

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630043

研究課題名(和文)平均場運動論理論による高速移動気液界面における非定常熱・物質輸送現象の解明

研究課題名(英文) Study of unsteady heat and mass transfer at the strong non-equilibrium interface
ugin mean-field kinetic theory

研究代表者

渡部 正夫 (Watanabe, Masao)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30274484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、平均場運動論理論から得られるEnskog-Vlasov方程式を用いて、強い非平衡状態にある気液界面近傍での非定常熱・物質輸送現象を解明することである。運動論理論の数値解析手法の一つであるEV-DSMC法を用いて、強い非平衡状態の気液界面近傍の非定常熱・物質輸送現象の数値解析を行い、流体力学の枠組み内で使用可能な、気液界面近傍の熱・物質輸送を記述する境界条件を構築した。この境界条件を用いて相変化を含んだ気泡運動を表す数理モデルを提案し、物理過程を調査した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to examine a kinetic boundary condition that depends on liquid temperature for the Boltzmann equation in a vapor-liquid two-phase system during unsteady net evaporation/condensation in a strong non-equilibrium status. We carried out numerical simulations of the unsteady heat and mass transfer in the vicinity of interface at the strong non-equilibrium status by using EV-DSMC method; then, we constructed the kinetic boundary condition that can prescribe the heat and mass transfer in the vicinity of the interface in the frame work of the macroscopic fluid mechanics. We proposed a novel model of the bubble dynamics with phase change taken into consideration. We also investigated the bubble dynamics with phase change.

研究分野：工学

キーワード：流体 熱工学 統計力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 気泡が液相の大きな慣性により急激に圧縮され発生する崩壊現象では、局所的・瞬時的に数千度、数千気圧程度の超臨界状態となる特異な極限現象が生じる。この気泡崩壊現象を積極的にがん治療に応用することが試みられている。

(2) 体外から超音波等を病巣に向けて照射すると、気泡が存在する位置においてのみ、高エネルギーを取り出すことが可能となり、局所的・選択的な治療に行うことが可能となる。具体的には気泡崩壊時の衝撃波やジェットを病巣に治療成分を導入する駆動力に利用する技術や、高エネルギー密度を抗腫瘍薬剤の活性化に利用するなどの技術がある。

(2) 治療効果を向上させるためには、気泡崩壊時に生じる温度・圧力を正確に定量的に評価することが必要不可欠であるが、相変化現象は局所平衡が成立しないため本質的に非平衡現象であり、さらに気液界面が高速で移動している場合にはさらに強い非平衡状態となるため、気液界面近傍の熱・物質輸送現象の解析は大きな困難を伴う。

(4) 気泡崩壊現象は局所的かつ高速であるために、実験による定量的評価が非常に困難であり、実際にはどの程度の温度、圧力が発生するのかが未だ未解明である。

(5) 上述の学術的背景を踏まえて、平均場運動論理論から得られる Enskog-Vlasov 方程式と Sutherland ポテンシャルの組み合わせで、強い非平衡状態にある気液界面近傍での非定常熱・物質輸送現象を解析する手法を開発することを想起した。

(6) 得られた方程式を解き、強い非平衡状態にある気液界面近傍での非定常熱・物質輸送現象を明らかにする。さらに、強い非平衡状態の気液界面の非定常熱・物質輸送現象を表す状態量を関数群として記述し、流体力学解析に適用可能な境界条件を構築する。

(7) 強い非平衡が存在する気液混合界面における輸送現象の基礎的物理特性を解明するための新たな手法を提案するとともに、平均場運動論理論の可能性を開拓することができる。また、気液界面近傍での熱輸送現象を詳細に評価することが可能となり、気液二相流の新たな展開に寄与する。

(8) 液体側での熱輸送現象までを考慮に入れた、気液界面で満たされるべき熱・物質輸送の境界条件を提示することが可能となり、キャピテーション気泡力学において未解明の重要課題である、気泡崩壊時に生じる温度・圧力を正確に定量的に評価することが現

実のものとなる。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、平均場運動論理論から得られる Enskog-Vlasov 方程式を用いて、強い非平衡状態にある高速で移動する気液界面近傍での非定常熱・物質輸送現象を解明することである。

(2) 相変化現象は局所平衡が成立しないため、気液界面近傍は本質的には非平衡状態であるが、気液界面が高速で移動している場合には、さらに強い非平衡状態となる。局所平衡が仮定される流体力学は適用できず、気液界面近傍の輸送現象の解析は大きな困難を伴う。

(3) 本研究では、運動論理論を用いて強い非平衡状態にある気液界面近傍での熱・物質輸送現象を定量的に評価する。さらに、得られた結果を整理し関数群の形で記述することにより、局所平衡が仮定される流体力学の枠組み内で使用可能な、気液界面近傍の熱・物質輸送を記述する境界条件を構築する。

3. 研究の方法

(1) 強い非平衡状態の非定常気液界面近傍の非定常輸送現象を適切に表現する気体論境界条件の検討

① 運動論理論の数値解析手法の一つである EV-DSMC 法を用いて、強い非平衡状態の非定常気液界面近傍の非定常熱・物質輸送現象を記述する Enskog-Vlasov 方程式の数値解析手法を構築した。

② 本解析手法においては、方程式系を閉じるために、境界から蒸気相へ向う分子の速度分布関数 f_{out} を気液界面における気体論境界条件 (Kinetic boundary condition, 以下 KBC) として指定した。本研究では Sone-Onishi モデルを用いて、蒸発係数 a_e と凝縮係数 a_c を含む液体温度 T について等方的な速分布関数について考えた。

③ 蒸発係数と凝縮係数は、分子の質量流束を用いて定義した。本研究における分子の質量流束は図 1 に示すような気液界面近傍の分子運動 (蒸発・反射・凝縮) に起因する質量流束である。

④ 本研究においては、強い非平衡状態の非定常気液界面近傍の非定常輸送現象として、正味の蒸発・凝縮を伴う蒸気の流れを検討した。上記の KBC を指定することによって、正味の蒸発・凝縮を伴う蒸気の流れを、気液界面近傍の非平衡領域も含めて解析することが可能であるかを調査した。

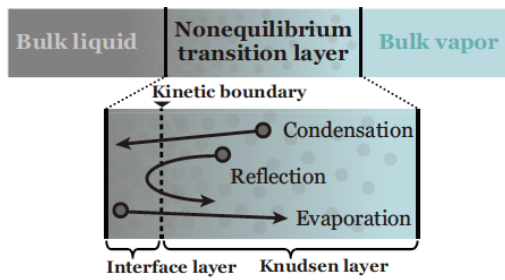


図1 気液界面近傍の分子運動と質量流束

⑤ 物理空間に1次元, 分子速度空間に3次元の計算空間を用いた. 分子は hard-sphere モデルを用い, 蒸気相とその凝縮相(液相)とから成る計算系を用いた. 二つの液相と, それらの液相に挟まれた領域に蒸気相が満たされた計算系(図2)を用い, 境界条件には周期境界条件を課した. 二つの液相にはそれぞれ異なる温度を設定し, 正味の蒸発・凝縮を伴う, 強い非平衡状態の非定常気液界面近傍の非定常輸送現象を実現した.

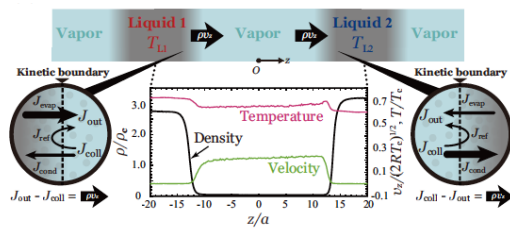


図2 計算系

⑥ EV-DSMC法を用いた数値解析結果からKBCを構成した. このKBCが強い非平衡状態の非定常気液界面近傍の非定常輸送現象を適切に表現可能かを検証した. 検証のために気相のみを解くことが可能な Boltzmann 方程式のモデルである ES-BGK モデルを用いた. ES-BGK モデルに KBC を課した数値解析結果が, 気相液相の両相を解くことが可能な EV-DSMC 法によって得られた解析結果と比較し, 検討した.

(2) 相変化を伴う気泡運動の解析

① 分子気体力学より得られた相変化を取り扱うことができる気液界面の境界条件を用いることで, 気泡内外の質量・運動量・エネルギー流束の保存を満たすように構築された気泡運動を表す数理モデルを提案し, 数値的に計算した結果を示す

② 無限に広がる液体中に, その蒸気を内部に含む単一の気泡が静止していると, 周囲液体と気泡内蒸気の圧力差により気泡が収縮または膨張する問題を考える. 気泡の中心は空間に固定されており, 並進運動はしないものとし, 気泡は常に球形であるとする. ま

た, 気泡内における圧力波の伝播は気泡壁の運動に比べ十分に速いとし, 気泡内部圧力は一様であるとする.

③ 図3に示すように, 気泡半径方向の一次元問題とする. 気泡壁における蒸発・凝縮に由来する蒸気の質量流束(正の値で蒸発, 負の値で凝縮を表す)を検討する. 気泡壁の速度と相変化を考慮することにより, 液体側気泡壁速度と蒸気側気泡壁速度をそれぞれ区別して定義する.

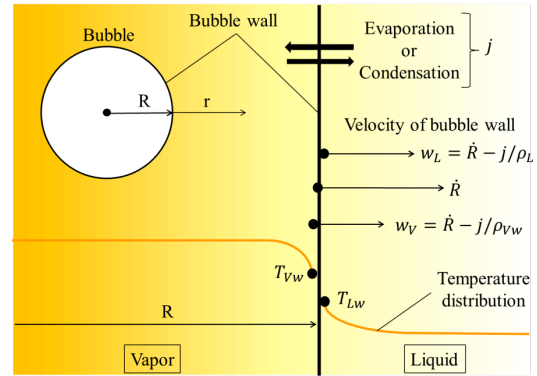


図3 解析モデルの概念図

④ 気泡壁の温度に関しても, 液体側気泡壁温度と蒸気側気泡壁温度を区別して, 気泡壁における温度の跳びを考慮する

⑤ 本研究で用いる方程式系は, 気泡半径, 圧力, 質量流束, 温度, 密度, 気泡壁速度, 気泡壁における温度勾配, 熱伝導率を含めた16個の変数を持ち, 12個の代数方程式と2個の常微分方程式, さらに気泡内外の温度場を求める積分方程式と積分微分方程式で構成されている. 本モデルでは, 空間に格子を設定し差分することで温度場を得るのではなく, 積分方程式と積分微分方程式を解くことにより温度場を求めることができる

⑥ 積分方程式は, 台形則による近似により求める. 被積分関数は, 特異性を有している. そのため変数変換を行い式中的の特異性を消去する Power-law singularity のある積分法を用いる. さらに離散化することにより, 数値的に積分を計算した.

4. 研究成果

(1) 強い非平衡状態の非定常気液界面近傍の非定常輸送現象を適切に表現する気体論境界条件の検討

① EV-DSMC法によって得られた結果と, 得られたKBCを課したES-BGK方程式によって得られた結果とを比較した. ES-BGK方程式に課したKBCは液体温度の時間発展を規定することによって得られる. 図4に蒸気速度分布と

温度分布との比較を示す。

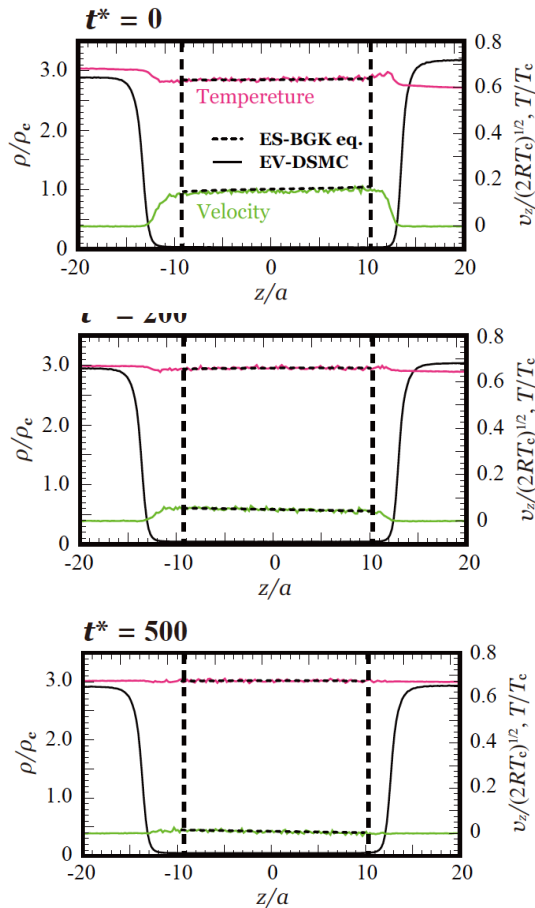


図4 速度分布と温度分布の比較

② 図4より両者は非常に良く一致することがわかる。これらの結果より、正味の蒸発・凝縮が存在する定常輸送現象を基に構築されたKBCが強い非平衡状態の非定常気液界面近傍の非定常輸送現象におけるマクロスケールの物理量を適切に表現することが可能であることがわかった。

③ 積分方程式は、台形則による近似により求める。被積分関数は、 s に対する特異性を有している。そこで本報では、変数変換を行い式中での特異性を消去する Power-law singularity のある積分法を用いる⁽⁷⁾。さらに離散化することにより、数値的に積分を計算する。

④ 図5に気泡半径の時間変化を示す。気泡が徐々に収縮し、その半径が初期気泡半径の1/20程度まで収縮し、最小半径に達した後に膨張に転じる。

⑤ 図6に気液界面での質量流束の時間変化を示す。縦軸の正の値が蒸発を表しており、負の値が凝縮を表している。気泡が収縮する過程では凝縮が生じ、膨張する過程では蒸発が生じる。気泡が収縮すると気泡内部の圧力

が上昇し、飽和蒸気圧以上になり凝縮が生じる。一方で、気泡が膨張すると気泡内部の圧力が低下し、蒸発が生じる

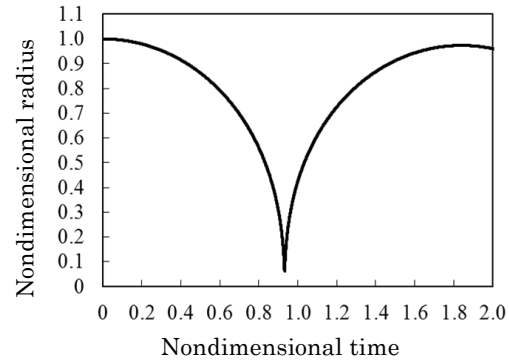


図5 気泡半径の時間変化

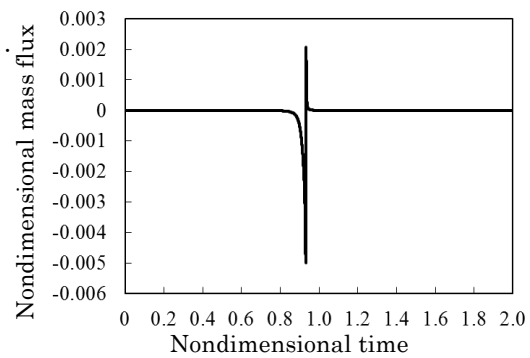


図6 気液界面近傍質量流束

⑥ 相変化を考慮した場合（4・1節と同様の条件）と相変化を考慮しない場合（ $j = 0$ ）を比較する。図7に気泡半径の時間変化を示す。図中の実線が相変化を考慮した場合であり、破線が相変化を考慮していない結果である。相変化を考慮した場合には、気泡が収縮する過程で凝縮が生じることにより、内部質量が気泡内部から液体に流出することから、相変化を考慮しない場合と比較して、気泡がより小さく、より速く収縮することが確認された。

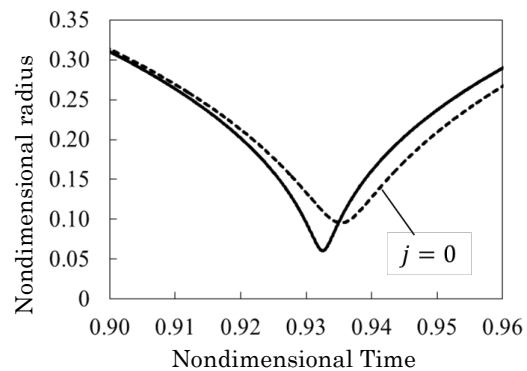


図7 気泡半径変化の比較

⑦ 図8に気泡内部圧力の比較を示す。相変

化がある場合、気泡半径は小さくその崩壊周期も短くなることから、気泡内部蒸気圧力は相変化が無い場合に比べて3.5倍程度高くなることが確認された。

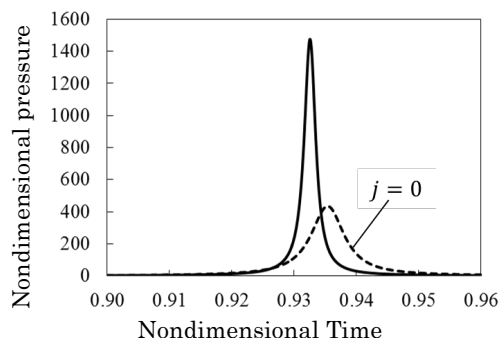


図8 圧力変化の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 今美沙希, 小林一道, 佐々木清文, 渡部正夫, 非平衡蒸発・凝縮下の気液界面における蒸発流束の評価, 混相流 29 493-500 (2016年3月) (査読有)
- ② Junya Kawahara, Masao Watanabe, Kazumichi Kobayashi, How do bubbles reduce the speed of sound in a bubbly liquid in a duct, Mechanical Engineering Letters, 1, 15-00464 (2015年12月) (査読有)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Misaki Kon, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe, Microscopic investigation of boundary condition at vapor-liquid interface during unsteady net evaporation and condensation, 2nd European Conference on Nonequilibrium Gas Flows, The Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands (2015年12月3日)
- ② 森川昌太郎, 神保佳典, 立藏祐樹, 小林一道, 渡部正夫, 分子気体力学に基づく気液界面の境界条件を適用した相変化を伴う気泡運動を表す数理モデルの数値計算, 日本機械学会2015年度年次大会, 北海道大学, 札幌 (2015年9月14日)
- ③ 今美沙希, 小林一道, 渡部正夫, 平均場運動論に基づく非平衡蒸発・凝縮下の気液界面における蒸発流束の評価, 日本混相流学会混相流シンポジウム2015, 高知工科大学, 加美 (2015年8月4日)

[その他]

ホームページ等

<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/flui>

d/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 正夫 (WATANABE MASAO)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 30274484

(2) 研究分担者

小林 一道 (KOBAYASHI KAZUMICHI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 80453140
矢口 久雄 (YAGUCHI HISAO)
群馬工業高等専門学校・機械工学科・講師
研究者番号: 20568521
藤井 宏之 (HIROYUKI FUJII)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 00632580