



ATR 三次元核熱水力計算手法について

PNC-TN1410-97-026

1997年8月

日本原子力研究所

動力炉・核燃料開発事業団



目 次

1. はじめに	1
2. 「LAYMON-2A」コード	2
2.1 計算の流れ	2
2.2 出力分布計算モデル	3
2.3 熱水力計算モデル	3
2.4 臨界サーチ機能	4
3. 「LAYMON-2C」コード	7
3.1 計算の流れ	7
4. 実測データと計算値の比較	10
4.1 「ふげん」運転実績データに基づく精度評価	10
4.2 DCA 実験に基づく精度評価	10
5. 参考文献	11

1. はじめに

3次元核熱水力結合炉心計算コード「LAYMON-2A」は、ATRの出力分布計算及び制御棒反応度値計算に用いられる。本コードは、臨界ほう酸濃度のサーチ機能等、炉心運用計画に必要な各種機能を持っており、炉心燃焼計算等の各種シミュレーション計算を行うことができる。なお、本コードの核定数は、炉心内の燃焼度分布、冷却材ボイド率分布、ほう酸濃度等を考慮するため、これらをパラメータとしたフィッティング式の形で入力される。

さらに、「LAYMON-2A」コードにキセノン・サマリウムの変特性方程式を組み込んだ炉心3次元キセノン動特性解析コード「LAYMON-2C」は、炉心の出力レベル、出力分布変化に伴うキセノン・サマリウム濃度の時間変化を考慮でき、炉心3次元のキセノンによる出力の空間振動特性及び領域出力制御特性解析に用いられる。

以下に「LAYMON-2A」及び「LAYMON-2C」コードの概要を示す。

2. 「LAYMON-2A」コード

2.1 計算の流れ

「LAYMON-2A」コードの計算の流れを図1に示す。

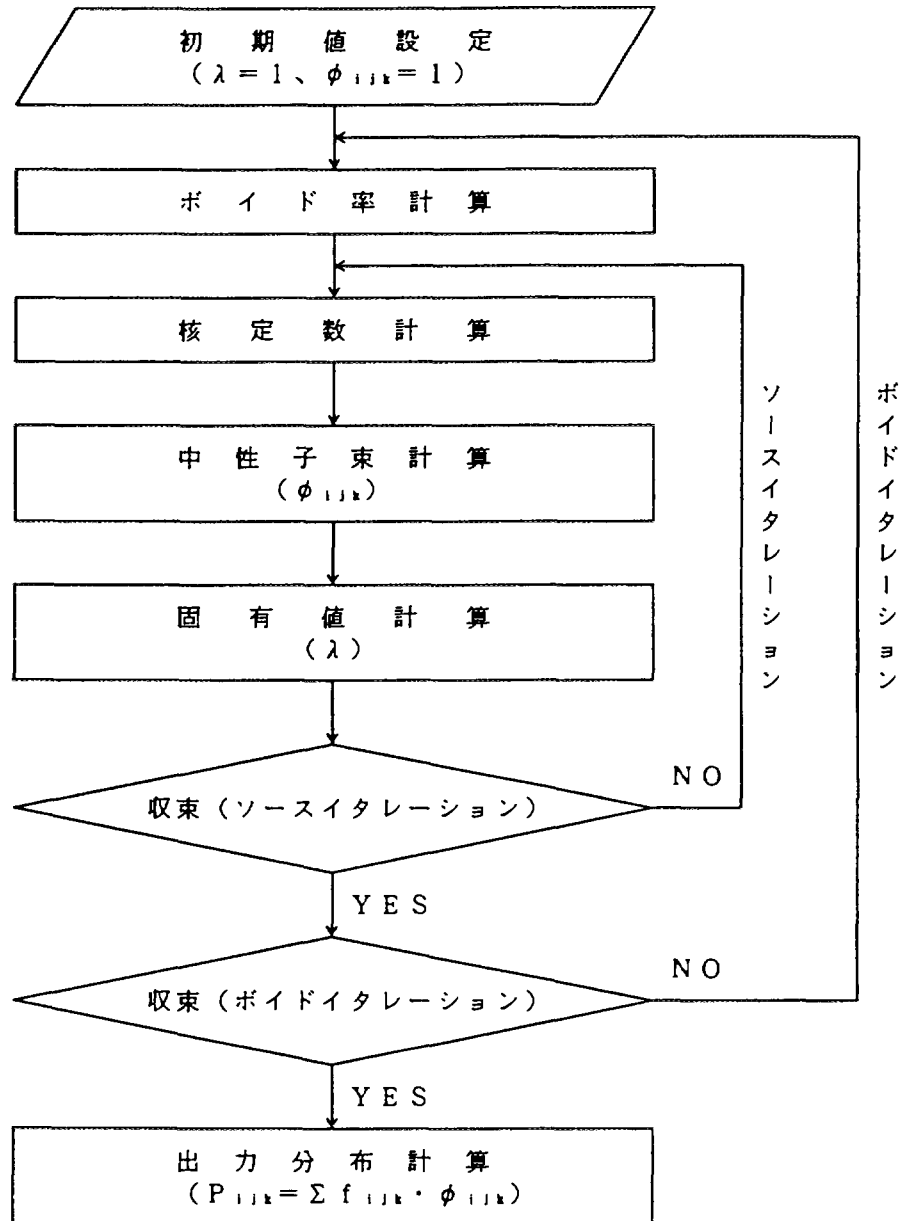


図1 「LAYMON-2A」コードの計算の流れ

2.2 出力分布計算モデル

出力分布計算は、3次元修正粗メッシュ、中性子エネルギー1群モデルに基づく拡散計算により計算する。ここで、修正粗メッシュ法とは、空間メッシュ効果による計算誤差を Askew の修正粗メッシュ法¹⁾を用いて補正することにより粗メッシュ計算と同程度の計算時間で詳細メッシュ計算に近い計算精度が得られる²⁾モデルである。

表1に修正粗メッシュモデルの基本式を、また、図2に粗メッシュモデルとの比較を示す。本モデルのメッシュ分割は、粗メッシュ計算と同じく1格子当たり1メッシュであるが、粗メッシュ間に仮想メッシュを設け、格子内中性子束分布を考慮して中性子束バランスを解くことにより、空間粗メッシュ効果による計算誤差の削減を図ったものである。格子内中性子束分布の効果は、修正粗メッシュ補正ファクタとして粗メッシュ差分拡散方程式に導入されるため、計算時間は粗メッシュ計算とあまり変わらず、計算精度は詳細メッシュ計算に近いものが得られる。

ここでは、境界条件として、通常の中性子外挿距離と物理的に等価な境界定数を使用する。

2.3 熱水力計算モデル

ノード分割は、炉心径方向は燃料格子毎に、炉心軸方向は燃料格子と同程度の幅で分割している。核熱水力結合計算に必要な炉心内各チャンネルの冷却材ボイド率分布は、炉心入口エンタルピー、炉心入口流量及びチャンネル入口から着目ノードまでの積分出力より求めたノード平均クオリティから計算する。平均クオリティからボイド率への換算は、ボイドクオリティ相関式としてバンコフ式または動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの14MW大型熱ループ(以下HTLという。)での実規模試験に基づき作成されたHTLの式を用いることができる。チャンネル流量は、チャンネル出力-チャンネル流量相関式を用いて計算する。

また、本コードには、HTLでの実規模試験で得られたCHF(Critical Heat Flux: 限界熱流束)相関式を組み込んでおり、ここで計算される各ノードの平均クオリティと核計算から求まる出力より、MCPR (Minimum Critical Power Ratio: 最小限界出力比)等の熱的余裕を示す指標の計算も可能である。

2.4 臨界サーチ機能

本コードには、燃焼計画等の炉心運用計画が容易に作成できるよう、以下に示す各種臨界サーチ機能をもっている。

- (1) 臨界ほう酸濃度のサーチ機能
- (2) 燃焼サーチ機能
- (3) アルベドサーチ機能
- (4) 出力レベルサーチ機能

表1 修正粗メッシュモデルの基礎式

No	項 目	基 本 式
1	拡散カーネル	$W_{ijk}^H = \frac{M^2_{ijk}}{hr^2} \gamma_{ijk}$ $W_{ijk}^Y = \frac{M^2_{ijk}}{hz^2} \gamma_{ijk}$ $W_{ijk}^S = \{4 - nr(1 - \alpha_r)\} W_{ijk}^H + \{2 - nr(1 - \alpha_z)\} W_{ijk}^Y$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p>ただし、</p> $\gamma_{ijk} = (1 - \frac{1}{27} \beta^2_{ijk} h^2) / (1 - \frac{1}{9} \beta_{ijk} h^2)$ $\beta^2_{ijk} = \frac{1}{M^2_{ijk}} (\frac{K_{\infty_{ijk}}}{\lambda} - 1)$ $h = \frac{1}{3} (2hr + hz)$ <p>nr, nz : メッシュ(i, j, k)が径方向、軸方向で炉心境界に接する面の数 α_r, α_z : 径方向、軸方向の境界定数(境界条件調整パラメータ)</p>
2	中性子束分布計算式	<p>中性子束分布 :</p> $\phi^*_{ijk} = \frac{W_{ijk}^H \sum_{l=1}^{4-nr} \phi^*_l + W_{ijk}^Y \sum_{m=1}^{2-nz} \phi^*_m}{1 - \frac{K_{\infty_{ijk}}}{\lambda} W_{ijk}^S}$
3	実効増倍率計算式	$\lambda = \frac{\sum_{ijk} K_{\infty_{ijk}} \phi^*_{ijk}}{\sum_{ijk} [(1 + W_{ijk}^S) \phi^*_{ijk} - W_{ijk}^H \sum_{l=1}^{4-nr} \phi^*_l - W_{ijk}^Y \sum_{m=1}^{2-nz} \phi^*_m]}$
4	出力分布計算式	<p>$P_{ijk} = \sum f_{ijk} \cdot \phi_{ijk}$ ただし、</p> $\phi_{ijk} = \phi^*_{ijk} (1 - \frac{1}{9} h^2 \beta^2_{ijk})$

修正粗メッシュモデル

空間メッシュ
(1粗メッシュ点+
6仮想メッシュ点/1格子)

粗メッシュ点 仮想メッシュ点

計算式

$$\phi_{111} = \frac{\frac{M'_{111} \cdot \tau_{111}}{h'} \cdot \frac{1}{2} \phi_c}{1 - \frac{\kappa_{c=111}}{\lambda} + \theta \cdot \frac{M'_{111} \cdot \tau_{111}}{h'}}$$

$$P_{111} = \sum_{r=111} \phi_{111} \cdot \alpha_{111}$$

修正粗メッシュ補正ファクター

$$\alpha_{111} = \left(1 - \frac{\lambda}{\theta} h \cdot \beta_{111}\right)$$

$$\beta_{111} = \left(\frac{\kappa_{c=111}}{\lambda} - 1\right) / M'_{111}$$

$$\tau_{111} = \left(1 - \frac{2}{27} h \cdot \beta_{111}\right) / \alpha_{111}$$

粗メッシュモデル

空間メッシュ
(1粗メッシュ点/1格子)

粗メッシュ点

計算式

$$\phi_{111} = \frac{\frac{M'_{111}}{h'} \cdot \frac{1}{2} \phi_c}{1 - \frac{\kappa_{c=111}}{\lambda} + \theta \cdot \frac{M'_{111}}{h'}}$$

$$P_{111} = \sum_{r=111} \phi_{111} \cdot \alpha_{111}$$

—

図2 修正粗メッシュモデルの概要 (粗メッシュモデルとの比較)

3. 「LAYMON-2C」コード

3.1 計算の流れ

「LAYMON-2C」コードの計算の流れを図3に示す。

図3に示すように、過渡計算では各タイムメッシュ点での臨界サーチ計算より求めた中性子束を用い、出力分布を計算すると共に、次のタイムメッシュ点でのキセノン・サマリウム個数密度を求める。この結果として、出力分布、キセノン・サマリウム濃度分布計算の他に、中性子核計装関連の中性子束モニタ値、領域出力も計算できる。

炉心領域出力制御シミュレーション計算は、領域出力が目標値を満足するような制御棒位置をサーチすることにより実施する。図4に領域別制御棒位置サーチ計算の流れを示す。

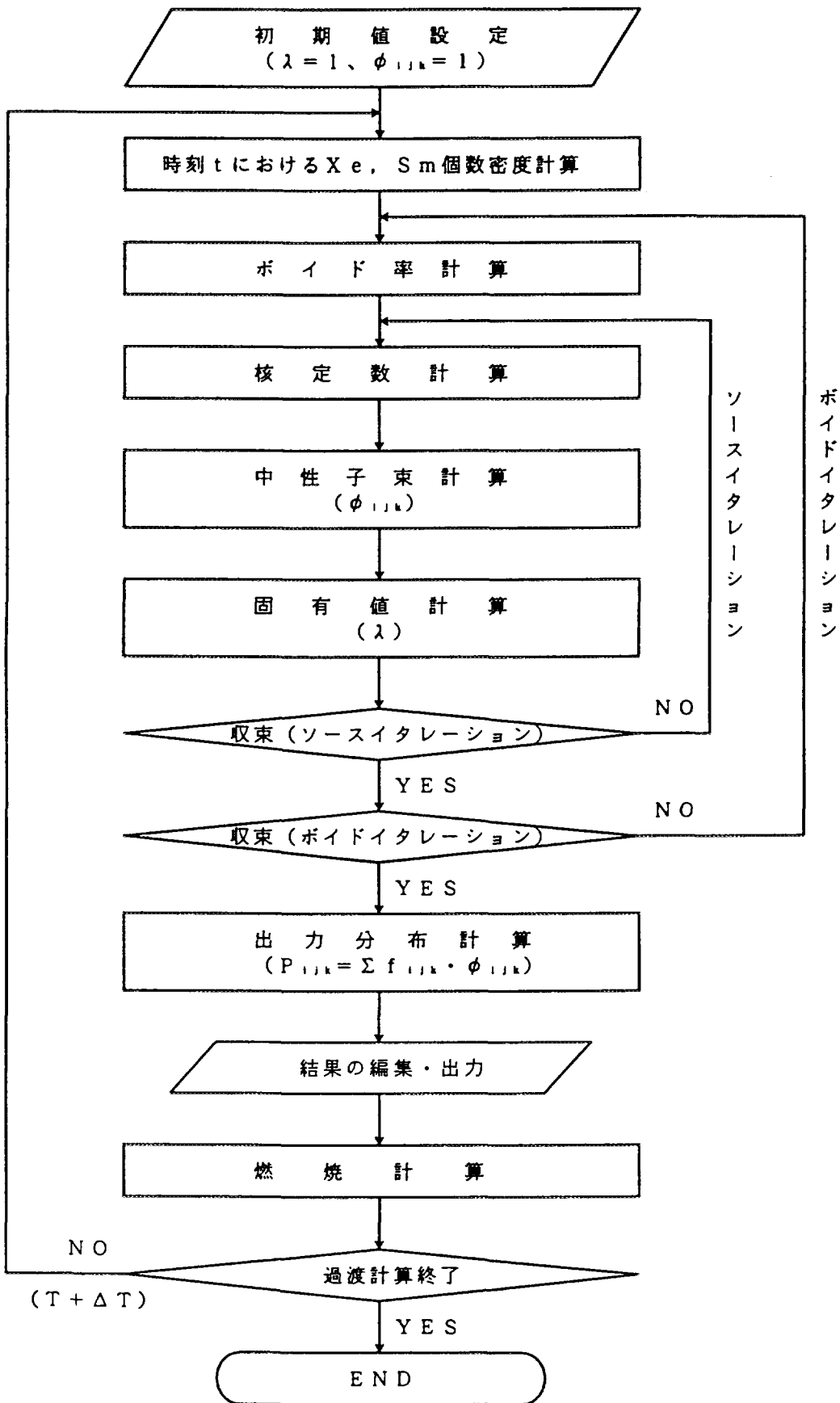


図3 「LAYMON-2C」コードの計算の流れ

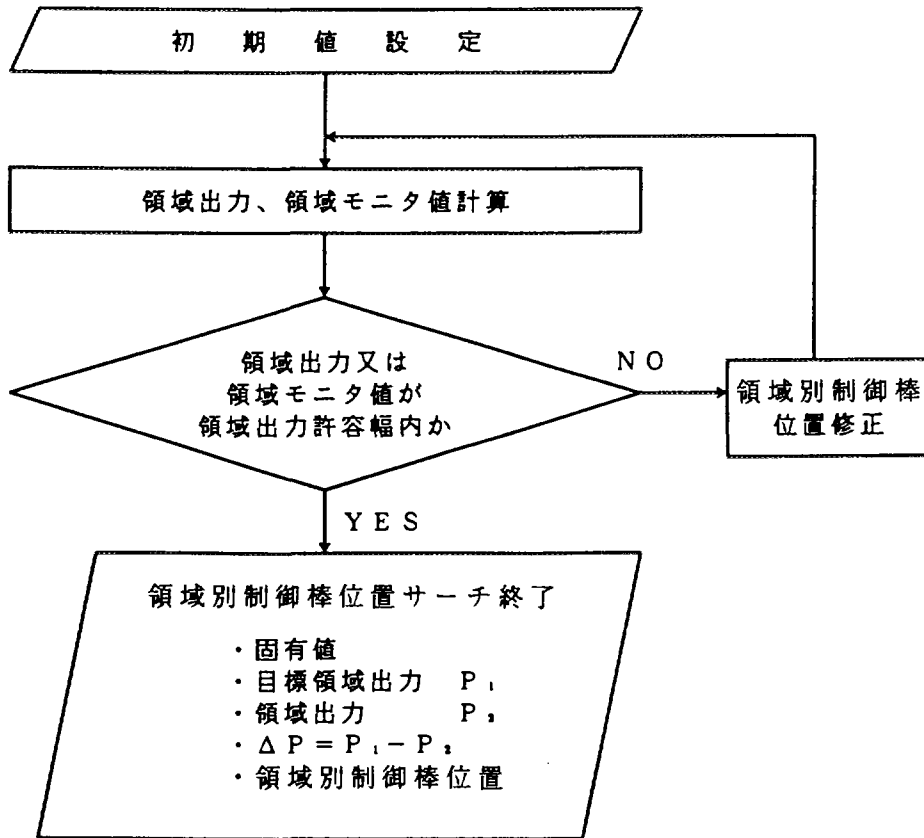


図4 「LAYMON-2C」コードの制御棒位置サーチ計算の流れ

4. 実測データと計算値の比較

「LAYMON-2A」コードを用いた計算値と「ふげん」運転実績データとの比較及び動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの重水臨界実験装置（以下 DCA という。）を用いて実施された径、軸方向出力分布測定実験に基づくデータとの比較を行い、解析精度の検証を行った。

4.1 「ふげん」運転実績データに基づく精度評価

図5、図6に「ふげん」における径方向出力分布及び出力ピーキング発生チャンネルの軸方向出力分布と、「LAYMON-2A」コードによる計算結果との比較例を示す。同図に示すように両者は良く一致している。

また、図7に「ふげん」における出力ピーキング係数（径方向出力ピーキング係数×軸方向出力ピーキング係数）の実績値と「LAYMON-2A」コードによる計算結果との比較例を示す。図7に示すように出力ピーキング係数の実績値と計算値の相対誤差は-3.6%～+3.5%の範囲にあり、その平均二乗誤差は2.0%である。

4.2 DCA 実験データに基づく精度評価

図8に径方向出力分布の実験値と「LAYMON-2A」コードによる計算値の比較例を示す。また、図9に炉心中央部に装荷された試験体の軸方向出力分布の実験値と「LAYMON-2A」コードによる計算値の比較例を示す。同図に示すように、同様に両者は良く一致している。

5. 参考文献

- (1) J. R. Askew et. al.: "Methods for Three-Dimensional Fuel Management Studies on High Temperature Reactors", CONF-720901, BOOK 1
- (2) 山本、他: 1次元修正粗メッシュモデルに基づく新型転換炉3次元核熱水力結合コードと出力分布解析精度、原子力学会予稿集 B66 (昭和58年3月)

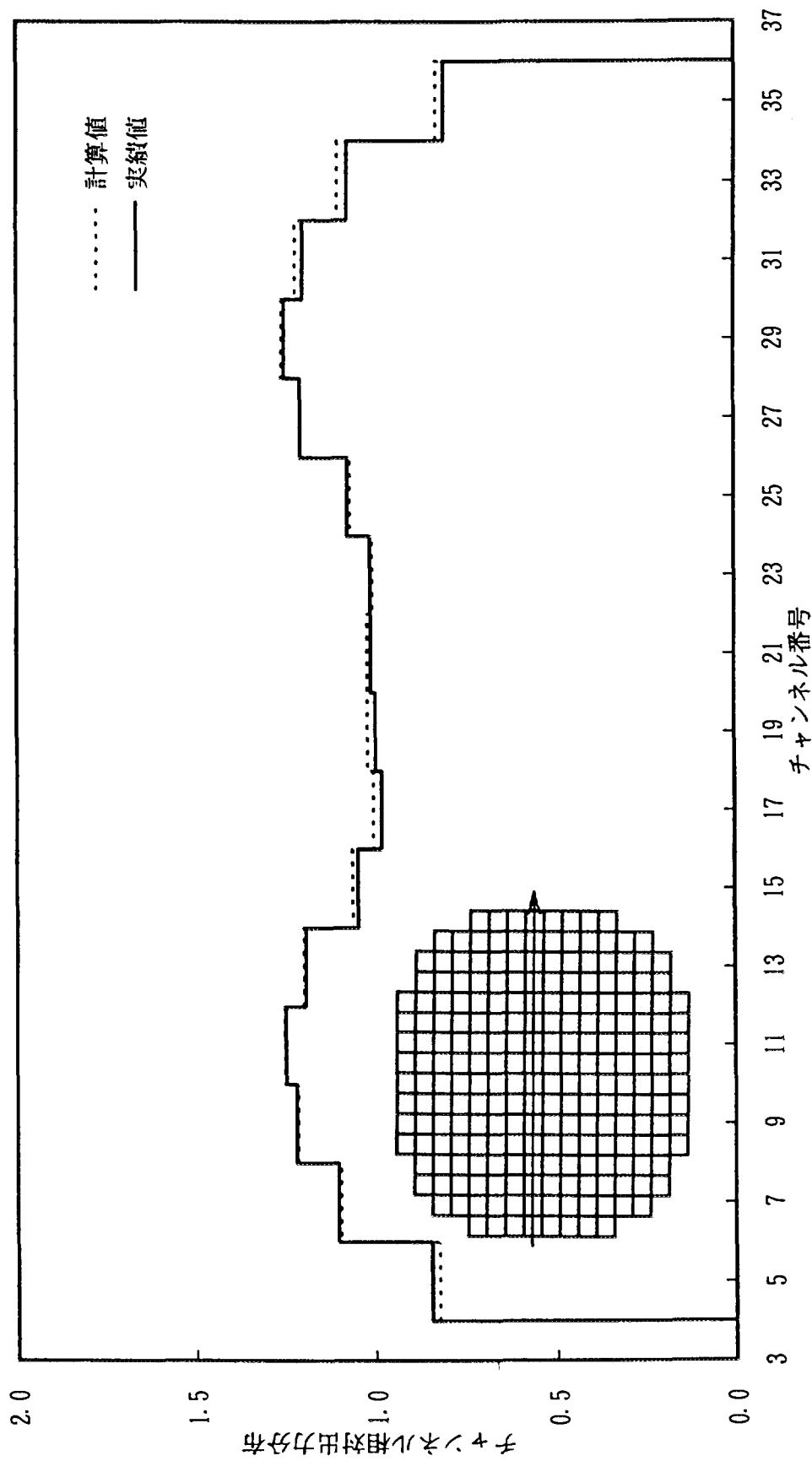


図5 径方向出力分布例

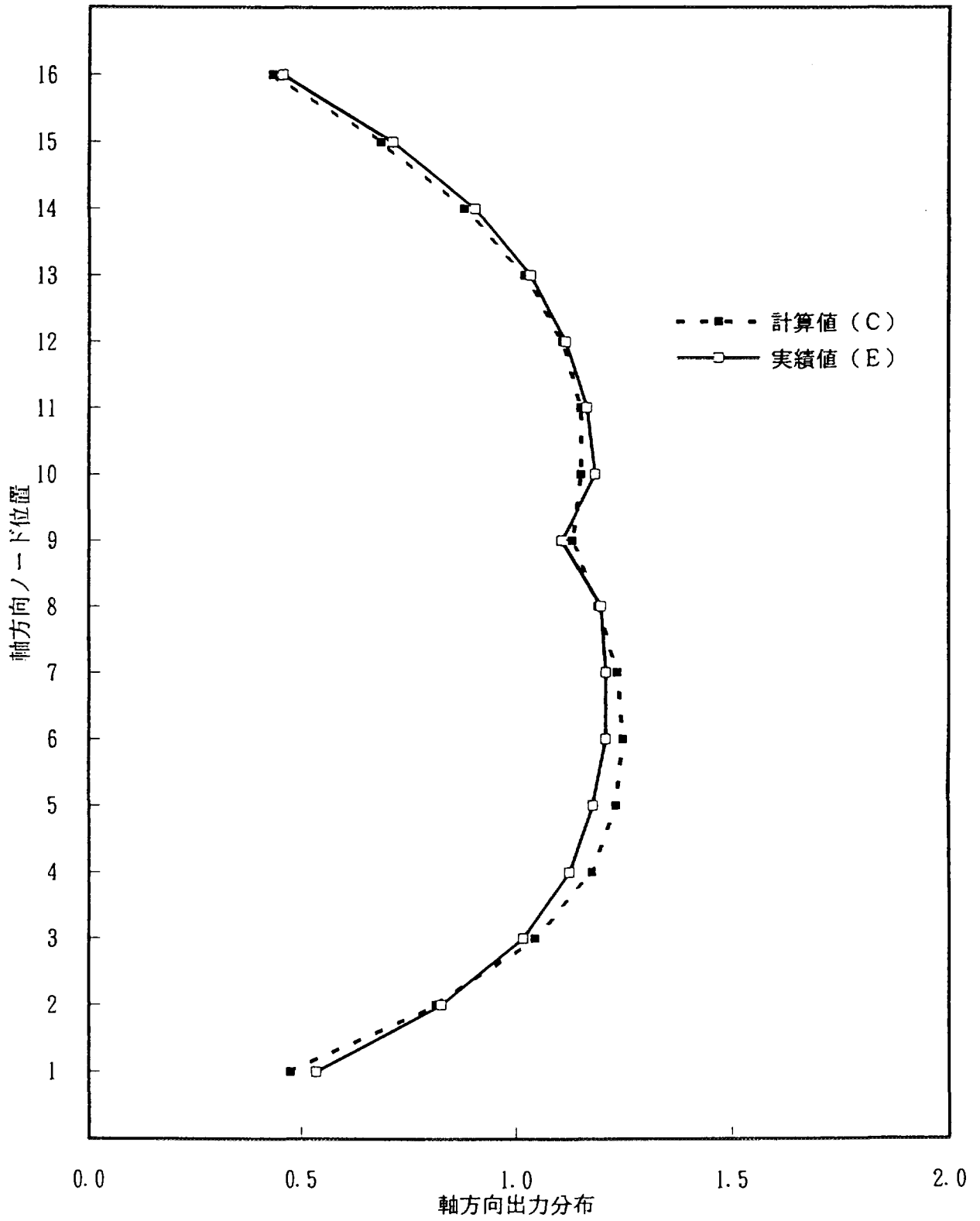


図 6 軸方向出力分布例

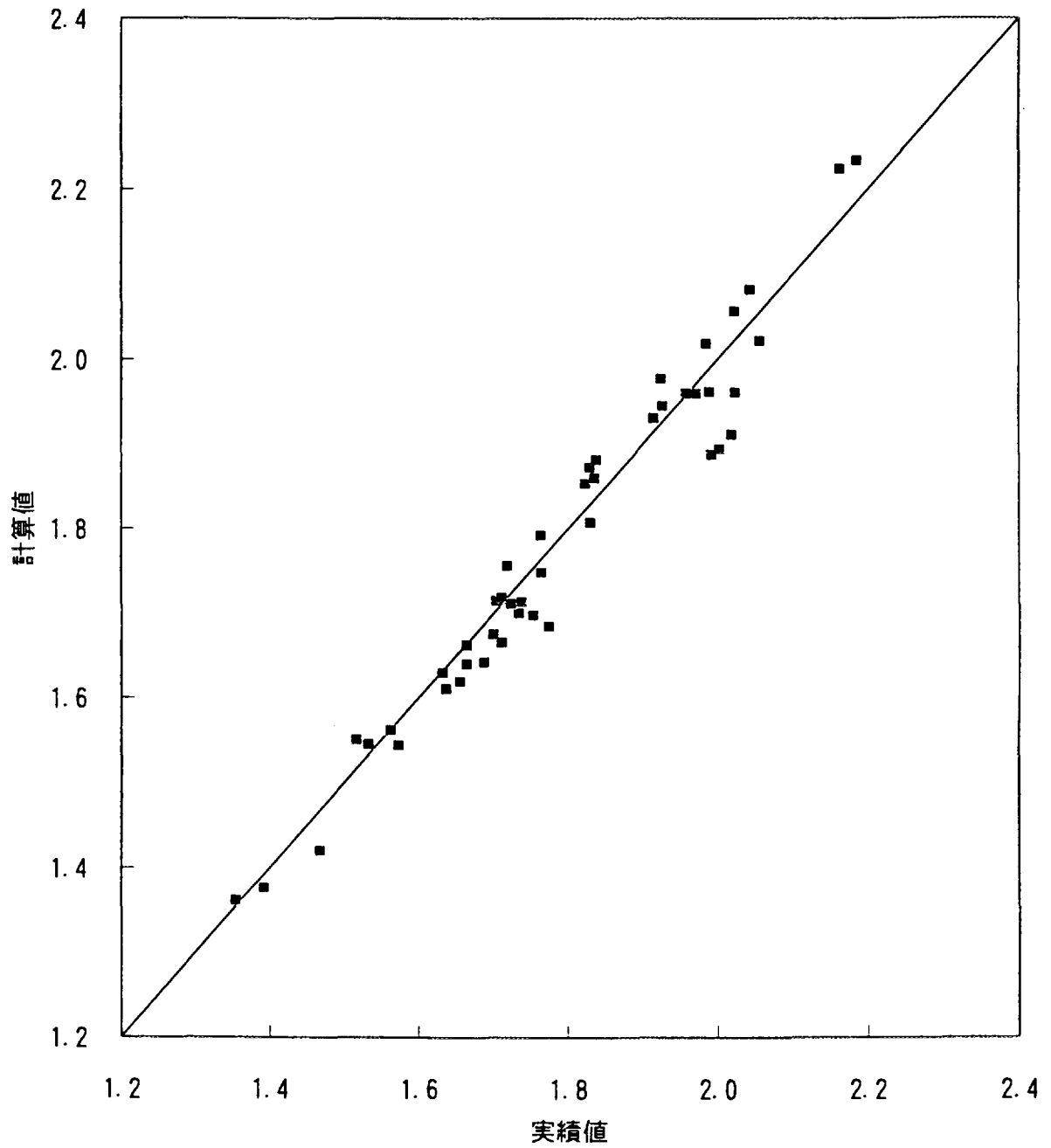


図7 出力ピーキング係数の実績値と計算値の比較例

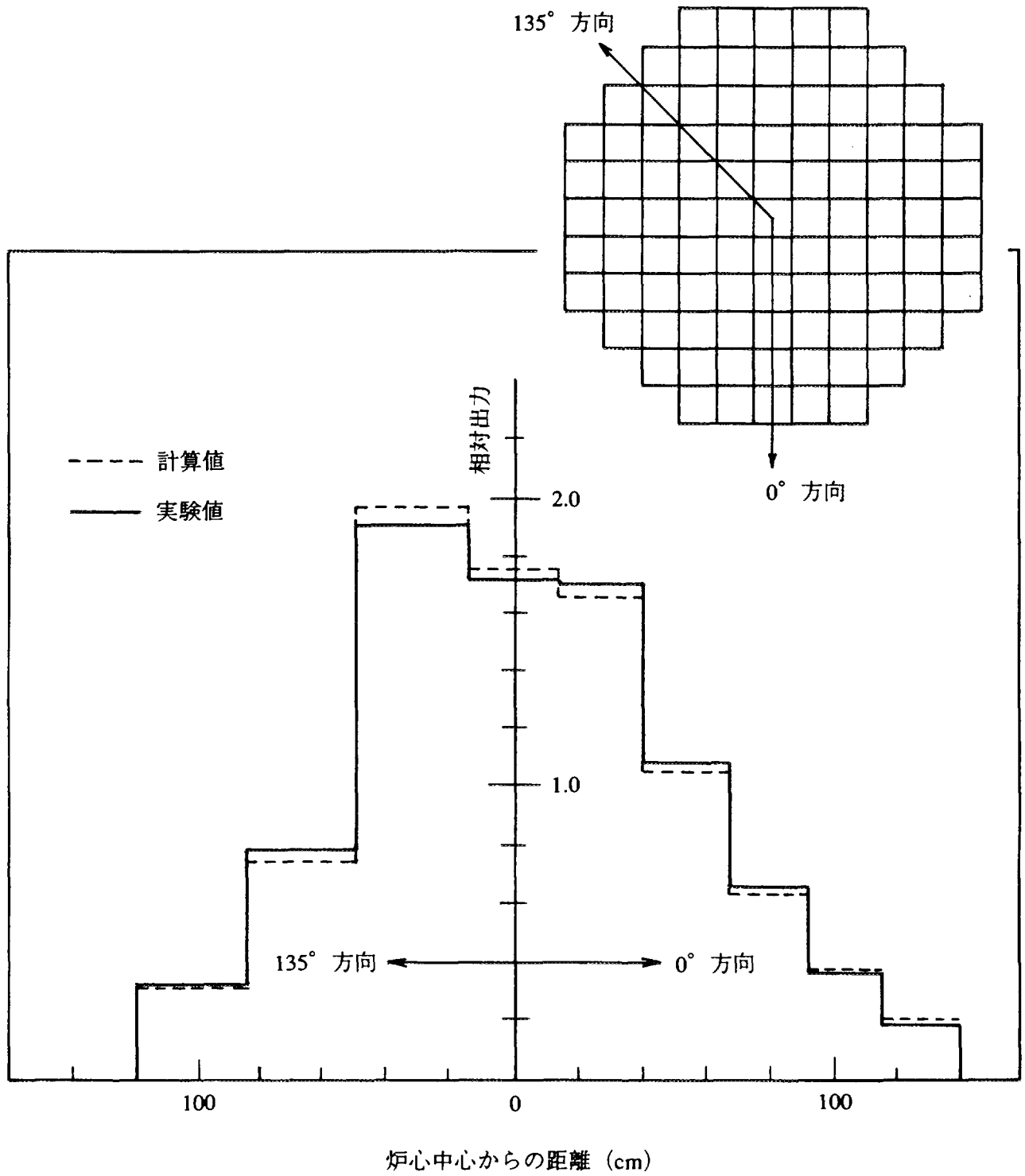


図8 DCA 実験における径方向出力比較例

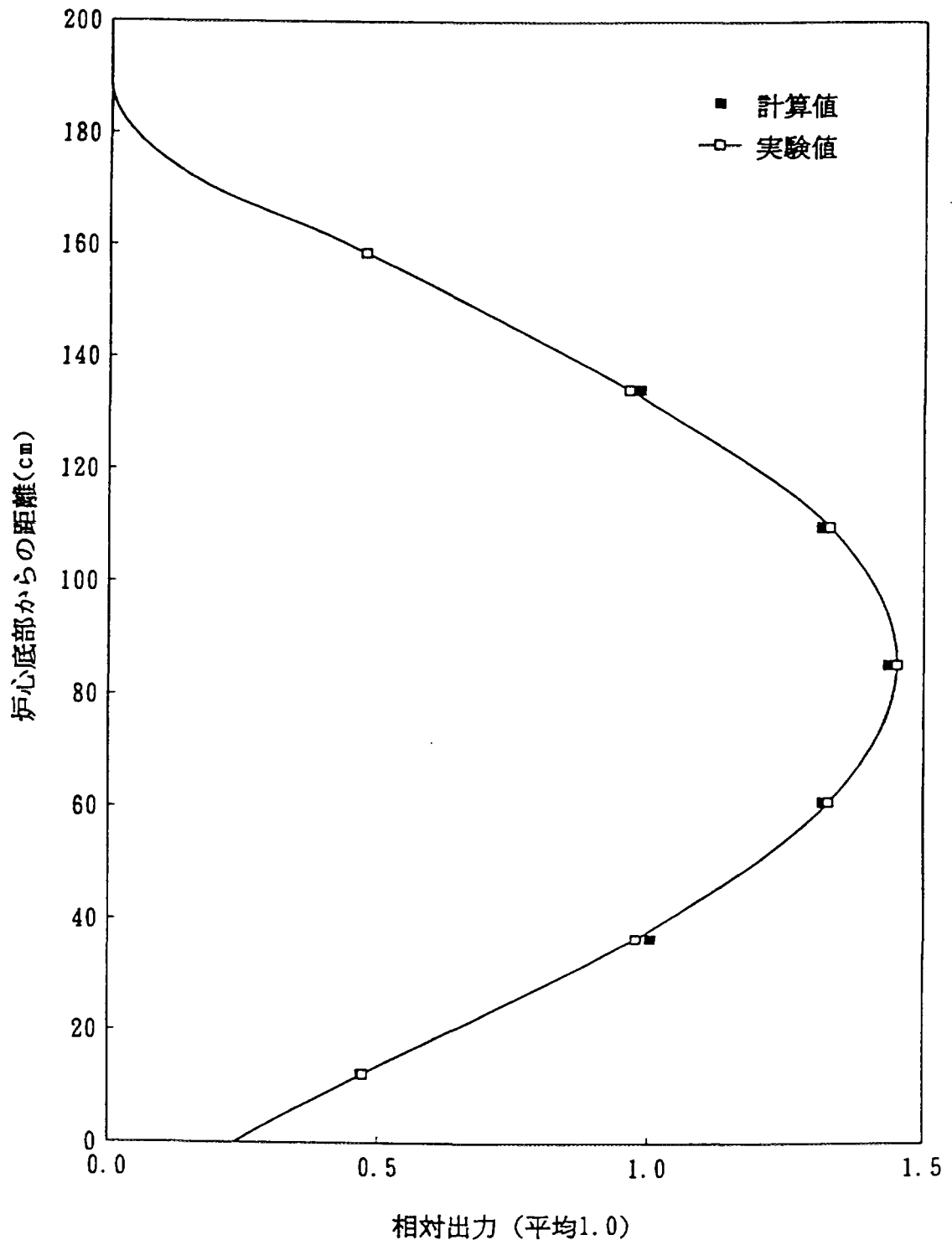


図9 DCA 実験における軸方向出力分布比較例