

|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 散射雑音を除去した光計測を基盤とする揺らぎのダイナミックスの研究  |
| Sub Title        | Investigations of fluctuation dynamics based on optical measurements with shot-noise reduction  |
| Author           | 青木, 健一郎(Aoki, Ken'ichirō)<br>三井, 隆久(Mitsui, Takahisa)   |
| Publisher        |   |
| Publication year | 2020  |
| Jtitle           | 科学研究費補助金研究成果報告書 (2019. )  |
| JaLC DOI         |   |
| Abstract         | <p>光計測を用いて、様々な物質の自発的な揺らぎを測定し、理論解析しました。ルビジウム原子の他の分子気体中のランダムウォークを初めて直接観測し、そして金属の反射率の自発的揺らぎを初めて観測しました。内部の揺らぎも測定することにより、光断層撮影で、各層の物質の揺らぎスペクトルを測定する方法を開発しました。氷表面の薄い液状層の厚みを測定しました。さらに層が水の性質を持つことを示し、厚みの2次元的な変化も初めて測定しました。これらの光計測ではいずれも我々の開発した散射雑音の除去法を用いており、重要な役割を果たしています。また、格子系を用いて、温度の基本的な性質と非線形振動の定常モードを分析しました。</p> <p>Properties of spontaneous fluctuations were investigated in various materials, through optical measurements, and analyzed from theory. Random walks of Rubidium atoms were observed directly. Atomic random walks had not been previously observed. Reflectance fluctuations in metals were observed for the first time, and their properties were investigated. A method to measure the fluctuation spectra of internal layers in optical coherence tomography was developed, and demonstrated. Surface melting of ice was investigated, and the thickness of the liquid-like layer was measured, through surface fluctuations. Furthermore, the properties of the liquid-like layer were analyzed, and were found to be similar to those of liquid water. In all these optical measurements, the reduction of shot-noise was essential to obtaining the results. Using lattice systems, basic properties, and the definition of temperature were studied. Furthermore, non-linear normal modes were studied systematically.</p> |
| Notes            | 研究種目：基盤研究 (C) (一般)<br>研究期間：2015～2019<br>課題番号：15K05217<br>研究分野：非平衡物理学  |
| Genre            | Research Paper  |
| URL              | <a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_15K05217seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_15K05217seika</a>   |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05217

研究課題名(和文) 散乱雑音を除去した光計測を基盤とする揺らぎのダイナミックスの研究

研究課題名(英文) Investigations of fluctuation dynamics based on optical measurements with shot-noise reduction

研究代表者

青木 健一郎 (AOKI, Kenichiro)

慶應義塾大学・経済学部(日吉)・教授

研究者番号：00251603

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光計測を用いて、様々な物質の自発的な揺らぎを測定し、理論解析しました。ルビジウム原子の他の分子気体中のランダムウォークを初めて直接観測し、そして金属の反射率の自発的揺らぎを初めて観測しました。内部の揺らぎも測定することにより、光断層撮影で、各層の物質の揺らぎスペクトルを測定する方法を開発しました。氷表面の薄い液状層の厚みを測定しました。さらに層が水の性質を持つことを示し、厚みの2次元的な変化も初めて測定しました。これらの光計測ではいずれも我々の開発した散乱雑音の除去法を用いており、重要な役割を果たしています。また、格子系を用いて、温度の基本的な性質と非線形振動の定常モードを分析しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子のランダムウォークの直接観測と金属の反射率揺らぎの観測は今までありませんでした。氷の表面融解は以前から様々な研究がありますが、我々は今まで無かった新たな方法でアプローチし、厚みの2次元的像を、不純物の影響がある場合も含め、初めて得ました。これら新たな結果は、大きな学術的意義を持つと考えています。また、光断層撮影は医療現場で重要な役割を果たしており、より詳細に内部の情報を得る方法を開発したので、実用面でも大きな意義があると考えています。有限温度の揺らぎの背後には非線形物理学のカオスがあり、その基本的性質と温度との関係について得た結果は新たな学術的発展につながると信じています。

研究成果の概要(英文)：Properties of spontaneous fluctuations were investigated in various materials, through optical measurements, and analyzed from theory. Random walks of Rubidium atoms were observed directly. Atomic random walks had not been previously observed. Reflectance fluctuations in metals were observed for the first time, and their properties were investigated. A method to measure the fluctuation spectra of internal layers in optical coherence tomography was developed, and demonstrated. Surface melting of ice was investigated, and the thickness of the liquid-like layer was measured, through surface fluctuations. Furthermore, the properties of the liquid-like layer were analyzed, and were found to be similar to those of liquid water. In all these optical measurements, the reduction of shot-noise was essential to obtaining the results. Using lattice systems, basic properties, and the definition of temperature were studied. Furthermore, non-linear normal modes were studied systematically.

研究分野：非平衡物理学

キーワード：揺らぎ 氷 表面融解 散乱雑音 雑音除去 光計測

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19(共通)

### 1. 研究開始当初の背景

有限温度では、あらゆる物質は原子レベルで常に揺らぎを持っています。このミクロの揺らぎは、有限温度の統計物理学の根底にある基本的な物理現象です。臨界温度近辺の物理や極低温の超流動状態等では、例外的にこの揺らぎが大きくなります。しかし、通常の物質は通常の状態においては、有限温度の揺らぎは原子スケール程度の大きさしかありません。一般に、このような小さな揺らぎを直接測定するには雑音が多すぎるため、雑音は、現実の実験においては様々な要因によって必然的に生じ、避けられるものではありません。

高い精度を要求される測定でもっとも一般的に用いられる強力な手法は光計測であり、あらゆる分野で用いられています。光計測実験では、レーザー光の振幅や振動数の不安定性、電子回路の雑音、光子の統計によって生ずる散乱雑音 (shot-noise) などの雑音がわずかであっても必然的に生じます。高い精度で測定をするためには、いかにしてこれらの雑音を小さくするかが課題となります。雑音の中でも特に散乱雑音は、温度、振動数に依存せず、光計測において必ず生じる量子力学的揺らぎです。この散乱雑音レベルは標準的量子限界ともよばれ、測定限界になる場合が多いと考えられています。よって、その除去は長年の課題となっています。

一般に雑音を低減化するためには、より雑音を低くした精密な測定を行います。また、求める信号の振動数が知られている場合は、その振動数について積算することにより、雑音を除去できます。しかし、これらの方法だけでは、たとえばスペクトルの測定のように、信号の振動数を特定しない測定では散乱雑音は除去できません。我々は散乱雑音を除去した測定方法とその解析法を開発し、この方法ではデータ処理が少し複雑になりますが、雑音を統計的に減少させるため、原理的には雑音レベルをいくらかでも小さくできます。この原理はシンプルであり、多くの測定に含めることができる汎用性の高いものです。これを応用して多様な分野で微小な揺らぎの測定を達成しています。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、今まで測定することができなかった様々な物質の様々な「普通の」状況での微小な揺らぎ測定をもとに、巨視的物性や分子構造と熱運動及び量子揺らぎとの関係を調べることです。この研究では、我々の開発した散乱雑音 (shot-noise) を統計的方法で除去する光計測法を用いて高精度な揺らぎ測定を用い、分子動力学を中心とした数値シミュレーションや流体力学的方法を用いて理論解析を行います。さらに、今まで観測されていない新たな物理現象を発見し、そのダイナミクスを解明することを目指しています。我々の開発した雑音を除去する方法は高い汎用性を持っているので、様々な状況における物質の揺らぎの測定を行い、解析します。この雑音の除去法を、学術的な分野のみならず、他の測定技術に応用していくのも大きな目的です。また、有限温度の揺らぎの背後には、力学のカオスのダイナミクスがあります。カオスの基礎理論と温度の関係を第一原理から理論的に分析することも目的としています。

### 3. 研究の方法

本研究の中心は、他の不要な雑音とともに散乱雑音を桁違いに減少させた状況での、様々な物質の揺らぎスペクトル精密測定とその解析です。散乱雑音を含めた雑音の除去には我々の開発した独自の方法を用いました。具体的には以下のような方法を用いて、研究を遂行しました。

- 単純に光を原子気体に照射し、その透過強度の揺らぎのスペクトラムを通じて、原子の動きを直接観測しました。その観測結果と原子の有限温度の動きとの関係を第一原理より分析しました

- 液体表面の揺らぎ,そして境界面のスペクトルの精密測定を行い,その解析を通じて既存の揺らぎスペクトルと液体の物性との関係がどこまで正しいのかを理論解析しました.
- 我々の光計測の方法は,比較的弱い光を照射するだけで,非常に低侵襲です.この特徴を活かし生体内部の揺らぎスペクトルの測定を行い,解析しました.
- 金属の反射率に揺らぎがあるかは,実験的にも理論的にも知られていません. 散射雑音を含めて除去することにより,反射強度の揺らぎスペクトルを非常に高い精度で,測定しました.
- 数値的な手法も用い,カオス理論と温度の意味の関係,そして,非線形系における周期的な運動を第一原理より解析しました.

#### 4. 研究成果

光計測を用いて,様々な自発的な揺らぎを測定し,それを理論解析しました.これらの光計測ではいずれも我々の開発した散射雑音の除去法を用いており,これが重要な役割を果たしています.次のような成果を得られました.

- ルビジウム原子が,他の分子がいる中をランダムウォークするのを直接観測しました.このような観測をしたのは我々が初めてです.観測したスペクトルがどのようにランダムウォークを反映しているかも第一原理より,理論的に明らかにしました.
- 金属の反射率に揺らぎがあることを実験的に示し,その揺らぎのスペクトルの性質を調べました.金,銀,アルミニウムの揺らぎスペクトルを測定しましたが,それらは定性的には共通した性質を持ち,定量的には異なる振る舞いを持つことが明らかになりました.この揺らぎの存在を指摘したのは我々が初めてで,どのような基礎過程が背後にあるのかはまだ明らかになってなく,現在も分析中です.
- 光断層撮影を用いると,内部の屈折率の変化が測定できます.この手法は物理学のみならず,医療の現場で既に重要な役割を果たしています.この断層撮影の各層での揺らぎスペクトルを測定する方法を開発し,その有効性を示しました.そして,その手法を用いて,指の内部等の生体の内部の性質も測定しました.この新たな手法は非侵襲的に内部の情報を得ることがあるので,単に学術的な成果に留まらず,実用面で重要な役割を果たすと考えています.
- 融点付近の固体表面には薄い液状の層があることが以前の研究より知られています.我々は以前とは異なり,表面揺らぎのスペクトルを光計測を用いて測定しました.この固体表面の液状層の性質を厚みを,その温度依存性を含めて調べました.厚みの2次元依存性を不純物がある場合と無い場合について,をミクロンオーダーで測定しました.このような,2次元スキャンを行ったのは我々が初めてです.
- 有限温度の揺らぎの背後には非線形物理学のカオスがあり,その基本的性質と温度との関係について第一原理より解析しました.それを通じ,非平衡状況では,見かけ上,熱力学の基本法則が破れるように見える状況があることを明らかにしました.また,非線形の格子系で,周期的な解を系統的に解析し,数値的に安定性も解析しました.どのように,安定性が格子系の大きさによって変化するかも系統的に調べました.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kenichiro Aoki   | 4. 巻<br>24                |
| 2. 論文標題<br>`Symmetry, chaos and temperature in the one-dimensional lattice phi4 theory     | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Computational Methods in Science and Technology                                  | 6. 最初と最後の頁<br>83-95       |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.12921/cmst.2017.0000055                                      | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Takahisa Mitsui, Kenichiro Aoki  | 4. 巻<br>89                |
| 2. 論文標題<br>Dynamically enhanced optical coherence interferometry                           | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Review of Scientific Instruments   | 6. 最初と最後の頁<br>094302-1-7  |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/1.5025859   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Takahisa Mitsui, Kenichiro Aoki  | 4. 巻<br>E99               |
| 2. 論文標題<br>`Fluctuation spectroscopy of surface melting of ice with and without impurities | 5. 発行年<br>2019年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review  | 6. 最初と最後の頁<br>010801-1-5  |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevE.99.010801                                      | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Kenichiro Aoki, Takahisa Mitsui,   | 4. 巻<br>2018              |
| 2. 論文標題<br>Thermal interface fluctuations of liquids and viscoelastic materials            | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Progress of Theoretical and Experimental Physics                                 | 6. 最初と最後の頁<br>043J01-1-11 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1093/ptep/pty026   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-                 |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Kenichiro Aoki, Takahisa Mitsui  | 4. 巻<br>A94              |
| 2. 論文標題<br>Observing random walks of atoms in buffer gas through resonant light absorption | 5. 発行年<br>2016年          |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review  | 6. 最初と最後の頁<br>012703-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevA.94.012703                                     | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Takahisa Mitsui, Kenichiro Aoki                    | 4. 巻<br>A95              |
| 2. 論文標題<br>Observation of Reflectance Fluctuations in Metals | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review                                    | 6. 最初と最後の頁<br>043821-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevA.95.043821       | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                       | 国際共著<br>-                |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kenichiro Aoki   | 4. 巻<br>E94               |
| 2. 論文標題<br>Stable and unstable periodic orbits in the one-dimensional lattice 4 theory | 5. 発行年<br>2016年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review  | 6. 最初と最後の頁<br>042209-1-11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevE.94.042209                                 | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>William Graham Hoover, Kenichiro Aoki   | 4. 巻<br>49C           |
| 2. 論文標題<br>Order and chaos in the one-dimensional 4 model: N -dependence and the Second Law of Thermodynamics | 5. 発行年<br>2017年       |
| 3. 雑誌名<br>Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation  | 6. 最初と最後の頁<br>192-201 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.cnsns.2017.02.006   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する          |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|                            |
|----------------------------|
| 1. 発表者名<br>青木健一郎, 三井隆久     |
| 2. 発表標題<br>表面融解の性質の測定と解    |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2018年秋季大会 |
| 4. 発表年<br>2018年            |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>三井隆久, 青木健一郎         |
| 2. 発表標題<br>散乱雑音より小さな揺らぎの計測法と応用 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2018年秋季大会     |
| 4. 発表年<br>2018年                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>三井隆久, 青木健一郎                      |
| 2. 発表標題<br>なぜ氷は滑り、スピードスケートの氷温は-5度Cから-9度Cなのか |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第74回年次大会                  |
| 4. 発表年<br>2019年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>青木健一郎                              |
| 2. 発表標題<br>局所的ポテンシャルを持つ非線形格子模型における周期的運動とその安定性 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2017年秋季大会                   |
| 4. 発表年<br>2017年                               |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>青木健一郎, 三井隆久             |
| 2. 発表標題<br>液体や粘弾性物体の界面熱揺らぎの直接測定と解析 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2017年秋季大会        |
| 4. 発表年<br>2017年                    |

|                             |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名<br>三井隆久, 青木健一郎      |
| 2. 発表標題<br>光を用いた微小揺らぎ計測の新展開 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2017年秋季大会 |
| 4. 発表年<br>2017年             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>青木健一郎, 三井隆久                      |
| 2. 発表標題<br>表面の原子レベルの有限温度揺らぎの測定と非バルク的振る舞いの現れ |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第73回年次大会                  |
| 4. 発表年<br>2018年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>三井隆久, 青木健一郎                      |
| 2. 発表標題<br>スペクトル干渉法による光CTを用いた揺らぎ計測と組織診断への応用 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第73回年次大会                  |
| 4. 発表年<br>2018年                             |



|                             |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名<br>青木健一郎            |
| 2. 発表標題<br>原子のランダムウォークの直接観測 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2016年秋季大会 |
| 4. 発表年<br>2016年             |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>青木健一郎                    |
| 2. 発表標題<br>散射雑音より小さい様々な表面の揺らぎの測定と解析 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2016年秋季大会         |
| 4. 発表年<br>2016年                     |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>青木健一郎                   |
| 2. 発表標題<br>境界面における散射雑音以下の揺らぎの測定と理論 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第72回年次大会         |
| 4. 発表年<br>2017年                    |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                    | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 三井 隆久<br><br>(MITSUI Takahisa)<br><br>(20242026) | 慶應義塾大学・医学部(日吉)・教授<br><br><br><br>(32612) |    |