



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



核沸騰のデジタル・シミュレーション(第1報)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山岸, 英明, 花岡, 裕 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3569

核沸騰のデジタル・シミュレーション (第1報)

山岸英明・花岡 裕

Simulation Using Computer Model on the Nucleate Boiling Phenomenon (1)

Hideaki Yamagishi and Yutaka Hanaoka

Abstract

Many workers have offered various useful theoretical and experimental results in nucleate boiling study. It is seemed to be expected that these are more confirmed by the fact that nucleate boiling phenomenon can be simulated in arbitrary conditions. This paper is attempted to simulate nucleate boiling by computer model based on the results. Generally, nucleate boiling is successive of many linkage cycles, each cycle being composed of bubble generation-growth-departure-waiting-generation. Data obtained up to the present day by investigators have been applied to each stage. The effect of the separation on the thermal boundary layer by agitation of bubbles is neglected, and the modified Jacob's relation, $\overline{fd_0} = \text{constant}$, is applied to the check of present results, bar is meaning of ensemble mean over the boiling field.

Relatively increasing or decreasing heat flux, present value of the constant tends to deviate from the one by other investigators. Mainly it seemed to be questionable on the treatment of coalescence of growing bubbles and waiting period. Therefore, present simulation model is needed to refine.

1. 緒 言

固体壁を加熱面とし、これに接する液体への熱移動の問題は古くから多くの研究者によって究明の努力がなされてきている。特に熱伝達に大きな働きを持つ気ほうの主要な役割を演ずる核沸騰現象は日常生活に見られるなべやかんの水の沸騰という身近かなものから、ボイラの加熱管内の沸騰さらに原子炉の燃料棒による冷却水の加熱など非常に広範囲に見られる。この種の核沸騰の問題に限定しても、現在までに理論・実験両面から多くの積み重ねがなされ有益な情報が次々と得られている。しかしこの現象の詳細な観察によれば、気ほうの生成や挙動などの過程が規則的・不規則的に入りまじり、さらに場の条件によっても大きく左右されるために、その全体の振舞いを解析的・数値的に表現することは極めて困難である。また実験的な把握を試みてもそれ自体が容易ではなく、その最も大きな困難さは再現性に乏しいことがあげられる。したがって、従来からの解析は例えば気ほうの発生機構、生長機構など各過程についての単独の場合に関することが多く、また実験的にも大雑把にその影響因子を把え実験公式として整理せざるを得ない。

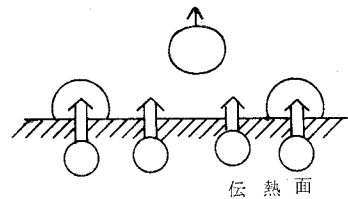
本報告はこのような観点から核沸騰熱伝達の現象を解析的・実験的に解く代りに、従来の研究により得られた諸結果を基礎に、デジタル計算機によるシミュレーション・モデルを作成し、様々な条件の下での机上実験により、巨視的な現象としての関係を把えようと試みたものである。具体的にはさしあたり基礎的な情報すなわち、発生気ほう数と過熱度、伝熱量と過熱度、発生気ほう数と伝熱量の関係などを求めた。

核沸騰現象に対してこのようなアプローチを行なったという報告は現在までのところ見受けられないが、基礎データの収集および原型となるモデルの作成¹⁰⁾、さらに気ほうの合体に対する考慮・気ほうの生長・休止時間などのより実験的なモデルへの改良^{11),12)}によりある程度の結果が得られた。

2. モデル化の手続き

まず最初にモデル化の手続きとしては気ほう発生にともなう伝熱過程を以下に記すような段階に分け、それぞれの過程について解析的表現を与え、それらを組み合わせる。

A. 第1図に示すように伝熱面からの熱量は気ほうに伝えられる部分(①)と温度境界層を通して水に伝えられる、すなわち対流による部分(②)の2つに分けて考える。ただし後者の場合について実際には気ほうの攪乱により温度境界層ははく離するが、それによって輸送される熱量は考えないことにする。



第1図

①については気ほうの体積を V_b とすれば、気ほう離脱にともない輸送される熱量 Q_b は次式から算出できる。

$$Q_b = V_b \rho_v L N \quad (1)$$

②については気ほうの存在しない領域であり次のように求められる。すなわち自然対流熱伝達の場合を想定するならば、その場合は N_u 数と R_a 数の2つの無次元数で整理できることが知られている。乱流領域に対してすなわち $2 \times 10^7 < R_a < 3 \times 10^{10}$ の範囲では N_u 数は(2)式で表わされる¹⁾。

$$N_u = C R_a^{1/3} \quad (2)$$

C は定数であり R_a 数を代入すれば(3)式が得られ、②の場合の伝熱量が計算される。

$$Q_c = C \rho C_p \left[\frac{\beta g (T_w - T_\infty)^4 a^2}{\nu} \right]^{1/3} \quad (3)$$

したがって全体の伝熱量 Q_T は①と②の和として算出され

$$Q_T = \frac{A_w}{A_T} Q_c + Q_b \quad (4)$$

が得られる。

B. 発生した気ほうが生長し、さらに離脱してある休止期間を経た後再び発生する1サイクルをつぎの4つの段階に分けて考察する。

a) 気ほう発生段階

気ほう発生は伝熱面上にあらかじめランダムに分布させた点(サイト)からある休止期間において発生するものとする。サイトの位置は一様乱数によって定める。

b) 気ほう生長段階

気ほうの生長速度は均一温度場を想定して得られたつぎの理論式を用いる²⁾。

$$d(t) = \left\{ \sqrt{\pi} a C_p \rho_l (T_w - T_\infty) / L \rho_v \right\} \sqrt{t} \quad (5)$$

なお、気ほうは伝熱面上では半球形を保ちながらその径を増すと仮定し、また近接の気ほうの取扱いについてはたがいに接触した時点で合体するものと考え、それに要する時間は無視する。

c) 気ほう離脱段階

離脱時の気ほう接触角とその時の気ほう体積の関係を第2図に示す。この図から平均的な接触角の値として $\varphi = 50^\circ$ を考えそれに対応する気ほう体積から離脱気ほう径の平均値を 2.6 mm と定めた。シミュレーションの場を伝熱面上に限ったので、離脱した後のその気ほうに関する情報は消えるものとしている。

d) 気ほう休止期間段階

気ほうが離脱後再発生するまでの時間を休止期間と呼ぶが、それは気ほうが発生して離脱するまでの時間の0.5倍ないし2.0倍の間に限定して一様乱数によって確率的に定める。

C. 気ほう発生サイクル f と離脱直径 d_0 の関係

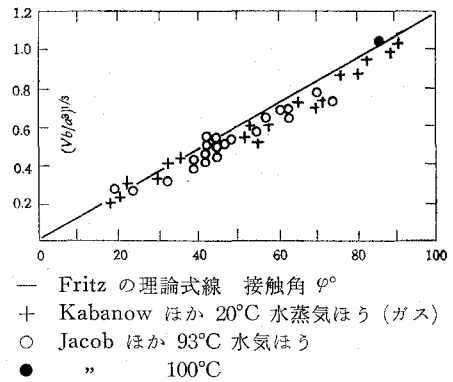
Jacob によって次式の関係が得られている³⁾。

$$f d_0 = \text{constant} \quad (6)$$

本報告では気ほうはあらかじめ設定されたサイトすべてから、ある確率で発生するものと考えているので、伝熱面上全体の平均値として次のようにかく張して表わす。すなわち

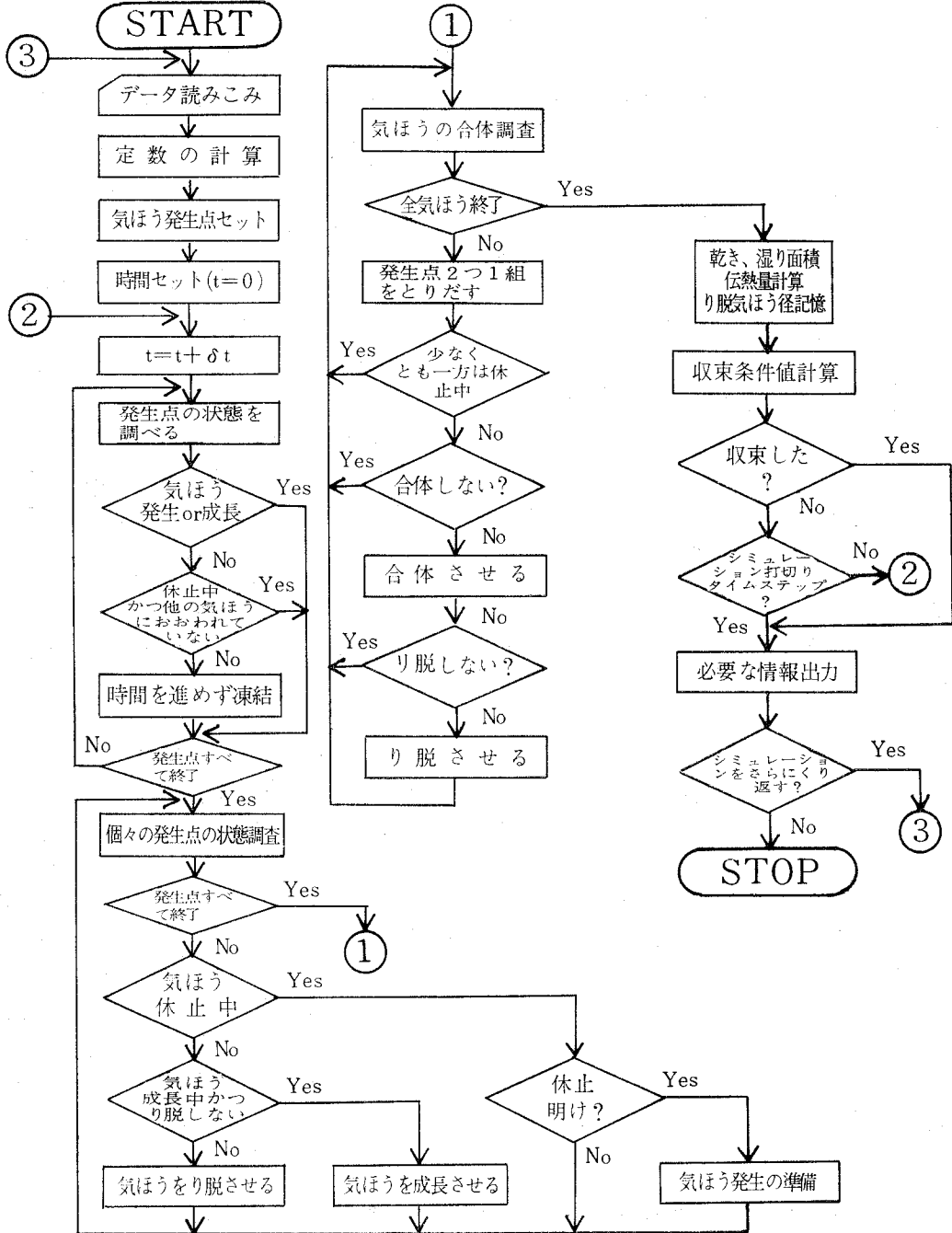
$$\overline{f d_0} = \text{constant} \quad (7)$$

定数の値は複合ほうの場合として $400 \text{ m/h}^{1/2}$ を用いて検討の対象とする。



第2図

核沸騰デジタル・シミュレーション
フロー・チャート



第 3 図

3. シミュレーションの実行および結果

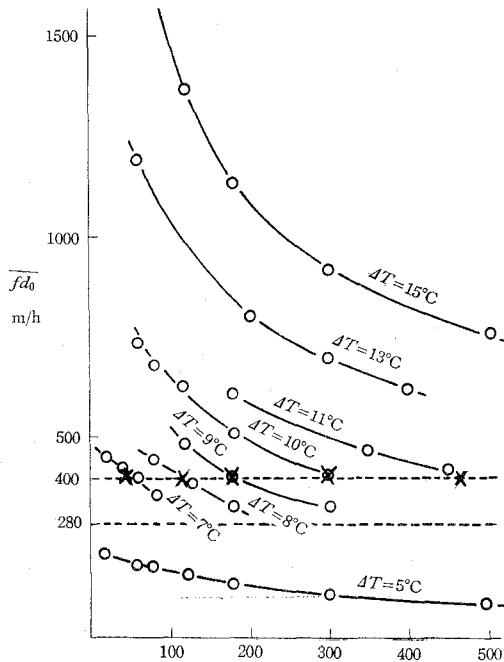
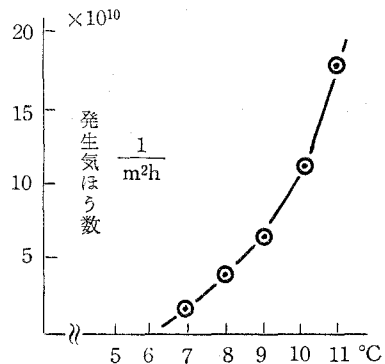
A. 実行条件

特定数のサイトを伝熱面上にランダムにはりつけ、個々のサイトは離脱気ほう径を正規分布に従うものと仮定し、乱数により定め対応させる。時刻零よりすべてのサイトいっせいに気ほうを成長させる。ある時間継続させると、合体や離脱が繰り返えされながら初期の不自然な状態の影響が消える。シミュレーションの手順を示す概略的なフローチャートを前ページ第3図に示す。

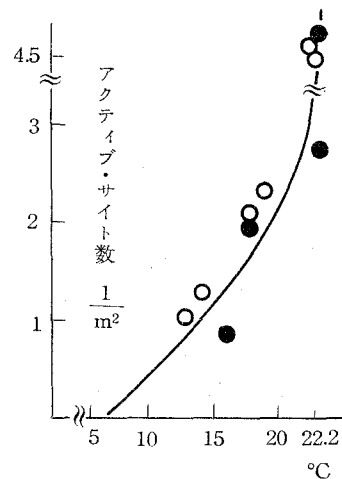
伝熱面を 20×20 mm の正方形としタイム・ステップを平均離脱半径 (1.3 mm) に達するまでの時間の $1/10$ 、離脱気ほう半径は平均値のまわりに 0.0002102 の分散 (半径 0.65 mm および 1.95 mm における気ほう数が平均値に対応する値の 5% 以下に相当) を有する正規分布で与え最大 1.95 mm, 最小 0.65 mm の範囲に限定している。打ち切りタイム・ステップ数は 100, 過熱度は $5 \sim 15^\circ\text{C}$ の範囲で、気ほう発生点 (サイト) の数は最小 20, 最大 500 である。液体は大気圧下の水を想定した。なお (3) 式の定数 C は 0.52^5 を選んだ。

B. 実行結果

第4図は $\overline{fd_0}$ と定数の関係を過熱度 ΔT をペ

第4図 気ほう発生点数と $\overline{fd_0}$ の関係

第5図 過熱度と離脱気ほう数の関係



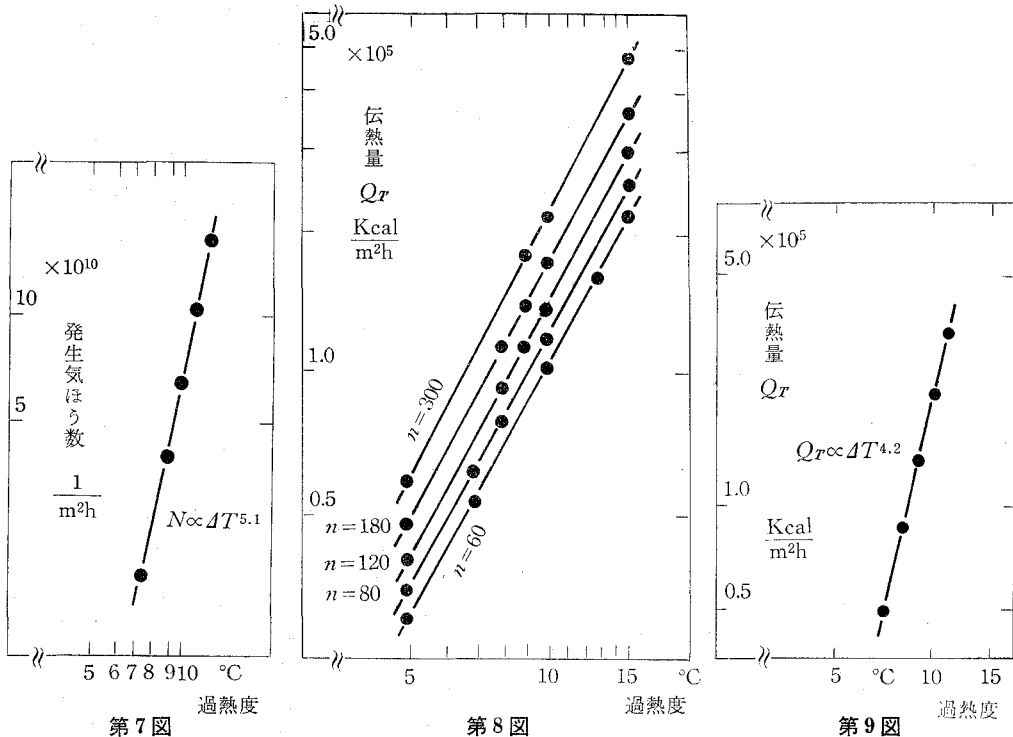
第6図 アクティブ・サイト数と過熱度の関係

ラメータに整理したものであり、破線はそれぞれ 280 m/h と 400 m/h の値を表わす。前者は単気ほうの場合について成立すると報告されており⁶⁾、また後者は複合ほうの場合に成り立つとされるが、本報告では合体気ほうが非常に多いことを考慮し、後者を妥当なものと仮定している。したがって、図中×印で示した交点における値が実際に意味を持つと考えられる。設定サイト数が多くなるにつれ定数は一定値に漸近する傾向を示し、また過熱度が大きい場合ほど気ほう発生数の増大は顕著である。第 5 図は×印における値をもとにして気ほう発生数と過熱度の関係を表わす。図より曲線を外挿していくと横軸（過熱度座標軸）に交わることが予想され、これはその交点における温度が気ほうを発生させるための最低の必要過熱度と考えられる。それを裏づける資料として参考のために、Griffith と Wallis の実験データより過熱度とアクティブサイト数の関係について求めた例を第 6 図に示す⁷⁾。上記 2 つのデータから最低過熱度が 6~7°C 附近にあると推察される。第 7 図は第 5 図を両対数グラフに表現し直したものであり、発生気ほう数 N と過熱度の関係が次式のように得られる。

$$N \propto \Delta T^m \tag{8}$$

したがって、その勾配から m の値を算出すれば 5.1 となる。

つぎに総伝熱量 Q_r と過熱度の関係について同様の考え方により整理した結果を第 8 図に示す。第 4 図における×印に対応した値のみについて図示したのが第 9 図であり、これにより



総伝熱量と過熱度の関係は次式で示されることがわかる。

$$Q_T \propto \Delta T^n \quad (9)$$

ここで n の値はその直線の勾配から 4.2 となり、一般に報告されている指数値 2.5~4⁹⁾ の間のほぼ上限附近にある。

(8), (9) 式より発生気ほう数 N と総伝熱量 Q_T の関係を求めれば次式のように表わされる。

$$Q_T \propto N^l \quad (10)$$

l の値は 1.2 と算出される。

4. 実行結果に対する検討

ここに得られた (8)(9)(10) 式の関係だけから、使用したモデルのよしあしを判断することは多少無理があると思われる。その最も大きい理由は (3) 式の定数 C の値は本報告で採用した値 0.52 の他に 0.14⁹⁾, 0.31⁹⁾ という値も報告されており、これら 3 つの値があまりにも広範囲にばらついているからである。さらに後者の定数の場合についても同様な実行結果を得る必要があると考える。

気ほうの運動による温度境界層への攪乱効果は伝熱量を飛躍的に増大させるが、これを無視しているため、過熱度と伝熱量の得られた結果は多少の疑問点が残る。(9) 式における n の値はこのことを考慮するならば、若干大きすぎるくらいが見られるが、他の要因も影響しているので、それらの関係については今後の課題としたい。一方 (8) 式の m の値は n の値よりも信頼できると思われる。なぜなら最低気ほう発生過熱度の値がこれまで報告されている値に近くまた気ほうの攪乱による影響は伝熱量には大きく現われるが、気ほうの発生にはそれほど大きく現われないと考えられるからである。

ここに得られた結果は、設定サイトの分布および気ほう発生、気ほう休止期間決定に用いた乱数が異なることによるバラツキを考慮していない。中心極限定理による結果のチェックはランニング回数が充分ではないので実行できなかったが、代りにここで得られた結果がどの程度の偏りになるかを判断するために、過熱度が 8°C、設定サイト数 80 の場合について離脱気ほう数と伝熱量の変動を調べた。その結果を第 1 表に示す。すなわちサイトの分布状態の相違による影響については 5 通りの分布状態を選び、表中の case 1~case 5 の欄により表わした。またそれぞれの分布状態の場合については試行回数によりそれぞれが持つ値の平均値に対する比を No. 1~5 の欄に記し、さらにそれらの平均値の全 case に対する平均値との比を Mean 欄に示した。したがってこの表から判断されるように分布状態の相違によるバラツキは一つの分布状態における場合の乱数を変化させた時のバラツキと同程度のゆらぎを示していることがわかる。気ほう発生数 N に関するゆらぎは伝熱量 Q_T の場合よりも大きい両者共ほとんど ±10% 以内に納まっている。以上のことから本報告の伝熱量および気ほう発生数の値は少な

第1表 乱数および発生点分布の相違によるバラツキ

Case \ No.	伝 熱 量 Q_r						気ほう発生数 N					
	1	2	3	4	5	Mean	1	2	3	4	5	Mean
1	1.066	1.008	0.999	0.972	1.014	1.008	1.047	0.053	0.993	1.006	1.001	0.983
2	1.000	0.982	0.992	1.003	1.022	0.984	0.984	0.970	0.979	0.071	0.996	0.944
3	1.004	0.995	0.999	1.005	0.996	0.993	1.121	0.954	1.029	0.947	0.950	0.990
4	0.997	1.003	1.019	1.005	0.996	1.006	1.059	1.114	0.950	0.947	0.930	1.043
5	1.007	1.001	0.990	1.000	1.009	1.009	0.985	1.029	1.029	1.207	0.911	1.040

$\Delta T = 8^\circ\text{C}$ $n = 80$

くともこの程度の偏りが存在すると考えられる。

5. モデルに対する検討

前述の気ほうによる攪乱効果を見無視していることや合体および離脱に要する時間を無視していること、さらには気ほう形状、離脱気ほう径分布の設定や発生状態などについて、かなり現実と異なるが、これらの影響については今後改善すべき課題と考える。沸騰の場合は主流・伴流などにより不規則な流れを伴ない、これが気ほうに作用することにより、またさらに表面の状態が不規則であれば離脱気ほう径や休止期間などはある特性を持つ分布状態になることが予想される。したがってモデル作成に際してこれらをいかに考慮するか、あるいはどの程度模擬できるかが問題となろう。

6. 記号表

A_w : ぬれ面積 (m^2)	Q_r : 総伝熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$)
A_r : 伝熱面総面積 (m^2)	T_w : 伝熱面温度 ($^\circ\text{C}$)
C : 定数	T_∞ : 飽和水温度 ($^\circ\text{C}$)
L : 水の蒸発潜熱 (kcal/kg)	ΔT : $T_w - T_\infty$
N : 発生気ほう数 ($1/\text{m}^2\text{h}$)	V_b : 気ほう体積 (m^3)
Q_b : 気ほうの運ぶ熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$)	A : 伝熱面面積 (m^2) $D = \sqrt{A}$
Q_c : 対流による伝熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$)	α : 熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)
a : 温度伝導率 (m^2/h)	β : 熱膨張率
C_p : 水の比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	γ : 水の動粘性係数 (m^2/h)
g : 重力加速度 (m/h^2)	ρ_l : 水の密度 (kg/m^3)
t : 時間 (h)	ρ_v : 蒸気の密度 (kg/m^3)
d : 気ほう直径 (m)	\overline{fd}_0 : Jacob 定数 (m/h)

$$f: \text{気泡発生サイクル (1/h)} \quad Ra: \text{レーリー数 } \beta g(T_w - T_\infty) D^3 / \alpha \nu$$

$$Nu: \text{ヌッセルト数 } \alpha D / \gamma C_p a$$

7. む す び

今後さらにより広範囲の条件のもとでシミュレーションを繰り返しモデルの向上をはかる予定であり、さしあたり気ほう攪乱の影響をできるだけ実際に近い形で考慮することを考えている。

本報告を終るにあたってご指導くださった北大工学部の斉藤 武教授ならびに谷口 博助教授に厚く感謝申し上げます。またデータの集収・結果の解析の際に本学卒業生の目黒憲一・山田 登の両君(昭和47年卒)、菊地友則・佐々木健雄の両君(昭和48年卒)の助力があったことならびに一場・奥田両教授はじめ本学機械工学科流体工学研究室の各氏のご協力により本報告がなされたことを附記し、心から謝意を表します。さらにシミュレーション実行の際には牧 栄一君はじめ本学電算室の方々ならびに北大大型計算機センターの方々のご協力を得、合わせて深く感謝の意を表します。

(昭和48年5月21日受理)

文 献

- 1) 甲藤好郎: 伝熱概数(昭42).
- 2) H. K. Forster and N. Zuber: J. Appl. Phys., **25**, 474 (1954).
- 3) M. Jacob: Heat Transfer, 1 (1949).
- 4) 西川・ほか: 機械学会論文集, **18-67**, 47, 53 (昭27).
- 5) 宮内・矢木: 水平伝熱面における核沸騰伝熱, 化学工学, **25-I**, 18 (昭36).
- 6) 日本機械学会編: 沸騰熱伝達(昭43).
- 7) P. Griffith and J. D. Wallis: Chem. Engng. Progr. Symp. Ser., **30-56**, 49 (1960).
- 8) C. Y. Han and P. Griffith: The Mechanics of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling. MIT Rep. No. 19 (1968-2).
- 9) N. Zuber: Int. J. Heat Mass Transfer. **6**, 53 (1963).
- 10) 目黒憲一・山田 登: 核沸騰現象に関するデジタル・シミュレーション. 室蘭工大, 昭和46年度卒業論文.
- 11) 菊地友則・佐々木健雄: 核沸騰のデジタル・シミュレーション. 室蘭工大, 昭和47年度卒業論文.
- 12) 山岸英明・花岡 裕: 第10回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 81 (1973-5).