

分置

大型 FBR 炉心の核的結合の測定

1996年2月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

大型FBR炉心の核的結合の測定

白方敬章*

要旨

日米共同大型高速炉臨界（JUPITER）実験では、通常の核特性に加えて炉心の核的結合を測定した。特に、核的ディカップリング特性の測定を主題にした初めての臨界実験である日米共同核的結合特性（JUPITER-Io）実験で測定した。制御棒（Control Rod、以後CR）挿入による検出器効率の変化、フラックス・テイルトの測定という静的手法、およびロッド・ドロップ実験、ボロン・オシレータ実験、炉雑音実験という動的手法によって、核的結合の指標である固有値間隔或いはその炉心間序列を測定した。各測定法の結果は概ね相互に一致し、また計算値ともほぼ一致した。その結果、固有値間隔に関する測定法の信頼性と有効性が明らかになり、固有値間隔という炉物理量が測定できることが明らかになった。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部

Measurements of Neutronic Coupling of Large FBR Cores

Keisho SHIRAKATA*

Abstract

In the U.S.-Japan joint physics large LMFBR core critical experiment program (called JUPITER), neutronic couplings were measured in addition to usual physics characteristics. They were measured particularly in the JUPITER-Io program, whose main purpose was to study the neutronic decoupling problems. Static methods such as flux distortions caused by control rod insertion and flux tilt, and dynamic methods such as rod drop, boron oscillator and noise coherence experiments were applied to the measurements of eigenvalue separation, an indicator of the spatial decoupling. Measured results of different methods roughly agreed with each other, and also agreed with calculated results. As a result, it was made clear that the measurement methods were reliable and effective, and that the reactor physics parameter, called eigenvalue separation, could be measured.

* Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, PNC

目次

1. 緒言	1
2. 核的結合の指標	2
3. 測定法と測定例	3
3.1 CR挿入による検出器効率の変化	3
3.2 フラックス・テイルト	4
3.3 ロッド・ドロップ実験	5
3.4 ボロン・オシレータ実験	6
3.5 炉雑音実験	6
4. 考察	8
謝辞	9
参考文献	9

表リスト

表 1 炉雑音実験による固有値間隔の測定結果

表 2 Difference between fundamental and first azimuthal harmonic eigenvalues for several JUPITER cores

図リスト

図 1 ZPPR-19A集合体の径方向断面

図 2 ZPPR-13A集合体の径方向断面

図 3 Measured and calculated detector efficiency ratios for a control rod in ZPPR-13A

図 4 ZPPR-13C集合体の径方向断面

図 5 Flux Tilt の等高線 (ZPPR-18A)

図 6 固有値間隔とテイルト/ ρ_1 の関係

図 7 Control rod locations in x-axis for flux tilt measurements (ZPPR-18A)

図 8 挿入外乱の大きさとテイルトの関係 (ZPPR-18A)

図 9 Change in ex-core detector count rate ratio as a function of time after a rod drop (ZPPR-9, 13A, 13C, 15A)

図 1 0 Change in ex-core detector count rate ratio as a function of time after a rod drop (ZPPR-19A, 19B)

図 1 1 Ratio of amplitudes of power oscillations measured by two ex-core detectors as a function of frequency of the B_4C oscillation (ZPPR-9, 13C, 15A, 19A)

図 1 2 Standard four detector locations in ZPPR noise measurements

図 1 3 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-9

図 1 4 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-13A

図 1 5 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-13C

図 1 6 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-15A

図 1 7 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-19A

図 1 8 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-19B

図 1 9 Fitting curves of coherence function ratios (ZPPR-9, 13A, 15A, 17A)

図 2 0 Fitting curves of coherence function ratios (ZPPR-9, 15A, 19B)

図 2 1 Fitting curves of coherence function ratios (ZPPR-18A, 18B, 19A, 19B)

図 2 2 Cross sections of eigenfunctions of x- and y-axis symmetric cores

1. 緒言

原子炉の炉心は核分裂連鎖反応の持続、或いは中性子の発生、吸収、漏れの釣り合いという意味で一つの閉じた系を形成しており、炉心の各部分が空間的に相互作用して炉心全体の核特性を形成する。閉じられた一つの系としての炉心において、一部の領域と他の領域、または炉心全体との核的（或いは中性子的）な関係を核的（中性子的）空間結合（Spatial neutronic coupling）或いは核的結合（核的カップリング）と呼び、その結合の強弱の度合を結合度（結合係数）と呼んでいる。そして、核的カップリングが弱いことを核的ディカップリング（Neutronic decoupling）と呼んでいる。

大型炉心では中小型炉心の場合に比べて、外乱に対して出力分布が敏感に変動する、CR干渉効果が増大する、核特性C/E（計算値/実験値）の空間依存性が増す、CR 1本誤引抜などの局所的外乱による影響が炉心全体には伝播されず、中性子束分布に大きな歪みを生じる、などの現象が一般に見られる。これらの現象は、炉心の大型化に伴い、炉心各領域間の核的結合が低下したことが共通の原因であり、核的ディカップリング特性と解釈することができる。一般に核的ディカップリングの程度は、炉心が大型化するほど大きくなり、また均質炉心よりは非均質炉心の方が、CR引抜き体系よりは挿入体系の方が大きくなる。

以前に報告されたフランスのスーパー・フェニックス（SPX-1）の炉心核特性の計算結果⁽¹⁾では、120万kWeの大型炉心の中性子束径方向分布がCRパターンの違いにより著しく異なること、CR挿入時の分布が全引抜時の基本モード分布とは全然違うことなどが示されている。これらの現象は、炉心の核的ディカップリングの程度が大きいことを意味している。

JUPITERは実証炉級大型FBR炉心の模擬実験であり、動燃と米国エネルギー省の共同研究としてアルゴンヌ国立研究所（ANL）のZPPR装置を用いて実施した広範囲で総合的な臨界実験である。径方向（以後、径）非均質炉心ZPPR-13Aにおいて、²³⁵U箔による反応率の周方向分布が方位角により不規則に最大約3%歪んでいることが観測された。そして、従来からある炉心組成の非均一性がこの歪みの原因であり、径非均質の大型炉心は一定の摂動が反応率分布へ及ぼす効果が中型炉心や同出力の均質炉心より大きいことがわかった。また、非均質炉心の核特性のC/Eは、径方向依存性が均質炉心の場合より大きかった。これらのことは、この炉心の核的ディカップリングの程度が大きいことが原因と考えられ、大型炉心の核特性の振舞は核的結合を考慮しないと物理的に解釈し辛いことがわかってきた。そしてこれを契機として、核的ディカップリング特性の測定を主題にした初めての臨界実験である日米共同核的結合特性（JUPITER-Io）実験が企画され、実施された。それ以前に実施したJUPITER-I,II,III実験は各炉心概念の核特性把握を目的としたベンチマーク実験であったが、初めての出力60～100

万kWe級大型炉心であったため、その特性が核的ディカップリング現象に基づいており、結果的に核的ディカップリングの考慮の必要性、重要性を明らかにした臨界実験であったと位置付けることができる。JUPITER-10のZPPR-19A集合体はその前の18A炉心に対して内側CRリング（6本）を全挿入した体系であり、核的ディカップリングの程度の大きい8500ℓクラスの均質炉心である。19A集合体の径方向断面（炉雑音実験の際の）を図1に示す。ANLのZPPR炉心企画は候補の炉心のディカップリング特性をまず評価し、それに基づいて行われた⁽²⁾。そしてJUPITER実験の後半、特にJUPITER-10では、通常の核特性に加えて固有値間隔、中性子束空間分布の感度などディカップリング特性を精力的に測定した。

我が国におけるFBRの開発は炉心の分野では、現在のところ混合酸化物（MOX）燃料による大型化、高燃焼度化の方向で進められている。動力炉としての高速炉は高燃焼度、長期運転サイクル期間を目指すため、中性子経済が良くなければならない。そのためには、拡散距離の長い高速中性子を効率よく閉じ込められるように炉心体積が大きい必要がある。高速炉の炉心体積が必然的にある程度大きくなるのは動力炉としての成立性のためであり、スケール・メリットのためではない。スケール・メリットを狙う場合はさらに炉心を大きくすることになる。すなわち、高速中性子によって連鎖反応を維持する高速動力炉の炉心は元来大きいものである。そのため大型炉心の核的ディカップリングの程度および特性を把握し、それを精度良く記述し、さらに炉心設計、炉心安全設計へのインパクトを評価することによって、大型炉心の成立および核特性の適正化、安定化のための核設計の方法を開発する必要がある。

2. 核的結合の指標^{(2)~(7)}

炉心の中性子結合度、或いは核的ディカップリングの程度を定量的に表わす指標として、固有値間隔（Eigenvalue Separation）^{(2)~(6)}およびAveryの結合係数⁽⁷⁾というものが提案され、用いられている。JUPITERでは固有値間隔による評価法が主に用いられたので、それを説明する。炉心の静的な中性子バランスは λ （静的）モード固有値問題としてと次式で表わされる。

$$L\phi_i = (1/\lambda_i) M\phi_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

L：消滅演算子

M：生成演算子

ϕ_i ：第*i*次モード固有関数（あるいはベクトル、中性子束分布）

λ_i ：第*i*次モード固有値

この式を解くことにより直交関数列 ϕ_i 、およびそれぞれのに ϕ_i に対する固有値 λ_i が求まる。第0次モードの ϕ_0 を基本モード固有関数、 λ_0 を基本固有値と呼び、定常状態の炉心では ϕ_0 のみが存在し、 λ_0 は実効増倍率を表わす。 ϕ_i ($i \geq 1$) を高次モード固有関数或いは高調波と呼

ぶ。摂動後の中性子束分布は、摂動前の ϕ_i の 1 次結合として表わせる。固有値間隔 ϵ_i は

$$\epsilon_i = (1/\lambda_i) - (1/\lambda_0) \quad \dots \dots \dots (2)$$

で定義される。この固有値間隔は、物理的に二通りの解釈⁽⁴⁾が可能である。まず第 1 に、各モード次数の高調波に対する反応度を基本モードを基準にして表現したものと考えることができる。第 2 に、高次モードの固有関数の零点上で炉心を分割して形成される部分炉心と全体系の炉心の実効増倍率の差を反応度で表現したものと考えることができる。このため、固有値間隔が大きいほど全体系の増倍率の内、他の部分炉心からの寄与が大きいことになるので、結合が強い、或いは核的ディカップリングの程度が小さいことになる。

核的ディカップリングの指標としての固有値間隔は、特に断らなければ

$$\epsilon_i = (1/\lambda_i) - (1/\lambda_0) \quad \dots \dots \dots (3)$$

つまり、第 1 次モード固有値に対する値を指すものとする。固有値間隔 ϵ_i が小さいほどその炉心の中性子結合が弱い、すなわち核的ディカップリングの程度が大きいことを表わす。

3. 測定法と測定例⁽⁸⁾⁻⁽¹⁵⁾

核的結合の測定法には静的手法と動的手法があり、下記の 3.1、3.2 は静的手法、3.3、3.4、3.5 は動的手法である。それぞれの手法と測定例を以下に述べる。

3.1 CR 挿入による検出器効率の変化

MSM (修正中性子源増倍) 法による反応度測定では、炉心・ブランケットに埋め込まれた 64 個の IFC (In-core Fission Chamber) の計数率を用いる。IFC は中性子束分布だけでなく、検出器効率も測ることができる。ここで検出器効率とは、核分裂による原子炉全体の中性子発生率に対するその検出器の計数率の割合である。径非均質の 13A 集合体の径方向断面を図 2 に示す。これに CR 1 本 (1.15\$) を挿入した場合の検出器効率と挿入前の効率の比⁽¹⁰⁾を図 3 に示す。CR 挿入位置付近は検出器効率が下がり、挿入位置の反対側は検出器効率が約 20% 上昇している。検出器効率の変化が大きいということは、CR 挿入時の中性子束分布の変化が大きく、外乱により出力分布が変化し易いことを意味し、炉心のディカップリングの程度が大きいことを示している。検出器効率の変化が小さければ、出力分布を一定に保ち易く、CR 挿入による出力分布の歪みも小さい。同様の CR 1 本挿入に対し 330MWe 級均質炉心の 15A は挿入位置の反対側の検出器効率が 5% 上昇し、650MWe 級径非均質炉心の 13C は 34% 上昇した。すなわち、13C はディカップリングの程度が 15A や 13A より大きいことがわかった。13C はいわゆるスノー・フレイク炉心を模擬したものであり、炉心断面を図 4 に示す。連続した内部ブランケット・リ

ングにより炉心燃料領域が半径と方位角の両方向で分断されており、方位角方向の核的結合が弱いことが理解される。

図3は、大型炉心の炉心全体としての中性子束分布が外乱投入により変化し、そのため検出器効率が場所により大きく変化することを示している。このことは、検出器で測定される外乱の反応度が検出器の場所により大きく変化する、いい換えれば、正しい反応度は特定の場所の検出器では測定できないことを意味している。炉外検出器等で測定される大型炉心の反応度が検出器間で大きくばらつくのは、このためである。大型炉心は中性子束の空間分布不変、つまり1点炉近似が成立しないため、それに基づく動特性モデルが適用できず、CR誤作動などの局所的な異常現象を特定位置の炉外検出器だけで正確に検知することは難しいということである。投入外乱の反応度は即時に精度よく検出することが要求されるが、ディカップリングの程度の大きい大型炉心ではそのことが容易でなく、炉心安全確保上の課題になってくる。

3.2 フラックス・テイルト⁽¹⁾

炉心の中性子束分布 $\phi(r, E)$ が外乱の投入により $\phi'(r, E)$ に変化したとすると、その際の中性子束分布の歪みであるフラックス・テイルト (Flux Tilt、以後FT) の測定から固有値間隔を求めることができる。径方向分布 $\phi'(r, E)$ の左半分と右半分の差でFTを定義すると、

$$FT = \{(\phi')_L - (\phi')_R\} / (\phi')_{L+R} \dots \dots \dots (4)$$

但し $(\phi')_L$ 、 $(\phi')_R$ 、 $(\phi')_{L+R}$ はそれぞれ炉心の左半分、右半分、全炉心の体積およびエネルギー積分を表わす。一例として、ZPPR-18AにPSR (運転用制御棒) を挿入した場合のFTの等高線、すなわち外乱投入前後の検出器効率の比を図5に示す。等高線は0.01間隔で示され、実線が変化しなかったところである。中性子束はPSR付近で凹み、反対側で高くなっているのがわかる。

(4)式では、左右対称のモード分布は打ち消し合うのでFT成分はなくなる。1次モード固有関数の分布の方向を左右にとると、それに直角の2次モード分布は左右対称となり、FTに対する寄与はなくなる。したがって、1次モード固有関数を刺激するような外乱を投入した場合のFTは、主として1次モード成分によって決まることになる。炉心・ブランケットの径方向断面に等間隔に埋め込まれた64個のIFCの計数率 R_i はそれぞれその周囲の領域の中性子束を代表しており、1次モード分布を刺激する外乱を投入した場合のFTは計数率 R'_i により、

$$FT \approx \{(R'_i)_L - (R'_i)_R\} / (R'_i)_{L+R} \\ \approx \rho_1 / \epsilon_1 \dots \dots \dots (5)$$

で表わされる。但し ρ_1 は1次モードに対する反応度、 ϵ_1 は(3)式の固有値間隔である。 ρ_1 は

$$\rho_1 / \rho_0 = \lambda_0 \phi_1^* / \lambda_1 \phi_0^* \dots \dots \dots (6)$$

の関係から計算或いは実験により求められる。ここで ρ_0 は基本モードに対する反応度、 λ_0 、

λ_1 は基本および1次モード固有値、 ϕ_0^* 、 ϕ_1^* はその位置での基本および1次モードのエネルギー平均の随伴中性子束である。ZPPR-18A、18B、19A、19Bのそれぞれにおいて、1次モードを刺激するPSRの挿入例4ケースと2次モードを刺激するPSRの挿入例4ケースのFTを測定し、固有値間隔の逆数と(テイルト/ ρ_1)を求め、その関係を図6に示す。その際 ϕ_0^* 、 ϕ_1^* 、 λ_0 、 λ_1 は計算値、 ρ_0 は実験値を用いて ρ_1 求めた。図6は(5)式がほぼ成立していることを示しており、測定されたFTから固有値間隔が求められることが確認できた。また、図7に示されたZPPR-18Aにおいてx軸上に、すなわち1次モードの方向に並んで配置されたベア制御棒を挿入した場合のFTを測定した。1次モードの投入反応度とFTの関係を図8に示す。ベア制御棒は1次モードを刺激し、2次モード成分はない。図8も(5)式がほぼ成立していることを示しており、測定されたFTから固有値間隔が求められることが確認できた。FTによる固有値間隔の測定値と、計算値および炉雑音実験による測定値との比較は、4章で述べる。

3.3 ロッド・ドロップ実験

一定出力の平衡状態で運転中の高速炉にPSRを急速挿入(ロッド・ドロップ)した場合、空間的に離れている二つの炉外検出器(BF₃カウンター)の計数率は共に急降下するが、両者の比は計数率自体が平衡値に達する前にロッド・ドロップ以前とは少し異なる新しい値に収束する。ほぼ同じ反応度(0.3~0.4\$)のPSRを挿入した場合のZPPR-9、13A、13C、15Aの計数率比の時間応答^{(9),(10)}を図9に、また19A、19Bの時間応答⁽¹⁵⁾を図10に示す。PSR挿入後の未臨界系における計数率比が挿入前の臨界系における計数率比と異なるのは、両系の中性子束分布が異なるからであり、計数率比の違いの大きさは炉心のデカップリングの程度を表わしている。先の3.1では検出器効率の違いからデカップリングの程度を導出したが、今回はそれによる計数率比の違いからデカップリングの程度を導出している。デカップリングの程度は15A、ZPPR-9、13A、13Cの順に大きくなり、また19Bより19Aが大きいことがわかる。

図9、10において、デカップリングの程度が小さい場合PSR挿入時の計数率比はステップ関数的に瞬時に一定値に達するが、大きい場合一定値に収束するのに時間がかかっている。これは、デカップリングの程度が大きい場合、PSR挿入による中性子束分布の変化が大きく、検出器効率の変化の収束に時間がかかるからである。13C炉心の置換反応度測定用体系では、計数率比が一定値に収束するのに数分もかかることが観測された。これは、²³⁵Uゾーンは遅発中性子割合が炉心領域より高いため、また²⁴⁰Pu比率の高いゾーンは自発核分裂中性子が炉心領域より高いため、PSR挿入後の新しい平衡状態の形成に時間がかかったものと考えられる。

1点炉近似が成立しない大型炉心では外乱投入による中性子束分布の変化が過渡現象としては比較的長く続いて収束に時間がかかり、収束後の状態の検出に時間がかかる。投入外乱はで

きるだけ早く検出することが要求されるが、デイクップリングの程度の大きい大型炉心では出力分布変化の時間応答が緩慢なためそれが厳しくなり、炉心安全確保上の課題になってくる。

3.4 ボロン・オシレータ実験⁽¹⁰⁾

¹⁰Bサンプルを炉心の軸方向に周期的に振動させた場合の2つの炉外検出器 (BF₃カウンター) の応答から、デイクップリングの程度を求めることができる。¹⁰Bサンプルの移動距離は75mm、周波数範囲は1~10⁻³Hz、2つの炉外検出器は¹⁰Bサンプルに対して非対称に配置される。炉外検出器の計数率の時間的変化からその周波数におけるサンプル反応度が動特性的手法により求まるが、2つの検出器の効率が違うため反応度が異なる。ZPPR-9、13C、15A、19B各炉心の反応度の比⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を図11に示す。反応度は1点炉近似が成立する場合等しくなるが、そうでない場合その違いがデイクップリングの目安になる。2つの反応度は低周波ではほぼ等しいが、高周波ではその違いが明瞭である。図11からデイクップリングの程度は15A、ZPPR-9、19B、13Cの順に大きくなることがわかる。

3.5 炉雑音実験⁽¹⁴⁾

一定出力の平衡状態にある炉心において、対称位置に配置された2つの中性子検出器の炉雑音 (ノイズ) の時間的相関を測定することにより、その炉心のデイクップリングの程度を求めることができる。ZPPRでは4個の⁶Liガラス・シンチレーション・カウンター1、1'、2、3が図12のように配置された。つまり1、1'が同位置に、2が炉心中心に対して180°、3が90°の方向に配置された。検出器1、2間のコヒーレンス関数は、次式で定義される。

$$R_{12}(\omega) = \phi_{12}(\omega) / \sqrt{\phi_{11}(\omega) \cdot \phi_{22}(\omega)} \dots \dots \dots (7)$$

ω : 周波数

$\phi_{11}(\omega)$ 、 $\phi_{22}(\omega)$: 検出器1、2の自己パワースペクトル密度

$\phi_{12}(\omega)$: 検出器対1、2の相互パワースペクトル密度

ZPPR-9、13A集合体のコヒーレンス関数の測定結果⁽¹⁰⁾を図13、14に示す。但し破線は、1点炉モデルの計算値、すなわち基本モード固有関数のコヒーレンス関数である。図14において、コヒーレンス関数における高次モードの効果は近接した検出器A、B間では正であり、測定値が破線より大きくなっているが、対称位置の検出器A、C間では負であり、測定値が破線より小さくなっている。90°位置の検出器A、D間では高次モードの効果は小さく、1点炉モデルに近い値になっている。さて、対称位置の検出器A、C間のコヒーレンス関数が1点炉モデル、つまり基本モード固有関数のものに近ければ炉心のデイクップリングの程度が小さく、両

者の差が大きければディカップリングの程度が大きいことを意味している。このことを利用して、測定されたコヒーレンス関数が1点炉モデルの曲線に近いかどうかでその炉心のディカップリングの程度を判断することができる。図14はA、C間のコヒーレンス関数が1点炉モデルの計算値からかけ離れており、13Aはディカップリングの程度が大きいことを示している。

ZPPR-13C、15A集合体のコヒーレンス関数の測定結果⁽⁸⁾⁽⁹⁾を図15、16に示す。図15からZPPR-13CはZPPR-13Aと同様にディカップリングの程度が大きいことがわかる。また図16からZPPR-15AはZPPR-9と同様にディカップリングの程度が小さいことがわかる。

図1に示した19Aのコヒーレンス関数の測定結果を図17に示す。A、D間のコヒーレンス関数が1点炉モデルの計算値からかけ離れており、19Aもディカップリングの程度が大きい。図18は19Bのコヒーレンス関数であるが、19Aに比べてディカップリングの程度が小さい。

(7)式のコヒーレンス関数は、実は分母の自己パワースペクトル密度が非相関成分（検出系の雑音）を含んでおり、炉心のディカップリングの検出に対して誤差要因になる。そこで同位置の検出器1、1'間のコヒーレンス関数 $R_{11'}$ との比を取ると、

$$R_{12}(\omega) / R_{11'}(\omega) = \phi_{12}(\omega) / \phi_{11'}(\omega) \dots \dots \dots (8)$$

となり、(7)式の $R_{12}(\omega)$ の分母の非相関成分が除去できる。これは、検出器1'、2は対称位置にあるため検出器効率が等しく、 $R_{12}(\omega)$ と $R_{11'}(\omega)$ は分母が等しいからである。(8)式は分母の自己パワースペクトル密度の非相関成分を除去した後の対称位置間のコヒーレンス関数であり、値が小さいほどディカップリングの程度が大きいことを意味する。ZPPR-9、13A、15A、17A、18A、18B、19A、19B各炉心のコヒーレンス関数の測定値から(8)式の比を求めると、図19、20、21のようになった。この結果、炉心のディカップリングの程度は

$$15A < 9 < 19B < 18B < 18A < 17A < 19A < 13A \dots \dots \dots (9)$$

であることがわかった。すなわち均質の15AやZPPR-9炉心が小さく、 I_0 の19Aや径非均質の13A炉心が大きいことがわかった。

断面が円形の炉心の λ モード固有関数は図22のような形状になる。 ω （動的即発）モードの基本、第1次モード固有値を α_0 、 α_1 とすると、x軸上の対称位置に配置された2つの検出器1、2のコヒーレンス関数（分母の自己パワースペクトル密度の非相関成分除去）は、

$$\frac{R_{12}(\omega)}{R_{11'}(\omega)} = \frac{\frac{1}{\omega^2 + \alpha_0^2} - \frac{a}{\omega^2 + \alpha_1^2}}{\frac{1}{\omega^2 + \alpha_0^2} + \frac{a}{\omega^2 + \alpha_1^2}} \dots \dots \dots (10)$$

で近似される。但し a は定数である。これは、2次、3次モード成分の影響がなくなるからである。また λ モード固有値間隔 ϵ_1 とは

$$\epsilon_1 = (\beta - \rho) \cdot (\alpha_1 - \alpha_0) / \alpha_0 \dots \dots \dots (11)$$

β : 遅発中性子割合

ρ : 反応度

が近似的に成立する⁽⁶⁾。図19、20、21のコヒーレンス関数の比に(10)式を最小自乗フィッティングして α_0 、 α_1 を求め、次に(11)式により ϵ_1 を求めた。結果を表1に掲げる。固有値 α_0 はフィッティング誤差の範囲で計算値と一致することが確かめられた。ディカップリングの程度の炉心間序列は、コヒーレンス関数の比から直接求められた(9)式の結果とフィッティング誤差の範囲で一致しており、炉雑音実験の有効性が確認できた。

4. 考察

JUPITER炉心の固有値間隔の測定値、計算値を表2に掲げる。まず、フラックス・テイルトと炉雑音実験による測定値は、ほぼ一致していることが確認できる。静的手法のフラックス・テイルトと動的手法の炉雑音実験という全く独立の両測定法の結果がほぼ一致したということは、両測定法の信頼性と有効性を示している。

次に、炉雑音実験による固有値間隔 ϵ_1 はフィッティング誤差の範囲で計算値と一致しており、炉雑音実験の有効性が確認できた。また、フラックス・テイルトの測定値も計算値とほぼ一致しており、固有値間隔に関する両測定法と計算法の妥当性と精度が証明され、固有値間隔という炉物理量が測定および計算で求まることが明らかになった。

検出器効率の変化、ロッド・ドロップ実験、ボロン・オシレータ実験は、固有値間隔を数値的に求めることはできないが、複数の炉心間における核的結合の序列、つまり固有値間隔の大きさの順序を測定することができる。したがって、複数の炉心のどちらがディカップリングの程度が大きいかはこれらの測定法で決定できる。測定された炉心間の核的結合の序列は、フラックス・テイルトや炉雑音実験による測定値および計算値と一致していることが確認された。

表2から炉心の核的結合に関し、次のような一般的傾向が読み取れる。(1)炉心サイズが大きいほどディカップリングの程度が大きい。(2)非均質炉心は同体積の均質炉心よりディカップリングの程度が大きい。一定の炉心体積では、均質炉心が最も核的結合が強い。(3)制御棒挿入炉心は、引抜炉心よりディカップリングの程度が大きい。(4)表2に掲げられた集合体の内、炉心のディカップリングの程度が大きいのは13C、19A、13Aである。このことは、これらの炉心の大きさ、炉心配置(概念)、制御棒の挿入・引抜などから予想された通りであり、またこれらの炉心における通常の核特性の傾向と符合している。

大型炉心では核的ディカップリングの程度を把握し、核特性をその観点から理解することが重要になる。核設計の良し悪しは核特性の良し悪しによって判断されるが、大型炉心の場合それがディカップリングの観点から行えることがわかってきた。大型炉心の宿命であるディカップリングは、局所的な異常現象の早急・正確な検出を難しくする、外乱による中性子束空間分布の変化を大きくし、不安定にするなどの傾向があるため、大型炉心の成立限界とも成り兼ね

ないものであり、その抑制およびディカップリングの程度の小さい炉心を設計するととが核設計の方法である。ディカップリング特性の研究は、大型炉心の核設計法の研究でもある。

謝辞

JUPITER-Io実験を米国側として企画・実施されたANLのS. G. Carpenter、H. F. McFarlane、S. B. Brumbachの各氏に深く感謝する。また駐在員として同実験に参加した動燃の中島文明、三田敏男（現日立）両氏の甚大な貢献に深く感謝する。

参考文献

- (1)SZTARK, H., et al. : "Le Coeur de la Centrale de Creys-Malville et son Evolution pour Superphenix 2" , IAEA-SM-284/20 (1985).
- (2)MCFARLANE, H. F. et al. : Nucl. Sci. Eng., 87, 204(1984).
- (3)橋本憲吾, 他 : 原子力誌, 31 [9]、1050(1989).
- (4)橋本憲吾 : 学位論文「空間高次モードによる大型炉心ディカップリング現象の解析」、名古屋大学、(1995).
- (5)白方敬章 : 原子力工業, 35巻, 5号, 66(1989).
- (6)EBERT, D., D., et al. : Nucl. Sci. Eng., 55, 380 (1974).
- (7)AVERY, R. : Proc. 2nd U.N. Int. Conf. Peaceful Use of Atomic Energy, Geneva, P/1858, 12,182 (1958).
- (8)BRUMBACH, S. B., et al. : ANS Top. Mtg. Reactor Physics & Shielding, Chicago, Vol. II, 595(1984).
- (9)CARPENTER, S. G., et al. : Top. Mtg. Reactor Physics & Safety, Saratoga Springs, 622(1986).
- (10)BRUMBACH, S. B., et al. : Nucl. Sci. Eng., 98, 103(1988).
- (11)中島文明 : 「大型炉心の核的結合に関する検討」、PNC SN2410 89-012(1989).
- (12)三田敏男 : 「炉雑音解析による高速炉炉心の核的結合の評価」、PNC SN9410 90-015, (1990).
- (13)三田敏男, 他 : 動燃技報, No. 75, 1(1990).
- (14)SANDA, T. : Nucl. Sci. Eng., 104, 135(1990).
- (15)SANDA, T. et al : Nucl. Sci. Eng., 113, 97(1993).

表1 炉雑音実験による固有値間隔の測定結果

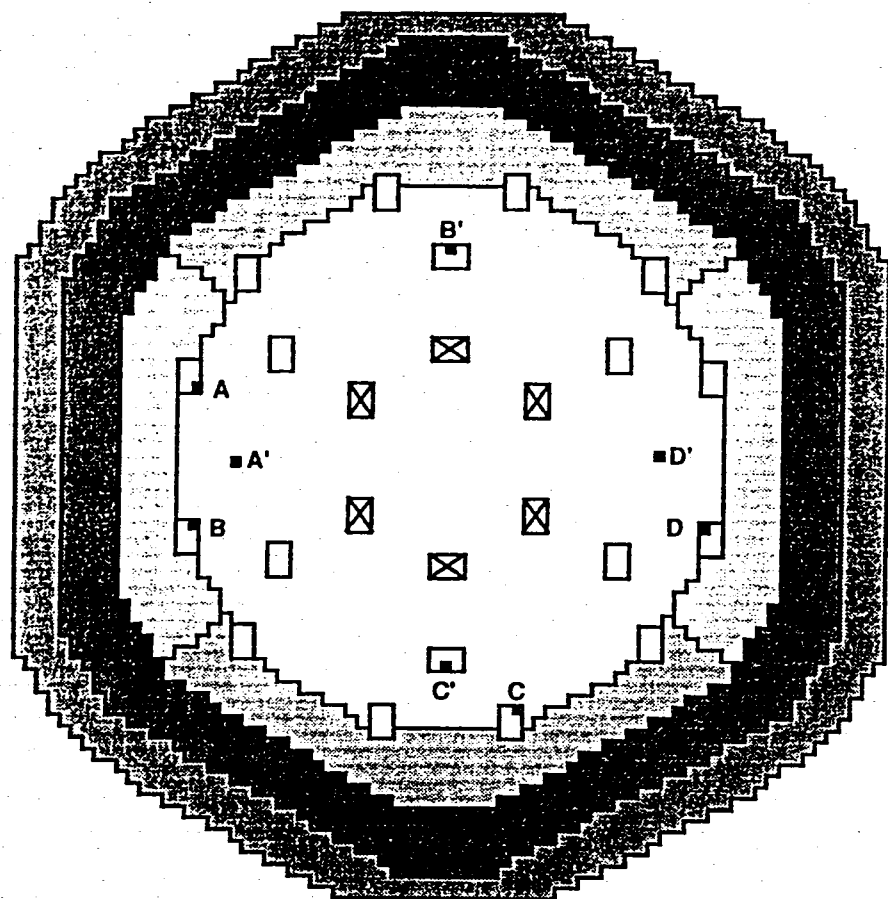
集合体	a (定数)	α_0 (kHz)	α_1 (kHz)	$\beta - \rho$ (%)	固有値間隔の 測定値(ϵ_1)
15A	7.5±20.4	2.01±0.35	71.9±106	0.379	13.2±20.1
9	2.42±0.43	1.09±0.26	16.4±1.9	0.360	5.06±1.44
13A	2.47±0.07	1.25±0.04	10.7±0.3	0.334	2.53±0.13
17A	2.83±0.25	1.20±0.10	15.1±0.9	0.356	4.12±0.46
18A	1.38±0.09	0.88±0.16	9.47±0.53	0.389	3.80±0.80
18B	1.63±0.11	1.02±0.16	11.0±0.6	0.393	3.85±0.70
19A	1.80±0.05	1.21±0.06	8.56±0.23	0.425	2.58±0.17
19B	1.51±0.20	1.05±0.20	11.4±0.7	0.399	3.93±0.87

誤差はフィッティング誤差 (1σ)

表2 Difference between fundamental and first azimuthal harmonic eigenvalues for several JUPITER cores

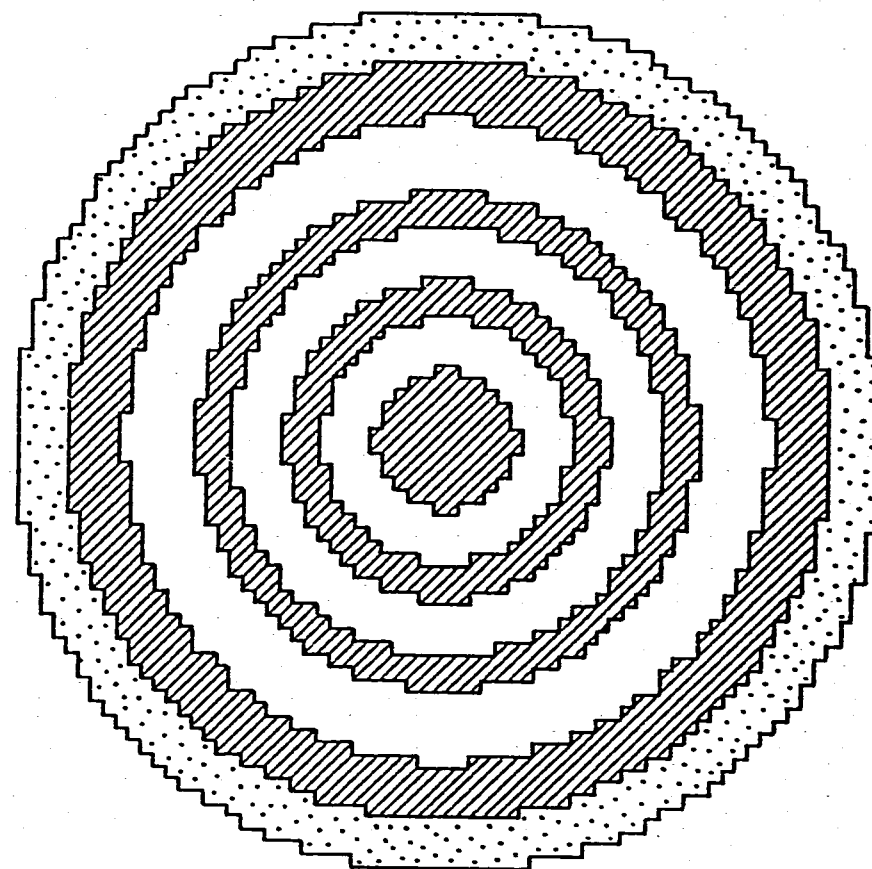
Assembly	Type	Size (MWe)	ES*, ϵ (%)		
			Calculated	Measured	
				NC**	FT***
ZPPR-9	Homogeneous	600	5.35	5.06±1.44	
10A	〃, 19CRPs	600	5.3		
10C	〃, 19CRPs	800	5.1		
13A	Radially-Heterogeneous	650	2.75	2.53±0.13	
13B/1	〃	650	3.31		
13B/2	〃	650	3.09		
13B/3	〃	650	3.08		
13B/4	〃, 30CRPs	650	3.00		
13C	〃 (Snow flake core)	650	1.49	1.28±0.65	
17A	Axially-Heterogeneous	650	3.90	4.12±0.46	
18A	Homo(sector),24CRPs	1000	3.90	3.80±0.80	
18B	Homo(sector),18CRs,6CRPs	1000	3.75	3.85±0.70	
19A	Homo(sector),6CRs,18CRPs	1000	2.35	2.58±0.17	
19B	Homo,24CRPs	1000	4.35	3.93±0.87	

*Eigenvalue Separation **Noise Correlation method ***Flux Tilt method



- CRP
- ⊗ CR (FULL - INSERTED)
- LITHIUM - GLASS DETECTOR
(A' - D' FOR EFFICIENCY CORRECTION)
- INNER CORE □ OUTER CORE □ U - DRIVER
- BLANKET □ REFLECTOR

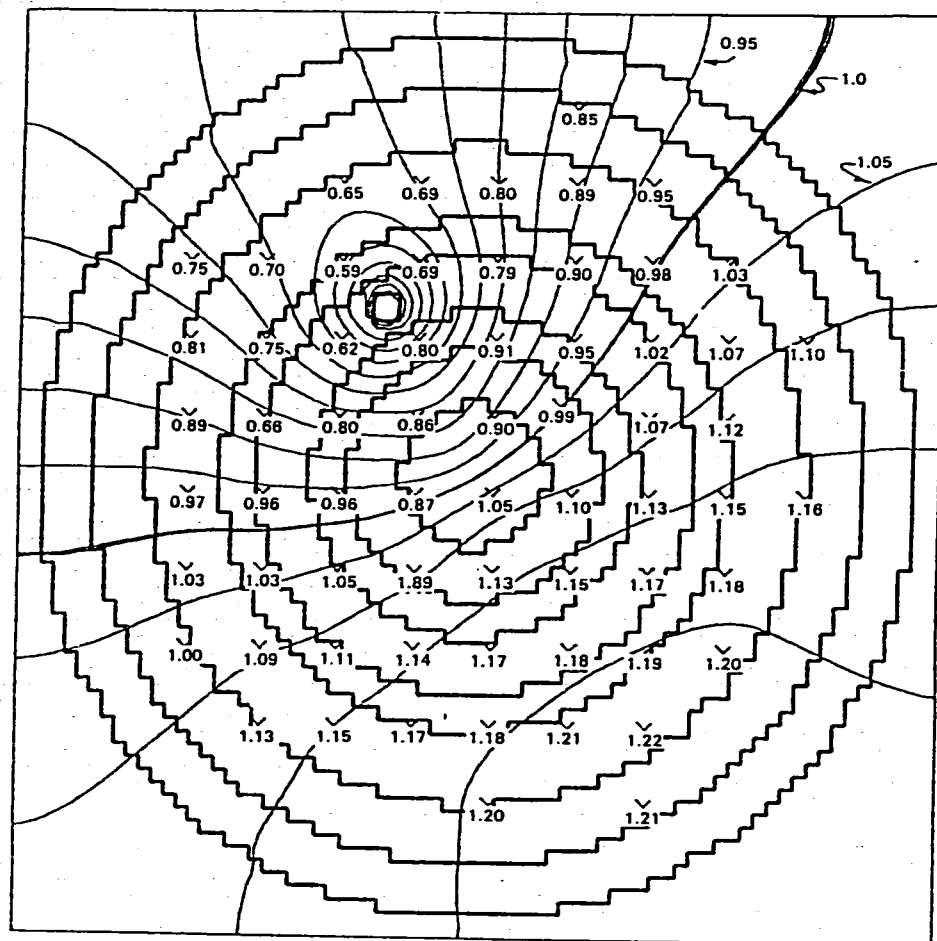
図1 ZPPR-19A集合体の径方向断面



- ▨ BLANKET
- REFLECTOR

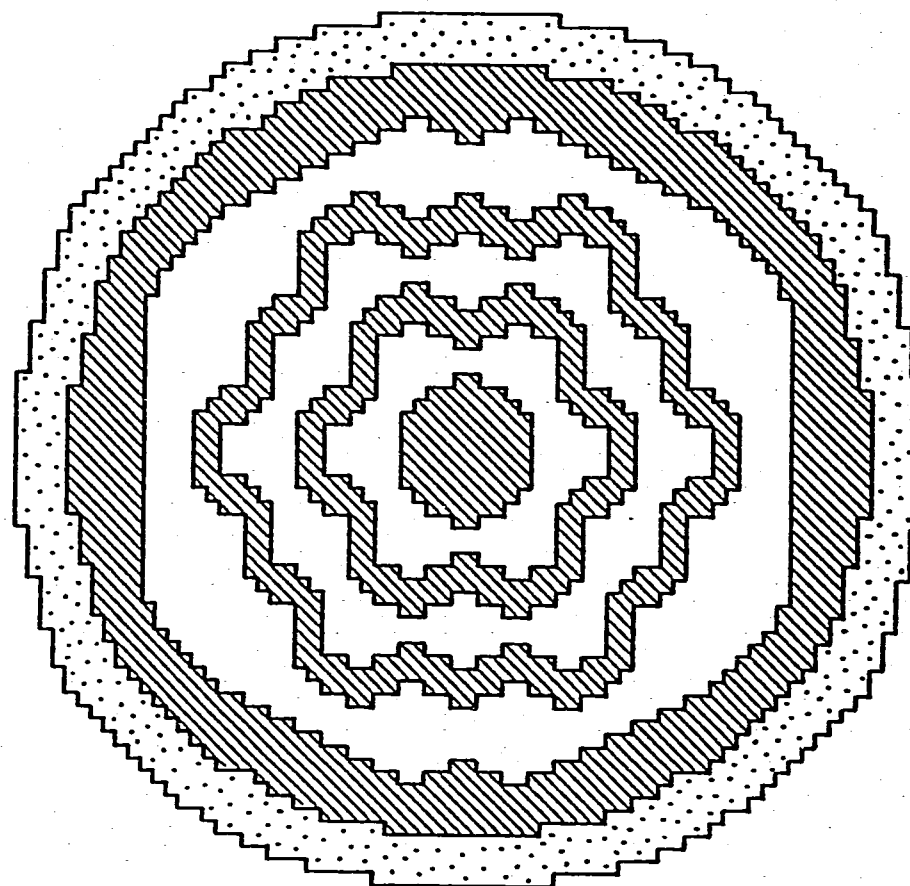
ZPPR - 13 A

図2 ZPPR-13A集合体の径方向断面



— CALCULATED EFFICIENCY RATIO IN INCREMENTS OF 0.05
 Y.YY EXPERIMENTALLY DERIVED EFFICIENCY RATIO
 X FISSION CHAMBER LOCATION
 □ CONTROL ROD LOCATION

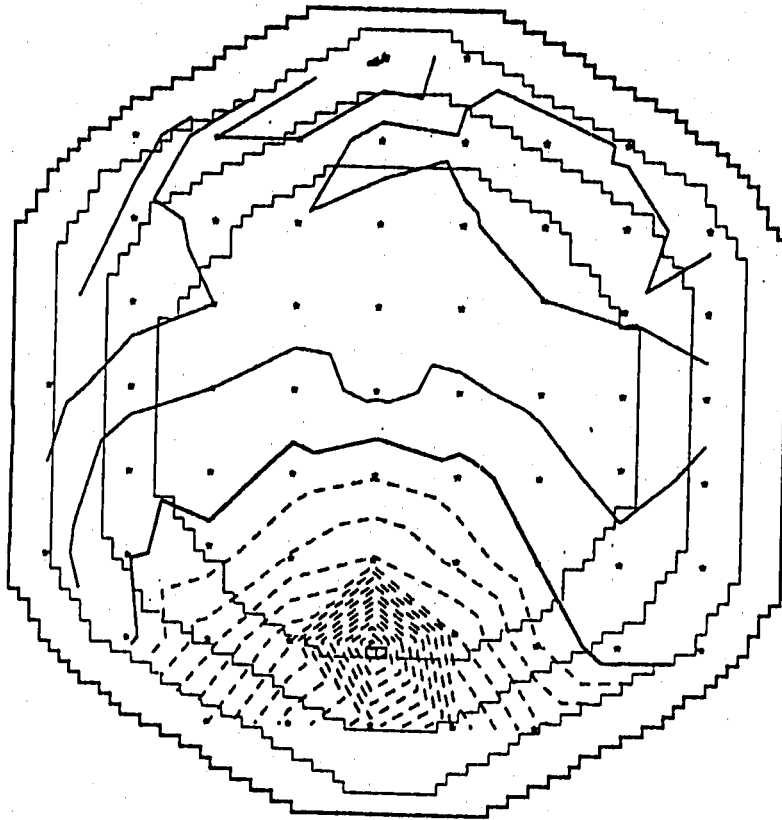
図3 Measured and calculated detector efficiency ratios for a control rod in ZPPR-13A



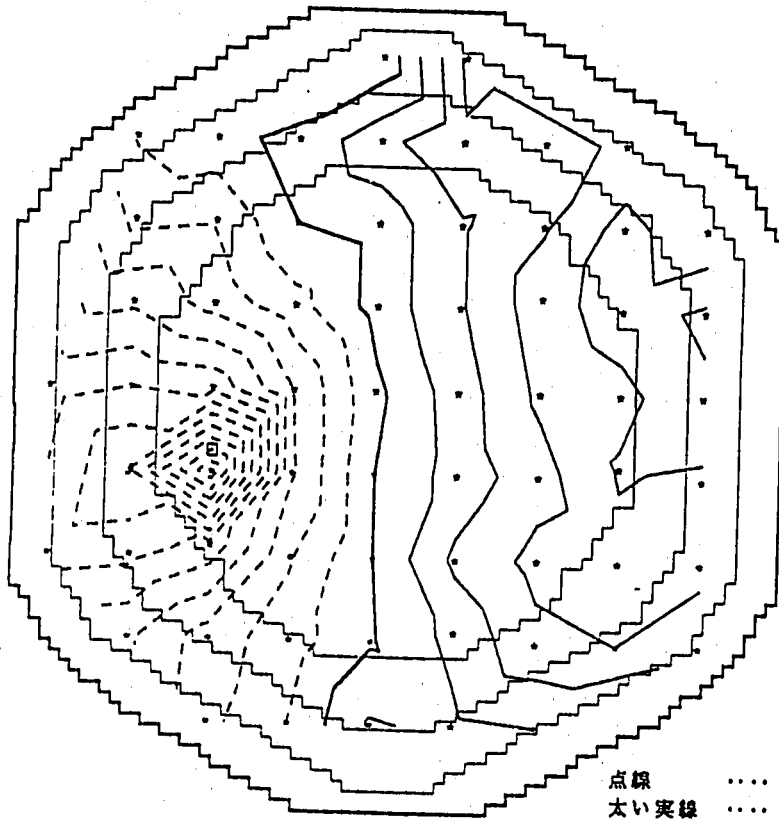
▨ BLANKET □ REFLECTOR

ZPPR-13C

図4 ZPPR-13C集合体の径方向断面



ZPPR-18A PSR(6& 7)



ZPPR-18A PSR(10&19)

点線 ···· Tilt < 1.0
 太い実線 ···· Tilt = 1.0
 細い実線 ···· Tilt > 1.0
 星印 ··· 核分裂計数管

図5 Flux Tilt の等高線 (ZPPR-18A)

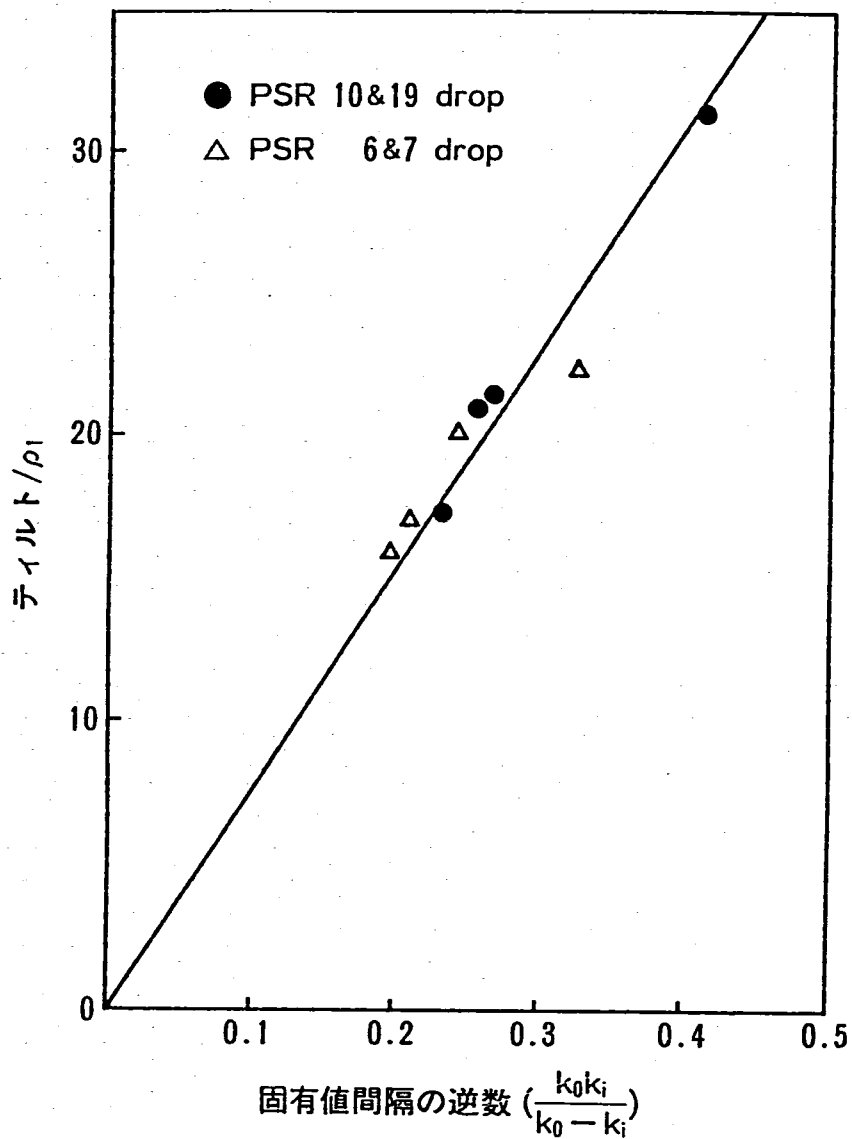
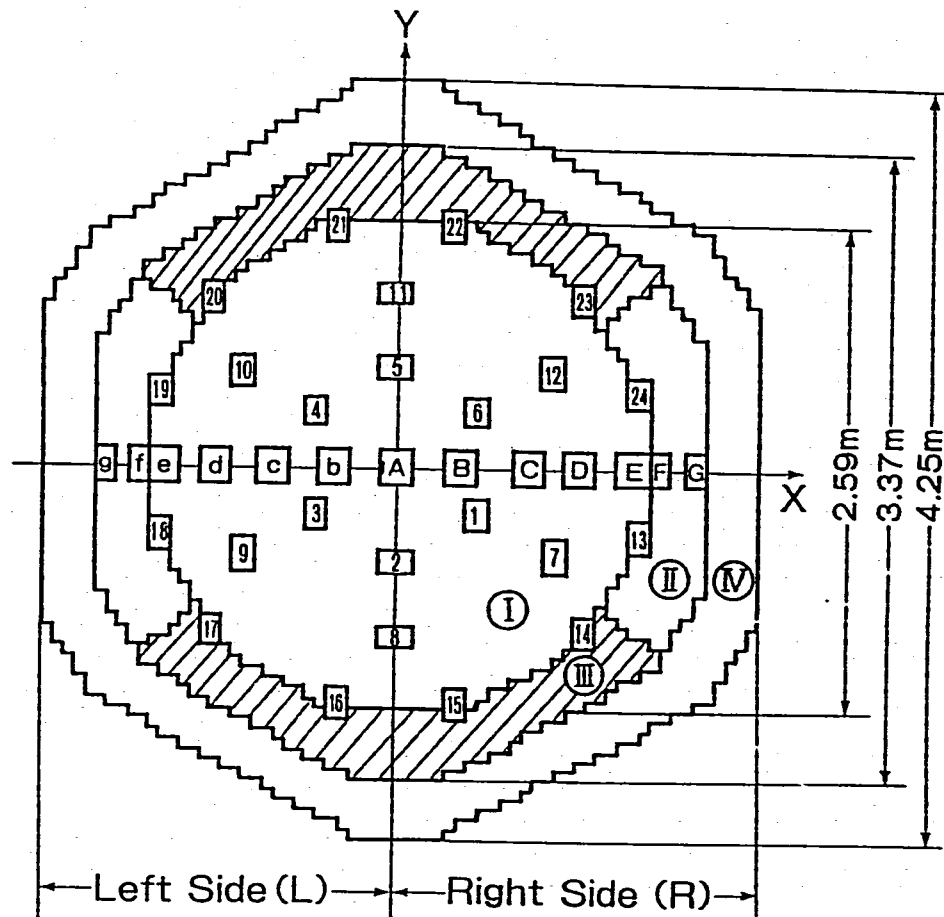


図6 固有値間隔とティルト/ρ₁の関係



- ⓐ : Inner Core
- ⓑ : Outer Core (Pu)
- ⓒ : Outer Core (U)
- ⓓ : Blanket
- Ⓐ ~ Ⓒ : X Axis Special Rod
- ⓑ ~ ⓖ : X Axis Special Rod
- ① ~ ⑳ : Control Rod

図7 Control rod locations in x-axis for flux tilt measurements (ZPPR-18A)

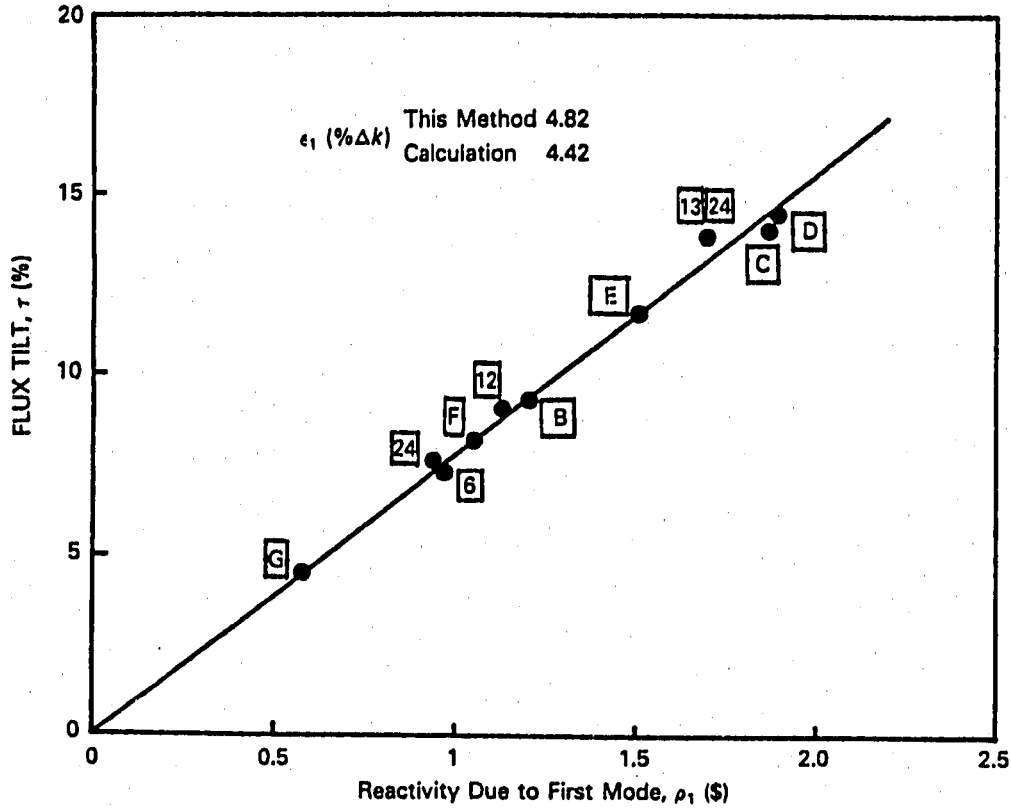


図 8 挿入外乱の大きさとティルトの関係 (ZPPR-18A)

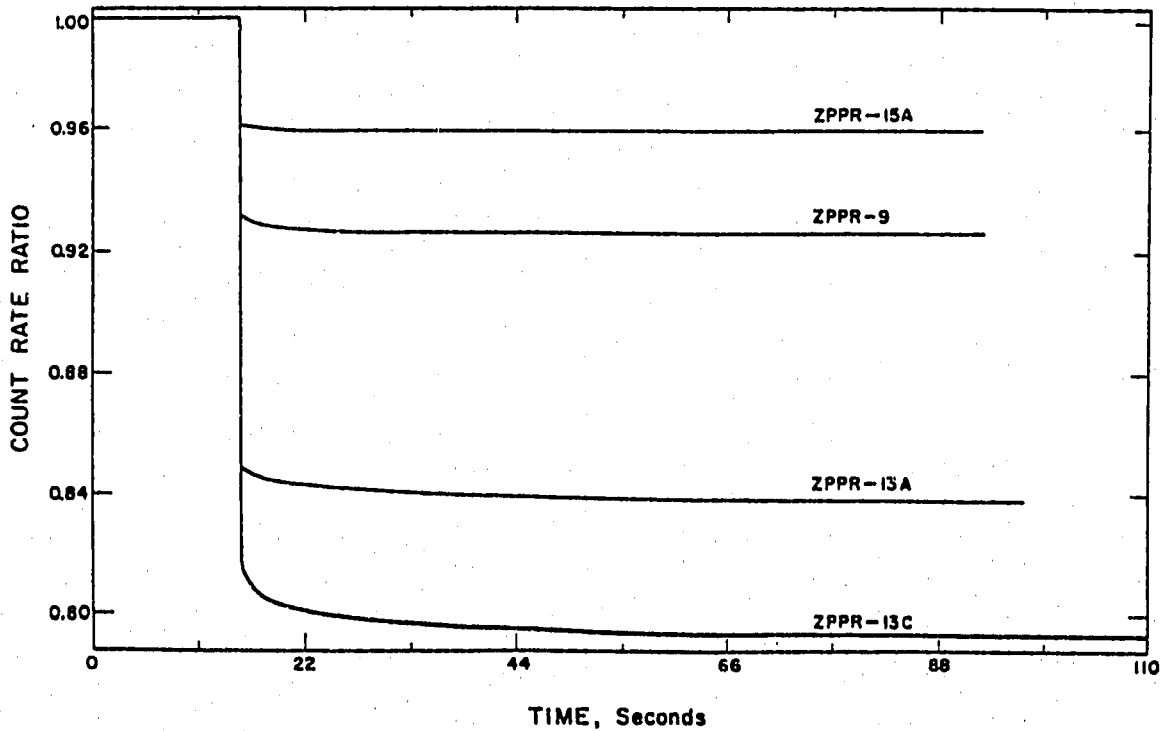


図 9 Change in ex-core detector count rate ratio as a function of time after a rod drop (ZPPR-9, 13A, 13C, 15A)

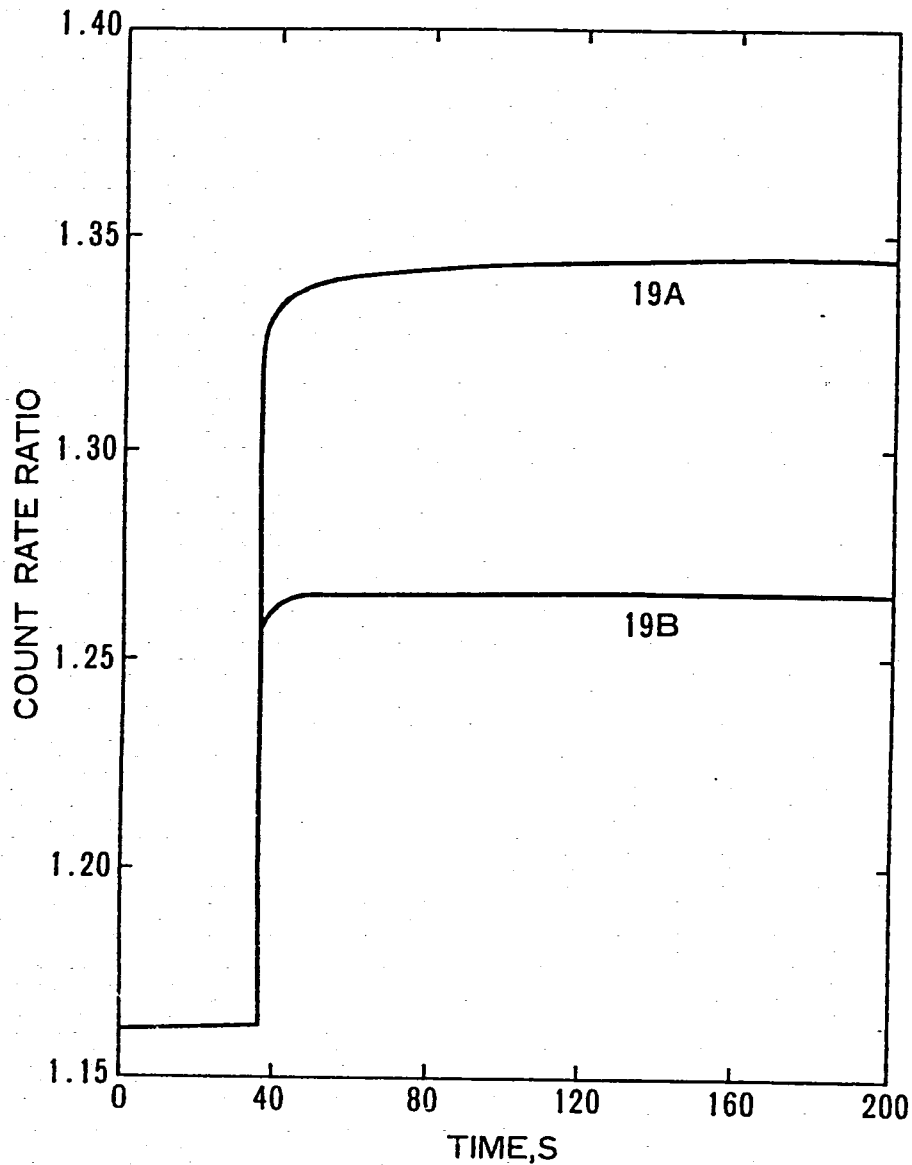


图 10 Change in ex-core detector count rate ratio as a function of time after a rod drop (ZPPR-19A,19B)

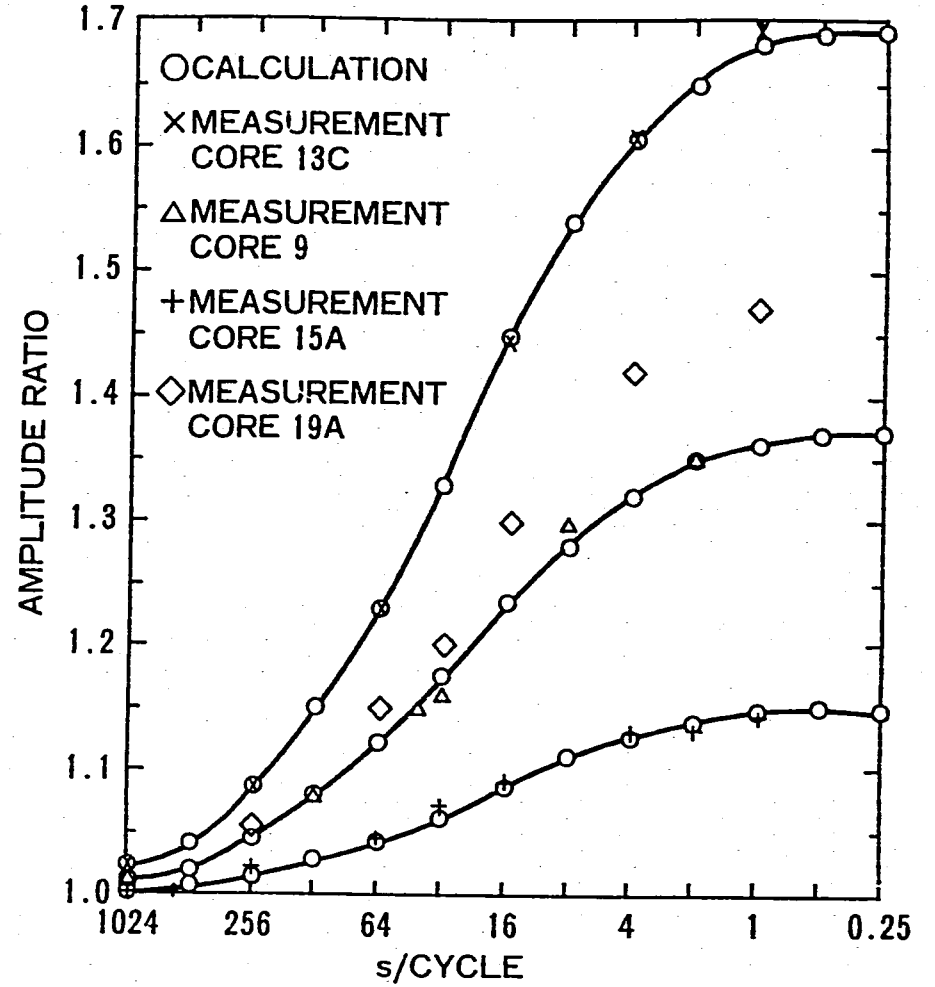
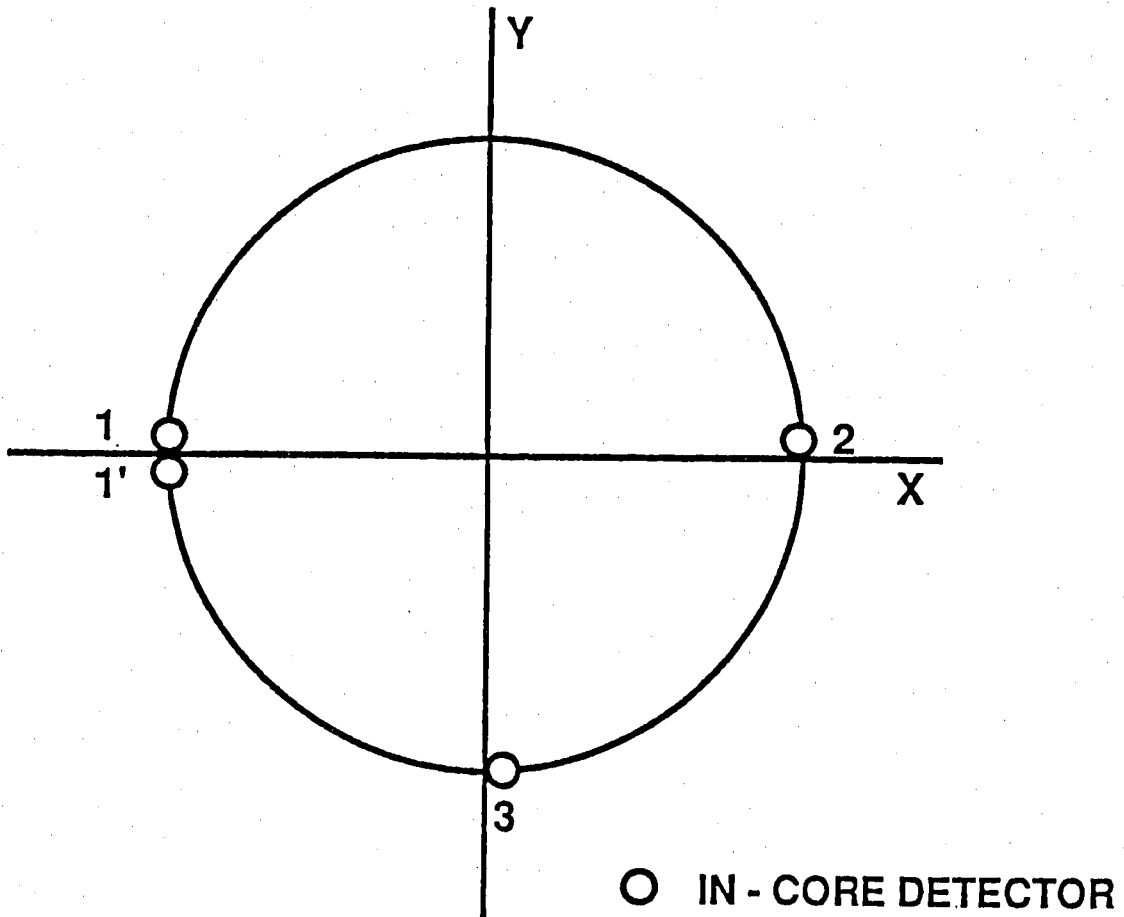


图 11 Ratio of amplitudes of power oscillations measured by two ex-core detectors as a function of frequency of the B_4C oscillation (ZPPR-9,13C,15A,19A)



☒ 1 2 Standard four detector locations in ZPPR noise measurements

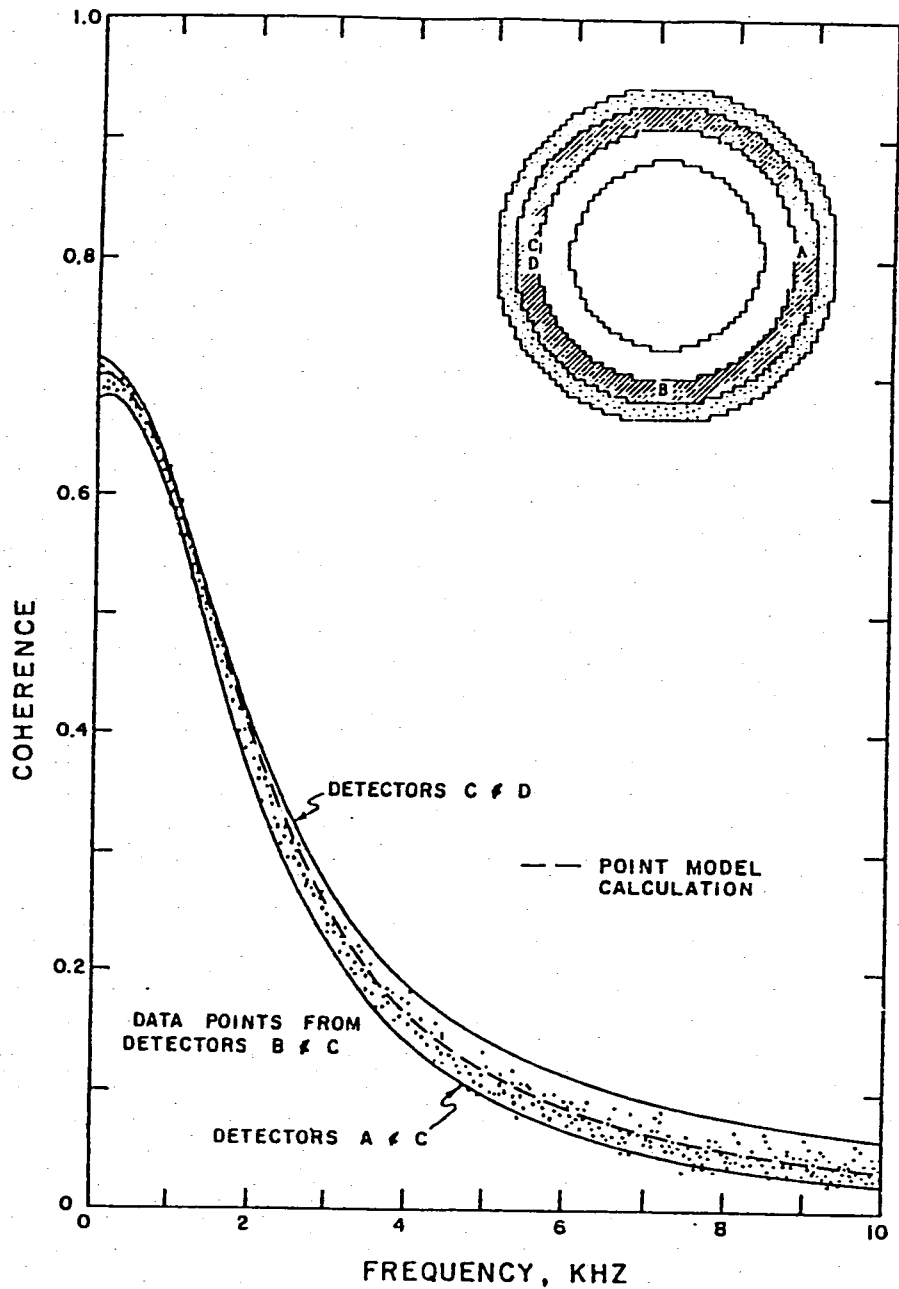


图 1 3 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-9

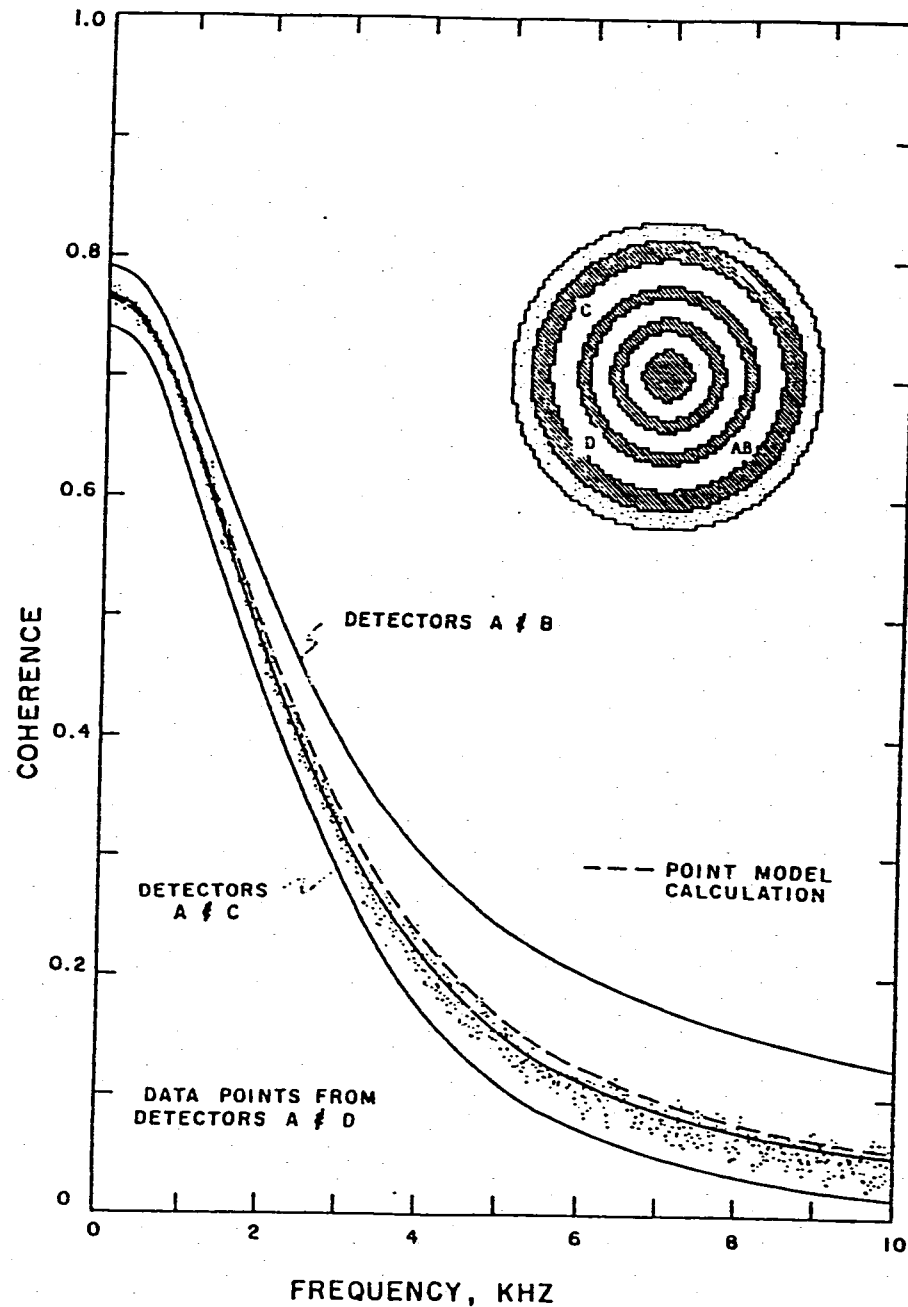


图 1 4 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-13A

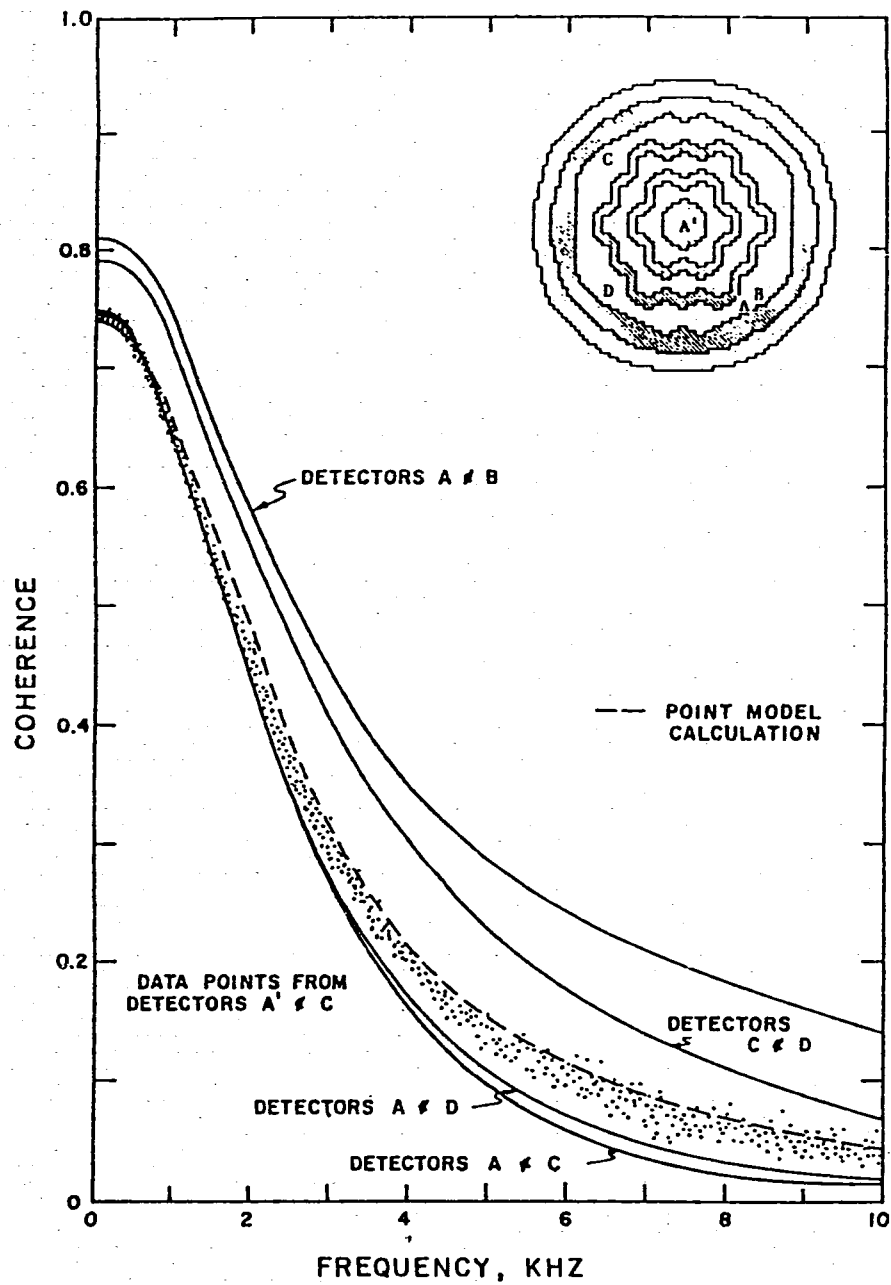


Fig 1 5 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-13C

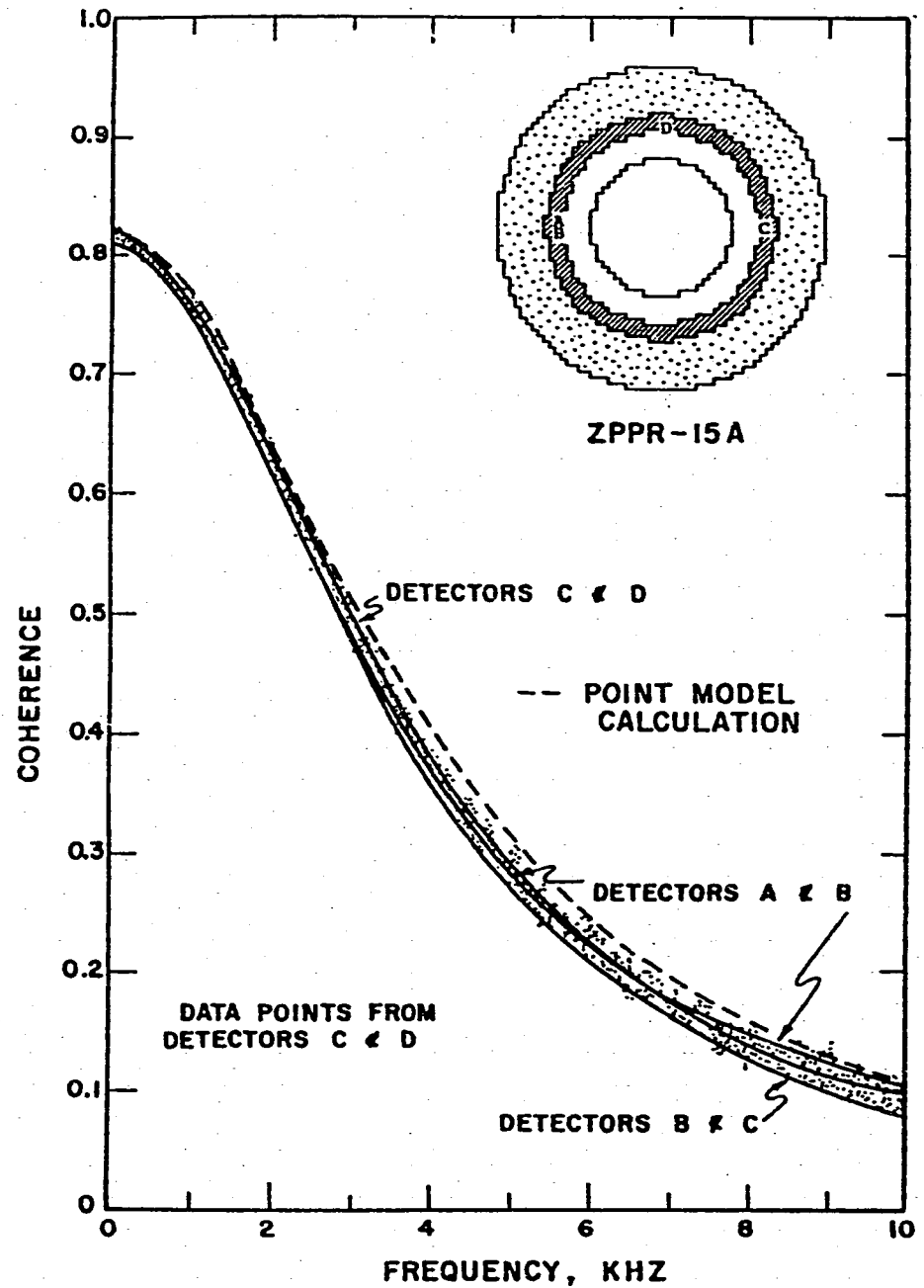
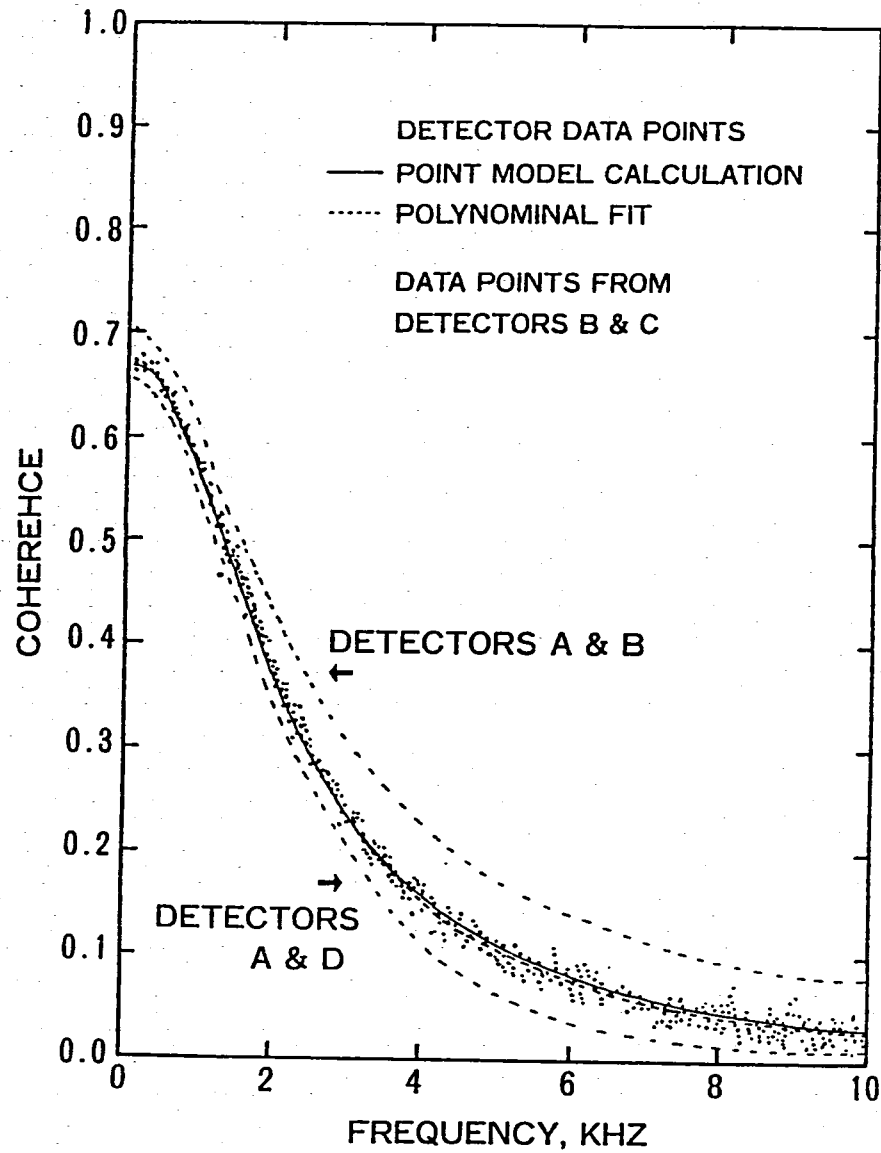
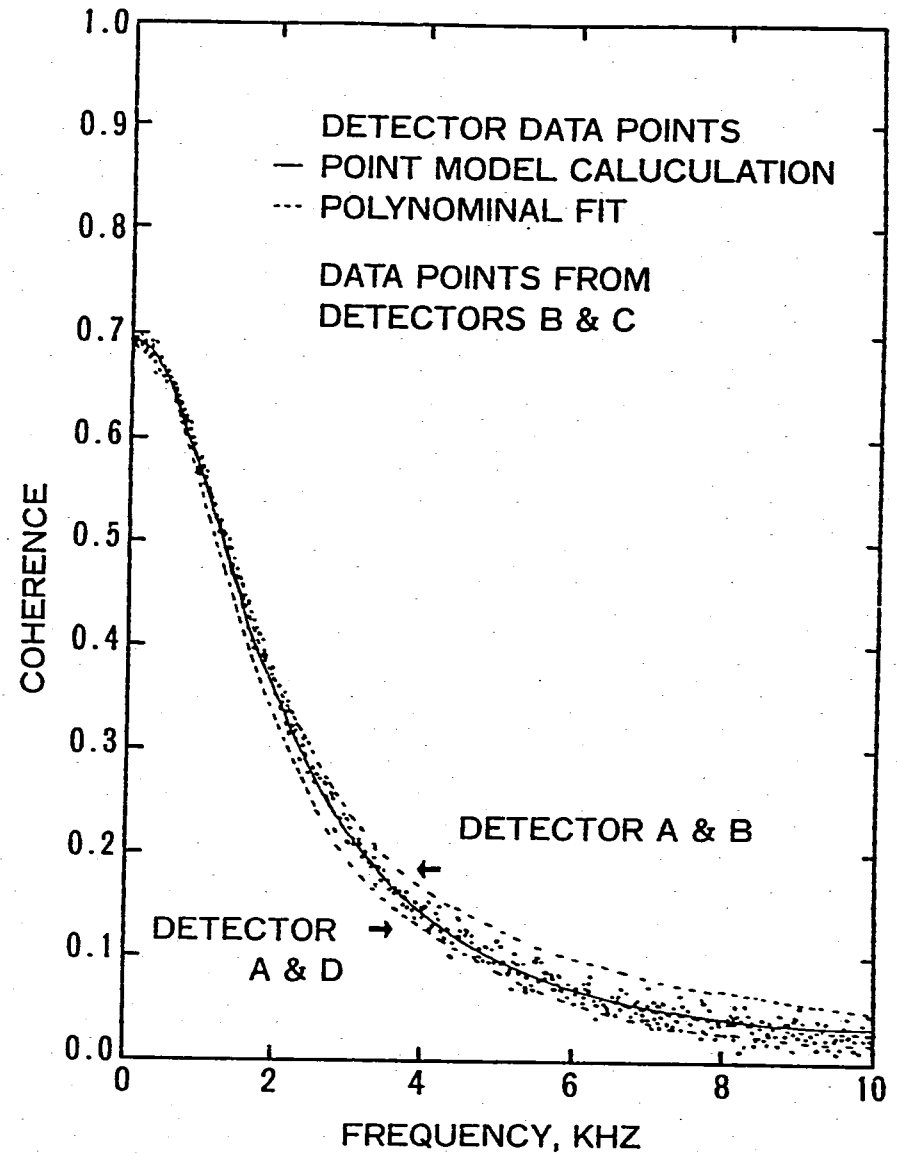


Fig 1 6 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-15A



☒ 1 7 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-19A



☒ 1 8 Coherence as a function of frequency for detector pairs in ZPPR-19B

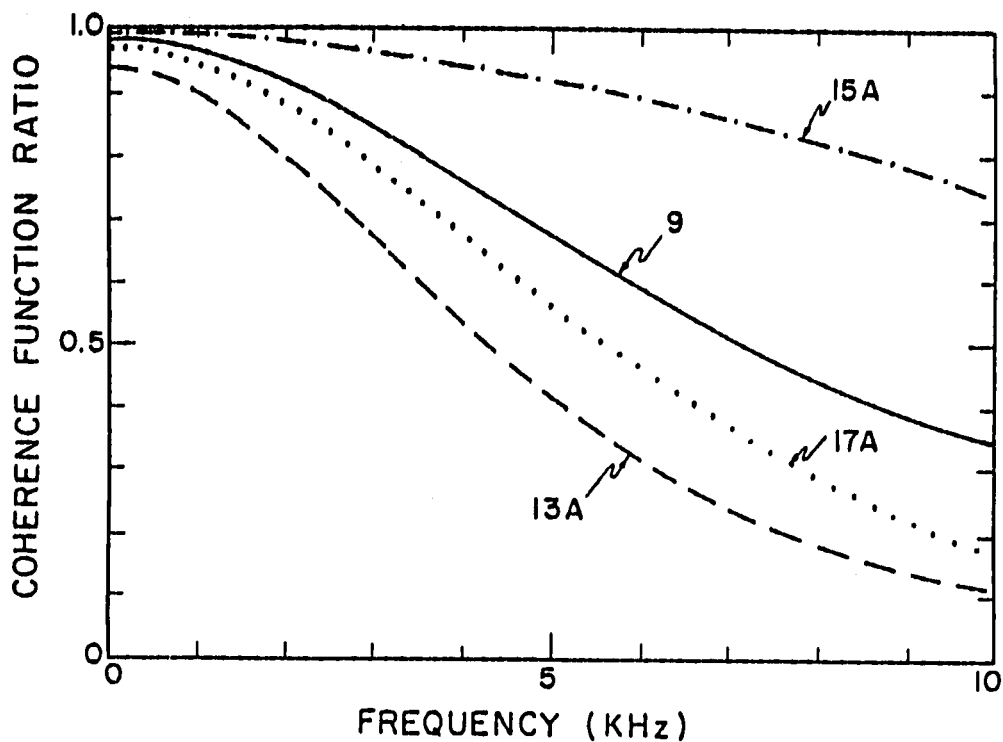


图 19 Fitting curves of coherence function ratios (ZPPR-9,13A,15A,17A)

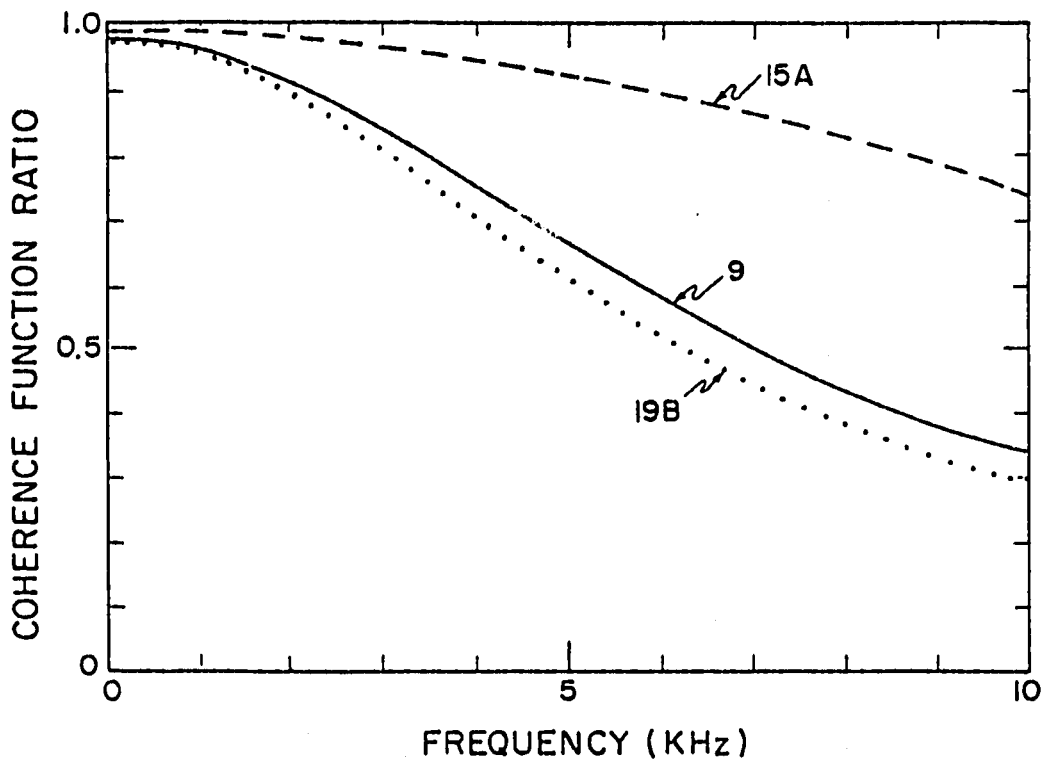


图 20 Fitting curves of coherence function ratios (ZPPR-9,15A,19B)

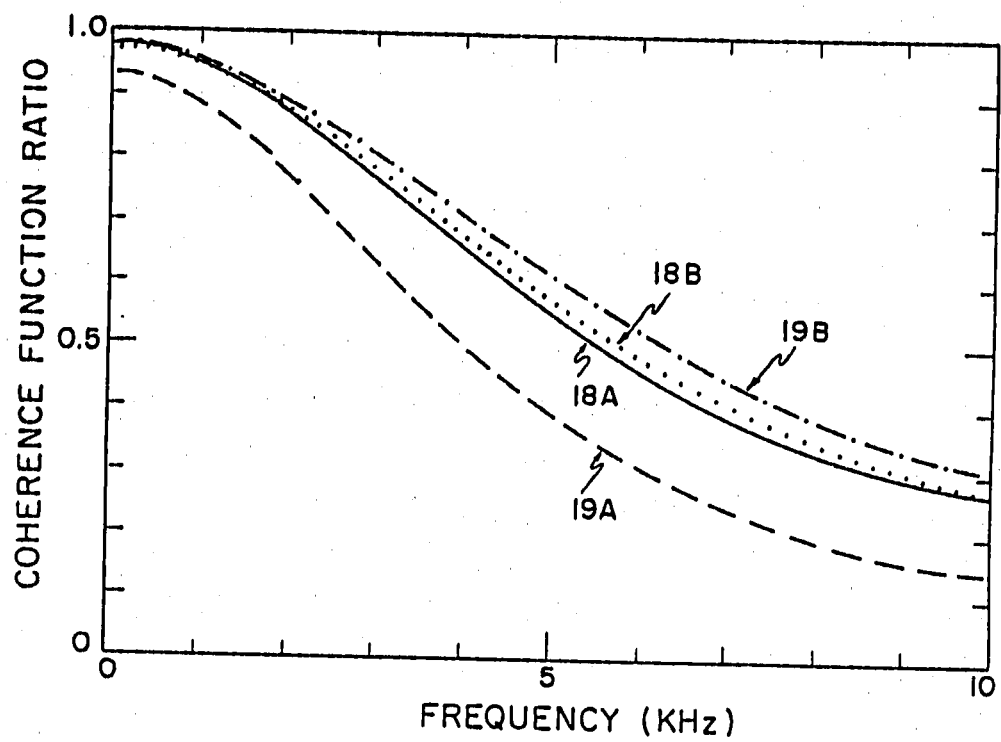


图 2.1 Fitting curves of coherence function ratios (ZPPR-18A, 18B, 19A, 19B)

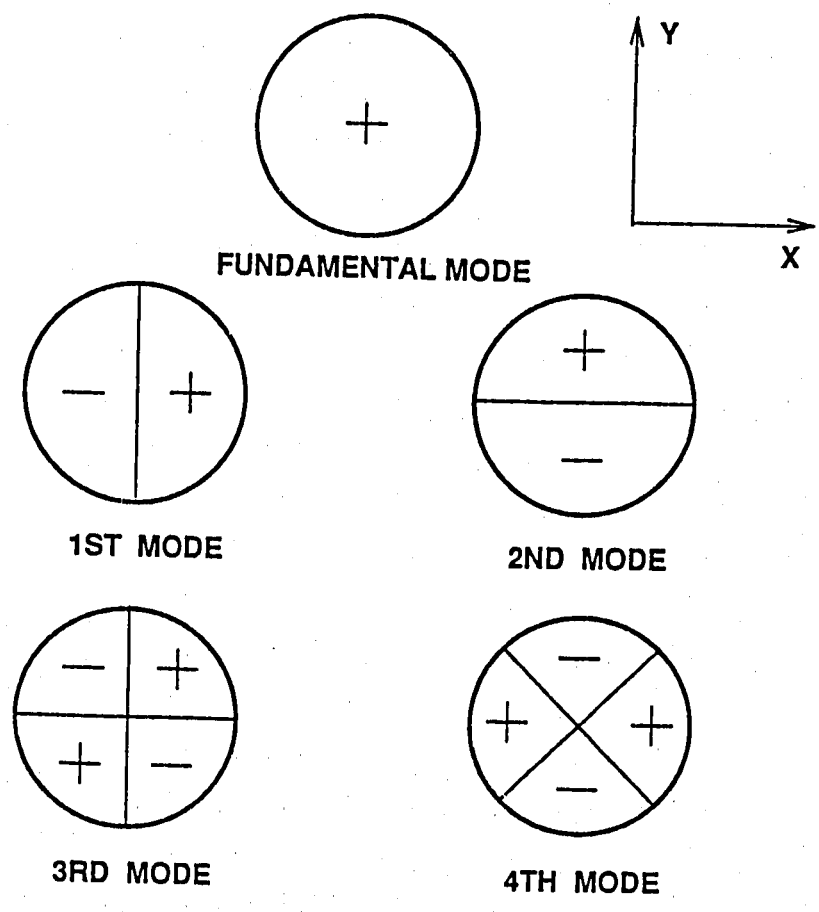


图 2.2 Cross sections of eigenfunctions of x- and y-axis symmetric cores