

無人潜水艇技術の研究

Development of Unmanned Submersibles

浦 環*

Tamaki URA

宇宙船・ロケット・航空機・自動車・鉄道・船舶といった人類の「足」の技術は極めて急速に発展し、花開いた。海の中は開発の重要性が昔からいわれているのに、そこでの「足」となるべき潜水艇や潜水機は少しも身近にならない。海中活動の理解を深めるために、本論では潜水作業について概観し、無人潜水艇をとりまく環境について述べる。また、PTEROA計画と呼ばれる自律型潜水艇開発研究計画のコンセプトを示す。

1. はじめに

「海のロマン」とよくいわれるが、これはいったい何であろう。未知・予知できない・想像できない・自然の雄大さ・自然の恐ろしさ・冒険・一獲千金・奇想天外・異質などのキーワードが挙がる。昔はいざしらず、現在でも「海」はそうであろうか。この情報社会において、海面上、地平線の向こう側の「海のロマン」のほとんどのものはノスタルジーの彼方へと消えてしまい、いまさら「海のロマン」などといっているロマンチストは詩人か小説家になるほかはない。しかし、同じ海でも海の底、特に深い海の底はどうであろう。そこには、いまだ15世紀の大航海時代然とした、先のキーワードの通用する世界が広がっている。

ここでは、その海の底や海の中での行動を作業という観点で捕らえ、作業の足である潜水艇の近年の動向、生産技術研究所の研究グループを中心にした無索無人潜水艇の開発研究について解説する。

海中での行動の困難さは、表1に示すような海中環境に起因している。大気中や大気圏外の環境と違った多重苦の作業環境が、海中での活動の困難さを際立たせている。したがって、無人潜水艇技術は単なる要素技術の集合ではなく、それらを総合するシステム技術であるといえる。

2. 潜水作業

図1は海中における計測活動を主にした、活動および計測項目の概念図で、以下に述べる無索無人潜水艇を中心にして記述してある。このような海中における作業は、作業者自身がどのような圧力環境にいるかにより、つぎの3つに分類される。

表1 作業環境の比較

項 目	海 中	大気中・陸上	大気圏外・宇宙
圧 力	深さ(m)×0.1(気圧)	1 気圧	0
密 度	空気の約840倍	0.12kg/sec ² /m ⁴	0
最大流速	数m/sec	数10m/sec	0
電 磁 波	ほとんど透過しない	透過	透過
視 界	数10m以下	数10~100km	∞
腐 蝕	強, 電蝕, 生物汚損	弱	ほとんど無い

(1) 無人潜水機作業

作業船上のオペレータが有索あるいは無索の潜水機械や潜水艇を操作する。

(2) 大気圧潜水作業

耐圧容器を持つ潜水艇・潜水機に乗り、1気圧の空気圧環境下でダイバーが作業する。図2は潜水艇の1例で、昭和60年に東京大学海洋研究所との共同研究「KAIKO計画」のために来日し、太平洋を潜水したフランスのIFREMER所属のNAUTILUS号である。3人乗りで、6,000メートルの深度まで潜れる。わが国でも、現在同程度あるいはそれ以上の性能を持つ「しんかい6500」を科学技術庁が製作中である。

(3) 環境圧潜水作業

潜水深度に応じた水圧に等しい圧力（環境圧と言う）の空気を呼吸して、その水圧を体に受けて作業する。

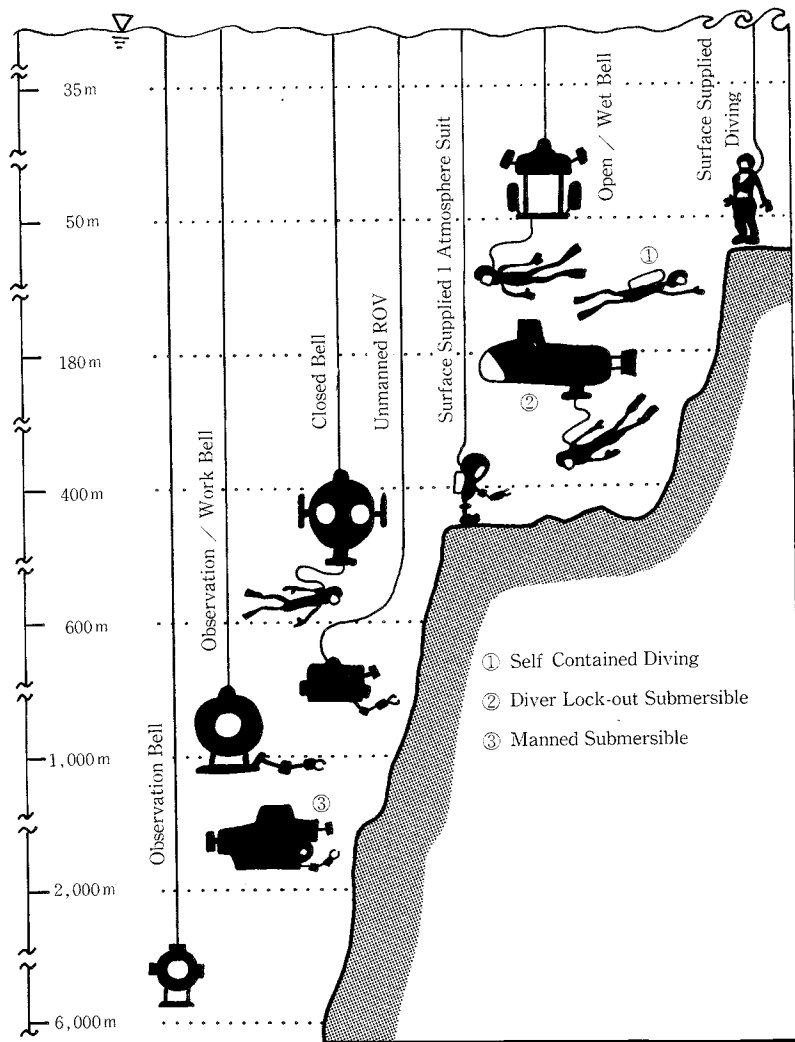
(3-1) 短時間潜水作業 (Bounce Diving)

長時間にわたる減圧停留を必要としない浅い海域の短時間の潜水作業。SCUBA (Self Contained Breathing Apparatus) の開発により、素人でも安全に潜水をおこなえるようになり、「SCUBA Diving産業」は海洋レジャーの大きな産業に発展しつつある。

(3-2) 飽和潜水作業 (システム潜水作業)

水中エレベータ等に備えられた、減圧装置を用いた

*東京大学生産技術研究所 第2部

図3 潜水作業深度と作業形態⁷⁾

何が大深度であるのかも理解できない。減圧停留など陸上作業では全く考慮する必要のないような事項に対する十分な配慮が必要となる。潜水作業に特有な減圧傷害等については付録で概説する。環境圧潜水により生じる作業者の障害については付録1で述べ、体に溶け込んだ空気を安全に体外に排出するための減圧について付録2で述べる。

3. 無人潜水艇

無人潜水艇は海上と通信あるいはエネルギー補給用の索(アンピリカルケーブル)で繋がれているかどうかで、有索式と無索式に分けられる。両者の特徴を表2に示す。

3.1 無索無人潜水艇

超音波による以外の通信手段がないために無索無人潜

水艇は開発途上と言って良い。また、実用性がすぐに得られるとは期待できない面があるので、欧米諸国では大学が中心になって研究がおこなわれている。表2に示されるように、無索式は通信手段が超音波になり伝送密度が低く、バッテリー容量も限られるので、有索式と互換性のあるものを作ることはほとんど不可能である。索のないことによる自由さを生かした、開発計画あるいは設計が必要である。これまでに開発された無索無人潜水艇の諸元を表3に示す。

3.2 PTEROA計画^{1,2,3,5,6)}

昭和60年度より、生産技術研究所浦研究室・同前田研究室・工学部石谷研究室を中心にして、無索無人潜水艇の開発研究計画が練られ、PTEROA計画とよばれる研究が開始された。PTEROとはラテン語で翼の意味である。

大きな胸ひれを持ち、洞穴の中では裏返って泳ぐミノカサゴは学名をPTEROISという。

PTEROA計画の趣旨はつぎのようなものである。

- 1 無索無人潜水艇を開発研究することにより、海中海底工学の基礎を大学において形成する。
- 2 海中海底における活動は、幅広い発展が期待されるので、研究の目的を限定せずに、自由度の大きい、幅の広いものとする。
- 3 東京大学海洋研究所を中心におこなわれている海洋科学研究および計測活動に関連した具体的なミッションを設定し、実用性の期待できる無索無人潜水艇を製作することを第1段階の目標とする。
- 4 Free Swimming Vehicleである無索無人潜水艇の特徴を生かして、航行型の潜水艇（以下P艇と呼ぶ）とする。

そのミッションの概要は図4に示すように

- ①海面上から投下されたP艇は制御面を利用してグライディング航行し、目的点に到達する。

②P艇はバラストを投下し、プロペラ推力で海底面の一定の高さを地図平面上を直線的に航行し、画像情報を獲得する。

③P艇が計画された地点に到達すれば、バラストを投下して正浮力にして、グライディング航行で浮上して、投下地点に復帰する。

④航行深度は6,000mを目標とする。

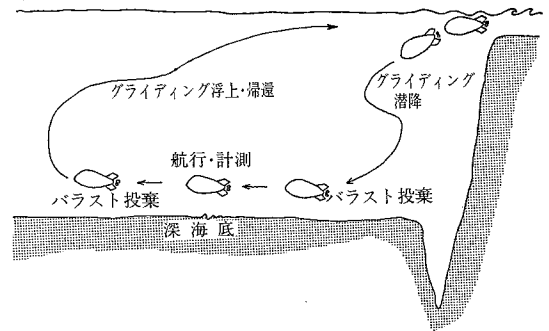


図4 PTEROA計画のミッション

表3 代表的な無索無人潜水艇の諸元¹⁾

機 名	PTEROA	EAVE EAST	EPAULARD	ROBOT II	UFSS	UARS	SPURV I・II
製 作 (国 名)	東京大学生産技術研究所(日本)	ニューハンプシャー大学(合衆国)	CNEXO(フランス)	MIT(合衆国)	NRL(合衆国)	ワシントン大学(合衆国)	ワシントン大学(合衆国)
実 績(予定)	1984～	1977～	1972～	1973～	1979～	1972～	1963～
長 さ (cm)	150	150	400	240	610	300	360
幅 (cm)	75	150	110	38φ	122φ	45φ	50φ
高 さ (cm)	45	100	200				
空中重量 (kg)	250	316	3000	60	3600	400	454
構 造	鯨型	解放フレーム型円筒形	涙滴型	魚雷型	FRP, etc	円筒型	円筒耐圧型
深 度 (m)	6000	914	6000	91	457	450	3000/1500
速 度 (knot)	10	2	2.5	3	5	3	7
航続時間(距離)	10H	6H	10H(12nM)	3H	25H(125nM)	10H	5/2H
動 力 源	アリカリ電池	鉛酸電池	鉛酸電池	8AH電池	Li電池(開発中)	鉛亜鉛電池	銀亜鉛電池
推 進 機	1—0.5hp	6—0.5hp	1—水平	1—50W	1—0.5hp	1—0.5hp	1—2 hp
通 信	音響	音響	音響	—	音響	音響	音響
コントロール	自律航行	推測航法, 音響パッシヴ, etc	7 mの鎖, 障害物回避ソナ	プログラム航行	プログラム航行	プログラム航行, 慣性誘導	
セ ン サ		6—エコーサウンダ	エコーサウンダ, 深度ソナ, 温度			2—ハイドロフォン, etc	マルチマイクロストラクチャ
コンピュータ		6100cpu, Motorola68000	2—8080, 3—UP114	280CPU, 2kROM, 1616DRAM	8080, 24kROM, 5kRAM	—	
記 録		—	35mmカメラ	—	—	デジタル記録装置	テープレコーダ
そ の 他	開発中	開発中	—	—	開発中		
用 途	海底調査・航行調査	パイプライン検査	海底地形測量用	海底調査	海洋データ採取沈船判定	海洋データ収集	海洋調査
文 献	生産研究, Vol. 36-12, 39-4, 39-5 造学誌Vol. 161	Proc. 2nd UMUTS, Oceans 81 Vol. 1	Proc. 2nd UMUTS, Oceans 81 Vol. 1	Undersea V. Directory 81, Oceans 81 Vol. 1	Proc. 2nd UMUTS, Oceans 81 Vol. 1	ワシントン大学 Tr.No.APL-UW 7219	Undersea V. Directory 81, Oceans 81 Vol. 1

⑤海上とP艇との通信は必要な場合以外はおこなわない。

昭和61年度では図5に示す潜水艇形状 (PTEROA40) についてその航行性能を検討した。艇体に作用する流体力を回流水槽で計測し、図6・7に示すグライディング航行性能を明らかにし、その操縦アルゴリズムを研究した。さらに、深海底での高い圧力環境下での機械機能を試験するために表4に示す仕様を持つ大型および小型の2基の耐圧試験装置 (図8参照) を製作した。

本研究計画から派生するものとして、上記のミッション以外に次のようなミッションも容易に可能となる。

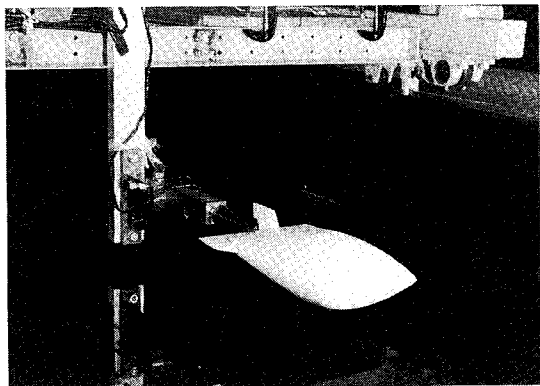


図5 試設計した航行型無索無人潜水艇PTERTOA40

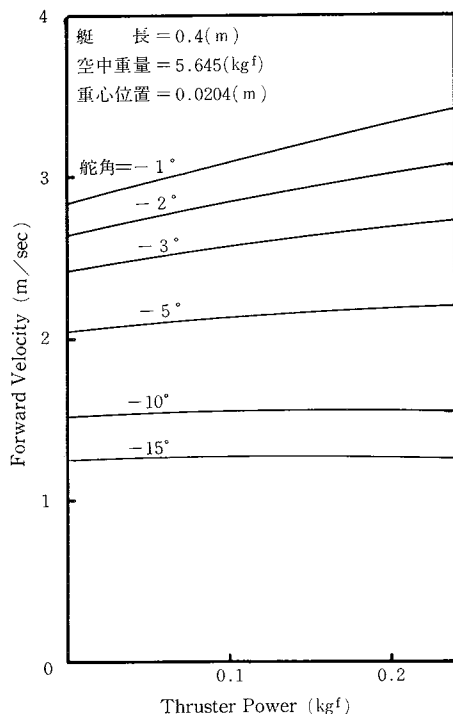


図6 PTEROA40のグライディング速度

①海底面に散在する海底地震計などの各種計測器に接近し、そこから、数100kHzの高い周波数で蓄積されたデータを読み取り、海上に送り届ける。

②海中の特定の位置の海水や生物のサンプルを自律的に採取する。

③特定海底の画像情報を定期的に取得する。

3.3 有索無人潜水艇⁴⁾

有索式は、せいぜい数mの小さな艇体に比べて数100m以上もの長い索を引かなければならないので、運動の自由が拘束されるが、索を通じて情報やエネルギーのやりとりが可能なので実用性が高く、ROV⁸⁾ (Remotely Operated Vehicle) と略称されている。1958年米国が開発した有索無人潜水艇CURV (Controlled Underwater Recovery Vehicle) が実用的なものの第一号機と言われている。その後、北海油田の開発などで、1975年頃より急速に需要が伸び、さまざまな規模・形式¹¹⁾のものが作られている。表5に主なものの諸元¹⁰⁾を示す。

1986年6月にスコットランドのアバディーンで開かれた'86ROV Conf.⁹⁾はROVの将来性に関する事項が第一テーマであった。おりからの原油価格およびドル・ポンドの低落で、北海油田開発は苦しい立場に立たされており、海底石油開発で発展してきたROVおよびその関連産業にとって、先ゆきは必ずしも明るくない。会議の中での主張の主なものは、

①ROVは

1) LC-ROV (Low Cost ROV)

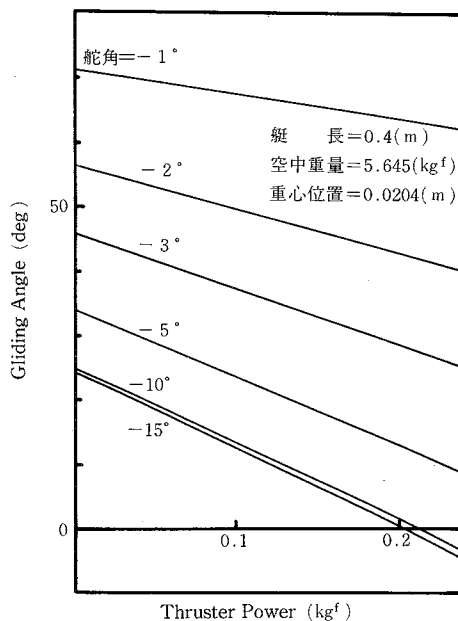


図7 PTEROA40のグライディング角度

表 4 大深度海底機械機能試験装置の仕様

	大型試験筒	小型試験筒
内 径	φ525mm	φ300mm
内 の り 高 さ	810mm	550mm
最大使用圧力	1200kgf/cm ²	
試験筒材質	SNCM鋼	
加 圧 装 置	水圧ポンプ式	
最小発生水圧	10kgf/cm ² 以下	
設定加圧精度	0.5%以上	
吐 水 量	0.1L/min	

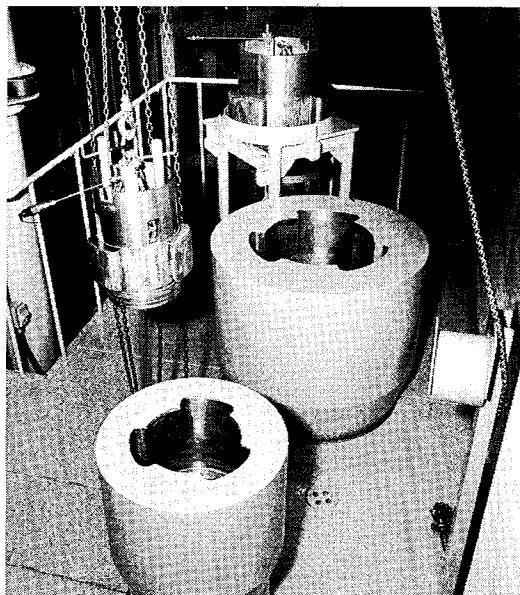


図 8 大深度海底機械機能試験装置

2) HD-ROV (Heavy Duty ROV)

に明確に分かれはじめています。LC-ROVは価格1千万円を切るような、手軽なものになり、潜水夫のサポートと視覚的な調査が重要な任務となる。HD-ROVは潜水夫に代わって海中作業をおこなおうとするもので、数億円の価格となる。LC-ROVの1例として、三井造船㈱のRTV-100を図9に、HD-ROVの1例として、AMETEC社のSuper Scorpionを図10に示す。

②LC-ROVの分野の発展はDiver Safetyの面から期待される。先に述べたように暗い海中での作業は潜水夫を不安にし、作業能率および作業の安全性が低下する。潜水夫のごく近くにROVがおり、そこからテレビカメラを通じて海上の人間が見ていてくれているという事実と、それを潜水夫が認識することにより、潜水夫に安心感が生まれ、能率と安全性が向上するのである。この効果は、陸上作業からは類推できないほど大きい。

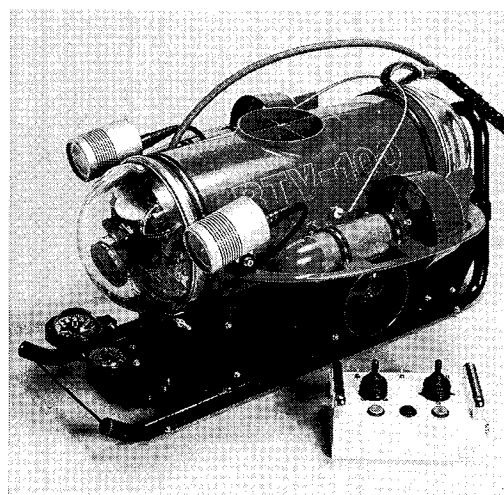


図 9 有索無人潜水艇「RTV-100」

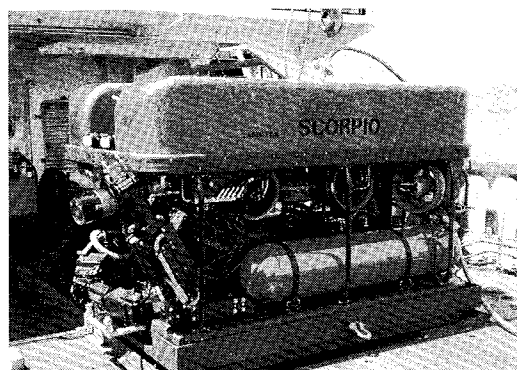


図10 有索無人潜水艇「Super Scorpion」

③潜水夫にかわって作業をするHD-ROVは潜水夫費用を下げ、海洋構造物の維持、管理コストを下げるので、今後ますますの発展が期待される。

4. システム潜水

30m以深では太陽光がとどかず、暗い世界である。そのような場所で2人の潜水夫による作業は孤独なものであり、窒素酔いや減圧症の恐怖、水圧、機器の誤作動の危険性などから、作業能率は下がる。そのうえに、長時間に減圧停留を強いられるとなると、大深度の長時間にわたる潜水作業は非現実的なものになってしまう。長期にわたる減圧の精神的な苦痛(孤独感や不安感)を和らげ、潜水作業を支援するために、圧力を保持できる容器を備えた水中エレベーター(SDC: Submersible Decompression Chamber)が用いられる(図11参照)。長時間深い水深に滞在した潜水夫をその深度の環境圧を保持したままSDCでデッキ上に揚げ、デッキ上の大きい容積を持つ減

圧室 (DDC:Deck Decompression Chamber) で、減圧表に従って圧力を大気圧まで下げる。こうすると、乾燥した状態で、また快適な環境で減圧時間を過ごすことができる。このような潜水法をシステム潜水と呼び、大深

度あるいは長期にわたる潜水に採用される。北海ではシステム潜水は実用化されているが、わが国では海底資源が乏しいために、経験が少なく、昭和60年度に完成した

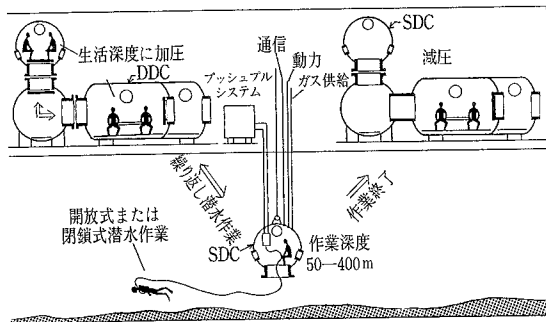


図11 システム潜水の概要⁸⁾

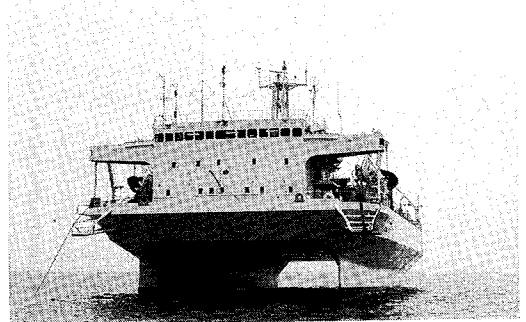


図12 海中作業実験船「かいよう」

表 5 代表的な有索無人潜水艇の諸元¹¹⁾

名 称	CURVⅧ	RUWS	ERICⅡ	ドルフィン 3 K	SUPPER SCORPIO	RCV-225	RTV-100
製 造 所 (国 名)	NOSC (米国)	NOSC (米国)	CERTSM (仏)	三井造船 (日)	AMETEK (米国)	Hydro Products (米国)	三井造船 (日本)
最大深度 (m)	2130	6000	6000	3300	1000	400	100
長 さ (cm)	381	335	500	300	250	66	80
幅 (cm)	198	145	300	200	150	51	55
高 さ (cm)	198	152	180	200	160	51	36
空中重量 (kg)	1814	1950	5000	2500	1800	82	25
正浮力 (kg)		4.5~13.5		10		2	
潜 航 方 式	自力潜航	ランチャー	ランチャー	自力潜航	ランチャー	ランチャー	自力潜航
推 進 機	油漬交流モータ	油圧モータ	ダクトスラスト	油圧モータ	油圧モータ	油漬直流モータ	直流モータ
前 後 推 力	3-10hp	2-20hp	6-	2-10ps	2-500lb	2-0.1hp	2-170W
左 右 推 力		2-20hp		2-7.5ps	2-500lb		1-170W
上 下 推 力		1-10hp		2-7.5ps	1-500lb	2-0.1hp	1-170W
速 力 (knot)	4 (水面にて)	1.5 (水面にて)		前進 3, 後進 2 左右 1.5 上下 1	前進 3.7, 後進 2.8 左右 2.7, 上下 1	前進 1.7 左右 1 上下 0.5	2.7 (水面にて)
主 電 源	400VAC, 120VAC 3 φ, 50KW	400V, 3 φ 6 KW	115V, 1 φ, 400Hz 100KW	440VAC, 3 φ, 60Hz 100VAC, 1 φ, 60Hz	440VAC, 60Hz 56KW	440VAC, 3 φ, 50/60Hz, 5KW	100VAC, 50/60Hz, 1 kVA
主 ケーブル 艇 ケーブル	2100×38φ	7000×30φ 260×21.8φ	8000 300	5000×30φ	1000×38φ 150×38φ	400 120	150×12φ
カ メ ラ	2-TV 1-35	2-B/WTV 1-70	2-TV	1-ST/TV, 1-B/W TV, 1-TV, 1-35	4-TV	1-SIT/TV	1-TV
照 明 装 置				4-散光型投光器, 2-集光型投光器	6-250W 2-500W	2-45Wハロゲン	2-150Wハロゲン
マニピュレータ	1-7自由度	2-7自由度 1-5自由度 (油圧)	2-フィードバック (油圧)	2-フィードバック (油圧)	1-5自由度 1-7自由度		1-2自由度
計測・航法装置	高度センサ 深度センサ 磁気コンパス CTFMソナ	高度センサ, デジタル磁気コンパス, 探索ソナ, 2-ハイドロフォン	スキャンソナ, ジャイロコンパス, エコサウンド, パーティカルジャイロ	高度ソナ, ジャイロコンパス, レートセンサ, トランスポンダ, 方位ソナ	CTFMソナ 自動進度方位制御器 トランスポンダ	深度計, 方位計	深度計, 方位計, トランスポンダ, ソナ

科学技術庁の「かいよう」(図12参照)は300mまでのシステム潜水作業を実験するための研究船である。

5. 終 わ り に

潜水艇技術は新しい分野の技術が発展する可能性が高く夢の広がる分野である。また、単一の要素技術ではなく、それらを総合するシステム技術であり、総合的な技術管理とプロジェクト管理が必要である。PTEROA計画のように緩く規程されたミッションのもとで、大学において開発を通じて海面下の工学を発展させることが肝要であると考えている。(1987年6月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 浦・大坪：グライダー型潜水艇の設計に関する研究（その1），生産研究，Vol. 37—1 (1985. 12) pp. 539—542
- 2) 浦・大坪：グライダー型潜水艇の設計に関する研究（その2），生産研究，Vol. 39—4 (1987. 4) pp. 149—152

- 3) 浦・大坪：グライダー型潜水艇の設計に関する研究（その3），生産研究，Vol. 39—5 (1987. 5) pp. 183—186
- 4) 浦：海中作業支援に関する近年の動向，昭和61年度サンシャイン計画委託研究開発成果報告書 (1987. 3)
- 5) 石谷：無人潜水艇の高度維持制御に関する考察（第1報），日本造船学会論文集，Vol. 160 (1986. 12) pp. 111—119
- 6) 石谷：無人潜水艇の高度維持制御に関する考察（第2報），日本造船学会論文集，Vol. 161 (1987. 6) pp. 215—224
- 7) Sisman, D. ed. "The Professional Diver's Handbook", Submex (1982)
- 8) "Remotely Operated Vehicles", Proc. ROV'85, Marine Tech. Soc. (1985)
- 9) "Remotely Operated Vehicles", Proc. ROV'86, Marine Tech. Soc. (1986)
- 10) "ROV Review", Subnotes Pub., (1986)
- 11) 海洋科学技術センター：“海中活動新技術の動向調査報告書”，(1984)

付録1. 潜 水 障 害

全く無頓着に潜水をおこなうと、各種の生理的な障害、すなわち潜水障害が潜水夫に起こる。1気圧でない環境圧の空気を呼吸することにより、力学的にも生理学的にもなんらかの障害が起こる。潜水の歴史はその生理的障害との戦いと言っても過言ではない。以下に主な障害について列举し、障害を起こさないための限界を示す。

(1) 含気腔障害 (Squeeze)

中耳や副鼻腔など、変形しにくい骨などで囲まれた閉鎖された空間の圧力が、環境圧に等しくならず、内外の圧力差により、疼痛・鼓膜の破裂・出血が起こる。中耳は、耳管を意識的に開くことにより、均圧にすることができる。環境圧が中耳の内圧より低い場合（浮上時）には一般には自然に耳管が開く。副鼻腔も鼻腔に通じる連絡管に通気性があり通常は自然に均圧されるが、感冒や副鼻腔炎などに感染していると障害が起こりやすい。これらが起こったときには、潜降・浮上速度を遅くするか、潜水を中止しなければならない。

(2) 肺過圧障害 (Air Embolism)

環境圧が急速に下がり、あるいは肺胞内圧力が上昇して、肺胞毛細血管が破裂、肺胞内の空気が血管内に侵入し、脳に至り、血管を閉塞させるために障害を与え、時には死に至る。

同じ深度変化 ΔD に対して水面近くでは環境圧の相対変化 R

$$R = \Delta Dy / (P_0 + Dy)$$

P_0 : 大気圧

D : 潜水深度

γ : 海水の比重量

が大きく、排出せねばならない呼吸量は多くなるため特に注意せねばならない。潜水中の呼吸法を十分に修得するためのトレーニングが必要である。

(3) 酸素中毒

呼吸気体の酸素分圧が約1.7気圧（約71mの水深の空気）を越えると発生する。吐き気・筋けいれん・呼吸困難が起こり、次いでテンカン的な発作が起こり、死に至る。飽和潜水では酸素

分圧を0.216～0.4気圧の値にせねばならない。

(4) 不活性ガス中毒

吸気気体の窒素分圧が約4気圧（約40mの水深の空気）を越えると発生する。視覚などの外部情報や記憶などの内部情報が正常に意識できなくなり、自分の置かれている状態が認識できなくなる（窒素酔い）。訓練によってある程度の適応はできるが、40mを越える水深でのダイバーの作業能力は一般に低下することを作業計画者は知っておく必要がある。窒素分圧は、5.3気圧以下に保つ必要がある。したがって、60mを越えるような潜水作業では、窒素をヘリウムガスあるいは水素ガスに置きかえた、混合ガスによる潜水法をおこなわなければならない。近年では水素ガスに置きかえる手法も検討されている。ヘリウムに比べて水素は安価であるが、爆発の危険性がある。

(5) 第一次気泡障害

体内に溶在している気体が環境圧の減少にともなって気泡化し、肺過圧傷害と同様に空気塞栓など生体組織に影響を与える。浮上速度（環境圧を下げる速度：減圧速度）を制御して、体内組織からの気体の排気（肺でガス交換）を十分におこなう必要がある。短時間の潜水では、飽和時間の遅い骨髄や脂肪組織については問題はないが、長時間の場合には、これらの組織の中に気泡が発生して、疼痛などの障害を起こす。

(6) 減圧疾病

体内に発生した気泡は、血液を凝固させ、塞栓をひきおこす。慢性的なもの、神経系に対するものなど多様な障害をもたらす。とくに、浮上後、数時間後に骨や関節に激痛をともなって発生するものはベンズと呼ばれる。

(7) 高圧神経症候群 (HPNS)

高圧ヘリウム・酸素混合ガスを呼吸すると発生する。脳波に異常が起こり、けいれんが主体の発作が起こる。窒素ガスを少量混合することにより、よい結果を得ている。

(8) その他

酸素不足や、潜水服の浮力調整の失敗などによる溺水、有害生物の攻撃、人為的なミスによる事故など、潜水夫の安全をおびやかす要因は多数ある。

付録 2. 減 圧 表

不活性ガスの体内組織内の溶解の速度と排出の速度を調べ、体内の不活性ガス分圧がその組織で気泡化する限界以下になるように、浮上速度を調節すれば良い。具体的には、ある程度浮上し、気泡化する手前の深度で止まり、そこに留まって体内の不活性ガス分圧を下げ、再び浮上する手順をとる。これを潜水深度とそこでの滞在時間を表にしたものが減圧表である。U.S. Navyの減圧表が有名であるが、ほかにフランスの開発したものなどもある。

(1) ホールデンの減圧表計算の手法³⁾⁴⁾

呼吸ガスの分圧を P 、溶解ガスの分圧(張力と書く) p とすると次の関係がある。

$$p - p_0 = (P - p_0)(1 - \exp[-kt]) \quad (1)$$

k : ある組織に固有な定数

T : 拡散灌流時間 $= \ln(2)/k$

p_0 : $t = 0$ における張力

環境圧を P_t とすると、張力 p が

$$p < S_c \times P_t \quad (2)$$

であれば気泡が発生しないと仮定する。 S_c は組織に固有な定数で限界過飽和係数と呼ばれる。体の組織を拡散灌流時間に関して 7 分, 30 分, 1 時間, 2 時間の 4 つのグループに分け、それぞれの組織の限界過飽和係数を実験により求めた結果が表 2-1 である。潜水手順にそい、(1)式に従って、体内組織各グループの不活性ガス張力を求め、(2)式をチェックして、浮上に関するスケジュールを定めればよいことになる。

表 2-2 は 45m に 60 分間潜った場合の計算例である。潜水直後の各組織の分圧は 0.79 bar である。60 分後に、7 分組織では 4.34 bar となる。減圧停留する深度は 3 m, 6 m, 9 m と 3 m ごとに設定する。この場合 6 m まで浮上すると $T = 30$ 分組織で気泡が発生することになる。そのため 9 m で停留し、6 m まで浮上しても問題がなくなる分圧にまで不活性ガスが排出されるのを待つ。ここでは 45 m から 9 m に浮上する間の 2 分間は、平均して考え、27 m に 2 分間滞在したことにして計算している。

表 2.1 組織の拡散灌流時間と限界過飽和係数^{3,4)}

拡散灌流時間 T (min)	k (1/min)	限界過飽和係数 S_c
7	0.1	2.56
30	0.0231	1.84
60	0.01155	1.60
120	0.00577	1.60

また表では、各深度の初期張力は前の深さの最終張力に等しいことに注意しておく。浅くなると 1 時間組織や 2 時間組織に問題が出てくることがわかる。

混合ガス潜水の場合には、(2)式に代わって、ある臨界圧力差 P_c に対して

$$p - P < P_c \quad (3)$$

をとる場合が多い。

(2) U.S. Navy の減圧表

安全な浮上法に関する考え方は、ホールデンの手法と同じである。長期にわたる実験的研究から、U.S. Navy は潜水マニュアルを作っている。先の例で、45 m の水深への 1 回の潜水に関しては表 2-3 に示す減圧表となる。たとえば、45 m に 1 時間潜水した場合には 12 m で 3 分, 9 m で 19 分…減圧停留せねばならず、総浮上時間は 112 分 30 秒となる。滞在時間が長くなるに従って急速に停留時間が増していく。これは (1) 式の性質より明らかである。

表 2-3 で滞在時間が 5 分未満のときには減圧停留をしなくて良い。この時間は無減圧停留限界とよばれ表 2-4 に示すように深度により異なる。無減圧停留限界で作業すれば、減圧停留の無駄な時間を省ける。深度が深くなると短い時間なので、それがほとんど不可能であることが表 2-4 で明らかである。

一日のうちに繰り返し潜水する場合には、前の潜水による影響を考慮しなければならない。これを表す指標として繰り返し潜水グループがあり、A~Z の記号で表す。体内の不活性ガス濃度は A が希く、Z が濃い。45 m に 1 時間潜水する例では、浮上直後は表 2-3 により Z になる。その後大気圧の環境下で休憩することにより、体内の不活性ガス濃度は減少する。休憩時

表 2.3 U.S. Navy のマニュアルによる 45 m へ潜水する場合の減圧表

海底滞在時間 (分)	第 1 停留点までの 浮上時間 (分:秒)	減圧停留水深 (m) での停留時間 (分)					総浮上時間 (分:秒)	繰り返し水 潜グループ
		15	12	9	6	3		
5						0	2:30	C
10	2:20					1	3:30	E
15	2:20					3	5:30	G
20	2:10				2	7	11:30	H
25	2:10				4	17	23:30	K
30	2:10				8	24	34:30	L
40	2:00			5	19	33	59:30	N
50	2:00		12	23	51		88:30	O
60	1:50		3	19	26	62	112:30	Z
70	1:50		11	19	39	75	146:30	Z
80	1:40	1	17	19	50	84	173:30	Z

表 2.2 45 m に 60 分間潜水した場合のホールデン式の減圧停留計算表

深度 (m)	平均 静水圧 P_t (bar)	呼吸 N_2 分圧 P (bar)	停 留 時 間 t (min)	7 分 組 織		30 分 組 織		1 時 間 組 織		2 時 間 組 織	
				$P_t \times S_c$ (bar)	初期張力 p_0 (bar)	$P_t \times S_c$ (bar)	初期張力 p_0 (bar)	$P_t \times S_c$ (bar)	初期張力 p_0 (bar)	$P_t \times S_c$ (bar)	初期張力 p_0 (bar)
0	1	0.79	∞	—	—	—	—	—	—	—	—
45	5.5	4.35	60	—	0.79	—	0.79	—	0.79	—	0.79
45~9	3.7	2.93	2	9.47	4.34	6.80	3.46	5.92	2.57	5.92	1.84
9	1.9	1.48	13	4.86	4.08	3.49	3.44	3.04	2.58	3.04	1.85
6	1.6	1.26	31	4.09	2.21	2.94	2.94	2.56	2.43	2.56	1.82
3	1.3	1.03	53	3.32	1.31	2.39	2.08	2.08	2.08	2.08	1.72
0	1	0.79	—	2.56	1.03	1.84	1.34	1.60	1.60	1.60	1.54

表2.5 休憩(時間:分)による不活性ガス濃度の減少(U.S. Navyマニュアルによる)

浮 上 時	N	0:10 0:25 0:40 0:55 1:12 1:31 1:54 2:19 2:48 3:23 4:05 5:04 6:33 9:44															
		0:24 0:39 0:54 1:11 1:30 1:53 2:18 2:47 3:22 4:04 5:03 6:32 9:43 12:00															
	O	0:10 0:24 0:37 0:52 1:08 1:25 1:44 2:05 2:30 3:00 3:34 4:18 5:17 6:45 9:55															
		0:23 0:36 0:51 1:07 1:24 1:43 2:04 2:29 2:59 3:33 4:17 5:16 6:44 9:54 12:00															
	Z	0:10 0:23 0:35 0:49 1:03 1:19 1:37 1:56 2:18 2:43 3:11 3:46 4:30 5:28 6:57 10:06															
		0:22 0:34 0:48 1:02 1:18 1:36 1:55 2:17 2:42 3:10 3:45 4:29 5:27 6:56 10:05 12:00															
		Z	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
		次の潜水の繰り返し潜水グループ															

表2.4 U.S. Navyのマニュアルによる無減圧停留限界

水深 (m)	無減圧停留限界 (分)
9	∞
10.5	310
12	200
15	100
18	60
21	50
24	40
27	30
30	25
33	20
36	15
39	10
42	10
45	5
48	5
51	5
54	5
57	5

表2.6 再び潜水する場合の等価不活性ガス時間
(U.S. Navyマニュアルによる)

次の水深 (m)	繰り返し潜水のグループとその等価不活性ガス時間 (分)														
	Z	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	A
42	42	40	38	35	32	29	26	23	20	18	15	12	10	7	5
45	40	38	35	32	30	27	24	22	19	17	14	12	9	7	5

表2.7 81m水深の減圧表(U.S. Navyマニュアルによる)

海底滞在時間 (分)	第1停留点までの浮上時間 (分:秒)	減圧停留水深(m)での停留時間(分)							総浮上時間 (分:秒)
		21	18	15	12	9	6	5	
5	4:10							1 3	8:30
10	4:00						2 5	11	22:30
15	3:50					3 4	11	24	46:30
20	3:40				2 3	9	21	35	74:30
25	3:30			2 3	8	13	23	53	106:30
30	3:30		3 6	12	22	27	64		138:30
40	3:20	5 6	11	17	22	51	88		204:30

間と繰り返し潜水グループの関係を表したものが表2-5である。Zの人が5時間休めばDとなる。Dの状態の人が再び水深45mに潜水するとき、対応する不活性ガス濃度を表2-6より等価不活性ガス時間に換算する。先の例では、その深度にすでに9分間滞在していたと考えればよく、新たな潜水時間をこれに加えて表2-3を用い、今回の減圧停留計画が定まる。

表2-7は81m水深の減圧表であり、減圧停留時間が長く、その危険性がうかがい知れる。

減圧表の詳細についてはU.S. Navy Diving ManualあるいはNOAA Diving Manualを参照されたい。

付録参考文献

- 1) U.S. Navy Diving Manual, Navy Department (1970)
- 2) NOAA Diving Manual, NOAA, Department of Commerce (1978)
- 3) Berry, Y., et al: La Plongée et l'Intervention sous la Mer, Arthaud (1977)
- 4) Berry, Y., et al (関 邦彦訳): “潜水学”, マリン企画 (1982)
- 5) 労働者安全衛生部労働衛生課編: “潜水士テキスト”, 中央労働災害防止協会 (1981)