

“大気に聞く”地震予測

GNSS-TEC法を用いた地震予測の可能性



目次

01

研究の背景

なぜこの研究を始めたのか

02

研究方法

研究の具体的な方法

03

分析

どのような分析を行ったか

04

結果

データ分析の結果

05

今後の展望

この研究をどう発展させていくか



Section 1

研究の背景







最大震度

7

9日15時00分ごろ

M8.3



もじも：~~も~~：近い将来に

これは南海トラフ巨大地震が起きた場合を想定したフェイクニュース画像である

内閣府内の委員会が作成した予測に基づく



南海トラフ巨大地震史

1361年以降を紹介（最古の観測記録は684年）

1361

137年

1498

107年

1605

102年

正平/康安 M8.5

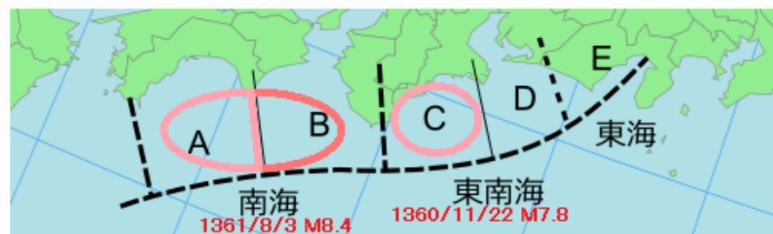
南海

1361年8月3日 (正平16年) M8.2~8.5

↑ 0.7年後

東南海

1360年11月22日 (正平15年) M7.8



明応 M8.4

南海

1498年7月9日 (明応7年)

↓ 0.2年後

東海 & 東南海

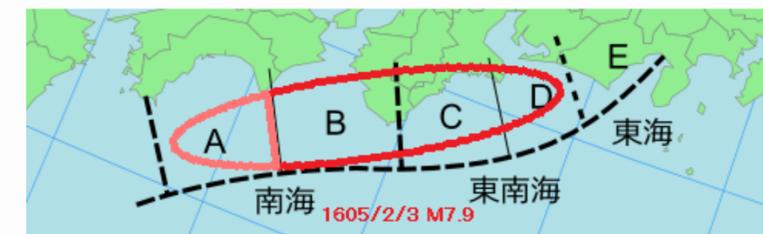
1498年9月20日 (明応7年) M8.2~8.4



慶長 M8.0

南海 & 東南海

1605年2月3日 (慶長9年) M7.9~8.0



User:Pekachu:derivative work:CC BY-SA 3.0 による, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8633592>



1707

147年

1854

92年

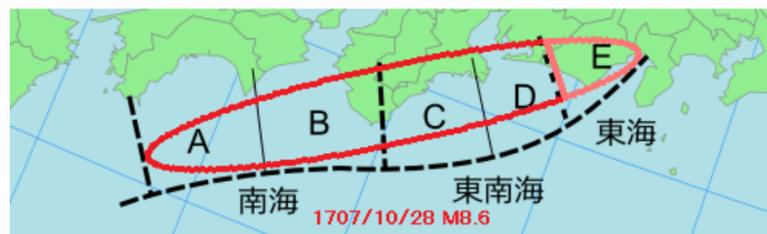
1946

76年

宝永 M8.6

東海 & 東南海 & 南海

1707年10月28日 (宝永4年) M8.6



安政 M8.4

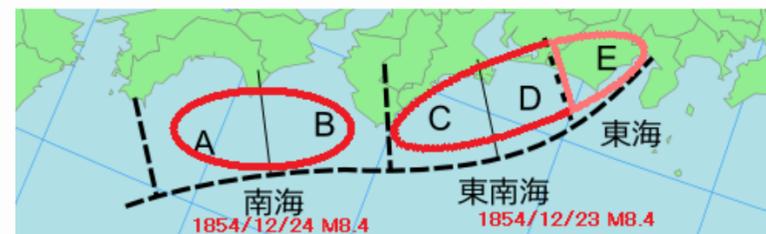
南海

1854年12月24日 (嘉永7年) M8.4

↑ 32時間後

東海 & 東南海

1854年12月23日 (嘉永7年) M8.4



昭和 M8.0

南海

1946年12月21日 (昭和21年) M8.0

↑ 2年後

東南海

1944年12月7日 (昭和19年) M7.9

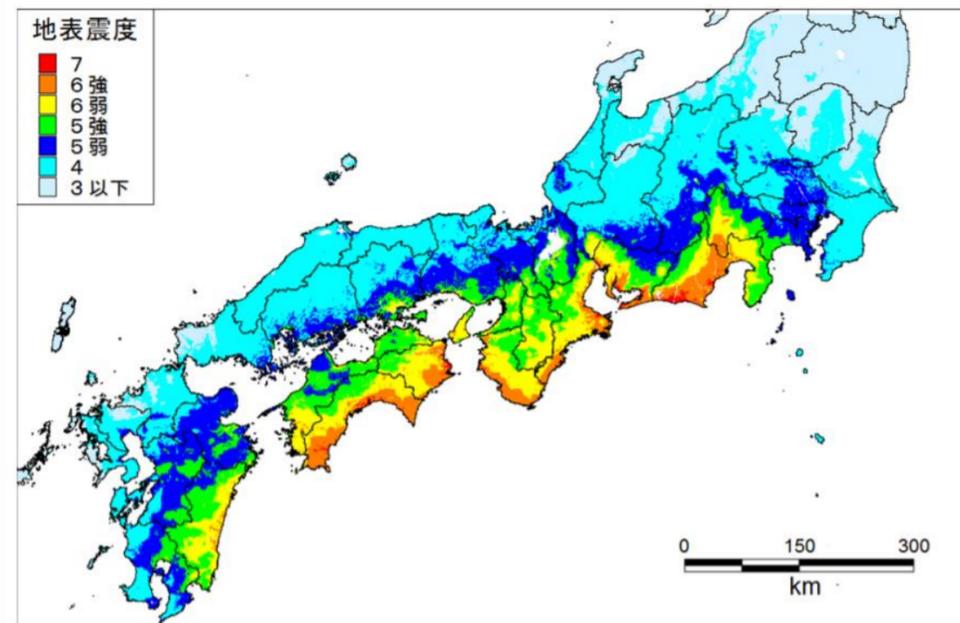


User:Pekachu:derivative work:CC BY-SA 3.0 による, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8633592>



10年以内: 30%
30年以内: 70% ~
80%
50年以内: 90%以上

日本政府による予測, 引用2



内閣府作成, 引用3

2022



20XX

現在

直近に起きた震度5以上の地震
2021/12/09 M6.1 トカラ列島
2022/01/04 M6.1 父島
2022/01/22 M6.6 日向灘

最悪の未来を 変えるために

南海トラフ巨大地震

- 想定死者数185,000人
(冬の深夜、平均的な風速のときに地震が発生し、主に東海地方が被害を受ける場合)
- 津波による死者が83%を占める
- 地震発生後1週間以内の想定避難者数9,500,000人

引用3

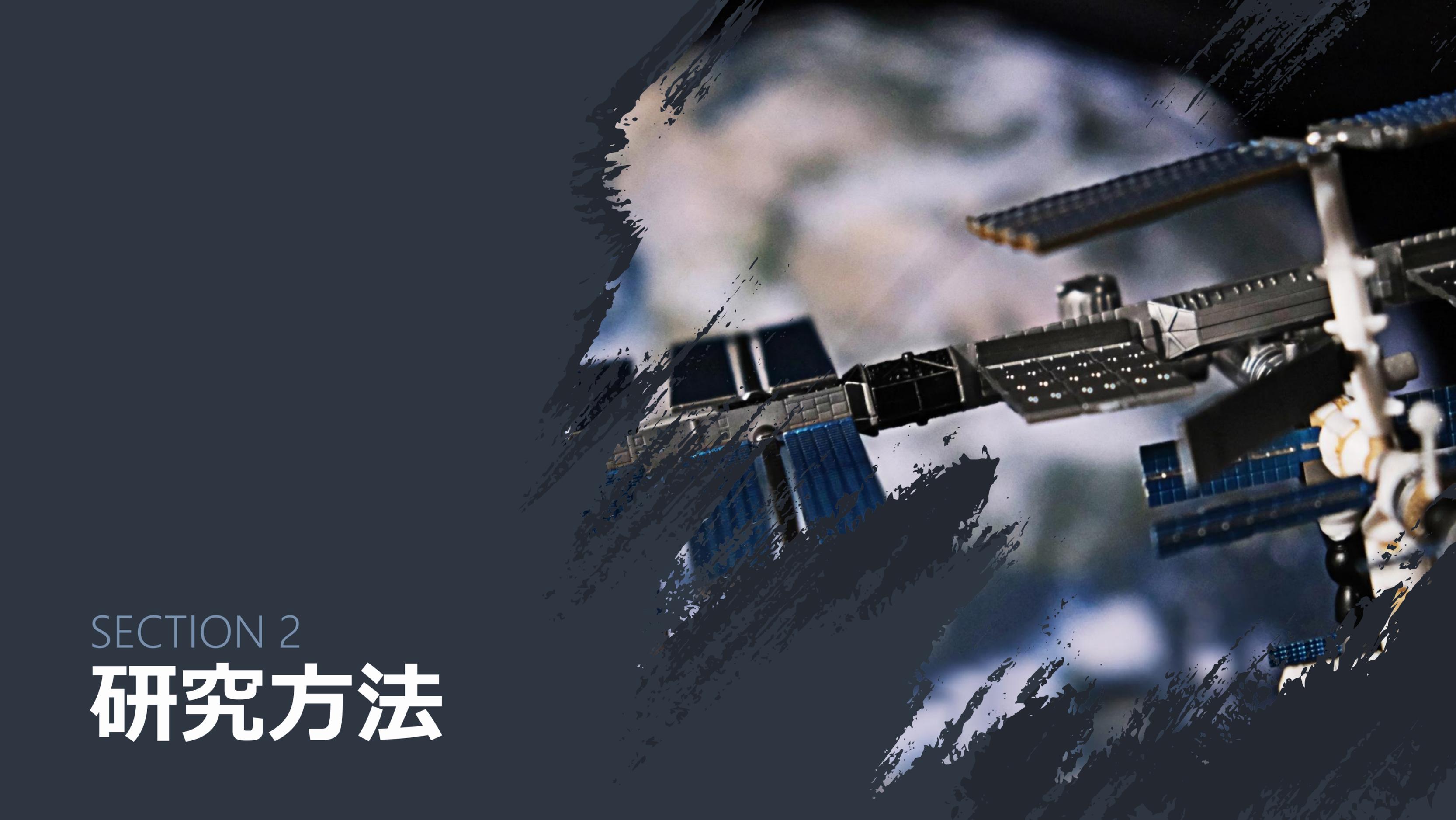


どうすれば命は助かる？





地震を正確に 予測することは 可能か？

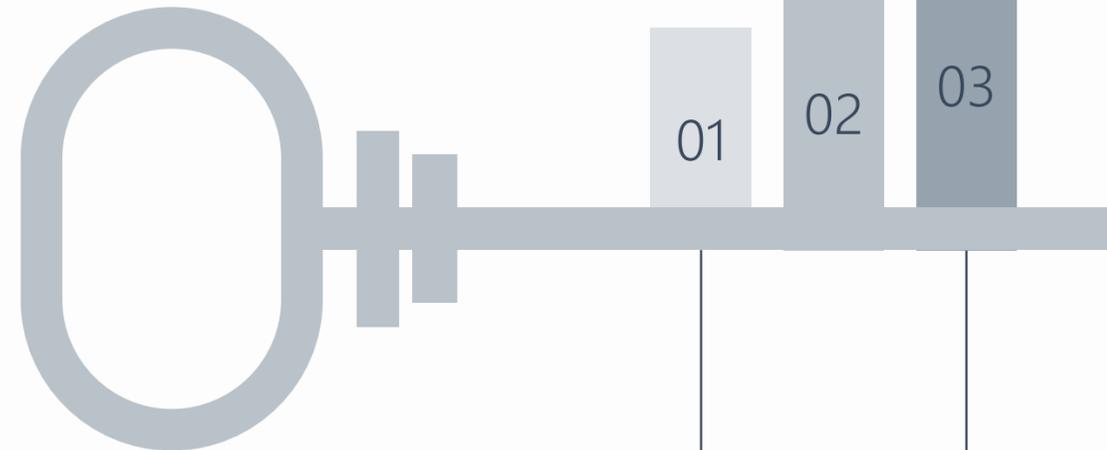
A detailed LEGO Technic model of a satellite or space station component, featuring various grey, black, and blue parts, with a white and yellow structure on the right. The background is a dark, abstract, brush-stroke-like pattern in shades of blue and black.

SECTION 2

研究方法



予測の3大重要ポイント



観測可能性

以下の条件を満たす観測機器を用いる必要がある

- 1. 既に**現在利用可能**
 - 2. **日本全国**に設置されている
- 新しい機器を全国に設置する時間はない

予測感度

どれくらい詳細に予測できるか
大きさ (マグニチュード)
震源位置
地震発生までの時間

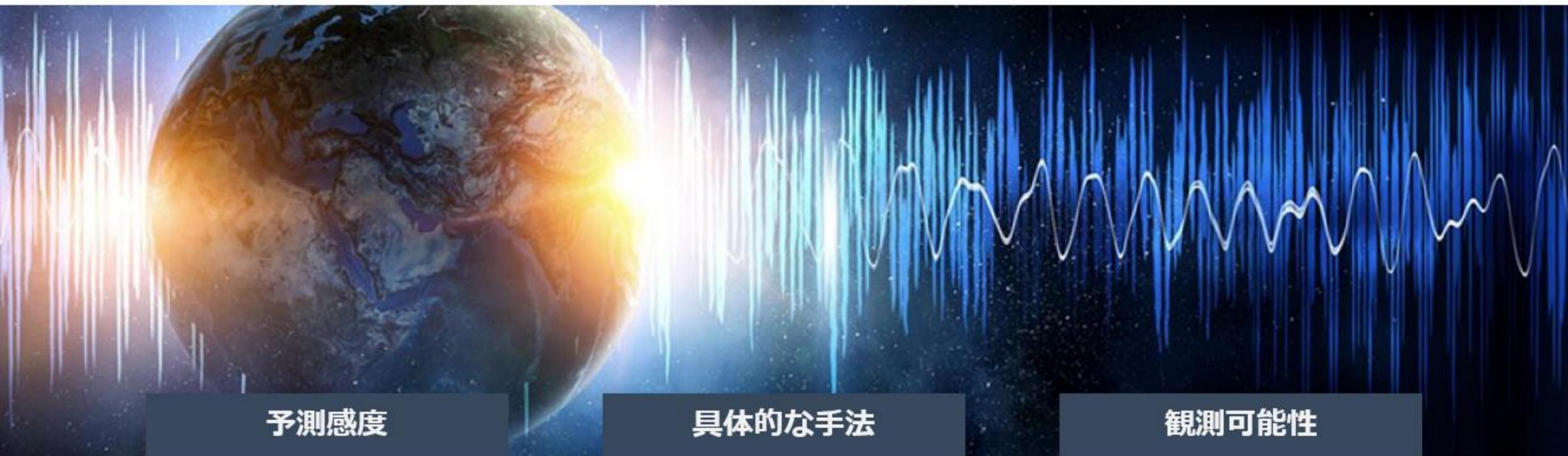
どれくらい**小さい地震**まで予測可能か

精度

最も重要なポイント

もし地震予報が外れた場合、社会がパニックに陥り損失を生むだけの可能性がある

GNSS-TEC法の**特徴**



予測感度

この手法で予測できる地震は

- 30分～1時間後に発生
- マグニチュード7以上

具体的な手法

TEC（電離圏総電子数）を算出し、
TECが地震発生の30分～1時間前に増加する現象を捉えることで地震を予測

観測可能性

GEONET（GNSS連続観測システム）のデータを利用することで
約1,300か所ある観測拠点（電子基準点）のデータを利用可能

GNSS-TEC法の**特徴**

GNSS = 全球測位衛星システム

私たちに位置情報を提供してくれる衛星システム
例: GPS, QZSS (日本の"みちびき"), GLONASS

予測感度

この手法で予測できる地震は

- 30分~1時間後に発生
- マグニチュード7以上

具体的な手法

TEC (電離圏総電子数) を算出し、
TECが地震発生の30分~1時間前に増
加する現象を捉えることで地震を予測

観測可能性

GEONET (GNSS連続観測システ
ム) のデータを利用することで
約1,300か所ある観測拠点 (電子基
準点) のデータを利用可能

GNSS-TEC法の**特徴**

TEC = **電離圏総電子数**

電離圏に存在する電子の総数

予測感度

この手法で予測できる地震は

- **30分～1時間後に発生**
- **マグニチュード7以上**

具体的な手法

TEC（電離圏総電子数）を算出し、
TECが地震発生の30分～1時間前に増加する現象を捉えることで地震を予測

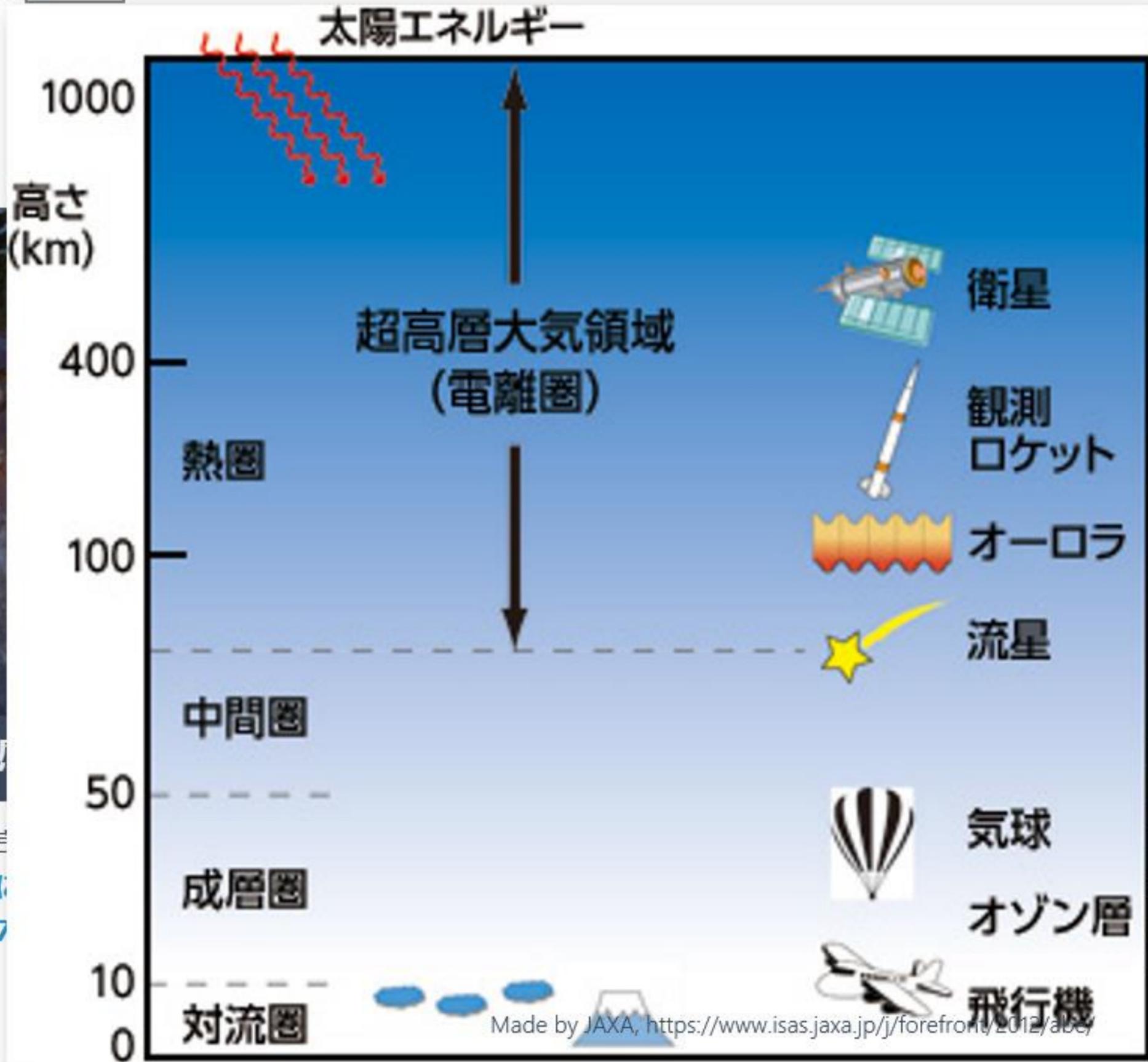
観測可能性

GEONET（GNSS連続観測システム）のデータを利用することで
約1,300か所ある観測拠点（電子基準点）のデータを利用可能



予測

- この手法で予測できる
- 30分~1時間後の
- マグニチュード7



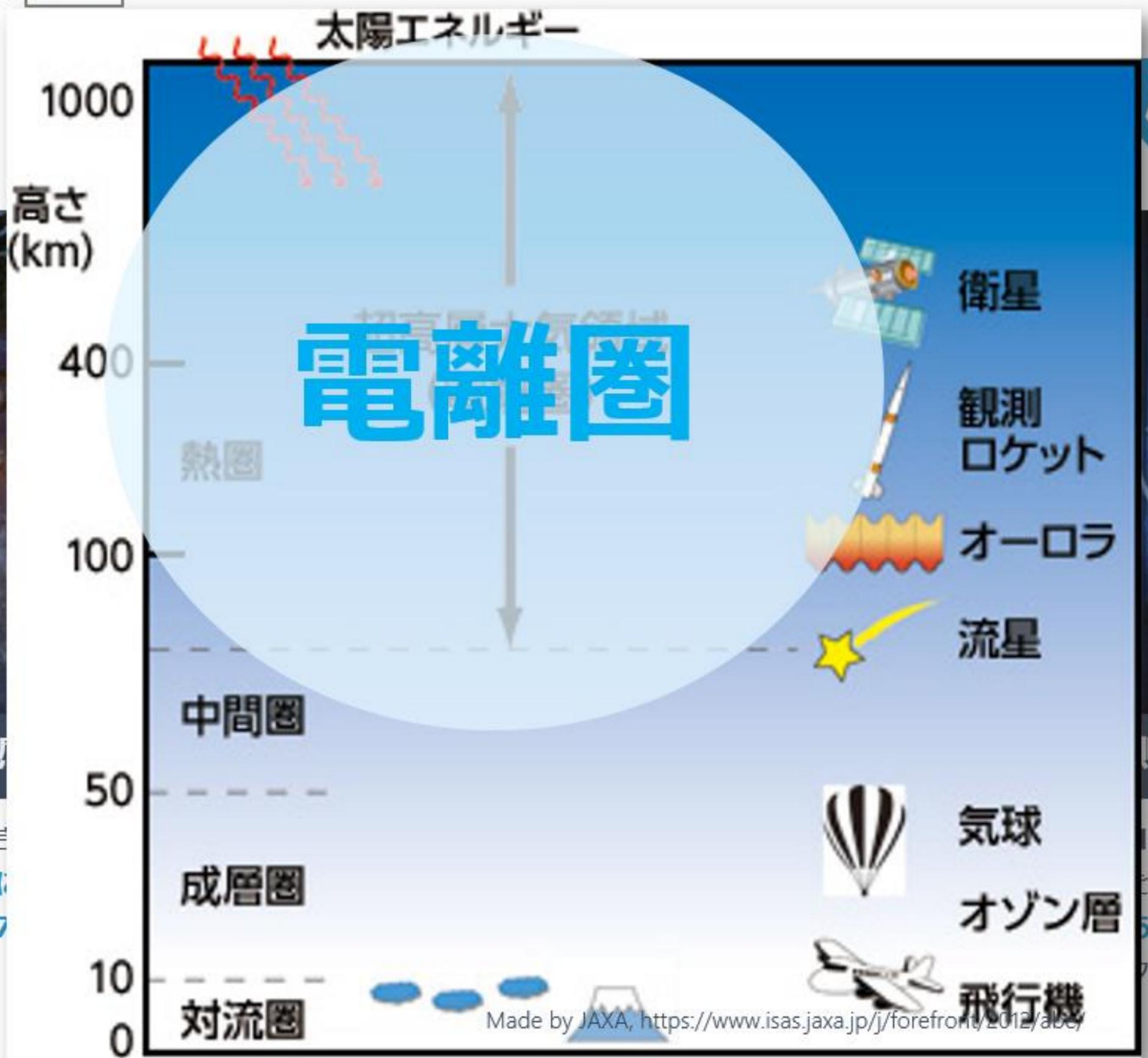
観測可能性

ISS連続観測システム
 を利用することで
 観測拠点(電子基
 礎)を利用可能



予測

- この手法で予測できる
- 30分~1時間後
- マグニチュード7



観測可能性

ISS連続観測システム
 を利用することで
 観測拠点(電子基
 礎)を利用可能

GNSS-TEC法の**特徴**



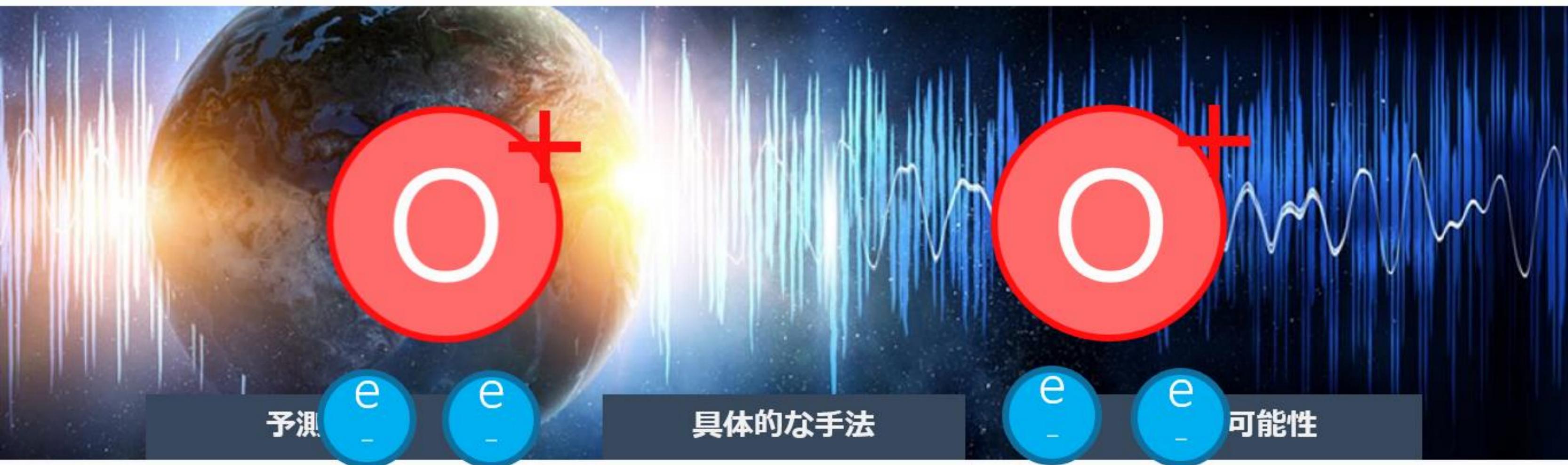
この手法で予測できる地震は

- 30分～1時間後に発生
- マグニチュード7以上

TEC（電離圏総電子数）を算出し、
TECが地震発生の30分～1時間前に増加する現象を捉えることで地震を予測

GEONET（GNSS連続観測システム）のデータを利用することで
約1,300か所ある観測拠点（電子基準点）のデータを利用可能

GNSS-TEC法の**特徴**



この手法で予測できる地震は

- 30分～1時間後に発生
- マグニチュード7以上

TEC（電離圏総電子数）を算出し、
TECが地震発生の30分～1時間前に増加する現象を捉えることで地震を予測

GEONET（GNSS連続観測システム）のデータを利用することで
約1,300か所ある観測拠点（電子基準点）のデータを利用可能



研究のプロセス

01

仮説

マグニチュード7を超える全ての地震でTECの増加を観測できる

02

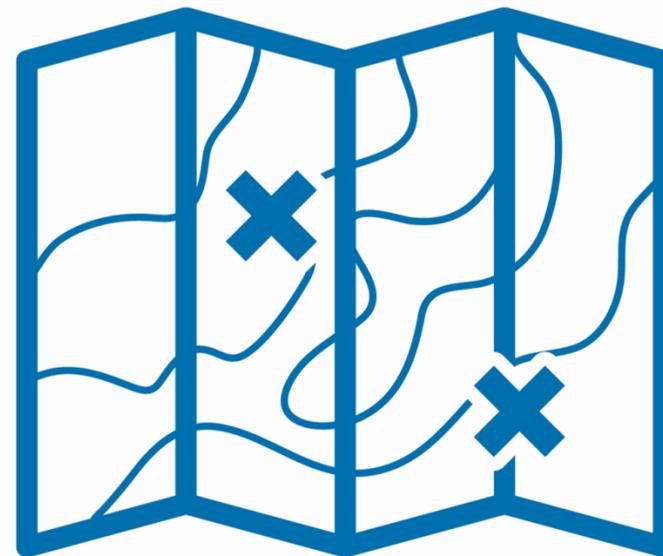
1次データの収集

1. 日本の領域内で過去10年に発生した地震をリスト化 (マグニチュード, 震度, 震源座標などのデータを統合)
2. GEONETから地震直前2時間のGNSSデータを取得

GNSSデータをTECデータに変換 (後述)

TECデータへの変換

03



04

TEC異常を観測

地震前のTEC異常が実際に存在しているか確認

本日の プレゼンテーション

東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）前の
TEC異常を見てみよう



f (MEX形式ファイルを読み込みf1値, f2値を出力 (RINEX ver.3.02 用))

Copyright © Kosuke Heki <http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>

```
program rdrnx3_mod
  implicit none

  integer :: site_num
  character :: fmt*128="(i4.4,i3.3,'0.','i2.2,'o')", file*128

  integer :: year=11, date=70, year=11

  site_num=1 1237
  do
    open(file, fmt) site_num, date, year
    call getf4_3x(file, 'J', 0.0, 24.0)
    site_num = site_num + 1
  end do

  stop
end program rdrnx3_mod
```

SECTION 3

分析

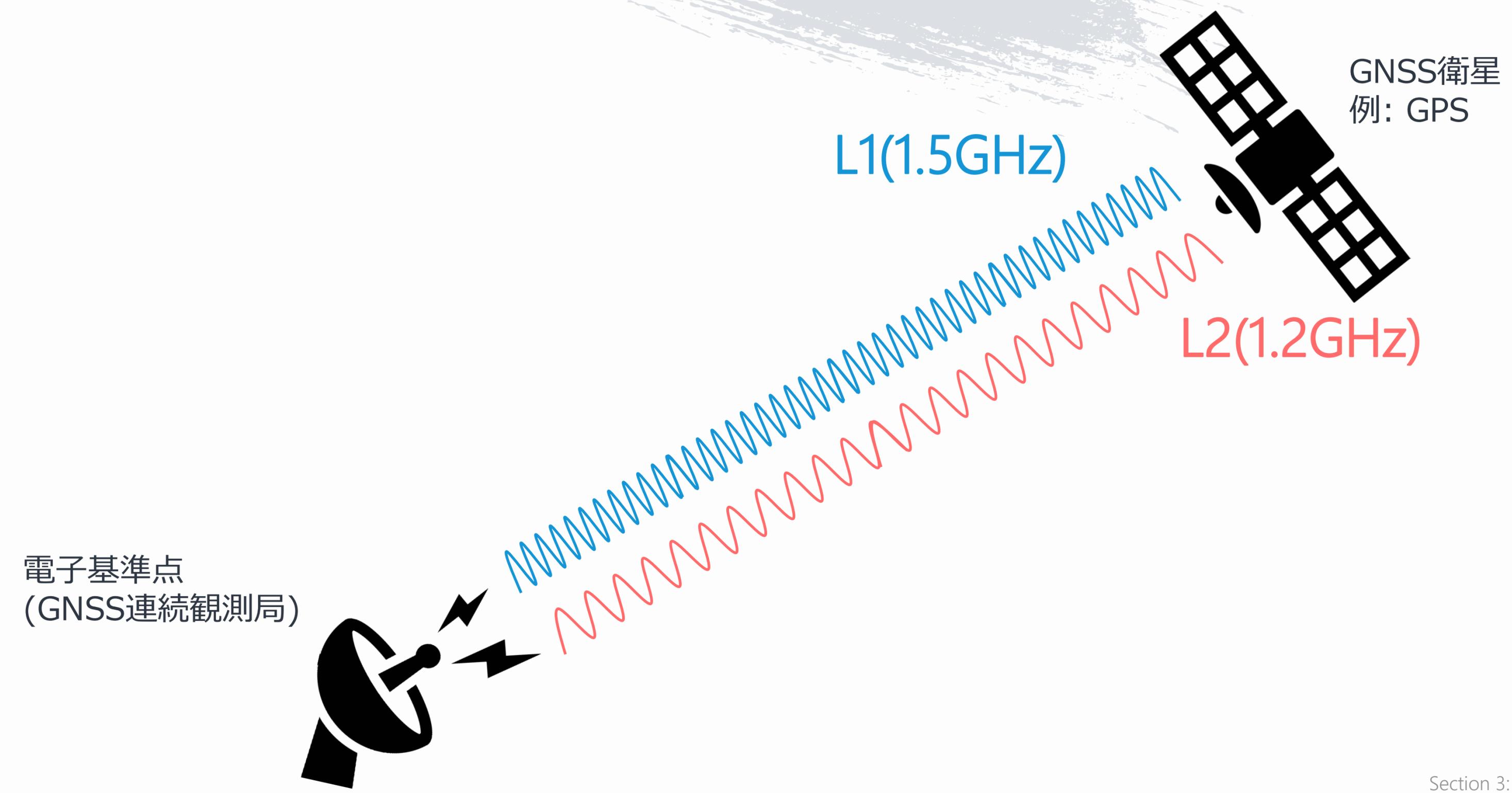


WARNING

**数学アレルギーをお持ちのあなたは
このセクションのスキップを推奨します**



TEC導出のメカニズム



TEC導出のメカニズム

$$D_{iono} = \frac{40.3N_e}{f^2}$$

- D_{iono} : 電離圏遅延
- f : 周波数
- N_e : 電離圏に存在する電子の数
= TEC (電離圏総電子数)

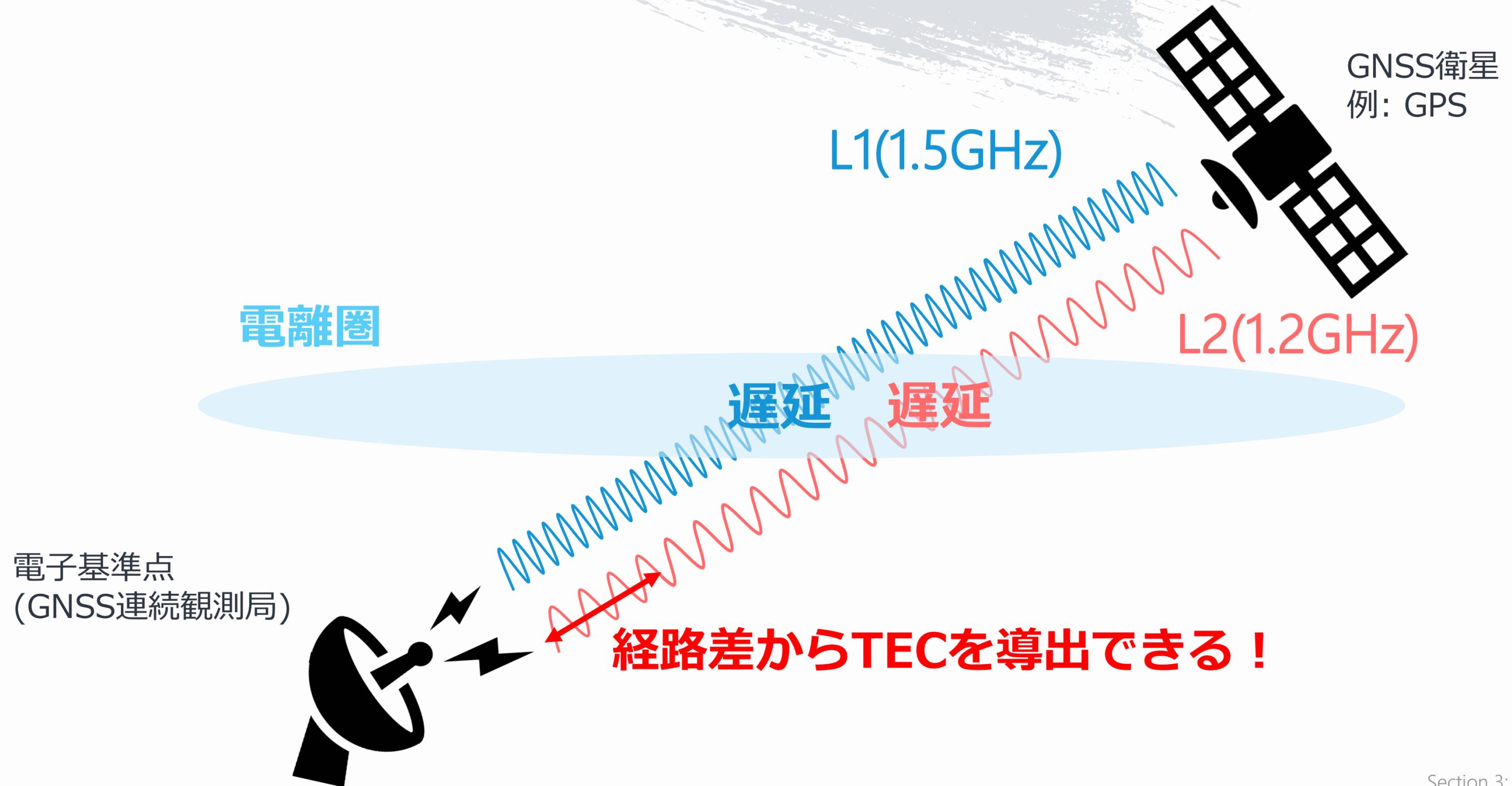


1. 波の周波数が低いほど
2. 電離圏にたくさんの電子が存在するほど

→ 電波はより長く遅延される



TEC導出のメカニズム



TEC導出のメカニズム

$$L = \lambda\phi = \rho - \boxed{D_{iono}} + D_{tropo} + \lambda n + \varepsilon + \tau$$

引用4

- L : 搬送波位相測定
- λ : 搬送波波長
- ϕ : 搬送波位相
- f : 周波数

- D_{iono} : 電離圏遅延

- D_{tropo} : 対流圏遅延

$$D_{iono} = \frac{40.3N_e}{f^2}$$

電離圏バイアス
受信機バイアス

$$L = \lambda\phi = \rho - \boxed{\frac{40.3N_e}{f^2}} + D_{tropo} + \lambda n + \varepsilon + \tau$$

- N_e : TEC (電離圏総電子数)

TEC導出のメカニズム

$$L_1 = \rho - \frac{40.3N_e}{f_1^2} + D_{tropo} + \lambda_1 n_1 + \varepsilon_1 + \tau_1$$

$$\rightarrow L_2 = \rho - \frac{40.3N_e}{f_2^2} + D_{tropo} + \lambda_2 n_2 + \varepsilon_2 + \tau_2$$

TEC, L, 定数のみから構成
される方程式

これらの値は全てGNSSデータから取得可能

$$L_1 - L_2 = -40.3N_e \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + Const.$$

↑
導出したいのは N_e (=TEC)

引用5, 6

TEC導出のメカニズム

$$N_e = \frac{1}{40.3} \frac{L_1 - L_2}{\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}} + Const.$$

$$TEC = N_e = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2) + Const.$$

TEC導出のメカニズム

$$\Delta TEC = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta(L_1 - L_2)$$

引用5, 6

```

8  cm = plt.get_cmap("seismic")
9
10 for i in range(20):
11     # 地図データ読み込み
12     df = gpd.read_file(...)
13
14     # 表示
15
16
17     with plt.style.context("dark_background",
18         df.plot(figsize=(14, 14), facecolor='white', linewidth=2))
19
20     # リストを読み込み
21     # csvファイル
22     f = open("{:.2f}SIR.csv".format(0.05 + 14.00), "r")
23     # リスト形式
24     reader = csv.reader(f)

```



Python 3.10.2

- グラフの作成など可視化がしやすい
- 様々な機能を持ったたくさんのモジュールがある

- Pythonより実行速度がずっと早い
- シンプルな文法で記述できる

Fortran 95

```

3  33.095781854355323 137.13332683906626
6  33.638462556001701 138.16456165635378
13 40.890121351 132.37854966788186
16 35.977299251 138.20788093658641
19 28.54937413 134.14814544234187
21 35.07688962 134.54217496234480
23 35.91275995 135.04227733622409
30 36.02350954 139.63627699703287
31 33.70191124 131.10973912378580
3  32.89607156 137.06577863023017
6  33.43618549 138.08959669398197
13 40.71189338 132.27837492156982
16 35.77258735 138.12653372849803
19 28.40248431 134.12740228866124
21 34.87797933551300 144.45576216223051
23 35.706234450097604 134.02722270507704

```

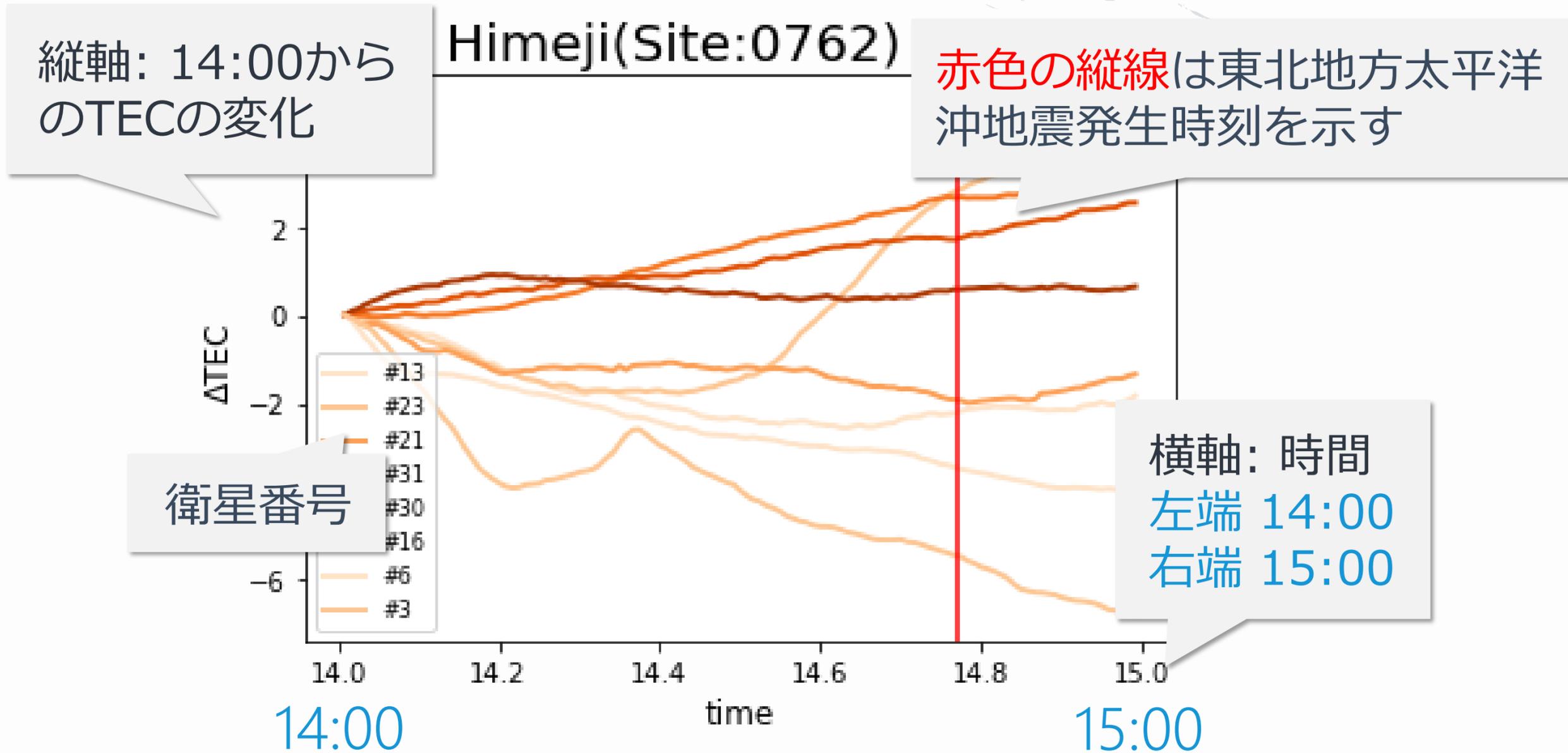


SECTION 4
結果





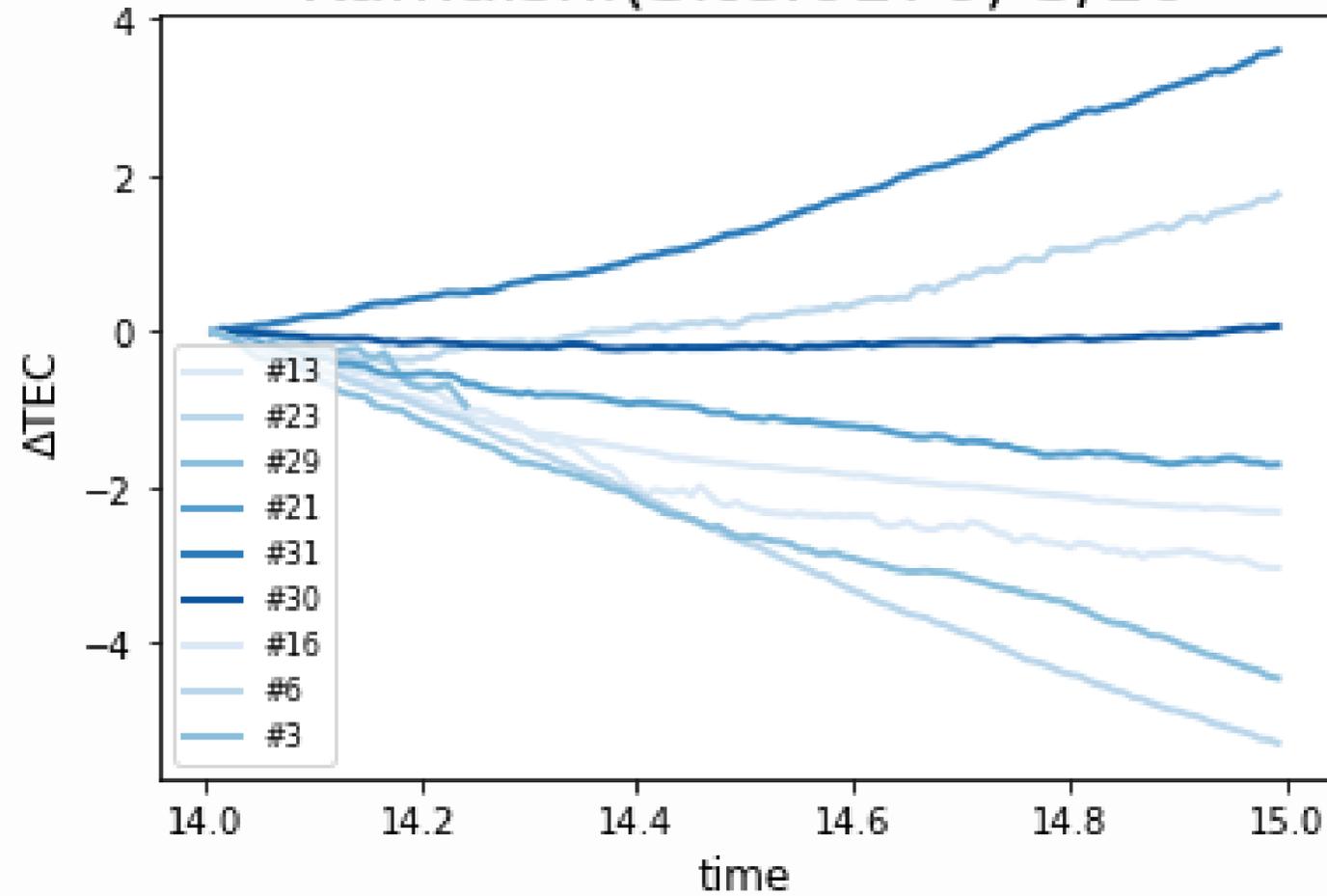
3月10日と11日の比較



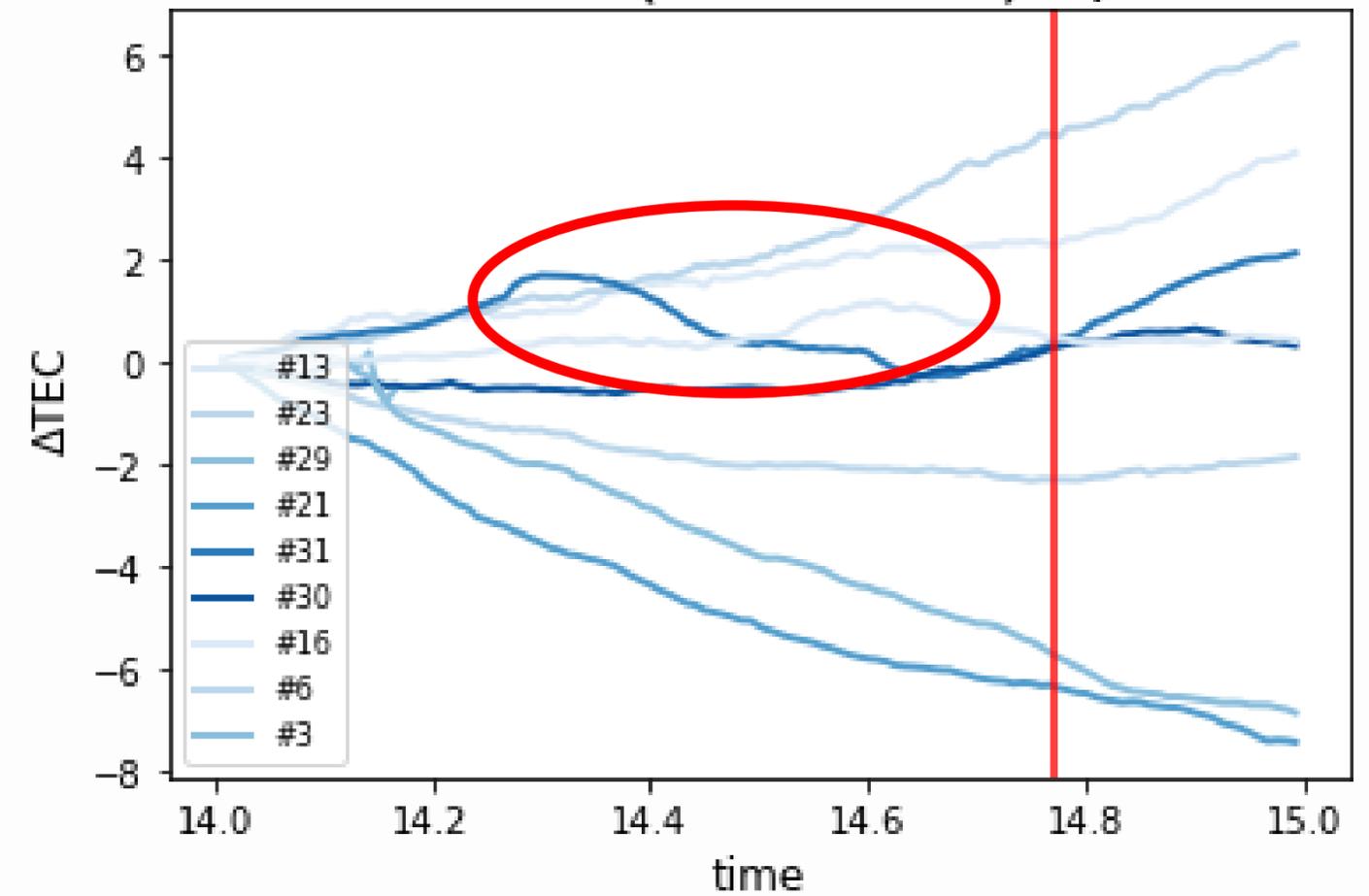


釜石, 岩手県

Kamaishi(Site:0170) 3/10



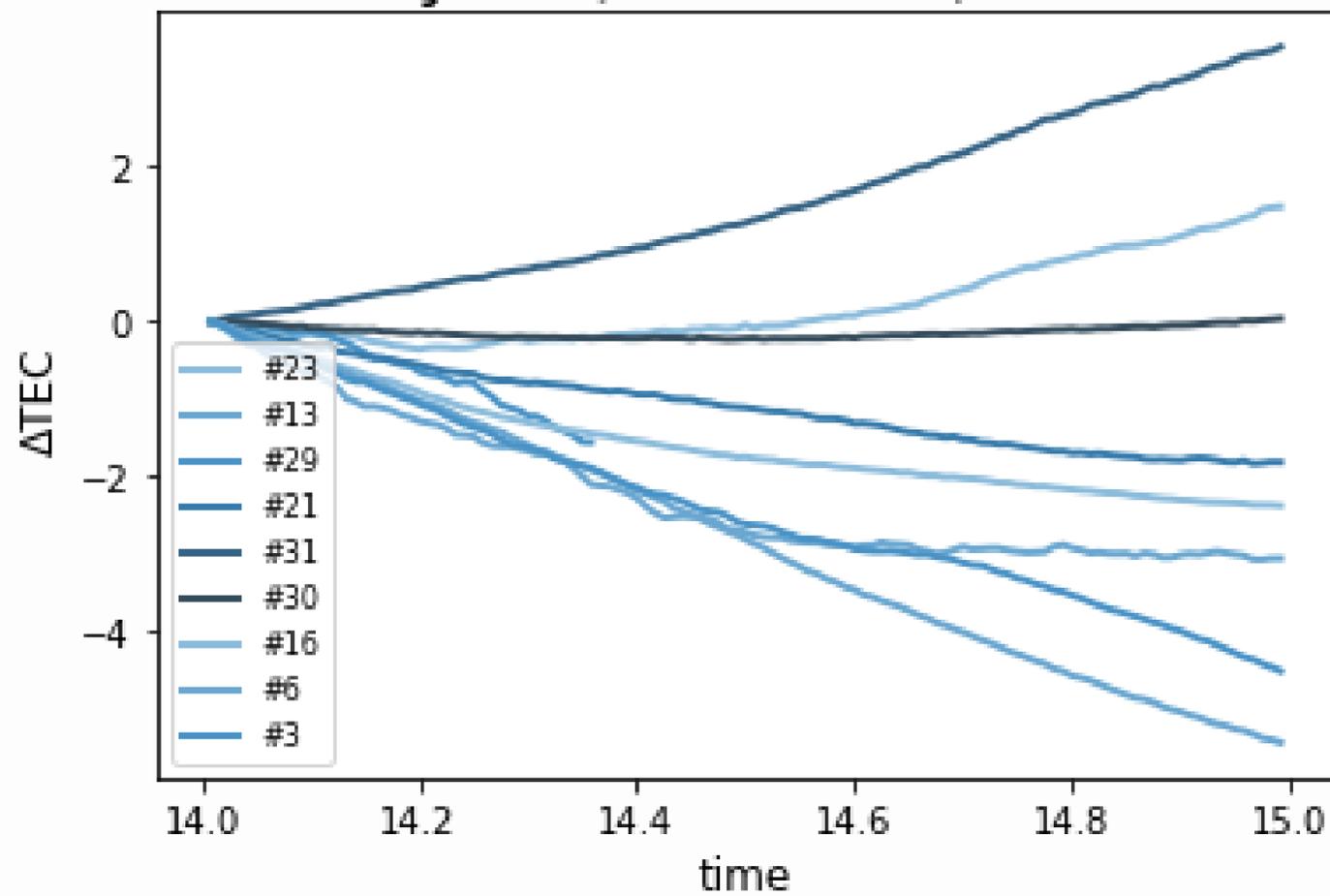
Kamaishi(Site:0170) 3/11



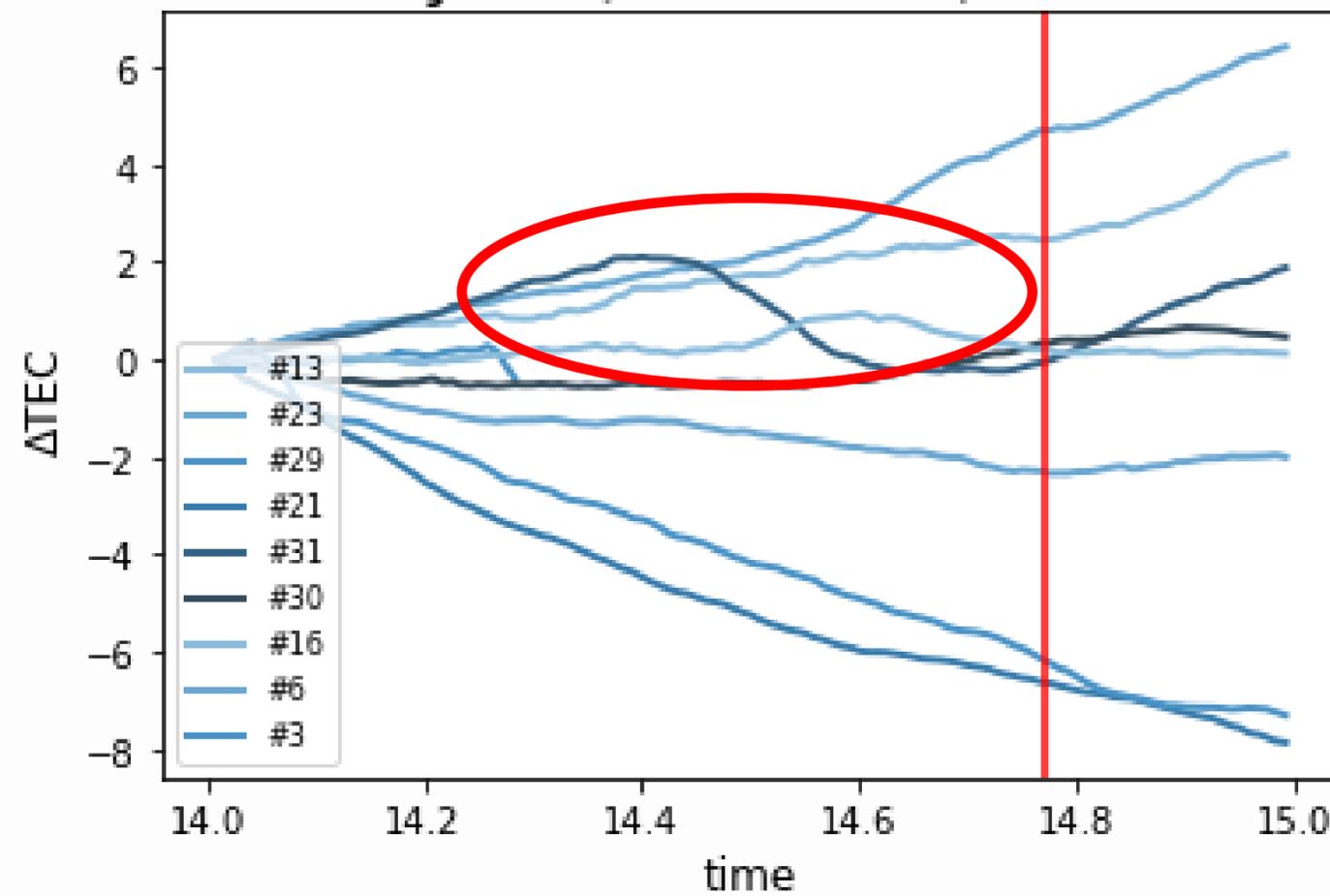


宮古, 岩手県

Miyako(Site:0028) 3/10



Miyako(Site:0028) 3/11

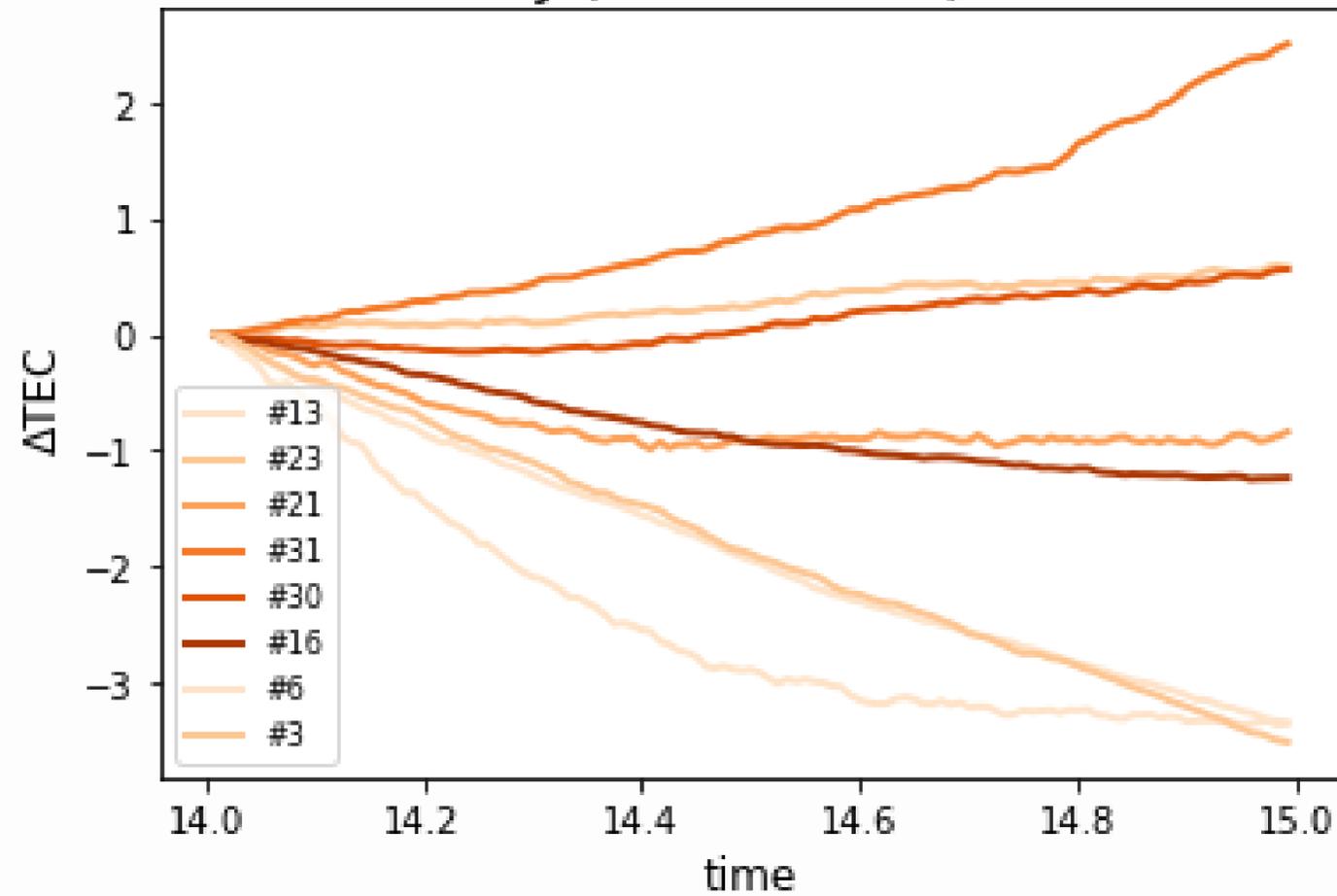




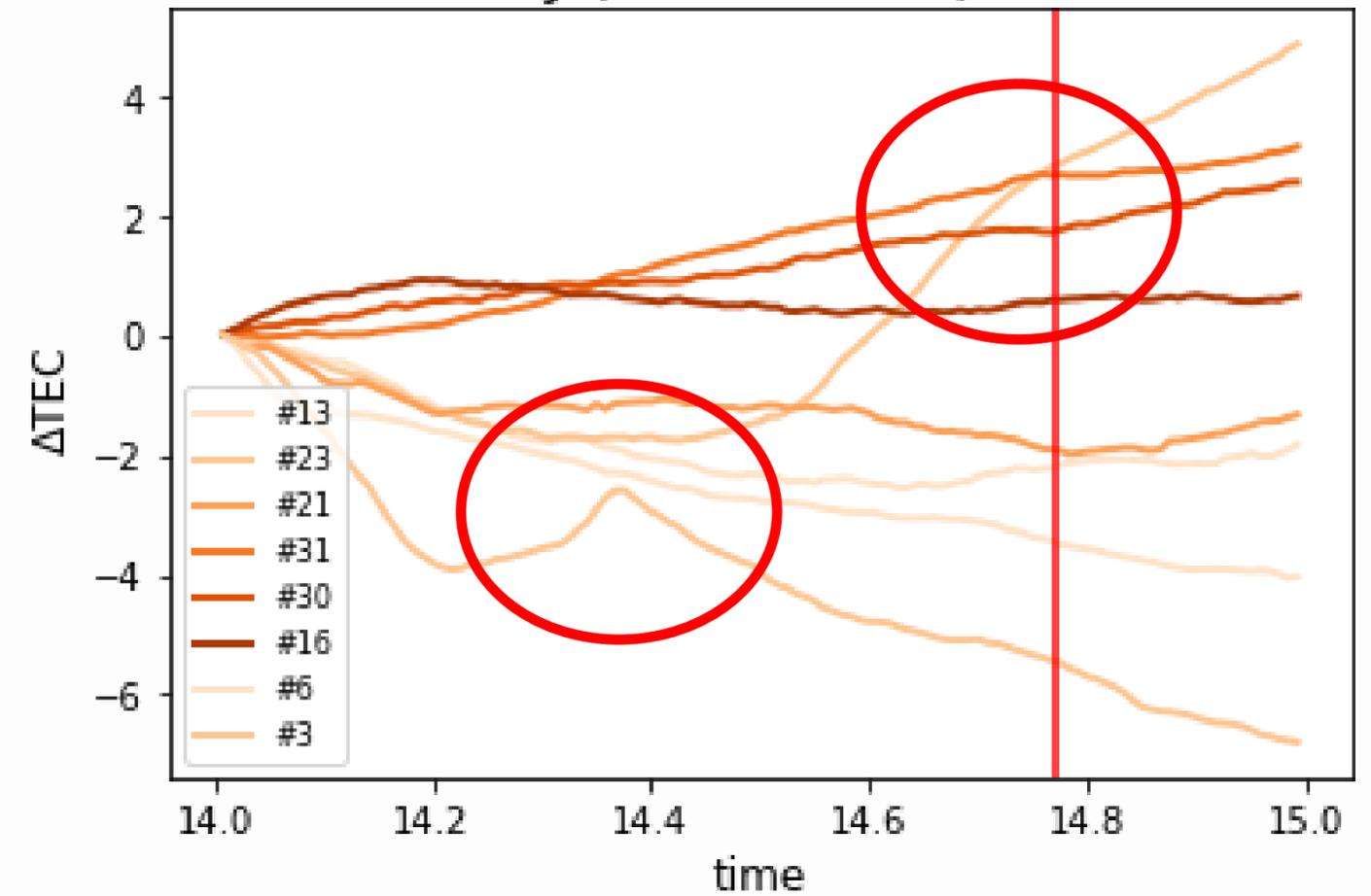
姫路, 兵庫県

この変化は前兆？

Himeji(Site:0762) 3/10



Himeji(Site:0762) 3/11



14:00

周囲より赤色が濃く青色が薄い
→ TECが増加している!

大きな縞模様が動いている
→ 他の原因による異常と考えられる

3.11, 14時から のTECの変化

減少

14:00時点のTEC

増加

地震発生時刻 14:46

結果

- 東北地方太平洋沖地震前のTEC異常を捉えることに成功した
- 現段階では地震の前兆のみを正確に判別できるまでには至っていない



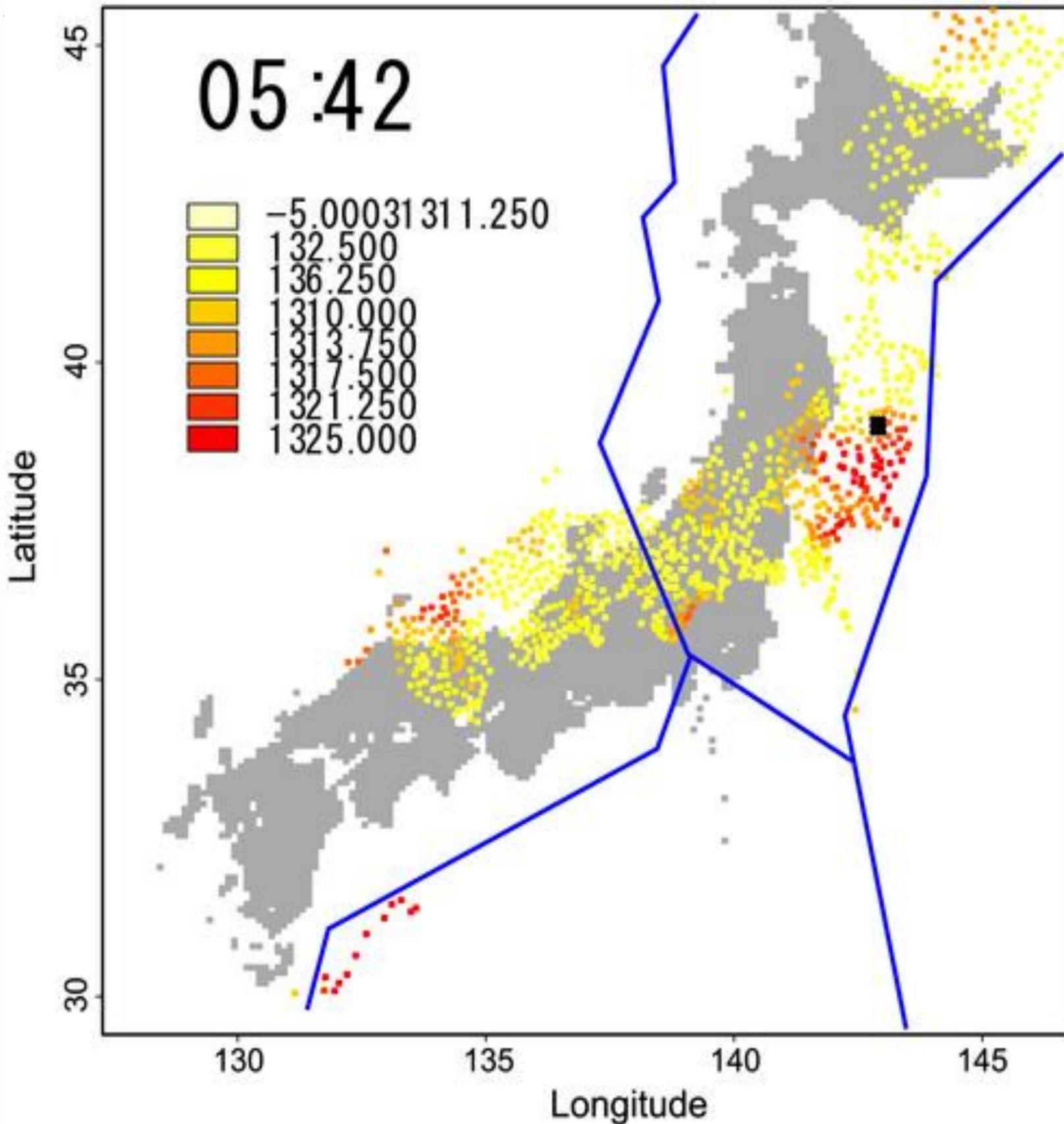
SECTION 5

今後の展望

地震予測の新たな手法を開発する

- GNSS-TEC法にディープラーニングを導入する
- ディープラーニングではどんな異常が地震の前兆なのか自分で学習させることができるので、他の原因による異常と地震の前兆をより正確に区別できるようになる
- 応用すれば地震の自動予測も可能となる





相関分析法

より進化したGNSS-TEC法

考える観測地点の周囲の観測地点のデータを用いることでノイズを取り除き地震の前兆を強調することが可能

姫路で地震の予兆はなかった

3月11日の姫路のデータで見られたTECの変動は別の原因による変動であった可能性が高い

"Correlation analysis for preseismic total electron content anomalies around the 2011 Tohoku-Oki earthquake" by Ken Umeno and Takuya Iwata, 引用7



参考文献

1. The Video material about the damage & measures for Nankai Megathrust earthquake

http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankai_syuto.html

Cabinet Office, Government of Japan

2. The List of long-term evaluation results of and subduction-zone earthquake faults published so far

<https://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran.pdf>

The Headquarters for Earthquake Research Promotion, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Government of Japan

Published on 2022/01/13

3. Working group to make Countermeasures for Nankai Megathrust Earthquake

http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankait_rough_info.html

Cabinet Office, Government of Japan

1st report: published on 2012/8/29

2nd report: published on 2013/3/18

4. Precise positioning theory and analysis with carrier-phase measurements

http://gpspp.sakura.ne.jp/tutorial/html/gps_symp_2005_1.htm

Tomoji Takasu

Published on 2005/6/13

5. Geophysics with GPS-TEC

https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/45003/1/Heki_etal_JGSJ2010.pdf

Kosuke Heki, Mamoru Sugawara, Masaru Ozeki & Ikuya Okazaki

Published on 2011/2/25

6. The Analysis of ionospheric anomalies the Megathrust earthquake and its mechanism to occur

Ken Umeno

Presented in IEEE Nagoya LMAG Symposium on 2019/8/31

参考文献

7. Correlation analysis for preseismic total electron content anomalies around the 2011 Tohoku-Oki earthquake

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JA023036>

Ken Umeno, Takuya Iwata

Published on 2016/8/22

Preseismic ionospheric anomalies detected before the 2016 Kumamoto earthquake

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017JA023921>

Ken Umeno, Takuya Iwata

Published on 2017/2/24

Programs I used to convert gnss data (based on rinex format) to TEC Data

<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>

Kosuke Heki

Downloaded on 2021/10/30



未来は明日ではなく、今日始まる。

THANK YOU!
ご質問はありますか？

柏木 創太 (リーダー番号: 2711)

Used the template "pollux" designed by Jun Akizaki