

# 深海は音の世界

深海には、「暗黒・低温・高水圧」という特徴の他に、  
現在では身の回りのあらゆる場面で使われている  
「電波」が届かないという特徴があります。

このような特徴を持つ深海を調査する時に活躍するのが「音波」です。

これまで、音波の特徴を活かしたさまざまな調査手法が開発され、  
謎の多い深海、さらには海底下の構造の姿まで  
明らかになってきました。

## 深海は音の世界。

水中の音波にはどのような特徴があるのか、  
JAMSTECでは音波を使ってどのような調査を  
行っているのか、紹介します。

## 監修

国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 海洋工学センター  
国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 地震津波海域観測研究開発センター

## 出典

東京大学海洋研究所編 (1997) 『入門ビジュアルサイエンス 海洋のしくみ』 日本実業出版社.  
古澤昌彦 (2001) 『音で海を見る』 成山堂書店.  
中井俊介 (1999) 『海洋観測物語 その技術と変遷』 成山堂書店.  
海洋理工学会編 (2015) 『海の姿を測る』 京都通信社.  
JAMSTEC 『海と地球の情報誌 Blue Earth』 国立研究開発法人海洋研究開発機構.

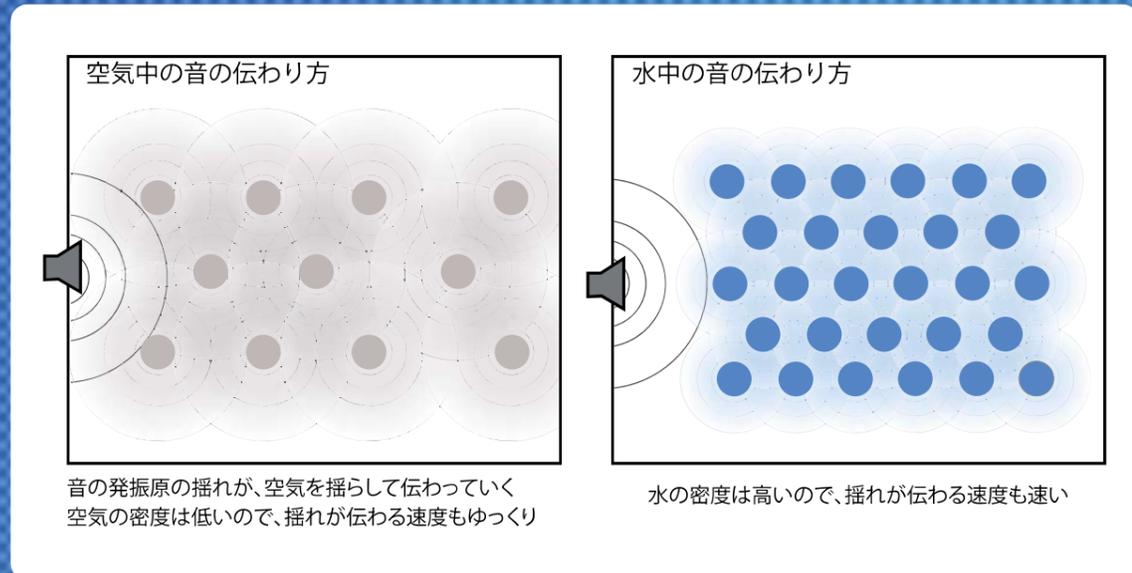


**JAMSTEC**

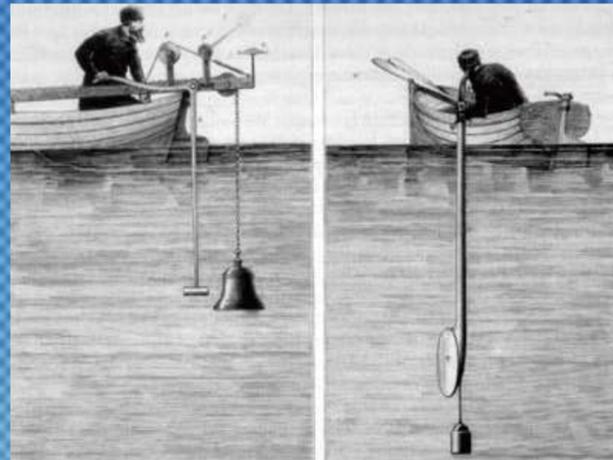
# 海中を伝わる音の速度

音の伝わる速さは、空気中では約340m/秒、水中では約1,500m/秒です。  
空気中よりも水中の方が早く音が伝わるなんて、すこしフシギですね。  
「音」は空気や水を振動させることで伝わります。水は空気に比べ密度が高いため、振動の伝播が容易で、音を伝えやすい性質を持っているのです。

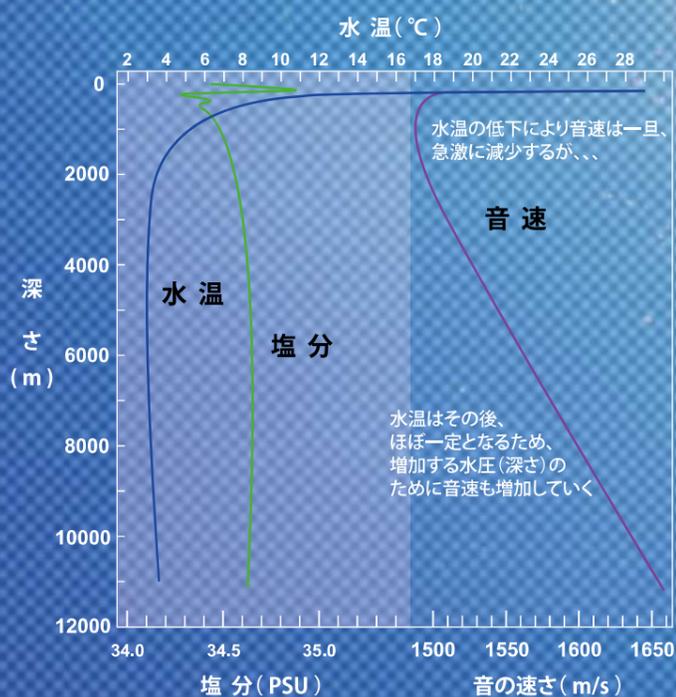
## 空気中と水中を伝わる音のイメージ



## 水中の音に関する初期の実験



1826年、スイスで行われた水中を伝わる音の速度を求めた実験。  
16km離れた船からそれぞれ水中に降ろした鐘と聴診器で、音の速度を求めた。鐘を鳴らすタイミングを知らせる発火装置(光速で信号を送る)も備えていた。

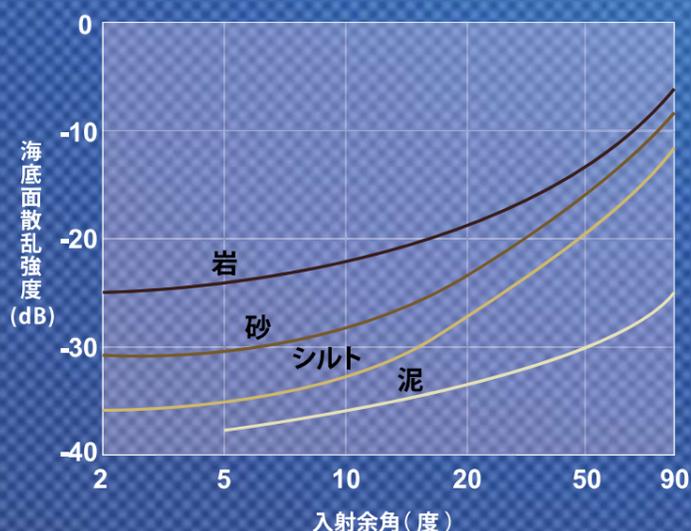


## 深さにより異なる音の速度

海水は、深さによって水温や塩分など、性質が異なります。

海中を音が伝わる速度も、深さによって異なります。  
音速は、水温が1°C上昇すると約5m/秒、100m深くなると約1.7m/秒増加します。

海の水温は浅いと高く、深さ500m付近から大きく低下し、1,000mを超えると変化は少なくなります。そのため、浅い層から深さ500m付近までは音速は低下していきますが、ここからは一転、上昇する圧力(深さ)のため、再び音速は増加していきます。



## 海底の質によって変わる音波反射

海中を進む音波は、海底にあたると反射します。  
海底の質は、硬い岩や柔らかい泥などさまざまです。  
音波は、この海底の質によって散乱(反射)する強さが変わります。海底の質による反射の変化の特徴を予め知っておくことで、反射した音波の強さから、海底の質を予想することができます。

海底に対して真上から(垂直に)音波があたった場合、硬い岩はほぼ同じ強さで音波を反射します。  
一方、砂→シルト→泥と、海底の質が柔らかくなるにつれ、反射した音波の強さは弱くなっていきます。

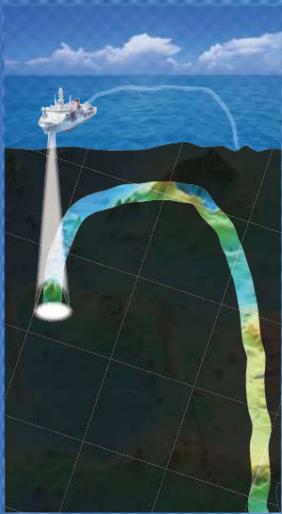
# 音を使って海の深さを調べる

## ロープを使って海の深さを調べる



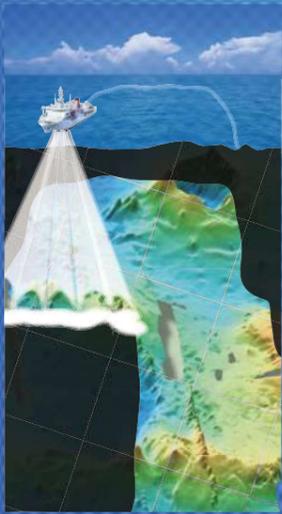
音波を使って海の深さを調べる技術が登場する以前は、錘をつけたロープを海中に垂らして、海底に着くまでの長さを測る「錘測法」が使われてきました。とても単純な方法ですが、この方法では広大な海を「点」でしか調べることができず、水深数千メートルを超えるような場所では1回の観測に数時間もの時間が必要で、大変な労力を要するものでした。

## 音波を使った測深法の登場

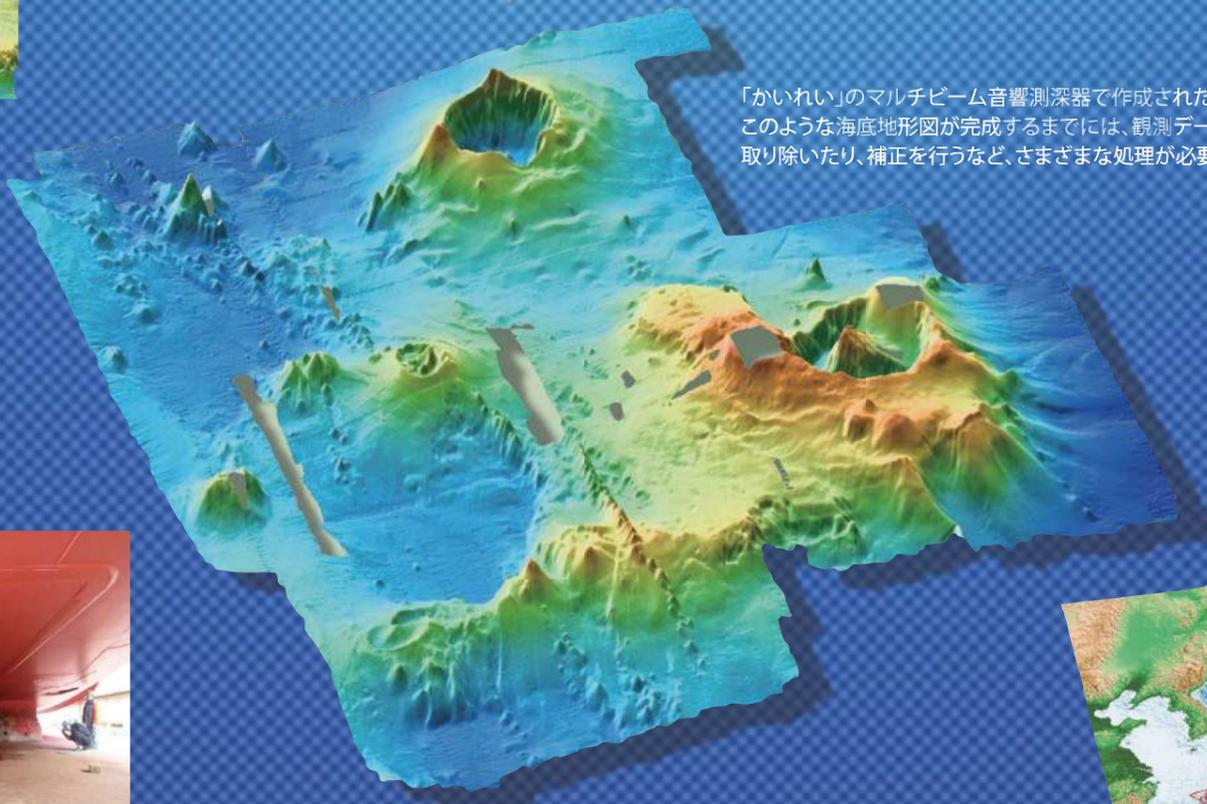


音響測深法は、海底に向けて発射した音波が反射して返ってくるまでの時間を測定することで水深を測るため、錘測法に比べて労力が劇的に軽減されました。しかも、船を留めることなく航行しながら連続して観測を行えるため、得られるデータが「点」から「線」となりました。

## より広範囲を、より正確に



1990年代に入ると音響観測の技術はさらに進化し、「マルチビーム観測」が登場しました。それまでは船の真下1点の水深しか測ることができませんでしたが、音波を扇状に発射することにより、得られるデータは「線」から「面」となり、広範囲の海底地形を一度に把握することができるようになりました。

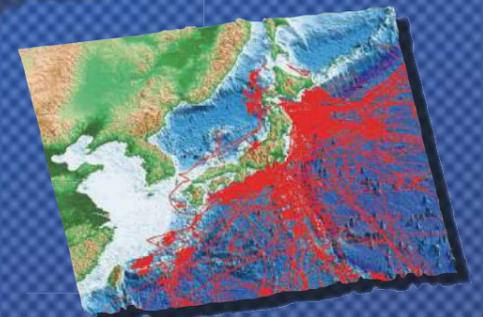


「かいれい」のマルチビーム音響測深器で作成された海底地形図  
このような海底地形図が完成するまでには、観測データからノイズを取り除いたり、補正を行うなど、さまざまな処理が必要となります

これまでJAMSTECの研究船が音響探査で海底地形のデータを取得してきた測線



「よこすか」の船底に設けられた音響ビーム送波器の窓部分



# 音を使って海底下の構造を明らかにする

海底下の様子を明らかにすることは、海底下で発生する地震の原因解明や海底資源の探査などに役立ちます。しかし、地球内部の構造を理解するために、人の目で直接観察することは困難です。このように謎の多い海底下の様子も、音波を用いることで明らかにすることができます。

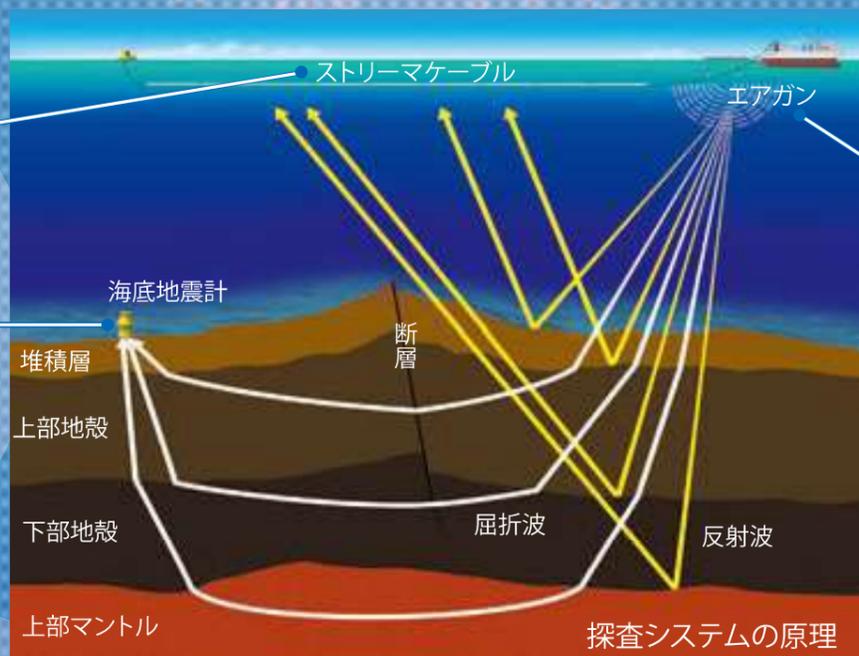
音波を用いた海底下構造探査技術の一つが「マルチチャンネル反射法探査システム」です。この方法ではまず、「エアガン」と呼ばれる装置を使って圧縮空気を一気に放出して、超低周波音波を人工的に発生させます。

超低周波音波は海底や、さらにその下の地層境界にまで達し、反射します。

この反射波を「ストリーマケーブル」と呼ばれる受振器で受信し、データを解析することで、海底下の構造を断面のように詳細に知ることができます。



ウインチに巻かれたストリーマケーブル。ストリーマケーブルは、音波を受振する「マイク」のような働きをします。たくさんの受振器が装備されたケーブルの総延長は、約5,000mにも及ぶことがあります。

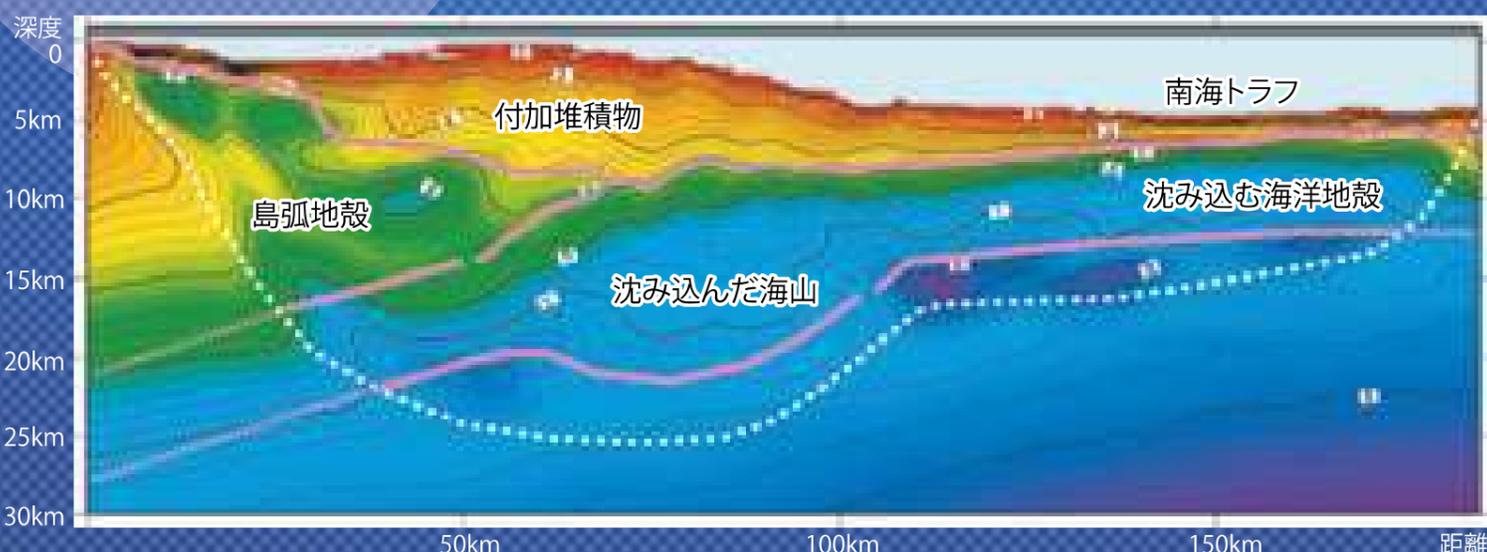


エアガンはいわば、海中に設置する大きな「スピーカー」です。圧縮空気を放出して、人工的に低周波音波を作り出します。



「かいよう」船上に並べられた海底地震計

エアガンから発生させた音波の内、海底下で屈折してくる反射波はストリーマケーブルで受振することができません。そのため、海底に受波器（海底地震計）を設置し、屈折波をとらえます。これにより、さらに深い海底下の構造も調べることができます。



探査システムでとらえた南海トラフの海山の沈み込みの様子

# 音を使って海中で画像データを伝送する

深海を探査するROVは、海上の母船とつながったケーブルを介し電気信号をやりとりすることで、深海の様子を映像で、リアルタイムに観察することができます。

しかし、海中は電波や光を通しにくい世界。ケーブルのない自立した潜水調査船は、母船へ画像や映像で様子を伝える方法がありませんでした。これを解決したのが、JAMSTECが世界ではじめて開発した水中画像伝送装置です。

水中画像伝送装置は、音波を使って海中で画像データを伝送する装置です。

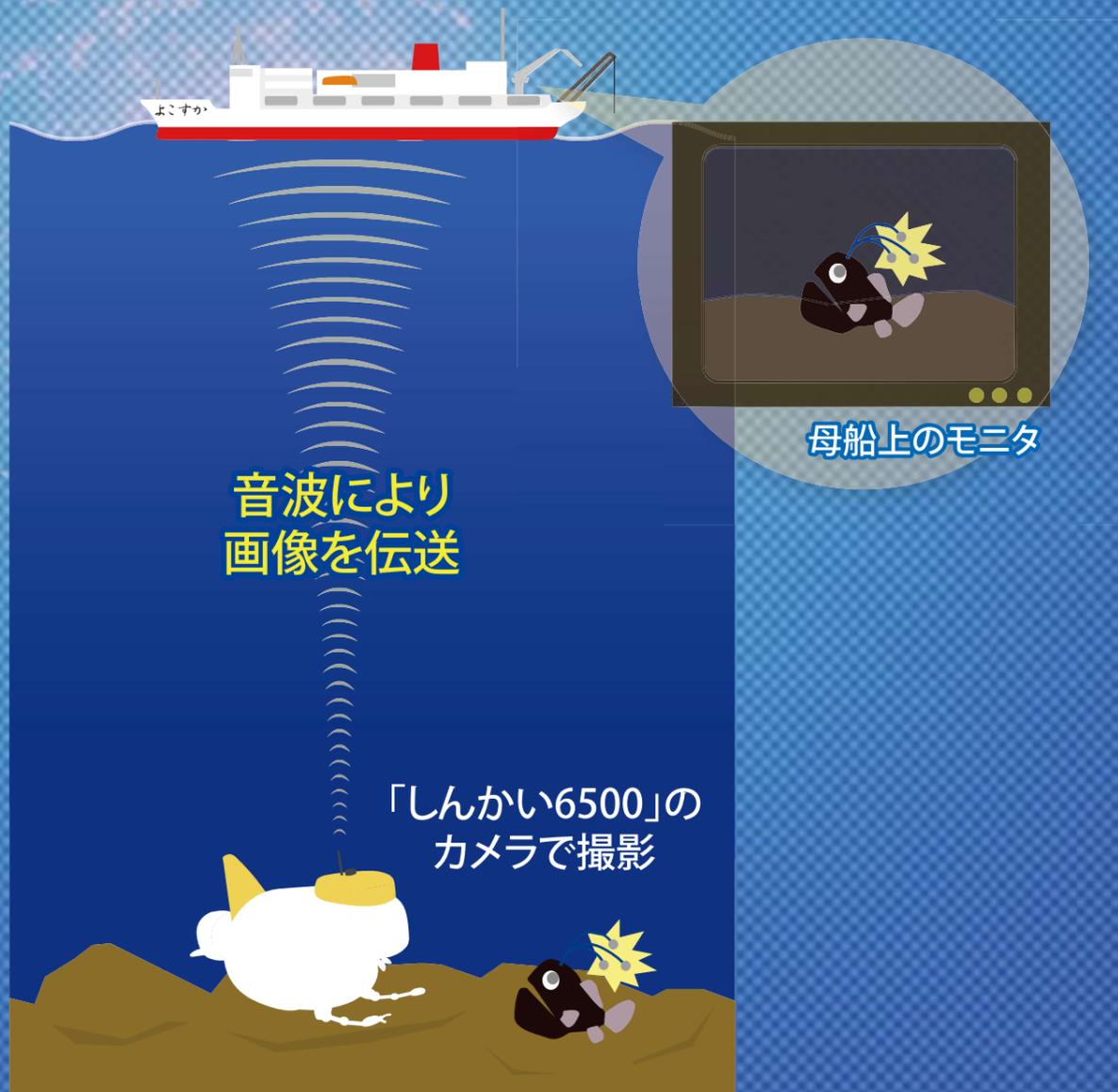
1991年に「しんかい6500」に搭載されたこの装置により、母船上にいる他の研究者も、数秒に1枚の静止画ではありますが離れた深海の様子を観察できるようになり、深海調査の効率が飛躍的に向上しました。



伝送後画像



伝送前画像



この装置は10秒に1枚のカラー画像を母船に送ることができます。

音声に比べ大きな情報量を持つ画像データを音波にのせて送るために、高度なデータ圧縮、エラー補正技術が使われています。

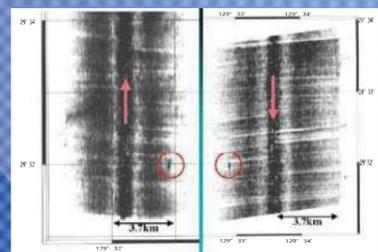
「しんかい6500」と母船では画像の伝送以外にも、頻繁に音声通話が行われますが、水深6500mまで潜るとこの通話に、片道4秒、往復で8秒の時間が必要です。

# 音を使ってもっと詳しく海底の様子をさぐる

音波を使うと、海底の地形や海底下の様子など、大きな構造を把握することができます。では、海底にある数メートル程度の、小さな構造はどうでしょうか？「サイドスキャンソナー」を用いると、そんなことも可能です。

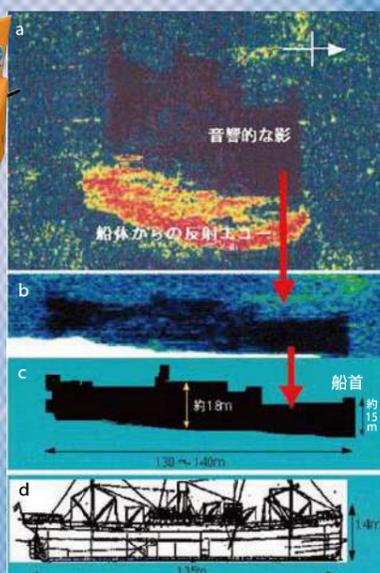
音響測深では、音響ビームを海上の船から海底へ向け、真上に発射していましたが、サイドスキャンソナーは、海中のROVなど近い場所から対象へ向け、横から音響ビームをあてる技術です。これにより、広範囲の海底を高分解能にとらえることが可能となります。JAMSTECではこの技術を、詳細な海底地形・構造の把握のために用いる一方、「対馬丸」や沈没船「ナホトカ号」の捜索や、墜落したH-IIロケット8号機の探査等、海中の探査・捜索にも活用し、大きな成果を挙げてきました。

## 海底探査の手順① （「対馬丸」捜索）



「かいらい」のマルチビームで海底の様子を広域に解析する。赤丸で示した位置に特異点が見える。

## 海底探査の手順② （「対馬丸」捜索）



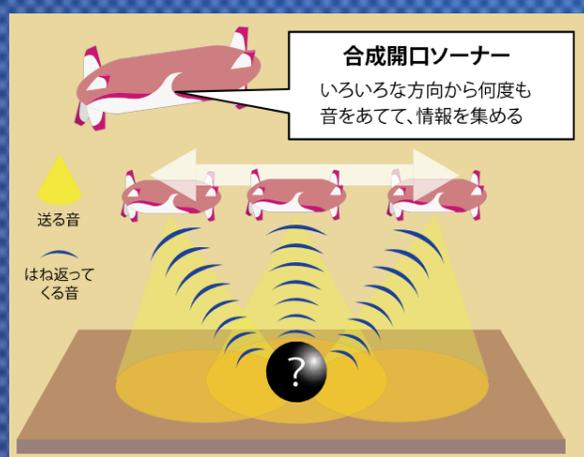
「かいらい」のソナーで、対象の詳細な構造を描く。

## 海底探査の手順③ （「対馬丸」捜索）

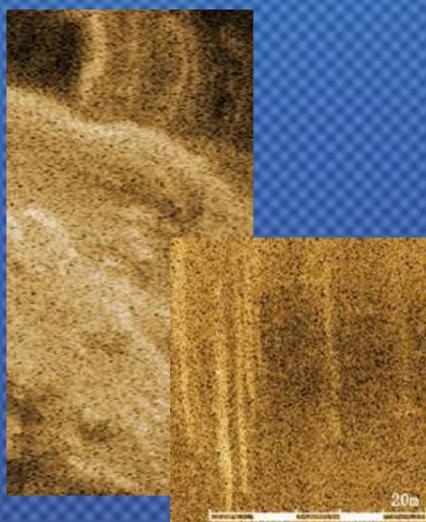


「ドルフィン3K」のビデオカメラで、直接映像を撮影する。

海底の同じ対象に向け、ソナーを直線的に移動させ違う位置から何度も音波を照射し、跳ね返った音波をコンピュータ上で合成する「合成開口ソナー」の技術は、さらに鮮明な画像を得ることを可能にしています。



合成開口ソナーは、海底資源探査に用いられる自立型無人探査機「ゆめいるか」に搭載されています。

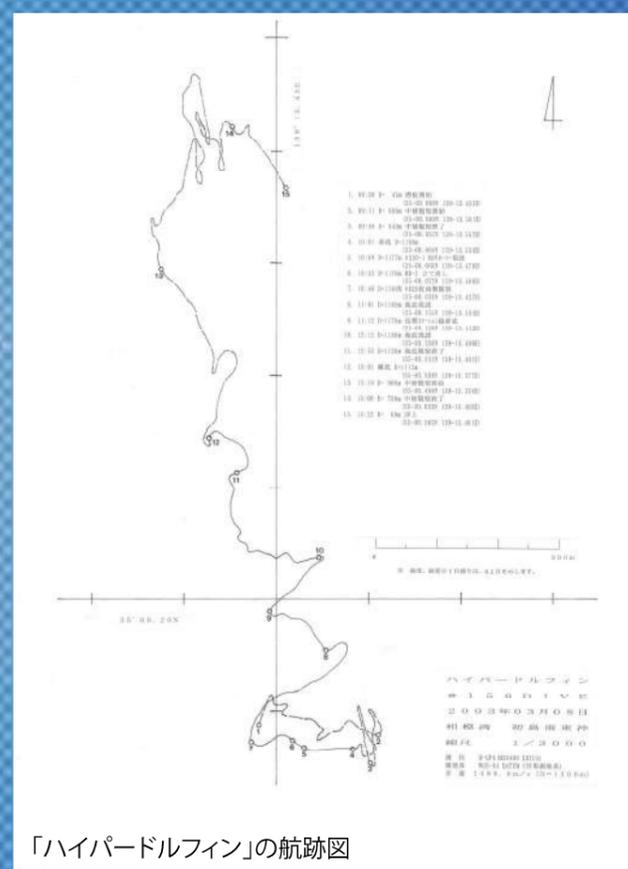


海底から噴き出す熱水の様子を捉えたソナーの比較画像。左が通常のソナーの画像。右が合成開口ソナーの画像。解像度は約5倍となり、海底の細かな起伏や立ち昇る熱水も詳細に捉えることができる。

# 音を使って海中で自分の位置を知る

車や船は、人工衛星を使ったGPSとよばれるしくみを使って、自分が地球上のどこにいるのか、正確な位置を知ることができます。でも、人工衛星との通信につかう電波は、水中には届きません。

では、海中を調査する潜水調査船・探査機は、どのようにして自分の位置を把握しているのでしょうか？そこで登場するのが「トランスポンダ」という機器です。



トランスポンダは、決まった音波パターンの音波に反応して信号を返す、海中に設置する「やまびこ」のような装置です。海中を調査する調査船や探査機は、海底にあらかじめ設置しておいた複数のトランスポンダや母船との間で音波を送りあって、互いの距離を測ります。この距離を計算することで、海中でも正確な位置を知ることができるのです。

## 反応良好!トランスポンダ

このトランスポンダはあらかじめ決められた波長の音波にだけ応答するようになっています。トランスポンダへ正しい波長の音波を送ることができるかな？チャレンジしてみよう！

