

科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年 5月26日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560207

研究課題名（和文） 自然対流が発生する二成分気体系安定密度成層内の分子拡散挙動の研究

研究課題名（英文） Study on molecular diffusion behavior in stratified stable density layer of two component gases with natural convection

研究代表者

武田 哲明（TAKEDA TETSUAKI）

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授

研究成果の概要（和文）：逆U字型平板流路の一方を加熱した流路における分子拡散と平板間に発生する自然対流による2成分気体混合過程は、局所的な自然対流の影響を大きく受け、気体混合時間は分子拡散の場合に比べて大きく短縮されること、特に密度差が小さい場合には、加熱量が小さく、例えば温度差が小さくとも気体混合過程は大きな影響を受けること、さらに一次元的な自然循環流の発生時間が短縮され、二成分気体の混合過程は複雑な現象の組合せになること等を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This study is to investigate an effect of natural convection on mixing processes by molecular diffusion in a vertical stable stratified fluid layer consisting of two component gases. The experiment has been performed regarding the combined phenomena of molecular diffusion and natural convection in two vertical slots which consists of the heated slot and the other side cooled slot. The density change of the gas mixture in the top of slot was obtained and the mixing process when the heavier gas ingress into the vertical slot filled with the lighter gas from the bottom side of the slot was discussed. It was found that natural convection affects an amount of transported gas more than molecular diffusion, even if a temperature difference is so small. The onset time of natural circulation becomes short by the localized natural convection; therefore the mixing process of two component gases becomes more complex phenomena by molecular diffusion, natural convection and natural circulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：熱工学（伝熱流動、物質移動）

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：分子拡散、自然対流、自然循環流、二成分気体、鉛直流体層

1. 研究開始当初の背景

密度の異なる二成分流体により鉛直流体層内に上部から下部に向かって密度が大きくなるような密度分布が形成され、安定成層

が形成される場合、流体混合は分子拡散に支配される場合が多い。流体が気体であるか液体であるかによって流体混合の速度は異なるが、一般的には二成分流体間の拡散係数の

違いによるものである。

鉛直な並行平板間に密度の異なる二成分流体により安定成層が形成されている場合、密度の小さい流体が充てんされている流体層上部の一方の壁面を加熱すると、流体層の上部には自然対流が発生する。このとき、流体層の下方から密度の大きい成分気体が分子拡散により移動する場合は、液体に比べて現象が複雑になること、温度差と成分気体の濃度差に起因した密度差による浮力とを分離することが容易でないこと等から分子拡散により成分気体が混合する過程に対し、局所的な自然対流がどのような影響を及ぼすのかについて定量的に調べた研究は報告者の知る限り行われていない。

熱対流が発生している系内に塩などの溶質が溶け込み、濃度勾配が生じて物質拡散と熱対流が重畳して発生する二重拡散対流と呼ばれる現象が知られている。これは一見、二成分気体系の分子拡散と対流が重畳して発生する現象に類似しているが、一般に二重拡散対流では溶質の移動に伴う密度変化は小さく無視できる場合が多いため、自然対流は主として温度場に依存し、一方、密度の異なる二成分気体系では成分気体の移動によっても密度分布が変化するため、自然対流は成分気体の濃度場にも依存する点が異なり、従来の数値解析でよく用いられるブジネスク近似が適用できないなどの点で現象の取り扱いも異なる。

実際の機器装置においては、例えば次世代の原子力システムの一つである高温ガス炉の事故時に密度の異なる気体混合現象が生じる。高温ガス炉では冷却材として化学的に安定な不活性気体であるヘリウムガスを用いているが、地震等により一次冷却系の配管が破断した場合、炉心内には密度の小さいヘリウムガスが、格納容器内にはヘリウムガスよりも密度の大きい空気が存在し、安定な密度成層が形成される。この時、炉心には高温の黒鉛構造物が多量に存在するため、もし仮に空気が浸入すると黒鉛酸化による炉心損傷や核分裂生成物の放出を引き起こす可能性がある。

これまでに、流路構成が一次元的である場合は、空気浸入の律速過程は主として分子拡散であり、空気浸入により発生するCO₂やCOの影響も小さいことが確認されている。しかしながら、事故後は時間の経過とともに炉心部の熱が、圧力容器に向かって半径方向に移動するため、炉心部と圧力容器との環状流路においては、炉心部側が高温、圧力容器側が低温となり、環状流路内にロールセル状の局所的な自然対流が発生すると考えられる。これまでの研究において局所的な自然対流の発生が予測される箇所では、分子拡散だけでなく、自然対流により空気の浸入と混合が促

進される可能性が指摘されている。分子拡散により空気が浸入することでレイリー数が増加して、発生している自然対流に影響を及ぼすことが予想されるけれども、この局所的な自然対流が空気浸入に与える影響は定量的に明らかとなっていない。

2. 研究の目的

一次元的な逆U字型の円管流路内に密度の小さいヘリウムガスを充てんし、一方の円管を加熱して逆U字型流路間に温度に起因する密度差を生じさせた場合、常温でヘリウムガスの約7倍密度が大きい窒素や空気は主として分子拡散により浸入し、局所的な自然対流が発生しない場合には、浸入過程の初期段階で密度差に伴い発生する浮力は流路下部に存在する成分気体の自然循環流を発生させるほど大きくないことが明らかとなっている。

そこで、本研究では、密度の小さい成分気体の自然対流が発生する鉛直流体層の下部から、密度の大きい成分気体が分子拡散により移動する場合の二成分気体挙動を明らかにすることを目的とした。具体的には、

- (1) 鉛直並行平板流路の一方の平板を加熱して、密度の小さい成分気体の自然対流を発生させ、鉛直流体層の下方から密度の大きい成分気体が分子拡散により移動する場合の二成分気体の混合挙動、
 - (2) 密度の大きい成分気体の移動が鉛直流体層内の自然対流パターンの変化に及ぼす影響、
 - (3) 二成分気体の混合挙動に対する成分気体密度差の影響、
 - (4) 逆U字型の流路に対して、流路全体にわたる一次元的な自然循環流を発生させる浮力が生じる場合に、局所的な自然対流の発生が密度の大きい成分気体の分子拡散による浸入過程の持続時間に及ぼす影響、
 - (5) 逆U字型流路に対して、密度の大きい成分気体の浸入を抑制するため、密度の小さい成分気体の注入が分子拡散による浸入過程の持続時間に及ぼす影響、
- を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

密度の小さい成分気体が充てんされた鉛直流体層内への密度の大きい成分気体の分子拡散による二成分気体混合挙動を明らかにするため、以下の現象に着目して系統的に研究を進めることとした。

まず、これまでに数多くの知見が得られている二次元的なロール状のセル対流を容易に発生させることができる鉛直並行平板流路を製作した。この実験装置を用いて、一方の平板を加熱して密度の小さい成分気体の自然対流を発生させ、その鉛直流体層内へ密

度の大きい成分気体を分子拡散により移動させ、分子拡散と自然対流が重畳した二成分気体系の混合挙動及び鉛直流体層内の自然対流パターンを調べた。次に、二成分気体の組合せを変えて、成分気体の密度差の影響を調べた。

さらに、逆U字型の流路を構成して、一次元的な自然循環流を発生させ得る体系において、流路全体にわたる非常に微弱な自然循環流と局所的な自然対流が重畳して発生する場合の分子拡散による密度の大きい気体の浸入過程と自然対流が与える影響を調べた。最後に、密度の大きい気体の浸入を抑制するため、逆U字型流路の頂部あるいは低温流路側に密度の小さい気体を注入し、分子拡散のみによる気体浸入の持続時間に与える影響についての検討を行った。

分子拡散と自然対流が重畳して発生する場合の二成分気体系混合挙動については、実験装置（鉛直並行平板逆U字型）を製作し、鉛直流体層内の気体混合実験を行う。具体的には、図1に示すような二つの鉛直並行平板で構成される鉛直流体層を上部で接続した実験装置を製作する。まず、密度の小さい気体が充てんされた鉛直並行平板間の流体層において、一方の鉛直平板を加熱して流体層内にロール状のセル対流を発生させ、下方から密度の大きい気体を分子拡散により浸入させた際に、自然対流が分子拡散による気体浸入に及ぼす影響を調べ、両平板を等温として自然対流を発生させない場合の挙動と比較検討する。このとき、流体層内の混合気体温度変動、各成分気体の濃度変化、混合気体の密度変化、平板温度も含めた流体層各部の温度を求めるとともに、時間的、空間的に変化する局所レイリー数と自然対流パターンの変化との関係等を調べる。

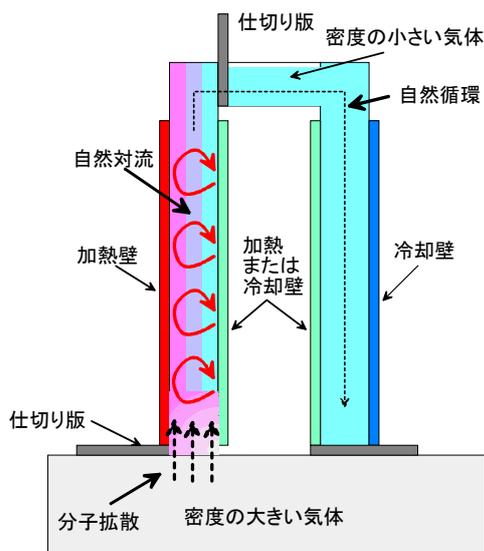


図1 鉛直平行平板流体層

一方、二成分気体系混合挙動の解析については、汎用の三次元熱流動解析コードを用いて、本実験体系における密度の異なる二成分気体の分子拡散と自然対流による気体混合挙動を再現し、実験結果と比較する。また、密度の異なる成分気体が分子拡散により移動することによる混合気体密度変化が、単成分気体の自然対流パターンに及ぼす影響について解析的検討を行う。

成分気体の密度差の影響では、二成分気体の密度差を変えた場合について、(1) ヘリウムガス/ネオンガス、(2) ヘリウムガス/窒素、(3) ヘリウムガス/アルゴンガス、(4) ネオンガス/窒素、(5) ネオンガス/アルゴンガス、(6) 窒素/アルゴンガスの六種類の組合せに関して実験を行い、密度の大きい成分気体の移動・混合挙動に対する密度差の影響を調べる。

一次元的な自然循環流と局所的な自然対流が逆U字型流路内への気体浸入に及ぼす影響については、鉛直並行平板で構成される二つの鉛直流体層を頂部で接続して逆U字型の流路を構成し、一方の流路の片方の鉛直平板のみを加熱して、局所的な自然対流を発生させ、さらに、流路全体にわたって非常に微弱な一次元的な自然循環流も発生する場合の密度の大きい成分気体の浸入挙動を調べ、分子拡散による移動過程、浸入挙動及び浸入量に対する一次元的な自然循環流と局所的な自然対流の影響を明らかにする。

4. 研究成果

2008年度は鉛直平行平板逆U字型実験装置を製作した。実験装置を図2に示す。これと並行して、密度の小さい気体が充てんされた鉛直並行平板間の流体層において、一方の平板を加熱して流体層内にセル対流を発生させ、下方から密度の大きい気体が浸入する際に、自然対流が分子拡散による気体浸入に及ぼす影響を評価するための温度の異なる鉛直平板間の自然対流に関する予備解析を行った。

実験装置は200mm×500mm×20mmの鉛直流体層を平行に並べて流体層の頂部で接続したものである。加熱流路側の加熱壁、冷却壁は、ともに厚さ5mmの銅製平板であり、加熱、冷却壁、および流体層内の温度を熱電対で測定し、気体密度は超音波を用いた音速計により濃度を測定することができる。

解析には汎用の3次元熱流動数値解析コードを用いて、本実験体系におけるグラスホフ数と自然対流パターンの変化との関係を調べるため、鉛直流体層内の単成分気体に関する自然対流の解析を行い、これまでに行われた自然対流の実験結果と比較した。さらに、汎用の3次元熱流動数値解析コードにより行った事前解析の結果を、代表長を流体層幅と

したグラスホフ数が53700の場合の窒素ガスの気体温度分布を求め、グラスホフ数が同程度の大きさである41800の場合の実験結果と比較した。その結果、窒素ガスの場合は流体層の上下端で温度分布が歪み、遷移領域での温度分布となることを確認した。この解析結果の一例を図3に示す。

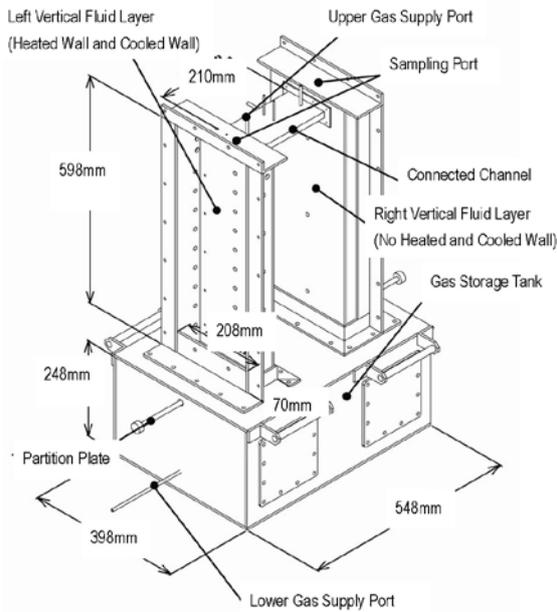


図2 鉛直平行平板逆U字型実験装置

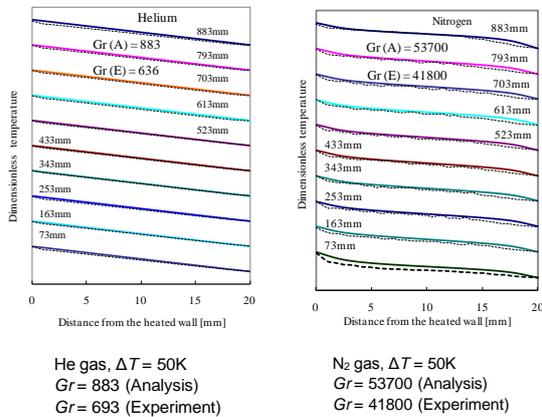


図3 平板間の温度分布 (実験と解析)

2009年度は前年度に作成した鉛直平行平板逆U字型実験装置を用いて、主に分子拡散による二成分気体系混合挙動を調べた。さらに、分子拡散による気体浸入に及ぼす自然対流の影響を評価するために、温度の異なる鉛直平板間の自然対流に関する解析を行った。

解析には汎用の3次元熱流動数値解析コードを用いて、鉛直流体層内の単成分気体に関する自然対流の解析を行い、これまでに行われた自然対流の実験結果と比較するとともに

に、グラスホフ数を増大させたときの自然対流パターンが変化するかどうかを調べた。解析結果の一例を図4に示す。分子拡散による実験では、本実験装置において当初予想していた分子拡散のみによる二成分気体混合が過去に行われた実験結果と定性的に一致するかを調べた。その結果、鉛直流体層の高さを考慮すると定量的にもほぼ同じ結果が得られたことから、引き続き行う実験では、分子拡散と自然対流及び一次元的な自然循環流が付加された場合の二成分気体混合過程を評価することができる。また、数値解析コードにより行った自然対流解析の結果を図5に示すが、実験条件の範囲では、自然対流が幾つものセル対流に分離することが確認できなかったことから、分子拡散と一つのセル対流による二成分気体混合過程になることを予想することができた。

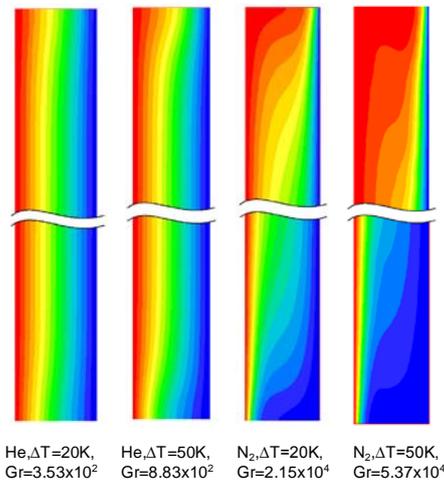


図4 流体層内温度分布の解析結果

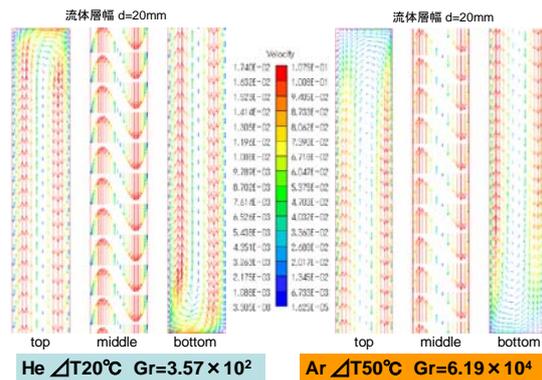


図5 流体層内のセル対流の様子

2010年度は研究の最終年度として、逆U字型の一方の流路内に局所的な自然対流が発生する鉛直流体層内への密度の異なる気体の浸入過程を調べる実験を行い、分子拡散による気体混合過程に及ぼす自然対流の影響を調べるとともに、最終的に発生する一次元的な自然循環流について調べた。また、一次元的な自

然循環流が発生しない条件における分子拡散による成分気体の移動に与える自然対流の影響を調べた。

まず、一次元的な自然循環流が発生しない場合における密度の異なる成分気体の分子拡散による移動現象に及ぼす局所的な自然対流の影響は、自然対流が発生している箇所と発生していない箇所が同時に存在する場合には成分気体の移動速度が大きく異なり、流路内の気体密度の非定常変化を求める際には、流路内各所の温度分布及び温度変化を正確に評価しなければ密度変化を予測できないことが分かった。

Combination of gas	Density ratio	Left side slot	Right side slot	$\Delta T=0^\circ\text{C}$	$\Delta T=10^\circ\text{C}$	$\Delta T=30^\circ\text{C}$	$\Delta T=50^\circ\text{C}$	$\Delta T=70^\circ\text{C}$	$\Delta T=100^\circ\text{C}$
N ₂ -Ar	0.70	Open	Open	●	●	●	●	●	●
Ne-Ar	0.51	Open	Open	●	●	●	●	●	●
He-N ₂	0.14	Open	Open	—	●	—	●	—	●
He-Ar	0.10	Open	Open	—	●	—	●	—	●

表1 実験条件

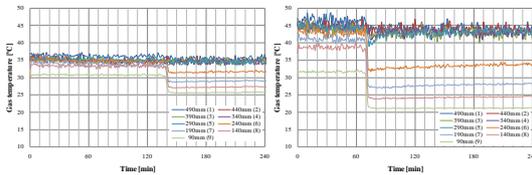


図6 自然循環流が発生する場合の温度変化

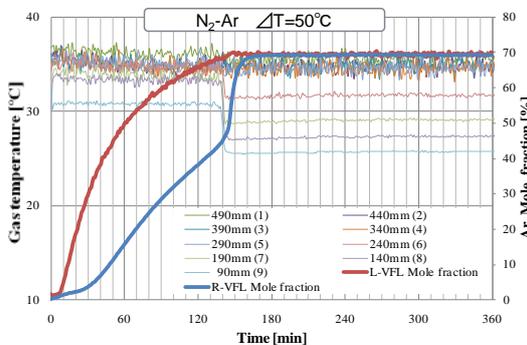


図7 自然循環流が発生する場合の密度変化

次に自然循環流の発生を許す、逆U字型流路における実験では、二成分気体の組み合わせ、局所的に発生する自然対流の強さによって一次元的な自然循環流の発生時間が大きく変化することが分かった。表1に実験条件を示す。また、一次元的な自然対流の発生が確認できる温度の時間変化を図6に、密度変化も含めた図を図7に示す。具体的には、密度差の大きいヘリウム/アルゴン系の気体混合は自然対流の影響を大きく受けるが、窒素/アルゴンの場合はさらに大きな影響を受け、これ

は、初期段階において既に比較的強い自然対流が発生しているかどうかにも依存していることが分かった。一次元的な自然対流の発生時刻と気体の組み合わせの影響を表2に示す。また、このうちアルゴンの時間変化について図8に示す。さらに、密度差の大きい場合の実験では、温度差の大小に伴う居所的な自然対流の強さが一次元的な自然循環流の発生にも影響を与えることから、このような密度の異なる成分気体の浸入挙動が関係する可燃性気体貯蔵装置内への空気浸入あるいは高温ガス炉の配管破断事故時の空気浸入挙動を予測する際には、各構造物の温度分布や温度変化が分子拡散と自然対流あるいは自然循環流による気体浸入過程に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

$\Delta T [^\circ\text{C}]$	N ₂ -Ar	Ne-Ar	He-N ₂	He-Ar
10	320 min	240 min	105 min	90 min
30	180 min	140 min	—	—
50	140 min	130 min	90 min	95 min
70	90 min	100 min	—	—
100	70 min	85 min	60 min	60 min

表2 重い気体の浸入時刻

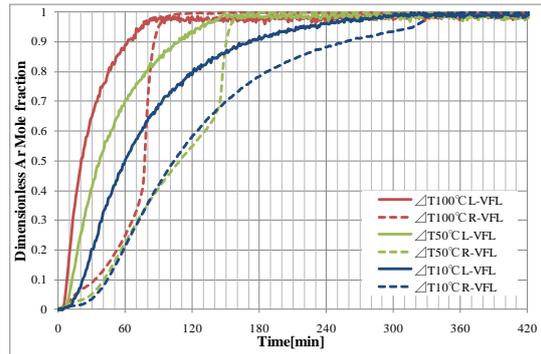


図8 アルゴンのモル分率の時間変化

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3件)

① 武田哲明、磯見宙孝、花沢大樹、Transport process by natural convection and molecular diffusion of two component gases in a stratified fluid layer、Proceedings of the 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC2011、査読有、Honolulu, Hawaii, USA, March 13-17, 2011. Paper AJTEC2011-44409.

② 武田哲明、花沢大樹、磯見宙孝、

Prevention technology of air ingress during the depressurization accident in very high temperature reactor、Proceedings of the 7th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, NTHAS7、査読有、Chuncheon, Korea, November 14-17, 2010. Paper NP70051.

- ③ 武田哲明、磯見宙孝、花沢大樹、鳥山孝司、Effectiveness of natural convection on molecular diffusion of two component gases in a vertical fluid layer、Proceedings of the 5th Topical Meeting on High Temperature Technology, HTR2010、査読有、Prague, Czech Republic, October 18-20, 2010. Paper 038.

[学会発表] (計9件)

- ① 武田哲明、磯見宙孝、花沢大樹、水野弘基、「超高温ガス炉の減圧事故時における気体混合現象に関する研究」、日本原子力学会「2011年春の年会」、2011年3月28日、福井県・福井大学
- ② 武田哲明、磯見宙孝、花沢大樹、「超高温ガス炉の空気浸入防止技術に関する研究」、日本原子力学会「2010年秋の大会」、2010年9月15日、北海道・北海道大学
- ③ 武田哲明、花沢大樹、磯見宙孝、「鉛直流体層内の2成分気体混合過程の研究」、機械学会2010年度年次大会、2010年9月6日、愛知県・名古屋工業大学
- ④ 武田哲明、花沢大樹、磯見宙孝、「鉛直流体層内の2成分気体混合過程に関する研究」、第47回日本伝熱シンポジウム、2010年5月28日、北海道・札幌コンベンションセンター
- ⑤ 武田哲明、「安定成層内の気体混合過程に関する研究」、第46回日本伝熱シンポジウム、2009年6月2日、京都府・国立京都国際会館
- ⑥ 武田哲明、「安定密度成層内の分子拡散と自然対流に関する研究」、日本機械学会関東支部第15期総会講演会、2009年3月6日、茨城県水戸市・茨城大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.ms.yamanashi.ac.jp/lab/takeda/index.html>