

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654125

研究課題名(和文)ロウソク火炎群の非線形振動・同期から俯瞰する気象現象のパターン動力学

研究課題名(英文)Elucidating candle flame oscillation and synchronization on the analogy of meteorological pattern dynamics

研究代表者

三池 秀敏(Miike, Hidetoshi)

山口大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：10107732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：束にしたロウソクの炎が規則的振動(約10Hz)を示すことは最近まで知られてなかった。本研究は、この振動メカニズムを解明するため、炎の周りの温度分布や気流の速度分布の画像解析を行った。その結果、1)炎の上空に形成される渦流が下降し炎にタッチした時に振動が開始される、2)炎上空の気流の上昇速度は無振動時に比べ振動時に速くなる(約5倍)、3)上空の渦流は、気象現象との類推により、不完全燃焼したロウの蒸気が上空で冷やされ"ロウの蒸気の雲"となって下降する際に形成される、4)"ロウの蒸気の雲"が蓄積し下方に広がる結果、爆発的燃焼が生じ振動時の気流の速度を上昇させる、など炎の振動メカニズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：When several candles are bundled together, the size of the combined candle flame oscillates. To understand the mechanism, we carried out the observational experiments, the temperature imaging around the oscillating candle flame and the image analysis to obtain the velocity distribution of the air flow above the candle flame. Our results elucidate the flame oscillation begins when cold turbulence grows downward from the upper regions and touches the candle flame. We also show that the velocity of the air flow above the candle flame under the oscillation state is much faster than that under the non-oscillation state. From analogy to meteorology, we speculate that the observed cold turbulence is formed by a cloud of uncombusted paraffin vapor generated during combustion. When the cloud above the candle expands downward, it supplies the paraffin for the combustion, and explosive combustion occurs. The explosive combustion causes the expansion and subsequent contraction of the flame.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎

キーワード：非線形振動子 ロウソク火炎 同期 気象現象 パターンダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

ロウソクの燃焼の理解は、マイケル・ファラデーの「ロウソクの科学」で知られている様に、自然科学の研究の入口として最適なものである。ファラデーの時代には、ロウソクの燃焼において、固体のロウが融けて液体となり、さらに気体となって燃焼すること(相転移)や、燃焼によって発生する気体が水蒸気と炭酸ガスであること、燃焼によって発生する熱と対流による冷却が液体のロウを溜めるカップを自己形成し、燃焼維持の機構となることなどが示されている。その後、P.W. Atkins は「新ロウソクの科学」の中で、ロウソクの燃焼の量子力学的理解を解説し、燃焼を含む化学反応の説明には原子・電子の理解とパラダイムの転換(ニュートン力学から量子力学へ)が必要とした。量子力学の確立により、炎が明るく輝く理由や燃焼反応の速度が説明され、化学反応は原子の再配列としてミクロな分析的な理解が進んだ。しかし、生命現象を含む化学反応の本質の解明には、構成要素の分析的な理解だけでは不可能である。複雑で柔らかなシステムの理解には更なるパラダイムの転換(物質の科学から生きた創発現象の科学へ)が必要とされる。

従来、非線形科学の分野におけるパターン形成・自己組織化の問題は、2次元の反応・拡散系を中心に展開されてきた。その中で3次元の反応・拡散系や反応・拡散+対流系での特異的なパターン形成(階層化による機能出現等)が一部の研究者によって取り上げられている。我々も典型的な反応拡散系として有名な Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応溶液において、反応容器全体にわたる化学反応波のコヒーレントな構造形成後に出現する、振動的な対流現象やラセン状の Flow Wave (図1参照)の自己組織化現象を見出した。反応・拡散現象に対流現象が加わることにより、パターン形成の階層性は深くなり、系の複雑性は飛躍的に高まる。

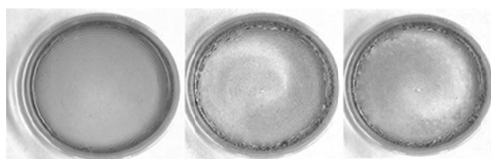


図1. BZ反応の Chemical Wave (波長約1mm) 上に自己組織された回転するラセン状対流波(波長約50mm以上)の階層構造。

一方、発生する局所的な振動流を非線形の対流振動子とみなし、その振動子集団が発生する秩序構造としてらせん状対流波を捉えれば、現象の理解は進む。振動流を発生させるメカニズムの詳細にこだわらなければ、非線形振動子が空間分布した場合における、各振動子間の位相差のダイナミクスによる秩序形成の枠組みで説明できる(位相動力学的な理解)。これは、いわゆる「情報の縮約」であり、現象の詳細な機構に依存せずに階層

的なパターン形成を理解できる。

2. 研究の目的

本研究では、身近なロウソクの燃焼における炎の動的挙動を取り上げ、反応・拡散・対流に加え“相転移”機構が関わる現象を対象とする。ロウソクの炎の振動現象は知られていたが、我々はロウソクの炎が一定条件下で非線形振動子として振舞うことを明らかにした。その中で、2本のロウソク振動子間の距離に応じて同相から逆相へと変化する同期現象を見出し、反応・拡散・対流+輻射による非線形振動子間の結合としてモデル化した。本研究では、ロウソクの炎の振動子が多数分布する場合のパターンダイナミクスから出発し、台風や竜巻の様な階層性を伴う動的気象現象を生むメカニズムの非線形科学的理解を目的とする。

具体的には、

- (1) 振動・同期する複数対のロウソク火炎振動子群の非線形モデルの深化・改良、
- (2) 振動子の位置を固定せず、例えば水面上を自由に移動できるロウソク火炎群を配置した時の振動・同期のダイナミクスを実験と数値シミュレーションにより観測、
- (3) 観測結果に基づき、火炎振動の機構解明を模索する方向と、特異な非線形性を持つ振動子集団の同期現象の位相動力学的理解の二つの方向でモデル化と数値解析、等を進め、ロウソク火炎群の同期の解明から動的気象現象(竜巻・台風)の非線形科学的理解を展望する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の計画に従い期間内に研究目的を達成する。

- (1) 複数対のロウソク火炎の振動・同期現象のモデル化を深化し、10-11Hzで振動する原因や同期の相互作用メカニズムを解明(現象の詳細な機構の解明)。
- (2) 振動子の位置を固定せず、例えば水面上を自由に移動できるロウソク火炎群を配置した時の振動・同期のダイナミクスを実験と数値シミュレーションにより観測。
- (3) 観測結果より、火炎振動の機構の詳細を解明する方向と、特異な非線形性を持つ振動子集団の同期現象の位相動力学的理解の二つの方向でモデルの深化と数値シミュレーションによる解析。
- (4) ロウソク火炎群が示す動的な同期現象の解明から、動的な気象現象(竜巻・台風)の非線形科学的理解を展望するための数値シミュレーションの実施。

図2は、約10Hzで振動するロウソク火炎上空(約20cm)で水平回転する渦流を、サーマルビジョン(熱赤外線カメラ)で可視化した映像である。この渦流は、従来の拡散火炎の振動の要因とされるケルビン・ヘルムホルツ(KH)不安定性による縦渦とは全く異なる。KH不安定性は、上昇するガス層と周りの大気

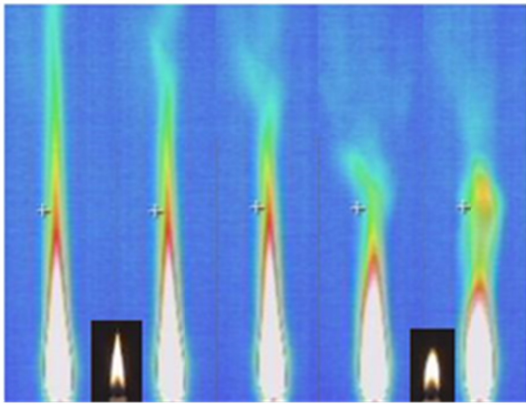


図2 . サーマルビジョンが捉えたろうソク火炎上空の渦流の下降 (図中ろうソク画像と同じスケールで表示)

層との密度差のある流体界面での速度差がもたらす不安定である。これに対し、我々が見出した水平回転する渦流は鉛直方向に上下し、その渦流がろうソクの炎にタッチダウンした時に火炎の振動が始まる。振動が先か、タッチダウンが先かは定かではないが、火炎の振動・同期現象に水平回転する渦流が関わっていることは確かである。この渦流は、ろうソクの燃焼に伴う激しい熱対流 (上昇気流) により発生すると考えられ、燃焼工学で知られる層流拡散火炎から乱流拡散火炎への遷移・成長とも関連する。

4 . 研究成果

(1) 炎の上空の気流の可視化と速度解析

24年度・25年度を通して、実験は種々の可視化法や動画画像計測・解析手法を駆使して行った。図3は、可視化法として液晶プロジェクター照明を利用したシャドウグラフ法を採用し、標準化周波数 240 Hz の高速ビデオカメラで録画した炎の上空 10 ~ 20cm 付近の気流の様子を捉えている。火炎長の振動 (約 10Hz) の様子と共に、炎の振動に伴い周期的に発生する煤 (前面) とそのシャドウ (後面) が映りこんでいる。温度差による空気の密度の違いとともに、間欠的な煤の発生も気流の

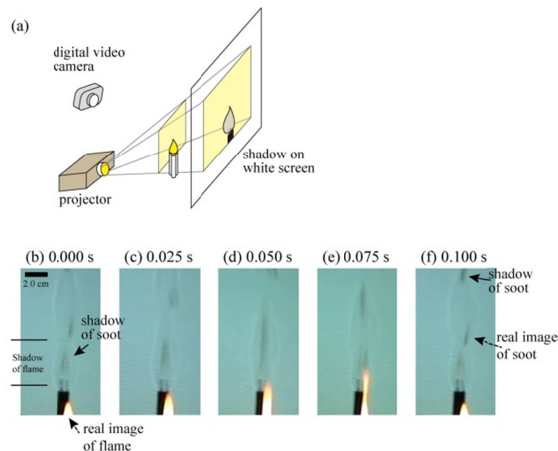


図3 . 液晶プロジェクターによるろうソク火炎振動のシャドウグラフ撮影。

可視化に寄与している。今回は、こうした映像を空間フィルタ法による動画画像処理を用いて解析し、対流速度の時間変化や炎の上空の位置による違いなどを求めた。

図4は、解析結果の一例を示している。図中 (a) はシャドウグラフ画像の一例でろうソク火炎の上空の密度差を可視化し強調している。 (b) はその画像に正弦波空間フィルタを重畳した結果で、縦 (y 軸) 方向の物体の運動速度の検出を可能にする。空間フィルタの波長は 0.14m である。 (c) は火炎振動発生時において空間フィルタを重畳した動画画像系列から濃淡値を積算した時系列を解析した結果を示す。静止した空間フィルタ中で物体の運動

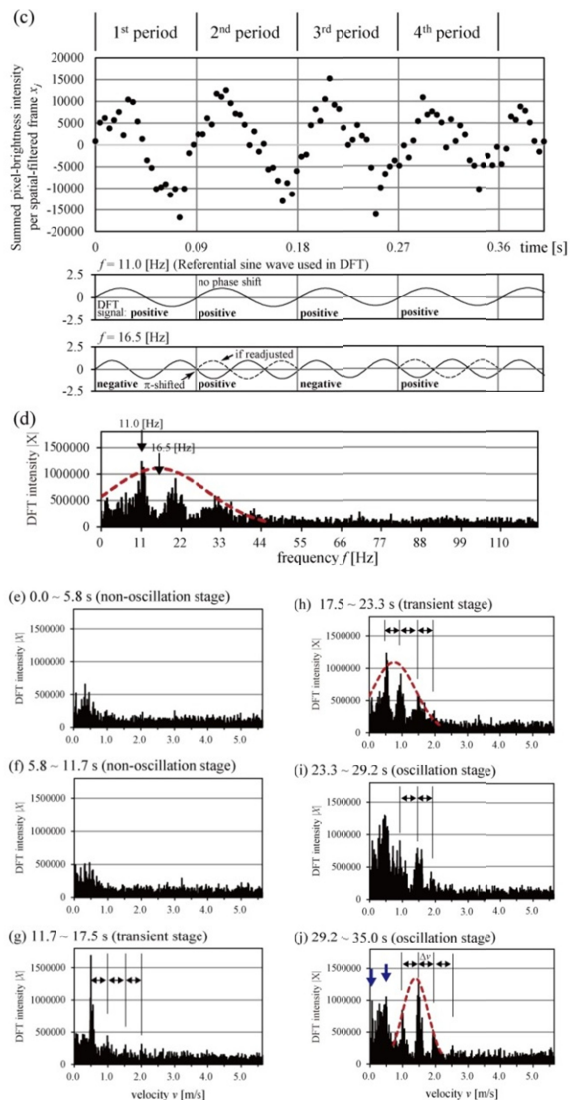


図4 . ろうソク火炎上空の気流の可視化画像の解析 : (a) 原画像、 (b) 空間フィルタを重畳した画像、 (c) 動画画像空間フィルタからの出力波形、 (d) 出力波形のスペクトル解析結果、 (e) ~ (j) 火炎の静止状態から振動状態への変化に伴うスペクトル変化 (流速分布変化) 。

や振動現象が生じると、こうした周期的時系列が得られる。(d)はその時系列のスペクトル解析結果であり、横軸は周波数であるが、空間フィルタの波長を考慮することで、周波数と物体運動速度との対応が出来る。ただ、(d)の結果はロウソク火炎の約 10Hz の周期振動を含んでいるため、気流の速度分布を反映したブロードなスペクトルが、約 10Hz で標本化された形となっている。すなわち、本来の速度分布を反映したスペクトルは赤色の点線で示したような形状をしている事が想定される。(e) ~ (f) は、ロウソク火炎が静止した安定な燃焼状態から約 10 Hz の振動状態に移行する過程を解析した結果を示す。振動発生と共に気流速度も上昇し、スペクトルのピークは高周波数側に移動する。図の横軸は、気流速度に変換して示している。

上記の解析にて、以下の事実が確認できる。

ロウソク火炎の振動開始前(図中 e, f)は、気流の中心速度は 0.3-0.5m/s である。

火炎の振動状態では、気流の速度分布は、高速の 1.0-1.6m/s を中心とする分布(赤色の点線)と、低速の 0.5m/s 付近に中心を持つ分布の二つに分かれる(図中 j)。

振動状態での高速の速度分布は、シャドーグラフ中の間欠的な煤の発生と高速な伝搬現象に対応している。

解析結果が示す振動状態での高速速度分布は、実際に高速な上昇気流が存在するのか、あるいは高速な火炎伝搬を示すのか、現時点では区別できない。これを明確にするには、適切な可視化粒子を含む雰囲気でのレーザドップラ流速計等を用いた定量的実験が必要となる。ただ、可視化粒子を何に選ぶかは重要であり、火炎の振動状態を乱す恐れのないものを選ぶ必要があり、今後の課題である。

一方、(j) に示す火炎振動がもっとも発達した状態では、高速領域に 3 つの顕著なピーク (~1.0 m/s, ~1.6 m/s, ~2.1 m/s) が観測され、それらの間隔がほぼ 0.5m/s である事が確認できる。この速度間隔は、周波数に変換すると約 10Hz に換算され、火炎の振動が約 10 Hz で有った事と対応する。すなわち、これらのピーク速度は、本来の速度分布(図中赤の点線)が火炎振動の周波数により標本化され、離散的なスペクトルとして表れている結果と理解できる。

(2) 振動状態における対流の空間構造

ロウソク火炎の振動状態において、火炎上空の各位置での対流構造の空間変化を知る事を目的として、シャドーグラフ画像をロウソクの炎の底からの高さに応じて分割し、各部分画像領域での空間フィルタ速度解析を行った。図 5 はその一例を示す。図中(a)は、ロウソクの火炎の振動状態を示す動画を、ロウソク火炎の底からの高さにより 11 段階に分割した。(c) ~ (k) は、11 箇所中の 5 箇所の位置でのスペクトル解析結果を示す。なおこの解析では、速度情報を上昇流と下降流と

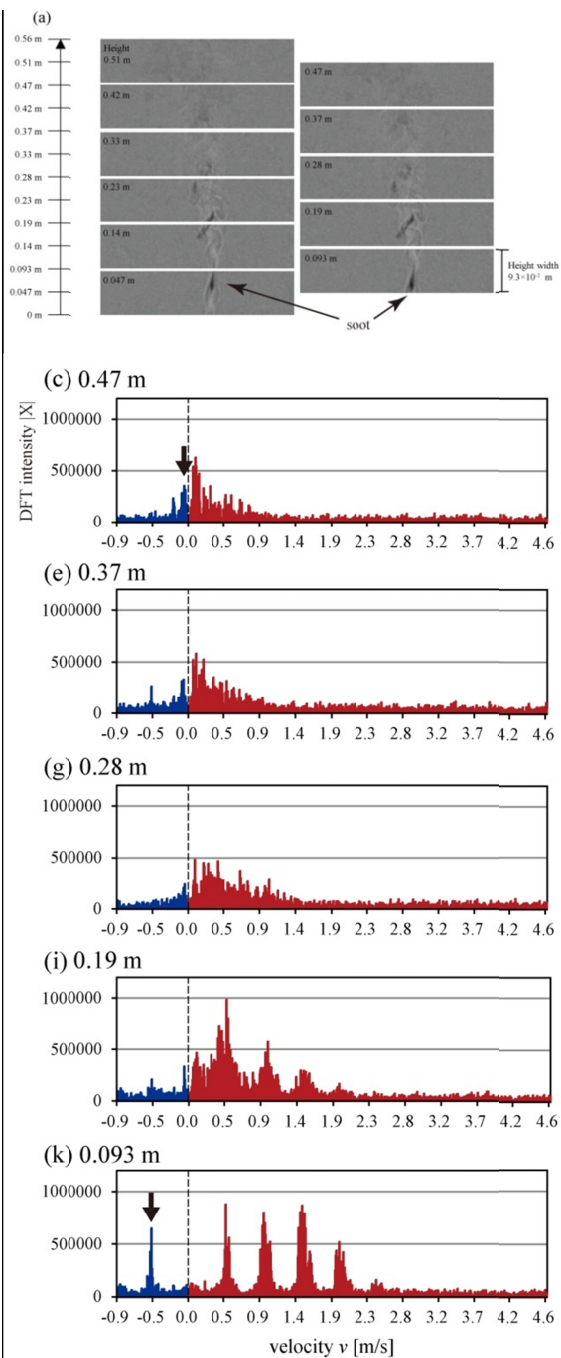


図 5 . 火炎の振動状態におけるシャドーグラフの動画画像解析(空間フィルタ法)により得られるパワースペクトルの空間依存性(ロウソク火炎の底から図った高さ依存性)。(a)原画像の空間分解、(c)-(k)各位置でのパワースペクトル(11箇所中の代表的5箇所)。

を区別するため、用いた正弦波の空間フィルタは鉛直方向の下向きに一定速度で移動している。すなわち、上昇する物体運動は等価的に高周波数の振動として観測され(赤色領域)、下降する物体運動は低周波数の振動として観測される(青色領域)。このため、運動速度 0m/s の位置は、図 4 とは異なり右側にシフトしている。また、下降速度は、約 0.9m/s まで計測が可能である。この図の結果から、以下の事実が確認できる。

ロウソク火炎直上の約5~15cmの位置では約10Hzの火炎振動の影響により、気流の速度情報を含むスペクトルは約10Hzで標準化された形状となる(図中(k)参照)。

振動状態での間欠的な火炎の高速伝搬の速度は、1.0-1.5m/sにピーク位置を持つブロードな分布を示し、最高速度は2.5m/sにも達する(図中(k)参照)。

上昇流だけでなく下降流成分が観測され、高さ位置によりその速度分布が異なる。特に、ロウソク火炎の直上に近い位置(5~15cm)では、-0.5m/sに明瞭なピークがあり、高速の上昇する流れと同時に下降する速い気流の存在を示唆している(図中(k)参照)。

一方、ロウソク火炎の上空の比較的離れた位置では、下降流を示す速度のマイナス成分が観測されているが(図中(c)~(i))、ピークは余り明瞭ではなく、0m/s~-0.9m/sまでの範囲で緩やかに減少している。

0.37m付近では、再び-0.5m/sのピークが明瞭となり(図中(e)参照)、火炎振動中に特定の速度を持つ下降流の存在が示唆される。

上昇流と下降流とを区別できる空間フィルタ速度解析結果は、振動火炎中に下降流の存在を示す明瞭なピークをもたらした。このことは、ロウソク火炎振動が、火炎上空の気流乱れに端を発する渦流の下降と炎へのタッチダウンにより始まるという知見(図2参照)と符合する。これは、気象現象で知られる、積乱雲中に観測される下降流の存在とも符合する。ロウソク火炎上空の気流と積乱雲中の気流との類似を短絡的に結論付けることは危険ではあるが、強い上昇流中の下降流の存在は興味ある符合と考えられる。

一方、上記の事実確認4)で示した下降速度成分の0m/sから-0.9m/sに向かう緩やかな減少は、各高さ位置での回転流の存在とも理解できる。鉛直面内で回転する気流があれば、その速度分布は0m/sに中心(最大)を持つ上昇・下降方向に対称な速度分布を持つと考えられる。図5中(c)の速度分布がこれに近い形状を示すことと符合する。もちろん、この高さ位置(0.47m)においても上昇流を示す正の位置(約0.1m/s)にスペクトル(速度分布)のゆるやかなピークは見られる。

(3) 結果のまとめと議論

本研究での成果は、主にロウソク火炎の振動メカニズムの理解に関するものである。特に、火炎上空の気流に注目しシャドウグラフ画像の空間フィルタ解析により、以下のような新たな知見が得られた。

火炎振動が発生する以前のロウソク火炎上空0.1~0.15mの位置では、上昇気流の中心速度は0.3~0.5m/sと緩やかである。

火炎振動が始まると、間欠的な煤の高速伝搬現象が観測され、1.0~1.6m/sに中心を持つ速度分布へと遷移する。また、上昇流の最高速度成分は2.5m/sを超える。

火炎振動発生時には、上昇速度成分以外に

下降速度成分を示す明瞭なピークが確認された(-0.5m/s)。このピークは気流の回転等の渦の存在によるものとは異なり、鉛直方向の指向性の強い下降流と判断される。

気象現象との類似で推論を進めれば、上昇気流中に発生する下降流の原因は、積乱雲中の雨粒や雹のように、密度の高い(比重の大きな)物質の出現(水蒸気が凝結して水滴や氷を生むように)に起因すると考えられる。ロウソク火炎の場合は、加熱により発生したロウの蒸気が完全には燃焼せず、上空で冷却され密度の高い雲状(ロウの蒸気が液体・固体へ転移)となって蓄積し、これが下降し炎の直上に達した時に着火燃焼し、煤を伴う高速火炎伝搬として観測されると理解できる。この解釈は、実証できてないが、一つの可能性を示す。また、ロウソク火炎上空で発生している回転渦流が一つのヒントを与える。渦流の発生は、上空の密度の高い物質(ロウの蒸気の雲)を鉛直下方に効率的に導くことが考えられる。もし渦流の回転周波数と火炎振動の周波数とが強い相関を示せば、この考えは信憑性の高いものとなり、約10Hzを示す振動周波数の原因も理解できることになる。

以上述べてきたように、本研究の成果は、ロウソク火炎振動メカニズムの解明に関する知見を得たことである。特に火炎振動発生時に観測された下降気流に対応するスペクトルの存在は、積乱雲(雷雲)雲底からの下降流の発生とも類似し気象現象との関連を想起させる。ロウソク火炎を巨大化させれば、火炎旋風の発生や、竜巻・台風などの発生メカニズムとの関連も議論できる。回転する積乱雲の発生が、竜巻発生につながる事は藤田哲也博士により実証されているが、積乱雲の回転の発生原因は解明されているわけではない。本研究で取り上げた、ロウソク火炎直上での回転渦流の降下現象(図2)の理解とも相似して今後の研究課題の一つである。

本研究では、ロウソク火炎振動のメカニズム解明を中心に研究を進めたが、当初の計画で達成されていない課題を含め、今後の課題を以下に纏める。第一は、3.研究方法の(2)で述べたように、ロウソク火炎振動子を水面に複数浮かべ、その振動子間の相互作用を検討した[学会発表,]。結果的には、水面上に浮かべる必要性から振動子間の距離を十分小さくできず、明確な結論は得られなかったが、振動子間にはその距離に応じて引力・斥力が働く可能性が有ることが示唆された。第二は、3.研究方法の(3)で述べたように、振動子の空間的なランダム運動を模擬した計算機シミュレーションを行い、蔵本モデルをベースとした振動子集団の同期現象への影響を調べた[学会発表,]。振動子間の相互作用に距離依存性を加えることにより、単純な集団全体の同期・非同期だけでなく、伝搬する同期波やらせん状の同期波の発生が観測された。この非線形振動子間に距離に応じた斥力・引力を加えることで振

動子集団全体のパターンダイナミックスがどう変化するかも今後の課題の一つである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

Y. Nagamine, K. Otaka, H. Zuiki, H. Miike, A. Osa, Mechanism of Candle Flame Oscillation: Explosive and Repeated Combustion Induced by Air Turbulence above the Candle Flame, Physical Review E, 査読有 (投稿中)

大高光輝、長篤志、杉村敦彦、西川潤、坂井田功、内視鏡画像における動きを基にした色の強調処理、画像の認識・理解シンポジウム論文集、査読有、MIRU2012, pp.1-6 (2012年8月)。

[学会発表](計 14 件)

H. Miike, From Nonlinear Science to Perceptual and Design Engineering, The 2nd German-Japan Workshop on "Nonlinear Science and KANSEI Informatics" (Invited Talk, 2013年8月29日~31日、セントコア山口、山口市)

長峯裕子、大高光輝、瑞木広幸、三池秀敏、長篤志、運動鮮鋭火技法を用いた火災振動するロウソク上空の気流の検出、数理モデリング研究会 (2013年8月26日~28日、北海道大学、札幌市)

三池秀敏、ロウソクの科学から見えてくる火災旋風、竜巻、台風の謎、数理モデリング研究会 (2013年8月26日~28日、北海道大学、札幌市)

S. Takemoto, Y. Nagamine, H. Miike, A. Osa, Computer Simulation of Synchronous Flashing of Fireflies Considering Effect of Random Walk and Dependence on Interaction Distance, 7th International Conference "Engineering of Chemical Complexity" (2013年6月10日~13日、バーネムンデ市、ドイツ)

H. Zuiki, K. Otaka, Y. Nagamine, H. Miike, A. Osa, Descending Motion of Vortex Associated with Candle Flame Oscillation, 7th International Conference "Engineering of Chemical Complexity" (2013年6月10日~13日、バーネムンデ市、ドイツ)

S. Takemoto, Y. Nagamine, H. Miike, A. Osa, Effect of Random Walk and Dependence on Coupling Length for Synchronous Flashing of Fireflies in Computer Simulation, Symposium on Spatio-temporal Organization in Non-equilibrium System (2013年2月23日、九州大学、福岡市)

K. Otaka, A. Osa, H. Miike, K. Okada, Motion Visualization Using an Impulse Response Model in Human Vision, Symposium on Spatio-temporal Organization in Non-equilibrium System

(2013年2月23日、九州大学、福岡市)
H. Miike, Hydro-chemical Solitary Wave in BZ-solution: the riddle of speed acceleration of the big wave, Symposium on Spatio-temporal Organization in Non-equilibrium System (Invited Talk, 2013年2月23日、九州大学、福岡市)

三池秀敏、化学反応が励起する流体现象のリズムと階層性、第22回非線形反応と協同現象研究会 (招待講演、2012年12月8日、お茶の水女子大学、東京都)

瑞木広幸、長峯裕子、三池秀敏、長篤志、ロウソク火炎の振動に伴う対流の構造と相互作用の可視化、第22回非線形反応と協同現象研究会 (2012年12月8日、お茶の水女子大学、東京都)

竹本駿、長峯裕子、三池秀敏、長篤志、ランダムウォークと結合の距離依存性を含んだホタル同期シミュレーション、第22回非線形反応と協同現象研究会 (2012年12月8日、お茶の水女子大学、東京都)

H. Miike, Emergent Pattern Dynamics in Reaction-Diffusion-Convection System, Japan-German Workshop "Emergent Phenomena in Spatial Patterns" (Invited Talk, 2012年9月25日、マグデブルグ大学、マグデブルグ市、ドイツ)

瑞木広幸、長篤志、三池秀敏、ロウソク火炎の振動に伴う対流構造の可視化・湯気や線香の挙動との比較、反応・拡散・対流研究会 (2012年8月25日~26日、北海道大学、札幌市)

三池秀敏、非線形振動子のリズムの同期から構造化する自然、視覚の非線形科学に関するミニ研究会 (2012年6月15日~16日、山口大学、宇部市)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件) 取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

(1) ロウソク火炎群の非線形振動・同期から俯瞰する気象現象のパターン動力学

<http://npepva.eng.yamaguchi-u.ac.jp/houga/houga.html>

(2) 映像情報科学研究室

<http://www.sip.eee.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三池秀敏 (MIIKE, Hidetoshi)

山口大学・理事 (副学長)・名誉教授

研究者番号: 10107732

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

長篤志 (OSA, Atsushi)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 90294652