27 くさびと共鳴器の結合系における うず放出の可視化

埼玉大工 川橋正昭[○]、細井健司

I. M. F. M. E. Brocher, P. Collini

Visualization of vortex-shedding from wedge coupling with resonator

by Masaaki KAWAHASHI^{*}, Eric BROCHER^{**}, Kenji HOSOI^{*}, Paul COLLINI^{**}

The excitation of the air column within a tube closed one end, placed in a uniform flow, was first presented by Vrebalovich. The air column oscillation was produced by means of mounting a tripping device, e.g., a ring or a wedge, at the front of the open end of the tube. However, the reasonable explanation about the oscillation mechanism of this resonator was not given by the author.

In order to get a better understanding of the oscillation mechanism of the resonator with a wedge as a tripping device, the wedge wake coupling with the oscillating flow produced within the resonator is visualized by means of the hydraulic analogy using an open channel of water. The shadowgraph method is applied to the observation of periodical flow, and the speckle method is applied to the quantitative visualisation of flow pattern at any instant.

The results of flow visualization give well understanding of flow structure produced by periodic vortex-shedding from the wedge coupling with the resonator.

1. 緒言

高レベル空力騒音の擬似音源や、主流中の伝ば音に対する境界層応答の研究などにおける音源として、ハルトマン振動子（またはH Sチューブ）やトリッピングデバイス付振動子などの空力音源が用いられている。ハルトマン振動子はノズルから流出する空気噴流によって励振されるが、後者は一様流中で励振されるため、風洞内音源として有用である。

トリッピングデバイス付振動子は、一端を閉じたキャビティの開口端前方にくさびやリングなどのトリッピングデバイスを配したものである⁽¹⁾。この振動子を一様流中に置くと、トリッピングデバイスの後流とキャビティ内気柱との干渉により音が発生する。しかし、その発音メカニズムの詳細はいまだに明らかにされていない。

本研究では、トリッピングデバイスとしてくさびを用いた振動子の発音メカニズム解明の端緒を得ることを目的とし、浅底回流水槽を用いた水力学的相似実験を行い、同時に流れの可視化を試みた。実験では、水路内の一様流中に垂直に立つくさび後流とキャビティ内振動流との干渉によって生じる流れ場を、シャドウグラフ法およびスペckル法を用いて可視化した。前者はビデオカメラによる流れ場の連続観察に適用され、後者は瞬時流速分布の定量的可視化に適用される。得られた流れの可視化結果から、くさび後流部にキャビティ開口部の振動流によって周期的に形成されるうずの構造が明らかにされ、振動維持機構を検討するための有用な知見が得られた。

^{*} : Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Urawa, Saitama

^{**} : Institut de Mecanique des Fluides de Marseille, 1 rue Honnorat, 13003 Marseille

2. 実験装置

水力学的相似実験に用いた浅底回流水槽およびビデオ観察系の概略図と、くさびおよびキャビティの配置が図1に示されている。水路の全長は5m、水路幅は500mmであり、底にはガラス観察窓が取り付けられている。なお本実験では、水路は水平に保たれている。キャビティの幅(W)は145mmであり、その長さ(L)は最長600mmまで可変である。用いたくさびの形状は図中に示されている。

くさびの後流とキャビティ内振動流との干渉によるうずを伴う流れ場は、水路上方に置かれた光源により照明され、水面変化部が影となって水路下方のスクリーン上に投影される。このスクリーン上の投影像が、水路上方よりビデオカメラにより観察される。流れ場の定量的計測は、図2に示すような測定系を用いて行われる。くさびとキャビティ開口部間流速分布の定量的可視化は、白色シート状ダブルパルス光源(菅原研究所製、PS-222)を用いたスペックル法によって得られる。さらに、くさび後流に形成される周期的うず構造と、キャビティ内振動流の位相関係を求めるため、開口部流速変動および閉端部水深変化が、熱線流速計および電気抵抗式水位計を用いて同時に測定される。

Arrangement of wedge and cavity

図1 実験装置概略図

3. 実験結果および考察

実験条件は、くさびの幅(D)を代表長さ、水路断面平均流速(U)を代表速度とするレイノルズ数(Re)が2000~3000、フルード数($Fr = U / \sqrt{gH_0}$; H_0 は平均水深)が0.12~0.17の範囲で行った。

はじめに、くさびを単独で水路内定常流中に置いたときの、くさびの向きによるうず放出現象の変化を観察し、放出周波数を求めて図3に示す。図の縦軸は無次元周波数(ストローハル数)であり、図中には径の異なる円柱からのうず放出ストローハル数も合わせて示してある。なお、このときの条件は $U \approx 100 \text{ mm/s}$ 、 $Fr = 0.14$ である。この結果、くさびを順方向に置いたときのうず放出ストローハル数は円柱についての

図2 測定系

値とほぼ一致するが、逆向きに置いたときのストローハル数は減少することが判る。本実験では、逆向きにくさびが置かれた場合の現象について主に調べる。

水路内一様流中にくさびとキャビティを図1のように配すると、特定のくさび・キャビティ開口端間距離 (l) の範囲でキャビティ内に周期的振動流が生じる。その振動流状態は音響管内の一次の固有振動状態に対応し、その周期 (τ) は、線形理論に基づく値 $4L/\sqrt{gH_0}$ にほぼ一致するが、キャビティ長さに対する振動周期実測値の変化は図4に示すように線形ではない。本実験の範囲では、キャビティ長さの二つの値に対して振動周期が不連続的に変化する。その結果、図中に示されるように1～3の三つの領域に分割される。各領域ではキャビティ長さと振動周期は線形関係にあるが、そのよう配はいずれも線形理論によるものより緩やかである。また、キャビティ内振動流の強さはキャビティ長さに強く依存し、水深変動定在波振幅が図4の領域2の範囲で急激に増加する。その結果が、キャビティ長さと閉端部水深変化振幅の関係により図5に示されている。なお、各キャビティ長さに対する水深変化振幅は、最も安定な振動流状態となるくさび・キャビティ開口端距離について得られた値である。

以上の結果から、くさびからのうず放出とキャビティ内振動流の結合条件によって、くさび・キャビティ間の流れが大きく変化することが予測される。そこで、各条件下での流れの可視化を行う。

キャビティ長さが短い図4の領域1においては、振動周期が短く、くさびの角から発達する剪断層の巻き込みにより形成される渦が十分に成長しない。また、図4の領域3では振動周期が長く、くさびを過ぎるながれの加速度が小さくなるため、剪断層は緩やかに巻き上がる。一方、領域2における現象は領域1および3と著しく異なり、うずはくさびの角から急速に成長する。領域2における流れ場のシャドウグラフ法による可視化例を、一周期にわたって

図3 自然うず放出周波数

図4 キャビティ内振動周期

図5 キャビティ内振動振幅

図6に示す。領域2では、キャビティ開口部に強いうずが形成され、開口端中央部に強い外向き流れが誘起される。この外向き流れが、キャビティ内に強い膨張波を生じ、結果的にキャビティ内振動流振幅を増加させる。このような強いうずの形成は、くさびからの周期的自然うず放出と、キャビティ内固有振動との結合により生じるものと考えられる。なお、図4に示されているように、くさびからの自然うず放出周期は領域2における振動周期と一致していないが、うず放出周期がキャビティとの結合によって変化し、領域2の周期範囲で最適結合系が形成されるものと考えられる。

つぎに、図6(a)に示したうず形成開始直後の流れ場について、スペックル法による二次元流速分布の定量的可視化を試みる。光散乱粒子を懸濁した流れを、白色シート状ダブルパルス光源で照明し、二重露光スペックル写真を撮影する。得られたスペックル写真が図7に示されている。なお、用いた粒子は平均粒径約 $5\mu\text{m}$ の二酸化チタンであり、懸濁量は約900 μl の水に5.5gである。また、光源の発光時間は $100\mu\text{s}$ 、発光間隔は3msである。

図7のスペックル写真から、He-Neレーザを用いたヤング縞法により二次元流速ベクトル分布が得られ、図8に示すようにくさび後流のうずが定量的に可視化される。

4. 結言

トリッピングデバイスとしてくさびを用いた音波発生器の水力学的相似実験を行い、その作動状態を流れの可視化によって調べた。明らかにされたくさび・共鳴器結合系の流れ場構造は共鳴器内振動発生および維持の基本的機構をよく説明する。

文献: (1) T. Vrebalovich, Jet Prop. Labo. TR-32-378 (1962)

(a) 流出→流入 (b) 流入
(c) 流出前半 (d) 流出後半
図6 シャドウグラフ法による流れの可視化

図7 スペックル写真

図8 流速ベクトル線図