

# A01-004 ガラスにおける遅いゆらぎのダイナミクスと隠れた秩序

名古屋大学大学院理学研究科 宮崎州正  
大阪大学 サイバーメディアセンター 吉野元

## 1. ランダムピンング液体の理想ガラス転移

ガラス転移点の存在はいまだに証明されていない。実験から得られる粘性やエントロピーのデータを高温側から外挿すると、確かに有限温度で熱力学的な特異点が存在することが示唆されるが、緩和時間の増大に阻まれて、その特異点を直接観測することが出来ないためである。我々は、この困難を克服するために構成粒子の自由度の一部を凍結（ピンング）させることにより、真のガラス転移点を高温側に引き上げることで、熱力学転移としてのガラス転移および熱平衡状態とし

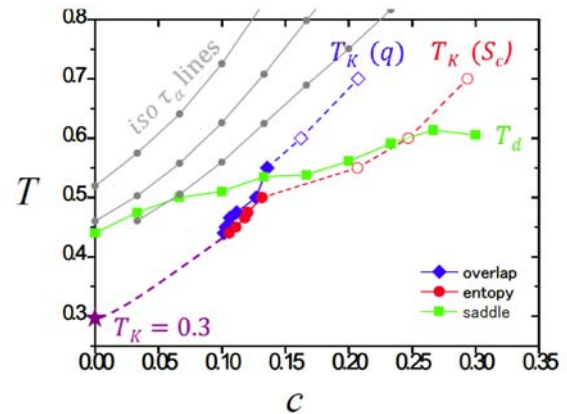


図1. 理想ガラス転移点  $T_K$  (◆と●)と動的転移点  $T_d$  (■)。

てのガラス状態を、シミュレーションにより再現することに成功した。ピンングのアイデアは既に平均場理論やモード結合理論により提案されていたが、我々は有限次元系でこれを再現し、動的転移点も含む熱力学的相図（図1）を明確に示した。この系のガラス相における熱力学量とダイナミクスをさらに詳細に調べた結果、ガラス相の中においてすら、残留エントロピーが有限であること、また拡散的な原子運動が残っていることを明らかにした。これは配置エントロピーがゼロになる点を転移点とする平均場描像では説明できない。これは平均場理論が「状態」と呼ぶポテンシャル極小状態の中に、さらなるエネルギーランドスケープの階層構造があることを示唆している([1]など)。

## 2. ガラス転移の平均場模型

モード結合理論(MCT)はガラス転移の平均場理論として知られている。我々は、上記1で記したピンング系などに現れる異常な転移点、いわゆる高次特異点における動的不均一性を解析するためのMCTを開発し、スケーリングなど普遍的なダイナミクスを解析した。また、平均場理論が厳密になるガラスの模型として、ベータ格子上的Fredrickson-Andersen模型を用いて、ピンング系の高次特異点の解析も行った([2]など)。MCT、FA模型の結果は共に、通常のガラス転移のダイナミクスとは異なる、対数的な緩和と異常な相関長、臨界指数を予言する。

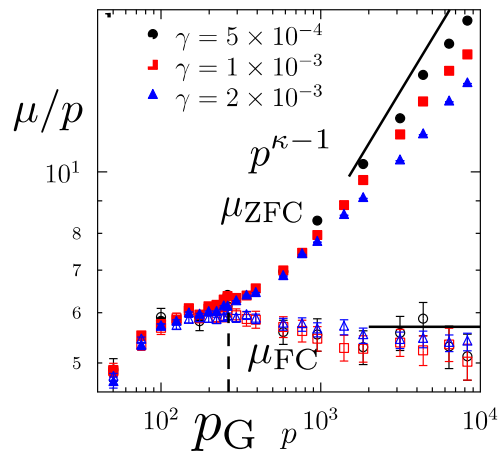
## 3. 多様なガラス転移の解析

ガラス転移の本質を理解するために、最近、空間次元やモデルの依存性の研究が盛んである。我々は、ガラスのモデルの相互作用の形状やパラメータを広い範囲で調べ上げ、その特異性や普遍性を解析した。例えば、(i) 構成原子のサイズ比を大きく変えた二成分模型におけるガラス転移をレプリカ理論により解析し、2RSB転移と呼ばれる新規転移を予言した。(ii) 原子間ポテンシャルをネットワーク型から剛体球型へシームレスに繋ぐモデルをシミュレーションにより解析し、ガラスを特徴づける重要なパラメータであるフラジリティを、単一モデル

で統一的に解析できることを示した。また、ultra-soft モデルと呼ばれる「柔らかい」相互作用を持つ系を用いて、原子同士がクラスターを作る新規ガラス相の存在を明らかにした([3] など)。

#### 4. ガードナー転移に伴う階層的なシア応答

我々は、ジャミング転移点付近の高密度コロイド粒子系が、観測する時間スケールによって、硬くも柔らかくも振る舞うという奇妙な性質を示すことを数値シミュレーションによって見出していた(岡村-吉野(2013)未発表)。そのメカニズムが、ガードナー転移と呼ばれるガラス-ガラス転移にあることを、レプリカ理論[4]、および大規模数値シミュレーション[5,6]によって明らかにすることに成功した。ガードナー転移において、系に無数にあるガラスの準安定状態の一つ一つ



がさらに分裂し、自由エネルギーランドスケープが階層的になる。これを反映し、力学物性が非自明になる。右図はこれを端的に示す、剛体球ガラス系における数値シミュレーションの結果[6]である。図は、ガードナー転移がおこる圧力  $p_G$  以上で、圧縮とシアが非可換になり、圧縮してからシアをかけると(ZFC)大きなシア応力が生じ、逆にシアをかけてから圧縮すると(FC)小さなシア応力しか残留しないことを示している。スケーリング特性を含め、理論とシミュレーションの結果が良い一致を示している。この結果は今後、実験的なレオロジー研究にも示唆を与えると期待される。さらに最近、ガードナー転移を反映して、周期的なシア摂動に対して、ある種の階層性を持つ新しい可逆-不可逆転移が現れることを見出した。[7]

#### 5. 回転自由度のガラス・ジャミング転移

ガラス転移を示すのは並進自由度に限らない。我々は、回転自由度をもつ系のガラス転移に関し、高次元極限で厳密になるレプリカ理論を構築することに成功した[8]。今後これに基づいて、(i)パッチコロイドや楕円コロイドにおけるガラス・ジャミング転移、(ii)連続彩色問題など連続自由度の制約充足問題、新たな誤り訂正符号問題などの統計的推定問題 (iii)外的乱れを含まないフラストレート磁性体におけるスピングラス転移、などの広範な問題を統一的観点から研究する土台が得られた。

#### 参考文献：

- [1] M. Ozawa, et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 112, 6914 (2015).
- [2] S. Kumar Nandi, et al. Phys. Rev. Lett. 113, 245701 (2014).
- [3] M. Ozawa, et al. J. of Stat. Mech., 074002(2016).
- [4] H. Yoshino and F. Zamponi, Phys. Rev. E 90, 022302 (2014); C. Rainone, P. Urbani, H. Yoshino, F. Zamponi Phys. Rev. Lett. 114, 015701 (2015).
- [5] D. Nakayama, H. Yoshino and F. Zamponi, J. of Stat. Mech, 10, 104001 (2016).
- [6] Y. Jin and H. Yoshino, Nat. Comm. 14935 (2017).
- [7] Y. Jin, P. Urbani, F. Zamponi and H. Yoshino, Sci. Adv. 4 eaat6387 (2018).
- [8] H. Yoshino, SciPost. Phys. 4(6), 040 (2018).