

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 26 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04842

研究課題名(和文) 超軌道速度流れ場の高信頼予測実現へ向けた非平衡モデルの進展

研究課題名(英文) Progress of nonequilibrium models toward the realization of highly reliable prediction of superorbital velocity flow fields

研究代表者

荻野 要介 (OGINO, Yousuke)

高知工科大学・システム工学群・講師

研究者番号：90586463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：大気圏突入時に宇宙機が経験する過酷な空力・輻射加熱環境における熱化学非平衡性や輻射熱輸送に関して本研究では、従来法の代替となり得る実物理過程に即した新たな解析モデルを創設・提案することを目的とした。アーク加熱風洞気流の数値解析を実施し、供試体へ入射する輻射スペクトルを比較検証し、従来法よりも優れた精度を得ることを確認した。これまでに得られた研究成果をまとめ、オンライン開催された国際会議や国内学会にて発表報告した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙空間から地球大気圏へ突入するカプセル宇宙機が溶融することなく地上まで帰還するためには、嚴重な熱防護設計が不可欠となる。突入時の安全対策に万全を期すため、カプセル前面に熱防護材が装備されるが、これは非常に重い。高重量な熱防護材の重さを軽減できれば、ロケット打ち上げ時に搭載する実験機材や人員を増やすことにも繋がり、将来の宇宙探査の可能性をさらに広げる。本研究では、カプセルまわりの過酷な加熱環境と、壁面入射する強烈な熱負荷を高精度に予測できる次世代の数値解析手法を構築提案した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop and suggest a new analysis model based on actual physical processes that can be an alternative to conventional ones regarding thermochemical nonequilibrium and radiative heat transfer in the severe aerodynamic and radiative heating environments experienced by spacecraft during atmospheric entry. A numerical analysis of the arc heating wind tunnel airflow was performed, and the radiation spectra incident on the wall surface of test model was compared and verified with measurements. It was confirmed that the accuracy superior to the conventional model could be obtained. The numerical results have been summarized and presented at international and domestic conferences held online.

研究分野：非平衡性を伴う流れの数値シミュレーション

キーワード：衝突輻射モデル 高エンタルピー流の数値計算 原子・分子過程 輻射熱輸送 分光計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

大気圏突入機まわりの流れ場では、極超音速飛行する機体の前方へ大気が圧縮されることで高圧・高温の衝撃層が形成される。流体要素に乗った座標系で見れば、主流は衝撃波通過後に数 100 倍程度に圧縮され、温度は数万 K まで急激に上昇し、分子化学種は振動励起し解離反応を起こし、生成された原子種は電子励起とともに一部は電離反応にまで達する。同時に原子・分子種は光子を放出・吸収し、輻射熱輸送が起こる。衝撃層内を流れる流体要素の内部では分子間の衝突反応と輻射の放出・吸収が繰り返えされ、機体近傍の境界層へ到達した流体は壁面を加熱することでエネルギーを失う。または機体の後方側へ向う膨張流に乗って脱励起や再結合反応を繰り返す。これまで世界的に行われてきた従来の極超音速流体解析では、上述の物理シナリオに対して“Park の 2 温度モデル [1]”を採用し流れ場の非平衡性を評価してきた。しかし、この非平衡モデルには信頼性を欠いた仮定がなされている。

(1) 衝突・輻射遷移過程による振動・電子励起状態の非平衡性を無視。

(2) 衝撃加熱時の計測データを補間し、圧縮流・膨張流における実在気体効果をモデル化。

まず仮定(1)に関して、Park モデルによる流体解析では、原子・分子の内部励起状態分布を Boltzmann 平衡関数によって平均化していることが解析精度の低下を招いている。一化学種あたり数百にも及ぶ異なる振動・電子励起状態に対して、粒子間衝突や輻射発光・吸収によって状態間の遷移が生じるため、精度の良い遷移確率データを全て収集しきることは非常に困難である。また、全励起状態を記述するために膨大な計算コストも要求されるため、従来法である Park モデルでは効率化のため止む無く励起分布を平均化したと言える。しかし、振動・電子励起分布の非平衡性によって正味の化学反応率と輻射熱輸送率は数 10%もの増減を示す場合もある。さらに、温度緩和時間や振動内部エネルギー等の熱力学諸量も大きく影響を受ける。飛行体後方の圧力分布計測データと膨張流計算結果が合致しない主因であるとも考えられており、次代を担う高信頼予測手法の確立が望まれている。

一方、仮定(2)の問題点は、実際の飛行環境とは異なるエントロピー状態において反応速度定数等の実在気体効果を決定していることである。衝撃波管を用いた計測にて全エンタルピーやレイノルズ数条件は実飛行条件と同等となっはいるが、衝撃層や壁面近傍の速度・温度境界層では衝突・輻射反応も伴った受吸熱が生じるため、別状態の実在気体効果を観測している。また、物体形状に合わせて流れ場は上流側から決まっていくにも関わらず、模型を設置せよになされた衝撃波管による単純な分光計測と一次的な流れ場解釈に関しても、その精度に大きく疑問が残る。さらに、Park 博士も警鐘を鳴らしているが飛行体後方へ向かう膨張流や他の航空宇宙応用であるノズル排気流など、強い膨張波と非平衡性の相互作用が本質的に重要となる流れ場ではその信頼性の検討が求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は上記 2 つの仮定に含まれる不確かさを直接取り除く(仮定しない)ことで、超軌道速度飛行体まわりの非平衡モデル開発と流動場予測用高精度数値計算コードを構築し、次代の世界基準に足り得る高信頼手法を提案することである。また、構築した非平衡モデルと計算コードの公開利用と物性値データベースの公表を持って研究成果の還元する。

3. 研究の方法

従来平均化されていた励起状態分布を衝突・輻射遷移方程式によって直接計算することで、上記の仮定を排除する。この方法は、非平衡物理モデルを複雑化することによって理論的な観点から Park モデルの高度化を図る狙いがある。大気圏突入機まわりの高速流動場の数値シミュレーション計算コードと、流体要素内部の励起状態分布に関する衝突・輻射遷移計算コードの統合開発にはこれまでに成功しているが、数万通りにも及ぶ全ての化学反応や励起遷移の速度定数と輻射の放出・吸収係数を高い精度で評価しモデル化することは非常に困難である。現状では一部高信頼な速度定数や輻射係数の物理モデルを導入できているものの、全てが高い精度とは決して言えないモデルも数多く包含せざるを得ない状況にある。それは理論的なアプローチまたは実験的な直接計測が非常に困難もしくは不可能な衝突・輻射反応が多いためである。そこで、モデル精度の近年の向上による更新情報に関して掲載ある学術論文などの参考文献公開を定期的に監視し、柔軟すみやかにそれら新モデルを衝突・輻射遷移計算コードの速度定数計算ルーチンへ取り込み代替する。

本研究で構築を目指す次世代計算コードは、流体運動と励起分布の非平衡性に加えて更に輻射によるエネルギー輸送方程式との統合をもって完成となるため、まずはこの統合計算コードの完成を目指す。構築した統合計算コードから得た数値分光スペクトルを用いて実験計測スペクトルの波長同定やフィッティングを行い、圧縮・膨張を伴う種々の高エンタルピー流れ場に対して差異の原因と誤差を調査する。最終的には実飛行条件に適合した実在気体効果と電子励起の非平衡分布の寄与をモデル化し、精緻な非平衡モデルと高信頼解析手法を構築・提案する。

4. 研究成果

(1) 電子励起分布の非平衡モデルと流体輻射の統合解析コードの開発

開発に成功した統合計算コードの概要を説明する。まず、流れ場の局所的な温度と密度組成から輻射の放出係数と吸収係数を算出する。続いて、得られた輻射の発光・吸収強度を3次元空間全域で光線追跡することで輻射による熱輸送を評価し、流れ場全域で発光吸収率の空間輸送を数値的に得ることができる。これは、局所的な熱力学諸量から光線追跡することで求めた輻射熱流束の発散を、流れ場のエネルギー保存式の生成項へと還元することを意味する。また同時に、輻射の放射率と輸送計算から得た輻射強度の吸収率、そして粒子間衝突過程に伴う化学反応や励起遷移の速度係数を算出し、衝突・輻射遷移方程式から非平衡な励起状態分布を直接計算する。輻射強度の吸収による励起遷移過程を考慮するためには光線追跡による輻射輸送計算が必須であるため、得られた非平衡励起分布はParkモデルでは算出できなかったより実現に即した解となる。このことが、本計算手法が次世代手法である理由であり最大の利点でもある。

複合的な物理過程（励起状態の非平衡性と輻射熱輸送、流れ場の流動現象）に対して数学的な近似や仮定をすることなく辻褃が合うよう統合した極超音速流計算コードは世界的にも類を見ない。また大気圏突入軌道の中で最大加熱率を迎える飛行条件では、電子励起の非平衡性によって輻射強度スペクトルが大きく変化し得る。本統合計算コードが最も価値を持つ条件の一つである。大気圏突入試験機のフライト試験条件に対して数値解析を実施し、対流・輻射加熱環境の再現や壁面圧力分布などを検証計算し、Parkモデルや実験計測値と比較検討も行なった。

(2) 風洞試験・分光計測との比較とモデル検証

NASA Amesの20 MW アーク加熱風洞にてPalumboらによって計測された輻射スペクトル [2] を例に計算を行う。主流速度を4.679 km/secとし、主流密度は $7.71 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 、主流の並進温度は600 K、振動温度または電子温度は3,827 Kである。密度がより低い極超音速主流であるため、衝撃層内部における熱化学非平衡性が顕著となる問題設定である。図1に計算領域と格子を示す。円柱形状の供試体の前面を計算領域とし、2次元軸対称と見なす。計算格子を衝撃波面と壁面付近に適合し、その総数は 61×61 点である。

図2と図3に並進温度と自由電子温度の計算結果を示す。極超音速流が壁面にて反射圧縮され、強い衝撃波と高温層を形成している。衝撃加熱によって重粒子温度がまず上昇し、解離・電離が生じる。また本計算条件では振動モードと電子励起・自由電子は即座に熱平衡と

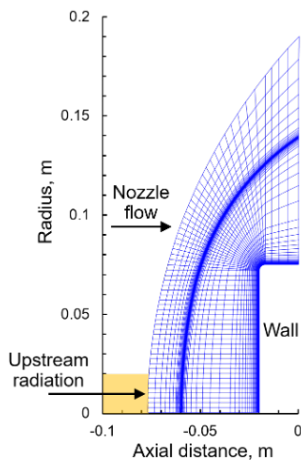


図2 計算領域と格子
になった。

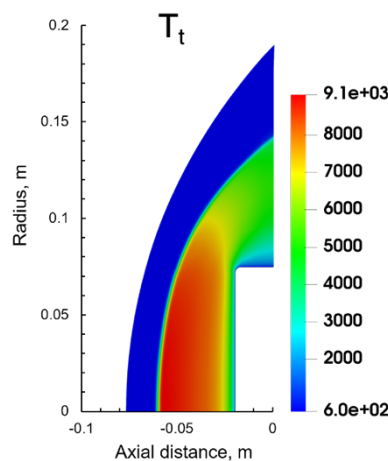


図1 並進温度の計算結果

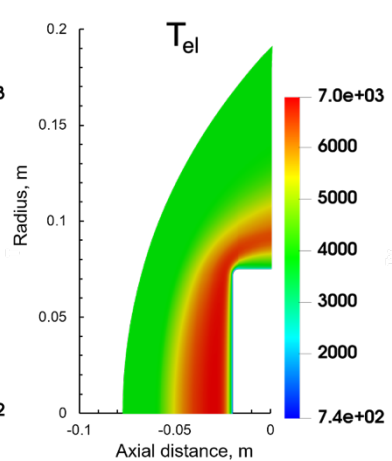


図3 電子温度の計算結果

図4に壁面へ入射する輻射スペクトルの計算結果（図中“CR”と表記）を示し、平衡励起分布による計算結果（図中“Boltzmann”）やPalumboらの計測結果との比較である。ここでPalumbo実験として示したスペクトルは非常に強い光入射で異常加熱であるとも報告されており未解明な部分を多く含む計測結果でもある。流体計算から得られた淀み流線上の温度分布と励起状態分布、化学組成をもとに、主流から壁面方向へ向かって輻射輸送方程式を数値積分することで算出した結果である。波長域を70nmから900nmまでとし、9,000波長点を配置した上で輸送計算したスペクトルである。局所熱平衡を仮定した従来のParkの2温度モデルによるスペクトルと異なって、特に紫外域や赤色からより長い波長域にかけてCRの方が高い輻射強度となり全体的な分布傾向は計測結果へ近づいていることがわかる。衝突・輻射過程によって励起分布が変化することで輻射スペクトルを平坦化する方向へ偏りが表れた。アーク加熱風洞試験における異常輻射加熱の一因であると報告されている前期解離反応を実装することで異常加熱に関して提言できる可能性がある。

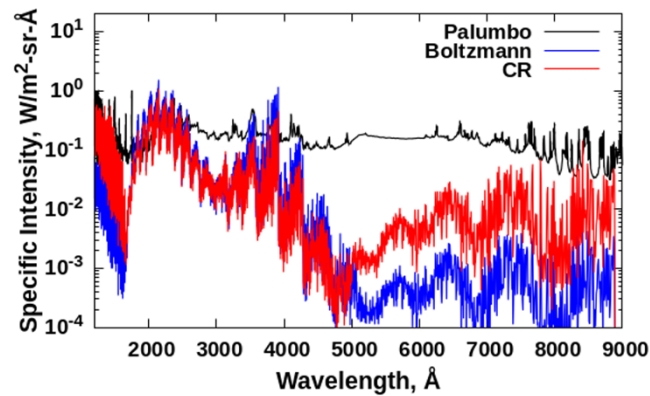


図 4 壁面入射スペクトルの比較

(3) まとめと今後の展望

NASA Ames 研究所に配備されたアーク加熱風洞気流の数値解析を実施し、供試体へ入射する輻射スペクトルを比較検証し、従来法よりも優れた精度を得ることに成功した。また、風洞固有の特徴から卓越する遷移化学反応の追加実装することでより高信頼なモデルに近づけることができる。今後より新しい近年の計測データとの比較検証を進める。

また、2020 年度に購入した分光計測機器にてアーク加熱風洞などの高速プラズマ気流中の物体まわりからの発光を計測する予定であったがコロナ感染拡大下であったため、風洞施設を保有する外部機関との連携実施が困難であった。そこで現在、所属大学の他研究室に配備されている放電管やマイクロ波発生装置を利用し、非平衡プラズマを生成することで分光計測の実施に至った。当初想定の高温高速流れ場とは異なるものの、構築した統合計算コードによる数値分光スペクトルとの比較から反応速度係数モデルの高度化を進めている。得られた研究成果をまとめ国際会議や国内学会にて講演発表報告し議論を重ねる予定である。

<引用文献>

- [1] Park, C., Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics, Wiley, New York (1990).
- [2] Palumbo, G., et al., "Measured Specific Intensity from 130 to 900nm at the Stagnation Point of a Model in Arcjet Flow of 7.8km/sec," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 57, (1997), pp. 207–236.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 浅井友彰, 荻野要介
2. 発表標題 励起非平衡計算による大気圏突入流れの再現
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荻野要介, 砂辺一行, 安部翔太
2. 発表標題 高エンタルピー流における原子・分子の遷移反応速度係数と輻射輸送計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荻野要介, 砂辺一行, 安部翔太
2. 発表標題 極超音速輻射流れ場の励起非平衡計算と分光スペクトル
3. 学会等名 2020年度 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安部翔太, 荻野要介
2. 発表標題 極超音速流れの新たな非平衡モデル構築へ向けた発光スペクトル同定
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 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 砂辺一行, 荻野要介, 酒井武治
2. 発表標題 Numerical Analysis of Flow and Radiative Transfer with Excitation Nonequilibrium in an Arc-jet Facility
3. 学会等名 AIAA SciTech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 砂辺一行, 荻野要介, 酒井武治
2. 発表標題 衝突輻射モデルによるアーク加熱風洞内の流体計算と輻射輸送解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻野要介, 大西直文
2. 発表標題 超音速飛翔体まわりの非平衡流体シミュレーション
3. 学会等名 第23回 日本流体力学会中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 砂辺一行, 荻野要介
2. 発表標題 アーク風洞気流計算と輻射輸送解析による淀み域加熱率の数値評価
3. 学会等名 第51回 流体力学講演会 / 第37回 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荻野要介, 砂辺一行, 大西直文
2. 発表標題 電子励起非平衡性を考慮した高エンタルピー流れ場の数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 砂辺一行, 荻野要介
2. 発表標題 アーク加熱風洞の電子励起非平衡計算による淀み点輻射加熱率評価
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 砂辺一行, 荻野要介, 酒井武治
2. 発表標題 電子励起非平衡輻射計算によるアーク風洞内淀み点の加熱率評価
3. 学会等名 第33回 数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019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
---------	---------