

2C02 吸光イメージングによる 極超音速飛翔体周りの流れ場評価に向けた検討

○野村哲史（宇宙航空研究開発機構）

How to Prepare the Paper for the Fluid Dynamics Conference / Aerospace Numerical Simulation Symposium
Satoshi Nomura (JAXA)

Key Words : Aerodynamic Heating, Flow Measurements

Abstract

To improve aerodynamic heating prediction during atmospheric entry, it is essential to compare experimental and analytical data on species density and temperature across the flow field. While measurements at the front of a capsule can be conducted using ground-based facilities like shock tunnels, rear flow measurements are more difficult and often require free-flight tests to avoid support interference. Traditional methods like Schlieren imaging provide flow visualization but lack detailed species or temperature data. Emission spectroscopy offers such data but struggles in low-temperature regions like the wake. This study explores absorption spectroscopy for rear-flow measurement in free-flight tests.

1. はじめに

大気突入時の空力加熱予測技術の向上のためには、全機周りの流れ場において、各化学種密度や温度などの分布を実験データと解析結果で比較できることが望ましい。カプセル前方の分布であれば、膨張波管や衝撃風洞などの地上模擬装置を用いて、高速気流中に模型を設置した計測が可能であるが、後流の分布取得には、自由飛行試験などにより模型支持構造の影響を回避する必要があり、衝撃風洞における模型自由落下を利用した計測や、軽ガス銃による自由飛行試験が行われる。しかし、試験時間の短さ、観測点が移動することなどに起因し、これら後流計測は、決して容易な計測ではない。古くから広く用いられている計測法としては、シュリーレンやシャドウグラフなどの密度勾配による光の屈折を利用した可視化法があるが、流れ場を構成する各化学種の密度や温度の情報を得ることは難しい。また、密度が低い環境への適用に際しては高感度化が必要になるなどの課題もある。発光分光計測は、計測対象の熱的励起状態を取得することで、温度や組成情報を得ることが可能であるが、比較的低温である後流領域の発光信号を十分な信号強度で計測するためには、計測時間を長く確保する必要があり、自由飛行試験への適用は難しい場合が多い。そこで、本研究では、自由飛行試験において供試体後流に吸収計測を適用することを検討する。

2. 吸収計測

ここでは、計測対象の各エネルギー準位間のエネ

ルギー差に応じた波長の光を照射し、その減衰量から密度分布情報を得ることを考える。まずは、その計測対象に応じた適切な光源波長の選択が重要である。また、吸収量は対象の吸収係数と光路長さの積 kl （アブソーバンス）に対して、指数関数的に減衰するため、あまりにアブソーバンスが大きい系に対しては密度変化に対する強度変化の割合が小さくなり、分布計測が困難になる。したがって、事前検証に際しては、各波長におけるアブソーバンスを予測し、その値が計測可能な範囲にあるか調査する必要がある。ここでは地球大気を想定した空気条件および火星大気突入を想定した二酸化炭素条件に対して検討を行う。対象とする波長帯としては、光源およびセンサーの入手性を考慮し、200nmから5500nmまでとする。センサーのAD分解能は16bit(=65536カウント)を想定し、ノイズの影響を踏まえ入射強度の1/1000を検知限界と仮定する。このときのアブソーバンスとしての検知下限は0.001であり、適用上限はおおよそ7となる。実フライト環境、あるいは試験環境では後流域は熱化学的非平衡状態にあると考えられるが、ここでは簡単のため、均一な空間分布とし、圧力は10kPaで固定、熱化学平衡とし1000~6000Kまで変化させた場合を考えることとする。

3. 観測系

JAXA調布飛行場分室にある自由飛行試験装置、二段式軽ガス銃を対象に吸収計測の成立性を検討する。図1に概略図を示す。観測チャンバー内には

0~1気圧の任意のガスを封入可能である。観測窓間の距離は800mmである。直径16mmの供試体運用実績があるため、後流域は20mmの長さで均一な吸収体が存在すると仮定して検討を行う。なお、窓や光学系での減衰は無視する。

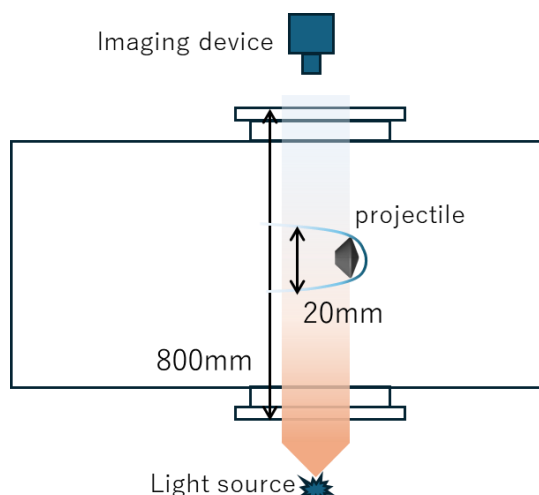


図 1 調布二段式軽ガス銃における吸収イメージング計測の概略図

4. 結果

空気の場合のアブソーバンススペクトル（200nmから1000nm）を図に示す。2000K程度以上になれば、NOによる吸収が250nm以下のUV域で検知可能な範囲にある。軽ガス銃における自由飛行試験環境では、供試体後方の流れ場だけでなく、試験気体として封入された常温のガス（図1の800mmのうち、後流20mm以外の領域）の影響も考慮する必要があるが、図2に示すように、常温域では吸収が非常に小さいため、その影響は無視できると考えられる。課題は、この波長域の光源の入手性であるが、250nm付近の波長であれば、LEDが比較的容易に入手できる。それ以下の波長帯では、235nmのLEDがいくつか確認できる。そのほかの光源としては、キセノンフラッシュランプが候補になると考えられる。

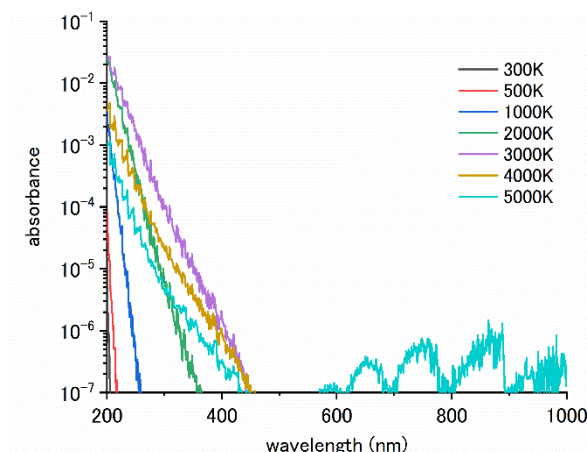


図 2熱化学平衡状態の空気のアブソーバンススペクトル

図3に熱化学平衡状態の二酸化炭素のアブソーバンススペクトルを示す。空気とは異なり、アブソーバンス1以上を示す波長域も存在し、特に4.2マイクロ帯の中赤外域には局所的に、常温状態でも非常に強い波長帯があり、その領域を避けた波長選定が必要になる。

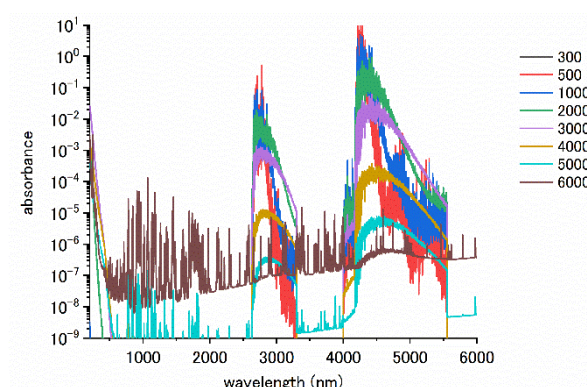


図 3 CO2のアブソーバンススペクトル

5. まとめ

大気突入機の全機周りの密度・温度場計測に向けて吸収イメージング計測を検討している。空気を条件とした場合では、250nm以下のUV域を利用すれば、検知可能であると考えられる。二酸化炭素環境では、2.8マイクロ帯もしくは4.2マイクロ帯が強い吸収を示し、有効な波長域ではあるが、常温での強い吸収を示す特定の波長域については、回避する必要がある。今後、具体的な光源およびセンサーの機器選定を進め、基本的な性能実証から取り組む予定である。