

埼玉大学 テニュアトラック 第5回研究発表会

平成30年度 研究概要・成果集

■日時/ 2019年7月26日(金曜日) 14:00~17:00

■場所/ 総合研究棟1階 シアター教室





埼玉大学研究機構長
伊藤修

私は、副機構長（研究企画推進室長）の石井昭彦先生をリーダーとするテニュアトラック推進オフィスのみなさんとともに、引き続きこの制度の成果が上がるべく努めていきたいと考えておりますので、全学のご協力をよろしくお願い致します。

さて、昨年4月に8名であったテニュアトラック教員のうち、Neal Bez 准教授（平成26年1月着任、数学）、坂井建宣准教授（平成26年4月、機械）、津田佐知子助教（平成26年4月、生体制御）の3名がテニュア審査に合格し、4月から理工研准教授となりました。現在は研究機構に在籍の3名と合わせて以下の計5名の方（着任順）が本学のテニュアトラック教員として在籍されています。

- ・ Noh Sung Chul 助教（経営学）
- ・ 乙須拓洋助教（応用化学）
- ・ 豊田正嗣准教授（分子生物）
- ・ 勝田哲助教（X線・光赤外線宇宙物理）
- ・ 川村隆三助教（ライフ・ナノバイオ）

平成30年度もテニュアトラック教員のみなさんは着々と研究を進められました。その一端として、Neal Bez 准教授の日本数学会2018年JMSJ論文賞受賞、坂井准教授のTHE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS 2018 Wolfgang Knauss Young Investigator Award 受賞および日本複合材料学会第36回林賞受賞、さらに豊田准教授の研究成果が米国科学雑誌「Science」に公開されるなど、着実に成果を上げておられます。（いずれも埼玉大学HPの研究トピックスに掲載しています。）

大学の研究面での実力は、「埼玉大学といえば□□の分野で〇〇先生がいる大学だ」という評価の集積だと思います。全教員がそうした評価の担い手となるべく全力を挙げたいものです。若いテニュアトラック教員のみなさんには、その牽引役として大きな業績をどしどし発表していただきたい。

専門が違っても、お互いの研究を知ることはいかに刺激になり、それはいろいろな面で大学にとって大事なことだと思います。この点でも、今回の発表会が一つの良い機会となってくれることを望みます。その意味で、文理を問わずすべての分野、研究科・学部から多数の参加をいただき、多方面からの活発な質疑応答、議論が交わされるよう呼びかけたいと思います。どうかよろしくお願い致します。



埼玉大学のテニュアトラック制度

埼玉大学では、平成24年度にテニュアトラック制を導入することを決定し、卓越した若手研究者の育成を目指した『埼玉大学・若手研究リーダー育成プロジェクト（SUTTプロジェクト）』を立ち上げました。このプロジェクトの推進により、自立的に研究できる環境整備等を通じて、新しい研究体制の構築を目指しています。また、新領域の開拓やイノベーションの創出、教員の年代・ジェンダー・国際バランスの是正等の効果をも期待しています。

5年間のテニュアトラック教員ポストは、理工系については理工学研究科教員ポストを流用し、人文・社会系については学長裁量教員ポストを措置しています。また、国際公募・選考は実施部局が行うものの、研究企画推進室が必ず関与することとしています。採用後は、研究の自主性・独立性確保と異分野融合を目的として、テニュアトラック教員を部局から全学的な組織である研究機構に配置換して集約し、十分な研究費と研究スペースを支援するとともに実施部局と研究企画推進室からの複数のメンターを充てることとしています。

現在は、テニュアトラック制の定着及び円滑化を図るため、若手研究者情報交換の場の定期的な開催や学内普及活動を実施しています。

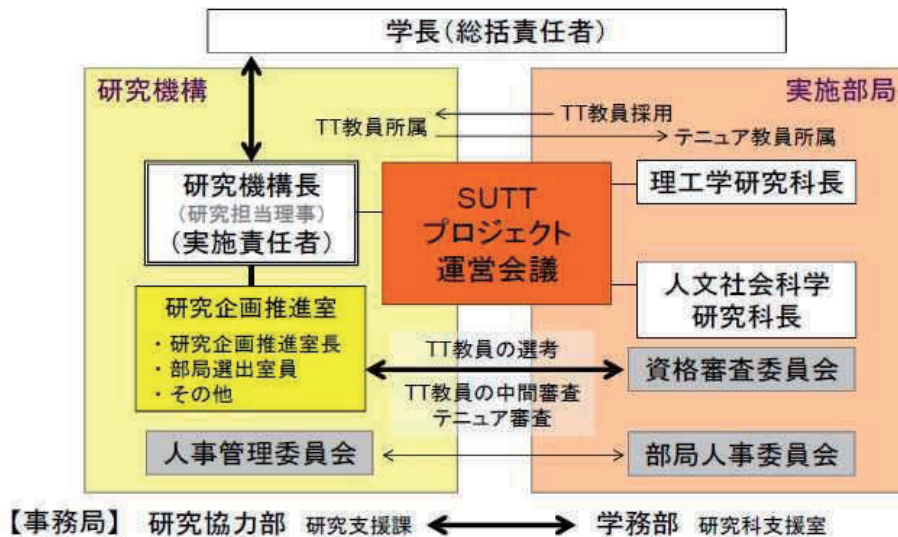
推進体制

学長のリーダーシップのもと、研究機構と実施部局（理工学研究科、人文社会科学研究科）が連携してSUTTプロジェクトを推進しています。具体的には、研究機構内にある研究企画推進室が主たる役割を担うとともに、研究機構長と各部局長で構成する『SUTTプロジェクト運営会議』において、研究機構と部局との連携を実質的なものとして運営しています。

また、事務的な体制として研究機構に対応した研究協力部研究支援課と、各部局に対応した研究科支援室が連携した体制を取っています。さらに、研究支援課内にテニュアトラック推進オフィスを設け、事務的なサポートを行うなどの支援をしています。

機関としてのテニュアトラック制の推進体制

埼玉大学・若手研究リーダー育成(SUTT)プロジェクト推進体制



卓越研究員について

卓越研究員事業は、若手研究者が、安定かつ自立して研究を推進できる環境を実現すること等を目的として文部科学省が実施している事業です。本学では、理工学研究科戦略的研究部門のライフ・ナノバイオ領域及びX線・光赤外線宇宙物理領域で、卓越研究員をテニュアトラック制により平成29年度に2名採用し、研究費の支援、メンターの配置、研究スペースの確保等の環境整備を理工学研究科と研究機構が連携して行っています。

目次

巻頭言 テニユアトラック第5回研究発表会によせて.....	1
I 平成30年度研究概要	
「炭素繊維強化ポリアミドの結晶化が曲げ特性に及ぼす影響」.....	7
坂井 建宣 理工学研究科 准教授（機械）	
「分散型クラウド労働プラットフォーム(Cloud-Crowd labor Platform)」.....	11
Sung-Chul Noh 研究機構 助教（人文社会科学研究科・経営学）	
「天の川銀河とマゼラン銀河の重力崩壊型超新星の親星質量分布」.....	15
勝田 哲 理工学研究科 助教（戦略的研究部門 X線・光赤外線宇宙物理領域） ・卓越研究員	
「細胞膜研究のための新規分光法の開発と応用」.....	19
乙須 拓洋 研究機構 助教（理工学研究科・応用化学）	
「グルタミン酸はカルシウムシグナルを介した植物の全身性防御応答を引き起こす」.....	23
豊田 正嗣 研究機構 准教授（理工学研究科・分子生物学）	
「分子が動くゲル材料 ―細胞のゆりかごとして―」.....	27
川村 隆三 理工学研究科 助教（戦略的研究部門 ライフ・ナノバイオ領域） ・卓越研究員	
「The Brascamp-Lieb inequality and related topics」.....	31
Neal Bez 理工学研究科 准教授（数学）	
「小脳神経回路の構築メカニズムの理解へ」.....	35
津田 佐知子 理工学研究科 准教授（生体制御）	
II 平成30年度テニユアトラック教員の研究成果	
Neal Bez 理工学研究科 准教授（数学）.....	41
津田 佐知子 理工学研究科 准教授（生体制御）.....	42
坂井 建宣 理工学研究科 准教授（機械）.....	43
Sung-Chul Noh 研究機構 助教（人文社会科学研究科・経営学）.....	44
乙須 拓洋 研究機構 助教（理工学研究科・応用化学）.....	45
豊田 正嗣 研究機構 准教授（理工学研究科・分子生物学）.....	46
川村 隆三 理工学研究科 助教（戦略的研究部門 ライフ・ナノバイオ領域）.....	47
勝田 哲 理工学研究科 助教（戦略的研究部門 X線・光赤外線宇宙物理領域）.....	48
III 研究発表会開催の記録	49
IV メンターからの一言	57



I

平成 30 年度 研究概要





炭素繊維強化ポリアミドの結晶化が曲げ特性に及ぼす影響

Effect of Crystallization of Carbon Fiber Reinforced Polyamide on Bending Properties

坂井 建宣 (Takenobu SAKAI)

理工学研究科・機械 准教授

Recently, carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTP) are widely used for various situations instead of carbon fiber reinforced thermosetting plastics (CFRP). Some of matrix resin of CFRTP are the crystalline polymers such as polyamide (PA), PEEK and polyimide. In this study, carbon fiber reinforced polyamide was used and investigated the effect of crystallinity of PA on the mechanical properties of CFRTP. To control the crystallinity of CFRTP, DSC analysis of CFRTP and PA was carried out, and it became possible to control the crystallinity of PA with different heat treatment time. In the results of DSC analysis, single peak of melting point was observed in the short heat-treatment time, and double peak was observed in the longer treatment time. As the results of bending tests, there was linear relationship between bending strength and heat-treatment time, however in the longer treatment time, there was nonlinear behavior in the bending modulus. As the results of DSC analysis of CFRTP, the melting point was decreased over 10 hours' treatment, therefore, bending modulus was affected by the crystal state of matrix resin.

Key words: CFRTP, Crystallinity, Crystal state, Mechanical Properties, Acoustic Emission

1. 緒言

私は本学テニユアトラック教員として、粘弾性挙動に着目して様々な研究を行ってきた。テニユアトラック期間に行った研究テーマは多岐にわたるが、現在まで行っているテーマは、

- 1) 高分子材料の粘弾性計測に関する研究
- 2) CFRP (炭素繊維強化複合材料) の破壊評価
- 3) 分子動力学シミュレーション
- 4) 生体組織の粘弾性評価

である。

本報告では、2) の一つである、CFRTP の結晶状態と破壊挙動について報告を行う。

近年、炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTP)は、炭素繊維強化熱硬化性樹脂(CFRTS)と同等な比強度、比弾性率¹⁾²⁾を有している。また熱可塑性樹脂は、熱硬化性樹脂に比べ靱性的であり、CFRTS と比べて耐衝撃性に優れている。さらに常温での保管が可能・保管期間が半永久的であり、ホットプレスを用いた成形が可能のため、成形コストの削減、生産性の向上が見込まれる³⁾⁴⁾。CFRTP は熱を加えることで母材が熔融し、強化繊維との分離がCFRTS と容易であることからリサイクル性にも優れ、廃棄処分による環境への負荷を小さくできる⁵⁾⁶⁾。

以上のような成形性の良さ、成形コスト、再成形可能などの利点から、近年多く自動車業界などに用いられてきている。さらに航空宇宙機器においても低コスト化のために CFRTS から CFRTP へ

の材料置換に向けた積極的な研究開発が進められている。現在においては、既に一部の航空機においては水平尾翼や方向舵、昇降舵、フロアーパネルなどに CFRTP 部材が使用されている⁷⁾。

現在多くの CFRTP は、成形性の良さからポリプロピレン (PP) が、また耐熱性が優れた PEEK 樹脂などが使われている。これらの母材樹脂は結晶性を有しているものが多く、結晶状態によって機械的特性が大きく変化することが知られている⁷⁾が、これまでに母材の結晶状態に着目した CFRTP の研究はほとんど行われていないのが現状である。特に結晶化度を任意に変化させることにより、機械的特性を制御することが可能になることが想定される。そこで、本研究では母材樹脂にポリアミド 6 (PA6) を用いた CFRTP に対して結晶化処理を行い、結晶化度と機械的特性との関係性を明らかにすることを目的とする。

2. 供試材料および実験方法

2. 1 供試材料

供試材料は、株式会社丸八よりご提供いただいた、PA6 を母材とする MCP1223 を使用した。積層構成は[(0/90)s]2s である。曲げ試験片の寸法は 120 × 10 × 2 mm の短冊形とし、すべての試料に 80 °C 24 時間の乾燥処理を施した後に、結晶化のために結晶化温度である 185 °C において、0, 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30 時間の熱処理を施した。結晶化温度等については DSC 測定より得た。

2. 2 DSC 測定

PA6 および CFRTP の熱的特性に把握には、島津製作所(株)製島津示差走査熱量計 DSC-60 plus を用いて行った。試料容器にはアルミニウムクランプセルを用い、基準物質はアルミナ粉末 7mg とした。試験温度は 40°C から 250°C まで加熱、250°C で 5min 保持した後、再び 40°C まで冷却した。昇温冷却速度は 10°C/min で行った。

2. 3 結晶化度の算出

結晶化度の算出を行うために、PA6 樹脂単体の DSC 測定結果から得られる融解熱を用いて、以下の式に従い算出した。

$$\chi = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_c} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここで、 χ : 結晶化度(%), ΔH_m : 融解熱, ΔH_c : PA6 の完全結晶の融解熱 (230 [J/g]) とする。

2. 4 静的曲げ試験

静的 3 点曲げ試験は JIS K7155 に準拠して行った。試験は MX-500N (株式会社イマダ) を用い、クロスヘッドスピード 10 mm/min, スパン長さ 80mm で行った。

3. PA および CFRTP の結晶化

熱処理を施していない PA6 の DSC 測定結果を Fig. 1 に示す。横軸は試験時間、左の縦軸に熱量および右の縦軸に温度を示す。これより、融点および結晶化温度が 225 °C および 185 °C であった。この結果より、熱処理温度を 185 °C と決定した。また、融解に伴う吸熱ピーク面積を融解熱として算出し、結晶化度の算出に用いた。

Fig. 2 に各種熱処理を施した PA6 の DSC 測定結果を示す。縦軸はそれぞれ縦軸方向に平行移動させ、並べて表示しているため、縦軸の値は参考値とする。熱処理を施していない樹脂単体の DSC 曲線は、215 °C にのみピークを有しており、結晶構造は単一構造を示していることが確認できた。ま

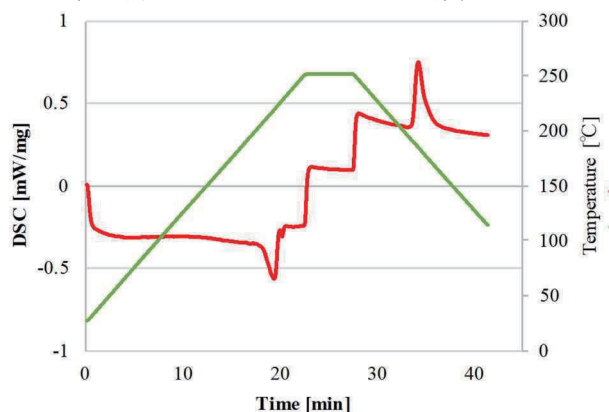


Fig. 1 DSC results of PA6 without heat treatment for crystallization

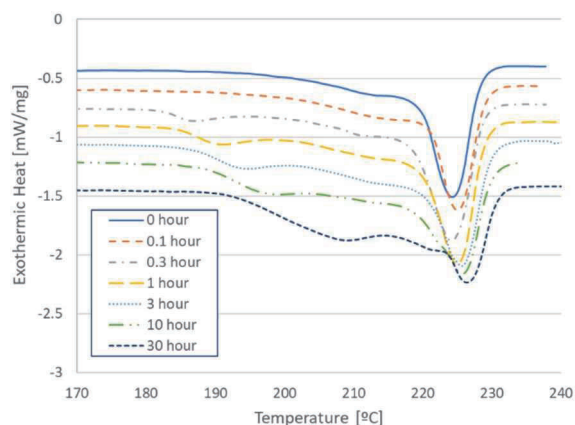


Fig. 2 DSC results of PA6 with each heat treatment conditions for crystallization

た、0.1 時間の熱処理においても同様の傾向が見られたが、0.3 時間以上の熱処理において、185 °C 付近にわずかなピークが見られるようになった。1 時間以上の熱処理を施すことで、低温領域における吸熱ピークが大きくなること、またそのピーク温度が熱処理の増加に伴い上昇している傾向が見られた。それに伴い、高温領域のピークが小さくなっていることも確認された。さらに融点も熱処理時間の増加に伴い上昇する傾向が見られた。

これらの 2 つの吸熱ピークは、高温領域のピークが一次結晶、低温領域の結晶が二次結晶であることが考えられる。熱処理の初期において一次結晶が発生し、その後一次結晶の間隙を埋めるように二次結晶が生成される。その後一次結晶の構造が少しずつ崩壊しつつ二次結晶が生成され、まるで一次結晶から二次結晶に構造が変化することが示唆される。また残った一次結晶の構造がより密になることで融点が上昇したと考えられる。

次に、得られた融解熱から結晶化度を算出し、Fig. 3 に示す。縦軸に結晶化度、横軸に熱処理時間の対数を示す。これより、熱処理時間の増加とともに結晶化度が増加し、3 時間以上の熱処理ではほとんど結晶化度が変化しないことが明らかとなった。

次に、CFRTP の DSC 測定結果を Fig. 4 に示す。CFRTP の結果については、測定対象にどの程度炭素繊維が含まれているかを定量的に評価できないため、結晶化度を算出することができない。得られた結果より、PA6 単体の結果と融解に伴う吸熱ピークの形状が明らかに異なることが明らかとなった。これは、PA6 の結晶が発生・成長するさいに、周りに存在する炭素繊維の影響を受け、結晶の成長方法が異なっていることが想定される。

CFRTP の DSC 測定結果は、樹脂単体の測定結果とは明らかに異なる挙動を示していることが確認

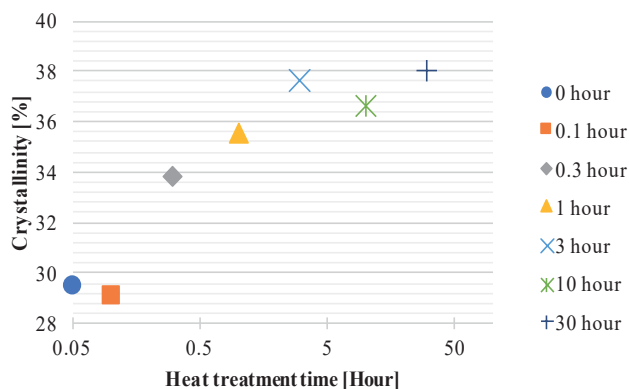


Fig. 3 Relationship between heat treatment time and crystallinity of PA6

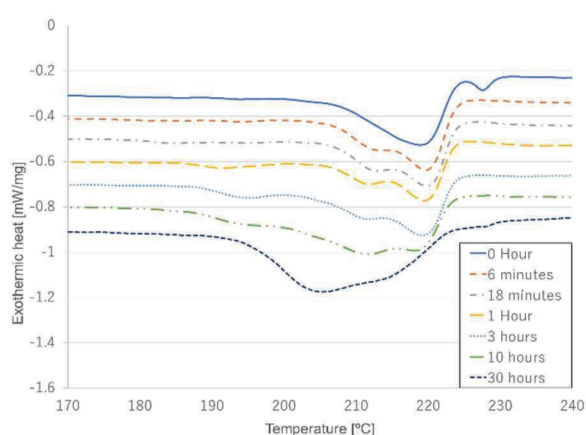


Fig. 4 DSC results of CFRTP with each heat treatment conditions for crystallization

できる。特に樹脂単体で見られたものとは異なるわずかなピーク (210° C 付近) も確認されている。また、樹脂単体と同じ構造とみられる二次結晶は、30 時間の熱処理剤において顕著に見られたが、3 時間以上の熱処理においてのみ発生しているように見られる。特に 10 時間以上においては、一次結晶と思われるピークより、二次結晶と思われるピークの方が融解に必要なエネルギーが大きくなっていることから、融点が大幅に低下する結果となった。これは 10 時間以上の熱処理によって、主な結晶構造が一次結晶ではなく二次結晶に変化したことが示唆される。

4. 結晶化度が機械的特性に及ぼす影響

本研究では結晶化度が機械的特性に及ぼす影響を把握するため、PA6 単体における結晶化度をパラメータとすることとした。様々な熱処理を施した試験片に対して、曲げ試験を行い、曲げ強度および曲げ弾性率を用いて結晶化度が機械的特性に及ぼす影響の評価を行った。曲げ強度のグラフを Fig. 5 に、曲げ弾性率のグラフを Fig.

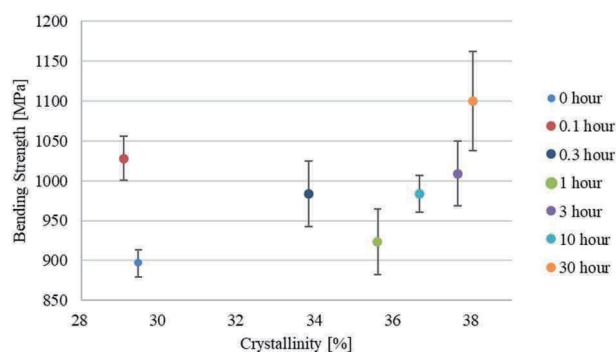


Fig. 5 Bending strength of CFRTP with heat treatment for crystallinity

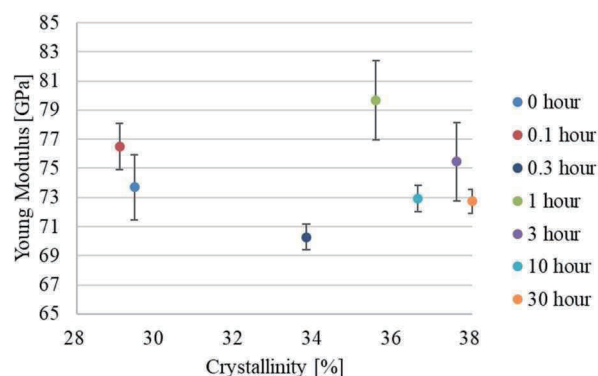


Fig. 6 Young's Modulus of CFRTP with heat treatment for crystallinity

6 に示す。

Fig. 5 より、曲げ強度は結晶化度の増加に伴い、0.1 および 0.3 時間の熱処理を施した材料を除いて、結晶化度の増加とともに増加することが明らかとなった。また、Fig. 6 より曲げ弾性率は 0.3 時間までの熱処理条件において、結晶化度の増加とともに減少する傾向が見られ、1 時間の熱処理において急激に増加、またその後減少している傾向が見られた。

ここで、DSC 測定結果を確認すると、0.1 時間以上において融点より 10°C 低い温度において 2 次結晶の融解が、また 1 時間以上において 195°C 付近において 3 次結晶の融解挙動が見られた。これらの結晶の存在が曲げ強度・曲げ弾性率に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

以上より、CFRTP の曲げ強度は結晶化度影響を受けて向上するが、曲げ弾性率は結晶構造の影響を大きく受けることが明らかとなった。また結晶化処理を施すことによって、機械的特性を制御することが可能であることが明らかとなった。

5. 結言

本研究では炭素繊維強化ポリアミド 6 の母材樹

脂を結晶化させることで、母材樹脂の結晶化が機械的特性に及ぼす影響を評価することで以下の結論を得た。

1. 熱処理を行うことで樹脂単体の結晶化度を制御できた。
2. DSC 測定結果より、樹脂単体と CFRTP では結晶状態が異なることが明らかとなった。
3. 曲げ強度および曲げ弾性率は結晶化度との関係だけでなく結晶状態の影響も大きく受けることが明らかとなった。

6. 昨年度に行ったその他の研究の概要

昨年度に行ったほかの4テーマの概要を以下に示す。

1) 高分子材料の粘弾性計測に関する研究

本テーマでは、ポリプロピレンの非線形性を考慮し、静的曲げ試験結果から長期曲げクリープ試験結果を予測可能としている。

2) CFRP (炭素繊維強化複合材料) の破壊評価

熱可塑性樹脂を母材とした CFRTP の結晶状態と曲げ特性の関係を明らかにしている。

3) 分子動力学シミュレーション

PE, PVC, PP を用いて応力緩和解析および引張解析を行い、側鎖の違いが応力緩和挙動に及ぼす影響を明らかにした。側鎖の分子量が非結合分子間結合力に大きく影響を及ぼすこと、また側鎖分子の大きさが大きいほど分子鎖が動きにくくなることを明らかにした。

4) 生体組織の粘弾性評価

ヘアレスマウスの背部皮膚組織における創傷および治癒過程における動的粘弾性特性の変化を、統計的に明らかにした。また変形性膝関節症を模擬するために、ブタの膝軟骨に対してコラゲナーゼ1型を用いた変性を施し、変性させた軟骨に対して動的粘弾性試験を行った。その結果、変性に伴い $\tan \delta$ の値が上昇し、より弾性的になることが示唆された。

7. 今後の研究について

今後の研究は、以下の3つのテーマに絞って行っていく。

1. 複合材料の損傷蓄積挙動の把握

これまでの研究において得られた CFRP の破壊音を機械学習を用いて分類を行うことで、得られた破壊音から損傷の種類を分別することを行う。

2. 分子動力学シミュレーション

引き続き、粘弾性特性と分子の動きの関連性を明らかにするとともに、原子間力顕微鏡やナノイ

ンデンテーション試験の結果と合わせていくことにより、実験と解析の整合性をとることを行っていく。特に解析速度が研究のネックになるので、今年度からはクラウド計算サーバーの活用や解析プログラムの変更等を行う。

3. 粘弾性特性評価 (高分子・生体)

高分子材料においては、鉛蓄電池のケースの劣化を予測するため、劣化と粘弾性挙動の関係を明らかにすることで、寿命測定をより正確に行えるようにすることを目標とする。

また、生体材料については、関節軟骨の劣化と粘弾性、特に粘弾性分布計測などを予定している。これにより劣化しやすい箇所が明らかになれば、治療の指針になると思われる。また、褥瘡モデルを用いた変位場計測を行い、FEM を用いた逆解析を行うことで、褥瘡内部の応力分布計測を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H04897 の助成を受けたものである。また、埼玉大学 蔭山健介 教授には、研究全般の遂行にあたって多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

1. Tohgo, K., Hirako, Y., Ishii, H., and Sano, K., Mode I interlaminar fracture toughness in carbon fiber reinforced thermoplastic laminate, *Transactions of JSME, Series A*, 61, pp.1273-1279 (1995).
2. J. Takahashi, K. Uzawa and T. Matsuo, Strategies and Technological Challenges for Realizing Lightweight Mass Production Automobile by using CFRTP, *Proceedings of JISSE12*, PL-3 (2011)
3. Silverman, E.M., Forbes, W.C., Cost analysis of thermoplastic composites processing methods for spacecraft structures, *SAMPE Journal*, 26, pp.9-15 (1980)
4. Ishikawa, T., Noguchi, Y. and Matsushima, M., Processing technique and high fracture toughness of carbon/thermoplastic composite, *Journal Society for Composite Materials*, 13, pp. 63-71 (1987).
5. Wanders, M. and Küsters, K., Development of hybrid structures based on thermoplastic composites, *Proceedings of 2nd International Conference & Exhibition on Thermoplastic Composites*, B6 (2014),
6. Yamane, M., Carbon fiber Reinforced Thermoplastic Technology — Material ・ Molding ・ Recycle — , *Science & Technology Co., Ltd.* (2015) (in Japanese).
7. Sakai, T., Ueno, S., Yamada, K. and Somiya, S., Creep Analysis of Polyacetal with Effect of Crystal State, *Jikken Rikigaku*, 9-4, pp.388-394 (2009)

分散型クラウド労働プラットフォーム(Cloud-Crowd labor Platform)

事例調査

研究機構 助教 (大学院人文社会科学研究科)

Sung-Chul Noh

第4次産業革命の定義と実態に関しては今なお議論がまとまらないが、その核心では‘データ’があるということに異見はない。データの生成、加工また管理は革新、成長、価値創出の中心になっており、もはや企業の競争力を左右する資源として機能している。特に、AIは多様な産業にわたってキーワードとなり、その土台になるデータ、またそれをめぐる新たな形態の労働は国家競争力を決定する資源として認識されている。(Li, 2018)

この背景で、本事例研究は東アジアの制度的な環境の分散型クラウド労働モデルがプラットフォームの運営者によって、どのように戦略的に使用されるのかを調べて、それが産業または個別労働者に渡る影響を探る。特に、既存の研究ではプラットフォーム労働者の仕事経験に焦点を合わせているが、この研究は差別化を図ってプラットフォームの運営者の動機と管理戦略の進化に焦点を合わせて分析を行う。このため、この研究では最近韓国でプラット労働モデルとして業界で革新を行われたと評価をされた人的ネットワーク管理スタートアップ A 社の代表と開発者たちを 2013 年からインタビューした資料を使っている。事例分析結果は第4次産業革命の基盤技術の一つであるディップラーニングを土台としてサービスと労働の関係に関するいくつかの含意を出す。

第1に、大体のサービスがマージナルコストを減らすため AI を利用する自動化を追求しているが、人の労働がくれる信頼性が象徴的な資源として再び評価されているということである。本来 AI のみでサービスを提供すれば完全なサービスを提供できると考えられている中で、人の労働がサービスの質を低下させる要因と考え、価値創出過程で最大に排除しようとする自動化の流れの中で現れた現象で、とても興味深い。Linked In のような求人求職ネットワークプラットフォームよりオフラインで名刺交換で関係を結ぶことを好む韓国、日本を含む東アジアの中でこの現象が目立つのは文化的な差を反映していると言える。例えば、日本の名刺管理アプリを提供しているサンサン (SANSAN) も A 社と同じようにクラウドソーシングと OCR 技術を結び付けて名刺をデジタル化するサービスを提供しているが、手作業入力はプレミアムサー

ビスで別途課金している。

第2に、労働の購買者と供給者の間で摩擦のない労働市場 (A frictionless labor market) プラットフォームを提供するだけで市場介入は最小化する (Brahman, 2013) というクラウドソーシングの理想とは違って、プラットフォームの運営と拡張のためには状況によって進化する労働市場管理/コントロールメカニズムが必要であることを確認した。最初に A 社は別途の人事管理または業務配置のアルゴリズムなしでサーバーに入る仕事を先に接続したタイピストが持っている処理する単純な先着順マーチング方法を使っていた。しかし、名刺入力の量とスピードだけでなく、クオリティが重要になって、結果コントロールをはじめたが、結果コントロールの費用を耐えられないほどプラットフォームが大きくなって良質のクラウド労働者 (wise-crowds) (Saxton et al., 2013; 32) だけを残すための入力コントロールを実施した。これはプラットフォーム会社が掛ける組織のアイデンティティみたいに、労働者を効果的に仲介する市場からプラットフォームの拡張によって必然的に市場のコントロールするものになる過程を見せる。A 社の事例だけでなく、この何年間ウーバーが無理な過程コントロール方法で使用者性をめぐる法的紛争に巻き込まれた事を考えると、今後研究を通じてクラウド労働市場をコントロールする方法とその含意に関して継続的な研究が必要である。

最後に、A 社の事例は AI とプラットフォーム労働の関係に関してもいくつかの含意を出せる。プラットフォーム企業が利潤を出すためには使用者とプラットフォーム労働者の生態系を拡張することが大事であることは皆が知っている事実である (Scholz, 2016)。特に A 社みたいな比較的小さい規模のローカルクラウド労働プラットフォームに関してはクラウド労働者のプールを安定的に維持するのは二つの点で重要である。第1に、使用者には迅速で正確なサービスを提供して信頼を確保し、競争プラットフォームから競争優位を得るため必要である。第2に、クラウド労働者たちの労働を通じてもっと大きな付加価値を創出ことができる精製された多量の取引 (transactional) データを確保することが出来ることである。良質のデータを入力 - 維持 - 補修する点でクラウド労働者はプラットフォームの電算インフラ (computational infrastructure) (Prassl, 2018; 8) または AI の人工知能 (Artificial Intelligence) に見える。(Economist, 2006)。この脈略でプラットフォームの成長が持ってくる超過利潤をクラウド労働者と共有しようとする最近の動きは重視すべきである。韓国のカープール先頭走者であるプラスは先月自社株 10% をカープールに参加する作業者とシェアすると発表した。プラットフォームの価値を投資家や株主だけでなく、直接の利害関係者であるクラウド労働者にも配分するこの実

験がサービスの初期段階での作業者を集めるための手段にとどまるか、それとも協同組合に近いクラウド労働モデルにつながるのかはまだ判断できない。しかし、少なくともクラウド労働の価値に関する社会的な公論化のきっかけになったという点で意味が大きいといえる。

参考文献

- Brabham, D. (2013). *Crowdsourcing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Cardinal, Laura B., Sim B. Sitkin, and Chris P. Long. (2004). "Balancing and Rebalancing in the Creation and Evolution of Organizational Control." *Organization Science* 15, no. 4: 411-431.
- Economist (2006). Artificial intelligence. *Software: For many tasks, humans outperform computers. So why not farm out computing tasks to people, not machines?*. Jun 8th, 2008. Retrieved from <https://www.economist.com/technology-quarterly/2006/06/08/artificial-artificial-intelligence>
- Li, Yuan (2018). How Cheap labor drives China's A.I. Ambitions. *Ny Times*, Nov. 25, 2018
- Liu, Li, Mark Borman, and Jun Gao. (2014) "Delivering Complex Engineering Projects: Reexamining Organizational Control Theory." *International Journal of Project Management* 32, no. 5: 791-802. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.10.006>.
- PWC (2016). Organize your future with robotic process automation
- Prassl, J. (2018). *Humans as a Service: The Promise and Perils of Work in the Gig Economy*. Oxford University Press.
- Rifkin J. (2014). *The Internet of things, the collaborative commons, and the eclipse of capitalism*, Basingstoke, Palgrave Macmillan.
- Rosenblat A. (2018). *Uberland: How Algorithms Are Rewriting the Rules of Work*. Univ of California Pr
- Saxton, G. D., Oh, O., & Kishore, R. (2013). Rules of crowdsourcing: Models, issues, and systems of control. *Information Systems Management*, 30(1), 2-20.
- Scholz, T. (2016). *Uberworked and Underpaid: How Workers Are Disrupting the Digital Economy* (1 edition). Cambridge, UK ; Malden, MA: Polity.

Srnicek, N. (2016). *Platform Capitalism*. Cambridge, UK ; Malden, MA : Polity.

天の川銀河とマゼラン銀河の重力崩壊型超新星の親星質量分布

Progenitor Mass Distribution of Core-Collapse Supernova Remnants in Our Galaxy and Magellanic Clouds

勝田 哲 (Satoru KATSUDA)

理工学研究科 助教 (戦略的研究部門 X線・光赤外線宇宙物理領域)

We investigate a progenitor mass distribution of core-collapse supernova remnants in our Galaxy and Large and Small Magellanic Clouds for the first time. We realize that previous mass estimates are subject to large systematic uncertainties because most of the relative abundances (X/Si) are not good probes for the progenitor masses. Only Fe/Si is sensitive to the progenitor mass. Therefore, we revised the progenitor masses of 34 core-collapse supernova remnants by comparing the Fe/Si ratios with the newest nucleosynthesis model, leading to a progenitor mass distribution of $f(M < 15 M_{\odot}) : f(15 M_{\odot} < M < 22.5 M_{\odot}) : f(M > 22.5 M_{\odot}) = 0.47 : 0.32 : 0.21$. This is consistent with the standard Salpeter initial mass function. Our result does not require a high-mass cutoff in exploding stars, conflicting with some recent observational and theoretical works.

1. はじめに

全ての重い恒星(太陽の8倍以上重い恒星)は進化の最終段階で重力崩壊する。しかしその後のシナリオは、華々しく超新星爆発を引き起こすか、静かに消滅するか、二手に分かれると信じられている。大部分は超新星爆発し、その結果、星の外層部分が周囲に散逸し花火のような超新星残骸を形成し、コア部分には中性子星かブラックホールになる。それ以外の一部の重い星は爆発せず、ブラックホールに潰れ込むと考えられている。

爆発の成否を左右する最重要パラメータの一つが爆発元の星「親星」の質量である。そのため、どの質量範囲の星が爆発に至るのかを特定することが、現代宇宙物理学の最重要課題の一つとなっている。理論的には、爆発に成功する最大質量は40太陽質量(M_{\odot})程度とされたこともあったが[1]、その後の詳細な多次元シミュレーションでは確かな結論が得られず、混沌としている[e.g., 2; 3; 4]。

観測的には、爆発しない大質量星の存在が様々な形で示唆されてきた。例えば、背景超

新星ニュートリノ量を説明するには、不発超新星が超新星と同じ頻度存在することを暗示している[5]。同様に、大質量星の形成率から予想される重力崩壊発生頻度は、超新星発生頻度の2倍である[6]。より直接的な観測では、近傍銀河の超新星の爆発前の画像から爆発前の親星を見出し、その光度と色から親星質量を推定する方法がある。現在30ほどのIIP型超新星について親星が同定されているが、親星として本来存在するはずの17—25 M_{\odot} の赤色超巨星が見つかっておらず、これが「赤色超巨星問題」として天文学者の間では広く認知されている[7]。この質量範囲の赤色超巨星は、爆発せずにブラックホールに潰れたのかもしれない。実際、17—25 M_{\odot} の赤色超巨星の後にブラックホールが残るとすれば、その質量は5—8 M_{\odot} と期待され、これがちょうど観測されたブラックホール質量を説明できるという指摘もある[8]。また、いくつかの近傍銀河の超新星残骸に対して、その周辺の恒星の「色-光度ダイアグラム」から残骸周辺の星形成史を紐解き、そこから親星

の年齢(→質量)を推定する手法もある[e.g., 9; 10]。この手法では、親星質量分布($dN/dM \propto M^\alpha$)の冪 α が標準的なサルピーター初期質量分布関数(IMF; 11)よりも有意に小さい(=重い星が少ない)ことが示された。つまり、爆発した最重量級の親星($M > 17 M_\odot$)の割合が期待より少なく、その分が不発超新星となった可能性がある。

このように書くと、爆発する親星の質量に上限値があることは観測的には既に確立しているように思われるかもしれないが、実は観測毎に様々な不定性が付随しており、それを考慮すればそれほど確実ではない。例えば、重力崩壊直前の親星の激しいガス放出で生成された星周塵による減光で、親星質量を系統的に小さく見誤ってしまう可能性がある[e.g., 12]。他方、超新星残骸周辺の恒星解析に関しては、最近の解析結果はサルピーターIMFと矛盾しない(つまり質量上限値を必要としない)という結果が相次いで報告されている[e.g., 13; 14]。

この状況を踏まえ、本研究では、天の川銀河・大小マゼラン銀河に存在する超新星残骸の親星質量分布を、新たに元素組成比の切り口から導出する。なお、この結果はすでに査読論文[15]として公表済みである。より詳細な情報はそちらを参照されたい。

2. 超新星残骸中の爆発噴出物の元素組成比に基づいた親星質量推定

2.1 過去の測定結果の系統的調査

天の川銀河およびマゼラン銀河中の超新星残骸は最近傍に位置するため、他の銀河の超新星(残骸)には不可能な詳細解析が可能であ

る。その好例が、爆発噴出物の元素組成比をきちんと計測できる点である。これまで、X線、紫外線、可視光などの観測から、超新星残骸の元素組成比が数多く測られ、異なる質量を持つ親星の元素合成モデルと比較することで、親星質量が推定されてきた。ただし、これまでのところは天体毎の各論にとどまり、統計的な議論は行われてこなかった。

そこで我々は、多数の文献に記載されている超新星残骸の親星質量をまとめることにした。一般に、親星質量の推定誤差は大きいため、次の3つの質量範囲に区分した：(A) $M < 15 M_\odot$, (B) $15 M_\odot < M < 22.5 M_\odot$, (C) $M > 22.5 M_\odot$ 。結果を表1の3列目に示す。親星数の割合は、 $f_A : f_B : f_C = 0.27^{+0.03}_{-0.17} : 0.27^{+0.20}_{-0.17} : 0.46^{+0.13}_{-0.07}$ と得られた。これは、C群すなわち最重量級の星がより軽い星よりも多いという驚くべき結果である。比較のため、標準的なサルピーターIMF[11]では、 $0.65 : 0.20 : 0.15$ 、IIP型超新星の親星のIMF[7]では、 $0.91 : 0.09 : 0.0$ である。これらは今回見積もった親星質量分布と明らかに異なる。

2.2 過去の結果の見直し

前節の結果を鵜呑みにできなかった我々は、様々な視点で結果を検証した。その結果、元素組成比に基づく親星質量推定が、多く場合に適切でなかったことに気が付いた。従来の親星質量推定においては、元素組成比を元素合成モデルと比較する際、測定した全ての元素組成比を同じ重みで評価していた。ところが、元素合成モデル[16]を精査したところ、Fe/Si以外は殆ど親星質量に敏感で無いこと

Table 1
Abundance-based Progenitor Masses of Core-collapse SNRs in Our Galaxy and Magellanic Clouds

SNR	Age (years)	M_{ZAMS} (M_{\odot})	(Fe/Si)/(Fe/Si) $_{\odot}$	Revised M_{COcore} (M_{\odot})	Revised M_{ZAMS} (M_{\odot}) ^F
*** Galactic SNRs ***					
Cassiopeia A	~340 (1)	15–20 (2)	1.0 ± 0.1 (3)	<3	<15
Kes 73	~750 (4)	20–30 (5)	$0.8^{+1.0}_{-0.3}$ (5)	<3	<15 ^{m1}
G350.1-0.3	~900 (6)	15–25 (7)	0.35 ± 0.05 (7)	3–6	15–22.5 ^{m1}
RX J1713.7-3946	~1600 (8)	≤15 (9)	<0.03 (9)	>6	>22.5
MSH 15-52	~1700 (10)	N.A.	0.78 ± 0.09 (11)	<3	<15
G292.2-0.5	~1900 (12)	25–30 (13)	$0.59^{+0.62}_{-0.48}$ (13)	<3	<15 ^{m1,m2}
RCW103	~2000 (14)	18–20 (15)	$1.33^{+0.17}_{-0.14}$ (15)	<3	<15
G349.7+0.2	~2800 (16)	35–40 (7)	$0.56^{+0.09}_{-0.10}$ (7)	<3	<15 ^{m1}
G292.0+1.8	~3000 (17)	30–35 (18)	0.55 ± 0.24 (18)	<3	<15 ^{m1,m2}
Puppis A	~4500	15–25 (19)	0.63 ± 0.05 (20)	<3	<15
Kes 79	4400–6700 (21)	30–40 (22)	$0.35^{+0.04}_{-0.05}$ (22)	3–6	15–22.5 ^{m1}
Cygnus Loop	~10000 (23)	≤15 (24)	0.7 ± 0.1 (25)	<3	<15
Sgr A East	~10000 (26)	13–20 (26,27)	$0.26^{+0.12}_{-0.09}$ (28)	3–6	15–22.5 ^{m1,m2}
MSH 15-56	~11000 (29)	N.A.	0.37 ± 0.11 (30)	3–6	15–22.5 ^{m1}
IC443	3000–30000 (31,32)	~25 (33)	0.25 ± 0.10 (34)	3–6	15–22.5 ^{m1,m2}
G290.1-0.8	10000–20000 (35)	20–25 (36)	0.11 ± 0.06 (36)	>6	>22.5
3C391	~19000 (37)	~15 (38)	<0.06 (38)	>6	>22.5
W44	20000 (39)	8–15 (40)	0.03 ± 0.01 (41)	>6	>22.5 ^{m2}
G284.3-1.8	~21000 (42)	>25 (43)	$0.59^{+0.59}_{-0.36}$ (43)	<3	<15 ^{m1,m2}
G156.2+5.7	20000–30000 (44)	≤15 (45)	0.37 ± 0.1 (45,46)	3–6	15–22.5 ^{m1}
3C400.2	~100000 (47)	N.A.	$5.3^{+1.1}_{-2.1}$ (48)	<3	<15
3C396	~3000 (49)	13–15 (49)	N.A.	N.A.	N.A.
G15.9+0.2	2000–6000 (50)	20–25 (50)	N.A.	N.A.	N.A.
Kes 17	2000–40000 (51)	25–30 (52)	N.A.	N.A.	N.A.
CTB109	~14000 (53)	30–40 (54)	N.A.	N.A.	N.A.
G116.9+0.2 (CTB1)	~16000 (55)	13–15 (56)	N.A.	N.A.	N.A.
G296.1-0.5	~28000 (57)	25–30 (57)	N.A.	N.A.	N.A.
W51C	~30000 (58)	≥20 (59)	N.A.	N.A.	N.A.
*** LMC SNRs ***					
N132D	~2500 (60)	~50 (61)	$0.48^{+0.14}_{-0.11}$ (62)	<3	<15 ^{m1}
N63A	2000–5000 (63)	N.A.	0.87 ± 0.13 (64)	<3	<15
N23	~4000 (65)	N.A.	0.38 ± 0.13 (66)	3–6	15–22.5 ^{m1}
N49	~4800 (67)	N.A.	0.18 ± 0.01 (66)	>6	>22.5 ^{m2}
N49B	~10000 (63)	>25 (68,69)	1.03 ± 0.07 (66)	<3	<15
B0453-68.5	12000–15000 (70)	N.A.	$0.42^{+0.17}_{-0.16}$ (64)	3–6	15–22.5 ^{m1,m2}
30 Dor C	4000–20000 (71)	N.A.	$0.08^{+0.20}_{-0.06}$ (71)	>6	>22.5 ^{m2}
Honeycomb	N.A.	N.A.	$0.17^{+0.13}_{-0.10}$ (64)	>6	>22.5 ^{m2}
*** SMC SNRs ***					
1E0102.2-7219	~2050 (72)	25–35 (73)	$0.63^{+0.26}_{-0.20}$ (74)	<3	<15 ^{m1}
IKT2	N.A.	N.A.	0.32 ± 0.24 (75)	3–6	15–22.5 ^{m1,m2}
DEM S32	N.A.	N.A.	0.28 ± 0.26 (75)	3–6	15–22.5 ^{m1,m2}
IKT6	~14000 (76)	13–15 (77)	$0.26^{+0.16}_{-0.07}$ (78)	3–6	15–22.5 ^{m1,m2}
IKT23	~18000 (79)	~18 (79)	$0.48^{+0.14}_{-0.25}$ (78)	<3	<15 ^{m1,m2}

注) 右端列の数値肩の m1, m2 はそれぞれ $M = 15 M_{\odot}$ 、 $M = 22.5 M_{\odot}$ に対応する。第2、3、4列のカッコ内の番号は参考文献を示す。[15]より転載。

が判明したのである。

そこで、Fe/Si のみに着目し、全ての超新星残骸の親星質量を推定し直した。結果を表1、右端列に示す。親星の質量分布は、 $f_A : f_B : f_C = 0.47^{+0.35}_{-0.24} : 0.32 \pm 0.32 : 0.21^{+0.26}_{-0.12}$ と大きく変化し、サルピーターIMF と矛盾しない。なお、表1、5列目に示した大質量星の CO コア質量は、Fe/Si 比から直接的に求められる物理量である。表1の親星質量は、CO コア質量を基に、単独星を仮定して推定した。

年老いた超新星残骸はとりわけ周辺の星間ガスに汚染されている可能性が高いため、若い超新星残骸(年齢 < 5000 年)だけに限って、親星割合を計算した。その結果、 $f_A : f_B : f_C = 0.69^{+0.19}_{-0.38} : 0.19^{+0.50}_{-0.19} : 0.12^{+0.12}_{-0.06}$ となり、誤差は大きいものの、さらにサルピーターIMF に近づく傾向があった。

3. 考察

本研究で提案した Fe/Si 比に基づく親星質量推定法と、従来の全ての元素組成比を等価

に扱う方法では、結果が大きく異なる。両者に系統的なズレも見られず、従来法では、本質的に重要でない元素組成比に引っ張られ、全く当てにならない結果になったのであろう。

ただし、今回の方法にも様々な系統誤差が付随することにも注意が必要である。具体的には、観測データに伴う誤差として(1)衝撃波加熱されていない爆発噴出物を考慮していない、(2)星間ガスの混入が完璧には取り除けていない、(3)Ia型超新星の寄与などが考えられる。他方、理論モデルにも(1)プラズマ放射モデルの不定性、(2)爆発時に中性子星と爆発噴出物を分ける mass cut の位置、(3)爆発エネルギーなどに不定性が残っている。

さらに別の不定性として、親星が連星系であった場合の取り扱いが非常に重要である。本研究では親星が単独星であることを仮定したが、実際には大質量星の7割以上が連星系であると考えられている[17]。連星系の場合、Fe/Si比に基づく親星質量は、実際より重い恐れがある[18]。連星系の効果を慎重に考慮することは今後の重要課題である。

4. まとめ

我々の銀河および隣の銀河であるマゼラン星雲内に存在する重力崩壊型超新星残骸の親星の質量分布を初めて導出した。得られた親星質量分布は、標準的なサルピーターIMFと一致した。これは、大質量星は全て超新星爆発を起こしている可能性を示唆しており、近年注目されている仮説「質量17—25 M_⊙の恒星は爆発せずにブラックホールに潰れ込む」と食い違っている。ただし今回の結果は不定性が大きく、今後、次期X線天文衛星「XRISM」

[19]なども用い、更に慎重に検討を重ねる必要がある。なお、親星質量推定において、全ての元素組成比のバランスを取るのではなくSi/Fe比のみに注目する必要性を指摘した点も、本研究で強調したい成果である。

謝辞

共同研究者の滝脇知也氏、富永望氏、守屋堯氏、中村航氏に深く感謝する。また、埼玉大学の田代信教授、寺田幸功准教授にはメンターとして多岐にわたりご助言いただいた。ここに記して感謝を示す。

参考文献

- [1] Heger, A., et al. 2003, ApJ, 591, 288
- [2] Kotake, K., et al. 2012, PTEP, 2012, 01A301
- [3] Janka, H.-T., et al. 2016, ARNPS, 66, 341
- [4] Burrows, A., et al. 2018, SSRv, 214, 33
- [5] Lien, A., et al. 2010, PhRvD, 81, 083001
- [6] Horiuchi, S., et al. 2011, ApJ, 738, 154
- [7] Smartt, S.J., et al. 2009, MNRAS, 395, 1409
- [8] Kochanek, C.S., 2014, ApJ, 785, 28
- [9] Badenes, C., et al. 2009, ApJ, 700, 727
- [10] Diaz-Rodriguez, M., et al. 2018, ApJ, 861, 92
- [11] Salpeter, E.E. 1955, ApJ, 121, 161
- [12] Walmswell, J.J. & Eldridge, J.J. 2012, MNRAS, 419, 2054
- [13] Williams, B.F., et al. 2018, ApJ, 860, 39
- [14] Auchettl, K., et al. 2019, ApJ, 871, 64
- [15] Katsuda, S., et al. 2018, ApJ, 863, 127
- [16] Sukhbold, T., et al. 2016, ApJ, 821, 38
- [17] Sana, et al. 2012, Science, 337, 6093
- [18] Cantiello, M., et al. 2007, A&A, 465, L29
- [19] Tashiro, M., et al. 2018, Proc. SPIE, 10699, 1069922

Development and application of novel fluorescence correlation spectroscopy for studying biomembranes

乙須拓洋 Takuhiro OTOSU

研究機構 助教（理工学研究科・応用化学）

Abstract: Biological membrane is highly heterogeneous, and the heterogeneity of the membrane gives unique biological functions on it. Therefore, it is crucial to analyze the conformational dynamics and the diffusion properties of multiple membrane constituents at the same time for elucidating the cooperativity of these molecules.

To this aim, novel fluorescence correlation spectroscopy, total internal reflection two-dimensional fluorescence lifetime correlation spectroscopy (TIR 2D-FLCS), was developed. TIR 2D-FLCS utilizes the correlation of fluorescence lifetime to discriminate the fluorescence signals and analyze them in a species-specific manner. This allows us to investigate the conformational properties and the dynamics of multiple molecules at the same time. In this study, TIR 2D-FLCS was applied to analyze the diffusion of lipids in proximal/distal leaflets of lipid bilayer. The results confirmed that TIR 2D-FLCS is a powerful tool to quantify the leaflet-dependent diffusion properties as well as the interleaflet coupling of lipids in the bilayer.

Key Words: biological membrane; fluorescence correlation spectroscopy; total internal reflection; supported lipid bilayer

1. 諸言

生物の最小構成単位である細胞は細胞膜に覆われている。その細胞膜はリン脂質からなる脂質二重膜を基本骨格としているが、膜中には膜蛋白質やコレステロールといった様々な分子が存在し非常に複雑な構造をとっている。生体内ではこれら膜中分子が流動性のある脂質二重膜中で離散集合を繰り返すことにより、細胞内部の恒常性維持や細胞内外への情報伝達といった細胞膜特有の機能を発現している。これら細胞膜上で起こる多彩な機能を理解する上では、細胞膜を構成する脂質二重膜の物性、特にダイナミクスに関する基本的な知識が必要である。特に我々は脂質二重膜中分子の並進拡散に着目してこれまで研究を行っている。

溶液中ならびに膜中分子の並進拡散速度の計測には、蛍光相関分光法（FCS）と呼ばれる手法が

古くから用いられてきた。後述するように、FCSでは顕微鏡の焦点領域をサンプル分子が拡散により出入りすることで生じる分子由来蛍光信号の揺らぎを解析し、分子の拡散係数を算出する手法である。FCSはそのシンプルな装置から単一分子種の拡散係数計測ツールとして広く用いられてきているが、異なる複数の分子種が存在する系においては、その平均としての拡散係数しか得られないという欠点があった。

この点を打破すべく、我々は自作の全反射顕微鏡システムに励起光源としてパルスレーザーを導入し、蛍光寿命と蛍光強度の同時測定に基づく界面選択的な蛍光寿命相関分光装置（TIR 2D-FLCS）の開発を行った。蛍光寿命の相関を解析する利点は、後述するように複数の分子種由来の蛍光信号を蛍光寿命の違いをもとに分離し、解析できる点

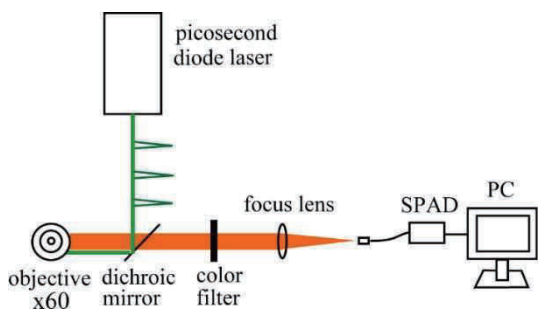


図 1 : TIR 2D-FLCS 装置. SPAD は単一光子検出フォトダイオードである.

にある. 本発表では昨年に引き続き TIR 2D-FLCS を用いて脂質二重膜を構成する 2 つの脂質単層膜それぞれにおける脂質分子の拡散計測を行った結果について報告を行う.

2. 実験装置

TIR 2D-FLCS 装置の概略図を図 1 に示す.¹装置の基本設計については市販の全反射顕微鏡と同じであるが, 蛍光寿命測定のためのパルスレーザーと単一光子計測を可能とする検出系を備えている. 本装置ではパルスレーザーとしてピコ秒ダイオードレーザーを用い, 繰り返し周波数は 50 MHz とした.

3. 解析方法

TIR 2D-FLCS で用いる解析について概念的に説明する. 詳細については参考文献 1,2 を参照されたい. 一般的な FCS においては次の式で定義される相関関数(G)を実験データより得る (図 2 上).

$$G(\Delta T) \equiv \frac{\langle I(T)I(T+\Delta T) \rangle}{\langle I(T) \rangle^2} \quad (1)$$

式中 $I(T)$ は時刻 T における蛍光強度を表し, $\langle \rangle$ は T に関する平均を意味する. 詳細は割愛するがここで得られる G の減衰時間は拡散による分子の焦点領域通過時間に対応することから, この時定数より拡散係数を得ることができる. 蛍光強度の解析では異なる分子種を区別して検出, 解析する事が困難なため, 得られる時定数は先述したように各分子種の拡散係数の平均値を反映した値となる.

一方でパルスレーザーを使用すると, 検出される蛍光信号について励起後どのくらい遅れて蛍光が発光されたか, という情報が得られる. この時間 (ここでは t で表す) のヒストグラムを作成することにより, ある時刻 T における蛍光減衰カーブを得ることができる (図 2 左下, 赤線). この蛍光減衰カーブには, 系に存在するすべての分子の蛍光寿命に関する情報が含まれている. ゆえに系

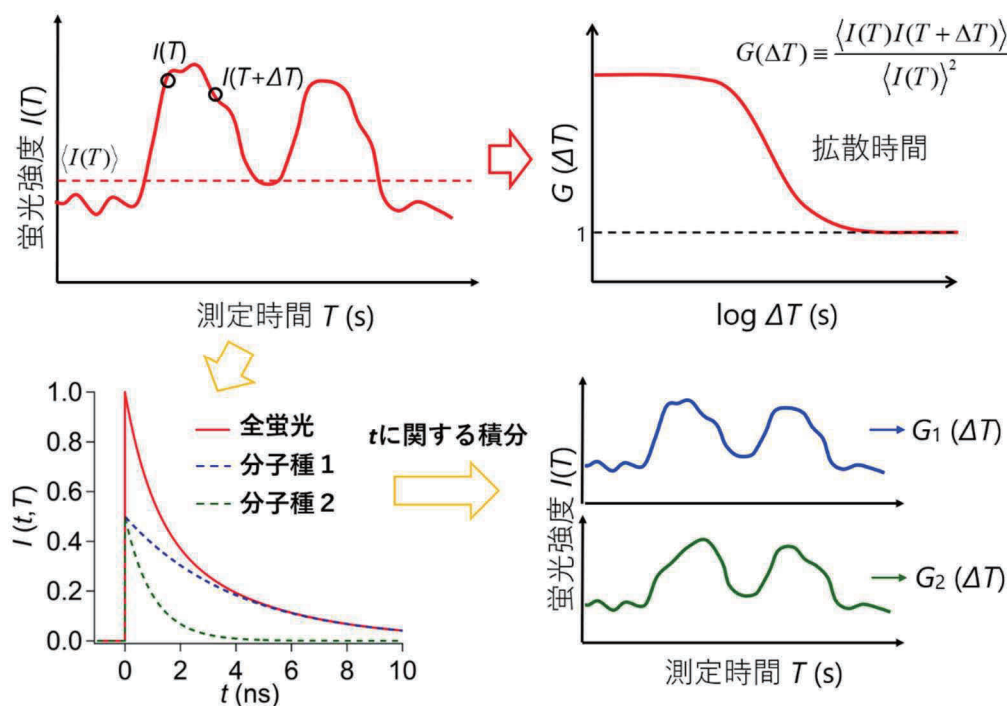


図 2 : 一般的な FCS での解析の流れ (赤矢印) と TIR 2D-FLCS で行う解析の流れ (黄色矢印).

に蛍光寿命の異なる 2 種類の分子が存在すれば、この蛍光減衰カーブは 2 つの分子種の寄与に分解することが可能となる (図 2 左下, 青, 緑破線). ここで, ある時刻 T で得られた蛍光減衰カーブ ($I(t, T)$) は t に関して積分すれば, 時刻 T における蛍光強度 ($I(T)$) になることから, 各成分の寄与 ($I_i(t, T)$) についても同様に t に関して積分することで, 時刻 T におけるそれぞれの分子種の蛍光強度 ($I_i(T)$) を得ることができる. ゆえに, この作業をあらゆる T で行い, 式(1)を適用することで, 個々の分子種の相関関数 ($G_i(\Delta T)$) が得られ, それぞれのデータから分子種ごとの拡散係数を得ることができる. これが蛍光寿命をもとにした成分ごとの FCS 解析のコンセプトである.

4. 実験結果と考察

本研究では TIR 2D-FLCS を用い, 脂質二重膜を構成する各単層膜 (リーフレット) 中脂質の拡散計測を行った. 脂質二重膜は 2 つのリーフレットが疎水基を向い合せることにより二重膜を形成している. つまり, 疎水性相互作用により 2 つのリーフレットは引きつけあっているが, このリーフレット間相互作用はどのくらい強いのか, また脂質組成によりどのように変化するのかについてはいまだ不明な点が多い. この点に関して, 我々は各リーフレット中脂質の蛍光寿命の違いを検出, 解析する事でリーフレット選択的な拡散計測を行い, リーフレット間相互作用に関する考察を行った.

試料にはガラス基板上に作成した平面脂質二重膜である支持脂質二重膜を用いた (図 3). 脂質には生体膜にも多く含まれている双対イオン性脂質である DOPC を用い, 少量の蛍光脂質を混ぜて支持脂質二重膜を作製した. 支持脂質二重膜中片方のリーフレット (ガラス基板側リーフレット) はその親水基が薄い水の層を介してガラス基板と相互作用しており, もう一方 (バルク側リーフレット) はバルク水中を向いている. このように環境の異なるリーフレット中脂質の拡散計測を行う事

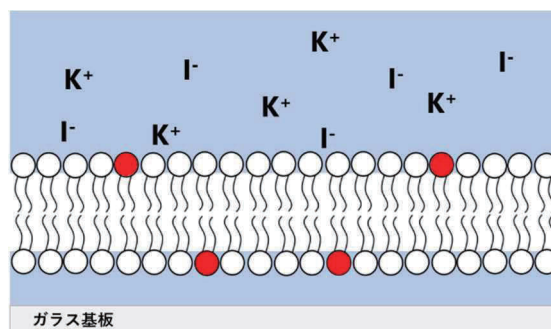


図 3 : 計測に使用する支持脂質二重膜のモデル図. バルク側には蛍光消光剤として知られているヨウ化カリウムが存在しており, バルク側リーフレット中蛍光脂質のみが消光され, その蛍光寿命が短くなる.

で, それぞれが独立に運動 (リーフレット間相互作用が弱い) しているか協同的 (リーフレット間相互作用が強い) かを検証した.

実験では支持脂質二重膜作製後, 脂質二重膜上部のバルク層に蛍光消光剤であるヨウ化カリウムを添加した. ヨウ化カリウムは膜不透過であるため, これによりバルク側リーフレット中蛍光脂質の蛍光寿命のみが短くなる. この蛍光寿命の違いをもとに図 2 に示した解析法で各リーフレット中脂質の相関関数を抽出し, そこからそれぞれの拡散速度を議論した.

図 4 には異なる pH で得られた各リーフレット中脂質の相関関数を示している. 図 4a からはっきりとわかるように, アルカリ pH では両リーフレット中脂質の相関減衰時間は完全に一致した. これは各リーフレットでの脂質の拡散係数が等しいことを表している. 一方で酸性 pH ではガラス基板側リーフレット中脂質の拡散がバルク側リーフレット中脂質と比較して遅くなっていることが分かった. この点について各リーフレット中脂質の pH 依存の相関関数の比較 (図 4b,c) を行った結果, 基板側リーフレット中脂質のみが pH に応答してその拡散係数を変化させていることが明らかとなった.

本研究で使用した DOPC, ならびに蛍光脂質は pH 5-10 で化学構造の変化がないことが知られている. 一方でガラス表面に存在するシラノール基

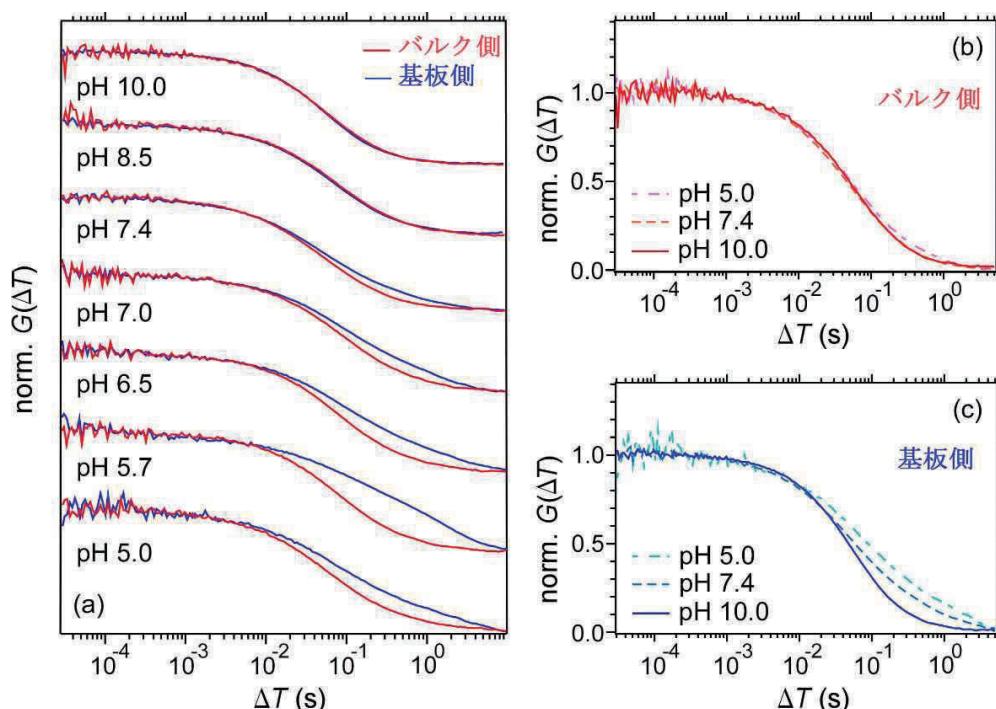


図 4: TIR 2D-FLCS による各リーフレット中脂質の相関関数. (a)異なる pH におけるバルク側リーフレット (赤), ならびにガラス基板側リーフレット (青) 中脂質の相関関数. それぞれのデータはその相関振幅が等しくなるように規格化し, 見やすいように pH ごとに異なるオフセットを加えている. 各リーフレットについて, pH に依存した相関関数を (b), (c) に示している.

は中性 pH 付近でプロトン化/脱プロトン化反応を起こすことが知られている. ゆえに, 本研究の結果は, ガラス表面が脱プロトン化 (高 pH) し正に帯電した条件においては両リーフレット中脂質の拡散は等しく, ガラス表面がプロトン化 (低 pH) し電荷密度が小さくなるにつれて基板側脂質の拡散が遅くなる, という事を強く示唆する結果となった. 具体的にどのような相互作用変化によってこのようなダイナミクス変化が生まれたかについてはさらなる検討が必要とされるが, 現在のところガラス表面の電荷密度に依存してガラス基板側リーフレットの脂質密度が変化しているのではないかと考えている.

さらに本研究の結果はリーフレット間相互作用について重要な知見を与えるものである. 図 4 に示すように, バルク側リーフレット中脂質の拡散はガラス基板側脂質の拡散の変化に鈍感であり, どの pH においても同じ拡散係数を示した. このことは, ガラス基板側脂質のダイナミクス変化がバルク側脂質にまで伝わっていない, つまり今回

使用した DOPC においてリーフレット間相互作用は弱い, という事を強く示唆する結果となった. 今後は異なる脂質組成で同様の実験を行い, リーフレット間相互作用に関するさらなる知見を得たいと考えている.

5. 謝辞

埼玉大学 山口祥一教授には, 研究の遂行にあたり多大なるご尽力をいただいた. ここに記して謝意を示す.

6. 参考文献

1. Takuhiro Otsu and Shoichi Yamaguchi “Quantifying the Diffusion of Lipids in the Proximal/Distal Leaflets of a Supported Lipid Bilayer by Two-dimensional Fluorescence Lifetime Correlation Spectroscopy” *J. Phys. Chem. B* **122**, 10315-10319 (2018).
2. Takuhiro Otsu and Shoichi Yamaguchi “Two-dimensional Fluorescence Lifetime Correlation Spectroscopy: Concepts and Applications” *Molecules* **23**, 2972 (2018).

Glutamate triggers systemic plant defence responses via long-distance Ca²⁺ signaling
グルタミン酸はカルシウムシグナルを介した植物の全身性防御応答を引き起こす

Masatsugu Toyota

豊田 正嗣

Associate Professor, Research and Development Bureau

研究機構 准教授 (理工学研究科・分子生物学)

Animals require rapid, long-range molecular signaling networks to integrate sensing and response throughout their bodies. For example, the amino acid glutamate acts as an excitatory neurotransmitter in the vertebrate central nervous system, regulating synaptic transmission and facilitating long-range information exchange via activation of glutamate receptor channels. Similarly, plants sense local signals, such as insect attack and transmit this information throughout the plant body to rapidly and pre-emptively activate defence responses in undamaged parts. Here we show that glutamate is a wound signal in plants that leaks to the apoplast from damaged cells. The *GLUTAMATE RECEPTOR LIKE* family of ion channels acts as sensors that convert this damage-associated signal into an increase in intracellular Ca²⁺ ([Ca²⁺]_i) that propagates to distant organs where defence responses are then induced¹.

Introduction

Plants rapidly respond to stresses, such as salinity, pathogen attack, mechanical wounding or herbivory with both a local and subsequently a system-wide reaction that primes non-damaged regions to mount pre-emptive²⁻⁷. For example, the defense hormone jasmonic acid and its active form jasmonyl-isoleucine (JA-Ile) accumulate not only at the immediate site of wounding but also within minutes in distal tissues, where JA-Ile elicits a suite of defense responses ranging from gene induction to shifts in defense metabolite metabolism. The precise nature of the rapid, long-range communication system remains to be defined but events such as propagating waves of reactive oxygen species (ROS) and electrical signals have been shown to correlate in time and space with systemic spread of the wound-response signal. Changes in the cytosolic Ca²⁺ level have also been linked both local wound stress responses and to the systemic spread of electrical and ROS-related events, such as in the systemic signaling elicited by root responses to NaCl⁸.

A major advance in characterizing this systemic signaling system has come from the finding that the electrical wound signal is dependent on the *GLUTAMATE RECEPTOR LIKE* ion channels *GLR3.3* and *GLR3.6*. In Arabidopsis, the GLRs are a family of 20 cation permeable ion channels closely related to mammalian ionotropic glutamate receptors. These channels have been shown to play roles in a wide range of plant physiological and developmental processes ranging from pathogen defense and stomatal function, to self-incompatibility responses, and pollen tube and root growth. However, the precise nature of the systemic wound system triggering GLRs and how GLRs in turn work to sustain systemic signaling events remains to be defined.

We therefore utilized the highly-sensitive single-wavelength GFP-based Ca²⁺ sensor GCaMP3⁹⁻¹² to monitor whole-plant signaling dynamics in response to wounding to ask whether a propagating Ca²⁺ signal might play a role in this systemic signaling system. As single wavelength reporters can yield imaging artifacts, we also validated the responses shown using the plants expressing the Yellow Cameleon ratiometric Ca²⁺ sensor (YC3.6) which corrects for many of these potential issues. Unfortunately, the Cameleon sensors proved complex to use routinely in these low magnification imaging studies due to their smaller dynamic range, which focused our analysis on using GCaMP as our major imaging tool.

Results

Touch is thought to trigger Ca^{2+} increases in plants and when a caterpillar of the cabbage white butterfly (*Pieris rapae*) moved on the *Arabidopsis* leaves, the mechanical contact induced a rapid but spatially-localized $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increases on the leaf surface. However, caterpillar feeding on a leaf caused an immediate increase in $[\text{Ca}^{2+}]_c$ in the wounded region, and this $[\text{Ca}^{2+}]_c$ change was transmitted within 1-2 mins to distal younger leaves. The spread of the $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase was most evident in the vasculature, an event that correlated with the caterpillar severing major veins in the leaf (Fig. 1A). Caterpillar feeding on a younger leaf also caused transmission of an increase in $[\text{Ca}^{2+}]_c$ toward older leaves, indicating that herbivory triggers bidirectional Ca^{2+} signal between older and younger leaves.

Caterpillar herbivory may include both chemical and physical stimuli. We therefore investigated whether wounding (by scissors) in the absence of chemical/biotic interaction could elicit these propagating changes in Ca^{2+} . Indeed, mechanical wounding in rosette leaf 1 caused a rapid $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase that propagated to specific distal target leaves (leaf 4 and 6) but not to other leaves (e.g., leaf 5 and 7) (Fig. 1B). Conversely, wounding in leaf 6 caused a Ca^{2+} increase that moved to leaf 1 and 3. Thus, mechanical wounding triggered similar bidirectional propagating Ca^{2+} increases as seen upon insect attack. Mapping the patterns of Ca^{2+} increase showed that upon wounding in leaf n the Ca^{2+} change preferentially propagated to leaves $n \pm 3$ and $n \pm 5$, resembling both the most direct vascular connections between leaves established during development and the pattern of propagation of wound-activated surface potential changes (WASPs). Consistent with all the vasculature being connected in the solid cylinder of the hypocotyl, cutting a hypocotyl caused transmission of a $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase toward almost all the leaves. Thus, transmission of Ca^{2+} increase from wounded to distal “target” leaves seems to largely follow the pathways of vascular connectivity between these organs.

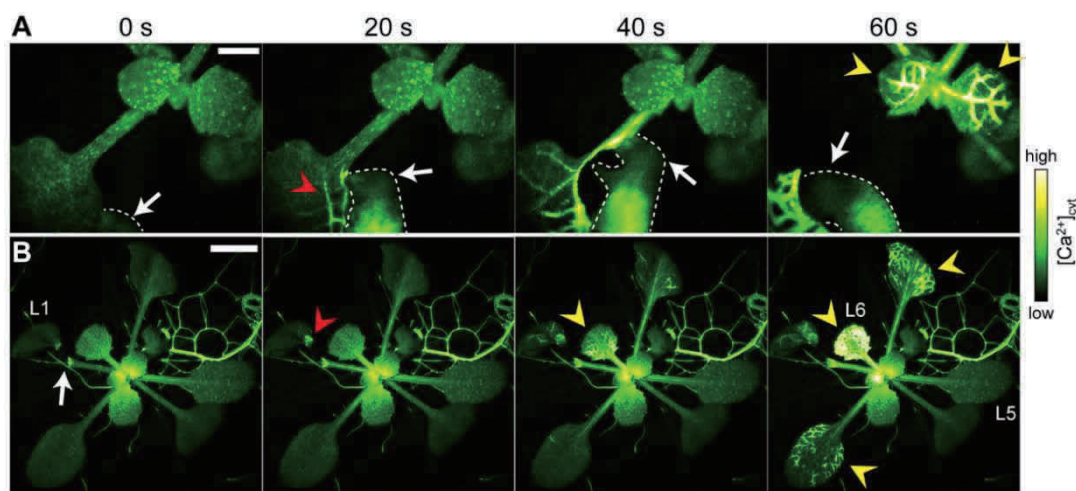


Fig. 1. Caterpillar herbivory/mechanical wounding triggers long-distance rapid transmission of increases in Ca^{2+} to specific systemic leaves. (A) A caterpillar feeding on the leaf (white arrow, and dashed outline, 0 s) caused a local $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase (red arrowhead) that is propagated towards distal younger leaves (yellow arrowheads). **(B)** Cutting the leaf 1 (L1) blade-petiole junction (white arrow, 0 s) caused a local $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase (red arrowhead) that is propagated towards specific distal leaves, e.g., leaf 6 (L6; yellow arrowheads) but not leaf 5 (L5).

We therefore used wounding of leaf 1 and testing of systemic responses in the target leaf 6 and non-target leaf 5 to more closely characterize this response system. A wound-induced $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase propagated at $1089 \pm 141 \mu\text{m/s}$, reaching leaf 6 within 1-2 min of damage, mirroring the velocities of both wound-induced systemic WASPs and the postulated mobile signal that triggers systemic induction of jasmonates in response. Consistent with a possible role in defence response, the pattern and timing of Ca^{2+} elevations mirrored changes in expression levels of defence marker genes (e.g., *JAZ5* and *JAZ7*) and accumulation of JA and JA-Ile in leaf 5 and 6.

Phloem is known to play a role not only in sugar transport but also in long-distance communication in plants, providing a potential route for the rapid phase transmission of the $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase to target leaves. Using the pSUC2 promoter, the GCaMP biosensor was expressed in the phloem/companion cells, revealing that the Ca^{2+} signal rapidly propagates in these cells toward a target leaf at $996 \pm 207 \mu\text{m/s}$. We hypothesized that the slower phase of cell-to-cell spread of the Ca^{2+} signal across the lamina out from the vasculature might then move through PD in the ground

tissues of a target leaf. Overexpression (OE) of PLASMODESMATA-LOCATED PROTEIN 5 (PDLP5), which is known to reduce cell-to-cell coupling due to callose deposition at PD, did not disrupt the rapid leaf-to-leaf transmission phase of the Ca^{2+} increase but did restrict spread in the target leaf to a region directly adjacent to the vasculature. Wound-induced systemic defence gene induction was also disrupted in target leaf 6 in the OE line consistent with a role for this Ca^{2+} increase in defence response induction.

Rapidly propagating systemic electrical signals have been shown to be dependent on the GLR ion channel family members GLR3.3 and GLR3.6. Both *glr3.3* and *glr3.6* single mutants showed systemic transmission of the $[\text{Ca}^{2+}]_c$ increase, although with altered kinetics. However, in the double knockout background, although local increases in Ca^{2+} were still observed at the wound site, the elevation in $[\text{Ca}^{2+}]_c$ did not obviously spread through the vasculature, and propagation of this change to distal leaves was inhibited. This response was restored to wild-type levels by driving GLR3.6 expression in this double knockout line using its native promoter, confirming the link between the function of this GLR and propagation of the Ca^{2+} increase.

GLR3.3 has been shown to be ubiquitously expressed in roots, including the vasculature. We found that GLR3.3-EGFP localized in a punctate manner to the plasma membrane of the phloem in the leaves consistent with ideas that damage-induced signals in the phloem may be linked to sieve tube Ca^{2+} channel action inferred from work on bean plants. In contrast, GLR3.6 localized to the plasma membrane (and potentially to some internal structures) in a subset of xylem parenchyma cells that have been termed xylem contact cells. These same cells show localized expression of lipoxygenase isoform 6 (LOX6), the LOX responsible for wound-related systemic jasmonate production. Thus, the GLRs associated with systemic Ca^{2+} increase localize to the cells where rapid propagation of the Ca^{2+} increase occurs, i.e., the phloem, and to the sites of defence response related to jasmonate synthesis, the xylem contact cells.

The GLRs are known to show gating by extracellular amino acids, with isoform specificity towards specific ligands. We therefore applied amino acid solutions to a cut surface at the very tip of the leaf, a protocol necessary as the cuticle of the intact leaf otherwise prevented reproducible application of compounds to the leaf interior. The cutting was carefully performed to cause minor damage and avoid triggering a systemic Ca^{2+} increase via avoiding disrupting major veins in the leaf. The leaf was also given a 1h recovery period prior to treatment. We first used a high level of amino acids to screen for potential candidate ligands. When 100 mM L-Glu was applied to the leaf, a wave of increased Ca^{2+} was seen to propagate throughout the plant (Fig. 4A) and that was dependent on *GLR3.3* and *GLR3.6* (Fig. 4A). Although some other amino acids including D-Glu, L-Gly and L-Cys triggered local Ca^{2+} increase in the treated leaf, only L-Glu triggered systemic responses. Similarly, 100 mM sorbitol (used as an osmotic control) failed to elicit local or systemic changes. Similarly, L-Glu, but not e.g., sorbitol, led to defense gene induction in systemic target leaves. As the L-Glu levels in the treatment was reduced, the extent of the systemic Ca^{2+} increase became more restricted. For example, at 50 mM, the Ca^{2+} increase propagated in an n+3 and n+5 pattern that mirrored those seen to wounding. Such results are consistent with a model where damage to the cells at the wound site causes

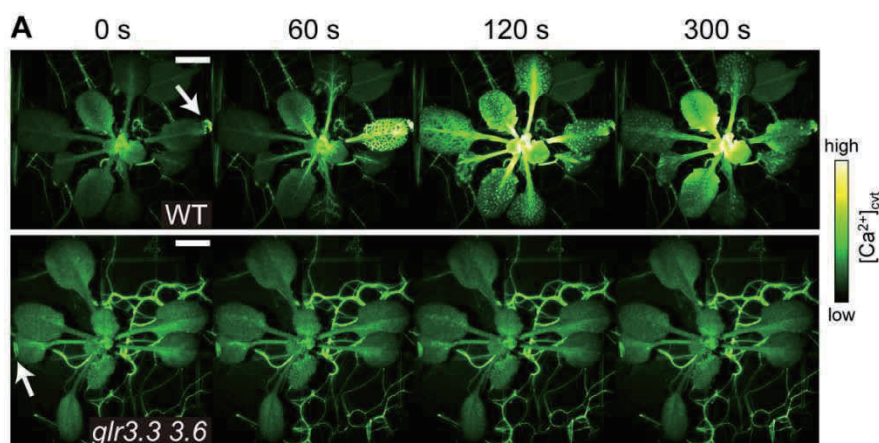


Fig. 2. Apoplastically applied Glu triggers long-distance, rapid Ca^{2+} transmission and defense responses in the systemic leaves. (A) Application of 100 mM Glu to a leaf (white arrow, 0 s) caused transmission of an increase in Ca^{2+} to almost all leaves in wild type (yellow arrowheads) but not in the *glr3.3glr3.6* mutants.

symplastic Glu to leak to the apoplast where it triggers systemic response.

We therefore targeted the GFP-based Glu sensor iGluSnFR to the cell wall of roots and leaves using the chitinase signal sequence. The sensor was responsive to exogenously applied Glu in both organs, showing resolution between ~10 μM and 100 mM. Upon wounding, there was a local wave of increase in iGluSnFR signal at the cut region of the leaf that rapidly attenuated within 1-2 mm from the wound site. This spatial temporal Glu level in the apoplast is consistent with that of $[\text{Ca}^{2+}]_c$ at the cut region. In vivo calibration, suggests the apoplastic Glu reached 10-50 mM at the site of damage, a concentration that fits well with the estimates of symplastic Glu in e.g., the phloem. When damage is more extensive, such as when wounding is applied by crushing a leaf with a hemostat rather than cutting with scissors, then the extent of the Glu release to the apoplast is likewise more extensive, as is the systemic signaling, as reported by the number of distal target leaves showing a propagating $[\text{Ca}^{2+}]_c$. Thus, the plant may be able to tailor the extent of its systemic defense response induction to the level of damage it is experiencing, possibly encoded by the extent and the level of apoplastic Glu produced at the wound site(s).

Acknowledgements

I would like to thank Professor Ikuo Nishida (Saitama University, Japan) and Professor Simon Gilroy (University of Wisconsin-Madison, USA) for the invaluable suggestions. I also thank Dirk Spencer (Stanford University, USA), Alexander Bilgri (University of Wisconsin-Madison, USA), Satoe Toyota (Leica Microsystems, Japan), Jiaqi Wang and all the colleagues in Cell Signaling (Toyota) Lab (Saitama University, Japan) for their assistance throughout the projects. This work is supported by the Tenure-Track Program of Saitama University and a grant from JST PRESTO and KAKENHI (17H05007, 18H04775, 18H05491).

References

1. Toyota M, Spencer D, Sawai-Toyota S, Wang J, Zhang T, Koo AJ, Howe GA, Gilroy S (2018) Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science* 361:1112-1115.
2. Hunter K, Kimura S, Rokka A, Tran HC, Toyota M, Kukkonen JP, Wrzaczek M (2019) CRK2 enhances salt tolerance by regulating callose deposition in connection with PLD α 1. *Plant Physiology* in press.
3. Toyota M, Furuichi T, Iida H (2018) Molecular Mechanisms of Mechanosensing and Mechanotransduction. *Plant Biomechanics*, 375-397.
4. Vincent TR, Avramova M, Canham J, Higgins P, Bilkey N, Mugford ST, Pitino M, Toyota M, Gilroy S, Miller AJ, Hogenhout SA, Sanders D (2017) Interplay of Plasma Membrane and Vacuolar Ion Channels, Together with BAK1, Elicits Rapid Cytosolic Calcium Elevations in Arabidopsis during Aphid Feeding. *Plant Cell* 29:1460-1479.
5. Lenglet A, Jaslan D, Toyota M, Mueller M, Muller T, Schonknecht G, Marten I, Gilroy S, Hedrich R, Farmer EE (2017) Control of basal jasmonate signalling and defence through modulation of intracellular cation flux capacity. *New Phytologist* 216:1161-1169.
6. Gilroy S, Suzuki N, Miller G, Choi WG, Toyota M, Devireddy AR, Mittler R (2014) A tidal wave of signals: calcium and ROS at the forefront of rapid systemic signaling. *Trends in Plant Science* 19:623-630.
7. Toyota M, Gilroy S (2013) Gravitropism and mechanical signaling in plants. *American Journal Botany* 100:111-125.
8. Choi WG, Toyota M, Kim SH, Hilleary R, Gilroy S (2014) Salt stress-induced Ca^{2+} waves are associated with rapid, long-distance root-to-shoot signaling in plants. *Proc Natl Acad Sci USA* 111:6497-6502.
9. Vincent TR, Canham J, Toyota M, Avramova M, Mugford ST, Gilroy S, Miller AJ, Hogenhout S, Sanders D (2017) Real-time In Vivo Recording of Arabidopsis Calcium Signals During Insect Feeding Using a Fluorescent Biosensor. *Journal of Visualized Experiments* 126:e56142.
10. DeFalco TA, Toyota M, Phan V, Karia P, Moeder W, Gilroy S, Yoshioka K (2017) Using GCaMP3 to Study Ca^{2+} Signaling in Nicotiana Species. *Plant Cell Physiology* 58:1173-1184.
11. Zhao Y, Araki S, Wu J, Teramoto T, Chang YF, Nakano M, Abdelfattah AS, Fujiwara M, Ishihara T, Nagai T, Campbell RE (2011) An expanded palette of genetically encoded Ca^{2+} indicators. *Science* 333:1888-1891.
12. Nakai J, Ohkura M, Imoto K (2001) A high signal-to-noise Ca^{2+} probe composed of a single green fluorescent protein. *Nature Biotechnology* 19:137-141.

分子が動くゲル材料 —細胞のゆりかごとして—

理工学研究科 助教(戦略的研究部門 ライフ・ナノバイオ領域)・卓越研究員
川村 隆三

Abstract: Cytoskeletal proteins and motor proteins are the main players to generate movement in the cells, which lead to various biological functions such as formation of organs, wound healing, cancer metastasis and so on. Inspired from the dynamic nature of cellular environment in live tissues which is arose from the function of cytoskeleton and the motor proteins, I propose an active material which can mechanically stimulate cultured cells in a stochastic manner at cell-scale. With use of kinesin and microtubule which are well known motor and the rail protein, kinesin-driven dynamic network of microtubules was prepared in a live cell compatible condition. When metastatic cancer cells were exposed to the stochastic mechanical stimuli, unusually long protrusions cell bodies were observed, which were reminiscent of the metastasis of the cancer cells. Strikingly, these responses were not seen in those without stimulations. This approach giving mechanical stimuli to cells in a stochastic manner at cell-scale allows us to uncover unknown behavior of cells which might benefit technologies of cancer diagnosis and regenerative medicine in future.

研究の背景と目的

「人間の体は、ほとんどが水でできている」とよく言われるが、材料の観点で分類するとおよそゲルである。ゲルとは、ほとんどが液体（大抵水）でできているが、高分子（ひも状分子）の鎖がジャングルジムのように立体的な網目を成して液体を保持した材料である。適度な力で液を保持するため、ジワジワと液や溶質を外部環境と交換することもできる。材料の物性としては、液体のように流れてしまわず、固体（剛体）とは違って変形性に富み、ゴムのように復元しようとする弾性を備える。ゲルが示すこれらの特徴は、極めて多様な高分子の種類、および液体（水）や溶質との相互作用で、幅広い範囲の「生物らしさ」を成立させている。

生命現象を理解する手段として、培養細胞をシャーレの上で顕微鏡観察する方法は、沢山の可視化を可能にしてきた。しかし、シャーレの材料について注目してみ

ると、ガラスのそれは、生物の体がゲル様である事と比べると、随分剛直で様子が違う。では、シャーレのガラス基板をゲルに置き換えるとどうなるか？ゲルの弾性率を様々に変化させた研究報告では、幹細胞を培養したときに、柔らかい基板では神経へ、硬い基板では骨の細胞へと「基板の弾性」で分化誘導に成功した例¹があり（図1）、外部環境のシンプルな力学条件も細胞の機能発現に重要な意味を持つことが示されている。本研究では、弾性だけでなく「動き」の要素が加わった材料を用いることで、未知なる細胞挙動の可視化できると仮説を立て、分子が動くゲル材料を開発して実証することを目的とする。

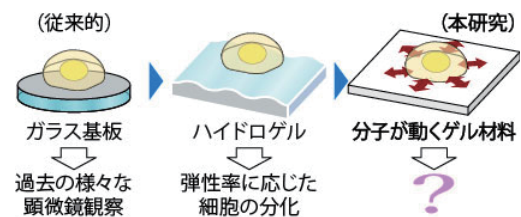


図1: 細胞の変形と遊走を支える細胞骨格タンパク質とモータータンパク質.

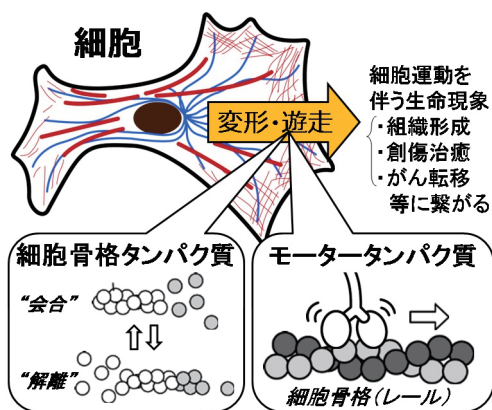


図2: 細胞の変形と遊走を支える細胞骨格タンパク質とモータータンパク質。

細胞は、動的に会合/解離する細胞骨格タンパク質とモータータンパク質の駆動力で、様々な変形・遊走を生み出す(図2)。細胞の運動性は力学環境に対する応答の元になっているはずで、弾性などの静的な条件だけでなく、動的力学条件も影響を与えるものと予想される。本研究では、代表的な細胞骨格・モータータンパク質分子である、微小管・キネシンの分子を生体内から抽出し、これらの分子集積体を人工的に再構築して「運動機能を発揮する分子集団」を構成する。細胞由来の材料を用いることで、類似の物性、出力、スケールの運動を発現する場の構築と、それによる細胞挙動の効果的な誘導が期待できる。具体

例として、変形と移動が顕著な転移性がん細胞について、未知なる挙動を可視化しようとしている。

周囲の研究状況と本研究の特色:

動的力学環境で細胞の動態を調べる従来の手法には、細胞を接着した弾性基板を伸展する方法や培養液の流動ずり応力を利用する方法が知られているが、細胞スケールでみると一方向的な力学刺激となるのが一般的である(図3)^{2,4}。しかし、生体内で細胞に加わる力学刺激は、一方向的なものだけではなく、組織内で集団を成す細胞群が各々変形して生じる細胞スケールで多方向の揺らぎが存在すると考えられる。本研究では、細胞集団ではなく運動する分子を材料として細胞の動的力学環境——つまり細胞スケールで多方向の揺らぎ力学刺激を発生する場——を構築し、分子の単純系で細胞の力学挙動を一般化して理解しようとする点に特徴がある。

研究経緯と方針:

川村は、これまでに微小管(細胞骨格)とキネシン(モーター)分子が、集団として発揮する運動に着目し、人工的に集合体が運動機能を発現する様子を報告してき

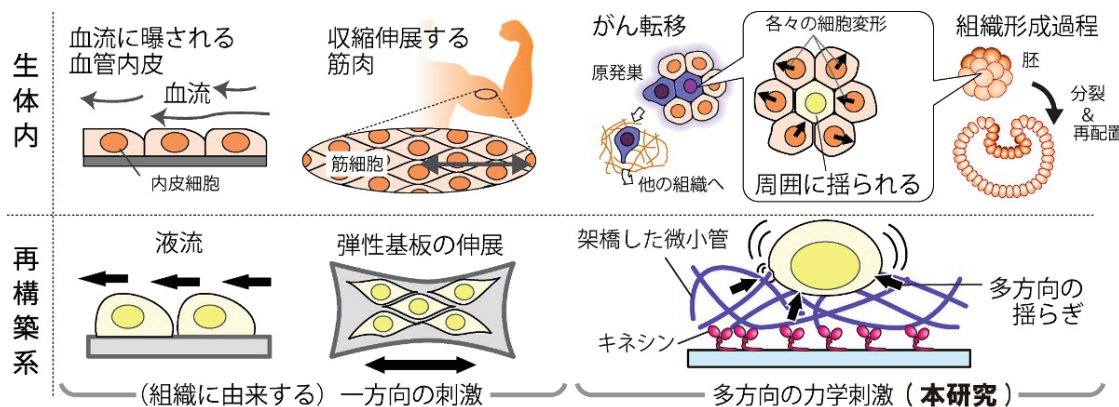


図3: 生体内の動的力学環境と機能解明に向けた再構築系での力学刺激再現。

た^{6,7}。近年では、微小管を架橋したネットワーク構造をキネシンで駆動する『運動界面』を開発し⁸、これを細胞培養基板に応用することで生細胞に「細胞スケールの揺らぎ力学刺激」を与える事にも成功している⁹ (図3右下)。転移性の高いがん細胞にこの**力学刺激を与えると、異常な突起伸長を示す**ことを観測していた。がん細胞は**周囲の力学環境に応じて高い遊走挙動を示すこと**や¹⁰、**細胞の混み合った状況は遊走挙動に影響する**¹¹といった報告されている。総合して考えると、**がん細胞の異常な変形は「転移性の高さ」を示している可能性**がある。本研究では、この実証を具体的な題材として、微小管・キネシンで構築する『運動界面』を**2次元・3次元を含む様々な形状に設計・構築して揺らぎ運動を発現して力学刺激を与え、様々な細胞の動的挙動を探索する**。生体内で細胞が周囲から受ける力学刺激を模倣することで、従来の培養環境では隠れていた細胞の挙動を可視化し、新たな細胞評価軸を獲得することを期待している。

平成30年度までの研究進捗：

微小管・キネシンの分子運動を人工系で再現する条件と細胞を培養する条件とでは、溶液条件が塩分濃度やビタミン類、

栄養源となるウシ血清の有無など異なる点が多い。これまでの研究で川村は、微小管・キネシンの運動する溶液条件に、細胞が必要とするビタミンやアミノ酸を補う形で、微小管・キネシンの運動と生細胞が共存する溶液条件を特定している。精製した微小管を再構成した後に、化学結合で架橋した微小管ネットワークを作製し、ガラス基板上に修飾したキネシンで駆動すると、マイクロメートルスケール、すなわち細胞スケールの揺らぎ運動を発生できる⁸。この「運動界面」に接着性の細胞を播種し、接着過程で力学刺激を付与する方式を開発してきた。細胞の接着を安定化する目的で、接着因子を基板に修飾する条件を加え (図4A)、また、観察チャンバーへの送液をポンプで低速かつ低速にコントロールすることで、観察対象とする細胞の数を常に確保できるよう改良を加えた。接着した細胞の形状をアクチンの細胞骨格タンパク質を染色して確認すると、接着因子の導入によって細胞内にアクチン凝集塊が形成すること (図4B) がわかった。運動界面で力学的に揺さぶられる状況にあっても、ピン止め構造を形成することで効率的に接着しようとするかのようなのである。がん細胞は、転移の過程で組織に侵入するとき、**浸潤突起**を形成することが知られており、

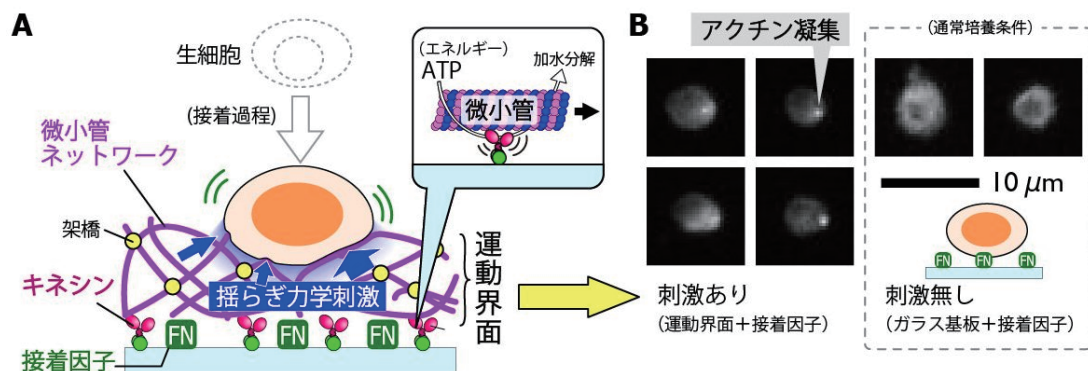


図4：接着因子を導入した運動界面で接着過程の細胞へ力学刺激を与える状況の模式図(A)と接着した細胞のアクチン構造(B)。

この場合突起にはアクチン骨格をメッシュ構造化するタンパク質 (Arp2/3) が含まれることが報告されている。そこで、Arp2/3 を阻害する薬剤を投入してみるとピン止め構造の出現率が減少する事が明らかになった。また、ここまでの検証ではマウスメラノーマのがん細胞を用いたが、ヒト乳がん細胞 MCF7 と正常乳腺細胞を比較した場合でも同様の傾向が観測された。他方で、悪性度の高い乳がん細胞モデルの MDA-MB-231 株については、Arp2/3 阻害剤の添加によってアクチン凝集体がむしろ増加して予想と逆の傾向がみられた。つまり、アクチン凝集体を観測することはがん細胞浸潤性と一定の相関が認められるものの細胞種横断的に一般化した指標には至らないことがわかった。

今後の展望：

接着因子を導入した運動界面で、浸潤能に関連しうるアクチン凝集体の形成が観測されたが、「アクチン凝集体を保有する細胞の割合」で評価している現状では、必ずしも悪性度の高いがん細胞種との相関を確認できていない。凝集体を評価する計測方法の再検討と、がん細胞種について「悪性度」よりも焦点を絞った「浸潤度」でモデル細胞系を選択して比較することで、本系のもたらす細胞応答挙動の意味を明らかにする必要がある。また、幅広い細胞での検証を実現するために、細胞染色過程を自動化システムを構築してゆく。

研究計画全体で予定していた、力学刺激を付与する「方向」の様式について多様化を図ることで、細胞の3次元動的挙動や「創傷治癒」のモデルへの応用なども検討してゆく予定である。方向については

基板表面のキネシンをレーザー照射で不活化する技術を開発しており¹²、「方向性」を持った運動界面の実現を検証する予定である。

まとめ：

微小管・キネシンの分子モーターの駆動力を利用した運動界面で、がん細胞の力学刺激条件下における特異な接着挙動を捉えることができるようになった。平成30年の研究では、マウスのみならずヒトのがん細胞株を用いた検証で、完全ではないが悪性度とアクチン凝集体挙動に共通して相関がみられることがわかった。引き続き、運動する分子でつくる材料開発・利用して、自然界の運動する分子集合体である細胞の運動する性質を独自のパラメーターで明らかにする研究を構築してゆく。

謝辞：

本研究では、卓越研究員事業に基づいて研究費、研究環境整備費の支援を文部科学省から頂いております。また、一部の研究には、日揮・実吉奨学会研究助成の資金的援助を頂いております。深く御礼申し上げます。

参考文献：

1. AJ Engler *et al.* *Cell* **126**, 677689 (2006).
2. HJ Hsu *et al.* *Plos One* **5**, e12470 (2010).
3. H Takada *et al.* *J Cell Sci* **127**, 4159 (2014).
4. K Yamamoto *et al.* *J Cell Sci* **124**, 3477 (2011).
5. B Li and SX Sun. *Biophys J* **107**, 1532 (2014).
6. R Kawamura *et al.* *Biomacromol* **9**, 2277 (2008).
7. R Kawamura *et al.* *Langmuir* **26**, 533 (2010).
8. R Kawamura *et al.* *RSC Adv* **4**, 32953 (2014).
9. R Kawamura *et al.* *ACS Biomater Sci Eng* **2**, 2333 (2016).
10. MH Lee *et al.* *Biophys J* **102**, 2731 (2012).
11. JA Park *et al.* *Nat Mater* **14**, 1040 (2015).
12. K Meguriya, R Kawamura *et al.* *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, SDDI01 (2019).

The Brascamp–Lieb inequality and related topics

Neal Bez

Associate Professor

Graduate School of Science and Engineering (Department of Mathematics)

1 The nonlinear Brascamp–Lieb inequality

The classical Brascamp–Lieb inequality takes the form

$$\int_{\mathbb{R}^n} \prod_{j=1}^m f_j(L_j x)^{c_j} dx \leq \text{BL}(\mathbf{L}, \mathbf{c}) \prod_{j=1}^m \left(\int_{\mathbb{R}^{n_j}} f_j \right)^{c_j}. \quad (\text{BL})$$

Here, $\mathbf{L} = (L_j)_{j=1}^m$ and $\mathbf{c} = (c_j)_{j=1}^m$ where $L_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n_j}$ is linear and $c_j \geq 0$ for each j . Also, $\text{BL}(\mathbf{L}, \mathbf{c})$ is the best constant for which the above inequality is valid for all nonnegative and integrable functions f_j on \mathbb{R}^{n_j} .

Put simply, the nonlinear Brascamp–Lieb conjecture asks if it is possible to replace the linear mappings L_j with nonlinear linear mappings. It has long been conjectured that if we consider nonlinear *perturbations* of linear mappings L_j such that $\text{BL}(\mathbf{L}, \mathbf{c}) < \infty$, then the corresponding nonlinear Brascamp–Lieb inequality will be true if we make the estimate appropriately localised. In my joint work with J. Bennett, S. Buschenhenke and T. Flock [2], we established the conjecture in the case where the Brascamp–Lieb data (\mathbf{L}, \mathbf{c}) is simple. The advantage of working with so-called simple data is the existence of a nice family of gaussian extremisers (i.e. gaussian functions which give equality in (BL)) which was essential for the induction-on-scales argument we developed in [2] to succeed.

Very recently, in collaboration with J. Bennett, S. Buschenhenke, M. Cowling and T. Flock [3], we solved the nonlinear Brascamp–Lieb in full generality. Our main theorem is the following.

Theorem 1.1. [3] *Let (\mathbf{L}, \mathbf{c}) be a Brascamp–Lieb datum. Suppose that $B_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n_j}$ are smooth submersions in a neighbourhood of a point x_0 and $dB_j(x_0) = L_j$ for each j . Then, for each $\varepsilon > 0$ there exists a neighbourhood U of x_0 such that*

$$\int_U \prod_{j=1}^m f_j(B_j(x))^{c_j} dx \leq (1 + \varepsilon) \text{BL}(\mathbf{L}, \mathbf{c}) \prod_{j=1}^m \left(\int_{\mathbb{R}^{n_j}} f_j \right)^{c_j}$$

holds for all nonnegative integrable f_j .

Although the argument in [3] is also based on induction-on-scales as in [2], a significant difficulty is that extremal functions do not necessarily exist in full generality. To overcome this problem, it was necessary to work with families of near-extremisers; fortunately, due to a fundamental theorem of Lieb [4], Gaussians are near-extremisers to the classical Brascamp–Lieb inequality in full generality. However, for technical reasons connected to the induction-on-scales argument, it was necessary to establish a certain *quantitative* version of Lieb’s famous theorem. After certain reductions, we established such a strengthening of Lieb’s theorem by analysing near-extremisers of weighted sums of exponential functions; this is a result of independent interest in optimisation theory and we state it as follows.

Theorem 1.2. [3] *Suppose $(u_j)_{j \in J}$ is a collection of vectors in \mathbb{R}^n . Then there exist $N \in \mathbb{N}$ and $\delta_0 > 0$, depending only on $(u_j)_{j \in J}$, such that for every $\delta \in (0, \delta_0)$ and nonnegative coefficients d_j ,*

$$\inf_{|y| \leq N \log(1/\delta)} \sum_{j \in J} d_j \exp(\langle u_j, y \rangle) \leq \inf_{y \in \mathbb{R}^n} \sum_{j \in J} d_j \exp(\langle u_j, y \rangle) + \delta \max_{j \in J} d_j.$$

2 Hypercontractivity

A particularly important special case (via duality) of the classical Brascamp–Lieb inequality (BL) is Nelson’s famous hypercontractivity inequality which states that

$$\|e^{sL} f\|_{L^q(\gamma)} \leq \|f\|_{L^p(\gamma)} \tag{1}$$

whenever $q > p > 1$ and $s > 0$ are such that

$$e^{2s} = \frac{q-1}{p-1}.$$

Here, $(e^{sL})_{s \geq 0}$ is the Ornstein–Uhlenbeck semigroup given by

$$e^{sL}f(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f(e^{-s}x + (1 - e^{-2s})^{1/2}y) d\gamma(y),$$

where $d \geq 1$ and γ is the standard gaussian probability measure on \mathbb{R}^d given by

$$d\gamma(y) = e^{-\frac{1}{2}|y|^2} \frac{dy}{(2\pi)^{d/2}}.$$

The generator L is given by $Lf(x) = \Delta f(x) - x \cdot \nabla f(x)$.

Related to the above hypercontractivity inequality, in collaboration with Y. Aoki, J. Bennett, S. Machihara, K. Matsuura and S. Shiraki, we proved the following closure property for supersolutions of the linear diffusion equation governed by L .

Theorem 2.1. [1] *Let $q > p > 1$ and $e^{2s} = \frac{q-1}{p-1}$. Assume $u : (0, \infty) \times \mathbb{R}^d \rightarrow (0, \infty)$ is such that $u(t, \cdot)^{1/p}$, $\partial_t(u(t, \cdot)^{1/p})$, $\nabla(u(t, \cdot)^{1/p})$, $u(t, \cdot)^{-1/p}|\nabla(u(t, \cdot)^{1/p})|^2$ and $\Delta(u(t, \cdot)^{1/p})$ are of polynomial growth locally uniformly in time $t > 0$, and satisfies*

$$\partial_t u \geq Lu.$$

Define $\tilde{u} : (0, \infty) \times \mathbb{R}^d \rightarrow (0, \infty)$ by

$$\tilde{u}(t, x)^{1/q} = e^{sL}(u(t, \cdot)^{1/p})(x). \quad (2)$$

Then $\tilde{u}(t, \cdot)^{1/q}$, $\partial_t(\tilde{u}(t, \cdot)^{1/q})$, $\nabla(\tilde{u}(t, \cdot)^{1/q})$, $\tilde{u}(t, \cdot)^{-1/q}|\nabla(\tilde{u}(t, \cdot)^{1/q})|^2$ and $\Delta(\tilde{u}(t, \cdot)^{1/q})$ are of polynomial growth locally uniformly in time $t > 0$, and

$$\partial_t \tilde{u} \geq L\tilde{u}.$$

Ignoring the technical ingredients of the above theorem, the main point is that

$$\partial_t u \geq Lu \quad \Rightarrow \quad \partial_t \tilde{u} \geq L\tilde{u}$$

where \tilde{u} is given by (2). Note that if we write $Q(t) = \int \tilde{u}(t, \cdot) d\gamma$, then by differentiation

$$Q'(t) = \int_{\mathbb{R}^d} \partial_t \tilde{u} d\gamma \geq \int_{\mathbb{R}^d} L\tilde{u} d\gamma = 0$$

which means Q is nondecreasing in time. Moreover, if we take a *solution* of the diffusion

equation $\partial_t u = Lu$ with nonnegative initial data of the form f^p , one can calculate

$$\lim_{t \rightarrow 0} Q(t) = \|e^{sL} f\|_{L^q(\gamma)}^q$$

and

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \|f\|_{L^p(\gamma)}^q,$$

and hence the monotonicity of Q implies Nelson's hypercontractivity inequality (1). We state the monotonicity result as follows.

Corollary 2.2. [1] *Suppose u satisfies $\partial_t u = Lu$ with initial data a bounded and compactly supported nonnegative function on \mathbb{R}^d . Let $Q : (0, \infty) \rightarrow (0, \infty)$ be given by*

$$Q(t) = \int_{\mathbb{R}^d} \left(e^{sL} (u(t, \cdot)^{1/p}) \right)^q (x) d\gamma(x),$$

where $q > p > 1$ and $e^{2s} = \frac{q-1}{p-1}$. Then Q is nondecreasing on $(0, \infty)$.

Acknowledgement. This work was supported by JSPS Grant-in-Aid for Young Scientists A [grant number 16H05995].

References

- [1] Y. Aoki, J. Bennett, N. Bez, S. Machihara, K. Matsuura, S. Shiraki, *A supersolutions perspective on hypercontractivity*, arXiv:1905.07911.
- [2] J. Bennett, N. Bez, S. Buschenhenke, T. C. Flock, *The nonlinear Brascamp–Lieb inequality for simple data*, arXiv:1801.05214.
- [3] J. Bennett, N. Bez, S. Buschenhenke, M. G. Cowling, T. C. Flock, *On the nonlinear Brascamp–Lieb inequality*, arXiv:1811.11052.
- [4] E. H. Lieb, *Gaussian kernels have only Gaussian maximizers*, Invent. Math. **102** (1990), 179–208.

Toward understanding of the development of cerebellar circuitry

小脳神経回路の構築メカニズムの理解へ

津田佐知子 (Sachiko TSUDA)

Associate Professor, Graduate School of Science and Engineering

理工学研究科・生体制御 准教授

1. Overview

During the development of the nervous system, the brain is formed structurally and functionally forming functional circuitries. Understanding of the organizing principles and development of the nervous system is important to elucidate the function of the brain.

To examine the mechanisms of the brain development, I focus on the cerebellum, a brain region which is an ideal place to analyze neuronal circuitries with its relatively simple and widely conserved structure. In contrast to the accumulated information on its anatomy and physiology, mechanisms of the formation of its functional circuitries remain unsolved. For this, recent advances in the optical techniques allow for various approaches to examine structural and functional development of the brain¹.

Here, I will discuss the recent progress in the following two topics; functional circuitry formation and dynamic migration of cell populations during cerebellar development. For the former topic, I will also focus on the emerging new techniques, such as optical measurement of neuronal activity using recently developed genetically-encoded voltage indicators in zebrafish²⁻⁴. Both of the two topics are involved in brain compartmentalization, a pivotal event in brain development, in which the brain tissue is divided into domains harboring distinct morphology and function. For these projects, I have used zebrafish, whose cerebellum is known to have similar circuitries to mammalian ones, and whose transparency and small size provide a big advantage in applying optical techniques.

2. Development of the functional circuitry in the cerebellum

The general anatomical organization of cerebellar circuits is well defined; however, their functional organization and its development are still unresolved. One of the prominent examples is cerebellar compartmentalization, one of which is shown by the sagittal distribution patterns of molecules such as zebrin/aldorase C expressing in Purkinje cells (Figure 1). Further anatomical and



Figure 1. Cerebellar compartments

physiological works suggested that these compartments would be important for the information processing by functioning as functional modules⁵. However, little is known about the underlying neuronal circuits and their development.

To address this issue, focusing especially on the brain compartmentalization, we have applied several optical approaches in zebrafish. Recent progresses in optical techniques provide powerful tools to analyze functional circuitries. A prominent example is "optogenetics" which enables optical control of neuronal activity, thereby allowing direct assessments of the function of a specific neuronal population⁶. Previously we had analyzed the functional organization of the cerebellar circuitries using optogenetics combined with electrophysiology as well as functional imaging^{7,8}.

2-1. Voltage imaging of neuronal activity

Optical measurement of the membrane potential (neuronal activity) enables fast, direct and simultaneous detection of membrane potentials from a population of neurons, providing a desirable approach for functional analysis of neuronal circuits⁷. Here, we applied recently developed genetically encoded voltage indicators, ASAP1 (Accelerated Sensor of Action Potentials 1) and QuasAr2 (Quality superior to Arch 2), to zebrafish, an ideal model system for studying neurogenesis^{2,3}.

To achieve this, we established transgenic zebrafish lines which express the voltage sensors, and showed that ASAP1 is expressed in zebrafish neurons. To examine whether neuronal activity could be detected by ASAP1, we performed whole-cerebellum imaging, showing that depolarization was detected widely in the cerebellum upon electrical stimulation (Figure 2). Furthermore, spontaneous activity in the spinal cord was also detected by ASAP1 imaging at single-cell resolution. These responses mostly disappeared following treatment with tetrodotoxin, indicating that ASAP1 enabled optical measurement of neuronal activity in the zebrafish brain.

Combining this method^{4,9} with other approaches, such as optogenetics and behavioural analysis may facilitate a deeper understanding of the functional organization of brain circuitry and its development.

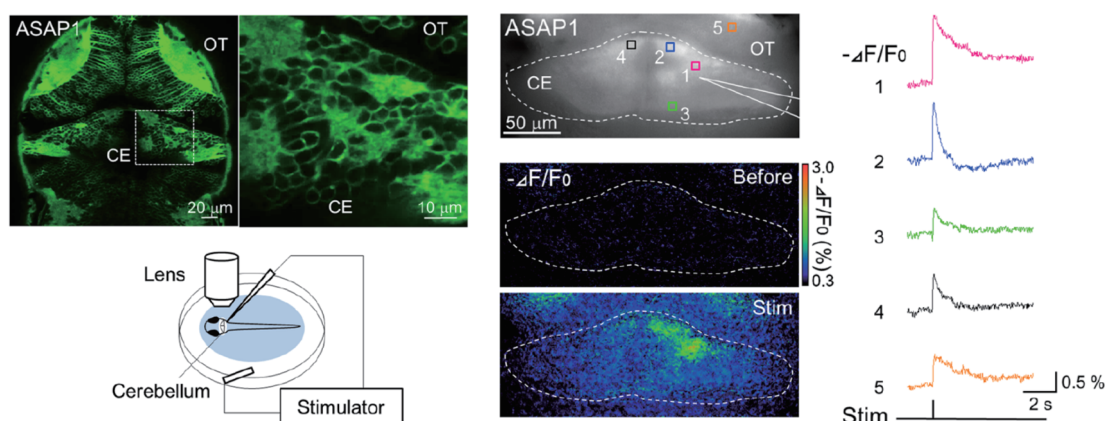


Figure 2. Voltage imaging in zebrafish brain (CE: cerebellum, OT: optic tectum)

2-2. Functional compartmentalization of the cerebellum

To examine the functional development of the cerebellar circuitry, we conducted high-speed calcium imaging of neural activities of cerebellar Purkinje cells, which was combined with behavioral tests, such as optokinetic response

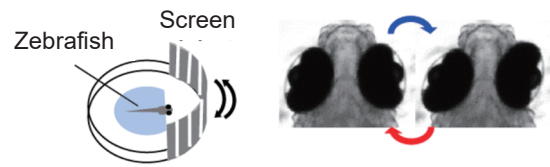


Figure 3. Optokinetic response (OKR)

(OKR) in which eyes follow moving objects under the regulation of the cerebellum (Figure 3). Specific populations of Purkinje cells were found to be activated in the cerebellum during OKR (Figure 4). 3D analysis of these Purkinje cells at a single-cell resolution revealed that at least three groups of Purkinje cells were found to show distinct patterns of activities, and that they were distributed differently along dorso-ventral axis. Furthermore, we tested the function of the activated Purkinje cell populations by optogenetic stimulation targeting these cells. Photostimulation of these cells repressed eye movement in OKR, suggesting that the activated Purkinje cell populations are indispensable for eye movement.

These findings suggest the structure and roles of the functional compartments in the developing cerebellum.

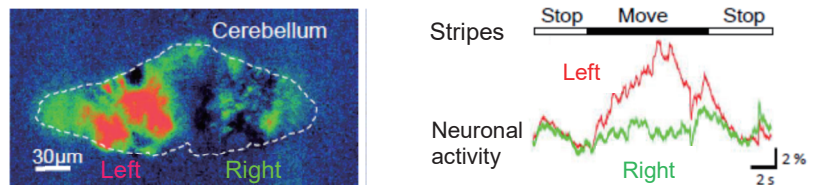


Figure 4. Response of Purkinje cells during OKR

3. 4D analysis of dynamic migratory behaviors of cell populations in cerebellar morphogenesis

During the early phase of the development, the cerebellum is first determined by the structural compartmentalization of the brain, such as midbrain-hindbrain boundary (MHB) formation. Although several regulatory mechanisms are known to underlie this compartmentalization¹⁰, little is known about the cell behaviors, especially from a 4D point of view.

Here, to examine the cellular dynamics around MHB, we performed confocal time-lapse imaging of the zebrafish embryos to track cell populations via 4D analysis. Eight to 24 hours of imaging of a transgenic fish in which a specific population of neuroprogenitor cells express GFP (green fluorescent protein) and quantitative analysis revealed novel types of cell migration, among which is the periodic migration from the MHB region toward the ventro-posterior direction in the neural tube including the cerebellum, followed by neuronal differentiation¹¹ (Figure 5). These cell populations with distinct behaviors might

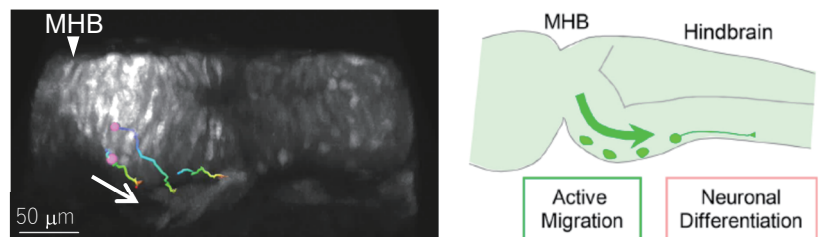


Figure 5. Migration of neuroprogenitor cells in the neural tube

contribute to the heterogeneity of neurons in the hindbrain and neural tube morphogenesis.

Acknowledgement

I would like to thank Kyo Yamasu, Akinori Kawamura (Saitama Univ.), Masahiko Hibi, Yoichi Oda (Nagoya Univ.) Hiroyuki Takeda, Yoshitaka Oka (The Univ. of Tokyo), Hitoshi Okamoto (RIKEN), Koichi Kawakami (NIG), Junichi Nakai (Tohoku Univ.), for their valuable supports. This work was supported by JST tenure track program of Saitama University (SUTT), Grants-in-Aid for Scientific Research, Kao foundation for Arts and Science, and Narishige foundation.

References

- 1 Mancuso JJ, Kim J, Lee S, Tsuda S, Chow NB, Augustine GJ. Optogenetic probing of functional brain circuitry. *Exp Physiol* **96**, 26-33 (2011).
- 2 St-Pierre F, Marshall JD, Yang Y, Gong Y, Schnitzer MJ, Lin MZ. High-fidelity optical reporting of neuronal electrical activity with an ultrafast fluorescent voltage sensor. *Nat Neurosci* **17**, 884-889 (2014).
- 3 Hochbaum DR, Zhao Y, Farhi SL, Klapoetke N, Werley CA, Kapoor V et al. All-optical electrophysiology in mammalian neurons using engineered microbial rhodopsins. *Nat Methods* **11**, 825-833 (2014).
- 4 Miyazawa H, Okumura K, Hiyoshi K, Maruyama K, Kakinuma H, Amo R, Okamoto H, Yamasu K, Tsuda S. Optical interrogation of neuronal circuitry in zebrafish using genetically encoded voltage indicators. *Scientific reports* **8**, 6048 (2018).
- 5 Cerminara NL, Lang EJ, Sillitoe RV, Apps R. Redefining the cerebellar cortex as an assembly of non-uniform Purkinje cell microcircuits. *Nat Rev Neurosci* **16**, 79-93 (2015).
- 6 Boyden ES, Zhang F, Bamberg E, Nagel G, Deisseroth K. Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity. *Nat Neurosci* **8**, 1263-1268 (2005).
- 7 Tsuda S, Kee MZ, Cunha C, Kim J, Yan P, Loew LM, Augustine GJ. Probing the function of neuronal populations: combining micromirror-based optogenetic photostimulation with voltage-sensitive dye imaging. *Neurosci Res* **75**, 76-81 (2013).
- 8 Kim J, Lee S, Tsuda S, Zhang X, Asrican B, Gloss B, Feng G, Augustine GJ. Optogenetic mapping of cerebellar inhibitory circuitry reveals spatially biased coordination of interneurons via electrical synapses. *Cell Rep* **7**, 1601-1613, doi:10.1016/j.celrep.2014.04.047 (2014).
- 9 Okumura K, Kakinuma H, Amo R, Okamoto H, Yamasu K, Tsuda S. Optical measurement of neuronal activity in the developing cerebellum of zebrafish using voltage-sensitive dye imaging. *Neuroreport* **29**, 1349-1354 (2018).
- 10 Nakayama Y, Kikuta H, Kanai M, Yoshikawa K, Kawamura A, Kobayashi K, Wang Z et al. Gbx2 functions as a transcriptional repressor to regulate the specification and morphogenesis of the mid-hindbrain junction in a dosage- and stage-dependent manner. *Mech Dev* **130**, 532-552 (2013).
- 11 Tsuda S*, Hiyoshi K, Miyazawa H, Kinno R, Yamasu K. 4D imaging identifies dynamic migration and the fate of gbx2-expressing cells in the brain primordium of zebrafish. *Neurosci Lett* **690**, 112-119 (2019).



Ⅱ

平成 30 年度

テニュアトラック教員の研究成果





Neal Bez 理工学研究科・数学 准教授

(平成 30 年度テニユア審査合格)



[学位]

2007 年 6 月: PhD in Mathematics (University of Edinburgh)

「Nonisotropic Operators Arising in the Method of Rotations」

[研究分野]

Harmonic analysis, geometric analysis, PDE theory

[研究の内容]

The focus of my research this year has been the nonlinear Brascamp-Lieb conjecture. Building on the partial progress towards this goal in the previous year, towards the end of 2018 in collaboration with J. Bennett, S. Buschenhenke, M. Cowling and T. Flock, I completely resolved the conjecture. This paper has been posted to the arXiv (ref. 1811.11052).

In collaboration with J. Bennett, S. Machihara and my Masters students Y. Aoki, K. Matsuura and S. Shiraki, we have also recently completed a project on Nelson's hypercontractivity inequality. In particular, we have identified a new perspective on this famous inequality in terms of supersolutions of the underlying diffusion equation. This paper has been posted to the arXiv (ref. 1905.07911).

Further directions of research have been explored too, including joint work with J. Cunanan and S. Lee on inhomogeneous Strichartz estimates for the wave equation (arXiv: 1902.01125), and work with J. Cunanan on smoothing estimates for velocity averages of solutions to the kinetic transport equation for initial data which possess radial symmetry.

平成 30 年度の研究成果

[論文(査読付)]

[1] Bez, N., Cunanan, J. “Smoothing estimates for velocity averages with radial data”, RIMS Kokyuroku Bessatsu (Accepted.)

[国際学会発表(招待講演)]

[1] Bez, N., “Mixed-norm estimates for multipliers associated with some hypersurfaces”, Harmonic Analysis and PDE Workshop, University of Birmingham (UK), September 2018.

[2] Bez, N., “The nonlinear Brascamp-Lieb inequality”, Analysis Seminar, Seoul National University (South Korea), March 2019.

[国内学会発表(招待講演)]

[1] Bez, N., “Smoothing estimates for the kinetic transport equation at the critical regularity”, 保存則をもつ偏微分方程式の解の正則性、特異性および漸近挙動の研究, 京都大学数理解析研究所, May 2018.

[2] Bez, N., “On the kinetic transport equation”, 調和解析と非線形偏微分方程式, 京都大学数理解析研究所, June 2018.

[3] Bez, N., “Strichartz estimates for orthonormal systems of initial data”, International Workshop on “Fundamental problems in mathematical and theoretical physics”, 早稲田大学, July 2018.

[4] Bez, N., “Geometric estimates arising in the analysis of Zakharov systems”, 日本数学会 2018 年度秋季総合分科会 (特別講演・函数方程式論分科会), 岡山大学, September 2018.

[5] Bez, N., “Strichartz estimates for orthonormal systems of initial data”, 16th Linear and Nonlinear Waves, 大阪大学, October 2018.

[6] Bez, N., “Smoothing estimates for velocity averages”, 関数方程式セミナー, 九州大学, October 2018.

[外部資金獲得]

平成 30 年度科学研究費助成事業 若手研究 A, “Conjectures associated with Brascamp-Lieb type inequalities” 10,100,000 円 (直接経費総額), 平成 28～30 年度.

津田佐知子

理工学研究科・生体制御 准教授

(平成 30 年度テニユア審査合格)



[学位]

2010 年 2 月: 博士 (理学) (東京大学)

「神経組織構築における Laminin1 の機能: メダカ変異体 *tacobo* を用いた解析」

[研究分野]

神経科学、発生生物学

[研究の内容]

小脳は様々な情報の統合の場として、感覚運動統合、運動学習、認知など多様な機能を持つと共に、神経回路研究の格好のモデルである。現在、小脳に存在する機能モジュールに注目し、理解の進んでいないその神経基盤と機能、構築メカニズムの解明を目指している。このため、発生・神経研究に適したゼブラフィッシュに、光技術 (カルシウム/膜電位イメージング・光遺伝学)、行動実験などを駆使・開発し研究を進めている。

平成 28 年度の研究成果

[論文 (査読付)]

- [1] Okumura K, Kakinuma H, Amo R, Okamoto H, Yamasu K, Tsuda S, Optical measurement of neuronal activity in the developing cerebellum of zebrafish using voltage sensitive dye imaging. *NeuroReport*, Vol. 29, 1349-1354, 2018.
- [2] Ikenoya C, Takemi S, Kaminoda A, Aizawa S, Ojima S, Gong Z, Chacrabati R, Kondo D, Wada R, Tanaka T, Tsuda S, Sakai T, and Sakata I, b-Oxidation in ghrelin-producing cells is important for ghrelin acyl-modification. *Scientific Reports*, Vol. 8, 9176, 2018.
- [3] Tsuda S*, Hiyoshi K, Miyazawa H, Kinno R, Yamasu K, 4D imaging and characterization of dynamic migratory

behaviors and fate of neuroprogenitors in zebrafish hindbrain. (*Corresponding author) *Neuroscience Letters*, Vol. 690, 112-119, 2019.

[国際学会発表(招待講演)]

[1] Tsuda S, Voltage imaging of the developing brain using VSD and genetically-encoded voltage indicators in zebrafish, Merocyanine 540 45+1 Symposium, ウッズホール海洋生物学研究所, 米国, 2018 年 9 月.

[2] Tsuda S, Optical interrogation of neuronal circuitry in zebrafish using genetically encoded voltage indicators, Voltage Imaging Symposium, 沖縄科学技術大学院大学 (OIST), 沖縄, 2018 年 10 月.

[3] Tsuda S, Toward understanding functional development of the cerebellar circuitry with GFP and voltage imaging, 5th Nagoya International Symposium on Neural Circuits: A Decade after "Discovery and Development of GFP": Expansion and Expectation, 名古屋大学, 2019 年 3 月.

[国内学会発表(招待講演)]

[1] 津田 佐知子, Proving the functional development of the cerebellum: voltage imaging in the zebrafish brain, 早稲田大学先進理工学研究科 生命医科学専攻セミナー, 東京, 2019 年 10 月. (他 2 件)

[国内学会発表(一般講演)]

[1] 日吉 加菜映, 弥益 恭, 津田 佐知子, 小脳神経回路における機能的区画の形成: ゼブラフィッシュを用いた 3 次元解析, 第 41 回日本神経科学大会, 横浜, 2018 年 7 月. (他 2 件)

[外部資金獲得]

- [1] AMED, モデル動物等研究コーディネーティングネットワークによる希少・未診断疾患の病因遺伝子変異候補の機能解析研究, H30-R1, 分担, 2,000 千円.
- [2] 成茂動物学研究助成, H30, 膜電位イメージングを用いた小型魚類の小脳発達機構, 代表, 500 千円.
- [3] 基礎生物学研究所共同利用, H30, IR-LEGO 光照射を用いた小脳機能的区画の形成メカニズムの解析, 代表, 340 千円.
- [4] 科学研究機補助金 (基盤研究 C), H29-R2, 脊椎動物胚の尾芽に存在する多分化能幹細胞の分化と脊髄発生の制御機構, 分担, 300 千円.

坂井建宣

理工学研究科・機械 准教授

(平成 30 年度テニユア審査合格)



[学位]

2008 年 3 月: 博士 (工学) (慶應義塾大学)

「熱可塑性樹脂およびその複合材料の線形粘弾性理論に基づくクリープ解析」

[研究分野]

粘弾性力学・複合材料・分子動力学シミュレーション・非破壊検査

[研究の内容]

粘弾性力学をベースに、高分子材料およびその複合材料や、生体材料の粘弾性特性や分子動力学シミュレーションによる粘弾性特性評価を行っている。また、Acoustic Emission 法を用いた非破壊検査法をベースにした複合材料の微視損傷蓄積過程の計測や関節音などの生体計測の分野において研究を進めている。

高分子材料においては、フィジカルエージング現象と呼ばれる構造の安定化現象や、応力緩和現象、体積クリープ解析などの粘弾性変形挙動について分子動力学シミュレーションを用いて解析を行っており、時間依存性、温度依存性、冷却速度依存性、分子量依存性のメカニズムを明らかにしている。特にポテンシャルエネルギーの変化や分子間結合角・ねじり角の変化を追うことによって明らかにしている。特に昨年度は高分子鎖の側鎖に着目し、側鎖の違いが粘弾性特性に及ぼす影響を明らかにし、分子量依存性および側鎖のサイズ依存性があることを明らかにした。

生物材料においては、生体組織の一つである皮膚に着目し、皮膚の UV 損傷が皮膚の粘弾性特性にどのよ

うな影響を及ぼすのか、また変形性膝関節症を模擬したブタ膝軟骨を用いて粘弾性特性に及ぼす変性の影響を明らかにしている。

Acoustic Emission 法を用いた研究では、炭素繊維強化複合材料の微視損傷蓄積過程の温度・ひずみ速度依存性に関する研究を行っている。本研究では熱可塑性樹脂を母材とする炭素繊維強化複合材料を題材に、樹脂の結晶化が機械的特性・粘弾性特性に及ぼす影響を明らかにしている。

平成 30 年度の研究成果

[論文(査読付)]

[1] 坂井 建宣, 鈴木 将士, 蔭山 健介, 分子動力学シミュレーションによるポリカーボネートの体積クリープの静水圧依存性評価, 日本複合材料学会誌, Vol. 45, No. 1, pp.26-33, 2019

他 3 件

[国際学会発表(一般講演)]

[1] Takenobu Sakai, Yuichiro Kudo, Satoshi Kobayashi and Kensuke Kageyama, Molecular Dynamics Simulation of Viscoelastic Behavior of Polypropylene, the 11th International Conference on the Mechanics of Time Dependent Materials, pp. 16-17, Keynote Lecture-Knauss Prize Awardee, 2018

他 10 件

[国内学会発表(一般講演)]

[1] 坂井 建宣, Nur Safiah Binti Shamsudim, 炭素繊維強化ポリアミドの結晶化が機械的特性に及ぼす影響, 第 10 回日本複合材料会議, 1D-15, 2018

他 5 件

[外部資金獲得]

[1] 平成 29 年度科学研究費助成事業 若手研究(A) “高分子材料の分子構造と寿命の関係の解明” 16,900,000 円 (直接経費総額), 平成 29~31 年度

[2] 株式会社日立化成 研究寄付金 500,000 円, 平成 30 年度

Sung-Chul Noh 研究機構 助教

(人文社会科学研究所・経営学、平成 27 年 4 月 1 日着任)



[学位]

2015 年 8 月：博士 (Management) (McGill University)

「Seeking solidarity among the heterogeneous: Exploring the process of collective action in pluralistic organizations」

[研究分野]

Workplace conflict, Social identity, Professional career, Corporate scandals

[研究の内容]

1. Collective action and institutional change.
2. Non-standard work arrangement and its implication for individuals and organizations.
3. Professionals and professional organizations.
4. Human Resource Management in Asia.

平成 30 年度の研究成果

[論文(査読付)]

- [1] Noh, S. (2019) “The Changing Face of Work Precarity: Dependent self-employed professionals and collective response to work precarity”, *Korean Journal of Industrial Relations*, 29(1): 55-81
- [2] Jang, H. & Noh, S. (2019) “Precarious Creative Workers and Their Identities: A Case of Employment Stabilization of Scriptwriters in a Local Broadcasting Station”, *Korean Journal of Labor Studies*, 25(1): 253-298

[3] Noh, S., Jung, H., & Lee, C. (2018) “A New Experiment or Institutional Subsumption? The Outcomes and Tasks of Contingent Worker Center for Korean Labor Movement”, *Korean Journal of Labor Studies*, 24(2): 137-179.

[4] Jung, H., Noh, S. & Kim, J. (2018) “The Process of Direct Employment of Agency Workers in Public Sector and its Performance Implication: Case Study of 120-Dasan Call Center in Seoul, South Korea”, *Labor Policy Review*, 18(3): 107-137.

[論文(査読なし)]

[1] Noh (2018) “The dynamics of outsourcing in the public sector: The case of public broadcasters” *Monthly Labor Review*, Vol. 164, 25-42. *Korea Labor Institute*.

[2] Noh et al. (2018) “KBS 非正規職雇用構造の改善と処遇改善の研究”, 韓国放送公社(KBS)

[3] Noh et al.(2018) “産業 4.0 時代の労働の未来-デジタルプラットフォーム労働の労働組合対応課題”, フリードリヒ・エバート財団

[4] Noh et al. (2018) “ソウル市の tbs フリーランサー, 非正規雇用構造改善の詳細実施へ”, ソウル市

[国際学会発表(一般講演)]

[1] Noh, S. & Yu, K. H. (2018) “Negotiating the crisis of meaning: Professional careers and the legitimation of commercial organizations” 34th EGOS Colloquium, Tallinn, Estonia, July 6-8, 2018

[2] Noh, S. (2018) “In the Era of Alternative Facts: Maintenance and Transformation of Professional Hierarchy in a News Organization” SASE 30th Annual Meeting. Kyoto, Japan, June 23-25, 2018

[国際学会発表(一般講演)]

2019, Giarratani Rising Star Award. Industry Studies Association

[外部資金獲得]

[1] 2018. 4~2020. 3 平成 30 年度科学研究費助成事業若手研究, 18K12834, “Non-standard(Dependent self-employed) Work in Professional Organizations and Workplace Conflict” 4,160,000 円

乙須 拓洋 研究機構 助教

(理工学研究科・応用化学、平成 27 年 4 月 1 日
着任)



[学位]

2009 年 3 月: 博士 (農学) (九州大学)

「The Electronic Relaxation Mechanism of Excited State Tryptophan as a Probe for Protein Conformation and Dynamics」

[研究分野]

生物物理化学, 分光物理化学

[研究の内容]

生体膜はあらゆる細胞に存在し、細胞内外を隔てることにより細胞内の恒常性維持に大きく寄与している。この生体膜の機能を理解するためには、その構成要素である脂質や膜蛋白質の膜上での挙動を正確に計測することが必要である。特に膜蛋白質の並進拡散速度は、膜蛋白質複合体の形成解離といった生体機能に重要なダイナミクスの速度論的な知見を与えるため、正確な計測が重要となってくる。拡散速度の計測には蛍光相関分光法と呼ばれる測定手法が広く用いられているが、現行の手法では複雑な構造を有する生体膜上分子の拡散係数を定量的に解析する事が困難なため、改良が求められている。

その点を克服するために、膜上での分子の並進拡散係数の正確な計測に特化した新たな蛍光相関分光装置の開発と、生体膜への応用を行っている。現在使用している装置は、全反射顕微鏡とパルスレーザーを組み合わせた蛍光相関分光装置である。全反射顕微鏡は、光の全反射により発生するエバネッセン

ト光を励起光として試料の観察を行う顕微鏡であり、通常の共焦点顕微鏡と比較して深さ方向の分解能が 10 倍近く高いのが特徴である。この特性はカバーガラス上に作成した人口生体膜の研究には非常に有利である。さらにパルスレーザーを励起光源として使用することで、蛍光寿命の情報を蛍光強度の情報とともに取得することが可能になる。これにより蛍光寿命の情報をもとに、検出される信号を異なる分子種ごとに分離し、それぞれの拡散係数を解析する事が可能になると期待される。

今後は本装置を生体膜特有の様々な課題に適用することにより、生体膜物性理解に向けた研究を推進していく。

平成 30 年度の研究成果

[論文(査読付)]

1. Takuhiko Otsu and Shoichi Yamaguchi “Total Internal Reflection Two-dimensional Fluorescence Lifetime Correlation Spectroscopy” *J. Phys. Chem. B* **122**, 5758-5764 (2018).
2. Takuhiko Otsu and Shoichi Yamaguchi “Two-dimensional Fluorescence Lifetime Correlation Spectroscopy: Concepts and Applications” *Molecules* **23**, 2972 (2018).
3. Takuhiko Otsu and Shoichi Yamaguchi “Quantifying the Diffusion of Lipids in the Proximal/Distal Leaflets of a Supported Lipid Bilayer by Two-dimensional Fluorescence Lifetime Correlation Spectroscopy” *J. Phys. Chem. B* **122**, 10315-10319 (2018).

[外部資金獲得]

平成 29 年度科学研究費助成事業 挑戦的研究(萌芽), 「新規光技術に基づく界面選択的流速計測法の開発と応用」, 4,700,000 円 (直接経費総額), 平成 29~30 年度

豊田正嗣 研究機構 准教授

(理工学研究科・分子生物学、平成 28 年 10 月 1 日
着任)



[学位]

2008 年 3 月: 博士 [医学] (名古屋大学)

「シロイヌナズナ胚軸および葉柄における重力応答性
細胞内カルシウム上昇」

[研究分野]

生物物理学・植物生理学

[研究の内容]

研究目標

「遠心顕微鏡」「超高感度発光測定装置」「広視野蛍光
顕微鏡」などの世界に 1 つしかないイメージング技術
を駆使して細胞内シグナルを可視化し、植物の様々な
感覚応答・伝搬機構を解き明かす。

研究内容

- ・ 植物の重力感受機構の研究
- ・ 植物-昆虫間相互作用の研究
- ・ オジギソウの高速接触運動の研究
- ・ 揮発性物質(緑のかおり)を介した植物-植物間コ
ミュニケーションの研究
- ・ グルタミン酸誘導性の植物の長距離カルシウムシ
グナル/病虫害抵抗性研究
- ・ 屈曲誘導性の側根形成の研究
- ・ 動物のイオン透過型グルタミン酸受容体の研究

平成 30 年度の研究成果

[論文・雑誌]

[1] Toyota M, Furuichi T, Iida H (2018) Molecular

Mechanisms of Mechanosensing and Mechanotransduction.
Plant Biomechanics 375-397.

[2] Toyota M*, Spencer D, Sawai-Toyota S, Wang J, Zhang
T, Koo AJ, Howe GA, Gilroy S* (2018) Glutamate triggers
long-distance, calcium-based plant defense signaling.
Science 361:1112-1115.

[3] 豊田正嗣 (2019) 植物の全身を流れる高速シグナル
を見る. *日経バイオテック* 902:44-46.

(その他 5 報)

[学会発表 (招待講演)]

[1] Toyota M (2019) Systemic calcium signaling via
glutamate receptor channels in response to mechanical
wounding. IPSR symposium, March 4-5, Okayama, Japan

(その他 4 件)

[新聞・メディア報道]

[1] 2018/11/08 *日経産業新聞* 次世代の先導者

[2] 2018/09/14 *読売新聞*

[3] 2018/09/14 *時事通信*

[4] 2018/09/14 *ナショナルジオグラフィック* 日本版

[5] 2018/09/14 *日本経済新聞*

[6] 2018/09/14 *National Geographic*

[7] 2018/09/13 *ScienceDaily*

[8] 2018/09/13 *Forbes*

[9] 2018/09/13 *The New York Times*

(その他 18 件)

[外部資金獲得]

[1] 平成 30 年度 科学研究費助成事業 新学術領域研
究 (研究領域提案型), “張力センサーを用いた細胞壁-
細胞膜インターフェイスの構造力学的研究” 44,700,000
円 (直接経費総額), H30~R4 年度, 代表 (総括班/計画
班)

[2] 平成 30 年度 科学研究費助成事業 新学術領域研
究 (研究領域提案型), “根-地上部間を伝搬する高速カ
ルシウムシグナルの分子基盤” 9,850,000 円 (直接経費
総額), H30~R1 年度, 代表 (公募班) *重複受給制限の
ため年度途中で辞退

[3] 平成 30 年度 科学研究費助成事業 若手研究 (A),
“新規顕微鏡法を用いた植物の重力センサーの解明”
20,200,000 円 (直接経費総額), H29~R1 年度, 代表

川村隆三 理工学研究科 助教

(戦略的研究部門 ライフ・ナノバイオ領域)

平成 29 年 10 月 1 日 着任)



[学位]

2008年12月：博士(理学)、北海道大学
「キネシンによる微小管の動的自己組織化」

[研究分野]

生物物理化学、高分子化学(モータータンパク質、細胞運動、ゲル)

[研究の内容]

生物の運動機能の根幹的な動力源であるモータータンパク質、細胞骨格タンパク質が分子の集団として発揮する機能の探索・解明、および工学的利用について研究しています。生物の運動に特有な、「スケールの幅の広さ(バクテリアからクジラまで)やしなやかさ、エネルギー効率の良さ、といった特徴を再現するにはどのような工夫が必要なのか」、また「どうすれば材料として有効活用できるのか」、という問いに答えることを目標にして研究を展開しています。

平成30年度の研究成果：

[査読付き学術論文]

- [1] K Hatazawa, H Miyazako, R Kawamura, T Hoshino. Start/Stop Motion Control of a Targeted Microtubule Using Virtual Cathode

Display. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*, **514**, 821–825 (2019).

- [2] K Meguriya, S Kikuchi, N Kobayashi, HY Yoshikawa, S Nakabayashi, R Kawamura. Reversible surface functionalization of motor proteins for sustainable motility. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, SDDI01 (2019).
- [3] AR Loukanov, AG Basnakian, R Kawamura, H Udono, CK Filipov, AV Savenka, T Fite, S Nakabayashi. Light-Powered Nanoconverters Cytotoxic to Breast Cancer Cells. *J Phys Chem C*, **122**, 7916–7924 (2018).

[学会発表(招待講演)]

- [1] Ryuzo Kawamura, Tsuyoshi Yokoyama, Keisuke Meguriya, Naritaka Kobayashi, Seiichiro Nakabayashi, Hiroshi Y. Yoshikawa. “Building up a Multi-Channel Flow System to Analyze Cellular Mechanical Behavior Utilizing Dynamic Network of Microtubule Gel Driven by Kinesins”, Gel Sympo 2018, 山形大学米沢キャンパス(山形・米沢, 平成30年8月).

[学会発表(一般公演)]

- [1] K Meguriya, S Kikuchi, N Kobayashi, HY Yoshikawa, S Nakabayashi, R Kawamura. “Removal of Surface Adsorbed Kinesin by Multi-Photon Laser Ablation and Reloading toward Arbitral Patterning of Microtubule Driving Track”, (口頭発表) NMC 2018, 札幌パークホテル(北海道・札幌市, 平成30年11月).
- [2] K Hatazawa, H Miyazako, R Kawamura, T Hoshino. “Temporal-Stop of Microtubule Movement by Electrical Stimulation on Virtual Cathode”, (口頭発表) NMC 2018, 札幌パークホテル(北海道・札幌市, 平成30年11月).

[その他の活動]

- [1] Semmelweis大学(ハンガリー)生物物理学・放射生物学科と埼玉大学大学院理工学研究科との部局間学術交流協定締結 平成30年5月15日

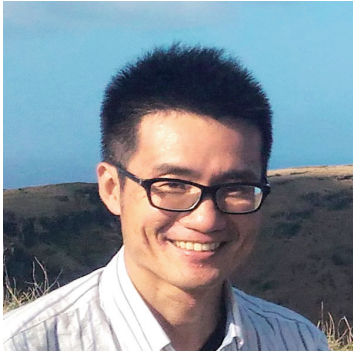
[外部資金]

- [1] 日揮・実吉奨学会研究助成「運動界面を利用した転移性がん細胞の変形応答評価系の開発」：2,000千円(代表)

勝田哲 理工学研究科 助教

(戦略的研究部門 X線光赤外線宇宙物理領域)

平成 29 年 10 月 1 日着任)



[学位]

2008 年 3 月: 博士 (理学) (大阪大学)

「古い超新星残骸の X 線による観測的研究」

[研究分野]

天文学

[研究の内容]

大学院時から一貫して宇宙物理学、とりわけ「超新星残骸」という天体の観測的研究を進めています。超新星残骸とは、星が一生の最期に起こす大爆発「超新星爆発」の痕跡で、電波からガンマ線まで様々な波長で明るく輝く花火のような天体です。私は日々これらの詳細な観測を通じ、超新星爆発の仕組みの解明、恒星内部および超新星爆発時に進む元素合成理論の直接検証、超高エネルギー粒子「宇宙線」の加速メカニズムの解明など、様々な研究課題に取り組んでいます。

平成 30 年度の研究成果

[論文(査読付き)]

[1] Takahashi, T., et al., including Katsuda, S. as a 92nd author, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 4 (2), 021402 (14pp), 2018

[2] Hitomi Collaboration, including Katsuda, S. as a 66th author, *Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol.70, 3 (16pp), 2018

[3] Frascetti, F., Katsuda, S., Sato, T., Jokipii, J.R., & Giacalone, J., *Physical Review Letters*, 120, 251101 (5pp), 2018

[4] Katsuda, S., Takiwaki, T., Tominaga, N., Moriya, T.J., & Nakamura, K., *The Astrophysical Journal*, 863, 127 (9pp), 2018

[5] Hitomi Collaboration, including Katsuda, S. as a 66th author, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 70, 113 (19pp), 2018

[6] Uchida, H., Katsuda, S., Tsunemi, H., Mori, K., Cumbee, R., Petre, R., Gu L., Tanaka, T., *The Astrophysical Journal*, 871, 234 (8pp), 2019

[国際学会発表]

[1] Katsuda, S., “Observations of X-Ray Emission from Thin-Thermal Plasmas in Supernova Remnant”, Collaborative Conference on Plasma Physics, Dubrovnik (Croatia), May, 2018 (招待講演)

[2] Katsuda, S., et al., “H α Polarization Measurements of Tycho’s Eastern Limb with the Subaru FOCAS”, SKA Workshop “The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of Cosmic Magnetic Fields”, Miyazaki (Japan), May, 2018 (口頭発表)

[3] Katsuda, S., “SNR View on SN Ia Progenitors”, 15th Marcel Grossmann Meeting (MG15), Rome (Italy), July, 2018 (招待講演)

[4] Katsuda, S., et al., “Progenitor Mass Distribution of Core-Collapse Supernova Remnants in Our Galaxy and Magellanic Clouds”, IWARA2018, Ollantaytambo (Peru), Sep., 2018 (招待講演)

[5] Katsuda, S., et al., “Establishing Charge Exchange X-Ray Emission from Supernova Remnants with Athena’s X-IFU”, Exploring the Hot and Energetic Universe: The second scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory”, Palermo (Italy), Sep., 2018 (口頭発表)

その他、口頭発表 1 件、ポスター発表 3 件。

[国内学会発表]

[1] Katsuda, S., “Probing Supernova Progenitors from Observations of Supernova Remnants”, 10th DTA Symposium: Stellar deaths and their diversity, 国立天文台, 2019 年 1 月(招待講演)

その他、口頭発表 1 件。

[外部資金獲得]

平成 29 年度科学研究費助成事業 若手研究 B, “超新星残骸の X 線および可視光観測で迫る Ia 型超新星の親星と最大光度の関係” 3, 100, 000 円 (直接経費総額), 平成 28~30 年度。

Ⅲ 研究発表会開催の記録

埼玉大学研究機構テニュアトラック 第1回研究発表会 (2015/4/17 開催)

プログラム

前半司会 坂井建宣 研究機構・准教授

13:00-13:05

学長挨拶

山口宏樹 埼玉大学・学長

13:05-13:20

新入のテニュアトラック教員自己紹介

Sung-Chul Noh 研究機構 助教 (経済学部)

乙須拓洋 研究機構 助教 (理工学研究科・応用化学)

13:20-13:50

埼玉大学のテニュアトラック普及・定着事業の現状と課題
—テニュアトラック制度を新時代の要請に応える教員採用制度とするためには—

小田匡寛 特任教授 (テニュアトラック推進オフィス)

13:50-14:20

気体 detonation (爆轟) で生成される高圧・高温環境
を利用した新しい飛翔体加速装置

(A new projectile launcher driven by high pressure/temperature environments behind gaseous detonations)

前田慎市 研究機構 助教 (理工学研究科 機械)

14:20-14:50

Harmonic analysis and interactions with partial differential equations and geometric computation
(調和解析と偏微分方程式及び幾何計算との相互作用)

Neal Bez 研究機構 准教授 (理工学研究科 数学)

14:50-15:20

神経回路の構築機構—光を用いて脳の形と機能を観る—
(Probing the structure and function of the neural circuitries via optical techniques)

津田佐知子 研究機構 助教 (理工学研究科 生体制御)

15:20-15:50 休憩

後半司会 Neal Bez 研究機構・准教授

15:50-16:20

特別講演:テニュアトラック教員を経験して

遠山忠 山梨大学 准教授

16:20-16:50

音響情報を利用した非侵襲的診断法
(Non-invasive diagnosis method by using bioacoustic information)

坂井建宣 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)

16:50-17:20

Evaluation of relative sea level rise and regional projection
(相対性海面上昇評価とリージョナル予測)

李 漢洙 研究機構 准教授 (理工学研究科 社会基盤)

17:20-17:50

Between “Russian Jew” and “Jew”: Zionism and Jewish Nationalism after the Collapse of Empire
(「ロシア・ユダヤ人」と「ユダヤ人」のあいだ

—帝国崩壊後のシオニズムとユダヤ・ナショナリズム—
鶴見太郎 研究機構 准教授 (教養学部 社会学)

17:50-18:00

挨拶と研究発表会の総括 (Concluding remarks)

坂井貴文 理工学研究科 教授 (理工学研究科長)



学長挨拶
山口宏樹 埼玉大学学長



Sung-Chul Noh 研究機構 助教 (経済学部)



乙須拓洋 研究機構 助教 (理工学研究科 応用化学)



小田匡寛 特任教授 (テニュアトラック推進オフィス)



講演「気体デトネーション (爆轟) で生成される
高圧・高温環境を利用した新しい飛翔体加速装置」
前田慎市 研究機構 助教 (理工学研究科 機械)



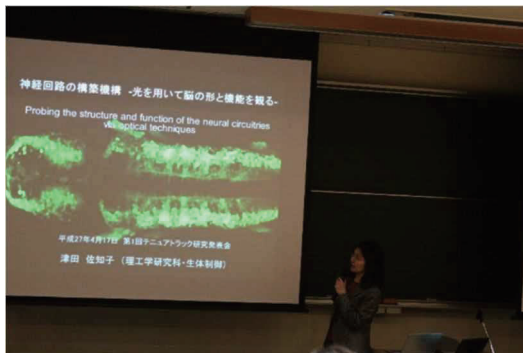
講演「音響情報を利用した非侵襲的診断法」
坂井建宜 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)



講演「調和解析と偏微分方程式及び幾何計算との相互作用」
Neal Bez 研究機構 准教授 (理工学研究科 数学)



講演「相対性海面上昇評価とリージョナル予測」
李 漢洙 研究機構 准教授 (理工学研究科 社会基盤)



講演「神経回路の構築機構—光を用いて脳の形と機能を観る—」
津田佐知子 研究機構 助教 (理工学研究科 生体制御)



講演「「ロシア・ユダヤ人」と「ユダヤ人」のあいだ
—帝国崩壊後のシオニズムとユダヤ・ナショナリズム—」
鶴見太郎 研究機構 准教授 (教養学部 社会学)



特別講演「テニュアトラック教員を経験して」
遠山忠 山梨大学 准教授



挨拶と研究発表会の総括
坂井貴文 理工学研究科 教授

埼玉大学研究機構テニユアトラック
第2回研究発表会 (2016/4/15 開催)

プログラム

前半司会 前田慎市 研究機構・助教
Sung-Chul Noh 研究機構・助教

13:00-13:05

開会挨拶

佐藤勇一 埼玉大学・研究機構長

13:05-13:20

気体デトネーション(爆轟)の「抑止」と「応用」

前田慎市 研究機構 助教 (理工学研究科 機械)

13:20-13:35

分子動力学シミュレーションを用いたフィジカルエージング現象の再現

坂井建宣 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)

13:35-13:40 質疑

13:40-13:55

Structural and functional compartmentalization in the cerebellar circuitry development

津田佐知子 研究機構 助教 (理工学研究科 生体制御)

13:55-14:10

新規蛍光相関分光法の開発に基づく生体膜中分子の並進拡散測定

乙須拓洋 研究機構 助教 (理工学研究科 応用化学)

14:10-14:15 質疑

14:15-14:30 休憩 (Coffee Break)

後半司会 津田佐知子 研究機構・助教

乙須拓洋 研究機構・助教

14:30-15:10

特別講演:信州大学テニユアトラック制度の歩み

伊藤建夫 信州大学 テニユアトラック事業コーディネーター 特任教授

15:10-15:25

Application of harmonic analysis techniques to dispersive partial differential equations

Neal Bez 研究機構 准教授 (理工学研究科 数学)

15:25-15:40

Impacts of tides on tsunami propagation in the Seto Inland Sea, Japan

李 漢洙 広島大学大学院国際協力研究科 准教授

(前 埼玉大学研究機構 准教授(理工学研究科 社会基盤))

15:40-15:45 質疑

15:45-16:00

The Transformation of Jewish Identity behind the Militarization of Zionism

鶴見太郎 東京大学大学院総合文化研究科

地域文化研究専攻 准教授

(前 埼玉大学研究機構 准教授(人文社会科学研究科 社会学))

16:00-16:15

A Pacified Labour?The Transformation of Labour Conflict.

Sung-Chul Noh 研究機構 助教 (人文社会科学研究科 経営学)

16:15-16:20 質疑

16:20-16:25

閉会挨拶

桐谷正信 研究機構研究企画推進室 室長



開会の挨拶
佐藤勇一 研究機構長



講演「気体デトネーション(爆轟)の「抑止」と「応用」」
前田慎市 研究機構 助教 (理工学研究科 機械)



講演「分子動力学シミュレーションを用いた
フィジカルエージング現象の再現」
坂井建宣 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)



講演「Structural and functional compartmentalization in the cerebellar circuitry development」
津田佐知子 研究機構 助教(理工学研究科 生体制御)



講演「Impacts of tides on tsunami propagation in the Seto Inland Sea, Japan」
李 漢洙 広島大学大学院国際協力研究科 准教授
(前 埼玉大学研究機構 准教授(理工学研究科 社会基盤))



講演「新規蛍光相関分光法の開発に基づく生体膜中分子の並進拡散測定」
乙須拓洋 研究機構 助教(理工学研究科 応用化学)



講演「The Transformation of Jewish Identity behind the Militarization of Zionism」
鶴見太郎 東京大学大学院総合文化研究科 地域文化研究専攻 准教授
(前 埼玉大学研究機構 准教授(人文社会科学研究科 社会学))



特別講演「信州大学テニュアトラック制度の歩み」
伊藤建夫 信州大学テニュアトラック 事業コーディネーター特任教授



講演「A Pacified Labour? The Transformation of Labour Conflict.」
Sung-Chul Noh 研究機構 助教(人文社会科学研究科 経営学)



講演「Application of harmonic analysis techniques to dispersive partial differential equations」
Neal Bez 研究機構 准教授(理工学研究科 数学)



閉会の挨拶
桐谷正信 研究機構研究企画推進室 室長

17:05-17:10

閉会挨拶

桐谷正信 研究機構研究企画推進室 室長

埼玉大学研究機構テニユアトラック 第3回研究発表会 (2017/7/28 開催)

プログラム

前半司会 津田佐知子 研究機構・助教
乙須拓洋 研究機構・助教

14:25-14:30

開会挨拶

佐藤勇一 埼玉大学・研究機構長

14:30-14:45

デトネーション燃焼を応用したエンジン

前田慎市 研究機構 助教 (理工学研究科 機械)

14:45-14:50 質疑

14:50-15:05

CFRP 積層板の接着不良評価

坂井建宜 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)

15:05-15:10 質疑

15:10-15:25

高次元における立方体の切断面

Neal Bez 研究機構 准教授 (理工学研究科 数学)

15:25-15:30 質疑

15:30-15:45

Managing PhDs: 専門家たちの人的資源管理

(サムスン電子のケース)

Sung-Chul Noh 研究機構 助教 (人文社会科学 経営学)

15:45-15:50 質疑

15:50-16:05 休憩

後半司会 前田慎市 研究機構・助教

Sung-Chul Noh 研究機構・助教

16:05-16:20

細胞膜研究のための新規分光法の開発と応用

乙須拓洋 研究機構 助教 (理工学研究科 応用化学)

16:20-16:25 質疑

16:25-16:40 小脳の形と機能の形成

津田佐知子 研究機構 助教 (理工学研究科 生体制御)

16:40-16:45 質疑

16:45-17:00

植物の長距離・高速シグナル

豊田正嗣 研究機構 准教授 (理工学研究科 分子生物)

17:00-17:05 質疑



開会の挨拶
佐藤勇一 研究機構長



講演「デトネーション燃焼を応用したエンジン」
前田慎市 研究機構 助教 (理工学研究科 機械)



講演「CFRP 積層板の接着不良評価」
坂井建宜 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)



講演「高次元における立方体の切断面」
Neal Bez 研究機構 准教授 (理工学研究科 数学)



講演「小脳の形と機能の形成」
津田佐知子 研究機構 助教
(理工学研究科 生体制御)



講演「Managing PhDs: 専門家たちの人的資源管理
(サムスン電子のケース)」
Sung-Chul Noh 研究機構 助教
(人文社会科学研究科 経営学)



講演「植物の長距離・高速シグナル」
豊田正嗣 研究機構 准教授
(理工学研究科 分子生物)



講演「細胞膜研究のための新規分光法の開発と応用」
乙須拓洋 研究機構 助教 (理工学研究科 応用化学)



閉会の挨拶
桐谷正信 研究機構研究企画推進室 室長

埼玉大学研究機構テニユアトラック
第4回研究発表会 (2018/7/27 開催)

プログラム

前半司会 乙須拓洋 研究機構 ・助教
勝田 哲 理工学研究科 ・助教

14:05-14:10

開会挨拶

伊藤修 埼玉大学・研究機構長

14:10-14:25

オジギソウは、何のためにお辞儀をするのか？

豊田正嗣 研究機構 准教授 (理工学研究科 分子生物)

14:25-14:30 質疑

14:30-14:45

Brascamp-Lieb の不等式:掛谷予想と Vinogradov 予想の
架け橋

Neal Bez 研究機構 准教授 (理工学研究科 数学)

14:45-14:50 質疑

14:50-15:05

Professionals in the hierarchical order:Balancing
control and autonomy

Sung-Chul Noh 研究機構 助教 (人文社会科学研究所
経営学)

15:05-15:10 質疑

15:10-15:25

運動界面を用いた細胞の動的力学環境構築と変形性評価
川村隆三 理工学研究科 助教 (理工学研究科 基礎化学)

15:25-15:30 質疑

15:30-15:45 休憩

後半司会 Sung-Chul Noh 研究機構 ・助教
川村隆三 理工学研究科 ・助教

15:45-16:00

超新星残骸の X 線観測から迫る超新星爆発の仕組み
勝田哲 理工学研究科 助教 (理工学研究科 物理)

16:00-16:05 質疑

16:05-16:20

細胞膜研究のための新規分光法の開発と応用

乙須拓洋 研究機構 助教 (理工学研究科 応用化学)

16:20-16:25 質疑

16:25-16:40 高分子材料の粘弾性変形機構

坂井建宣 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)

16:40-16:45 質疑

16:45-17:00

新たな手法として気体デトネーションを用いた
爆風シミュレータ

前田慎市 理工学研究科 准教授 (理工学研究科 機械)

17:00-17:05 質疑

17:05-17:10

閉会挨拶

石井昭彦 研究機構研究企画推進室 室長



開会の挨拶
伊藤修 研究機構長



講演「オジギソウは、何のためにお辞儀をするのか？」
豊田正嗣 研究機構 准教授 (理工学研究科 分子生物)



講演「Brascamp-Lieb の不等式:掛谷予想と Vinogradov
予想の架け橋」
Neal Bez 研究機構 准教授 (理工学研究科 数学)



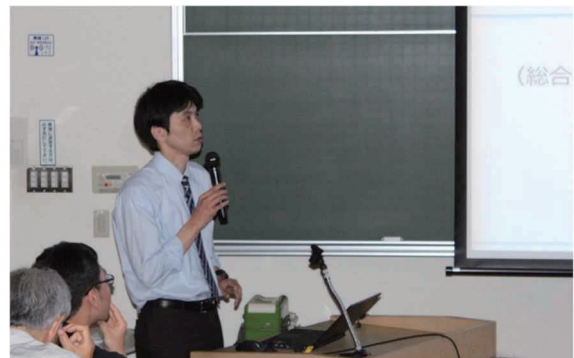
講演「Professionals in the hierarchical order:Balancing control and autonomy」
Sung-Chul Noh 研究機構 助教 (人文社会科学研究科 経営学)



講演「高分子材料の粘弾性変形機構」
坂井建宣 研究機構 准教授 (理工学研究科 機械)



講演「運動界面を用いた細胞の動的力学環境構築と変形性評価」
川村隆三 理工学研究科 助教 (理工学研究科 基礎化学)



講演「新たな手法として気体デトネーションを用いた爆風シミュレータ」
前田慎市 理工学研究科 准教授 (理工学研究科 機械)



講演「超新星残骸の X 線観測から迫る超新星爆発の仕組み」
勝田哲 理工学研究科 助教 (理工学研究科 物理)



講演「細胞膜研究のための新規分光法の開発と応用」
乙須拓洋 研究機構 助教 (理工学研究科 応用化学)



閉会の挨拶
石井昭彦 研究機構研究企画推進室 室長

IV メンターからの一言

長澤 壯之 理工学研究科教授（数学）

（Neal Bez 准教授のメンター）

埼玉大学では、平成 24 年度にテニュアトラック制度を導入し、初期に採択された教員は、多くの研究実績を挙げ無事に本学や他大学でテニュアを付与されている。「その意味」では、制度は機能を果たしていると言える。「別の意味」ではどうだろうか。テニュアトラック教員は、その趣旨から資金面でも時間面でも研究に対して優遇される。それは、他の教員の負担と表裏一体の関係にある。テニュアトラック教員の成果のみを見て、制度が機能しているか否かを判断するのは危険である。埼玉大学全体として研究面・教育面でのパフォーマンスは上がったのか。多くの教員が研究に対する資金と時間のやりくりで苦慮している中、この制度がこれに拍車をかけていないか。検証は困難であるが、目をそむけてはいけない問題である。

弥益 恭 理工学研究科教授（生体制御）

（津田佐知子准教授のメンター）

本学のテニュアトラック制度では、文部科学省の「テニュアトラック普及・定着事業」、「卓越研究員事業」により、すでに多くの優秀な若手教員が採用されている。本制度では、透明性の高い選考により若手研究者を任期付で採用、自立した研究環境を準備した上、厳正な審査を経てテニュアを付与することにより、本学の研究力アップ、指導者育成などが意図されていたと思うが、先行した教員についてはここ数年、厳しい条件をクリアし、テニュアが付与されつつあり、本制度は順調に成果を挙げてきたと考える。しかし、課題も見えていないのではないかと考える。特に、限られた研究費や研究スペースなどの学内資源を前提として、こうした若手教員の研究力をさらに発展させ、本制度を継続的に維持し、定着させるための体制整備が期待される。

蔭山 健介 理工学研究科教授（機械）

（坂井建宣准教授のメンター）

若手研究者の自立を支援する制度として、本学のテニュアトラック制は一定の成果を挙げていると感じています。一方で、若手研究者が早期に独立した研究室を主宰することが、テニュアトラック制の本来の理念でもありますが、そもそも物理的スペースが不足しているなど本学の研究環境では達成が難しい一面もあると思います。とはいえ、様々な分野の研究者が 1 キャンパスに集う本学の独自性を活かせば、若手研究者の意欲・能力が最大限発揮されるような本学独自の研究体制の仕組みを構築できるのではないかと期待しています。そのためにも、テニュアトラック制により活躍されている若手研究者による幅広い学問領域の連携とそれらの知識の統合により、新たな研究分野が開拓されることを願っています。





□編集/テニュアトラック推進オフィス

□住所/〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255 □TEL/048-829-7113

□ホームページ/<http://www.saitama-u.ac.jp/iron/tt/>