

Title	Experimental and Theoretical Study on Density Oscillator
Author(s)	加納, 剛史
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1916
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏 名 加 納 たけし

博士の専攻分野の名称 博 士 (理 学)

学 位 記 番 号 第 2 2 1 9 4 号

学 位 授 与 年 月 日 平 成 2 0 年 3 月 2 5 日

学 位 授 与 の 要 件 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当

生命機能研究科生命機能専攻

学 位 論 文 名 Experimental and Theoretical Study on Density Oscillator.
(密度振動子の実験・理論的研究)

論 文 審 査 委 員 (主査)

教 授 木 下 修 一

(副査)

教 授 菊 池 誠 教 授 井 上 康 志

論 文 内 容 の 要 旨

自然界には、心筋細胞の収縮リズムや月経サイクルなど、自発的にリズムを刻む系が多く存在する。このような系は自励振動子と呼ばれ、系外からのエネルギーの供給によって系固有の特性を持った自発的な振動が維持されるという特徴を有する。このような自励振動子の中でも特に、遅い緩和過程と急激な移り変わりの過程の繰り返しによって振舞いが特徴づけられる振動子は、緩和振動子と呼ばれる。緩和振動子は、生体などさまざまな系において見られるだけでなく、電気回路などテクノロジーの分野への応用も広くなされており、その本質的かつ普遍的なメカニズムを理解することは、生物・医学・工学などの広い分野において極めて重要な意義を持つと考えられる。

過去に報告されている研究において、緩和振動の振舞いは現象論的に記述されてきたものの、振動に最も本質的であると考えられる急激な移り変わりの過程がどのようにして起こるのかについては詳細に議論されておらず、従って緩和振動が起こるメカニズムは真の意味では明らかにはされてこなかった。振動のメカニズムの解明のためには、急激な移り変わりの過程に注目し、ミクロな視点から振動の振舞いを明らかにすることが必要であると思われる。

密度振動子は、緩和振動のメカニズムを探るための優れた実験系である。密度振動子とは、底に管を取り付けた小さな容器を大きな容器に取り付け、小さな容器を重い流体で、大きな容器を軽い流体でそれぞれ満たすと、重い流体の大きな容器への流出と軽い流体の小さな容器への流入が周期的に繰り返される振動子である。その振舞いは、上向き・下向きの流れそれぞれについては過去の報告においてよく理解されてきたものの、流れの転換のメカニズムについては明らかにされてこなかった。本研究では、密度振動子の流れの転換過程を実験・理論の両面から探ることで、緩和振動の急激な移り変わりの過程に潜む普遍的なメカニズムを明らかにすることを目的とした。

実験では、水面の高さを測定すると同時に、管の内部を実体顕微鏡で観察した。その結果、流れの転換は、次のようにして起こることが明らかになった。例えば、下向きから上向きへの流れの転換過程の場合、まず軽い流体がわずかに侵入する。侵入した流体は非常にゆっくりとした速度で成長を続けるが、その侵入距離がある閾値に達すると急激に成長し始め、軽い流体が管の上端に達すると完全に流れが転換する。即ち、流れの転換過程は、流体の侵入とその急激な成長によって特徴づけられる。さらに、この侵入のタイミング及びその成長速度は流体の粘性率に大きく依存することが明らかになった。

このような実験結果を説明するために、流れの転換過程を取り込んだ密度振動のモデルを構築した。モデルは、侵

入した流体の先端部の単位体積要素に粘性応力 (F_1)、静水圧勾配及び重力 (F_2)、そして管を通過した流体の加速による効果 (F_3) という3つの力がかかると考え、運動方程式を構築した。 F_1 、 F_2 、 F_3 はそれぞれ、侵入した流体を引き戻す働き (inhibiting factor)、侵入した流体を進ませる働き (promoting factor)、流体の管の中への侵入を誘起する働き (triggering factor) を持っている。このモデルをもとにシミュレーションを行ったところ、上記実験結果を概ね再現することができた。そして、その結果から、流体の侵入は F_3 によって引き起こされ、その急激な成長は F_2 の効果が F_1 の効果に打ち勝つことによって引き起こされる、ということが明らかになった。

このように、密度振動子の振舞いは、流れの転換過程における3つの要因 (inhibiting factor、promoting factor、triggering factor) を考えることによって、概ね理解することができる。この知見から、緩和振動子の急激な移り変わりの本質的なメカニズムは次のようであると考えることができる。まず、triggering factor によって、急激な移り変わりの前兆現象がゆっくりと進行する。そして promoting factor が inhibiting factor に打ち勝った時に急激な移り変わりが引き起こされると考えられる。

本研究によって明らかになったこの緩和振動のメカニズムは、複数の緩和振動子が相互作用する系 (結合振動子系) の振舞いの解明や緩和振動の制御法の開発など、さまざまな応用研究に今後生かされると期待される。

論文審査の結果の要旨

密度振動子は、底に管を取り付けた小さな容器を大きな容器に入れ、小さな容器を重い流体で、大きな容器を軽い流体でそれぞれ満たすと、重い流体の流出と軽い流体の流入が周期的に繰り返される振動子であり、心臓や呼吸などの自発的にリズムを刻む振動子のモデル系として知られている。その振舞いは、上向き・下向きの流れそれぞれについてはよく理解されてきたものの、流れの転換のメカニズムは明らかにされていない。本研究は、密度振動子の流れの転換過程を実験・理論の両面から研究したものである。

本研究では、密度を一定に保ったまま粘性を変化させ、流れの転換過程における管の内部の様子を実体顕微鏡下で詳細に観察した。その結果、下向きから上向きへの流れの転換過程の場合、まず軽い流体がわずかに侵入し、その後、ゆっくりとした速度で成長を続けるが、侵入距離がある閾値に達すると急激に成長し始め、流れが転換することが分かった。さらに、この過程は流体の粘性率に強く依存する。

申請者は、この結果を説明するため、侵入した流体の先端部の単位体積要素に、粘性応力・静水圧勾配及び重力・管を通過した流体の加速による効果という3つの力がかかると考え、運動方程式を立て解析した。これらの力はそれぞれ、侵入した流体を引き戻す働き (inhibitor)、進ませる働き (promoter)、管の中への侵入を誘起する働き (trigger) として理解できる。このモデルをもとにシミュレーションを行ったところ、流体の侵入過程及び侵入した流体の急激な成長過程を再現でき、その粘性依存性も実験結果とよく一致した。

この知見は、密度振動子に限ったことでなく、心臓や呼吸など自然界に存在する多くの振動子における急激な切り替わりの過程にも適用できると考えられ、これら3つの要因を制御することにより、自然界の振動子系の振舞いを自由自在に制御できる可能性を示唆するものである。よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。