



水中画像化ソナー用 音響レンズについて

艦艇装備研究所 探知技術研究部 探知機器研究室
(現:海洋信号処理研究室)

防衛技官 奥山 智尚

1. 研究の背景
2. 音響レンズ系設計における課題
3. 音場の数値計算精度の向上
4. 音響レンズが形成する音場の検証
5. まとめ

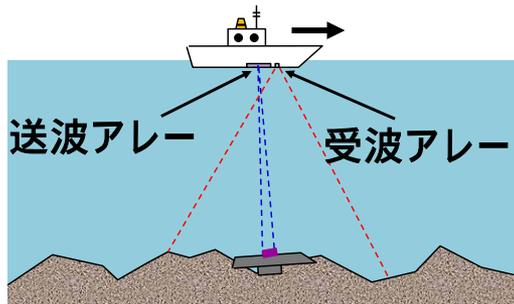
音響による水中の画像化

水中での光学カメラの見通し距離は数十mが限界

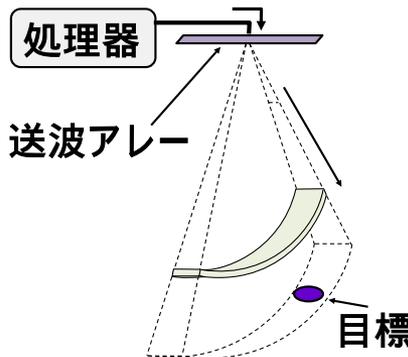
→ より遠くの画像は音響的に得る必要あり(例: マルチビーム測深儀)

クロスファンビーム法

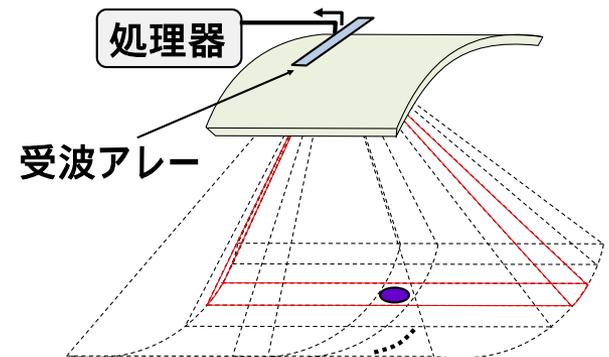
船底に送波アレーと受波アレーを設置



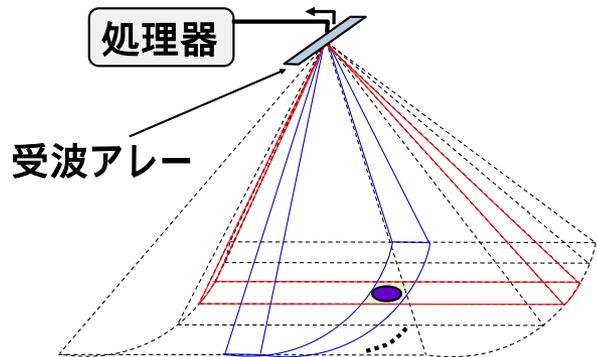
縦に狭い扇状のビームを送波



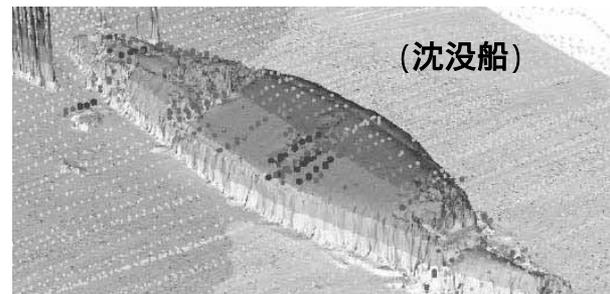
横に狭い複数のビームを用意し、エコーを待ち受け受波



縦横の組合せで位置を特定



定速移動で送受波を繰り返し画像を得る



出典: Lawrence et al, "GEOPHYSICAL TECHNIQUES FOR MARITIME ARCHAEOLOGICAL SURVEYS" 17th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems

画像化ソナーへの音響レンズの適用

クロスファンビーム法はアレーの信号処理により、送受波ビームを電子的走査していた ➡ 電子回路と処理量が問題



ビームの電子的走査に代わり、音響レンズを適用

水と音速が異なる物質をレンズ状に作ることで、光と同様に音が収束する

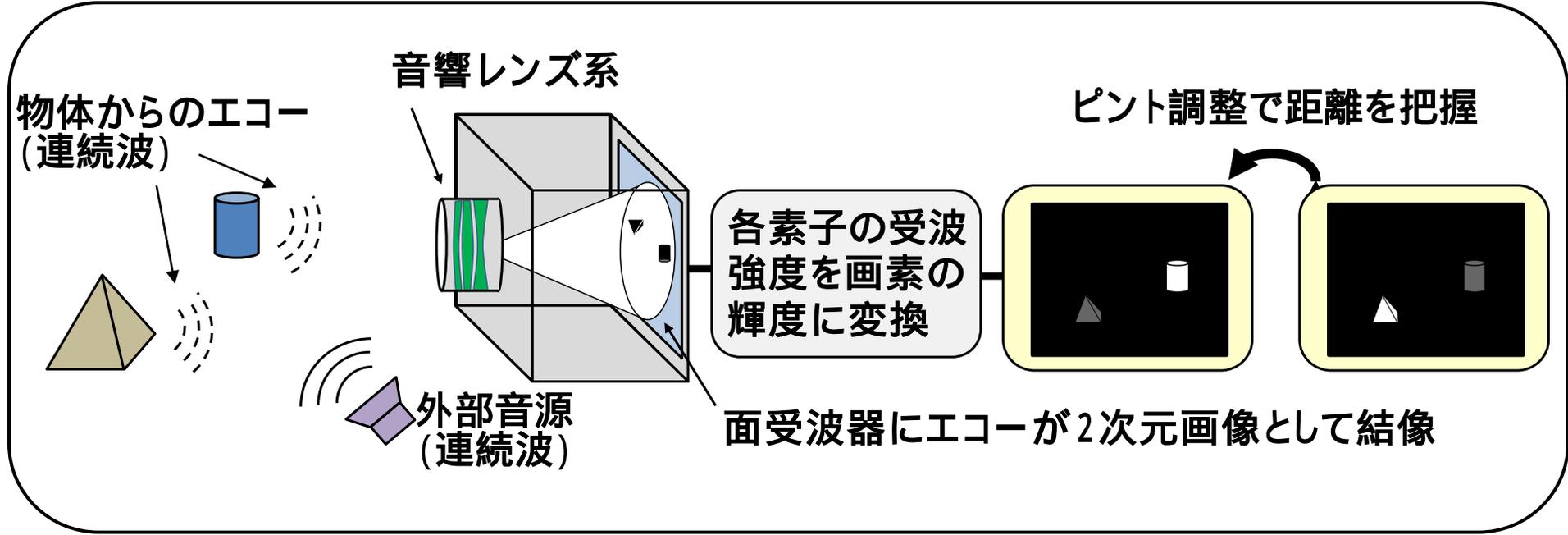
音波

水より音速小

音響レンズによって、目標からのエコーが面受波器内に像を結び、その位置にある素子が受信

面受波器

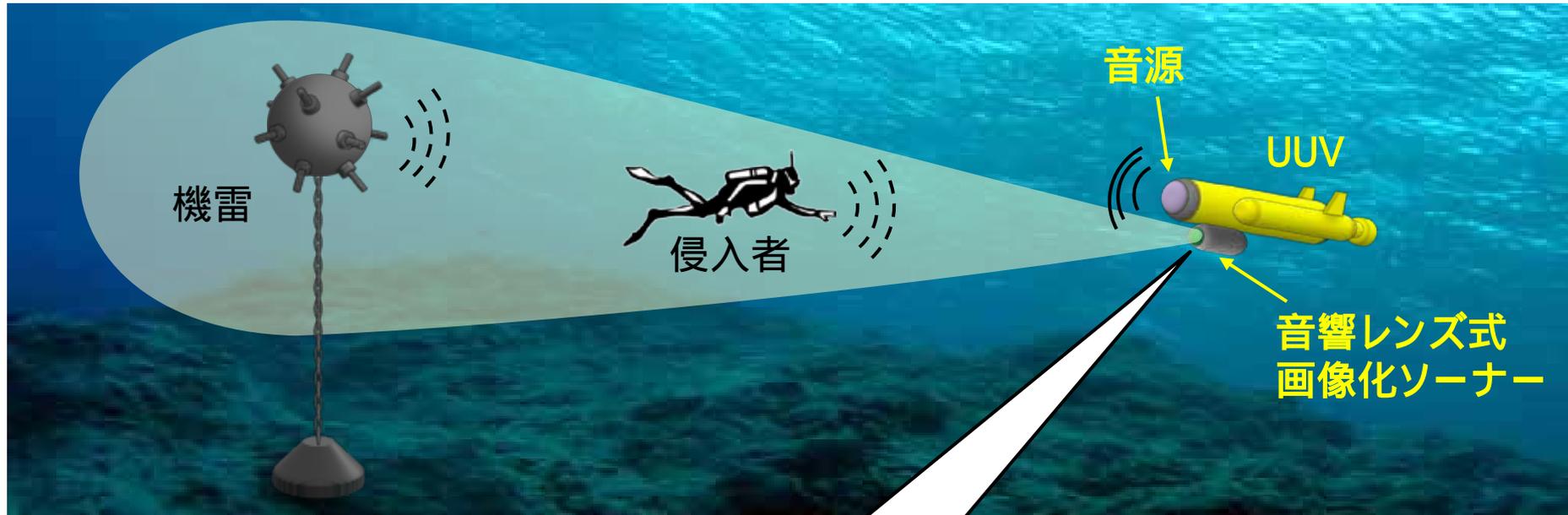
音響レンズ



- ▶ 人間の視覚に近い**正面図**を得る
 - ▶ 断続的なパルス波に代わり、**連続波**が使用可能
 - ▶ 画像化に必要な**処理量**を大幅に削減
- } フレームレート
の高速化

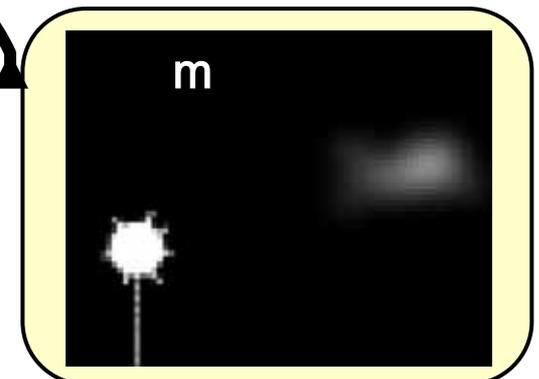
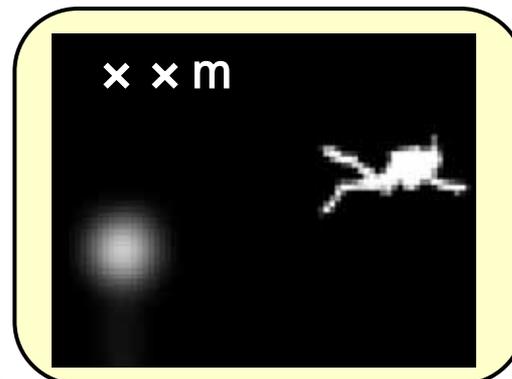
音響レンズ式画像化ソナーの応用例

音響レンズ式画像化ソナーのUUVへの搭載



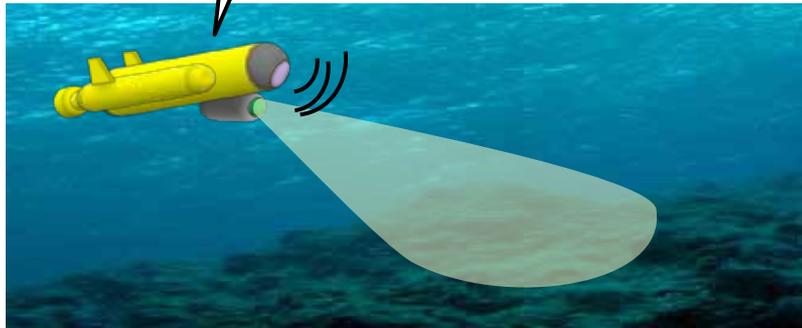
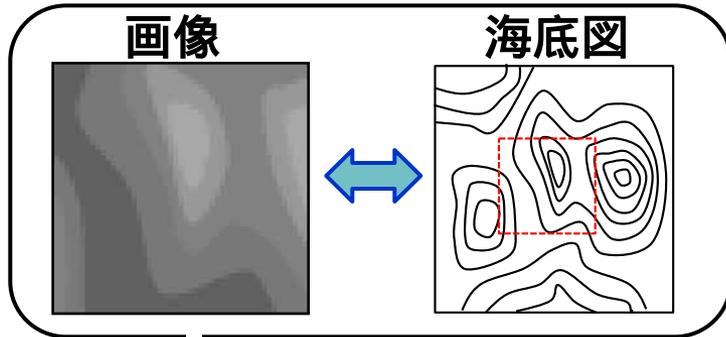
ピント調整で距離を把握

侵入者や機雷等を
発見・類別



UUV用の地形照合

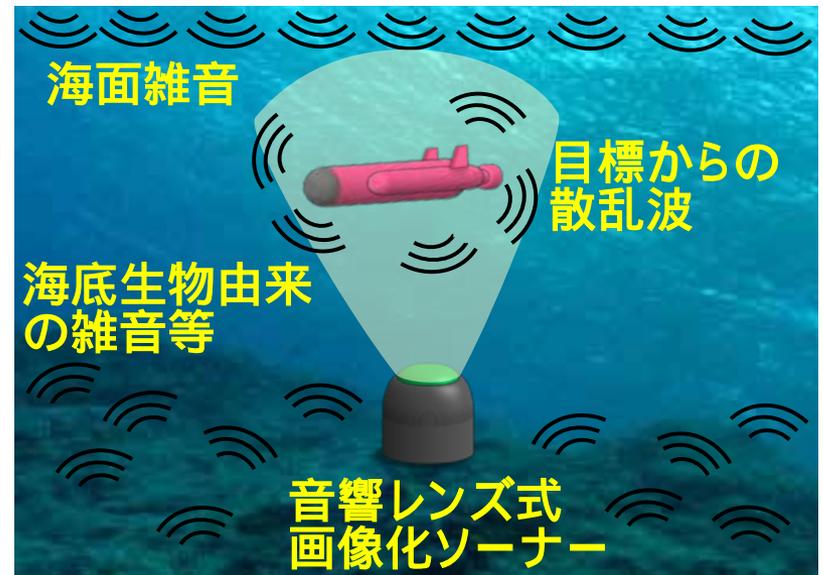
画像をデータ化した海底図と照合し、自分の位置を把握



画像の全領域が同時に得られるため、UUVの運動の自由度が増す

周囲雑音を用いた目標探知

周囲雑音による目標からの散乱波を音響レンズで捉える



低騒音の移動目標に対し、秘匿性を保持したままの探知が可能

音響レンズ系設計の流れ

画像化ソナーが必要とするレンズ系の性能(分解能・収差等)および制約条件(重量・寸法等)を設定

レンズ系の初期案の構造を決定

入射音波に対してレンズ系が形成する音場を計算

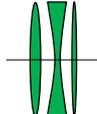
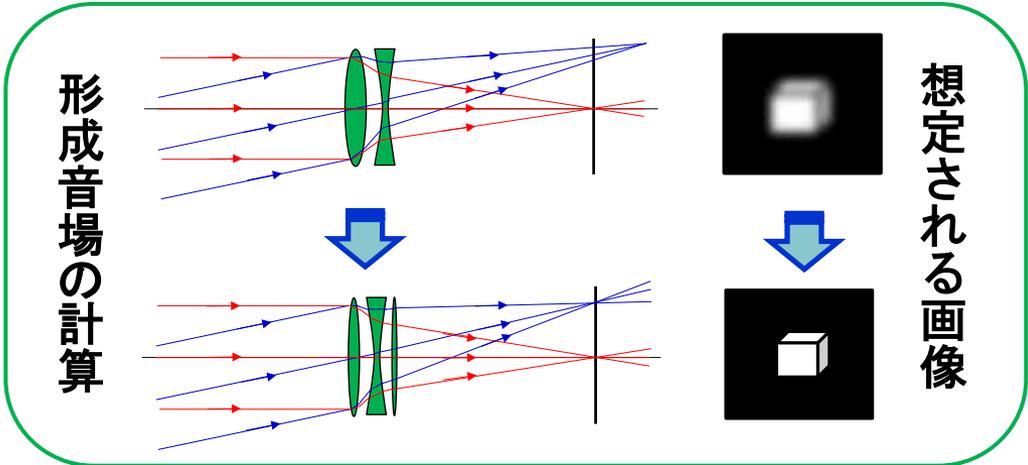
必要とする性能および制約条件を満たすか?

レンズ系の構造を修正

No

Yes

最終案として採用

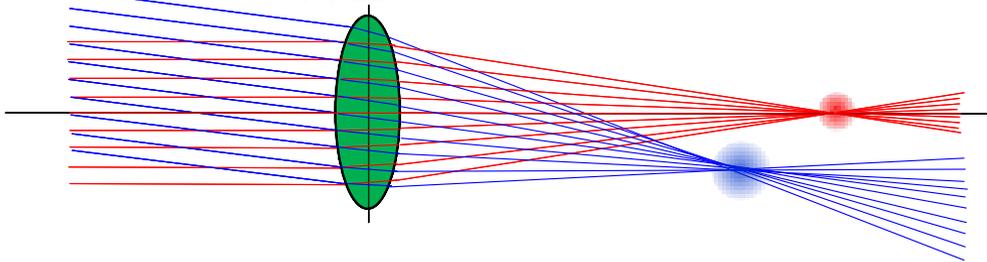
レンズ系が形成する音場を正確に計算する必要がある

幾何光学近似法の問題点

波の伝搬や屈折が音線で表せる幾何光学近似法は計算が比較的容易である一方、**波動性を無視**しているため、波長が長い(低周波)ほど誤差が増大する

〔画像化ソナーで使用する帯域の音波の波長は可視光線の**数万～数十万倍**だが、光学レンズの寸法とは大差がない〕

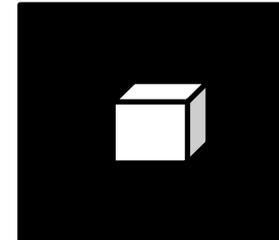
音響レンズ



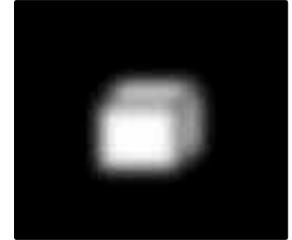
(収差がない場合)

- ・幾何光学近似法では焦点は完全な点
- ・実際は波動性により、焦点はある程度の広がりを持つ

計算結果



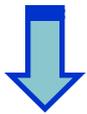
実際の画像



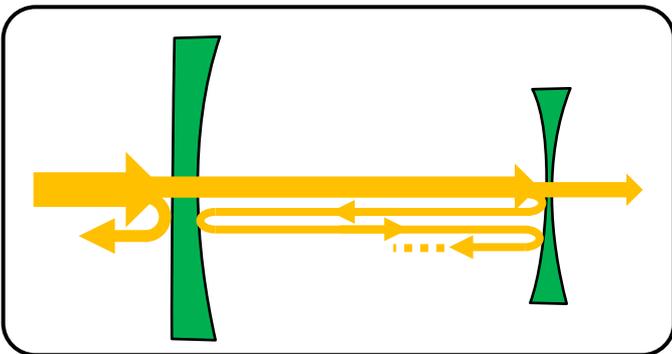
幾何光学近似法では要求が満たされない可能性がある

波動性を考慮する必要がある

PE法は波動性を考慮した
計算法の一種だが、後退
波の影響が扱えない

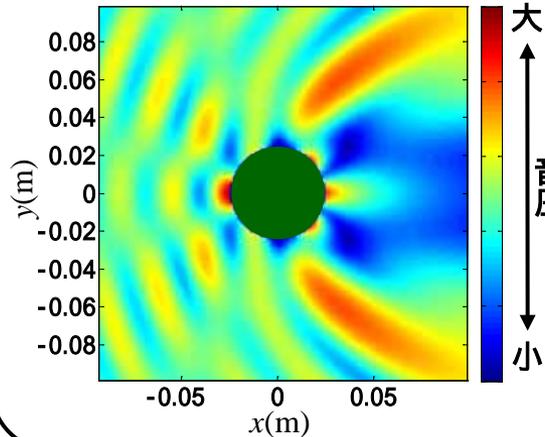


複数枚の**レンズ**間で起こ
る**多重反射**の影響を計算
できない



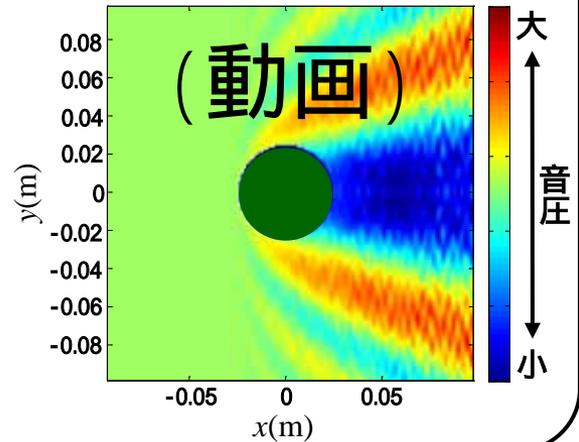
円柱に平面波が垂直入射した際の音場
(解析的な理論解が得られている)

解析的理論解

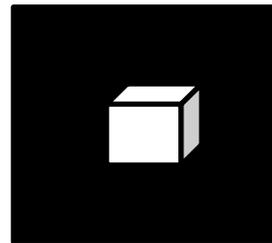


PE法

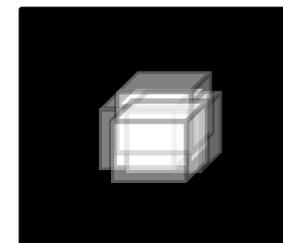
(動画)



計算結果



実際の画像



ゴーストが
発生

PE法では要求が満たされない
可能性がある

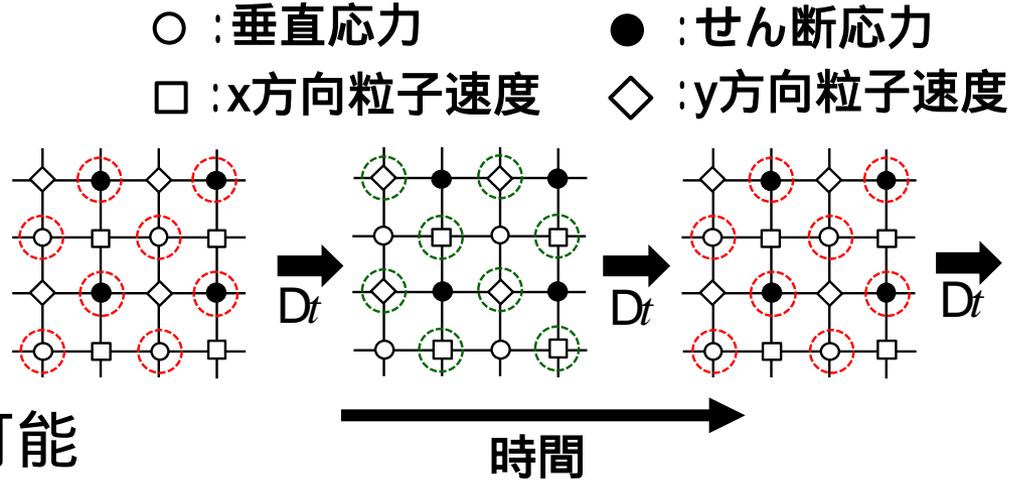
FDTD (時間領域有限差分) 法の適用を検討

FDTD (時間領域有限差分) 法による計算

応力と粒子速度の格子点を交互に配置し、時間的にも交互に計算



物体間の多重反射も計算可能

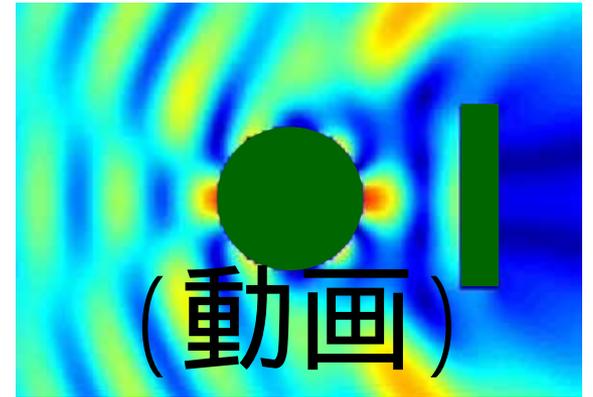
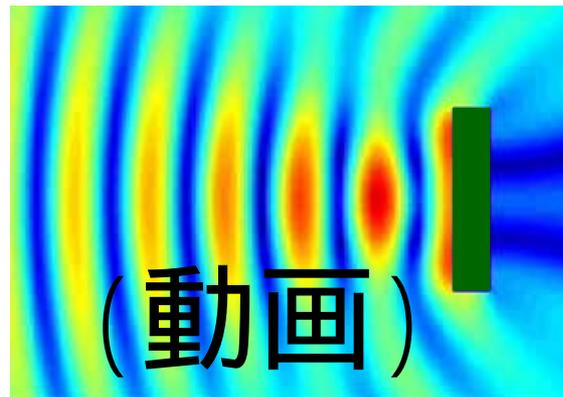
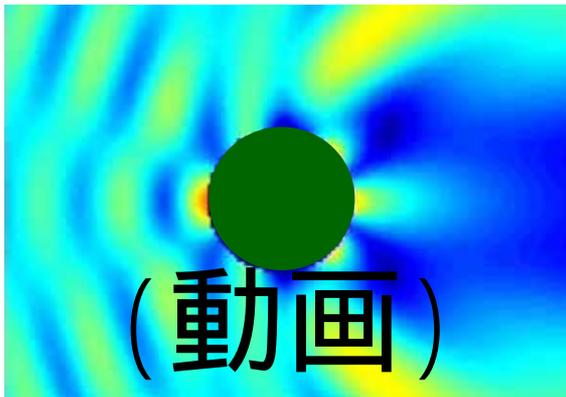


平面波が左から入射し、定常状態になるまでの時間変化の計算結果

アクリル円柱のみ

剛体板のみ

アクリル円柱 + 剛体板



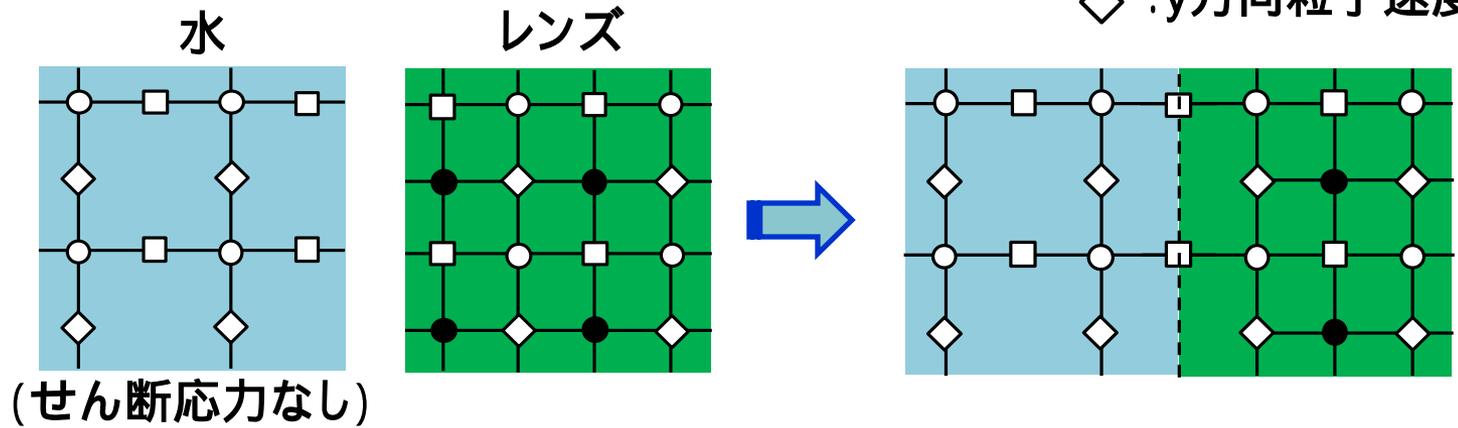
FDTD法では波動性を考慮した複数レンズ系の設計が可能

水とレンズの間の境界条件の設定に関する問題点

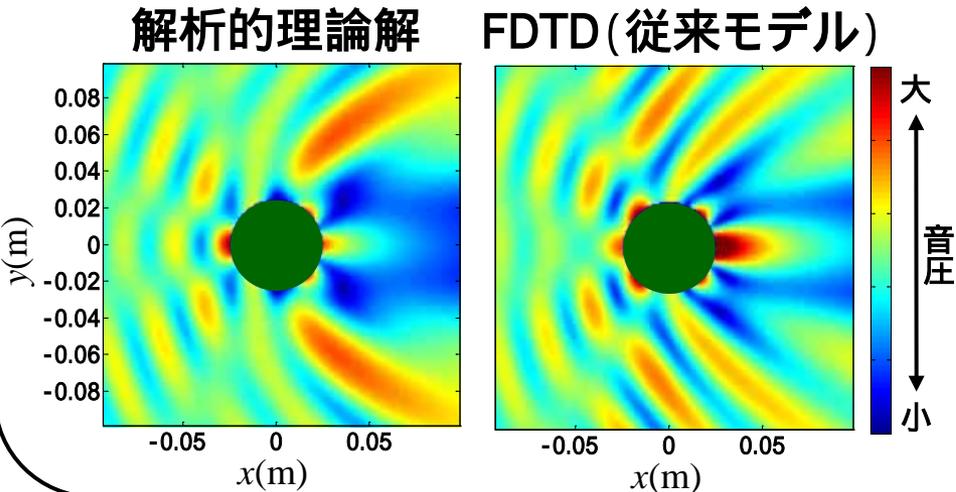
FDTD法では、**水とレンズの境界**に粒子速度の格子点を置く \Rightarrow この点の密度をどう設定するか？

- : 垂直応力
- : せん断応力
- : x方向粒子速度
- ◇ : y方向粒子速度

(従来)
境界面に水とレンズの**平均値**を用いたモデル



円柱に平面波が垂直入射した際の音場

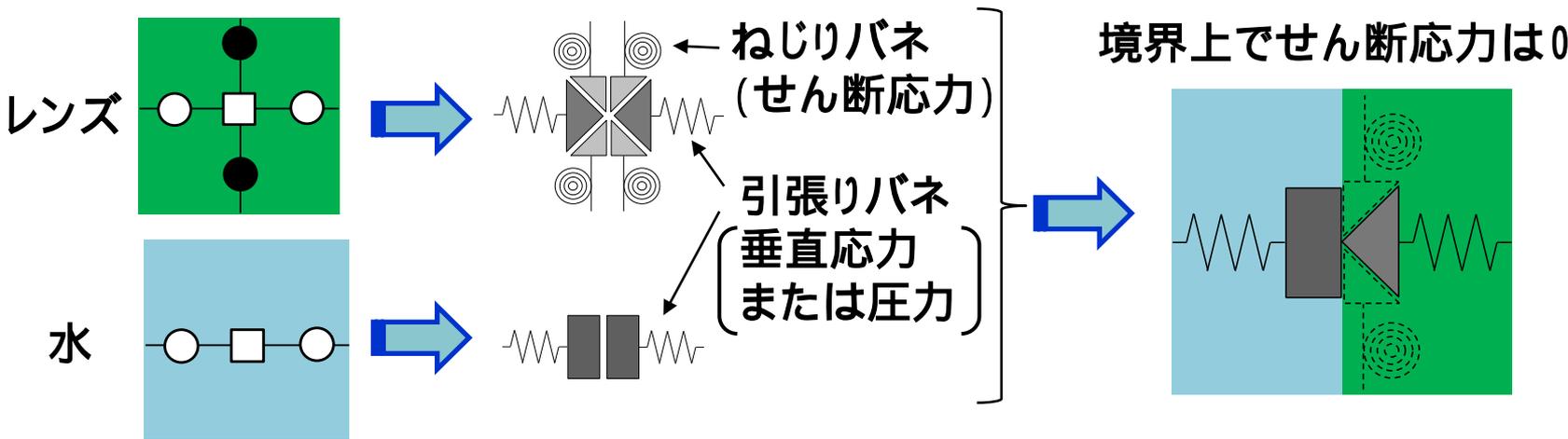


FDTD計算値の誤差が大きい



現実により近い境界条件の設定が必要

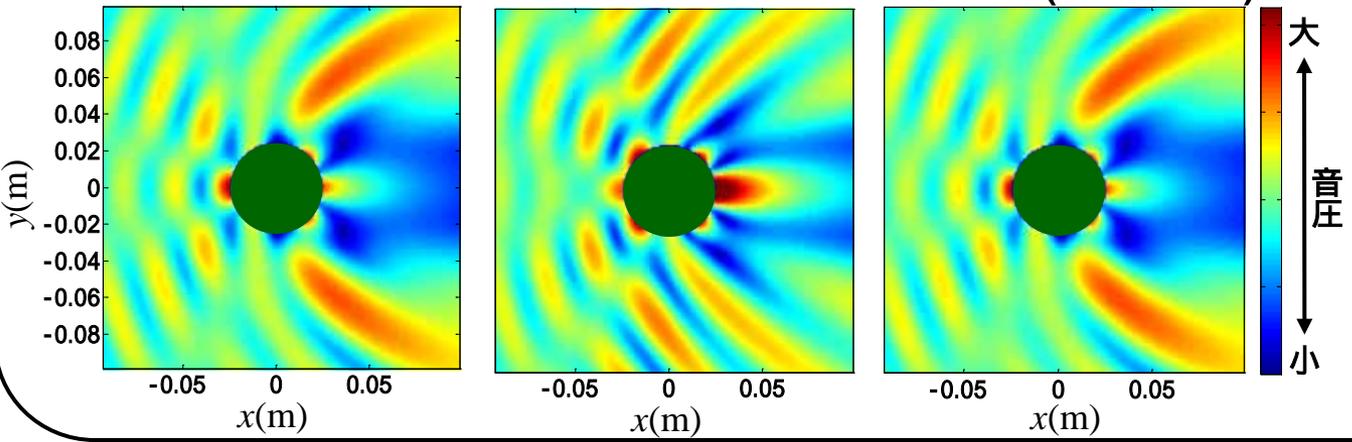
格子点をバネ - 質点系として扱い、バネごとに質量を分割したモデル



境界ではねじりバネを外し、その分だけ**レンズの質量も減らす**

円柱に平面波が垂直入射した際の音場

解析的理論解 FDTD(従来モデル) FDTD(新モデル)



従来の境界条件に比べ、理論解との誤差が小さい

材質	特徴	水に対する屈折率	音が収束する形状
アクリル	音響レンズへの使用実績がある	0.59 (< 1)	凹レンズ
ゴム	屈折率および反射率の調整が可能	1.34 (> 1)	凸レンズ

アクリル(凹レンズ)

ゴム(凸レンズ)

正面

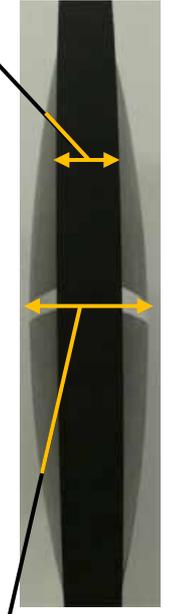
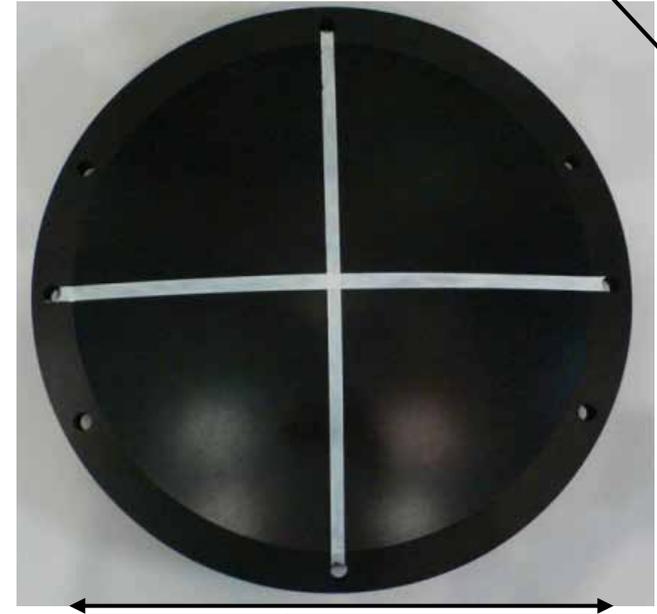
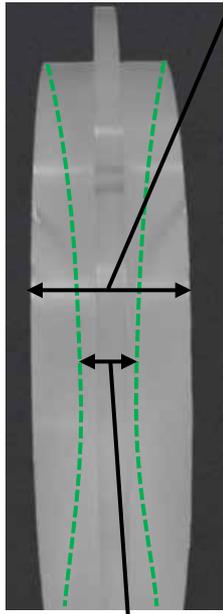
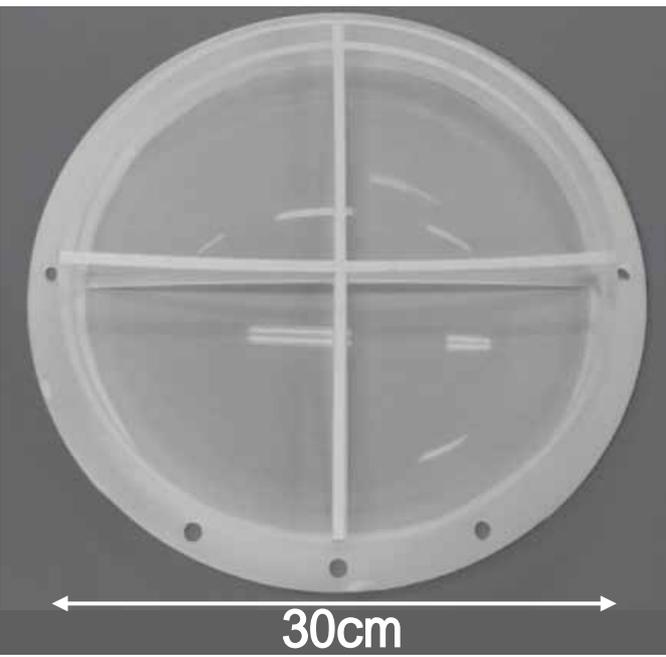
側面

5cm(縁)

正面

2cm

側面

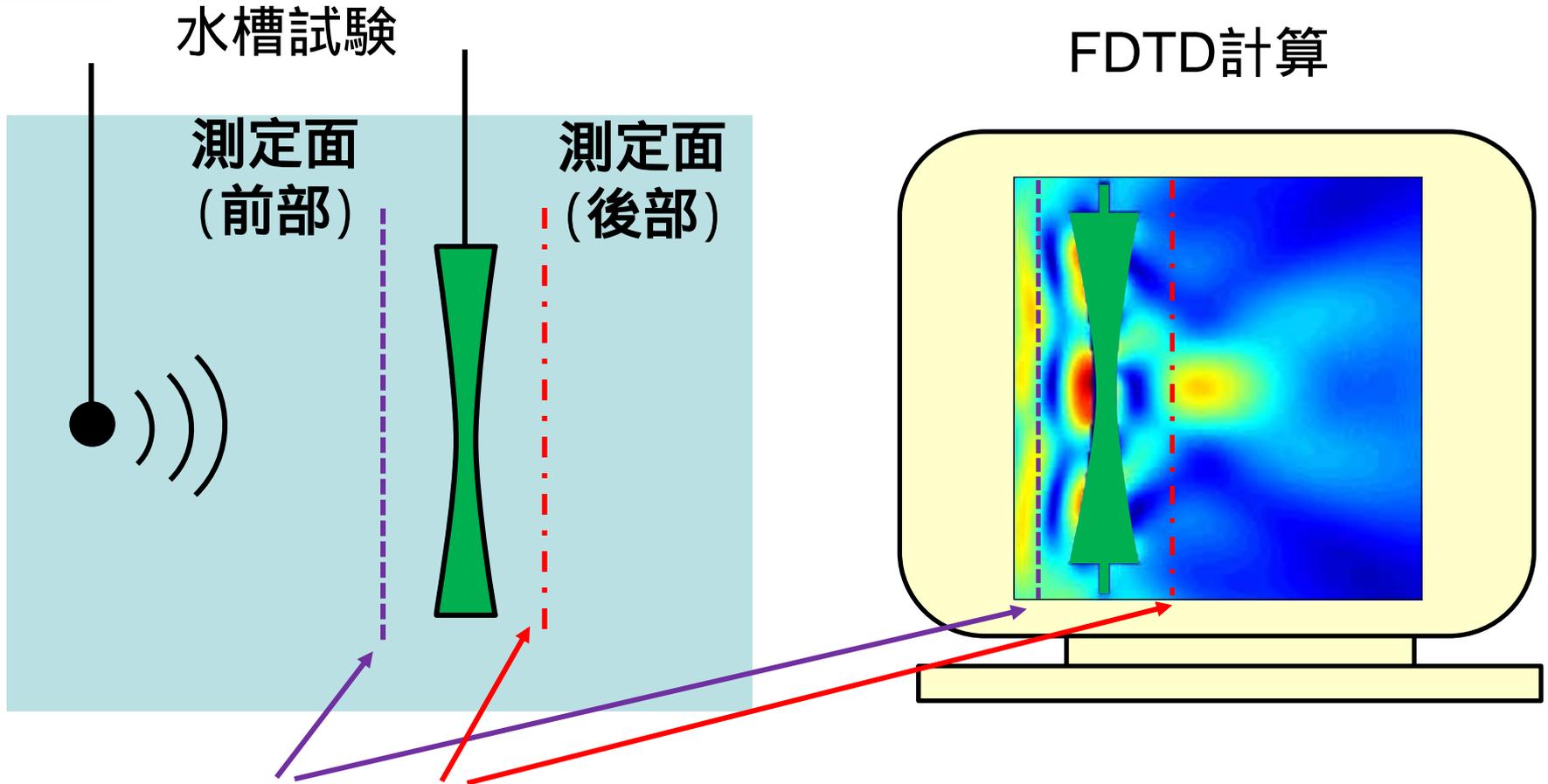


2cm(最薄部)

30cm

6cm(最厚部)

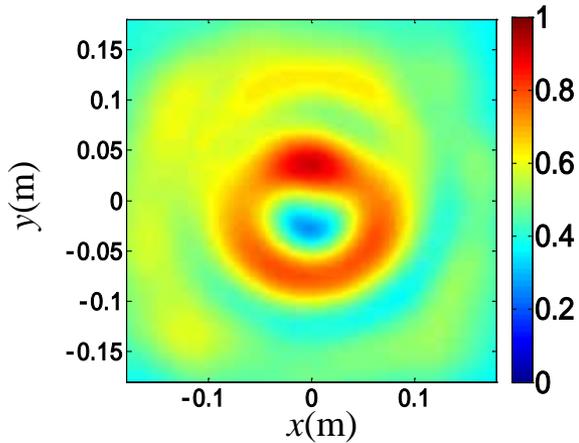
(ともに球面半径は60cm)



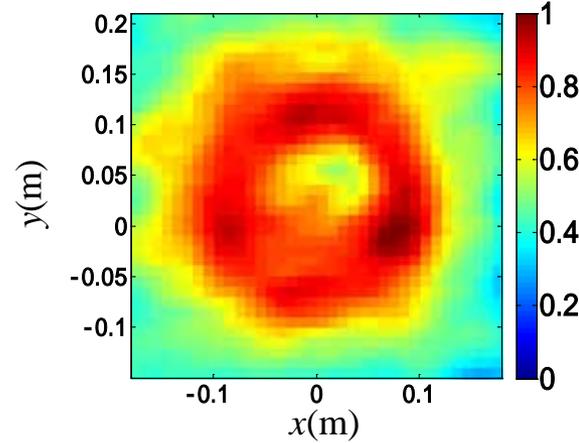
レンズの**前部**と**後部**、それぞれの測定面における音場分布の測定値と計算値を比較

波動性の影響を確認する為、低周波域の音波を使用
(周波数: 16kHz / 波長: 9.4cm)

測定面 (前部)
計算値

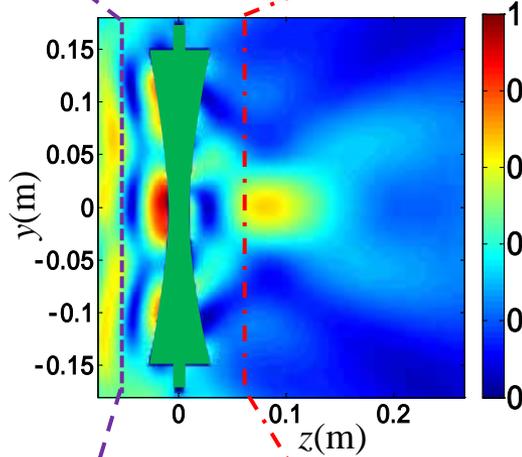


測定値



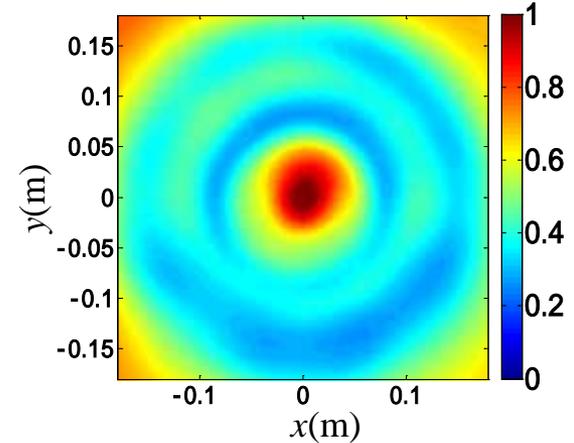
FDTD計算値

凹レンズ

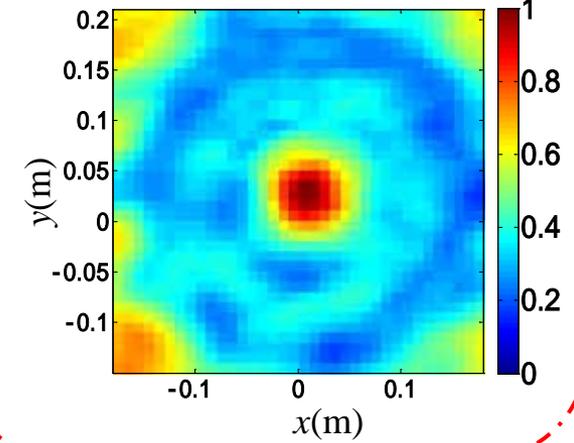


測定面 (後部)

計算値



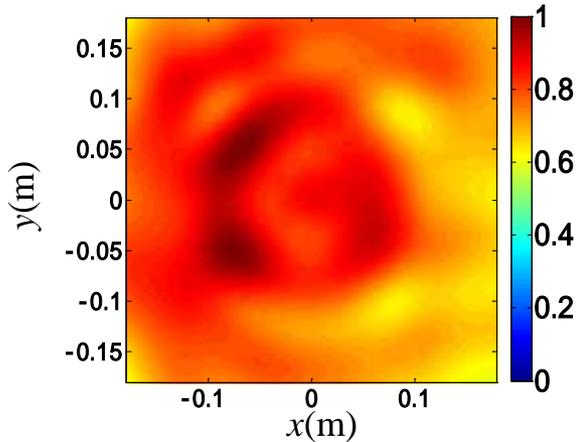
測定値



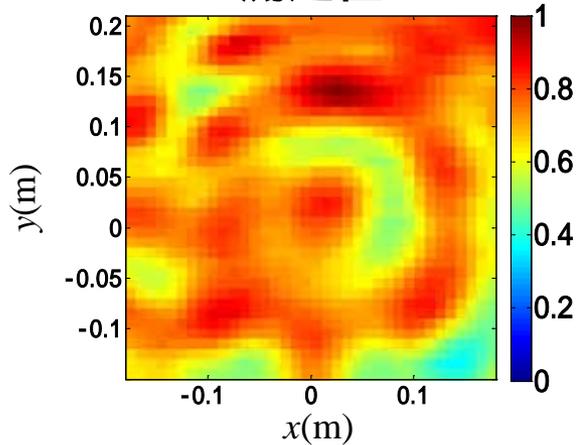
それぞれの画像
における最大値
を1として正規化

FDTD計算値は測定値の音場分布とよい一致が得られた

測定面 (前部)
計算値

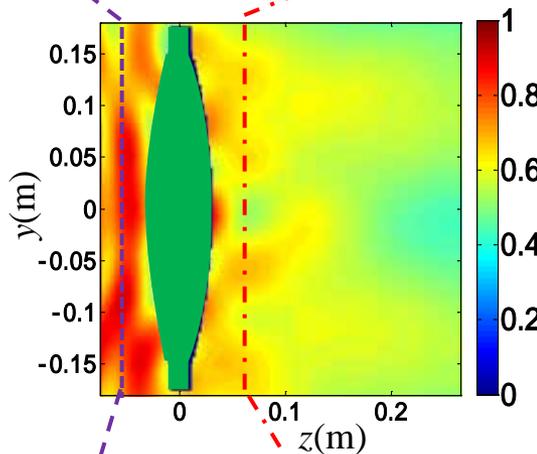


測定値

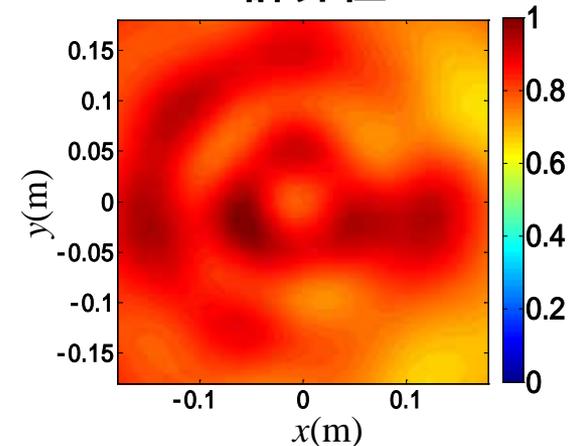


FDTD計算値

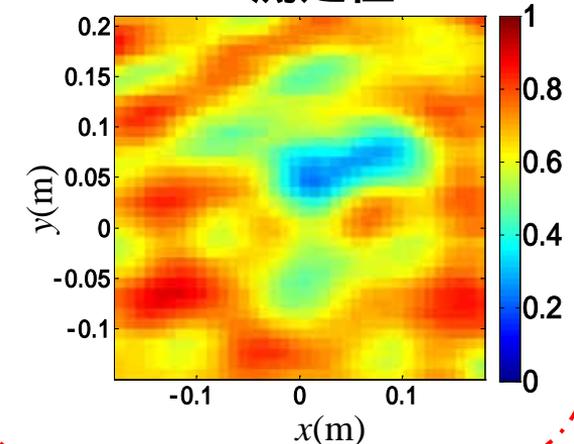
凸レンズ



測定面 (後部)
計算値



測定値



それぞれの画像
における最大値
を1として正規化

FDTD計算値と測定値との差がアクリルより大きい

目的

送受波アレーの信号処理によるビームの電子的走査が不要となる音響レンズ式画像化ソナーに適した音響レンズ系の設計

課題と対策

レンズ設計における波動性及びレンズ間での多重反射の影響を考慮するため、音場の計算にFDTD法を適用し、水とレンズの境界条件のモデルを従来より厳密化

結果

- ・境界条件の厳密化により理論解との誤差が減少
- ・アクリル製レンズにおいてはFDTD計算値が測定値に良く一致

今後の検討

- ・ゴム製レンズにおける誤差の原因の解明
- ・FDTD法による、画像化ソナーに適したレンズ系の最適設計