

● 経 験

大気圧潜水服を用いた潜水作業時の生体負担

榎木 暢雄* 中川 宏** 毛利 元彦*

深度300m級の大気圧潜水服を用いた潜水作業における、操作者への負担と内部環境を夏季と冬季に屋内プールにおいて測定した。

夏季：水温28～29℃での潜水服内温度は30℃以上、湿度は90%を越えるため、この高温高湿の内部環境は作業継続時間も制限することになり、また酸素や二酸化炭素の調節を含む、潜水服内環境ガス組成も問題になると思われる。歩行型では、海底の歩行移動や中層での作業は非常に困難であったが、スラスタの使用により大きく改善された。既存のマニピュレータのみでの作業性は制限されるが、専用機器の開発によりかなり向上すると思われる。非常に機動性と経済性に富んだ大気圧潜水服も、その操作にはかなりの訓練が必要で、内部環境は厳しく、温度環境要素は水中作業の制限因子になると思われる。しかし、観察や簡単な作業、また専用機器の開発によりかなりの作業能力を期待できるとと思われる。

キーワード：大気圧潜水服、作業負担、環境ストレス、心拍数、温度

Evaluation of Work load and performance in the operator within the One Man Atmospheric Diving Suit (OMADS) NEWTSUIT

Nobuo Naraki*, Hiroshi Nakagawa** & Motohiko Mohri*

*Japan Marine Science & Technology Center

**Toyama Diving Services

Work load and environmental stress were assessed in six human subjects working with a OMADS: Newtsuit, designed to work at a 300m depth in warm (28～29℃) and cold water (11～13℃) in an indoor pool.

Heart rate of the operator and chamber parameters of Newtsuit were monitored. Inside air temperature exceeded 30℃ and relative humidity exceeded 90% during dives in a warm water. When operators wore sufficient clothes for maintain direct contact with the inside wall of the Newtsuit, muggy conditions were aggravated. Oxygen and carbon dioxide control was judged in sufficient. Walking is a difficult operation, but this heavy work load was reduced by using a thruster. A training effect in work load was found

after several days exercise. Operator performance was limited with the Newtsuit hand manipulator.

Uncomfortable thermal conditions in the OMADS under warm water diving conditions appear to be the most important factor limiting work performance.

Keywords :

Atmospheric diving suit
Work load
Environmental stress
Heart rate
Temperature

はじめに

他給気潜水装置が実用化されて以来約150年、潜水深度の増大と潜水時間の延長により、潜水作業における最大の問題は減圧に関する点で集約されてきた。そのため“長期の減圧が不要で、自力で水中活動を行う”という願いを達成するために大気圧潜水服が考案された。しかし、大気圧潜水服にとって最大の問題は、水圧により押し込まれる

*海洋科学技術センター

**富山潜水サービス

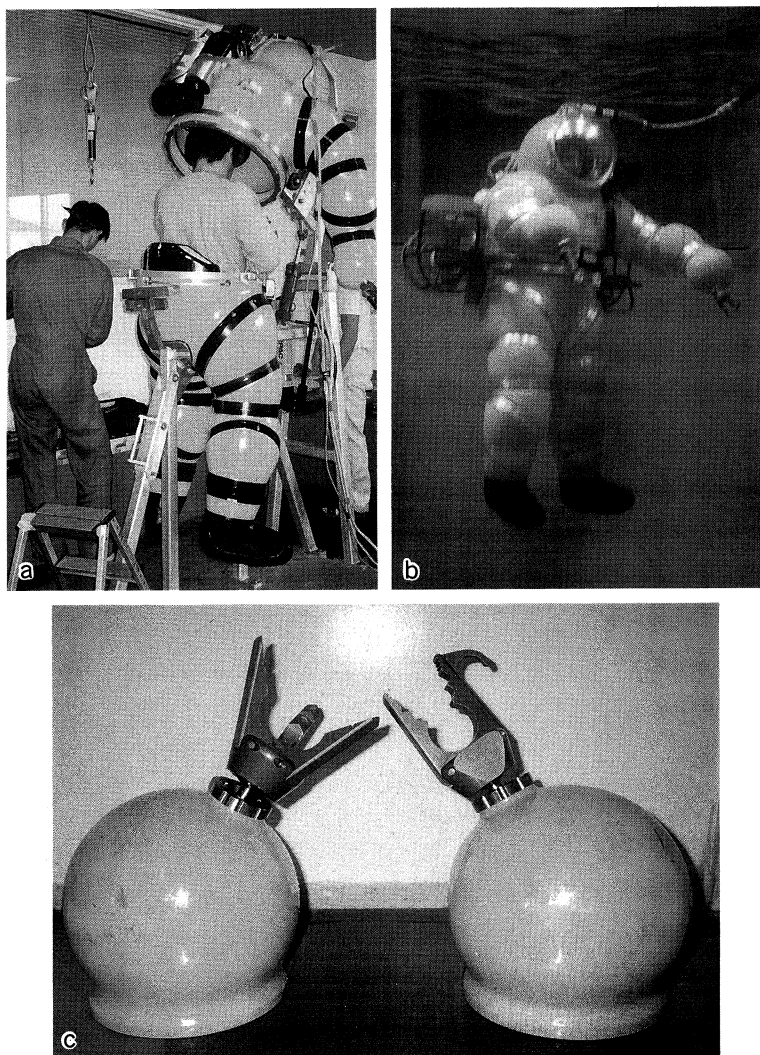


図1 Newtsuitの概観と実験状況

- a : Newtsuit (歩行型) の脱着時：胴部より上下に分離
- b : Newtsuit (スラスター型) 水中移動
- c : マニピュレータ

関節部の動きを如何に滑らかにするかであり、実用機として1970年代始めにかけて開発されたGALEAZZIやJIMなどが登場した^{1)~4)}。

大気圧潜水服は、OMADS (One Man Atmospheric Diving System)に分類され、この種の潜水機器は近年20年で約200機が生産されている。また軽量化と関節機構の改良、さらにスラスターやTVカメラの装備により、超小型潜水作業艇に近

くなっている。その中でも注目を集めているのが、本実験で使用した深度300mまでの潜水作業が可能なカナダHard Suit社製のNewtsuitである。Newtsuit本体は、最大でも約100kgの部分に分解でき、昇降機を含めても1tに満たないため、車両やヘリコプター等での運搬が可能である。さらに作業現場到着後2時間以内に水深300mでの作業が、また作業終了後は1時間以内に完全な撤収が

可能である。またこのシステムの運用人員数は、潜水服の操作者のダイバーを含めても5名と少数で、消耗品も原則としてダイバー消費による酸素と二酸化炭素吸収剤のみである。しかし、大気圧潜水服は機動性や経済性を追求し過ぎたためか、その操作者への負担はあまり研究されておらず、特殊環境下の装置の常として、ヒトを装置に合わせることにより、作業を遂行していると思われる。そのため、本研究は大気圧潜水服の操作者への負担と、その影響因子である潜水服内の環境条件を調査した。

Newsuitの概要（富山潜水サービス所有）

本体はアルミニウム合金製で、その重量は歩行型で285kg、スラスター型で350kgであるが、水中重量は錘により調節し、歩行型で13~17kg、スラスター型で2~3kgとした。ダイバーの体格差は、胴部と下腿部への各種スペーサーの挿入により調節できる。

関節部は、四肢全体で20個の部分とロータリージョイントより構成されており、ダイバーのNewsuitへの出入(脱着)は、上下に切り離された胴部より行う(図1 a)。

スラスターの操縦は靴の中敷状のフットペダルにより行い、中性浮力状態を得るトリム機構を持ち、その最大速度は約1.5ノットである(図1 b)。作業用の2指と3指のマニピュレータは、360°回転可能で、軸も手先端において40°の角度変更が可能であり、またものを掴んだまま固定することも可能である(図1 c)。

顔面前部の観察窓は、曲率半径約15cm、厚さ2cmの亚克力製で、半球状の視野が確保されており、つま先を見ることもできる。

内部環境ガスの調節は原則として、二酸化炭素を腰背部のスクラバーにより吸着除去し、減少した酸素を外背部の酸素ボンベより補給する。酸素濃度計は装備されているが、二酸化炭素濃度計は装備されていないため、二酸化炭素は酸素濃度と内部圧力より推測することになっている。

携帯できる酸素の量は大気圧換算で約1,000リットルで、安静状態では約50時間のダイバーの酸素消費を補充できる。酸素濃度の管理は、二酸化炭素吸収により生じる内部圧の低下を検知し酸素を添加する自動系と、酸素濃度計の指示により行

表1 Newsuitによる潜水作業手順

項目	所要時間
座位安静 (Suit 外)	7分
座位安静 (開放 Suit 内)	7分
Suit 装着	10分
座位安静 (閉鎖 Suit 内)	7分
潜 降 (チェック, 水中重量)	10分
水中立位安静	5分
作 業 (移動)	10分
作 業 (シャックル作業) (プール: 中層と底部)	10分
浮 上	10分
Suit 脱	10分
座位安静 (Suit 内)	7分

う手動の2系統がある。

二酸化炭素吸収能力は約2,000リットルで、スクラバー用換気ファンが作動しない場合に供え、スクラバー直結のマスクも装備されている。しかし、スクラバーの乾燥による吸収能力低下防止もあり、徐湿装置は装備されていない。

方 法

実験は、深度300m仕様のNewsuit:歩行型とスラスター型の2機種を用い、水深5mの室内プール(4.5m * 5.5m)において、夏季9月(水温:28~29℃)と冬季1, 3月(水温:11~13℃)に、延べ33回の潜水作業を6名のダイバーで実施した。

潜水服の内部環境条件として気温、湿度、内部壁温、酸素濃度を、またダイバーの心拍数を携帯メモリー式記録装置(VINE社製MAC-DUO VM2-001)により測定した。

酸素濃度の分析には、泰栄商工KK社製の携帯式酸素モニターOM-25ANL、湿度と内部ガス温の測定には、VAISALA社製被服用温・湿度計HMP133YSを用い、各測定機からの出力電圧を安立計器KK社製データコレクタ:AM-7052で1分毎に記録した。また内壁表面温度は下腿と頭

表2 被験者の身体的特性

ダイバー	身長(cm)	体重(kg)	年齢(歳)
A	172	63	30
B	165	72	27
C	163	65	28
D	169	58	33
E	175	66	24
F	170	60	22

部で、環境ガス温は腿部、腹部、頭部を1分間隔で安立計器 KK 社製の熱電対記録装置 AM-7001 により測定した。

潜水作業は表1に示すように、移動(歩行、スラスタ遊泳)、シャックルの脱着とし、測定1回の所用時間は約100分で水中滞在時間は45~50分とした。なお表1に記した所用時間は、機器の調節等で厳守できず目標時間とした。

実験に参加した6名のダイバーは全員とも通常の潜水作業の熟練者で、9月と1月の実験はA, B, Cの3名とし、3月の実験はC, D, E, Fの4名で、延べ33回の潜水作業を行った。またダイバーAは、Newtsuitの潜水作業経験時間が約100時間と豊富で、その他は初体験もしくは、数時間の経験のみであった。さらにダイバーB, Cは日常的に運動等を行っており、最大酸素摂取量が各々3.2リットル/分と3.7リットル/分であった。表2にNewtsuitの運動性に大きく影響するダイバーの体格を示す。ダイバーの服装は、潜水服内壁や関節端部に触れるため、ドライスーツの下着や上下繋ぎ服や厚手の靴下と手袋を着用した。

結 果

夏季実験ではNewtsuitの装着後数10分で内部環境温は30~32℃、湿度は95%以上と非常に蒸し暑く、いっぽう冬季は低水温のため内部壁温が12~13℃、内部環境温は15~18℃、湿度は80~90%と、高温ではあるが夏季に比べかなり快適であった(図2)。さらに内部酸素濃度の変動が大きく、作業時の低下や手動添加による上昇が認められた。

作業時の心拍数の最大値は、ダイバーA, B, Cにおいてはほとんど作業条件で150bpmで(図3)、またダイバーE, Fにおける実験初日(事前に数時間訓練のみ)には、最大心拍数が約180bpmと高い値を示した(図4)。高い心拍数を示した項目は、歩行、シャックル作業、前傾姿勢作業、スラスタを用いた中層のシャックル作業であった。しかし数日の訓練後には同一内容の作業に対して、実験初日ほどの心拍数の増加が認められず、訓練効果が顕著に認められた(図4)。また数回の潜水実験では作業後に頭痛を訴えることがあった。

考 察

1. 内部環境

Newtsuit内の温熱環境に関する報告はほとんどないが、1950年代から1960年代にかけての斉藤一や三浦豊彦らによる一般的な高温環境下の作業に関する研究では、高温環境下の裸体における体熱放出は、環境温が28℃程度までは皮膚血管反応によるが、それ以上の環境温では発汗蒸散による。また熱中症等が発生する環境を温度33℃以上、湿度75%以上としており、その時の作業従事者の心拍数を約150bpmとしている⁵⁾。

本実験でダイバーが着用していた衣類の熱抵抗値は1.5~2.0cloと思われ⁶⁾、また二酸化炭素の吸収による発熱量は代謝産熱量の約2割に相当し、潜水服内の総産熱量は安静時に約100W、また作業時には400~600Wにも達することからも⁷⁾、高温条件下の大気圧潜水服作業に対する早急な解決策が待たれる。

また、同様の問題は以前から指摘されており、Newtsuitの先駆的：JIMにおける水温30℃の潜水作業では内部に水筒を持ち込んだり、また水温20℃の条件下の作業に比べ短時間で作業を完了するという結果も、一刻も早くその環境から逃避したいがため懸命に作業を行ったことによるとしている⁸⁾。

日本近海の太平洋側では水深数百メートルの水温は季節変動は少なく、冬季実験の水温とほぼ同じ10℃~15℃であるため大きな問題にはならないが、夏季の浅海潜水や低緯度地域における潜水作業では、内部の温度条件は作業遂行上最大の問題になると思われる。

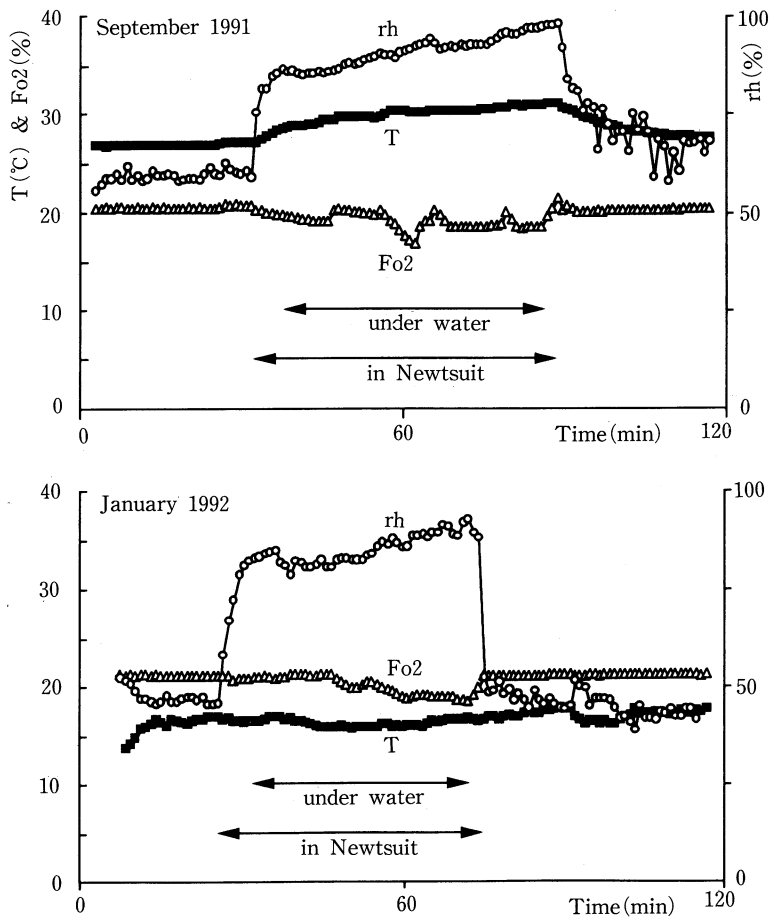


図2 夏季、冬季実験における Newtsuit 内部環境

(1991年9月10日, 13時~15時, 水温: 28.5°C)

(1992年1月16日, 13時~15時, 水温: 12.0°C)

T: 温度(°C), rh: 相対湿度(%), Fo2: 酸素濃度(%)

一方、大気圧潜水服が高熱伝導性のアルミニウム製であるため、氷海等での潜水作業では、ダイバーが内壁へ直接接しない場合でも、輻射による体熱喪失は非常に重要な問題になるとと思われる。

内部の酸素濃度の調節に関して、安静時の過剰酸素状態や作業時に低酸素状態と、酸素濃度変動が大きいことを示した(図2)。潜水服内部容積は約200リットル、そのうちガス容積は約100リットルと仮定でき、さらに内部のガスは関節部における通気は少なく、呼吸できる頭部付近のガス量は

約50リットル、その酸素の量は10リットル以下であると考えられる。そのため、酸素濃度が作業強度により大きく変動したと思われる。一般に低酸素の影響としては、16%程度以下での頭痛や呼吸困難が報告されている⁹⁾。

通常の使用条件において Newtsuit の二酸化炭素吸収能力に問題はない設計であるが、潜水作業後に訴えられた頭痛の原因として、二酸化炭素濃度の上昇も考えられるため、二酸化炭素濃度計の装備が望まれる。一般に二酸化炭素の安全な吸気水準は0.5%以下とされており、高二酸化炭素の影響

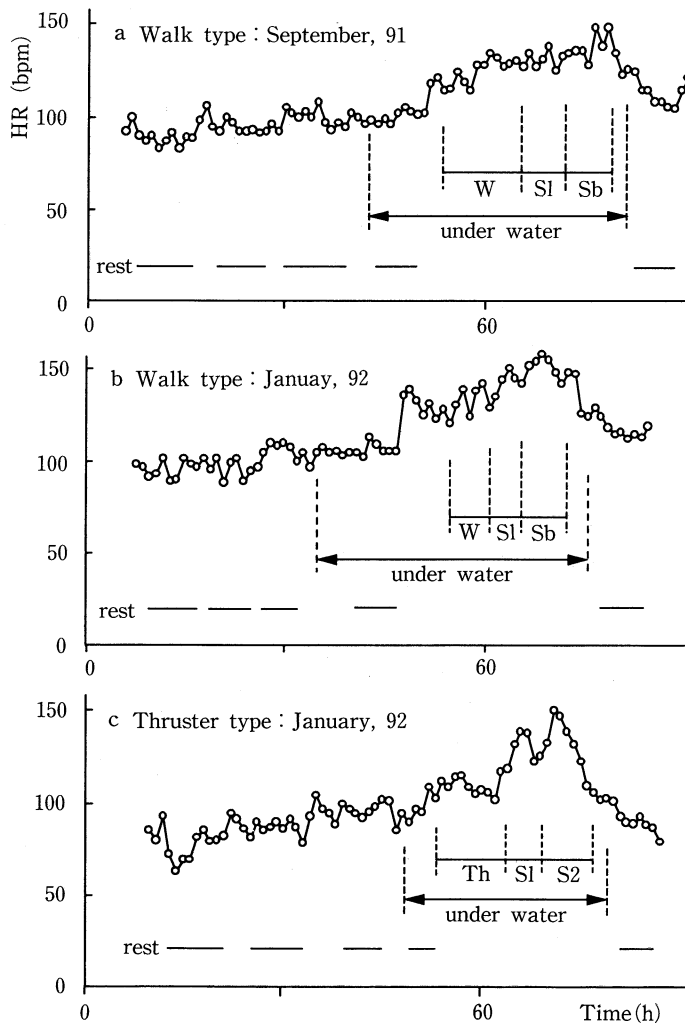


図3 Newtsuit 作業時の心拍数 (ダイバー B)

a : 歩行型 (Walk type) : 1991年 9月10日

b : 歩行型 (Walk type) : 1992年 1月16日

W : 歩行移動, SI : 立位のシャックル作業,

Sb : 底部前傾姿勢のシャックル作業

c : スラスタ型 (Thruster type) : 1992年 1月15日

Th : スラスタ移動, SI : 立位のシャックル作業,

S2 : スラスタによる中層のシャックル作業

rest : 待機安静

響としては、1%~2%以上から呼吸量の増加やときには頭痛が見られる¹⁰⁾。

2. 作業・運動性

運動性能に及ぼす水中重量の影響は大きく、数

kgの水中重量不足では歩行、前傾作業、方向転換が難しくなり、数kgの過剰では傾斜からの復帰が困難となった。さらに、マニピュレータの動力源が腕力といっても、あまり肩幅が広いダイバー

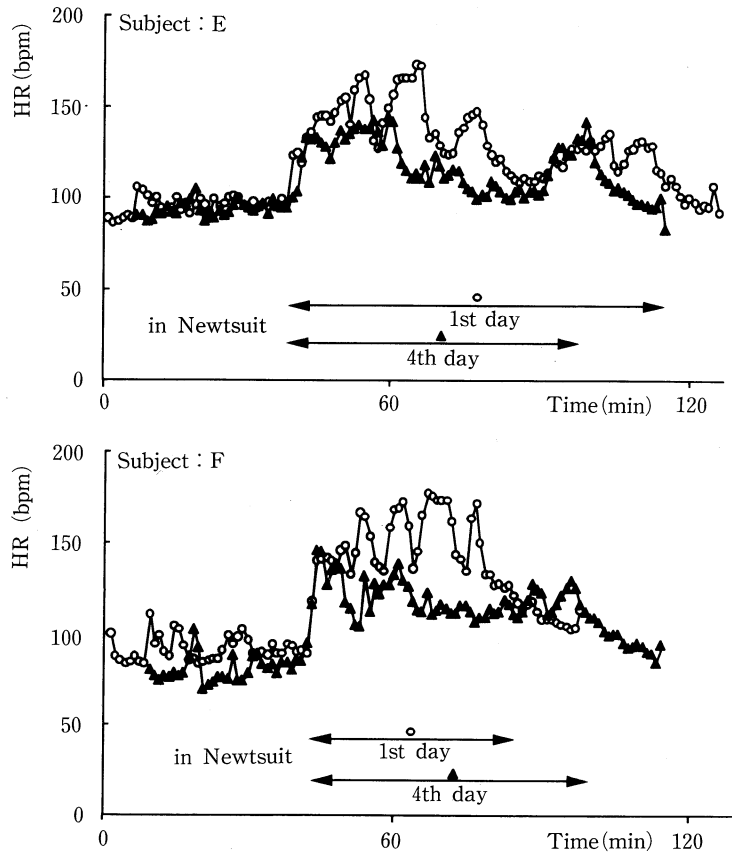


図4 Newtsuit 作業の訓練効果と心拍数(ダイバーE, F)
実験初日と実験4日目のほぼ同一作用時の心拍数

では、上肢を潜水服の肩関節部から抜くことができず、頭部周囲に配置されている諸機器の操作や、覗き窓の曇り除去等の操作ができない。

下腿部と胴部にスペーサーと呼ばれる延長部品を挿入し、体格差をある程度解消しているが、適性身長は165~185cm、体重は85kg以下程度と思われる。

歩行速度は平易なプールの底において、熟練者でも10~15m/分とおそいが、高さ40~50cmの障害物を越えることはできる。歩行による移動は、海底条件によっては非常に困難であると思われる。関節部の最大可動角度は60~90°であるが、ヒトの関節の動く方向とロータリジョイントの回転方向が90°で直接関節を開閉できないため、的確に作業を遂行するにはかなりの力と訓練を要すると

思われる。

スラスタ型ではトリム機構により中層での作業も十分可能で、歩行型に比べ移動におけるダイバーへの負担は非常に小さかった。しかしスラスタ型では自重不足のため、スラスタが使用できない懸濁し易い海底における目標物への最終接近の歩行や、数kgでも力を要する作業は反力のため困難である。

マニピュレータによるシャックルの脱着作業は数時間の訓練で可能に、また5~6時間の訓練でスラスタ型による中層(ホバリング状態)のシャックル作業が可能になる。既存のマニピュレータでは、指の形状や握力等の問題により熟練者でも簡単な作業しかできないが、マニピュレータ専用機器の開発により、かなりの作業が可能になる

と思われる。

海底の作業を想定した伏臥姿勢での作業においては、環境圧潜水では体重を意識しないが、大気圧潜水服では内部のダイバーに通常の重力がかかり、肘や腹部で体重を支えつつ作業を行うため、ダイバーへの負担はかなり大きくなる。さらにスラスタ型では自重で伏臥位をとれないため、スラスタの前進（ペダルスイッチの右つま先）と潜降（左つま先）の同時操作により伏臥位を保つため、スラスタの微調整が必要となり、負担もそれだけ大きくなる。さらにプール底部での前傾操作中、過剰の前傾からあわてて復旧しようとした際に通常のように両つま先に力を入れるため、さらに前傾を強めたこともあった。そのため機動性や運動性が向上したスラスタ型では、安全性確保のために無意識的にもスラスタを操縦できるよう訓練する必要があると思われる。

球面の覗き窓による視界の歪みは、初心者にとって距離の目測や目標への接近等に問題があった。また Newtsuit は、自重と水中重量の関係で動作時には揺れる状態に近く、さらに立位においても潜水服の腰部にほぼ座った状態であり、歩行時でも下肢に体重を感じないため、人によっては乗り物酔いと同様となる。しかし、視界の異常や揺れによる酔いには、数時間の訓練で慣れることができた。

本研究では心拍数により Newtsuit を用いた潜水作業時のダイバーの生体負担量評価を試みた。しかし、夏季の潜水作業は冬季の高心拍数を示した作業より数段過酷であったとの被験者の感想、精神的緊張を要する中層シャッフル作業（図3）、訓練効果による心拍数の低下（図4）等を考慮すると、装置等の都合で制限された実験であったといえども、温熱環境条件、運動作業量、精神的緊張、さらに訓練効果等の要因を含む生体負担の計測限界を改めて知った。

深海潜水作業全体において、大気圧潜水服による作業内容は飽和潜水作業の水準に達していない。今回の実験に参加したダイバーの1人は300m級の飽和潜水に数回参加しており、彼の意見からも大気圧潜水服は作業内容と訓練次第では、専門家による飽和潜水作業の事前調査や事後の保守点検、また飽和潜水における救難用として利用できそうで、今後マニピュレータ専用機器の開発によ

りその作業性は高くなるとと思われる。

ま と め

深度300m級の大気圧潜水服(Newtsuit)を用いた潜水作業時の、操作者(ダイバー)への負担と内部環境を夏季と冬季に屋内プールにおいて測定した。高水温域での作業時内部温度は30℃以上、湿度は90%を超えるため、この高温高湿の内部環境は作業継続時間も制限することになる。また酸素分圧や二酸化炭素分圧の調整を含む、潜水服内環境ガス組成も問題になるとと思われる。

歩行型では、海底の歩行移動や中層での作業は非常に困難であり、また行動性が非常に改善されたスラスタ型でも、海底等の条件によってはスラスタが発生する水流による混濁により、作業の遂行が困難になることも考えられる。現有のマニピュレータのみではその作業性に制限されるが、今後のマニピュレータ専用機器の開発によってはかなりの作業が遂行できるとと思われる。また、球面の覗き窓による視界の歪みと遠近感の異常、また揺れる閉鎖環境による“酔い”は、訓練によりかなり克服される。

非常に機動性と経済性に富んだ大気圧潜水服も、その操作にはかなりの訓練が必要で、内部環境は厳しく、温度環境要素は水中作業時間の制限因子になるとと思われる。しかし、観察や簡単な作業、また専用機器の開発によりかなりの作業能力を期待できるとと思われる。

【参 考 文 献】

- 1) Bachrach, A. J., JIM-An armored diving system. In: Miller J. W., ed. Proceedings, Fourth joint meeting of the panel on diving physiology and technology, the United State-Japan cooperative program inn natural resources (UJNR), Buffalo, NY. Rockvill, MD: National Oceanic and Atmospheric Administration. 1978
- 2) Berry, Y., P. Gavarry, J. P. Hubert, J. Le-Chuiton et J. Parc, Tourell d'observation et scaphandre rigide. In: La Plongee et l'intervention sous la mer. Arthaud p380, 313-317. 1977
- 3) Curley, M. D. & A. J. Bachrach, Operator performance in the one-atmosphere diving system JIM in water at 20°C and 30°C, Undersea

- Biomed. Res. Vol.9-3, 203-212. 1982
- 4) Fridge, D. S., Atmospheric suit designs challenge deep hyperbaric diving methods. Off-shore, Vol.37-5, 140-141. 1977
 - 5) 齊藤一, 三浦豊彦: 日本の高圧労働—その実態と対策— p289 労働科学研究所出版 1978
 - 6) 岩永光一, 三木美穂子, 横山慎太郎: 温熱, 佐藤方彦監修, 人間工学基準数値集式便覧, 技報堂出版, p333-353, 1992
 - 7) 古賀俊策, 植木暢雄, 横山慎太郎: エネルギー代
謝, 佐藤方彦監修, 人間工学基準数値集式便覧,
技報堂出版, p197-211, 1992
 - 8) Curley, M. D. & A. J. Bachrach, Tactile Sensitivity in the One-Atmosphere Diving System JIM, Human Factors, Vol. 23-3, 291-297, 1981
 - 9) 松田和也, 三木美穂子: 化学的環境, 佐藤方彦監修, 人間工学基準数値集式便覧, 技報堂出版, p400-406, 1992
 - 10) 三浦豊彦: 労働の衛生学, 大修館書店, p316, 1972