

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：32644

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2020

課題番号：17KK0120

研究課題名（和文）大型膨張波管設備を用いた大気突入飛翔体周り流れの高精度解析モデルの開発

研究課題名（英文）Development of an accurate analysis model for the assessment of atmospheric entry flights using a large-scale expansion tube facility

研究代表者

山田 剛治（Gouji, Yamada）

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：90588831

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究は、探査機のスケールモデルを用いた地上試験を行い、探査機周りの流れ場の解明と解析モデルの高精度化を行うことを目的とする。最初に衝撃波管を用いた予備試験により、垂直衝撃波により生成された1次元的なプラズマの特性を明らかにした。そして最終的に膨張波管を用いたくさび模型周りのプラズマ流の特性調査を実験的に行い、流れ場の数値解析モデルの検証を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では、飛翔体模型を用いずに、大気突入時と同じ速度で生成した垂直衝撃波背後のプラズマ流の熱化学過程について主に衝撃波管試験により特性調査が実施されてきた。しかしながら実際の飛翔体周りの流れ場は3次元的であり、背面加熱率が数値予測と異なるという問題も指摘されている。そこで本研究で実施したくさび模型周りのプラズマ流の分光計測結果から衝撃波による圧縮と模型背面部の膨張を伴う場合の熱化学特性が解明され、探査機周り流れの解析モデルの高精度化が期待できる。また国際共同研究として実施したことで、今後は当該研究のますますの進展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to characterize flows around space vehicles and improve the prediction accuracy of physical model by ground testing using a scale model. First, preliminary experiments using a shock tube was conducted to clarify one-dimensional characteristics of plasma generated by a normal shock wave. Finally, plasma flow around a wedge model was experimentally investigated using an expansion tube and the result was used to validate numerical model.

研究分野：再突入空気力学

キーワード：Shock wave Spectroscopy Expansion tube CR model Plasma Hypersonics Atmospheric entry

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年世界各国で様々な惑星探査ミッションが計画されている。惑星探査機は、地球帰還時に超高速で地球大気に再突入飛行するために、強い衝撃波が発生して空力加熱が作用する。そこで空力加熱から探査機を守るために熱防御材料を用いることが必須となる。しかしながら、探査機周りの空気は、高温高速のプラズマ流となり内部エネルギーの励起、化学反応、輻射エネルギー輸送など複雑な熱化学現象が生じ、探査機が受ける加熱量を正確に予測することは困難である。そのため現状では過大な安全率を課して熱防御材料の厚みを決定しており、システム重量と開発コスト増加の要因となっている。そこで再突入探査機周りの流れを解明し、空力加熱量を高精度で予測できる流れ場の解析モデルを確立するために、世界各国で再突入飛行環境を模擬した地上試験が実施されている。再突入飛行環境では、探査機周り生成される高温プラズマ流の熱化学反応過程の解明とモデル化が重要となる。そのためこれまでの研究では、衝撃波管を用いた垂直衝撃波背後の熱化学非平衡プラズマの分光計測により解析モデルの開発と検証が行われてきた。この方法においては、衝撃波管内流れは一次元流れとみなすことができるために、解析モデルの内部励起や化学反応の速度定数を高精度化するためには有効である。しかしながら実際の探査機周り流れは、圧縮や膨張を伴う3次元流れであり、背面加熱率が解析モデルによる予測と大きく異なるといった問題も明らかになっている。そこで今後は、探査機のスケールモデルを用いて地上試験を行い解析モデルの開発と検証を行っていく必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまでの衝撃波管を用いて実施してきた解析モデルの検証試験をさらに発展させるために、探査機のスケールモデルを用いた地上試験を行い、探査機周りの流れ場の解明と解析モデルの高精度化を行うことを目的とする。そのために、本研究ではクィーンズランド大学所有の膨張波管設備で生成した探査機模型周りの高温プラズマ流の特性解明を実施する。

### 3. 研究の方法

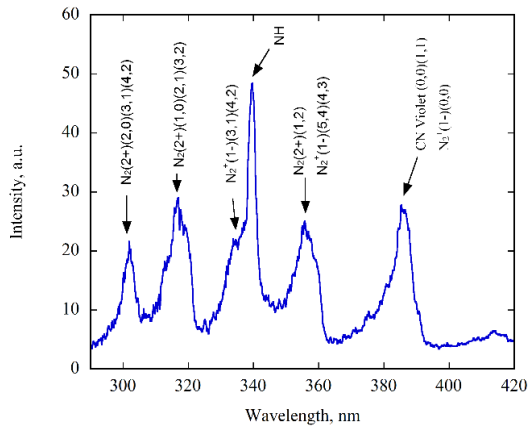
本研究では、予備試験として衝撃波管を用いて垂直衝撃波を生成して発光分光計測を実施する。そして1次元流れのCFDコードの検証と改善を行い、熱化学反応モデルの高精度化を行う。渡豪後に、膨張波管設備の観測部に設置した探査機模型周りの高温プラズマ流の分光試験を実施して、模型周りの圧縮領域と膨張領域の流れの特性について明らかにする。また探査機模型周りのCFD解析を実施して、実験結果と比較検証を実施してCFDコードに含まれる解析モデルの検証と改善を実施する。

### 4. 研究成果

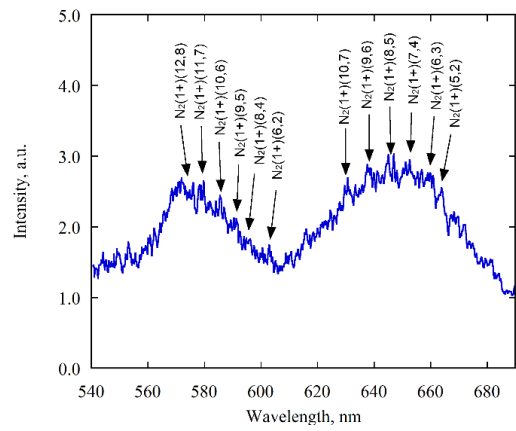
#### (1) 衝撃波管を用いた予備試験の実施

渡航に先立って、自由ピストン駆動衝撃波管を用いてアルゴン及び窒素試験気体中に生成した高速衝撃波に誘起されたプラズマの発光分光計測を実施した。図1に窒素を試験気体として取得した極短時間イメージング分光の計測結果を示す。試験条件は衝撃波速度5.5km/s、試験気体圧力50Paである。これより本試験条件においては、窒素分子スペクトルが支配的であり窒素原子スペクトルは明瞭に確認できないために、窒素分子の内部励起と緩和過程が支配的であると考えられる。近紫外光領域と可視光領域それぞれ観測される窒素分子スペクトルは、それぞれ電子遷移の異なるN<sub>2</sub>(2+)バンドとN<sub>2</sub>(1+)バンドである。本研究では計測したスペクトルに対して理論スペクトルをフィッティングすることで回転温度と振動温度の空間分布特性を図2のように取得した。図2(a)は、N<sub>2</sub>(1+)バンドスペクトルから評価した温度分布でありB準位(窒素分子の電子準位)の内部エネルギー緩和過程を示している。一方で図2(b)は、N<sub>2</sub>(2+)バンドスペクトルから評価した温度分布であり、C準位(窒素分子の電子準位)の内部エネルギー緩和過程を示す。図中の直線は従来の解析モデルを組みこんだCFDコードにより計算した温度分布である。これよりばらつきが大きいもののB準位の回転温度と振動温度は概ね計算結果と良い一致を示しているのが分かる。一方でC準位の振動温度は計算結果と良い一致を示しているものの、回転温度に関しては計算値よりも著しく低く回転非平衡状態にあることが分かる。図3に時間分解分光で取得した発光強度の時間分布を示す。窒素プラズマ中で主要な、N<sub>2</sub>(2+)(1,0)バンド、N<sub>2</sub>(1-)(0,0)バンド及び窒素原子スペクトルの波長を対象として計測を行ったものである。これよりいずれの発光化学種についても衝撃波前方から発光強度が増加しており、衝撃波前方領域で窒素分子の電子励起、光解離及び光電離現象が生じていることが明らかになった。

次にアルゴンを試験気体として秒速5~6km/s、試験気体圧力50~200Paの条件で極短時間イメージング分光計測と時間分解分光計測を実施した。図4に計測した発光スペクトルを示す。これより近紫外から可視光領域にかけては、アルゴン原子とイオンスペクトルと共に、広範囲にわたって連続スペクトルが支配的であることが分かる。一方で近赤外領域においては、アルゴン原子スペクトルが支配的である。また図5に波長763nmにおけるアルゴン原子スペクトルの時間分解分光計測の結果を示す。これより衝撃波前方領域から発光強度が次第に上昇しており衝撃波面でピークとなりその後減少する傾向となっている。この結果は衝撃波前方においてアルゴン原子の電子励起が生じていることを示している。

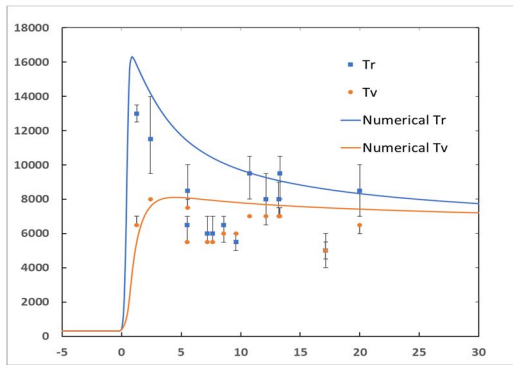


a) 近紫外光領域

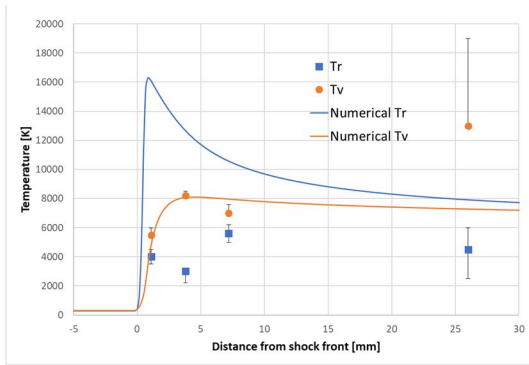


b) 可視光領域

図1 衝撃波管で計測した窒素分子スペクトル



a) N2(1+)バンド : B 準位



b) N2(2+)バンド : C 準位

図2 衝撃層内の回転温度と振動温度の空間分布特性

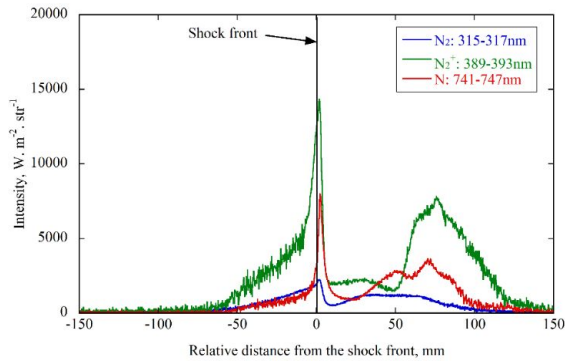
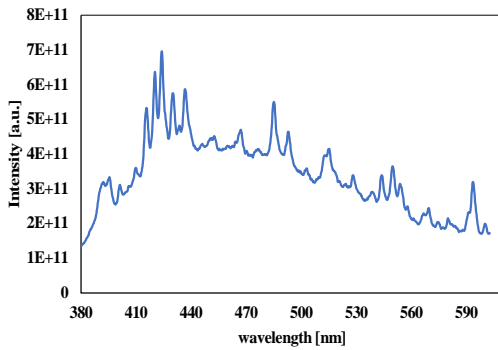
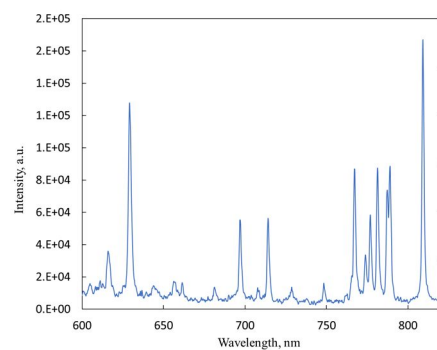


図3 窒素プラズマ中の各化学種の発光強度分布特性



(a) 近紫外光と可視光領域



(b) 近赤外領域

図4 アルゴンプラズマの発光スペクトル

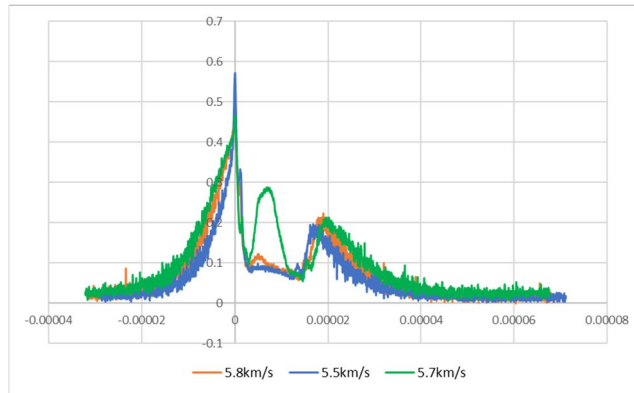
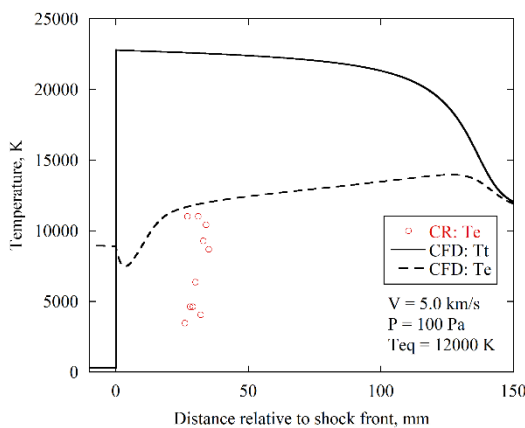


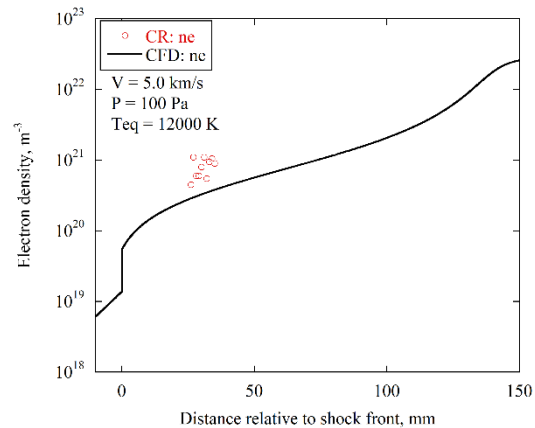
図5 波長763nmにおけるアルゴン原子線の発光強度の時間分布特性

(2) アルゴンプラズマの衝突輻射モデルの開発とプリカーサモデルの組み込み

電子衝突過程と輻射遷移に加えて原子衝突過程を考慮してアルゴンプラズマの衝突輻射モデル(CRモデル)の開発を行った。本研究で用いるCRモデルでは、基底準位を含めて65準位のアルゴン原子の電子構造を考慮している。またアルゴンプラズマはアルゴン原子、電子及び基底状態のアルゴンイオンから構成され、準中性であると仮定される。励起準位の数密度方程式を、電子密度と電子温度をパラメータとして準定常近似で解くことにより、励起準位密度が得られ理論スペクトル強度を計算することができる。理論スペクトルを実験スペクトルにフィッティングすることにより電子温度と電子密度を評価することができる。本研究では、他のスペクトルとの重なりが少ない7本のアルゴン原子スペクトルを用いて理論スペクトルによるフィッティングを行った。またアルゴンプラズマの1次元熱化学非平衡計算コードにプリカーサモデルを組みこんでCFDコードの拡張を行った。プリカーサモデルとして衝撃波前方領域の光電離とアルゴン原子の電子励起をCFDコードに組み込んだ。光電離モデルは、衝撃波背後からの輻射輸送を衝撃波面からの黒体輻射として取り扱い、衝撃波前方で光吸収により光電離のみが生じると仮定するモデルである。また輻射場の温度をパラメータとして扱った。図6(a)と(b)にCRモデルとCFDより得られた電子温度と電子密度の空間分布特性の比較結果を示す。図6(a)より、CRモデルから得られた電子温度は、衝撃波面からの距離の増加とともに急激に上昇する傾向にあり、3500Kから11000Kの範囲に分布しているのが分かる。計算値も同様に衝撃波直後から衝撃波面からの距離の増加とともに急激に上昇しており定性的な傾向は実験値と一致している。しかしながら、実験の方が20mm後方から電子温度が急激に上昇しておりCFDよりも温度上昇の開始が遅くなっているのが分かる。図6(b)より、電子密度についても同様にCRモデルとCFDの値は衝撃波面からの距離の増加とともに上昇する傾向にあり、定性的な一致を示す一方で、実験値は $10^{21} \text{ m}^{-3}$ でありCFDの値より少しだけ高い値となっている。今後はプリカーサモデルをさらに改良していく必要がある。



(a) 温度分布



(b) 電子密度分布

図6 プリカーサを考慮した場合の計算結果とCRモデルの結果の比較

(5) 2次元楔模型周りのアルゴンプラズマ流の特性解析

膨張波管X2によりアルゴンを試験気体として、2次元くさび模型周り流れのイメージング分光計測を実施した。図7にくさび模型周りの分光計測位置を示す。分光計測位置は模型上面を基準とした高さをパラメータとしており、衝撃波による圧縮領域と膨張領域を含む範囲をイメ

ージング計測している。図8に模型上面0.75mmで計測した発光スペクトルの一例を示す。これより計測した波長範囲においては、777nm付近に酸素原子スペクトルが観測されているもののアルゴン原子スペクトルが支配的となっているのが分かる。図9に各波長で観測されたアルゴン原子スペクトルの流れ方向の発光強度分布を示す。これよりすべてのアルゴン原子スペクトルは、-10mm付近から衝撃波により圧縮により発光強度が上昇しており、膨張が生じるくさびの肩部付近から発光強度が減少する傾向にあることが分かる。また-20mmから-10mmの範囲の衝撃波前方領域で既に発光していることが確認できるため、本実験においてもプリカーサ現象が生じていることが分かった。次にCRモデルを適用して電子温度と電子密度の空間分布特性を図10に示すように取得した。図中にはCFD計算から得られた結果も破線で示している。CRモデルから取得した結果では衝撃波前方領域で電子温度と電子密度が計算よりも高くなっておりプリカーサ現象の影響によるものである。衝撃層内に関しては実験結果と計算結果は不一致が大きいため、今後さらに詳細な検討を行って改善していく必要がある。

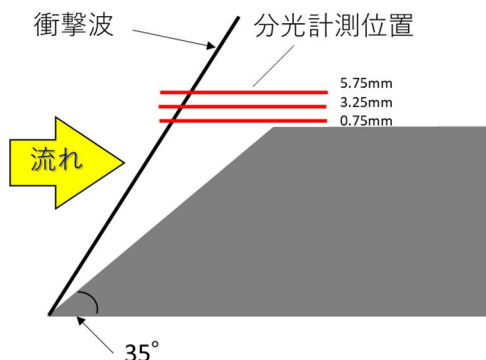


図7 くさび模型周りの分光計測位置

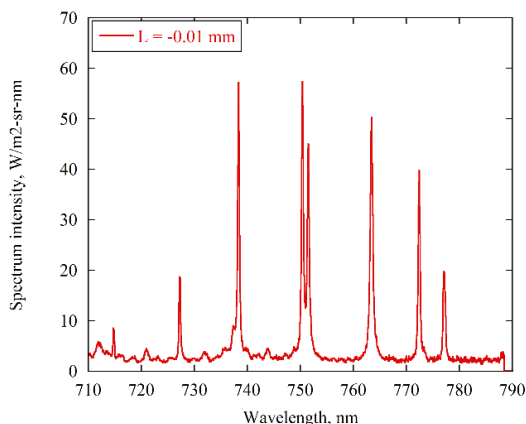


図8 実験スペクトル

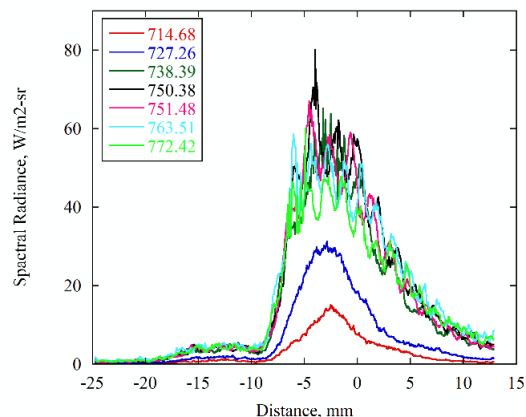
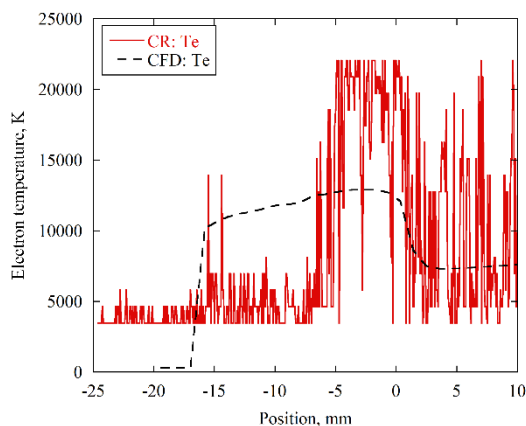
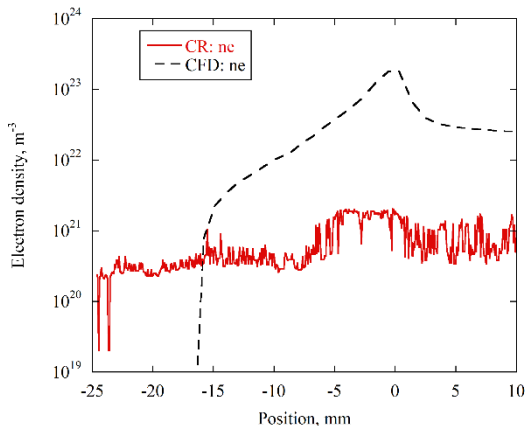


図9 スペクトルの空間分布強度



(a) 電子温度



(b) 電子密度

図10 模型上面0.75mm位置における温度と電子密度の流れ方向の空間分布特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 YAMADA Gouji, KAJINO Mizuki, OHTANI Kiyonobu	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental and numerical study on radiating shock tube flows for spacecraft reentry flights	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2019jfst0022	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田剛治
2. 発表標題 衝突輻射モデルと分光計測を融合した衝撃波背後のアルゴンプラズマの電子温度・電子密度決定法
3. 学会等名 第53回流体力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊池史晃、山田剛治
2. 発表標題 強い衝撃波背後のアルゴンプラズマにおける電離現象の 解明
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mizuki Kajino, Gouji Yamada, Fumiteru Kikuchi, Kiyonobu Ohtani
2. 発表標題 Spectroscopy of Shocked High-Speed Flows for Re-entry Flight
3. 学会等名 The Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ティム マッキンタイヤ  (Timothy McIntyre)	クィーンズランド大学・極超音速流研究センター・教授	

	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
その他の研究協力者	デイビッド ギルファインド  (David Gildfind)	クィーンズランド大学・極超音速流研究センター・講師	
その他の研究協力者	ピーター ヤコブス  (Peter Jacobs)	クィーンズランド大学・極超音速流研究センター・准教授	
その他の研究協力者	ロワン ゴラン  (Rowan Gollan)	クィーンズランド大学・極超音速流研究センター・講師	

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

オーストラリア連邦	クィーンズランド大学極超音速 流研究センター			
-----------	---------------------------	--	--	--