

鳥取大・工(正) 松岡 広成 鳥取大・工(正) 福井 茂寿 鳥取大・院(学) *山根 加津子

1. はじめに

二つの固体表面が、液体を介して分子の直径の十倍(数～数十nm)程度まで近づくと、二面間には、構造力と呼ばれる力が働くことがわかっている^{1),2)}。

本研究では、液体で満たされた平面・球面間に働く液体構造圧力を考慮し、平面に球体を近づけた時、球体がどのような運動をするかを、コンピュータシミュレーションによって解析した。

2. 構造力のしくみ^{1),2)}

図1は、固体表面間の液体分子の状態を模式的に示したものである。この図から、二面間距離 D が液体分子の直径 s の整数倍となるところでは液体分子の密度が高くなり、その間では密度が低くなることわかる。このような、固体表面間の液体分子の周期的な密度変化によって、構造力は発生する。

図2は、構造圧力を模式的に表したものであり、図中のaからdは、図1での(a)から(d)に対応している。この図から、確かに密度の高い所では斥力が、密度の低い所では引力が発生していることがわかる。構造力は、二面間距離に対して指数関数的に減衰する振動力であり、また振動の周期は二面間に介在する液体分子の分子直径にほぼ等しい、という性質がある。

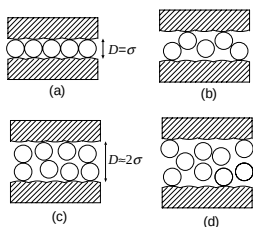


Fig. 1 Density of liquid molecules

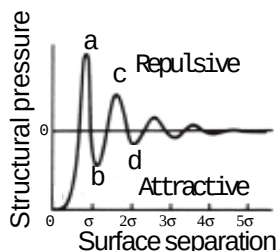


Fig. 2 Structural pressure

3. 解析モデル

図3のように、平面に向かって、質量 m 、半径 R の球が衝突するような運動を考えると、式(1)が成り立つ。ただし、 F は二面間に働く力、 p は構造圧力を表している。式(1)を数値的に解くことによって解析を行った。

$$m\ddot{z} = F = \iint_S p dS \quad (1)$$

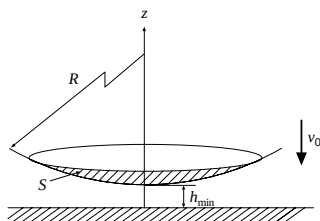


Fig. 3 Coordinate for impact motion

4. 解析結果

4.1 最小すきまとその間に働く力の関係

図4は、球の半径を、5, 10, 20mと変化させて、二面間の最小すきま h_{min} とその間に働く力 F との関係を調べたものである。

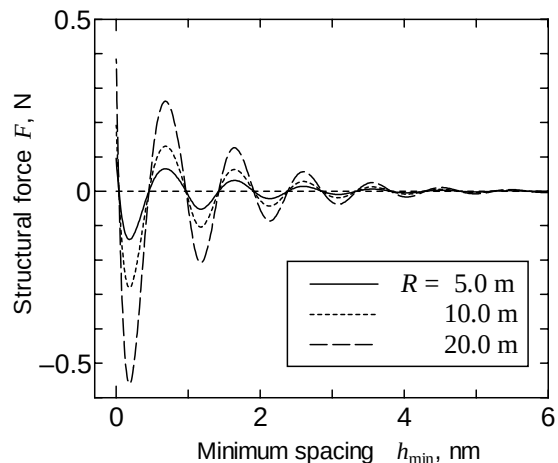


Fig. 4 Relation between minimum spacing and structural force

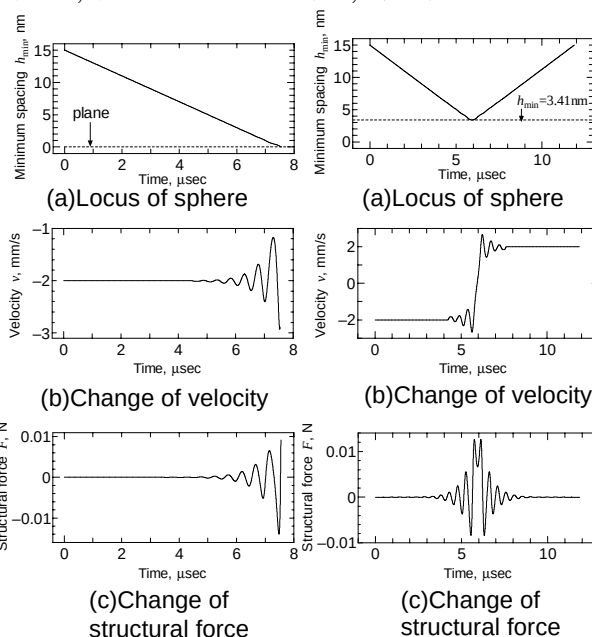
この図から、二面間のすきまが大きいときはほとんど力は働かないが、すきまが小さくなるほど、振幅が大きくなることわかる。また、球の半径が大きいほど振幅が大きくなることわかる。

4.2 衝突運動の時間変化

図5, 6は、衝突運動を行った際の、二面間の最小すきま h_{min} 、球の速度 v 、二面間に働く構造力 F 、それぞれの時間変化を表したものである。

図5は、球の質量 m を1.0mg、初速度 v_0 を-2.0mm/s、半径 R を0.5mとして計算した結果である。この図から、球が平面に近づくにつれてだんだん構造力の振幅が大きくなり、それにしたがって速度も振動し、約7.5μsec過ぎたあたりで平面に衝突することがわかった。

図6は、図5のパラメータの中で、球の半径だけを10.0m

Fig. 5 Calculation results ($m=1.0$ mg, $R=0.5$ m, $v_0=-2.0$ mm/s)Fig. 6 Calculation results ($m=1.0$ mg, $R=10.0$ m, $v_0=-2.0$ mm/s)

に変えて計算を行った結果である。この場合も先ほどと同じように、球が平面に近づくにつれてだんだんと構造力の振幅が大きくなり、それにしたがって速度も振動した。しかし、二面間の最小すきまが3.41nmとなったところで跳ね返されることがわかった。

4.3 最小すきまとポテンシャルエネルギーの関係

図7は、図4に示した二面間に働く力を積分して、ポテンシャルエネルギーを求めたものである。この図から、二面間のすきまの大きいところではポテンシャルエネルギー U はほとんど0であることがわかる。したがって、初期の力学的エネルギーは運動エネルギー E_0 のみとなり、 $E_0 = mv_0^2/2$ で求められる。図7から、 $E_0 = 20\text{pJ}$ のとき $h_{\min} = 1.51\text{nm}$ で球が跳ね返されることがわかる。さらに、 m や v_0 を大きくし、 E_0 を30pJ, 40pJとすると、跳ね返される位置は、0.61nm, 0.57nmと平面に近づくことがわかる。また、 E_0 が30pJや40pJの時のように、同じポテンシャルエネルギーの山で跳ね返される場合は、跳ね返される位置はほとんど変わらない。しかし、 E_0 が20pJの時は、異なるポテンシャルエネルギーの山で跳ね返されるので、跳ね返される位置は大きく変わる。したがって、 m や v_0 をだんだんと大きくし、跳ね返される位置を調べると、ほとんどその位置が変わらないところと、大きく変わるところがあることが予想できる。

4.4 各パラメータごとの跳ね返される位置の変化

図8(a)は、球の質量 m をさまざまに変えて計算を行い、球が跳ね返される位置 $h_{\min,b}$ を調べたものである(図中の黒丸)。4.3でも述べた通り、ポテンシャルエネルギー U が、初期の運動エネルギー E_0 と等しくなった時、球は跳ね返される。したがって、つぎの式が成り立つ。

$$U(h_{\min,b}) = E_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad \therefore m = \frac{2}{v_0^2}U(h_{\min,b}) \quad (2)$$

よって、4.3で求めたポテンシャルエネルギー U に $2/v_0^2$ をかけて、質量 m と球が跳ね返される時の最小すきま $h_{\min,b}$ の関係を求めたものを実線で表した。

図8(b)は、初速度 v_0 をさまざまに変えて計算を行い、球が跳ね返される位置 $h_{\min,b}$ を調べたものである(図中の黒丸)。先ほども述べた通り、 $U=E_0$ となった時に球は跳ね返されるのでつぎの式が成り立つ。

$$U(h_{\min,b}) = E_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad \therefore v_0 = \pm \sqrt{\frac{2U(h_{\min,b})}{m}} \quad (3)$$

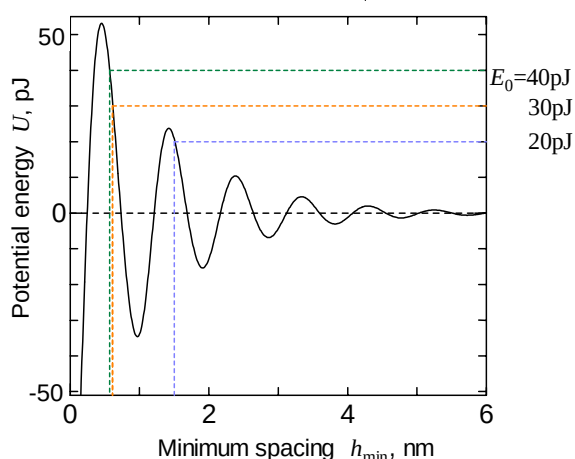


Fig. 7 Relation between the minimum spacing $h_{\min}$ and potential energy U ($R=20\text{m}$)

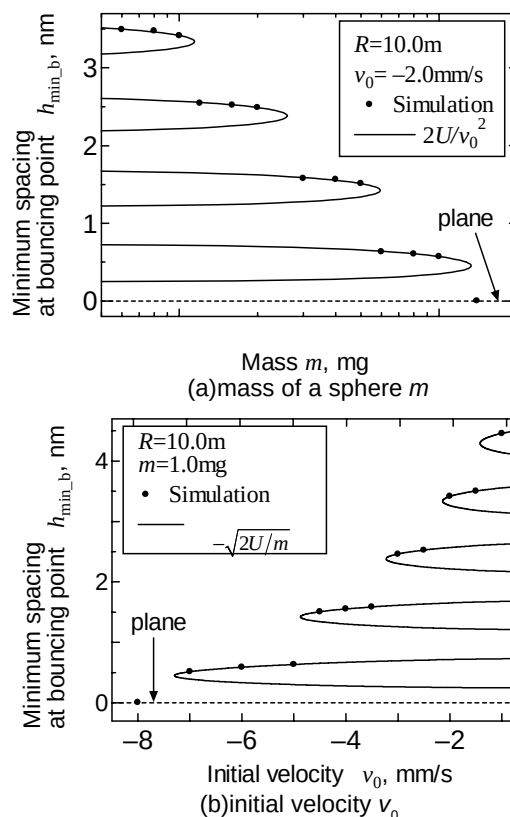


Fig.8 Relation between minimum spacing at bouncing point $h_{\min,b}$ and mass of a sphere m

よって、4.3で求めたポテンシャルエネルギー U を用いて初速度 $v_0 = -\sqrt{2U/m}$ (初速度 v_0 は負)として計算し、初速度 v_0 と球が跳ね返される時の最小すきま $h_{\min,b}$ の関係を求めたものを実線で表した。

図8から、質量や初速度の絶対値は、大きくするほど跳ね返る位置は平面に近づき、ある値を超えると平面に衝突することがわかった。これは、質量や初速度を大きくすると初期の運動エネルギーが大きくなるためである。

また、いずれの場合もシミュレーションによって得られた $h_{\min,b}$ は、階段状に離散的な値をとっている。これは、4.3でも述べた通り、同じポテンシャルエネルギーの山で跳ね返される場合には跳ね返される位置はほとんど変わらないが、異なる山で跳ね返される時は大きく変わるためである。

5. おわりに

本研究では、液体で満たされた非常に狭いすきまにおいて発生する液体構造圧力を考慮して、平面に向かって球が衝突するような運動を想定し、シミュレーションを行った。

条件によって、球が平面に衝突したり、衝突する前に跳ね返されたりすることがわかった。

また、球の質量と初速度の大きさをパラメータとして計算を行った結果、跳ね返される位置がパラメータによって変化し、階段状に離散的な値をとることがわかった。

参考文献

- 1) J. N. イスラエルアチヴィリ, 1996, 分子間力と表面力, 朝倉書店
- 2) 松岡広成, 1995, 分子オーダーの流体潤滑膜厚さに関する研究, 東京大学博士論文