

## ベーストリガ蒸気爆発のトリガ条件に関する研究\*

阿部 豊<sup>\*1</sup>, 新井 崇洋<sup>\*2</sup>

## Study on Trigger Condition of Base-triggered Vapor Explosion

Yutaka ABE<sup>\*3</sup> and Takahiro ARAI<sup>\*3</sup> Department of Engineering Mechanics and Energy,  
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,  
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

Spontaneous vapor explosion can occur when a layer of the high temperature molten material lies on the water pool or on the moisture floor. This is so-called base-triggered vapor explosion. The base-triggered vapor explosion is supposed to occur in the case of a severe accident in various industrial facilities. It is very important to clarify the occurrence condition and possibility of the base-triggered vapor explosion from the viewpoints of the prediction and the prevention of the vapor explosion. In order to evaluate the occurrence conditions and to clarify the micro-mechanism of the base-triggered vapor explosion, the experimental apparatus to observe the base-triggered vapor explosion from the bottom of the floor to above is designed and constructed. The experiments using U-Alloy95 as a simulant material are conducted. Consequently, the microscopic behavior at the interface between the molten material and water can be observed in detail with this experimental apparatus. The interfacial behavior of the molten material is quantitatively evaluated by the PIV analysis and the digital auto-correlation method with the experimental results. The blowout velocity of the molten material at vapor explosion is evaluated from the visual data obtained on the experiment. The generated pressure at the vapor explosion is estimated by using the blowout velocity. In addition, occurrence condition of the base-triggered vapor explosion is evaluated with the thermal interaction zone (TIZ) theory.

**Key Words:** Base-triggered Vapor Explosion, Visual Observation, PIV, Digital Auto-correlation Method, TIZ

## 1. 結 論

蒸気爆発は、大きな温度差のある高温液体と低沸点液体とが液液直接接触をしたときに起こりうる現象である。蒸気爆発は低温液体が満たされたプール内に高温溶融物が落下した条件のもとで起こることが知られている。この体系における蒸気爆発を分散混合型蒸気爆発と呼ばれている。一方で、高温溶融物が水たまりあるいは湿気を帯びた床に層状に堆積するときにも蒸気爆発が起こる可能性が懸念されている。この体系における蒸気爆発は、ベーストリガ蒸気爆発と呼ばれている。この蒸気爆発は高温溶融物を扱うさまざまなプラントにおいて起こる可能性があるため、施設の安全性を考える上で現象の詳細を解明することが必要とされている。

これまで多数の蒸気爆発に関する研究が行われてきているが、それらのほとんどは水深のある程度確保された容器内でのいわゆる分散混合型蒸気爆発に関する研究である。分散混合型蒸気爆発を説明するために Boardらによって熱的デトネーションモデル<sup>1)</sup>が提唱されている。現在、蒸気爆発プロセスは熱的デトネーションモデルに

基づいて、図1に示すように説明されている。まず、高温溶融物が低温液体と接触した場合(図1(a))、高温溶融物はある程度の大きさに分散し、粗混合と呼ばれる状態となる(図1(b))。このとき、それぞれの高温液滴周りには蒸気膜が形成され、低温液体とは断熱された状態にある。仮に高温液滴周囲の蒸気膜が何らかの外乱などによって崩壊した場合には、高温液滴と低温液体が直接接触することになる。直接接触することによって高温液滴がさらに微粒化し、それによって伝熱面積が急激に増加し、急速な熱伝達が生じて大量の蒸気が瞬間的に生成される。急速伝熱に伴って大きな圧力波が生成され、粗混合領域内を伝播する(図1(c))。最終的には大規模蒸気爆発にいたるものとしている(図1(d))。

一方、体系の異なるベーストリガ蒸気爆発に対して、図1で示したプロセスが適用できるかについては現在のところ明らかになっていない。水深が浅く床面でトリガリングが生じるベーストリガ蒸気爆発に関する研究はこれまでほとんど行われてきていない。

\* 原稿受付 2004年4月8日。

<sup>\*1</sup> 正員、筑波大学大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)。<sup>\*2</sup> 学生員、筑波大学大学院システム情報工学研究科。  
E-mail: abe@kz.tsukuba.ac.jp

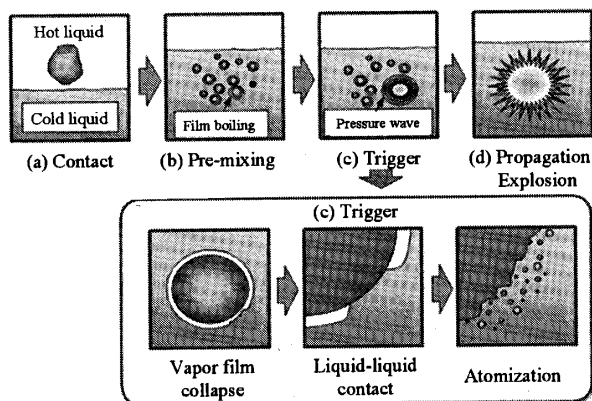


Fig. 1. Schematic diagram of the basic process of the vapor explosion based on the thermal detonation model<sup>(6)</sup>

わずかに容器底部におけるトリガリングについては、Long<sup>(9)</sup>がアルミニウムと水による実験を行い、容器底面と溶融アルミニウムとの間で水を囲い込んで蒸気爆発が発生するというエンタラップ機構を提唱し、松村、成合ら<sup>(6)</sup>は、すずと水による実験からベーストリガ蒸気爆発の発生条件の評価を行っているものがあるのみである。すなわち、ベーストリガ蒸気爆発についてはいまだに現象そのものが解明されておらず、特にエンタラップ機構が達成されているか否かについての可視観測を含めて蒸気爆発発生時のメカニズムに対しては十分な知見が得られていない。特に、ベーストリガ蒸気爆発時の床面における溶融物と水の接触界面の相互作用に関する知見は存在していない。熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発素過程によれば、蒸気爆発のトリガーは溶融物と水の間に存在する蒸気膜が崩壊することによって発生することが知られている<sup>(9)</sup>。しかしながら、そもそも蒸気膜が存在するか否かも含め、高温溶融物の界面挙動に関する研究は行われてきていない。これは床面における溶融物挙動を上部および側面から観測することが極めて困難であるためであると考えられる。

そこで、本研究における目的としては、ベーストリガ蒸気爆発における高温溶融物と水の界面挙動を可視観測することによって、ベーストリガ蒸気爆発の発生メカニズムを解明することとした。更に得られた実験結果からベーストリガ蒸気爆発の発生条件ならびに発生エネルギーの評価を行うこととした。そのために、床面での溶融物挙動を床面下部から観測が行うことのできる実験装置を設計、製作するとともに、この実験装置を用いて蒸気膜の存在の有無を含めた床面における溶融物と冷却材の界面挙動を可視観測することとした。

## 2 理 論

蒸気爆発が発生する条件は、温度に関してある程度の制限があることが知られている。図2は松村、成合らによる溶融スズと水の温度をパラメータとした蒸気爆発の実験結果の一例である。●は床面に溶融物が達する前に水中で蒸気爆発が発生した条件、△は溶融物が床面に達した直後に蒸気爆発が発生した条件、そして×は蒸気爆発が発生しなかった条件を示している。この結果より、蒸気爆発がある特定の温度領域で発生することがわかる。この温度領域は熱的相互作用領域(TIZ)と呼ばれており、主に、床面に溶融物が達する前に水中でトリガリングが発生する、いわゆる分散混合型蒸気爆発に対して提唱されている。以下に TIZ の境界条件に関する理論について述べる。

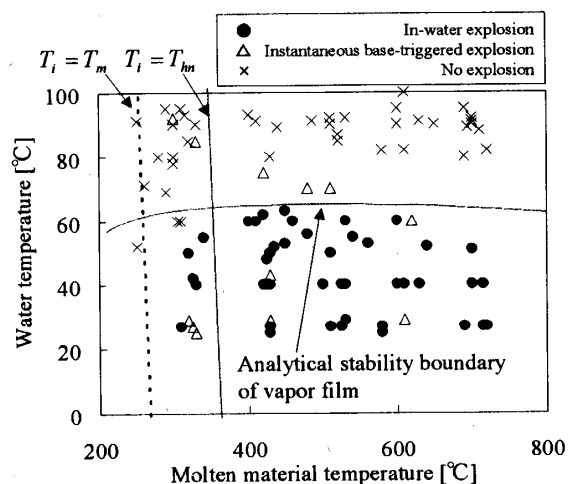


Fig. 2. Experimental results of thermal interaction zone for molten Tin and water<sup>(6)</sup>

Fauske ら<sup>(6)</sup>は均質核生成理論を蒸気爆発に適用して自発核生成モデルを提唱した。このモデルは、低温液体と高温液体の接触界面温度  $T_i$  が、水の均質核生成温度  $T_{hm}$  以上のときに蒸気爆発が発生するとしている。接触界面温度は、二つの無限物体間の熱伝導方程式を解くことによって求めることができる。

$$T_i = \frac{T_h - T_c}{1 + \sqrt{\beta}} + T_c \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \beta = \frac{(\rho C_p \lambda)_c}{(\rho C_p \lambda)_h}$$

ここで、 $\rho_h$  は高温液体の密度、 $\rho_c$  は低温液体の密度、 $C_{ph}$  は高温液体の比熱、 $C_{pc}$  は低温液体の比熱である。均質核生成温度  $T_{hm}$  とは、液体同士の伝熱面の

ように気泡核が存在しない場合、低温液体側が飽和温度以上にまで加熱されていき、自発的に核が生成され、瞬間的に激しく気泡が発生するときの温度である。この温度は低沸点液体によって決まり、その温度は熱力学的な相の安定性によって求められた Lienhard の半理論<sup>7)</sup>を用いて導かれる。

$$T_{hn} = T_{sat} + (0.905 - g_{sat} + 0.095g_{sat}^8) T_{crit} \quad (2)$$

$$\text{ただし, } g_{sat} = \frac{T_{sat}}{T_{crit}}$$

ここで、 $T_{sat}$  は飽和温度[K]、 $T_{crit}$  は臨界温度[K]である。よって、大気圧下での水の均質核生成温度は  $T_{hn} = 587.1$  [K] となる。大きな過熱度を持った低沸点液体は、均質核生成温度  $T_{hn}$  を超えた場合には急速な発泡と高圧の発生に主要な役割を果たしていると考えられる。図2において、点線は直接接触時に接触界面温度がスズの融点と等しくなる条件であり、実線は直接接触時に接触界面温度が均質核生成温度と等しくなる条件である。

蒸気爆発が発生するプロセスにおいては、高温液滴周りに形成された蒸気膜が崩壊し、二つの液体が直接接触することもまた必要条件となっている。古谷ら<sup>8)</sup>は、高温液滴周りの蒸気膜の線形安定解析を行っている。図3は解析モデルの概要図である。このモデルにおいて、流れのない低温液中に半径  $R$  の高温液が球状に静止して存在し、両液体は低温液の蒸気膜で分離されている体系を対象とする。低温液の粘性と表面張力を無視し、蒸気膜厚さが高温液滴径に対して十分小さい ( $r \approx R$ ) と仮定すると、簡略モデルに基づく安定境界における低温液のサブクール度は次式で表される。

$$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_l = \frac{T_{sat} \left( 1 + \frac{4\varepsilon\sigma T_{sat}^3}{h} \right)}{\frac{h_{gl}}{R_g T_{sat}} - \frac{T_h}{T_h - T_{sat}}} + \frac{\varepsilon\sigma}{h} (T_h^4 - T_{sat}^4) \quad (3)$$

図2の太線が式(3)によって評価された蒸気膜の安定境界温度である。水温が蒸気膜安定境界温度よりも高い条件では蒸気爆発が起こりにくいと考えられている。

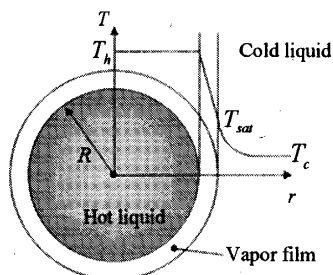


Fig. 3. Schematic diagram of vapor film stability analysis

### 3. 実験

図4に実験装置の概要を、図5にテスト部の概要を示す。実験装置は大別すると試験物質を加熱・溶融させる高周波誘導加熱炉、水溜りを模擬したテスト部、そして温度・可視観測を行う計測系からなる。可視観測には、ハイスピードカメラおよびデジタルビデオカメラを用いて、全体的または局所的な挙動を捉える。床面のハイスピードカメラによる可視観測を可能にするために、キューブ型ビームスプリッターを使用する。本研究の実験装置には透過/反射比が 1:1 となるものを使用する。仮にミラーとテスト部での光の反射率が 100% であるとする、ライトから出た光の 1/2 がビームスプリッターを通過してテスト部に到達し、テスト部で反射された光の 1/2 がカメラに到達する。よって、ライトから出た光の最大で 1/4 が可視観測に利用可能となる。

実験手順は、まず低温液体として使用する水を Hole に注ぎ、水たまりの水深ならびに水温を所定の実験条件に調節する。試験物質の温度が実験条件に達した後に加熱炉のプラグを引き抜いて溶融物を落下させる。その時の現象を側面及び床面下部の二方向から可視観測を行う。本実験では、模擬物質として比較的低融点の合金である U-Alloy95 (融点: 95°C, 密度 984 g/cm<sup>3</sup>) を使用することとした。

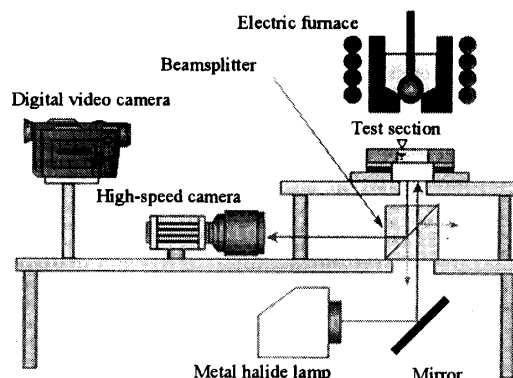


Fig. 4. Schematic diagram of experimental apparatus

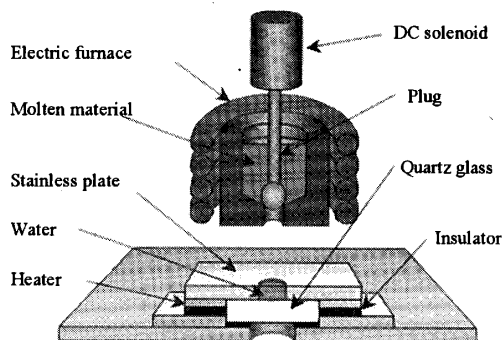


Fig. 5. Schematic diagram of test section

#### 4. 実験結果

まず図6-8に、蒸気爆発が確認されなかった場合の観測結果を示す。実験条件は、水温が 30℃、U-Alloy95 が 600℃、3g、水たまりが直径 10mm、水深が 10mm である。

図6はテスト部からの側面観測結果である。観測画像から、溶融物が水中に入ることによって体積的あるいは沸騰の影響によって水が押し上げられ、側面から見ると床面よりも Hole 部分の水が盛り上がる様子が確認された。

図7は、図6の様子を床面下部から観測した結果である。白線で囲った円形部分が Hole つまり水たまりである。そして水たまりの内部の黒い部分が水が床面に接している部分であり、白く反射しているところは溶融物が床面に接している部分である。水中に入った溶融物が床面に達し、その後床面と溶融物の間に水をトラップしながら床面を溶融物が覆っていく様子が確認できる。そのトラップされた水は激しく沸騰していた。

図8は、実験後に回収された固化物の写真である。図8(a)は、固化物を上部から示した様子であり、図8(b)は、床面に接していた面を示した様子である。全体的な形状としては水たまりの大きさに比べて落下させた溶融物の量が少ないためか、水たまりの周囲に押し出されたような中心のないドーナツ状で固化していた。また、床面に接していた面の様子をみると表面にくぼみが多く存在していることがわかる。これは溶融物が床面を覆っていく過程に水または蒸気をトラップしていたことを示唆する結果である。

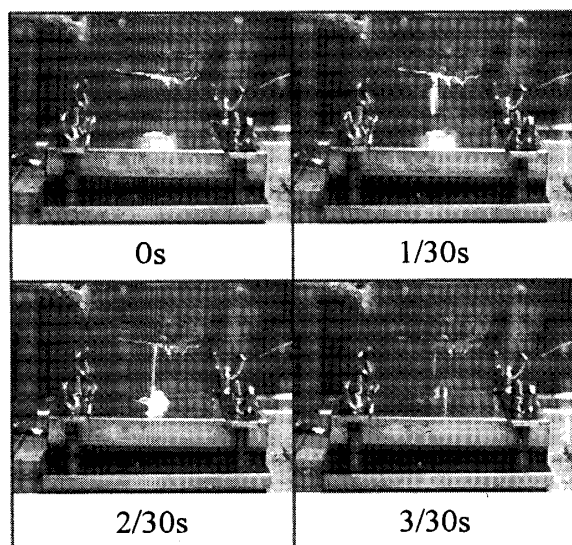


Fig. 6. Observation result of interaction between molten material and water (U-Alloy95: 200 °C , 3g, Water: 30 °C )

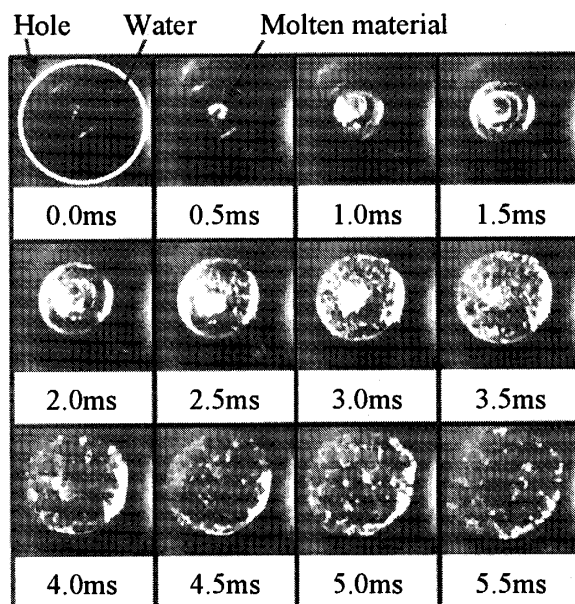


Fig. 7. Observation result of molten material and water (U-Alloy95: 200 °C , 3g, Water: 30 °C )

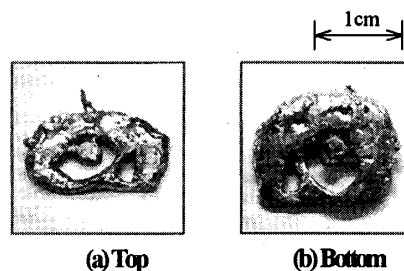


Fig. 8. Photograph of fragment (U-Alloy95: 200 °C , 3g, Water: 30 °C )

図9-11に、蒸気爆発が確認された場合の観測結果を示す。実験条件は、水温が 30℃、U-Alloy95 が 600℃、3g、水たまりが直径 10mm、水深が 10mm である。

図9はテスト部側面からの観測結果である。溶融物を水中に入れた直後に Hole から真上にポンという音とともに水柱があがった。図6の蒸気爆発が起こらなかった場合の側面観測結果と比較すると、かなり広範囲に溶融物や水が飛び散る様子がみられた。

図10は、図9の様子を床面下部から観測した結果である。時刻 25ms までは溶融物が床面を徐々に覆っていく様子がみられるが、時刻 30ms のときに溶融物部分の様子が何らかの要因によって急激に変化しており、その後床面を覆っていた溶融物が吹き飛ばす様子が確認された。この様子がトリガリングから蒸気爆発に至るプロセスを示していると考えられ、図9で上方に溶融物ならびに水が吹き飛んだ時刻と一致すると考えられる。

図11は実験後に回収された固化物の写真である。図11(a)は蒸気爆発時に外部に吹き飛ばずに水たまりに堆積

した固化物であり、図 11 (b)はその堆積した固化物の床面に接していた面の様子を示している。また図 11 (c)は蒸気爆発によって生成されたフラグメントを示している。堆積固化物をみると、周囲の一部に微粒子状の固化物が固着していることがわかる。この微粒子が固着している部分が蒸気爆発のトリガリングとなった部分である可能性が考えられる。蒸気爆発による生成フラグメントは  $10 \sim 10^2 [\mu\text{m}]$  オーダーの非常に細かい粒子も確認された。

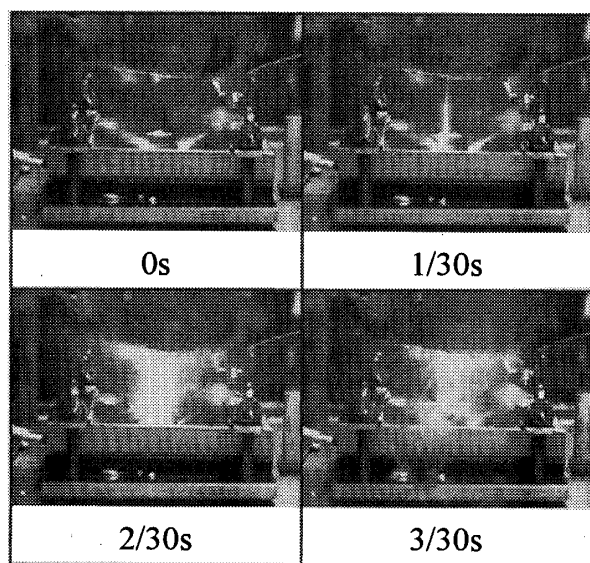


Fig. 9. Observation result of interaction between molten material and water (U-Alloy95: 500 °C , 3g, Water: 30 °C )

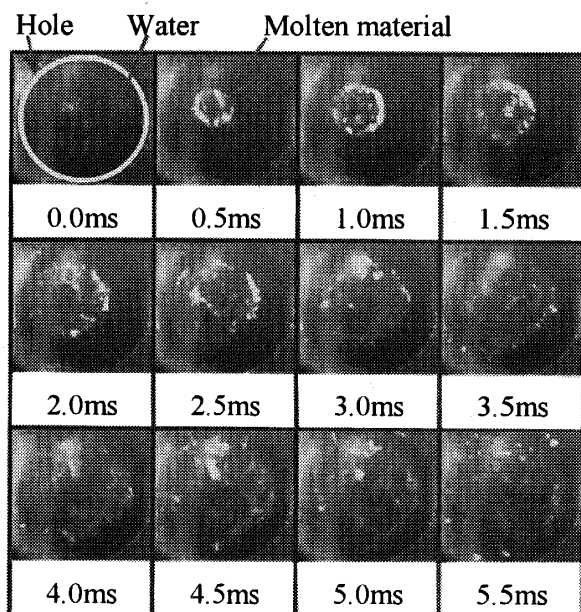


Fig. 10. Observation result of molten material and water (U-Alloy95: 500 °C , 3g, Water: 30 °C )

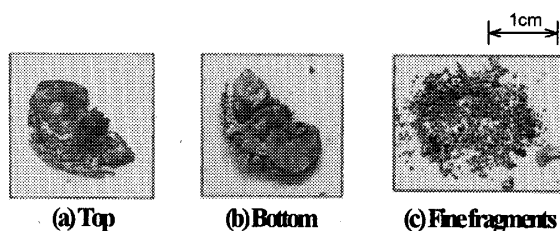


Fig. 11. Photograph of fragments (U-Alloy95: 500 °C , 3g, Water: 30 °C )

図 12 は、蒸気爆発が発生した様子をハイスピードカメラによって側面から観測した結果である。画像上部の黒い影が加熱炉下部、中央の縦に伸びているのが落下している溶融物、画像下部の黒い影が床面であり、その床面の中央に水たまりがある。実験条件は水温が 30°C、U-Alloy95 が 600°C、3g、水たまりが直径 10mm、水深が 10mm である。溶融物が水中に投入され、床面に達する程度の時間が経過した後蒸気爆発が発生する様子が観測された。その際、溶融物と水が鉛直方向に吹き飛ばす様子が観測されている。

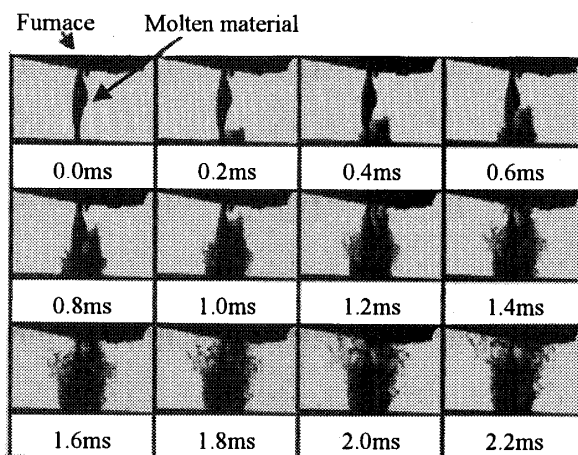


Fig. 12. Observation result of interaction between molten material and water (U-Alloy95: 600 °C , 3g, Water: 30 °C )

## 5. 画像解析結果

図 13 は、蒸気爆発が発生した条件における床面下部からの観測結果である。実験条件は、水温が 20°C、U-Alloy95 が 600°C、3g、水たまりの大きさが直径 10mm、水深が 10mm である。図中の白線で囲った円形部分が Hole つまり水たまりである。そして水たまりの内部の黒い部分が水が床面に接している部分であり、白く反射しているところは溶融物が床面に接している部分であると考えられる。時刻 0.0ms に溶融物が床面に達した後は床面を広がってゆき、時刻 5.5ms において蒸気爆発が発生した様子を示している。

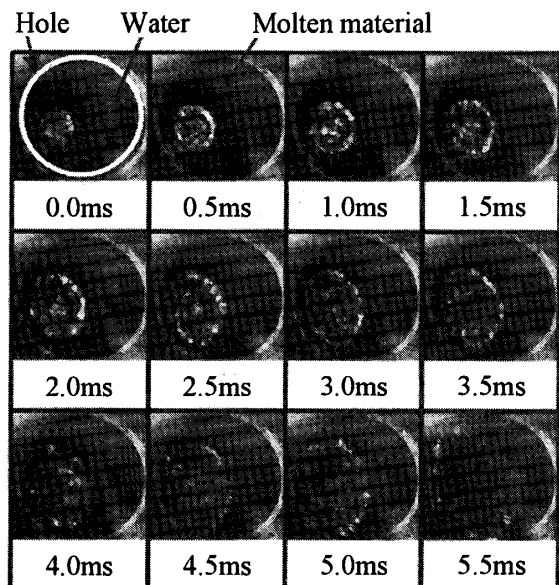


Fig. 13. Observation result of molten material and water (U-Alloy95: 600 °C ,3g Water: 30 °C)

図 14 は図 13 に示した観測結果のうち、時刻 0.0ms および 5.0ms の画像に対する PIV 解析結果である。まず時刻 0.0ms における代表的な速度ベクトルの絶対値は 0.67m/s であった。次に蒸気爆発が発生した時刻である時刻 5.0ms では急激な速度増加がみられた。代表的な速度ベクトルの絶対値は 1.62m/s であった。これにより、溶融物が床面を覆ってゆく過程に比べ、蒸気爆発発生時にはおよそ 3 倍程度の速度で溶融物が広がることが定量的に評価された。

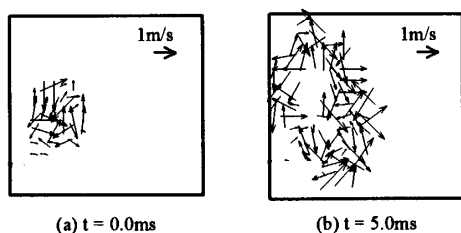


Fig. 14. PIV analysis results

しかしながら、現時点における観測画像の空間分解能ならびに時間分解能の限界により、溶融物挙動を同定するまでには至らなかった。そこで現時点における観測画像からより局所的で小さな変位の挙動、すなわち溶融物と水との接触界面挙動に対する評価をサブピクセル精度変位で行うために、デジタル相関法による界面移動速度の解析を行うこととした。図 15 にデジタル相関法による界面位置の算出方法の概要図を示す。まず、観測画像から輝度分布  $f(x, y)$  を抽出する。そして、輝度分布  $f(x, y)$  と界面を模擬する参照関数  $g(x, y)$  と

の相互相関を計算する。本解析においては、界面位置での相互相関係数  $r(x)$  が最大値をとるように参照関数として  $4 \times 4$  ピクセルのステップ関数を使用する。以下の式を用いて相関係数を求める。

$$r(x) = \frac{\sum_i \sum_j [g(x, y)][f(i+x, j+y)]}{\sqrt{\sum_i \sum_j [g(x, y)]^2} \sqrt{\sum_i \sum_j [f(i+x, j+y)]^2}} \quad (4)$$

求められた相関係数分布より、界面位置において相関係数が最大値となっていることがわかる。ガウス近似を相関係数分布の最大値付近の三点に対して適用することで、最終的に相関係数の最大値を決定する。その結果、界面位置をサブピクセル精度で算出することが可能となる。

デジタル相関法を先ほどの PIV 解析で用いた図 13 の観測結果に対して行う。図 16 は、図 13 の画像から溶融物と水の界面付近の  $64 \times 64$  ピクセルを抜き出した画像であり、各画像に対してデジタル相関法を適用することで界面位置を求めた結果である。赤線が求められた接触界面位置である。これらの界面位置の変化から界面の一次元速度分布を求めた結果が図 17 である。縦軸が画像の縦方向位置、横軸が界面移動速度である。界面移動速度は、時刻 0.0ms においておよそ 1.0m/s、時刻 2.5ms においてはおよそ 0.5m/s、そして蒸気爆発が発生したと思われる時刻 5.0ms においては 4 ~ 5m/s となり、時刻 0.0ms のときの四倍程度であった。これらの解析結果により、床面における溶融物の挙動を定量的に評価できる可能性が示された。

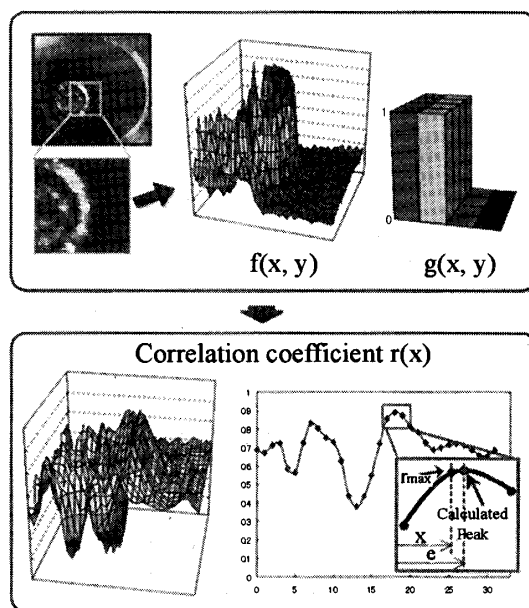


Fig. 15. Schematic diagram of digital auto-correlation method



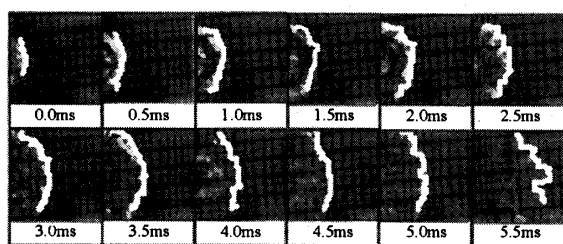


Fig. 16. Estimated results of interface location by digital auto-correlation

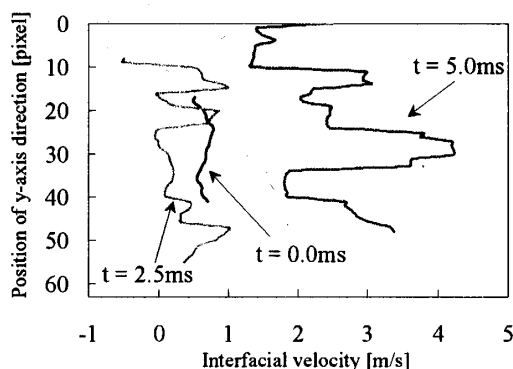


Fig. 17. Estimated results of the interfacial velocity

さらに、溶融物が床面に達した直後にはある界面移動速度であったものが、一旦減速したのちに蒸気爆発にいたる様子が界面の移動速度により確認された。この結果は溶融物落下初期段階において、溶融物周囲には蒸気膜が存在しており、その蒸気膜が何らかのトリガーがかかることによって崩壊したことを示すものと考えられる。すなわち、時刻 5.0ms までは溶融物は蒸気膜で覆われており、時刻 5.0–5.5ms の間で蒸気膜が何らかの要因で崩壊し、液液直接接触が起こることによって蒸気爆発にいたったのではないかと考えることができる。よって、蒸気膜崩壊から蒸気爆発に至るといふ熱的デトネーションモデルに基づく素過程における蒸気膜崩壊プロセスがこのベーストリガ蒸気爆発に対しても適用できる可能性が示唆されたものとする。

図 18 は、図 12 に示した観測画像から溶融物の輪郭のみを抽出した画像を重ね合わせた結果である。この実験条件では蒸気爆発挙動が垂直上方に拡大していることから、溶融物が水溜りから垂直方向に拡大するものと仮定して噴出速度を算出する。水たまりの中心から半径方向に 2.5mm、5.0mm の位置における溶融物の輪郭位置を求め、この輪郭位置の垂直方向への変化量から噴出速度を求めるものとする。

図 19 は図 18 から求められた溶融物輪郭位置の時間変化である。縦軸が垂直方向の輪郭位置、横軸は時間である。先ほどと同様に、この時間スケールにおいては輪郭

位置がほぼ一定速度で変化していることから直線近似によって噴出速度を求める。その結果、溶融物の噴出速度はおおよそ 14m/s であった。

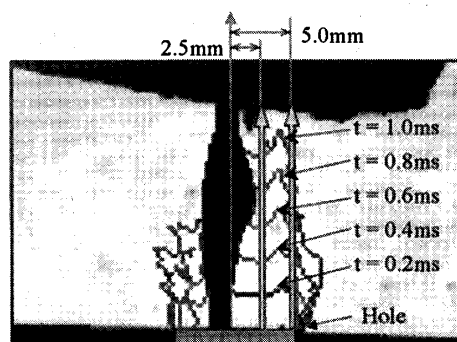


Fig. 18. Interfacial outline of blowout molten material

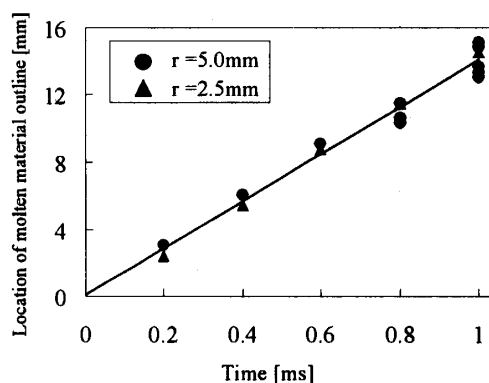


Fig. 19. Location of top of the blowout molten material

ここで、図 20 に示すように、図 12 の挙動を、蒸気爆発時に発生した圧力によって溶融物が上方に吹き飛ばされるものとしてモデル化する。つまり、蒸気爆発が発生した時刻  $t = t_0$  に初期圧力  $p_0$  であった溶融物が、時刻  $t = t_1$  に圧力  $p_1$ 、速度  $v_1$  で噴出すると仮定している。時刻  $t = t_1$  における溶融物の圧力  $p_1$  は大気圧とし、噴出速度としては図 19 から求められた値を適用することとする。このモデルに対してエネルギー保存式を用いて蒸気爆発発生時の発生圧力を算出すると、おおよそ 10 気圧と評価された。

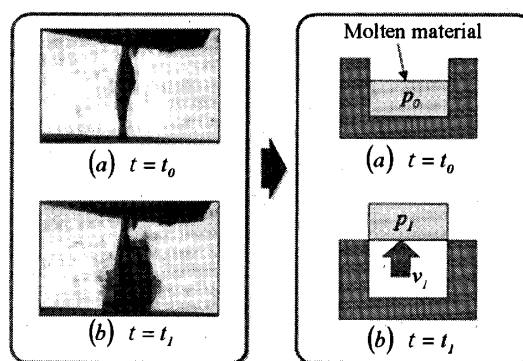


Fig. 20. Estimation of the generated pressure

図 21 は、主に分散混合型蒸気爆発に対して提唱されている熱的相互作用領域(TIZ)と、ベーストリガ蒸気爆発を対象とした本実験結果との比較結果である。縦軸が水温、横軸が溶融物温度であり、TIZ は二本の実線で囲まれたグラフ右下の領域となる。グラフ内の●はベーストリガ蒸気爆発が発生した条件であり、×は発生しなかった条件を示している。グラフより、蒸気爆発が発生した温度条件が TIZ の範囲内にほぼ含まれる結果となった。よって、分散混合型蒸気爆発に対して提唱されていた TIZ 理論が、ベーストリガ蒸気爆発に対しても適用できる可能性が示唆された。このことは、もし TIZ 理論が適用できるならば、ベーストリガ蒸気爆発も分散混合型蒸気爆発と同様のメカニズム、つまり図 1 に示したプロセスに従うものである可能性が示された。

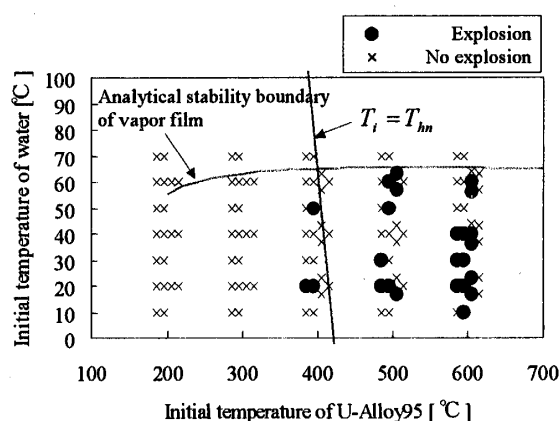


Fig. 21. Comparison between TIZ and experimental results

## 6. 結 言

ベーストリガ蒸気爆発現象を詳細に観測するための実験装置を設計・製作し、模擬物質として U-Alloy95 を用いて実験を行った。その結果、本実験装置によって床面下部ならびに側面の二方向からベーストリガ蒸気爆発発生挙動の詳細な観測結果が得られた。

また、蒸気爆発挙動を明らかにするために、床面下部からの可視観測画像に対して PIV 解析ならびにデジタル相関法を適用して蒸気爆発時の床面における溶融物挙動を定量的に評価した。その結果、溶融物と水の間には蒸気膜が存在している可能性が示唆され、熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発素過程における蒸気膜崩壊プロセスがベーストリガ蒸気爆発に対して適用できる可能性が示唆された。

テスト部側面からの観測画像からは溶融物の噴出速度を算出し、その噴出速度から本実験体系における蒸気爆発発生時の発生圧力を求めた。

分散混合型蒸気爆発に対して提唱されている TIZ 理論と本実験結果を比較したところ、TIZ の推定範囲内にベーストリガ蒸気爆発の発生した条件がほぼ含まれる結果となり、ベーストリガ蒸気爆発に対しても TIZ 理論が適用できる可能性が示された。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたっては佐藤健一郎氏、中川裕二氏（三菱重工業株）に多大なるご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) S.J. Board, R.W. Hall, and R.S. Hall, "Detonation of Fuel Coolant Explosions", *Nature* 254, (1975), 319-321
- (2) OECD/NEA, "Meeting summary", *Proceedings of the CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions*, NUREG/CP-0127, NEA/CSNI/R (98) 8, (1993), MS-1-11
- (3) G. Long, "The Explosions of Molten Aluminum in Water-cause and Preventions", *Metal. Prog.* 71-5, (1957), 107
- (4) K. Matsumura and H. Nariai, "Experimental Study on Base-triggered Explosions in Molten tin/Water Systems" *Journal of Nuclear Science and Technology*, 36-9, (1999), 767-774
- (5) Y. Abe, H. Nariai, Y. Hamada, "The Trigger Mechanism of Vapor Explosion", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39-8, (2002), 845-853
- (6) H. K. Fauske, "On the Mechanism of Uranium Dioxide-Sodium Explosive Interactions", *Nuclear Science and Engineering*, 51, (1973), 95-101
- (7) J. H. Lienhard, "Correlation for the Limiting Liquid Superheat", *Chem. Eng. Sci.* 31, (1976), 847-849
- (8) M. Furuya, K. Matsumura, I. Kinoshita, "A Linear Stability Analysis of a Vapor Film in Terms of the Triggering of Vapor Explosions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39-10, (2002), 1026-1032