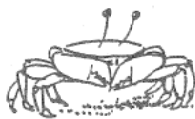


水中における蒸気噴流の凝縮



研究ノート

加治増夫*

水中に水蒸気を吹き込む研究は、かつてエネルギー危機が叫ばれた頃(?)蓄熱システムとして蒸気アキュムレータを見直そうということで始めたものである。水の蒸発潜熱を利用した蓄熱法は、熔融塩の融解熱を利用する方法などに比べて、エネルギー量の点で最も有利なことは言うまでもない。また、水中への蒸気吹き込みによる直接接凝縮は、原子炉容器の圧力抑制系での放出蒸気の処理法として採用されている。

凝縮は伝熱研究における重要な一分野であり、多数の研究が行われてきたが、基本的な点で未解決の問題が多い。すなわち、凝縮の引き金となる核生成、固体壁面などの伝熱面のぬれ易さに依存する凝縮形態(滴状または膜状凝縮)、気液界面における現象など、多数の因子が複雑に影響するためである。このようなマイクロな問題については著者の力およばぬところであり、ここではマクロな視点に立って検討した。

蒸気アキュムレータの充填過程では、凝縮の際に発生する騒音、さらに凝縮後の水の容器内での温度分布が問題となる。そこで、まずどのような状態で騒音が発生するかを調べた。

水中に浸漬したノズルから鉛直上向きに水蒸気を噴出させると、図1に示すような凝縮形態が観察される。白く光った部分が気液界面であり、毎秒100コマで撮影した連続写真である。流量が比較的小さい(A)の場合、蒸気の噴出は断続的であるが、流量が大きくなると(B)の形態を経て、(C)のようにノズル出口部に安定した円錐状の蒸気コーンが形成されるようになる。

図2は、いわゆる流動様式線図であり、質量

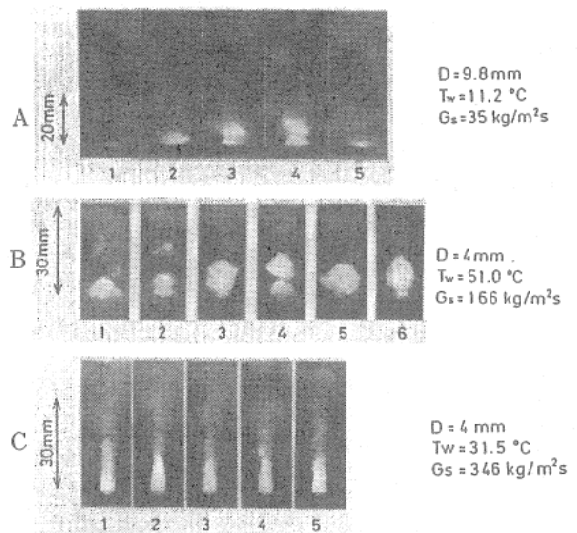


図1 凝縮形態の写真例

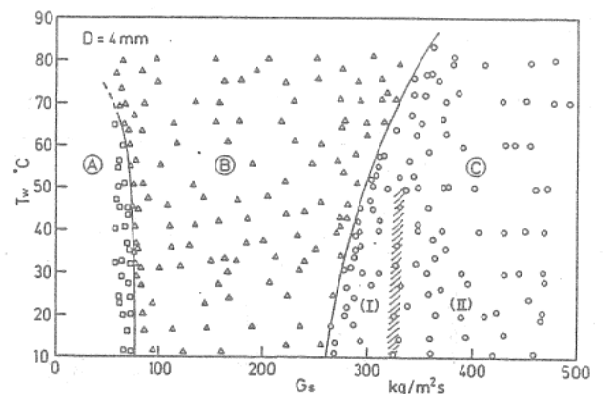


図2 凝縮形態の分類

速度、水温に対して上記の形態を分類した結果である。原子炉圧力抑制系を対象とした、大径ノズルによる蒸気の下向き吹き込み実験でも、定性的にこれと似た結果が得られている。

凝縮形態と騒音の関係を調べるため、ノズル出口付近に設けた静圧タップで圧力変動を測定した。その結果、図3に示すように、気液界面が変動しない場合は変動の振幅が小さく、凝縮騒音も小さいこと、また凝縮形態が遷移する領域では振幅が急激に変化することがわかった。

*加治増夫 (Masuo KAJI), 大阪大学工学部, 機械工学科, 助教授, 工学博士, 伝熱工学

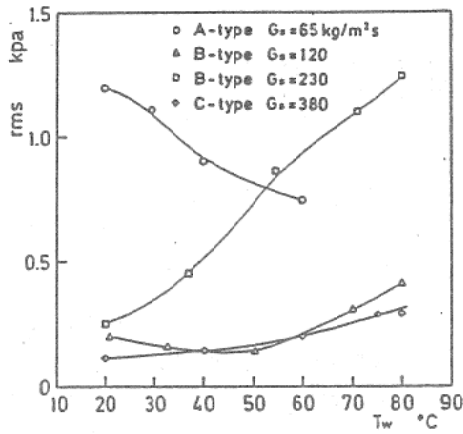


図3 ノズル圧力変動振幅

このような凝縮形態の遷移条件については、残念ながら現段階では満足な解析は行われていない。気液界面を単純に球面と仮定した場合でも、凝縮熱伝達係数を正しく評価するデータがないなど多くの問題が残されている。

つぎに、気液界面の形状がほぼ安定して一定であるCの凝縮形態について簡単な解析を試みた。凝縮界面付近の温度・速度分布の測定は非常に困難であったので、その下流の单相域の温度分布の測定値から凝縮噴流の構造を推定した。その結果、噴流の拡がり角、温度分布ともに单相乱流噴流のそれにほぼ一致することがわかった。そこで、図4に示すように单相乱流噴流理論を適用し、蒸気コーンの部分をポテンシャルコア同等とみなして計算を行った。凝縮量 G_c は気体運動論により、

$$G_c = \frac{\sigma_c}{2 - \sigma_c} \left(\frac{M}{2\pi R_o} \right)^{1/2} \left(\frac{P_s}{T_s} - \frac{P_i}{T_i} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 M は分子量、 R_o は一般ガス定数、 T_s 、 p_s は蒸気の飽和温度および圧力、 T_i 、 p_i は液表面温度およびその飽和圧力である。 σ_c は凝縮係数と呼ばれ、気相から液面に向う分子のうち凝縮するものの割合をあらわす。 σ_c は通常1に近い値とされているが、測定の困難さからまだ十分なデータが得られていないのが現状である。

図5は実験値と計算結果の比較を示す。たて軸は蒸気コーンの長さをノズル径で無次元化した値、横軸は蒸気の質量速度である。最初に、通常よく用いられる $\sigma_c=1$ を採用したところ、

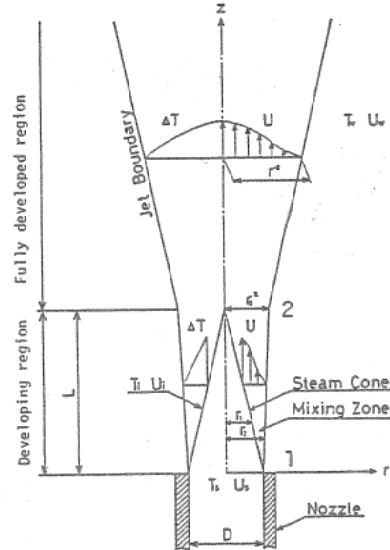


図4 計算モデル

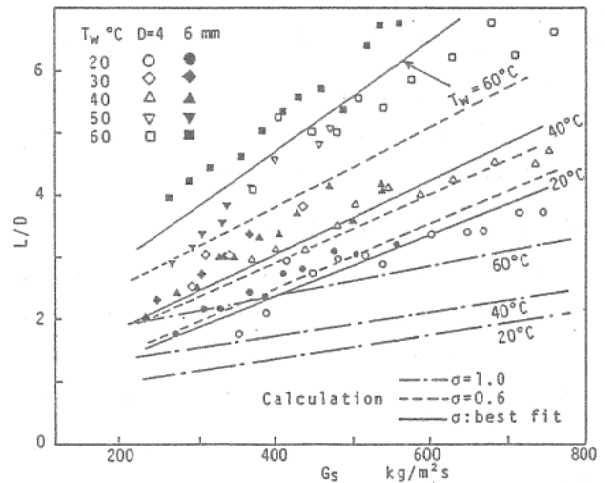


図5 無次元蒸気コーン長の実験値と計算値の比較

凝縮量が過大でコーン長が短くなるという結果が得られた。実験値とよく合う σ_c を見積ると、水温によって変化するが、ほぼ0.6~0.4の値となることがわかった。ただし蒸気コーン内部で凝縮直前に蒸気温度が低下している可能性もあるため、熱電対を用いて測定を試みたところ、そのような傾向は認められたものの、正確なデータはまだ得られていない。

エネルギー危機を契機に、著者には未知の凝縮伝熱の領域に踏み入ってはみたが、その奥はまだまだ深く、富士の樹海をさ迷う登山者の心境である。

終りに、本稿執筆をお勧め下さいました大阪大学工学部世古口言彦教授に感謝します。