

## 2次元ディラックノーダルライン物質の

### 構造と電子状態および輸送特性の解明

研究代表者 高山 あかり  
(先進理工学部 物理学科 准教授)

#### 1. 研究課題

ック型電子のバンドが線（ループ状）で交わる「ノーダルライン型バンド分散もつ物質」は、ディラック電子系の利点はそのままだに高いキャリア密度をもつことができる物質系とされ、近年注目が集まっている。2次元ディラックノーダルライン物質の候補として有力視されているのが  $\text{Cu}_2\text{Si}$  単原子層であり、 $\text{Cu}(111)$ 基板上に作製された単層  $\text{Cu}_2\text{Si}$  において2次元物質におけるノーダルループの存在が角度分解光電子分光（ARPES）により報告されている[1]。ノーダルライン型の電子状態および輸送特性を明らかにするため、初年度は、Si 基板上的  $\text{Cu}_2\text{Si}$  の作製、高分解能 ARPES 測定による電子状態の決定、極低温強磁場下電気伝導測定における輸送特性の解明、全反射高速陽電子回折（TRHEPD）による構造解析を行なった。本年度は極低温強磁場下電気伝導測定における輸送特性の解明、全反射高速陽電子回折（TRHEPD）による構造解析を行なった。

#### 2. $\text{Cu}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$ の輸送特性とその構造

$\text{Cu}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$ の輸送特性を明らかにするため、超高真空下・極低温・強磁場下での4端子電気伝導測定を行った。測定の模式図を図1(a)に示す。本実験では試料表面に垂直に最大7 Tの磁場  $B$  を印加し、試料温度は0.83 Kまで冷却して実験を行った。図1(b)に2.00 MLおよび2.25 MLの  $\text{Cu}_2\text{Si}/\text{Si}$  の30 K以下のゼロ磁場化(0 T)におけるシート伝導率  $\sigma_{\text{sheet}}$  の温度依存性を示す。実験の結果、 $\sigma_{\text{sheet}}$  は温度が下がると徐々に減少し、これは弱局在(WL)または弱反局在(WAL)による補正を取り入れたフィッティングでよく説明できる。また、試料温度1 Kでの磁気伝導率は、磁場の増加に伴い  $\sigma_{\text{sheet}}$  は低磁場領域(0~0.5 T)で減少し、その後、高磁場領域(0.5~7.0 T)でわずかに増加した[図1(c)]。低磁場領域の振る舞いに着目すると、 $\Delta\sigma$ (ゼロ磁場下の伝導度との差分)の関係は、Hikami-Larkin-Nagaoka (HLN)の式で記述できることがわかった[図1(d)]。単層  $\text{Cu}_2\text{Si}$  は  $T_c \sim 4.1$  Kでの超伝導転移が予測されているが、Si(111)上の  $\text{Cu}_2\text{Si}$  層の構造では、WAL効果の誘起によって超伝導転移が妨げられていると結論づけた。

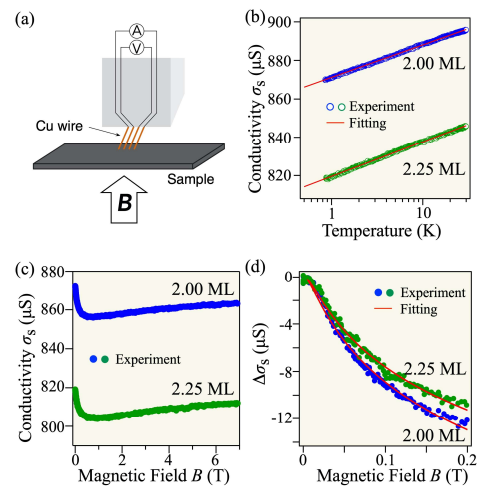


図 1. (a) 4 端子電気伝導測定の模式図。  $\text{Cu}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$ におけるシート伝導度の (b) 温度依存性、(c)磁場依存性、(d) ゼロ磁場下の伝導度との差分。

下の伝導度との差分)の関係は、Hikami-Larkin-Nagaoka (HLN)の式で記述できることがわかった[図1(d)]。単層  $\text{Cu}_2\text{Si}$  は  $T_c \sim 4.1$  Kでの超伝導転移が予測されているが、Si(111)上の  $\text{Cu}_2\text{Si}$  層の構造では、WAL効果の誘起によって超伝導転移が妨げられていると結論づけた。

これまでの  $\text{Cu}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$  のバンド計算ではノーダルループの存在は示されておらず、これは、従来の計算では図 2(a) に示すような  $5.55 \times 5.55$  周期の超構造を反映させた構造を反映していなかったことに起因すると考えられる。また、単層  $\text{Cu}_2\text{Si}$  のバンド計算では、ノーダルループは  $\text{Cu}_2\text{Si}$  層のバックリングの有無によって縮退点でのギャップの存在が指摘されており、ノーダルループ電子状態の議論には、正確な構造でのバンド計算が必須である。本研究では、 $\text{Cu}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$ -  $5.55 \times 5.55$  構造を明らかにするため、全反射高速陽電子回折(TRHEPD)実験による構造解析から、この格子非整合による巨大格子系の構造決定を試みた。本実験は高エネルギー加速器研究機構低速陽電子実験施設(SPF)にて行った。解析では、原子密度と層間距離の情報を反映する一波条件下において、(00)スポット強度の視斜角依存性(ロッキング曲線)を測定し、実験とよく対応するロッキング曲線をもつ構造モデルを探索する。最表面の  $\text{Cu}_2\text{Si}$  および  $\text{Cu}_2\text{Si}$  直下の Si 層の歪みも考慮した解析を行った結果、図 2(b) に示す構造モデルが最も実験値を良く再現する[図 2(c)]ことを見出した。今回決定した構造は、 $\text{Cu}_2\text{Si}$  層の構造は先行研究とよく対応すること、さらに基板の Si 層にも多少の格子緩和が存在することを示唆している。

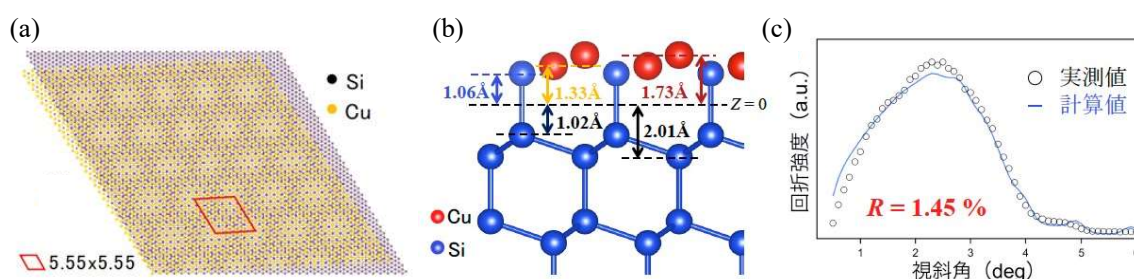


図 2.  $\text{Cu}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$ -  $5.55 \times 5.55$  の(a)構造模式図, (b)決定した構造モデル, (c)実験および解析結果。

### 3. 共同研究者

中村 友謙 (沖縄科学技術大学・研究員)

長谷川 修司 (東京大学・教授)

望月 出海 (高エネルギー加速器研究機構・助教)

兵頭 俊夫 (高エネルギー加速器研究機構・ダイヤモンドフェロー)

### 4. 研究業績

#### 4.5 学会および社会的活動

早稲田大学理工学術院総合研究所より助成を受け、本プロジェクトで用いた陽電子ビームおよび様々な量子プローブ利用促進を図る研究会を実施した。

第 17 回日本放射光学会 若手研究会

「材料研究×イメージング：基礎から融合研究へのステップアップ」

【開催時期】2025 年 8 月 19 日 (火) ~ 8 月 20 日 (水)

【開催場所】高エネルギー加速器研究機構 つくばキャンパス 4 号館 2 階輪講室

【開催 URL】[https://jssrr.smoozy.atlas.jp/ja/notices/wakate\\_17](https://jssrr.smoozy.atlas.jp/ja/notices/wakate_17)

### 5. 研究活動の課題と展望

本年度に研究の主となる実験は全て終了したため、1 年前倒してプロジェクトを終了することとした。この 2 年間の研究成果をまとめ、2026 年度に論文執筆および投稿を予定している。