

相関解析法による電離圏異常と 連動する前兆すべり(プレスリップ)の 検出可能性



梅野健(Ken Umeno)

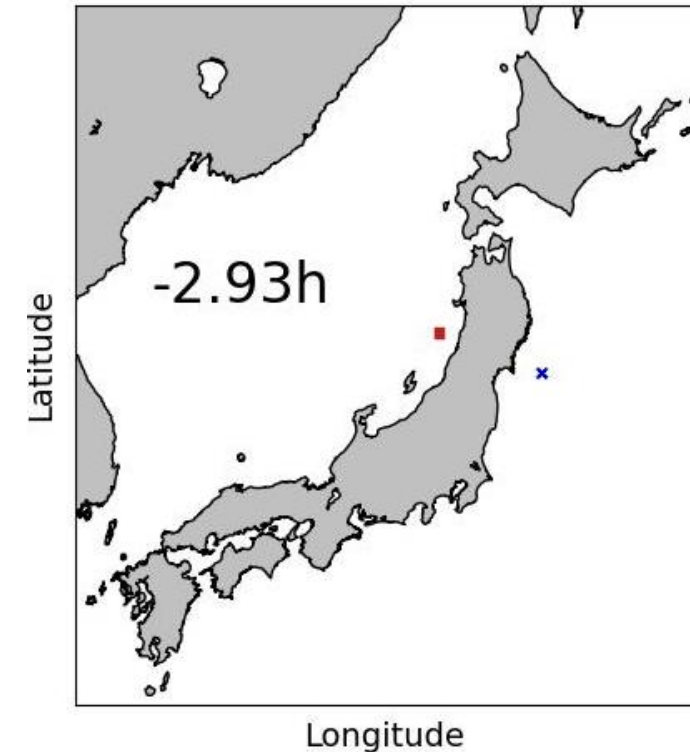
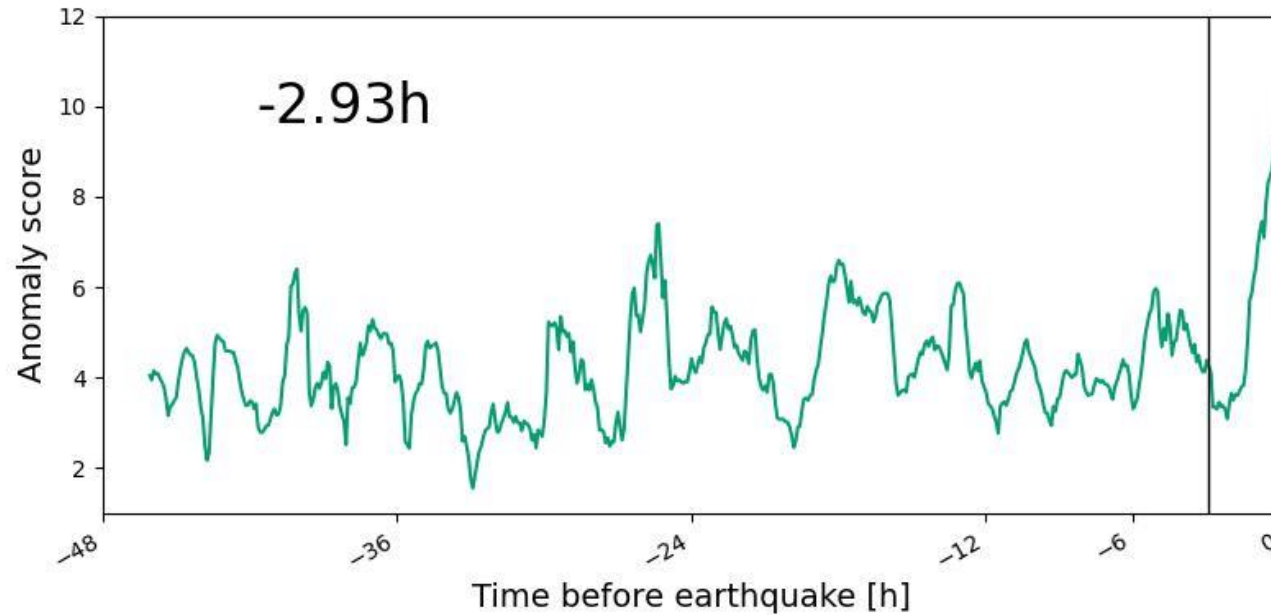
京都大学大学院情報学研究科

2025年12月20日 日本地震予知学会招待講演

あらまし

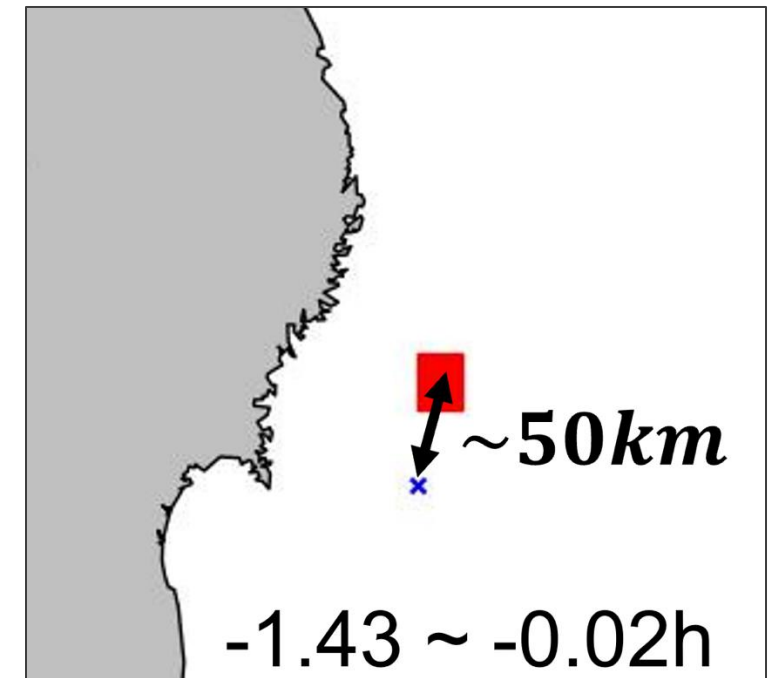
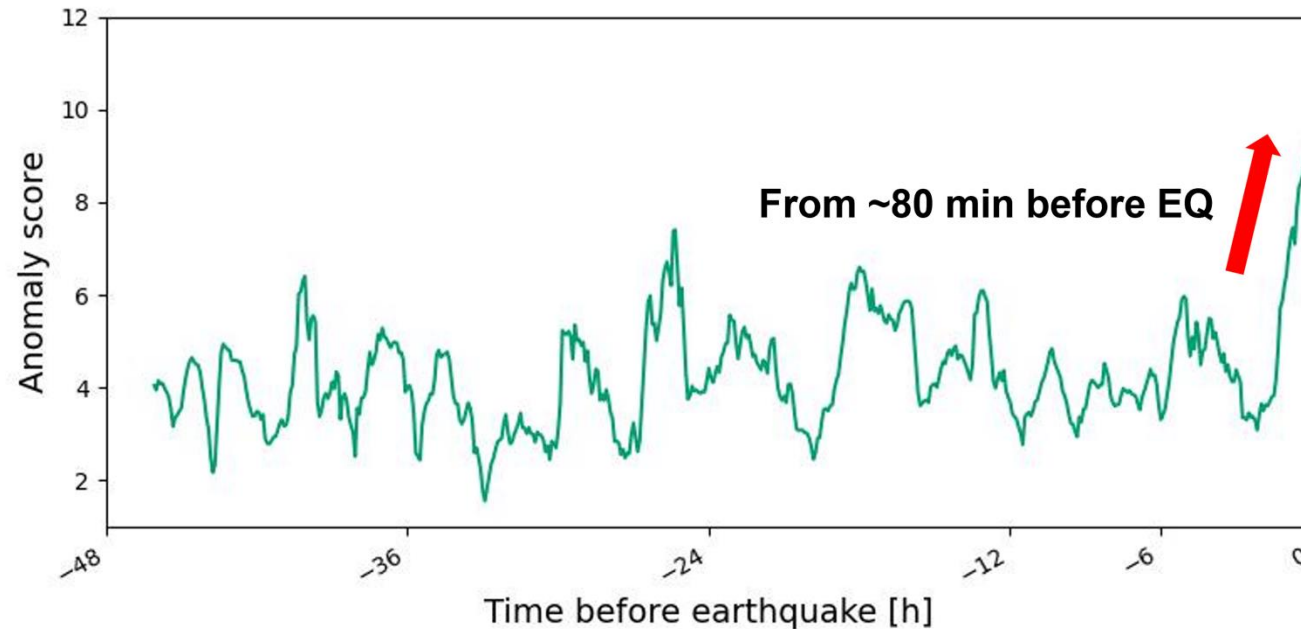
1. 背景 及び どこまでできているのか？－現在の到達点(AGU25)
－震央推定の様子－を見ていただく－
シグナル対ノイズ
2. 電離層の異常
(戦前の昭和東南海地震についての結果を含む)
3. 相関解析の概要
4. プレスリップの解析
5. まとめ

World First Result : **Epicenter prediction** for M9.1 2011 Tohoku-Oki mainshock³



- From ~80 min before the mainshock:
 - **Predicted epicenter** (the grid point with the max anomaly at each epoch) located **near** the area north of the USGS[1] **epicenter**
 - Anomaly score **increased** and **peaked** just before the mainshock
→ consistent with [B&N2023][T&U2025]

World First Result : **Epicenter prediction** for M9.1 2011 Tohoku-Oki mainshock⁴



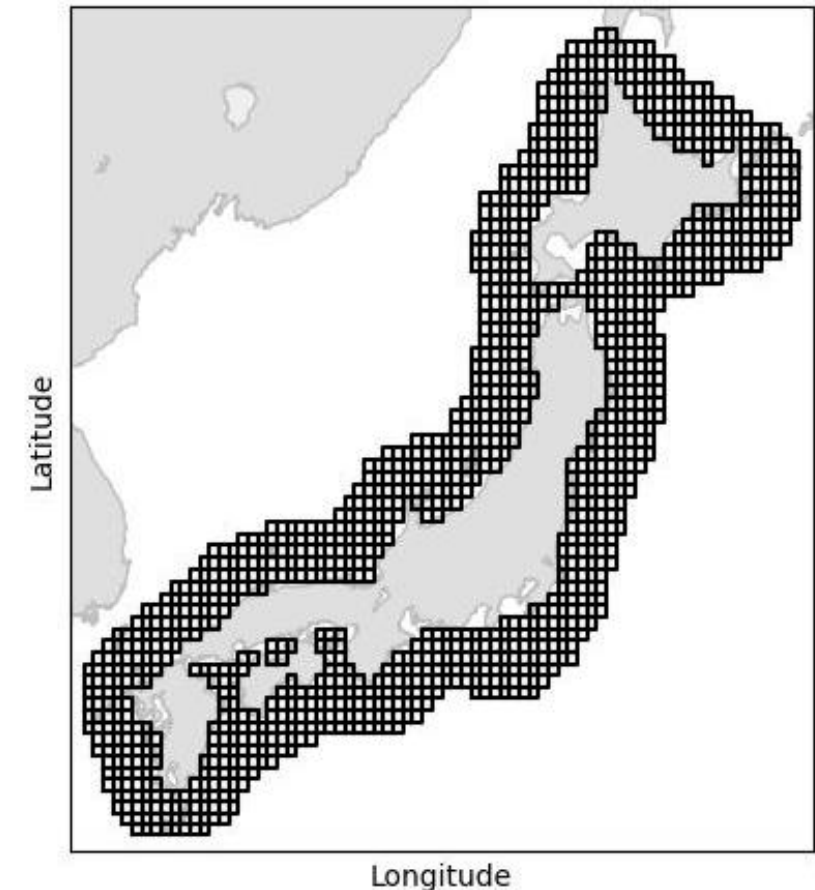
- From ~80 min before the mainshock:
 - **Predicted epicenter** (the grid point with the max anomaly at each epoch) located **near** the area north of the USGS **epicenter**
 - Anomaly score **increased** and **peaked** just before the mainshock
→ consistent with [B&N2023][T&U2025]

○Data

Nevada Geodetic Laboratory (NGL[1])

○Method

- Apply CRA to relative GNSS displacements relative to the 48-24h pre-earthquake median position[2-3]
- **Discretize the epicenter search region into a grid(20 × 20km)**
- Compute CRA-based features at each grid point k and time t ;
 - Synchronized slip of nearby stations : $\overline{C_k(t)} (m^2)$
→ Mean $C(t)$ among nearby stations
 - Distance decay of synchronized slip : $R^2_k(t)$
→ power-law fit ($y = \alpha x^{-\beta} + \gamma$) to mean $C(t)$
- Estimate anomaly score and predicted epicenter over time

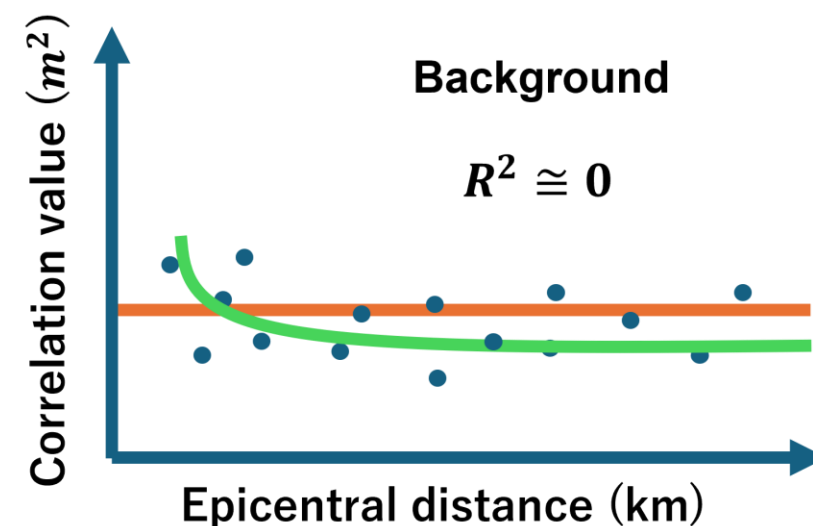
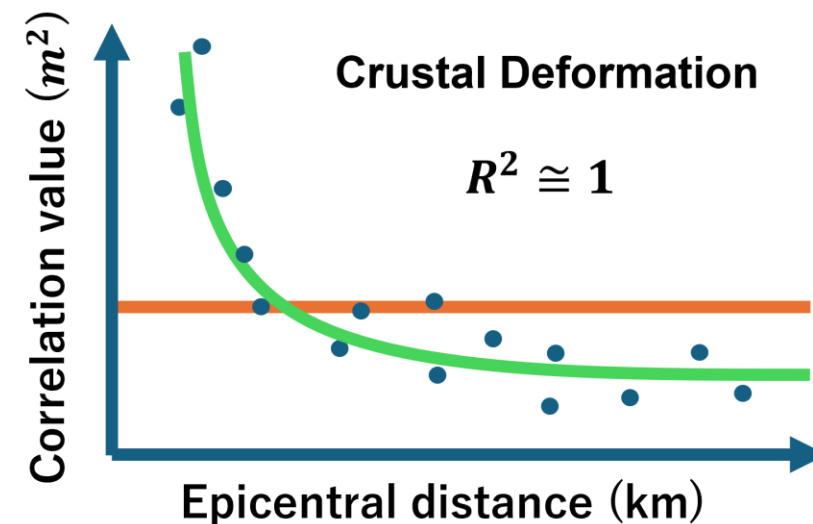


○Data

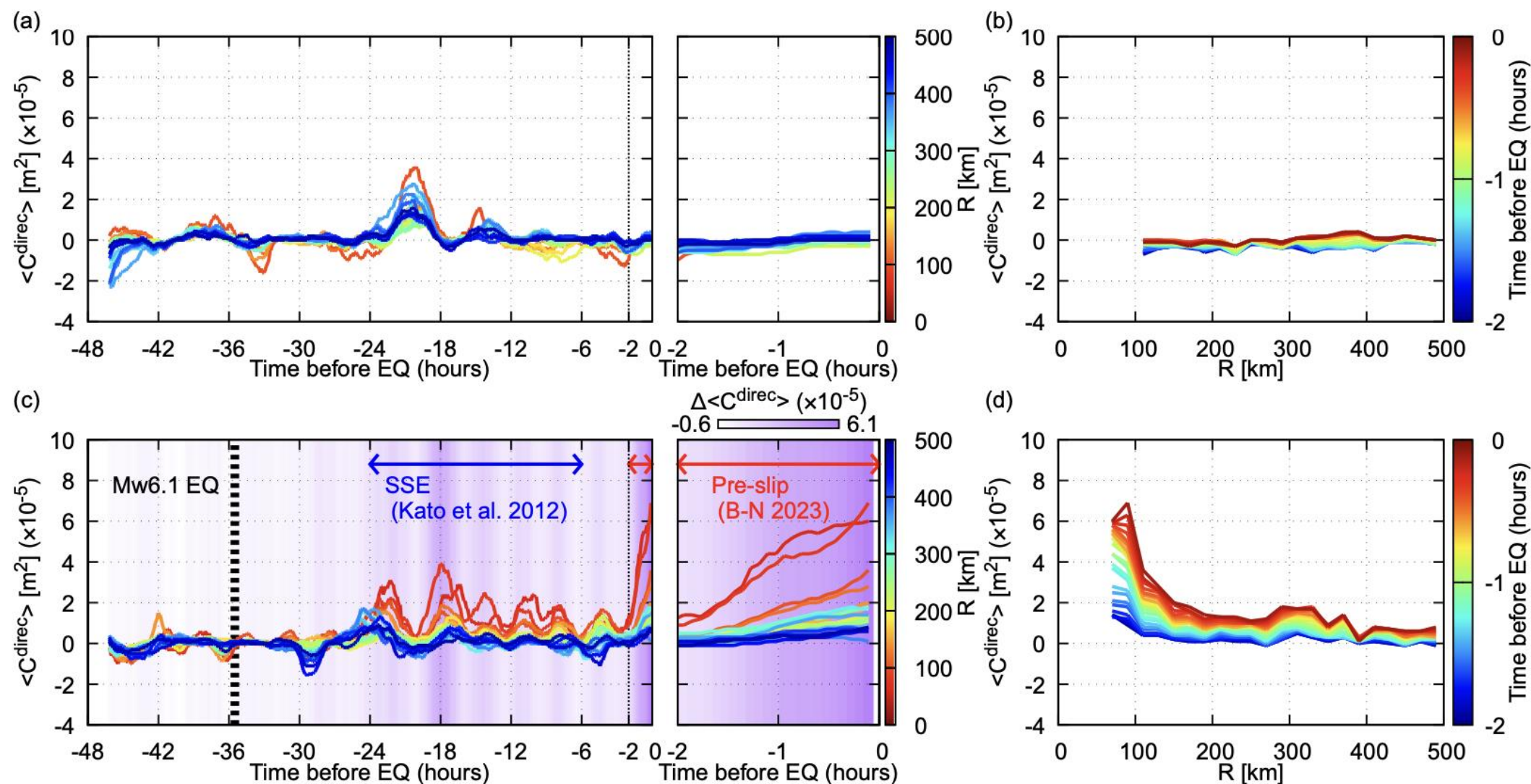
Nevada Geodetic Laboratory (NGL[1])

○Method

- Apply CRA to relative GNSS displacements relative to the 48-24h pre-earthquake median position[2-3]
- Discretize the epicenter search region into a grid($20 \times 20km$)
- Compute CRA-based features at each grid point k and time t ;
 - Synchronized slip of nearby stations : $\overline{C_k(t)}$ (m^2)
→ Mean $C(t)$ among nearby stations
 - Distance decay of synchronized slip : $R^2_k(t)$
→ power-law fit ($y = \alpha x^{-\beta} + \gamma$) to mean $C(t)$
- Estimate anomaly score and predicted epicenter over time



本震直前のスロースリップ(Kato et al. 2012)と本震のプレスリップ(BN2023)を単一の方法で検出 by 相関解析法 Tanaka-Umeno 2025



研究の背景ー2011年東北沖地震にプレスリップ(前兆滑り) は存在し、検出できるものなのか？

大地震発生直前（例:2011年東北沖地震）に現れる電離層異常＝前兆現象と解釈＝は本物（本当に地震由来の現象）か？

(Heki2011, Iwata-Umeno2016,,...)論争が続いていた。

一方、Bletery and Nocquet 2023により、2011年東北沖地震発生直前にプレスリップが5分間隔GNSSデータと地震解との内積により存在したと発表されたが、すぐに多くの研究者が共通モードエラーによるものであるという反論がなされ、Bletery とNocquetも共通モードエラーを得られたシグナルを差し引いて前兆を捉えようとしたが、前兆シグナルそのものも差し引いてしまっ見えなくなってしまった。

現在の結果に関する自分の考え：

- 大地震発生直前のシグナルのみで“ほぼ正確に”震央推定できることから、大地震に由来する前兆滑り(プレスリップ)は検出できた、と結論付けできる。
 - ー東北沖地震の場合、誤差率0.01以下で震央を50km以内で推定ー
- 逆にもし、このシグナルがエラー（例:共通モードエラー）なら、震央付近のみにエラーが局所的に現れることを説明しなければならず、その確率は無視できるほど小さい。
- 報告された大地震発生直前の電離圏異常一日置TEC(GRL, 2021)、Iwata-Umeno(JGR, 2016)は、前兆滑り（プレスリップ）と連動する現象であるー大地震直前のプレスリップと電離圏異常とがどの様に連動するのかは未解明で非常に興味深い問題(Open Question)があるー
- Xクラス太陽フレア直後に大地震が発生した例(2024年能登半島地震、2025年三陸沖地震)は偶然なのか、何か因果関係があるのか？（上記の問題と関連）

最初は誰も、ノイズとP波を区別できるとは思わなかった。(当時を知っている人の談話。P波検知ができる提唱者の金森先生は米国に行かれたので、日本に残った学者、鉄道総合研究所の人が諦めずに開発した。

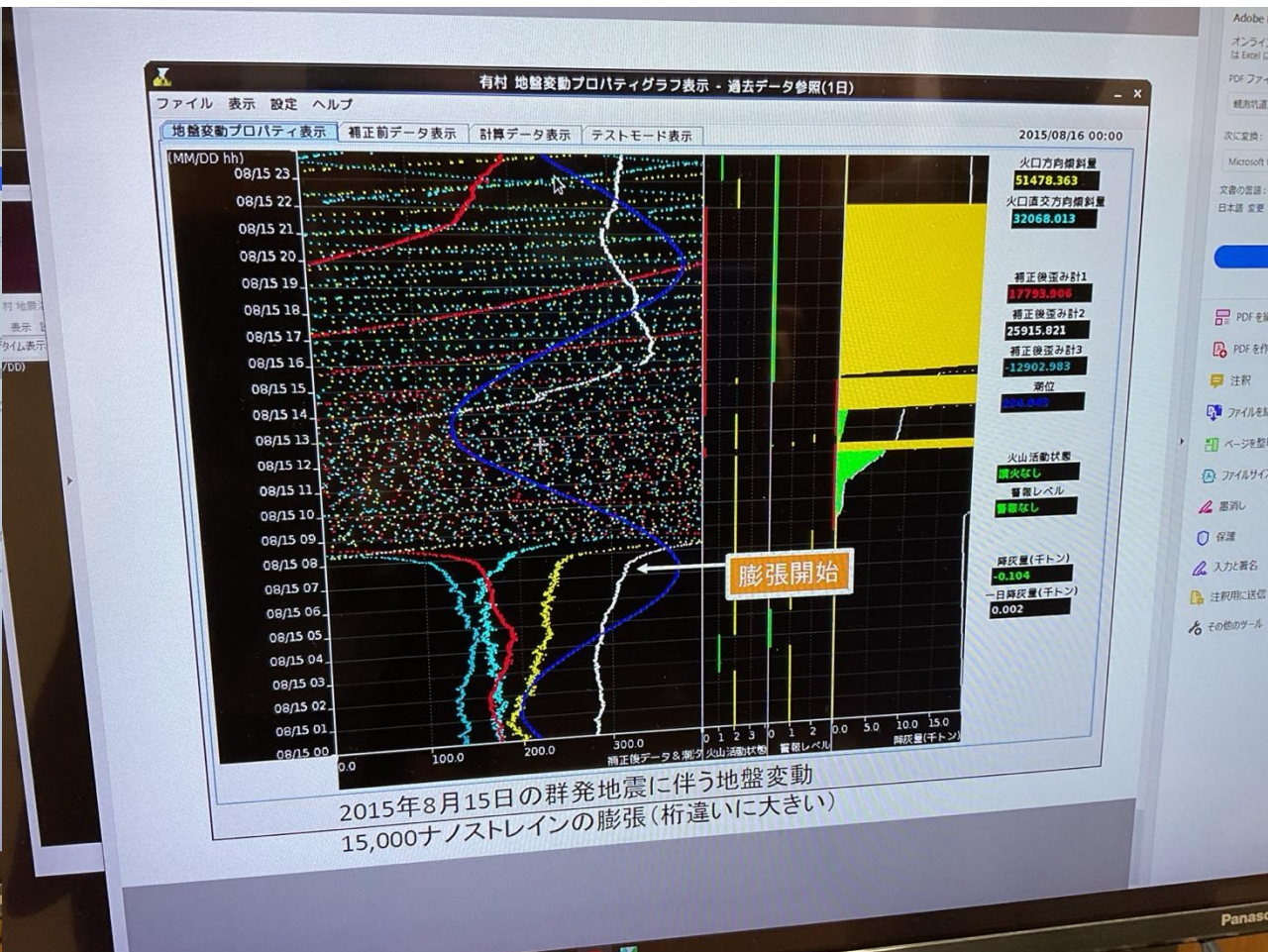
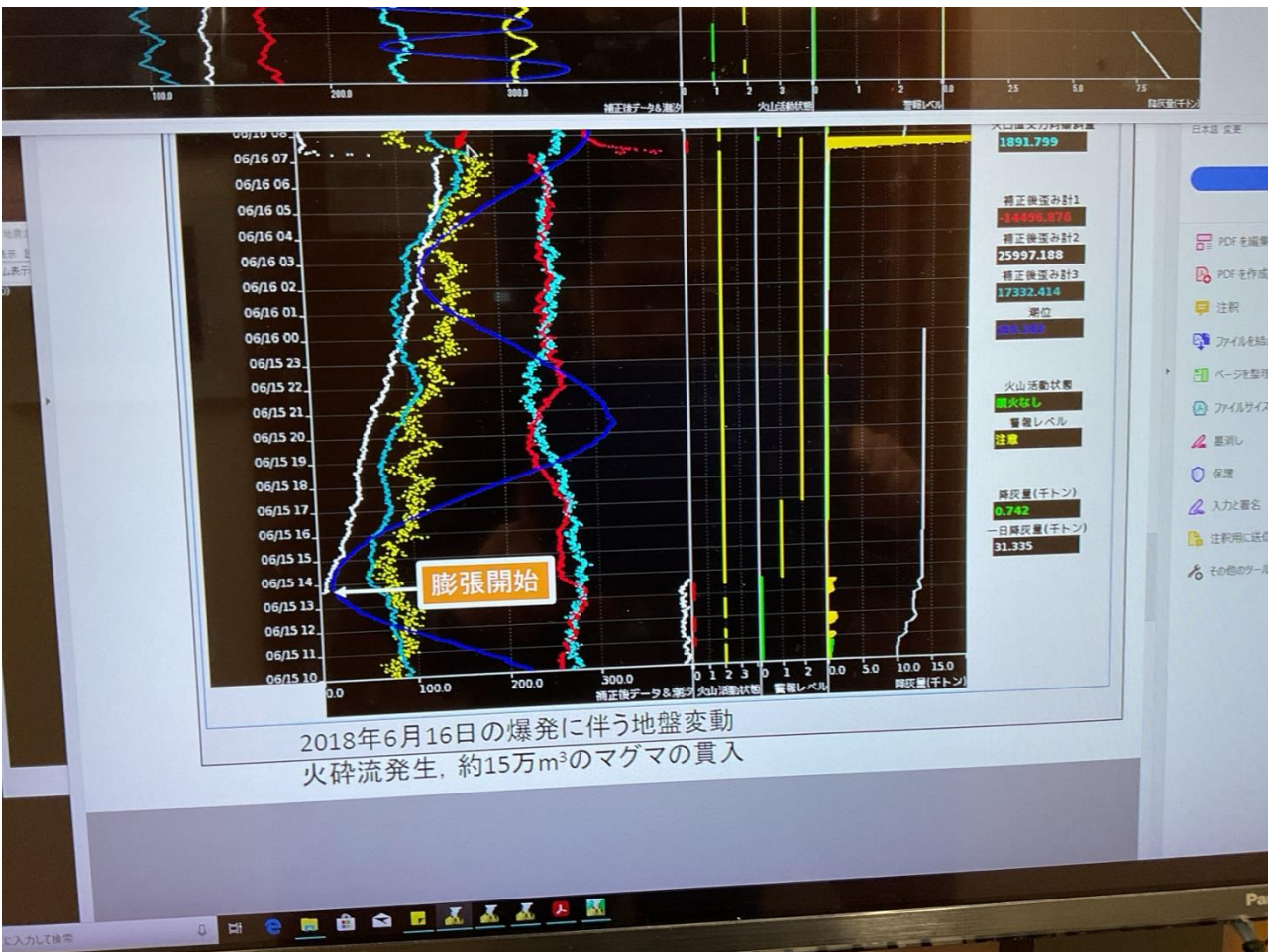
ノイズ処理を諦めずに頑張ったお陰で (影のイノベーション)、P波検知ができ、震央からの距離に関する依存性から震央を素早く推定する手法—現在実用化したB- Δ 法の開発につながる。

我々の研究—プレスリップ信号検出から震央推定まで全部一緒にやる(それも1-2年の短期間で)研究は、恐らくすぐに受容されるものではないと考える。**ただ、今、P波検知が当たり前の様にできているときに、P波が存在するかなどと聞く人はもはや誰もいない。** それとプレスリップ検知は、同じことであろう。

地震前兆現象については、山の様にあると思われる。
観測すればするほど出てきて、科学的な解釈が追いつかない。

- 前兆現象が解明されれば、震央推定ができ地震予知につながる訳では必ずしもない。
- 電離層異常はその様な例で、確かに山の様に観測事例がある—自分による観測（イオノゾンデ）—でもそう。電離層だけによる地震予知は非常に難しい—
- ただ、**地殻変動による前兆現象については、地震（地が震レル）という物理現象に直結することから、震央推定、マグニチュードなどの推定—地震予知—（実現）に直結すると考える。**
- **両方やる（地殻変動と電離層異常検知）、そして両者の関係を明らかにするのが地震予知につながると考える。**

火山噴火では、噴火直前の膨張(プレスリップシグナル)は、潮汐による変動と比べて1/10程度。ただ潮汐がモデル化できているので



何故、今まで前兆シグナルを検出できなかったのか？

観測ノイズに前兆シグナルが埋もれる。→地震前兆シグナルを捉えることはできない。

地震前兆シグナルを捉えることができれば、命を救うことができない。→世界の現状

観測ノイズ（誤差）の大きさ：数cm（水平方向）：10cm(鉛直方向)

前兆すべり（2011年東北沖地震の1-2時間前）： 2時間で**1cm**弱すべる

受信局1



受信局2



受信局3.....



受信局M



地殻変動と電離層の“異常”を検出する研究(技術)について— Summary—

短期**決定論的地震予知**はできる(人類初の技術)。カオス理論と整合性。

その実装は、人類に貢献。国連専門機関のトップからも問い合わせ。

対象地震範囲：南海トラフ大地震、首都直下型地震など**タイプを問わず**。

対象地震のタイプによって**電離層、地殻変動**の現れれ方が異なる。

プレート境界型(311, 南海トラフ)→**プレスリップ** vs 内陸型(熊本、能登)→TID(移動性

電離圏擾乱TID: Traveling Ionospheric Disturbances)の速度変化

地震学者が何故100年かけてもできなかったか？→同時に多数のデータを処理する基礎技術(通信では当たり前)のSNを上げる技術)を知らずに、1局1局計測し、

ノイズの中のわずかな信号を検出できなかった。

では何故できるのか？

→ノイズの中にあるわずかな信号を**多点同時**観測で相関を

取ることにより(**相関解析**)、初めて検出できるようになった。

対象データ(電離層(30秒間隔)及び地殻変動(5分刻み))のデータ。イオノゾンデ受信

地殻変動—電離層の同時刻(1-2時間前)に異常。そのメカニズムも解明

太陽フレアとの関係も新たに発見(311→2日前朝にXクラスの太陽フレア, 2024年能登半島地震→当日朝にXクラスの太陽フレア)

従来の手法と何が違うのか？

★ 電離圏（電離層：上空 5 0 km から 1 0 0 0 km）の観測

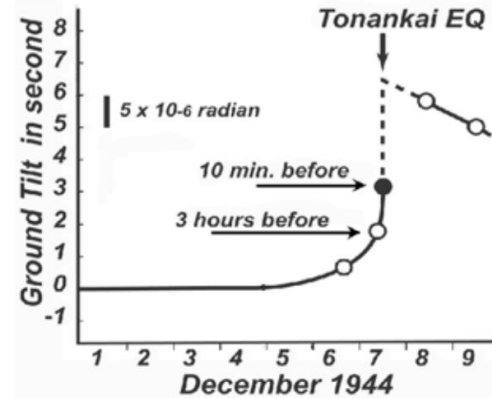
摩擦のない世界での異常を捉える。→精度が保証される。

★ 相関解析（多局同時に観測し、ノイズを打ち消す。ノイズにかき消され見えなかったシグナルが見えるようになる。）

★ 地殻変動と電離圏の電子数の変動の両方を見る。そして両者の間の物理的メカニズム

★ リアルタイム解析が可能→実際に予知システムが稼働可能であることを示す。

—1944年12月7日13時36分のプレスリップの検出—今村明恒—



第3図 水準測量から推定する1944年東南海地震前の傾斜変動。茂木(1982)が水準測量往復誤差から推定した傾斜変動(○)に今回の結果(●)を加筆する。

Fig.3 The ground tilt changes calculated from closure errors of the precise leveling around Kakaegawa by Mogi (1982) and the ground tilt estimated from the level instability.

1923年に亡くなった大森の後を継いで地震学講座の教授に昇進する。1925年に北但馬地震、1927年に北丹後地震が発生し、次の大地震は南海地震と考えた明恒は、これを監視するために1928年に南海地動研究所（現・東京大学地震研究所和歌山地震観測所）を私費で設立した。明恒の予想通り1944年に東南海地震、1946年に南海地震が発生した。東南海地震後には南海地震の発生を警告したものの、被害が軽減できなかったことを悔やんだと言われる。

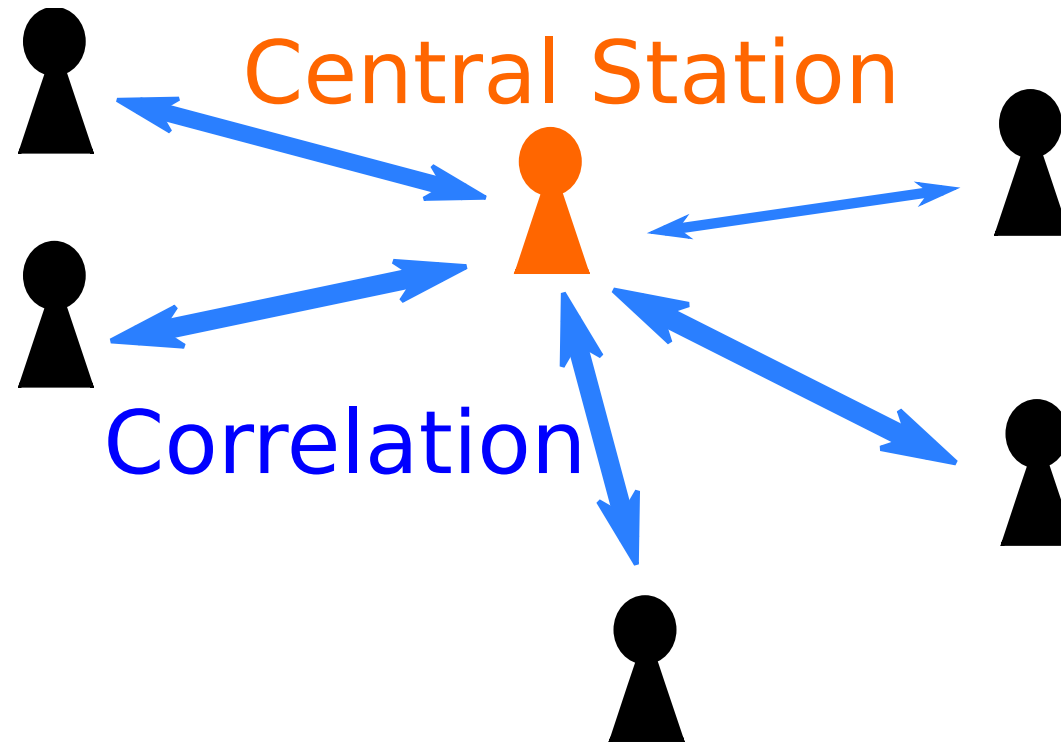
1929年、1892年に解散していた日本地震学会を再設立し、その会長となった。専門誌『地震』の編集にも携わった。1931年に東大を定年退官したが、その後も私財を投じて地震の研究を続けた。1933年に三陸沖地震が発生した際には、その復興の際に津波被害を防ぐための住民の高所移転を提案した。また、津波被害を防ぐには小学校時代からの教育が重要と考えて『稲むらの火』の国定教科書への収載を訴えた。それが実現した後、1940年に『『稲むらの火』の教え方について』を著して、その教え方についても詳しく指導している。

1944年12月7日に前述の東南海地震が発生した際には、陸地測量部が掛川-御前崎の水準測量を行っていた。この測量は今村の強い働きかけによるものであった^[9]。この測量の時、地震前日から御前崎が隆起する動きが確認できた。これが現在の東海地震の発生直前の地震予知が可能であるという根拠とされている。墓所は多磨霊園。

我々の方法: CRA(CoRelation Analysis)←通信のノイズ環境下でのシグナル検知技術論文にて標準検知方法として命名。特許も日・米・中・インドネシア・台湾で取得

主なアイデア：隣の観測局との TEC 予測誤差の**同時相関**をとる。

TECの予測誤差が隣も同様に大きくなる→**相関大(異常と判断)**



相関解析法の原理、文系むきの解説→梅野健“大地震発生直前の前兆すべり（プレスリップ）の検出について～事前防災の鍵となるのは、ノイズに埋もれた微弱なシグナルを検出すること

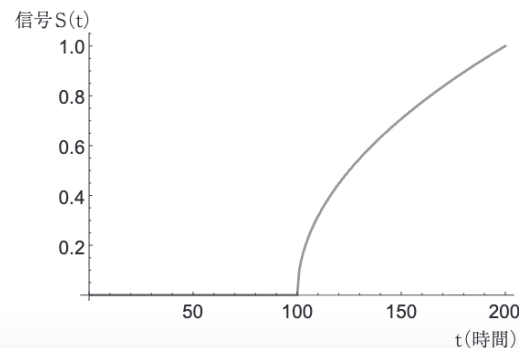
2 信号と雑音と相関解析

何らかの前兆的な信号（シグナル）を検出するとき、簡単に検出できず、観測機器のノイズに埋もれてしまうことがよくある。ノイズと比べて同じ位か、あるいはもっと小さい状況である。一般に、

$$R(\text{受信信号}) = S(\text{シグナル}) + N(\text{ノイズ})$$

と書ける。例えば、**図表1**のような信号 $S(t)$ を考える。 $S(t)$ は、時刻 $t=100$ までは0で、そこから1に増加する関数である。そして、その信号 $S(t)^2$ を考えると、 $t=100$ から $t=200$ までは、**図表2**のように線形に増加する $S(t)^2 = 0.01 \times (t-100)$ となる関数とする。

図表1 信号



観測点A： R_1 （受信信号）

$$= S(\text{シグナル}) + N_1(\text{ノイズ})$$

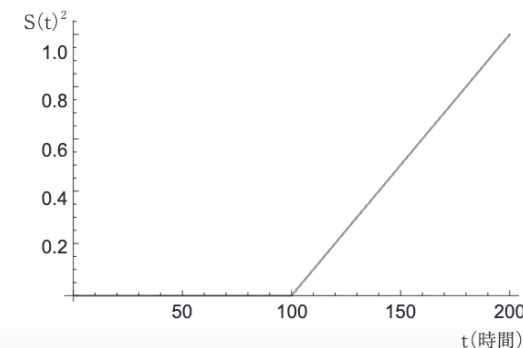
観測点B： R_2 （受信信号）

$$= S(\text{シグナル}) + N_2(\text{ノイズ})$$

が成り立つ。今、ノイズとして平均0、標準偏差＝0.5、0.8、1.0のガウス雑音 N が加わるとすると、ノイズの大きさが徐々に大きくなるにつれて、**図表3、4、5**のように、元のシグナル S の形が徐々に消えていくことが分かる。

特に、**図表5**のように標準偏差1を超えてくると、もともと信号の大きさの最大値が1であることにより、信号 $S(t)$ がノイズ信号 $N(t)$ に埋もれている状況で、 $S(t)$ の概形をこの観測からは検知できない。

図表2 $S(t)^2$



2 観測点の信号：ケース 1（ノイズ小）

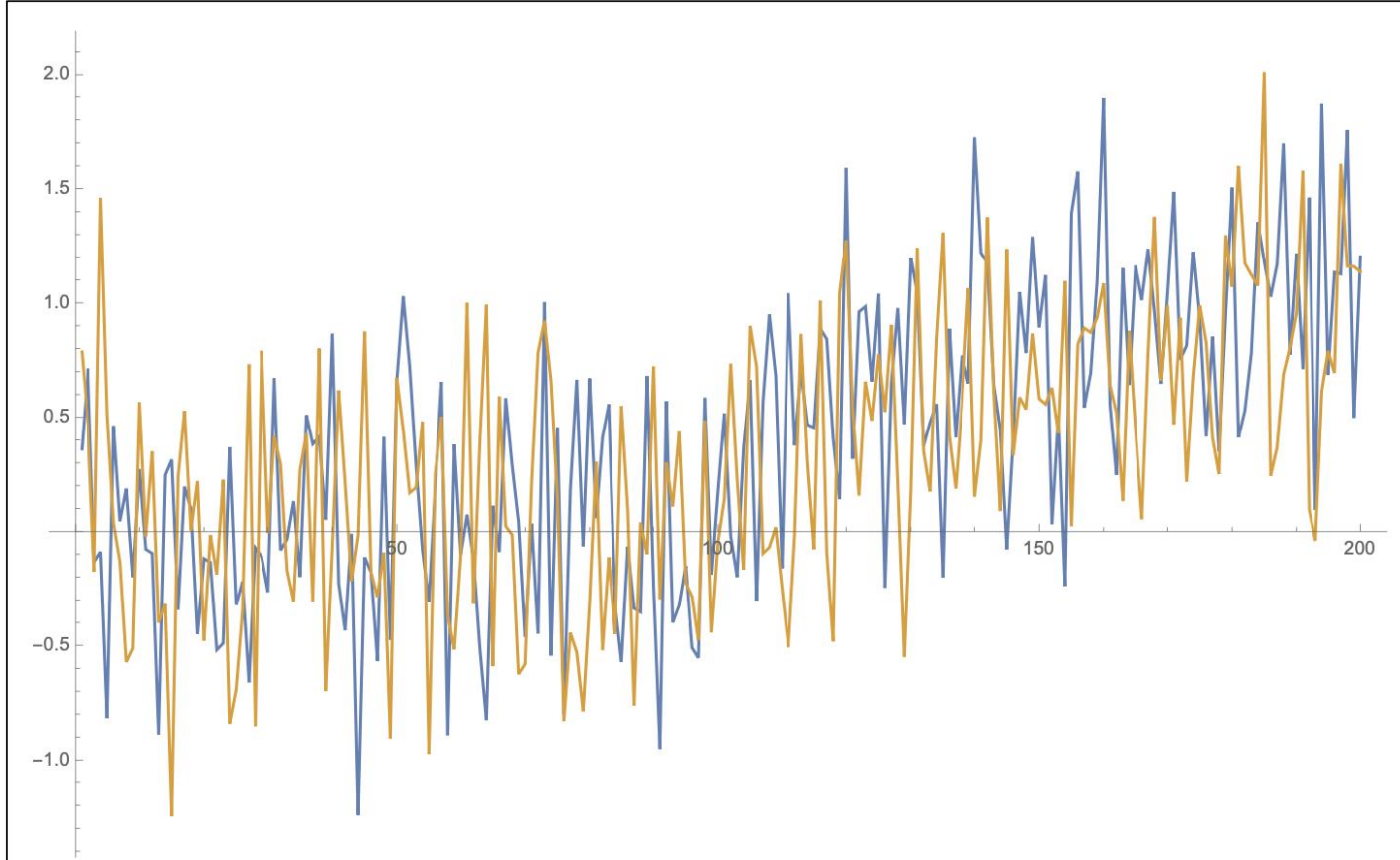


図 3: 2 観測点の信号 $S(t)+N(t)$ (シミュレーション)

横軸: 時間 t . 縦軸: 信号 $S(t)$ +ノイズ $N(t)$

ノイズ $N(t)$ は平均 0, 標準偏差 0.5 のガウス雑音

2 観測点の信号：ケース 2（ノイズ大）

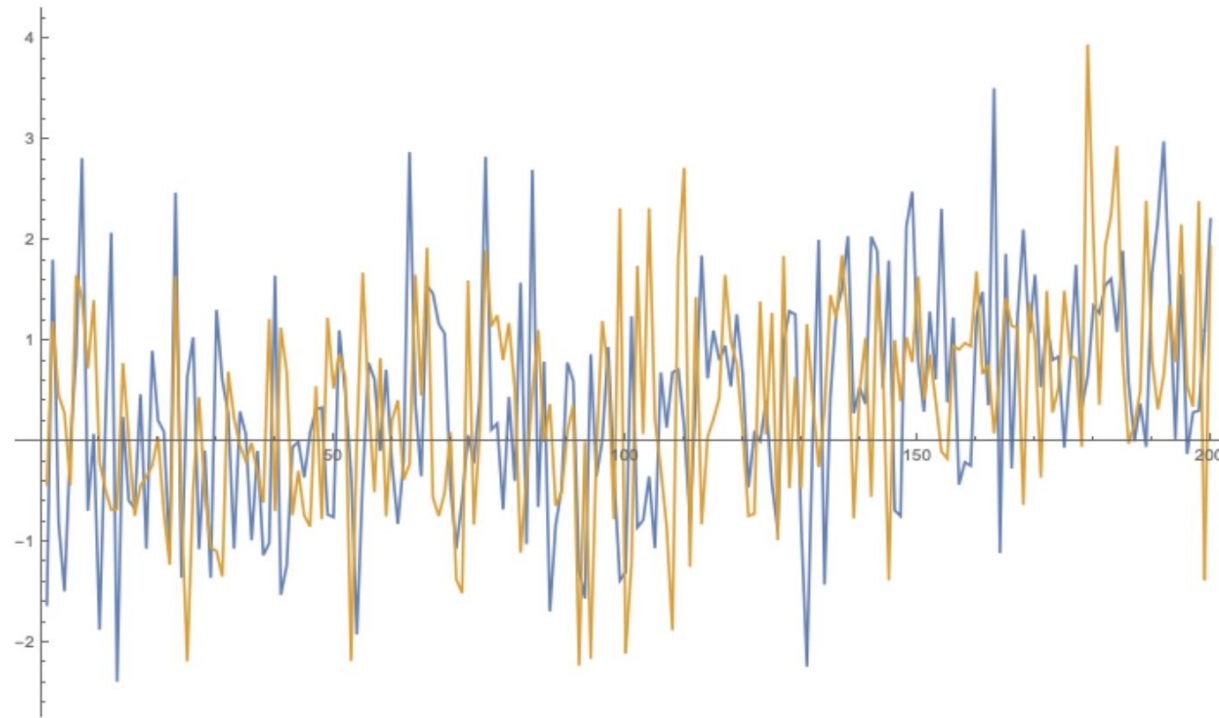


図 5: 2 観測点の信号 $S(t)+N(t)$ (シミュレーション)

横軸: 時間 t . 縦軸: 信号 $S(t)$ +ノイズ $N(t)$

ノイズ $N(t)$ は平均 0, 標準偏差 1 のガウス雑音

ノイズが大きくて観測信号からは、ほとんど $S(t)$ の概形を留めていない。

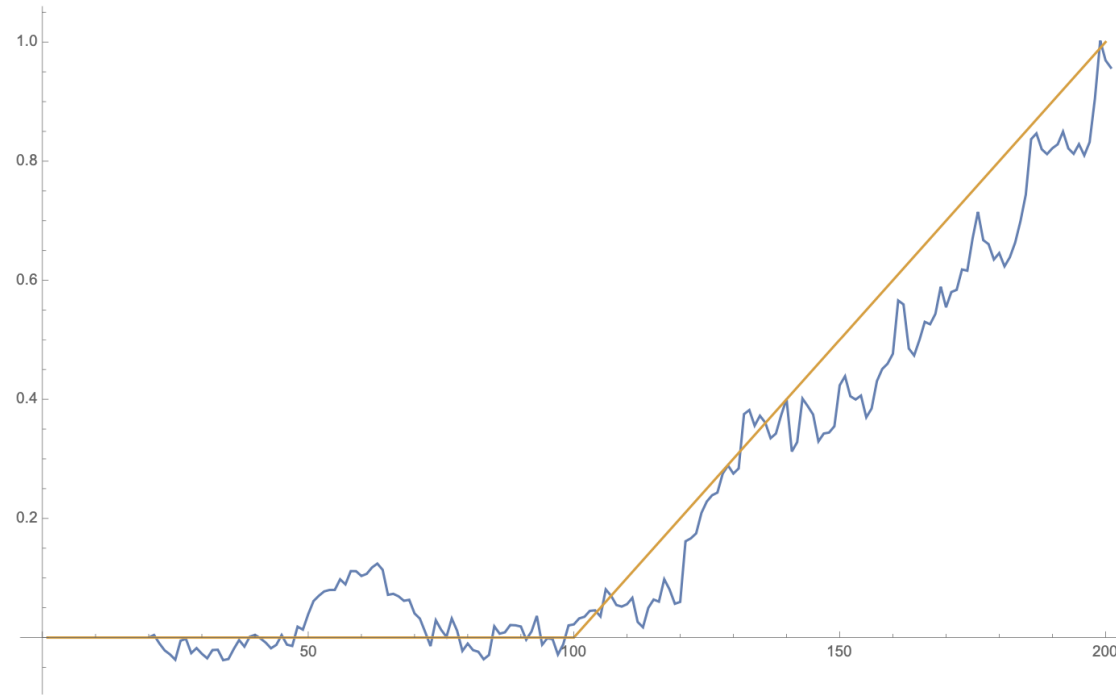


図 7: 相関解析法結果($\sigma=0.5$)。横:t, 縦軸: $C(t)$

時間方向について 20 サンプルングで時間平均。元の $S(t)$ が良く再現できている。

最初の時間サンプルングは、時刻 $t=1$ から時刻 $t=20$ までの信号積 $R_1(t)R_2(t)$ 20 個の和を 20 で割ったもの。それが相関値 $C(t=20)$ となる。従って相関値は

サンプルング時間数 20 だけ右にシフトしている。

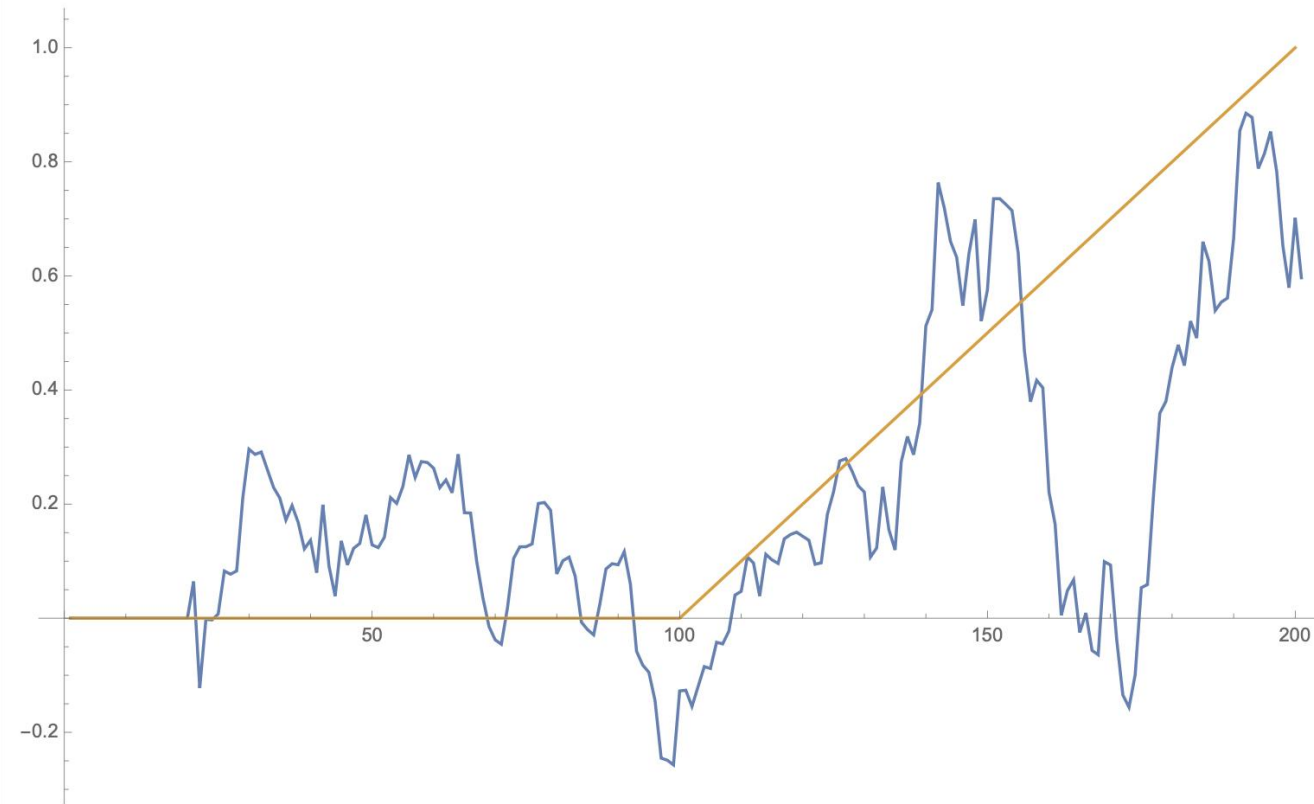


図 9: 相関解析法結果($\sigma=1.0$)。横:t, 縦軸: $C(t)$

時間方向について 20 サンプルで時間平均。元の $S(t)$ の概形($t=100$ から増加傾向)とは異なり、 $t=170$ のあたりで $C(t)$ はマイナスになっている。ノイズの影響が消えていないことになる。

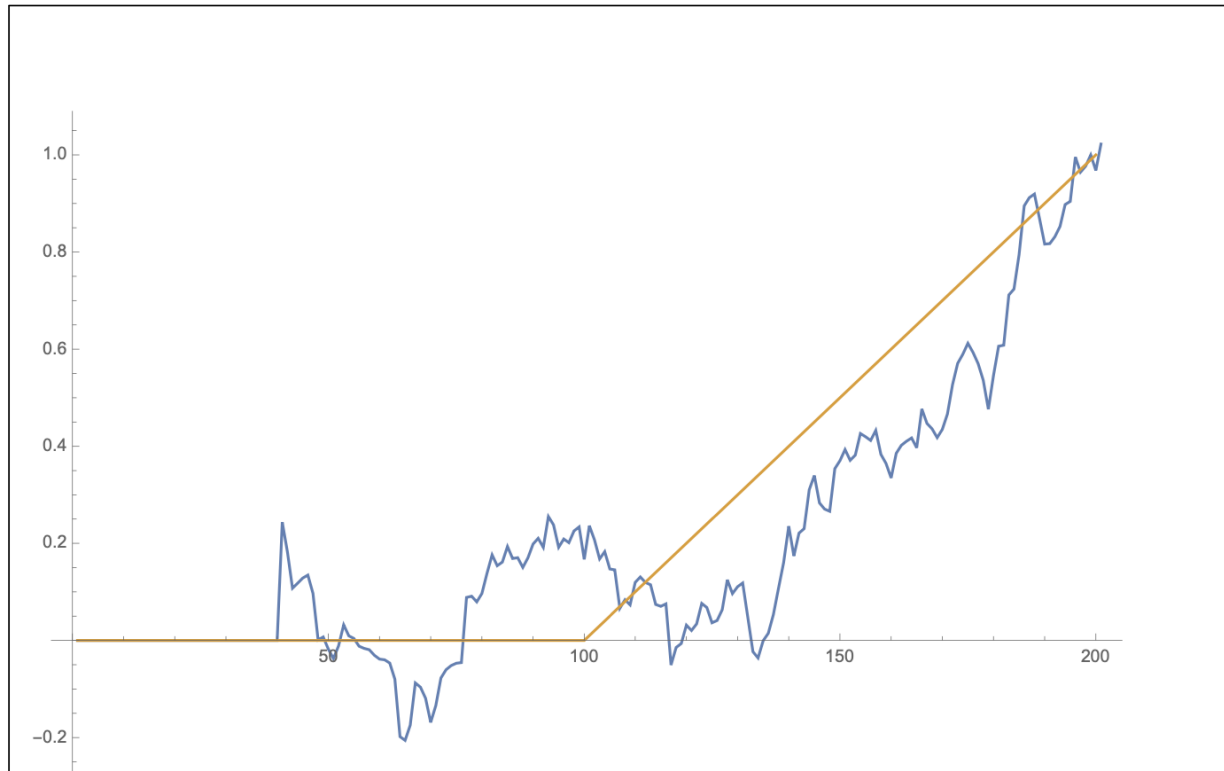


図 10: 相関解析法結果($\sigma=1.0$)。横:t, 縦軸: $C(t)$

時間方向について 40 サンプルで時間平均。ノイズレベルが同じの図 9(20 サンプル)の場合と異なり、元の $S(t)$ の概形($t=100$ から増加傾向)は綺麗に復元できている。

制御できるパラメーター

N : サンプル数 (拡散率) $\rightarrow \text{SNR} = O(N)$ 、但しあるところで頭打ちになる。

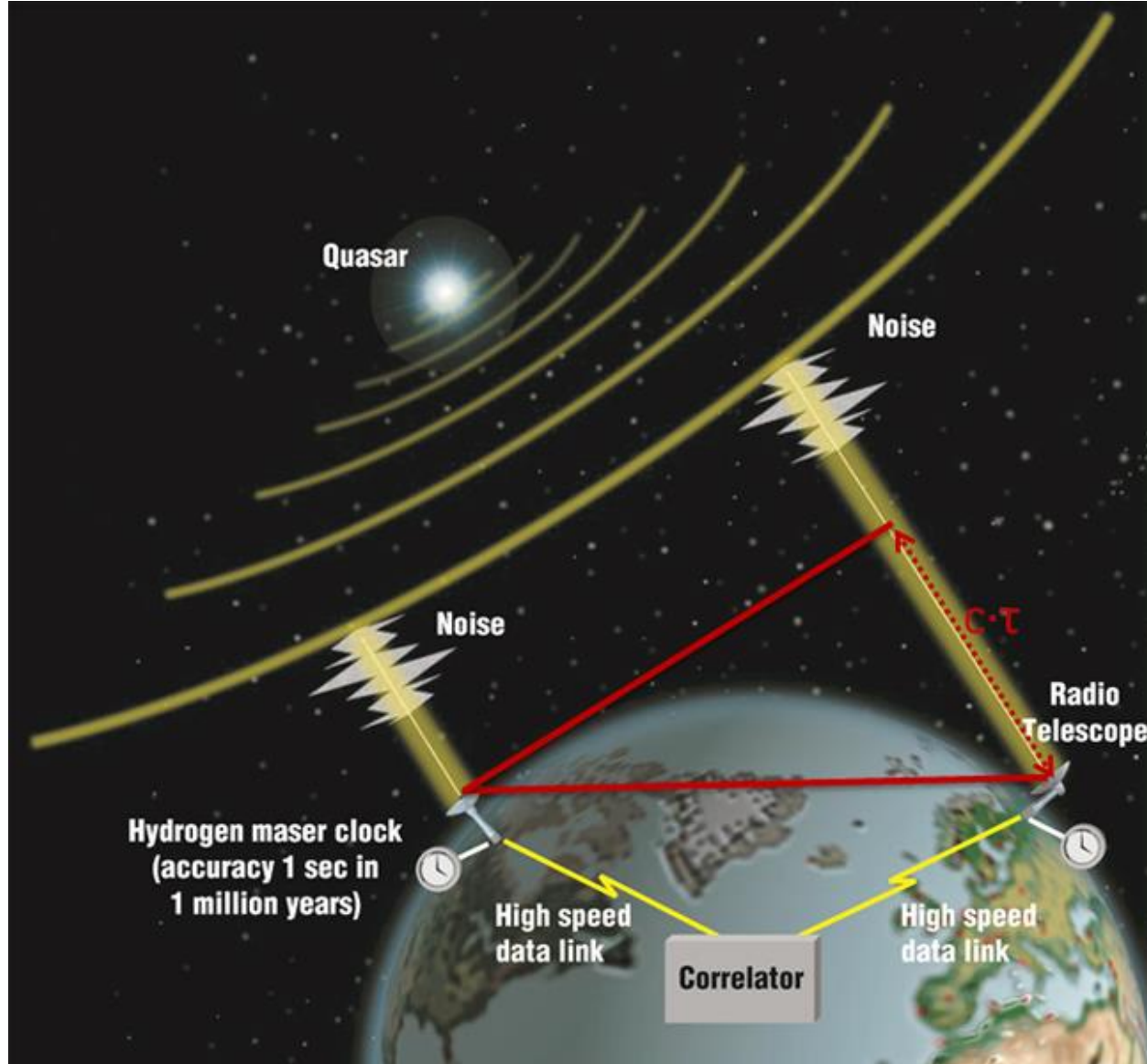
(サンプリング定理)

Δt : サンプル間隔(sec)

T : 現象の特徴的な時間 (プレスリップの場合約 2 時間)

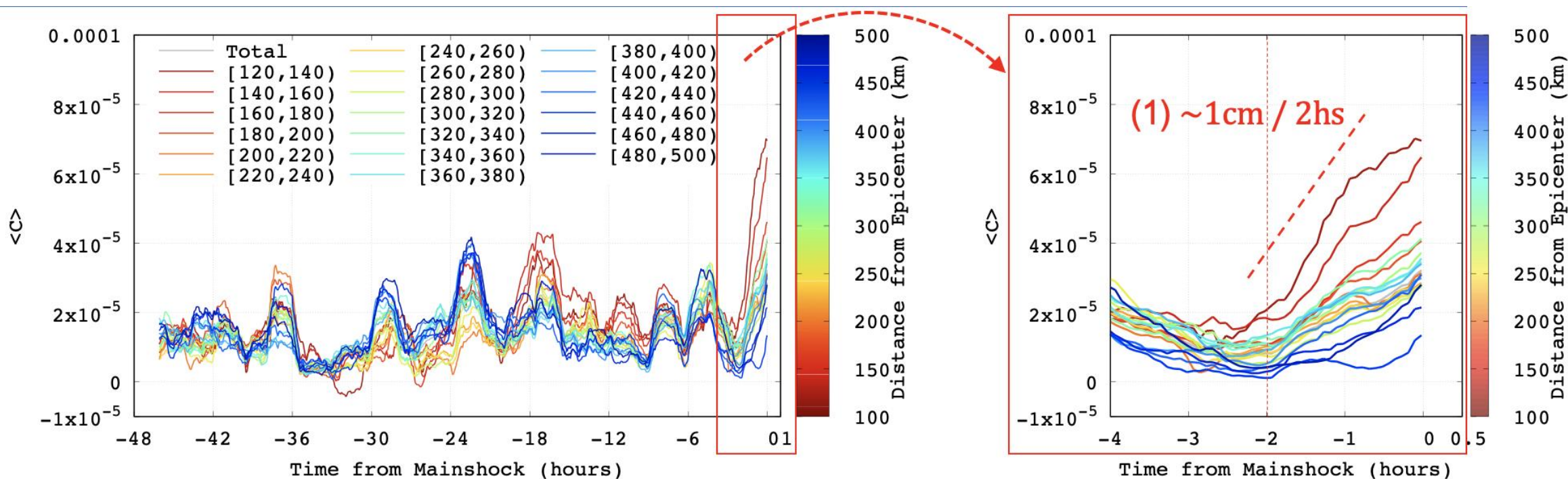
今の場合、 $N = T/\Delta t \rightarrow \Delta t$ を極端に小さくしても
SNは上がらない。

VLBI (クエーサー電波検出) and Correlation Analysis (相関解析) $N(t) \gg S(t)$



世界初プレスリップの検出(ノイズの中のシグナルをうまく抽出)

2011年東北沖地震 (3 1 1) の前兆も捉えられていた！ (昨年、国際会議にて発表)

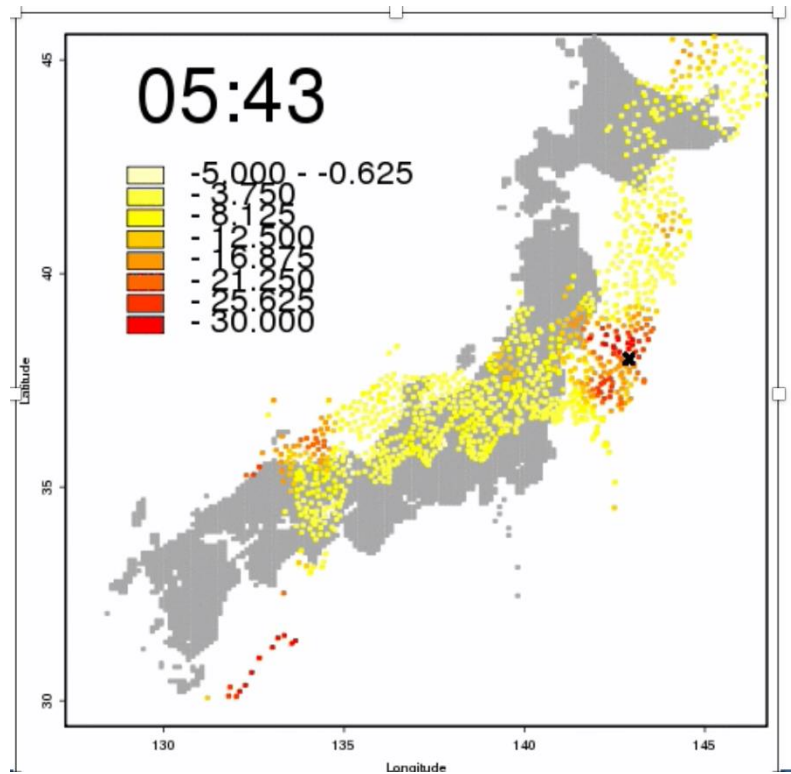


AGU 2024 Meeting 発表資料(Tanaka-Umeno, 2024)より

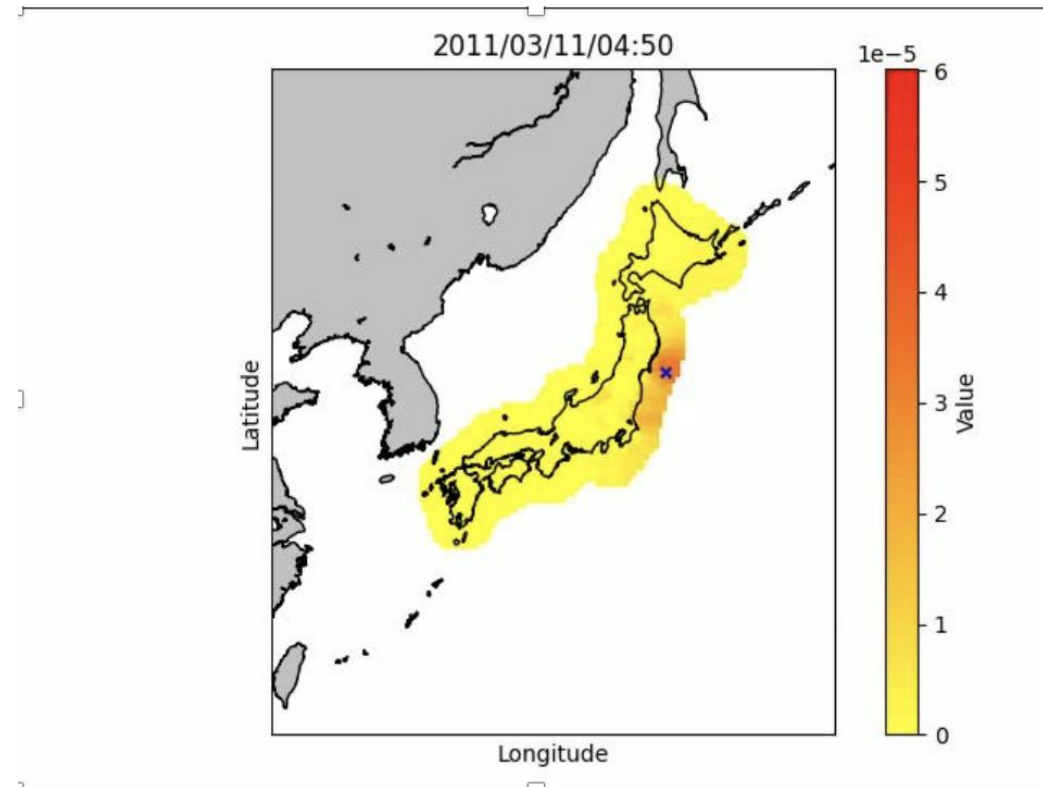
相関値が震央からの距離に依存→震央由来のシグナルの証拠

震央予測手法の精度比較、2016→2024進化

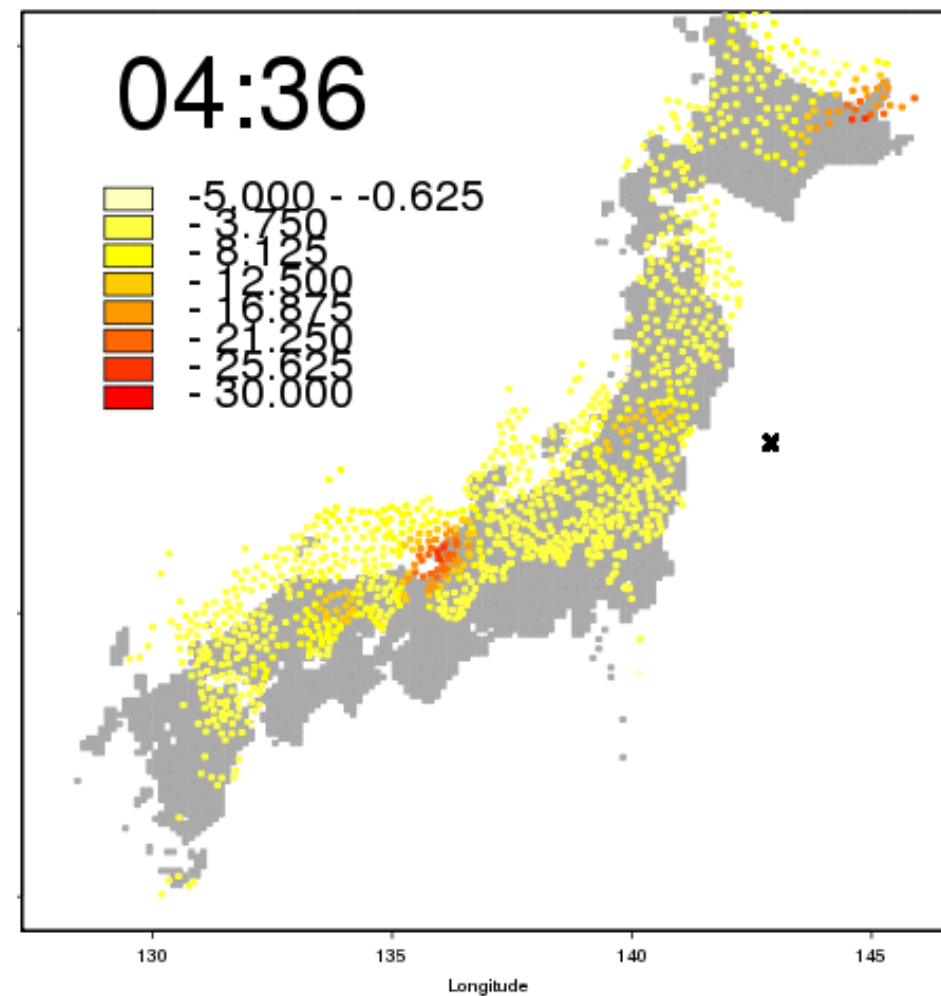
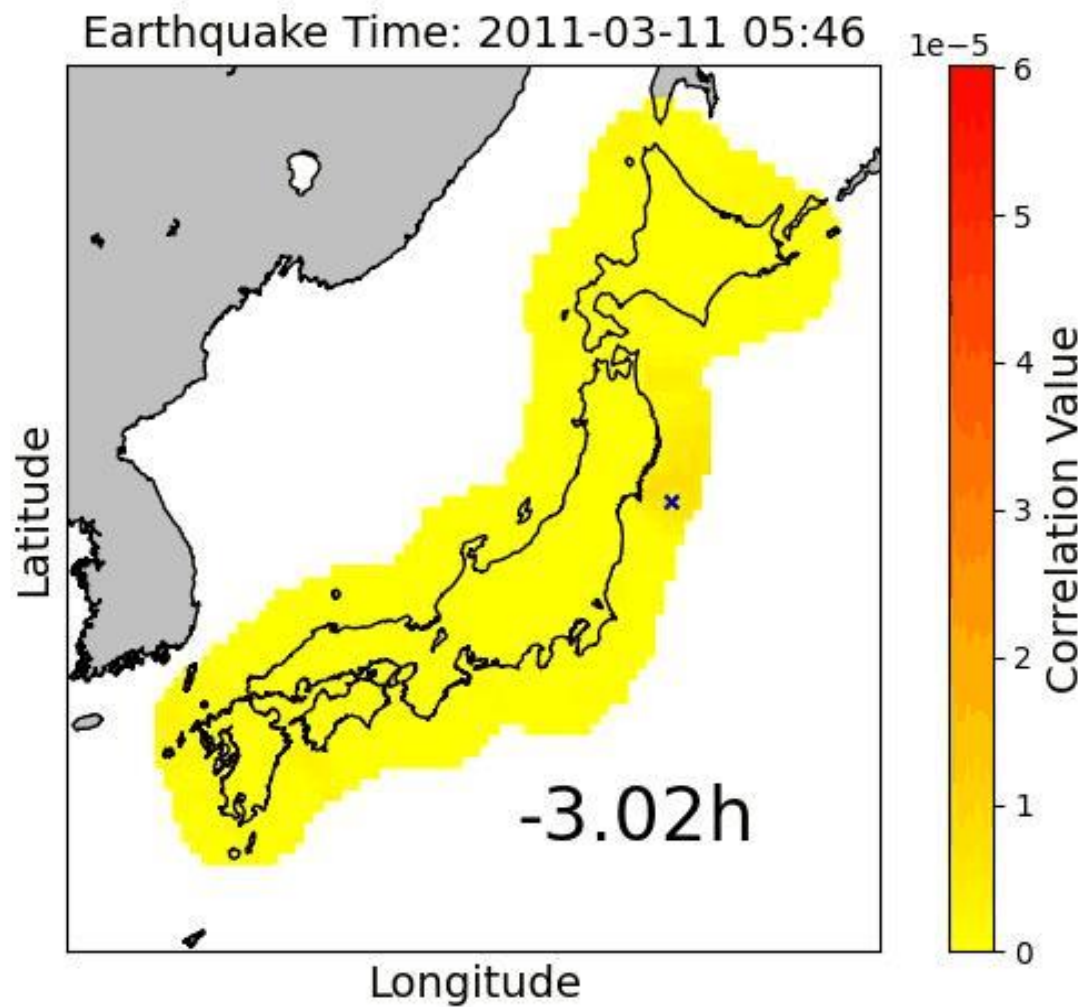
地震発生前3分前：電離圏擾乱の相関解析 JGR(2016)
(2024)



地震発生前の56分前：最新の地殻変動の相関解析



311直前の地殻変動震央推定（左）と電離圏異常（右）



実際の手順（地震予知）

ステップ 1：①電離圏異常と②地殻変動異常の両方を同時にみる。

ステップ 2：①、②同時に異常 → 危ない！（大地震の可能性大）

ステップ 3：震央推定可視化で赤色の位置（震央候補）を推定

ステップ 4：震央候補の近くにいる場合 → 火を消し、逃げる！

20年後の未来予想図

一時間前に南海トラフ地震(203X年12月Y日深夜) を検知しアラートを発出。そして。。。

- ・ 死者29万8千人（中央防災会議2025年3月推定） → **死者1万2千人へ激減**（日本人だけでなく観光客も助かる。）
（津波及び家屋倒壊被害から逃げる）
- ・ 損害保険会社の保険金支払いが激減 → **CRA技術活用**による損害保険会社の利益（金融・保険）
- ・ 自衛隊1時間前情報に基づく救出作戦始動（**事前防災情報に基づく大規模災害救助への貢献**）
- ・ 東海道新幹線が自動停止（**鉄道インフラ・人的被害を最小化**）

- ・ 翌朝、**南海トラフファンド***の運用基金を出資者（企業、個人、国、地方自治体）へ返還。

→ 想定経済被害292兆円を 1/2の146兆円以下にする。 **どうやってできるか？**

*** 南海トラフファンド:** 南海トラフ地震経済被害に対するリスクヘッジを行うためのファンド（本プレゼンター考案）。

運用益の1/2を超短期地震予知—CRA技術確立—のための観測局整備、技術開発の改良、AI活用、運用企業運営コストにあて、運用益の1/2をファンド出資者に南海トラフ地震発生時に返還する。

7月18に日本経済新聞に掲載。政府は10兆円規模の投資を

私見
卓見

南海トラフに備えるファンドを

京都大学教授(カオス理論) 梅野 健

南海トラフ地震の被害総額は最大で29兆円、死者数29万8千人という数字が公表されたが、ピンとこない人も多いはずだ。確かに国難には違いないが、実際、何をしたら良いかわからないというのが正直なところだろう。

この状況を打破すべく、今から少しずつそのリスクや被害を減らすことはできないか。南海トラフ地震に特化したファンド(基金)を設置して運用し、その運用益を南海トラフ地震の事前防災対策、事前防災に資する情報取得の観測網整備、人工知能(AI)活用型異常検知システムの開発や運用などに充てることを提案したい。

任を分離することで、この巨大なリスクを役割分担することにある。基金の規模は10兆円程度で、南海トラフ地震の発生後、出資者に基金と運用益の一部が返還される仕組みだ。

出資者は政府、自治体、企業、富裕層などで、運用益を1〜2%と見積もると、毎年1000億円規模が観測網の整備、事前防災に活用する異常情報取得などに充てられることになる。政府は南海トラフ地震の発生に備え、役に立つ情報を取得し、新手法を開発し、その解析結果を生かし、被害を減らすことに注力できる。

また、AI活用型異常検知システムの開発については科学的に100%正しいと証明されるのを待つのでなく、日々の観測データと実際の結果との比較の積み重ねで判断誤差を少しずつ減らし、小さな誤差を許容する仕組みも必要だ。もし、異常検知したシグナルが誤りであっても、事前情報に基づく避難訓練と考えれば、南海トラフ地震が発生した時に避難し、結果的に多くの命が助かることにつながるだろう。

リスクとは事前に分解できるものであり、可能な限り、分解できない複数のリスクの最小単位へとあらかじめ分解すべきものだ。東日本大震災では2次災害、3次災害とリスクと被害が発生後の時間経過とともに大きくなり、リスクを分解できる状態ではなくなってしまった。南海トラフ地震が起きてからでは遅い。今、リスクを分解できる時に取り組みしかない。

当欄は投稿や寄稿を通じて読者の参考になる意見を紹介します。〒100-8066東京都千代田区大手町1-3-7日本経済新聞社東京本社「私見卓見」係またはkaietan@nknk

ai.comまで。原則1000字程度。住所、氏名、年齢、職業、電話番号を明記。添付ファイルはご遠慮ください。趣旨は変えずに手を加えることがあります。電子版にも掲載します。

まとめ

相関解析法によるプレスリップ検出を用いて、M9.1の2011年東北沖地震の震央推定(50kmの精度)が可能であることを示した。

TEC異常、電離層の異常も同じ時間に現れていることから、今後、どういう条件で震央推定を含むプレスリップ検出が可能かを詳細に調べる必要がある。**Future Problem：マグニチュード推定は可能か？** **さらなるプレスリップの物理の理解が必要**

データを集めれば準リアルタイム解析が可能(本日、小池発表)というところまでできている。民間企業、地方自治体との共同研究という枠組みで、**受信点 (GNSS観測局) の密度を増加することが肝。** 地震予知投資 (南海トラフファンド) の仕組みも提案。