

## 古崎物性理論研究室

### Condensed Matter Theory Laboratory

主任研究員 古崎 昭 (博士 (理学))

FURUSAKI, Akira (Ph.D)



#### キーセンテンス：

1. 物質の普遍的な性質を理解する
2. 物質の多様性を理解する
3. 新しい物質相を見つける
4. 相転移現象を理解する

#### キーワード：

強相関電子系、磁性、超伝導、新奇量子秩序、量子相転移、トポロジカル絶縁体、アンダーソン局在

#### 研究概要

当研究室では、物質の示すいろいろな性質を、物質中の電子に対する基礎理論（量子力学や統計力学）にもとづいて理論的に解明することを目指して研究している。多数の電子が相互作用しつつ運動している多電子系では、自発的に対称性の破れた秩序相が低温で現れ、温度・磁場・圧力などの変化とともに相転移が起きる。遷移金属・希土類酸化物や分子性導体などの強相関電子系における超伝導や磁性がその典型例であり、これらの量子現象の普遍性と物質に即した多様性を研究する。

三角格子、籠目格子、パイロクロア格子上の反強磁性体などのフラストレーションの強い量子スピン系では、磁気秩序の形成が抑えられて非自明な秩序状態が生じる。その一例であるスピン液体、スピン・ネマティック相やカイラル秩序相の性質について研究している。また、局所的秩序変数をもたないトポロジカル秩序相や、量子（スピン）ホール系などのトポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体に関する研究も行っている。

#### 1. 鏡映対称性のある場合のトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類（森本、古崎）

Kitaev のクリフォード代数を用いた分類法を用いて、鏡映対称性などの付加的な対称性がある場合において、トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類を行った。付加的な対称性を系の対称性のなすクリフォード代数に付け加えることにより定式化し、以前 Chiu らにより導かれていた鏡映対称性のある場合の分類を簡潔に再導出した。これにより、時間反転対称性と reflection により守られた SnTe のトポロジカル相や particle-hole symmetry と reflection により守られた超伝導トポロジカル相についての系統的理解を与えた。

#### 2. 弱いトポロジカル絶縁体・超伝導体の表面状態の安定性（森本、古崎）

弱い  $Z_2$  トポロジカル絶縁体・超伝導体にあられる表面状態の安定性を議論した。一般の Altland-Zirnbauer symmetry class と次元にあられる弱い  $Z_2$  トポロジカル絶縁体・超伝導体を考え、層間の dimerization に対応した質量項により常に表面バンドにギャップを開けられることを示した。弱い  $Z_2$  トポロジカル絶縁体・超伝導体の乱れた表面が平均して空間的に一様であれば、異なる dimerization pattern に対応した  $Z_2$  トポロジカル相の間の量子臨界点が存在するために、表面状態は局

在しないことを見いだした。

### 3. 重い電子系超伝導体 $UPt_3$ の示すトポロジカル超伝導性 (堤)

重い電子系超伝導体  $UPt_3$  がトポロジカル超伝導体としての性質を示すことを明らかにした。表面にはマヨラナフェルミオンによるゼロエネルギー状態が存在する。このゼロエネルギー状態は結晶の鏡映対称性により守られており、特定方向の磁場下でのみ準粒子分散がギャップを持つ。また、量子渦にもマヨラナフェルミオンのゼロエネルギーモードが存在することを示した。量子渦束縛状態は磁場の大きさを変化させることで、トポロジカルに自明な励起から結晶対称性に守られたトポロジカル励起にトポロジカル相転移を起こす。

### 4. トポロジカル超伝導・超流動体における熱応答 (伊藤)

トポロジカル超伝導体及び超流動体における熱応答の理論的研究を行った。トポロジカル相を記述する具体的なバルクハミルトニアンに対して熱勾配を表現するポテンシャル項を新たに導入することで数値的に熱応答現象を計算した。トポロジカル超伝導体およびトポロジカル超流動体のトポロジカル不変量が熱応答によって特徴づけられることが分かった。

### 5. 新種の分数量子ホール状態の実現についての研究 (伊藤)

$N=1$  ランダウ準位におけるパラフェルミオン状態と呼ばれる分数量子ホール状態の研究を行った。二次元強磁場中の基底状態を密度行列繰りこみ群法により計算し、分数占有率  $\nu=7/3$  および  $8/3$  においてパラフェルミオン状態が実現する可能性があることが分かった。さらに二次元面の持つ厚みの効果を取り入れることで、厚みの増加がパラフェルミオン状態を不安定化させラフリン状態への量子相転移を引き起こすことを明らかにした。

### 6. 量子スピナイス物質のモデルを導出する (小野田)

スピロクロア格子上的ある種の磁性希土類 ( $Dy, Ho$ ) 酸化物はスピナイスとして知られている。スピナイスにおいては、スピン自由度が立方晶氷の水素結合と類似した役割を果たし、長距離磁気秩序を示さない。一方、 $Pr, Tb, Yb$  を含む系においては、スピンをフリップする交換相互作用が量子揺らぎをもたらす。これら量子スピナイス系においては、スピンの湧き出し・吸い込みに関連したトポロジカルチャージを運ぶ準粒子が、仮想的格子量子電磁気学を構成する。我々は、 $Tb_2Ti_2O_7$  に対する特別な量子スピナイスモデルを、 $Pr, Yb$  の場合に対する以前の研究では無視された第一結晶場励起二重項を考慮に入れることにより導出した。

### 7. パイロクロア反強磁性体におけるマグノン対形成 (桃井)

クロムスピネル酸化物  $ACr_2O_4$  ( $A=Zn, Cd, Hg$ ) はパイロクロア格子上的スピン  $S=3/2$  の反強磁性体として、理論と実験の比較がしやすい系である。しかし、近年の高磁場における実験から飽和磁場近傍にこれまでの古典スピン系では説明できない相が存在することが明らかになってきた。これらの実験を説明するために量子  $S=3/2$  パイロクロア反強磁性体を双 2 次型相互作用がある場合に調べた。飽和磁場におけるマグノン自由度を調べた結果、パイロクロア格子上ではごく僅かな双 2 次型相互作用によりマグノンの対形成が起こり、飽和磁場以下では、スピン状態はマグノン対の凝縮により記述されるスピン・ネマティック状態になることを示した。

## 8. 分子性導体 $X[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の有効モデル解析 (妹尾)

擬 2 次元分子性導体  $\beta'$ - $X[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$  は多様な物性を示し活発に研究されているが、系統的な有効モデル研究がなかった。そこで第一原理計算を元にしたモデルに対して平均場近似を適用し、 $X$  の違いや相互作用の大きさによる電子状態の変化を調べた。基底関数として  $\text{Pd}(\text{dmit})_2$  分子の配位子上に局在した 2 つのフラグメント軌道を取り、オンサイトクーロン相互作用および古典自由度として取り扱う格子変位と電子の結合を考慮した結果、 $X$  によって異なるスピン構造を持つ反強磁性相が安定化し、また特異な電子格子結合状態とも競合することがわかった。

## 9. 新規水素結合系分子性導体の電子状態 (妹尾)

$\kappa\text{-H}_3(\text{Cat}\cdot\text{EDT}\cdot\text{TTF}/\text{ST})_2$  の電子状態を第一原理計算により解析した。この系は水素結合を介したユニットが 3 次元的に結合した構造を持ち、従来の電荷移動錯体とは異なる新規の分子性導体である。バンド構造は擬 2 次元的な有効 1/2 充填バンドを持ち、異方的三角格子によってモデル化できることが分かった。また、層間の遷移積分も有意の大きさを持ち、3 次元的な結合が特徴的である。

## 10. 磁場中スピン 1/2 ジグザグ交替鎖における、スピングャップをもったベクトルカイラリティー秩序 (上田、小野田)

擬 1 次元スピン 1/2 フラストレート磁性体  $\text{Rb}_2\text{Cu}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$  では、ゼロ磁場における基底状態はスピングャップを持った非磁性状態にあるが、弱い印加磁場によってスピンのヘリシティー (ベクトルカイラリティー) のみが長距離秩序を示すことが実験的に示唆されている。磁場によって誘起されたベクトルカイラリティー秩序が、スパイラル磁気秩序を伴わず、スピングャップを有することは興味深い。この現象を理解するため、磁場によって誘起されるリング交換相互作用を考慮したスピン 1/2  $\text{XXZ}$  ジグザグ交替鎖モデルを、密度行列繰り込み群法により解析した。その結果、磁場の印加とともにゼロ磁場スピングャップ相の 1 つである *even-parity dimer* 相から、スピングャップを閉じずにベクトルカイラル秩序相へ基底状態が相転移することを示した。この結果により実験結果を定性的に説明することに成功した。

## 11. 三角格子スピン 1/2 反強磁性体の基底状態磁気相図の決定 (山本、Marmorini)

$\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$  などの反強磁性体をはじめ、ある種の格子 Bose 系や Bose-Fermi 混合系などを記述する三角格子上反強磁性スピン 1/2  $\text{XXZ}$  模型の基底状態を理論的に決定した。大サイズクラスター平均場+スケールリング (CMF+S) 法を用いてフラストレート系の理論解析の困難さを打開し、基底状態相図を  $\text{XXZ}$  型異方性と印加磁場強度の全領域にわたって明らかにした。量子揺らぎを加味した結果、*coplanar* 相と *umbrella* 相の境界が古典スピン近似の予想から容易面異方性側に大きくシフトすることが分かった。さらに古典的な相図上には存在しない非自明なスピン状態が、量子効果によって有限の相領域を伴って安定化することを示した。その結果として、容易面異方性が非常に強い場合には磁化過程に二段階量子一次相転移が現れることが示唆された。

## 12. フラストレート磁性体における縮退を持つマグノンの凝縮状態 (Marmorini、桃井)

磁場下の偏極状態におけるマグノン分散のエネルギー極小状態が、不整合波数を持って 6 重に縮退しているフラストレート磁性体に対して、多重  $Q$  状態の可能性を調べた。特に、スピン 1/2 の三角格子上  $J_1\text{-}J_2\text{-}J_3$  模型に面間相互作用  $J_0$  がある場合の相図を希薄ボーズガスの理論を用いて得た。その結果、いく

つかの相境界が、3次元から2次元へのクロスオーバーにおいて異常な振る舞い( $J_{3c} \sim 1/4 - A/\log|J_0|$ )をすることが分かった。この特異性が現れるメカニズムを明らかにした。また、相図を得る上で、厳密対角化法も用いた。

### 13. 光格子中二成分ボーズ混合気体の量子三重臨界点近傍の臨界現象 (山本)

光格子中に閉じ込められた二成分ボーズ混合気体の有効模型である二成分ボーズ・ハバード模型の量子三重臨界点とその臨界現象を研究した。場の理論を用いた解析計算により厳密な臨界指数とlog補正を導き、量子モンテカルロ法を用いて数値的に確認した。特に量子三重臨界点を実験的に特定する際に有用な、超流動転移温度の化学ポテンシャル依存性と密度揺らぎの臨界特性について明らかにした。

### 14. 光格子中ボーズ気体の一次量子相転移と異常な履歴現象 (山本)

光格子中冷却ボーズ気体分野における三つの系(三角格子中の双極ボーズ気体・超立方格子中の二成分ボーズ気体・超立方格子中のスピン1ボーズ気体)に共通する性質である一次量子相転移現象を包括的に研究した。冷却気体実験における一次相転移の観測可能性の議論に加え、特に実際の相転移が二相間の一方向にしか起こらない「異常な履歴現象」の発現条件および機構を明らかにした。

### 15. 超流動ヘリウム3-A相のカイラリティ (堤)

超流動ヘリウム3-A相はカイラリティを持つと考えられているが、直接的にカイラリティは観測されていなかった。最近の実験により、A相中の不純物を外場により駆動すると、運動方向とは垂直に力を受けることが観測された。また、力の向きは超流動転移を経ると逆向きとなる場合があることも示された。この現象を超流動状態の準粒子による不純物の散乱として理解できることを理論的に示し、A相のカイラリティが力の向きを決めていることを明らかにした。

### 16. 擬1次元Fermi超流体における外場ポテンシャル効果 (Marmorini)

擬1次元の超流動フェルミ気体のBogoliubov-de Gennes方程式の解析解を調べた。実験的にも興味深いレーザートラップの様な外場ポテンシャルが存在する状況を考えた。局所密度近似を用い、局所ケミカルポテンシャルが十分大きい状況において、秩序変数に対する非線形微分方程式を得た。その解から、Larkin-Ovchinnikov-Fulde-Ferrell状態の周期の局所的変化やdark solitonの特徴的サイズの変化等の、観測可能性を明らかにした。

### 17. 高次特異値分解を利用したテンソル繰り込み群の計算原理の解析 (上田)

近年2次元量子系への適用が容易であることから注目されている手法の1つである高次特異値分解を利用したテンソル繰り込み群(HOTRG)の計算原理を1次元量子系/2次元古典系において解析した。その結果、非臨界系では繰り込み変換に関連するスペクトルの固定点はBaxterの角転送行列の直積から得られるスペクトルと一致し、臨界系ではHOTRGの固定点におけるスペクトルは既知の密度行列繰り込み群や行列積状態を利用した手法のそれと異なる非自明なものになることが分かった。

-----

**Key Sentence:**

1. Understand universal properties of materials
2. Understand diversities of materials
3. Find a new state of matter
4. Understand phase transitions

**Key Words:**

strongly-correlated electron systems, magnetism, superconductivity, novel quantum orders, quantum phase transitions, topological insulators, Anderson localization

**Outline**

Main aims of our research are to discover theoretically novel properties of materials and understand them from microscopic theory (quantum and statistical physics). Many-electron systems go into ordered phases with spontaneous symmetry breaking at low temperatures. Typical examples are superconductivity and magnetism of strongly-correlated electron systems in transition-metal or rare-earth oxides and molecular conductors, and these are our major research subjects.

In strongly-frustrated quantum spin systems such as triangular, kagome, and pyrochlore antiferromagnets, exotic quantum states, instead of magnetic ordered states, are expected to emerge. For example, we have recently studied spin liquids, spin nematic states, and chiral ordered states. Furthermore, we study states with some kind of topological order: topological insulators and superconductors.

**1. Classification of topological insulators and superconductors with reflection symmetries**  
(Morimoto, Furusaki)

We have studied how the classification of gapped systems of non-interacting fermions is altered when we impose additional reflection symmetry, by applying Kitaev's classification scheme using Clifford algebras. We have found that the recent classification with reflection symmetry by Chiu et al. is concisely reproduced. In the Clifford algebra approach, we are able to systematically understand various topological crystalline insulators such as SnTe materials (protected by time-reversal symmetry and reflection symmetry) and mirror superconductors (protected by particle-hole symmetry and reflection (mirror) symmetry).

**2. Stability of surface states of weak  $Z_2$  topological insulators and superconductors** (Morimoto, Furusaki)

We studied the surface stability of weak  $Z_2$  topological insulators and superconductors (TIs/TSCs) in the general Altland-Zirnbauer symmetry classes, considering representative Dirac Hamiltonians in various spatial dimensions. Surface fermions can be always gapped out by a Dirac mass term that dimerizes stacked layers. Under the assumption of spatial uniformity of the disorder-averaged surface, we have shown that the gapless surface states are in a metallic phase which is connected with the quantum critical point between the two dimerized phases with different  $Z_2$  indices.

### 3. Topological superconductivity in heavy-fermion superconductor UPt<sub>3</sub> (Tsutsumi)

Topological properties are studied for the heavy-fermion superconductor UPt<sub>3</sub>. The dispersion of Majorana fermions bound to the surface of UPt<sub>3</sub> crosses zero energy. Since the zero-energy states are protected by mirror symmetry of the UPt<sub>3</sub> crystal, the dispersion does not have a gap except under symmetry breaking fields. In quantized vortices, there are Majorana zero-energy modes. By increasing magnetic fields, the vortex bound states undergo a topological phase transition from trivial excitations to non-trivial topological excitations protected by crystal symmetry.

### 4. Thermal responses in topological superconductor and superfluid (Ito)

Thermal response of topological superconductors and superfluids was studied numerically by introducing a new kind of potential term to represent thermal gradient. It was found that topological invariants of topological superconductors and superfluids are characterized by thermal responses.

### 5. Parafermion ground state in N=1 Landau level (Ito)

The ground states at fractional fillings  $\nu=7/3$  and  $8/3$  in the N=1 Landau level were numerically studied by using the density matrix renormalization method (DMRG). It was found that a parafermion state can be realized as the ground states at  $\nu=7/3$  and  $8/3$ . It was also found that a quantum phase transition between the parafermion state and a Laughlin state is induced by changing the thickness of two-dimensional electron gas.

### 6. Modeling quantum spin ice materials (Onoda)

A class of magnetic rare-earth (Dy, Ho) oxides on the pyrochlore lattice form spin ice, in which the spin degrees of freedom play a similar role to the hydrogen bonding in cubic water ice and do not show any long-range magnetic order. There exist its variant materials involving Pr, Tb, or Yb where quantum fluctuations are introduced by spin-flipping exchange interactions. These quantum spin ice systems host a fictitious lattice quantum electrodynamics due to emergent quasi-particles carrying topological charge associated with the divergence of spins. We have derived a particular effective quantum spin ice model for Tb<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> by taking into account the first excited crystal-field doublets that were ignored in the previous studies on the Pr and Yb cases.

### 7. Magnon pairing in pyrochlore antiferromagnets (Momoi)

Chromium spinel oxides ACr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (A=Zn, Cd, Hg) provide simple  $S = 3/2$  pyrochlore antiferromagnetic spin systems where detailed comparison between experimental and theoretical studies is possible. Recent high-field measurements revealed a new phase near saturation field, which has not been predicted by the classical spin model. Motivated by these observations, we studied the quantum  $S = 3/2$  pyrochlore Heisenberg antiferromagnet with biquadratic interaction. Our calculation concludes that a very small biquadratic interaction can induce magnon pairing in pyrochlore antiferromagnets near saturation field, which leads to the appearance of ferro-quadrupolar phase or equivalently spin nematic phase.

## 8. Effective model study of molecular conductors $X[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ (Seo)

Quasi-two-dimensional molecular conductors  $\beta'$ - $X[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$  show a variety of physical properties and are studied extensively; however, a systematic effective model study was lacking. Here we apply a mean-field analysis to the model based on first-principles band calculations, and investigate the variation of electronic states by the choice of X and the effect of interactions. We take the basis functions of the model as two fragment molecular orbital localized on the dmit ligands, and take into account the on-site Coulomb interaction as well as coupling between the electrons and lattice distortions treated as classical variables. We find that, depending on X, antiferromagnetic states with different spin patterns are stabilized, which compete with a peculiar charge-lattice ordered state.

## 9. Electronic states of newly found hydrogen-bonding molecular conductors (Seo)

We have studied electronic states of  $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF/ST})_2$ . Their structure consists of units connected by a hydrogen bonding which are coupled three-dimensionally, and is different from conventional molecular charge-transfer type salts. The band structure has quasi-two-dimensional dispersion with an effective band-filling being 1/2; they can be modeled by an anisotropic triangular lattice. In addition, the inter-layer couplings are also appreciable, suggesting the existence of three-dimensionality in this system.

## 10. Vector-spin-chirality order in a dimerized frustrated spin-1/2 chain under the magnetic field (Ueda, Onoda)

Experiments on the quasi-one-dimensional spin-1/2 frustrated magnet  $\text{Rb}_2\text{Cu}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$  have suggested that the ground state is nonmagnetic at zero magnetic field and shows a long-range spin helicity (vector-chirality) order at a weak magnetic field. It is intriguing that this field-induced vector-chirality order is not accompanied by a magnetic spiral order and has a spin gap. To understand this phenomenon, we have studied a spin-1/2 XXZ zigzag chain model having a bond alternation and a field-induced ring-exchange interaction, by means of the density-matrix renormalization group method. Our results show that with increasing field, the ground state undergoes a phase transition from a spin-gapped even-parity dimer phase to a vector-chirality ordered phase without closing the spin gap. Our results provide qualitative explanations of the experimental observations.

## 11. Magnetic phase diagram of the triangular-lattice XXZ model (Yamamoto, Marmorini)

We determined the ground-state phase diagram of the triangular-lattice spin-1/2 XXZ model in the plane of the anisotropy parameter and the magnetic field by means of a large-size cluster mean-field method with a scaling scheme and the dilute Bose gas expansion. We found that quantum fluctuations break up the nontrivial continuous degeneracy of the classical ground state at the Heisenberg line into two first-order phase transitions. In between the two transition boundaries, the degeneracy lifting results in the emergence of a new coplanar phase not predicted

in the classical counterpart of the model. We suggest that the quantum phase transition to the non-classical coplanar state can be observed in triangular-lattice antiferromagnets with large easy-plane anisotropy or in the corresponding optical-lattice systems.

#### 12. **Magnon condensation with degeneracy in frustrated magnets** (Marmorini, Momoi)

We studied possible magnetic structure of the spin 1/2 triangular-lattice  $J_1$ - $J_2$ - $J_3$  model with interlayer coupling  $J_0$  near saturation field, where the single-magnon energy dispersion has six-fold degenerate minima at incommensurate momenta. We obtained ground-state phase diagram near saturation, using the dilute Bose gas theory applied to magnons (quantized spin waves). Some phase boundaries have a singular  $J_0$  dependence ( $J_{3c} \sim 1/4 - A/\log|J_0|$ ) in the limit of weak  $J_0$ , implying that even a very small interlayer coupling drastically changes the ground state. A mechanism for this singularity is presented. Exact diagonalization analysis is also applied to the search of bound states of magnons.

#### 13. **Quantum tricriticality of Bose-Bose mixtures in an optical lattice** (Yamamoto)

We studied the quantum tricriticality at the superfluid-insulator transition of the two-component Bose-Hubbard model, which describes Bose-Bose mixtures in an optical lattice. We derived the critical exponent and the logarithmic correction in the vicinity of the quantum tricritical point with the use of an effective field theory. Moreover, we confirmed the critical properties including a characteristic chemical potential dependence of the superfluid transition temperature and strong density fluctuation by means of the unbiased quantum Monte Carlo method.

#### 14. **First-order transition and anomalous hysteresis in lattice Bose gases** (Yamamoto)

We studied the first-order quantum phase transition phenomena in triangular-lattice dipolar Bose gases and hypercubic-lattice multi-component Bose gases. We focused, in particular, on anomalous hysteresis behavior in which the phase transition occurs in a unidirectional way and a hysteresis loop does not form. We explained the underlying mechanism of the anomalous hysteresis by means of Ginzburg-Landau theory, and found that it is a ubiquitous phenomenon of systems with a phase region of lobe shape that is surrounded by the first-order boundary.

#### 15. **Chirality in superfluid helium-3 A-phase** (Tsutsumi)

It has been considered that the superfluid helium-3 A-phase has chirality; however, the chirality has not been observed directly. Recently, it was experimentally observed that impurities driven by external electric field in the A-phase are subject to transverse force. The direction of the force can be reversed when helium-3 passes through the superfluid transition. We demonstrated that the transverse force is due to the scattering of impurities by quasiparticles in the superfluid state and the direction of the force is fixed by chirality of the A-phase.

#### 16. **Effect of external potential on quasi-1D Fermi superfluids from an analytic approach** (Marmorini)



We studied analytic solutions of the Bogoliubov-de Gennes equation of the quasi-one dimensional superfluid fermionic gas. We turned to the experimentally interesting setup in which an external potential is applied to the system, e.g. a laser trap. By using the local density approximation and restricting to those regions where the local chemical potential is much larger than the external potential, we can find a closed nonlinear differential equation for the order parameter. From its solutions, several observable effects can be read out, such as the local change of periodicity of the Larkin–Ovchinnikov–Fulde–Ferrell state and the modification of the typical size of dark solitons.

### **17. Doubling of entanglement spectrum in tensor renormalization group (Ueda)**

We investigated the entanglement spectrum in HOTRG—tensor renormalization group (RG) method combined with the higher order singular value decomposition—for two-dimensional classical vertex models. Away from a critical point, the entanglement spectrum associated with the RG transformation is described by “doubling” of the spectrum of the Baxter’s corner transfer matrix. At the critical point, a nontrivial entanglement scaling behavior appears in the entanglement entropy.

### ***Principal Investigator***

古崎 昭 Akira Furusaki

### ***Research Staff***

桃井 勉 Tsutomu Momoi

小野田 繁樹 Shigeki Onoda

妹尾 仁嗣 Hitoshi Seo

Giacomo Marmorini

森本 高裕 Takahiro Morimoto

堤 康雅 Yasumasa Tsutsumi

上田 宏 Hiroshi Ueda

山本 大輔 Daisuke Yamamoto

### ***Student***

伊藤 透 Toru Ito

### ***Assistant and Part-timer***

網代 雅代 Masayo Ajiro

### ***Visiting Members***

有田 亮太郎 Ryotaro Arita

古川 俊輔 Shunsuke Furukawa

引原 俊哉 Toshiya Hikihara

伊豆山 健夫 Takeo Izuyama

是常 隆 Takashi Koretsune

久保 健 Kenn Kubo

求 幸年 Yukitoshi Motome

二宮 正夫 Masao Ninomiya

野村 健太郎 Kentaro Nomura

笠 真生 Shinsei Ryu

坂井 徹 Toru Sakai

佐藤 正寛 Masahiro Sato

進藤 龍一 Ryuichi Shindou

Konstantin Matveev

Christopher Mudry

Philippe Sindzingre

Nicholas Shannon