

白色干渉計による衝撃波面の観測

米田研究室 近藤 茂

背景・目的

流体中で物体や揺動が音速を越えると、亜音速部と超音速部の境界で衝撃波が現れる。この衝撃波は、超音速飛行機や再突入宇宙船などでみられる現象であるが、多くの爆発現象にも表れるものである。一般に衝撃波現象は、メートルから数光年に至るまでの大きなものもあり、その場合の駆動エネルギーは、非常に大きなものとなり再現するのは容易ではない。ところが、近年、高出力パルスレーザーを用い、気体、液体、固体などに集光させることで、高いマッハ数の衝撃波を発生させ、それを天体现象、爆破現象などの模擬として用いようとする研究が盛んに行われるようになってきた。例えば実験室天文学という分野ではレーザーで生成された高温プラズマのもつ高フラックス流体特性を利用して天体での爆発現象を模擬が大型レーザーを用いて行われている。これらの衝撃波は、シュリーレン法やシャドウグラフ法のように波面の変化する様子を横から 2 次元的に捉えるものが一般的なものである。これは、衝撃波面で平均自由行程の数倍という短い距離で密度や温度がジャンプするつまり不連続に変化する現象であり、 dn/dx に感度があるためである。

図 1.1 はシャドウグラフ法やシュリーレン法で観測された衝撃波の例である。放物線の形状に見える黒い部分が衝撃波面の位置を表している。これは肉眼では見ることができないが屈折率が波面部分で異なっていることからこれらの手法で可視化することができる。

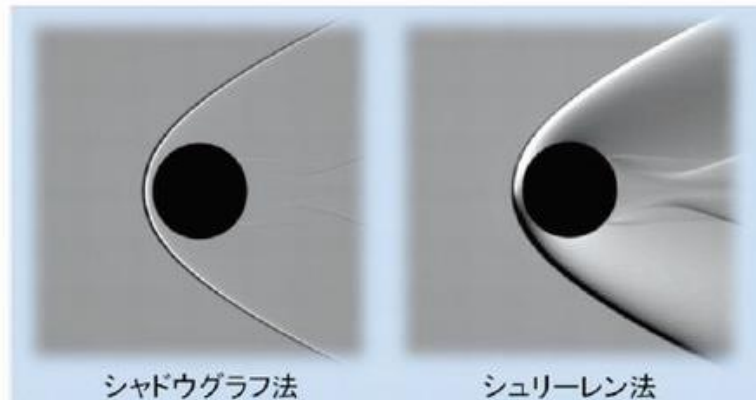


図 1.1 シュリーレン法やシャドウグラフ法で観測された衝撃波[1]

一般的な衝撃波の観測手法は上記に上げたように衝撃波の進行方向に対して横からの観測であり、2 次元的な波面状態の変化は分かるが、進行方向から見て波面の状態を知ることができない。衝撃波を正面から観測する手法としては、最近 VISAR と呼ばれる反射波のドップラー効果を利用して速度を計測する手法が用いられている。[2]この場合、分光器とストリークカメラの組み合わせになっているが、その原理上、1 次元空間分解能しか得られず、空間分解能も干渉縞のピッチ以下にはできないため、空間的丸め込まれたものになってし

まう。衝撃波は、様々な波が重なって波面を形成する場合も多くあり、その時の詳細な 3 次元計測が問題となってきたが、現在は実験的に確認することは困難である。衝撃波面の後方では温度が上がるため、より平滑化されるといわれるが高精度な測定をした場合に正しいかは不明である。そのため、波面を高時間、高空間分解能で 2 次元的に計測する計測手法の開拓が必要になってきている。

そこで本研究では、白色干渉計の原理を用い、超短パルスレーザーで生成される超短パルス白色光をプローブ光源とし、その干渉像の波長特性から衝撃波の瞬時波面形状を計測する手法の開発を行うことを目的としている。

測定原理

白色干渉計の形式で光源にスーパーコンティニューム(SC)光を用いて、干渉計の測定側の反射面に衝撃波の波面を持って来るものとなる。(図 2)白色干渉計であるため対象の 2 次元的な測定ができ、超短パルス光を用いていることからその時間による変化つまり動いている対象へも測定ができると考えられる。干渉計の光路差が 0 のときからどれだけ差がつくと RGB 比が変化するかをまずは測定する。その後、測定対象からの反射との干渉画像の RGB の変化から測定対象の形状を測ることができる。RGB 比とはある画像の中に赤色、緑色、青色のうちどの色の要素がどれだけ含まれているかの度合いを表すものである。干渉画像から赤色、緑色、青色の成分のみを抽出してその強度を測る。

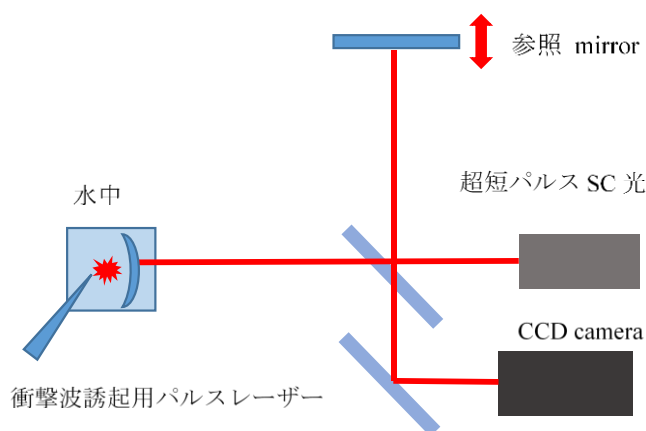


図 2. 目標とする観測手法

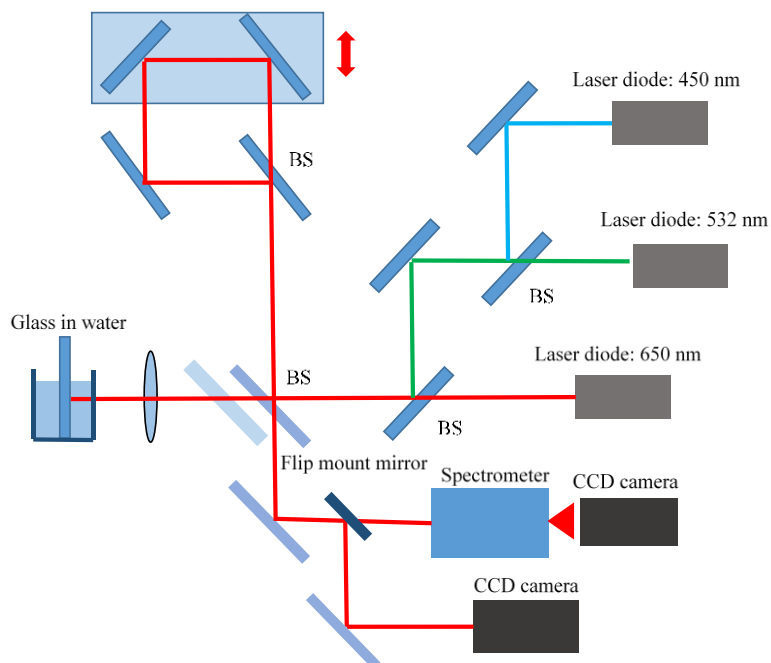
あらかじめ、光路差と RGB 比の変化がどう対応するかが分かっていたら逆に干渉画像の RGB 比からどれだけ光路差がついたのかを測定することができる。これにより衝撃波面の 3 次元的なこれを行うためには白色干渉計の技術をそのままにして用いることはできない。

- ・光源を広帯域でかつ時間変化を追うためにパルス光である。
- ・参照面と測定面の距離の変化と色の変化がどう対応するかを調べる。

の 2 点について考慮しつつ白色干渉計を制作する必要がある。

光路差による色強度の変化

光路差の変化から色強度がどのように変化するかを調べるために 450 nm, 532 nm, 650 nm の赤色、緑色、青色の 3 色の半導体レーザーを用いて干渉計を制作した。



この干渉計を制作するとき水の中のガラス表面を衝撃波面に見立てたものを被測定側とした。なぜなら、水とガラスの屈折率差 Δn は 10⁻¹ 程度となり水中における衝撃波波面と水の屈折率差と近い値であると考えられるからである。そして、それからの反射と参照側のミラーから反射した光を干渉させた。参照ミラーは差動マイクロメーターが付いたステージに乗っており光路差の細かな調整が可能ないようにした。また、干渉させた光は CCD カメラだけでなく分光器にも選択して入れることができ、この分光器を通した画像から光路差が 0 で広帯域な光が干渉している位置を決定した。

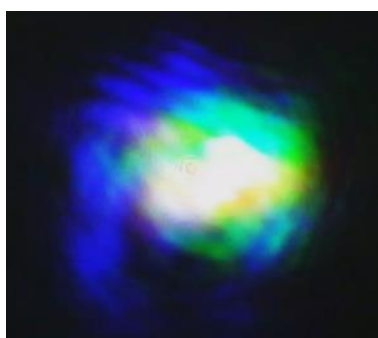


図 3. 3 色の半導体レーザーの干渉の例

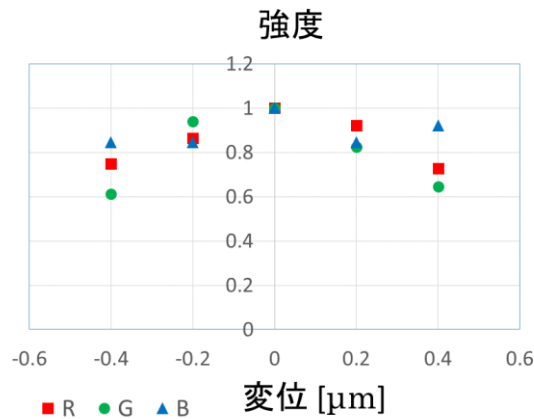


図 4. 基準の位置から光路差を変えたときの RGB 強度の変化

光路差を変化させたときの色ごとに強度の変化していく傾向を得ることができた。例えば、 $0.2 \mu\text{m}$ 程度のずれであれば赤～緑色が強く、 $0.4 \mu\text{m}$ のずれであると青色が強くなって来る。およそ $0.2 \mu\text{m}$ 程度の光路差の変化を捉えることができると考えられる。この傾向に照らし合わせることで画像の色強度の変化から光路差に検討をつけることができる。

超短パルス白色光の導入

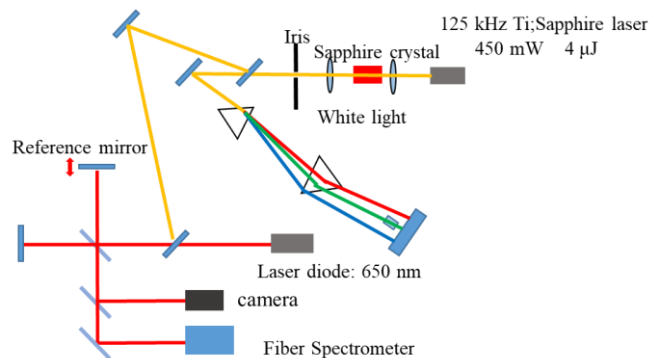


図 5. 超短パルス白色光を用いた干渉計

サファイア結晶中にチタンサファイアレーザーを集光して自己位相変調を起こし、SC 光を発生させた。プリズムペアを用いて分散させ、波長ごとの強度を調整できる系を導入した。十分に分散されたところに細い金属の棒を入れて減衰させることができる。こちらもまた、干渉させた光の一部を分光器に通して光路差が 0 になる位置を決定できるようにした。

超短パルス白色光を用いた干渉計

サファイア結晶を用いて SC 光を発生させると結晶内での自己収束によって光強度が安定せずプローブ光として問題があった。これを解消するためにフォトニック結晶ファイバーを用いて SC 光を発生させた。(図 6)

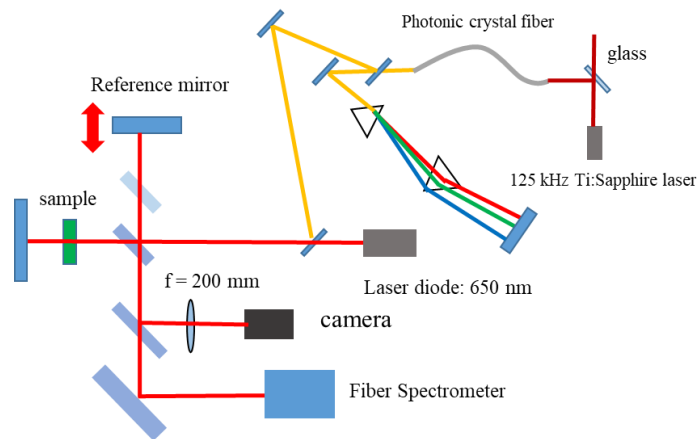


図 6. フォトニック結晶ファイバーによる白色光を用いた干渉計

こちらにも結晶のときと同様に色強度に補正をかけられる系を導入している。干渉計の片側の経路中に測定対象を入れ、 $f = 200 \text{ mm}$ のレンズでカメラへ像転送した。

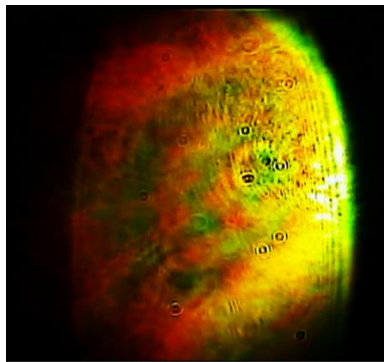


図 7. フォトニック結晶ファイバーを用いたときの干渉の様子(測定対象なし)

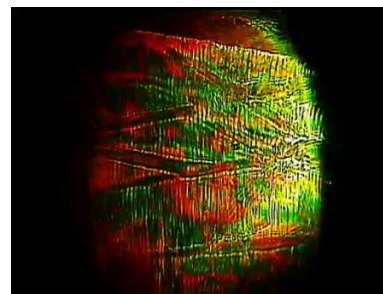
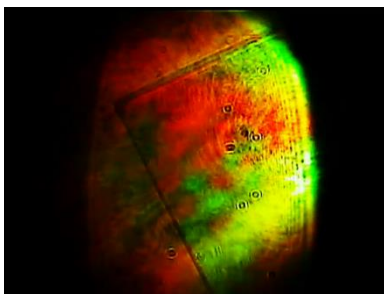


図 8. 測定対象を $150 \mu\text{m}$ のガラス(左)、 $10\mu\text{m}$ のサランラップ(右)としたとき

測定対象が一様な平面であれば色もほぼ一様になると考えられるが、所々微小なたわみがあると色は異なっている。この色の変化を図 4 の傾向と照らし合わせることで表面形状を測定することができる。

まとめ、今後の展望

衝撃波面の観測に超短パルス白色光を用いた白色干渉計の形式を用いることを考えた。半導体レーザー 3 色を用いた干渉計を制作し、対象と参照の光路差によって色が変わっていく傾向を得た。超短パルスレーザーを用いて SC 光を発生させ、これを用いて干渉計を制作し、色強度の補正をできる系を導入した。光路中にある微小なたわみを干渉の色の変化から検出することができた。

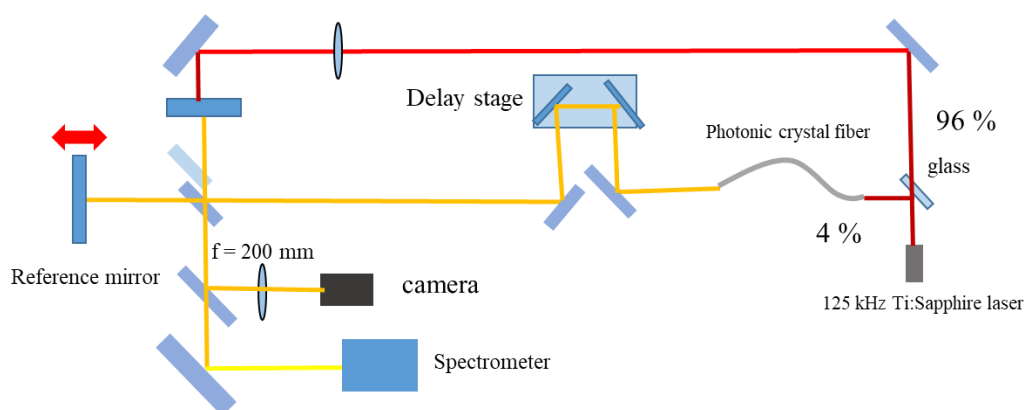


図 8. 今後の展望

今後は、ガラスで分けた片側(強度全体の 96%)をミラー内へ集光して衝撃波を発生させ、それによりミラーの反射面が揺らぐのを観測し、衝撃波面を観測することへとつなげていく。

参考文献

[1] 東北大学 流体科学研究所 複雑衝撃波研究分野

http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/cofrd_cswl.html

[2] L.M.Barker et.al Journal of Applied Physics 45, 3692 (1974)