

## 液滴衝突現象の超高速ビデオカメラによる観察

近畿大学 竹原 幸生(Kohsei Takehara), 江藤 剛治 (T. Goji Etoh)

School of Science and Engineering, Kinki University

国立シンガポール大学 S.T. Thoroddsen

National University of Singapore

### 1. はじめに

雨滴や砕波による飛沫などが水表面に衝突する際に気泡を生じる。取り込まれた気泡のうち、スケールの大きい気泡は水表面に浮上し、水表面で破裂し、さらに微小水滴を発生させる。小さいスケールの気泡は水中を長時間浮遊し、最終的に気泡内部の気体は水中へ溶解してしまう。一方、水表面で気泡の破裂により生じた水滴の一部は、再度水表面に落下衝突し、水中に気泡を生じる。また、一部は大気上空に飛散し、海塩粒子等の物質となる。著者らはこのような現象を、“水滴-気泡の連鎖現象”と呼んでいる。

“水滴-気泡の連鎖現象”は大気-海洋間の物質輸送現象に大きく影響を及ぼすものと考えられる。しかし、水滴の水表面衝突や、気泡の水表面での破裂に関する様々な現象は微小な領域で、しかも一瞬で起こる現象が多く、詳細な観察が困難であった。特に、液滴と液滴、もしくは液滴と液面が接触する瞬間には、接触点付近では曲率不連続となり、特異点となる。特に表面張力が作用する場では、表面の曲率が現象を規定するため、非常に複雑で高速な現象となってしまう。

江藤ら<sup>1)</sup>は、2001年に100万枚/秒の速度で撮影できる超高速ビデオカメラを開発した。著者らはこれまで新たに開発された超高速ビデオカメラを用いて水滴の水表面衝突や気泡の合体などの水滴-気泡の連鎖現象に関連する素過程を詳細に観察してきた<sup>2)~4)</sup>。

本報告では、まず著者らが開発した超高速ビデオカメラに関して概要を述べる。特に高速化のために新たに設計された撮像素子の概念を述べる。さらに液滴の衝突現象への適用例として、単一の液滴が、表面張力の違う液体に衝突するとき生じるクラウンの崩壊現象の観察について報告する。液滴が液体表面に衝突するとき、よく知られている Edgerton crown を生じる (Worthington<sup>5)</sup>, Edgerton & Killian<sup>6)</sup>)。一般的に、クラウンは端部の表面張力不安定により液滴に分裂する。本報告では表面張力の異なる液体の接触による不安定に起因するクラウンの崩壊過程について報告する。

### 2. 超高速ビデオカメラの開発

#### 2.1 概要

1991年に著者らは4,500枚/秒のビデオカメラを開発した<sup>7)</sup>。これは並列読み出し型の超高速ビデオカメラであったが、シャッター、録画装置などの機械部分を全てICに置き換えることで当時の撮影速度の世界記録を達成した。このカメラはその後フォトロン、コダックから市販され、科学技術の様々な分野で使われた。

2001年に著者らは更に100万枚/秒のビデオカメラを開発した<sup>8)~10)</sup>。これは全ての画素一つ一つに103個の記録要素を作り込み、全画素並列で画像信号を記録操作することにより超高速撮影を実現することができた。著者らの方法によれば理論的には1億枚/秒程度の撮影速度を達成できる。撮影後は、10枚/秒で再生することにより、十分滑らかな映像を10秒間以上観察することができる。

また各画素のメモリー領域の末端にはドレーンを設けており、古い画像信号を連続的に排出

しつつ、常に最新の画像信号を画素内に保存することにより連続書き込みできるようにしている。これにより超高速連続撮影を行うときの課題の一つである、撮影対象現象の生起と撮影の同期が容易になった。

## 2.2 ISIS : 画素周辺記録型撮影素子

新たに CCD 型の超高速撮影素子 ISIS を開発した。正確な名称は「斜行直線 CCD 型 (Slanted Linear CCD)、画素周辺記録撮影素子 (ISIS : In-situ Storage Image Sensor)」である。

この素子は約 8 万画素 (260×312 画素) の原理実証素子である。ISIS では、全ての画素内に 100 個以上のメモリーを作り込み、全面素一斉に画像を記録する。小さな各画素内に多数のメモリー要素を作り込むので、メモリー要素の構造はできる限り単純でなければならない。全面素の近傍に多数のメモリー要素を作り込めば超高速撮影できることは古くからわかっていた。著者らがこのアイデアの実用化に成功したのは、「斜行直線 CCD 型」という極めて単純で低ノイズのメモリー構造を考案したからである。原理を図-1 に示す。

図中の CCD 要素サイズ (3~5 ミクロン程度) に比べて、巨大なフォトダイオードが使われていることがわかる (通常の撮影素子のその数十倍の面積である)。これは開口率を大きくし、高速撮影に必要な感度を上げるためである。

フォトダイオードから直線的に下に伸びる CCD を画像信号のメモリーとして使っている。フォトダイオードに光が入射すると電子・ホール対ができる。ホールは連続的に素子外に排出され、電子からなる電荷パケットが生成する。これが画像信号となる。これを各フォトダイオードの直下の CCD 要素に転送する。

図-1 でフォトダイオードの配置は斜めになっている。しかし、正方形のグリッド上に配置されているので正方ピクセル配置となっている。この撮影素子をカメラに取り付けるときは少し斜めにすれば良い。

このとき CCD の方向が相対的にやや斜めとなる。これが「斜行直線 CCD 型」画素周辺記録撮影素子の命名のゆえんである。パッケージングしたチップの写真を写真-1 に示す。

これまでの高速ビデオカメラは、多数の読み出し線からの並列読み出しと、読み出し画素数を減らして画像 1 枚あたりの読み出し時間、すなわち撮影時間間隔を小さくするという 2 つの技術により高速化を計っていた。この原理であると、ある程度以上の撮影速度に対しては画面

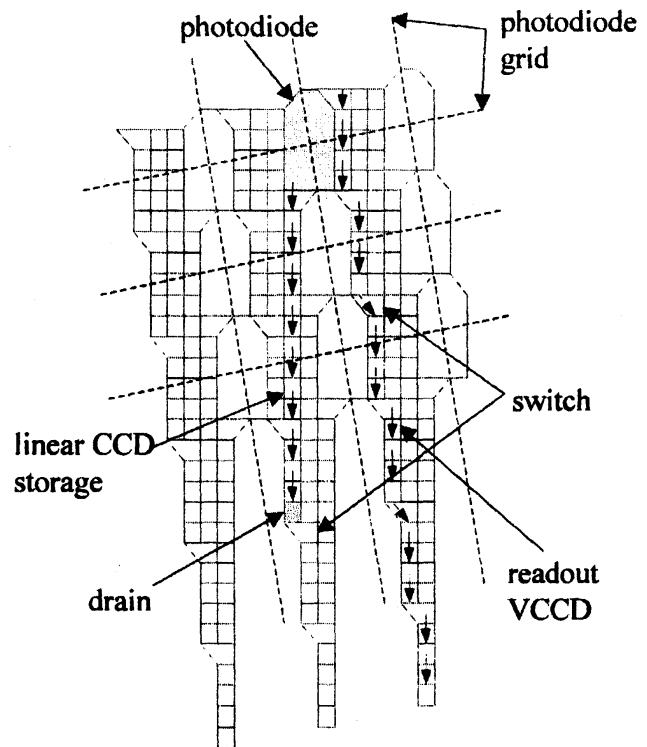


図-1 開発された斜行直線 CCD 型画素周辺記録領域を有する ISIS の各要素

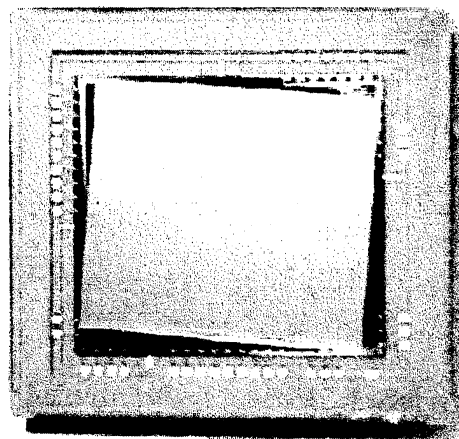


写真-1 開発された ISIS (斜めにパッケージされている)

を縮小せざるを得ない。ISIS では撮影速度が大きくなっても画素数は変わらない。かなり質の高い画像で連続観察することができる。

問題は、連続撮影枚数が、各画素内の画像信号の記録個数により決まり、比較的小さいことである。このために、撮影対象現象の生起を正確にとらえ、連続上書き記録操作を停止するためのトリガー信号を発生する高性能のトリガーシステムを並列して開発することが不可欠である。

### 3. 液滴衝突実験

#### 3.1 実験方法

開発した 100 万枚/秒の高速ビデオカメラを用いて単一のグリセリン水溶液を固体壁面上のエタノール薄膜上に衝突させたときに生じるクラウンとその崩壊をより詳細に観察した。

液滴に用いたグリセリン水溶液の濃度は 89% に固定した。液滴の生成は外径 4.9mm のステンレス製ノズルから重力によって滴下させた。生成される液滴の水平方向の直径は 5mm であった。液滴の落下高さは 4.37m に固定し、衝突速度は 7.7m/s であった。落下時の外気の揺らぎによる衝突点の変動を極力防ぐために、長さ 4m の塩化ビニル製のパイプを通して落下させた。

少量のエタノール(99.5%)をガラス板の上に注射器により 0.2ml 滴下することにより、薄膜を形成させた。実験毎の条件を同じにするため、まず、ペーパータオルで残っている液体をきれいに拭き、その上に 0.2ml のエタノールを撮影中心部に滴下する。エタノールとガラス板は完全な濡れの関係であるため、ガラス表面上にエタノールが薄く広がる。滴下後、約 40 秒ほどで約直径 7cm になり、それ以上はほとんど広がらない。一様に広がっているものと仮定し、またエタノールの蒸発がまったくないとすると厚さは約 50 $\mu$ m となる。気温が 30 $^{\circ}$ C の場合の蒸発を考慮すると厚さは約 34 $\mu$ m となる。

撮影用のトリガーとしては、レーザートリガーを用いた。衝突点上方数センチの液滴の中心が通る位置にレーザービームを水平方向にセットし、そのビームをフォトディテクターで感知し、トリガー信号を出すようになっている。

照明にはメタルハライドランプを用い、ディフューザーを通して、バックライティングとした。よってシルエット撮影をなっている。

#### 3.2 実験条件

画像から求めた液滴の水平直径  $D$  および衝突速度  $U$  を用いて Weber 数および Re 数を求めた。本実験においては、エタノール薄膜が大気に触れており、また薄膜内の流れが生じないため、エタノール薄膜の厚さ  $\delta$  は適切な長さスケールではない。しかし、液体の特性は、粘性と表面張力によって規定されるので、薄膜および液滴の We 数および Re 数は以下のように定義した。

(薄膜)

$$We_f = \rho_f D U^2 / \sigma_f = 10500, \quad Re_f = D U / \nu_f = 39000$$

(液滴)

$$We_d = \rho_d D U^2 / \sigma_d = 5600, \quad Re_d = D U / \nu_d = 460$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $\sigma$  は表面張力、 $\nu$  は動粘性係数であり、添え字  $f$  および  $d$  はそれぞれ薄膜、および液滴を表している。グリセリン水溶液の表面張力は 65dyn/cm で、エタノールは 22dyn/cm であった。

### 4. 観察結果

写真-2 に典型的なクラウンの崩壊過程を示す。グリセリン水溶液の液滴がエタノール薄膜に

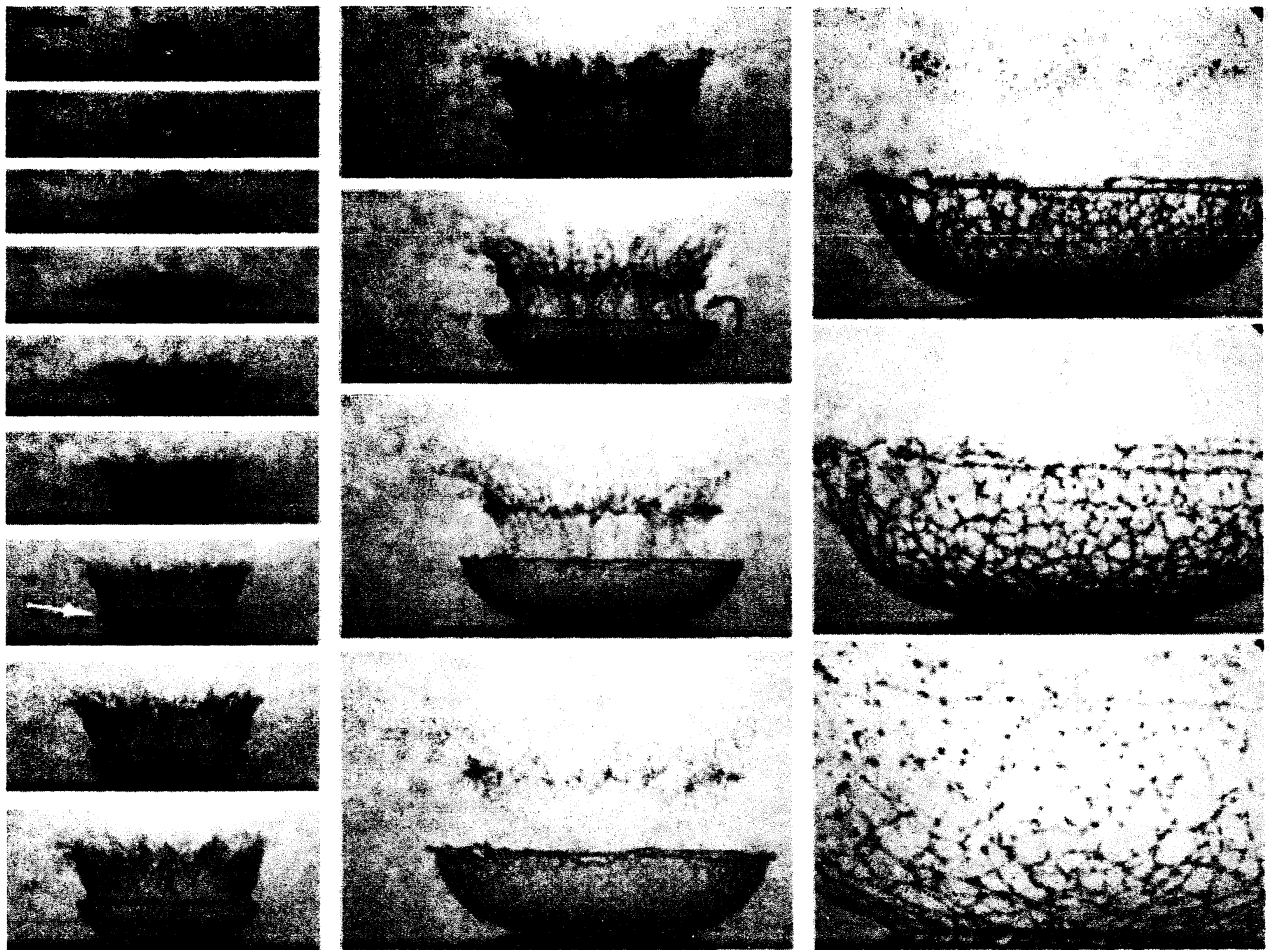


写真-2 グリセリン水溶液の単一液滴がガラス板上のエタノール薄膜に衝突したときに生じるクラウンの崩壊  
時刻 0, 50, 100, 150, 200, 250, 350, 450, 550, 650, 800, 1050, 1400, 2000, 2800, 4600  $\mu\text{sec}$   
左上端の黒色のスケールは 5mm を表している。

衝突した直後に非常に速い水平のスプラッシュが生じる。衝突から最初の連続 3 コマを利用して求めたエタノールの微小液滴の水平方向速度は約 100m/sec であった。この結果は、Thoroddsen<sup>7)</sup>の結果と一致する。水平方向のエタノール微小水滴の発生に引き続き、シート状のエタノールが鉛直方向に向かって生成し始める。

グリセリン水溶液の液滴が衝突から 250 $\mu\text{sec}$  後に、液滴のクラウンの薄膜が、エタノール薄膜に引き続き生成する (図中の白色矢印)。エタノール薄膜とグリセリン水溶液の薄膜は連続している。しかし、2 つの部分は全く違った挙動を示す。液滴から生じたグリセリン水溶液のクラウンはさらに発達し、大きくなる。一方、エタノールの薄膜はクラウンの内部に引き戻されるような挙動を示す。これは以下の 2 つの影響によるものと考えられる。

1 つは表面張力により内側に引き込まれる影響であり、もう 1 つはクラウン回りの気流の影響である。グリセリン水溶液膜がエタノール膜よりかはるかに厚いため、クラウンを形成する粘性の高い膜 (グリセリン水溶液膜) の慣性力は、エタノール薄膜の慣性力より大きい。よって、表面張力の影響は小さいと考えられる。発達しているクラウンの上縁では平板が外向きに動いている状態と同じであり、その上縁を回りこんでくる強い気流が生じていると考えられる (写真-2 の 11 番目の写真中の黒い矢印)。最終的には、エタノール薄膜は筋状に崩壊していく。

エタノール薄膜が崩壊し、グリセリン水溶液でできたクラウンの内部に取り込まれた初めてから、クラウン上部から孔が開き始める。クラウンはさらに大きく広がり、クラウン上部から発生した孔は広がり、また孔の数もクラウン底部に向かって増えていく。最終的にクラウンから

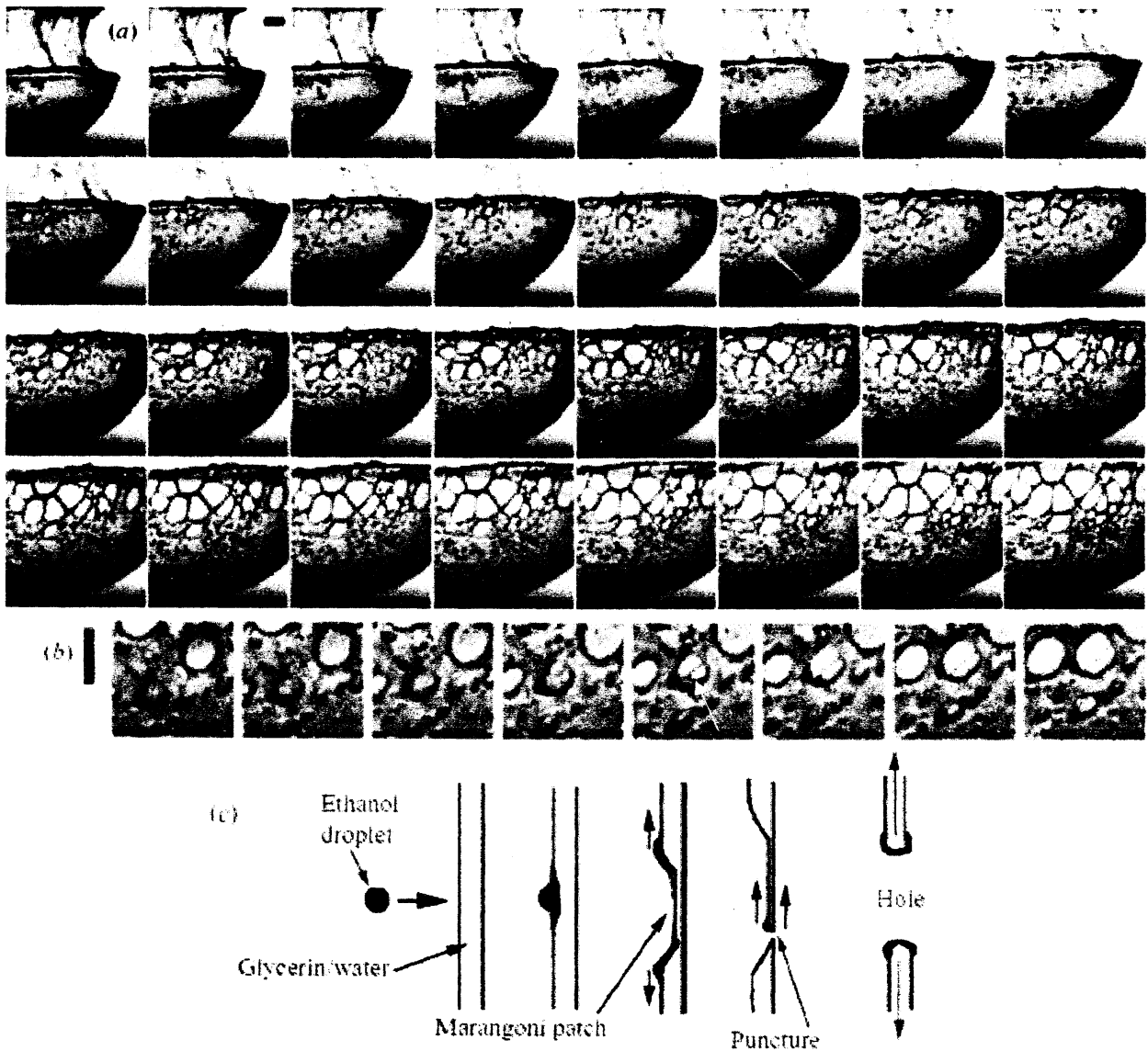


図-2 クラウン上での孔の形成過程

(a) Marangoni instability によって孔が生じる様子。図中の白色矢印で示しているところで孔が生じているのがわかる。各画像間の時間間隔は  $20\mu\text{sec}$ , (b) (a) で着目した点の拡大画像, スケールは  $1\text{mm}$ , (c) Marangoni 不安定によって孔が生じる現象の模式図

網かご状に変化し、液滴となって崩壊する。

グリセリン水溶液でできたクラウンの膜に孔が生じる現象を詳細に観察するために、拡大撮影を行った。図-2 にその 1 例を示す。図-2 (a) には、グリセリン水溶液のクラウン上に生じる Marangoni 不安定によって生じる孔の発達過程の一連の動画を示したものである。各画像間の時間間隔は  $20\mu\text{sec}$  である。クラウン上端部に多数の点状のものが大きくなり、孔を形成していく過程観察される。

図中の矢印部分の孔に着目して拡大した画像が図-2 (b) である。まず、円形にグリセリン水溶液液膜が薄くなり、結果として図中の矢印で示しているように孔が生成しているのがわかる。この結果より、予測されるクラウンの崩壊過程を模式的に示したのが図-2 (c) である。グリセリン水溶液のクラウン形成に先立って飛沫化したエタノールがクラウン内壁に付着する。エタノールとグリセリン水溶液の表面力の差により、エタノールは表面張力の高いグリセリン水溶液に

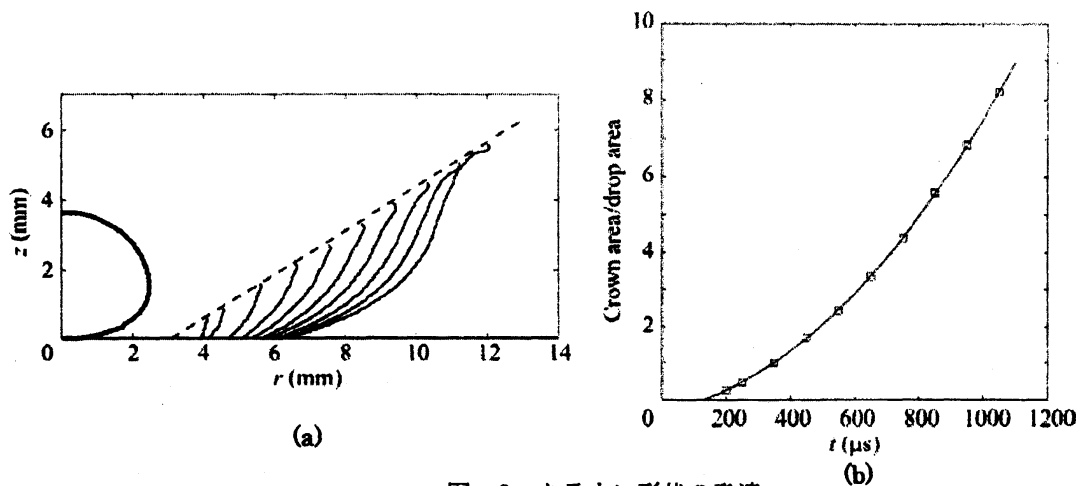


図-3 クラウン形状の発達

- (a) クラウン形状, グリセリン水溶液の液滴の衝突から, 200, 250, その後 100 $\mu$ sec 毎のクラウン形状,  
 (b) クラウンサイズの経時変化

より引っ張られ, その部分のグリセリン膜が薄くなり, 孔を形成する. 形成した孔はクラウンの発達とともに網状に変化し, 最終的に崩壊する.

図-3(a)には, グリセリン水溶液の液滴の衝突から, 200, 250, その後 100 $\mu$ sec 毎のクラウン形状をトレースした結果を示す. クラウン高さ  $z$  と半径  $r$  は直線の関係にあり, 次式で表される.

$$z = 0.62(r - R)$$

ここで,  $R$  は液滴の水平半径である.

また, 図-3 (b)には, クラウン面積の経時変化を示している. クラウンの面積は液滴の面積で正規化されている. 2次関数的に増加しているのがわかる.

## 5. おわりに

グリセリン水溶液の単一液滴が, ガラス板上のエタノール薄膜に衝突したときのクラウン形成, および崩壊過程を高速ビデオカメラにより詳細に観察した. 観察には著者らが開発した高速ビデオカメラを用いた. 高速ビデオカメラは, 1秒間に 100 万枚の撮影速度を持っている. 観察により以下のことが明らかとなった.

グリセリン水溶液の衝突により, 第1段階としてエタノールのジェットが水平方向に飛び出す. 引き続き, エタノールの薄膜が上方に向かって形成される. その後, グリセリン膜のクラウンが形成され始める. エタノールの薄膜は, 主に, クラウン周りの気流によりクラウン内部に巻き込まれ, 微小液滴に分裂する.

エタノールの微小水滴は, グリセリン水溶液でできたクラウンの内壁に付着し, Marangoni 不安定を生じる. Marangoni 不安定によって, クラウンの膜に多数の孔が生じ, 網かご状のクラウンを生じ, 最終的に崩壊する.

## 参考文献

- 1) Etoh, T.G., Pogemann, Kreider, K., et.al.: IEEE Trans. Electron Devices 50, pp144-151, 2003.
- 2) Thoroddsen, S.T., Etoh, T.G., Takehara, K.: JFM, Vol.478, pp.125-134
- 3) Thoroddsen, S.T., Etoh, T.G., Takehara, K., Ootsuka, N.: Physics of Fluids, Vol. 17, Issue 7, pp. 071763-1 - 071763-4
- 4) Thoroddsen, S.T., Takehara, K., Etoh, T.G.: JFM, Vol. 527, pp.85-144
- 5) Worthington. A.M.: A Study of Splashes. Longmans, 1908.

- 6) Edgerton, H.E., Killian, J.R. :Flash! Seeing the Unseen by Ultra high-speed Photography, Hale, Cushman & Flint, Voston,1939.
- 7) Thoroddsen, S.T.: J.F.M. Vol.451, pp.373-381,2002.
- 8) 江藤剛治, テレビジョン学会誌, 46, No.5, p p. 543-545, 1992.
- 9) 江藤剛治, 他 : 映像情報メディア学会誌, 56, No.3, pp.483-486, 2002.
- 10) 江藤剛治 : 顕微鏡, 39, No.2, p p. 129-132, 2004.