

# カゴメ金属の新奇な多重量子相を予言・制御する理論を構築 — ループ電流・電荷秩序・超伝導が奏でる“アンサンブル” —

## 【本研究のポイント】

- ・カゴメ金属は、ループ電流相・電荷秩序・超伝導が発現する、新奇量子相の宝庫である。
- ・カゴメ金属の新規量子相を微小外場(磁場および一軸歪場)で制御する理論を構築した。
- ・本理論はカゴメ金属のみならず、高温超伝導体など他の金属にも適用可能である。

## 【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科の山川 洋一 講師と紺谷 浩 教授は、国立大学法人 京都大学基礎物理学研究所の田財 里奈 助教と共に、カゴメ格子構造<sup>注1)</sup>の金属化合物で創発する新奇な多重量子相<sup>注2)</sup>を予言し、かつ微小な外場により制御する理論を構築しました。

幾何学的フラストレーション<sup>注3)</sup>を有する新種の超伝導体であるカゴメ格子金属  $AV_3Sb_5$  ( $A=Cs, Rb, K$ ) では、ナノスケールの永久電流が流れる「ループ電流相<sup>注4)</sup>」やダビデ星型パターンを伴う「電荷秩序」、回転対称性を破った「電子液晶相」など、新奇な量子相が共存して実現します。こうした多重量子相を自由に制御することは大変魅力的で、デバイス応用をはじめとする可能性が一気に広がります。

本研究では Ginzburg-Landau 自由エネルギー理論<sup>注5)</sup>に基づき、磁場および一軸歪という「外場」を用いたカゴメ金属の多重量子相の制御理論を構築しました。本理論によると、カゴメ金属に微小な外場をかけることでループ電流相が顕著に増強します。その結果、いわば楽器の“アンサンブル”のように、電流・電荷・超伝導の3つの量子相が共存・競合するという、カゴメ金属の驚くべき実験事実を解明することができました。本理論提案は、カゴメ金属特有の量子相のみならず、高温超伝導体<sup>注6)</sup>など様々な金属の量子相の外場制御を可能とするため、高い汎用性があります。

本成果は 2024 年 1 月 11 日付アメリカ科学誌「Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America」誌(PNAS、米国科学アカデミー紀要)で公開されました。

## 【研究背景と内容】

金属中の電子は融通無碍な存在であり、強磁性体、絶縁体、超伝導など実に多彩な量子相を示します。金属電子論は基礎科学のみならず応用でも重要であり、強磁性相を活用したスピントロニクス素子や超伝導マグネットは、世界を変えた応用例です。金属電子の多彩な姿の背後には、量子力学<sup>注7)</sup>があります。電子は波と粒子の2面性を持ち(不確定性原理)、波として自由に遍歴するとき金属になり、粒子として局在するとき絶縁体になります。しかし最近、遍歴性と局在性が拮抗する中間領域で、これまでにない性質を持つ量子相が続々と発見されています。例えば、回転対称性が自発的に破れたネマティック秩序が、鉄系高温超伝導体や銅酸化物超伝導体などで普遍的に観測されています。

最近発見された幾何学的フラストレーションを有する新規超伝導体CsV<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub>は、格子形状よりカゴメ金属と呼ばれます。カゴメ金属では、散逸しない永久電流を伴う図1の「ループ電流相」という新種の量子相が発現し、その時間反転を破ったトポロジカルに非自明な性質(例えば磁場を必要としないホール効果など)が興味を集めています。我々はいち早くループ電流相の安定性を理論的に証明し、さらにその熱力学的証拠を京都大学の実験グループと協力して解明しました。さらにカゴメ金属では、ダビデ星型秩序と超伝導相が協力・競合して「多重量子相」が実現し、その新奇な物性や著しく敏感な外場依存性が、研究者の一層の注目を集めています。こうした多重量子相に対する予言能力のある理論や、外場による制御理論の構築は大変重要で、デバイス応用をはじめとする可能性が一気に広がります。

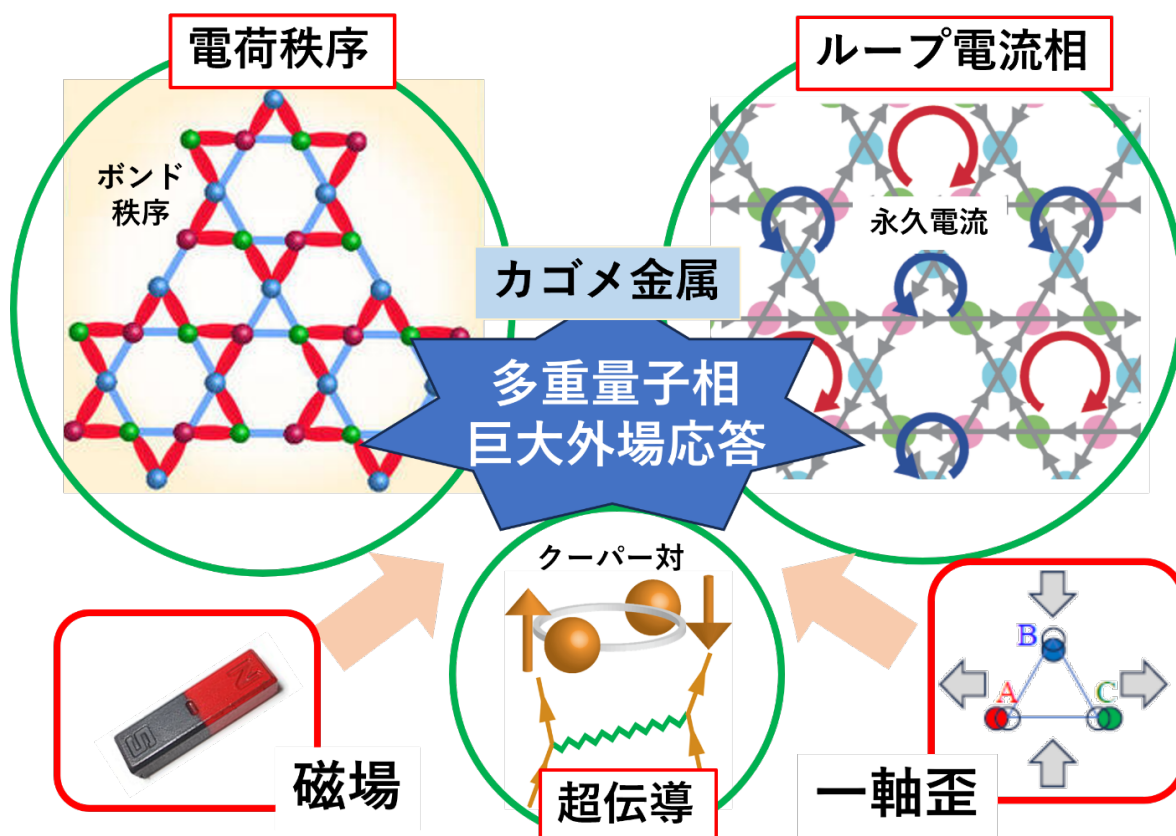


図1 カゴメ格子金属には、永久ループ電流相、電荷秩序相、超伝導相が協力・競合して発現する。このような新奇な「多重量子相」を記述する理論と、外部からの微小な摂動(磁場や一軸歪)により量子相を制御する理論が、求められていた。

カゴメ金属における多重量子相を正しく理解するため、我々は Ginzburg-Landau

自由エネルギー理論に基づき、外場(磁場および一軸歪場)中のカゴメ金属の多重量子相の理論を構築しました。驚くべきことにカゴメ金属では、純粋な電荷秩序の単相に微小磁場をかけるだけでループ電流相が誘起し、二相共存相が実現することがわかりました(図2)。磁場誘起電流は、電荷秩序の強度に比例し、低温ほど増大します。加えて電流と電荷の共存相が、わずかな一軸歪場によっても顕著に促進されることがわかりました(図2)。本研究の理論提案は、カゴメ金属特有の量子相のみならず、高温超伝導体など様々な金属の量子相の外場制御を可能とするもので、高い汎用性があります。

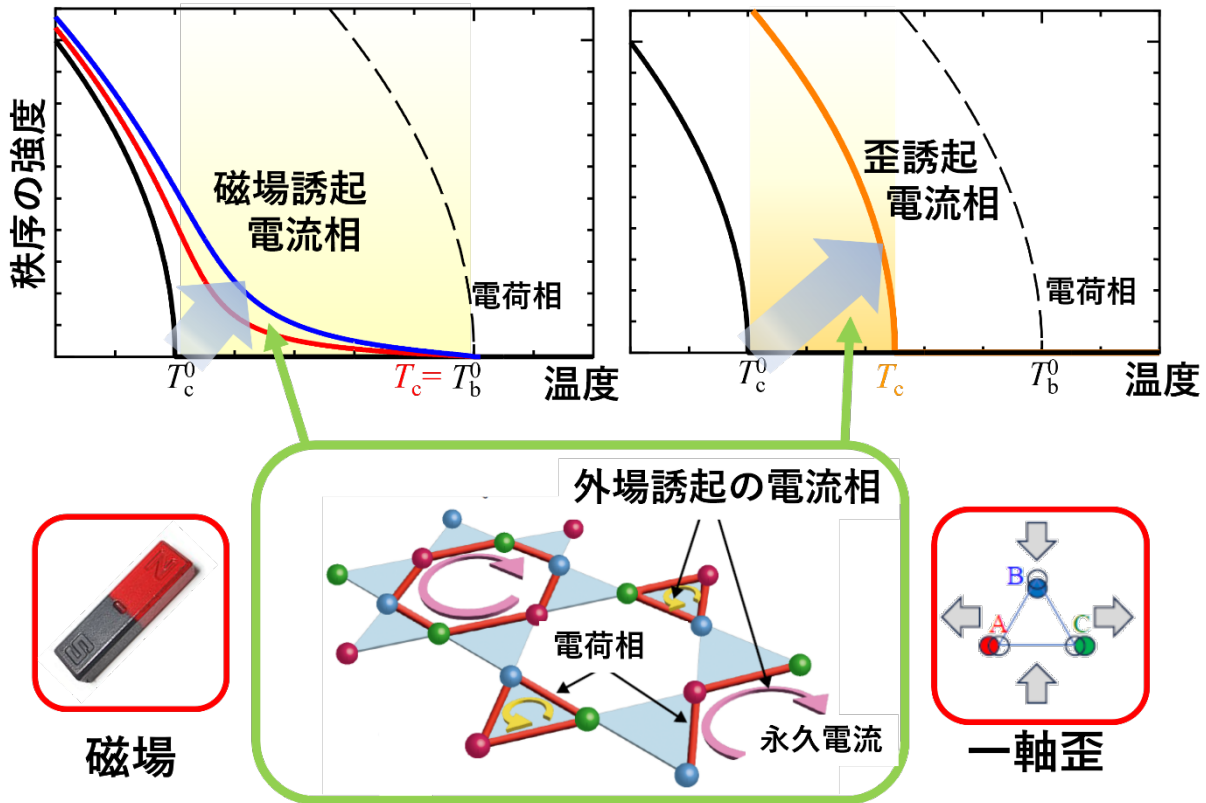


図2 本理論で得られた磁場誘起電流相。カゴメ金属のループ電流相の顕著な磁場依存性を説明する。本理論は、カゴメ金属の電流相を含む多重量子相の制御法に対する、重要なアイデアを与える。

相転移は電子間の相互作用によって起きる現象です。カゴメ金属における多重量子相は、電荷秩序を起こす相互作用と、ループ電流を起こす相互作用が、拮抗していることを意味します。我々はその理由を、くりこみ群と呼ばれる量子場の理論<sup>注8)</sup>に基づき解明しました。相転移をもたらす「低エネルギーの有効相互作用」を仮定なく求めるに当たり、素性が分かっている「高エネルギー成分」から漸次計算してゆき、最終的に低エネルギー成分に到達するという手法です。この手続きは、図3のくりこみ群微分方程式を解くことで、実行できます。その結果、カゴメ金属では電荷秩序とループ電流の相互作用の強さが拮抗して発達し、続いて超伝導相互作用が発達することがわかりました。これは、カゴメ金属における転移温度(電荷秩序・ループ電流の相転移温度がおおよそ 100K、超伝導転移温度がおおよそ10K)と整合します。

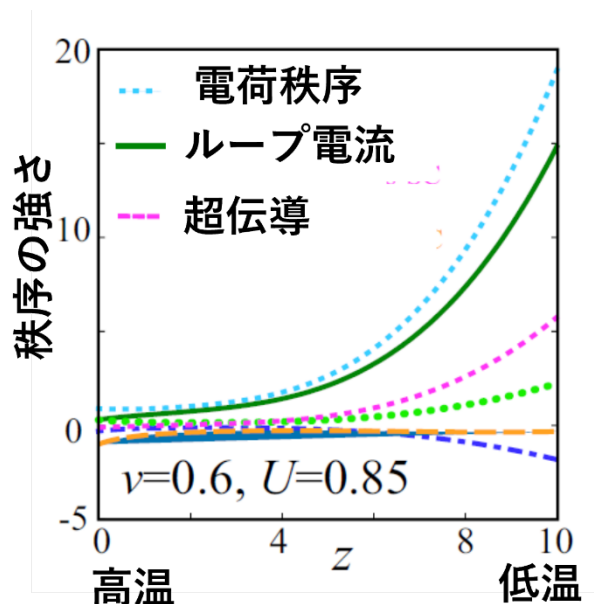
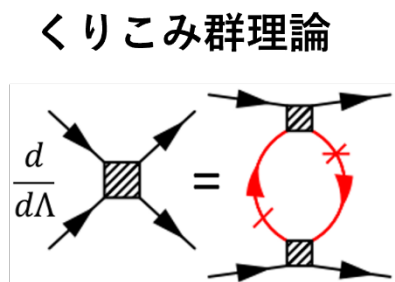


図3 (左)電子間の相互作用をとりこむ理論であるくりこみ群方程式および(右)くりこみ群理論で得られた低エネルギー有効相互作用。ループ電流相と電荷秩序が協調して発達する様子が分かる。

**【成果の意義】**

新種の超伝導体であるカゴメ格子金属では、幾何学フラストレーションのために、原子位置にスピンや電荷を配置する単純な秩序は起きません。その代わりに、原子と原子の間位置に電荷  $\delta t$  を配置する、ボンド秩序 ( $\delta t = \text{実数}$ ) やループ電流 ( $\delta t = \text{虚数}$ ) という新奇量子相が実現します。ループ電流相は、かつてダンカン・ホールデン (Duncan Haldane、英物理学者) が数学的に予言した、伝導電子のトポロジカルな性質に由来する永久電流を伴う状態で、金属における初めての実現例として世界的な注目を集めています。さらにループ電流とボンド秩序が共存する多重量子相は、更なる新奇物性の宝庫として、世界的に研究が進展しています。本研究では、カゴメ金属の多重量子相に対する、予言能力のある理論の構築に成功しました。さらに、微小な外場 (一様磁場や一軸歪) により多重量子相を制御する理論を提案しました。本理論に立脚した、カゴメ格子金属の量子相を活用した新規デバイス応用が近い将来可能かもしれません。

本研究は、2019 年度から始まった文部科学省 新学術領域研究「量子液晶の物質科学」の支援のもとで行われたものです。

**【用語説明】**

注 1)カゴメ格子構造:

竹籠の網目模様に類似した 2 次元格子構造 (図 1)。カゴメ格子金属の強い幾何学フラストレーションにより、単純なスピン秩序や電荷秩序が抑制される一方で、電荷やスピンの強い量子揺らぎが発達し、新規な電子物性の舞台である。

注2)多重量子相:

量子性が強い金属電子の巨視的な性質(相)は量子相と呼ばれる。カゴメ金属においては、ループ電流相、ダビデ星型秩序相、超伝導相などの多彩な量子相が一様状態として共存する「多重量子相」が実現する。多重量子相では、これまでにない新奇な電子状態が実現し、その理解と制御は物理学における重要な課題である。

注3)幾何学フラストレーション:

カゴメ格子が有する三角形構造は、電子の磁気秩序や電荷秩序を著しく抑制する効果があり、幾何学フラストレーションと呼ばれる。このとき電子の粒子・波動の 2 面性が強調されて、新奇な電子状態が生まれやすい。

注4)ループ電流相

電子相関によって時間反転対称性を破った電子・正孔秩序が生じたとき、ループ電流が流れる。銅酸化物超伝導体において長年精力的に研究されてきたが、最近カゴメ金属において多数の有力な実験的観測が報告されている。

注5)Ginzburg-Landau 自由エネルギー理論:

金属の量子相は、金属電子の自由エネルギーを考察し、その極小値を与える解として求まる。かつて Ginzburg と Landau はその汎用性の高い理論を構築した。カゴメ金属における多重量子相は、複数の秩序変数を有する Ginzburg-Landau 自由エネルギーを構築し、その極小値問題を解くことで理解することが出来る。

注6)高温超伝導体:

超伝導転移温度が 50K を超える超伝導体のこと。大気圧下で実現する高温超伝導体として、1986 年にバドノルツ・ミュラーにより発見された同酸化物高温超伝導体と、2008 年に細野・神原により発見された鉄化合物の高温超伝導体がある。

注7)量子力学:

電子などのミクロな粒子の運動を司る物理法則。電子は粒子としての性質(粒子性)と波としての性質(波動性)という 2 重性をあわせ持ち、不確定性原理と呼ばれる。

注8)量子場の理論:

多電子の量子力学的状態を自然に記述する理論。場の理論に基づき、ファイマンにより創始されたファイマン図の理論や、ウィルソンにより創始されたくりこみ群理論が展開される。

**【論文情報】**

雑誌名: Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America 誌(PNAS、米国科学アカデミー紀要)

論文タイトル: Drastic magnetic-field-induced chiral current order and emergent current-bond-field interplay in kagome metals

著者: 田財里奈(京都大学)、山川洋一(名古屋大学)、紺谷浩(名古屋大学)

DOI: 10.1073/pnas.2303476121