

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST



# 次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との 融合によるインテリジェント地震波動解析 (iSeisBayes)の取り組み

## 長尾 大道

東京大学地震研究所 計算地球科学研究センター

東京大学大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻

第1回 新たな科学技術を活用した地震調査研究に関する専門委員会

2020年3月24日

# 経歴（東大地震研／東大情報理工・長尾大道）

1991年4月 京都大学理学部 入学

1995年4月 京都大学大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 修士課程入学

2002年3月 京都大学大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 博士後期課程修了

2002年4月 特殊法人 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 客員研究員  
現：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

2006年3月 独立行政法人 海洋研究開発機構 地球内部変動研究センター 研究員

2009年6月 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所  
特任研究員 ⇒ データ同化研究開発センター 特任准教授

2013年9月 東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター 准教授  
現：計算地球科学研究センター

2013年10月 東京大学大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻 准教授

2013年11月 統計数理研究所 客員准教授

# JST CREST “iSeisBayes” の背景

## 次世代の地震計測ビッグデータベースの構築が進行中

- ✓ 1,000点以上の定常観測点の高精度地震計測データ
- ✓ 各建造物やライフラインに設置された振動計のデータ
- ✓ スマートフォン等に内蔵された加速度計のデータ

データプラットフォーム拠点形成事業（防災分野）  
～首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト～

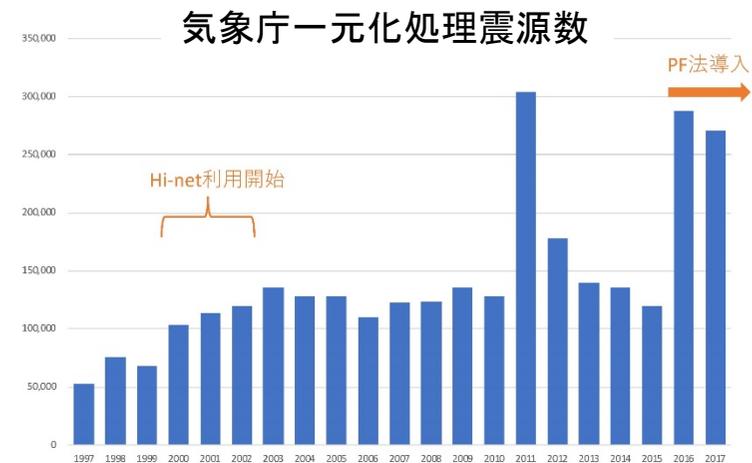
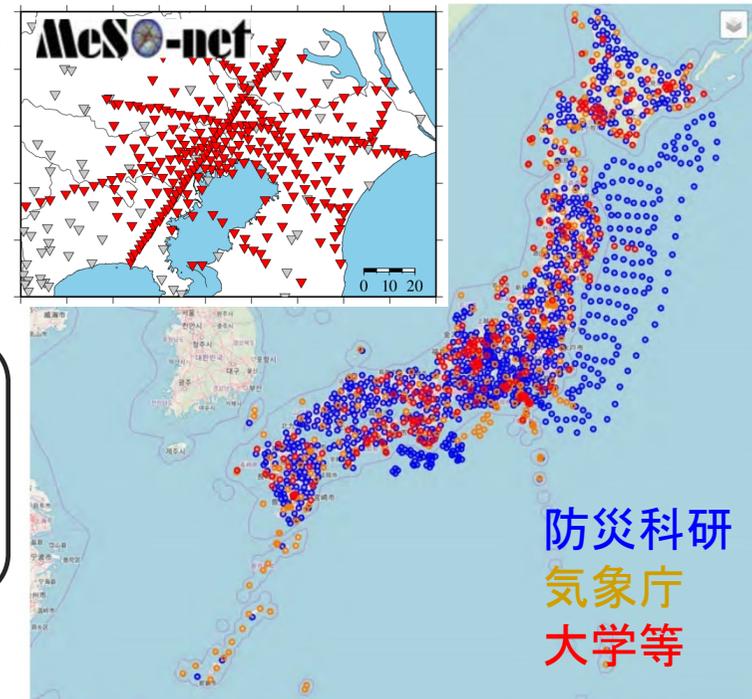
データ利活用協議会（会長: 平田直）

2017年6月発足

## 「玉石混交」の地震計測ビッグデータ利活用

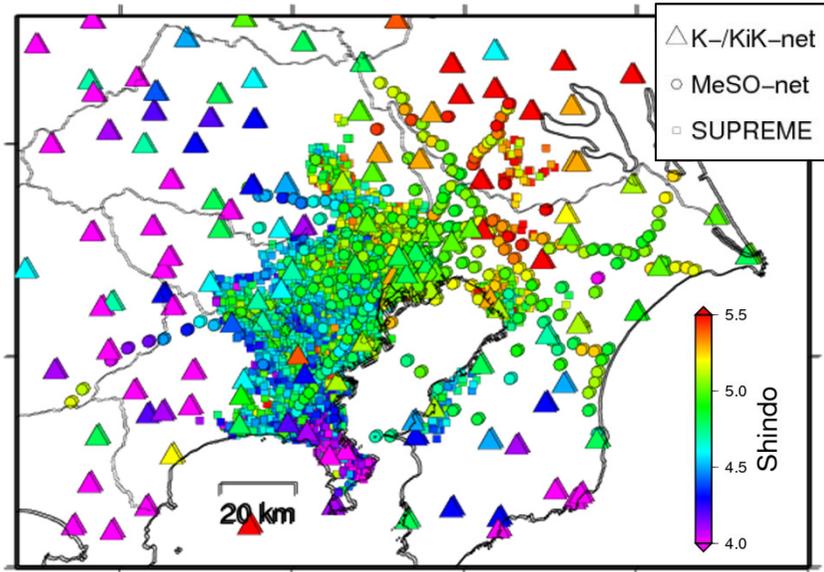
- ✓ 数千万点に及ぶ観測点からの自動選択アルゴリズム
- ✓ 固体地球起源の多様な振動現象を包括的に解析し、  
情報を余すところなく抽出するためのアルゴリズム

「インテリジェント地震波動解析」  
手法の開発

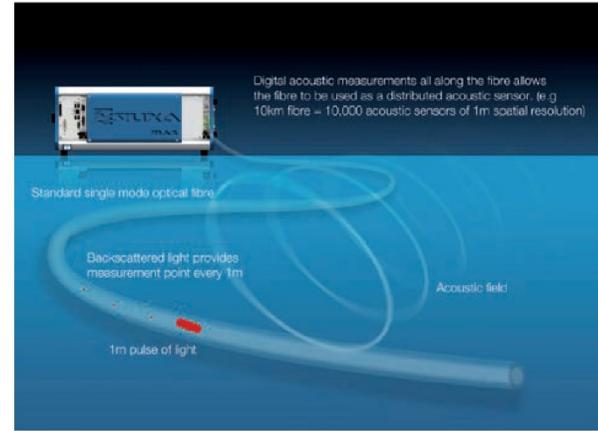


# 民間データの地震研究への利活用の可能性

## 民間会社が所有する振動計



## DAS (Distributed Acoustic System)

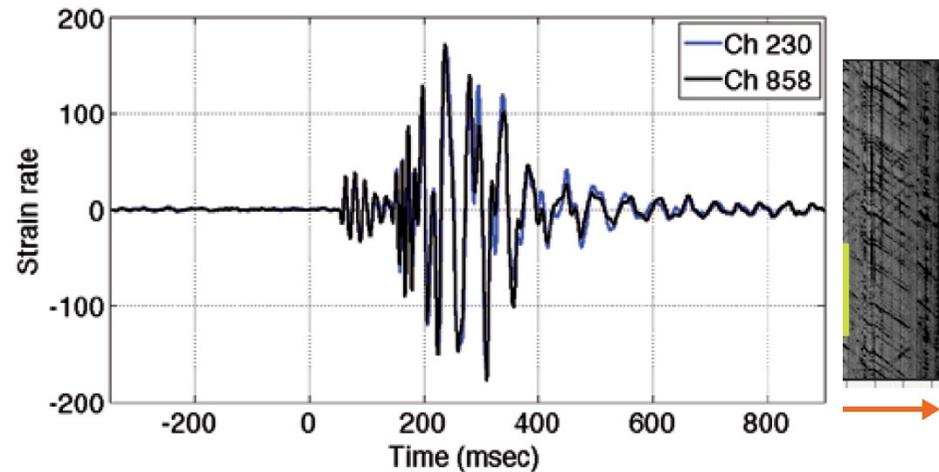
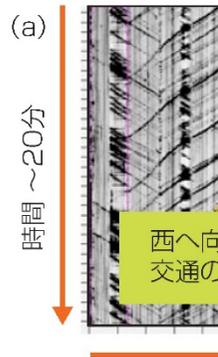


Parker *et al.* (2014)



Hill (2015)

## スマートフォンが持つ振動計



# JST CREST “iSeisBayes”



次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合による  
**インテリジェント地震波動解析**



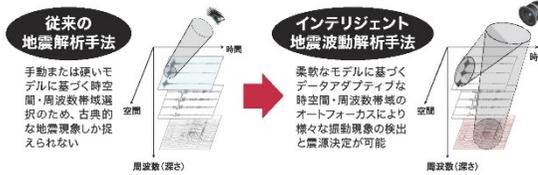
ビッグデータと統計学で拓く、地震研究の未来。



わが国では、千点以上の観測点で得られる高精度地震計測データが常時収集されていますが、これに加えて、建造物、電気・ガスのライフライン、スマートフォンが持つ加速度計等のデータを活用する次世代の地震計測ビッグデータベースが構築されつつあります。本研究は、最先端ベイズ統計学を武器に、多種多様な地震計測データを包括的に解析するためのアルゴリズム群開発に取り組み、地震防災・減災や地震現象の解明に役立てます。

## 異分野融合により地震現象の理解の深化に挑戦

地震計測ビッグデータベースの大容量データから本質的な情報を抽出するための統計学的解析手法の開発を行い、多様な振動現象を包括的に解析する本研究は、これまでの地震学分野にはない独創的なものです。また観測点密度の急激な増大によって得られる空間情報を最大限に活かす高次元状態空間モデルの導入も、国際的に見ても極めて先駆的です。

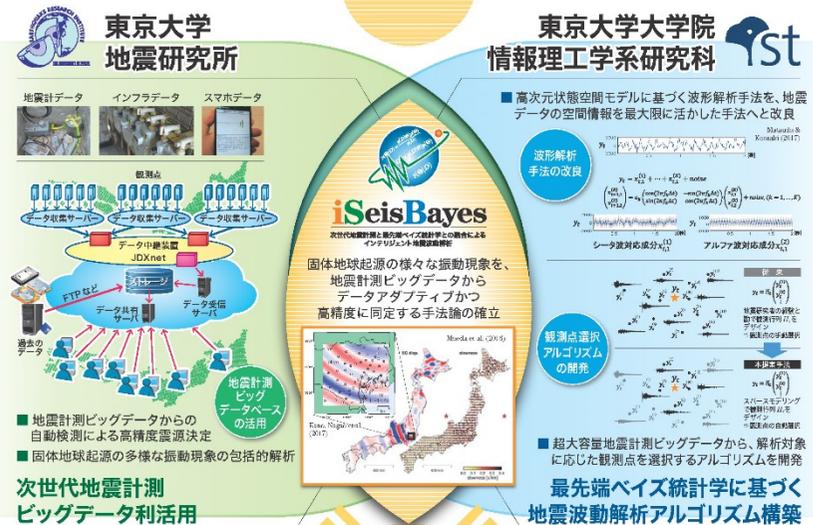


次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合による  
**インテリジェント地震波動解析**



## 地震学と統計学の専門家集団による地震研究の根幹をなす手法を開発

東京大学地震研究所と東京大学大学院情報理工学系研究科に所属する地震学と統計学の専門家が一層緊密かつ有機的に協働することにより、地震発生メカニズムの理解に飛躍的の進展をもたらし、日本社会へ大きなインパクトをもたらします。



<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/iSeisBayes/>

JST CREST インテリジェント地震波動解析 事務局  
〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 東京大学地震研究所 E-mail: iSeisBayes@eri.u-tokyo.ac.jp

HPはこちらからご覧ください。



ENGLISH



次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合による  
**インテリジェント地震波動解析**






**ビッグデータと統計学で拓く、地震研究の未来。**

- ホーム
- プロジェクト概要
- メンバー
- 研究業績
- お知らせ

わが国では、千点以上の観測点で得られる高精度地震計測データが常時収集されていますが、これに加えて、建造物、電気・ガスのライフライン、スマートフォンが持つ加速度計等のデータを活用する次世代の地震計測ビッグデータベースが構築されつつあります。本研究は、最先端ベイズ統計学を武器に、多種多様な地震計測データを包括的に解析するためのアルゴリズム群開発に取り組み、地震防災・減災や地震現象の解明に役立てます。

**新着情報**

2019.08.18-21  
国際会議11th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei11)にて、セッション

- 研究期間：2017年10月～2023年3月
- 中核機関：東大地震研，東大情報理工，東北大工学研究科（2020年4月～）
- 研究者数：30名



次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合による  
**インテリジェント地震波動解析**




- ホーム
- プロジェクト概要
- メンバー
- 研究業績
- お知らせ
- メンバー限定

**メンバー**

東大地震研チーム

— 平田直，東京大学地震研究所・教授（研究代表者）



専門は観測地震学，地殻構造論，地震防災。これまでに，地震観測網の設計，震源決定に関する手法を開発し，地震活動，地殻構造の研究を行ってきました。地震学を防災に役立たせたいと思っています。

- 岩崎貴哉，東京大学地震研究所・名誉教授
- 酒井慎一，東京大学地震研究所・准教授
- 鶴岡弘，東京大学地震研究所・准教授
- 加藤愛太郎，東京大学地震研究所・教授
- 長尾大道，東京大学地震研究所・准教授
- 前田拓人，弘前大学大学院工学研究科・准教授
- 中川茂樹，東京大学地震研究所・准教授
- 加納将行，東北大学大学院理学研究科・助教
- 森川耕輔，大阪大学大学院基礎工学研究科・助教
- 伊藤伸一，東京大学地震研究所・助教
- 吉光奈奈，東京大学地震研究所・特任助教
- 椎名高裕，東京大学地震研究所・特任研究員
- 吉田美和，東京大学地震研究所・学術支援専門職員

**東大情報理工チーム**

— 駒木文保，東京大学大学院情報理工学系研究科・教授（主たる共同研究者）



専門は統計学。特にベイズ理論・予測理論の研究と脳科学関係の統計モデルとデータ解析手法の開発を行ってきました。ベイズ統計学を用いた地震学の手法の開発に取り組みます。

- 清智也，東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授
- 廣瀬善大，北海道大学大学院情報科学系研究科・准教授
- 矢野憲佑，東京大学大学院情報理工学系研究科・助教
- 倉田遼人，東京大学大学院情報理工学系研究科・特任助教

# iSeisBayes の主要研究テーマ

地震発生

## 地震超ビッグデータ自動処理システム

### 地震超ビッグデータ

高精度地震計データ

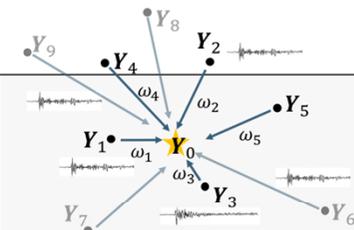


民間振動計

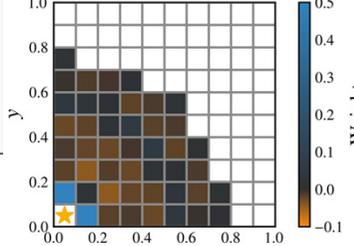


スマートフォン

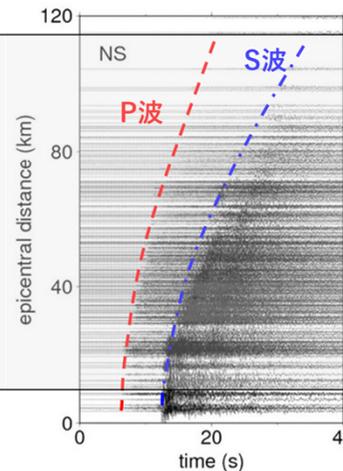
### 観測点自動選択



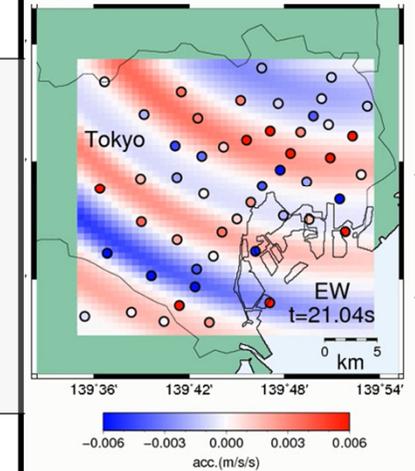
Number of effective stations  $K = 46$



### 深層学習に基づく地震自動検測



### 地震波動場再構成



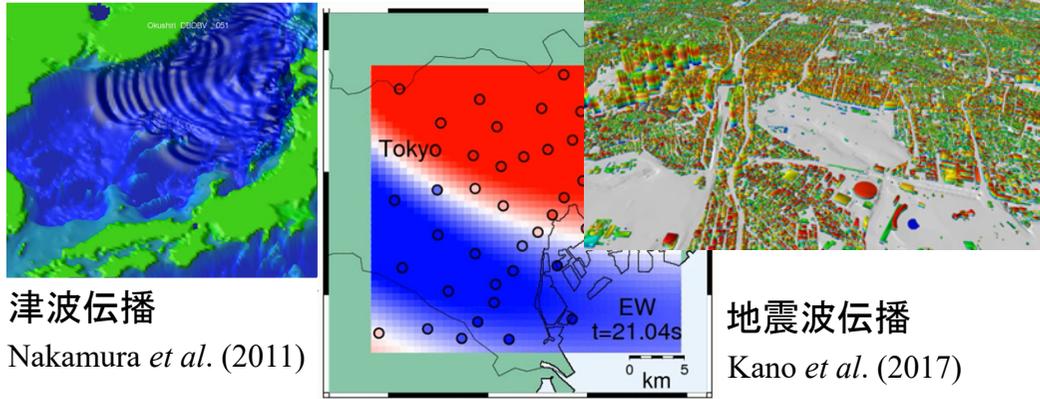
## ➤ 本日紹介する研究テーマ

- 深層学習に基づく地震自動検測
- データ同化に基づく地震波動場再構成 (⇒緊急地震速報の精度向上)
- 観測点自動選択アルゴリズム開発

# 数理科学・情報科学が支える地震研究

## 理論・数値シミュレーション

HPCによる地震関連シミュレーション(堀宗朗先生ご提供)



津波伝播

Nakamura *et al.* (2011)

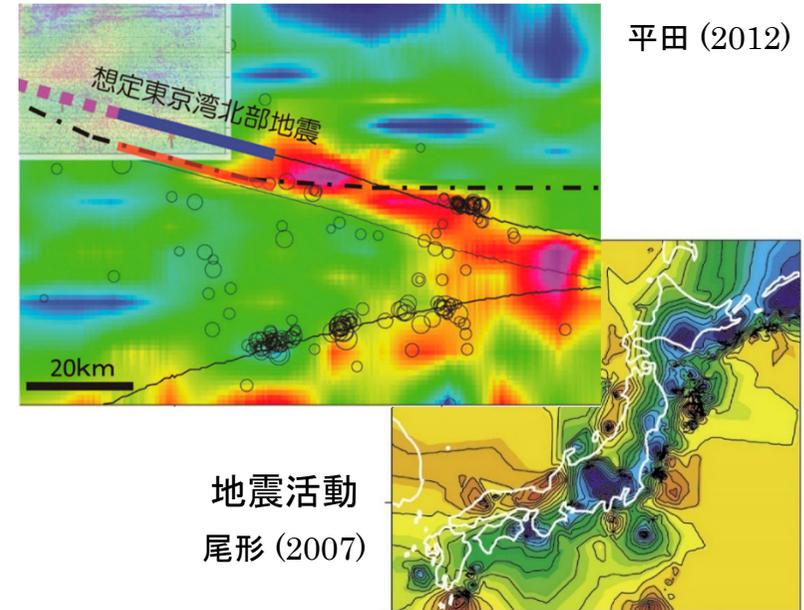
地震波伝播

Kano *et al.* (2017)

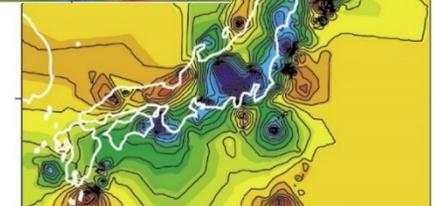
## モデリング

地球内部構造

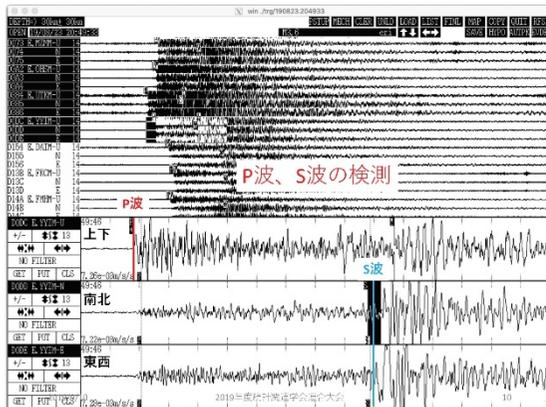
平田 (2012)



地震活動  
尾形 (2007)

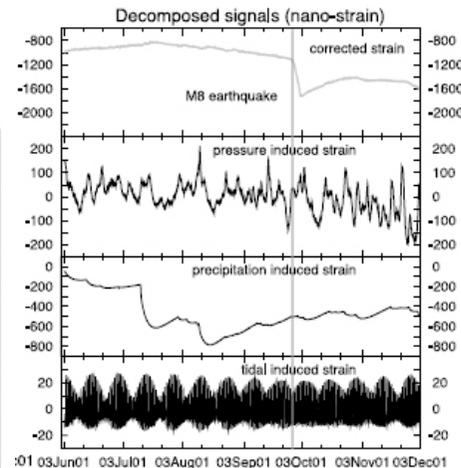


## 観測・データ解析



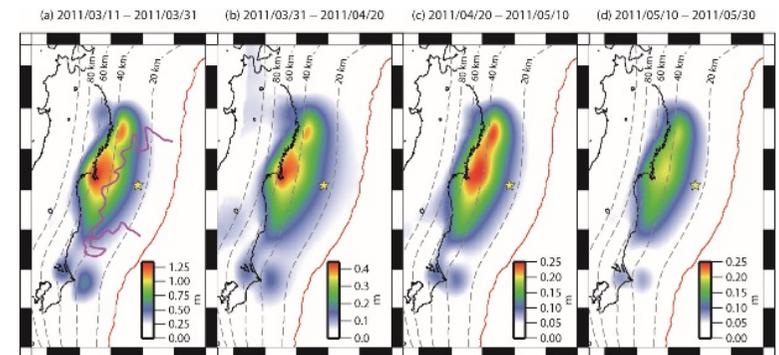
地震波形データ

中川 (2019)



地震関連データ

Takanami *et al.* (2013)



地殻変動

Fukuda *et al.* (2013)

# 地震自動検測のための人工知能技術の応用

## 単一観測点への適用による自動検測

### ◆ 多層パーセプトロン

- Wang and Teng (1995)
- Tiira (1999)

### ◆ 畳み込みニューラルネット

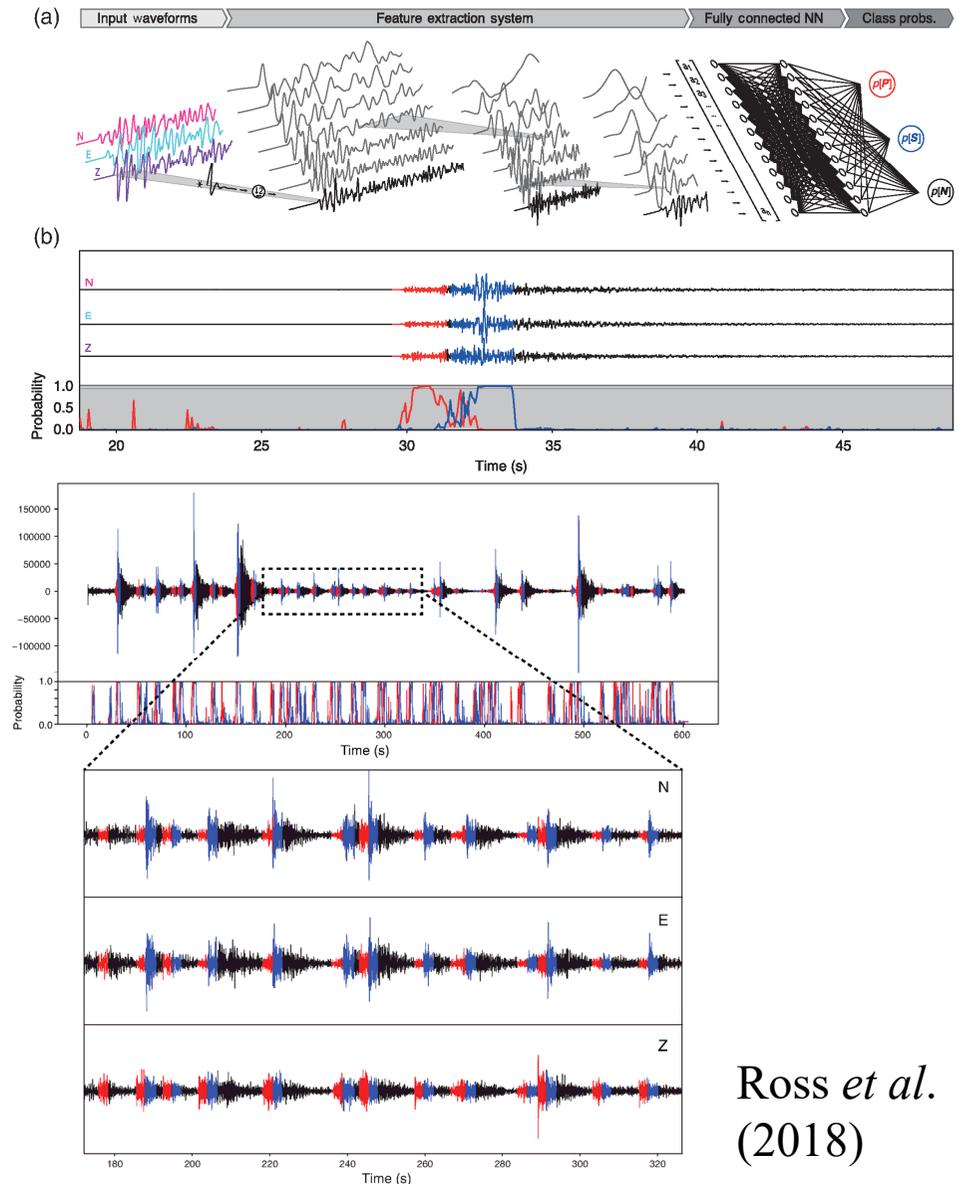
- Ross et al. (2018)
- Perol et al. (2018)
- Zhu and Beroza (2018)
- Wang et al. (2019)
- Hara et al. (2019)

## 複数観測点への適用

### ◆ 震源決定

- Kriegerowski et al. (2019)

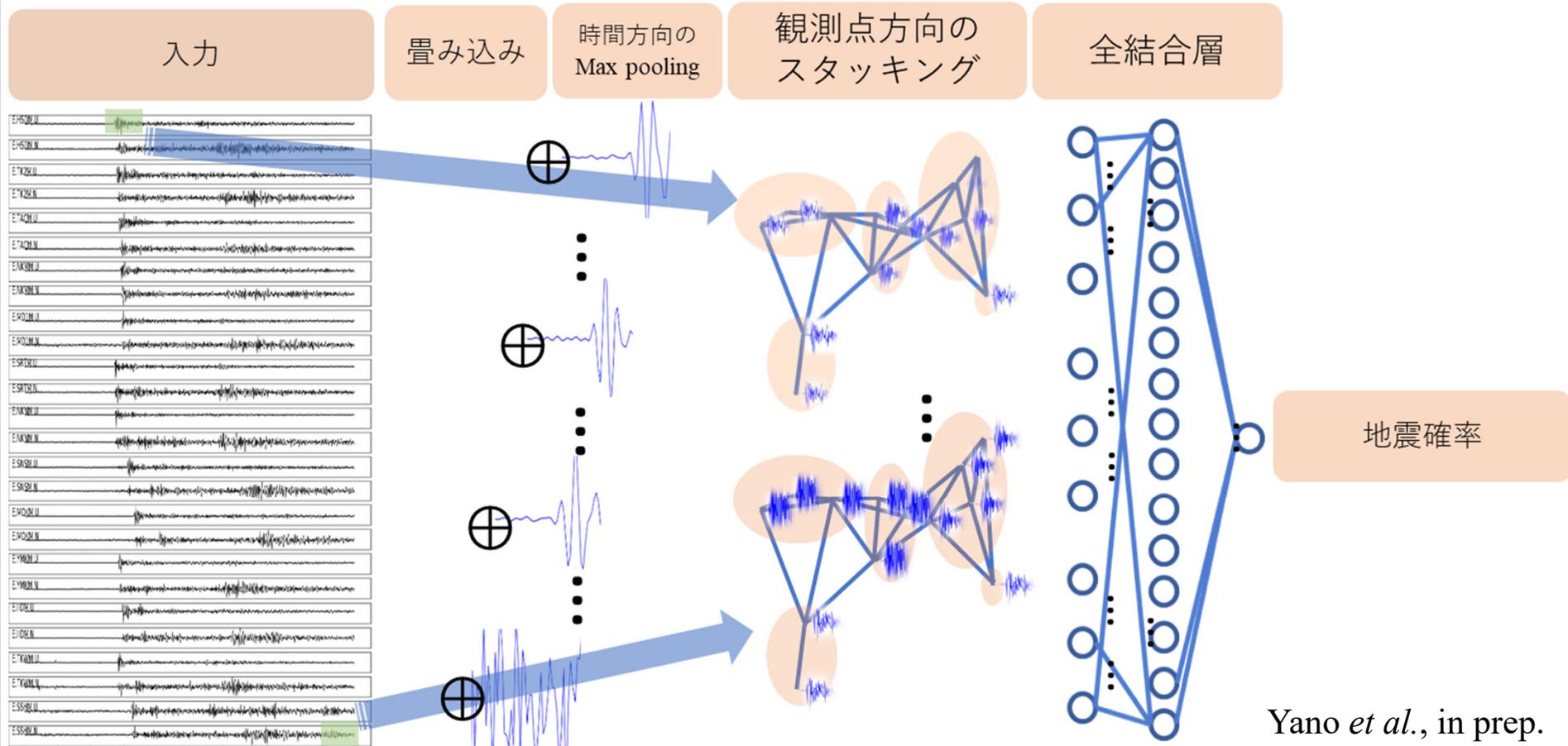
地震学においても、人工知能の  
応用研究が世界的に大流行



Ross et al.  
(2018)

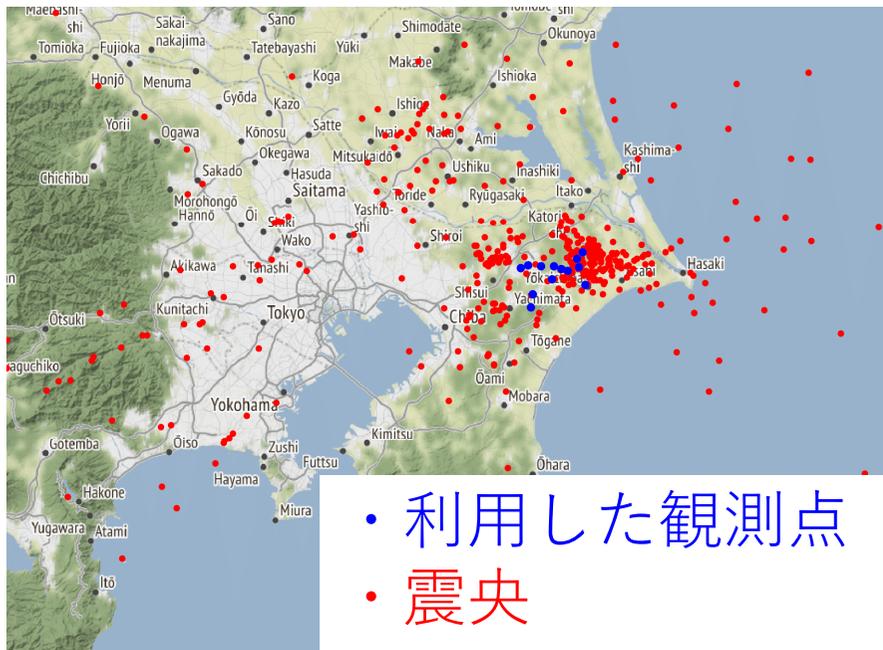
# 深層学習に基づく地震自動検出技術の開発

- 入力: 複数観測点の3成分連続波形 (時間幅 × 観測点数 × 3)
- 出力: 地震・ノイズ判別

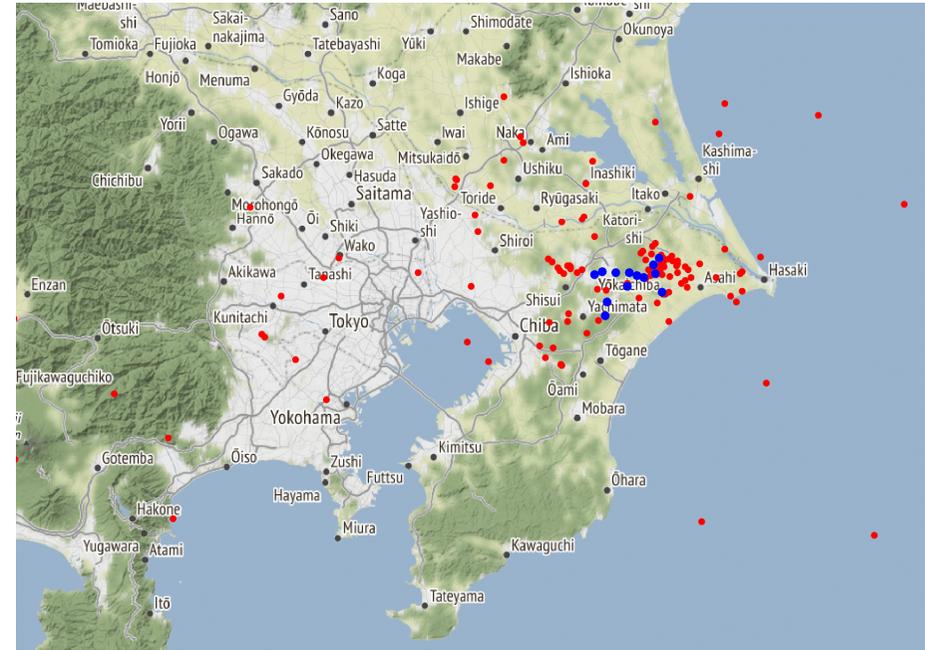


# MeSO-net 「成田アレイ」 データに基づく検証

20秒窓のランダムに選んだイベント(地震400;ノイズ200)で検証



訓練データ (04-13/09/2011)



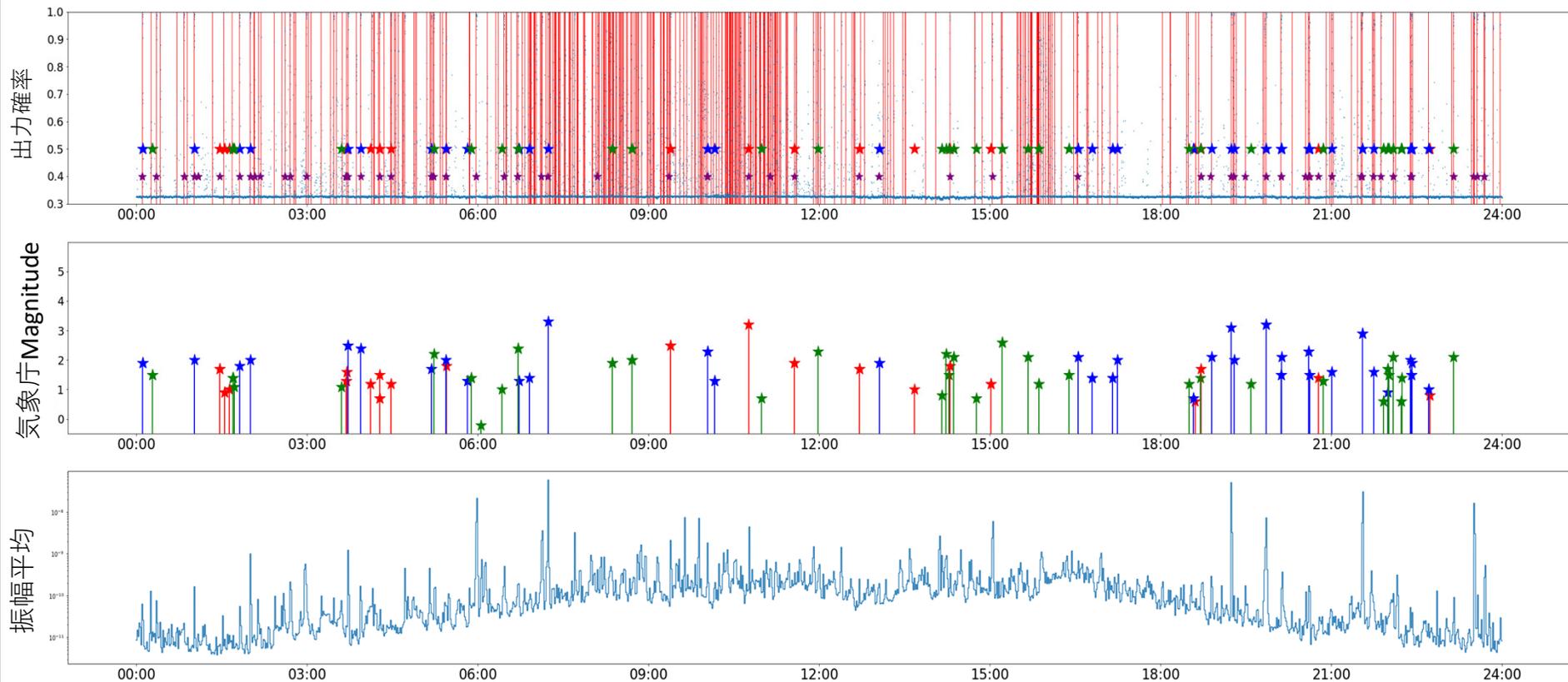
検証データ (14-16/09/2011)

	単観測点へのCNN	複数観測点へのCNN	提案手法
地震見逃し	2%	5%	<b>1.25%</b>
誤検知	10%	2.5%	<b>1%</b>

Yano *et al.*, in prep.

# 気象庁一元化カタログとの比較

Yano *et al.*, in prep.



長所：気象庁一元化カタログとの対応・新しい地震を発見  
短所：特定の時間帯のノイズに反応している傾向

# 「基礎データセット」の配布

- 地震観測網：首都圏地震観測網（MeSO-net）
- データ期間：2011年9月4日から9月16日までの13日間。
- 【基礎データ】：
  - 波形データ：地震記録（757記録），ノイズ記録（6,998記録）
  - 自動処理による検測情報（震源位置の情報やP波/S波の到達時刻）
- 【成田アレイ】：
  - 波形データ：連続記録，地震記録（565記録）
  - 目視確認した検測情報（P波/S波の到達時刻）

解析手法評価のための  
標準データセット  
として関係者に配布

## 東京大学地震研究所で現在稼働している自動処理システムの性能

自動処理の結果	地震記録	ノイズ
地震と判別	589	10 (誤検出)
地震と判別せず	168 (見逃し)	

➔ 【基礎データ】に対する実験

- 誤検出率：1.7% [=10/(589+10)]
- 見逃し率：22.2% [=168/(589+168)]

# Kaggle (のようならことができれば良いが)

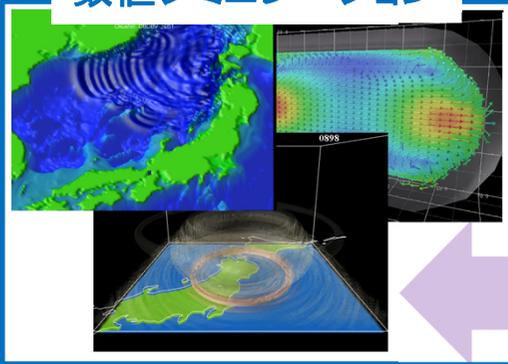
The screenshot shows the Kaggle website interface for the 'LANL Earthquake Prediction' competition. The main banner includes the text 'LANL Earthquake Prediction' and 'Can you predict upcoming laboratory earthquakes?'. A red circle highlights the '\$50,000 Prize Money' text. Below the banner, there is a table with the following content:

Overview	
Description	Forecasting earthquakes is one of the most important problems in Earth science because of their devastating consequences. Current scientific studies related to earthquake forecasting focus on three key points: when the event will occur, where it will occur, and how large it will be.
Evaluation	
Timeline	
Prizes	
Additional Information	In this competition, you will address when the earthquake will take place. Specifically, you'll predict the time remaining before laboratory earthquakes occur from real-time seismic data.  If this challenge is solved and the physics are ultimately shown to scale from the laboratory to the field, researchers will have the potential to improve earthquake hazard assessments that could save lives and billions of dollars in infrastructure.  This challenge is hosted by <a href="#">Los Alamos National Laboratory</a> which enhances national security by ensuring the safety of the U.S. nuclear stockpile, developing technologies to reduce threats from weapons of mass destruction, and solving problems related to energy, environment, infrastructure, health, and global security concerns.

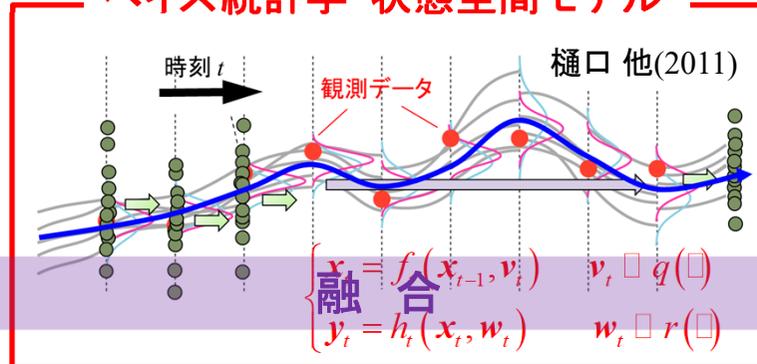
米国ではコンペを利用し、地震データ解析手法を極めて多数の情報科学研究者に競争的に開発させる取り組みも行われている。

# データ同化 ～数値シミュレーションと観測データの融合～

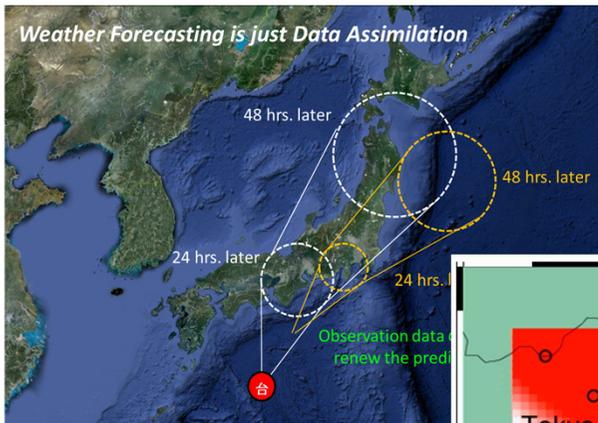
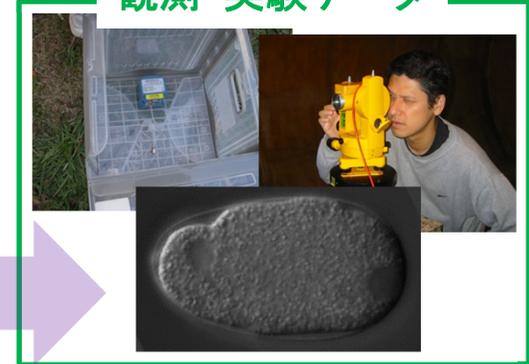
## 数値シミュレーション



## ベイズ統計学・状態空間モデル



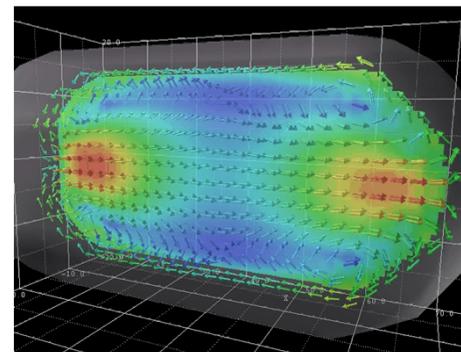
## 観測・実験データ



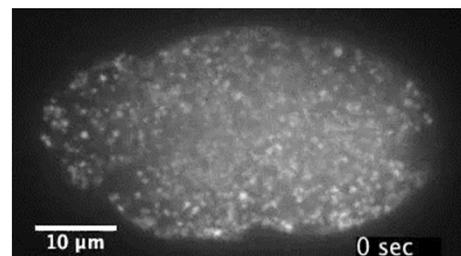
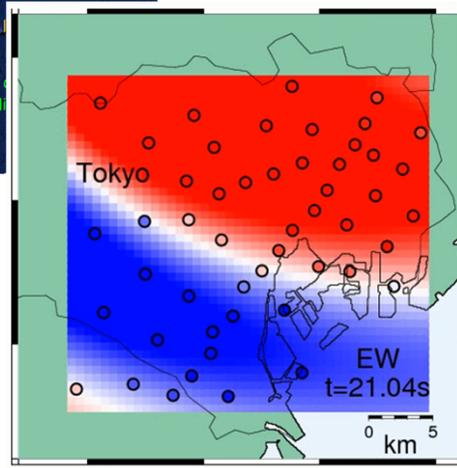
## 気象学・海洋学

Kano, Nagao *et al.* (2017)

## 生物学

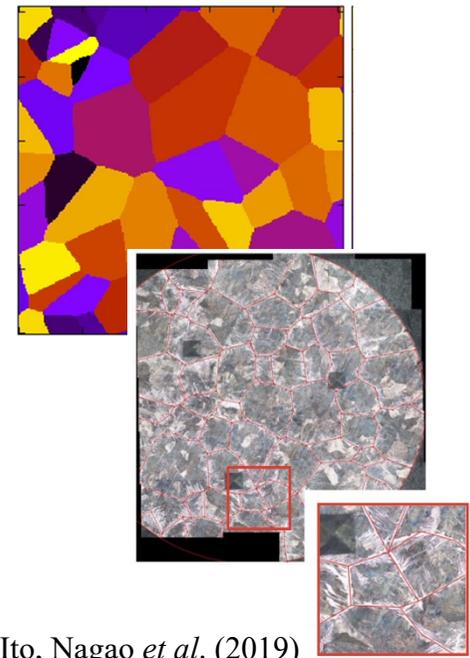


## 地震学



Niwayama, Nagao *et al.* (2016)

## 材料科学



Ito, Nagao *et al.* (2019)

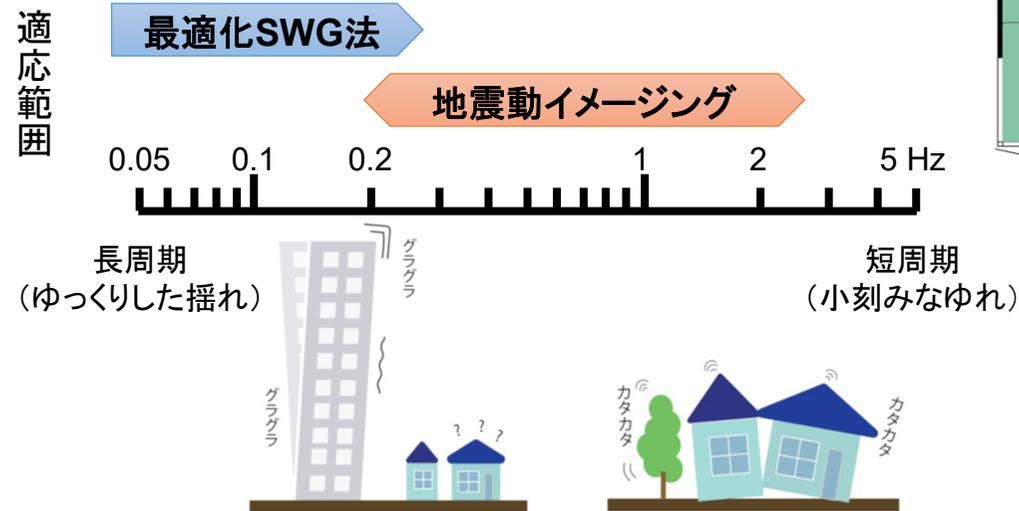
# データ同化に基づく地震波動場再構成

## 目的

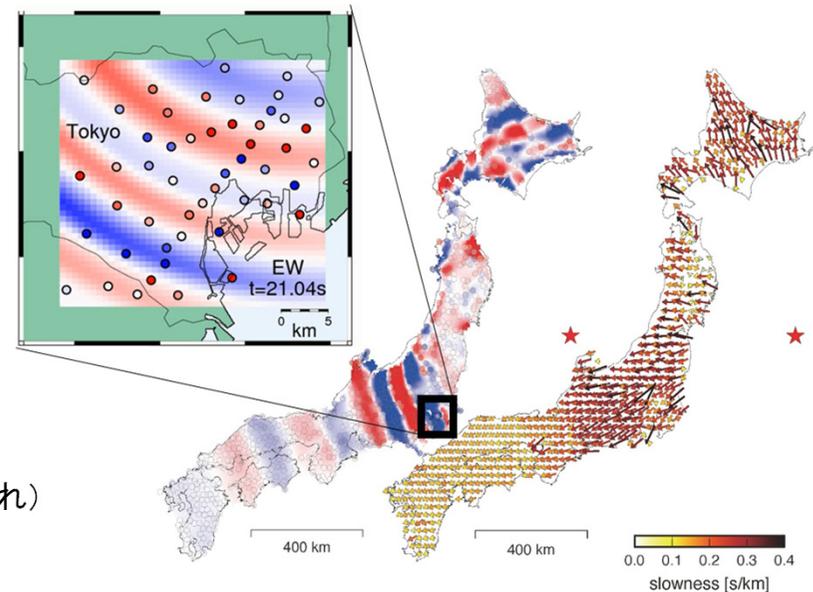
- 離散的に分布する観測点の記録から地震波動場を面的に再構築。
  - 任意の場所や建物の揺れの即時把握, あるいは揺れの予測を行う上ための高精度なインプットとしての活用が期待。

## 成果

- 地震動イメージング
- Seismic wave gradiometry (SWG)法



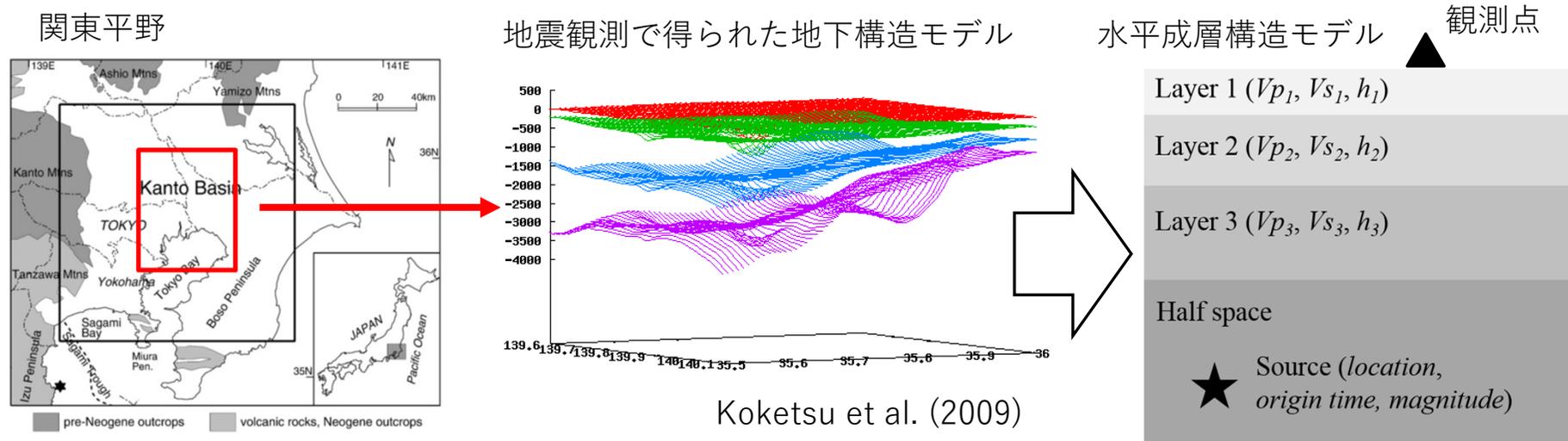
Kano *et al.* (2017)



Maeda *et al.* (2016)

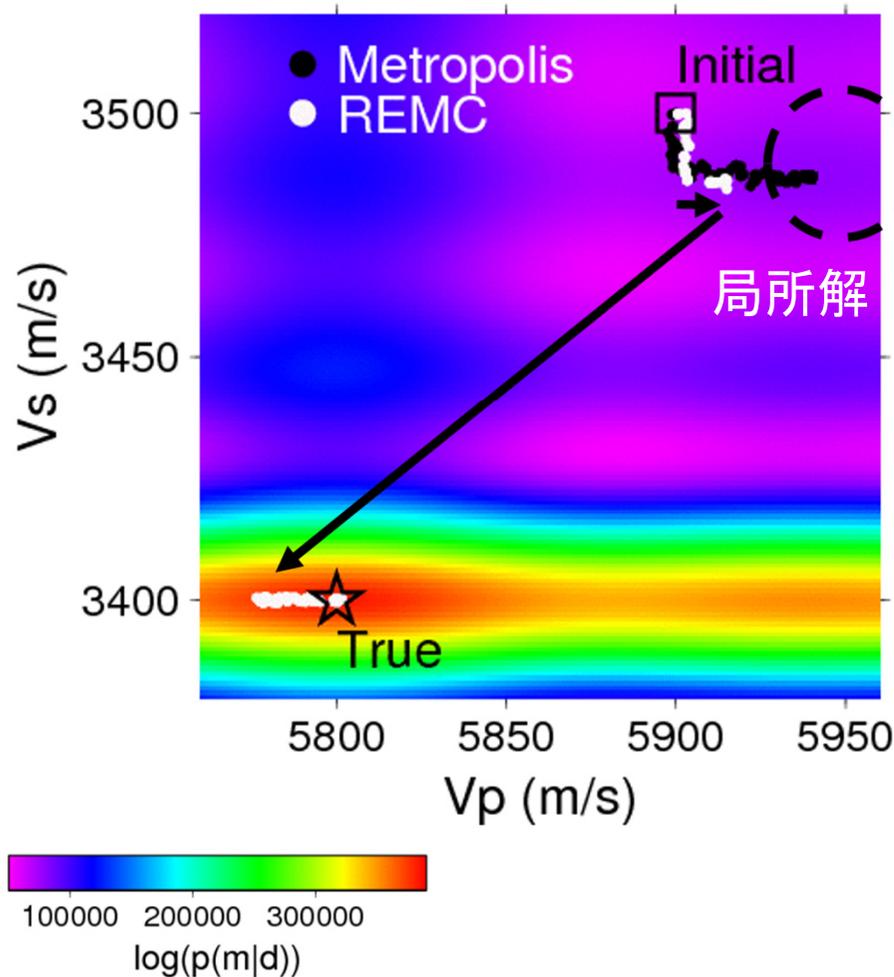
# 地震動イメージング

マルコフ連鎖モンテカルロ法の並列版であるレプリカ交換モンテカルロ法を用いて、地下構造・震源に関するパラメータを推定しながら、波動方程式に従うイメージングを行う (Kano et al., 2017)



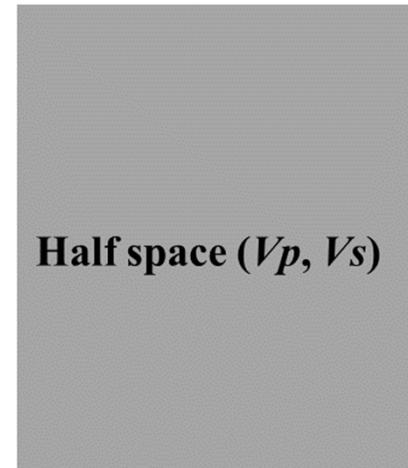
- ✓ 3層 + 半無限の水平成層構造
- ✓ モデルパラメータ: 各層の層厚と地震波速度・震源位置・発震時刻・すべり量
- ✓ 震源が与えられた時の理論波形計算 ⇒ 波数積分法 (Hisada, 1995)

# レプリカ交換モンテカルロ法の必要性



Kano *et al.* (2017)

半無限構造



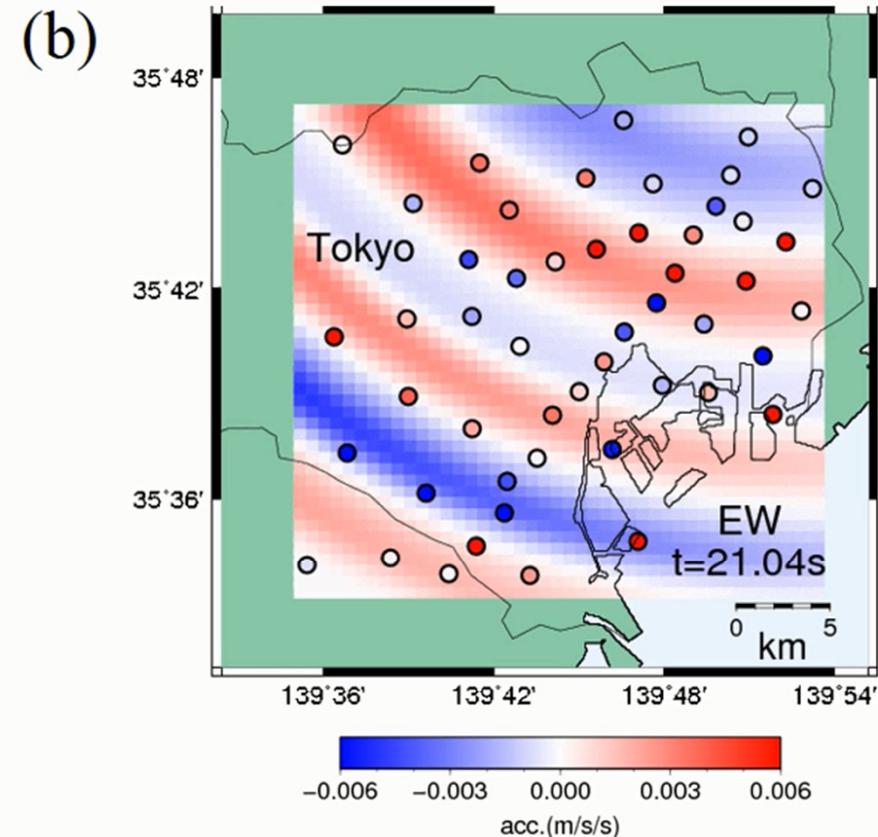
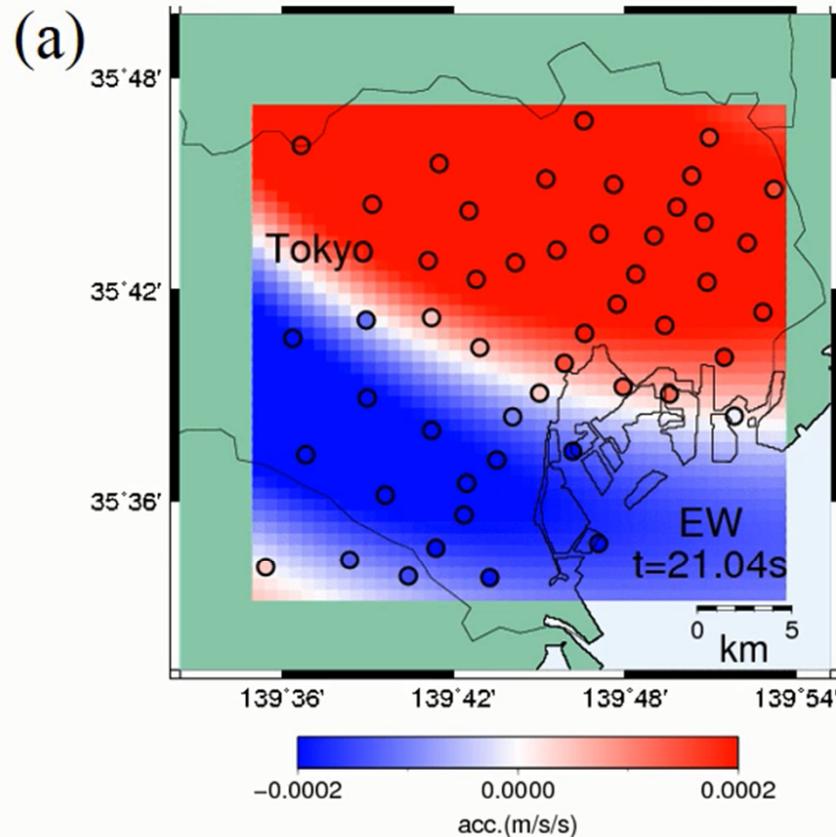
真値  $(V_p, V_s) = (5800, 3400)$  (m/s)  
初期値  $(V_p, V_s) = (5900, 3500)$  (m/s)

- ✓ 単純な地下構造の設定でも、事後分布は多峰性をもつ
- ✓ レプリカ交換モンテカルロ法を用いた大域的なサンプリングが有効

# 首都圏地震動イメージング(東京23区全域)

長周期 (5~10秒周期)

短周期 (1~10秒周期)



地下構造を推定しながら波動場を再構成  
⇒緊急地震速報の精度向上へ

Kano *et al.* (2017)

# 観測点選択アルゴリズム開発

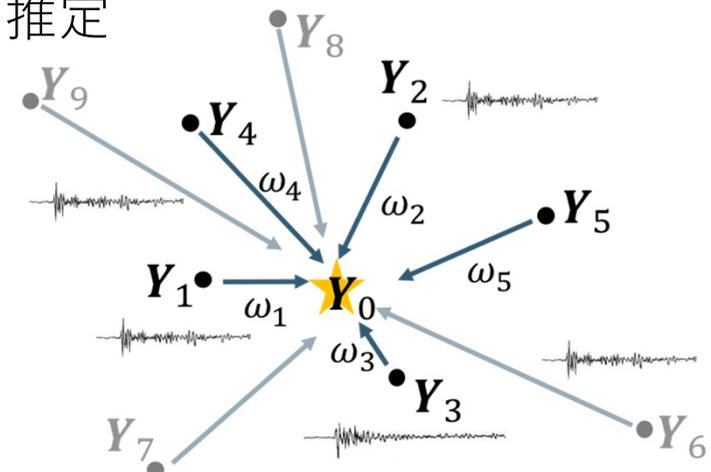
**目的** 離散的な観測点から**連続的**な地震波動場の推定

## クリギング補間による場の再構成

観測点のない場所  $s_0$  の信号  $Y_0$  を  
 周りの観測点  $s_i$  の信号  $Y_i$  の重み和で補間

$$Y_0 = \sum_{i=1}^n \omega_i Y_i \quad \text{ただし} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1$$

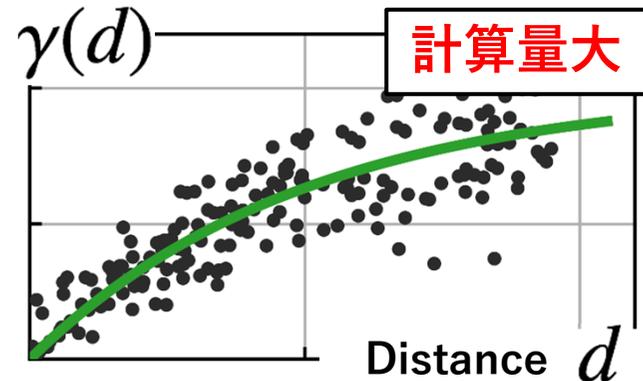
$\omega_i$  : 観測点  $i$  の重み



1. 経験的バリオグラム  $\gamma(d)$  の推定.

全ての観測点ペア  $ij$  に対して  $\begin{cases} d_{ij} = |s_i - s_j| \\ \gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2} |Y_i - Y_j|^2 \end{cases}$  を計算.

散布図を書く



2. 重みに関する二次計画問題を解く.

評価関数  $L(\omega) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma(|s_i - s_j|) \omega_i \omega_j + \sum_{i=1}^n \gamma(|s_0 - s_i|) \omega_i$

最適化問題  $\min L(\omega) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1$

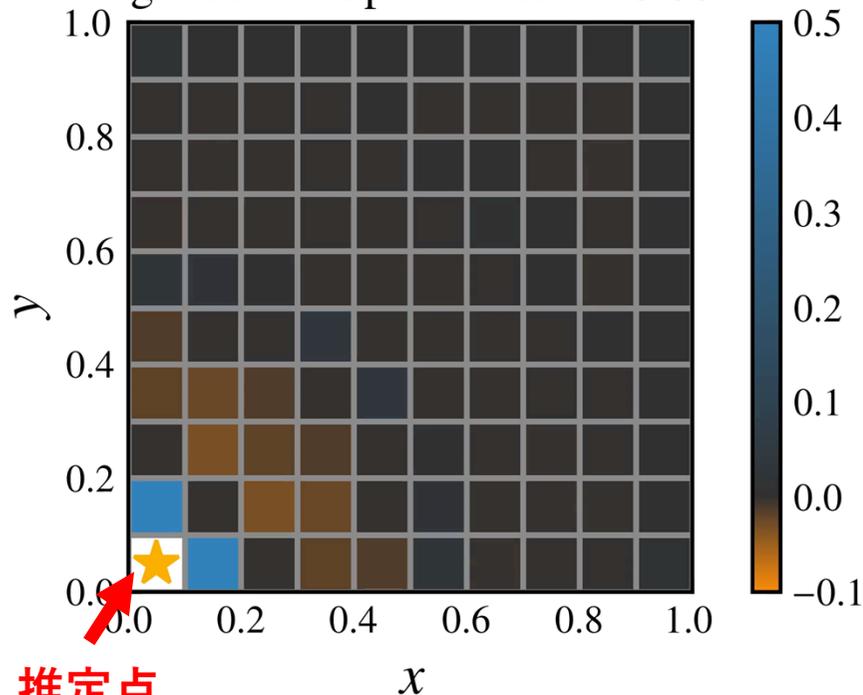
全ての観測点を用いるのは  
非効率的かつ非現実的.

**スパースモデリングによる観測点選択**

# スパースモデリングに基づく観測点自動選択

## LASSO 正則化

Regularization parameter  $\lambda = 0.007$

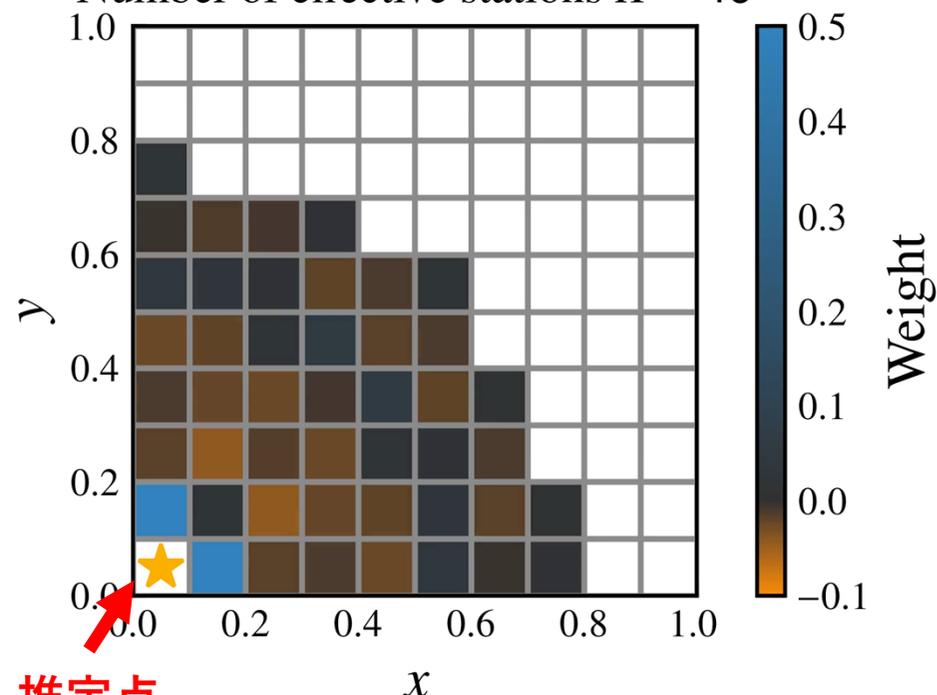


推定点

不定性により重みがゼロに収束しない。

## L1-LargestK正則化

Number of effective stations  $K = 46$



推定点

遠い観測点から順に  
重みが厳密にゼロになる。

超大容量計測データから有効な観測点の自動選択が可能に!

# まとめ

- 超ビッグデータ時代の到来が確実な地震研究においては、情報科学・数理科学の導入と強化が今後一層重要となることは明白である。
- JST CREST研究課題“iSeisBayes”では、東大地震研の観測地震学の専門家と、東大情報理工の統計学の専門家との協働により、「地震超ビッグデータ時代」に先駆けて、最先端の情報学的・数理科学的手法に基づく地震データ解析手法の開発を目指している。
- 深層学習に基づく地震自動検測技術の開発をはじめ、緊急地震速報に直結する地震波動場再構成のためのデータ同化手法開発や、数千万点～数億点にも及ぶ可能性のある超多点の観測点から、解析対象に応じて観測点を選択するためのアルゴリズム等を開発している。