

心室中隔壁を伝播する興奮性心筋細胞の集団運動

原田義文*¹, 井上敬章*², 岡田 孝*², 原田烈光*², 吉川義博*²,
戸次直明*³, 金井 浩*⁴

*¹福井大学名誉教授, *²アロカ研究所, *³日本大学, *⁴東北大学大学院工学研究科

[1] はじめに

生命現象で広く見られる非線形・非平衡開放系は、普遍的な揺らぎの従う物理法則に支配されマイクロ・マクロ・メガロにわたるスケール不変な階層構造をもち、きわめて多彩な相互作用が存在するため、多数の準安定状態が実現する[1]。心臓の鼓動のように、自然界に見られるリズム現象の多くが「非平衡開放系」に現れる普遍的な現象である。このような平衡から遠くはなれた開放系において、多体系が構成するパターン形成の秩序化過程はカオスやフラクタルが示すみごとなダイナミカルなパターン変化の姿態やマクロなリズムが自発的に現れるため人々の注目を集めてきた[1]。心臓に見られる集団同期では、拍動にともなうリズムカルな振動や引き込み現象からリミットサイクル振動子を構成要素とする集団振動の振動場が形成される[2], [3]。また一方、散逸構造の数理物理において、複素ギンツブルグ・ランダウ方程式 Ginzburg-Landau 方程式 (CGL) :

$$\frac{\partial}{\partial t} A(x, t) = \epsilon A(x, t) + (1 + ic_1)\nabla^2 A(x, t) - (1 + ic_3)|A|^2 A(x, t) \quad (1)$$

の果たす役割は大きく、平面波解や位相特異点を含む解をもち非線形ダイナミクスの理解に、ますます重要性をまし、有効な縮約方程式として欠かせない存在となってきた[1, 2]。一般化した時間依存の一次元 TDGL 方程式は、川崎らによって非平衡臨界現象の研究に導入され[4]、戸次一野崎は非線形場におけるパターン形成の動力学を展開し見事に解析解を見出しこれをホール解と命名した[5]。このことは、ローカライズしたホール（振幅の落ち込み）の厳密解が CGL 系に存在することを証明したもので、数学者を魅了させた極めて重要な発見である。さらに、この解は長波長の極限では Kuramoto-Shivaskinsky (KS) 方程式によって見出された Burgers 方程式に従う Phase-Shock であることが明らかにされた[6]。KS 方程式が時空カオス解を示すことは良く知られているが、空間パターンは近似的に周期性をもっており、これは線形成長率が最大となる波数にほぼ対応している。

時空の乱れや位相乱流からの欠陥（ディフェクト）生成の複雑な運動にはホール生成の自発的生成消滅が生ずる。戸次一野崎のダークソリトンを含むホール解の発見は、平面波解や位相特異点を含む非線形波動の研究において重要であり、特にパターン選択、パターン形成デフェクト・カオス、欠陥乱流、位相乱流、振幅乱流、時空間欠性、自己組織化臨界現象等の時空ダイナミクスの根幹にかかわる非線形物理学の普遍法則の解明に向けて、この分野の研究は大きく発展した[1, 5-8]。

また一方、東北大学の金井研では、このような現象と関連した心臓の興奮伝播パター

ンの秩序化過程や心筋収縮特性を定量化した、心筋細胞の集団運動に関連した力学データが発表され、心臓疾患の臨床応用に向けての新たなブレーク・スルーが生まれている[9]。金井らは高精度・高分解能の計測が可能な超音波医療診断装置を開発し[10, 11, 12]、収縮末期の大動脈弁閉鎖時に、大動脈弁の閉鎖にともなう力学的刺激波が心室中隔壁に沿ってパルス波状の伝播波を観測している[12]。また、金井らは「心電図 Q 波から R 波の間のタイミングに、自発的に発生したパルス振動が心筋を伝搬する生理学的な現象」をはじめて発見した[9]。拍動に伴う心臓の心室中隔壁の自発的な興奮伝播波を *in vivo* で計測可能とする技術は、世界ではじめての画期的な発見である。

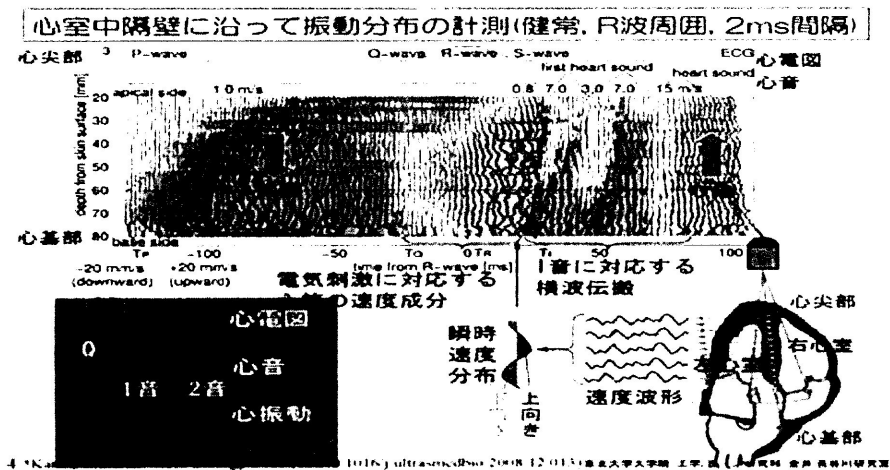


Fig.1: 心電図 Q 波から R 波の間に自発的に発生する心筋興奮波

心臓は心筋組織の収縮によって血液を循環させており、興奮収縮が最も基本的な心臓機能を果たしている。開発された、超音波医療診断装置では、胸壁上から計測した反射超音波の直交検波出力信号の振幅と位相の両者を用いて、対象の瞬時的な位置を決定することによって高精度トラッキングを行い、拍動によって大きく動いている心臓壁上の振幅数 $10\mu\text{m}$ 以下、数百 Hz までの微小な振動を高精度に計測する位相差トラッキング法を用いた実用化に成功している。

本研究の目的は正常者の心室中隔壁を伝播する速度波形を計測し、その時空間特性を位相勾配からなるベクトル場に表示し、複素ギンツブルグ・ランダウ方程式の厳密解として知られている Bekki-Nozaki ホール解と測定値を比較検討し、ホール解の存在を実験的に検証することである。これらの結果から臨床応用への可能性を前進させることである。以上の計測技術で測定した臨床例のデータを用いて、心室中隔壁を伝播する心筋の興奮波の位相勾配とそのベクトル場を高精度に計測し、本来心臓の有する機能として拍動にともなう心筋興奮伝播の時空カオスの力学特性から「伝播しているホール解」の実験的検証を行うことである。かかる現状下において、生きた心臓の心筋興奮波のように平衡から遠く離れた非平衡開放系で見られる「カオスの中の秩序^{**}」として、戸次一野崎によって見出されたホール解のようにコヒーレント・パターンが自発形成されるとい現象を心臓において実証を目指した例は現在のところまだ見出されておらず、本研

究が初めてである。

[2] 測定原理とその方法

東北大金井研究室では従来の医用超音波診断装置にはなかった、高精度・高分解能の位相差トラッキング法を用いて、拍動で大きく動く心筋内の各点の速度を、周波数解析可能な波形データとして非侵襲計測できる手法を開発してきた[10, 11]。本計測法の特徴は、心室中隔の振動速度波形から心臓壁の厚み変化の測定が可能である点と、心筋の速度波形の例えば40Hz成分の振幅と位相情報の計測が高い精度で実現できる点にある[10, 11]。ここでは具体的に、金井研で開発された新しいタイプの「位相差トラッキング法による心臓壁微小運動速度計測の原理」の概要について述べる。まずはじめに、In vivo 計測におけるデータ取得方法については、Fig. 2 に示すように、超音波診断装置(SSD-6500: ALOKA 製)の3.75 MHz セクタ型プローブを用いて、左室長軸像Fig. 2(a)と心尖アプローチによる心尖部左室長軸像(Fig. 2(b))を描出した。左室長軸像(Fig. 2(a))における計測では、心室中隔壁と左心室後壁(自由壁)の両者、心尖部左室長軸像(Fig. 2(b))における計測では心室中隔壁のみにRF 信号取得領域を設定した。

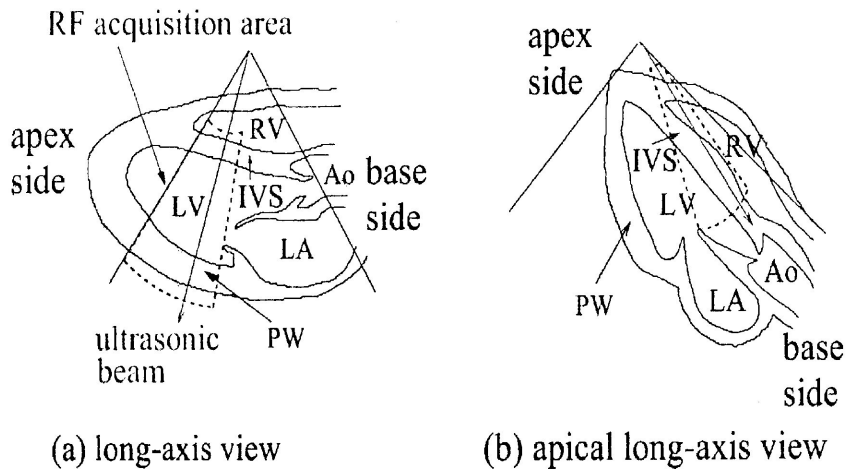


Fig. 2: (a)左室長軸像におけるRF信号取得領域 (b) 心尖部左室長軸像におけるRF信号取得領域

左室長軸像(2(a))におけるデータ取得の際は時間分解能を向上させるために、走査範囲を約72度に制限し、この範囲を12本の超音波ビームで約6度ごとにスパースに走査し、約600 Hzの高フレームレートを実現した。心尖部左室長軸像(Fig. 2(b))におけるデータ取得の際は、走査範囲を約15度に制限し、この範囲を8本の超音波ビームで2.2度ごとに走査することで、左室長軸像における計測と同程度のフレームレート(500-600 Hz)を実現した。RF信号のサンプリング周波数は $f_s = 15$ MHzであり、取得したRF信号は別のコンピュータに転送して解析を行った。

「位相差トラッキング法による心臓壁微小運動速度計測の原理」

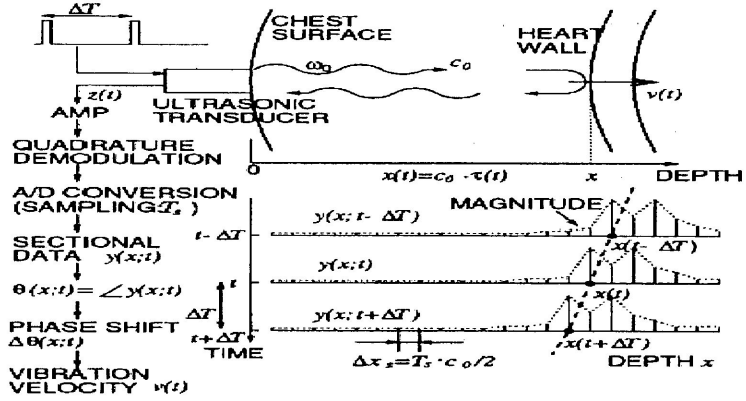


Fig. 3: 位相差トラッキング法による心臓壁運動速度計測法 [9].

Fig. 3 に示すように、角周波数 $\omega_0 = 2\pi f_0$ の超音波パルスを繰り返し周期 ΔT ごとに胸壁上からプローブにより心臓壁へ送信するとき、音速を c_0 、対象反射点までの片道の伝搬時間を τ とすると、距離 $x(t)$ からの検波信号 $y(x; t)$ の反射波の位相 $\theta(x; t)$ は次式で与えられる。音速 c_0 は生体中で約 $1,540 \text{ m/s}$ と仮定する。

$$\theta(x; t) = 2\omega_0 \tau(t) = 2\omega_0 \frac{x(t)}{c_0} \quad (2)$$

よって、 ΔT ごとに繰り返し送受信した2つの検波波形 $y(x; t)$ と $y(x; t + \Delta T)$ 間の位相差 $\Delta\theta(x; t)$ は次式のようなになる。

$$\Delta\theta(x; t) = \theta(x; t + \Delta T) - \theta(x; t) = \frac{2\omega_0 \Delta x(t)}{c_0} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta x(t) = x(t + \Delta T) - x(t)$ は ΔT 間の対象点の移動距離である。 $\Delta x(t)$ を ΔT で割ることによって、対象点の ΔT 間の平均速度 $\hat{v}(x; t + \Delta T/2)$ は次式で与えられる。

$$\hat{v}\left(x; t + \frac{\Delta T}{2}\right) = \frac{\Delta x(t)}{\Delta T} = \frac{c_0}{2\omega_0} \frac{\Delta\theta(x; t)}{\Delta T} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

このとき、相続く検波波形 $y(x; t)$ と $y(x; t + \Delta T)$ に関して、振幅は変化せず位相のみが変化するという制約のもとで2つの波形間の二乗平均誤差(整合誤差)を求め、整合誤差が最小となる位相差を算出することで ΔT 間の対象点の平均速度 $\hat{v}(x; t + \Delta T/2)$ を高精度に求めることができる[10]

得られた速度と時間 ΔT の積で得られる瞬時変位を前の時刻の t における対象点の位置 $x(t)$ に加えることによって、次の時刻における対象点の位置を推定できる。

$$\hat{x}(t+\Delta T) = \hat{x}(t) + \hat{v}(x; t + \frac{\Delta T}{2}) \Delta T \quad [m] \quad (5)$$

この演算を繰り返すことによって、拍動に伴う心臓壁運動のトラッキングを行いながら、微小振動速度を高精度に計測することができる。

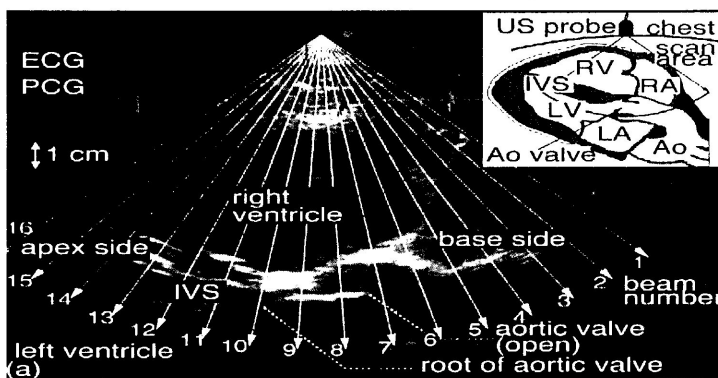


Fig. 4. 測定された心エコー図による断面図[11]

Fig. 4 は 2 1 才男性の健常者の通常的心エコー図の断面を示したものである。右上の挿図はイメージングにおける、超音波ビームのスキヤニングの範囲を示している。矢印は、心臓壁の 160 点に対する振動を測定するために使用された 16 本の超音波ビームの方向をしめしている。以上の測定技術を用いて測定した健常者の心室中隔の興奮伝播波のデータの解析結果については後述する。

[3] 理論 - Bekki-Nozaki ホール

ホール解は大自由度系カオス場の中にコヒーレンスが存在するという物理的に価値の高い発見であり、広く非線形物理学の分野に大きなインパクトを与えた。

ホール解の導出とその安定性解析には数学的には多大の数式と特殊な数学的テクニックを必要とし導出の過程が困難であるため、Bekki-Nozaki ホールの概要を原論文に従って概要を述べる [5]。

一般化した CGL 方程式はつぎのように書ける。

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} + (p_r + ip_i) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + (q_r + iq_i) |\psi|^2 \psi(x, t) = i \gamma \psi(x, t) \quad (6)$$

係数 $p_i = q_i = \gamma = 0$ ($p = p_r + ip_i$, $q = q_r + iq_i$) のとき、この方程式は非線形シュレーディンガー方程式に帰着する。パターン形成の理論では CGL 方程式はさまざまな分野にわたり非常に大きな役割を果たしているが、1次元シュレーディンガー方程式はさまざまなソリトンの厳密解をもち、定常な局在パルスでダーク・ソリトンとブライト・ソリトンとよばれる 2 つの解をもつことが知られている。ここで重要なことは、このダーク・ソリトンにつながる Bekki-Nozaki ホール解と呼ばれ、CGL 方程式の解析解として戸次一野崎によってはじめて見いだされた。この解はソリトン解を求める強力な

方法として (1) 式で, $p_i < 0$, $q_i > 0$, $\gamma > 0$ として Propagating hole の厳ここに数式を入力します。密解は, 広田の方法を適用することによって得られる。

$$\psi = \frac{G(x,t)}{F(x,t)^{1+i\alpha}} e^{i(kx-\Omega t)} \quad (7)$$

ここで, k , Ω , α , F は実数で, 修正された双線形演算子を用いた双線形の微分方程式が得られる。双線形方程式の $G = b_1 e^{\kappa\xi} + b_2 e^{-\kappa\xi}$, $F = e^{\kappa\xi} + e^{-\kappa\xi}$ ($\xi = x-ct$) を設定することによって, (1) 式に代入して得られる Propagating hole 解は最終的に次のように書ける。

$$\begin{aligned} \psi(x,t) &= \frac{b_1 e^{\kappa\xi} + b_2 e^{-\kappa\xi}}{e^{\kappa\xi} + e^{-\kappa\xi}} \exp\left[\frac{i}{2} \int^\xi (\kappa_+ + \kappa_- \tanh \kappa\xi) d\xi - i\Omega t\right] \\ &= \frac{b_1 e^{\kappa\xi} + b_2 e^{-\kappa\xi}}{(e^{\kappa\xi} + e^{-\kappa\xi})^{1+i\alpha}} e^{i\frac{\kappa_+}{2}\xi - i\Omega t} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで,

$$\kappa \equiv \frac{k_1 - k_2}{2}, \quad \kappa_{\pm} \equiv k_1 \pm k_2,$$

$$\Omega \equiv p^r K_m^2 - \frac{c(k_1 k_2 + K_m^2)}{k_1 + k_2}.$$

ホール解は振幅の局在したディップをもち、そこが自発的に形成されたペースメーカーのように波の湧きだし口となっている。CGL 方程式の数値シミュレーションからホール解の安定なパラメタ領域が示されている [13]。ホール解のまわりの線形化方程式に基づいた安定性の議論によれば、不安定性には2つのタイプが知られている。それは、位相不安定性およびコア不安定性とよばれている。系に自発的な乱れが生じる時空カオス状態ではホール的な構造が過渡的に現れたり消えたりする。

[4] 位相勾配によるベクトル場表示

位相特異点と位相勾配

[位相特異点]

非線形場が非局所的に分布した時空のダイナミクスを記述する位相方程式は一般にはかならずしも明らかではないが, 最近の位相応答関数を含む位相ダイナミクスのアプローチは Winfree のアイソクロンと呼ばれる等位相面や蔵本の集団振動子による集団引き込み転移をふくむ位相縮約理論の一連の精力的な研究が特に注目される [2]。Winfree は化学媒体において誘発された興奮波がスパイラルな旋回をするを見出し

た[14]。CGL方程式からはスパイラル波のパターンを見ることが出来るが、渦巻状、標的パターン、さらには興奮性の場にもリミットサイクル振動場が現れることが知られている[2, 3]。スパイラル波やホールのような孤立位相特異点の存在するパターンに対して、ある時刻における無数の局所振動子の状態分布が相空間における点集合で表されることが知られている[2]。このような点では位相が定義出来ない[2]。位相また心臓の心筋興奮伝播の応答関数として測定された位相特異点の空間分布が循環器系の心臓疾患の臨床应用到に適用されている。その位相特異点は、局所位相を $\phi(\mathbf{r})$ としてトポロジカル・チャージ n を導入することによって、つぎのように定義出来る[16]。

$$n \equiv \frac{1}{2\pi} \oint_C \nabla\phi \cdot d\mathbf{l} = \pm 2m\pi \quad (9)$$

Fig. 5. は位相特異点となっており、この空間点はトポロジカルな欠陥であり、これを囲む任意の閉曲線に沿って1周するとき 2π または -2π だけ変化する。

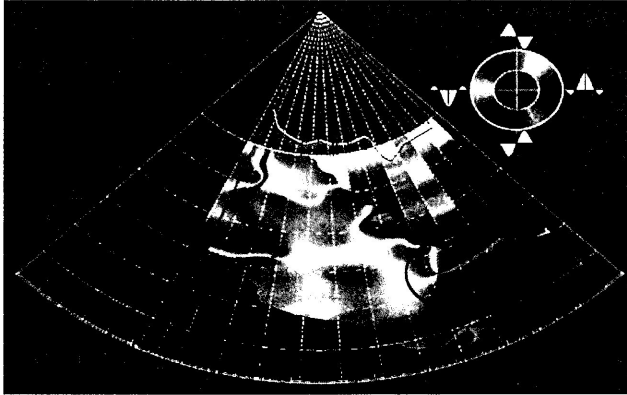


Fig. 5. 丸印は測定された健常者の位相特異点（位相欠陥）を示している

【位相勾配】

空間パターンは空間のいたるところで近似的に周期構造をもち、空間変調は位相 ϕ とローカル波数ベクトル $\nabla\phi$ によって特徴づけられる。この考えに基づき スカラー場 $\psi(\mathbf{r}, t)$ は位相 ϕ とローカル波数ベクトル $\nabla\phi$ によって

$$\psi(\mathbf{r}, t) = f(\phi(r, t), \nabla\phi(r, t)) \quad (10)$$

のように書ける[17]。ここで、 f は 2π 周期関数であり、位相勾配は（ローカル波数ベクトル）ローカル波数ベクトルとして

$$\nabla\phi \equiv \mathbf{k}$$

で与えられ、位相 ϕ で加えた外力に対する振動数への影響を表現している。ここでは、位相勾配は実空間の波数ベクトル \mathbf{k} と関係して、つぎのように定義できる[18]。

$$\mathbf{k} = \nabla\phi = \text{gradient } \phi \quad (11)$$

上述したように、最近、孤立位相特異点のトポロジカル・チャージを追跡した臨床例が多数見られるようになった。心室細動をおこすとスパイラルが異常脱分極からスパイラル・リエントリーを発生し時空カオスに至る様子が臨床診断結果（例えばブルガダ症候群のVFの症例でも崩壊過程が見られる）で見られる。本研究では、心室中隔の興奮伝播波の「位相勾配による時空パターンの可視化」より心筋細胞の集団運動や集団同期の時空(Spatiotemporal Structure)構造を観測してきた。ここで重要なことは、既に上述したように、金井らによる「大動脈弁が閉鎖するタイミングに、自発的に発生したパルス状振動が心筋を伝搬する生理学的な現象」の発見にともない、本共同研究が企画され、ここでは、拍動に伴い心臓の心室中隔壁を伝わるソリトンライクな心筋細胞の興奮波のダイナミクスをベクトル場表示としてその可視化を行い、位相、振幅、位相勾配、ホールの速度、ディフェクト・カオス・・・等々を含む、さまざまな物理量の定量計測を可能にしたもので、心臓疾患への基礎研究・応用研究の可能性が大きく期待できる。

位相勾配のプロファイル



Fig. 6. 丸印はFig. 5. で測定された健康者の位相勾配でみた位相特異点（位相欠陥）の位置を示している。形の違いは、プログラム上の都合で反転したパターンになっている。

Fig. 6. のベクトル場は位相勾配 $\nabla\phi$ の計算をMATLABソフトの組み込み関数quiver関数を使って計算したベクトル場を示している。quiver(x, y, kx, ky)関数は座標x, yに対して引数 kx, ky にはベクトル場を与えている。この画像表示の部分を拡大するとベクトルで記述した最少単位の矢印で構成されており大きく拡大すると、渦(Vortex) や鞍部点(Saddle Point)等の周辺においてもベクトル表示の矢印が見られる。

振幅ホールのプロフィール

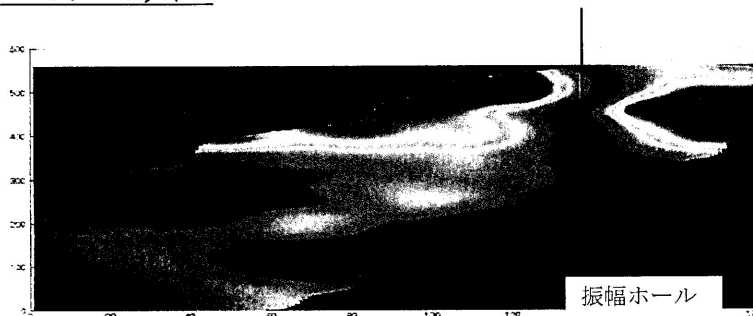


Fig. 7. 健全者の振幅ホールの位置を示している。形の違いは、位相のセクター表示画像とプログラム上の都合で反転したパターンになっている。矢印は振幅ホールを示している。

Fig. 7. の矢印で示した部分が Bekki-Nozaki ホール解に対応した振幅の落ち込みの部分を示している。この部分を拡大した図を Fig. 9. の振幅ホールの局在した振幅の深いディップが示されていることから理解できる。

[5] Bekki-Nozaki ホールの実験的検証

Bekki-Nozaki によって CGL 方程式はホール解の解析解が存在することが証明され、その後、ホールと CGL は相互に関係するため減速摂動法を含む縮約方程式の研究が活発化し、ホールの研究は非線形物理学の研究分野にインパクトを与え大きく前進してきた。また、ここで導かれたトラベリング・ホール解については、[3]でのべたように(8)式で与えられる。この過程で忘れてはならないことは、ホール解の検証に必要なホールの伝播速度と波数との定式化された関係である。ホールの速度 c は

$$c = (p_r q_i - p_i q_r)(k_1 + k_2)/q_i \quad (12)$$

ここで、 k_1, k_2 は平面波の衝突の前後で互いに逆方向に進む波の波数である。この事情は Fig. 7. をみれば衝突の前後で k_1 の勾配が正で、 k_2 は負となっていることから理解できる。

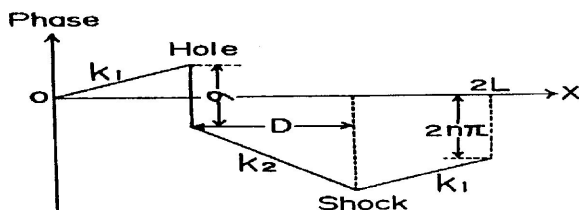


Fig. 8. 周期 $2L$ の周期境界条件で計算された、ホールと波数ショック間の位相整合の様子を図式的に表示している [5]

周期境界条件において、伝播パターンの中の2つのショックフロントがたがいに衝突してそ

の結果それとは別の波数ショックが生まれる。このようなショックは周期境界条件におけるホール位相と整合するための重要な役割をはたしている。長さ $2L$ をもった周期領域におけるホールとショックに対する位相整合の条件は

$$k_1(2L - D) + k_2 D = 2n\pi - \sigma$$

ここで、 n は整数、 D はホールとショック間の距離であり、 σ はホールにおける位相の飛びを表している。

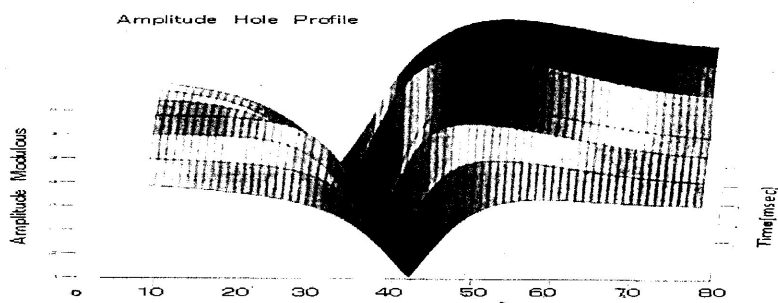


Fig. 9. 心室中隔を伝播するトラベリング・ホールの振幅特性

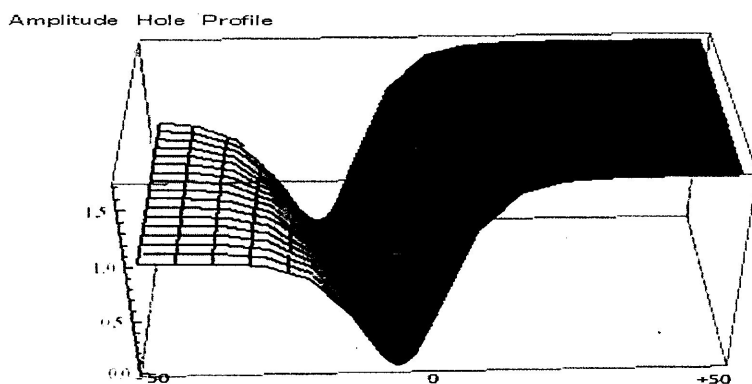


Fig. 10. 心室中隔を伝播する Bekki-Nozaki ホールの解析解から計算された振幅特性

Fig. 9. は T 波のピーク値である収縮期の Late Stage 末期における第 2 音の終端までのタイミングで測定した心室中隔を伝播するトラベリング・ホールの振幅の時空間特性を示している。Fig. 10. は Bekki-Nozaki ホールの解析解から計算された振幅特性を示したものである。典型的なホールの落ち込みを観測することが出来た。収縮期の Late Stage 末期の第 2 音の後期までの 200 msec (100 フレーム分) の内 6 フレーム分の (9 msec) 間に伝播するホールの振幅特性を示している。位相特性については、規格化した振幅の落ち込みと位相の飛びに対応した、順方向、逆方向の振幅の絶対値の比較検討などは現在まだ検討中である。これまでの先行研究で、ホールの実験的検証例は Lega 達の円環状のセルを用いたレーリー・ベナール対流の実験でロールにそって伝播するトラベリング・ホールの存在が確認されている [19]。Burguete 達は 1 次元スロット・チャ

ンネルと呼ばれる直線状の幅の狭いセルを用いて、上下ではなく側壁加熱の熱対流の実験で Hopf 分岐点近傍でホールを観測し[20]、複素 GL 方程式との比較検討から c_1 と c_2 を実験から評価しているが、デフエクトを隔てた両サイドの鮮明な波数の傾きが確認したい。

[5] おわりに

以上、本研究は金井らが心臓疾患の臨床応用に開発してきた「画期的な新しい計測手法」を用いて、従来からの伝統的な電気生理学的アプローチでは取得不可能であった心臓の力学的な興奮伝播波を直接検出することに成功しており、多数の臨床診断の結果が既に報告されている。我々は、上に述べた計測法に加えて非侵襲的に高い精度で計測可能な測定手段を用いて取得してきた臨床データの詳細な解析を行うことより、複雑系の視点から見た多様性のある心室中隔壁を伝播する非線形波動の発現機序の一部を明確化することに成功したのでその結果を以下に述べる。

目的とする、中心的な課題は：正常者の心室中隔壁を伝播する速度波形を計測し、その時空間特性を位相勾配からなるベクトル場で表示し、複素ギンツブルグ・ランダウ方程式の厳密解として知られている Bekki-Nozaki ホール解と測定値を比較検討し、ホール解の存在を実験的に検証を試みたが、位相特性のデータ解析が未だ未完成であり、この問題を現在検討中であり、その他の被験者のデータについても検討する必要がある、今後に残された課題となっている。以上の結果を要約すると：

複雑系のカテゴリーにそって「心臓データ：自発的に発生したパルス振動の生データ」の数理物理的解析で次の2つのカテゴリーにそった、Bekki-Nozaki ホールの発見の可能性を実験的に明らかにした。カテゴリー（1）（本来のオリジナルな Bekki-Nozaki ホールの実験的検証）：心室中隔壁を伝播する興奮波の位相及び振幅の臨床データを用いて、本来心臓が有する機能と関連した動的な力学情報をさらに強調できるベクトル場表示を行い、その位相勾配及び振幅情報からホール解の存在を半定量的に検証した。

カテゴリー（2）（拡張された Bekki-Nozaki ホールの実験的検証）：拡張された新しいタイプのホールの生成；「心臓のような散逸系の非線形波動やパターン選択、パターン形成をとまなうデフエクト・カオス、欠陥乱流、位相乱流、振幅乱流、時空間欠性、自己組織化臨界現象等の時空ダイナミクスと多様性のある「心臓の大自由度系・時空ダイナミクス」の存在を定量化する手段としてベクトル場による解析方法を、まず提示し、その多くの場合に、スモール・ホールと呼ばれるホールの存在を確認した。今後、今回の測定結果と同様に何例かのホールの伝播を確認し、再度他の検証例についても更なる検証の明確化が必要であり、将来的には心筋梗塞症例についても検証していく予定である。

参考文献

- [1] M.C. Cross, P.C. Hohenberg, Rev. Mod. Phys. 65 851 (1993), and references therein
- [2] 蔵本由紀,河村洋史:「同期現象の数理」位相記述によるアプローチ (培風館) 非線形科学シリーズ ⑥ 中村勝弘編.
- [3] 蔵本由紀編著:「リズム現象の世界」(東京大学出版会, 2005). 非線形・非平衡現象の数理 ① 三村昌康監修.
- [4] K. Kawasaki, Vistas Astron, 37 57 (1993), 川崎恭治著: 非平衡と相転移—メソスケールの統計物理学—, 朝倉書店.

- [5] Bekki and Nozaki, "Formation of spatial patterns and holes in the generalized Ginzburg-Landau equation", *Phys. Lett.* 110A, 133 (1985).
- [6] Y. Kuramoto and T. Tsuzuki, *Prog. Theor. Phys.*, 55 (1976) 356.
- [7] H. Chate and P. Manneville, *Phys. Rev. Lett.* 58, 112 (1987).
- [8] M.V. Hecke, *Phys. Rev. Lett.* 80, 1896 (1998).
- [9] H. KANAI, *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 35, No. 6, pp. 936-948, 2009.
- [10] H. Kanai, M. Sato, Y. Koiwa and N. Chubachi, "Transcutaneous Measurement and Spectrum Analysis of Heart Wall Vibrations," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol. 43, pp. 791-810, 1996.
- [11] H. Kanai, H. Hasegawa, N. Chubachi, Y. Koiwa, and M. Tanaka, "Noninvasive Evaluation of Local Myocardial Thickening and Its Color-Coded Imaging," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol. 44, pp. 752-768, 1997.
- [12] H. Kanai, "Propagation of Spontaneously Actuated Pulsive Vibration in Human Heart Wall and *In Vivo* Viscoelasticity Estimation," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol. 51, pp. 1931-1942, 2005.
- [13] H. Sakaguchi, "Instability of the hole solution in the complex Ginzburg-Landau equation", *Prog. Theor. Phys.*, 85 417 (1976).
- [14] A.T. Winfree "Spiral waves of chemical activity", *Science* 175: 634(1972).
- [15] M.A. Bray, et' al, "Experimental and Theoretical Analysis of Phase Singularity Dynamics in Cardiac Tissue," *J.Cardiovasc Electrophysiol*, Vol.12. 6, 716(2001).
- [16] 線積分はトポロジカルなディフェクトを囲む閉曲線の積分のパスがとられる。ここで、コアはアクティブな心臓の組織と区別出来ない。(4)式における半径aの積分のパスを考慮してトポロジカル・チャージnを求めることによって波数
- $$\mathbf{k}(\mathbf{r}, t) \equiv \nabla \phi(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial}{\partial x} \phi(\mathbf{r}, t) \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \phi(\mathbf{r}, t) \mathbf{j}$$
- を観測することが出来る。しかしながら、この波数ベクトルはスパイラル波やホールのような場合の孤立位相特異点(PS)では位相は定義出来ない。この点を除いてPSを計算するには有限差分によるピクセル(m, n)の離散化した位相イメージで近似できるアルゴリズムが提案されている[16]。
- [17] N. Tukamoto, H. Fujisaka and K. Ouchi, "Derivation of Phase Dynamics in Non-Locally Distributed Systems with Periodic Structures in Either Space or Time", *Prog. Theor. Phys.* Vol. 116, 669 (2006).
- [18] これを規格化して位相勾配を次のような表式でベクトル場を構成した。
 $\frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}$, モジュラス: $M = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, 位相: $\theta = \tan^{-1} \frac{k_y}{k_x}$
- [19] J.Lega, B.Janiaud, S.Jucquois, and V.Croquette, *Localized Phase Jumps in Wave Trains*, *Phys.Rev. A* 45 (1999) 5596.
- [20] J.Burguete, H.Chate, F.Daviaud, and N.Mukolobwicz, Bekki-Nozaki Amplitude Holes in Hydrothermal Nonlinear Waves, *Phys. Rev. Lett.*, 82 (1999) 3252.

**

L' ORDER DANS LE CHAOS (P.Berge, Y.Pomeau, Ch. Vidal)

「カオスの中の秩序」相沢洋二 訳 (1984, Feb)1990 アンリ・ポアンカレ賞を受賞

本来の「カオスの中の秩序」では、リアプノフ数やカオスアトラクターを含む1連のカオスの普遍性を秩序と言っているが、本研究ではカオスの中に coherence が存在する意味で、ホールの存在を秩序と呼んだ。