

Maxwell-Bloch 乱流

京大基研 池田研介、NTT 基研 大塚建樹、北大薬 松本健司

本講演では、活性（負温度）共鳴媒質中を透過する電磁場の古典的モデルである Maxwell-Bloch 方程式系で記述される複雑な動的挙動に関する研究を報告する。目的は2つある。1つは、レーザーで頻繁に観測される多モード発振に伴う様々な不規則現象が、系それ自体にそなわった chaotic dynamics によって説明できるか否かをさぐることに、今1つはこれまで展開してきた情報理論的手法によって、多モードが参加する複雑な乱流現象の中身をどれ程解明できるかをテストすることにある。実験的観点からするとレーザーのような光学系ではスペクトル分解した実験データが容易に得られるので、波数空間での情報理論的特徴づけは、実験データの整理と解釈に有力であろうことが期待される。

不思議なことに Maxwell-Bloch 系の多モード発振の研究は殆ど行なわれてこなかった。我々は擬スペクトル法を用いて 512-1024 個の cavity modes を取り入れた計算機シミュレーションを行なった。ポンピングが第2しきい値を越すと、共鳴ラビ不安定性によってまずラビ周波数の self-locked pulsation がおこり、ついでそれがカオス化する。

この時点では空間パターンのフーリエ成分は、特定の cavity mode に集中している。しかしさらにポンピングレベルが増大すると空間パターンのスペクトルは、媒質の利得域全域に広がり、空間パターンは著しく不規則な様子を呈するに至る。この状況が多モード発振に対応すると考えられる。我々が関心を持つのがこの状況である。

我々は各 cavity mode に分配されたエネルギーの時間変動に注目した。それを適当にコード化し、異なった2個ないし3個のモードエネルギーの変動現象が共有する2点及び3点相互情報量から波数空間情報地図を作成して、波数空間内での時間的連結性を定量化した。エネルギーの90%以上は共鳴媒質の利得帯域（core range）に集中する。しかしこの領域は決して活発ではなく利得帯からラビ波数 k_R だけへだてて対称に位置する狭い帯域（Rabi chaotic bands）でカオスによる情報生成が行なわれていることがわかった。2つのバンドの夫々は更に2つの部分（upper band と lower band）に分離し、夫々の帯域を源とする情報ネットワークが形成されている。upper band は k_R の整数倍位置（ここでエネルギースペクトルはピークをもつ）のダイナミクスを制御するのに対し lower band は k_R の半整数倍位置（スペクトルの谷）を制御していることが明確に示された。さらに core range には極めて長いタイムスケールの運動が存在し、それが Rabi upper band のダイナミクスを同じタイムスケールで支配していることがわかった。しかしこの運動は、それよりはるかに短いタイムスケールでおこるカオス運動とは直接に結びついていない。一方負の3点情報量の解析から2つの Rabi chaotic bands が強く相関することによって core の運動に強い影響を与えていることが示された。更に3点情報量は、 k_R のサブハーモニックモードが活性化していることを示唆した。これは Hillman たちが Dye laser で観

測した subharmonic transition と関係しているかもしれない。さて Rabi chaotic bands と core range の interplay はどのような物理過程としてあらわれるのだろうか？以下では上記の情報理論的研究を念頭において得られた Maxwell-Bloch 系のダイナミクスの研究結果をまとめておこう。

core range では分配された全エネルギーの和はほぼ一定に保たれているにも拘らず、各モードに分配されたエネルギーは極めて長いタイムスケールで大振幅の変動を行なっている。このタイムスケールが上述の長いタイムスケールに他ならない。この現象は半導体レーザーの多モード発振でしばしば観測され光による情報電送と絡んで問題にされてきたモード分配雑音に対応している。従来モード分配雑音は、外界から侵入する雑音に駆動された光子数ダイナミクス（モード競合—生存競争—モデル）で理解されてきた。しかし M—B 系のモード分配雑音はその起源が系自身に内在する chaos にあり、しかも光子数（＝振幅）ではなく位相が本質的役割をはたす。:

M—B 系はその内的対称性に由来する slow manifolds を数多くもっており、各 manifold 上の空間パターンは巻数（winding number）で特徴づけられる。各 manifold 上では全エネルギーが保存され、空間パターンの時間変動は位相変数で記述される。従ってそのタイムスケールはきわめて長い。core range の運動は slow manifold 上の運動であり、それが 2 つの Rabi chaotic bands の結合によって生み出される Rabi force の摂動を受けて、ゆるやかに変動する位相の空間ゆらぎをつくりだす。これがモード分配雑音として観測される。

モード分配雑音より更に長いタイムスケールでは異なった winding number をもつ slow manifold 間を遷移する現象がみられる。これが様々のレーザーで古くから観測されてきたモード跳躍とよばれる現象である。この現象も従来外部雑音に駆動された光子数ダイナミクスのモデルによって理解されてきた。しかし、M—B 系でみられるモード跳躍は、系の内部状態と無相関に発生する外部雑音に起因するわけではなく、内部状態を反映して形成されたカオス的内力に起因している：モード跳躍が発生するためには core range に winding number を変化させるような defect が核形成されねばならない。defect の発生は core range と Rabi chaotic bands の間のきわめて巧妙な連携動作によっておきている。即ちまず core range の位相変数の空間パターンに停留点が出現する。この位置では 2 つの Rabi chaotic bands へ相対的に多くの輻射が送られ chaos 運動が局所的に活性化され、停留点の発生した位置に強い Rabi force が発生する。この力はフィードバックされて位相停留点を成長させ、それをもとに defect の種が生まれる。そして条件が整えば defect は成長し winding number の遷移が発生する。このようにカオスによる defect の自己形成過程によって異なった winding number をもつ slow manifold 間に easy path が動的に形成され slow manifold 間を遍歴してゆく運動（chaotic itinerancy）がモード跳躍なのである。この現象は、ホログラフィーを挿入された連想記憶レーザー素子で観測された「day dream」現象や、津田がニューラルネットワークモデルで見いだした記憶の遍歴現象とよく似ているがその関連はまだはっきりしない。

結論として、従来多モード発振で観測されてきたいくつかの現象が M—B 系の chaotic itinerancy

として説明できる可能性があることがわかってきた。空間構造が比較的乱れていない乱流状態を研究する統一的方法として情報理論的方法がかなり有力な手掛かりを与えてくれるようである。しかし系内部で発生している物理過程の詳細を知るためには、情報理論的手法を手掛かりにして系の active な部分を削除（フィルターリング）したりあるいは移植したりする積極的な実験が同時に必要である。

《参 考 文 献》

- ・ K. Ikeda and K. Matsumoto, Phys. Rev. Lett. **62**(1989) 2265.
- ・ K. Ikeda, K. Otsuka and K. Matsumoto, Suppl. Prog. Theor. Phys に掲載予定