

高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究*
(第1報, 単一滴による実験)

飯田 嘉宏**, 高島 武雄**, 秋吉 亮***

高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究*

(第1報, 単一滴による実験)

飯田 嘉宏**, 高島 武雄**, 秋吉 亮***

A Study of the Vapor Explosion Mechanism with Single Drops of High Temperature Liquids and Volatile Liquids (1st Report, Experiments with a Single Drop)

by Yoshihiro IIDA, Takeo TAKASHIMA, and Ryo AKIYOSHI

A small single drop of molten LiNO_3 and molten tin is dropped into a tapped ethanol and ethanol solution respectively, and the phenomena generated after the collapse of stable film boiling around the drop are investigated in order to study the vapor explosion mechanism. The observation study of explosion configuration using a high speed camera and flash light shows that the surface of the vapor bubble is very uneven, and the change of the configuration has a close connection with the pressure change induced around the drop. The curves of pressure change are roughly divided into four types. When the maximum pressure is relatively high, a characteristic curve which has three groups of pressure peaks is detected. The first peak is supposed to be connected with the collapse of vapor film, the second with the fragmentation of hot liquid and the third, which is usually the maximum, with the recontact to volatile liquid. The peak values are related to the time interval between the second and the third peak.

Key Words: Thermal Engineering, Phase Change, Vapor Explosion, Thermal Interaction, Direct Contact Heat Transfer, Film Boiling

1. 緒 言

蒸気爆発現象は、これまで金属工場や化学工場ではしばしば発生して問題視されていたが、一部の原子炉や液化ガス装置など、高温液と低温液の直接接触の可能性のある諸システムの安全対策のために、最近の研究は盛んになってきている^{(1)~(4)}。これらの結果、それまでほとんど不明のままであった蒸気爆発機構に関して少しずつ明らかになりつつあり、1980年に行われた専門家会議では、蒸気爆発が発生するためには以下の4段階が必要であるとの合意を得るに至った⁽⁵⁾。すなわち、

- (1) 膜沸騰下での初期粗混合
- (2) 膜沸騰の不安定化
- (3) 微混合と急速伝熱
- (4) 急速伝熱域の拡大

の各段階である。

しかし、上記の合意は多くの研究結果から帰納的に

推論されたもので、各段階での具体的挙動についての実験的実証はまだ不十分である。また、各段階がいかなる空間的、時間的關係をもつかについてはわかっておらず、一言にして言うともまだ機構は不分明のままと言える。多くの研究にかかわらずこのような現状の理由は、現象が極めて複雑なことの他、高速で確率的でさえあるために、実験的に把え難いためと考えられる。そこで著者らは、このような現象にアプローチするにはできるだけ単純で安定な実験系を選ぶのが望ましいという考えをもつとともに、膜沸騰に引き続き現象を把えるのが肝要と考えて次のような実験を試みた。すなわち、低沸点液中に落下させた高温液の小滴周囲に安定な膜沸騰を実現させ、蒸気膜崩壊につづく爆発的現象を研究した。少量の高温液塊を水などの低温液中に落下させる方法で行った実験^{(6)~(8)}は、従来もいくつかあるが、現象を十分単純化するに足るような微小液滴のまま、安定な膜沸騰を確実に実現したのちに爆発に至らせる実験は、レーザーで加熱溶解させた酸化鉄と水を使った Nelson ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾の実験しか著者らは知らない。この実験はエキスプローディングワイヤによって単一液滴のみの蒸気爆発を起こさせたもので、興味ある事実を提供したが実験例はあまり多くなく、一般則を描出するには至っていない。これに対して一

* 昭和58年6月3日 第20回日本伝熱シンポジウムおよび昭和59年6月1日 第21回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和60年5月28日。

** 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

*** 学生員、東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

連の本研究では、単一液滴の場合について広く実験を行うだけでなく、複数滴の場合のプロバゲーション段階をも含み、前記の4段階のうち、最初の粗混合段階を除くすべての段階に関する実験研究を行おうとする。

本第1報では、安定な膜沸騰実現後に蒸気爆発を起こす両液の組合せの代表として溶融 LiNO_3 と常温のエタノール、溶融せずと常温のエタノール水溶液を選び、高温単一液滴について行った実験とその結果について報告する。これらの液・液の組合せを用いた主な理由は、膜沸騰確認後の蒸気爆発を容易に実現できること、両高温液と水に関してだが液塊による小規模蒸気爆発の実験例⁶⁾⁷⁾があること、 LiNO_3 はそれ自体の酸化が少なく再現性高い実験ができることなどであり、性質の大きく異なる2種の高温液を使用したのは、実験結果の一般性を確立しようとしたためである。

記号

- C: エタノール水溶液の重量濃度
 F: 蒸気泡域の投影面積
 F_0 : 膜沸騰時の投影面積
 L: 膜沸騰崩壊時の液深
 P: 圧力
 P_B, P_C : 圧力ピーク B および C の圧力値
 P_{\max} : 最大圧力値
 t: 時間
 Δt_{BC} : 圧力ピーク B, C 間の時間間隔
 T_c : 低沸点液の温度
 T_d : 液滴のノズル滴下時の温度

2. 実験装置と方法

実験に先立って、低温液中で安定な膜沸騰を生じた後に蒸気爆発する液・液の組合せについて、種々の予備的実験を行うとともに、蒸発時間曲線法⁽¹¹⁾で予測を行うなどした結果、 LiNO_3 -エタノール系と、すず-エタノール水溶液系を選んだ。

図1は、 LiNO_3 -エタノール系の実験装置の略図である。すず-エタノール水溶液系の装置構成はほぼ同様なので説明は略し、以下では前者について述べる。図1の上半部は試料の溶融滴下部、下半部が試験部である。常温では粉末状の LiNO_3 を内径 20 mm のステンレス鋼製容器①に入れ、電圧調整器⑨で制御されるヒータ②で加熱溶融した。温度はシース熱電対⑩、温度記録計⑬で測定される。内径 2 mm のステンレス鋼管で作られた滴下ノズル⑥の入口は通常はバルブ⑤で閉

じられているが、バルブと接続しファン⑬で冷却されるソレノイド③を制御部④によって微小時間開放することにより、単一の液滴を滴下する。ノズル先端部のシース熱電対の温度と試料容器内温度とは同一になるようにヒータを調節しており、この温度を滴下時液滴温度 T_d とした。滴下時の液滴直径は 4~5 mm であった。

エタノールの容器⑦としては、内径 40 mm、長さ 500 mm のアクリル樹脂製の円筒容器を使用し、液深は 450 mm とした。また、一部の観察実験では内径 20 mm のガラス管を使用した。エタノール自由表面とノズル⑥の間の空間には窒素ガスを流して着火の危険を防いだ。なお、本装置内と大容量の容器内で起こる蒸気爆発の間に機構上の基本的相違は有り得ないと考えている。

爆発的挙動を呈するような条件の場合には、滴下液は自由表面に達して蒸気膜を形成し、周囲に蒸気膜を保持したままエタノール液中を約 0.4 m/s の速度で沈降してゆく。 T_d が小の条件では沈降中に自然に膜崩壊し、細粒化して爆発的挙動を示すことがあったが、多くの場合は底部に到着後や側壁面に接触後に膜崩壊した。また、 LiNO_3 の場合は自然膜崩壊を起こす位置は不確定で再現性は小さく、この時の現象を写真などで撮影するのは困難なので、他の多くの実験と同様に膜崩壊を起こす人為的トリガを使うこととした。トリガの方法としては、エキスパローディングワイヤや圧力急減法などがあるが、本研究では液中に障害物

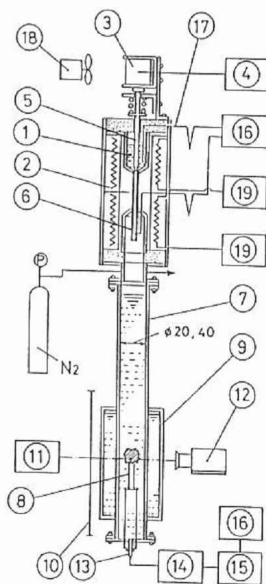


図1 実験装置の略図

⑧を設け、そこに液滴が接触して膜崩壊を起こさせるようにした。このため、16本の金属針をピッチ3mmで千鳥足状に上向きに並べた針山を用いた。金網なども試したが、爆発時に四方に拡張する蒸気泡領域への影響や観察上の問題から針山を選んだ。また、自然崩壊の場合の様相と圧力波形は針山接触時のそれらとほとんど相違ないことをあらかじめ確認しており、蒸気爆発の開始条件よりもむしろ開始後の状況や伝ばなどの機構解明を目的とする本研究にとっては、接触法で差しつかえないものと考えられる。なお、実際の蒸気爆発発生時においても蒸気膜は自然崩壊するというより、器壁や他の液滴との接触または圧力パルスなどが崩壊の原因になる場合が多いものと考えている。

様相は、光散乱ガラス⑩、透過光⑪を利用して高速度カメラ⑫で撮影した。円筒容器による光の屈折は、く形の水槽⑨で補正するようにした。また、35mmカメラとフラッシュ光での瞬間写真も撮影した。圧力変動は容器底にとりつけた半導体圧力センサ⑬と増幅器⑭、デジタルオシロスコープ⑮によって10 μ s/ポイントで測定し、記録計⑯で記録した。なお、本装置では圧力液の減衰は小さいうえ、その反射も後述する圧力波形にあまり影響していないことを一連の予備実験で確かめている。また、センサへの圧力波到達時間は、主要な実験の場合0.1ms以下である。

まず-エタノール水溶液系の実験では、液深を50cmとした。また、この場合は後述するように沈降中に比較的定まった位置で蒸気爆発するので、針山などの障害物は設けない状態で自然に膜崩壊させた。高温液滴下時の温度 T_d は、LiNO₃について約600~800K、すずについて約550~900K、また、低沸点液温度は常温付近である。

3. 溶融LiNO₃小滴とエタノールによる実験の結果

実験条件の範囲内で一高温液滴が落下後に呈する挙動は、大別して3種に分けられた。

(1) エタノール表面ではおねあげ現象を起こすのみで膜沸騰は生じない。圧力波のピークは小さい。

(2) 膜沸騰しつつ沈降するが、障害物に触れても細粒化せず、蒸気泡を伴う核沸騰に遷移し、そのまま固化する。圧力波は非常に小さい。

(3) 膜沸騰しつつ沈降し、沈降中かまたは障害物に接して膜崩壊し、細粒化しつつ急激に蒸気泡を生じ、特徴ある複数の高いピーク圧力波や、その他の複数の圧力波を発生する。

ものの3種である。(3)のうち高いピーク圧力を発するものは、一小液滴の現象ゆえ粗混合と伝ばを含まないが、緒言中で述べた蒸気爆発の必要段階の他を含み、鋭い圧力波を生じるので1滴の蒸気爆発と呼び得ると言えよう。本研究で主に扱うのはこの場合である。

図2は、1滴の蒸気爆発の典型例を透過光で高速度撮影したものである。2000こま/sで撮影したが、図中には代表的な時間でのフレームを選んで掲げた。液滴はやや扁平な形状となり、膜沸騰しつつ沈降していく(写真番号②、③)。上部には蒸気塊があるが、エタノールの過冷度が大きいため蒸気泡の離脱は見られない。この場合の瞬間写真例を図3(a)に掲げた。やがて針山の一部に触れ蒸気膜崩壊を起こす(④、時間0とした)。この時の位置が針山最上端より下方にあるのは、液滴が針山の写真手前側に沈降してき、液滴の側面が針山の手前側面に接触したためである。

写真の黒色部は発生蒸気だけでなく高温液も含むので、以下これを蒸気泡域と呼ぶとすると、膜崩壊後に同域は膨張し、数ms後から急激に膨張する(⑤)

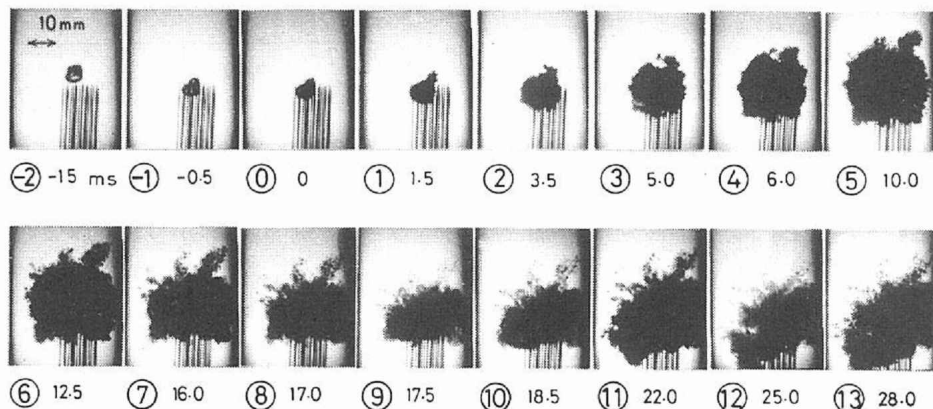


図2 爆発様相の高速度撮影例(LiNO₃-エタノール, $T_d=785$ K, 2000 FPS)

～⑤)、やがて最大径(⑥)となったのち収縮する(⑥～⑧)、この間透過光はほとんど通さず、蒸気泡域は黒色に写る。図3(b)は、膨張段階(図2では③～⑤相当)における様相を、反射光による瞬間写真で示したもののだが、単純な場合の沸騰蒸気泡が一般に滑らかな界面を呈しつつ膨張するのは大きく異なり、界面は極めて凹凸に富み、白濁している。また外部に飛び出している部分もある。細かい凹凸は透過光を散乱するために図2のように黒色に写るのであり、また同図でも飛び出しおよび界面の凹凸がある程度わかる。このような著しい凹凸および飛び出しの発生原因は、高温液が細粒化して蒸気泡域界面および外周に飛散していることによると考える以外にないものである。また、図3(b)によれば、細粒子は蒸気におおわれていること、すなわち膜沸騰状態にあることが推定される。このことをさらに確認するために、図2の⑤以降で上部右側に突出した蒸気泡域部を例として観察する。⑥で最大の大きさになり全体が黒色だが、⑦、⑧と黒色部は次第に細分化し、⑨では小さな粒々ほどの黒色部が残る程度になる。また、⑩、⑪とかけてこれらが再び大きくなっている。さて、この蒸気泡部が低温液蒸気のみであるとすると、細分化して収縮する事実は説明できない。実際には細粒化した高温液(または細粒化後に凝固した固体粒)まわりに蒸気を残した形で、蒸気が収縮すると考えるのが妥当であろう。また、最収縮時の⑨付近では、この蒸気膜は非常に薄くなるか、またはいったん消失していると考えられる。多くの他の写真撮影によっても、最収縮時付近では蒸気泡域の界面はぼやけて非常に不明瞭になるとともに、中心付近でも黒色の程度は減少するのが常であり、全体にわたって薄化か消失が生じているものと考えられた。⑨の後には再び蒸気泡域は膨張(⑨～⑪)、収縮(⑪～⑫)、

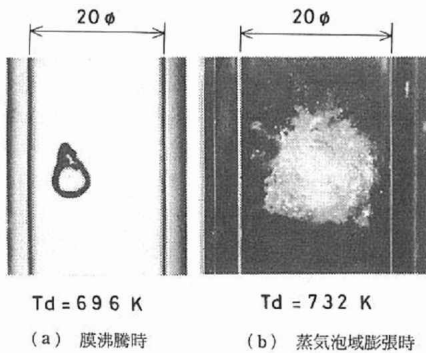


図3 瞬間写真の例

膨張(⑫～⑬)を数回繰返すが、その程度は弱くなるとともに像も不めいりようになり、ついには固化した高温液粒子群がコロイド状となり、ゆっくり沈降してゆく。なお、これら粒子はやがて緩慢にエタノールに溶解してゆく。

図4は、図2の場合の圧力波形を実線で、蒸気泡域の投影面積 F と膜沸騰時の同面積 F_0 の比を点線で示したものである。圧力波のピークはA, B群およびC群に分かれるが、圧力波形と F/F_0 または図2の様相に良く対応していることがわかる。すなわち、膜崩壊時にピークA、蒸気泡域急膨張開始時にB、最収縮時に対応して各 C_1, C_2, \dots がある。Aから1時間後にピーク B_1 を生じる。 B_2, B_3 などは B_1 に付随するものと考えられる。 B_1 および蒸気泡域急膨張の原因については、現時点では確言できないが、Aの膜崩壊につづく直接接触時にあらく飛散した高温液が再び低温液と接触し、本格的な細粒化と急速伝熱を起こしているのではないかと予想される。次に注目したいのは、B群につづき圧力が低下し、0.02 MPa 程度の減圧状態が永く続くことである。このため細粒子まわりには容易に

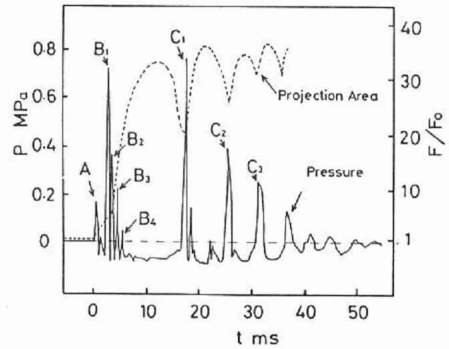


図4 圧力波形と蒸気泡域変化の典型例 (図2と同条件の場合)

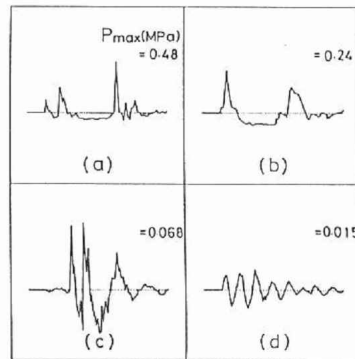


図5 圧力波形の分類 (LiNO₃-エタノール系)

蒸気膜が形成され、後の現象に引きつがれるであろう。またこの減圧期間中に F/F_0 は最大約 34、体積比にすると約 200 倍となる。やがて、凝縮によると考えられる蒸気泡域は収縮し、圧力が回復する過程で 0.76 MPa を呈すピーク C_1 が生じている。時間は最収縮時に対応し、その後再び急膨張している。同ピークは収縮パルスによるものか、膨張に伴うものなのかは今のところ不明だが、同ピーク値が最大値となる場合が多かった。 C_1 、 C_2 などは C_1 現象の振動であると考えられるが、減衰してゆく。

図5は、実験条件の範囲で観測された圧力波形を整理し、4種類に分類した内の各典型例である。各図の縦軸は P_{max} の例値で比較されている。(a)形は、図4のA、B群、C群に対応する各波形を例外なく有するもので、多くの場合ピークC値 (P_c) が最大値を呈する。(b)形は(a)形の波形がくずれているが、(a)とほぼ同様の減圧期間を有し、二つ以上の大きなピークをもつので同類と見なせる。(c)形は衝撃的な高い圧力波はなく、(a)、(b)形と同類とは見なし難いが複数のピークを有するもの、(d)形は単純な圧力振動に近いもので圧力も小さいもの、である。

図6は、 T_d で滴下した時の P_{max} 値を、上記(a)、(b)、(c)、(d)の各波形形に対応させてプロットしたものである。約 0.2 MPa 以上の比較的高い P_{max} を呈するのはすべて(a)形と(b)形であり、(a)形がその中でも大きな P_{max} を呈する。一方、(c)、(d)形は大きな圧力ピークも衝撃的な圧力波も見られないので、 $LiNO_3$ -エタノール系の1滴の蒸気爆発を代表する圧力波形は(a)形であって、(b)形はその類型であると考えられる。

4. 溶融せず小滴とエタノール水溶液による
実験の結果

すず-エタノール水溶液系における蒸気爆発の実現

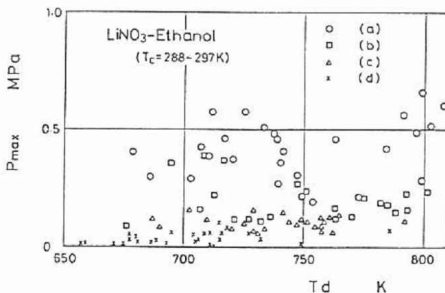


図6 $LiNO_3$ -エタノール系における滴下時温度と最大圧力値および圧力波形の関係

は、エタノール濃度によって条件が相違した。濃度 100% の場合は、滴下されたすず小滴周囲に厚い蒸気膜をもって沈降し、底部に達してから膜沸騰から核沸騰への遷移現象のみを示し、蒸気爆発はなかった。一方、濃度 0%、すなわち水の場合には、滴下直後に水面上ではね上げ現象を起こして冷却されるのみで、同じく蒸気爆発はなかった。そこでエタノール濃度を変えて実験したところ、濃度によっては膜沸騰の沈降中に自然に蒸気爆発を起こした。図7は、 $T_d=820$ K の場合に自然発生の蒸気爆発を起こした液深を○印でプロットしたものである。△印は膜沸騰から核沸騰に遷移するのみであったことを示す。図7の斜線部の液深で蒸気爆発または遷移を起こし、その右下部の条件では膜沸騰しつつ沈降していることを意味する。よって本実験の場合、濃度 $C=20\sim 60\%$ で沈降中に自然に蒸気爆発を起こす。

図8は、 $C=60\%$ の場合につき、 T_d と L の関係を示したものである。 T_d 大なるほど L が大きくなる傾向があり、自然な蒸気爆発を起こすには、液滴温度がある温度近くまで冷やされる必要のあることを示唆している。

図9は、蒸気爆発様相を高速度撮影した一例であ

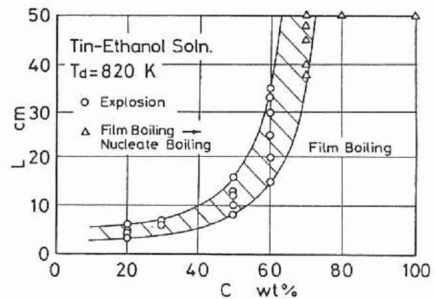


図7 すず-エタノール水溶液系でのエタノール濃度と蒸気爆発自然発生位置の関係

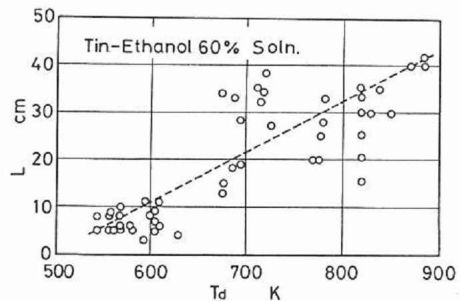


図8 すず-エタノール水溶液系での滴下時温度と蒸気爆発自然発生位置の関係

る。偏平な形で膜沸騰をしつつ沈降してくる(写真番号②, ①)。この際エタノール濃度が高いときには、肉眼でも蒸気膜の存在が容易にわかるほどその厚さが大きい。濃度が低くなるほど薄くなるように観察された。膜崩壊した時を番号①(時間も0)としているが、この場合は下方に蒸気泡域を拡張している。本実験の撮影コマ数(3000コマ/s以下)の限りでは、通常は全体にわたって一挙に崩壊すると観察されるものが多かったが、本例は一事実を示すと考えられるので掲げた。直後にいったん収縮(①)しているが、この点だけLiNO₃-エタノール系と異なり、あとは膨張(①~②)、収縮(②~③)、膨張(③~⑤)と繰返し、ついには蒸気泡域は消滅し、細粒化したすずのみが沈降すること、蒸気泡域は黒色に写りその界面は凹凸に富んでいること、は前系の場合と同様である。ただし、膨張の程度は小さく、また現象の進行速度は前系の4~5倍である。

図10(a)は、同系における圧力波形のうち、大きな P_{max} を生じるものの典型例である。同系では、 $C=20, 50, 60\%$ の場合につき、合計73例の圧力波形測定を行ったが、前系の場合にくらべて波形はやや単調になるものの、図5で掲げた4種に分類することが可能であった。これによると73例のうち(a)13例、(b)27例、(c)17例、(d)16例であって、合わせて40例になる(a)、(b)形は前系と同様に大きな P_{max} を呈するものであった。図10(b)は(a)形に対応しており、ピークA', B', C'は図4のそれぞれのピークA, B, Cに相当するものであり、蒸気爆発時の波形は定性的に同じになることがわかる。

一方、図10(b)は、Nelsonら⁽⁹⁾が $T_d=2233\text{K}$ の酸化鉄小滴を水中に滴下し、エキスプローディングワイヤによって蒸気膜を破壊した時に得たものである。

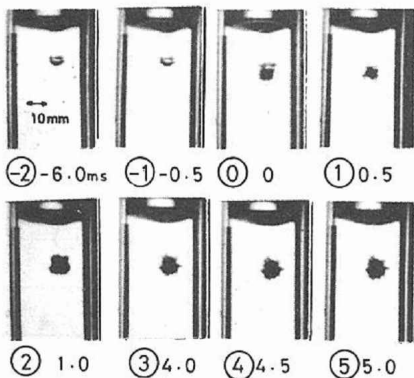
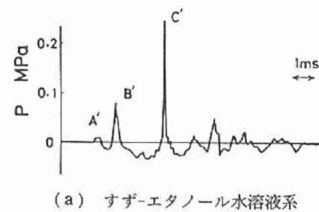


図9 すず-エタノール水溶液系での蒸気爆発の撮影例(60% soln, $T_d=570\text{K}$)

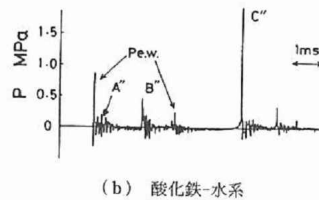
$P_{e,w}$ は同ワイヤによるものなので、これを除いたものが蒸気爆発の波形になる。しかし同実験によると、最初のピークに遅れること約0.4msで蒸気泡域が膨張開始しているが、この時に圧力ピークが発生したとしても、 $P_{e,w}$ の波形に含まれて識別できないと考えられる。そこで実際には0.4ms後のA'点に小さな圧力ピークがあると推定すれば、 $P_{e,w}$ を除いた圧力波形はA'', B'', C''の圧力ピークをもつと考えられ、前二者の蒸気爆発典型例の場合と定性的に一致する圧力波形であることがわかる。なお、酸化鉄-水系での圧力ピークが極めて鋭いものに対して本実験系では有限な幅をもつのは、使用した液容器が関係すると考えている。すなわち同系では大きな水槽のため圧力波が四方に拡散するのに対し、本実験系では比較的細い円柱容器のため減衰が少ない反面、器壁での反射・散乱があるためと思われる。また、同系では圧力ピーク間の減圧がほとんど見られないのも同じ理由によると考えられ、同系でも爆発箇所近くでは減圧が測定されるものと考えている。

5. 圧力波形のまとめと他の実験結果

4章までに示したように、LiNO₃-エタノール系およびすず-エタノール水溶液系の一液滴の蒸気爆発時に見られ、酸化鉄-水系で十分予想された、図11に代



(a) すず-エタノール水溶液系



(b) 酸化鉄-水系

図10 蒸気爆発時に観測された圧力波形

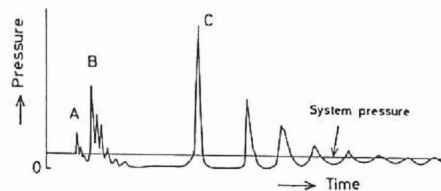


図11 一高温液滴の蒸気爆発時の代表的圧力波形

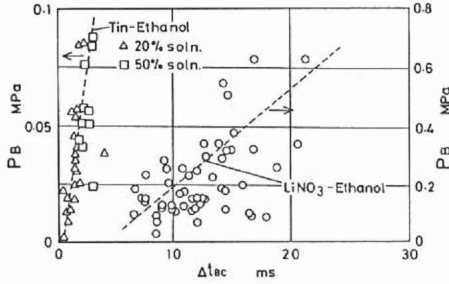


図 12 圧力ピーク B, C 間の時間間隔と P_B の関係

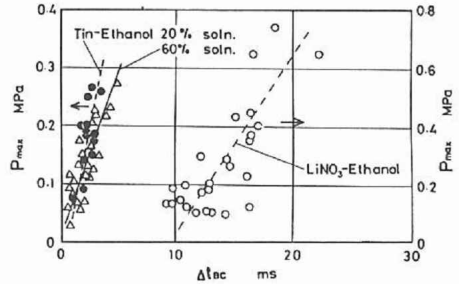


図 13 圧力ピーク B, C 間の時間間隔と P_{max} の関係

表して示した圧力波形は、一高温液滴の蒸気爆発時には普遍的に発生するものと、ほぼ結論づけることができよう。すなわち、蒸気膜崩壊時のピーク A, それにつづくピーク B, C があり、ピーク間は減圧状態になる。これらは蒸気爆発機構と密接な関係があると思われる。本報の目的は、一液滴に関する実験事実を述べるのが主なので、詳細な考察は伝ば現象を含めて議論する予定の次報にゆずるが、圧力ピーク値とピーク間時間間隔の間に次のような実験的事実があったことを述べる。

図 12 は、圧力ピーク B, C 間の時間間隔 Δt_{BC} と、ピーク値 P_B の関係を、図 13 は P_C が最大値 P_{max} となった時の Δt_{BC} と P_{max} との関係をプロットしたものである。図 12 では Δt_{BC} は P_B の従属変数となるはずのものだが、図 13 との比較のためにこのように表した。いずれの場合も、両者はほぼ直線的関係にあること、すず-エタノール水溶液系では LiNO_3 -エタノール系に比べて Δt_{BC} がかなり小さくなることが示されている。また図 12, 13 によれば、 P_B が大なほど P_C が大になることになる。3章で簡述したが、ピーク B は本格的な細粒化に対応するものと考えられ、細粒化程度が大きいほど P_B は大きく、また Δt_{BC} および P_C が大きくなることを示すと思われる。

6. 結 言

1 滴の溶融 LiNO_3 および溶融すずを、それぞれ常温のエタノールおよびエタノール水溶液中に滴下し、膜沸騰の蒸気膜崩壊後に起こる現象を、蒸気爆発機構の解明を目的として実験的に調べた。主な結論を列挙すると、

- (1) 蒸気爆発時には、膜崩壊時の小圧力パルスを含めて 3 種類の圧力ピークをもつ特徴的な圧力波を生じる。
- (2) 圧力ピーク間は減圧状態になる。
- (3) 圧力波形は蒸気泡域の膨張、収縮と密接な関係をもつ。
- (4) 蒸気泡域の界面は極めて凹凸が激しく、細粒化した高温液が飛散して膜沸騰していると考えられる。
- (5) 第 2 と第 3 の圧力ピーク間の時間間隔は、それぞれのピーク圧力値と比例している。

次報では、大規模な蒸気爆発にとって不可欠な伝ばを含めた実験結果を示すとともに、機構について詳しい考察を行う予定である。

終わりに、本実験に協力された安藤喜昌氏〔現、三菱重工業(株)〕、資料の提供をいただいた東京工業大学・井上見教授に謝意を表す。また本研究の経費の一部は文部省科学研究費補助金〔エネルギー特別研究(エネルギー)〕によったことを記す。

文 献

- (1) 井上, 伝熱研究, 19-73 (昭 55), 22.
- (2) 秋山, 原子力誌, 20-6 (昭 53), 379.
- (3) 成合, 機誌, 81-721 (昭 53), 1277.
- (4) Cronenberg, A. W., *Nucl. Sof.*, 21-3 (1980), 319.
- (5) Briggs, A. J., *CSNI Rep.*, No. 74 (1982), 7.
- (6) 飯田・ほか 6 名, 化学工学論文集, 10-5 (昭 59), 652.
- (7) 庄司・高木, 機論, 48-433, B (昭 57), 1768.
- (8) Anderson, R. P. and Bova, L., *ANL*, 7657 (1976).
- (9) Nelson, L. S. and Duda, P. M., *SAND*, 81-1346 (1981).
- (10) Nelson, L. S. and Buxton, L. D., *SAND*, 77-0998 (1978).
- (11) Iida, Y. and Takahima, T., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 23-9 (1980), 1263.