

私たちは心臓に Bekki-Nozaki ホールなる位相特異点を持っているか？

非線形・非平衡開放系の臨界現象に対して複素 Ginzburg-Landau 方程式 (CGLE) モデルは重要な役割を果たして来た。約 30 年前に 1 次元 CGLE の解析的厳密解が発見され、とりわけ、振幅の凹みを伴う伝播する位相特異点のダイナミクスを記述する解は、Bekki-Nozaki (BN) ホール解と呼ばれている。これまで、この BN ホール解の実験的検証は困難を極め、測定結果と BN ホール解との定量的比較は十分ではなかった。例えば、直線上の幅の狭いセルを用いて、側壁加熱のシリコン油の熱対流の実験で、Hopf 分岐点近傍で振幅の凹みを観測し、定性的に BN ホール解と比較されたが、定量的には不十分であった。そこで、BN ホール解の実験的検証については、実験対象を流体やプラズマなどに拘ることをやめて、健康な人間の心臓の心筋運動による波のダイナミクスを測定して、それらの力学的特性を調べることにした。

測定原理は超音波の位相トラッキング法による。超音波の周波数は、普通の医療器に用いるものと同じで 3.75 MHz である。このとき 1 波長は 0.411mm になり、対象の変位計測は、この波長程度の精度しか得られない。しかし、位相トラッキング法では、サブミクロンの細かな変位まで計測することが可能になり、高分解能の測定が実現された。図 1 左は、第 2 心音直前の心室中隔壁 (IVS) 上の 2 次元位相データのスナップショットで、IVS の○印のところに典型的な位相特異点が観察される。また、図 1 右は、その位相特異点がビームライン方向に伝播している様子を示している。

最近、東北大学大学院工学研究科のグループは、大動脈弁が閉じた直後において、心臓壁を伝播する波を計測することに初めて成功した。日本大学工学部と東北大学大学院工学研究科のグループは、その計測データの力学的特性を調べた。この波は、生きている健康な人間の最も基本的な心臓の状態を特徴付けており、この非線形波動の振る舞いを調べることは、心臓疾患などの診断に役に立つことが予想されて、非常に重要である。この波は、流体や化学反応系の波動とは異なり、心筋収縮系自体の粘弾性力学的特性が加わった非常にユニークな強い非線形波動である。驚くべきこと

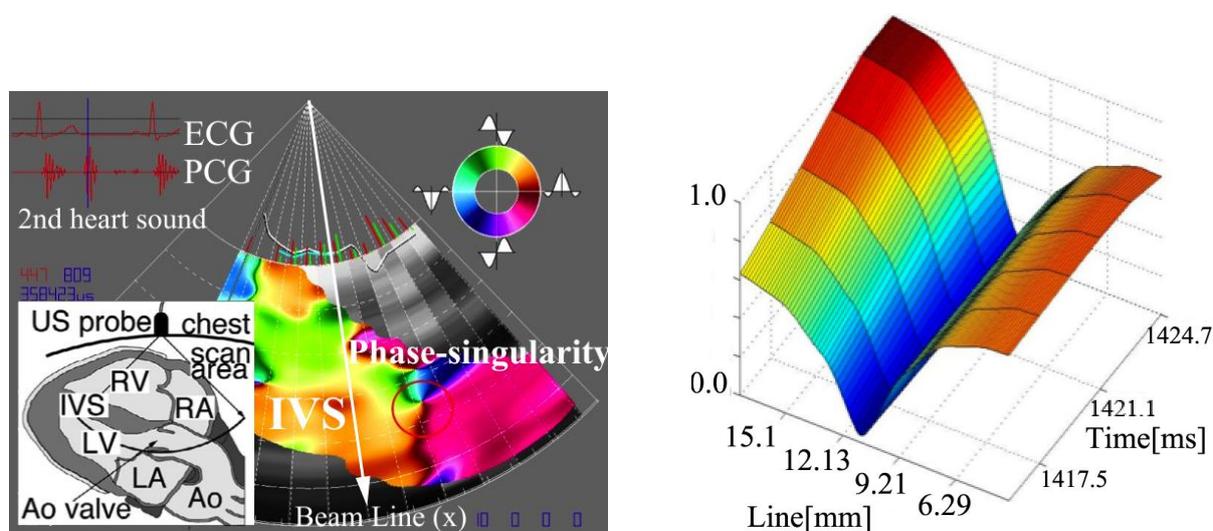


図 1. 第 2 心音直前の心室中隔壁上の 2 次元位相データのスナップショット (左) と興奮波の位相特異点近傍の振幅の時空間プロフィール (右). 上右図に興奮波位相特異点付近の振幅の凹み (ホール) が確かに観察できる。

に、その非線形波の振る舞いが1次元CGLEモデルで説明できることが初めて明らかにされた。即ち、非線形波の位相と振幅のダイナミクスがCGLEの厳密解の一つとして知られているBekki-Nozakiホール解でコンシステントに説明可能なことが、本論文で示された。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の2012年7月号に掲載された。

本研究成果は、心室中隔壁の心筋の力学的特性がCGLEのBekki-Nozakiホール解で説明できることを初めて実証した例の一つとして、多くの研究者の注目を集めている。心筋収縮系自体の粘弾性力学特性が加わった強い非線形波動である波の相互作用によるBNホール解の生成過程などが調べられているが、心筋細胞の集団運動による波の織りなすBNホール以外の複雑なパターンの振る舞いは未だ明らかではなく、今後の研究の展開が期待される。

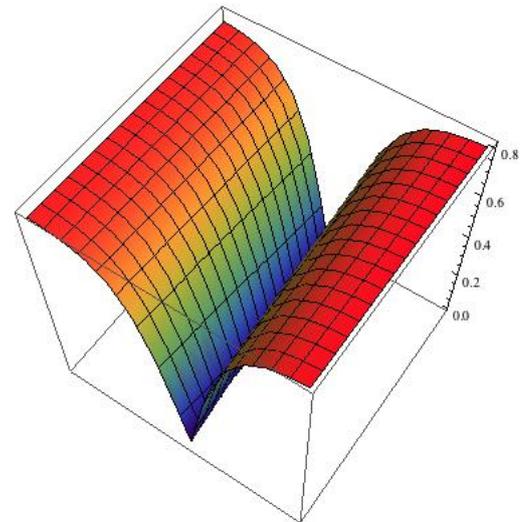


図2. 1次元CGLEのBekki-Nozakiホール解の時空間プロフィール（時間空間は観測値の振幅[図1右]と同じスケールで描かれている）。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) No.7, p.073801

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/073801> (6月19日公開済)

問合せ先：戸次 直明（日本大学工学部総合教育・数学研究室）

原田 義文（福井大学）

金井 浩（東北大学大学院工学研究科）