

## 磁性液滴衝突界面現象の磁場による制御

# Magnetic Control of Impact Phenomena with Magnetic Drop Collision

須藤誠一 , 露木浩二

Seiichi Sudo , Koji Tsuyuki

いわき明星大学

Iwaki Meisei University

キーワード： 磁性流体力学 (magnetohydrodynamics), 磁場 (magnetic field), 液滴衝突 (drop impact), 界面現象 (interfacial phenomena), 磁場制御 (magnetic control)

連絡先： 〒970-8551 いわき市中央台飯野5-5-1 いわき明星大学 理工学部 機械工学科 須藤研究室  
須藤誠一, Tel.: (0246)29-7185, Fax.: (0246)29-0577, E-mail: sudou@iwakimu.ac.jp

## 1. はじめに

液滴が固体平板や静止している液体自由表面に衝突する際に発生する界面現象は、自然科学のさまざまな分野における基本的かつ興味深い問題であり、Worthingtonによってスプラッシュ現象の高速度写真観察が行われて以来<sup>1)</sup>、非常に多くの研究者によって研究され続けてきた。現在までの研究の成果はLesser & Field<sup>2)</sup>およびProsperetti & Öguz<sup>3)</sup>らのレビューにおいて容易に知見される。たとえば、Levin & Hobbsは、湯いた固体面への液滴の衝突に関して定量的な実験観察を行っており<sup>4)</sup>、Stow & Hadfieldは、粗度の知られた固く乾いた金属面への水滴衝突と関連づけた流れの研究を行い<sup>5)</sup>、Marmains & Throddsenは、高レイノルズ数、高ウェーバー数における液滴の固体面への衝突後に現れる、指状のパターンについて実験的に研究を行った<sup>6)</sup>。液滴の縁に現れるパターン形状に関しては、Thoroddsen & Sakakibaraが、ガラ

ス板に衝突した水滴が、薄いジェットのようにすばやく広がる際の、指状のパターンの進展について研究を行っている<sup>7)</sup>。また、Yarin & Weissなどは、固体面への衝突液滴について実験的、理論的な研究を行っている<sup>8)</sup>。

このように、液滴衝突に関してさまざまな研究が行われているが、これまでの研究において使用された液体は水などの通常流体であり、人工流体である磁性流体を液滴として使用した液体衝突界面現象に関する研究は知見しない。磁性流体液滴は磁場に感応し変形を示すため、磁場の印加により球形状とは異なる形状で標的物体に衝突させることが可能となる。

そこで本報では、磁性流体を液滴とし、磁場の作用下において通常流体と衝突した場合の複雑な液滴衝突界面現象について調べた。すなわち、磁性液滴のケロシン自由表面への衝突と飛散の現象を、磁場のある場合と無い場合について調べた。

また、インクジェットプリンタなどへの応用も考慮し、ゴム平板上の紙面へ磁性流体液滴が衝突する場合の衝突界面現象に関して、磁場の作用が存在しない場合および水平紙面に対して垂直に磁場が作用する場合の磁性液滴の飛散によって形成された衝突パターンを調べ、磁場による磁性流体界面現象の制御を試みた。

## 2. 実験装置および方法

磁性流体液滴と通常流体との衝突現象を調べるために使用した座標系を図1に示す。また、磁性液滴と紙平板の衝突現象を調べるために使用した実験装置系および計測システムを図2に示す。磁性流体液滴は25mlのリザーバから自由落下させることによって生成した。液滴が形成される際に発生するサテライト液滴はドロップカッターシステムによって取り去られる。すなわち、光センサーにより液滴の形成を検知し、1個の液滴を通過させた後に通路を遮断して後続の液滴をカットした。また、液滴衝突速度 $v$ は落下高さ $H$ を変化させることによって、無磁場中でおよそ $v = 3.92\text{m/s}$ から $2.39\text{m/s}$ の間で変化させた。実験で使用した試料の磁性流体は水ベースのW-35である。表1にW-35の物性値を示す。

液体自由表面との衝突実験における標的液体はケロシンである。ケロシンは水ベース磁性流体とは混じり合わず、かつ透明であるため現象過程の観察が容易である。

固体平板との衝突実験において、液滴の衝突する標的物体は、天然ゴム平板上に白い印刷用紙を

Table 1 Physical properties of magnetic fluid W-35 at 20 .

	density	viscosity	surface tension
liquid	kg/m <sup>3</sup>	Pa·s	N/m
W-35	1385.0	0.0141	0.0294

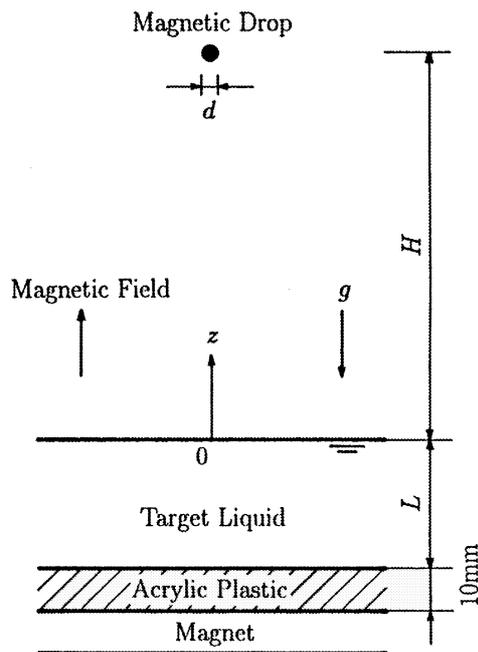


Fig. 1 Coordinate system and principal nomenclature.

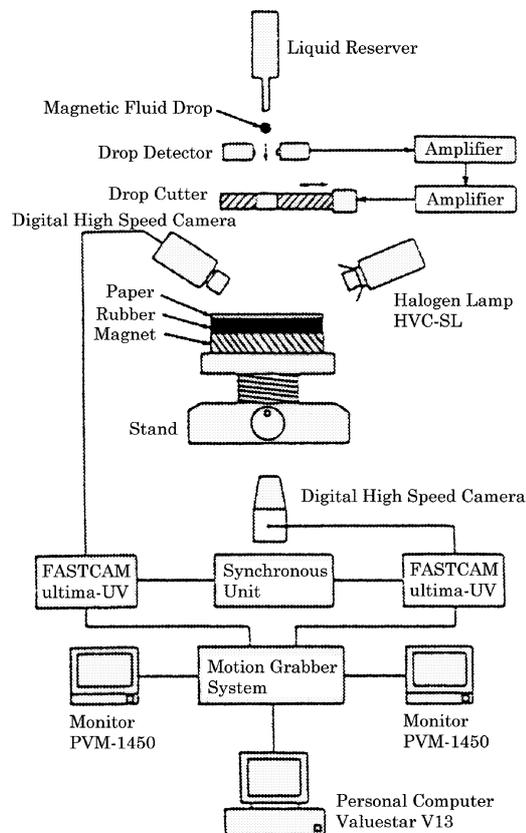


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

貼り付けたもので、衝突痕が明瞭になるようにした。直径70mmの永久磁石を天然ゴム平板下に設置することによって磁性液滴に磁場を与える。図3に実験で使用したマグネットの特性を示す。このとき、印加磁場の方向は衝突面に垂直である。

磁性液滴衝突時における界面現象は、2台のデジタルハイスピードカメラ(フォトロン FASTCAM ultima-UV)、シンクロユニット、2台のビデオカセット、モーショングラバーシステムおよびコンピュータから構成されるシステムにより解析される。ハイスピードカメラを使用して撮影・録画した液滴の衝突現象は、1コマ1/13,500sのスピードで、モーショングラバーシステムとパーソナルコンピュータにより連続した現象として記録される。また、撮影には十分な光量を得られるようにハロゲンランプを使用している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 落下液滴の挙動

一般に、ノズルから離れて落下する液滴は、表面張力による振動を呈する。しかし、磁性流体の液滴が磁場の作用を受けると磁場方向に伸長することが知られている。図4は磁場作用下での落下液滴の変形を示している。磁場作用下で落下磁性液滴が標的に近づけば近づくほど変形率 $a/b$ が大きくなる。図4中の $C$ は磁性流体の重量濃度を示しており、 $C$ の大きい磁性流体の液滴ほど変形が大きくなる。磁場が作用しない場合の液滴速度は式(1)によって記述される。

$$v = v_T \{1 - \exp[-2g(H - z)/v_T^2]\}^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $v_T$ は気象学で知られている式(2)から求まる。

$$v_T = 24.1660 + 448.8336d - 75.6265d^2 + 4.6259d^3 \quad (2)$$

$(1.4 \leq d \leq 5.8\text{mm})$

ただし、 $v_T$ の単位はcm/sである。磁場が存在する場合、液滴に体積力が作用するため、式(2)より若干高めの速度となる。

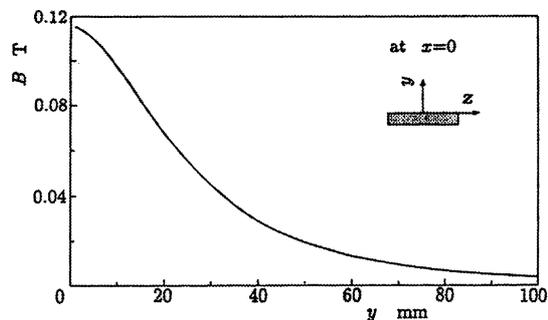


Fig. 3 Magnetic flux density distribution toward the upper part.

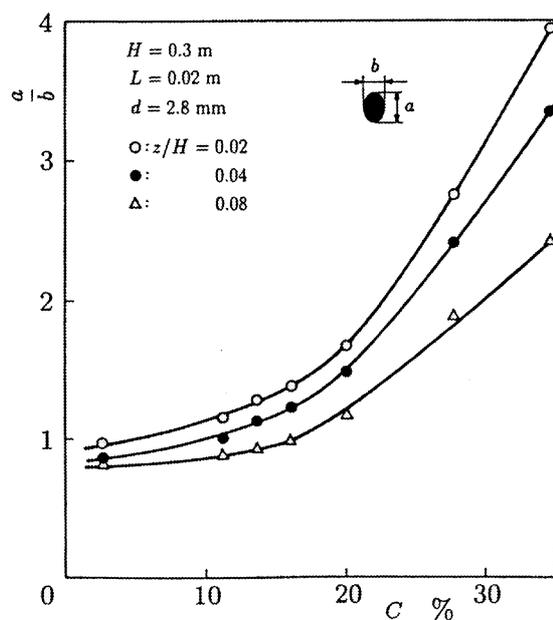


Fig. 4 Deformation of the magnetic drop.

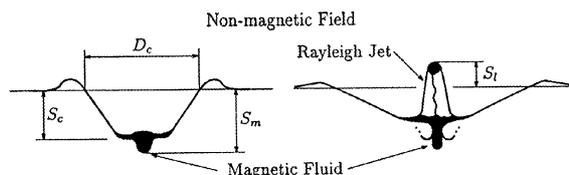


Fig. 5 Definition of the amount in the interfacial phenomenon.

### 3.2 磁性液滴の界面衝突現象

磁性液滴とケロシンの自由表面との衝突現象を調べた。磁場が作用しない場合は、一般に、従来観察されてきた界面現象と同じであり、キャビティとレーリー・ジェット<sup>1)</sup>の形成が見られる。ここで、界面現象を定量的に調べるため、図5で示すような各諸量を定義する。図6は、そのような諸量の時間変化を示している。液滴衝突によりキャビティが形成され成長し、最大に達する。その後、液面の復元に伴って、磁性流体と標的流体で形成される複合レーリー・ジェット (Compound Raileigh jet) が成長する。衝突液滴と標的液体が同一の場合と大きく異なる点が、この複合噴流の形成である。すなわち、磁性流体は上下に大きく引き伸ばされる。

### 3.3 磁場作用下における液面への衝突界面現象

磁場の作用下における磁性液滴衝突後に発生する界面現象は、前述の様相とは著しく異なったものとなる。磁場作用下におけるこの界面現象も定量的に調べるために、図7に示すような諸量を定義する。図8はそれらの諸量の時間変化を示している。図8と図6を比較することにより、磁場の作用の効果が明白である。すなわち、液滴衝突によって形成されるキャビティは、磁場作用下で小さくなる。

### 3.4 無磁場下における紙平面との衝突界面現象

磁場の作用がない場合、衝突する磁性液滴は紙平面に衝突後、液膜流を形成しながら四方に広がり、最大径に達した後、表面張力の作用によりわずかに収縮する。図9に液膜噴流の時間変化を示す。液膜の拡がりはその高さにおいても、およそ2ms程度で終了する。

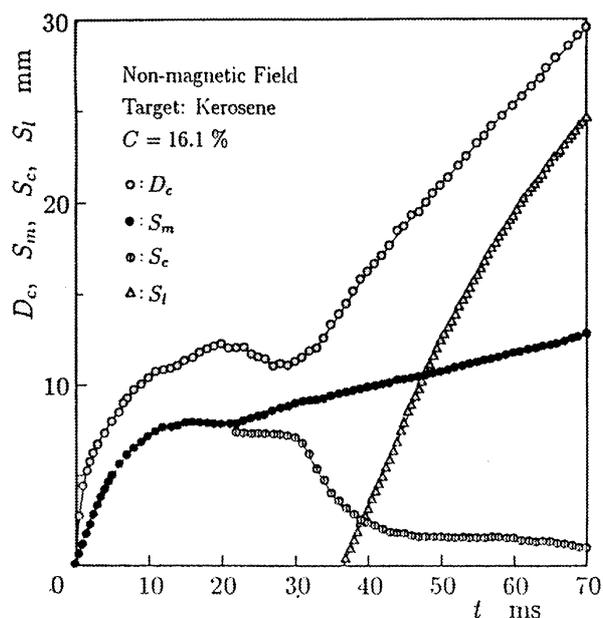


Fig. 6 The changes of  $D_c$ ,  $S_m$ ,  $S_c$  and  $S_l$  with time.

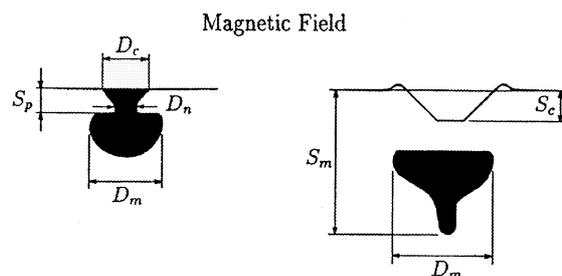


Fig. 7 Definition under the magnetic field of the amount.

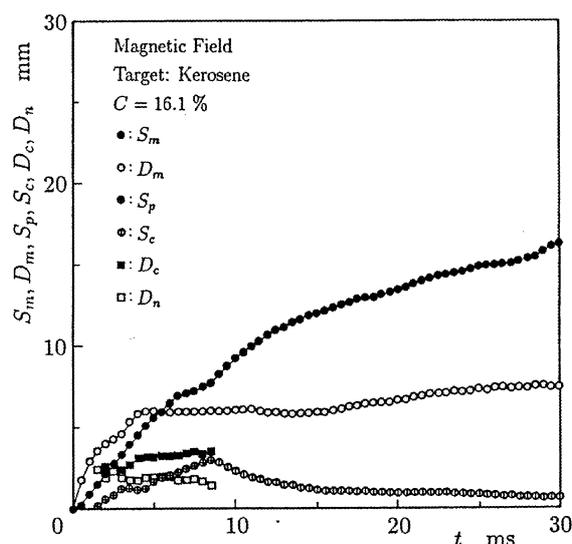


Fig. 8 The changes of  $S_m$ ,  $D_m$ ,  $S_p$ ,  $S_c$ ,  $D_c$  and  $D_n$  with time.

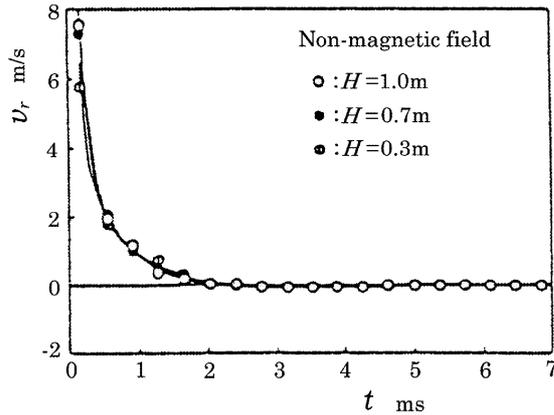


Fig. 9 The changes of the liquid film jet with time.

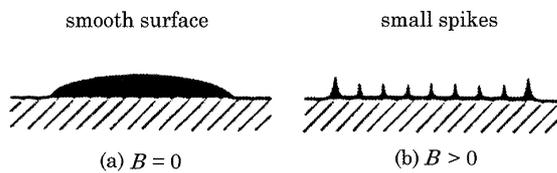


Fig. 10 Splashing pattern after the impact of a magnetic fluid drop.

### 3.5 磁場作用下における紙平面への衝突界面現象

前述したように，磁場の作用が無い場合，紙面に衝突した磁性液滴は，液膜流を形成して四方に流れるが，やがて拡がり速度  $v_r$  が 0 となり，表面張力等の作用により若干中心方向に戻り，静止して平衡状態となるため，最終的に図 10(a) のようになる．しかし，磁場の作用下において最終平衡状態は図 10(b) に示すように多数の微小なスパイクを伴うパターンが形成される．

このときの液膜流の拡がりには衝突後の短い時間範囲において式 (1) によって近似できる．

$$\frac{2r_m}{d} = \alpha t^\beta \quad (3)$$

ここで，係数  $\alpha$  および指数  $\beta$  はともに速度  $v$  と磁束密度  $B$  の関数であり，実験的に見出すことができる．

## 4. おわりに

磁場作用下において，磁性流体の液滴が液体自由表面に衝突することによって生ずる界面現象，および紙面上に落下衝突する場合に発生する界面現象と液滴衝突パターンについてそれぞれ磁場による制御を試みた．

## 参考文献

- 1) A. M. Worthington: A study of splashes, Longman and Green, (1908)
- 2) M. B. Lesser and J. E. Field: The Impact of Compressible Liquids, Ann. Rev. Fluid Mech., **15**, 97/122(1983)
- 3) A. Prosperetti and H. N. Ögüz: The Impact of Drops on Liquid Surfaces and the Underwater Noise of Rain, Ann. Rev. Fluid Mech., **25**, 577/602(1993)
- 4) Z. Levin and P. V. Hobbs: Splashing of Water Drops on Solid and Wetted Surface : Hydrodynamics and Charge Separation, Phil. Trans. R. Soc. Lond., **A269**, 555/585(1971)
- 5) C. D. Stow and M. G. Hadfield: An Experimental Investigation of Fluid Flow Resulting from the Impact of a Water Drop with an Unyielding Dry Surface, Proc. R. Soc. Lond., **A373**, 419/441(1981)
- 6) H. Marmanis and S. T. Thoroddsen: Scaling of the Fingering Pattern of an Impacting Drop, Phys. Fluids, **8**, 1344/1346(1996)
- 7) S. T. Thoroddsen and J. Sakakibara: Evolution of the Fingering Pattern of an Impacting Drop, Phys. Fluids, **8**, 1359/1374(1998)
- 8) A. L. Yarin and D. A. Weiss: Impact of Drops on Solid Surfaces Self-similar Capillary Waves, and Splashing as a new Type of Kinematic Discontinuity, J. Fluid Mech., **283**, 141/173(1995)