

# ガラス球を用いた自由落下型深海探査機「江戸っ子1号」の開発と簡易型海中センシングへの応用に向けた展開

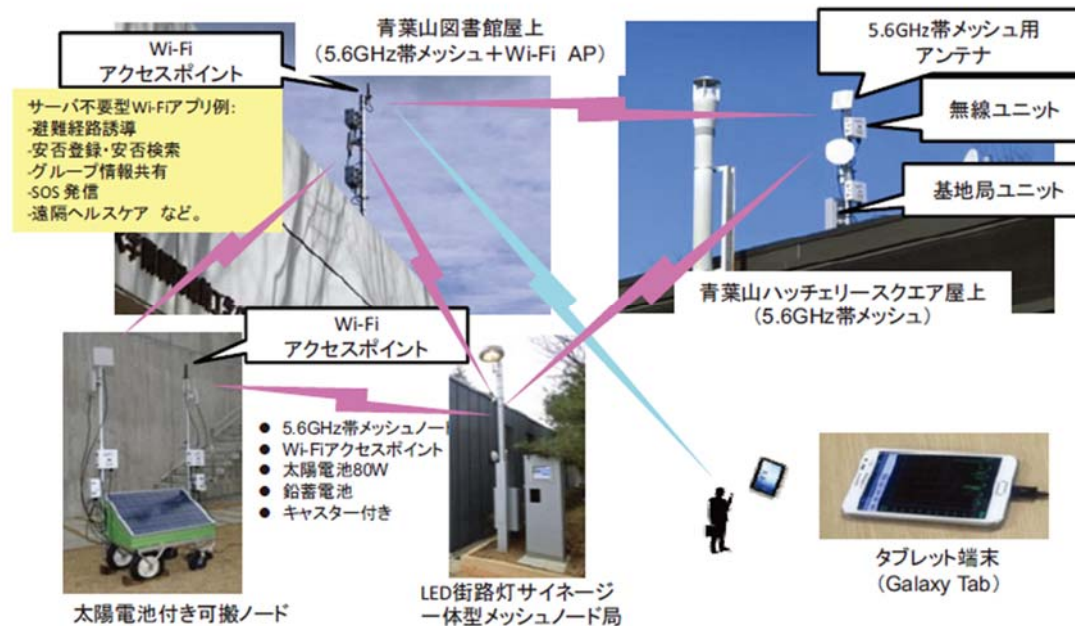
芝浦工業大学工学部  
森野博章

インターネットカンファレンス 2014



# これまでの研究分野

- 稠密設置無線LANのスケラブルなMACプロトコル
- 無線メッシュネットワークによる地域情報網



## 無線メッシュによる災害時通信網 NerveNet(NICTとの共同研究)

- Android端末間のアドホック通信により安否情報を伝達する  
Disruption Tolerant Networks

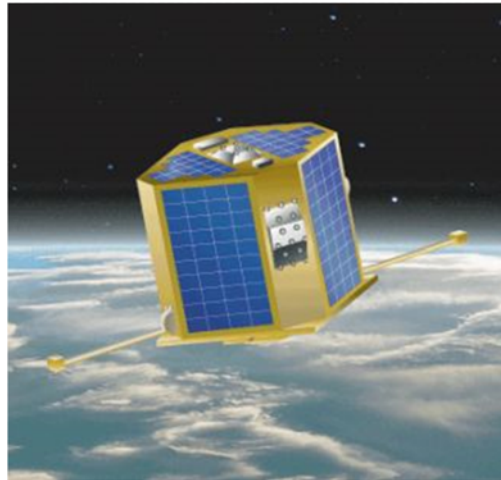
# Agenda

1. チャレンジとしての深海探査機開発と実験
  - 江戸っ子1号プロジェクトの経緯
  - 深海探査機の開発課題
  - 潜航実験により得られた技術的な知見 – 撮影機能と通信機能 –
  - 無人探査機への応用可能性
  
2. より幅広い用途に供する簡易型海中映像ライブストリーミング装置の開発
  - 近海海底映像の撮影と無線LANによる陸上へのライブ伝送



# 江戸っ子1号について

- 2009年から現在に至るまで、産官学連携で進められてきた  
深海探査機開発のプロジェクト



まいど1号

**下町産 深海ロボ計画**

2012年完成目標

工場の技結集「江戸っ子1号」

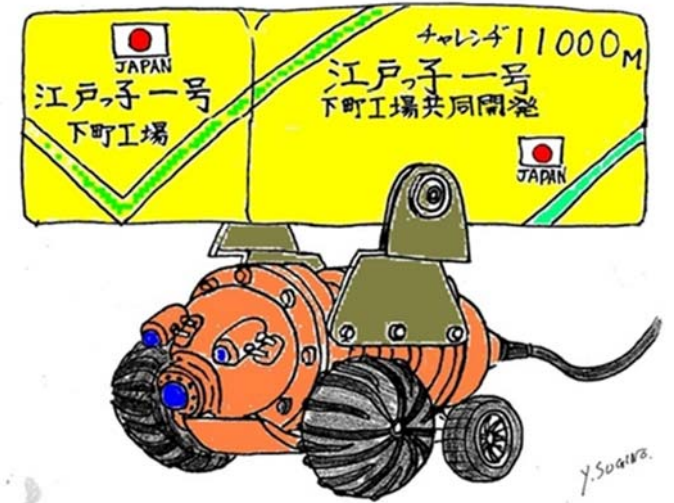
「江戸っ子1号」は、宇田航空研  
が今年1月に打ち上げ  
られた小衛星「まい  
ど1号」に搭載された。大  
阪の中小企業家連合の垣根  
を越え、大船が半なら、  
我々は深海を目標とす」と  
杉野社長は語ったという。

杉野さんの会社は従来機  
器の設計から、5人、町工場として仕  
事をする。

「江戸っ子1号」は、宇田航空研  
が今年1月に打ち上げ  
られた小衛星「まい  
ど1号」に搭載された。大  
阪の中小企業家連合の垣根  
を越え、大船が半なら、  
我々は深海を目標とす」と  
杉野社長は語ったという。

杉野さんは、宇田航空研  
が今年1月に打ち上げ  
られた小衛星「まい  
ど1号」に搭載された。大  
阪の中小企業家連合の垣根  
を越え、大船が半なら、  
我々は深海を目標とす」と  
杉野社長は語ったという。

杉野さんは、宇田航空研  
が今年1月に打ち上げ  
られた小衛星「まい  
ど1号」に搭載された。大  
阪の中小企業家連合の垣根  
を越え、大船が半なら、  
我々は深海を目標とす」と  
杉野社長は語ったという。



杉野ゴム化学製作所の杉野社長が東京東信用金庫へ技術相談  
→ 江東区，墨田区の企業に呼びかけ(2009年)



# 深海探査機開発の動機



- 日本は排他的経済水域の面積で世界第6位
- 深海の調査を通して魚類に関する新たな知見の獲得，資源発掘の可能性
- 漁船からでも調査できるような安価な探査機技術確立を目指す。
- Scienceとしては，東日本大震災での震源域となったプレート付近の調査可能性も。

# 一般的な深海探査機の機能



- ケーブルを通して支援船からビークルを操作するROV(Remote Operational Vehicle)構成
- 機体の耐圧容器はチタン製
- ソナーによる広域調査とカメラによる近景撮影

# 海水の温度，塩分観測機器

CTDプローブ  
長期観測のため重量大  
1/1000°Cまで測定可能



JAMSTEC 土屋博士のページより  
[http://www.tsuchiya2.org/CSV\\_file\\_seisaku/ctd.htm](http://www.tsuchiya2.org/CSV_file_seisaku/ctd.htm)

XCTDプローブ  
使い捨て，精度はCTDより劣る

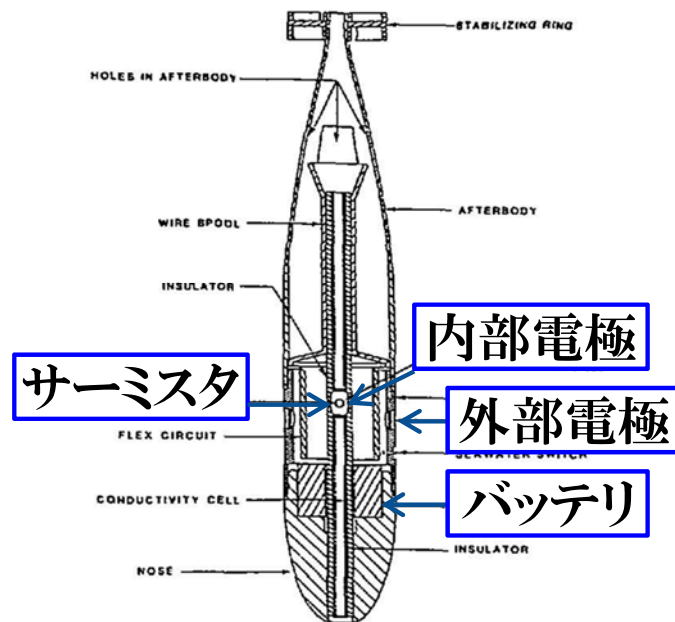


XTBプローブ，深度と水温のみ測定



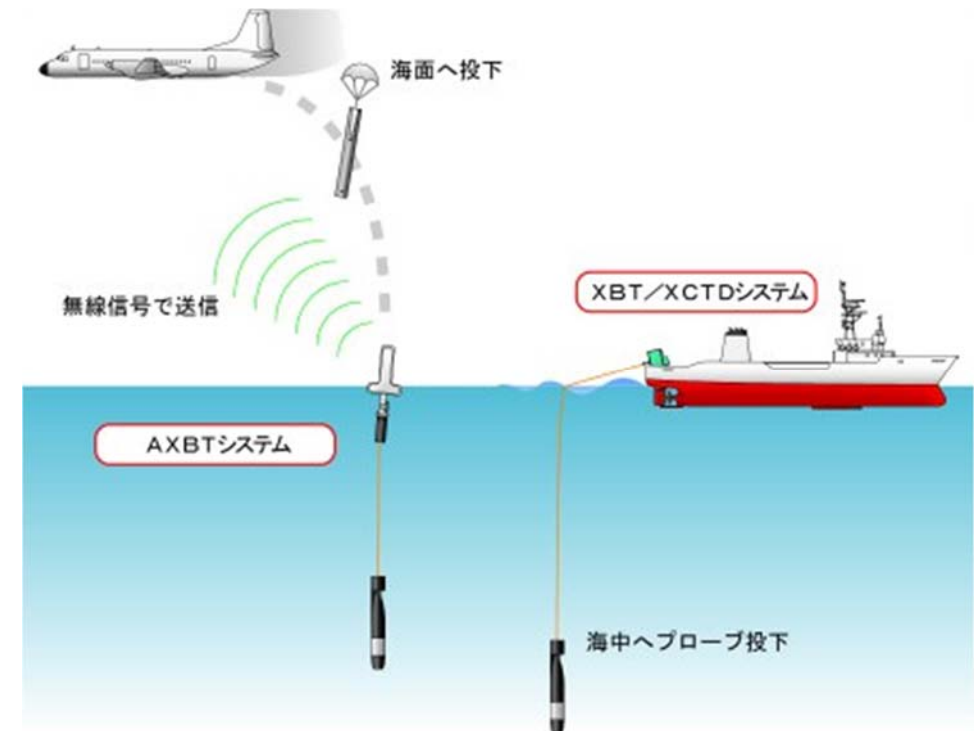
# XCTDの構成と運用

## XCTDの構成



深度は時間Tから換算式により算出  
 $Depth = AT - BT^2$  (A, Bは公称値定数)

## XCTDの運用



(cf: 鶴見精機 Webサイト)



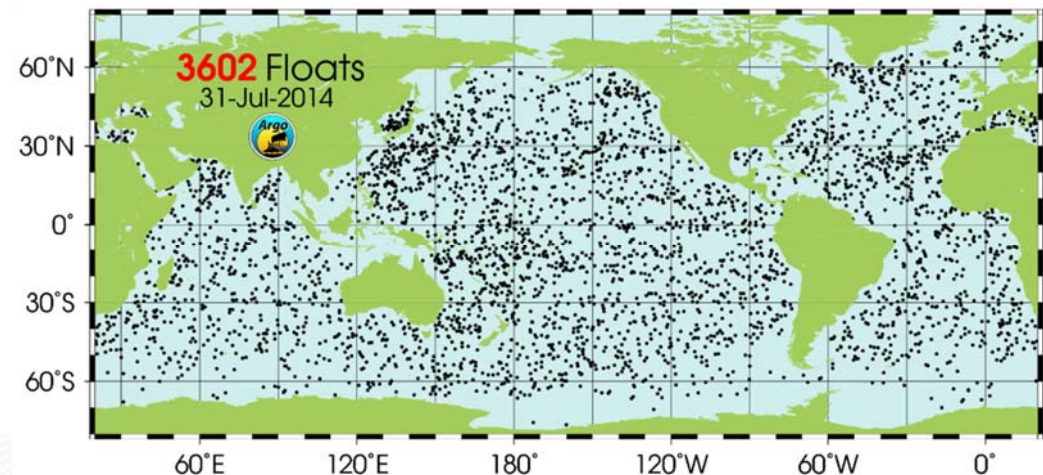
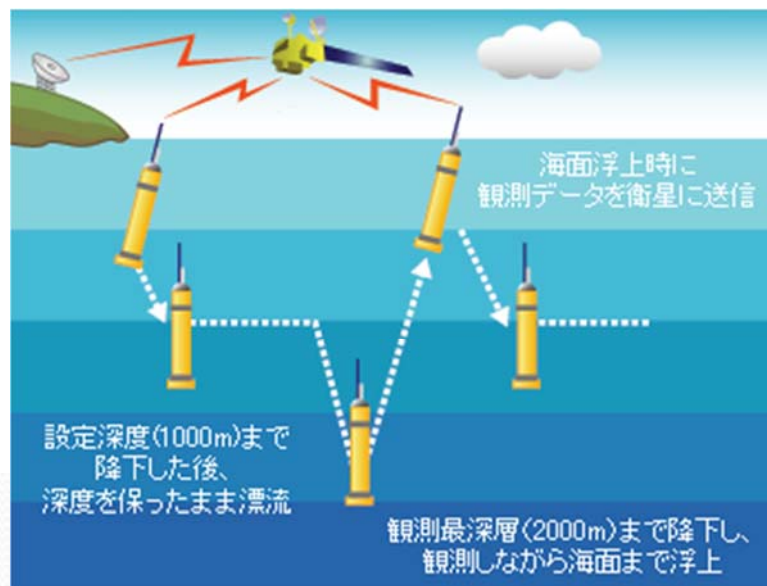
# 海洋観測システム : アルゴシステム

2000年に始まった地球全体の海洋変動をリアルタイムで捉えることを目指した 大規模な国際プロジェクト

海流によって漂流

<http://www.argo.ucsd.edu/>

アルゴフロートの動作サイクル概念図

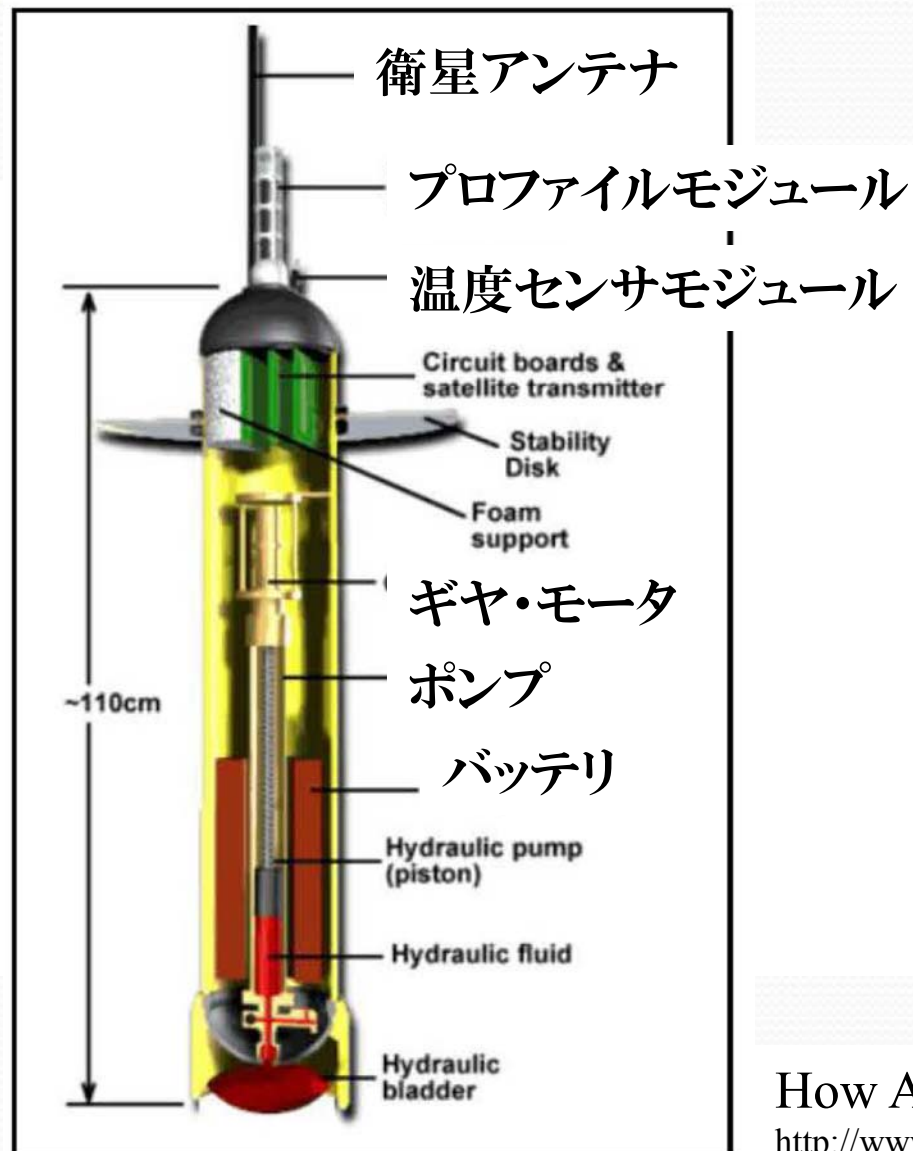


Positions of the floats that have delivered data within the last 30 days (AIC, updated daily) :

JAMSTECアルゴについてのページより

[http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/overview/overview\\_3.html](http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/overview/overview_3.html)

# アルゴフロートの構成



- アルゴフロートは自身で浮力を調整し、最深層から海面の沈降, 浮上を行う。その間に水温や塩分等の鉛直分布を観測し、海面浮上後にアンテナから電波を発射して衛星経由で観測データを伝送する。このような沈降/浮上サイクルを3~4年にわたって繰り返す。

How Argo floats work. より

[http://www.argo.ucsd.edu/float\\_design.html](http://www.argo.ucsd.edu/float_design.html)

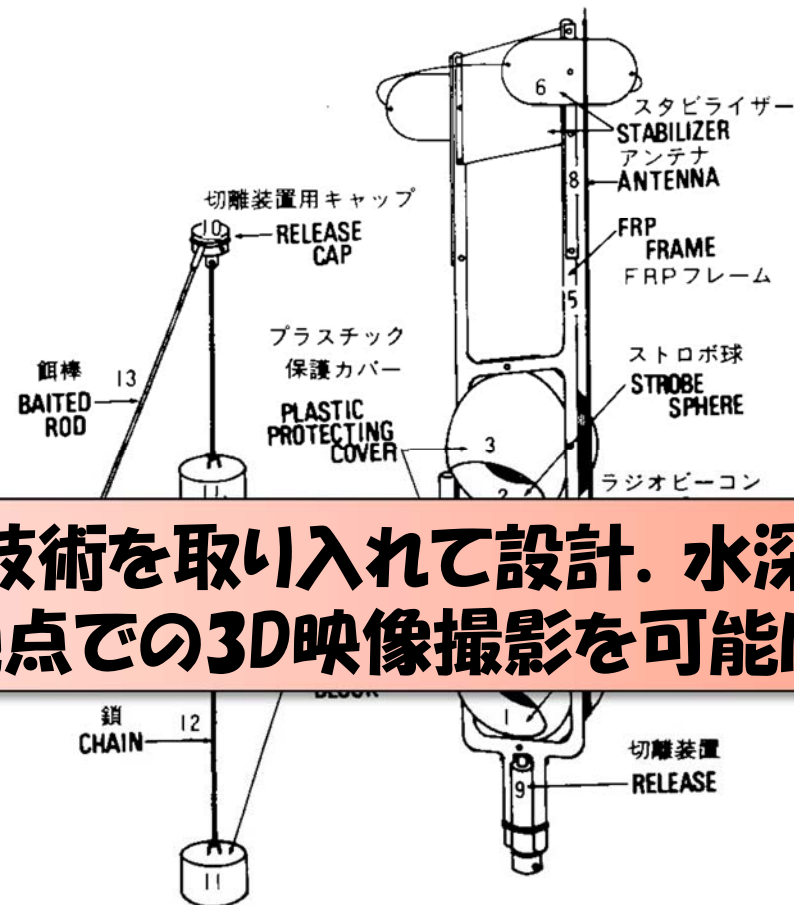
# 深海探査機の機能目標

- フロートのような形で一度設置すれば、あとは無人で魚類の撮影とセンサによる温度・圧力等の測定が行える、安価な装置の開発。



# 機体構造の検討

- JAMSTECをアドバイザーとして検討継続(2011年～)



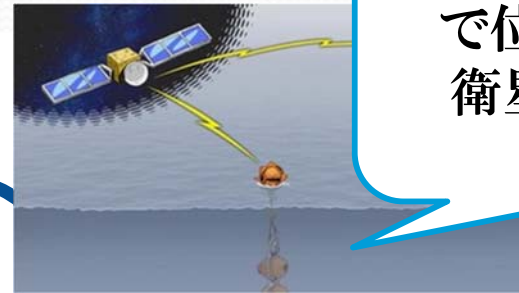
**新たな技術を取り入れて設計. 水深8000m  
地点での3D映像撮影を可能に.**

ガラス球によるフリーフォール型探査機  
(1978年 JAMS TEC)

# 江戸っ子1号による探査の流れ

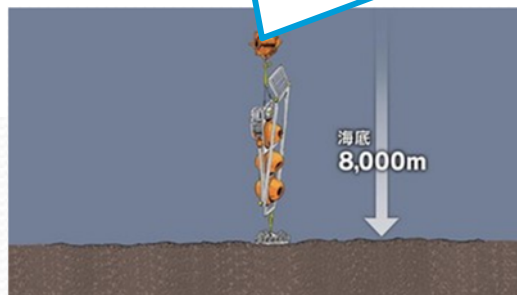


① 漁船などの小型船で探査位置に運搬し、投下

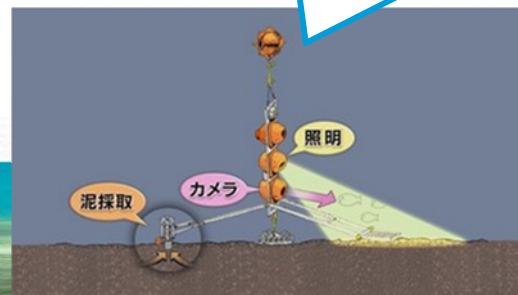


⑤ 海面浮上後にGPSで位置を取得し、衛星によりメール送信。

② 自重で海底まで沈降  
(ロープなどはなし)



③ 海底に到達すると照明が点灯、撮影開始



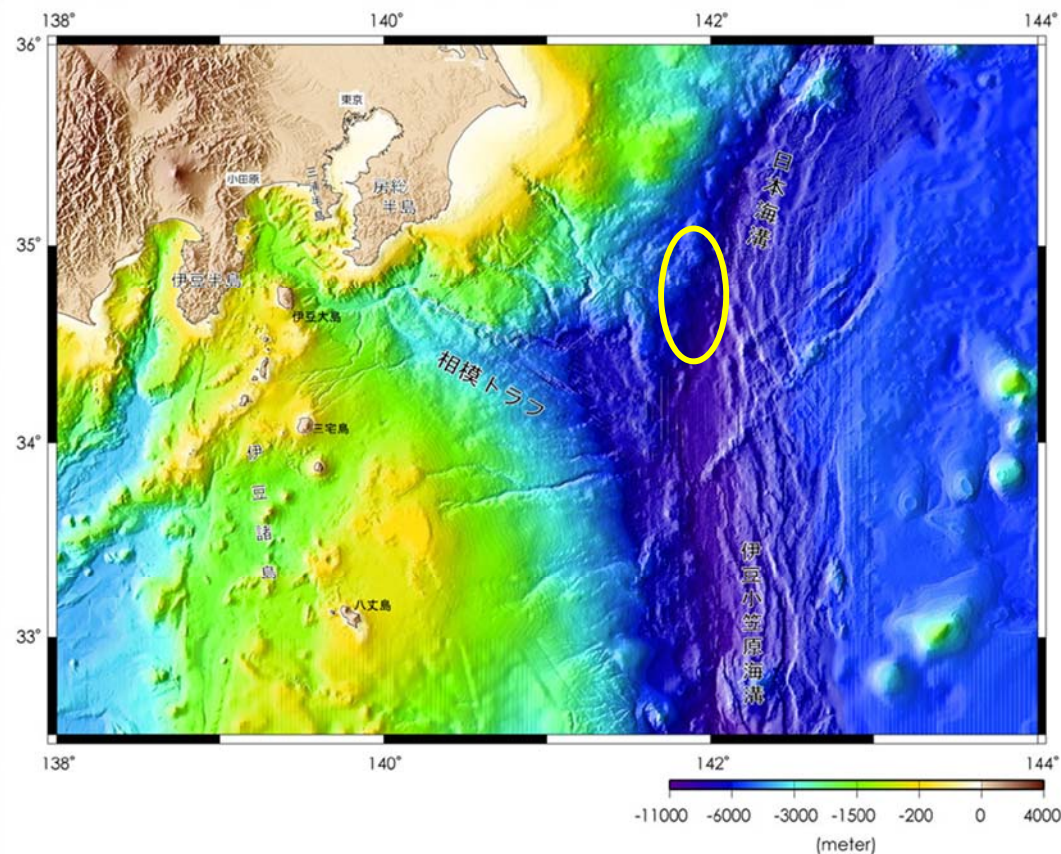
④ 船からの指令でおもりを切り離して浮上。



最大約40時間

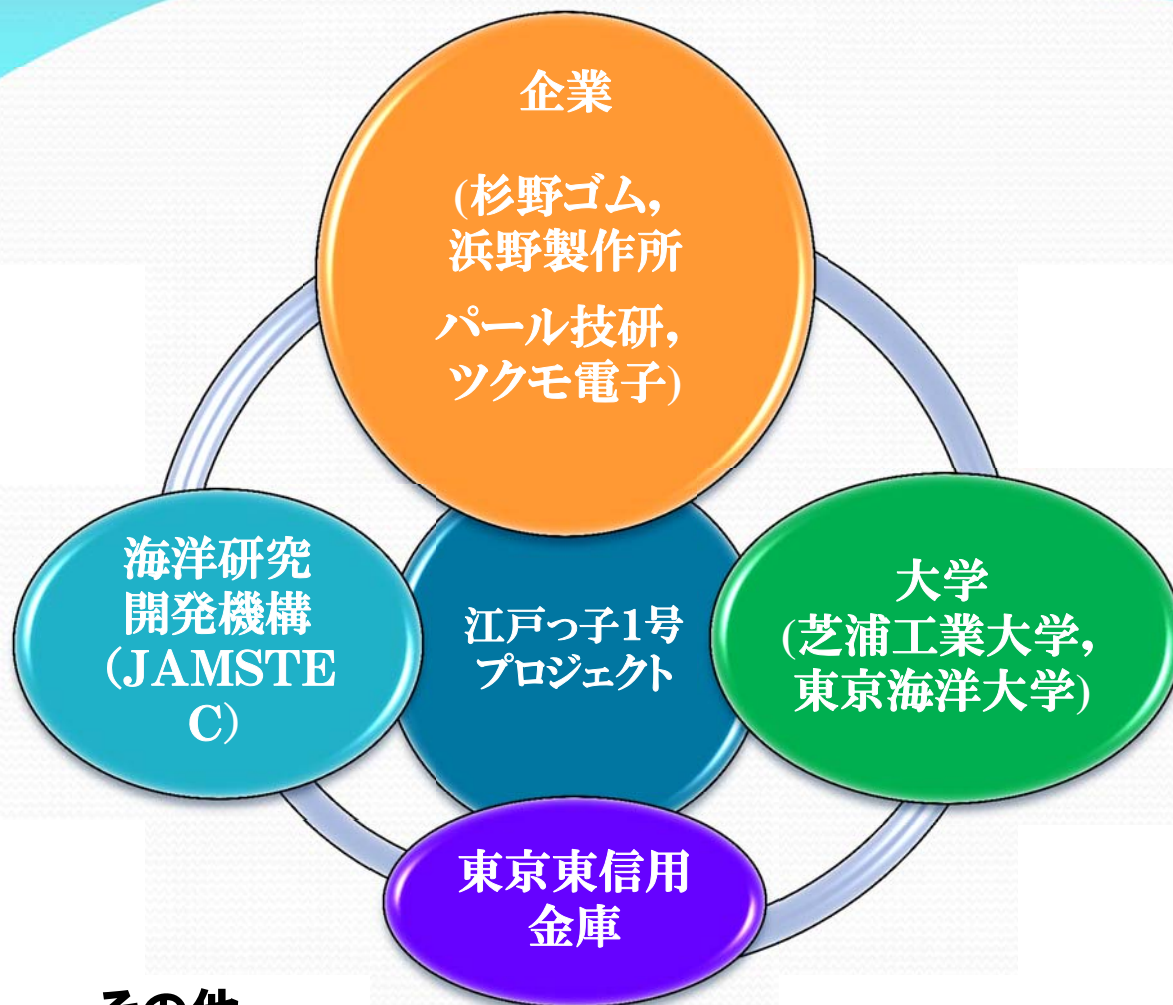
8000m以上の深海探査魚類と海底泥の採取を目指す

# 探査目標海域



8000mの深海は  
日本の陸から比較的近い位置にある。  
(日本海溝付近へは船で東京から東へ10時間程度)





その他,  
ソニー有志 (カメラ制御設計)  
新江ノ島水族館 (実験環境提供)  
などからの支援

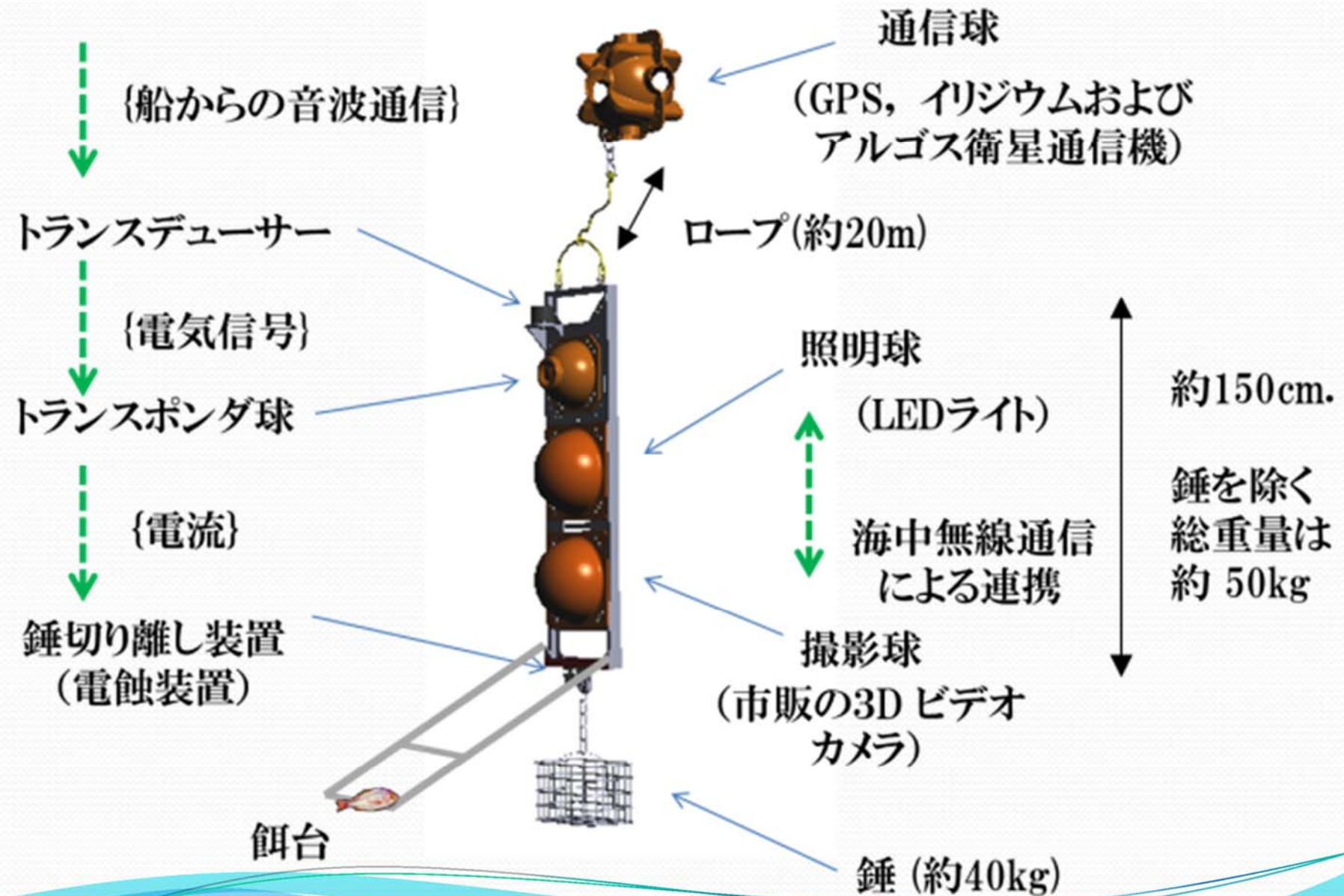
2012年1月

プロジェクト契約  
正式調印,

後に岡本硝子 (ガラス球製作), バキュームモールド (カバー製作) が加わる



# 機体の全体構成





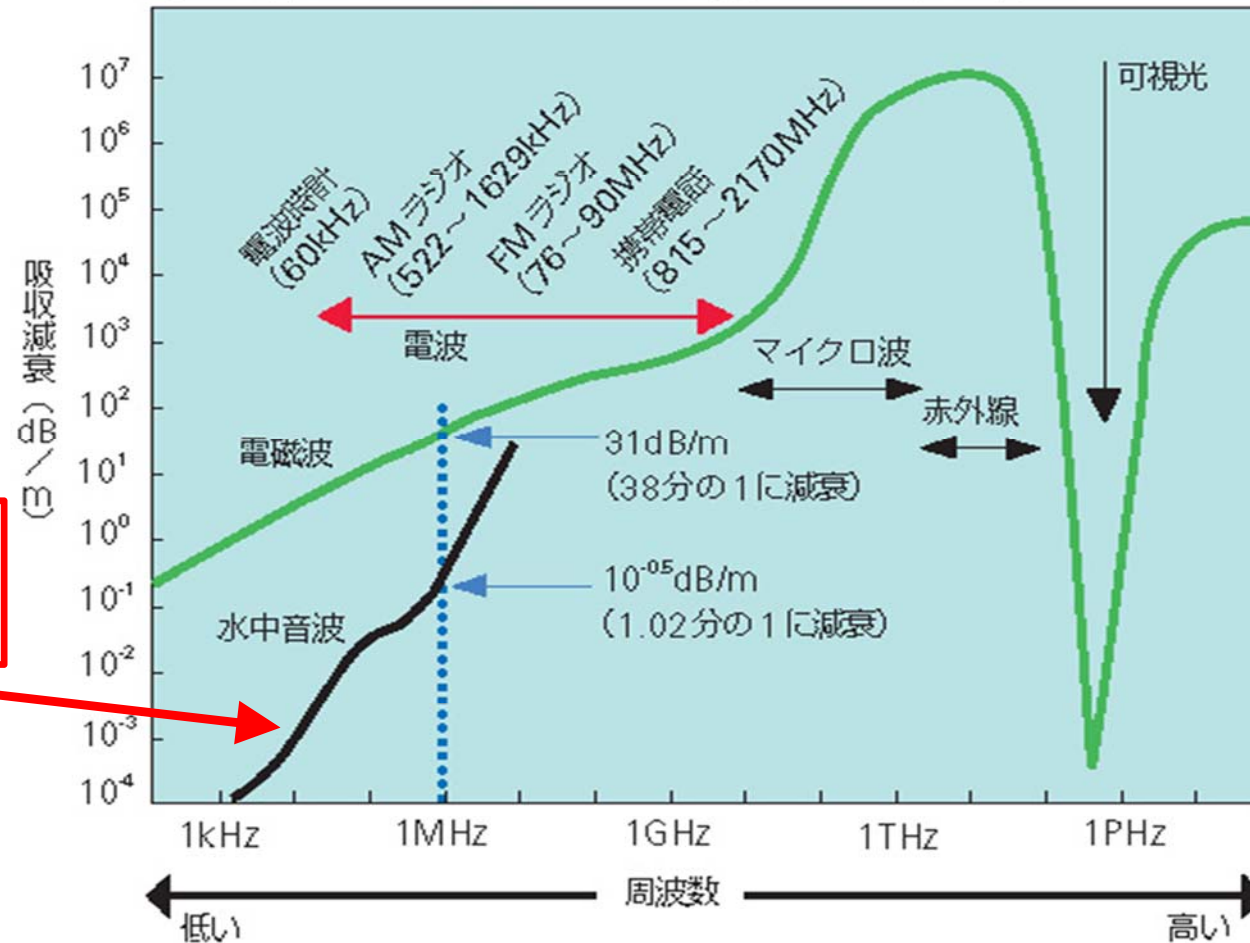
# 機体概観



# 機体開発に向けた課題

## (1) 陸上とは異なる海中の通信特性

電波・音波と水中における減衰（弱くなり方）の関係



10kHzの音波通信  
を利用

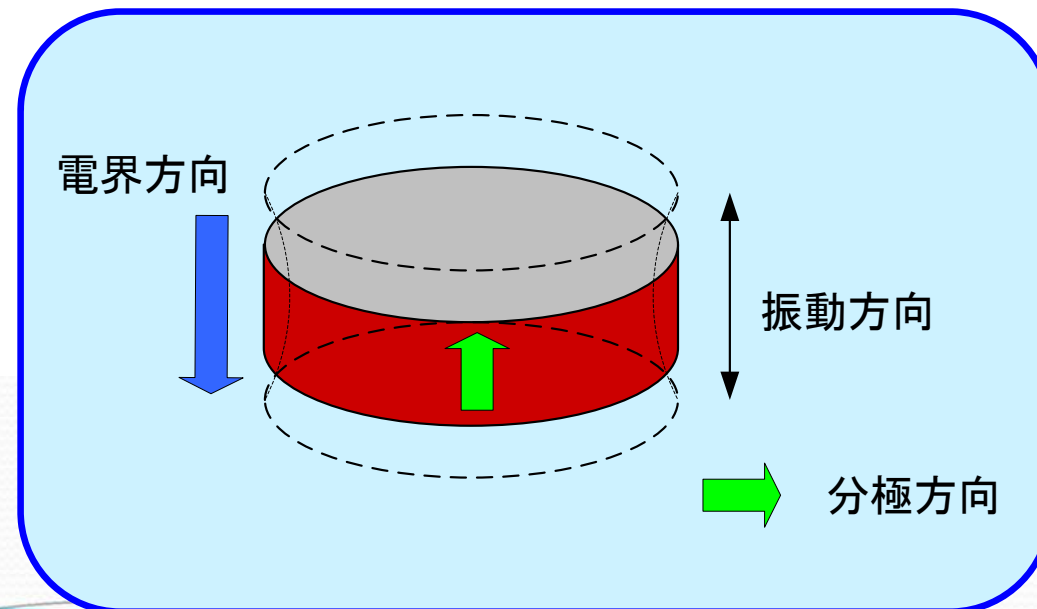
# 海洋での音波発生 - 圧電素子 -

- 圧電効果： 圧力を与えると電荷を発生する効果  
逆圧電効果： 電圧をかけると変形する効果

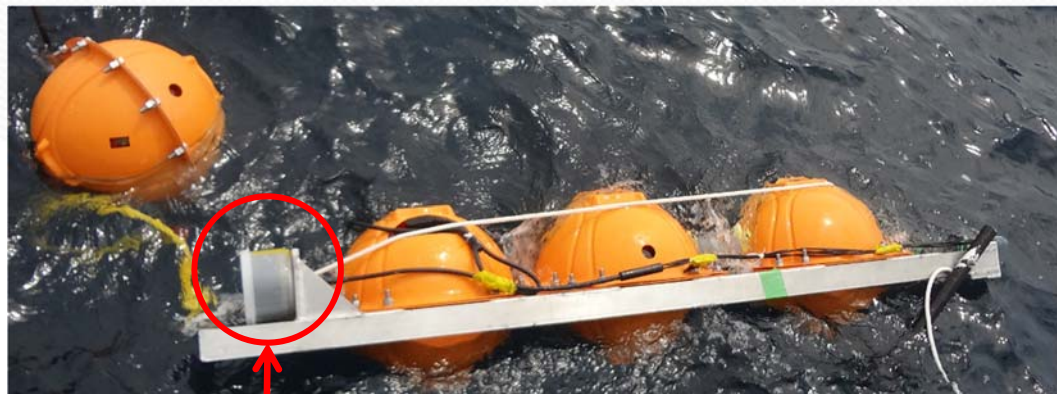
- 圧電材料

セラミックス：チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) など

結晶：水晶,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  など

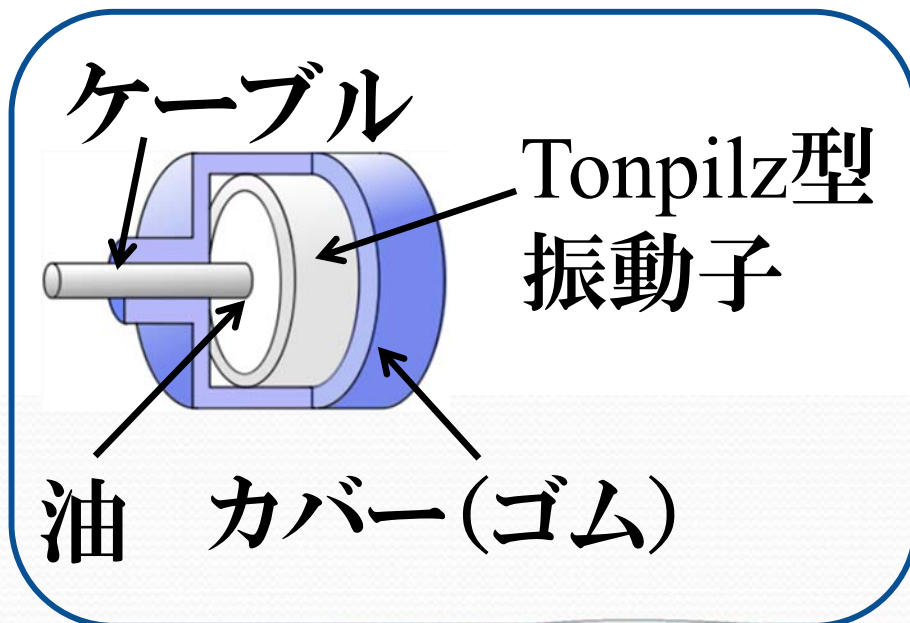


# 江戸っ子1号の音響素子



音響通信用振動子

海洋電子株式会社のトランス  
ポンダシステムを使用



- ・水深10,000mで耐える
- ・周波数10kHz, 無指向性
- ・PN符号で通信, 50bit/sec 程度

# 機体開発に向けた課題

## (2) 水圧への対策

水深 8000m → 800kg/cm<sup>3</sup>の水圧

ガラス球の耐圧性能が重要。

## (3) 海底でガラス球内部から外を鮮明に長時間撮影するための機体構成

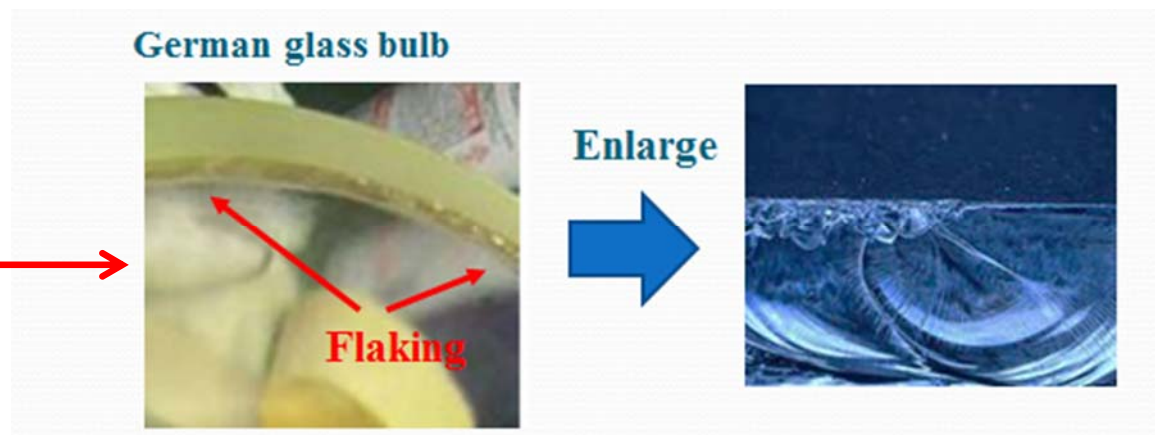
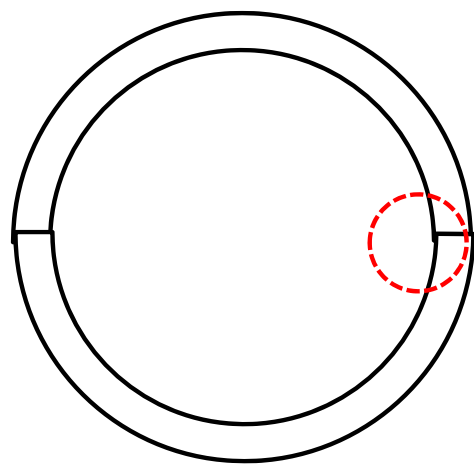
- 姿勢が長時間安定するためのガラス球配置
- カメラの撮影方向
- 照明方向
- バッテリー制御 等

ガラス球の外にセンサなどを設置するとなると水圧、浸水対策で高価になるため今回はすべてガラス球の内部に設置。



# 耐圧ガラス球の開発

- 当初はドイツ、アメリカ企業製のガラス球を使用。
- 水深7000m相当の圧力を加える試験を行ったところ、半球を合わせる面の付近でガラスの剥離が生じ、繰り返しの使用に不安を残した。

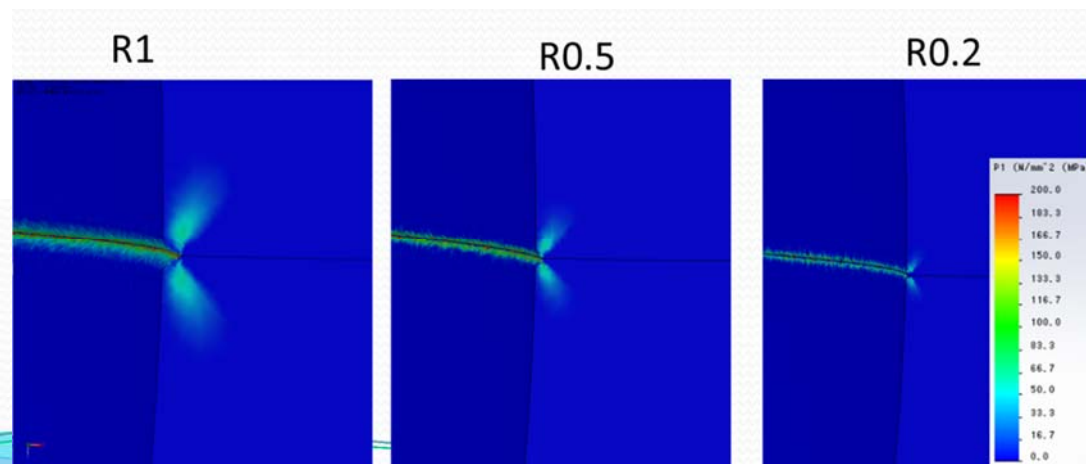
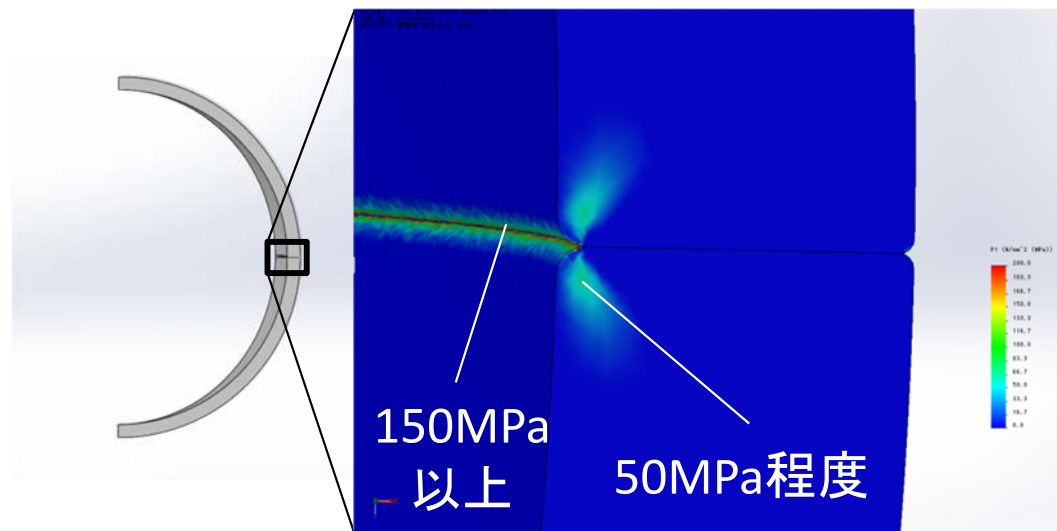


ガラス球 断面の模式図

→ プロジェクト参加企業が新たに開発。

# ガラス球に加わる応力の解析

- 7000m相当の圧力下で球に加わる力を解析したところ、半球を合わせる面のエッジ付近に大きな応力が生じ、面の加工精度が低いと剥離を引き起こすことが判明。

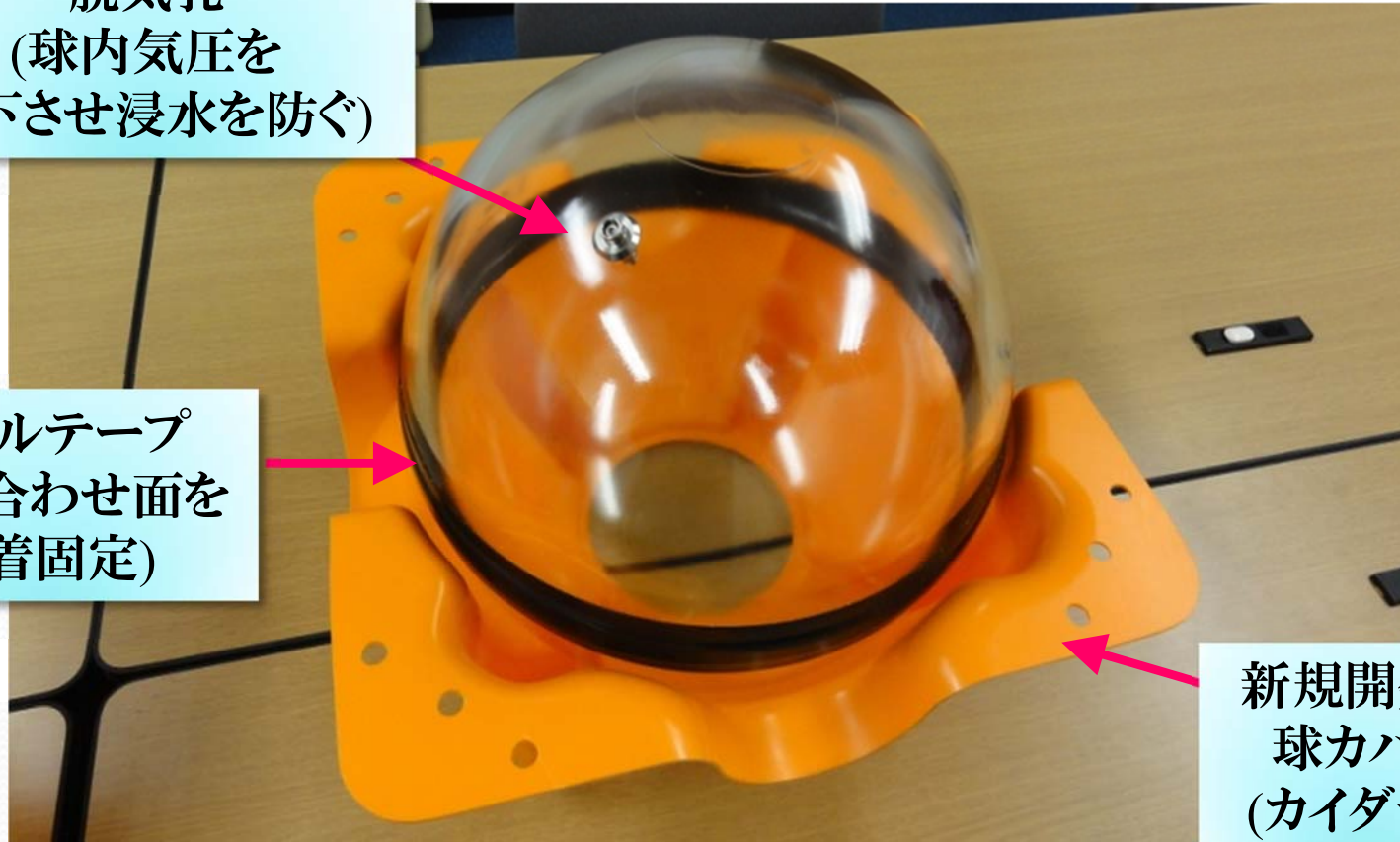


# 開発されたガラス球と球カバー

脱気孔  
(球内気圧を  
低下させ浸水を防ぐ)

ブチルテープ  
(半球合わせ面を  
密着固定)

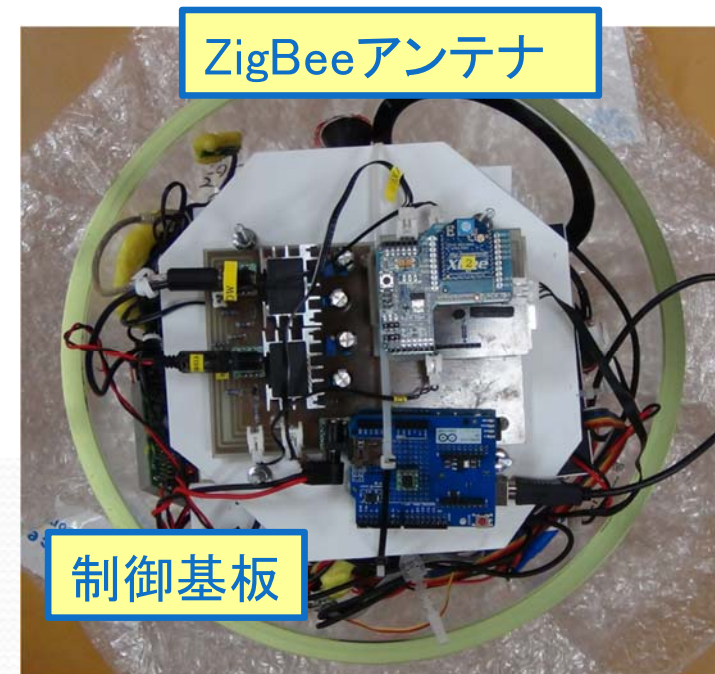
新規開発の  
球カバー  
(カイダック)





# 撮影球の開発

- 試作機の撮影球の要求仕様
  - 鮮明な3D撮影
  - 1.4m離れた被写体の撮影
  - 5時間の撮影時間の保証
  - 間欠動作(所定の時間でカメラのON, OFFなど)
  - 未使用時のバッテリー消費の防止
  - 照明球との連携
  - 非接触データ転送



# 撮影球の開発

- 水族館での予備実験ではガラス球面にカメラのフォーカスが合ってしまい、水中が鮮明に映らず。
- 試行錯誤の結果、球面を十分に研磨し透明度を上げることで解決できることが判明。
- 魚類を俯瞰的に撮影できるための撮影方向についても繰り返し実験検討。



# 通信球の開発

- 要求仕様： 海面浮上後の位置情報通知を10時間継続
- 通信方式として 機体Red にはイリジウムを，機体Green，機体Blueにはアルゴスを採用。
- 両システムの簡単な比較

	イリジウム (商用サービス)	アルゴス (学術目的に限定)
周波数帯	1.6GHz	401MHz
衛星数	66基	7基
衛星飛来間隔	約10分	約30分～1時間
利用料金	基本料 3000円 + 従量制通信料	基本料 0円 + 従量制通信料



# アルゴス電波探知器の利用

- 送信機の発信信号を直接受信し、到来方向を推定。
- 衛星が上空を飛来しない時間帯でも支援船から見た送信機の相対方向を推定可能。
- 信号に含まれるデータは復号できないため、衛星経由でのメール受信と併用する必要がある。

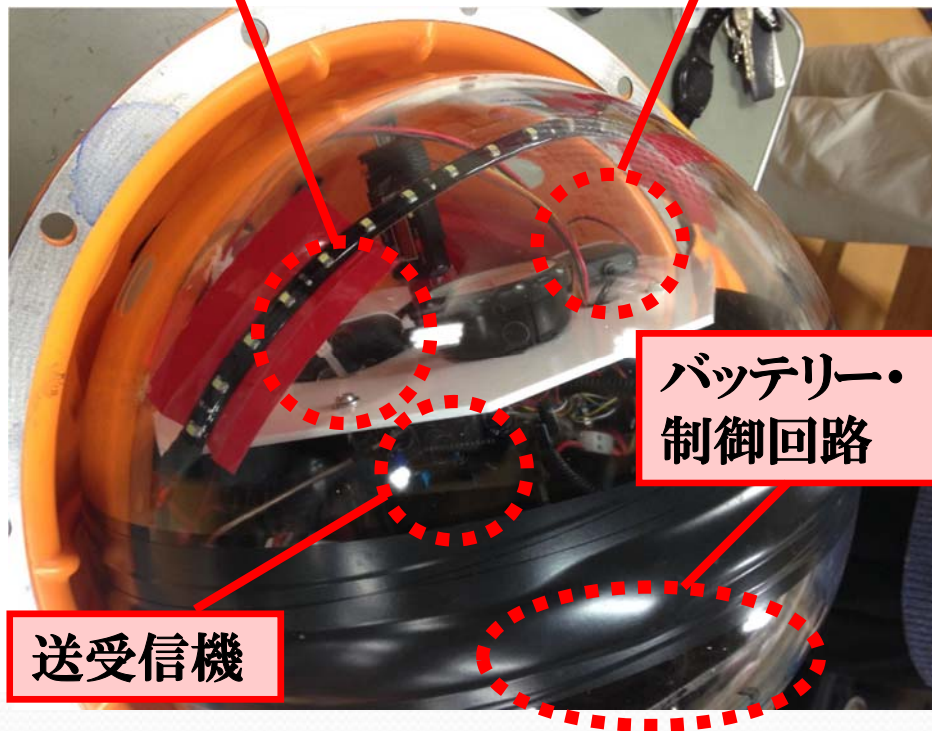


# 通信球概観

## ● 機体Red

イリジウムアンテナ

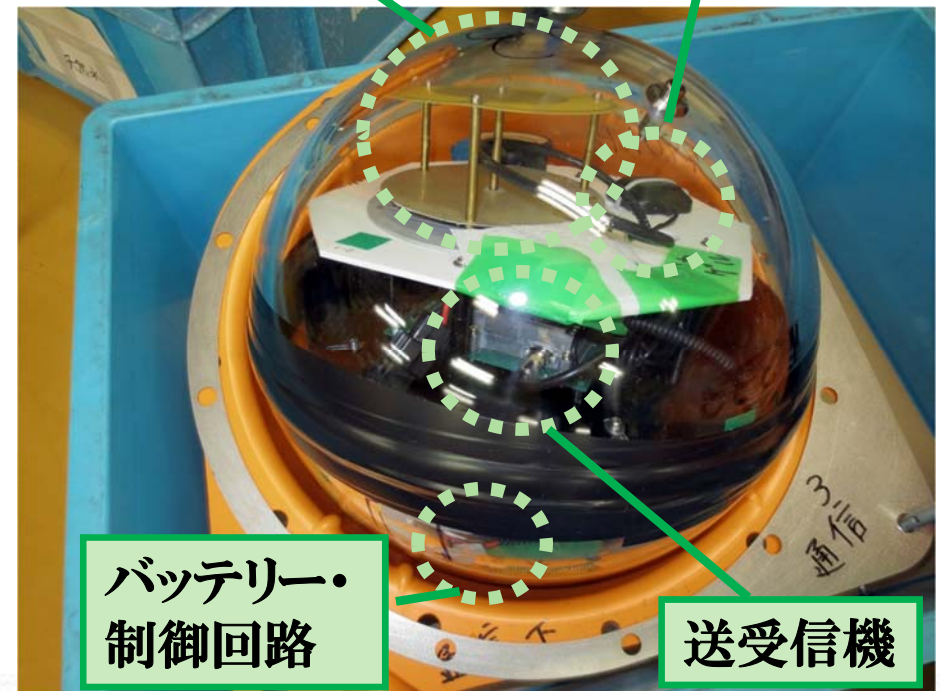
GPSアンテナ



## ● 機体Green

アルゴスアンテナ

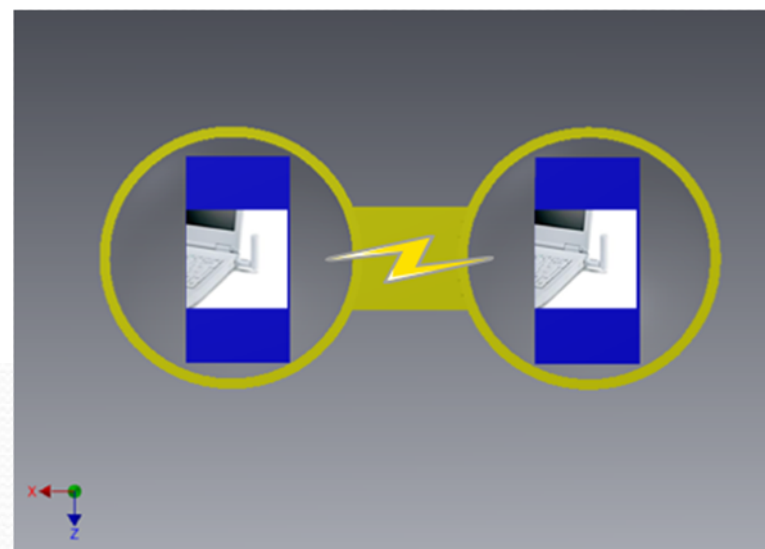
GPSアンテナ



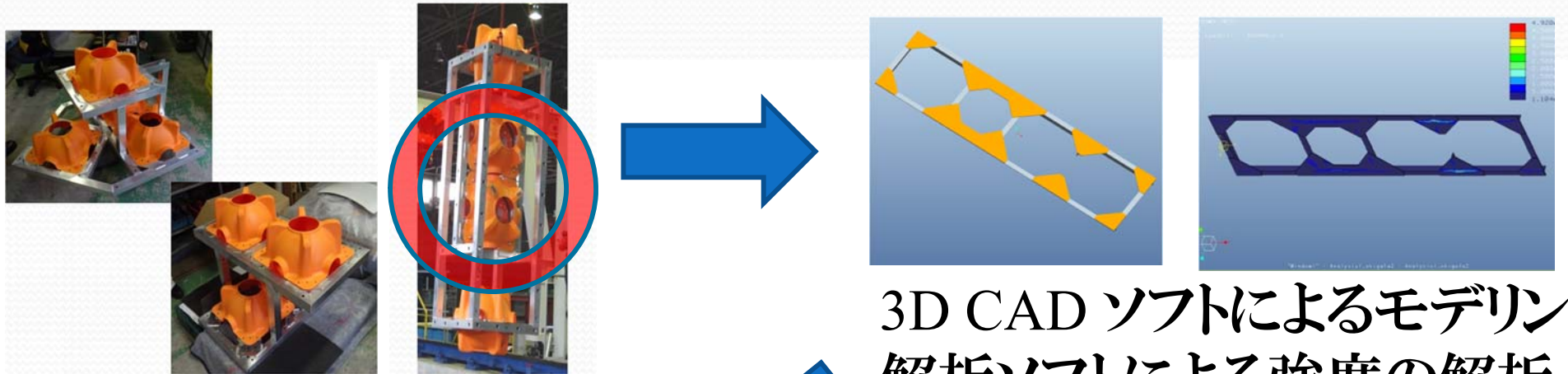
海面浮上時にアンテナ受信面が常に上を向くよう、球の中央から下半分の位置に送信機・バッテリー等重量の大きい構成物を配置。

# 海中電波通信によるカメラ・照明連携

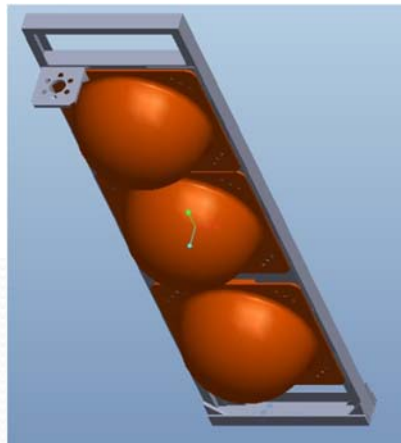
- 東京海洋大の清水准教授らが開発したゴムを用いた海中電波通信により撮影球と照明球を接続。
- 送受信機の入った2つのガラス球の間にゴムを設置し、双方に接触させるだけで通信が可能。  
加工・配線の手間がない。
- 撮影球からの制御信号により照明(LED)のオン・オフ制御が可能。



# 機体の強度解析



3D CAD ソフトによるモデリング  
解析ソフトによる強度の解析



# 予備実験(2012年春～)



江/島水族館(水深2-3m)

江/島沖での小型漁船による実験  
(水深 50m, 100m, 700m で計8回)





# JAMSTEC調査船「かいよう」による8000m海域実験

- 2013年9月 第一回実験 → 台風のため引き返し。
- 2013年11月 第二回実験 が成功。



# 通信球に関する特性評価

	イリジウム (機体Red)	アルゴス (機体Green, Blue)
浮上からメール送信 開始までの時間	3分	1分
メール送信間隔と 受信成功率	1分に1度の送信, 受信成功率 約60%	
送信から 受信までの経過時間	数十秒~1分	10分~90分毎に 一括受信 (衛星毎に異なる)
GPS測位性能	衛星捕捉時間: 約1分, 測位誤差: 約1m (測位誤差は事前実験に基づく推定値)	

アルゴス衛星を使用した機体ではメール受信の遅延が大きく、  
結果として電波探知器が有効に働いた。



# ガラス球内部のセンサによる温度・圧力測定

## □球内部からの測定の利点

ガラス球のみ耐圧構造にしておけば、内部のセンサ類には陸上用の機器をそのまま使用できる。

- センサ単体を深海で使用する場合、様々な対策が要求され非常に高価となる
  - 浸水対策(20mで2気圧)
  - 水圧対策(機材の破損, 回路動作の不良)

回路動作不良の原因:

水圧による素子値の変化

圧力センサは逆に水晶振動子の共振周波数が圧力に影響を受けることを利用したもの

- 短絡および電蝕対策  
イオン化傾向により、海水と反応し金属が腐食



# ガラス球内部のセンサによる温度・圧力測定

## □ ガラス球内からの測定データにより以下を検討

- 1) 深度の測定の可能性
- 2) 海水温プロファイル(鉛直方向の温度分布)の測定の可能性
- 3) 無人探査機の着底, 離底の検知の可能性

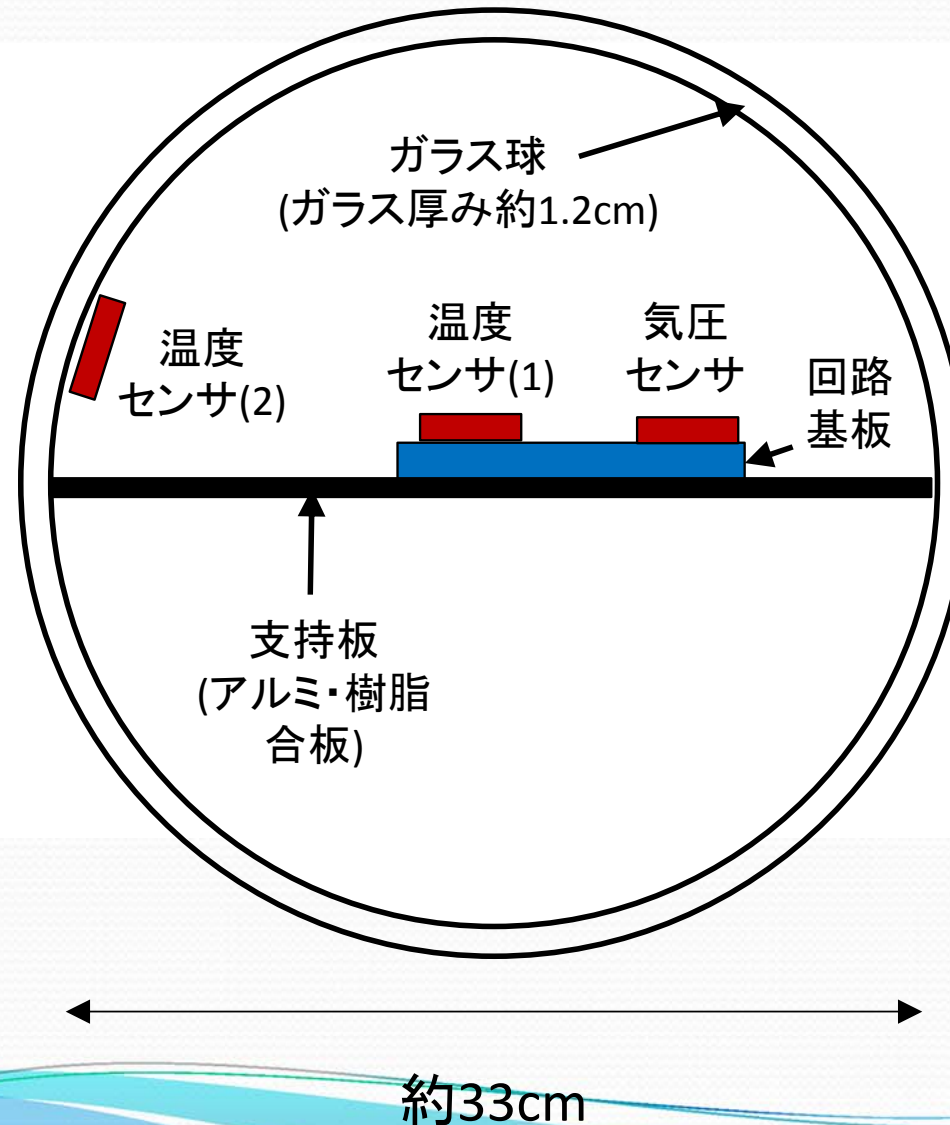
## □ 問題点

- 1) ガラスから外部の環境測定は可能か?  
ガラスの熱拡散率:  $4.0 \times 10^{-7}$  (m<sup>2</sup>/s)  
金属の熱拡散率:  $1.1 \times 10^{-4}$  (m<sup>2</sup>/s)



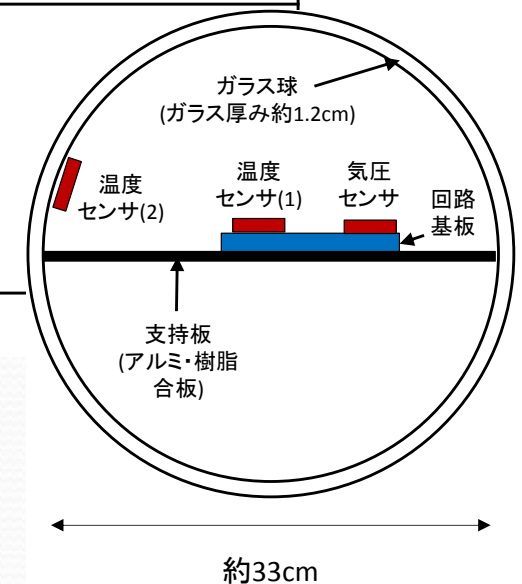
# ガラス球内部のセンサによる温度・圧力測定

- 球内のセンサの配置



# 使用したセンサ

<p>温度センサ(1) 基板温度測定</p>	<p>ADT7411 (Analog Devices社) 測定レンジ: <math>-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}</math> 精度: <math>\pm 0.5^{\circ}\text{C}</math></p>
<p>温度センサ(2) ガラス球内面測定</p>	<p>103AT-11-FT (SEMITEC社) 測定レンジ: <math>-50^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}</math> 精度: R25許容差 1%</p>
<p>圧力センサ ガラス球内 気圧測定用</p>	<p>MPL115A1 (Freescale社) <math>\pm 10\text{hPa}</math> <math>500\text{hPa} \sim 1150\text{hPa}</math></p>



# サーミスタ温度センサの取り付け

ガラス球内面測定用サーミスタ温度計: SEMITEC社製

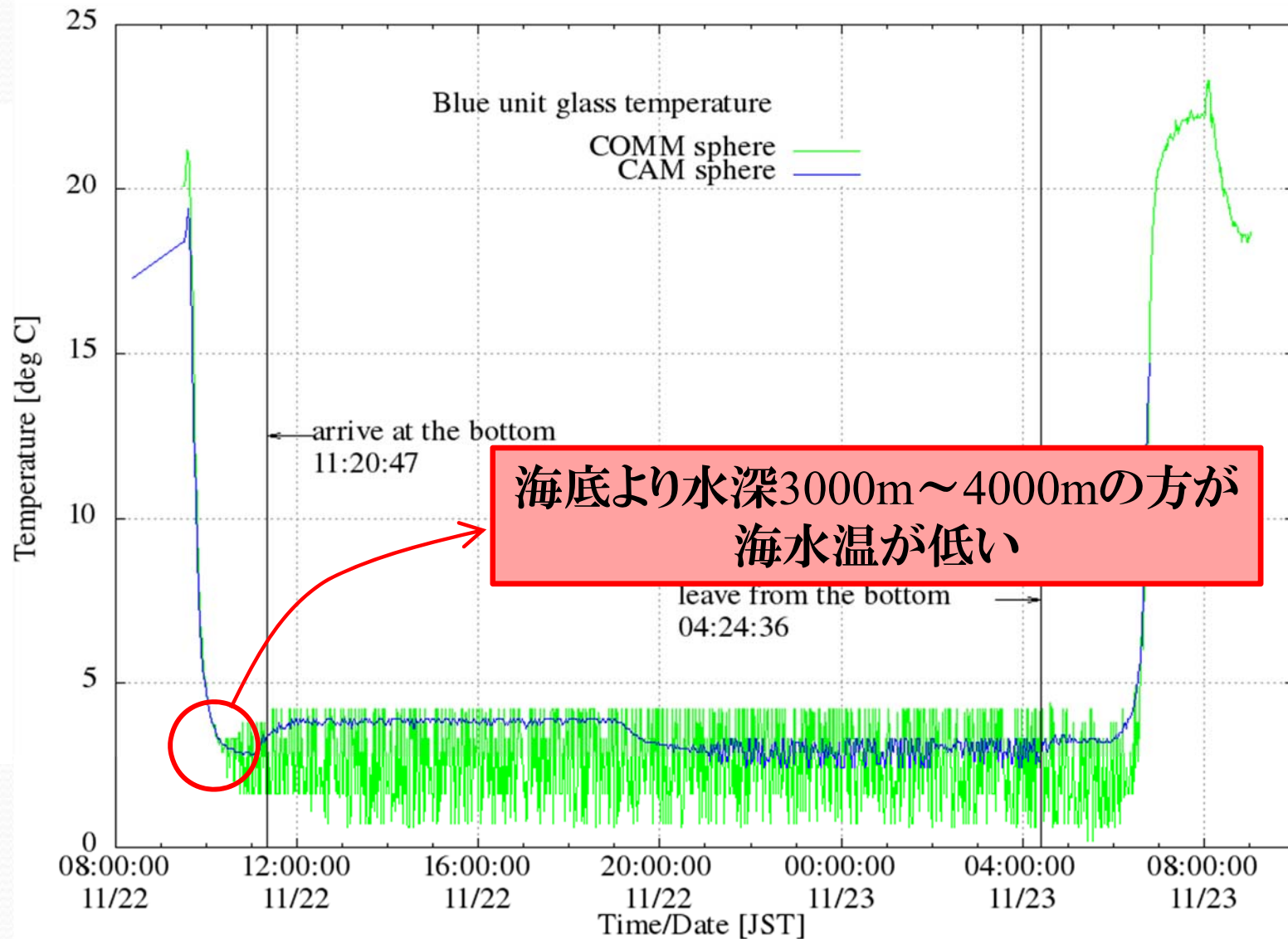


- ガラスへの接着: 接着剤不適 (熱膨張係数の違いにより剥離可能性)
- 粘着ラバーの適用

粘着ラバー: BluTack



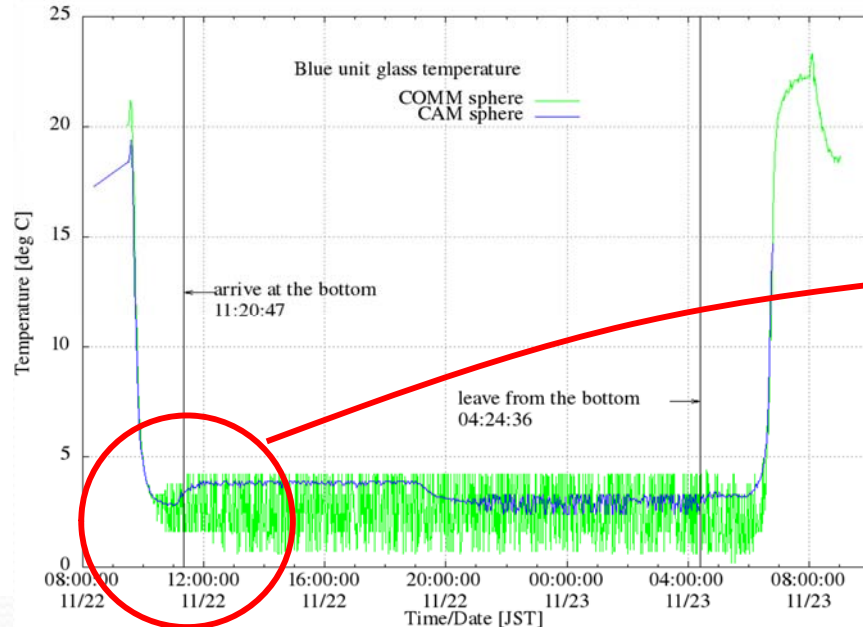
# ガラス面温度測定結果(機体Blue)



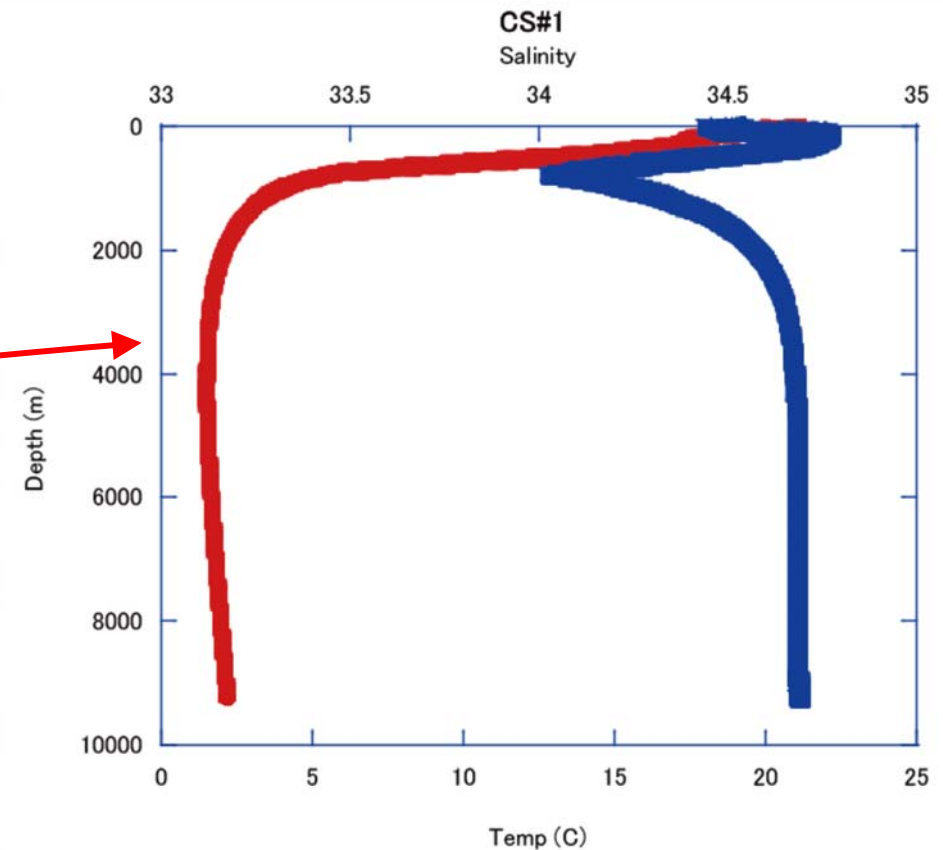


# 他の測定法との比較対照

## 江戸っ子1号潜航中の ガラス球面温度特性



## CTDによる海水温測定 結果(JAMSTEC,2012年6月)



# 体積特性による着底・離底検知の可能性

- 以下の式により、ガラス球の体積変化分を計算

$$Volume\ delta = \frac{T}{P} - \frac{T_0}{P_0}$$

**T:** 温度(ガラス内面または基板温度)

**P:** ガラス球内圧力

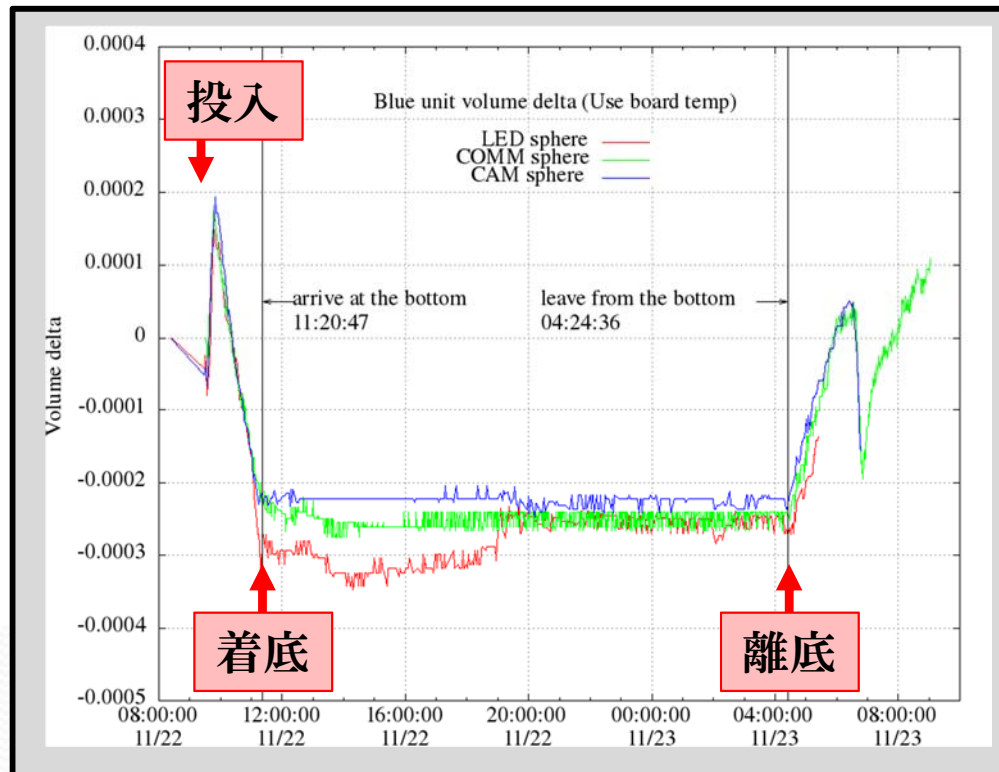
**T<sub>0</sub>:** 海中投入前の温度データ

**P<sub>0</sub>:** 海中投入前の圧力データ

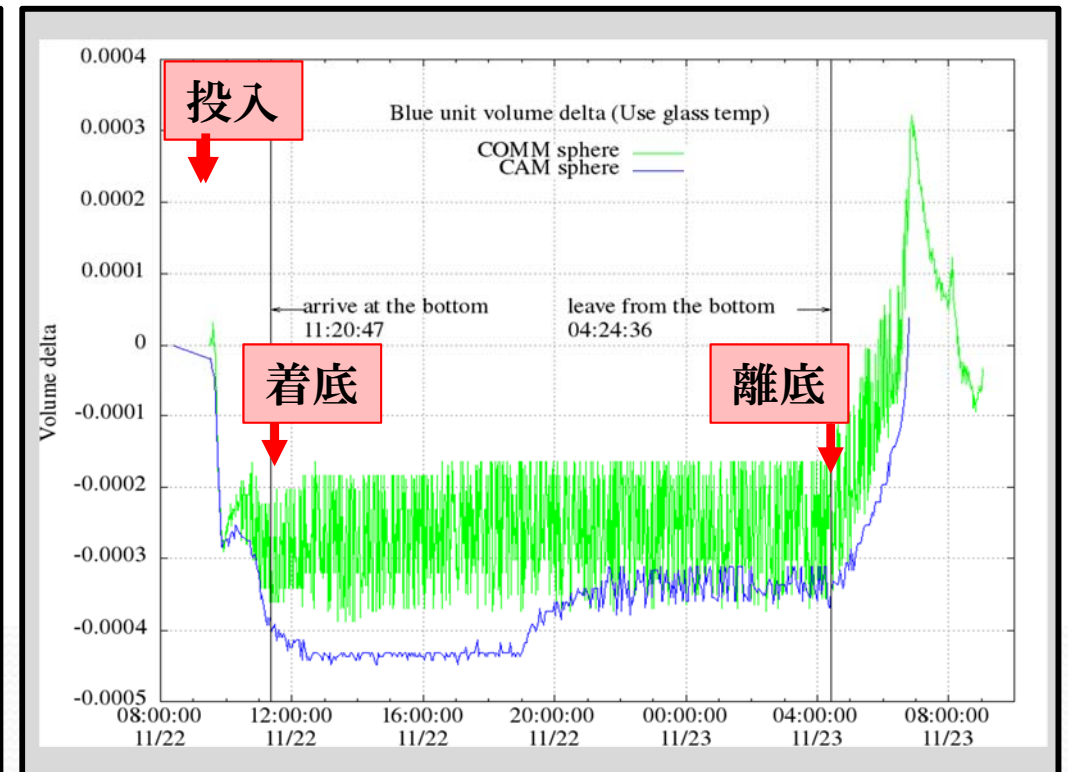


# ガラス球体積の時間変化特性

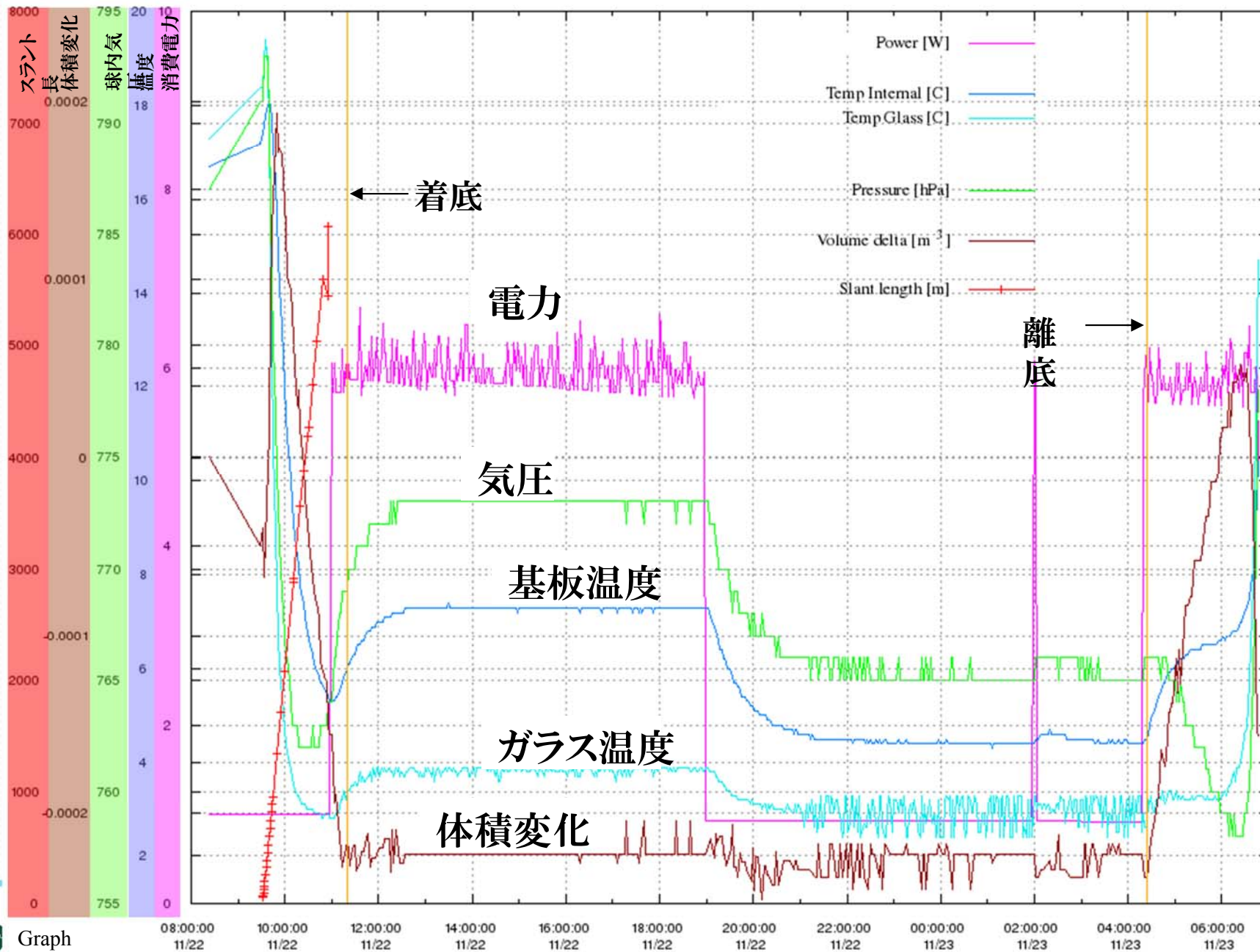
気圧と基板の温度  
から求めた体積変化



気圧とガラス球内面  
温度から求めた体積変化



# 機体Blue カメラ球の各センサ値時間変化



## ガラス球内センサによる 温度・圧力測定に関する知見

- 従来, 専用設計のセンサ(CTD)で測定していた鉛直方向の海水温分布(プロファイル)を, ガラス球面に設置した温度センサでも一定の誤差範囲で( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) 測定できる.
- 基板に設置した温度センサと気圧センサの値から求めたガラス球体積の変化特性から, 機体の着底, 離底をおおよそ検知できる.

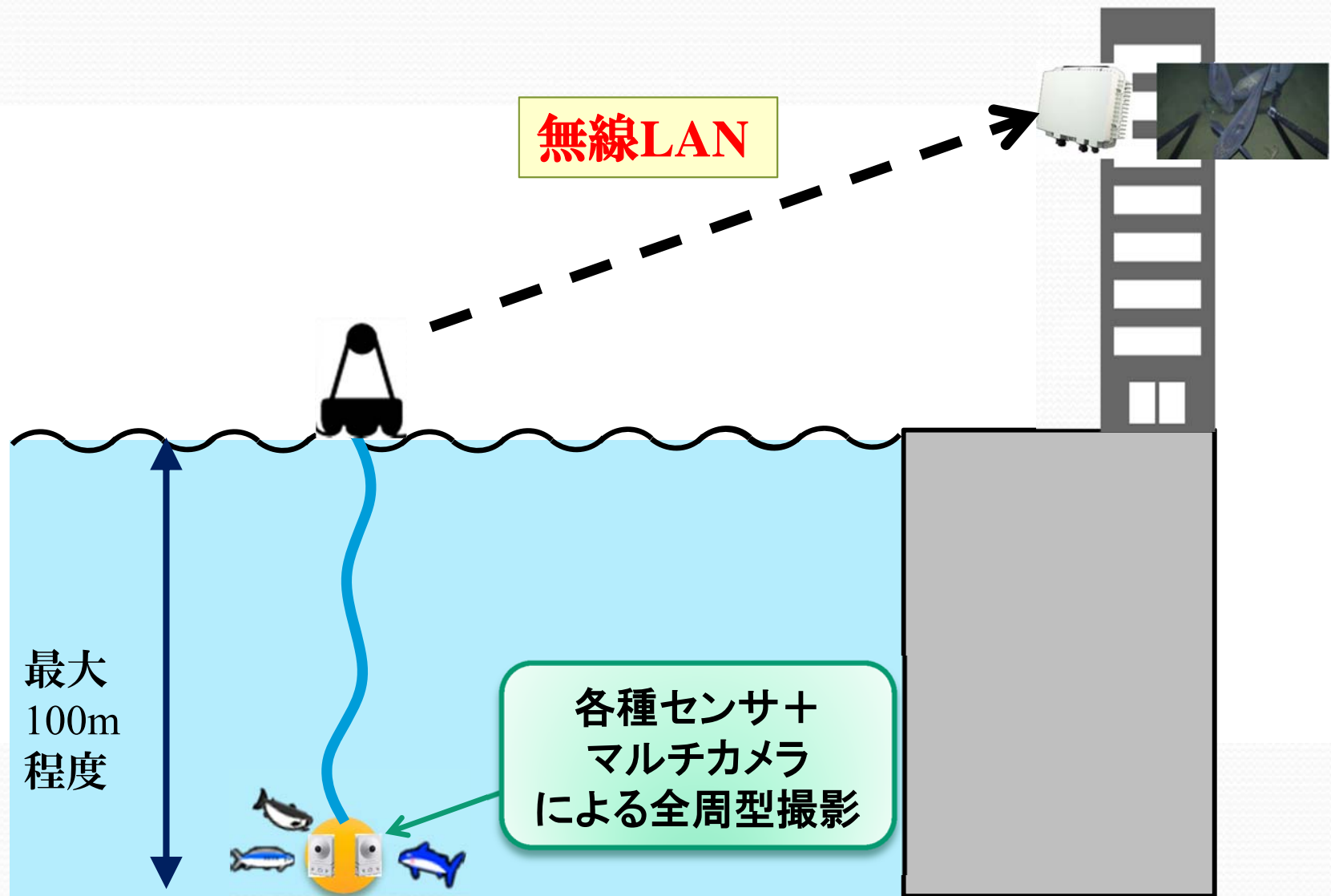


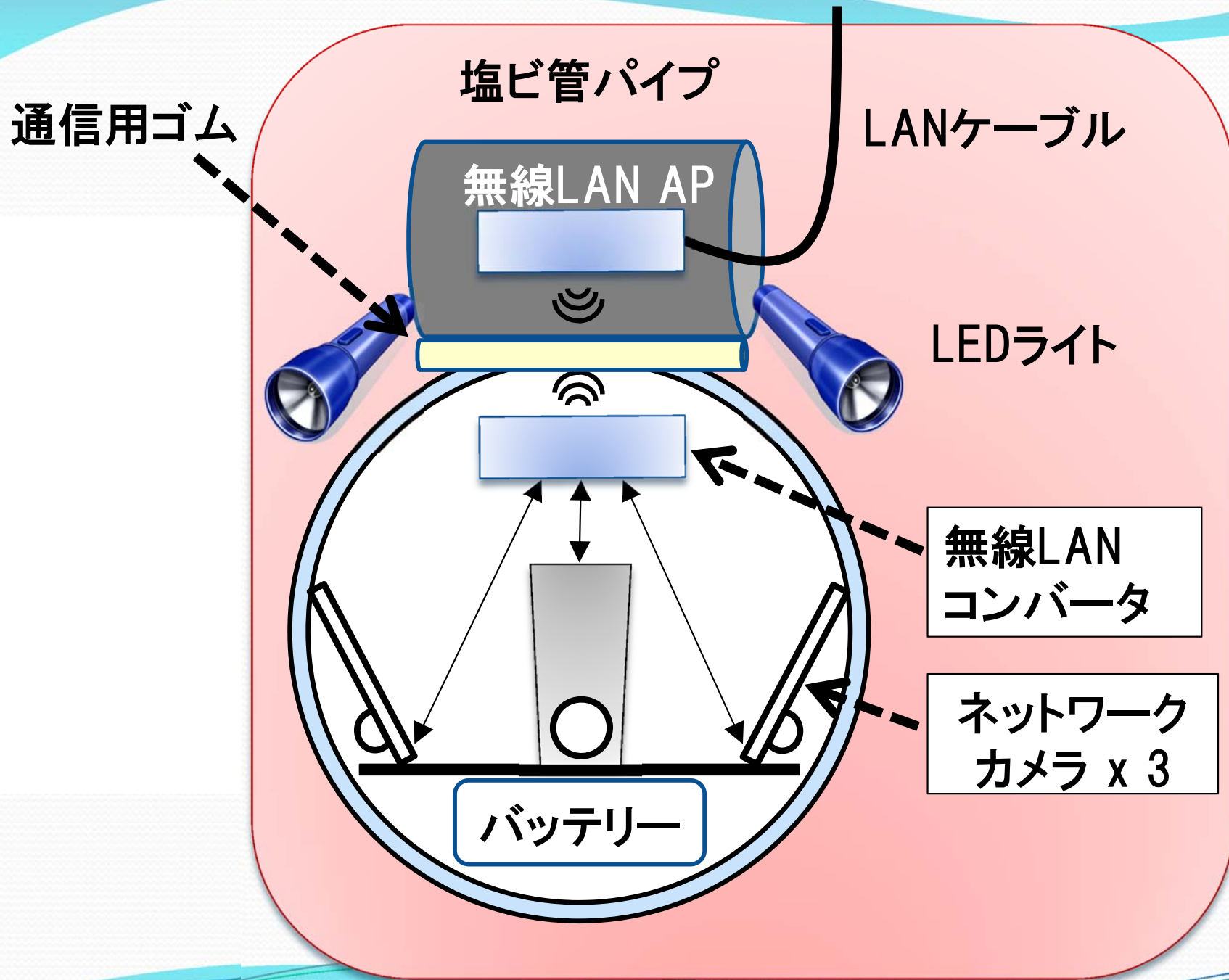
## 次のステップに向けて

- 開発した機体は今後どのような用途で使われそうか？  
→ 昨年11月の実験終了後、関連する企業などにヒアリングを実施。
- 以下のような用途への可能性(主に撮影)
  - (1) 海底の危険箇所調査, マップ作成(沈船のある場所等)
  - (2) 漁礁の状態確認
  - (3) 海底の水産資源(メタンハイドレードなど)の有無についての簡単な調査
- (1)(2)の漁は100m程度までの水深の地域で行われる。  
(3) は水深500m-1000m程度



# 単一球によるライブモニタリングシステム



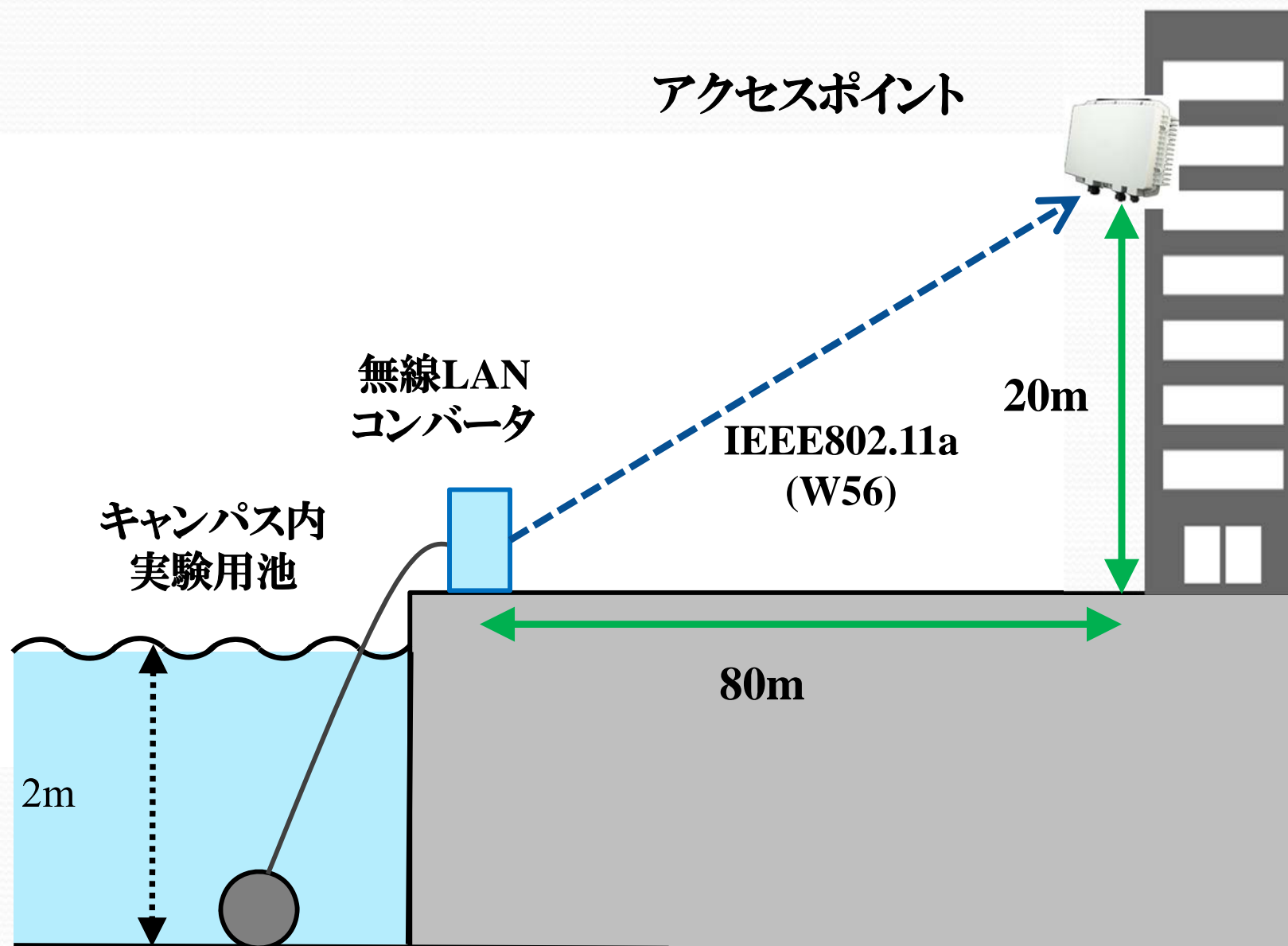




# 機体の概観



# 予備実験(東京海洋大越中島キャンパス, 10月末)



# 実験に用いた建物側無線LANアクセスポイント

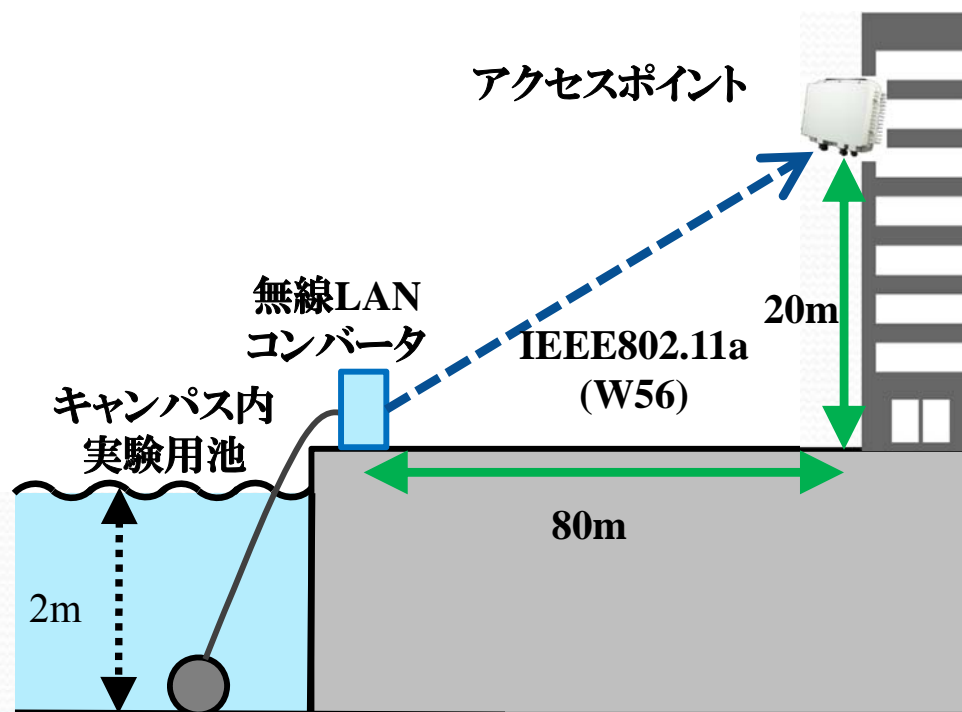
- GoNetworks社  
GoBeam 8000
  - 2.4GHz/5GHzのIEEE802.11n, IEEE802.11acをサポート
  - ゲイン17.6dBiの指向性アンテナ
  - フェーズドアレイで水平方向120度, 垂直方向45度の範囲で端末を追尾



実験風景

# 実験結果

- 予備実験
  - コンバータの位置にIEEE802.11n(アンテナ数1)内蔵のノートPCを置き、APに接続したところ、iperfで約50Mbpsのスループット。
- 映像ストリーミング伝送実験
  - 6Mbpsの水中映像ライブストリーミング伝送に成功。



# 今後に向けて

- 近海センサネットワーク端末群としてのガラス球システム
  - 単一球システムは安価に構成できるので、対象地域に多数の球を配置して面的調査ができる可能性がある。
  - 例えばガラス球面にソナーを設置することで、球の周囲にある物体までの測距が可能か。(ただし球全体が振動するため、方向推定は困難)
  - 水深100mまでの範囲でセンサデータを陸上に定期的に送信する用途であれば、伝送ケーブルに代えて市販の圧電セラミックによる超音波センサによる音波通信が利用できる。(ただし回路の浸水対策などは必要)

