飲料缶から注ぎ出される液体の挙動に関する可視化実験および数値解析*

和田 誠^{*1}, 小川 隆申^{*2}, 田村 浩章^{*3}, 山下 公明^{*3}, 大日方 昭善^{*4}

Experimental and Numerical Study of the Motion of a Liquid Pouring from a Beverage Can

Makoto WADA, Takanobu OGAWA^{*2},
Hiroaki TAMURA, Kimiaki YAMASHITA and Akiyoshi OBINATA^{*2} Department of Systems Design Engineering, Seikei University
3-3-1 Kichijoji-Kitamachi, Musashino-shi, Tokyo 180-8633, Japan

The motion of a liquid pouring from a beverage can is experimentally and numerically studied. First, we measure pouring motion for sixteen examinees and find that the can motion in pouring consists of three stages; tipping stage, filling stage, and returning stage. In each stage, the angular velocity of a can is nearly constant, and its average velocity is obtained. A liquid flow from a can rotating at the average angular velocity is visualized with high-speed cameras and is also numerically simulated with the Volume of Fluid (VOF) method. At the beginning of pouring, the liquid from a can opening is once blocked by the rim of a upper lid and then flows over the rim. It falls from the can forming a V-shaped surface, which converges few centimeters below the rim expanding the liquid surface in the direction perpendicular to the V-shaped surface. This results in a wavy pattern of the liquid surface. The computational result agrees with the experiment.

Key Words : Free-Surface Flow, Visualization, Experiment, CFD, Beverage Can

1. 緒 言

近年の飲料缶は心地よく飲めるように、また注ぎやすいように飲料の種類に応じて飲み口の大きさや形などが設計されている。こうした飲みやすさ、注ぎやすさといったユーザビリティを向上させるには、人が飲料缶から飲料を飲んだり注いだりする際に缶がどのような運動をするのか、そして、飲料が缶内部から外部へ流出するときに液体がどのような運動をするのか明らかにする必要がある。

容器から流出する液体の運動に関連する過去の研究では、管内の粘性流体に空気が流入した際の運動⁽¹⁾や傾けられた容器からの粘性流体の流出⁽²⁾について理論的に調べられている。これらはいずれも容器内部における流体運動について論じたものであるが、容器から外部へ流出し落下する流体については、Reiner⁽³⁾はティーポットから注がれて落下する水がティーポット側に引き寄せられる“Tea-pot effect”を見出し、その原因について実験を基に考察を行っている。Keller⁽⁴⁾や Vanden-Broeck ら^{(5) (6)}は平板から流れ落ちる液体の 2 次元流れについてポテンシャル理論を利用して解析を行っているが、Kistler ら⁽⁷⁾は同様の状況を粘性流として扱い、“Tea-pot effect”が粘性応力や重力、表面張力などの力の相互作用によって生じることを数値解析と実験によって明らかにしている。

上記の研究は主に固定した 2 次元平面から流れ落ちる液体を対象にした研究であるが、実際の缶から飲料を注ぐ際の現象について体系的に調べた例は少ない。これを調べるには、飲料を注ぐ際の人間の動作を測定することと、その缶の動作を再現して流出する液体挙動を測定するという 2 つが必要となる。飲料を注ぐ際の動作測定につ

* 原稿受付 2013 年 3 月 28 日

^{*1} 成蹊大学理工学研究科 (現 三菱電機株式会社)^{*2} 正員, 成蹊大学理工学部システムデザイン学科 (〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1)^{*3} アサヒビール(株) 生産本部生産技術センター (〒302-0106 茨城県守谷市緑 1-1-1)^{*4} 昭和アルミニウム缶(株) 技術センター (〒323-0811 栃木県小山市犬塚 1-30-3)

E-mail: ogawa@st.seikei.ac.jp

いて川地ら⁽⁸⁾は、人がビール缶からコップへ注ぐ際の缶の運動を光学式モーションキャプチャ装置により計測し、ビールの注ぎ方とそれによって発生する泡の性質との関係について定性的に議論している。また、茅原ら⁽⁹⁾はボトル型缶の飲みやすさ評価のために、人が缶から飲料を飲む際の缶の傾斜角を映像を基に測定を行い、缶傾斜角の時間的变化を定量的に明らかにするとともに、ボトル内の液量が多くなるにつれて傾斜角速度が小さくなるという結果を得ている。ただし、前者の測定結果は定量的なデータとして供されておらず、また、後者はボトル型缶という特殊な形状の缶を対象にしている。一方、飲料缶から注ぎ出される液体の挙動については、茅原ら⁽¹⁰⁾は所定の角度に傾けられたボトル型缶内部からの液体流出をVOF法によりシミュレートし、缶から流出する流量が時間的に2度ピークを持つことと、それが缶内部の液体が缶底面で反射するためであると議論している。

本研究では近年市場で主流となっている形状の飲料缶を対象に、缶から飲料を注ぐ際に液体が缶内部から流出して落下するまでの挙動を実験および数値解析によって明らかにする。そのためにまず、人が缶からコップへ飲料を注ぐ際の缶運動を多数の人間を対象に測定を行い、動作の特徴を定量的に明らかにする。そして、その測定結果を基に飲料が注がれる際の流体现象を実験および数値解析によって再現する。実験では人が注ぐ際の缶の回転運動を模擬するための装置を開発し、高速度カメラを用いて液面の可視化を行う。一方、数値解析ではVOF法を用いたCFDにより実験と同等の条件で現象を数値的に再現し、液面位置や形状を実験と比較することで検証を行うとともに現象を明らかにする。

2. 飲料を注ぐ際の缶運動の測定

飲料を注ぐ際の缶運動を測定するには、缶にマーカーを取り付けて光学的に追跡する方法⁽⁸⁾と角度センサーを用いた機械的な方法がある。本研究では、人間の動作を計測するには多数の被験者を対象に実験を行う必要があるため、キャリブレーションの不要な後者の方法を採用した。以下に開発した測定装置とそれを用いた実験について説明する。

2.1 缶運動測定装置および測定方法

本研究で開発した缶運動測定装置を図1に示す。飲料缶を保持するためのボトルホルダーが2本のアームで土台に固定され、それぞれのアームの接続部分は自由に回転するようになっている。アーム接続部分には角度センサー（緑測器 CPP35B）が取り付けられており、各センサーからの出力をデータレコーダ（KEYENCE GR-3500）でサンプリングレート0.1秒で記録する。3つの角度センサーから得られた角度とアーム長から缶の位置および対地角度 θ を求めることができる。なお、SI単位系では角度はラジアンを用いるが、「度」を用いた方が缶の状態を把握しやすいため、本研究では「度」（記号 $^{\circ}$ ）を用いて角度を表すことにする。

実験を行う際は図2に示すようにボトルホルダーに差し込んだ飲料缶を手で持ち、固定されたコップに所定の目印まで飲料を注ぐ。コップの大きさ、今回の実験では底面が直径50mmのコップを用い、底面から80mmに付けた目印まで飲料を注ぐこととした。注ぐ飲料の体積は120mlとなる。この実験装置は次の二つの点で缶から注ぐ際の動作に影響を及ぼす可能性がある。まず、実験装置の自重で135gの質量が缶に付加される。また、装置の構造上、缶の回転は y 軸方向のみで、並進運動は $x-z$ 平面（回転平面）内のみである。しかし、加速度センサを用いた別の実験でこれらが人の動作に与える影響は軽微であることを確認している。

2.2 測定結果

飲料を注ぐ際の缶の対地角度 θ を時間に対してプロットしたのが図3である。これは被験者16人分の結果を全て表示したもので、缶から所定量の飲料を注ぐという特定の動作であっても個人差によって結果にはかなりばらつきが見られる。一方、同一人が3回実験を行った結果を図4に示す。図3の個人差によるばらつきに比べ、同一人によるばらつきは比較的小さいことがわかる。特に、いずれのデータも対地角度 θ の波形が三つの区間に分けられ、それぞれの区間で θ がほぼ直線的に変化していることがわかる。この三つの区間について、代表的な測定例を基に図5で詳しく説明する。対地角度 θ は注ぎ始めのごく初期こそゆっくりと上昇するが、ある時点（この場合は約0.5s）から大きくなり直線的にある角度まで上昇する。同図左側に示すように、この区間は注ぎ始めて缶内部から飲料が流出してコップに落下するまでの間であり、本研究ではこれを「注ぎ始め区間（Tipping stage）」と呼ぶ。

Fig. 1 Experimental apparatus for measuring can motion. Fig. 2 Experiment for measuring can motion in pouring.

次に、コップの所定の位置に液面が上昇するまで缶を傾けて飲料が注がれることになり、この区間を「充填区間 (Filling stage)」と呼ぶ。充填区間では注ぎ始め区間よりも回転角 θ の勾配は緩やかで、定常に近い状態で飲料が流出することになる。最終的に液面が所定位置に達すると缶を元の状態に戻す。この「注ぎ終わり区間 (Returning stage)」では他の2区間よりも急に対地角度が変化する。図5に破線で示したように、いずれの区間においても回転角は時間に対してほぼ直線的に変化する。すなわち、各区間の缶回転の角速度はほぼ一定に近い。

Fig. 3 Time histories of the can angle (results by 16 examinees).

Fig. 4 Time histories of the can angle (results by one examinee for three times).

以上の3つの区間とその特徴は図3に示すいずれの被験者の波形についてもほぼ当てはめることができる。そこで、缶運動は3つの区間で缶の角速度が一定であるとしてモデル化し、測定結果から3つの区間それぞれの時間間隔 Δt および角速度 $\dot{\theta}$ を同定する。注ぎ始め区間における全被験者の平均角速度をその区間の経過時間 Δt に対してプロットした結果が図6である。経過時間 Δt が大きくなるほどゆっくりと回転することになり、必然的に平均角速度 $\dot{\theta}$ は小さくなる。今回の実験結果では注ぎ始め区間の平均角速度は約 $36^\circ/\text{s}$ となった。全ての区間における角速度の平均値と偏差を表1に示す。充填区間はかなり小さな角速度となり、一方、注ぎ終わり区間は注ぎ始めより2倍程度大きな角速度となっていることがわかる。

Fig. 5 Three stages in pouring motion

Fig. 6 Correlation between the angular velocity and the elapsed time in the beginning of pouring motion.

Table 1 Averaged angular velocity in each stage.

Stage	$\dot{\theta}$ [°/s]
Tipping stage	36 ± 14
Filling stage	4.1 ± 1.2
Returning stage	-61 ± 18

3. 缶から注がれる液体の可視化実験及び数値解析

本節では、缶から注がれる液体の挙動を可視化実験と数値流体解析によって明らかにする．注ぎやすさについて検討する場合、注ぎ始め区間が最も重要になる．そこで、前節で求めた注ぎ始め区間における缶の平均角速度を用いる．

3.1 実験装置および実験条件

缶から注がれる液体の運動を実験によって調べるためには所定の角速度で缶を回転させる必要があるが、それを人間が行うのは困難である．そこで、本研究では缶から飲料を注ぐ装置を開発し、前節の缶運動測定結果を入力条件として回転させ、飲料に見立てた液体が缶から流出する様子を可視化する．

図7に缶を回転させて飲料を注ぐ装置の概要を示す．装置は缶保持器 (Can holder) をサーボモータで回転させる仕組みになっており、サーボモータは任意の角速度で回転できるよう制御することができる．回転軸は缶の中心を通過する．人が缶を注ぐ際には回転運動だけでなく並進運動もしているが、本実験ではその影響は無視した．回転する缶から飲料が流出する様子は正面（飲み口の方向）、側面（回転軸方向）、斜め上からの3方向から3台の

高速度ビデオでフレームレート 120 fps で同時に撮影する．

缶には市販の 350ml ビール缶（高さ 110mm）を用いるが，内部飲料の物性値への依存性を避けるため，飲料の代わりに水を用い，実験ごとに規定容量の水を缶に充填する．また，その度に缶開口部周辺の水滴をぬぐった上で乾燥させる．缶口の蓋はプルタブによって缶内部に折り曲げられた状態となる．初期において缶の対地角度は 0° ，すなわち缶を鉛直に設置し，一定の角速度で 60° まで回転させる．角速度は注ぎ始め区間の平均値である $36^\circ/\text{s}$ とした．実験結果は数値解析結果とともに 3.3 節に示す．

Fig. 7 Pouring machine controlled by a servomotor.

3.2 解析手法および解析条件

実験で明らかになった缶運動の測定結果を用いて，缶から注がれる際の飲料の 3 次元流体解析を行う．支配方程式は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式で，汎用熱流体解析プログラム STAR-CCM+を用い，有限体積法に基づいて支配方程式を離散化する．対流項には 2 次精度風上，時間積分には 2 次精度陰的時間積分を適用した．自由表面の解析手法には VOF 法⁽¹¹⁾を用い，領域全体に体積分率（ F 値）を与えることで液体（ $F = 1$ ）と気体（ $F = 0$ ）を再現する．液面を高い解像度で捉えるために HRIC(High Resolution Interface Capturing) スキーム⁽¹²⁾を適用する．本解析は乱流モデルを用いず，層流で解析を行った．

缶からの液体流出解析を行う前に，2 次元液柱崩壊問題 (Dam-breaking problem) を用いて計算精度の検証を行った．解析条件は図 8 に示すように，幅 $4L$ の容器の中に幅 L ，高さ $2L$ の静止した液体を板で仕切り， $t=0$ において板を除去する．計算格子には 1 辺 $L/25$ (5.84 mm) の正方格子を用い，時間刻み幅 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ で解析を行った．液体の先端位置の座標を時間に対してプロットした結果が図 9 である．解析結果は Koshizuka ら⁽¹³⁾の実験結果と概ね一致していることがわかる．解析結果は実験よりも液体先端位置が若干速く移動する点は他の VOF 法を用いた解析事例と同様の結果となっている．

図 10 に缶からの液体流出解析のための計算領域を示す．計算領域は直径，奥行きともに 800 mm の円筒形で，重力場において計算領域全体を回転させることで缶の回転運動を再現する．可視化実験と同様に，缶の中心部を回転軸が通り，注ぎ始め区間の平均角速度である $36^\circ/\text{s}$ で回転させる．表 2 に今回の解析で用いた各種物性値を示す．液体が固体と接する際になす角である接触角は別途，実験により計測し，水と缶蓋 (can lid) で 83° ，水と缶胴 (can body) で 50.3° という値を得た．計算格子には多面体メッシュを用いた．図 11a は缶表面の格子，同図 b は計算領域中心断面内の格子分布を示す．総セル数は約 76 万セルである．液体が流出する経路となる缶上部周辺付近は図 11c のように部分的に格子を細かくした．最小格子幅は 1.0 mm，時間刻み幅 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ として解析を行った．

3.3 可視化実験および数値解析による結果

図 12 に缶の回転角度 $\theta=37, 40, 50, 60^\circ$ における実験および数値解析の結果を示す．上段 3 つの図は液面の形状を可視化実験と数値解析とで比較したもので，異なる視点から同時刻に観察した結果を上段から側面図 (Side)，斜め上から見た図 (Top)，正面図 (Front) と並べた．最下段の図は数値解析で求めた液体表面上および中心断面内の速度分布で，缶や液体表面は中心断面よりも奥側のみを表示している．また，液面形状を見やすくするために意図的に中心断面速度分布の周辺を青く表示しているが，実際の速度分布は連続している．

Fig. 8 Computational setup of a dam-breaking problem.

Fig. 9 Normalized positions of the water tip, Z/L , as a function of time.

Fig. 10 Computational domain

Table 2 Physical properties used for simulation

Density [kg/m^3]	Water	997.6
	Air	1.18
Viscosity $\times 10^4$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	Water	8.89
	Air	0.186
Contact angle [$^\circ$]	Water / can lid	83
	Water / can body	50.3

今回の実験条件である缶回転の角速度が $36^\circ/\text{s}$ の場合、缶の回転角 θ が約 35° を過ぎると缶内部の液体が缶の縁を越えて外部に流出し始める。図 12a は缶の回転角 37° の時の結果で、ちょうど液面がわずかに缶縁から飛び出た状態となる。側面図における実験結果と解析結果を比較すると、外側の液面形状は両者近いものの、図中矢印で示した液面下部は解析結果の方が実験結果よりも下方に垂れ下がった形状となっている。上方と正面から見た結果を見ると、缶開口部から流出した液体が缶上部の縁に設けられているくぼみに一旦入り、その後、缶の縁を乗り越えて外部に流出している様子がわかる。図最下段の速度分布を見ると、その流速は約 0.3 m/s で、缶上部のくぼみに入った部分の流速は小さく、淀み領域となっていることがわかる。

図 12b は回転角が 40° の結果で、缶縁から流出し始めた液体が 4.5 cm ほど落下した状態となる。缶上蓋のくぼみに一旦溜まった液体が流出するため、落下する液体の先端は丸く膨らむ。上方から見ると、缶上面のくぼみに溜まって左右に広がった液体は缶の縁を乗り越えた後に中央部に向かって落下するため、液体表面が V 字型となる。そして、その V 字型の流れが中心部で衝突すると、今度は V 字型の面とは垂直な方向に広がり、その結果、側面

Fig. 11 Computational mesh, (a) surface mesh, (b) mesh in the center plane, (c) mesh around the can mouth. The red color shows the initial water region.

図中に矢印で示すように缶縁やや下方で液面が広がった状態となる。上記特徴は数値解析結果でも概ね再現できているが、液面最下端の丸みの形状に若干差異が見られる。開口部から流出した部分の流速は 0.4 m/s となり、回転角 37° のときよりも加速していることがわかる。一方、缶内部の流速分布に大きな変化は見られない。また、落下した液体は重力の影響で先端に行くほど速度が増し、最下点では 1 m/s 近くとなっている。この条件では落下する液体が缶側に引き寄せられる“Tea-pot effect”は見られなかった。条件は異なるが、Kistler ら⁽⁷⁾の実験や解析では $O(10)$ を超えるレイノルズ数で“Tea-pot effect”がすでに弱くなっていることを考慮すると、缶縁を越える液面高さに基づくレイノルズ数が $O(10^3)$ となる今回の条件で“Tea-pot effect”が見られないのは妥当であるとも言える。

回転角 50° における正面図（図 12c）を見ると、V 字型液面が回転角 40° の場合（図 12b）よりも下方に伸びた状態になっていることがわかる。それにより、図 12c 側面図中の矢印で示すように、V 字型液面の下端で流れの衝突による液面の広がりも同様に降下する。回転角 40° の場合と比較すると、液面形状には上述のような変化が見られるものの、速度分布には缶内外ともに大きな変化は見られない。

回転角 60° の結果を図 12d に示す。多くの被験者が注ぎ始め区間から充填区間に移行する角度である。缶がかなり傾いた状態となるため、缶開口部から流出する液体は缶の縁と大きく接触することなく下方へ落下する。したがって、回転角 $40, 50^\circ$ （図 12cd）で観測された V 字型の液面、そして、その下端で見られる液面の広がりも顕著ではなくなる。その結果、液面の凹凸やくびれも小さくなっている。この角度になると流速分布も大きな変化は見られない。この角度でも実験では液体の一部が缶上蓋くぼみに流れ込んでいるが、解析ではその様子が再現できていない。

全体を通して缶開口部付近に着目すると、数値解析、実験ともに開口部を液面が塞ぐことはなく、缶内部への通気は保たれた状態であった。数値解析でも内側に折り込まれた缶蓋を模擬しているが、図 12 の速度分布を見ると缶蓋の背後で流速が減速しており、缶内部の流れに影響を与えていることがわかる。実験では缶蓋を開けるためのプルタブが角度によっては開口部から流出する液体とわずかに接触しているが、その影響は軽微なものである。数値解析結果は、流出し始めの液面形状と缶縁への液体の溜まり具合に実験との差異が見られたが、実験で観測された特徴的な現象は概ね再現できていると言える。ただし、缶口の径（約 1 cm ）に基づくレイノルズ数は缶からの流出部分で 3000 程度に達し、局所的に乱流に遷移している可能性がある。その影響については乱流を考慮した解析による検討が必要である。

Fig. 12 Experimental and computational results at the can angle $\theta = 37, 40, 50$, and 60 deg. The upper three rows of figures show liquid surfaces from three different observing points and compare the experimental and the computational results. The bottom figure shows the computed velocity magnitude distributions on the liquid surface and in the center plane.

Fig. 12 (Continued from previous page.)

4. 結 言

一般的な飲料缶から飲料を注ぐ際に缶内部から流出して落下するまでの液体の挙動を実験および数値解析によって調べた。そのためにまず、人が缶から飲料を注ぐ際の缶運動を測定するための装置を開発し、16人の被験者を対象に測定した。その結果、人が缶から飲料を注ぐ際の缶回転運動が大きく三つの区分に分けられ、それぞれの区間で角速度がほぼ一定になることを明らかにした。その結果に基づき、缶から飲料を注ぎ始める際の液体の運動を実験および数値解析で再現した。実験では所定の角速度で缶から液体を注ぐ装置を開発し、その様子を高速度カメラにより可視化した。また、数値解析はVOF法を用い、CADデータを元に再現した缶を含む計算領域全体を回転させることで缶から注がれる液体の運動をシミュレートした。これらの結果から、液体が缶開口部から流出した後、一旦、缶上部のくぼみに溜まって缶縁に沿って広がり、缶縁を乗り越えた後は中央に向かって落下する様子などが確認できた。また、缶の回転角が変化するにつれ、缶開口部からの液体流出の方向や流出する液体と缶縁との干渉の度合いが変化し、それによって液面形状も変化してゆく様子も観察された。これら実験で観察された現象は、流出し始めの液面形状には若干の差異が見られたものの、数値解析でも概ね再現できていることがわかった。本研究により、注ぎ時の缶運動の測定および再現、注ぎ時の液体運動の可視化および数値解析という現象解明の一連の手法を確立できた。

謝 辞

実験を行うにあたり成蹊大学理工学部 堀口淳司助手、および、同エレクトロニクス学科 丹羽圭児氏、藤田弥氏の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) Taylor, G.I., "Deposition of a Viscous Fluid on the Wall of a Tube," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, (1961), pp. 161–165.
- (2) Takagi, D. and Huppert, H.E., "Pouring Viscous Fluid out of a Tipped Container in Minimal Time," *Physical Review E*, Vol. 84, 035303, (2011).
- (3) Reiner, M., "The Teapot Effect...a Problem," *Physics Today*, Vol. 9, (1956), pp. 16–20.
- (4) Keller, J.B., "Teapot Effect," *Journal of Applied Physics*, Vol. 28, (1957), pp. 859–864.
- (5) Vanden-Broeck, J.M. and Keller, J.B., "Pouring Flows," *Physics of Fluids*, Vol. 29, (1986), pp. 3958–3961.
- (6) Vanden-Broeck, J.M. and Keller, J.B., "Pouring Flows with Separation," *Physics of Fluids A*, Vol. 1, No. 1, (1989), pp. 156–158.
- (7) Kistler, S.F. and Scriven, L.E., "The Teapot Effect: Sheet-forming Flows with Deflection, Wetting and Hysteresis," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 263, (1994), pp. 19–62.
- (8) 川地克明, 木南朋久, 持丸正明, 橋田学, 河内眞紀子, "動作類似度に基づくビール注ぎ動作の泡質への影響の解析", 4th Digital Human Symposium, (2009).
- (9) 茅原崇徳, 山崎光悦, 伊藤隆一, "アルミボトル口径の飲みやすさ評価法に関する検討(残存液量の違いによる比較と考察)", 日本機械学会第17回設計工学・システム部門講演会, (2007), pp. 36–39.
- (10) 茅原崇徳, 山崎光悦, 伊藤隆一, "アルミボトル口径の飲みやすさ評価法に関する基礎的検討", 日本機械学会論文集C編, Vol. 74, No. 737, (2008), pp. 134–141.
- (11) Hirt, C., Nichols, B.D., "Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, (1981), pp. 201–225.
- (12) Muzafertija S., Peric, M., Sames, P., and Schellin, T., "A Two-fluid Navier-Stokes Solver to Simulate Water Entry," 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, (2000), pp. 638–651.
- (13) Koshizuka S. and Oka Y., "Moving-particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 123, (1996), pp. 421–434.