

宇宙の音

大村 善治^{1*}

Sound of Space

Yoshiharu Omura^{1*}

概要

宇宙空間では可聴域の周波数をもつ様々な電磁波が発生し、その一部は地上まで伝わってきます。そして、その電磁波をアンテナで受信し、オーディオアンプに通すと鳥の鳴き声のような音となって聞こえます。この電磁波によって、磁気圏に侵入する太陽風粒子の一部が相対論的なエネルギーにまで加速され、地球の周りに放射線帯が形成されていることが分かっています。宇宙の音が伝える宇宙環境の変動について紹介します。

1. はじめに

地球周辺の宇宙空間で「宇宙の音」が作られる仕組みを解説します。宇宙空間は、気体がイオンと電子に分離してできるプラズマという状態の大気で満たされています。プラズマは非常に希薄な気体なので、その振動は空気中の疎密波が耳の鼓膜に伝わるように音として伝搬することができません。しかし、電子とイオンが振動することで電流が作られて電磁波が発生します。その発生した電磁波の一部は地上にまで伝わってきてアンテナで受信することができます。この信号をオーディオアンプにいとるとスピーカーから音となって聞こえます。我々が聴くことの出来る音の周波数は数十ヘルツから1万数千ヘルツまでの振動数ですが、それと同じ周波数帯の電磁波が宇宙空間で生成されています。

2. ジオスペースの構造

では、地球の周りの宇宙空間であるジオスペース(geospace)について説明します。図1はこれから説明する太陽風、磁力線、磁気圏、プラズマ圏、放射線帯が描かれています。象徴的に描かれており、実際の大きさのスケールは正しくないのでご注意ください。

2.1 太陽風

地球の周りのプラズマ環境を支配しているのは太陽からやってくる太陽風(Solar Wind)です。太陽の中心では核融合反応が起こっており、そのエネルギーによりプラズマと磁場が作られて太陽系空間に広く流れ出ています。プラズマの中ではアルフベン波(Alfven wave)が存在していて電磁界が振動するのですが、太陽風は、その波の伝搬速度よりも大きな数百 km/s の速度で流れており、超音速の状態になっています。時折、コロナ質量放出(Coronal Mass Ejection: CME)という現象が起こり巨大なエネルギーが大きなプラズマの塊として放出され、それが地球にやってくると地球の磁場が乱れる磁気嵐(magnetic storm)という現象がおこります。

2019年7月16日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存科学計算機実験分野。

* E-mail: omura@rishi.kyoto-u.ac.jp

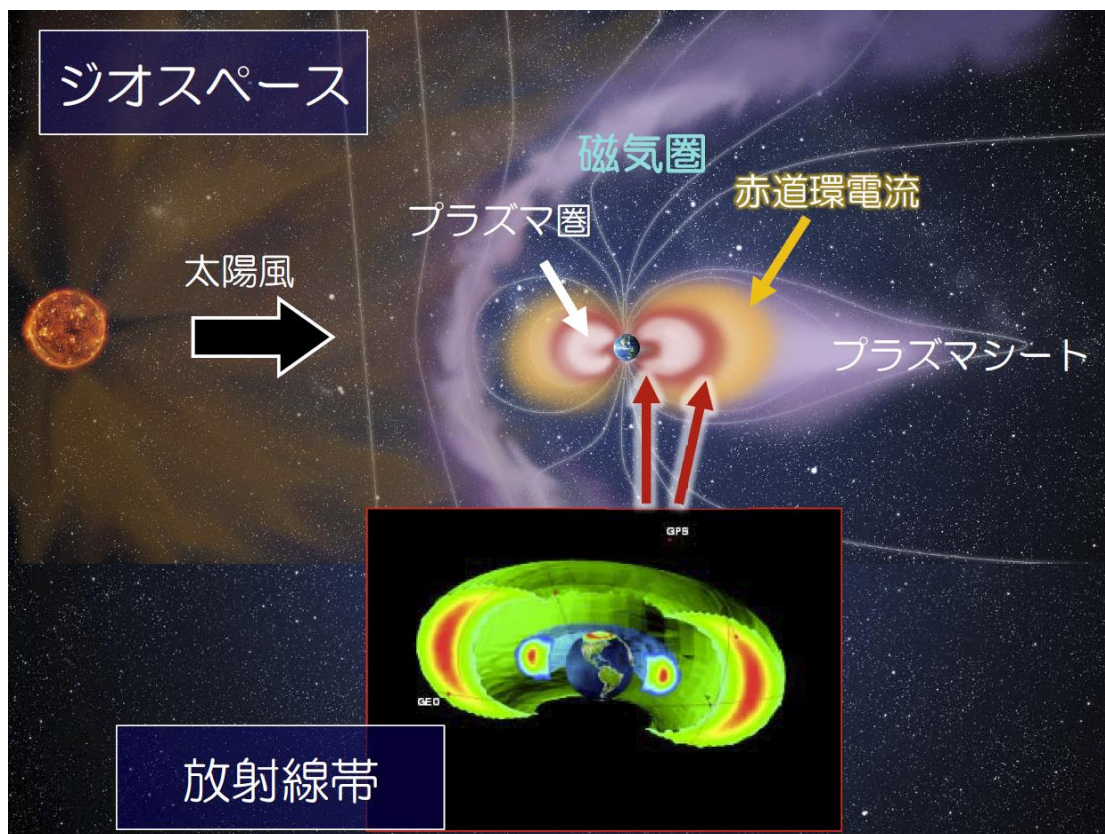


図 1：ジオスペース

2.2 磁気圏

地球周辺の宇宙空間は、高速の太陽風が地球の固有磁場に吹き付けており磁気圏(magnetosphere)という領域ができています。これはプラズマの電子やイオンが地球磁場の磁力線を横切ることができないという性質があるためです。地球に吹き付ける太陽風はその前面で遮られて減速し、超音速が亜音速になってバウショック(bow shock)と呼ばれる衝撃波が地球磁気圏の前面に現れます。また太陽風の圧力を受けて太陽側の地球磁気圏は歪められ、反太陽側には、プラズマシート(plasmashet)と呼ばれる磁場が弱くてプラズマ密度が高くなった部分と共に磁力線が長く伸びた磁気圏尾部(magnetotail)が形成されています。

2.3 プラズマ圏

特に地球に近い領域は、地球の大気が電離してできた密度の高いプラズマが存在しており地球と一緒に自転しています。この領域をプラズマ圏(plasmasphere)と呼びます。このプラズマ圏に重なるようにして、赤道環電流 (ring current) ができており、この電流はプラズマ圏の冷たいプラズマよりも数百倍の高いエネルギーをもっています。これは太陽風の一部が磁気圏に流れ込んだものです。この高いエネルギーの粒子によって様々なプラズマ波動がつくられており、その波動によってさらに粒子の一部が加速され、またさらに数百倍の非常に高いエネルギーをもつ放射線帯が形成されています。

2.4 放射線帯(ヴァンアレン帯)

1958年に打ち上げられたエクスポローラー1号に積んだ粒子計測器によってアイオワ大学のヴァンアレン教授が発見したことから、放射線帯(radiation belts)はヴァンアレン帯(Van Allen belts)とも呼ばれています。光速に近い相対論的なエネルギーをもつ電子からなる外帯と高エネルギーのイオンからなる内帯に分けることができます。イオンは電子よりも約1800倍も重たいために、それを捕捉するには

より強い磁場が必要です。そのために地球に近い磁場の強い領域に高エネルギーのイオンが捕捉されて内帯が形成されています。

3. VLF 波動観測

ジオスペースには可聴域の周波数をもつ特徴のある電磁波が発生・伝搬しています。VLF 電波というのは 3 kHz から 30 kHz までの周波数の波のことを指します。波長が 10 km から 100km あるので、電離層で反射して地球の反対側までも伝搬するため、かつては船舶との通信やナビゲーションに使われていました。現在は衛星通信があるので使われていませんが、波長が長いので海の中までも電波が浸透するので、現在でも潜水艦に信号を送るのに使われています。

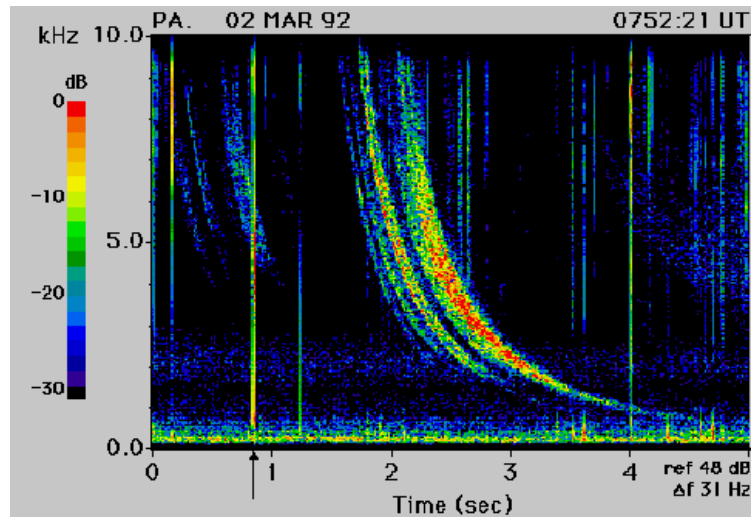


図 2：ホイッスラー (Web of Stanford Univ.)

3.1 ホイッスラー

地球の南半球で発生した雷から放射される幅広い周波数の電波の一部が地球の磁力線にガイドされて北半球へと伝搬してきたものを地上で受信することができます。この電波の周波数スペクトルの時間変化を示すのが図 2 です。ダイナミックスペクトルとも呼ばれます。宇宙空間を磁力線で伝搬する波の速度が周波数の高い部分程速く、周波数の低い部分が遅いため、反対半球では高い周波数から徐々に低い周波数へと変化する電波が受信されます。このような電波はホイッスラー(whistler)と呼ばれ、長距離で電話が使われ始めた 19 世紀の終わりごろから、通話にこのような音が混ざることから知られていましたがその原因は謎でした。また、地上 100 km の上空に電波を反射する電離層が存在していることも、1924 年のアップルトンによる実験で証明されていましたが、さらに宇宙空間にまで電離気体であるプラズマ空間が広がっていることは明確にはわかっていませんでした。宇宙空間が真空ではなくプラズマで満たされていることが検証できたのは、1957 年に人類初の人工衛星スプートニク 1 号が打ち上げられて始まる宇宙時代になってからですが、英国のストーレイ(Storey)は 1953 年の学位論文でそれを理論的に予測しています。ストーレイは宇宙空間のプラズマの存在を仮定することでホ

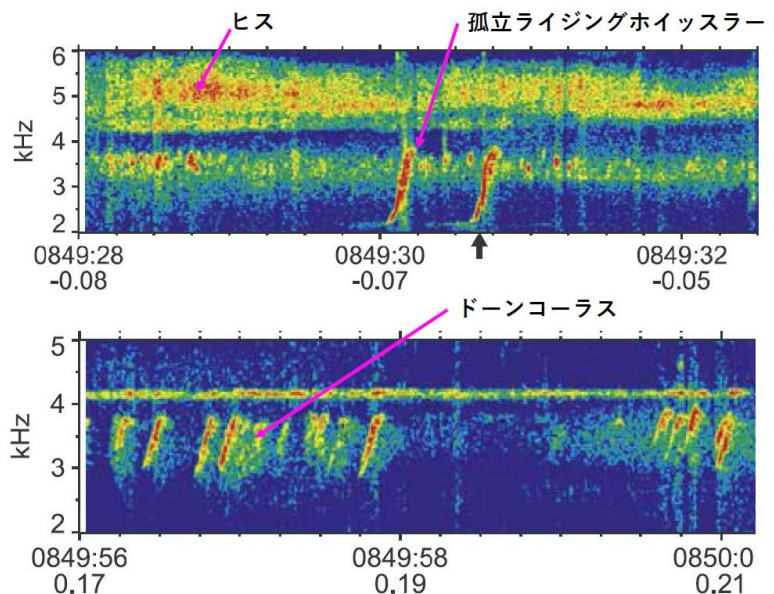


図 3：クラスター衛星で観測された VLF 電波 (Santolik et al., JGR, 2003)

イッスラーの謎がとけることを示しました。

3.2 磁気赤道域から発生する VLF 電波

ストーレイの論文の付録には、雷起源のホイッスラーとは異なる電波が受信されることが報告されています。ヒス(hiss)、孤立ライジングホイッスラー(isolated rising whistler)、ドーンコーラス(dawn chorus)等の記述がみられます。宇宙時代に入ってから、人工衛星で VLF 電波の観測が多くおこなわれてきています。図 3 に示すのは、4 つの衛星が編隊飛行しているクラスター衛星によって得られたデータです。これらの電波の信号をオーディオアンプに入れると、ヒスは連続的な特徴のないノイズのような音として聞こえ、孤立ライジングホイッスラーは雷ホイッスラーとは逆に周波数が滑らかに上昇する音、またドーンコーラスはその名の通り短いライジングホイッスラーが連続的に繰り返されてあたかも夜明けに鳴く鳥の声のように聞こえます。

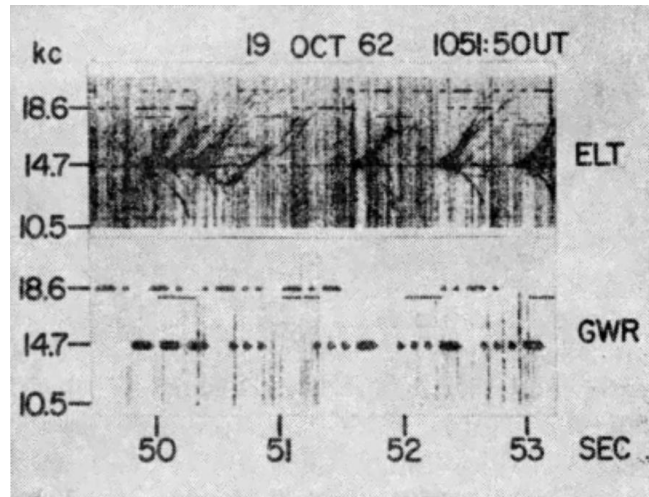


図 4：モールス信号からの VLF とリガード放射 (Helliwell, et al., JGR, 1964)

3.3 VLF トリガー放射

図 4 は、スタンフォード大学の VLF 電波の研究グループが、北半球から出されたモールス信号を南半球緯度 51 度にあった米国海軍の船上で受信した際に、モールス信号が引き金となって周波数変動を伴う新しい波が励起されることを発見したものです。この周波数変動は、ドーンコーラスの周波数変動と殆ど同じであることから、人工的に放射した電波からコーラスを励起する実験が盛んにおこなわれました。南極のサイプル(Siple)基地から VLF 電波を放射し、それを磁気共役点で受信する実験が 1970 年代から 1980 年代前半にかけて盛んにおこなわれました。周波数が増えるライジングトーンのみならず降下するフォーリングトーン、下がって上がるブックと呼ばれるエミッションも観測されています。磁気圏に電波を入力することで、そこから性質の異なる新しい電波が出てくるといのは非線形現象の典型的な例です。

ここで励起される周波数が増えるコーラス放射は、高エネルギー電子とのサイクロトロン共鳴することによって共鳴電子からエ

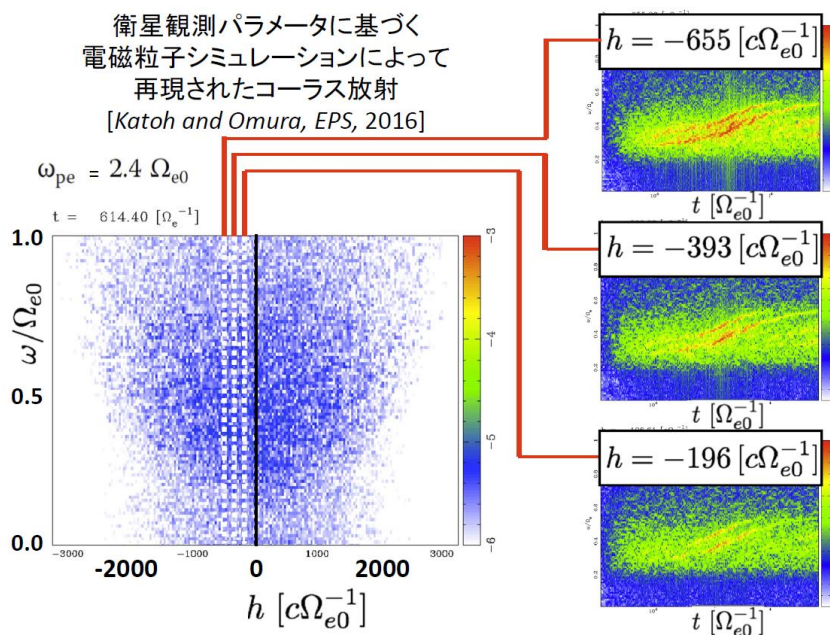


図 5：コーラス放射の計算機シミュレーション

エネルギーを受けとって成長します。このとき、高エネルギー電子の一部は磁力線に対するピッチ角が減少して磁力線にそって高緯度に向かって走り極域の大気に降り込みオーロラを発生させていることが分かってきました。また、共鳴電子の一部は、波がつくる電磁界のポテンシャルに捕捉されさらに光速に近い速度まで加速されて相対論的なエネルギーを獲得し放射線帯の電子フラックスを形成しています。

4. 宇宙のドーンコーラス

4.1 コーラス放射の計算機シミュレーション

1970年代後半にホイッスラーモード不安定性(whistler mode instability)の計算機シミュレーション研究が始まり、その後、スーパーコンピュータと数値計算手法の発展を見て、現在ではコーラス放射やホイッスラーモードトリガー放射を再現することができるようになりました。図5の計算機シミュレーションは、電磁界の基本方程式と多くの高エネルギー電子の運動方程式を解くことにより再現したものです。このようなコーラス放射を再現する計算機シミュレーションに2007年に成功し、そのデータ解析を通じて理論研究も大きく進展しました。

このシミュレーションでコーラス放射を発生させている要因は、地球の磁場モデルです。地球の内部には棒磁石に相当する磁場が作られており北極付近にS極、南極付近にN極があります。棒磁石の周りにはN極からS極に向かう磁力線が出来ており、ダイポール(双極子)磁場と呼ばれています。この磁場の強度は地球の赤道面付近で最小となり磁力線に沿って極域に移動すると次第に強くなります。特に赤道面付近では、この磁力線に沿った磁場強度の変化は二次曲線によって近似することができます。赤道付近でコーラス放射が発生し、それが南北に磁力線に沿って伝搬する様子を、縦軸を周波数、横軸を磁力線沿いの距離 h としてプロットしたのが図5です。同時に異なる周波数でコーラス放射が発生しています。黒い実線が赤道面の位置を表しており、そこから少し離れた距離にある白い点線で示した異なる3点で観測されたコーラス放射のダイナミックスpektrumを右側にプロットしています。赤道面付近で発生した波の振幅が磁力線に沿って赤道から南の方向($h<0$)に伝搬するにつれて次第に大きくなっています。

赤道面から北側($h>0$)に現れている波動は、コーラスとヒスが混じったようなspektrumを示しています。コーラス放射は一つのパケットの中で周波数が連続的に変動する波動のように見えますが、その振幅は大きく変動し多数のサブパケットが集まって構成されています。一つ一つのサブパケットは、振幅が成長・飽和・減衰という変化を示し、その間、周波数が次第に上昇します。面白いのは、振幅は成長と減衰を繰り返すのに周波数は徐々に上昇してゆくということです。一つのサブパケットは、図6に示すような振幅と位相からなる単一の波形です。波形を振動の幅を表す振幅と三角関数の積で表します。三角関数は回転する位相とともに-1と1の間を滑らかに変動します。この位

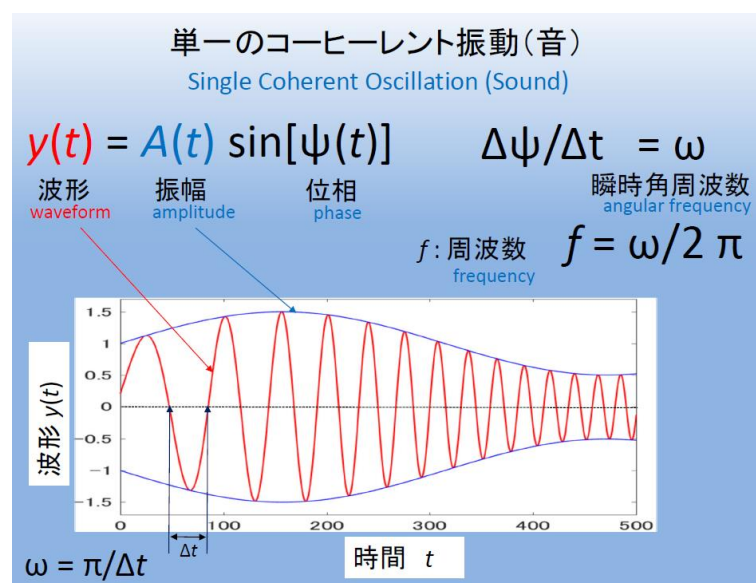


図6：単一の振幅と位相からなる波形

相が規則正しく滑らかに連続的に変動する波をコーヒーレントな波と呼びます。微小な時間 Δt で変化する位相 $\Delta \phi$ を考え、その比をとることで瞬時角周波数を求めることができます。

4.2 コーラス放射の衛星観測

コーラス放射のサブパケット構造は衛星観測で得られたコーラスの波形データを解析することで確かめることができます。図 7 はヴァンアレンプローブ (Van Allen Probes) という NASA の衛星で観測されたものです。波動を構成している磁界 3 成分の波形データを計測しており、外部磁場に垂直な波形の振動から振幅(図 7a)と瞬時周波数(図 7b)を計算してプロットしています。瞬時周波数の各点は波形がゼロを横切って符号が反転する時刻を表しており、そのゼロを横切る時系列データの間隔が半周期であるとみなして周波数を計算しています。また、図 7c に示すように波形の時系列のデータをフーリエ変換することによりスペクトルが得られます。水平の黒線 $1/2f_{ce}$ は、電子のサイクロトロン周波数 (f_{ce})の半分の周波数を示しています。コーラス放射はホイッスラーモード波と呼ばれる波動ですが、 $1/2 f_{ce}$ を境にして伝搬特性が変化します。そのため、 $1/2 f_{ce}$ の上側には別の場所から伝搬してくる波が入る場合があります。周波数の異なる 2 つのコーヒーレントな波が同時に存在するために瞬時周波数に揺らぎが生じています。しかし、それでも周波数は大体滑らかに上昇し、 $1/2 f_{ce}$ を越えて周波数上昇が続いています。これはコーラス放射が発生している領域に非常に近いところで衛星が波動を観測していることを示唆しています。通常、衛星は発生領域から離れたところでコーラス放射を受信する場合がありますが、その場合、 $1/2 f_{ce}$ における伝搬特性の変化および $1/2 f_{ce}$ 付近で波動が減衰するために周波数スペクトルにギャップが現れます。この $1/2 f_{ce}$ の周波数の上側と下側でコーラス放射を upper-band chorus、lower-band chorus と分けて呼んでいます。

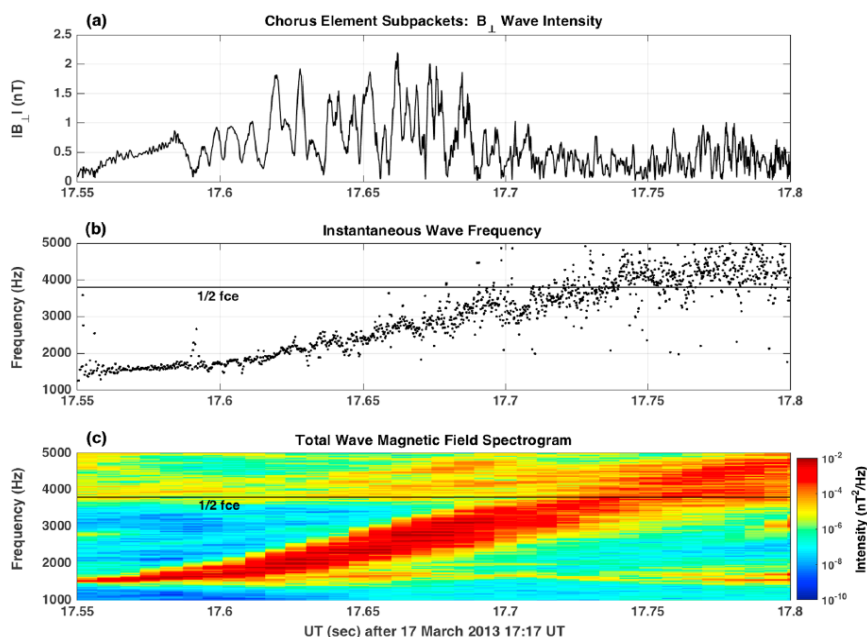


図 7 : Van Allen Probe 衛星で観測されたコーラス放射のサブパケット構造 (Foster et al., JGR, 2017)

4.3 コーラス方程式

コーラス放射を構成しているサブパケットの成長過程には、コーヒーレントなコーラス放射とサイ

クロトロン共鳴する電子が、速度位相空間(velocity phase space)において、波の電磁界によって非線形な粒子軌道をとるために共鳴電子が欠乏した電子ホール(electron hole)が作られ、そのために共鳴電流が流れて周波数変動し、同時に粒子からエネルギーを受け取って振幅が成長することがシミュレーション研究で確認できています。約 10 年前に周波数変動と波の振幅の関係式および振幅変動を表す非線形成長率の式を導くことに成功し、この 2 つの式をコーラス方程式と呼んでいます。このコーラス方程式を積分することで得られる振幅と周波数の変動が、シミュレーションで再現されたコーラス放射や磁気赤道付近で観測されたコーラスの波形と良い一致を示すことが多くの論文で検証されています。

4.4 コーラス放射の閾値振幅

コーラス方程式を解いて非線形成長が起こる条件として、波の振幅が閾値振幅(threshold amplitude)よりも大きいことが必要です。この閾値振幅は、赤道域で発生したコーラス放射が磁力線にそって伝搬しつつ非線形成長するための条件、および磁気赤道において振幅が成長する条件から導かれます。よって、コーラスを発生させるにはこの閾値振幅より大きな振幅の波が磁気赤道域に入射することが必要です。この波をトリガー波(triggering wave)と呼びます。コーラスは、背景プラズマの熱雑音が高エネルギー電子の温度異方性による線形成長率で増幅される波がトリガー波となって発生しているものです。一方、VLF トリガード放射は、人工的に放射された波がトリガー波となってコーラスと同じ非線形成長が起こります。

4.5 コーラス放射の最適振幅

コーラス方程式を解くと波の振幅は大きな非線形成長率のために急速に成長します。通常、閾値振幅付近では非線形成長率は線形成長率よりも大きくなります。しかし非線形成長率は振幅の関数でもあり、大きな振幅に対しては小さくなります。非線形成長率は速度位相空間における電子ホールが周波数上昇と共に最大の非線形成長率を与える形状となることを前提として導かれており、その形状が維持できる振幅を求め、それを最適振幅(optimum amplitude)と呼びます。その周波数依存性のグラフと実際に観測されているコーラス放射の振幅やシミュレーションで再現されたコーラス放射の振幅の周波数依存性のグラフが良く一致することが多くの事例で報告されています。このことから、非線形成長により形成される各サブパケットの飽和振幅値が最適振幅に対応していると考えられます。

4.6 コーラス放射の数値モデル

磁気赤道において閾値振幅より少し大きいトリガー波を初期値としてコーラス方程式を積分することにより、コーラス放射の先頭のサブパケットを成長させます。振幅が最適振幅に到達すると、非線形成長率の符号を反転させることにより成長から減衰に切り替えてコーラス方程式を解き、閾値振幅付近まで振幅を下げることでより一つのサブパケットを生成します。次のサブパケットも同様に形成しますが、初期周波数は一つ前のサブパケットの最終周波数を使います。この操作を繰り返すことにより、周波数が次第に上昇し $1/2 f_{ce}$ に達した時に、一つの lower band コーラス放射の生成が終了したとみなします。このようにしてコーラスの振幅

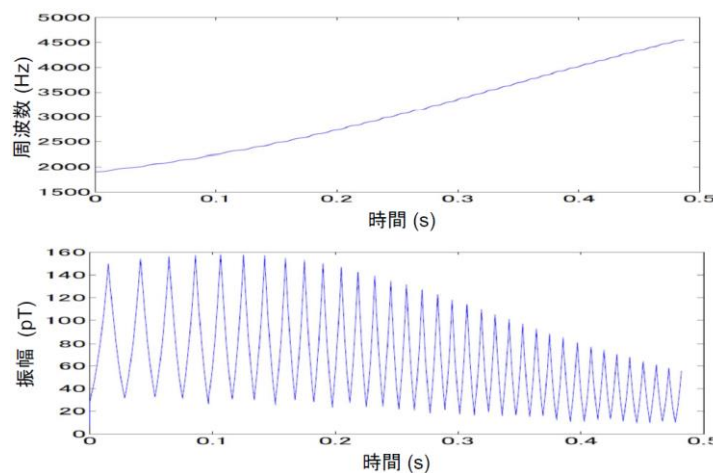


図 8：コーラスのサブパケット構造の数値モデル

と周波数の変動を再現したものを図 8 に示します。この波形のデータを MATLAB 等の音生成関数に入力すると、コーラスのような音となって聞こえます。

5. インドネシアのドーンコーラス

私は、生存圏研究所の一員ですので、宇宙圏と人間圏との共同研究にも参加しています。宇宙の人工衛星からマイクロ波の電波を使ってインドネシアの広大な早生樹植林のバイオマス量を推定する等の研究をしています。インドネシアの森林の生物多様性を調査している東南アジア研究所の藤田素子さんと一緒に現地調査に出かけることもあります。以前、藤田さんに何を研究しているのですかと尋ねたところ「ドーンコーラスです」と応えられて、「私もです」ということで意気投合しました。鳥は、日が昇る 20 分前後に最も活発に聞かれますが、これは鳥の縄張りの誇示だろうと考えられています。英語ではこの夜明け (dawn: ドーン) に聞こえる鳥の鳴き声をドーンコーラスと呼んでおり、これに因んで朝方に宇宙から伝わってくる VLF 電波の中で周波数が変動するものをドーンコーラスと名付けたわけです。

そこで実際に、インドネシアのドーンコーラスと宇宙のドーンコーラスを比べてみようと思い、藤田さんからカリマンタン島で録音した鳥のドーンコーラスのデータを頂いて解析してみました。図 9 の左側にドーンコーラスの振幅、右側に周波数スペクトルを示します。左下の図のように周波数が上昇している部分の振幅を拡大すると宇宙のコーラスと同じくサブパケット構造があることがわかります。さらにそのサブパケット構造をもった周波数上昇の成分の前には、トリガー波に相当する一定周波数の波形も存在していることもわかります。これは、鳥の声帯を通じてエネルギーを放出する機構が、宇宙のコーラスと共通する物理過程をもっている可能性を示唆しており、地上の鳥の発声機構が非線形な物理現象として記述でき、その特性を利用することで鳥の声から鳥の種類を自動認識する等の応用が考えられます。

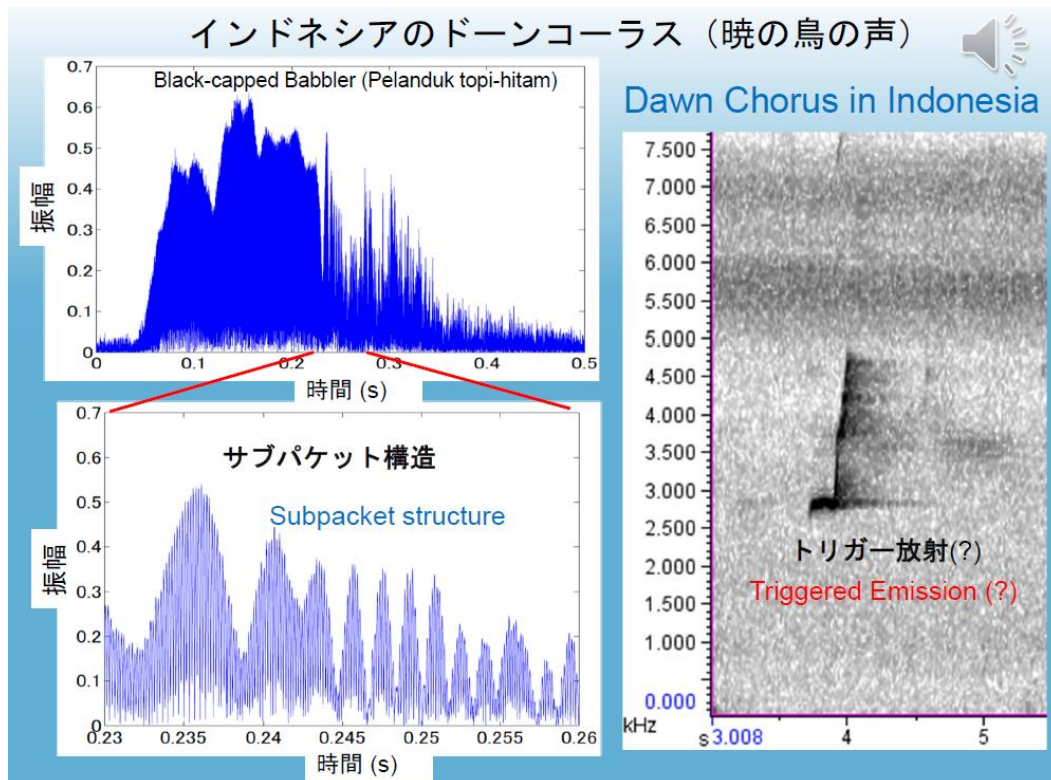


図 9：インドネシアのドーンコーラスの波形解析(左)と周波数スペクトル(右)

6. おわりに

コーラスやオーロラは磁場のある惑星で発生する現象です。実際に木星や土星には強い磁場があり磁気圏が形成されてオーロラやコーラスが観測されています。過去半世紀余りの研究で、宇宙の音に対する我々の理解は着実に進んできています。コーラスが高エネルギー電子を効率良く相対論的なエネルギーにまで加速することがわかってきており、地球を取り巻く放射線帯の変動の物理が議論されています。本稿で紹介した観測例やシミュレーションは現在進行中の研究プロジェクトの成果です。これらの研究テーマには未だわからない問題が多く残されています。

謝辞

図1の作成にあたっては中村紗都子氏に協力して頂きました。図9の鳥の音声データと周波数スペクトルは藤田素子氏から提供して頂きました。

参考文献

- 1) Helliwell, R. A., J. Katsufakis, M. Trimpi, and N. Brice, Artificially stimulated Very-Low-Frequency radiation from the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 69, 2391-2394, 1964.
- 2) Omura, Y., D. Nunn, and D. Summers, Generation processes of whistler-mode chorus emissions: Current status of nonlinear wave growth theory, *AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere"*, 10.1029/2012GM001347, 2012.
- 3) Omura, Y., D. Nunn, H. Matsumoto and M. J. Rycroft, A Review of Observational, Theoretical and Numerical Studies of VLF Triggered Emissions, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 53, pages 351-368, 1991.
- 4) Santolík, O., D. A. Gurnett, J. S. Pickett, M. Parrot, and N. Cornilleau-Wehrin, Spatio-temporal structure of storm-time chorus, *J. Geophys. Res.*, 108(A7), 1278, doi:10.1029/2002JA009791, 2003.
- 5) Storey, L. R. O., An investigation of whistling atmospherics, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A246, 113-141, 1953.

著者プロフィール



大村 善治 (Yoshiharu Omura)

＜略歴＞ 1980 年京都大学工学部電子工学科卒業／1985 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了（工学博士）／同年京都大学工学部助手／1988 年京都大学大超高層電波研究センター助教授／2000 年同大学宙空電波科学研究センター教授、2004 同大学生存圏研究所教授 現在に至る。＜研究テーマ＞宇宙プラズマ中の非線形波動粒子相互作用の研究、熱帯人工植林のリモートセンシング。＜趣味など＞少林寺拳法。毎日 1 万歩以上歩くこと。