

量子物性物理学研究室

1. メンバー

教授： 石橋 晃 011-706-9423 i-akira@es.hokudai.ac.jp
准教授： 近藤 憲治 011-706-9424 kkondo@es.hokudai.ac.jp
学生： 黄倉 侑人(M2)、小森 至瑠(M2)、周 子凌(M2)、余 佳興(M2)、
森島一輝(M1)、王 瀟涵(M1)、洪 性百(M1)、成瀬貴彦(B4)

2. 研究成果

トップダウン系に対するアンチテーゼとして最近その重要性が認識されてきた一つの流れは、自律分散型相互作用など内在的ルールにより構造が決まっていくボトムアップ系である。バイオ系に代表される自律分散系の他、たとえば半導体量子ドットなど無機物のセルフアセンブル系を含め、広くボトムアップ系に期待が集まっている。しかしながら、両系は未だに専ら独立で、トップダウン、ボトムアップ両系の間には橋渡しする事は極めて重要にも係らず、未だ実現されていない。当研究室では、このような課題を解決しながら、新しい量子機能・高機能デバイス、光電変換システム創出を目指した研究を実験と理論の両面から進めている。

SDGs (*Sustainable Development Goals*: 持続可能な開発目標) の観点からも、視点をアトム(Atom)・ビット(Bit)・エネルギー(Energy)/環境(Environment)空間 [ABE²空間] において、今後ナノテク・ナノサイエンス分野で得られる新しい効果や機能を既存の Si ベースの IT インフラ構造と接続し相乗効果を引出し、最終的にナノとマクロを結合して、新しいエネルギー・環境科学技術を実現することを目指している。

従来の「ボトムアップとトップダウンの統合」が両者のいいとこ取りでナノ構造を作るといったものであったのとは異なり、当研究室では両者の相互乗り入れを可能とする和集合の観点から取り組んでいる。両者の構成原理が大きく異なるため容易ではないが、もしトップダウン・ボトムアップの両系を繋ぐことができれば、今後ナノテク・ナノサイエンス分野で得られる新しい効果や機能を既存の Si ベースの IT 基盤やエネルギー・環境インフラ構造と接続し相乗効果を引出すことができ、特に、空間的な機能縮退を解消することで効率的な太陽光発電と低環境負荷の高清浄環境が実現できる。

(a) 新型光電変換システムと極限高清浄環境 (Clean Unit System Platform: CUSP) の展開

本来、熱力学限界に迫り得るはずの太陽電池の究極の高効率化、及び無人飛行体(UAV)・無人地上車(UGV)等への効率的な光無線給電 (パワービーミング) は、未だ実現していない。本研究では、図1に示すように、光を収穫 (ハーベスト) する部分 (受光部) とこの光を電力化する光電変換部 (発電部) を空間的に分離し、2次元的に接続する (2-Dimensional PhotoReceptoConversion Scheme: 2DPRCS) というアイデアに拠って、発電と給電という今までは独立して議論されることの多かった2つの分野が遭遇してきた困難や目標が一気に解決することを目指している。具体的には、①集光システムによる太陽電池の高効率化という課題と、②ビームふらつきに強い光無線給電 (レーザーパワービーミング) を可能とするという2つの大きな目標を同時に実現する (図1参照)。これらを

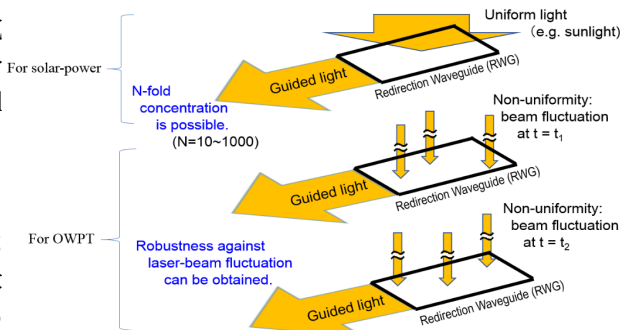


図1 2-Dimensional PhotoReceptoConversion Scheme: 2DPRCS)による一様光 (太陽光) の集光システム (上段) と、レーザービーム光のふらつきに強い光無線給電システム (中段、下段) の概念図

支える全く新しい導波路として、光進行方向が定義する軸に関してその前後反転に対する対称性を持たない非対称導波路を提案し、3次元空間伝搬光の効率的な2次元光化(3D-2D 転換)を実現する。この新しい導波路は無色で、窓に貼り付けたり、建築物の屋根や側壁材として景観を損なうことなく全面に用いることができ、ZEB(zero-energy building)やZEH(zero-energy house)等近未来社会を支える基幹技術となる。

また、クリーンユニットシステムプラットフォーム (CUSP) 技術を基に、新型コロナ等感染症対策として、必要な、時・期間・場所に、直ちに設置できる可搬型高潔浄空間を創出した。

- ・第一に、ベッドや布団を内包し、患者を守る内外等圧のテント式 CUSP であり、クラス 100 級の清浄度を実現した (図 2 参照)。

- ・第二に、医療従事者と患者間のインタラクションを守る(医療従事者と患者間の”隔離性”を担保する)内外等圧の結合 CUSP ブース(CCB)であり、医師ブースでは患者ブースで発生したエアロゾルを約三桁低減する。

- ・第三に、内外等圧性により、新型コロナをうつさず・うつされない(相互感染リスクゼロの)究極的防護服 CUBS の作製に成功した (原子炉等作業にも展開できる)。

具体的には、孤立・閉鎖系高潔浄環境 CUSP 技術を進化させて、T-CUS、CCB、CUBS のトリプルセイフティーシステムを実現した。特に、CUBS 防護服内では、呼吸時のエアフローFが、防護服面で包まれる内部と外界との間で出入りする事が無いことにより、使用者は外界の新型コロナウイルスを吸いこむ事がなく、また逆に、内部から周りに菌を撒き散らす事も完全に抑止できる。有用薬剤ミストを利用して、上記 CUSP システムを繰り返し安全に利用するための消毒法も見出した。外出時に新型コロナをうつされず、またうつもしない理想的な相互感染防止力により、医療従事者はもとより、一般市民を含む社会全体に安心と安定をもたらさうる孤立・閉鎖系要素技術の開発に成功した。

(b)理論

2 次の高次トポロジカル絶縁体の弱い相の発見

全体の目的としては、物性理論の観点から、トポロジカルな磁性現象の解明を行い、物理学への新しい知見を得ることを目的としている。その中でトポロジカル絶縁体の特異なバンド構造を利用した新奇なスピndeバイスの提案ならびにスピン軌道相互作用の非可換ゲージ場の側面を活かしたデバイスの検討を行うことにより、スピントロニクスなどの工学にも寄与することを目指している。

今年度の成果は以下のものである。今年度は 2018 年に F Schindler が提案した 2 次の高次トポロジカル絶縁体のハミルトニアンに異方性ホッピングを加えて拡張したモデルを研究した。その結果、ハミルトニアンが記述する系においては、強い相以外に弱い相と呼べる状態を発見した。検討したハミルトニアン。ここで、 $t_z=t$ とすれば、F Schindler のモデルと一致する。

$$H(\mathbf{k}) = H_{\text{host}}(\mathbf{k}) + H_{\text{mass}}(\mathbf{k}),$$

$$H_{\text{host}}(\mathbf{k}) = \left(M + t \sum_{i=x,y} \cos k_i + t_z \cos k_z \right) \tau_z \otimes \sigma_0 + \Delta_1 \sum_{i=x,y,z} \sin k_i \tau_x \otimes \sigma_i,$$

$$H_{\text{mass}}(\mathbf{k}) = \Delta_2 (\cos k_x - \cos k_y) \tau_y \otimes \sigma_0.$$

すなわち、z 軸方向に異方性を入れたモデルになっている。このハミルトニアンの H_{host} の部

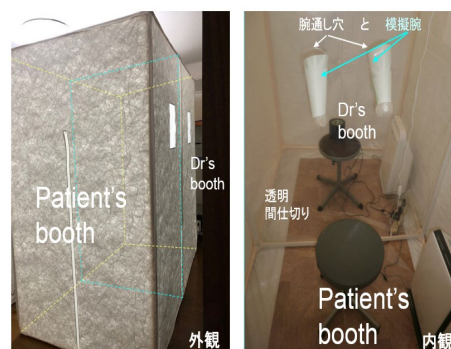


図2 内外等圧の連結CUSPブース (Connected CUSP Booths: CCB)。左はCCBの外観、右は同内観 (手前が患者ブースで奥側が医師ブース)。医師ブースでは、患者ブースで発生する塵埃・菌が約千分の一に抑制できることが示された。

分は、Wilson-Dirac 型の 1 次のトポロジカル絶縁体になっており、その相図を解析すると図 3 のようになる。ここで、STI 相に対して、質量項を導入するとやはり 2 次のトポロジカル絶縁体の強い相になるが、では WTI 相に対して、質量項を導入した場合はどうなるであろうか？それは自明ではなかった。WTI 相に対して、質量項を導入した場合における Wilson ループは既存の解釈では、トリビアル相になってしまうが、それでも電子状態を描画してみるとヒンジに電子が集中しており、トポロジカルに見える。そこで、1 次の弱い相と同じであると考えて、Wilson ループを巻き付き数で見ないで、解釈を変更すると図 4 の相図が得られる。これらの結果から、1 次の強い相に基づき、それに質量項を入れて 2 次の相を作ると 2 次の強い相が発現し、1 次の弱い相に基づき、それに質量項を入れて 2 次の相を作ると 2 次の弱い相が出来ることを発見した。特に、K 群を用いた分類では、この種の弱い相は発見できない。図 5 は、弱い 2 次のトポロジカル絶縁体の電子密度分布である。1 次の異方性ホッピングによって周期的な変調構造が見られる。強い相では、この変調構造は見られず、一様なヒンジになっている。

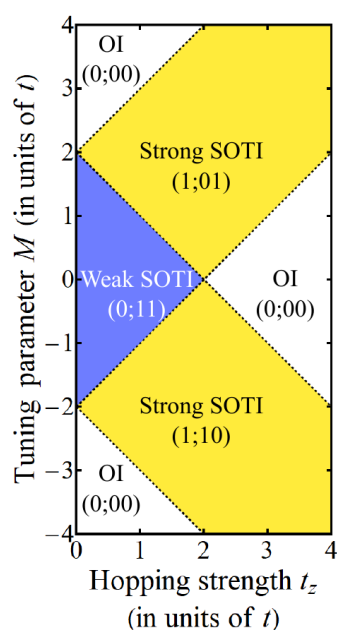
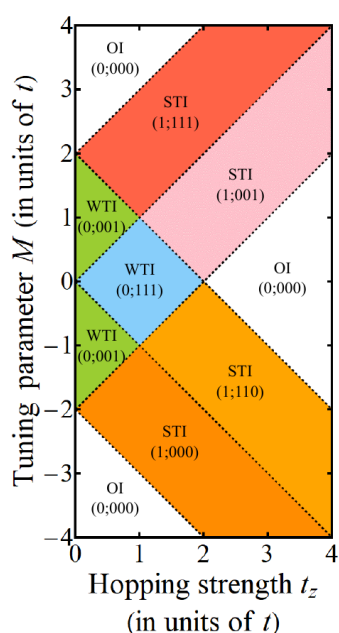


図 3 : Wilson-Dirac 型の 1 次のトポロジカル絶縁体の相図

図 4 : 2 次のトポロジカル絶縁体の相図

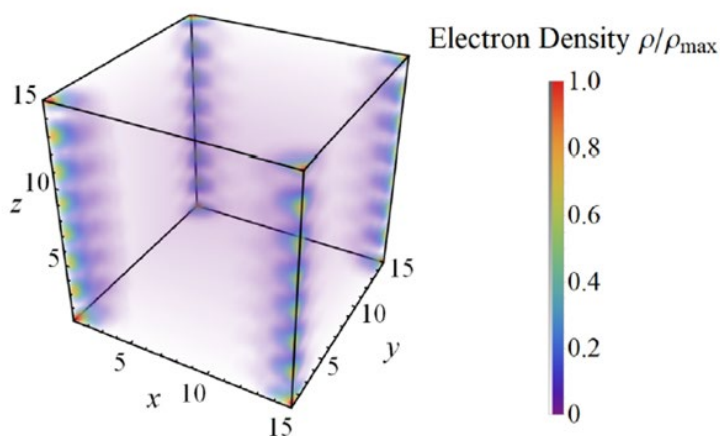


図 5: 2 次 TI の弱い相の電子密度分布

3. 成果発表（レフェリー制のあるジャーナルには * 印を付ける）

<原著論文>

- 1)* **A. Ishibashi**, Y. Okura and N. Sawamura: “Lifting Off Spatial Degeneracy of Functions, Where Does It Lead Us for Photovoltaic Device Systems?”, *Energies*, **13**: 5234-1–5234-16 (2020)
- 2)* 羽山 広文、石垣 祐里奈、**石橋 晃**、松田 順治: 「ガス交換ユニットを用いた拡散換気システムの性能検証」、*クリーンテクノロジー*、**30**: 68-73 (2020)
- 3)* K. Morishima and **K. Kondo**: " A Comparison of Magnetoconductivities between Type-I and Type-II Weyl Semimetals ", *J. Appl. Phys.* **129** 125104 -1-125104 -11 (2021).
- 4)* S. Komori, and **K. Kondo**: "A proposal of strong and weak phases in second-order topological insulators", *Journal of Physics Communications* **4**, 125005-1-125005-12 (2020).

<著書>

なし。

<特許>

・国際特許

1. **A. Ishibashi**, T. Etoh, N. Noguchi and J. Matsuda : 中国特許 CN110691946 B, “Building and method for controlling gas molecule concentration in living and/or activity space in building”, 特許登録 2020年11月27日
2. **A. Ishibashi** and F. Ishibashi : US 10,677,483, “Wall, system of highly clean rooms, production method thereof and construction”, 特許登録2020年6月9日
3. **A. Ishibashi**, T. Etoh, N. Noguchi and J. Matsuda : US 2020/0171427 AI, “Building and method for controlling gas molecule concentration in living and/or activity space in building”, 2020年6月4日
・国内特許
1. **石橋 晃**、Liang Sheng-Fu、安武 正弘 : 特願2021-39791、「生物体の健康状態分析システムおよび生物体の健康状態分析方法」、2021年3月12日
2. **石橋 晃** : 特願2021-023700、「防護閉空間システム」、2021年2月17日
3. **石橋 晃**、松岡 隆志 : 特願2020-204678、「光電変換装置」、2020年12月10日
4. **石橋 晃** : 特許第6763614号、光導波装置、「光電変換装置、建築物、電子機器及び発光装置」、特許登録 2020年8月18日

4. 学術講演

4-1. 学術講演（国際学会・国際シンポジウム）

<招待講演>

<一般講演>

1. **A. Ishibashi*** and N. Sawamura : “Two Dimensionally Connected Photorecepto-conversion Scheme (2DPRCS) for High Efficiency Solar Cells and Optical Wireless Power Transmission ”, The 2nd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference, Yokohama, Japan (2020-04)
《ポスター発表》
- 1) X. Hong*, J. Yu, Y. Okura, N. Sawamura and **A. Ishibashi** : “For Fabrication of Waveguides in Multi-stripped Orthogonal Photon-Photocarrier Propagation Solar Cell(MOP3SC) System”, The 21st RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2020-12)
- 2) X. Wang*, Z. Zhou, M. Yasutake and **A. Ishibashi** : “Clean Unit System Platform (CUSP) and developing connected CUSP Booths (CCB)”, The 21st RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan (2020-12)
- 3) 黄倉 侑人*、余 佳興、周 子凌、王 瀟涵、安武 正弘、**石橋 晃** : 「新型太陽電池プロセス、及び新型コロナ対応プラットフォームとしての孤立閉鎖系清浄環境 Clean Unit System Platform (CUSP) 」、第 15 回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム

- (Renewable Energy 2020)、東京ビッグサイト(東京都)、Japan (2020-12)
- 4) 余佳興*、黄倉 侑人、澤村 信雄、石橋 晃：「2次元的に接続された受光・発電分離型光電変換スキームに向けて」、第15回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム(Renewable Energy 2020)、東京ビッグサイト(東京都)、Japan (2020-12)
 - 5) K. Morishima* and **K. Kondo**: "A Study of Magnetoresistance in Type-I and Type-II Weyl Semimetals", The 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2020), Online, USA (2020-11).
 - 6) S. Komori and **K. Kondo**: "Magnetotransport Characteristics in Second-order Weyl Semimetals", The 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2020), Online, USA (2020-11).
 - 7) K. Morishima* and **K. Kondo**: "An Effect of Inclination of Weyl Cone on Magnetoconductivities of Weyl semimetals", The 21th RIES-HOKUDAI International Symposium "ma", Virtual Conference Online, Sapporo, Japan (2020-12).
 - 8) K. Komori* and **K. Kondo**: "Exotic Electronic Structures and Magnetotransport Phenomena of Second-Order Weyl Semimetals", The 21th RIES-HOKUDAI International Symposium "ma", Virtual Conference Online, Sapporo, Japan (2020-12).
 - 9) K. Komori* and **K. Kondo**: "A Weak Phase of Second-Order Topological Insulators", The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics, Online, Sendai, Japan (2021-2).

4-2. 学術講演(国内学会・国内その他)

<招待講演>

- 1) 石橋 晃*、安武 正弘、松田 順治：「孤立・閉鎖系高清浄環境 CUSP の新型コロナ等感染症対策への応用」、2020年度ダイナミック・アライアンス合同Web分科会、大阪大学、Japan (2020-11)

<一般講演>

《口頭発表》

- 1) 余佳興*、洪 性百、澤村 信雄、石橋 晃：「スペクトル分割多接合設計に対する非対称導波路結合方式の優位性」、日本応用物理学会 2021年春季大会、オンライン開催、Japan (2021-03)
- 2) 王 瀟涵*、周 子凌、余佳興、安武 正弘、石橋 晃：「Clean Unit System Platform (CUSP) and Connected CUSP Booth (CCB)」、日本応用物理学会 2021年春季大会、オンライン開催、Japan (2021-03)
- 3) 石橋 晃*：「「縮退」解消をもたらす新しいエネルギー・環境系とミニマルファブシステムのシナジー可能性」、令和2年度ファブシステム研究会臨時総会、産業技術総合研究所(つくば中央)、Japan (2020-11)
- 4) 石垣 祐里奈*、羽山 広文、森 太郎、石橋 晃、松田 順治：「ガス交換ユニットを用いた拡散換気システムの性能検証」、2020年度日本建築学会大会学術講演会、千葉大学、千葉、Japan (2020-09)
- 5) 小森 至瑠*、近藤 憲治：「2次のType-II Weyl 半金属で現れるFermi Arc」、2020年日本物理学会秋大会、オンライン (2020-09)
- 6) 森島 一輝*、近藤 憲治：「Type-I 及びType-II ワイル半金属における磁気抵抗効果の違いに関する研究」、2020年日本物理学会秋大会、オンライン (2020-09)

《ポスター発表》

- 1) 松田 順治*、石橋 晃：「新型ウィルスや、インフルエンザ対策にお役立ち!!」、ビジネスEXPO「第34回 北海道 技術・ビジネス交流会」、アクセスサッポロ(札幌市)、Japan (2020-11)
- 2) X. Wang*, Z. Zhou, C. Chiu, T. Hsieh, S. Liang and **A. Ishibashi** : "Clean Unit System Platforms

- and Developing Connected CUSP Booths”, The 6th Hokkaido University Cross-departmental Symposium 第6回北海道大学部局横断シンポジウム, Hokkaido University, Japan (2020-10)
- 3) X. Hong*, J. Yu, Y. Okura, N. Sawamura and **A. Ishibashi**: “Exploration for Photon-Photocarrier Propagation Properties of Waveguide Based on Polydimethylsiloxane”, The 6th Hokkaido University Cross-departmental Symposium 第6回北海道大学部局横断シンポジウム, Hokkaido University, Japan (2020-10)
 - 4) 小森 至瑠*, **近藤 憲治**: “2次のワイル半金属のエキゾチックな電子状態に関する研究”, 第6回北海道大学部局横断シンポジウム、オンライン (2020-10) .
 - 5) 森島 一輝*, **近藤 憲治**: “ワイル半金属の磁気伝導率とワイルコーンの傾きの効果”, 第6回北海道大学部局横断シンポジウム、オンライン (2020-10) .
 - 6) 小森 至瑠*, **近藤 憲治**: “2次のWeyl半金属の電子状態と磁気輸送特性に関する研究”, 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25)、オンライン(阪大) (2020-11) .
 - 7) 森島 一輝*, **近藤 憲治**: “低エネルギー領域におけるType-I及びType-IIワイル半金属の磁気抵抗効果”, 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25)、オンライン(阪大) (2020-11) .

5. 国際学会および国際シンポジウムの組織

<組織・運営委員>

1. 石橋 晃: 第2回 Optical Wireless Power Transmission Conference, Program Committee (2019年10月1日~2020年4月3日)

7. 科研費、助成金等の取得状況

- 1) 研究代表者: **石橋 晃**、研究分担者:安武 正弘(国立研究開発法人日本医療研究開発機構AMED): AMED ウイルス等感染症対策技術開発事業【基礎研究支援】「ウイルス等感染症患者用高潔浄閉空間システムの飛躍的高機能化」、2020年度、12700千円
- 2) 研究代表者: 松岡 隆志(東北大学金属材料研究所)、研究分担者: **石橋 晃**: 物質・デバイス領域共同研究 展開研究 A 「ラテラル方向に組成の傾斜した InGaAlN 層に基づくマルチストライプフォトン・フォトキャリア直交型太陽電池の研究」
- 3) 研究代表者: 松田 順治、**研究分担者**: **石橋 晃**、安武 正弘、物質・デバイス領域拠点・ダイナミックアライアンス: 「清浄環境 CUSP のコロナ対策応用の検討」、2020年度
- 4) 研究代表者: 榎本 良治(東京大学宇宙線研究所)、**研究分担者**: **石橋 晃**: 物質・デバイス領域共同研究(基盤共同研究) 「放射線検出器 γ Iと清浄環境CUSPの結合の展開」、2020年度
- 5) 研究代表者: 安武 正弘(日本医科大学)、**研究分担者**: **石橋 晃**: 物質・デバイス領域共同研究(基盤共同研究) 「新清浄環境技術 Clean Unit System Platform (CUSP)の健康増進・医療応用に関する研究」、2020年度
- 6) 研究代表者: 植村 哲也、**研究分担者**: **近藤憲治** 科学研究費助成事業(基盤研究(B)) 17,550千円: 「スピン軌道トルクによるハーフメタル強磁性体磁化制御とそのデバイス応用」
- 7) 研究代表者: 植村 哲也、**研究分担者**: **近藤憲治** 科学研究費助成事業(基盤研究(B)) 17,550千円: 「ワイル半金属を用いた電流誘起スピン軌道トルクの解明とそのデバイス応用」
- 8) 研究代表者: **近藤憲治**、共同研究者: 佐久間昭正(東北大)、小峰啓史(茨城大)、寺本央(北大)、CSRN 東北大学スピントロニクス学術連携研究プロジェクト、スピントロニクスデバイス理論研究領域、200千円: 「トポロジカルな性質を持つ物質とその応用の研究」

8. その他

[国内外の学会・委員会の役職]

- 1) 石橋 晃: 産業技術総合研究所ファブシステム研究会委員 (2010年02月01日~2021年03月31日)

- 2) 石橋 晃：レーザー学会光無線給電技術専門委員会委員
- 3) 近藤憲治： **Editorial Board Member for Scientific Reports (published by Nature Publishing Group)**. (2016年- 現在)
- 4) 近藤憲治：磁気学会 スピントロニクス専門研究会 世話人(2019年4月- 現在)

[併任・兼業]

- 1) 石橋 晃：産業技術総合研究所客員研究員 (2010年04月01日~2020年03月31日)
- 2) 石橋 晃：シーズテック株式会社 (北海道大学発ベンチャーカンパニー) 技術担当取締役 (CTO) (2007.04 - 現在)

[新聞・雑誌・放送等]

- 1) 松田 順治、石橋 晃：北海道放送 (HBC) 今日ドキッ 2021年1月7日 「テント式CUSP、連結CUSPブース (CCB) の紹介」
- 2) 松田 順治、石橋 晃：STV ニュース 2021年1月4日 「T-CUSP、連結CUSPブース (CCB) の紹介」
- 3) 松田 順治、石橋 晃：テレビ北海道 (TVh) 5時ナビニュース 17:00- 2020年11月25日 「連結CUSPブース (CCB) の紹介」

[教育活動]

石橋 晃：

○ 博士論文副査

1. NGO HaiDang: “Development of Compound Plasmonic Films Based on Boride and Oxide for Photo-Energy Applications”

○ 修士論文主査

1. 黄倉 侑人：「導波路結合 受光・発電分離型光電変換素子に向けた光進行方向変換層の研究」
2. 周 子凌：「クリーンユニットシステムプラットフォーム (CUSP) とその派生アプリケーションの開発」
3. 余 佳興：「スペクトル分割型多接合型に対する非対称導波路結合方式の優位性と当該導波路作製のための準備」

○ 修士論文副査

1. 小森 至瑠：「高次トポロジカル物質のエキゾチックな電子状態に関する理論研究」

近藤 憲治:

○ 修士論文主査

1. 小森 至瑠：「高次トポロジカル物質のエキゾチックな電子状態に関する理論研究」

○ 修士論文副査

1. 黄倉 侑人：「導波路結合 受光・発電分離型光電変換素子に向けた光進行方向変換層の研究」
2. 山家 椋太：「軌道混成をもつ空間反転対称な遍歴磁性体における非共面磁気構造の理論的研究」
3. 周 子凌：「クリーンユニットシステムプラットフォーム (CUSP) とその派生アプリケーションの開発」
4. 余 佳興：「スペクトル分割型多接合型に対する非対称導波路結合方式の優位性と当該導波路作製のための準備」

[学会会員]

石橋 晃

日本物理学会

応用物理学会

IEEE (Senior Member)

レーザー学会

Materials Research Society of Japan

日本空気清浄協会

近藤憲治

日本物理学会

応用物理学会

日本磁気学会

米国 **Material Research Society**