

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18778

研究課題名（和文）超高感度マルチパスレーザーヘテロ干渉計の開発と衝撃波前方プリカーサ現象の解明

研究課題名（英文）Development of ultra-sensitive multipath laser heterodyne interferometer and evaluation of precursor phenomena ahead of shock wave

研究代表者

松井 信（Matsui, Makoto）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90547100

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではまずマルチパスセスにおける感度向上の上限を調べた。3.7×10¹³ケースの光線追跡解析により5946倍感度向上が可能なセットを発見した。一方、実験で得られた感度向上の上限は1790倍±160であった。この違いは光学系アライメントの分解能で決まることがわかった。次にマルチパスセルを用いたレーザー干渉計の位相安定性を評価したところ、光路長の増加とともに安定性が低下し、光路長1260mmで87.4degであることがわかった。プリカーサー領域の電子密度測定には安定性を一桁以上上げる必要があり、パルス可によるマルチパスセル内での干渉を防ぐ必要があると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マルチパスセルは汎用的な高感度化手法ではあるが感度向上は2桁程度がこれまでの上限であった。我々はミラー及びレーザー光の入射位置、角度を0.001mm、0.001degの精度で網羅的に変化させ、3.7×10¹³パターン of 光線追跡法により感度向上の上限を検証した。これにより75mmのミラーにより13510倍感度向上が可能な組み合わせを発見した。また実験により光学系のアライメント分解能により感度上限が決まることを実証した。マルチパスセル自体は汎用的な計測法であり、この成果は多岐にわたる分野で応用可能である。

研究成果の概要（英文）：The upper limit of sensitivity enhancement in multipath access was investigated by numerical calculation and experiment. In the calculation of 3.7×10¹³ ray-trace analysis, the sensitivity enhancement was increased to 5946, whereas the maximum sensitivity enhancement was 1790±160 in the experiment. This difference was determined by the resolution of the optical alignment. Next, the phase stability of the laser interferometer using the multipath cell was evaluated. It was found that the stability decreased with increasing optical path length and was 87.4 deg for an optical path length of 1260 mm. Therefore, it is necessary to reduce the stability by one order of magnitude for the measurement of electron density in the precursor region to prevent interference in the multipath cell by the pulsed beam.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：マルチパスセル レーザーヘテロダイナミクス干渉計 プリカーサー

1. 研究開始当初の背景

将来の惑星サンプルリターンミッションでは大気圏突入速度が HAYABUSA の 12 km/s を大きく上回る 15 km/s 以上が想定されている。加熱率の予測には衝撃波構造を正確に予測できるモデルが必要であるが、このような超高速再突入環境では既存モデルと実験結果の不一致が報告されている。この原因として衝撃波層内からの強い輻射により前方で光電離が生じるプリカーサ現象が疑われており、数値計算によるモデルが提案されているが未だ実験的に検証された例はない。そこで我々のグループでは He-Ne, CO₂ の二種類のレーザーを用いてレーザー干渉計を用いて衝撃波近傍の電子数密度分布の測定を行ってきたが、測定可能領域が重なっておらず、最も必要な衝撃波前方領域に相当する電子密度 10²⁰~10²²m⁻³ 領域がエアポケットになっている (図 1)。

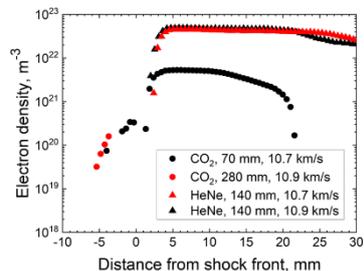


図 1. 衝撃波近傍の電子密度分布

2. 研究の目的

本研究ではマルチパスセルを用いることで HeNe レーザーを用いたレーザーヘテロダイン干渉計 (測定下限~10²²m⁻³) の感度を向上させることで高時間分解能 (100 ns) 保持しつつ広測定領域 (10²⁰ m⁻³~10²³m⁻³) を可能とする計測システムの開発を目的とする。そのためまず 1) マルチパスセルの高感度化の限界を検証し、次に 2) 干渉信号の安定性を評価する。

3. 研究の方法

(1) 数値計算による感度上限の検証

計算には近軸近似を用いない 3 次元光線追跡法を用いた。レーザービームの断面は有限な大きさの円であると仮定し、断面形状の変化を考慮するため円内に配置された 36 本の光線によってシミュレーションを行った。マルチパスセルは 2 枚の平行な球面凹面鏡で構成され、そのうちの 1 枚にはレーザービームの入出力用の穴が開いている。3 次元座標系におけるマルチパスセルの概略図を図 2 に示す。ここで $D, f, d, r_0, \theta_0, \delta_0$ はそれぞれ球面凹面鏡の直径、ミラーの焦点距離、ミラー間距離、入射ビーム位置、 x 方向の z 軸に対する入射角度、 y 方向の z 軸に対する入射角度である。計算パラメータと条件を表 1 に示す。ミラーの直径と焦点距離は市販の球面凹面ミラーの使用を想定し、それぞれ 12.5 mm から 75 mm, 10 mm から 500 mm の範囲に設定した。ビームの拡大を考慮しミラー距離は焦点距離に応じて表 1 に示すように設定した。回転対称性を仮定すると入射ビーム位置は x 軸上に設定できるため x 軸との入射角度は $\theta_0 \geq 0$ とした。入射ビーム位置はミラー半径内で変化させレーザービームがもう一方のミラーに当たるように入射角度を変化させた。実用性を考慮しレーザービームは直径 1mm の理想的なガウシアンと仮定し、入出力穴の直径は 2mm に固定した。計算ではレーザービームの一部がミラーを外れた場合、この条件では感度ゼロとして計算を停止した。レーザー光の一部が入射孔に重なった時点で計算を終了し、それまでの反射回数を出力した。このようにしてビーム位置、入射角度、ミラー距離の組み合わせ条件を掃引する計算を行った。

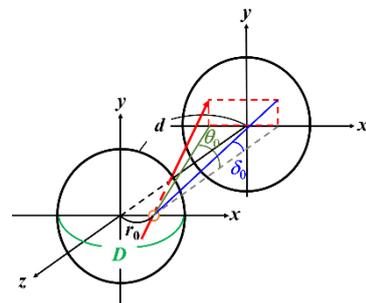


図 2. 計算に用いた座標系の概略

表 1. 計算条件

Parameters	Values
Mirror diameter D , mm	12.5, 25, 50, 75
Focal length f , mm	10 - 500
Mirror distance d , mm	$0.5f - 2.1f$
Incident beam position r_0 , mm	$0 - D/2$
Incident beam angle to x-axis θ_0 , °	$0 - \tan^{-1} \frac{r_0}{d}$
Incident beam angle to y-axis δ_0 , °	$-\tan^{-1} \frac{0.5D+r_0}{d} - \tan^{-1} \frac{0.5D-r_0}{d}$
Entrance and exit hole, mm	2.0
Beam diameter, mm	1.0

(2) 実験によるマルチパスセルの感度上限の検証

次に計算結果を実験的に検証した。実験の概略図を図 3 に示す。電流変調型 DFB レーザーダイオード (DFB 076083, ナノプラス社製) を用いて大気中の 762.31 nm における酸素分子の吸収プロファイルをスキャンした。レーザー波長はファンクションジェネレータを用いて周波数 100Hz, 変調幅 40GHz で変調した。反射したレーザービームがダイオードに戻るのを防ぐため、光アイソレーターを使用した。レーザービームは 2 つのビームに分割され、一方のビームは相対周波数を校正するために 1.5GHz の共振周波数間隔を持つエタロンへ、もう一方をファイバカプラ (PAF2-5B, Thorlabs Inc.) によりシングルモード光ファイバを通してマルチパスセルに導入した。ファイバ後の平行光の 1/e²径は 1mm であった。さらに、He-Ne レーザー光をファイバを通してプローブ光と結合し、アライメントを行った。マルチパスセルは直径 50mm, 焦点距離 200mm

の同一の球面凹面鏡 2 枚で構成されている。直径 48.3 mm のミラーの表面には反射率 99.96 % の誘電体多層膜反射コーティング (LEX 社製) が施され、各反射におけるレーザー強度の損失を低減した。ミラーの距離は電動マイクロステージを用いて 0.01 mm の空間分解能で可変とした。入射ビームはファイバーポートでコリメートされ、入射条件はマイクロステージ、回転ステージ、ミラーマウントを備えたロッドミラーを用いてアライメントされた。入射ビーム位置の空間分解能は 0.01mm, 入射角度は 0.02°であった。複数回反射させた後、ロッドミラーを使用してレーザービームも反射させ、アバランシェフォトダイオード (APD 430/M, Thorlabs Inc.) で検出した。吸収信号はオシロスコープ (DL850E, 横河株式会社) により記録した。装置全体を三次元空気バネ防振台 (ASD 1812-T, 日本発条工業株式会社) に固定し、機械振動を抑制した。

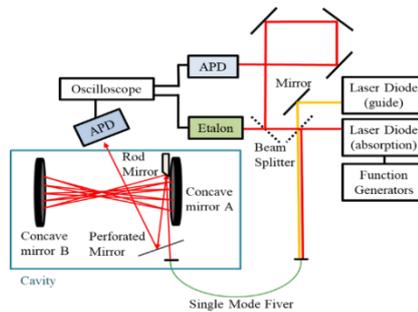


図 3. マルチパスセル概略図

(3) 位相安定性の検証

真空チャンバ内に設置したマルチパスレーザー干渉計の概略図を図 4 に示す。干渉計の光源には線幅 100kHz 以下の外部共振器型半導体レーザーを用いた。マルチパスセルには焦点距離 200mm の凹面鏡を使用した。チャンバ直径が 500 mm であり、アライメントスペースを確保するため、ミラー間距離は 270mm とした。レーザー光は音響光学素子に入射し、測定光として透過光である 0 次光、干渉信号を得るための参照光として 1 次光を用いた。測定光はシングルモード光ファイバに入射し、窓の減衰を考慮しチャンバ内にマルチパスセルを設置した。光ファイバを出たレーザー光はコリメートされ、ロッドミラーによりマルチパスセル内に導入し、再びロッドミラーに当たり、2 枚のミラーを用いてチャンバ外に導出し、参照光と干渉させアバランシェフォトダイオードで検出した。

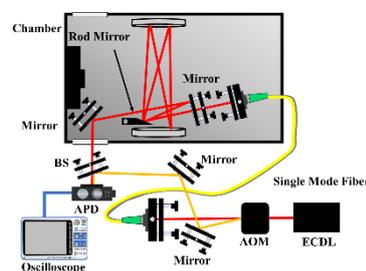


図 4. マルチパスレーザー干渉計概略図

4. 研究成果

(1) 数値計算によるマルチパスセルの感度上限

計算は以下手順で行った。まずミラーの直径を固定し、各焦点距離について入射ビーム位置の粗い変化、入射角度とミラー距離の細かい変化に対する最大感度向上条件を求めた。ここで感度向上は反射回数として定義した。気流診断では 2 枚のミラーが流れの外側に設置されるため、光路長と気流を通過する実効光路長が一致しないためである。図 5 はミラー直径が 50 mm の場合の入射ミラーの位置と焦点距離の関数としての最大感度向上の典型的な結果を示している。その結果、最適な焦点距離は 200mm と決定された。感度は入射ビーム位置の変化に対してピークを示す。このため入射ビーム位置が 15 mm から 20 mm まで微細に変化する場合に感度が最大となる条件を決定した。図 6 は最大感度の空間分解能および角度分解能依存性を示している。感度は分解能の増加とともに増加し、0.1 mm または 0.1°より小さい分解能で収束した。従って最大感度向上は 5,946 は約 2.0×10^{12} の計算条件から求めた。ミラー上のスポットパターンとオーバーラップ数を図 6 に示す。ここでオーバーラップとはビームの一部分が他のビームと重なることを示す。最大オーバーラップ数は 86 であり半分の領域で 10 を超えていることがわかった。同様にミラー径の変化に対する感度向上の最大値を計算した結果を図 7 に示す。ここで計算条件の総数は約 3.7×10^{13} であった。感度向上はミラー径とともに増加し、ミラー径 75mm で 13,510 に達した。この結果は二次関数とよく一致する。これは図 5 に示したスポットパターンと同様にビーム径を 1 mm に固定した場合、感度向上はミラー面積に比例することを示している。従って相似則を考慮すると同じミラー径であってもビーム径を小さくすれば感度向上は大きくなると考えられる。

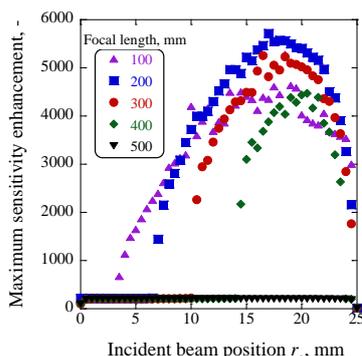


図 5. 入射条件に対する最大感度

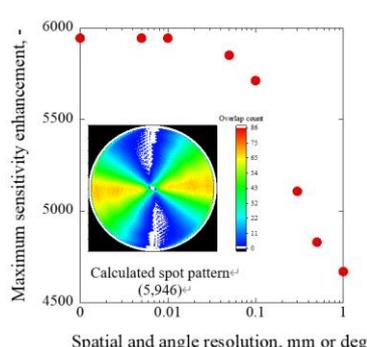


図 6. 最大感度の空間・角度分解能依存性とミラー上でのビームパターン

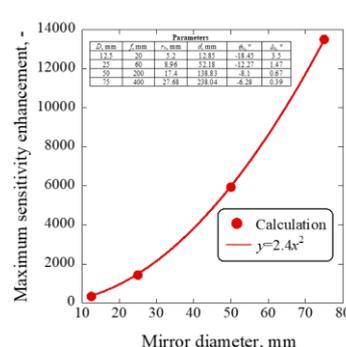


図 7. 最大感度のミラー径依存性とミラー上でのビームパターン

(2) 実験によるマルチパスセルの感度上限

図8に実験で得られた最大吸収プロファイルと吸収長 3.5m の参照吸収信号を示す. ここで I_0 と I_t はそれぞれ入射レーザー強度と透過レーザー強度である. マルチパスセルの感度は参照吸収信号に対する吸収面積の比から推定した. 実験で用いた有効ミラー直径 48.3 mm の場合, 計算で得られた最大感度は 5,596 であったが, 実験で得られた最大感度は $1,790 \pm 160$ であった. ここで実験での感度誤差はフィッティング誤差から推定した. 実験のスポットパターンは図7に示すように計算でえられる感度 1,754 のパターンとよく一致し, 入射ビーム条件も一致した. 従って計算コードは妥当であるといえる. 吸収のない透過レーザー強度に対する平均ノイズ比はそれぞれマルチパスで 0.0065, シングルリファレンスパスで 0.0022 であった. 従ってビームの重なりが S/N 比に与える影響は致命的ではなく, マルチパスセルの感度は反射数でほぼ決まることになる. この結果は図7に示すようにほとんどの領域でオーバーラップ数が 2 以下であったという数値結果と一致する. 実験での最大感度が計算結果より低い理由を説明するために入射ビーム条件の許容誤差に注目した. 表2に空間分解能 0.0001mm, 角度分解能 0.0001° のアライメントの計算公差を示す. 感度が 1,754 の場合の公差は実験分解能よりはるかに大きく, 一方感度が 5,596 の場合の公差は分解能より小さかった. ロッドミラーポストの効果を仮定すると穴の開いたマルチパスセルではこの実験よりも感度が向上する可能性がある. しかしながら計算上の最大感度向上を達成するためには分解能が 1 桁以上高いアライメント光学系が必要である. さらにこのパターンでは多数のオーバーラップによるエタロン効果で S/N 比が低下することを考慮する必要がある.

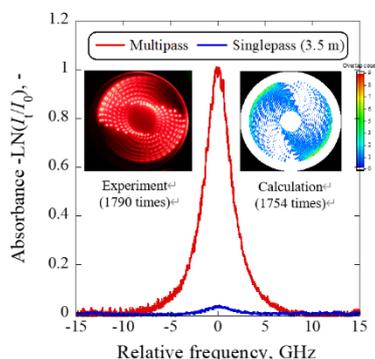


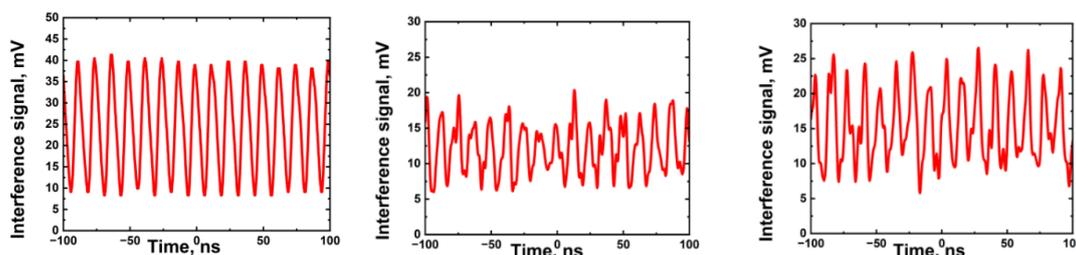
図8. 最大吸収プロファイルと実験, 計算でのビームパターン

表2 アライメント公差

	r_0 , mm	d , mm	θ_0 , °	δ_0 , °
1,754	-0.2049	-0.6196	-2.1477	-0.0598
	+0.6451	+0.6639	+0.4453	+0.0830
5,596	-0.0071	-0.0001	-0.0004	-0.0007
	+0.0013	+0.0059	+0.0011	+0.0093
Instrument resolution	0.01	0.01	0.02	0.02

(3) 位相安定性

図9に光学台上での干渉信号 (a), 真空チャンバ内での干渉信号 (b) および真空チャンバ内でポンプ作動時の干渉信号 (c) を示す. この結果を FFT 解析により 4 周期 (50ns) ごとの位相に変換した結果を図10に示す. 解析結果からマルチパスセルを光学台からチャンバ内に設置することで位相の偏差 (3s) は 6.95 倍, ポンプ作動前後でさらに偏差が 2.24 倍大きくなるのがわかる. これは干渉信号の位相安定性に光学台を分離した時の影響とポンプ作動中の振動が原因だと考えられる. ポンプ作動時には位相の偏差だけでなく 25kHz 程度で周期的に変動しているが, 実際の衝撃波管適用時には衝撃波に比べ十分遅いので問題にはならない. 次にマルチパスセルの光路長を変えた場合の位相安定性を図11に示す. 図が示す通り光路長を 660mm から 1260mm まで伸ばすことで偏差は 33.8deg から 87.4deg まで 2.6 倍大きくなっているのがわかる. 目的の電子数密度測定を行うのはこれより一桁以上の位相安定性及び光路長が必要である. 従って, 今後除振台の設置の導入及びマルチパスセル内での干渉を考慮したビームパターンの検証が必要である.

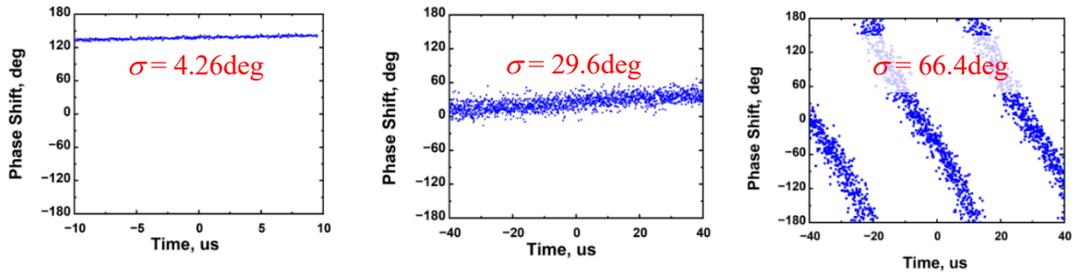


(a) 光学台上

(b) 真空チャンバ内

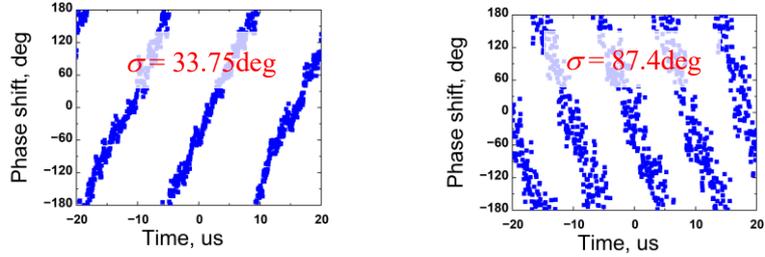
(c) ポンプ作動時

図9 (a) 光学台上, (b) 真空チャンバ内, (c) 真空チャンバ内でポンプ作動時の干渉信号



(a) 光学台上 (b) 真空チャンバ内 (c) ポンプ作動時

図 1 0 (a) 光学台上, (b) 真空チャンバ内, (c) 真空チャンバ内でポンプ作動時の位相安定性



(a) 光路長 660mm

(b) 光路長 1260mm

図 1 1 位相安定性の光路長依存性 (a) 660mm (b) 1260mm

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsui, M., Kobayashi, R., and Yasui, T.	4. 巻 33
2. 論文標題 Enhancement Limit of Sensitivity in Laser Absorption Spectroscopy using a Multipass Cell composed of Spherical Concave Mirrors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 115203
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/ac856b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小林隆, 松井信, 山田和彦	4. 巻 29
2. 論文標題 マルチパスレーザー吸収分光法における膨張波管窓の感度向上への影響評価と時間分解気流診断	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ応用科学	6. 最初と最後の頁 15-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsui, M., Kobayashi, R., Okamoto, T., Yamada, K., and Tanno, H.	4. 巻 64
2. 論文標題 Temperature Measurement of HEK-X Expansion Tube Flow by Laser Absorption Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 193-194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.64.193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Matsui, M., and Morita, R.	4. 巻 19
2. 論文標題 Development of High-Sensitive Laser Absorption Spectroscopy System for Number Density Measurement of Atomic Oxygen in Optically Thick Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology	6. 最初と最後の頁 447-451
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.19.447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Nogami, H., Matsumoto, H., and Matsui, M.
2. 発表標題 Oxygen Molecule Detection in Expansion Tube Flow by Sensitivity Enhanced Laser Absorption Spectroscopy
3. 学会等名 30th Annual Meeting of IAPS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nogami, H., Kobayashi, R., and Matsui, M.
2. 発表標題 Optimization of Optical Path Length in Laser Absorption Spectroscopy Using Multi-Pass Cell
3. 学会等名 13th International Symposium on Applied Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上颯斗, 松本帆堯, 松井信
2. 発表標題 マルチパスセルを用いたレーザー吸収分光法における光路長最適化のための最適化計算結果の実験的検証
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上颯斗, 松本帆堯, 松井信
2. 発表標題 マルチパスセルを用いたレーザー吸収分光法の光路長最適化のための数値計算
3. 学会等名 令和4年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gunji, K. Kobayashi, R., Matsui, M., Yamada, K.
2. 発表標題 Flow Diagnostics by Laser Absorption Spectroscopy Using Multi-pass Cell in Expansion Tube
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ishikawa, T., Matsui, M., Nomura, S., Fujita, K.
2. 発表標題 Electron Density Measurement in front of and behind the Shock Wave by a Laser Interferometer with a Variable Optical Path Length
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kobayashi, R., Sakai, H., and Matsui, M.
2. 発表標題 Investigation of the effect of observation window on the sensitivity enhancement in the multi-pass cell outside the expansion wave tube chamber
3. 学会等名 19th inter-Academia (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川建, 野村哲史, 高柳大樹, 松井信, 藤田和央
2. 発表標題 火星大気突入における赤外放射の実測に向けた検討
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水義仁, 小林隆士, 松井信, 山田和彦
2. 発表標題 シュリーレン法を用いた膨張波管低圧管内の気流の可視化
3. 学会等名 令和3年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林隆士, 松井信, 山田和彦
2. 発表標題 真空チャンパー内に設置したマルチパスレーザー吸収分光法による膨張波管気流診断
3. 学会等名 第65回宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川建, 松井信
2. 発表標題 大気圧プラズマを用いたレーザー干渉計の解析手法の検討
3. 学会等名 第65回宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林隆士, 松井信, 山田和彦
2. 発表標題 膨張波管チャンパー内に設置したマルチパスセルの感度調査
3. 学会等名 第53回流体力学講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学工学部機械工学科松井研究室HP
<https://ars.eng.shizuoka.ac.jp/~matsui/index.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------