

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24800011

研究課題名(和文) 流体中における輸送現象の複雑ネットワーク理論による解析

研究課題名(英文) Complex network analysis of transport phenomena in fluids

研究代表者

藤原 直哉 (Fujiwara, Naoya)

東京大学・生産技術研究所・民間等共同研究員

研究者番号：00637449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、流体中における粒子の輸送現象を複雑ネットワークとして捉え、ネットワーク科学の手法を用いて解析することである。その結果、通常の流体解析では明らかにならなかった性質を解明した。まず、乱流モデルにおけるネットワークを構成し、媒介中心性を用いた解析を行い、対流ロールの境界領域において高い媒介中心性を与えることを明らかにした。また、ネットワーク構造が変化した場合の定常状態の変化に対する問題を、摂動論的に考察した。問題を3つのクラスに分類し、それぞれの状況に特有な条件を考慮して摂動方程式を導き、粒子数が保存する場合はその方程式が厳密となることを示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to analyze the transport phenomena in fluids using methodologies of the complex network science. We have shown properties of the transport phenomena which has not been clarified with the conventional methods. First, we constructed the network of a turbulence model and analyzed the network using the betweenness centrality. We found that the boundary region between convection rolls show high betweenness centrality. Next, we considered the change of the steady state under the change of the control parameters of the system. We have classified the problem into three sub classes. We took into account the conditions specific to each situation, derived the perturbation equation, and showed that the derived equation is exact in the case that the number of particles is conserved.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ネットワーク 流体 数理工学

1. 研究開始当初の背景

スモールワールドネットワーク (Watts & Strogatz, Nature (1998))およびスケールフリーネットワーク (Barabasi & Albert, Science (1999)) のモデル研究を端緒として、複雑ネットワークの研究が2000年代に急速に発展している。驚くべき事に、これらの性質を持つネットワークは、社会学、神経科学、生物学、経済学、情報科学など、分野を超えて広く見いだされている。ネットワーク解析の手法は、要素間の相互作用の性質を明らかにできる点が特徴であり、解析手法も数多く開発されている。これらの手法の発展にともない、ネットワーク構造の特徴、普遍性はもとより、ネットワークを介した感染症伝播など、ネットワーク上における動力学的性質なども研究されている。

近年、気候データをネットワーク科学の手法を用いて解析する研究が行われるようになってきている。Donges et al., Europhys. Lett. (2009) は、異なる領域における海表面温度の空間相関を相互情報量で特徴付け、相互情報量が高い領域間をリンクでつなぐことでネットワークを構成した。彼らは、ネットワーク解析の結果、骨格をなす構造として、暖流の流れが抽出されることを示した。このように、気候ダイナミクスに対するネットワークアプローチは、これまで知られていなかった遠距離の相関の特徴を解析するのに有効であると考えられる。

このアプローチの一般化として、流体による輸送現象をネットワークとして解析を行うことができると考えられる。応用例として、乱流拡散を利用したより効率の良い混合問題の他、地球科学においては、ある領域で発生した汚染物質の空気・水による拡散の予測などが考えられる。また、汚染物質の都市部への流入を防止するために必要な対策、気候変動にともなう大気や水の循環の変化の見積もりなど、ネットワーク解析が威力を発揮する喫緊の課題は数多く存在すると思われる。

理論的に流体の輸送を取り扱う際には、流体方程式の数値シミュレーションによる解析が通常行われている。しかし、これらの数値シミュレーションは一般に膨大な計算量を必要とされる上、現実の問題においては、支配方程式が必ずしも明らかではない場合も多いので、データ駆動型の手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、複雑ネットワーク科学の手法を用いて輸送現象の解析を行う新たな枠組みを提案することを目標とする。

本研究では、小領域をネットワークのノードと見なし、ノード間での粒子輸送の有無をもってネットワークの接続関係を規定する。領域間の粒子遷移確率のみを扱う事になるので、流体方程式の直接数値計算と比較して少

ない計算量でその本質を捉えることが可能となると考えられる。本研究の概念図を、図1に示す。

本研究を通じて、輸送現象に本質的な貢献を示す空間領域の特定する新しい方法を確立し、輸送現象に対する新たな描像を確立する。また、近年の地球温暖化などの環境変化や、汚染物質が流体を通じて拡散する時の動的な性質を特徴づけ、その制御に向けた手法の基礎を確立することが、本研究の目的である。

気候データをネットワークとして解析した先行研究との最大の違いは、本研究では、粒子の流れという、より物理的意味の明らかな量をもとにネットワークを構成しているため、ネットワークの物理的意味の解釈が容易である点である。

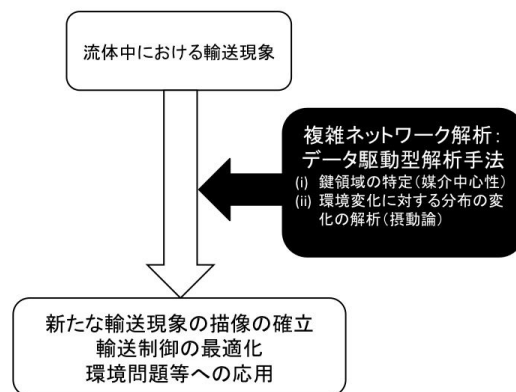


図 1 : 本研究の概念図。

3. 研究の方法

3.1. ネットワークの構成法

まず、流れ場における粒子の移流データからネットワークを構成する方法について述べる。

最初に、全領域を多くの小領域に区分する。それぞれの小領域をネットワークのノードと見なす。小領域の中の異なる点を粒子の初期位置にとって、粒子を拡散させる。ある時刻を経た後に粒子がどの小領域に移動したかを調べ、ある小領域から別の小領域への遷移確率を求める。遷移確率が0でない時、ノード間にはリンクが張られているとみなす。粒子運動の支配方程式がわかっている場合はシミュレーションによって拡散を求めることも可能だが、粒子の移流データから決定することも可能である。このような状況は非常に一般的であると考えられる。例えば、サンゴの卵の異なる海域への移流確率が、サンゴの遺伝子解析により見積もられている (Underwood et al., Mol. Ecol. (2007))。この場合では、提案手法によって、サンゴの個体数変化や、局所的な環境変化の影響の全海域への影響を見積もることが可能と考えられる。

このようにして構成されたネットワークの物理的意味は明快である。粒子の位置に関してだけ時間が経過すると時間相関が消えて

いと仮定して、後の粒子位置がマルコフ的に遷移するとみなしている。このネットワーク上のマルコフ過程の定常分布は、定常状態における各小領域における粒子の観測確率を表す。

3.2. ネットワークの解析手法

このようにして、小領域間の粒子の流れをネットワークで捉え、そのネットワークを解析することで、有用な情報を得ることが本研究の最大の目的である。本研究では、ネットワーク科学で頻りに用いられる二つの手法を、輸送の特徴を考慮しつつ適用した。具体的には、(1) 媒介中心性による流れ場の特徴抽出、および (2) 流れ場の摂動に対する応答性の見積もり、である。以下、それぞれの手法について述べる。

(1) 媒介中心性による流れ場の特徴抽出

まず、ネットワーク科学で用いられる特徴量として、媒介中心性を用いた解析を行う。あるノードAの媒介中心性は、別のノードBからノードCへ至る最短経路の数と、その最短経路のなかでAを通るものの数の比である。媒介中心性を測定することによって、流れ場中の粒子輸送ネットワークにおけるボトルネック領域を特定することが可能である。結果を含め、得られた結果の解釈は後述する。

(2) 流れ場の摂動に対する応答の見積もり

環境問題においては、系を特徴付ける制御変数が変化した場合に、流れ場の特徴がどのように変化するかを見積もることは非常に重要である。このような問題設定においては、摂動論を用いた解析が有用である。本研究において、我々は以下の3つの問題設定を考察した。粒子の吸収問題。例えば、大気中に拡散している汚染物質を、ある小領域で吸収する状況である。この場合、粒子源が存在しないので、粒子の数は時間とともに減少していくが、どの領域で吸収すると効率良く吸収可能かを調べる。粒子の放出、吸収問題。汚染物質を常に放出する領域があるときに、と同様に効率の良い吸収が可能な領域を考える。この場合、粒子の放出と吸収がバランスする定常状態が存在する。粒子数が保存される状況における定常状態の変化。水などが、保存則を満たしながら流れ場に従って循環する場合に、流れ場が摂動を受けてわずかに変化した場合の、定常状態の変化を考察する。

本研究では、解析および数値計算の両面から研究を行い、それぞれの状況固有の条件を考慮すると、異なる摂動展開が得られることを示した。

3.3. ラグランジアン乱流モデル

本研究では、数値例として、ベナール対流ロールが複数並んでいる系での粒子の運動に対する、ラグランジアン乱流モデルを用いた。これは、2次元平面上での各点における時間に

依存した粒子速度を常微分方程式で表現したモデルである(Ouchi et al., Prog. Theor. Phys. (1991))。空間中のある小領域に粒子を配置した後、小領域から出発した粒子群がこの常微分方程式に従って全空間に拡散する。定常状態における粒子分布の例を、図2に示す。この例では2つのロールが存在する場合が示されているが、一般にはより多くのロールが存在しうる。

この例において、3.1で説明した方法で遷移行列を構成した(図3)。同一ロール内ではノード間は密に結合しているが、ロール間をつなぐノードの数は多くないことがわかる。この行列が、この系の輸送特性を特徴付けているネットワークを表現していると考え、この行列を解析する。

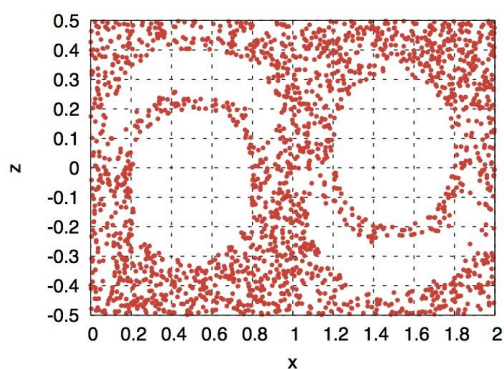


図 2: ラグランジアン乱流による x - z 平面内における粒子の拡散の定常状態。点線で囲まれた各小領域がネットワークのノードに対応する。

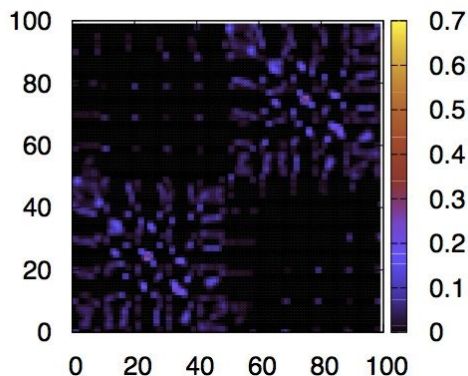


図 3: 図 2 の例における、ノード間の粒子の遷移確率行列。

4. 研究成果

(1) 媒介中心性による流れ場の解析

ラグランジアン乱流モデルに対して媒介中心性を測定した結果、対流ロールの境界領域において高い値を示すことがわかった。この結果は以下のように解釈される。すなわち、対流ロールの境界では、粒子が左右のロールに移動する可能性があることから、この領域をネットワークのノードとして見ると、左右のロールに属するノードと隣接している。そ

の結果として、異なるロールに属するノード間の最短経路上に存在する確率が高くなっていることが、高い媒介中心性の原因であると考えられる。

以上の結果より、媒介中心性を用いることで、流れの境界となる領域や、流れにおいて中心的な領域を検出することができる。このような領域では、カオスを特徴付ける量である局所リアプノフ指数が高いと考えられるが、その媒介中心性との関連性に関する解析は今後の課題である。

(2) 摂動論による流れ場のネットワーク解析

まず、粒子の吸収問題についての結果について述べる。この場合、摂動論により、非摂動状態において、粒子の存在確率が高い小領域で粒子を吸収することが最も効率よいことを、解析的に示した。また、摂動論による定常状態の変化の見積もりが数値計算の結果とよく一致ことを確認した。図4は、ある小領域で粒子を吸収したときの、粒子の吸収速度を描いたもので、赤が摂動論による見積もり、青が数値実験の結果である。両者がよく一致していることがわかる。この結果は、本手法によってラグランジアン乱流モデルの粒子の輸送の特徴を捉えることができていることを示しており、本手法の妥当性を示している。

次に、粒子の放出、吸収問題に対しては、の場合と似た方程式が得られたが、放出と吸収がバランスする定常分布を、放出と吸収がない状態での分布を用いて摂動論的に表現した。

最後に、粒子数が保存される状況における定常状態の変化においては、摂動方程式に、粒子数保存条件を付与することによって、近似解ではなく厳密解を与える方程式を導くことができることを示した。ここで、粒子数保存条件は、遷移行列の最大固有値が1であるという条件である。この条件により、摂動下での固有値方程式を解く必要がなくなるため方程式の取り扱いが容易になることが重要である。

このように問題のクラスの整理を行い、それぞれに特有の条件を考慮することによって、摂動論的な手法を発展させ、本手法の有効性を確認するとともに、将来の応用に向けた基礎的研究を行った。

本研究では、流体中の粒子の輸送をネットワークとして捉える新たな解析手法を提案した。いくつかの解析手法を提案するとともに、それらの有効性を確認した。今後は、ナビエ=ストークス方程式など、より複雑な流体モデルで同様の解析を行う。また、データ駆動型である本手法の特徴を生かし、実データをを用いた解析を行う予定である。

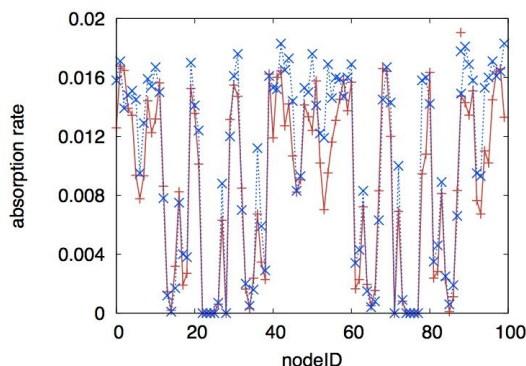


図4：摂動論の検証。各ノードで粒子を吸収した際の吸収速度を示す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Naoya Fujiwara, Analytical framework of flow networks and its applications, Proceedings of 2nd Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS2013), 2013 (2 pages) (査読あり).

Naoya Fujiwara, Network analysis of transport phenomena in flow fields, Proceedings of International Symposium of Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013), 2013, 314-317 (査読あり).

[学会発表](計4件)

Naoya Fujiwara, Jonathan F. Donges, Reik V. Donner, Jurgen Kurths, and Kazuyuki Aihara, Perturbative methods in transport networks and application to controlling geophysical flows, European Geosciences Union General Assembly 2014, 2014年5月2日, Vienna (オーストリア).

藤原 直哉, 流れデータのネットワーク解析, Geo-communication seminar, 2014年1月14日, 香川市.

Naoya Fujiwara, Analytical framework of flow networks and its applications, 2nd Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS2013), 2013年10月17日, 沖縄市.

Naoya Fujiwara, Network analysis of transport phenomena in flow fields, International Symposium of Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013), 2013年9月10日, Santa Fe (アメリカ合衆国).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原 直哉 (FUJIWARA, Naoya)

東京大学・生産技術研究所・民間等共同研究員

研究者番号：00637449