

# 模擬磁気圏から直接求めるダン ジー循環の磁力線再結合率： 極冠横断電位差に対応する磁気 圏側の物理量

畠山将英<sup>1</sup>, 渡辺正和<sup>2</sup>, 藤田茂<sup>3</sup>, 田中高史<sup>4</sup>

1:九州大学 大学院 理学府 地球惑星科学専攻

2:九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

3:情報・システム研究機構統計数理研究所

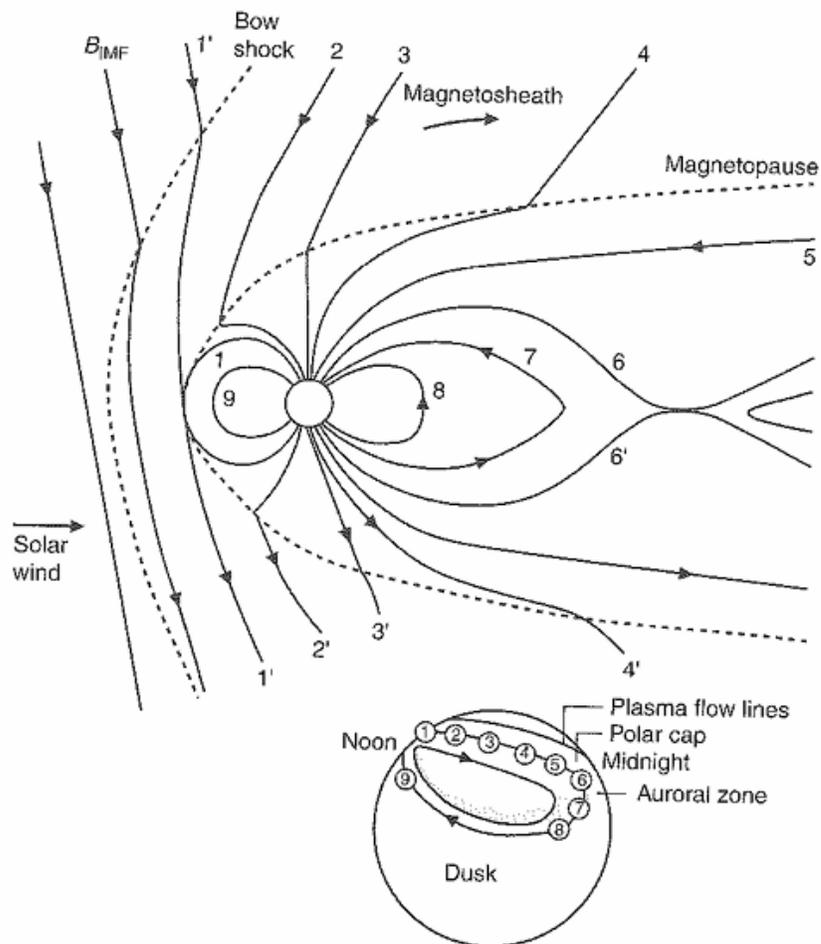
4:九州大学 国際宇宙惑星環境研究センター

# 目次

- 導入
- 目的
- 手法
- 結果
- 考察
- 結論

# 導入

## ダンジー循環

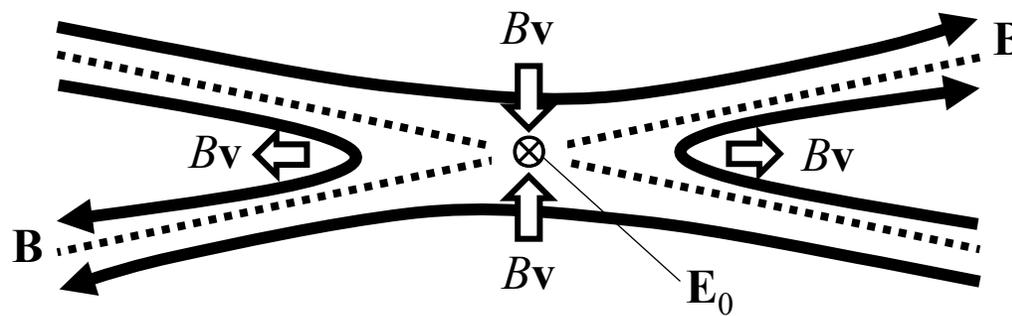


Dungey (1961)の考えにそって描いた対流の模式図  
After Kivelson and Russell, 1995

## 磁気リコネクション

プラズマ中で磁力線が繋ぎ替わり、磁場のエネルギーをプラズマのエネルギーに変換する現象

2次元磁気リコネクションにおいては  
リコネクション率  
= X型零点を通過してゆく単位時間当たりの磁束  
= 零点における電場 [V/m = (Wb/m) / s]



$$\text{磁場の“フラックス”} = Bv = E$$

# 導入

## 3次元磁気リコネクション

図の左側の面  
平行磁場に垂直な面に磁力線を投影  
⇒X型の反平行磁場

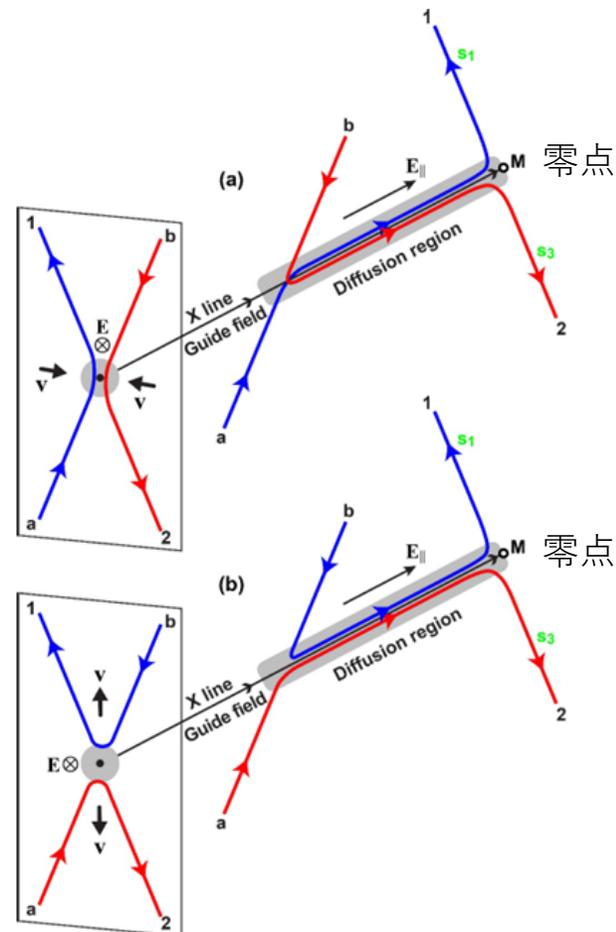
X line: Xの中心を通り面に垂直な直線

「2次元⇒3次元」では「X point ⇒ X line」  
X lineはセパトリクス上にあり必ず磁力線

$$R_{\text{rec}} = \int E_{\parallel} dl \quad \frac{Wb}{s}$$

系に零点が存在しない場合にも上式は有効で、  
一般には  $\int E_{\parallel} dl$  の最大値がリコネクション率  
(Hesse and Birn, 1993)

3次元磁気リコネクションの模式図

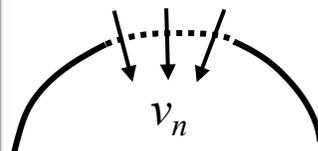
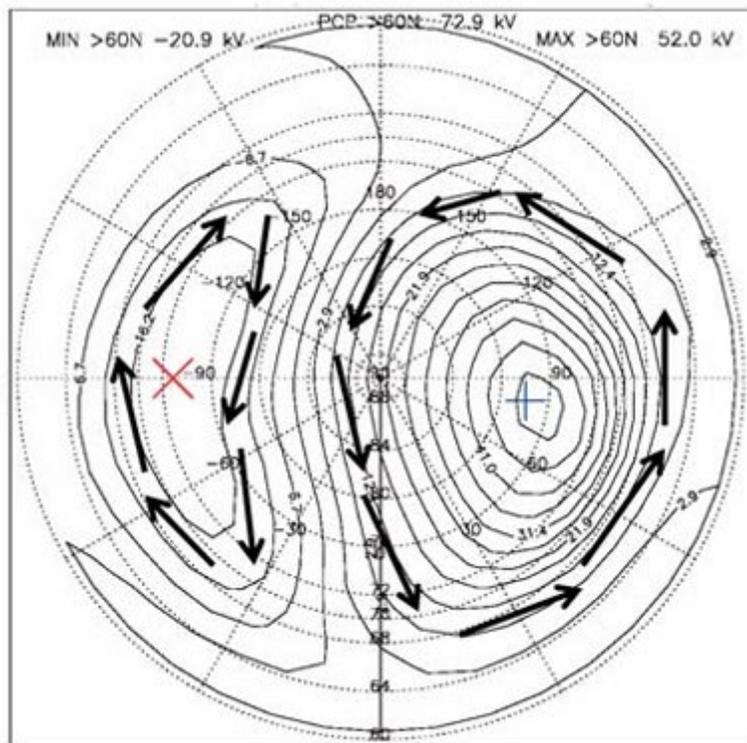


極地研電子ライブラリー「オーロラ物理学」  
第4巻 磁気圏ダイナモと磁気圏磁場トポロジー (第2版)

# 導入

## 極冠横断電位差(Cross Polar Cap Potential, CPCP)

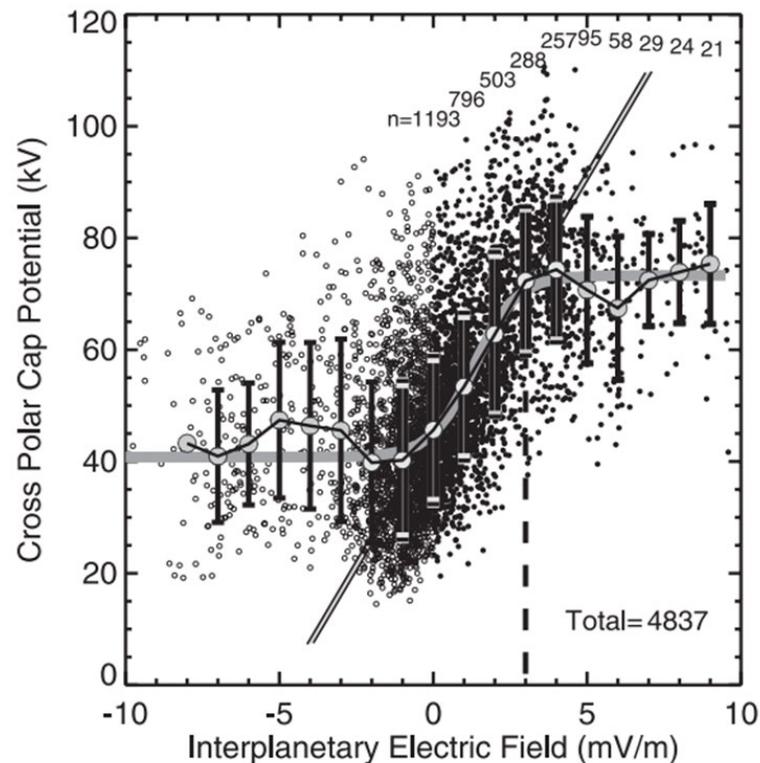
電離圏対流 (Dungey cycle)の強さ  
太陽風と磁気圏の結合の指標



$$R_{rec}^{Dungey} = Bv_n l$$

電離圏で単位時間  
にO/C境界を  
通過する磁束

SuperDARNによる観測  
惑星間空間電場に対して飽和



Khachikjan et.al.(2008)

National Institute of Information and Communications Technology  
Quarterly, Vol. 55, Nos. 1-4, 2009

$$\Phi_{pc} = \Phi_{Dungey} + \Phi_{lobe} + \Phi_{viscous} \approx \Phi_{Dungey} = R_{rec}^{Dungey}$$

飽和の一因は磁気圏が小さくなることを示唆<sup>5</sup>

# 目的

## 観測の課題

太陽風とIMFパラメータは制御できない。  
極端な太陽風やIMFの状況が発生することは稀である。  
観測値から磁気圏でのリコネクション率やX lineの長さを決定することは困難。

$$R_{rec} = \int E_{\square} dl$$

## 研究目的

Reproduce Plasma Universe (REPPU) code (Tanaka, 2015)を用いて、三次元模擬磁気圏から直接リコネクション率とX lineの長さを定量的に決定する。

磁気圏側の巨視的量であるリコネクション率と電離圏の巨視的量であるCPCPの関係性を調べる。

CPCP飽和に対する沿磁力線電場 ( $E_{\parallel}$ ) とX lineの長さ ( $l$ ) の依存性を調べる。

# 手法

## X lineとリコネクション率の決定方法

X line

北半球の零点と南半球の零点を結ぶ磁力線  
(いわゆるセパレータ)

零点：磁場がゼロになる点 (右図のM,N)

セパレータ：セパラトリクス之交線(右図の橙線)

セパラトリクス：磁場の境界を表す面

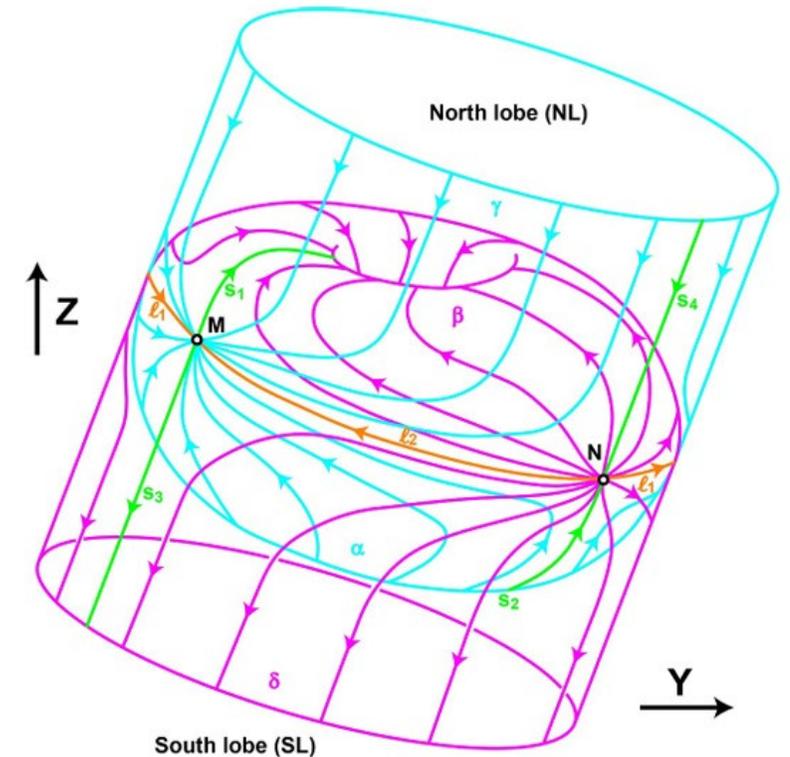
M,Nの中点はX軸と交わる

⇒X軸上で $E_{\parallel}$ が最大になる点を通る磁力線がX-line

リコネクション率

$$R_{rec} = \int E_{\parallel} ds$$

2-零点, 2-セパレータの基本構造を太陽方向から見た図

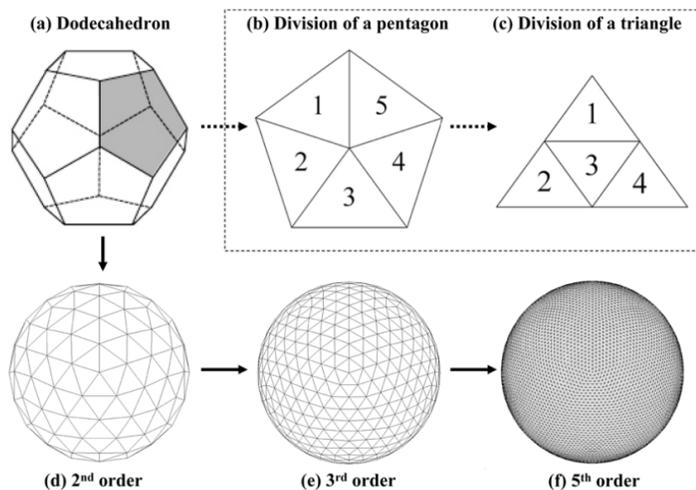


極地研電子ライブラリー「オーロラ物理学」  
第4巻 磁気圏ダイナモと磁気圏磁場トポロジー (第2版)

# 手法

## グローバル数値シミュレーション

REPPU code : The Reproduce Plasma Universe code (Tanaka,2015)



$$v_m = 0.003 \times \left( \frac{J^2/J_0^2}{B^2/B_0^2 + (0.003)^2} \right) \approx \frac{0.003}{(\Delta l)^2}$$

電流シートの厚さの2乗に反比例する電気抵抗を仮定

## シミュレーションのセットアップ

- (1) 準定常磁気圏の作成  
北向きIMFで180分走らせる
- (2) その後、設定したパラメータで計算  
南向きIMFで140分(合計320分)

IMFのZ成分:3パターン  
太陽風速度:3パターン  
合計9パターン

IMFのZ成分 (3パターン)  
-5.0, -7.0, -10nT

IMF時計角:-30°  
Bx=0

太陽風速度(3パターン)  
250, 500, 750km/s

固定パラメータ

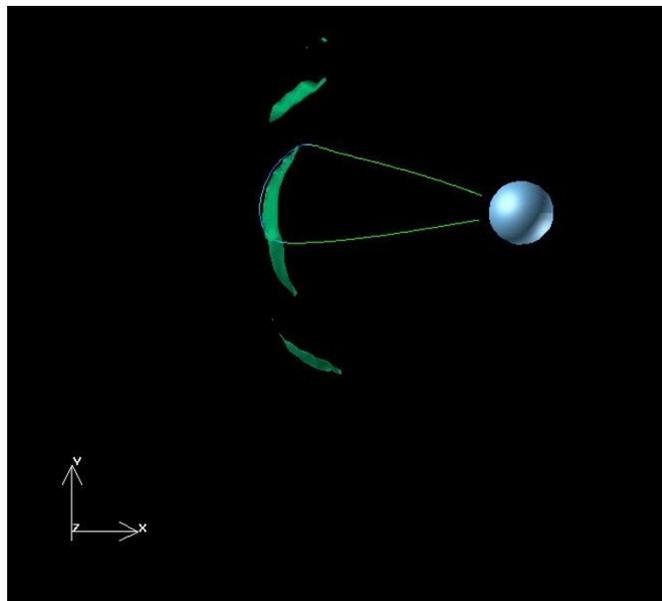
太陽風密度

Np=5.0 個/cc

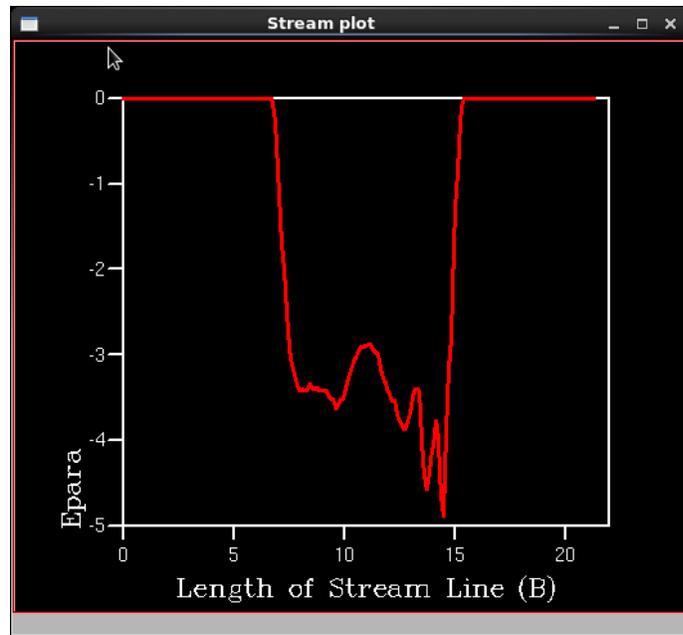
ダイポール傾斜角:0°

# 結果

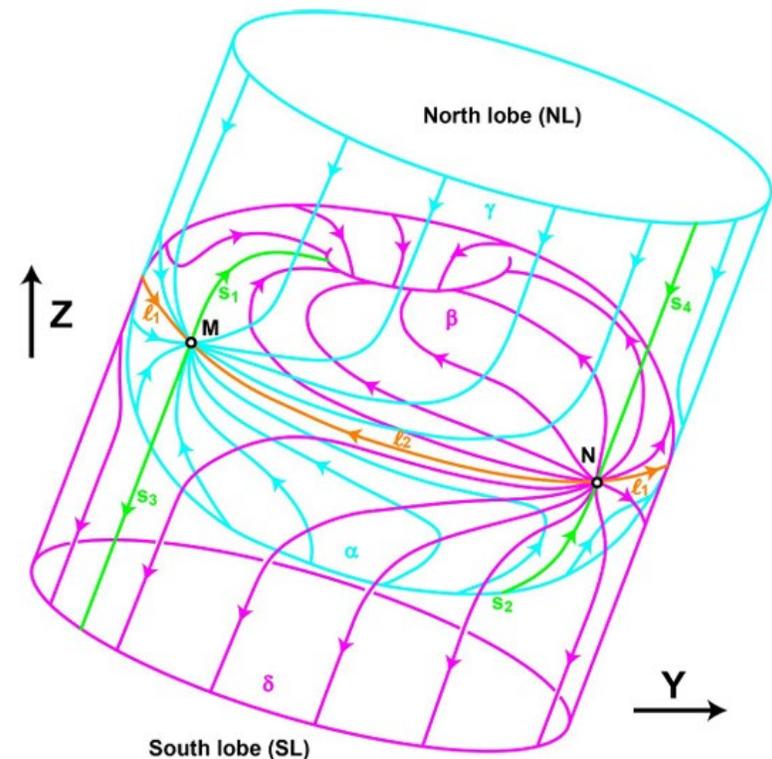
## X lineとリコネクション率



左図  
Z方向から見た図  
面：沿磁力線電場の等数値面  
線：X軸上で $E_{\parallel}$ が最大になる点を通る磁力線(X line)



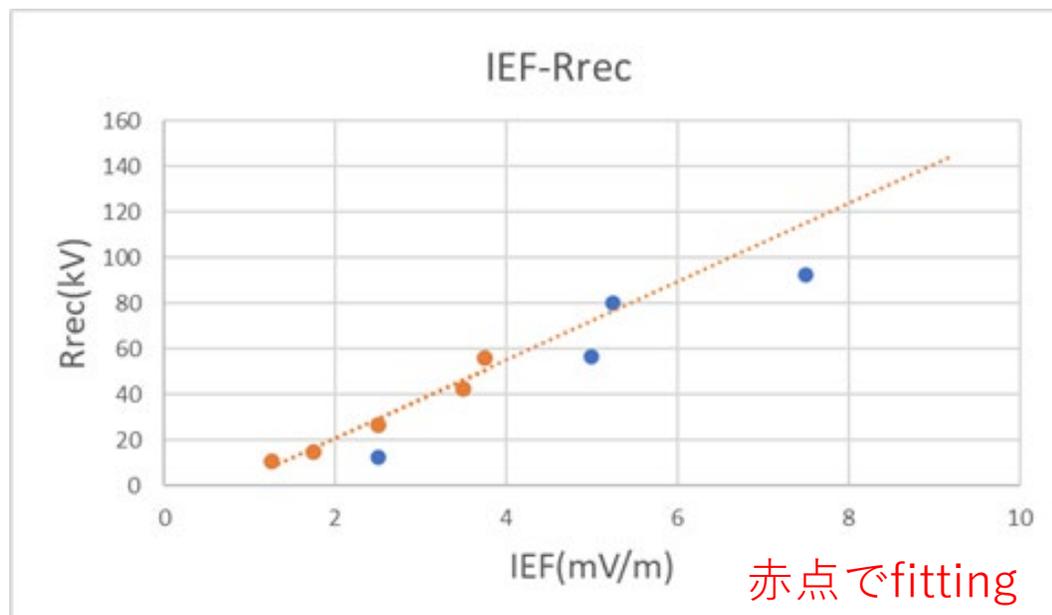
右図  
X lineに沿う電場  
横軸：磁力線の長さ  
縦軸： $E_{\parallel}$



M,Nの中点はX軸と交わる  
 $\Rightarrow$ X軸上で $E_{\parallel}$ が最大になる点を通る磁力線がX-line

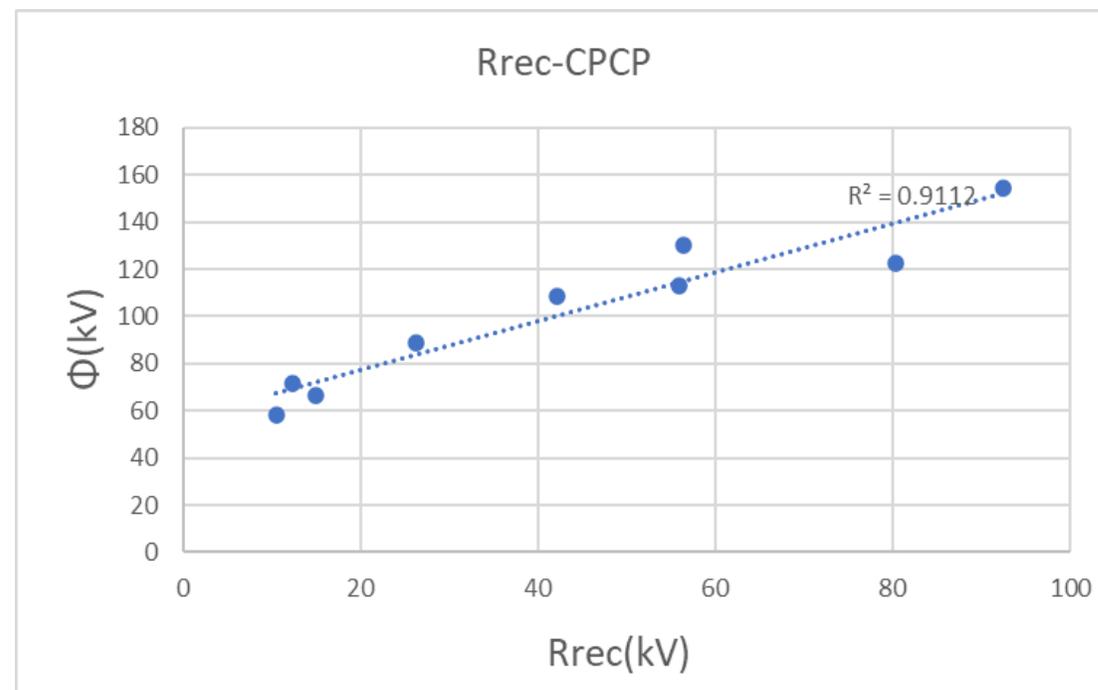
# 結果

## リコネクション率( $R_{rec}$ )



横軸:IEF、縦軸:リコネクション率

IEF $>$ 5mV/mの時、 $R_{rec}$ の成長率が低下



横軸:リコネクション率、縦軸:CPCP

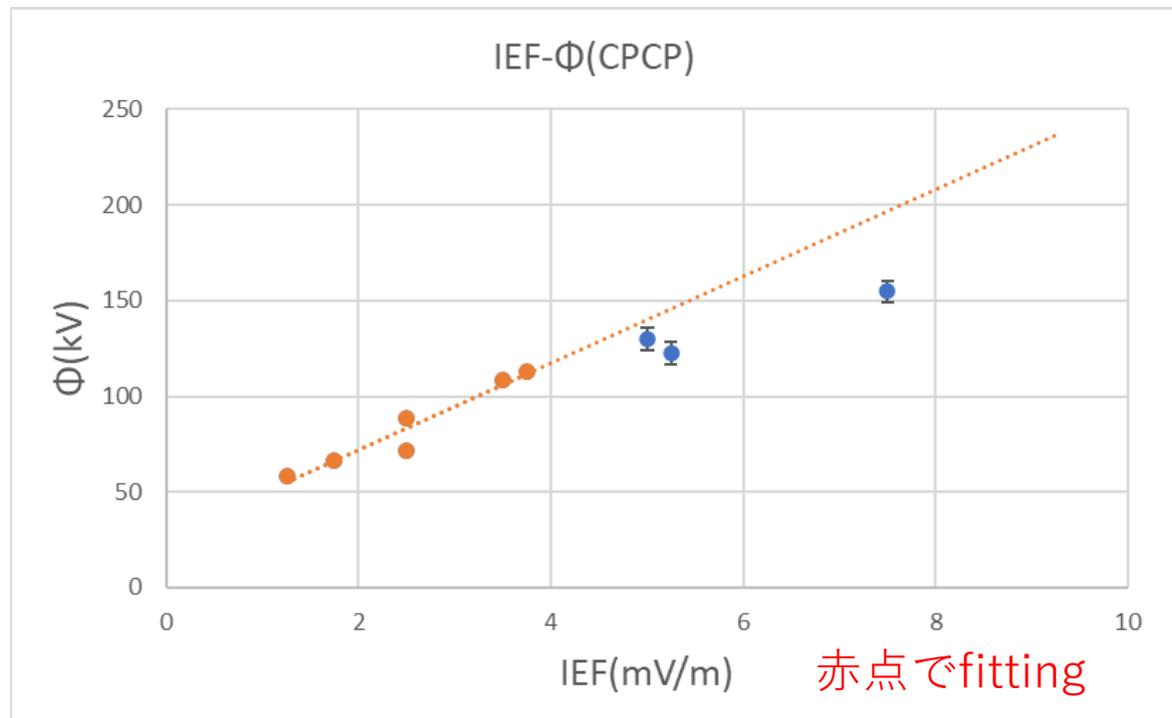
相関係数=0.95

⇒リコネクション率がCPCPを決定

ただし、粘性セル、ローブセルを考慮しても2倍近く違う

# 結果

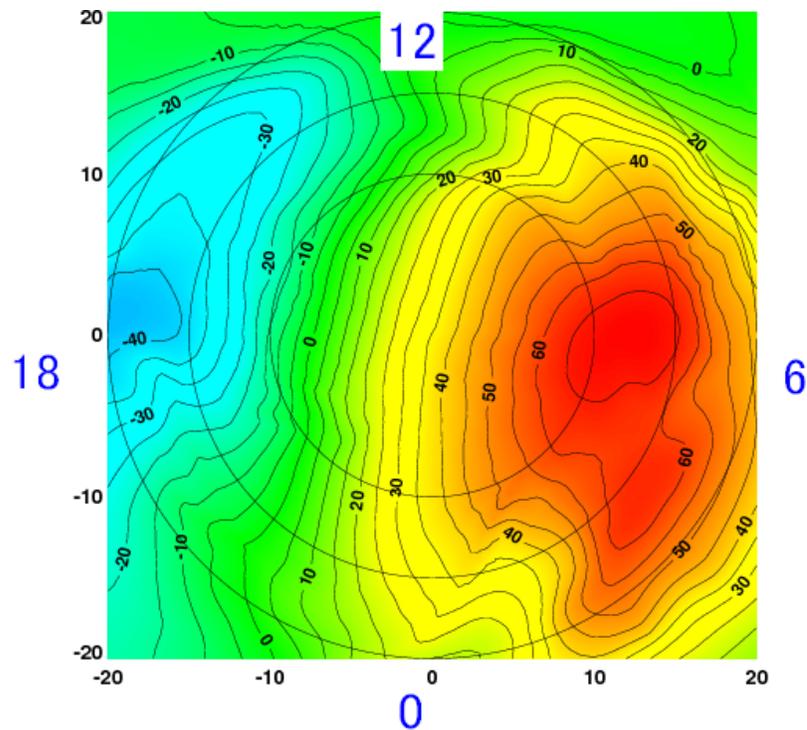
## IEF-CPCPグラフ



最終4ステップの平均値  
右図のポテンシャルの最大値-最小値

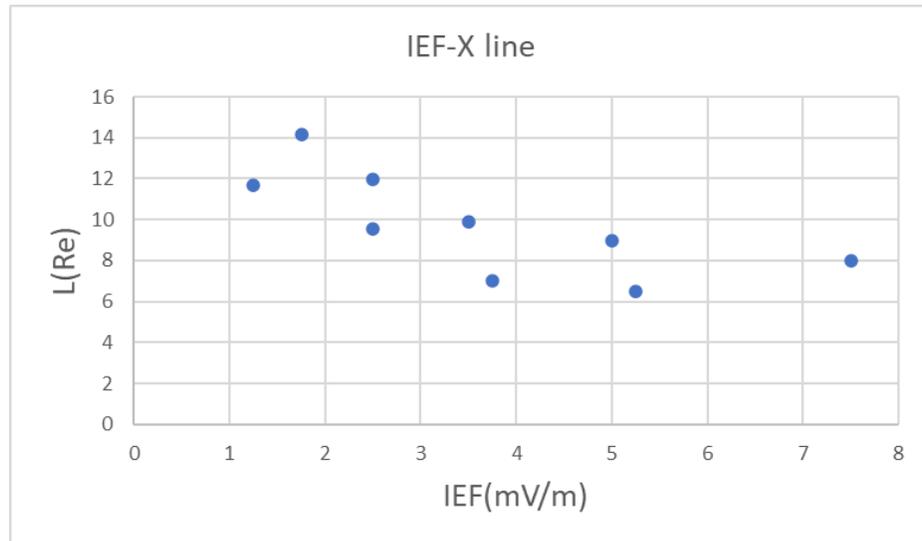
IEF > 5 mV/m の時、CPCP 成長率の低下

極冠のポテンシャル図  
Bz = -5 nT, V = 750 km/s の最終ステップ  
最大値: 68 kV  
最小値: -43 kV



# 考察

## IEFとX lineの長さ,沿磁力線電場



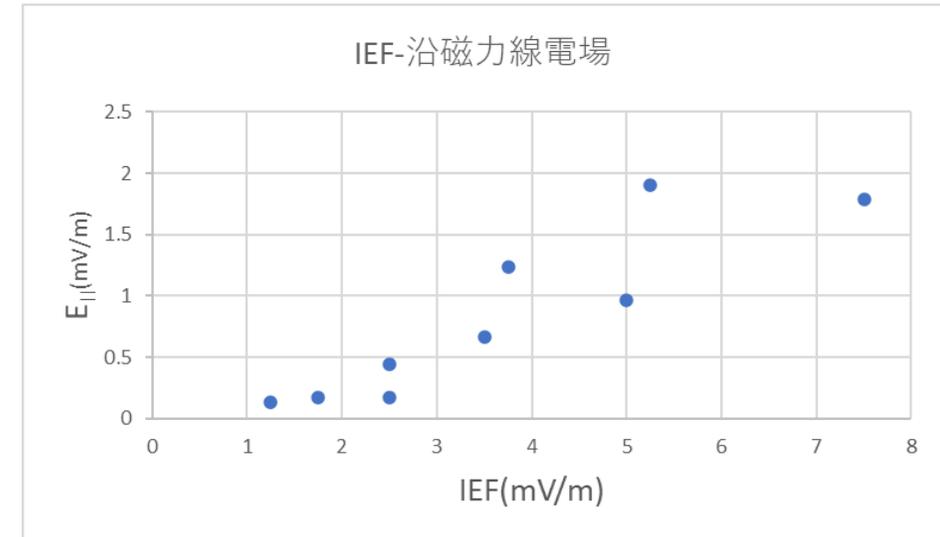
横軸:IEF、縦軸:X lineの長さL

LはIEFに対して飽和傾向

IEF<4mV/mの範囲で累乗近似

$$L = 15.063 \varepsilon^{-0.422}$$

$\varepsilon$  :IEF



横軸:IEF、縦軸:沿磁力線電場

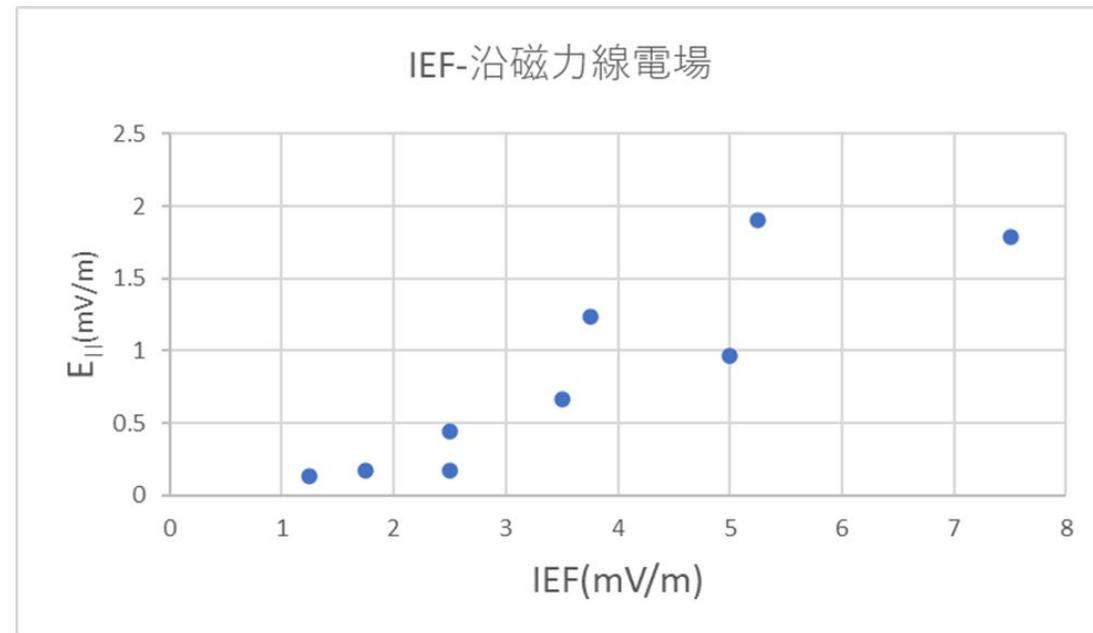
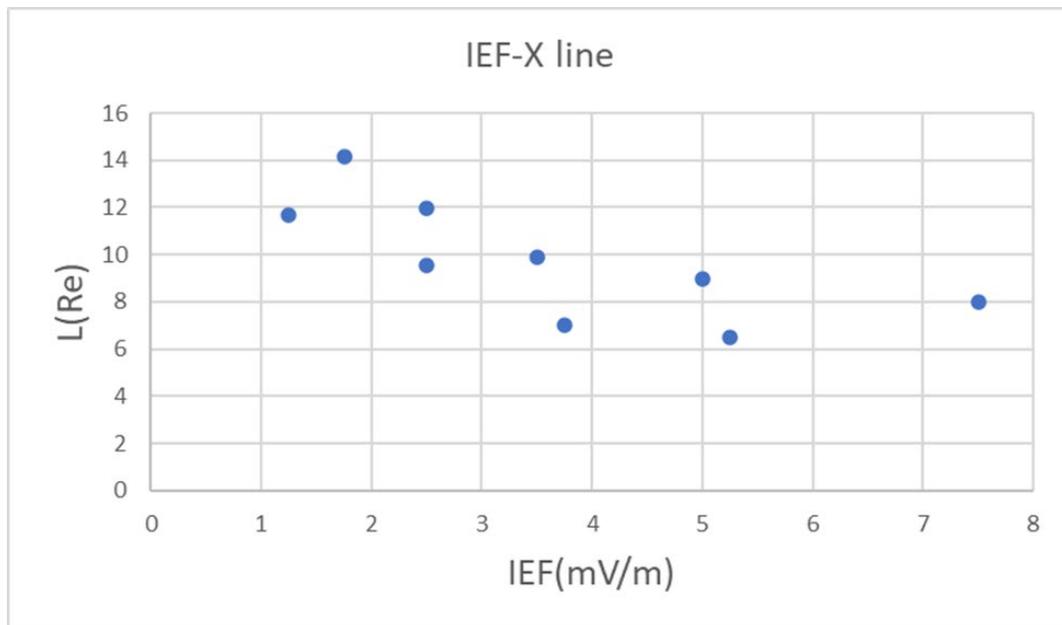
拡散領域の平均値を絶対値で表示

沿磁力線電場もIEFに対して飽和傾向

IEF<4mV/mの範囲で累乗近似

$$E_{||} = 0.0654 \varepsilon^{-1.8807}$$

# 考察



IEF-CPCP線形領域

累乗近似した数式を用いて、

$$\begin{aligned} R_{rec} &= E_{\parallel} \times L \\ &= 0.985 \epsilon^{1.458} \end{aligned}$$

IEFとリコネクション効率、CPCPは線形傾向

IEF-CPCP飽和領域

X lineの長さ と 沿磁力線電場はどちらも飽和 ⇒ リコネクション効率は飽和

# 結論

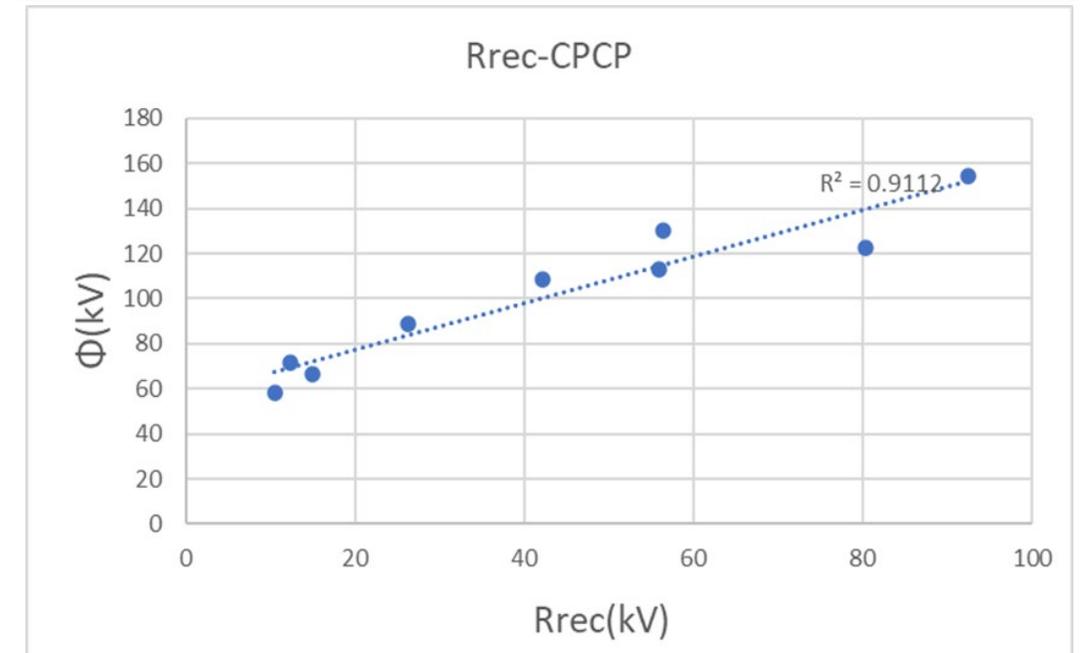
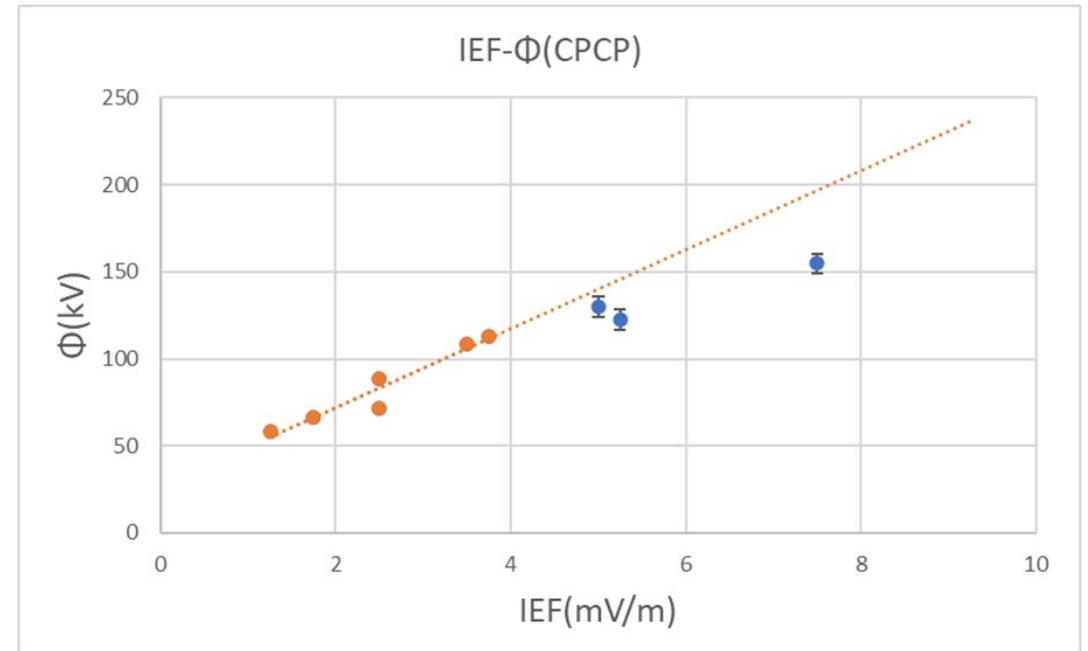
本研究のシミュレーションでは、CPCP成長率の低下はIEF $>$ 5 mV/mで発生した。

沿磁力線電場のX lineに沿った線積分であるリコネクション率とCPCPは非常に良い相関（相関係数:0.95）だが、値に差がある。

リコネクション率について

線形領域では、沿磁力線電場の増加はX lineの長さLの減少を上回る。

飽和領域では、Lと沿磁力線電場の両方が飽和する傾向がある。



発表は以上です。  
ご清聴ありがとうございました。

---