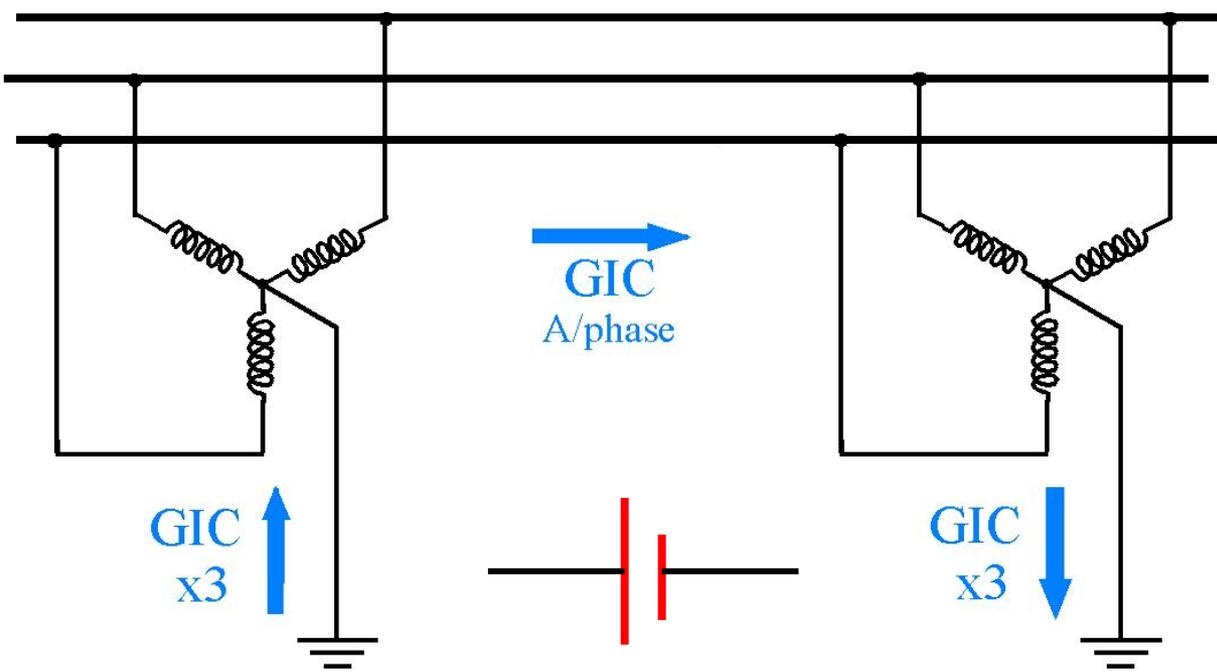


# 日本における地磁気誘導電場の の評価

気象大学校

藤田茂

# 電力網に流れる地磁気誘導電流(GIC)



1989年磁気嵐  
変圧器の損傷



亘さんから

# 地磁気誘導電流研究の重要性

1989年北米大停電の例のように、高緯度地域においては地磁気誘導電流は電力供給に大きな障害を与える。一方、低緯度に位置する我が国は深刻な被害の報告はない。しかしながら、1000年に一度の東日本大震災以後、稀に起きる現象でも深刻な被害をもたらすものは想定外として無視するべきではないという認識が我が国では広まった。従って、極端宇宙天気現象が起きた場合、日本において地磁気誘導電流がどの程度の影響をもたらすかを見積もることは、社会が宇宙天気研究に求める重要なテーマである。



# 経済産業省産業構造審議会電気設備自然災害等対策 ワーキンググループの中間報告書（2014年6月）

- 太陽フレアに伴う磁気嵐が電気設備に与える影響
  1. 変圧器への影響（変圧器磁気飽和による鉄心加熱）
  2. 電圧低下（変圧器磁気飽和による無効電力消費増）
  3. 高調波の発生（変圧器磁気飽和による高調波発生）
  4. 保護リレーの誤動作（地磁気誘導電流による保護リレー誤動作）



＜太陽フレア観測機関との連携の強化等＞

＜太陽フレアによる地磁気誘導電流発生に係るメカニズムの調査研究の実施＞

＜巨大太陽フレアに伴う磁気嵐に対するリスク評価等及び対策の充実化＞

**2015年3月：「太陽フレアによる地磁気誘導電流に関する調査検討委員会」においても、誘導電流の研究の重要性を確認**

# 内容

- 日本の地磁気誘導電場・電流研究の現状
- 地磁気誘導電流（GIC）推定
  - 誘導電流観測データがない場合のモデリング結果
  - 誘導電流と磁場の時系列観測データがある場合
- 地磁気誘導電場（GIE）計算および最大誘導電流推定の問題点
  - 実測に基づく地下電気抵抗分布
  - 日本（中低緯度）での地磁気擾乱の特徴

# 日本の地磁気誘導電場・電流研究の現状

- 日本は磁氣的に低緯度にあり、磁場変動は比較的穏やかとされている。よって、地磁気誘導電流に関する関心は低い。特に予測に必要な地磁気誘導電場・電流のモデリング研究は未着手であった。
- ヨーロッパやアメリカに比べ、日本は非常に複雑な地下電気抵抗分布を持っている。諸外国の先行研究の成果をそのまま日本に当てはめることはできない。
- 地磁気誘導電流がもたらす停電は、現代社会になって初めて深刻な災害になってきた。よって過去の経験が存在しない。予測の手段は科学的アプローチだけである。それは太陽物理学から地球内部までカバーする分野横断のアプローチになる。

# 分野横断の科学

宇宙空間物理学

太陽

磁気圏電離圏

巨大磁気嵐の推定

太陽物理学

地上磁場変化

誘導電場

地下電気抵抗分布の推定

固体地球電磁気学

送電線網インピーダンス分布

地磁気誘導電流(送電線網)

# 内容

- 日本での地磁気誘導電場・電流研究の現状
- 地磁気誘導電流（GIC）推定
  - 誘導電流観測データがない場合のモデリング結果
  - 誘導電流と磁場の時系列観測データがある場合
- 地磁気誘導電場（GIE）計算および最大誘導電流推定の問題点
  - 実測に基づく地下電気抵抗分布
  - 日本（中低緯度）での地磁気擾乱の特徴

# 誘導電流推定法：誘導電流観測データがない場合

- モデル計算によって誘導電場を求める。
- 求められた誘導電場の下で、送電線情報を与えて誘導電流を求める。

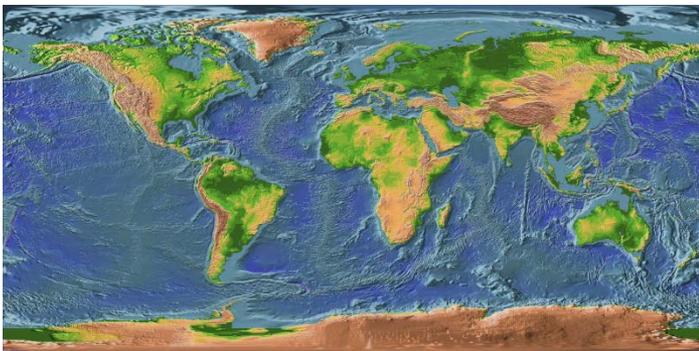
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \boxed{R(\vec{r})} \vec{I}(\vec{r}, t)$$

$$\nabla \times \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{J}(\vec{r}, t) + \mu_0 \boxed{\vec{J}^{ext}(\vec{r}, t)}$$

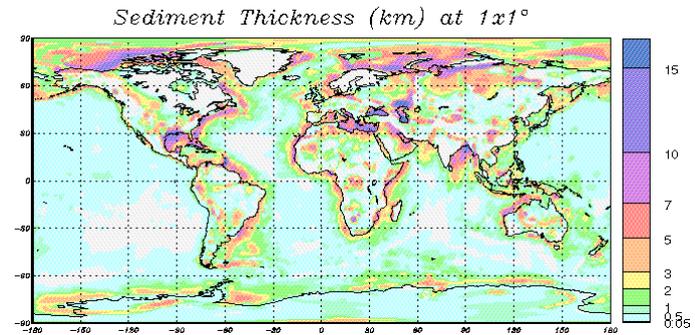
$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} = i\omega \vec{B}(\vec{r})$$

□ 地下電気抵抗

□ 外部電流



ETOPO1 (NOAA)



Laske and Masters, 1997

標高データ (1' × 1')

堆積層の厚さデータ (1° × 1°)

1' × 1' に内挿

海水:  $0.333\Omega\cdot\text{m}$   
岩石層:  $1000\Omega\cdot\text{m}$

堆積層:  $10\Omega\cdot\text{m}$

3次元抵抗モデル

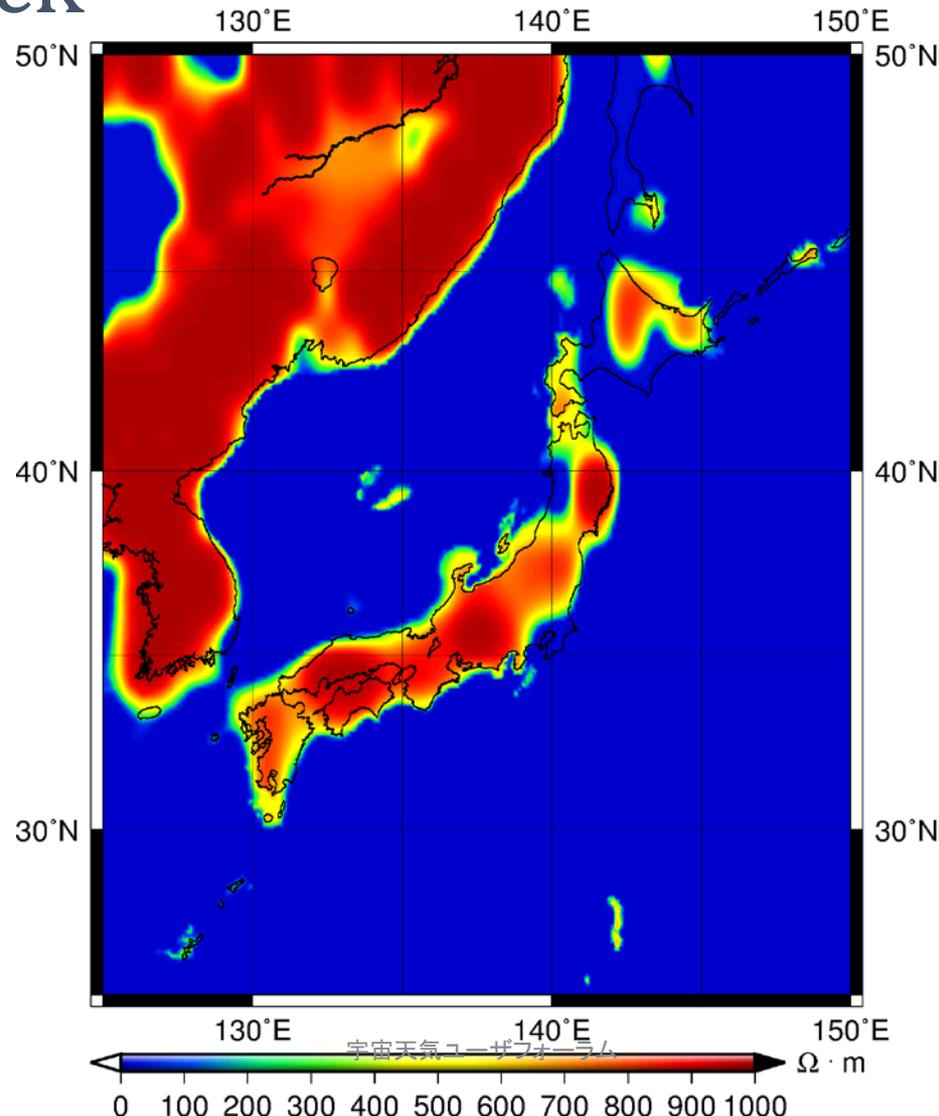
外部からの誘導源

数値計算

地磁気誘導電場分布

# 地下電気抵抗分布 (深さ1 kmまでの平均)

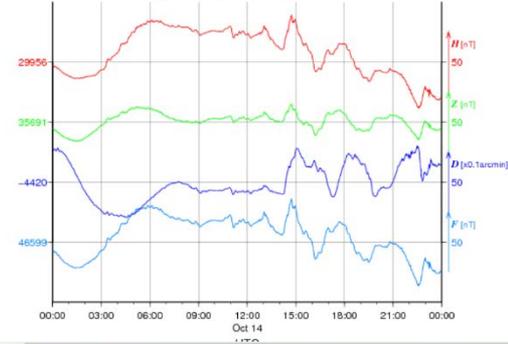
$$\rho_{\text{rock}} = 1000 \Omega \cdot \text{m}$$



# 外部擾乱

- 将来起こりうる極端現象の波形は不明  
外部擾乱源（電流）を基本変動に分け  
実際の現象を模したものではない。
- 最大誘導電場を評価するため、外部擾

KAKIOKA  
2014/10/14 Provisional Geomagnetic Data (1-min) - Normal -

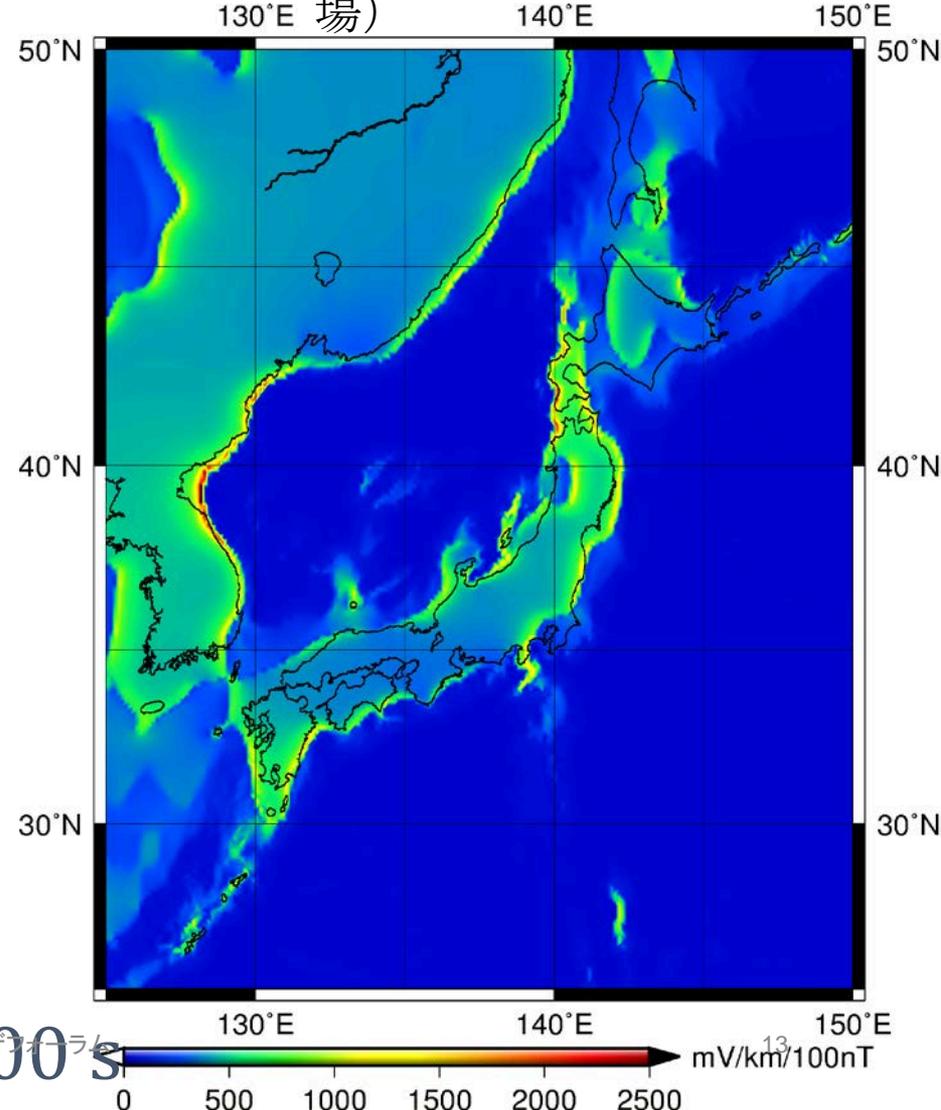
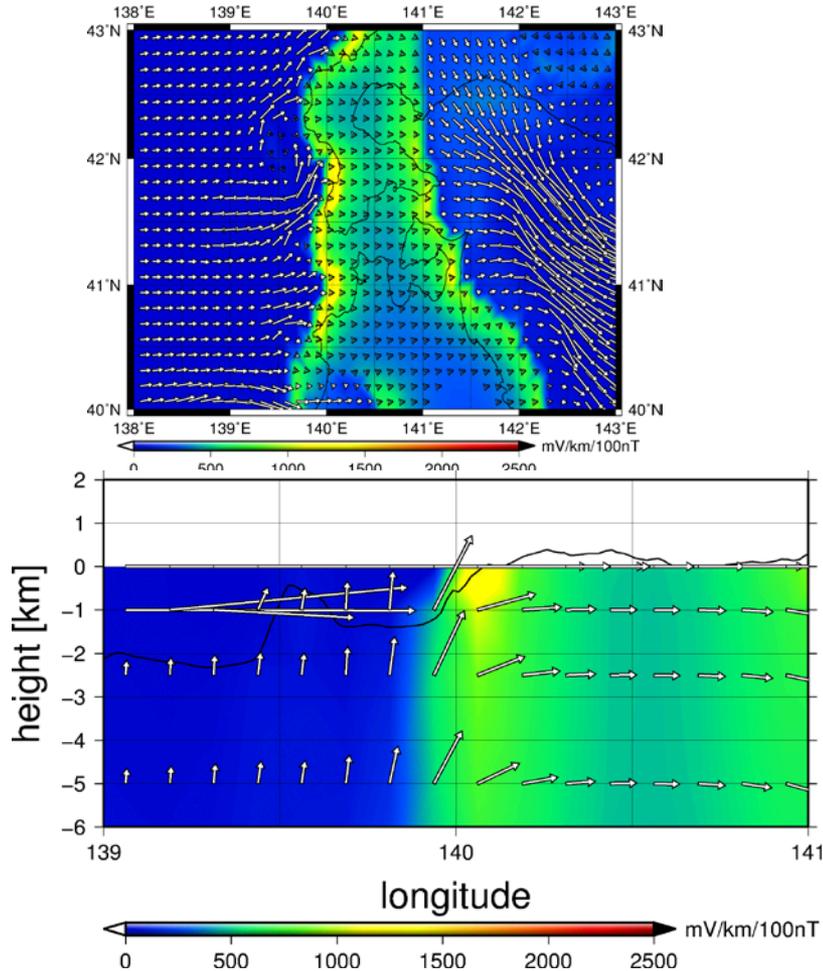


# 日本の誘導電場生成の特徴

誘導電場振幅 (柿岡で100nTの変動があった場合の電場)

誘導電流ベクトル

外部東西電流



$$\rho_{\text{rock}} = 1000 \Omega \cdot \text{m}$$

$$T = 200 \text{ s}$$

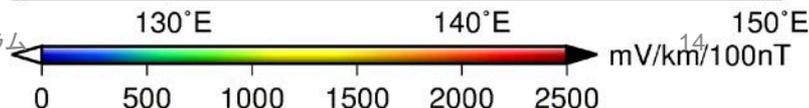
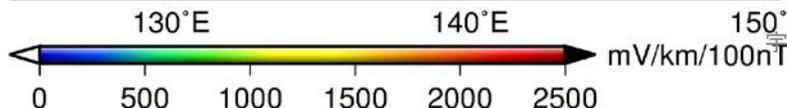
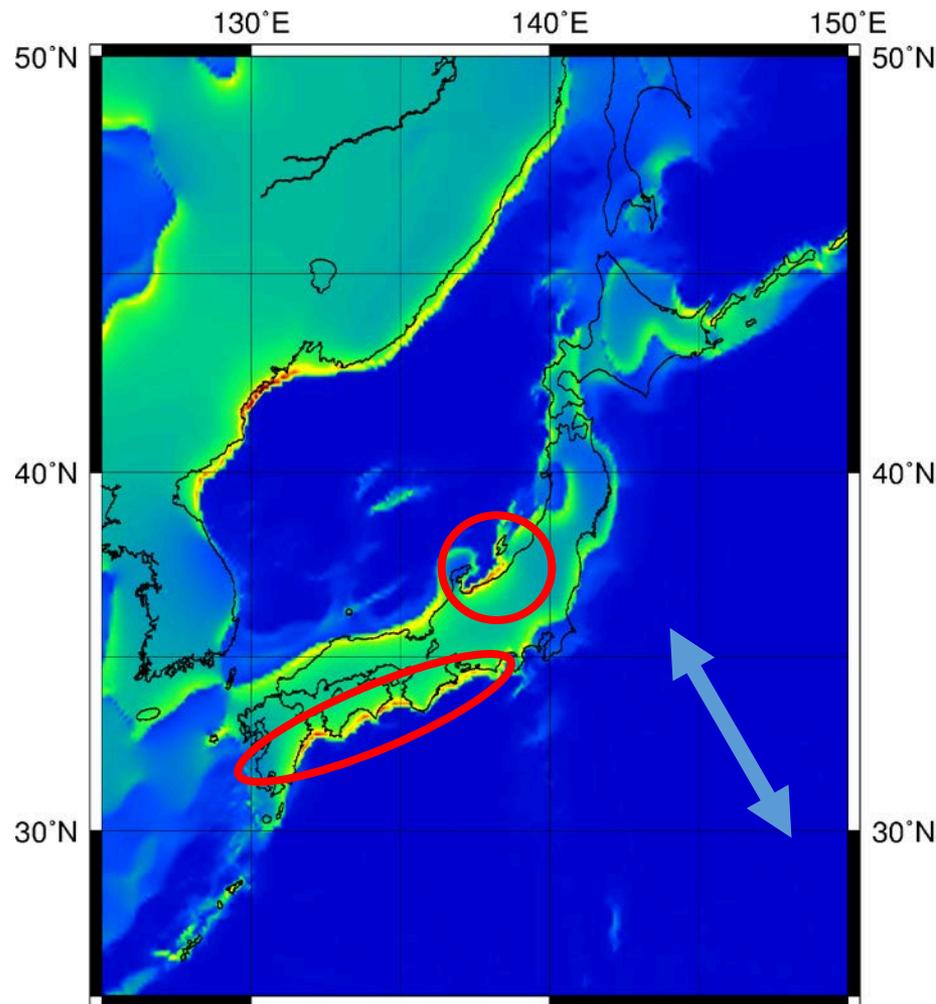
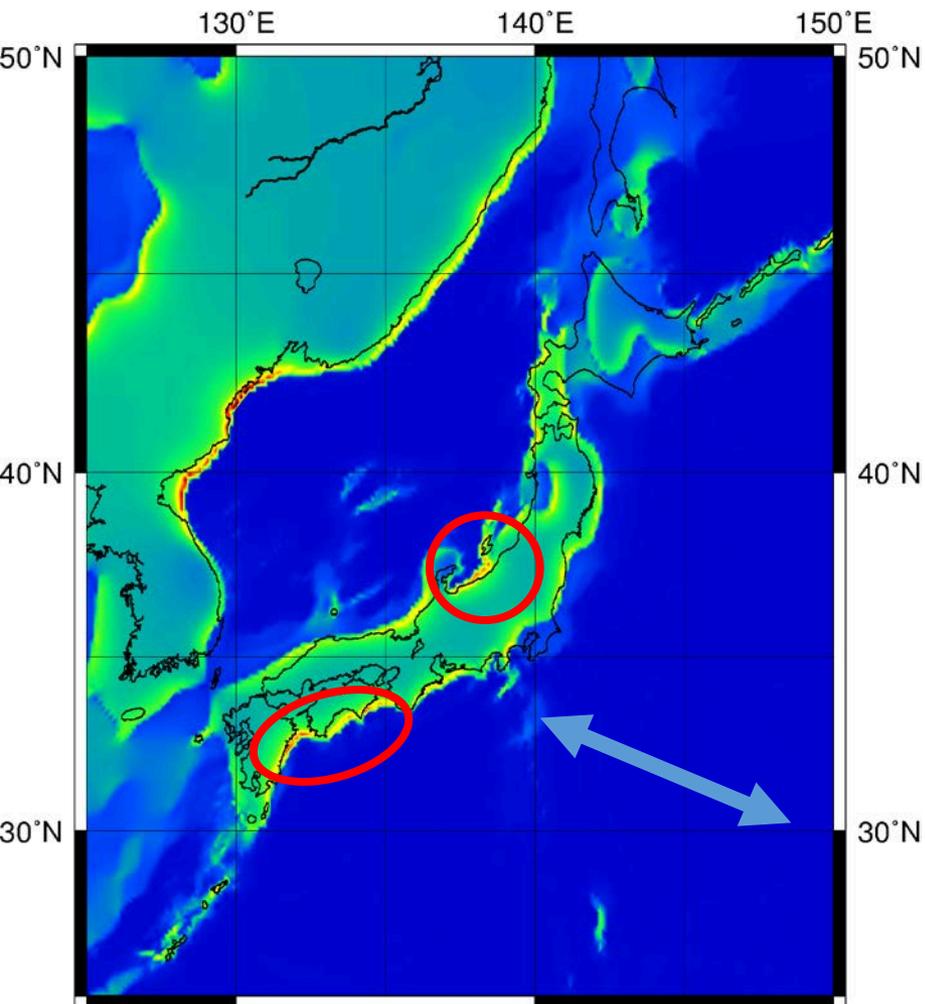
宇宙天気ユーザフォーラム

# 地表誘導電場分布

## -30°

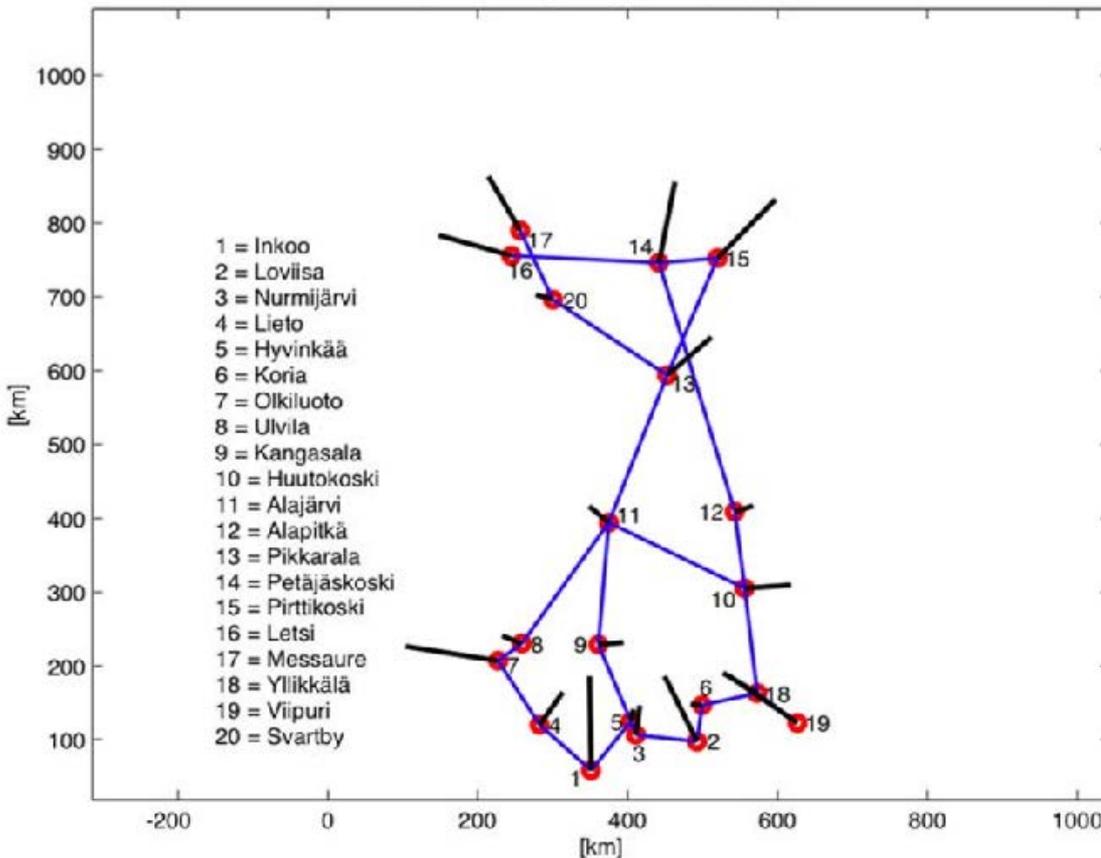
$$\rho_{\text{rock}} = 1000 \Omega \cdot \text{m} \quad T = 200 \text{ s}$$

## -60°



# 地磁気誘導電流計算の例

Finnish 400 kV power grid in 1979 to 1983



Pirjola (2008)

- Finland 400kV送電線網と変電所の地磁気誘導電流。一様な誘導電場（一様な地下電気抵抗構造）を与えた。
- 黒線の方法は最大誘導電流を与える誘導電場の方向、線の長さは誘導電流の大きさを示す。
- 送電線網の情報（電力会社の協力）が必要

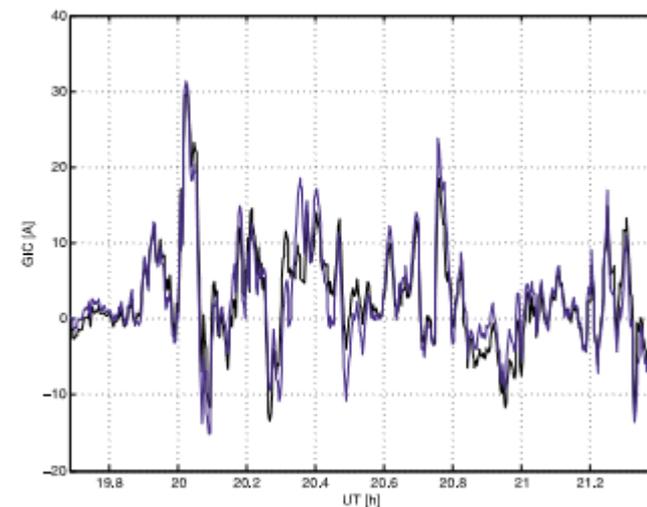
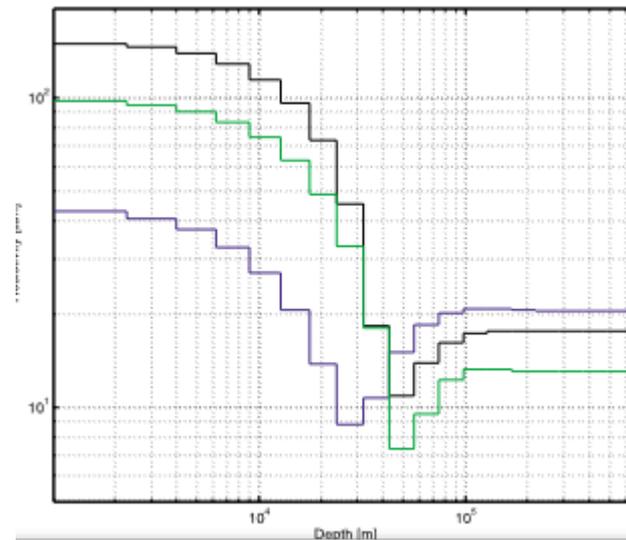
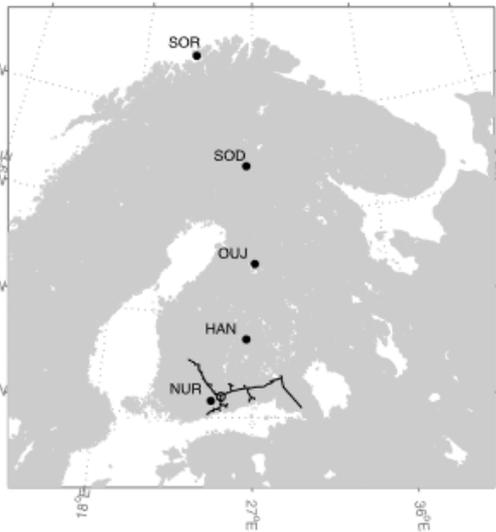
# 誘導電流推定法：誘導電流と磁場の時系列観測データがある場合

Pulkkinen et al (2007)

$$\text{GIC}(t) = aE_x(t) + bE_y(t) + \epsilon(t)$$

$$\begin{pmatrix} \overline{E_x}(\omega) \\ \overline{E_y}(\omega) \end{pmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{yx} \\ Z_{xy} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{B_x}(\omega) \\ \overline{B_y}(\omega) \end{pmatrix} + \epsilon'(\omega)$$

地面の電磁誘導特性を利用。ただし1次元地下構造を仮定



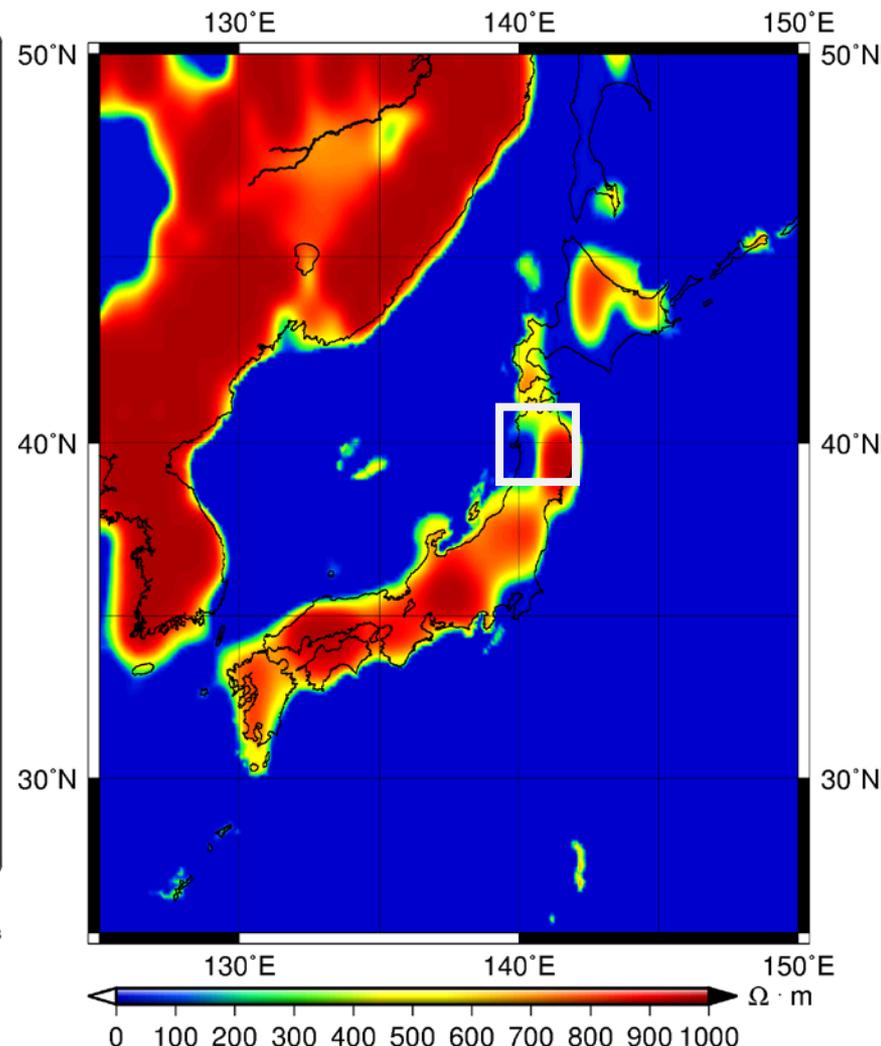
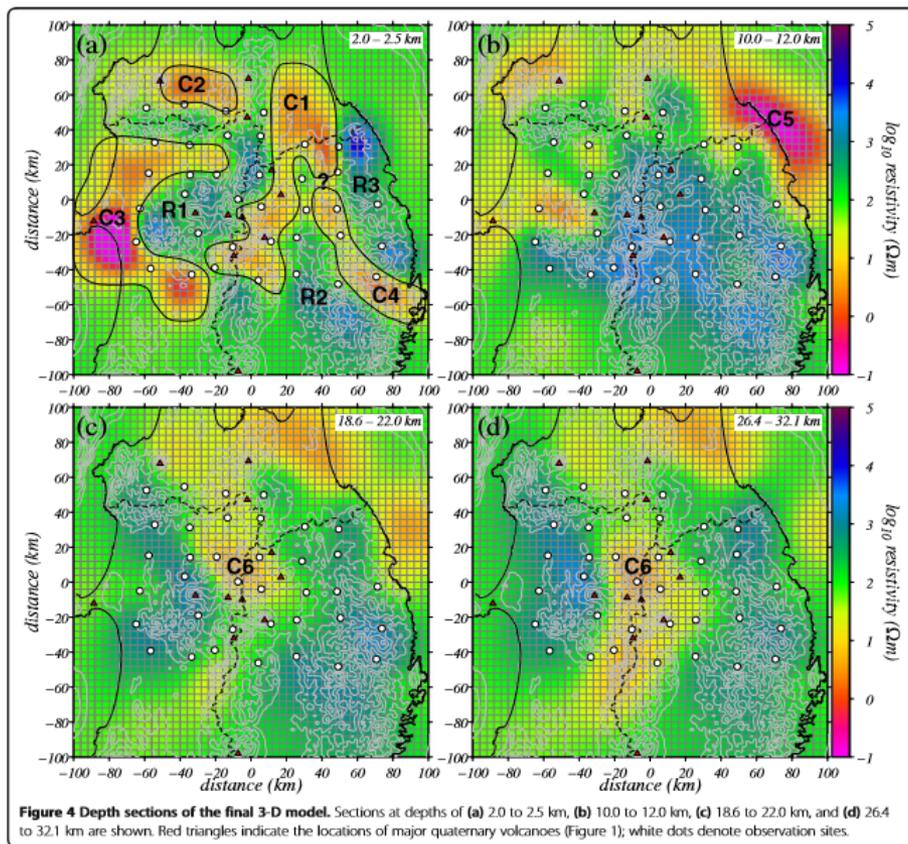
日本のような複雑な電気抵抗構造では検証が必要

# 内容

- 日本の地磁気誘導電場・電流研究の現状
- 地磁気誘導電流（GIC）推定
  - 誘導電流観測データがない場合のモデリング結果
  - 誘導電流と磁場の時系列観測データがある場合
- 地磁気誘導電場（GIE）計算および最大誘導電流推定の問題点
  - 実測に基づく地下電気抵抗分布
  - 日本（中低緯度）での地磁気擾乱の特徴

# 地下電気抵抗実測例

(本研究)



Kanda and Ogawa (2014)

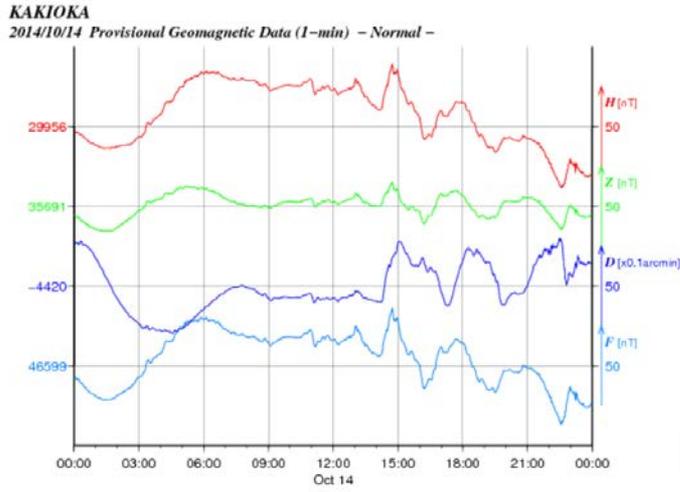
that the regional conductor C6 seems to be the Kanto volcano (KVV in Figure 1).

# 中低緯度帯における巨大磁気嵐の特異な振る舞い

巨大磁気嵐は、中小規模の磁気嵐と違う点がある。

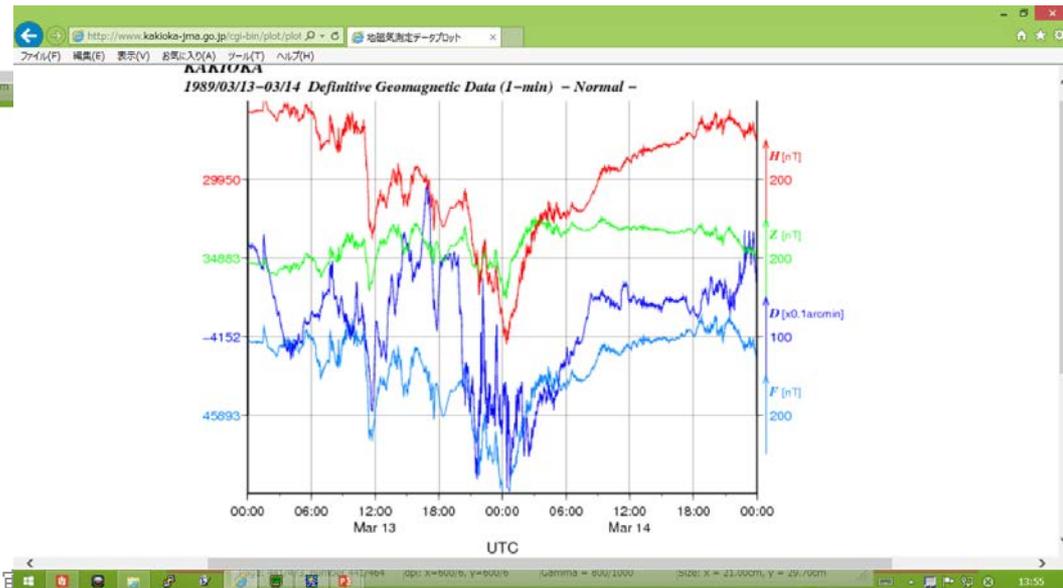
- 巨大磁気嵐には比較的短周期（10分以下程度）擾乱振幅が発達するイベントがある。⇒ 磁気嵐の大きさの指標（Dst）と誘導電流が比例関係にあると考えることが多い。しかしこの仮定は誘電電流の過小評価となるかもしれない。

# 通常の磁気嵐と巨大磁気嵐



2014/10/14

1989/03/13-14



# 1958/02/11巨大磁気嵐の際、長時間継続した短周期変動（振幅>100nT）

40

M. Nagai

at Kakioka. Before the occurrence of the storm, a solar flare of importance 2 (S 1; W 14°) occurred at 21h 08m UT, February 9, accompanying an outburst of Type I

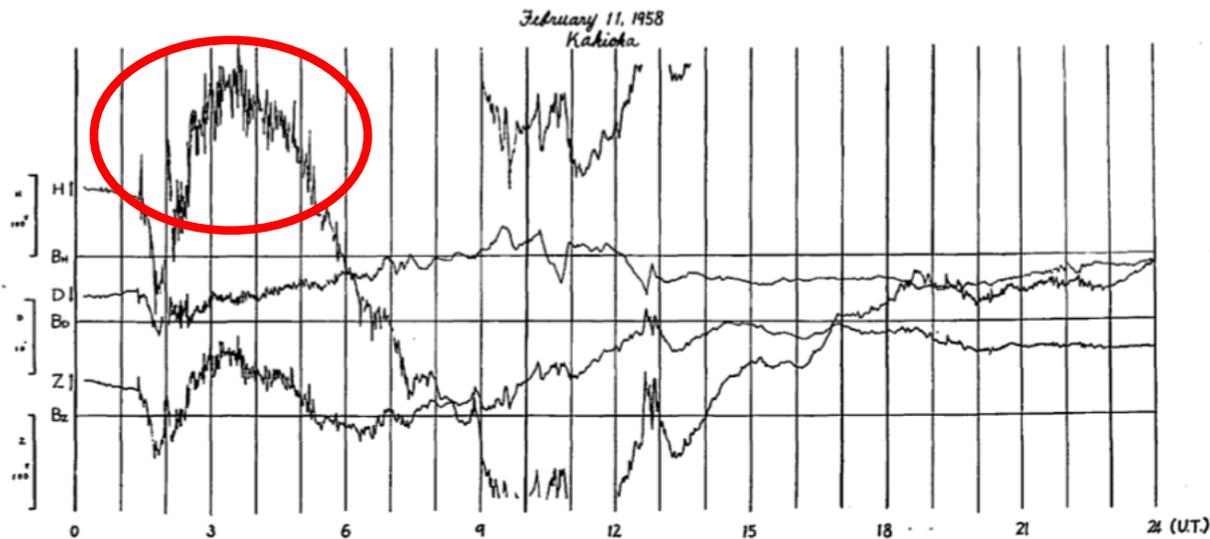


Fig. 1. Magnetogram at Kakioka (Feb. 11d 00h—24h UT).

Nagai, 1964

# まとめ（研究の現状と今後の展望）

極端宇宙天気現象に伴う日本での地磁気誘導電流の予測は社会にとって重要であるが、まだ研究は緒についたばかりである。

## • 現状

- 日本域の地下電気抵抗分布をモデルで与えた場合の誘導電場分布を推定した。深い海から陸地になる海岸や深い湾で電場が大きくなることが特徴である。

## • 展望

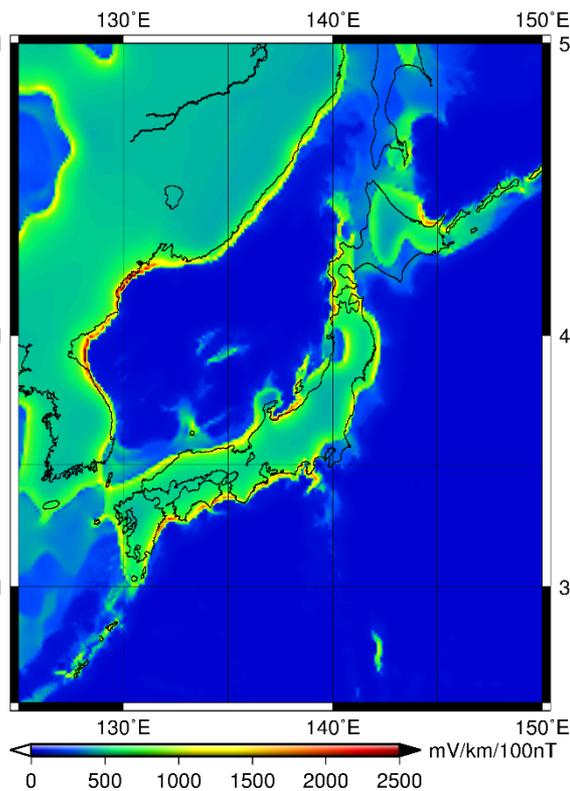
- 誘導電場のモデル計算に用いた地下電気抵抗分布が実測に基づいたものではないので今後の研究が必要である。
- 中低緯度の巨大磁気嵐は、短周期変動が卓越する場合がある。この変動は誘導電流発生に効果的である。大規模磁気嵐推定の際、中小規模の磁気嵐で得た誘導電流の値にDstの比を掛けた推定が行われるが、これは誘導電流の過小評価になるかもしれない。巨大磁気嵐の振る舞いの解明が必要である。
- 誘導電流観測と地磁気観測両方のデータが利用できる場合は、任意の地磁気変動に対する誘導電流を推定する方法が提案されている。日本における適用可能性の検証が必要。

終わり

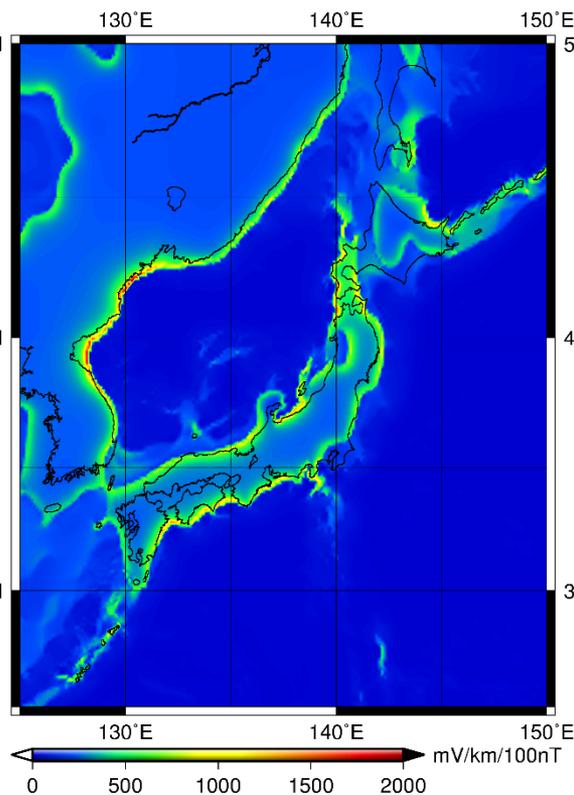


A moving truck in Champaign  
2015/May/23

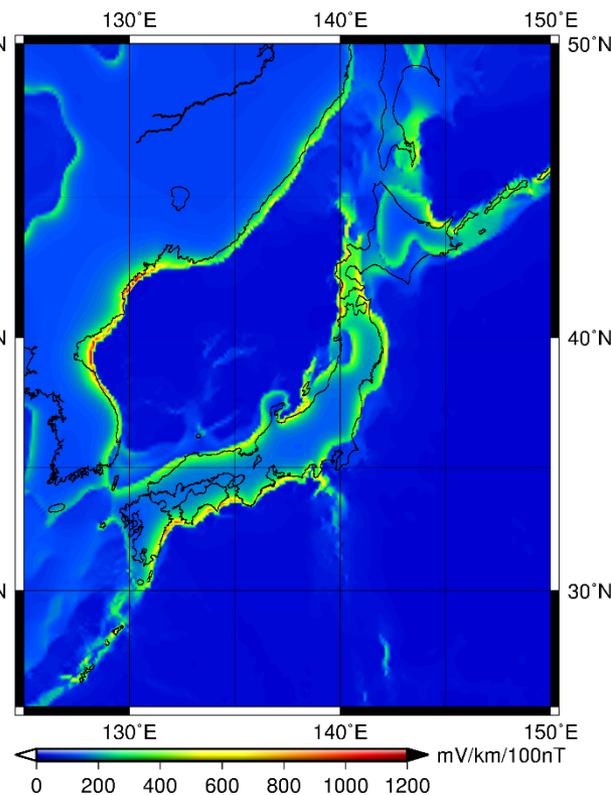
# 最大誘導電場分布



200秒  
最大～2V/km/100nT



800秒  
最大～1.5V/km/100nT



3600秒  
最大～1V/km/100nT