

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：51101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14099

研究課題名（和文）ふく射伝熱が粘性型不安定の自然対流境界層遷移に及ぼす機構因子の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanistic factors of radiation heat transfer on the viscous-type unstable natural convective boundary layer transition

研究代表者

古川 琢磨 (Kogawa, Takuma)

八戸工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：80818518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：LESによる三次元伝熱解析から、空間発展型の自然対流境界層ではふく射伝熱によって遷移領域中の速度分布を制御すれば、その不安定性を制御できることが明らかとなった。擾乱方程式を用いた数値解析から、自然対流境界層は変曲点型不安定に起因することが示唆された。以上から、空間発展型の自然対流境界層では、ふく射伝熱によって境界層の変曲点不安定を制御可能であり、その不安定性は境界層のふく射熱流束によって変更可能であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果は自然対流境界層の不安定メカニズムに対して新しい知見をもたらす。また、ふく射伝熱を応用した新しい境界層制御技術の創成にも繋がり、本研究結果の意義は大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：Three-dimensional heat transfer analysis using LES reveals that the instability of the spatially evolving natural convection boundary layer can be controlled by controlling the velocity distribution in the transition zone by radiative heat transfer. Numerical analysis using the disturbance equation suggests that the natural convection boundary layer is caused by an inflection point-type instability. It is concluded that in a spatially evolving natural convection boundary layer, the inflection point instability of the boundary layer can be controlled by radiative heat transfer, and that the instability can be modified by the radiative heat flux in the boundary layer.

Translated with DeepL.com (free version)

研究分野：熱工学

キーワード：自然対流境界層 T-S波 変曲点不安定 粘性型不安定 擾乱方程式 LES

1. 研究開始当初の背景

大規模系で生じる自然対流伝熱はパッシブな伝熱現象であり、使用済み核燃料棒の乾式冷却や建築物の換気システム等に利用される。大規模自然対流を利用するアプリケーションでは長期運用・省エネルギー性を重要視しており、境界層制御による熱伝達率の促進・抑制技術が貢献するところは非常に大きい。大規模系で生じる自然対流では、スケール効果によってふく射伝熱の影響は無視できなくなる。ふく射伝熱では、ふく射性媒体である流体が外部から放射されるふく射を吸収し、発熱する。ふく射効果による流体の発熱は浮力起因の自然対流境界層の形成過程に顕著に影響を及ぼす。特に乱流場が形成される大規模系では、乱流場の発生メカニズムがふく射効果によって大きく変化する可能性がある。しかしながら、ふく射伝熱が空間発展型の自然対流境界層の乱流場に及ぼす過程については定量的な解明はされておらず、大規模系の自然対流境界層の効率的な制御には至っていない。

2. 研究の目的

これまでの申請者らの研究から、閉鎖系における自然対流・ふく射の連成伝熱問題では変曲点不安定がふく射伝熱によって促進され流体の不安定性が促進されることが明らかとなっている。一方で、鉛直加熱平板の自然対流境界層等、変曲点型不安定とは異なる不安定性が支配的と考察されている対流問題については定量的には明らかとなっていない。そこで本研究では、T-S 波起因と考えられている空間発展型の自然対流境界層に着目し、ふく射影響下での境界層における乱流場の初生・成長メカニズムを明らかにすることを目的とする。本目的を達成するために、本研究期間中には Large Eddy Simulation (LES) を用いた対流・ふく射の連成伝熱解析と、擾乱方程式を用いた自然対流境界層の微小擾乱の数値解析を行った。

3. 研究の方法

3.1 ふく射影響下での空間発展型自然対流境界層の乱流成長メカニズムの調査

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 1 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。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[1]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 擾乱方程式、線形安定性解析を用いた自然対流境界層の不安定

4.1 で後述するが 4.1 の結果から変曲点でのせん断速度が小さくなると、境界層が安定化し、変曲点でのせん断速度が大きくなる時に不安定性が促進することが明らかとなっている。本結果は自然対流境界層の不安定メカニズムが変曲点型であることを示唆している。一方、これまでの既存の研究では自然対流境界層の不安定性は T-S 波起因であると議論されている[2][3]。そこで本研究では自然対流境界層の根本的な不安定メカニズムを解明するために、擾乱方程式を用いた 2 次元系での Direct Numerical Simulation (DNS) を実施した。DNS では、粘性項をスイッチングすることにより、意図的に粘性による不安定効果が健在化するかどうか評価できる条件を構築した。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。図 2 に本研究で使用した解析モデルを示す。本研究では加熱壁微小擾乱の高解像度を行い、その擾乱の成長性について議論した。

4. 研究成果

4.1 ふく射影響下での空間発展型自然対流境界層の乱流成長メカニズムの調査

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 3 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 3 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。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。本結果から、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。

図 4 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 4 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 $a=0.01, 0.1, 1$ の場合では $a=0$ 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 $a=10, 100$ 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 5 に変曲点における速度勾配の大きさの変化量を示す。図 5 に示されるように、吸収係数が $a=10$ となる時、変曲点の速度勾配は最小の値となった。 $a=10$ 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 6 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 6 に示されるように、 $a=10$ 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 7 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 7 に示されるように、 $a=10$ の条件においても、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 5 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できると考えられる。

4.2 擾乱方程式、線形安定性解析を用いた自然対流境界層の不安定

図 8 に粘性項をスイッチングした際の、鉛直方向の速度変動分布を示す。図 8 に示されるように粘性項がない場合の条件では鉛直方向の速度変動はより大きくなっていることがわかる。これは粘性項が速度変動にとって安定条件であることを示唆している。これ T-S 波起因による不安定の場合、粘性項は不安定条件になることが示唆されている。一方で本解析結果から粘性項は安定条件に作用していることから、自然対流境界層の不安定性は T-S 波起因ではなく、変曲点不安定であることが示唆された。また本研究では擬 2 次元系での線形安定性解析を行い、同様の条件での安定性解析を行った。その結果からも粘性項は境界層の安定化に作用することが明らかとなっている。これまで自然対流境界層の安定化は T-S 波起因と考えられていた[2],[3]。本研究結果はこれまでの議論とは異なる結果であり、自然対流境界層の不安定研究に対して新しい知見をもたらすものであると考えられる。

5. 結言

4.1.の研究結果から、空間発展型の自然対流境界層ではふく射伝熱によって遷移領域中の速度分布を制御することができれば、境界層の不安定性を制御できることが明らかとなった。本知見から自然対流境界層は変曲点型不安定であることが示唆される。4.2 の研究結果から自然対流境界層は変曲点型不安定に起因することが示唆された。以上の結果をまとめると、空間発展型の自然対流境界層では、ふく射伝熱によって境界層の変曲点不安定を制御可能であり、その不安定度合いは境界層中のふく射熱流束によって変更可能であることが明らかとなった。本研究結果は基礎的な自然対流境界層の不安定メカニズムに対して新しい知見をもたらす。さらに、ふく射伝熱を応用した新しい境界層制御技術の創成にも繋がり、本研究結果の意義は大きいと考える。

参考文献

- [1] Vreman, *Physics of Fluids*, Vol. 16, 2004.
- [2] Zhao et al., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019.
- [3] Zhao et al., *Journal of Fluid Mechanics*, 2017.

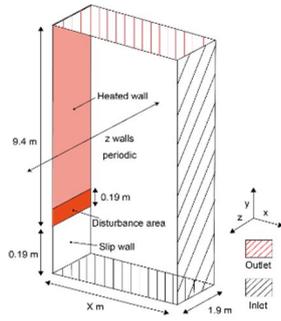


図 1 使用した解析モデル

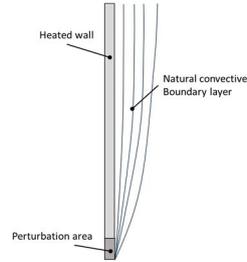


図 2 擾乱方程式を用いた数値モデルの概念図

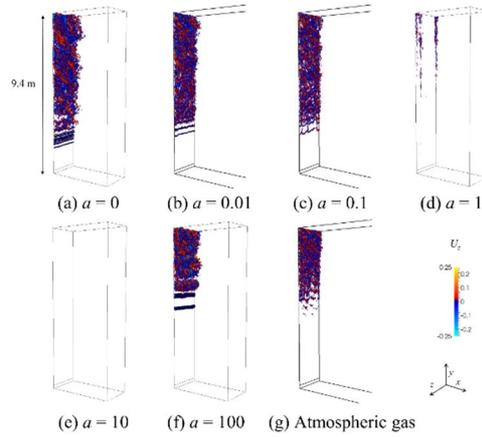


図 3 吸収係数変動時における速度勾配テンソルの第二不変量 Q の等値面の変化

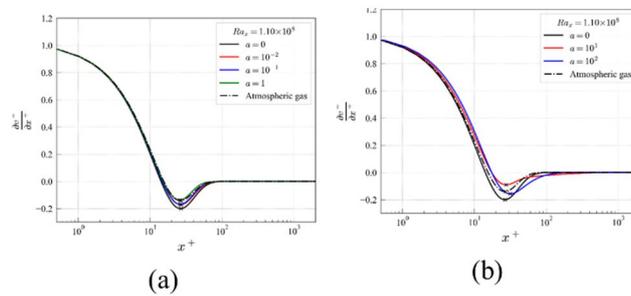


図 4 層流域での自然対流境界層の速度勾配分布の比較, \times 印は変曲点を示す. (a)吸収係数が小さい系, (b)吸収係数が大きい系

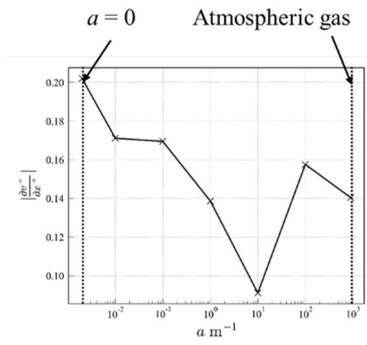


図 5 変曲点における速度勾配分布の絶対値の比較

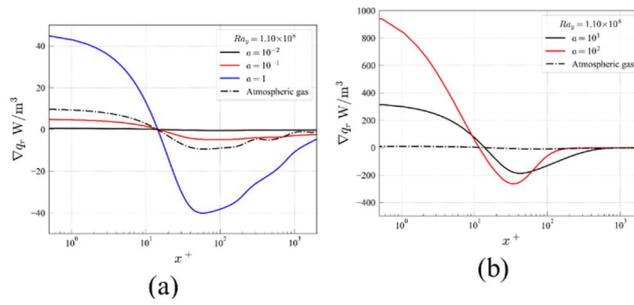


図 6 ふく射熱流束分布の比較

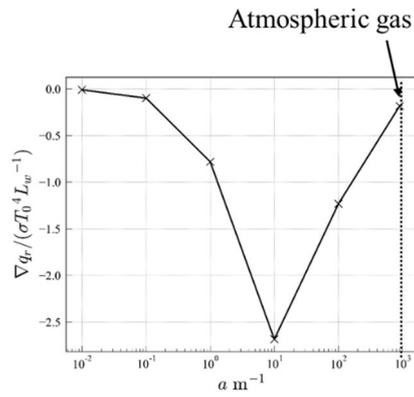


図 7 変曲点におけるふく射熱流束分布量の絶対値の比較

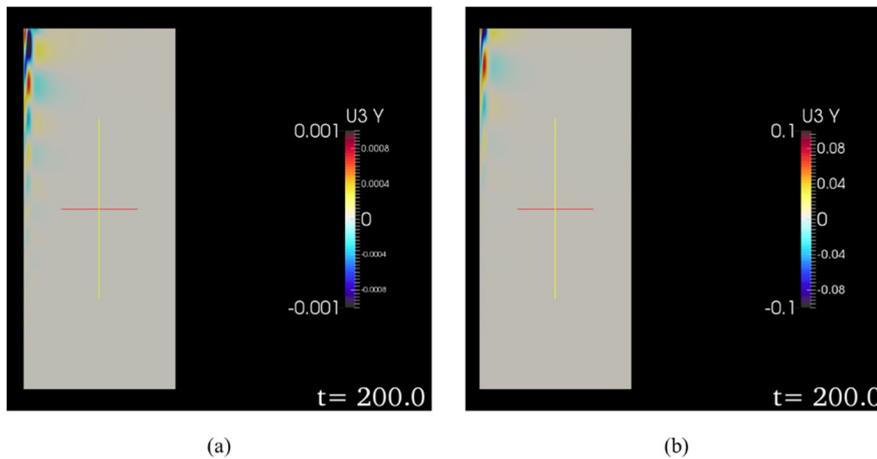


図 8 鉛直方向の速度変動分布(a)粘性項あり, (b)粘性項なし

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Kogawa, J. Okajima, A. Komiya, S. Maruyama	4. 巻 177
2. 論文標題 Effect of gas radiation-depended natural convection on the transition of spatially developing boundary layers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 121580
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121580	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 N. Ogasawara, J. Torres, Y. Kanda, T. Kogawa, A. Komiya	4. 巻 6
2. 論文標題 Resonance-driven heat transfer enhancement in a natural convection boundary layer perturbed by a moderate impinging jet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.6.L061501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Koizumi Takuma, Kogawa Takuma, Torres Juan F., Kanda Yuki, Komiya Atsuki	4. 巻 148
2. 論文標題 Controlling instability waves on vertical natural convection using a buoyant impinging jet	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Communications in Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 107033 ~ 107033
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ishibashi Hikaru, Tomabechei Riku, Nishidate Kurumu, Osaka Nanaho, Shimomura Tomoki, Yamada Shohei, Okajima Junnosuke, Kogawa Takuma	4. 巻 243
2. 論文標題 Evaluation of radiative absorption effect to estimate mean radiant temperature in environments with high water vapor concentration such as in a sauna	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 110684 ~ 110684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2023.110684	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H. Gonome, Y. Takagi, K. Suzuki, J. Okajima
2. 発表標題 Radiation and Convection Coupling Calculation in a Direct Numerical Simulation for Misting Fire Extinguishing Devices
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田翔英, 安藤杏将, 西山幸輝, 岡部孝裕, 古川琢磨
2. 発表標題 レイリー数 (10^8 ~ 10^{10}) の水平対流における温度・速度変動の数値解析評価
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小笠原 照悟, 古川 琢磨
2. 発表標題 対流現象可視化のためのS-BOS法の有用性評価
3. 学会等名 機械学会東北支部学生会第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高木松誠, 小泉匠摩, 古川琢磨, 小宮敦樹
2. 発表標題 固体熱伝導を加味した三次元モデル内でのふく射・対流連成解析と光干渉計による自然対流境界層の妥当性評価
3. 学会等名 第59日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木松誠, 小泉匠摩, 古川琢磨
2. 発表標題 ふく射影響下の自然対流境界層中の壁面放射率特性が及ぼす影響の可視化測定
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小笠原直人, Torres Juan F, 神田雄貴, 古川琢磨, 小宮敦樹
2. 発表標題 衝突噴流による自然対流温度境界層の共鳴効果を用いた伝熱促進
3. 学会等名 第58日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石澤輝, 高木松誠, 古川琢磨
2. 発表標題 シュリーレン PIV 法による速度分布可視化計測の評価
3. 学会等名 東北学生会第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kogawa
2. 発表標題 Interaction of Thermal Radiation and Natural Convection
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------