

地球磁気圏尾部におけるContinuum Radiationの発生・伝搬に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16491

氏名	高野博史
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第512号
学位授与の日付	平成14年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	地球磁気圏尾部における Continuum Radiation の発生・伝搬に関する研究
論文審査委員(主査)	長野 勇(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	村本健一郎(工学部・教授) 橋本 秀雄(工学部・教授) 八木谷 聡(自然科学研究科・助教授) 岡田 敏美(富山県立大学工学部・教授)

学位論文要旨

ABSTRACT

Lobe trapped continuum radiation (LTCR) has been observed by the plasma wave instrument onboard GEOTAIL spacecraft in the distant magnetotail. From a direction finding analysis the arrival directions of the LTCR are almost parallel to the dawn-dusk direction. A 3-D ray tracing analysis shows that the initially radiated Sun-Earth ray directions of the LTCR are transformed into the dawn-dusk directions by the reflection at the cylindrical tail magnetopause. By comparing the results of the direction finding with the 3-D ray tracing analysis the possible source regions for the LTCR are the plasma sheet boundary layer away from the nominal tail axis and the low latitude boundary layer.

The LTCR is believed to be generated through a linear mode conversion from an electrostatic wave near the upper hybrid frequency (f_{UHR}) in a large density gradient perpendicular to the geomagnetic field. We have calculated the conversion efficiency from a Z mode wave to an L-O mode wave by using a full wave method. This calculation result shows that the LTCR is radiated from the elliptic cone with its major axis perpendicular to the $B_0 - \nabla n_e$ plane. It would be possible to explain the generation mechanism of the LTCR on the basis of a comparison between the multi-spacecraft observation and this numerical calculation.

1. 諸論

Continuum Radiation (CR) は、過去 25 年にわたって多くの科学衛星によって観測され、研究が行われてきた。このプラズマ波動は 5kHz から 100kHz に及ぶ広帯域で強度の時間変動が小さいノイズ状のスペクトル構造を持つ電磁波である。発生領域は、電子密度勾配と地球磁場が直交するプラズマポーズ近傍と考えられている [1][2]。CR はこの領域において、UHR (Upper Hybrid Resonance) 周波数近傍で強められた ECH (Electron Cyclotron

Harmonic) 波動が Z モードの電磁波に変換され、さらに radio window を介した線形モード変換により L-O モードとして生成されたと考えられている [3]. Gurnett は、CR を地球磁気圏内に閉じ込められる 5kHz~20kHz の低周波成分と、磁気圏外へも自由に伝搬できる 20kHz~100kHz の高周波成分に分類し、これらをそれぞれ “trapped CR”, “escaping CR” と名付けた [2]. また、CR の低域カットオフ周波数は衛星周辺の電子密度を表しており、電子密度を推定するうえで大変重要な波動である。

一方、ISEE-3 衛星の磁気圏尾部観測から低周波 CR ($f > 5\text{kHz}$) が確認され、その発生領域がマグネトシースや尾部境界層 (マグネトポーズ) であることが提案された [4]. また、GEOTAIL 衛星による磁気圏遠尾部の観測では、数百 Hz~8kHz に狭帯域ではあるが、CR と似通ったスペクトル構造を持つプラズマ波動が観測された [5]. Nagano らは、プラズマポーズ近傍で生成され磁気圏内に閉じ込められた trapped CR と区別して、この波動を Lobe 領域に閉じ込められていることから “Lobe Trapped CR (LTCR)” と名付けた。また、電子密度勾配が地球磁場に対して垂直であるというプラズマポーズと似通った構造であるプラズマシート境界層 (Plasma Sheet Boundary Layer : PSBL) 近傍において、CR の生成に重要な ECH 波動が LTCR と共に観測されていることから、発生領域が PSBL 近傍であることを示唆している [5]. しかし、LTCR の発生メカニズムや発生領域推定に関しては詳細な解析が行われていない。

本研究では、GEOTAIL 衛星搭載のプラズマ波動観測装置 (Plasma Wave Instrument : PWI) で測定されたデータを解析し、理論計算と比較することにより LTCR の発生領域を推定し生成メカニズムを明らかにすることを目的とする。

2. Lobe Trapped Continuum Radiation (LTCR) の特性

本論文の目的である LTCR の発生領域推定や生成メカニズムを解明するために、まず LTCR の特性を調査した。PWI のサブシステムである波形捕捉受信器 (Wave Form Capture : WFC) による LTCR の波形観測により、詳細なスペクトル構造を調べることが可能である。調査した結果、その特徴がプラズマポーズで生成される Normal CR (trapped CR と escaping CR を含めた総称) と似通っていることを確認した。この Normal CR と似通った LTCR のスペクトル構造の特徴を図 1 に示す。図 1 の左図において、縦軸は時間、横軸は周波数、白黒の濃淡で電界スペクトル強度を表しており、上部に電界アンテナと地球磁場が平行になった時間を矢印で示している。また、右図は各周波数において 8.6 秒間の平均強度を表している。PSBL 近傍で観測される LTCR のスペクトルはバンド構造をしており (図 1(a)), 発生領域から離れるにしたがって電界強度がほぼ一定となる特徴を持っている (図 1(c))。このハーモニック構造の間隔が PSBL でのサイクロトロン周波数に一致することから、静電波である ECH 波からモード変換を経て生成される Normal CR と同じ生成メカニズムが考えられる。また、図 1(b) では、電界アンテナと地球磁場が平行になった時 (矢印で示す) 低域カットオフ周波数が最も低くなり、電界アンテナと地球磁場が垂直になった時低域カットオフ周波数が最も高くなるというように、衛星のスピンの同期して二つのカットオフが見られる。コールドプラズマの分散関係から、これらのカットオフ周波数がプラズマ周波数と R モードのカットオフ周波数であることが確認された。また、偏波解析からも LTCR の伝搬モードが L-O モードと R-X モードの混在モードであり Normal CR と同じであることが明らかになった。これらの結果より、LTCR の特性は Normal CR とよく一致しているため、同じメカニズムで生成されたと考えられる。

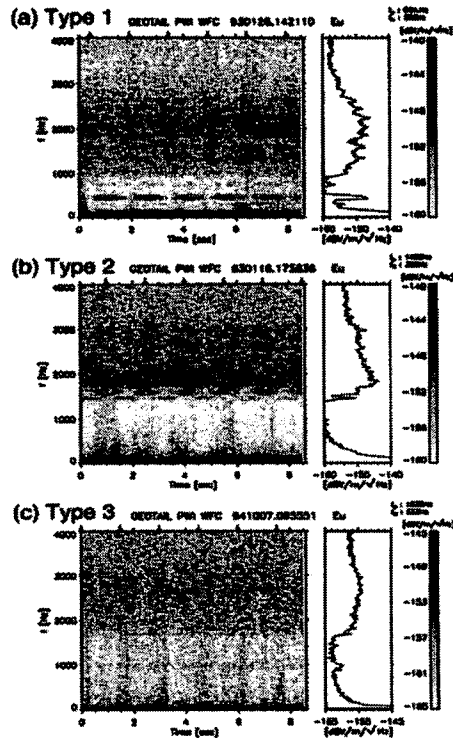


図 1: WFC によって観測された LTCR のタイプ別スペクトル構造

一方、サブストーム時に LTCR の電界強度が強くなることが確認されている。また、強い低周波 (100kHz 以下) の Auroral Kilometric Radiation (AKR) と同じくして突発的に発生する LTCR Enhancement も観測されている。LTCR とサブストームの関係を調べるために、LTCR と磁気擾乱の状態を表す Kp インデックスとの相関を調べた。その結果、磁気活動度が高くなるにしたがって LTCR の平均電界強度が強くなることが明らかになった。また、サブストームオンセット時に低周波 AKR の電界強度と LTCR Enhancement の電界強度の相互相関係数を調べることで、それらの波動の発生する時間差を求めた。この解析結果より、AKR よりも LTCR Enhancement の方が約 30 秒程早く観測されることが明らかになった。この時間差は、サブストームオンセット時に Near Earth Neutral Line (NENL) から放出される高エネルギー電子の伝搬時間に関係があると考えられる。しかし、これを詳細に説明するには複数衛星によるプラズマ粒子の多点観測データや地上での地磁気観測データとの比較が必要であり、今後の研究課題である。

3. LTCR の発生領域推定

プラズマ波動の発生領域を推定する方法として、到来方向解析や統計的に強度空間分布、観測頻度分布を調べる方法がある。まず、最初にプラズマ波動観測データを用いた統計解析により LTCR の発生領域推定を行った。Near Tail Data を用いた統計解析では、LTCR, Normal CR, AKR の電界強度空間分布を作成した。太陽風の影響を考慮した GSM' 座標系の X-Y 平面や磁気地方時-磁気緯度における LTCR の強度分布からは、明らかに強くなっている領域が見られないため発生領域を特定することはできなかった。ここで、GSM' 座標系とは、X 軸が太陽方向、Y 軸が磁場ダイポール方向と X 軸の外積、Z 軸はこれらの右手系で決まる GSM 座標系を太陽風の影響とプラズマシートの位置を考慮して補正した座標系である。しかし、Normal CR や AKR の強度分布と異なることから、LTCR の発生領

域がこれらの波動の発生領域とは異なることが言える。また、 $X_{GSM'}$ (GSM' 座標系の X 座標) に対する観測頻度分布より、地球から $25R_E$ (R_E は地球半径) 以上離れた位置から急激に上昇していることが明らかになった。これは、LTCR が地球近傍 ($X_{GSM'} > -25R_E$) では発生していないことを意味する。

一方、Distant Tail Data を用いた統計解析では LTCR と Normal CR の電界強度比を β としてその $X_{GSM'}$ 分布を調べた [6]。ここで、 $\beta > 1$ では LTCR の電界強度が Normal CR の電界強度より強いことを示しており、その時、衛星が LTCR の発生領域近傍を通過していたことを意味する。この結果、 $X = -100R_E$ を境にして β が 1 以上から 1 以下に変化していることがわかる (図 2)。これは、LTCR の平均的な発生領域が $X_{GSM'} > -100R_E$ で分布していることを示唆している。以上の統計解析から、LTCR の発生領域が $-100R_E < X_{GSM'} < -25R_E$ で存在していることが確認されたが、その詳細な空間分布を知ることはできなかった。その理由として、LTCR が定常的に発生しておらず発生領域が磁気圏尾部の広範囲に広がっていることが考えられる。

次に、LTCR の発生領域を推定する他の方法として到来方向解析を行った。LTCR は非常に微弱であるため磁界成分が測定されない。そこで、衛星のスピンのより変調を受けた電界成分のスペクトルデータを用いて解析を行う。この結果より、磁気圏尾部において LTCR はスペクトル構造や観測位置に関係なく朝方-夕方方向に伝搬していることが明らかになった (図 3)。図 3 において、横軸、縦軸はそれぞれ GSE 座標系の X, Y 座標である。ただし、単位は R_E であり、GSE 座標系とは X-Y 平面が黄道面に一致しており、X 軸は太陽方向、Z 軸は黄道面に垂直方向、Y 軸はこれらの右手系で決まる座標系である。また、○印は衛星が LTCR を観測した位置であり、棒線はその到来方向を表している。しかし、LTCR が PSBL において Z モードから L-O モードへの線形モード変換により発生していると仮定すると地球-尾部方向 (X_{GSE} 方向) に放射されるはずである。そこで、この観測結果を説明するために 3 次元レイトレーシングによる伝搬経路解析を行った。図 4 にその解析結果を示す。この図には、3 次元の伝搬経路 (レイパス)、GSE 座標系における X-Y, X-Z, Y-Z 平面に投影したレイパスを表記している。発生位置は $X_{GSE} = 65R_E$, $Z_{GSE} = 2R_E$ と固定して $Y_{GSE} = 1$ (図 4(a)), 5 (図 4(b)), 10 (図 4(c)) R_E の 3 種類の場合について計算している。この解析より、尾部中心軸から離れたプラズマシート境界層から地球-尾部方向へと放射された LTCR が、電子密度の高いマグネトポーズやプラズマシートで反射することにより朝方-夕方方向に伝搬するようになることが明らかになった。観測データを用

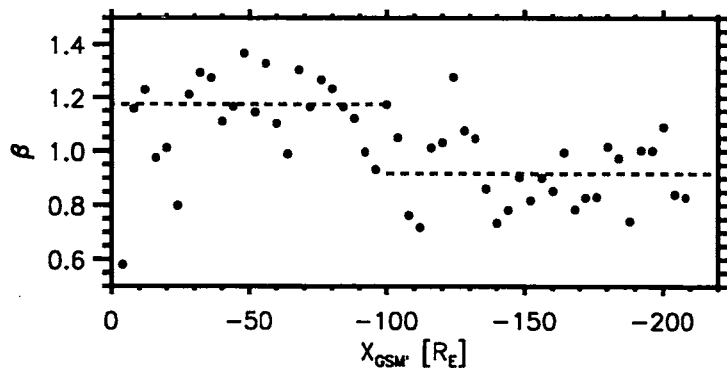


図 2: $X_{GSM'}$ に対する β (LTCR と Normal CR の電界強度比) の分布

いた到来方向解析の結果は、尾部中心軸から離れたプラズマシート境界層より放射されたLTCRが、円筒状のマグネトポーズやプラズマシートで反射を繰り返し磁気圏尾部内を伝搬したために生じる朝方-夕方方向伝搬を観測していると考えられる。また、LTCRの磁気圏尾部における伝搬特性を利用して、到来方向解析と3次元レイトレーシング解析の結果を比較することにより、GSE座標系のX-Y平面においてLTCRの発生領域分布を求めた[7]。図5において白黒の濃淡は、各々の位置から放射されるレイのX-Y平面における伝搬角が、到来方向解析によって求められた範囲にある確率を表している。この解析結果から、従来LTCRの発生領域と考えられていたプラズマシート境界層に加えて低緯度境界層(Low Latitude Boundary Layer: LLBL)も有力な発生領域であることが確認された。

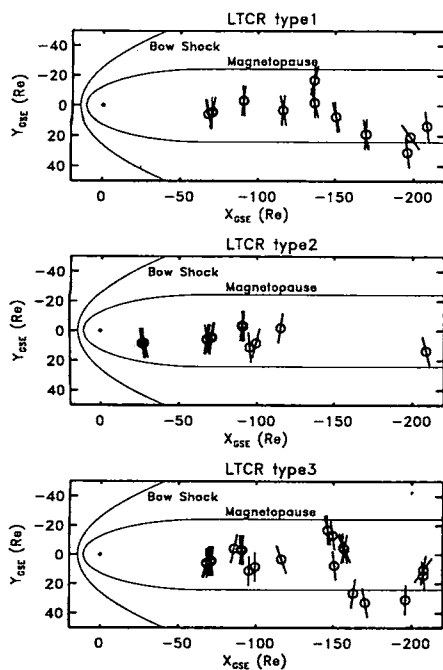


図3: LTCRの到来方向解析の結果

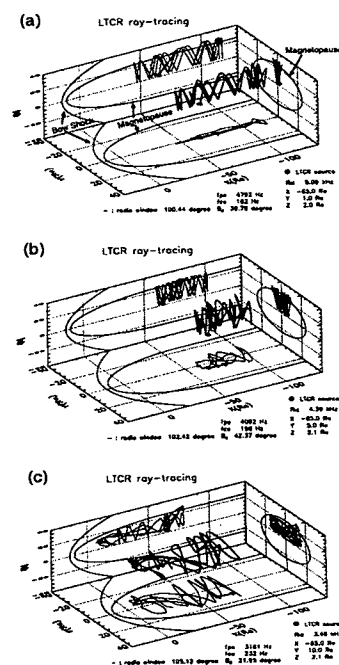


図4: LTCRの3次元レイトレーシングの結果

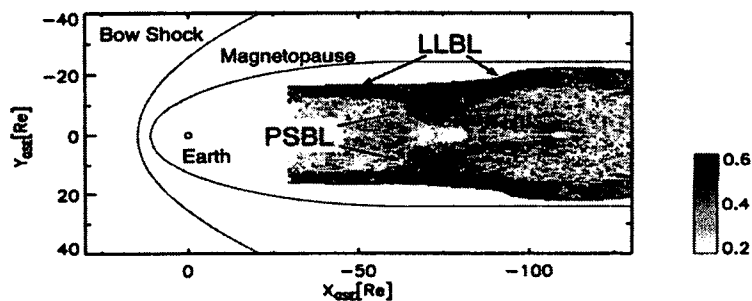


図5: LTCR発生源の空間分布

4. LTCR 生成に関する理論解析

これまでの解析により、LTCR の発生領域が磁気圏尾部の PSBL や低緯度境界層であることが示され、Z モードから L-O モードへの線形モード変換により生成していることを提案した。そこで、LTCR の生成メカニズムで最も有力である線形モード変換に関して、積分近似法による full wave 計算により理論解析を行った。積分近似法はレゾナンスの効果を含んでいるため、波動がレゾナンス点を通じた時の吸収係数を計算できる利点がある [8]。磁場と水平層状面のなす角 Dip, 電子密度勾配を表す量 L , 波動の周波数 ω とサイクロトロン周波数 ω_c の比 $Y (= \omega_c/\omega)$ に対して radio window を介した Z モードから L-O モードへの変換効率を計算しその特性を確かめた。また、水平層状媒質に入射する角度を θ , 磁場と電子密度勾配が作る面とのなす角を ϕ として $\theta - \phi$ 面における 2 次元空間での変換係数を計算した。ここで、変換係数は入射波 (Z モード) のポインティングフラックスの Z 成分 (P_z^Z) と最上層に透過した L-O モードのポインティングフラックスの Z 成分 (P_z^L) の比 $C (= P_z^L/P_z^Z)$ で求められ、半値幅を変換係数が 0.5 となる角度幅と定義する。図 6 に計算結果の一例を示す。この図において、縦軸と横軸はそれぞれ θ , ϕ であり、変換係数はデシベル値で白黒の濃淡で表示している。また、半値幅となる $C = -6\text{dB}$ の等高線を白の点線で表している。この計算結果から、 ϕ 方向の半値幅が θ 方向の半値幅より大きい楕円錐状になることが明らかになった。この理論計算は、LTCR の発生領域である PSBL や LLBL でのパラメータを用いて、LTCR がどのように放射しているかを知ることが可能にしたが、GEOTAIL の観測データのみではこれらの計算結果と比較することは困難である。今後、複数衛星による多点観測により LTCR の生成メカニズムに関して理論と比較して検討することが可能になると思われる。

5. 地球磁気圏尾部で観測される Z モード波

磁気圏遠尾部で WFC により観測されたプラズマ周波数近傍の狭帯域の波動に関して、スペクトル解析と偏波解析を行い伝搬モードの推定を行った。解析の結果、この波動は Z モードであることが明らかになった。この波動は、LTCR の生成過程において非常に重要な役割を担っており、ECH 波の $f \sim f_{UHR}$ 成分から生成されると考えられている。しかし、LTCR や ECH 波は磁気圏尾部において多数観測されているにも関わらず Z モード波の観測は 3 イベントであった。この観測結果より、Z モード波が密度勾配のある領域を伝搬す

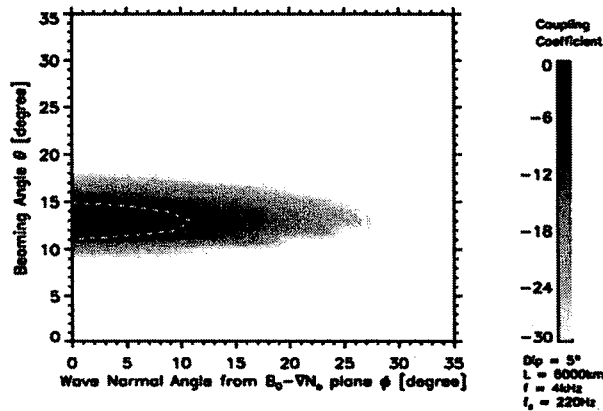


図 6: PSBL のパラメータを用いて計算した変換係数の 2 次元分布

ることにより瞬時にしてL-Oモードに変換され、Zモードのままに伝搬することが困難であることが推測される。これを確かめるために電磁粒子コードを用いた計算機実験を行った。この計算より、ECH波からL-Oモード波(LTCR)が生成されることを確認することができたが、ECH波がZモード波に変換される様子を観察することができなかった。今後の課題として、十分な時間分解能があるシミュレーションを行いECH波からZモード波への変換過程を検討することが考えられる。

6. 結論

LTCRの波形観測から詳細なスペクトル構造を調べることができ、スペクトル解析と偏波解析より伝搬モードを特定することができた。また、LTCRはNormal CRと同様に磁気擾乱と関係があり、サブストーム時に電界強度が強くなることが明らかになった。

統計解析や到来方向解析によりLTCRの発生領域推定を行った。統計解析では、地球近傍($X_{GSM'} > -25R_E$)ではLTCRはほとんど生成されず、平均的な発生領域が $X_{GSM'} > -100R_E$ に分布していることが明らかになった。到来方向解析とレイトレーシング解析を組み合わせることにより、 $X_{GSE}-Y_{GSE}$ 平面でのLTCRの発生領域分布を得ることができ、従来LTCRの発生領域と考えられていたPSBLに加えてLLBLも有力な発生領域であることが確認された。

LTCR生成に関する理論解析では、full wave法を用いてZモードからL-Oモードへの変換効率を調べた。この理論計算より、変換効率の高い領域は ϕ 方向に長軸を持つ楕円錐状をしていることが明らかになった。推定されたLTCRの発生領域でのパラメータを用いて、LTCRの放射パターンを理論的に計算することが可能となったが、現在の観測データと比較・検討することは困難である。今後、複数衛星による多点観測により得られる観測データと理論解析の結果を比較することにより、LTCRの生成メカニズムに関する議論が可能になると思われる。

参考文献

- [1] Gurnett, D. A., and R. R. Shaw, Electromagnetic radiation trapped in the magnetosphere above the plasma frequency, *J. Geophys. Res.*, 78, 8136-8149, 1973.
- [2] Gurnett, D. A., The Earth as a radio source : The nonthermal continuum, *J. Geophys. Res.*, 80, 2751-2763, 1975.
- [3] Jones, D., Terrestrial myriametric radiation from the Earth's plasmopause, *Planet. Space Sci.*, 30, 399-410, 1982.
- [4] Coroniti, F. V., F. L. Scarf, C. F. Kennel, and D. A. Gurnett, Continuum radiation and electron plasma oscillations in the distant geomagnetic tail, *Geophys. Res. Lett.*, 11, 661-664, 1984.
- [5] Nagano, I., S. Yagitani, H. Kojima, Y. Takehi, T. Shiozaki, H. Matsumoto, K. Hashimoto, T. Okada, S. Kokubun, and T. Yamamoto, Wave form analysis of the continuum radiation observed by GEOTAIL, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2911-2914; 1994.

- [6] Hironobu TAKANO, Isamu NAGANO, Satoshi YAGITANI, Hiroshi MATSUMOTO, Continuum Radiation Observed by GEOTAIL in the Distant Magnetotail, *2000 International Symposium on Antennas and Propagation*, 3, 1263-1266, 2000.
- [7] 高野 博史, 長野 勇, 八木谷 聡, 福岡 将, 松本 紘, 地球磁気圏尾部における Lobe Trapped Continuum Radiation の伝搬特性, 電子情報通信学会論文誌 (B), J84-B, 2358-2366, 2001.
- [8] 高橋 典光, 長野 勇, 八木谷 聡, 不均質プラズマ中のレゾナンス点近傍における電磁波伝搬の解析, 電子情報通信学会技術研究報告 信学技法, AP94-50, 1-6, 1994.

学位論文審査結果の要旨

平成 14 年 1 月 28 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催, 2 月 1 日に口頭発表, その後に第 2 回審査委員会を開催し, 慎重審議の結果以下の通り判定した。なお, 口頭発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

本論文は, GEOTAIL 衛星の磁気圏尾部探査によって確認されたプラズマ波動である Lobe Trapped Continuum Radiation (LTCR) の発生メカニズムや発生領域推定に関する研究結果をまとめたものである。過去の研究報告より, LTCR の発生領域がプラズマシート境界層 (PSBL) であると考えられていたが, GEOTAIL 衛星搭載のプラズマ波動観測装置によって測定された観測データを解析することにより, PSBL に加えて低緯度境界層 (LLBL) も有力な発生領域であることを初めて明らかにした。これらの領域において, Z モードから L-0 モードへの線形モード変換により LTCR が生成されることが考えられるが, レゾナンスの影響を考慮した full wave 計算法を用いることにより LTCR の生成に関する理論計算が可能となった。LTCR の発生領域である PSBL や LLBL のパラメータを用いて線形モード変換の理論計算を行うことにより, LTCR は地球磁場と電子密度勾配ベクトルが作る面の法線方向に長軸を持つ楕円錐状に放射されることを明らかにした。

この研究成果は, プラズマ波動の研究分野の発展に貢献するだけでなく, プラズマ波動観測から宇宙プラズマ中の電子密度を計測するリモートセンシング技術において, その精度を向上させるものと期待できる。以上の内容から, 本論文は博士 (工学) に値するものと判定した。