

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06140

研究課題名(和文) 宇宙プラズマ中の電磁サイクロトロン波による電子加速散乱機構の実証的研究

研究課題名(英文) Analyses and Verification of Particle Acceleration and Scattering by Electromagnetic Cyclotron Waves in Space Plasmas

研究代表者

大村 善治 (Omura, Yoshiharu)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：50177002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 133,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球を取り巻く宇宙プラズマ環境で電子モードの電磁サイクロトロン波によって電子が効率よく加速されて放射線帯外帯が形成され、またイオンモードの電磁サイクロトロン波によってその電子が散乱消失される過程を計算機実験と観測によって実証し、放射線帯変動のモデリングを行うためのコーラス波動による電子分布関数の変動を示す数値グリーン関数のデータベースを構築した。磁気圏シース領域においても同じ非線形波動粒子相互作用が起こっていることを衛星データで検証した。これらの知見を活かしてプラズマ波動・粒子計測機器の新機能の開発と小型化・高性能化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙プラズマ中の粒子加速散乱過程において電子及びイオンモードの電磁サイクロトロン波が本質的に重要な役割を演じており、これが従来の線形・準線形理論では記述できない非線形過程であることを実証したことは今後の研究の流れを変えるものである。非線形過程を取り入れた新しい放射線帯変動モデルを開発したことにより、その急激な変動の予測が可能となり、人類の宇宙利用に不可欠な精度の高い宇宙天気予報に貢献するものである。さらに地球放射線帯以外の領域においても同様の非線形過程が生起していることを検証し、小型化した高性能の波動・粒子計測器を開発したことは、今後の惑星探査による研究にも資するものである。

研究成果の概要(英文)：Our numerical simulations and spacecraft observations in the inner magnetosphere surrounding the Earth have shown that the outer radiation belt is formed by efficient electron acceleration due to electromagnetic electron cyclotron waves (whistler-mode chorus waves) and that the outer radiation belt is dissipated rapidly by pitch angle scattering due to electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves. We have constructed the database of numerical Green's functions representing evolution of energetic electron distribution function interacting with chorus waves for modeling of rapid formation of the outer radiation belt. It has also been confirmed by analyses of spacecraft data that the same nonlinear wave-particle interactions taking place in the inner magnetosphere also occur in the magnetic reconnection region of the Earth's dayside magnetopause. Based on the new physical insights, new designs of instruments for wave and particle measurements and their miniaturization have been achieved.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：波動粒子相互作用 放射線帯 磁気圏 プラズマ波動 非線形過程 プラズマ計測 宇宙天気 宇宙天体プラズマ

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。

## 1. 研究開始当初の背景

太陽から放出される太陽風プラズマのエネルギーは、磁気リコネクションによりプラズマを加速し、内部磁気圏へと侵入し、高エネルギー電子やイオンにより磁気赤道で周波数変動を伴う電子モードのコーラス波およびイオンモードの電磁イオンサイクロトロン (EMIC: Electro-Magnetic Ion Cyclotron) 波が生成される。これらの波の電磁界は、空間的にピッチが変化する特殊な螺旋構造を持ち磁力線に沿って走る高エネルギー電子とサイクロトロン共鳴し効率良くエネルギーの授受・ピッチ角散乱を起こしており、人工衛星等に障害を与える放射線帯の高エネルギー粒子の生成・消失を予測するために世界中で広く研究されている。特に、電子モードのコーラス放射は、大振幅で顕著な周波数変化を示す波動であり、過去半世紀に渡り多くの観測的研究がなされてきているが、その厳密な発生機構については長年にわたる謎であった。しかし2007年以來、我々の研究グループは第一原理に基づく計算機シミュレーションにより、周波数が大幅に変動するコーラス放射を再現することに成功し、その原因となる不安定性は、従来考えられていた線形理論の不安定性とは本質的に異なる非線形過程によって引き起こされていることを解明した。一方、コーラス放射で見られた波の周波数変動による非線形成長は、周波数が全く異なる数 Hz の波動の観測においても発見され、コーラス放射と同じ非線形過程が作用していることが判明した。この波がイオンモードのライジングトーン EMIC 波である。従来から EMIC 波は、放射線帯の相対論的電子ともサイクロトロン共鳴し、放射線帯を含む赤道域に捕捉された電子およびイオンをピッチ角散乱により降下させ、極域においてオーロラを発光させていることが観測や準線形理論から推定されてきた。しかし、EMIC 波の周波数変動に伴う非線形成長過程に関しては、さらに定量的な研究が必要である。これらの電磁サイクロトロン波と共鳴する電子は、ピッチ角散乱を受けて運動エネルギーを失うだけでなく、一部の電子は非常に効率良く加速されて放射線帯を形成するような相対論的なエネルギーに達することが分かってきた。このため地球放射線帯の相対論的電子フラックスが生成・消滅を繰り返す、一部の相対論的電子は極域大気へ降下して、地球の気候変動にも影響を及ぼしている可能性が示唆されている。これらの非線形過程は、地球を取り巻くジオスペースの放射線環境の変動に影響を与えるものとして非常に重要であり、今後のジオスペースにおける衛星観測によって検証されてゆく必要がある。

## 2. 研究の目的

- (1) あらせ衛星で得られる波動と粒子の位相関係から、磁気赤道での非線形波動成長理論を検証し、電磁サイクロトロン波動の時空間発展モデルを確立する。
- (2) 電磁サイクロトロン波の時空間の発展モデルに基づき、テスト粒子計算により粒子分布関数の変動を表すグリーン関数を求め、粒子のダイナミクスを解明する。
- (3) あらせ、THEMIS、VAP (Van Allen Probes) 衛星の波動データから、コーラス放射および EMIC ライジングトーン放射の発生領域と頻度を推定する。同時に近い距離を飛翔している複数の衛星の位相空間密度を比較して、密度の空間勾配依存性を解明し、これにより動径方向拡散係数を評価する。
- (4) グリーン関数のデータベースと電磁サイクロトロン波の発生頻度に基づいて、畳込積分を繰り返して行い、長時間にわたる放射線帯の変動を再現し、従来の準線形拡散モデルでは扱えなかった非線形波動粒子相互作用の効果を取り入れた新しい放射線帯モデリング手法を確立する。
- (5) MMS 衛星の波動データを解析して、電磁サイクロトロン波の検出を行い、同時に粒子データを解析する。
- (6) 磁気リコネクション領域では、内部磁気圏と同様の電磁サイクロトロン波による電子加速が起きているのか、また起きていないとすればそれは何故なのかを観測的に検証する。
- (7) 本研究で実証される物理機構の知見を活かしてプラズマ波動・粒子計測機器の新機能の開発と小型化・高性能化を進める。

## 3. 研究の方法

- (1) 電磁サイクロトロン波の発生機構および高エネルギー粒子との非線形相互作用の解明について：スーパーコンピュータを駆使して計算機シミュレーションおよびデータ解析を行う。
- (2) 内部磁気圏における電磁サイクロトロン波による高エネルギー電子の加速・散乱機構と地球の放射線帯において高エネルギー電子のプラズマ波動を介した加速や散乱について：計算機シミュレーションの結果に基づきグリーン関数のデータベースを構築する、あらせ衛星・MMS 衛星の観測データ処理・解析し、観測とシミュレーションデータを比較する。
- (3) 電子と電磁サイクロトロン波との共鳴によるピッチ角散乱を取り入れた衝撃波における電子加速理論の構築について：MMS 衛星のデータを解析し、理論とモデルを実証する。

- (4) 磁気リコネクション領域のモデリング： プラズマ粒子シミュレーションおよびデータ解析をする。さらに今後のシミュレーション研究に備えて、高精度の数値解法を開発する。
- (5) 次世代波動粒子計測器開発： 粒子計測器の小型化により、超小型衛星にも搭載可能なカスパ型低エネルギー電子分析器を開発する。さらに感度は低い超小型軽量のセンサーエレメントを複数並べることで必要な感度を確保するタイプの超小型の粒子観測器を開発する。このために波動計測、粒子計測の電子回路部分を ASIC 化する。
- (6) プラズマ粒子分析器開発： 電子・イオンの速度分布関数を一つのセンサーヘッドにて同時計測することが可能な新規の粒子分析器の着想に基づき、その粒子分析器の構造に関する詳細な数値解析および試験器の製作を行う。

#### 4. 研究成果

##### 研究目的(1)(2):

非線形理論と人工衛星観測データを用いて、異なる振幅や伝搬角を持つ 12 種類の電磁サイクロトロン波モデルを構築し、テスト粒子シミュレーションを実施した。これにより、非線形波動粒子相互作用の数値グリーン関数が得られた。サイクロトロン共鳴による電子の加速やピッチ角散乱を調べた結果、波動ポテンシャルによる非線形トラップ過程が磁気圏内の電子散乱において重要な役割を担っていることが判明した。特に、斜め伝搬ホイッスラーモード・コーラスにおける波動粒子相互作用では、 $n=1$  サイクロトロン共鳴以外にの  $n=0$  のランダウ共鳴または  $n=2$  サイクロトロン共鳴の重要性が明らかとなった (Omura et al., *JGR*, 2019; Hsieh et al., *JGR*, 2020)。波動粒子相互作用の多重共鳴効果には、波の振幅のサブパケット構造が重要であることがわかった。テスト粒子計算の結果をもとに、各共鳴作用による波動と非線形トラップ電子のエネルギー交換メカニズム、および電子加速の上限が解明された。さらに、電子ピッチ角の理論的な時間変化を求め、グリーン関数の結果と比較することで、各共鳴がもたらす電子ピッチ角散乱過程と、波の振幅、伝搬角、周波数、周波数変化率、背景磁場強度の空間勾配などのパラメータ依存性を明確に示すことに成功した。

先行研究 (Hsieh & Omura, 2017) では、高次サイクロトロン共鳴が発生しなかったため、当初は放射線帯電子の加速散乱プロセスについて、 $n=1$  サイクロトロン共鳴、 $n=0$  ランダウ共鳴、 $n=2$  サイクロトロン共鳴だけ着目された。しかし大きい斜め伝搬角のコーラス波動粒子相互作用においては、予期しなかった  $n=-1$  のサイクロトロン共鳴による高いピッチ角からの電子降下が起こることを発見した。このプロセスの二次共鳴条件と非線形不均一性因子を分析し、非線形トラッピングを検証した。この非線形共鳴は共鳴電子と斜め伝搬コーラス波の左回り偏波の成分との相互作用によって起こる。広い範囲の伝搬角の波動により、数十 keV から数百 keV までの磁気圏電子が電離層に急降下することが判明した。

##### 研究目的(3):

「あらせ」衛星の 5 年以上に及ぶ観測データから、太陽活動度極小期の内部磁気圏現象の概要を把握することができた。「あらせ」衛星単独観測に加え、衛星 - 衛星間、衛星 - 地上観測網間の協調観測により、内部磁気圏における電磁サイクロトロン波による高エネルギー電子の加速・散乱機構に関する研究成果が多数上がった。特に、地上観測と衛星の協調観測が順調に進んだことにより、地球磁場に補足されている高エネルギー電子が電磁サイクロトロン波によるピッチ角散乱を受けた結果、ロスコーン内に散乱された電子が超高層大気に降り込む現象については、秒以下の速い時間スケールにまで及んで脈動オーロラの明滅をコントロールしていることを解明する (Hosokawa et al., *Scientific Reports*, 2020, Ozaki et al., *Nature Communications*, 2019, Kasahara et al., *Nature*, 2018) など、数 10 keV ~ 数 MeV までの幅広いエネルギー帯の電子の降り込みについて、研究成果があがっている。また、限られた衛星の観測データから波動-粒子相互作用を定量的に解析するために考案された WPIA 法によって、波動と粒子の間でのエネルギー交換が実際に宇宙空間で行われていることを評価することが可能となり、その結果としての速度分布関数の変化を捉えることに成功 (Shoji et al., *Scientific Reports*, 2021) した。

研究目的(4):

電磁サイクロトロン波モデルに基づく非線形波動粒子相互作用の数値グリーン関数データベースを構築し、波動発生領域を考慮し、ロスコーン分布の電子を初期値として、数時間にわたる放射線帯の電子エネルギーとピッチ角変動を再現した(図1)。この数時間の電子変動を利用して、斜め伝搬と平行伝搬コーラス波による放射線帯電子加速メカニズムを定量的に解明した(Hsieh et al., *JGR*, 2020)。さらに、コーラス波によって極域超高層大気に降下する電子の軌道を再現し、降下電子フラックスの波の振幅および伝搬角に対する依存性を明らかにした。振幅に関しては、大振幅の波により電子加速が速くなり降下も増加することが確認された。一方、伝搬角については、斜め伝搬波が平行伝搬波よりも多くの MeV 電子を降下させることが判明し、斜め伝搬波による多重共鳴として、二段階の電子降下プロセスが提案された(Hsieh et al., *JGR*, 2022)。これにより、非線形過程による加速散乱は準線形過程の時間スケールよりも遥かに速く進行することが検証されて、放射線帯における非線形電磁サイクロトロン波動粒子相互作用の重要性が明らかとなった。

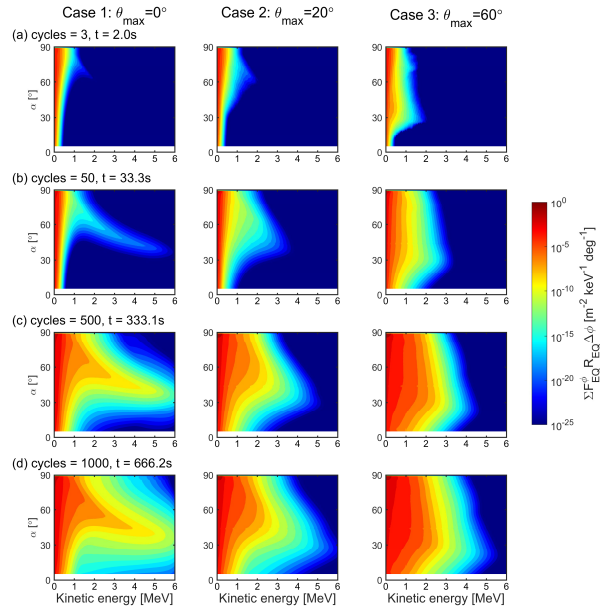


図1 平行伝搬と斜め伝搬コーラス波による電子分布関数の長時間変動 (Hsieh et al., *JGR*, 2022)

研究目的(5)(6):

MMS 衛星のイオンの超高時間分解能観測を中心に用いて、電磁イオンサイクロトロン波動と高エネルギーイオンの間のエネルギー輸送について直接計測し、電磁イオンサイクロトロン波動を介して水素イオンからヘリウムイオンにエネルギーが輸送されるという過程(図2)を観測に基づいて実証し、宇宙空間においてサイクロトロン波を介したエネルギー輸送の重要性を実証した。また、非線形波動成長理論から予測される電磁イオンホールの詳細観測に成功し、非線形波動成長理論の妥当性、重要性を示すことに成功した(Kitamura et al, *Science*, 2018)。

ホイッスラーモード波動についても MMS 衛星のデータから大量に検出を行い、夜側の磁気リコネクション領域のみならず昼側の磁気圏シース領域および衝撃波近傍の解析も行った。磁気圏シースにおいては波動の非線形成長理論や波動発生領域の時空間スケールについて、内部磁気圏との比較を行いその類似性を確認することができた。また、衝撃波近傍における高エネルギー電子の加速について、ホイッスラーモードによる散乱が重要な役割を果たしていることを観測と理論の両面から示すことに成功した。

当初は磁気圏尾部のリコネクションに着目していたが、昼側の磁気圏境界における磁気リコネクションの方がホイッスラーモード波動と電子の相互作用の詳細解析に適していることが明

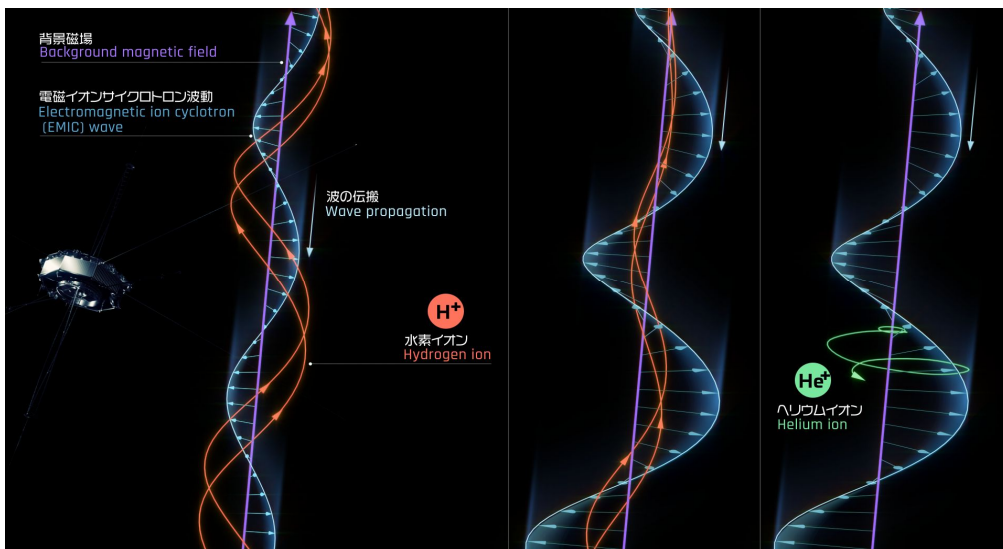


図2 電磁イオンサイクロトロン波動を介して水素イオンからヘリウムイオンにエネルギーが輸送される過程の模式図

らかとなり、昼側の磁気リコネクションについて重点的に解析を行い目的の達成を目指した。Kitamura et al. (*Science*, 2018)で磁気圏内でイオンとイオンサイクロトロン波の相互作用を実証するのに使用した手法を電子とホイッスラーモード波の相互作用に適用し、内部磁気圏と同様の非線形波動粒子相互作用による電子加速散乱が起きているかを解析した。波動の周期が 1000 分の 1 以下であるため、MMS 衛星の電子のデータの時間分解能を極限まで高めて利用する手法を開発し、非線形波動粒子相互作用による共鳴電子のホールの検出、エネルギー輸送率、そのエネルギー輸送に基づく波動成長率の導出に世界で初めて成功した。更に、MMS 衛星が 4 機編隊である事を活用し、非線形波動粒子相互作用に重要な磁場勾配の評価をサイクロトロン波動に対して初めて直接的に行うことができた。その結果、非線形相互作用自体は内部磁気圏と同様であるものの、内部磁気圏では波動の周波数変動と磁場勾配の効果が両方重要であるのに対し、リコネクション近傍ではほぼ磁場勾配の効果のみで非線形効果を起こせるという当初の計画を超えた非線形効果の多様性を示唆する知見も獲得できた(Kitamura et al., *Nature Communications*, 2022)。多様な環境や条件でも、波動が非線形成長し粒子を加速散乱することを実証できたことは、宇宙空間における非線形波動粒子相互作用の普遍的重要性を示す大きな成果である。

#### 研究目的(7):

感度は低い超小型軽量のセンサーエレメントを複数並べることで必要な感度を確保するタイプの超小型の粒子観測器については、アナライザーを構成する構造材料として、金属材料を絶縁材とともに用いるという発想を 180 度転換し、絶縁物であるピーク樹脂材料の一部をメタライズしたものを部品とすることでアナライザーの構造を単純化することが可能で、かつ極端な軽量化を実現できる超小型軽量粒子観測器の開発を行なった。研究開始当初には、計算機シミュレーションの結果と実際の試験モデルの特性計測結果が合わないという問題を抱えていたが、複数回の試作・試験を通して、アナライザーの改良を進めることで、計算機シミュレーションの結果と特性計測結果の合致するアナライザーを設計・製作することができた他、センサーエレメント 14 個を連結して感度を上げたアナライザー構造の設計・試作も行うことができた。これにより、本アナライザーの観測対象として、最も高い観測角度分解能、エネルギー分解能が要求される太陽風イオンの観測を行えるだけの性能を持った超小型軽量粒子観測器を設計することにも成功した(図 3)。また、更に、粒子センサーにおける粒子捕捉イベントをとらえるためのプリアンプ部の小型化を実現するための ASIC 化に成功し、捕捉粒子一つ一つの信号を歪みや遅延が十分に小さい状況で電気信号として取り出す回路の 32 チャンネル分が、1cm 角にチップ内に実現できる目処がたった。そして開発したチップを用いた粒子計測を真空チェンバー内で実際に行い、動作の精度などの検証もあわせて行い問題ないことを確認した。

上記粒子センサーとともに WPPIA を実現するプラズマ波動観測器についても ASIC 化を進めた。電界や磁界センサーでピックアップされた微弱な信号を取り扱うプラズマ波動観測器のアナログ電子回路部の ASIC 化を行うとともに、低ノイズ化の設計にも取り組み、波形観測器としてのプラズマ波動観測用チップが実現した。また、同時に、そのチップの広帯域化、広ダイナミックレンジ化(rail-to-rail 化)も行い、観測帯域を 10MHz 程度までカバーできる ASIC チップを実現させた。これにより、宇宙空間プラズマ中でのプラズマ波動観測の大部分を行うことができる専用チップ(1cm 角)が、現実のものとなり、本研究課題で取り組んだ、放射線帯、磁気リコネクション領域、衝撃波周辺でのアナログ部のワンチッププラズマ波動観測器が実現できる。

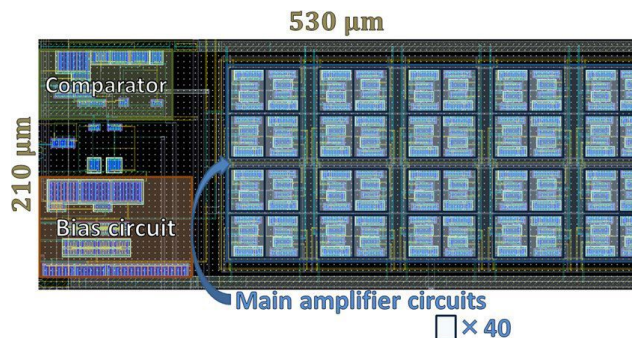


図 3 開発した粒子センサー用 ASIC プリアンプのレイアウト図: 1ch 分が、約 0.5mm x 0.2mm で実現できている(Kikukawa et al., *EPS*, 2022)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計64件（うち査読付論文 64件／うち国際共著 29件／うちオープンアクセス 19件）

1. 著者名 Nakamura S., Miyoshi Y., Shikawa K., Omura Y., Mitani T., Takashima T., Higashio N., Shinohara I., Horii T., Imajo S., Matsuoka A., Tsuchiya F., Kumamoto A., Kasahara Y., Shoji M., Spence H., Angelopoulos V.	4. 巻 49
2. 論文標題 Simultaneous Observations of EMIC Induced Drifting Electron Holes (EDEHs) in the Earth's Radiation Belt by the Arase Satellite, Van Allen Probes, and THEMIS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2021GL095194	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 該当する

1. 著者名 Hsieh Yi Kai, Omura Yoshiharu, Kubota Yuko	4. 巻 127
2. 論文標題 Energetic Electron Precipitation Induced by Oblique Whistler Mode Chorus Emissions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1, 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JA029583	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 Kitamura N., Amano T., Omura Y., Boardsen S. A., Gershman D. J., Miyoshi Y., Kitahara M., Katoh Y., Kojima H., Nakamura S., Shoji M., Saito Y., Yokota S., Giles B. L., Paterson W. R., Pollock C. J., et al.	4. 巻 13
2. 論文標題 Direct observations of energy transfer from resonant electrons to whistler-mode waves in magnetosheath of Earth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-022-33604-2	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

1. 著者名 Nogi Takeshi, Omura Yoshiharu	4. 巻 127
2. 論文標題 Nonlinear Signatures of VLF Triggered Emissions: A Simulation Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1, 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JA029826	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 Liu Yin、Omura Yoshiharu、Hikishima Mitsuru	4. 巻 73
2. 論文標題 Simulation study on parametric dependence of whistler-mode hiss generation in the plasmasphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1, 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01554-6	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 Omura Yoshiharu	4. 巻 73
2. 論文標題 Nonlinear wave growth theory of whistler-mode chorus and hiss emissions in the magnetosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1, 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01380-w	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 Kitamura N., Shoji M., Nakamura S., Kitahara M., Amano T., Omura Y., Hasegawa H., Boardsen S. A., Miyoshi Y., Katoh Y., Teramoto M., Saito Y., Yokota S., Hirahara M., Gershman D. J., Giles B. L., Russell C. T., Strangeway R. J., Ahmadi N., Lindqvist P. A., Ergun R. E., Fuselier S. A., Burch J. L.	4. 巻 126
2. 論文標題 Energy Transfer Between Hot Protons and Electromagnetic Ion Cyclotron Waves in Compressional Pc5 Ultra low Frequency Waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1, 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JA028912	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 該当する

1. 著者名 Nagai Tsugunobu, Shinohara Iku	4. 巻 126
2. 論文標題 Dawn Dusk Confinement of Magnetic Reconnection Site in the Near Earth Magnetotail and Its Implication for Dipolarization and Substorm Current System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1, 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JA029691	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 Ebihara Yusuke, Ikeda Takuya, Omura Yoshiharu, Tanaka Takashi, Fok Mei Ching	4. 巻 125
2. 論文標題 Nonlinear Wave Growth Analysis of Whistler Mode Chorus Generation Regions Based on Coupled MHD and Advection Simulation of the Inner Magnetosphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JA026951	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

1. 著者名 Amano T., Katou T., Kitamura N., Oka M., Matsumoto Y., Hoshino M., Saito Y., Yokota S., Giles B. L., Paterson W. R., Russell C. T., Le Contel O., Ergun R. E., Lindqvist P.-A., Turner D. L., Fennell J. F., Blake J. B.	4. 巻 124
2. 論文標題 Observational Evidence for Stochastic Shock Drift Acceleration of Electrons at the Earth's Bow Shock	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 6~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.065101	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 Hsieh Yi Kai, Kubota Yuko, Omura Yoshiharu	4. 巻 125
2. 論文標題 Nonlinear Evolution of Radiation Belt Electron Fluxes Interacting With Oblique Whistler Mode Chorus Emissions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JA027465	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 Nakamura S., Omura Y., Kletzing C., Baker D. N.	4. 巻 124
2. 論文標題 Rapid Precipitation of Relativistic Electron by EMIC Rising Tone Emissions Observed by the Van Allen Probes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 6701~6714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JA026772	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 該当する



1. 著者名 Omura Yoshiharu, Hsieh Yi Kai, Foster John C., Erickson Philip J., Kletzing Craig A., Baker Daniel N.	4. 巻 124
2. 論文標題 Cyclotron Acceleration of Relativistic Electrons Through Landau Resonance With Obliquely Propagating Whistler Mode Chorus Emissions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 2975 ~ 2810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JA026374	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 該当する

1. 著者名 S. Nakamura, Y. Omura, D. Summers	4. 巻 123
2. 論文標題 Fine Structure of Whistler Mode Hiss in Plasmaspheric Plumes Observed by the Van Allen Probes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 9055-9064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JA025803	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 該当する

1. 著者名 Y. Hsieh, Y. Omura	4. 巻 123
2. 論文標題 Nonlinear damping of oblique whistler mode waves via Landau resonance. Journal of Geophysical Research: Space Physics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 7462-7472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JA025848	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 S. Zenitani and T. Umeda	4. 巻 25
2. 論文標題 On the Boris solver in particle-in-cell simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Plasmas	6. 最初と最後の頁 112110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5051077	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 Zushi, T., H. Kojima, Y. Kasahara, and T. Hamano	4. 巻 30
2. 論文標題 Development of a miniaturized spectrum-type plasma wave receiver comprising an application-specific integrated circuit analog front end and a field-programmable gate array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Meas. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ab0821,	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 Hsieh Yi-Kai, Omura Yoshiharu	4. 巻 52
2. 論文標題 Study of Wave-Particle Interactions for Whistler Mode Waves at Oblique Angles by Utilizing the Gyroaveraging Method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Radio Science	6. 最初と最後の頁 1268 ~ 1281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017RS006245	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 Kato H., Omura Y., Miyake Y., Usui H., Nakashima H.	4. 巻 123
2. 論文標題 Dependence of Generation of Whistler Mode Chorus Emissions on the Temperature Anisotropy and Density of Energetic Electrons in the Earth's Inner Magnetosphere	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1165 ~ 1177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JA024801	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 Kubota Yuko, Omura Yoshiharu	4. 巻 123
2. 論文標題 Nonlinear Dynamics of Radiation Belt Electrons Interacting With Chorus Emissions Localized in Longitude	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 4835 ~ 4857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2017JA025050	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 Kitamura N., Kitahara M., Shoji M., Miyoshi Y., Hasegawa H., Nakamura S., Katoh Y., Saito Y., Yokota S., Gershman D. J., Vinas A. F., Giles B. L., Moore T. E., Paterson W. R., Pollock C. J., Russell C. T., Strangeway R. J., Fuselier S. A., Burch J. L.	4. 巻 361
2. 論文標題 Direct measurements of two-way wave-particle energy transfer in a collisionless space plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1000 ~ 1003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aap8730	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 該当する

1. 著者名 Amano Takanobu	4. 巻 366
2. 論文標題 A generalized quasi-neutral fluid-particle hybrid plasma model and its application to energetic-particle-magnetohydrodynamics hybrid simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 366 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2018.04.020	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58件 (うち招待講演 33件 / うち国際学会 52件)

1. 発表者名 T. Amano
2. 発表標題 Perspectives for Electron Heating and Acceleration at Collisionless Shocks,
3. 学会等名 MMS Spring 2021 Science Working Team Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Amano
2. 発表標題 Particle Acceleration at Collisionless Shocks
3. 学会等名 10th East-Asia Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas (EASW-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Amano
2. 発表標題 Electron injection at shocks: Transition from stochastic shock drift acceleration to diffusive shock acceleration
3. 学会等名 XXVIII Cracow EPIPHANY Conference on Recent Advances in Astroparticle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Zenitani
2. 発表標題 Issues in kinetic modeling of relativistic magnetic reconnection
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大村善治
2. 発表標題 Convective Growth of Whistler-mode Chorus and Electromagnetic Ion Cyclotron Rising-tone Emissions
3. 学会等名 ICEAA 19, Granada, Spain, September 10, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hsieh, Y. Kubota, and Y. Omura
2. 発表標題 Nonlinear modeling of radiation belt electron flux interacting with whistler mode chorus emissions
3. 学会等名 AGU fall meeting, San Francisco, USA, December 10, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Shinohara, T. Nagai, T. Mitani 他
2. 発表標題 MeV electrons observed at the plasma sheet boundary associated with substorm onsets
3. 学会等名 AGU fall meeting, San Francisco, USA, December 9-13, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Zenitani
2. 発表標題 Asymmetric magnetic reconnection at the dayside magnetopause
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas, Nagoya, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kitamura, M. Kitahara, M. Shoji 他 16 名(Y. Saito が第8 著者)
2. 発表標題 Small scale whistler mode waves near the magnetic field intensity minimum in the magnetosheath
3. 学会等名 AAPPS-DPP 2019 (3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics), Hefei, China, November 4, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Nakamura, Y. Omura, C. Kletzing, D. N. Baker
2. 発表標題 EMIC Rising Tone Emissions Inducing Rapid Precipitation of Relativistic Electron
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA, December 9-13, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Omura, Y. Hsieh
2. 発表標題 Generation of lower-band and upper-band chorus emissions and associated acceleration of energetic electrons
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T., Katou, N., Kitamura, N., Matsumoto, Y., Oka, M., Hoshino, M.
2. 発表標題 Three-dimensional Particle-In-Cell Simulations for High Mach Number Collisionless Shocks
3. 学会等名 AAPPs-DPP 2018 (2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Zenitani, H. Hasegawa, T. Nagai
2. 発表標題 Electron physics near the X-line in asymmetric magnetic reconnection
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Zenitani
2. 発表標題 Electron Particle Dynamics in Collisionless Magnetic Reconnection
3. 学会等名 The 13th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Amano, T., Katou, N., Matsumoto, Y., Hoshino, M.
2. 発表標題 Stochastic Shock Drift Acceleration for Electrons
3. 学会等名 EASW8 (8th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas), (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Hsieh and Y. Omura
2. 発表標題 Stationary wave condition of oblique whistler mode waves regarding Landau resonance
3. 学会等名 JpGU meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kitamura et al.
2. 発表標題 Non-resonant acceleration of He <sup>+</sup> by EMIC waves observed by MMS in the magnetosphere
3. 学会等名 JpGU meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Shinohara et al.
2. 発表標題 Energetic electrons observed in the plasma sheet near the outer radiation belt,
3. 学会等名 JpGU meeting 2018, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shinohara, I., Nagai, T., Mitani, T., Kasahara, S., Kazama, Y., Wang, S.Y., Tam, S.W.Y., Higashio, N., Matsuoka, A., Asamura, K., Yokota, S., Takashima, T., Miyoshi, Y.
2 . 発表標題 Substorm injection like signatures of energetic electrons observed at the plasma sheet boundary,
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hsieh, Y. K., and Omura, Y
2 . 発表標題 Nonlinear wave damping of slightly oblique whistler mode waves by Landau resonance
3 . 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Omura
2 . 発表標題 Formation Process of the Outer Radiation Belt Through Nonlinear Interaction with Chorus Emissions Localized in Longitude
3 . 学会等名 AOGS 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kojima, H., M. Ozaki, Y. Kasahara, S. Yagitani, T. Zushi, Y. Tokunaga, and T. Takahashi
2 . 発表標題 Miniaturized Plasma Wave Receiver System Targeting the use in Micro- and Nano-satellites
3 . 学会等名 The 3rd COSPAR Symposium (COSPAR Symposium 2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年



1. 発表者名 S. Zenitani
2. 発表標題 Electron particle dynamics in collisionless magnetic reconnection
3. 学会等名 IAPSO-IAMAS-IGA scientific assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北村成寿
2. 発表標題 Direct Measurements of Energy Transfer between Hot Protons and He+ via EMIC Waves Observed by MMS in the Outer Magnetosphere
3. 学会等名 AGU fall meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Amano
2. 発表標題 Cosmic-Ray Acceleration via Astrophysical Coherent Radiation
3. 学会等名 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Saito
2. 発表標題 Importance of Microsatellite Mission in the Field of Solar Terrestrial
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (AOGS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Shinohara
2. 発表標題 Energetic electrons observed in higher latitude regions of the plasma sheet near the outer radiation belt
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>[ホームページ] 宇宙プラズマ中の電磁サイクロトロン波 による電子加速散乱機構の実証的研究: PCWAVE <a href="http://pcwave.rish.kyoto-u.ac.jp/">http://pcwave.rish.kyoto-u.ac.jp/</a></p> <p>[主催した国際会議] VERSIM (VLF/ELF Remote Sensing of the Ionosphere and Magnetosphere) 2020 2020年11月16日~20日 オンライン会議 <a href="http://pcwave.rish.kyoto-u.ac.jp/versim/index.html">http://pcwave.rish.kyoto-u.ac.jp/versim/index.html</a></p> <p>[国民への情報発信] 「宇宙の声を聞いてみよう!」京都大学アカデミックデイ2018へ出展 2018年9月22日 京都大学・百周年時計台記念館 <a href="https://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/a2018/">https://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/a2018/</a></p> <p>[若手研究者育成] 第14回 宇宙空間シミュレーション国際学校 ISSS-14 (The 14th International School for Space Simulations) 2022年9月12日~16日 オンラインセミナー <a href="https://iss14.org/">https://iss14.org/</a></p> <p>[記者発表] MMS 衛星成果論文の「Science」誌掲載に関する説明会 <a href="https://www.youtube.com/watch?v=jQvdQwa88uw">https://www.youtube.com/watch?v=jQvdQwa88uw</a></p> <p>[プレスリリース] 1. 宇宙空間で電子からプラズマの波へのエネルギー供給を直接捉えた~効率の良い電磁波動成長の理論を観測で実証~ <a href="https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/upload/20221031_isee.pdf">https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/upload/20221031_isee.pdf</a> 2. 世界初! 宇宙空間でプラズマの波を介した粒子のエネルギー輸送を実証 <a href="http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20180926_isee.pdf">http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20180926_isee.pdf</a></p> <p>[新聞、メディア掲載] 粒子の加速を電磁波が仲介する瞬間を磁気圏で初検出(アストロアーツ天文ニュース、2018年9月11日) <a href="https://www.astrorarts.co.jp/article/h1/a/10161_magnetosphere">https://www.astrorarts.co.jp/article/h1/a/10161_magnetosphere</a></p>
--

## 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
研究分担者	天野 孝伸 (Amano Takanobu) (00514853)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授  (12601)	
研究分担者	篠原 育 (Shinohara Iku) (20301723)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  (82645)	
研究分担者	齋藤 義文 (Saito Yoshifumi) (30260011)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  (82645)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	小嶋 浩嗣  (Kojima Hirotsugu)		
研究協力者	北村 成寿  (Kitamura Naritoshi)		
研究協力者	謝 怡凱  (Hsieh Yikai)		
連携研究者	平原 聖文  (Hirahara Masafumi)  (50242102)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授    (13901)	
連携研究者	銭谷 誠司  (Zenitani Seiji)  (10623952)	国立天文台・理論研究部・特任助教    (62616)	

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3件

国際研究集会 VERSIM (VLF/ELF Remote Sensing of Ionospheres and Magnetospheres) 2020 Online	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 Kyoto Workshop on Nonlinear Wave-Particle Interactions in Plasmas, November 19, 2018, Uji, Kyoto, Japan,	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 ISSS-13 (The 13th International School/Symposium for Space Simulations), September 6- 14, 2018, Los Angeles, USA	開催年 2018年～2018年

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

中国	Peking University			
チェコ	Czech Academy of Sciences			
インド	Indian Institute of Geomagnetism			
米国	Massachusetts Institute of Technology	University of Iowa	University of Colorado	他11機関
ドイツ	German Research Centre for Geosciences			
カナダ	Memorial University of Newfoundland			
ハンガリー	Eotvos University			
フランス	Sorbonne Universite	Universite Paris-Saclay	Observatoire de Paris	他2機関
スウェーデン	Royal Institute of Technology			