

気液混相流の渦崩壊に伴う音波

Acoustic Wave with Vortex Breakdown in a Gas-Liquid Multiphase flow

○坂入信之, 筑波大シス情報, つくば市天王台 1-1-1, nsakairi@surface.kz.tsukuba.ac.jp

金子公久, 日本ガイシ, 名古屋市瑞穂区須田町 2 番 56 号,

山田麗徳, 筑波大シス情, つくば市天王台 1-1-1, yamada@surface.kz.tsukuba.ac.jp

京藤敏達, 筑波大シス情報, つくば市天王台 1-1-1, kyotoh@kz.tsukuba.ac.jp

Nobuyuki SAKAIRI, Univ. of Tsukuba, 1-1-1, Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Kimihiisa KANEKO, Nihon Gaishi, 2-56, Mizuho-ku, Nagoya-shi, Aichi

Yoshinori YAMADA, Univ. of Tsukuba, 1-1-1, Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Harumichi KYOTOH, Univ. of Tsukuba, 1-1-1, Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Acoustic sound is generated on the operation of microbubble generator with vortex breakdown. In this study, source of the sound is assumed to be originated from oscillations of the gas column which is generated with centrifugal force of strong swirling flow. Since wavelength of the sound in water is much larger than radius of the column, acoustic sound is calculated by solving equation of motion of incompressible fluid in polar coordinate. Nonlinear equations for amplitude of velocity component of radial direction, and gas column displacement are determined. A linear dispersion relation between frequency of the sound and radius of the gas column is obtained by perturbation analysis.

1. はじめに

渦崩壊を用いた微細気泡発生装置の稼働の際に大きな音が発生する。本研究ではそこで発生する音波が、旋回流中心の気柱の渦崩壊の際の振動によるもの仮定し、解析を行った。

気柱の半径が音波の波長に比べて十分に小さいと仮定して⁽¹⁾, 旋回流中の音波の伝播について非圧縮性流体の軸対称の運動方程式を解くことで解析を行った。流速の方位角方向の成分についての方程式が循環の保存則になることから、旋回流についてポテンシャル渦と Burgers 渦を仮定した。以上の計算により、放射方向の流速の振幅の時間についての関数と、気柱と旋回流の界面についての非線形方程式が得られる。一次の摂動を取ることで振動の周波数と気柱の径の間の線形の分散関係を得た。

2. 支配方程式

極座標系での連続の式から、放射方向の流速は、 $u_r = A(t)/r$ で与えられる。

運動方程式の方位角方向成分は、Lagrange 変数を用いて循環の保存則 $dC/dt = 0$ と変形できる。ここで、 C は循環で、 $C = ru_\theta$ として決まる。循環の保存則より、一般解を $C = C_0(r_0), r^2 = r_0^2 - 2 \int_0^t A(\tau) d\tau$ として与える。

また、運動方程式の r 方向成分を積分すると、

$$A_t \log r - \frac{A^2}{4r^4} - \int_{\infty}^r \frac{C^2}{r^3} dr = -\frac{1}{\rho}(p - p_{\infty}), \quad (1)$$

として圧力が得られる。ただし、ここで ρ, p_{∞} は水の密度、無限遠での圧力である。

3. 境界条件と一次の摂動

気柱の表面を $r = R(t)$ とし、 A と R について、

$$R = a + \epsilon \xi(t), \quad A = \epsilon \eta(t), \quad (2)$$

として展開する。但し、 ϵ は任意の微小量。また、 a は気柱の平均径である。

以下、一次の摂動を取ることで、線形の分散関係式を求める。

運動学的境界条件は

$$\xi_t - \frac{\eta}{a} = 0. \quad (3)$$

力学的境界条件は、旋回流の形をポテンシャル渦と、Burgers 渦を各々仮定して、(1) より圧力を求めることで得る。

ポテンシャル渦について、

$$(\log a)\eta_t - \left(\frac{\Gamma^2}{16a^5} + \frac{2\gamma p_0}{\rho a} - \frac{T}{\rho a^2} \right) \xi = 0. \quad (4)$$

(3) と (4) より、ポテンシャル渦の場合の気柱の半径 a と振動の周波数 ω の関係は、

$$\omega^2 = - \left(\frac{\Gamma^2}{16a^5} + \frac{2\gamma p_0}{\rho a} - \frac{T}{\rho a^2} \right) / a \log a, \quad (5)$$

となる。但し、 Γ は渦の強さである。

Burgers 渦の力学的境界条件は、

$$(\log a)\eta_t + \left(\frac{K}{16a^5} - \frac{2\gamma p_0}{\rho a} + \frac{T}{\rho a^2} \right) \xi - K I e^{\frac{\alpha}{\nu}} \int \eta d\tau = 0. \quad (6)$$

ここで、 K, I はそれぞれ渦の強さを示すパラメータ。式 (6) の指数関数の項について、 $\eta = 0$ 周りで展開して解くと、周波数と気柱径の間の関係は、

$$\omega^2 = \frac{-\frac{K}{16a^5} + \frac{2\gamma p_0}{\rho a} - \frac{T}{\rho a^2} + K I \frac{\alpha a}{\nu}}{a \log a}, \quad (7)$$

となる。

4. まとめ

気液混走流の渦崩壊に伴う気柱の振動による音波について解析を行った。旋回流の影響を、支配方程式に於て方位角方向の流速について解くことで、それを考慮に入れた。旋回流の形について、ポテンシャル渦、Burgers 渦を仮定した。各々の渦の場合の気柱の径と音の周波数の間の関係が得られた。

参考文献

- (1) M. S. Longuet-Higgins, "Monopole emission of sound by asymmetric bubble oscillations. Part 1. Normal modes", J. of Fluid Mech., vol. 201, (1989), pp525-541.