

機関番号：37112

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540381

研究課題名（和文）ガラス系の非平衡統計物理学

研究課題名（英文）Non-equilibrium statistical physics of glass transitions

研究代表者

川崎 恭治（KAWASAKI KYOZI）

福岡工業大学・エレクトロニクス研究所・客員研究員

研究者番号：40037164

研究成果の概要（和文）：過冷却液体のダイナミクスに対する場の理論的定式化をおこなった。ここで時間反転に対する正しい変換性を持つ事に注意した。又超伝導体の量子化された磁束のダイナミクスを表す簡単な模型について考察した。関連する問題としてスピングラスや量子論的多体系の有効相互作用について研究した。

研究成果の概要（英文）：A field theoretical formulation for supercooled liquid dynamics is considered where proper behavior under time reversal was guaranteed. A one-dimensional model for dynamics of quantized flux was considered. As related problems we took up spin glass problem and effective interaction in quantum many body problem.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，数理物理・物性基礎

キーワード：非線形非平衡物理学，構造ガラス，渦糸ガラス，モード結合理論

1. 研究開始当初の背景

ガラス転移の問題は古くからの未解決な難問である。この分野の最近の注目すべき発展として第一原理の立場に立ち、統計力学から出発してガラス転移に迫る試みが部分的に実をむすびつつある事である。これは最初に動的臨界現象において開発されたモ

ード結合理論の応用として80年代半ばから始まった。この発展の一つとして液体の動力学に使える場の理論による定式化がある。これはまだ未完成で揺動散逸定理や高次摂動項の処理などが色々研究されている。一方これと相補的な関係にある考えかたに

結晶内に存在するトポロジカルな欠陥によりガラス化が起こるという見方がある。その典型として量子的渦糸がある。この二つの方向が統一されえる兆しもみえてきた。

2. 研究の目的

この様な状況下で本研究は前述の2つの相補的な方向からガラスの問題に迫る。

(1) 液体論からのアプローチ

ここ20-30年の間に理論及び計算機シミュレーションによって我々の液体の静的、動的振る舞いに対する理解は飛躍的に高まった。なかでも液体の動的臨界現象の理解に端を発したモード結合機構の発見(川崎、1966年)とゲッツェ他によるその液体論への応用(1984年)はそれ以前の液体の動的振る舞いの理解を一新した。この延長として液体のガラス転移のモード結合理論(MCT)がガラスの唯一の第一原理に基づいた理論として現在盛んに研究されている。特に相互作用をしているコロイド粒子系の性質を定量的に予言したことはこの理論の最大の成果とみなされている。一方MCTの基礎を立ち入って吟味してみると甚だ心もとない面があることが実感されてきた。即ちガラスの特徴である高密度液体の強い相関が甚だ乱暴と思える近似で処理されている。それにもかかわらず、これまでの研究で驚くほど定量的に実験を説明に成功している事は驚きに値する事実であり、この点を改善する試みが種々提案されてきた。

ここ数年来川崎とB. KIMは、これまでMCTで導入されてきた近似の性格を吟味することを目的としてKACポテンシャルの様な小さな展開パラメータを含む動的モデルの構築に取り組んできた。ここで遭遇した一つの困難はそれまでの理論が元の模型方程式の時間反転対称性に起因する遥動散逸関係を満たしていない事である。我々はBiroli達により提案された補助変数を導入する方法を改良する事によって、この問題の場の理論的定式化に成功した。現在、この新しい理論は、場の理論でのいわゆる1-ループ近似の範囲で前述のゲッツェ達のMCT方程式を再導出できる事が確認されている。これに関して、本研究計画で取り上げる問題は現在の1-

ループの計算を2-ループ、3-ループなど高次ループ近似の計算に進め、更に3体、4体などの高次相関も計算する。このテーマには韓国昌原大学の金峰秀教授及び筑波大の宮崎国州氏が参加されている。

(2) 固体からのアプローチ

一方実際のガラス転移では粘性係数の増大が14桁にも昇り上述の理論的枠組みでは手が出ない。そこで液体論から出発するMCTと対照的な固体論から出発するアプローチにも目をむける事が意味を持つてくる。この立場ではガラスは結晶に転位や回位(disclination)の様なトポロジカルな欠陥が入った乱れた構造として理解される。

トポロジカルな欠陥の典型例である超流動や超伝導における秩序変数場が生ずる渦糸系については実験の要請から渦糸の動的振る舞いが理論の研究対象になっている。本研究分担者の一人である山藤は、高温超伝導系の中で第二種超伝導体といわれるものに必然的に含まれる磁場を持った渦糸の動的特性を長年に亘り研究し、この分野でわが国の第一人者と目されている。

高温超伝導体の渦糸の動的振る舞いの研究を深めることによって前項のMCTと相補的なトポロジカルな欠陥の動力学の理解を進め、ひいてはMCT的な液体論からのアプローチと結晶のトポロジカルな欠陥に着目した固体論あからのアプローチをつないで、ガラスの物理を総合的に理解できるようにすることを最終目的とする。ここで具体的な問題として取り上げるのは高温超伝導体の量子渦糸系の中に含まれた不純物によるピンニング・デピンニング転移に関するものである。

3. 研究の方法

課題の理論的側面を十分把握して解析的計算によって先の見通しを得る努力をした。理論的予測や結果は予備的計算機シミュレーションに依って検証する。またモンテカルロ法による計算機シミュレーションもおこなった。

4. 研究成果

(1) 我々が開発した時間反転の対称性を尊

重なる場の理論的定式化を用い新しい摂動法を考えた。則ちコロイド系のDean-Kawasakiモデルにおける相互作用ポテンシャルの新しい展開法を発展させた。ここで相互作用ポテンシャルがない時もモデルの非線形項はなくならないので、これを非摂動的に取扱うことが問題になる。この問題には別の見方もあり現状は流動的である。最終的結論は今後の研究に委ねられている。

(2) 第2種超伝導体における量子磁束の運動に関しては次ぎの問題を考察した。印加電流をゼロに近づけた時電気抵抗もゼロに近づくか？この為に磁束の運動を記述するランジュバン方程式を立てそれを数値的に解くことを試みた。これまでにこの問題の定式化と予備的な数値解析がなされた。これに関連した課題として電気抵抗の久保公式に渦糸などの局在した励起の熱的活性化過程の影響をとり入れる方法を考察した。

(3) 一方でこの10年ほど構造ガラスとスピングラス間に密接な関係があることが認識されてきた。したがって構造ガラスの研究にスピングラスの知見が応用されて来ている。我々は合金系のスピングラスモデルについて対称性の破れをとりいれたモンテカルロシミュレーションをおこなった。そして合金の濃度と温度の空間で相図を決定した。

(4) ガラスの様な非平衡問題では射影演算子が重要な役割を演じる。関連した射影演算子は量子多体系の問題でも重要な役割を果たす。本研究でとりあげた、その一例を以下で説明する。量子系のハミルトニアンが無摂動部分と摂動部分に分離され、また全ヒルベルト空間が有限次元の模型空間とその補空間に分割するとき、模型空間内の有効ハミルトニアンとは、その固有値が全ヒルベルト空間における固有値と一致するものである。一般的なQ-box法による有効ハミルトニアンに対し、新しい関数演算子を導入することにより、発散しないなどの有用な性質を持つ有効相互作用を導いた。これらの理論的性質を、厳密解が得られる模型ハミルトニアンを用いた数値計算により確かめた。

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) Tomohiko Kato and Takahiro Saita, Ferromagnetic spin glass transition in Pd alloys: Symmetry breaking of ferromagnetism and spin glass by multicategorical method, J. Phys.: Condens. Matter, 23 巻 106001(1-10) 2011年、査読有り

(2) 山藤馨、川崎恭治、熊谷博夫、加藤友彦
On asymptotic behavior of electric resistivity at infinitesimal electric current in glassy state of superconducting quantized fluxoids. I. Basic formulations 福岡工業大学研究論集、43 巻、103 - 109 2011 年、査読無し

(3) Kenji Suzuki, Ryoji Okamoto, Hiroo Kumagai, and Shinichiro Fuji, Graphical method for deriving an effective interaction with a new vertex function Phys. Rev. C 83 巻、024304(1-9) 2011 年、査読有り

(4) Ryouzi Okamoto, Kenji Suzuki, Hiroo Kumagai, and Shinichiro Fujii. A new solution for effective interaction Journal of Physics: Conference series 267, 024304(1-9), 2011年、査読有り

(5) B. Kim and K. Kawasaki, An FDR-consistent field theory for the Stochastic density function model, Progress of theoretical physics: Supplement 178 巻、123-132、2009 年、査読有り

(6) K. Kawasaki, A mini-review of structural glasses --- a personal view, Forma, 24, 2009 年、3-9, 査読有り

[学会発表] (計3件)

(1) 川崎恭治
Half a century of random walk through

statistical physics, Workshop on the Dynamics of the Glass/Jamming Transition in celebration of the 80th birthday of Prof. Kyozi Kawasaki, 平成 22 年 9 月 10 日, プサン ノボテルアンバサダーホテル

(2) Ryoji Okamoto, Kenji Suzuki, Hiroo Kumagai, and Shinichiro Fujii, A new solution for effective interaction, 10th International spring seminar on nuclear physics: New quests in nuclear structure, 2010 年 5 月 22 日, Vietri Sul Mare, Italy

(3) 川崎恭治, 相転移におけるパラダイムシフトとモード結合理論, 「第 2 回ソフトウェア物理若手勉強会」, 2008 年 7 月 5 日, 東京大学弥生講堂・一条ホール

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川崎恭治 (KAWASAKI KYOZI)
福岡工業大学・エレクトロニクス研究所・
客員研究員
研究者番号: 40037164

(2) 研究分担者

加藤友彦 (KATO TOMOHIKO)
福岡工業大学・工学部・教授
研究者番号 90023217

熊谷博夫 (KUMAGAI HIROO)
福岡工業大学・情報工学部・教授
研究者番号: 60099025

山藤 馨 (YAMAFUJI KAORU)
福岡工業大学・学長
研究者番号: 90037721