急激な温度こう配をつけた水中で生じる 小規模蒸気爆発の研究*

(冷却液サブクール効果についての検討)

庄 司 正 弘**, 高 木 二 郎***
川 永 慶 治****, 田 中 尚 文****

Small-Scale Vapor Explosions of Molten Tin Dropped into Thermally Stratified Water (On the Effect of Coolant Subcooling)

by Masahiro SHOJI, Niro TAKAGI,
Keiji KAWANAGA, and Naofumi TANAKA

Relating to vapor explosions, the effect of coolant subcooling is studied experimentally and theoretically. A molten tin droplet falls into thermally stratified water, in which the upper layer temperature is kept at 90°C while the lower layer temperature is varied from 10 to 70°C. In thermally stratified water, the explosion is much more likely to occur and the explosion pressure is much higher than in the uniform temperature water. This suggests that the coolant subcooling has a strong effect on the trigger mechanism of a vapor explosion by condensing the vapor film around the molten tin. The results of parametric calculations show that the pressure generated when the vapor film collapses is high enough to fragment the molten tin resulting vapor explosions.

Key Words: Phase-change, Vapor Explosion, Film Boiling, Splashing, Minimum Film Boiling

1. 緒 言

溶融金属と水の組合せで生ずる小規模蒸気爆発現象解明のため、著者らはこれまでプール水中に溶融すず滴を落下する系⁽¹⁾、静止溶融すず面上を水が流れる系⁽²⁾、静止溶融すず面に水滴が落下衝突する系⁽³⁾において実験的研究をおこなってきた。これらの実験から得られた知見に、

- (1) 蒸気爆発は溶融すず温度がある範囲内にあるときのみ発生する
- (2) その温度範囲の上限は膜沸騰における蒸気膜崩壊開始温度（いわゆるクエンチ温度）に等しい
- (3) その上限温度は低温液体（水）のサブクールによって強い影響を受ける
- (4) 蒸気爆発発生温度域にあって爆発が生じない場合にも、溶融金属表面に激しい波打ち（スプラッシュ現象）が起こる場合がある

などがある。これらの事実は、冷却水のサブクールが

その蒸気凝縮作用によって溶融すずまわりの蒸気膜の崩壊に影響を及ぼし、ひいては蒸気爆発の発生と直接的に関係する可能性を示すものと考えられる。ところで、一般に蒸気爆発は溶融金属まわりの蒸気膜の崩壊と結びついたものと理解されているが、そのプロセスについて冷却液サブクールとの関連で詳しく議論した研究は著者らが知るかぎりこれまでない。そこで本研究では、

- (a) 水中に急激な温度こう配をつけた系（水の蒸気凝縮効果がより顕著に現れるであろう系）での溶融すず落下実験
 - (b) 蒸気膜の凝縮崩壊によって爆発やスプラッシュを生ずるに十分な力学的力（圧力）が発生しうるか否かのモデル計算
- をおこなってみた。

2. 実 験

実験装置の概略を図1に示す。装置の基本構成は前報⁽¹⁾の場合と変わらないが、水槽は180 mm × 100 mm < 形断面、深さ500 mmの亚克力製であり、鉛直方向に温度こう配をつけるため、水槽内の300 mm高さ位置に仕切板を設けている。つまり、仕切板の上部に温度約90°Cの温水を入れ、下部には温度が

* 昭和60年5月21日 第22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8月12日。

** 正員、東京大学工学部（〒113 東京都文京区本郷7-3-1）。

*** 正員、日本電装(株)日本自動車部品総合研究所（〒445 西尾市下羽角町岩谷14）。

**** 学生員、東京大学工学部。

10～70℃の範囲で一定の冷水を入れる。仕切板は溶融すずを落下させる直前に開くが、実験直前の水温分布の実測結果は図2のようになっている。すなわち、仕切板位置を中心に上下1～2 cmの範囲に急激な温度こう配が形成される。ところで前報⁽¹⁾⁽²⁾の実験結果によれば、水温約80℃以上では蒸気爆発は発生しない。したがって、本実験の場合、上部水中では爆発は起こらず、溶融すずは蒸気膜に覆われた形で落下し、仕切板位置を通過する際に冷水に接して強い凝縮作用を受け、爆発が発生する可能性が生ずることになる。実験では、爆発の発生確率、爆発圧力、爆発発生位置を調べ、前報など⁽¹⁾の一樣水温の場合の結果と比較した。主たる実験パラメータは落下直前のすず温度 T_i と水槽下部層の水温 T_l の二つである。爆発圧力は仕切板下方約2 cm位置に設置した圧力センサで計測、爆発発生位置の測定はビデオによった。実験はすべて大気下でおこなっている。なお、水槽内の水深は48 cmとし、水面上15 cm位置からすずを落下させた。1回当たり落下させたすずの量は5 gである。

3. 実験結果

図3は爆発発生確率の水温（下部層の水温）による変化である。ここに爆発発生確率は、同一の条件下で

図1 実験装置概略

図3 爆発発生確率の水温による変化

N 回の繰返し実験をおこない、そのうちの n 回に爆発が起こったとき $f = n/N$ で定義している。図3から、温度こう配のある水中では一樣温度の場合に比べ爆発発生率は全体的におよそ30～40%も高く、水温分布が爆発の発生に強い影響をもつことがわかる。一方、図4は爆発発生確率の初期金属温度 T_i (落下直前のすず温度) による変化であるが、少なくとも40℃以上においては、爆発確率は初期すず温度に無関係となっている。

図5は爆発圧力の水温、および初期すず温度による変化である。ここに爆発圧力としては $P_{VE, \max}$ (爆発時に観察される最大圧力 P_{VE} の同一繰返し条件下で得られた最大の値) を採用した。図5は水温 $T_l = 45^\circ\text{C}$ の場合の一例であるが、一樣水の場合に比べ数倍から1けたも大きな値がえられている。しかしこの場合も、初期すず温度の影響はほとんどない。

図6は爆発発生位置に関する結果である。縦軸の H は一樣水温の場合は自由液面からの深さを、温度こう

図2 水槽内水温分布

図4 爆発発生確率の初期金属温度による変化

配のある場合は仕切板下面位置からの深さをとっている。二点鎖線は図2で水温が急変する領域の下限位置を示し、破線は一樣水温の場合の H の変化である。爆発は水温、初期すず温度が高くなるにつれ水中より深い位置で発生するようになるが、図6の実線と破線とを比較して、また図6と前報⁽¹⁾の図11を比較して、一樣水温の場合と温度こう配のある場合とで両者の間にそれほど差は認められない。

一方、図7は初期すず温度と図6の爆発位置から、前報⁽¹⁾と同じ方法で計算により爆発発生時のすず温度 T_{ve} を推定したものである。実線の T_q は高温固体面の急冷点温度(クエンチ温度)であり、破線は水とすずの接触界面温度が水の自発核生成温度となるすず温度(Fauskeの温度いき値説⁽⁴⁾による)を示す。ただし、水の自発核生成温度の値は不明確なので、ここでは均質核生成温度をとった。また、一点鎖線はすずの融点である。図7は温度こう配のある場合の結果のみならず一樣水温の場合の結果も含むが、両者に本質的な差はみられず、すずの温度が T_q と T_i の間にあるときに爆発が発生している。なお、図7の二点鎖線は理解の助けのための参考線であり、初期温度 $T_i = 750^\circ\text{C}$ のすずが 30°C の水中に突入する場合を例にとり、すず温度の時間的変化を、一樣温度の場合(B)、温度こう配のある場合(A)について、周囲水温の変化とともに示したものである。図7の各データはこうした線上で爆発が生じた点での温度状態をプロットしたものである。

4. サブクール水の凝縮作用に関するモデル計算と検討

前報⁽¹⁾⁻⁽³⁾までの結果と本実験結果を総合して、溶融

すずに生ずる爆発の発生プロセスを考えてみると、まず落下した溶融すずのまわりに安定な蒸気膜が形成され、その蒸気膜はすず温度がクエンチ温度まで降下したとき崩壊(いわゆる蒸気膜の全体的な崩壊)を始める。このとき、液サブクールの存在による蒸気凝縮効果が相乗的に作用して蒸気膜の厚さが局所的に急減し、それと同時に膜内には高い圧力が発生、これが蒸気爆発のトリガ、あるいはスプラッシュの発生原因になると考えられる。ただ、現時点でこの考えを主張するには、少なくとも次の2点を検討しておく必要がある。まず第1に、上記考えに基づいた非定常伝熱計算をおこない、実際に蒸気膜内に充分高い圧力が発生するの否か確かめる必要がある。第2に、このようにして発生した圧力がいかなるプロセスで蒸気爆発を誘起するのか、あるいは溶融金属を微細化するのかを明らかにしておく必要がある。第2の点については後に議論することとして、ここでは第1の問題について検討してみよう。図8は安定な蒸気膜が崩壊する際の様子をモデル化して示したものである。サブクール膜沸騰状態にある溶融金属面上の蒸気膜の厚さ、あるいは蒸気膜に接する外側液体内の温度や速度境界層などは平均値を中心に時間的に不規則に変化していると考えられる。しかし、金属表面の温度が高く、膜沸騰状態にある間は面に垂直および平行な方向の熱的、流体力学的バランスによって蒸気膜は比較的安定に保たれる[図8(a)]。しかし、金属面の温度が下がってこうした全体的なバランスがくずれると、蒸気膜が崩壊を始めると考えられる(いわゆるクエンチ点というのはこのような状態と考えられる)。図8(b)は蒸気膜崩壊部

図5 爆発圧力の水温および初期金属温度による変化

図6 爆発発生位置

図7 爆発発生時のすず温度(推定値)

を一次元的にとらえたモデルであり、膜厚 a_0 、温度境界層厚 a^* (平均温度境界層厚さは a^{**}) の状態にある蒸気膜部分が崩壊を開始するときの状態を示している。以下に示すモデル計算は、この後の状態変化、つまり高温金属からの伝熱量に基づく蒸発と液体サブクールによる蒸気の凝縮を考慮して、蒸気および水の流体運動と熱バランスから、蒸気膜厚さ、蒸気膜内圧力の過渡変化を求めようとするものであり、簡単のためつぎの仮定をおいている。

- (1) 球対称、一次元の扱い
- (2) 蒸気膜内の圧力は一様
- (3) 蒸気膜内の温度は直線分布
- (4) 蒸気密度以外の物性値は一定
- (5) 蒸気の状態変化は理想気体の法則に従う
- (6) 水の粘性は無視

計算の方法は、基本的には Inoue-Bankoff⁽⁵⁾の方法とほぼ同じであり、基礎式、境界条件、初期条件は次のようになる。なお、座標系は図 8 (c) に示した。

〔基礎方程式〕

溶融せず内部：

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad (1)$$

蒸気層：

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_2 r^2 u_2) = 0 \quad (2)$$

$$p_2 = p_{2s} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{(T_{2s} - T_w)(r - l) + T_w}{a} \quad (4)$$

液体 (水)：

$$\frac{\partial}{\partial r} (r^2 u_3) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} + u_3 \frac{\partial u_3}{\partial r} = -\frac{1}{\rho_3} \frac{\partial p_3}{\partial r} \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} + u_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha_3 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) \quad (7)$$

〔境界条件〕

溶融せず中心：

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

溶融せずと蒸気界面 ($r = l$)：

$$u_2 = 0, T_1 = T_2 = T_w(t) \quad (9)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \quad (10)$$

蒸気と液体の界面 ($r = l + a$)：

$$\rho_2 \left(\frac{da}{dt} - u_2 \right) = \rho_3 \left(\frac{da}{dt} - u_3 \right) \quad (11)$$

$$p_3 = p_{3s} \quad (12)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} + h_{fg} - m_e \quad (13)$$

$$m_e = \frac{\alpha_m}{\sqrt{2\pi R}} \left(\frac{p_{3s}}{\sqrt{T_{3s}}} - \frac{p_{2s}}{\sqrt{T_{2s}}} \right) \quad (14)$$

〔初期条件〕

溶融せず内部：

$$T_1 = T_h = T_w \quad (15)$$

蒸気層：

$$p_{2s} = p_\infty, a = a_0 \quad (16)$$

$$\frac{da}{dt} = \left(\frac{da}{dt} \right)_0 \quad (17)$$

液体：

$$r = l + a \text{ で } T_{3s} = T_{3s}(\sim p_\infty) \quad (18)$$

$$r > l + a \text{ で } T_{3s} = T_{30} \quad (19)$$

その他、状態方程式

$$p_2 = \rho_2 R T_2 \quad (20)$$

なお、記号は T ：温度、 a ：蒸気膜厚さ、 p ：圧力、 u ：流速、 ρ ：密度、 r ：半径、 t ：時間、 l ：溶融金属の半径、 h_{fg} ：蒸気潜熱、 m_e ：蒸発量、 α ：温度伝導率、 λ ：熱伝導率、 α_m ：蒸発凝縮係数、 R ：ガス定数であり、添字は 1：溶融金属、2：蒸気膜、3：液体、 s ：飽和状態、 w ：金属表面、 ∞ ：遠方を示す。

初期条件〔式(15)～(20)〕に関し、蒸気膜の厚さ a_0 は Berenson⁽⁶⁾の式から標準となる値を推算、またクエンチ温度 (膜沸騰下限界温度) のサブクール依存性については Dhir-Purohit⁽⁷⁾の式を、その圧力依存性に関しては桜井らの実験式⁽⁸⁾を用いた。なお、水中の温度分布は界面温度がある瞬間に飽和温度になったとして定まる分布を用いた。また、式(14)の境界条件はこの種の解析では一般に用いられ、本計算でも用いてい

(a) 安定なサブクール膜沸騰

(b) 蒸気膜の崩壊 (モデル)

(c) 座標系と変数

図 8 溶融金属面に接する蒸気膜とその崩壊モデル

るが、結果的には本計算条件の場合、その寄与 ($\alpha=1$ として) は高々数%であって影響の小さいものである。そこで、以下の議論では一応 α は 1 とおくこととした。さて、具体的な計算手順を述べると、上記の諸式から五つの未知数 T_w , m_e , a , T_{2s} , T_{3s} に関する構成方程式を導き、それを差分法により大形計算機 (東京大学 HITAC 8800) で解いた。その計算結果の幾つかを図 9 (a)~(c) に示した。図 9 (a) は初期蒸気膜厚さの影響をみた計算結果の一例であり、大気圧下、20°C の場合につき、Berenson の式から予想される厚さ 90 μm の場合を中心にそれより小さい場合と大きい場合を調べたもので、初期蒸気膜厚さが薄いほど大きな圧力が発生することがわかる。図 9 (b) は、水温の影響 (サブクールの影響) に関する計算結果の一例である。水温が低いと極めて大きな圧力が生じるが、水温の上昇とともに低下して、水温 80°C にもなると圧力発生はごく小さなものとなっている。図 9 (c) は系圧力

の影響をみたものである。約 0.1 atm から 5 atm までの 5 種類の圧力について計算しているが、大気圧に相当する圧力 (曲線 3) で最大の圧力発生がみられるとの結果が得られている。一方、図 10, 11 は液体内温度境界層および蒸気膜界面の初期移動速度の影響を調べたものである。これらの量の厳密な設定は現実には極めて困難であるが、発生圧力に強い影響をもつものであることがわかる。いずれにしても、図 9~11 の結果は、蒸気膜内に充分高い蒸気圧が発生しうること示している。そして、もしこの発生圧力が蒸気爆発と直接的に関係するものであるとすれば、図 9 の結果には前報⁽¹⁾でみた小規模蒸気爆発の諸特性とよく符合するものがある。たとえば、図 9 (b) は前報の「蒸気爆発は一般に水温が低いほど激しく、80°C 以上の水温では爆発は生じない」との事実に対応し、図 9 (c) は「蒸気爆発は大気圧下でもっとも激しく、もっとも頻繁に発生し、低圧でも高圧でも発生し難くなる」との事実

(a) 初期蒸気膜厚さによる変化

(b) 液サブクールによる変化

(c) 系圧力による変化

図 9 モデル計算の結果

図 10 モデル計算における蒸気膜初期崩壊速度の影響

図 11 モデル計算における液体内温度境界層の影響

対応すると考えられる。また図9(a), 10, 11などは金属の温度や水温といったマクロな条件が同一でも、蒸気膜が崩壊する際の膜厚とか温度の境界層といったミクロな条件の微妙な違いが大きく結果に現れることをしめしており、これは前報⁽¹⁾などでみた蒸気爆発現象のランダム性を説明している可能性がある。

ところで前記のように、蒸気膜内に生ずる高い圧力がいかにして爆発のトリガとなるのか、あるいは熔融金属をいかにして微細化するのが残された重要な問題である。しかし残念ながら著者らは現在のところまだ、この問題に対するはっきりとした解答をもっていない。ただ、いまのところは次のように考えている。上記モデルでは簡単のため球対称の扱いをしたが、実際には球面上の各点で条件は微妙に違っているであろう。そして、たとえばある点で局所的に上記モデルに近い状態で高い圧力が発生すると、その部分の熔融金属表面が強く押される。その結果、熔融金属表面の他の部分が局所的に激しく外方向へ突出することとなる。ところで熔融金属表面上の各点で条件は微妙に違っているとはいっても、表面上の各点はマクロな意味では熱・流体的に互いに近い状態にある。したがって、熔融金属突出部では蒸気膜崩壊が起こりやすく、上記モデルに近い形でこの部分に高い圧力が直ちに発生するであろう。このようなプロセスが次々と伝ばし、全体としてみたとき、短時間に急激な蒸気の発生、熔融金属の微細化、つまり蒸気爆発が発生するものと考えられる。

5. 結 論

熔融せず・水系で生ずる小規模蒸気爆発の発生機構を探るため、特にサブクール水の蒸気凝縮作用に注目

し、まずその作用が顕著に現れる系（急激な温度こう配をもたせた水中での実験系）で実験的研究をおこなった。その結果、水温にこう配がある場合は一様水温の場合に比し、爆発発生率、爆発規模ともに大きくなることが判明した。次に、サブクール水の蒸気凝縮作用に基づく蒸気膜崩壊時の蒸気膜内圧力に関しモデル計算をおこなったところ、蒸気爆発あるいは熔融金属の微細化を引き起こすに十分な圧力が発生し得ること、またそのパラメータ依存性が前報⁽¹⁾⁻⁽³⁾などでみた小規模蒸気爆発の特性とよく符合するものがあることがわかった。

東京工業大学 井上晃教授には本報のモデル計算をおこなうに際しいろいろお教えいただいた。また、圧力発生と蒸気爆発、金属の微細化との関連に関し、本報に記述のものとほぼ同じような考えを既に以前からお持ちとのご指摘をいただいた⁽⁹⁾。蒸気爆発に関する同教授の一連の先駆的御研究に対し、深甚より敬意を表したい。

文 献

- (1) 庄司・高木, 機論, 48-433, B (昭57), 1768.
- (2) 庄司・高木, 機論, 49-446, B (昭58), 2190.
- (3) 庄司・高木, 機論, 51-448, B (昭60), 2614.
- (4) Fauske, H. K., *Nucl. Sci. Eng.*, 51-2 (1973), 95.
- (5) Inoue, A. and Bankoff, S. G., *Trans. ASME, J. Heat Transf.* 103-3 (1983) 459.
- (6) Berenson, P. J., *Trans. ASME, Ser. C*, 83-3 (1961), 351.
- (7) Dhir, V. K. and Purohit, G. P., *Nucl. Eng. Des.*, 47-1 (1978), 49.
- (8) 桜井・ほか2名 第17回日本伝熱シンポジウム前刷集, B 112 (昭55), 202.
- (9) 井上, 伝熱研究, 23-88 (昭59), 43.

討 論

〔質問〕 飯田 嘉 宏〔横浜国立大学工学部〕

(1) 困難なモデル計算により一定の結果を得られたことに敬意を表すが、凝縮作用を考慮した場合には貴結果と似た結果はより多様なモデル、たとえばキャピテーション気泡の場合、によって出てくるのではないかと考えているがいかがか。

(2) 貴解析で得た崩壊時の圧力と蒸気爆発時に通常見られるピーク圧力とは、どのような関係を持つとお考えか。

(3) 実験値と解析値の間で、爆発圧力について大きな差があるが、その理由は何か。

(4) 水槽上方では膜沸騰は確認されているか。

(5) 図10と11の図またはその説明文は逆ではないか。

(6) 爆発時の膜崩壊の解析には、文献(5)のほか文献(付1)などがあり、対象は少し違うが一部似た取扱いをしている。ご存知であろうか。

〔回答〕 (1) 本計算に先立ちキャピテーションに関連の文献の調査をおこなっている。マイクロジェットの発生がシミュレートされているなど参考になる

(付1) Corradini, M. L., *Nucl. Sci. Eng.*, 78-2 (1981), 154.

ことが少なからずあったが、キャビテーションの計算はもともと気泡が対象であって蒸気膜の崩壊を扱うものではないこと、雰囲気圧力の変動が問題であるなどの点で本計算とはかなりの相違点があり、質問者の言うように多様なモデルが可能との認識は持っていない。

(2), (3) 本計算での発生圧力は熔融金属の微細化を生ずるための圧力であり、蒸気爆発発生時の圧力を意味しているものではない。また、本解析は球全体が一樣状態にあるとしたモデル計算であり、実際には、起こり得ても局所的に幾つかの点で繰返し生ずるものと考えられる。したがって、今のところまだ、モデルと実際を定量的に議論する段階に至っていないと考えている。

(4) 蒸気爆発の実験で直接確かめてはいないが、落下固体球を用いた類似実験で得た伝熱特性（沸騰曲線）から判断して、膜沸騰が存在すると考えている。

(5) ご指摘のとおりであり、図が逆です。交換させていただければと存じます。

(6) ご指摘の文献は見えていなかった。ご指摘のように同種の計算方法であるが、考えるに球座標系の非定常伝熱計算をしようとすれば誰がやってもこの程度の類似性があたり前とも思われる。したがって重要なのは問題の設定の仕方ということになるかと思うが、本解析は実験に応じたパラメトリックなモデル計算をおこなって、その結果が実際と定性的に一致することを示したものであり、この点で新しい成果と考えている。