

恩藤忠典・丸橋克英,  
宇宙環境科学,  
オーム社, 2000

よりずっと小さい)の熱的プラズマ  
く、電子とイオン...  
の場合、 $\theta$ を波の法線( $k$ 方向)が磁場となす角とすると、 $\beta < 1$ の類の波の分散式が  
得られる。 $\omega^2 = k^2 V_A^2 \cos^2 \theta$ のモードは熱運動に関係なく、冷たいプラズマ近似の  
アルフベン波と同じである。波に伴うイオンの運動方向が、静磁場と波の法線( $k$   
方向)を含む面に垂直なので、シアアルフベンモード (shear Alfvén mode) と  
も呼ばれる。他の二つの波のモードの分散式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega}{k} &= V \\ V^2 &= \frac{V_A^2 + V_s^2 \pm [(V_A^2 + V_s^2)^2 - (2V_A V_s \cos \theta)^2]^{1/2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8.55)$$

で表され、いずれも磁気音波 (magnetosonic waves) である。 $\beta < 1$ の磁気圏の  
大半の領域では、複号の正符号は速い磁気音波 (fast magnetosonic wave)、負  
符号は遅い磁気音波 (slow magnetosonic wave) と呼ばれる。 $\theta \neq 0^\circ$ のときの二  
つの磁気音波によるイオンの運動方向は  $B$  と  $k$  を含む面内にあり、波の磁界  $b$   
が波の進行方向に振動する ( $k \cdot b \neq 0$ ) 縦波的特性を示し、イオン速度  $v$  が  $k$  方向  
の成分をもつために、二つの磁気音波モードはプラズマ粒子の熱運動の影響を強  
く受ける。 $\beta \ll 1$ では  $V_s^2/V_A^2 \ll 1$ となり、 $V = V_A$ のアルフベン波となる。 $\beta \gg 1$ で  
は  $V_s^2/V_A^2 \gg 1$ となり、 $V = V_s$ の音波となる。

式(8.55)の  $V_A$  と  $V_s$  との大小関係は、 $\beta < 1$ のときの  $V_A > V_s$  から  $\beta > 1$ の  
ときの  $V_A < V_s$  へ逆転する。したがって、 $\beta < 1$ のときの複号に対応する各モードの  
位相速度の大小関係は、 $\beta > 1$ では逆転する。アルフベン波は左回り偏波モードに  
つながる磁力線に沿って伝わる横波であり、磁気音波は右回り偏波モードにつな  
がる圧縮性の縦波的波動である。

### 8.11.3 地磁気脈動

磁気流体波の現象として、周期が0.2~600 s(周波数が5~0.002 Hz)、振幅が  
10 nT またはそれ以上の地磁気脈動 (geomagnetic pulsation) がある。地磁気脈  
動には、地球磁場の水平成分の正弦的なきれいな波形が、数十分間以上続く連続  
的な Pc 脈動と、継続時間の短い不規則な波形の Pi 脈動があり、周期の短いほう  
から Pc 1~Pc 5, Pi 1~Pi 2 と分類されている。周期が比較的長い数十秒~数分の

Pc 脈動は、朝方から夕方までの昼間によく起こり、観測点付近の地球磁力線の振  
動を表す。Pc 脈動の周期  $T$  は、アルフベン波の地球磁力線に沿う往復時間、

$$T_A = 2 \int \frac{ds}{V_A} = K \int \left( \frac{\sqrt{\rho}}{B} \right) ds$$

の整数分の1に等しい。ただし、 $K$ は定数、 $\rho$ は質量密度である。 $T_A$ は地球磁力  
線に沿う磁場とプラズマ密度の分布に依存するが、地上の磁気緯度が  $55^\circ \sim 60^\circ$   
( $L=3 \sim 4$ ) で  $50 \sim 100$  s,  $63^\circ \sim 70^\circ$  ( $L=5 \sim 8.5$ ) で  $150 \sim 600$  s のオーダーである。

低緯度磁気圏の  $L=3 \sim 4$  の昼間で、Pc 4~5 の地球磁力線に垂直方向の磁界成  
分 ( $b_{\perp} \gg b_{\parallel}$ ) の振動に伴って、84~230 keV のイオン流束密度の振動が逆相(位相  
差  $180^\circ$ ) で同時に観測される。これはアルフベン波がプラズマイオンの局所的振  
動を伴う証拠であり、地磁気脈動の磁界と正イオンとの地球磁力線に沿う磁気ド  
リフトバウンス共鳴、 $m\omega_d - \omega = \omega_b$  によって説明できる。ただし、 $\omega$  は Pc 脈動の  
角周波数、 $\omega_b$  は地球双極子磁場中のイオンのバウンス(地球磁力線に沿う)角周  
波数、 $\omega_d$  はイオンのバウンス平均した磁気ドリフト角周波数、 $m$  は方位角波数で  
ある。脈動周波数の  $f=0.004$  Hz,  $m=-110$  (西向き) の場合、イオンの共鳴エ  
ネルギーは 150 keV である [Takahashi, 1996]。Pi 2 脈動は磁気圏あらし  
(magnetospheric substorm) 開始時によく起こり、磁気圏の地球磁力線を横切っ  
て伝搬し、静止衛星と中低緯度の地上でしばしば観測される。

## 8.12 惑星からの電波

短波通信の妨害電波を監視していた米国ベル研究所の K. Jansky は毎日 1 回  
必ず東から現れ西へ消える 20 MHz 付近の電波を 1932 年に発見した。この電波  
は毎日同じ時間帯に銀河中心の射手座座の方向から到来する地球外電波である [森  
本, 1973]。木星の 22 MHz の強い電波バーストは、1950 年代はじめに Burke と  
Franklin によって発見された [Burke, 1955]。その後地上と Voyager 衛星などの  
電波観測により、磁場のある木星、土星、天王星、海王星から、地球磁気圏の電  
波放射に似た電波が観測された。磁場のない水星、金星、火星からも、大気中の  
雷放電に伴う電波放射、およびそれらの惑星のパウショック (bow shock) 付近  
で、静電的電波が惑星周回衛星によって観測された [Gurnett, 1993b]。

### 8.12.1 惑星と地球の電波スペクトル

図 8.20 は地球軌道 (1 AU) における受信電力束密度に換算した、地球、木星、

土星、天王星、海王星からの強い電波の周波数スペクトルである。これらの強い惑星電波は AKR と同様に、電子サイクロトロンメーザ不安定により発生すると考えられる。木星電波は他の惑星の電波の中で最大で、AKR より3桁も大きい。電子サイクロトロンメーザ不安定による木星デカメータ電波の周波数は 3-20 MHz で、AKR の 50-500 kHz、および他の惑星電波の周波数より2桁以上高い [Gurnett, 1992]。すなわち図 8・20 の惑星電波が AKR と同様に、局所的電子ジャイロ周波数  $f_H$  付近に発生するとすれば、木星の磁場が他の惑星に比べて非常に強いことを意味する。木星（太陽からの距離：5.20 AU）は非常に強い磁気双極子能率、 $1.5 \times 10^{24} \text{ G/m}^3$  (G はガウス、 $10^{-4} \text{ Wb/m}^2$ ) をもつ。木星と同様に他の外惑星も地球より強い磁場をも

つ、各惑星の磁気能率は、木星 (0.39 AU) が  $4.0 \times 10^{16} \text{ G/m}^3$ 、地球 (1.00 AU) が  $7.9 \times 10^{15}$ 、土星 (9.54 AU) が  $4.3 \times 10^{15}$ 、天王星 (19.19 AU) が  $4.2 \times 10^{15}$ 、海王星 (30.06 AU) が  $2.0 \times 10^{15}$  である。木星、地球、木星、土星は自転軸と磁気軸とが近いが、天王星の磁気軸は太陽方向から数度以内であり、近似的に太陽風の方向にある。また海王星の磁気軸は自転軸と  $60^\circ$  をなし、回転ごとに磁気圏を振り回している。水星の磁場は弱く、小型の磁気圏が観測されている。

### 8・12・2 惑星電波の発生機構

惑星磁気圏のもう一つの強い電波として、周波数  $f_{\text{vms}} \approx (s+1/2)f_H$  の準静電的電子サイクロトロン放射 ( $s$  は整数) の強い連続性電波がある。地球の静電的連続性電波は、プラズマポーズの磁気赤道面付近で発生し、プラズマポーズと磁気圏境界との間に捕捉されている。この連続性電波は木星、土星、天王星、海王星で

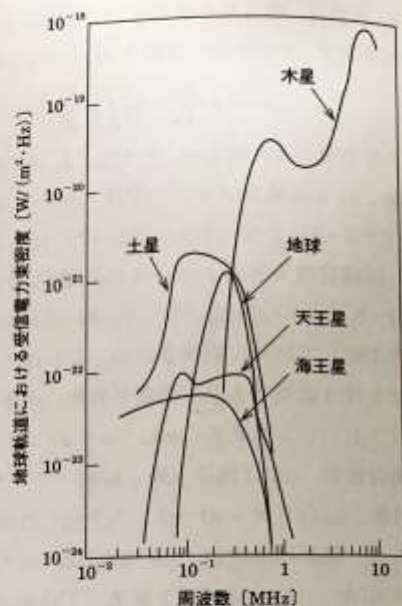


図 8・20 地球、木星、土星、天王星、海王星からの電子サイクロトロンメーザ放射の地球軌道 (IAU) における受信電力束密度の周波数スペクトル [Gurnett, 1992]

も各惑星磁気圏の赤道面付近で、ピッチ角  $90^\circ$  付近に極大をもつ異方的低エネルギー電子とともに頻繁に観測される。これは赤道面付近の低エネルギー電子分布の、ロスコーンの異方性によって発生した  $f_{\text{vms}}$  付近の静電波が、Zモードで伝搬して、プラズマ密度勾配の大きい領域で L-O モードの電波に変換されたと思われる。この電波は磁気赤道面と  $\alpha = \pm \tan^{-1}(f_H/f_p)^{1/2}$  をなす2方向に放射される [Jones, 1980]。

惑星周辺を通過した Voyager-1 と Voyager-2, Ulysses, Galileo, および Phobos-2 によって、磁気圏のある木星、土星、天王星、海王星で、地球と同様なホイスラモードの VLF 電波が観測された。これらのホイスラモード電波の周波数帯は地球とはほぼ同じであるが、時間スケールが異なるから必然的に  $df/dt$  も異なる。これらの外惑星の磁場は地球よりはるかに強いので、周波数が同じでもホイスラモードの VLF 電波と電子とのサイクロトロン共鳴相互作用に要する、電子エネルギーは地球の場合よりはるかに大きく、ELF ヒスでは 100-1000 keV、周波数の高いコーラスでは 1-10 keV である。ホイスラモードの ELF ヒスは木星、土星、天王星、海王星で観測され、コーラスは木星、土星、天王星で観測される。広い周波数帯の木星のオーロラヒスは、木星の衛星イオ (Io) から木星電離圏へ降下する電子流によって発生する。木星でもオーロラは活発に起こっている。木星と海王星では雷活動による  $D \sim 2 \times 10^4 \sqrt{S}$  の大きな分散のホイスラがよく観測され、南北半球間をホイスラが伝搬している。しかし木星と冥王星からのホイスラモードの電波は全く観測されていない。

## 8・13 マイクロ波帯の太陽電波

マイクロ波帯の太陽電波は、静かな太陽面からの熱放射の B 成分と、その上に太陽活動領域の高温 ( $4 \times 10^7 \text{ K}$ ) 高密度プラズマの熱放射 S 成分と、黒点の強い磁場に起因する磁気共鳴放射 S 成分が重なったものである。高温高密度のプラズマからの熱放射の分布はブラージの分布とよく合い、磁気共鳴放射の分布は黒点の分布とよく一致している。したがって S 成分の強度は黒点の出現とともに増加する。太陽電波の電力束密度 (flux density) は、

$$F = \frac{2k_B T_b \Omega}{\lambda^2} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})] \quad (8-56)$$

であり、 $T_b$  は電波源の輝度温度、 $\Omega$  は電波源の立体角、 $\lambda$  は放射電波の波長であ

る。電波干渉計によって電波源の詳細な輝度分布が測定できる。 $T_0$ はS成分が数百万Kで、電波バーストでは1億K以上になることもある。太陽電波バーストは数時間~数日間続くことがある。

## 8・14 太陽電波バースト

太陽フレアは、光球からアーチ状にコロナに伸びた磁力線のコロナループに関係して爆発的に起こる。太陽フレアは太陽活動の高い期間に、低緯度の黒点領域で発生する。磁気圏に磁気あらしを起こす、フレアまたはCME時に放出される太陽風プラズマ流はコロナから流出する(2章参照)。本節では、磁気あらしと密接に関係するコロナ付近で発生するメートル波帯の太陽電波バースト(solar radio burst)、および外部コロナと惑星間空間で発生する超長波帯の電波バーストの特性について主に解説する。

太陽X線の衛星観測によれば、フレア時にコロナループの頂部は2000万~5000万Kに加熱される。これに伴って加速された高エネルギー電子は、コロナループの磁力線に沿って高密度の彩層へ下降衝突し、硬X線、 $H\alpha$ 線の急激な増加を起こす。また電子降下で加熱した高温プラズマがコロナループ上部へ上昇して軟X線を放射する。通常の太陽コロナは、 $B^2/(2\mu_0)$ が $Nk_B T$ より大きい低 $\beta$ プラズマであるが、フレア時のプラズマ加熱、高エネルギー電子加速のときに、コロナループに高 $\beta$ プラズマが存在すると推測される。フレアモデルの主な考え方は次の二つである。

- (1) コロナループに沿って強い電流が流れると、電流の周りの環状磁場のためにコロナループの磁場がねじられ、コロナループに分裂(tearing)不安定が起こりプラズマ加熱と電子加速が生じる。
- (2) コロナループの相隣る反平行な磁力線が局所的に接触すると、X型の磁気再結合が起こり、プラズマ加熱と電子加速が生じる。

いずれにしても、フレア初期に高エネルギー電子とコロナループの強い磁場とが相互作用して、シンクロトロン放射が発生し、インパルス性のマイクロ波バーストが観測される[桜井, 1984]。

図8・21は大きな太陽フレアに伴う五つの型の太陽電波バーストの周波数(MHz)と時間(min)の動スペクトルの模式図である。ただし、すべての太陽フレアで、すべての型の太陽電波バーストが観測されるわけではない。大きな太陽

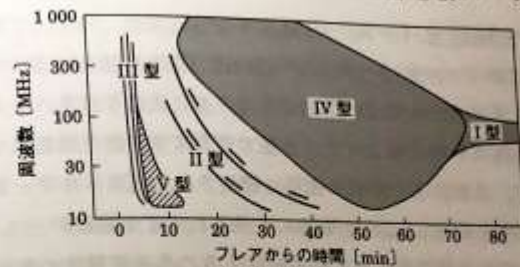


図8・21 大きい太陽フレアに伴って観測される太陽電波III型、V型、II型、IV型、I型バーストの電界スペクトルの模式図 (New Culoora Radiospectrograph Technical Report, IPS-TR-93-03, June 1993による)

フレアの場合、通常はまず急速に周波数が減少するIII型電波バーストが発生し、その低周波数側にV型電波バーストが現れる。それに引き続いて周波数が緩やかに減少するII型電波バーストが起こり、その後に広帯域のIV型電波バーストが続いて現れる。しかしフレア発生から数十分以上経て現れる狭帯域のI型電波バーストは、太陽フレアよりも活動的な黒点群に伴って主に発生する。黒点活動に伴い100~300 MHz帯(m級波長)で、数秒間強くなる狭帯域(5~10 MHz)のI型電波バーストが頻発する。図8・22は1993年10月2日に通信総合研究所平磯宇宙環境センターのHiRASで観測した、多くのスパイク状のIII型バーストと、0645 UT以後の広帯域(100~500 MHz)の連続性IV型バーストの電界スペクトルである[近藤, 1994]。

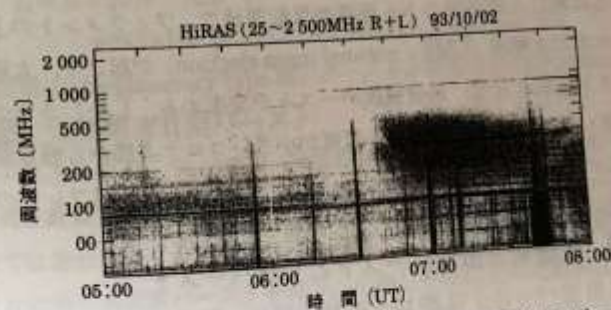


図8・22 1993年10月2日0645 UT以後に平磯宇宙環境センターのHiRASで観測された太陽電波IV型バースト(100~500 MHz)と頻発するスパイク状のIII型バーストの電界スペクトル[近藤, 1995]

## 8-11-1 太陽電波バーストの発生モデル

太陽フレアに伴うコロナループの反平行の磁力線の再結合によって電子が加速され、磁場のエネルギーが電子の運動エネルギーに変換される。上方に向かって飛び出す高エネルギー電子はコロナの下部でプラズマ振動を励起してIII型電波バーストを起こす。また、アーチ状の磁場に捕捉された高エネルギー電子が、コロナのプラズマ振動を励起し、これが電波に変換されてV型電波バーストが起こる。再結合した磁力線の集積で生じた、閉ループ上方の高速衝撃波の前面付近で加速された電子群が、周辺コロナのプラズマを励起して、メートル波(30~300 MHz)のII型電波バーストを起こす。一方突発的なフレアの輝きに伴う急激なエネルギー解放によって生じたコロナの高エネルギー電子は、広帯域のジャイロシンクロトロン放射のIV型電波バーストを発生する。

磁場の周りを運動する電子からのサイクロトロン放射  $\omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} = s\omega_H$  は、電子が相対論的速度になると、角周波数  $\omega$  はドップラー効果により広がり、放射電波は同じくらいの強度  $I_s$  の連続スペクトルになる。これをシンクロトロン放射 (synchrotron radiation) という。  $B$  (ガウス) を磁場、  $\alpha$  を電子のピッチ角、  $m$  を電子質量とすると、全放射強度は、

$$I_s \approx 1.62 \times 10^{-21} \left( \frac{WB \sin \alpha}{mc^2} \right)^2 \quad (\text{J/s}) \quad (8-57)$$

と表される。サイクロトロン放射の高調波は、次数  $s$  が高くなるほど磁力線に垂直方向へ放射され、磁場に垂直なビーム状のシンクロトロン放射となる。

## 8-11-2 CMEに伴う惑星間電波バースト

黒点群とは別に太陽磁場のNS極性の反転領域で、フィラメントの上昇活動に伴ってコロナガス噴出 (CME: coronal mass ejection) が起こり、太陽フレアの電波バーストに似たII型、III型電波バーストが発生する。しかしコロナガス噴出に伴う電波バーストは、磁場と電子密度が小さいコロナ上部から惑星間空間の領域で起こるので、CMEに伴う電波バーストの周波数帯は、太陽フレアの電波バーストより低い。またCMEは太陽のどの緯度でも起こる。

## 8-11-3 太陽電波III型バーストとV型バースト

太陽電波III型バーストは約10~20秒の間に、周波数が約500 MHzから10 MHzへ急速に下がる。その周波数変化率は100 MHz付近で30 MHz/sであり、10 MHz付近で約1 MHz/sである。III型バーストの継続時間は、単一の周波数で

は数秒間程度であるが、周波数が減少すると増加する。通常数個のIII型バーストが10秒程度の間をおいて一群として続いて発生する。III型バーストはフレアによって太陽コロナへ放出された、数~数百 keV の電子ビーム(速度:  $0.1c \sim 0.9c$ ,  $c$  は光速) が周辺の局所的電子プラズマ周波数  $f_p$ 、またはその高調波の  $2f_p$  の静電的ラングミュア波を励起し、このラングミュア波が非線形な三波パラメトリック過程によって、電磁波に変換されたものである。ほとんどの太陽フレアは  $30^\circ$  以下の低太陽緯度で起こるから、III型電波バーストは低緯度の現象である。

三波パラメトリック過程で相互作用する、静電的ラングミュア波、静電的イオン音波、および変換過程で発生する電磁波の周波数を、それぞれ  $f_L$ ,  $f_S$ ,  $f_R$ 、それらの波数を  $k_L$ ,  $k_S$ ,  $k_R$  とすると、エネルギーと運動量の保存則により、

$$f_L + f_S = f_R \quad \text{と} \quad k_L + k_S = k_R \quad (8-58)$$

が成り立つ [Gurnett, 1993a]。  $f_S \ll f_L \approx f_p$  だから、エネルギーの保存則により、発生する電磁波の周波数  $f_R$  は  $f_p$  より少し高い。ラングミュア波の波数  $k_L$  は電磁波の波数  $k_R$  よりずっと大きいので、式(8-58) から  $k_S \approx -k_L$  となる。すなわち、イオン音波はラングミュア波と波長が同程度で反対向きに伝搬している。III型バーストに続いて約200 MHz以下に現れるV型バーストは約1~3分間続く。

## 8-11-4 惑星間III型電波バースト

高エネルギー電子はコロナから惑星間空間へ太陽磁力線に沿って伝わり、局所的プラズマ周波数の惑星間III型バーストを励起する。VoyagerやPioneer衛星によって、

$$f_R \approx f_p = 9\sqrt{N} \quad (\text{cm}^{-3}) \\ \approx 285 \text{ kHz} (10^9 \text{ cm}^{-3}) \sim 1 \text{ MHz} (1.2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3})$$

の惑星間III型 (interplanetary type III) バーストが観測された [Gurnett, 1976]。

## 8-11-5 太陽電波II型バースト

II型バーストは約10~30分間に、周波数が約300~20 MHz付近まで緩やかに減少し、周波数減少率は100 MHz付近で約1 MHz/sである。II型バーストは特定周波数では数分間続くが、しばしば基本周波数の2倍の第二高調波バースト、定周波数では数分間続くが、しばしばそれ以上の高調波は観測されなおよびまれに第三高調波バーストを伴う。しかしそれ以上の高調波は観測されない。このようにII型バーストの周波数減少率は、III型バーストの約1/100である。この違いは両者の発生機構の違いによる。III型バーストは高エネルギー電子が太

陽コロナから磁力線に沿って高速で外へ流出するときに、周辺のプラズマを励起して周波数  $f_p$  の電波を連続的に発生する現象である。他方、II型バーストは太陽から流出するプラズマ雲に先行する磁気流体衝撃波が、電子密度の比較的低いコロナで周辺プラズマの  $f_p$ 、または  $2f_p$  のラングミュア波を連続的に励起して、それが電波へ変換されたものである [Gurnett, 1995]。III型バーストに比べて、II型バーストの開始周波数と周波数減少率は小さい。

II型バーストはプラズマ雲前方の衝撃波で励起されたラングミュア波に起因する。衝撃波の伝搬速度はIII型バーストを起こす高エネルギー電子よりはるかに遅く、また電子密度 ( $\propto n^2$ ) は太陽から離れるにつれて減少するから、II型バーストの周波数と周波数減少率はIII型バーストに比べて小さく、また太陽から離れるにつれて小さくなる。II型バーストの初期の周波数減少率から求めた、発生源の移動速度は  $1\,000\sim 2\,000\text{ km/s}$  であり、コロナ内の磁気流体衝撃波の伝搬速度と合う。

#### 8・14・6 惑星間II型電波バースト

Voyager, Pioneer 衛星によって観測されたII型バーストは、惑星間II型バーストと呼ばれている。惑星間空間のプラズマ密度は緩やかに太陽から外向きに減少し、太陽風速度は  $500\sim 1\,000\text{ km/s}$  と遅いから、惑星間II型バーストの周波数と周波数減少率は、太陽から遠ざかるにつれて小さくなる。地球軌道周辺ではII型バーストの周波数は VLF 帯になる。惑星間II型バーストは、CME によって放出されたプラズマのピストン駆動衝撃波 (piston driven shock) が励起したプラズマ振動が電波源と考えられている。CME はどの緯度でも起こるから、惑星間II型電波バーストの発生は太陽緯度に関係しない。

#### 8・14・7 太陽電波IV型バースト

太陽フレアの後半に現れるIV型バーストは、大別して広帯域 ( $25\sim 200\text{ MHz}$ ) で  $3\sim 45$  分間続く連続性放射の flare continuum, II型バーストの後の緩やかに周波数が減少する広帯域 ( $20\sim 400\text{ MHz}$ ) スペクトルの、30分から2時間続く連続性の移動性IV型バースト (moving Type IV)、および広帯域 ( $20\sim 1\,000\text{ MHz}$  以上) の連続性微細構造をもつ数時間から数日間続く静止IV型バーストがある。

広帯域の連続性放射は、黒点磁場内の高エネルギー電子からのジャイロシンクロトロン放射と思われる。静止IV型バーストはフレア時の巨大なコロナループからの放射であり、移動性IV型バーストはコロナを上昇する磁場ボトル内 (magnetic bottle) に捕捉された電子が励起したプラズマ振動に起因するといわれてい

る。移動性IV型バーストの電波源は数百  $\sim 2\,000\text{ km/s}$  の速度でコロナを上昇する。静止IV型バーストの円偏波特性と広帯域の連続スペクトルは、プラズマ雲の放出に伴う磁場内の高エネルギー電子からのジャイロシンクロトロン放射、または比較的低エネルギーの電子が励起したプラズマ波動に起因するものである。磁場内の準相対論的エネルギー以下の電子からの放射を、ジャイロシンクロトロン放射 (gyro-synchrotron radiation) という。相対論的エネルギーの電子からのシンクロトロン放射の太陽電波バーストは、まれなことである [McLean, 1985]。

太陽フレアエネルギーの大半は、プラズマ雲の放出とその前方の衝撃波の発生に消費される。これはフレア時の X 線、電波バースト、H $\alpha$  線などの放射エネルギーより数倍以上大きい。一般にIV型バーストは磁気あらしの発生とよく相関しており [Maeda, 1962]、磁気あらしの発生子報に使われている。

## 8・15 ま と め

磁化プラズマ内の電波の分散関係、地球、惑星、太陽からのいろいろな周波数スペクトルの電波とその発生機構について述べた。磁場をもつ惑星や太陽では、地球の磁気圏の電波放射に似た発生機構で、磁場と電子密度に依存する周波数の電波が発生している。また、磁場のない惑星では大気放電による電波が発生している。

宇宙電波の発生伝搬過程は宇宙環境に密接に関係しており、これらの電波特性の解析により、宇宙環境の仕組みやパラメータを解明できる。この意味において宇宙電波環境の研究観測は、宇宙環境科学にとって大変重要である。太陽電波の観測は、天候に関係なく太陽活動を監視できる宇宙環境予報に有用な地上手段である。また太陽風あらし監視用の太陽風レーダの開発など今後の一層の発展が期待される。

### 演習問題

- Q1  $N$  個の電子が磁場の周りを旋回して電磁波を放射している場合、インコヒーレントとコヒーレント放射の違いについて述べよ。
- Q2 ホイスラモードの電波は、同じ磁力線の周りを旋回する逆向きの電子とサイクロトロン共鳴する。その理由を述べよ。

- Q3 送電線放射の特性とその磁気圏、放射線帯への影響について述べよ。  
 Q4 木星、土星、天王星、海王星。地球の電波放射が似ているのはなぜか。また、木星の電波放射が特別強いのはなぜか。その理由を述べよ。  
 Q5 太陽電波II型バーストとIII型バーストの違いを簡単に述べよ。

## — 参考文献 —

- [Aikyo, 1971] Aikyo, K. and Ondoh, T.: "Propagation of nonducted VLF waves in the vicinity of the plasmopause", *J. Radio Res. Labs.*, Vol. 18, pp. 153-182 (1971)  
 [Alfvén, 1963] Alfvén, H. and Falthammar, C.-G.: "Cosmical Electrodynamics, Fundamental Principles", Oxford, Clarendon Press (1963)  
 [Bekefi, 1966] Bekefi, G.: "Radiation Process in Plasmas", p. 208, John Wiley & Sons Inc. (1966)  
 [Bernstein, 1958] Bernstein, I. B.: "Waves in a plasma in a magnetic field", *Phys. Rev.*, Vol. 109, No. 1, p. 10 (1958)  
 [Brice, 1964] Brice, N.: "Fundamental of VLF emission generation mechanism", *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, p. 4515 (1964)  
 [Bullough, 1979] Bullough, K. and Kaiser, T. R.: "Ariel 3 and 4 studies of power line harmonic radiation", *Wave Instabilities in Space Plasma*, Palmadesso, P. J. and Papadopoulos, K., D. (eds.), pp. 37-50, Reidel Pub. Co. (1979)  
 [Burke, 1955] Burke, B. F. and Franklin, K. L.: "Radio emission from Jupiter", *Nature*, Vol. 175, p. 1074 (1955)  
 [Burtis, 1975] Burtis, W. J.: "Magnetospheric chorus; Amplitude and growth rate", *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, p. 3265 (1975)  
 [Chappell, 1970] Chappell, C. R., Harris, K. K., and Sharp, G. W.: "A study of the influence of magnetic activity on the location of the plasmopause as measured by OGO-5", *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp. 50-56 (1970)  
 [Carpenter, 1986] Carpenter, D. L.: "Whistler studies of the plasmasphere shape and dynamics", *Advances in Space Research*, Vol. 6, pp. 5-19 (1986)  
 [Crawford, 1969] Crawford, F. W.: "Laboratory plasma wave experiments", *Plasma Waves in Space and in the Laboratory*, Thomas, J. O. and Landmark, B. J. (eds.), pp. 125-156, American Elsevier (1969)  
 [Dunckel, 1974] Dunckel, N.: "Low-frequency radio emissions from the Earth and Sun", *Tech. Rept.*, No. 3469-2, Stanford Univ., Calif. (1974)  
 [Fredericks, 1969] Fredericks, R. W. and Scarf, F. L.: "Electromagnetic and electrostatic Bernstein modes in a warm, collisionless Maxwell plasma", *Plasma Waves in Space and in the Laboratory*, Thomas, J. O. and Landmark, B. J. (eds.),

- pp. 97-107, American Elsevier (1969)  
 [Grabbe, 1981] Grabbe, C. L.: "Auroral kilometric radiation: A theoretical Review", *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 19, pp. 627-633 (1981)  
 [Gurnett, 1974] Gurnett, D. A.: "The earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiations", *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, pp. 4227-4238 (1974)  
 [Gurnett, 1976] Gurnett, D. A. and Anderson, R. R.: "Electron plasma oscillations associated type III radio bursts", *Science*, Vol. 194, pp. 1159-1162 (1976)  
 [Gurnett, 1983] Gurnett, D. A., Shawhan, S. D., and Shaw, R. R.: "Auroral hiss, Z mode radiation, and auroral kilometric radiation in the polar magnetosphere: DE 1 observations", *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, p. 329 (1983)  
 [Gurnett, 1988] Gurnett, D. A. and Inan, U. S.: "Plasma wave observations with the Dynamic Explorer 1 Spacecraft", *Rev. Geophys.*, Vol. 26, pp. 285-316 (1988)  
 [Gurnett, 1992] Gurnett, D. A.: "Nonlinear radio emission processes interplanetary magnetospheres", The University of Iowa, Iowa (1992)  
 [Gurnett, 1993a] Gurnett, D. A., Hospodarsky, G. B., Kurth, W. S., Williams, D. J., and Bolton, S. J.: "Fine structure of Langmuir waves produced by a solar electron event", *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, pp. 5631-5637 (1993)  
 [Gurnett, 1993b] Gurnett, D. A.: "Planetary Plasma Waves", The University of Iowa, Iowa (1993)  
 [Gurnett, 1995] Gurnett, D. A.: "Heliospheric radio emissions", *Space Sci. Rev.*, Vol. 72, pp. 243-254 (1995)  
 [Hayakawa, 1992] Hayakawa, M. and Sazhin, S. S.: "Mid-latitude and plasmaspheric hiss: A review", *Planet. Space Sci.*, Vol. 10, pp. 1325-1338 (1992)  
 [Helliwell, 1968] Helliwell, R. A.: "Whistlers and VLF emissions", *Physics of Magnetosphere*, Carovillano, R. L., et al. (eds.), pp. 106-146, Springer-Verlag, New York (1968)  
 [Helliwell, 1974] Helliwell, R. A.: "Controlled VLF wave injection experiments in the magnetosphere", *Space Sci. Rev.*, Vol. 15, pp. 781-802 (1974)  
 [Helliwell, 1979] Helliwell, R. A.: "Effects of power line radiation into the magnetosphere", *Wave Instabilities in Space Plasmas*, Palmadesso, P. J. and Papadopoulos, K. D. (eds.), pp. 27-36, Reidel Publ. Co. (1979)  
 [Jones, 1980] Jones, D.: "Latitudinal beaming of planetary radio emissions", *Nature*, Vol. 288, p. 225 (1980)  
 [Maeda, 1962] Maeda, H., Sakurai, K., Ondoh, T., and Yamamoto, M.: "A study of solar-terrestrial relationships during the IGY and IGC", *Annales de Geophysique*, Vol. 18, pp. 305-333 (1962)  
 [Matsumoto, 1979] Matsumoto, H.: "Nonlinear whistler-mode interaction and

- triggered emissions in the magnetosphere: A review", *Wave Instabilities in Space Plasmas*, Palmadesso, P. J. and Papadopoulos, K. D. (eds.), pp. 163-190, Reidel Publ. Co. (1979)
- [Matsumoto, 1993] Matsumoto, H., Nagano, I., Anderson, R. R., Kojima, H., Hashimoto, K., Tsutsui, M., Okada, T., Kinura, I., Omura, Y., and Okada, M.: "Plasma wave observations with GEOTAIL spacecraft", *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 46, pp. 59-95 (1993)
- [McLean, 1985] McLean, D. J. and Labrum, N. R.: "Solar Radio Physics", Cambridge University Press, Cambridge (1985)
- [Melrose, 1980] Melrose, D. B. and White, S. M.: "Amplified Cerenkov emission of auroral hiss: Limitation implied by quasi-linear theory", *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, p. 3442 (1980)
- [Mosier, 1969] Mosier, S. R. and Gurnett, D. A.: "VLF measurements of the Poynting flux along the geomagnetic field with the Injun-5 satellite", *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, pp. 5675-5687 (1969)
- [Ondoh, 1981] Ondoh, T., Nakamura, Y., and Murakami, T.: "Characteristics of VLF saucers and auroral hisses from ISIS satellites received at Syowa station, Antarctica", *Memories, Natl. Inst. Polar Res. Special Issue*, Vol. 18, pp. 54-71 (1981)
- [Ondoh, 1982] Ondoh, T., Nakamura, Y., Watanabe, S., and Murakami, T.: "Latitudinal variation of chorus frequency observed in the topside ionosphere", *J. Radio Res. Labs., Japan*, Vol. 29, pp. 1-13 (1982)
- [Ondoh, 1983] Ondoh, T., Nakamura, T., Watanabe, S., Aikyo, K., and Murakami, T.: "Plasmaspheric hiss observed in the topside ionosphere at mid- and low-latitudes", *Planet. Space Sci.*, Vol. 31, pp. 411-422 (1983)
- [Ondoh, 1990] Ondoh, T.: "Broad band auroral VLF hiss and inverted-V electron precipitation in the polar magnetosphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 52, pp. 385-397 (1990)
- [Ondoh, 1993] Ondoh, T.: "Narrow band plasmopause hiss observed by ISIS satellites", *Radio Science*, Vol. 284, pp. 629-642 (1993)
- [Oya, 1974] Oya, H.: "Origin of Jovian decameter wave emissions-conversion from the electron cyclotron plasma wave to the ordinary mode electromagnetic wave", *Planet. Space Sci.*, Vol. 22, p. 687 (1974)
- [Oya, 1990] Oya, H., Morioka, A., Kobayashi, K., Iijima, M., Ono, T., Miyaoka, H., Okada, T. and Obara, T.: "Plasma wave observation and sounder experiments (PWS) using the Akebono (EXOS-D) satellite-Instrumentation and initial results including discovery of the high altitude equatorial plasma turbulence", *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 42, pp. 411-442 (1990)
- [Sazhin, 1993] Sazhin, S. S., Bullough, K., and Hayakawa, M.: "Auroral hiss: A review", *Planet. Space Sci.*, Vol. 41, pp. 153-166 (1993)
- [Smith, 1990] Smith, A. J. and Cotton, P. D.: "The Trimp effect in Antarctica: Observation and models", *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 52, pp. 341-355 (1990)
- [Stix, 1962] Stix, T. H.: "The theory of plasma waves", p. 11, McGraw-Hill (1962)
- [Storey, 1953] Storey, L. R. O.: "An investigation of whistling atmospherics", *Phil. Trans. Royal Soc. London, Ser. A*, Vol. 246, p. 113 (1953)
- [Stratton, 1941] Stratton, J. A.: "Electromagnetic Theory", p. 270 Cambridge (1941)
- [Takahashi, 1996] Takahashi, K.: "New observations, new theoretical results and controversies regarding Pc 3-5 waves", *Advances Space Res.*, Vol. 17, pp. 63-71 (1996)
- [Watanabe, 1976] Watanabe, S. and Ondoh, T.: "Deuteron whistler and trans-equatorial propagation of the ion cyclotron whistler", *Planet. Space Sci.*, Vol. 24, pp. 359-364 (1976)
- [Wu, 1979] Wu, C. S. and Lee, L. C.: "A theory of terrestrial kilometric radiation", *Astrophys. J.*, Vol. 230, pp. 621-626 (1979)
- [近藤, 1994] 近藤哲朗, 磯辺 武, 猪木誠二, 巨 慎一, 菅丸宗利: "平磯の新太陽電波観測システム", *通信総合研究所季報*, Vol. 40, pp. 85-102 (1994)
- [桜井, 1984] 桜井 隆: "活動する太陽の姿", *現代の太陽系科学 (下)* 文部省科学研究費補助金特定研究, 太陽系の進化と惑星環境の研究, 成果報告書, 代表者: 大林辰蔵, pp. 256-300 (1984)
- [前田, 1970] 前田憲一, 木村警根: "電磁波動論", p. 104, オーム社 (1970)
- [森本, 1973] 森本雅樹: "星の一生", *NHK ブックス* 163, 日本放送出版協会 (1973)