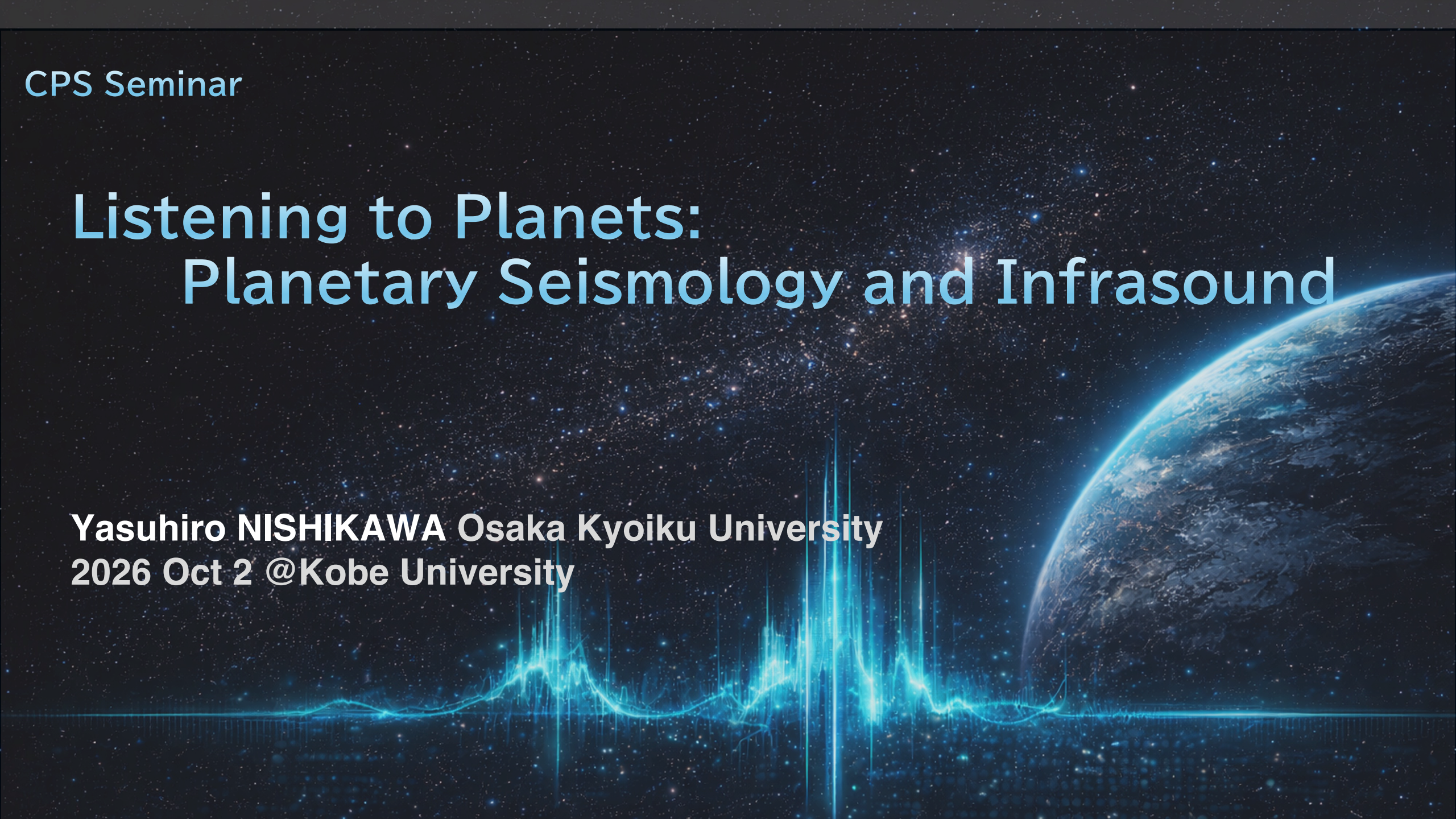


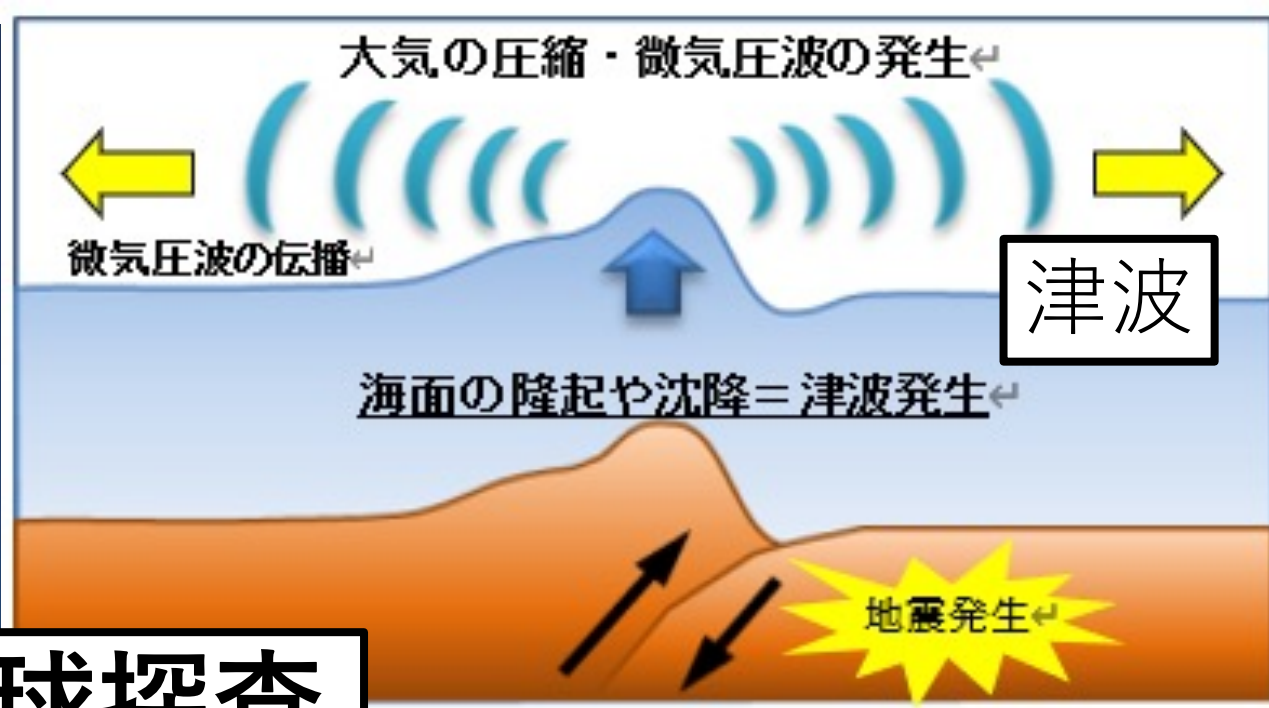
CPS Seminar

Listening to Planets: Planetary Seismology and Infrasound

Yasuhiro NISHIKAWA Osaka Kyoiku University
2026 Oct 2 @Kobe University

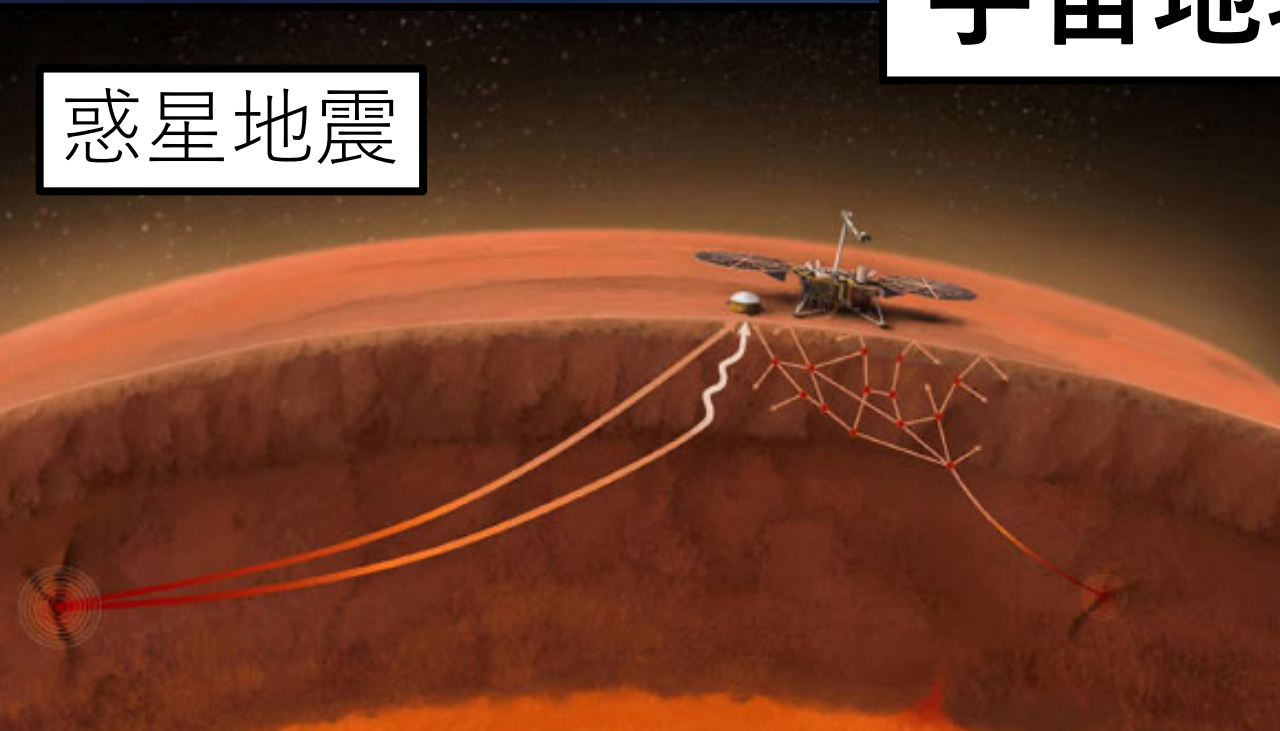


隕石・探査機の大気圏突入

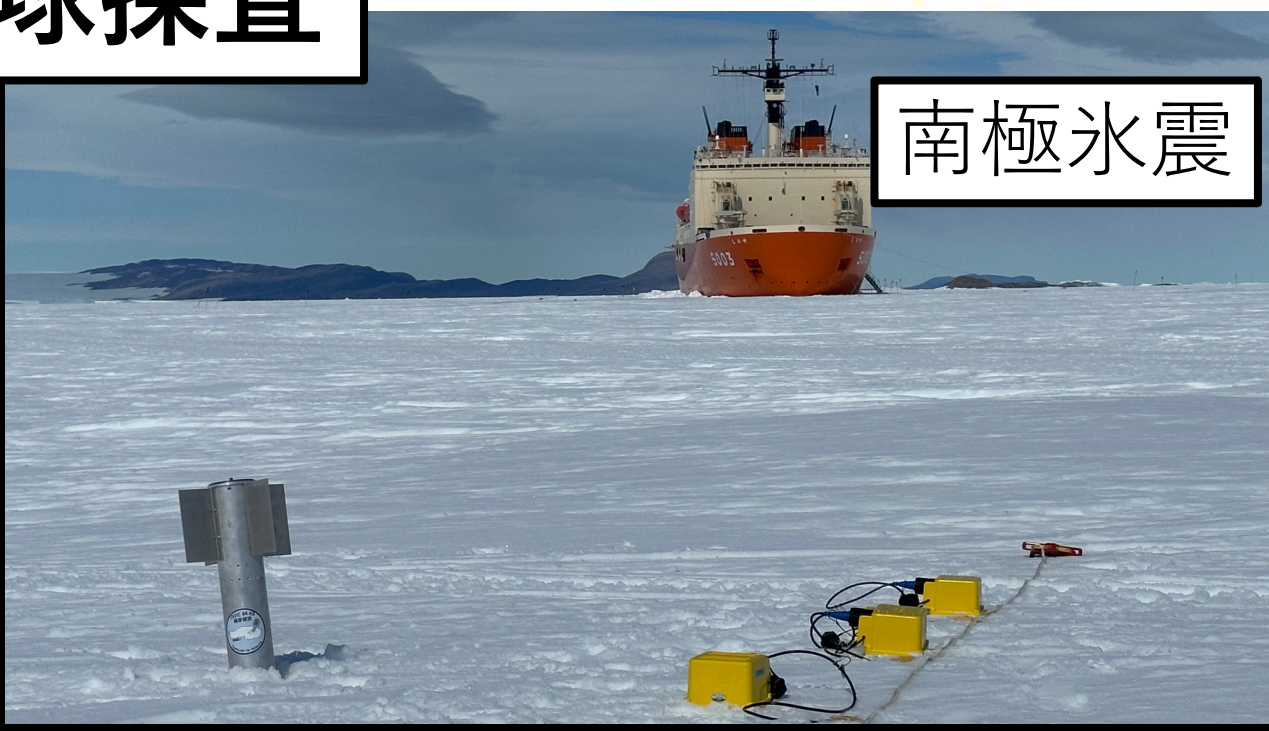


宇宙地球探査

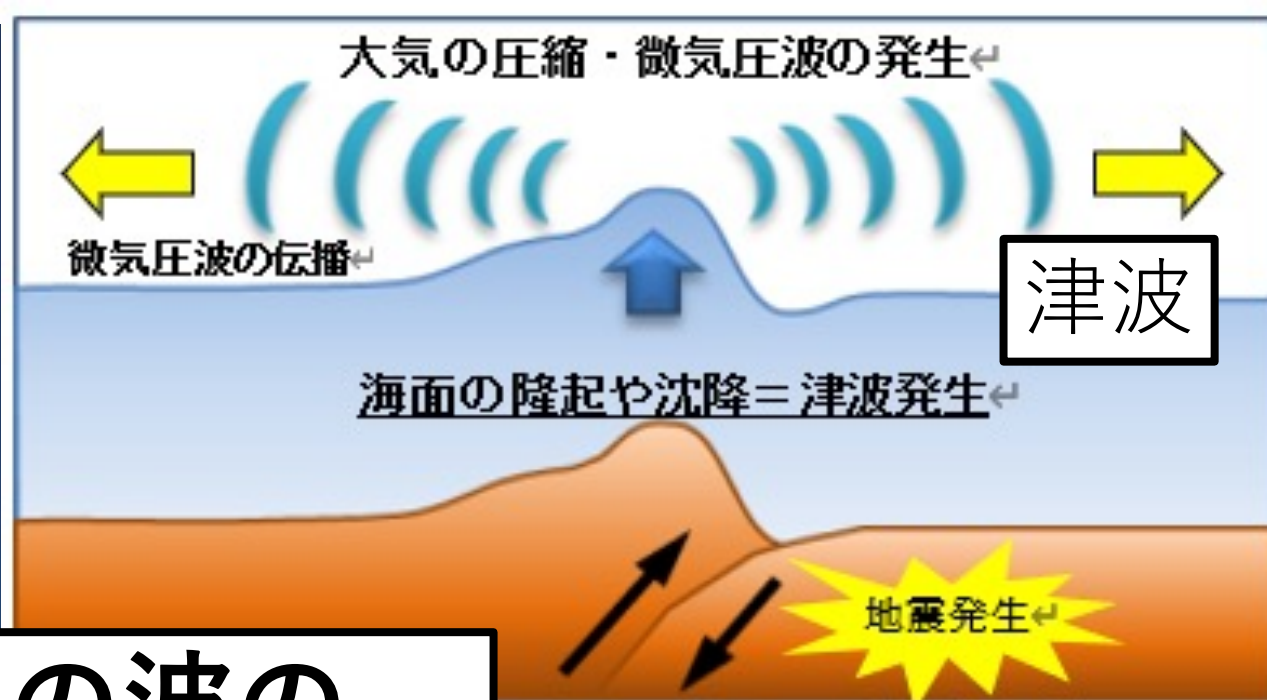
惑星地震



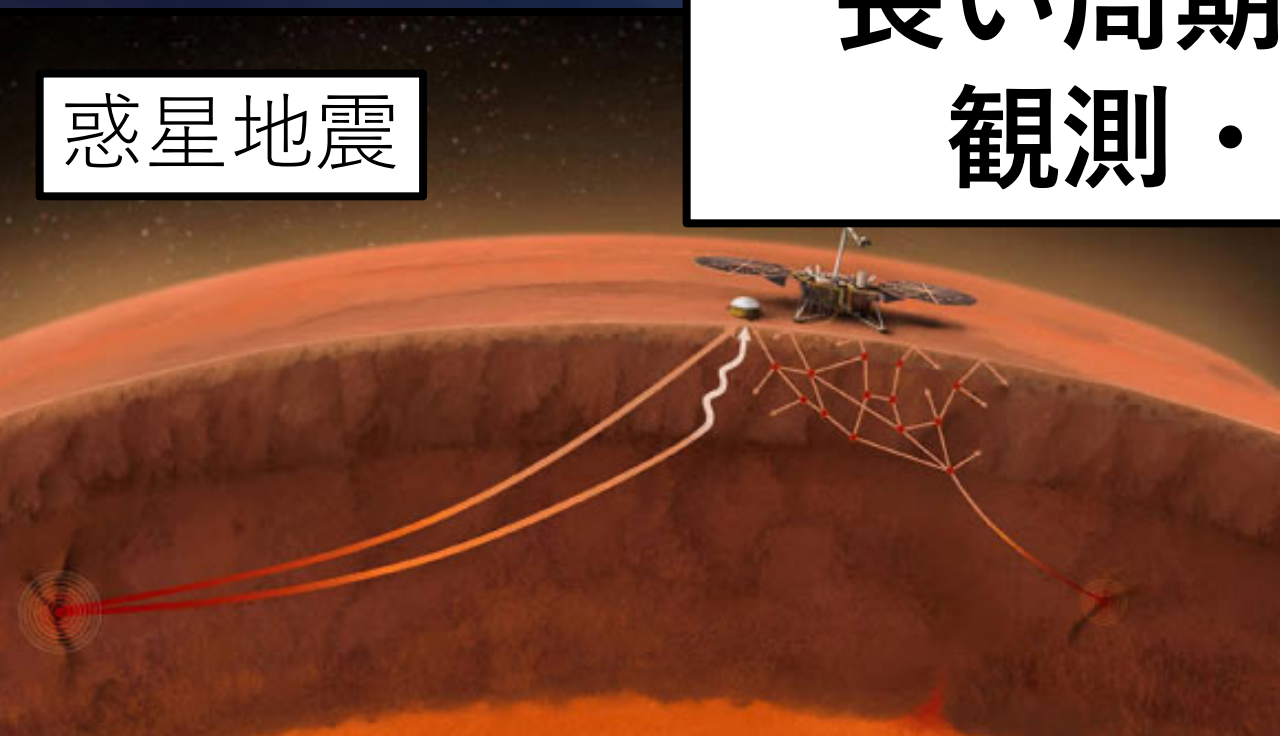
南極氷震



隕石・探査機の大気圏突入

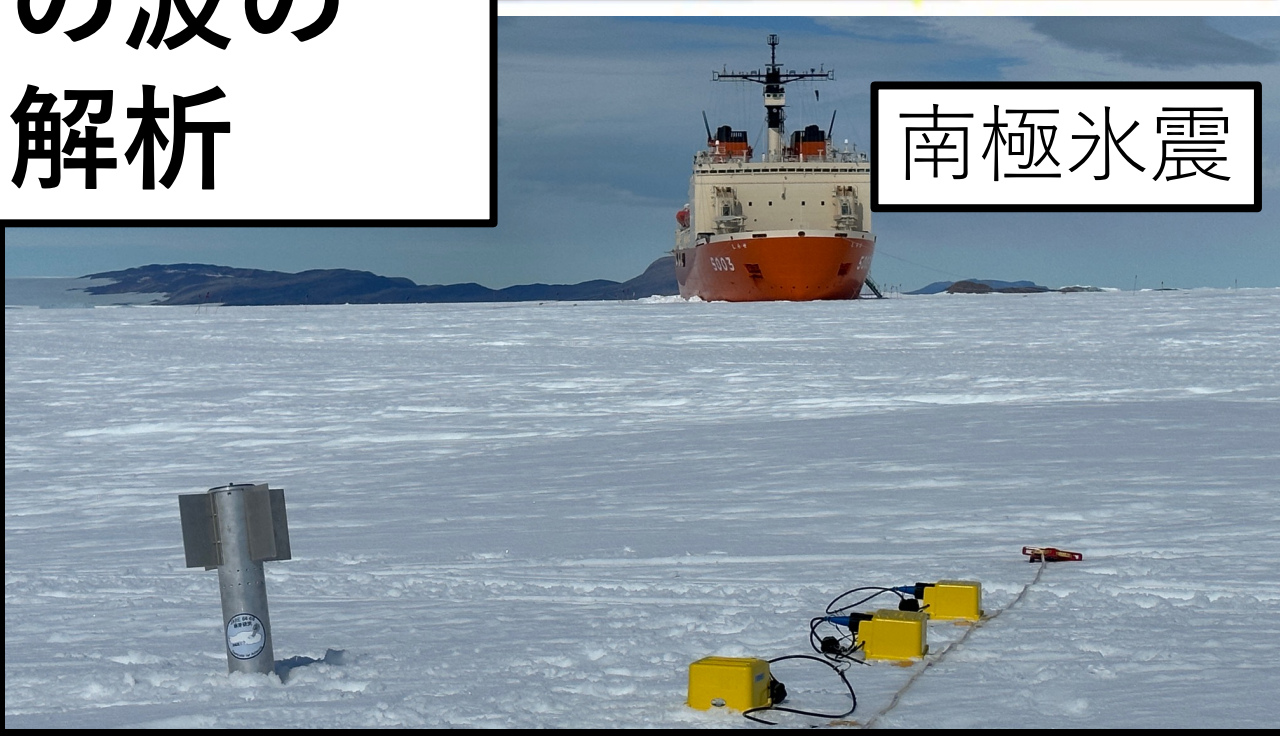


惑星地震



長い周期の波の 観測・解析

南極氷震



今日のお話

01

惑星地震学

地震波で惑星の内部を見る

Earth → Apollo → InSight

02

固体と大気の相互作用

大気が惑星を揺らし、
惑星が大気を揺らす

Atmosphere ⇄ Solid

03

インフラサウンド

惑星の「揺れ」と「音」
を同時に測る

Seismic + Infrasound

04

次世代の惑星探査へ

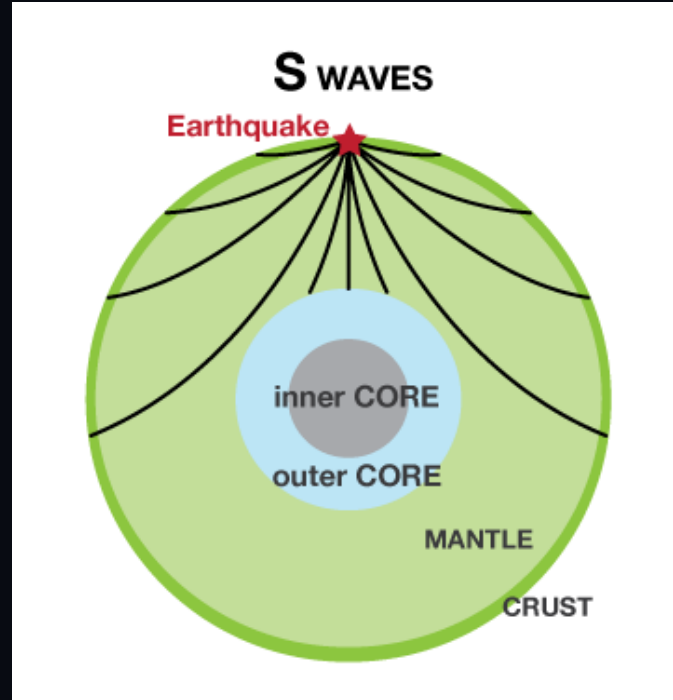
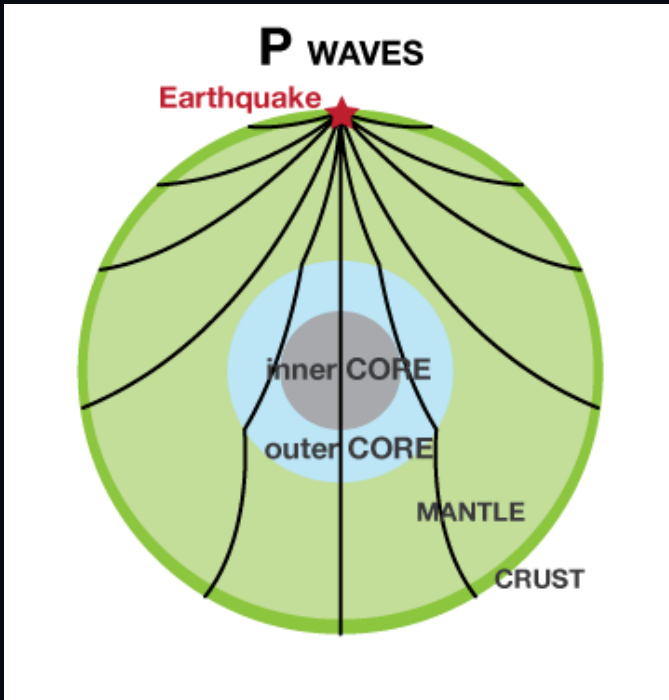
観測点を増やし、
月・火星・タイタンへ

Penetrator / Mars / Titan

惑星の「声」を聴く — 揺れと音から、その内部と活動を探る

地震波で地球内部を探る

地表で観測した「揺れ」から、直接見ることのできない内部構造と物性を推定する



Source: USGS / Lisa Wald (Public Domain)

速度 → 弾性・密度・相境界

$$V_p = \sqrt{[(K + 4\mu/3) / \rho]}$$

$$V_s = \sqrt{(\mu / \rho)}$$

K: 体積弾性率 μ : 剛性率 ρ : 密度

減衰 → 温度・散逸・部分溶融

$$A(x) = A_0 \exp(-\pi f x / QV)$$

Q 大: 減衰しにくい / Q 小: 減衰しやすい

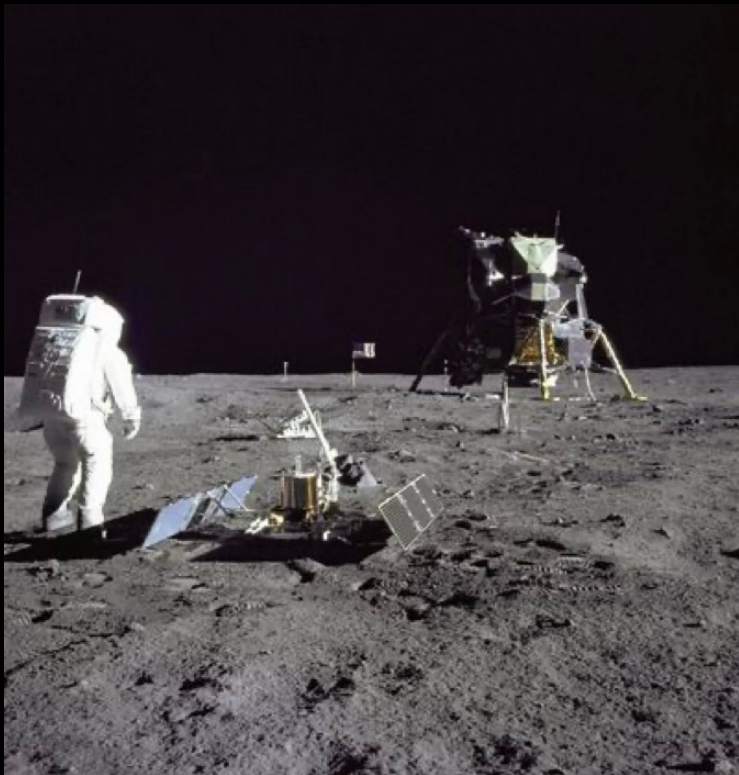
※ 幾何減衰などを除いた簡略表現

同じ地震でも、通ってきた内部によって「到着時刻」と「波形」が変わる

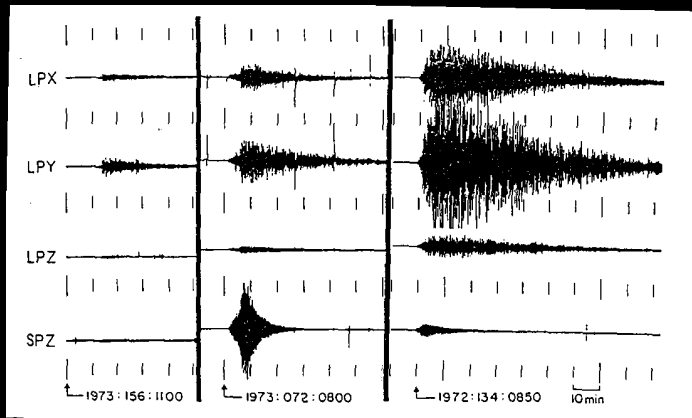
地震波の 速度・走時・減衰 を測る → 地殻・マントル・核の構造と物性を推定

月を地震で探る — Apollo Passive Seismic Experiment

人類初の地球外天体における本格的な地震観測ネットワーク



Apollo 12 / 14 / 15 / 16
4観測点のネットワーク
1969–1977



Nakamura et al. (1982)

3成分 長周期 + 鉛直 短周期

月震や衝突による
月面の微小な揺れを連続観測



Apollo 11で初観測
→ 4点ネットワークへ

月で観測された主な震動源

- 深発月震 潮汐に強く関連
- 浅発月震 比較的浅い場所で発生
- 隕石衝突 外部からの励起源
- 人工衝突 ロケット段・LMなど

Apolloが示したこと

月にも地震活動がある
地震波から月内部を探れる
→ 惑星地震学の出発点

地球で確立した地震学を、初めて別の天体へ — 「月の揺れ」から月の内部と活動を探る

Apollo地震観測から見てきた月の内部

地震波の走時と振幅から、地殻・マントル・深部構造を制約

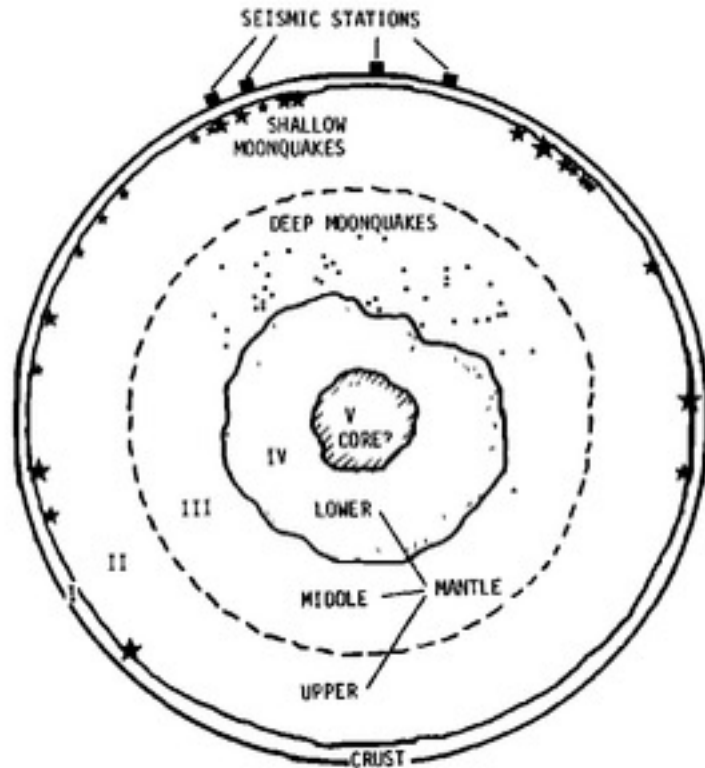


Fig. 7. Schematic diagram of the lunar interior inferred from the Apollo seismic data.

Nakamura et al. (1982)

Apolloデータから得られた一次的な描像

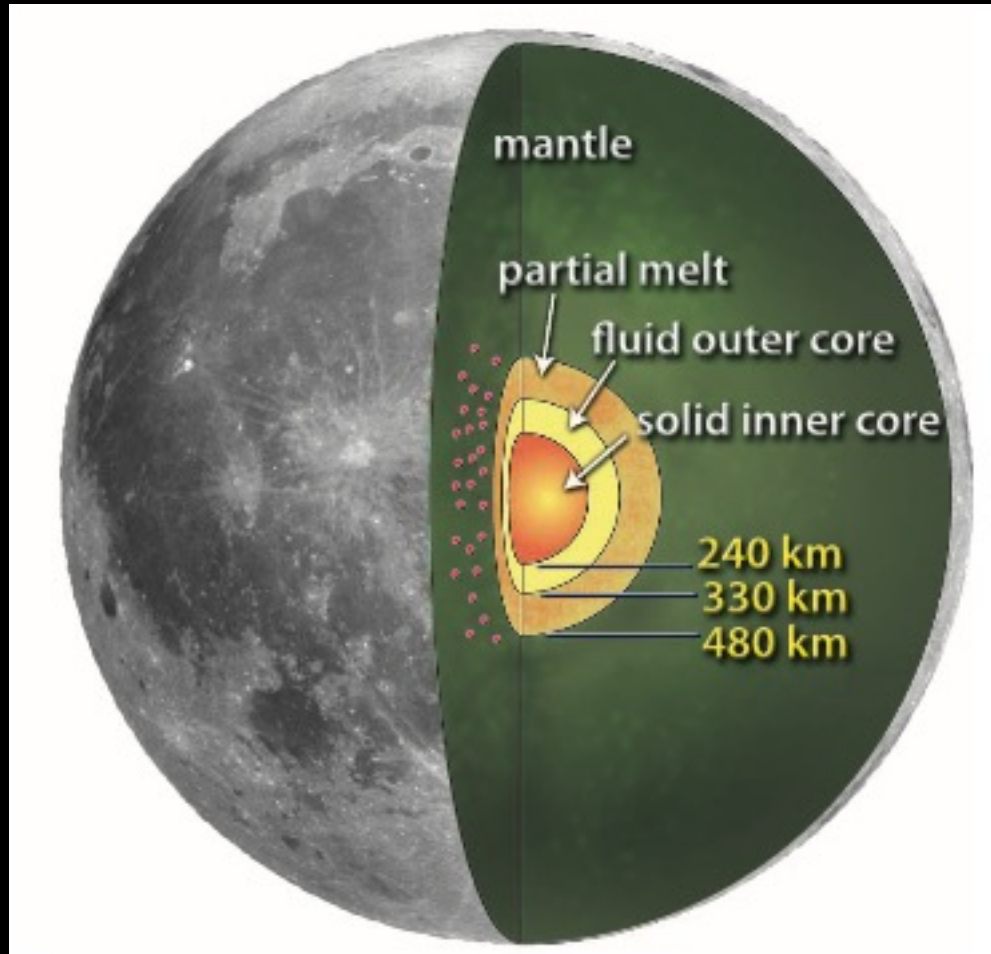
- 地殻 典型的な1-Dモデルでは約30–60 km
- マントル 地震波速度構造を約1000 km深まで制約
- 深部 強い減衰を示す領域 → 部分溶融・核の存在を示唆
- 限界 観測点が月の表側に集中 → 最深部の制約は弱い

後年の再解析・重力観測で深部モデルを更新

月にも「地殻・マントル・小さな核」がある — 地震学で別天体の内部構造を直接探れることを実証

Apollo地震観測から見てきた月の内部

地震波の走時と振幅から、地殻・マントル・深部構造を制約



Weber et al. (2011)

Apolloデータから得られた一次的な描像

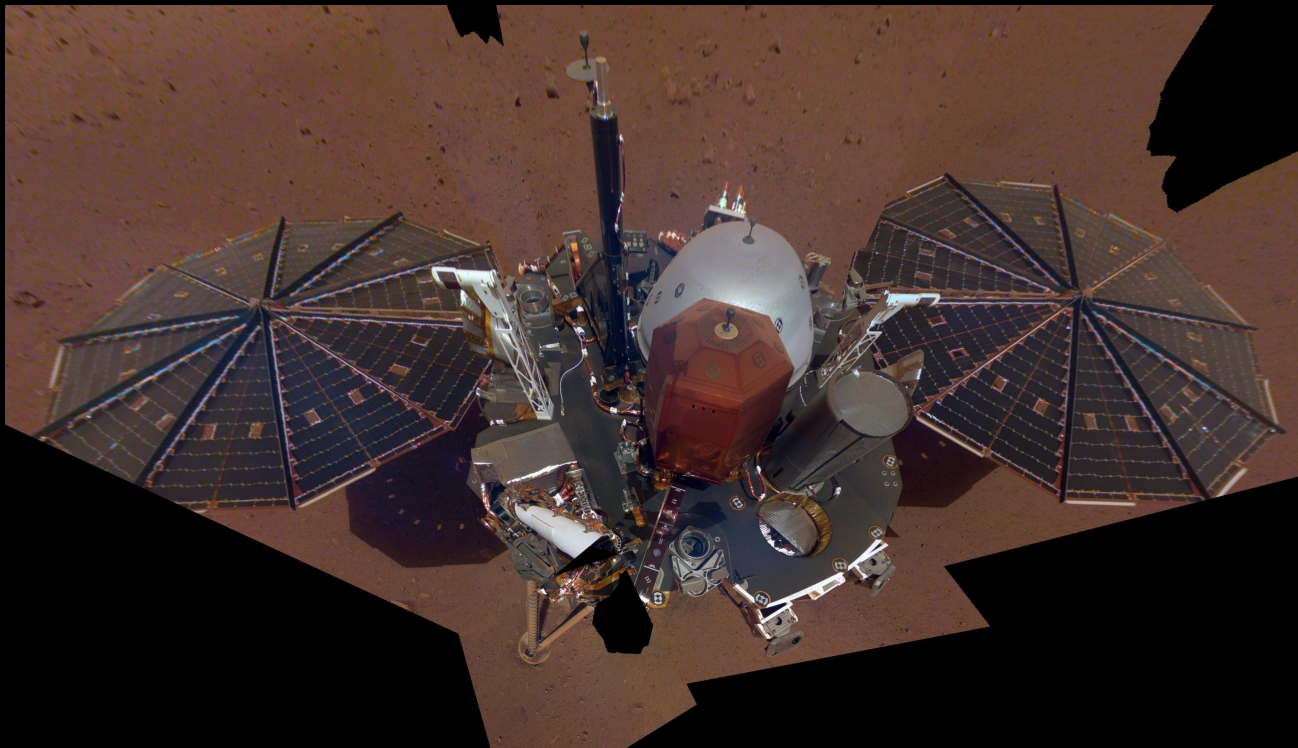
- 地殻 典型的な1-Dモデルでは約30–60 km
- マントル 地震波速度構造を約1000 km深まで制約
- 深部 強い減衰を示す領域 → 部分溶融・核の存在を示唆
- 限界 観測点が月の表側に集中 → 最深部の制約は弱い

後年の再解析・重力観測で深部モデルを更新

月にも「地殻・マントル・小さな核」がある — 地震学で別天体の内部構造を直接探れることを実証

そして火星へ — NASA InSight

1台の超高感度地震計 SEIS で、火星の「脈動」を直接測る



2018年11月 着陸
2022年12月 ミッション終了

InSightが初めて実現したこと

- 火星地震を直接検出
 > 1,300 seismic events
- 地震波で内部を探索
 crust / mantle / core

Apolloとの大きな違い

観測点は1点
→ 震源位置も内部構造も工夫して推定

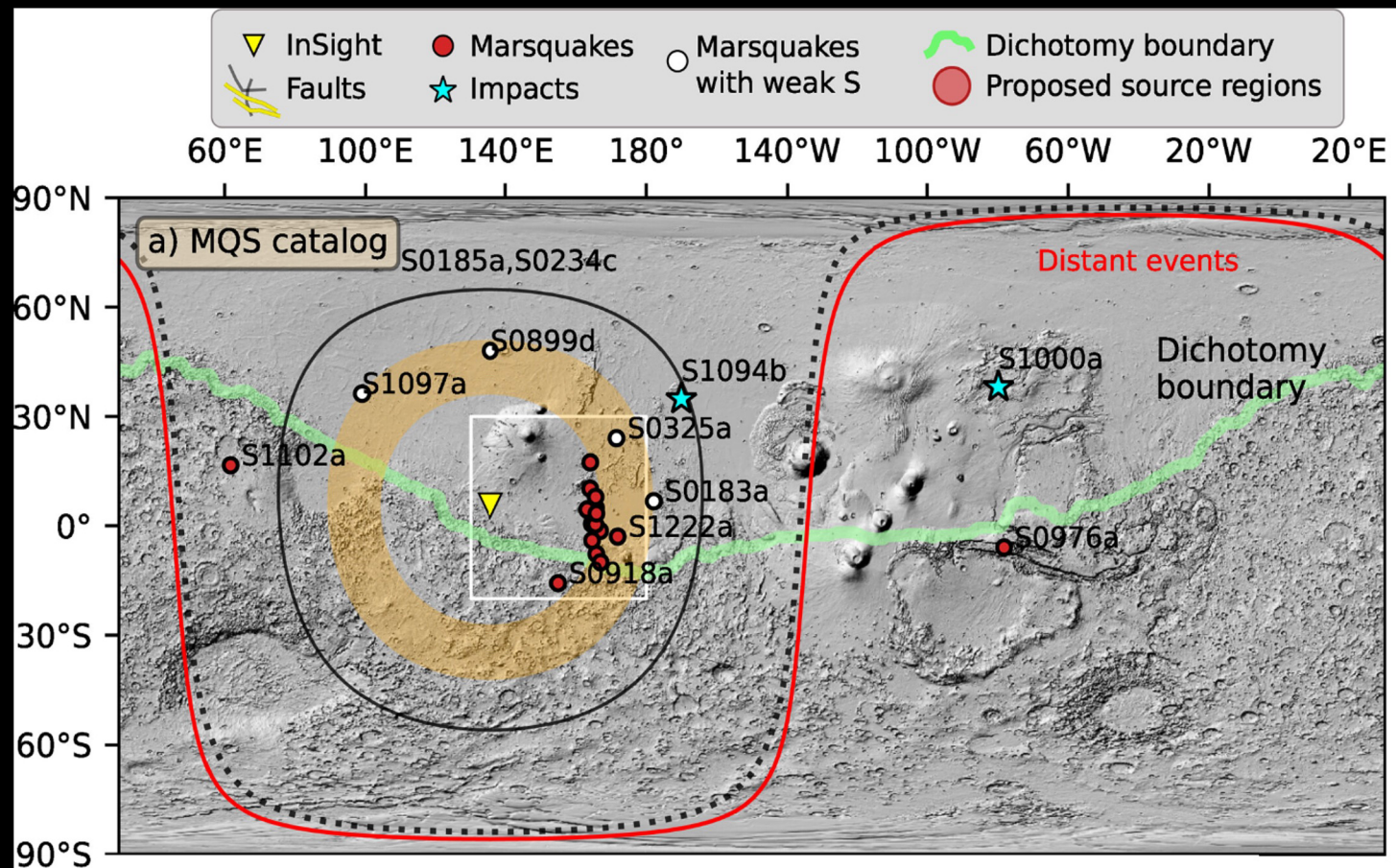
それでも火星内部の三層を直接制約

Apolloから約40年 — 地震学が再び別の天体の内部へ

そして火星へ — NASA InSight

1台の超高感度地震計 SEIS で、火星の「脈動」を直接測る

2018年11月 着陸
2022年12月 ミッション終了



InSightが初めて実現したこと

- 火星地震を直接検出
> 1,300 seismic events
- 地震波で内部を探索
crust / mantle / core

Apolloとの大きな違い

観測点は1点
→ 震源位置も内部構造も工夫して推定

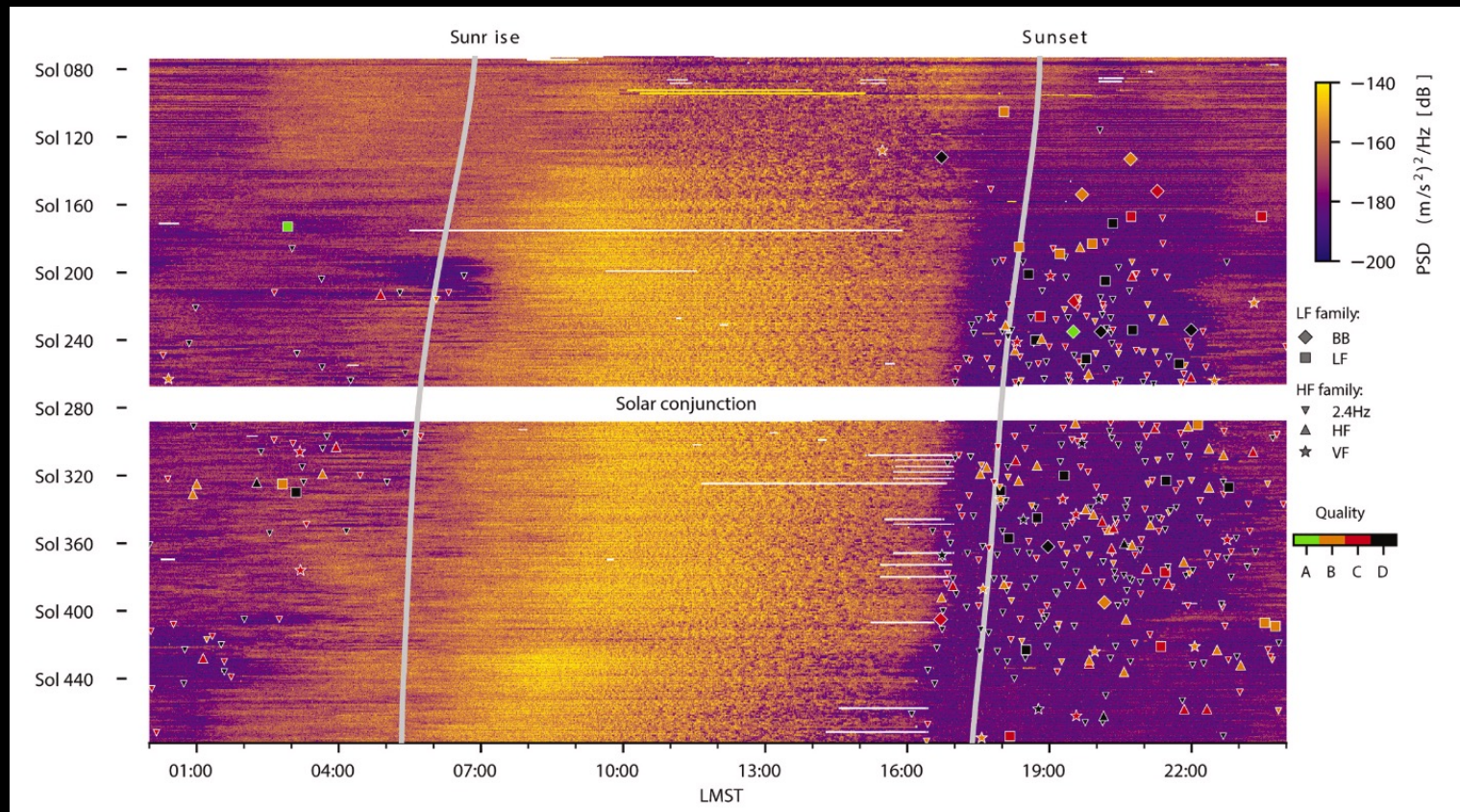
それでも火星内部の三層を直接制約

Apolloから約40年 — 地震学が再び別の天体の内部へ

そして火星へ — NASA InSight

1台の超高感度地震計 SEIS で、火星の「脈動」を直接測る

2018年11月 着陸
2022年12月 ミッション終了



Clinton et al. (2021)

InSightが初めて実現したこと

- 火星地震を直接検出
> 1,300 seismic events
- 地震波で内部を探索
crust / mantle / core

Apolloとの大きな違い

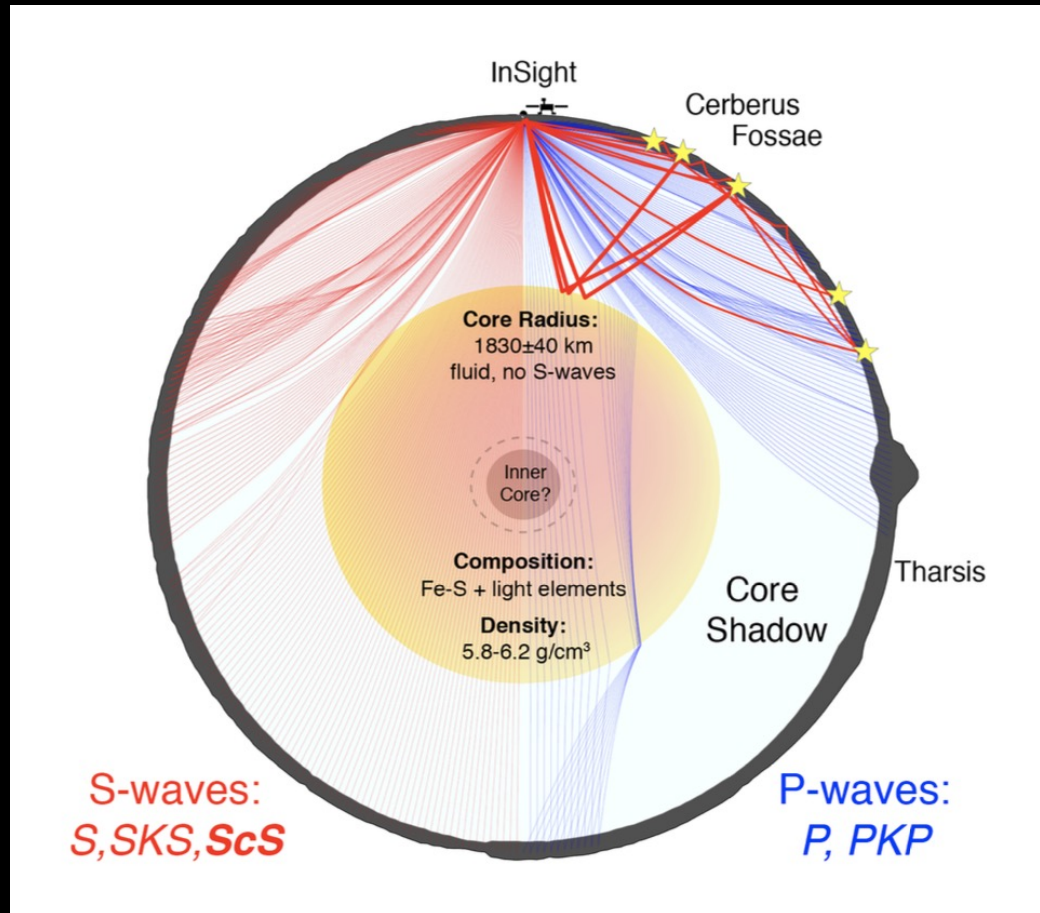
観測点は1点
→ 震源位置も内部構造も工夫して推定

それでも火星内部の三層を直接制約

Apolloから約40年 — 地震学が再び別の天体の内部へ

1台の地震計から、火星の内部が見えた

Marsquakes の走時・反射・変換波から crust / mantle / core を制約



InSightが描いた火星内部

- **Crust** 着陸地点下 約25–40 km
複数層からなる比較的薄い地殻
Knapmeyer et al. (2021)
- **Mantle** ~800 km深を通る波を解析
地球より比較的低温のマントル
Khan et al. (2021)
- **Core** 初期解析：約1,800 km 半径
大きく低密度な液体核
Stähler et al. (2021)

※ 内部モデルはその後の再解析で更新が続いている

Marsquake は火星内部を照らす「光源」 — 1点観測でも惑星内部を直接探査できる

火星は「静かな惑星」ではなかった

InSight は4年間の連続観測で、火星の現在の地震活動を初めてカタログ化した

活動の集中：Cerberus Fossae

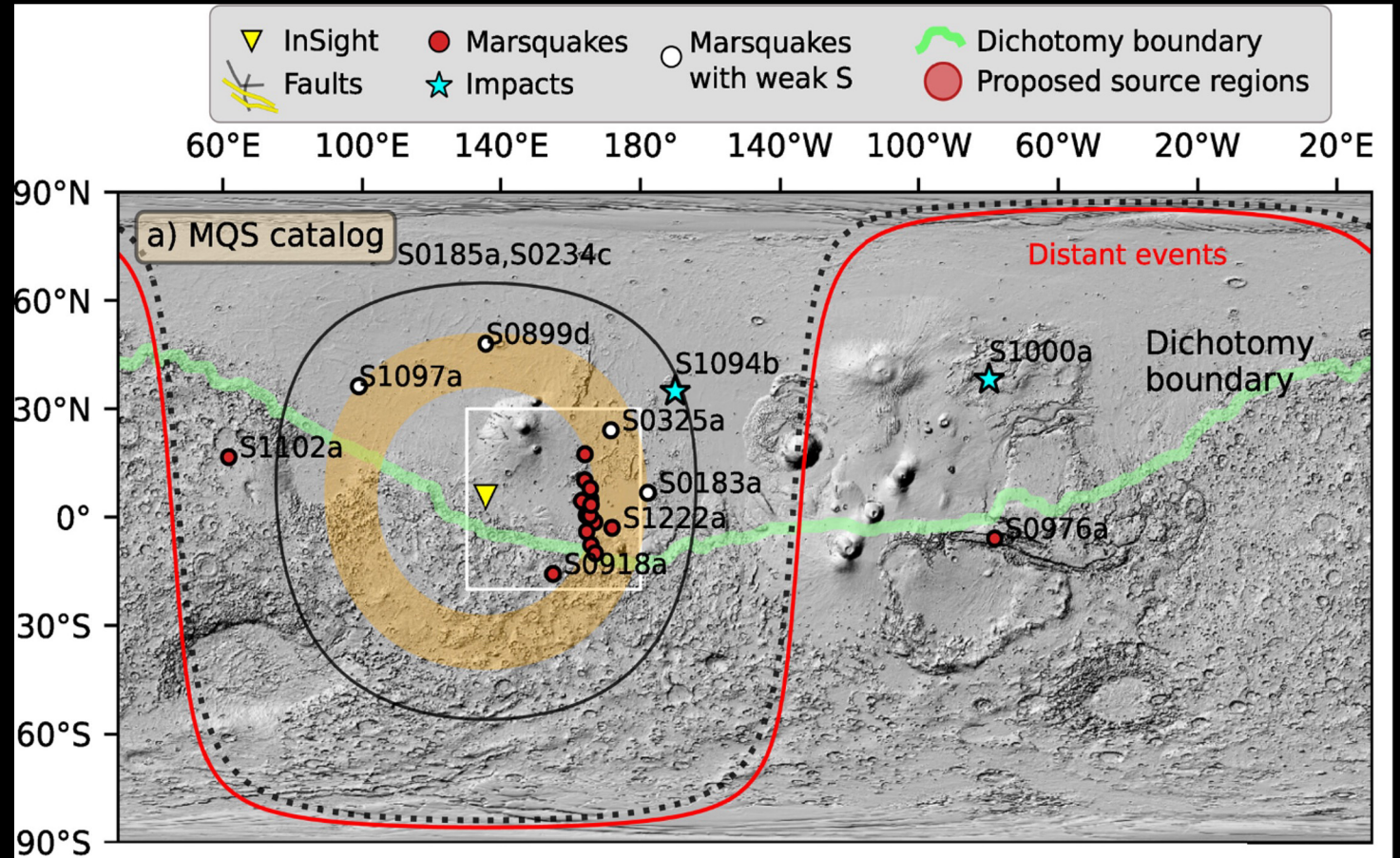
> 1,300

検出された seismic events

そのうち約100イベント
低周波 (<1 Hz) に
大きな振幅をもつ

一方、明瞭な back-azimuth を
決められたイベントは少ない

1点観測の難しさ
= 「揺れた」 ≠ 「場所がわ
かる」

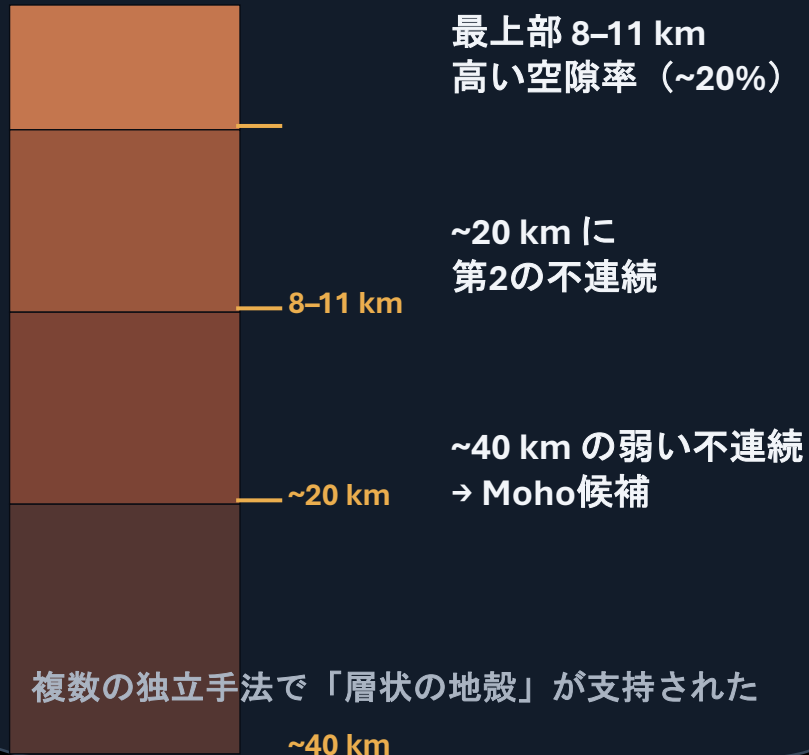


InSight は「火星に地震がある」ことを発見し、その活動域まで描き始めた

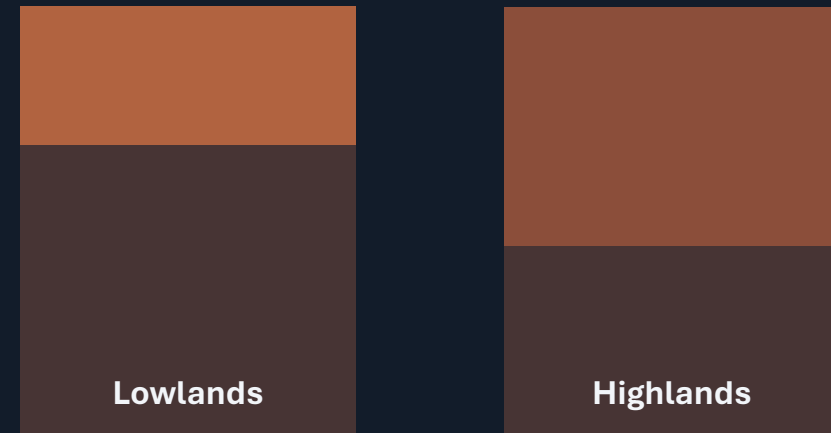
火星の地殻は「1枚」ではない

受信関数・ノイズ相関・表面波を組み合わせ、着陸地点下の層構造と全球的な地域差を制約

Elysium Planitia : InSight直下



さらに S1222a の表面波で「横方向」へ



北部低地と南部高地で
地殻速度・厚さが異なることを直接示す

→ 1点観測から「全球の地殻」へ

火星の地殻は、深さ方向にも横方向にも不均質だった

隕石衝突が「人工震源」の代わりになった

地震波を検出→軌道上の画像で新しいクレーターを確認：震源位置と時刻が独立にわかる

① Meteoroid impact



衝突時刻が
SEIS の波形に記録される

② Seismic waves



震源位置が既知なら
火星内部の速度構造を検証
できる

③ Orbital imaging



MRO画像で新クレーターを確認
→ seismic event と一対一対応

Posiolova et al. 2022

“震源がわかる地震”は非常に貴重

火星では、地震だけでなく隕石衝突も内部探査の震源になる

核の大きさは「決着」ではなく、更新された

ScS から得た大きな核 → 深部を通る新しい波で、核上部の溶融シリケート層が浮上

2021 : ScS で核を直接検出



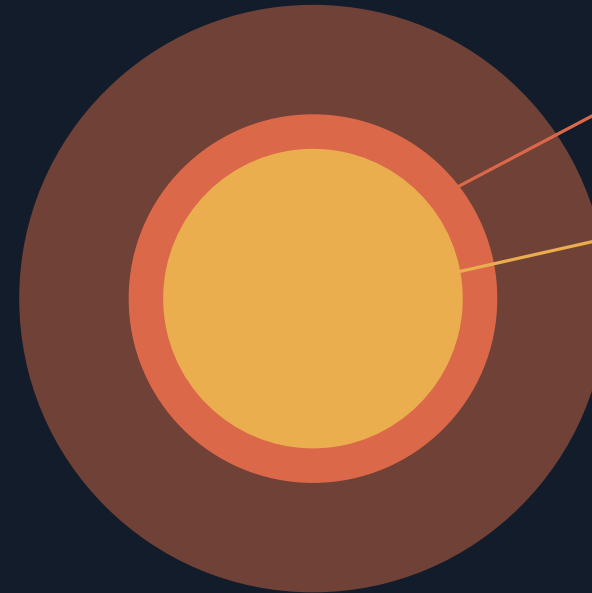
Core radius
 $1,830 \pm 40$
km
大きく低密度な核
→ 多量の軽元素が必要

Stähler et al. (2021)



新しい
深部波

2023 : 核の上に溶融シリケート層



Molten silicate

Metallic core

Core radius
 $\sim 1,650-1,675$
km

より小さく、より高密度な金属核

重要なのは数字そのものより、「新しい波が見えると内部モデルが更新される」という地震学の強さ

InSight が火星地震学を「実証」した

1台の地震計でも、地震・表面波・多重反射・衝突を組み合わせれば惑星内部を探れる

SEISMICITY

>1,300 events

現在も活動する火星

CRUST

layered + lateral

不均質な地殻

MANTLE

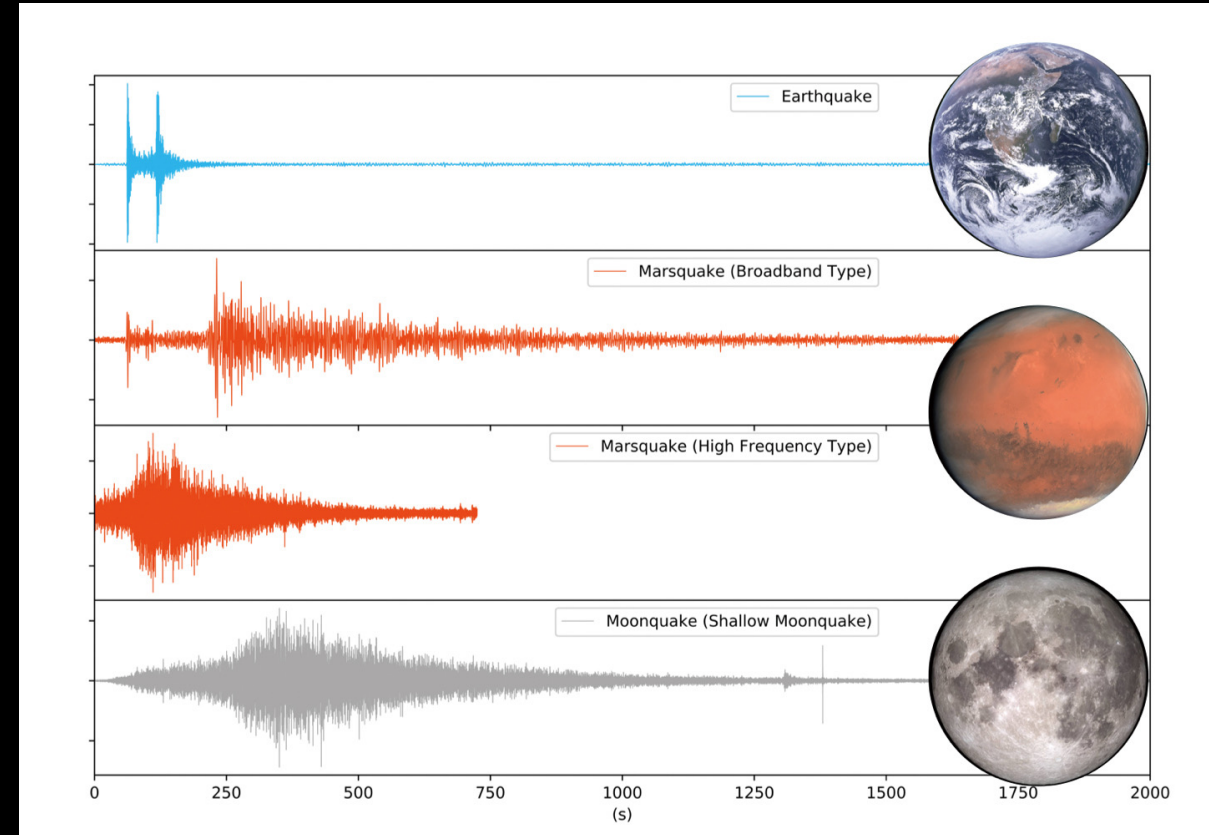
multiple phases

熱状態まで制約

CORE

revised model

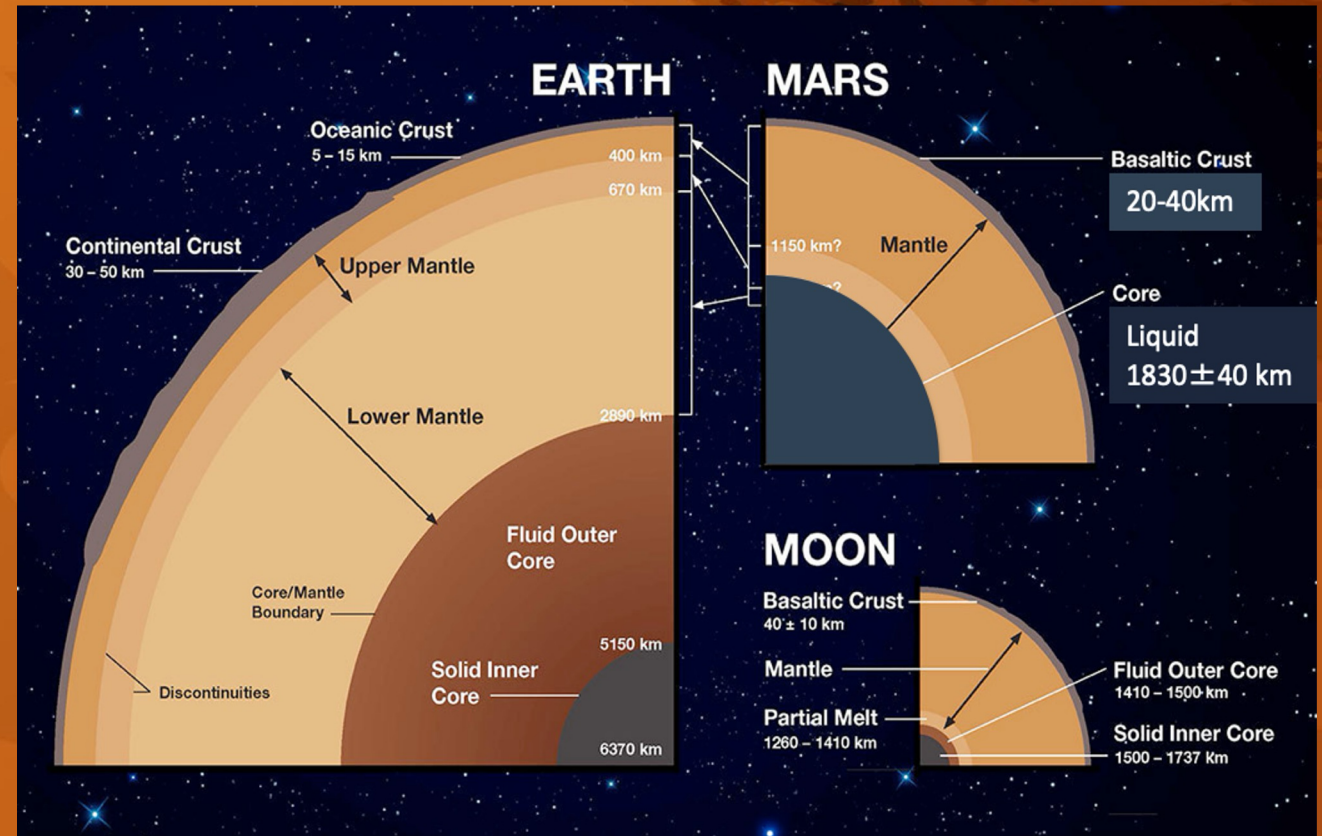
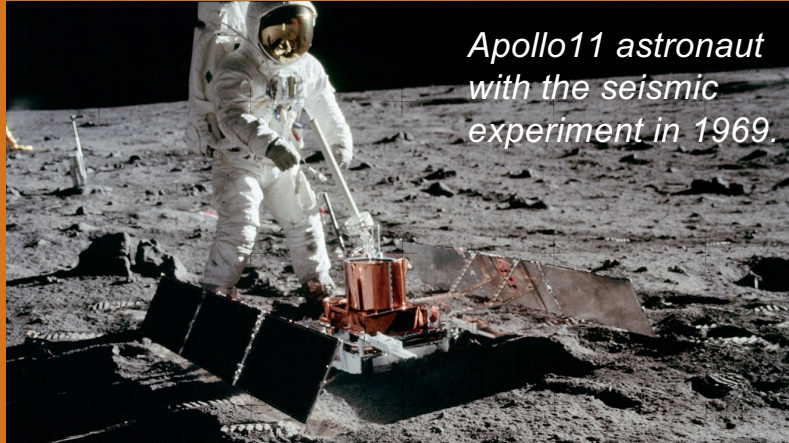
熔融層+小さい核



辻 & 川村. (2021) なみふる



Planetary seismology



Lognonné et al., 2023

The current **internal structure** is key information of rocky planet evolution



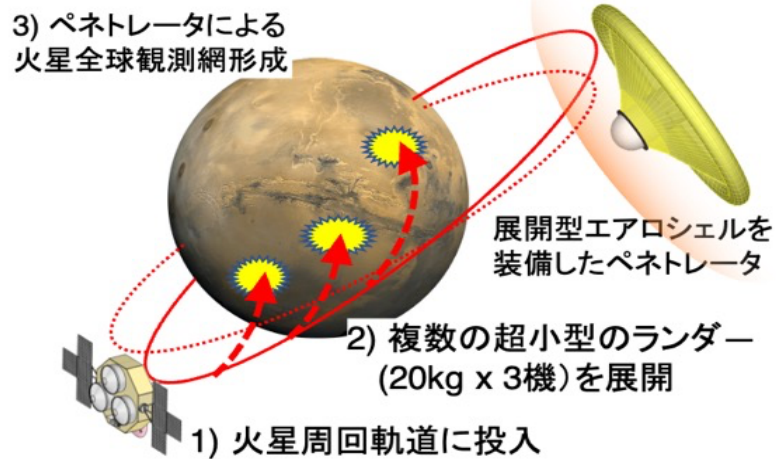
Seismic observation

アポロ計画の月震観測(1969-77), InSightの火震観測(2018-2022)を経て、惑星地震学ブーム

Artemis III,IV
Moonquake 2028 ~



戦略的火星着陸探査 STEP1
Marsquake 2030年代半ば



NASA Dragonfly
Titanquake 2028年 打ち上げ



アルテミス計画の過去・現在・未来

「月に戻る」だけでなく、月で継続的に活動し、その経験を火星へつなげる段階的な計画

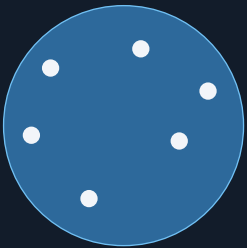


ポイント： Artemis は単なる月探査ではなく、**月での活動基盤づくり**を通じて、将来の火星滞在へ進む計画。

惑星地震学の問題点

最大の制約は「観測データが圧倒的に少ない」こと

地球



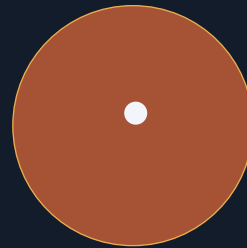
多数の観測点

同じイベントを
多方向から観測できる

network seismology

≠

惑星



観測点が少ない

InSight でも基本は1点
震源・構造の情報が不足

limited observations

どう補う？

地震 + 音響



異なる物理量を
同時に観測する

震源・大気・地表の
相互作用を切り分ける

seismo-acoustics

観測点を簡単には増やせない → 「1点から得られる情報」を増やすことが重要

固体と大気は相互作用する

惑星表面を境界として、エネルギーは Atmosphere $\rightleftharpoons$ Solid の両方向に伝わる

ATMOSPHERE

Atmosphere $\rightarrow$ Solid

Pressure fluctuations / acoustic waves



Surface loading



Seismic response / normal modes

$\rightarrow$ 火星大気による常時励起

SOLID PLANET

$\rightarrow$ インフラサウンド観測

Solid $\rightarrow$ Atmosphere

Acoustic / pressure waves



Surface motion



Seismic waves / impact source

同じ惑星現象を、固体側と大気側の両方から観測する

固体と大気は相互作用する

惑星表面を境界として、エネルギーは Atmosphere $\rightleftharpoons$ Solid の両方向に伝わる

ATMOSPHERE

Atmosphere $\rightarrow$ Solid

Pressure fluctuations / acoustic waves



Surface loading



Seismic response / normal modes

$\rightarrow$ 火星大気による常時励起

SOLID PLANET

$\rightarrow$ インフラサウンド観測

Solid $\rightarrow$ Atmosphere

Acoustic / pressure waves



Surface motion



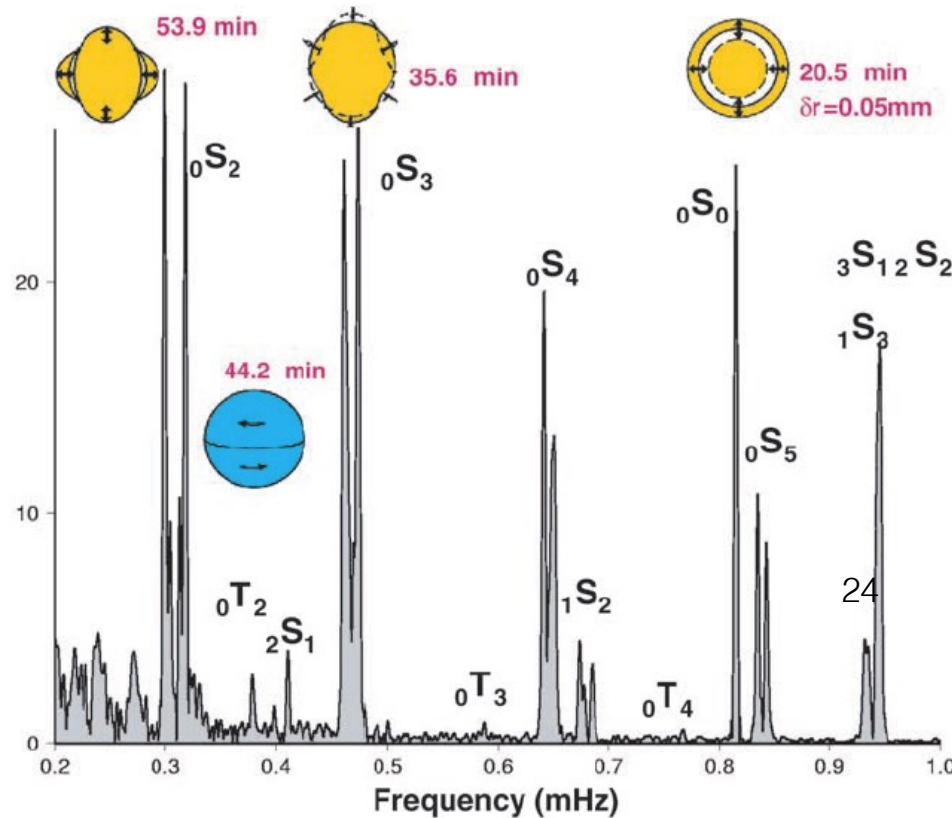
Seismic waves / impact source

PLANETARY SURFACE

同じ惑星現象を、固体側と大気側の両方から観測する

常時火星自由振動 Mars' background free oscillation

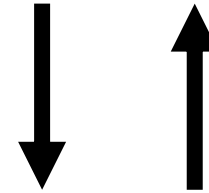
What is the planetary free oscillation?



Schematic of the motion of free oscillations excited by 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. (Jefferey Park et al. 2015).

The eigenfrequencies are constant no matter how the earthquake is big. These are function of **internal structure** of the Earth.

Internal structure



Eigen frequency

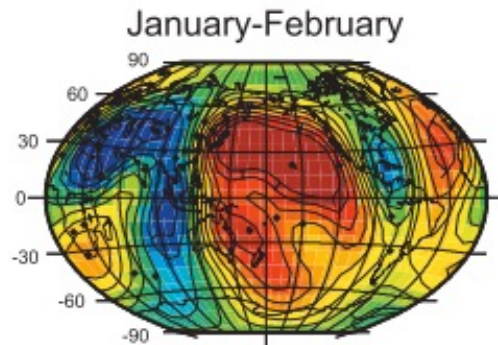
If we observe these eigenfrequencies, we can **estimate internal structure**.

常時火星自由振動 Mars' background free oscillation

What is the planetary **background** free oscillation(hum)?

Without such a huge quake, the planets are shaken by fluid bodies continuously.

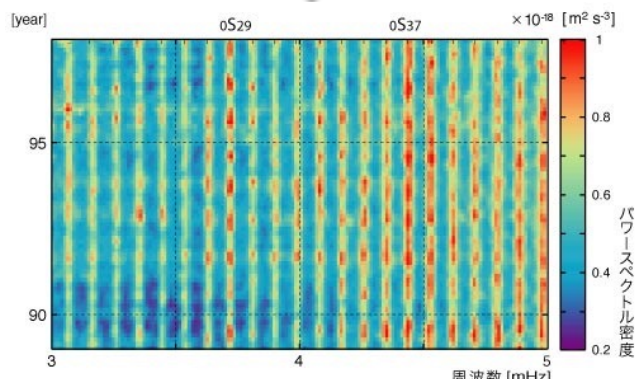
Earth



Excitation force
Ocean, atmosphere

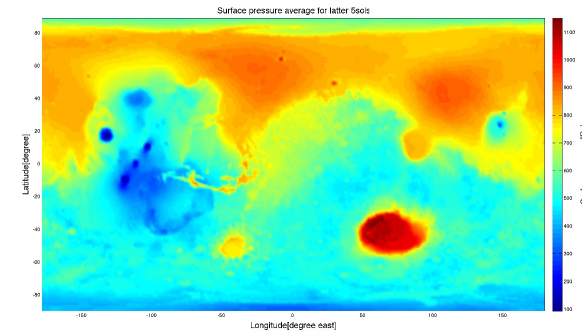
Nishida and Fukao, 2007

Earth excitation is
mixture of **ocean +
atmosphere** (at $0S_{29}$,
 $0S_{37}$ atmospheric
resonances)



Planet's
background
free oscillation

Mars



Global Circulation
Model (GCM)



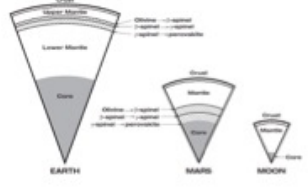
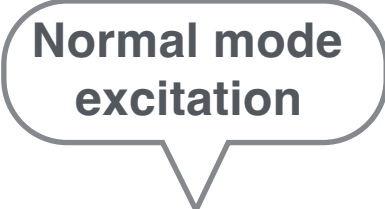
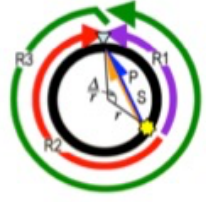
Similar process is
expected on Mars but only
through **atmospheric
coupling**

常時火星自由振動 Mars' background free oscillation

Computation of seismogram

$$u(t) = \sum_k \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau g_k(t - \tau) \times S_k(\tau) \times R_k$$

$$= \sum \left(\text{Green function (internal model)} \right) \times \left(\text{Normal mode excitation} \right) \times \left(\text{Receiver (position)} \right)$$

k : mode
 ω : eigen frequency
 σ : angular velocity
 Q : Q factor
 u : normal mode displacement
 U : radial function
 Y : spherical harmonics
 P : Legendre polynomial

$$g_k(t) = H(t) \frac{e^{i\sigma_k t}}{i\sigma_k},$$

$$\sigma_k = \omega_k + i \frac{\omega_k}{2Q_k},$$

$$u_k(\vec{r}_R) = U_k(r_R) Y_k(\vec{r}_R),$$

$$Y_l^m(\theta, \phi) = P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi}$$

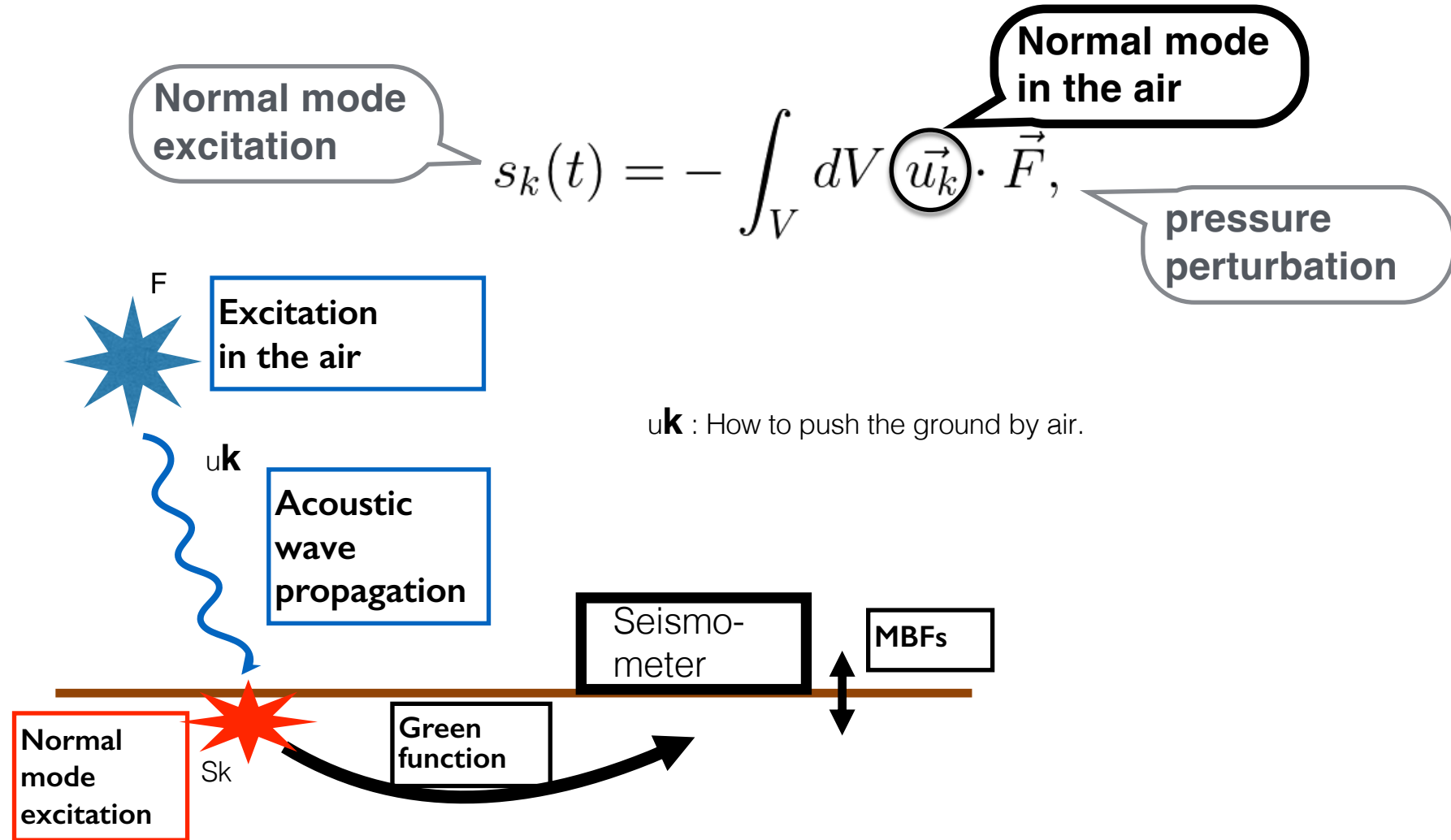
subscript 'k' includes 3 orders, **n** (radial order), **l** (angular order) and **m** (azimuthal order).

If I fix the internal structure and receiver (seismometer) position,
I can calculate marsquake (martian hum).

常時火星自由振動 Mars' background free oscillation

Normal mode calculation

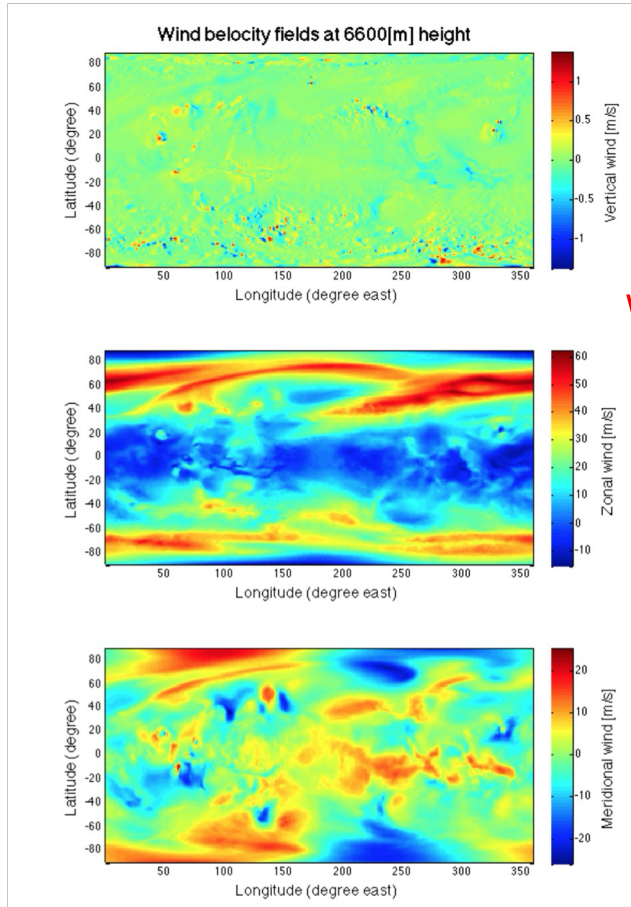
Excitation in the atmosphere (vertical process).



常時火星自由振動 Mars' background free oscillation

What is the atmospheric source ?

- The **wind** and **atmospheric pressure** generate in the atmosphere a density of seismic forces (or seismic moment) depending on time and location

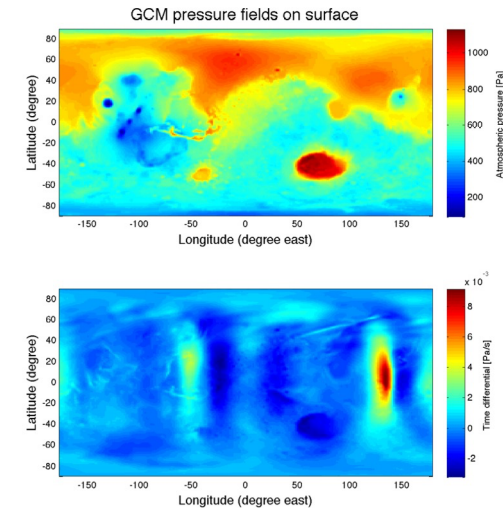


GCM wind velocity field at 6.6km height.

Wind Reynold stresses

$$\vec{F} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) - \nabla p_{glut}$$

Pressure forcing

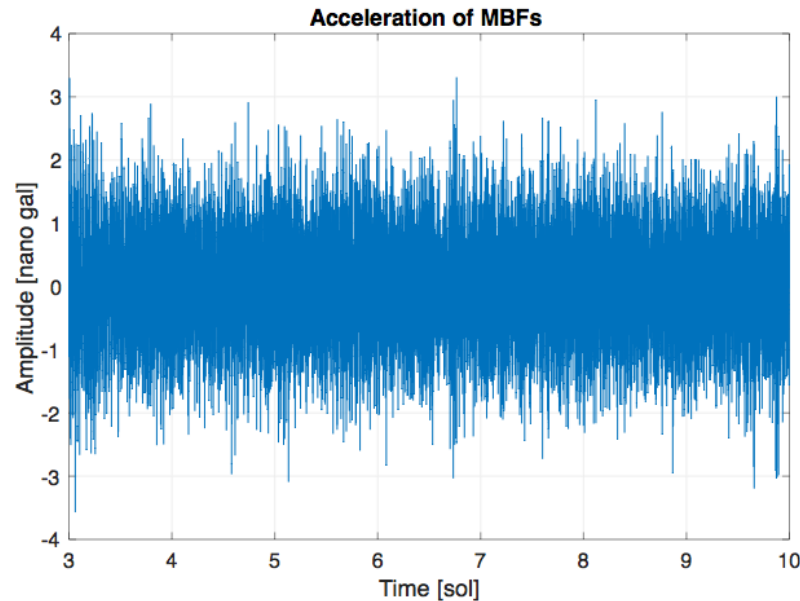


GCM atmospheric pressure field and differentiated atmospheric pressure at the ground.

Result

Mars' background free oscillation

$$u(t) = \sum_k \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau g_k(t - \tau) \times S_k(\tau) \times R_k$$

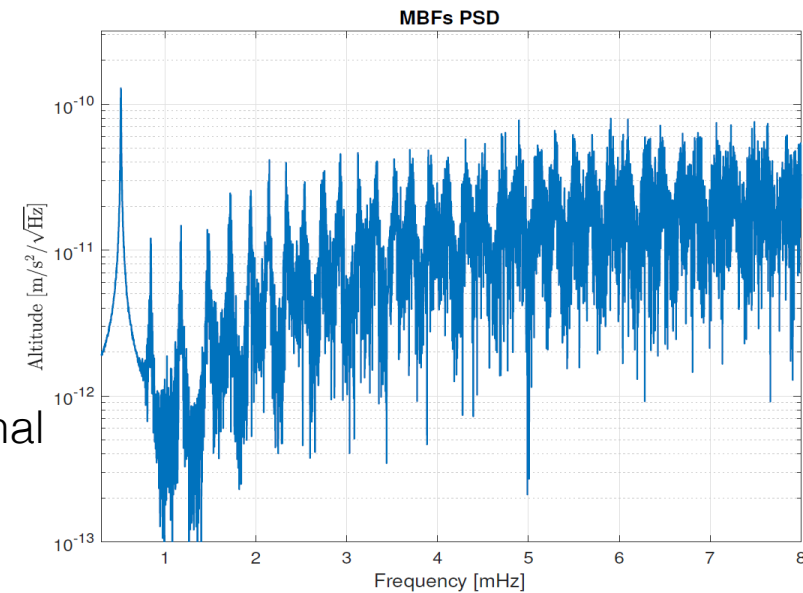


=
Same signal

29

sol = 1 martian day = 24.6 hours

7 sols MBF acceleration. The MBF is sum of angular order 2 to 39 fundamental modes. The amplitude of is nano gals (10^{-11} m/s²).

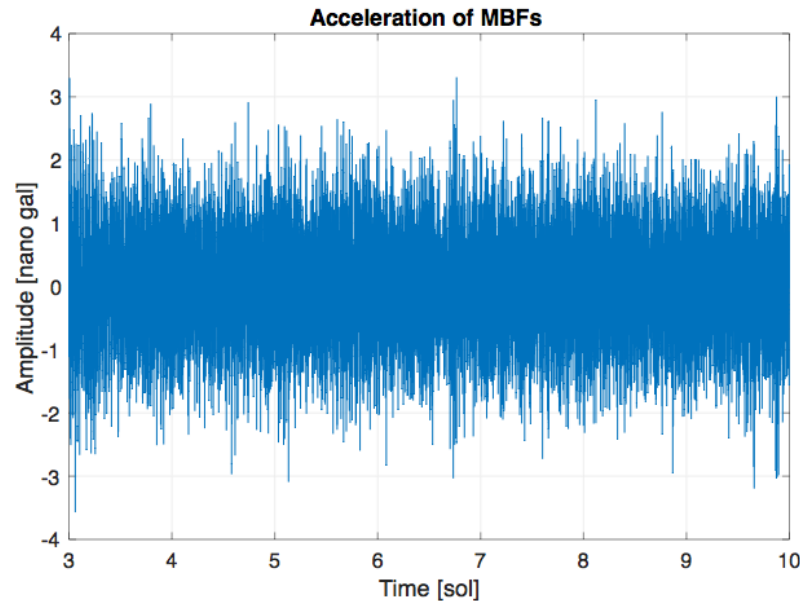


PSD of MBF acceleration. The MBF is sum of 2 to 39 fundamental normal modes.

Result

Mars' background free oscillation

$$u(t) = \sum_k \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau g_k(t - \tau) \times S_k(\tau) \times R_k$$



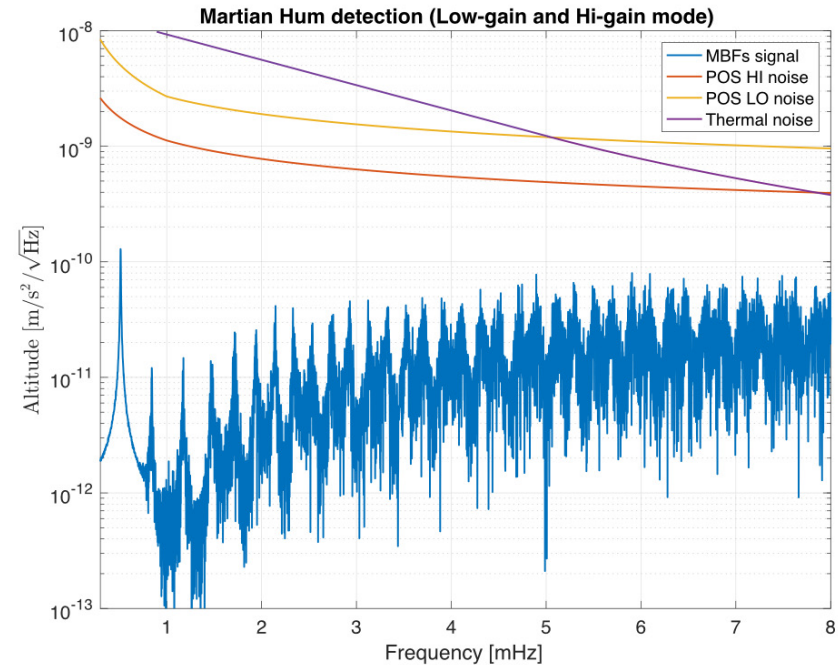
=

Same signal

30

sol = 1 martian day = 24.6 hours

7 sols MBF acceleration. The MBF is sum of angular order 2 to 39 fundamental modes. The amplitude of is nano gals (10^{-11} m/s²).



PSD of MBF acceleration. The MBF is sum of 2 to 39 fundamental normal modes.

固体と大気は相互作用する

惑星表面を境界として、エネルギーは Atmosphere $\rightleftharpoons$ Solid の両方向に伝わる

ATMOSPHERE

Atmosphere $\rightarrow$ Solid

Pressure fluctuations / acoustic waves



PLANETARY SURFACE

Surface loading



Seismic response / normal modes

$\rightarrow$ 火星大気による常時励起

SOLID PLANET

$\rightarrow$ インフラサウンド観測

Solid $\rightarrow$ Atmosphere

Acoustic / pressure waves



Surface motion



Seismic waves / impact source

同じ惑星現象を、固体側と大気側の両方から観測する

惑星の周りには、さまざまな音源がある

INFRASOUND

インフラサウンドは、固体表面から大気中からも発生する

ATMOSPHERE

火球

流星・小天体

再突入

探査機・回収カプセル

爆発

人工的な爆発

気象

嵐・雷・大気現象

大気を直接 励起

火球・再突入
爆発・気象

INFRASOUND

大気中を伝わる低周波の圧力波 ($f < 20 \text{ Hz}$)

SURFACE

SOLID SURFACE

地震

地面の振動

火山

噴火・爆発

衝突

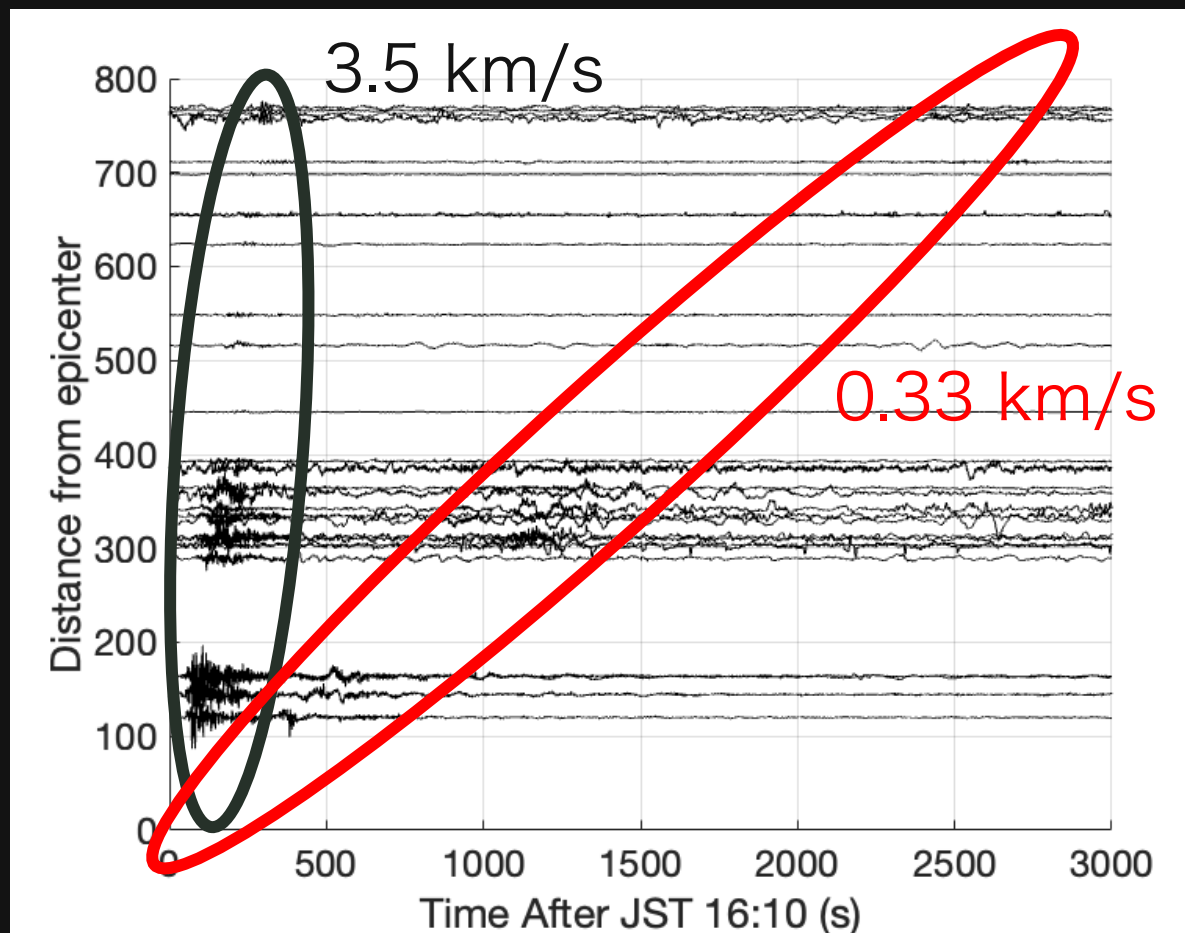
隕石・小天体

地表から 大気へ

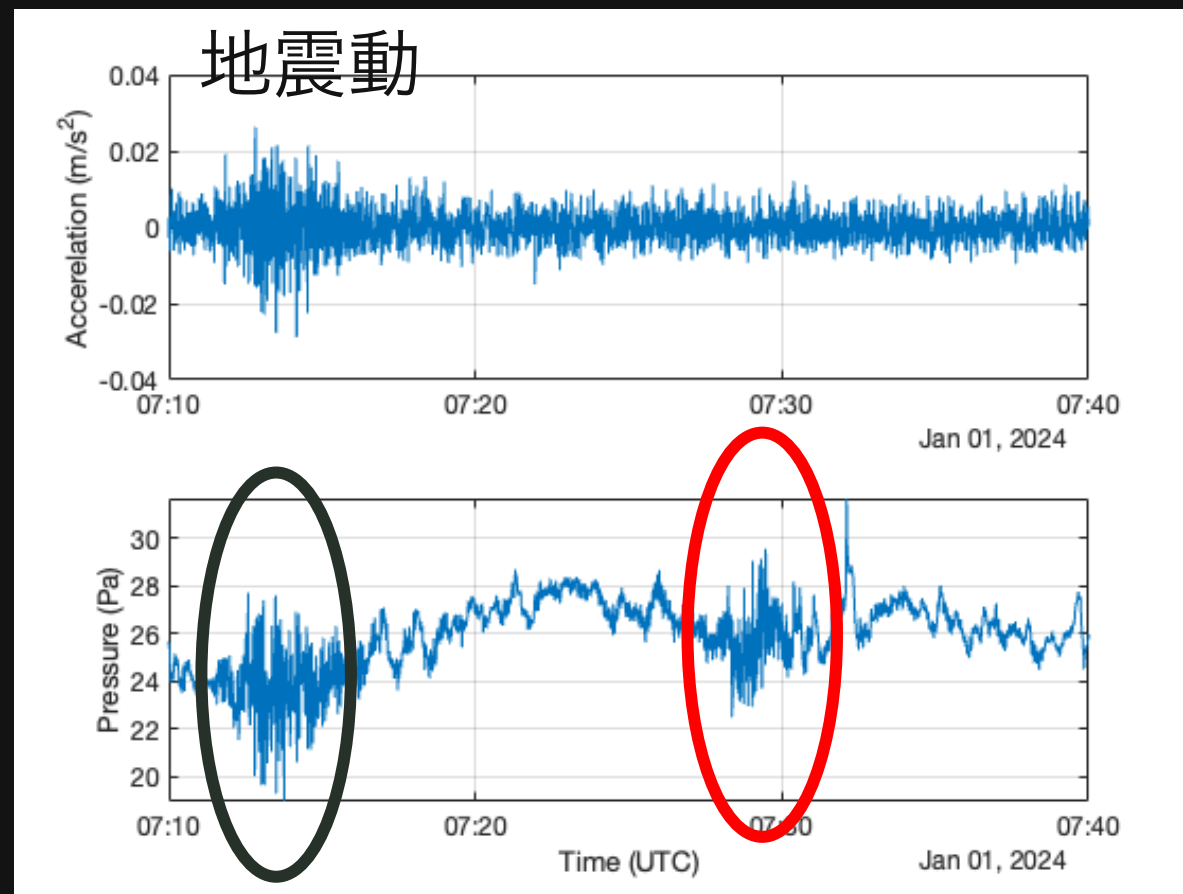
地震・火山・衝突

同じ「インフラサウンド」でも、発生メカニズムはさまざま

能登半島地震直後の地震動と気圧変動



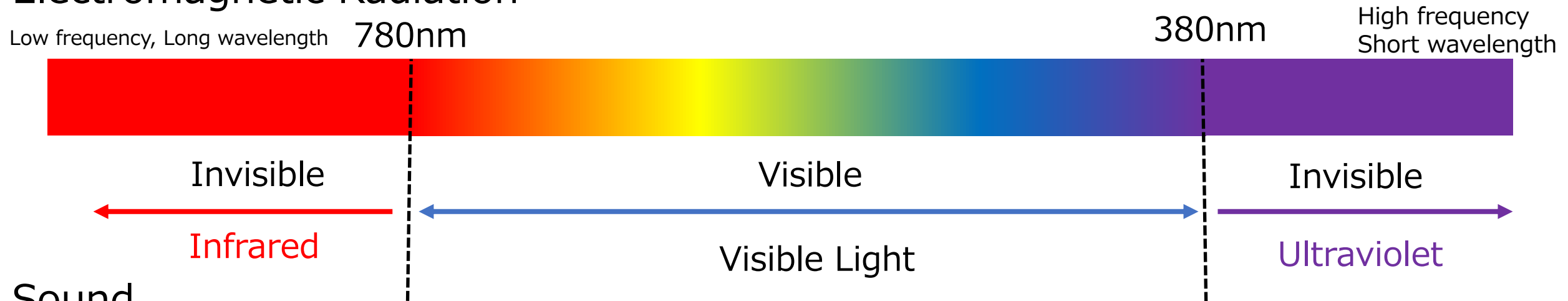
地震動と同時に気圧の変動が観測された後、地震動と関係なく気圧変動が到達する。この気圧変動は震源から近い順にほぼ音速で到達している



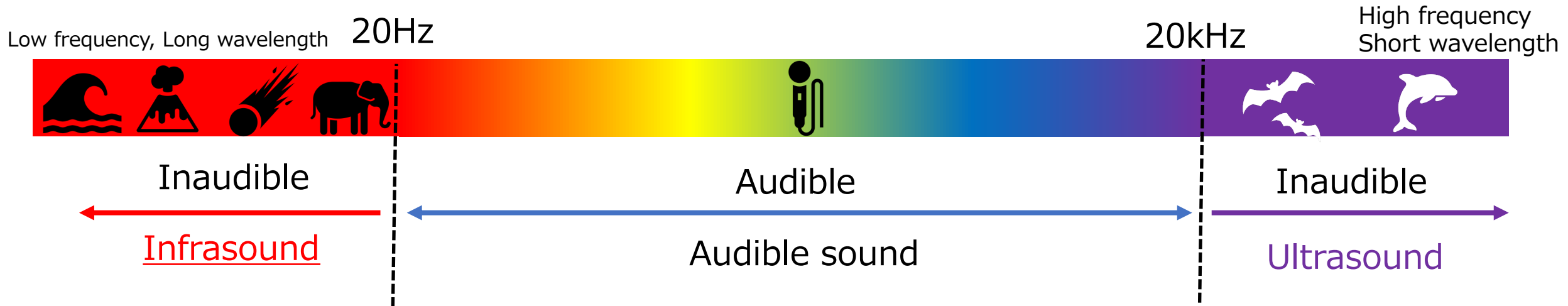
震源から約320 km 離れた那珂市での
加速度と気圧変動

Infrasound (Inaudible sound)

Electromagnetic Radiation



Sound



Infrasound is characterized by its occurrence in large-scale phenomena and reaches farther than audible sound.

インフラサウンドの特徴 – 地球規模の低周波の“声”

物理的特徴：

- ・可聴音より低い周波数(20 Hz 以下)
- ・波長が長く(数十~数千 m) 散乱・吸収されにくい
- ・減衰が小さく、数百~数千km離れても伝播

観測・応用面の特徴：

- ・発生源は火山噴火、地震、隕石突入など多様
- ・大気構造（風や気温分布）の影響を強く受ける
- ・観測事例が少なく、研究・防災両面で注目度が高い
- ・可聴音ではないのでプライバシーに考慮できる

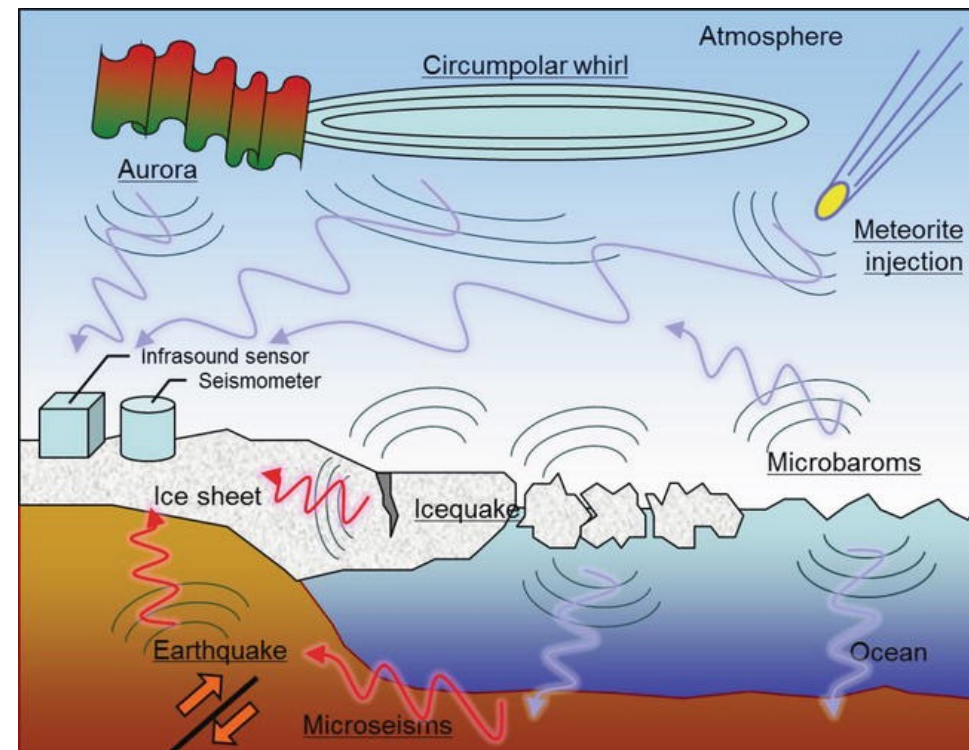
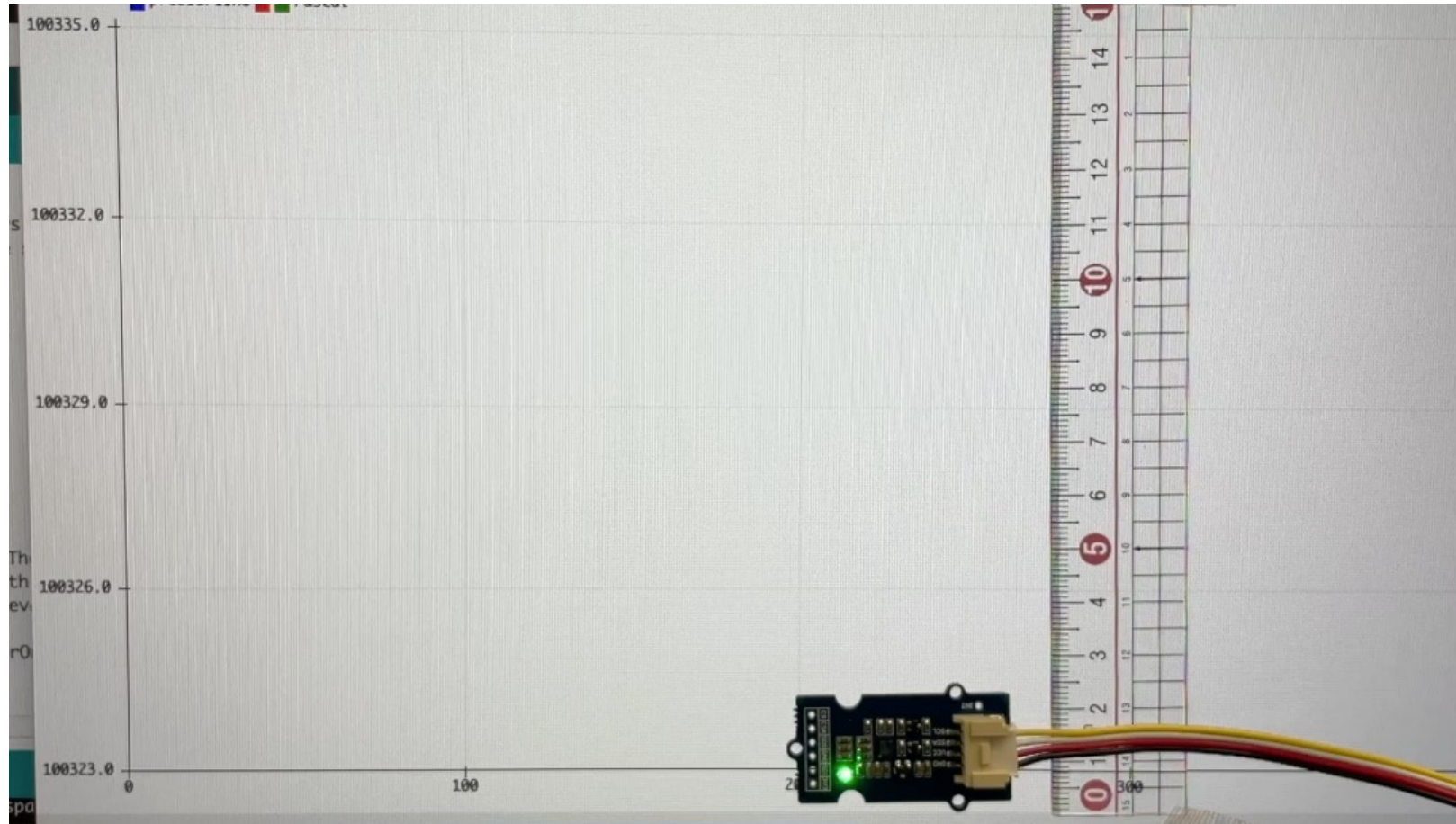


図1：大気圏・水圏・氷圏・岩石圏の間で生じる相互作用と、それに伴うインフラサウンドの発生・伝播の概念図。(村山ほか 2018)

観測手法・装置

MEMS式センサー

- ・シリコン基盤上に形成された微小な膜が外圧で変形。
- ・変形をピエゾ抵抗や容量変化で検出する。
- ・半導体プロセス技術を用いるので非常に小型。
- ・比較的高ノイズ、携帯性に優れる



MEMS型気圧計DPS310(1500円)の精度

なぜ Infrasound が重要なのか？

大規模現象を、遠くから、地震波と組み合わせて観測できる

01

大規模現象は
低周波を励起する

大きな空間・時間スケール



長周期の圧力変動

火山噴火・火球・再突入
地震・津波・大規模爆発

02

低周波は
遠くまで届く

Low frequency



Low atmospheric absorption



Long-range propagation

数百～数千 km の観測も可能

03

地震観測と
相性が高い

Seismic

Infrasound



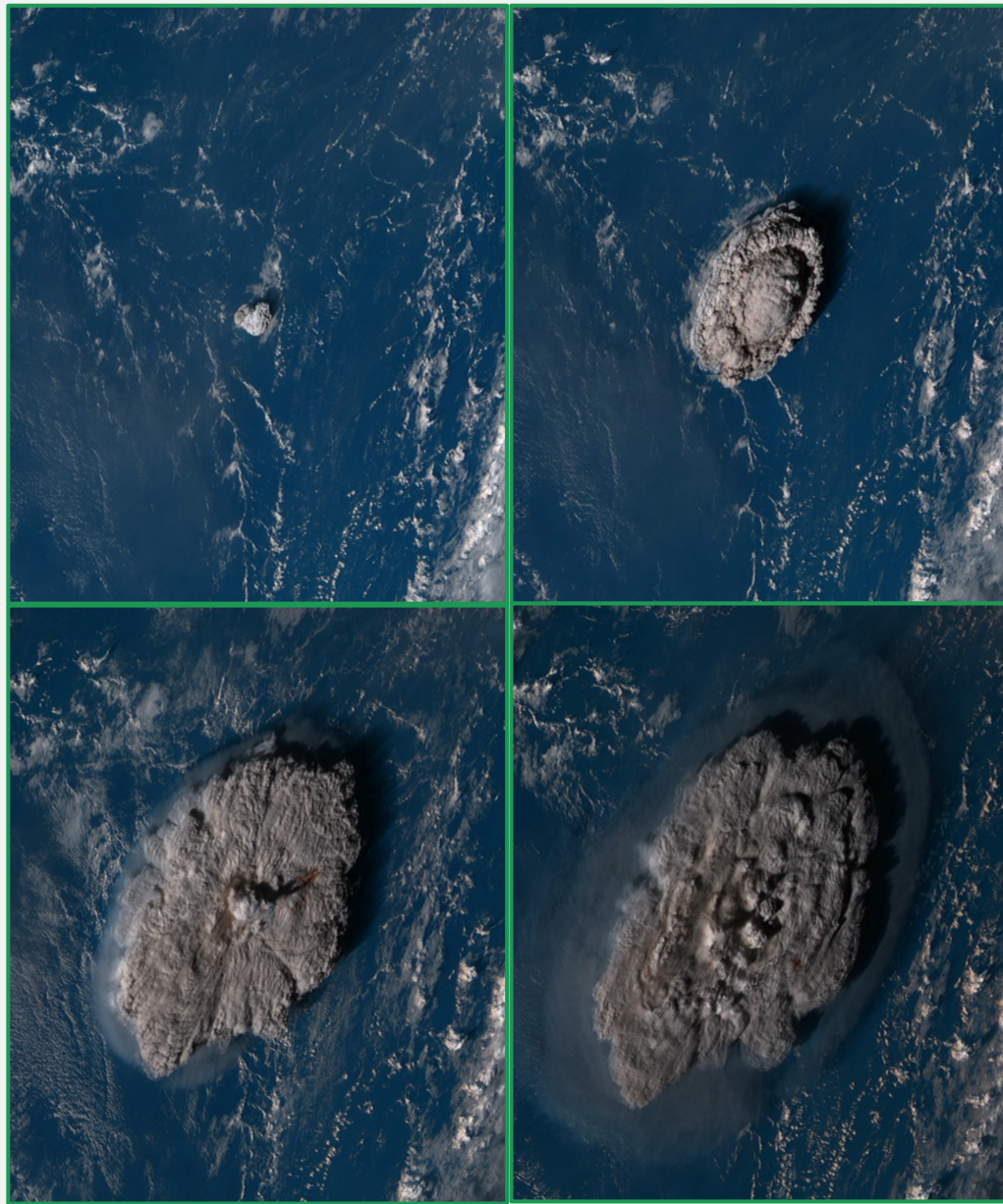
周期帯が大きく重なる

同じ現象を
固体波 + 大気波で観測

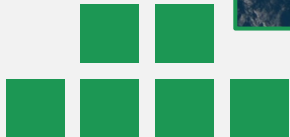
大規模現象を「遠距離」から「複数の波」で捉えられる



Solid- Atmosphere- Ocean coupling



フンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ海底火山の噴火
出典：気象庁ホームページ



Timeline of events (JST)

Volcanic eruption

13:10 January 15, 2022
Hunga Tonga-Hunga Ha'apai erupted.

1



VEI 6 is said to be a
"once in a century".

7 hours

Atmospheric pressure fluctuations

20:00 long-period airwave
traveled 8,000km away.

2



The earliest arriving is the
Lamb wave (310 m/s).

4 hours

Tsunami

24:00 The sea-level change began
on the coastlines of Japan.

3



0.9 m and 1.2 m tsunamis were
observed at Kuji and Amami.

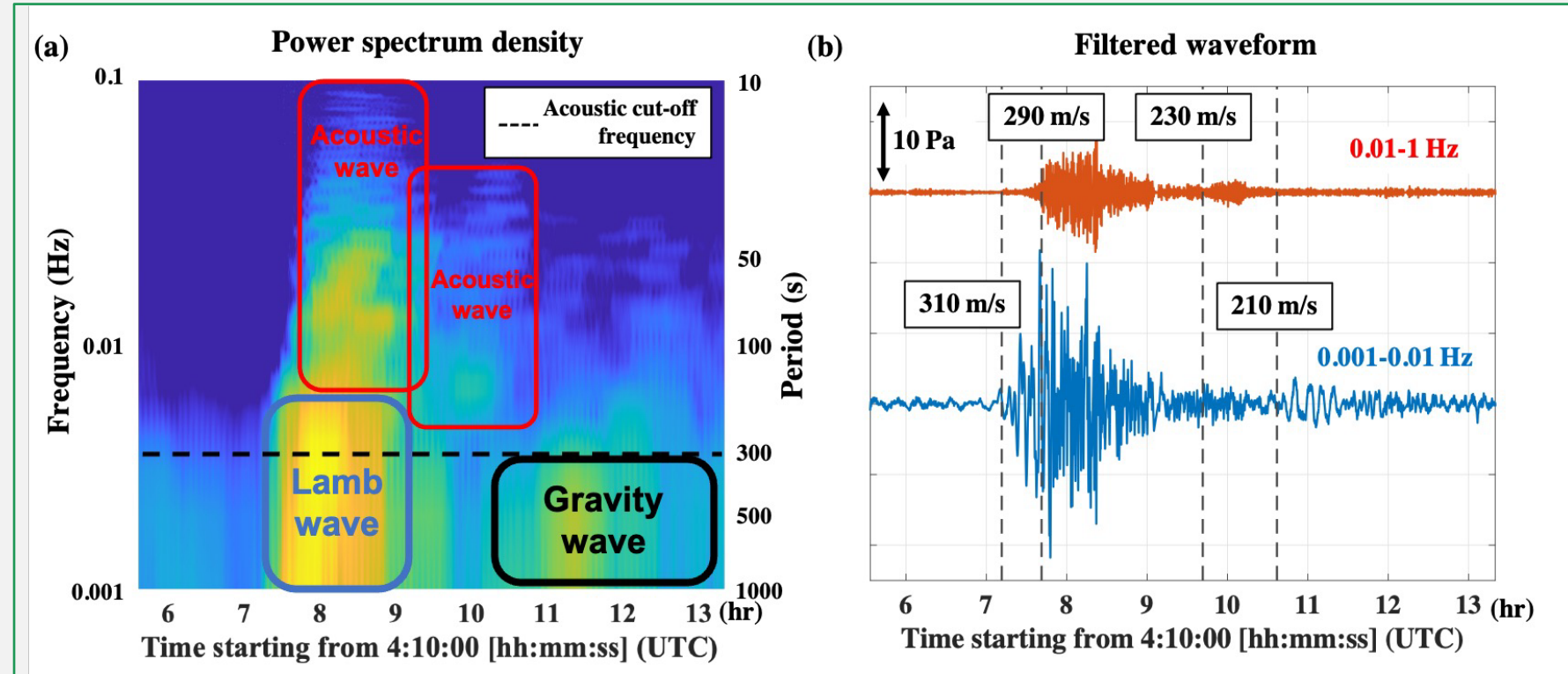
The tsunami is believed to be excited
by the atmospheric pressure fluctuations. *Kubota et al., 2022*



Four-wave categories

The frequency analyses of pressure waves concerning the arrival time of each wave packet showed that it contained four-wave categories.

- Long-period Lamb wave
- Short-period 2 acoustic waves
- Long period gravity wave



Time series of the atmospheric pressure perturbations at Muroto, Kochi (N33.25, E134.18).

(a) Power spectrum density of atmospheric pressure waves

(b) Filtered signals by two frequency ranges.

Excitation of tsunami



Coupling of atmosphere and tsunamis

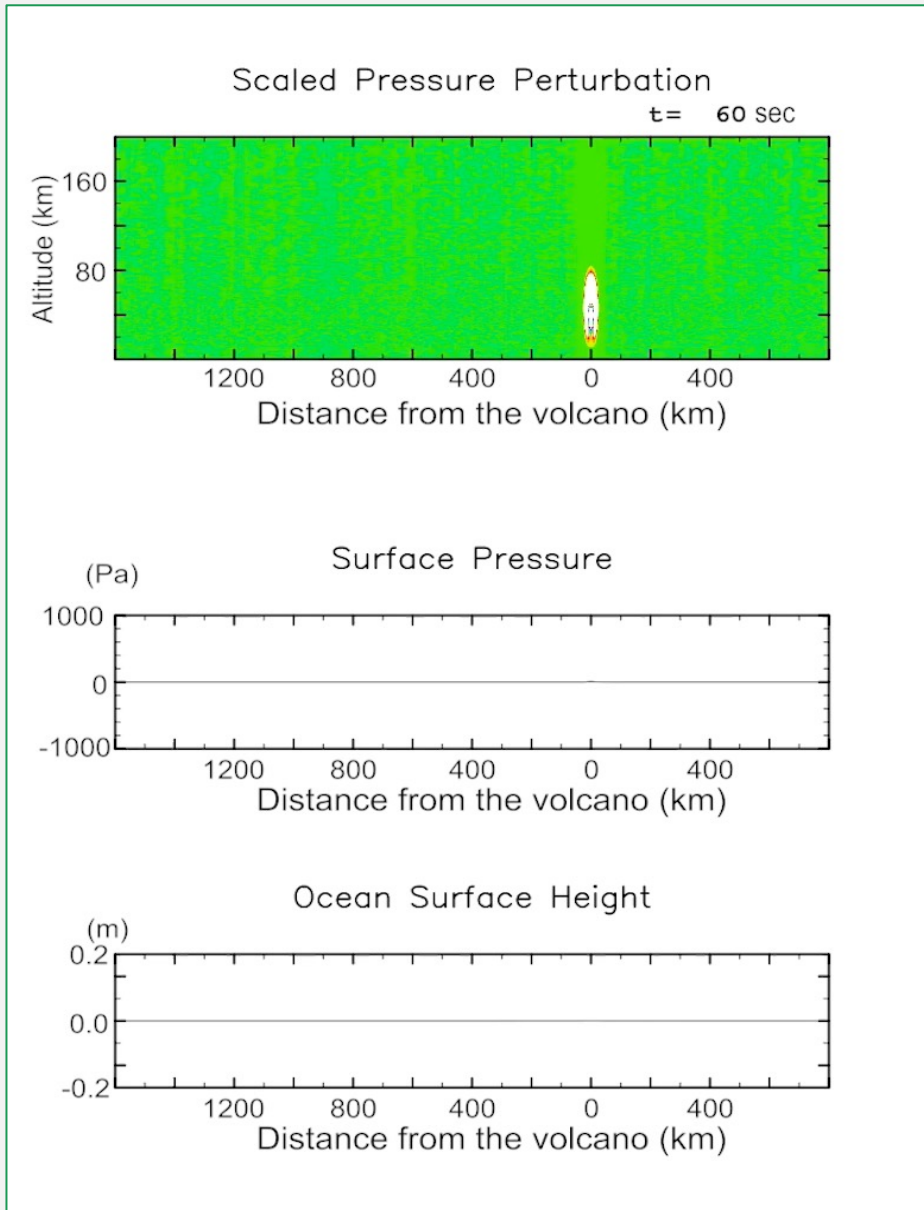
Numerical conditions

- 3,200km horizontally and 480km vertically
- Grid spacing 800m horizontally and 250m vertically
- The cyclic boundary condition is assumed horizontally
- Wintertime temperature profile of Japan
- Exosphere temperature 1000K
- This model is coded using the framework of SPMODEL*.
- Effect of volcanic eruption is volumic heating (Q)

Q : heating per volume
N : normal distribution
 $x_0 = 1600\text{km}$
 $z_0 = 40\text{km}$
 $\sigma_x = 16\text{km}$
 $\tau = 30\text{ s}$
 $Q_0 c_p T_0 = 10\text{ kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$

$$Q(x, z, t) = \frac{Q_0 c_p T_0}{(2\tau/\pi)} \times N(x_0, \sigma_x) \times N(z_0, \sigma_z) \times \sin \frac{\pi t}{\tau}$$

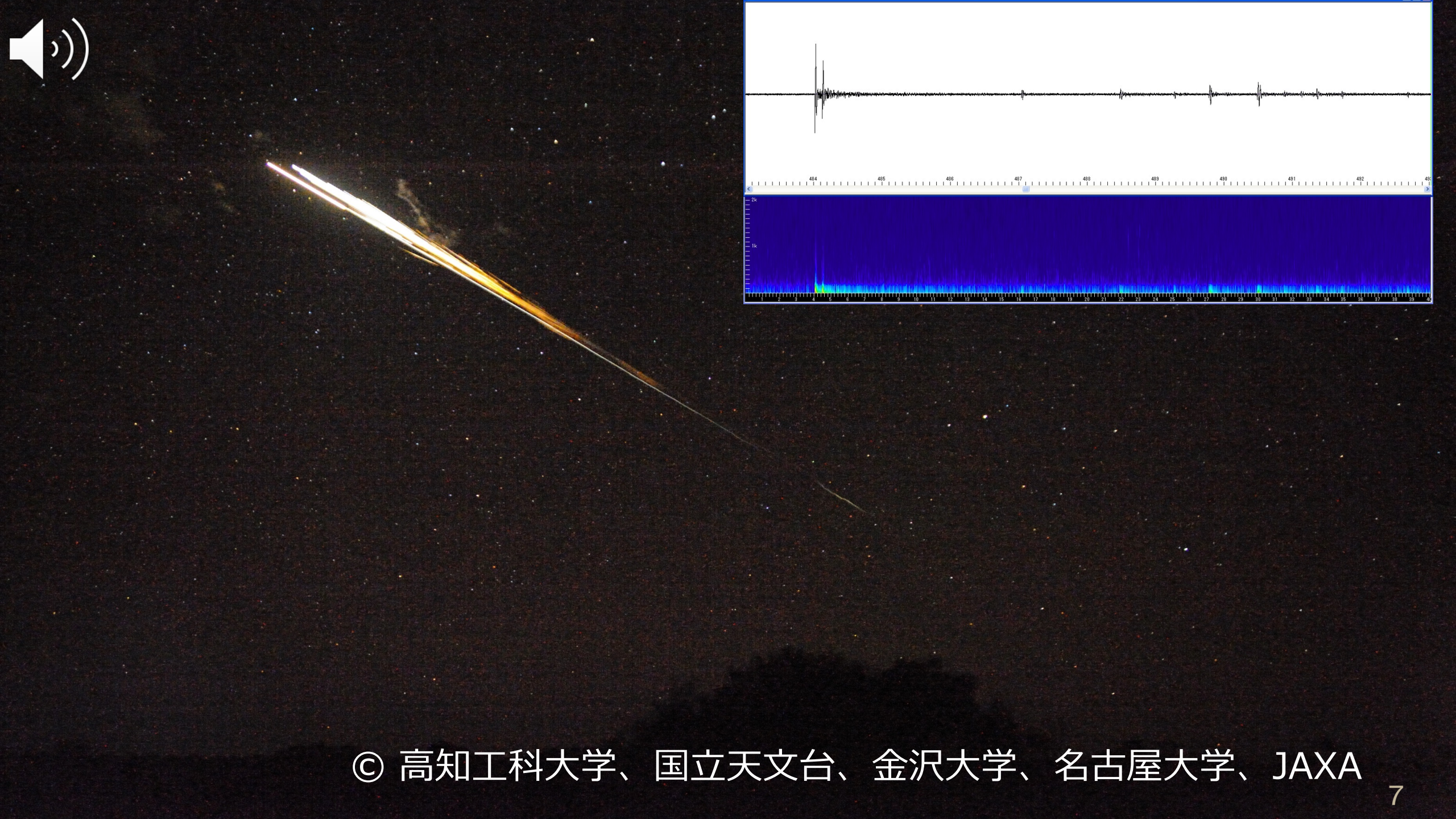
- The explosive release of heat in the stratosphere excites all candidates of observed waves.
- Tsunamis are excited by gravity waves whose phase speed is comparable to tsunamis (~200 m/s)



2010年 6月13日 23:21

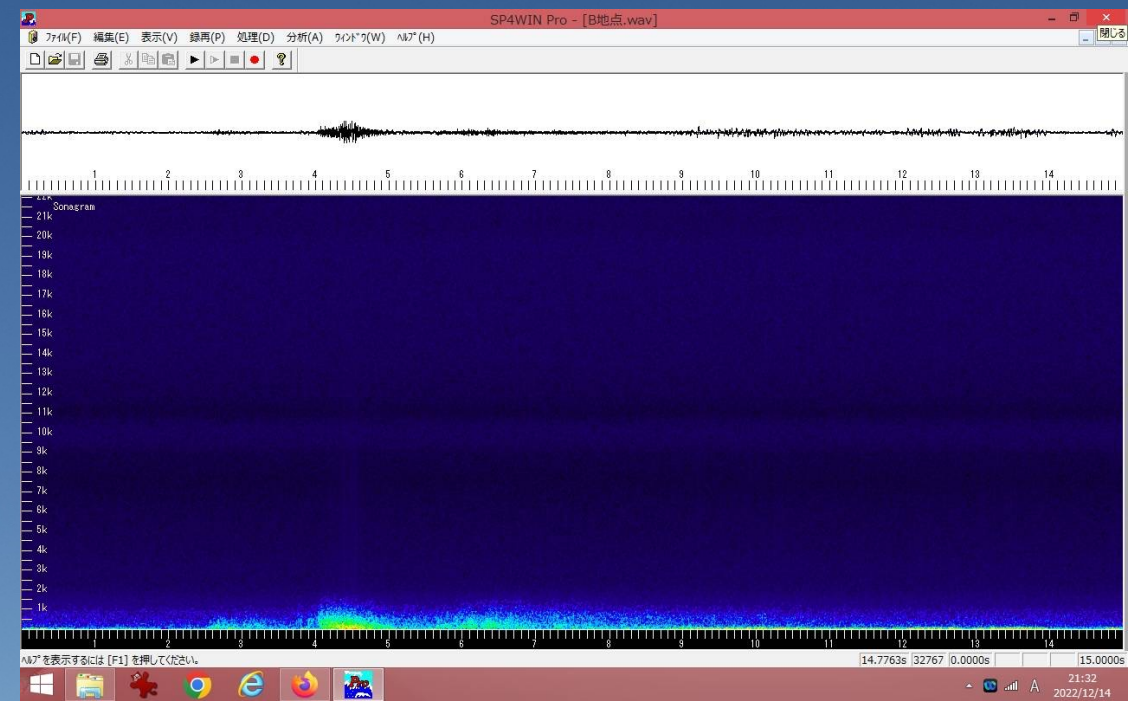
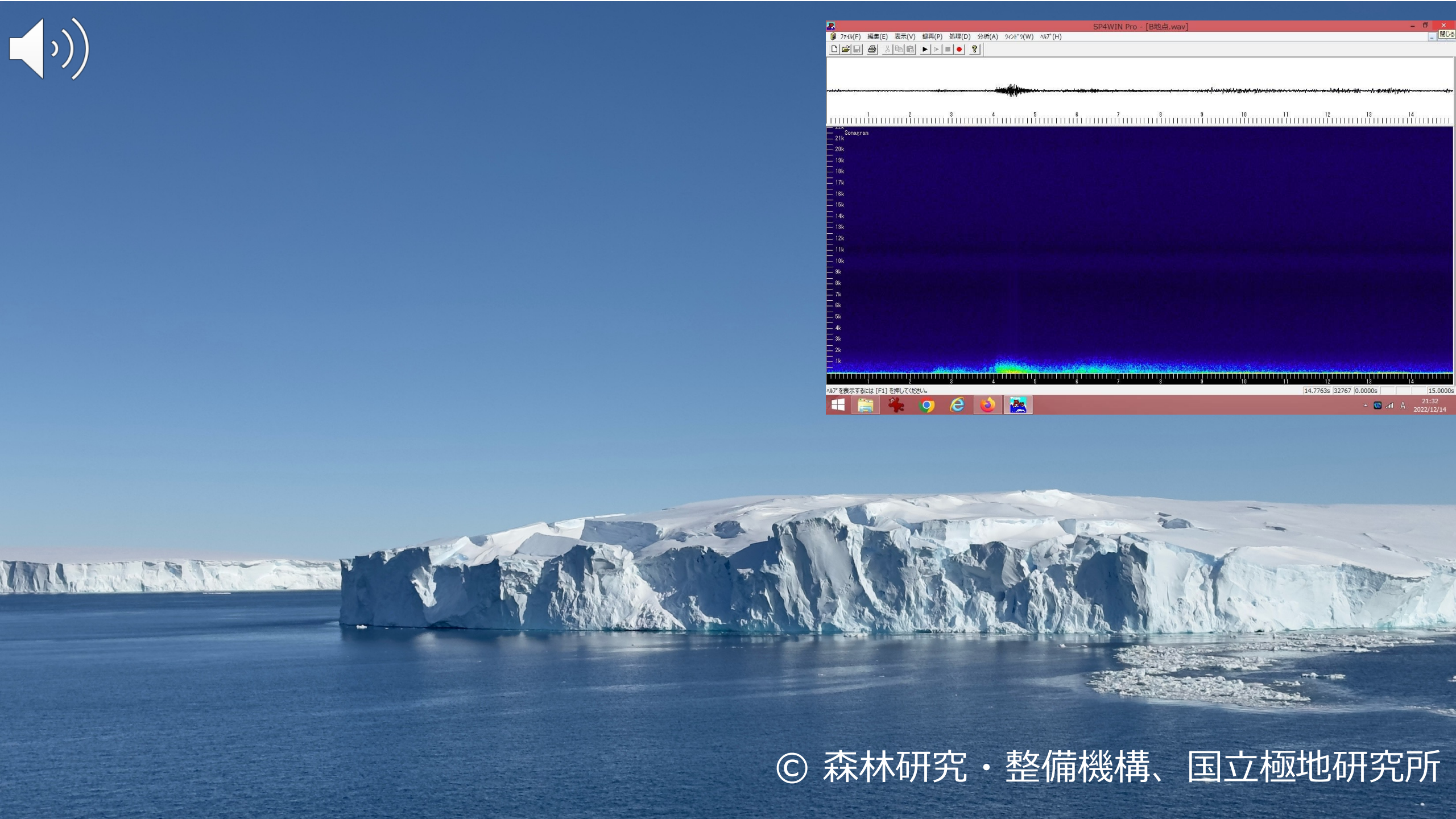
オーストラリア ウーメラ砂漠

小惑星探査機 はやぶさ の帰還時の音



© 高知工科大学、国立天文台、金沢大学、名古屋大学、JAXA

南極大陸 スカーレン氷河 氷河の崩落音



オーロラ

南極の昭和基地では空の写真とインフラサウンドが
常に記録されている

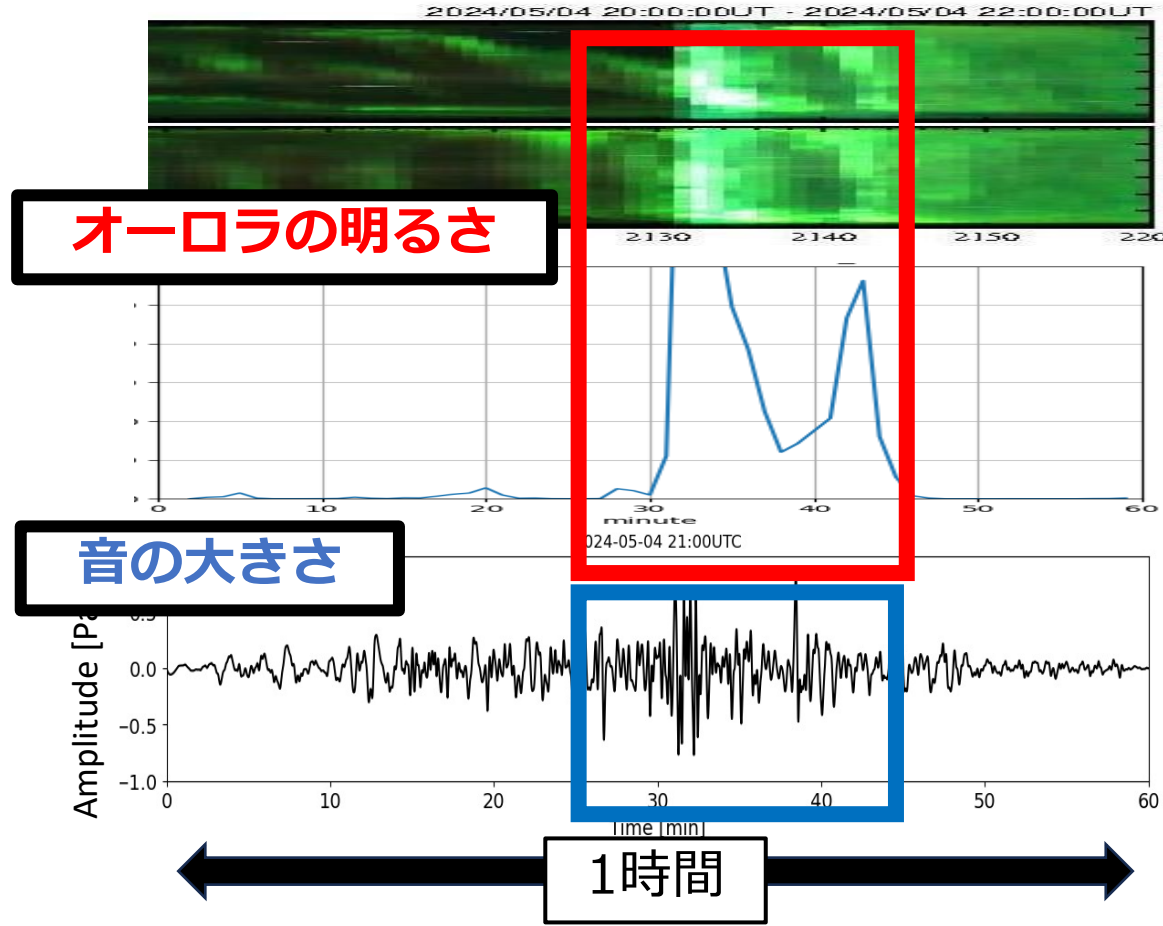
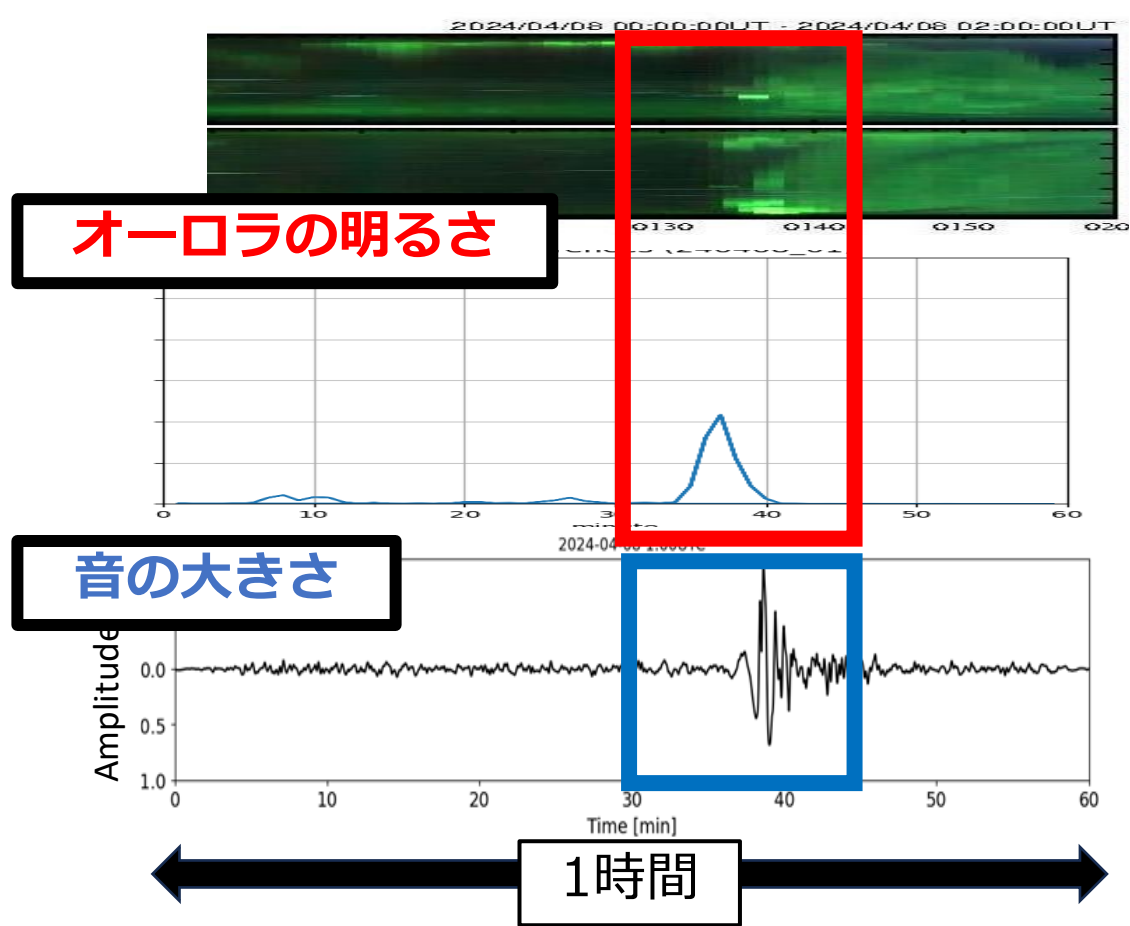


昭和基地で観測されたオーロラ



オーロラ

データ提供:高知工科大学 浅野氏・山本氏

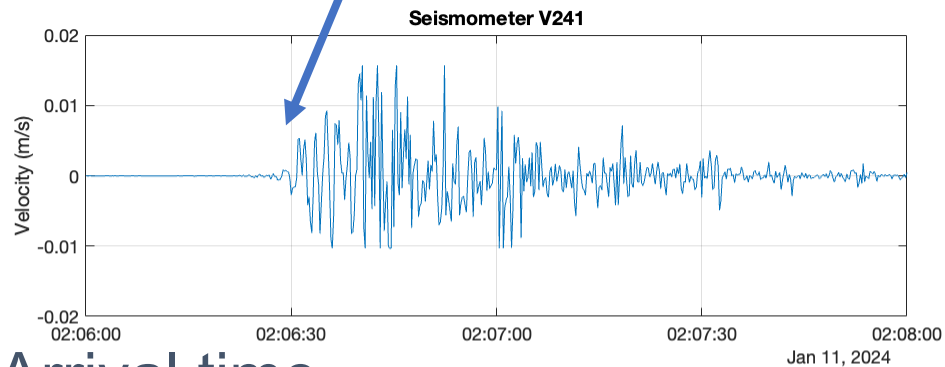


オーロラが爆発的に動いた時にインフラサウンドが観測される時がある

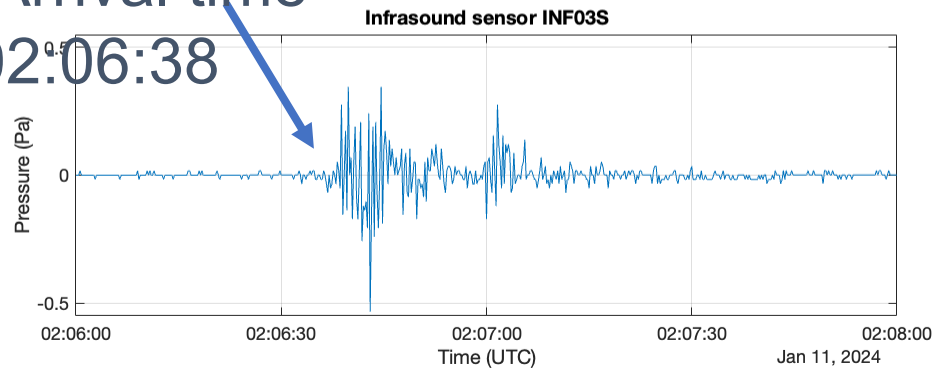
オーロラが動く時、南極では
オーロラの音が鳴り響いているかもしれない

Seismic and Infrasound waves

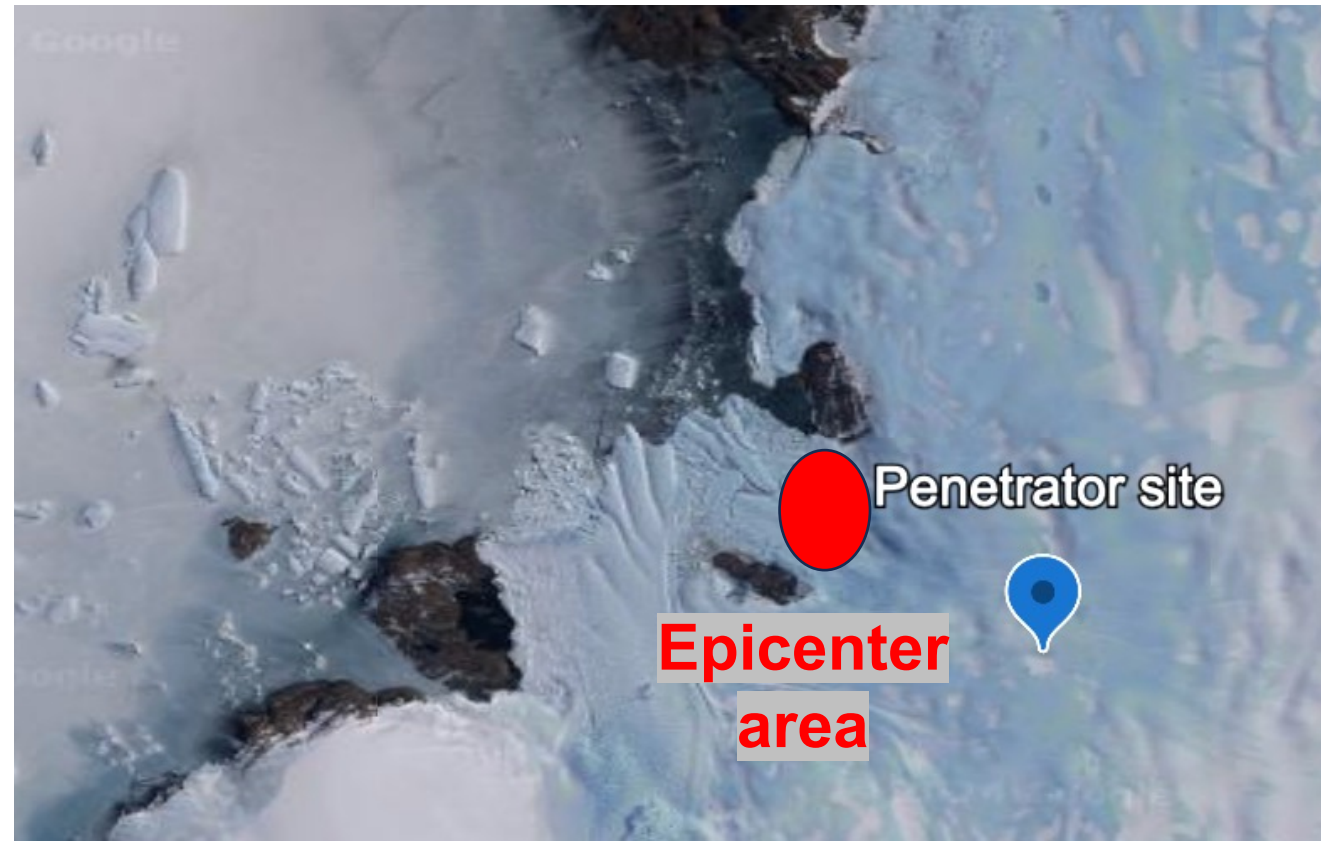
Arrival time
02:06:29



Arrival time
02:06:38



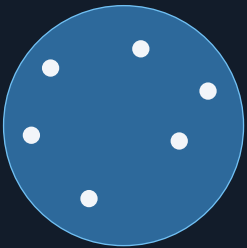
Seismic and Infrasound data
observed by the penetrator.



惑星地震学の問題点

最大の制約は「観測データが圧倒的に少ない」こと

地球



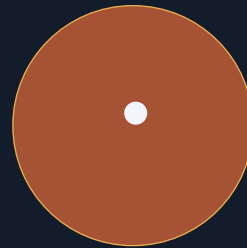
多数の観測点

同じイベントを
多方向から観測できる

network seismology

≠

惑星



観測点が少ない

InSight でも基本は1点
震源・構造の情報が不足

limited observations

どう補う？

地震 + 音響



異なる物理量を
同時に観測する

震源・大気・地表の
相互作用を切り分ける

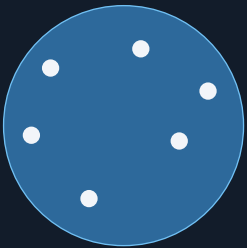
seismo-acoustics

観測点を簡単には増やせない → 「1点から得られる情報」を増やすことが重要

惑星地震学の問題点

最大の制約は「観測データが圧倒的に少ない」こと

地球



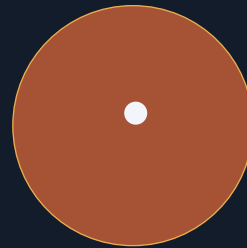
多数の観測点

同じイベントを
多方向から観測できる

network seismology

≠

惑星



観測点が少ない

InSight でも基本は1点
震源・構造の情報が不足

limited observations

どう補う？

地震 + 音響



異なる物理量を
同時に観測する

震源・大気・地表の
相互作用を切り分ける

seismo-acoustics

観測点を簡単には増やせない → 観測点を増やす

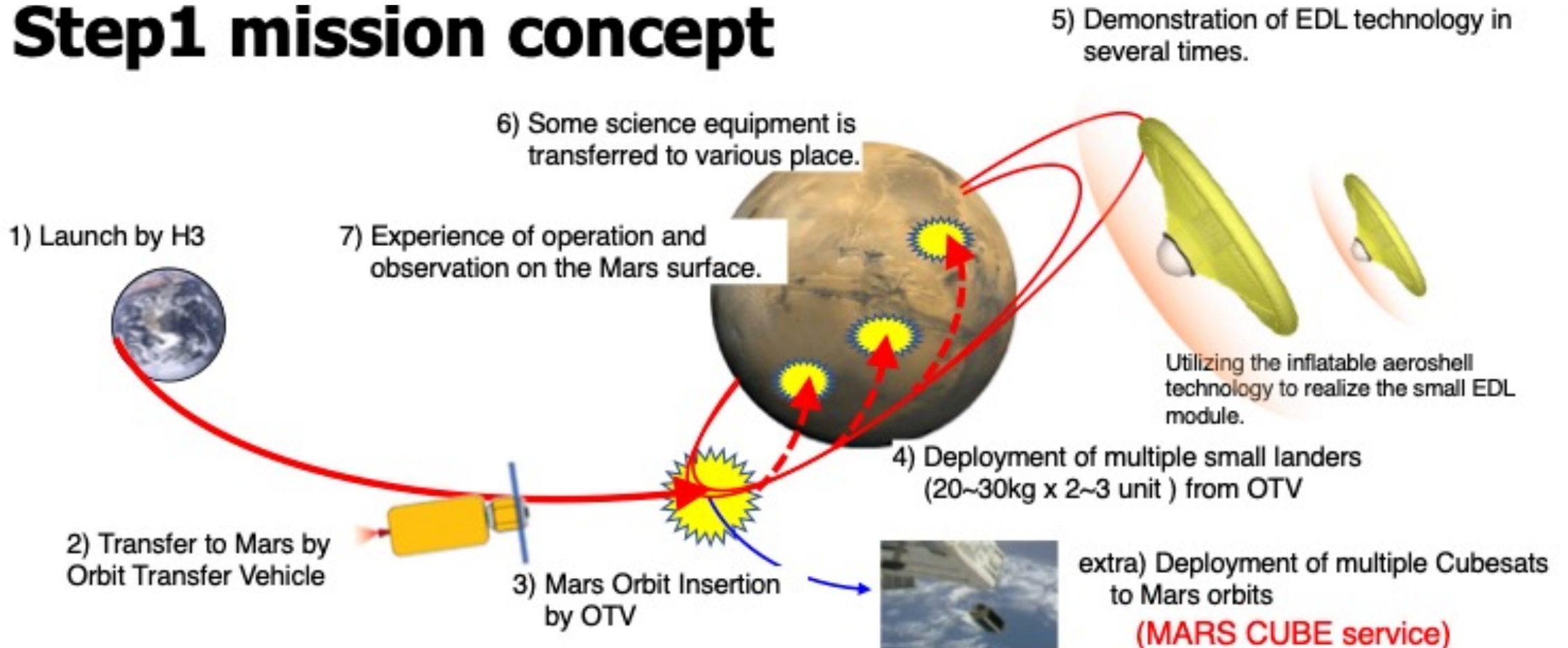
Mars Landing Program

- Next generation EDLs to planets
- Landing anywhere on the surface of Mars
- Unique Japanese technology



Multiple penetrators equipped with inflatable aeroshells are dropped from satellite orbit.

Step1 mission concept



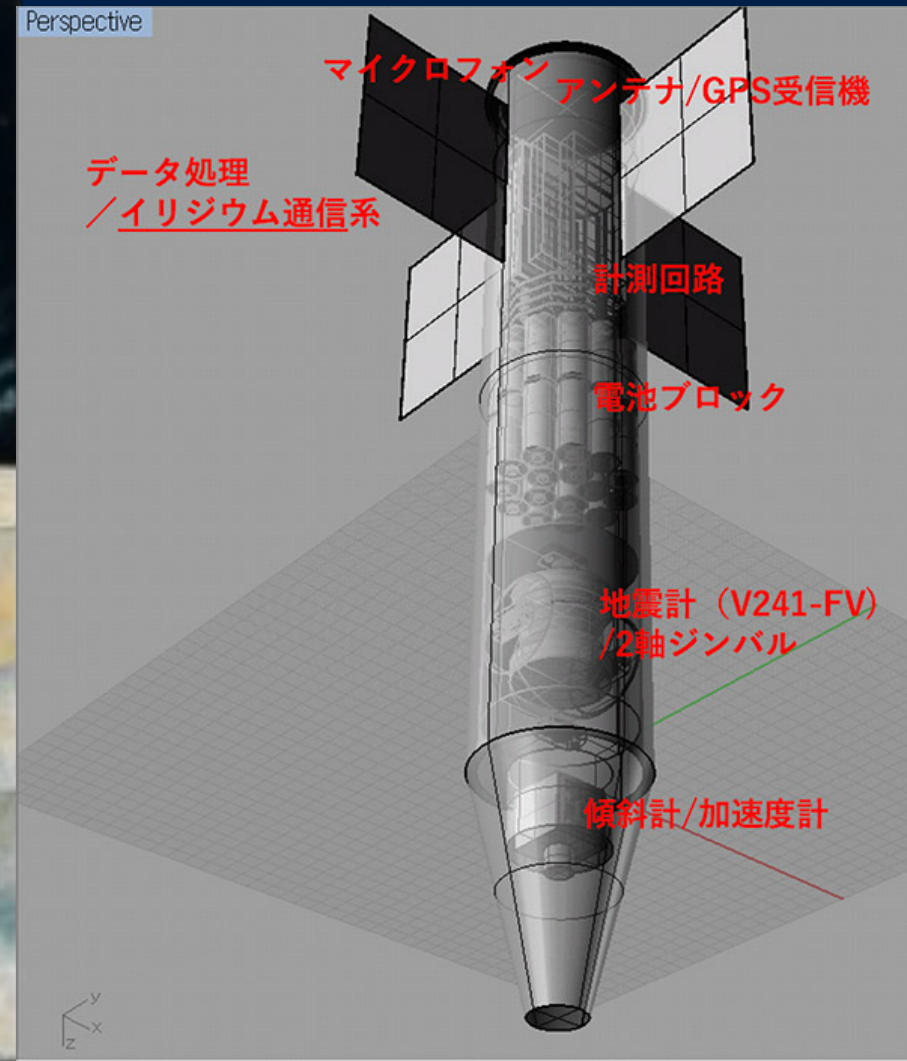
What is the penetrator?

Originally developed for planetary explorations.

Pencil shaped self-contained vehicle.

Drop from high altitudes using UAV.

Install observation equipments in *dangerous and unmmanned* locations.



Tanaka et al., 2011, Lorentz, 2011

Equipments

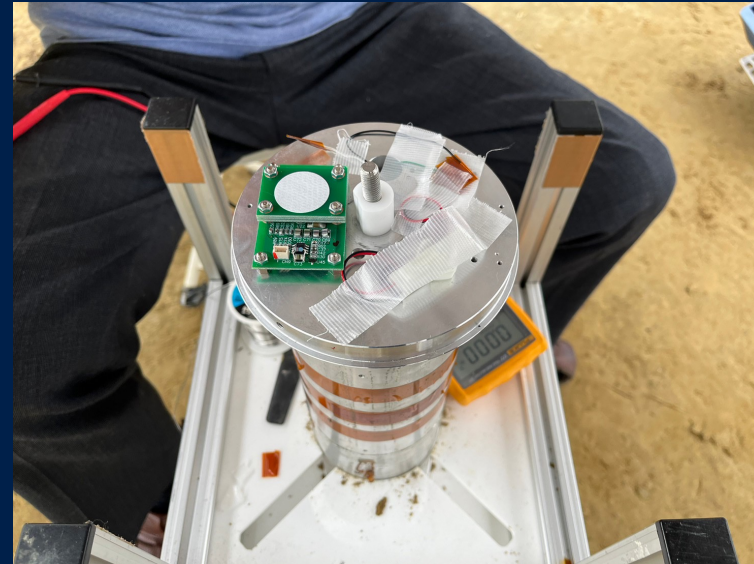
Penetrator anchored to the ground.

Seismometer : V241



V241, タイタン震観測のために開発された地震計

Infrasound sensor : INF03S



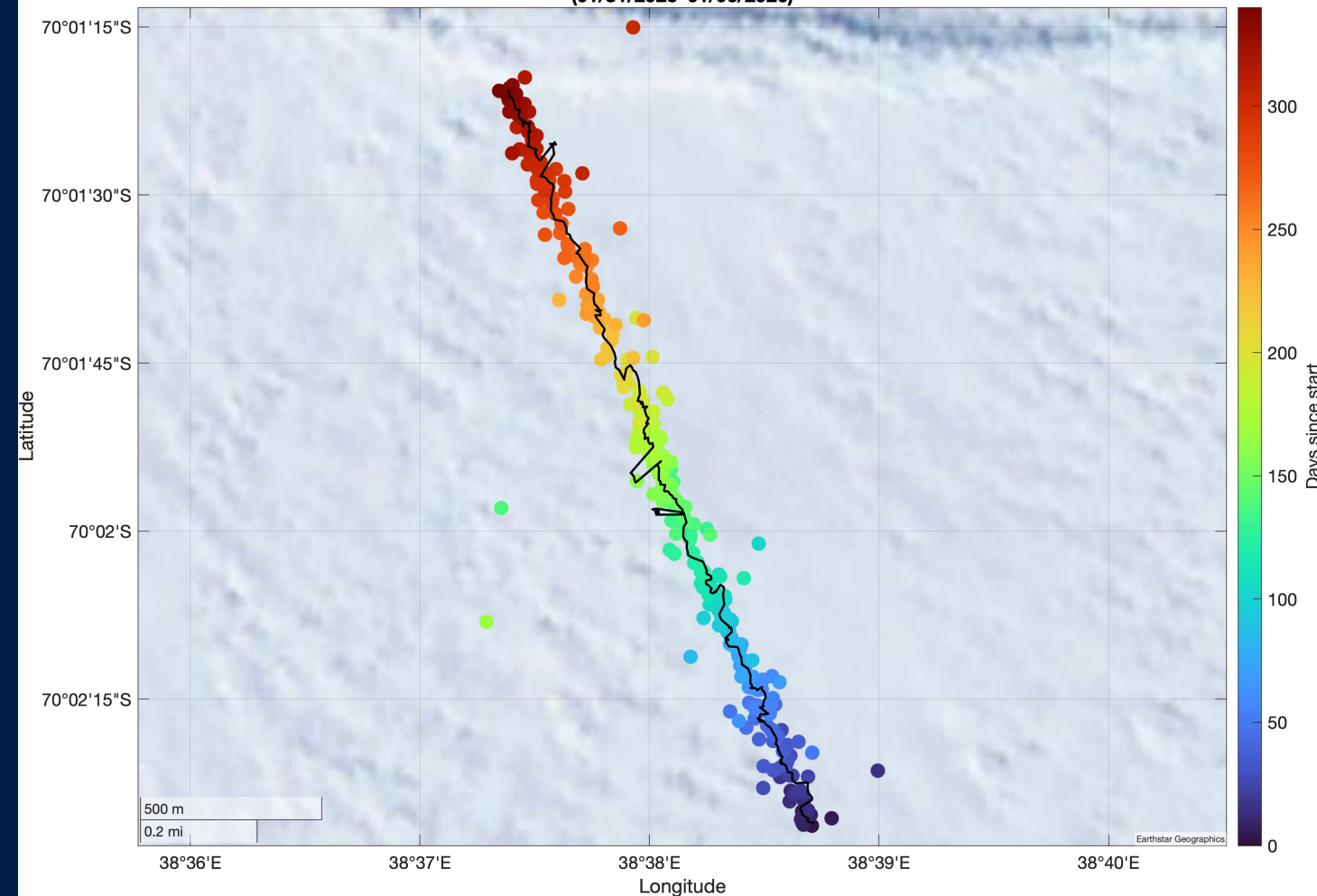
INF03S, 火星探査用に開発されたMEMS型の小型インフラサウンドセンサー



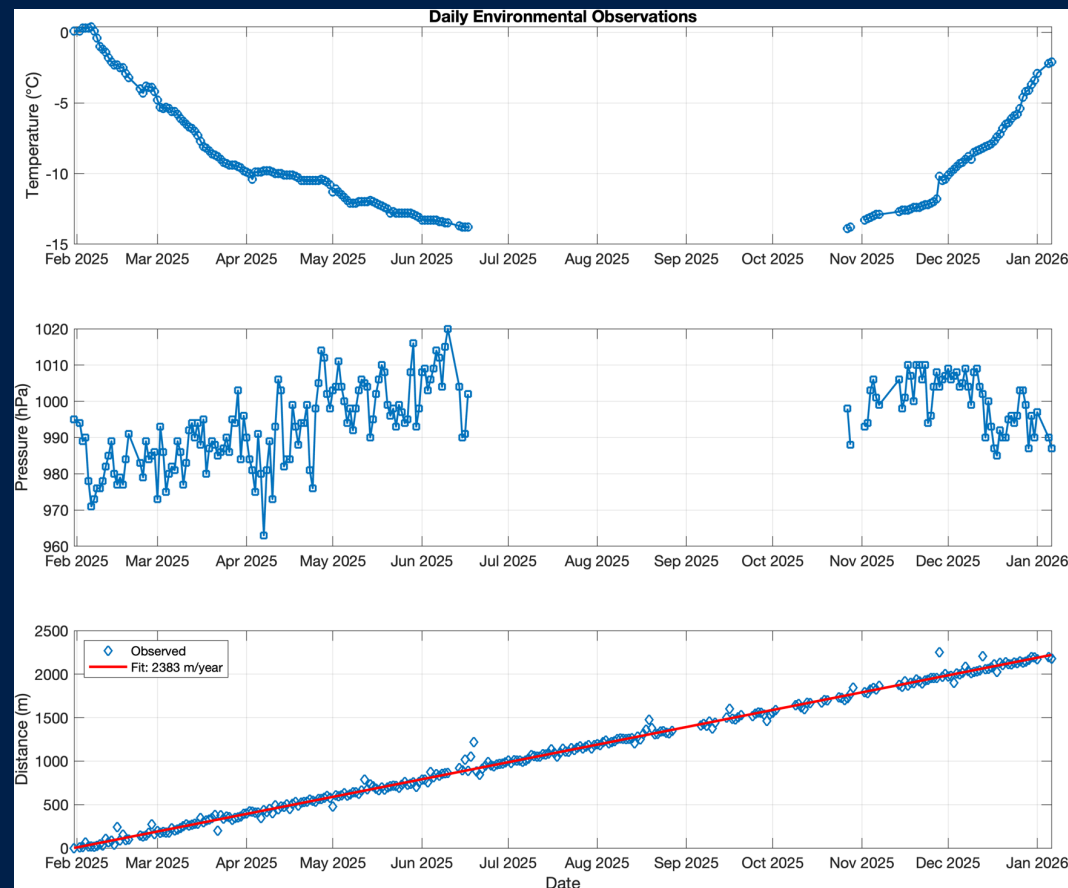


One year penetrator observation on Antarctica

Observation Points (Color = Time)
(01/31/2025–01/06/2026)



Daily Environmental Observations

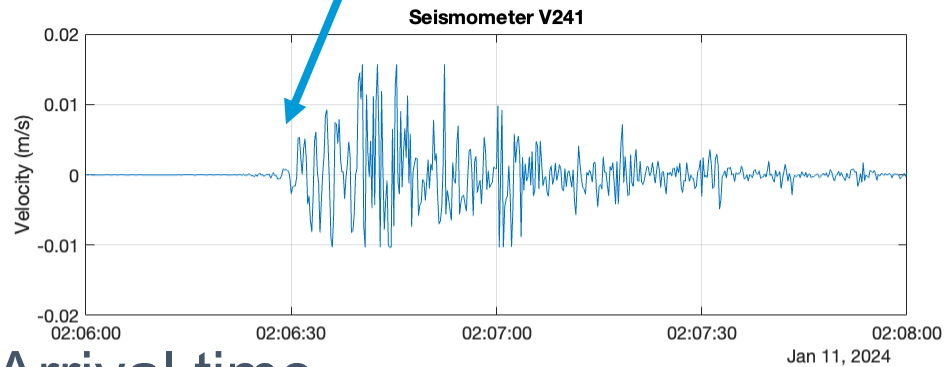


南極白瀨氷河上での
約1年間のペネトレータの位置情報

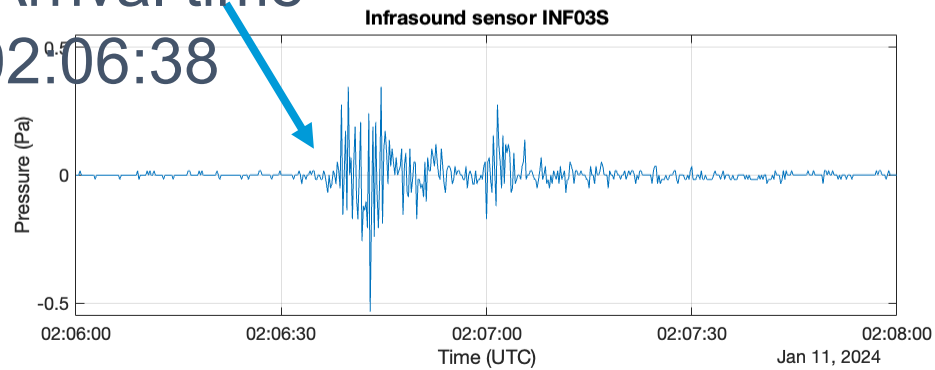
気温、気圧、投下地点からの距離

Seismic and Infrasound waves

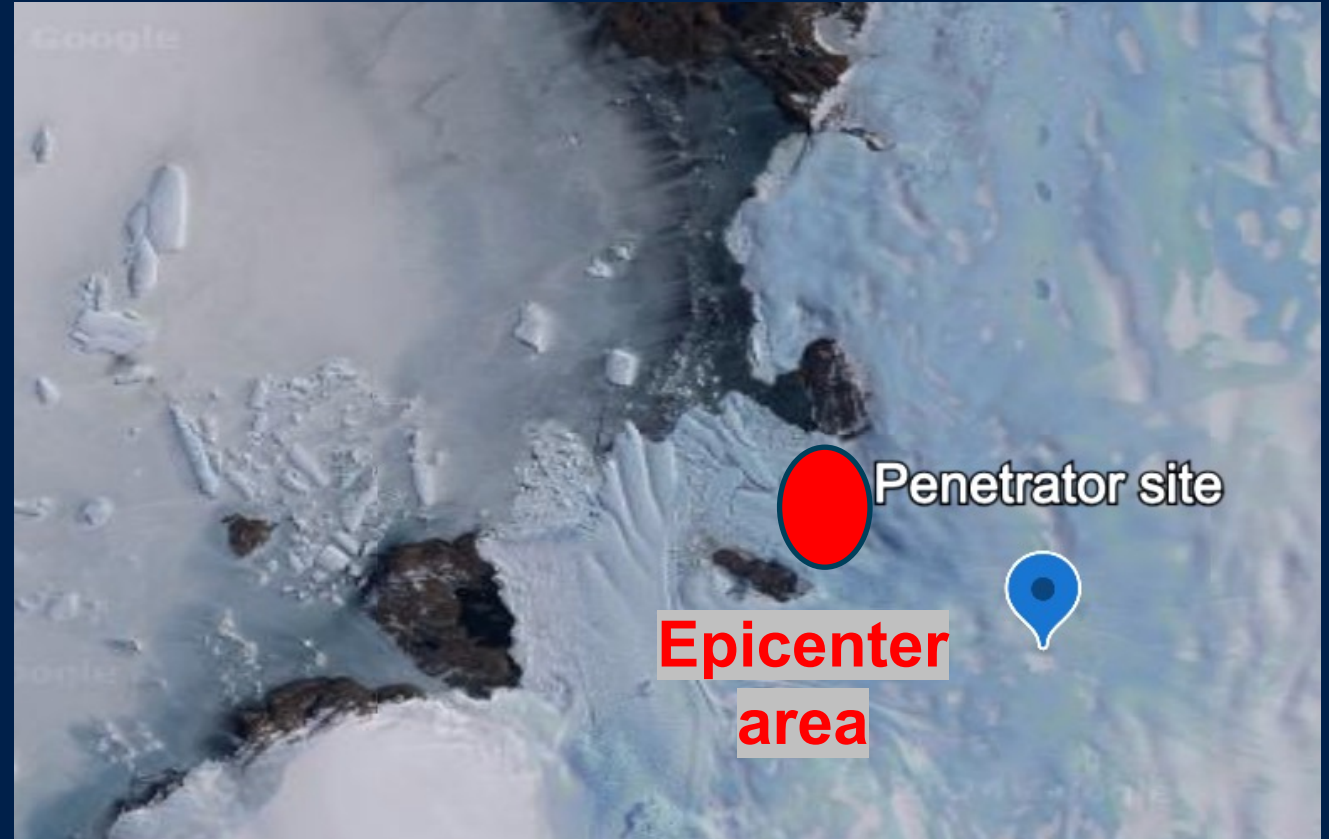
Arrival time
02:06:29



Arrival time
02:06:38

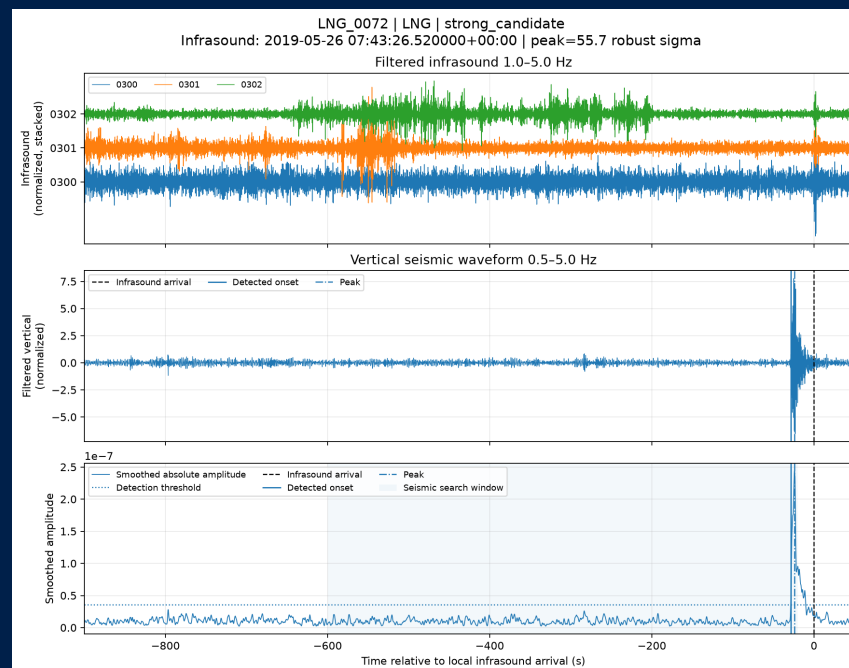
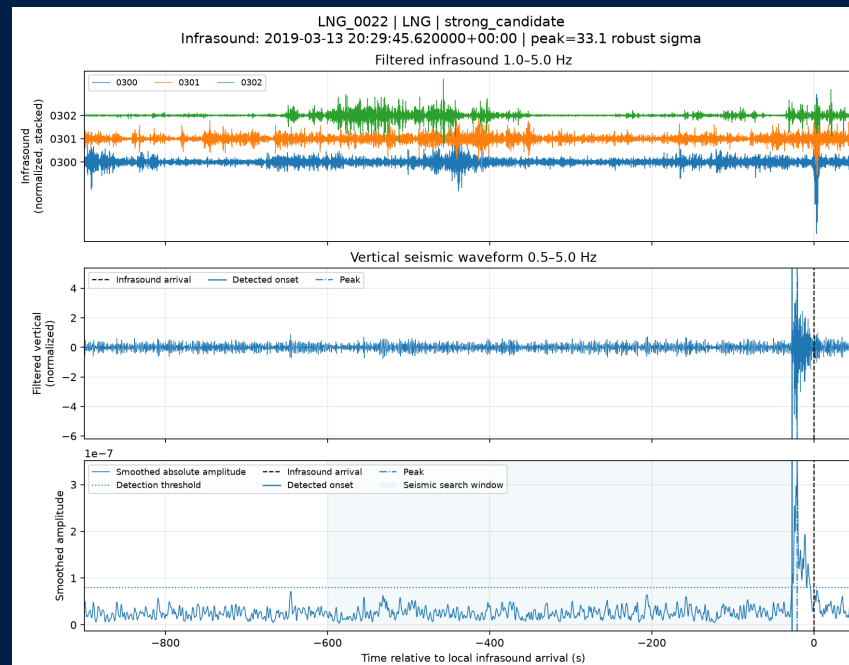
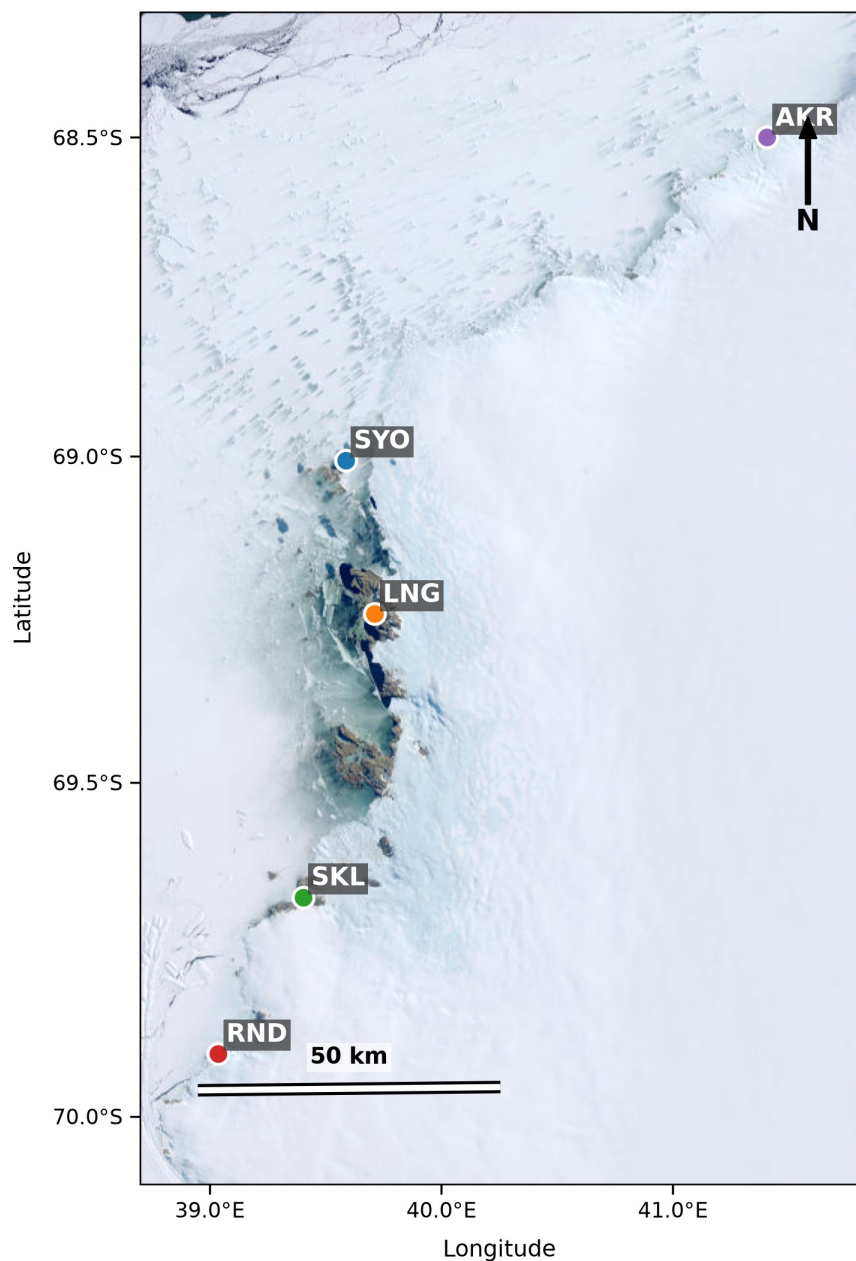


Seismic and Infrasound data
observed by the penetrator.



テーレン氷河上のペネトレータ投下地点と
地震、インフラサウンド観測から予想された震源位置

Lützow-Holm Bay observation network

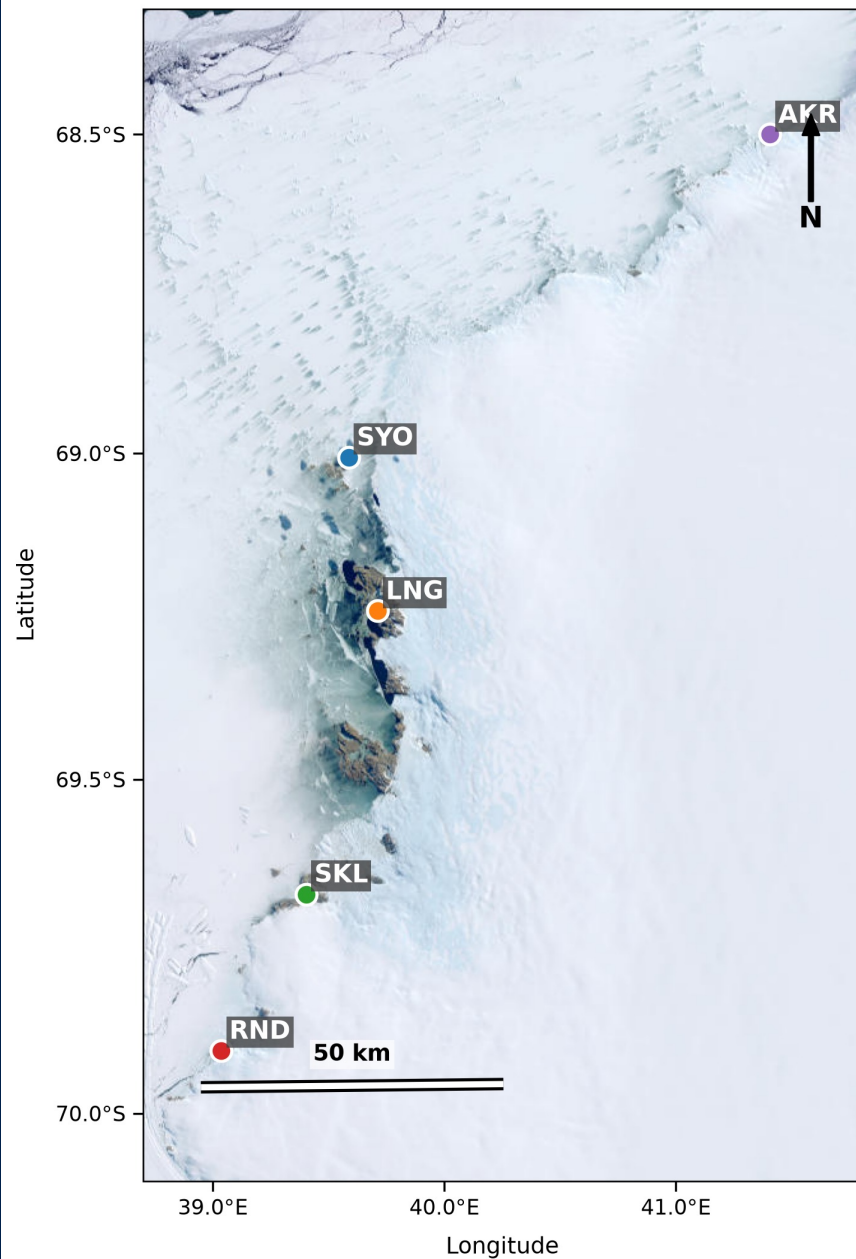


ラングホブデ付近で
数十秒差で
北北西からくる
地震・インフラサウンド
が多く観測される

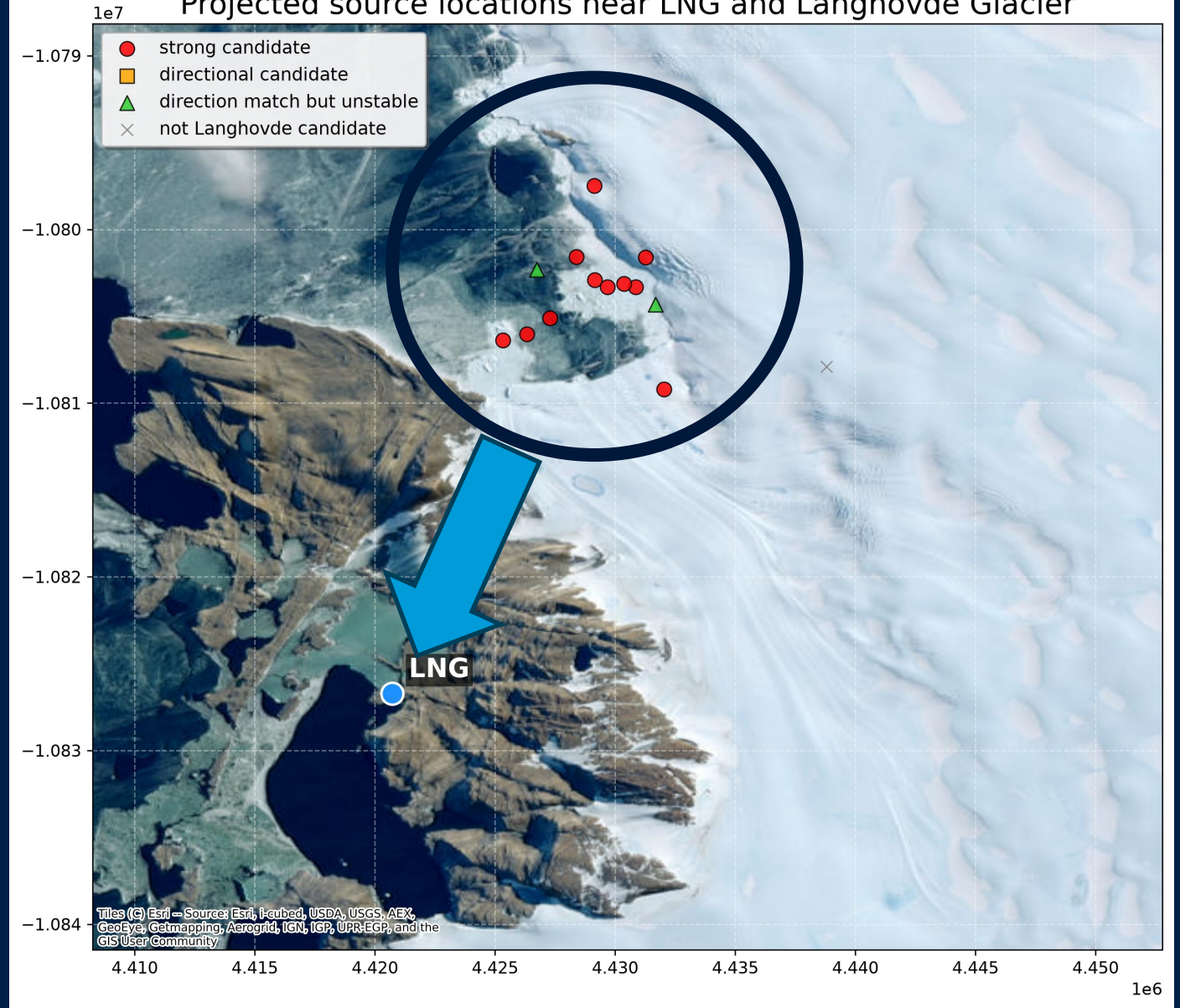


インフラサウンドを励起
する氷震の巣がある

Lützow-Holm Bay observation network



Projected source locations near LNG and Langhovde Glacier

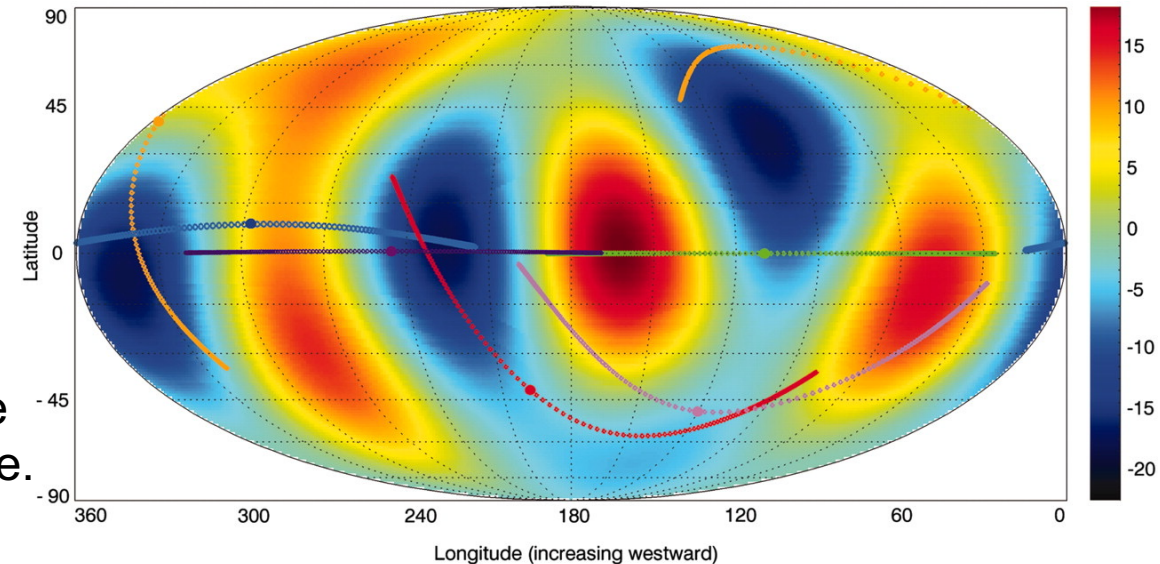


Expected Icequakes on Titan

Tidal stresses vs. Ice-shell strength

- Tidal forcing by Saturn produces global tensile & shear stresses of $\sim 10^4 - 10^5$ Pa
(from Titan's large tidal Love number $k_2 \approx 0.6$; Iess et al., 2012)
- Cold ice (90 - 100 K) behaves as a strong, brittle elastic plate
→ Near-surface bending stress concentrates during tidal flexure.

Bending stress reaches the brittle failure threshold in shallow ice.



Meter-Scale Vertical deformation of Titan's ice shell
(Iess et al., 2012)

This stress balance makes “tidal icequakes” physically plausible analogue to tidally induced icequakes in Antarctica and predicted on Europa/Enceladus (Icy-moons).

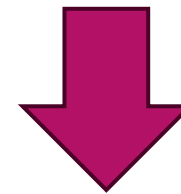
Why Icequakes?

- Icequakes reveal ice-shell stresses, tidal deformation, fracture processes, and shell thickness
- Essential for Titan (Dragonfly mission) and future Icy-moon landers
- Antarctica = Earth analog with long-term continuous icequake activity
- Need an automatic, reproducible data-science pipeline for future icy-moon mission



Illustration of Dragonfly mission concept at Titan.
Launch July 2028
(Johns Hopkins/APL)

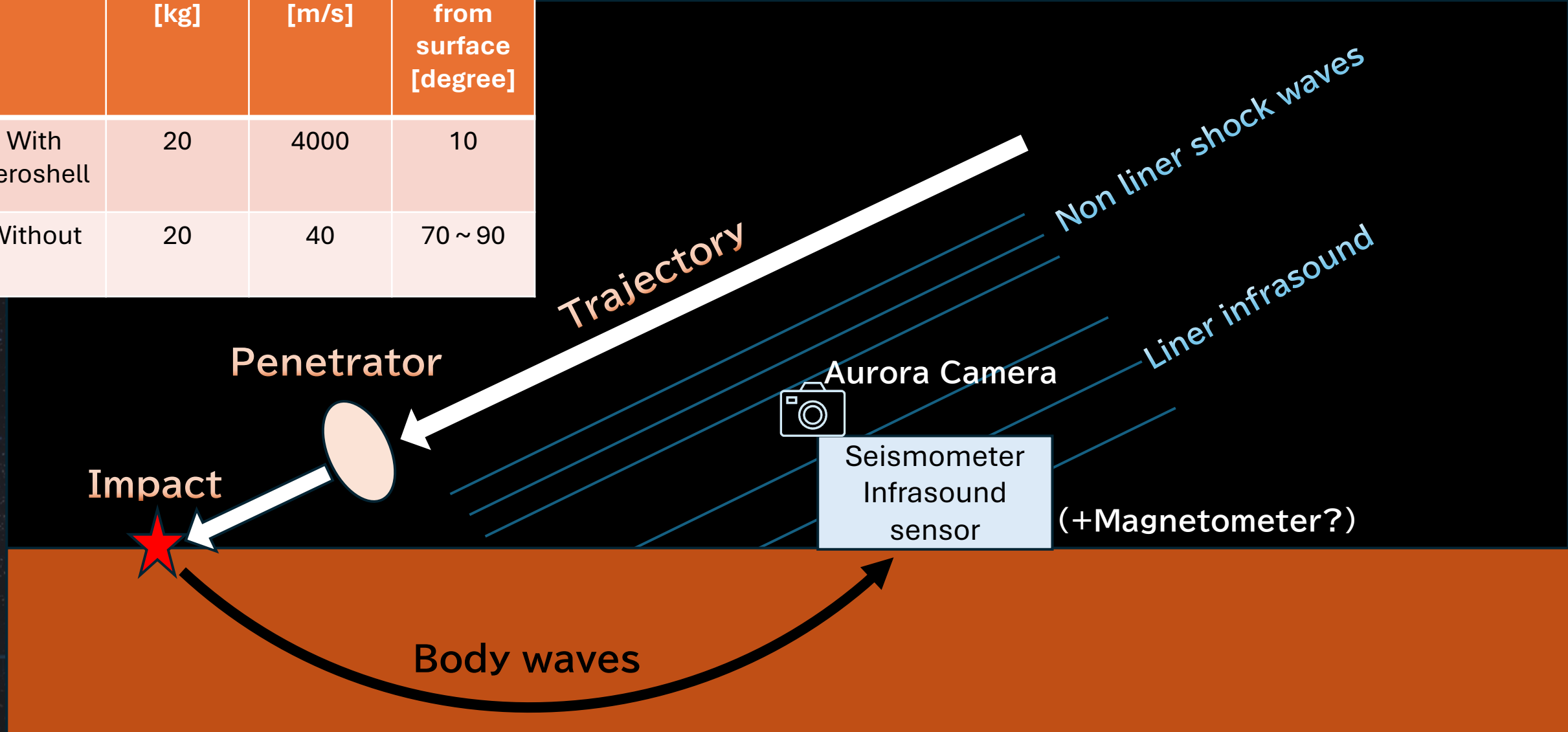
We are designing an automatic icequake detection system on Titan



What kind of “Titanquakes”
should we expect?

Concept: Penetrator as an artificial seismic source

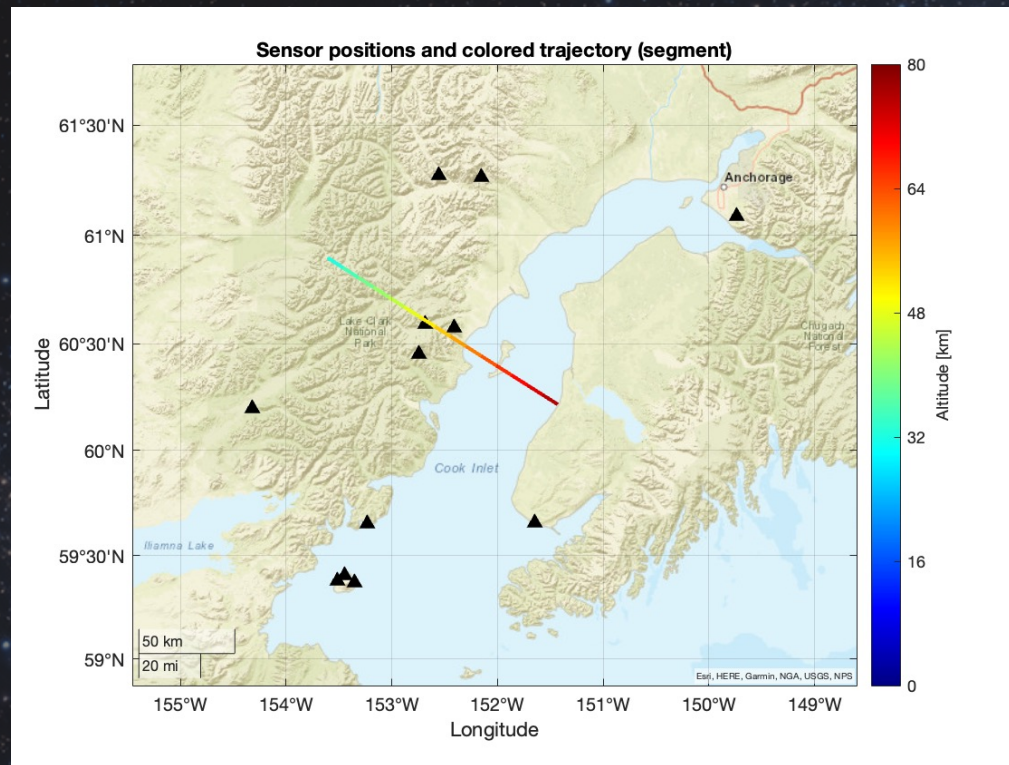
	Mass [kg]	Velocity [m/s]	Angle from surface [degree]
With aeroshell	20	4000	10
Without	20	40	70 ~ 90



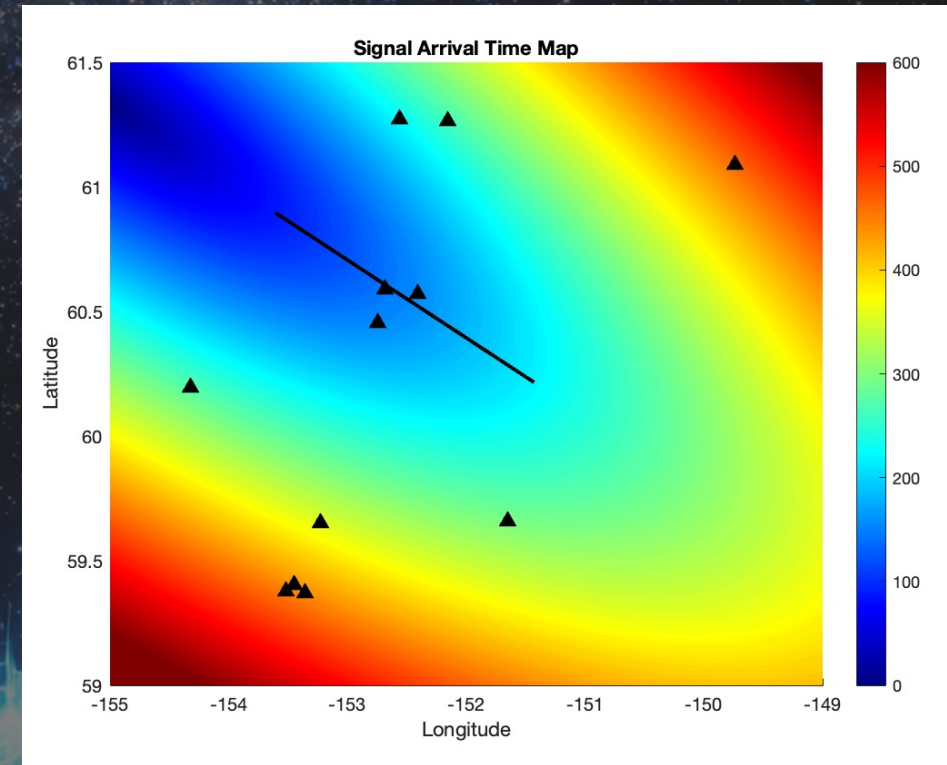
Concept: Penetrator as an artificial seismic source

2025年4月24日、アラスカ上空を火球が通過し、発せられた衝撃波が12箇所に設置されたインフラサウンドセンサーにより観測された。

インフラサウンドの観測から、大気の構造や隕石の軌道を逆算することができる。

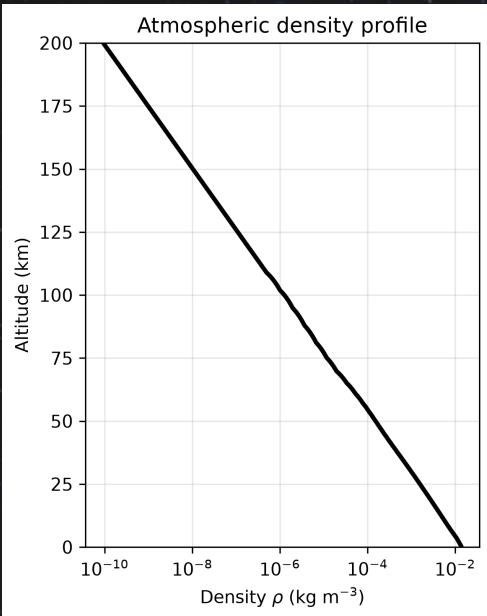


隕石からのインフラサウンドが観測されたインフラサウンドセンサーの場所と、観測結果から推測された隕石の軌道。



観測結果から推測された隕石の軌道と衝撃波面の到達時刻の差分。

Concept: Penetrator as an artificial seismic source



Drag

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2$$

$$\beta = m / (C_D A)$$

$\beta \downarrow \rightarrow$ stronger deceleration

ρ : 大気密度 C_D : 抗力係数 A : 代表面積
 v : 速度 m : 質量 β : 弾道係数

Aeroshell

$v \approx 40 \text{ m/s}$

large A

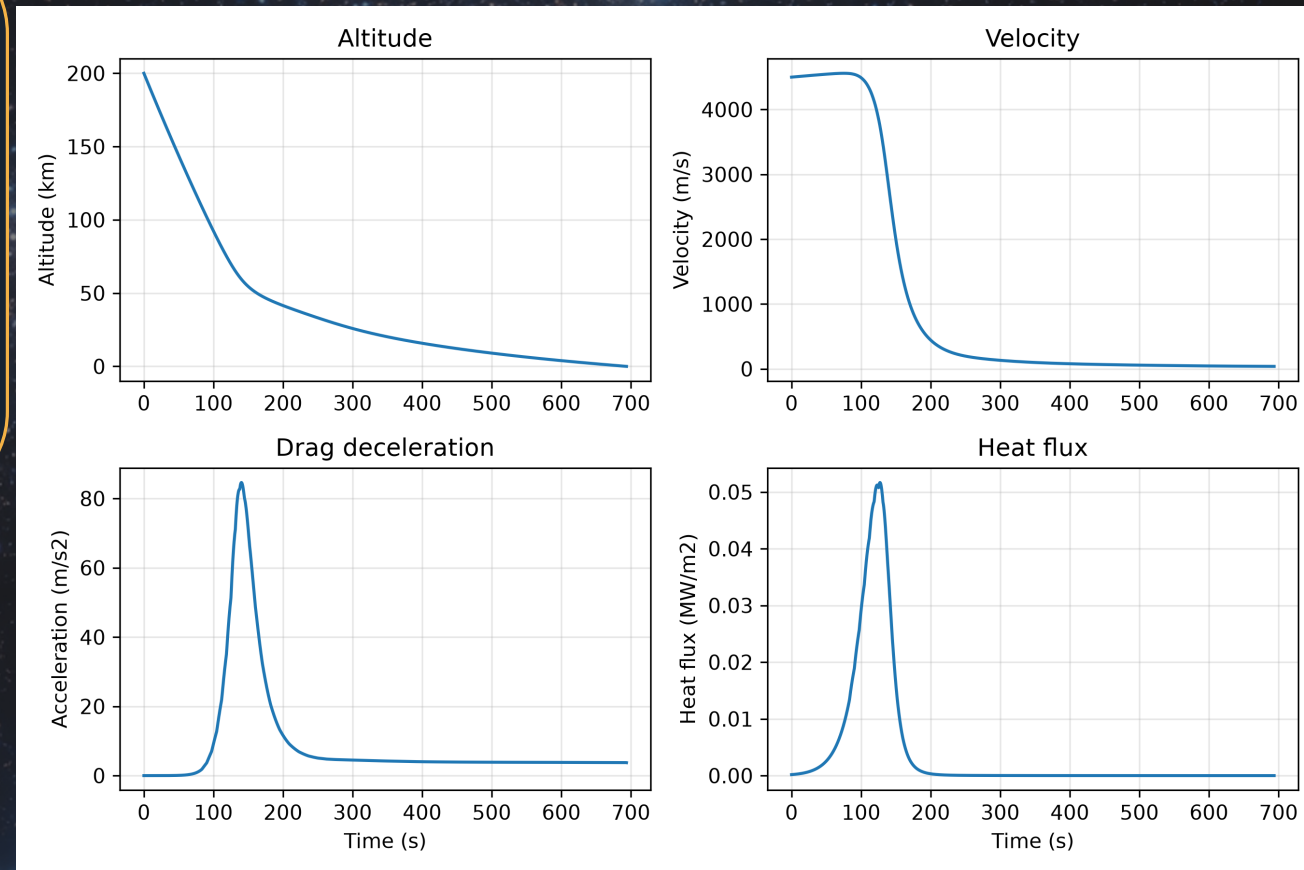
β small

No aeroshell

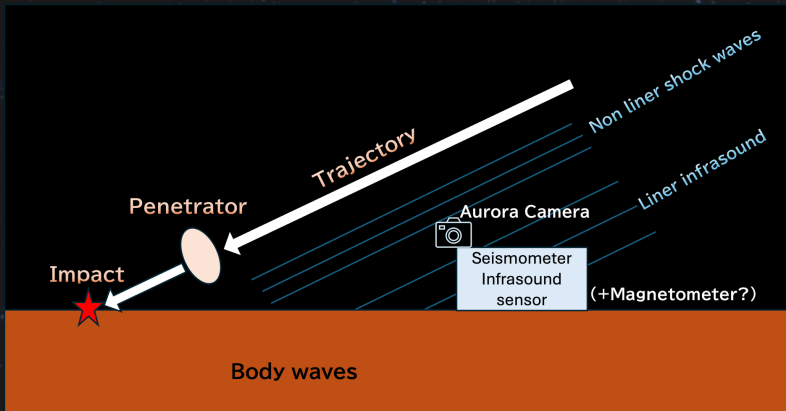
$\approx 4 \text{ km/s}$

small A

β large



Concept: Penetrator as an artificial seismic source



Impact energy

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Seismic efficiency

$$E_s = k_s E$$

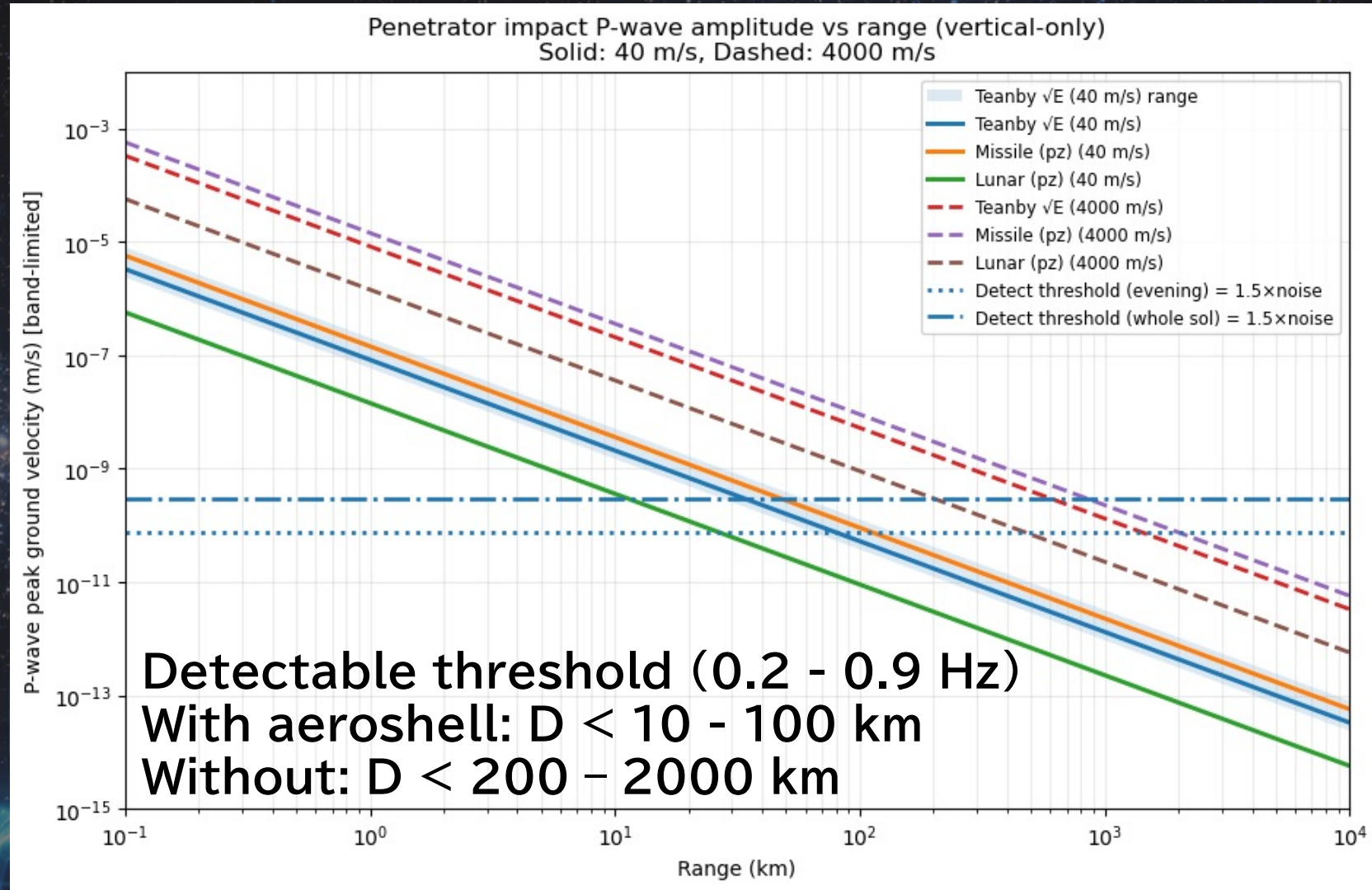
m: 質量 v: 衝突速度 E: 衝突運動エネルギー
 Es: 地震波エネルギー ks: seismic efficiency
 (地震波への変換効率)

Mars small-impact simulations

$$k_s \sim 10^{-6}$$

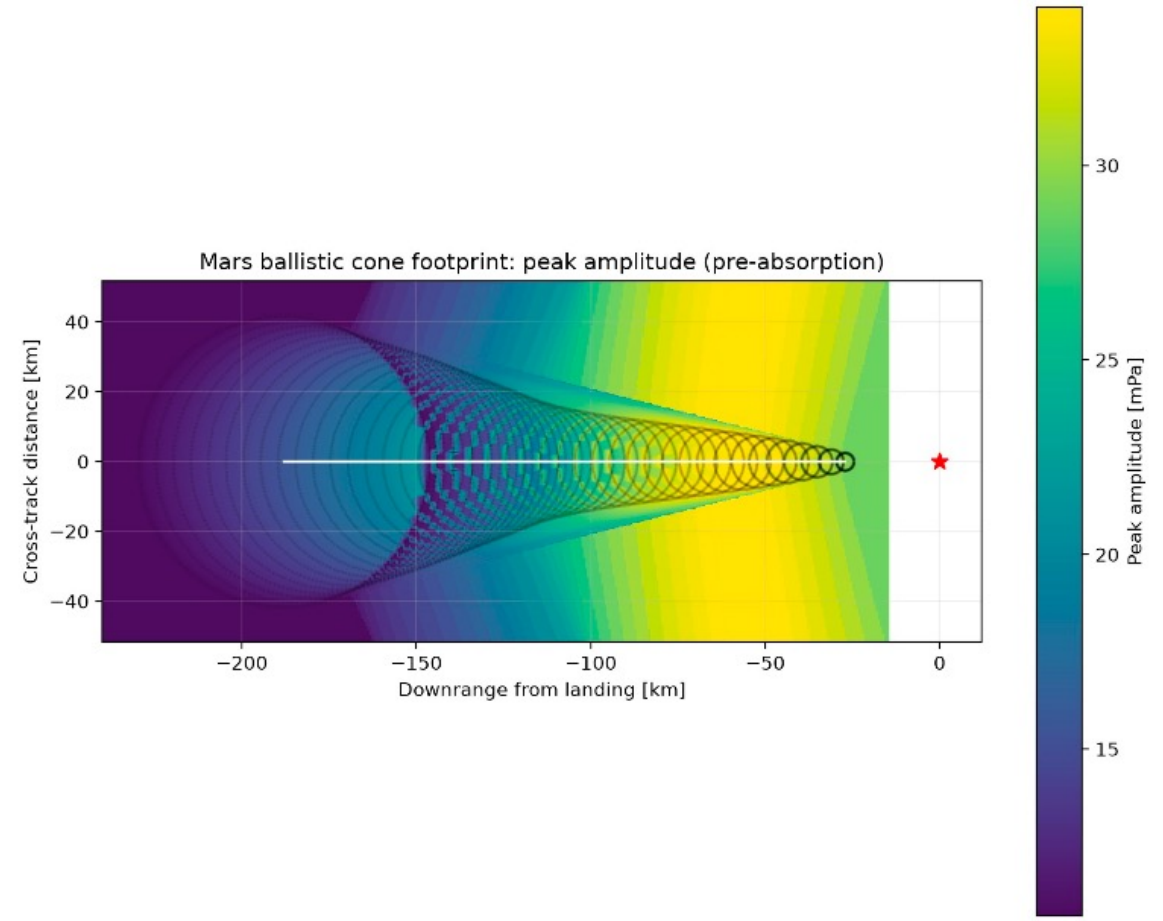
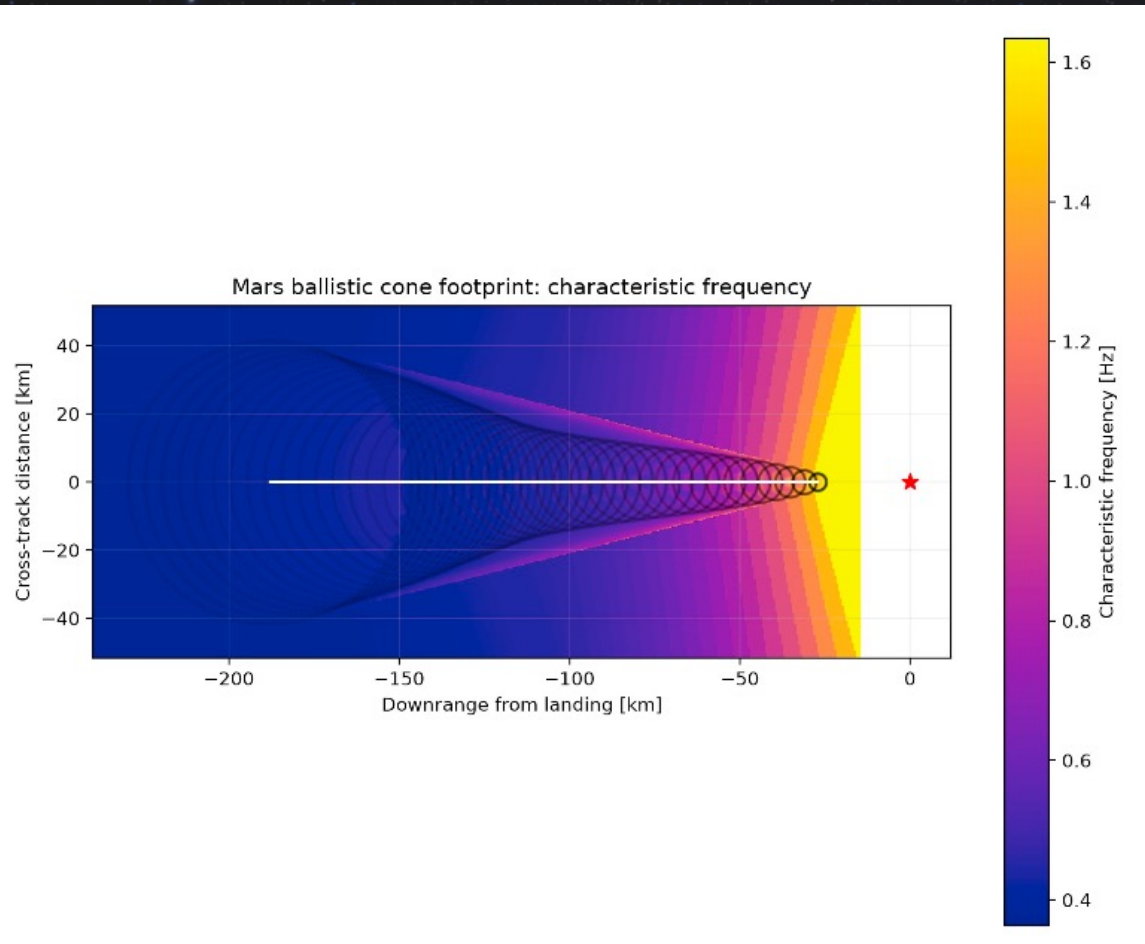
強い target / geometry 依存
 → detectability はモデル依存

Wójcicka et al. (2020), Fernando et al. (2022)



ペネトレータ衝突によって励起されるP波の振幅と伝播距離の概算。
 破線はエアロシェルなし、実線はエアロシェルありの場合。

Concept: Penetrator as an artificial seismic source



火星表面で観測されるエアロシェルつきペネトレータが大気圏突入時に発生させるインフラサウンドの代表周期(左)と最大振幅(右)

惑星の「声」を聴く

- 1 地震波から惑星内部を見る
Apollo → InSight → 次世代探査
- 2 「揺れ」だけでなく「音」も測る
Seismic + Infrasound
- 3 観測できる場所から観測したい場所へ
Antarctica → Mars/Titan

惑星の「揺れ」と「音」から、
その内部と活動を探る

