

機関番号：12501

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246121

研究課題名 (和文) CARS法を中心とした非線形分光法による強い衝撃波背後の
分子振動・回転温度計測研究課題名 (英文) Measurement of vibrational and rotational temperatures behind strong
shock waves by nonlinear spectroscopic methods like CARS

研究代表者

前野 一夫 (MAENO KAZUO)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30133606

研究成果の概要 (和文)： 大気圏再突入飛行体への空力加熱問題は宇宙開発の重要な課題である。本研究では、大気圏再突入時の強い輻射衝撃波背後の極超音速流れを地上で実現し、高温の实在気体流れを計測して、空力加熱を正確に解析する数値計算の基本実験データを取得する。実験では高出力レーザーと高速分光装置を用い4～7km/sを超える高速の極超音速衝撃波背後の空気流れにCARS分光計測法を適用し、得られたスペクトルを解析することで窒素分子の振動・回転温度を求めた。計測された振動・回転温度は、通常の衝撃波関係式により求められる平進温度上昇には追従せず、従来の解析とは異なる温度分布となる。以上の結果は世界で初めてのもので、今後の宇宙航空開発研究に大きく寄与する。

研究成果の概要 (英文)： In the re-entering phase of space vehicle into the atmosphere strong shock wave is generated, and non-equilibrium, radiating high enthalpy flow is generated behind the shock wave. Together with the convecting heat transfer, the radiative and non-equilibrium heating from the shocked air plays an important role on the total heat flux to the vehicle. This research treats nonlinear spectroscopic measurement on the vibrational/rotational temperatures of nitrogen behind the hypervelocity shock waves from 4-7km/s by CARS method. The CARS spectroscopic signals are successfully observed by free-piston, double-diaphragm shock tube experiments, and the measured results are compared with simulated spectra to decide the temperatures by spectral matching method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	21,400,000	6,420,000	27,820,000
2009年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
年度			
年度			
総計	36,400,000	10,920,000	47,320,000

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：CARS, 振動・回転温度計測, 極超音速衝撃波, 大気圏再突入, 实在気体力学

1. 研究開始当初の背景

近年の航空宇宙工学の発展に伴い、宇宙飛行体が国際宇宙ステーションなどの宇宙軌

道から大気圏に再突入し帰還する機会が多くなっている。この再突入の際、飛行体の前面には強い衝撃波が発生し、衝撃波波面背後

ではエネルギー放射を伴う高エンタルピー流れが生じる [1,2]。飛行体の先端部は高温非平衡流れにさらされ、飛行体の耐熱設計を行う上での課題となっている。しかしながら現在までの世界の研究は高エンタルピー流れに対する詳細な解明には至っておらず、気体分子の内部構造や電離・解離までを考慮した解析では多くの仮定に基づく解析法に留まっている。特に実在気体の内部自由度に関する実験的研究は強い衝撃波面背後流れの時間凍結スペクトル分光に限られ、幾つかの研究報告がなされて来た[3]。

以上の研究状況を背景に、空気中の窒素分子に着目して、実際に強い衝撃波背後の極超音速流れで振動・回転エネルギー状態がどのように直接非平衡励起されているかを把握する必要が生じて来た。しかし、4 km/s を超える衝撃波後方の非線形光学的計測法に基ずく実際の測定は極めて困難であり、世界的にも全く成功例がない状態であった。

[1] Allen, R. A., Keck, J. C. and Camm, J. C.: Non-Equilibrium Radiation from Shock heated Nitrogen and a Determination of the Recombination Rate, Avco Everett Research Laboratory, AFBSD-TR-61-20, Research Report 110(1961).

[2] S. P. Sharma and W. D. Gillespie. Non-equilibrium and equilibrium shock front radiation measurements. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 5(3) , pp.257-265, Sept. (1991).

[3] A.Matsuda, et.al.,: Ro-Vibrational Temperatures Derived from N₂(2+) Emission Spectra and CARS Method behind Strong Shock Waves, AIAA Paper, 2007-4547 (2007).

2. 研究の目的

研究代表者らは、強い衝撃波背後流れの数値解析に必要な信頼性のある基礎実験データの蓄積を目的として、このような高温非平衡流れと衝撃波環境を地球上で模擬できる装置として、自由ピストン二段膜衝撃波管を用い、低密度空気中に入射マッハ数 12 から 22 の極超音速衝撃波を生成し、CARS (Coherent Anti-stokes Raman Spectroscopy) 分光計測システムによって高エンタルピー非平衡流における窒素分子の CARS 信号を取得し、信号の分光解析を行うことで振動・回転温度の計測を行なうものである。また全放射発光現象について CARS 法と同時観測を行い、流れの均一性や持続時間の検証を進めて CARS 法による温度計測の検証と放射発光現象の解明を試みる。

3. 研究の方法

本研究では自由ピストン二段膜衝撃波管を用いる。この衝撃波管は図 1 に示すように、高压管 (充填気体: 窒素), 圧縮管 (充填気体: ヘリウム), 中圧管 (充填気体: ヘリウム), 低压管 (充填気体: 空気) および観測部と真空タンクで構成されている。各管はそれぞれ高速可動弁, 第 1 隔膜 (Fe:SS400), 第 2 隔膜 (Al:A1050P) で仕切られている。このようにピストン圧縮方式と二段膜方式を組み合わせることにより, 高温の駆動気体を発生させ, 低压管内に強い衝撃波を生成する。

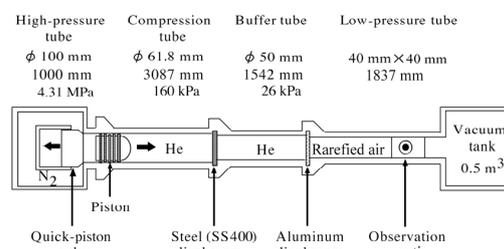


図 1. 自由ピストン二段膜衝撃波管

実験より得られる CARS 分光スペクトルは、物質の運動状態に対応するエネルギー準位に関係しており、計測された分子の測定スペクトルと、理論計算によって得られるスペクトルとのフィッティングで振動・回転温度が決定される。以下に温度算出方法を簡略に述べる。まず、実験で用いる色素レーザーの分光波形データと理論式を基に理論波形データを作成する。この時、振動温度 T_v , 回転温度 T_r , スリット関数 W , ラマン線幅 Γ_j , 非共鳴項成分の 5 つのパラメータをプログラムに入力し、各値を任意に指定した範囲で変化させることで数千通りの理論波形データが作成される。次に、この理論波形データと測定スペクトルにおける無次元化した発光強度の誤差の二乗平均を計算し、その誤差 (フィッティング誤差) が最小となる理論波形データを決めることで窒素分子の振動・回転温度が決定される。

次に CARS 分光計測システムの概略を図 2 に示す。衝撃波背後における窒素分子のスペクトル信号取得のための CARS 分光観測システムは、YAG レーザー ($\lambda=532\text{nm}$),

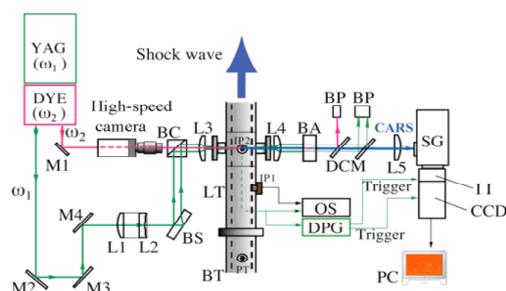


図 2. CARS 計測システムの概略図

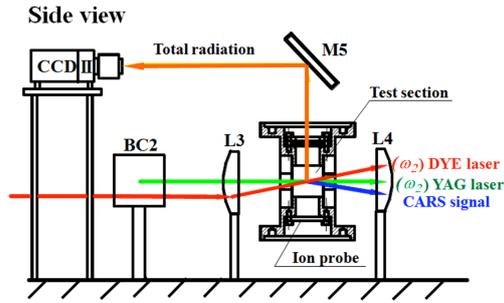


図3. 全放射発光観測システム

色素レーザー($\lambda=606.5\pm 7\text{nm}$), 分光器, 高速ゲート内蔵イメージンシファイア付き CCDカメラ (ICCD), および画像の取得・処理のためのパーソナルコンピュータで構成されており, この CARS 信号を観測, 解析することにより窒素分子の回転・振動温度を計測する.

図3に全放射発光現象観測システムの側面図を示す. 衝撃波管によって生成された衝撃波が観測部に到達した際, 観測部上部に設置された観測窓より発せられる全放射発光をミラーで反射し CCD カメラで取得する.

4. 研究成果

4.1 CARS 分光波形の比較

マッハ数 12.6 (4.3km/s, 破線)と 15.7 (5.3km/s, 一点鎖線), 17.1 (5.8km/s, 実線)の衝撃波波面背後約 1mm 後方において取得された CARS 信号の分光スペクトルを比較したものを図4に示す. 図4ではマッハ数 15.7の衝撃波背後のスペクトルが他のスペクトルに比べ異なる傾向を示していることが明らかである. 特に, 波数 20980 cm^{-1} から 21080 cm^{-1} の領域と 21130 cm^{-1} 以上の領域の相対信号強度が他のスペクトルより大きくなっている. 原因はマッハ数 15.7の衝撃波背後で CARS 信号を取得した際に使用したストークス光の中心波長は 606.5nm であったことに対し, マッハ数 12.6, 17.1の衝撃波背後で CARS 信号を取得した際のストークス光の中心波長はそれぞれ 607.5, 607.4nm であるため, ストークス光の中心波長によると考えられる. しかし, マッハ数 12.6, 15.7の衝撃波背後のスペクトルがストークス光の中心波長の影響によって高波数側にシフトしていると仮定しても, マッハ数 15.7の衝撃波背後におけるスペクトルの傾向は他のスペクトルと異なる.

図5にマッハ数 15.7 (一点鎖線) と 17.1 (実線), 22.4 (7.6km/s, 破線)の衝撃波背後において取得された CARS 信号の分光スペクトルを比較したものを示す. マッハ数 22.4の衝撃波背後で得られた CARS スペクトルは

衝撃波波面背後より 2.2mm 後方で取得されたものである. 図5よりマッハ数 22.4の衝撃波背後で得られたスペクトルは波数 21100 cm^{-1} 以上の高波数側の相対信号強度が強いことがわかる. このスペクトルが得られたときのストークス光の中心波長は 607.4nm でありマッハ数 17.1のスペクトルのものと同じであるため, 高波数側にシフトしているとは考えることはできない. よって, CARS スペクトル波形は衝撃波のマッハ数, または信号を取得する波面背後距離に依存すると考えられる.

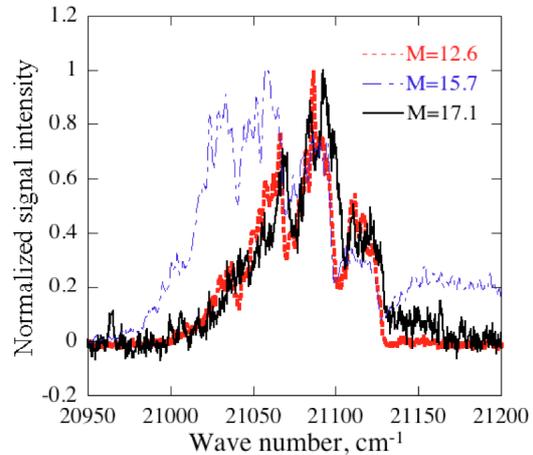


図4. 実験の CARS スペクトルとマッハ数 I

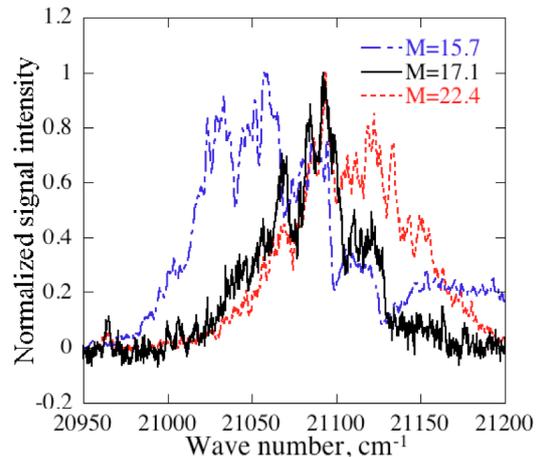


図5. 実験の CARS スペクトルとマッハ数 II

図6にマッハ数 17から 22の比較的高いマッハ数の衝撃波波面より後方約 2mm の位置で得られた CARS 分光スペクトルを示す. この結果から波数 21100 cm^{-1} 以上の高波数側の領域において観測対象とする衝撃波のマッハ数が増えるに従い相対信号強度が強くなるということがわかった. この領域は非共鳴項に相当する. 波数 21100 cm^{-1} 以下の領域では大きな差は見られないが, 衝撃波のマッハ数が大きくなるに従い相対信号強度は弱くなる傾向を示した.

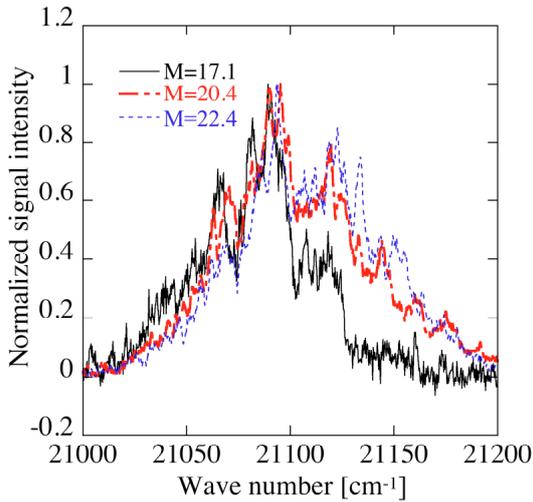


図6. 高マッハ数域のCARSスペクトル

4.2 スペクトルフィッティング法による振動・回転温度の算出

図7に実験より得られたCARSスペクトルと、計算により得られたCARSスペクトルをフィッティングした結果を示す。横軸は波数、縦軸は無次元化した発光強度を示している。試験気体は空気であり、初期圧力1039Pa、衝撃波速度は5.8km/s、マッハ数は17.1、測定点は衝撃波の波面から後方1.3mmの位置である。赤色の実線は実験によって得られたCARSスペクトルであり、黒の破線は理論スペクトルである。スペクトルフィッティングの結果、振動・回転温度はそれぞれ5000K、7000Kとなった。実験より得られたCARSスペクトル（実線）とコンピュータープログラムによって作成された理論スペクトル（破線）は全体的に一致しているが、波数21060、21080、21110cm⁻¹付近で不一致がみられる。

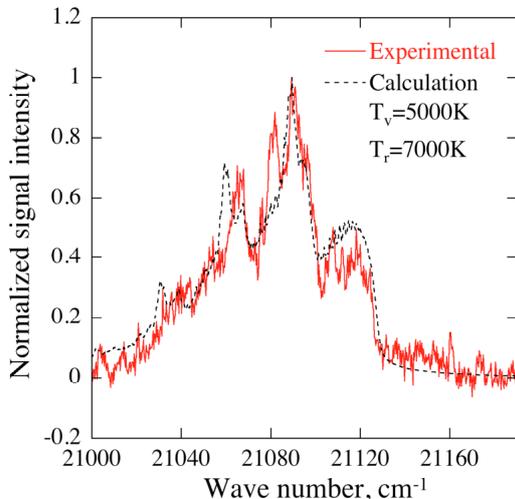


図7. スペクトルマッチング法 (M=17.1, 衝撃波面後方1.3mm)

図8は衝撃波速度6.9km/s(マッハ数20.4)の衝撃波の波面後方1.3mmの位置で取得され

たCARS信号をしたものである。青色の一点鎖線は人間の目視によって選出されたスペクトルであり、最小二乗平均計算プログラムによって選出されたスペクトル(黒破線)と異なる結果を示した。計算プログラムによる理論スペクトル選出より目視によるフィッティング結果の方が実験スペクトルに対して一致していることが明らかである。これは理論スペクトル作成プログラム波数21130cm⁻¹以上の高波数側の領域を再現できていないこととフィッティング誤差の計算(評価)領域にスペクトルを再現できていない波数21130cm⁻¹以上の領域が含まれているためである。よって、フィッティングプログラムの誤差計算領域から波数21130cm⁻¹以上の領域を取り除く必要がある。振動・回転温度はそれぞれ3000K、9000Kとなった。

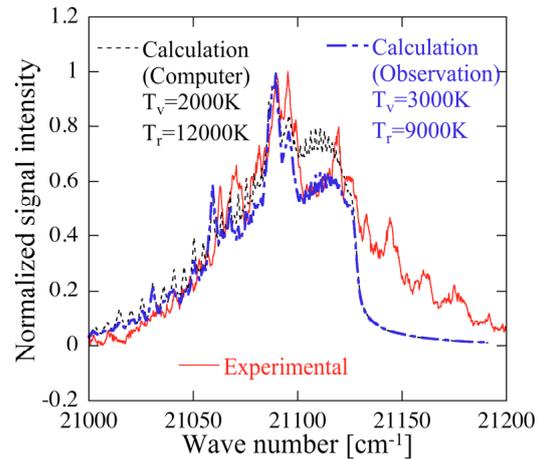


図8. スペクトルマッチング法による振動・回転温度結果 (M=20.4, 1.3mm 後方)

図9は衝撃波速度7.6km/s(マッハ数22.4)の衝撃波の波面後方2.2mmの位置でのCARS信号のスペクトルフィッティング結果であるが、図8と同様に計算プログラムによるフ

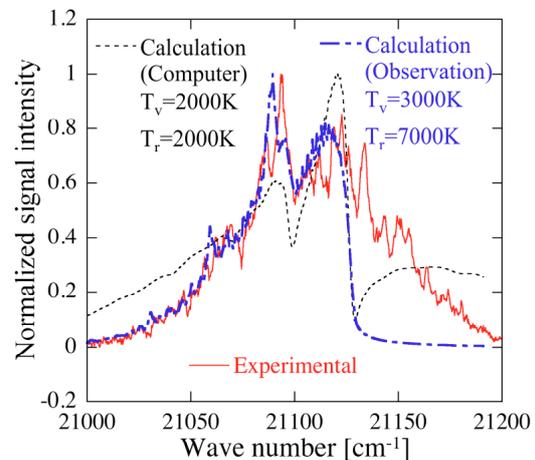


図9. スペクトルマッチング法による振動・回転温度結果 (M=22.4, 2.2mm 後方)

フィッティングと目視によるフィッティングでは異なる結果が示された。振動・回転温度はそれぞれ 3000K, 7000K となった。

4.3 全放射発光の高速撮影

以上のスペクトルを取得するにあたって、衝撃波とその背後の流れの一様性や乱れの様子、全放射発光の分布等を調べる必要があり、本研究では高速カメラを用いて発光の様子を観測した。図 10 にマッハ数 17.1 とマッハ数 22.4 の実験において同時観測した全放射発光現象を示す。衝撃波進行方向は画像の右から左であり、擬似カラー表示にて放射の発光強度を示している（相対強度）。図より CARS 分光測定した衝撃波は垂直波面を有しており、分光計測にあたって問題がないことが確認された。また衝撃波波面において、マッハ数 22.4 のほうがマッハ数 17.1 より発光強度が強いことがわかった。これより、衝撃波速度が高くなればなるほど衝撃波波面における発光強度が強くなると考えられる。

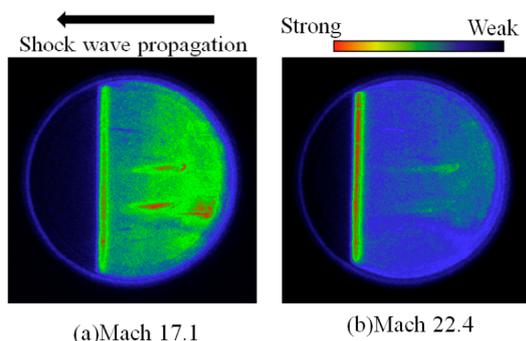


図 10. 全放射発光の観測例（相対強度）

本研究では、入射マッハ数 12~22 以上までの輻射を伴う極超音速衝撃波背後の空気流れにおける窒素分子振動・回転温度に対して従来は不可能であったナノ秒オーダーの高速 CARS 分光計測を試み、分光計測データの取得に成功した。さらに得られた CARS 分光データに対してスペクトルマッチング法を用い、振動温度・回転温度を得ることができた。特に高マッハ数領域においては温度算出法において用いるプログラムの改良を行い、電離や解離の支配的な非共鳴項領域をマッチング域から外した手法で振動・回転温度をより正確に求めることができた。

さらに CARS 分光計測と全放射発光現象の同時観測システムの再構築を行い、高速カメラを用いてプリカーサー現象の有無や衝撃波背後流れの発光と流れの均一性等に対する観測を実施した。

以上の結果は他に例がなく独創的で新しいものであり、今後の極超音速衝撃波背後流れの解明と解析に極めて有効である。

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 7 件）

(1) K.Sakurai, V. Hima Bindu, S. Niinomi, M. Ota, K. Maeno, CARS Measurement of Vibrational/Rotational Temperature with Total Radiation Visualization behind Strong Shock Waves of 5-7 km/s, Rarefied Gas Dynamics (Proc. 27th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics), AIP-CP Vol.1333, pp.419-424 (2011).

(2) K.Sakurai, T.Osada, S.Niinomi, M.Ota, K.Maeno, High-Speed Visualization of Total Radiation and CARS Measurement of Vibrational/Rotational Temperature behind Hypervelocity Shock Waves of 5km/s, Journal of Japan Society for Experimental Mechanics (Journal of JSEM), Vol.10, SI, pp.85-89 (2010)

(3) S.Niinomi, K.Sakurai, V. Hima Bindu, T. Osada, M. Ota, K. Maeno, Ro/Vibrational Temperature Measurement of N2 in Hypersonic Non-equilibrium Flow behind Shock Wave by CARS Method, USB Proc. 5th Int. Symp. on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (5th ISEM), pp.1-6 (2010).

(4) T. Osada, Y. Endo, C. Kanazawa, M. Ota, K. Maeno, The Measurement Technique of Nitrogen Vibrational and Rotational Temperatures behind Hypervelocity Shock Wave over the Mach Number of 15 with CARS, Space Technology Japan (Special Issue of ISTS), Proc. of 27th ISTS (Proc.は発行済), 09-e-17, 4ps.(2010).

(5) T. Osada, Y. Endo, C. Kanazawa, M. Ota, K. Maeno, CARS Rotational/ Vibrational Temperature Diagnostics behind Hypervelocity Shock Wave at Mach Number Range from 12 to over 15, CARS Rotational/Vibrational Temperature Diagnostics behind Hypervelocity Shock Wave at Mach Number Range from 12 to over 15, Proc. of 27th International Symposium on Shock Waves (27th ISSW), 4ps.(2010).

(6) K.Maeno, Y.Endo, M.Ota, K.Arimura, High-speed Measurement of Vibrational and Rotational Temperatures of Nitrogen Molecules behind Hypervelocity Shock Wave by CARS Method, Trans. JSASS Space Tech Japan, Vol.7, No.istis26, pp.Pe_77-Pe_82 (2009).

(7) Y.Endo, T.Osada, C.Kanazawa, M.Ota, K.Maeno, CARS Measurement of Vibrational and Rotational Temperatures of

Nitrogen Molecules behind Hypervelocity Shock Wave, Rarefied Gas Dynamics (CD-ROM Proceedings of 26th Int. Symp. on RGD), AIP CP-1084, 1-9 (2009).

〔学会発表〕 (計 7 件)

(1) K.Sakurai, V. Hima Bindu, S. Niinomi, M. Ota, K. Maeno, CARS Measurement of Ro/Vibrational temperature with High Power Laser and High Speed Visualization of Total Radiation behind Hypervelocity Shock Waves of 5-7 km/s, 18th Int. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers (GCL-HPL 2010), Sofia, Bulgaria, 2 Sept. (2010).

(2) T. Osada, Y. Endo, C.Kanazawa, M. Ota, K. Maeno, CARS Application to the Vibrational/Rotational Temperature Measurement of Nitrogen behind Shock Waves over Mach Number 13, 22nd Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive System(ICDERS), Minsk, Belarus 27-31 July (2009).

(3) K.Maeno, Y.Endo, K.Arimura, T.Osada, M.Ota, CARS Measurement of Non-Equilibrium Radiating Hypervelocity Flow behind Strong Shock Wave on Nitrogen Molecules by Controlling High Power Second Harmonics YAG-Dye Laser Pulses, XVII Int.Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers, Lisbon, Portugal, 15-19 Sept., (2008).

以下国内学会例

(4)ヒマビンドゥ・ベニガラ, 櫻井孝太郎, 新實翔太, 小黒将志, 太田匡則, 前野一夫, 極超音速衝撃波背後流れの CARS 法による N₂ の振動・回転温度計測, 平成 22 年度衝撃波シンポジウム, 青山学院大学, 講演論文集, pp.49-52 (2011 年 3 月).

(5)新實翔太, 長田堯, 櫻井孝太郎, ジャッパル・パリダ, 太田匡則, 前野一夫, 速度 6km/s までの衝撃波背後における大気中の窒素分子の CARS スペクトルによる振動・回転温度の算出, 平成 21 年度衝撃波シンポジウム, 埼玉大学, 講演論文集, pp.49-52 (2010 年 3 月).

(6) 前野一夫, 太田匡則, 遠藤陽一, 長田堯, 金沢力, マッハ数 12~16 範囲の衝撃波面背後における窒素分子の振動/回転温度の CARS 分光計測, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会、1 E19, 2pgs, 淡路島, 11 月 5~7 日 (2008).

(7) 前野一夫, 太田匡則, 遠藤陽一, 長田堯, 金沢力, CARS 法によるマッハ数 12 以上の衝撃波背後の非平衡流れ中の窒素分子回転振動温度計測, 日本流体力学会年会 2008、神戸, 9 月 4-7 日, 講演要旨集, p.83 (2008).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前野 一夫 (千葉大学・大学院工学研究科・教授)

研究者番号 : 30133606

(2) 研究分担者

太田 匡則 (千葉大学・大学院工学研究科・助教)

研究者番号 : 60436342

(3) 連携研究者

安部 隆士 (独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・宇宙輸送工学研究系・教授)

研究者番号 : 60114849