

成果概要

粉体のジャミング転移の研究を中心に据え、同時に通常のガラス転移の場の理論や外力駆動系のジャミング等も調べた。特に今年度の成果として摩擦のない粉体粒子のジャミング転移におけるスケーリング理論の有効性を確立した点とせん断粉体粒子系のゆらぎの定理を含めた統計力学的理論を発展させたことを成果として強調したい。

1. ジャミング転移のスケーリング理論

粉体のジャミング転移とは、粒子集団が臨界密度以上で硬さを持つ相転移である。また、降伏応力の出現の有無によるレオロジ的相転移とも捉えることが可能である。摩擦のない粉体粒子に関しては密度に関する連続転移であり、その臨界現象に伴うスケーリングが提案されていた。我々は平均場理論に基づき臨界指数を理論的に推定すると共に様々な場合についてその妥当性を数値計算との比較から明らかにした。その結果は臨界指数が次元に依存せず、局所的な相互作用のみで決まること、圧力と粘性率が臨界密度からの差の4乗に反比例して発散すること、動径分布関数の第一ピークの発散もほぼ理論通りであること、これらのスケーリングは粒子が硬く、せん断率がゼロの極限で成り立つこと等である。[1]

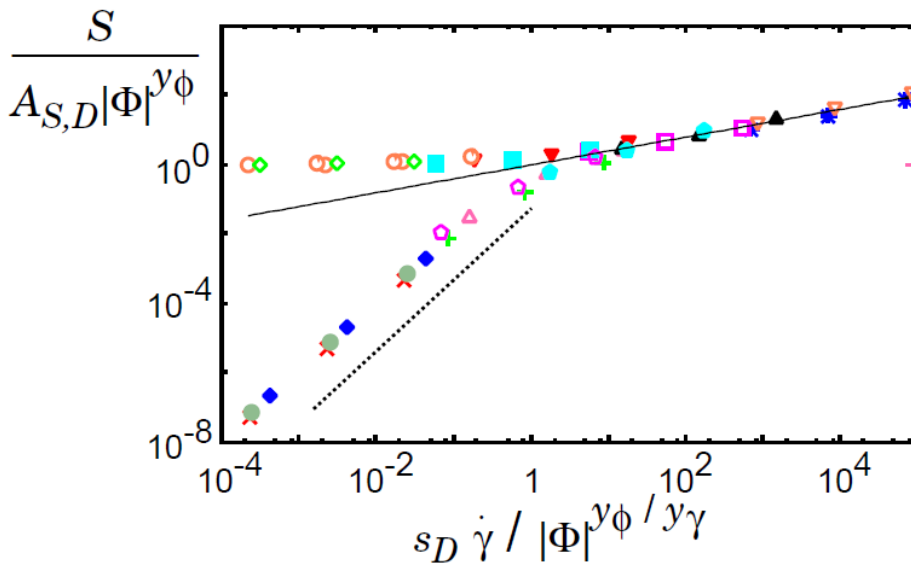


図1.  $y_\phi, y_\gamma$ はスケーリング指数。様々な次元、臨界密度からのずれである $\Phi$ のデータを重ね書きしたもの。図の左側で水平に伸びている分枝はせん断速度がゼロの極限でも有限の降伏応力を持つことを示すジャミングを表し、左下に伸びている分枝はせん断速度がゼロになると接線応力がゼロになる液体的分枝を表す。

2. せん断粉体の液体論と統計力学の構築

上記のようにせん断粉体系はジャミング転移を示すが、上記スケーリング理論は現象論で

あり、統計力学的理論とは言い難い。その点で Liouville 方程式から出発して一般化 Green-Kubo 公式やゆらぎの定理の積分形を導き、更にモード結合理論を導出する液体論を構築しつつある。[2]更にその液体論の森方程式にマルコフ近似を行うことで fluctuating hydrodynamics を導いている。[2]その fluctuating hydrodynamics を用いることで長距離相関やロングタイムテールを統一的に議論できることが分かった。[3]

### 3. 場の理論に基づくガラス転移の研究

ガラス転移について融解のモデルとして用いられた位相変数を導入したモデルを導入し、解析を行ったが、予定通りには進んだとは言い難い。結局のところ、モデル自由エネルギーにフラストレーションの効果を入れる必要を痛感した。結果は修士論文としてまとめられた。

### 4. その他のジャミング転移に関する研究

その他、ボトルネックのある系で分子液体を外力駆動した場合に生じるジャミングについて詳細に調べた結果、分子間引力によって大きく性質が決まることを明らかにした論文が直接研究課題と関係している。[4]

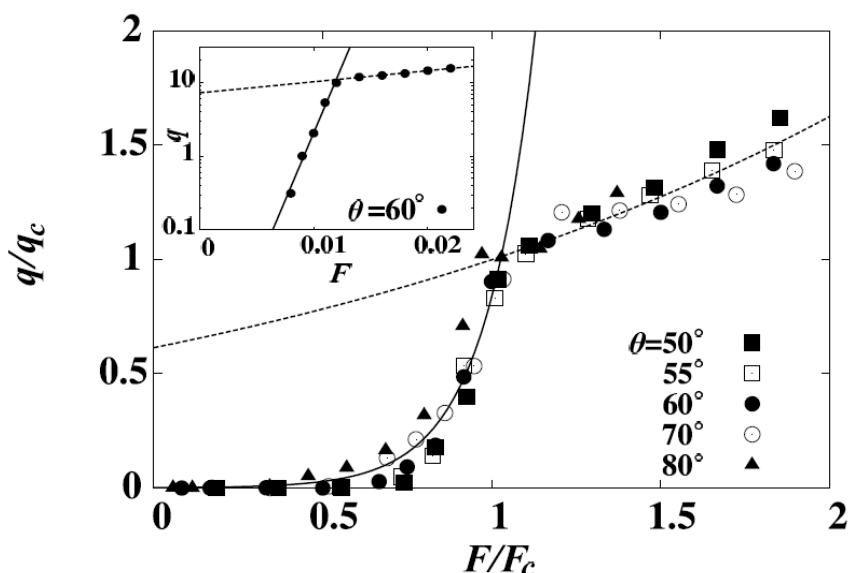


図2は流量と外力の関係で流量と外力がきれいなスケーリング関係式を満たすことを示している。また2つのスケーリング関数は分子間力が支配的な領域と外力によって決まる領域を表している。

#### <参考文献>

- [1] M.Otsuki and H. Hayakawa, PTP121, 657 (2009), PRE 80, 011308 (2009); M. Otsuki, H. Hayakawa and S. Luding, arXiv:1002.0618.
- [2] S-H.Chong, M. Otsuki and H. Hayakawa, arXiv:0906.1930, to be published in PTP Suppl.; H. Hayakawa, S-H. Chong and M.Otsuki, to be published in the proceedings of IUTAM Symposium on MPGF09 edited by J.Goddard (AIP, 2010).
- [3] M.Otsuki and H.Hayakawa, J. Stat. Mech. (2009) L08003, PRE79, 021502 (2009), to be published in EPJE.
- [4] C. Nakajima and H. Hayakawa, PTP 122, 1377 (2009).