

ジャミング・ガラス転移の統一理論の構築研究

京都大学基礎物理学研究所・教授 早川尚男

1. 初期の研究目標と実際の研究推進

初期の研究目標は粉体のジャミング転移とコロイド等のガラス転移を別々の角度からアプローチし、統一的な理論を構築するものであった。2年間の研究の結果、ジャミング転移の研究に関しては報告者のグループが2009年初旬に発表した論文の検証的研究が進んだこともあり、一定の成果として国際的認知度もある程度高まったものの、ガラス転移の研究については場の理論的研究を進めたものの論文発表には至らず著しく成果は不十分であったと思う。これらのテーマの周辺分野については（粉体素子としての）ナノクラスターの衝突の問題、ナノスケールの粒子輸送、粉体せん断系のゆらぎの定理や同時刻長距離相関、時間相関のロングタイムテール等に一定の成果が挙げられた。特にナノクラスター衝突の問題では交付期間直前に発表した論文が世界中のメディアで取り上げられ、日本でも東京新聞等で紹介されたり、別の論文がPRLのeditor's choiceに選ばれたりした。

2. 研究成果

2-1. ジャミング転移

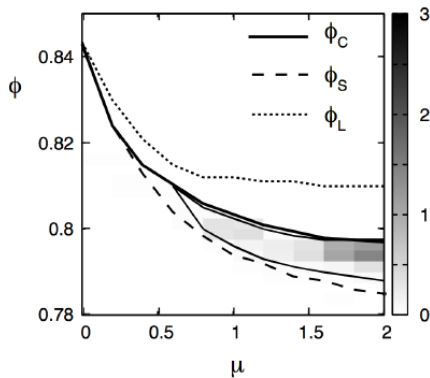


図1: ジャミング転移の臨界密度の摩擦係数 μ 依存性。このうち ϕ_c が真の臨界密度で、それ以外はスケーリングに用いた外挿した臨界密度である。[2]

効でかつ、臨界指数が摩擦のない場合と一緒であること、更に見掛け上の臨界点が多数現れることを見出した(図1参照)[2]。

2-2. 粉体せん断液体系の統一理論

ジャミング転移は高密度粉体せん断系のゼロせん断極限での振る舞いに注目しているが、高密度では粒子間のコンタクトが発生しエルゴード性も失われる事から一般論の構築に至っていない。一方、ジャミング転移点以下の液体領域では第一原理的な扱いも可能になり、こ

ジャミング転移とは、粒子密度が一定の密度以上になった時に剛性が現れるか否かの転移である。まず我々は摩擦のない粉体粒子系に対して平均場近似に基づく理論を提出し、連続転移であることと、臨界指数が次元によらないこと、平均場近似の臨界指数が良く数値計算の結果を再現することを見出した。

[1] また、摩擦のある粒子系では連続転移が不連続転移に変化し、ヒステリシスを持つこと、また連続転移点への外挿によって摩擦のない粒子と同様にスケーリング解析が有

の2年間で様々な性質が明らかになってきた。まず特筆すべきはミクロの時間反転対称性も局所平衡の仮定もなしにゆらぎの定理が成り立つことを明らかにした事である。[3] そこで用いられた手法は散逸量子系でも有効であることが分かっている[4]。また、せん断定常系でKNSTと呼ばれる非平衡定常状態の理論の有効性も検証している。[5]

その他、通常の液体同様に同時刻長距離相関が存在すること[6]や、弾性極限で時間相関関数のロングタイムテールがせん断率の逆数を境に変化することを発見した。[7]

2-3. ガラス転移の場の理論による解析

ガラス転移に関しては概要に述べた通り、全く予定外れだった。ヘキサティックオーダーの特徴付けのためにボンド角のオーダーパラメータを導入した解析を行ったが、その導入でエルゴード性の回復が実現するというあては外れたため、学生が修士論文を著したのみで、その学生が卒業後その方面の研究は途絶えたままである。

2-4. 周辺分野

紙数も尽きたので周辺分野の論文を列挙するに留める。これらの発表論文には粉体素子としてのナノクラスターの衝突の研究（但しこれらが最も注目を集めた）[8]、ジャミングを起こすナノ粒子の外場中の輸送現象[9]や蠕動する管の中の粒子輸送[10]、粉体ガスを実現する微小重力下の加振実験[11]等がある。その他、論文執筆中のものとしてヘリウム上の古典電子輸送に見られるジャミングやアクティブマターのレーン形成に関する研究が現在進行形である。

<参考文献>

- [1] M. Otsuki and H. Hayakawa, PTP**121**, 657 (2009); PRE **80**, 011308 (2009); M. Otsuki, H. Hayakawa, and S. Luding, PTP Suppl. No.**184**, 110 (2010).
- [2] M. Otsuki and H. Hayakawa, arXiv:1006.3597.
- [3] S.-H. Chong, M. Otsuki and H. Hayakawa, PRE **81**, 041130 (2010); H. Hayakawa, S.-H. Chong and M. Otsuki, in IUTAM-ISIMM Symposium on Mathematical Modeling and Physical Instances of Granular Flow, pp.19-30 edited by J. D. Goddard, J. T. Jenkins and P. Govine (AIP vol.1227, New York, 2010).
- [4] H. Hayakawa, PTP Suppl. No.**184**, 543 (2010) and in preparation.
- [5] S.-H. Chong, M. Otsuki, and H. Hayakawa, PTP Suppl. No.**184**, 77 (2010).
- [6] M. Otsuki and H. Hayakawa, PRE **79**, 021502 (2009); Eur. Phys. J. Special Topics **179**, 179-195 (2009).
- [7] M. Otsuki and H. Hayakawa, J. Stat. Mech: Theor.& Exp. (2009) L08003.
- [8] H.Kuninaka and H. Hayakawa, PRE **79**, 031309 (2009); この論文は各種メディアで取り上げられた。K. Saitoh and H. Hayakawa, PTP **122**, 1081 (2009); PRB**81**, 115447 (2010). K. Saitoh, A. Bodrova, H. Hayakawa and N. V. Brilliantov, PRL **105**, 238001 (2010) featured as editor's choice.
- [9] C. Nakajima and H. Hayakawa, PTP **122**, 1377 (2009).
- [10] N.Yoshioka and H. Hayakawa, arXiv:1102.0354.
- [11] S. Tatsumi, Y. Murayama, H. Hayakawa & M. Sano, JFM **641**, 522 (2009).