

# 音波反射に強い水中音響測位システムの開発

2021年11月5日

沖縄海洋ロボットコンペティション  
海洋産業におけるIoT活用シンポジウム

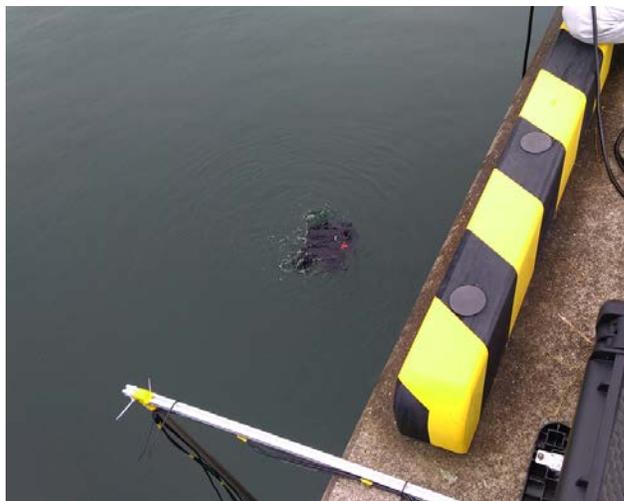
北見工業大学 工学部 情報通信系  
吉澤 真吾

# 水中音響測位とは？

- 水中ロボット(ドローン)は海中での位置が把握しにくい
  - 濁度の高い水域
  - GPS衛星からの電波が海中(水中)で減衰して届かない



対象物が発する音波を手掛かりに位置を見つける



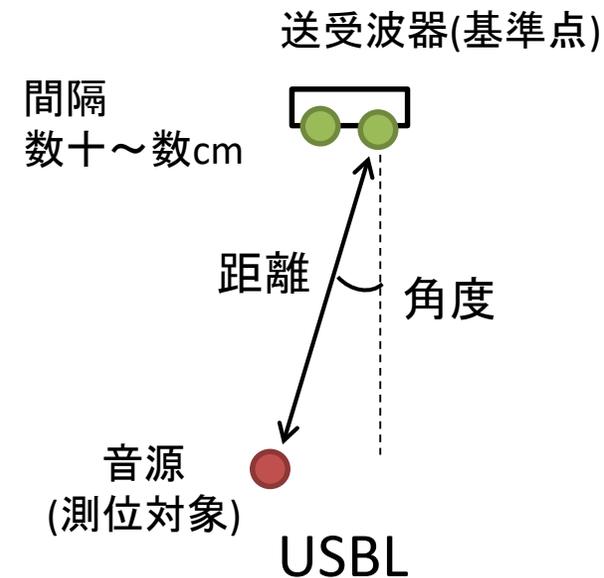
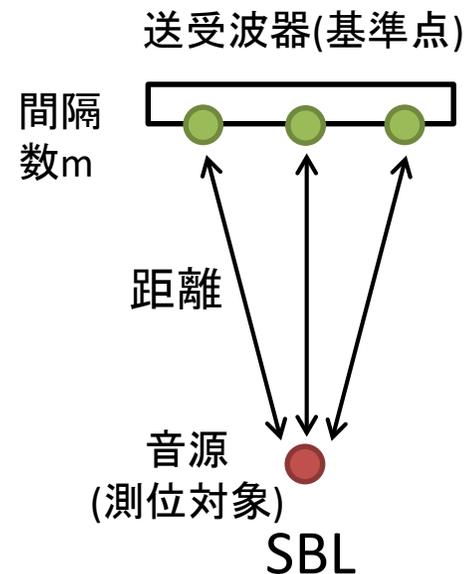
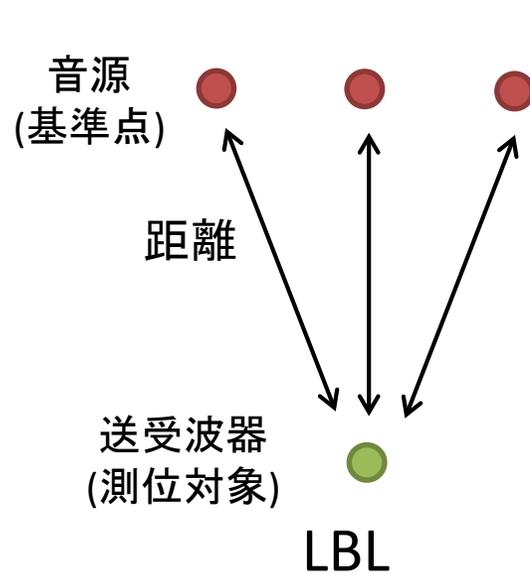
千葉県浦安市河口付近



北海道サロマ湖氷上

# 音響測位方式

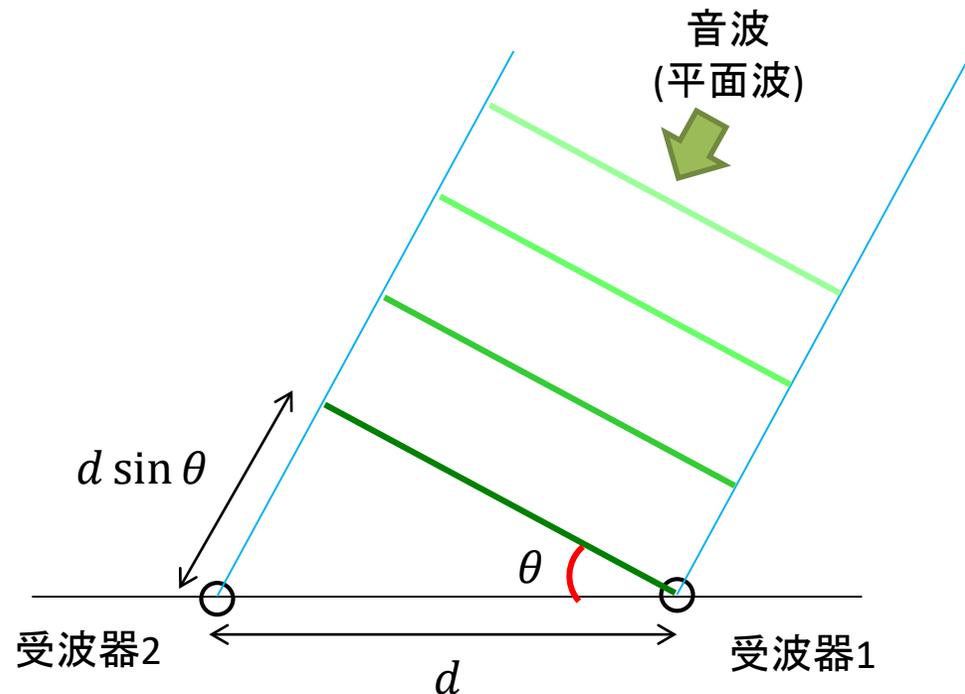
- 基準点からの相対的な距離や角度を音波で測る
  - LBL (Long Base Line)
  - SBL (Short Base Line)
  - USBL (Ultra Short Base Line)\*



\*SSBL (Super Short Base Line)とも呼ばれる

# 到来方向推定

- 2つの受波器に到達する音波から到達時間差(TDOA, Time Difference of Arrival)を計測
- 時間差を角度に換算



$$d \sin \theta = c\tau$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{c\tau}{d} \right]$$

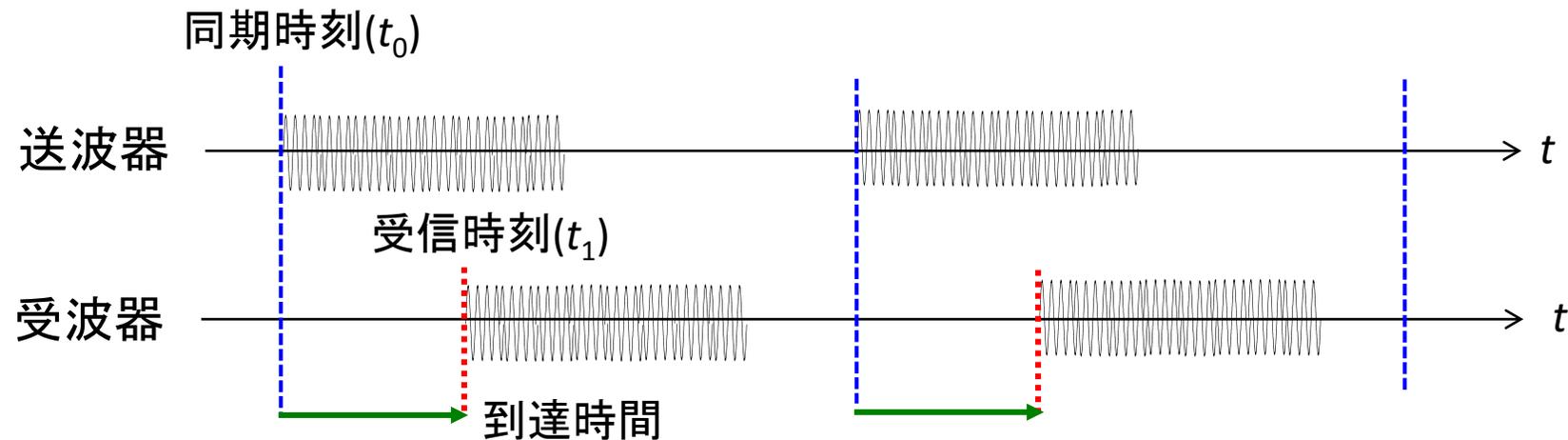
c: 水中音速 [m/s]

d: アレイ間隔[m]

$\tau$ : 到達時間差 [s]

# 距離計測

- トランスポンダ方式
  - 2点間の音波往復時間から距離を計測
- 同期信号方式
  - 送信側と受信側で時刻を合わせ、音波受信時刻から距離を計測
  - 最近では原子時計や原子時計クラスのGNSS基準周波数発生器が入手可能

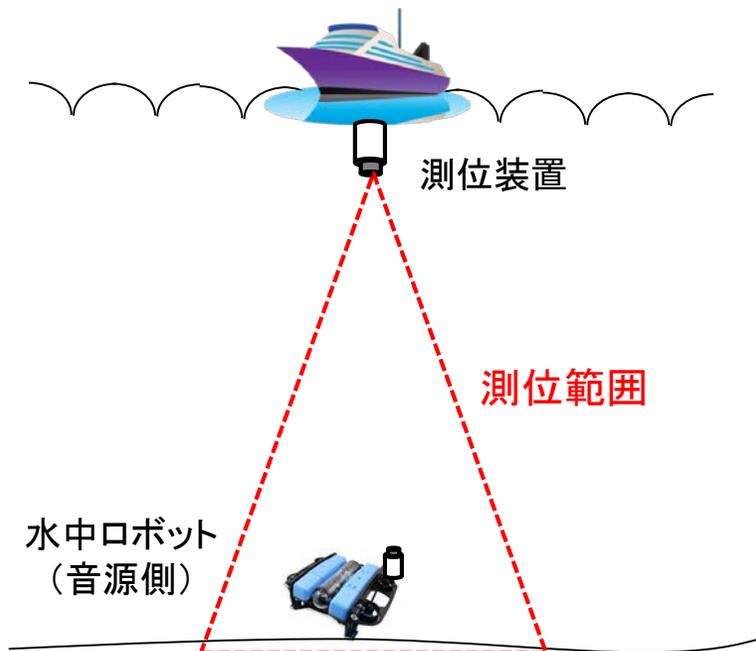


同期信号方式による距離計測

# 水中音響測位システムの技術課題

- 水深が浅い海域や水平方向の音響測位は誤差が大きい
  - 音波反射が大きく影響する

従来の音響測位システム  
主に鉛直方向で測位



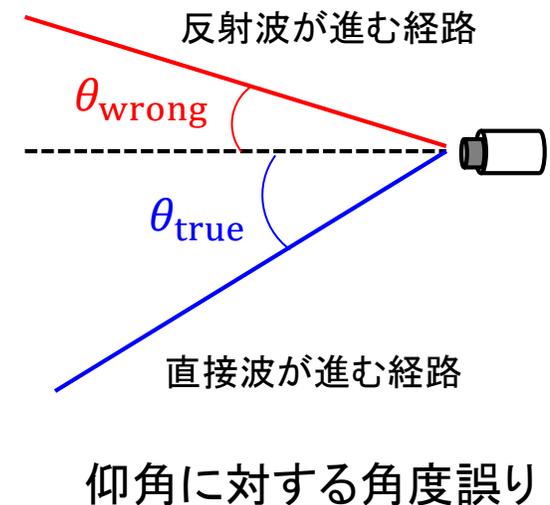
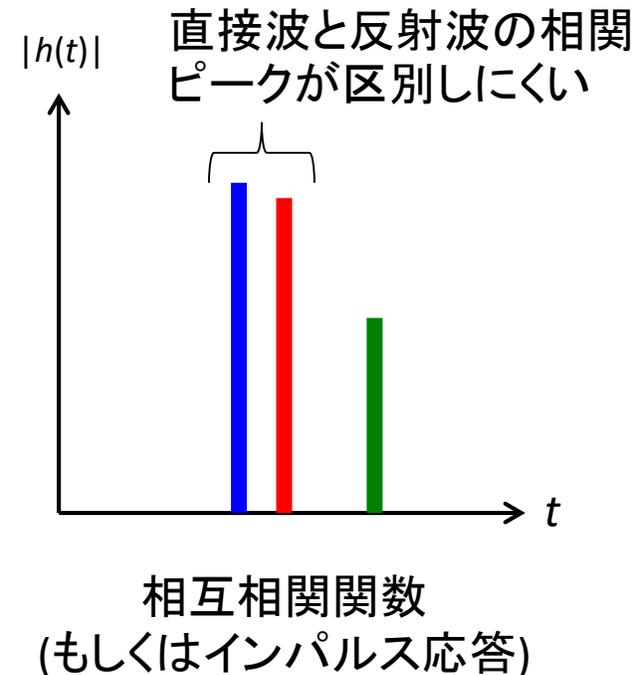
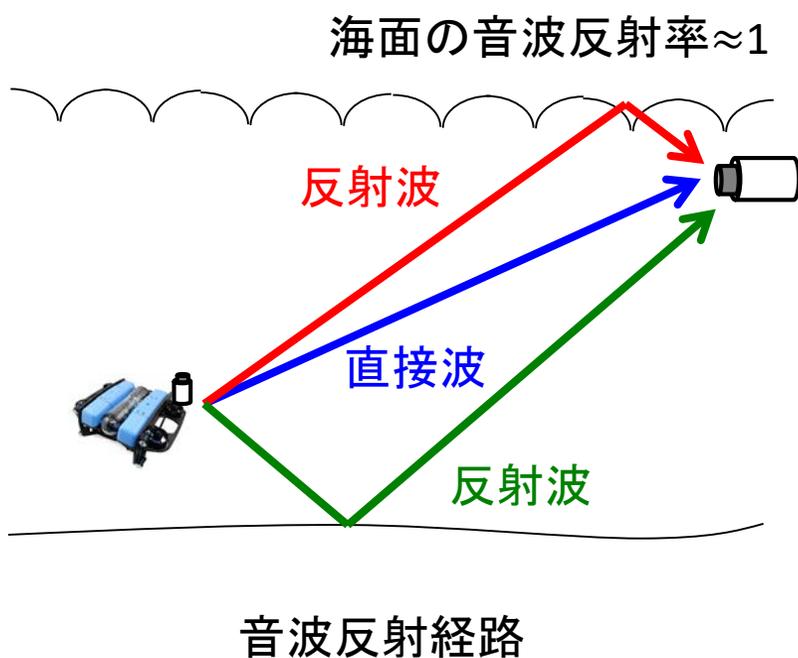
新しい音響測位システム  
浅海域、水平方向で測位



市販の音響測位装置でも水平方向測位は可能であるが  
測位誤差が大きくなる

# なぜ水平方向の測位は難しいのか？

- 水中音響では海面で反射した波がほとんど減衰しない
- 直接波ではなく反射波の到来方向を誤って検出してしまう場合がある
  - 仰角に対する到来方向推定が困難



# 提案方式

- 小型水中ロボットに適した音響測位システム
  - 方位角, 距離, 深度で3次元位置を特定
  - 水中ロボットの機能(深度センサ)を利用する

	測定対象	送波器数	受波器数	備考
従来方式	仰角, 方位角 距離	1	3~4	トランスポンダ方式により 音の往復時間から距離を計測
提案方式	方位角 距離 深度	1	2	深度センサで高さ位置情報を取得 同期信号方式により音の片道時間から距離 を計測

# 深度センサの精度

- Bar30深度センサのカタログ上相対精度は 204 cm
- 遊泳用プールで実際に測定

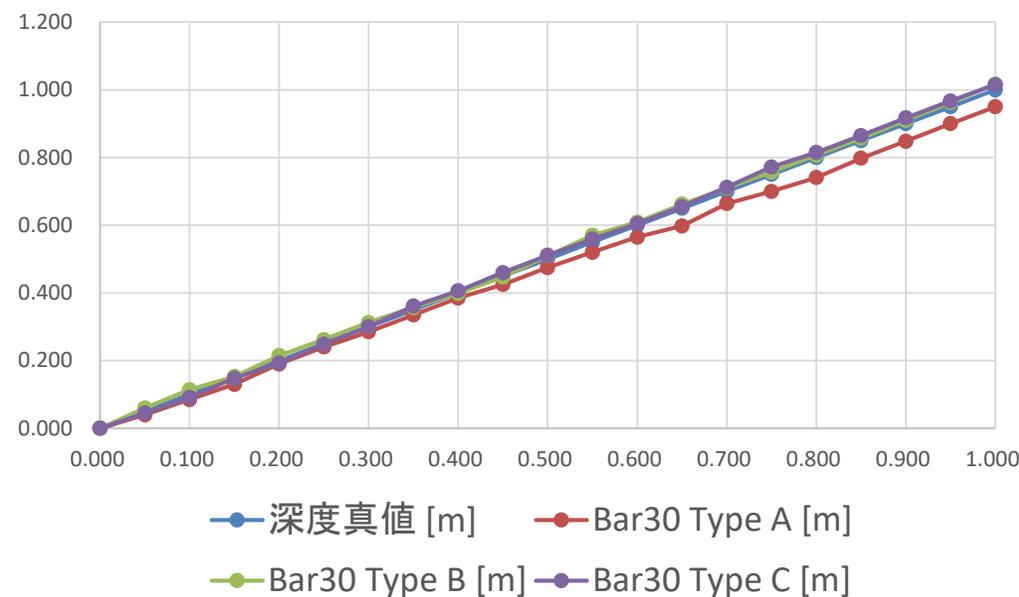
Bar30深度センサ      USBリピータケーブル



Arduinoマイコン



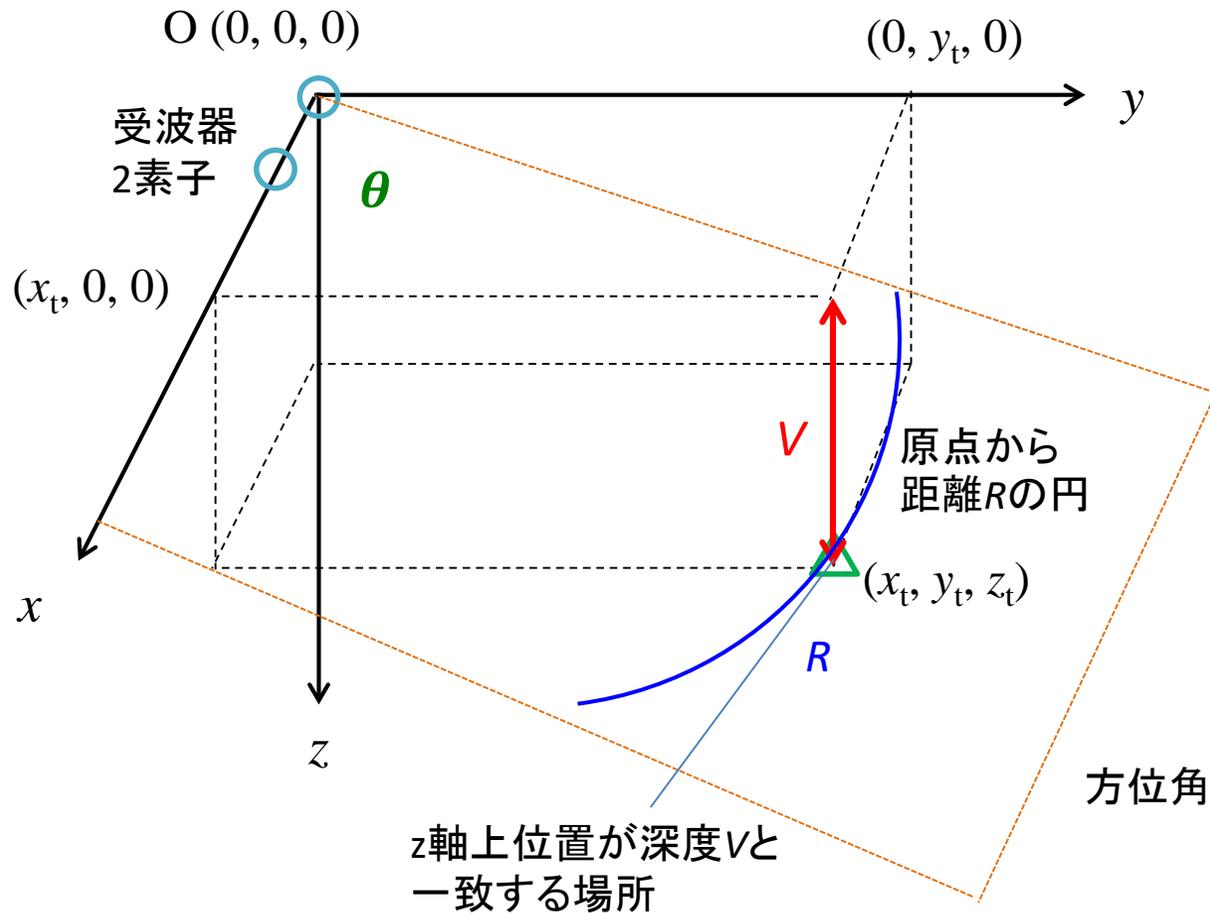
水面からの深度比較 (キャリブレーション後)



オフセット誤差(水面下15cm程度)を補正する必要があるが  
キャリブレーション後の誤差平均は1~3 cm

# 深度情報を用いた測位

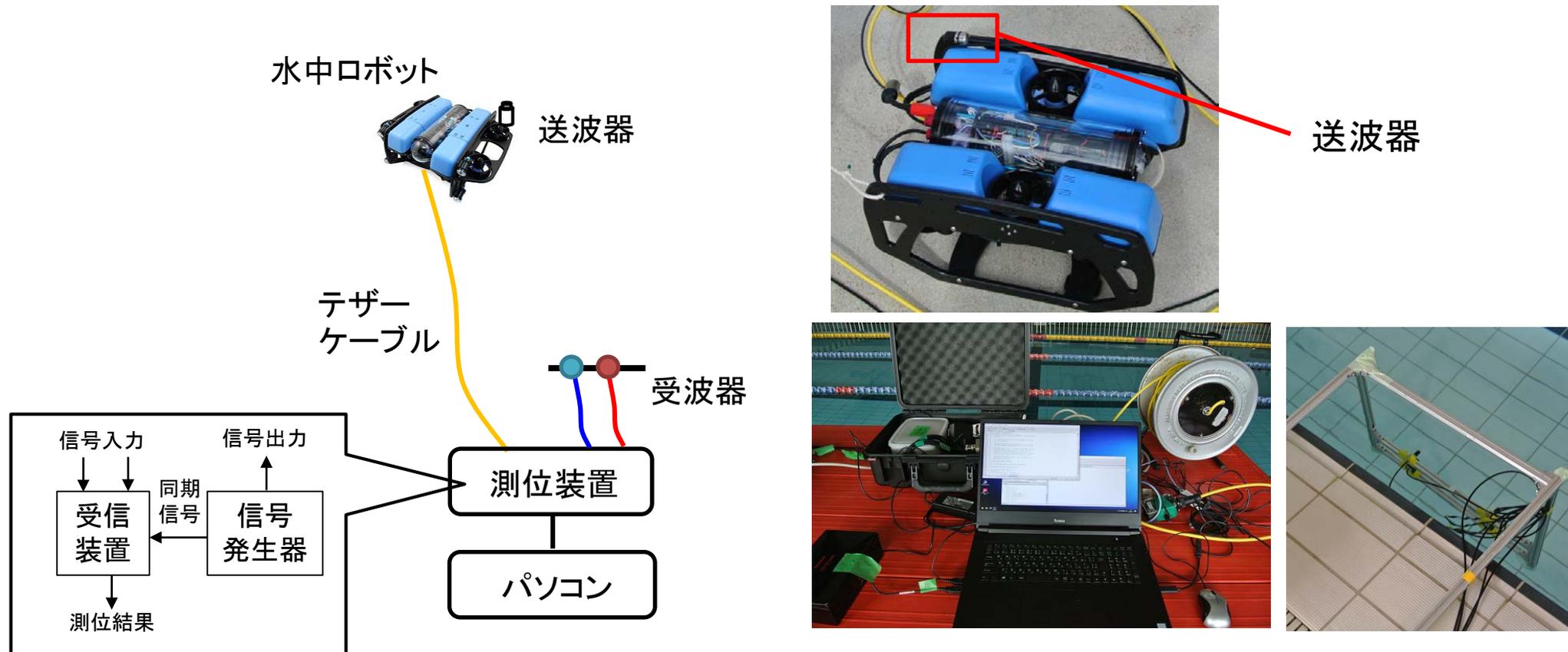
- 距離、方位角、深度で3次元位置を特定



$$\begin{aligned}
 x_t &= R \cos \theta \\
 y_t &= R \cos \phi \\
 z_t &= V \\
 \cos \phi &= \sqrt{1 - \cos^2 \theta - \left(\frac{V}{R}\right)^2}
 \end{aligned}$$

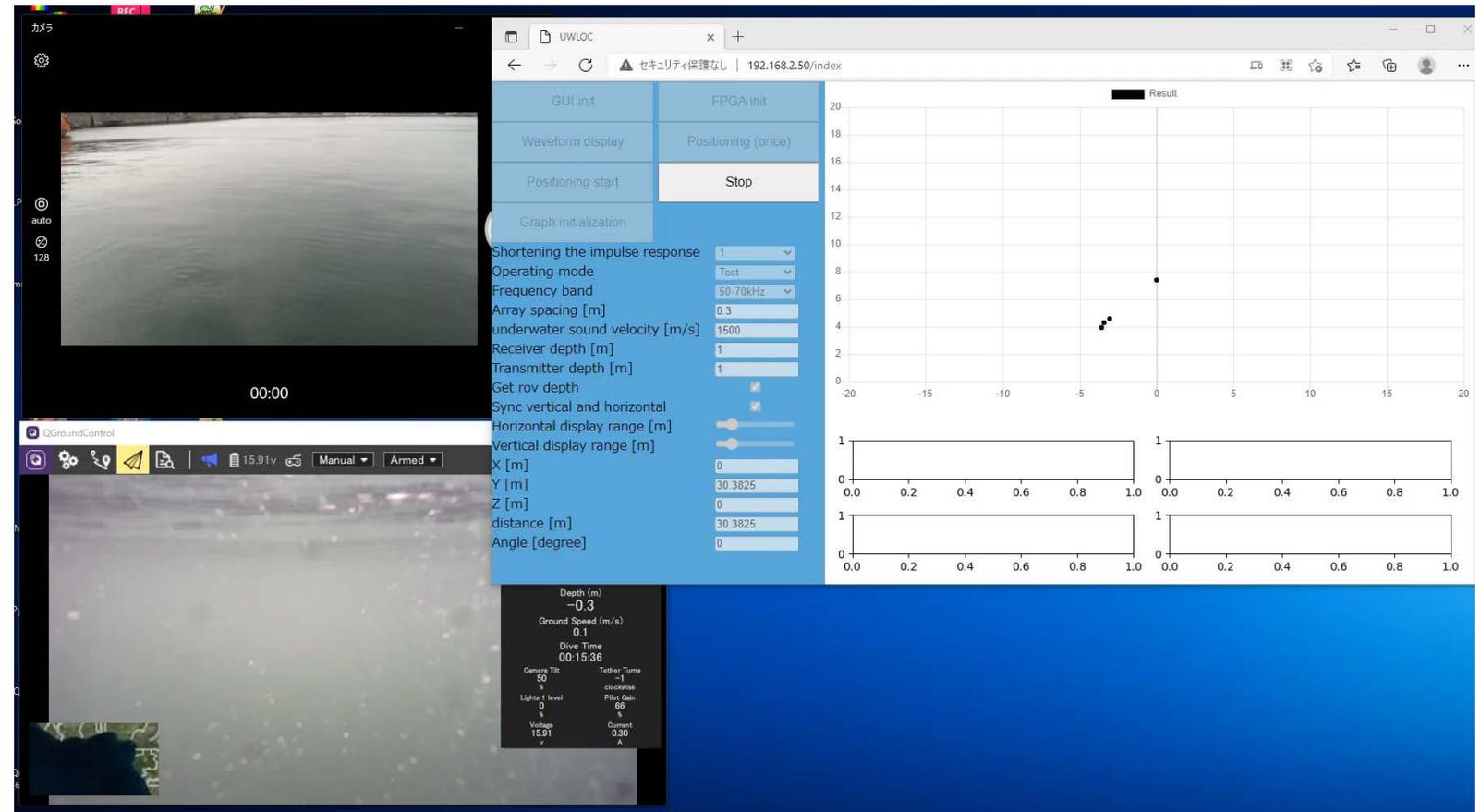
# 測位装置構成\*

- 送波器(トランスデューサ)を水中ロボットに取り付ける
- テザーケーブルを介して測位信号を送信する



# 試作中の音響測位装置

- 2021年9月 北海道紋別市オホーツクタワー周辺で実施

The screenshot shows the UWLOC software interface. On the left, there is a video feed of the water surface. In the center, there is a control panel with various settings and buttons. On the right, there is a large graph area. At the bottom, there is a status display showing various parameters.

**Control Panel Settings:**

GUI init	FPGA init
Waveform display	Positioning (once)
Positioning start	Stop
Graph initialization	
Shortening the impulse response	1
Operating mode	Test
Frequency band	50-70kHz
Array spacing [m]	0.3
underwater sound velocity [m/s]	1500
Receiver depth [m]	1
Transmitter depth [m]	1
Get rov depth	
Sync vertical and horizontal	
Horizontal display range [m]	
Vertical display range [m]	
X [m]	0
Y [m]	30 3825
Z [m]	0
distance [m]	30 3825
Angle [degree]	0

**Status Display:**

Depth [m]	-0.3
Ground Speed [m/s]	0.1
Dive Time	00:15:36
Camera Tilt	50
Light 1 level	0
Voltage	15.91
Current	0.20
Tether Time	1
Pilot Gain	60
	A

The graph area shows a plot of the results, with a single data point visible at approximately (0, 4). Below the graph are four small sub-plots, each showing a range from 0.0 to 1.0 on the x-axis and 0 to 1 on the y-axis.

# 方位角に対する測定

- 音波反射に強い角度推定アルゴリズム
  - インパルス応答型一般化相互相関関数(IR-GCC-PHAT)[1]を提案
    - 海面・海底反射がある環境でも方位角を正しく測定可能

アルゴリズム	参照信号	音波反射耐性 (初期反射)	雑音・ 後期残響耐性
GCC	不要	弱	弱
GCC-PHAT	不要	強	弱
MF	必要	弱	強
IR-GCC-PHAT	必要	強	強

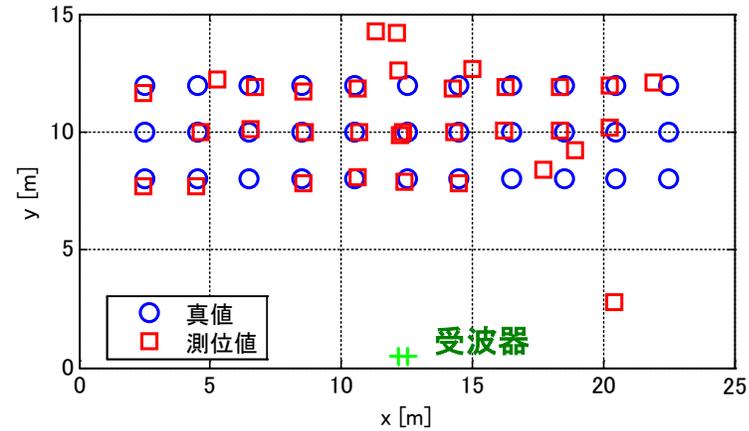
[1] 高田溪作, 吉澤真吾, “水中音源到来方向推定におけるマルチパス干渉に強い到達時間差測定アルゴリズム,”  
Journal of Signal Processing, Vol. 25, No.1, pp. 33-42, Jan. 2021.

# プールでの測位実験

- 最も劣悪(?)な環境での音響測位
  - 周囲壁からの音波反射も強く影響する

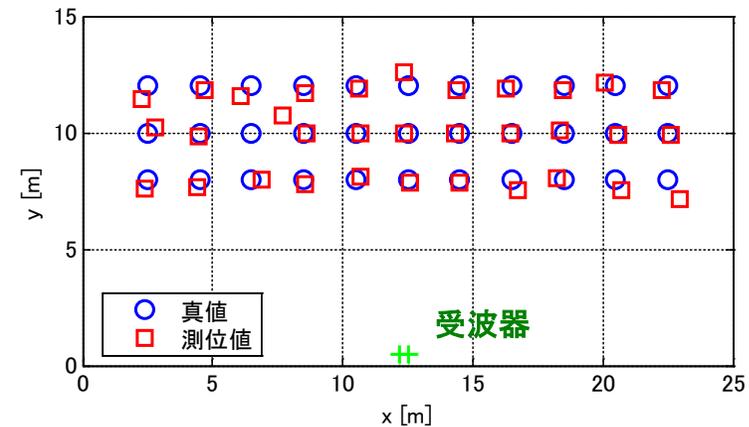


受波器間隔 0.3 m



従来方式  
(GCC-PHAT)

誤差平均  
1.63 m

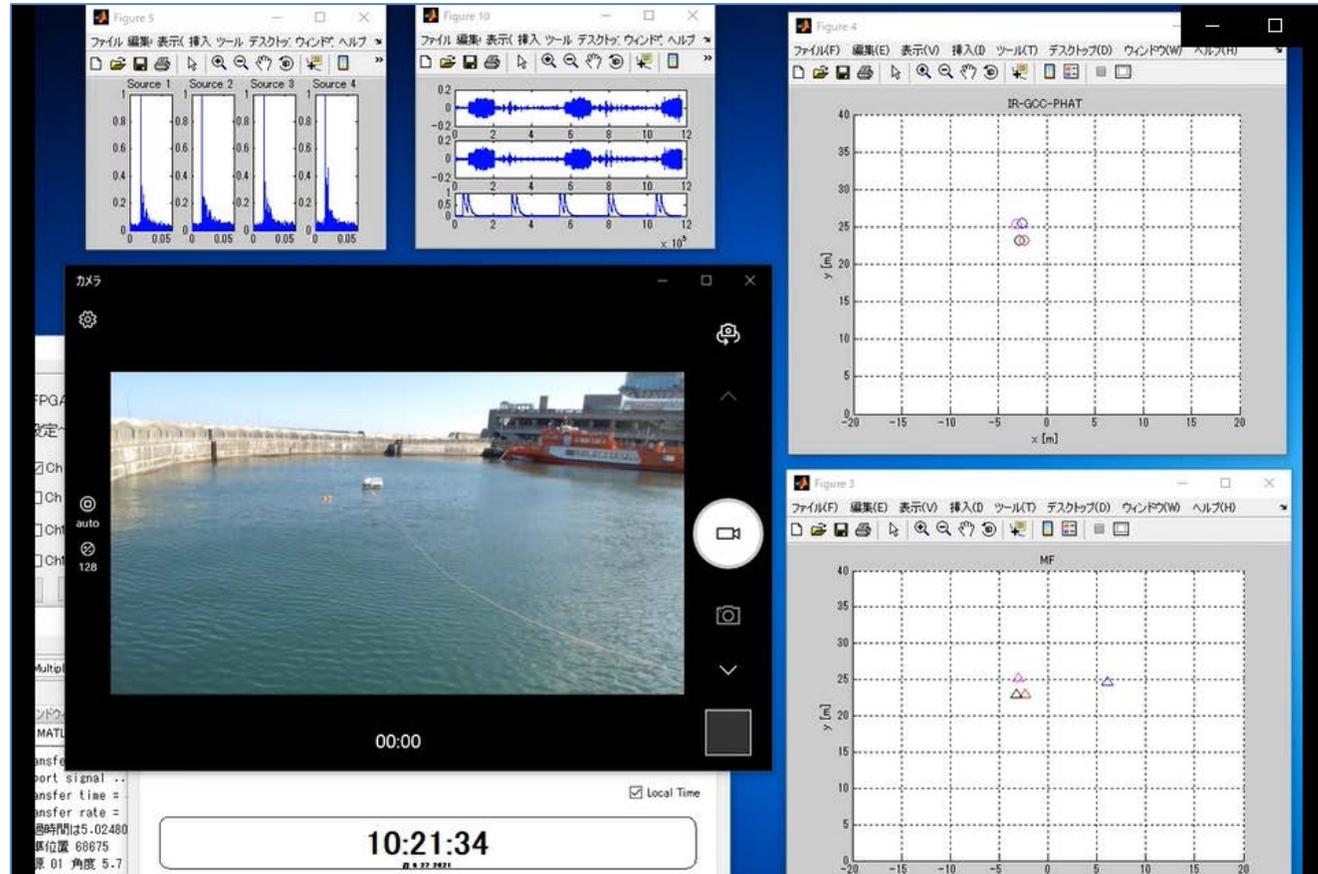


提案方式

誤差平均  
0.34 m

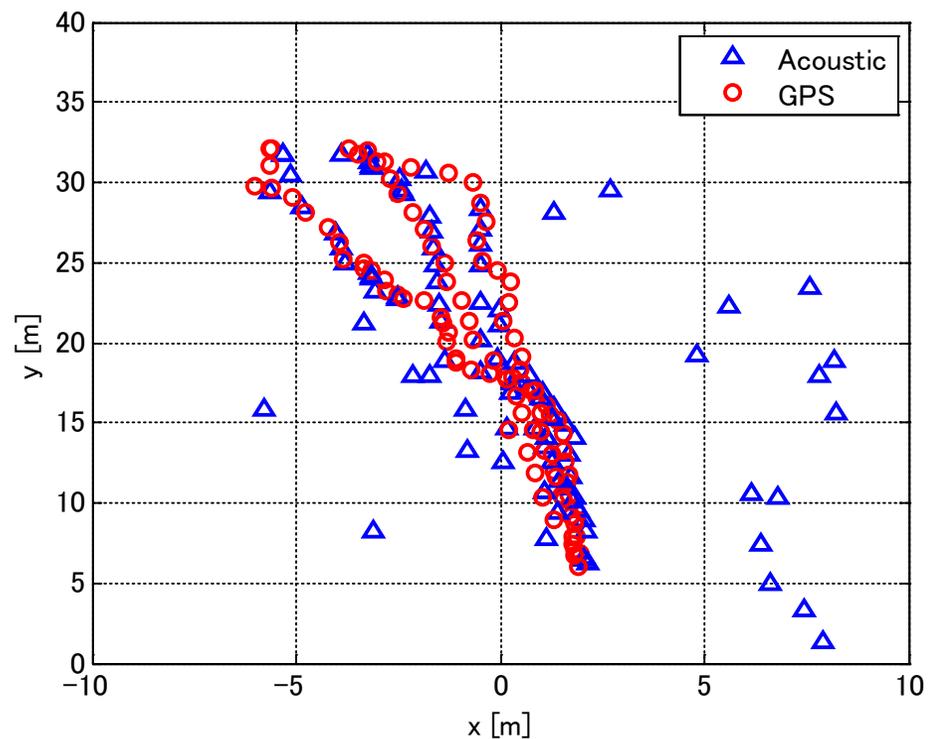
# 実海域での測位

- 2021年9月 北海道紋別市オホーツクタワー周辺で実施
- ゴムボートにGPSアンテナと音源を取り付けての測位試験

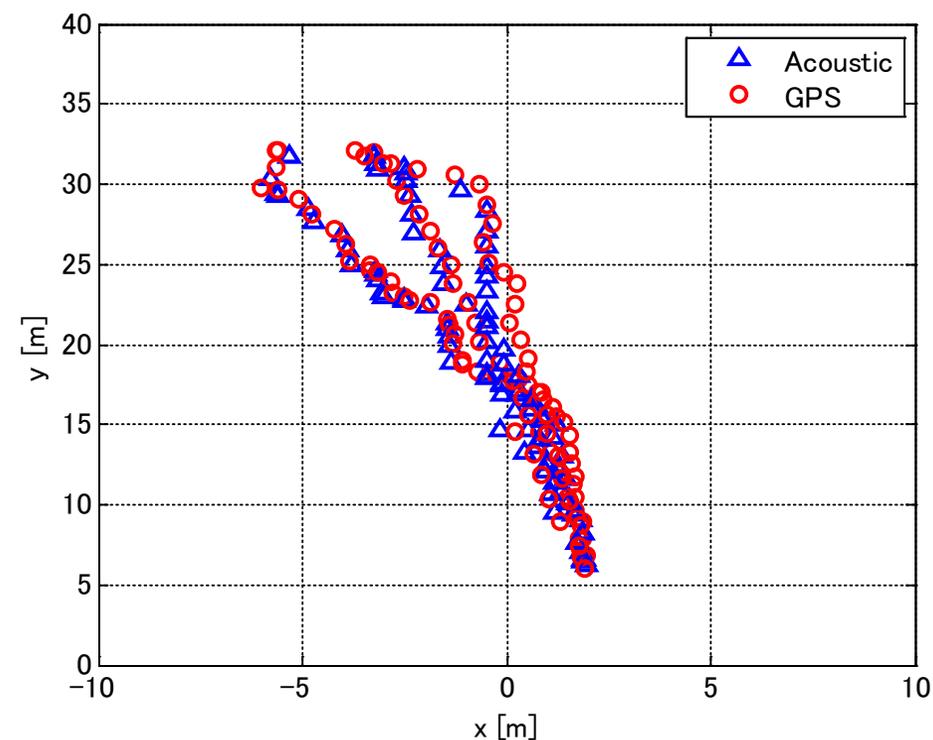


# GPS位置との比較

- 提案法(IR-GCC-PHAT)は安定した音響測位を示す
  - 測位誤差はボートが静止した状態で0.2 ~ 0.4 m



従来法(MF)

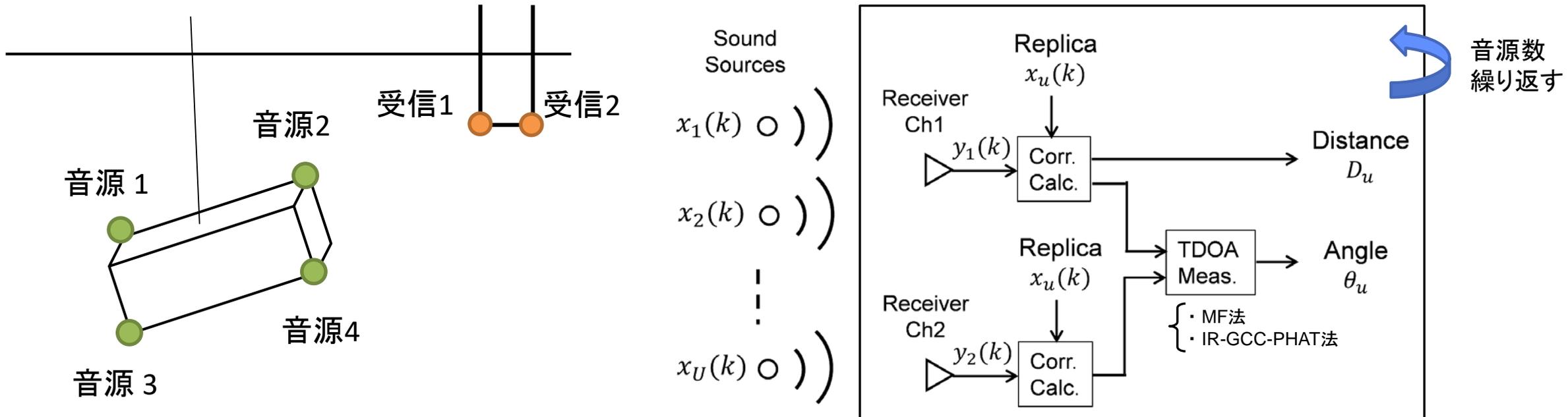


提案法(IR-GCC-PHAT)

# 最新の研究紹介

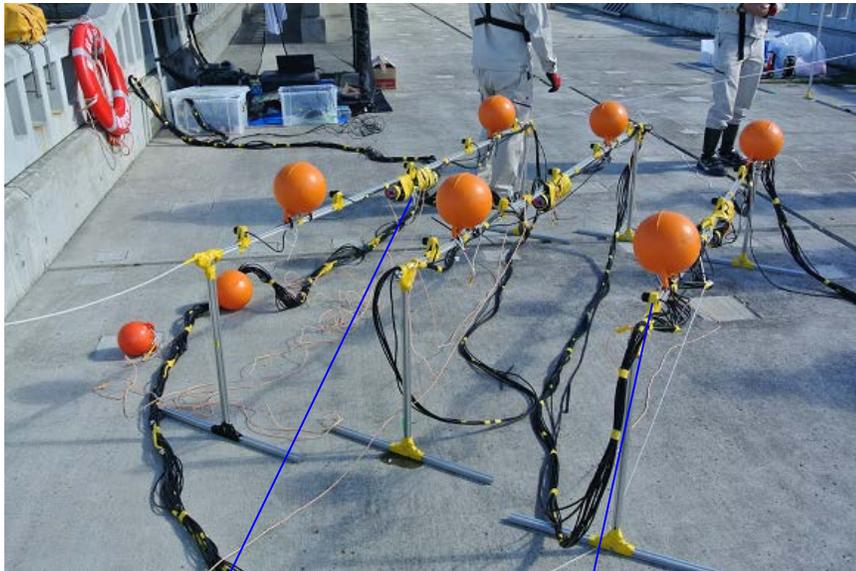
- 多点同時計測\*

- 複数の音源を用いて同時に測位を行う
- 海洋土木工事で海中に構造物を投入したときの位置や姿勢をリアルタイムで把握することが可能



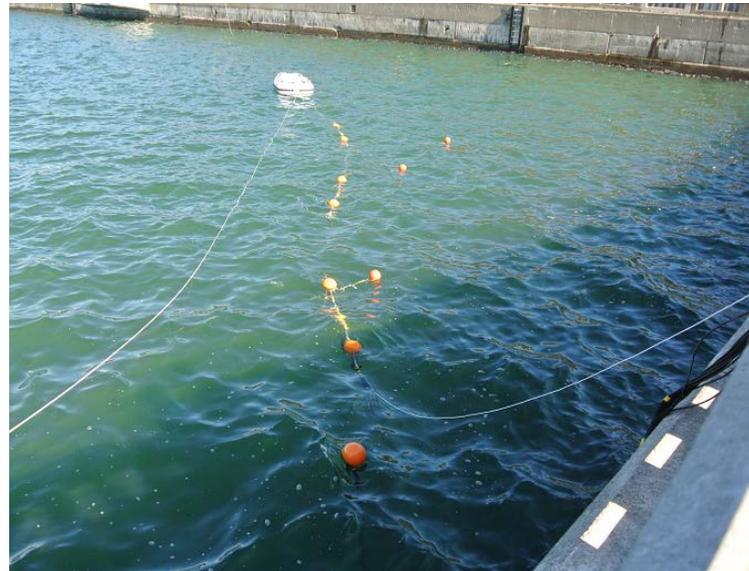
# 多点同時計測試験

- 2021年9月 北海道紋別市オホーツクタワー周辺で実施
- 音源数15, 深度センサ数 3

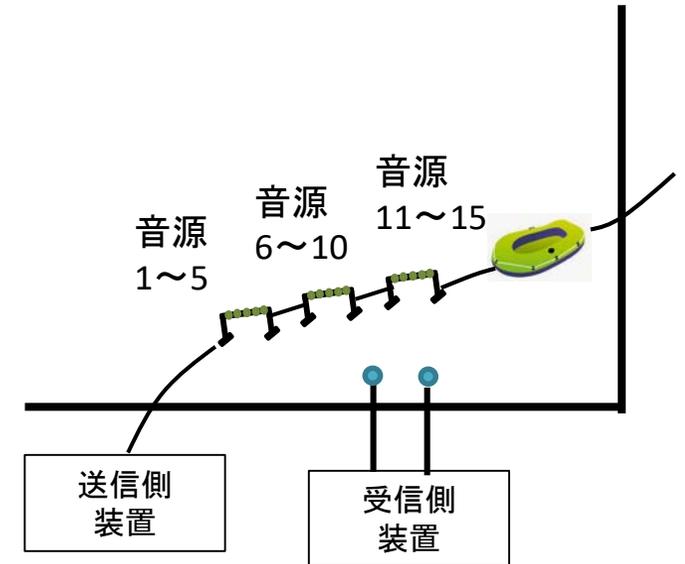


深度センサ

音源 (トランスデューサ)



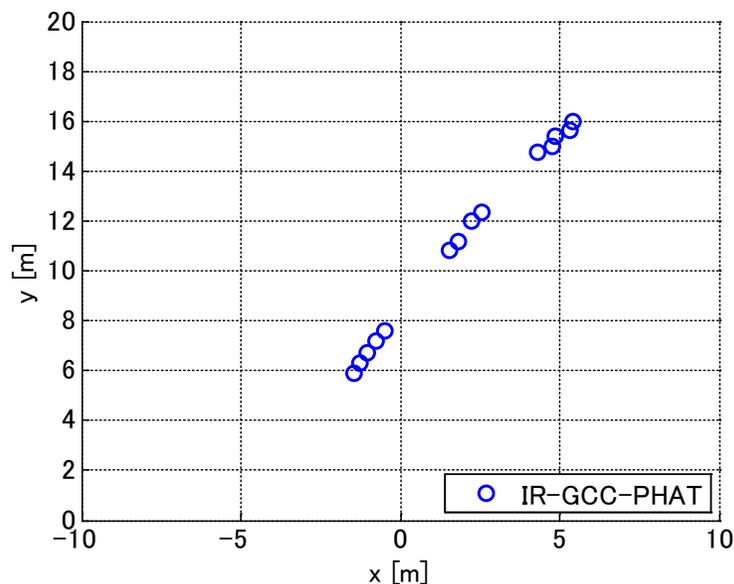
音源を取り付けたアルミフレームを海中に投入



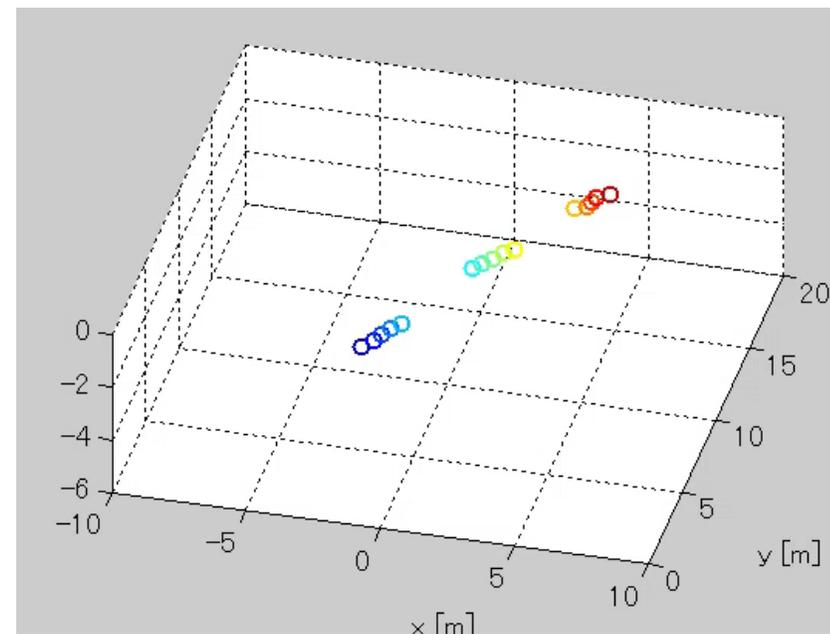
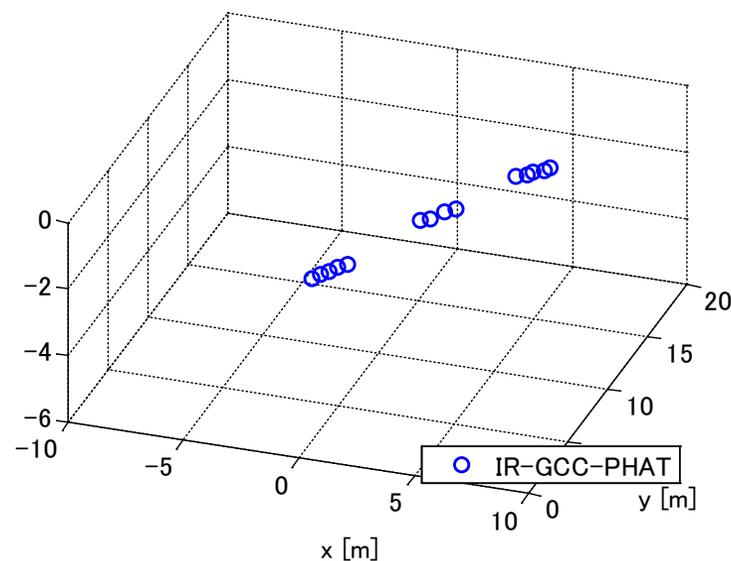
装置配置図

# 測位結果例

- 海中でのアルミフレーム位置を把握することが可能
- 時間経過とともにロープの揺動に合わせて音源位置が変化



1フレームに対する測位結果



200フレーム(30分間)に対する測位結果

# まとめ

---

- 音波反射に強い水中音響測位システム
  - 深度情報を用いた3次元測位
  - 小型水中ロボットに適した音響測位装置の開発
  - 音波反射に強い到来方向推定アルゴリズム
- 今後の予定
  - 音響測位装置のプロトタイプ製作
  - 多点同時計測の実験検証