

自律運動する樟脳船の集団運動

末松 J. 信彦, 栗津 暁紀, 中田 聡, 西森 拓

広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻

概要

自発的に運動する個体の集団運動は主に生物を対象とした観察、もしくは数理モデルを用いた数値計算が主流であるが、条件制御の容易さや個体間相互作用の明確さから無生物系におけるモデル実験は有用である。本研究では、水面を自発的に滑走する樟脳船を作成して一次元水路に1-51個浮かべ、集団運動を観察した。その結果、交通流の自由流と渋滞流に対応する挙動、および、アリの行列で認められるようなクラスターモードが確認された。樟脳船は水面に展開される樟脳の濃度場を介して相互作用している。この相互作用を踏まえて作成した数理モデルから、相互作用が2体間に留まる場合に交通流の運動モード、それ以上の場合でクラスターモードが現れる可能性があることが示唆された。このように、樟脳船の集団運動は条件に応じて種々の運動モードを表現することが可能な無生物系のモデル実験であることが示された。

A Group Motion of Self-Driving Camphor Boats

Nobuhiko J. Suematsu, Akinori Awazu, Satoshi Nakata, Hiraku Nishimori

Department of Mathematical and Life Sciences, Graduate School of Science, Hiroshima University

Abstract

Major approaches to investigate a group motion are an observation of behavior of animals and a numerical calculation. However, inanimate system is also suitable for analysis of a group motion. Here, we introduce a novel inanimate system that exhibits a group motion of self-driving camphor boats, which float on water surface spontaneously. The boats showed several modes of a group motion, *e.g.*, analogous with traffic flow or ant trail. The boats interact through the surface concentration of camphor on water. A mathematical model, which is based on the interaction between boats through camphor concentration, indicates that if the interaction is limited to only two neighboring boats, the boats show a group behavior analogous with traffic flow, otherwise the collective motion becomes cluster mode similar to an ant trail. The results insist that a group motion of camphor boats is a suitable as an inanimate model system to investigate a group motion.

1 はじめに

自発的に運動する固体の集団運動は、生物の群れの運動を理解するという学理的な興味だけでなく、交通渋滞の原理の理解と回避法の追及などの現実的な問題にも関係する興味深い研究対象である。集団運動の研究は従来、アリ

の行列、鳥や魚の群れ、車の渋滞など、主に生物を対象とした観察、もしくは数理モデルを用いた数値計算が主流であるが、条件制御の容易さや個体間相互作用の明確さから無生物系を対象としたモデル実験の確立も求められている。

無生物系においても、自発的に運動する現象はいくつか報告されている。例えば、界面活

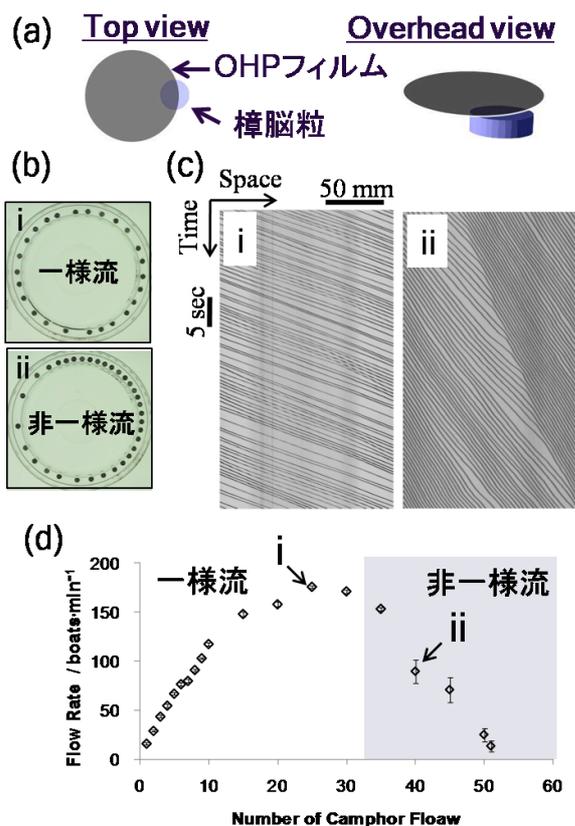


図 1 : (a) 樟脳船の模式図。(b) 樟脳船集団のスナップショット。黒い丸が樟脳船を示し、輪状の擬一次元水路を時計回りに自律運動している。(c) 時空間プロット。(d) 流量の船数依存性。

性剤水溶液中でガラス基板上を走る油滴[1]、水面を滑走するアルコール液滴[2]や固体の樟脳粒[3]などが挙げられる。特に樟脳の運動は、プラスチック板を付けて船にすることで運動特性を制御することが可能で、一次元水路中で相互作用する 2 隻の船の運動が同期することも示されている[4]。

樟脳分子は疎水性で、水面に展開されると表面張力を下げる作用がある。加えて昇華性があるため、水面に展開された樟脳の濃度は時間とともに低下する。樟脳船は、プラスチック板で樟脳分子の水面拡散を抑制することにより、表面張力の非対称性を生みだし、一方向的な自

律運動を誘起するシステムである。2 隻の船が一次元水路を滑走する場合、前の船が展開した樟脳分子により、船の後方の表面張力は低下している。そのため、2 隻の船の距離がある間隔以上近づくと、後方の船の駆動力は低下し、適度な間隔を保って船は滑走することになる。これが樟脳船間の相互作用である[4]。

この様に、樟脳船は一次元水路を一方方向に進行することが可能で、かつ船間の相互作用に関しても知見がある。そこで、多数の樟脳船を一次元水路に浮かべ、集団運動のモデル実験として確立することを目的として本研究を行った。

2 実験

樟脳船は、直径 6 mm の円形に切り出した OHP フィルム (ポリエチレンフィルム) の端に樟脳円板をバスボンドで接着して作成した (図 1a)。この時、OHP フィルム と樟脳円板の中心間距離は 3 mm とした。樟脳円板は直径 3 mm、厚さ 1 mm の円板である。水路は直径 150 mm、幅 10 mm の擬一次元の円形で、水深は 5 mm とした。水相は蒸留水またはグリセリン水溶液 (5, 10 mM) を用いた。

水路に 1-51 隻の船を浮かべ、自律運動の様子をビデオ撮影した。ただし、水相にグリセリン水溶液を用いた実験では船の数は 40 隻とした。デジタルデータを PC に取り込み、画像解析ソフト「ImageJ」を用いて解析および時空間プロットの作成を行った。

3 結果・考察

蒸留水の水相に船を浮かべたところ、船の数に依存して二種類の集団運動が認められた。船の数が 30 隻以下のとき、船は空間均一に分散した状態で、一様な速度を保って自律運動した (一様流; 図 1b-i, c-i)。一方 35 隻以上になると、

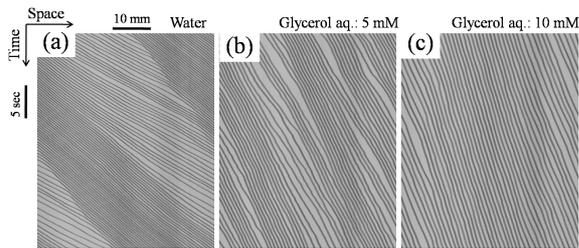


図2：水相の粘度に依存した集団運動の様子を示した時空間プロット。水相には、(a) 蒸留水、およびグリセリン水溶液 (b) 5 mM、(c) 10 mM を用いた。船の数は 40 個である。

船の数密度は高密度領域と低密度領域に分離した(非一様流; 図 1b-ii, c-ii)。このとき、高密度領域の先頭の船は加速し、低密度領域を通過して再び高密度領域の最後尾に着くという、先頭の入れ替わりが繰り返された。

水路のある地点を 1 分間に通過する船の数を流量として測定し、船の数に対してプロットした結果、30 隻までは単調に増加し、それ以上では減少に転じた(図 1d)。これは高速道路における車の渋滞にも認められる現象である[6]。ただし、交通流で認められるような「人」型の不連続な転移は認められなかった。

船の数が少ない時に、流量が数に比例するのは、船の速度が船の数に依存せず一定のためである。一方で船の数が多くなると、速度の減少の寄与が現れ、やがて流量が減少する。

交通流の数理モデルの一つである最適速度モデル(OV モデル)[5]の線形安定性解析から、船への抵抗が高くなると船の数に依らず一様流が安定になることが示されている[6]。そこで、粘性抵抗の高いグリセリン水溶液を水相に用いて 40 隻の船を浮かべた。その結果、蒸留水では非一様流が観察されていたのに対し、グリセリン濃度の増加に伴い一様流へと転移した(図2)。

OV モデルでは直前を走る車との車間に依存

して速度が調節される。実験結果が OV モデルの解析に基づく予想と一致したことから、樟脳船においても前の船との距離だけに応じて自身の速度を制御しているものと考えられる。すなわち、1 つの船から展開される樟脳濃度場の影響は直後の船までに留まり、それ以上離れた船にはほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

さらに、長時間実験を行った後の水相(蒸留水)では、複数の高密度領域(以後、クラスターと呼ぶ)が安定に存在する分布が認められた。前述の非一様流(図 1a-ii, b-ii)とは異なり、この分布ではクラスターの先頭の入替わりは起こらなかった。これはアリの行列などで認められるクラスターモードに相当すると考えられる。ただし、このモードが観察される実験条件は、明確には特定できていない。

樟脳船の集団運動は交通流に類似した挙動およびクラスターモードなど、複数の運動モードを示すが、個々の実験条件と集団としての振る舞いの関係の詳細は不明である。そこで、個々の樟脳船の運動および船間相互作用を数理モデルで再現し、その解析を試みる。

4 数理モデル

単体の樟脳粒の運動に関する数理モデルはすでに長山らにより報告されている[7]。そこで、長山モデルを参考にして樟脳場を介して相互作用する樟脳船の数理モデルを構築した。まず、駆動力である表面張力差と粘性抵抗だけを考慮して、運動方程式を以下のように記述した。

$$m\ddot{x}_i = -\eta\dot{x}_i + l[\gamma(c(x_i + L, t)) - \gamma(c(x_i, t))] \quad (1)$$

ここで、 m は船の質量、 x_i は i 番目の船の船尾の位置、 η は粘性係数、 l は船の横幅、 v_i は i 番目の船の速度、 $c(x, t)$ および $\gamma(c(x, t))$ は位置 x 、時間 t における樟脳濃度および表面張力を示す。樟脳濃度 $c(x, t)$ は以下の方程式で記述した。

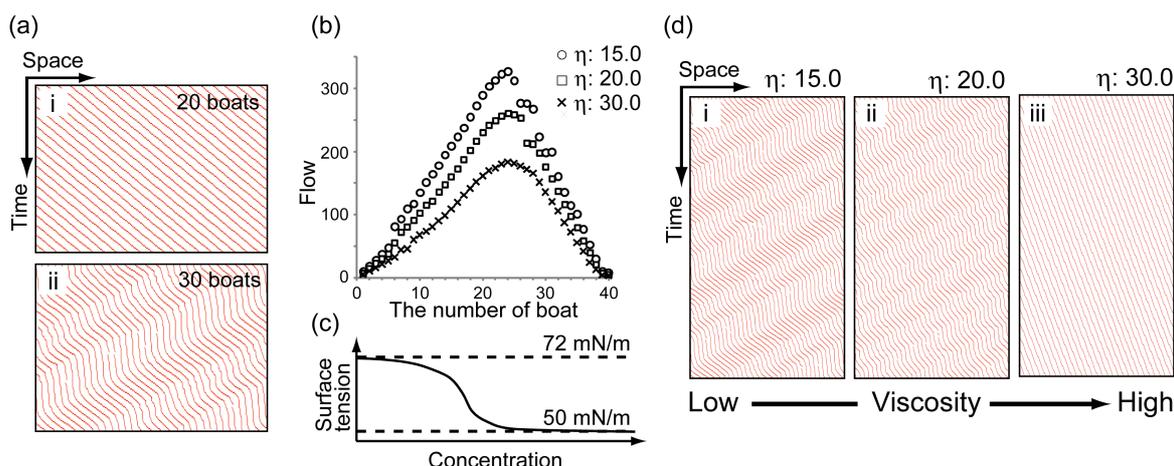


図3: 数値計算結果。船の数に依存した(a) 時空間プロット(η : 15) と (b) 流量。(c) 樟脳濃度と表面張力の関係図。(d) 粘度に依存した集団運動の時空間プロット。船の数は30個である。

$$\dot{c}(x,t) = DV^2c(x,t) - \alpha c(x,t) + \beta \sum_{i=1}^N \delta(x_i - x) \quad (2)$$

ここで、 D は拡散係数、 α は昇華速度に関する係数、 β は樟脳粒から溶解する速度に関する係数である。質量、船の大きさ、表面張力、拡散係数および粘性係数は実測値を与えた。

船の位置を無秩序に配置した初期条件からスタートし、十分に時間が経過してから流量を測定した。その結果、船の数に依存して、25個までは一様流で、流量が増加し、それ以上では非一様流で、流量は減少した(図3a,b)。さらに、粘性率を増加させると、30隻の船で非一様流から一様流への転移が認められた(図3c)。

この数理モデルは、船の運動速度に対して樟脳濃度場の変化が十分に速いという条件下においてOVモデルに帰着する。したがって、実験においてクラスターモードが確認されたのは、この条件の外であると考えられる。

5 結論

本研究では、樟脳船を用いて、無生物系における自律駆動粒子の集団運動の実験および数理モデルの作成を行った。その結果、実験条

件に応じて交通流に類似した運動モードおよびクラスターモードが確認され、それらの挙動を数値計算で定性的に再現した。以上の結果より、樟脳船は集団運動研究における有用な無生物系のモデル実験であることが示された。

謝辞

本研究の一部は明治大学グローバル COE プログラム「現象数学の形成と発展」(連携機関: 広島大学)の支援のもとに行われた。

参考文献

- [1] Y. Sumino, N. Magome, T. Hamada, K. Yoshikawa, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 068301.
- [2] K. Nagai, Y. Sumino, H. Kitahata, K. Yoshikawa, Phys. Rev. E **71** (2005) 065301.
- [3] S. Nakata, Y. Iguchi, S. Ose, M. Kuboyama, T. Ishii, K. Yoshikawa, Langmuir **13** (1997) 4454.
- [4] S. Nakata, Y. Doi, H. Kitahata, J. Phys. Chem. B **109** (2005) 1798.
- [5] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama, Phys. Rev. E **51** (1995) 1035.
- [6] T. S. Komatsu, S. Sasa, Phys. Rev. E **52** (1995) 5574.
- [7] M. Nagayama, S. Nakata, Y. Doi, Y. Hayashima, Physica D **194** (2004) 151.