

月周辺におけるホイッスラーモード波のスペクトルについて

—Rising toneの存在とスペクトル形状の空間分布

太陽惑星系電磁気学分科 沢口航 (SAWAGUCHI, Wataru)

1. 導入

地上から宇宙にアンテナを向けてスピーカーに繋いでいると、鳥の囀りのような音が聞こえることがあります。これはホイッスラーモード・コーラス放射と呼ばれる電磁波の一種によるもので、短い時間に繰り返し周波数（音の高さに相当）が上がる（もしくは下がる）rising tone (falling tone) という特徴のために、音に変換すると鳥の囀りのように聞こえるのです。コーラスという名前もそれにちなんで付けられました（図1）。

コーラス放射は地球を含む様々な惑星の磁気圏（天体が持つ磁場が影響を及ぼす空間）で発生することが知られていて、特に地球の磁気圏に存在する危険な「放射線帯」の形成に関わることから盛んに研究されています。

それでは、例えば月ではコーラス放射は起こるのでしょうか？ 現在開発計画が進められている月ですが、月にアンテナを立てて、この鳥の囀りのような音を聞くことはできないのでしょうか？ これまで、月のような大気や全球的な磁気圏を持たない天体の周りではこのような現象の報告はありませんでした。

しかし、月の周りでもコーラス放射の元となるホイッスラーモード波は発生することが知られています。太陽から飛ん

できた電子が月の表面で吸収されたり、局所的に月の地殻に存在する磁場によって電子が跳ね返されたりすることによって、電子の分布に偏りが生じ、そのことが強い波を生み出すエネルギーになるという仕組みです。

元となる波動は存在するのだから、それがコーラス放射のようなものに成長することはあり得ないことではないでしょう。そう考え、月近くを飛ぶ周回衛星の観測データをよく調べてみたところ、コーラス放射と非常によく似た、短時間に繰り返し周波数が上昇する電磁波イベントを発見しました。

2. Rising toneの検証

本研究ではまず、このコーラス放射によく似た現象について2点、検証を行いました。1つ目はその現象が本当に月に関係のあるものであるのか？ ということです。例えば地球の周りで発生したものがたまたま月の近くまで伝わってきた、ということであれば話が変わってきます。それでは、少なくとも、月の周りで発生する現象としての話はできないでしょう。

それを確かめるために、月の周りを2機の衛星が飛んでいることを利用します。月に磁力的に接続した一方の衛星では現

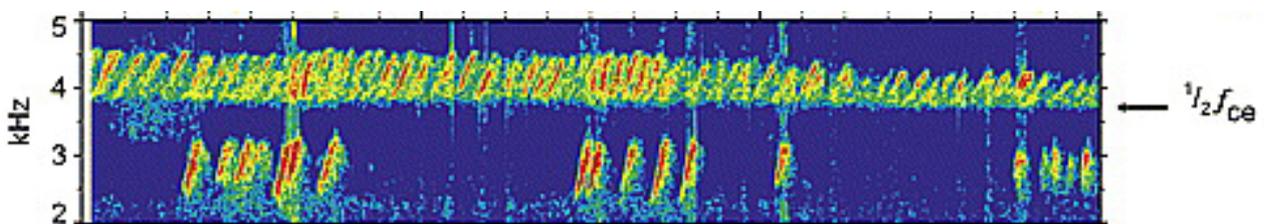


図1 地球内部磁気圏で観測されたコーラス放射の例 (Santolik et al., 2003、一部抜粋)。

象が観測できて、接続していないもう一方の衛星では観測されない、ということであれば、月に関連して発生した現象であると分かります。逆に、両方の衛星で観測される現象であれば、それは月とは関係ない、もっと大きなスケールで起こった現象ということになります。

実際、今回示す2つのイベントはどちらも一方の衛星のみで波や、波を引き起こすような電子の分布が観測されていて、月に関連したホイッスラーモード波であることが確かめられました。

2つ目は既存のコーラス理論との比較です。2008年、Omuraほかはコーラス放射の周波数の時間変化と磁場の強さの関係についての式を提唱しました。元の論文ではこの式をもとにコンピューターでモデル計算を行ってコーラス放射の再現をしています。実際に地球で観測されたコーラス放射についてもこの式に概ね従うことがCullyほか（2011年）やKuritaほか（2012年）によって確かめられています。よって、この式を今回月の周りで観

測された現象に当てはめて結果がよく一致していれば、表面的な特徴だけでなく、その生成の過程も共通していると言えるでしょう。

こちらはこの論文で扱うイベントでは、波どうしが重なり合っていることなどから判断が難しい部分もあるものの、理論から予測される周波数の変化の仕方は実際の観測データに近い結果を示しています。

以上の2点の検証結果から導き出される結論は、月の周りでもコーラス放射と同様の仕組みを持つ電磁波現象が発生することがある、ということです（図2）。このことは、将来の月開発において重要になるであろう月周辺の電磁波環境についての新たな知見です。同時に、こちらでも重要視されているコーラス放射の生成理論についての正しさを確かめる上で、地球とは大きく異なる月の条件でも検証ができるようになったということでもあります。

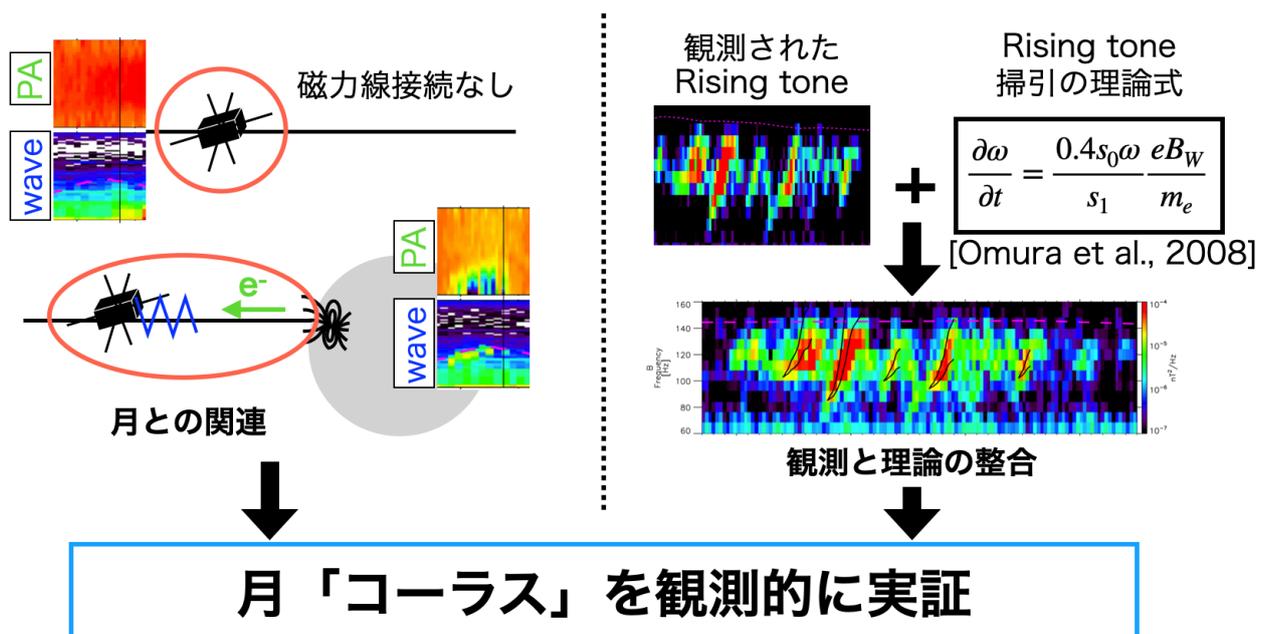


図2 月でコーラス放射と同様のrising toneが発生し得ることの検証の概要。

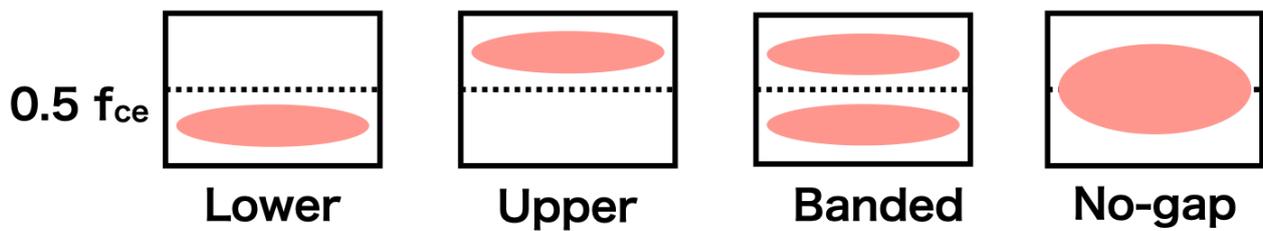


図3 スペクトル形状の4分類。

3. 2バンド構造

地球内部磁気圏のコーラス放射はもう一つ典型的な特徴を持っていることが知られています。それが2バンド構造と呼ばれるスペクトル（振幅と周波数の関係）形状で、電子ジャイロ周波数の半分付近の周波数に強度の極小を持ち、その上下で2つ（lower bandとupper band）に分かれる特徴です。2バンド構造の生成機構については長年議論が続いていますが、地球内部磁気圏においては、2バンド構造を持つイベントが多く観測されるということが、Tengほか（2019）やGaoほか（2019）によって統計的に明らかになっています。

前節ではコーラス放射が月の周りでも発生し得るということを示しましたが、この2バンド構造が月の周りで見られるのかどうかは今まで調べられていません。そこで、月の周りの磁場観測データに対し、Tengほか（2019）の手法を適用することで、月の周りでのホイッスラーモード波のスペクトルの特徴を統計的に調べました。

月のホイッスラーモード波を自動的に判定するアルゴリズムを作り、イベントをスペクトル形状からlower band only, upper band only, banded, no-gapの4つに分類しました（図3）。この内のbandedイベントが2バンド構造に対応します。さらに、月に特有の多様なプラズマ環境の変化を反映させるために、月の位置（太

陽風、磁気シース、磁気圏尾部）と、月面の昼夜によっても分類を行いました。

月と磁力的に接続している観測を取り出して、月に関する波動のみを分類した結果を表に示します。

表 スペクトル形状毎の発生率（昼）

月位置	Lower	Upper	Banded	No-gap
太陽風	97.1%	0.05%	0.05%	2.79%
シース	96.1%	0.12%	0.07%	3.71%
磁気圏	53.4%	13.0%	0.06%	33.5%

統計解析の結果、地球内部磁気圏とは異なり、no-gapイベントは一定数観測されているにもかかわらず、bandedのものはほとんど見られず、2バンド構造の生成機構は働いていないことが明らかになりました。さらに、太陽風・磁気シース中ではupper bandを含む形状の波動の発生割合が磁気圏尾部に比べて著しく低くなっていて、これらの地域ではupper band波動の励起が抑制されることが明らかになりました。

本研究の結論としては、コーラス放射は月でも起きるのに、2バンド構造は見られないということで、地球内部磁気圏とは大きく異なる月環境からコーラス理論に対して重要な示唆を与えることができました。また、月周辺の空間の物理にとっても、新しい波動粒子相互作用プロセスの存在と、月の多様なプラズマ環境が波動励起与える影響を示す重要な成果となりました。

参考文献

- Angelopoulos, V., The ARTEMIS mission, *Space Science Reviews*, 165(1-4), 3–25, doi:10.1007/s11214-010-9687-2, 2011.
- Auster, H. U., et al., The THEMIS Fluxgate Magnetometer, *Space Science Reviews*, 141(1-4), 235–264, doi:10.1007/s11214-008-9365-9, 2008.
- Burtis, W. J., and R. A. Helliwell, Magnetospheric chorus: Occurrence patterns and normalized frequency, *Planetary and Space Science*, 24(11), 1007–1024, doi:10.1016/0032-0633(76)90119-7, 1976.
- Coroniti, F. V., F. L. Scarf, C. F. Kennel, W. S. Kurth, and D. A. Gurnett, Detection of Jovian whistler mode chorus; Implications for the Io torus aurora, *Geophysical Research Letters*, 7(1), 45–48, doi:10.1029/GL007i001p00045, 1980.
- Cully, C. M., V. Angelopoulos, U. Auster, J. Bonnell, and O. Le Contel, Observational evidence of the generation mechanism for rising-tone chorus, *Geophysical Research Letters*, 38(1), doi:10.1029/2010GL045793, 2011.
- Gao, X., L. Chen, W. Li, Q. Lu, and S. Wang, Statistical results of the power gap between lower-band and upper-band chorus waves, *Geophysical Research Letters*, 46(8), 4098–4105, doi:https://doi.org/10.1029/2019GL082140, 2019.
- Halekas, J. S., et al., Lunar precursor effects in the solar wind and terrestrial magnetosphere, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A5), doi:10.1029/2011JA017289, 2012.
- Harada, Y., J. S. Halekas, A. R. Poppe, S. Kurita, and J. P. McFadden, Extended lunar precursor regions: Electron-wave interaction, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(11), 9160–9173, doi:10.1002/2014JA020618, 2014.
- Harada, Y., et al., MAVEN observations of electron-induced whistler mode waves in the Martian

- magnetosphere, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(10), 9717–9731, doi:10.1002/2015GL067040, 2016.
- Harada, Y., J. S. Halekas, A. R. Poppe, Y. Tsugawa, S. Kurita, and J. P. McFadden, Statistical characterization of the forenoon particle and wave morphology: ARTEMIS observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6), 4907–4921, doi:10.1002/2015JA021211, 2015.
- Horne, R. B., et al., Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts, *Nature*, 437(7056), 227–230, doi:10.1038/nature03939, 2005.
- Hospodarsky, G. B., T. F. Averkamp, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, J. D. Menietti, O. Santolik, and M. K. Dougherty, Observations of chorus at Saturn using the Cassini Radio and Plasma Wave Science instrument, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A12), doi:10.1029/2008JA013237, 2008.
- Kurita, S., Y. Katoh, Y. Omura, V. Angelopoulos, C. M. Cully, O. Le Contel, and H. Misawa, THEMIS observation of chorus elements without a gap at half the gyrofrequency, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A11), doi:10.1029/2012JA018076, 2012.
- McFadden, J. P., C. W. Carlson, D. Larson, M. Ludlam, R. Abiad, B. Elliott, P. Turin, M. Markwordt, and V. Angelopoulos, The THEMIS ESA Plasma Instrument and In-flight Calibration, *Space Science Reviews*, 141(1-4), 277–302, doi:10.1007/s11214-008-9440-2, 2008.
- Omura, Y., Y. Katoh, and D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A4), doi:10.1029/2007JA012622, 2008.
- Roux, A., O. Le Contel, C. Coillot, A. Bouabdellah, B. de la Porte, D. Alison, S. Ruocco, and M. C. Vassal, The Search Coil Magnetometer for THEMIS, *Space Science Reviews*, 141(1-4), 265–275, doi:10.1007/s11214-008-9455-8, 2008.
- Santolik, O., D. A. Gurnett, J. S. Pickett, M. Parrot, and N. Cornilleau-Wehrin, Spatio-temporal structure of storm-time chorus, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A7), 2003.
- Teng, S., X. Tao, and W. Li, Typical characteristics of whistler mode waves categorized by their spectral properties using Van Allen Probes observations, *Geophysical Research Letters*, 46(7), 3607–3614, doi:10.1029/2019GL082161, 2019.

Thorne, R. M., et al., Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus, *Nature*, 504(7480), 411+, doi:10.1038/nature12889, 2013.

Tsurutani, B. T., and E. J. Smith, Postmidnight chorus: A substorm phenomenon, *Journal of Geophysical Research*, 79(1), 118–127, doi:10.1029/JA079i001p00118, 1974.