

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13930

研究課題名（和文）CO₂緩和反応モデル検証のための中赤外レーザー吸収分光法による温度分布計測研究課題名（英文）Temperature Measurements of CO₂ by Laser Absorption Spectroscopy for Evaluation of Relaxation Rate

研究代表者

野村 哲史（Nomura, Satoshi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：80709361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：カプセルの火星大気突入環境を模擬した高速気流を膨張波管にて生成し、二酸化炭素の吸収線をレーザーを用いて計測した。レーザー波長を高速掃引することで、衝撃波到達からテスト気流、膨張波の到達までの吸収スペクトルを数百マイクロ秒の間、連続的に捉えることができた。その結果、テスト気流の並進温度は、熱化学平衡を仮定して算出される理想的な値よりも高いことが明らかになった。主な原因として、理想的には無反射にて衝撃波が伝播するとされる膨張波管装置の第二隔膜において、微小であるが反射が生じていることが考えられる。第二隔膜をより薄いフィルムへと変更することで反射を抑えられると考え、現在隔膜変更の効果を評価中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、大気突入を有するミッションの検討が盛んであるが、膨張波管は、大気圏突入条件を再現する装置として、幅広く用いられ、大気突入時の加熱環境のモデル化およびその検証に役立てられている。しかし、その気流温度については、直接的な計測評価が実施された例が、非常に少ない。本研究では、各種温度の中でも基本的な並進温度を直接計測することで、気流の素性についての理解を深める際の重要な情報を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：A martian atmospheric entry environment is simulated with an expansion tube, and the test flow is measured by a laser absorption spectroscopy. The rapid sweeping of the laser wavelength enables the highly time-resolved measurement, and the time history of translational temperature is obtained from the shock arrival to the expansion wave arrival. The measured temperature is higher than the ideal values which is estimated with a thermochemical equilibrium assumption. This disagreement comes from the weak reflection at the second diaphragm of the expansion tube. The second diaphragm is replaced by a thinner film. The evaluation of its replacement effect is currently conducted.

研究分野：熱空気力学

キーワード：レーザー吸収分光 膨張波管 二酸化炭素

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来の火星探査に向けて、さまざまなミッションが検討されているが、火星大気突入時の空力加熱予測精度の向上は、それらに共通の課題である。火星大気圏突入における加熱環境は、加熱率としては地球大気圏突入時のそれに比べて、一般的に決して高くはないが、二酸化炭素由来の赤外波長領域における輻射加熱を精度よく予測することは、依然として重要な技術課題として挙げられている。そのためには、3原子から構成される二酸化炭素分子の内部励起緩和反応および解離再結合反応を如何に確からしく記述するかが重要となり、関連する実験データの拡充もあわせて必要である。膨張波管は、気流生成過程に淀み点がなく、高速気流でありながら、バイナリスケールを合わせた試験が可能であるという特徴がある装置であり、上記のような反応流れ場に関する研究に適している。しかし、基本的な動作原理は古くから知られているものの、実際には、装置壁面の境界層の影響や第二隔膜破膜時のわずかな衝撃波反射などの要因により、生成された気流の素性を正確に把握することが容易ではない。広く用いられる計測手法は、ピトー圧計測であり、試験時間の推定も圧力の時間履歴から行われる場合が多い。その他、流れの可視化手法を用いた実験による気流診断なども数多く試みられているが、気流中にプローブを挿入する接触型の計測が多く、気流温度の非接触直接計測は、報告例がない。これは、膨張波管の気流は本質的に温度が低く、その気流維持時間もせいぜい数百マイクロ秒程度と短いことから、気流の発光を計測するような受動分光が適用できないためと考えられる。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、吸収分光法を適用して、二酸化炭素気流の温度を計測することを試みる。二酸化炭素を試験気体とする地上試験装置に、吸収分光法を適用した例はいくつか報告されているが、膨張波管への適用例はなく、世界初の試みと考えられる。

3. 研究の方法

図1に吸収分光法の概略図を示す。光源には、DFB-QCL(QCL, AC081, Thorlab Inc.)を用いた。このレーザーは、その温度および電流を調整することで 2293cm^{-1} から 2296cm^{-1} 程度まで発光することができる。レーザーは電流変調によりその波長を掃引している。ここでは、 50kHz の繰り返し周波数で、掃引幅、およそ 0.2cm^{-1} を掃引している。繰り返し周波数は、計測対象である膨張波管試験気流の維持時間から決まる。振動回転励起状態に関する情報を得るためには、掃引幅を広くとり、多数の遷移を計測する方がよいが、繰り返し周波数一定で、掃引幅を広くとると、より高周波な電流計測が必要となり、高い信号比を維持した計測がより困難となる。ここでは、線スペクトルを捉えられる範囲で可能な限り狭い掃引幅を設定した。なお、現在は波長掃引をモニターするためのエタロンを用いておらず、得られたスペクトルの時間情報を波数情報に変換する際には、複数の吸収ラインを取得して、その対応関係を求めている。膨張波管を透過したレーザー強度を InSb デテクター(P5968-060, Hamamatsu Photonics K.K.)により受光し、その出力は高速 IV 変換器(C6438, Hamamatsu Photonics K.K.)を用いて増幅して計測している。デテクターの前方には、バンドパスフィルターおよびピンホールを設置し、気流の自発光ノイズをおさえた。

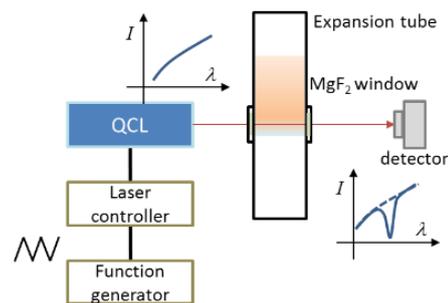


図1 計測系概略図

4. 研究成果

図2に圧力センサーによる静圧の時間履歴と、レーザー強度の時間履歴を示す。衝撃波到達から、接触面到達までの熱いガスと、接触面到達後の冷たい試験気体では、吸収信号の特徴が大きく異なる。ここでは、衝撃波到達直後の信号については、吸収が小さいため、それ以降の信号に対して解析を進める。なお、衝撃波到達時刻は、静圧信号の立ち上がり時刻から決定し、接触面到達時刻は、熱化学平衡を仮定した計算値から $30\mu\text{s}$ 程度としている。図3に1つの

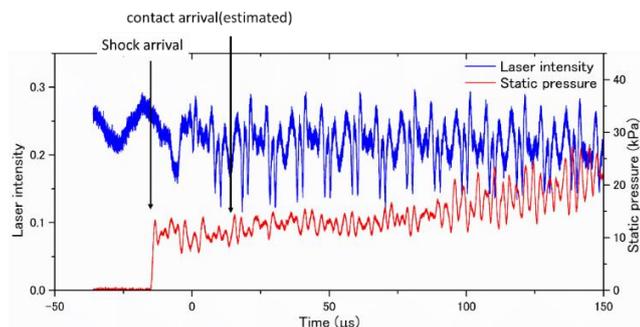


図2 吸収信号および圧力信号の時間履歴

掃引により得られる吸収スペクトルを示す。ここでは、4つの吸収線が記録されている。図中の遷移の表記法は、CSDSなどのデータベースで使用されているものである。それぞれの波数（波長）はデータベースを参照して求まるため、時間軸を波数軸に変換できる。現在は、エタロンを用いていないため、この方法で時間軸を波数軸へ変換している。線幅がり評価のためには、4つのピークを持つデータに対して、フォークト関数近似を適用することになるが、全ての近似パラメータを拘束なしで近似解を求めようとしても、収束しない場合も少なくない。そこで、ここではまず、ピーク位置を定めるために、比較的扱いが容易なガウス関数を4つで近似を行い、吸収中心位置を求めた。次に、先に述べた方法により、時間を波数へと変換する。その後、フォークト関数近似する際には、中心位置は固定とし、またガウス幅がり、ローレンツ幅がりについては、4つの吸収ラインについて同一とした。以上より、ガウス幅がりが求まり、並進温度が算出される。図4に静圧の時間履歴と並進温度の時間履歴を示す。温度の計測時刻は、P24(1,1,1,1)→(1,1,1,0,1)の吸収中心における時刻を代表値として、プロットしている。100 μs以降において、膨張波の到達により試験時間が終了し、静圧の上昇が確認され、また並進温度にも上昇の傾向が確認できる。加えて、20 μsにおいて計測された温度はほかの温度に比べて低い値を示しており、この時間において、気流静定が完了していないと考えられる。ここでは、静圧、温度の時間履歴から衝撃波到達後およそ25 μsから100 μsまでの間を試験時間であると考え、平衡仮定に基づくと、衝撃波到達から接触面到達までの時間は30 μs程度、試験時間は100 μs間と予測され、計測結果から求められる結果は、それぞれの計算値よりもわずかに短い。この原因としては、熱非平衡性と境界層の影響が考えられる。試験時間内に計測された温度を平均すると2900±200Kとなる。一方、熱化学平衡計算から算出される気流温度は、2100Kであり、計測値の方が高い。この原因の1つとしては、第二隔膜の破膜において、わずかに衝撃波反射が生じていることが考えられる。

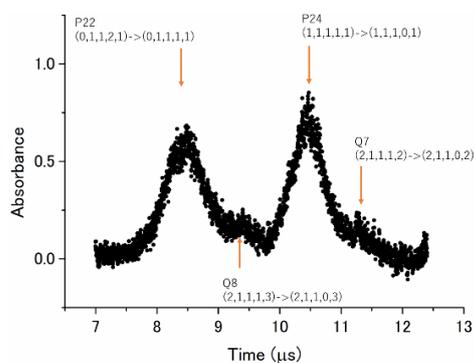


図3 吸収スペクトル

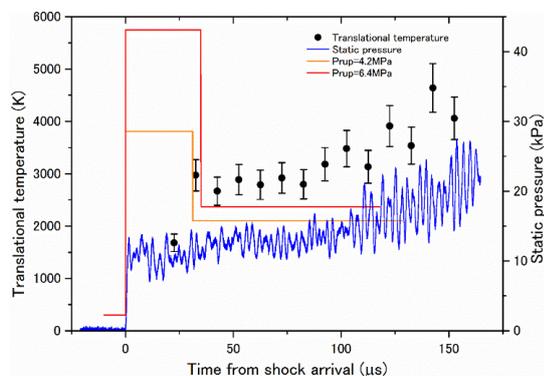


図4 並進温度の計測値および計算値と静圧の時間履歴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 野村哲史、藤田和央
2. 発表標題 Laser Absorption Measurements of High Enthalpy CO ₂ Flow in Expansion Tube
3. 学会等名 International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村哲史、藤田和央
2. 発表標題 Absorption Spectroscopy of CO ₂ Flows in Expansion Tube
3. 学会等名 International Symposia on Shock Waves (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高柳大樹、野村哲史、藤田和央
2. 発表標題 調布JAXA膨張波管における火星大気突入環境模擬と赤外輻射計測技術の紹介
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム
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
---------------------------	-----------------------	----