

スーパーコンピュータによる物理現象シミュレーション

発電プラント熱交換器内の気液二相流解析

Analysis of a Gas-Liquid Two-Phase Flow in the Heat Exchanger of Power Plants

発電プラントの熱効率を向上させるため、タービン抽気蒸気や高温ドレン水によって給水を加熱する熱交換器が設けられている。ドレン水には蒸気が含まれ、気体と液体が混合した気液二相流となる。気液二相流で、気体と液体は密度が異なるために互いに異なる運動をする。そこで、気液の運動を別個に取り扱う二流体モデルによる新しいスーパーコンピュータ用三次元二相流解析手法を開発した。従来の差分法と異なり、気液の空間分布と速度を同じ位置で計算するので、気液の空間分布が気液間速度差に及ぼす影響を正確に評価することができる。熱交換器へのドレン水の流入挙動を解析し、水は流動抵抗の大きい領域の上流に蓄積される傾向を明らかにした。

湊 明彦* Akihiko Minato
村田重人** Shigeto Murata
中尾俊次** Toshitsugu Nakao
住谷吉男*** Yoshio Sumiya

1 緒 言

発電プラントでは、図1に示すように、ボイラまたは原子炉で発生した蒸気を使ってタービンを回転させ、発電機を駆動している。タービンから出た蒸気を凝縮器で水に戻し、ボイラまたは原子炉で再び加熱して蒸気を発生させる。凝縮器を出た水(給水)は低温である。そこで、熱交換器を設けて、タービンから引き出した蒸気(抽気蒸気)によって給水を加熱し、熱効率を向上させている。熱交換器は数段設けられており、後段の熱交換器の高温ドレン水も、前段の熱交換器の加熱源として利用される。ドレン水は、より低圧の熱交換器に流入するので、減圧沸騰によって発生した蒸気が同伴され、水と蒸気の混じった混合流(気液二相流)となる。その流動状態は熱交換器の熱伝達特性に大きく影響する。

気液二相流は、原子炉、ボイラ、化学プラント、自動車の燃料供給系、冷蔵庫・空調機の冷媒系に見られ、気液の空間分布は機器の性能に影響する。そこで、熱交換器やこれらの機器を効率的に開発するため、気液の空間分布を高精度で予測できる三次元解析法の確立が望まれている。

気体と液体は密度比が数十から数千と大きく、重力や慣性の効果によって速度が異なる。この速度差は気液の空間分布と互いに影響するため、数値計算が不安定になりやすい。このため、気体と液体が同じ速度であると仮定する均質モデル、気体と液体の速度差を固定するスリップモデルが多く利用されてきたが、気液の速度差が小さい場合や準定常流れの範囲

に適用が限られていた。

最近、気体と液体の運動を互いに独立に計算する二流体モデルによる二相流解析が行われるようになってきたが、現在のところ一次元解析が主流である。これまでに開発された三

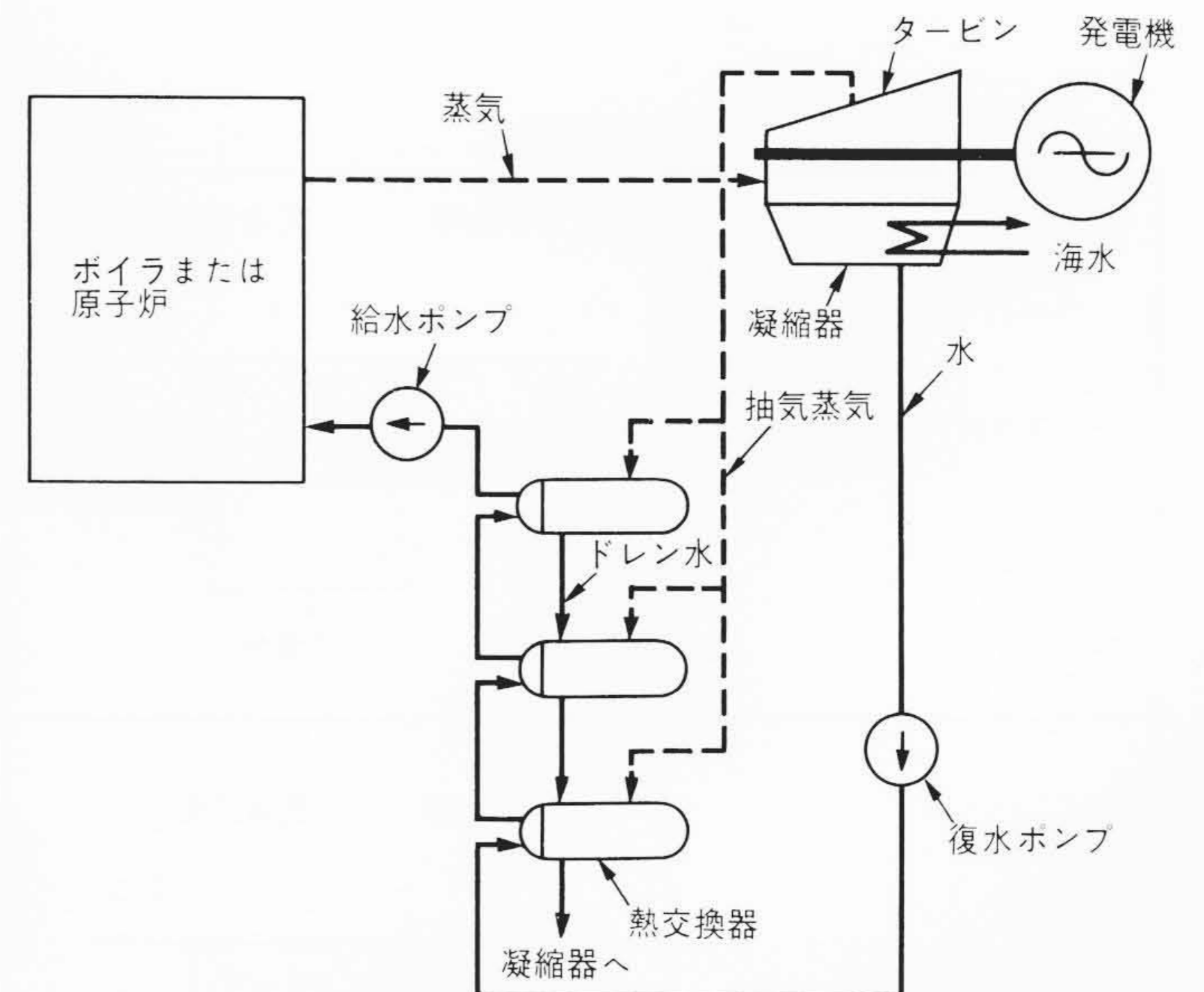


図1 発電プラントの系統図 ボイラや原子炉で発生した熱を用いて水を沸騰させる。発生した蒸気を使ってタービンを回転し、発電機を駆動する。凝縮器を出た水(給水)をタービンからの抽気と高温ドレン水によって加熱し、熱効率を向上させている。

* 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士 ** 日立製作所 エネルギー研究所 *** 日立製作所 日立工場

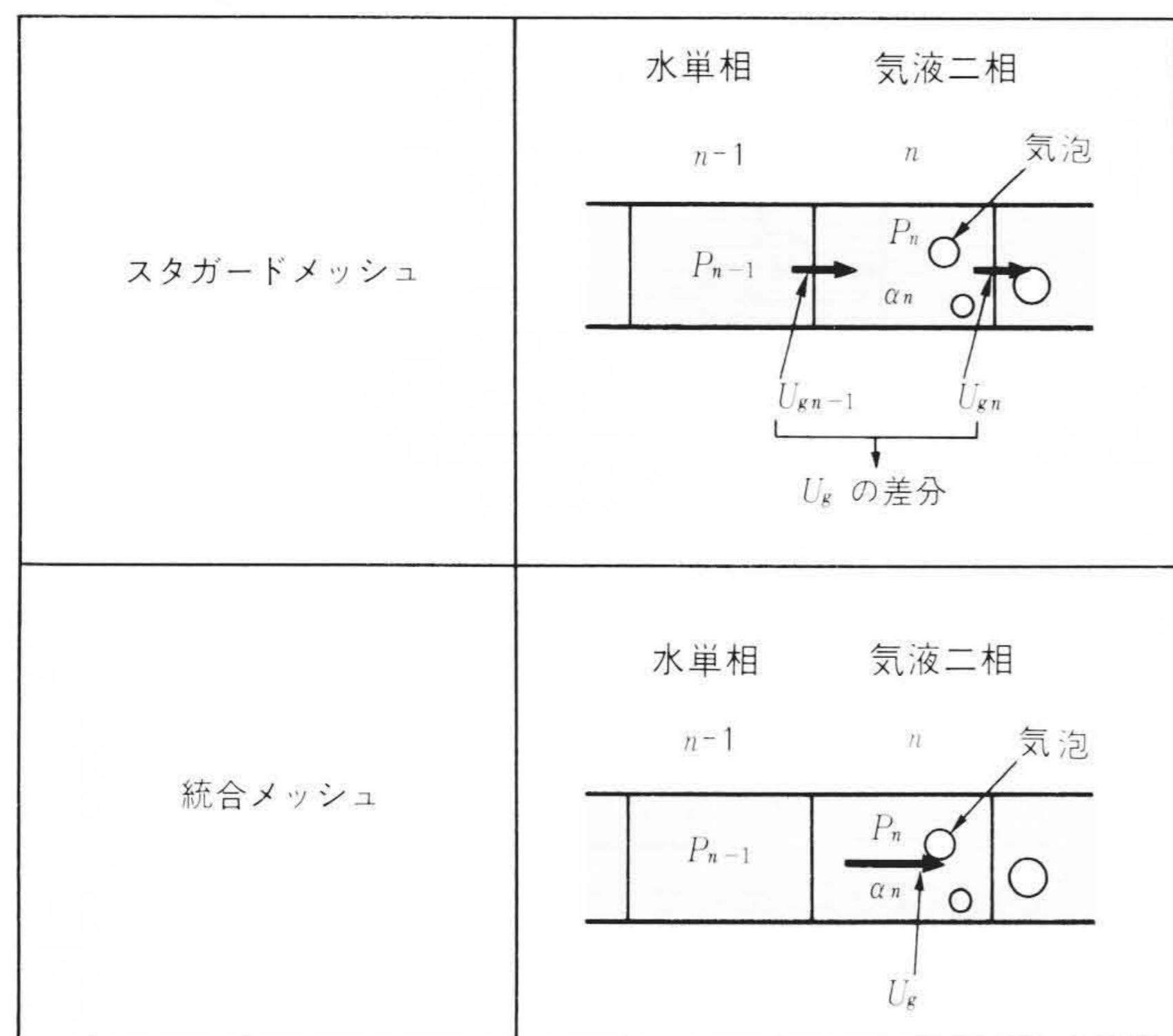
次元解析プログラムは、TRACプログラム¹⁾に代表されるように、大型容器内の平均的な流れの予測を目的として開発されているので、機器の特性を支配する二相流の局所的な挙動の解析には適用が困難であった。

以下、従来の二流体モデルによる気液二相流数値計算の問題点と、スーパーコンピュータの高速計算機能を活用した新しい数値計算法を説明し、さらにこの数値計算法を熱交換器内の気液二相流挙動解析に応用した結果について述べる。

2 三次元気液二相流解析手法の開発

スーパーコンピュータの開発により、最近の流体数値計算技術の進歩は目覚ましいが、その対象の大部分は気体または液体だけ存在する单相流の分野に限られている。单相流解析の分野では、MAC(Marker and Cell)法²⁾を発展させた計算法が主流である。この計算法では、**図2**に示すように、圧力と流速の計算を異なる位置で計算するスタガードメッシュを用いた差分法を採用している。二流体モデルによる気液二相流解析の分野でも、この手法を踏襲していることが多いが、二流体モデルに適用した場合、スタガードメッシュと差分法にはいろいろな問題が発生する。

水を部分的に加熱して沸騰させたとき、**図2**に示すような水单相領域と気液二相領域の境界が発生する。この境界を挟む範囲で気体速度の差分計算は、一方に気体が存在しないので不可能である。一般には水单相の領域でも、微量の気体が存在すると仮定して、仮想的な気体運動を計算している。



注：記号説明 n (メッシュ番号), α (ボイド率), P (圧力), U_k (気体速度)

図2 スタガードメッシュと統合メッシュ 従来主流であったスタガードメッシュでは、蒸気流速とボイド率を異なる位置で計算するのに対して、ここで用いた統合メッシュでは同じ位置で計算される。

しかし、物理的に意味がない仮想気体の質量に解が依存するという問題点がある。

ボイド率(気体が占める体積比)は、気体と液体の摩擦と互いに影響するので、気液の運動に大きな効果を持っている。スタガードメッシュでは、ボイド率は圧力と同様に、流速とは異なる位置で計算される。隣り合うメッシュでボイド率の差が大きいとき、通常は両側のメッシュのボイド率の平均値を用いて気液の運動が計算される。このため、流速計算ではボイド率・圧力計算と異なる流動状態を想定していることになる。

以上のことから、二流体モデルによる気液二相流の解析では、差分計算を用いず、またボイド率と流速を同じ位置で与える統合メッシュによる計算が必要であることがわかる。二流体モデルの基礎式は、気体と液体の質量・三次元の運動量・エネルギーの保存と輸送に関する10個の連立微分方程式で構成される。差分計算を避けるため、この基礎式をメッシュ内で体積積分した式に基づく数値計算を行う。

この計算手順を**図3**に示す。メッシュに囲まれた領域をコントロールボリュームとし、その中の気体と液体をそれぞれ1個の粒子と考える。粒子に働く力は、圧力こう配、重力、流体の摩擦力である。これらの力による気液の粒子の運動を、ニュートンの運動方程式を用いて解くことができる。コントロールボリューム境界を横切って、隣接するコントロールボリュームに移動した質量から、それに伴う運動量とエネルギーの輸送を計算する。タイムステップ Δt の間の各コントロー

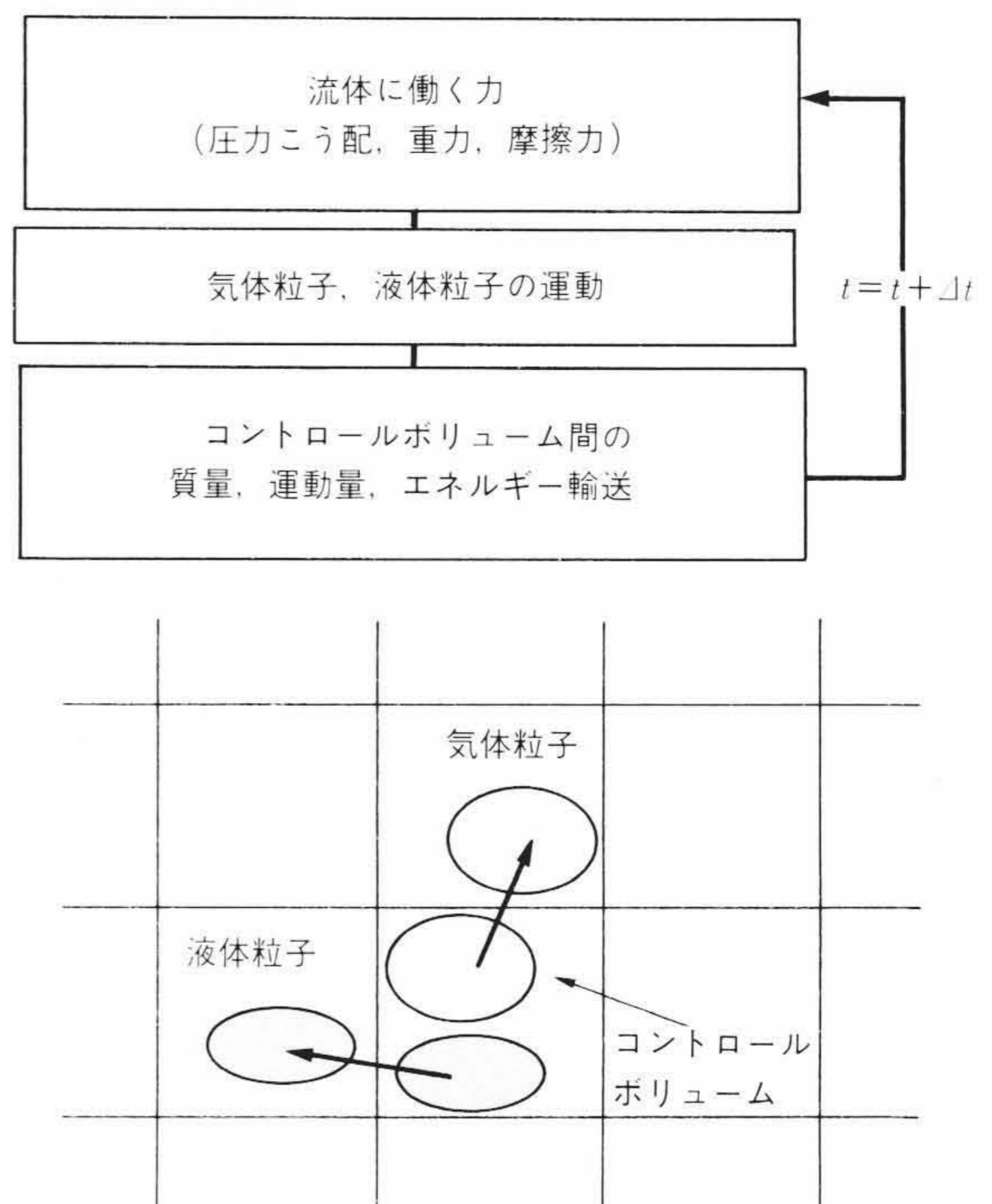


図3 この計算法の手順 気体と液体をそれぞれ粒子と考える運動を計算し、メッシュ間の質量・運動量・エネルギー輸送を求める。

ルボリューム内の質量・運動量・エネルギーの変化から圧力、ボイド率、気液流速の変化を求めることができる。この計算では、流速の計算値は圧力・ボイド率の計算値と同様にコントロールボリュームの平均値であり、同じ位置(コントロールボリュームの中心)で与えられるので、統合メッシュを用いていることになる。この計算法を用いて、二次元および三次元二相流解析プログラムを開発した^{3),4)}。

管群のような内部構造があるとき、流路形態にそって小さいメッシュを多数配置すると、計算時間と記憶容量が多く必要になる問題がある。機器特性の解析には、部分的な流れの計算は必ずしも必要ではなく、平均的な流動挙動の解析で十分である場合が多い。このため、比較的大きい領域で平均的な流路面積と流動抵抗を考慮した解析ができるポーラスメディア(多孔質)近似を採用し、計算時間の節約を図った。

二流体モデルは、従来の均質モデルやスリップモデルと比べて、重力や慣性効果による気体と液体の運動の違いを計算できる点に特徴がある。ここではテスト計算として、慣性効果の影響が顕著である、水平流路から垂直流路に接続するエルボ部の二相流の運動を計算した。水の流速分布と水体积比

の計算結果を図4に示す。ドットの密度の大きい領域は、二相流中の水の割合が多いことを表している。流路幅は0.3 mであり、水平部の上部に蒸気が、下部に水が1.4 m/sの流速で流入する境界条件とした。全計算メッシュ数は192である。水の一部は前面の壁に衝突して上部に跳ね上がり、大部分は重力のため垂直流路に落下する。慣性効果によって、密度の大きい水は、水が衝突した垂直流路の壁に沿って落下する。この計算結果は実験で観察された流動状況と一致している。

3 熱交換器内ドレン水流入挙動の解析

熱交換器の胴体は、図5に示すように、横置きの円筒形状である。上部から高温の蒸気と水の二相流および抽気蒸気が流入し、伝熱管内を流れる低温の給水を加熱する。蒸気が凝縮して生じた水は、下部のドレン管から外部に導かれる。二相流と蒸気の入口には、流入の衝撃を緩和するために、穴あきバッフル板が設けられている。二相流と蒸気が伝熱管群に流入する挙動は熱交換器の特性に影響する。このため、図5の二点鎖線で示した上部空間での三次元流動解析を行った。伝熱管群とバッフル板の流路面積と流動抵抗は、ポーラスメ

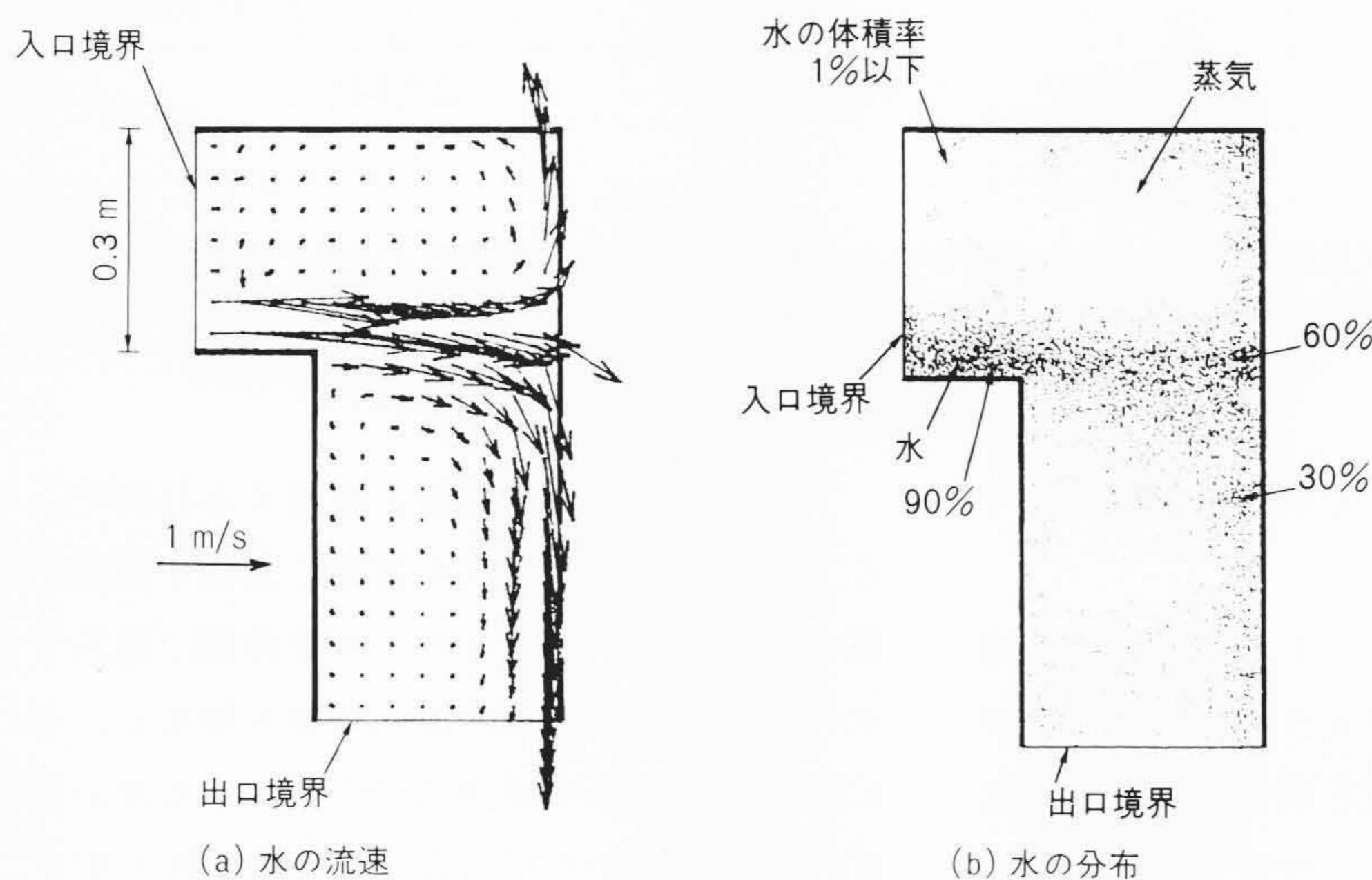


図4 エルボ管を流れる二相流の解析結果
水は垂直流路の壁に衝突し、一部は跳ね上がるが大部分の水は壁に沿って落下する。

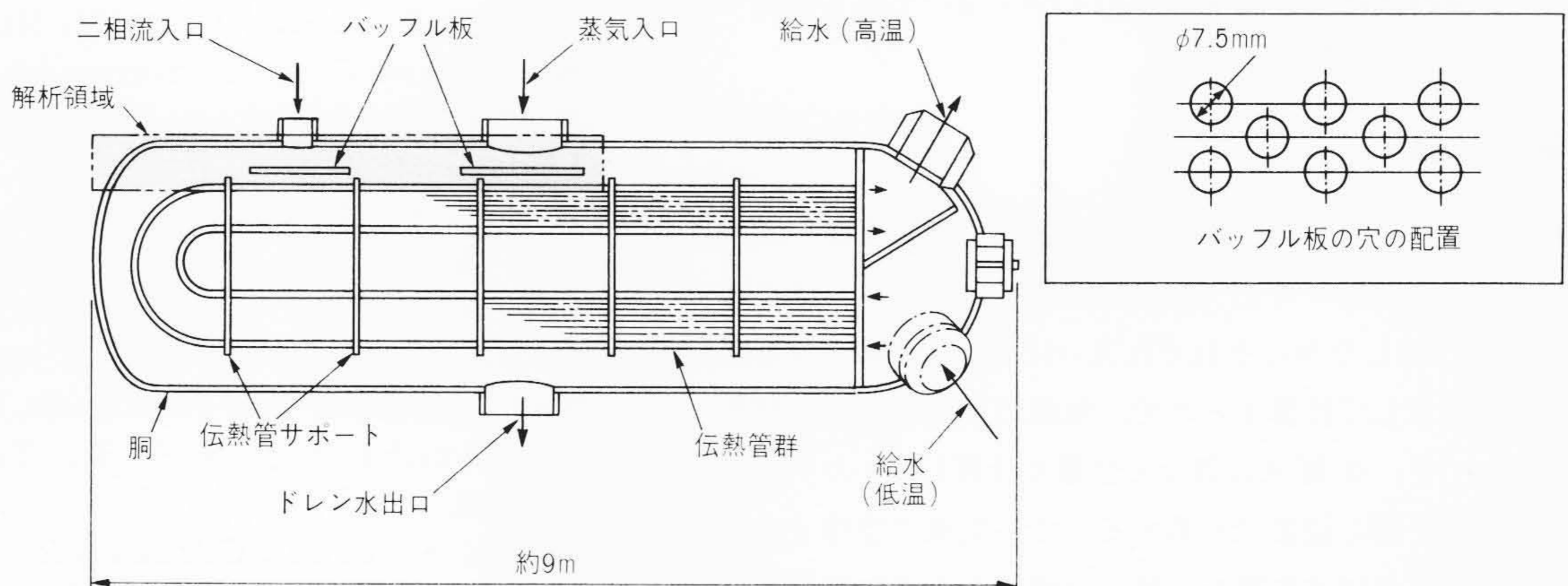
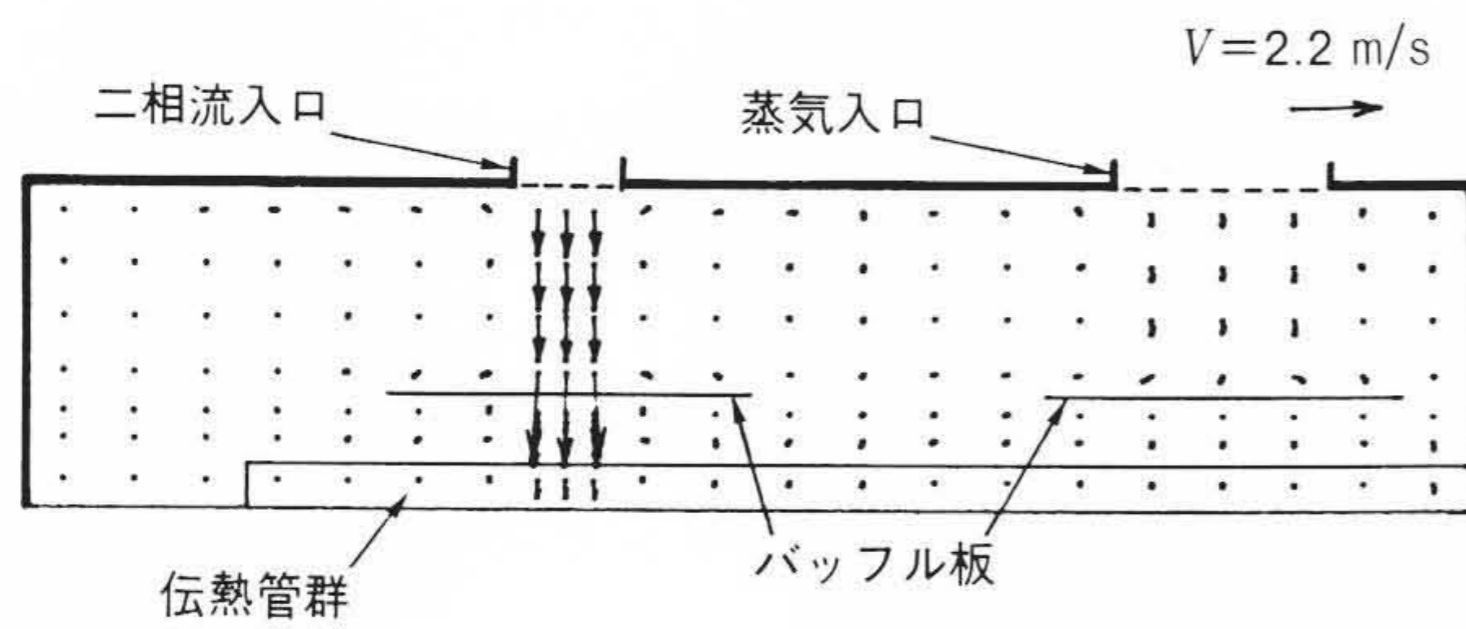
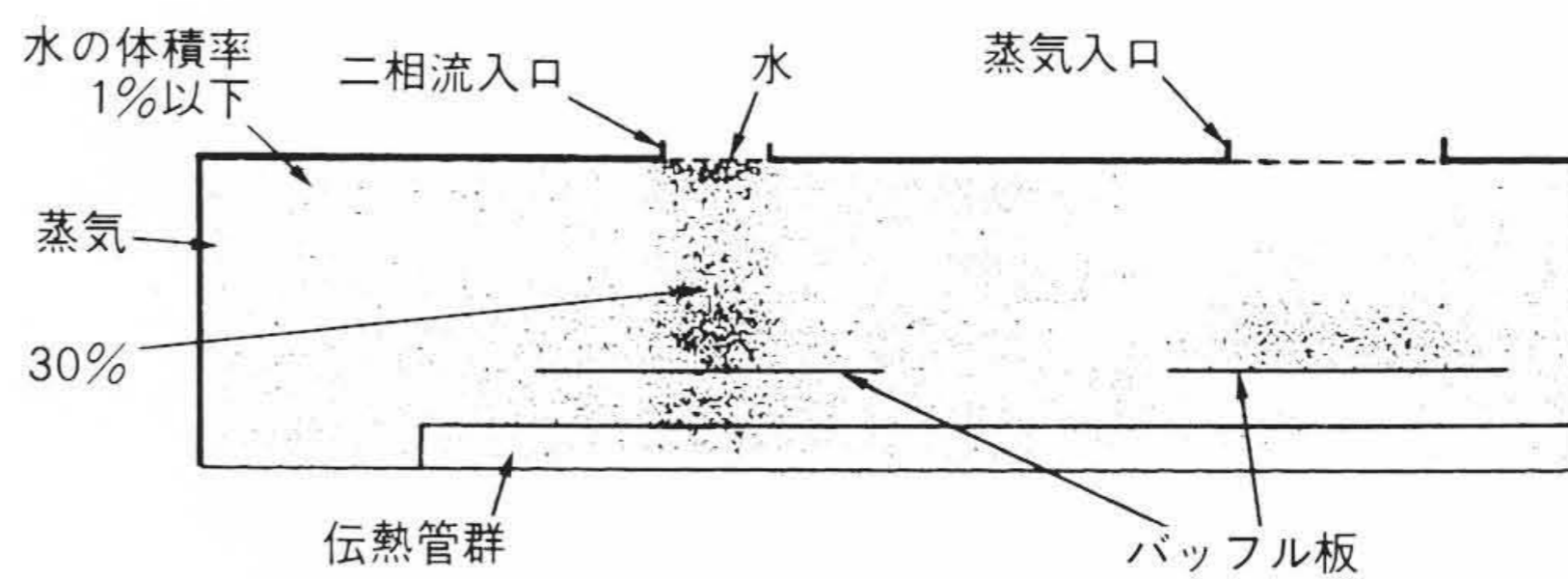


図5 熱交換器の構造 胴側を流れる高温の二相流と蒸気によって、管側を流れる低温の給水が加熱される。

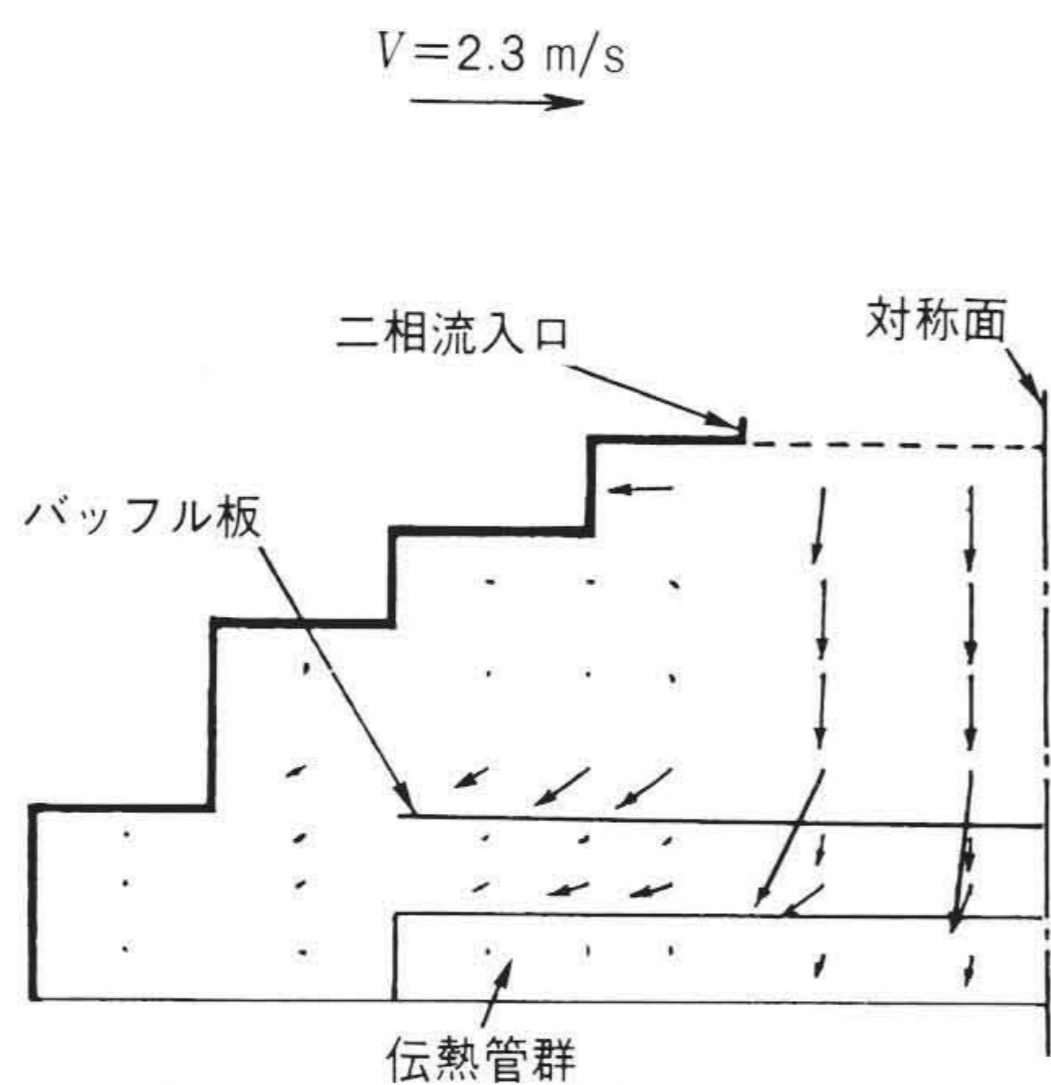


(a) 水の流速

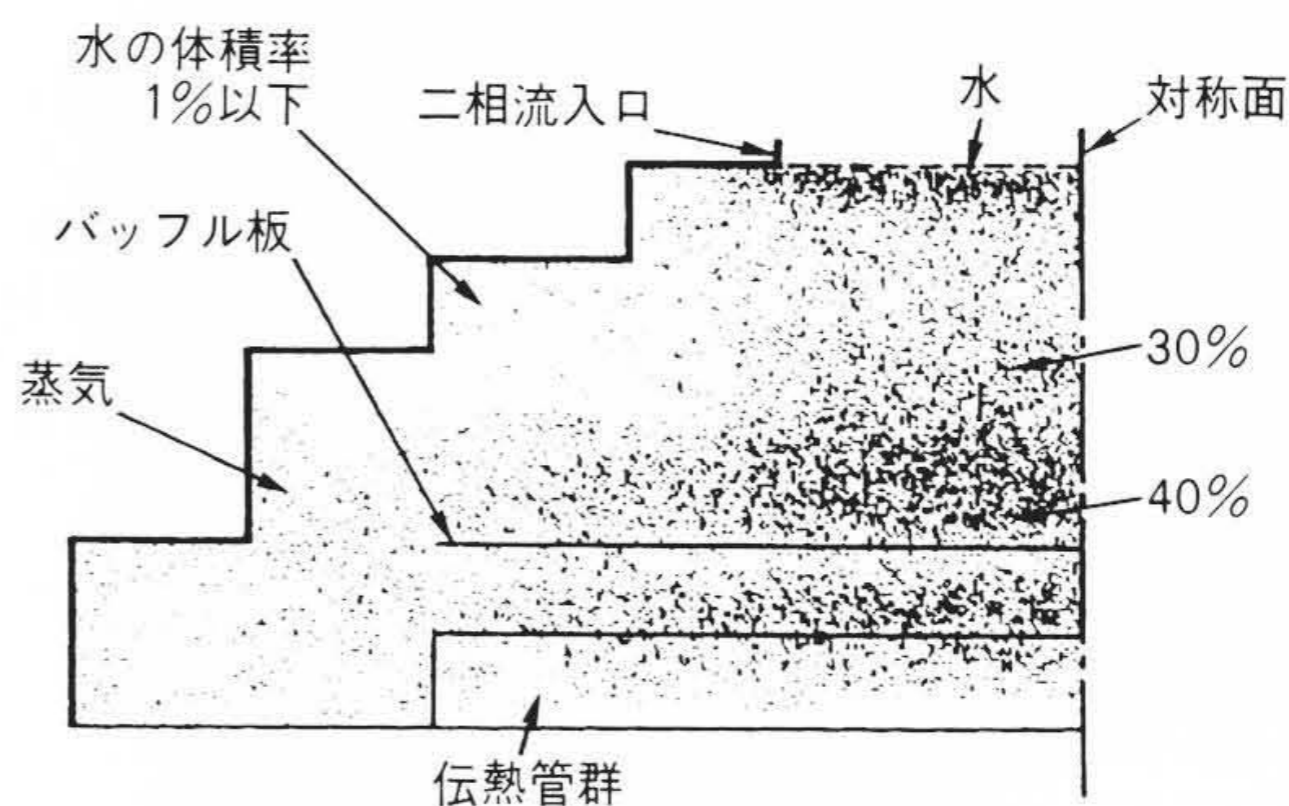


(b) 水の分布

図6 熱交換器内の二相流解析結果(横断面) 水は密度が大きいのでほぼ垂直に落下し、流動抵抗の大きいバッフル板と管群の上流側に蓄積される。



(a) 水の流速



(b) 水の分布

図7 熱交換器内の二相流解析結果(縦断面) 水は、流動抵抗の大きいバッフル板と管群の上流側で蓄積されると同時に周囲に広がる傾向がある。管群内では流動抵抗が大きいので、水の流速が小さくなる。

ディア近似で取り扱った。二相流の入口でボイド率は27%であり、全メッシュ数は1,078である。

水流速と水体積率の計算結果を図6に示す。水はほぼ垂直に落下し、伝熱管群の中では流動抵抗が大きいために流速が小さくなる。解析領域の断面での水流速と水体積率の計算結果を図7に示す。流動抵抗が大きいバッフル板と伝熱管群の上流側で、周囲にやや広がりながら蓄積されている挙動が見られる。計算時間は、HITAC S-820/60を用いて約7時間であった。

4 結 言

気液二相流での気体と液体の運動を別個に解析する、二流体モデルによる解析プログラムを開発した。このプログラムは、(1)相互作用しながらそれぞれ互いに異なる運動をする気体と液体を連立して計算するので、気液の複雑な挙動を解析することができ、(2)従来は異なる位置で計算していた気液の体積比と速度を同じ位置で計算するので、気液の空間分布が気液間速度差に及ぼす影響を正確に評価できる点に特徴がある。

プログラムの解析機能を確認する目的で、エルボ部を流れる二相流を解析し、水の運動に及ぼす慣性と重力の効果を計算できることがわかった。熱交換器に流入する高温の蒸気と水の二相流と蒸気流の流入挙動を解析し、水はバッフル板と伝熱管群の上部で周囲にやや広がりながら蓄積され、伝熱管群の中では流動抵抗によって流速が低下することがわかった。

参考文献

- 1) Liles, D. R., et al. : TRAC-PF1/MOD1, An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Thermal-Hydraulic Analysis, NUREG/CR-3658, LA-10157-MS(1986)
- 2) Harlow, F. H., et al. : Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, *Phys. Fluids*, 8(12), 2182(1965)
- 3) Minato, A., et al. : Numerical Analysis Method for Two-Dimensional Two-Fluid Model Using Control Volume Formulation, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 25(12), 901(1988)
- 4) Murata, S., et al. : Calculation for Three-Dimensional Structures of Two-Phase Flow in Enlarged Flow Area, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 26(9), 893(1989)