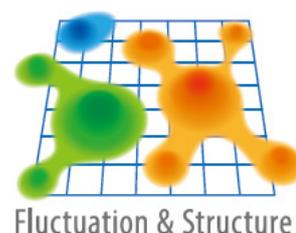


ゆらぎと構造の協奏

～非平衡系における普遍法則の確立～

News Letter Vol.9

2017.6.23 発行



新たに研究に参加された方々、異動された方々の紹介

ニュースレター編集委員 竹内一将

いよいよ本新学術領域研究も最終年度に入りました。各研究課題のラストスパートを迎えるにあたり、連携研究者の追加など、いくつかの体制変更がありました。また、多くの若手研究者が活躍する本領域では、今年度も多くの人事異動がありました。本ニュースレターでは、はじめに、昨年度から現在までの組織変更、雇用・転出された方々、異動のあった方々をご紹介します。

組織変更（計画研究）

A01 基礎班 佐野グループ	
山本 量一（京都大学大学院工学研究科）	連携研究者（追加・2016年4月）
A03 機能班 好村グループ	
多羅間 充輔（京都大学福井謙一記念研究センター）	連携研究者（新任・2016年6月）
A02 時空班 折原グループ	
日高 芳樹（九州大学大学院工学研究院）	研究分担者（連携研究者から変更・2017年4月）
A02 時空班 平野グループ	
柴田 康介（学習院大学理学部）	連携研究者（新任・2017年4月）

雇用（博士研究員等）

VAN ESTERIK Francis	九州大学 水野グループ（A03 計画班）	（2017年3月1日）
高島 芙弥	千葉大学 北畑グループ（A02 計画班）	（2017年4月1日）

転出・任期満了（博士研究員等）

FERRIER Meydi	大阪大学 小林グループ（A01 計画班）	（2016年6月30日）
	→ パリ南大学 講師	
南 佑樹	京都大学 佐々グループ（A01 計画班）	（2017年3月31日）
	→ 産業技術総合研究所 機能材料コンピュータショナルデザイン研究センター テクニカルスタッフ	

異動・職位変更

義永 那津人 (A03 公募班 研究代表者)

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助教 → 准教授 (2016年7月)

齊藤 圭司 (A01 計画班 小林グループ 研究分担者)

慶應義塾大学理工学部 准教授 → 教授 (2017年4月)

衛藤 雄二郎 (A02 計画班 平野グループ 連携研究者)

学習院大学理学部 助教 → 産業技術総合研究所計量標準総合センター主任研究員 (2017年4月)

櫻井 建成 (A02 計画班 研究代表者)

千葉大学大学院理学研究科 准教授 → 山口芸術短期大学芸術表現学科准教授 (2017年4月)

石原 秀至 (A02 計画班 櫻井グループ 研究分担者)

明治大学理工学部 准教授 → 東京大学大学院総合文化研究科 特任准教授 (2017年4月)

塚原 隆裕 (A01 公募班 研究代表者)

東京理科大学理工学部 講師 → 准教授 (2017年4月)

内田 就也 (A03 公募班 研究代表者)

東北大学大学院理学研究科 助教 → 准教授 (2017年4月)

藤原 慶 (A03 公募班 研究代表者)

慶應義塾大学理工学部 助教 → 専任講師 (2017年4月)

和田 浩史 (A04 公募班 研究代表者)

立命館大学理工学部 准教授 → 教授 (2017年4月)

量子乱流への相転移 ～ その個性と普遍性

竹内一将、高橋雅裕、小林未知数

はじめに

昨年、本新学術領域の佐野グループの実験によって、平行平板間を流れる流体が乱流化する際、directed percolation (DP) クラスと呼ばれる普遍的な非平衡臨界現象が現れることが明らかとなった[1]。同様の結論は同軸円筒系の層流乱流転移でも独立に確認されており[2]、注目を集めている[3]。DP 臨界現象は、電氣的に駆動された液晶の乱流間相転移でも観測されており[4,5]、統計力学理論では、吸収状態転移と総称される様々な非平衡相転移が属する普遍クラスとしてよく理解されている[5,6]。そこで本稿では、もう1つの重要な乱流現象である、超流動ヘリウムや冷却原子気体で見られる量子乱流に注目し、その乱流相転移がどのような臨界現象を示すのか、数値的に検証した結果[7]を紹介したい。特に、単純流体や液晶との比較を通して、量子乱流転移が示す非平衡臨界現象の普遍的な側面と、その裏返しである量子乱流の個性についても議論を行う。

古典乱流と量子乱流

乱流は、恐らく最も古くから科学的研究の対象とされてきた非平衡現象の1つだが、そこで使われてきたのは、通常、水などの単純流体だった。例えば、Reynolds が 1883 年、パイプ中の層流乱流転移を測定し、現代的な乱流研究の端緒を開いたのに使われたのは水だったし、佐野と玉井[1]が層流乱流転移で DP 臨界現象を発見した際も水が使われた。通常の流体は Navier-Stokes 方程式で記述されるため、理論的、数値的に膨大な研究が Navier-Stokes 方程式を出発点として行われている。その結果、発達乱流に関する Kolmogorov 則などの重要な知見が得られているが、基礎研究として「乱流がわかった！」と言える状況からはまだ遠い。

乱流そのものの理解を目指す立場に立つならば、単純流体で見られる乱流の諸性質が、通常の Navier-Stokes 方程式で記述できない流体でどの程度現れるかを調べ、様々な流体における乱流の普遍性と個別性の理解を目指すやり方もあるだろう。そのような流体には、粘弾性体や液晶などの複雑流体、それに超流動ヘリウム、冷却原子気体などの量子流体が挙げられるが、ここでは特に後者に注目しよう。古典流体と比較して、量子流体の顕著な特徴は渦の量子化である。一般に、渦の強さは循環 $\Gamma = \oint \vec{v}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{l}$ で与えられる（積分経路は渦を囲むようにとる）。古典流体では、循環 Γ は任意の値を取ることができ、一般に渦の有無や大きさは定義できない。従って古典乱流は、レオナルド・ダヴィンチが描いたように、強弱大小様々な渦が入り乱れた状態である(図 1)。一方、量子流体の超流体成分は巨視的波動関数 $\psi(\vec{r}, t) = |\psi(\vec{r}, t)|e^{i\theta(\vec{r}, t)}$ によって記述され、超流体速度は $\vec{v}_s(\vec{r}, t) = (\hbar/m)\vec{\nabla}\theta(\vec{r}, t)$ で与えられる (m は原子質量)。従って、超流体成分による循環 Γ は

$$\Gamma = \frac{\hbar}{m} \oint \vec{\nabla}\theta(\vec{r}, t) \cdot d\vec{l} = n\kappa \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

のように離散的な値を取る (図 2a)。ここで $\kappa = \hbar/m$ は循環量子、 n は巻き数と呼ばれる。 $|n|$ の大きな渦はエネルギー的に不安定なため、通常生じる渦は $n = \pm 1$ のいずれかとなる。そして、このような量子渦が大量に発生し、乱れ、相互作用している状態が量子乱流である (図 2b)。乱流を乱れた渦の集まりだと考えるなら、それが離散的な実体として存在する量子乱流は、ある意味古典乱流より単純な状態であり、還元主義的な考え方で乱流を理解できる可能性がある。

量子乱流研究は、特に超流動ヘリウムの熱対向流 (図 3a) に関して長年行われてきた[9]が、90 年代になって超流動ヘリウムを攪拌や剪断によって乱流化したり[10,11] (図 3b)、最近では冷却原子気体の Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) がトラップを介した攪乱により乱流化される[12] (図 3c) など、様々



図 1: レオナルド・ダヴィンチによって 16 世紀初めに描かれた、水路を渦巻く水のスケッチ。Codex Atlanticus から抜粋・電子化したものを転載 (パブリックドメイン)。

な系で量子乱流が実現されている。さらに、十分強く駆動され、発達した量子乱流では、古典乱流と同様の Kolmogorov 則が実験でも数値計算でも発見されている ([8,10]など)。その一方で、駆動力をゼロから徐々に強くしていったとき、量子流体がどのように乱流化するかという問題は、熱対向流[9]や、振動物体により攪拌された超流動ヘリウム系[11]などで精力的に調べられているが、系の個別の理解を超えた、量子乱流転移の一般的なメカニズムは中々見えてこない。これは、乱流への道すじ[13]が力学系理論に基づいておおよそ整理されている古典乱流とは対照的である。

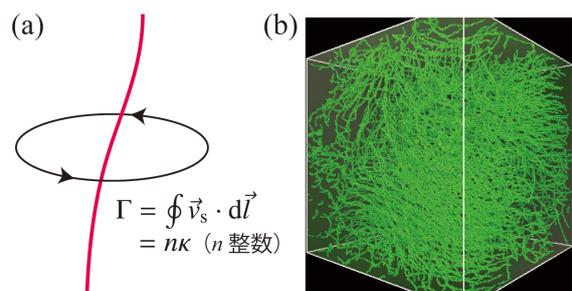


図 2: 量子渦と量子乱流。(a)量子渦の概念図。渦の周りの循環 Γ は量子化されている。(b)ランダムポテンシャルで駆動した散逸付 Gross-Pitaevskii 方程式で見られる量子乱流[8]。大量の量子渦が発生している。

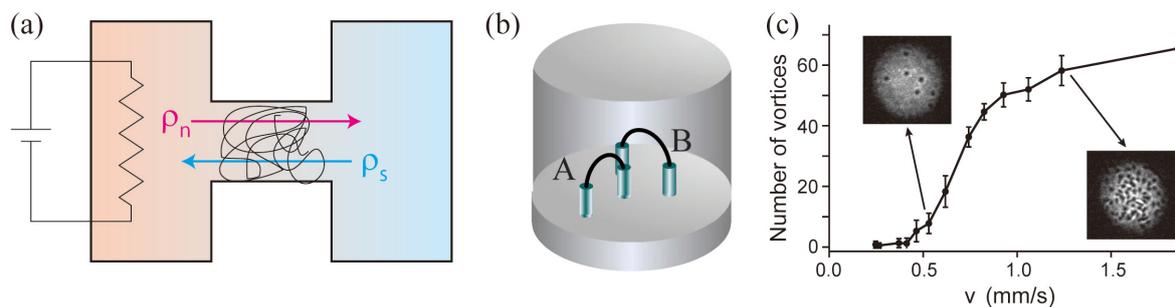


図 3: 量子乱流の代表的な実験系。(a) 超流動ヘリウムの熱対向流[8]。例えば容器の左側を熱すると、熱は常流体によって右側に運ばれるが、運動量保存則により超流体は左側に流れる。結果、中央部では常流体と超流体が対向し、これが激しいと乱流化する。(b) 振動物体を用いた量子乱流実験系の例[11]。[11]ではワイヤを振動させて超流動ヘリウムを攪拌するが、球やグリッドを振動させる実験もある。論文[11]から図を調整のうえ転載。(c) 冷却原子気体の量子乱流[12]。斥力的な光学ポテンシャルで攪拌することで、量子乱流転移が観察されている。論文[12]から図を転載。

吸収状態転移としての視点

量子乱流が見られる系は、図 3 のように様々なものがあるが、どの系であっても量子乱流状態では大量の量子渦が存在し、一方で駆動力が弱い場合には量子渦は殆ど存在しないと考えられている。だとすると、量子乱流転移とは、量子渦の有無が切り替わる相転移として特徴づけられるのではないかと、素朴に考えられる。すなわち、何らかの方法で量子渦を生成したときに、それが存在し続けるか、消えてなくなってしまうかという相転移である。このような相転移は、非平衡統計力学の分野では、吸収状態転移としてよく知られている[5,6]。吸収状態とは、一度入ったら二度と出ることができないような巨視的状态のことで、ここでは量子渦が全く存在しない状態を指す。量子渦のないところから量子渦を生成するには、それに伴うエネルギー障壁を超えなくてはならないので、それをレアイベントとして無視する近似のもとでは、量子乱流転移は吸収状態転移の一種とみなすことができるはずだ。

実は、この意味で非常に近い乱流相転移が、ネマチック液晶の電気対流現象で竹内らによって報告されている[4]。ある種のネマチック液晶に比較的低い周波数の交流電圧を印加すると、dynamic scattering mode (DSM) 1 と DSM2 という二種類の乱流状態の間の相転移が見られる。DSM1 と DSM2 の違いは、DSM2 が液晶の配向秩序に関する大量の線欠陥からなっていることにあり (図 4 挿図)、その意味で DSM2 は量子乱流とよく似た構造をもつ。そして、DSM1-DSM2 転移は、線欠陥が存在するか否かの吸収状態転移とみなすことができる。転移点近傍では、線欠陥の絶対量が小さいため、DSM2 は一部領域に局在化して存在し、転移点に達すると DSM2 は全滅してしまう。従って、DSM2 の分量が相転移のオーダーパラメータとなり、転移点近傍では、図 4 のように臨界現象の典型的なべき則を示す。竹内らは、様々な測定から多くの臨界指数を測定し、その全てが、吸収状態転移の最も基本的な普遍クラスである DP クラスの値と一致することを発見した[4]。本稿冒頭でも紹介したように、同じ臨界現象は、剪断下の層流乱流転移でも昨年発見されている[1,2]。これは、こうした乱流相転移が

DP クラスの普遍的なスケーリング則や場の理論で統一的に扱えることを意味しており、非平衡の普遍的側面を探求するうえで重要な知見だと考えられる。

では、素朴に吸収状態転移との関係が期待できる量子乱流転移は、DP クラス、あるいはそれと関連した非平衡相転移理論によって理解できるのだろうか？ それが本研究で考えたい問題である。

BEC における量子乱流転移シミュレーション

図3で紹介した量子乱流転移の実験例は、どれも非常に興味深いものだが、壁や振動物体との境界条件に大きく影響されたり、系により、不均一性、非等方性、有限サイズ効果などが強かったりするため、相転移の一般的性質を探る立場からは必ずしも理想的でない。そこで我々は、理論の立場から、均一かつ比較的大きなシステムサイズで、量子乱流転移のシミュレーションを行った。用いた方程式は Gross-Pitaevskii (GP) 方程式[14]で、これは冷却原子気体 BEC を定量的に記述できるモデルとして知られている。通常の GP 方程式では超流体の粒子数やエネルギーが保存するが、乱流現象を考えるうえでは、常流体成分との相互作用により生じる散逸の存在が無視できない。そこで、GP 方程式に現象論的な散逸項を導入した、散逸付き GP 方程式

$$(i - \gamma) \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\nabla^2 \psi + (V_{\vec{r},t} - \mu) \psi + g |\psi|^2 \psi \quad (2)$$

を考えることにする。ここで、 $\psi(\vec{r}, t)$ は巨視的波動関数、 $V_{\vec{r},t}$ は外部ポテンシャル、 μ は化学ポテンシャル、 g は結合定数、 γ は散逸係数であり、原子質量を m とし $\hbar = 2m = 1$ とする単位系を選択した。また、本稿で紹介する数値計算では $\gamma = \mu = g = 1$ とし、周期境界条件を使うこととした。

この系で乱流を起こすには、外部ポテンシャル $V_{\vec{r},t}$ を時間的・空間的にランダムに変動させれば良い。ランダムポテンシャルの振幅 V が十分大きい場合、このモデルは発達した量子乱流を示し、エネルギースペクトルは Kolmogorov 則を示すことが小林・坪田の数値計算によって示されている[8]。それなら、ここから V を小さくすれば、どこかで量子乱流転移が起こるはずだ。

図5は、定常状態において、 V が小さいときと大きいときで量子渦の様子がどのように変わるかを表す。これを見るとわかるように、 V が小さいと散発的に小さな輪っか状の量子渦が生じるだけだが（左図、 $V = 10$ ）、 V が大きくなると、大小さまざまな量子渦が非自明に分布して、相互作用し、揺らぐようになる（右図、 $V = 15$ ）。そこで、様々な V に対して量子渦の密度 ρ を測定したところ、図6のように、 $10 \leq V \leq 15$ 付近で量子渦密度が有意に増大することがわかった。これは、このあたりに量子乱流転移があることを示唆する一方で、液晶乱流の場合（図4）のようにシャープな転移にはなっていない。

実は、ランダムポテンシャルで駆動する GP 方程式の場合、 V が小さくても単発的な量子渦の生成消滅が起こるため（図5左も参照）、量子渦密度 ρ はゼロにならない。これは、ゆらぐ外部ポテンシャル項 $V_{\vec{r},t}$ が式(2)に実効的に熱ゆらぎのような効果をもたらし、量子渦の熱的な生成消滅を引き起こすからだと解釈できる。事実、 V が小さい領域での量子渦密度は、実効温度 T_{eff} が $V_{\vec{r},t}$ の分

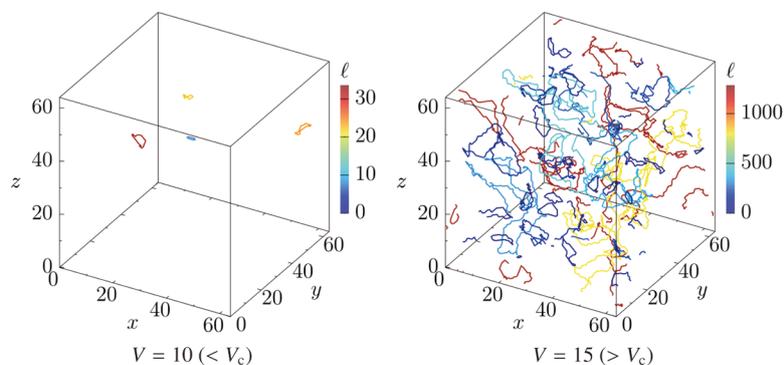


図5:ランダムポテンシャルによって駆動した GP 方程式の定常状態における量子渦の様子[7]。渦の長さに応じて色付けしている。

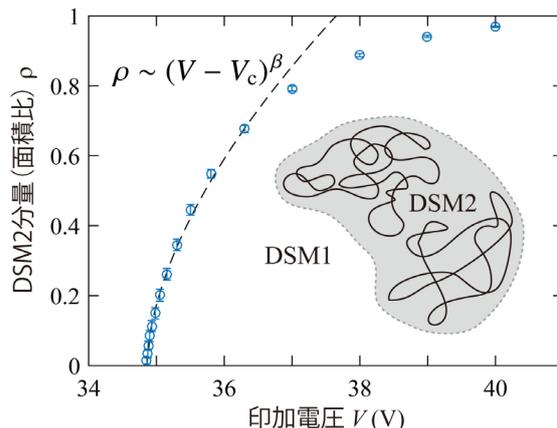


図4:液晶のDSM1-DSM2乱流間転移[4]。挿図:DSM1とDSM2の模式図。DSM2は大量の線欠からなる。メインパネル:定常状態におけるオーダーパラメータ ρ と印加電圧 V の関係。臨界現象のべき則 $\rho \sim (V - V_c)^\beta$ が見られ、臨界指数はDPクラスの普遍的な値と一致する。

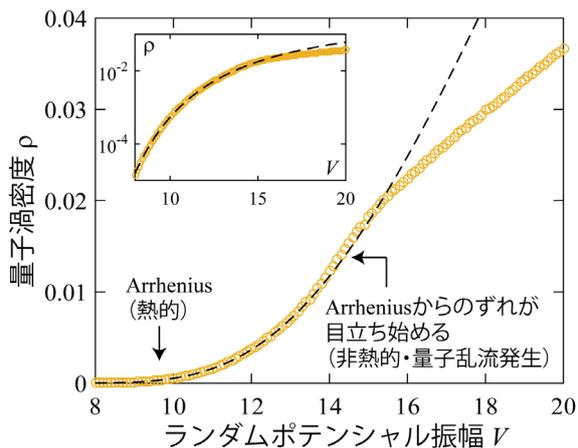


図 6: 定常状態の量子渦密度 ρ [7]。小さな V では Arrhenius 則 $\rho \sim e^{-c/k_B T_{\text{eff}}}$ ($T_{\text{eff}} \sim V^2$) (破線) が見られるが、大きな V では非熱的效果によるずれが顕著になる。

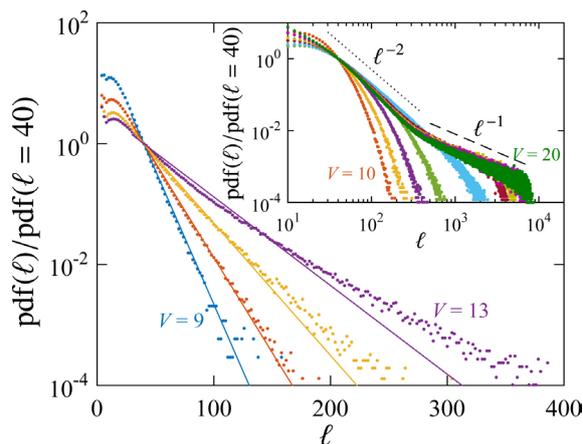


図 7: 定常状態における量子渦の長さ ℓ の分布[7]。小さな V では Boltzmann 分布 $e^{-c\ell/k_B T_{\text{eff}}}$ (実線) が見られるが、大きな V では非自明なべき分布へと変化する(挿図)。

散 ($T_{\text{eff}} \sim V^2$) だとみなしたときの Arrhenius 則 $\rho \sim e^{-c/k_B T_{\text{eff}}}$ に従うことが確認できた (図 6 破線, c は定数)。一方, V が大きくなると Arrhenius 則からのずれが顕著になる。我々はまた, 定常状態における量子渦の長さ ℓ の分布も測定した (図 7)。これも, V が小さいと Boltzmann 分布 $e^{-c\ell/k_B T_{\text{eff}}}$ が見られるのに対し (量子渦のエネルギーは, 対数補正を除き, 長さ ℓ に比例する), V が大きくなると非自明なべき分布へと変化する。つまり, $10 \leq V \leq 15$ で, 熱的な状態から, 非熱的な乱流状態へと変化が起こっているのである。

転移点近傍の定常状態では, 非熱的な量子渦が十分発達しておらず, 熱的效果により生成された量子渦と区別することが難しい。そこで我々は, 非常に大きい V を用いて発達した量子乱流を生成し, そこから転移点近傍へ V を急降下 (クエンチ) させたときの, 量子渦密度 $\rho(t)$ の緩和過程を測定した。図 8 は様々な V に対して $\rho(t)$ をプロットしたもので, $V \geq 11$ では定常状態の $\rho > 0$ へと収束し, $V \leq 10$ では, べき関数より速く減衰した後, 熱的效果による量子渦密度の値に収束する。ちょうど間の V では, 熱的效果が顕わになるまでの長い時間に渡り, べき的な減衰

$$\rho(t) \sim t^{-\alpha} \quad (\alpha = 0.74 \pm 0.04) \quad (3)$$

が見られる。実はこれは吸収状態転移を測定する標準的な手法の 1 つで[5,6], べき減衰(3)が見られるところが転移点 $V = V_c$ である (すなわち $V_c = 10.5 \pm 0.5$)。さらに, 式(3)の指数 α は臨界現象を特徴づける臨界指数の 1 つだが, その値は 3次元 DP クラスの値 $\alpha \approx 0.732$ [6]と一致した。本稿では割愛するが, 論文[7]では他に 2 つの臨界指数を測定しており, 十分な精度とは言えないものの, やはり DP クラスの指数と矛盾しない結果が得られている。従って, DP クラスの普遍的な臨界現象は, 液晶の乱流間転移[4]や, せん断下の単純流体の層流乱流転移[1,2]だけでなく, BEC を記述する GP 方程式(2)の量子乱流転移をも支配していたのである。

量子乱流転移の普遍性と個性

本研究により, GP 方程式(2)が記述する量子流体の乱流転移は, DP クラスの普遍的な臨界現象を示すことがわかった。これは, 量子渦の自発生成がエネルギー障壁を伴うレアイベントであり, 量子乱流転移が近似的に吸収状態転移とみなせることが本質的な理由である。従って, GP 方程式が記述する冷却原子気体 BEC に限らず, 量子渦生成のエネルギー障壁が大きい超流動 ^4He も, 同じ臨界現象を示

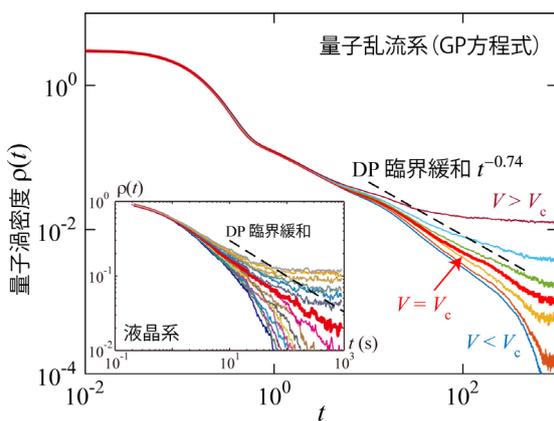


図 8: クエンチ後の量子渦密度 $\rho(t)$ の緩和過程[7]。転移点 $V = V_c = 10.5$ で, べき減衰(3)が見られる。挿図は液晶の乱流間転移に対して同様の測定を行った結果[4]。

すことが期待できる。現在知られている量子乱流の実験系(例えば図3)は、系の不均一性や非等方性、あるいは有限サイズ効果などが強く、必ずしも無限系の臨界現象を調べるのに適した系ではないが、例えば図3cのBEC実験[12]では量子渦密度 ρ を測定量として量子乱流転移が観察されており、本研究で示した非平衡臨界現象の文脈での解析が望まれる。また、最近のBEC実験では、箱型ポテンシャルによる均一なトラップも実現されており、臨界現象の実験的測定の機運が高まっているように思われる。量子乱流転移に比較的ロバストにDP臨界現象が現れることが明らかになれば、DPに関する非平衡統計力学の知見から、ゆらぎの相関、緩和過程や乱流成長の過程など、様々な性質に関して予言を与えることができる。無限系での普遍的な臨界現象を抑えたうえで、その拡張として、熱対向流(図3a)や振動物体実験(図3b)などの境界を含む問題が理解できるようになれば、大変面白い。

また、本研究の結果、単純流体や液晶では見られなかった、量子乱流の個性も見えてきた。1つは熱的效果との競合である。単純流体や液晶では、せん断や電場によってもたらされる不安定性がゆらぎを生み出しており、熱的な影響は無視できる。一方で、超流動ヘリウムやBECは、超流体成分の分量が温度に強く依存するうえ、乱流の生成は外的な攪拌によることが多く、本研究のランダムポテンシャルのように、実効的に熱ゆらぎのような効果をもたらす場合があるだろう。熱ゆらぎとの競合は、過去の吸収状態転移の研究で考慮されてこなかった側面である。さらに、相転移を担うのが空間的な広がりをもつ量子渦だというのも面白い。著者の知る限り、これまで調べられてきた吸収状態転移は、空間的に局在した活性領域が生きるか死ぬかの相転移であり、量子渦のように線状の構造を持ち、転移に伴って非自明な絡み合い構造(図5右)ができるような例は知られていない。量子渦の集団的構造(例えば図7の渦長分布)とDP臨界現象の関係を明らかにするのは今後の重要な課題である。

吸収状態転移は、長らく統計力学のトイモデルでしか見られない現象だったが、近年になって急速に実現象との繋がりが明らかになってきた[5]。その過程で、本稿でも議論したように、現実の系が有する個別の事情に向き合い、トイモデルで培われた理想的な臨界現象の知見にいかにか統合するかという課題が見えてきた。こうした研究によって、非平衡スケーリング則のもつ普遍性の範疇が明らかになり、多彩な非平衡現象がもつ普遍的側面の理解や乱流転移の解明に繋がっていくことを期待したい。

本研究は、本新学術領域の公募班キックオフミーティングが契機となって始まりました。所属も領域内の班も異なる三名による共同研究を実現させてくれた本新学術領域に感謝を申し上げます。

- [1] M. Sano and K. Tamai, *Nat. Phys.* **12**, 249 (2016).
- [2] G. Lemoult *et al.*, *Nat. Phys.* **12**, 254 (2016).
- [3] *Nature Physics* 2016年3月号は層流乱流転移におけるDPの特集が組まれており、昨年のBoltzmannメダル受賞者であるPomeau氏のコメント記事等を読むことができる。
- [4] K. A. Takeuchi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 234503 (2007); *Phys. Rev. E* **80**, 051116 (2009).
- [5] 竹内一将, *日本物理学会誌* **70**, 599 (2015年8月号)
- [6] H. Hinrichsen, *Adv. Phys.* **49**, 815 (2000).
- [7] M. Takahashi, M. Kobayashi, and K. A. Takeuchi, arXiv: 1609.01561 (2016).
- [8] M. Kobayashi and M. Tsubota, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 065302 (2005); *J. Phys. Soc. Jpn.* **74**, 3248 (2005).
- [9] J. Tough, in *Progress in Low Temperature Physics*, Vol.8, edited by D. Brewer, pp.133-219 (Elsevier, 1982).
- [10] J. Maurer and P. Tabeling, *Europhys. Lett.* **43**, 29 (1998).
- [11] R. Goto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 045301 (2008).
- [12] W. J. Kwon *et al.*, *Phys. Rev. A* **90**, 063627 (2014).
- [13] 神部勉, P. G. ドレイジン, 「流体力学 安定性と乱流」(東京大学出版会, 1998)
- [14] C. J. Pethick and H. Smith, *Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases* (Cambridge Univ. Press, 2002).
- [15] N. Navon *et al.*, *Science* **347**, 167 (2015); *Nature* **539**, 72 (2016).

竹内一将 (東京工業大学・理学院・准教授)

高橋雅裕 (学習院大学・理学部・助教)

小林未知数 (京都大学・理学研究科・助教)

研究会報告:International Workshop on Hydrodynamic Flows in/of Cells

A02 班 北畑裕之

2016年11月24日、25日の二日間にわたって、首都大学東京において、International Workshop on Hydrodynamic Flows in/of Cellsが開催されました。当日は、54年ぶりに11月の積雪が東京で観測され、そのせいで交通が少し遅れて講演順が変更になるなど多少のアクシデントもありましたが、学生13名を含む27名の参加があり、二日間にわたって、10件の講演と8件のポスター発表が行われました。講演時間は一件あたり60分で、発表40分、質疑20分と議論を重視した内容でした。細胞内外の流動に関する研究を近年盛んに進めているベルリンFritz-Haber研究所のMikhailov教授を招き、英語での講演、議論となりました。



写真1: 雪の積もった首都大学東京のキャンパス。

研究会の対象は、細胞内外での流動現象という特化した内容であったが、質疑においてはそれぞれの現象についての専門的な内容だけでなく、一般的な内容まで幅広い議論がなされ、20分の質問時間でも足りない講演が相次ぎました。また、ポスターセッションにおいても、プログラム上は1時間だけでしたが、それぞれの休憩時間にもポスターの前で議論をしている姿が見られ、活発な議論がなされていました。

本研究会のテーマである細胞内外の流動現象は、その流動がアクティブに、すなわち、非平衡条件下で化学エネルギーを消費しながら引き起こされており、しかも細胞内外の空間的な構造に大きく影響されるという意味で、本新学術領域のテーマである「ゆらぎと構造の協奏」が非常に重要な役割を果たす系の一つと言えます。今回の研究会において、様々な立場から細胞内外の流動現象にアプローチする研究が示され、議論を深めることができ、今後の研究の発展し、また、新たな共同研究が始まることが期待されます。

以下に講演のタイトルを列記します。



写真2: Mikhailov氏による総括的な講演。

- N. Uchida, “Some applications of Smoothed Profile Method for active flow in and out of cells”
- A. Kimura, “The mechanism of cytoplasmic streaming in the Caenorhabditis elegans embryo”
- Y. T. Maeda, “Hydrodynamics and enzymatic reaction in moving thermal gradients”
- N. Yoshinaga “The hydrodynamic interaction and collective behaviours of self-propelled particles and drops”
- S. Fujii, “Nuclear dynamics revealed by bio-tracers”
- S. Komura, “Anomalous diffusion in active cells”
- D. Mizuno “Non-Gaussian glassy dynamics in living cells and cytoskeletons”
- T. Ooshida “Analytical treatment of collective motion in colloidal liquids”
- H. Kitahata, “Hydrodynamic collective effects of active proteins in biological membranes”
- A. S. Mikhailov, “Hydrodynamic activity in biological cells”

Organizers: Shgeyuki Komura (Metropolitan University of Tokyo), Hiroyuki Kitahata (Chiba University)

生物物理学会におけるシンポジウム「モーターと細胞骨格の新展開」の報告

A03 班 後藤一樹

2016年の生物物理学会 年会は、つくば国際会議場で行われ、2000名近い参加者がありがたいへんな盛会となりました。その初日、晴天に恵まれた中、永井健氏（北陸先端科学技術大学院大学/A01 基礎班 班友）と西坂崇之教授（学習院大学/A03 機能班 公募研究 研究代表者）のオーガナイザーによるシンポジウム「モーターと細胞骨格の新展開・ステップから集団運動まで」が開催されました。本領域の共催です。

ところで皆さんは、生物物理学会に「若手奨励賞」があることをご存知でしょうか？ 多数の応募者の中から、10人が厳選され、その方々が年会の初日の午前に登壇して最後の5人が選ばれます。*Nature* や *Science* 級の論文があれば必ずもらえるという安易な賞ではなく、当日のプレゼンの完成度、そして研究の科学的意義が徹底的に競われる、最難関の賞とされています。

え、賞とシンポに何の関係があるのかって？ それは最後まで読んでいただければ分かります。

さてシンポジウムに戻ります。残念ながら会場は写真撮影と動画撮影が禁止されており、会場の雰囲気そのままお伝えすることはできませんが、1つの部屋に150名の聴衆が殺到し、会場は大変な熱気に包まれていました。博士課程の学生を含む気鋭の若手6人に加え、キーノート講演者としてミュンヘン工科大学の Andreas Bausch 教授を迎えた、とてつもなく充実したシンポジウムでした。いま改めて注目すべき、分子モーター研究の2つの方向性 – 1ユニットの動作の可視化と集団運動の妙一の両極端を見事にカバーした、まさに息もつかせぬ160分間となりました。

下記の講演タイトルにありますが、前半の3演題は F_0F_1 -ATPase や滑走バクテリアなどの1分子観察が主眼となっており、最新の技術により動作原理に肉迫した最先端の研究成果は、目から鱗が落ちる思いでした。故木下一彦氏が黎明期に大きく貢献した、1分子生物物理学という新しい流れが、今、若手研究者の活躍に繋がっていることを強く実感しました。

そして圧巻は後半の集団運動のパートです。微生物から細胞、そしてもっとも単純なユニットである細胞骨格とモーターが特徴的なパターンを作るさまについて、様々な材料、様々な切り口をもって、多面的な説明が次々となされていきました。まだ初学者ゆえ、特に理論的な説明では分かるスライドは少なかったのですが、2010年に金字塔的な論文を發表された Bausch 教授の講演を間近に聞いたことは、この分野の学生にとって本当に幸運なことでした。そして本物のサイエンスと、それを伝えるべく入念に準備された皆さんの発表に心打たれ、日々精進しよう！と改めて強く思った次第です。また若手と女性研究者がこれだけ活躍している生物物理学という分野に、未熟な学生ながら、確かな将来性を感じることができました。

さて、最後に若手奨励賞の話です。なんと、シンポジウム講演者である木下佳昭氏（学習院大学 西坂研究室所属）と永井健氏は、奨励賞の候補者に選出されていました。そのためシンポジウム発表の数時間前に、奨励賞でも講演することになり、一日に同じ学会で2つも講演をこなすという前代未聞の事態になってしまいました。

そして・・・2人も受賞！という、これまた前代未聞の快挙となりました。「ゆらぎと構造の協奏」が共催したシンポジウムのレベルの高さを示す、特別なエピソードとして、お伝えしたいと思います。

木下さん・永井さん、本当におめでとうございます！

講演者一覧(敬称略、講演順)

渡邊 力也（東京大学） 「Single molecule analysis of F_0F_1 -ATP synthase」

岸川 淳一（京産産業大学） 「*De novo* 設計軸の回転から明らかになったトルク発生機構」

木下 佳昭（学習院大学） 「滑走バクテリアと遊泳アーキアの運動超分子マシナリーの単位ステップ観察」

鹿毛あずさ（東北大学） 「A small stroke for an individual, but giant motion for a population: negative gravitaxis and bioconvection of *Chlamydomonas reinhardtii*」

永井 健（北陸先端大学） 「インビトロ運動アッセイ中の自走する微小管の集団運動」

進藤 麻子（名古屋大学） 「胚発生過程における細胞集団運動を担うアクチオミオシンの制御」

Andreas Bausch（TU München） 「Shape Remodeling of Active Cytoskeletal Vesicles」

後藤一樹（学習院大学・理学部・修士課程1年）

「第10回物性科学領域横断研究会」報告

A03 班 齊藤圭司

本研究会は、異なる分野の新学術領域研究の研究者が一堂に会した、分野横断型の会議である。毎年、新学術領域研究の採択が発表されると、物性物理学に関連する領域に参加を促し開催されている。今回は第10回目の会議であり、8つの新学術領域が参加した。各領域は1時間の枠が与えられ、最初に各領域代表が領域全体の紹介を行い、引き続き2名の講演者が最近の研究成果について発表するという形式であった。その他に、4つの新学術領域がゲスト領域として、25分ずつの講演を行った。他の分野の現状を学びつつ、自分たちのやっていることを物理学全体の幅広い角度から見つめ直す場として、有意義な会議であると言える。総参加者は160人程度、ポスター発表も85件あり、全体的に盛会であったと言えるだろう。ただ、全体的に固体物理や光物性に偏っていたせいも、「ゆらぎと構造の協奏」からの出席率は高いとは言えなかった。他分野の研究者に向けた発表であるので、どの発表も基礎から最先端までを分かりやすく話してくれ、福山秀敏先生の言葉を借りれば「最先端を短時間で吸収できるお得な会議」であったと言えるであろう。

第一日目は、各領域の発表はもちろん素晴らしいが、目玉は凝縮系科学賞とポスター発表であった。第11回凝縮系科学賞は、「光で水を分解する研究」で東工大の前田和彦氏に与えられた。応用上極めて重要であるのは明確であり、受賞にふさわしい業績である。ポスター発表では、昨年度からポスター賞が選出され、懇親会で表彰と記念品の授与式が行われた。ポスター賞は、大学院生及び学位取得後5年以内の研究者が対象であり、今回は85件中52件がポスター賞にエントリーし、全体から5件の優秀ポスター賞と1件の最優秀ポスター賞が選出された。凝縮系の中でも固体物理学系の領域が多いため、全体として超伝導や強相関電子系、多極子伝導などのテーマが大多数を占める形となったが、各ポスターの内容はレベルも高く、活発な議論が行われていたと感じた。なお、最優秀ポスター賞には、東大院工の吉竹純基さんが選ばれ、賞状の他、副賞としてノーベル賞授賞式の晩さん会にも使用された地元の灘の純米大吟醸酒1本などが授与され、懇親会では同じお酒が参加者にも饗されたため、懇親会は大いに盛り上がったことは言うまでもない。

第二日目の最初のセッションが「ゆらぎと構造の協奏」の発表であり、佐野領域代表が全体説明をした。乱流実験、生体系や自己駆動粒子系の実験、また、電流ゆらぎの実験など数多くの成果が本学術領域からの成果として報告され、あらためて本学術領域の成果の多彩さが感じられた。他の発表として、私が量子系における振動外場中での熱化現象、名古屋大学の宮崎州正氏がソフトポテンシャル系でのガラス転移の数値計算の結果を発表した。他の領域としては、光駆動による分子状態制御やトポロジーが関連する物質科学などが、近年のノーベル物理学賞や化学賞などを参照しながら科学としての立ち位置を力説していたのが印象に残った。最後の単一分子での機能設計では、科学としての思想が興味深かった。FitHugh-Nagumo が神経伝達メカニズムを電気回路との類似性からモデルを立てたことはよく知られているが、単分子で作った電子回路から逆に神経伝達に似た外部応答設計ができるはずとし、その文脈から分子ダイオードや負の微分コンダクタンスを設計するという考えが領域の方向性である。物理学以外から、類似性を基に将来設計を立てるのは極めて楽しく、また正しい科学の姿勢であると感じられた。

福山先生のお歳を感じさせない元気な質問の数々にも魅了され、元気をもらった会議であったと思う。

アクティブマター研究会 2017 の報告

A03 班 諸橋博昭

2017年1月21日(金)、22日(土)の二日間に渡って、九州大学西新プラザにおいて「アクティブマター研究会」が開催されました。日本全国からアクティブマターを研究する研究者、大学院生合わせて34名が一同に会し、アクティブマターの最先端の研究に関する基調講演と企画講演が行われました。理論やシミュレーションによる研究から有機合成化学的手法によるアクティブマターの合成や運動の制御など講演の内容は多岐に渡り、アクティブマターという分野の広がり強く印象づける研究会でした。また分野を横断した横の広がりはもちろん、アクティブマターの物理、化学、生物学的な理解が深まってきていることも参加された皆様の活発な議論の様子から明らかであり、アクティブマター研究に携わる一学生として今後も研究に邁進せねばと新年の決意を新たにしたところでもあります。

本研究会は北畑裕之先生(千葉大学)による研究会の概要の説明に続き、2件の基調講演、3件の企画公演と17件のショートトークから構成されており、各々活発な議論を伴って非常に魅力的な講演でありました。基調講演は細胞運動における力学的な場に着目した研究に関する講演となっており、初日に平岩徹也先生(東京大学)により「真核細胞のアクティブダイナミクス」というタイトルで理論モデルに関する研究を、また二日目に木戸秋悟先生(九州大学)により「細胞行動を操作するハイドロゲル微視的力学場設計」というタイトルで、細胞外の力学的な場を制御することで細胞運動そのものを制御する研究の進展を概観する講演をして頂きました。初日に行われた「自発的な分裂」をテーマとした企画講演は幅広い分野にまたがる講演となっていました。最初に伴野太祐先生(慶應義塾大学)により、「水中を駆動する細胞サイズの油滴の分裂現象」というタイトルで有機化学的手法によって駆動する油滴を構成する分子と反応性の高い界面活性剤を合成する研究について詳しくお話して頂きました。次に宮崎牧人先生(早稲田大学)により「細胞分裂装置の *in vitro* 再構成」というタイトルで、液滴や人工リポソーム内に封じ込めた精製されたタンパク質や細胞抽出液が示す自己組織化構造やダイナミクスに関して、最後に野口博司先生(東京大学)により「ベシクルの変形と分裂」という講演で、リン脂質が水中で自発的に形成する膜(ベシクル)が示す多彩な変形と分裂についてシミュレーションに基づく研究を紹介していただきました。ショートトークでは幅広い話題での発表、議論がなされ、自発的に発生するダイナミクスや秩序構造について広く知見を得ることができる有意義な時間となりました。

特に伴野先生と木戸秋先生は私が参加する物理学会などでお見かけすることがほとんどない先生方であり、研究の手法と結果に大いに刺激を受けました。伴野先生による有機合成反応を用いた自己駆動油滴の作製に関する研究と、木戸秋先生による細胞が遊走する基板(ハイドロゲル)のヤング率を局所的に変えることにより、細胞の遊走を制御する研究はアクティブマター研究に新たな知見をもたらす可能性を感じました。このような分野の垣根を超えて様々な結果、研究手法に出会える機会は世界的にも注目を集めているアクティブマターに関する研究会ならではの言えるのではないかと考えます。

初日の夜には懇親会が開かれ、研究の話題から日常の話題までざくばらんに多くの方々とお話することができました。様々な立場、分野の方々とお話できる機会となり、参加された皆様にとって充実した時間であったことと思います。

最後となりましたが、世話人の江端宏之先生(九州大学)、北畑裕之先生(千葉大学)、多羅間充輔先生(京都大学)に厚くお礼申し上げ、アクティブマター研究会 2017 の報告と致します。

“International Workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems”

A01 班 池田晴國

物理学会の翌日 2017 年 3 月 21 日から 23 日まで、大阪大学 中之島センターにて、国際会議 “International Workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems” が開催されました。研究会は 30 件の口頭発表と、13 件のポスター発表から構成され、国内外から 57 名の参加者を迎えました。これまでのガラス転移の研究会では、参加者や発表者がある程度固定されており、他の分野との交流も活発とは言えない状況でした。本研究会は、このような状況を改善する為、これまでよりもより広範な分野から広い意味でのガラス転移に関連する講演を募り、異なる分野の研究者間の交流を促進しようという意図の元開催されました。

実際に三日間の間に行われた口頭発表では、過冷却液体に関する講演(田中, Tong, Han, Ganapathy, 芝, Karmakar, Xu, Peng 各氏)や、アモルファス固体に関する講演(Zhang, Sastry, Dauchot, 水野, 大槻 各氏)だけではなく、粉体や複雑液体のレオロジー(早川, 荒木, 堀内, Ingebrigtsen 各氏), 液晶や XY 模型(竹内, 芳賀各氏), 量子渦やレーザー冷却されたボーズ気体(大熊, 坪田 各氏), 摩擦(前田, 松川, 山口 各氏), 地震(波多野氏), スピングラス(田畑, 間宮, 佐々木 各氏)から究極の非平衡現象である生命現象を理解しようという試み(畠山, Lou 各氏)と言った具体的に非常に多彩な研究対象についての講演が行われました。

正直なところ研究会が始まる前は、これだけ分野が離れていては研究者同士の交流も覚束ないのではないかと危惧していたのですが、実際にはほとんどの講演が、聴衆が分野外であることを意識して良く練られたもので、質疑応答の際にも出身分野や若手シニアを問わず活発な議論が行われていました。研究会が成功裏に終わったことは、集合写真での参加者達の満足げな表情からも分かるものと思いません。今後、本研究会で行われた異なる研究領域どうしの交流から新しいアイデアが生まれ共同研究として発展していくことを期待します。



図：最終日に撮影された参加者の集合写真

国際会議「The Origin of Life: Synergy among the RNA, Protein and Lipid World」

A03 班 鈴木健太郎

生命の起源に関する国際会議「The Origin of Life: Synergy among the RNA, Protein and Lipid World」が、まさに生命の息吹を感じる新緑の2017年5月29日、30日の両日に、東京大学駒場キャンパス 数理科学研究科棟 大講堂で開催された。「生命起源」に関連する研究は、昨今多様な展開を見せており、ひとことでその全貌を言い表すことは難しいが、本会議では、現在の生命現象が出現する以前の原始地球環境において、どのようにして無生物からの生命が誕生し得たのかを明らかにすることを目的とした研究に関する講演が行われ、特に、生命起源に重要な働きをしたと考えられている、RNA/DNA、タンパク質、膜からなる、三つの世界(ワールド)の役割について活発な議論が交わされた。事前登録者133名、当日参加者のべ58名(総数のべ192名)と、この規模の研究会としては多くの聴衆を集めた活気あるものとなった。



図:集合写真

二日間の会期中、本分野を牽引する研究者である J. Szostak (Harvard Univ., 米)、D. Deamer (UCSC, 米)、菅原正 (神奈川大)、金子邦彦 (東大)による4件の特別講演と、I. Chen (UCSB, 米)、S. Rajamani (IISER Pune, 印)による2件の基調講演、国内外の招待講演者による9件の一般講演が行われた(敬称略)。その中で、筆者が特に印象に残ったのは、Szostak による、「The Surprising Chemistry of Nonenzymatic RNA Replication」と題する特別講演である。この講演では非酵素的なRNA合成に関する研究が紹介されたが、その手法は完全に有機合成化学に基づくものであった。Szostak は2009年にノーベル生理学・医学賞を授与されるなど、遺伝学分野では国際的権威として知られるが、そのSzostak が異分野の方法論を取り込みながら研究を進めていることに驚きと敬意を表すると共に、生命のない初期の地球環境での物質の成り立ちを理解する上での化学の役割を改めて思い起こすことが出来た。本分野の特色は、生物学に限定されないさまざまな分野の研究者が、自らの分野の特色を活かしつつ、異分野の手法を取り入れながら研究を進め、分野を超えた共通の価値観でその成果を互いに評価しあえる点にある。会議通じて行われた講演に対する質疑応答や、休憩時間での個々のディスカッションの盛況ぶりは、まさにこの特徴を窺がわせるものであった。

ところで今回、本会議のロゴをデザインする際、会議の主題との関連性と日本らしさという観点から、江戸時代の禅師 仙厓義梵の禅画である「○△□図」を組み込んだ。禅画の面白さは、その画を見た人それぞれに解釈がゆだねられる所にあるという。しかし、その裏には作者の奥深い意図があり、画を見る人はいつの間にか、その真理に近づいているのではないか。生命起源の研究においてもこれと同じように、各々がそれぞれの視点で生命に挑んでいるうちに、いつの間にやら、真理の近くに迫っているようなことになれば幸いである。

なお、本会議のサテライトとして「International Workshop "Reconstructing the Phenomenon of Life –To Retrace the Emergence of Life–」が、翌31日に東工大において開催された。

今後の予定

◎新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」主催

- アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性
2017年9月11,12日(月・火)
グリーンピア大沼(函館)

- International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017)
2017年11月20日(月)～23日(木)
仙台国際センター

◎新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」共催

- 第16回 関東ソフトマター研究会
2017年8月22日(火)
東京農工大学小金井キャンパス

- 第11回 物性科学領域横断研究会(領域合同研究会)
2017年11月16日(木)～18日(土)
東京大学物性研究所

編集委員よりお願い

本ニュースレターでは、新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」による研究成果をできるだけ早く発信していきたいと考えております。自薦、他薦問わず重要な研究成果、あるいは関係する研究会報告などありましたら、編集委員までお寄せください。

ニュースレター編集委員 竹内一将(東京工業大学) kat@kaztake.org
 北畑裕之(千葉大学) kitahata@chiba-u.jp