

令和 5 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20962

研究課題名（和文）破壊発光メカニズム解明へのプラズマ分光診断からの挑戦

研究課題名（英文）Challenge to triboluminescence mechanism from plasma spectroscopy

研究代表者

蓮尾 昌裕（Masahiro, Hasuo）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：40218433

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：雰囲気ガス可制御試料破壊装置と高スループットカメラレンズエシエル分光器を製作した。水素ガス中で氷砂糖を破壊し、その際に放出される発光を同時観測波長範囲400～950 nm、観測空間範囲0.2 mm×0.1 mmで高波長分解計測した。一度の破壊でのバルマーアルファ発光線とバルマーベータ発光線のスペクトル同時計測に成功し、それらの解析から破壊発光を生成するプラズマの電子密度、ガス密度を推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体を勢い良く破壊すると破壊発光や摩擦発光と呼ばれる発光が生じ、その生成メカニズムとして固体破壊時の応力により帯電した亀裂面間の放電が予想されている。しかし、どのようなプラズマが生じるのかなど、その詳細な挙動は明らかではない。本研究では、破壊発光に対してプラズマ分光診断の手法を適用することにより、破壊発光を生成するプラズマの電子密度、ガス密度の推定可能性を実証した。

研究成果の概要（英文）：We have constructed a sample destruction chamber, in which gas pressure can be controlled, and a high-throughput camera lens Echelle spectrometer. We destroyed a sucrose crystal in a hydrogen gas and measured its high resolution triboluminescence spectrum over a wavelength range of 400-950 nm with a observation spatial range of 0.2 mm × 0.1 mm. We successfully measured the Balmer alpha and beta emission line spectra simultaneously for a single destruction, and estimated the electron and gas densities of the plasma, which causes the triboluminescence, from the analysis of these spectra.

研究分野：プラズマ分光

キーワード：破壊発光 摩擦発光 プラズマ分光診断 水素原子発光 カメラレンズエシエル分光器 電子密度 ガス密度

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

固体を勢い良く破壊すると破壊発光や摩擦発光と呼ばれる発光が起こることが知られている。身近な例として、氷砂糖を暗い部屋の中で破壊すると、青白い発光がかろうじて肉眼でも確認される。破壊発光の様子を図1に示す。氷砂糖の破壊発光のスペクトルは、氷砂糖に窒素が含まれていないのにも関わらず、空気放電中の窒素分子発光スペクトルと類似していることから、この発光は氷砂糖破壊時に空気中で起きる微小な放電によるものだと考えられている。

ランジュバンが予想した破壊発光のメカニズムを図2に示す[1]。固体が破壊される時、応力により帯電した亀裂が形成される。この亀裂面間に生成する電位により放電が起こる。しかし、どのようなプラズマが生じるのかなど、その詳細な挙動は明らかにされていない。

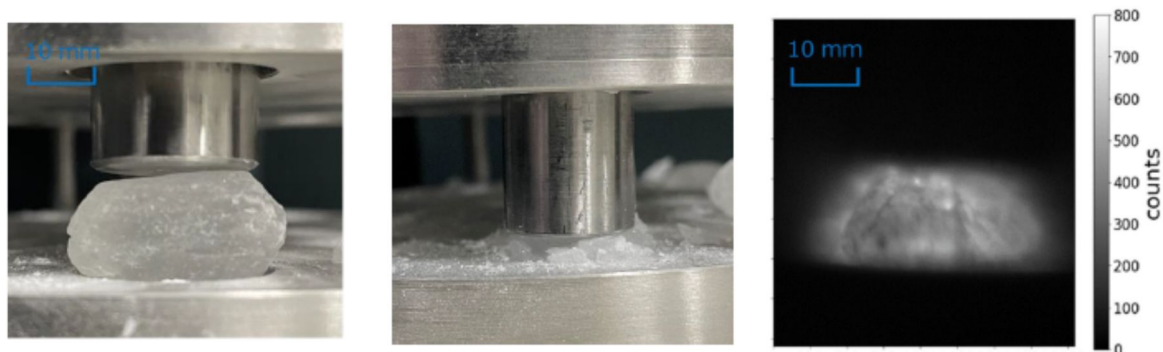


図1 本研究での氷砂糖の破壊の様子（左図：破壊前、中図：破壊後）と CMOS カメラで撮影した破壊発光の実画像（右図）

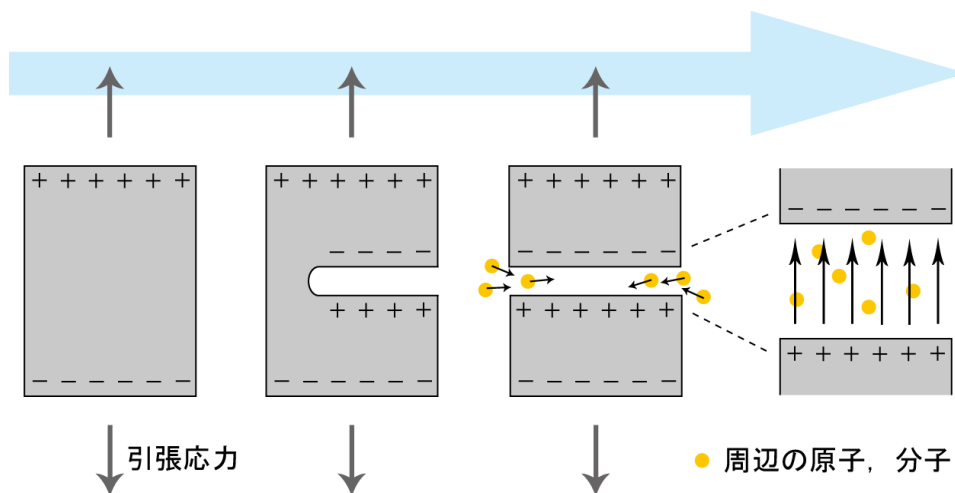


図2 Langevin が予想した結晶の破壊に伴い発光が起こるメカニズム[1]
上図左図から破壊の進展を示し、右図は亀裂面間での放電の様子を示す。

プラズマの中の原子やイオンは発光する。このような発光を分光計測し、その解析によりプラズマの素性を明らかにするプラズマ分光診断法は、非接触な手法であるため、亀裂面間に生成するような微小なプラズマに対しても有効な計測手段となる得る特徴がある。

本研究では、量子力学的効果によって生じる発光スペクトル形状の変化を精密に測定することで、プラズマの電子密度、ガス密度を推定する。電子密度とガス密度はそれぞれシュタルク広がりと呼ぶと圧力広がりと呼ばれるスペクトルのローレンツ幅から評価できるが、ローレンツ幅にはそれらの両方の寄与が含まれているので個別の評価はできない。そのため、我々は水素原子のガス密度に敏感なバルマー 発光線（波長 656 nm）と電子密度に敏感なバルマー 発光線（波長 486 nm）を計測し[2,3]、それらのスペクトルにおけるシュタルク広がりと呼ぶと圧力広がりと呼ぶ寄与を分離することで電子密度とガス密度を求める戦略を立案した。しかし、従来の高分解能分光器では同時観測波長域が狭いため、バルマー 発光線、バルマー 発光線をそれぞれ氷砂糖の別々の破壊で計測せざるを得ず、破壊条件が変わってしまうという問題点があった。さらに、図1右図に見られるように破壊発光は空間的に様でないため、大きな領域で観測すると空間平均した情報となってしまう問題点もあった。

2. 研究の目的

本研究では、先に述べた問題点を克服するため、水素ガス雰囲気中の破壊発光の際に放出されるバルマー 発光線とバルマー 発光線を同時に高分解・高感度で計測する分光システムを開発する。図2に示すような放電現象が生じているとの仮説のもと、それらのスペクトルにおけるシュタルク広がりや圧力広がりやの寄与を分離することで電子密度とガス密度を推定し、破壊発光を生じるプラズマおよびその生成メカニズムに迫る。

3. 研究の方法

実験装置の全体像を図3に示す。実験装置は雰囲気ガス可制御試料破壊装置と広波長域高分解分光装置から構成され、ともに本研究で開発した。

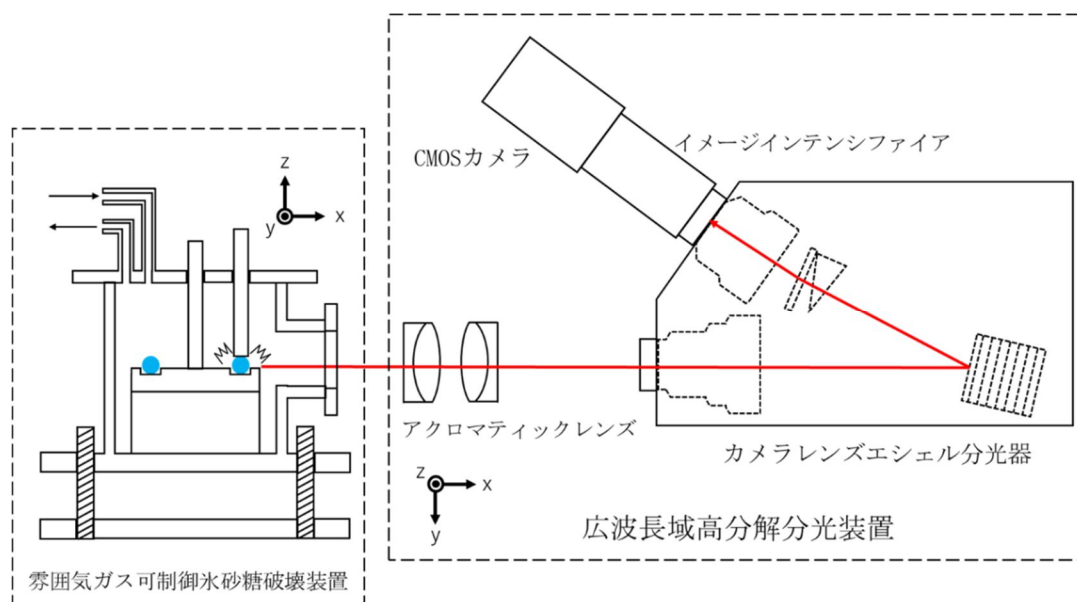


図3 実験装置の全体像
(左図) 雰囲気ガス可制御試料破壊装置、(右図) 広波長域高分解分光装置。

雰囲気ガス可制御試料破壊装置

図3左図にその断面図を示すようなステンレス製の密閉容器で、ロータリーポンプを用いて排気口から装置内の気体を排気でき、ガス導入口から装置内にガスを導入できる。また、排気口のパルプとガス導入口のニードルバルブの開閉量を調節することで装置内の圧力を調節できる。台には8個試料を置く場所があり、回転棒を回すことで試料を交換できる。試料上部のステンレス棒に衝撃を与えることで試料を破壊する。破壊発光は観測窓を通し観測する。

広波長域高分解分光装置

破壊発光は微弱であるため、集光効率の高いカメラレンズを採用するとともに、上記の2つの発光線のみならず多数の発光線の同時計測をも可能にするため、エシェル回折格子を採用する。破壊発光はアクロマティックレンズ(Thorlabs社製、AC508-150-A-ML、口径50.8mm、焦点距離150mm)の対により集光され、等倍像として結像されて入口スリット(高さ0.2mm、幅0.1mm)に入射した光は、コリメートレンズ(ニコン社製、AI AF Nikkor 180mm f/2.8DIF-ED)によって平行光となる。その光は、リトロー配置となるように設置されたエシェル回折格子(Newport社製 52.67 grooves/mm、63.5° blaze、46mm×92mm)に入射して鉛直方向に分光された後、さらにプリズム(テクニカル社製、頂角30°、斜辺58mm、高さ60mm)および回折格子(Newport社製 100 grooves/mm、52mm×52mm)から成る分散素子で水平方向に分光される。その後、結像レンズ(ニコン社製、AF-S Nikkor 105mm f/1.4E ED)に入射し、結像された光をイメージインテンシファイア(浜松ホトニクス社製、C9016-21)で増幅し、リレーレンズ(浜松ホトニクス社製、A4539)でCMOSカメラ(浜松ホトニクス社製、C11440-22C)の検出素子上に結像する。これらにより、同時観測波長範囲400~950nmの高感度・高波長分解分光が可能になった。

分光装置の波長較正と装置幅評価は、トリウム-アルゴン ホロカソードランプ(PHOTRON社製、P858A)からのトリウム発光線を計測することで行った。得られたスペクトルをフォークト関数でフィッティングし、装置幅におけるガウス幅とローレンツ幅を評価した。バルマー 発光線の波長域でそれぞれ0.066nmと0.112nm、バルマー 発光線の波長域でそれぞれ0.079nmと0.029nmであった。

4. 研究成果

水素ガスの圧力を変えて氷砂糖の破壊発光の強度を計測すると、2 Torr の時に比較的強い発光が観測された。その時のバルマー 発光線とバルマー 発光線のスペクトルの計測例をそれぞれ図4の左図と右図に示す。分光器の入口スリットの大きさ、すなわち $0.2 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ の観測空間範囲で一度の破壊発光から、水素原子のバルマー 発光線とバルマー 発光線のスペクトル同時計測が可能であることを実証した。

得られたスペクトルをフォークト関数でフィッティングした結果を図中の青線で示す。フィッティングから得られたローレンツ幅は、バルマー 発光線で $0.252 \pm 0.008 \text{ nm}$ 、バルマー 発光線で $0.14 \pm 0.02 \text{ nm}$ であった。これらのローレンツ幅から推定した電子密度とガス密度はそれぞれ $(1.7 \pm 1.3) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、 $(1.2 \pm 1.5) \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ となった。このガス密度は 2 Torr、300 K の水素ガスの密度 $6.4 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ より 2 倍程大きく、また誤差範囲でゼロを含むことより、十分な信頼性はない。一方、電子密度は 2 Torr、300 K の水素ガスの密度 $6.4 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ を仮定し計算しても、バルマー 発光線からは $(2.5 \pm 1.2) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、バルマー 発光からは $(1.8 \pm 0.7) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ となり、すべて誤差範囲で一致した。破壊発光を生じるプラズマは電離度 10^{-4} 程度のプラズマであることが分かる。

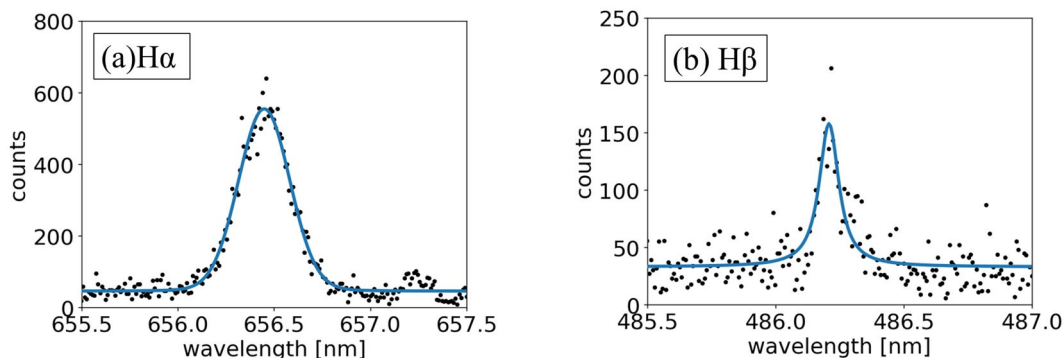


図4 2 Torr における (左図) バルマー 発光線、(右図) バルマー 発光線のスペクトルの計測例

<引用文献>

- [1] M. Langevin, Rapports et discussions du Conseil de Physique tenu à Bruxelles en 1913, sous les auspices de l'Institut Solvay (Paris: Gauthier-Villars), p.251 (1921).
- [2] V.P. Krainov, H.R. Reiss and B.M. Smirnov, Radiative Processes in Atomic Physics (Wiley Inter-science, 1997).
- [3] M.A. Gigosos and V. Cardenoso, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 29 (1996) 4795.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Ishihara, A. Kuzmin, M. Kobayashi, T. Shikama, K. Sawada, S. Saito, H. Nakamura, K. Fujii and M. Hasuo	4. 巻 291
2. 論文標題 Corrigendum to “Ro-vibrational population distribution in the ground state of hydrogen isotopologues in LHD peripheral plasmas deduced from emission spectroscopy” [J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 267 (2021) 107592]	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer	6. 最初と最後の頁 108316 (4pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jqsrt.2022.108316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 花田和明, 四竈泰一, 藤井恵介, KUZMIN Arseniy, 米田奈生, 蓮尾昌裕, 後藤基志, 小林政弘	4. 巻 98
2. 論文標題 表面分析と分光計測によって明らかになった水素原子分子の炉内分布と輸送	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Plasma Fusion Res.	6. 最初と最後の頁 20-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Tanaka, K. Fujii, T. Shikama, S. Morita, M. Goto and M. Hasuo	4. 巻 8
2. 論文標題 Plasma Spectroscopy on an Aluminum-Pellet Ablation Cloud in an LHD Plasma with an Echelle Spectrometer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms8040081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 H. Ishihara, A. Kuzmin, M. Kobayashi, T. Shikama, K. Sawada, S. Saito, H. Nakamura, K. Fujii and M. Hasuo	4. 巻 267
2. 論文標題 Ro-vibrational Population Distribution in the Ground State of Hydrogen Isotopologues in LHD Peripheral Plasmas Deduced from Emission Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer	6. 最初と最後の頁 107592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jqsrt.2021.107592	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷口太一, 北川柚葉, 久富瑞稀, 黒澤大河, Kuzmin Arseniy, 四竈泰一, 蓮尾昌裕
2. 発表標題 水素ガス中での氷砂糖トライボルミネッセンスの広波長域高分解プラズマ分光
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒澤大河, 福田紘平, 藤井恵介, 四竈泰一, 蓮尾昌裕
2. 発表標題 高効率ラマン計測に向けたカメラレンズエシエル分光器の開発
3. 学会等名 2020年日本分光学会年次講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------