

# これまでの研究の概要

(by May 1999)

## 1 Odd- $A$ 球形核の低い素励起モード (1971→1975)

「着物を着た3準粒子モード」を key concept とする新しい理論を展開し、従来の準粒子-フォノン結合理論で説明困難であった異常結合状態など多くの実験データについてその有効性を示した。

(主な共同研究者：丸森寿夫、栗山惇、岡本良治) [論文 1⇒13, Talk2-1,3-1]

- Odd- $A$  核の低エネルギー励起状態の中に現れると期待される新しい集団励起モードとして「着物を着た3準粒子モード」の概念を提案した。[論文 2]
- 論文 2 で提案した微視的モデルに基づいて、Odd- $A$  核の異常結合状態の構造を系統的かつ詳細に解析し、この状態群の多様な性質が統一的に理解できることを示した。[論文 3]
- 2 準粒子相関を取り扱う通常の New-Tamm-Dancoff 近似 (乱雑位相近似) の拡張として、3 準粒子 New-Tamm-Dancoff 近似の理論を一般的に定式化した。[論文 5]
- Odd- $A$  核の低い励起状態において集団的3準粒子相関が本質的な役割を果たしている多数の具体例を示した。[論文 6]
- $j-j$ 結合シェルモデルで説明できない、角運動量  $I = (j-1)$  をもつ異常結合状態は「着物を着た3準粒子状態」と考えると、その電磁的性質が良く説明できることを示した。[Talk 2-1]
- 集団的3準粒子相関を取り入れた、Odd- $A$  核の素励起モードの新しい理論を展開し、この理論の有効性を示す典型的現象を論じた。[Talk 3-1]

## 2 転移核の非調和振動 (1976→1982)

4重極 (粒子-空孔) 相関と対相関の動的結合を取り扱うモード・モード結合理論を開発し、球形から4重極変形への転移領域にある原子核における振動と回転の中間的な励起スペクトルの性質を論じた。

(主な共同研究者：鈴木徹、冬木正彦) [論文 14, 17⇒22, Talk2-2,2-3]

- Fermion 状態空間の中で角運動量  $J = 0$  の Fermion Pair のみを Boson 演算子に転写し、残りの自由度を (拘束条件を満足する) 準粒子演算子によって記述する理論を提案した。この方法は、今日、Quantized Bogoliubov Transformation の方法と呼ばれている。[論文 14]
- 多くの準粒子ペアから構成された多フォノン状態空間のノルム行列の性質を分析し、当時、現象論的に導入されていた  $SU(6)$  近似が成り立つための微視的条件を明らかにした。[論文 17]
- フェルミオン状態空間の中に角運動量  $J = 0$  と  $J = 2$  のペアからなる集団的部分空間を構成し、これに対応するボソン空間に転写する方法を与え、このモデルで振動から回転スペクトルへの励起パターンの変化をシミュレートできることを示した。[論文 18]
- 粒子数に共役な角度演算子と、補助変数を用いた正準変換の方法を活用して、有限系のスーパー状態 (超伝導相) で現れる対回転モード (Pairing Rotation) と準粒子モードの動的結合を記述する微視的理論を展開した。[論文 19]

- 有限フェルミ系のスーパー相における多準粒子モード、対回転モード、対振動モードの間のモード・モード結合を、シェル・モデルの有効ハミルトニアンから出発して微視的に導出した。[論文 21]
- 4重極振動の多フォノン状態における集団性の減衰因子として、微視的にはパウリ効果と対相関のブロッキング効果が考えられるが、現象論的ボソン・モデルでは両者を区別することが困難である。可解  $O(4)$  モデルを用いて2つの効果を解析し、どちらか一方を無視した議論は正当化出来ないことを示した。[論文 22]
- 対相関と4重極相関の動的結合を取り扱えるように、改良丸森型ボソン展開の方法を拡張した。4重極変形への転移領域にある原子核の低励起スペクトルを角運動量  $J = 0$  と  $J = 2$  の核子ペアで記述するアプローチの有効性ととも、その適用限界を論じた。[Talk 2-3]

### 3 高速回転する原子核 (高スピン核構造) (1977→現在)

#### 3.1 イラスト・トラップ

イラスト・トラップと呼ばれる高スピン・アイソマーの微視的構造は核子の角運動量整列状態としてよく記述できることを示した。

(主な共同研究者：T. Døssing, K. Neergard, H-C. Chang) [論文 15,16]

- 1976年頃、新しく建設された重イオン加速器を用いて発見された Dy 領域の高スピン・アイソマーの島は、核子の角運動量整列メカニズムによって理解できることを示した。[論文 15]
- Pb 領域に広範に観測される高スピン・アイソマーの微視的構造は核子の角運動量整列状態として理解できること、角運動量の整列に伴ってオブレート変形が成長するメカニズムを明らかにした。[論文 16]

#### 3.2 回転座標系での RPA

回転座標系での diabatic 準粒子表示による RPA と準粒子-フォノン結合理論を展開し、高速回転による振動モードの性質の変化、高スピン状態の電磁的性質を研究した。

(主な共同研究者：清水良文、松崎昌之) [論文 23⇒29,32,33,35,37,46, Talk2-5,3-2]

- 回転座標系でのシェル・モデルの拡張として、Diabatic (透熱) 表示に基づいて2準粒子相関を取り込んだ回転系 RPA (乱雑位相近似) の方法を提案した。この方法では、断熱近似に伴うバンド交差領域での困難を避けることができる。[論文 25]
- 回転整列した2個の準粒子の励起は小さな非軸対称変形を誘起することを示した。[論文 27]
- 回転整列 (Aligned) 2準粒子状態の上に励起されるガンマ振動は強いシグネチャー量子数依存性をもつこと、これが高スピンでのガンマ振動のポプリング運動への性格変化の第一歩であることを理論的に示唆した。[論文 28]
- 単極および4重極巨大共鳴に対する非軸対称変形および高速回転の影響を理論的に予想した。非等方調和振動子モデルに対しては、解析的な表式を導いた。[論文 29]
- 回転系シェル・モデルで使うための、非断熱近似に基づく準粒子表示 (Diabatic 表示) の新しい構成法を開発した。この方法を用いて、慣性モーメントの角運動量依存性の微視的起源を分析した。[論文 32]

- 高スピン・イラスト状態の上に励起される単極および4重極巨大共鳴の性質が系の角運動量の増大につれてどのように変化するか、理論的予想を与えた。[論文 33]
- 静的および動的な非軸対称4重極変形の効果を取り入れて、Odd- $A$ 核の高スピン状態を記述する新しい微視的モデルを定式化した。このモデルを用いてOdd- $A$ 核の電磁的性質を系統的に分析し、非軸対称変形の効果として多くの回転バンドのシグネチャー依存性が説明できることを示した。[論文 37]
- $A = 150$ 領域のOdd- $A$ 核の高スピン状態での $B(M1)$ と $B(E2)$ の特徴的なシグネチャー量子数依存性が、動的および静的ガンマ変形の効果としてどのように理解できるか論じた。[Talk 2-5]

## 4 大振幅集団運動 (1985→現在)

自己無撞着集団座標法(丸森、益川、坂田、栗山)を正準量子化する処方を開発し、非調和ガンマ振動の2フォノン状態の性質を解明した。更に、レベル交差と変形共存の問題を論じた。

(主な共同研究者：松尾正之、福井隆裕、相場浩和) [論文 30,31,34,36,38,40, Talk2-4,2-7,2-8,2-15]

- 自己無撞着集団座標の方法で得られる古典ハミルトニアンを正準量子化する実用的な処方箋を与え、その有効性を可解モデルで確かめた。[論文 30]
- 自己無撞着集団座標の方法に基づいて、非調和ガンマ振動を記述する集団ハミルトニアンを微視的に導出する新しい理論的方法を与えた。この方法を用いて $^{168}\text{Er}$ は非軸対称変形への転移領域にあることを示した。[論文 31]
- ガンマ振動と、他の多様な素励起モードの間のモード・モード結合の微視的構造を分析し、ガンマ振動の2フォノン状態の性質を理論的に予想した。[論文 34]
- 変形核における非調和ガンマ振動の性質を、このシリーズの第1部、第2部で展開した微視的理論を用いて系統的かつ詳細に分析し、ガンマ振動の2フォノン状態の探索に理論的指針を与えた。[論文 36]
- 低励起スペクトルで広範に観測されている変形共存現象を記述するための、透熱近似に基づいた新しい微視的理論を定式化した。さらに、多重 $O(4)$ モデルを用いて、断熱近似では許されない場合でも、集団ポテンシャルの第2極小点近傍に局在した波動関数をもつ励起変形状態が存在しうることを示した。[論文 40]
- 原子核の集団運動の非調和性に関する微視的理論の到達点について、時間に依存するHartree-Bogoliubov近似の観点から論じた(Niels Bohr 生誕100周年記念会議でのレビュー講演) [Talk 2-4]

## 5 超変形核の振動励起モード (1990→現在)

超変形イラスト状態の上に著しい集団性をもつ8重極型の表面振動モードが励起され得ることを理論的に示した。最近、Hg領域の超変形核でこの実験的証拠が得られた。

(主な共同研究者：水鳥正二郎、中務孝、清水良文, W.Nazarewicz) [論文 39,41⇒43,45,48,49,51, Talk2-6,2-9⇒2-13,3-3]

- 回転座標系シェル・モデルに基づく大規模な準粒子RPA計算を遂行し、著しい集団性をもつ8重極型( $K = 0, 1, 2, 3$ )集団励起モードが超変形状態の上に形成され得ることを示し、それらの性質に対する詳しい理論的予想を与えた。[論文 42]

- 軸比 2 : 2 : 1 の非等方調和振動子モデルでの 8 重極型振動モードの性質を解析的に調べ、超変形シェル量子数に関する偶奇効果などいくつかの興味ある性質を理論的に予想した。[論文 43]
- 超変形状態での準粒子モードと 8 重極型振動モードの結合の性質を分析し、 $^{193}\text{Hg}$  の超変形イラスト状態からの励起スペクトルに見えているいくつかの異常性がこの効果によって説明できることを示した。[論文 45]
- 私達は、高スピン超変形核に特有なシェル構造の下では、通常変形核とは異なる性質を持った八重極型の集団励起モードが現れることを理論的に示唆してきたが、最近、Hg や Pb の超変形状態で発見された合計 10 個の励起回転バンドは初めての実験的証拠と考えられる。「回転系での RPA 近似」に基づく微視的モデルによれば、空間対称性と軸対称性を同時に破る  $Y_{32}$  型の表面変形振動モードと回転整列した準粒子モードの競合によって、実験データの特徴を統一的に説明できる。[論文 51]
- 超変形状態のうえに形成される集団的な素励起モードの性質を考察し、超変形状態は空間反転対称性を破る 8 重極型の变形自由度に対して最もソフトであることを示した。[Talk 2-9]
- 高スピン超変形のイラスト状態の近傍に、 $K$  量子数 = 1 をもつバナナ形の新しい表面振動モードが出現する可能性があること、その性質が超変形シェル構造と対相関に敏感であることを理論的に予言した。[Talk 2-10]
- 高速回転する原子核に関する核研国際シンポジウムにおけるレビュー講演。超変形高スピン状態での 8 重極相関に関する最近の理論的到達点を論じた。[Talk 2-13]
- 稼働し始めた新しいガンマ線多重測定器システム (米国 Berkeley の Gammasphere, フランス Strasbourg の Eurogam) を用いた高スピン・スペクトロスコピーによって、この 1-2 年の間に  $A \approx 190$  (Hg、Pb 領域) 超変形核のイラスト回転バンドの上の励起バンドが続々と発見されつつある。これらの高スピン回転バンドの動力学的慣性モーメントは、通常の「回転座標系シェルモデル」では説明できない奇妙な性質を示している。我々は「回転系での RPA 近似」に基づく微視的モデルを展開し、空間対称性と軸対称性を同時に破る  $Y_{32}$  型の表面変形振動モードと回転整列した準粒子モードの競合によって、これらの実験データ ( $^{190,192,194}\text{Hg}$ ,  $^{194,196}\text{Pb}$ ) の主要な特徴を矛盾なく統一的に説明できることを示した。更に、周辺の超変形核に対する幾つかの理論的予測を与えた。我々は、高スピン超変形核に特有なシェル構造の下では、通常変形核とは異なる性質を持った八重極型の集団励起モードが現れる可能性があることを理論的に示唆してきたが、超変形 Hg、Pb アイソトープの励起バンドは、これに対する初めての実験的証拠と考えられる。[Talk 3-3]

## 6 エキゾチック変形シェル構造の起源 (1993→現在)

半古典論 (周期軌道理論) に基づくエキゾチック変形シェル構造の起源の研究。古典周期軌道の分岐 (bifurcation) に伴う量子シェル構造の増幅機構の存在を指摘した。

(主な共同研究者: 在田謙一郎、杉田歩、三須敏幸、A. Magner) [論文 44,47,50,52,53, Talk2-14,2-16⇒2-19]

- 準位密度の半古典論に基づいて、巨大変形ポテンシャルに特有な新しい変形シェル構造の性質を分析した。周期の異なる 2 種類の周期軌道群の間の量子力学的干渉効果によって生じるスーパーシェル効果のために、空間反転対称性を破った形をもつ超変形核が存在する可能性を理論的に示唆した。[論文 47]

- 半古典論と空間反転対称性を破った非調和振動子モデルを用いて、古典周期軌道の分岐 (bifurcation) の量子スペクトルへの反映を分析し、非可積分ハミルトン系での分岐現象に伴う量子シェル構造の顕著な増幅機構が存在することを示した。[論文 50]
- 軸対称変形 cavity モデルと半古典周期軌道理論を用いて超変形シェル構造の起源を系統的に分析した結果、赤道平面 2 次元軌道から分岐し、対称軸方向の振動数と対称軸まわりの回転振動数の比が 1 : 2 の 3 次元周期軌道群が超変形シェル構造の形成に本質的な役割を果たしていることがわかった。このような周期軌道群は、調和振動子ポテンシャルの場合と異なり、短軸と長軸の比が 1 : 2 という特殊な場合に限られず、変形パラメーターの一定の領域で存在し、重要な役割を果たす。このことは、超変形シェル構造を平均ポテンシャルの幾何学的形状で定義するよりも、それをもたらず周期軌道群の性質で定義する方がより一般性があることを意味している。[論文 53]
- 周期軌道の分岐とエキゾチック変形シェル構造の起源に関する最新の講演。空間反転対称性を破った軸対称変形キャビティに閉じ込められた粒子の量子スペクトルのシェル構造 (固有値分布の揺らぎに現れる規則的な振動パターン) を変形度の関数として系統的に調べた。その結果、四重極変形と八重極変形の一定の組み合わせで、新しい顕著なシェル構造が形成されることを見つけた。その動力学的起源を探るため、非可積分ハミルトン力学系に対する半古典論 (周期軌道理論) および、スケール系に対するフーリエ変換の方法を用いて、周期軌道の性質の変形パラメータ依存性を解析した。その結果、赤道面上の三角形と四角形の周期軌道群から三次元周期軌道群が分岐する分岐曲線の近傍で上記のシェル構造が急激に成長していることが分かった。この結果は原子核やマイクロクラスターなどの有限量子系にエキゾチック変形が現れる新しい機構を示唆している。[Talk 2-17]

## 7 重い不安定核の構造 (1997→現在)

陽子や中性子のドリップ線近傍にある重い不安定核の構造を研究する第一歩として、空間対称性になんら制限を課さない 3 次元格子表示に基づく Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov 計算を開始した。

(主な共同研究者：山上雅之)[Talk2-20]

- 不安定核でのエキゾチック変形の探索を主な目的として、空間対称性に制限を課さない三次元正方形メッシュ表現による Cranked Skyrme-Hartree-Fock 法の計算プログラムを開発した。これを用いて先ず  $^{32}\text{S}$  の高スピン・イラスト状態の性質を調べ、a) 超変形バンドが角運動量  $I = 24\hbar$  付近で劇的な内部構造変化を起こしハイパー変形に転移していくこと、b)  $I \simeq 10\hbar$  のイラスト領域に空間反転対称性と軸対称性を同時に破った  $Y_{31}$  変形バンドが現れること等を見つけた。[Talk 2-20]