

シャープフォーカシングシュリーレン法について

檜谷賢士, 山口裕 (防衛大)
須田武志, 北野秀樹 (防衛大 研究科)

On the sharp focusing schlieren method

Masashi Kashitani, Yutaka Yamaguchi (N.D.A.)
Takeshi Suda, Hideki Kitano (Graduate Student, N.D.A.)

概要

シュリーレン法は、光学的可視化手法の一つとして高速風洞試験における流れ場の観察などによく用いられている。しかし、通常のシュリーレン法は凹面鏡間に生ずる密度勾配を積分するので、複雑な三次元構造の流れ場における任意断面の情報を得ることが困難であることが知られている。一方、流れに平行な任意断面の可視化が可能なシャープフォーカシングシュリーレン法(以下、フォーカシングシュリーレン法と記述)がWeinsteinによって提案され、低温風洞をはじめとした各種風洞実験に利用されている。本報告では、Weinsteinが提案したフォーカシングシュリーレンシステムを発展させ、より高光量の拡散光源としてロッド拡散光源を適用したフォーカシングシュリーレン装置を試作し、その可視化特性実験の結果および、遷音速衝撃波管翼型流れの模型スパン方向の断面の可視化への適用について報告する。実験には、間欠式の遷音速風洞として衝撃波管を用い、翼型模型には二重くさび翼型を用いた。その結果、本実験よりロッド拡散光源を使用すると拡散光源の照射面において、ほぼ一様に光を照射することが可能であり、ロッドを有する本システムは、遷音速衝撃波管翼型流れのスパン方向中央の可視化に適用可能であると考えられる。

1. はじめに

シュリーレン法は、光学的可視化手法の一つとして高速風洞試験における流れ場の観察などによく用いられている。しかし、シュリーレン法は凹面鏡間に生ずる密度勾配を積分するので、複雑な三次元構造の流れ場における任意断面の情報を得ることが困難である。

一方、流れに平行な任意断面の可視化が可能なシャープフォーカシングシュリーレン法(以下フォーカシングシュリーレン法と記述)が1950年代に提案され⁽¹⁾、その原理が明らかにされた。しかし、初期の研究において本手法は、可視化視野が狭いこと、光学系の設定が困難であることが報告されたために、通常のシュリーレン法ほど注目されることはなく、装置の改良もあまり進まなかったようである。しかし、1990年代に入るとWeinsteinによって上述の欠点を補う改良されたフォーカシングシュリーレン装

置⁽²⁾が提案され、低温風洞をはじめとした風洞実験など、流れの可視化に利用されている⁽³⁾⁽⁴⁾。本手法は初期のフォーカシングシュリーレン法と比較して、高光量で広い視野における任意断面の密度勾配の可視化が可能である。

本報告では、はじめにフォーカシングシュリーレン法の概要について述べる。次に、より高光量の拡散光源としてロッド拡散光源⁽⁵⁾を適用したフォーカシングシュリーレン装置の特性実験と、遷音速衝撃波管翼型流れの可視化への適用について報告する。

2. シュリーレン法

通常のシュリーレン光学系をFig.1に示す。また、Fig.2には風洞実験などでよく用いられるZ Typeのシュリーレン光学系を示す。通常のシュリーレン法では、レンズ焦点に設置された光源から出た光束は、平行な光束(理想的には)となり測定部へ入射する。

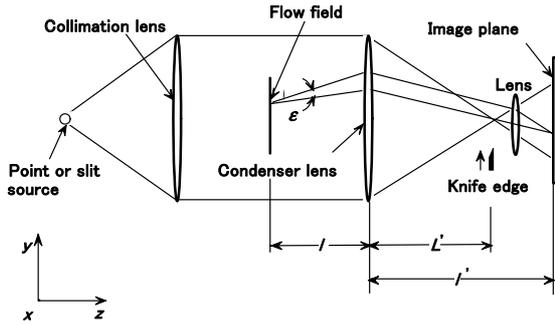


Fig.1 Conventional schlieren system.

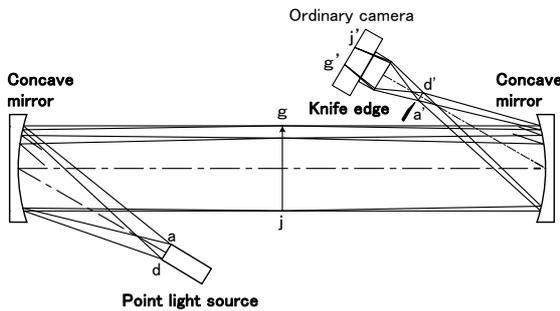


Fig.2 Conventional schlieren system (Z Type).

その後、平行な光束はナイフエッジ側のレンズにより集光し、光束の一部が遮断されスクリーンに像を結像する。シュリーレン法は、Fig.2に示す凹面鏡間において、像の倍率が一定で凹面鏡間で生じる密度勾配はすべてカメラまたはスクリーンに積分される。よって、これまでシュリーレン法は二次元流れ場の可視化に利用されてきた。

3. フォーカシングシュリーレン法

3. 1 光学系

フォーカシングシュリーレン装置の基本的な配置図を Fig.3 に示す。図よりフォーカシングシュリーレン装置は、拡散光源、拡散光源からの光束全体を集光するフレネルレンズ、複数の光源となる遮光板(ソースグリッド)、フレネルレンズから集光する光束全体を再び拡散するための結像用カメラレンズ、通常のシュリーレン法のナイフエッジに相当し光源像の光束の一部を遮断する第二遮光板(カットオフグリッド)、および流れ場を写す結像板から構成される。図に示すように、座標xyzを設定し、測定部の流れを紙面に垂直なx軸方向とすれば、フォーカシングシュリーレン法によってxy平面の可視化が可能である。また、図中z軸方向の記号はそれぞれ結像

用カメラレンズ光学中心からの距離を示し、 l は測定部の焦点面までの距離、 l' は結像面までの距離、 L はソースグリッドまでの距離、 L' はカットオフグリッドまでの距離である。ここで、ソースグリッドとカットオフグリッドには、一定間隔の細長い隙間によって構成されたスリットを用いる。

3. 2 結像機構

フォーカシングシュリーレン法の結像機構を理解するため、Fig.4に示すように多光源であるソースグリッドのうち、一つの光源からの光について考える。いま、測定部に流れはなく、ソースグリッドはx軸に平行なスリットで、小さいが有限の幅abを持つ単一の光源とする。図中yz平面上のソースグリッドの一点aから出た光は、平行でなく視野が狭い。この光が測定部で乱されない場合には光束agjとなり、結像用カメラレンズによってa'に焦点を結ぶ。また、同様に光源abの像a'b'が得られる。次に、測定部の一点cに達する光は光束abcに含まれ、結像用カメラレンズを通り光束ca'b'内を伝わり、スクリーン上のc'に焦点を結ぶ。測定部の直線cd上の他の点を通る光束も光源の像a'b'を通過し、スクリーン上に像c'd'が得られる。このようにフォーカシングシュリー

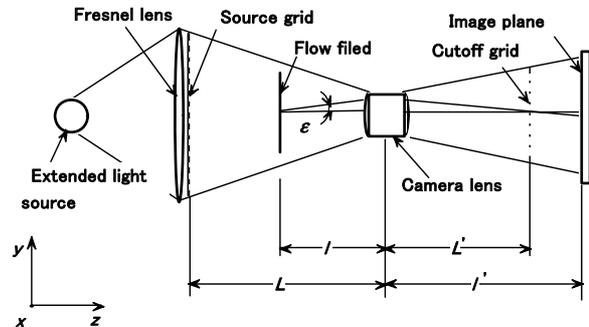


Fig.3 Sharp focusing schlieren system.

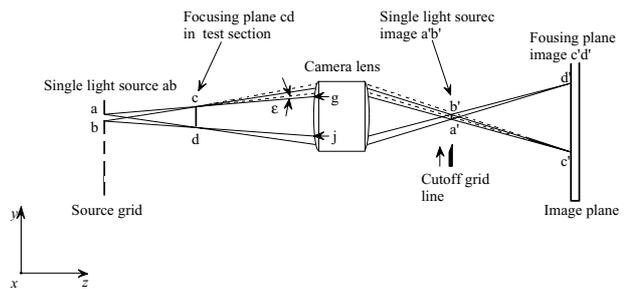


Fig.4 Single light on focusing schlieren⁽⁴⁾.

ーレン法は、測定部に入射する光束が平行光線ではなく、焦点深度が小さいので、測定部内の一平面cdからの光束のみが鮮明にスクリーン上に結像する。

ここで、図の点a'の下方に示すカットオフグリッドを矢印の方へ動かし、光源の像a'b'を通過する光の一部を遮ると、abからの光束すべてが一様に影響を受け、スクリーン上の測定部の像は一様に暗くなり、スクリーン上には、カットオフグリッドによって覆われていない部分に比例する明るさの光(コントラスト)が達する。この状態で測定部に流れが生じると光は屈折し、図の点cを通る光束は、破線で示すように点cでy方向に角εだけ曲げられる。光束に沿うカットオフグリッドまでの距離をLと近似すれば、カットオフグリッドの位置における光源像のy方向の変位Δaは、 $\Delta a = L'\epsilon(L-l)/L$ となりコントラストΔI/Iは、 $\Delta I/I = \Delta a/a = L'\epsilon(L-l)/aL$ である。ここで、aはz軸方向から見たカットオフグリッドにより遮断されない光源像のy方向の幅、Iは光の強度、ΔIは光の強度の変位である。このように測定部で光線が屈折することにより、測定部のxy平面の像がスクリーン上にコントラストΔI/Iとして結像し、xy平面の密度勾配に比例する。なお、フォーカシングシュリーレン法では、多光源を利用するので、他のスリットからの光束のうち測定部cdの像を通る光束もc'd'に像を結び、測定部の広い視野をスクリーン上に結像することが可能である。

3. 3 焦点深度

通常のシュリーレン法の光源が理想的な点光源なら、凹面鏡と凹面鏡の間は平行光線となり、焦点深度は凹面鏡の間全体まで伸びる。一方、フォーカシングシュリーレン法は平行光線を用いないので、焦点深度は小さく、わずかな距離で像の焦点内と焦点外が決まる。Weinsteinは焦点深度として錯乱円の許容量を、測定部における分解能wと直径2mmの円柱物体を対象物と考え、結像用カメラレンズの直径をDとして、次式で示す鮮明焦点深度DSと不鮮明焦点深度DUを定義した。なお、各式の係数2は焦点面の前後を考慮するためであり、前方物体焦点深度と後方物体焦点深度が等しいと仮定している。

$$DS = 2lw/D \tag{1}$$

$$DU = 2l/D \times 2 = 4l/D \tag{2}$$

3. 4 拡散光源

Weinsteinによって提案されたフォーカシングシュリーレン法では、照射面で光の強度が一様となるようにディフューザなどが用いられてきた。しかし、このような光学系では光量の損失が考えられることから、本実験では光量損失を抑制するためロッド拡散光源を適用したフォーカシングシュリーレン装置を製作し流れ場観察に適用する。Fig.5はロッド光学系の概念図を示す。図より拡散光源から出た光束はロッド内で全反射され、出口で一様な光束を得ることができる。次に本実験に使用したロッド光源を有するフォーカシングシュリーレン装置の光学系をFig.6に示す。

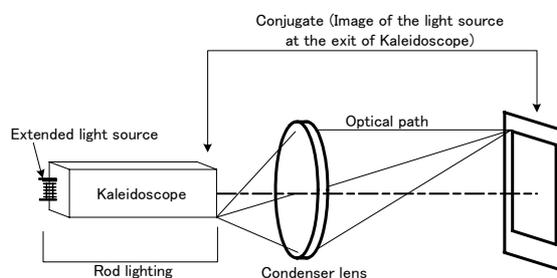


Fig.5 Rod extended light source⁽⁵⁾.

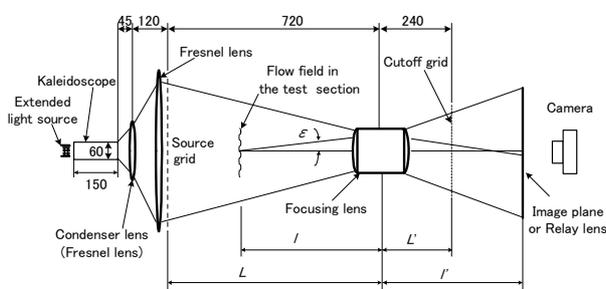


Fig.6 Present optical system⁽⁵⁾.

3. 5 ソースグリッドとカットオフグリッド

本研究に使用したソースグリッドをFig.7に示す。ソースグリッドは幅0.25mmのスリット、間隔1.75mmである。本手法ではソースグリッドを用いることにより光源を多光源とすることで、焦点外の不鮮明な像が重ね合わされ不鮮明な像はより不鮮明となり、焦点が合う任意断面の可視化が可能となる。なお、本システムでは不鮮明焦点深度DUは、後述する衝撃波管測定部スパン(幅60mm)中央において18.6mmである。この場合10%の明暗を検出する場合の感度は $\epsilon = 20626 aL/L'(L-l)$ arcsec (1秒は3600

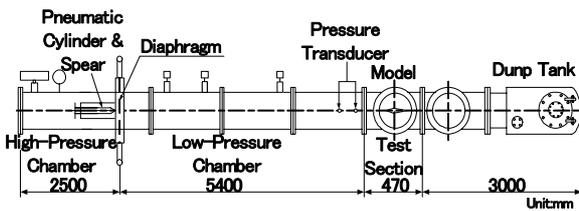
Fig.7 Source grid⁽⁶⁾.

分の1度)より光源像の50%をカットした場合、 ε はおおよそ6 arcsec程度となる。また、カットオフグリッドは、ソースグリッドの焼付け現像処理により作成する。

4. 衝撃波管

本研究では、遷音速衝撃波管翼型流れにフォーカシングシュリーレン法を適用する。実験に用いる衝撃波管の概要をFig.8に示す。衝撃波管は高圧室(長さ2.5m, 内径160mmの円形管), 低圧室(長さ5.4m, 幅60mm, 高さ150mm), スロット開口率20%と測定部容積の1.1%のプレナム室を有する測定部(長さ470mm, 幅60mm, 高さ150mm 短形断面), ダンプタンクで構成されている。隔膜として厚さ0.075mmのマイラーフィルムを使用し空気シリンダーによる撃針により破膜する。

翼型には二重くさび翼型を用いた。翼型模型は、翼厚比10%, 翼弦長75mm, 翼幅58mm, 最大翼厚7.5mm, アスペクト比0.8の上下対称である。

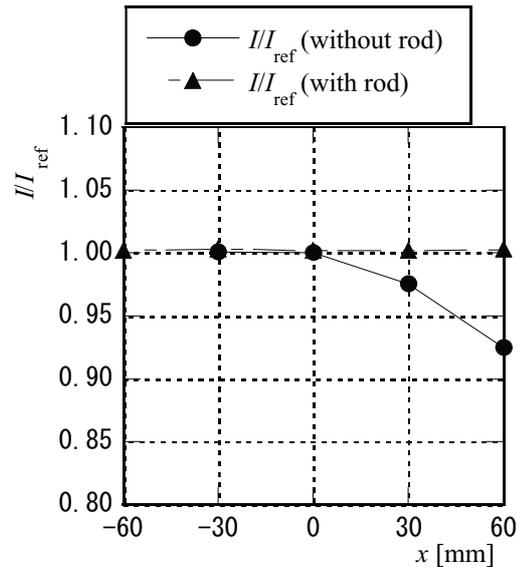
Fig.8 Shock tube system⁽⁶⁾.

5. 実験結果

5.1 ロッドの効果

照射面における光の強度をロッドを取り付けた場合と、取り付けない場合について計測した。その結果をFig.9に示す。 I_{ref} はロッド装着時の $x=0$ mm(測定部中心位置)における強度、 I は各点における光の強度である。縦軸は I_{ref} を基準値として無次元化した

光の強度比 I/I_{ref} 、横軸は測定部中心からの距離 x [mm]である。記号●はロッドがない場合の光の強度比、記号▲はロッドがある場合の光の強度比である。図より、ロッドがある場合とない場合についての強度比の平均値は、ロッドありの場合、測定部に対してほぼ均一な光の強度を持ち、また、全体として光の強度の損失を抑制する効果があると考えられる。

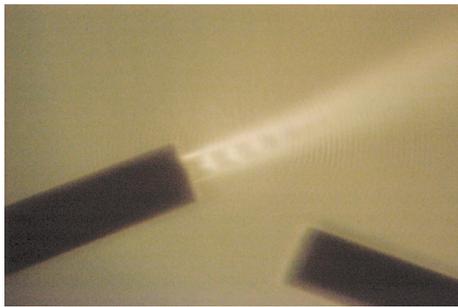
Fig.9 Light intensity⁽⁶⁾.

5.2 噴流の可視化

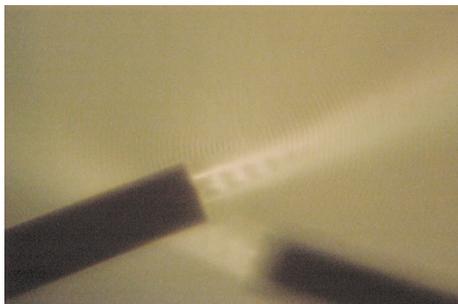
次に、内径0.6mmのダストスプレイから噴出する噴流の可視化結果をFig.10に示す。作動ガスはHFC-125aである。紙面左のノズル出口は、 $l=300$ mmに固定し、紙面右のノズルは出口を10mm間隔でソースグリッド側に移動し撮影を行った。なお、図(a)の紙面右のノズルは、噴流が衝突するので作動していない。図より、紙面右のノズルの距離が増加するに従い、次第に像は不鮮明となり、 $l=330$ mm, $\Delta l=30$ mmでは、ノズルおよび噴流はほとんど確認されない状態である。本実験より、ロッドを有する本光学系においても、焦点深度の小さい任意の断面の可視化が可能である。なお、 $l=300$ mmの不鮮明焦点深度は前述したように $l=18.6$ mmである。

5.3 遷音速衝撃波管翼型流れの可視化

上節の可視化特性実験から遷音速衝撃波管翼型流れのスパン方向中央に焦点を設定したときの可視化結果をFig.11に示す。迎角は $\alpha=0^\circ$ である。主流マ



(a) Left side nozzle $l = 300\text{mm}$, Right side nozzle $l = 300\text{mm}$



(b) Left side nozzle $l = 300\text{mm}$, Right side nozzle $l = 310\text{mm}$

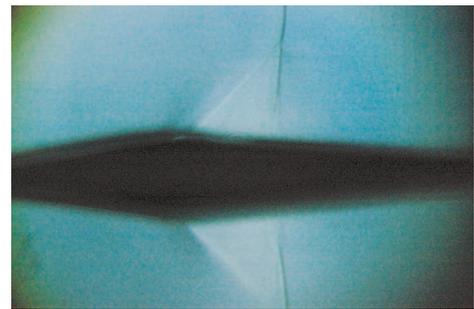


(c) Left side nozzle $l = 300\text{mm}$, Right side nozzle $l = 320\text{mm}$

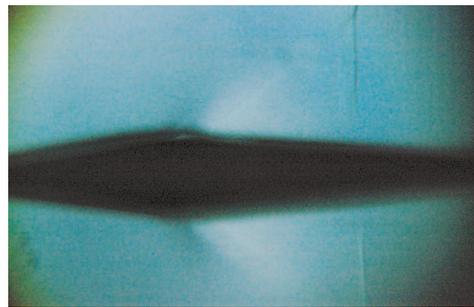


(d) Left side nozzle $l = 300\text{mm}$, Right side nozzle $l = 330\text{mm}$

Fig.10 Free jets from dust spray nozzle with focusing schlieren method⁽⁵⁾.



(a) $M=0.80, Re=4.7 \times 10^5$



(b) $M=0.84, Re=4.9 \times 10^5$

Fig.11 Flow visualization around the airfoil model⁽⁶⁾.

マッハ数およびレイノルズ数はそれぞれ、 $M = 0.80, 0.84$ および、 $Re=4.7 \times 10^5, Re=4.9 \times 10^5$ である。図より本手法により模型スパン方向中央における翼面上の主衝撃波が可視化されている。また、図(a), (b)を比較すると主流マッハ数が大きくなると翼面上の主衝撃波位置は下流に移動している。このように本システムは遷音速衝撃波管翼型流れのスパン方向中央における流れの可視化に適用可能と考えられる。

6. まとめ

ロッド拡散光源を有するフォーカシングシュリーレン装置を試作し、その可視化特性を明らかにするとともに遷音速衝撃波管翼型まわりの流れ場の観察を行った。本実験よりロッドを使用すると拡散光源の照射面において、ほぼ一様に光を照射することが可能である。また、流れの可視化結果よりロッドを有する本システムは、遷音速衝撃波管翼型流れのスパン方向中央における可視化に適用可能であると考える。

7. 参考文献

(1) A. Kantrowitz and R. Trimpi, "A Sharp - Focus-

- ing schlieren system” Journal of Aeronautical Sciences, Vol.17, No.5, (1950) pp.311-314.
- (2) L. M. Weinstein, “An Improved Large-Field Focusing Schlieren System” AIAA91-0567, 1991.
- (3) E. Gartenberg, L.M. Weinstein, and E.E. Lee Jr, “Aerodynamic Investigation with Focusing Schlieren in a Cryogenic Wind Tunnel” AIAA J. Vol.32, No.6, (1994) pp.1242-1249.
- (4) 山口裕, 榎谷賢士, 和田伸一, 斉藤照夫, “シャープフォーカシングシュリーレン法の可視化特性” 可視化情報学会誌, Vol.20, No.77, (2000) pp.158-164.
- (5) Masashi KASHITANI and Yutaka YAMAGUCHI, “Investigation of visualization characteristics of the sharp focusing schlieren method” 21th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, No.1-2, 2005, CD-ROM.
- (6) 須田武志, 山口裕, 榎谷賢士, “改良化された光源のフォーカシングシュリーレン法による翼型まわりの可視化” 日本航空宇宙学会第37期年会講演会, (2006) pp.82-85.