10 K-モアレ法による水面形状の可視化

工学院大 長瀬吉夫^{*} 水野明哲 山内邦比古

VISUALIZATION OF LIQUID SURFACE FORM BY K-MOIRE METHOD

Yoshio NAGASE,^{*} Akisato MIZUNO,^{*} Kunihiro YAMAUCHI^{*}

A new visualization technique is introduced to know the shape of liquid surface. This method, which we named 'K-Moire method', is excellent in the point that it is possible to see very small disturbances of the surface with high resolution compared with ordinary grid lighting Moire method.

In this paper detailed technique for the visualization is explained. The grid used here is made of nylon string 0.23 mm in diameter which is arranged with 0.5 mm pitch using screw notch.

The lines in the pattern observed is not defined as contour lines, but the pattern could be reproduced by digital plotter after numerical analysis.

Experimental examples are presented for simple surface shapes, which are paraboloid of revolution and combined vortex. For both cases the computer plots are shown together, and they agreed with experimental results pretty well.

1. まえがき

流れによって起こる自由表面の変化の形状を可視化する方法としてモアレ法がある。中でも格子照射法⁽¹⁾は、液面に近接して置かれた格子を点光源により照射することにより等高線縞を生じる。これと似た手法で面光源を用いたのが本報で述べる手法であり、これをK-モアレ法と名付ける。この手法で見られる縞は等高線とは異なり、液面の形状に応じて敏感に反応を示す特有のものである。

本研究はこのK-モアレ法が弱い渦等の可視化に有効であることに着目し、手法の紹介に重点を置き、簡単な水面形状(強制渦, 組み合わせ渦)についての実験結果と理論解析との対応を述べるものである。

2. 実験装置および方法

Fig. 1は強制渦(回転放物面)を可視化する場合の装置の概略図である。座標は格子の中心に原点を定め、格子面をx-y面としている。y軸は張ってある糸の方向に平行であり、紙面に垂直に向かう方向である。

格子は縦170 mm, 横500 mmであり、つや消し黒色塗装をした径0.23 mmのナイロン製釣糸をネジのピッチを利用して0.5 mm間隔に張ったものである。設定は微動装置により格子面と静止水面とが平行になるようにする。

^{*} Department of Mechanical Engineering, Kogakuin University, Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo

光源は面光源であるために可視化する範囲をカバーするものが必要である。本実験では縦200 mm, 横650 mmの面光源を得るために500 W棒状ハロゲンランプ3個を直線状に配し, 反射板前面に取り付けたトレーシングペーパー全体を均等に照らすようになっている。

容器は直径160 mm, 高さ160 mmの円筒形のものを使用し, 回転数を調整できるレコードプレーヤーを用いて実験した。

撮影には一眼レフカメラを使用した。その際, 鮮明な縞を得るには絞りを絞ってピントを格子面に合わせることが大切である。そのため, 十分なシャッター速度にするには増感現象が必要である。

なお, 水面には従来のモアレ法のようにアルミ粉末を浮かせる必要はないが, より鮮明な縞を見るには容器内面を黒色つや消し塗装にする。

組み合わせ渦については, 速度の異なる平行流の境界で生じる渦(Fig. 2) を可視化した。 Fig. 3 は上述と同じ装置を回流水槽測定部にセットしたところである。

3. 実験結果

3.1 静止水面

Fig. 4 は水面が静止しているときに視点P (-170 mm, 0 mm, 570 mm) の位置から見た縞模様である。水平面に生じる縞は張ってある糸の方向に平行な直線模様となる。また, 容器周辺部での複雑な縞は表面張力により面形状に急な変化を生じたところである。この写真は格子と水面との間隔が30 mm であるが, 間隔が広がるほど縞数が増え細かくなる。

3.2 強制渦(回転放物面)

Fig.1 Apparatus for the Visualization by K-Moire Method

Fig.2 Schematic Illustration of Shear Flow between Two Parallel Streams

Fig.3 Photograph of assembly

Fig.4 Water Surface at Rest

Fig. 5 (a), (b), (c), (d) は静止水面と同じ視点位置から見た回転放物面によって生じる縞模様である。図中の×印は回転放物面の中心を示している。回転数 (rpm) は (a) 30, (b) 35, (c) 39, (d) 45 であり、格子と自由表面最深部つまり回転放物面の中心との間隔が 30 mm になっている。ここで、面形状は次式によって与えられる。

$$Z = \frac{r^2 \omega^2}{2g} + H \quad (1)$$

$$(r^2 = x^2 + y^2)$$

r は回転中心からの半径、 ω は角速度、 g は重力加速度、 H は自由表面最深部の座標である。いま、 $r = 50 \text{ mm}$ を例にとると、中心の水位差は (a) 1.26 mm, (b) 1.71 mm, (c) 2.13 mm, (d) 2.83 mm となる。このことから、水面形状のわずかな変化に対して著しく縞模様が変化していることがわかる。

3.3 組み合わせ渦

Fig. 2 に示されたように速度の異なる平行流の境界では渦を発生する。そのことを明確に知るために水面に染料を流すことにより可視化した写真が Fig. 6 である。流速は $U_1 = 6.0 \text{ cm/sec}$ (上

(a) 30 rpm

(b) 35 rpm

(c) 39 rpm

(d) 45 rpm

Fig.5 Paraboloid of Revolution

Fig.9 Numerical Plot of Paraboloid

側), $U_2 = 20.0 \text{ cm/sec}$ (下側) である。同じ流れを視点 (-520 mm , 0 mm , 1280 mm) の位置から K-モアレ法により可視化したのが Fig. 7 である。Fig. 8 はその中の 1 つの渦を拡大したもので、回転放物面の場合とはまったく異なる縞模様をしている。

4. 理論解析との比較

水面の形状が $z = f(x, y)$ の形で与えられる場合に、この K-モアレ法により生じる縞模様は、格子上のある一点を見たときに、その点が明るい暗いによって予測できる。

このことは、光の反射の法則と格子ピッチとの関係から求めることができる。

前ページの Fig. 9 (a), (b), (c), (d) は回転放物面について得た結果で、それぞれが Fig. 5 に対応する。面形状は式 (1) によって与えた。

組み合わせ渦についてはランキン渦の式が一般的であるが、水面の変曲点において勾配の微分が不連続になり不都合が生じるので、中心で r^2 に、 $r \rightarrow \infty$ で $-\frac{1}{r^2}$ に比例するような連続関数

$$z = 2 \cdot \frac{h}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{r^2}{3a^2} - \frac{\pi}{2} \right) + H \quad (r^2 = x^2 + y^2) \quad (2)$$

を使用した。H は $r \rightarrow \infty$ のときに漸近する格子下の水面の位置であり、 h はその位置からの渦の深さである。また a は変曲点半径でランキン渦での強制渦と自由渦との境に相当する半径である。この式において、 $h = 0.8 \text{ mm}$, $a = 7.0 \text{ mm}$ のときに得た結果が Fig. 10 であり、Fig. 8 の可視化によるものとかなり一致している。このようにして、弱い渦の水面形状をはっきりと観察できる。

文献 (1) 浅沼偏：可視化ハンドブック，朝倉書店 (1977)，p 385～361

(2) A. Roshko : J. Fluid. Mech. (1974), vol. 64, part 4, p 775～816

Fig. 6 Shear Flow Vortex by Tracer Method

Fig. 7 Shear Flow Vortex by K-Moire Method

Fig. 8 A Vortex in Shear Flow
(Fig. 7)

Fig. 10 Numerical Plot of
Combined Vortex