特別会員の窓

シュリーレン法の実際*

河村 守康**

How To Schlieren

Moriyasu KAWAMURA

フローパターンを可視化する光学的方法は、流体の光の屈折率勾配を可視化するとき、注入・懸濁法のような触媒を必要としないため、流れにそのための負荷を与えることなく観察できるすぐれた特徴を有する。

この光学的方法の代表的なものは、シュリーレン法と光干渉法であるが、以下にシュリーレン法についてそのあらましを述べる。

1. 一般のシュリーレン法

シュリーレン法は、レンズまたは凹面鏡によって、光の波面の乱れの少ない平面波または球面波を作り、この光束の中に流れの場を置き、光の屈折率勾配によって光束が曲げられるのをフローパターンとして観測するものである。

本法は、伝統的に図1に示す配列で、受光部においてナイフエッジを用い、集光点で光束を切り込むことによって検出感度を増減するものである。

ナイフエッジを全く切り込まないとき、すなわちシャドー法であるが、この場合は光源が点光源に近いほどコントラストのよいフローパターンを得ることができる。

因みにピンホールの直径が、2 mm で焦点距離が2 m の2面向向法の場合は、光束自身が約3分の広がり角を持つ。つまりこれだけのエフレターを持ったフローパターンをみることになる。ピンホールは、現状では光量の面で暗い事をいとわなければ、0.3 mm 程度までが、 実際的限度であ

る。これで約30秒の広がり角の光束となる。

現象による振れ角がこの角度より十分大きければ、このシャドー法で、容易にフローパターンの観測を行うことができる。

気体の流れまたは極めて低速の液体の流れの場合、シャドー法ではコントラストが悪く、ナイフエッジの切り込みが必要となる。すなわちシュリーレン法測定である。

この場合、ナイフエッジの用い方が正しく、振動等の問題のない環境であれば、流れの場における光の屈折によって検出される光の振れ角 ϵ は $\epsilon = \alpha a / s$ となる。 a は曲げられた光と、流れによって影響を受けなかったと仮定した2つの光のナイフエッジ上での結像点の距離、 s は流れの場からナイフエッジまでの距離、 α は視野の照度と、見分けのつく照度変化の比で $\alpha < 1$ である。仮に a が $5 \mu\text{m}$ 、 s が 2000 mm であれば $\epsilon = 0.5$ 秒となり、実際にこの程度の検出は容易である。

ここで、シュリーレン法に用いるレンズ、または凹面鏡（一般に口径 10 cm 以上になると、色収差がなく、経済的な凹面鏡を用いる）の精度が問題になる。精度の悪いものでは、ナイフエッジを切り込んで、密度勾配を見出す前に、レンズまたは凹面鏡の欠陥による明暗が出てきて目的を達することができない。または、フローパターンとエラーパターンが混在してしまう。エラーのチェックは、シュリーレン法測定と全く同一の配列で容易に行える。すなわち図1のシュリーレン法の光路図で、ピンホールを最小にし、流れの場を取り去り、ナイフエッジを極限まで切り込むのである。われわれは、これをフーコーナイフエッジ

*原稿受付 昭和58年8月2日

**新潟県光学工業所

図1 シュリーレン法の光路図

テストと呼んでいる。この方法は、実際の測定手順とほとんど同様であるから以下に少し詳しく述べる。

1.1 フーコーナイフエッジテスト

光源側のピンホールは極力小さくし、ナイフエッジは、ピンホールの結像点で光軸に対して直角な方向から切り込む。正しい結像点は次のようにして見出す。図3のピンホール結像点の真近に目を据え、レンズ（または凹面鏡）を覗き込むと、レンズ（または凹面鏡）全体が輝いて見える。ここでナイフエッジを切り込むと、例えば図3(A)のようにナイフエッジが光源側に寄っているとナイフエッジを切り込んでいく反対側から視野が蹴られていく。逆に(B)のようにナイフエッジが観測側に寄っていると切り込んでいくのと同じ側から視

野が、蹴られていく。ナイフエッジの光軸方向の微動調節を行って、ナイフエッジを切り込んだとき、全視野が同時に暗くなる位置を探せばよい。実際理想的なレンズまたは凹面鏡ではナイフエッジの僅かの切り込み方向の動きで、全視野が同時に明、暗となるが、不適当なレンズまたは凹面鏡では、エラーパターンが出てくる。図4(A)が不適当な凹面鏡の例である。図4(B)は精度の保証された凹面鏡である。図4(B)では、大気其自然対流が出ており、鏡面精度は光波長の $1/10$ ぐらい、すなわち $0.05 \mu\text{m}$ 以下の平坦度を有する。

1.2 ロンキーテスト

図5は、ロンキーテストの説明図である。フーコーナイフエッジテストのピンホールの位置に格子を置きこの空中像がスリットを通過したときの

図2 シュリーレン法で検出される振れ角

図3 フーコーナイフエッジテスト

図4 フーコーナイフエッジテストによるエラーパターン

図5 ロンキーテスト光路図

回折像をみると、レンズまたは凹面鏡の不正に応じた曲線となるものである。図6(A)が不良、(B)が保証された凹面鏡の例である。このテストは、フーコーナイフエッジテストほど感度はないが、線の曲がりを見るため、直接的でわかり易い。換言すれば、ロンキーパターンが屈曲してみえるものは、使用に耐えないということである。

他に光干渉法による高精度の定量的測定法があるが本稿では割愛する。

2. レーザーによるシュリーレン法

レーザーは、単色性・指向性にすぐれた光であるため、容易に強力な点光源を得ることが出来る。例えば He-Ne レーザーを用いて、焦点距離 8mm の収差の少ないレンズで集光すれば、直径 5 μm の強力な点光源を得る。これを焦点距離 2m のシュリーレン凹面鏡で平行光束にすれば、平行度 0.5 秒程度の揃った波面を持つ平行光線となる。このままでシャドー法による観測を行えば、

図6 ロンキーテストの例

明るいハイコントラストの密度変化によるフローパターンが得られる。前述のように、インコヒーレントな光では、 $300\mu\text{m}$ のピンホール光源が実用の限度で、しかも暗いことを考えると、格段の違いがある。

コヒーレント光で問題になることは、スペックルパターンである。これは、流れの中の微粒子による散乱光同志および投影面の粒子による散乱光同志の干渉によるギラギラした干渉縞群団である。他に集光レンズの両面の反射光による干渉縞と、ゴミ等による回折像で、視野が汚れることである。また、流れの場に窓硝子等のある場合、この面の反射光によって、不必要な干渉縞の発生することがある。両者は、レーザー光のコヒーレン

スを落とすか、後者は、反射防止膜処理をするとか、窓の設計時に対策を施して綺麗な視野にすることは可能であるが、ケースバイケースでその対処の仕方も異なる。

レーザーを光源とする時、ナイフエッジの問題は厄介である。すなわちシャドー法ではその特徴が顕著であるが、さらに感度を上げるためにナイフエッジをビームの集光点に切り込むと、たちまちエッジによる回折像が発生する。したがってコントラストを上げるためにナイフエッジを用いるときは、切り込みの加減をしなければならないが、いずれにしても、全く回折像を回避することは不可能である。