

多種イオンプラズマ中の非線形磁気音波の平行電場  
 Parallel electric fields in nonlinear magnetosonic waves  
 in a multi-ion-species plasma

樋田美栄子

Mieko TOIDA

核融合研

NIFS

理論と相対論的電磁粒子シミュレーションによって、非線形磁気音波は様々な機構で粒子を強く加速することが示されている [1]。その加速機構のいくつかにおいて、磁場に平行方向の電場  $E_{\parallel}$  が本質的な役割を果たしている。例えば、磁場に対して斜めに伝播する磁気音波の衝撃波によって、電子が捕捉され加速されるが、 $E_{\parallel}$  はこの電子の捕捉を引き起こす。また、電子、イオン、陽電子からなるプラズマ (e-p-i プラズマ) では、陽電子が  $E_{\parallel}$  によって超相対論的エネルギーにまで加速される場合がある。これらの電子や陽電子の加速は、電子のサイクロトロン周波数がプラズマ周波数より大きいような ( $\Omega_e/\omega_{pe} > 1$ ) 磁場が比較的強い場合に起こるが、そのような場合は、 $E_{\parallel}$  を磁場に沿って積分した量  $eF \equiv -e \int E_{\parallel} ds$  が電子温度よりもはるかに大きい値となる。

この  $E_{\parallel}$  と  $F$  については、非線形波動理論に基づいて解析がなされてきた。1種類のイオンと電子からなるプラズマ中の非線形磁気音波中の  $F$  は、振幅  $\epsilon$  が小さい場合は、 $eF \sim \epsilon^2 m_i v_A^2$  と見積もれる [2]。ただし、ここでは、プラズマのベータ値が1よりはるかに小さいとして、温度の効果は無視した。この理論式は、磁場が強くなると  $F$  が大きくなることを示す。また、e-p-i プラズマの低周波領域 ( $\omega \ll \Omega_i$ ) の非線形磁気音波中の平行電場についても、解析がなされた [3]。

本研究では、2種のイオンと電子からなるプラズマ中の磁気音波の平行電場について理論解析を行った。2種イオンプラズマでは、磁気音波には高周波と低周波の2つのモードが存在する。これらのモードの非線形の振る舞いは、それぞれ Korteweg-de Vries 方程式 (KdV 方程式) で記述される [4,5]。ただし、それぞれの KdV 方程式のソリトン解の幅は大きく異なり、準直角伝播の場合は、低周波は  $c/\omega_{pi}$  のオーダー、高周波は  $c/\omega_{pe}$  のオーダーである。また、KdV 方程式が成立する周波数領域は、低周波モードは  $\omega \ll \Omega_i$ 、高周波モードは  $\Omega_i \ll \omega \ll \sqrt{\Omega_i \Omega_e}$  である。そして、振幅が大きくなると高周波モードのパルスが重要となる。今回、これら2つのモードの非線形パルスの  $F$  を導出し、その最大値が、低周波の場合は  $eF \sim \epsilon^2 (m_e m_i)^{1/2} v_A^2$ 、高周波の場合は  $eF \sim \epsilon^2 m_i v_A^2$  となることが分かった。この理論式は、低周波の  $F$  に比べて高周波の  $F$  は、 $(m_i/m_e)^{1/2}$  倍大きいことを示す。これは、高周波モードの  $E_{\parallel}$  が加速に寄与する可能性があることを意味する。

また、電子、イオン、陽電子からなる3成分プラズマの非線形磁気音波についても、 $\Omega_i \ll \omega \ll \sqrt{\Omega_i \Omega_e}$  の周波数領域に対応する非線形磁気音波の  $E_{\parallel}$  と  $F$  を解析し、 $F$  の大きさが  $eF \sim \epsilon^2 [n_i^2 / (n_e + n_p)^2] m_i v_A^2$  となることを示した。この  $F$  は、文献3で示された  $\omega \ll \Omega_i$  の領域の  $F$  と一致する。

[1] Y. Ohsawa, Phys. Reports **536**, 146 (2014).

[2] H. Takahash, Y. Ohsawa, Phys. Plasmas **14**, 112305 (2007).

[3] H. Takahash, M. Sato, Y. Ohsawa, Phys. Plasmas **15**, 082309 (2008).

[4] M. Toida, Y. Ohsawa, J. Phys. Soc. Jpn. **63**, 573 (1994).

[5] M. Toida, Y. Kondo, Phys. Plasmas **18**, 062303 (2011).