

# 磁気リコネクション電子加速の粒子シミュレーション

## Full Particle Simulation of Electron Acceleration during Magnetic Reconnection

\* 湯村 翼 yumu@stp.isas.jaxa.jp, 田中 健太郎, 篠原 育, 藤本 正樹

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所本部

### 磁気リコネクションによる粒子加速

宇宙プラズマにおける粒子の加速源として磁気リコネクションが重要な役割を担っていることが示唆されている。人工衛星での地球磁気圏の in-situ 観測や、シミュレーションを用いた理論的研究が進められてきたが、加速モデルを完全に解明するまでには至っていない。惑星磁気圏や太陽フレアといった大規模な磁気リコネクション構造を形成する過程では磁気島合体を経由することが考えられるが、過去の研究では初期に単一な X-line を形成させるなど磁気島合体が粒子加速メカニズムに与える効果についてはあまり考察されてこなかった。本研究では磁気島合体を経由する磁気リコネクションのシミュレーションを実行し、電子加速における磁気島合体の効果を明らかにする。

### シミュレーション設定

PIC (Particle-in-cell) 法を用いて磁気リコネクションの 2 次元粒子シミュレーションを行った。初期条件は Harris 型電流層に波数 8 の擾乱を加え 8 個の磁気島を生成した。

$$n = 2 \times 10^8 \text{ (128 / cell)}$$

$$m_i / m_e = 100$$

$$N_x \times N_z = 1536 \times 1024$$

$$D = 0.5 \lambda_i$$

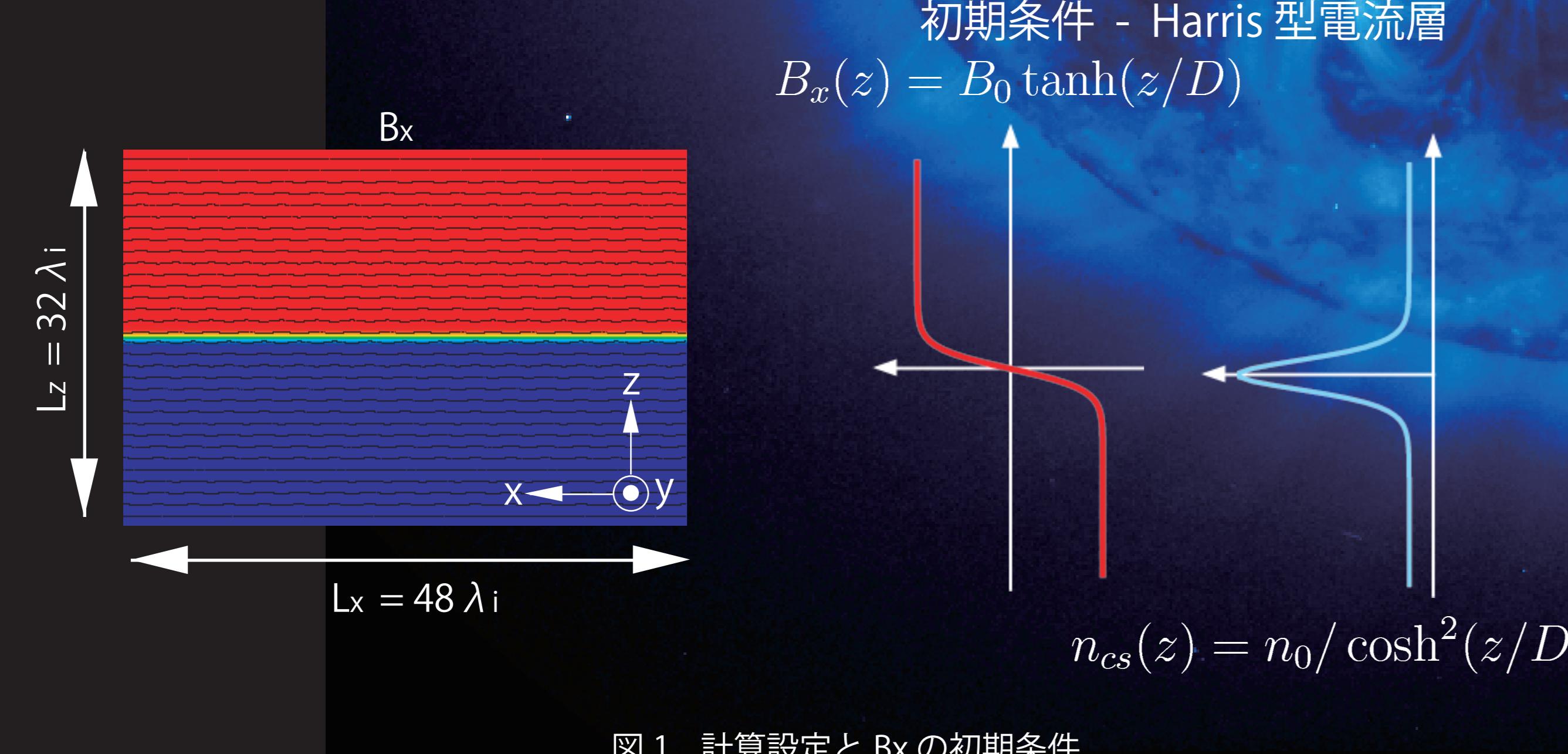


図 1. 計算設定と  $B_x$  の初期条件

### シミュレーション結果

2段階の合体を経由し(図 2), この合体相に対応して強電場が生じ電子が加速された(図 3)。磁気島合体領域でおこるリコネクションでも同様な構造の加速が生じたり, X-line での 2段階加速によって高エネルギー電子が 2重リング分布を形成する(図 3)など, 磁気島合体の効果によって特徴的な電子加速構造が見られた。

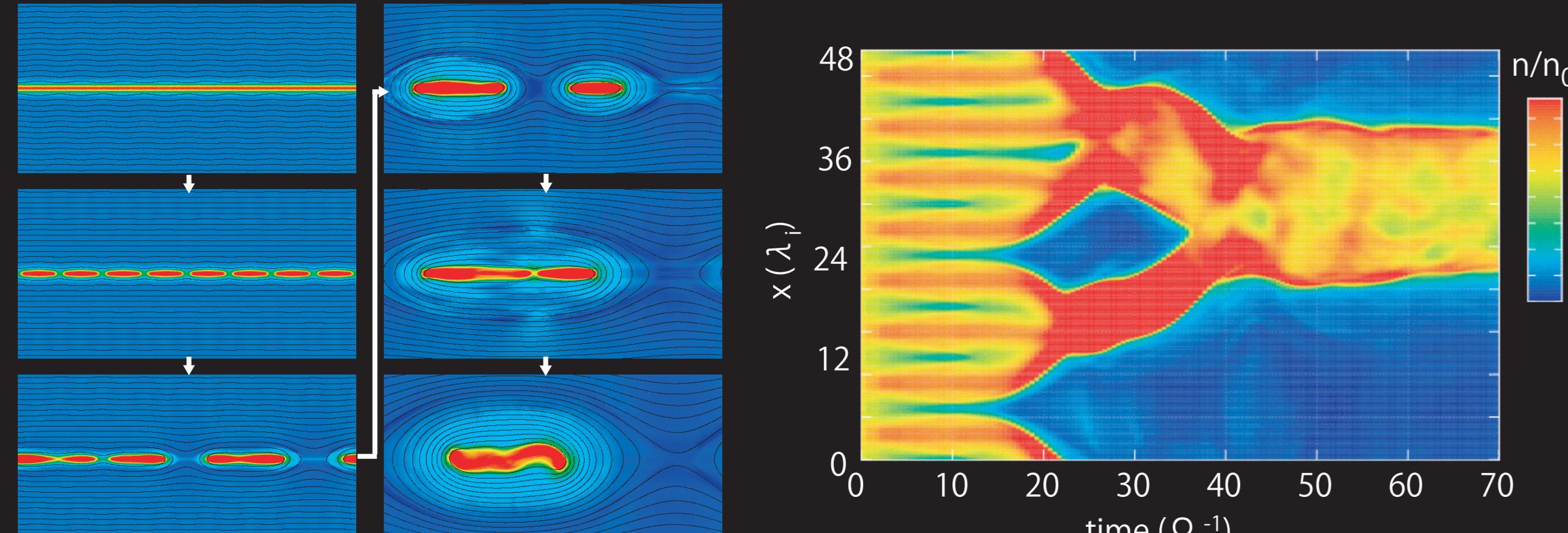


図 2. (左) 電子密度のスナップショットによる磁気島合体の様子。 (右) 磁気中性面 ( $z=0$ ) における電子密度の時間変化。

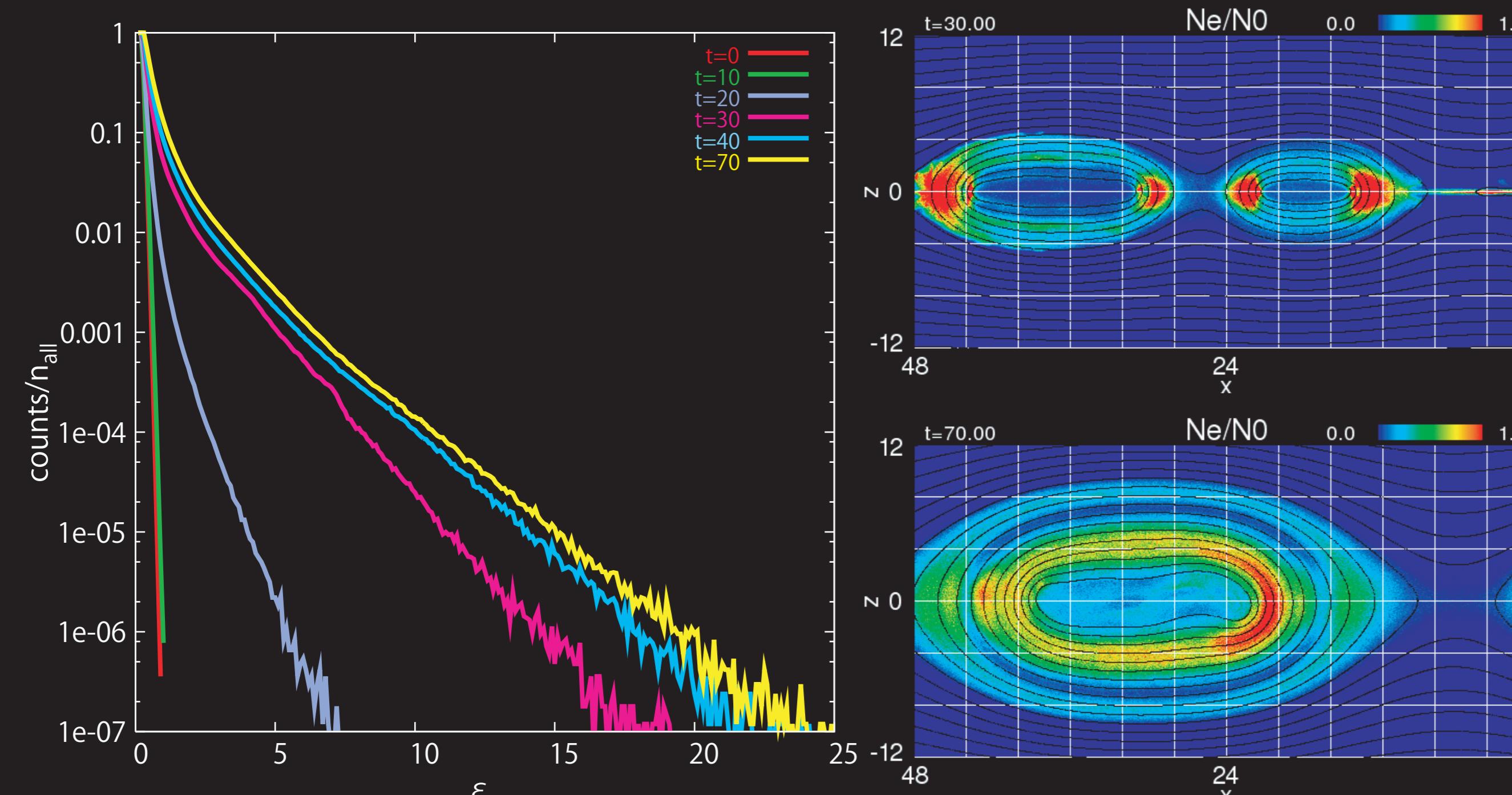


図 3. (左) 各時刻でのエネルギースペクトル。 (右)  $\epsilon > 1$  の高エネルギー電子密度。合体後は 2重のリング状分布をなす。

### 電子加速メカニズム

最終的に高エネルギーとなる電子を追跡して軌道とエネルギー増加より加速メカニズムを調査した。粒子は X-line, 磁気島合体領域, pile-up 領域で加速されていた。これら 3ヶ所全てで加速を受けた電子の軌跡を図 4 に示す。

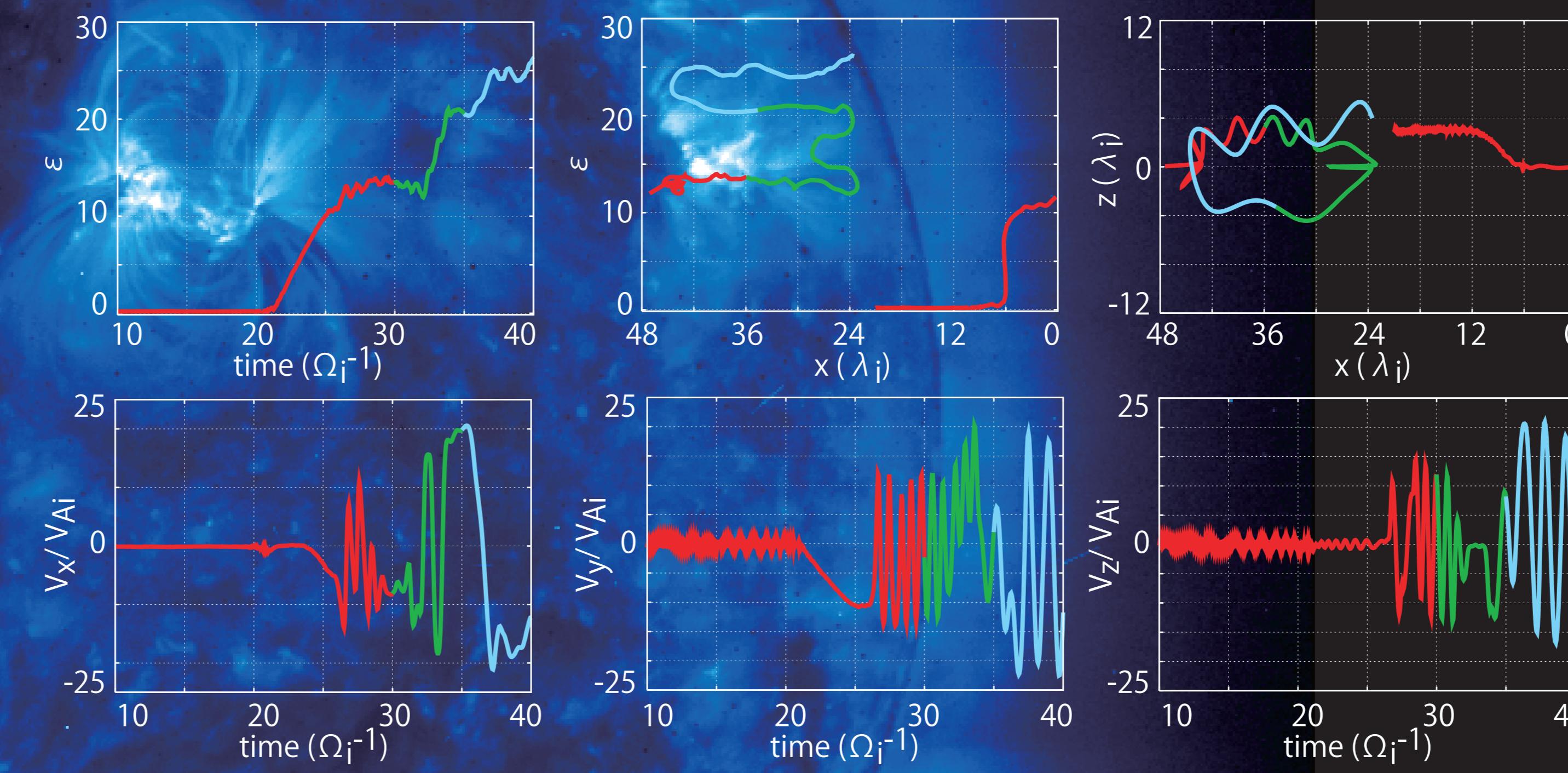


図 4. 追跡粒子の軌道。(左上) エネルギーの時間履歴, (中上)  $x$  座標とエネルギー, (右上) 空間座標履歴, (左下)  $x$  方向速度の時間履歴, (中下)  $y$  方向速度の時間履歴, (右下)  $z$  方向速度の時間履歴, ただし赤色は時刻 10 ~ 30, 緑色は時刻 30 ~ 35, 水色は時刻 35 ~ 40 の軌跡である。

### X-line での加速

X-line 付近では, 补足された粒子が meandering motion をしながら  $y$  方向の電場を受けて加速される。

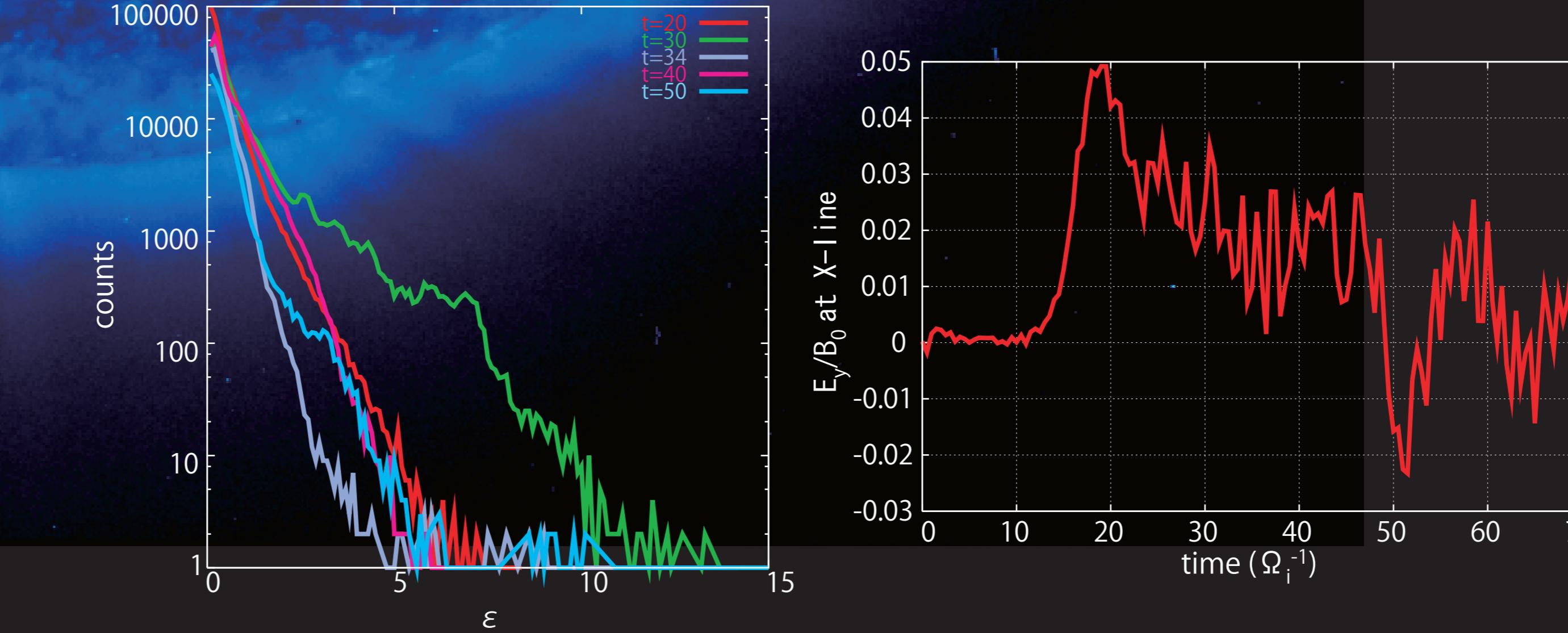


図 5. (左) X-line 付近でのエネルギースペクトル。 (右) X-line 付近での電場の  $y$  成分。

### 磁気島合体領域での加速

磁気島合体領域でも磁気リコネクションが発生するため, X-line と同様の構造と加速が見られた。

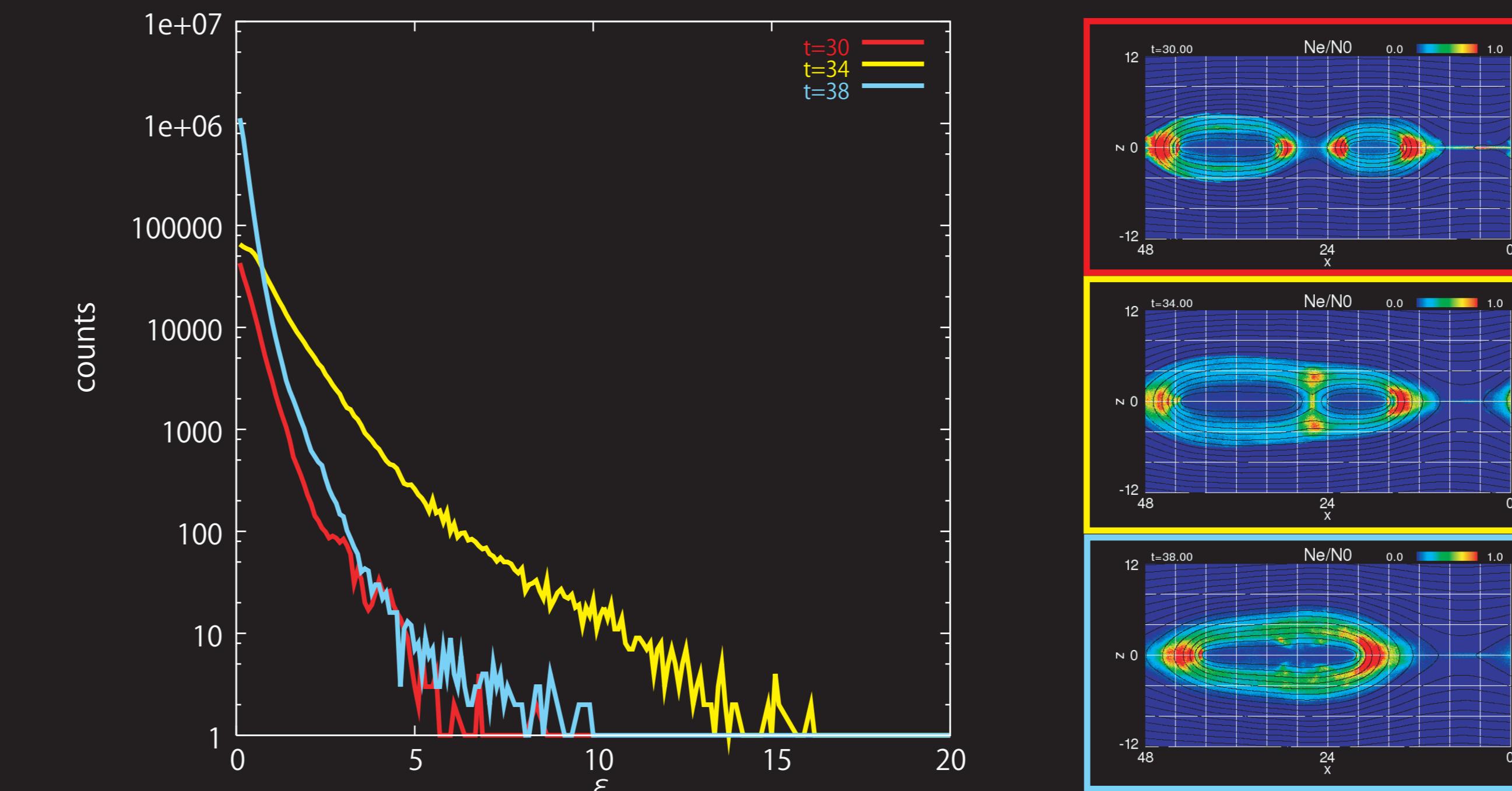


図 6. (左) 磁気島合体領域でのエネルギースペクトル。 (右) 磁気島合体時刻付近の高エネルギー電子密度 ( $\epsilon > 1$ )。

### pile-up 領域での加速

pile-up 領域では磁場勾配ドリフト / 磁場湾曲ドリフトと  $y$  方向の電場によって加速される。

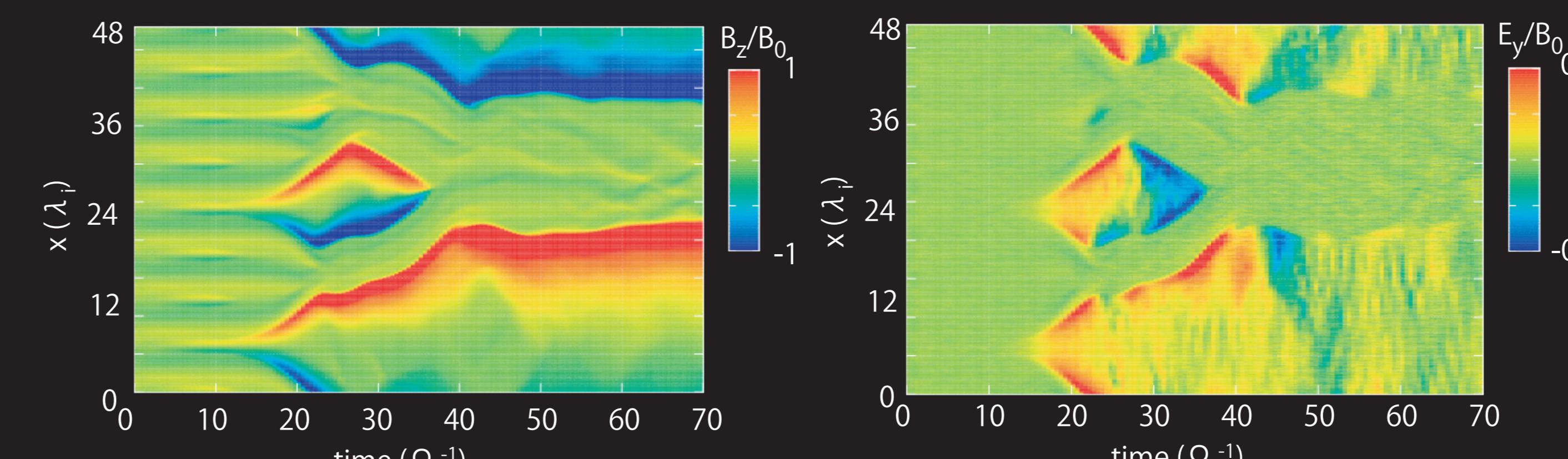


図 6. (左) 磁気中性面 ( $z=0$ ) における磁場の  $z$  成分の時間変化。 (右) 磁気中性面 ( $z=0$ ) における電場の  $y$  成分の時間変化。