

公益財団法人 山田科学振興財団

## 山田研究会 「電磁応答理論の新展開と先端マテリアルサイエンス」

### ・趣旨

電磁気学では電磁場と相互作用する物質の多様性を反映して、今なお次々と新しい現象や概念・手法が見出されているが、これについて近年わが国では二つの大きな流れが生れている。第一は電磁応答理論の階層構造を正面から取り入れた非相対論的な微視的・巨視的応答理論の構築とその実験的応用であり、第二は一般的なゲージ理論の観点から見直した電磁気学の新局面（Emergent Electromagnetic Field, スピン流等）である。これらは、どちらも理論として高い一般性を持つとともに、対象とする実験や物質も広範囲に及ぶ。

このような流れの中で、本研究会では各分野の気鋭な研究者が集い、過去の電磁気学の諸問題の究明を行うとともに、現在の電磁気学の現状把握ならびに将来の新展開をはかる。特に相対論的量子電磁気学から巨視的応答理論に至る論理的一貫性を具体的に組み込んだ電磁気学の構築を目指す。さらには、この視点から見た実験手法の探索、新しい物性探究を目指した新展開を討議する。

- ・ 日程                    平成 26 年 10 月 2 日（木）～ 10 月 3 日（金）
- ・ 会場                    ホテル北野プラザ六甲荘
- ・ 参加者                約 40 名
- ・ 主催責任者          大阪大学名誉教授 張紀久夫

---

参加者は前もって登録が必要ですので、関心をお持ちの方は、山田財団にお問い合わせ下さい。

## 実施報告書

### 山田研究会

#### 「電磁応答理論の新展開と先端マテリアルサイエンス」

会場     ホテル北野プラザ六甲荘  
会期     平成 26 年 10 月 2 日, 3 日  
参会者   46 名

物理学の主要な柱の一つである電磁気学は 150 年以上も前にマクスウェル方程式の形にまとめられ、その後物質の粒子描像・量子力学・相対論に基づく精密化を経て量子電磁気学の高みにまで達したが、その応用は最精密な物理学から工学・化学・生物学に至る広範な分野に及んでいる。その長い歴史と応用分野の広さのため、電磁応答理論は相対論的な量子電磁気学から巨視的現象論に至るまでさまざまな形に展開され（巨視的応答に関してはさまざまな疑問点を含みながらも）大きな成功を収めてきた。電磁気学では電磁場と相互作用する物質の多様性を反映して、今なお次々と新しい現象や概念・手法が見出されているが、これについて近年わが国では 2 つの大きな流れが生れている。第一は電磁応答理論の階層構造を正面から取り入れた非相対論的な微視的・巨視的応答理論の構築とその実験的応用で、第二は一般的なゲージ理論の観点から見直した電磁気学の新局面（創発電磁場、スピン流等）であり、どちらも理論として高い一般性を持つとともに、対象とする実験や物質も広範囲に及ぶ。実験としてこれと結びつきの強いテーマは、第一の流れに関しては（半導体から化学的合成系を含む）ナノ構造物質のサイズ・形状に依存した電磁応答、近接場光学、微小物質の光操作、メタマテリアル、等々、第二の流れに関してはマルチフェロイクス、スピンホール効果、トポロジカル絶縁体を初めとする新規物質系の電磁応答、等々が挙げられる。このような流れの中で各分野の鋭意な研究者を集め、過去の電磁気学の諸疑問点を糾し、研究の現状を把握すると共に（相対論的量子電磁気学から巨視的応答理論に至る）論理的一貫性を具体的に組み込んだ電磁気学の構築を検討することと、その視点から見た実験手法的・物質状态的に考え得る新展開を考察することを目的として下記のプログラムのような研究会を実施した。

上述の意図を反映するため講演者は各分野から指導的な研究者を、それ以外の参加者も各世話人の周辺からこのテーマに関して鋭い関心を持っていると見られる研究者を若手中心に選んだ。各講演者にはたつぷりとそれぞれの研究の精髓を語ってもらったが、そのレベルは高く内容も豊富で、多くの活発かつ真摯な質疑応答が引き出された。また、特別ゲストとして電磁気学・量子力学に関する大先輩である霜田光一先生と江沢洋先生にも参加して頂き、プログラム最後のコメントをお願いした。

この研究会は日ごろ交流の無い 2 つのコミュニティの間に橋をかけようとする他に例を

見ないものであったので、その点について得られた成果と今後の展望を述べておきたい。  
以下では、2つの研究コミュニティを以下の A, B の名称で引用する。

[A] 非局所応答によるマイクロ・マクロな階層的電磁場を用いる応答

[B] 創發電磁場を用いる電磁応答

これまで[B]の立場で取り上げる創發電磁場・スピン流・マルチフェロイックス・トポロジ一感受性、等々の新概念による電磁応答（主には輸送現象）が従来からの「電磁気学」に収まる話なのか、あるいはそこからみ出した話なのか、外部の者にはあまり明らかではなかった。これについて永長の講演で示された定式化、すなわち「相対論的QEDを非相対論的に近似したラグランジアン（およびハミルトニアン）をゲージ原理の観点から書き換えると、スピン軌道相互作用やスピnzeeman項などの相対論的補正項がスピン流と結合する非可換ゲージ場を含む相互作用項として現われる。さらに固体中の電子に対してバンド構造、電子相関などにより低エネルギーのヒルベルト空間が多様体としての部分空間に制限される時には、その多様体の曲率を記述するゲージ場（創發電磁場）が現れる。」によって事情が明らかになったと思われる。

この書き換えは可逆的なもので、それを実行しても電荷・電流密度を電磁場の源とするマクスウェル方程式の形は変わらないので電磁応答の決め方としては従来と同じである。すなわち、[A]のシナリオ「相対論的補正項を含む (Pauli) ハミルトニアンによる物質の量子力学から求められた電荷・電流密度がマクスウェル方程式の源の項になる」と基本的に同等と言える。[B]の特徴的な点は自発分極・磁化を持つような複雑な物質系の電磁応答の記述に創發電磁場という概念を持ち込むことによって物理的イメージを伴う解析がし易いというところにある。あまり複雑ではない物質系に対しては Pauli ハミルトニアンを用いて（必要に応じて自発成分も含む）電流密度を計算すれば正しい結果が得られる。実際、石原・芦田の講演にあった[A]のタイプの議論「CuCl の光学応答ではスピン軌道相互作用を含むバンド構造を基にした閉じ込め励起子の非局所感受率が精密分光の結果を詳しく再現する」ことから分るように、スピン軌道相互作用があっても、創發電磁場を用いない解析が十分に機能する場合も少なくない。

[B]で重要視されているトポロジーに敏感な物性は、[A]において試料のサイズ・形状に敏感な電磁応答が現われることに対応している。今のところ問題にしている物理量が[B]では輸送係数、[A]では光学応答であるため詳しい比較材料が少ないが、マイクロ応答におけるサイズ・形状依存性とマクロな輸送係数のトポロジー依存性は根元ではつながっている。創發電磁場はヒルベルト空間の制限によって発現することから、必然的にその有用性はギャップや相関エネルギーよりも十分に低いエネルギーの（波長の長い）現象に限られる。逆に高いエネルギーの現象は、空間的には小さいマイクロなスケールで物事が決まるので、波動関数による記述が適切となる。両者はその意味で相補的である。

また、[A]でマイクロな形に導出されたキラル感受率は任意の多体系の固有値・固有関数で表されているので、基底状態における自発分極・磁化と合わせると、静的・動的なマルチ

フェロイクスの記述の基礎になると考えられる。この点を追求すればマルチフェロイックスのマイクロな解析も可能になると期待される。

上述の現状分析と将来展望は[A]の立場からのものであるが、永長によって与えられた[B]の立場からの現状分析と将来展望は以下の表の通りである。

現状分析	実時間・実空間	エネルギー・運動量
(A) マイクロ・ マクロ 階層電磁場	非局所電磁気学	フォトニック結晶
	励起子閉じ込め	X線動的回折理論
	非平衡電子・電磁場結合系	
	近接場光学      プラズモニクス (集団励起)	
	光のポーテックス      負の屈折率	
(B) 創発電磁場		ベリー位相
	マルチフェロイックス	異常ホール効果
	スキルミオン	スピホール効果
	モノポール	トポロジカル絶縁体
将来展望	実時間・実空間	エネルギー・運動量
(A) マイクロ・ マクロ 階層電磁場	創発電磁場の人工閉じ込め	
	非平衡創発電磁気学	
	多体効果	
(B) 創発電磁場	トポロジカル場の理論	トポロジカル フォトニック結晶
	光スキルミオン?	プラズモン結晶

研究会のプログラムは以下の通りである。（下線は世話人）

10月2日（木）

- 12:55-13:00 楠本 正一（山田科学振興財団理事長）「開会挨拶」  
13:00-13:10 張 紀久夫（阪大）「研究会趣旨説明」  
13:10-14:10 張 紀久夫（阪大）「電磁応答理論：マイクロからマクロへ」  
14:10-15:10 石原 一（阪府大）「光と物質の空間インタープレイ：  
セミマクロから分子スケールまで」  
15:25-16:15 芦田 昌明（阪大）「ナノからバルクへのクロスオーバー領域における  
光学応答の巨大化」  
16:15-17:15 信定 克幸（分子研）  
「光近接場領域における電子・電磁場ダイナミクス」  
17:15-18:15 萩行 正憲（阪大）「テラヘルツ領域におけるメタマテリアル」  
18:40- 懇親会

10月3日（金）

- 09:00-09:50 笹木 敬司（北大）「局在プラズモン角運動量制御による光ナノ成形」  
09:50-10:50 永長 直人（理研）「固体における創発電磁気学」  
10:50-11:50 十倉 好紀（理研）「磁性体の創発電磁応答」  
13:20-14:10 有馬 孝尚（東大）「メタホウ酸銅の方向二色性に対する強磁場効果」  
14:10-15:00 多々良 源（理研）「スピントロニクス現象の電磁気学的解釈」  
15:00-15:30 江沢 洋（学習院大名誉教授）「コメント」  
15:30-16:00 霜田 光一（東大名誉教授）「教科書に無い電磁気学」  
16:00-16:10 永長 直人（理研）「まとめ」

以上

世話人代表 張 紀久夫