


図4.3 ピンディスパージョン発生時期推定方法の考え方

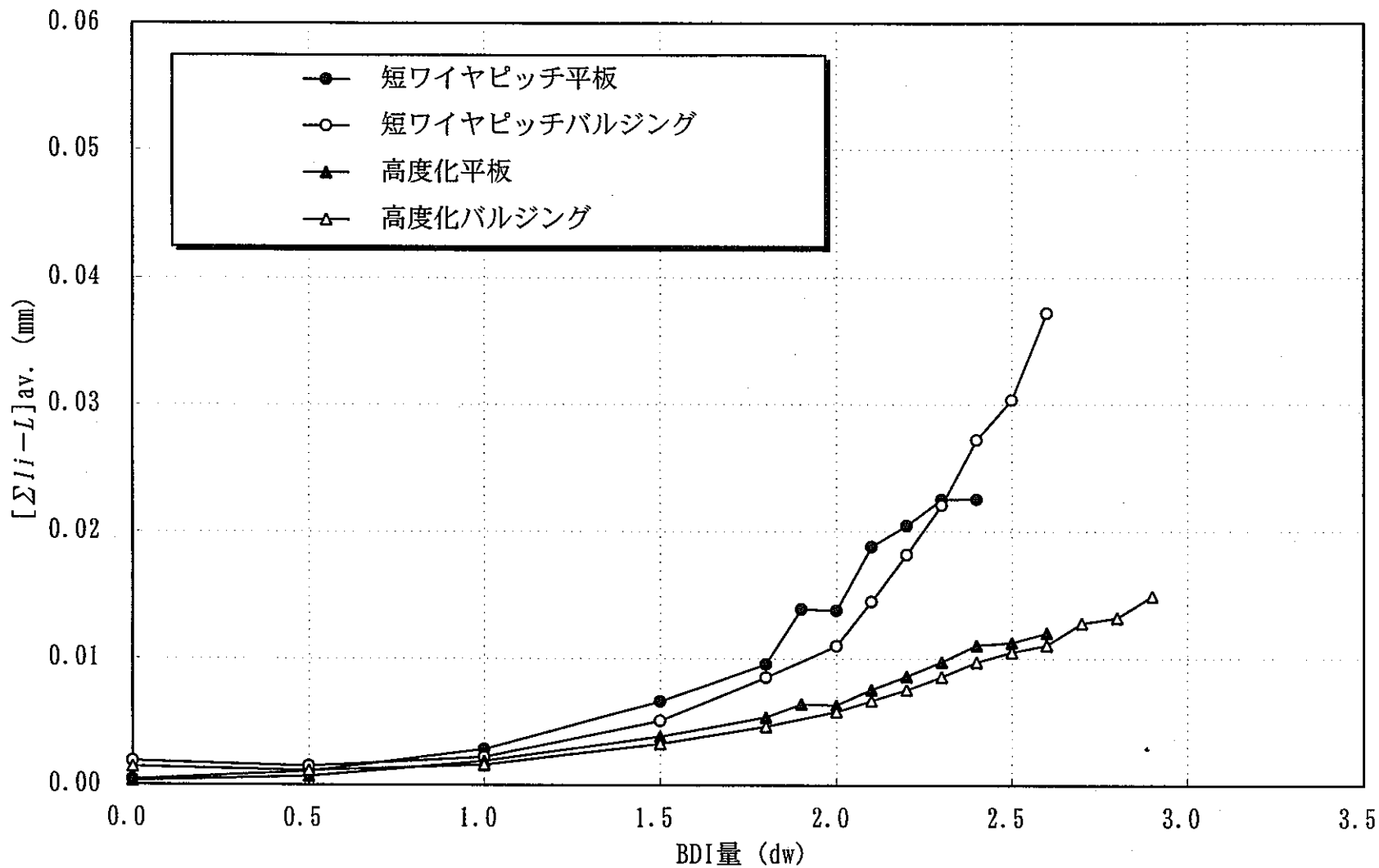


図4.4 ピンディスページョン発生時期の推定



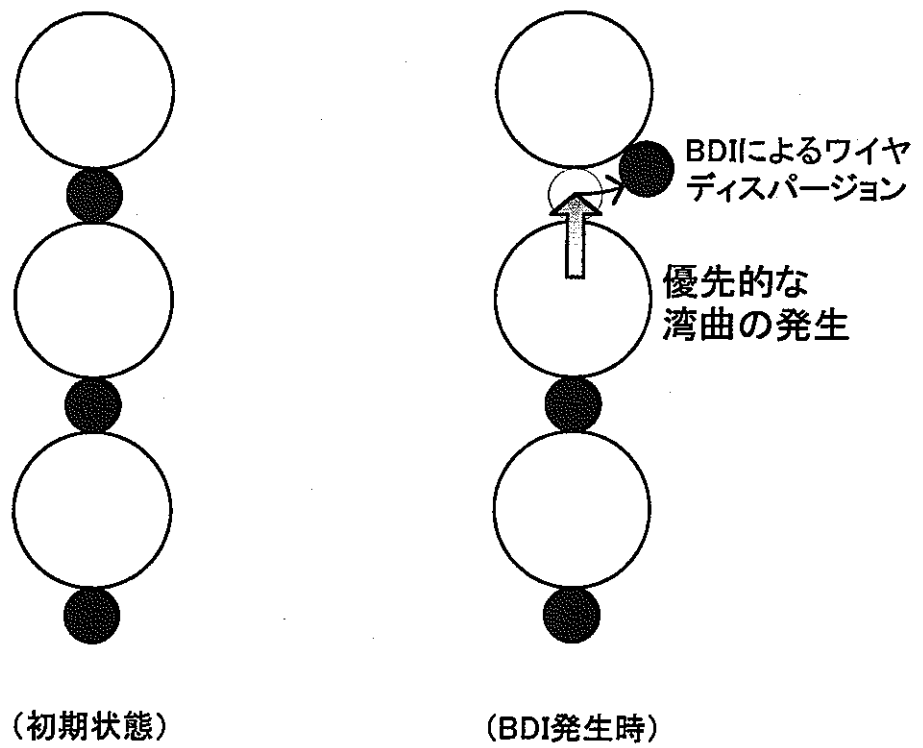


図4.5 ワイヤ空隙部への湾曲

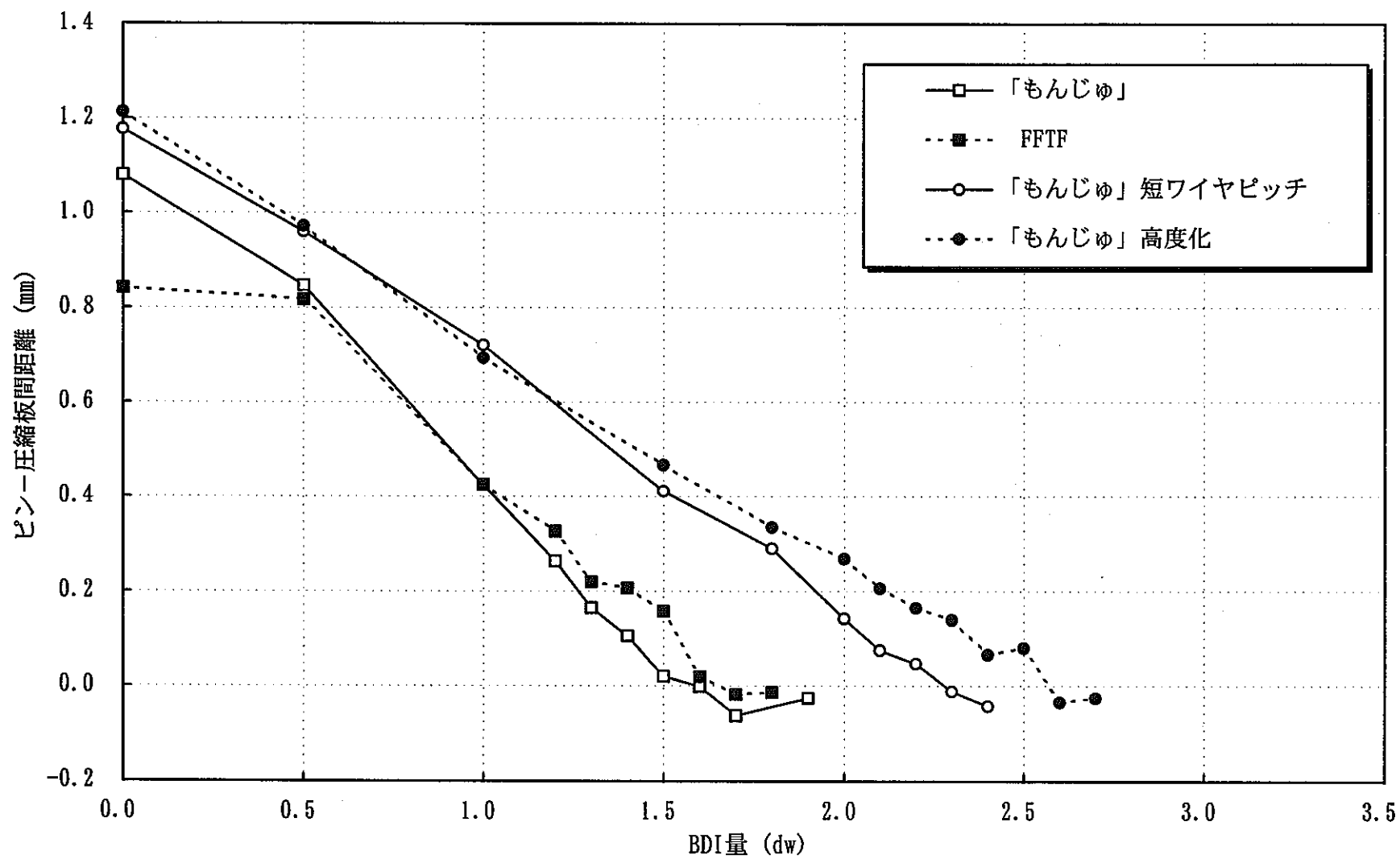


図4. 6 ピン-圧縮板間最小距離の変化 (平板)

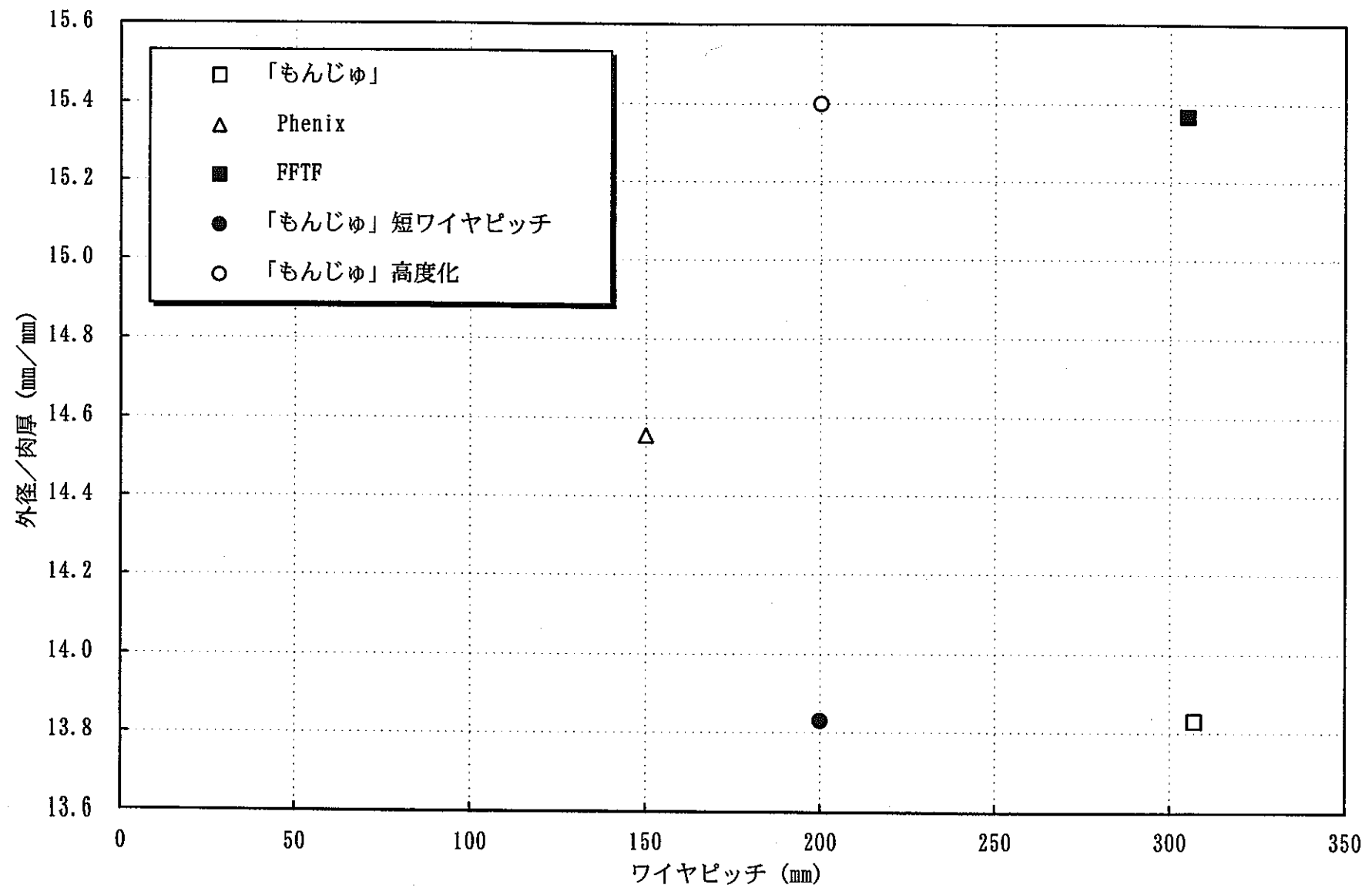


図4. 7 ワイヤピッチと外径肉厚比の関係

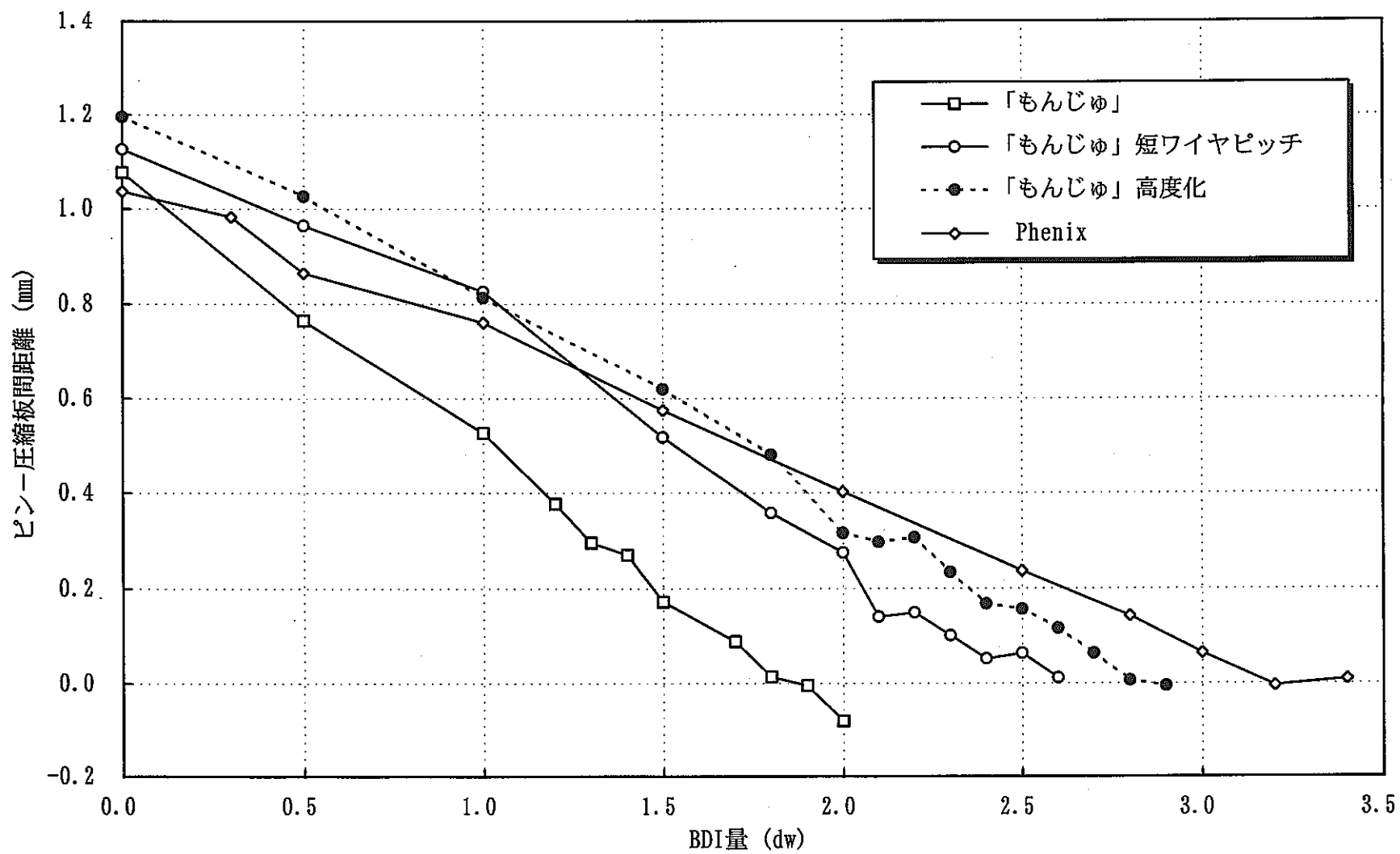


図4. 8 ピン-圧縮板間最小距離の変化 (バルジング)

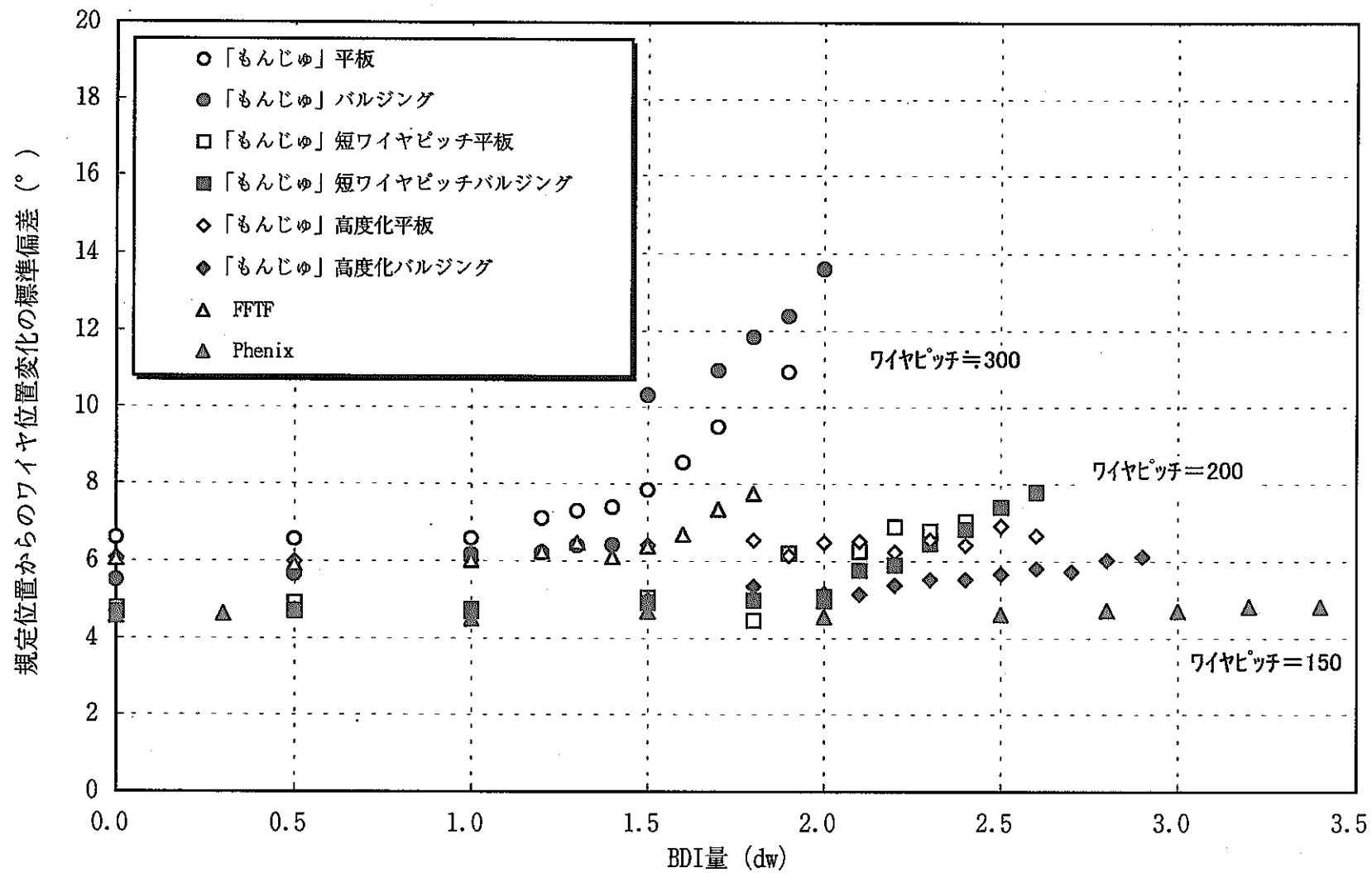


図4.9 ワイヤディスパージョン発生時期

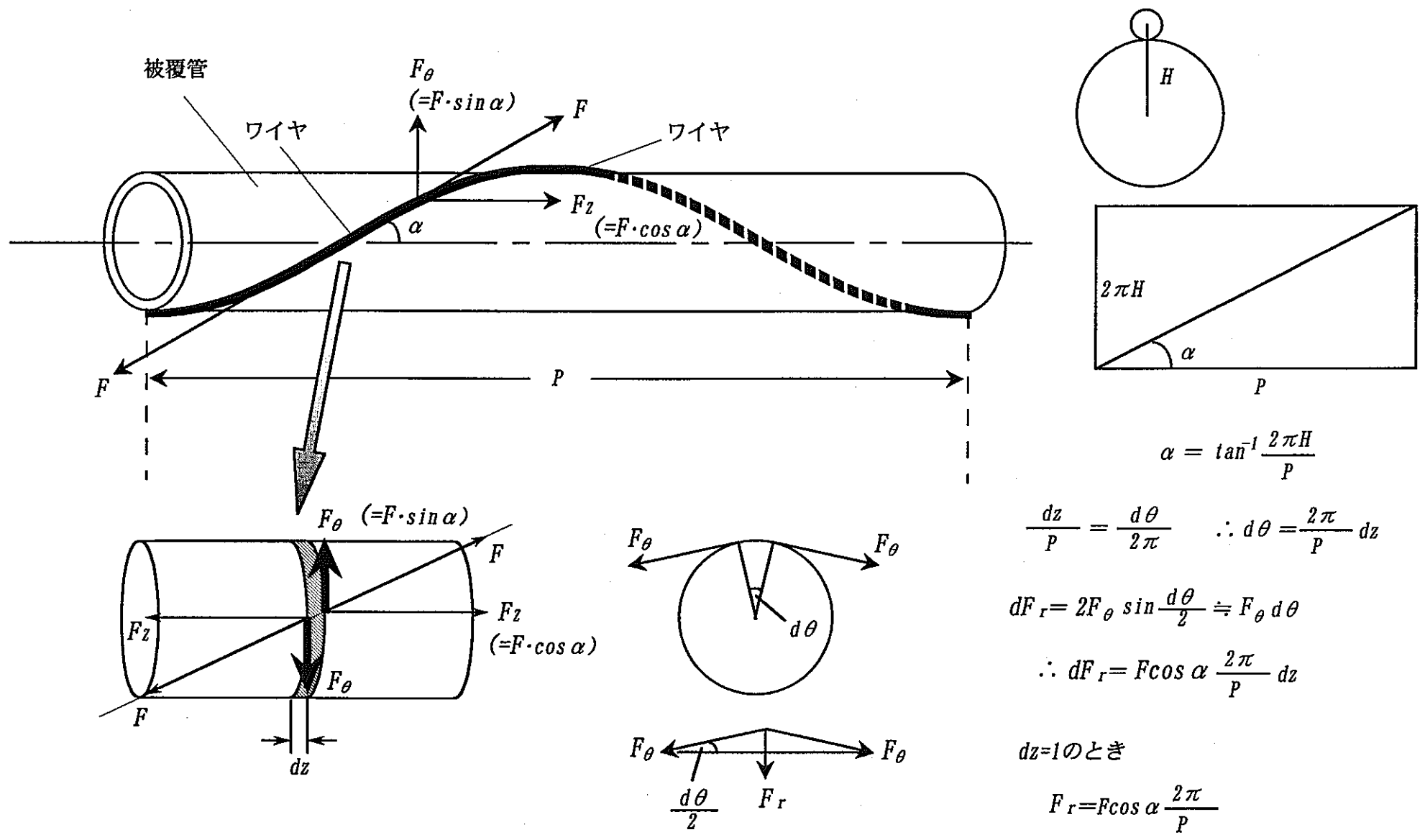


図4.10 ワイヤ巻き付け力とピン仕様との関係

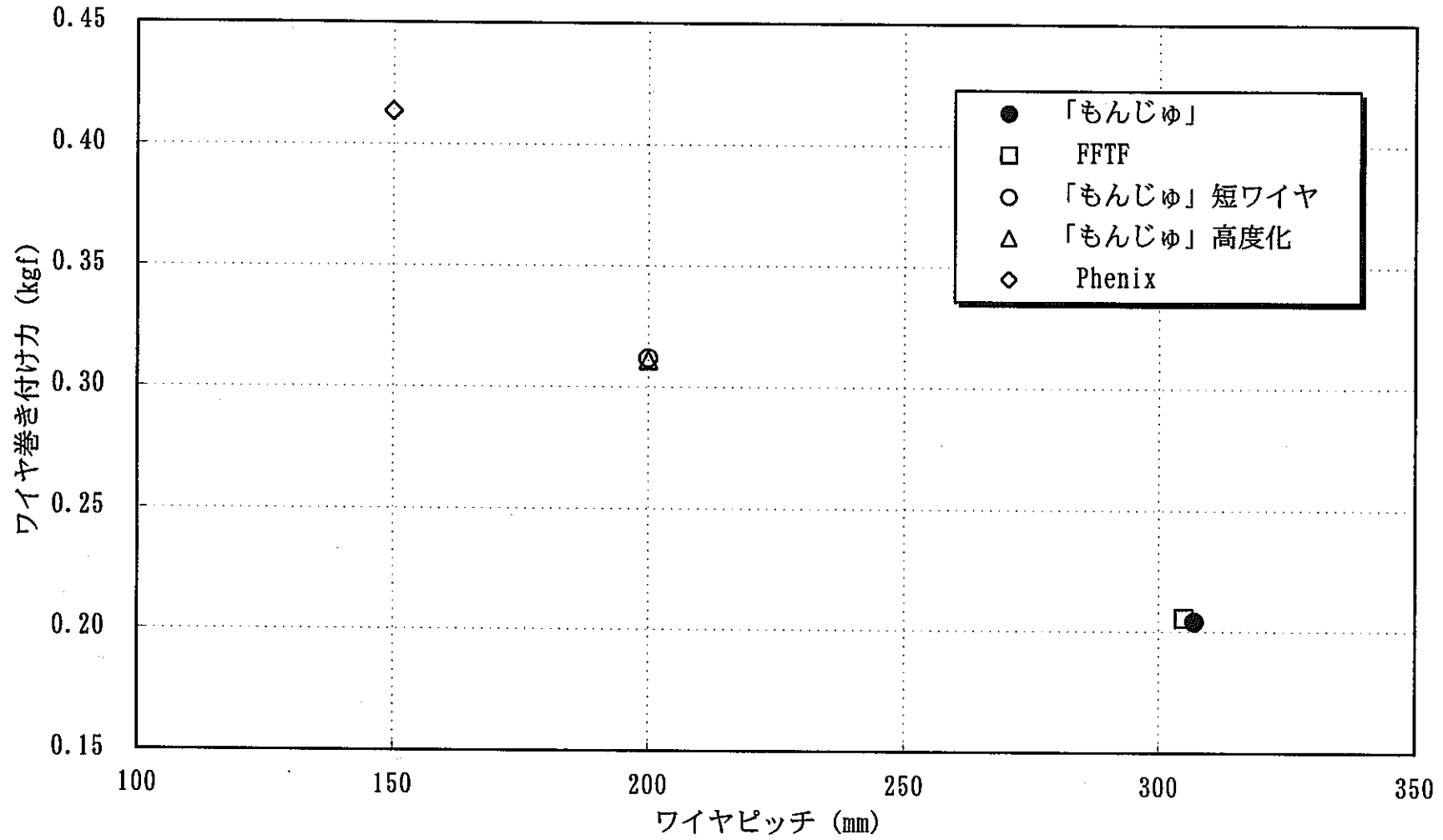


図4. 11 ワイヤピッチとワイヤ巻き付け力の関係

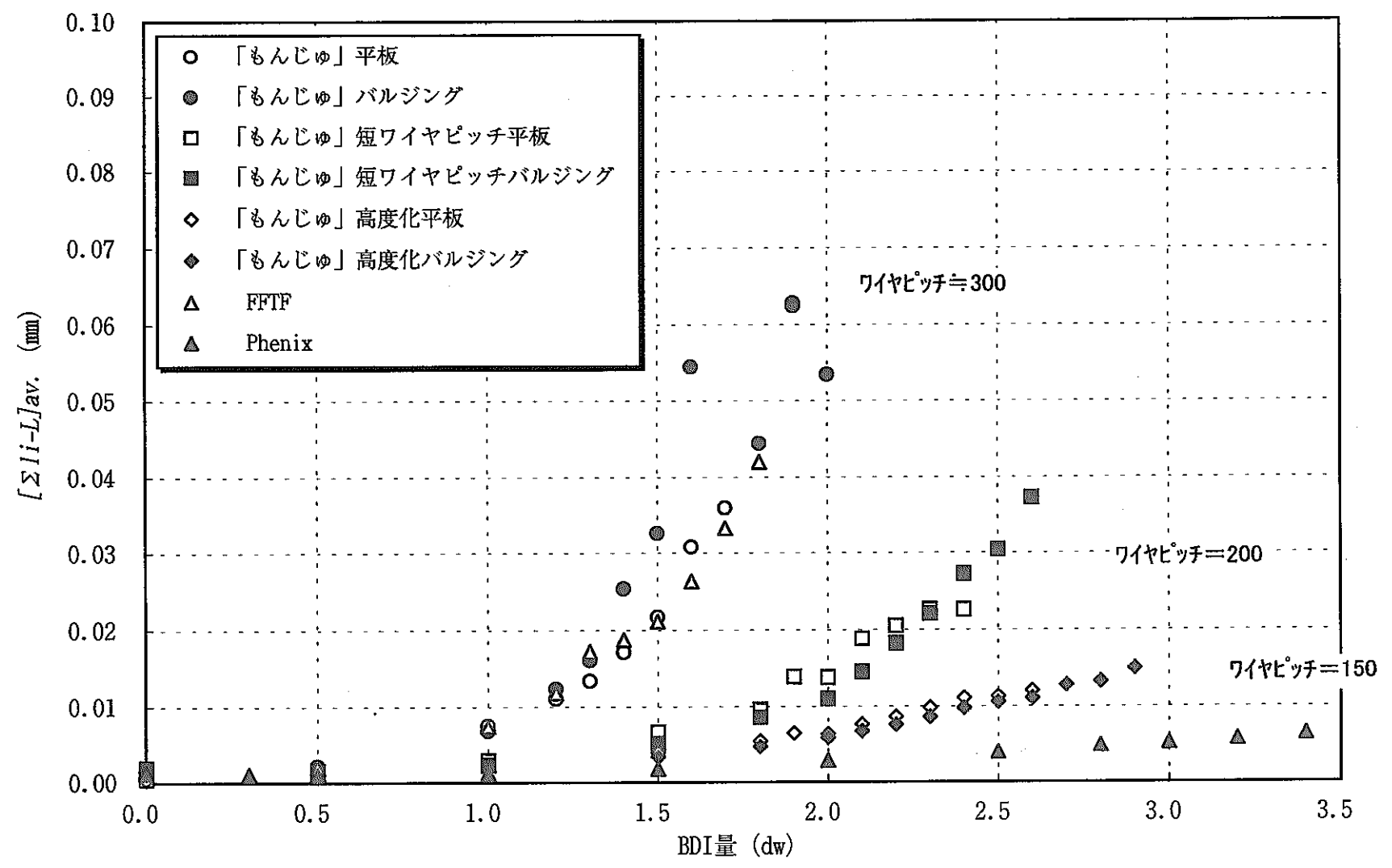


図4. 12 ピンディスパージョン発生時期の推定



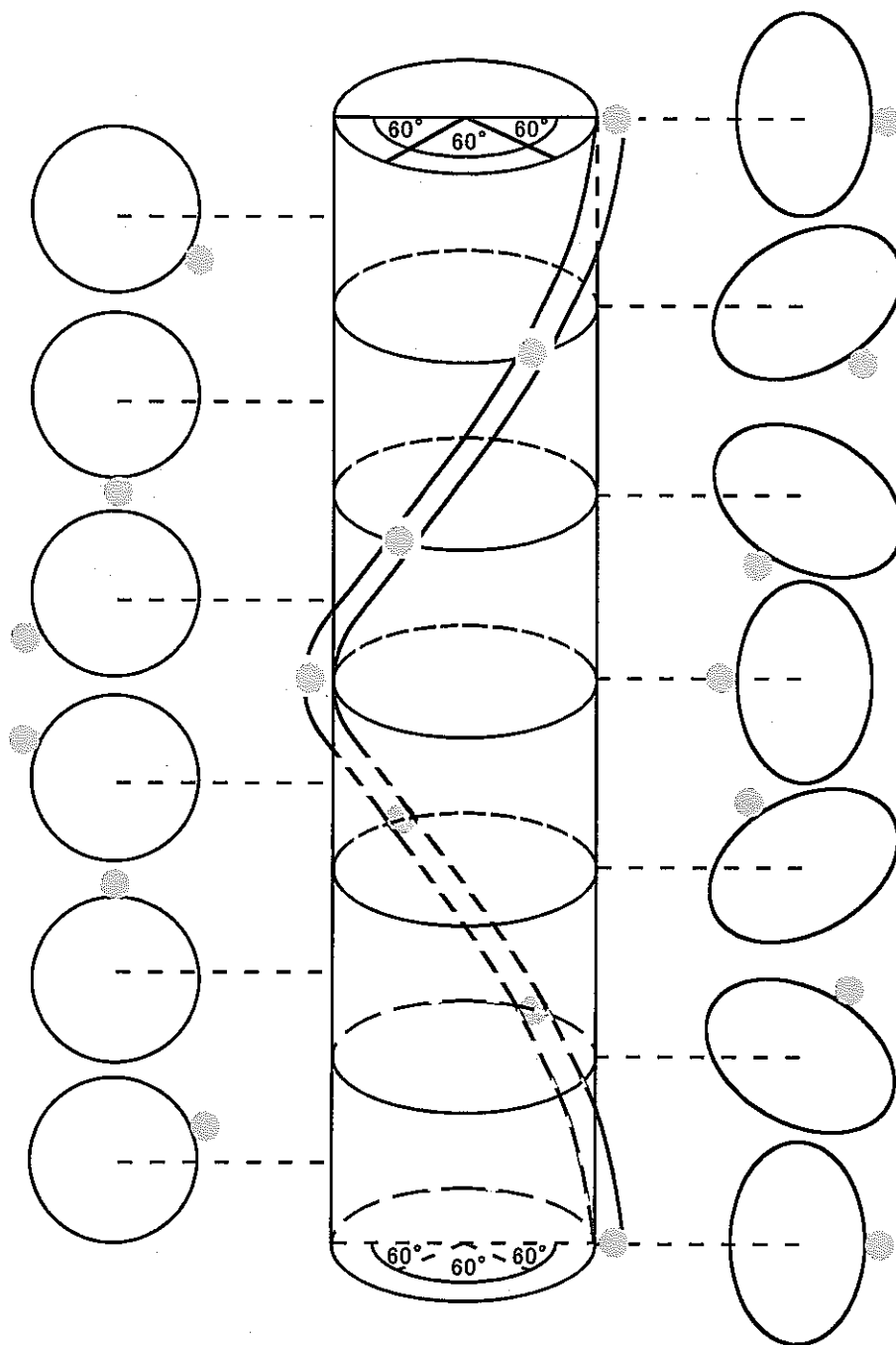


図4. 13 模擬的なBDI発生時の被覆管の変形

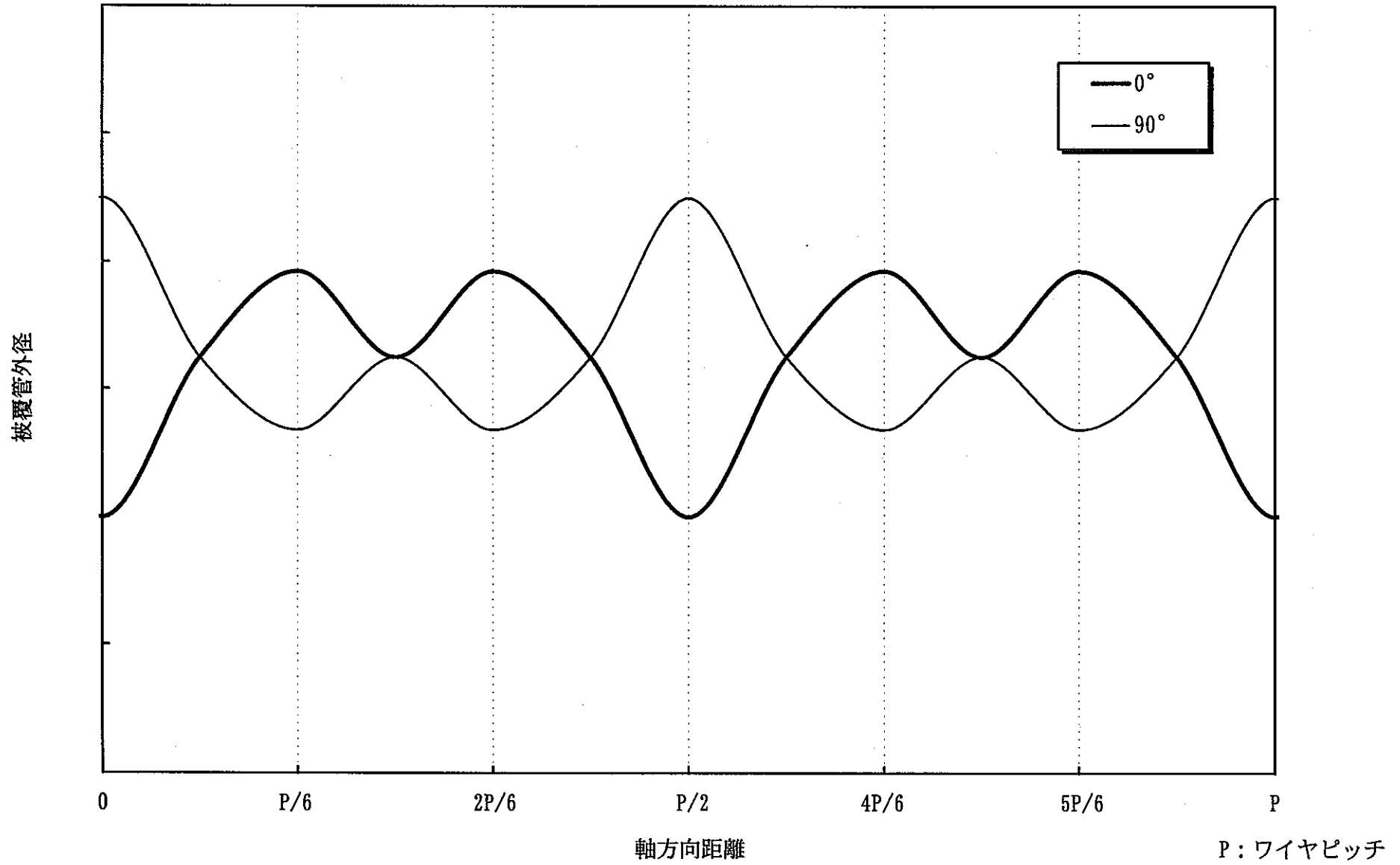


図4. 14 BDI発生時の被覆管外径軸方向プロファイル (模式図)

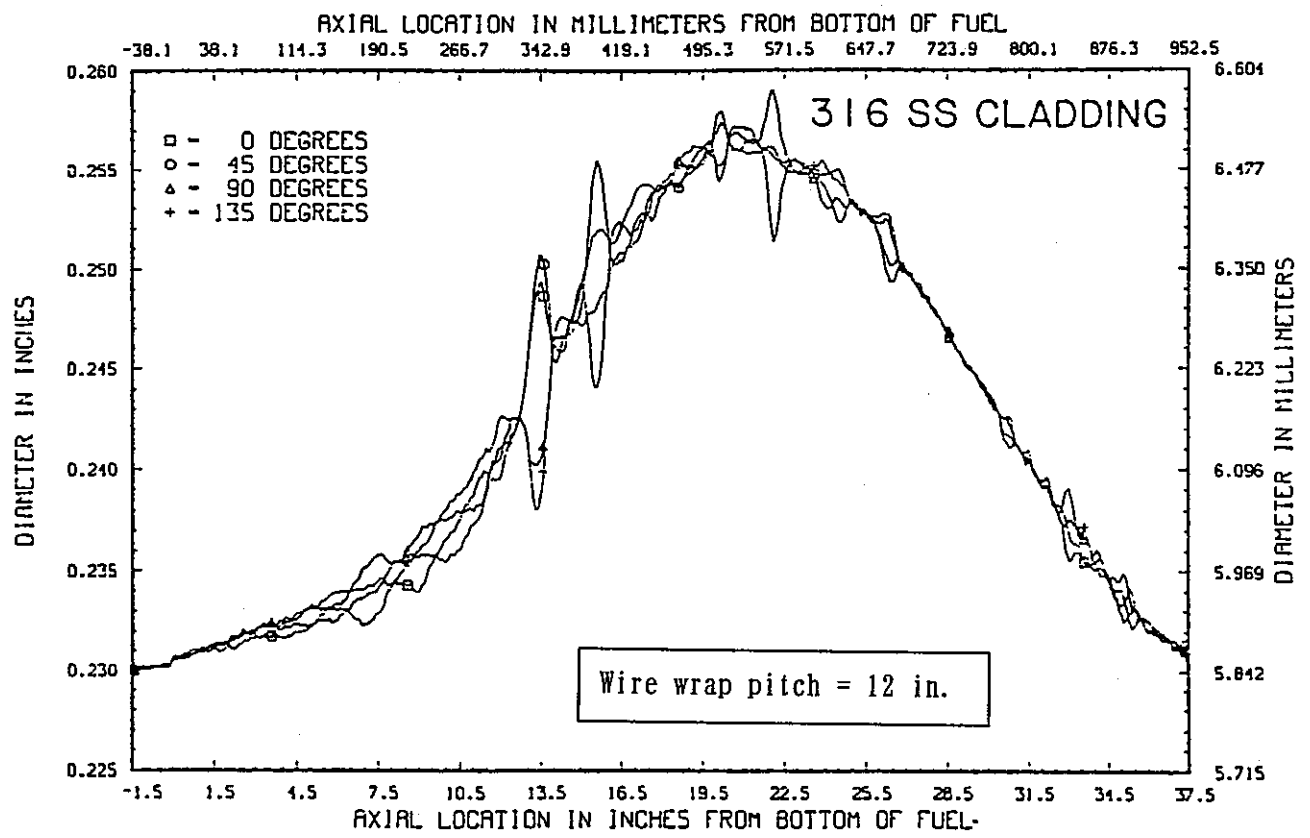


図4.15 米国FFTF炉で $17 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ まで照射されたSUS316鋼製燃料ピンの外径プロフィール

[ B.J.Makenas, 「Performance of Titanium Stabilized D9 Cladding and Ducts」,  
 Proceedings of ANS International Conference on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, 3-52, (1986)  
 より引用 ]

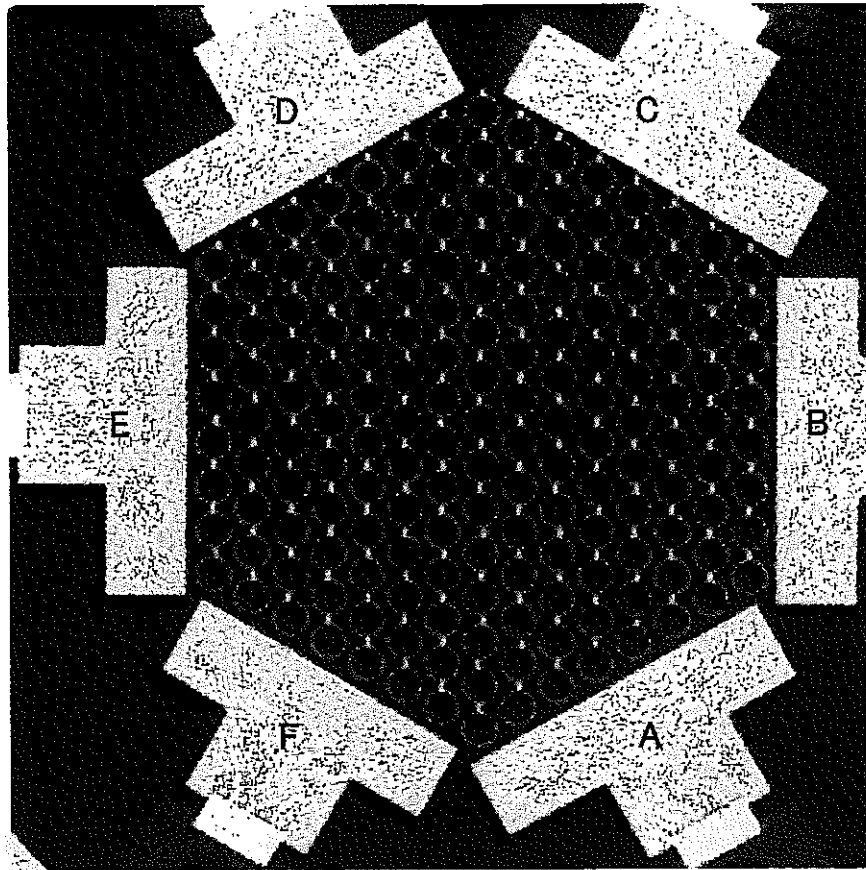


写真 3.1 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板: 0dw)

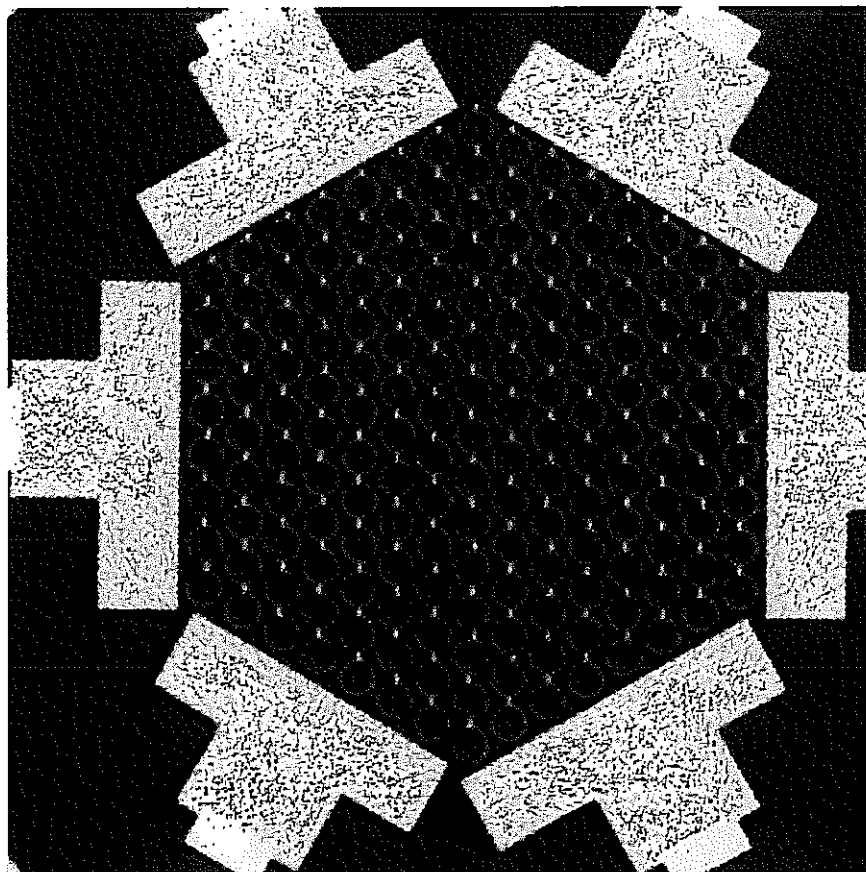


写真 3.2 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板: 0.5dw)

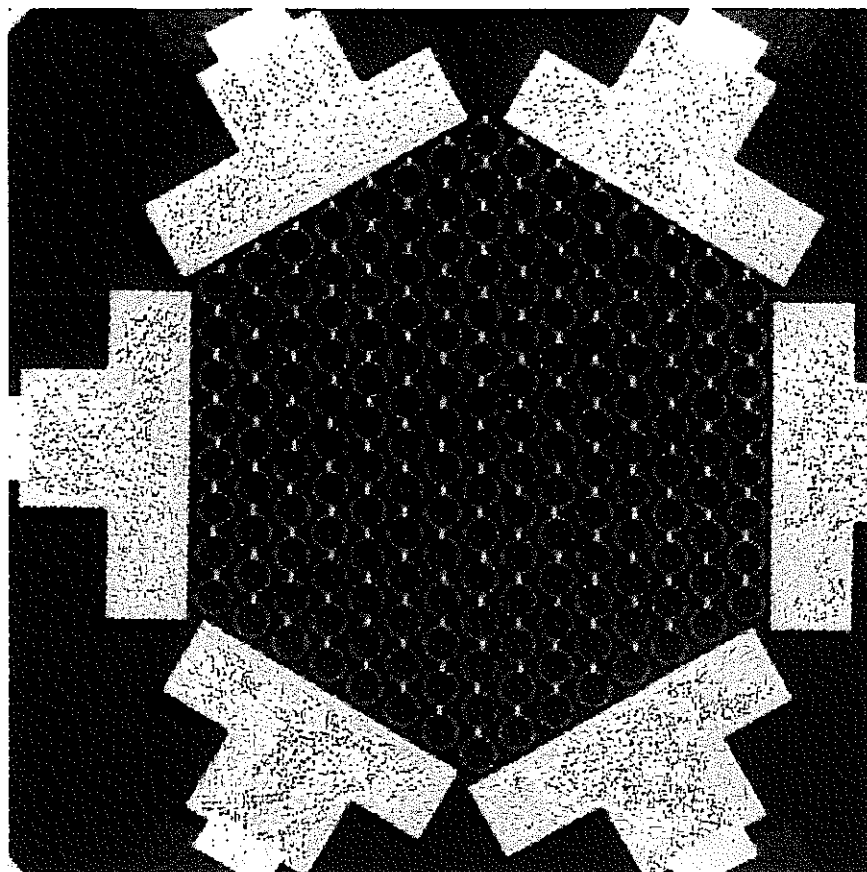


写真 3.3 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 1.0dw)

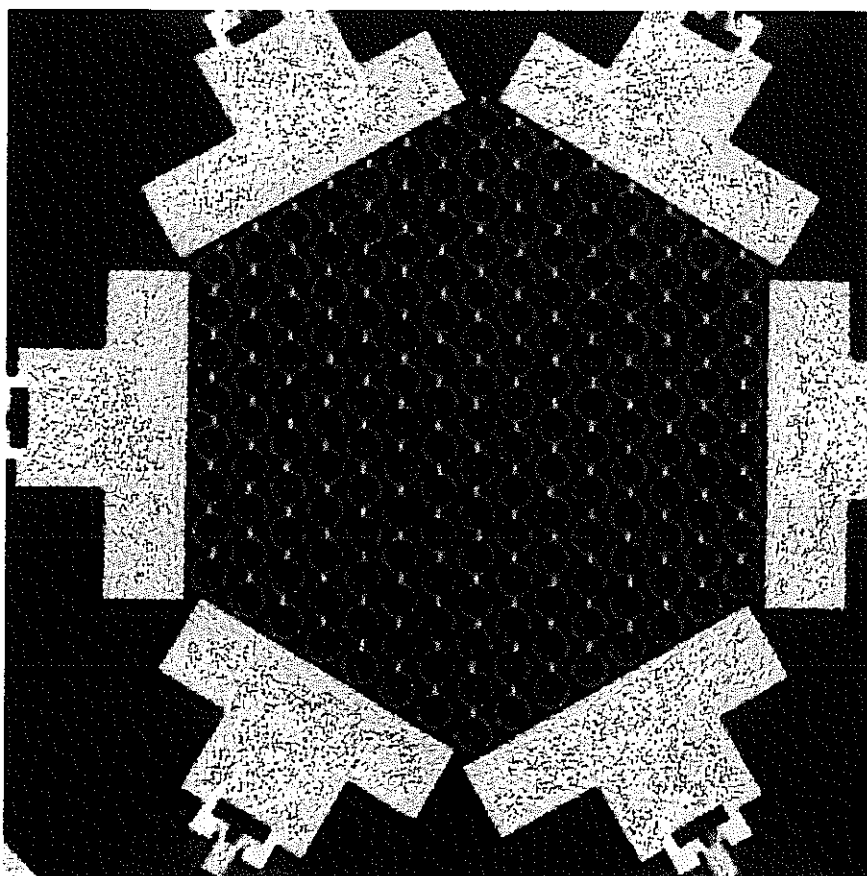


写真 3.4 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 1.5dw)

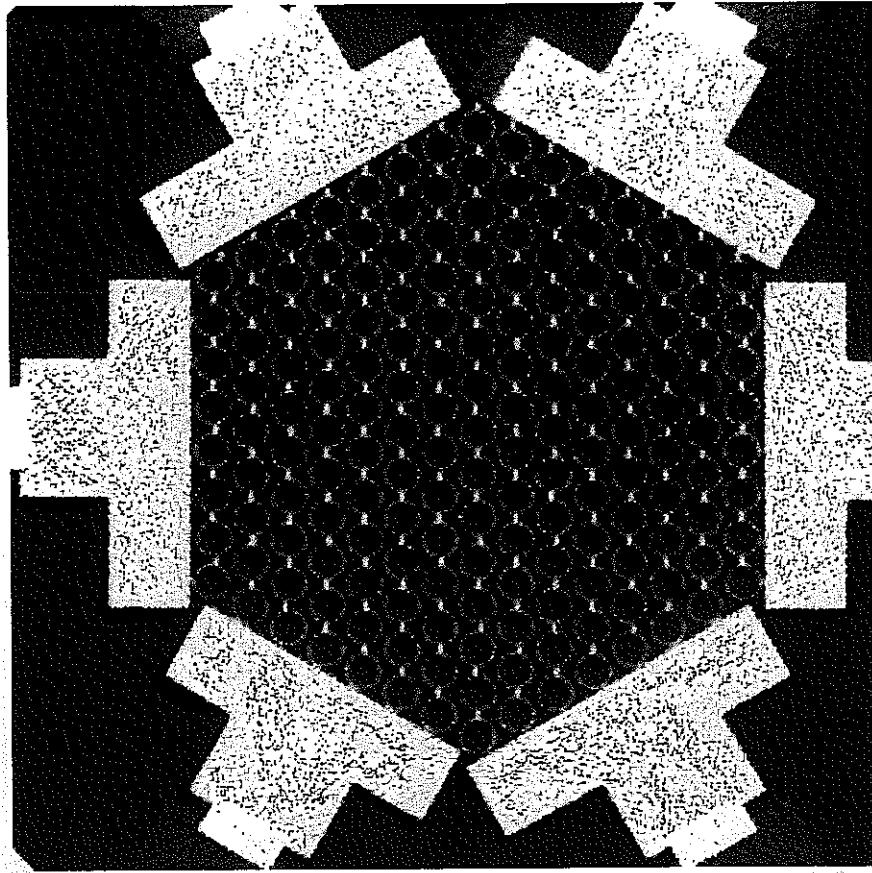


写真 3.5 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 2.0dw)

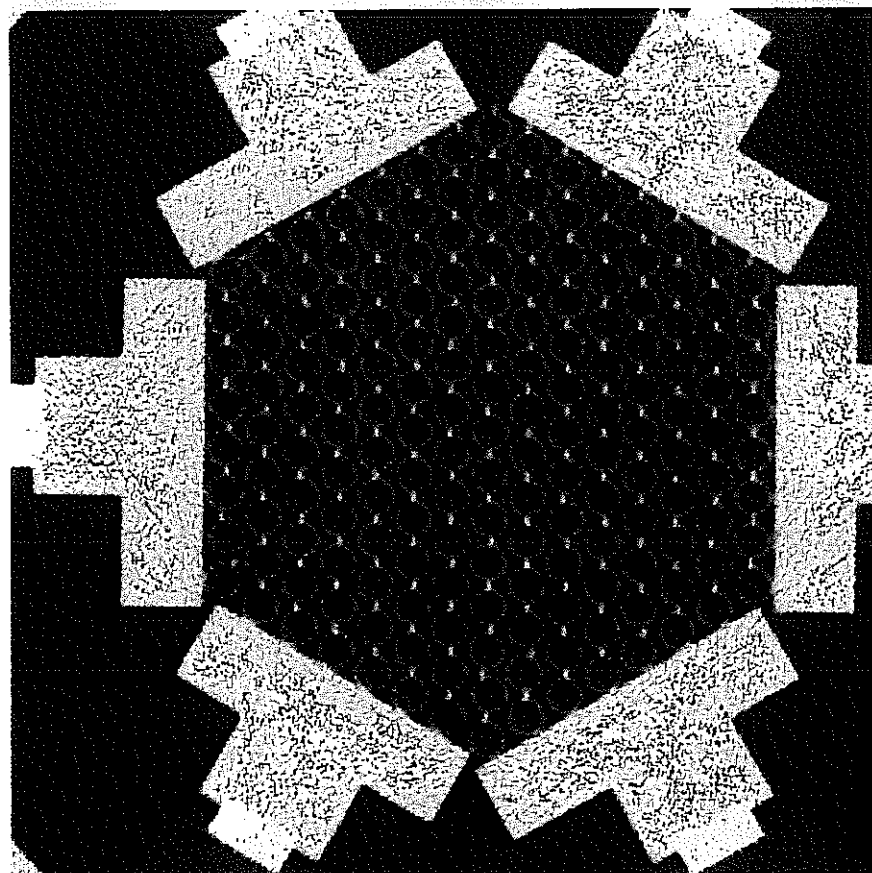


写真 3.6 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチ平板 : 2.4dw)

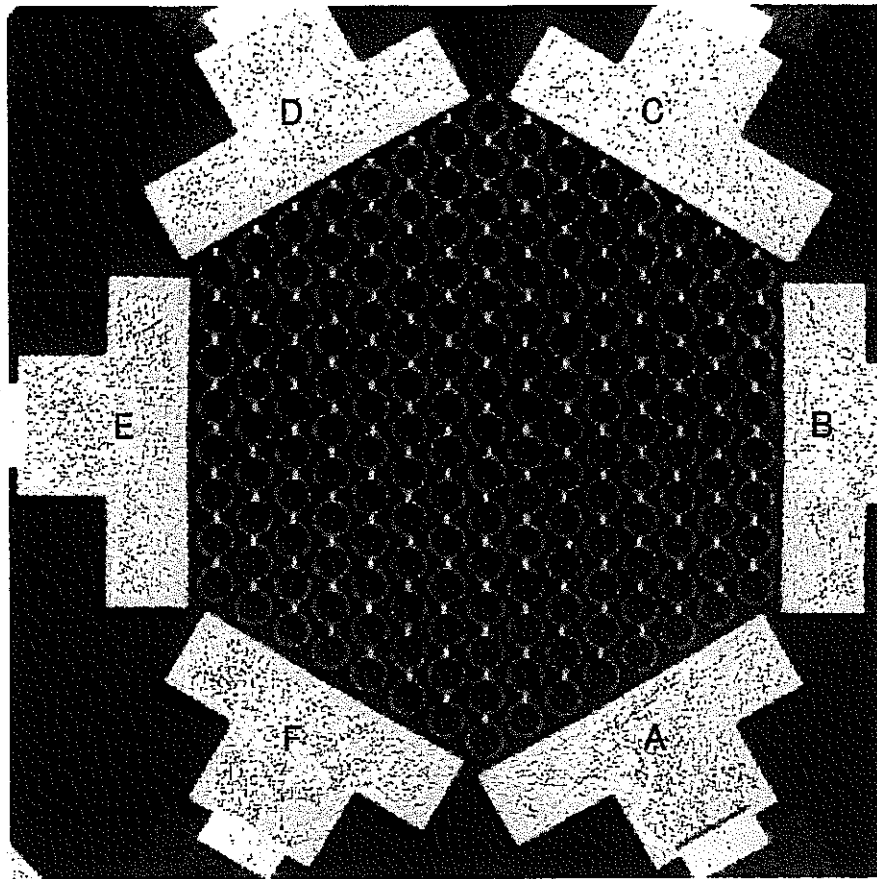


写真 3.7 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 0dw)

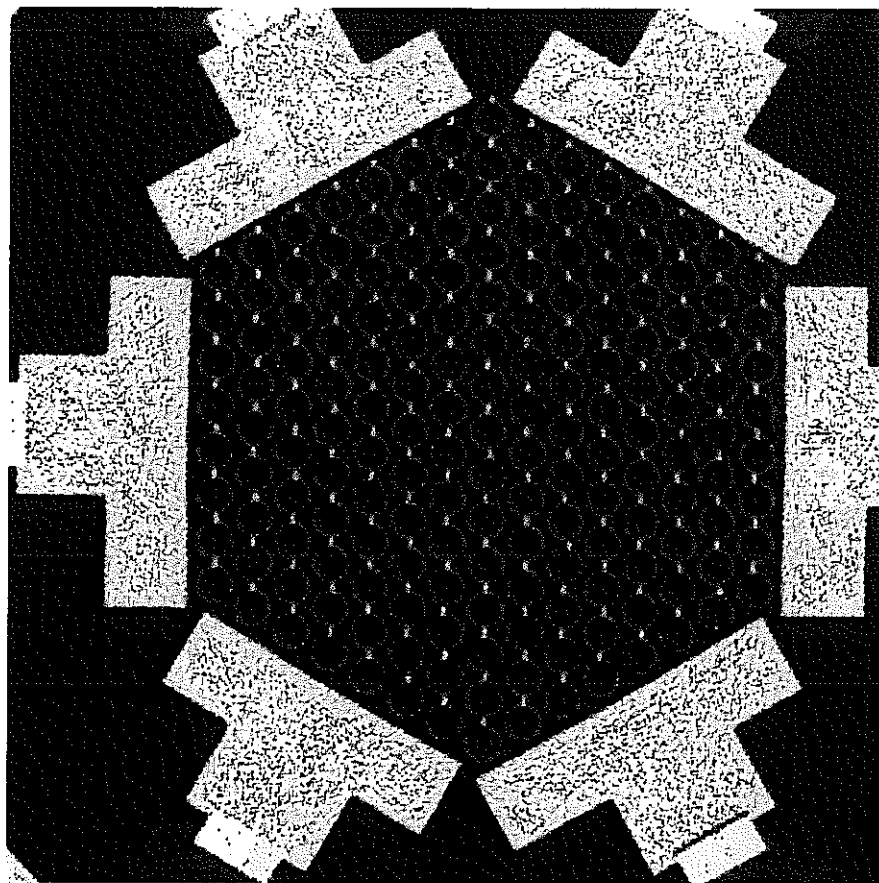


写真 3.8 X線 CT 画像 (短ワイヤピッチバルジング : 0.5dw)

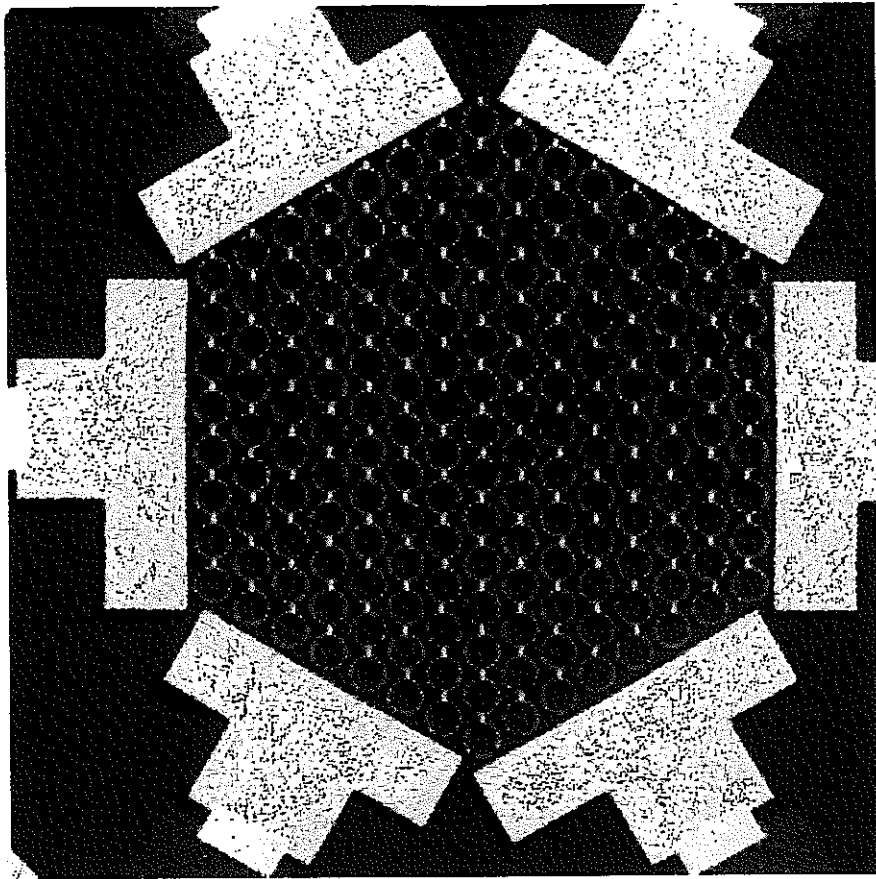


写真 3.9 X線CT画像（短ワイヤピッチバルジング：1.0dw）

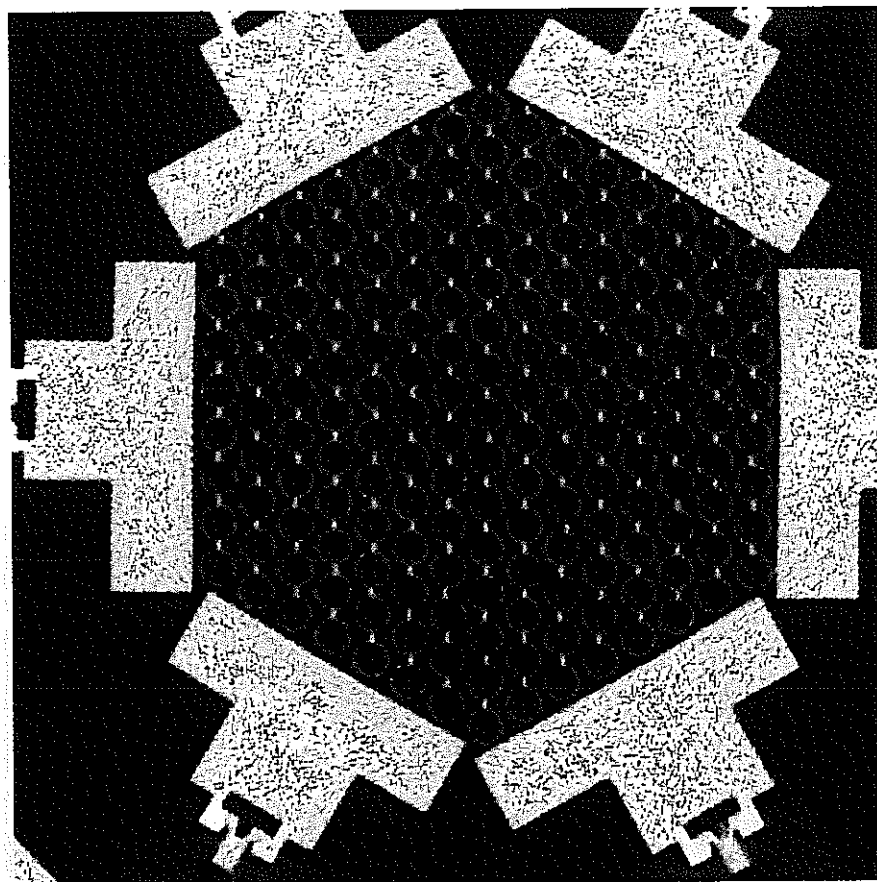


写真 3.10 X線CT画像（短ワイヤピッチバルジング：1.5dw）



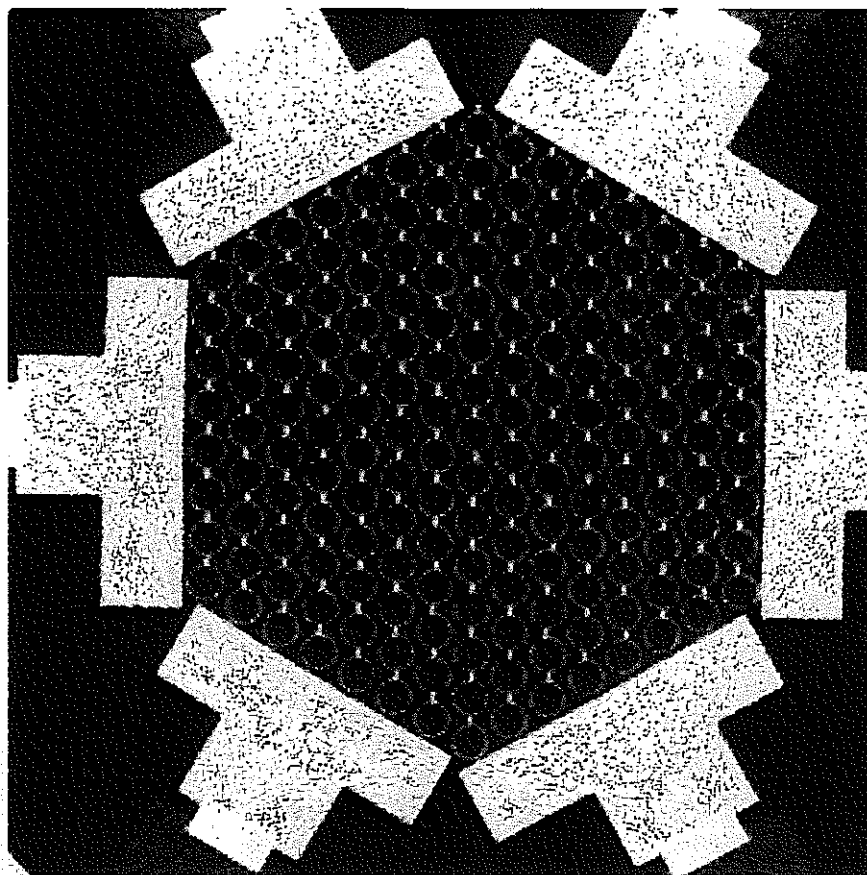


写真 3.11 X線CT画像 (短ワイヤピッチバルジング : 2.0dw)

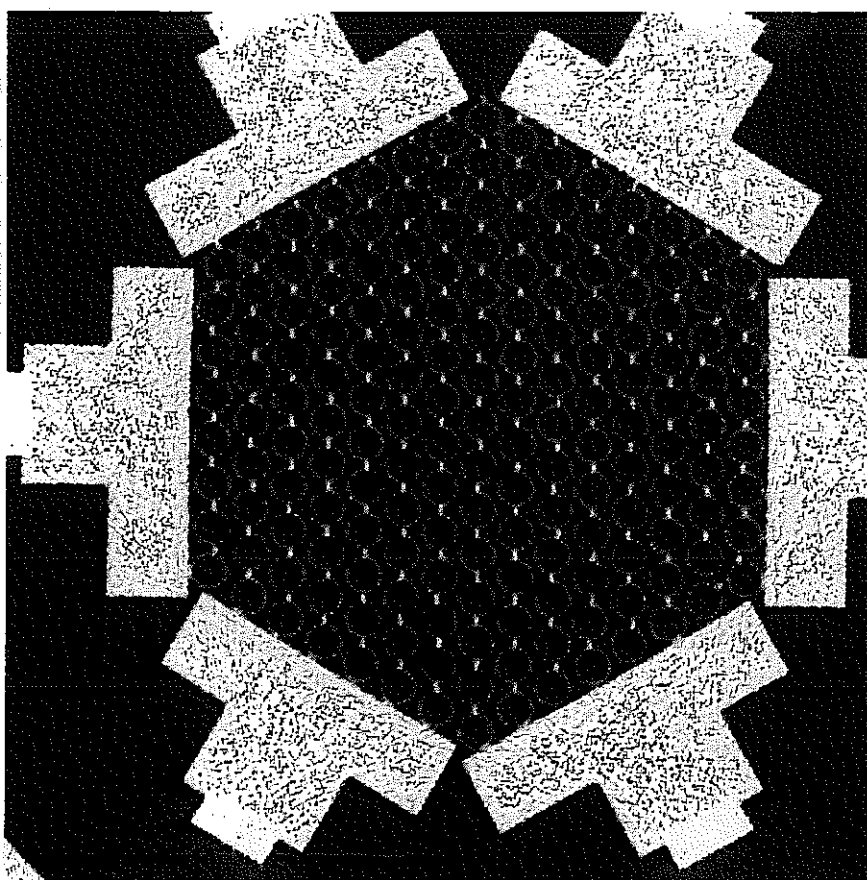


写真 3.12 X線CT画像 (短ワイヤピッチバルジング : 2.5dw)

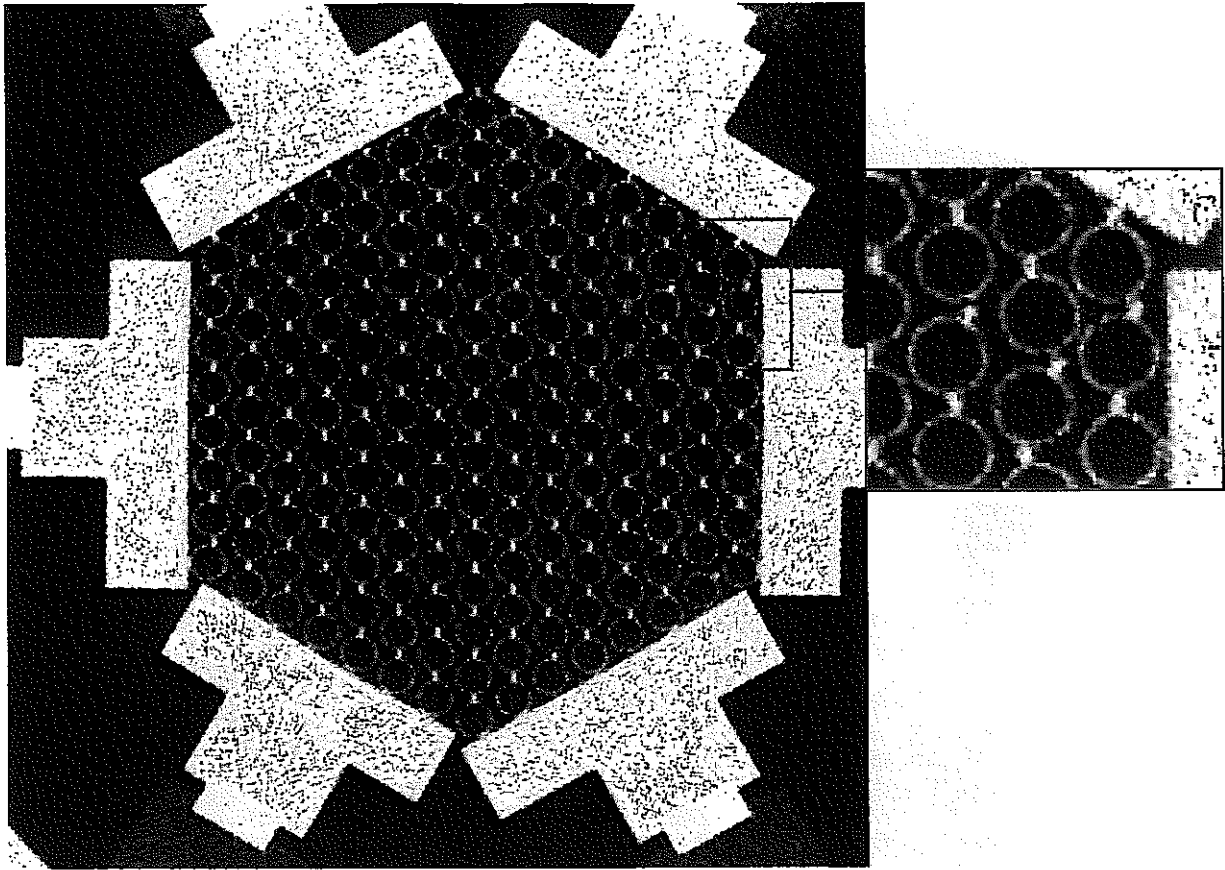


写真 3.13 X線CT画像（短ワイヤピッチバルジング：2.6dw）

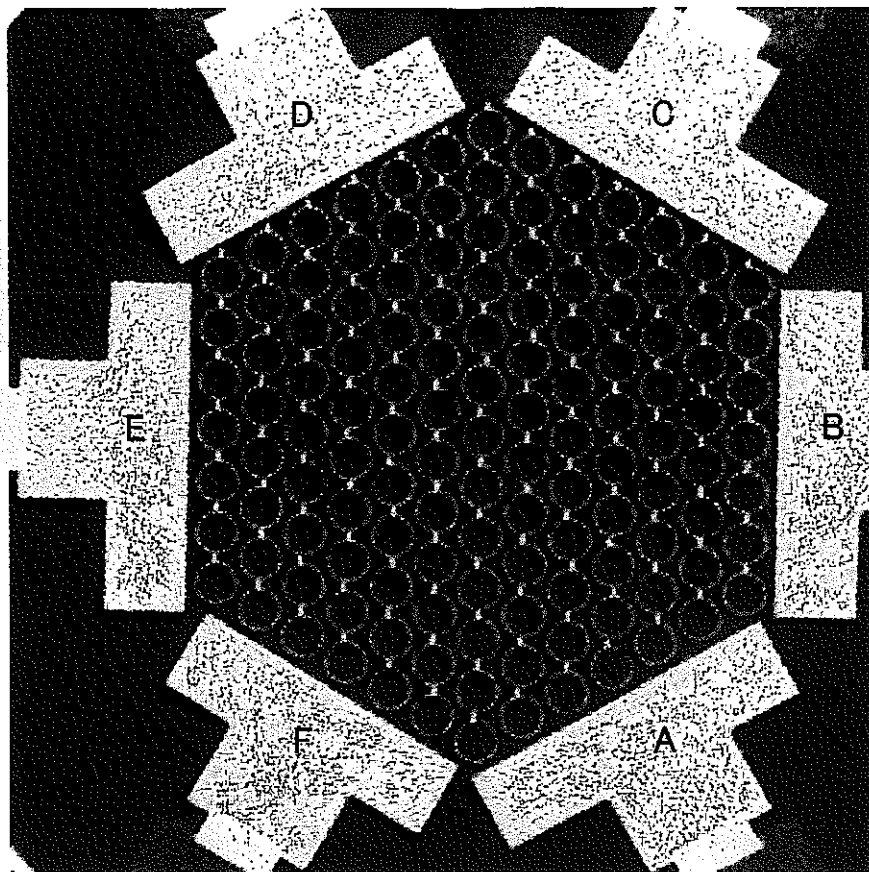


写真 3.14 X線 CT 画像 (高度化平板 : 0dw)

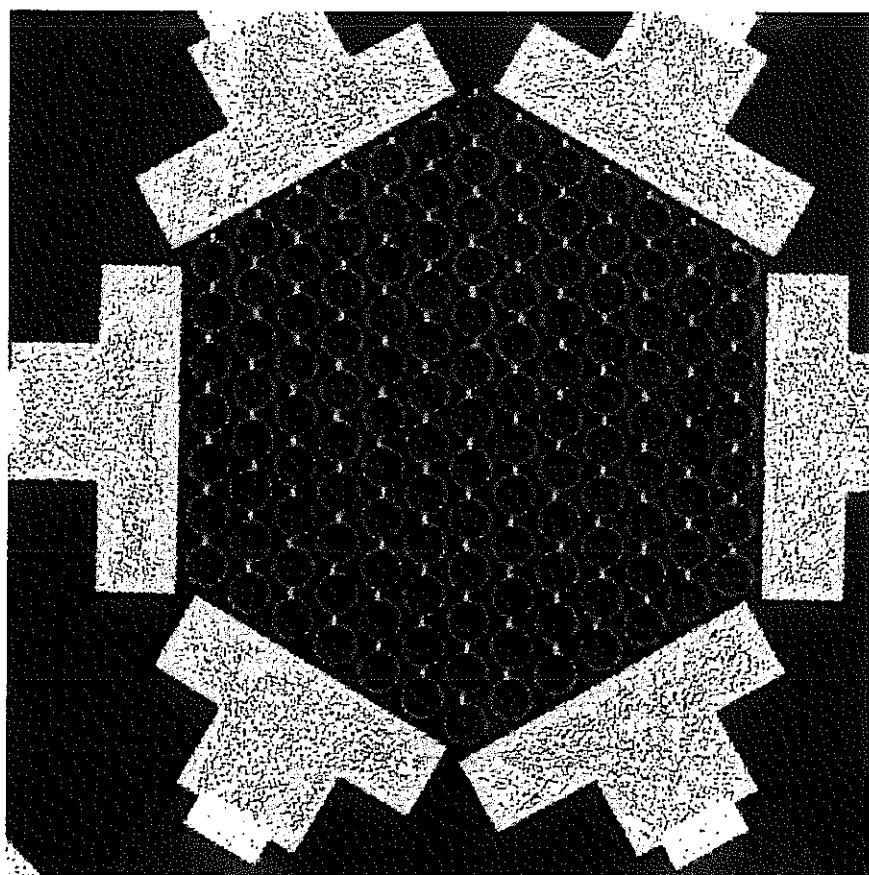


写真 3.15 X線 CT 画像 (高度化平板 : 0.5dw)

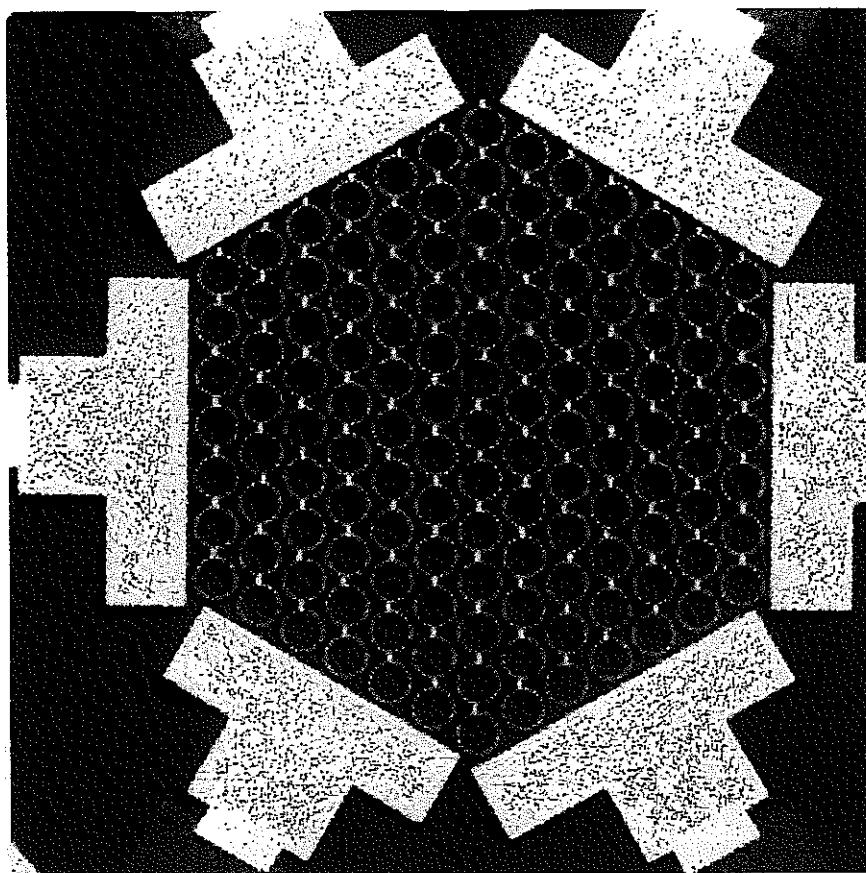


写真 3.16 X線 CT 画像 (高度化平板 : 1.0dw)

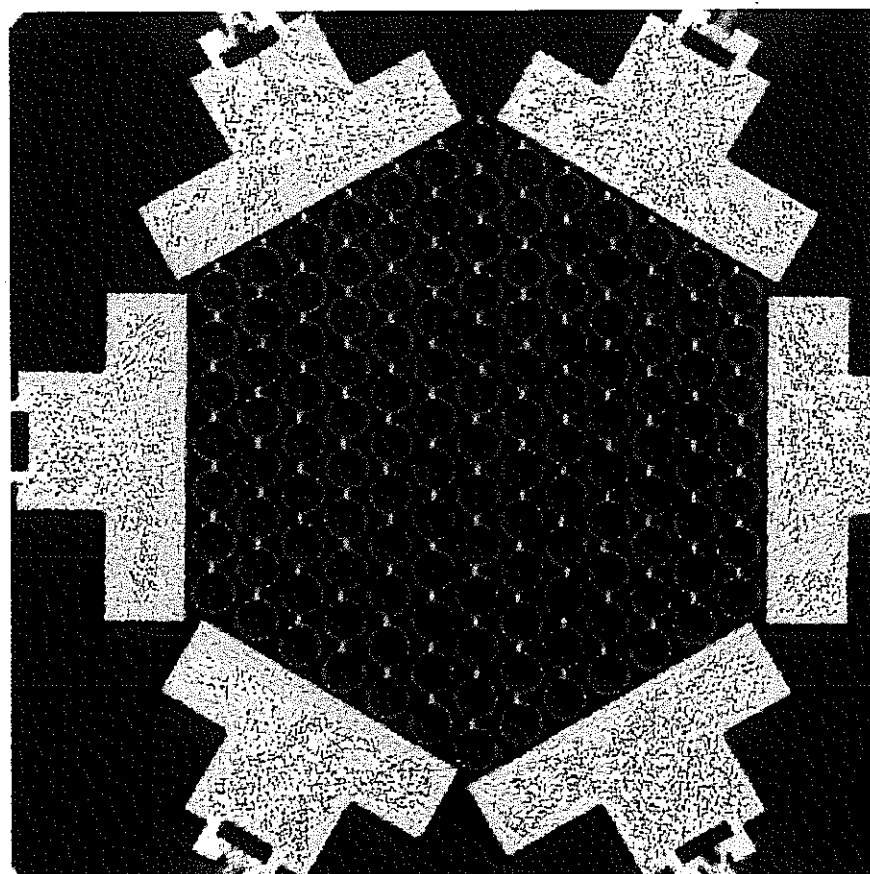


写真 3.17 X線 CT 画像 (高度化平板 : 1.5dw)

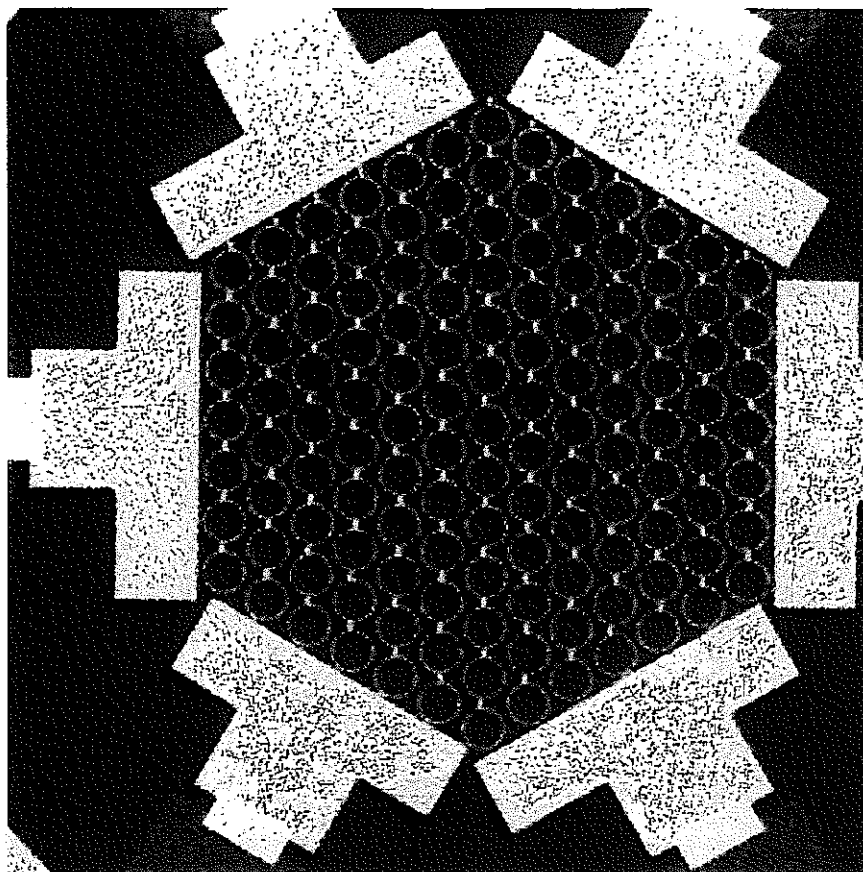


写真 3.18 X線 CT 画像 (高度化平板 : 2.0dw)

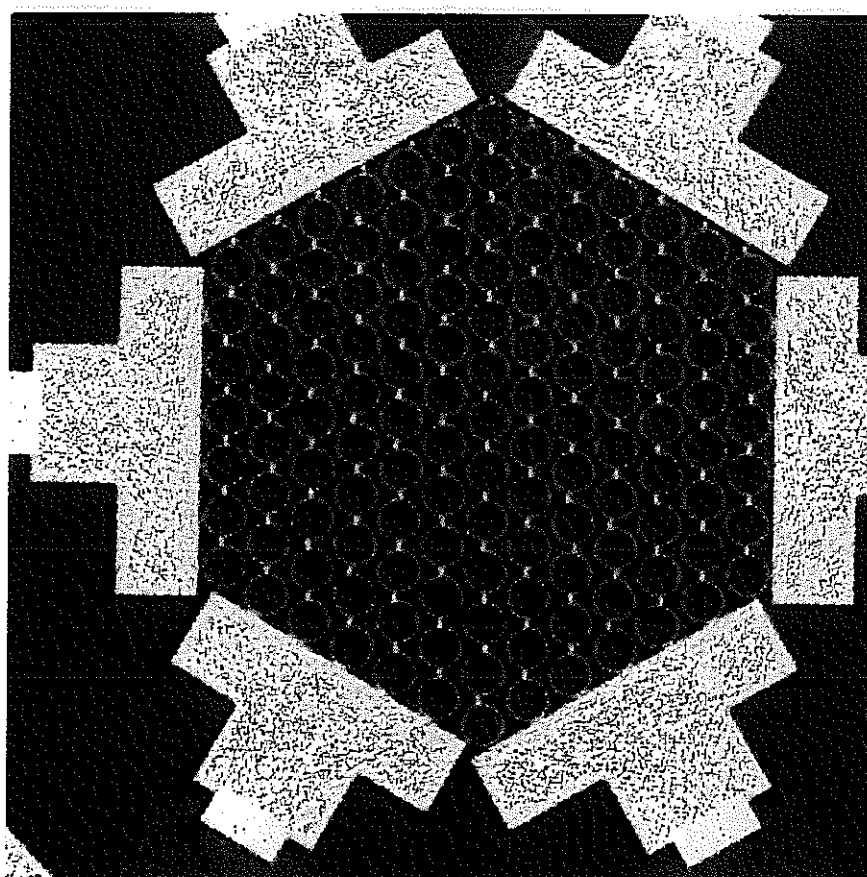


写真 3.19 X線 CT 画像 (高度化平板 : 2.5dw)

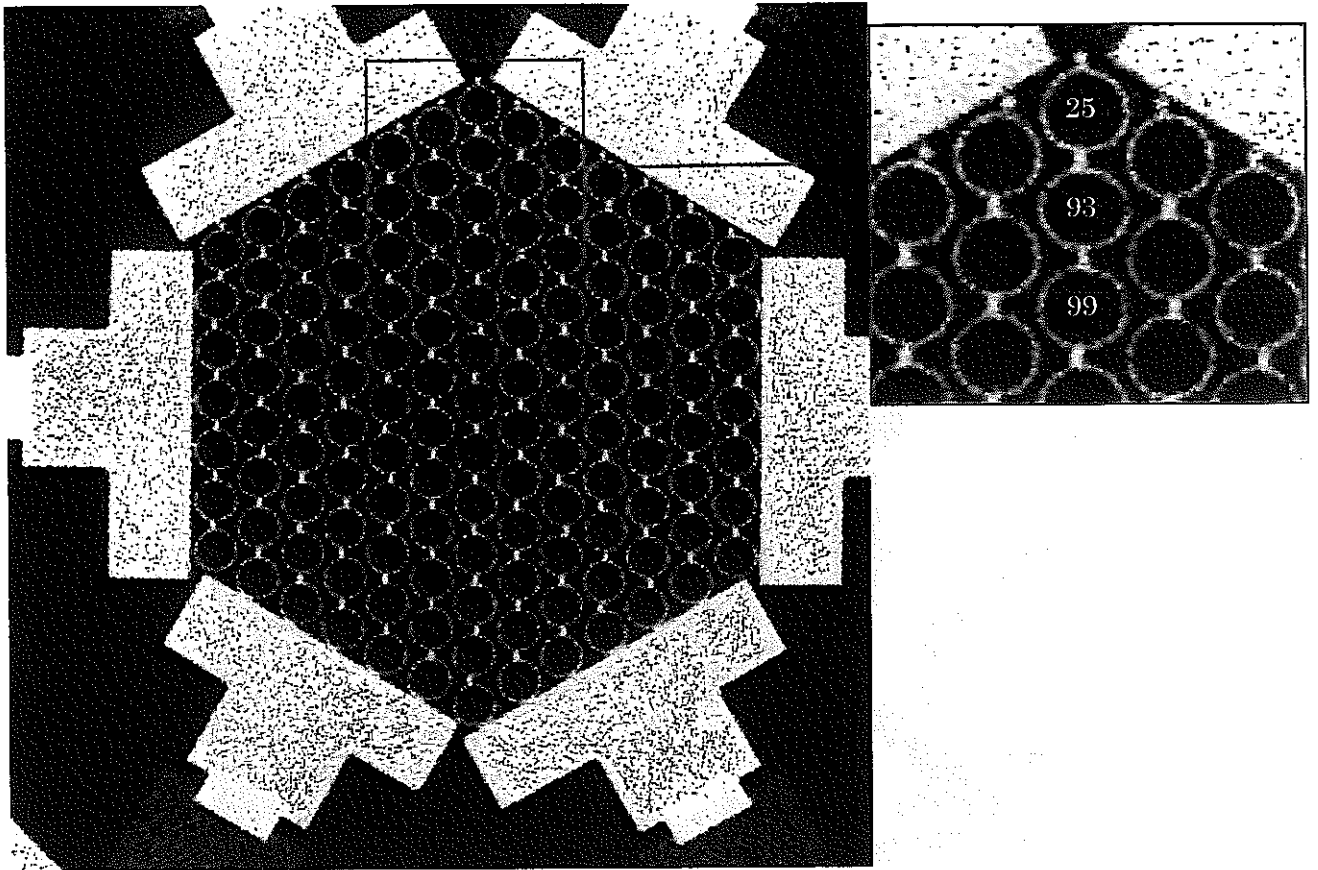


写真 3.20 X線 CT 画像 (高度化平板 : 2.6dw)

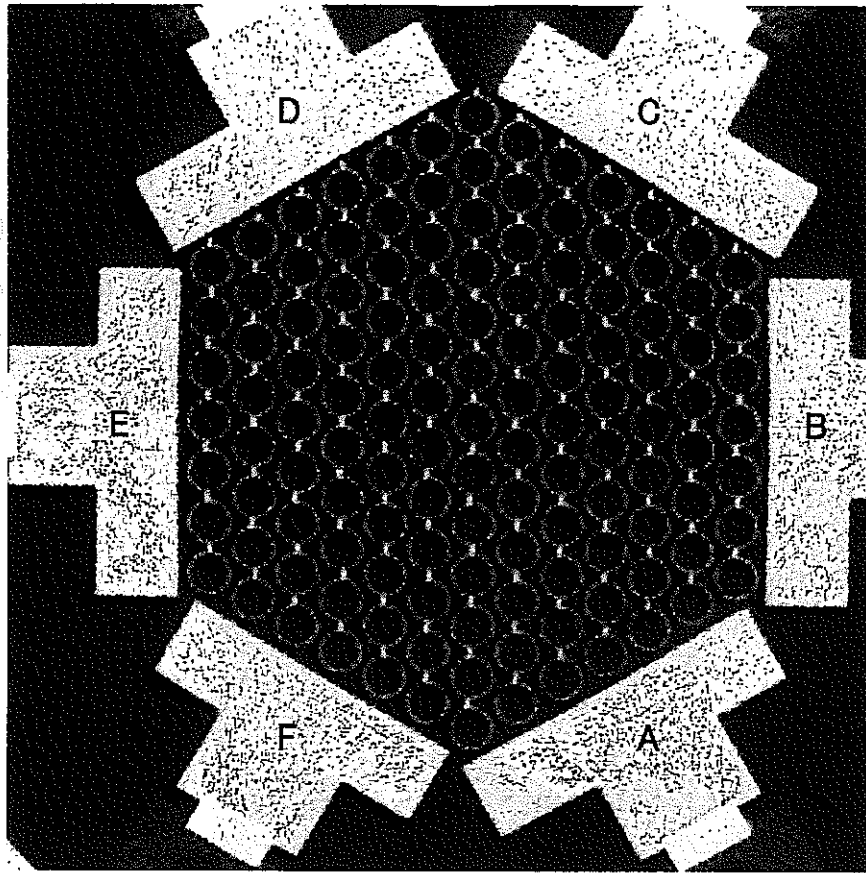


写真 3.21 X線 CT 画像 (高度化バルジング : 0dw)

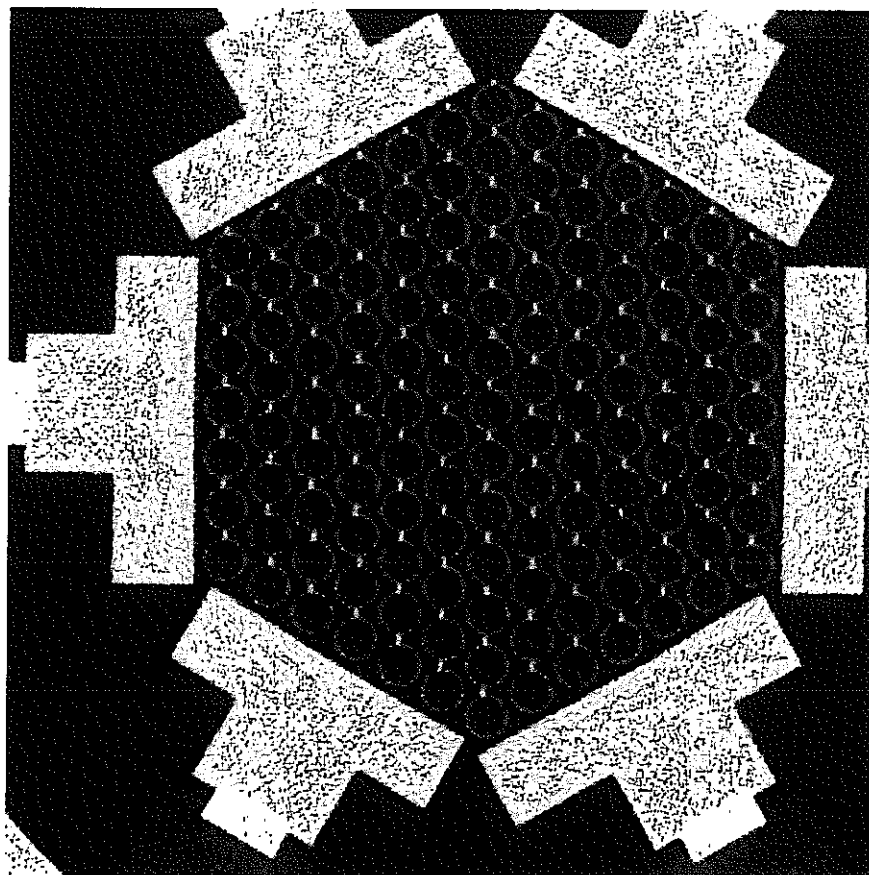


写真 3.22 X線 CT 画像 (高度化バルジング : 0.5dw)

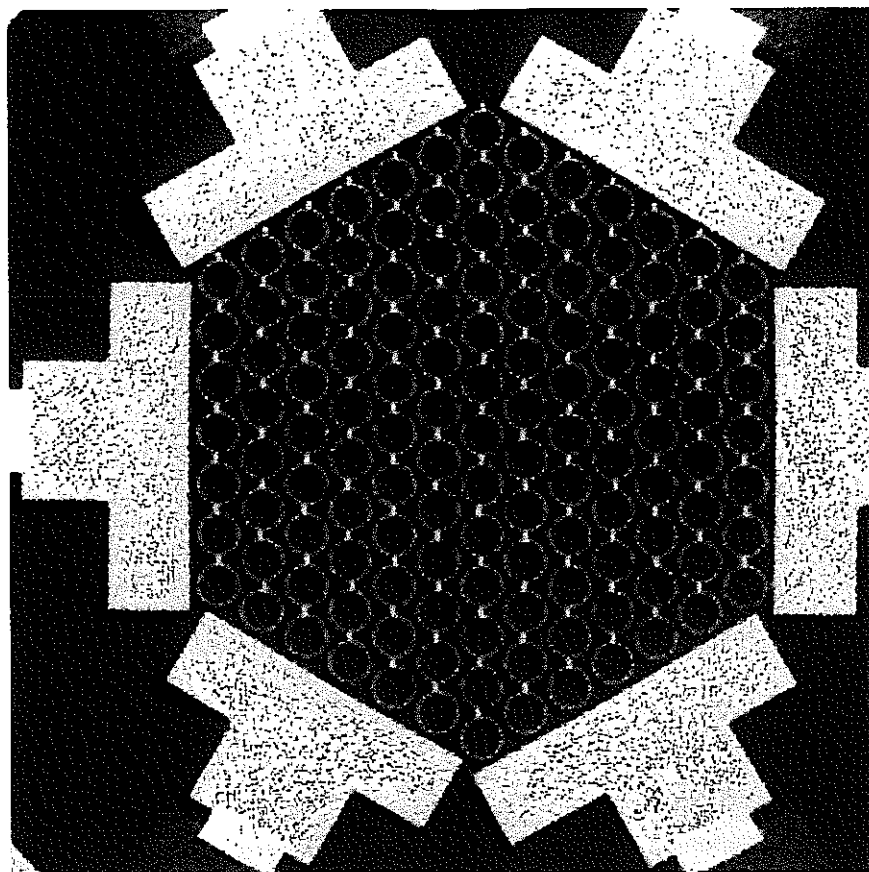


写真 3.23 X線 CT 画像 (高度化バルジング : 1.0dw)

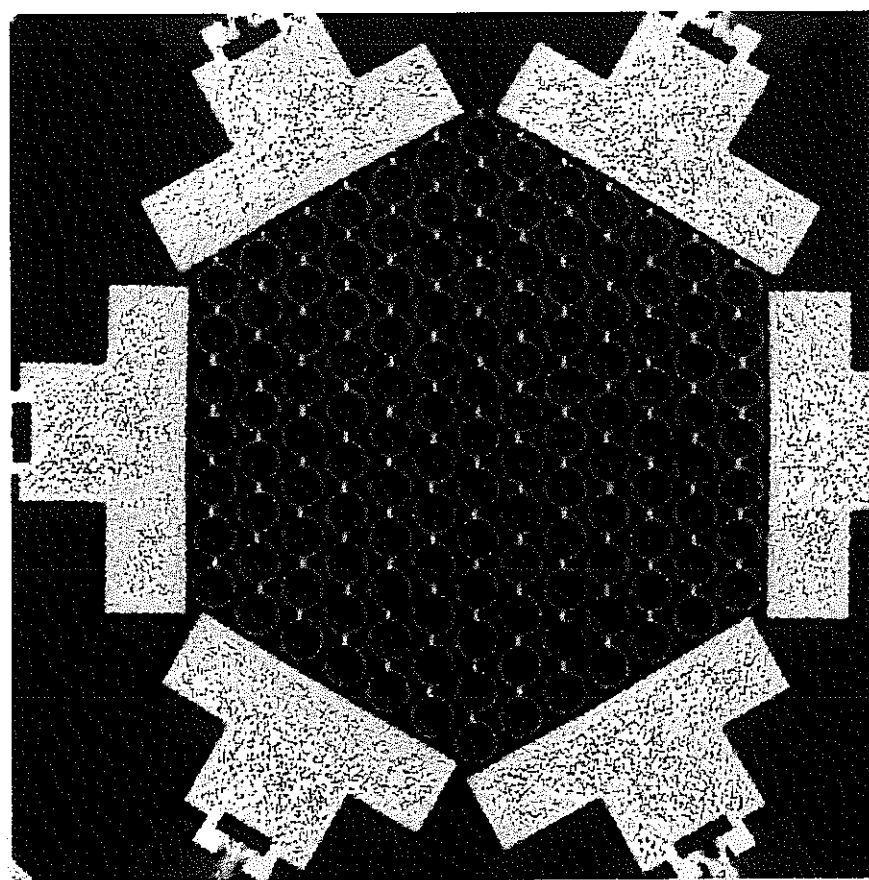


写真 3.24 X線 CT 画像 (高度化バルジング : 1.5dw)



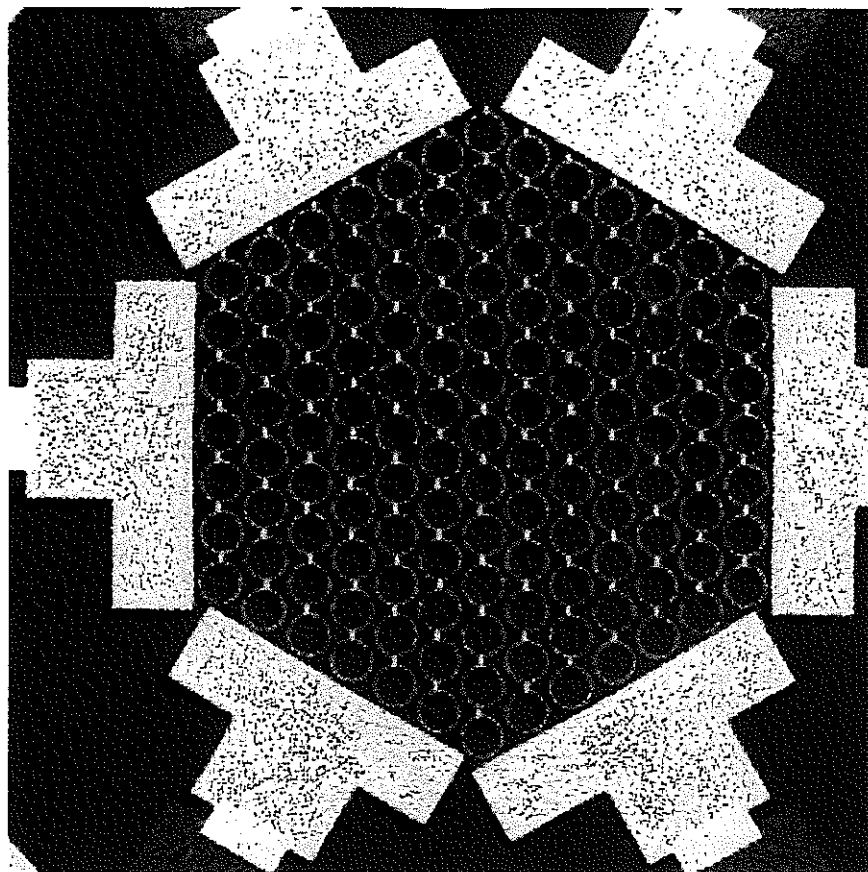


写真 3.25 X線 CT 画像 (高度化バルジング : 2.0dw)

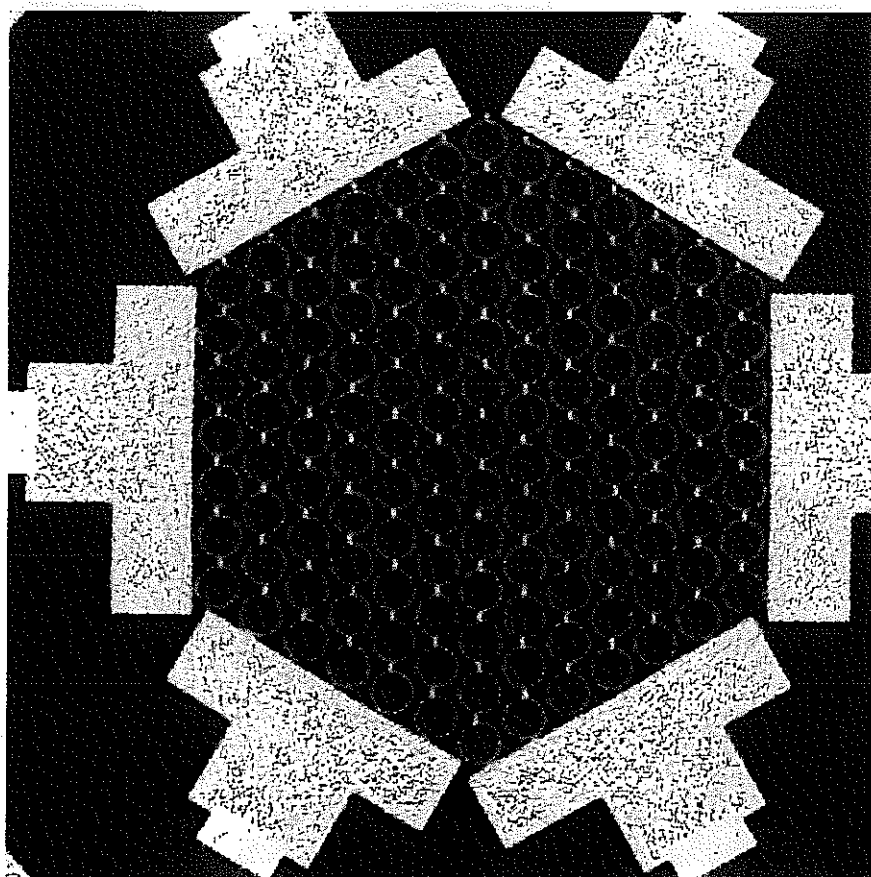


写真 3.26 X線 CT 画像 (高度化バルジング : 2.5dw)

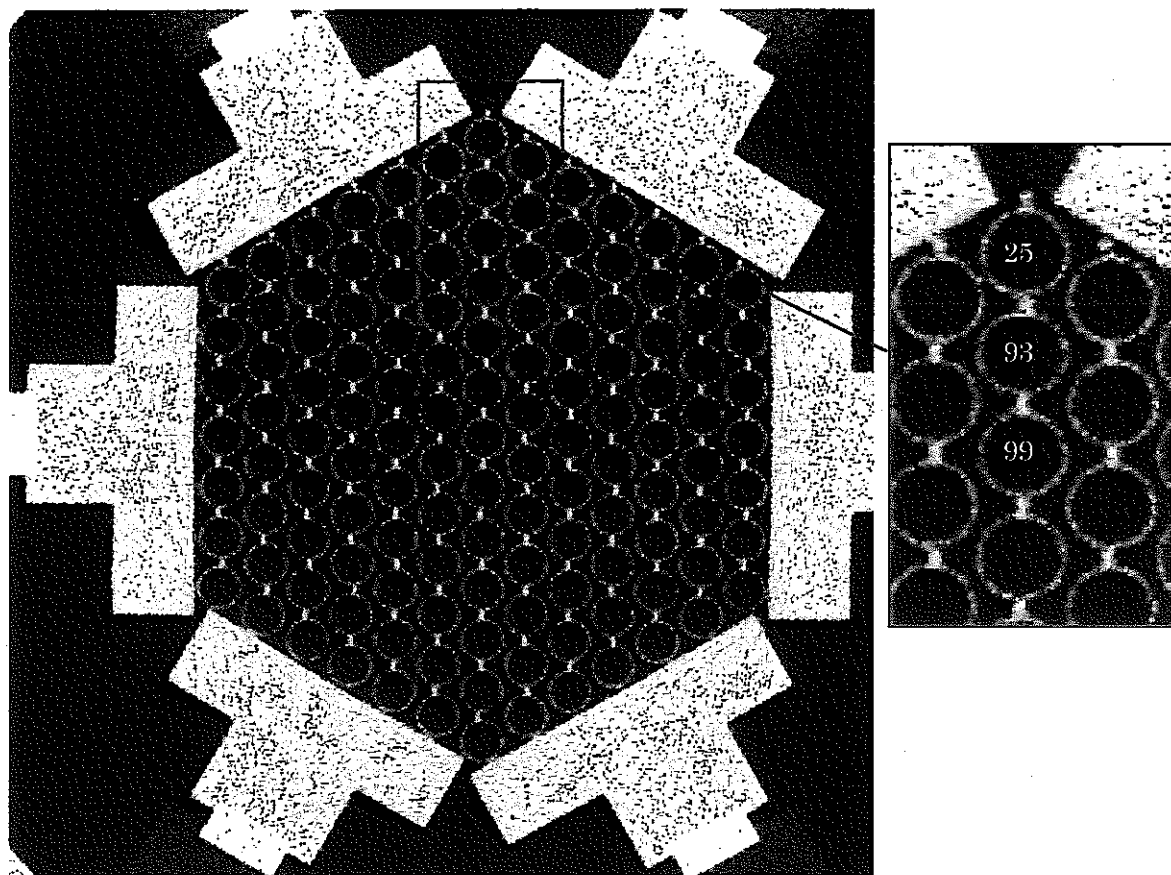


写真 3.27 X線CT画像（高度化バルジング：2.9dw）

## (付録)

## 用語の説明

本報告書で使用した用語の定義及び内容の説明を以下に示す。

(a)BDI 量: BDI 量とはバンドルとダクトの寸法上の不整合量を表現した BDI の程度を表すパラメータであり, 次式で定義される (図 A 参照)。

$$\text{BDI 量} = (B - E) / dw \quad (\text{A. 1})$$

B : バンドルの対面寸法 (mm)

E : ダクトの内対面間距離 (mm)

dw : ワイヤ径 (mm)

バンドルの対面寸法 B は次式により求まる。

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

N : リング数

D : ピン外径 (mm)

上記 BDI 量はバンドルとダクトの対面間におけるタイトさをワイヤ径の倍数で表現する値であり, 対面 BDI 量とも呼ばれている。なお, (A. 1) 式で求める BDI 量は, バンドルとダクトの対面寸法差 [mm] をワイヤ径 [mm] で除した値であるため通常では無次元となるが, BDI のタイトさをワイヤ径の倍数で表すことを明確にすることから, 意図的に dw を付して使用されている。

(b)ピン-圧縮板間距離: 模擬ピン被覆管と圧縮板との距離。

(c)ピン-圧縮板接触: 最外周模擬ピン被覆管と圧縮板の接触。

(d)ピン-ピン間距離: 隣接する模擬ピン被覆管同士の距離。

(e)オーバリティ: 被覆管の偏平化 (楕円変形)。

(f)オーバリティ量: 被覆管の偏平化の値であり, 楕円の長径から短径を引いた値。

(g)短ワイヤピッチ平板: 「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様バンドルを平板で圧縮した試験。

(h)短ワイヤピッチバルジング: 「もんじゅ」短ワイヤピッチ仕様バンドルをバルジング形状の板で圧縮した試験。

(i)高度化平板: 「もんじゅ」高度化仕様バンドルを平板で圧縮した試験。

(j)高度化バルジング: 「もんじゅ」高度化仕様バンドルをバルジング形状の板で圧縮した試験。

(k)ピンチプレーン: ワイヤが圧縮板のコーナー部と対面し, ワイヤの中心と被覆管の中心が一直線上に並ぶ軸位置。

(l)ノーマルプレーン: ワイヤが圧縮板に対面し, 被覆管の中心と自己ワイヤの中心を結ぶ直線が圧縮板内面と直交する軸位置。

(m)CD コーナーワイヤ位置: ピン下端から 812.0mm 位置のピンチプレーンであり, この横断面では CD コーナーにワイヤが向いている。

(n)C 面ワイヤ位置: ピン下端から 795.3mm 位置のノーマルプレーンであり, この横断面は

C面にワイヤが向いている。

(o)対角ピン列：CDコーナーとFAコーナーを結ぶ直線上に並ぶピン列。

(p)対面ピン中心間距離：対面関係にある最外周ピンの中心間距離。

(q)対角ピン中心間距離：対角ピン列の両端に位置するピンの中心間距離。

(r)バンドルサイズ：特定横断面上の最外周ワイヤを除くバンドルの大きさ。