

共同利用研究ハイライト

5分間にかかる世界初の太陽観測： 放射光は理想的な光源

成影 典之 国立天文台 SOLAR-C準備室 助教

1. はじめに

我々は観測ロケットを用いて世界初の太陽観測にチャレンジしていますが、観測ロケット実験は僅か5分間強の観測時間のために全力投球する実験です。観測装置の開発には信頼できる良質な光源が必要で、それを提供して下さっているのが分子科学研究所のUVSORです。

太陽は、様々な状態のプラズマと磁場で満ちている、ダイナミックな世界です。最も温度の低い太陽表面（光球）でも6000度あり、コロナでは100万度を越えます。そして、太陽フレアと呼ばれる爆発現象においては、温度は1000万度を越え、粒子は光速近くまで加速されます。我々はこの様な太陽の活動を理解するために、またプラズマの物理を理解するために、太陽から放たれる光（電波～X線・ガンマ線）を精密に測定しています。

観測する波長帯によっては（真空紫外線～X線）、地球大気によって吸収されてしまうため、宇宙からの観測が必須となります。理想的なのは衛星を用いた定常的な観測ですが、新しい観測技術や観測手法を試すには、衛星より安価で簡便に宇宙にアクセスする機会を提供してくれる観測ロケットを用います。観測ロケットは衛星に準じる高度300km程度まで到達できますが、観測時間は5分間～十数分間に限られます。

2. 観測ロケット実験CLASP

(Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter)

2007年頃、国立天文台の常田教授(当

時；現宇宙科学研究所所長）から一通のメールが研究室のメンバーに流れました。太陽の大気層である彩層・遷移層の磁場を直接測定するための観測ロケット実験をやろうというメールです。文末の「これをやる人はいませんか？」に反応した若手が集まってこのロケット実験の検討が始まりました。このロケット実験の目標は、次の4つのステップからなります。1. ライマン α 輝線(波長122 nm)の高精度偏光分光観測装置(0.1%の偏光測定精度)の実現、2. 太陽ライマン α 輝線の直線偏光の検出(「放射場の非等方性によって生じる散乱偏光」と「磁場によるハンレ効果によって生じた偏光」の足し合わせ)、3. ハンレ効果によって生じた偏光の検出、4. ハンレ効果による偏光から磁場情報を獲得する。これらはどれも、まだ誰も達成したことのない世界初の試みで

した^[1]。

真空紫外線であるライマン α 線は、その波長特性から限られた材質しか透過せず、酸素を含む多くの物質に簡単に吸収されてしまいます。そこで我々は、0.1%の偏光測定精度を達成するために、互いに直行する2つの直線偏光を同時に計測でき、必要最低限の数の反射型光学素子(波長板以外)しか使わない新機軸の光学系を考案しました^[2]。この光学系を実現するための装置開発においては、強い強度、安定した強度、高い波長純度、高い偏光度を持つライマン α 線光源が求められます。これらの条件を満たす光源として、分子科学研究所・極端紫外光研究施設(UVSOR)のBL-7Bは最適でした。我々は延べ40週以上のマシンタイムを使わせて頂き、試作した波長板^[3]やコーティング^[4]など、CLASPに用いる全ての光

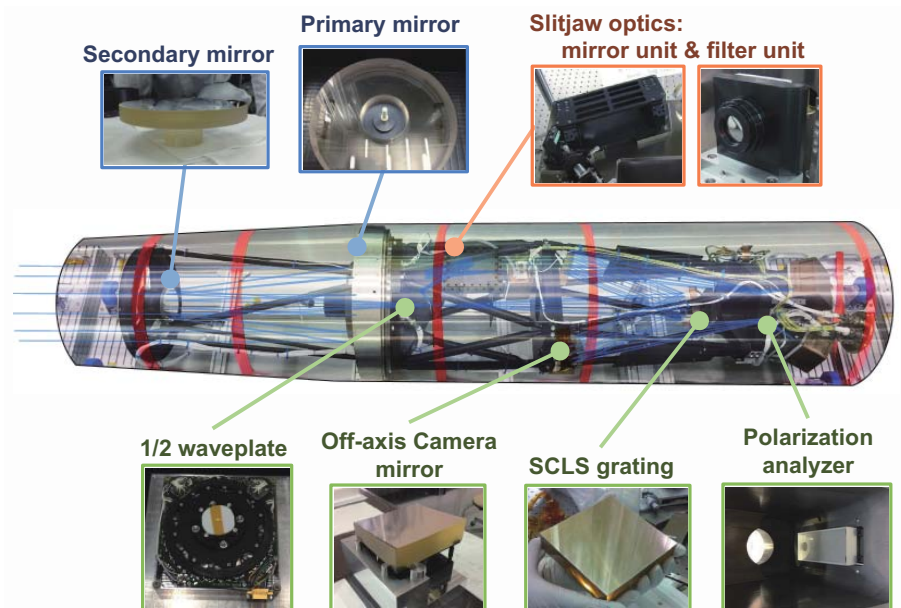


図1 観測ロケットCLASPの観測装置部。左側が望遠鏡で右側が偏光分光装置。
(©NAOJ, ISAS/JAXA, NASA/MSFC, IAS)

学素子をBL-7Bで評価しました。こうして開発したCLASPは、0.1%の偏光測定精度を達成する装置として完成しました(図1:[5][6])。

2015年9月3日、CLASPは米国ニューメキシコ州にあるホワイトサンズのロケット実験場で打ち上げられました。打ち上げ後約100秒が経過した時、ライマン α 線の太陽像がディスプレイに映し出されました。とても感激しましたが、この段階ではまだ目的の精度の偏光データが取れたかは分かりません。5分間の観測データを全て使って解析して初めて結果が分かります。射場からホテルに戻る車の中で早速データの解析を行い、結果が出ると車を路肩に止めて皆でデータを確認しました。後続車に乗っていた米国のメンバーも車を止め、道端でのデータ鑑賞会となりました。このデータから、CLASPの段階的目標であるステップ2(世界初となる0.1%の精度でのライマン α 線直線偏光の検出;図2:[7])とステップ3(世界初となる紫外線域でのハンレ効果の検

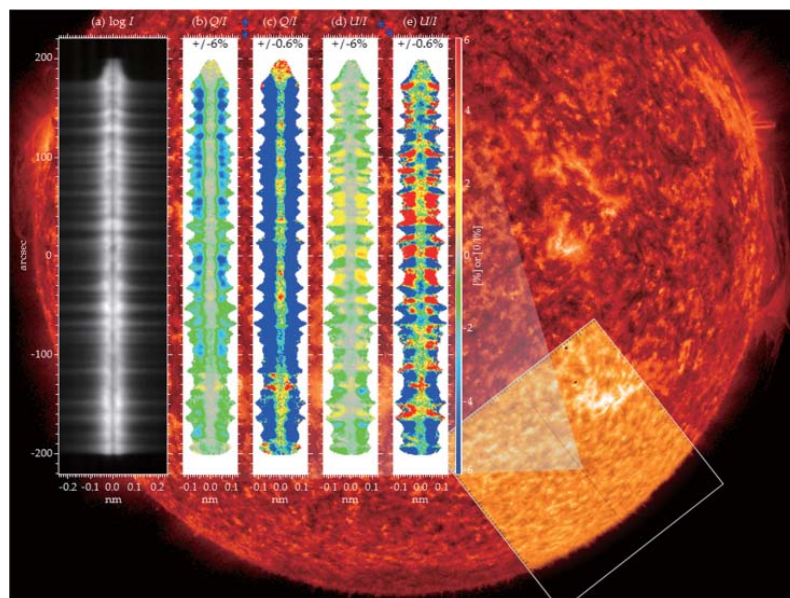


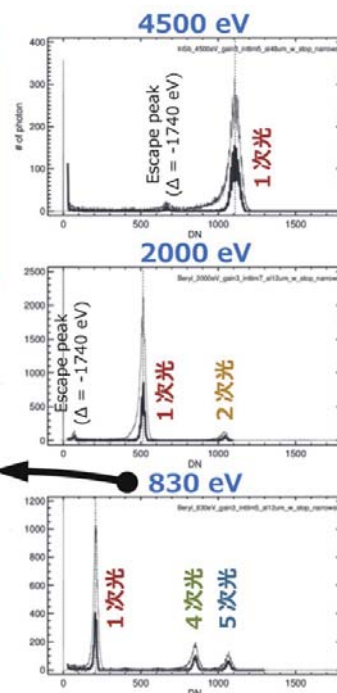
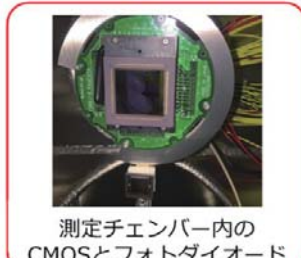
図2 CLASP が世界で初めて測定した0.1% の高精度直線偏光データ。
(©NAOJ, JAXA, NASA/MSFC. 背景太陽像: NASA/SDO.)

出:[8])に成功しました。現在、ステップ4(磁場情報の獲得)を達成するために、損傷なく回収されたCLASPの観測装置を改良し、観測波長をマグネシウム線(280 nm:ゼーマン効果とハンレ効果の両方に感度があるライン)へと変更する作業と開発を行っています[9]。もちろん、この開発にもBL-7Bを使わ

せて頂いています。CLASP2の打ち上げは、2019年の予定です。

3. 観測ロケット実験FOXSI-3 (Focusing Optics X-ray Solar Imager)

一方、我々は世界初となる太陽軟X線の光子計測による2次元撮像分光観



2次元撮像分光の一例: 分光器を830 eVにセットした時のビーム強度分布

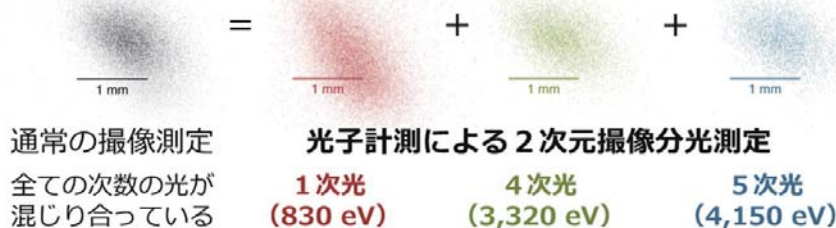


図3 BL-2Aを用いた裏面照射型CMOSセンサーを用いた高速X線カメラの評価。830 eVから4500 eVまでの感度を評価した。830 eVのビーム照射では、本カメラの2次元撮像分光能力が確認できた(1次光、4次光、5次光を分離できた)。

測の実現も目指しています。光子計測とは、入射したX線のエネルギーに比例する信号を出力するピクセル化された検出器を用い、X線光子が1ピクセルに複数個入射するよりも十分に短い露光時間で撮像することで、X線光子のもつエネルギー情報を、空間情報、時間情報とともに記録するというものです。高エネルギー天体ではCCD検出器などを用いて古くから行われてきている観測手法ですが、太陽の観測ではまだ実現できていません。なぜなら、CCDは露光と読み出しに1秒程度を要するので、十分な数のX線光子をサンプリングし、スペクトルを作るには数時間～数十時間が必要となります。一方、太陽フレアの寿命は数十分間～数時間で、特にエネルギーの解放が顕著なフレア初期の現象は数分間程度で終わってしまいます。つまり、CCDでは太陽フレアの光子計測は出来ないのです。このような状況を打開するために、我々のグループは、高速連続撮像が可能なCMOS技術に着目してきました^[10]。そして、ついにX線に感度がある裏面照射型CMOS検出器を用いた高速度カメラの開発に成功しました^[11]。

撮像速度は1秒間に1,000回を達成でき、見積りでは太陽フレアのスペクトルを約10秒毎に取得することが可能です。この原稿を執筆している今日現在、UVSORに共同利用で訪問させて頂いており、軟X線用ビームライン BL-2Aを使ってこのカメラのエネルギー感度の評価を行っています（図3）。我々はこのカメラを2018年夏に打ち上げ予定の日米国際共同の観測ロケット実験FOXSI-3に搭載し、世界初の太陽軟X線2次元撮像分光観測を実施します。このロケット実験の結果は、また別の機会にご紹介できればと思います。

4. 最後に

BL-7Bの利用では田中先生、蓮本さん、木村先生（大阪大学）、福井先生（福井大学）に、BL-2Aでは繁政先生、近藤さん、中村さんに大変お世話になっております。いつもありがとうございます。また、我々が開発しているCMOS検出器を用いた軟X線高速度カメラの放射光での活用については、加藤先生、大東先生との議論が始まったところです。



なるかげ・のりゆき

2006年、京都大学大学院理学研究科博士課程修了。2006年～2016年まで、JAXA宇宙科学研究所と国立天文台でプロジェクト研究員を務める。2016年7月から現職。日米欧の国際共同観測ロケット実験CLASPではInstrument Scientist（観測装置の統括）を務め、日米の国際共同観測ロケット実験FOXSI-3では軟X線装置のPrincipal Investigator (PI; 研究代表者)を務める。また、磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速過程を明らかにすることを目指した分野横断型衛星計画PhoENiXの主査も務める。

参考文献

- [1] Kano et al., Proceedings of the SPIE, 8443, article id. 84434F (2012)
- [2] Narukage et al., Applied Optics, 54, 2080 (2014)
- [3] shikawa et al., Applied Optics, 52, 8205 (2013)
- [4] Narukage et al., Solar Physics, 292, article id.40 (2017)
- [5] Giono et al., Solar Physics, 291, pp.3831 (2016)
- [6] Giono et al., Solar Physics, 292, article id.57 (2017)
- [7] Kano et al., Astrophysical Journal Letters, 839, article id. L10 (2017)
- [8] Ishikawa et al., Astrophysical Journal, 841, article id. 31 (2017)
- [9] Narukage et al., Proceedings of the SPIE, 9905, id. 990508 (2016)
- [10] Narukage et al., eprint arXiv: 1706.04536 (2017)
- [11] Ishikawa et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (in press), eprint arXiv: 1711.04372 (2017)

共同利用研究ハイライト

第57回分子科学若手の会 夏の学校 講義内容 検討会および開催支援の報告

沖野 隼之介 学習院大学大学院自然科学研究科 博士後期課程2年

1. はじめに

「分子科学若手の会」は、分子科学に関心を持つ若手研究者の交流の機会を設けることで、研究活動の推進と発展に資することを目的として活動する団体である。弊会は、大学院生を主体とする若手自身によって運営されており、毎年異なる幹事陣により57年続いている。弊会が保有する資料によると、分子研の設立時に多くの若手が関心を持っていたことがわかり、分子研との深い繋がりがうかがえる。

弊会では年に一度、『分子科学若手の会 夏の学校』を開催している。夏の学校は、若手研究者・学生が集まり勉強・議論する場を提供する、合宿形式の勉強会である。第一回の当初より、最先端の研究課題について時間をかけて取り組むことを重視した、集中講義・議論の形式をとっている。

2017年度は、分子科学研究所の平成29年度共同利用研究（前期）「若手研究会等」の支援のもと「第57回分子科学若手の会夏の学校 講義内容検討会および開催支援」を行い、そこでの議論の成果を反映して「第57回分子科学若手の会夏の学校」を分子科学研究所（愛知県岡崎市）にて開催した。以下、この2件の活動について報告する。

2. 第57回分子科学若手の会夏の学校 講義内容検討会

6月18日に分子科学研究所にて、講義内容検討会を開催した。事前に、5名の研究者に、夏の学校および講義内容検討会における講義（分科会）を依頼し、それぞれにテキストを作成いただいた。

この日は5名の講師と弊会役員により、分科会の内容とテキストの詳細について検討・議論を行った。同日、弊会の役員会議を開催し、夏の学校における各種企画・運営の打ち合わせ等を行った。

3. 第57回分子科学若手の会夏の学校

8月21日-26日に分子科学研究所および岡崎コンファレンスセンターにて、第57回分子科学若手の会夏の学校を開催した。2013年以来二度目となる分子科学研究所での開催となり、分子科学の若手にとって一層意義深い場となったことを強調しておく。分子研・古谷祐詞准教授のご尽力もあり、分子研からは講師含め新たに4名の参加者があった。この場にて、分子科学研究所 共同利用研究『若手研究会等』による支援をいただいて印刷したテキストを、講義内容検討会の成果報告として配布した。講師を除く参加者は74名であった。

【分科会・全体講演】

参加者は以下の5つの分科会に分かれ、それぞれ約16時間の集中講義を受けた。また各先生にはご自身が取り組まれている研究について、全参加者の前でご講演いただいた。5つの分科会を下記に記す。

1. 牛山 浩 准教授（東京大学 工学系研

究科）

「量子ダイナミクスの基礎と化学反応への応用」

2. 岸根 順一郎 教授（放送大学 教養学部）

「分子科学者のための磁性理論入門」

3. 井上 圭一 准教授（名古屋工業大学 工学研究科）

「光受容タンパク質の分子科学研究」

4. 本林 健太 助教（名古屋工業大学 物理工学科）

「イオン液体の界面科学：その場観測と表面科学的視点」

5. 石村 和也 特任研究員（分子科学研究所）

「大規模並列量子化学計算」

【ポスターセッション】

参加者によるポスターセッションでは、希望者がそれぞれ2時間強の発表を行った。全体で51件の発表があり、後に続く懇親会の時間も気にせず、闊達に議論する様子が多く見られた。若手のみで研究について好きなだけ語れる場を用意するのは「夏の学校」の意義のひとつである。若手同士の自発的な科学議論は、最終日の懇親会まであちらこちらで途切れることがなかった。

その他、「第57回分子科学若手の会夏の学校」Webサイト上にも情報を掲載している。興味のある向きはご参照いただきたい。



分科会の様子（第二分科会）。



分科会の様子（第三分科会）。

4. さいごに

本項では「第57回分子科学若手の会 夏の学校 講義内容検討会および開催支援」および「第57回分子科学若手の会 夏の学校」の活動報告を行った。

2017年現在、多くの学術系イベントはあるものの「5時間以上の集中講義・議論」の方式はほとんどない。若手で顔を突き合わせて、時間をかけて内容を掘り下げ議論するこの場は、学会主催のシンポジウムや研究会の延長では

ない、趣向に富んだイベントだと言えることができる。このようなイベントが成り立つ背景には、分子科学研究所 共同研究「若手研究会等」による支援とテキスト印刷への補助によるところが大変大きい。改めて若手の会一同、感謝に堪えない。特に弊社テキストは研究者からの問い合わせも多く、好評を博しているもののひとつである。

2018年度も、新しい幹事（代表：加藤史明 京都大学大学院理学研究科博士

後期課程1年）のもと、夏の学校を企画準備中である。この一年を振り返ってみると、分子科学研究所並びに諸先生方のご理解とご協力が無ければ、この企画の成功を想像することも困難であった。資金調達手段に限りのある大学院生に『分子科学に関連した各種活動』に対して支援するという分子研の当該制度は、大変魅力的かつ意義深いものである。是非今後とも、弊会を含めた若手への寛大なるご支援を継続いただきたい。



集合写真 岡崎コンファレンスセンターにて。



おきの・しゅんのすけ

2016年学習院大学大学院自然科学研究科化学専攻修士課程修了。2016年4月より同専攻博士後期課程在学中。専門は液相の可視・近赤外領域のフェムト秒時間分解分光。研究テーマは溶液中における、パイ電子などの比較的非局在化した電子のダイナミクスについて。凝縮相における粒子間の相互作用に興味があり、現在は電子が溶媒和される際のダイナミクスについて（いわゆる溶媒和電子）の研究を進めている。

共同利用研究ハイライト

分子科学研究所若手研究会： 第15回ESR夏の学校の開催報告

江間 文俊 神戸大学大学院理学研究科化学専攻 博士後期課程2年

1. はじめに

「電子スピンサイエンス学会若手の会」は、電子スピンサイエンスに携わる若手相互の交流を積極的に推し進めることで視野を広げると共に、様々な分野・学術領域に対応できる見識を養うことを目的とした団体です。本若手の会の活動を通して、電子スピンサイエンス研究の発展と裾野の拡大に貢献していきたいと考えています。そこで毎年、ESR夏の学校、そして本年度から電子スピンサイエンス

若手研究会を開催しています (<https://sestwakate.jimdo.com>)。本若手の会は、満32歳未満の学生会員124名と博士研究員などで構成されています（2017年10月23日現在）。運営は、江間文俊（神戸大学大学院理学研究科博士後期課程2年）、岡本翔（神戸大学大学院理学研究科博士後期課程2年）、池谷皐（東京大学大学院総合文化研究科博士後期課程1年）の3名で行っています。また、各主催行事の実行委員会や事務局を兼ねており、

運営協力者を募りながら活動しています。

2. ESR夏の学校

ESR夏の学校は、ESRに関する勉強をじっくり行くとともに、参加者同士のつながりを作ることを目的として、毎年7-8月頃に2泊3日の合宿形式で開校しています。日中は3名の講師による各3時間ずつの講義を受講し、夜は参加者の自己紹介を兼ねた研究発表および討論会を行っています。講義テキ

ストは、各講師に作成していただいた夏の学校用オリジナルテキスト原稿を製本して使用しています。

3. 第15回ESR夏の学校

本年度は、2017年7月7日（金）から9日（日）の日程で、自然科学研究機構、岡崎コンファレンスセンターで開催いたしました。参加者の内訳と人数は、7大学10研究室の学生20名と企業や大学教職員5名の計25名でした。今回は、太田仁先生（神戸大学分フォトサイエンス研究センター、ESR夏の学校校長）、原英之先生（ブルカー・バイオスピン株式会社）、三宅祐輔先生（京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科）の3名の先生方に、各先生の専門分野に関係した講義を行っていただきました。運営には、中村敏和先生、浅田瑞枝先生（中村グループ助教）、山崎由実様（中村グループ）にご協力いただきました。

太田先生の講義では、「電子スピン共鳴（ESR）序論 Introduction to Electron Spin resonance (ESR) Spectroscopy」という題目で、ESR法の歴史から始まり、続いて、赤外分光法や可視紫外分光法とは異なり、電磁波は一定で外部磁場を掃引するといった分光法としての特徴をお話いただきました。ESRの基礎から応用への橋渡しになったと思います。原先生の講義では、「電子2重共鳴法によるタンパク間距離測定—パル

ス ESR 法の基礎から ELDOR/DEER 法の応用測定まで—」という題目で、パルス ESR 法の原理や緩和現象、パルス ESR 装置の特徴から始まり、タンパク質試料を例に、パルス ESR 法やパルス電子-電子2重共鳴法（ELDOR / DEER）を利用した距離測定について教えていただきました。三宅先生の講義では、「溶液中ラジカルの拡散運動」という題目で、溶液試料で観測される ESR スペクトルの特徴や溶液中ラジカルの拡散についてお話いただきました。ESR 法だけでなく、NMR 法などの他の分光法と比較することで理解が深まったと思います。また、分子科学研究所機器センターの藤原基靖様に、共同利用可能な ESR 装置の紹介と見学案内をしていただいたので、装置に対する理解がより一層深まりました。

1日目と2日目の夕食後には、参加者の自己紹介を兼ねた研究紹介を行いました。電子スピンサイエンスに関わる様々な分野の研究発表と質疑応答が活発に行われ、最先端の研究内容に対する相互理解が深まったようでした。3日目午前には、3名の講師による講義内容に対する質問の時間を設定しました。講師の先生方には、講義中に非常に丁寧な説明をしていただきましたが、すべてを講義時間内で理解することは難しかったと思います。しかし、多くの参加者から質問が出て、先生方もホワイトボードを利用しな



講義の様子。

が丁寧に回答していただいたので、参加者の理解も促進され、非常に有意義な時間となりました。

4. 電子スピンサイエンス学会若手の会の今後の展望

今回、分子科学研究所の共同利用である「若手研究会等」*に採択していただいたおかげで、例年より多くの方々に ESR 夏の学校へご参加いただくことができました。しかし、他分野の学会や若手研究者との交流の機会を増やすためには、本若手の会の存在をより幅広い分野の方々知っていただく必要があると感じました。そこで、もし可能でございましたら、貴研究所の ESR 装置が共同利用可能であることを本若手の会で紹介させていただくとともに、本学会および本学会の若手の会の存在の周知にご協力いただけますと幸いです。今後ともご理解とご支援のほどよろしくお願い申し上げます。

*平成30年度より「若手研究活動支援」と名称が変更されます。



全体集合写真。



えま・ふみとし

2014年3月に静岡大学理学部化学科を卒業、2016年3月に神戸大学大学院理学研究科化学専攻博士課程前期課程を修了し、現在は神戸大学大学院理学研究科化学専攻博士課程後期課程に在学中です。主に時間分解電子スピン共鳴法を用いて、二分子膜界面における生成ラジカルの挙動やメビウス構造の環拡張型ポルフィリンの三重項電子状態、有機室温リン光発光結晶の発光機構と電子構造を調べています。