

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340098

研究課題名(和文) ガラス転移とジャミング転移の平均場描像の確立

研究課題名(英文) Establishing the mean-field picture of the glass and jamming transitions

研究代表者

宮崎 州正 (Miyazaki, Kunimasa)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40449913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：過冷却液体のガラス転移の研究の歴史は非常に長い但未だに平均場理論すら確立していない。我々は、ガラス転移の平均場描像の有力候補であるRFOT理論を検証するために、数値計算と理論研究を行った。具体的には、液体のガラス転移と粉体のジャミング転移を統一理論の検証、非一様モード結合理論の高次特異点への拡張、および「柔らかい」長距離相互作用モデル液体のクラスターガラス転移などに関する新しい知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Although the study of the glass transition of the supercooled liquids has a long history but even the mean-field picture has not been completely established yet. In this project, we have implemented extensive simulations and theoretical analysis in order to verify one of the most promising scenario of the glass mean field theory, called the RFOT. More specifically, (1) we established that the RFOT can quantitatively verify the relationship between the glass transition for liquids and the jamming transition for hard spheres, (2) we extended the so-called inhomogeneous mode-coupling theory to the system in the vicinity of the higher order singularity point, and (3) we have done the simulation for a cluster glass phase of the quasi-long ranged "ultra-soft" potential model fluids.

研究分野：非平衡統計物理学

キーワード：統計力学 化学物理 物性基礎論 ガラス転移 ソフトマター

1. 研究開始当初の背景

液体を融点以下に急冷したときの分子運動の凍結が、ガラス転移である。このとき発散的に緩和時間が増大するにもかかわらず、見かけ上、分子配置は液体とほとんど変わらない。では、何が分子運動を遅くするのか？ そもそもガラス転移は熱力学的転移だろうか、それとも動力学的クロスオーバーに過ぎないのだろうか？ 一方、熱揺らぎがない粉体においても似た現象がある。例えば、剛体球の入った容器を急激に圧縮すると、球はランダムな配置のまま動けなくなる。興味深いことに、そのときの密度(体積分率)は、常に結晶密度(74%)よりも小さい64%となる。これをジャミング転移と呼ぶ。ジャミング転移はガラス転移の温度ゼロの極限と考えてよいだろうか？ それとも別種の現象だろうか？ 現在まで、これらの疑問に答えるために、様々な理論が提案されている。例えば、P. Wolynesらによる Random first order transition 理論(RFOT) や田中肇による「中距離結晶秩序」理論は、遅いダイナミクスの起源を、複雑なエネルギーランドスケープに隠された何らかの構造秩序に求め、ガラス転移を熱力学的転移と考える。一方で、D. Chandler らは、ガラス転移は純粋な動的転移であり、熱力学的な異常は伴わないと主張している。また、分子運動論から発展したモード結合理論(MCT) や、液体論をランダム系に応用した G. Parisi らのレプリカ液体論は、転移を第一原理的に記述する試みであり、一定の成功を収めている。このように、様々な理論が競合し乱立しているが、解決の道筋はついていない。それどころか、あらゆる協同現象の理解の第一歩であるべき平均場描像についてすら意見が分かれている。その状況で、現在最も受け入れられているのは、スピングラスの分野で発展した平均場描像である。この描像によると、ガラス転移は動的転移点 T_{MCT} (MCT 転移点) と、真の熱力学的転移点 T_K (Kauzmann 温度) の 2 つの転移点により特徴付けられる。液体は、複雑な多谷構造を持つエネルギー面上を運動しているが、温度が高ければ、谷の影響を強く受けない。この時、揺らぎの相関関数は時間と共にゼロに緩和する。しかし、温度を下げると、ある温度 T_{MCT} を境に系がポテンシャルの谷に落ち込み始める。平均場理論ではポテンシャルの障壁は無限に高いので、軌道の運動は非エルゴード的となり、相関関数の緩和時間は発散する。これが動的転移である。しかし、この状態は熱力学的には準安定状態に過ぎない。さらに温度が T_K まで低くなると、系はポテンシャルの数少ない谷底に落ち込み、一種の対称性の破れを伴う真の相転移が起きる。この描像の理論的な骨組みを与えるのが、熱力学的側面については、先述のレプリカ液体論であり、動力学については MCT であると予想されている。この平均場描像は、乱立する理論の多くを統合できる点で極めて魅力的

である。RFOT 理論や「中距離結晶秩序」理論は、この描像の有限次元版とみなせるであろう。さらにランドスケープ描像において、温度とエネルギーを、圧力と密度に読み替えれば、剛体球液体やコロイド系のガラス転移も説明でき、ジャミング転移もこの描像で統一的に理解することが可能となる。この描像が T. Kirkpatrick らにより提案されたのは 20 年以上前であるが、未だに完全に受け入れられていない第一の理由は、実験や数値実験による検証がないこと、第二の理由は、この理論体系は深刻な矛盾を内包しており、不完全であることである(A. Ikeda *et al.*, PRL 104, 255704 (2010))。最近、我々にはできるだけ平均場的なモデル液体の数値実験を開始した。その準備的な成果は、最新の計算機能力を活用すれば、平均場描像を検証できる可能性が十分にあることを示している(A. Ikeda *et al.*, PRL 106, 015701 (2011))。

2. 研究の目的

本研究は、数値実験と理論解析により、ガラス転移の平均場描像を確立することを目的とする。液体のガラス転移、あるいは粉体のジャミング転移は、構成粒子がランダムな配置を保ったままダイナミクスが凍結する、極めて普遍性の高い現象である。その本質を理解するために、数多くの理論が提案されてきたが、どの理論が正しいかを示す決定的な証拠はなかった。しかし、近年の計算機技術の発展により、競合する理論の検証の可能性が現実味を帯びてきた。我々は、相互作用や密度、空間次元など、前例のない幅広いパラメータ空間において、様々な過冷却液体のダイナミクスを詳細に調べ尽くし、ガラス転移の理解のための第一歩ともいえるべき平均場描像の確立を目指す。我々の試みは、乱立する理論を統合し、同時にガラス転移とジャミング転移の統一的理解をもたらすと期待される。

(1) ガラス転移とジャミング転移の統一的理解

平均場の概念を剛体球系に適用すると、ジャミング転移とガラス転移の関係が自然に理解できる。まず、剛体球液体では、温度 T とそれに共役なポテンシャルエネルギーの代わりに、圧力 p と体積(またはその逆数である密度)をパラメータに選ぶのが自然である。ランドスケープの多谷構造の谷底の値は、剛体球液体の各瞬間の配置から得られる最大密度(の逆数)の値となる。この値を数値実験で得るためには、ある密度における剛体球液体に、急激に圧力をかけて圧縮すればよい。この手続きは、系をジャミング転移させることに他ならない。谷底の値に対応する密度(の平均値)がジャミング転移点である。つまり、ジャミング転移はガラス転移理論の枠組みの中に埋め込まれているのである。このことから予想されることは、圧縮する前の液体の密度が動的転移点 T_{MCT} を超えると

の値が上昇することである。 < ρ_{MCT} であれば、系は全ての谷底の上にあるため、圧縮後は谷底のあらゆる値の平均値が得られる。これが、ジャミング転移点が初期状態によらず一定値 $\rho^* = 0.645$ になると信じられてきた理由である。しかし、 ρ が ρ_{MCT} を超えると、取り得る谷底の値は平均して小さくなる。つまり ρ^* は上昇することが予想される。

(2) 数値実験による平均場描像の検証と理論開発

長距離相互作用極限を取ることににより、ガラス転移の「平均場模型」を実現する試みは以前からあったが、結晶化や熱力学的な不安定化のために、あるいは数値実験の規模が十分でなかったために成功しなかった(Klein et al. Physica A 205, 738 (1994))。長距離相互作用系は、粒子どうしが重なりあえるほど斥力相互作用を弱く(柔らかく)し、さら密度を高くすることにより得られる。この「柔らかい」ガラス系は、新規ガラスの宝庫であり、平均場描像の検証のみならず、ガラス転移研究の裾野を広げることに寄与する可能性が高い。今まで研究されてきたガラス転移のモデルは、ほぼ例外なく、剛体球ポテンシャルや Lennard-Jones ポテンシャルのような短距離斥力による排除体積効果が支配的な単純液体であった。そのため、それらのダイナミクスも定性的に似通っており、ガラス転移を多面的に理解することを阻んできた。それに対して、排除体積効果が弱い「柔らかい」ガラスは、従来の系にはない多様なガラス的振舞いを示すと期待される。高分子やデンドリマー、エマルジョンのようなソフトマター系の相互作用は、実際に短距離斥力が弱く「柔らかい」。これらの系は、熱力学的にも豊かな物性を示すため、近年ソフトマター物理学の分野でも興味を集めている。

(3) ガラス転移の高次特異点における動的不均一性とその臨界的ダイナミクス

ガラス転移におけるスローダイナミクスの背後には、動的不均一性と呼ばれる協同運動があることが知られているが、これが静的な臨界揺らぎなのか、あるいは核生成における核のような有限の静的揺らぎなのか、あるいは文字通りの動的揺らぎなのかは分かっていない。一方、ガラス転移のダイナミクスを記述する標準理論であるモード結合理論は、最近、代表者らにより転移点における動的不均一性を記述できるように拡張された。これは外場におり空間的に変調された MCT における二点相関関数を摂動展開して、動的不均一性を記述するための多体相関関数を計算するもので IMCT と呼ばれる。一方、従来の MCT はその数理構造が調べつくされていて、その豊かな構造がガラス研究の裾野を広げてきた。

3. 研究の方法

(1) ガラス転移とジャミング転移の統一的理解

我々は、剛体球液体の組成や空間次元($d = 2$ と 3) を系統的に変えて数値実験を行う。まず、通常の MD シミュレーションあるいは MC シミュレーションにより、密度 ρ における熱平衡状態を用意し、その状態で急圧縮および共役勾配法により、ジャミング状態を生成する。そして剛体球の配置の局所構造の変化を解析する。 ρ^* は、最密充填密度である hcp 結晶の密度 0.74 を越えられない。素朴に考えれば、 $\rho^* > 0.645$ に対応する剛体球の配置は、部分的に結晶秩序が混入した状態と想像される。しかし、ランドスケープ描像によれば ρ^* の増大は、多谷構造の谷底の値が平均して低くなった事を反映しているに過ぎず、結晶秩序が成長しているとは限らない。我々は、結晶秩序などの局所的な構造の有無を調べるために、ボンド秩序パラメータや局所エントロピーの相関関数を解析する。本課題は、大学院生の尾澤岬氏が中心となり推進した。

(2) 数値実験による平均場描像の検証と理論開発

我々は最近、Gauss 型モデルについて数値実験を行い、高密度でガラス化することを示した。しかもそのダイナミクスは、過去のどのモデル系よりも MCT との定量的な一致が良いことが分かった(A. Ikeda et al., PRL 106, 015701 (2011))。我々は、この結果を発展させ、様々な「柔らかい」ガラスの普遍的な性質を調べる。熱力学的な性質が既にある程度わかっている系として、Herz ポテンシャル系と、 k 空間 overlap ポテンシャル系と呼ばれる液体の数値実験を行う。手法は通常分子動力学シミュレーションおよび積分方程式法を用いる。本課題は、大学院生の岡崎祥太氏および御茶ノ水女子大学の菅江祥子氏が推進した。

(3) ガラス転移の高次特異点における動的不均一性とその臨界的ダイナミクス

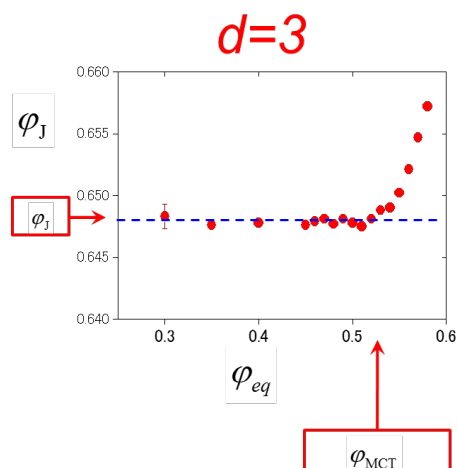
MCT は本来、時間と空間の揺らぎの情報を含んだ物理量で書かれる理論であるが、(少なくとも)原子の大きさ程度のミクロな波長については無視をしても捕らえる物理は変化しないことがわかっている。そこで、我々はスケマティック MCT と呼ばれる短波長を無視して単純化した MCT を IMCT へ拡張した。さらに MCT の構造を適当に変えて、数理的な普遍性クラス(カタストロフ理論における特異点の次数)を変えることにより、動的不均一性の変化を調べた。

4. 研究成果

(1) ガラス転移とジャミング転移の統一的理解

我々は、2次元と3次元の剛体球液体の inherent structures、すなわちジャミング転移点を、大規模の数値実験により計算した。

そして、クエンチ前の熱平衡状態における密度に、ジャミング転移点がどのように依存するかを調べた。その結果、動的転移点と呼ばれる MCT 転移点より密度が小さい系では、ジャミング転移点が一定であるのに対して、転移点より密度が大きくなると、ジャミング転移点が上昇することが分かった(下図)。さらにジャミング状態の剛体球の配置の局所



構造の変化を解析した。結晶秩序などの局所的な構造の有無を調べるために、ボンド秩序パラメータや局所エントロピーの相関関数を解析した。その結果、ジャミング転移点が上昇した系においても、ジャミング転移に特有の一種のマージナルな安定性を表す性質である、isostaticity が保たれていることがわかった。しかし、ボンド秩序変数の相関関数には、小さいが明確な相関長の増大が見られた。これらの発見は、ガラス転移の標準理論の有力な候補の一つであり、平均場理論のシナリオを包含する、ランダム一次転移シナリオを定性的のみならず定量的に支持するものである。

(2) 数値実験による平均場描像の検証と理論開発

我々は、ガラス転移の平均場描像を定量的に検証するために、様々なあ長距離相互作用系の液体の数値実験と理論解析を行った。具体的には、相互作用の特徴的な長さが長い、いわゆる「柔らかい」相互作用系の高密度状態におけるダイナミクスを調べた。熱力学的な性質が既にある程度わかっている系として、エマルジョン系などのモデルである Hertz ポテンシャル系に注目し、理論的に密度が濃く、Kirkwood 不安定の起こるスピノーダル付近の平均場理論の検証を行い、レプリカ理論と MCT の整合性を調べた。数値実験は、やはり Hertz ポテンシャル系のクラスター相付近のダイナミクスを調べ、クラスターガラスと言うべき、新しい相を発見した。

(3) ガラス転移の高次特異点における動的不均一性とその臨界的ダイナミクス

短波長情報を無視した単純化した MCT に対応した IMCT を半解析的に分析した。スケール

則や数値解析の結果、A3 特異点と呼ばれる特異点周辺のダイナミクスと長距離相関(動的不均一性)が、通常のガラス転移とは定性的に変化することが分かった。具体的には、通常のガラス転移の動的相関長の臨界指数は $\approx 1/4$ であるのに対して、我々は新たに $\approx 1/2, 1/3$ と二種の指数を見出した。不純物や強い引力が存在する場合におけるガラス転移においては、モード結合理論が予想されるダイナミクスに、不連続連続転移やそれに伴う A3 特異点が存在することが知られているが、我々の理論はこの普遍性クラスに属するものと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

1. Saroj Kumar Nandi, Giulio Biroli, Jean-Philippe Bouchaud, Kunimasa Miyazaki, David R. Reichman, "Critical dynamical heterogeneities close to continuous second-order glass transitions", *Physical Review Letters*, 113 (2014) 245701/1-4, DOI <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.245701>
2. Kang Kim, Shinji Saito, Kunimasa Miyazaki, Giulio Biroli, and David R. Reichman, "Dynamic Length Scales in Glass-Forming Liquids: An Inhomogeneous Molecular Dynamics Simulation Approach", *Journal of Physical Chemistry B*, 117 (2013) 13259-13267.
3. Takeshi Kuroiwa, Kunimasa Miyazaki, "Brownian motion with multiplicative noises revisited", *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 47 (2014) 012001/1-8.
4. Masaki Ozawa, Takeshi Kuroiwa, Atsushi Ikeda, and Kunimasa Miyazaki, "Jamming Transition and Inherent Structures of Hard Spheres and Disks", *Physical Review Letters*, 109 (2012), 205701-1 ~ 205701-4, 10.1103/PhysRevLett.109.205701
5. Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki, "Ultra-soft potential system as a mean-field model of the glass transition", *Journal of the Physical Society of Japan Supplement A*, 81 (2013), SA006-1 ~ SA006-9, 10.1143/JPSJS.81SA.SA006.
6. Masaki Ozawa and Takeshi Kuroiwa and Atsushi Ikeda and Kunimasa Miyazaki, "Jamming and glass transitions viewed from the mean field pictures", *AIP*

Conference Proceedings, 1,518 (2013),
128-133,
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4794559>

[学会発表](計 39 件)

1. Daniele Coslovich, Atsushi Ikeda, Kunimasa Miyazaki, "An Unprecedentedly Mean-Field-Like Glass Former", Workshop on Percolation and the Glass Transition: Kinetically-Constrained Models, Bootstrap Percolation, Mixed-Order Phase Transitions, and Large Deviations (招待講演) 2014 年 10 月 19 日~2014 年 10 月 23 日, Tel Aviv University, Israel.
2. Misaki Ozawa, Walter Kob, Atsushi Ikeda, and Kunimasa Miyazaki, "Thermodynamic glass transition of randomly pinned systems", Unifying Concepts in Glass Physics VI (招待講演), 2015 年 02 月 01 日~2015 年 02 月 07 日, Aspen Center for Physics, Aspen, CO, USA
3. Misaki Ozawa, Walter Kob, Atsushi Ikeda, and Kunimasa Miyazaki, "Numerical Study of Ideal Glass Transition by Random Pinning", 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 03 月 21 日~2015 年 03 月 24 日, 早稲田大学
4. Misaki Ozawa, Kang Kim, and Kunimasa Miyazaki, "Tuning of Pairwise Potential Can Control the Fragility of Glass-Forming Liquids: From Tetrahedral Network to Isotropic Soft Sphere Models", Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter, 2015 年 03 月 16 日~2015 年 03 月 18 日, 東京大学
5. Harukuni Ikeda and Kunimasa Miyazaki, "Glass transition of a randomly pinned kinetically constrained model on the Bethe lattice", Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter, 2015 年 03 月 16 日~2015 年 03 月 18 日, 東京大学
6. Misaki Ozawa, Kang Kim, and Kunimasa Miyazaki, "Control of the Fragility of a Glass Former by using the Fragile-to-Strong Crossover", Unifying Concepts in Glass Physics, 2015 年 02 月 01 日~2015 年 02 月 07 日, Aspen Center for Physics, Aspen, CO, USA
7. Harukuni Ikeda and Kunimasa Miyazaki, "Sufficiently advanced statistic is indistinguishable from dynamics near the glass transition", Spin glasses: An old tool for new problems, 2014 年 08 月 25 日~2014 年 09 月 06 日, Colisica, France
8. Misaki Ozawa and Kunimasa Miyazaki, "Dynamical Heterogeneity of Supercooled Liquids and Shear Transformation Zone of Amorphous Solids: A Comparative Simulation Study", Liquids 2014, 9th Liquid Matter Conference, 2014 年 07 月 21 日~2014 年 07 月 25 日, Lisbon, Portugal
9. Harukuni Ikeda and Kunimasa Miyazaki, "The correlation length of the glass transition", The 8th Mini-Symposium on Liquids, 2014 年 07 月 05 日~2014 年 07 月 05 日, 岡山大学
10. K. Miyazaki, "Hidden amorphous orders near the jamming and glass transitions", CECAM workshop "From cooperativity in supercooled liquids to plasticity of amorphous solids" (招待講演), 2013 年 06 月 17 日, CECAM-ETHZ, Zurich, Switzerland.
11. 宮崎 州正, 「ガラス転移研究の最近の進展」, ニューガラスフォーラム第 111 回若手懇談会 (招待講演), 2013 年 07 月 09 日, 日本ガラス工業センター(東京都新宿区)
12. K. Miyazaki, "Unified view of the glass and jamming transitions", The East Asia Joint Seminars on Statistical Physics (EAJSSP) 2013 (招待講演), 2013 年 10 月 22 日, 京都大学基礎物理学研究所
13. K. Miyazaki, Misaki Ozawa, Takeshi Kuroiwa and Atsushi Ikeda, "Hidden length scales in the glass and jamming transitions", The Fifth International Symposium on the New Frontiers of Thermal Studies of Materials (招待講演), 2013 年 10 月 28 日, 横浜情報文化センター(横浜市中区)
14. 池田晴國, 宮崎州正, 「二成分系の柔らかい粒子における多彩な動力学」, 関東ソフトマター研究会, 2013 年 08 月 24 日, 御茶ノ水女子大学
15. 尾澤岬, 宮崎州正, 「過冷却液体の動的不均一性とアモルファス固体のせん断変形領域の関係」, 関東ソフトマター研究会, 2013 年 08 月 24 日, 御茶ノ水女子大学
16. 尾澤岬, 宮崎州正, 「Dynamical heterogeneity と Shear transformation zone の関係のシミュレーションによる考察」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 09 月 26 日, 徳島大学
17. 池田晴國, 宮崎州正, 「MCT とレプリカ液体論の融合に向けた試み」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 09 月 26 日, 徳島大学

18. 池田晴國, 宮崎州正, 「ガラス転移における平均場シナリオの理論的検証」, 第3回ソフトマター研究会, 2013年12月14日, 首都大学東京
19. 宮崎州正, 「拘束や温度勾配がある系のmultiplicativemultiplicativeなブラウン運動」, 第3回ソフトマター研究会, 2013年12月14日, 首都大学東京
20. 尾澤岬, 池田昌司, 宮崎州正, “Phase Diagram of a Random Pinning Glass”, 日本物理学会2014年春季年会, 2014年03月30日, 東海大学
21. 池田晴國, 宮崎州正, 「ガラス転移における平均場シナリオの理論的検証」, 日本物理学会2014年春季年会, 2014年03月28日, 東海大学
22. 池田晴國, 宮崎州正, 「柔らかいポテンシャルの高密度極限におけるガラス転移のMCT及びレプリカ法による解析」, 日本物理学会第68回年次春会, 2013年3月26日, 広島大学
23. 菅江祥子, 宮崎州正, 「Generalized Hertzian ポテンシャル液体のガラス転移」, 日本物理学会第68回年次春会, 2013年3月26日, 広島大学
24. 黒岩健, 宮崎州正, 「拘束条件のもとでの確率過程とpスピン球形モデルへの応用」, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月19日, 横浜国立大学
25. 岡崎祥太, 池田昌司, 宮崎州正, 「Ultrasoft ポテンシャル液体の特異な熱力学相と双対性」, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月20日, 横浜国立大学
26. 尾澤岬, 黒岩健, 池田昌司, 宮崎州正, 「剛体球液体のInherent structureの構造とダイナミクスII」, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月21日, 横浜国立大学
27. 宮崎州正, 「ガラス転移研究の最近の発展と今後の課題」, つくばソフトマター研究会2013(招待講演), 2013年3月11日, 筑波大学
28. 宮崎州正, 「ガラス転移とジャミング転移の平均場描像」, 物性研共同利用・CCMS・元素戦略合同研究会「計算物性物理学の新展開」(招待講演), 2013年1月10日, 東大物性研、柏
29. 宮崎州正, 「やわらかい粒子のガラス転移」, 計算機センター特別研究プロジェクト『結晶成長の数理』第七回研究会-ソフトマターと結晶成長-(招待講演), 2012年12月25日, 学習院大学
30. K. Miyazaki, “Unifying concept of the glass and jamming transitions”, Workshop on the Open Problems of the Glass Transition and Related Topics (招待講演), 2012年12月18日, 九州大学西新プラザ
31. K. Miyazaki, “Jamming and Glass

Transitions viewed from the Mean Field Pictures”, The 4th International Symposium on Slow Dynamics in Complex Systems (招待講演), 2012年12月5日, 東北大学

32. 宮崎州正, 「ガラス転移の平均場描像」, 第61期金属ガラス部門・分子動力学部門合同委員会(招待講演), 2012年7月 大阪大学
33. 宮崎州正, 「ガラス転移とジャミング転移の統一的理解」, 基研研究会2012非平衡系の物理 - その普遍的理解を目指して(招待講演), 2012年8月2日 京都大基礎物理学研究所
34. K. Miyazaki, “Mean Field Picture of Glass (and Jamming) Transition”, WPI-AIMR Workshop, Structure and Dynamics of Glass -Bridging mathematics and material science-(招待講演), 2012年6月27日 東北大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.r.phys.nagoya-u.ac.jp/index-j.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 州正 (MIYAZAKI KUNIMASA)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号: 40449913