

令和2年3月5日

国立大学法人 電気通信大学
国立大学法人 名古屋大学
国立大学法人 金沢大学
大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
国立大学法人 東北大学
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

宇宙の電磁波の「さえずり」がオーロラの「またたき」を制御

- 北極域での高速オーロラ観測と科学衛星「あらせ」による国際協調観測 -

細川敬祐教授（電気通信大学）を中心とする国際共同研究グループは、科学研究費基盤研究S「極限時間分解能観測によるオーロラ最高速変動現象の解明（代表 藤井良一）」によって北極域（北欧、アラスカ）に設置された高速オーロラ撮像装置と、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の科学衛星「あらせ」による協調観測を実施し、宇宙空間で発生するコーラス波動の秒以下で起こる変化（宇宙の電磁波の「さえずり」）に呼応して、地上から観測されたオーロラの秒以下の脈動が変動すること（オーロラの「またたき」）を初めて示しました。

地球周辺の宇宙空間（ジオスペース^{*1}）にある高エネルギー電子は、人工衛星の障害を引き起こすなど人間の宇宙空間での活動に影響を及ぼします。また、最近の研究によって、これらの高エネルギー電子は地球大気の奥深くまで進入し、オゾン層を部分的に破壊する可能性があることも分かっています。このように、ジオスペースの高エネルギー電子の振る舞いを知ることや予測することは、私たちの生活とも密接に関係しています。このジオスペースの高エネルギー電子の増加には、宇宙空間で発生する自然電波の一種であるコーラス波動^{*2}が関係していると考えられています。

本研究成果は、様々なヴァリエーションを持つオーロラの形態が宇宙空間の電磁波の変動によって制御されていることを強く示唆しています。この関係を用いることで、地上からのオーロラ観測によって宇宙空間のコーラス波動の変化を推測することができます。観測衛星の数が制限されていることから宇宙空間での電磁波観測点は極めて少なく、観測によってコーラス波動の分布を直接知るのは難しいのが現状です。しかし、本研究成果により、地上からのオーロラ観測によって宇宙空間のコーラス波動の二次元分布を推測することが可能となります。本研究を応用して、地上からのオーロラ観測から高エネルギー電子の増減を予測することで、安全かつ安定した宇宙活動に貢献することが期待できます。

【ポイント】

- これまでは、観測の時間分解能^{*3}が不足しているために、オーロラの秒以下の「またたき」を制御している要因がコーラス波動の「さえずり」であることを実証することができなかった。
- 北欧とアラスカに設置された高速オーロラカメラと科学衛星「あらせ」による国際協調観測に

より、オーロラの「またたき」がコーラス波動の「さえずり」に対して、秒以下の時間スケールで完全に呼応していることが実証された。

- この成果は、オーロラが持つ多様な形態を説明する糸口になるだけでなく、人工衛星の障害を引き起こすヴァンアレン帯^{※4}の電子の形成過程の解明にもつながる。

この研究成果は、2020年2月25日（英国時間10時、日本時間19時）に、Nature系の学術論文誌「Scientific Reports」のオンライン版に掲載されました。

【報道に関するお問い合わせ先】

電気通信大学 総務企画課 広報係

電話：042-443-5019 E-mail：kouhou-k@office.uec.ac.jp

名古屋大学 総務部 総務課 広報室

電話：052-789-2699 E-mail：nu_research@adm.nagoya-u.ac.jp

金沢大学 総務部 広報室

電話：076-264-5024 E-mail：koho@adm.kanazawa-u.ac.jp

情報・システム研究機構 国立極地研究所 広報室

電話：042-512-0655 E-mail：kofositu@nipr.ac.jp

東北大学 大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

電話：022-795-6708 E-mail：sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

【研究内容に関するお問い合わせ先】

電気通信大学大学院情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 教授 細川敬祐

電話：042-443-5299 E-mail：keisuke.hosokawa@uec.ac.jp

【研究概要】

1. 背景

極地方の夜空を彩るオーロラは、高さ100 km付近に存在している酸素や窒素などの大気が発光する現象です。オーロラが光っている場所には、地球の近くの宇宙空間（ジオスペース）から、地球の磁気（地磁気）に導かれて高いエネルギーを持った電子が注ぎ込まれています。注ぎ込まれた電子が地球の大気にぶつかることで大気にエネルギーを与え、そのエネルギーが光として私たちの目に見える現象がオーロラです。オーロラは、形が明瞭なディスクリートオーロラと形があいまいなディフューズオーロラに大別されます。ディフューズオーロラは、ジオスペースに存在する電波である「コーラス波動」の働き（波動粒子相互作用^{※5}）によって、ジオスペースの電子が地球へと注ぎ込まれることで発生していると考えられています（図1左）。コーラス波動は人間の可聴域の周波数

帯に存在する自然電磁波であり、電波を音波に変換すると、鳥のさえずりのように聞こえるため「コーラス（合唱）」と呼ばれています。

ディフューズオーロラを高速オーロラカメラで撮影すると、そのほとんどが、数秒から数十秒の間隔で明るくなったり暗くなったりしていることが知られています。その明滅の様子が、脈を打つ心臓のように見えるため「脈動オーロラ^{※6}」とも呼ばれています。JAXA によって打ち上げられた科学衛星「あらせ」と地上からの光学観測を組み合わせた最近の研究により、脈動オーロラが脈を打つペース（主脈動）が、コーラス波動が強くなったり弱くなったりするリズムによって決められていることが分かってきました（Kasahara et al., Nature）。さらに、脈動オーロラ的一种である「フラッシュオーロラ」という瞬間的に発光するオーロラがコーラス波動によって作り出されていることも、科学衛星「あらせ」と地上観測の同時観測データによって明らかにされています（Ozaki et al., Nature Communications）。

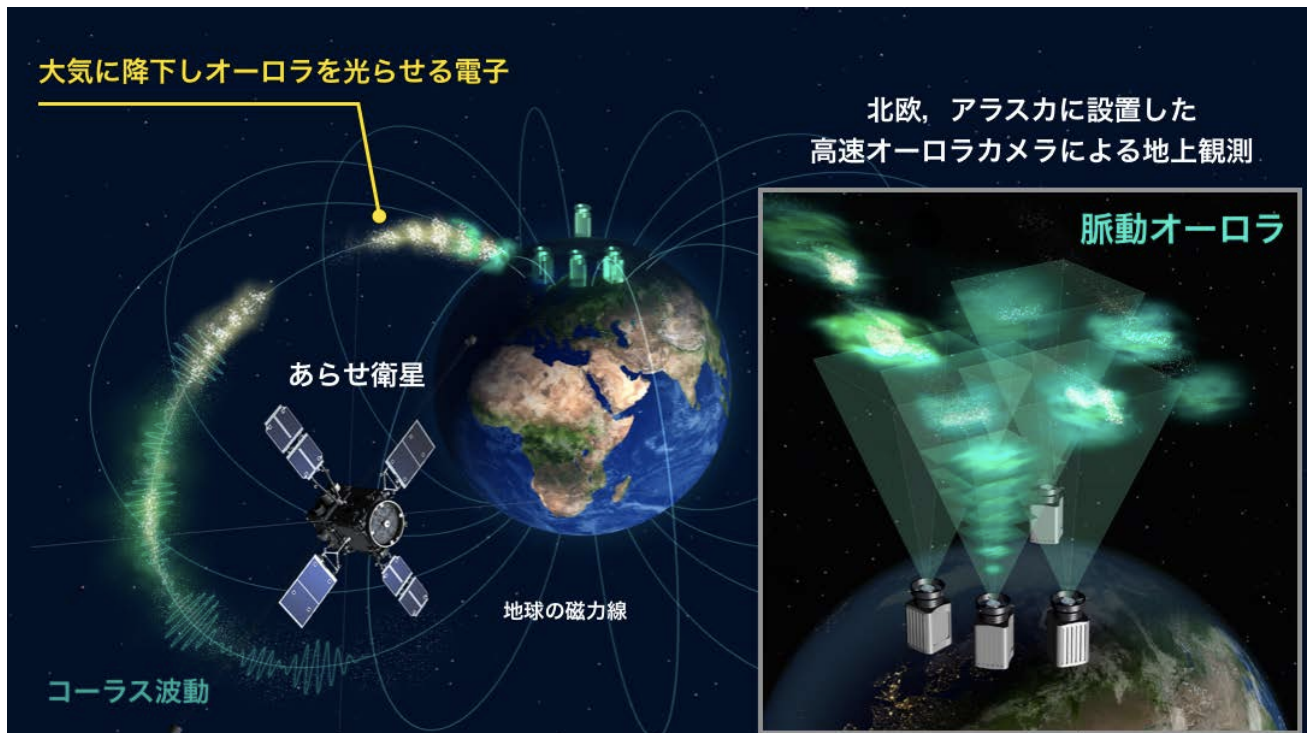


図 1: (左) コーラス波動によってジオスペースの電子が叩き落とされ、磁力線に沿って地球大気へ降下し、オーロラを光らせる様子。(右) 本研究によって北欧とアラスカに設置された高速オーロラカメラによる観測の模式図。

脈動オーロラの興味深い性質の一つとして、明るさの変化に「階層的周期構造」が存在することが挙げられます（図 2 左）。数秒から数十秒で明滅する主脈動の明るくなっている時間を高速オーロラカメラでズームインしてみると、さらに短い周期の「またたき」が埋め込まれていることが分かります。このまたたきは「内部変調」と呼ばれ、およそ 1 秒間に 3 回のペースで起こることが知られています。ゆったりとした主脈動の明滅をズームインしたときに秒以下の細かい周期性が現れ

る様子は、脈動オーロラが階層構造を持つことを意味しています。本研究グループは、ジオスペースで観測されるコーラス波動が類似する階層的周期構造を持つこと（図 2 右）に着目したモデル研究を行い（Miyoshi et al., 2015）、秒以下の「またたき」も含めた脈動オーロラの明るさの変化がコーラス波動の強度変化によって完全に制御されていることを予想しました。しかし、これまでは観測の時間分解能の限界が原因で、この予想を証明することができませんでした。特に、コーラス波動の中に、オーロラの「またたき」に呼応するような「さえずり」が存在するのかどうかを、宇宙と地上での同時観測で実証することがなされていませんでした。

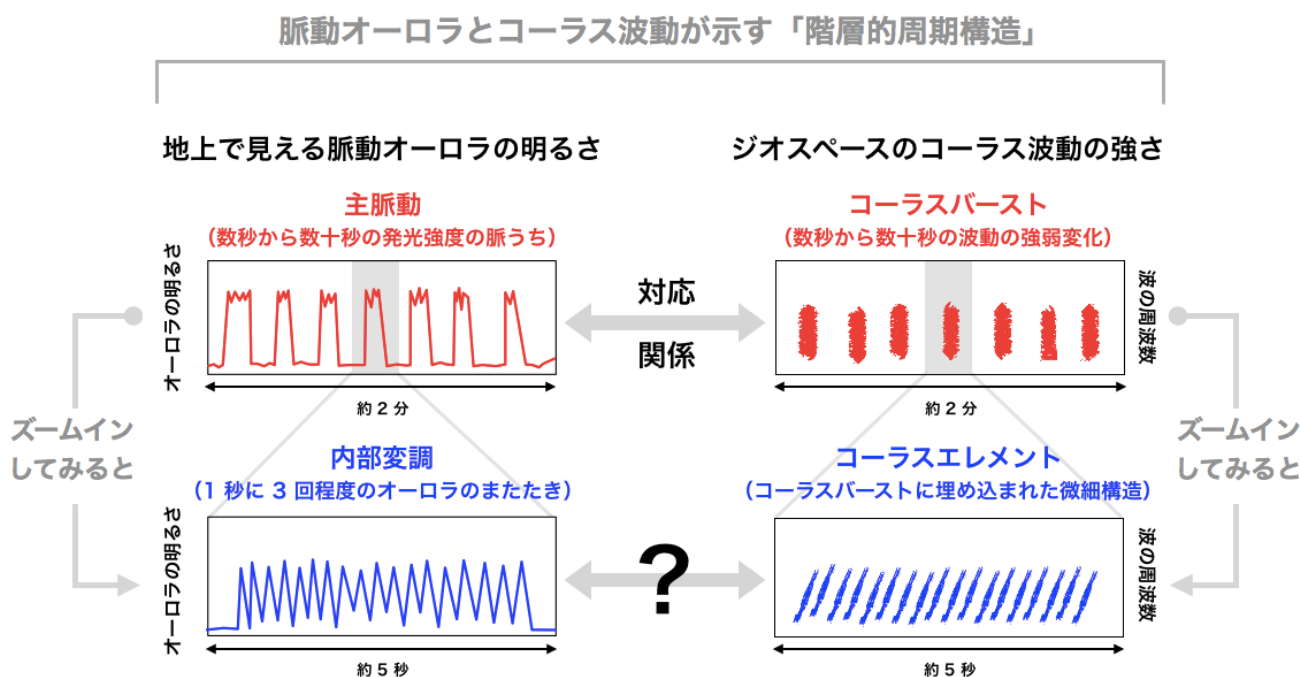


図 2: (左) 赤線は数秒から数十秒のペースで明滅する脈動オーロラの「主脈動」を表す。主脈動の明るくなっている時間（山の部分）をズームインすると、青線で描いたような 1 秒間に 3 回程度明滅する「またたき（内部変調）」が存在することが知られている。(右) 赤線は、コーラス波動が集団的に発生する様子（コーラスバースト）を示す。このコーラス波動の時間変化が脈動オーロラ的主脈動をコントロールしていることが、近年の科学衛星「あらせ」による観測によって示されている。このコーラスバーストをズームインすると、「コーラスエレメント」と呼ばれるコーラス波動の「さえずり」が見られることが知られている。コーラスエレメントと脈動オーロラの内部変調（またたき）の間に関連があることが予想されていたが、宇宙と地上での同時観測による実証がなされていなかった。

2. 研究手法

科学衛星「あらせ」は、2016 年 12 月 20 日に鹿児島県にある JAXA 内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。科学衛星「あらせ」にはプラズマ波動計測器（Plasma Wave Experiment）が搭載されており、コーラス波動に代表されるジオスペースの自然電波を高い時間分解能で計測しています。

本研究では、科学衛星「あらせ」による観測と、北欧・アラスカの6箇所に設置された地上からの高速オーロラカメラによるオーロラ撮像を組み合わせることによって、脈動オーロラの「またたき」とコーラス波動の「さえずり」の間の対応関係を検証しました（図1右）。この高速オーロラカメラは、1秒間に100枚のオーロラ画像を取得することができます。本研究は、カメラの観測視野に対応する領域を科学衛星「あらせ」が飛翔する時間帯に、衛星側での電波の計測を1秒間に64,000個のデータを取得するバーストモード^{*7}で行い、秒以下のコーラス波動の「さえずり」を捉えられるようにしました。このような衛星と地上の計測を密にコーディネートした協調観測は、衛星打ち上げ後の2017年3月から実施され、これまでに多くの良好なデータを取得することができています。

3. 研究結果

2017年3月29日の夜、北欧フィンランドの上空に脈動オーロラが現れた時間帯に、科学衛星「あらせ」はジオスペースでコーラス波動の周期的な変化を観測しました（図3）。図3の中段はオーロラとコーラス波動の時間変動を直接比較したものです。白黒のパネルにオーロラの明るさの変化が示されていますが、縦方向に白いストライプが周期的に現れており、オーロラが明るくなったり暗くなったりしていることが分かります。これが、脈動オーロラのメインの周期である「主脈動」です。その下に示されているのは、地磁気につながったジオスペースの領域において科学衛星「あらせ」が観測したコーラス波動のデータです。脈動オーロラの主脈動と同じタイミングで、コーラス波動の強度が高まっている（赤くなっている）ことが分かります。この完璧な1対1の対応は、コーラス波動の強さの変化（コーラスバースト）が、脈動オーロラの主脈動のビートを決めていることを示しています。論文では、この対応を動画で表現しています^{#1}。この例の中から、一つの主脈動と一つのコーラスバーストを取り出してズームインしたものを下段に示しています。脈動オーロラとコーラスバーストの「1発」が拡大されていますが、そのいずれにも、予想していた脈動オーロラの「またたき」やコーラス波動の「さえずり」の兆候が見られません。ここから、この脈動オーロラは、秒以下のまたたきを持たないものだったことが分かります。この結果は、コーラス波動に秒以下の変化がない場合は、脈動オーロラにも秒以下のまたたき（内部変調）が存在しないことを示し、脈動オーロラには内部変調を持つものと持たないものが存在することが、コーラス波動の性質によって決められていることを示しています。

#1: 脈動オーロラの主脈動とコーラスバーストの対応関係を示した動画:

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41598-020-59642-8/MediaObjects/41598_2020_59642_MOESM2_ESM.mov



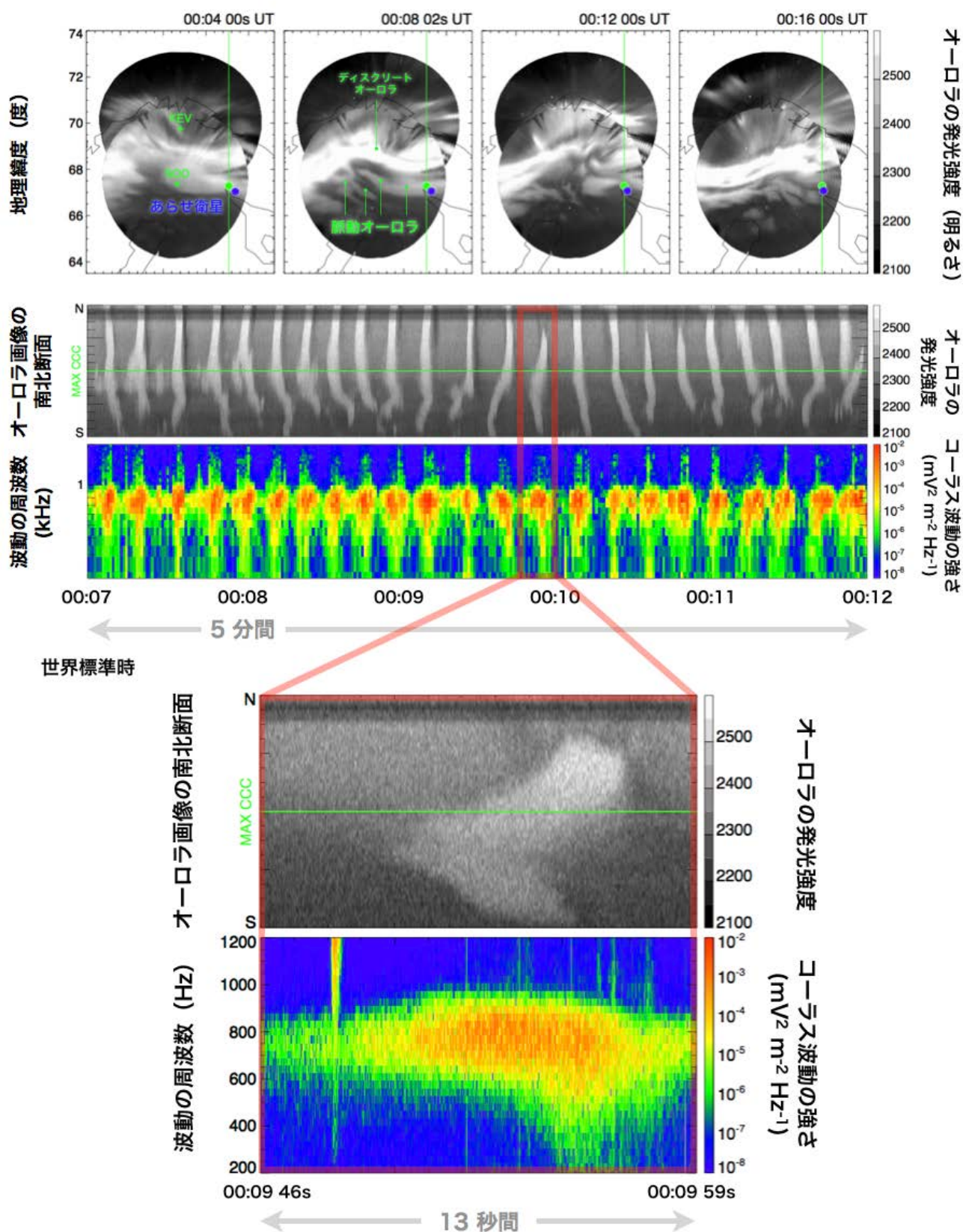


図 3: 2017 年 3 月 29 日に北欧フィンランドで観測された脈動オーロラの事例。中段に示した図から、脈動オーロラの主脈動（白黒）とコーラスバーストの時間変化（カラー）が完全に一致していることが分かる。また、下段には、主脈動とコーラスバーストの「一発」をズームインした観測が示されており、コーラス波動に「さえずり」がない場合、脈動オーロラにも秒以下の「またたき」が存在しないことが分かる。

幸運なことに、上記の観測の翌日の 2017 年 3 月 30 日に、今度はアラスカにおいて、科学衛星「あらせ」と高速オーロラカメラによる脈動オーロラの衛星地上同時観測に成功しました（図 4）。この例においても、中段に示されているように、主脈動とコーラス波動の時間変化の間に 1 対 1 の対応関係があることが分かります。この中の 1 発の主脈動とコーラスバーストをズームインしたものを下段に示しています。図 3 に示された北欧の事例とは対照的に、脈動オーロラとコーラス波動のどちらにも、細かい変化が存在していることが分かります。オーロラの方を見ると、秒以下の繰り返し周期で明るさが変わっており、1 例目と異なり、この日の脈動オーロラは、細かい「またたき」を持つものだったことが分かりました。また、コーラス波動の方にも、1 発の波動強度の増大の中に細かいスジ（コーラスエレメント）が埋め込まれていることが見て取れます。これらの秒以下の変動が 1 対 1 に対応していることから、脈動オーロラの内部変調が、コーラスエレメント^{*8}と呼ばれるコーラス波動が内包する微細な構造によって完全にコントロールされていることが分かりました。論文では、コーラス波動のデータを音声に変換し、脈動オーロラのまたたきがコーラスエレメントの発生に呼応する様子を音声付きの動画で表現しています^{#2}。このような、衛星と地上の双方で秒以下の変化を分解できる観測を行うことによって、オーロラの内部変調がコーラスエレメントの繰り返し周期によって形づくられていることが、初めて示されました。

#2: 脈動オーロラの内部変調とコーラスエレメントの対応関係を示した動画:

コーラス波動を変換した音声合成されている。目で見えるオーロラの「またたき」が、耳で聞くコーラス波動の「さえずり」に完全に呼応していることが分かる。

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41598-020-59642-8/MediaObjects/41598_2020_59642_MOESM3_ESM.mov



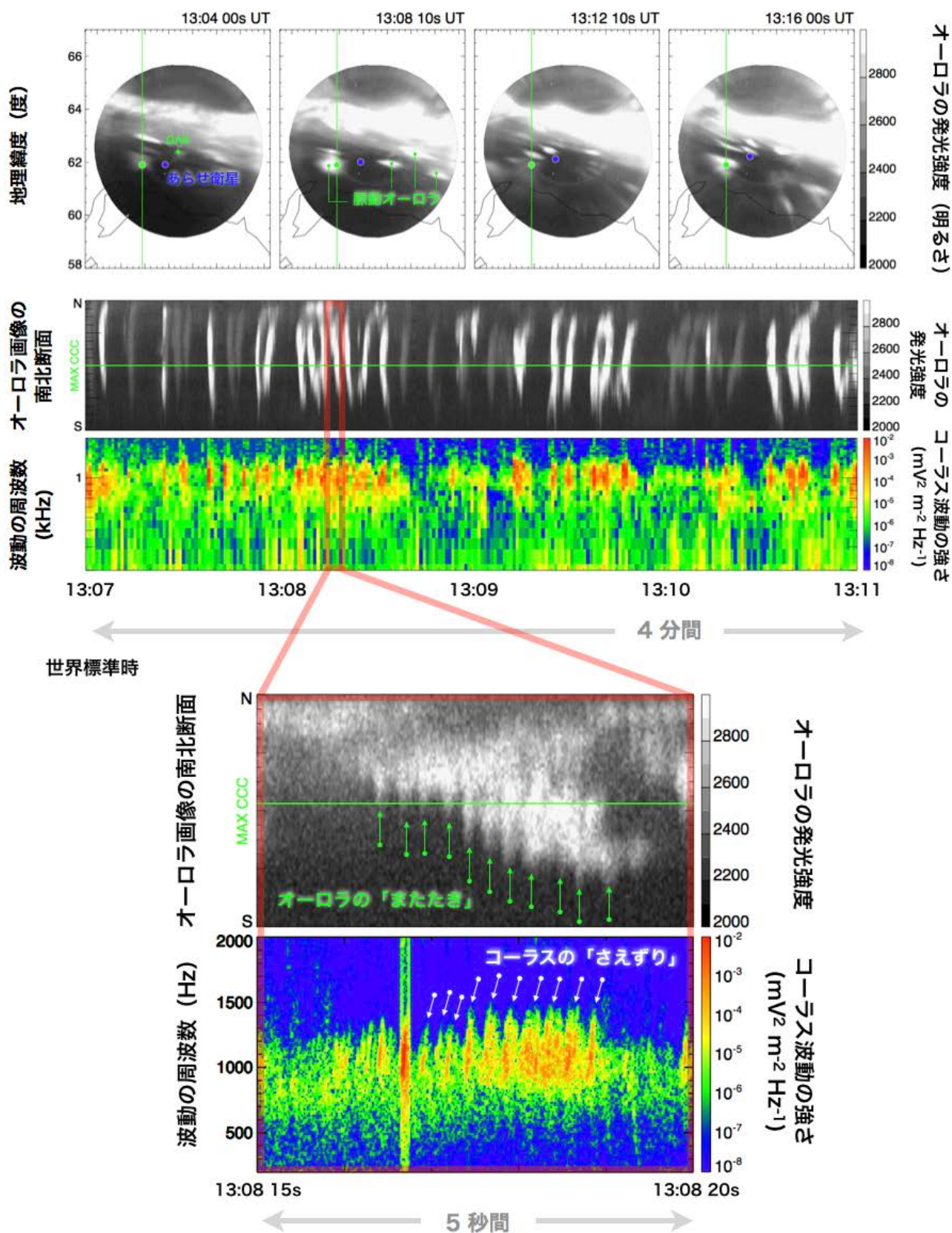


図 4: 2017 年 3 月 30 日にアラスカで観測された脈動オーロラの事例。北欧での観測事例と同様に、主脈動とコーラスバーストの時間変化の間には良い対応関係があることが分かる。また、それぞれの「一発」をズームインすると、脈動オーロラには「またたき（内部変調）」が、コーラス波動には「さえずり（コーラスエレメント）」が存在していることが分かる。

本研究は、北欧で見られた「またたかない」オーロラ、アラスカで見られた「またたく」オーロラを比較することで、脈動オーロラに見られる秒以下の「ビート」の有無が、コーラス波動の「鳴き方（さえずりの有無）」によって決まっていることを明らかにしました（図 5）。コーラス波動に秒以下の「さえずり」がある場合はオーロラにも「またたき」が存在します。逆に、コーラス波動に「さえずり」がない場合には、オーロラはまたたけないことを示しています。

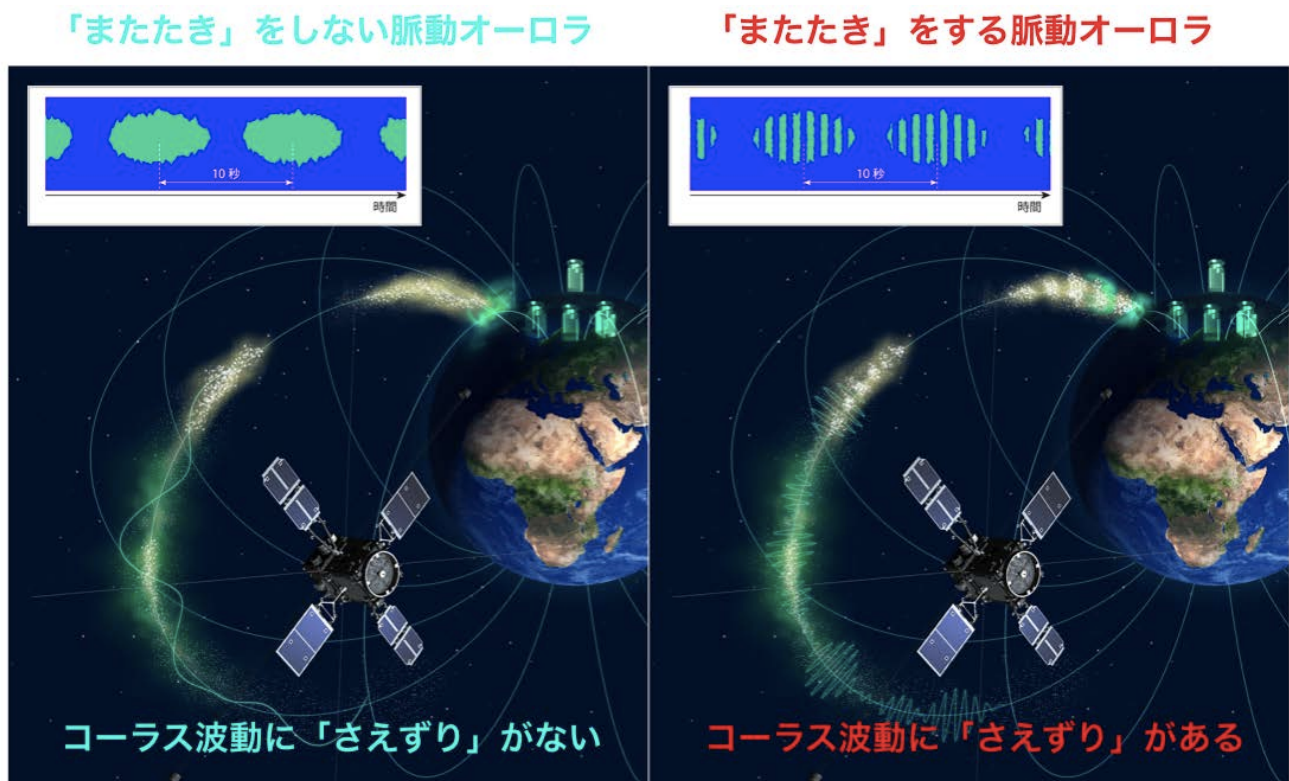


図 5: (左) コーラス波動に「さえずり」がない場合には、大気へ落ちている電子の量にも秒以下の時間変化がなく、脈動オーロラに「またたき」がない。(右) コーラス波動にエレメントが見られる場合は、大気へ降下する電子の量に秒以下の変動が生じ、それが脈動オーロラの「またたき」を作り出している。本研究では、この 2 つのケースを比較することで、コーラスの鳴き方（「さえずり」の有無）がオーロラのまたたきを制御していることを示した。

【今後の展望】

脈動オーロラの明滅を作り出しているコーラス波動は、人工衛星の障害の原因となる高エネルギーの電子を生み出す役割を担っていると考えられています。衛星を安全に運用するためには、衛星を壊してしまうほど高いエネルギーを持った電子が、いつ、どこで、どのようにして作られているのかを明らかにすることが必要ですが、その鍵を握っている現象の一つがコーラス波動です。つまり、脈動オーロラを調べることは、衛星障害を引き起こす高エネルギー電子がどのようにして生まれるのかを明らかにすることにもつながります。また、最近の研究から、脈動オーロラを光らせる電子は非常に高いエネルギーを持つため地球大気の奥深くまで進入し、オゾン層を部分的に破壊する可能性があることも分かってきています。脈動オーロラの生成メカニズムを理解することは、人工衛星の障害やオゾン層の破壊など、私たちの社会生活とも密接に関わっています。

【用語説明】

（※1）ジオスペース

数多くの人工衛星が飛翔する地球近傍の宇宙空間のこと。太陽の活動（主として太陽から来るプラズマの風である太陽風）の影響を受けてその環境が乱れ、人工衛星の運用や宇宙通信環境に影響を与えることが知られている。本研究において科学衛星「あらせ」が探査したジオスペースの領域は、地球中心から地球半径の6〜7倍程度離れた領域となっている。

（※2）コーラス波動

電子が磁力線に沿って、らせん状に運動することによって生じる電磁波。ジオスペースの朝側の領域において高い頻度で発生する。電磁波の強度を音声に変換すると、鳥が「さえずる」ように聞こえるために、“コーラス” 波動と呼ばれている。

（※3）時間分解能

計測データの取得（サンプリング）間隔の短さを意味する。計測の対象となる自然現象が速い時間変化を示す場合には、より短い時間間隔でデータのサンプリングを行い、「時間分解能の良い観測」を行う必要がある。

（※4）ヴァンアレン帯

エネルギーの高い荷電粒子（電子やイオン）が地球の固有磁場に補足される形で存在しているジオスペース中の領域のひとつ。太陽風の影響を受けて荷電粒子の量やエネルギーが増大し、その領域を飛翔する人工衛星の運用に影響を与えることが知られている。

（※5）波動粒子相互作用

電磁波動とプラズマ粒子（電子、イオン）が、電界・磁界の変動を介して相互作用すること。この相互作用によって、コーラス波動がジオスペース電子を高いエネルギーに加速したり、磁力線に沿って大気に降下させたりする。

(※6) 脈動オーロラ

形があいまいなディフューズオーロラの種類で、明るさが準周期的に変動するオーロラ。その明るさの変化には、数秒から数十秒のビートで明滅する「主脈動」と、1秒間に3回くらいの「内部変調（またたき）」が重なり合う“階層的周期構造”が存在する。

(※7) バーストモード

科学衛星「あらせ」の電磁波動の観測において、波動強度を高速に取得できる観測モードのこと。本研究では、波動強度を1秒間に64,000回サンプリングするバーストモード観測によって得られたデータを解析している。

(※8) コーラスエレメント

秒以下の繰り返し周期でコーラスが再帰的に発生すること。荷電粒子との非線形相互作用によって波動の振幅が成長することで生起すると考えられている。

【共同研究グループ】

細川 敬祐	電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授
三好 由純	名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授
尾崎 光紀	金沢大学理工研究域電子情報通信学系准教授
大山 伸一郎	名古屋大学宇宙地球環境研究所 講師
小川 泰信	情報システム研究機構 国立極地研究所 准教授
栗田 怜	名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教
笠原 禎也	金沢大学総合メディア基盤センター 教授
笠羽 康正	東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻 教授
八木谷 聡	金沢大学理工研究域電子情報通信学系 教授
松田 昇也	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 特任助教
土屋 史紀	東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻 助教
熊本 篤志	東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻 准教授
片岡 龍峰	情報システム研究機構 国立極地研究所 准教授
塩川 和夫	名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授
Tero Raita	オウル大学ソダンキラ地球物理観測所 研究員
Esa Turunen	オウル大学ソダンキラ地球物理観測所 名誉所長
高島 健	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 教授
篠原 育	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 准教授
藤井 良一	情報システム研究機構 機構長（名古屋大学 名誉教授）

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（15H05747, 15H05815, 16H06286, 16H04056, 16H01172, 17H06140）の補助により行われました。科学衛星「あらせ」および関連する地上観測データは、JAXA 宇宙科学研究所と名古屋大学が共同運用している ERG サイエンスセンターから配信されているものです。

【論文】

論文雑誌名: Scientific Reports

タイトル: Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves

著者: K. Hosokawa, Y. Miyoshi, M. Ozaki, S.-I. Oyama, Y. Ogawa, S. Kurita, Y. Kasahara, Y. Kasaba, S. Yagitani, S. Matsuda, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, R. Kataoka, K. Shiokawa, T. Raita, E. Turunen, T. Takashima, I. Shinohara and R. Fujii,

URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-59642-8>