

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22860008

研究課題名（和文）非平衡原子・分子過程と空気プラズマ流れ場の結合解析コード開発

研究課題名（英文）Code development for air plasma flowfield with nonequilibrium atomic and molecular processes

研究代表者

荻野 要介 (OGINO YOUSUKE)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90586463

研究成果の概要（和文）：

空気プラズマ流れ場における、非平衡な原子・分子過程を考慮した数値解析コードを開発した。本計算コードを用いてパルス生成プラズマの非定常性を調べた結果、電離緩和時間はパルス加熱持続時間と同程度となった。プラズマ状態を適切に記述するためには、原子・分子過程の非定常性を考慮することが重要である。また、比較的広範な温度・密度域におけるプラズマ内部状態分布の平衡モデルを検証し、適用可能範囲を示した。

研究成果の概要（英文）：

A time-dependent collisional-radiative model for air plasma has been developed to study the effects of nonequilibrium atomic and molecular processes on the population density in high enthalpy flow. The unsteady nature of pulsively heated air plasma was investigated. When the ionization relaxation time is of the same order as the time scale of a heating pulse, the effects of unsteady ionization are important for estimating air plasma states. From parametric computations in wide temperature and density range, we suggested the appropriate conditions for physical models of plasma internal states.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011 年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：衝突輻射非平衡, 高エンタルピー流, 原子・分子過程

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、大気圏突入物体まわりの極超音速流れや、レーザー生成プラスト波の伝搬といった高エンタルピー流に関する数値的研究を行ってきた。これらの流れ場では、原子・分子ばかりでなく、イオン、電子そして光子が混在した系となり、流体要素内

部は平衡に達しない場合が多い。分子の回転・振動運動や電離、解離などの化学反応による熱化学非平衡や、励起状態分布の非 Boltzmann 分布化、それらに伴う輻射過程の非平衡性は、流動や拡散などの巨視的ダイナミクスをも変化させ得る。このような非平衡複合系の流れ場の解明とその理解を深め

ることは、基礎的な物理過程と工学応用とを結びつける非常に重要な研究である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非平衡原子・分子過程と流れ場の結合数値計算コードの開発である。従来の熱化学非平衡流体解析では、励起状態分布を Boltzmann 平衡分布関数によって平均化するが、本手法では流体要素内部に自由度を導入し、励起状態ごとの保存則を解くことで状態分布を決定する。このようなマルチスケールな計算手法は、局所的に非平衡な原子・分子過程を伴う非定常空気プラズマの大域的な運動を記述する。そのため大気圏突入物体まわりの極超音速流れだけでなく、レーザーやマイクロ波を利用した推進技術、大気圧グローやストリーマ放電に代表される大気圧非平衡プラズマなど多くの先進的な応用技術に対しても適用可能であり、従来法よりも格段に正確な数値解析が可能である。これまでの研究結果からも言えることであるが、原子・分子過程の非平衡性が流れ場に及ぼす影響は非常に大きい。現在、欧米各国においても、大気圏突入問題を想定した原子・分子過程の非平衡数値計算コードが NASA や ESA 系の研究チームによって開発が進められているが、それらの実験データはもちろん、計算コードも一般公開されていない。我々日本の多くの研究者にとってはブラックボックスと化しており、同等の結果を得ることができる計算コードはまだない。こういった日本の現状を打破し、空気プラズマ流れ場の実験、数値解析を更なる高みへと引き上げる礎を築くために、非平衡プラズマ解析コードの開発が急務である。

3. 研究の方法

(1) 原子・分子過程計算コードの概要

空気プラズマ内部の原子・分子励起状態間の遷移レート方程式計算コードを開発する。本計算コードは、空気プラズマ内部の原子・分子励起状態間の遷移過程を直接解き、非平衡状態分布を計算する。考慮した遷移過程は、電子・原子・分子間衝突による励起、電離、解離過程、重粒子間衝突による化学反応、輻射の放出・吸収過程である。適用可能な温度域を 300K から 40,000K、密度域を $10^{12}/\text{cm}^3$ から $10^{19}/\text{cm}^3$ とし、真空紫外から近赤外までの主要な発光スペクトルを解析できるように、各化学種の電子励起状態を選定した。図 1 は、これまでに開発した原子・分子過程解析コードのテスト計算結果で、初期に温度 300K、全数密度 $10^{16}/\text{cm}^3$ であった空気を、瞬間的に 8,000 K まで加熱した際の発光スペクトルである。数万本以上に及ぶ全ての輝線と連続波長スペクトルに対して、発光源となった原子や分子化学種の励起状

態と、その占有数密度までを特定することができる。得られた状態分布から、比熱比や化学組成、分配関数、輸送係数、輻射放出・吸収率などの巨視的物理量を計算可能である。つまり、通常無視されている輻射の寄与を考慮した実在気体の物性を評価することができる。また、本計算手法による研究結果から、特に化学反応生成率と輻射熱放出・吸収率は数 10%以上もの増減を示すことが分かっており、これらの影響を流れ場に考慮することで、対流や拡散といった大域的な流体運動との相互関係を解析できるようになる。

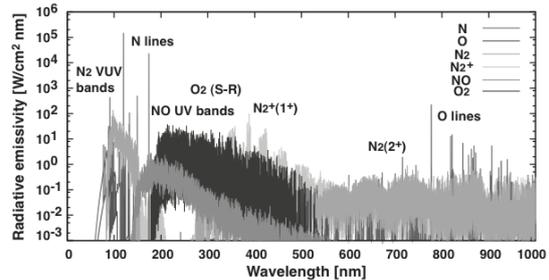


図 1: 発光スペクトルのテスト計算結果

(2) 流れ場との結合計算コード開発

図 2 に、原子・分子過程計算コードと流れ場の結合解析手法の概念図を示す。原子・分子、イオン、電子、光子からなる系を前提としており、エネルギー伝達の流れに主眼を置いた図である。流れ場の支配方程式に加え、流体要素内部の原子・分子の運動状態やエネルギー状態を考えて、それらの熱的・化学的非平衡性を組み込む。特筆すべきは、要素内部の状態分布に対して、Boltzmann 平衡を仮定しない点である。原子・分子過程を考慮して状態間の遷移レート方程式を解き、非平衡な状態分布を導出、それを基に巨視量を計算し、流れ場の保存量にフィードバックさせる。従来の熱化学非平衡流体解析では評価することが出来なかった、状態分布の非平衡性による流れ場への影響を明確に見積もることができる。

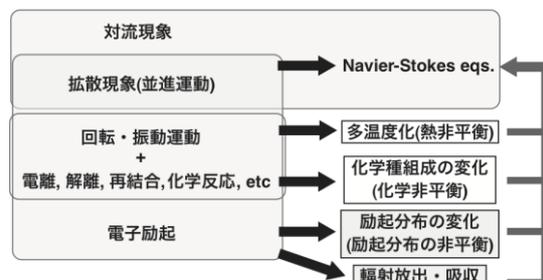


図 2: プラズマ流れ場の結合解析モデル

これまでに研究代表者は、レーザー生成アルゴンプラズマの原子過程と流れ場の結合計算コード開発に成功している。そのときに得られた経験を生かすことで、結合解析コード構築を速やかに行うことができる。コード構築後、大気圏突入時の物体まわりの解析を行い、観測データや他の計算コードとの比較を行う。その後、気体駆動型レーザー推進装置におけるパルス生成プラズマの解析を行う。また、本結合解析コードは、時々刻々変化するプラズマ流れ場の大域的な変動を追跡しながら、任意の時空間における発光スペクトルを数値データとして記録できる。分光装置により測定された発光スペクトルとの直接的な比較が可能となる。そのため、プラズマ内部状態をより精緻に解析することができ、高エンタルピー実験との非常に密な連携を実現する。

4. 研究成果

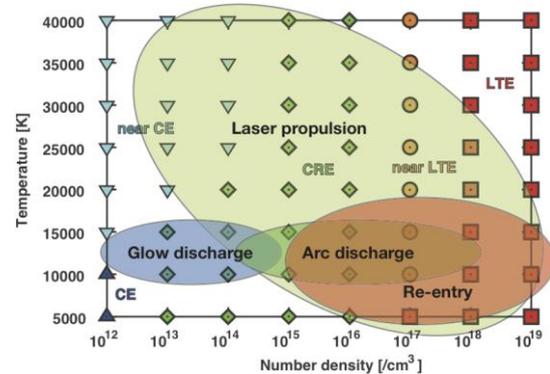
(1) 各平衡モデルの適用可能範囲

レーザー生成プラズマによって駆動されるプラスト波の伝搬や、大気圏再突入物体まわりの極超音速流れ、放電現象など、多くの工学的応用技術において、プラズマ内部の非平衡原子・分子過程が流れ場に及ぼす影響は、詳細にはわかっていない。

衝突輻射平衡 (Collisional-Radiative Equilibrium: CRE) は、局所熱平衡 (Local Thermodynamic Equilibrium: LTE) とコロナ平衡 (Corona Equilibrium: CE) モデルの中間的な平衡モデルで、両者を一般化したものである。CRE モデルは低密度極限において CE に、高密度プラズマでは LTE に一致する。LTE の場合、励起状態分布は Boltzmann 分布関数に従う。一方、CE の場合、低密度プラズマにおける粒子間衝突による励起レート係数は、自然放射係数に比べて相対的に非常に小さいため、より上準位への衝突励起が起こる前に基底状態へ脱励起すると見なして、全ての化学種が基底状態にあると仮定する。また、CRE モデルによる励起状態分布は遷移レート方程式を直接解くことで決定される。そのため CRE モデルは決して簡便なモデルではなく、プラズマ状態分布の記述には LTE や CE モデルの方が好まれる場合が多い。つまり、各平衡モデルが適用できる密度・温度範囲を調べることは、非常に有益な情報となる。

図 3 に、空気プラズマに対する各平衡モデルの適用可能範囲の調査結果を示す。温度域を 5,000K から 40,000K、全数密度域を $10^{12}/\text{cm}^3$ から $10^{19}/\text{cm}^3$ と設定した。このような計算条件は、前述の空気プラズマの工学的応用例における密度・温度域を網羅している。プラズマ内部状態の LTE からの差異は、

より高温・低密度な領域で大きくなることを確認できる。数密度が $10^{16}/\text{cm}^3$ を下回るような条件では、状態分布は LTE に到達しない。よって、プラズマ状態の正確な数値的予測や、発光線強度を利用するプラズマ診断実



験には、CRE モデルを用いるべきである。

図 3: 各平衡モデルの適用可能範囲

(2) 励起状態分布の非定常性

図 4 に窒素原子の占有密度の時間発展を示す。図中の励起状態は、中性原子の基底状態から 5 状態、一価電離イオンの基底と準安定状態、そして二価電離イオンの基底状態である。破線は、各々の励起状態に対する Boltzmann 占有密度である。初期組成は、全数密度 $10^{17}/\text{cm}^3$ 、温度 300K の局所熱平衡にあると仮定し、瞬時に 40,000K まで加熱した結果である。この計算条件は、気体駆動型レーザー推進装置におけるパルス生成プラズマを想定している。窒素分子は、10ns までにほぼ全て解離している。中性原子の時間発展を見ると、電離を伴う非定常励起過程は 40ns まで維持され、その後、非定常電離状態が 100ns まで続き、中性原子の各励起状態は自由電子と一価電離イオンとの間で平衡に達する。そして、一価電離イオンの各励起状態における占有密度の過剰分は、主に二価電離イオンの生成によって消費される。電離成長過程における系全体の緩和時間は、 $5\mu\text{s}$ となった。レーザー推進装置における電離プラズマは、半値全幅が数十 ns でパルス持続時間が数 μs のレーザー光の集光によって生成される。電離緩和時間は、パルスレーザーの持続時間スケールと同程度なので、空気プラズマの内部状態を記述する際に、非定常電離過程の影響を考慮することは重要である。ここで用いた計算条件は、定常時には LTE に達しているが、レーザー生成プラズマの非定常性を適切に評価する必要がある場合には、時間依存遷移レート方程式を解くことが重要である。

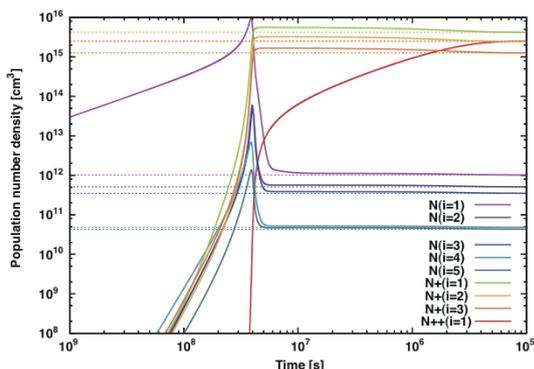


図 4: 窒素原子の占有密度の時間発展

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 4 件)

1. 江波戸翔一, 荻野要介, 大西直文, “Computational Study of Discharge Processes in DBD Plasma Actuators,” *Journal of Space Technology and Science*, 査読有, Vol. 25, pp. 19-33, 2011.
2. 荻野要介, 大西直文, “A Collisional Radiative Code for Computing Air Plasma in High Enthalpy Flow,” *Shock Waves*, 査読有, Vol. 21, pp. 289-299, 2011.
3. 荻野要介, 大西直文, “Numerical Study on Air Plasma Flowfield Coupled with Transition Rate Equations,” 42nd Plasmadynamics and Lasers Conference, 査読無, AIAA Paper 2011-3622, pp. 1-8, June, 2011.
4. 荻野要介, 大西直文, “Development of Computational Code for Atomic and Molecular Processes in High Enthalpy Flow,” 41st Plasmadynamics and Lasers Conference, 査読無, AIAA Paper 2010-4308, pp. 1-8, June, 2010.

[学会発表] (計 2 件)

1. 荻野要介, 大西直文, “Numerical Study on Air Plasma Flowfield Coupled with Transition Rate Equations,” 42nd Plasmadynamics and Lasers Conference, 2011年6月27日, Hawaii, US.
2. 荻野要介, 大西直文, “Development of Computational Code for Atomic and Molecular Processes in High Enthalpy Flow,” 41st Plasmadynamics and Lasers Conference, 2010年6月28日, Chicago, US.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荻野 要介 (OGINO YOUSUKE)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：90586463

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：