

本研究室では、熱・統計物理学に関する理論研究を行っています。  
最近扱っている分野は **複雑系 非平衡系 非線形系 相転移現象** で、  
解析計算・数値計算を用いて研究しています。

### 複雑ネットワーク

複雑ネットワークはインターネットや人間関係のような多数の要素が複雑に絡み合う現実のnetworkをその構成要素 (node) と要素対 (link) によって表現し、networkの特徴的な性質を探索する分野である。

様々な現実のnetworkが示す性質として network全体の次数  $k$  (各nodeの持つlink

の数) の分布  $P(k)$  がべき則 ( $P(k) \propto k^{-\lambda}$ ) を示すスケールフリー性というものがある。スケールフリー性を示すnetworkを特にスケールフリーネットワーク (SF network) と呼ぶ。

複雑ネットワーク上で起こる現象の研究として、我々は特に実社会での選挙における投票行動をモデル化した以下のモデルの性質に着目している。

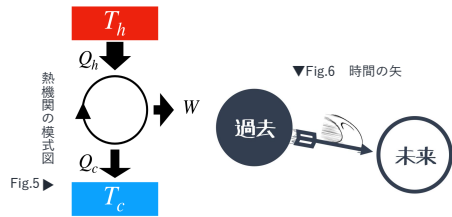
#### NCO (Non-Consensus Opinion) モデルの手順

1. 各nodeに対して意見Aを確率  $f$  でランダムに割り振り、確率  $1 - f$  で意見Bを割り当てる。
2. 各nodeは隣接するnodeの意見を確認し、局所的な多数意見へ意見を変更する。
3. step2を全体の意見が変更しなくなるまで繰り返す。

NCOモデルでは最初に割り振る意見Aのnodeの割合  $f$  に対して終状態での最大クラスター (意見Aのnodeの塊) の大きさ ( $S_1$ ) をプロットするとパーコレーション転移 (クラスターの大きさがnetwork sizeに対して、小さい状態から同程度の状態になる転移) が見

られる。特にSF networkの場合は連続転移した後に不連続転移が起きるパラメータ領域が存在する。我々はこの転移の詳細の解明を目指して統計物理学的手法を用いて研究を行っている。(疋田)

ミク□とマク□を



### 熱力学で時向を考える!?

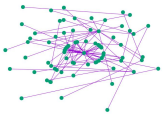
# 物

理学には様々な分野が存在するが、古典力学や量子力学とは違い、熱力学には時間の矢が登場する。しかし、学部の熱力学ではほとんど平衡状態のみを対象とするため、時間という概念が主役になることはない。だが身の回りを見渡すと、時間の向きが存在する非平衡系ばかりであることに気づくはずだ。我々はそのような非平衡系を研究対象としている。

代表的な熱力学の応用先である熱機関について考えてみよう。その性能を記述する物理量として熱効率がある。学部ではCarnot効率が熱効率の上限であり、準静的過程ならばCarnot効率を達成できると学んだ。しかし、仕事率に着目すると、準静的過程では仕事率がゼロになってしまうではないか!?では、有限時間でCarnot効率は達成可能なのだろうか?この当然の疑問に答えるためには非平衡系の熱力学が必要になってくる。今現在この分野で分かっていることはほとんどないが、だからこそ活発に研究が進められている。数年前に前述の疑問に答える熱効率と仕事率のトレード・オフ関係 (熱効率が上がれば仕事率が下がる、またはその逆) が発見されたが、この研究にもエントロピー生成という時間の矢に関係する概念が使われている。我々はトレード・オフを破らずに有限時間でCarnot効率が達成する可能性を研究している。わからないことだらけのこの世界に一緒に飛び込んでくれる有志を募集する!! (三浦)

事率がゼロになってしまうではないか!?では、有限時間でCarnot効率は達成可能なのだろうか?この当然の疑問に答えるためには非平衡系の熱力学が必要になってくる。今現在この分野で分かっていることはほとんどないが、だからこそ活発に研究が進められている。数年前に前述の疑問に答える熱効率と仕事率のトレード・オフ関係 (熱効率が上がれば仕事率が下がる、またはその逆) が発見されたが、この研究にもエントロピー生成という時間の矢に関係する概念が使われている。我々はトレード・オフを破らずに有限時間でCarnot効率が達成する可能性を研究している。わからないことだらけのこの世界に一緒に飛び込んでくれる有志を募集する!! (三浦)

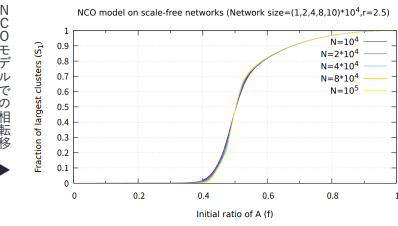
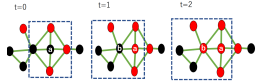
Fig.1 ネットワークの模式図



network	node	link
インターネット	サーバー	回線
人間関係	ヒト	友人関係
航空網	空港	航路

Table.2 実ネットワークの例

Fig.3 NCOモデルの時間発展



### 確率熱力学と情報幾何学

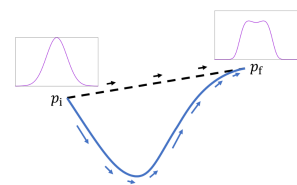
# 学

学部の熱力学で扱った系と熱浴との熱交換を、確率熱力学では少しmicroに、系が熱浴から確率的な力を受け、この力の仕事熱であるという様に捉える。例えばBrown運動は、水中に浮遊した微粒子を系とし、この微粒子が熱浴である周囲の水分子から摩擦や確率的な衝突を受けるものと捉えられる。dynamicsが確率的であるために、熱などの物理量も確率的となり、しばしば状態を表すのに確率分布が用いられる。この枠組みでは、学部の熱力学では扱えなかった有限時間の状態遷移や散逸 (energyが熱として不可逆的に移動する現象) をも扱えるようになる。

近年、確率熱力学を情報幾何の枠組みに当て嵌めた議論が盛んに行われている。情報幾

何学は確率分布を各点とする抽象的な空間において幾何的性質を扱う学問である。確率熱力学における状態が各点、状態遷移は空間中の移動に対応する。この移動の軌跡の長さが幾何学的な観点からまず注目される。長さの測り方を定めるのは計量と呼ばれる量であり、計量の定義は如何様にも定められるが、散逸と関係することから最近特にWasserstein計量が注目されている。始状態、終状態、および遷移時間が与えられた場合、Wasserstein計量による長さが最短となる軌跡を等速で遷移すると散逸が最小となる。我々はこのような幾何的な性質から示される熱力学の法則を研究している。(渡部)

Fig.7 確率分布からなる空間を、最短距離かつ等速で移動する経路 (黒い線) と蛇行する経路 (青い線) の模式図



### 過去の研究内容

2020 複雑ネットワーク上のNCOモデルに関する解析 (修士・疋田) / セルオートマトンによる貝殻表面パターンのモデリング (修士・口町)  
/ Analysis of stochastic ratchets with binary tape (学部・柳橋) / 陽子・電子系についてCoulomb Interactionに従う軌道とBreit Interactionに従う軌道の比較 (学部・黒川)

2019 Cluster states in adaptive neural networks (修士・佐藤) / Efficiency of triangle Brownian motor (修士・比嘉) / マスター方程式における熱力学的不等式 (学部・渡部)  
/ The Simplest Spin Glass Model and Random-Energy Model (学部・布谷)