

2. 蒸気膜崩壊挙動の可視観測実験

2.1. 本章の目的

蒸気爆発現象ではトリガリング挙動がその発生条件を決定付けている。すなわち、トリガリング挙動における蒸気膜の崩壊の有無によって蒸気爆発の発生が決定付けられることになる。蒸気爆発現象では、以下に示す2種類の蒸気膜崩壊がある。

- ① 粗混合した高温粒子表面上の蒸気膜が自然に崩壊する、自発的な蒸気膜崩壊
- ② 粗混合した高温粒子表面上の蒸気膜に圧力波が到来し、圧力波によって蒸気膜が崩壊させられる強制的な蒸気膜崩壊

①は蒸気爆発の発生のきっかけとなるものであり、また周囲に現象が伝播するための圧力波を生成する現象である。②は到来した圧力波により蒸気膜が崩壊させられさらに圧力を生じる現象である。これらの蒸気膜の崩壊挙動は、どちらも大規模蒸気爆発の発生には必要となり、その崩壊する条件やメカニズムを明らかにする必要がある。

これまでに、高温物体表面上の蒸気膜の崩壊挙動に関してはさまざまな実験的研究がなされている従来の研究では、熔融金属を用いた実験、または円筒形状または平板形状の固体物質を用いた実験が行われている。しかしながら、熔融金属を用いた場合には蒸気膜の崩壊に続いて微粒化が発生し、蒸気膜の崩壊挙動のみを観察することは非常に困難である。また、円筒形状または平板形状の固体物質を用いた実験では、系が異方性を有しており、蒸気膜の崩壊挙動に異方性が表れる可能性がある。そこで、高温粒子を模擬した金属球を用いて蒸気膜の崩壊挙動を実験的に調べることにする。それに先立ち、本章では自発的な蒸気膜崩壊挙動ならびに強制的な蒸気膜崩壊挙動を調べるための実験装置ならびに実験結果の処理・評価方法を確立することとする。

2.2. 実験装置

本実験では、蒸気膜を自発的に崩壊させた場合ならびに圧力パルスを当てて強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動を高速度ビデオカメラで撮影するとともに、鋼球表面温度、圧力、水温の同時計測を行うこととした。

図 2.2.1 に実験装置の概要図、図 2.2.2 に実験装置テスト部の詳細図を示す。実験装置は主にテスト部、圧力パルス発生装置、ならびに実験データの計測機器で構成されている。

テスト部は内径 54mm、肉厚 3mm、高さ 316mm のステンレス鋼の角パイプで製作されている。テスト部中央の三面には可視観測用に 40mm 四方のポリカーボネート板が取り付けられている。残る一面には圧力測定用ならびに高速度ビデオカメラへのトリガ信号用のひずみゲージ式圧力トランスデューサーが取り付けられている。テスト部中央から上方 30mm の位置に水温測定用のシース熱電対が取り付けられている。

圧力パルス発生装置はテスト部の底部に設置されている。窒素ガスによって駆動された弾丸をピストンに当てることによって圧力パルスを発生させている。再現性を持たせるために、窒素ガスの流れは電磁バルブによって制御されている。

実験データは、アンプを介して一度アナライジングレコーダーに電圧値のデータとして記録され、GP-IB を介して PC に転送される。可視観測データは高速度ビデオカメラを用いた。アナライジングレコーダーを介した圧力トランスデューサーからのトリガ信号によって、高速度ビデオカメラは撮影を開始する。

図 2.2.3 は本実験で用いた光学システムの詳細図を示している。テスト部を照らす照明にはハロゲンランプを用いた。可視観測データを取得する高速度ビデオカメラには、Photoron 社製 FASTCAM-ultima (最大撮影速度：40,500fps、取得画像解像度：256×256 pixel@1,000fps、64×64 pixel@40,500fps) を用いた。また現象を近接して撮影するために、Nikon 社製近接撮影可能レンズ Micro Nikkor (レンズ間長さ 105mm、F/2.8、最小被写界深度 0.1mm) を用いた。

図 2.2.4 に本実験におけるデータ記録シーケンスを示す。蒸気膜を自発的に崩壊させた場合の実験と蒸気膜を自発的に崩壊させた場合の実験では異なる実験シーケンスを採用している。

図 2.2.4 (a)は蒸気膜を自発的に崩壊させた場合の実験に対するデータ記録シーケンスを示している。この実験では、高速度ビデオカメラの撮影を開始するトリガ信号として鋼球表面温度を用いた。実験を開始した時点より常時高速度ビデオカメラは画像を取得しつづけている。蒸気膜がクエンチを起こして、鋼球表面温度が低下し始めた時刻にアナライジングレコーダーよりトリガ信号を出すように設定した。このトリガ信号が出た時刻から前後数 ms の画像をメモリユニット内に保存する。それとともに、鋼球表面温度もアナライジングレコーダー内に記録される。

図 2.2.4 (b)は圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の実験に対するデータ記録シーケンスを示している。この実験では、高速度ビデオカメラの撮影を開始するトリガ信号として圧力トランスデューサーの信号を用いた。蒸気膜を自発的に崩壊させた場合の実験と同様に、実験を開始した時点より常時高速度ビデオカメラは画像を取得しつづけている。圧力トランスデューサーが発生した圧力パルスを検知した時刻にアナライジングレコーダーよりトリガ信号を出すように設定した。このトリガ信号が出た時刻から前後数 ms の画像をメモリユニット内に保存する。それとともに、鋼球表面温度もアナライジングレコーダー内に記録される。

図 2.2.5 は実験で用いたステンレス鋼球の構造を示している。直径 15mm のステンレス鋼球はシース

熱電対でテスト部中央に吊り下げられている。吊り下げているシース熱電対は鋼球表面温度を測定するのに用いた。シース熱電対は放電加工によって開けられた鋼球の穴に挿入されており、鋼球上部でかきめることによって先端が鋼球の仮面と面一となるように固定されている。

本実験では高速で非定常である蒸気膜の崩壊挙動を観測するために、熱電対には高速な温度応答性が求められる。そこで本実験では、先端を削り素線を剥き出しにした熱電対を用いた。図 2.2.6 は熱電対の応答性を調べた実験結果を示している。この結果より、熱電対の温度応答性は $10\mu\text{s}/^\circ\text{C}$ 以下と評価された。

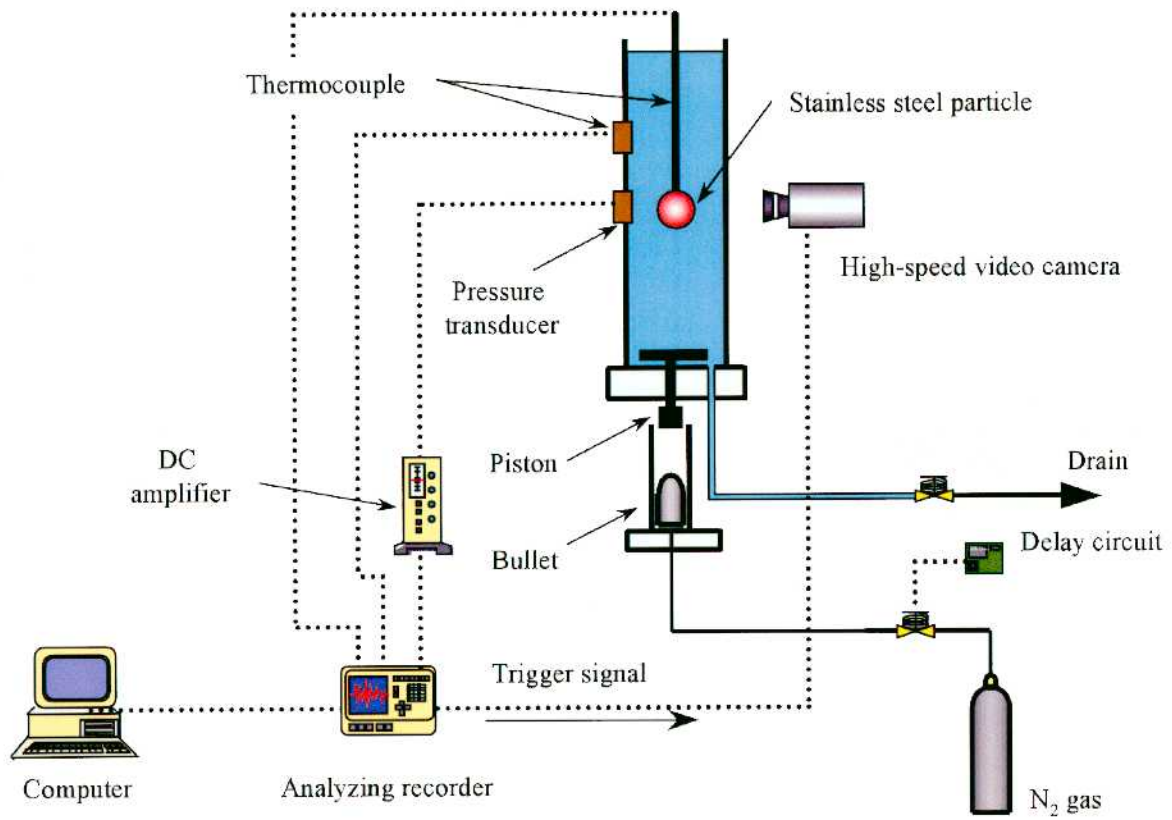


Fig. 2.2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

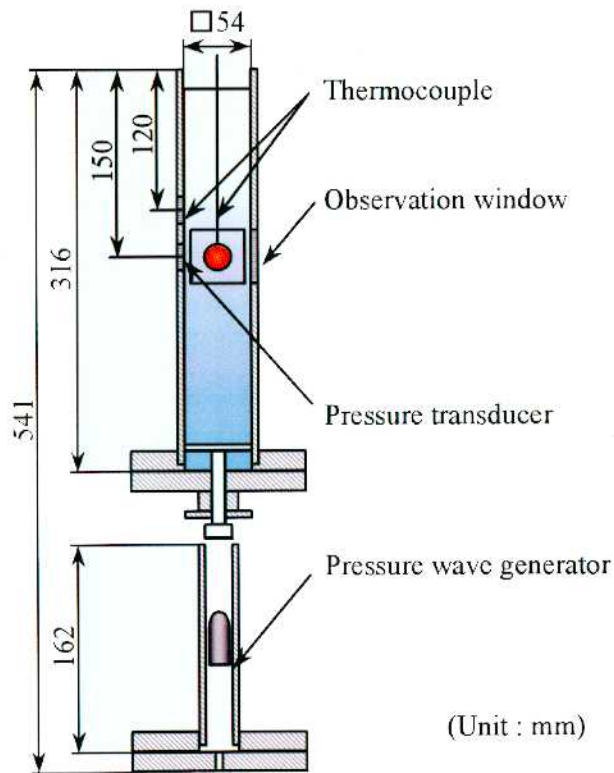


Fig. 2.2.2 Details of test section

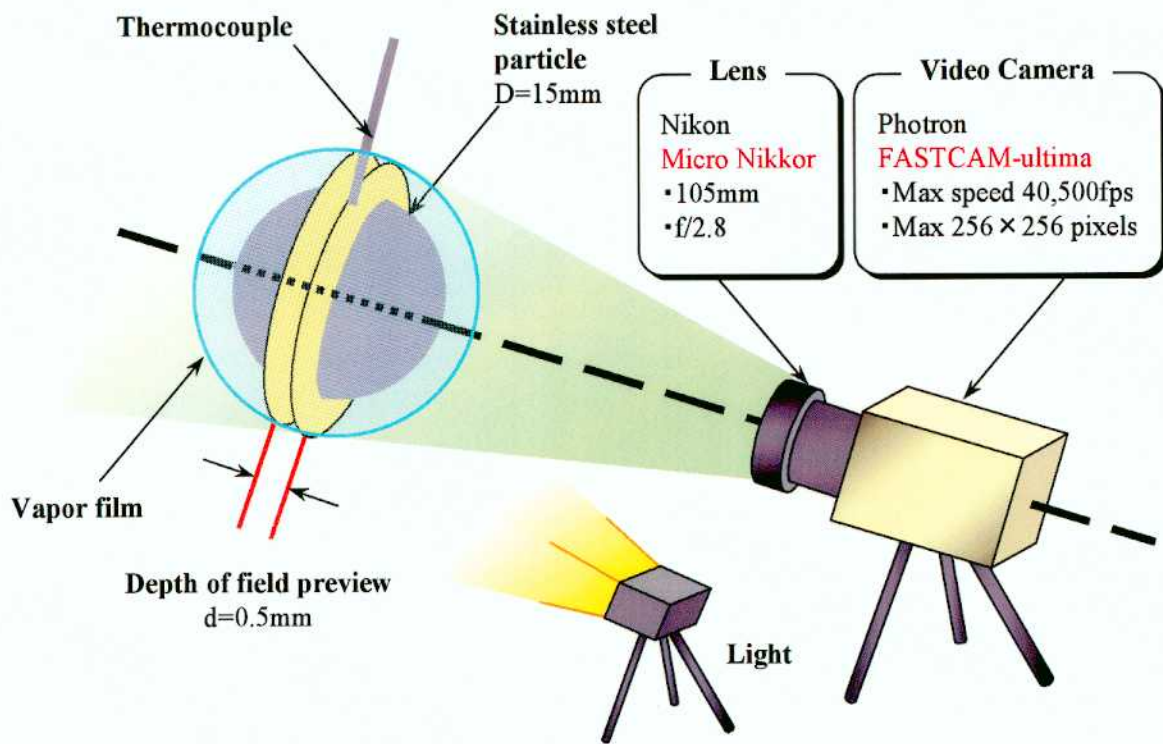


Fig. 2.2.3 Schematic diagram of optical measurement system

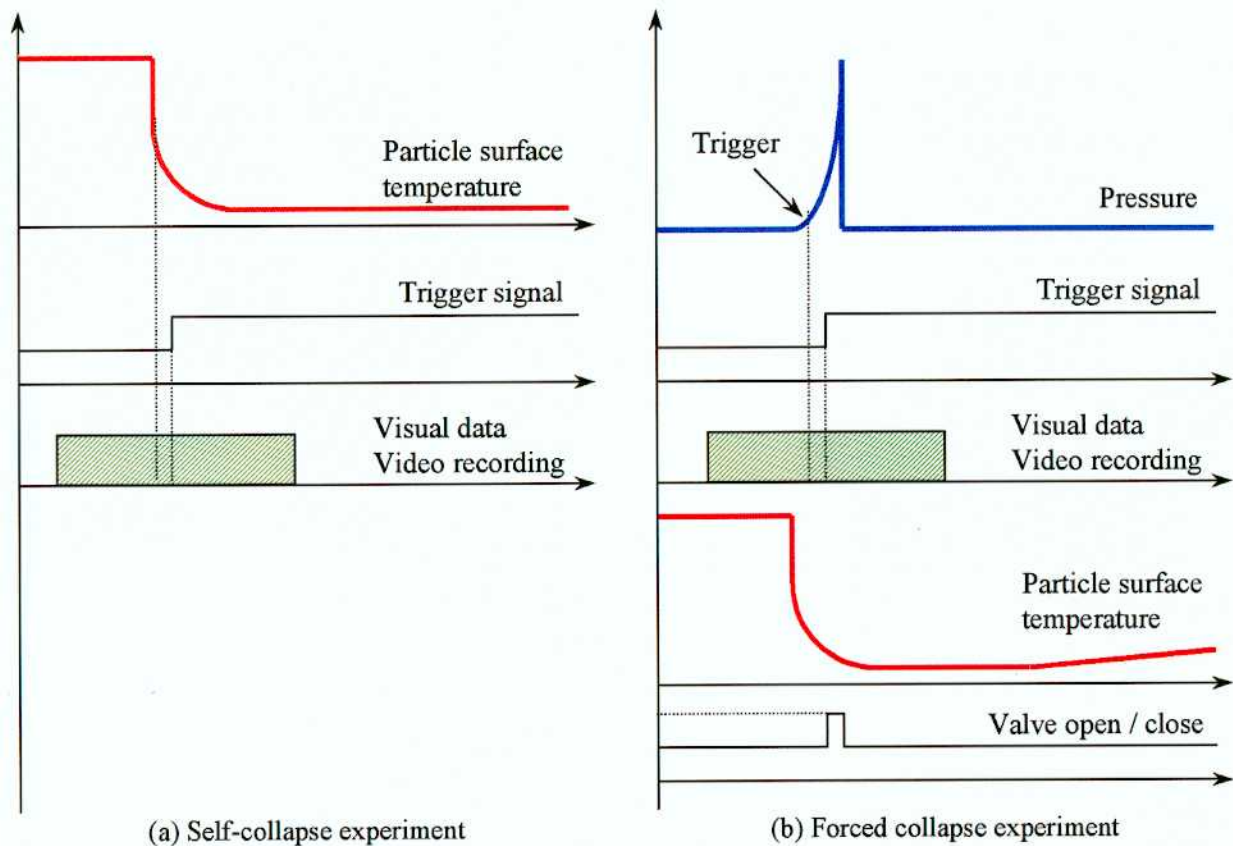


Fig. 2.2.4 Data recording sequence

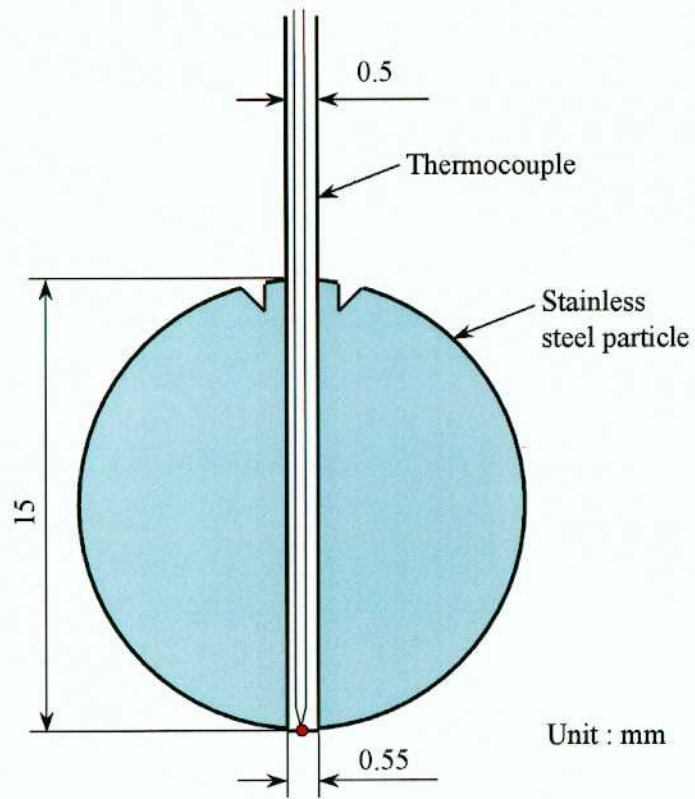


Fig. 2.2.5 Structure of stainless steel particle

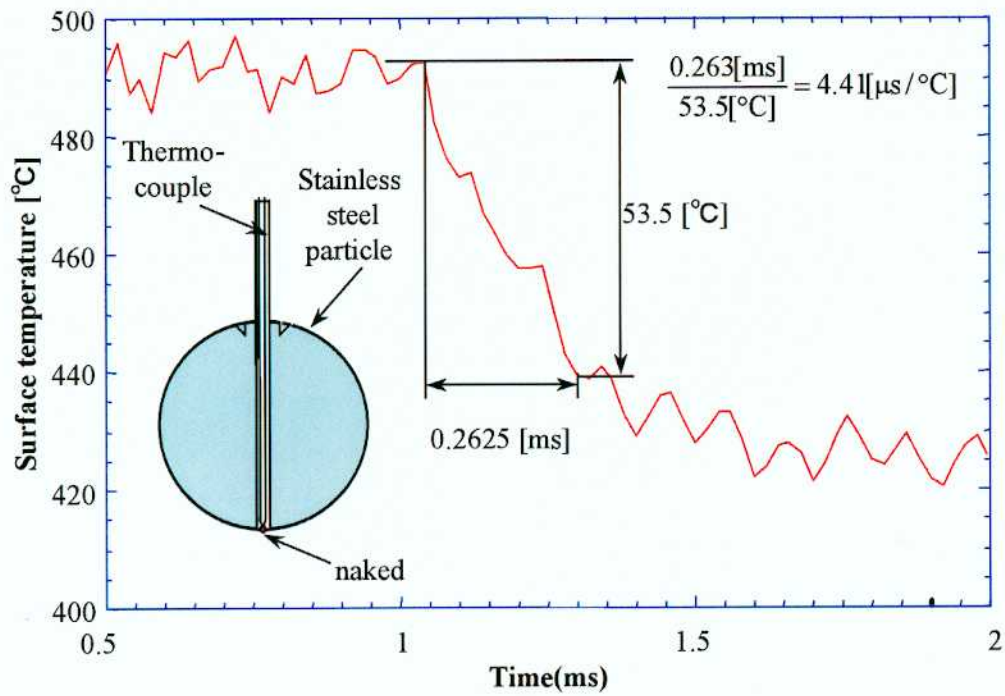


Fig. 2.2.6 Time constant of thermocouple

2.3. 実験手順

本実験では、蒸気膜を自発的に崩壊させた場合ならびに圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の二通りの実験を行った。その実験手順を図 2.3.1 に示す。

まず初めに、蒸気膜を自発的に崩壊させたときの挙動を調べるために以下の実験を行った。図 2.3.1(A) に示すように熱電対によって吊り下げられた鋼球をバーナーで所定の温度まで加熱する。続いて、図 2.3.1(B) に示すように水の中に挿入し、鋼球表面上に蒸気膜を形成させる。そしてそのまま何も行わずに蒸気膜を自発的に崩壊させる。そのときの挙動を高速ビデオカメラで撮影するとともに圧力、鋼球表面温度、水温の同時計測を行った。

次に、蒸気膜に圧力パルスを当てて蒸気膜を強制的に崩壊させたときの挙動を調べるために以下の実験を行った。自発的に蒸気膜を崩壊させた場合の実験と同様に、まず初めに図 2.3.1(A) に示すように熱電対によって吊り下げられた鋼球をバーナーで所定の温度まで加熱する。続いて、図 2.3.1(B) に示すように水の中に挿入し、鋼球表面上に蒸気膜を形成させる。図 2.3.1(C) に示すように鋼球表面温度が所定の温度に達したとき、実験装置下部に設置された圧力パルス発生装置で圧力パルスを発生させ、鋼球表面の蒸気膜に当てる。そのときの挙動を高速ビデオカメラで撮影するとともに圧力、鋼球表面温度、水温の同時計測を行った。

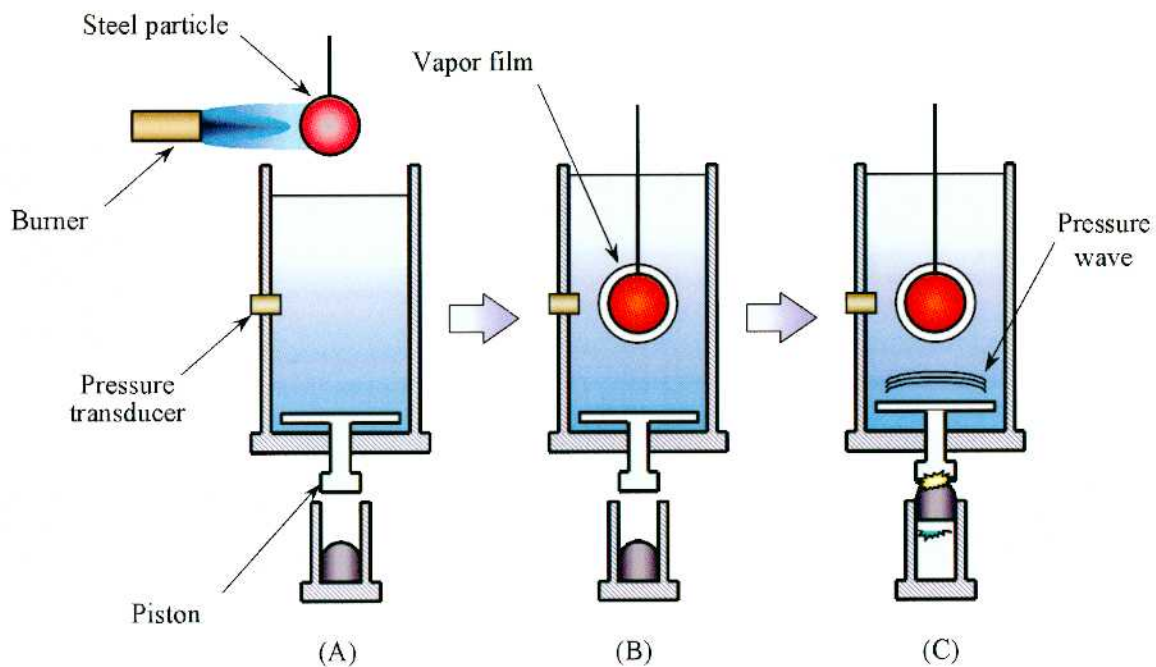


Fig. 2.2.7 Experimental procedure

2.4. 実験条件

蒸気膜の崩壊挙動を調べる実験を行う前に、どのような条件で鋼球表面上に蒸気膜が形成されるかを調べる必要がある。そこで、予備実験として鋼球表面上の膜沸騰の継続時間を調べた。表 2.4.1 に実験の条件を示す。膜沸騰の継続時間は可視観測画像ならびに温度履歴より判定した。この表において、 T_0 は水中に投入したときの初期鋼球表面温度、 T_{sub} は水のサブクーリング、 f は画像の撮影速度を示している。

図 2.4.1 は測定した膜沸騰の継続時間を示している。縦軸は膜沸騰の継続時間、横軸はサブクーリング、そして奥行き方向の軸は初期鋼球表面温度を示している。この結果より、サブクーリングが低くなるにつれて、また初期鋼球表面温度が高くなるにつれて膜沸騰が長時間にわたって鋼球表面上に形成されることが明らかとなった。

そこで、蒸気膜を自発的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動ならびに蒸気膜に圧力波を当てて強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動を実験的に調べるために、それぞれの実験を以下の条件で行うこととした。表 2.4.2 は蒸気膜を自発的に崩壊させた場合の実験条件を示しており、表 2.4.3 は圧力波を当てて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の実験条件を示している。これらの表において、 T_0 は水中に投入したときの初期鋼球表面温度、 T_{sub} は水のサブクーリング、 P_0 は窒素ガスの設定圧力、 f は画像の撮影速度を示している。

T_0 [°C]	T_{sub} [°C]	f [frame/sec]
400	10	30
500	10,20	
600	10,20,30,40	
700	10,20,30,40	
800	10,20,30,40,50,60,70	

Table 2.4.1 Experimental condition

Run No.	T_0 [°C]	T_{sub} [°C]	f [frame/sec]
1	500, 600, 700	10	30
2	700	10,20,30	750

Table 2.4.2 Experimental condition for self-collapse experiment

Run No.	T_0 [°C]	T_{sub} [°C]	f [frame/sec]	P_0 [MPa]
1	500	10	4,500	0.5
2	700	10,20,30	4,500	
3			40,500	

Table 2.4.3 Experimental condition for forced-collapse experiment

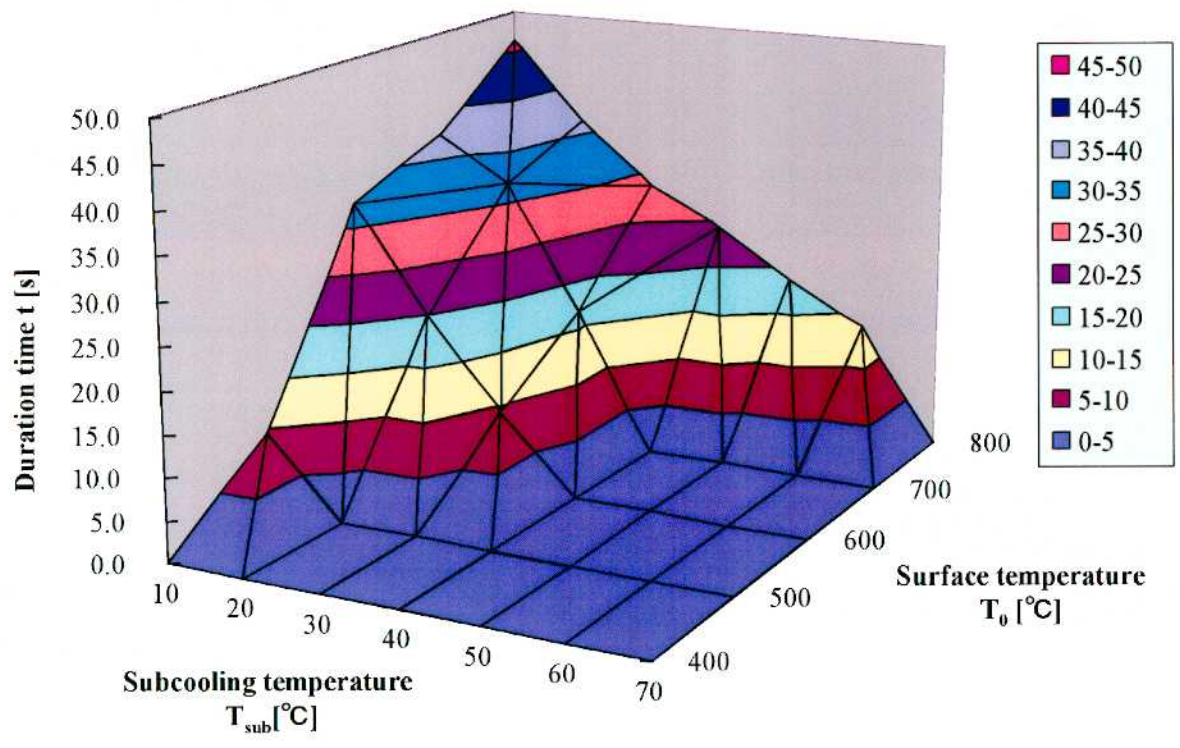


Fig. 2.4.1 Duration time of film boiling

2.5. 実験データの解析

2.5.1. 画像処理による平均蒸気膜厚さの評価

本実験では、得られた画像を用いて蒸気膜厚さの測定を行うこととした。その測定方法を図 2.5.1 に示す。まず初めに実験開始前に蒸気膜のない状態の鋼球のみの画像を取得する。次に、実験を行い蒸気膜がある状態の画像を取得する。これらの画像をそれぞれ二値化し、蒸気膜のある状態の画像から鋼球のみの画像を差し引く。そして残った部分のピクセル数を数え、その数を実スケールに換算することで蒸気膜厚さを評価した。

2.5.2. PIV 解析

先の章では鋼球表面上の平均蒸気膜厚さの計測を行う手法を構築した。この方法では、鋼球表面上の蒸気膜の平均厚さ、すなわち、巨視的な蒸気膜の挙動を調べる上では有効であると考えられるが、微視的な蒸気膜の挙動を調べることは困難である。そこで、本研究では気液界面の変動の測定方法として PIV 解析手法を用いた計測を導入することとした。先の蒸気膜厚さの計測方法ではスカラー量でしか得られなかった気液界面の変動が、この手法を用いることによってベクトル量で得られ、また、より詳細で微視的な気液界面の変動の計測が可能となるものと期待されている。

PIV とは粒子画像相関流速計測法のことであり、時間の連続した画像において対応する小さな検索領域の空間相関をデジタル的に求めて粒子の移動を明らかにする、類似の相関パターンの空間移動量を求める、もしくはヤング縞等を利用してその部分の速度を得るもので、個々の粒子像ではなく検査領域の全体像を使用する。現在、PIV の各種アルゴリズムが提案されている。

図 2.5.2 に本研究で用いた PIV 解析システムを示す。初めに、最高録画速度 40,500fps の高速度ビデオカメラを用いてデジタル画像データを撮影する。続いて時間の連続した画像を PIV ソフトウェア「VISIFLOW」を用いて解析する。最終的に、2 つのデジタル画像データの違いから速度場情報を計算する。

図 2.5.3 に本研究で行った PIV 解析の手順を示す。手順は以下のとおりである。

1. 時間の連続した画像 $t=t_1$ ならびに $t=t_2$ より蒸気膜の外周、すなわち気液界面の情報を取り出し、16 の領域に分割する。
2. 時間の連続した画像 $t=t_1$ ならびに $t=t_2$ の分割した領域の画像の 1 つをおたがいの画像が重なり合うまで全ての方向に対して少し動かす。
3. 2 つの画像が重なったならば移動角度と距離を評価し、その領域に対する気液界面の移動量が決定される。
4. 2、3 の手順を分割した 16 の領域それぞれに適用し、最終的に全領域に対する気液界面の変動の速度ベクトルが得られる。

2.5.3. 熱伝導解析

本実験では、蒸気膜崩壊時に気液界面で起きている現象を調べるために、気液海面の温度を評価することとした。そのために、実験より得られたデータを元に熱伝導方程式を用いた熱伝導解析を行い、鋼

球内、蒸気膜内、液相内温度分布を評価することとした。

実験より得られた鋼球表面温度、液相温度、ならびに画像解析より得られた蒸気膜厚さを境界条件として熱伝導方程式を解き、鋼球内、蒸気膜内、液相内温度分布を算出した。それら算出された値より鋼球表面より放出される熱流束、気液界面温度ならびに気液界面における熱流束を評価した。

図 2.5.4 に本解析を行う際に用いた解析体系の概略図を示す。図 2.5.4 の上部は解析体系の概略図を示している。体系は鋼球、蒸気膜、液相の 3 相で構成されている。本解析では完全な球体系と物質の均質性を仮定している。これら各相に対し、式(2.5.1)で示される、温度分布は半径方向のみに依存する熱伝導方程式を解くこととした。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.5.1)$$

ここで用いた記号は以下に示すとおりである。

r	: 鋼球中心からの半径方向位置	t	: 時間
T	: 温度	κ	: 熱拡散率

また、温度を以下のように定義する。

$$T(r) = \begin{cases} T_s(r) & (0 \leq r \leq R) \\ T_v(r) & (R \leq r \leq R + \delta) \\ T_l(r) & (R + \delta \leq r) \end{cases} \quad (2.5.2)$$

ここで用いた記号は以下に示すとおりである。

$T_s(r)$: 鋼球内温度分布	R	: 鋼球半径
$T_v(r)$: 蒸気膜内温度分布	δ	: 蒸気膜厚さ
$T_l(r)$: 液相内温度分布		

また、図 2.5.4 下部には各相温度分布の概略図を示している。先の実験から鋼球表面温度 T_w 、ならびに水温 T_l が得られており、また、画像解析より蒸気膜厚さ δ が得られている。熱伝導方程式を解くための境界条件としてこれらの値を用いた。さらに本解析では、境界条件として気液界面において蒸気より流出する熱流束と、液相に流入する熱流束が等しいという境界条件を与えている。すなわち、

$$q_v = q_l \quad (2.5.3)$$

という条件である。ここで用いた記号は以下に示すとおりである。

q_v	: 蒸気相側において蒸気より液相に流出する熱流束
q_l	: 液相側において蒸気より液相に流入する熱流束

これらを境界条件として、式(2.5.1)を鋼球内、蒸気膜内ならびに液相内それぞれについて解いて温度分布を算出した。なお、鋼球内温度分布はガウスの消去法、蒸気膜内ならびに液相内温度分布はSOR法を用いて求めた。

図 2.5.5 に本解析のフローチャートを示す。解析の手順は以下の通りである。

1. 暫定的な界面温度 T_i を与える。
2. 初期温度分布を決定する。
3. 本解析の境界条件として用いる鋼球表面温度 T_w 、水温 T_1 ならびに蒸気膜厚さ δ の時系列データを入力する。
4. 鋼球内温度分布 $T_s(r)$ を算出する。
5. 蒸気膜内温度分布 $T_v(r)$ を算出する。
6. 液相内温度分布 $T_l(r)$ を算出する。
7. 気液界面において、蒸気より流出する熱流束 q_v が、液相に流入する熱流束 q_l と等しいかどうか判定する。
8. この熱流束一定の条件を満たさなければ、界面温度に微小量を加えて蒸気膜内温度分布および液相内温度分布を再計算する。
9. 手順 5~8 を界面における熱流束収支が釣り合うまで繰り返す。
10. 熱流束一定の条件を満たしたならば、各相温度分布を出力し、時間を進展させる。

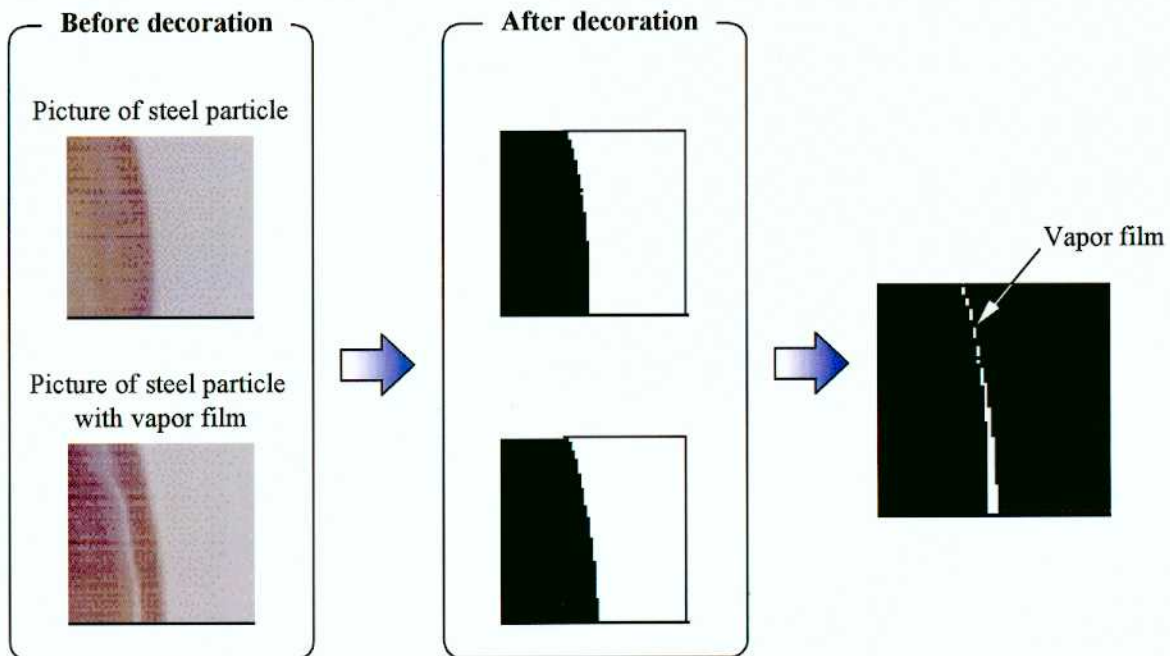


Fig. 2.5.1 Measurement method of vapor film thickness

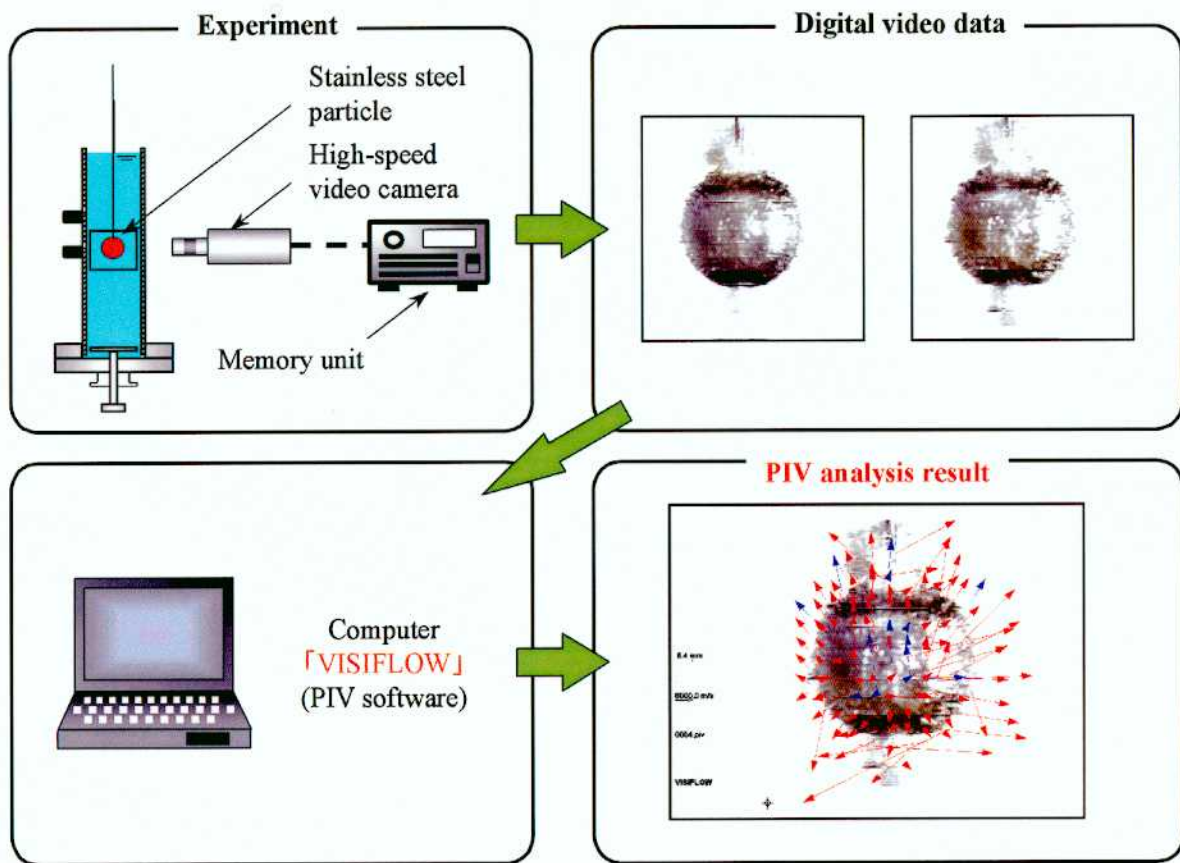


Fig. 2.5.2 PIV analysis system

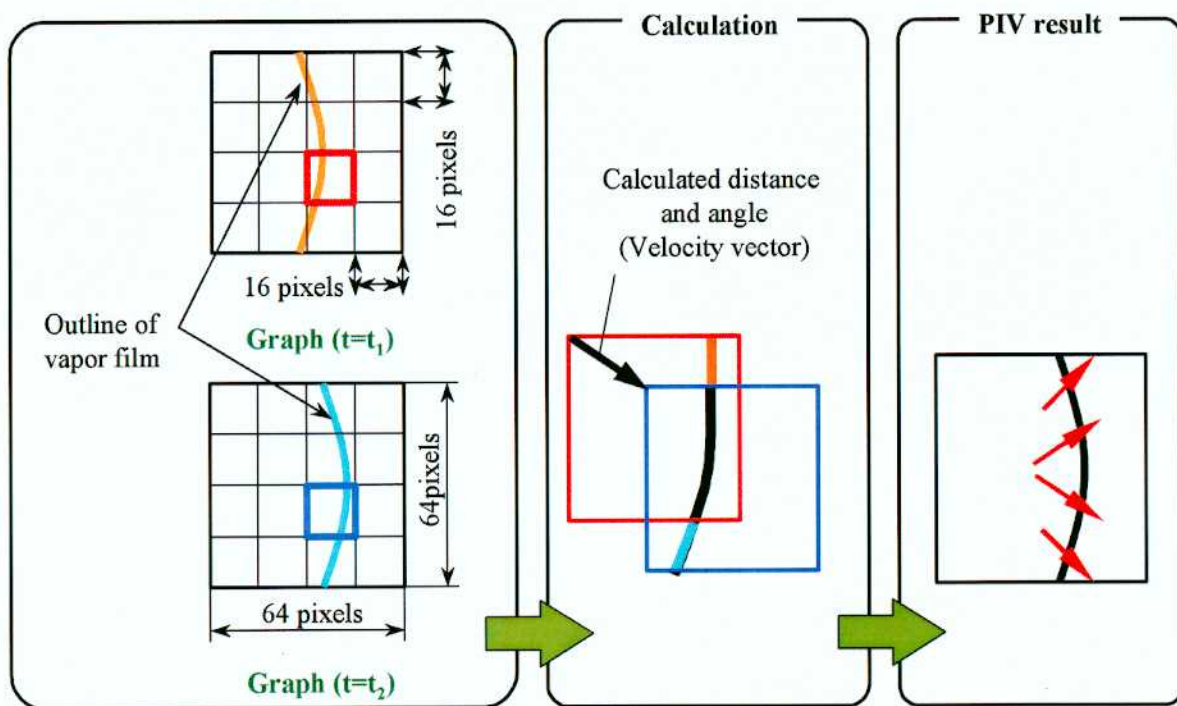


Fig. 2.5.3 Procedure of PIV analysis

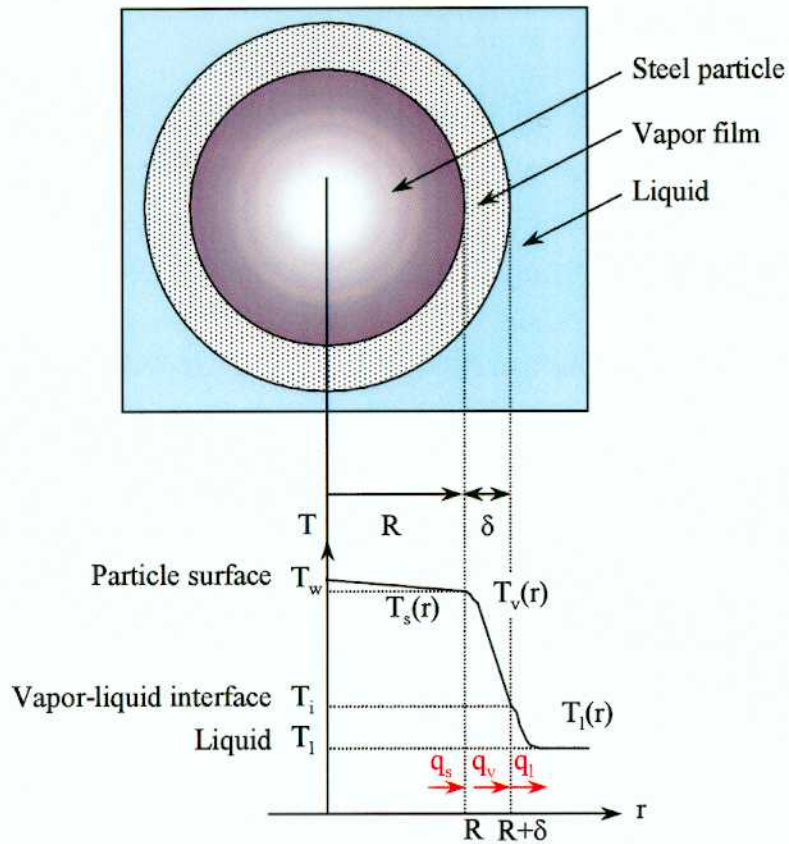


Fig. 2.5.4 Schematic diagram of analysis system and temperature distribution in heat conduction analysis

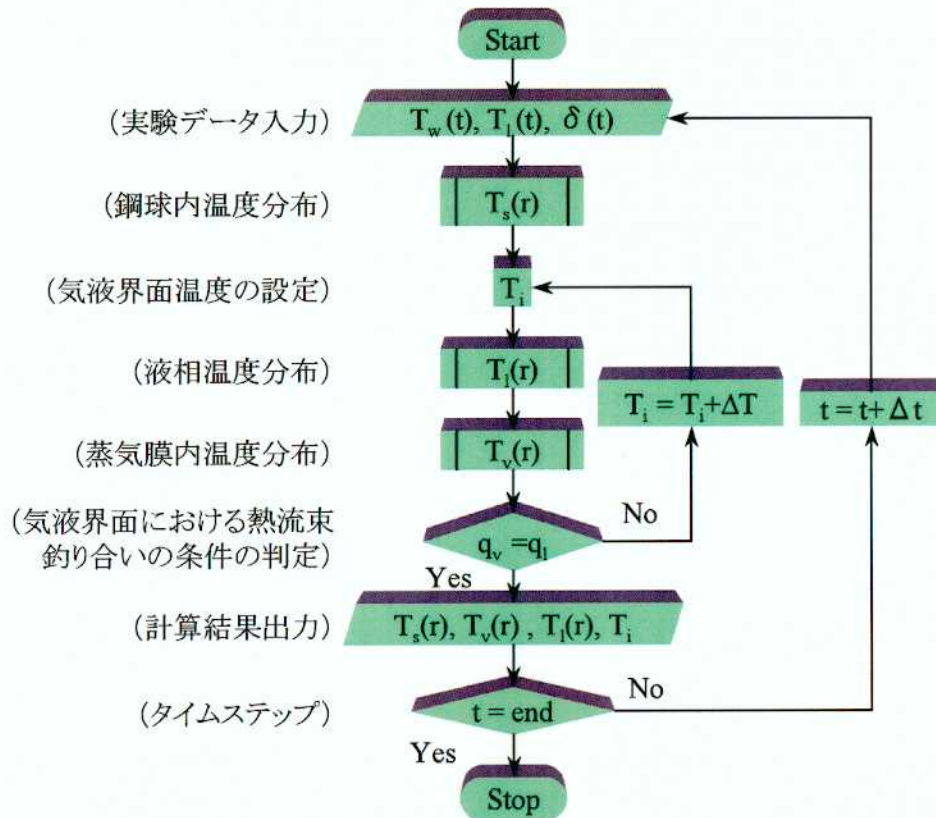


Fig. 2.5.5 Flowchart of heat conduction analysis

2.6. 本章のまとめ

本章では、蒸気爆発現象において蒸気膜が自然に崩壊して圧力波を発生する蒸気膜の自発的な崩壊現象と、圧力波によって蒸気膜が崩壊される強制的な崩壊現象について実験的に調べるために、実験装置の構築を行った。

次に、実験を行う条件を確定するために膜沸騰の継続時間について調べ、蒸気膜が形成される条件を明らかにし、その実験結果を元に実験を行う条件を確定した。

さらに、蒸気膜崩壊時の気液界面での状態を調べるために、得られた実験結果より解析を行う手法を確立した。まず、可視観測画像より鋼球表面上の蒸気膜厚さを評価する方法を確立した。次に、気液界面の微視的変動を調べるためにPIV法を用いた解析を行うシステムについて確立を行った。さらに、気液界面温度を調べるために熱伝導解析を行うこととした。本章ではその計算手法について確立を行った。

これらの実験の準備を行った上で実験を行うこととした。