

# 大規模自然対流の革新的制御システムの開発

## Development of novel control system using large scale natural convection

研究代表者 八戸工業高等専門学校 機械システムデザインコース 助教 古川琢磨

Takuma Kogawa

共同研究者 東北大学 流体科学研究所 教授 小宮敦樹

Atsuki Komiya

In this study, to develop the novel controlling system of the natural convection in the large scale environment, the effect of the thermal radiation on the natural convection has been investigated. To separate the radiation effect appropriately, the “surface radiation” and “gas radiation” has been focused. To evaluate the surface radiation effect, the thermal boundary layer of the natural convection in the square cavity was visualized by the phase-shifted interferometer, and compared with the numerical calculation. Furthermore, to investigate the gas radiation effect, the natural convective boundary layer containing the participating medium was calculated by Large eddy simulation. As a result, it was concluded that the surface radiation effect had the small temperature difference due to the cooling by the radiative heat flux was confirmed. In addition, the heating of the participating medium at the outer region of the boundary could control the transition of the natural convective boundary layer.

### 要旨

本研究では、大規模系で生じる自然対流伝熱の革新的制御技術の開発を目的とする。大規模系での自然対流はふく射伝熱と密接に相互作用し、ふく射伝熱効果のスケール効果性は非常に大きい。本研究では、ふく射伝熱と対流場の相互作用メカニズムを明らかにするために、実験及び数値解析的手法を用いることで「表面ふく射効果」、「ガスふく射効果」の両効果が自然対流伝熱に及ぼす影響を評価した。位相シフト型光干渉計を用いることで、壁面の放射率の違いによる温度境界層の変化量を観察することにより、表面ふく射効果が自然対流の温度場に与える影響を評価した。さらに、ふく射性媒体中の自然対流境界層中の Large Eddy Simulation (LES) を実施することにより、ふく射性媒体中の発熱により境界層の発達過程の変化を評価した。

### 1. まえがき

近年大型建築物の換気システム等、省エネルギーシステムとして大規模系での自然対流アプリケーションの開発が積極的に行われている。ふく射効果はスケール効果を有しており、大規模系での自然対流伝熱はふく射効果が支配因子となり得る。また自然対流の浮力増加によって乱流場も形成され、より複雑な流動現象となる。そのため実環境下の大規模自然対流はふく射効果を見逃し可能な小規模系の自然

対流場とまったく異なる対流場である。そのため大規模系での自然対流アプリケーションを効率的に利用するためにも、ふく射効果は絶対に評価しなければならない重要な研究対象である。

本研究では、ふく射効果を応用した自然対流伝熱の熱流動場の能動的制御手法を開発することを目的とする。本目的を達成するために、ふく射性媒体と固体壁面を介した加熱・冷却現象を示す「ガスふく射効果」及び「表面ふく射効果」の二種類の効果を定量的に切り分け、それら効果の応用可能性について議論した。

これまで表面ふく射効果については、数値解析的に検証されてはきたが、実験的な検証例は少なく、本効果の定量的な実験的立証が求められる。本研究では、表面ふく射効果の実験的立証を目的とし、位相シフト型光干渉計を用いた矩形キャビティ内部の自然対流の温度境界層の可視化計測を行った。矩形キャビティの断熱壁の放射率を制御し、放射率の差異による自然対流温度境界層の温度勾配について評価した。さらに、対流、ふく射伝熱の複合伝熱解析を実施し、その妥当性について言及した。

ガスふく射効果では、流体がふく射性媒体となりふく射効果により流体自身が発熱、冷却する。この発熱効果によって自然対流境界層の成長過程が変動する可能性がある。そこで本研究では、ふく射性媒体中の自然対流伝熱の Large Eddy Simulation (LES) を実

施し、諸種の乱流統計量の観点から乱流遷移の制御可能性について言及した。

## 2. 表面ふく射効果の実験的検証

### 2.1 実験方法

本研究では、自然対流境界層中の温度境界層の可視化計測を実施するために、位相シフトマツハツェンダー型光干渉計を製作した。図 1 に製作した光干渉計を示す。本光干渉計では、直線偏光の He-Ne レーザーを光源として使用する。光源から照射された光は偏光ビームスプリッターによって P 偏光、S 偏光の光に分割する。試験光側には非対称加熱壁面を有したキャビティを設置する。恒温水槽を使用してキャビティ壁面温度を制御した。キャビティ上部、下部の断熱壁面には厚さ 50  $\mu\text{m}$  のアルミホイルを貼り付け、黒体スプレーを塗布した状態と塗布しない状態の二種類の断熱壁面を使用して自然対流境界層の可視化計測を行った。アルミホイルは放射率が極限に小さいことから黒体スプレーを塗布しない状態は実質的に放射率  $\varepsilon=0$  の反射壁と仮定することができる。また黒体スプレーの放射率の公称値は  $\varepsilon=0.95$  であることから、実質的な放射率  $\varepsilon=1$  の黒体面と仮定することができる。本研究では、これら二種の断熱壁面を使用して、断熱壁周囲の温度境界層の可視化計測を実施した。矩形キャビティ内部の作動流体は空気とした。矩形キャビティの大きさは一辺 140 mm とした。

### 2.2 矩形キャビティ加熱壁面の温度境界層の可視化

図 2 に測定した加熱壁面中心部の位相シフト画像を示す。構築した測定装置を用いることにより直径 20 mm 幅の可視化領域を達成することができた。また図 2 に示されるように、加熱壁面近くに形成される温度境界層を測定することができた。可視化した位相シフト値の分布から温度分布に変換し、温度境界層の可視化可能性について検討を行った。図 3 に図 2 の位相シフト値から算出した加熱壁面付近の温度分布を示す。図 3 に示されるように、境界層外縁から加熱壁面近くにおいて温度が上昇していることがわかる。境界層外縁から加熱壁面近くでの上昇量は 8 K 程度であることが分かる。本研究では、加熱壁面温度を 10 K 程度に制御していたため、本結果は妥当である

と考えられる。

### 2.3 断熱壁の放射率変化による温度境界層変動の可視化結果

図 4 に放射率変化時の矩形キャビティ内部の上部断熱壁の近くの位相シフト画像を示す。図 4(a), (b) はそれぞれ、断熱壁が反射壁 ( $\varepsilon=0$ )、黒体壁 ( $\varepsilon=1$ ) の時の位相シフト画像を示す。図に示されるように、断熱壁による温度差による位相差が観察される。本研究では、図 4 に示される位相シフト画像の結果を使用して、壁面近くの温度に変換した結果を図 5 に示す。図 5 に示されるように、反射壁は黒体壁と比較して大きい温度勾配を有することが観察される。上部断熱壁では、温度成層の影響により断熱壁周囲の温度はキャビティ中心と比較して高くなる。同時に、上部断熱壁の温度もキャビティ中心部よりも高くなる。そのため断熱壁が黒体面である時、断熱壁からは周囲流体に対して放射冷却が発生する条件となるため、放射冷却効果によって、反射壁と比較して温度勾配が小さくなったと考えられる。

前述した事象を経ることによって、放射率の違いによって図 5 のような温度分布が形成されたと考えられる。図 5 から放射率の違いによる温度分布の差異を検出することができた。しかしながら、図に示されるように、計測された温度差分布は依然としてノイズが多いことが分かる。光干渉計計測システムでは、参照光側での外乱が計測誤差に大きく影響を及ぼす。本研究で実施した計測環境下では、エアコンや恒温水槽の熱交換機による擾乱の影響が大きかったため、図 5 に示されるようなノイズの大きい温度差分布が計測されたと考えられる。今後はノイズを除去可能な計測環境の構築をすることが必要である。

### 2.4 連成伝熱解析との比較

本研究では図 5 に示された放射率変動による温度分布の変化を検証するために、熱伝導、対流、ふく射伝熱の連成伝熱解析を行った。連成伝熱解析には、オープンソフト CFD ソフトウェアである OpenFOAM 6.0 に実装されている、ChtMultiregionFOAM を用いた。実験で用いた矩形キャビティと同一の条件にて解析を実施した。その結果、実験と同一の解析条件では、放射率の差異による温度勾配の差が観察することは

できなかった。放射率による温度分布の変動は非常に小さいため、断熱壁での熱伝導効果を正確にモデル化する必要がある。本研究では、断熱壁での熱伝導効果によるモデル化が不十分であると考え、断熱壁での熱伝導効果量を無視して同一の解析を行い、断熱壁周囲の温度分布の比較を行った。図6に断熱壁の熱伝導率を極端に小さい値にした時の解析結果を示す。図6に示されるように、放射率の違いによって実験と同様な温度差分布が観察された。

図6の結果から、連成伝熱解析中の断熱壁の熱伝導効果を正確にモデル化する必要があることが示唆された。アルミホイルの厚さが極端に薄いため、アルミホイルを解析メッシュに含有しなかった。しかしながら、アルミホイルの熱応答性は矩形キャビティで使用したアクリルと極端に異なる。そのため、アルミホイルの貼り付けを無視した解析条件では絶対量が小さいふく射熱流束量の変化を検出することは困難であると考えられる。しかしながら、図6から熱伝導効果のモデリングは不十分であるものの、実験と同一の傾向を取得することができた。本結果から、定性的ではあるが表面ふく射効果による温度境界層の変動を実験的に立証することができたと考えられる。今後は、より定量的な実証を行うために、極端に薄いアルミニウムホイル貼り付けの熱的モデリングを行う必要がある。具体的には、熱抵抗やフーリエ数の観点から解析メッシュにも組み込み可能な熱伝導効果のモデリングを実施する予定である。

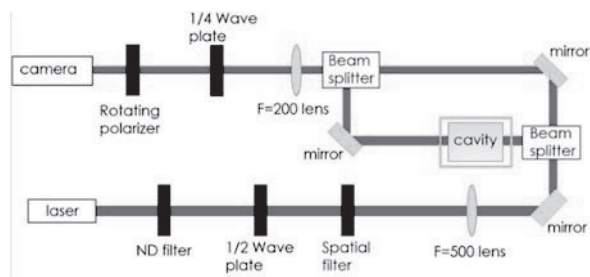


図1 構築した位相シフトマッハツェンダー型光干渉計

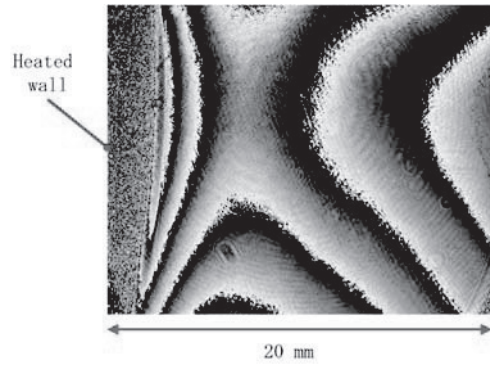


図2 加熱壁近くにおける位相シフト画像

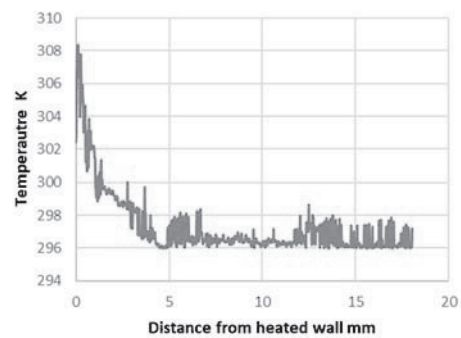


図3

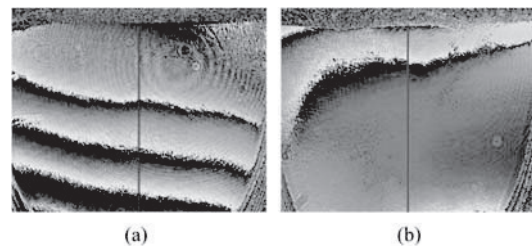


図4 上部断熱壁近くにおける位相シフト画像,(a)反射壁 ( $\epsilon=0$ ), (b)黒体壁 ( $\epsilon=1$ )

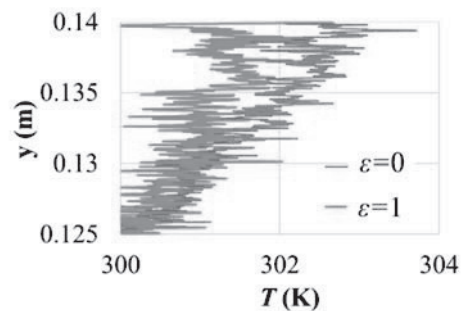


図5 位相シフト画像から取得した上部断熱壁における温度分布の比較

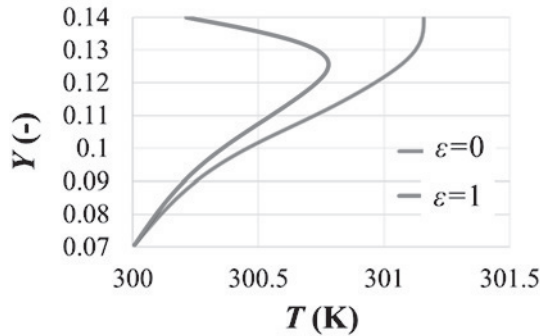


図 6 連成伝熱解析から取得した上部断熱壁付近の温度分布

### 3. ガスふく射効果の LES による理論的検証

#### 3.1 解析方法及び解析条件

本研究では、ガスふく射効果による自然対流境界層の遷移制御可能性について言及するため、ふく射性媒体中の自然対流境界層の LES を実施した。LES の解析には OpenFOAM2.3 に内蔵されている buoyantBoussinesqPimpleFOAM を修正したソルバーを用いた。

図 7 に本研究で使用した数値解析モデルを示す。本解析では、9.4 m の長さを有する鉛直平板加熱平板の自然対流境界層を解析対象とした。加熱平板温度及び周囲温度は 304 K、300 K とした。熱物性値は空気のものを用いた。ガスふく射効果量の変化量を評価するために、ふく射性媒体の吸収係数を変化させて、解析を実施した。鉛直平板に対面する境界と解析ドメインの下面には入り口境界条件を設定し、解析ドメインの上面には出口部を設定した。入り口境界条件として、自由流入境界条件を用いた。出口境界には対流流出境界条件を用いた。図 8 に使用した解析モデルのメッシュ分布を示す。本研究では 5000 万個のメッシュ数とした。本解析メッシュには、粘性底層が十分に解像可能なものを用いた。乱流モデルには、過去の研究によって、その有効性が担保されている Vreman model<sup>[1]</sup>を用いた。ふく射伝熱のモデル化には、OpenFOAM に内蔵されている fvDOM ライブラリを用いた。本研究では、加熱壁面からのふく射場をふく射性媒体である流体が吸収する系を模擬するため、加熱壁面は黒体と設定した。対流項及び、拡散項の離散化にはそれぞれ、三次、二次の離散スキームを用いた。時間項の離散化には二次精度の離散スキームを用いた。

#### 3.2 解析手法の妥当性評価

本研究で使用した解析条件の妥当性を検証するために、ふく射効果を見捨てた時の解析結果と Tsuji<sup>[2]</sup>らによる実験結果との比較を行った。その妥当性について検証した。図 9、図 10 に本数値解析と実験結果との比較結果を示す。図 9 は局所熱伝達率分布の比較、図 10 は速度境界層の比較結果を示す。また比較のために Nakao<sup>[3]</sup>らによる解析結果も示す。図に示されるように、本解析と実験結果は同様な傾向を示すことが分かる。以上の結果から、構築した乱流解析手法の有効性が示された。

#### 3.3 ふく射性媒体の吸収量の変化による乱流構造の変化

本研究では、ふく射性媒体のふく射吸収量の変化による乱流遷移の変動を評価するために、速度勾配テンソルの第二不変量である Q 値の等値面を評価した。図 11 にそれぞれの吸収係数における Q 値の等値面の変化を示す。図 11 に示されるように、吸収係数が  $a=0.01$  から  $a=1$  と変化するとき、乱流場の遷移点は下流側に遷移することが分かる。さらに、 $a=10$  となる時、乱流場は形成されず、層流化することが明らかとなった。また吸収係数が  $a=100$  となる時、再度乱流が形成されることが明らかとなった。以上の結果から、吸収係数がある一定度の値を有する時、乱流場が極端に安定化することが明らかとなった。以上の結果から、ガスふく射効果によって自然対流境界層の不安定性を制御できる可能性があることが示唆された。

#### 3.4 温度境界層の変動の比較

本研究では、図 11 に示された、乱流構造の変化の原因を調査するために、それぞれの吸収係数における低 Ra 数、高 Ra 数における自然対流境界層に形成される、温度境界層の比較を行った。図 12、図 13 に低 Ra 数、高 Ra 数における温度境界層の比較結果を示す。

図 12 に示されるように、吸収係数  $a=0$  の温度分布から遷移領域において横渦起因の温度境界層の変動が観察できる。一方で遷移領域が下流点に変化した、 $a=0.01, 0.1, 1, 10$  の系ではガスふく射効果による境界層外縁の媒体発熱によって温度境界層が厚く



なることが明らかとなった。図 11 に示された  $Q$  値の当等値面の比較から、極単に層流化した  $\epsilon=10$  では高温領域の温度境界層の厚さが最も厚くなっていることが分かる。本結果から、遷移領域での温度境界層の厚さが自然対流境界層の乱流形成に密接に関与していることが分かる。

### 3.5 境界層中の速度勾配および、ふく射熱流束分布の比較

図 14 にそれぞれの吸収係数における、低  $Ra$  数域での速度勾配分布を示す。図 14 に示されるように速度勾配分布はすべての解析条件において同一の分布を示している。一方で、速度勾配の勾配が 0 となる変曲点では異なる分布を持つことが分かる。変曲点における速度勾配の大きさを比較する時、吸収係数  $\epsilon=0.01, 0.1, 1$  との場合では  $\epsilon=0$  の場合と比較すると、変曲点で小さい速度勾配を有していることが分かる。同様に極端に吸収係数が大きい系の  $\epsilon=10, 100$  でも同様の傾向が観察される。以上の結果から、変曲点における速度勾配の絶対量が乱流遷移と相関性があることが示唆される。

本研究では、変曲点の速度勾配の絶対と乱流遷移の相関関係を確認するために、吸収係数に対する編曲点の速度勾配量の比較を行った。図 15 に変曲点における速度勾配の大きさの変化量を示す。図 15 に示されるように、吸収係数が  $\epsilon=10$  となる時、変曲点の速度勾配は最小の値となった。 $\epsilon=10$  の時、乱流生成が最も抑制されたことから、変曲点の速度勾配の大きさが乱流不安定性と密接に関わっていると考えられる。

変曲点における速度勾配の低下は速度境界層外縁でのせん断力が低下していることを示唆している。速度境界層外縁のせん断力の低下は周囲流体における流れ方向の速度が増大していることを示す。自然対流伝熱は浮力が速度境界層生成の要因となる。そこで本研究では、境界層の浮力促進の原因となりえるふく射熱流束に着目した。図 15 に境界層中におけるふく射熱流束の分布を示す。ふく射熱流束の正負はそれぞれ、ふく射製媒体である流体の冷却、加熱を示している。図 16 に示されるように、 $\epsilon=10$  でふく射熱流束が速度境界層外縁 ( $x=100$ ) 付近において最も小さいふく射熱流束を示している。図 17 に変曲点における各吸収係数のふく射熱流束分布を示す。図 17

に示されるように、 $\epsilon=10$  の条件においてもっとも、変曲点でのふく射熱流束が小さい値を有することが明らかとなった。本分布は図 15 と同一の傾向を示している。これは変曲点でのふく射熱流束の低下すなわち、流体の加熱が速度勾配の低下の原因と考えられる。

以上をまとめれば、ガスふく射効果を考慮する時、速度境界層外縁での流体の発熱が外縁でのせん断力を低下させ、乱流形成を抑制したと考えられる。以上の結果から、境界層内部のふく射吸収量を制御することができれば、境界層の遷移点を能動的に制御することができると考えられる。

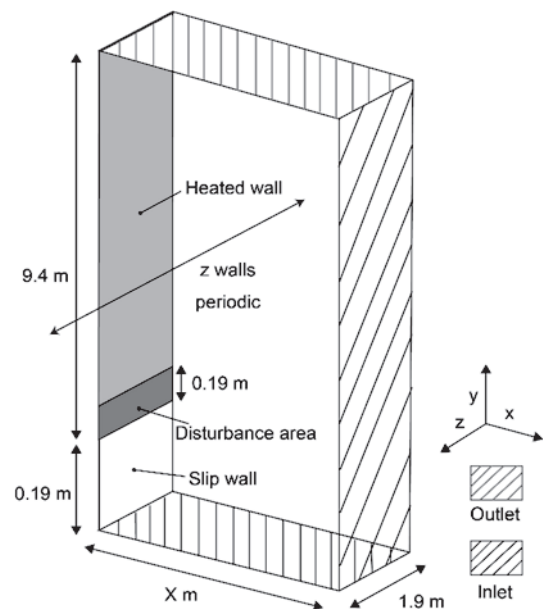


図 7 使用した解析モデル

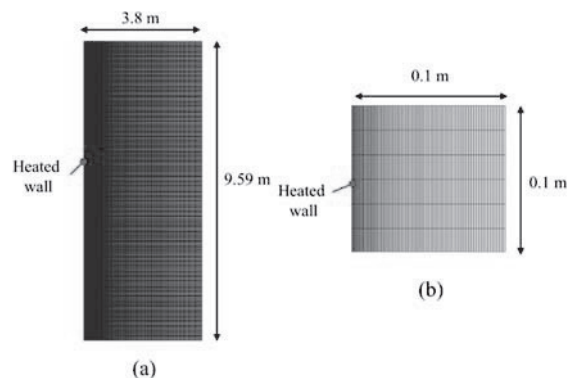


図 8 解析ドメインのメッシュ分布

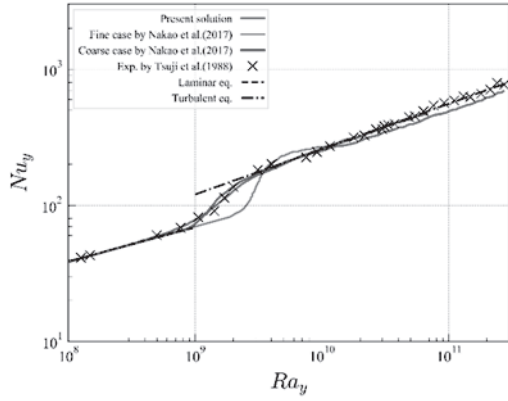


図 9 局所熱伝達率分布実験値との比較

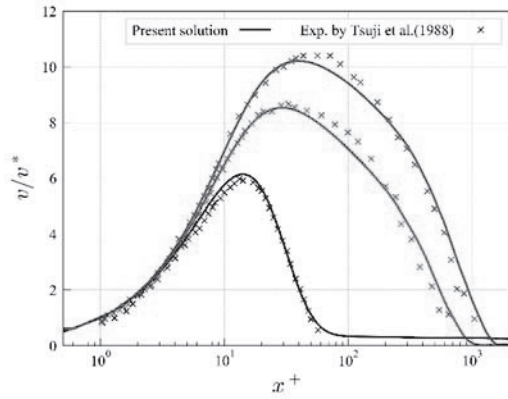


図 10 速度分布の実験結果との比較

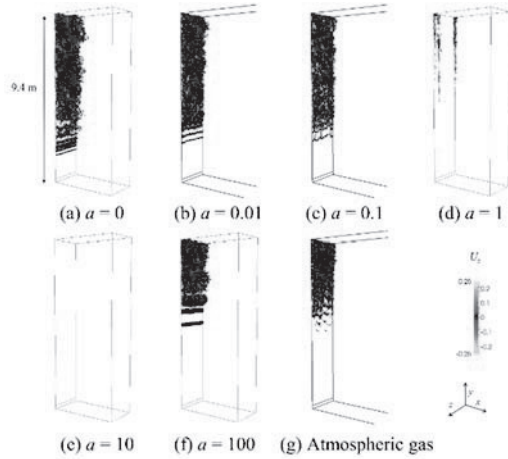


図 11 吸収係数変動時における速度勾配テンソルの第二不変量  $Q$  の等値面の変化

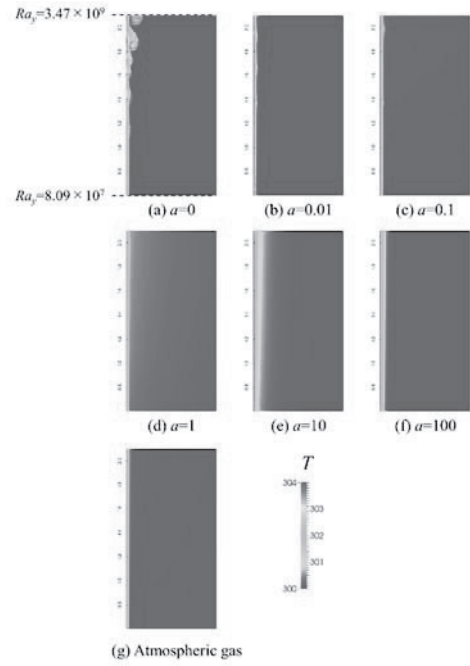


図 12 低 Ra 数における自然対流境界層の温度分布の比較

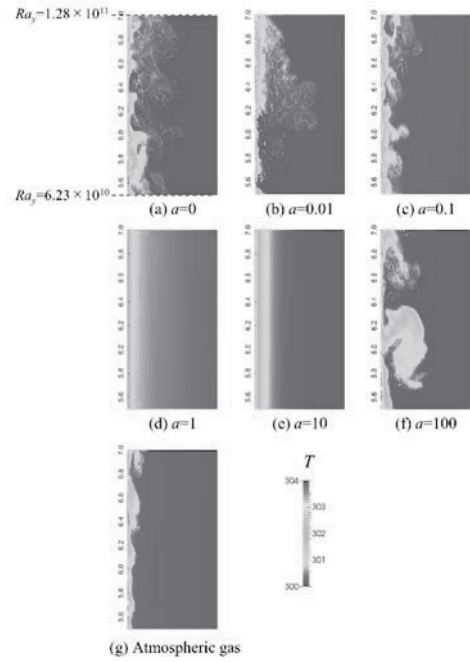
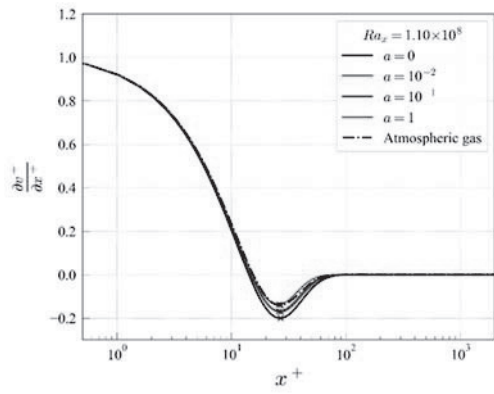
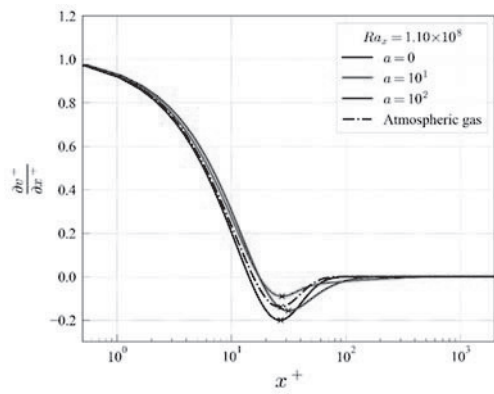


図 13 高 Ra 数における自然対流境界層の温度分布の比較

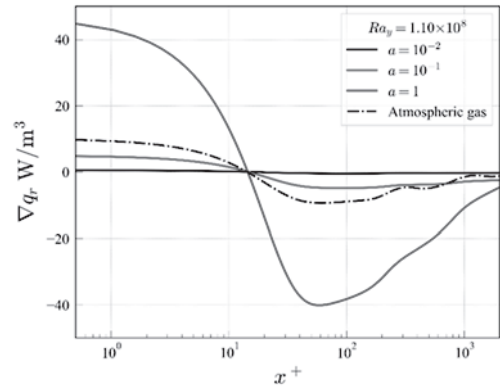


(a)

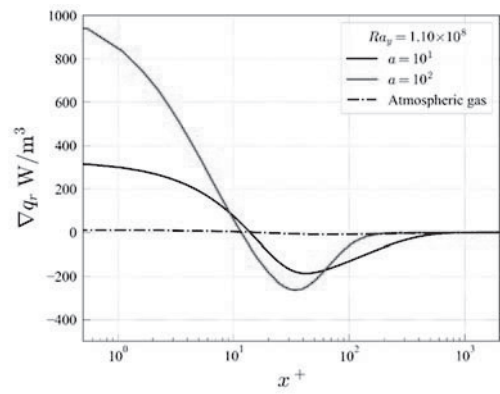


(b)

図 14 境界層の速度勾配分布の比較, ×印は変曲点を示す. (a) 吸収係数が小さい系, (b) 吸収係数が大きい系



(a)



(b)

図 16 ふく射熱流束分布の比較

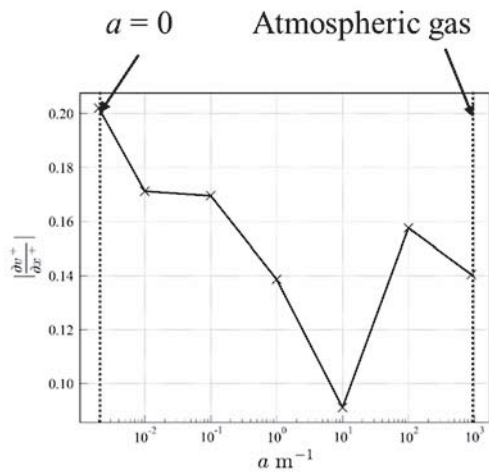


図 15 変曲点における速度勾配分布の絶対値の比較

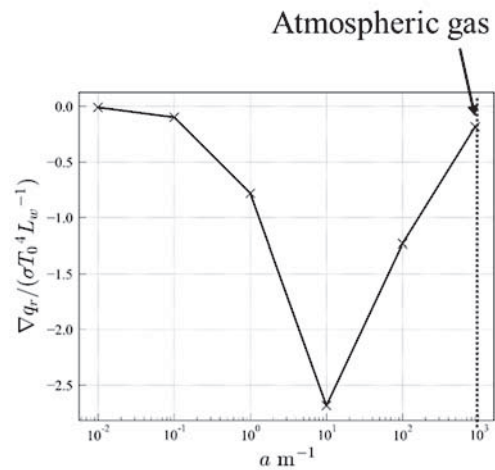


図 17 変曲点におけるふく射熱流束分布量の絶対値の比較

#### 4. 結言

本研究では、ふく射伝熱が自然対流境界層に及ぼす影響を評価するために、「表面ふく射」、「ガスふく射」効果をそれぞれ切り分けた研究を実施した。

表面ふく射効果が自然対流伝熱に及ぼす影響を評価するために、位相シフト光干渉計を用いた自然対流の温度境界層の可視化計測を実施した。可視化計測の結果、放射率変動による温度境界層の制御可能性について定性的ではあるが実験的に立証することができた。

ガスふく射効果が自然対流境界層の乱流遷移に及ぼす影響を評価するためにふく射性媒体を含有した自然対流伝熱の LES を実施した。解析の結果、速度境界層外縁でのふく射性媒体の発熱量が自然対流境界層の乱流遷移に密接に影響を及ぼすことが明らかとなった。本結果から、媒体のふく射吸収量を能動的に制御することによって、自然対流境界層を能動的に制御可能であることが示唆された。

#### 発表論文

- [1] T. Kogawa, E. Shoji, J. Okajima, A. Komiya, S. Maruyama, “Experimental evaluation of thermal radiation effects on natural convection with a Rayleigh number of 108-109 by using an interferometer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 132, pp. 1239-1249, 2019.
- [2] 小泉匠摩耗, 古川琢磨, “OpenFOAM を用いたふく射・対流場の連成伝熱解析の妥当性評価”, *八戸工業高等専門学校紀要*, Vol. 54, pp. 33-36, 2020.
- [3] H. Gonome, T. Nagao, Y. Takagi, M. Ono, T. Kogawa, S. Moriya, J. Okajima, “Protection from thermal radiation of hazardous fires: Optimizing microscale droplet size in mist barriers using radiative transfer analysis”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 143, pp. 114-120, 2020.
- [4] T. Kogawa, J. Okajima, A. Komiya, S. Maruyama, “Effect of gas radiation-depended natural convection on the transition of spatially developing boundary layer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (Reviewing)

#### 参考文献

- (1) A. Vreman, “An eddy-viscosity subgrid-scale model for turbulent shear flow: Algebraic theory and applications”, *Physics of Fluids*, Vol. 16, pp. 3670, 2004.
- (2) T. Tsuji, Y. Nagano, “Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 1723-1734, 1988.
- (3) K. Nakao, Y. Hattori, H. Suto, “Numerical investigation of a spatially developing turbulent natural convection boundary layer along a vertical heated plate”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 63, pp. 128-138, 2017.