

# 宇宙の音、コーラスの謎を解く\*

大村善治\*\*

## 1. はじめに

宇宙空間は、物質の第4の状態と呼ばれている電離気体であるプラズマで満たされています。太陽を中心とする太陽系の惑星間空間には、太陽から吹き出す磁場とプラズマからなる太陽風が流れています。さらに太陽および惑星から放射される電波や宇宙線と呼ばれる高エネルギーの粒子が飛び交い、電波の一部は地上でも受信できて可聴域の音として聞くこともできます。本稿では、過去100年余りの電離層とその電波伝搬の研究、過去50年の宇宙開発の研究を、宇宙空間での電波研究の歴史をたどりつつ、宇宙から聞こえてくるコーラスと呼ばれる音（電波）の発生機構と、それに関連する宇宙環境の問題について解説します。

## 2. ホイッスラーと地球磁気圏

19世紀後半から20世紀前半にかけて通信は電気を流す銅線ケーブルを張り巡らして行う有線の電信や電話が主な通信手段として広く使われていましたが、欧米の高緯度地域では、この電信電話の信号に、時折、口笛のようなきれいな音が混じることが知られていました。これは、20世紀前半においては、大気中で発生する雷放電によって発生する電波の一部が銅線ケーブルに混信しているものと考えられていました。その具体的な発生機構は理解されていませんでしたが、口笛に似た音の特徴からホイッスラーと呼ばれていました。

1953年にストーレー(L. R. O. Storey)<sup>1</sup>がこのホイッスラーは地球の磁力線に沿って北半球から南半球、南半球から北半球と伝搬しており、周波数によって伝搬速度が異なり、周波数の低い電波程、伝搬速度が遅くなるために、高い音から低い音へと変化する口笛のような音になることを定量的に解明しました(図1)。この伝搬路の解析から電離層の高度(100 km～400 km)をはるかに超えた高い空間にまで電子密度の高い領域が存在していることを発見しました。この当時は磁気圏という言葉はありませんでしたが、地球の磁力線と共に電離気体が存在していることを発見したのです。宇宙開発は1957年にソ連が打ち上げられた最初の人工衛星であるスプートニクから始まりましたが、それよりも5年も早くに、地上での電波観測のみから宇宙空間に磁力線と共に電離気体が広がっていることを見出したことは大変見事な研究です。

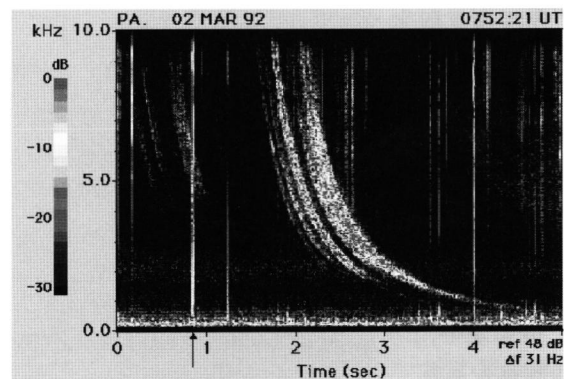


図1：地上で観測されたホイッスラー（スタンフォード大学 VLF 研究グループの WEB ページより）

\* 2009 年 10 月 2 日作成 本稿は第 6 回生存圏研究所公開講演会（2009 年 10 月 24 日開催）で発表したものである。

\*\* 〒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@rish. Kyoto-u.ac.jp .

その後、このホイッスラーの地上観測が盛んに行われましたが、特筆すべきは、1963年にカーペンター(D. L. Carpenter)<sup>2</sup>が、異なるホイッスラーの伝搬時間の違いから地球と一緒に自転しているプラズマ圏の境界であるプラズマポーズの存在を発見しました。プラズマ圏の外側には、地球の自転ではなく太陽から流れてくる太陽風の方方向になびくように形成される磁気圏が存在しています。(図2)このように電波の解析を通じて、地球磁気圏の3次元的な構造(図2)が明らかになってきたのです。

1964年以降スタンフォード大学のヘリウェル(R. A. Helliwell)<sup>3</sup>を中心とする研究グループにおいてホイッスラーモード波の地上観測および地上のモールス信号の一部が磁気圏に伝わる過程から新たに発生する波の地上観測とその研究が盛んに行われました。1966年にはガーネット(D. Gurnett)<sup>4</sup>が人工衛星観測によってVLFヒスを報じ、1974年にはツルタニとスミス(B. T. Tsurutani and E. J. Smith)<sup>5</sup>が人工衛星によるコーラス放射の観測を報じました。1974年にはナン(D. Nunn)<sup>6</sup>によってホイッスラーモード非線形波動粒子相互作用の理論解析がなされました。

京都大学においても、1966年に木村磐根(I. Kimura)<sup>7</sup>によってホイッスラーモード波の伝搬を計算機で解くレイトレーシングや、1976年に松本紘(H. Matsumoto)等<sup>8</sup>によってホイッスラーモード波動粒子相互作用の計算機シミュレーションが先駆的に行われました。1980年以降、世界中で衛星観測・理論・シミュレーションを駆使して多くの研究が活発になされてきていますが、京都大学の研究グループも世界をリードする多くの研究成果を出してきています。

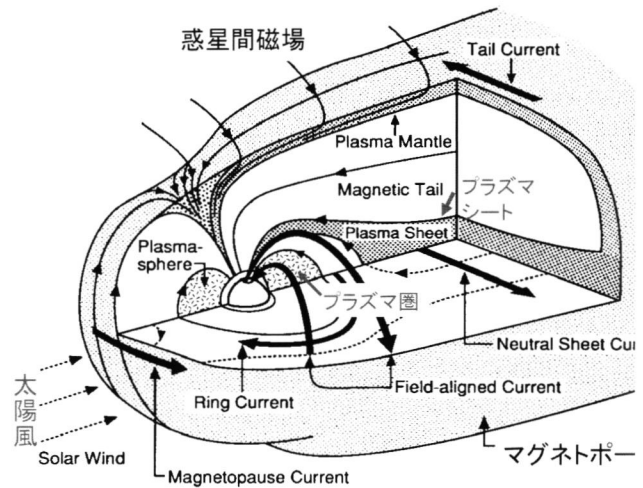


図2 地球磁気圏

### 3. コーラス

先に述べたストーレーの論文には付録があって、雷放電によるホイッスラーと同様の耳で聞こえる周波数の電波ですが、その音色が全く異なる電波についても報告されています。この電波は、さらにその音色によって以下の3つに分類されています。

- (1) 夜明け頃に聞こえる鳥の鳴き声に似たドーン・コーラス
- (2) 連続的なヒス
- (3) 単発的に周波数が上昇するライザー

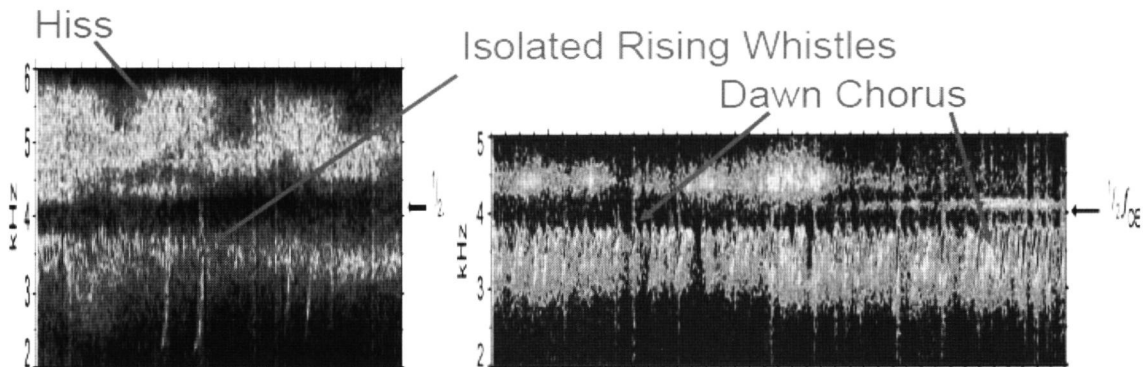


図3 磁気赤道付近で観測された波動の周波数スペクトル<sup>9</sup>

ドーン・コーラスは地球の磁場が乱れている状態の時の夜明け頃に、1秒以下の短時間に周波数が上昇するパターンが頻繁に繰り返されるもので、この電波をオーディオアンプを通して音に変換すると、まさに朝の鳥のさえずりのような音色のように聞こえます。このコーラスに伴って、連続的なヒスも聞こえます。また、単発的なライザーの発生頻度は低く、午後や夕刻に時折聞こえるものであると記述されています。これらの電波は英国のケンブリッジで受信されたものですが、最近では、宇宙空間を飛翔する人工衛星によって受信することができます。図3にクラスター衛星で観測されたコーラス放射の例<sup>9</sup>を示します。最初の部分には強いライザーが2つ発生しています。そのあと、5 kHz以上の周波数の高い部分にヒスが表れて同時に、4 kHz以下の部分にドーン・コーラスが表れています。

#### 4. サイクロトロン共鳴と線形成長率・準線形理論

コーラスの発生機構は長年の謎でした。地球磁気圏に磁気嵐等で注入される高エネルギー電子ビームによって励起されるホイッスラーモード(whistler-mode)と呼ばれる電磁波が磁力線に沿って伝搬する過程で周波数変化してゆくものであると一般的には考えられていました。ホイッスラーモード波というのは、磁力線に沿って伝搬する電磁波です(図4b)。その電界と磁界のベクトルが磁力線方向に対してお互いに直交しており(図4c)、その電磁界のベクトルが波の周波数で磁力線の周りの回転しながら伝わってゆきます。このホイッスラーモード波と磁力線に巻きつくように運動する高エネルギー電子とは共鳴してエネルギーのやり取りをすることが可能です。電子が磁力線の周りを旋回する運動のことをサイクロトロン運動と呼び、1秒間に磁力線を旋回する回数をサイクロトロン周波数と呼びます。ホイッスラーモード波の電磁界のベクトルはサイクロトロン周波数よりも低い周波数で磁力線の周りを回転します。サイクロトロン周波数の0.1~0.7倍程度の周波数が多く見られます。高エネルギー電子は磁力線の周りを旋回すると同時に、磁力線に沿って自由に動くことが可能です。電子が波の進行方向とは逆の方向に進んでいると電子から見た波の周波数はドップラー効果によって高くなります。これがサイクロトロン周波数に一致すると、電子のサイクロトロン運動と波の電磁界が同じ周波数で旋回することになり、波の電界により電子が加減速されて、波の間でエネルギーのやり取りが起こります。これがサイクロトロン共鳴です。(ドップラー効果というのは、移動している音源の音の周波数が変化する現象です。日常の経験を例にとると、救急車のサイレンの音の高さが近づいて来るときには高く、離れてゆくときには低くなる現象です。)

1966年にケネルとペツェック(C. F. Kennel and H. E. Petschek)<sup>10</sup>が、ホイッスラーモード波の線形成長率の理論式を導きました。線形成長率というのは、ある特定の周波数の波において、波の振幅が小さく、高エネルギー粒子との相互作用の結果表れる速度分布関数の変化が振幅に比例するという前提のもとに導かれるものです。一般に、プラズマ中を伝搬する電磁波は、電流から放射され、またその振幅は、電流によって変化してゆきます。ホイッスラーモード波の場合、この電流は波とサイクロトロン共鳴する電子によって形成される共鳴電流です。波の振幅と共鳴電流の大きさ比例して変化するとき、この相互作用は線形であるといいます。波の振幅が小さい段階では、線形関係がなりたっています。しかし、波の振幅が大きくなってくると、比例関係が崩れて非線形となりますが、線形関係が成り立つ小振幅の波においては、周波数の異なる複数の独立した波を同時に考えることが出来ます(重ね合わせの原理)。

サイクロトロン共鳴する際の電子の磁力線沿いの速度を共鳴速度と呼びます。共鳴速度はサイクロトロン周波数が最も小さい時に、最小値を取ります。サイクロトロン周波数は磁力線の磁場強度で決まりますが、地球の双極子磁場の強度がもっとも小さくなるのは磁気赤道です。したがって、磁気赤道において共鳴速度は最も小さくなり、通常、高エネルギー電子の速度分布関数は、速度の小さい部分ほど密度が高くなる分布を形成していますので、磁気赤道面付近で波と共鳴することのできる高エネルギー電子の密度は最も高くなります。そのため、磁気赤道面付近での線形成長率が最大となります。

周波数が変化するコーラスを、周波数の異なる多数のホイッスラーモード波で代表させて、線形成長率に基づき、コーラスによる高エネルギー電子の分布関数の変動を推定する手法がよく使われてきました。この理論を準線形理論(Quasi-Linear Theory)と呼びます。この時、個々の波は互いに独立した波なので、波の電磁界のベクトルの方向を表す位相に秩序はなく、ばらばらでランダムな状態にあると想定されています。このような波をインコーヒーレントであると表現します。しかし、コーラスは、きれいにそろった位相からなるコーヒーレントな波なので、この準線形理論に基づく推定は、あくまで近似的な手法であり、コーラスの物理過程を正しく表現するものではありません。

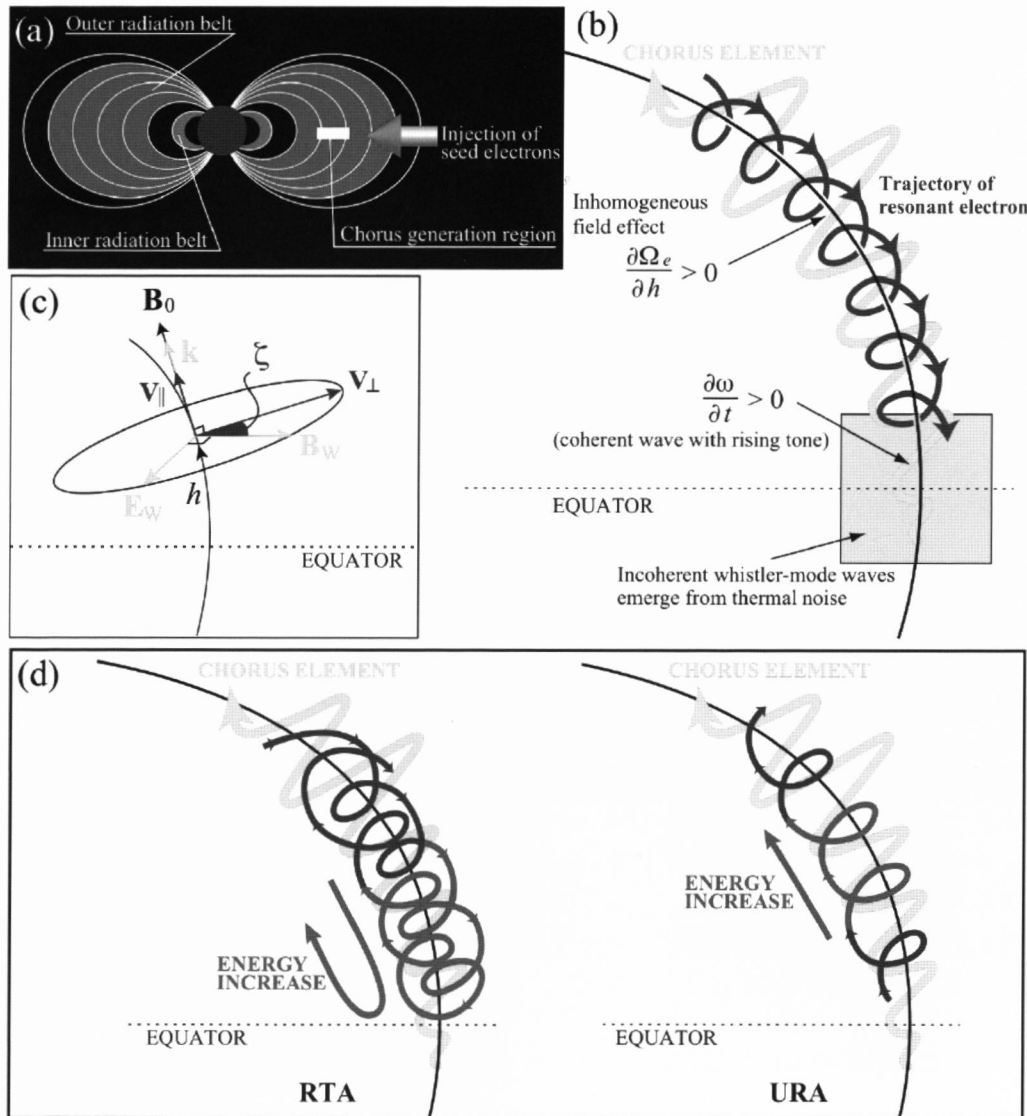


図4 ホイッスラーモード波動粒子相互作用の原理

## 5. 非線形成長によるコーラス放射

2007年に我々生存圏研究所の研究グループは非常に大規模な計算機シミュレーションを行い、周波数が大幅に上昇するコーラス放射(図5a)を再現することに成功しました<sup>11,12</sup>。これは、高エネルギー

一粒子を粒子モデルとして扱い、波の伝搬を支えるコールド電子を流体として扱う電子ハイブリッドコードによる計算機シミュレーションです。2008年には、高エネルギー電子とコールド電子の両方共、粒子モデルとして扱う電磁粒子コードによっても再現することに成功しました（図 5b）<sup>13</sup>。これらの計算結果として得られた電磁界および高エネルギー電子の時空間のデータを詳細に解析することによって、コーラスの発生機構を解明することができました。このシミュレーションから明らかになったことは、コーラスを構成する波は、周波数の異なるランダムな位相の波の重ね合わせではなく、一つの明確な位相をもったコーヒーレントな波です。通常の電磁波のように位相が一定の周波数で回転するのではなく、回転速度が徐々に変化してゆくために周波数が変化するので。

磁気嵐およびサブストームと呼ばれる地球磁場の乱れがあるときには、地球磁気圏の尾部から内部磁気圏へと高エネルギー電子が輸送されます（図 4a）<sup>14</sup>。この時、電子のピッチ角は赤道面付近で立っており、磁場に垂直な方向の温度の方が、平行な方向の温度よりも大きくなっています。これを温度異方性と呼びますが、この温度異方性があると磁気赤道付近に先に述べたようにホイッスラーモード波の線形成長率は磁気赤道面付近で最大となり、磁気赤道面付近でコーラスの種となるホイッスラーモード波が線形成長率にしたがって形成されます。最初、波は熱雑音から徐々に成長してきますので、異なる周波数の波が重ねあわされたインコーヒーレントな波ですが、線形成長率が最大となる周波数におの並みの振幅が最も大きくなり、波は次第にコーヒーレントな波へと変化してゆきます。赤道面付近で形成されるこのコーヒーレントな波の振幅がある閾値を超えると線形成長とは全く異なる非線形成長が起こります<sup>15</sup>。

コーヒーレントな波の電磁界は共鳴粒子を共鳴速度の周りに捕捉することができるポテンシャル構造を形成することができます。このポテンシャル構造は均質な媒質中で波の周波数が一定の場合には、波の磁界ベクトルについて対称形をしており、このポテンシャルの周りを移動する電子の運動により形成される共鳴電流は波の磁界ベクトルと平行に流れます。一般に電磁波の電界ベクトルは磁界ベクトルに対して垂直方向にあるため、共鳴電流と電界ベクトルが垂直になり、電子は波とエネルギーをやり取りすることができません。これは、電子が加速減速を受けるには、電界ベクトルの方向に運動する時だけであるからです。

このポテンシャル構造の対称性を崩して波とエネルギーの授受を起こさせるには、不均一な磁場構造または周波数の時間変化が必要になります。磁気赤道付近では、磁場は一定で均一ですので、唯一周波数変動のみが、ポテンシャル構造の対称性を崩す要因となります。周波数が上昇するように波の位相が加速度的に変化すると、このポテンシャル構造の対称性が破れて、かつ共鳴電子が波の電界によって減速されてエネルギーを失うように作用します。これが非線形成長の原理です。この非線形成長率が最大となるように位相が自然に選ばれて、その波が成長して

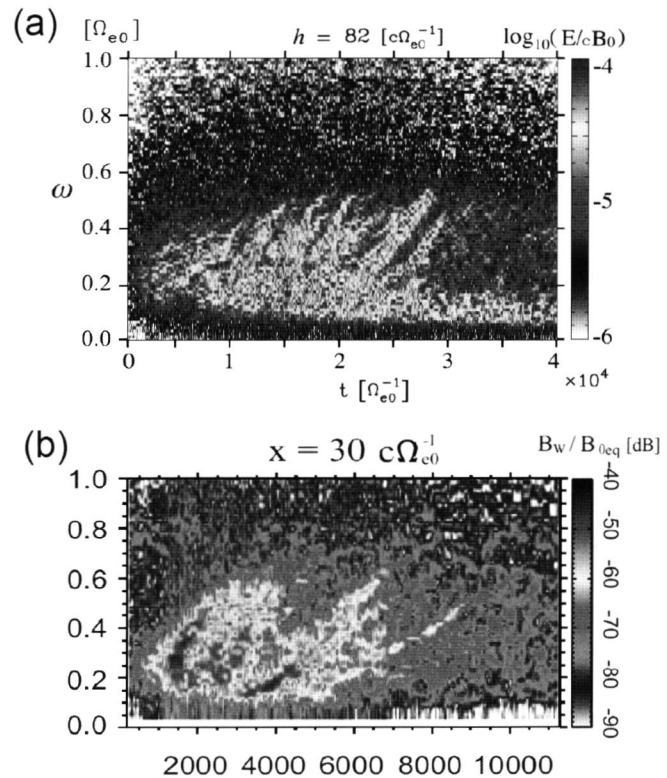


図 5 計算機シミュレーションで再現されたコーラス放射

ゆきます。この位相変化は波の振幅に比例することを理論的に示すことができます<sup>11</sup>。また、成長率を決定する共鳴電流の大きさは、振幅の平方根に比例します。この点において、非線形成長は、振幅と共鳴電流が比例する線形成長とは全くことなつた原理によるものであることがわかります。

しかし、周波数が上昇するコーヒーレントな波が、すべてコーラス放射へと成長できるわけではありません。波の振幅がある値（閾値）以上にならないとダメです。このコーラス放射の振幅の閾値は波の成長が磁気赤道で起こるための条件から導かれます<sup>15</sup>。空間的に固定された点で起こる不安定性は、絶対不安定性と呼ばれ、波が伝搬する過程で振幅が成長する不安定性（伝搬不安定性）と区別されます。コーラス放射の発生で重要な条件は、磁気赤道において絶対不安定性が起こることです。不安定性で成長した波のエネルギーはその波の群速度によって運ばれてゆくため、場所を固定して波の振幅変化を観察すると、伝搬によってやがて波の振幅は減衰してゆきます。この時、波の振幅の空間勾配の大きさによって減衰の割合がきまり、絶対不安定が起こるためには、この減衰率よりも大きな成長率でもって波が成長しなければならないのです。

ここで、波の振幅の空間勾配にも、ある必要条件が存在します。波が磁気赤道から離れて伝搬してゆく過程において、波の振幅と磁場の空間勾配が比例すると仮定すると、最大の非線形成長をおこすようにポテンシャル構造の対称性を崩した状態で維持することができます。詳しくは参考文献<sup>15</sup>に譲るとして、コーラスが非線形成長をするための振幅の閾値は、地球の双極子磁場の特性で決定されることを示すことができます。磁気赤道で絶対不安定により励起された波動は、周波数が上昇するコーヒーレントな波で、かつ磁気赤道から伝搬する過程においても、引き続き非線形成長をしながら、さらに大きな振幅をもった波として高緯度に伝搬してゆきます。高緯度に伝搬するにつれて、サイクロトロン周波数が大きくなり、共鳴速度も大きくなり、高エネルギー電子の分布関数の形状から、共鳴する電子の数が少なくなるために、やがて共鳴電流を形成することができなくなります。そのため、非線形成長は止まることになります。

## 6. 放射線帯とコーラスによる電子加速

地球の双極子磁場は高エネルギーの電子やイオンを捕捉することができます。磁気赤道面において地球の中心から地球半径からの距離にして地球半径の1.2倍から7倍程度の領域には、特にエネルギーの高い粒子が捕捉されたドーナツ状の領域が形成されており、これを放射線帯または発見者の名にちなんでバン・アレン帯と呼んでいます（図6）<sup>16</sup>。地球半径の2倍～3倍程度のところにあるスロットと呼ばれる粒子の欠損した領域をはさんで内帯と外帯からなります。外帯を構成する

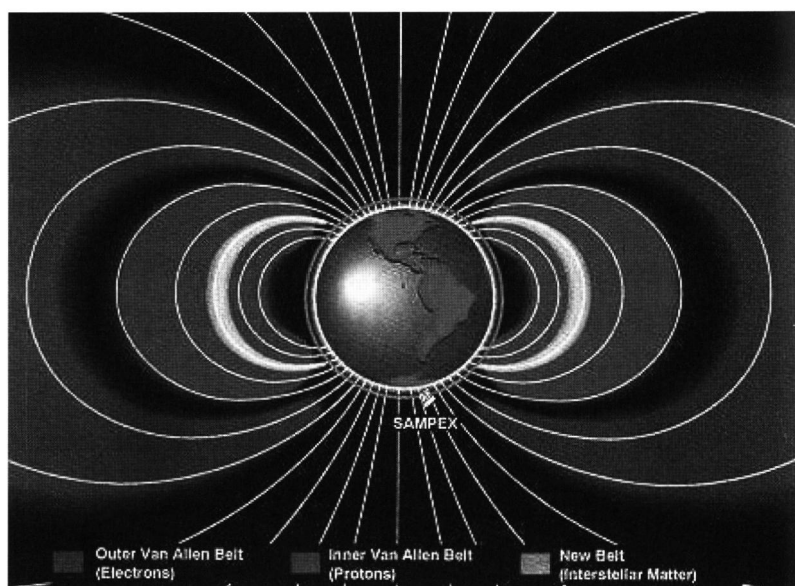


図6 地球の放射線帯(バン・アレン帯)<sup>16</sup>

のは1 MeV以上の相対論的なエネルギーをもつ電子です。この電子はキラー・エレクトロンともよばれ地球を周回する人工衛星や宇宙ステーションの電子機器に障害をあたえたりします。内帯にはさらに大きなエネルギーの電子および陽子等の正イオンの原子が存在しています。放射線帯の外帯の電子



フラックスは磁気嵐があると大きく変動します。太陽表面でフレアと呼ばれる爆発現象がおけるとそれから、2, 3日して地球の磁場が大きく変動することがあります。これを磁気嵐と呼びますが、この時、放射線帯の相対論的な電子の大部分は消えてしましますが、その後数日間かけて次第に相対論的な電子フラックスが形成されます。その原因の一つとしてコーラス放射が考えられます。コーラス放射は非常に幅広いレンジのエネルギーをもつ電子と共鳴することができ、特に速度が光速に近づいて、相対論効果が顕著になってくると、RTA<sup>17</sup> および URA<sup>18</sup> と呼ばれる非常に効率の良い加速

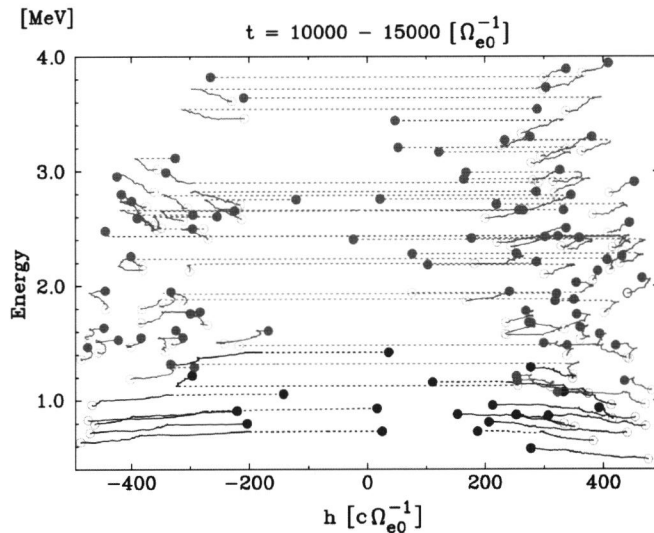


図7 コーラス放射の計算機シミュレーションにおける相対論的粒子加速 (Kato et al., 2008)<sup>13</sup>

過程 (図4 d) が起こることを、我々の最近の研究で明らかにしました。コーラスの発生と同時に、一部の粒子は加速され (図7)、磁場に対する速度ベクトルの角度 (ピッチ角) が大きくなって、磁場に巻きつくような運動が主流となって磁気赤道付近に安定して捕捉されるように変化します。コーラスは繰り返し発生しますので、この加速過程が繰り返されて、次第に放射線帯の相対論的電子フラックスが形成されます<sup>19</sup>。

一方、コーラス放射が発生するときには、大部分の高エネルギー電子は減速されて、ピッチ角が小さくなり、磁場に沿って運動するように変化してゆきます。これらの減速される高エネルギー粒子の運動エネルギーの一部がコーラス放射の電磁界のエネルギーに変換されるわけです。ピッチ角が小さくなり、磁力線方向に速度成分が向けられると、高緯度において磁力線からの捕捉から解放されて、極域の電離層に降下してゆきます。この電子が地球の大気を構成する窒素や酸素の分子・原子と衝突すると発光し、これが高緯度地方でオーロラとして見えるのです。

## 7. むすび

コーラスは、宇宙から聞こえてくる不思議な音として、研究されてきましたが、最近では、地球を取り巻く宇宙空間 (ジオスペース) を利用する上で大きな障害となる放射線帯の形成にも関与していることがわかり、新たな関心を呼んでいます。放射線帯の電子フラックスの変動を定量的に推定するために、最近のジオスペース研究においては、人工衛星による観測計画、理論・シミュレーション研究が盛んにおこなわれています。ここでは、紹介しませんでした、周波数が上昇するだけでなく下降するフォーリングトーンを示す電波も観測されています。この発生機構については、まだ十分に理解されておらず、現在、我々はその理論・シミュレーション研究に取り組んでいます。

## 参考文献

- 1) Storey, L. R. O., An investigation of whistling Atmospherics, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 246, 908, pp. 113-141, 1953.
- 2) Carpenter, D., Whistler Evidence of a 'Knee' in the Magnetospheric Ionization Density Profile, J.

- Geophys. Res., 68(6), 1675–1682, 1963.
- 3) Helliwell, R. A., J. Katsufurakis, M. Trimpi, and N. Brice, Artificially stimulation very-low-frequency radiation from the ionosphere, J. Geophys. Res., 69, 11, 1964.
  - 4) Gurnett, D., A Satellite Study of VLF Hiss, J. Geophys. Res., 71(23), 5599–5615, 1966.
  - 5) Tsurutani, B. T., and E. J. Smith, Postmidnight chorus: A substorm phenomenon, J. Geophys. Res., 79(1), 118, 1974.
  - 6) Nunn, D., A self-consistent theory of triggered VLF emissions, Planetary and Space Science, 22, 349–378, 1974.
  - 7) Kimura, I., Effects of ions on whistler-mode ray tracing, Radio Sci., 1(New Series), 269–287, 1966.
  - 8) Matsumoto, H., Y. Yasuda, Computer simulation of nonlinear interaction between a monochromatic whistler wave and an electron beam, Phys. Fluids, 19, 1513, 1976.
  - 9) Santolik, O., D. A. Gurnett, J. S. Pickett, M. Parrot, and N. Cornilleau-Wehrlin, Spatio-temporal structure of storm-time chorus, J. Geophys. Res., 108(A7), 1278, doi:10.1029/2002JA009791, 2003.
  - 10) Kennel, C. F., and H. E. Petschek, Limit on stably trapped particle fluxes, J. Geophys. Res., 71, 1, 1966.
  - 11) Katoh, Y., and Y. Omura, Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere, Geophysical Research Letters. Vol. 34, L03102, doi:10.1029/2006GL028594, 2007.
  - 12) Omura, Y., Y. Katoh, and D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, Journal of Geophysical Research, vol. 113, A04223, doi:10.1029/2007JA012622, 2008.
  - 13) Hikishima, M., S. Yagitani, Y. Omura, and I. Nagano, Full particle simulation of whistler-mode rising 1 chorus emissions in the magnetosphere, J. Geophys. Res., 114, A01203, doi:10.1029/2008JA013625, 2009
  - 14) Katoh, Y., Y. Omura, D. Summers, Rapid energization of radiation belt electrons by nonlinear wave trapping, Ann. Geophys., 26, 3451–3456, 2008.
  - 15) Omura, Y., M. Hikishima, Y. Katoh, D. Summers, and S. Yagitani, Nonlinear mechanisms of lower-band and upper-band VLF chorus emissions in the magnetosphere, J. Geophys. Res., 114, A07217, doi:10.1029/2009JA014206, 2009.
  - 16) From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays, Steven T. Suess, Bruce Tadashi Tsurutani, Editors, American Geophysical Union, Special Publication Vol. 50, 1998.
  - 17) Omura, Y., N. Furuya, D. Summers, Relativistic turning acceleration of resonant electrons by coherent whistler-mode waves in a dipole magnetic field, Journal Geophysical Research, Vol. 112, A06236, doi:10.1029/2006JA012243, 2007.
  - 18) Summers, D., and Y. Omura, Ultra-relativistic acceleration of electrons in planetary magnetospheres, Geophys. Res. Lett., 34, L24205, doi:10.1029/2007GL032226, 2007.
  - 19) Furuya, N., Y. Omura, and D. Summers, Relativistic turning acceleration of radiation belt electrons by whistler mode chorus, Journal of Geophysical Research, vol. 113, A04224, doi:10.1029/2007JA012478, 2008.