

赤外線ふく射法を用いた高エンタルピー流温度計測

Temperature Measurement of High Enthalpy Flow with IR Emission

○正 高橋周平 (岐阜大) 正 若井和憲 (岐阜大)
正 津江光洋 (東大) 正 河野通方 (東大)

Shuhei TAKAHASHI, Kazunori WAKAI, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193
Mitsuhiro TSUE, Michikata KONO, University of Tokyo

1. 緒言

次世代用航空機エンジンとして有望視されているラム/スクラムジェットエンジン[1]は、空気取入口より吸い込んだ高エンタルピーの空气中に燃料を噴射して推力を得る。このとき、燃焼器内部は高温かつ遷音速あるいは超音速の流れ場となり、燃焼現象を極めて複雑にしている。このような燃焼器内部において温度分布を正確に測定することは、現象解明および性能把握の観点からきわめて重要と考えられる。しかしながら先に述べた流れ場の特長により、熱電対のような接触型の手法では、応答性が確保できない、流れ場を乱す、高い熱負荷に耐えられない、といった問題点が挙げられる。

そこで本研究では、十分な応答性を持ち、かつ流れ場に擾乱を与えずに測定を行うことが出来る赤外線ふく射2色法を2次元的な高エンタルピー流れの温度測定に適用した。本手法では、特定の媒質からのふく射エネルギーを2つの波長帯で測定することで、温度と圧力の情報が得られる。これは、特に超音速場においては、温度分布に加えて圧力分布を測定できることを意味し、流れ場の把握に重要な情報をもたらす。本研究では、H₂O および CO₂ を媒質として、超音速および亜音速の高エンタルピー流れの測定を行った結果を示す。

2. 測定原理および実験装置

本研究では、東京大学工学部航空宇宙工学科本郷キャンパスに設置されたマッハ 2.0 超音速燃焼風洞(本郷風洞)、および新領域創生学研究科柏キャンパスに設置された高エンタルピー燃焼風洞(柏風洞)で温度測定試験を行った。本郷風洞は、加熱方法として Vitiated Air 方式を用いており、このため流入空气中に大量の H₂O を含んでいる。よって、本郷風洞に対しては媒質として H₂O を選択する。柏風洞は、加熱方法としてペブルによる蓄熱体方式を採用している。このため、そのままでは測定するターゲットが存在しない。よって、柏風洞での測定においては少量の CO₂ をドーピングすることにより測定を行う。

媒質として用いる H₂O は 1.9 μm および 2.5 μm 付近に、また CO₂ は 4.4 μm 付近に強い吸収帯を持つことが知られている。本研究では、表 1 に示すバンドパスフィルターを組み合わせることで、それぞれの媒質からの2波長のふく射強度を測定する。ふく射強度は、媒質の温度と分圧の関数となるため、あらかじめ測定部分の温度・圧力範囲においてふく射強度計算コード RADCAL[2]を用いてデータベース

を作成し、このデータベースから各波長での実験値に合致する温度・分圧を内挿による求める。

媒質に H₂O を選択した条件では、ふく射強度の測定は、図 1 に示す測定装置を用いて行った。測定部からのふく射はハーフミラーで2つに分けられ、それぞれフィルターを通して検出器 (Judson J13TO PS3-0-51) へ導かれる。得られたふく射強度 I_j は、式 1 で表される[3]。

$$I_j = C_j \int_{\omega_j} \tau_{g,\lambda} \tau_{A,\lambda} \tau_{F,\lambda} \varepsilon_{\lambda} I_{B,\lambda} d\lambda \quad \text{Eq. 1}$$

ここで、 C_j は窓ガラスやレンズなどの光学部品の特性や検出器の感度で決まる実験定数であり、黒体炉を用いてあらかじめ求められる。また、媒質に CO₂ を選択した条件では、赤外線カメラ (NIKON LAIRD-S270) にバンドパスフィルターを取り付け、2次元情報として記録した。

Table 1 Band pass filter used for IR measurement

Medium	Filter	Center of wavelength	Half band width
H ₂ O	1	1.908 μm	98.5 nm
	2	2.611 μm	119 nm
CO ₂	3	4.405 μm	44.7 nm
	4	4.425 μm	47.8 nm

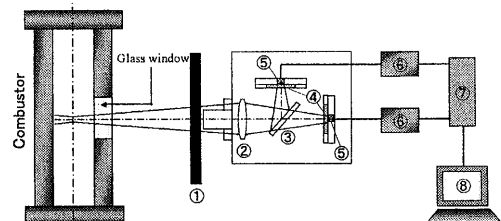


Fig. 1 Schematic of IR detectors, 1:Chopper, 2: Lens, 3: Half mirror, 4: Band pass filter, 5: Detector, 6: Amp., 7: A/D converter, 8: PC

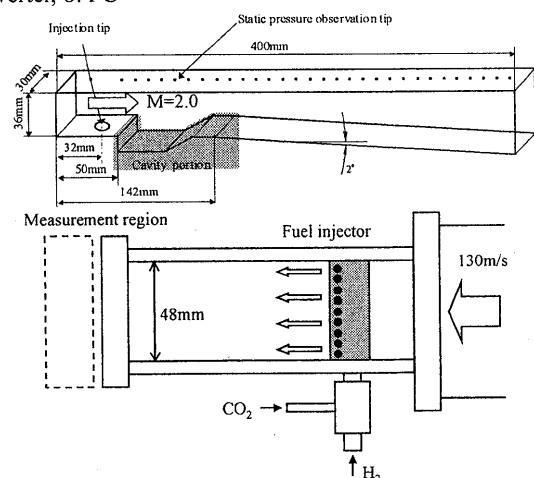


Fig. 2. Schematic of test sections. Upper: Supersonic wind tunnel. Lower: Subsonic wind tunnel.

本郷風洞での実験は、キャビティを有するスクラムジェット燃焼器を風洞出口に直結し、主流総温 1800K、主流総圧 0.38MPa、マッハ数 2 の条件でキャビティを越える流れ場の温度測定をサファイア窓を通して行った。柏風洞では、主流温度 1200K、圧力 101kPa、流速 130m/s、の条件で、風洞出口に燃焼器を取り付け、気流のみ、および当量比 2.3 の条件で水素を噴射したときの燃焼器出口での排気温度の測定を大気開放条件で行った。なお、このとき CO₂ は、水素燃料に気流空気の約 1.5%を混入して噴射することで添加した。それぞれの風洞での観測部の詳細を図 2 に示す。

3. 実験結果および考察

図 3 に、本郷風洞で得られた温度および圧力分布の結果を示す。本実験では、流れ方向に間隔 10mm で 12 点、高さ方向に 6~14mm で 5 点の計 60 点の測定を行った。主流総温から計算される測定部入口での静温は 1145K、測定部上流での静圧は 50kPa である。温度分布を見ると、測定部入口中央付近において 1085K の温度が測定されており、ほぼ妥当な値となっている。燃焼器上流側ではやや温度の高い部分が線状になって現れており、風洞の Vitiation 加熱器によって生じた温度分布が観察されていると考えられる。このような温度分布は壁面静圧から得ることは出来ないため、風洞設備の調整や評価に本計測手法が有用であることが分かる。また、圧力分布を見ると、キャビティのランプ部に衝突した主流が生じる斜め衝撃波が反対側の壁面に到達して形成する高圧部分を捕らえることが出来ている。またキャビティ内部においては、圧力温度とも低下している様子も捉えている。今回の実験では、60 回の点計測の結果であるため、再現性の問題もあり、得られた結果は解像度と精度に不十分な点もあるが、定性的な特徴を捉えるには十分であった。また、ふく射を利用することで光学経路が単一で済み、またレーザー等の光源も不要であるため、簡便な計測法として有効である。

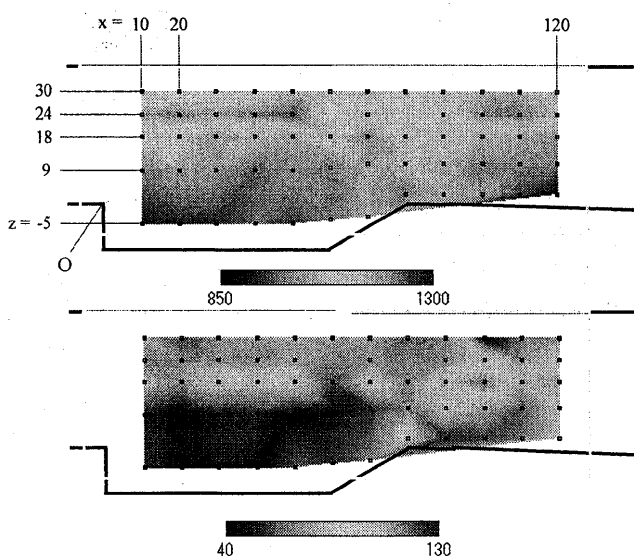


Fig. 3 Temperature distribution (upper, unit: K) and pressure distribution (lower, unit: kPa).

次に、柏風洞における燃焼器出口の温度を測定した結果を示す。本実験では、本郷風洞の実験と異なり、各波長帯での測定を異なる試験で行ったが、各試験における風洞の作動条件がばらついたため、2つの測定値から 2 色法で温度・圧力を求めると大きな誤差が生じてしまった。しかしながら、本実験では燃焼器出口が大気開放であり、CO₂ 分圧は大気圧と投入濃度から求めることが出来るため、1 色法を用いて温度測定を行った。図 4 左は、燃焼器出口 10mm 下流におけるふく射強度から求めた CO₂ 濃度-温度曲線である。2 色法では 2 つの曲線の交点が求める解となるが、既知である CO₂ 濃度と異なる解を与えている。これは、2 色のふく射の測定が同じ試験で行われていないため生じた誤差である。そこで、CO₂ 濃度が 1.52% 既知として温度を求めると、主流温度 1177~1189K が得られた。この値は、測定部上流において熱電対により測定された値 1219K に近く妥当な値である。図 4 右は燃料噴射器より当量比 2.3 で水素を噴射したときの出口での測定結果である。断熱火炎温度 2282K に比べて、測定された温度は 1930~2020K とやや低めであるが、燃焼効率および壁による冷却を考慮するとこの値も妥当であると考えられる。

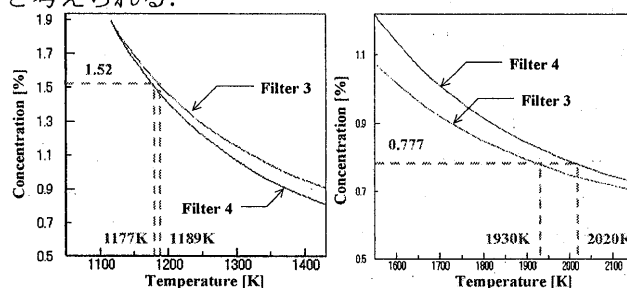


Fig. 4 Concentration-temperature diagrams. Left: No fuel injection. Right: combustion.

結論

赤外線ふく射法を用いて高エンタルピー風洞での 2 次元流れ場の温度測定を行い、以下の知見を得た。

1. 温度および圧力の空間分布を求めることが出来た。これらの情報は、接触型の計測器では求めることが困難であるが、本手法を用いることで、比較的容易に測定することが出来る。
2. 2 色法で精度よく測定する場合は、同時刻に 2 波長の帯域で測定する必要があり、CCD タイプのように単一のディテクターを利用した場合には、光学系の工夫が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、本学 4 年生の前田一樹君、安里明哲君に多大な協力を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] F. S. Billig, J Prop. Power 9, pp. 499-514, 1993.
- [2] W. L. Grosshandler, "RADCAL: A Narrow-Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment", NIST TN1402, 1993.
- [3] 諸頭, 若井, 高橋, 志水, 燃焼の科学と技術 7, pp. 175-185, 2000.