

沸騰の動力学モデル

総合研究大学院大学¹ 柳田達雄

沸騰は人類が火を用いるようになってから親しまれてきた現象であり、日常生活のなかでもよく観測される。それにもかかわらず、この現象に関して分かっていることは多くない。

「沸騰」は液相－気相の1次相転移にともなう現象である。しかし、沸騰の動力学そのものも核沸騰 (nucleate boiling)－膜沸騰 (film boiling) なる遷移を示す。沸騰の工学的応用例として発熱体の冷却があげられるが、沸騰状態は熱伝導効率の点で対流状態に比べすぐれており、沸騰水型原子炉やボイラーに利用されている。しかしこの時に、核膜遷移が起こると、熱伝導効率が急激に下がり、発熱体の温度が急上昇する。これが原因となり発熱体が損傷する危険がある。このような工学的要請からも核膜遷移は沸騰研究の重要なテーマとなっている。

液体の入っている容器を下部から温度 T^{bottom} で加熱し、上部から温度 T^{top} で冷却すると、温度差 $\Delta T = T^{bottom} - T^{top}$ が十分に小さい場合、温度場は Fourier 則に従う。加熱が強まると容器内の流体は運動をはじめ、温度が沸点に達すると沸騰が始まる。通常我々が観測する沸騰では、泡は流体力学的相互作用せず独立に生成され運動を行う。このような沸騰初期段階を核沸騰領域と呼び、流体力学的相互作用をしない泡を個別泡と呼ぶ。加熱が強まると、泡は相互作用をし結合分離を行うようになる。更に加熱を強め発熱体の温度がある遷移点 (burning point) に達すると、蒸気泡が発熱体を覆う膜沸騰状態となる (Fig. 1)。これが、沸騰現象で見られる核膜遷移である。

文部省 統計数理研究所 e-mail yanagita@ism.ac.jp

泡は液相内で運動するため、流体の基礎方程式である Navier-Stokes 方程式に従うと考えられる。しかし、沸騰現象は気液二相が混在し、その境界は時間空間的に不規則に変化する。このため、Navier-Stokes 方程式を用いた数値的解析は非常に困難である。また、Navier-Stokes 方程式は、現象の定量的解析を主目的とするが、定性的振舞いを支配する動力学を明かにするには、簡単なモデルを作成し、それを解析する方法が有効である。

このような観点から、我々は沸騰現象、さらには核膜遷移を示す簡単なモデルを作成した。まず、空間を格子状に粗視化する。各格子の状態は、実変数である温度のみで記述される (Fig. 2)。これらの変数は、以下のような熱拡散、移流、潜熱の3つの相互作用をする。

1. 熱拡散

$$T'_{x,y} = T_{x,y} + \frac{\epsilon}{4} \{T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x-1,y} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y}\} \quad (1)$$

2. 移流

$$T''_{x,y} = T'_{x,y} + \frac{\sigma}{2} T'_{x,y} \{ \rho(T'_{x,y+1}) - \rho(T'_{x,y-1}) \}$$

$$\rho(T) = \tanh(\alpha(T - T_c)) \quad (2)$$

3. 潜熱

$$\text{if } T''_{x,y} > T_c \text{ and } T''_{x,y} < T_c \text{ then } T''_{N(x,y)} = T''_{N(x,y)} - \eta$$

else

if $T''_{x,y} < T_c$ and $T'^{-1}_{x,y} > T_c$ then $T''_{N(x,y)} = T''_{N(x,y)} + \eta$ ここで、 $N(x,y)$ は x,y の4つの最近接点である。

移流項全体は、密度差による浮力の効果を表現している。移流項の Hyperbolic tangent は密度 ρ がパラメーター T_c 前後で急激に変化することを表す。潜熱項は、熱拡散、移流の手続きを行った後、状態が液相 (温度が T_c 以下で) から気相 (温度が T_c 以上) に変化した場合に、まわりのセルから熱を奪うことを表している。以上の3つの手続きを単位時間に行い、時間発展する。 x 方向には周期的境界条件を課した。 y 方向の境界は Fig.2 のように、上面は低熱源 T^{top} に接し、下面は高熱源 T^{bottom} に接する subcooled 状態を考えた。

ここで、 $\epsilon, \sigma, \alpha, T_c, \eta$ はモデルを記述するパラメーターで、 $\epsilon = 0.5, \sigma = 0.3, \alpha = 10, T_c = 10, \eta = 0.5$ とした。今回の発表では、下面熱源の温度 T^{bottom} のみを変化させ、その他のパラメータは全て同じである。

底面の温度が小さい場合、このモデルの温度場は Fourier 則に従う (Fig. 3a)。しかし、 T^{bottom} がある臨界値を越えると、泡が生成され沸騰状態に入る。ここで、泡と称したのは、パラメーター T_c よりも高温なセルの塊である。この時の平均温度場は Fig.3b のようになり、熱輸送が効率よく行われていることを示している。泡は底面が一様に加熱されているにもかかわらず、時間空間的に不規則に生成され、最大 Lyapunov 指数は0から正に転移する (Fig. 4)。 T^{bottom} がさらに増加すると、沸騰は激しさを増し、泡は次第に大きくなる。この時、泡の大きさの分布は、泡が空間的に独立に生成されていることを反映して、指数分布となる (Fig. 5)。

このモデルは核膜遷移と考えられる現象を示す。 Burning Point に対応する $T^{bottom} \sim 9.91$ で空間パターンは Fig.6 のように個別泡から縞状泡に一転する。実際の膜沸騰では、発熱体を蒸気膜が覆い、泡は蒸気膜から離脱するかたちで浮上するが、我々の

モデルでは、この蒸気膜全体が同時に浮上し、縞模様となる。遷移過程をより正確にとらえるには、状態変数として密度をいれ、表面、界面の効果を導入する必要があるが、我々は、現在のモデルでも遷移過程の一側面はとらえていると考えている。

その他に、このモデルは急激な温度変化に対するヒステリシスや攪拌による泡生成の低下などを示す。これらは実験で観測されている現象である。

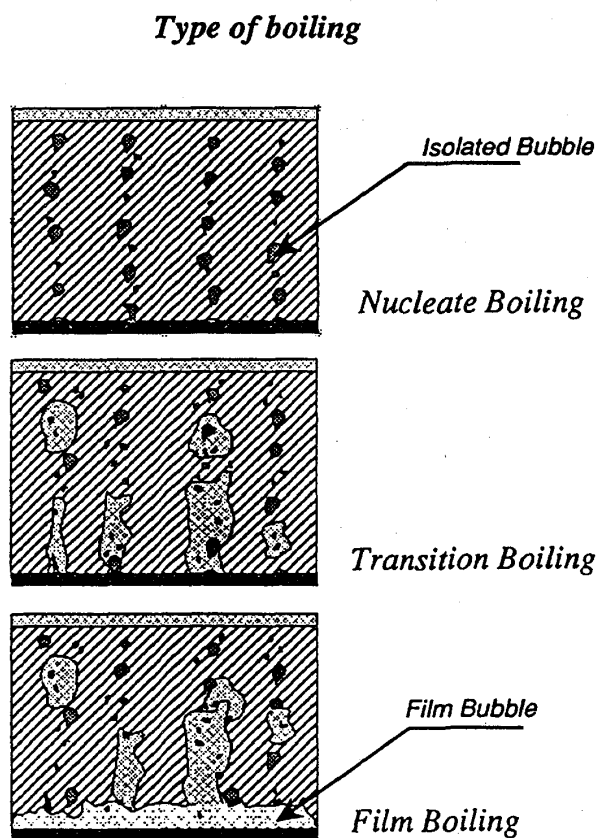


Fig.1

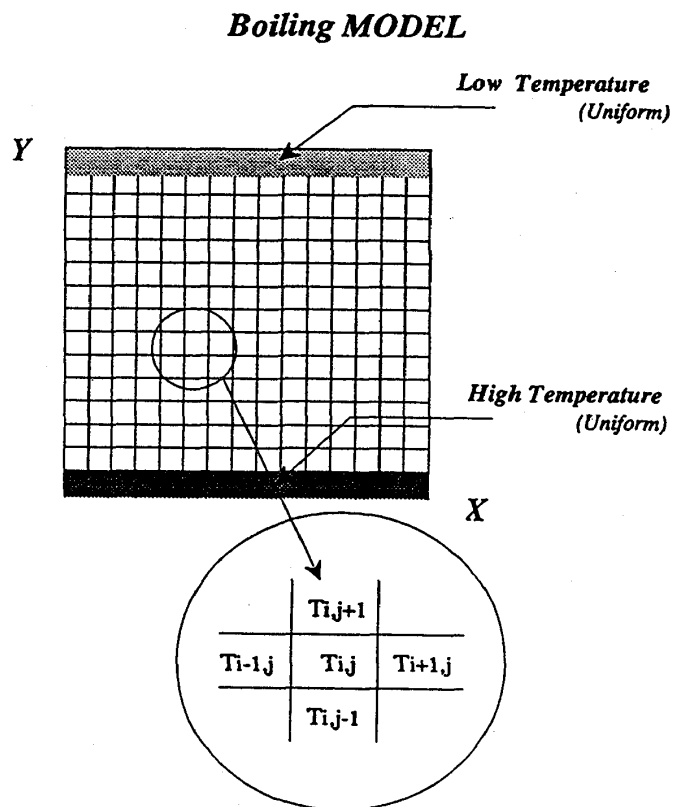


Fig.2

Mean Temperature Field

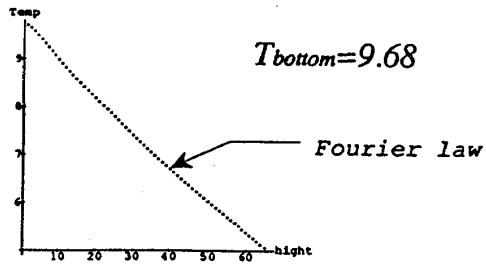


Fig.3-a

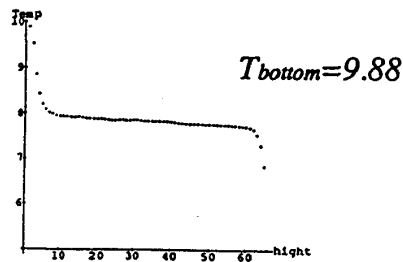


Fig.3-b

Maximum Lyapunov Exponent

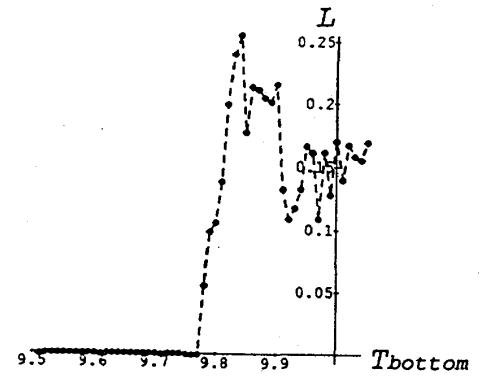


Fig.4

Distribution of Bubble Size

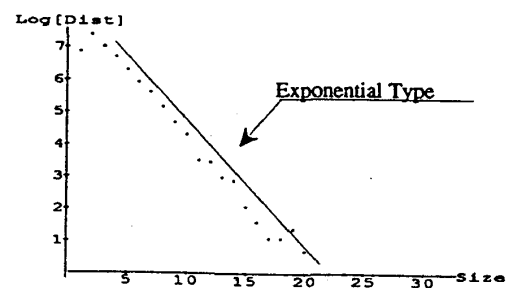
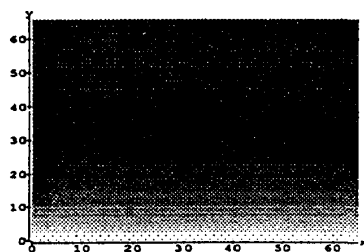
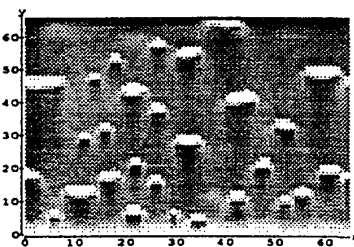


Fig.5

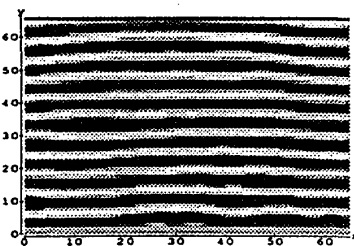
Spatial Pattern



T_{bottom}=9.75



T_{bottom}=9.85



T_{bottom}=9.95

Fig.6