

1. 背景

宇宙では天体は単独で存在するというよりも、むしろ、星は集まって銀河となり、銀河が集まって銀河団を作ることが知られます。それらがさらに編み目のように連なって大規模構造を形作ります(図1)。これを宇宙の階層構造と呼んでいます[1]。では膨張を続ける宇宙のなかで、銀河や銀河団のような大きな天体は、いつどのように生まれ、進化してきたのでしょうか？ 近年の宇宙マイクロ波背景放射の全天観測により宇宙モデルが精度よく決定された[2]一方で、その中での天体形成や大規模構造の進化を理解することが現代の宇宙物理学の大きな課題の一つになっています。私は天体の放つ様々な波長の電磁波を人工衛星や地上望遠鏡で観測することで、これらの問題の解決を目指しています。

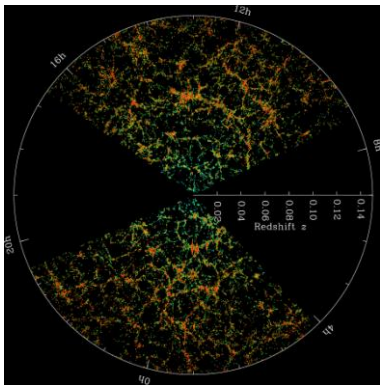


図1. スローンデジタルスカイサーベイによる宇宙地図 (M. Blanton and the Sloan Digital Sky Survey提供)。一つ一つの点は銀河で、銀河が密集するフィラメントと銀河がほとんど存在しないボイドが見られる。

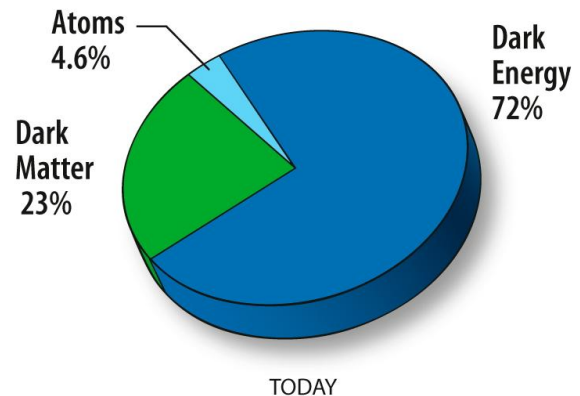


図2. 現在の宇宙の組成比[3]。WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射の全天サーベイから決定されたもの。通常の物質はわずか4.6%で、23%がダークマター、72%はダークエネルギーが占める。

上で述べたように、宇宙においては銀河や銀河団は網目状(フィラメント状)に連なり、大規模構造を形成しています。銀河団や大規模構造の起源は、理論的には宇宙初期に生じた密度ゆらぎが自己重力で成長したものと説明されます。しかし、このような構造を作るには材料となるガスや星自身の重力だけでは足りず、その10倍近いダークマター(暗黒物質)と呼ばれる物質が大量にそこに潜っていなければならないと考えられています。しかし、ダークマターには重力は働くもののそれ自身は光を発しないために直接観測が難しく、未だにその正体は解明されていません。これは宇宙物理学の大問題で、ダークエネルギーの存在とともに21世紀の最大の難問の一つに位置づけられています。なおここでダークエネルギーとは万有斥力を及ぼし、この宇宙を加速膨張させているエネルギーで、その正体は

ダークマター以上にわかっていません。図2に示したように、現在の宇宙の組成比においては、我々の知る通常の物質はわずか4.6%しかなく、残りはダークマターとダークエネルギーによって占められていることが報告されています。このような未解決の謎の解決に向けて、ダークマターを最も多く含む天体である銀河団の研究は大いに注目されています。

2. 宇宙最大の天体、銀河団

2.1 銀河団とは

銀河団とは、その名の通り多数の銀河が群れをなす宇宙で最も大きな天体です[4]。この銀河団を可視光で見ると、100~1000個の銀河がお互いの重力で引き合っただけで寄せ集まっているように見えますが、我々の目には見えないX線で観測すると姿ががらり一変します。銀河と銀河の間の空間は真空ではなく、数千万度から1億度近い高温で希薄なガスが満たし、それが全体的に光っている様子が浮かび上がるのです(図3)。ここで、銀河団を構成するのは実は銀河と高温ガスだけではなく、その質量の最も重要な担い手はダークマターであると考えられています。これについては §2.2 で述べることにします。また、私たちの住む太陽系を含む天の川銀河もおとめ座を中心とする超銀河団の一部であるといわれ、その他に今までに見つかっているだけでも1万個を超える銀河団があります。このことから銀河団は宇宙を代表する天体であるといえます。

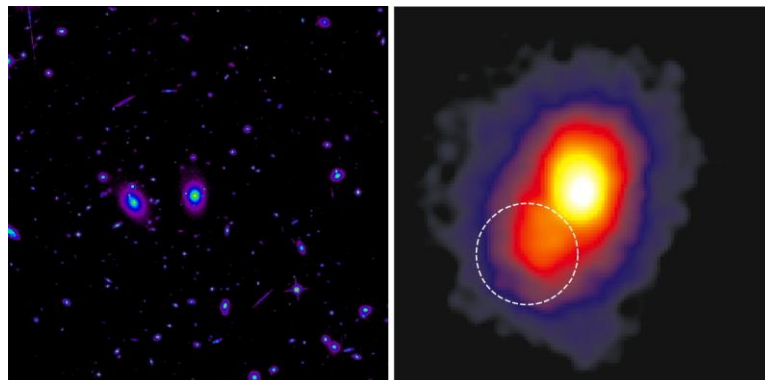


図3. 距離約50億光年にある銀河団RXJ1347-1145。左がハッブル宇宙望遠鏡による可視光画像、右がチャンドラ衛星によるX線画像。いずれも図の一边は約200万光年に対応する。右の点線で囲った領域に、宇宙で最も高温の3億度のガスが見つかった(詳しくは§3.3参照)。

2.2 銀河団中のダークマターの存在と質量推定

さて、銀河団に含まれるダークマターの存在や質量はどのように確かめることができるのでしょうか。古典的には、銀河団中のメンバー銀河の運動速度からビリアル定理を用いて推定されてきました。一見すると静止しているように見える銀河ですが、実際には毎秒1000km近い速度で銀河団の中を飛び回っています。そんな高速で動いている銀河がちりぢりにならないで一カ所に集団をなしているためには、それをつなぎ止める重力が必要で

す。その大きさをビリアル定理から求めると、質量にして太陽の $10^{14} \sim 10^{15}$ 倍にもなります（1太陽質量は 1.99×10^{33} グラム）。このほとんどを星やガス以外の「見えない物質」、ダークマターが担っているのです。

近年ではより精度の良いダークマター質量の測定方法として、(1)高温ガスのX線放射を観測する方法と(2)可視光の重力レンズ効果を用いる方法がよくとられます[5]。これらの原理を簡単に紹介します。

(1)高温ガスのX線観測による質量測定

ここではまず簡単のため球対称の銀河団を考えます。ダークマターの重力ポテンシャルに高温ガスが束縛され、ガスに働く内向きの重力と外向きの圧力勾配が釣り合っているとします。この釣り合いの条件を静水圧平衡といいます。ここで、ガスの圧力はガスの密度と温度の積で与えられるので、この二つをX線スペクトルデータから求めれば、静水圧平衡条件から重力源であるダークマターの質量が推定できます。

(2)重力レンズ効果による質量測定

銀河や銀河団などの重力ポテンシャルによって、一般相対論的效果で光が曲げられる現象を重力レンズ効果といいます。この効果によって、銀河団の背後にある天体の像が引き延ばされたり複数に分裂したりして見えることがあります(図4)。そこで、どのようなレンズ像が観測されるかは、重力源である銀河団中のダークマターの分布と三者(観測者・銀河団・背景天体)の位置関係に依存します。この性質から、背景天体までの距離や重力レンズ像の形状を詳しく調べることでダークマターの質量を推定することが可能です。

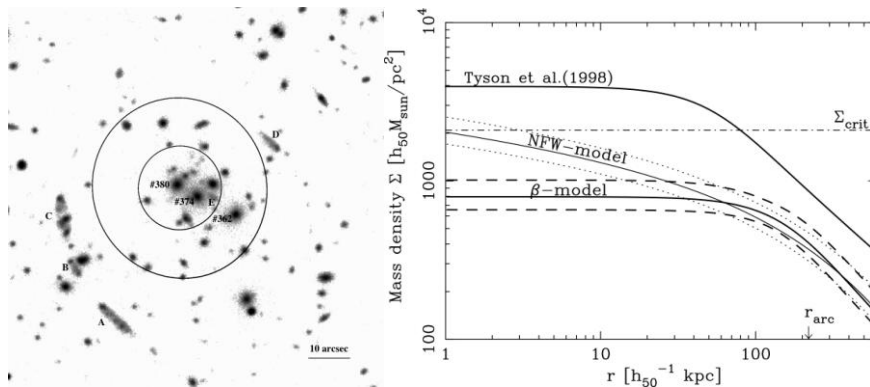


図4. (左)Canada-France-Hawaii 望遠鏡による重力レンズ銀河団 CL0024+17 の可視光画像。#374, 380 等は銀河団に属する銀河、A~E は銀河団の重力レンズ効果によってゆがめられた背景天体の像。(右)CL0024+17 銀河団におけるダークマター質量分布の推定結果[5]。β-model, NFW-model とあるのがX線観測に基づいて推定した質量分布、Tyson et al.(1998)とあるのが重力レンズ効果によって求められた質量分布。

3. これまでの研究

ここまで、銀河団の一般的な性質や宇宙大規模構造におけるダークマターの問題などについてふれてきました。本章では私がこれまでに行ってきた研究のなかからいくつかの成果を紹介します。この他に、X線衛星搭載用の検出器の開発や校正実験にも携わってきましたが[6,7,8 など]、主に銀河団研究に焦点をあてて述べることにします。

3.1 X線観測を用いた銀河団の構造進化の統一的研究

「あすか」衛星およびローサット衛星を用いて、79個という過去最大サンプル数の遠方銀河団のX線データを統一的に解析し、高温ガスの温度および空間分布を精度良く調べました。これ以前には遠方銀河団のまとまった解析結果はなく、初めて距離約90億光年までの銀河団について信頼性の高いX線カタログを完成させることができました(図5)。その結果、近傍宇宙から距離約60億光年までの高温プラズマの性質には大きな進化がないことがわかり、同時に銀河団中心の高密度領域(これをコアと呼ぶ)の大きさが50 キロパーセクと200 キロパーセクという特徴的な2つのスケールを持つことを発見しました[9,10,11]。

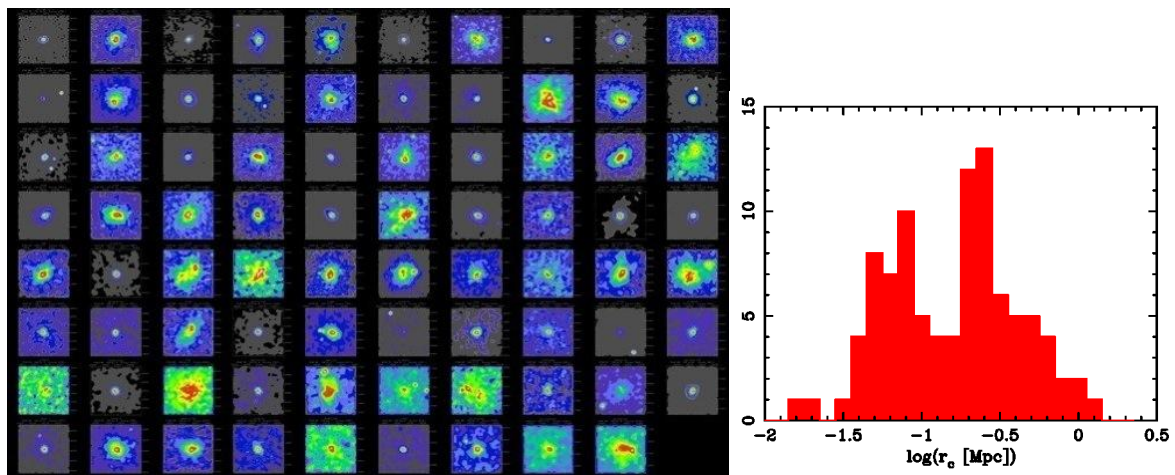


図 5. (左) 遠方銀河団カタログ[9,10]。ローサット衛星による 79 個の遠方銀河団の X 線画像をタイル状に並べたもの。(右) 銀河団のコアの大きさ度数分布[9]。50 キロパーセクと 200 キロパーセクに顕著なピークがみられる。1 パーセクは約 3 光年($3 \times 10^{18} \text{cm}$)に相当。

理論的モデルからは予想もされなかったこの 2 つのスケールの起源に迫るため、さらに統計的解析を進め、特にコアの小さなものはガスの放射冷却が穏やかに進んだ準静水圧平衡の状態にあると考えると観測事実を統一的に理解できることを示しました [12]。この描像をさらに定量的に検証するため、現在は準静水圧平衡のもとで期待されるガスの温度・密度分布の詳細な理論モデルの構築を進めています。

3.2 多波長を用いた遠方銀河団のダークマターと高温ガスの構造の研究

§2.2でも述べたように、可視光による重力レンズ効果とX線による高温ガスの観測は、ダークマター分布を調べる有力な手段を与えます。しかも2つの独立な手法の比較によって、より強い制限を課すことができるのです。私は、「あすか」やチャンドラなどのX線観測を活用して、多くの測定結果を導き出してきました。特に、静水圧平衡の仮定のもとでX線から求めたダークマター質量が重力レンズ効果から推定される質量より系統的に2-3倍小さい、いわゆる「質量不一致の問題」を複数の銀河団について確認しています [5,13,14,15]。図4に示したCL0024銀河団は、その代表的な例です。

銀河団は可視光やX線だけではなく、電波の領域においても観測が可能です。ここ数年でめざましく観測が進展している分野でもあります。銀河団にはたえず宇宙背景放射の3K光子がふりそそいでおり、その光子が銀河団中の高エネルギー電子と出会うと逆コンプトン散乱が起きて背景放射のスペクトルにゆがみが生じます。これを、スニヤエフ-ゼルドヴィッチ(SZ)効果といいます。SZ効果の電波観測は、遠方銀河団の温度構造を調べるもう一つの強力な手段を与えます。私は、野辺山45m電波望遠鏡によるSZ効果の観測プロジェクトにおいて、観測計画からデータ処理に渡って中心的な役割を果たしました。これが次に述べる、遠方銀河団中の超高温ガスの発見へとつながっていったのです。

3.3 宇宙で最も高温の銀河団ガスの発見

銀河団は宇宙年齢(137億年)に匹敵する長い時間をかけて作られるため、すでに力学平衡に到達した静的な系であると信じられてきました。しかし、最近のX線観測などから、想像以上にダイナミックに進化している系であることが明らかにされつつあります。

これまで知られていた銀河団ガスの温度は高くても1億度でした。ところがその温度を数倍も上回る、極めて高温の領域が存在していることが確認された天体があります。地球から約50億光年の距離に位置する銀河団 RXJ1347-1145です(図3)。この天体は約1.5メガパーセクの広がりを持ち、特にX線の波長では全天で最も明るい銀河団としても知られます。

我々は野辺山電波天文台で取得された高分解能SZ効果のデータとチャンドラ衛星のX線データを分析し、銀河団の中心付近に非常に高温のガスの塊があるらしいことをすでに見つけていました[16]。しかし、当時の測定精度は十分とはいえませんでした。そこで2005年に打ち上げられた「すざく」衛星[17]に搭載された二種類のセンサーで数日間かけてデータを蓄積し、銀河団ガスのX線スペクトルを詳細に解析しました。その結果、図6のように3億度に相当する高いエネルギーのX線放射の存在を確認することに成功しました [18,19]。

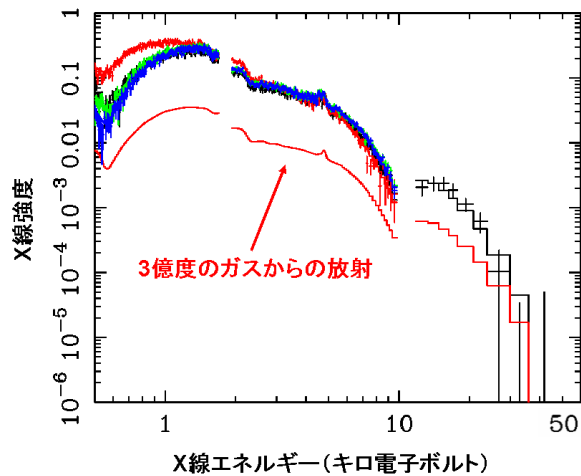


図 6. 「すざく」衛星による RXJ1347 銀河団の X 線スペクトルデータ(十字)。横軸は X 線のエネルギーを、縦軸は各 X 線エネルギーに対する強度を表す。赤線が超高温ガスからの X 線放射の成分を示す。

「大人しい」と思われてきた銀河団に超高温ガスが潜んでいたことは驚きでした。しかも、宇宙においてガスを 3 億度まで熱するのはそう容易ではありません。一般に、ガスはダークマターの重力に引き寄せられ、重力エネルギーを熱に変えることで高い温度を獲得します。しかしこの説で説明できるのはせいぜい一億度までです。現在、超高温ガスの起源を説明する最も有力なシナリオは、RXJ1347 が最近激しい天体衝突を経験したというものです。2 つの銀河団が毎秒 4000km もの猛スピードで衝突し合体すると、ガスの一部が圧縮されて加熱がおきます。これが極めて高温の X 線放射として観測されたのではないかと考えています。

4. 今後の研究計画

ここまでに述べてきたように、私は X 線や様々な波長の電磁波の観測を通して、宇宙の謎の解明に取り組んでいます。銀河や銀河団、大規模構造の形成、そして宇宙の進化を理解するためには未だ正体の分からないダークマターやダークエネルギーという大問題に挑まねばなりません。そこでダークマターの巨大な塊ともいえる銀河団の研究は、今後も加速し、宇宙全体の進化を紐解く鍵になるものと期待されているのです。特に、宇宙論的な制限につなげていくためには、ダークマターの重力のもとで銀河団ガスがどのような運動状態にあるかを見極め、様々な距離にある銀河団の質量構造を精度良く測る必要があります。

宇宙のダイナミックな進化に迫ることを目標として、新しい X 線観測衛星 ASTRO-H の開発が進行中です[20,21]。これは日本の JAXA を中心に、日米欧の国際協力のもとで 2013 年度打ち上げを目指す大規模なプロジェクトです(図 7)。ASTRO-H 衛星には先進的な観

測機器が複数搭載されます。その一つ、X線マイクロカロリメータはこれまでのX線分光の精度を数十倍も上回る、まさに超精密分光を可能にします。ガスが運動すると、ガスに含まれる鉄などの重元素が出す特性X線の波長にドップラーシフトやブロードニングという現象が生じます。このわずかな波長の「ずれ」を測定するのです。物質が寄せ集まりそして宇宙最大の天体や大構造が作られる現場が、まさにガスの動きとして捉えられる日が近づいています。私は、新しいサイエンスの探求とカロリメータ検出器の較正実験の両面からこのプロジェクトに関わり、宇宙物理に進展をもたらすことを目指して研究を進めていきます。

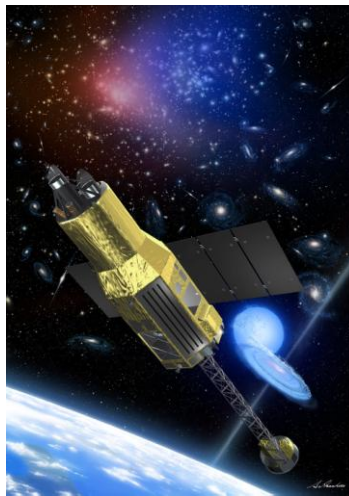


図 7. ASTRO-H 衛星の完成予想図 (JAXA 提供)。2013 年度に種子島宇宙センターから打ち上げ予定。

[文献]

- 1) 須藤靖, 宇宙の大構造, 培風館 (1992)
- 2) E. Komatsu et al., “Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation”, *The Astrophysical Journal Supplement*, **192**,18 (2011)
- 3) WMAP衛星ホームページ <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- 4) 谷口義明・岡村定矩・祖父江義明著, 銀河I-銀河と宇宙の階層構造, 日本評論社 (2007)
- 5) N. Ota, E. Pointecouteau, M. Hattori, & K. Mitsuda, “Chandra Analysis and Mass Estimation of the lensing cluster of galaxies CL0024+17”, *The Astrophysical Journal*, **601**, 120-132 (2004b)
- 6) N. Ota, et al. (32 co-authors), “Thick and Large PIN diodes for hard X-ray astronomy”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **436**, 291-296 (1999)

- 7) N. Ota, et al. (14 co-authors), “Performance verification of the Suzaku X-ray Spectrometer in the flight configuration”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **559**, 614-616 (2006)
- 8) R. L. Kelley, et al. (43 co-authors including N. Ota), “The Suzaku High Resolution X-ray Spectrometer”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **59S**, 77-112 (2007)
- 9) N. Ota & K. Mitsuda, “X-ray Study of 79 Distant Clusters of Galaxies: Discovery of Two Classes of Cluster Size”, *The Astrophysical Journal*, **567**, L23-L26 (2002)
- 10) N. Ota & K. Mitsuda, “A uniform X-ray analysis of 79 distant galaxy clusters with ROSAT and ASCA”, *Astronomy & Astrophysics*, **428**, 757-779 (2004)
- 11) 太田 直美, “X線による銀河団の構造と進化の系統的な研究-銀河団規模での二重構造の発見-”, 天文月報9月号 Eureka (2001)
- 12) N. Ota, T. Kitayama, K. Masai, & K. Mitsuda, “ L_X - T Relation and Related Properties of Galaxy Clusters”, *The Astrophysical Journal*, **640**, 673-690 (2006)
- 13) N. Ota, K. Mitsuda, & Y. Fukazawa, “ASCA Observations of the Lensing Clusters CL0500-24, CL0024-02, and A370: Mass Determinations and Comparisons”, *The Astrophysical Journal*, **495**, 170-178 (1998)
- 14) N. Ota, K. Mitsuda, M. Hattori, & T. Mihara, “Detection of Iron Emission Line from the Galaxy Cluster Including the Distant Radio Galaxy 3C220.1”, *The Astrophysical Journal*, **530**, 172-176 (2000)
- 15) N. Ota, et al. (15 co-authors), “Chandra Observations of SDSS J1004+4112: Constraints on the Lensing Cluster and Anomalous X-Ray Flux Ratios of the Quadruply Imaged Quasar”, *The Astrophysical Journal*, **647**, 215-221 (2006a)
- 16) T. Kitayama, E. Komatsu, N. Ota, T. Kuwabara, K. Yoshikawa, M. Hattori, & H. Matsuo, “Exploring cluster physics with high-resolution Sunyaev-Zel'dovich effect image and X-ray data: A case of the most X-ray luminous galaxy cluster RX J1347-1145”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **56**, 17-28 (2004)
- 17) K. Mitsuda et al. (141 co-authors including N. Ota), The X-ray Observatory Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **59S**, 1-7 (2007)
- 18) N. Ota, K. Murase, T. Kitayama, E. Komatsu, M. Hattori, H. Matsuo, T. Oshima, Y. Suto, and K. Yoshikawa, “Suzaku broad-band spectroscopy of RX J1347.5-1145”, *Astronomy & Astrophysics*, **491**, 363-377 (2008)
- 19) 「すざく」速報 <http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/flash/2008/1028/>
- 20) T. Takahashi et al. (176 co-authors including N. Ota), The ASTRO-H Mission, Space Telescope and Instrumentations, 7732, **27** (2010)
- 21) ASTRO-H衛星プロジェクト公式ホームページ <http://astro-h.isas.jaxa.jp/>

発光性希土類錯体による アニオン認識と発光センシングの研究

理学部化学科 片岡 悠美子

希土類イオンは、遷移金属イオンとは趣の異なる錯体機能を有することから、多彩な希土類錯体が、NMRシフト試薬やキラリティープローブ、発光ラベル化剤、MRI造影剤など、化学のみならず分子生物学や臨床医学などの幅広い分野で活躍している。また希土類錯体は、他の元素には見られない特徴的な優れた発光特性を有することから、様々な発光材料に利用され、日常生活に不可欠なものとなっている。錯体化学の分野においても、長寿命発光や線幅の狭い発光スペクトルなど有機発光体などには見られない特徴を示すことから、分子レベルでの発光材料として大きな注目を集めている。このような希土類錯体に、優れた選択性を示す「分子認識能」や「発光センシング機能」を付与するためには、適切な有機配位子をデザインすることによって、希土類錯体と標的基質分子からなる高配位型錯体の構造をいかに制御するかが重要なポイントとなる。希土類錯体の柔軟な配位化学を制御することは容易なことではないが、その発光機能と組み合わせることで、標的とする分子の詳細を希土類発光として検出（発光センシング）することが可能となる¹⁾。筆者はこれまで、ダイナミックな電子構造や多彩な配位化学をもつ希土類錯体の錯体構造を制御することで、希土類錯体による「アニオン認識能」や「発光センシング」系を構築することを目指す研究に取り組んできた。

希土類イオン (Ln^{3+}) は、イオン半径が大きく ($0.98\sim 1.16 \text{ \AA}$ 、8配位)、一般に8~12までの高配位型の錯体が形成されることが知られている。また希土類イオンは、ハードなルイス酸であり、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{O}^-$ 、 $-\text{NH}_2$ 基などのハードなルイス塩基と強い結合性を示す。その結合は高いイオン性を示し、配位子交換速度が速く、様々な方向からの配位が可能となる。従って、希土類錯体は、立体構造の自由度が極めて大きく、溶液中でその構造を予測することは困難である。

希土類錯体のf軌道間の電子遷移は、エネルギー的に可視領域から近赤外領域で起こるが、軌道の対称性から禁制遷移となり、励起状態から基底状態への発光遷移過程は遅く、長寿命発光特性を示す。f軌道に充填された電子は内殻電子(5s、5p)の内側に存在するため、それらの励起状態は熱的失活を起こしにくく、マイクロ秒からミリ秒にわたる遷移が観測される。このことから希土類錯体の発光は、発光材料として活用する上で、遷移金属錯体には見られない大きな魅力を有している。

希土類イオンの中で発光性をしめすものとして、可視領域に発光領域をもつユウロピウム(赤色)、テルビウムイオン(緑色)、さらに近赤外領域に発光特性を有するイッテルビウム、ネオジウム、エルビウムイオンなどがある。これらは、それぞれ固有の波長で特徴的な発光特性を有することから、希土類イオンの種類を選ぶことによって、用途に合わせて希土類発光をチューニングすることができる。効率良い希土類発光を得るためには、光エネルギーを吸収し、希土類イオンに受け渡す光アンテナ機能を有する、f軌道間の電子

遷移に最適な励起エネルギーをもつ有機配位子が必要となる。

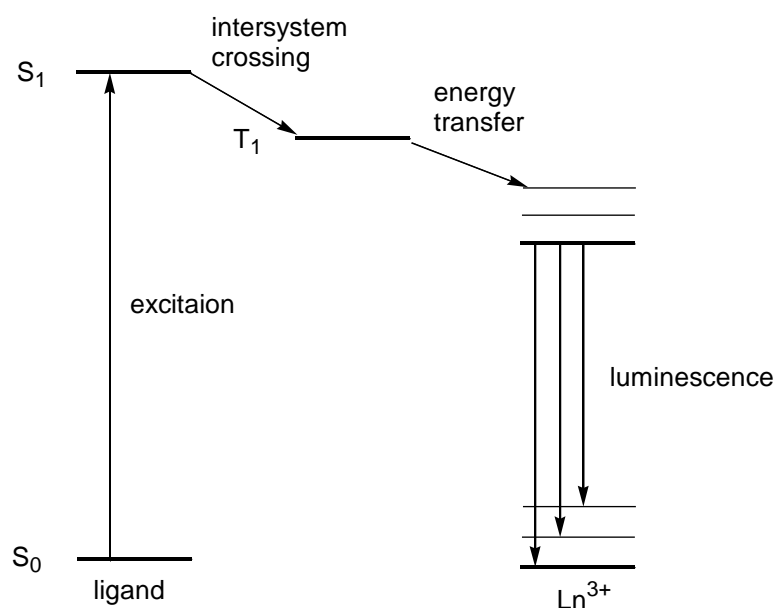


図1. 希土類錯体の発光過程

希土類錯体の発光過程は、有機配位子の光励起、一重項から三重項への項間交差、配位子から希土類イオンへのエネルギー移動、希土類発光から成り立つ（図1）。これらの効率に加えて、希土類錯体の量子収率は、f軌道の励起状態から希土類イオン周りの分子振動へのエネルギー失活過程に大きく依存する。C-H、N-H、O-H結合の伸縮振動は大きな振動エネルギー（3,000～3,500 cm⁻¹）を有するため、希土類イオンの励起エネルギーからこれらの振動エネルギーへの失活が観測されるが、特に希土類イオンに水分子が直接配位している場合、水のO-H伸縮振動が強く発光を抑制する。近赤外領域に発光性を示す希土類イオンでは、とくに低倍音O-H伸縮振動とのマッチングが大きくなることから、希土類発光が大きく消光される。この失活過程を抑制するためには、重溶媒中での測定や配位子内の希土類イオン周辺の水素を重水素化する必要がある。f電子の発光遷移過程と消光過程の詳細を解明することができれば、強発光性希土類錯体を開発する上で、大きな知見が得られると期待され、今後の研究テーマとして興味をもっている。

溶液中で、希土類錯体に、より強配位性のアニオンを加えると容易にアニオン交換が起こり、希土類-配位子-ゲストアニオンからなる高配位型錯体が形成する（図2）²⁾。この特徴を利用して、希土類錯体にアニオン認識能を賦与することができる。希土類錯体とゲストアニオンとの高配位型錯体の形成は、可逆的であり、交換が速く平衡に達するまでの時間が短いことから、優れたアニオン認識能を示すと考えられた。

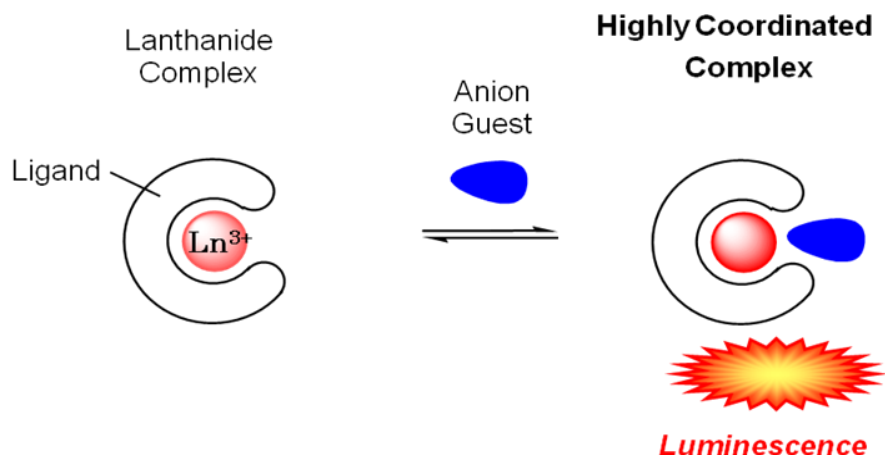


図2. 高配位型錯体形成による希土類発光アニオンセンシング

著者らの研究では、これまで希土類錯体のもつアニオン認識能に発光機能を組み合わせて、外部アニオンとの高配位型錯体の形成を発光挙動の変化によって検出し、アニオンの種類や濃度を決定するアニオンセンシング系を構築できることを見出してきた。希土類イオンに配位している水分子や溶媒分子は、ある特定の配位性アニオンの配位によって、希土類イオンの配位圏から離脱し、希土類発光効率の増大を示すと予想された。さらに錯体の対称性の変化によるスペクトルパターンの変化、禁制のやぶれによる発光効率の変化が見られた。

ここでは、著者が実際に執り行った研究から、アセトニトリル溶液中で、特にチッソ含有芳香環を含むトリポード配位子を含むユウロピウム錯体による無機アニオンの発光センシングについて報告する。

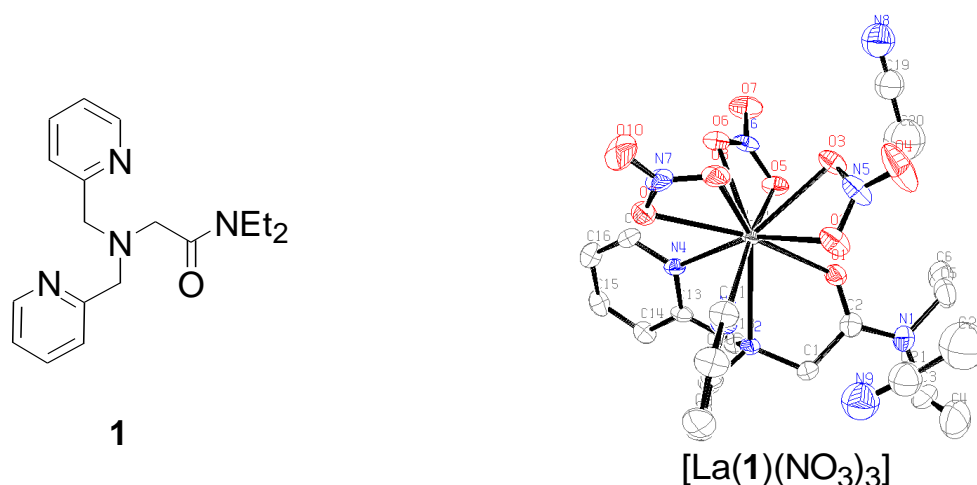


図3. Ln^{3+} :配位子1 = 1:1錯体の結晶構造

採用したトリポード（三脚）型の中性配位子1は、希土類イオンに対して4配位座を有する。希土類イオンの配位数は1の配位座の数に比べて大きいため、1:1錯体を形成する場

合、アニオンや配位性溶媒によって残りの配位座が占められると予想された。対アニオンとして硝酸アニオンを用いた場合、X線結晶構造解析の結果から希土類イオンであるランタンイオンに配位子**1**のほかに3つの硝酸イオンが二座配位した10配位構造を取ることが示された(図3)。希土類錯体のf電子は配位結合に関与しないことから、希土類イオンの種類が異なってもそれらの錯体構造は類似していると考えられ、ユウロピウムイオンについても同様の錯体が形成していると考えられた。

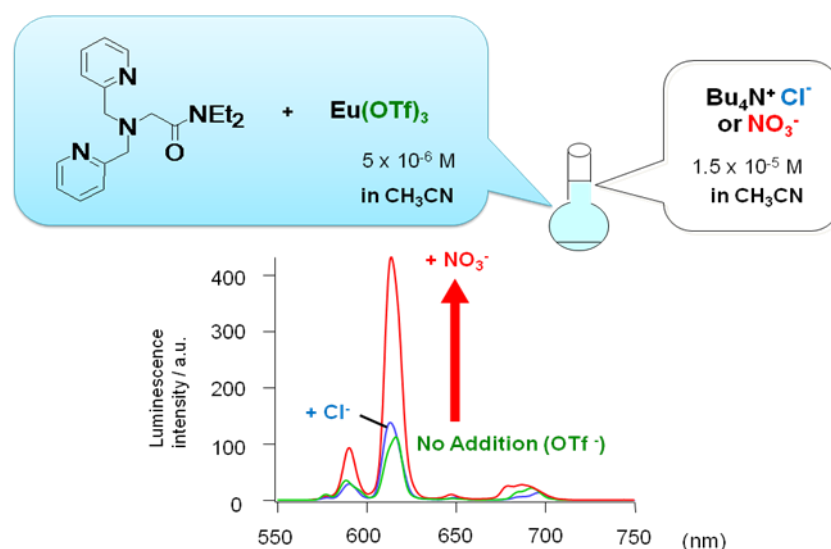


図4. 配位子**1**を含むユウロピウム錯体によるアニオンセンシング

アセトニトリル溶液中で対アニオンとして、配位性の極めて弱いトリフラートを用いてチッソ含有芳香環を含むトリポード配位子を含むユウロピウム錯体を調製し、種々のアニオンを添加したところ、それぞれ外部アニオン基質との選択的な高配位型錯体が形成され、アニオンの種類によって異なるユウロピウム発光応答が得られた(図4)³⁾。とくにピリジン環を有する配位子**1**では、硝酸イオンに対して顕著な発光増大が観測されたのに対し、キノリン環を含む配位子**2**では塩化物イオンに対して発光増大が観測され、トリポード配位子の構造の違いによって、アニオンに対する発光応答性が変化した。

トリポード型配位子の希土類イオンへの配位は、アニオンの種類や配位性溶媒と競合するため、溶媒中に存在する錯体種の化学量論や配位構造は、それぞれの濃度や溶媒の種類、混合比によって大きく変化した。アセトニトリル中、一定濃度のトリポード配位子にLn³⁺トリフラート塩を加えていくと、1:1(Ln³⁺:配位子)錯体および1:2や1:3錯体の形成が確認された。一方、Ln³⁺硝酸塩やLn³⁺塩化物塩にそれぞれの配位子を加えていくと、主に1:1錯体が形成され、他に1:2錯体の存在が確認され、系中に存在するアニオンの種類によって錯体種が大きく変化した。

形成された高配位型錯体の安定性は、ゲストアニオンのルイス塩基性の強さとともに、希土類イオンに配位している配位子と基質との立体障害や配位性などにも依存することから、配位子の立体構造や電子的特性によってゲストアニオン選択性を制御できると考えられた。

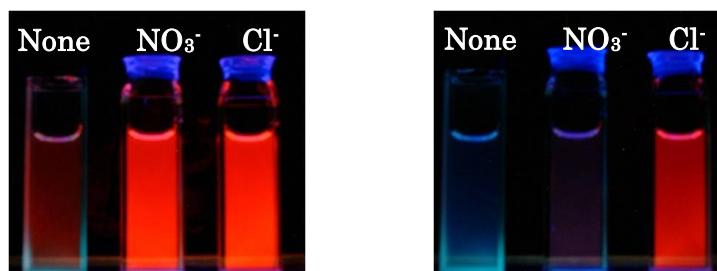
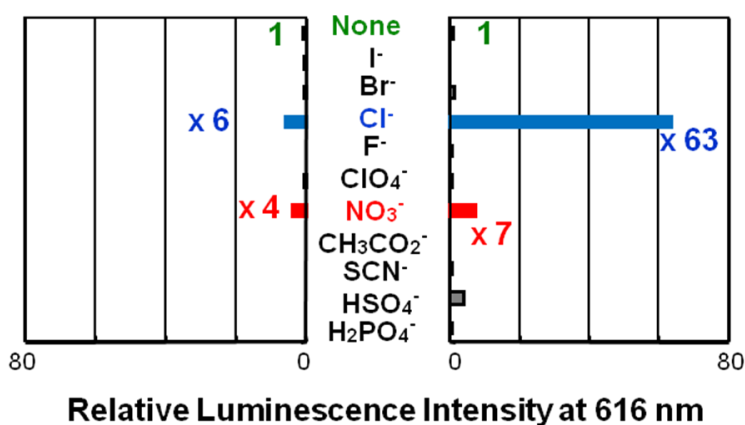
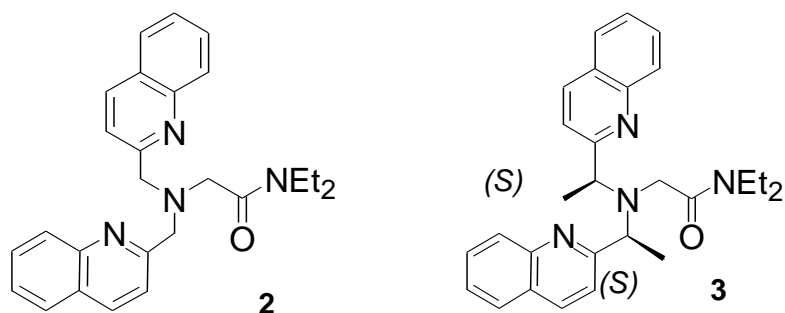


図5. ユロピウム錯体による塩化物イオンの発光センシング

配位子にキラルなメチル基を導入した配位子**3**では**1**に比べて、塩化物イオンに対する発光応答性が向上し、図5に示すようにユロピウム錯体の裸眼による塩化物イオン検出が達成できた⁴⁾。このような発光応答性の違いは、系中に存在する最も強い発光性を示した1:1錯体の存在量に依存した。配位子**3**を含むユロピウム錯体では対アニオンとして硝酸イオンを導入すると、弱発光性の1:2 (Ln³⁺:配位子) 錯体が主に形成されることから、希土類発光が減少し、結果的に塩化物イオンに対する発光応答性が向上した。このように希土類錯体のダイナミックな錯体構造の変化を利用することで、アニオン選択性を向上させることが示された。

今後さらに、検出したいアニオンの特性に合わせた配位子の配位数、立体構造、光アンテナ部位および希土類イオンの組み合わせを最適化することによって、より多彩なアニオ

ン選択性を発現することが可能であり、より高感度で高選択的な発光センシング系を構築できると期待している。

[文献]

- 1) 築部 浩, 片岡悠美子, “希土類錯体を用いる分子認識と発光センシング”, 『希土類の機能と応用』 足立 吟也 監修, pp. 339-343, シーエムシー出版, (2006).
- 2) 篠田哲史, 片岡悠美子, 築部 浩, “キラリティーを活用する金属イオン認識系および希土類光センシング系の構築”, 『有機合成化学協会誌』, 63, 1209-1217 (2005).
- 3) Y. Kataoka, D. Paul, H. Miyake, T. Yaita, E. Miyoshi, H. Mori, S. Tsukamoto, H. Tatewaki, S. Shinoda, H. Tsukube, “Experimental and Theoretical Approaches Toward Anion-Responsive Tripod-Lanthanide Complexes: Mixed Donor Ligand Effects on Lanthanide Complexation and Luminescence Sensing Profiles”, *Chem.-Eur. J.*, 14, 5258-5266 (2008).
- 4) Y. Kataoka, D. Paul, H. Miyake, S. Shinoda, H. Tsukube, “A Cl⁻ Anion-responsive Luminescent Eu³⁺ Complex with a Chiral Tripode: Ligand Substituent Effects on Ternary Complex Stoichiometry and Anion Sensing Selectivity”, *Dalton Trans.*, 2784-2791 (2007).

安全性や快適性の観点から、建築部位・部材の性能評価方法に関する研究

生活環境学部住環境学科 工藤 瑠美

私の専門は建築材料である。建築材料といっても特定の材料を軸に研究を遂行するのではなく、材料の性能について研究している。課題は、安全性や快適性の観点から、建築部位・部材の性能評価方法に関する研究である。特に床のすべり、摩耗、建築部位・部材の手での接触抵抗などの研究に取り組んでいる。今回は私の代表的な2つの研究と今後の研究予定について紹介する。

1つ目は、私の博士論文のテーマである「摩耗による床のすべり抵抗の変化の即時推定方法に関する研究」を紹介する。このテーマの設定は、恩師のすべりの研究と恩師のさらに恩師の摩耗の研究がきっかけである。二人の恩師が行ったすべりと摩耗の二つの性能の関係を追及しようと考案したものである。

研究の背景として、床には安全性や快適性の観点から、すべり防止加工が施されているものが多いが、多くの歩行者が利用することで、床表面が徐々に摩耗され、初期のすべり防止性能が保持できなくなり、転倒事故が発生することが問題視されていた。特に駅や病院など、不特定多数の人々が利用する場所で、すべりによる転倒事故が多発している。対策として、床試料を設置する前に、歩行時の摩耗により床のすべりが変化するか判断することができれば、耐摩耗性のある床試料の開発に役立ち、転倒事故防止につながるのではないかと考えた。

研究方法としては、長期間の歩行により摩耗された床のすべりを、短時間で再現できればよいが、まさか毎回人間が床試料の上を歩行して摩耗させるわけにはいかない。そこで、歩行後の床のすべりを短時間に再現できる摩耗試験機を開発することにした。

まず、この研究はすべりを媒体として展開するので、歩行時の床のすべりを測定できる写真1に示すすべり試験機を使用する。これは、私の恩師である小野英哲が開発したすべり試験機である。人間動作時のすべり抵抗を表示でき、測定されたすべり抵抗値で、安全性・快適性の観点から床の評価が可能である。



写真 1. 携帯型床のすべり試験機 (ONO・PPSM)

初めに実施した実験は、何歩で実際に摩耗された床表面を再現できるか、歩行実験を行った。写真2に示すように、様々な試料に足型を書き、床に並べ、足型の上を歩く歩行実験である。研究室の仲間と1つの試料につき10万歩以上歩行したが、試料表面のすべりは全く変化しなかった。実験をはじめたばかりだが、すでに壁にぶつかった。実際に使用されている床では、摩耗してすべりが大幅に変化しているが、この歩行実験では全く変化しなかった。理由として、試料の足型の上を歩行するように指示したことで、歩行者は強制的な歩行になってしまい、自然な歩行が行え



写真2. 歩行実験状況

なかったことが考えられた。では、通常の歩行動作と歩行実験で行った歩行動作との違いは何か、高速度ビデオカメラで観察してみることにした。図1に示すのが、履物が床に接触した時の履物の側面と裏面から観察した結果の代表例である。履物底が床に接触した位置を点線で示し、履物底が接触移動する方向を矢印で示している。

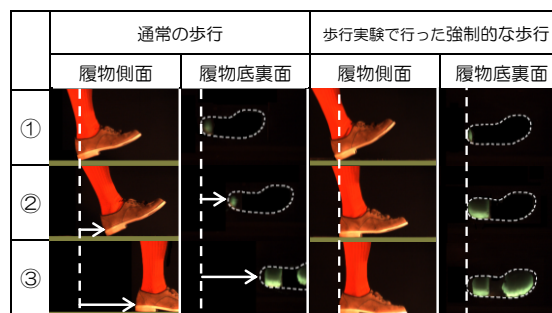


図1. 通常歩行と歩行実験で行った強制的な歩行の観察結果

二つの歩行動作を比較すると通常歩行の場合は、履物のかかと部分が床表面に接触し、そのままこすりながら移動するこすり現象が見られたが、歩行実験で行った強制的な歩行では、こすり現象は見られなかった。このことから、床のすべりに影響を及ぼす歩行時の摩耗は、こすり現象が重要だと想定できた。

考えてみれば当然のことである。だが、この結果を出すまでに数年かかった。研究に没頭しすぎると、実情をかけ離れた方向に進む場合がある。この実験から実情をしっかりと観察することが研究の基本だと学んだ。

次に、通常の歩行で見られるこすり動作を中心にこすり歩行実験を行った。写真3に示すように試料を床に設置し、片足のかかとで試料に接触し、こすりながら移動する歩行実験にした。その結果、4万歩歩行ただけで歩行後の床表面のすべりが大幅に変化し、実際の床のような摩耗した表面が再現できた。ここで初めて成果が得られ、先が見えてきた。



写真3. こすり歩行実験状況

次に、得られた歩行後の床表面のすべりの変化を再現するために、こすり現象を取り入れた試験機の開発に取り組んだ。試行錯誤を繰り返し、完成した摩耗試験機が写真4である。この試験機は車輪が回転する回転式の摩耗試験機とした。車輪に付いている摩耗治具が試料を摩耗する。人間に例えれば足のかかと部分を想定してほしい。摩耗治具はフレキシブルバネを軸とし、車輪に取り付け、車輪が回転することで、設置した試料表面に摩耗治具の摩耗片が接触し、そのまま移動することでこすり現象を発生させる構想である。このように自分の考えが試験機という形になることは、研究の面白さの一つである。



写真4. 開発したすべり抵抗変化用床の摩耗試験機と基本構想

こすり歩行実験では4万歩を歩行するのに4～5時間費やしたが、この試験機では30分で4万歩後の床表面すべりを再現することができる。

代表的な試料A～Dを用いたこすり歩行実験前後のすべり抵抗の変化と摩耗試験機前後のすべり抵抗の変化を図2に示す。図より、おおよそこすり歩行実験のすべり抵抗の変化を開発した摩耗試験機で再現することができた。

実は、これまでも国内外において、数多く摩耗試験機が開発されている。しかし、大半は仕上材料の摩耗量そのものを主題とした研究である。私の試験機の特徴は、多種多様の仕上材料を対象とし、すべりという安全性の観点から、床の摩耗との関係を追及した点である。すべりの変化を軸に開発された試験機は、国内外においては見当たらない。

開発した試験機の利用により、すべりによる転倒事故防止を目的とし、耐久性・耐用性のある床の開発、選択の具現に寄与することは明確であるが、同時に補修・改修等を含む維持管理方法の設定にも果たす役割は大きいと考えている。実際に数社のメーカーから購

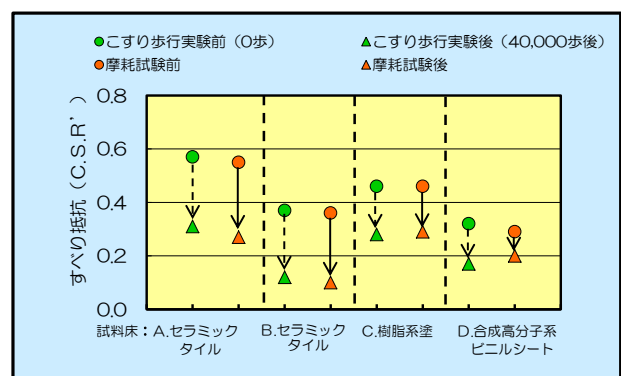


図2. こすり歩行実験前後と摩耗試験前後のすべり抵抗の測定結果

入いただき、実用化されている。

研究者として、自分の研究が少しでも社会に貢献できたと実感できたときの喜びは、何物にも替えがたいものである。しかし、この研究は私一人で、得られた成果ではない。一緒に歩行してくれる仲間や試験機作成に手を貸してくれる仲間、励ましてくれる仲間がいたからこそ、得られた成果である。研究を続ける上で、自分を支えてくれる人々に感謝する気持ちを忘れないことを心がけている。

私は、これまで自分の身近な課題から、研究テーマを設定してきた。2つ目の研究は、脳出血で倒れ、左片麻痺になった恩師の日常生活から発想した研究課題を紹介する。このテーマの設定は、左片麻痺の恩師が、いつも机や壁などの建築部位・部材や什器・備品に手を触れ、姿勢を保持したり、動作を支援したりという行動が目についたことがきっかけである。さらに観察すると、手を十分に接触する面積がない場所では、指だけで部位・部材に触れる程度でも、姿勢保持や動作支援に大きく寄与することがわかった。高齢者のみならず健常者においても、身体を支える手での接触時には、すべりだけでなく、小さな突起や角部などへのひっかかりによる抵抗が大きいと感じる。このことから、手でのすべりやひっかかりなどの抵抗を含めた接触抵抗で、建築部位・部材を測定・評価する方法を研究しようと発案した。

手で建築部位・部材に触れる場合を観察すると、まず指が触れ、場合によっては掌まで触れ、指と掌を合わせた手全体で触れることがある。また、頻度は高くないが、掌だけ触れる場合もある。まずは最も頻度が高い指の評価方法を提案し、さらに掌、そして指と掌を合わせた手全体の評価方法を提案することとした。

研究の方法としては、官能検査手法を用いて、指・掌・手を建築部位・部材に接触させ、動作支援・姿勢保持の観点から心理的尺度を構成する。次に接触抵抗を測定できる試験機を設計・試作し、測定方法を提案する。最後に接触抵抗と尺度との対応から、手での接触抵抗の評価方法を提示する手順である。

初めに行った官能検査の概要を表1に示し、官能検査の状況を写真5に示す。

表 1. 指・掌・手での官能検査の概要

構成する尺度 ※()内は略称	動作支援尺度(支援尺度)	姿勢保持尺度(保持尺度)
尺度構成手法	系列範ちゅう法	
質問事項	検査試料に指・掌・手を触れ、所定の動作を行ってください。あるいは、所定の姿勢を保ってください。その際の動作のしやすさ、あるいは姿勢保持のしやすさについて、5段階の判断 範ちゅうの中から最も適当と思われるものをお答えください。たくさんの検査試料について判断していただけますが、他とは比較せず、それぞれ自分が感じたとおりにお答えください。	
判断範ちゅう	①かなり動作しにくい	①かなり姿勢保持しにくい
	②やや動作しにくい	②やや姿勢保持しにくい
	③どちらでもない	③どちらでもない
	④やや動作しやすい	④やや姿勢保持しやすい
	⑤かなり動作しやすい	⑤かなり姿勢保持しやすい
動作および姿勢 ※()内は略称	椅子から立ち上がる(椅子立ち) 椅子に座る(椅子座り) 歩く(歩行)	片足で立つ(片足立ち)
接触面の向き	水平、鉛直の2種	



写真 5. 指での接触時の官能検査状況

指・掌・手についての官能検査の分散分析結果（紙面の都合上省略する。）からすべての場合において、動作のしやすさ、姿勢保持のしやすさの程度に関し、試料の接触抵抗に対する検査員の判断には共通の基準があることを確認でき、検査および構成する尺度が有効であることも判明した。

次に、指・掌・手での接触抵抗を測定する接触抵抗試験機を設計・試作した。官能検査の接触状況、ならびに日常の人々の接触状況の観察を基本に、試行錯誤的に設計・試作した試験機の概要を図3に示す。測定方法は対象とする部位・部材に、図に示すように重錘（質量1kg）を載荷した接触抵抗片を設置し、各々の引張角度で静的に引張った時の最大引張荷重（Pmax）を検出し、得られた測定値を接触抵抗値とすることとした。

指・掌・手での接触時の各動作から構成した尺度と設計・試作した接触抵抗試験機により得られた測定値の対応図を図4に例示す。試料を鉛直に設置し、片足立ちで姿勢を保持した場合を例に挙げる。保持尺度と接触抵抗の組み合わせにより、多少の乱れがみられるもののおおむね良い対応がみられた。また、例示以外の組み合わせにおいても同様の傾向がみられたことから、設計・試作した接触抵抗試験機の基本的妥当性は十分証明されているといえる。

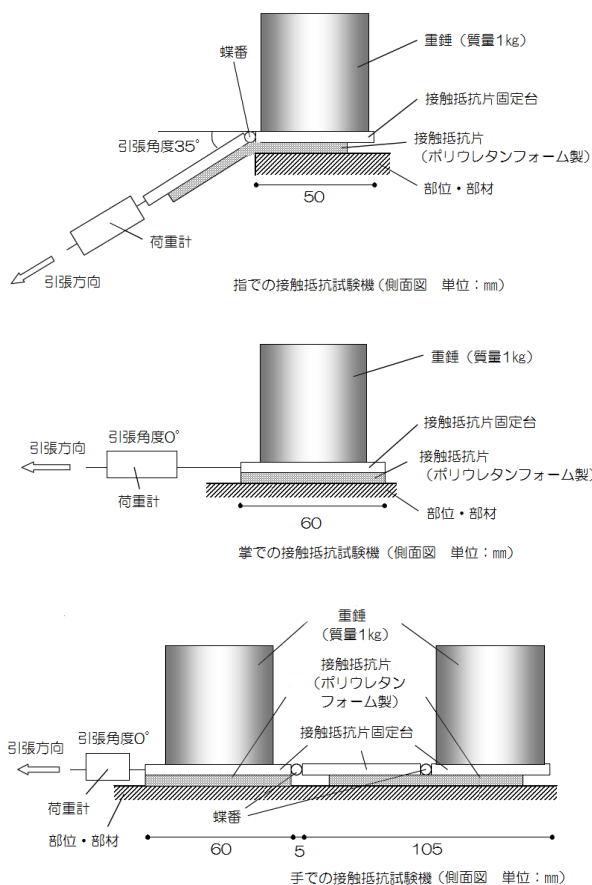


図3. 指・掌・手での接触抵抗試験機の概要

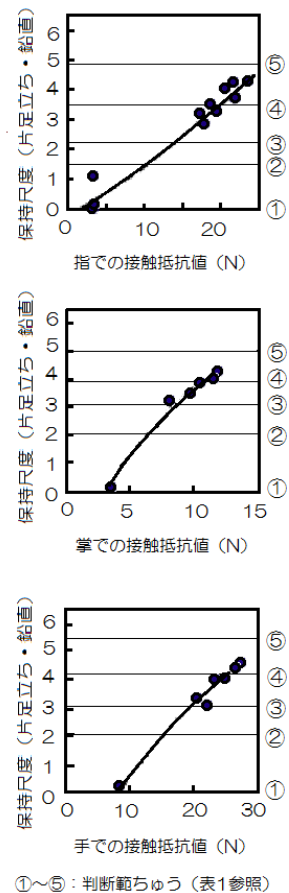


図4. 姿勢保持と接触抵抗の関係

提案した評価方法により、建築部位・部材の形状、および想定される接触方法に応じて評価方法を用いることで、接触抵抗の違いを利用した建築部位・部材の開発に適用できると考えている。

さらに現在は、建築部位・部材を手でつかんだ場合の接触抵抗の評価方法について、研究を展開しているところである。

これまで述べてきたように、床や壁、手摺などの建築部位・部材のすべり抵抗・接触抵抗は、安全性、快適性の観点から非常に重要な性能であり、特に床のすべりについては、妥当な測定・評価方法はすでに確立されている。また、手での接触抵抗の測定・評価方法についても近いうちに確定できるといえる。

このように床のすべり・手での接触抵抗の測定・評価が可能になってきた一方で、最適なすべりや接触抵抗を具現するための指標がないことで、建築部位・部材の製造者が合理的な製品の開発に到っていないという実情がある。そのため、すべり抵抗や接触抵抗に大きな影響を与えると想定できる試料表面凹凸の要因を究明し、妥当なすべり抵抗や接触抵抗をもつ建築部位・部材の開発の一助とすることを目的とし、今後は研究を遂行するつもりである。

[文献]

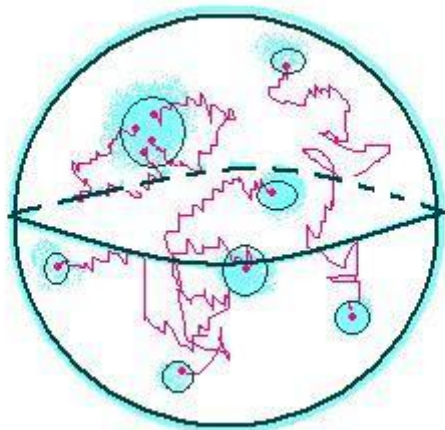
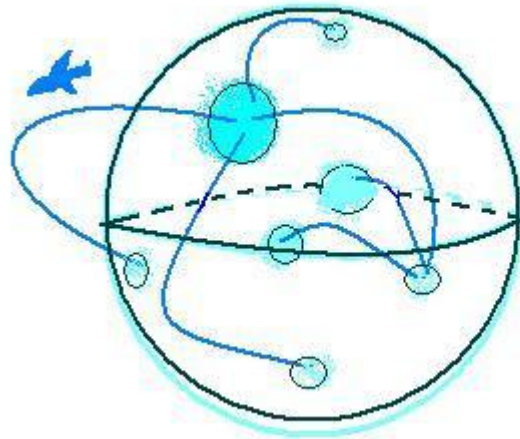
- 1) 工藤瑠美, 小野英哲, 摩耗による床のすべり抵抗の変化の即時推定方法に関する研究 (その1) 歩行負荷を代表とする摩耗による床のすべり抵抗の変化の把握方法に関する予備的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 618 号, pp.7-13, (2007 年).
- 2) 工藤瑠美, 小野英哲, 摩耗による床のすべり抵抗の変化の即時推定方法に関する研究 (その2) 歩行負荷を代表とする摩耗によるすべり抵抗の変化を再現するための床の摩耗試験機的设计・試作, 日本建築学会構造系論文集, 第 631 号, pp.1483-1487, (2008 年).
- 3) 工藤瑠美, 新美浩二, 細界守明, 古賀純子, 横山裕, 動作支援, 姿勢保持からみた建築部位・部材の指での接触抵抗の評価方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 654 号, pp.1439-1444, (2010 年).
- 4) 新美浩二, 工藤瑠美, 古賀(井戸川)純子, 細界守明, 横山裕, 動作支援, 姿勢保持からみた建築部位・部材の接触抵抗の評価方法に関する研究 掌および手での接触抵抗の評価方法の提示, 日本建築学会構造系論文集, 第 659 号, pp.37-44, (2011 年).

斜積拡散過程に対する極限定理の研究

理学部数学科 嶽村 智子

多様なモデルに対応した確率過程の構築を目指し、その性質を研究することを目的としています。時間の経過に伴ってランダムな値をとる系を表す確率過程は、粒子の運動を数学的にモデル化したものとして捉えることができます。その様な確率過程の中で、過去の情報に依らずに現在の情報のみが未来に影響する過程をマルコフ過程といいます。このようなマルコフ過程の例として、数理ファイナンスにおけるブラックショールズモデルや集団遺伝学における拡散近似モデルなどがあります。偶然に左右されて動くものであっても、それを特徴づける確率法則があり、そのような法則を見つけることが確率過程論です。

ブラウン運動のように、花粉が水面をランダムに浮遊する運動を確率論的にとらえることができますが、社会の発展に伴い必要となるモデルは多様化しています。たとえば、伝染病のモデルを考えると地球表面上の運動だけでなく、空港と空港を結ぶ空路のように点と点が特異的に結ばれているような状況を考えなければなりません(右図)。更に、伝染のルートは枝分かれをしたり、ジャンプをしたりするので、このようなモデルも取り扱う必要があります。しかし、このようなモデルは、考えるべき空間がさまざまな幾何学的構造を持ち、またこれまで取り扱われていた確率過程のクラス内に留まりません。このような多様なモデルに対応する確率過程の構築を目指しています。



私は、これまで吸収壁境界条件を伴う一次元拡散過程と球面上のブラウン運動の斜積における極限定理とそこで取り扱う確率過程の性質について研究を行いました(文献 1, 2, 3)。これは、左図のように球面内を運動するブラウン運動で球面上に到達したらジャンプをし、

球面上の別の点から新たに運動を始めるモデルにつながる研究です。そこでは、重ならない超平面が複数個ある空間内のブラウン運動を考察した先行研究を基に研究を行いました。先行研究と異なり、斜積拡散過程を取り扱うことにより、コンパクト多様体上に制限した過程を極限過程としてもつ極限定理を得ることができ、更に、これらの運動に対応する例である具体的な過程に対応する表現も得ることができました(文献 5)。今後も様々なモデルに対応した確率過程の構成を行っていきたいと思っています。

ここからは研究で取り扱っている数学の一端をご紹介します。

[斜積拡散過程]

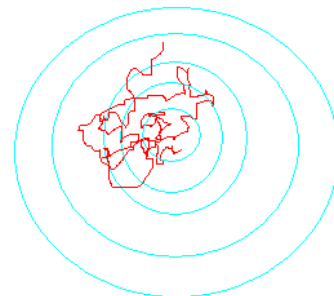
私は、斜積拡散過程という確率過程を取り扱っています。では、斜積拡散過程とはいったいどのようなものなのか。定義と例を紹介いたします。

粒子が拡散していくモデルに対応した拡散過程を2つ準備します。それぞれは独立に運動をしているものとします。これらを $X_t^i (i = 1, 2)$ と書くことにします。これは、時刻 t で粒子がいる場所を表しています。これらに対して、次のような過程を考えます。

$$(X_t^1, X_{f(t)}^2)$$

ここで、 $f(t)$ は、 X_t^1 によって与えられる時間変更とします。つまり、2つの拡散過程の一方がもう一方に影響を与えながら運動しているというモデルになります。

例えば、右図のような粒子が拡散していく様子をモデル化した d 次元ユークリッド空間上のブラウン運動は、独立な一次元のブラウン運動を d 個準備して下の左式のように表現することができます。



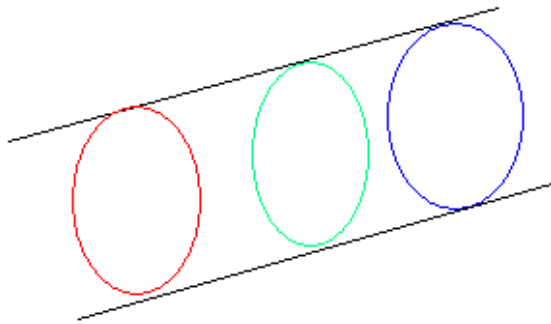
$$(B_t^1, B_t^2, \dots, B_t^d) \longleftrightarrow (R_t^{(d)}, \Theta_{f(t)}^{(d-1)})$$

一方、上の右式のように、 d 次元のブラウン

運動の長さだけをみた過程である d 次元ベッセル過程 $R_t^{(d)}$ と球面上のブラウン運動

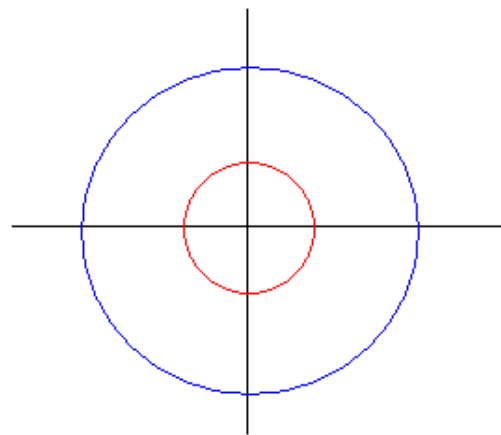
$\Theta_t^{(d-1)}$ を用いて上のように斜積によっても表現する事ができます。ここで、斜積拡散過程

の時間変更である正值加法的汎関数は、 $f(t) = \int_0^t (R_s^{(d)})^{-2} ds$ で与えられます。このような表現は、 d 次元ブラウン運動を直交座標系への射影したものが上の表現の左式、極座標表示への射影が斜積拡散過程としてみることができます。



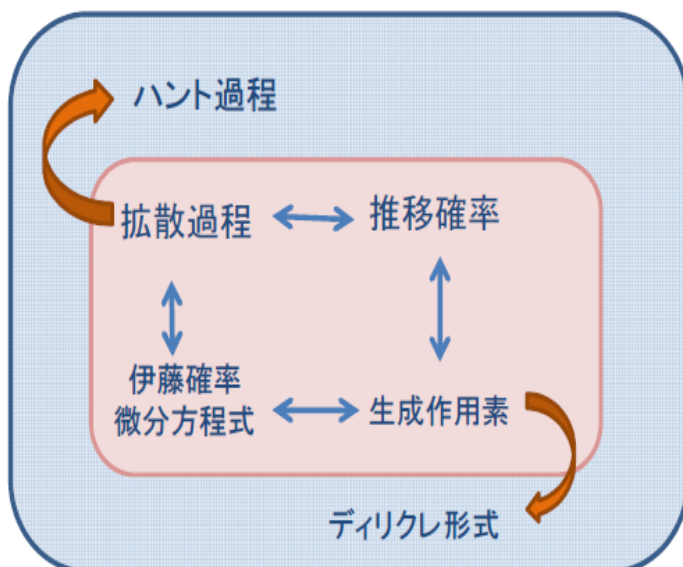
もし、ここで時間変更を行わずにベッセル過程と球面上のブラウン運動の積を考えると、対応した運動は左図のような一次元方向の直線と球によって作られる円柱の側面また内部を運動するものになってしまい、今考えたいユークリッド空間上の運動としてみることはできません。

ここで、球面ブラウン運動をベッセル過程による時間変更を行う事により、原点からの距離によって現れる球が右図のように調整され、 d 次元ユークリッド空間上のブラウン運動を表現することができます。



このような表現を用いることで、原点からの距離に対応する一次元拡散過程と球面上のブラウン運動との斜積によって表現される d 次元ユークリッド空間を運動する拡散過程を取り扱う事ができます。また一次元拡散過程や球面上のブラウン運動のそれぞれの性質やそれらに対応した測度から、球内を運動し境界である球の表面でジャンプや消滅を起こすような拡散過程をみる事ができます。

[ディリクレ形式]



私の研究の目的は、先でも述べたようにジャンプを持つものに対応したモデルの構築です。特に、連続な過程である拡散過程の列を考え、極限では連続とは限らないような極限定理を考えています。拡散過程には、対応する推移確率密度関数、生成作用素と呼ばれる二階微分作用素、伊藤確率微分方程式などが存在します。しかし、ここで取り扱う極限過程はジャンプや消滅が起こりえますので、必ずしも拡散過程であるとは限りま

せん。そこで拡散過程よりも広い過程のクラスに対応する特徴づけが必要になります。

拡散過程に対応する生成作用素の拡張としてみることのできるディリクレ形式という対称二次形式と関数空間の組で与えられる特徴づけがあります(前頁左図)。ディリクレ形式がある条件を満たせば拡散過程よりも広い確率過程のクラスであるハント過程と対応していることが知られていますので、このディリクレ形式を用いて研究を行っています。

$$\mathcal{E}^{X_n}(f, g) = \int_{S^{d-1}} \mathcal{E}^{R_n}(f(\cdot, \theta), g(\cdot, \theta)) dm^\ominus(\theta) + \int_I \mathcal{E}^\ominus(f(r, \cdot), g(r, \cdot)) d\nu_n(r)$$

↓

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^X(f, f) &= \int_{S^{d-1}} \mathcal{E}^R(f(\cdot, \theta), g(\cdot, \theta)) dm^\ominus(\theta) + \int_\Lambda \mathcal{E}^\ominus(f(r, \cdot), f(r, \cdot)) d\nu(r) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{k \in K: l_1 < a_k < b_k < l_2} \int_{S^{d-1} \times S^{d-1}} \{f(a_k, \theta) - f(a_k, \varphi)\}^2 J_k^{1,1}(\theta, \varphi) d\mathcal{M}(\theta, \varphi) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{k \in K: l_1 \leq a_k < b_k < l_2} \int_{S^{d-1} \times S^{d-1}} \{f(b_k, \theta) - f(b_k, \varphi)\}^2 J_k^{2,2}(\theta, \varphi) d\mathcal{M}(\theta, \varphi) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{k \in K: l_1 < a_k < b_k < l_2} \int_{S^{d-1} \times S^{d-1}} \{f(a_k, \theta) - f(b_k, \varphi)\}^2 J_k^{1,2}(\theta, \varphi) d\mathcal{M}(\theta, \varphi) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{k \in K: l_1 < a_k < b_k < l_2} \int_{S^{d-1} \times S^{d-1}} \{f(b_k, \theta) - f(a_k, \varphi)\}^2 J_k^{2,1}(\theta, \varphi) d\mathcal{M}(\theta, \varphi) \\ &+ I_1(f) + I_2(f), \end{aligned}$$

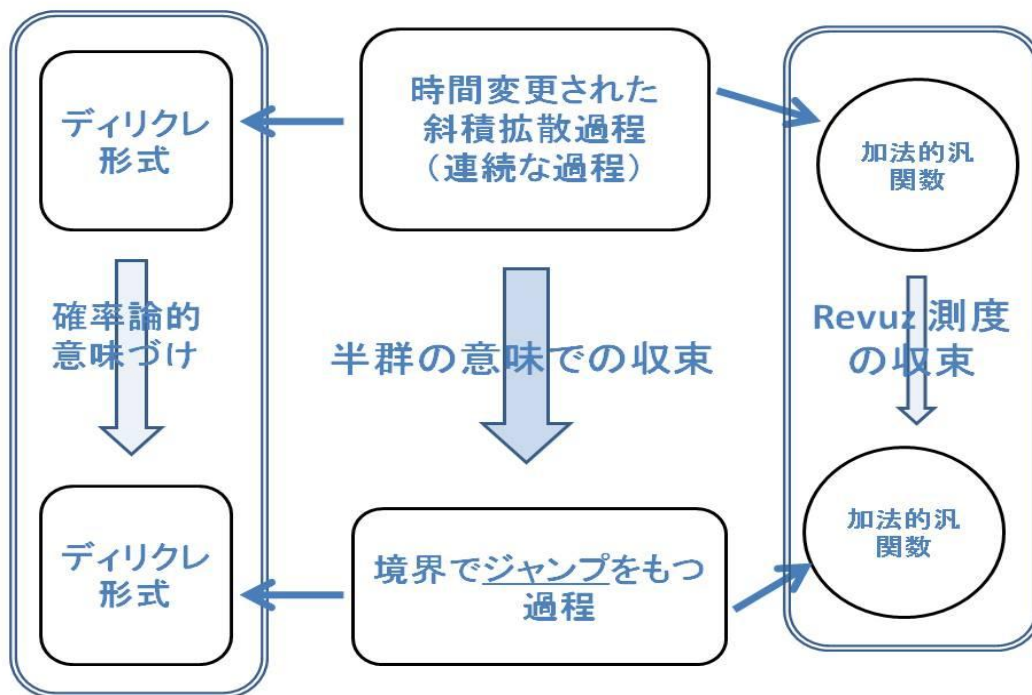
上図の二つの式は、私を取り扱った時間変更された斜積拡散過程に対応したディリクレ形式です(文献 1,2,3)。上の式が時間変更された斜積拡散過程に対応したディリクレ形式の列とします。ある条件のもと極限定理を考えると、極限過程に対応したディリクレ形式は下の式のようにになります。極限に対応したディリクレ形式は、ジャンプ項や消滅項が現れます。

私は、斜積拡散過程を時間変更させた確率過程の列を扱って研究を行ってきました。これは、対応するディリクレ形式を基盤とするヒルベルト空間の測度を変更させているものになります。ディリクレ形式も基盤となるヒルベルト空間も動く時にどのような極限を得るかということを考えています。このような様々な条件のもと、極限定理を考えることで上に挙げた式のような多様なモデルに対応したディリクレ形式への収束とみることができそうです。今後は、以下に挙げる手法で研究を行っていこうと思っています。

[今後の研究]

任意の関数に対して、正値加法的汎関数による伊藤積分の平均が、対応する確率過程の推移確率とある測度の積で表現することができます。この測度を Revuz 測度と呼び、Revuz 測度が正値加法的汎関数と一対一に対応しています。この対応をもとに Revuz 測度と正値加法的汎関数を構成する確率過程との収束の関係について研究を行いたいと思っています。私は、半群の意味での収束を示すことにより、ジャンプをもたない確率過程からジャンプをもつものへの収束を示しました。そこで取り扱った具体的な正値加法的汎関数の収束問題では、確率過程に対応するリゾルベントと Revuz 測度との積に似た表現を取り扱い、ある列に関する収束定理を得ることができました。同様に精密な議論を行う事により、一般的な正値加法的汎関数と対応する Revuz 測度との収束を示す事ができると予想されます。確率過程には、上で挙げたように対応する推移確率・半群・リゾルベント等があり、これらの対応はよく知られています。今後の研究では、まずリゾルベントによる収束から研究を行い、また半群・推移確率等の収束の意味から関係を探りたいとも思っています。

下の図は今後の研究の手法を簡単にまとめたものです。



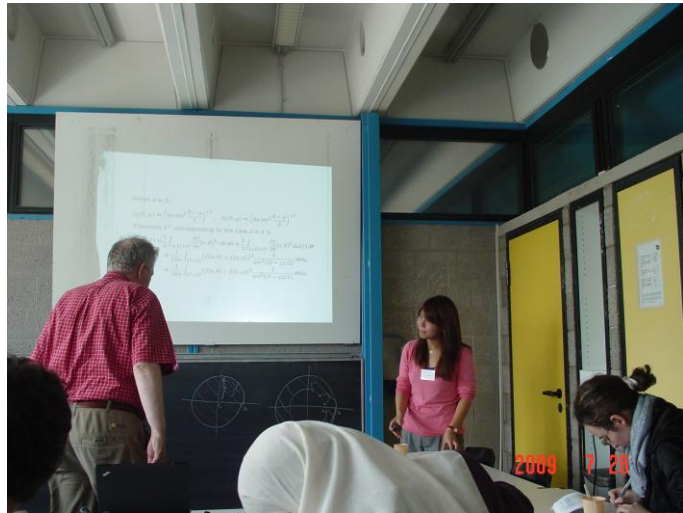
このような方法で多様なモデルに対応した確率過程の構築を目指し、研究を進めていきたいと思っています。

[最後に]

私は、奈良女子大学で学位を取得し、独立行政法人 日本学術振興会 特別研究員 PD として京都大学に所属していました。学生時代は、素晴らしい先生方に温かく見守っていただきましたことを心から感謝しております。

現在は、奈良女子大学の教員として充実した研究生活を送っています。国内外問わず、さまざまな研究集会に参加し、得られた結果を講演しています。そこでは、今後につながる議論を積極的に行っています。研究を通して、国籍を問わずたくさん人たちと交流でき、刺激的な毎日を過ごしています。

最後になりましたが、奈良女子大学という恵まれた環境で研究ができることに感謝いたします。



[文献]

- 1) Tomoko Takemura and Matsuyo Tomisaki, Feller property of skew product diffusion processes, *Osaka Journal of Mathematics*, 48, 269-290, 2011.
- 2) Tomoko Takemura, Convergence of time changed skew product diffusion processes, (preprint).
- 3) Tomoko Takemura, Skew product and their time changes, 奈良女子大学大学院 人間文化研究科 複合現象科学専攻 博士論文, 2010.
- 4) Tomoko Takemura, State of boundaries for harmonic transforms of one-dimensional generalized diffusion processes, *Ann. Report of Graduate School of Humanities and Sciences Nara Women's University*, 25, 285-294, 2009.
- 5) Tomoko Takemura, Elementary solutions of Bessel processes with boundary condition, *Ann. Report of Graduate School of Humanities and Sciences Nara Women's University*, 23, 265-278, 2007.