R006-06
C 会場 ：11/5　PM1 （13:45-15:30）
15:00〜15:15

MMS 衛星の観測による地球バウショックでの電子加速における高周波ホイッスラー波強度の重要性

#増田　未希 [1)], 天野　孝伸 [2)], 岡　光夫 [3)], 北村　成寿 [4)]
([1] 東京大学　地球惑星科学専攻,[2] 東大・理,[3] カリフォルニア大学バークレー校・宇宙科学,[4] 名大・宇地研

MMS observation of importance of high-frequency whistler waves intensity for electron acceleration at Earth's bow shock

#Miki Masuda[1)], Takanobu Amano[2)], Mitsuo Oka[3)], Naritoshi Kitamura[4)]
([1]Department of Earth and Planetary Science, Univers,[2]University of Tokyo,[3]SSL, UC Berkeley,[4]ISEE, Nagoya University,

Non-thermal high-energy particles are frequently observed in space, and collisionless shock waves are one of the sources of these particles. Particle acceleration in the vicinity of shock waves has been observed, but the specific process has not been understood clearly. Although shock drift acceleration is candidate mechanism for the acceleration process, some problems remain yet. For example, in these mechanism, low-energy electrons cannot be accelerated or accelerated electrons' energy is not sufficient. To solve these problems, Katou & Amano (2019) proposed stochastic shock drift acceleration. In this mechanism, low-energy electrons are trapped in the transition layer by cyclotron resonant scattering with high-frequency waves. The most promising candidate for the scattering agent is whistler waves with frequencies ranging from 10% to 50% of the electron cyclotron frequency. On the other hand, Oka et al. (2006) showed statistically that the electron acceleration occurs efficiently only when the shock is super-critical with respect to the whistler critical Mach number. This result suggested that the whistler waves play important roles to accelerate electrons in the layer, but the specific mechanism has yet been not understood. Katou & Amano (2019) and Amano et al. (2020) predicted that the electron acceleration occurs only when the intensity of the whistler waves exceeds a certain theoretical threshold, which comes from the condition that electrons need to be trapped sufficiently in the layer. The theoretical threshold is proportional to $(M_A \cos\theta_{Bn})^{-2}$ and may be consistent with Oka et al. (2006) in the statistical sense. However, since the intensity of the whistler waves may vary in each event, more detailed analysis is needed.

In this study, we use the data of the Earth's bow shock crossing events observed by the Magnetospheric Multiscale (MMS) spacecraft in the burst mode. We investigate statistically the relation between the intensity of whistler waves and some shock parameters (M_A, θ_{Bn}, β_e), as well as efficiency of electron acceleration. We select events where the upstream and the downstream are stable during 2017 to 2018 performed a detailed analysis of the transition layer where the electron acceleration occurs efficiently. We define the time when the magnetic field strength increased by a factor of more than 1.2 relative to the upstream magnetic field as the transition layer. First, by using Search Coil Magnetometers (SCM), we calculated the power spectrum of magnetic fluctuations with a time resolution 1s. We determine the wave intensity for each frequency normalized by the electron cyclotron frequency and correlate with each shock parameter. As the result, we find the positive correlation between the intensity of the high-frequency whistler wave and $M_A/M_{crit}{}^{w}$. Furthermore, we investigate the relation between the shock parameters and the energy density of high-energy electron in the downstream normalized to the flow kinetic energy of the upstream plasma, or the electron pressure in the downstream for each event. Based on these results, we discuss the relation between the electron acceleration efficiency and the property of whistler waves.

宇宙空間にはベキ型のスペクトルを持つ非熱的な高エネルギー荷電粒子が存在し、無衝突衝撃波はこれらの粒子の生成源として考えられている。実際に衝撃波近傍での粒子加速は観測されているが、その具体的な過程は明らかになっていない。これまで加速過程の候補として一次フェルミ加速や衝撃波ドリフト加速などが挙げられているが、低エネルギー電子の加速ができないことや、十分な加速ができないという課題が残っている。この課題に対して、低エネルギー電子の加速メカニズムの候補として統計的衝撃波ドリフト加速が提唱された（Katou & Amano, 2019）。このメカニズムでは電子と高周波の波動とのサイクロトロン共鳴散乱により電子を遷移層内に捕獲することで低エネルギー電子の十分な加速が可能であると考える。そしてこの散乱体の有力候補と考えられているものが電子のサイクロトロン周波数の 10% から 50% 程度の周波数を持つ高周波ホイッスラー波である。一方で、Oka et al. (2006) では観測のデータを元に衝撃波アルフベンマッハ数 (M_A) がホイッスラー臨界マッハ数 ($M_{crit}{}^{w}$) に比べて超臨界の時にのみ電子加速が効率的になるということを統計的に明らかにした。この結果からホイッスラー波が電子加速に重要な役割を担っていることが示唆されるが、その具体的なメカニズムは明らかになっていない。Katou & Amano (2019) や Amano et al. (2020) は遷移層内に電子が十分に加速されるという条件からホイッスラー波の強度についての閾値を導き、それよりも大きい時にのみ電子加速が起こることを予言した。衝撃波面の法線方向と上流の磁場のなす角を θ_{Bn} とするとこの閾値は $(M_A / \cos\theta_{Bn})^{-2}$ に比例するため、定性的には Oka et al. (2006) と整合的であるが、ホイッスラー波の強度はイベントごとに異なるため、各イベントに対しての調査が必要である。

本研究では Magnetospheric Multiscale (MMS) 衛星による地球バウショックの burst mode 観測のデータを用いる。各イベントごとのホイッスラー波強度とマッハ数や θ_{Bn}、電子ベータなどの衝撃波パラメータ、エネルギー密度の関係を

統計的に調べ、電子加速とホイッスラー波強度の関係を調べた。イベントは 2017 年から 2018 年の観測のうち衝撃波上流と下流が安定しているものを用い、電子加速が効率的に働いている遷移層の範囲を詳細に解析した。このとき、上流の磁場に対し磁場強度が 1.2 倍以上に増加している時間帯を遷移層と定義した。まず、Search Coil Magnetometers(SCM) のデータを用い、1s 間隔の磁場のパワースペクトルの平均を計算し、サイクロトロン周波数で規格化した周波数ごとに波動強度を求め、衝撃波の各パラメータとの相関を調べた。その結果、特に高周波ホイッスラー波強度と $\mathrm{M}_A/\mathrm{M}_{crit}{}^w$ に正の相関を得ることができた。さらに、各イベントに対し下流の高エネルギー電子のエネルギー密度と衝撃波上流の運動エネルギーや下流圧力の比をとることで衝撃波エネルギーから高エネルギー電子へのエネルギー分配率を算出し、加速が効率的になる場合の条件を調べる。以上の結果を元に、地球バウショックにおける電子加速とホイッスラー波との関係性を議論する。