

## 磁気研究よもやま話

今回は佐藤勝昭先生から、わが国がリードする「光と磁気」分野において、基礎から応用に至る幅広い領域でのご研究に取り組まれてこられた半生を綴っていただきました。ご研究のドライビングフォースが先生ご自身の「光と磁気」へのつきない興味と絶え間ない努力にある事は間違いないのですが、その大らかなお人柄が産・学・官を超えてたくさんの人々を巻き込みながら、現在もお、JST研究広報主監のお立場としてわが国の科学・技術の発展に寄与されておられます。本学会では、先生は画家としても知られていますが、インターネットでの「物性なんでもQ&A」サイトで、博識な先生からのアドバイスで救われた輩も少なくないのではないのでしょうか。そんな多彩な才能と優しきままざしをもっておられる先生の先駆的なご研究のエッセンスが、とても丁寧な言葉で語られています。是非ご覧ください。

## 光と磁気よもやま話

### Chatting about Magneto-optics

佐藤勝昭 科学技術振興機構

K. Sato, Japan Science and Technology Agency

#### 「光と磁気」事始め：NHK基礎研にて

私の「光と磁気」の旅は、NHK大阪放送局から世田谷のNHK基礎研究所物性研究室に転属になった1968年9月に始まります。寺西暎夫主任研究員のもと、私に与えられたテーマは「磁性半導体」の結晶成長と光物性研究でした。扱ったのは、 $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ <sup>1)</sup>やEuSなどの強磁性半導体、MnSや $\text{CuFeS}_2$ などの反強磁性半導体、 $\text{FeS}_2$ - $\text{CoS}_2$ などバイライト型磁性体などでした。私は、また、客員研究員としてきてくださっていた配位子場理論で有名な東京大学の菅野 暎教授のセミナー（毎週土曜日）にも参加させていただくことができました。このセミナー（通称菅野ゼミ）では、同じ物性研究室から対馬国郎博士、青柳 淳博士、鷲宮秀幸博士などそうそうたる物性研究者が参加しておられ、オルソクロマイトにおける励起子のダビドフ分裂、フォトンエコー、光誘起磁気相転移など、広い意味での磁気光学の先端的な話題が議論されました。当時のNHK基礎研では、こんな基礎的な学術研究が許されていたのは驚きです。このゼミには、外部からもたくさんの研究者が折に触れ参加しておられました。電気通信大学から権平健一郎教授、神原武志助教、東京工業大学から田邊行人教授、物性研究所から守谷 亨教授、里子允敏博士（後に日本大学教授）、京都大学理学部から博士研究員として越塚直己博士（後に産業技術総合研究所）、上坂保太郎博士（後に日本大学教授）などが、光を用いて磁性を理解しようという研究を議論しました。

私は、大学では工学部電気系の学科の材料系の研究室で強誘電体の研究をしていました。理学部の講義を受講して量子力学や固体物理の一応の基礎知識は学んでいましたが、磁性と量子力学の術語が飛び交う菅野ゼミに初めて参

加したときは、ちんぷんかんぷんでした。ついていくために、背伸びしてずいぶん勉強しました。1970年頃、反強磁性体 $\text{CuFeS}_2$ の電子構造と磁性の関係を考える基礎として、カルコバイライト系半導体 $\text{CuAlS}_2$ の単結晶に添加された微量のFeのゼーマンスペクトルを測定しましたが、これを解析するために、配位子場理論の手ほどきを受け、群論に基づいて、クレブシュゴルダン係数、ウィグナー係数などを使ってスペクトルを解析することもできるようになりました。この研究成果は物理学会のJournalに投稿することができました<sup>2)</sup>。

#### 偏光変調分光との出会い

私は、磁性半導体 $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ の電子構造解明へのてがかりを光学測定に求めました。しかし、透過スペクトルではバンドギャップ内の状態しかわかりません。通常の反射スペクトルにはバンドギャップ付近の構造が現れないので、何らかの変調分光が有効ではないかと考えていました。おりしも、オーストラリア国立大学のJ. Ferguson博士の講演を聴く機会があり、光弾性変調器による偏光変調を使えば $\text{KZnF}_3$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ の磁気円二色性(MCD)スペクトルを簡単に測定できるということを知りました。私は、さっそく光弾性変調器を使って吸収端付近の微細構造のMCDスペクトルを測定して電子構造を調べたいと寺西主任研究員にお願いしました。この物質のキュリー温度は129.5 Kにありクライオスタットを使った低温での測定が必要です。また、フッ化物と違って透明ではないので、反射のMCD(RMCD)を測定する必要がありました。そこで、超伝導磁石のボアに試料を置き、磁界を試料表面に垂直に印加し、垂直入射に近い配置で反射光を検出器に導かなければならないので、光学系の設計にかなりの工夫が必要でした。

こうして4.2 Kにおける磁界1 TでのRMCDスペクトルが得られ、吸収端付近(1.1 eV)に明瞭な微細構造があり、この構造が温度低下に伴って低エネルギーシフトをすることが明らかになりました。また、このスペクトルからクラーマース・クローニヒ(KK)変換によって磁気カー回転のスペクトルを求め、さらに文献の光学定数を用いて、誘電率テンソルの非対角成分の実数部、虚数部のスペクトルも得ることができました<sup>3)</sup>。

### 光磁気ディスク研究を通じて獲得した 「カー回転スペクトル測定法」

1980年当時、NHK基礎研では龍岡静夫部長・寺西英夫主任研究員・戸上雄司職員を中心に光磁気(MO)ディスクの研究開発が行われました<sup>4)</sup>。私は、MO媒体材料であるアモルファスGdCoの磁気光学スペクトルによる評価のお手伝いをしました。ビデオ映像が記録できるディスクができるまでに紆余曲折がありました。よい画像が得られなかった頃の磁気光学スペクトルはサンプルごとに異なっていました。ところが、録画できるようになってからは、どれを測定しても同じスペクトルが得られるようになりました。実用的な研究開発があって初めて信頼性のあるアモルファス磁性体の磁気光学データが得られたことは、基礎研究と応用研究の関係を考えるうえでのよい経験になりました。

この過程で、「KK変換によらず、簡便にカー回転角が測定できないか」という部長の問題提起を受け、MCD装置に検光子Aを追加し、光弾性変調器の変調周波数の2倍の周波数成分を検出しさえすれば、磁気旋光角が測定することに気づき、さっそく図1のような装置を作りました<sup>5)</sup>。この手法は「佐藤の方法」として引用され、世界中で使われるようになりました。この装置を用いて測定したアモルファスGdCo薄膜の磁気光学スペクトルにおいて磁気カー楕円率は、1.2 eV付近で符号を変えることが初めて明らかにされました<sup>6)</sup>。

必要は発明の母と言われますが、簡便にカー回転スペクトルを測定できないかという上司の問題提起がなければ、この技術は実現しなかったと思います。応用と基礎は不可

分であることを実感させられた経験です。

### 磁性/非磁性多層膜の磁気光学効果

東京農工大学に移って2年目に文科省科研費特定領域研究「新しい光磁気材料の開発と物性の研究」(代表：内山晋名大教授)(1986FY)に加えていただきました。

この領域の研究会で、Fe/Cu人工格子膜の磁気光学カースペクトルはFe単体のカースペクトルと異なりCuのプラズマ周波数付近でピークを示すという産総研の実験結果を知りました。研究室の学生に、仮想光学定数法でシミュレーションしてもらったところ、計算で求めた磁気カースペクトルは実験におけるFeとCuの層厚依存性をほぼ説明できました<sup>7)</sup>。

複素磁気カー回転角 $\theta_k + i\eta_k$ は、誘電率の非対角成分 $\epsilon_{xy}$ のみならず誘電率の対角成分 $\epsilon_{xx}$ を使って式(1)のように表されるということを実感することができました。

$$\theta_k + i\eta_k = \frac{\epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}(1 - \epsilon_{xx})}} \quad (1)$$

### 朝倉書店から「光と磁気」出版

私は以前から応用物理学会結晶工学分科会の幹事をしていました。1986年頃、そこで知り合った学習院大学の小川智哉先生から「朝倉書店から現代人の物理シリーズの単行本を出すので編集委員になってもらえないか」と声をかけていただきました。委員会で、私がシリーズ第1巻を執筆するよう言われ、「光と磁気」というタイトルで出版することになりました。執筆に際しては、NHK基礎研時代に四半期報告書に書かっていた文章と、科研費特定領域研究で学んだ磁気光学応用の知識などが役立ちました。ちょうどMOディスクの研究開発が盛んに行われていた時期だったので、MOが市場に出る前に出そうと大急ぎで書き上げ、1988年に刊行することができました<sup>8)</sup>。この本の初版は4,000部と、多数の読者に恵まれ、1997年には、本会から出版費をいただくことができました。磁気とは異分野の結晶工学にかかわっていたことが、この本を産むきっかけになったので、学際的に幅広くお付き合いするこ

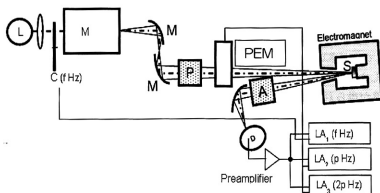


図1. MCD装置に検光子Aを追加することでカー回転スペクトルの測定が可能に。

との大切さを身にしみて感じました。

## 磁気光学の最先端を求めて

### 人工格子の磁気光学効果

1990年には文科省科研費重点領域研究「金属人工格子の制御と生成」(代表:藤森啓安東北大学教授)(1990FY~1992FY)に公募で加えていただき、1.2~5.9 eVまでの広帯域で磁気光学スペクトルの測定ができる装置を開発することができました。

短波長用の偏光子としてフッ化マグネシウム製のローションプリズム、短波長用の光源としてキセノンランプ、分光器としてはダブルモノクロ(回折格子のブレース波長200 nm)を用いました。光学系は保護膜としてフッ化マグネシウムをコートしたアルミ箱円鏡で構成しましたが、最初納入されたものはコーティング膜厚の最適化が行われておらず、反射率が低いため作り直してもらうなど、短波長ならではの苦勞もありました<sup>9)</sup>。

この装置を使ってPt/Coの人工格子の磁気光学スペクトルを測定しました。このスペクトルの解析から、界面にPtCo合金層が形成されていることが明らかになりました<sup>10)</sup>。

その後も、この装置を用いて、PtMnSb、MnSb、Fe/Au人工格子など多くの磁性体の磁気光学スペクトルの測定が行われました。

### 有機金属分解(MOD)法による磁性ガーネット膜

MOD法で作成された磁性ガーネット薄膜は、現在では磁気光学インディケータ膜<sup>11)</sup>やスピントロニクス用磁性膜として普通に使われるようになっていますが、この手法は、農工大物理システム工学科の学生実験がなければ実現しなかったと思います。2001年のある日、佐藤研究室は、当時の学生実験担当から、磁性薄膜を担当するよう依頼を受けたのですが、簡単な装置で学生実験の時間内にできるという条件につき、どうするか迷っていました。その時、研究室の助手でビスマス系高温超伝導の専門家だった石橋隆幸博士(現、長岡技術科大教授)の発案で、高温超伝導の世界で使われているMOD法を磁性ガーネット膜に適用してみようということになりました(まさに異分野融合です)。

高純度化学(株)に相談したところ、「よい膜ができるかどうかかわからないが、MOD液を作ってみましょう」ということでMOD液を用意していただきました。これを4年生のN君の卒論テーマにしたところ、ガラス基板上に簡単に良質のガーネット薄膜が得られ、GGG基板上に作ったものは、ラザフォード背面反射法(RBS)で明確なチャネルリングを示す良質のエピ膜でした<sup>12)</sup>。学生実験では、1日目にスピントロニクス、焼成(650°C 2時間)、2日目(次週)磁気測定、磁気光学測定を課題にし、学生たちは楽しそうに実験していました。まさに「飄箏から駒」の開発経験でした。

最先端の磁気光学研究の一つとして、近接場磁気光学顕微鏡を開発し、Pt/CoのディスクにMO記録された磁区を100 nmの分解能で観測できました<sup>13)</sup>。また、Fe/Au人工格子の界面の磁性を非線形磁気光学効果によって観測し、新しい知見を得ることができました<sup>14)</sup>。これらの成果は著書「新しい磁気と光の科学」に反映することができました<sup>15)</sup>。また偏光変調法を用いた磁気光学顕微鏡の開発にも取り組み、コンビナトリアル法で作製した試料の磁気光学評価に貢献できました<sup>16)</sup>。最近、トポロジカル絶縁体においてスピンと運動量が直交して強く結合する現象が知られており、巨大な磁気光学効果の出現が期待されています。「光と磁気」から「光とスピン」へこれからは目が離せません。

### 終わりにあたって

本会において、光マグネティクス専門研究会(1990FY~1994FY)、光スピニクス専門研究会(1995FY~2002FY)の世話人、光磁気記録国際シンポジウム(MORIS)の実行委員などを経験することができました。会合を通じて、磁気光学のフロントランナーたちの研究発表に接することができたのは幸いです。お世話になった本会会員の皆様には深く感謝します。

### References

- 1) K. Sato and T. Teranishi: Photoconductivity and Electronic Structures of CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **29**, 523 (1970).
- 2) K. Sato and T. Teranishi: Infrared Luminescence of Fe<sup>3+</sup> in CuGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> and CuAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub>. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **37**, 415-422 (1974).
- 3) K. Sato: Reflectance Magneto-Circular Dichroism of CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **43**, 719-720 (1977).
- 4) Y. Togami, K. Kobayashi, M. Kajiwara, K. Sato, and T. Teranishi: Amorphous Thin Film Disk for Magneto-Optical Memory. *SPIE—Optical Disk Technology*, **329**, 208-214 (1982).
- 5) K. Sato: Measurement of Magneto-Optical Kerr Effect Using Piezo-Birefringent Modulator. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 2403-2409 (1981).
- 6) K. Sato and Y. Togami: Magneto-Optical Spectra of RF-Sputtered Amorphous GdCo and GdFe Films. *Proc. Int. Colloq. Magn. Films and Surfaces*, Yokohama, 1982, *J. Magn. Magn. Mat.*, **35**, 101-102 (1983).
- 7) K. Sato, H. Kida, and T. Katayama: Interpretation of Magneto-Optical and Reflectivity Spectra in Compositionally Modulated Multilayered Fe/Cu Films. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L237-L239 (1988).
- 8) 佐藤勝昭: 光と磁気(朝倉書店1988年4月刊) A5判全196頁(2001年11月改訂版刊行)
- 9) K. Sato, H. Hongu, H. Ikekame, Y. Tosaka, M. Watanabe, K. Takanashi, and H. Fujimori: Magneto-optical Spectrometer for 1.2-5.9 eV Region and Its Application to FePt/Pt Multilayers. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, 989-995

- (1993).
- 10) K. Sato, H. Hongu, H. Ikekame, J. Watanabe, K. Tsuzuki-yama, Y. Togami, M. Fujisawa, and T. Fukazawa: Magneto-optical Spectra in Pt/Co and Pt/Fe Multilayers. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 3603–3607 (1992).
  - 11) T. Ishibashi, T. Kawata, T. H. Johansen, J. He, N. Harada, and K. Sato: Magneto-optical Indicator Garnet Films Grown by Metal-organic Decomposition Method. *J. Magn. Soc. Jpn.*, **32**, 150–158 (2008).
  - 12) T. Ishibashi, A. Mizusawa, M. Nagai, S. Shimizu, K. Sato, N. Togashi, T. Mogi, M. Houchido, H. Sano, and K. Kuriyama: Characterization of epitaxial  $(\text{Y,Bi})_2(\text{Fe,Ga})_4\text{O}_{12}$  thin films grown by metal organic decomposition method. *J. Appl. Phys.*, **97**, 013516 (4 pages) (2005).
  - 13) K. Sato, T. Ishibashi, T. Yoshida, J. Yamamoto, A. Iijima, Y. Mitsuoka, and K. Nakajima: Observation of Recorded Marks of MO Disk by Scanning Near-Field Magneto-Optical Microscope. *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(S1), 201–204 (1999).
  - 14) K. Sato, A. Kodama, M. Miyamoto, A.V. Petukhov, K. Takahashi, S. Mitani, H. Fujimori, A. Kirilyuk, and Th. Rasing: Anisotropic Magnetisation-Induced Second Harmonic in Fe/Au Superlattices. *Phys. Rev. B*, **64**, 184427 (10 pages) (2001).
  - 15) 菅野 暁・小島憲道・佐藤勝昭・対馬国太郎「新しい磁気と光の科学」(講談社サイエンティフィック2001年4月) 第6

章、第8章分担執筆

- 16) X. R. Zhao, W.-Q. Lu, S. Okazaki, Y. Konishi, K. Akahane, T. Ishibashi, K. Sato, Y. Matsumoto, H. Koinuma, and T. Hasegawa: High-throughput characterization of  $\text{Bi}_2\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{12}$  combinatorial thin films by magneto-optical imaging technique. *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 2628–2633 (2006).

(2017年6月12日受理)



佐藤勝昭 さとう かつあき

1966年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。1966～1984年 日本放送協会(1968～1984年 放送科学基礎研究所)。1984～2007年 東京農工大学(1984年 工学部助教授、1989年 同教授、2005年 副学長)。2007年～現在 科学技術振興機構(2007～2013年 さきがけ次世代デバイス研究総括。2008年～現在 研究広報主監。2010年～現在 研究開発戦略センターフェロー)

専門 磁気光物性、半導体デバイス、結晶工学  
 著書 光と磁気、応用電子物性工学、応用物性、半導体物性なんでもQ&A、理科力をきたえるQ&A、太陽電池のキホン ほか