

超音波計測に基づく花崗岩中の表面波伝播特性に関する研究

木本 和志・岡野 蒼(岡山大・環境生命科学) 斎藤 隆泰(群馬大・理工学府)

佐藤 忠信(神戸学院大・現代社会学部)

松井 裕哉(日本原子力研究開発機構・幌延深地層研究センター)

キーワード: 不均質材, 弹性波, 多重散乱, 花崗岩, 超音波, 波数ベクトル

1. 背景

- 建設、資源、地球科学分野で対象とする多くの材料は強い不均質性を示す。
(例えは: 岩盤、地盤、土壤、地殻、岩石コア等)
- 物性や形状の不規則性、異方性により、弹性波は多重散乱を起こす。
- 不均質性の強い媒体に対する弹性波探査やモニタリングでは、多重散乱メカニズムを理解することが重要。
- 多重散乱の強度と進行は波面(位相)の空間的な乱れによく反映される。

2. 目的

- ① 花崗岩供試体中を伝播する表面波を計測して可視化し、多重散乱が波動伝播に与える影響を調べること。
- ② 位相構造の乱れを局所波数ベクトルとして定量化し、その確率的な特性を調べること。

3. 研究方法

岩石供試体を使った超音波計測(→4節)

時間波形: $a(x, y, t)$ $t > 0$, $(x, y) \in \mathcal{R}$ (計測領域)

供試体表面振場の可視化(→5.1節)

$$A(x, y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a(x, y, t) e^{i\omega t} dt$$

周波数スペクトル

位相の空間分布を取得(→5.2節)

$$\phi(x, y, \omega) = \arg \{ A(x, y, \omega) \}$$

位相スペクトル

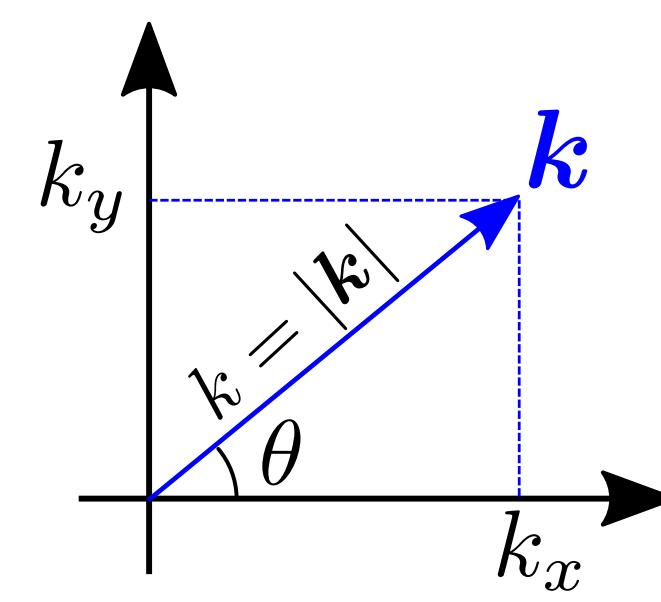
局所波数ベクトルの推定(→5.3節)

$$\mathbf{k} = (k_x, k_y) = 2\pi \nabla_x \phi(x, y, \omega)$$

波数ベクトルの確率密度分布を算出(→5.3節)

$$\text{Prob}[\mathbf{k}](\omega), \text{Prob}[\theta](\omega)$$

分散性と配向性(直進性)の評価(→5.4節)



4. 実験方法

4.1. 供試体

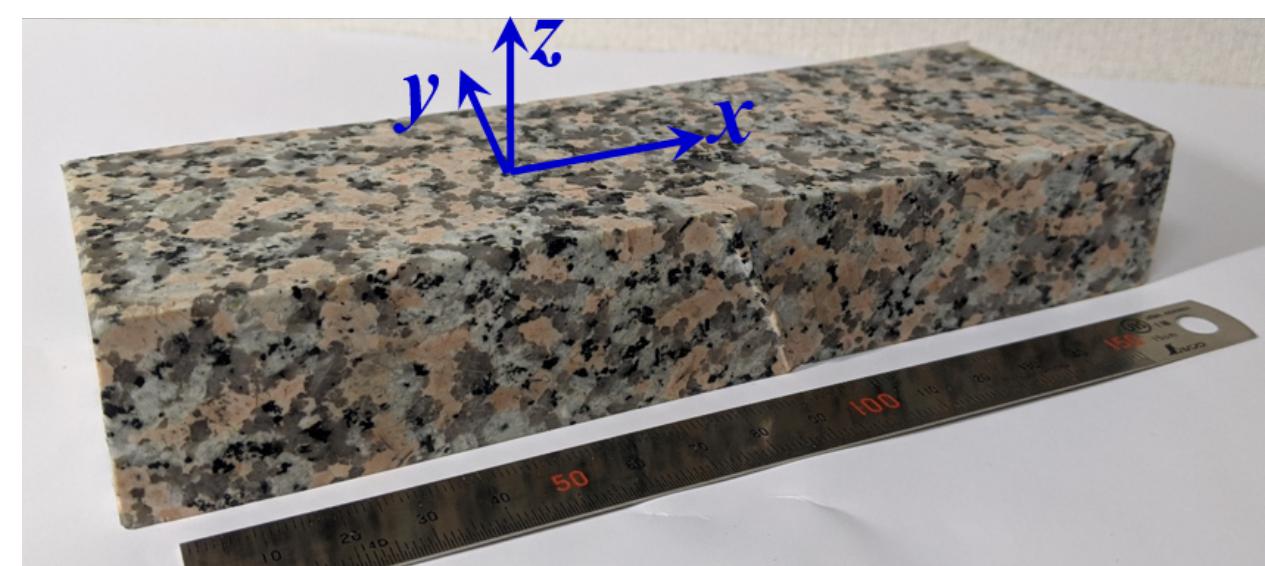


図1: 超音波計測のための花崗岩供試体

- 試料: 万成花崗岩
- 主要造岩鉱物:
カリ長石、長石、雲母、石英
- 鉱物粒径: 数mm~1cm
- 風化や割れは無し

4.2. 計測位置

供試体上面に圧電トランステューサを設置して超音波(表面波)を励起。

20mm×40mmの矩形領域で超音波波形を計測。

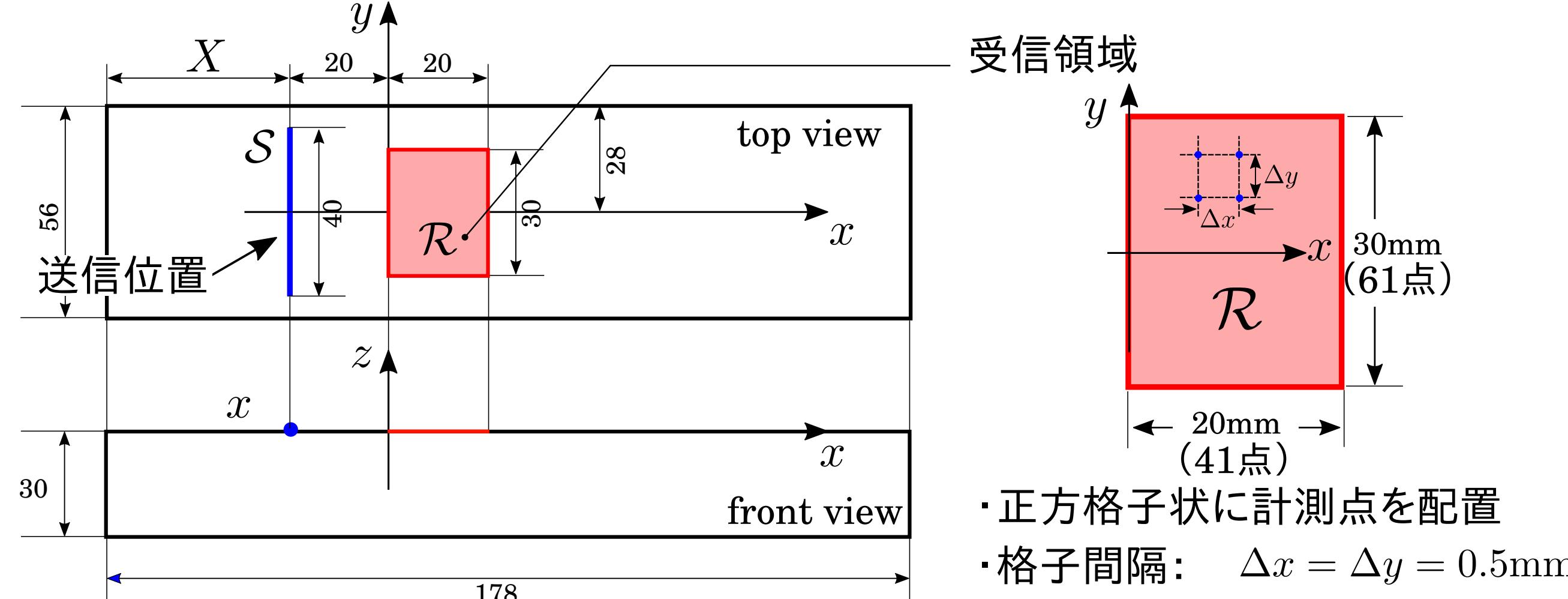


図2: 供試体寸法と超音波の送受信位置

4.3. 超音波計測(装置、計測条件)

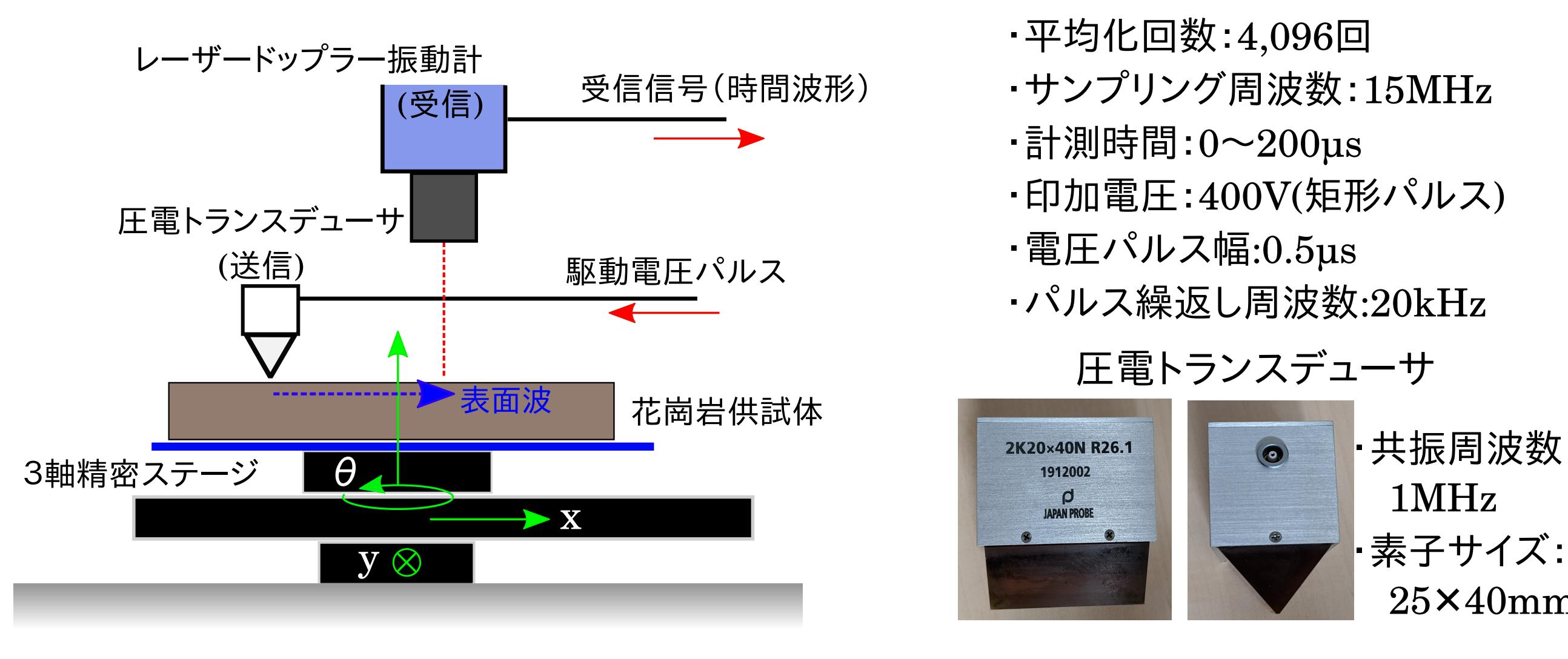


図3: 超音波計測装置の構成

5. 計測結果

5.1. 表面振動

計測波形 $a(x, y, t)$ から領域 \mathcal{R} における振動速度分布を可視化。

概ね x 軸方向に表面波が透過。振幅は空間的に不規則に変動。

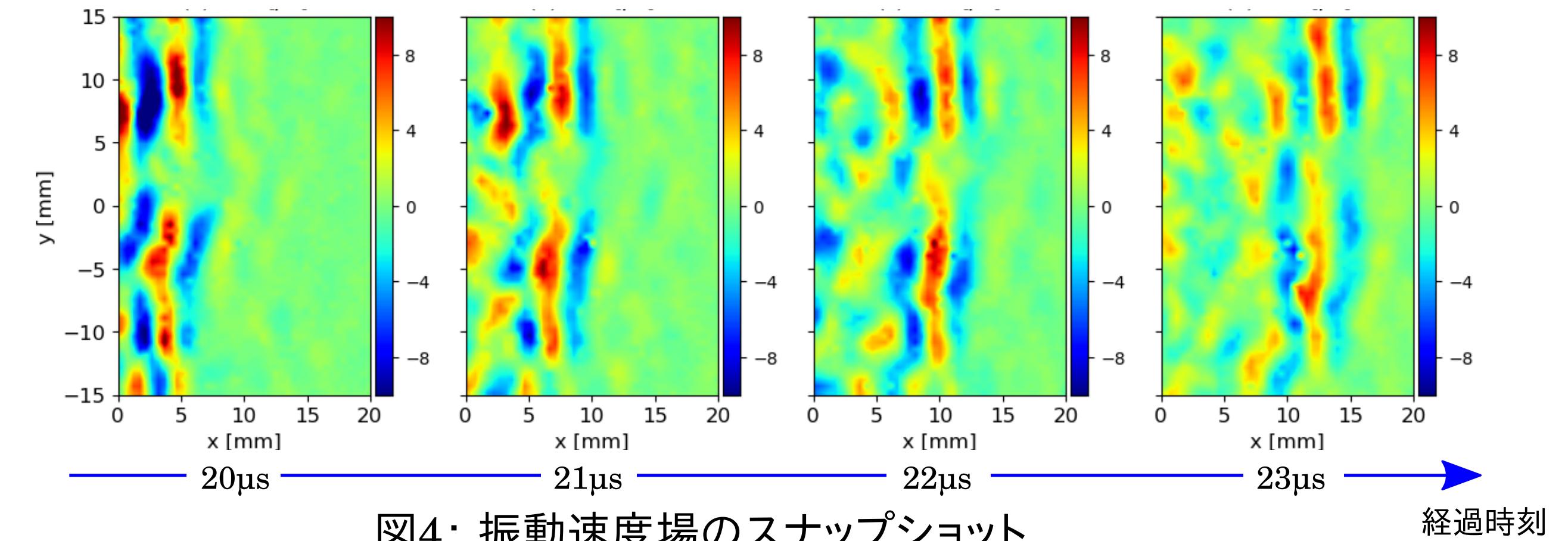


図4: 振動速度場のスナップショット

経過時刻

5.2. 位相の空間分布

フーリエ変換により位相の空間分布 $\phi(x, y, \omega)$ を周波数毎に計算。

低周波数域では、 y 軸方向に伸びる波面が観察される。

高周波数域では、位相分布の規則性がほとんど消失している。

周波数に依らず、波面は屈曲している。

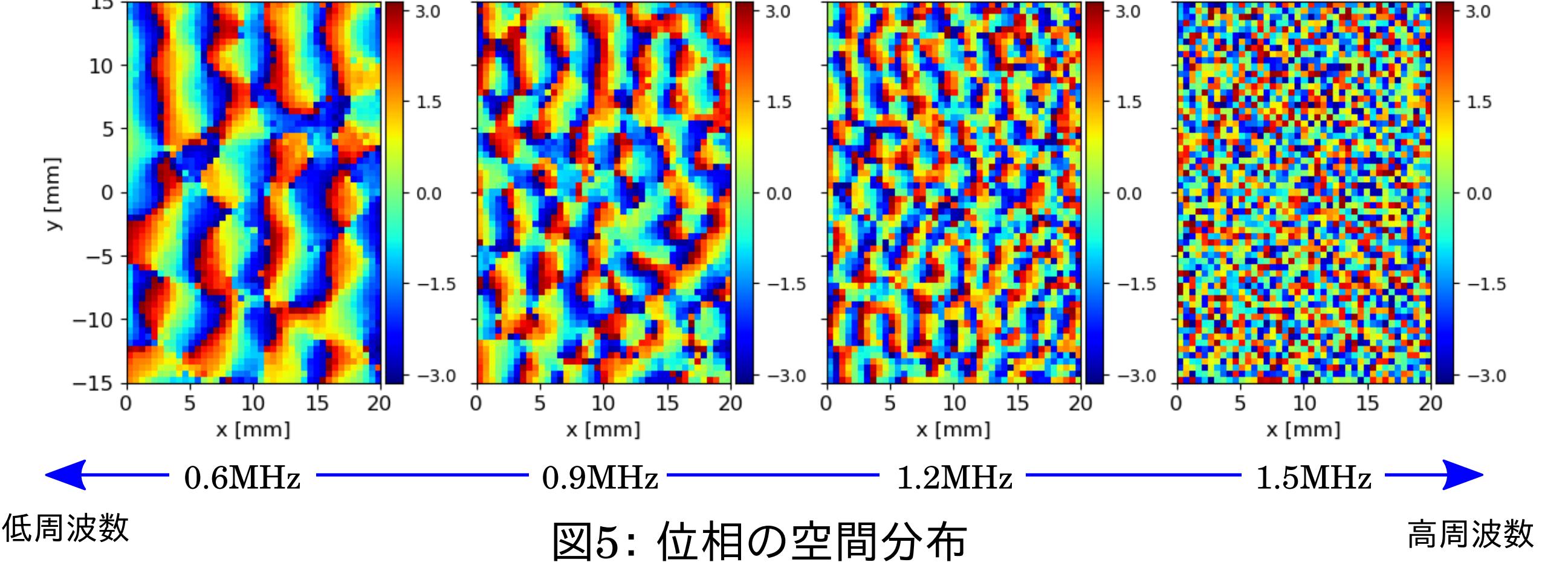


図5: 位相の空間分布

高周波数

5.3. 波数ベクトルの確率密度

位相の勾配から波数ベクトルを算出。

波数ベクトルの分布を確率密度 $\text{Prob}[\mathbf{k}](\omega)$, $\text{Prob}[\theta](\omega)$ として表示。

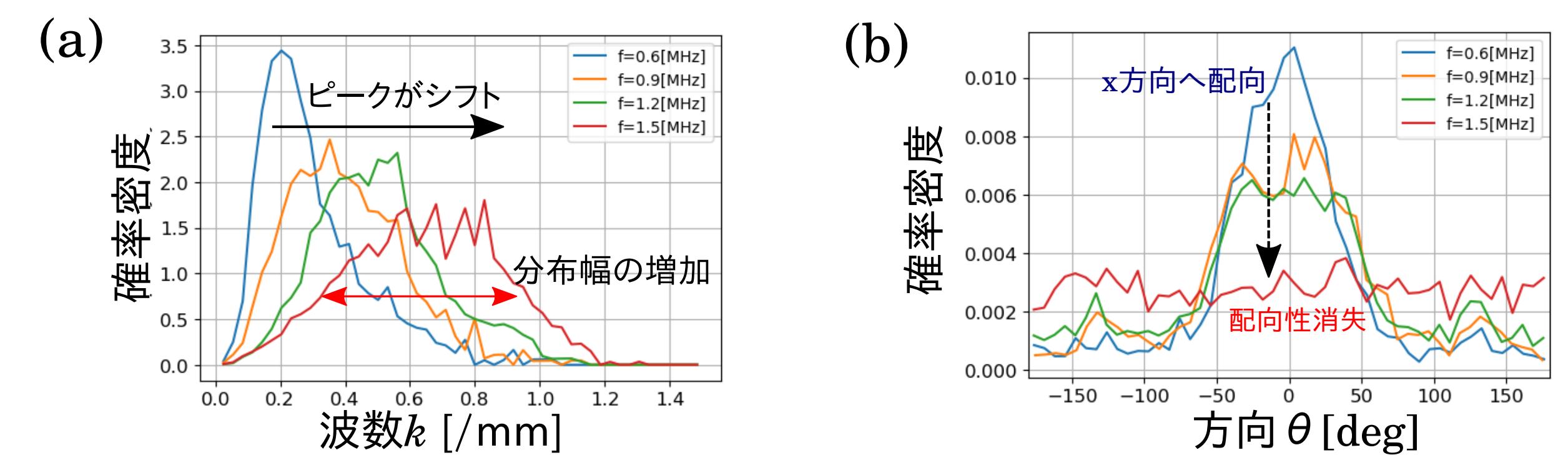


図6: 波数ベクトルの確率密度分布 (a)大きさ, (b)方向。

(a)

3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0

波数 k [1/mm]

0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4

0.6MHz 0.9MHz 1.2MHz 1.5MHz

ビーグがシフト
分布幅の増加

(b)

0.010
0.008
0.006
0.004
0.002
0.000

方向 θ [deg]

-150 -100 -50 0 50 100 150

0.6MHz 0.9MHz 1.2MHz 1.5MHz

配向性消失

(a)

Prob[k](ω) 確率密度

平均 \pm 標準偏差

0.000 0.025 0.050 0.075 0.100 0.125 0.150 0.175

波数 k [1/mm]

0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75

I II III

平均 \pm 標準偏差

(b)

Prob[θ](ω) 確率密度

平均 \pm 標準偏差

0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14

方向 θ [deg]

0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75

I II III

平均 \pm 標準偏差

5.4. 考察

- 高周波数域側で、波数の分布幅が広がる ← 鉱物粒の音響物性変化に反応
- 高周波数域側では配向性が次第に失われる ← 散乱・屈折による経路の屈曲

遷移帯域が存在(図7、周波数帯域II):

- 進行波成分は存在するが多重散乱の影響を強く受ける
- 平均波数-周波数関係の勾配 $\frac{dk}{d\omega}$ が相対的に大きい → 群速度の低下
- 配向性の急激な低下

6.まとめと課題

- 局所波数ベクトルの周波数に依存した統計的性質を実験によって調べた。
- 波動場の構造(規則性)は、遷移周波数帯域を経て高周波側で消失する。
- 遷移周波数帯域と媒体の物性値の関係を調べること、波数ベクトルの統計的性質を踏まえた波形合成法を開発することが今後の課題。