

# 水圧の世界を考える 「圧力の驚異と深海への挑戦」

海洋科学技術センター（JAMSTEC）では、これまで海洋についてのさまざまな研究をおこない、また画期的な調査技術の開発をおこなってきました。特に深海域における調査では、卓越した先進技術の開発と意義ある発見を数多く残してきましたが、その業績の影には常に圧力との戦いがあります。水深数百mのダイバーにかかる圧力や、水深数千～1万mでの水中機器や潜水船にかかる圧力。この圧力は、1気圧の世界に生きる私たちの想像を遙かに超えたすさまじい力を持っています。その驚異のパワーと、JAMSTECがおこなってきた圧力に対する挑戦の歴史を紹介します。

0m

3,000m

5,500m



毛利元彦

海洋生態・環境研究部  
医学博士  
人体が潜水によって受けるさまざまな影響を、生理学的見地から研究する第一人者



長根浩義

研究業務部  
施設・設備課  
水深300mの深海潜水実験体験者。水圧が人体に及ぼす影響など豊富な知識を持つ



発泡スチロールで作られた模型は、水深が増すごとに小さくなり水圧の影響を受ける。右下の模型は水深約5,500m相当の水圧を受けて縮んでしまったもの。水深約5,500mでは、1あたり570kg（海水の場合）もの力が作用する。ほぼ切手の大きさに約570kgの重りが乗っている状況を想像すれば圧力のパワーもわかりやすいのではないだろうか

# 水圧

## 驚異のパワーを秘めた圧力

私たちが水の中に潜ろうとすると、潜るにつれて耳が痛くなってきます。これは、水圧によって鼓膜が圧迫されることによって起こる現象です。このように水深数mでも人体に影響を及ぼす水圧は、非常に大きな力を持っています。

水中では、大気圧に加えて水圧が作用し、水深10mでは2気圧、水深1,000mでは101気圧というように、

水深が深くなるにつれて気圧も高くなります。この101気圧という圧力は、1あたり104kgの力が作用することを指します。これは、手のひらに車を乗せたほど大きな力です。

水中に挑もうとするとき、この水圧は大きな障壁となって私たちの前に立ちふさがります。JAMSTECでは、数十気圧の潜水実験や、数百気圧に耐える潜水機器の開発をおこなってきました。

水深5,000m前後の高圧下では、鉄やアルミ製の小型ボンベも簡単に潰れてしまう。また、写真中の発砲スチロール製カップヌードル容器は元々同じ大きさのものだが、水深数千m相当の圧力をかけることにより、数分の1の大きさになってしまう

有人潜水調査船「しんかい6500」の乗員室に使われた耐圧殻の強度試験のために作られた内径70cm（実物は2m）のチタン合金製の球も、圧力のパワーによって写真のように押しつぶされてしまう。圧壊試験では、水深13,200m相当の圧力をかけたときに壊れた



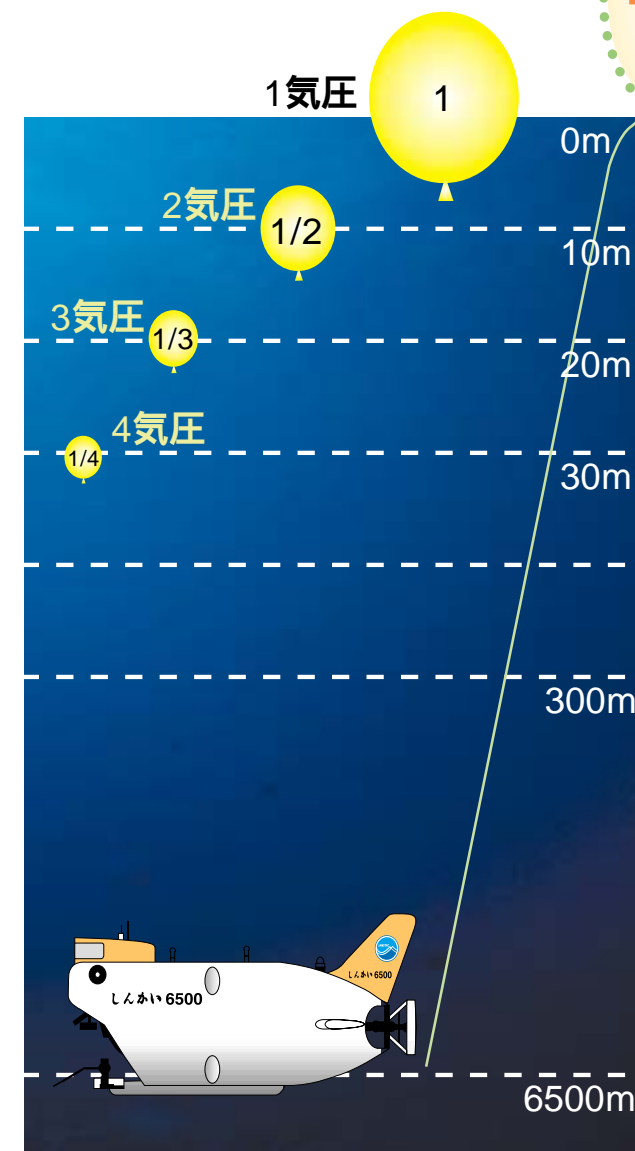
# 圧力と気体の容積

## 圧力増加に反比例する気体の容積

圧力が増加すると、それに反比例して気体の容積は小さくなります。例えば風船やビーチボールなどは、水深30m（4気圧）で1/4まで縮んでしまいます。より深い所では、さらに大きな力がかかり、ドラム缶や魔法瓶なども簡単に潰されてしまいます。



JAMSTECには、深海用機器や材料の耐圧試験をおこなうためのさまざまな装置がある。写真上・左下は、水深15,600m相当の圧力環境を再現できる「高圧実験水槽」で、「しんかい6500」に使用する耐圧殻の破壊実験はこの装置でおこなった。写真下中央は水深15,000m相当の圧力環境を再現できる「中型高圧実験水槽」、写真下右は水深4,000m相当の圧力環境を再現できる「小型高圧実験水槽」



水深が深くなるほど、気体の容積は小さくなる。深海などの高圧下では、空気の入った密閉容器は簡単に潰れてしまう。潜水調査船に頑丈な乗員室が必要なのはこのため。ただし、容器の中に水や油が入っている場合は潰れることはない

# 潜水の方法

## 環境圧潜水とそれによって生じる問題

人間が水中に潜る方法には、潜水船に乗船した時のように普通の生活と同じ気圧環境のまま潜る「大気圧潜水」と、素潜りやスクーバ潜水などのように、身体が水圧の影響を受けて潜る「環境圧潜水」の2パターンがあります。

「環境圧潜水」では、水深が10m増すごとに1気圧ずつ水圧が全身にかかります。気体（呼吸



ガス）は圧力に反比例して圧縮されるので、その圧力に均衡になるように均圧操作をおこなわなければ重大な圧力障害を起こすことになります。潜水を職業にするアマ（海女・海士）は、長年にわたる潜水作業により、鼓膜の肥厚、慢性中耳炎、内耳障害などによる聴力障害を起こす人が非常に多く見られますが、これも圧力障害の一種といえます。

また、正しい潜水法をおこなわなかった場合、鼓膜が圧迫される「スクイズ」や、水圧の減少によって肺の容積が膨れ上がることによる「肺破裂」、圧縮空気を呼吸ガスとするスクーバ潜水やヘルメット潜水などでは圧縮空気に含まれる窒素による麻酔作用「窒素酔い」、急激な減圧によって生じる「減圧症」など、さまざまな障害が発生します。また、数年前に「減圧性骨壊死」の存



1985年から開始した「ニューシートピア計画」では、300mの深海潜水実験をおこなった。31気圧、水温6℃という過酷な環境への潜水をおこなうためには、写真のような重装備が必要。潜るだけでなく減圧作業もたいへんで、12日間もかかる

在が明らかになり、その研究が進められています。

では「環境圧潜水」で、人は何mまで潜ることができるのでしょうか。酸素とヘリウムや水素を混合させた潜水呼吸ガスを用い、また「飽和潜水」という特殊な潜水方法によって、より深い水中への潜水が可能になりました。

JAMSTECでは、300m深度の実験をおこないました。またフランスでは701mの実海域実験に成功しています。今後、さまざまな問題をクリアすることで、1,000mまでの潜水が可能だと考えられています。

## 潜水船による大気圧潜水

人間が普段生活している大気圧の環境のまま、水中に潜水することを「大気圧潜水」といい、潜水調査船や潜水艦には、この潜水方法が用いられています。

「大気圧潜水」は、人体への負担が大幅に減少される反面、乗員室となる耐圧殻は非常に頑丈に造る必要があります。現在JAMSTECが保有している潜水調査船は「しんかい2000」と「しんかい6500」で、どちらも非常に強固な耐圧殻を持っています。両潜水調査船ともに、横長のスタイルですが、耐圧殻部分は完全な球形をしています。これは過酷な水圧に対して、球体がもっとも強い形状であるからです。特に3名の乗員を収容する「しんかい6500」の耐圧殻は安全性・信頼性を確保しつつ徹底的な軽量化をはかるため、材料や設計、工作の分野で、最新の技術を駆使して開発されました。



「しんかい2000」は1981年に完成した日本初の本格的な有人潜水調査船で、水深2,000mまで潜ることができる（写真上）。1989年の完成以来、世界最先端の水深6,500m級潜水調査船として数々の業績を残してきたのが「しんかい6500」。これまでの650回を超える潜航で、高い安全性が実証されている

日本人と潜水の関わりは古く、アマ（海女・海士）の活動は「魏志倭人伝」「古事記」に記されているほどだ。10mほどの素潜りでも人体は水圧による大きな影響を受ける（写真上）。スクーバ潜水は、気軽に水中を体験できるため、職業潜水のみならず、レジャーとしても大人気。しかし、誤った潜水は、人体に大きな障害を与えるため、入念な潜水方法の習得が不可欠だ（写真右・右上。JAMSTECの潜水プールでの訓練風景）

# JAMSTECの挑戦

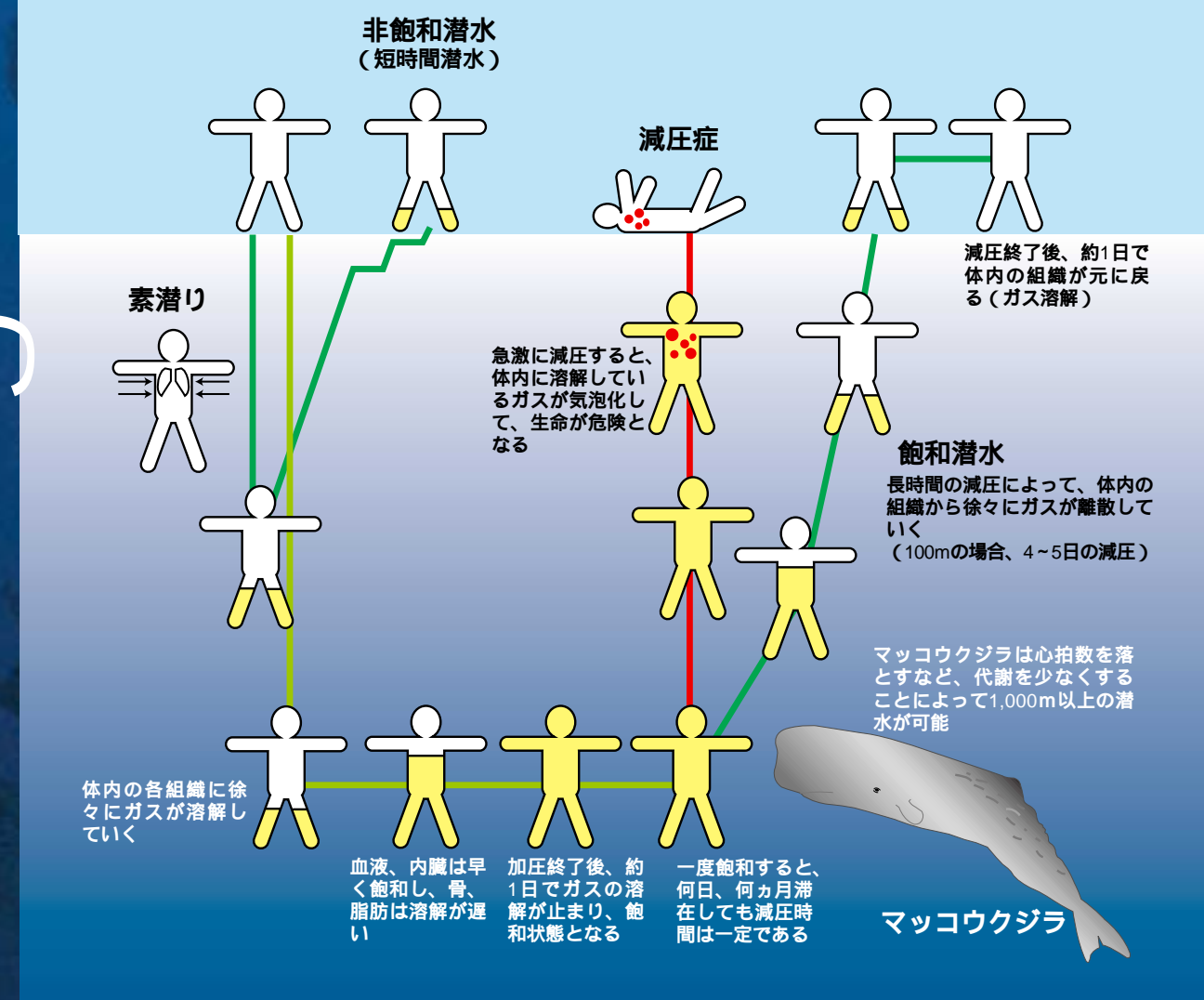
## 飽和潜水で300mの環境圧潜水に挑む

JAMSTECでは、1972年スタートの「シートピア計画」、1985年スタートの「ニューシートピア計画」など、海中居住に関する計画を通じて、ダイバーによる数々の潜水実験をおこなってきました。特に「ニューシートピア計画」では、60mの実海域実験からスタートし、1988年に300mの潜水実験に成功、1990年の最終潜水実験までに飽和潜水技術の開発と、水深300mという厳しい条件下での海中作業技術・潜水システムを確立し、「環境圧潜水」というジャンルに大きな貢献を果たしました。

ここで「飽和潜水」という、人間がより深く潜水する

ために無くてはならない技術について解説しておきます。レジャーダイビングなど、通常のスクーバ潜水ではボンベ内に圧縮した空気を用い、この潜水では50mが限度であるとされています。一方の飽和潜水では、多くの場合空気の代わりにヘリウムと酸素の混合ガスを使用します。不活性ガスであるヘリウムは、高圧環境の圧力に応じて血液や各組織に溶解していきますが、ある溶解量以上では溶解しなくなり、飽和点に達します。一度飽和されるとその水深で何時間でも滞在でき、滞在時間の長短に関わらず減圧時間は一定であるという利点があるのです。

## 飽和潜水とは



上の写真は、毛利元彦さんがおこなったアマ(海士)を被験者とした潜水と生体反応の実験風景

## 潜水によって起こる生体反応

人間が何mまで潜れるのかという環境圧潜水の限界へのチャレンジと並行して、潜水が人体に及ぼす生体反応についての研究も進められてきました。

潜水に伴って起こる生体反応には、潜水除脈(顔を水につけると脈拍数が下がる反応)、不整脈、高尿酸血現象(スクーバ潜水で誘起される現象)、高圧潜水後の貧脈などが知られています。これらの生体反応をふまえた上で、運動負荷と潜水除脈の関係や、高尿酸血現象の抑制法などさまざまな研究がおこなわれています。

## 「潜水」に関する計画

JAMSTECでは、資源の豊富な大陸棚の開発を目的とした海中居住計画「シートピア計画」(1972年)を皮切りに、さまざまな計画を実施し、環境圧潜水の研究を積み重ねてきました。1976年には潜水シミュレーション実験「シードラゴン計画」をおこない、1985年には潜水実験の集大成ともいえる「ニューシートピア計画」をスタートしました。実際にダイバーを海底に送るこの計画は1990年まで続き、最終潜水実験では300mの潜水に成功し、新たな潜水技術の確立に貢献しました。



「ニューシートピア計画」での潜水実験イメージ。この計画では、タカアシガニが生息する水深300mの潜水に成功した

# 生物

## 深海に生きる生物たち

私たち、大気圧（1気圧）の世界に住む人間にとって、水深数千mという深海域は、常に高圧にさらされる極限環境といえます。しかし、これまでの調査によって、高圧を好む生物の存在や、熱水が噴出する深海底を好む生き物の存在も確認されています。

1984年には、相模湾初島沖において「シロウリガイ」を優占種とする深海生物群集が発見されました。この生物群集はメタンや硫化水素などの冷湧出水を利用する化学合成細菌を基幹とする特異な生態系を構成していることがわかっています。また、水深430～1,400mの熱水噴出孔（海底温泉）周辺にのみ生息する「ユノハナガ

ニ」や、細長いホースのような形をし、世界中の化学合成生態系に生息する「ハオリムシ」の存在も確認されています。このハオリムシ類にはさまざまな種類があり、82mという浅い水深から3,270mの深海まで、幅広く生息している生き物です。

“極限環境”という表現は、人間からの一方的な視点であり、特異な生態系に生きる深海生物たちにとっては、私たちが生きている1気圧の世界の方が、極限環境なのかも知れません。



世界最深部で発見された「カイコウオソコエビ」。1,000気圧を超える世界にも生物が存在している。  
写真左下は、ハオリムシ類の中で最も浅い海に生息する「サツマハオリムシ」。写真右下は「ユノハナガニ」。白色で眼が退化しているのが特徴。JAMSTECでは7年間の飼育に成功



Creature

## 潜水機器で高圧の世界に挑む



ディーブ・トウ

しんかい2000

ハイパー・ドルフィン

うらしま

ドルフィン-3K

しんかい16500

「かいこう」ランチャー

「かいこう」ビークル

JAMSTECがおこなってきた深海域の研究には、数多くの潜水機器が投入され、さまざまな実績を上げています。

潜水機器には、大きく分けると無人探査機と有人潜水船の2種類があり、右図内の「しんかい2000」と「しんかい16500」以外は全て無人探査機です。この無人探査機は、曳航式（ディーブ・トウ）と、自航式に大別できます。自航式無人探査機は支援母船船上からの操作でいろいろな調査をおこなうことのできる無人ロボットで、深海底のサンプルを採取するアーム（マニピュレータ）や、撮影機材などが積まれています。1994年には「かいこう」が、地球上の最深部にあたるマリアナ海溝チャレンジャー海淵（水深10,911m）での調査に成功し、これにより、JAMSTECは、地球上に存在するあらゆる深さにおける探査をおこなうことが可能になりました。

Challenge