

# 液体噴流と薄液膜の干渉

## Interaction between Liquid Jet and Thin Liquid Film

- 松本充弘, 京都大・工, 京都市西京区京都大学桂 C3, E-mail : matsumoto@kues.kyoto-u.ac.jp  
 広橋謙介, 京都大・工, 京都市西京区京都大学桂 C3

Mitsuhiro Matsumoto, Kyoto University, Kyoto Daigaku Katsura C3, Kyoto 615-8540

Kensuke Hirohashi, Kyoto Univeristy, Kyoto Daigaku Katsura C3, Kyoto 615-8540

We carried out a series of molecular dynamics simulations to investigate the response of thin liquid film to impingement of thin liquid jet. In all cases of vertical impingement, the film is finally ruptured. Film deformation before the rupture depends on the jet speed; slower jet causes a larger hollow on the film. When jet is impinged with a slant angle, reflection of the jet is observed as a transient state, showing some similarity with macroscopic experiments; as the film deformation proceeds, however, the film becomes unstable and finally perforated.

### 1. はじめに

石けん膜など薄い液膜の安定性や動的挙動については古くよりいろいろな観点から研究がなされている<sup>(1)</sup>。最近, 固体微粒子や液体噴流(ジェット)が液膜に衝突した際の液膜の変形やエネルギー吸収挙動についての実験<sup>(2, 3, 4)</sup>が報告された。これらは界面活性剤で安定化された液膜についての巨視的な実験であるが, 投射物による液膜の変形(トランポリン効果)により投射粒子や噴流のエネルギーや運動量が吸収されることが示されている。我々は昨年, 分子スケールの薄液膜について微粒子の投射に対する液膜の変形や不安定化を調べる分子動力学計算を報告した<sup>(5)</sup>。今回は, 同様の手法を用いておこなった, 液体噴流に対する薄液膜の応答のシミュレーションについて報告する。

### 2. 計算方法

Lennard-Jones (LJ) 相互作用をする単原子分子流体を用いた単成分液膜を作成し, その中央部に, 液膜と同種の LJ 液体の噴流を衝突させる分子動力学 (MD) 計算を行った。以下では, 表 1 に示すように LJ パラメタで諸物理量を無次元化して示す。

#### 2.1 計算系

半径  $35\sigma$  の円筒形計算セルの中央部に, 中心軸と垂直に LJ 液体の薄い液膜を用意し, 温度を一定に制御した MD 計算により平衡化する。本研究においては, 液膜の膜厚は  $10\sigma$  程度とした。また, 平衡化温度は  $T_0 = 0.72$  とした。これは大まかには水の三重点温度に対応するように選んだものである。噴流を衝突させる際, 液膜が噴流に押されて中心軸上を並進運動(後退)することを防ぐため, 平衡化後に液膜の最外周の粒子位置を固定した。これ以外の粒子については, 円筒側面は反射境界, 上下底面は流出境界とした。これとは別に, 膜厚とほぼ同じ直径  $10\sigma$  の円筒セルを液体密度の LJ 粒子で満たして温度  $T_0$  で平衡化した後, 軸方向に一様な並進速度  $V_0$  を与えて円筒から吐出させることにより液体噴流(ジェット)を作成する。このようにして別々に作成した液膜系と噴流系を組み合わせることで噴流衝突の MD シミュレーションを行った。なお衝突の主計算においては温度制御

Tab. 1: Units of the simulation system and values roughly corresponding to water.  $k_B$  is the Boltzmann constant.

	Unit	Value for water
Length	$\sigma$	$0.276 \times 10^{-9}$ m
Energy	$\epsilon$	$5.75 \times 10^{-21}$ J
Mass	$m$	$3.00 \times 10^{-26}$ kg
Time	$\tau \equiv \sigma \sqrt{m/\epsilon}$	$0.630 \times 10^{-12}$ s
Velocity	$\sigma/\tau$	440 m/s
Temperature	$\epsilon/k_B$	410 K

は行わない。

#### 2.2 計算条件

一般には, 液膜については膜厚や半径, 噴流については半径・噴出速度・衝突角度など, 多くのコントロールパラメタがある。本発表では, 主として噴流の速度  $V_0$  と衝突角度  $\theta$  をいろいろと変えて行った計算結果について報告する。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 概要

典型的な場合について, 一連のスナップショットを図 1 に示す。液膜と噴流は全く同じ種類の LJ 粒子で構成されているが, 現象が見やすいように異なる色で表示してある。

垂直衝突  $\theta = 0$  の場合は, ここで計算した範囲 ( $0.3 \leq V_0 \leq 20.0$ ) ではいずれの場合も最終的には液膜に大きな穴が開いて, 噴流がそのまま通過する状態に至った。過渡的な段階では, 液膜が噴流に押されて大きくたわむ様子が見られた。特に, 噴流速度が小さい場合, 液膜がゆっくりと押し出されるためにその変形度がかなり大きくなる [図 1 (a)]。ただし, この場合は変形が局所的ではない

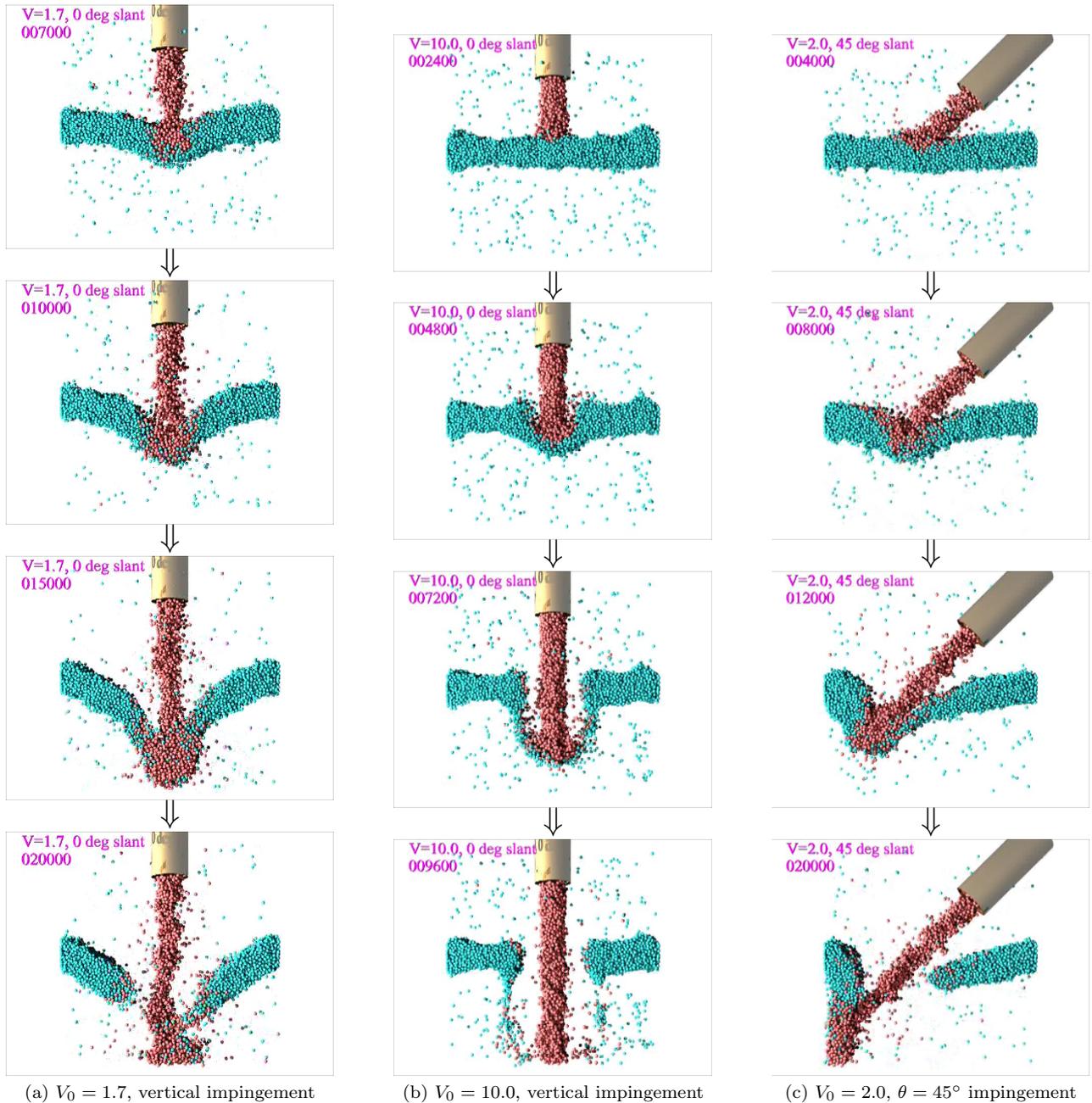


Fig. 1: Sequential snapshots of jet impingement on thin liquid film.

ため、液膜のサイズ（半径）への依存性が無視できないと思われる。逆に噴流速度が大きい場合、液膜は局所的に大きく引き伸ばされて、比較的容易に穴が開く [図 1 (b)]。

斜めに衝突する場合、実験的には液膜による噴流の反射や屈折などの興味深い現象が報告されている<sup>(4)</sup>。本シミュレーションにおいては、大きな衝突角（例えば  $\theta = 80^\circ$  の場合）で初期に反射的な挙動が観察された以外は、すべての計算条件で液膜に穴が開いて噴流がそのまま通過する状態に至った。

なお、液膜に与えるインパクトを小さくするために、噴流速度をさらに小さくしたり ( $V_0 \leq 0.3$ )、噴流直径を小

さくしたりすると、熱揺らぎが顕著になり、噴流が安定に保持できなくなる。これは、Rayleigh-Plateau 不安定性のあらわれであるとも言えよう。

### 3.2 液膜の変形

噴流衝突時の液膜の変形量を定量的に調べた。図 2 には噴流が貫通するまでの、液膜の軸方向の最大変位を噴流速度の関数として示している。上述のように、遅い噴流ほど液膜が大きくたわむ。

一度液膜に穴が開くと、その穴は拡大していった破断に至る。この不安定性は、噴流の太さが液膜厚さと同程度以上の場合に見られると考えられ<sup>(6)</sup>、固体投射物の場合と類似のふるまい<sup>(5)</sup>であろう。図 3 に、液膜に開いた

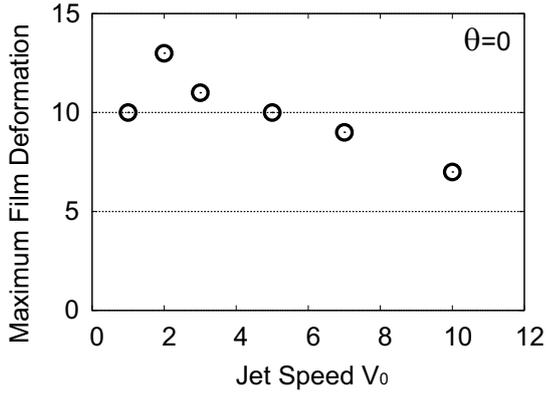


Fig. 2: Maximum film deformation vs. jet speed  $V_0$  for the vertical impingement cases.

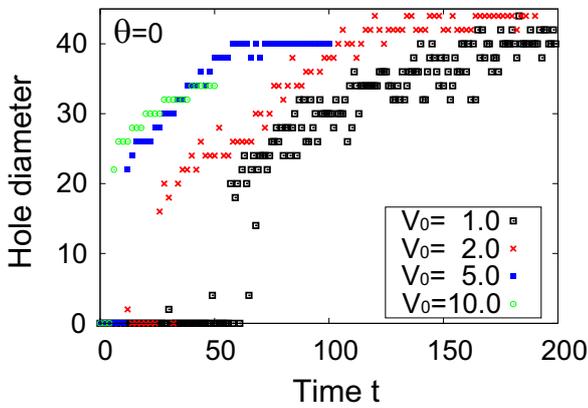


Fig. 3: Examples of the hole size change during rupture; vertical impingement cases.

穴の直径の時間変化を示す。穴が拡大する速度は噴流速度にあまり依存せず、ほぼ一定であることがわかる。

#### 4. まとめ

分子スケールの薄い液膜について、同じく分子スケールのサイズの液体噴流の衝突に対する応答を調べる分子動力学シミュレーションを行った。噴流の反射や屈折が報告されている巨視的スケールの実験の結果とは異なり、調べた範囲のすべての条件において最終的には液膜の破断に至った。

Tab. 2: Experiments vs. simulations.  $\rho$ : liquid density,  $\gamma$ : surface tension,  $\mu$ : viscosity,

Experiments <sup>(4)</sup>		Our simulatons
$\sim 100$ nm	Film thickness	$\sim 3$ nm
$80 \sim 260$ $\mu$ m	Jet size $D$	$\sim 3$ nm
$1 \sim 4$ m/s	Jet speed $V$	$130 \sim 4400$ m/s
$5 \sim 100$	Weber number $We \equiv \frac{\rho DV^2}{\gamma}$	$1 \sim 1000$
$100 \sim 400$	Reynolds number $Re \equiv \frac{\rho DV}{\mu}$	$1 \sim 30$

計算結果が実験と大きく異なっていた理由として、実験では、界面活性剤によって液膜が安定化されているといった物性の違いに加えて、噴流速度の差によるところが大きいと考えている。実験<sup>(4)</sup>では、 $1 \sim 4$  m/s の噴流 (直径は  $80 \sim 270$   $\mu$ m) が用いられているが、我々の計算では、無次元速度  $V_0 = 1$  がおおまかに  $440$  m/s 程度に対応するため、実験よりもずっと高速な噴流を対象としていることになる。ただし、ウェーバー数やレイノルズ数といった無次元量で比較すると、表 2 に示すように、条件にそれほど違いはない。

#### 参考文献

- (1) P-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré, “Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves” (Springer, 2002).
- (2) L. Courbin and H.A. Stone, “Impact, puncturing, and the self-healing of soap films,” *Phys. Fluids*, **18** (2006) 091105.
- (3) A. Le Goff, L. Courbin, H.A. Stone, and D. Quéré, “Energy absorption in a bamboo foam,” *Euro. Phys. Lett.*, **84** (2008) 36001.
- (4) G. Kirstetter, C. Raufaste, F. Celestini, “Jet impact on a soap film,” *Phys. Rev. E* **86** (2012) 036303.
- (5) 松本充弘, 中谷俊洋, “ミクロスケールの投射物に対する薄い液膜の MD シミュレーション,” 第 27 回数値流体力学シンポジウム (名古屋, 2013).
- (6) G.I. Taylor and D.H. Michael, “On making holes in a sheet of fluid,” *J. Fluid Mech.*, **58** (1973) 625.