

Title	A study on the thermal-hydraulic structure in subcooled flow boiling
Author(s)	Rouhollah, Ahamdi
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/24962">https://hdl.handle.net/11094/24962</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	ルハラ アハマディ Rouhollah Ahmadi
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 26187 号
学位授与年月日	平成25年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科機械工学専攻
学位論文名	A study on the thermal-hydraulic structure in subcooled flow boiling (サブクール流動沸騰の熱流動構造の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 片岡 勲 (副査) 教授 赤松 史光 電気通信大学情報理工学研究科知能機械工学専攻教授 大川 富雄 准教授 吉田 憲司

## 論文内容の要旨

Prediction of the void fraction profile in the subcooled flow boiling region is of considerable practical importance in evaluating the two-phase flow instabilities in boiling channels and the neutron moderation and fuel burnup in nuclear reactor cores. In this study, bubble dynamics in water subcooled flow boiling was investigated through visualization using a high-speed camera. The test section is a vertical rectangular channel, and a copper surface used as a heated surface. Main experimental parameters are the pressure, mass flux, liquid subcooling and surface wettability. However, considering the high-temperature and radiation environments in nuclear reactors, the surface of low contact angle is more practicable used as the heated surface. On the surface with low contact angle, several experiments were conducted under low void fraction conditions close to the onset of nucleate boiling. It is observed that no bubbles stayed at the nucleation sites at which they were formed. Depending on the experimental conditions, the following two types of bubble behavior were observed after nucleation: (1) lift-off from the heated surface followed by collapsing rapidly in subcooled bulk liquid due to condensation, and (2) sliding along the vertical heated surface for a long distance. Since the bubble lift-off was observed only when the wall superheat was high, the boundary between the lift-off and the sliding could be determined in terms of the Jakob number. Based on the bubble behavior in high wettable surface, discussion was made for the possible mechanisms governing the bubble dynamics. Using visual investigation, mechanism of net vapor generation is developed for low pressure and moderate pressure condition.

In low pressure condition, at high liquid subcooling close to the condition of the onset of nucleate boiling, all the bubbles were lifted off the heated surface immediately after the nucleation to disappear quickly in the subcooled bulk liquid due to condensation. It was found that the void fraction did not increase significantly unless the liquid subcooling became low enough for some bubbles to be reattached to the heated surface after the lift-off. When the reattachment took place, the bubble lifetime was substantially elongated since the bubbles slid up the vertical heated surface for a long distance after the reattachment. It was concluded that in the atmospheric pressure conditions tested in this work, the bubble reattachment to the heated surface

was a key phenomenon to cause the sharp increase of the void fraction at the point of net vapor generation.

Observations in moderate pressure show that as bubbles nucleate on the heated surface, they depart from nucleation sites and slide on the heated surface. In the course of sliding, some bubbles grow and travel to the downstream flow and some bubbles collapse in subcooled liquid. Near the condition of ONB, because only few small bubbles nucleate on the heated surface, vaporization rates and therefore void fractions remain in low value. It is found that when the condition of OSV is reached, the vaporization rates vigorously increase while condensation rates remain low. The measurement results reveal that, the volume of the collapsing bubbles is a small fraction of whole bubbles volume, owing to their small size. In contrast, the production of few big sliding bubbles in a wide ranges of bubble size make the vigorous increase of vaporization rates, right after the condition of OSV. In following, it is revealed that the big sliding bubbles are mainly formed in the wake region of the preceding sliding bubbles. Therefore, the significant increase of the void fraction at OSV is contributed to the formation of big sliding bubbles which is induced by the wake-effect of the preceding sliding bubbles.

Finally, the influence of contact angle on bubble dynamics and void evolution is explored in visual investigation. Close to ONB condition, it is observed that bubble behavior is essentially different as surface contact angle is changed. Bubbles stick to nucleation site in hydrophobic surface, and they depart from nucleation site in hydrophilic surface. In hydrophobic surface, bubble departure as a preliminary triggering mechanism is observed at NVG condition. In atmospheric pressure condition, it is observed that in some nucleation sites bubble departure follows by bubble reattachment to contribute void fraction increase sharply when the condition of OSV reaches. In elevated pressure, bubble departure coincides with the wake-effect of the preceding sliding bubble to cause void fraction significantly increases at OSV.

## 論文審査の結果の要旨

強制対流サブクール沸騰においてボイド率分布を正確に予測することは、原子炉の中性子減速や燃焼度並びに沸騰流路の二相流不安定の評価に極めて重要である。本研究では高速度ビデオによる可視化によって強制対流サブクール沸騰における気泡のダイナミクスを研究したものである。試験部は垂直上向きの矩形流路であり、伝熱面には銅を用いた。主たる実験パラメータは圧力、質量流速、液のサブクール度、伝熱面の濡れ性である。原子炉における高い伝熱面温度と放射性照射環境を考慮して伝熱面の濡れ性としては小さい接触角のものを用いた。こうした伝熱面を用いて核沸騰開始点に近い低いボイド率条件で実験を行った。実験結果では沸騰核には気泡がとどまらないことが観察された。実験条件によって次の二つのタイプの気泡挙動が観察された。一つは気泡が伝熱面を離れてサブクール液中で凝縮により急速に崩壊するもの、もう一つは伝熱面にそって長距離滑りながら上昇するものである。気泡の伝熱面からの離脱は高い伝熱面過熱度においてのみ観察された。気泡の離脱と伝熱面を滑りながら上昇する現象の境界はヤコブ数によって決定された。濡れ性のよい伝熱面での気泡挙動の観察から気泡のダイナミクスを支配するメカニズムについて考察を行い、これに基づき低圧ならびに中程度圧力における実質的な蒸気生成位置を決定するモデルを開発した。

低圧でサブクール度が大きい場合には沸騰開始直後の状態においてすべての気泡は伝熱面を離脱して凝縮により消滅した。サブクール度が小さくなりいくつかの気泡が伝熱面に再付着するようになるまでボイド率は目立った上昇をしなかった。再付着が起こると気泡の存在時間は長くなり伝熱面に沿って長い距離滑りながら上昇するようになった。本研究におけるような大気圧に近い低い圧力では実質的な蒸気生成位置でのボイド率の急速な上昇は気泡の伝熱面への再付着によるものであることが明らかとなった。

中程度の圧力では沸騰核から発生した気泡は伝熱面に沿って滑りながら上昇した。その過程において一部の気泡は成長しつつ下流へ流れていき、一部の気泡はサブクール液中で消滅した。沸騰開始点直後では小さな気泡のみが伝熱面に発生しボイド率は小さいが、気泡が離脱して伝熱面を滑り始めると蒸発率は急激に大きくなり、大きな気泡がそれに先行する気泡の後流領域で成長し、ボイド率は急速に大きくなった。

伝熱面の濡れ性の影響については、沸騰開始点直後では、撥水性の伝熱面では気泡は気泡核に付着したままであるのに対し、親水性の伝熱面では気泡は気泡核から離脱した。この結果伝熱面の濡れ性は実質的な蒸気生成にも大きな影響を及

ばすことが明らかとなった。

以上のように、本論文は原子炉等の沸騰伝熱装置における強制対流サブクール沸騰のボイド率と気泡挙動を正確に予測する手法を確立するとともに、それに関連する種々の物理的な素過程を解明し、有用なモデルを提案している。この結果は基礎的な学術分野においても、また実際の機器への応用においても極めて有用なものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。