



ISSN 1349-1113  
JAXA-RR-07-045



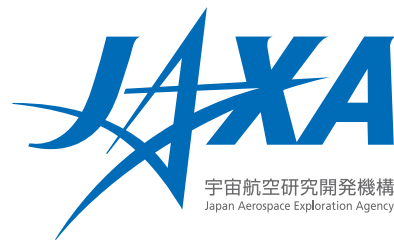
宇宙航空研究開発機構研究開発報告

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA Research and Development Report

半導体レーザ吸収法によるExpansion Tube気流の計測

中北 和之, Jay B. JEFFRIES, Ronald K. HANSON

JAXA-RR-07-045



2008年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

概要 .....	1
1 はじめに .....	2
2 Stanford 6 inch Expansion Tube .....	2
2.1 Expansion tube の概要 .....	2
2.2 Stanford 6 inch Expansion Tube 気流への半導体レーザ吸収法適用 .....	3
3 半導体レーザ吸収法 .....	3
3.1 原理 .....	3
3.2 気体水分子を用いる吸収法 .....	5
3.3 半導体レーザ吸収法のデータ処理 .....	5
3.4 Line Selection（最適吸収線の選定） .....	6
3.5 温度計測手法 .....	7
3.6 半導体レーザスキャン周波数 .....	8
3.7 計測用ハードウェア .....	9
4 試験気体持続時間同定試験 .....	9
4.1 使用吸収線 .....	9
4.2 計測用模型及び試験セットアップ .....	9
4.3 試験気体持続時間計測結果 .....	10
5 温度計測試験 .....	11
5.1 使用吸収線 .....	11
5.2 計測用模型及びセットアップ .....	12
5.3 静的温度検証（初期計測結果） .....	12
5.4 計測ソフトの改良 .....	13
5.5 静的温度検証（ソフト改良後の結果） .....	13
5.6 Expansion Tube 試験 .....	14
5.6.1 膨張波管気体が He の場合 .....	14
5.6.2 膨張波管気体が空気の場合 .....	15
まとめ .....	16
Appendix 高温場計測システムの検討 .....	18
A-1. 使用吸収線の選定、計測ソフトの改修 .....	18
A-2. 溶鉱炉を用いた高温場での吸収線計測 .....	19

# 半導体レーザ吸収法による Expansion Tube 気流の計測\*

中北 和之<sup>\*1</sup>、Jay B. JEFFRIES<sup>\*2</sup>、Ronald K. HANSON<sup>\*2</sup>

## Expansion Tube Flow Diagnostics Using Laser Diode Absorption Spectroscopy\*

Kazuyuki NAKAKITA<sup>\*1</sup>, Jay B. JEFFRIES<sup>\*2</sup>, Ronald K. HANSON<sup>\*2</sup>

### Abstract

An expansion tube flow diagnostics was conducted to identify its flow static temperature as a research topic of the visiting researcher from JAXA. The expansion tube has constructed at High Temperature Gasdynamics Laboratory (HTGL), Department of Mechanical Engineering, Stanford University since July, 2005. As the expansion tube flow diagnostics, it was necessary to measure flow static temperature, however, it could not apply the conventional thermo sensors, which have poor time response, or theoretical estimation using incident Mach number of shock wave, which may cause error. The tunable laser diode absorption spectroscopy was applied because of its merits of fast and direct temperature measurement.

The target seed of the tunable laser diode absorption spectroscopy was water vapor. This article includes followings as the description of the measurement system preparation and construction;

- theory of absorption spectroscopy and temperature calculation
- line selection program to select best lines for the expansion tube tests
- test model for expansion tube test
- measurement system of the tunable laser diode absorption spectroscopy for expansion tube

HITRAN2004 was utilized to apply line selection and construct the data reduction software as the database of the absorption line.

The expansion tube flow diagnostics was conducted using the constructed measurement system. Its scanning frequency was 50kHz, measuring temperature every 20 $\mu$ s. The data acquisition rate was 50MHz ; 1000 data points on every one scan of absorption spectroscopy. At first, test gas duration was measured using single line setup. Then, the system was extended to two line setup and applied the static temperature measurement of the expansion tube flow.

**Keywords :** *Absorption Spectroscopy, Temperature Measurement, Expansion Tube*

### 概 要

2005 年 3 月からの 1 年間、長期在外研究員として滞在した Stanford 大学機械工学科 (Department of Mechanical Engineering) 高温気体力学研究室 (High Temperature Gasdynamics Laboratory; HTGL) において、2005 年 7 月に完成したばかりの Stanford 6 inch Expansion Tube 気流の静温計測のための研究を行った。expansion tube の気流持続時間は数 10 $\mu$ s ～数 ms と非常に短く、通常の温度センサによる温度計測は時間応答性の面から不可能であり、衝撃波速度を介した推定も誤差が大きい。このため高速の直接温度計測が可能な半導体レーザ吸収法を用いて気流静温の計測を行った。

半導体レーザ吸収法の対象計測種としては気体水分子を用いた。吸収法の原理と温度算出手法、多数の水分子吸収線から試験条件に最適なラインを選択する最適吸収線選定プログラムの構築、吸収量及び温度計測のデータ処理ソフトの作成、expansion tube での計測用模型及び計測システムの製作の概要を紹介する。吸収線選定及びデータ処理にあたっての吸収線データベースとしては HITRAN2004 を活用した。

構築したシステムを用いて expansion tube 気流の計測を行った。半導体レーザ吸収法のスキャン周波数は expansion tube 気流の持続時間を考慮し 50kHz (20 $\mu$ s 毎に 1 点の温度を算出) とし、吸収量データの取り込みは 50MHz、1 スキャンあたり 1000 点のデータを使った。まず吸収線 1 本のシステムでシステムの動作確認も含めた expansion tube の試験時間の同定試験を行い、次に 2 本の吸収線を同時に計測するようシステムを拡張し、expansion tube 気流の静温の時間履歴を計測した。

---

\* 平成 19 年 12 月 3 日 受付 (Received 3 December, 2007)

\*1 総合技術研究本部 風洞技術開発センター (Wind Tunnel Technology center, Institute of Aerospace Technology)

\*2 スタンフォード大学 機械工学科 高温気体力学研究室(High Temperature Gasdynamics Laboratory (HTGL), Department of Mechanical Engineering, Stanford University)

## 1. はじめに

半導体レーザ吸収法は入力電流によって高速に出力波長をスキャン可能な半導体レーザ(Laser Diode; LD)の特徴を活かし、分子の吸収線形状を計測することを通して種々の状態量を算出することができる分光計測法である。温度、密度、速度などが計測でき[1-4]、主に燃焼計測の分野での先端的計測として用いられている。高速・短時間計測が可能、非接触計測であること、熱電対などの温度センサが使えないような高温場への適用も可能といった利点がある。近年の通信や CD, DVD などの技術の発展に伴い半導体レーザも急速な進歩を見せているが、これらも適用波長範囲の拡大、高速化などの面で半導体レーザ吸収法に大きく寄与している。

半導体レーザ吸収法は光路上の状態量の積分としてしかデータが得られないとの問題点があり、流体計測の分野での適用例は限られているが、その時間応答性と非接触性、高温場への適用性によって燃焼計測の世界では燃焼場の計測や実時間制御に用いられつつある。これまでの研究例としては温度や計測対象種の密度計測の他に、エンジンナセルに流入する空気の質量流量を実時間で計測する試み[5]、Pulse Detonation Engine の計測[6]などが行われている。空力計測や風洞への適用も試みられている[7-10]。また近年では Stanford 大と日産自動車の間で自動車エンジン内のサイクルを通しての温度履歴の計測[11]も行われている。計測対象種としては、燃焼計測の分野で発達してきた技術であることから、気体水分子、CO<sub>2</sub>、NO、O<sub>2</sub> など燃焼場で重要な役割を果たす種の利用例が多く、前出の通信や CD, DVD 用の半導体レーザの波長帯を活用できるバンドが主流である。

この半導体レーザ吸収法を expansion tube 気流の診断ツールとして用いる。expansion tube は衝撃波管に類似の短時間風洞であり、超高エンタルピー発生装置としても注目されている[12]ものである。Stanford 大では設定圧力の組み合わせを選ぶことでノズルを換えたりすることもなく広いシミュレーション範囲の気流を発生させる点に注目し、航空機や飛行体などの試験装置としての用途から SCRAM Jet エンジン内の着火過程の研究に用いる高温場の生成まで、様々な試験条件での利用を目指している。expansion tube の持続時間は非常に短く、エンジン燃焼を模擬する高温流れ場のシミュレーションでは 100-200 $\mu$ s 程度となる場合もある。このような時間スケールでは熱伝導を伴う通常の温度センサを用いることはできず、衝撃波速度の計測と理論を組み合わせた流れ場の推定が用いられることが一般的である。しかし、境界層の発達や理論上は時間 0 での破膜を仮定するダイアフラムの存在などの問題点も多い。このため直接計測が求められるが、その際には非接触かつ光学計測である半導体レーザ吸収

法が有効なツールとなる。

本稿では完成直後の Stanford 6 inch Expansion Tube[13]の気流特性試験として test gas 時間の把握と気流静温の計測を目的とし、50kHz での半導体レーザ吸収法計測が可能であるシステムの選定、構築、気流評価用モデルの製作や、システムの改良、既知環境での性能評価などを経て、実際の expansion tube への適用までを紹介する。

## 2. Stanford 6 inch Expansion Tube

### 2.1 Expansion Tube の概要

expansion tube は衝撃波管に類似の短時間風洞であり、衝撃波管の管端にさらに膨張波管を付加した構造を持つ。メリットとしては建設費、運用経費が安価であること、高圧管、低圧管、膨張波管のガス種や初期設定圧力を変えることにより広い範囲のマッハ数や動圧、静温をもつ気流を作り出せること、衝撃波管を上回る高エンタルピー気流を発生可能なことなどがある。デメリットとしては気流持続時間が短く、特に燃焼性ガスが自発火するような高い静温を持つケースでは 1ms 以下の試験時間しか確保できないこと、低圧管と膨張波管の間の第 2 隔膜の存在が試験気体に影響し、乱れや膜による気流汚染が起きることなどがある。

Stanford 大では超音速流れや SCRAM Jet 内部の燃焼場をシミュレートするための装置として Stanford 6 inch Expansion Tube を建設し、2005 年 7 月に完成した。図 1 にその外観を。図 2 に x-t ダイアグラムと構造を示す。膨張波管の出口径は $\phi 142$ mm である。各部はいくつかの管をつなぎ合わせた構造となっており、発生させる気流に応じて各部の長さを最適化することが可能である。膨張波管と計測部も兼ねる真空タンクの間には隔膜はなく、初期設定圧力は同じとなる。



図 1 Stanford 6 inch Expansion Tube

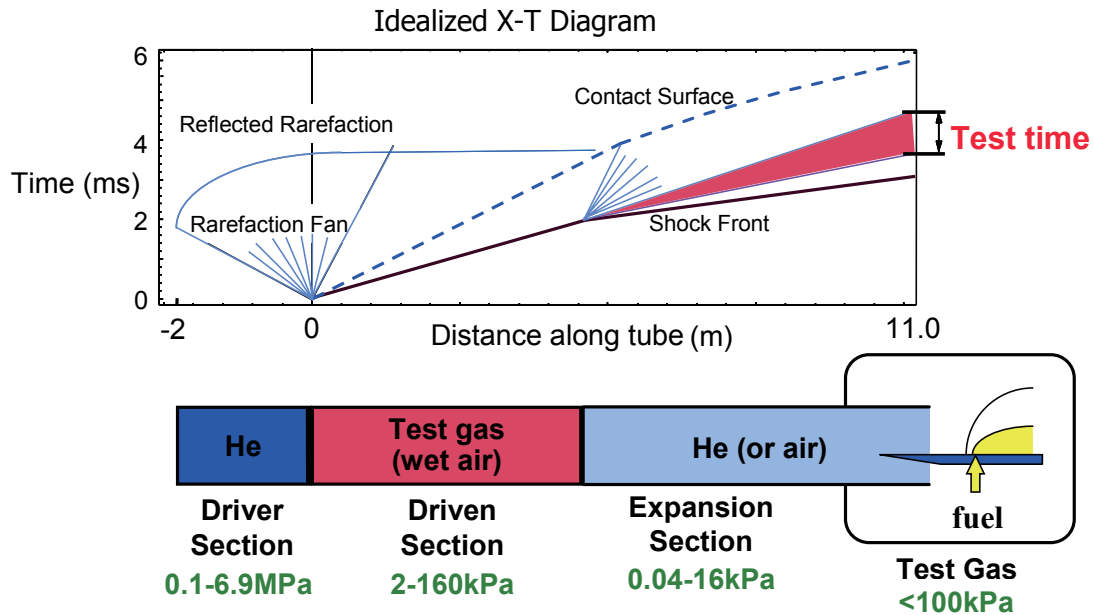


図2 Stanford 6 inch Expansion Tube の x-t ダイアグラムと構造

## 2.2 Stanford 6 inch Expansion Tube 気流への 半導体レーザ吸収法適用

expansion tube のような短時間風洞では温度を計測することは非常に難しい。直接に温度を計測することは熱電対などの温度センサの応答性の限界からほぼ不可能であり、一般には入射衝撃波マッハ数の計測値から衝撃波関係式を用いて気流の静温を算出する方法が用いられる。しかしこの方法も入射衝撃波が一度通過した後の試験気体を他の波が通過して状態量に変化したり、管内に発達する境界層の影響で入射衝撃波が徐々に減速したりするような場合の推定温度は実際の気流温度に対して誤差を持つこととなる。

このような問題を抱える一般的な手法に代わり半導体レーザを用いた光学的温度計測法により直接流れの温度を計測する。

Stanford 6 inch Expansion Tube がシミュレーションする流れ場としては主に以下の2つの条件がある；

### ①飛行試験用条件

高度 2,500-200,000ft の飛行試験に相当する気流をシミュレート

Ps~ 0.02-90kPa, Ts~ 220-280K

### ②燃焼試験用条件

SCRAM Jet 内部の圧縮され高温となった流れ場をシミュレート

Ps~ 20-50 kPa, Ts~ 1000-1500K

この中の①飛行試験用条件に対し、試験気体の持続時間計測と静温測定を行なう。

半導体レーザ吸収法を用いれば静温計測以外にもドップラーシフトを用いた流速計測や、密度計測と速度計

測を組み合わせ得られる質量流量計測、運動量流量計測、さらにはテストセクションで実際に燃料を燃焼させた場の中での局所計測などにも計測対象を拡張することが可能である。

## 3. 半導体レーザ吸収法

### 3.1 原理

吸収法とはある波長の光を媒質に入力し、媒質を通過した光の一部が媒質により吸収された場合、その吸収量から媒質の状態を算出する手法である。

半導体レーザはその特性として、活性層の温度により発振波長が変化する。このため半導体レーザ吸収法では LD の出力波長を安定させるため LD は温度コントローラで温度を制御しながら用いられる。この特性を逆に利用すると、温度を変化させることにより数  $10\text{cm}^{-1}$  の範囲で波長を選択することができる。また LD に入力する電流値を変化させると光出力が変化するとともに活性層の温度も変化するため発振波長も変化する。この波長変化は電流スキャン周波数にもよるが、1~数  $\text{cm}^{-1}$  のオーダーである。

この電流スキャンによる波長スキャンを行い、その際の吸収量を計測すると波長に対する吸収量の変化を連続的にモニタすることができ、吸収線形状や一連の吸収線分布が計測できることになる。これが半導体レーザ吸収法である。

図3に示される gas に入射する前後のレーザ光強度をそれぞれ  $I_0$ ,  $I$  とすると、両者の関係は Beer-Lambert の式；

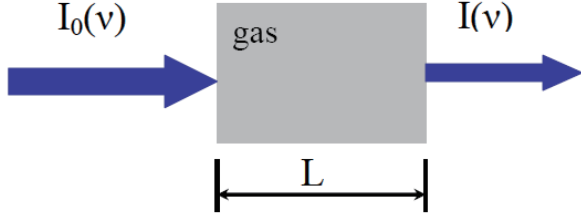


図 3 吸収法

$$T_v \equiv \frac{I}{I_0} = \exp(-k_v L) \quad (1)$$

によって記述することができる。ここで  $k_v$  は spectral absorption coefficient であり；

$$k_v = P x_i S(T) \phi(v) \quad (2)$$

と表される。 $S(T)$  は temperature-dependent line strength、 $x_i$  は計測対象種  $i$  のモル分率、 $P$  は場の静圧である。 $\phi(v)$  は normalized lineshape function であり、すべての周波数を積分すると 1 となるよう規格化される；

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(v) dv = 1 \quad (3)$$

また absorbance  $k_v L$  を周波数方向に積分すると integrated absorbance ；

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) dv = \int_{-\infty}^{+\infty} k_v L dv = P x_i S(T) L \quad (4)$$

を得る。

lineshape function としては Voigt function を用いた；

$$\phi(v) = \frac{2}{\Delta v_C} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} V(a, w) \quad \text{V: Voigt function} \quad (5)$$

$$V(a, w) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-u^2) du}{a^2 + (w - u)^2} \quad (6)$$

ここで、

$$\text{Voigt a parameter; } a = \frac{\sqrt{\ln 2} \Delta v_C}{\Delta v_D} \quad (7)$$

$$\text{non-dimensional line position; } w = \frac{2\sqrt{\ln 2}(v - v_0)}{\Delta v_D} \quad (8)$$

$$\text{Doppler width; } \Delta v_D = 7.162 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (9)$$

$$\text{Collisional width; } \Delta v_C = P \sum_i x_i (2\gamma_i) \quad , \quad 2\gamma_i = 2\gamma_{i,T_0} \left(\frac{T_0}{T}\right)^n \quad (10)$$

Voigt function の計算には Whiting の方法[14]による近似計算を用いた；

$$\begin{aligned} \frac{I_\lambda}{I_{\lambda_{CL}}} = & \left[ 1 - \frac{\Delta v_C}{\Delta v_V} \right] \cdot \exp \left[ -2.772 \left( \frac{\lambda - \lambda_{CL}}{\Delta v_V} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\Delta v_C}{\Delta v_V} \right] \frac{1}{1 + 4 \left( \frac{\lambda - \lambda_{CL}}{\Delta v_V} \right)^2} \\ & + 0.016 \left[ 1 - \frac{\Delta v_C}{\Delta v_V} \right] \left[ \frac{\Delta v_C}{\Delta v_V} \right] \left\{ \exp \left[ -0.4 \left( \frac{\lambda - \lambda_{CL}}{\Delta v_V} \right)^{2.25} \right] - \frac{10}{10 + \left( \frac{\lambda - \lambda_{CL}}{\Delta v_V} \right)^{2.25}} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{Voigt width: } \Delta v_V = \frac{\Delta v_C}{2} + \sqrt{\left( \frac{\Delta v_C}{4} \right)^2 + \Delta v_D^2} \quad (12)$$

Intensity at line center:

$$I_{\lambda_{CL}} = \frac{I}{\Delta v_V \left[ 1.065 + 0.447 \left( \frac{\Delta v_C}{\Delta v_V} \right) + 0.058 \left( \frac{\Delta v_C}{\Delta v_V} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

半導体レーザ吸収法の特徴としては、

- ・ 熱電対等では不可能な 10kHz 以上の周波数での温度計測が可能
- ・ 光学的な非接触計測
- ・ line-of-sight 計測

ことが挙げられる。3 点目の line-of-sight 計測とは半導体レーザ吸収法はレーザ光が通過したすべての媒質の影響が反映される計測であることを意味する。このため半導体レーザ吸収法は特に CT 法のような空間分布再構成手法を用いない限りレーザ光路上の空間分解能は得られない。

計測可能状態量としては、

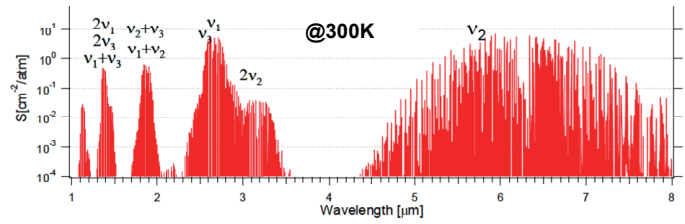


- ・計測対象種の分圧
- ・温度
- ・速度（ドップラーシフトより）

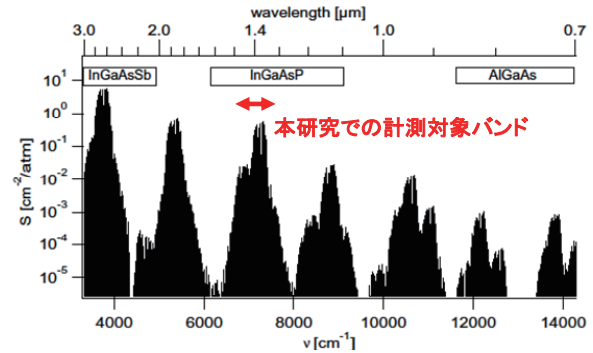
また、これらの複合として、

- ・質量流量
- ・運動量流量

も計測可能となる。



(a)



(b)

図4 水分子の吸収線分布

(a) 1-8μm (b) 0.7-3μm

(b)は横軸が波数であるため(a)とは軸が異なるている

本研究では気体水分子(水蒸気)を計測対象種とした。図4(a), (b)はその分布である。これらからも分かるように近赤外領域には非常に多くの水分子吸収線が存在する。図4(b)上部の枠囲みは実用化されているLDの材質である。ここでは図4(b)中の矢印で示した1.4μmバンドの吸収線を計測対象とした。このバンドの吸収線は倍波や混合波であるため2μm以上に分布する基本波よりも吸収量が小さいが、この領域は石英光ファイバの伝送損失最小の領域に相当し、通信用レーザの多くはこの領域を用いているため安価かつ高性能なLDが容易に入手可能であるというメリットを持つ。

水分子は流体的な観点からは；

- ・通常の空気中に普遍的に存在
- ・燃焼生成物でもあり燃焼場の計測で重要

光学計測の観点からは；

- ・吸収量が多い
- ・通信用LDが使用可能
- ・光ファイバを利用し簡単に光学系が構築可能

などの長所を持つため半導体レーザ吸収法の計測対象種として最も多く利用されている種である。

半導体レーザでは、

- ① 購入時の半導体レーザ波長帯の指定
- ② 温度コントロールによる個別波長の設定
- ③ 電流スキャンによる波長スキャン

の3段階の波長設定により測定対象種の個々の吸収線に特化した吸収法計測が可能である。シングルモード半導体レーザの線幅は非常に小さく、分光器での計測などで問題となるスリット関数とのconvolutionなどの問題も低温や低圧以外ではほとんど問題とならない。

### 3.3 半導体レーザ吸収法のデータ処理

半導体レーザ吸収法のデータ処理概略を図5に示す。

①は計測生データである（縦軸：Volt, 横軸：サンプリング番号）。半導体レーザに供給する電流を変化させると出力と同時に発振波長も変化する。x=600付近の凹みが水分子による吸収である。

②ではx=200~400及び850~950部分の吸収のない領域を用いて吸収のある領域の本来のベースラインを推定する。推定されたベースラインが緑のラインである。②での赤のラインが図3でのI、緑のラインがI<sub>0</sub>に対応する。

③では計測されたデータIと②で推定されたベースラインI<sub>0</sub>から(1)によって absorbance を求める。ここでの absorbance のx軸はサンプリング番号であるので本来求めるべき波数に対する吸収量に変換するため、④でx軸をサンプリング番号から波数に変換する。このためには図6上部に示すように半導体レーザデータと同時に計測されたエタロンデータ（黒線）を使用する。エタロンは図7のような平行度の非常に高いガラスで、共振周波数は平行平面間の長さによって決まる。図6に示したデータは共振周波数2GHzのエタロンによるデータであり、ピーク間の周波数が2GHzに相当する。これにより④でのデータは縦軸が absorbance、横軸が相対波数にとった吸収線プロファイルに変換された。⑤でこの計測データに(11)-(13)のVoigt関数を fitting し最適 fitting を与える4つのパラメータが決定される。これら4つのパラメータを用いて integrated absorbance も計算でき、この integrated absorbance が温度算出や試験時間計測で用いられる吸収量データとなる。

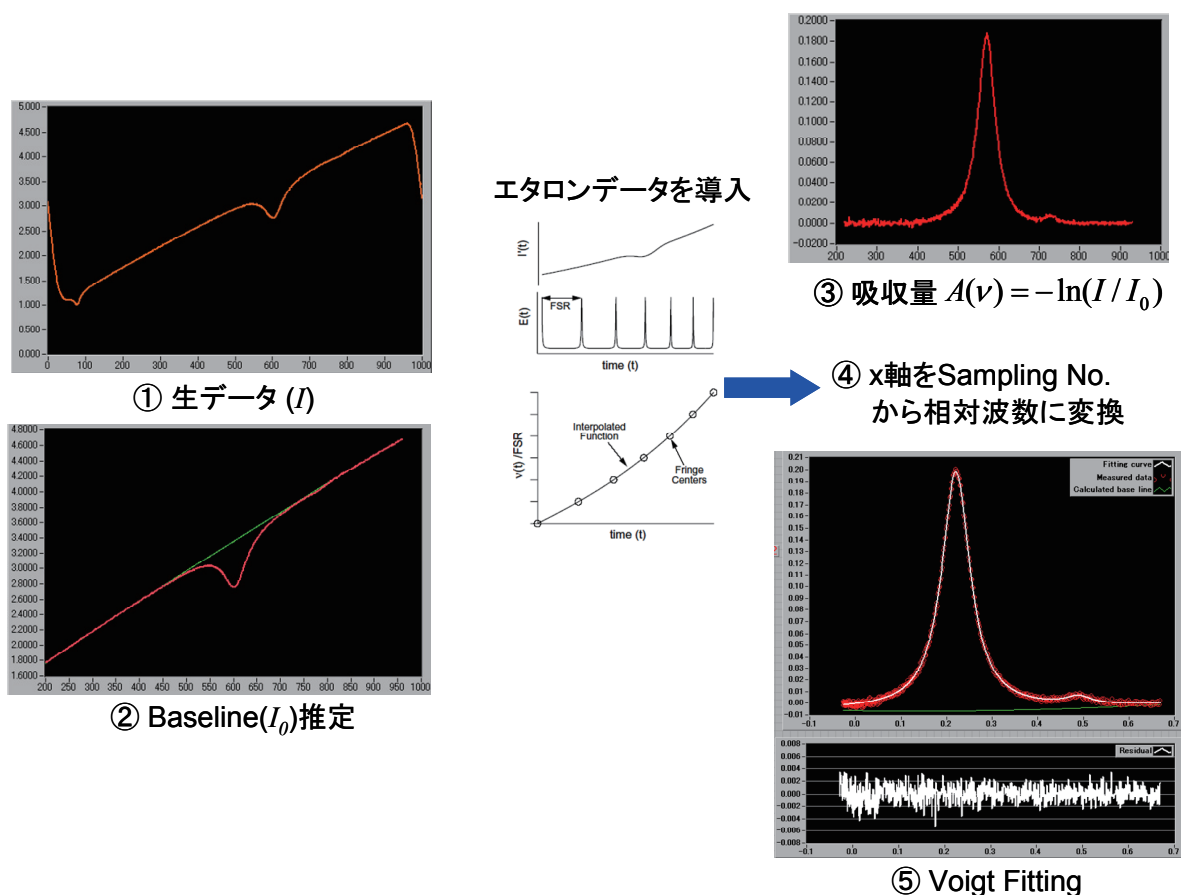


図5 半導体レーザ吸収法のデータ処理概略

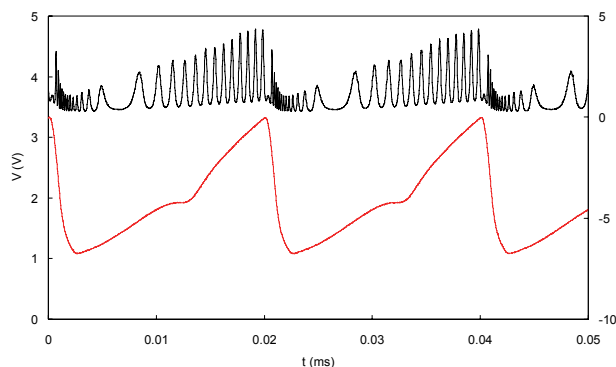


図6 半導体レーザデータ(赤)とエタロンデータ(黒)

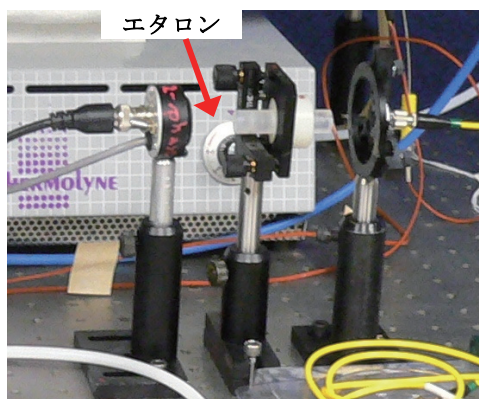


図7 エタロンとその周辺光学系

### 3.4 Line Selection (最適吸収線の選定)

図4に示されたように水分子の吸収線は無数と言ってもよいほど多くある。これら多数の吸収線から試験対象となる場に適当な吸収線を選択する必要がある。このためには必要な selection rules を決め、それに則って吸収線を選択していく line selection プログラムを構築しなければならない。水分子の吸収線データベースとしては HITRAN2004[15,16]を用い、line selection プログラム製作

に当たっては Xin Zhou の方法[17]を参考とした。

HITRAN2004 には 1.0-2.0 $\mu\text{m}$  だけでも 15907 本の吸収線が収蔵されており、この中から選択を進めていく。selection rule としては以下の6個を設定した；

- ① 市販の InGaAsP 系 DFB LD が使える波長であること
- ② 吸収量が十分大きいこと
- ③ 他の吸収線とのオーバーラップが十分小さいこと



- ④ 測定部以外の大気中の水分子の影響を受けにくいこと
- ⑤ 十分な温度感度が得られること
- ⑥ 水分子以外の他ガスの吸収線とのオーバーラップが十分に小さいこと

⑤に関しては温度計測時に用いる2本の吸収線のペアとして評価する。

HITRAN2004 からのデータとこれら6個の selection rules を用いた line selection プログラムを MATLAB 上で構築し、選定を進めた。Line selection プログラムでは数本から10本程度の絞込みまでを行い、最終的な最適ラインの決定はこれらのデータを比べつつ自分の手で行う。

### 3.5 温度計測手法

3.1 節での式(4)より integrated absorbance  $A$  が温度  $T$  と吸収媒体の長さ  $L$ 、静圧  $P$ 、吸収種のモル分率  $x_i$  の関数であることが示されている。ここで line strength  $S(T)$  を書き表すと；

$$S(T, \nu_0) = S(T_0, \nu_0) \frac{T_0}{T} \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT_0}\right)} \exp\left(-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (14)$$

ここで、 $T_0=296\text{K}$ ,

$h$ : プランク定数

$k$ : ボルツマン定数

$c$ : 光速

$\nu_0$ : 吸収線の中心周波数

$E''$ : lower state energy of the transition

$Q(T)$ : 分配関数

lower state energy  $E''$  の異なる2本の吸収線に対し、integrated absorbance を取り出しその比を取ると、計測光路が同一であれば吸収媒体の長さ  $L$ 、静圧  $P$ 、吸収種のモル分率  $x_i$  は等しいため、式(4)と(14)より；

$$\begin{aligned} \frac{A_1}{A_2} &= \frac{S(T, \nu_1)}{S(T, \nu_2)} \\ &= \frac{S(T_0, \nu_1)}{S(T_0, \nu_2)} \exp\left(-\frac{hc}{k} (E_1'' - E_2'') \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \times \\ &\quad \left( \frac{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_1}{kT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_1}{kT_0}\right)} \right) \left( \frac{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_2}{kT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_2}{kT_0}\right)} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

が導かれる。

計測温度  $T$  が  $T_0=296\text{K}$  に近い場合には、 $1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT}\right) / 1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT_0}\right) \approx 1$  との近似を用いて；

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{S(T, \nu_1)}{S(T, \nu_2)} \approx \frac{S(T_0, \nu_1)}{S(T_0, \nu_2)} \exp\left(-\frac{hc}{k} (E_1'' - E_2'') \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (16)$$

との式を使うこともできる。

温度計測のための2本の吸収線の選定には計測温度範囲内で図8に示すように吸収量増減の傾向が逆になっているものを選ぶほど計測精度が良くなる。

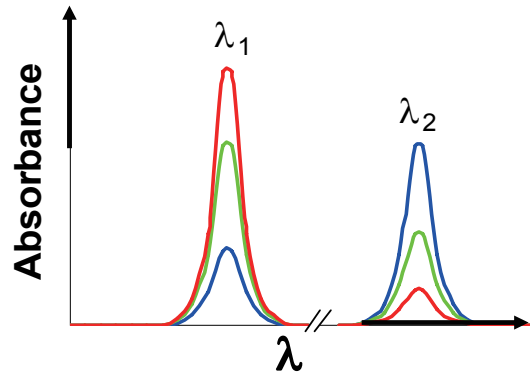


図8 温度計測のための吸収線の選定

3.4 節の⑥のプロセスでは、まず計測対象の温度・圧力範囲を決定し、温度計測で想定される標準偏差の値を用いて最適ラインを選定する。標準偏差は以下の式(17)を用いて算出する。

#### Peak ratio

$$R = \frac{(\alpha_{peak})_{highE''}}{(\alpha_{peak})_{lowE''}} = \frac{H}{L}$$

#### Uncertainty of R

$$\sigma_R^2 \cong \sigma_H^2 \left( \frac{\partial R}{\partial H} \right)^2 + \sigma_L^2 \left( \frac{\partial R}{\partial L} \right)^2 + 2\sigma_{HL} \left( \frac{\partial R}{\partial H} \right) \left( \frac{\partial R}{\partial L} \right)$$

$\sigma_H, \sigma_L$ : peak signal の不確定性の推測値

$\sigma_H = \sigma_L = \sigma_M$  を仮定

$\sigma_M$ : measured noise floor, 経験的には 0.2~0.5%

partial derivatives は以下のように書き表される；

$$\frac{\partial R}{\partial H} = \frac{R}{H}, \quad \frac{\partial R}{\partial L} = -\frac{R}{L}$$

→

$$\sigma_R = \sigma_M \frac{1}{L} \sqrt{1 + \left(\frac{H}{L}\right)^2} = \sigma_M \frac{1}{L} \sqrt{1 + R^2}$$

### Measured temperature uncertainty

$$\sigma_T = \frac{\sigma_R}{dR/dT} = \sigma_M \frac{1}{dR/dT} \frac{1}{(\alpha_{peak})_{lowE^n}} \sqrt{1 + R^2} \quad (17)$$

温度計測のための処理ソフトウェアは LabVIEW 上に構築し、データ処理を行った。

### 3.6 半導体レーザスキャン周波数

expansion tube では気流エンタルピを高くする燃焼試験用条件では試験時間が 100 $\mu$ s にまで小さくなる。このような気流を計測するためには高い計測レートで計測する必要がある。

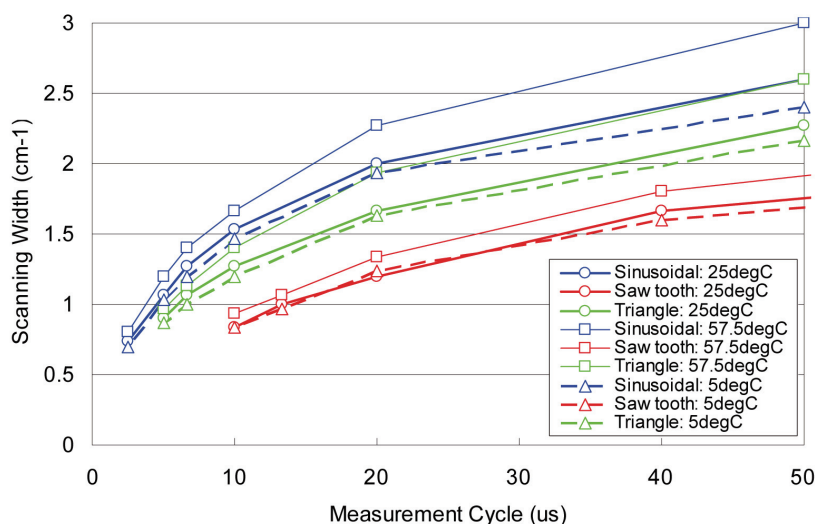
しかし、半導体レーザの物性としてスキャン周波数とスキャン波長範囲の間には反比例の関係があり、スキャン周波数を大きくするとスキャン波長幅が小さくなる。またデータ収集装置 (Data Acquisition (DAQ) Unit) の収集可能周波数にも制限があり、高すぎる計測レートを用いると 1 スキャン中の計測点数が少なくなり、Voigt fitting の精度に悪影響を及ぼす。さらには光検出器の周

波数応答性にも制約がある。計測の面では光検出器の面積が大きく、気流の擾乱による optical steering によって多少の入射位置に変動があっても出力に影響を与えないものが望ましいが、面積の大きな光検出器は一般的に応答性が悪くなる。

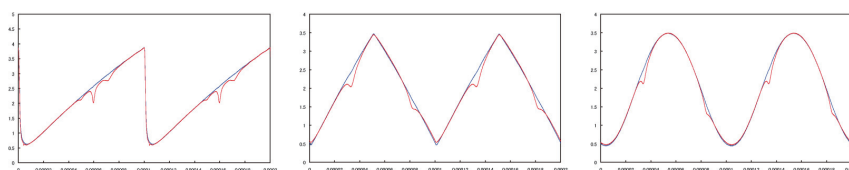
図 9 に半導体レーザのスキャン周波数とスキャン幅の関係を示す。図 9(a) のスキャン周期とスキャン幅からスキャン周期を小さくするとスキャン幅が小さくなる事が分かる。同じスキャン周期であってもノコギリ波 (sawtooth) より三角波 (triangle), サイン波 (sinusoidal) の方がスキャン幅が大きくなるが、高いスキャン周期での三角波・サイン波では往復での吸収線位置のヒステリシスが顕著になり処理が複雑になるためノコギリ波を採用する。また個々の半導体レーザによるスキャン周波数とスキャン幅の関係は個体差が大きい。

ここでの研究では半導体レーザのスキャン周波数を 50kHz と設定し、20 $\mu$ s 毎に 1 点の温度が算出される。データ取得レート 50MHz、1 スキャンあたり 1000 点の計測点を収集し、データ処理を行った。

データ収集装置としては最大 100MHz (2CH の場合)、12bit A/D 分解能でのデータ収集が可能な Gage Applied Technologies 製 Gage Scope CompuScope 12100 を 4CH、50MHz の設定で使用した。また光検出器としては 10MHz の応答性を持つ Thorlabs 製 PDA400 を用いた。



(a)



(b)

(c)

(d)

図 9 半導体レーザのスキャン周波数とスキャン幅の関係

(a) スキャン周期とスキャン幅, (b)-(c) スキャン波形, (b) ノコギリ波 (sawtooth), (c) 三角波 (triangle), (d) サイン波 (sinusoidal), 三角波・サイン波では往復で吸収線位置にヒステリシスは現れる。

### 3.7 計測用ハードウェア

半導体レーザ吸収法に用いる主なハードウェアとしては以下のようなものである。

#### 半導体レーザ

NTT Electronics Corporation (NEL) 製 DFB (Distributed Feedback) LD

14p Butterfly 形状、光ファイバ pigtail 付、FC/APC コネクタ

#### 半導体レーザ関係

半導体レーザ・ドライバ LDX-3620 ILX Lightwave 製  
温度コントローラ LDT-5910B ILX Lightwave 製  
半導体レーザ・マウント LDM-4984 ILX Lightwave 製  
ファンクションジェネレータ DS345 Stanford Research System 製

#### レーザ受信系

光検出器 PDA400 Thorlabs 製

#### Data Acquisition (DAQ) Unit

Gage Scope CompuScope 12100 Gage Applied Technologies 製

#### 光ファイバ

光ファイバ 9 $\mu$ m core, single mode, FC/APC connector  
ファイバ・スプリッタ

FUSED-12-www-9/125-50/50-xyz-3-0.5 OZ Optics 製

FUSED-12-www-9/125-10/90-xyz-3-0.5

(光ファイバ出力を減少させたり、分岐させたりするために用いる)

ファイバ・コリメータ F230FC-C Thorlabs 製

(光ファイバ端からのレーザ光を集光させる)

#### その他

集光レンズ

プリズム

微調機能付きレンズマウント 等

### 4. 試験気体持続時間同定試験

本来の目的である expansion tube の静温計測に先立ち、expansion tube の試験気体の持続時間計測を行った。expansion tube に備え付けの圧力センサ(後述の図 11 の PCB(Ps)) では膨張波管気体と試験気体である低圧管気体との区別が行えないため、半導体レーザ吸収法を用いて試験気体の同定を行なった。半導体レーザ吸収法では試験気体だけに空気力学的に無視できる程度の量の水分

子をシードすれば膨張波管気体と試験気体を認識できる。

#### 4.1 使用吸収線

まず line selection プログラムを用いて最適な吸収線の選定を行った。expansion tube の運転モードとしては飛行試験用条件が対象である。3.4 節での①～④の selection rule を用いて最適なラインを選定し、⑥の他の種との干渉の有無を確認した。

④の“測定部以外の水分子の影響を受けにくいこと”に関しては計測対象気流が室温と同程度の温度であり、かつ計測対象気流の静圧は大気圧以下であるため、選定当初から計測部以外の水分子による吸収量の影響が懸念された。この問題については計測部以外の光学系をビニール袋で覆い窒素パージする方法(nitrogen bag)で対応した。5.4 節で後述するが、温度計測の場合にはこの nitrogen bag だけでは対処しきれず、ソフト的な対応も必要となった。

図 10 に選定された吸収線を示す。中心波数  $\nu_0=7294.1\text{cm}^{-1}$  ( $\lambda_0=1370.97\text{nm}$ ), lower state energy  $E''=23.79$  のラインである。 $E''$ が相当に低いため図 10 で温度が大きくなるにつれ吸収量が低下していることから分かるように低温で存在確率の多いラインであるが、200-300K の温度範囲内では最も吸収量の大きいラインのひとつであり、7293.85 $\text{cm}^{-1}$  付近に別の小さな吸収ラインが存在するがそれ以外には他のラインとの重なりもなく、Voigt fit も適用しやすいラインである。

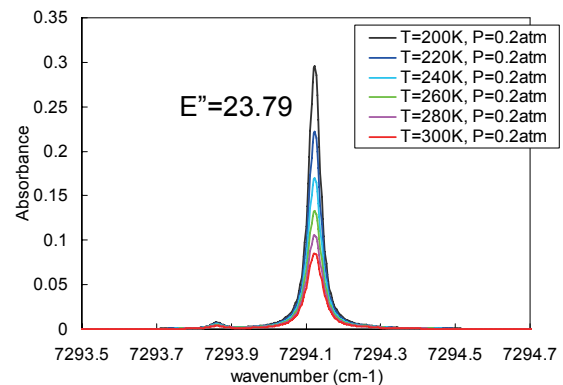


図 10 Test Gas Duration 同定試験用吸収線

中心波数  $\nu_0=7294.1\text{cm}^{-1}$ ,  $E''=23.79$

#### 4.2 計測用模型及び試験セットアップ

図 11 に試験時間計測試験のセットアップを示す。高圧管気体、膨張波管気体は He、試験機体である低圧管気体は空気である。試験気体の空気は水分を含む室内空気をそのまま用いた。膨張波管気体は He であるが、初期圧力が大気圧より低く、かつわずかな漏れがあるため微量の水分を含んだ空気が混入した。膨張波管側の動作は膨張波管壁面に設置した PCB 圧力センサによってモニ

タする。PCB 圧力センサは衝撃波速度計測用として PCB 132A35（共振周波数>1MHz、立ち上がり時間 <3 $\mu$ s）が 30.5cm 間隔で 4 点、静圧計測用として PCB 112A22（共振周波数>250kHz、立ち上がり時間 <2 $\mu$ s）が 1 点設置されている。

図 12 は計測部に設置された試験模型である。模型は 2 つの平板から成り、その平板上の $\phi 12.7$ mm の石英ガラス製光学窓を通してレーザ光を透過させる。2 つの平板の気流外側には、光ファイバから出たレーザ光を集光する collimator からなる入射系と、レーザ光を集光するレンズ、レンズ微動装置、光検出器からなる集光系の各装置が設置されている。半導体レーザ自体は計測部外の大気圧環境下に置かれ、光ファイバを介して計測部内の模型までレーザ光を伝送する。

試験模型内にはピトー圧を計測するためのピトープローブを設置した。このピトープローブは気体の比熱比とマッハ数の違いによるピトー圧の変化から膨張波管気体と試験気体の気体組成差を検出できることから試験気体到着時間の検出のために用いる。

#### 4.3 試験気体持続時間計測結果

図 13 に試験時間計測試験の結果を示す。赤線が図 11 に記されたピトープローブによるピトー圧、青線が integrated absorbance である。PCB 圧力センサから算出された衝撃波マッハ数(Ms) 4.7 から計算された気流静圧(Ps)は 13kPa、静温(Ts)は 230K である。

青線の integrated absorbance に着目して流れを解析する。赤線の Ps データによると 5ms 付近で気流が到達しているが、その時間以前の integrated absorbance は He 中に水分を含んだ空気がリークしているため一定値の吸収が存在する。5ms から 5.5ms 付近までは衝撃波によって圧縮・加熱された膨張波管気体である。圧力は初期状態より大きくなるが温度も大きくなるため、図 10 に示されるように吸収量は小さくなる。5.5ms 以降の integrated absorbance の増大が水分子を含んだ試験気体の到達である。ほぼ 6~10ms 付近が試験時間に相当する。10ms 以降は圧力が低下しつつも integrated absorbance が増大している。これは気流温度が低下し、図 10 にも示されるように integrated absorbance が増大したものである。その後 13~15ms にわたって integrated absorbance が急減している。これが水分子を含んだ試験気体と高圧 He の高圧管気体が混在している接触面の領域に相当すると考えられる。15ms 以降は高圧管気体の領域になる。

図 14 に高圧管気体の初期圧力(P4)と低圧管気体の初期圧力(P1)と膨張波管気体の初期圧力(P10)の比が等しい 2 つの試験時間同定試験結果を示す。赤線のピトー圧の履歴の最初の圧力ステップは衝撃波の入射による圧力上昇、

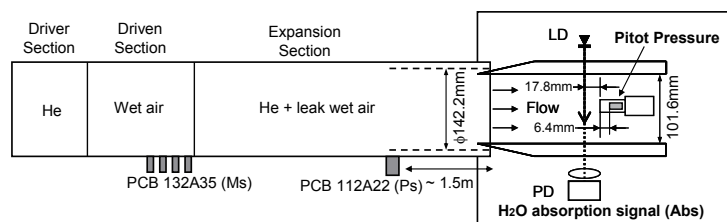


図 11 試験時間同定試験セットアップ  
レーザ光路長 101.6mm

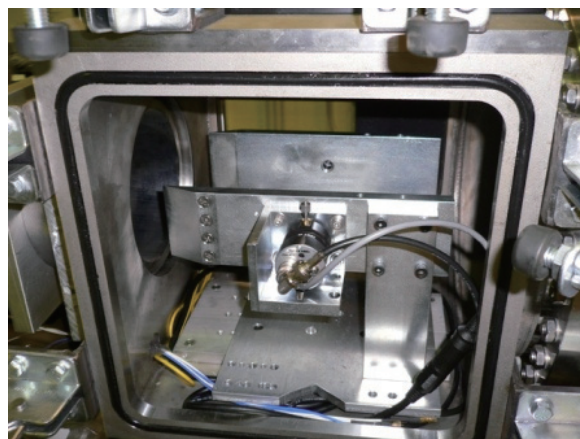


図 12 計測部に装着された試験模型  
(実際の試験時には膨張波管の管端をさらに模型先端近傍まで接近させる)

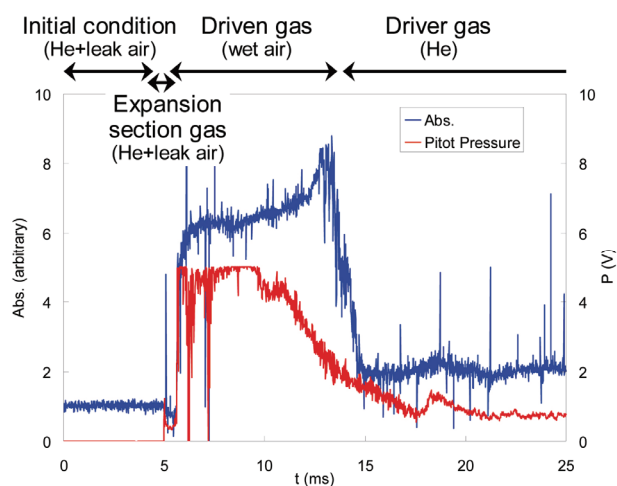


図 13 試験気体持続時間同定試験結果

Ps=13kPa, Ts=230K, Ms=4.7

P4:P1:P10=2070kPa(He):69kPa(air):2.1kPa(He)

ピトー圧は 5V のスケールオーバーのため一部不良

2 番目のピトー圧上昇は試験気体到着による比熱比とマッハ数変化によるものである。ピトー圧と integrated absorbance を比較すると、全てのケースについて integrated absorbance の立ち上がりとピトー圧の 2 番目の



立ち上がりの時間は一致しており、ピトープローブを用いることで試験気体の到着点を計測ができると言える。しかし試験気体の終点についてはピトー圧波形と integrated absorbance の間には有意な対応は認められず、ピトー圧履歴からは試験気体の終点は計測できない。始点・終点の双方を決定し試験時間を同定するためにはピトー圧計測ではなく、半導体レーザ吸収法が必要であることが分かる。

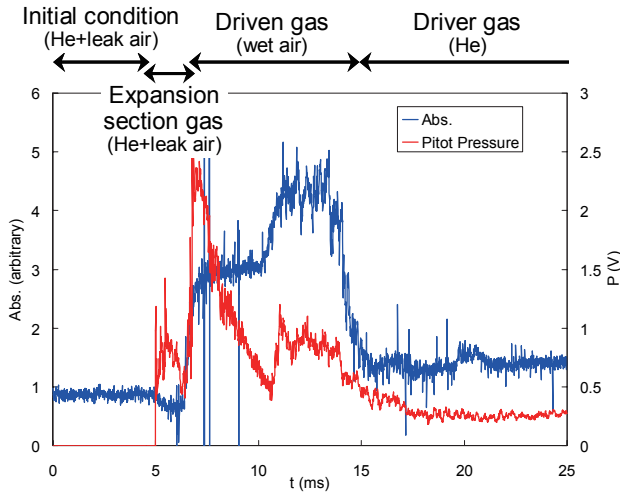
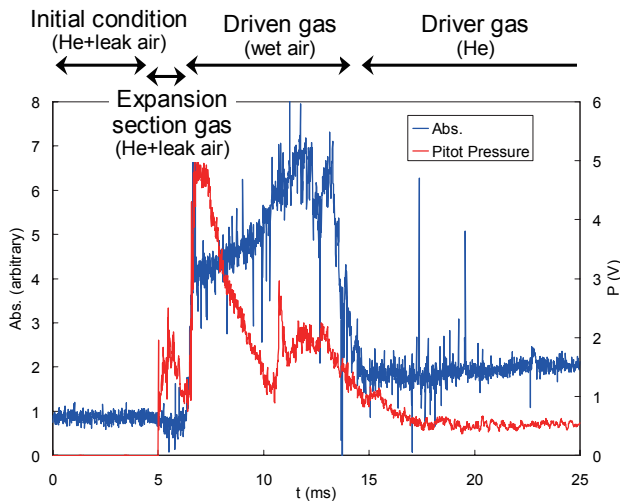
(a)  $P_s=59\text{kPa}$ ,  $T_s=550\text{K}$ ,  $M_s=1.9$ (b)  $P_s=121\text{kPa}$ ,  $T_s=570\text{K}$ ,  $M_s=1.9$ 

図 14 試験時間同定試験結果

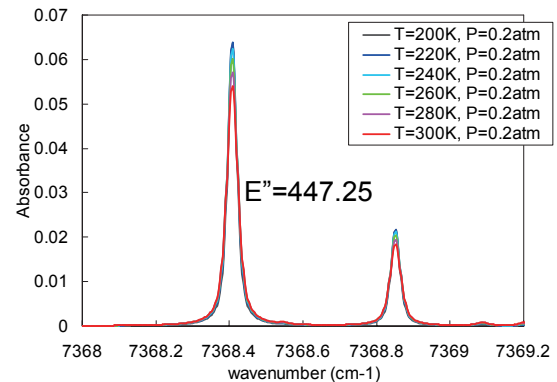
(a)  $P_4:P_1:P_{10}=517\text{kPa(He)}:16\text{kPa(air)}:16\text{kPa(He)}$ , (b)  
 $P_4:P_1:P_{10}=1100\text{kPa(He)}:32\text{kPa(air)}:32\text{kPa(He)}$

## 5. 温度計測試験

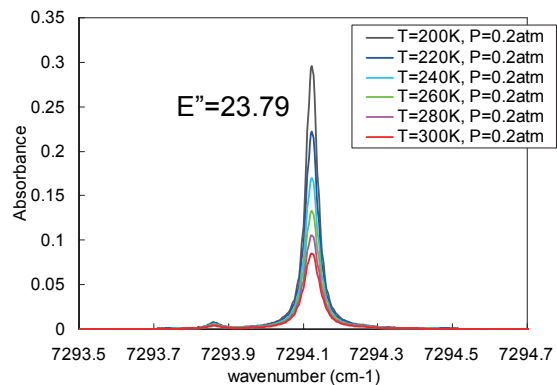
### 5.1 使用吸収線

3.4 節で記述した line selection rule の①～⑥を適用して expansion tube の飛行試験用条件で最適吸収線を選定した。図 15(a), (b)に選定された吸収線を示す。(a)は lower state energy の高い側のラインであり中心波数

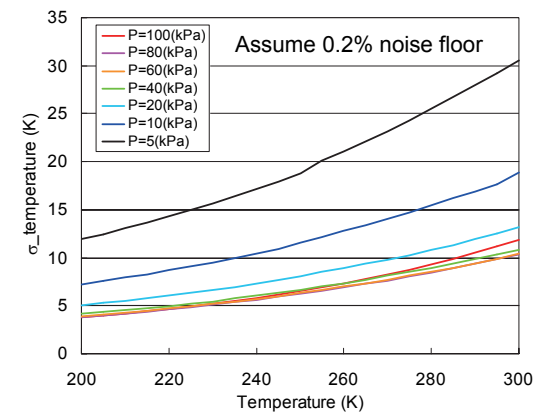
$\nu_0=7368.4\text{cm}^{-1}$  ( $\lambda_0=1357.1\text{nm}$ ), lower state energy  $E''=447.25$  のラインである。(b)は lower state energy の低い側のラインであり、4 章の試験時間同定試験で用いたものと同じラインである。図 15(c)はこの line pair に noise floor 0.2% を仮定して求めた推定温度計測精度である。 $E''=447.25$  のラインは 200-300K の範囲で吸収量の変化は小さいが、 $E''=23.79$  のラインでは温度が大きくなるにつれ急激に吸収量が小さくなるため、高温側ほど温度計測誤差が大きくなっている。また、圧力が小さくなっても温度計測誤差が大きくなっているが、これは(4)式からも分かるように圧力が大きくなれば integrated absorbance が大きくなり計測精度が向上するためである。



(a)



(b)



(c)

図 15 温度計測用 Line Pair

$\text{H}_2\text{O}$  分圧 1%, レーザ光路長 76.2mm

(a) High  $E''$  Line,  $E''=447.25$ , (b) Low  $E''$  Line,  $E''=23.79$

(c) 推定温度計測誤差, noise floor=0.2%仮定

## 5.2 計測用模型及びセットアップ

図 16 に温度計測用模型の風洞への設置状況を、図 17 に光学系の構成と expansion tube に対する設置位置関係を示す。試験時間同定試験ではレーザ光路 1 本、2 枚の両側壁のみであったが、温度計測用模型では温度計測のためにレーザ光路を 2 本とし、2 つの光路が極力同じ場を計測できるように X 型の配置とした。風洞計測部に十分な大きさがなかったため、レーザ光入射側の光学部品配置にも配慮した。

また試験時間同定試験では水分子を含む試験気体の検出だけが目的であったため両側板のみで上下方向から計測部に入射する膨張波管端面の影響は無視したが、温度計測ではレーザ光路上の場の一様性が温度計測精度に影響するため、上下にも平板を追加して矩形断面とし、模型先端を膨張波管端面よりも上流側に挿入し、平板間の距離も横 76.2mm、縦 63.5mm として膨張波管の気流コアだけを抽出できるよう変更した。この模型の平板の先端部分の楔の角度は  $22.5^\circ$  であり衝撃波が離脱するマッハ数は約 2 である。これより小さなマッハ数の気流ではチャンネル内の流れはチョークすることになる。

図 16 で模型上部に設置されている追加の平板は気流による光ファイバの振動防止用カバーであり、模型支持脚にもテープで光ファイバが固定されている。シングルモードファイバであっても光ファイバが振動すると偏向が変化し、光学窓などの反射面で反射する際の反射率が変化する。これによって計測されるデータは吸収と等価な変動を被ることになるため、試験中に光ファイバが振動したりすることのないように固定には注意する必要がある。

## 5.3 静的温度検証（初期計測結果）

構築した試験模型、光学系、データ処理ソフトなどからなるシステムを expansion tube 試験に用いる前に既知

の温度場を用いた静的温度検証試験を行った。静的な場としては試験模型を装着した expansion tube の計測部を風洞試験で想定される圧力に近い 33kPa 付近まで減圧し、十分な時間放置して温度が室温(Actual Temp.)に等しいと考えられる場を用いた。室温としては水銀温度計による値を採用した。

これらの計測結果を表 1 に示す。各ケースはそれぞれ 100 点の計測点を用いて算出した結果である。標準偏差は図 15(c)の 300K、100kPa で値よりかなり小さいが、これは風洞試験時の仮定である光路長 76.2mm に比べ、静的温度試験では模型外側が真空ではなく、模型内部と同じ気体で満たされているため光路長が大きくなっていること、1%の水分圧を仮定した計算より実際の水分圧が大きかったことなどによるものである。一方、室温との差は最大 10K と静定した場の計測としては非常に精度が悪く、expansion tube で計測を行ううえで大きな問題と考えられる。

この大きな温度差の原因について調査したところ、図 18 に示すように計測部内を非常に低い圧力に設定した際、低い圧力に相当する幅の狭い成分（白線の fitting 結果と形状が近い）の他にピーク値は小さいものの幅の広い大気圧下の水分子の吸収線が重畳していることが観測された。図 18 でも分かるように計測ソフトの fitting では考慮されていない大気圧成分が存在するために Voigt fitting の結果に誤差が含まれ、これが表 1 の温度誤差をもたらしたものと考えられる。

表 1 静的温度検証結果（初期計測）

Case	P (kPa)	Actual Temp. (K)	Meas. Temp. (K)	DT (K)	$\sigma$ (K)
1	33.5	295	299.4	4.4	1.4
2	33.5	295	300.9	5.9	1.5
3	34.0	294	302.5	8.5	2.8
4	34.0	294	304.0	10.0	2.6



図 16 計測部に設置された温度計測用模型

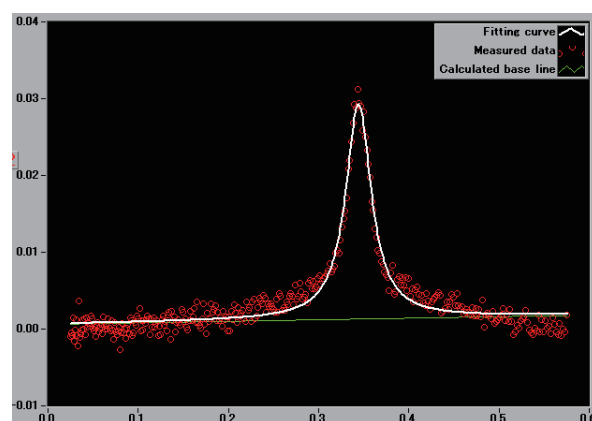


図 18 低圧での吸収量計測データ



#### 5.4 計測ソフトの改良

5.3 節に述べた大気圧環境下のレーザ光の光路上の水分子の影響であるが、大気圧下の光学系は LD から計測部まですべてが光ファイバで構築され、レーザが空間中を通過する部分は存在しないため、当初は大気圧環境部分の水分子の影響はないものと考えていた。水分子の影響を受けるとすれば図 19 に示した光ファイバを分岐、あるいは光量削減のために用いられるファイバ・スプリッタの black box 部分である。この中には固体のビームスプリッタが入っており、光ファイバから出たレーザ光が空間を通過する微小部分が存在する。

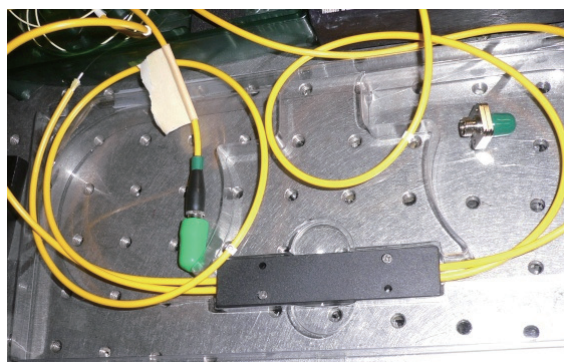


図 19 ファイバ・スプリッタ

5.3 節の結果より、大気圧下の水分子の影響を排除するため、まず最初に、通常行われる方法である光学系全体を覆い、窒素でパージする方法（ビニール袋で系をカバーする方法が最も簡単であり、“Nitrogen Bag”と呼ばれていた）を用いた。しかしこの方法では効果がなかった。ファイバ・スプリッタ中の black box はある程度密封された構造になっており、この中に存在する水分子は高々数時間の窒素パージでは置換できないためであろうと考えられる。

ハードウェアでの対処が難しいため、次にソフトウェアでの対処を考えた。Voigt fitting で、計測部の低圧部分に相当する半値幅の小さい吸収線形状と、大気圧部分に存在する半値幅の大きい吸収線形状を重ね合わせる方法である。

図 20 は計測部を可能な最低圧まで減圧した場合の計測データと改良したソフトウェアを用いて fitting した 2 種類の吸収線形状の例であり、下段は計測データと fitting 形状との残差である。fitting カーブの計測部内部分はソフトウェア上での最適値決定ルーチンによって求められるが、大気圧成分の各係数は較正によって決定した定数を用いる。この大気圧成分の較正としては、本来は計測部を十分な低圧に減圧し、計測部での水分子の影響を除去した上で大気圧成分に対して最適値決定ルーチンを適用して決定すべきであるが、計測部を含む真空タンクには多少の漏れがあり、最低圧力が図 20 の 0.5kPa ま

でしか到達せず計測部内の水分子の影響を排除することができなかったため、大気圧成分は最低圧状態でのベース成分を最も良く再現する係数を手作業で決定した。

図 18 と図 20 は圧力などの条件は異なるが、両者を比較することで大気圧成分を取り入れた図 20 では計測データと良く一致する fitting を行うことができるように改良されていることが確認できる。温度算出などの基礎データとなる integrated absorbance の算出などは計測部内部分の fitting 係数のみを用いて行う。

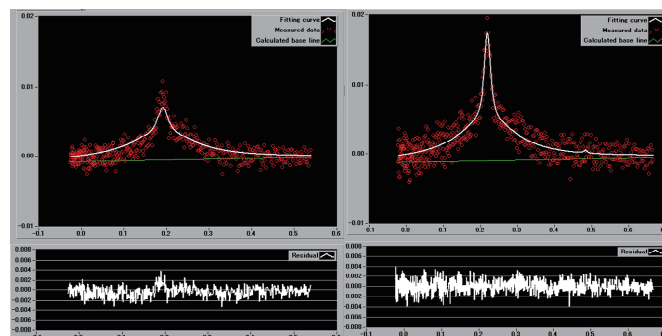
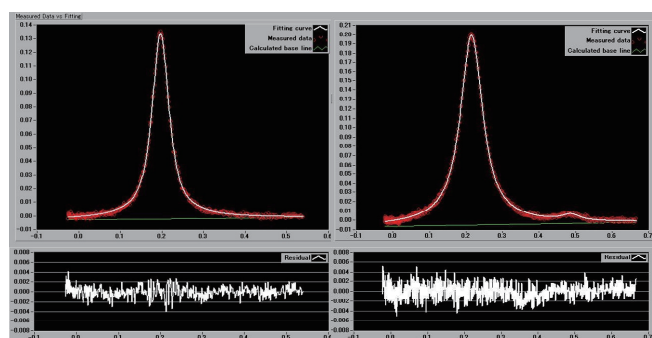


図 20 0.5kPa での計測データと改修後のソフトウェアによる Voigt fitting 及び残差  
左 : High E” Line, 右 : Low E” Line

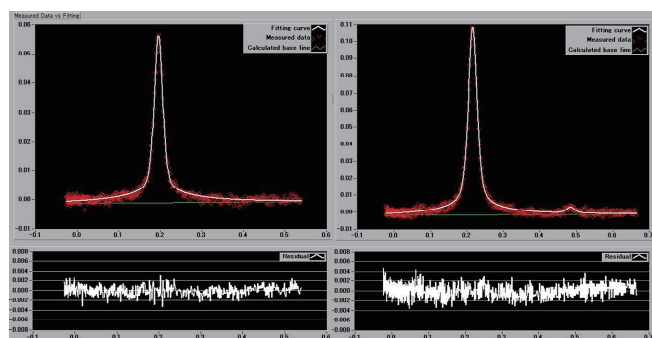
#### 5.5 静的温度検証（ソフト改良後の結果）

5.4 節で改良された計測ソフトウェアを用いて表 1 に示したものと同一計測データを再処理した。その結果を表 2 に示す。上から 4 行が表 1 に対応する結果である。表 1 では温度誤差 DT が最大で 10K であったが、表 2 では 5.5K にまで改善された。表 1 では示さなかった 16.7kPa, 6.8kPa, 2.8kPa のケースについても改良前は 20-30K 程度の温度誤差があったところを改良後は 2.8kPa の場合でも 4.5K の誤差に収まった。標準偏差については低圧ほど大きな値となっているが、これは 5.1 節で述べたことと同様に低圧ほど integrated absorbance が小さくなり計測精度が低下するため必然的に標準偏差が大きくなる。

図 21 は(a) 33.5kPa と(b) 2.8kPa の Voigt fitting の例である。両者ともに計測データと fitting 結果との間の残差はほぼ 0 であり、2.8kPa のケースでも fitting が十分に機能していることが確認できる。



(a)



(b)

図 21 計測データと改良ソフトによる fitting 結果

(a) 33.5kPa, (b) 2.8kPa

左 : High E'' Line, 右 : Low E'' Line、各画像の上段は吸収量の計測値と Voigt fitting 結果、下段は計測値と fitting 結果との残差を示す

表 2 静的温度検証結果 (改良後)

Case	P (kPa)	Actual Temp. (K)	Meas. Temp. (K)	DT (K)	$\sigma_T$ (K)
1	33.5	295	296.0	1.0	2.0
2	33.5	295	293.9	-1.1	2.2
3	34.0	294	299.4	5.4	4.3
4	34.0	294	299.5	5.5	4.1
5	16.7	295	297.9	2.9	2.3
6	6.8	295	297.6	2.6	3.6
7	2.8	295	299.5	4.5	7.3

## 5.6 Expansion Tube 試験

構築してきたシステムを expansion tube に適用し気流静温を計測する試験を行った。expansion tube で通常用いられる高压管気体=He, 低压管気体=空気, 膨張波管気体=He のケースと、通常用いられるケースではないが比較対象としての高压管気体=He, 低压管気体=空気, 膨張波管気体=空気のケースの 2 つに対して気流静温測定を行った。

以下にこれら 2 つのケースについての測定例を記す。

### 5.6.1 膨張波管気体が He の場合

高压管 607kPa (He), 低压管 93.3kPa (wet air), 膨張波管 2.7kPa(He)のケースの試験結果を図 22 に示す。同時に計測された衝撃波マッハ数の計測結果から推定された試験気体の気流条件は  $T_s=240K$ ,  $P_s=35kPa$ ,  $M=3.0$ 、膨張波管気体部分で  $T_s=510K$ ,  $M=1.7$  である。膨張波管気体部分では推定されたマッハ数が  $M=1.7$  であるため  $22.5^\circ$  との楔の角度から、試験模型の矩形チャンネル内で流れがチョークしている可能性が高く、定量的な温度評価には用いることができない。

図 22(a)は処理結果の生データであり、赤線が計算された温度、黒線が模型内に設置されたピトー圧プローブの履歴である。0~5.5ms の間は計測部には初期の膨張波管気体である He とリークした水分を含む空気、あるいはこれが入射衝撃波によって加熱されたものが存在するが、含まれる水の分圧が小さいために吸収量も小さく、結果として算出される温度も誤差の大きいものとなっている。5.5ms 以降は試験気体である wet air が到達するため吸収量が大きくなり、算出温度のばらつきも小さくなっている。(a)では 0~5.5ms の温度のばらつきが大きく、ばらつきに隠れて現象の議論が難しいために(a)に 5 点を用いた移動平均を加えた結果を(b)に示す。また(c)は計測された integrated absorbance の履歴である。

試験気体部分については、図 22(c)の integrated absorbance の履歴より試験時間は 5.5-6.8ms 程度でありこの区間では圧力もそれほどの大きな変動はないといえるレベルである。この試験時間の温度は 260K 程度から 280K 程度まで徐々に変化している。この温度は衝撃波マッハ数から推定した気流静温  $T_s=240K$  よりやや大きい値であるが、システムの温度計測誤差 (図 15(c)) が 7-8K あること、推算に用いた衝撃波マッハ数は膨張波管の管端から 1.5m の部分で計測した値であり、衝撃波マッハ数は expansion tube の流れ方向に徐々に減速するため試験気体である低压管気体を通過した衝撃波マッハ数は測定値より大きいことが予想されること、などを考えると妥当な差であると考えられる。

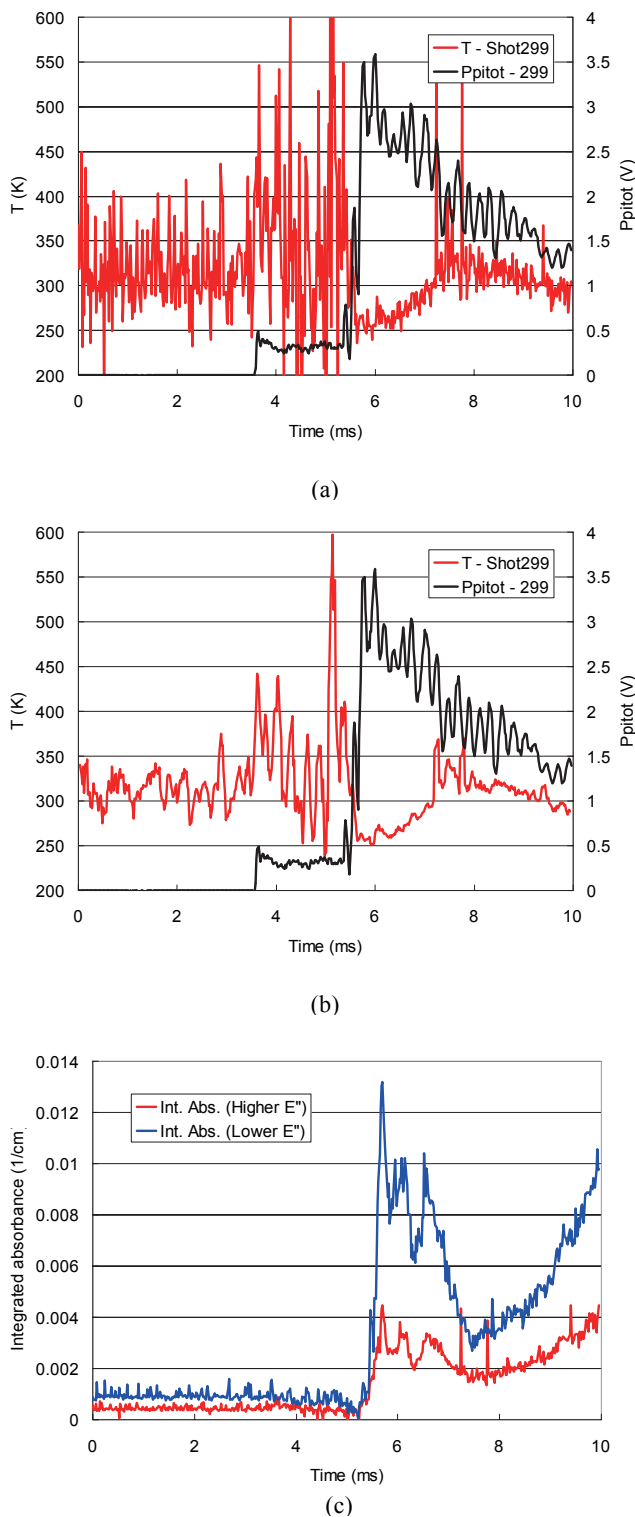


図 22 気流静温及び integrated absorbance 計測結果

初期設定圧力：高压管 607kPa (He), 低压管 93.3kPa (wet air), 膨張波管 2.7kPa (He), (a) 静温及びピトー圧, (b) 静温及びピトー圧で(a)の静温データに 5 点移動平均を掛けたもの, (c) integrated absorbance

### 5.6.2 膨張波管気体が空気の場合

高压管 607kPa (He), 低压管 93.3kPa (wet air), 膨張波管 2.7kPa (wet air) のケースの試験結果を図 23 に示す。同時に計測された衝撃波速度の計測結果から推定された試験気体の気流条件は  $T_s=230\text{K}$ ,  $P_s=33\text{kPa}$ ,  $M=2.76$ 、膨張波管気体の推定気流条件は  $T_s=870\text{K}$ ,  $M=1.4$  である。このケースでも膨張波管気体部分では推定されたマッハ数が  $M=1.4$  であるため試験模型の矩形チャンネル内で流れがチヨークしている可能性が高く、定量的な温度評価には用いることができない。

図 23(a) はピトー圧と算出された静温であり、赤線・ピンク線が計算された温度、黒線が模型内に設置されたピトー圧プローブの履歴である。(b) は計測された integrated absorbance の履歴である。(b) の integrated absorbance の履歴からは、膨張波管気体が終わり試験気体である低压管気体が到達するのが 2.4ms 付近であり、そこから 2.8ms 付近までの 0.4ms 程度が接触面に相当する混合領域である。(a) の温度履歴についても 2.4ms から 2.8ms にかけて勾配をもって温度が低下しているのは接触面が幅をもっていることに対応する。その後(b)での 2.8~3.0ms の integrated absorbance のプラトー部分が試験時間に相当する。この部分の温度は 320K から 300K に多少低下しているが試験に用いるに十分に安定しているといえるレベルである。この温度は衝撃波マッハ数からの推算  $T_s=230\text{K}$  とは大きな差がある。ピトー圧履歴を観察すると、図 23 では図 22 のピトー圧履歴と比較して 2.5ms から 3ms にかけての領域でのステップ的な圧力上昇が鈍い。断定はできないが、この鈍い圧力上昇は膨張波の入射によるものであると思われる。衝撃波マッハ数を計測する圧力ポートの下流で膨張波が低压管気体に追いつき、流れの状態量を理想状態から変えてしまったために前述のような推算温度と計測温度の差が生じたのであろうと考える。この時点での expansion tube の管の配置は 5.6.1 に記した膨張波管気体が He の場合の配置を使っており、膨張波管気体だけを空気に交換した状態で試験を行った。このため試験気体の時間領域に膨張波が入射する可能性は十分考えうる。

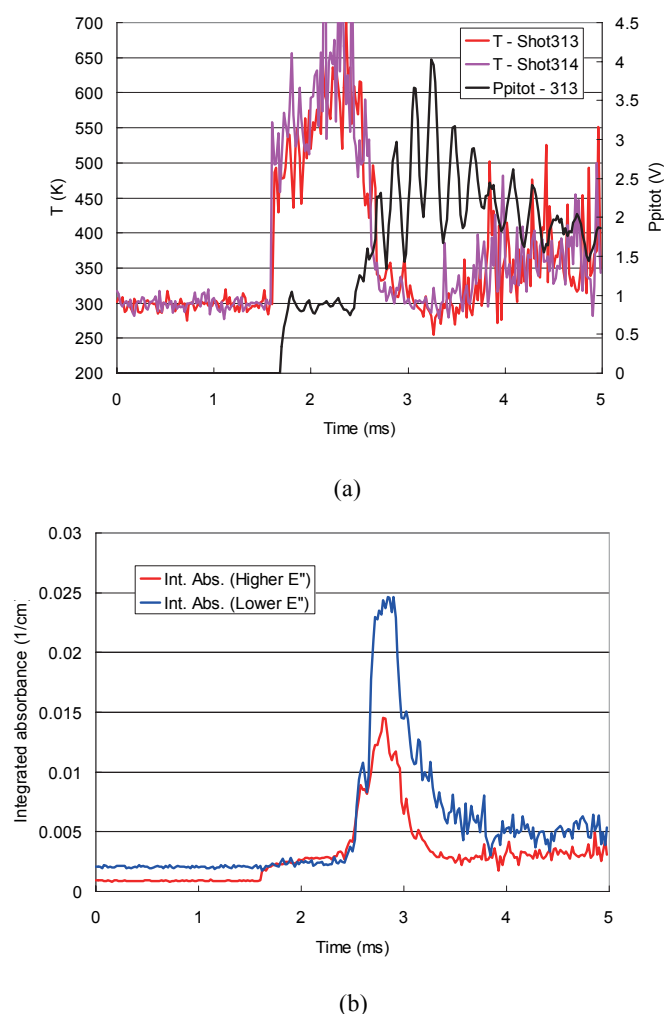


図 23 気流静温及び integrated absorbance 計測結果  
初期設定圧：高压管 607kPa(He), 低压管 93.3kPa (wet air),  
膨張波管 2.7kPa (wet air) (a) 静温及びピトー圧, (b)  
integrated absorbance

## 6. まとめ

半導体レーザ吸収法による Stanford 6 inch Expansion Tube 気流の静温測定を行った。最適な吸収線を選定する line selection program の作成から始め、試験模型及び計測光学系設計、計測システムの構築、LabVIEW 上でのデータ処理プログラムの構築などのシステム整備を行い、整備したシステムを用いて最初に LD 1 台による expansion tube の試験時間同定試験を行い、ピトー管データだけでは確定できない風洞試験時間の同定を行った。次に静的な既知温度場を用いた温度検証を経て expansion tube の飛行試験用条件の静温計測試験を行い、膨張波管気体が He の場合と空気の場合の両者に対して試験時間中の静温の時間履歴計測を行った。

半導体レーザ吸収法は温度や数密度だけでなく、質量流量や特定の化学種の存在率などのさまざまな状態量を

高速かつ非接触に計測できる技術である。現時点での世界的な流れの主流は、半導体レーザ吸収法を燃焼場で用いている方向であるが、そのリアルタイム性を活かしたフィードバック技術としてや、高速で空間状態量を計測できることなどから空力や制御の面でも広いポテンシャルを持っている。本技術は将来にわたって航空宇宙機の研究開発において有効に活用することができる技術であることは間違いなく、今後の研究開発の場に活かしていきたい。

## 参考文献

- [1] L. C. Philippe and R. K. Hanson, "Tunable Diode Laser Absorption Sensor for Temperature and Velocity Measurements of  $O_2$  in Air Flows," AIAA 91-0360
- [2] M. G. Allen and W. J. Kessler, "Simultaneous Water Vapor Concentration and Temperature Measurements Using 1.31- $\mu$  m Diode Lasers," AIAA J. Vol.34, No.3, 1996, pp. 483-488.
- [3] P. L. Varghese, C. S. Miller and R. Villarreal, "Temperature and  $CO_2$  Concentration Profiles in Flames Measured by Laser Absorption Tomography," AIAA 97-0317, 1997.
- [4] <http://navier.stanford.edu/thermosciences/theses.html>  
Recent Theses in the Thermosciences Group of the Mechanical Engineering Department の中で Advisor="Hanson"となっている諸研究
- [5] K. Lyle, "Development of a Real-Time Diodelaser Mass Flux Sensor for Simultaneous Measurement of Density and Velocity of Oxygen," Stanford PhD. Thesis, TSD report 163, 2005.
- [6] D. W. Mattison, et al, "Tunable Diode-Laser Temperature Sensor for Evaluation of a Valveless Pulse Detonation Engine," AIAA-2005-0224, 2005.
- [7] A. Mohamed, et al., "Tunable Diode Laser Measurements on Nitric Oxide in a Hypersonic Wind Tunnel," AIAA J. Vol.34, No.3, 1996, pp. 494-499.
- [8] S. D. Wehe, D. S. Baer and R. K. Hanson, "Tunable Diode-Laser Absorption Measurements of Temperature, Velocity, and  $H_2O$  in Hypervelocity Flows," AIAA 97-3267, 1997.
- [9] 中北, 山崎, 出口, 穂積, "衝撃風洞澱点温度直接計測の試み," 宇宙航行の力学シンポジウム, 1998, pp. 113-116.
- [10] M. Matsui et al., "Laser diagnostics of atomic oxygen in arc-heater plumes," AIAA-2002-793, 2002.
- [11] G. B. Rieker, et al, "Rapid Measurements of Temperature and  $H_2O$  Concentrations in IC Engines with a Spark

- Plug-Mounted Diode Laser Sensor,” 31st Int. Symp. on Combustion, Heidelberg, Aug. 2006; in Proc. Comb. Inst 31, 2007, pp.3041-3049.
- [12] R. G. Morgan, “Development of X3, a Superorbital Expansion Tube,” AIAA-2000-558, 2000.
- [13] W. N. Heltsley et al., “Design and Characterization of the Stanford 6 Inch Expansion Tube,” AIAA 2006-4443, 2006.
- [14] E. E. Whiting, “An Empirical Approximation to the Voigt Profile,” J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol. 8, Issue 6, 1968, pp. 1379-1384.
- [15] L. S. Rothman et al., “The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database,” J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Volume 96, Issue 2, 2005, pp. 139-204.
- [16] <http://cfa-www.harvard.edu/HITRAN/>
- [17] X. Zhou, “Diode-Laser Absorption Sensors for Combustion Control,” Stanford PhD. Thesis, TSD report 161, 2005.



## Appendix

### 高温場計測システムの検討

本文で紹介した温度の低い expansion tube 試験ケースへの静温計測システムの他に、expansion tube の高温場試験ケースへの拡張を念頭に置き、吸収線の選定とテストスタンドを用いたシステムの確認を行ったので appendix として紹介する。

#### A-1. 使用吸収線の選定、計測ソフトの改修

計測用ソフトウェア、ハードウェアには低温計測の場合と構成に大きな変化はないが、計測対象となる吸収線を高温で吸収量変化の大きなラインに変更する必要がある。これに伴い半導体レーザも異なる波長のものに変更する。

4.1 節、5.1 節と同様に line selection プログラムを用いて 1000-1500K の温度場を計測するための最適な line pair を選定した。この選定に際しては、高温場の吸収線データベース、特に線強度のデータは誤差が大きいので、これまでに Stanford 大において校正済の吸収線データベースに記述されている吸収線に限定した。これらの特性データのうち、 $E''$ , line center, 圧力広がりなどのデータは HITRAN 2004 から、線強度のデータは Stanford のデータベースから、それぞれ取り込んだ。

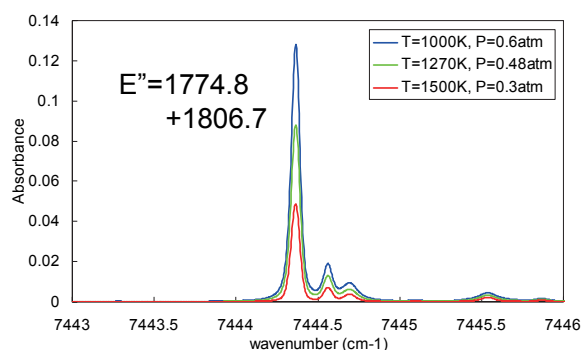
図 A-1 に (a), (b) に選定された吸収線を、(c) にこの line pair に noise floor 0.2% を仮定して求めた推定温度計測精度を示す。(a) は lower state energy の高い側のラインであり中心波数  $\nu_0 = 7444.35 \text{ cm}^{-1}$  と  $7444.37 \text{ cm}^{-1}$  ( $\lambda_0 = 1343 \text{ nm}$ ) の 2 本のラインが近接して存在するためあたかも 1 本のラインのように扱うことのできるラインであり、lower state energy  $E''$  は 1774.8 と 1806.7 である。(b) は lower state energy の低い側のラインであり、中心波数  $\nu_0 = 7185.60 \text{ cm}^{-1}$  ( $\lambda_0 = 1392 \text{ nm}$ )、lower state energy  $E''$  は 1045 である。

図 A-1(c) はこの line pair に noise floor 0.2% を仮定して求めた推定温度計測精度である。図 A-1 では  $\text{H}_2\text{O}$  分圧を 1% として計算している。高温領域では低温よりはるかに多くの量子的な準位が励起するために多数の吸収線が存在し、各々の吸収線の吸収量=量子的な存在確率は小さくなる。よって図 A-1(c) での計測誤差は低温での例 (図 16(c)) よりも 1 オーダー大きな値となっている。この誤差を改善するためには半導体レーザの光路長を大きくするためにレーザ光を数往復させる方法や、test gas 中の  $\text{H}_2\text{O}$  含有率を大きくするなどの方法が考えられる。

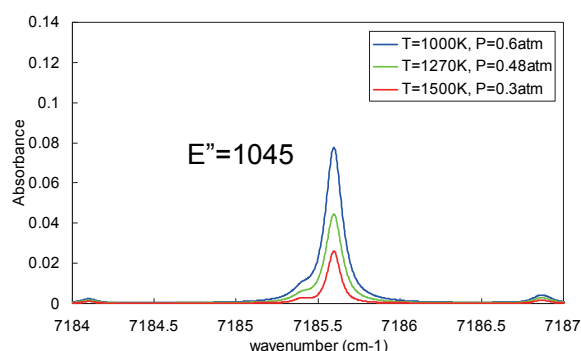
図 A-1(c) での他の問題点としては、高温側で計測精度が悪くなっていることがある。これは用いたライン、特に high  $E''$  line 側の  $E''$  の値が 1000-1500K の対象温度範囲に対してやや小さいためである。high  $E''$  line 側ラインの  $E''$  の値として 3000 以上のものを用いる選択肢もあり、この場合には温度計測誤差も改善するが、high  $E''$  line の

吸収量は図 A-1(a) よりはるかに小さくなる。温度精度よりも十分な吸収量を持つ line を使う方が良い、との観点から図 A-1(a), (b) のペアに決定した。

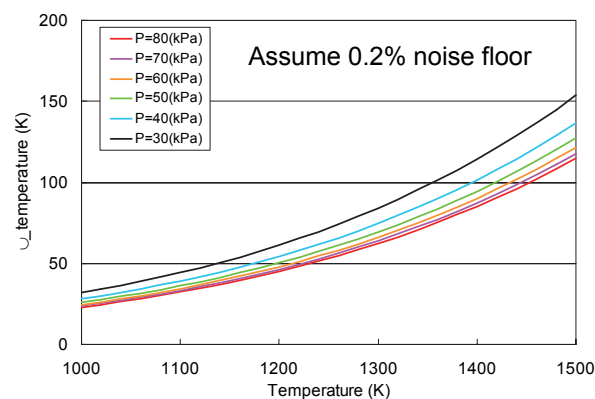
計測ソフトに関しても、基本的な構成は低温計測の場合と同様であるが、吸収線の情報を交換し、high  $E''$  line, low  $E''$  Line それぞれに計測対象ライン以外に近傍の吸収線も同時に計測されてしまうために Voigt fitting の部分でこれらのラインも含めて fitting を行うように改良した。



(a)



(b)



(c)

図 A-1 温度計測用 Line Pair

$\text{H}_2\text{O}$  分圧 1%, Laser path=3 inch

(a) High  $E''$  Line,  $E''=1774.8+1806.7$ , (b) Low  $E''$  Line,  $E''=1045$ , (c) 推定温度計測誤差, noise floor=0.2% 仮定



## A-2. 溶鉱炉を用いた高温場での吸収線計測

選定した吸収線と改修したソフトの検証を目的とし、温度場が他の方法で計測可能な静的な高温場を用いてシステムの確認を行った。高温場の発生装置としては single-zone furnace (単一区画型溶鉱炉) を用いた。図 A-2 に single-zone furnace と半導体レーザ吸収法の計測システム、及び single-zone furnace の内部構成断面図を示す。右上の断面図にあるように、furnace 内部でも端部では外気に近いために温度分布が様ではなくなる。温度分布が一般的な中心部のみを計測に用いるため、中心部にのみ計測対象ガスを注入するテストセルが存在し、両端部は石英ガラスのロッドとすることでこの部分の温度がガスに及ばないような構造となっている。furnace での試験時には expansion tube で想定される気流圧力同じ設定圧力

とし、試験気体はビニール袋内部に容器に入れた水を置き  $\text{H}_2\text{O}$  蒸気圧を飽和させた環境から供給する。 $\text{H}_2\text{O}$  分圧は約 2.5%、レーザ計測距離=20cm である。これは減圧タンクを用いて  $\text{H}_2\text{O}$  分圧を 10%とし、レーザ計測距離=7.5cm である expansion tube 試験の約 2/3 の吸収量である。furnace の温度は軸方向に 4 点設置された K 熱電対を用いて計測する。

図 A-3 に設定温度を 810K とした場合の furnace による吸収線計測結果及び fitting curve、実験データと fitting curve との残差を示す。この結果から、high E" line、low E" line とともに下段の残差は 0.2%以下であり改修したソフトウェアを用いた fitting ルーチンは十分に機能していることが確認できる。

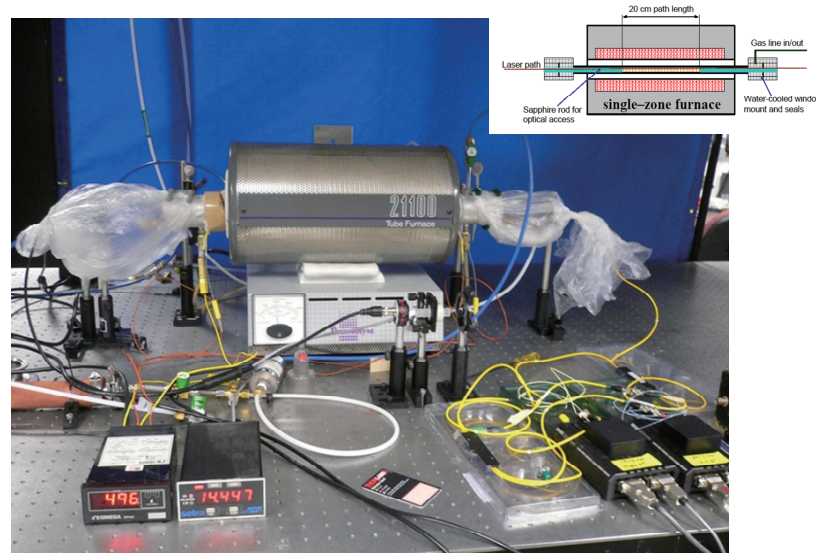


図 A-2 Single-zone furnace に設置された  
半導体レーザ吸収法計測システム

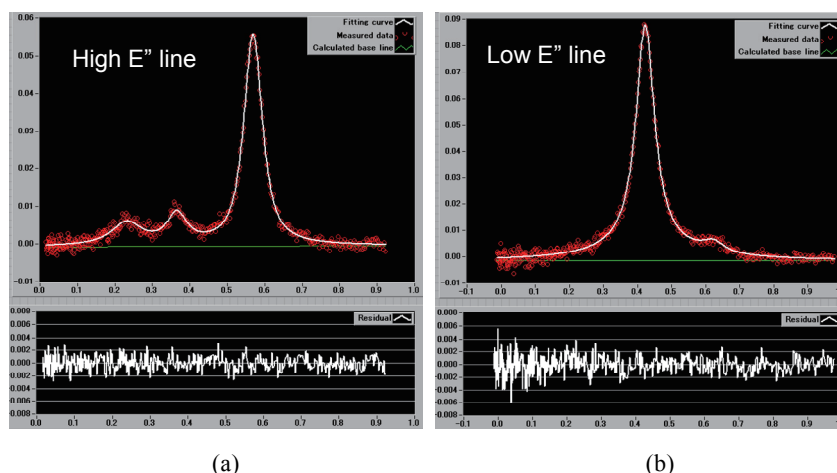


図 A-3 Furnace による吸収線計測結果及び fitting curve、実験データと  
fitting curve との残差

設定温度 810K,  $\text{H}_2\text{O}$  分圧 約 2.5%, レーザ計測距離=20cm

(a) High E" Line,  $E''=1774.8+1806.7$ , (b) Low E" Line,  $E''=1045$