

# CIP 法による跳飛現象の数値シミュレーション

## Numerical Simulation of the Ricochet Phenomenon using CIP Scheme

- 河合 剛巨, 東工大, 〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1 E-mail: tkawai@es.titech.ac.jp  
矢部 孝, 東工大, 〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1 E-mail: yabe@mech.titech.ac.jp

Takao KAWAI, Dept. of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology,

2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, 152-8552, Japan

Takashi YABE, Dept. of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,

2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, 152-8552, Japan

The phenomenon that the stone skims on the surface of water when the stone is thrown is known as "Skimmer". It is expected that this phenomenon is related to the mechanism such as high-speed boats. In this study, we have performed numerical simulations on this phenomenon using C-CUP Scheme in order to examine its mechanism. By using the CIP method, we are able to describe interaction of solid, liquid and gas simultaneously and also visualize the process effectively using the information inside the cell given by CIP. Then, we verified the validity of the simulation by the experiment.

### 1. はじめに

湖面や川面に向かって平らな石を投げた際に、石が水面を跳ね飛ぶ回数を競う遊びは、「みずきり」や「いしきり」などとして知られ、多くの人が経験することと思う。この石が水面を跳ね飛ぶ現象(水切り現象)は、石である固体が液体、気体の自由表面に接触して相互に影響を及ぼし合いながら運動する流体现象で、興味深い。

この現象は、船舶の衝撃荷重やスラングの問題<sup>(1)</sup>、高速艇などの高速航行時の挙動などとも関連があると考えられる一方で、踏みこんだ取組みは見られていない。実際、近年の多様な交通手段の発達に伴って、船舶の高速は進み、高速艇が多数建造され、レジャー艇などの小型船舶などへも多様な拡がりを見せており、開発・設計に応用が期待される数値シミュレーションの需要は高まっている。しかし、自由表面を含むこうした流れ問題は、固相、液相、気相にわたることが非常に多く、取り扱いには様々な工夫が要る。

そこで、本研究では、各相が混在する系の流体解析手法として C-CUP 法<sup>(2)(3)</sup>を採用しシミュレーションを行う。C-CUP 法は移流計算に CIP<sup>(4)</sup>法を用いているため、比較的粗いグリッドでも精度良く計算を行うことができ、固気液各相を統一的に取り扱い計算することができる。これら特徴を生かし、水切り現象の再現を試みる。

妥当性確認のため、実験も行い、シミュレーション結果と比較することで検証をする。

### 2. 計算手法

支配方程式は、Navier-Stokes 方程式、時間発展型の圧力方程式および密度と密度関数の質量保存式である。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + Q_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p = -\rho C_s^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho = -\rho (\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \phi_i = -\phi_i (\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (4)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $\phi_i$  は各  $i$  相の密度関数、 $Q_u$  は粘性、応力、重力、表面張力からなる項、 $C_s$  は音速で、比熱比

$\gamma$  を用いて以下のように定義する。

$$C_s^2 = \frac{\gamma P}{\rho} \quad (5)$$

以上の支配方程式に対して C-CUP 法を採用する。

支配方程式を時間分離解法により、非移流項、移流項とに分離して解く。非移流項において、式(1)の各成分の微分を取り、式(2)とにより整理すると以下の圧力に関するポアソン方程式が導かれる。

$$\nabla \left( \frac{\nabla p^*}{\rho^n} \right) = \frac{p^* - p^n}{\rho^n C_s^2 \Delta t^2} + \frac{\nabla \mathbf{u}^n}{\Delta t} \quad (6)$$

式(6)から  $p^*$  を計算し非移流項を求めた後、CIP 法によって移流を行う。ただし、密度関数の移流においては、気相と液相では  $10^3$  もの密度差をシャープに捉える必要があるため、以下の変数変換を用いて  $F_\phi$  の移流方程式を計算する。

$$F_\phi = \tan[(1 - \epsilon)\pi(\phi - 0.5)] \quad (7)$$

$$\phi = \frac{\arctan F_\phi}{(1 - \epsilon)\pi} + 0.5 \quad (8)$$

また、固相においては剛体として取り扱えるので、移流項、粘性項などは省き、周囲の圧力によって決定する。

### 3. 数値シミュレーション

シミュレーションは、実験に相当する物理量を用いてモデル化し、実験結果との比較検討を行えるよう設定する。これを元に、現象の再現を試みる。

計算では、石に相当するスキッパーは、実験と同じ条件を与えるため、アルミの物性値を用い、初期速度  $V_0$  で水面に衝突させる。格子数は、 $360 \times 80$  とし、格子間隔はスキッパーの移動部を直径の  $1/50$  にとり、周位を不等間隔で設定した。図 1 に示す。

このように簡易なモデルでも、図 2 のように、スキッパーが水面より跳飛する計算結果が得られている。図 3 は、この時の過渡分布である。赤い部分が正、青い部分が負の過渡である。自由界面にスキッパー前部から渦が生成され、剥離したものと自由界面に発達した波によるものとが確認できる。気相は液相、固相に対して密度比が

大きい為、変動が大きく、スキッパーの運動とは異なる複雑な運動を示しており、大きな影響を及ぼしていない。  
 ここで、水面下部の圧力分布と比較の密度分布を図4, 5に示す。これを見てみると、スキッパー底面にはっきりとした分布が確認できる。接水面の進行方向前端部を中心に高い圧力分布が見られることから、スキッパーへの水撃荷重が大きく影響していることが予想される。様々な条件での定量解析を充分に行いたい。

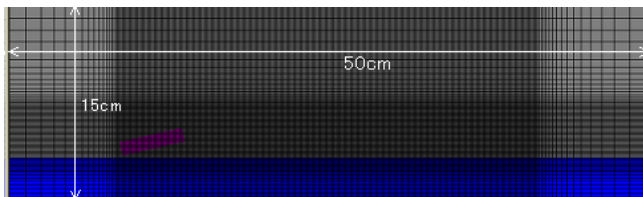


Fig. 1: Computational grid

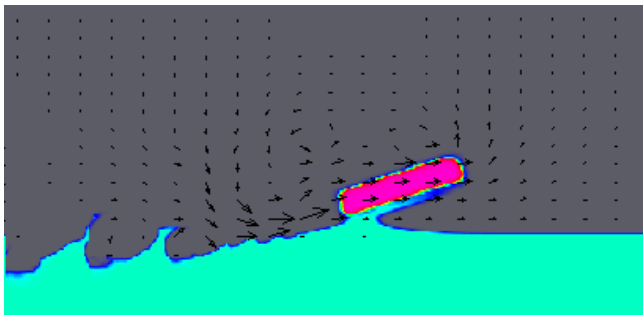


Fig. 2: Density and velocity field,  $t=0.037[s]$

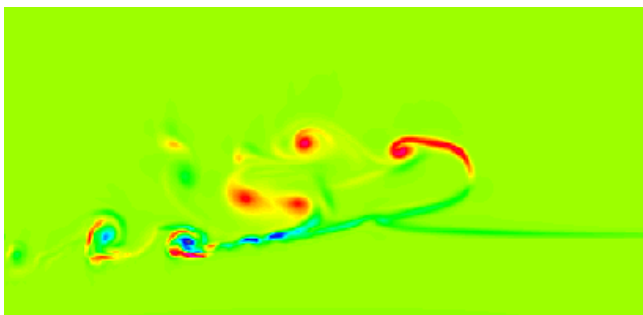


Fig. 3: Vorticity contour,  $t=0.037[s]$

#### 4. 実験との比較

実験は、跳飛させるスキッパーとして、直径5cm, 厚さ1cmのアルミ円盤を採用した。また射出装置を作成することにより実験の再現性, 安定性を確保し, これを高速度ビデオカメラによって撮影を行い, 画像処理による姿勢や速度などの各種データを定量した。

図7~20に実験結果とシミュレーションの比較を示す。このように、概ね定性的な一致が見られるが、実験結果では波に3次元性がある点や速度変化量にも違いが確認できている。これについては今後の3次元解析にて明らかにしたい。

#### 5. 現状と展望

これまで、2次元でのシミュレーションと実験を行い、比較検証を行ってきたが、C-CUP法による解析では現象の再現が充分可能であることが確認できた。現在は、実験との比較から3次元でのシミュレーションを取り組んでおり、より現実的な解析へと発展させる予定である。3次元での解析は大規模なものとなるため、CIP法の利点を充分に生かした手法を検討している。

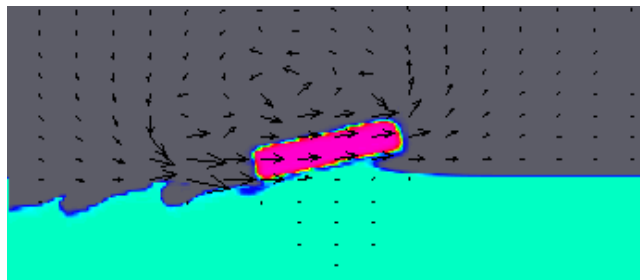


Fig. 4: Density and velocity field,  $t=0.024 [s]$

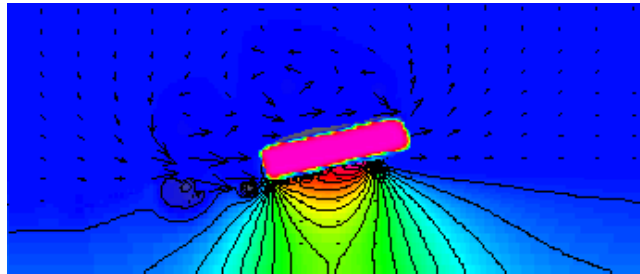


Fig. 5: Pressure contour,  $t=0.024 [s]$

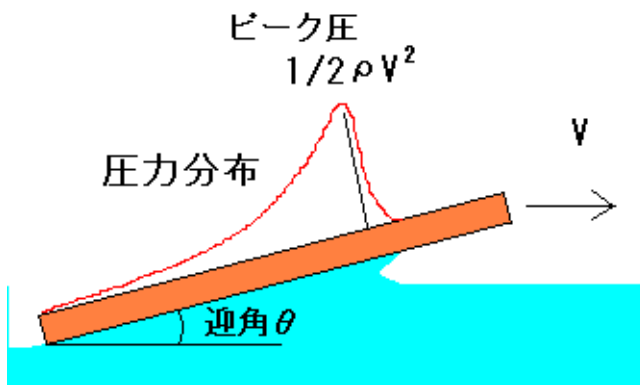


Fig. 6: Planing

#### 参考文献

1. 田島, 矢部, 第12回数値流体力学シンポジウム, (1998), pp.203-204
2. T. Yabe and T. Aoki, Comput. Phys. Commun., 66(1991), 219
3. Yabe T., and P. Y. Wang, Journal of The Physical Society of Japan, 60(1991), 2105
4. Takewaki, H., Nishiguti, A., and Yabe, T. Journal of Computational Physics, 61(1985), 261

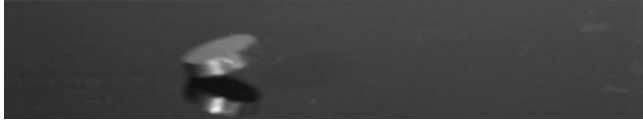


Fig. 7:  $t=0.000$  [s]

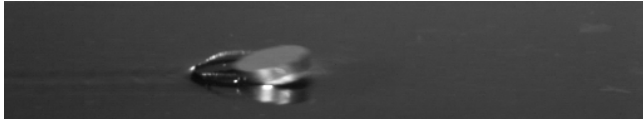


Fig. 8:  $t=0.006$  [s]

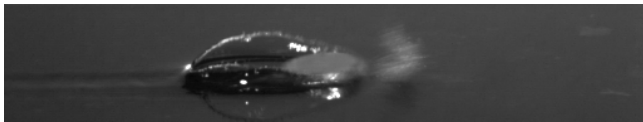


Fig. 9:  $t=0.012$  [s]

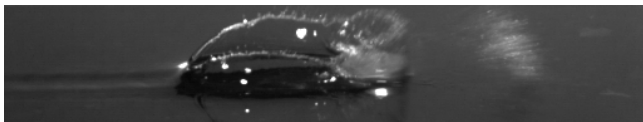


Fig. 10:  $t=0.018$  [s]

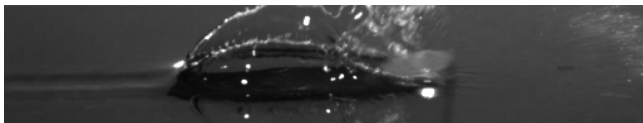


Fig. 11:  $t=0.024$  [s]

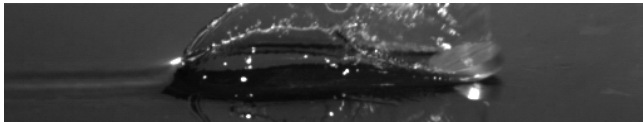


Fig. 12:  $t=0.030$  [s]

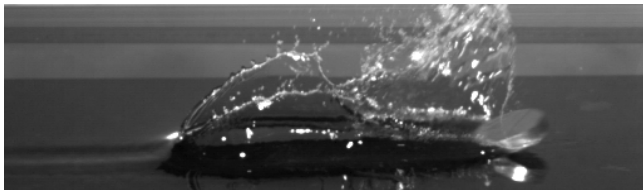


Fig. 13:  $t=0.036$  [s]

Time evolution of skimming (high speed camera)



Fig. 14:  $t=0.000$  [s]



Fig. 15:  $t=0.006$  [s]

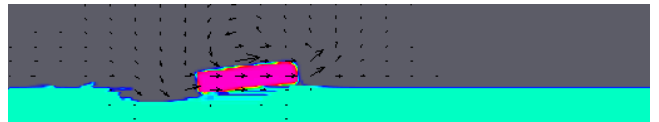


Fig. 16:  $t=0.012$  [s]

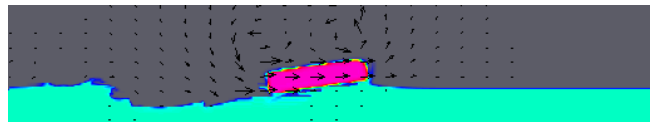


Fig. 17:  $t=0.018$  [s]

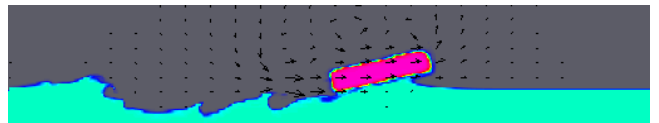


Fig. 18:  $t=0.024$  [s]



Fig. 19:  $t=0.030$  [s]

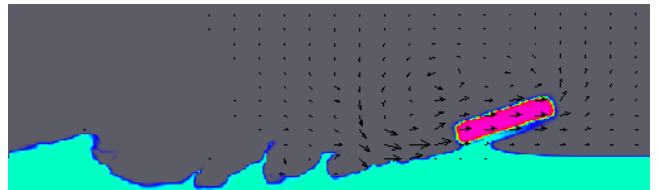


Fig. 20:  $t=0.036$  [s]

Time evolution of skimming (C-CUP simulation)