

北極海氷下ドローン「COMAI」の技術 ～海氷下観測とナビゲーションへの新たな挑戦～

2024年3月11日

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境部門・北極環境変動総合研究センター

吉田 弘

持続可能な生命圏と社会圏

干渉の削減・環境改善技術

予測シミュレーション

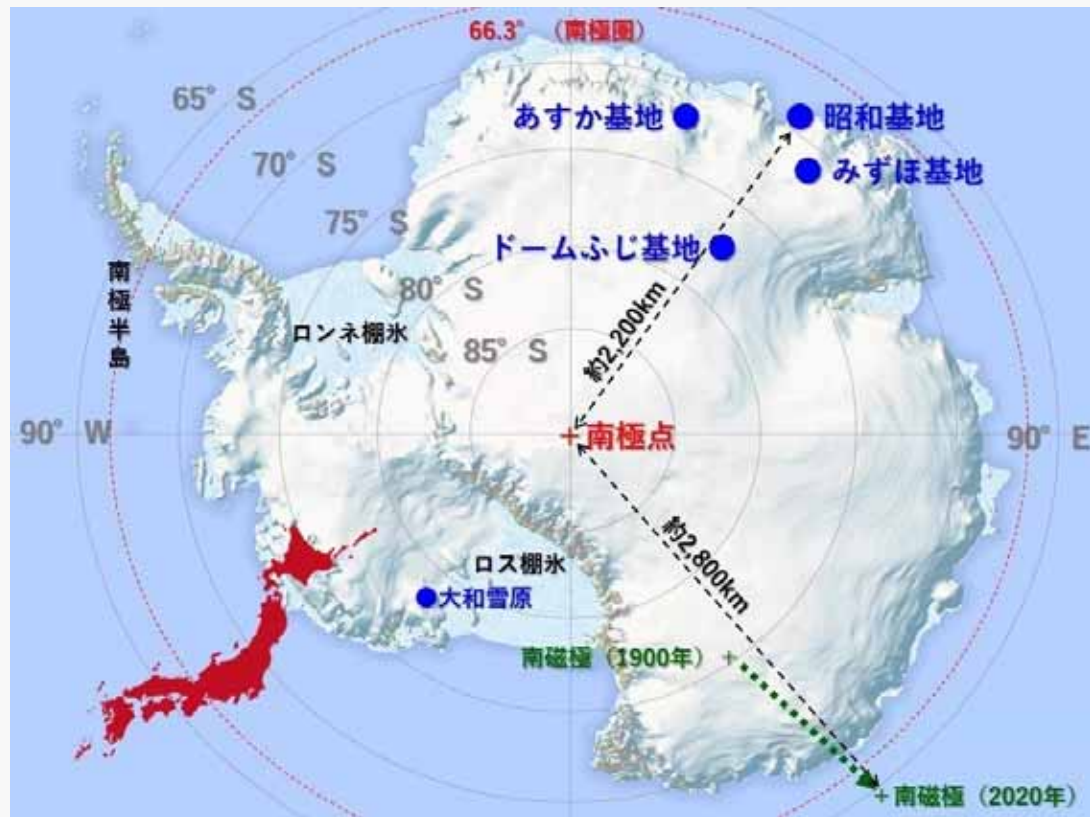
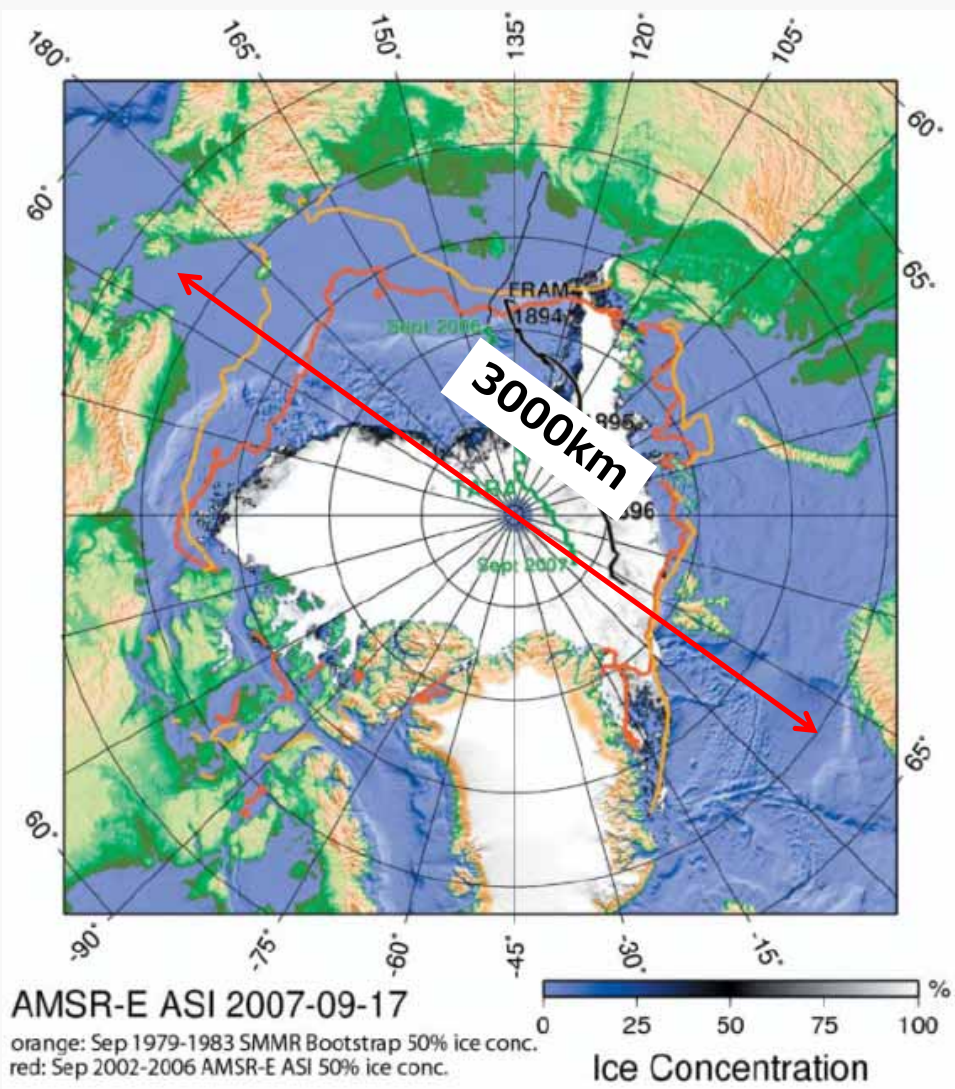
環境調査

人類の干渉

地球生命圏

全球調査
極域調査

海氷で覆われる極域は、知識の空白地帯



海氷下の調査手法

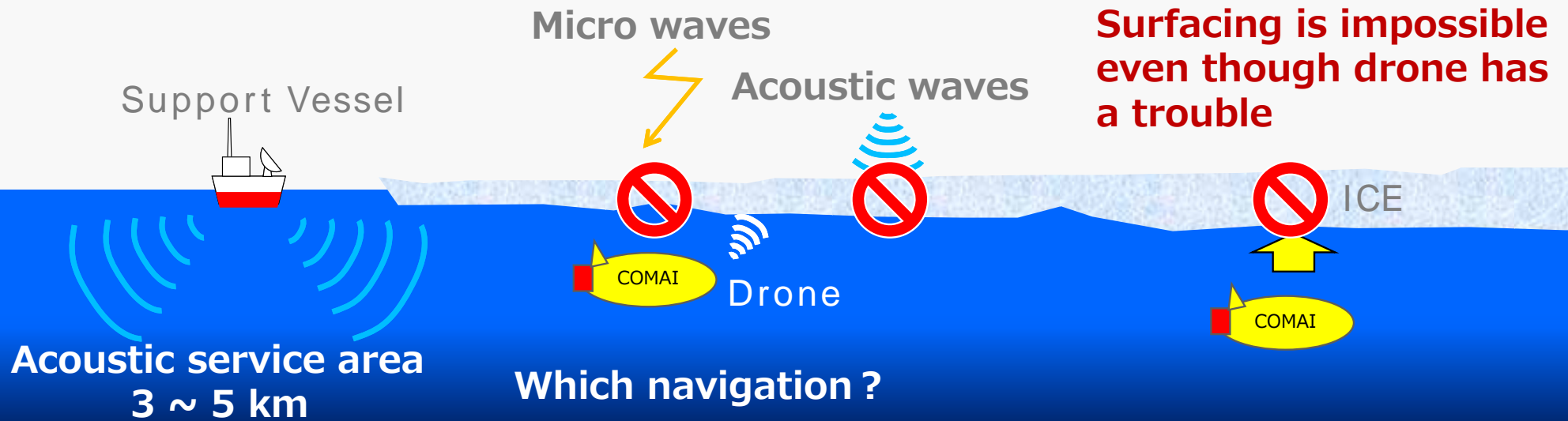
極域（海氷下）環境調査はビジネスになりそうもない → 開発法人が実行する

手法	要求性能	実現の容易さ	
潜水艦	◎	×	
ドリフティングブイ	×	○	
ロボット	○	△ (長距離は難しい)	
船	△ (砕氷船・時間を要す)	△ (コスト)	
氷上からの観測	△ (時間とコスト大)	×	△ (コスト)

海氷下調査の課題

- ✓ 人の介入ができない
- ✓ 電波・音波が届かない
- ✓ 広い ~2,000 km

➡ ロボットに命令するどころか、どこにいるかさえ知る事ができない

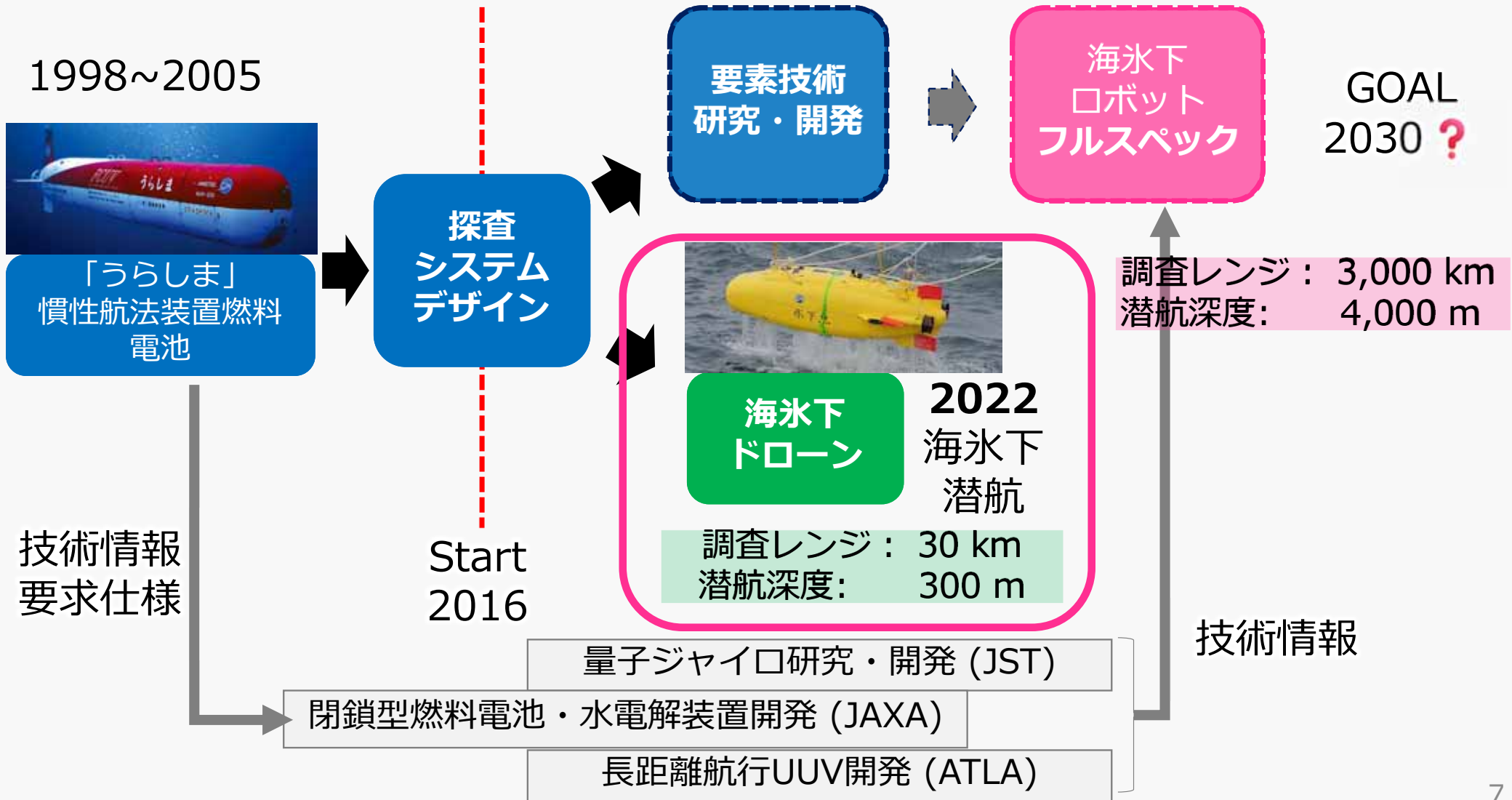


既存の海中ロボットはどこまで海氷下へ

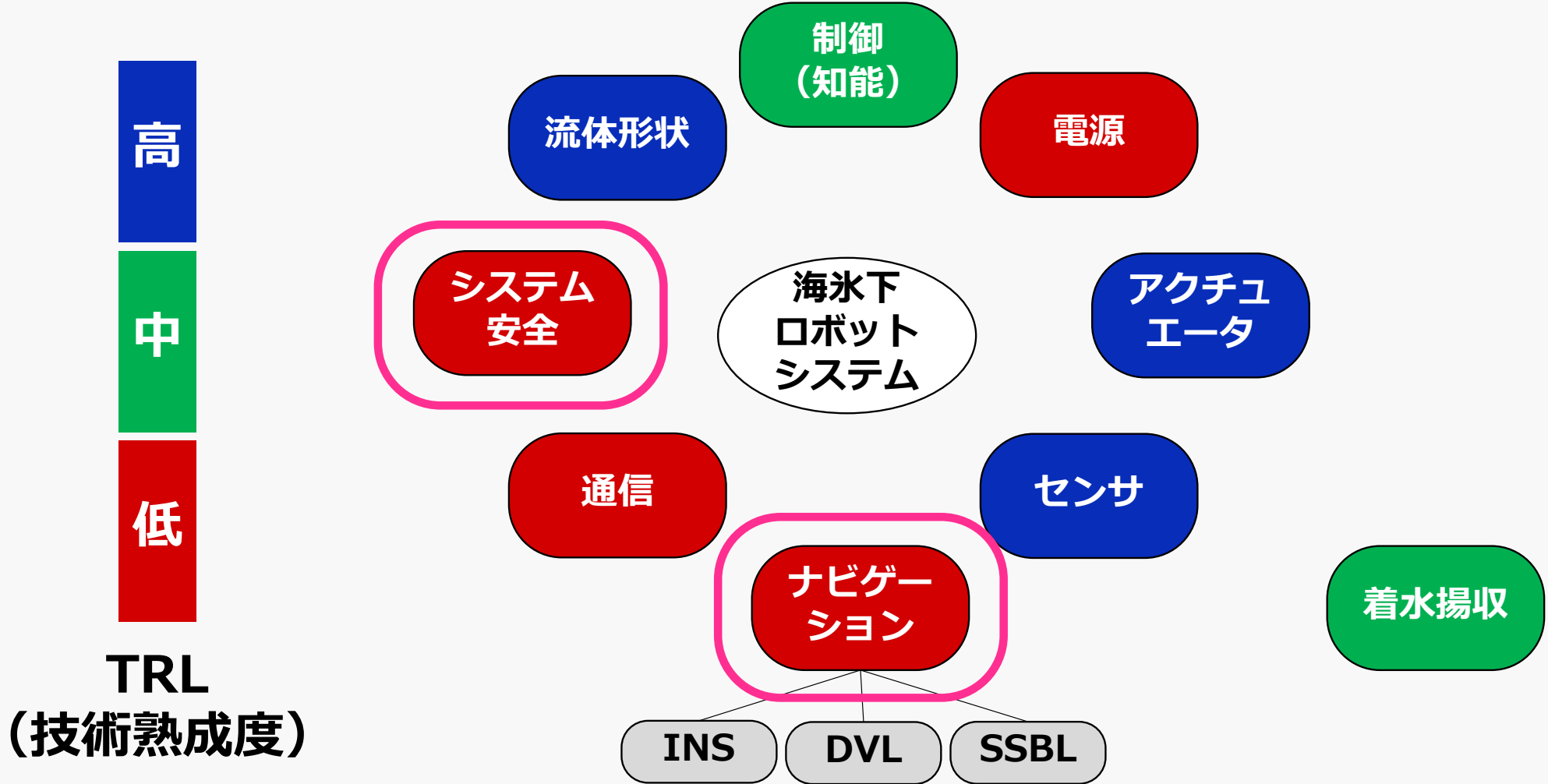
- ✓ トップレコード：
ISE（カナダ） → over **1,000 km**（数回の往復で）
- ✓ AUVのレコード：
サザンプトン海洋研究所（英） → **60 km**
ただしロストしている
- ✓ その他の国は，氷縁から**数km**.

2016年三菱総研調査

海氷下ロボット開発のマイルストーン by 吉田



向上すべき技術熟成度の項目（フルスペック）



「COMAI」の仕様

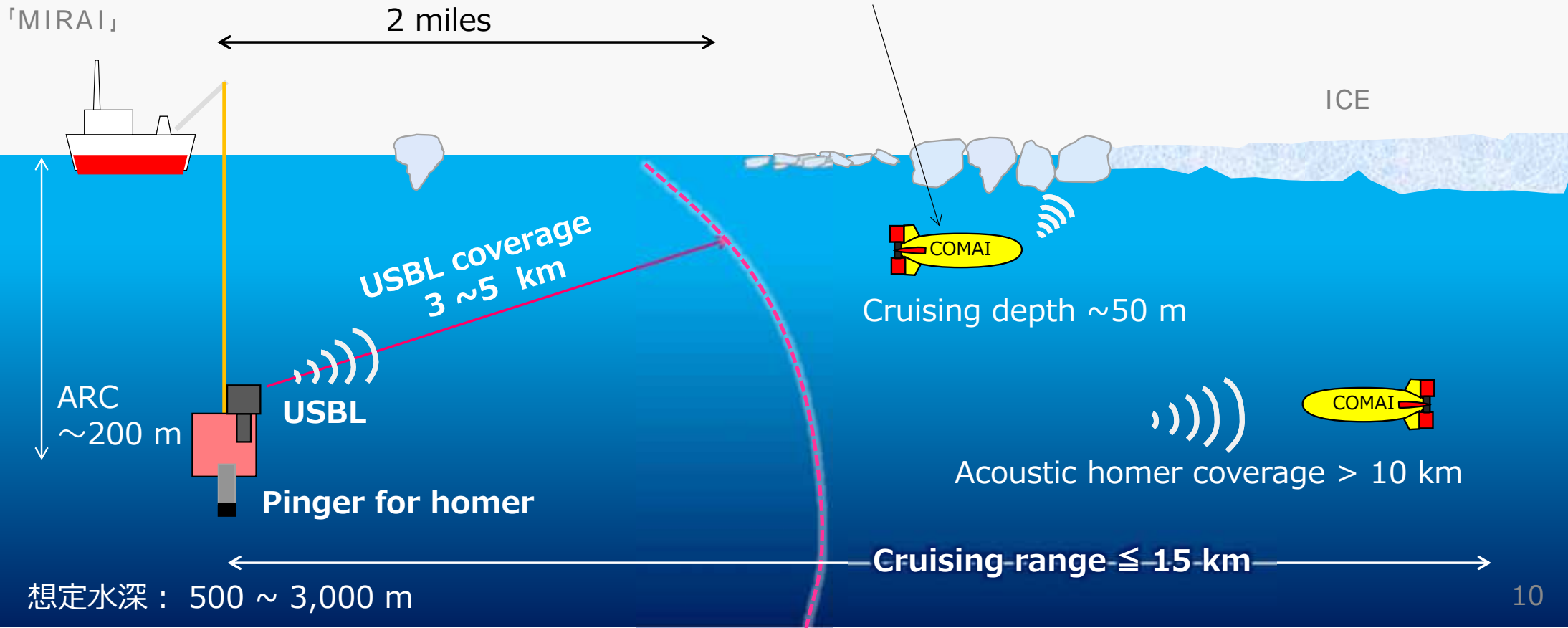
- ✓ 大きさ：長さ 2.3 m, 重さ 330 kg
- ✓ 航行距離：最長で氷縁から **15 km** まで往復
- ✓ 潜航深度：**300 m**
- ✓ 巡航速度：2 ノット
- ✓ 氷接近距離：写真を撮るためには数mまで接近要
- ✓ 観測機器：① CTD, ② 蛍光・濁度計, ③ カメラ,
④ マルチビーム



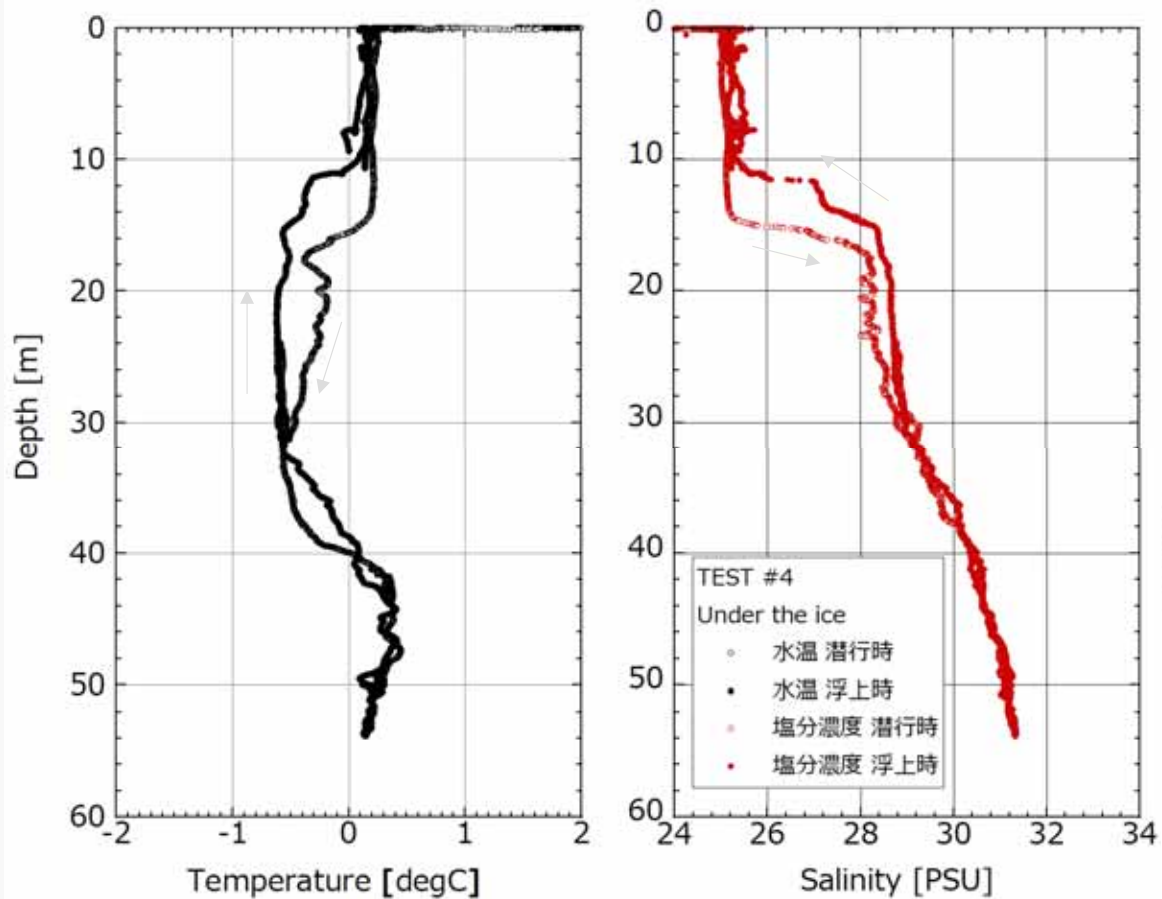
現在, 小型採水装置を開発中

COMAIのオペレーションデザイン

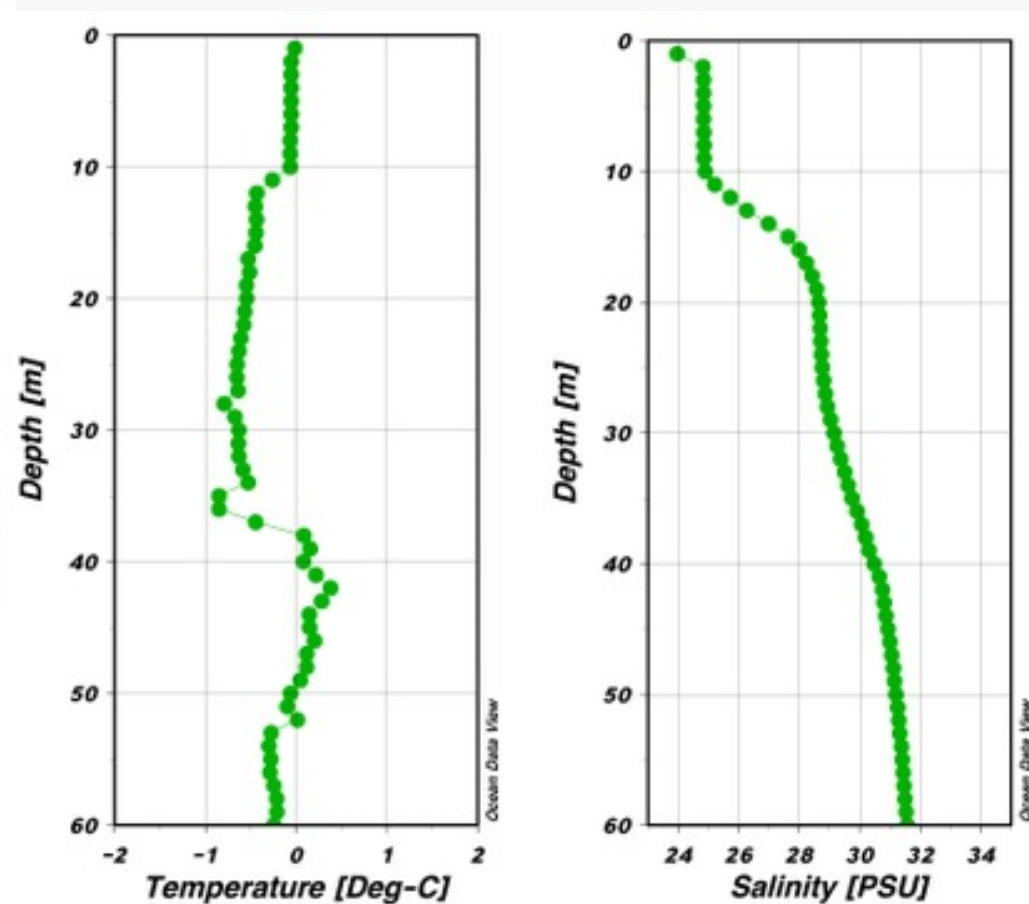
COMAI is controlled by a scenario program based on position measured with a hybrid navigation system consisting of a **Doppler velocity sensor** and an **inertial navigation system** with a magnetic compass.



鉛直方向の温度と塩分濃度

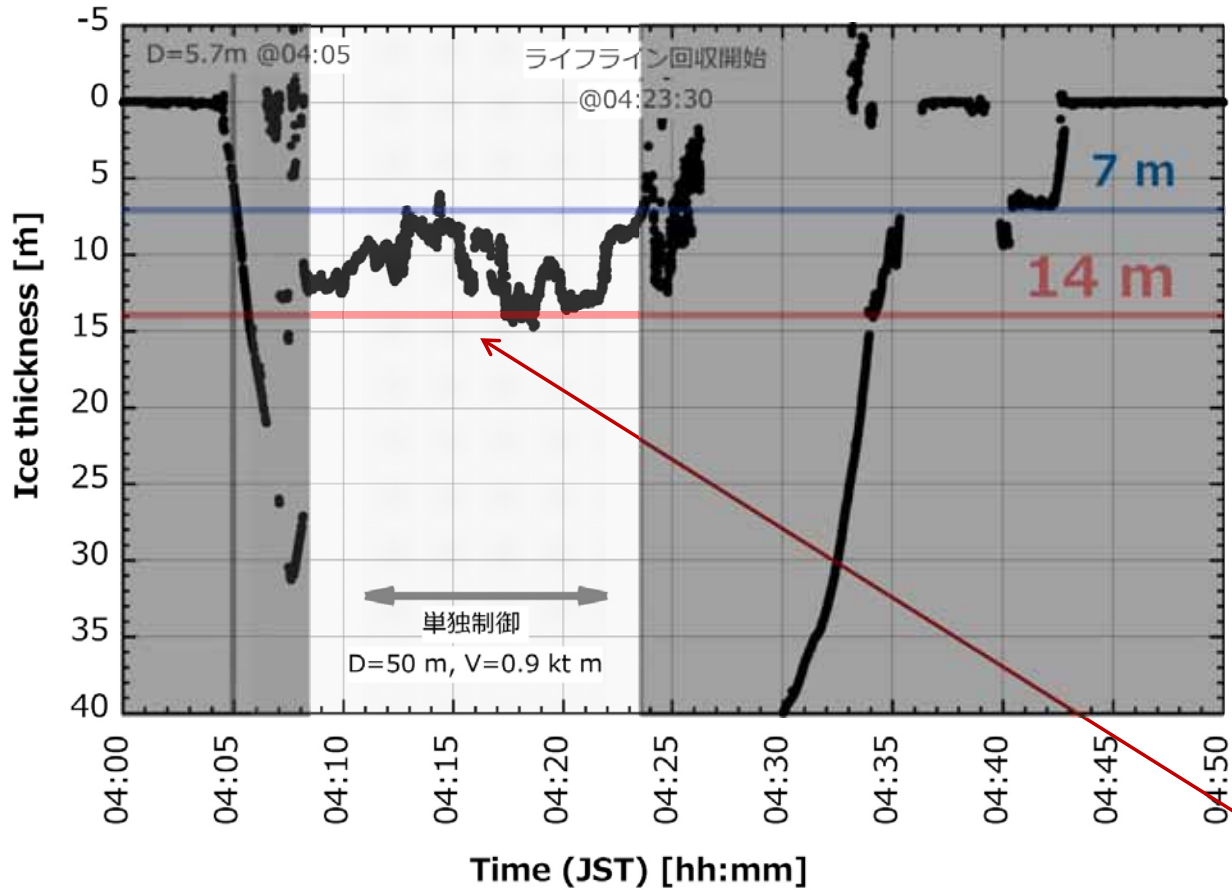


COMAI diving around the ice

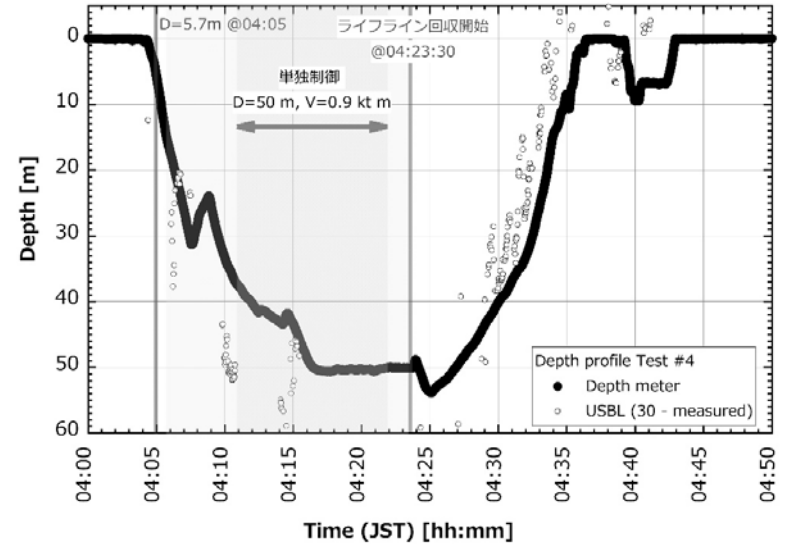


XCTD (X066)

海氷厚みの計測

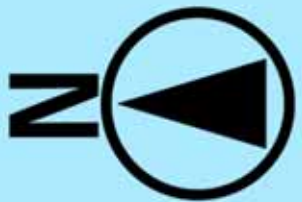


Ice thickness



Depth trend

Big roughness!
氷の真ん中の方が薄い



MIRAI



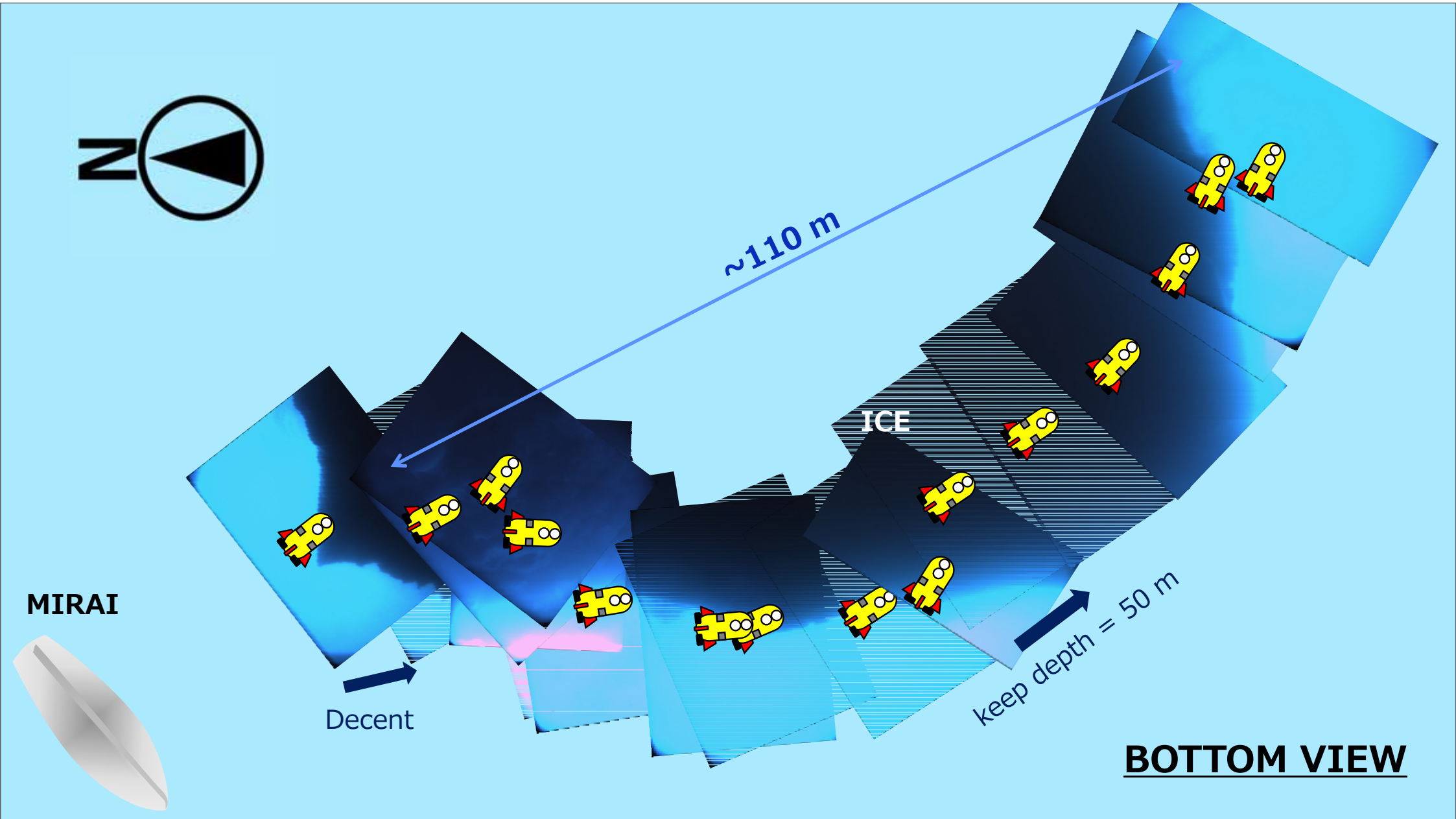
Decent

~110 m

ICE

keep depth = 50 m

BOTTOM VIEW



1. 氷の下での緊急事態の対応

ナビゲーションシステムが故障した場合の帰還方法

INS故障

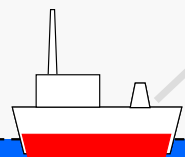


私はどこ？



帰還方向を示す

「みらい」



音響灯台

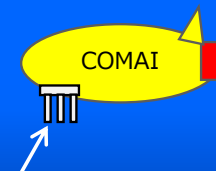


音響ホーミングシステム
有効距離：10 km



ICE

INSが故障した場合
音のする方向に向かって走る



Super short baseline array

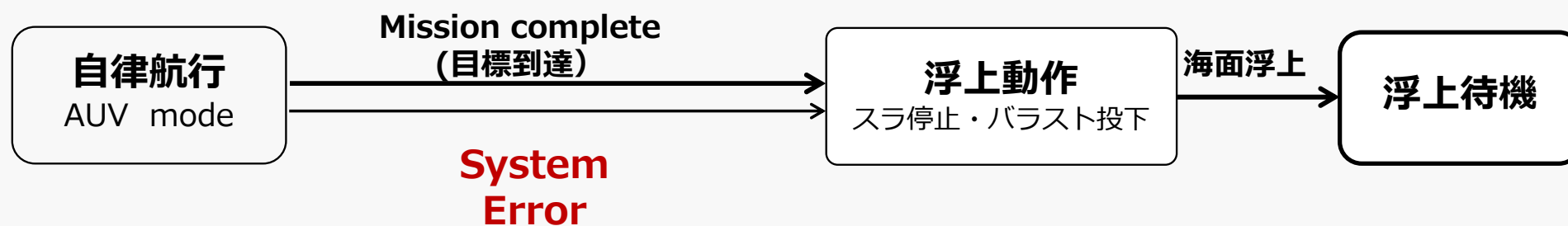
従来のAUVの緊急システム



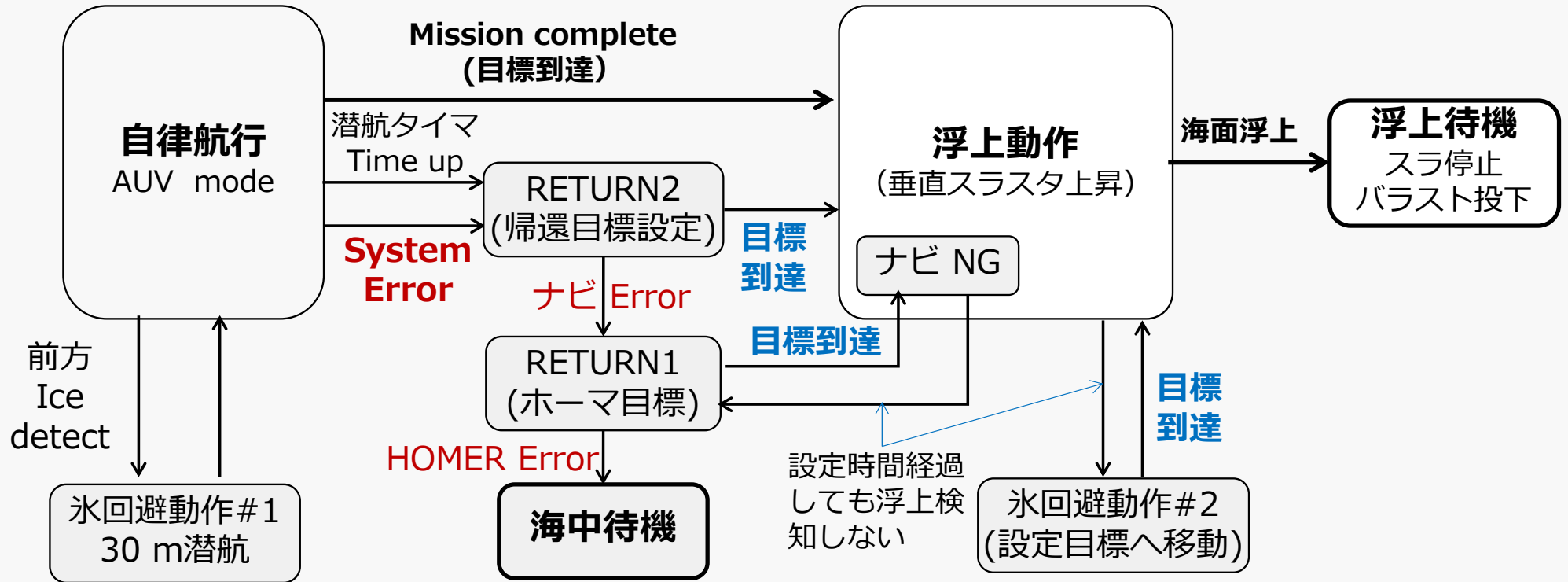
氷の下だと



従来型AUVのシステム安全

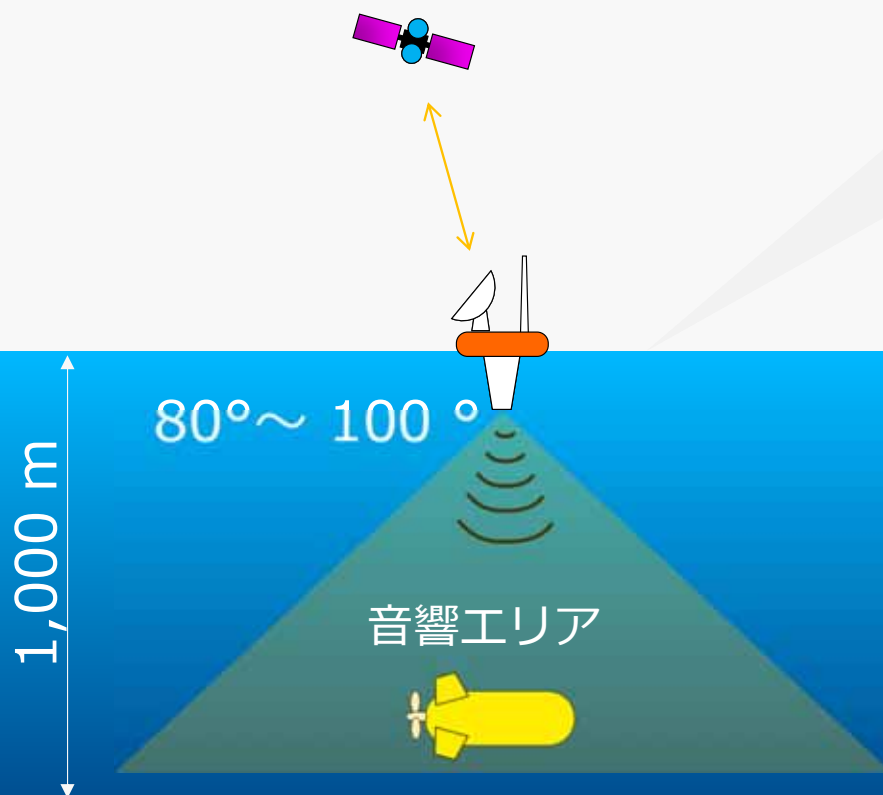


COMAIのシステム安全



2. 氷の下でのナビゲーション

通常のAUVの測位方法



✓ 慣性航法装置

✓ ドプラ速度計

✓ ~~音響航法装置~~

慣性計測の理屈

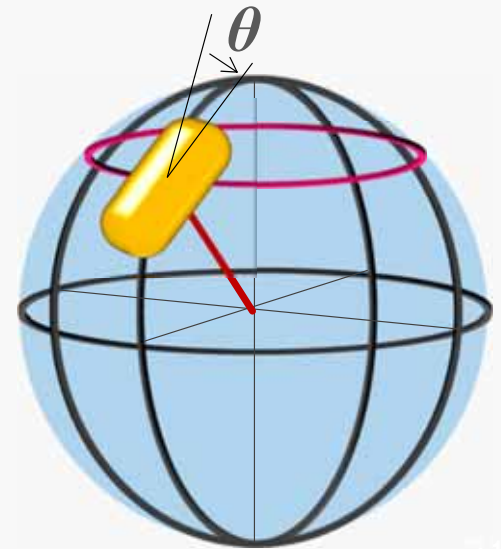
- ✓ 3軸の加速度計で, X, Y, Zの**加速度 a** を計測
- ✓ 3軸のジャイロで, X, Y, Z各軸の**回転速度 ω** を計測

ω から姿勢を知り, その時の加速度aを2回積分すれば移動した距離が分かる

ニュートンの法則 : $F = ma$

速度 : $v = \int a dt$

位置 : $x = \int v dt$



慣性航法装置

INS (Inertial Navigation System) :

位置と姿勢を計測

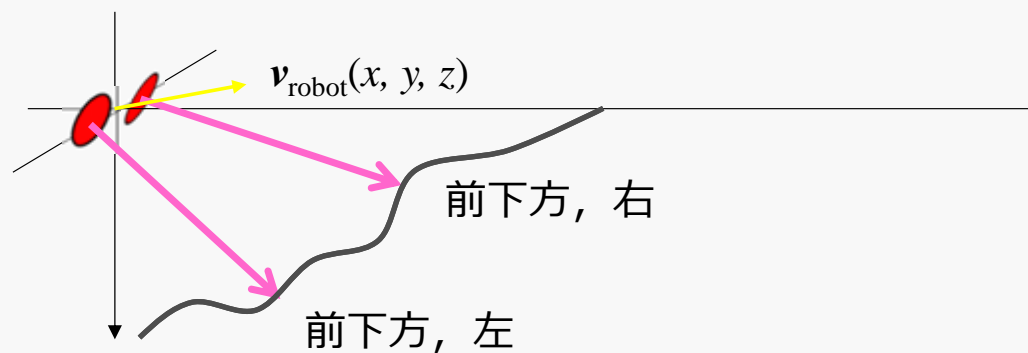
慣性計測装置

IMU (Inertial Measurement Unit):

姿勢を計測

ドプラー速度計とは？

- ✓ 4つのビームのドプラー効果で海底に対する速度を計測
- ✓ 4つのビームで海底までの距離を計測.
- ✓ IMUなどで, ロール・ピッチ・ヨーの計測が必要.



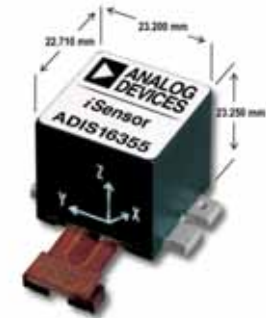
慣性航法装置の価格と性能

INS

IMU

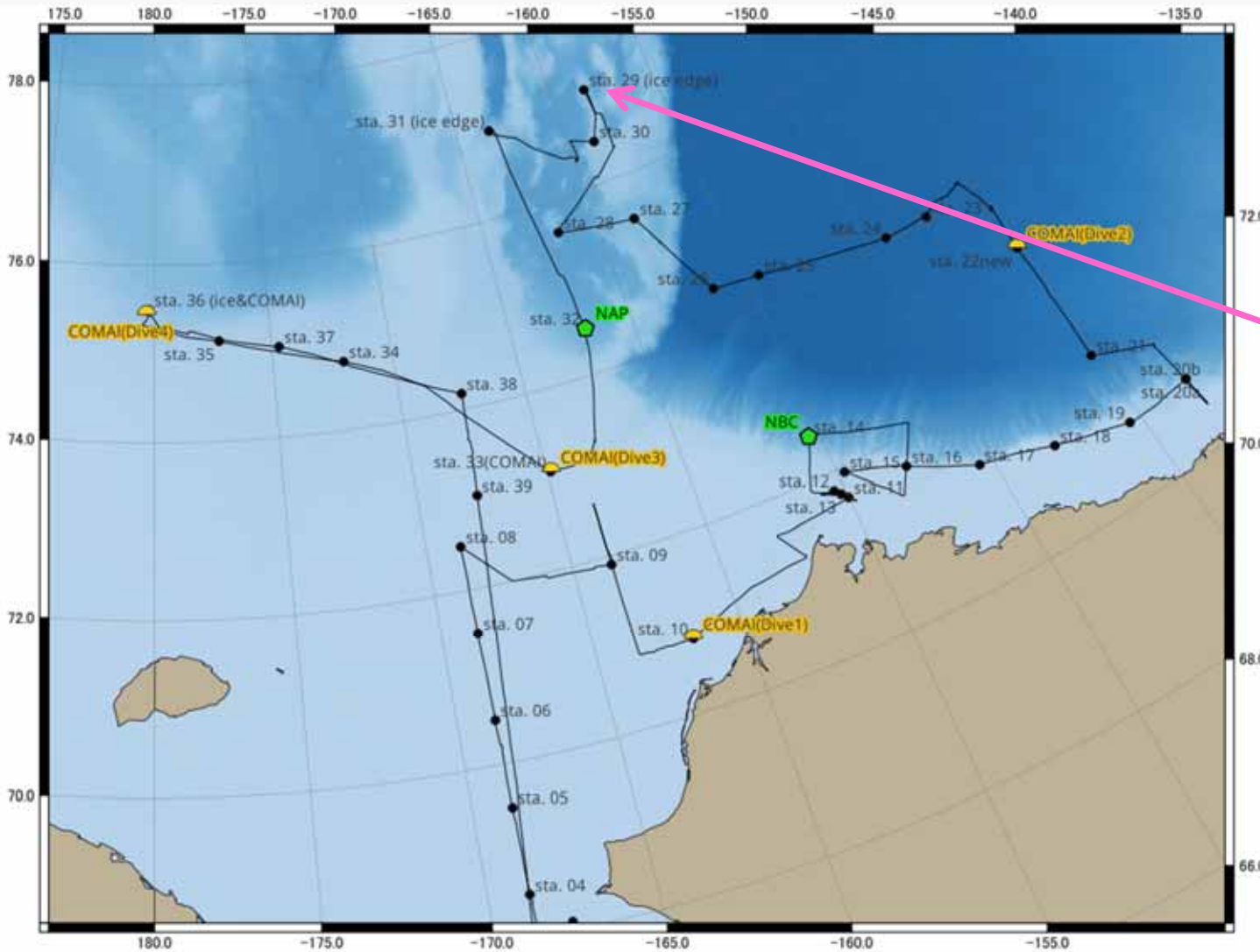


Phins C3



	Phins	Phins compact	HG4930	ADIS16355
角度誤差	0.01	0.15	0.12	0.9
バイアス不安定性	0.01 °/h	?	> 0.5°/h	54 °/h
ランダムウォーク	0.01°/√Hz	0.1°/√Hz	0.06	4.2
サイズ	16 cm	14 cm	6.5 cm	3.7 cm
価格	2千万	1千万	110万	10万

COMAIはどの辺まで行くのか？



Location		water depth	Dive
Lat.	Lon.		
70.82567	-161.7167	44.8 m	1
73.16433	-145.166	3600 m	2
73.08667	-164.8553	69 m	3
75.44967	179.649	852 m	4

たとえば2023年の航海では
北緯75.4°まで行った！

慣性航法装置の真北調整エラー：ミスアライメント

実際の地球座標系の方向余弦マトリクス C_b^n とINSが計算した座標系 \tilde{C}_b^n の間のミスアライメント B はミスアライメントの角度が小さい場合に,

$$\tilde{C}_b^n = [I - \Psi]C_b^n$$

$$\text{ここで, } \Psi = \begin{pmatrix} 1 & -\delta\gamma & \delta\beta \\ \delta\gamma & 1 & -\delta\alpha \\ -\delta\beta & \delta\alpha & 1 \end{pmatrix}$$

- ✓ $\delta\alpha, \delta\beta$ は北向きならびに西向き（チルト角）のミスアライメントで**加速度計バイアス**に依存.
 - ✓ $\delta\gamma$ は垂直軸のミスアライメントで、ヘディングエラーとなり**ジャイロのバイアス**に依存する.
- ボディフレームが地球座標系に対して垂直になっている場合, $C_b^n = I$ となり,

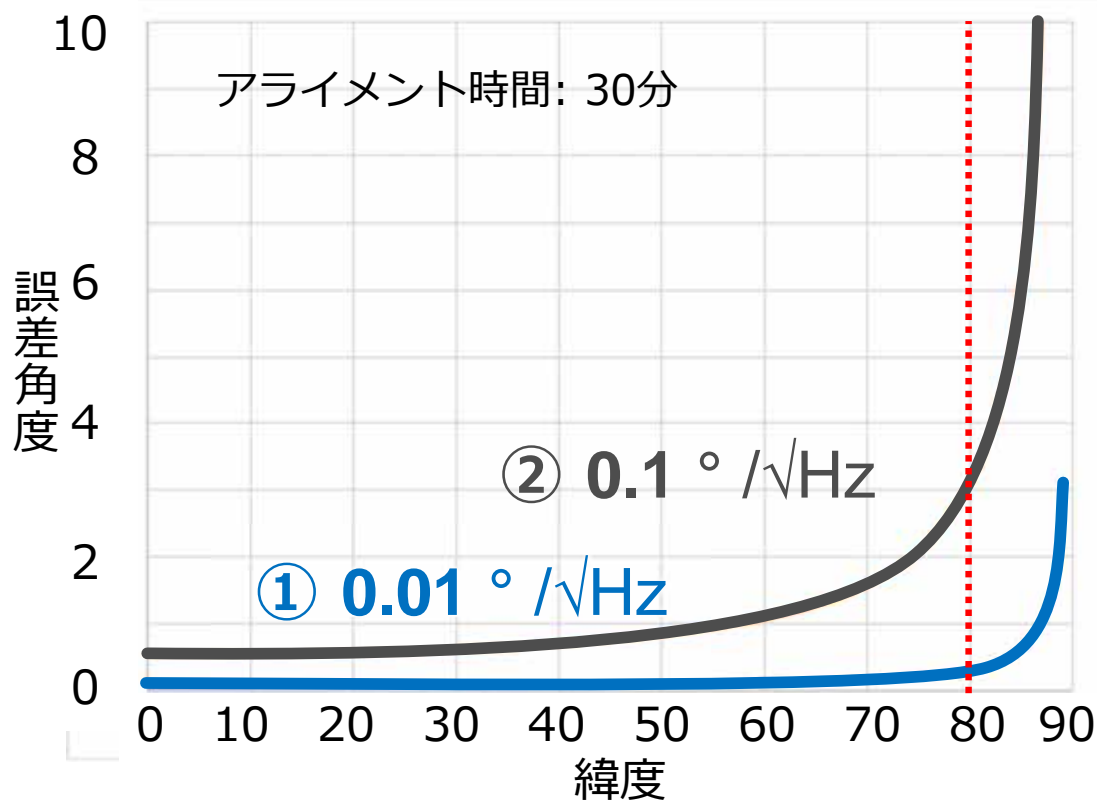
$$\delta\alpha = \frac{B_y}{g}$$

$$\delta\beta = -\frac{B_x}{g}$$

$$\delta\gamma = \frac{D_y}{\Omega \cos L} + \frac{B_y \tan L}{g}$$

高緯度での慣性航法装置 (INS) のアライメントエラー

候補としたINS	ランダムウォーク	特徴
JIMS-180 [JAE], Phins [Exail]	0.01°/√Hz	AUV標準搭載機器
Phins compact C3 [Exail]	0.1°/√Hz	COMAIに使用可能なサイズ



INS	緯度35°	緯度80°
①	0.066	0.31
②	0.66	3.1

二千万円のINSでも
北極では精度が出ない
目標： 0.05°以下

緯度によるアライメント角度誤差

おどろきの事実！

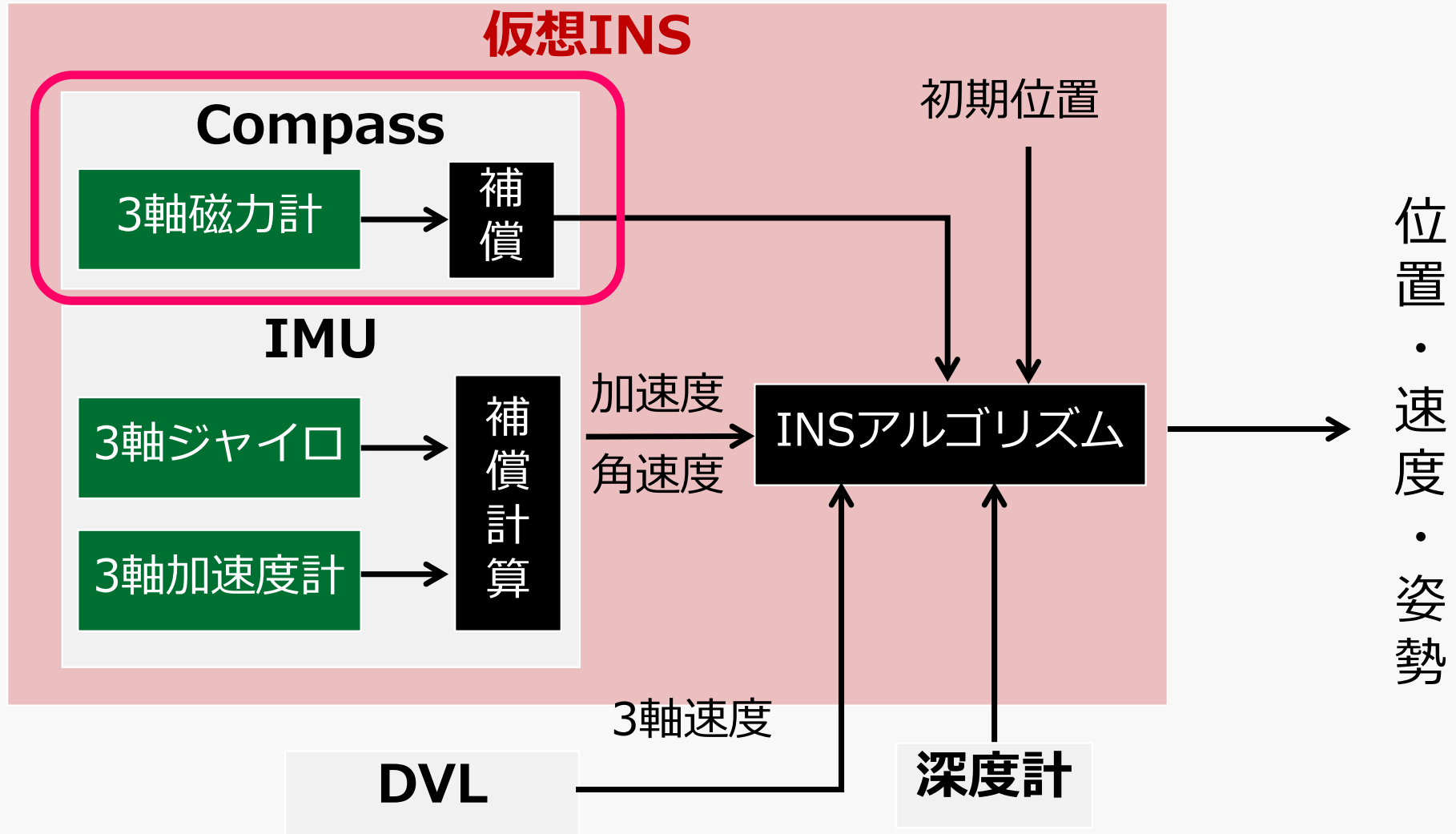
なんと、**2000万円のINS**でも、
北緯80°では、**0.3°**の誤差が発生！

あなたの携帯やドローンのIMUでは？

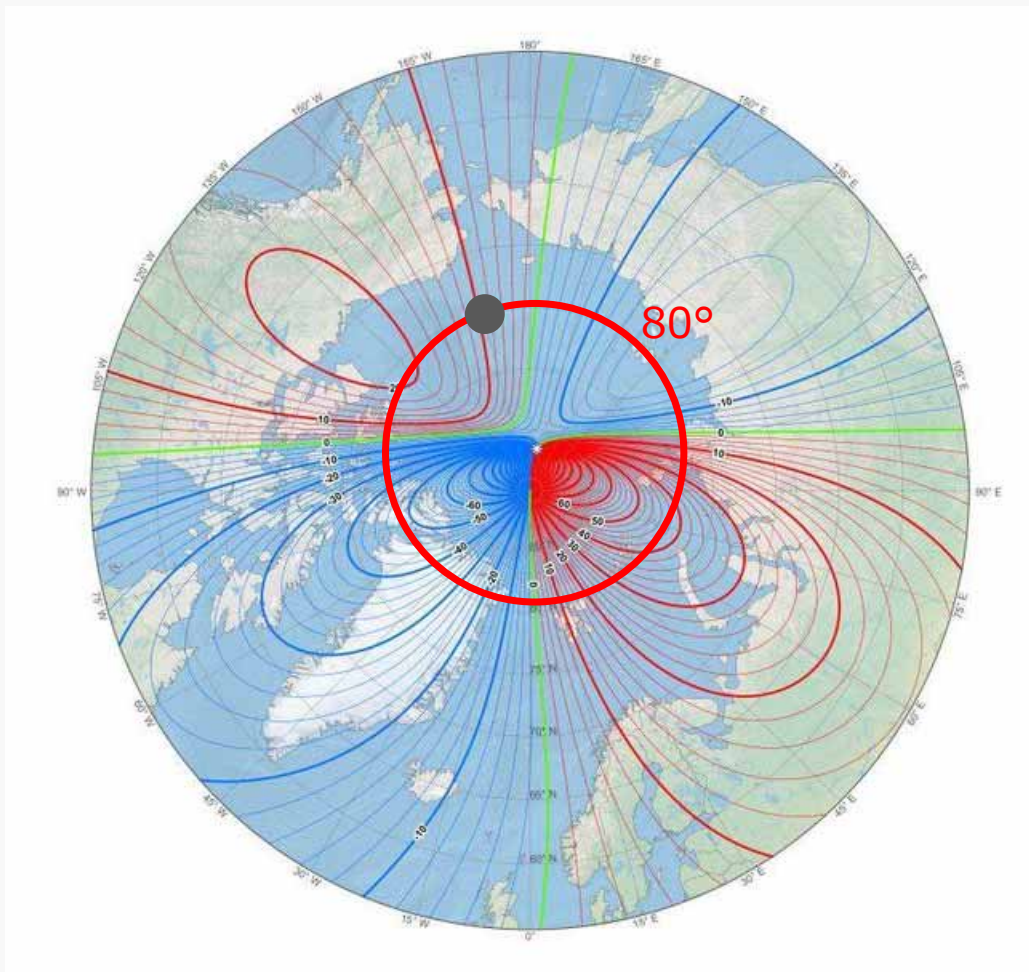
- ① 初期角度誤差が数°程度.
- ② バイアス誤差（時間経過誤差）が数十°.
→ 北を知ることができない
数分でどこにいるかわからない

COMAIは、**磁方位**を計測し、計算で真北を求めている

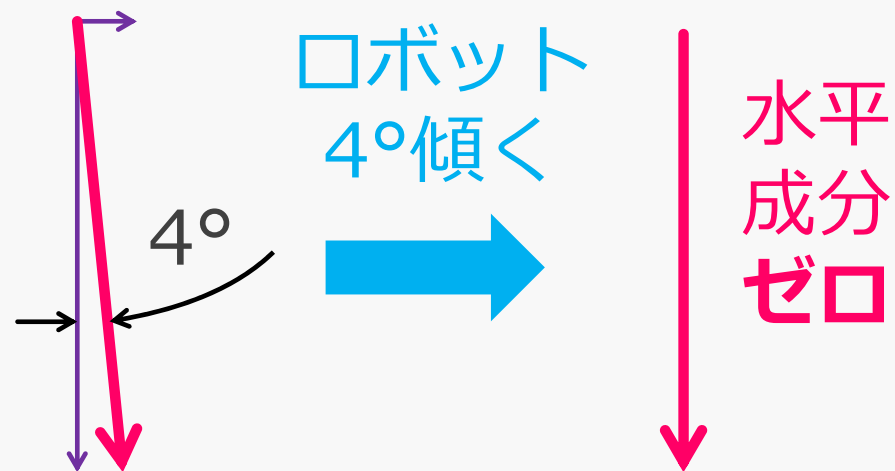
COMAIのナビゲーション



北極では、磁気コンパスの水平成分は非常に小さい！



Latitude [°]	North [Gauss]	Vertical [Gauss]	ratio N/V
35	0.246	0.316	0.78
80	0.040	0.575	0.07
85	0.008	0.573	0.01



2024年3月のCOMAI

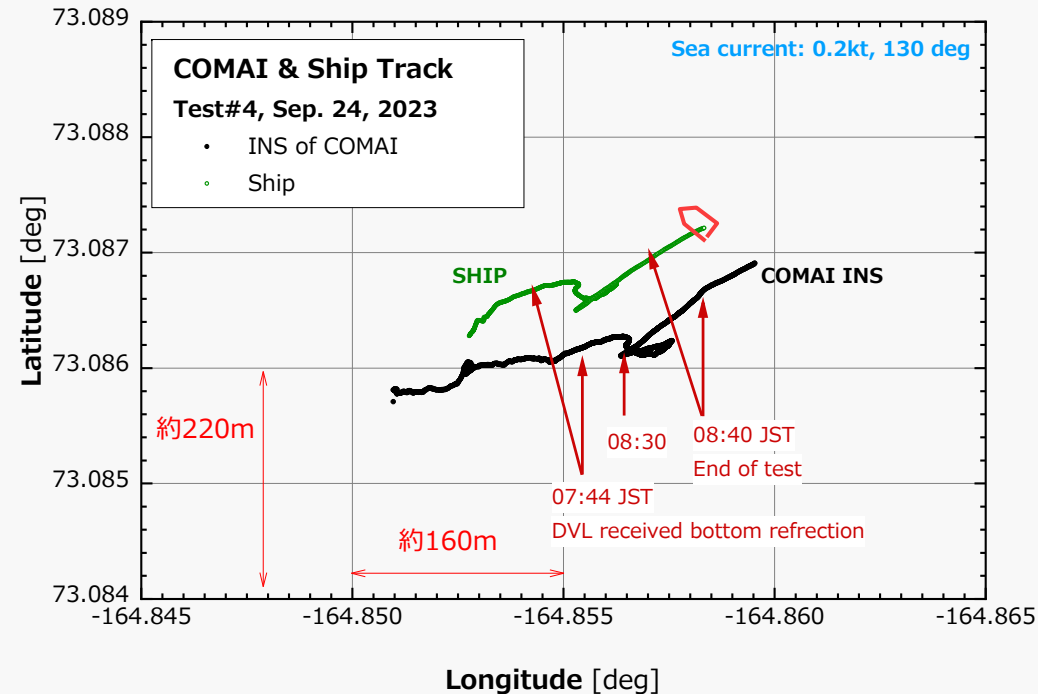
- ✓ INSと磁気コンパスの問題を、これまでの海域試験で克服し、DVLベースの航行で短い距離（数キロメートル）の探査であれば位置情報をロストせずに航行できることを確認。
- ✓ DVL対地（水深が60mより浅い海）ができれば、より長い距離が走れる。



- ✓ 氷で覆われた海中の航行30 kmに対しては、まだ一性能が不十分。



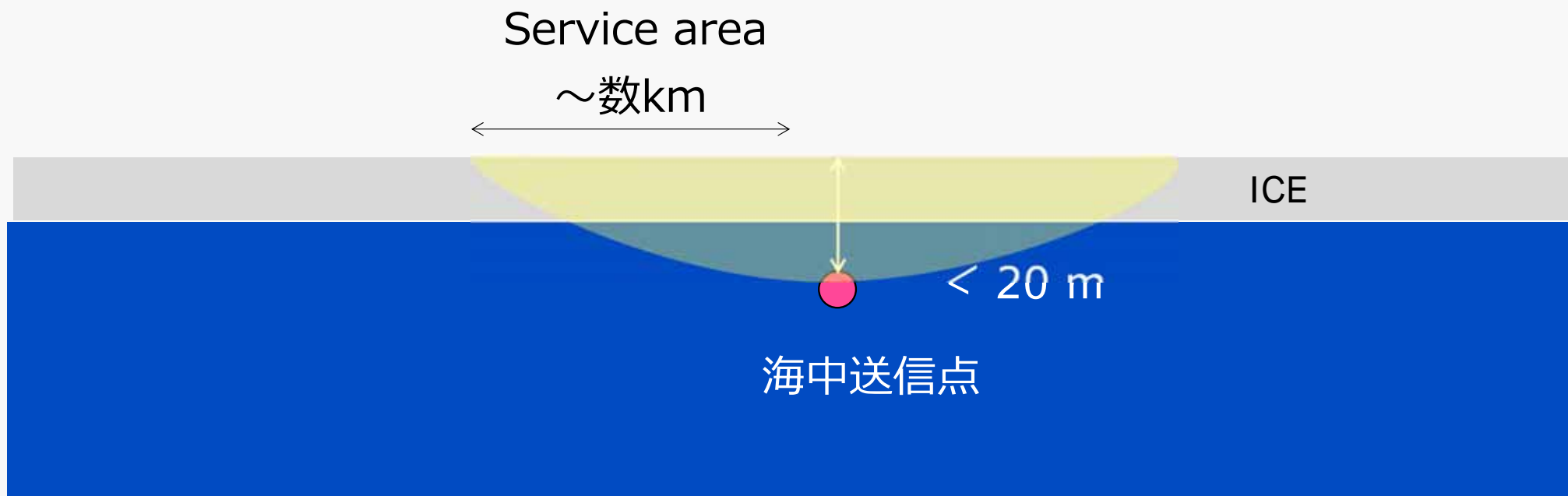
新たな測位手法を開発



対地が取れているDVLの位置精度@北極海

3. 開発中の極域ナビゲーション

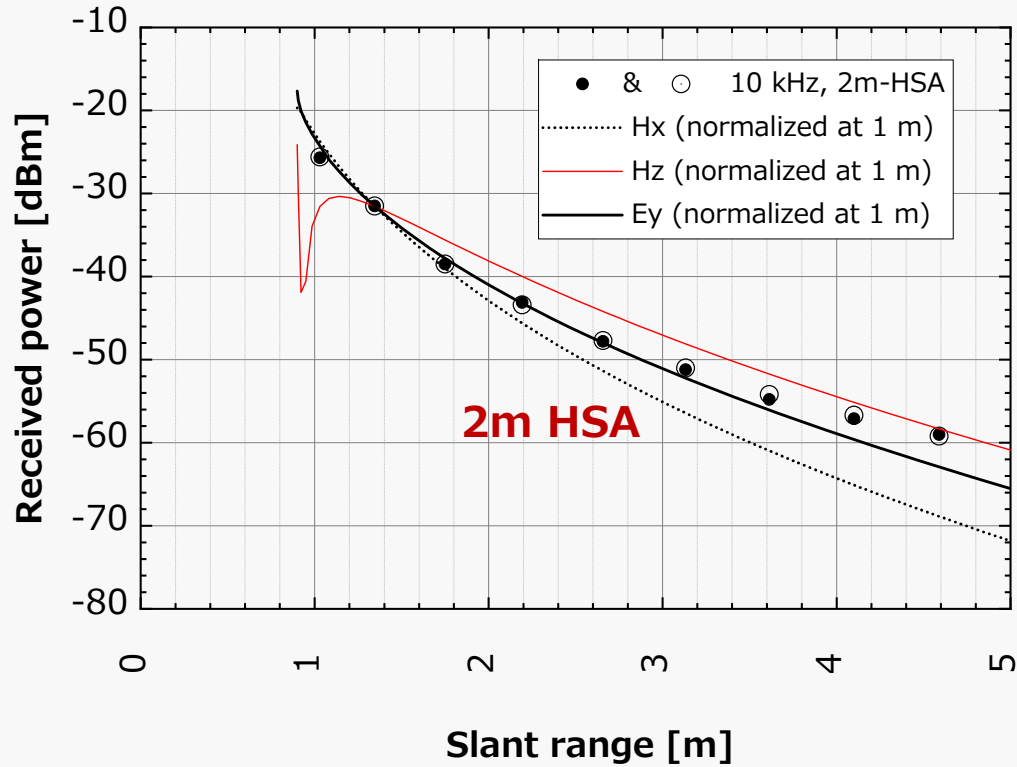
海中・海氷・空気中の電磁波



潜水艦通信と同じ帯域の周波数を用いる！

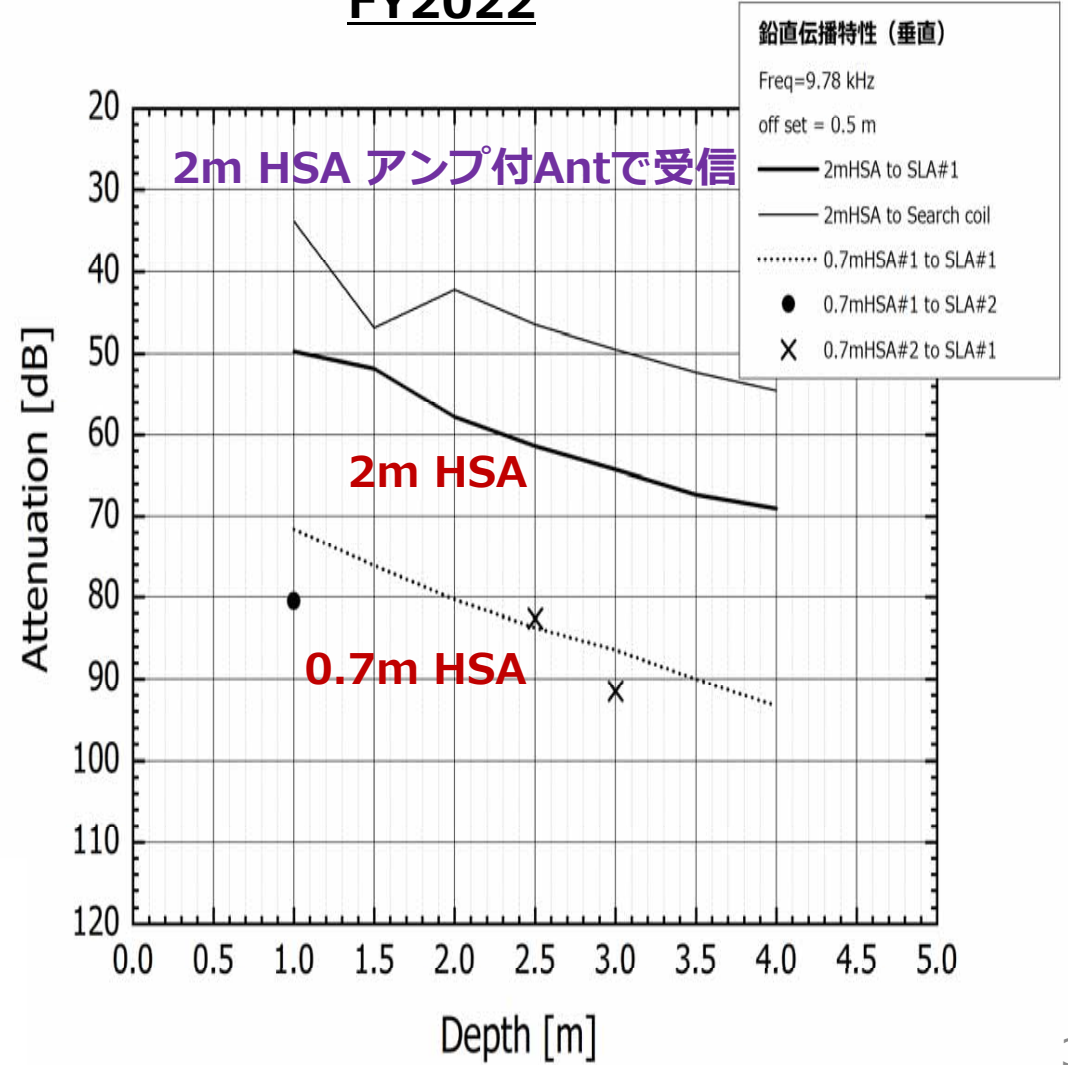
鉛直伝播: Air~Ice~Seawater@10 kHz

FY2020



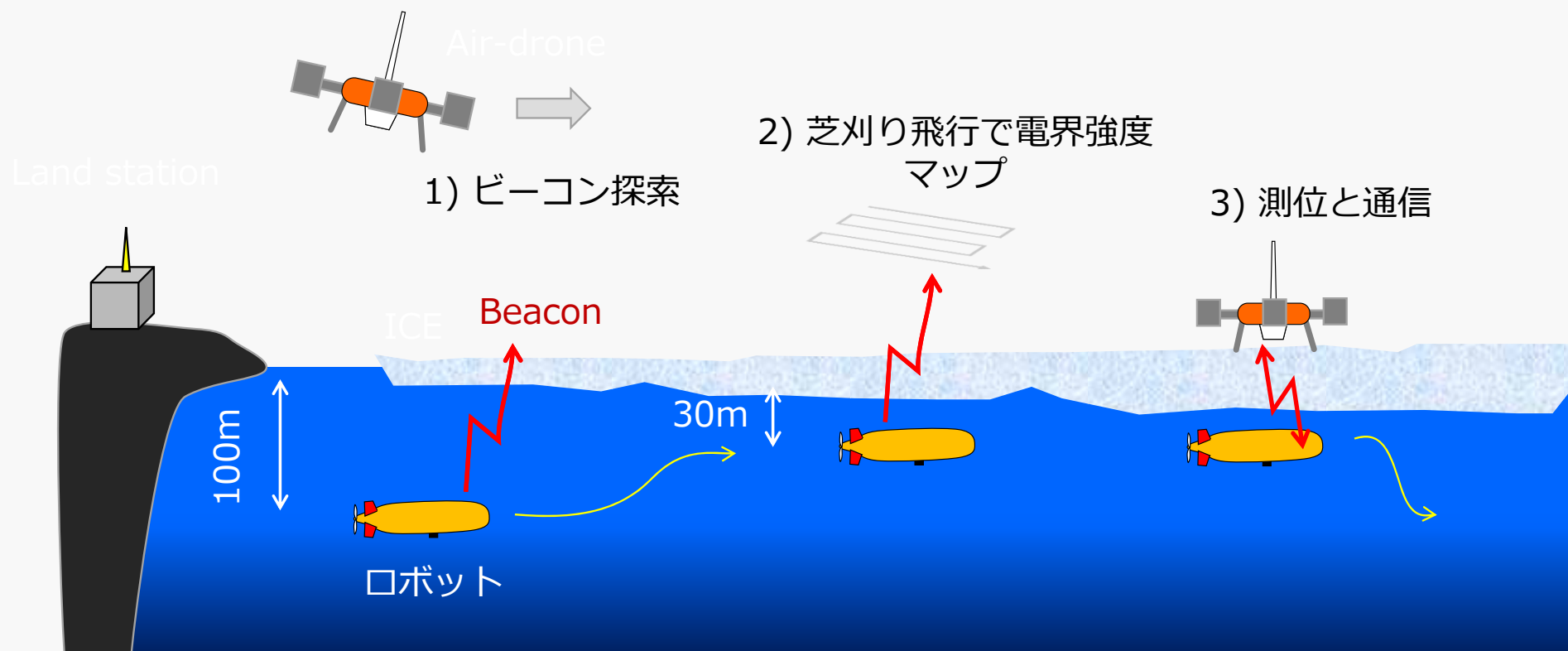
Maximum vertical communication distance
 estimated from experimental data
 and simulation results
 is **20 m**. (Tx power = 10W@10kHz)

FY2022

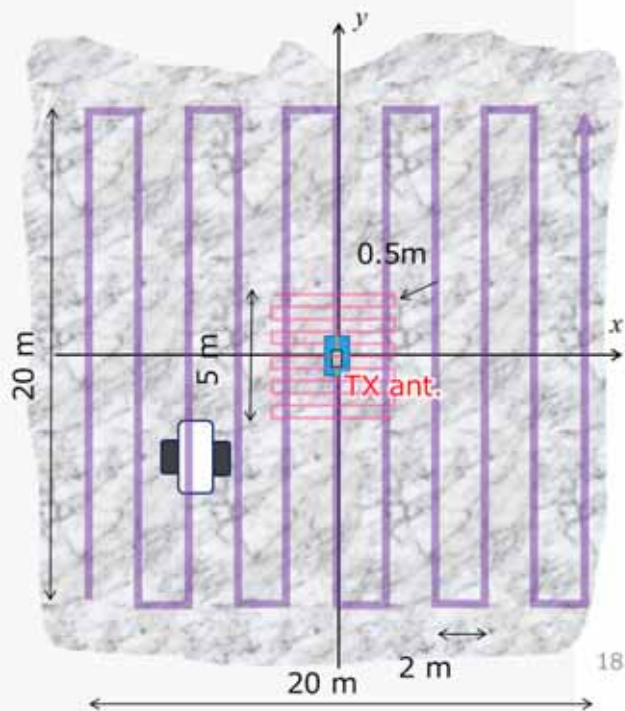


ドローンによるロボットの探索

- 水中ドローンは 低周波のビーコンを送信
- エアドローンでビーコンを受信したらトラッキングしながら特徴点を求める
- 特徴点 = COMAI位置 (座標)
- COMAIに測位情報を電磁波通信で送信

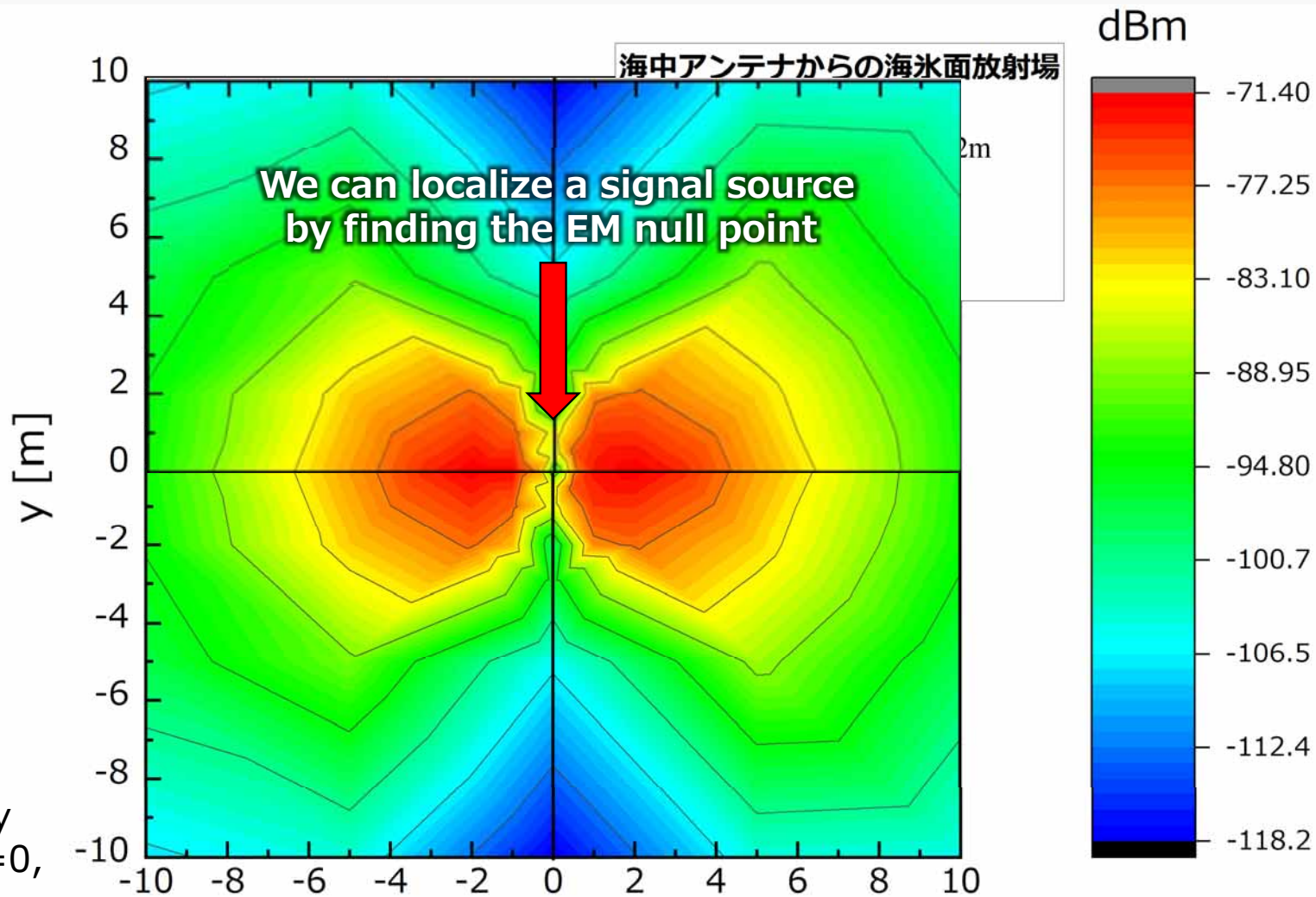


ドローンの位置計測データ@サロマ湖



Measurement map

Measure the electromagnetic field on the sea ice surface by placing a signal source at $(x=0, y=0)$ in the sea.



EM strength map measured

電磁測位の欠点と対策

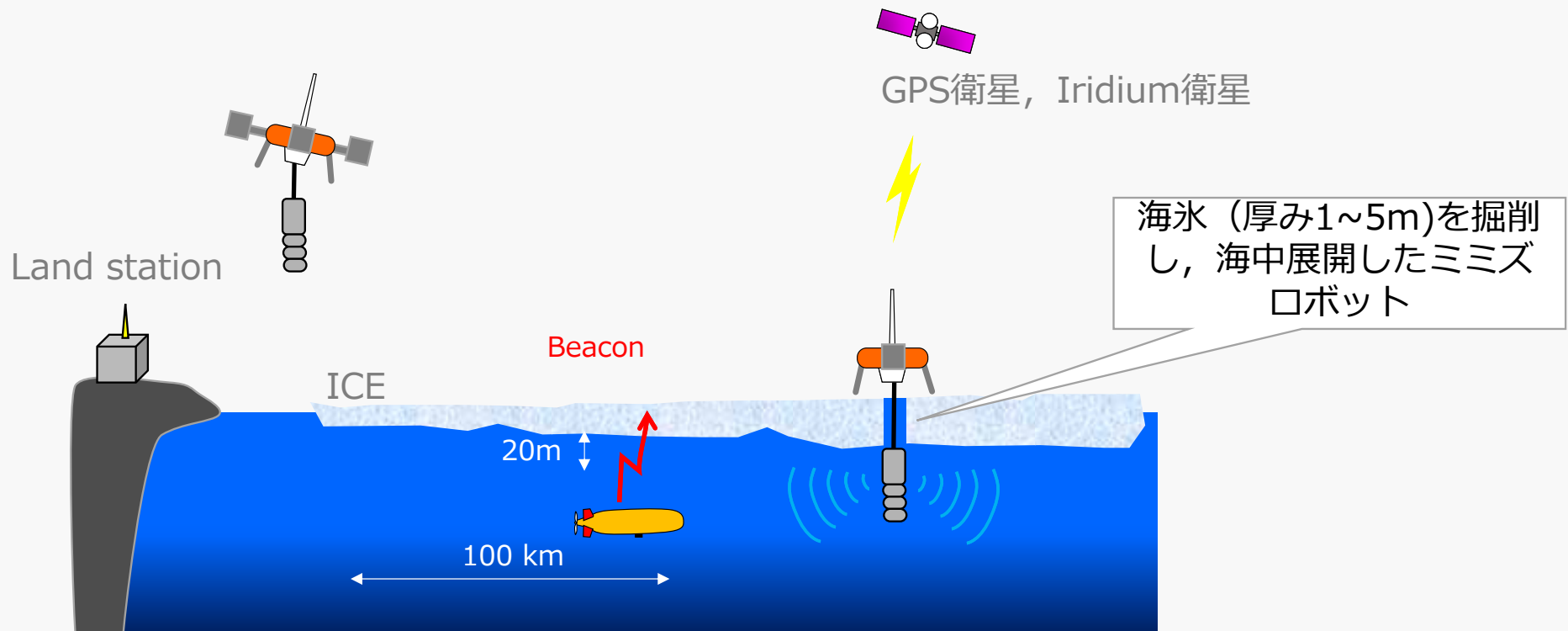
- 海中は最大でも数十m
- ドローンは測位のために、海氷裏面から20mに近づく必要あり
- 氷下観測は問題ないが、他の計測には問題



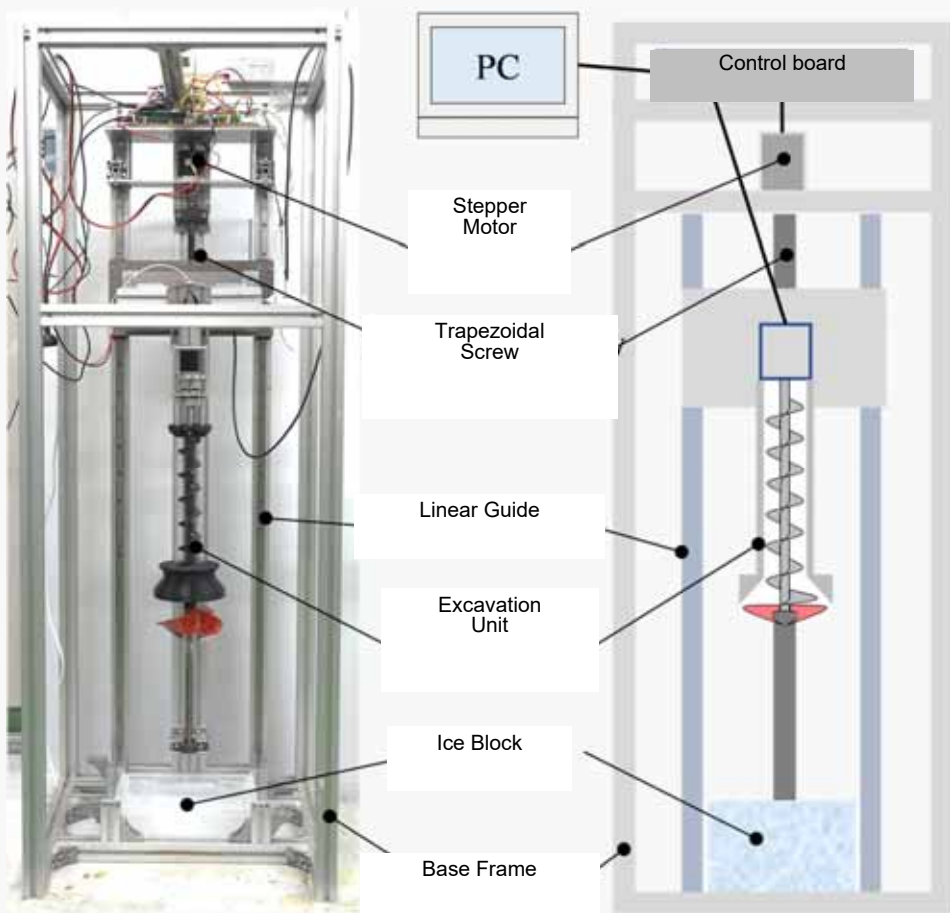
無人で、氷に穴をあけて、音響通信・測位装置を展開する

ミニズロボットと海中ドローンのコラボレーション

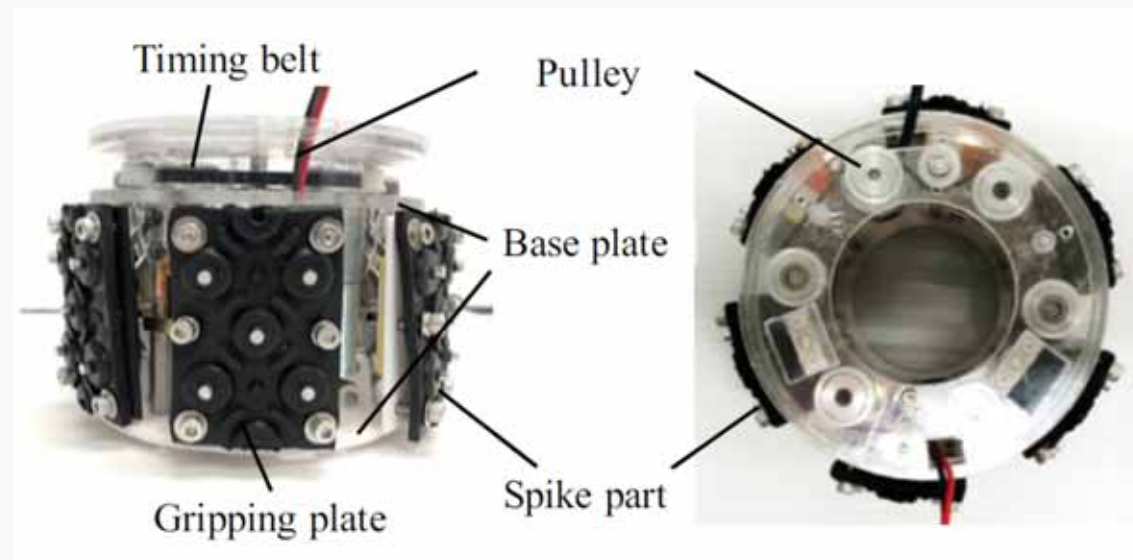
- ① 海氷掘削ミニズロボットに音響測位・通信装置を搭載
- ② エアドローンが海氷掘削ミニズロボットを目的位置まで運ぶ
- ③ ビーコン範囲でミニズロボットを展開
- ④ 海氷を掘削して海中へ展開することで、電波—音響変換ステーションとなる
- ⑤ 海中ドローンは音響測位・通信を実現



開発中@中央大のミニズロボットのパーツ



掘削ユニット



推進ユニット

Photo by KinaP

ありがとうございました