

## 5. 格子ガスオートマトン法を用いた蒸気膜の崩壊挙動に関する 解析

### 5.1. 本章の目的

本章では、圧力波が到来したときの蒸気膜の崩壊挙動に対して支配的となる要因を明確にするために、4章で開発した3次元15速度モデルならびに伝熱・相変化モデルを用いて蒸気膜の崩壊挙動に関する数値シミュレーションをこととした。

まず初めに、解析体系を構築した後、次の条件について蒸気膜の崩壊挙動に関する解析を行うこととする：(1)流動のみを考慮した場合、(2)流動ならびに壁伝熱を考慮した場合、(3)流動、壁伝熱ならびに相変化を考慮した場合。これら得られた数値シミュレーションの結果を比較することで、蒸気膜の崩壊挙動に対して流動もしくは相変化のどちらが支配的要因となるかをより明確にすることを目的とする。

## 5.2. 解析概要

本章では、圧力波を用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動における支配的な要因を明らかにするために、蒸気膜の崩壊挙動に関する数値シミュレーションを行うこととした。数値シミュレーションに用いるモデルは以下の通りである。

- (1) 流動モデルのみ
- (2) 流動モデル+伝熱モデル
- (3) 流動モデル+伝熱モデル+相変化モデル

初めに、高温の鋼球を模擬した固体球と蒸気膜を模擬した赤成分流体の膜からなるターゲットを領域内に配置し、それに圧力パルスを当てて赤成分流体の挙動を見ることとする。

図 5.2.1 に本計算で設定した計算領域の概要図を示す。計算領域の大きさは  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向にそれぞれ  $64 \times 64 \times 256$  格子と設定した。上側の境界は流出境界、下側の境界は滑りなし壁と設定し、側面の壁は滑りなし壁と設定した。計算領域の下の部分  $0 \leq z \leq Z_p$  は高圧領域を模擬しており、上の部分  $Z_p \leq z \leq 256$  は低圧領域を模擬している。高圧領域における粒子の初期平均数密度は  $d=0.95$ 、低圧領域における粒子の初期平均数密度は  $d=0.5$  と設定した。ターゲットは低圧領域における  $Z_p$  の 64 格子上下に配置した。高圧領域と低圧領域は位置  $Z_p$  において隔壁で区切られており、この隔壁を移動させることで圧力波が  $z$  方向の正方向に伝播してゆく。本計算では重力効果変数を  $g=1/100$  と設定した。

図 5.2.2 にターゲットの詳細図を示す。ターゲットは直径 18 の固体球が中心に存在し、その周りを厚さ 2 の赤成分流体が覆っている。

次に、隔壁の位置を変化させた場合、すなわち高圧領域の大きさを変化させた場合に、圧力波の形状がどのように変化するかを観察することとした。その結果を図 5.2.3 に示す。この図は隔壁の 64 格子上で測定した圧力の時間変化を示している。横軸はサイクルを示し、縦軸は圧力を示す。本計算では隔壁の位置（高圧領域の大きさ）を  $Z_p=32, 64, 96, 128$  と変化させて計算を行った。また、隔壁はサイクル 0 のときに移動させた。図中の矢印は圧力波の前縁を示している。

この結果より、高圧領域の大きさを変化させても圧力波自体の最大値は変化しなかった。しかしながら、高圧領域が小さい場合に圧力波はパルス状となっていたが、高圧領域の大きさが大きくなるに連れて圧力波が階段状となることが示された。本研究では実験に倣い圧力パルスを蒸気膜に当てることとしたので、隔壁位置（高圧領域の大きさ） $Z_p=32$  を採用することとした。

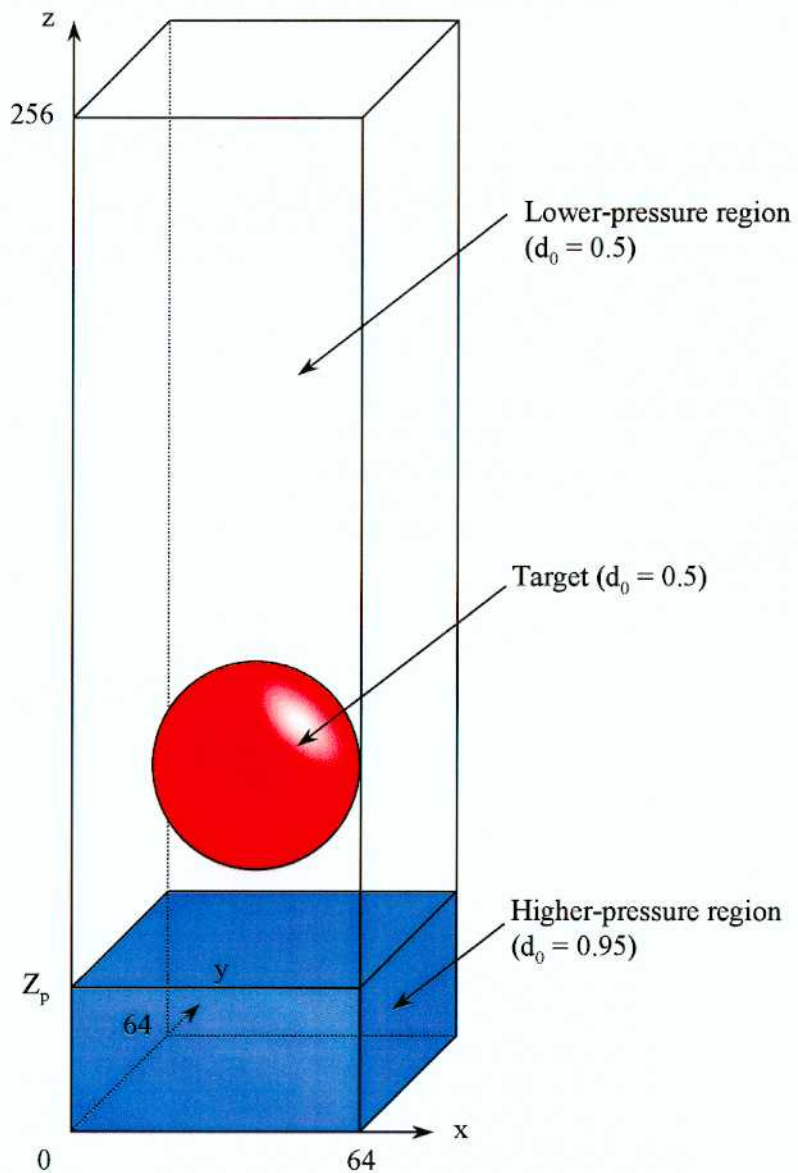
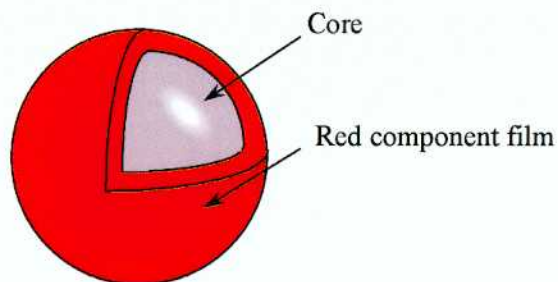
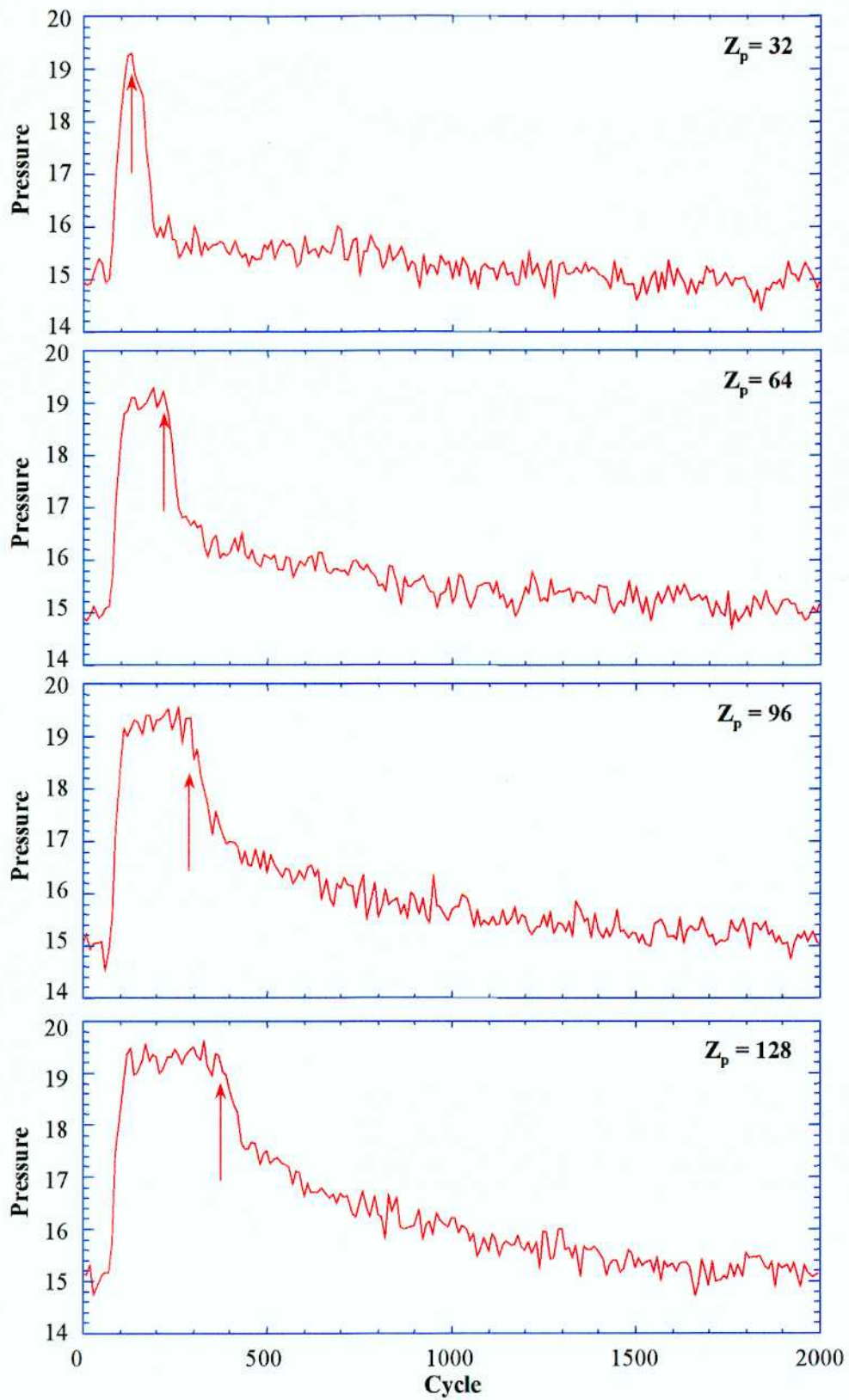


Fig. 5.2.1 Schematic diagram of computational domain for vapor film collapse with pressure pulse



Solid core diameter : 18  
 Red component film thickness : 2

Fig. 5.2.2 Details of target



**Fig. 5.2.3** Computational result of pressure wave propagation for different higher-pressure region size

### 5.3. 流動のみを考慮した解析

初めに、熱的な効果を考慮せず、流動のみを考慮した格子ガスオートマトン法の 3 次元 15 速度 ILG モデルを用いて、蒸気膜が崩壊するときの挙動に関する数値シミュレーションを行った。その結果を図 5.3.1 に示す。

上側のグラフは、固体球中心と同じ高さの側壁における圧力の時間変化を示している。縦軸は圧力を示しており、横軸はサイクルを示している。下側の図は、固体球近傍における赤成分流体の挙動ならびに圧力分布を示している。左側の図は赤成分流体の挙動を示しており、右側の図は圧力分布を示している。この図では赤成分流体の挙動を詳細に観察するために  $64 \leq z \leq 128$  の領域を抜き出している。図中に示されている赤の面は、赤・青成分の割合が同じとなる等値面（界面）を示している。図の下の記号 A ~ F は左のグラフ中の記号 A ~ F に対応している。

圧力パルスが到来する以前の時刻 A においては、固体球上に球形の赤成分流体が形成されていた。圧力パルスが到来した時刻 B には、赤成分流体が下方より変形し始めている様子が示された。圧力パルスのピークが到達した時刻 C において、赤成分流体は鋼球表面より剥離し始めており下流側に赤成分流体が移動している様子が示された。圧力パルスのピークが通過した時刻 E では、赤成分流体が下流側に引き伸ばされている様子が示された。圧力パルスが通過した時刻 F においては、赤成分流体の大半が図示されている領域の上方に移動した。この際、固体球表面上には赤成分流体が付着している領域と剥離している領域の二種類の領域が観測された。この結果と実験より得られた結果を比較すると、実験結果と解析結果では定性的に異なることが示された。

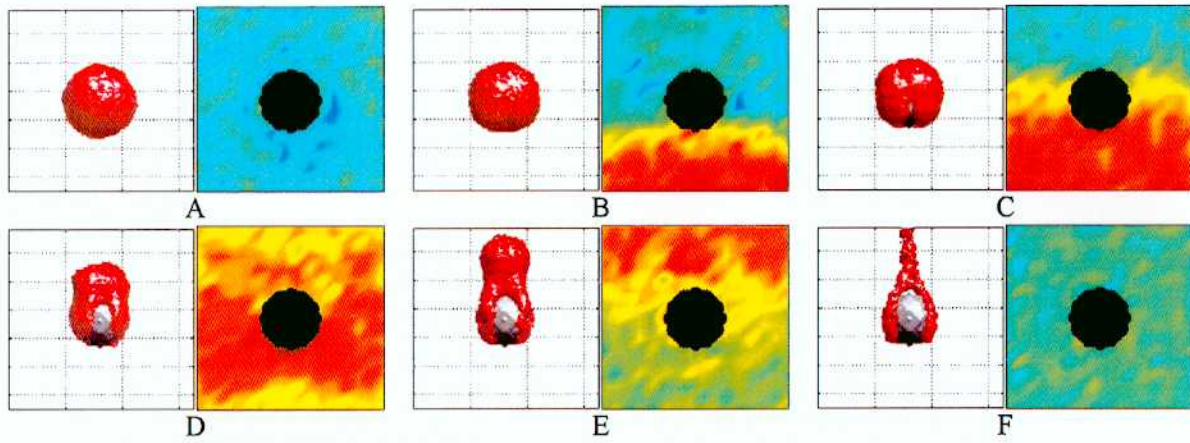
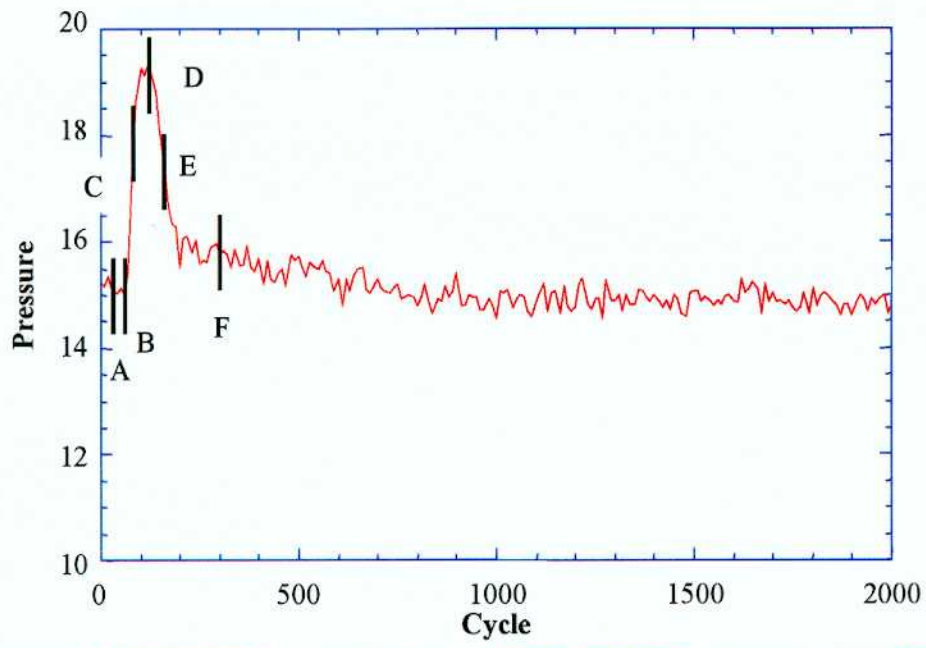


Fig. 5.3.1 Computational result of vapor film collapse behavior with pressure pulse (flow effect only included)

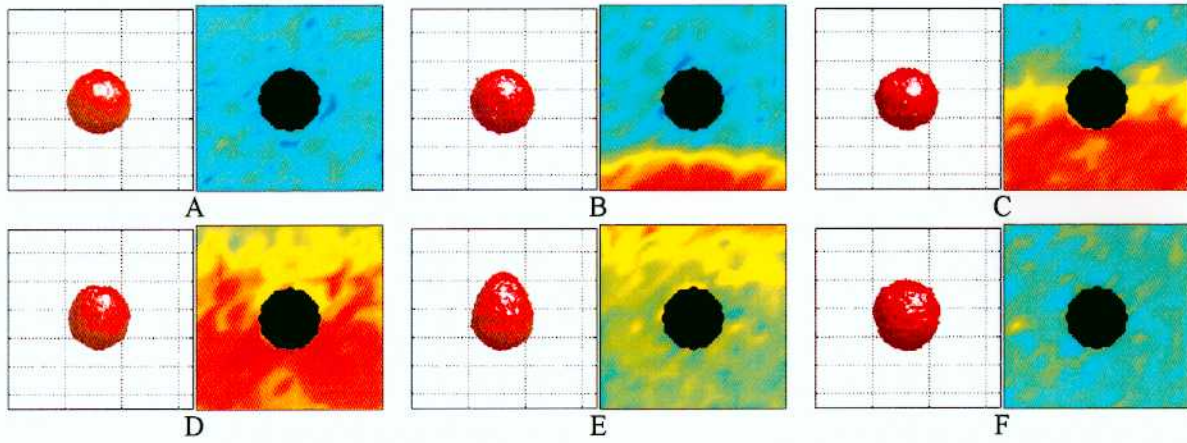
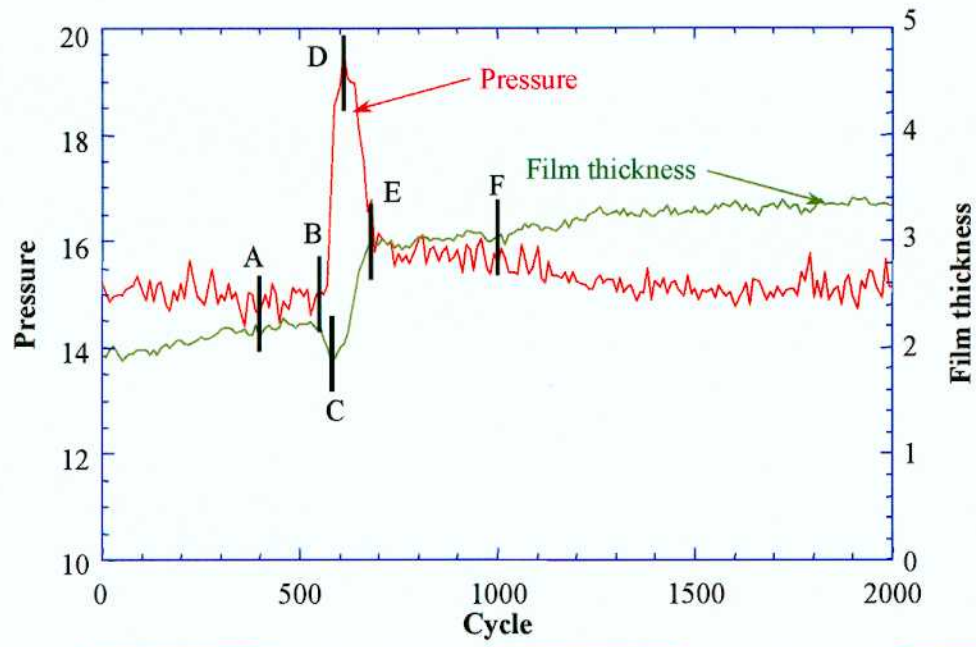
#### 5.4. 流動ならびに壁伝熱を考慮した解析

次に、流動のみを考慮した格子ガスオートマトン法の3次元15速度ILGモデルに壁伝熱の効果を考慮したモデルを用いて、蒸気膜が崩壊するときの挙動に関する数値シミュレーションを行った。その結果を図5.4.1に示す。

上側のグラフは、固体球中心と同じ高さの側壁における圧力の時間変化ならびに固体球表面上における赤成分流体の膜厚の時間変化を示している。赤成分流体の膜厚は、計算結果より得られた画像の固体球の下半分における部分より評価した。縦軸はそれぞれ圧力ならびに膜厚を示しており、横軸はサイクルを示している。図中の赤の線は圧力の時間変化を示し、緑の線は膜厚の時間変化を示す。下側の図は、固体球近傍における赤成分流体の挙動ならびに圧力分布を示している。左側の図は赤成分流体の挙動を示しており、右側の図は圧力分布を示している。この図では赤成分流体の挙動を詳細に観察するために $64 \leq z \leq 128$ の領域を抜き出している。図中に示されている赤の面は、赤・青成分の割合が同じとなる等値面（界面）を示している。図の下の記号A~Fは左のグラフ中の記号A~Fに対応している。

圧力パルスが到達する以前の時刻Aにおいて、固体球表面上に球形の赤成分流体の膜が形成されている。圧力パルスが到来した時刻Bにおいてもほぼ同じ挙動を示した、圧力パルスのピークが到来するまでの時刻Cにおいて、赤成分流体の膜は収縮していることが示された。圧力パルスのピークが到来した時刻Dにおいて、少し赤成分の膜が膨張している様子が見られる。圧力パルスが通過した時刻Eにおいて赤成分流体は上方に伸張している様子が見られたが、時刻Fにおいてはほぼ球形の形となっていた。

本解析において、圧力パルスが到来したときに膜厚が減少し、圧力パルスが通過した後に膜厚が初期の状態より増加している要因として以下のことが考えられる。圧力パルス到来時に膜はひとたび収縮する。膜厚が薄くなったことにより青成分流体が固体球表面に接触し、赤成分へと変化する。しかしながら、周囲の流動により赤成分流体の膜は上方へ引き伸ばされるが分裂するまでには至らず、表面張力により元の球形へと戻ることとなった。結果として赤成分流体の体積が増加し、膜厚が初期の状態より増加したものと考えられる。この結果と実験より得られた結果を比較すると、実験結果と解析結果では定性的に異なることが示された。



**Fig. 5.4.1** Computational result of vapor film collapse behavior with pressure pulse (flow effect and heat wall condition included)



## 5.5. 流動、壁伝熱ならびに相変化を考慮した解析

流動のみを考慮した格子ガスオートマトン法の3次元15速度ILGモデルに壁伝熱の効果ならびに変化の効果を検討したモデルを用いて、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蒸気膜の崩壊挙動に関する数値シミュレーションを行うこととした。

図5.5.1に蒸気膜の崩壊挙動に関する計算結果を示す。以下に、各計算で設定した飽和曲線の式を示す。

$$T = 2.77778 \cdot \ln(P + 1) \quad (5.5.1)$$

ここで、Pは式(4.5.1)より評価した局所圧力、Tは式(4.5.2)より評価した局所温度を示している。これらの計算では安定な蒸気膜を形成させるために、計算開始後500サイクルに低圧領域と高圧領域を隔てている隔壁を取り除くこととした。

(a)は圧力、膜厚ならびに相変化効果を受けた粒子の数の時間変化を示している。(a)の上側のグラフは、固体球中心と同じ高さの側壁における圧力の時間変化ならびに固体球表面上における蒸気成分の膜厚の時間変化を示している。蒸気成分の膜厚は、計算結果より得られた画像の固体球の下半分における部分より評価した。縦軸はそれぞれ圧力ならびに膜厚を示しており、横軸はサイクルを示している。図中の赤の線は圧力の時間変化を示し、緑の線は膜厚の時間変化を示す。

(a)の中央のグラフは、相変化効果を受けた粒子の数の時間変化を示している。縦軸は相変化効果を受けた粒子の数で、横軸はサイクル数である。また、図中の赤線は領域全体において流体内での相変化で蒸発効果を受けた粒子の数の時間変化、青線は領域全体において流体内での相変化で凝縮効果を受けた粒子の数の時間変化、紫線は高温球を模擬した高温固体球上で蒸発効果を受けた粒子の数の時間変化、緑線は領域全体において蒸発効果を受けた粒子の数（すなわち、赤線と紫線の値を足し合わせた値）の時間変化を示している。

(a)の下のグラフは、蒸発効果を受けた粒子数と凝縮効果を受けた粒子数のバランスの時間変化を示している。相変化のバランスは

$$\begin{aligned} & (\text{蒸発した粒子数}) - (\text{凝縮した粒子数}) = \\ & (\text{鋼球表面で蒸発した粒子数}) + (\text{流体内で蒸発した粒子数}) - (\text{凝縮効果した粒子数}) \end{aligned} \quad (5.5.2)$$

で評価することとした。すなわち、値が正のときは領域内で蒸発現象がより多く起きている状態を示しており、負のときは領域内で凝縮現象がより多く起きている状態を示している。縦軸は粒子数の差を示しており、横軸はサイクル数である。

(b)は、固体球近傍における赤成分流体の挙動ならびに圧力分布を示している。左側の図は赤成分流体の挙動を示しており、右側の図は圧力分布を示している。この図では赤成分流体の挙動を詳細に観察するために  $64 \leq z \leq 128$  の領域を抜き出している。図中に示されている赤の面は、赤・青成分の割合が同じとなる等値面（界面）を示している。図の下の記号A~Fは左のグラフ中の記号A~Fに対応している。

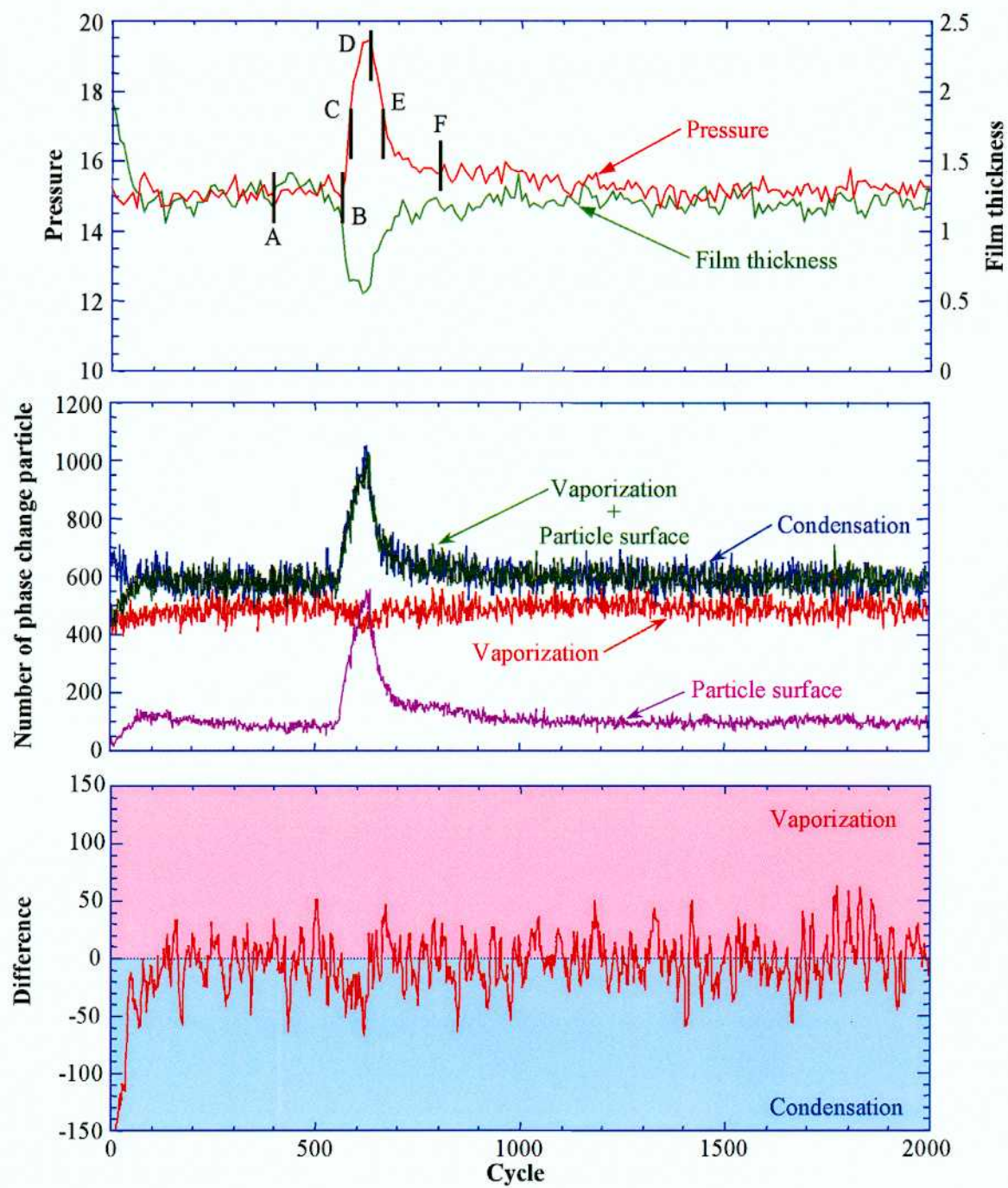
(c)は圧力—温度線図を示している。縦軸は式(4.5.1)より評価した温度を示し、横軸は式(4.5.2)より評価した圧力を示している。図中に示されている記号は、各格子点において起きた相変化現象を示しており、赤丸は蒸発、青三角は凝縮を示している。また、緑の線は飽和圧力を示している。

(d)は圧力—温度線図ならびに本解析の状態変化図を示している。縦軸は式(4.5.1)より評価した温度を示し、横軸は式(4.5.2)より評価した圧力を示している。図中に示されている記号は、各格子点において起きた相変化現象を示しており、赤丸は蒸発、青三角は凝縮を示している。また、緑の線は飽和圧力を示しており、黒の線は本解析より得られた結果の状態を図示したものである。

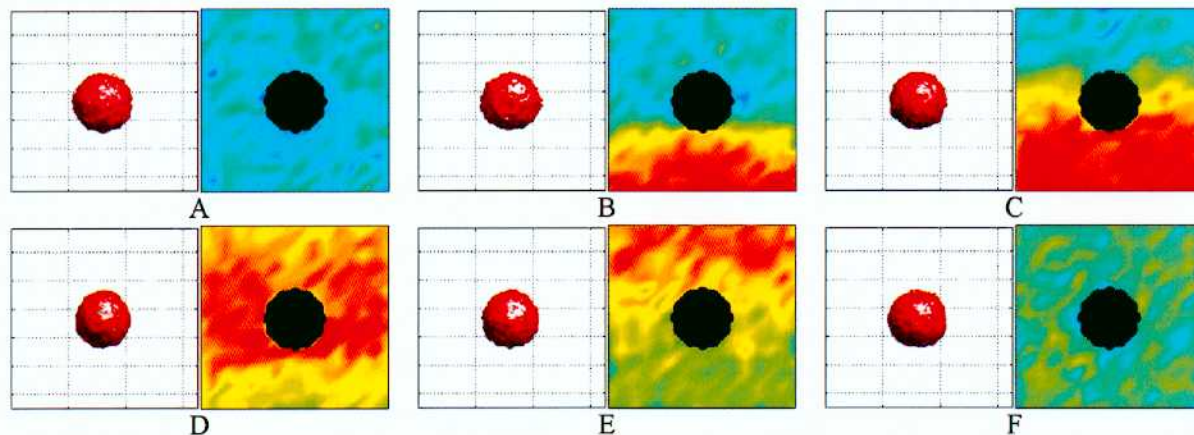
圧力パルスが到来する以前の時刻 A においては固体球表面上において球形の膜が観測された。圧力パルス到来したときには、流体圧力の上昇により凝縮が発生して膜厚が減少し始め、圧力パルスのピークが到達した時刻 D には膜厚が最小値となることが示された。圧力パルス通過後は、流体圧力の降下に伴い沸騰現象が発生して膜が膨張し、膜厚が圧力パルス到達前の状態に回復することが示された。

次に、蒸発と凝縮のバランスを見てみると、圧力パルス通過前では蒸発と凝縮がバランスしていたが、圧力パルスが蒸気膜に到来した時刻には凝縮が蒸発より優勢に起きていることが示された。圧力パルス通過後は、圧力パルス通過以前と同じように蒸発と凝縮がバランスしていた。

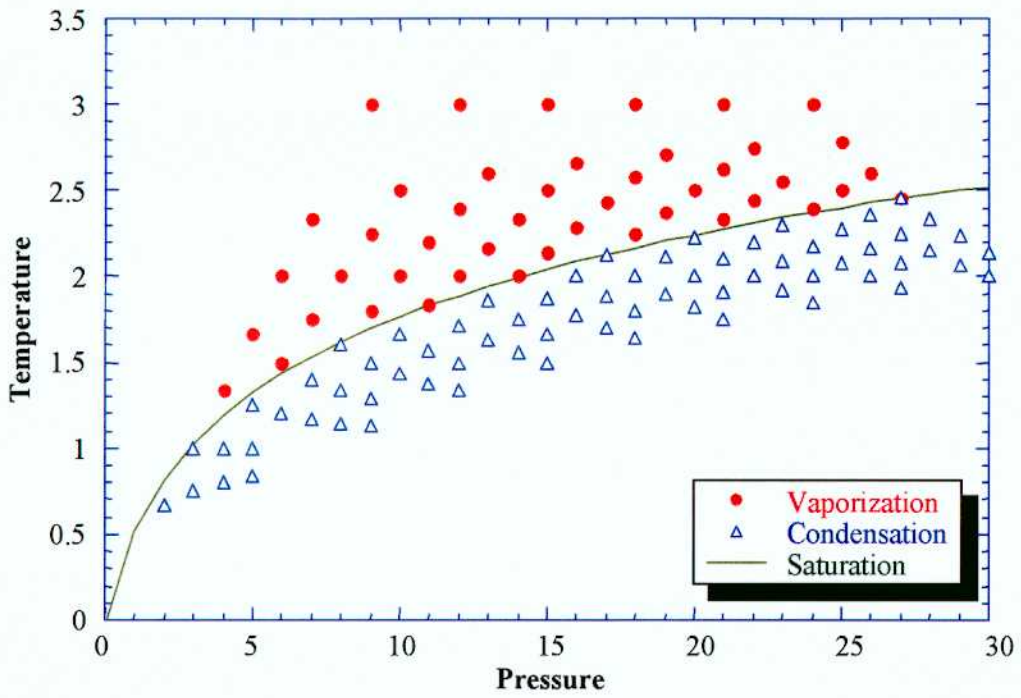
本節では、流動、壁伝熱ならびに相変化を考慮した条件で解析を行った。その結果、固体球上の蒸気膜に圧力パルスが到達したときに、膜は収縮して膜厚も減少することが示された。また圧力パルス通過後は、膜が膨張して膜厚が増加し、圧力パルス通過前の膜厚に回復する様子が示された。この傾向は、圧力パルスを用いて蒸気膜を崩壊させた場合の実験結果で示された傾向とほぼ同じであることが示されたが、圧力パルス通過後に蒸気膜が膨張する様子が再現されていなかった。実験結果と比較すると、圧力パルス通過後の膨張波が再現されておらず、圧力パルス蒸気膜の膨張は膨張波によるものであることが考えられ、この膨張波を考慮した解析を行う必要があることが示された。



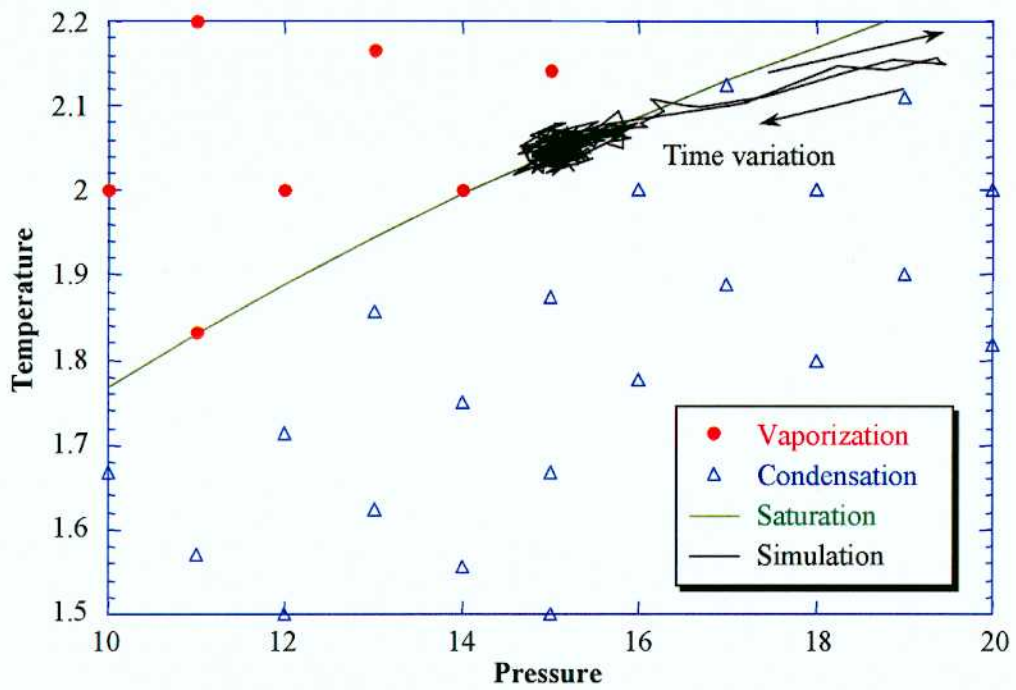
(a) Time transient of pressure, film thickness and number of phase change particle



(b) Vapor component behavior



(c) Pressure-temperature diagram used in calculation



(d) Pressure-temperature diagram and calculation result

**Fig. 5.5.1** Computational result of vapor film collapse behavior with pressure pulse (flow effect, heat wall condition and phase change effect included)

## 5.6. 流動、壁伝熱、相変化ならびに膨張波を考慮した解析

先の節では、流動のみを考慮した格子ガスオートマトン法の3次元15速度ILGモデルに壁伝熱の効果ならびに変化の効果を検討したモデルを用いて、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蒸気膜の崩壊挙動に関する数値シミュレーションを行った。その結果、圧力波が到達したときに蒸気膜が凝縮により収縮する様子が示された。しかしながら、圧力パルス通過後に蒸気膜が膨張する様子が再現されていなかった。実験結果との比較を行った結果、圧力パルス通過後の膨張波が再現されておらず、圧力パルス通過後の蒸気膜の膨張はこの膨張波によることが予想される。

そこで本節では、圧力パルス通過後の膨張波を再現した条件で上記膜の崩壊挙動に関する解析を行い、解析結果の検討を行うこととした。

図5.6.1に膨張波の再現方法を示す。図5.6.1(a)は本解析で用いた解析体系の下部の一部を示している。解析体系は図5.2.1の解析体系と同じであるが、高压領域を圧力が調節できるように変更して膨張波を再現することとした。

圧力調節領域の調節方法を図5.6.1(b)上図に示す。本解析では、領域内の数密度を調節することで圧力を調節して膨張波を再現することとした。図の縦軸は数密度を示しており、横軸はサイクル数を示している。図中の青の点線は低压領域の初期数密度を示している。計算を開始した時点では、高压領域を再現するように $d=0.95$ に設定する。サイクル $t_w$ に低压領域と隔てている隔壁を取り除き圧力波を上方へ伝播させる。次にサイクル $t_e$ に圧力調節領域内の数密度を $d=0.35$ と設定する。この時刻以降、 $d=0.35$ と設定することによって膨張波を再現することとした。

このように設定することで得られた固体球中心での圧力の時間変化を図5.6.1(b)下図に示す。縦軸は圧力を示しており、横軸はサイクル数を示している。この解析では、 $t_w=500$ 、 $t_e=550$ と設定した。この図より、前節の解析と同様に圧力パルスが到達することが示されたが、圧力パルス通過後は低压領域の初期圧力より低くなっていることが示され、膨張波が再現できることが示された。

この膨張波を用いて解析を行った結果を示す。図5.6.2に蒸気膜の崩壊挙動に関する計算結果を示す。以下に、各計算で設定した飽和曲線の式を示す。

$$T = 2.77778 \cdot \ln(P + 1) \quad (5.6.1)$$

ここで、 $P$ は式(4.5.1)より評価した局所圧力、 $T$ は式(4.5.2)より評価した局所温度を示している。これらの計算では安定な蒸気膜を形成させるために、計算開始後500サイクルに低压領域と高压領域を隔てている隔壁を取り除くこととした。

(a)は圧力、膜厚ならびに相変化効果を受けた粒子の数の時間変化を示している。(a)の上側のグラフは、固体球中心と同じ高さの側壁における圧力の時間変化ならびに固体球表面上における蒸気成分の膜厚の時間変化を示している。蒸気成分の膜厚は、計算結果より得られた画像の固体球の下半分における部分より評価した。縦軸はそれぞれ圧力ならびに膜厚を示しており、横軸はサイクルを示している。図中の赤の線は圧力の時間変化を示し、緑の線は膜厚の時間変化を示す。

(a)の中央のグラフは、相変化効果を受けた粒子の数の時間変化を示している。縦軸は相変化効果を受けた粒子の数で、横軸はサイクル数である。また、図中の赤線は領域全体において流体内部での相変化で蒸発効果を受けた粒子の数の時間変化、青線は領域全体において流体内部での相変化で凝縮効果を受けた粒子の数の時間変化、紫線は高温球を模擬した高温固体球上で蒸発効果を受けた粒子の数の時間変化、

緑線は領域全体において蒸発効果を受けた粒子の数（すなわち、赤線と紫線の値を足し合わせた値）の時間変化を示している。

(a)の下のグラフは、蒸発効果を受けた粒子数と凝縮効果を受けた粒子数のバランスの時間変化を示している。相変化のバランスは

$$\begin{aligned} & (\text{蒸発した粒子数}) - (\text{凝縮した粒子数}) = \\ & (\text{鋼球表面で蒸発した粒子数}) + (\text{流体内で蒸発した粒子数}) - (\text{凝縮効果した粒子数}) \end{aligned} \quad (5.6.2)$$

で評価することとした。すなわち、値が正のときは領域内で蒸発現象がより多く起きている状態を示しており、負のときは領域内で凝縮現象がより多く起きている状態を示している。縦軸は粒子数の差を示しており、横軸はサイクル数である。

(b)は、固体球近傍における赤成分流体の挙動ならびに圧力分布を示している。左側の図は赤成分流体の挙動を示しており、右側の図は圧力分布を示している。この図では赤成分流体の挙動を詳細に観察するために  $64 \leq z \leq 128$  の領域を抜き出している。図中に示されている赤の面は、赤・青成分の割合が同じとなる等値面（界面）を示している。図の下の記号 A~F は左のグラフ中の記号 A~F に対応している。

(c)は圧力-温度線図を示している。縦軸は式(4.5.1)より評価した温度を示し、横軸は式(4.5.2)より評価した圧力を示している。図中に示されている記号は、各格子点において起きた相変化現象を示しており、赤丸は蒸発、青三角は凝縮を示している。また、緑の線は飽和圧力を示している。

(d)は圧力-温度線図ならびに本解析の状態変化図を示している。縦軸は式(4.5.1)より評価した温度を示し、横軸は式(4.5.2)より評価した圧力を示している。図中に示されている記号は、各格子点において起きた相変化現象を示しており、赤丸は蒸発、青三角は凝縮を示している。また、緑の線は飽和圧力を示しており、黒の線は本解析より得られた結果の状態を図示したものである。

圧力パルスが到来する以前の時刻 A においては固体球表面上において球形の膜が観測された。圧力パルスが到来したときには、流体圧力の上昇により凝縮が発生して膜厚が減少し始め、圧力パルスのピークが到達した時刻 D には膜厚が最小値となることが示された。圧力パルス通過後は、膨張波により周囲流体の圧力が減少して蒸発現象が生じており、蒸気が急速に生成される様子が示された。

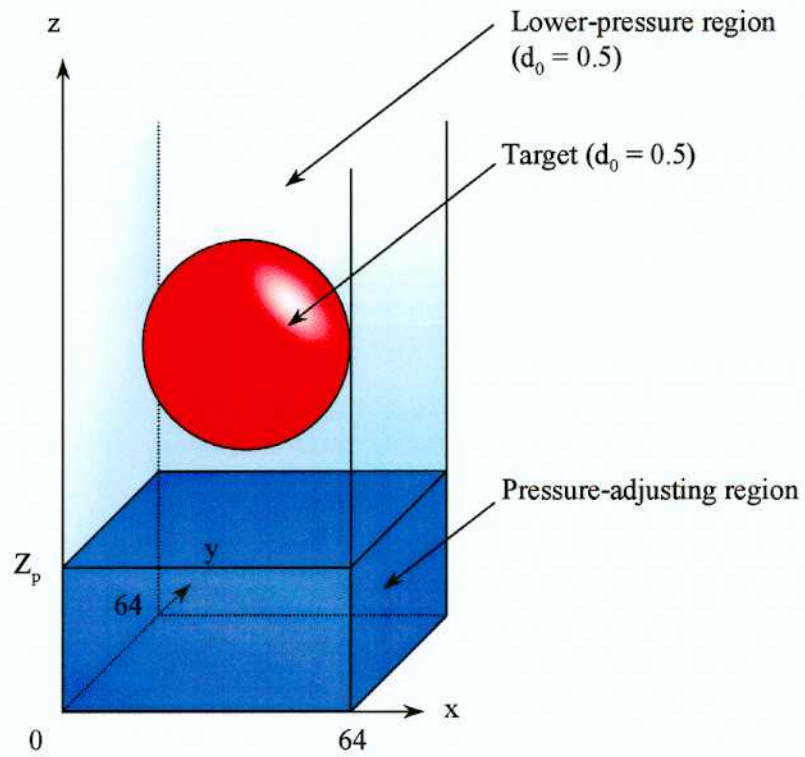
また、相変化を受けた粒子数の時間変化を見ると、計算全体にわたって蒸発粒子数と凝縮粒子数がほぼ等しい値をとっていることが確認できる。圧力パルス到達前においては蒸発粒子数・凝縮粒子数ともにほぼ一定の値をとっていたが、圧力パルス到来時には流体内で凝縮粒子数が急激に増加している様子が示された。実験結果ではこの時刻に白濁現象が生じており、白濁現象は蒸気が凝縮することに起因するものであることが示唆された。また、この時に、凝縮粒子数の増加に伴って固体球表面上で蒸発効果を受ける粒子数が増加していることが示された。固体球表面上で蒸発効果を受ける粒子数が増加することは、固体球より流体に対して放出される熱が増加することを意味しているものと考えられる。圧力パルス通過後は凝縮粒子数も圧力パルス通過前の状態に減少していることが示された。

次に、蒸発と凝縮のバランスを見てみると、圧力パルス通過前では蒸発と凝縮がバランスしていたが、圧力パルスが蒸気膜に到来した時刻には凝縮が蒸発より優勢に起きていることが示された。圧力パルス通過後は蒸発が凝縮より優勢に起きていることが示された。この変化は圧力パルス通過時に蒸気膜が収縮し、圧力パルス通過後は膨張する挙動と一致することが示された。すなわち、圧力パルスが到来したときには気液界面において凝縮が起きており、凝縮により蒸気膜が収縮を起こす。また、圧力パルス通過後は膨張波により周囲流体の圧力が飽和圧力以下に減少して蒸発が生じ、蒸気膜の膨張は膨張波によ

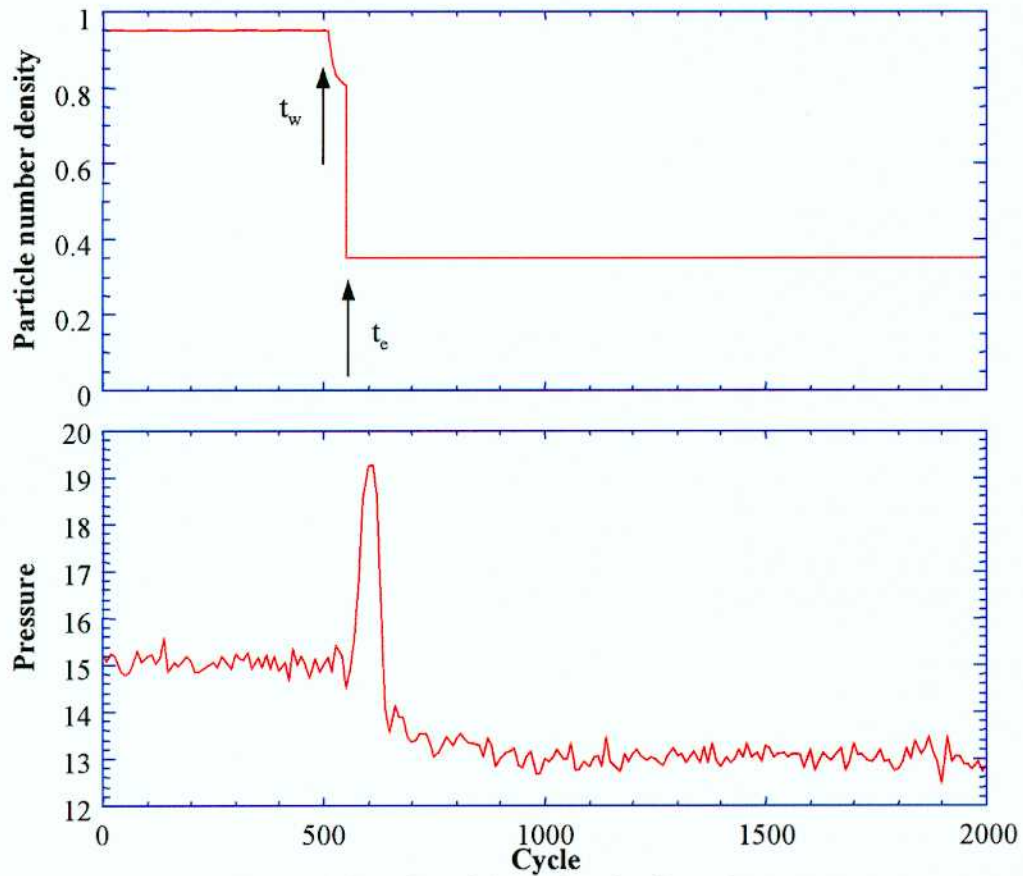
るものであるということが示唆された。

本節では、流動、壁伝熱ならびに相変化を考慮した条件で解析を行った。その結果、固体球上の蒸気膜に圧力パルスが到達したときに、膜は収縮して膜厚も減少することが示された。また圧力パルス通過後は、膜が膨張して膜厚が増加する様子が示された。この傾向は、圧力パルスを用いて蒸気膜を崩壊させた場合の実験結果で示された傾向と同じであることが示された。また、圧力パルスが到来した時刻に蒸気成分が凝縮を起こしていることが計算より示された。実験では圧力パルスが到来した時刻に白濁現象が生じており、白濁現象は凝縮に起因する現象であることが示唆された。

以上の実験結果ならびに本解析結果より、蒸気膜の崩壊挙動は流動現象より相変化現象に支配されるということがより明確に示された



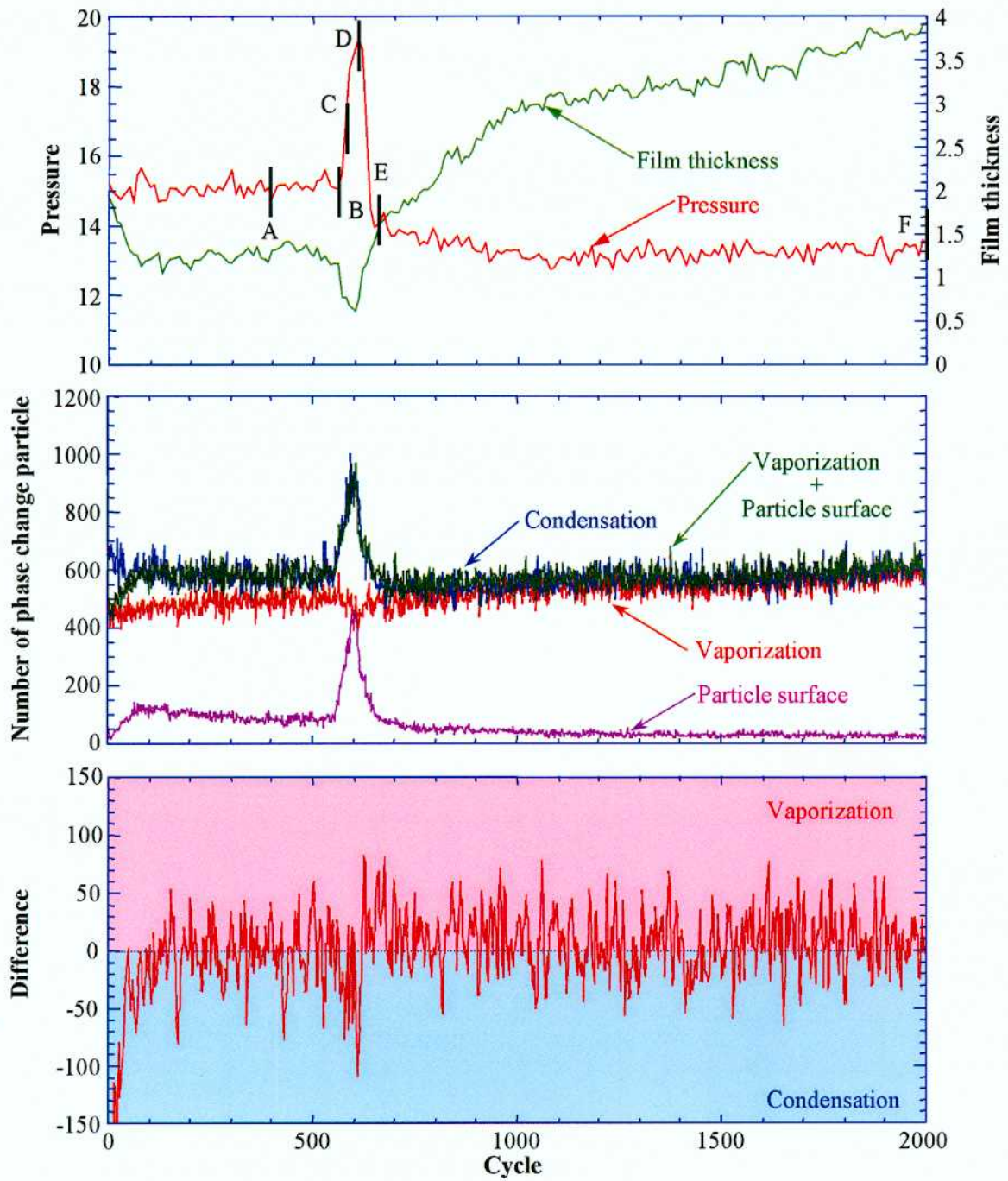
(a) Lower part of computational domain



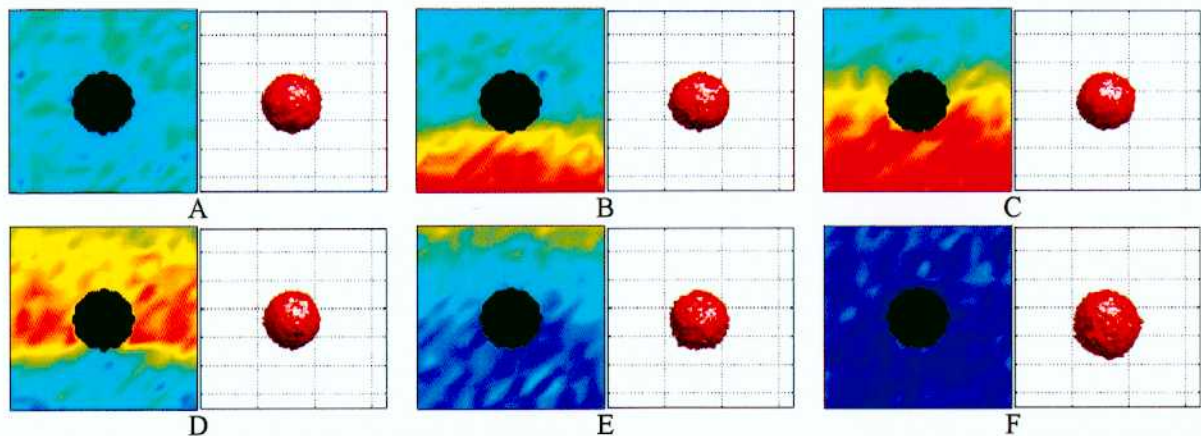
(b) Time variation of particle number density and pressure

**Fig.5.6.1 Representation of expansion wave**

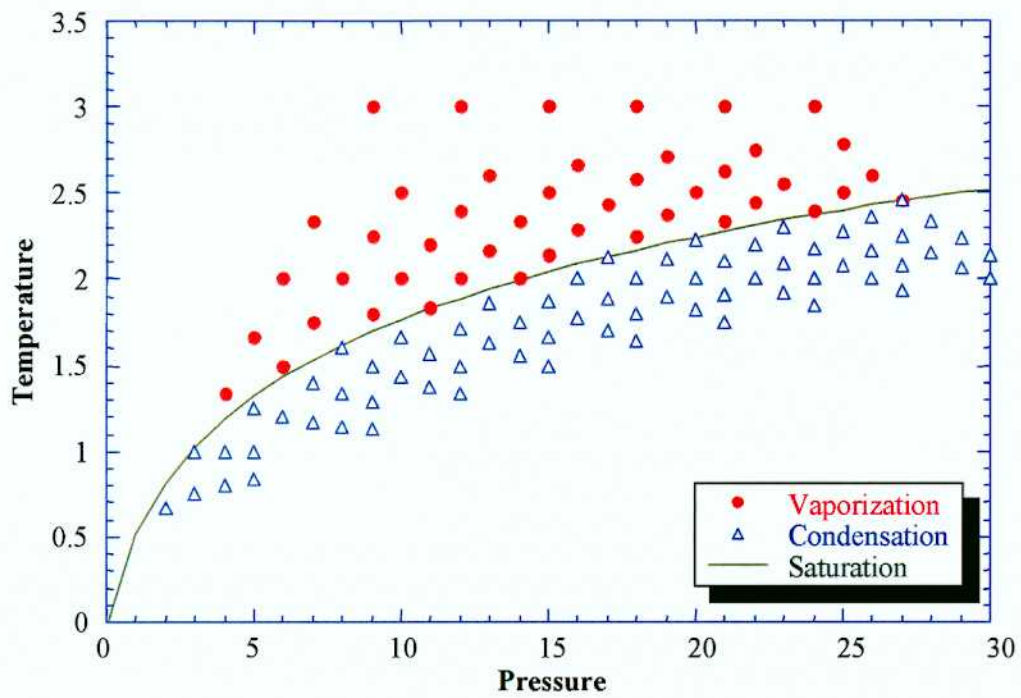




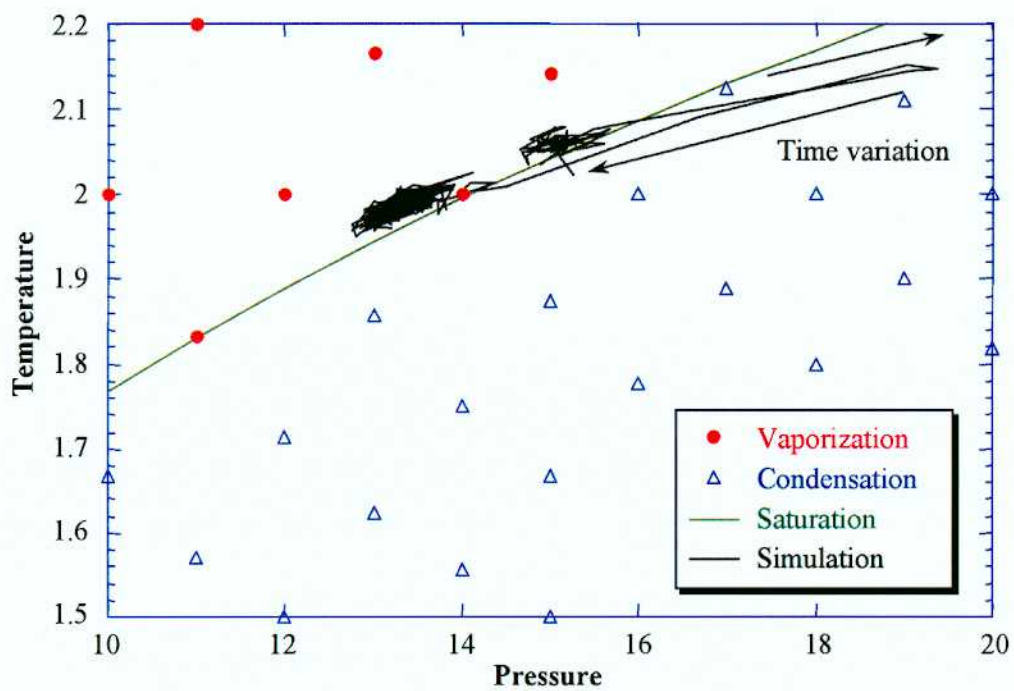
(a) Time variation of pressure, film thickness, number of phase change particle



(b) Vapor-component-fluid behavior



(b) Pressure-temperature diagram used in calculation



(c) Pressure-temperature diagram and calculation result

**Fig. 5.6.2** Computational result of vapor film collapse behavior with pressure pulse (flow effect, heat wall condition and phase change effect included)

## 5.7. 蒸気膜の崩壊挙動に関する考察

ここで、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より得られた結果ならびに解析より得られた結果を総合的に考察することとする。

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結果より、以下のことが明らかとなった。圧力パルス到来以前では界面温度は飽和温度よりも高い状態であったが、圧力パルスが到来したときに、蒸気膜は白く濁り、飽和温度は界面温度以上に上昇した。圧力波通過後、飽和温度は再び界面温度以下に降下し、蒸気膜は急激に膨張し始めた。このことより、圧力パルス到来時において気液界面近傍で凝縮が起きており、蒸気膜が白く濁る白濁現象は凝縮に起因する現象であるということが示唆された。

また、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蒸気膜の崩壊挙動に対して支配的となる要因、すなわち、流動もしくは相変化のどちらが支配的要因となるかを明らかにするために、格子ガスオートマトン法を用いて圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合に対する解析を行った。まず初めに、流動のみを考慮して数値シミュレーションを行った。その結果、固体球上の膜は剥離する様子が示され、下流側へと伸長する様子が示された。また、固体球表面上には膜の一部が付着している領域と、剥離している領域が見られた。実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に異なることが示された。次に、流動、壁伝熱、相変化を考慮して数値シミュレーションを行った。その結果、圧力パルスの到来とともに膜は収縮し、圧力パルス通過後は膜が膨張する様子が示された。実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に類似することが示された。

以上の結果を総合すると、圧力パルスが到来したときの蒸気膜の崩壊挙動は、周囲流体の流動よりむしろ低温液体の相変化が支配的要因となることが示唆された。このことを考慮に入れると、図 1.2.6 で示した蒸気爆発を記述するモデルの1つである熱的デトネーションモデルに修正箇所がいくつか出てくる可能性が示唆された。

図 5.7.1 に従来の熱的デトネーションモデルの概略図を示す。膜沸騰状態にある高温液滴が低温低沸点液体中に分散・粗混合した状態において、蒸気膜を崩壊させるのに十分な大きさの圧力波が到来した場合を考える。この圧力波によって高温液滴周りの蒸気膜が崩壊されると、高温液滴と低温低沸点液体の密度の相違に基づいて加速度の差が顕著となり、高温液滴が微粒化を起こす。この微粒化による伝熱面積の増加ならびに高温液滴と低温低沸点液体の直接接触によって急速な熱の移動が生じ、蒸気泡が発生する。蒸気泡の発生によって急激な膨張が生じ、それによりきわめて高い圧力ピークが発生して蒸気爆発に至るとされているのが熱的デトネーションモデルである。

しかしながら、上記の結果より図 5.7.2 に示すように修正することができるものと思われる。圧力波が到来したときに、高温粒子表面上の蒸気膜は、周囲流体の流動によって剥ぎ取られるのではなく、相変化によって収縮し、液-液接触を経た後に蒸気の生成によって膨張する。熱的デトネーションモデルでは、流動によって液滴の微粒化が生じるとされているが、この蒸気膜の収縮、膨張によって内部に存在する溶融液滴の表面が不安定となり、液滴の微粒化を引き起こす。そして最終的に細かな液滴へと分裂し、蒸気泡の発生によって急激な膨張が生じ、それによりきわめて高い圧力ピークが発生する、という修正を加えたシナリオを構築することができるものと考えられる。

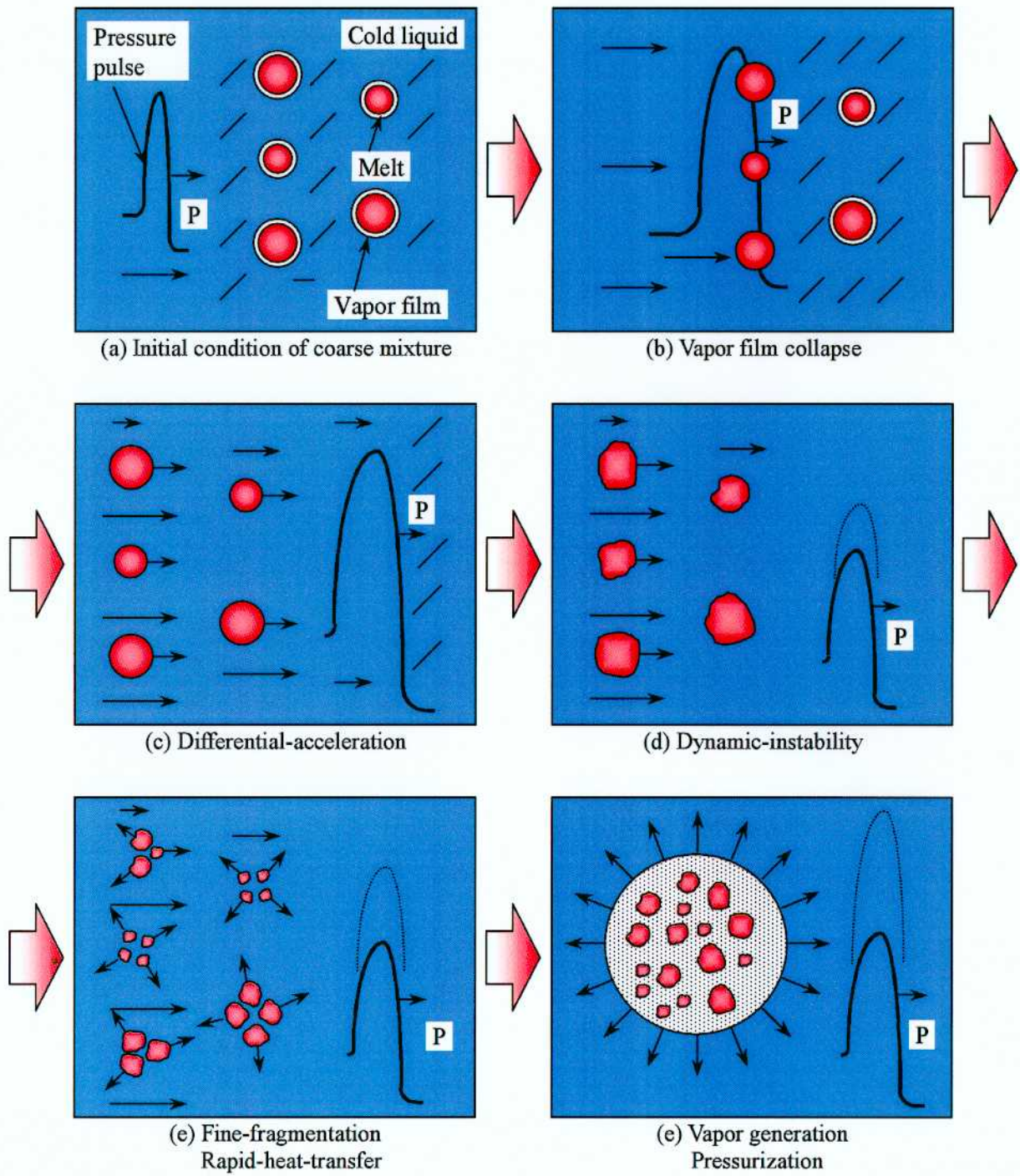
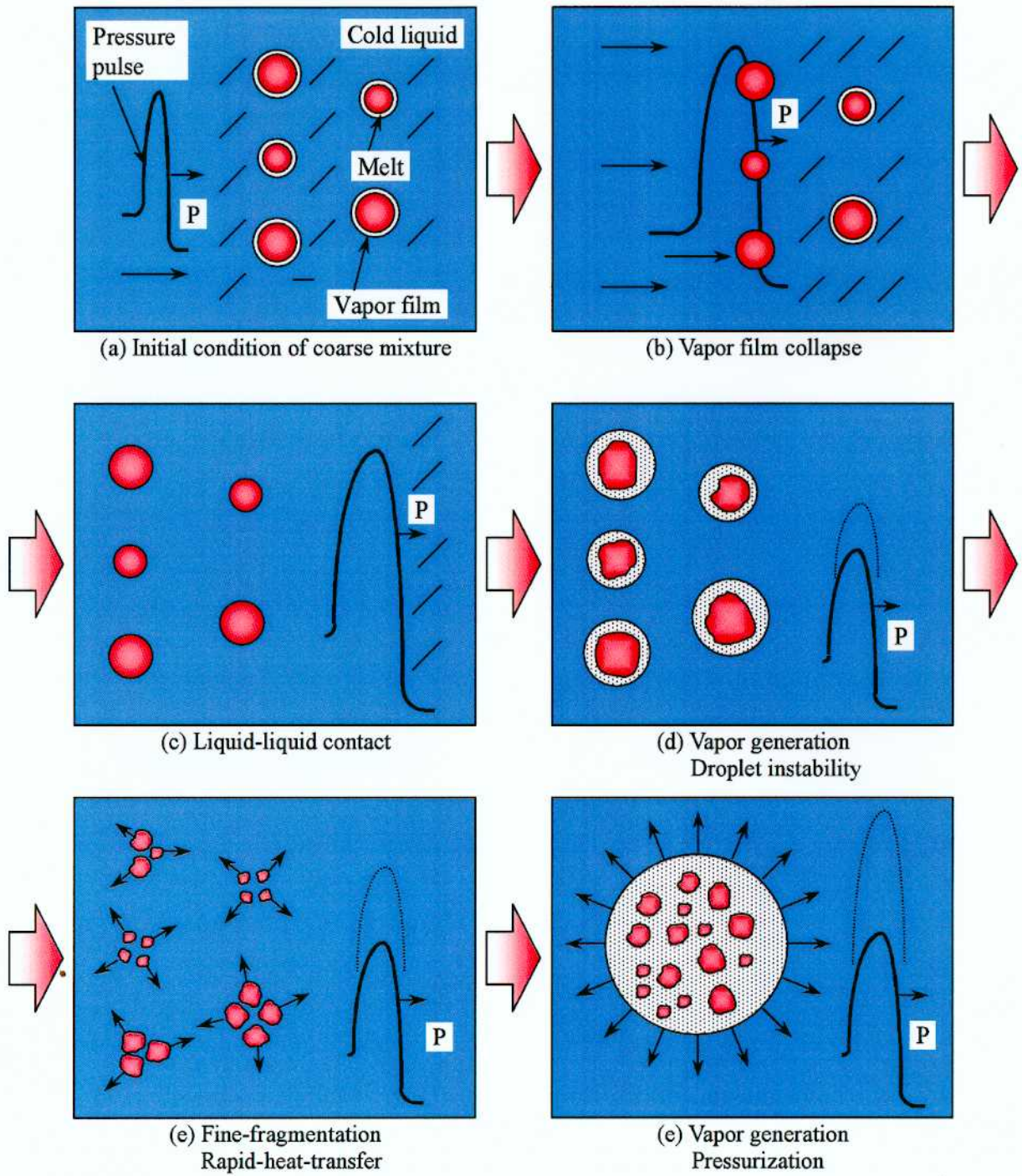


Fig. 5.7.1 Original thermal detonation model



**Fig. 5.7.2 Modified thermal detonation model**

## 5.8. 格子ガスオートマトン法を用いた蒸気膜の崩壊挙動に関する解析のまとめ

3章の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結果より、圧力パルス到来時に凝縮現象が起こっている可能性が示唆され、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蒸気膜の崩壊挙動は、周囲流体の流動よりむしろ流体の相変化が支配的であることが考えられた。

そこで、本章では4章で新たに開発した3次元格子ガスオートマトン法ならびに伝熱相変化モデルを用いて蒸気膜の崩壊挙動に関する解析を行うこととした。その結果を比較することで、蒸気膜の崩壊挙動に対して流動もしくは相変化のどちらが支配的要因となるかをより明確にすることとした。

その結果、以下の知見を得ることが出来た。

- 初めに、流動のみを考慮したモデルを用いて蒸気膜の崩壊挙動に関する数値シミュレーションを行った。その結果、固体球上の膜は剥離する様子が示され、下流側へと伸長する様子が示された。実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に異なることが示された。
- 次に、流動ならびに壁伝熱を考慮したモデルを用いて数値シミュレーションを行った。その結果、圧力パルスによる圧力の増大によって膜は収縮するものの、圧力パルス通過後に膨張する様子は見られなかった。実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に異なることが示された。
- さらに、流動、壁伝熱、相変化を考慮した解析を行うこととした。その結果、圧力パルスの到来とともに膜は収縮し、圧力パルス通過後は膜が膨張する様子が示された。実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に類似することが示された。

以上の数値シミュレーションの結果より、流動のみを考慮した場合には実験結果と定性的に異なったが、流動ならびに相変化を考慮した場合には実験結果と類似することが示された。すなわち、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蒸気膜の崩壊挙動は周囲流体の流動より流体の相変化が支配的となる可能性があることがより明確に示された。