三胴船に働く波浪外力に関する研究

艦艇装備研究所 システム研究部 水上艦艇システム研究室
防衛技官　土 橋 純 也

発表次第

- 研究の背景
- 研究の目的
- 計算手法の概要
- 水槽試験の概要
- 計算結果と水槽試験結果の比較
- まとめ
- 今後の課題

研究の背景
ー 艦艇の多用途化 ー

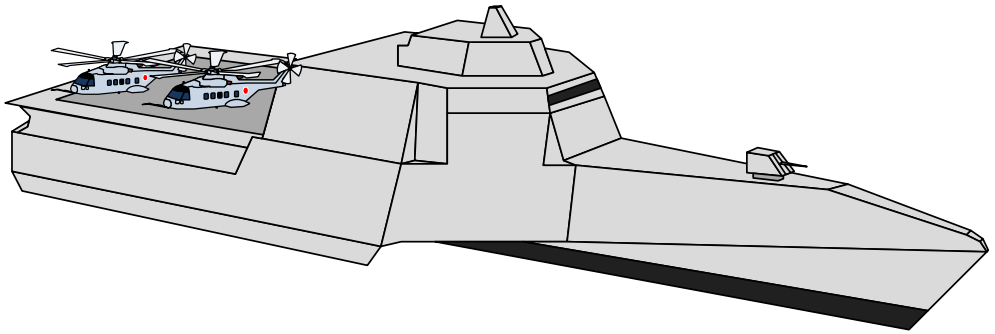
● 艦艇の多用途化への対応

例) 高速輸送能力の確保、複数機搭載　等

↓

・高速航行性能　・広い甲板面積

従来の艦艇と異なる性能を持つ有力な選択肢の一つ・・・・・三胴船



(出典) CISD Report:「Joint High Speed Sea Truck」

研究の背景
ー　三胴船の特徴　ー

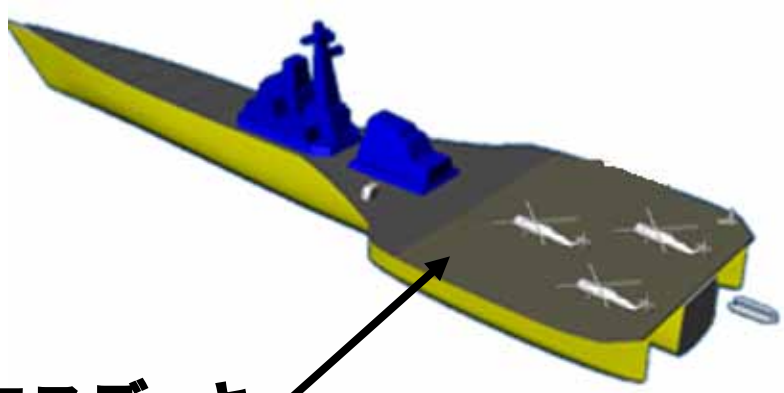
● 三胴船とは

細長い主船体の両脇にサイドハルを設けた船

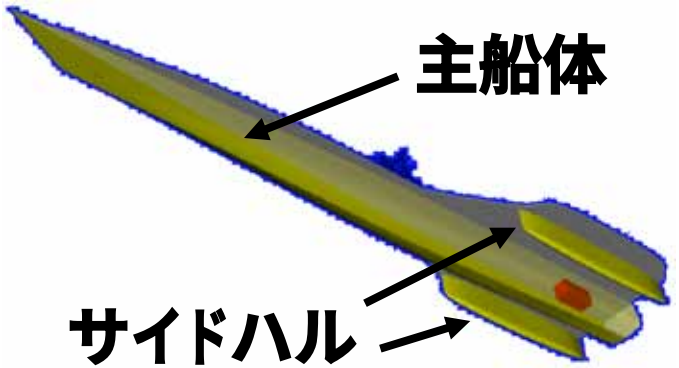
(特徴)

同じ排水量を持つ在来船舶に比べて広い後部甲板面積を保有

上から見た三胴船



船底から見た三胴船



研究の背景 － 三胴船の技術的課題 －

● 大型高速三胴船の設計に関する現状

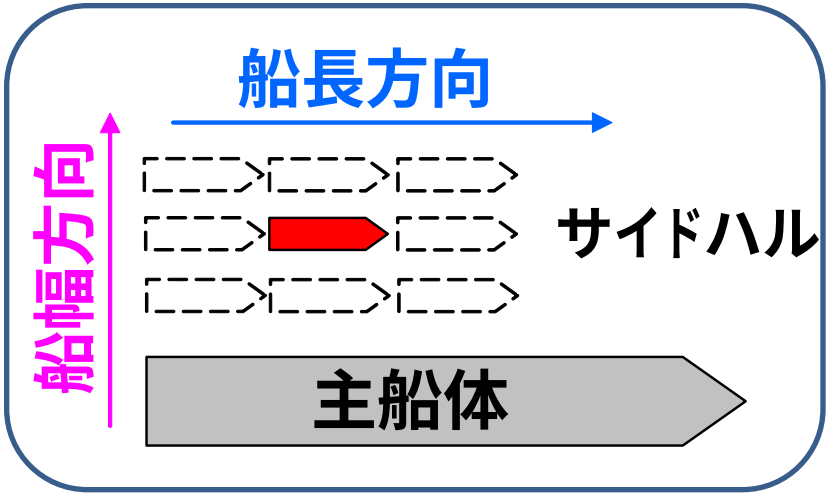
国内での建造実績が皆無であり、大型高速三胴船の設計が困難である。

－ 三胴船の設計パラメータ ➡ 単胴船と比べ多い

サイドハルの主要目、船長方向、船幅方向の配置

・サイドハル位置の影響

{ 流体力学的性能：抵抗性能
　　耐航性能 等
　構造強度：波浪外力



● 大型高速三胴船の構造設計

構造強度評価に必要不可欠な波浪外力（特にクロスデッキ部に働く波浪外力）の特性を把握することが重要

研究の目的

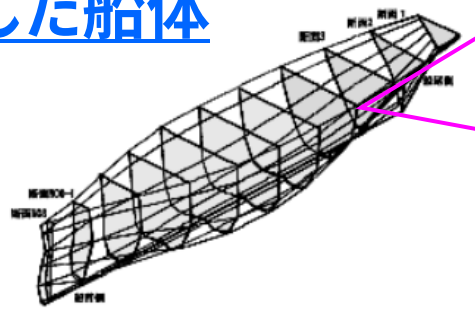
水槽試験および理論計算を実施し、三胴船に働く波浪外力に関する技術資料を得る。

計算手法の概要　ー ストリップ法 ー

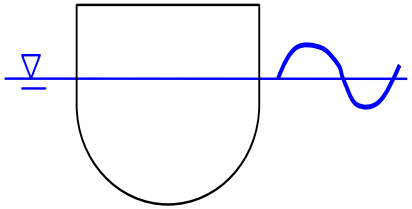
● ストリップ法

船体が運動する際に、船体周りの流体から受ける流体力を船体の長さ方向に輪切りにした断面毎に求め，その断面毎の流体力を船長方向に積分し，船全体が受ける流体力とする解析手法

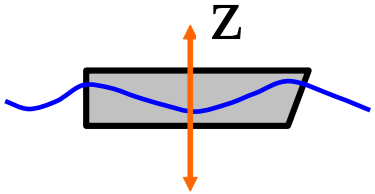
輪切りにした船体



断面の2次元問題



上下揺



船体運動方程式

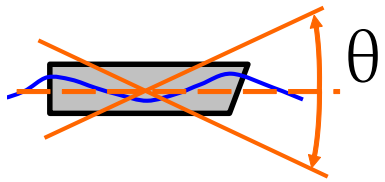
・**上下揺**

$$m\ddot{z} = F \quad (F：船体に働く上下方向の力)$$

・**縦揺**

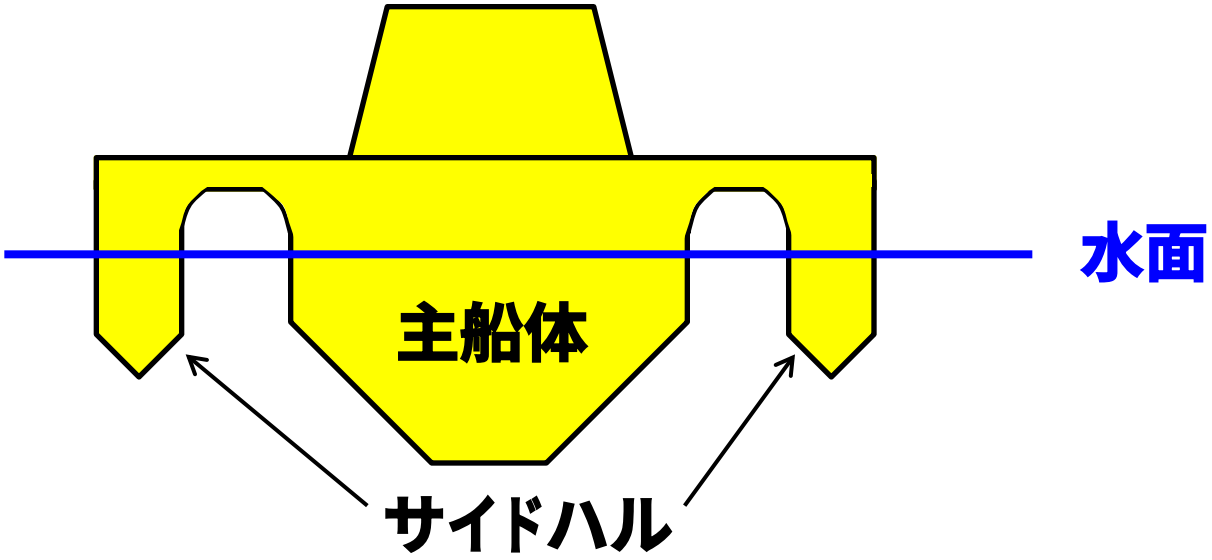
$$I\ddot{\theta} = M \quad (M：船体に働く縦方向のモーメント)$$

縦揺



計算手法の概要　－ 波浪外力の計算 －

正面図



● 計算手法の手順

(1)　主船体とサイドハルの流体力を個別に計算

(2)　三胴船の船体運動方程式から船体運動を求める

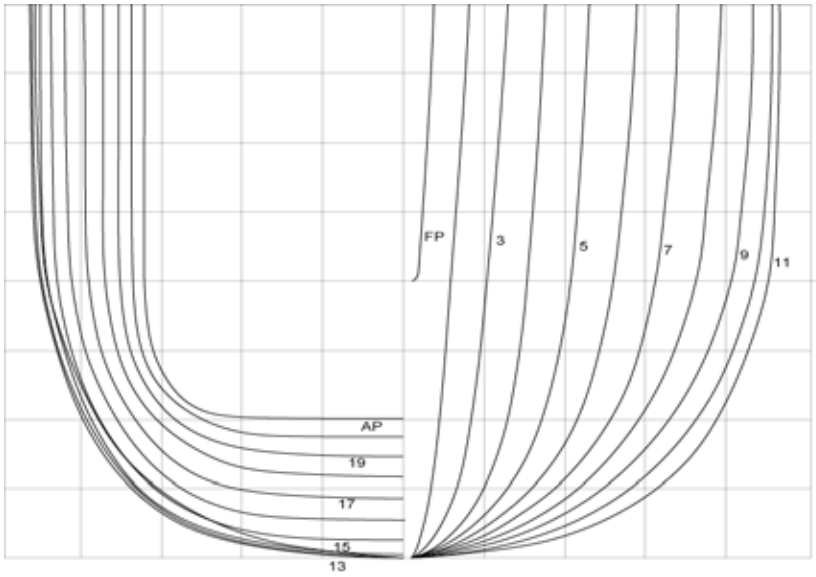
・上下揺　$m\ddot{z} = F$　　・縦揺　$I\ddot{\theta} = M$

※m:三胴船の質量、I:三胴船の慣性2次モーメント

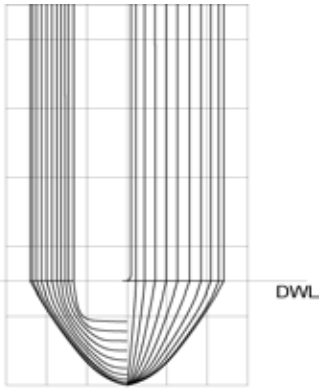
(3)　三胴船に働く波浪外力を計算

水槽試験の概要　－ 船型と主要目 －

● 三胴船型



主船体



サイドハル

※　サイドハルの排水量
：三胴船全体の排水量の2.5%

● 主要目

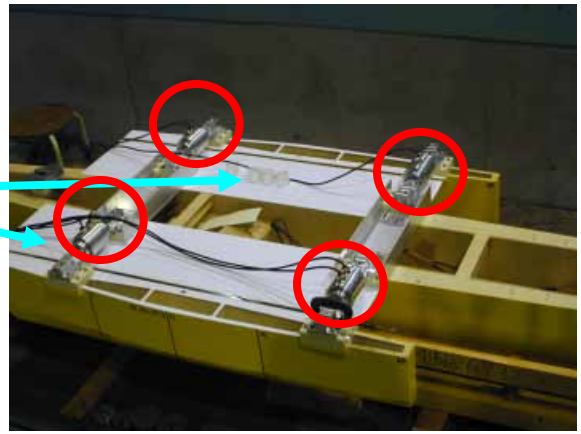
主船体				サイドハル			
水線長 Lm (m)	100	排水量 (トン)	1900	水線長 Ls (m)	35	排水量 (トン)	50

水槽試験の概要
ー 模型船とサイドハル位置 ー

● 水槽試験用模型船 (実艦の約1/26)

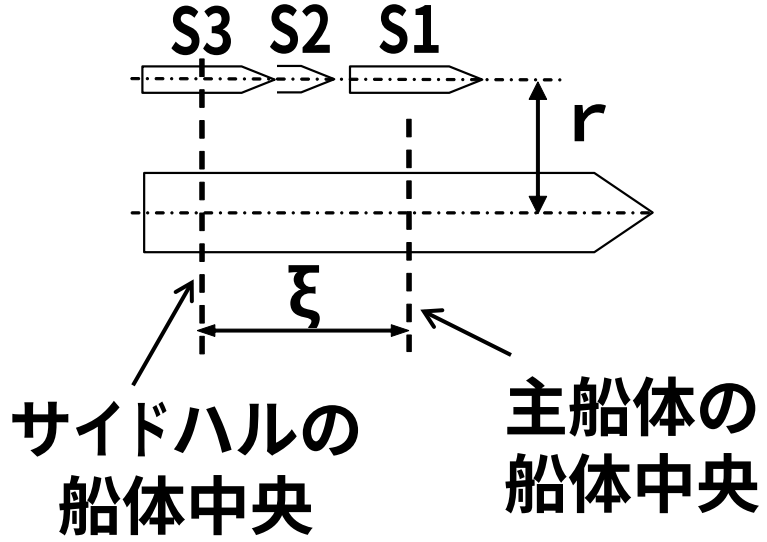
全体概観

クロスデッキ部概観



● サイドハル位置

サイドハル位置	船長方向の距離 ξ (m)	船幅方向 r (m)
S1	0.0	0.43
S2	−0.86	
S3	−1.24	

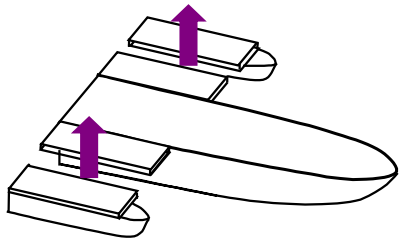


水槽試験の概要
ー 計測項目と試験条件 ー

● 計測項目

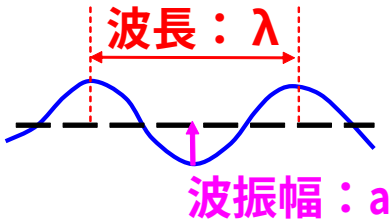
- ー 船体運動（上下揺、縦揺）
- ー 波浪外力（クロスデッキ部に働くせん断力）

せん断力：Fz

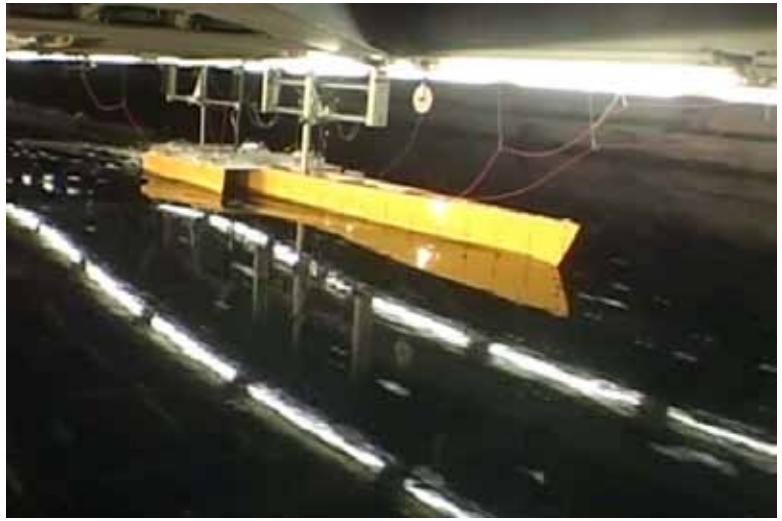


● 試験条件

- ー 船速：Fr=0.0～0.6
- ー 入射波の波長船長比（λ/Lm）
  ：0.5～3.0
- ー 入射波の振幅（a）：2.0 cm
- ー 波向き：正面向い波

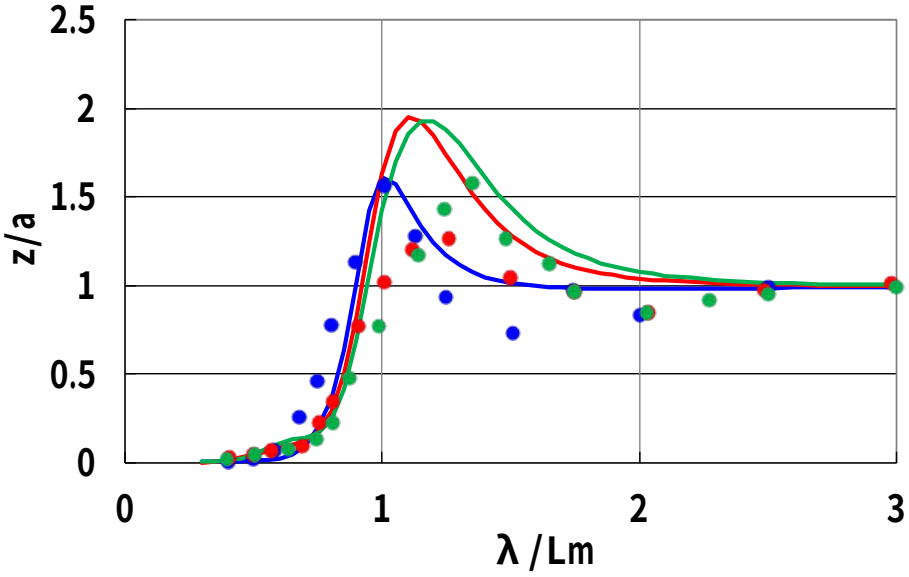


水槽試験の様子

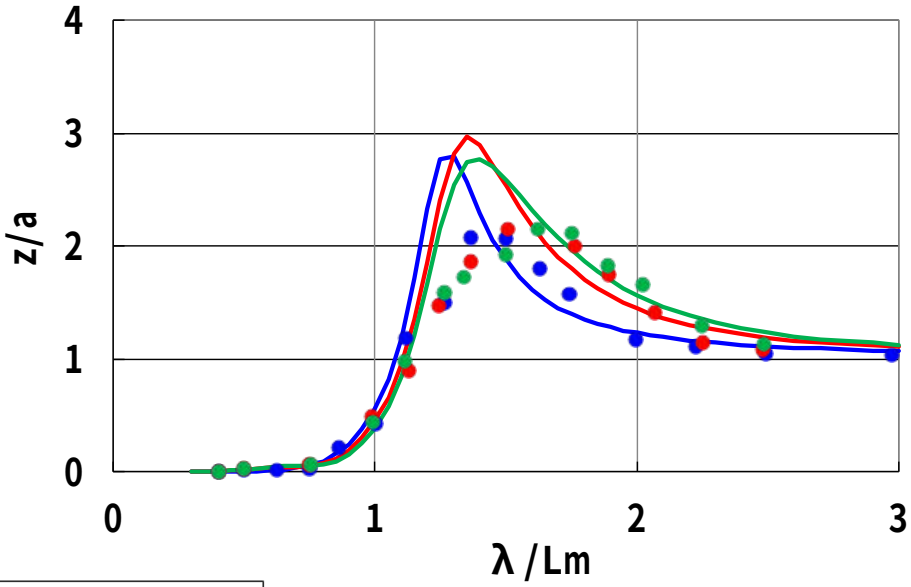


計算結果と水槽試験結果の比較
ー 船体運動（上下揺）ー

Fr=0.4



Fr=0.6

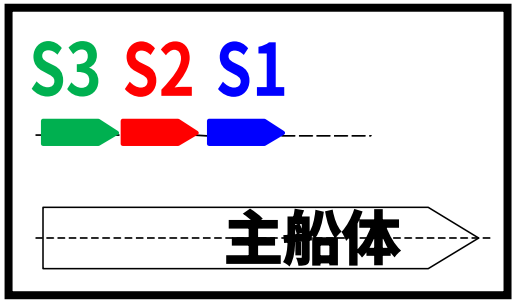


- Z:上下揺の振幅
- Lm:主船体の船長
- a:入射波の振幅
- λ:入射波の波長

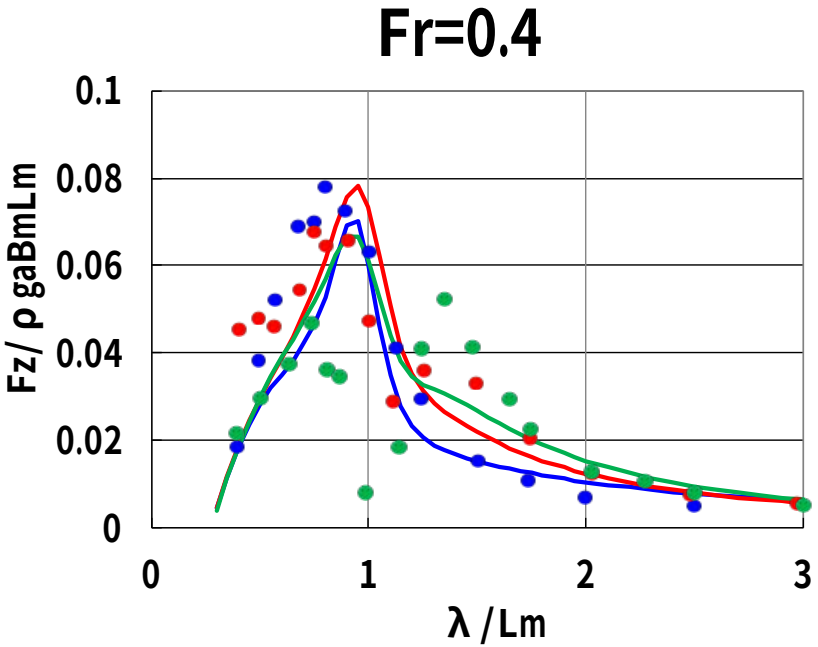
S1 Cal.　S1 Exp.
S2 Cal.　S2 Exp.
S3 Cal.　S3 Exp.

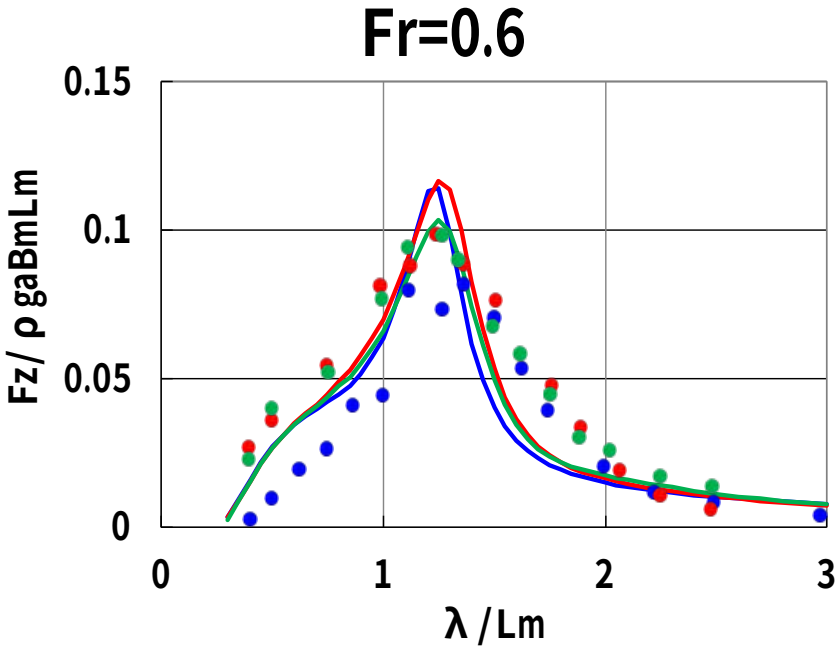
Cal.：計算値
Exp.：実験値

サイドハル位置



計算結果と水槽試験結果の比較
ー クロスデッキ部に働くせん断力 ー



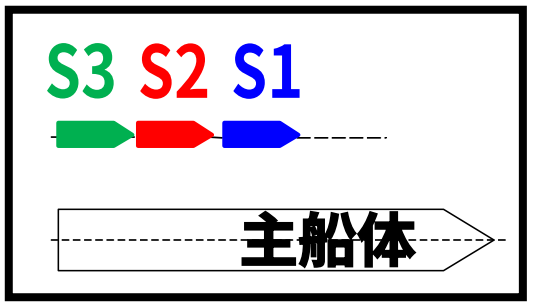


- Fz:せん断力の振幅
- Bm:主船体の水線幅
- ρ:水の密度
- g:重力加速度

Cal.:計算値

Exp.:実験値

サイドハル位置



まとめ

水槽試験と本研究で作成した理論計算から、三胴船に働く波浪外力を検討した結果、今回用いた船型に対して以下のことが分かった。

- 船体運動については、ピーク値付近では、実験値と計算結果に多少の差があったが、理論計算により船体運動に対するサイドハル位置の影響を捉えることが可能であることが分かった。
- 三胴船のクロスデッキ部に働くせん断力については、船体間の干渉が小さくなる高速域になるほど、計算結果と実験値の一致度は良くなることが確認できた。

今後の課題

- サイドハルの主要目（水線長、排水量）およびサイドハルの船幅方向が波浪外力に及ぼす影響

- 主船体とサイドハルとの流体力学的な干渉を考慮した計算手法の構築

水中画像化ソーナー用
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

発表の概要

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

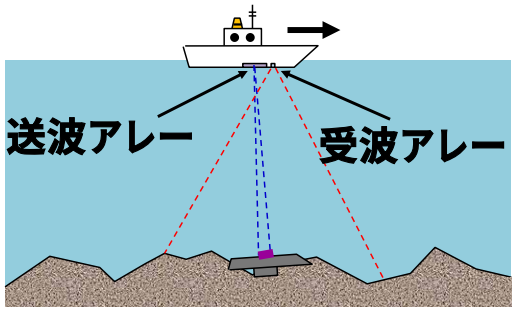
5. まとめ

音響による水中の画像化

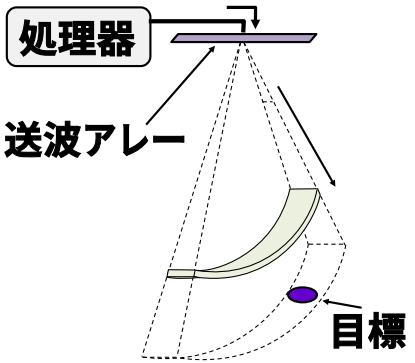
水中での光学カメラの見通し距離は数十mが限界
⇨より遠くの画像は音響的に得る必要あり（例：マルチビーム測深儀）

クロスファンビーム法

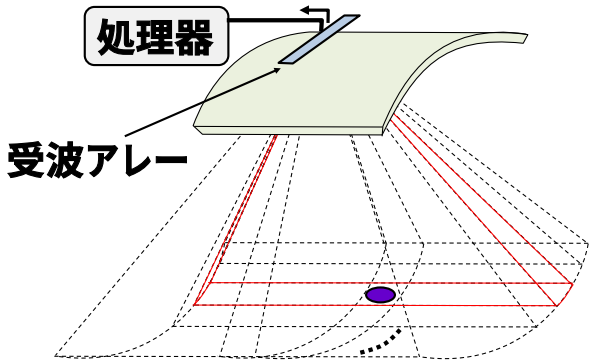
船底に送波アレーと受波アレーを設置



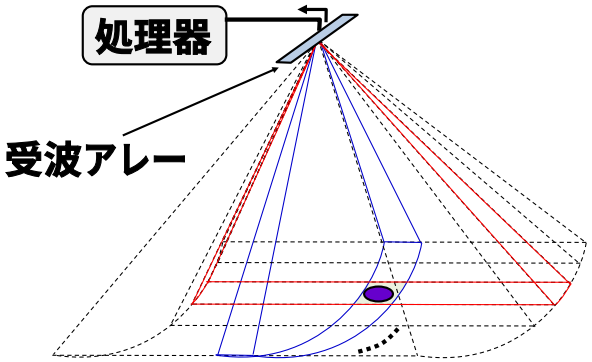
①縦に狭い扇状のビームを送波



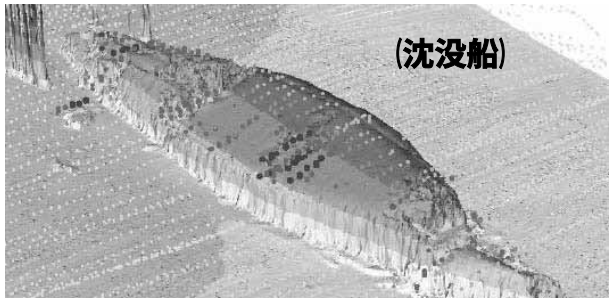
②横に狭い複数のビームを用意し、エコーを待ち受け受波



③縦横の組合せで位置を特定



④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

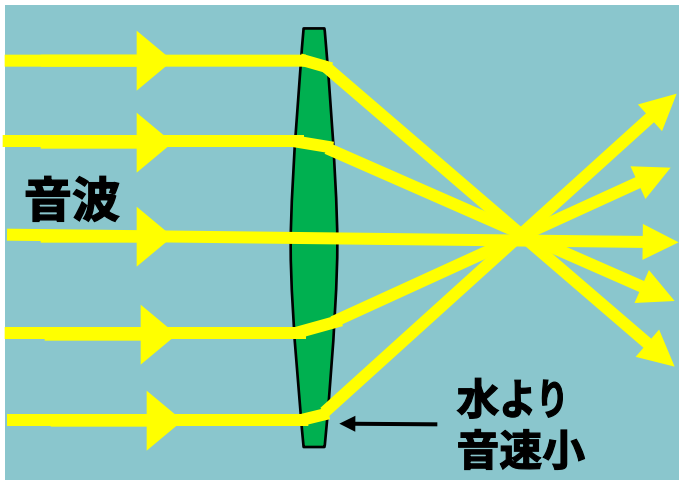
画像化ソーナーへの音響レンズの適用

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

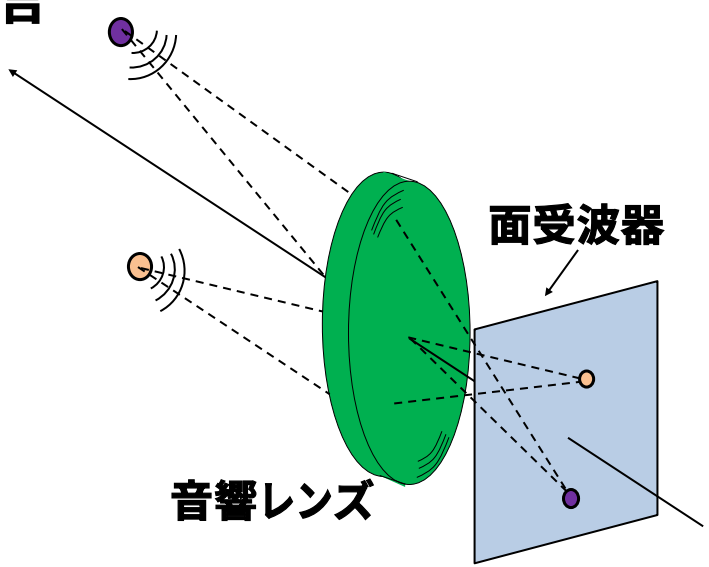
⇩

ビームの電子的走査に代わり、音響レンズを適用

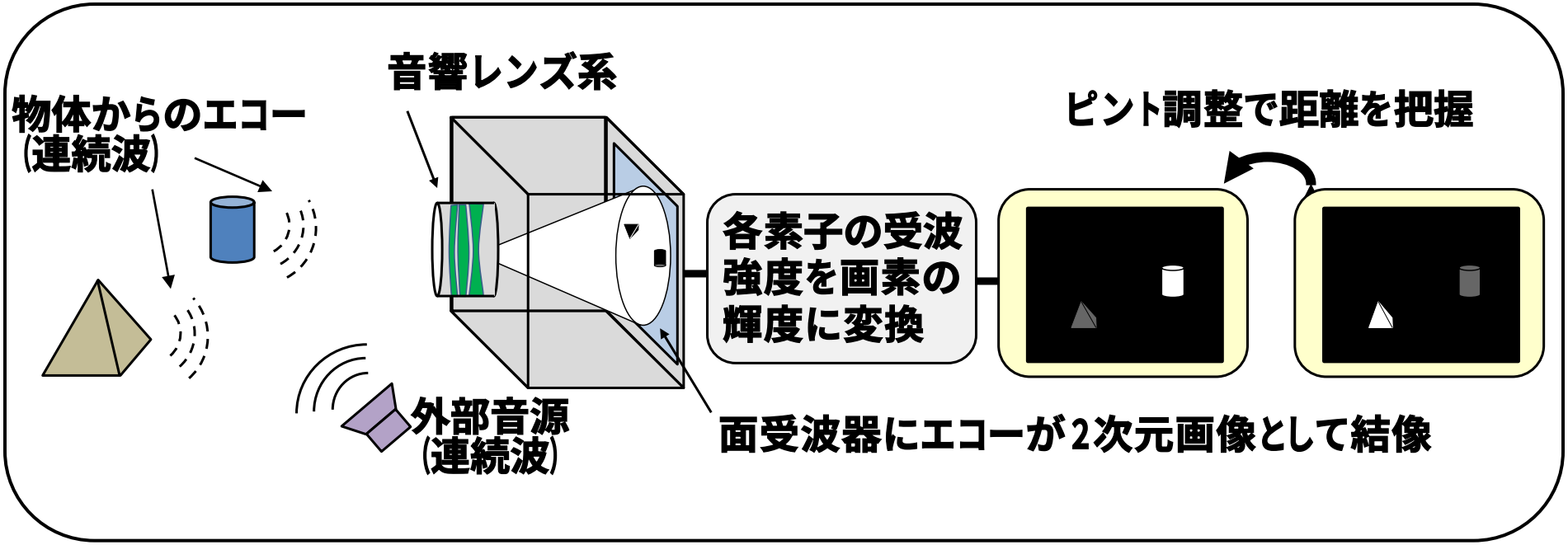
水と音速が異なる物質をレンズ状に作ることで、光と同様に音が収束する



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



音響レンズ式画像化ソーナーの原理と特徴

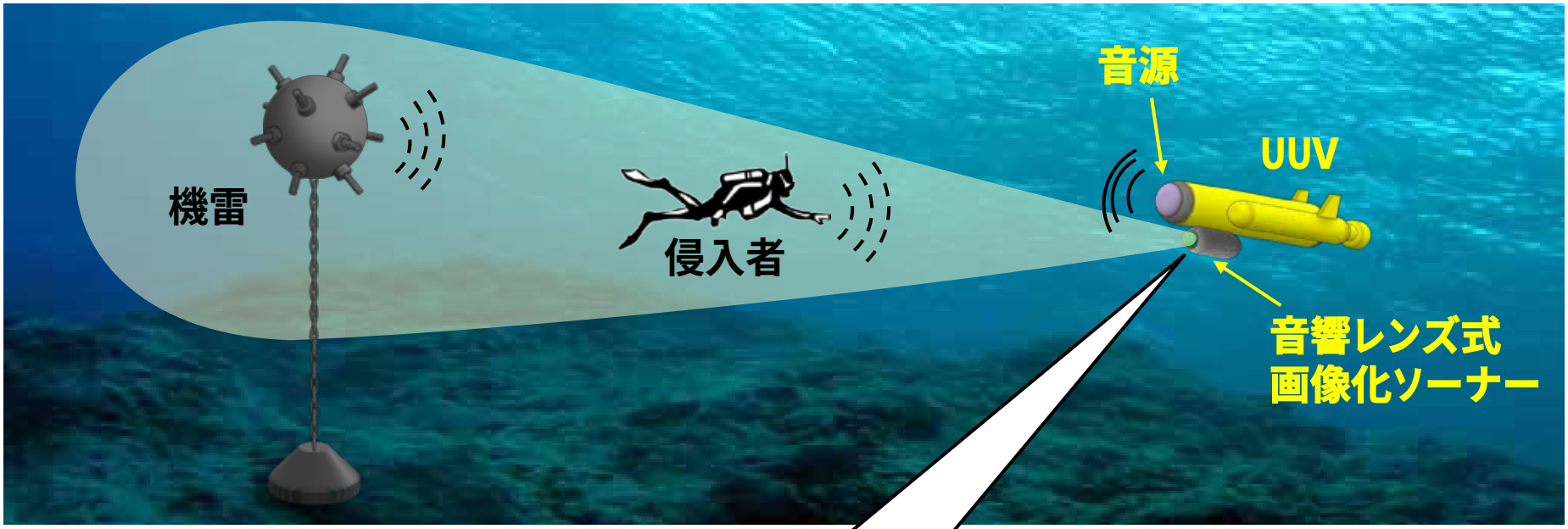


- 人間の視覚に近い**正面図**を得る
- 断続的なパルス波に代わり、**連続波**が使用可能
- 画像化に必要な**処理量を大幅に削減**

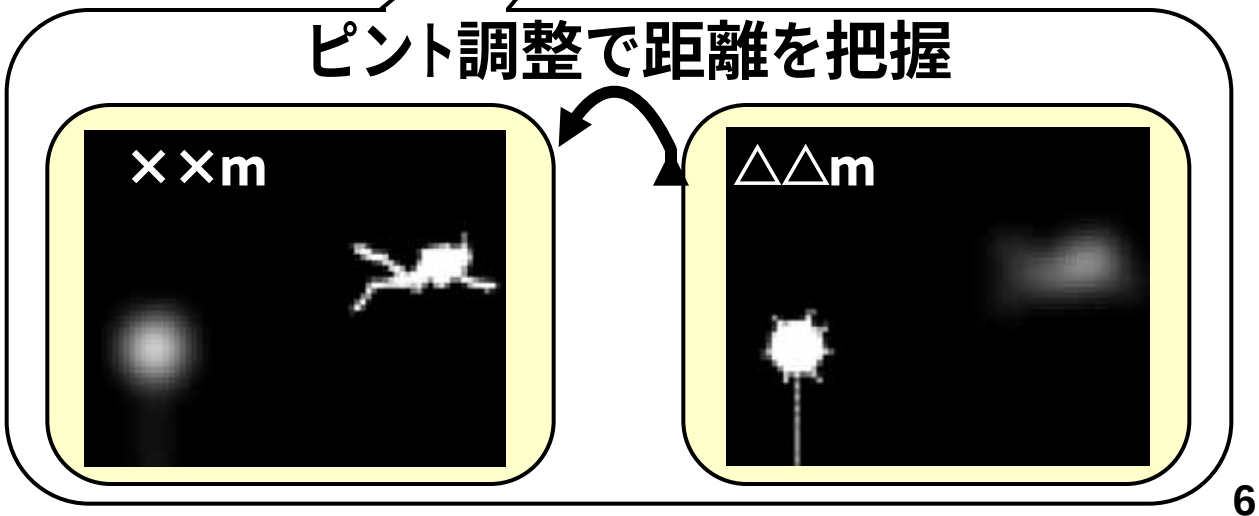
} フレームレートの高速化

音響レンズ式画像化ソーナーの応用例

音響レンズ式画像化ソーナーのUUVへの搭載



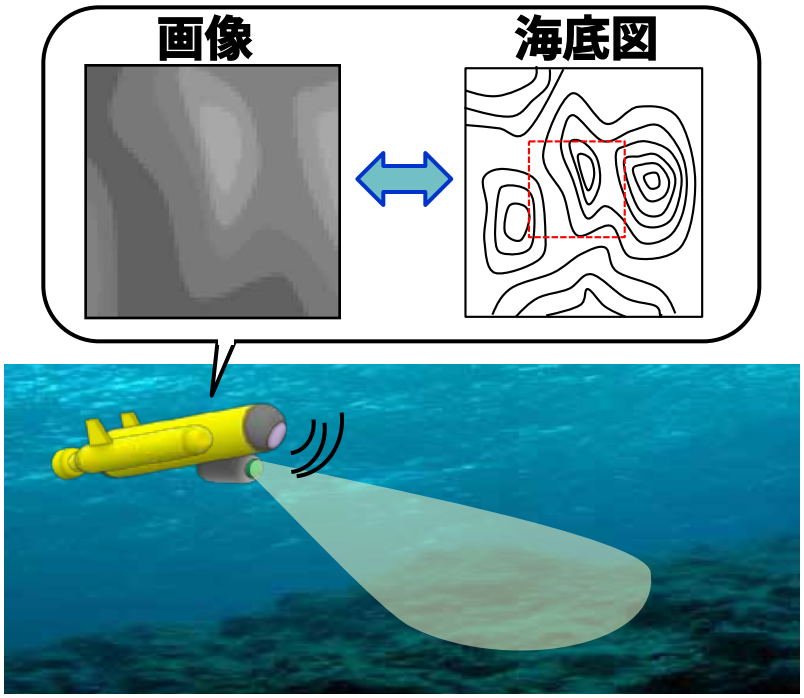
侵入者や機雷等を
発見･類別



音響レンズ式画像化ソーナーのその他の応用例

UUV用の地形照合

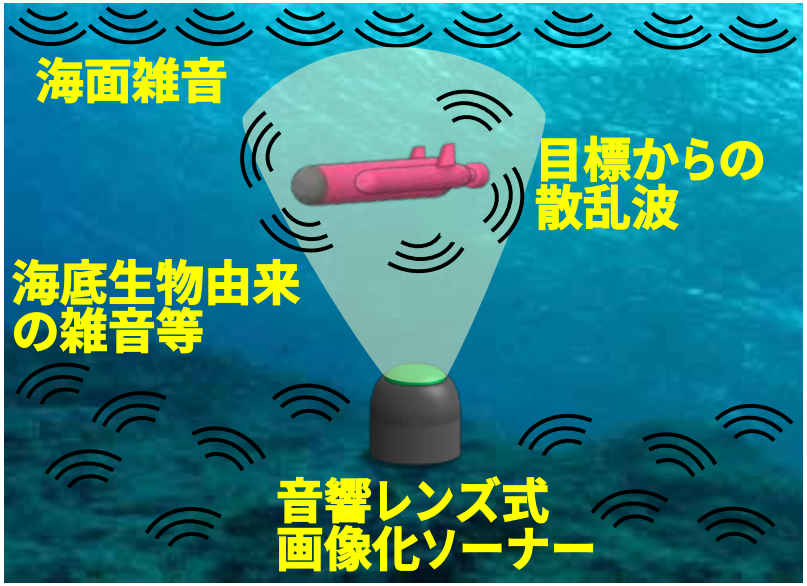
画像をデータ化した海底図と照合し、自分の位置を把握



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

画像化ソー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

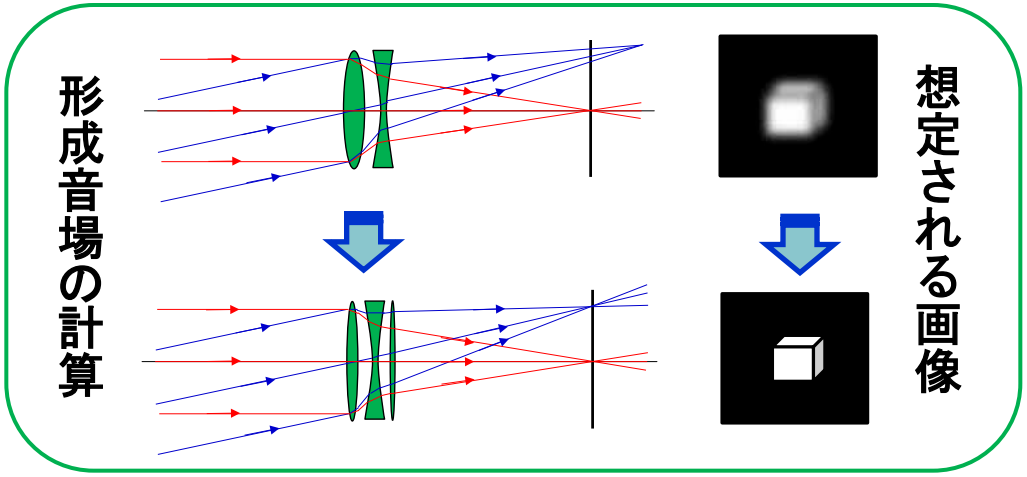
必要とする性能および制約条件を満たすか？

No

レンズ系の構造を修正

Yes

最終案として採用



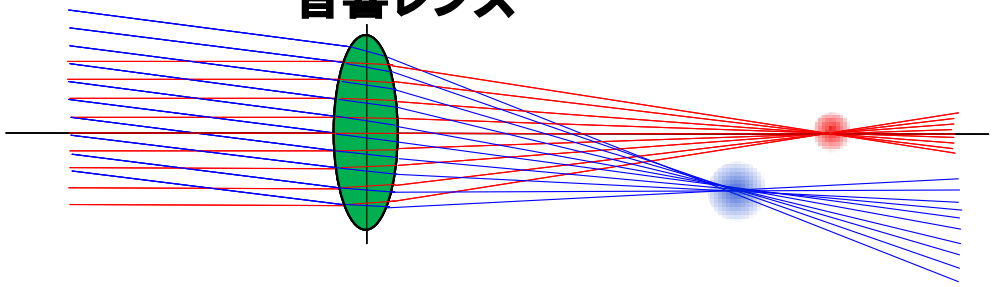
レンズ系が形成する音場を正確に計算する必要がある

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

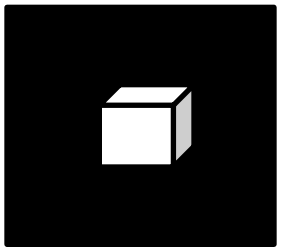
画像化ソーナーで使用する帯域の音波の波長は可視光線の**数万～数十万倍**だが、光学レンズの寸法とは大差がない

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

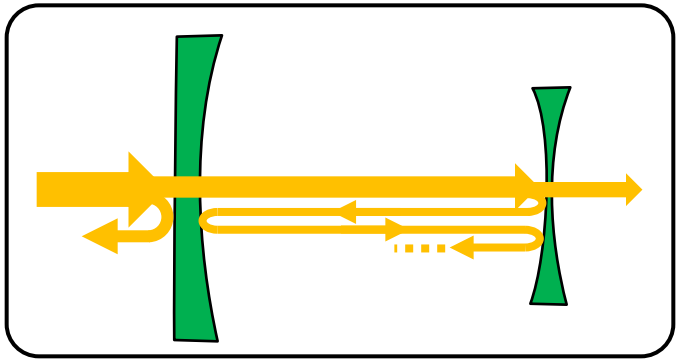
幾何光学近似法では要求が満たされない可能性がある

波動性を考慮する必要がある

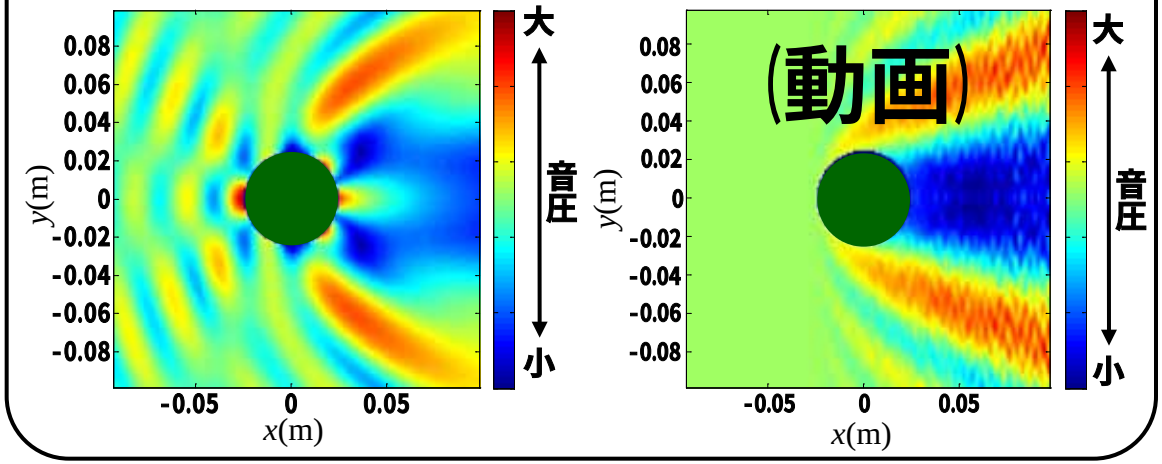
PE（放物型方程式）法の問題点

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）



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

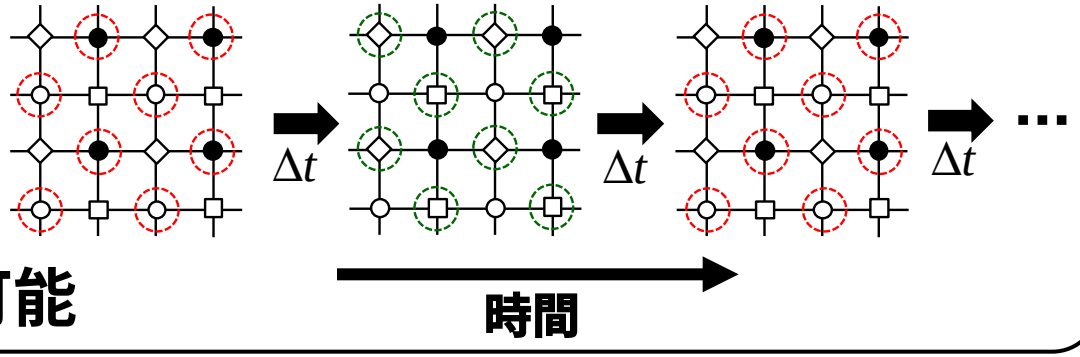
(PE : Parabolic Equation)　(FDTD : Finite Difference Time Domain)

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

○：垂直応力　●：せん断応力

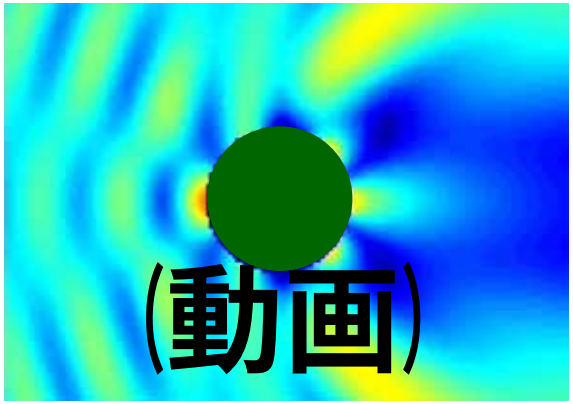
□：x方向粒子速度　◇：y方向粒子速度



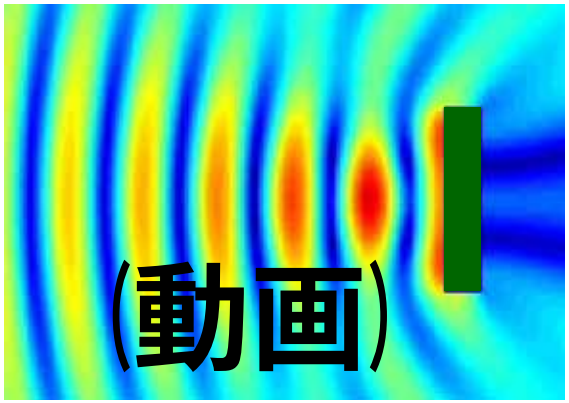
物体間の多重反射も計算可能

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

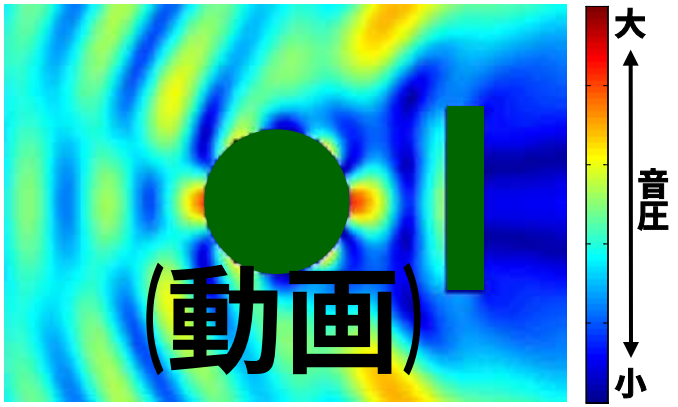
アクリル円柱のみ



剛体板のみ



アクリル円柱＋剛体板



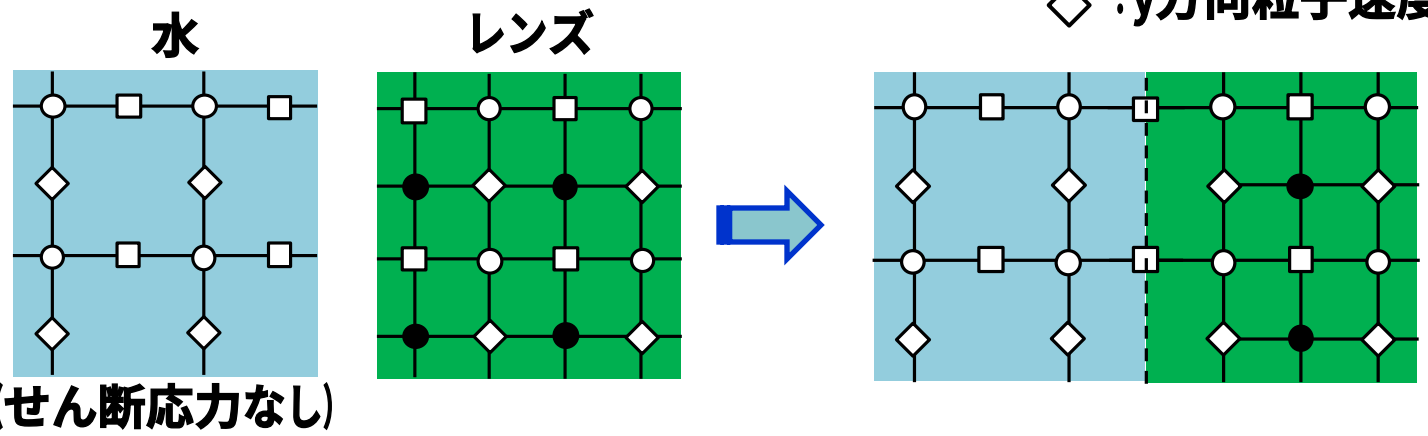
FDTD法では波動性を考慮した複数レンズ系の設計が可能

水とレンズの間の境界条件の設定に関する問題点

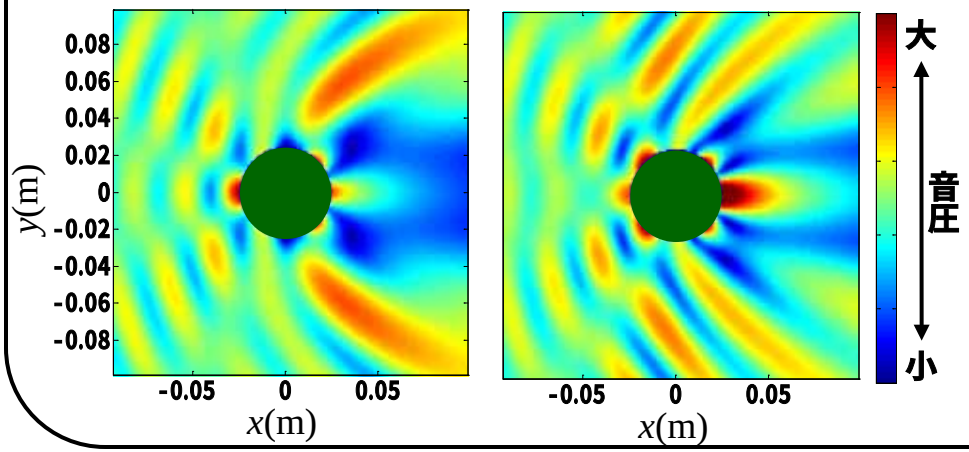
FDTD法では、水とレンズの境界に粒子速度の格子点を置く ⇨ この点の密度をどう設定するか？

○ ：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



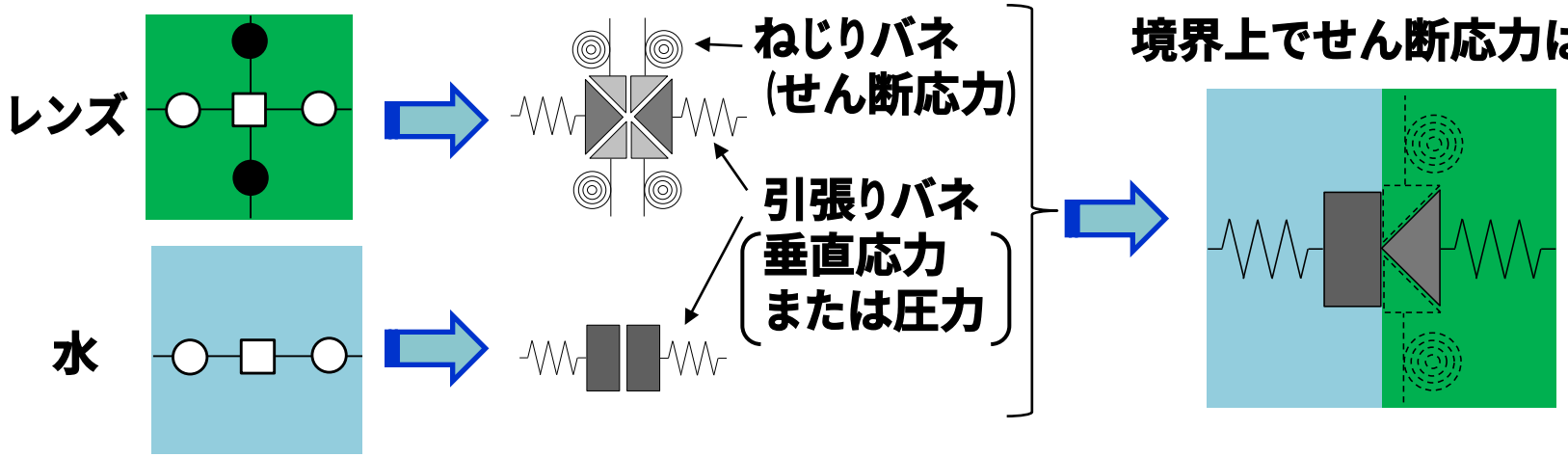
FDTD計算値の誤差が大きい

⇩

現実により近い境界条件の設定が必要

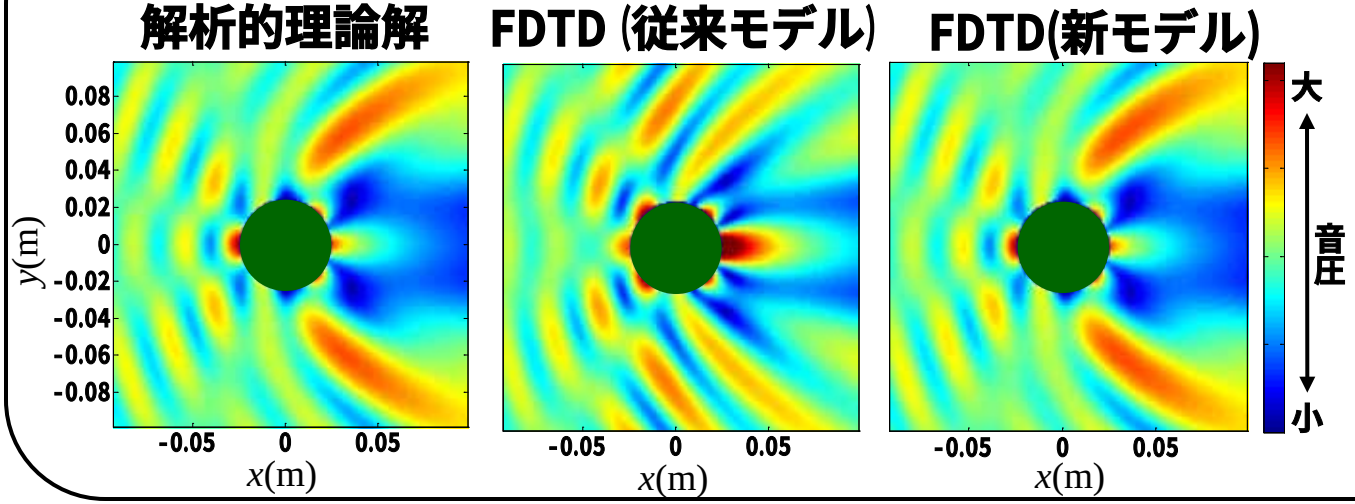
境界面の新たなモデル化

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



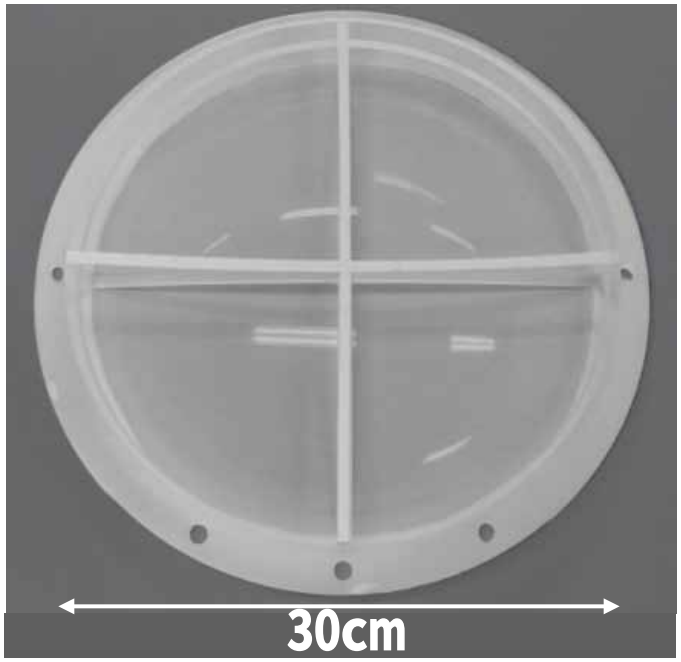
従来の境界条件に比べ、理論解との誤差が小さい

FDTD法を評価する為の音響レンズ

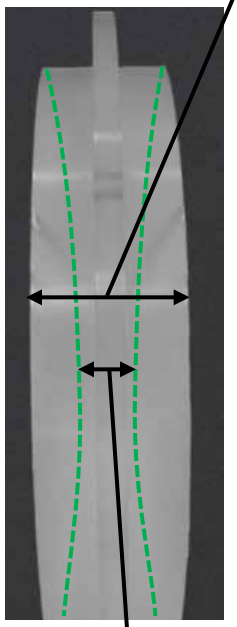
材質	特徴	水に対する屈折率	音が収束する形状
アクリル	音響レンズへの使用実績がある	0.59 (＜1)	凹レンズ
ゴム	屈折率および反射率の調整が可能	1.34 (＞1)	凸レンズ

アクリル (凹レンズ)

正面

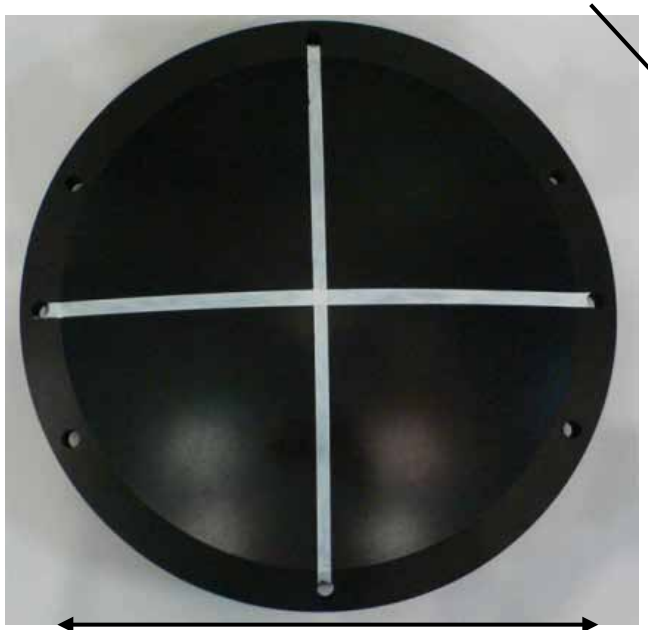


側面

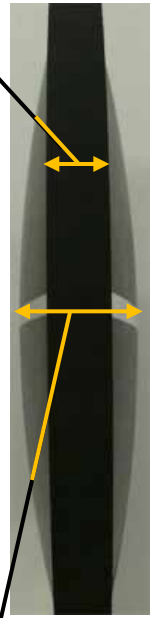


ゴム (凸レンズ)

正面

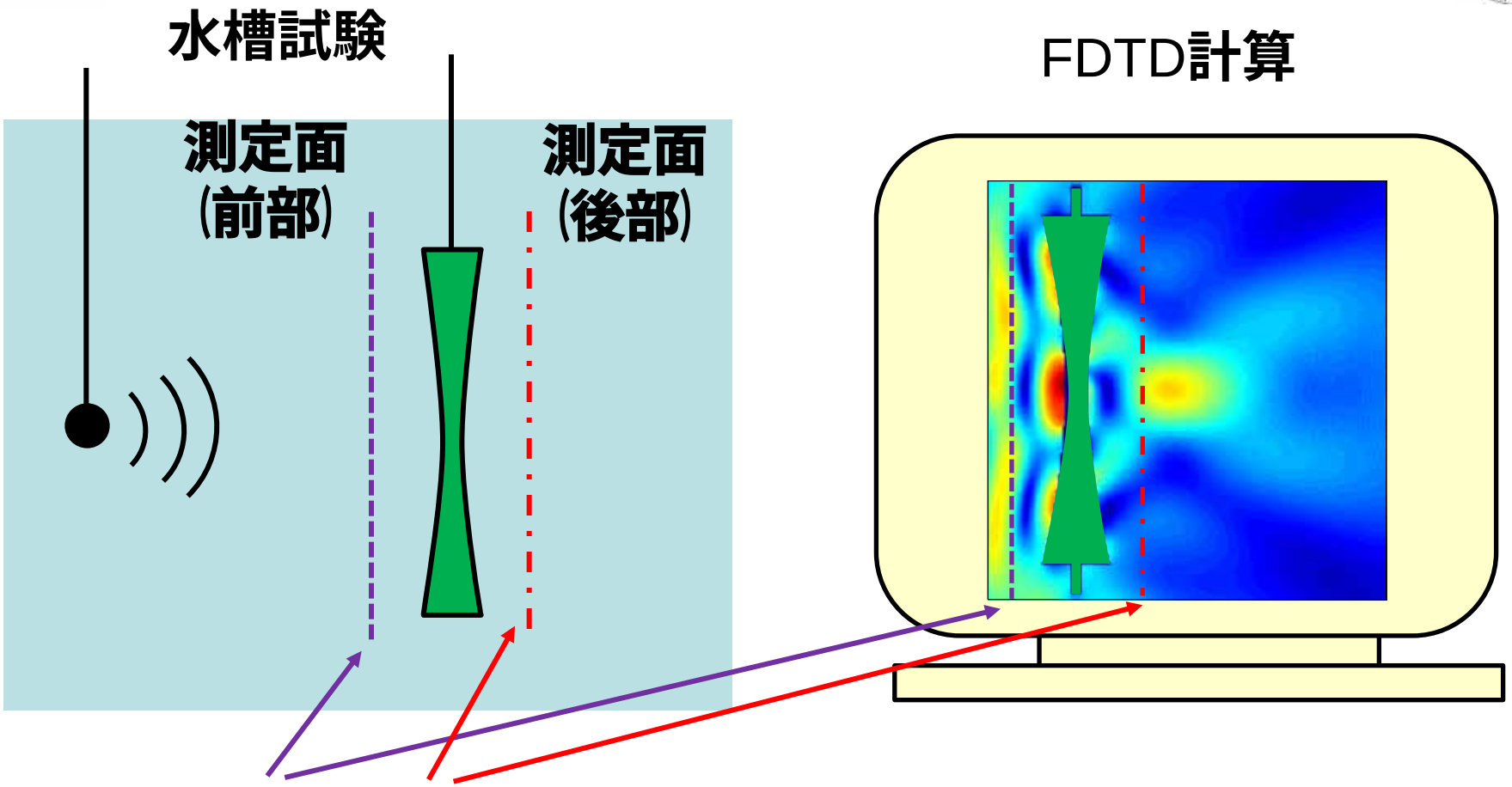


側面



(ともに球面半径は60cm)

音響レンズが形成する音場の測定とFDTD計算



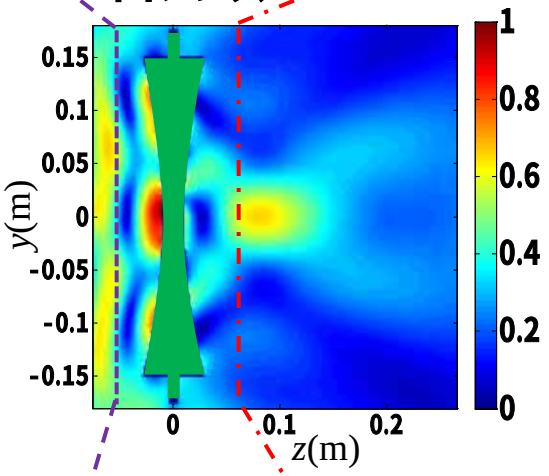
レンズの前部と後部、それぞれの測定面における音場分布の測定値と計算値を比較

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)

測定値と計算値の比較（アクリル）

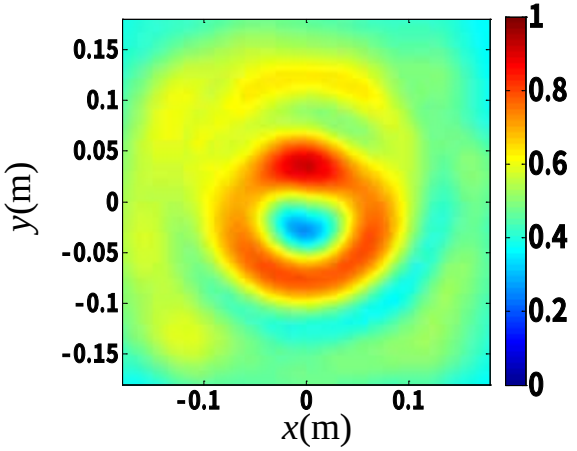
FDTD計算値

凹レンズ

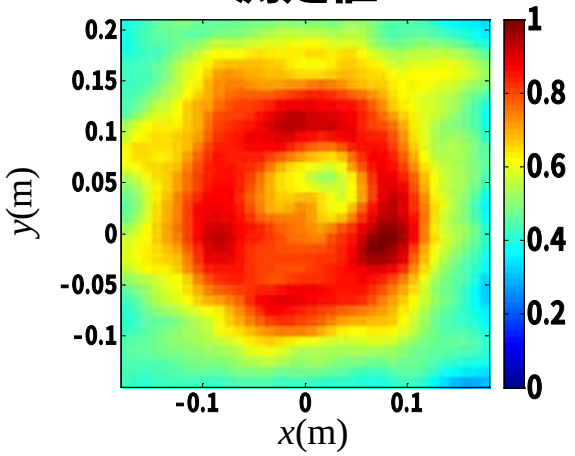


測定面（前部）

計算値



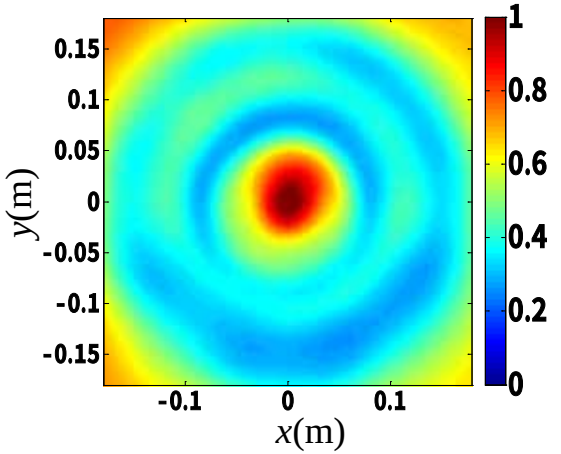
測定値



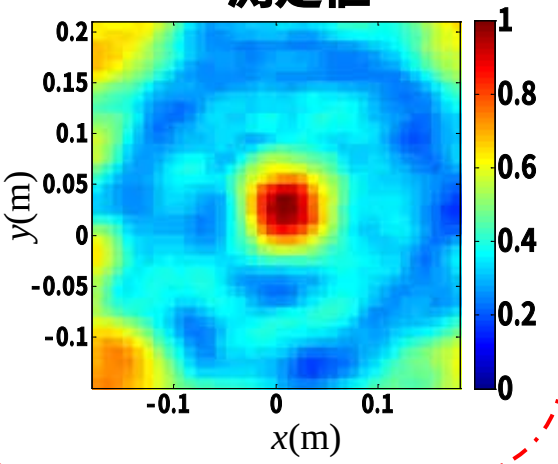
それぞれの画像における最大値を1として正規化

測定面（後部）

計算値



測定値

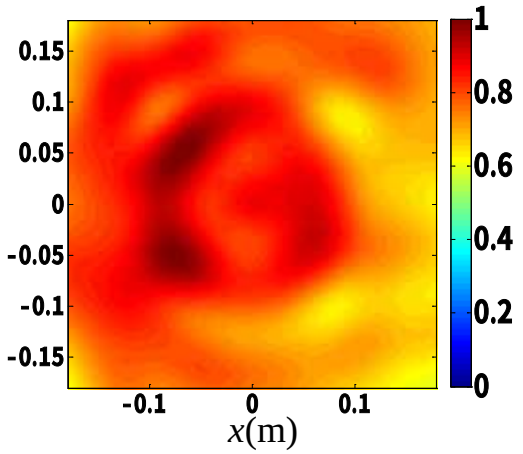


FDTD計算値は測定値の音場分布とよい一致が得られた

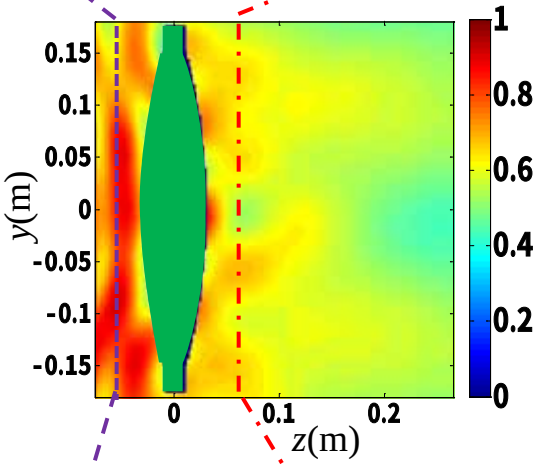
測定値と計算値の比較（ゴム）

FDTD計算値

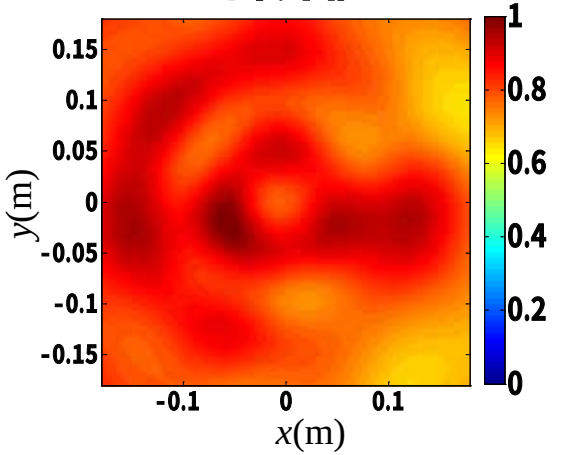
測定面（前部）
計算値



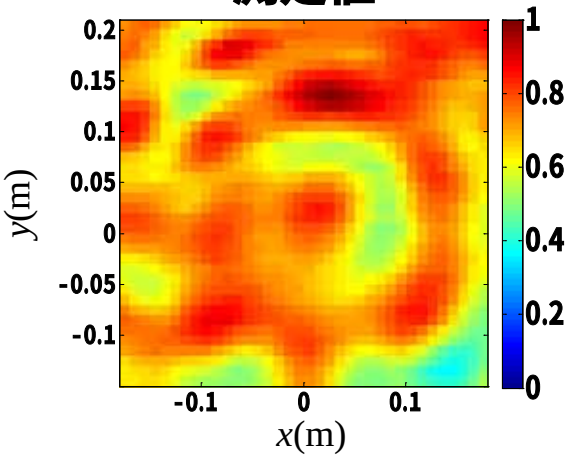
凸レンズ



測定面（後部）
計算値

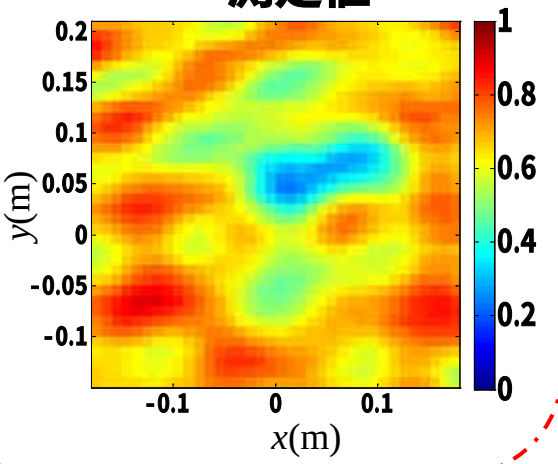


測定値



それぞれの画像
における最大値
を1として正規化

測定値



FDTD計算値と測定値との差がアクリルより大きい

まとめ

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ー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、画像化ソーナーに適したレンズ系の最適設計