



研究室にて光音響プロジェクトに取り組むビルギット・ステイラー氏(写真提供:ステファン・スパンゼンバーク氏)

光音響学が熱力学的驚異を説明： 液体内の負圧

サリー・コール・ジョンソン

完全に密閉された液体コア光ファイバの熱力学的挙動を、光と音波でモニタリングができるか調査する中、新たな液体ベースの光ファイバセンサの開発につながり得る知見を得た。

独マックスプランク光科学研究所 (Max Planck Institute : MPL) と独ライプニッツ光技術研究所 (Leibniz Institute of Photonic Technology : IPHT) の研究者らが、全くの好奇心から進めてきたプロジェクトではあったが、最近、液体内の負圧の存在を偶然にも発見した。

圧力とは、固体、液体、気体の表面に対して垂直方向に作用する、単位面積当たりにかかる力のことである。通常の状態では、圧力の数値は常に正である。

しかし、液体は例外的に、負の圧力値に相当する準安定状態が存在できるという、特異な性質を有している。この準安定状態では、外部からのわずかな影響でさえも、系を別の状態へと変化させてしまう可能性がある。

熱力学の法則から考察すると、液体に対する負圧の影響は次のように想定できる。液体は、その体積が減少する一方で、ガラス繊維の毛細管内では粘着力によって保持され、ゴムバンドのように伸縮できる。

「当研究グループは当初、光音響学技術が、完全に密閉された液体コア光ファイバ内の熱力学的挙動をモニタリングするのに役立つか判断しようとしていた」と、MPLの量子光音響研究グループのリーダー、ビルギット・ステイラー氏 (Birgit Stiller) は言う。「しかし、

当グループの測定値が特異な挙動と傾向を示したため、その仮定と理論の再検討を迫られたのだ」。

負圧による液体の準安定状態

この特異な結果と負圧による液体の準安定状態への考察を深めるため、ステイラー氏ら (図1) は、光波と音響波を組み合わせて熱力学的状態を測定した。

「ブリルアン・マンデルスタム散乱とは、2つの光波と1つの音響波の相互作用だ」と、ステイラー氏は説明する。「後者は温度、圧力、ひずみの変化へ非常に敏感に反応するため、熱力学的測定に適している」。

「ブリルアン・マンデルスタム散乱」の「マンデルスタム」という名前の由来について補足説明しておく。レオニード・マンデルスタム氏 (Leonid Mandelstam) はロシアの物理学者で、1928年に光の組み合わせ散乱を発見したが、残念ながら見過ごされていた。光の組み合わせ散乱は、C.V. ラマンの名前が冠されているが、実は、マンデルスタム氏とグリゴリー・ランズベルグ氏 (Grigory Landsberg) がその1週間前に観測していた。研究者らがその名前に「マンデルスタム」と付け加えたのは、マンデルスタム氏の功績を最終的に評価し、その敬意を表したからだ。フォトニクス業界にも、マンデルスタム氏の功績を称えようとする動きが広

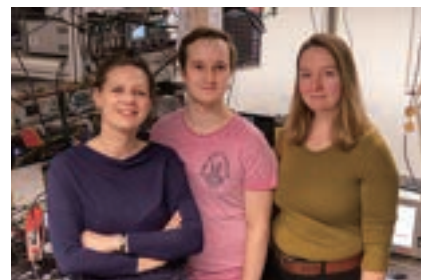


図1 アンドレアス・ガイレン氏、アレクサンドラ・ポップ氏とともに研究室にいるビルギット・ステイラー氏 (写真提供：フロリアン・リッター氏 (Florian Ritter)、MPL所属)

がりつつある。

IPHT イエナに所属し、ステイラー氏と共同研究するマリオ・ケムニッツ氏 (Mario Chemnitz) とマルクス・シュミット氏 (Markus Schmidt) は、さまざまな熱力学的領域に到達するために、小型で使いやすい光学プラットフォームを先駆的に開発した。「このプラットフォームがなければ、さまざまな熱力学的領域には決して到達できなかっただろう。これは、MPLの当グループとIPHTのグループにとって、真の有益な共同研究なのだ」と、ステイラー氏は言う。

ケムニッツ氏とシュミット氏の光学プラットフォームはどのように機能するのだろうか。完全に密閉された光ファイバ内にナノリットルの液体を封入すると、高圧力の正圧と負圧の両方をかけることができる。また、液体内の光波と音響波の相互作用により、液体の様々な状態について圧力と温度の影響を測定できるようにする。

準安定状態を測定する際、特に有毒な液体を使用する場合には、厳重な安

全対策が必要不可欠だ。同研究グループは、有毒な液体である二硫化炭素を使用した。負圧の発生および測定の実験にあたり、以前の測定セットアップには、大きな実験スペースを必要とし、準安定状態の系に障害を及ぼす可能性があった。

それに対して、同グループのコンパクトな手法で実験すると、「独自の光ファイバベースの系内の熱力学的な依存関係について、さらに深く理解できた」と、スティラー氏のグループの大学院生、アレクサンドラ・ポップ氏 (Alexandra Popp) は述べる。

驚異の発見

スティラー氏によると、光音響相互作用は、「信号処理、光エネルギー貯蔵、マイクロ波フォトニクスの分野のみならず、他の研究分野と組み合わせる新たなルートを開拓できる可能性が大いにある。ただし、型破りな発見に備える一方で、仮定は慎重に設定しなければならない」。

負圧の発見には、同研究グループは驚嘆した。「音響周波数の傾向は、負圧の仮定につながる線形減少を明らかに示していた。しかし、われわれ当グループは非線形量子光学の研究をしているため、この仮定については確信が持てなかった」と、スティラー氏は述べる。「実験結果の解釈を通じて、熱力学についてさらに詳しく考察できた」。

負圧領域の観測については、「音波の周波数を測定すると非常に明確になった」と、スティラー氏と共に研究している博士課程の学生、アンドレアス・ガイレン氏 (Andreas Geilen) は言う。

スティラー氏のグループは、「液体コア光ファイバ内で特異な熱力学的領域に到達するなどの課題」に現在も取り組んでおり、「この種の光ファイバには

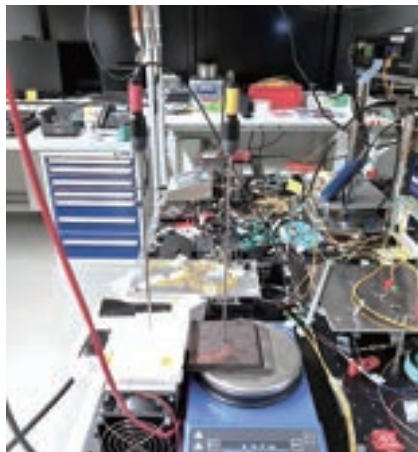


図2 スティラー氏のグループによる液体コア光ファイバ内の温度制御のための光音響実験装置と加熱プレート(写真提供: アンドレアス・ガイレン氏)

特殊な設計が必要で、測定もさらに複雑になるかもしれない」と、同氏は述べる。

液体ベースの光ファイバセンサと量子光学

スティラー氏は、光音響測定と密閉した毛細管光ファイバを組み合わせると、これまで調査が困難だった物質やマイクロリアクターなどの有毒液体内の化学反応のモニタリングを通じて、熱力学の未踏分野を開拓できると期待している。

同研究グループのもう1つの発見は、等圧領域における液体光ファイバの感度が、標準的な光ファイバよりも7倍高いということである。この発見は、新たな液体ベースの光ファイバセンサの開発につながる可能性がある。一般的な光ファイバでは、音響周波数が1℃あたり1MHz程度変化するが、この液体コア光ファイバでは1℃あたり7MHz程度も変化する。この特性は、短い検出長(数十メートル)には最適なセンサとなる可能性がある。

「新しい測定手法を革新的なプラットフォームと組み合わせると、従来の

確立された手法では調査が困難であった現象が、予想外に扱いやすくなる」と、スティラー氏は説明する。

同研究グループが使用した音波は、光ファイバの長さ方向に温度、圧力、ひずみの変化を非常に高感度で検出できる。さらに、空間分解測定も可能である。つまり音波は、光ファイバ内で起こっている現象を、その長さ方向にセンチメートル単位の解像度で画像化できる。

一般的な光音響測定では、光ファイバの全体像しか把握できない。しかし、分散型光ファイバセンシング法を活用すると、光ファイバの1センチメートルごとに起こっている現象を詳細に把握できる。

スティラー氏のグループが活用している方法は、レーダを参考にしたものである(図2)。広帯域の光信号がファイバの両端に送信される。同氏の実験装置の中央部では、両波の相関が常に同一になる相関ピークが現れる。しかし、それ以外の場所では、光波はランダムな挙動を見せる。この光相関ピークと局所的な音響波との相互作用により、同グループは、音響波が数センチメートル程度の短距離においてどのように変化するかについて、情報を取得できる。これは、ブリルアン光相関ドメイン解析(BOCDA)と呼ばれる手法である。

「当研究グループは量子光学にも興味があるので、当プラットフォームが量子信号処理のアイデアを実験するための絶好の環境になると期待している」と、スティラー氏は言う。「当グループは、今後もさらに特異な熱力学的領域を研究していく予定であり、驚嘆の発見に備えている。おそらく、熱力学研究者ら以上に、当グループが驚嘆するだろう」。