

Formation of Liquid Fountains in a Kundt's Tube

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/3561>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 128, pp.31-36, 2005-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



クント管内での噴水の形成

辰野正和*¹

(2005年1月27日受理)

Formation of Liquid Fountains in a Kundt's Tube

Masakazu TATSUNO

E-mail of corresponding author: tatsuno@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

When a one-dimensional standing sound wave is excited in a rectangular Kundt's tube that the liquid partially fills, general circulations of the air are induced between adjacent nodes and antinodes, and the surface of the liquid is deformed depending on the pressure distribution. If the intensity of the sound is exceeded a certain threshold, the liquid surface ruptures and fountains occur at the antinodes.

In this work, an experimental study has been made of the mechanism of the formation of the liquid fountain in a Kundt's tube.

When the intensity of the sound is increased, a small distortion of the liquid is produced on the surface. The pressure at the top of a distortion or a liquid boss becomes smaller than that at the sides in an oscillating flow. The distortion or the boss is more sharpened with increase of the intensity of the sound. As a result, at a certain threshold value of the sound, the liquid surface would rupture suddenly and the fountains occur.

Key words : Kundt's tube, Standing sound wave, Liquid, Fountain

1. 緒言

古くからクント管という管中の空気柱の共鳴に関する実験は知られている。管の底におかずやコルク粉等を入れておき、管内に音の定在波を作ると、定在波の腹の部分に粉末が多く縞模様を形成する。この畝の縞模様の形成に関しては多くの研究報告がある。Hutchisson & Morgan¹⁾は、種々の粉末あるいは音圧レベルと縞模様の大きさとの関係を調べた。Andrade^{2,3)}は、詳細な実験を行い、管中に気流の定在波を作ると、管中に波長の1/4の長さを持ち、流れ方向が逆向きの一対の循環流(管の中心部では、節から腹に向かい、壁付近では腹から節に向かう)が形成されること、および管の床に出来る縞模様は細かい粉の畝の周りに誘起される二次流れによって形成されるのであると報告した。しかし、管の全断面にわたって粒子膜が形成されることは、畝同士の二次流れでは説明できず、いまだ確定的なメカニズムの解明はなされていないようである。

一方、クント管内の底部に液体を入れ音の定在波を作ると、音の強さがあるしきい値を超えると、液面の頂上(音場の腹の部分)から噴水が生じることも知られている。

Howatson⁴⁾とか Ingard^{5,6)}という人々が報告している。Ingard は、細い棒を液中に入れ、液面に引き上げてリッジ(畝)を作り、噴水現象を起こさせる実験を行った。そして、音場内でのリッジ先端では音の回折により圧力が低下し噴水現象が起こると説明している。

粉末による畝の縞模様の形成と液体による噴水現象も同じ音の定在波内で起こっていることであるが、その形成過程には違いがあるようである。本研究の目的は、音場の定在波中で液体の噴水が起こる過程を詳細に調べようとするものである。

2. 実験装置と方法

Fig.1 に、実験装置を示す。中央が音の定在波を作る矩形管である。本実験では、断面が1.73cm平方であり、長さが99.2cmの小型パイプと断面が幅3cm、深さ4cmであり、長さ103.5cmの大型パイプの2種類を使った。Fig.1に示すパイプは大型パイプである。パイプの右端にあるのがスピーカーのドライバーユニットであり、これを発振器を使い適当な振動数で駆動する。また、パイプの左端には音の強さを測るマイクが設置される。大パイプの中央には、管

*¹九州大学応用力学研究所

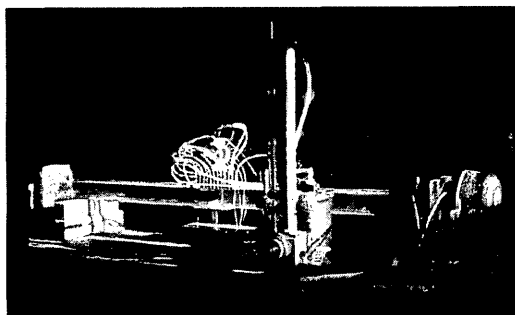


Fig.1 Experimental apparatus

内の圧力分布を計測するための圧力孔が設けられている。

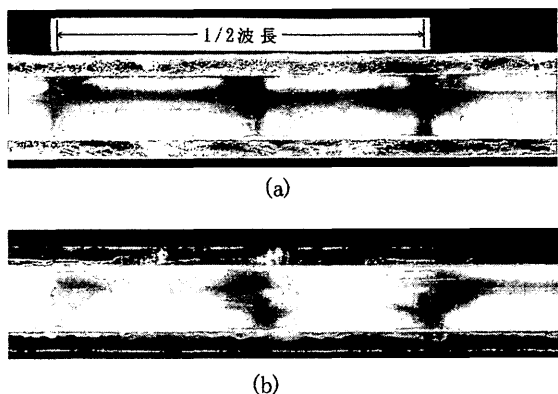
これらは内径 1.5mm のステンレスパイプであり、1cm おきに 12 本設置している。Fig.1 は、ビニールパイプでマンメータに接続している様子を示している。水平に支持したパイプの中には、深さ 3~5mm に灯油を入れた。灯油を使ったのは、水より表面張力が小さく、噴水を作り易いからである。

3. 実験結果

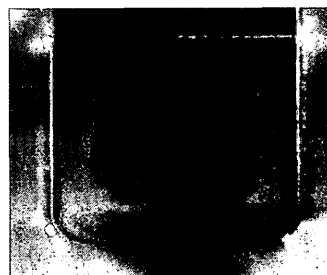
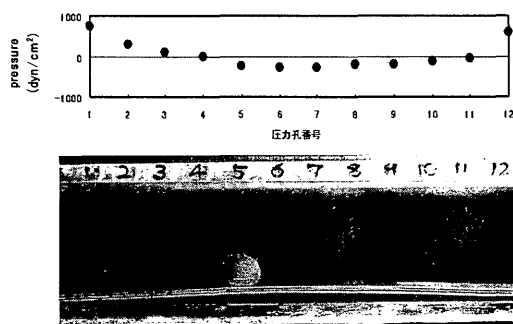
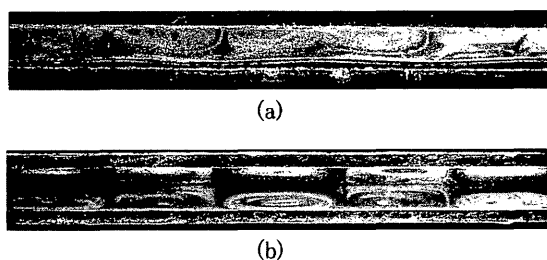
3. 1. 基本場

Fig.2 に、小型パイプを使って管内に定常な二次流れが作られた様子を示す。可視化のために管中にはたばこの煙が注入され、(a) と (b) は、互いに 90° 異なった方向から見た中央断面の流れ模様である。定在波の一波長間に 4 個の循環流が形成される。

Fig.3 は、一つの循環流のほぼ中央の管軸に直角な断面を観察したものである。管のほぼ中央の白いところが管軸中心部の流れ、外側の煙の集中した環状の部分が壁近く循環流断面を示している。

Fig.2 General circulations in a rectangular tube at $f=1718\text{Hz}$.

(a) Plane view in a vertical section., (b) plane view in a horizontal section.

Fig.3 Plane view of a general circulation in a cross section normal to the tube axis at $f=1529\text{Hz}$.Fig.4 Static pressure distribution and the deformation of the liquid surface at the middle of the tube when $f=1150\text{Hz}$.Fig.5 General circulations in a rectangular tube containing a layer of oil at $f=1813\text{Hz}$.

(a) Plane view in a vertical section, (b) plane view in a horizontal section.

Fig.4 は、大型パイプを使い、管の底部に深さ約 3mm (静止時) に灯油を入れ、 $f=1150\text{Hz}$ の音の定在波を作った時の管のほぼ中央の腹付近の液面変形と空気柱内の静圧分布を示したものである。圧力孔の間隔は 1cm おきであり、グラフの縦軸は、大気圧 1.013×10^6 (dyn/cm²) からの差で示している。6番の圧力孔のあたりが最も圧力が低くなっており、圧力分布に従って液面が変形しているのがわかる。

Fig.5 は、同じく大型パイプを使い、深さ 4mm まで灯油を入れた時の管内の定常二次流れをたばこの煙で観察したものである。(a) は管中央部の鉛直断面の模様であり、(b) は水平断面の循環流を示している。(a) で明らかなように、

気柱の静圧分布に従って液面は波状に変形している。そのため、上部の空気中に現れる循環流は、Fig.2 の場合と比べて大きく変形しているのが分かる。

3. 2. 噴水現象

前述のように、管内の気流中に定在波を作った場合、気流中には二次循環流が常に形成されており、音の強さを大きくしていくと液面も圧力分布に従って変形する。音の強さがある値に達すると、液面が不安定となって、液面の高いところ、つまり音圧の低いところで液面に小さな揺らぎが生じ、これが突然成長して噴水にいたる。

Fig.6 は、定在波の腹の部分近くの液表面に小さな突起が生じ、これが鉛直方向に成長し、ついには破裂し、噴水に至る過程を示している。写真は、毎秒 64 コマ撮影の 16mm フィルムカメラで撮影したものである。示した時間は余り正確ではないが、1コマに 1/64 秒かかるとして概算したものである。このように小さな突起が出来ると、これがほぼ同じ幅で鉛直方向に成長する。あるところで液面変形が表面張力にうち勝つと激しく液を吹き上げて噴水に至る。

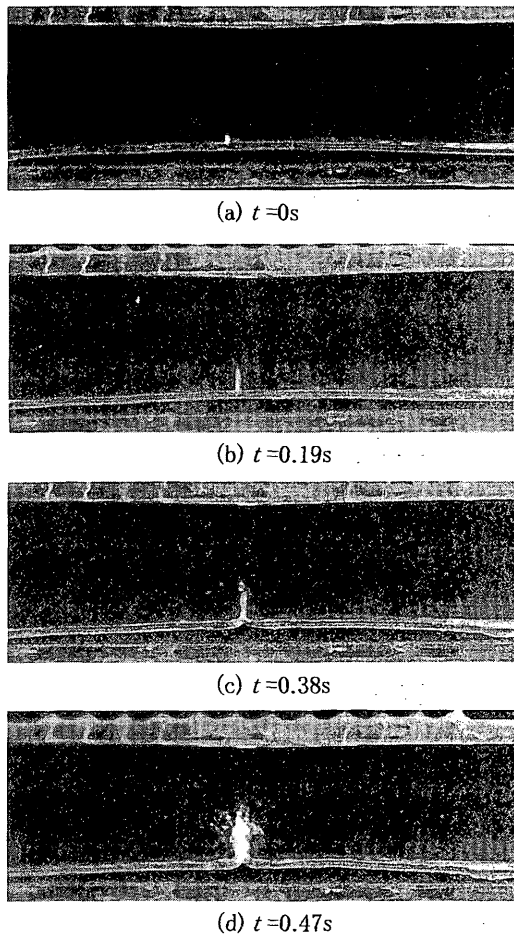


Fig.6 Consecutive stages of formation of a fountain from an oil boss at the antinode when $f=1120\text{Hz}$.

Fig.7は、いくつかの周波数に対して、音の強さを徐々に強くして、最初の噴水が起こった時の音の強さを○で示している。周波数が大きい程、音の強さが低いところで噴水は起こる。なお、この噴水現象はヒステリシスであって、いったん噴水が出来ると、音の強さを若干小さくしても噴水は持続する。Fig.7 には、音の強さを小さくしていった、噴水が消えた点を▲で示している。

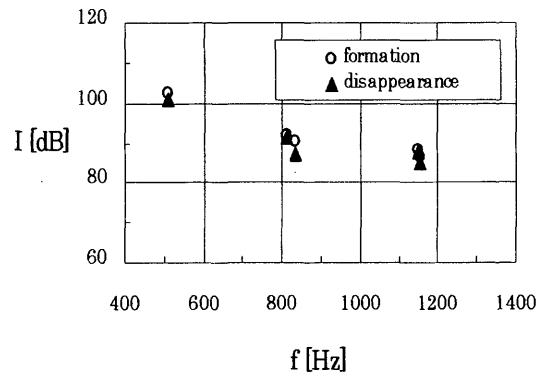


Fig.7 Relationship between intensities and frequencies of the sound when the fountain is formed or disappeared.

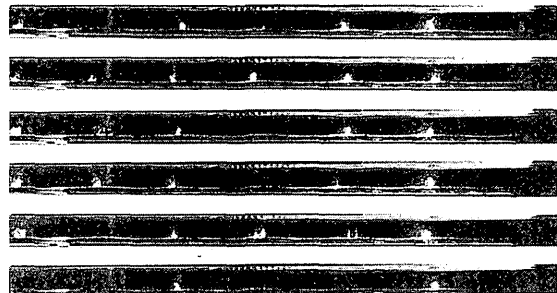


Fig.8 Formation of fountains at antinodes when $f=11140\text{Hz}$.

Fig.8 は、ゆっくり音圧を高めていき、噴水が出来たところで一定の音圧で止めた後の連続的な変化の様子を示している。空気柱の腹の部分、つまり液面の山の部分で噴水が起こっているのは間違いないが、どの噴水も安定しているのではなく、噴水は出来たり消えたりするし、一カ所の噴水の強さも一定しない。

噴水は液面の一つの山にいくつも出来ることがある。Fig.9は、その様子を示す。空気柱振動の周波数が小さい程、つまり音の波長が長い程、液面の勾配が緩やかであるため複数の噴水が出来やすい。ただし、徐々に山の頂上へと集まり、1個の噴水となる。

一つの噴水が出来ると、噴水の上部で出来た球形の液滴が飛び散り、これが隣の山に噴水を作ることがある。この様子を Fig.10 に示す。写真の上から下へと現象は進んでいる。まず、一番上の写真で、右側に噴水が生じ、多くの液滴が液面に浮かんでいるのが分かるであろう。これらは

液面の谷に集まるが、徐々にリッジを作りながら隣の山へと登っていく。これは圧力分布に従って移動しているであろう。隣の山の頂上に達すると新たな噴水を作る。多くの液滴が、移動する時管軸に直角に並び、リッジを形成する。これは圧力分布が管軸に直角には一定であることに依っているであろう。ところが、これらリッジがいくつも並ぶことがある。この現象は、クント管内の粉末によるリッジ列の形成と同根なのかもしれないが、未だそのメカニズムの詳細は不明である。

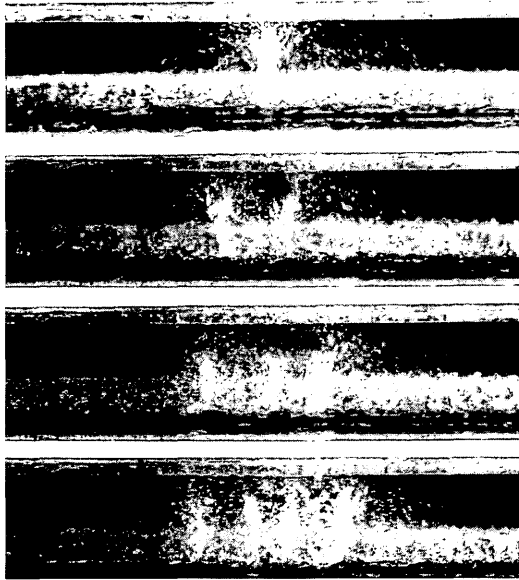


Fig.9 Formation of fountains at antinodes when $f=508\text{Hz}$.



Fig.10 Consecutive stages of formation of fountains when $f=1147\text{Hz}$.

3. 3. 液滴変形実験

前述のように、噴水の発生は、液表面の揺らぎや小さな変形が核となって起こるものと思われる。また液面の山のと

ころで起きやすいということは、音という空気の振動流の振幅の大きなところで起こりやすいということの意味するであろう。

さて、振動流の中に突起物があれば、その突起物の頂上で最も圧力が低いはずである。そのことを確かめるために、大型パイプの底にグリセリンの液滴をおいて、定在波中の液滴の変形を観察した。Fig.11 がその時の実験写真である。パイプの圧力孔 No.6 から注射針を入れて、パイプの底にグリセリンの液滴を作る。Fig.11(a)は、音のない状態であり、グリセリンの液滴は底部で直径約 7mm であった。周波数 807Hz の定在波を作り、音の強さを徐々にあげていくと、(b)→(c)のように上方に尖った形に変形していき、ついには(d)のように表面張力が破れ、液滴は破裂する。



(a) 0dB



(b) 143.8dB



(c) 144.1dB



(d) 144.1dB

Fig.11 Consecutive stages of burst of a glycerin droplet at $f=1143\text{Hz}$.

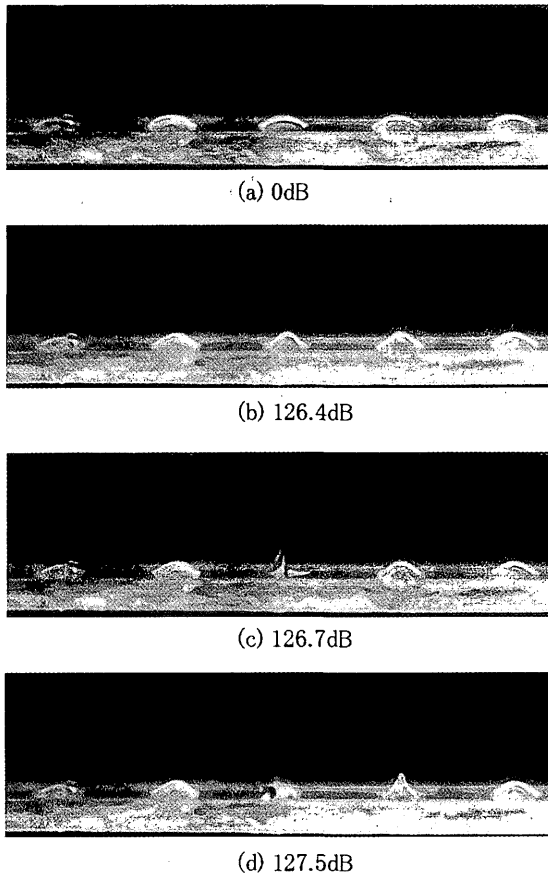


Fig.12 Consecutive stages of burst of glycerin droplets at $f=1145\text{Hz}$.

Fig.12は、同様に、パイプの底に5個の液滴を作り、その変形の早さを比べたものである。圧力孔 No.2, 4, 6, 8, 10の真下に直径約8mmのグリセリンの液滴を作る。つまり液滴間の距離は2cmおきである。 $f=1145\text{Hz}$ で徐々に音の強さをあげていくと、No.6の位置の液滴の変形が最も早い。ここは、静圧の最も小さい、つまり振動流の振幅の最も大きい位置である。その次にNo.8, No.4の順序で変形する。No.6の液滴が破裂した後、No.8の液滴が破裂する。その次にNo.4の液滴が破裂する。

3. 4. リッジ表面圧力分布計測

前節で述べたように、液滴は音波の振動振幅の最も大きいところで変形が早く、液滴は上方へ尖り、破裂に至る。このことは、液滴の左右側面よりも頂上部の圧力が低くなっていることを示唆している。このことを確かめるため、次のような実験を行った。

Fig.13は、圧力分布を計るリッジモデルである。直径0.965cmの円柱の一部を削り、高さ0.760cmのリッジとし

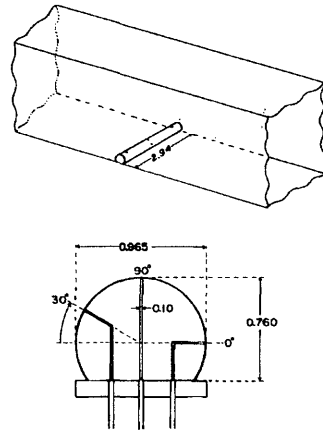


Fig.13 Schematic diagram of a ridge model.

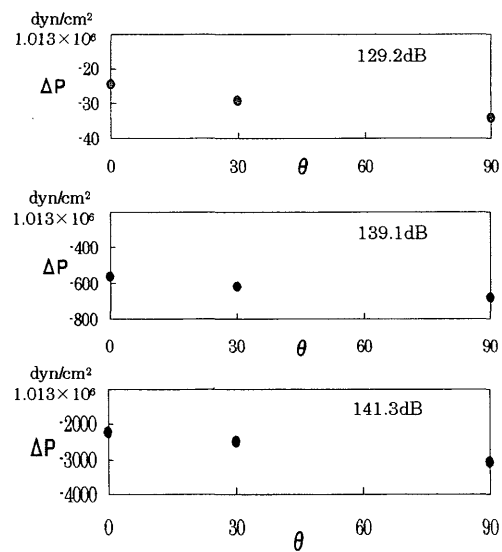


Fig.14 Static pressure at each point on the surface of a ridge model at several intensities of sound when $f=812\text{Hz}$.

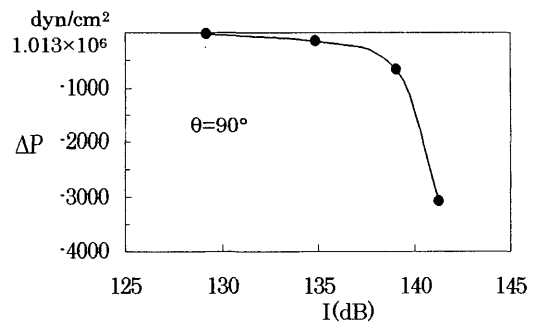


Fig.15 Variations of static pressure with sound intensity at $\theta=90^\circ$ when $f=812\text{Hz}$.

た。その表面に、図のように 0° , 30° , 90° の位置に直径1mmの圧力孔を備えている。これを大型パイプの圧力

孔 No.6 の真下に設置した。

Fig.14 に、管中に $f=812\text{Hz}$ の音の定在波を作り、音の強さを変えて3カ所の圧力を測定した結果を示す。縦軸は、大気圧からの差を示している。いずれの音の強さでも 90° の位置、つまりリッジの頂上が最も圧力が低いことが分かる。

Fig.15 は、同じく $f=812\text{Hz}$ の時、リッジの頂上の圧力が音の強さでどのように変化するかを示したものである。音の強さを大きくしていくと、リッジ頂上での静圧は急激に低くなっていくのが分かる。

4. 結論

クント管の下部に液体を入れて、音の定在波を作った時に観察される噴水の形成過程について調べた。

液面は定在波の圧力分布に従って変形しているが、音の強度が強くなると、液面に不安定が起こり、小さな揺らぎが起こる。振動流により、この揺らぎの突起の側面よりも頂上部の圧力が小さくなり、変形は鉛直方向に発達し、ついには噴水に至るということが分かった。ただし、液滴のリッジが複数並ぶ現象はこれでは説明がつかない。

参考文献

- 1) Hutchisson, E. & Morgan, F. B. :An experimental study of Kundt's tube dust figures, *Physical Review* **37**(1931)1155-1163.
- 2) Andrade, E, N, DA C. : On the circulations caused by the vibration of air in a tube, *Proc. Royal Soc. London* **A134**(1932)445-470.
- 3) Andrade, E. N. DA C. : On the groupings and general behaviour of solid particles under the influence of air vibrations in tube, *Phil. Trans. Roy. Soc.* **A230**(1932)413-445.
- 4) Howatson, A. F. : The behaviour of liquids in a vibrating air column, *Phil. Mag.* **36**(1945)20-31.
- 5) Ingard, U. : Some aspects of the interaction of sound with a liquid surface, *7th Int. Congress Acoustics, Budapest* **20 P 9**(1971)213-216.
- 6) Ingard, U. & Galehouse, G. : Second-order pressure distribution in an acoustic normal mode in a rectangular cavity, *Amer. J. Phys.* **39**(1971)811-813.
- 7) 安達 健、新井洋二、松田和久:クントの実験における粉の動きと縞の生成, *Nagare* **11-4**(1980)25.
- 8) 藤田祐幸、中塚 満、諸隈之彦、竹光信正、松信八十男 : Kundtの実験の意味するもの、慶應義塾大学日吉論文集・自然科学編 **16**(1981)1-70.