Stefan Junk 氏の文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞に寄せて

筑波大学数理物質系
福島　竜輝

Stefan Junk 氏（学習院大学理学部数学科・助教）が「ランダム媒質中の高分子模型の研究」により，令和 8 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞されました．心よりお祝い申し上げます．Junk 氏は 2019 年にミュンヘン工科大学で博士の学位を取得され，京都大学数理解析研究所と筑波大学に日本学術振興会外国人特別研究員として滞在された後，東北大学材料科学高等研究所・助教を経て，2023 年 9 月より現職に就かれています．最近では，2024 年度日本数学会賞建部賢弘賞特別賞も受賞されており，それに続く今回の受賞を，彼が博士課程学生の頃からの共同研究者として，大変嬉しく思っております．

Junk 氏の主要な研究対象である「ランダム媒質中の高分子模型」は，もう少し詳しくいえばディレクテッドポリマーと呼ばれるもので，時空間にランダムに配置されたポテンシャルと相互作用するランダムウォークから定まる Gibbs 測度のことを指します．この模型は，元々は不均質な相互作用をもつ Ising 模型の二相間界面を単純化した模型として導入されましたが，例えば Anderson 模型とも呼ばれるランダム Schrödinger 作用素の時間依存版という別の意味もあり，様々な背景から 40 年余りにわたって研究されてきました．ポテンシャルの影響が弱いときには元のランダムウォークと変わらない挙動をする一方で，ポテンシャルの影響が強いときには全く異なる挙動をすることがわかっており，ランダム媒質由来の相転移を起こす興味深い模型になっています．さらに，最近では空間一次元においてある種の高温極限を考えると，界面成長模型に関するいわゆる Kardar–Parisi–Zhang の普遍性クラスに属することが厳密に証明され，その観点からも非常に盛んに研究されています．ただし，Junk 氏の主要な業績は，この潮流とはかなり異なる方向のものです．

業績の説明をするために，関連する先行研究の説明から始めます．まず，統計物理の標準的な考え方として，相転移とは Gibbs 測度の分配関数や自由エネルギーが何らかの意味で温度のようなパラメータについて不連続になることをいい，その点を臨界点といいます．一方で数学的には，この模型の分配関数は，適当に正規化するとマルチンゲールと呼ばれる性質の良い確率過程になり，その性質を使って定義される臨界点がいくつか存在します．例えば，マルチンゲールが L^2 有界になるか否かを分ける臨界点，一様可積分か否かを分ける臨界点，などが考えられてきました．この模型の数学的な研究においては，これらの臨界点を使い分けることでうまくいくことが多く，例えば Comets–志賀–吉田（2003）では，マルチンゲールが一様可積分でない相では，ある種の局在現象が起こることが示され，一方で Comets–吉田（2006）では，マルチンゲールが一様可積分な相では，高分子のスケール極

限が Brown 運動に収束することが示されています．つまり，高分子の挙動の転移という視点では，一様可積分性で定まるものが“正しい”臨界点です．一方で，この模型の性質を詳しく調べる際には，遷移確率にあたる量の各点収束である「局所極限定理」が有用になる場面も多く，これも深く研究されてきました．しかし，この方向の結果は，マルチンゲールが L^2 有界になる場合にしか証明がない状況が長らく続いていました．また，自由エネルギーに基づく統計物理的な臨界点にももちろん意味があり，上記の局在現象について，物理的に“目に見える”形での局在が証明されていたのは，この意味で優臨界的な相だけでした．

このような背景から，複数の異なる方法で定義された臨界点が，実際に異なるのかを判定することは，この分野では重要な問題です．例えばパーコレーションのようなより古くから研究されている模型では，複数の臨界点の一致が証明されている場合も多く，相転移の sharpness と呼ばれています．ディレクテッドポリマーに関しては，やや状況は複雑で，マルチンゲールが「L^2 有界になるか否かを分ける臨界点」と「一様可積分か否かを分ける臨界点」は異なることが 2010 年頃までに証明されていました．したがって，マルチンゲールが L^2 有界になる場合にしか証明されていない結果が，一様可積分性だけの仮定でも成立するか，という問題が自然に生じます．一方で，「一様可積分か否かを分ける臨界点」と「自由エネルギーの意味での臨界点」が一致するか否かは，長年の未解決問題でした．Junk 氏は，この二つの問題に取り組み，両方の最も重要な部分を解決しました（一部は Hubert Lacoin 氏との共同研究）．具体的には，上で述べた局所極限定理がマルチンゲールの一様可積分性だけの仮定でも成立することと，一様可積分性と自由エネルギーの意味の臨界点が一致することの証明に成功しました．前者については，現時点で出版されている論文では技術的な仮定がついていますが，それも最近外すことに成功したようです．これらは，片方だけとっても革新的な成果であり，両方がほぼ同時期に解決したことは，この分野の研究者にとっては衝撃だったのではないかと思われます．

証明の技術的な内容については，この模型で自然に現れるマルチンゲールに特有の性質を，鋭い直感で見出し，hard analysis によって確立していくというもので，手短かに概要をまとめるのは容易ではありません．ここでは，専門的になりすぎるので，詳細には踏み込まないことにします．筆者は，上記の成果につながる研究では，ほぼ傍観者として議論に付き合ってきた程度ですが，次々と立ち上がる困難を的確に把握し，新しいアイデアや腕力で克服していく様子は，圧巻の一言でした．

なお，ここでは Junk 氏の研究のうちで，説明のしやすい未解決問題への貢献に限って書きましたが，高分子模型に限っても他にもいくつもの独創的な成果があり，さらにランダム媒質中のランダムウォークなどの異なる模型の研究にも取り組んでおられます．これからも，確率論のさまざまなモデルで，新しい局面を拓くような面白い結果を見せてくれることを期待しています．