

# 波動理論による音響レンズの高精度設計技術

神奈川大学 大学院工学研究科  
電気電子情報工学専攻  
准教授 土屋 健伸

2018年12月4日

# 研究分野の背景

医療機器, 船舶, 水中物体検知, 構造物検査, 水産, 自動車, 航空機, 建築物、などの「電磁波・音波」を用いたセンシング分野においては、機器の状態や物体の認知など対象の状態を測定する

- 新しいセンサー技術の開発
- 既存装置の高性能化

が求められている。

# 従来技術とその問題点(その1)

電磁波や音波を用いたセンサーは、既に多くの実用例があるが、

- 分解能の粗さ
- 応答速度の遅さ

等の問題があり、更なる性能向上が要求されている。

## 従来技術とその問題点(その2)

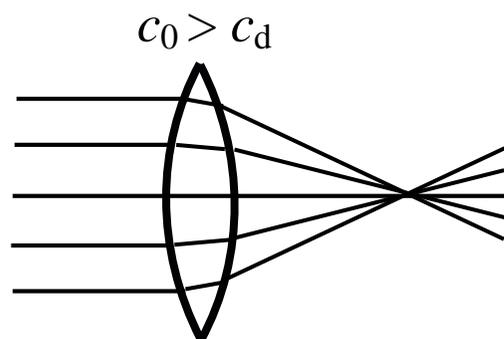
- ◆ レンズは分解能を向上させ応答速度を高速化するデバイスで、既に十分研究されてきた古いデバイスであると言える。
- ◆ しかし、波長の短いミリ波(電磁波)や音波を用いたセンサーでは、従来の光線(音線)設計手法では十分な性能が発揮できない。

そこで、十分な性能が発揮できる計算方法を開発することが必要とされている。

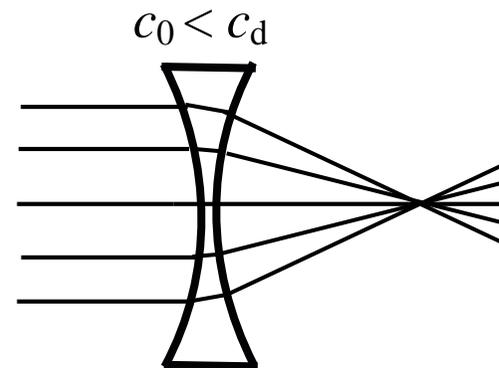
# 新技術の特長・従来技術との比較

- 使用周波数の上昇によりレンズの開口径と波長の関係が異なるため、従来理論の光線理論による設計ではレンズの十分な性能評価ができなかった。
- 本技術を用いることでレンズを高精度に設計することができる。

音響レンズ



Convex lens

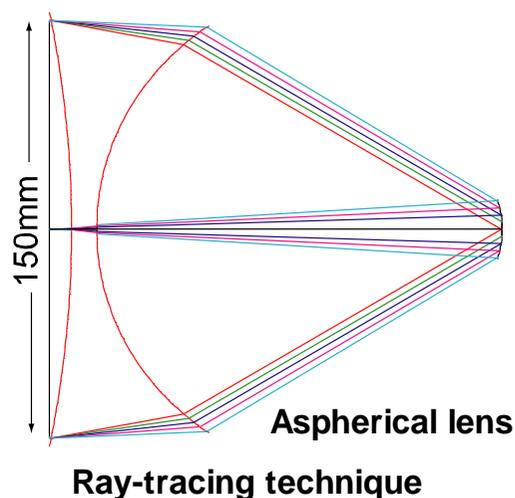


Concave lens

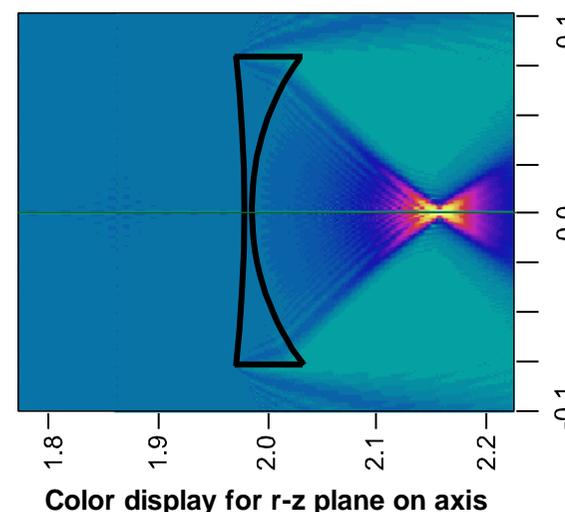
$c_0$ : speed in the water,  $c_d$ : speed in lens

# 新技術の特長・従来技術との比較

- 従来理論の光線理論による設計では、設計結果と測定結果に誤差を生じる。
- 波動理論に基づく本技術を用いることでレンズによる集束分布を高精度に解析できる。



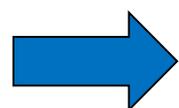
従来技術：焦点位置のみを把握



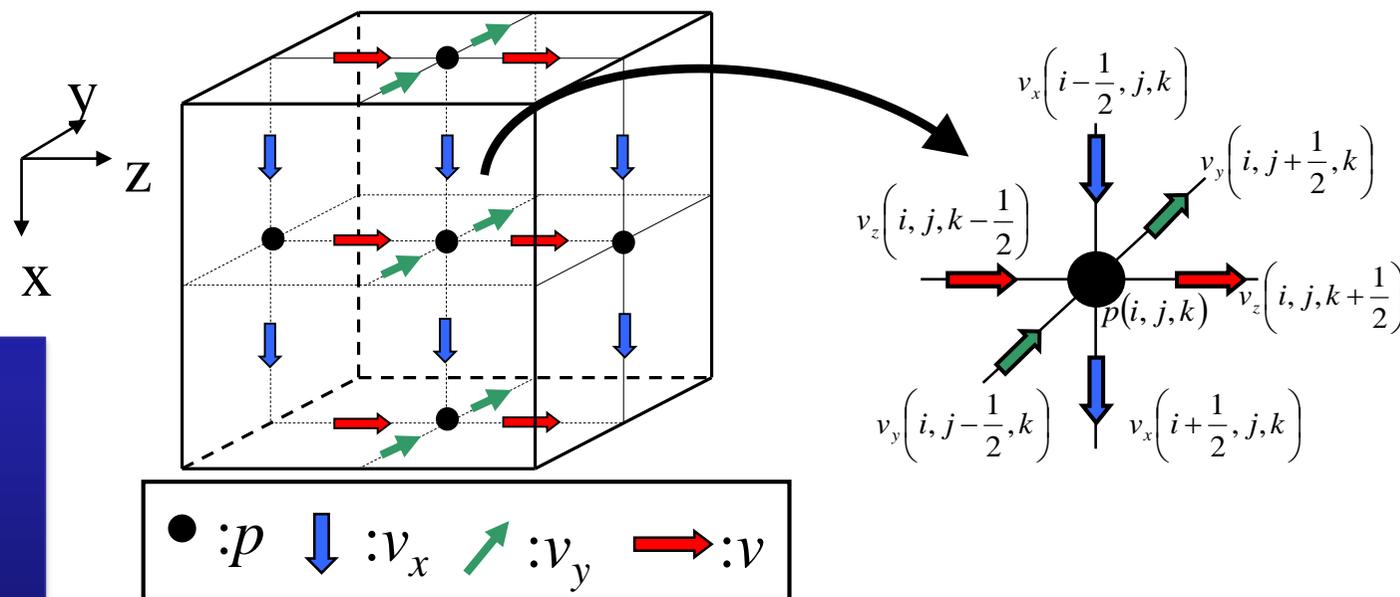
新技術：焦点位置のみだけでなく  
集束分布全体を把握

# 新技術

## 本技術のベースとなる波動理論解析



- ・波動の伝搬を記述した方程式を直接計算
- ・伝搬する空間を微小サイズに分割

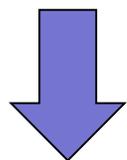


コンピュータ  
シミュレーション技術  
にて解析を実施

直交座標系の空間分割モデル

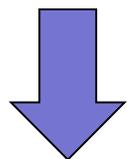
# 新技術

通常のCPUでは計算時間が長大

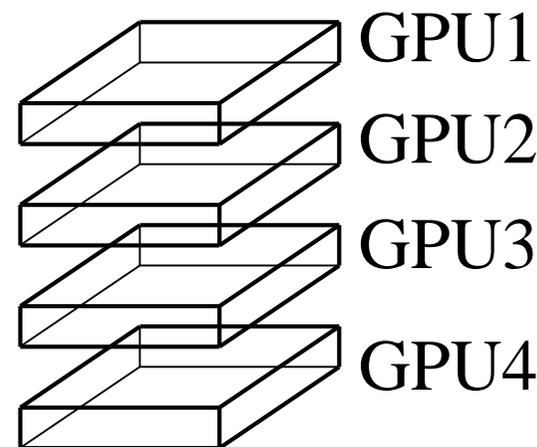
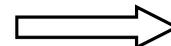
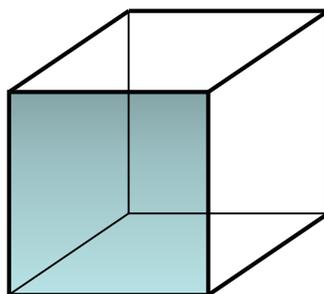


- ・GPU\*を用いたシミュレーション
- ・解析領域分割による分散処理

を用いて高速化



- ✓ 大幅に計算時間を短縮
- ✓ 高精度な解析

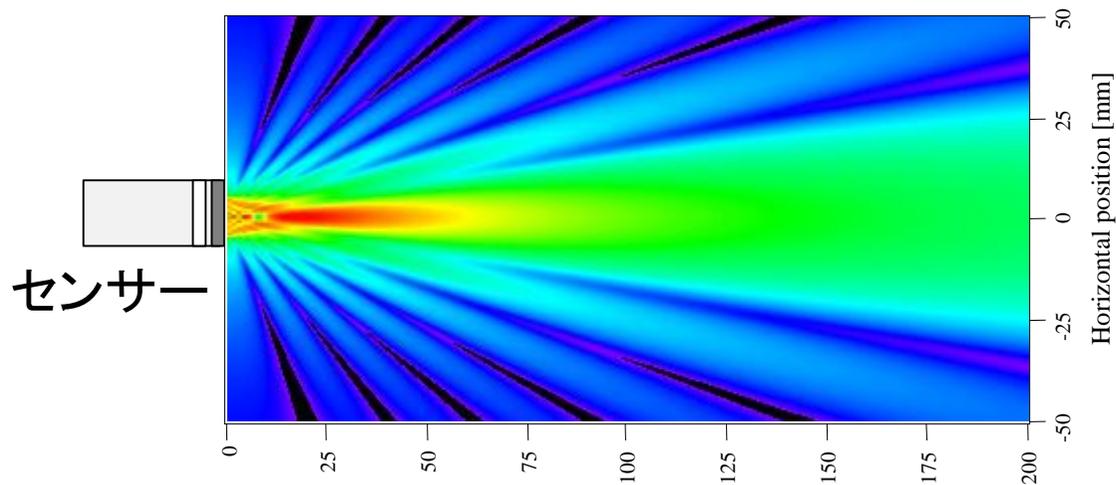


領域分割イメージ

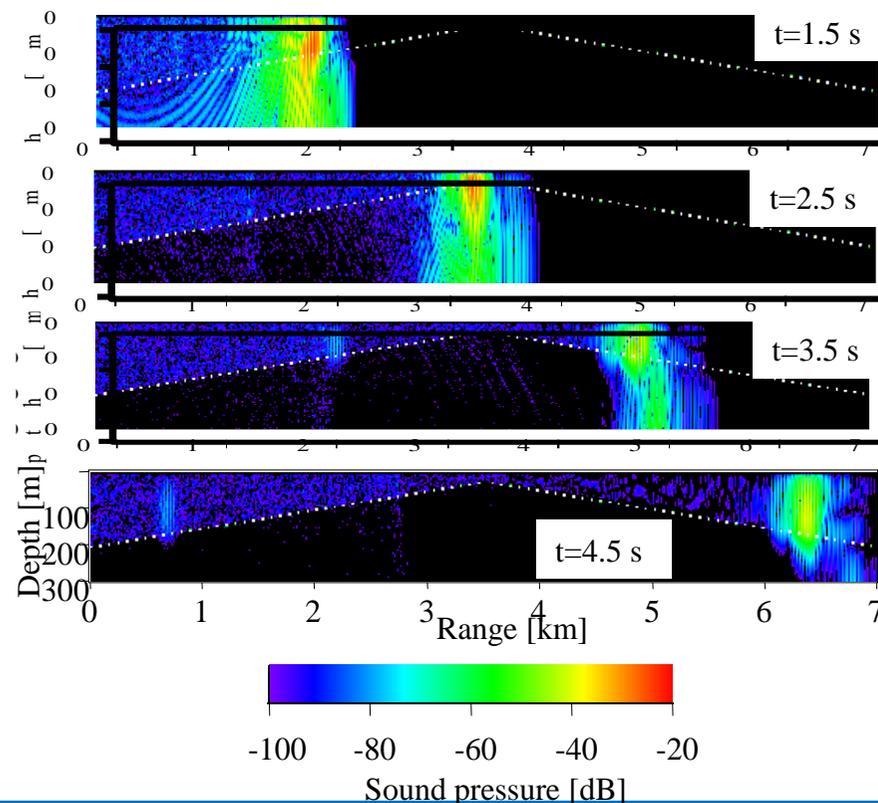
\* GPU: Graphic Processing Unit

# 新技術

- ◆ センサーから放射される波動(音・光)の可視化が可能.
- ◆ センサーの形状も任意で設定可能
- ◆ 空間的な分布や時間変化も簡単に計算可能



センサーからの放射波動解析

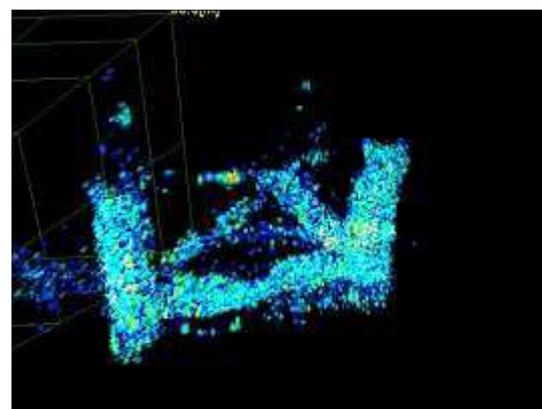


# 新技術の適用例 その1

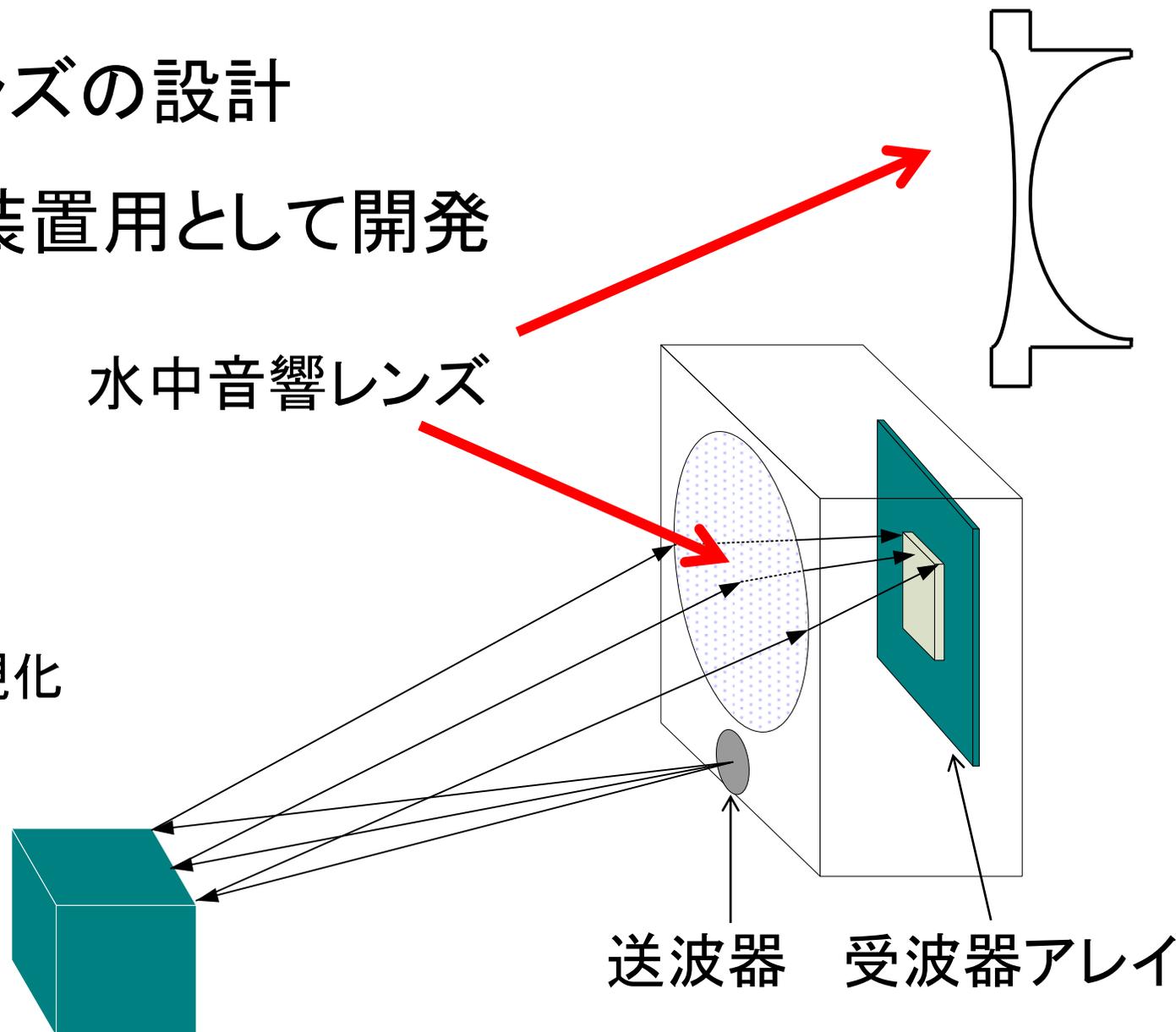
- ◆ 高性能音響レンズの設計
- ◆ 水中映像取得装置用として開発



栈橋の水中構造の可視化



水中音響レンズ



送波器

受波器アレイ

# 新技術の適用例 その1

- ◆ 試作音響レンズの性能評価
- ◆ 設計値と計測値が一致

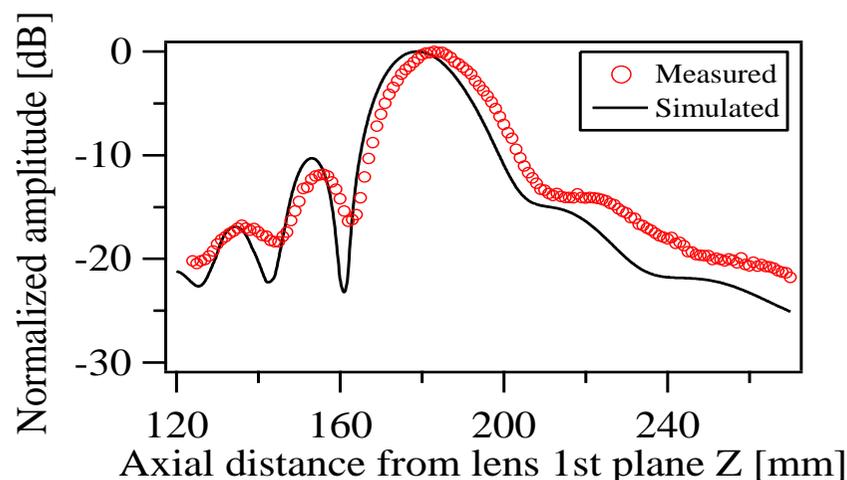
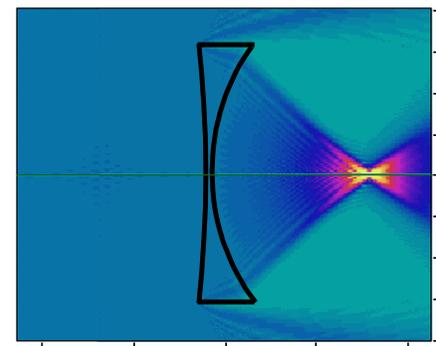


Table 焦点位置の周波数特性

	Measured	Analysis
0.5 MHz	182.5	179.0
0.7 MHz	183.0	179.5
1.0 MHz	184.0	181.0

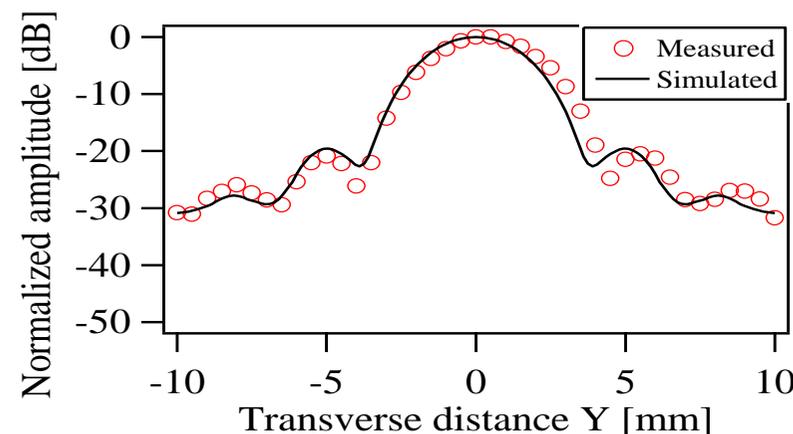


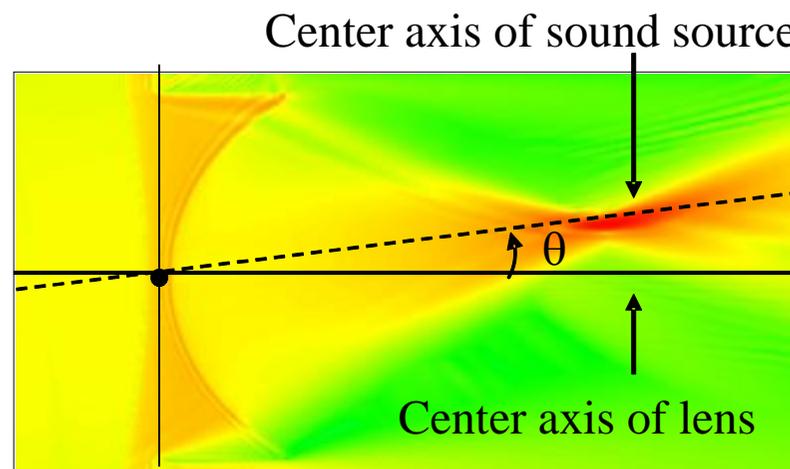
Table ビーム幅(-3dB)の周波数特性

	Measured	Analysis
0.5 MHz	3.1	3.14
0.7 MHz	2.6	2.30
1.0 MHz	2.0	1.70

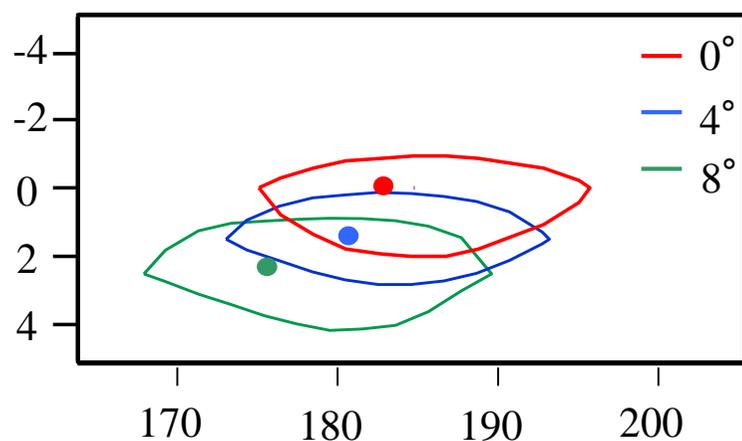
Unit [mm]

# 新技術の適用例 その1

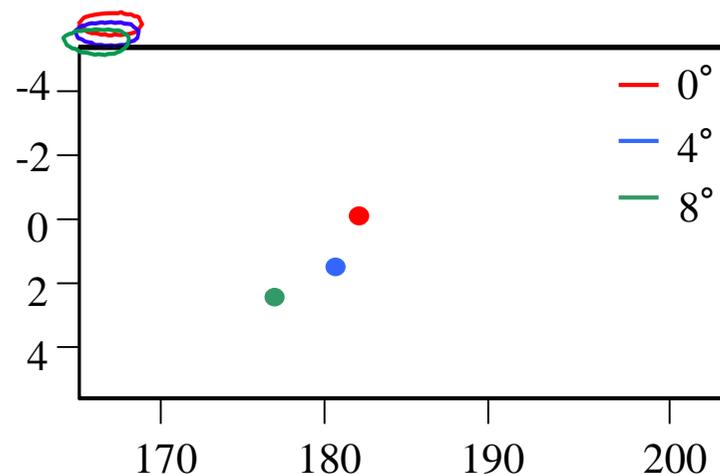
- ◆ 波源より伝搬し音響レンズに斜め入射した際の焦点変動
- ◆ 設計値と計測値が一致



波源斜め入射時の集束音場



(a) Measurment

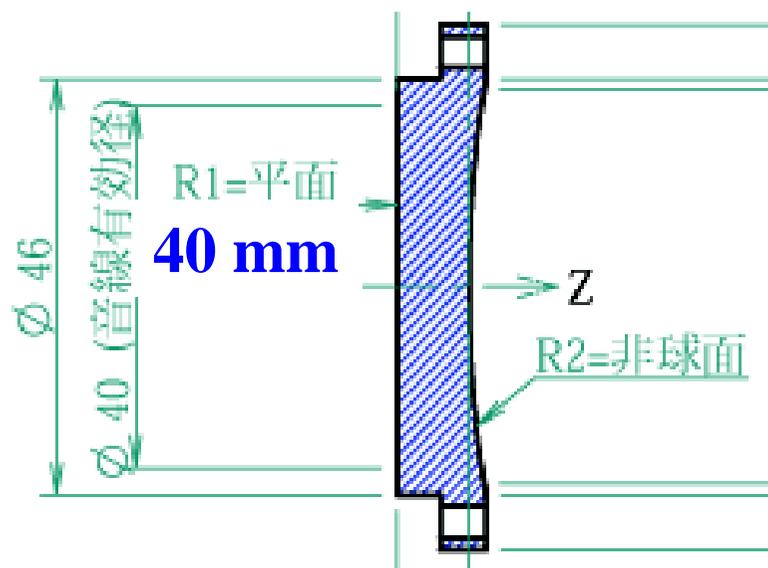


(b) Analysis

入射角度に対する焦点の変動

# 新技術の適用例 その2

## ◆ 医用超音波診断装置の小型音響レンズ開発

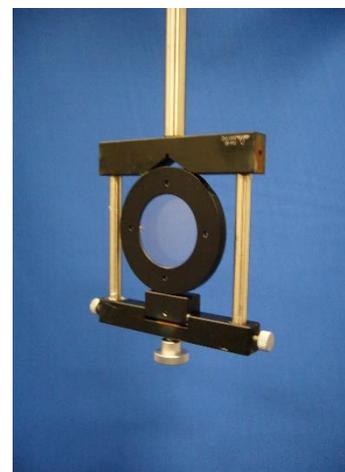


特徴

- 前方が平面
- 後方の曲率半径も大きい
- 緩やかな集束

Fig. Geometry of aspherical acoustic lens.

$$Z_{B2}(Y) = \frac{Y^2 / (136.5)}{1 + \sqrt{1 - (1 + (-0.5597))Y^2 / (136.5)^2}}$$



1st plane of lens

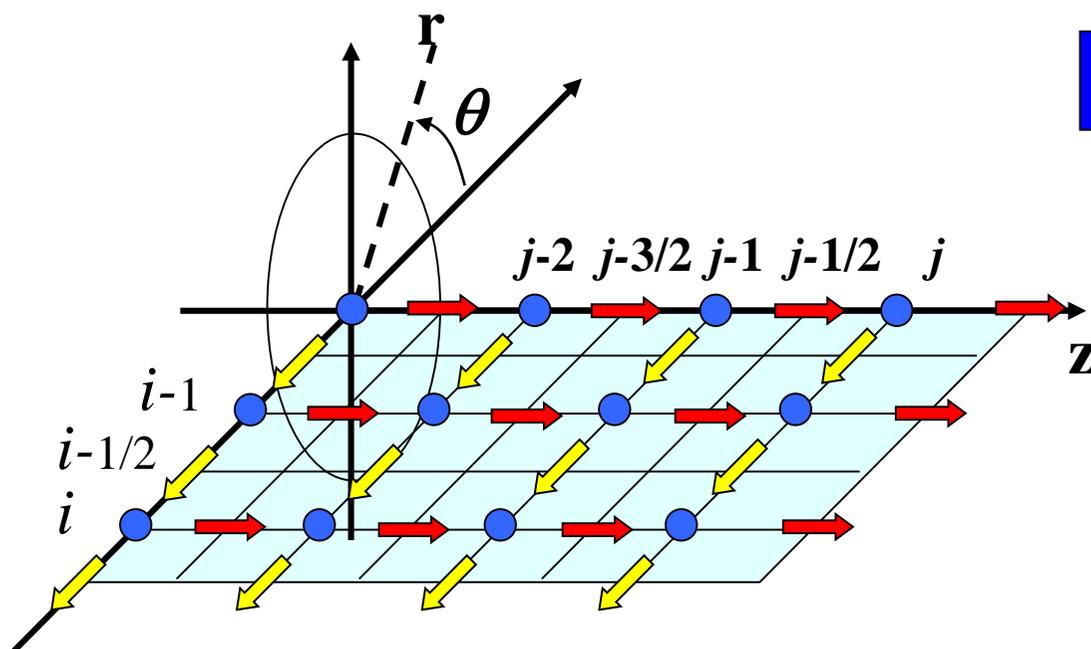


2nd plane of lens

Photograph of custom lens.

# 新技術の適用例 その2

## 円筒座標系シミュレーションによる高速化



基本式

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = K \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right\}$$

$$-\rho \frac{\partial v_r}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$-\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial z}$$

● 音圧  $p$      $\rightarrow$  粒子速度  $v_z$      $\swarrow$  粒子速度  $v_r$

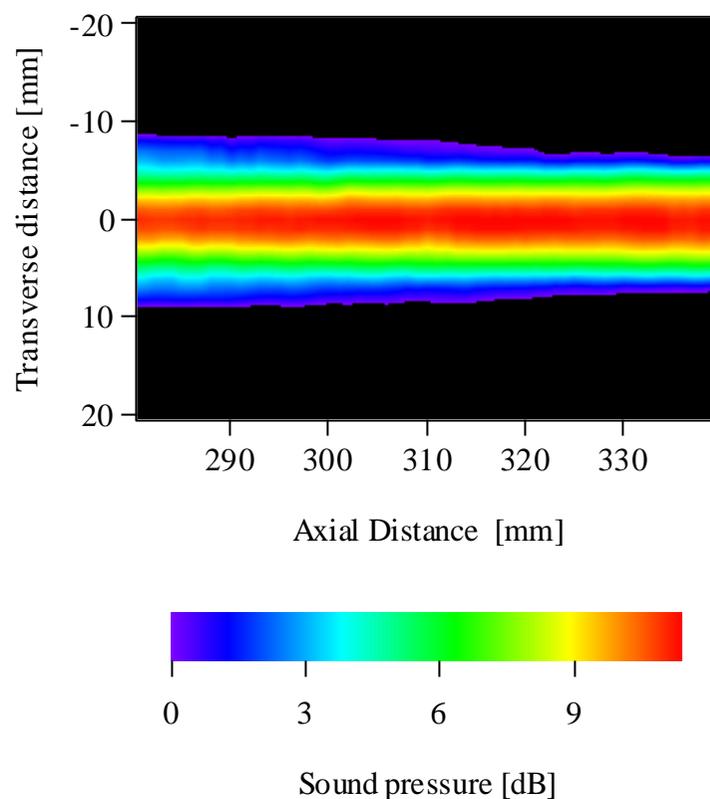
- ・z軸対称を仮定して  
方位方向成分を除外
- ・無損失媒質

Fig. Grid model for 2D-FDTD method in cylindrical coordination.

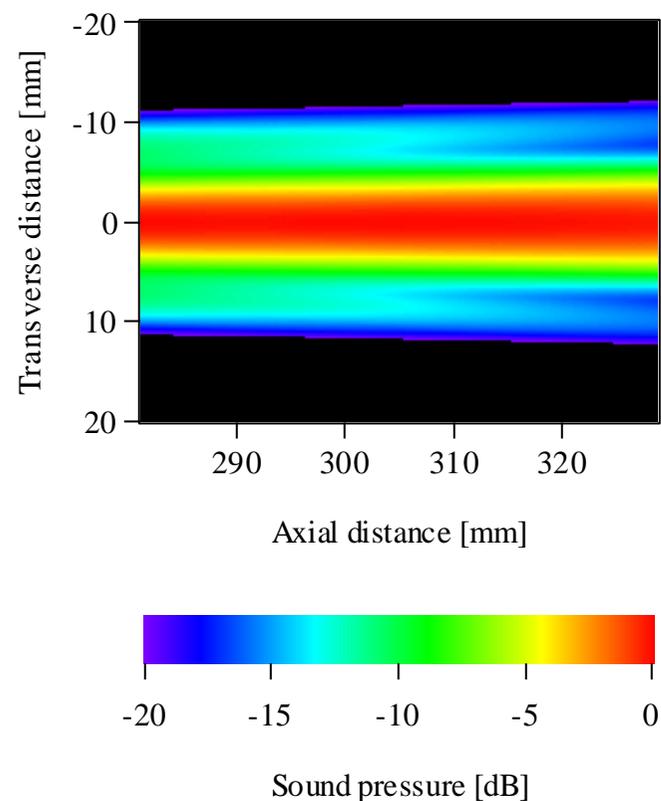
# 新技術の適用例 その2

## 実測結果と解析結果の比較 ー垂直2次元断面ー

(a) Measurement data

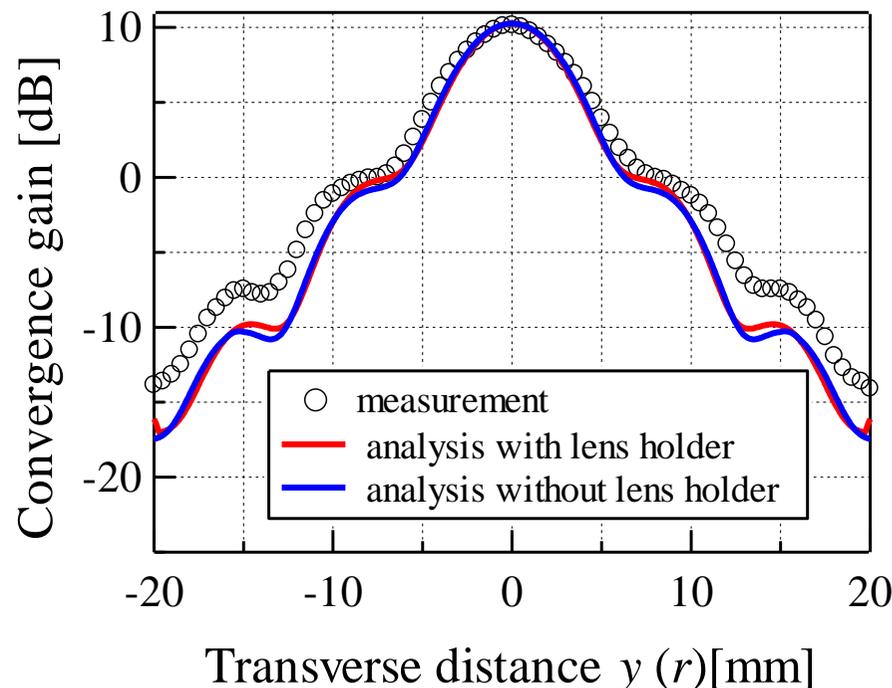
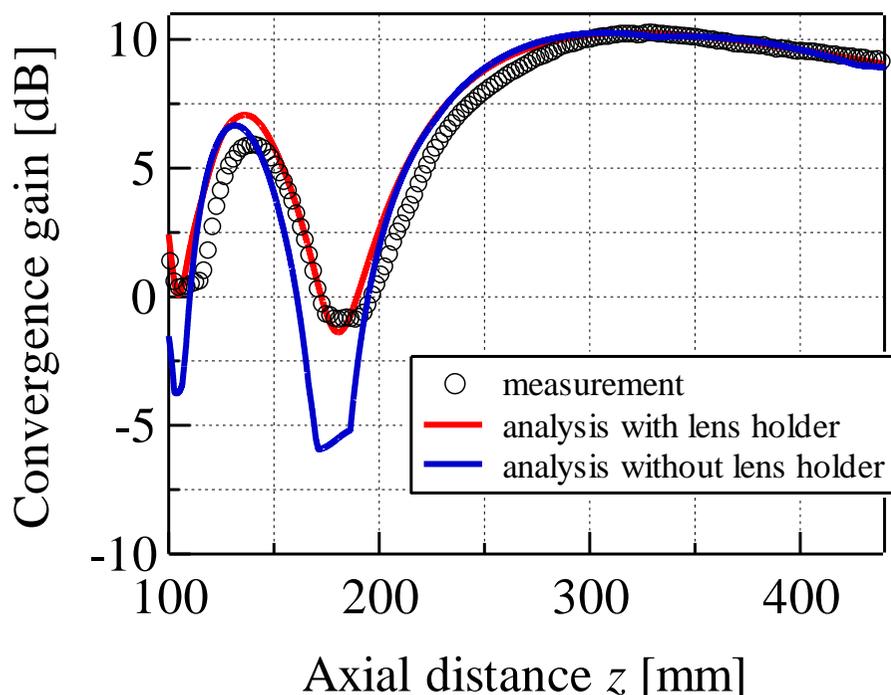


(b) Calculation data.



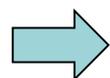
# 新技術の適用例 その2

## 音軸上ならびに焦点での径方向音圧分布



- 音線設計時の焦点距離は291.6mm
- 実測および新技術での解析は約328mmと一致

	実験値	計算値
焦点距離	328.5 mm	326 mm
ビーム幅	5.5 mm	5.6 mm



高性能解析 & 設計が可能

# 新技術の適用例 その3

## フォノンニック結晶構造による音波伝搬制御

- バンドギャップ帯には波動が存在できない
- フォノンニック結晶構造で波動の伝搬を制御

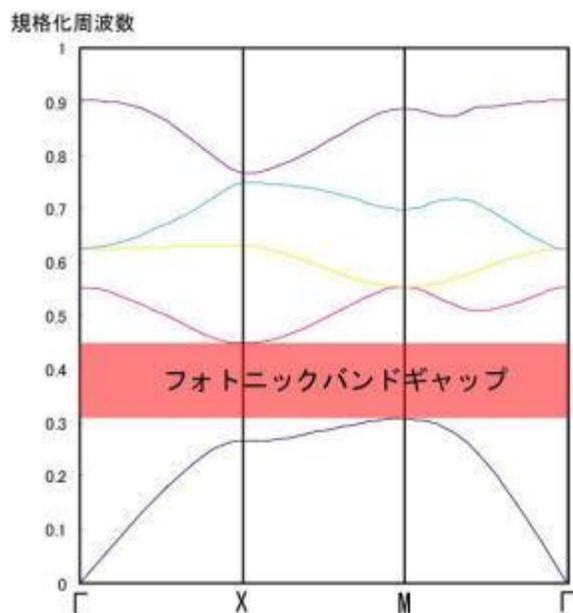


Fig. Structure sand gap

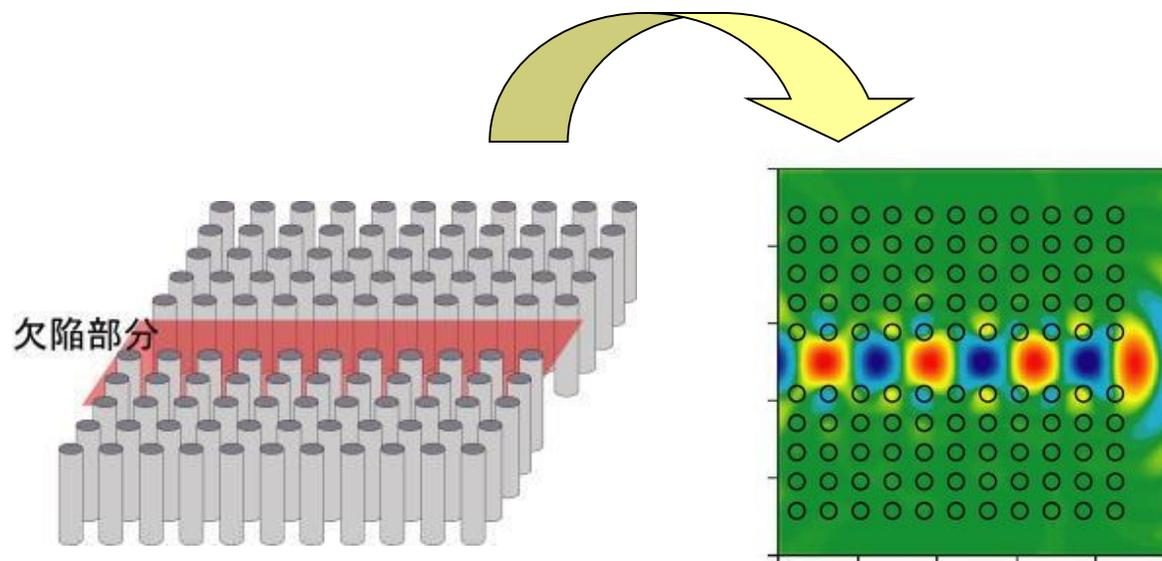


Fig. Phononic crystal band gap structure

Fig. Waveguide using phononic crystal band gap structure

# 新技術の適用例 その3

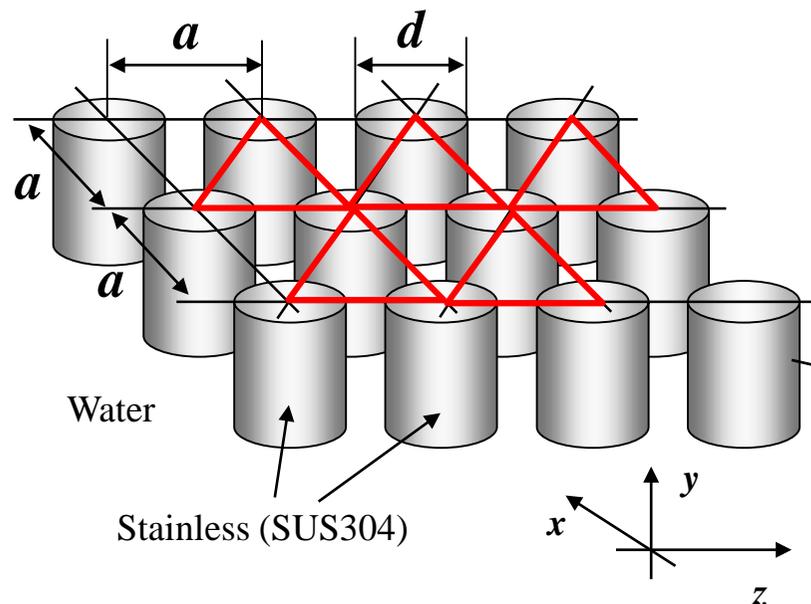
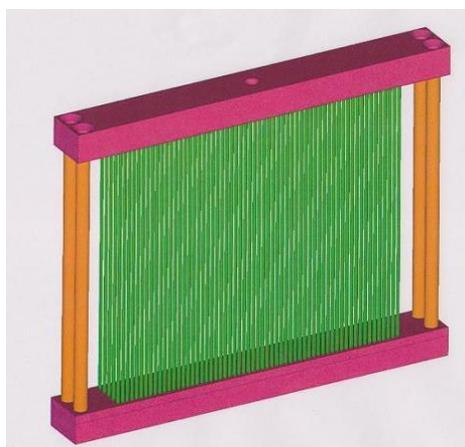


Fig. Phononic crystal structure.



音響レンズ試作モデルCAD図

- ◆ メタマテリアル材料の利用
- ◆ 負の屈折効果で平板のコンパクトレンズを設計

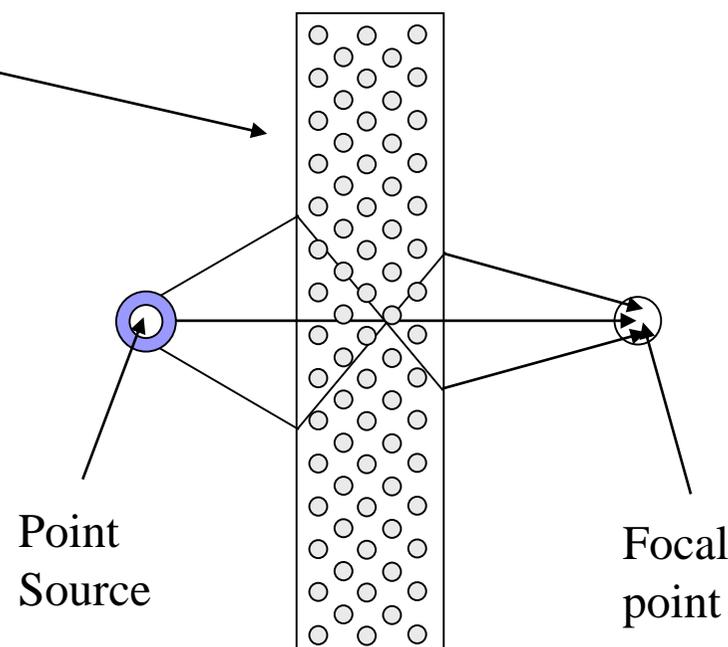
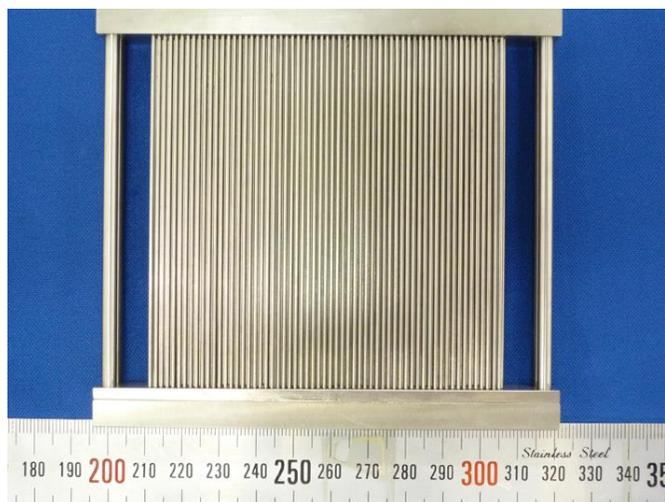


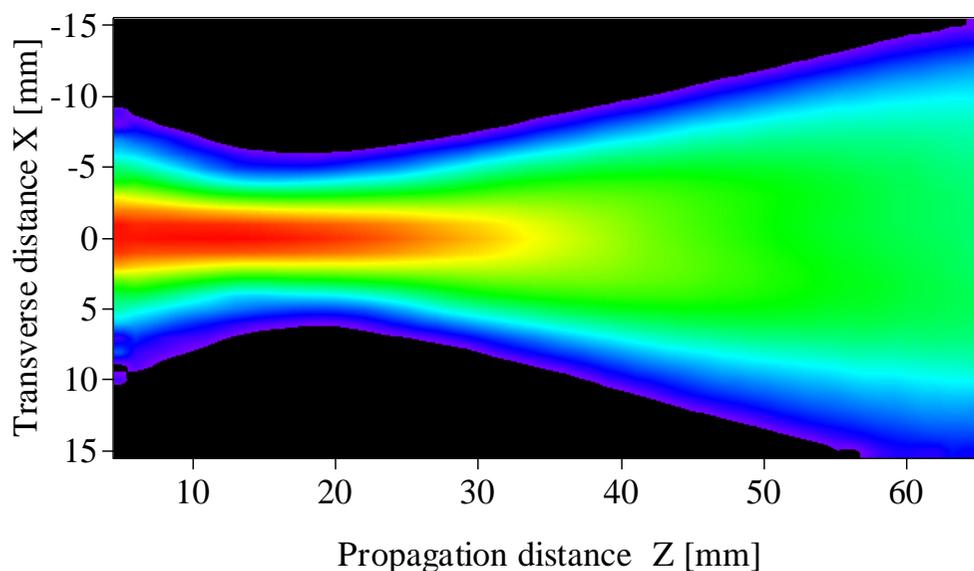
Fig. Configuration of phononic crystal lens

# 新技術の適用例 その3

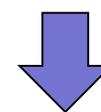


試作モデル:45度方向より

音響レンズ試作モデル 左:正面図 右:側面図



音場測定結果



平板で集束効果を持つ  
レンズが作成可能

## 想定される用途

- 大型AUVに搭載し、海底資源探査用の映像装置に用いる。
- 音波探査映像装置の大型アレイ受信器と信号処理器等を省略できる。省電力システムが構築可能。
- 小型のAUVやROV等に搭載可能であり、港湾設備などの点検に用いる。
- また、ミリ波レーダーなどの車載センサー分野や用途に展開することも可能と思われる。

# 実用化に向けた課題

- 現在、一様媒質レンズについて実用的な設計が可能なところまで開発済み。しかし、メタマテリアル材質レンズの設計手法が未確立。
- 今後、メタマテリアル材質について実験データを取得し、伝搬制御，特に消音分野に適用していく場合の条件設定を行っていく。

# 企業への期待

- 水中音響や施工技術やセンサーを開発する企業との共同研究を希望。
- センサーや計測機器を開発中の企業が手軽に性能を向上させるデバイスとして利用。
- また、コストパフォーマンスが要求される分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

# 産学連携の経歴

## <共同研究実績>

- 2001年-2002年 1件
- 2005年-2006年 1件
- 2005年-2007年 1件
- 2006年-現在 1件
- 2015年-2017年 1件

# お問い合わせ先

**神奈川県 神奈川大学 研究支援部 産官学連携推進課**  
**産官学連携コーディネーター 尾谷 敬造**

**TEL 045-481-5661 (代)**

**FAX 045-481-2764**

**e-mail [sakangaku-renkei@kanagawa-u.ac.jp](mailto:sakangaku-renkei@kanagawa-u.ac.jp)**