

位相差を考慮した電磁浮遊液滴の $m=\pm 2$ 振動と回転周波数の同定

江田拓朗¹, 小澤俊平¹, 尺長憲昭¹, 田川俊夫¹, 日比谷孟俊²

1 首都大学東京, 2 慶應義塾大学

Scope of Space Utilization Sciences Identification of $m=\pm 2$ oscillation and droplet rotation for electromagnetically levitated droplet considering phase difference

Takuro Koda¹, Shumpei Ozawa¹, Noriaki Takenaga¹, Toshio Tagawa¹, Taketoshi Hibiya²

1 Tokyo Metropolitan University 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

2 Keio University, 2-15-45 Mita, Minato-ku, Tokyo 108-8345

E-Mail: kouda@astan1.tmit.ac.jp

Abstract: An identification of frequencies of the $m=\pm 2$ oscillation is required to measure an accurate surface tension of high temperature by the oscillating droplet technique using electromagnetic levitation. However, it is very difficult because the frequency peak of the $m=2$ oscillation splits into two peaks in the frequency analysis if the droplet rotates. In this study, we clarified the influence of the droplet rotation on the $m=\pm 2$ oscillation in the frequency analysis considering initial phase difference between $m=+2$ and $m=-2$.

Key words; Surface tension, Oscillating droplet method, Electromagnetic levitation, Spherical harmonics, rotation

1. 緒言

液滴振動法では過冷領域を含む広い温度範囲で、高精度な表面張力測定が可能である[1]。地上における、電磁浮遊装置を利用した液滴振動法では、高温の浮遊液滴から、 $l=2, m=0, \pm 1, \pm 2$ 振動周波数を特定することで表面張力値を求めることが出来る[2,3]。これらの周波数は、上部から観察した液滴の輪郭情報を抽出し、液滴の投影面積(A)、液滴の重心を座標系の原点としたx, y軸における液滴の径長さ(R_x, R_y)の和と差(R^+, R^-)の時系列情報を用いることで、Table 1の関係によって得られる。

浮遊液滴が回転すると、 R^- の周波数情報において、 $m=\pm 1, \pm 2$ 振動が等しいピーク強度でスプリットすることが理論的に示されている[4]。このスプリットに似た現象は実験研究においてしばしば確認されているが、実際にはスプリットした2つのピーク強度が大きく異なり、その理由については、既往の知見では説明できない問題がある。

本研究では、液滴の回転と $m=\pm 2$ 振動を詳細に解析し、 R^- の周波数情報における、それらの関係を明らかにすることを目的とする。特に、 R^- に現れるスプリットした2つのピークの強度が異なる事を理論的に説明する。

2. 球面調和関数による液滴の振動表現

浮遊液滴の表面振動は球面調和関数によって表すことができる。球座標系における $m=\pm 2$ 振動の挙動を次に示す。

$$\varepsilon_{m=\pm 2}(\theta, \phi, t) = 3a_{m=\pm 2} \sin^2 \theta \cos(m(\phi - \omega_{rot} t)) \times \cos(\omega_{m=\pm 2} t - \psi_{m=\pm 2}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{m=\pm 2}(\theta, \phi, t) = 3a_{m=\pm 2} \sin^2 \theta \sin(m(\phi - \omega_{rot} t)) \times \cos(\omega_{m=\pm 2} t - \psi_{m=\pm 2}) \quad (2)$$

$\varepsilon_{m=\pm 2}$ は $m=\pm 2$ 振動のみを表している。 a は振幅、 $\omega_{m=\pm 2}$ は $m=\pm 2$ 振動の角周波数、 $\psi_{m=\pm 2}$ は $m=\pm 2$ 振動の初期位相、 ω_{rot} は浮遊液滴の回転角周波数を示す。ここで浮遊液滴の表面振動を記述する上でいくつかの仮定を示す。①浮遊液滴の初期形状は真球である。② $m=+2, -2$ の振動振幅は等しい(i.e. $a_{m=+2} = a_{m=-2}$)。③浮遊液滴の回転はz軸周りで一定である。また、Cummings & Blackburnの補正式から[3]、 $m=+2$ と $m=-2$ の振動周波数は等しい事が言える(i.e. $\omega_{m=+2} = \omega_{m=-2}$)。したがって、浮遊液滴の $m=\pm 2$ 振動は次のようになる。

$$R(\theta, \phi, t) = r_0 + \varepsilon_{m=+2}(\theta, \phi, t) + \varepsilon_{m=-2}(\theta, \phi, t). \quad (3)$$

また、式(3)から、 R^- の時系列情報は次のようになる。

$$R^-(t) = R(\pi/2, 0, t) - R(\pi/2, \pi/2, t). \quad (4)$$

$m=\pm 2$ 振動の R^- における周波数情報は式(3, 4)を用いて数学的に示すことができる。本研究では浮遊液滴に回転を与え、 R^- の周波数情報においてスプリットした2つのピークの強度変化を調べるために、 $m=+2$ と $m=-2$ 振動の初期位相($\psi_{m=\pm 2}$)に着目した。

Table 1 Relationship among oscillation of $m=0, m=\pm 1$, and $m=\pm 2$, corresponding to that of area A, R_x and R_y

	$R^+ = R_x + R_y$ and $R^- = R_x - R_y$		
	$m=0$	$m=\pm 1$	$m=\pm 2$
A	Yes	Yes	No
R^+	Yes	Yes	No
R^-	No	Yes	Yes

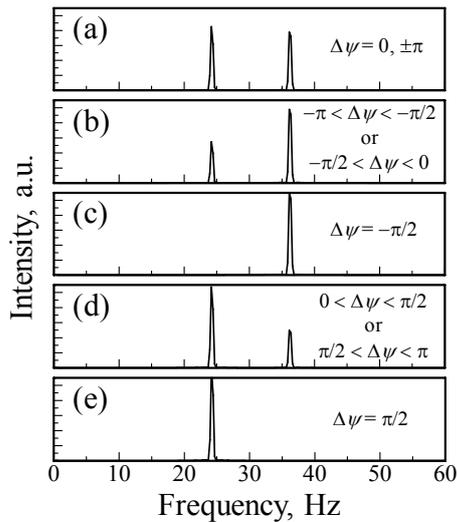


Figure 1 Five patterns of appearance in the R^- spectrum. The left-hand side peak is at 24Hz and the right-hand side peak at 36 Hz. (a) Equal intensity at $\Delta\psi = 0, \pm\pi$. (b) The right-hand side peak is higher than the left-hand side one at $-\pi < \Delta\psi < -\pi/2$ and $-\pi/2 < \Delta\psi < 0$. (c) Only right-hand side peak appears at $\Delta\psi = -\pi/2$. (d) The left-hand side peak is higher than the right-hand side one at $0 < \Delta\psi < \pi/2$ and $\pi/2 < \Delta\psi < \pi$. (e) Only left-hand side peak appears at $\Delta\psi = \pi/2$.

3. 表面振動の解析結果と考察

回転周波数 $f_{rot}=3\text{Hz}$, $m=\pm 2$ 振動周波数 $f_{m=\pm 2}=30\text{Hz}$ として解析を行った. ここで液滴の回転は反時計回り($\omega_{rot} > 0$)とした. R^- の周波数情報をFig. 1に示す. この結果は $m = +2$ と $m = -2$ 振動の初期位相差によって5つの場合に分けて示している. 初期位相差は次のように定義した.

$$\Delta\psi = \psi_{m=-2} - \psi_{m=+2}. \quad (5)$$

Fig. 1の全てのグラフにおける左側のピークは24Hzであり, $f_{m=\pm 2} - 2f_{rot}$ の関係が成り立っている. 右側のピークは36Hzであり, $f_{m=\pm 2} + 2f_{rot}$ の関係がある. この2つのピークは $m=\pm 2$ 振動がスプリットしたピークである. (a)–(e)における左右のピーク強度の違いは, 初期位相差 $\Delta\psi$ に依存している. Fig. 1(a)は左右のピーク強度がほとんど等しく, (b, d)は左右のピーク強度に差が出る結果になった. (c, e)では左右どちらか一方のピークしか現れなかった.

スプリットした左右のピーク($f_{m=\pm 2} \pm 2f_{rot}$)の強度変化について詳細に解析し, その結果をFig. 2に示した. ここでは, 浮遊液滴が反時計回りに回転している場合の, R^- の周波数情報でスプリットしたピークの初期位相差とピーク強度の関係を示している. Fig. 2から, Fig. 1 (a), (c)および(e)に示すピーク強度の関係は初期位相差 $\Delta\psi$ が特別な値をとる場合に現れることがわかる. また, ほとんどの $\Delta\psi$ の値にお

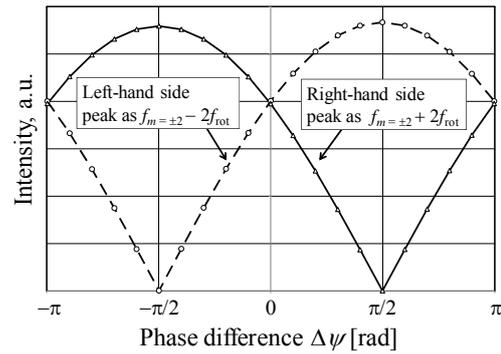


Figure 2 Intensities of right and left side peak which appear in R^- spectrum as a function of phase difference between $m = +2$ and -2 ($\Delta\psi$).

いて, Fig. 1(b), (d)に見られるピーク強度の関係が現れることが言える.

つまり, 回転によりスプリットしたピーク強度は, 常に等しい強度を持つわけではなく, 強度差がある場合がほとんどである事が分かった.

実験研究では, Fig. 1(b)のピーク強度の関係がよく観察された. これは, 真の回転と $m = \pm 2$ 振動による見かけの回転方向が同じであることを示している.

謝辞

本研究テーマは, 「微小重力下での酸素分圧制御による金属性融体の表面張力測定ワーキンググループ」(代表: 日比谷孟俊(慶応大))に属し, 研究活動・議論を行っていることを記す. なお, 本研究の一部は, NEDOからダイフク・アルベック・ソフトウェアを通じて委託された「溶接設計支援システム用データベース構築の調査研究及び研究開発等」の成果である. また一部は, JSTから東北大学を通じて委託された, 「高度ものづくり支援—超高温熱物性計測システムの開発」の成果である. 磁場中での測定実験は, 東北大金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターとの共同研究により実施した.

References

- [1] M. Przyborowski, T. Hibiya, M. Eguchi and I. Egry, *J. Crystal Growth*, **151**, 60, 1995.
- [2] Lord Rayleigh, *The Royal Society*, **29**, 71, 1879
- [3] D. L. Cummings and D. A. Blackburn, *J. Fluid Mech.*, **224**, 395, 1991.
- [4] I. Egry, H. Giffard and S. Schneider, *Meas. Sci. Technol.*, **16**, 426, 2005