「特殊環境における衣料」特集

海中活動を行う際の作業服

山 田 稔

1. はじめに

海をはじめ、湖等の水中環境とは、陸上環境に適応している人間にとって極めて活動しづらい環境である。つまり人間は、水中で呼吸ができず溺れてしまう、体温が保持できない、視力が得られず物がぼんやり見える。極めてゆっくりした泳力しかない、皮膚がふやけて傷付き易い、などどれをとっても活動を妨げるものである。

この為ダイバーは、潜水呼吸器をはじめ、潜水服等の潜水装備品を身にまとい、これら欠点をカバーしつつ、それでもまだ不自由なおもいで苛酷な水中環境で活動している。

1.1 海中活動の現状

海中活動は海底石油の開発から軍事目的まで幅広く行われているがこれらはダイバー作業から無人機 ROV (REMOTELY OPERATED VEHICLE) とそれぞれ活動目的により使い分けられ、ある時はまた連携作業が行われている。表1に海中活動システムを示す。

この中で潜水服を装着して潜水するのは、環境圧潜水 (AMBIENT PRESSURE DIVING) で、ダイバーは高い水圧に曝されながらの潜水となる。環境圧潜水は、潜水

表1 海中活動システム

Problems about diving suit

筆者紹介 MINORU YAMADA, Japan Marine Science & Technology Center, Diving Technology Department, 海洋科学技術センター, 潜水技術部, 研究主査

筆者は、潜水技術の向上に従事されている。本稿では、潜水服 (ウェットスーツ, ドライスーツ, 加温式潜水服及び大気圧潜水服) について分かり易くまとめたいただき、また今後の問題点を明らかにしていただいた。

船によるマニピュレーター作業 (大気圧潜水), ROV 作業と比較するとダイバーに苛酷な環境での作業を強いることになるが、高度で緻密で確実な作業が行えると高く評価されている。この為、先進国では環境圧潜水の技術開発が進み、実際の海中での作業実験で531m (1988フランス), 潜水シミュレーター (陸上での模擬潜水実験装置) では、686m (1981アメリカ) までの潜水記録がある。我が国では海洋科学技術センターが本格的潜水作業として昨年7月にニューシートピア実験で300mを達成させている他、海上自衛隊でも300mを超える深海潜水を実施している。

現在、ダイバーの活動は海底石油、天然ガスの試掘・生産段階の支援作業、海底パイプラインの設置・メンテナンス、サルベージ、港湾・橋梁工事、軍事活動、警備救難などに加え、海外では軽油タンク内作業、50°Cを越える原子炉内水中作業と活動範囲が拡がりつつある。

これら潜水作業を行うダイバーは、厳しい身体検査をパスして養成されるが、水深数十mまでの空気潜水ダイバーと、ヘリウムを主体とした混合ガス潜水による深海ダイバーに区別される。この深海ダイバーは北海での石油開発が盛んであった1981年に5400人にも達したが、その後は石油価格の下落から減少傾向をたどっている。ここでは、これら海中環境で活動するダイバーの潜水服の概要、問題点について紹介する。

2. 潜水服の概要

ダイバーが装備する潜水服は、体温の保持と皮膚の保護を目的とし、ウェットスーツに代表される保温服と、温水によってダイバーを積極的に暖める加温服を潜水深度や水温の状況により選んで、使用している。図1に水温と潜水服装着ガイドを示す。

2.1 ウェットスーツ (WET SUIT)

ウェットスーツは、発泡ネオプレン生地断熱特性

写真1 原子炉内の潜水作業

図1 水温と潜水服装着ガイド

を利用して保温（保温服）するもので、身体と潜水服の間隙に海水が侵入し、皮膚がウェット状態となることからこう呼ばれている。この生地は、保温性に優れている、柔軟で伸縮性がある装着し易い、体形にフィットする、スーツ接着剤で容易に加工できるなどの特徴から

ダイバー、さらには海女達の潜水服、またマリンスポーツ用の保温服としても広く普及している。

この生地には窒素ガスの微小（約0.1mm）気泡が密に含まれているが、ダイバーが潜水すると、水深10m毎に1気圧ずつ増す水圧のために縮小し、体積、厚み、長さが図2のように変化する。特に体積の変化はダイバーにとって浮力の減少として現れ、水深20mでは55%にも減少し潜水深度の変化に応じた浮力調節が要求される。また気泡の縮小と厚みの減少に伴い保温力は水深が増すとともに低下する。

2.2 ドライスーツ (DRY SUIT)

ドライスーツは、海水の侵入を防ぎ、身体と潜水服の間隙に空気層があって皮膚が濡れることなく乾いた状態となるもので、保温用の厚手の下着で確保される空気層

図2 ウェットスーツの圧力変化

図3 ドライスーツ(発泡ネオプレン生地製)

の断熱特性で保温している。

ドライスーツの防水部分は頸部と両手首、及び装着時に身体を入れる部分(通常は背中)の3箇所である。この身体を入れる部分は防水ジッパーが使われ、頸部や手首は伸縮性のある生地(ゴム素材)で頭や手を通した後、服の内側へ折り返し防水シールにより浸水を防いでいる。これらの部分はいずれも空気が溜り易い箇所であり、空気が溜まる程内側への折り返しにより浸水防止が効果的となる。

装着時に服内に溜まった空気は潜降すると水圧により縮小し、著しく浮力が減少する、また水圧による強い締め付け(スキーズ SQUEEZE)も起こる。これを防ぐため潜水中に服内に空気を補給するホースが潜水用ボンベと潜水服の間に取り付けられ、服に直接付けられた送気バルブの操作により服内に空気が補給でき、スキーズも予防される。また海底から浮上する際はこの空気が

水圧により膨張し、著しく浮力が増し、浮上速度をコントロールできず、時には水面への吹上げ(ブローアップ BLOW UP)事故も起こる。(この吹上事故は肺の破裂、減圧症などを伴う危険な事故である。) これらを防ぐ為、服に直接付けられた排気バルブから自動的、または手動で排気しながら浮上するのが普通である。

ドライスーツ内の空気層は、陸上では一様に保てるが一旦水中に入ると足元の水圧と胸元の水圧差(約150cm 水柱)から一様に空気層を保てず、図4のように水圧の低い部位に空気が溜まる、また水圧の高い足元では水圧によるスキーズが起こり、膝の曲げ伸ばし等の運動性も低下させてしまう。

ドライスーツの特徴は服内が乾いた状態であるが、浸水トラブルもあり、原因は頸部、手首のシール部と排気弁からの浸水が主である。一旦浸水すると保温力が急激に低下してしまうので潜水を中止せざるを得ない程、大きな問題となる。浸水トラブルを少なくする為には各人のサイズに合ったドライスーツを装着することが好ましく頸部の太さにも個人差があり、頸部が細いとシール機能が満たせず浸水してしまう。また、手首も手腕作業で筋立つとシール機能が低下し、そこから浸水し

てしまう。排気弁についても、服内外の差圧が少ない際に作動させると浸水トラブルが生ずる。

ドライスーツの浸水トラブルを防ぐ為に、頸部シール部を無くし、直接ヘルメットと接続するタイプ、また、直接グローブと接続できるよう手首部に接続リングを設けているタイプ、給気・排気弁を直接服に取り付けずホ

図4 ドライスーツとウェットスーツの相違

ースの先端に取付けて浸水トラブルを少なくしているドライスーツも考案されている。

またドライスーツでは、服内に空気層を確保することから、ウェットスーツの2～3倍(10～15kg)のウエイトを装備して潜水している。

ドライスーツの生地には、ゴム引き布地、発泡ネオプレン生地、ナイロン素地の3種類がある。ゴム引き布地のものは、従来のヘルメット式潜水で装着するドレスと呼ばれているもので、擦れや水の透過に強く潜水漁業、港湾土木に多く使用されている。発泡ネオプレン生地のものは、保温性が高く寒冷地での潜水に使われ、南極観測隊での潜水にも実績がある。ナイロン素地のものは、ミシン目の防水処理が可能になり、軽い、作業性が良い、色彩も豊富なのが特徴でマリンスポーツ用に使われ始めている。然し従来の生地と比較し海水が徐々に透過する欠点がある。

ドライスーツ内のガスはダイバーの呼吸ガスと同様にヘリウムガスを主体とするガスである。このヘリウムガスの保温力は低く、空気に比べ熱伝導率は約6倍でドライスーツを深海潜水で使用するとダイバーは非常に寒く感じる。したがって、深海潜水では温水加温服等を装備しなければならない。

2.3 加温式潜水服 (HEATED SUIT)

従来からの潜水服であるウェットスーツ、ドライスーツは服生地等の保温力でダイバーを保温しているが、さらに低温の水域、熱伝導率の高いヘリウムガスを使用する深海潜水ではダイバーを温水、または電氣的にニクロム線ヒーターにより積極的に温めなければならない、これが加温式潜水服である。

この加温式潜水服はヘリウムガスを使用した深海潜水が開発された1940年代から使用され始めたもので、当初は、パイロット用の電気加温下着をドライスーツの下着に装着して使用したため感電などのトラブルがあったと報告されている。その後、1965年米国のダムに潜水する際、ボイラーの湯をドラム缶に溜め、ポンプ、ホースによりダイバーのウェットスーツ内に送水したのが温水式加温服の始まりで、当時は温度コントロールも粗雑で軽い火傷を負った潜水であったと聞く。同じ年の1965年に米国海軍が行った SEALAB-II 潜水実験は水深62m、水温9℃の海中で行われたが、ウェットスーツを着用していた為に当初予定のダイバー水中作業時間を、大きく下回ってしまい、温水加温服の開発に拍車がかけられた。これまで加温式潜水服には、これら以外に化学反応により発生する熱を利用したものや、アイソトープを利用したものなどが試作されたが何れも実用には達しなかった。

2.3.1 温水式加温服 (HOT WATER SUIT)

温水式加温服は、ダイバーが装備する温水スーツと船上の温水ヒーター(ヒーターの熱容量は50,000キロカロリー/hr～150,000キロカロリー/hrと大容量である)及びホースから成り、原則的に海水を吸い上げヒーターで60～70℃に熱し、300～500mもあるホースから毎分20ℓ程度で送水する。温水は冷たい周囲の海水で熱を奪われ水中エレベーターを経由して、ダイバーへは約40℃で到達する。温水スーツはウェットスーツタイプで身体の隅々に温水が分配されるよう穴の開いたチューブ(このチューブは先端に行くほど径の大きな穴が開けられている)が配管されているとともに、服のサイズがルーズに仕立られ、温水が服内に十分回るよう配慮されている。約40℃で供給された温水は身体の各部ではほぼ適温の体温相当(37℃)になる。温水の供給量はダイバー1人当たり約10ℓ/分で通常2人用として毎分20ℓで船上から送水される。ダイバーを温めた温水は、スーツの開放部(襟、グローブ、ソックス)から外部へ流れ出る。

温水式加温服は、温水を利用している為、加温が迅速で服内が一様に温まる(服内温度分布は手足の先から体幹部まで温度幅が狭い)優れた加温効果がある。

海洋科学技術センターが実施しているニューシートピア実験でも水深300m(水温8℃)で温水加温服を使用し、一回当たり1時間を超える水中作業を延べ10回行った。このように200mを超える深海潜水ではダイバーを暖める温水を利用して、更に潜水呼吸ガスも加温し、ダイバーの体温損失を防いでいる。

2.3.2 電気式加温服 (ELECTRICAL HEATED UNDERWEAR)

電気式加温服は、船上から給電ケーブルで低電圧を送り、ダイバーが装備している電気加温下着を温めるもので船上設備が温水システムと比較すると軽便である特徴をもつ。電気加温下着はさながら電気毛布で手先から足の甲まで一面にニクロム線が配線されている。図5参照電気式加温服はドライスーツの下着として利用するが、感電等断線による加温不良や局部加熱等の心配から事前点検、修理にも手間取り、極めて限られた範囲で使用されている。しかし装置が軽便であることから将来、安全性を高めた電気式加温服の開発が期待されている。

2.4 大気圧潜水服 (ATMOSPHERIC DIVING SUIT: ADS)

これまで述べてきた潜水服は、水圧に曝されて潜水しているダイバーの装備品であるが、この大気圧潜水服は潜水服自体が耐圧能力(水深300～600m)を有するもので、中のダイバーは潜水船の乗組員同様に大気圧環境で潜水することができる、機能的には酸素供給装置、空気

写真2 ニューシートピア300mの潜水作業(イラスト)
温水加温服を使用している。

清浄装置等を備えているから通常の潜水服とは異なるが、形態が似ているため参考までに紹介する。

この服ではダイバーは加圧されないことから前述の環境圧潜水を超える深度の潜水も可能で、また減圧も不要なため、直ちに水面へ引き上げられメンバーの交替も容易に行える。大気圧潜水服では、短い訓練期間で操縦技術を習得できることから従来潜水機会の無かった科学者や水中土木工事の検査員等にも潜水機会が増すと期待され、宇宙服開発の成果を活かした画期的な運動機能を持つ大気圧潜水服も登場するなど新たな潜水技術(一人乗り・有索・大気圧潜水システム)としても注目されている。大気圧潜水服は概ね人の体型をした耐压服で、船上から吊りワイヤーで海底まで降ろされ、原則的に内部の人力つまり脚を動かすことにより関節脚部を動かして歩行する、また腕を動かし関節腕部を動かす、手でハンドル操作をシミュレーターを動かすなどして簡単な作業をこなす。操縦者は潜水用の保温下着を着装して操作するが大気圧潜水服の保温性と操縦者の発熱量から冷たい深海潜水でも強いて加温する必要はない。搭乗中のライフサポート(生命維持)は、酸素ボンベからの酸素の供給と、炭酸ガス呼吸を服内のスクラバー装置で行っており、通常の運用時間は数時間程で緊急時には72時間も

のライフサポート能力がある。大気圧潜水服の重要なのは関節で構成される脚部と腕部で、関節部を液体で満たし関節運動をスムーズに行うもの(JIMなど)とボールベアリングによるロータリージョイントで更にスムーズな動きにしているもの(NEWT SUIT)があるがいずれも腕や脚を人力で動かし移動・作業している。この分野の先進国である欧米では、約10年前より水深50~500mで学術調査と為の潜水、ワイヤーの切断、物品の回収、海洋構造物の点検作業などの比較的軽作業をこの大気圧潜水服で実施し、死亡事故ゼロの輝かしい記録を残している。

3. 潜水服の問題点

ダイバーが海中活動する際の作業服である潜水服は、ダイバーの体温を維持するとともに、岩礁等での鋭利な突起物から皮膚を守る役割も担っている。

後者の皮膚の保護は、肌を露出させない潜水服であれば容易に目的を達成できるが、潜水服は他に下記のような様々な性能が要求されている。

3.1 ダイバーの運動機能を妨げない。

潜水服は保温力を高めるために厚い生地が使われている。このため潜水服を着装しての作業性は悪い。保温力は低下させずに運動性能のより良い潜水服の開発が望まれる。

3.2 潜水服の浮力を一様に保てない。

水中を三次元的に自由に泳ぎまわるダイバーの浮力は中性浮力が望ましい。しかし発泡ネオプレン生地の潜水服では水圧による浮力の変動が著しく各深度で中性浮力を得るのは難しい。この為、スクーバダイバーは浮力調整具(BUOYANCY COMPENSATOR: BC)を着用しスーツの浮力が変動するたびにBC内の空気量を調整して中性浮力を維持している。

3.3 ダイバーの皮膚は乾かしておきたい。

陸上に適応している人間の皮膚は通常乾いている。皮膚が水に浸っているとふやけて傷付き易い、皮膚呼吸という点からも問題であろう。従って本来理想的な潜水服はドライスーツが考えられる、使い易いウェットスーツを超えるドライスーツの開発が望まれる。

3.4 服内の空気層は一様に保てない。

水中では身長分の水圧差が大きく、ドライスーツ内の空気層は低い圧力部分へ移動してしまう、水中で横臥等の水圧差の少ない姿勢では比較的空気層は一様となるが、通常の立位の姿勢では脚部と胸部の空気層は一様とはならない。従って空気層が確保される胸部では温かく、脚部ではスキーズぎみで寒い状態となる。ドライスーツの保温下着の工夫によりこの温度差を少なくする

図6 大気圧潜水服 (JIM)

3.6 浸水トラブルの無いドライスーツの開発

ドライスーツの防水部分（頸部、手首等）のシールは締めつけることで防水機能は向上するが、息苦しさを増してまでの防水対策は難しい。また、服内ガスの中へへの排気操作による浸水トラブルも起こり、全く浸水トラブルの無い「完全なるドライスーツ」の開発は容易ではない。

4. おわりに

海中活動を行うダイバーの潜水服について概要と問題点をこれまで紹介してきた。水中環境での活動の困難さを軽減するための潜水服をはじめとする潜水装備品も徐々に改良されてはいるものの、未だに多くの問題点を残している。しかし海中の厳しい環境の中でも更に快適な潜水服の開発によって、四面海で囲まれた我が国の水辺の作業、あるいはスポーツに、より理想的な防水服のイメージを重ねることもでき、潜水服の今後の開発に大きな期待が膨らむ。

図7 大気圧潜水服 (NEWT SUIT)

図8 ドライスーツの装着手順

引用文献

- 1) 山田, 村井, 潜水個人装備品 オーシャンエージ, 1978年, 5月号
- 2) U. S. NAVY U. S. NAVY DIVING MANUAL 1985
- 3) David Sisman THE PROFESSIONAL DIVER'S HANDBOOK 1982

- 4) 富安, 中村, 山田, ダイバーの体熱損失と保温に関する研究, JAMSTECTR 5 1980年
- 5) 山田, 門元, 他 ダイバーの加温システムの運用実験 JAMSTECTR 4 1980年
- 6) 山田, 温水加温服の効果について 第2回潜水技術シンポジウム講演集 1980年
(平成元年5月16日受理)

学生会員入会者 (12名)

	紹介者		紹介者
高橋晃一郎 (理科大)	金元 哲夫	森田 均 (京工繊大)	小西 孝
梁 傳 信 (農工大)	平林 潔	白井 美充 (信州大)	松沢 秀二
西村 修志 (群馬大)	新井 幸三	桂 精一郎 (東大)	佐渡 篤
沖原 巧 (京大)	片山 健一	山崎 洋一 (農工大)	佐渡 篤
長谷川 真 (東大)	白田 誠人	大野 直孝 (農工大)	佐渡 篤
西川 智 (信州大)	近田 淳雄	小澤 玲子 (東京家政大)	卜部 澄子