B204 下面が水面の水平矩形ダクト内伝ば音による水面跳躍現象の可視化

埼玉大工学部 川橋正昭○

埼玉大工学部 細井健司

埼玉大院 荒川雅裕

VISUALIZATION OF RUPTURES OF A LIQUID SURFACE

BY STRONG SOUND WAVE PROPAGATING IN A PARTIALLY LIQUID-FILLED DUCT

Masaaki KAWAHASHI*, Kenji HOSOI* and Masahiro ARAKAWA**

When a strong sound wave is attenuated by friction in a unsteady boundary layer adjacent to a solid wall, an acoustic streaming is produced. The acoustic streaming is a steady motion defined by the steady part of second-order velocity caused by non-linearity in a wave motion. A creeping motion generated by a standing wave formed in a pipe by intense sound is known as a typical acoustic streaming which forms dust patterns in a Kundt's tube. And also a second-order pressure distribution is generated in a standing wave. The pressure distribution is shown by deformation of a surface of liquid that partially fills a tube. And when the sound pressure exceeds a certain threshold value, a rupture of liquid surface is occur and fountains are present at sound pressure nodes. This report presents visualization of the fountains and critical values of sound pressure for ruptures of liquid surface.

1. まえがき

一端を閉じた管内の伝ば音によって生じる定常波の節または腹の間隔を可視化して計測し、その伝ば音の周波数を調べる方法は、クント管法と呼ばれ、典型的な物理実験の一つとして広く行われている。その可視化法は、水平管内にコルク粉またはリボコジウムなどを散布し、それらが定常波の音圧の節または腹部に移動して生じる縞模様を観察するものである。この微粉末が移動する現象については、古くから多くの研究者の関心を集め、その基本的メカニズムについての定性的説明がなされてきた⁽¹⁾⁽²⁾。それらは以下のようなものである。伝ば音の音圧レベルの増加とともに波動の非線形効果が現れ始め、二次の項の定常分として音響流が生じる。管内定常波によって生じる音響流は、壁近傍の非定常境界層中で節部に向かう流れとなって現れ、その流れが節部と腹部、および対称軸に囲まれた領域に循環流を形成し、この循環流が微粉末の移動をもたらすと説明されている。しかし、実際に観察される現象は単純ではなく、粉末の粒径、比重などによって縞の現れ方が変化したり、粉が膜状に舞い上がる現象等も報告されている⁽³⁾。このような現象については、二次的な流れの発生だけでは十分に説明されず、その発生要因はいまだに明らかにされていない。

さらに、このような高音圧状態の定常波では二次の圧力項が生じて、その定常分は管軸

* Dept. of Mech. Eng., Saitama Univ., 255 Shimo-okubo, Urawa, Saitama 338

** Saitama Univ., Graduate Student

方向に平均圧力の変化をもたらす。その結果、定常波の音圧の節部は低圧部、腹部は高圧部となる。この平均圧力分布は、下部を液体で満たした管内の定常波による液面の変形から可視化される⁽⁴⁾。さらに、音圧の値があるレベルを越えると、突然圧力極小点において噴水状に液面が吹き上がる。このような現象は、

Fig.1 Illustrating streaming generated by standing wave.

Fig.2 Visualization of acoustic streaming generated in duct.

中国に古くから伝わる”魚の泉”と呼ばれる水鉢で起こる噴水現象を想起させる⁽⁵⁾。

本報告では、高出力音源によって駆動される一端を閉じた矩形断面ダクト内気柱振動の定常波によって生じる噴水現象を可視化するとともに、ダクト内音圧および変動波形の計測を行ないその結果を示す。

2. 実験結果および考察

Lord Rayleighは、平行平板間の平面波伝ば音による定常波によって、二次のオーダーの項として音響流が現れることを示し、その音響流が Fig. 1 に示すような対称の循環流を形成することを示した。このような音響流については、煙を注入した円管内の可視化によって、軸対称循環流の存在が確認されている。そこで本報告では、はじめに矩形ダクト内の定常波に伴う音響流の存在を、レーザライトシート法による可視化で確認する。供試ダクトの断面形状は、25mm×60mmの矩形であり、長さは1,500mmである。ダクトには線香の煙が注入され、スピーカー音源からの音の供給により定常波が生じる。このときダクト長さ方向の左右対称面が、レーザビームスキヤニング法によるシート光で照明され、照明面の散乱光パターンが写真撮影される。撮影された写真例が Fig. 2 に示されている。このときの音源周波数は958Hzである。得られた結果は、循環流パターンを示しており、音響流の存在が確認される。しかし、この循環流の構造は通常上下対称ではなく、照明面をずらすと異なったパターンが観察される。

つぎに、本報告の本来の目的である噴水現象の可視化に用いた実験装置概略図が、Fig. 3 に示されている。用いたダクトはアクリル製であり、その長さは600mm、幅は60mm、深さは75mm

Fig.3 Schematic view of experimental apparatus.

(a) 1st mode of standing wave (279Hz).

(b) 3rd mode of standing wave (830Hz).

(c) 5th mode of standing wave (1390Hz).

Fig.4 Visualization of deformations of water surface generated by standing wave in duct.

である。このダクト下部を水で満たして水深を50mmとし、上部の空間部高さを25mmに保つ。また、水面吹き上げ現象が生じているとき水中に誘起される流れを可視化するため、粒径約 $10\mu\text{m}$ のナイロン粒子が混入されている。ダクトの一端には音源であるホーンスピーカー用ドライバーユニットが設置され、他端にはダクト内音圧測定用の半導体圧力変換器が取付けられている。実験では、音源のドライバーユニットは100Wの増幅器で駆動され、その周波数はダクト長さがちょうど $1/2$ 波長の整数倍になるように調整される。このとき、音圧の増加とともにダクト内水面は $1/2$ 波長ごとに一つの山が形成されるように変形する。さらに音圧が増加してある値を越えると、突然水面形状の凸部頂点から噴水状に水が吹き上がる。

Fig.5 Visualization of "fountain".

この噴水現象の可視化写真が、定常波の1次、3次および5次の各モードについてFig. 4に、また噴水部拡大写真が Fig. 5に示されている。各モードにおける噴水現象は、定常波の音圧の各節部において一個所または複数個所で生じる。とくに一次のモードでは、常に複数の吹き上がりが観察される。この噴水現象は、ダクトの上壁に到達し、上壁に強

Fig.6 Critical pressure waves at closed end of duct.

く打ち当たる勢いを示す。噴水部を拡大して観測した結果から、水の吹き上げは局所的に発生していること、噴水部近くの水の表面に波長の短いさざなみが生じていること、水中に誘起される流れは水面の極く近傍に限ることなどが観察された。

つぎに、噴水現象が発生する直前のダクト閉端部圧力波形が、Fig. 6 に示されている。測定された閉端圧力波形はいずれも高調波成分を含み歪んでいるが、噴水発生時の臨界閉端音圧は、定常波の次数によらずほぼ一定で約160dBである。また、噴水発生直前の水面変形による水位差は、山部と谷部で約10mmであり、ダクト内に約 0.1kPaほどの平均圧力の差が生じることがわかる。噴水現象の発生とともに水面は不安定になり、重力波伝ばによる定常波状態で周期的に振動しはじめる。その水面の振動の周期で、ダクト内定常波振幅も変動し不安定になる。

3. あとがき

強い音場下で生じる二次流の発生、および二次のオーダーの圧力分布について、矩形断面ダクト内に定常波を発生させることにより観察した。その結果、とくに下部を水で満たしたダクト内の水面が、噴水状に吹き上がる現象を確認することが出来たが、その発生要因を明らかにする手がかりを得るまでには至らなかった。今後、水面の変形と同時に気柱部二次流の可視化を行ない、その関連性を調べる必要があるものと思われる。終わりに、本実験に協力された、本学学生上田敦君に謝意を表する。

文献

- (1) Lord Rayleigh, "Theory of Sound I", Dover Pub. Inc., New York (1945), 333.
- (2) Andrade, E. N. Da C, Phil. Trans. Roy. Soc., A230 (1932), 413.
- (3) 安達・他2名, Nagare, 11-4 (1980), 25.
- (4) Ingard, U & Galehouse, D. C., AJP, 39 (1971), 811.
- (5) 日本音響学会誌, 28-6 (1972), 317.