

● Young Scientists Corner

飽和潜水の生理学的研究に就いて

檜木 暢雄*

はじめに

私が潜水生理学と出会ったのは、学生時代にテキストとして渡された S. K. Hong 博士の海女に関する論文でした。Hong 博士と私が所属する海洋科学技術センター（以下：海洋センター）は、現在も潜水生理学の分野において種々の共同研究を行っています。

また、この分野の研究に直接触れたのは、オイルショック対策と海洋開発が叫ばれていた約20年前の秋、指導教官の指示により海洋センターにおける“飽和潜水実験：Sea-Dragon I（保圧深度100m，エクスカッション深度140m）”の計測補助として参加したことでした。

その翌年の夏には、深海飽和潜水の現状も知らず、憧れだけでフランスのマルセイユでこの分野に飛び込み、その道中も華やかなパリは素通りし、パリに着いた翌日には夜行列車でマルセイユ入りしました。

マルセイユでは、担当教授が責任者であった国立科学研究所（CNRS）の高圧生理学部門（GIS）で、到着の翌週から言葉の不自由さも省みず、研究に没頭したことを覚えています。

巖窟王で有名なイフ島を旧港の入り口にもつマルセイユ、その北方約10kmにある北医学部内にあった研究所で、日本における南仏：プロバンスブームとは無関係の生活をその後6年ほど続けました。

フランスの有人深海潜水の研究には二つの流れがあり、一つは海洋生物学者クストーが創設し、60～70年代に活動した通称“セマ CEMA : Centre d' Etudes Marines Avances”があり、1960年代初めに深度数十メートルでの海底居住実験

“Precontinent シリーズ”があります。また、陸上における模擬潜水実験設備では、シュトー教授を中心に有人潜水実験や山羊などを用いた深度1000m 付近までの動物実験が実施されましたが、1970年後半に CEMA は閉鎖されました（図1）。

また、もう一つの流れは、現在も海底油田関連の深海商業潜水を実施し、さらに水素潜水技術の開発等で活動中のコメックス COMEX 社です。この水素潜水は、約10年間の実用化研究の後、5年前に水素-ヘリウム-酸素の三種混合ガスを用い、深度701m の有人模擬潜水実験“HYDRA-10”に成功しました（図2）。

私がいた研究所：GIS は、“CEMA”，“COMEX”双方の流れを受けながら、独自の動物実験の他、COMEX や仏海軍との共同研究を行っていました。高圧実験設備としては、最大150～250気圧の小、中型動物用チェンバーが数機と細胞標本実験用のものが1機あり、その構造は横方向開閉式や上部開閉式、左右両端開閉式等と、研究者の使い勝手を考慮した設計となっていました（図3）。

私の研究テーマは“100～120気圧：深度1,000m～1,200m までの高圧ヘリウム酸素環境下の呼吸・体温調節機能”で、ネコを用いた動物実験が主でした（図4）。

その概要は、体温調節反応の発現環境温に及ぼす深度（環境圧）の影響の研究で、体温調節項目として Panting, 皮膚血管拡張・収縮、寒冷による最大酸素消費の発現環境温を見るものでした。体温調節の発現環境温域値は深度の増加に伴い上昇し、また各体温調節反応発現閾値の間隔も狭くなっており、深度1,000m, すなわち100気圧近い高圧ヘリウムの環境下の適温は、平均皮膚温とほぼ同じ34～35℃、幅も深度0m 空気環境の数分の1になっています（図5）。

*海洋科学技術センター、海域開発・利用研究部



図1 CEMA : Centre d' Etudes Marines Avances 潜水高压医学研究施設 (フランス=マルセイユ) とシュトー教授 (右)



図2 COMEX で実施された水素, ヘリウム, 酸素を用いた深度 701m 有人潜水実験成功の新年用記念カード

海洋センターでは約25年前の設立以来8年前の実現まで、深度300mまでの安全な実海域潜水実験の遂行を目指していました。そのため帰国した14年前当時、海洋センターにおける最初の研究テーマは、フランス時代からの延長で呼吸と体温調節関連でした。特に水深300mの水温は5~10℃と低いため、ダイバーは加温された高压のヘリウム酸素混合ガスを呼吸しており、その吸気加温装置が作動しない場合を想定し、低温の高压ヘリウムガス呼吸が体温に及ぼす影響を研究しました。

深度300mの適温環境下(32℃)における20分間の吸気温5℃の低温ガス呼吸の結果、鼻孔より25cmの気管分岐点の食道温は2~3℃、鼻孔より40cmの心臓真裏の食道温は0.7~0.8℃、鼓膜温も0.7~0.8℃低下しましたが、直腸温の低下は0.2~0.3℃のみでした。このことは、低温の高压ヘリウムガス呼吸により、頭部、胸郭の深部が直接冷却されたことを示しています。またこのような場合、直腸温は深部体温のよい指標ではないことが明らかになりました(図6)。

その後は、より安全で快適な深海潜水をめざし、海中作業実験船“かいよう”を用いた深度300mまでの実海域実験に参加しました(図7)。“かいよう”は、船内の居住用チェンバー(DDC: Deck Decompression Chamber), 作業現場の海底とDDCの間を往復する水中エレベータ(SDC: Sub-

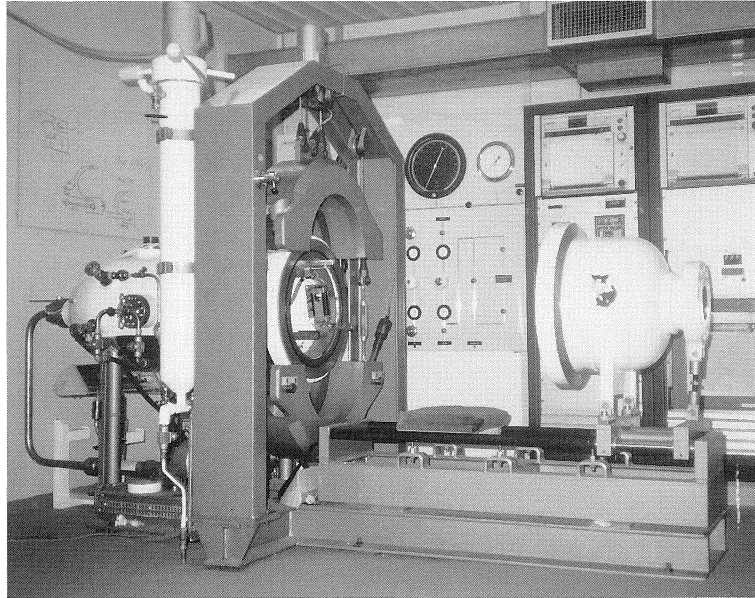


図3 フランス国立科学研究所(CNRS: Centre National Recherche Scientifique) マルセイユ高圧生理学部門(GIS)の中型動物実験用高圧タンク(Caisson 225)

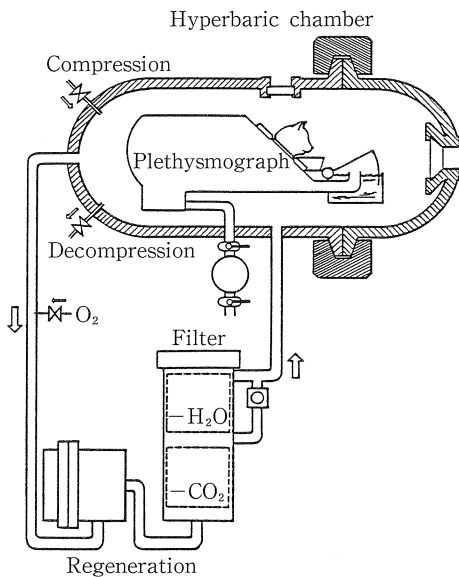


図4 フランス国立科学研究所(CNRS)マルセイユ高圧生理学部門(GIS)の中型動物実験用高圧タンク関連装置概略図
呼吸量測定用ボディプレティスモ内のネコ

mersible Decompression Chamber) より構成され、ダイバー2名とSDC内に残る補助者: テンダー1名の呼吸ガスと加温用温水は海面の船より供給されます。昼間は潜水作業中のダイバーとテンダーの状態を有線と携帯式心拍計で測定しました。

当初、ダイバーの作業はテンダーより負担が大きいと想像していましたが、心拍数からみた負荷量とダイバーからの聞き取り調査では、ダイバーの生命を預かる責任感と狭いSDC内部での中腰作業などのため、テンダー作業の方がダイバーに比べて負担が大きく、テンダーの心拍数はダイバー以上になることも度々でした(図8)。

また夜間は、船という限られた空間と機材、さらに睡眠を妨げない方法として、テレメータ式的心電図測定を行い、心拍数、心拍変動等のon-line解析により、起床時には一晩全体の1分毎の心拍数、心拍変動が得られ、睡眠状態の把握に有用でした。

また、近年はこれまでの心電図解析の流れを受け、地上のシミュレーション潜水実験においても、呼吸、心電図RR間隔解析による自律神経機能等

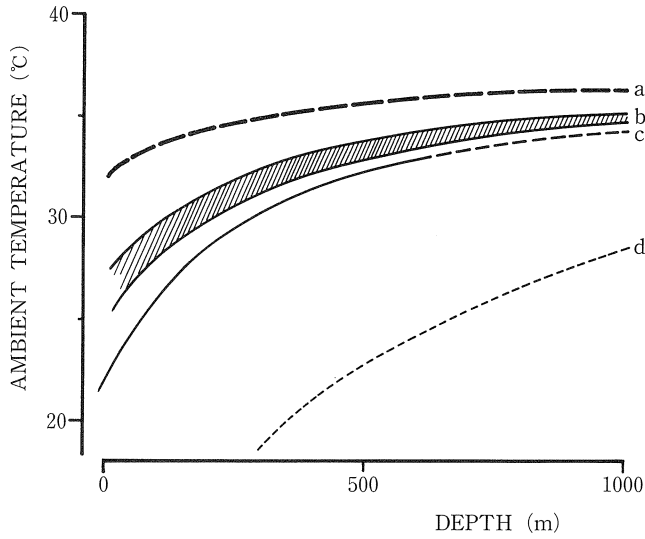


図5 深度1,000m:100気圧までの高圧ヘリウム酸素環境下のネコにおける体温調節反応発現環境温
 a:パンティング b:皮膚血管拡大 c:皮膚血管収縮
 d:寒冷に対する最大酸素摂取

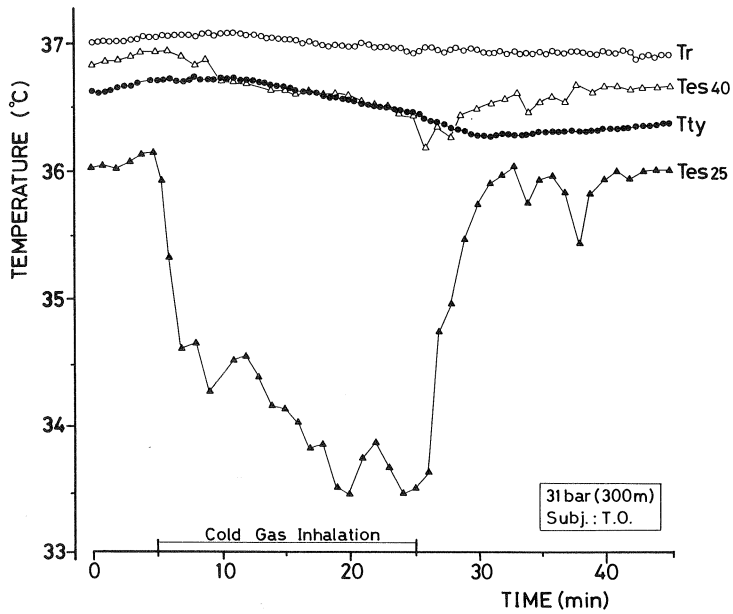


図6 深度300m:ヘリウム酸素31気圧環境下の低温ガス呼吸時の深部体温低下。吸気温約5°C,低温ガス呼吸20分間
 Tr:直腸温, Tes40 & 25:鼻孔より40 & 25cmの食道温, Tty:鼓膜温

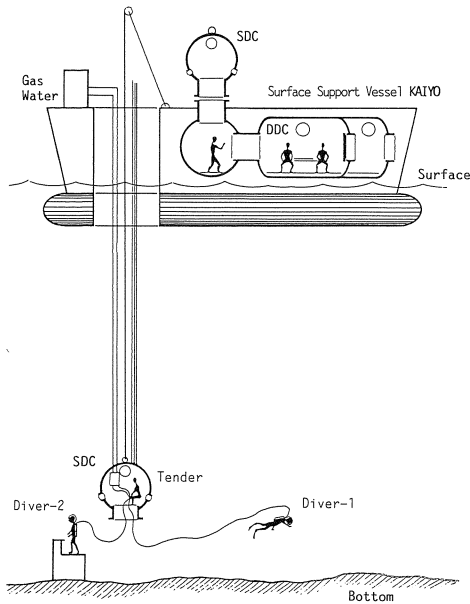


図7 海中作業実験船“かいよう：KAIYO”の深海潜水設備概略

かいよう：半没水型双胴船3,500t,
 居住用高压タンク DDC:Deck Decompression Chamber
 水中エレベータ SDC:Submersible Decompression Chamber

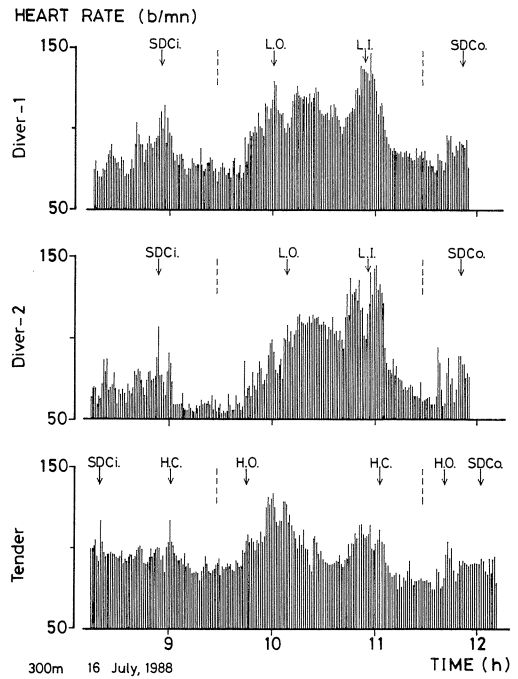


図8 深度300m 飽和潜水時のダイバー2名とテンダーの心拍数

SDCi: SDC 乗込み SDCo.: SDC 退出
 LO: ロックアウト (SDC からの泳出)
 LI: ロックイン (SDC への泳入)
 HO: SDC 下部ハッチ開放
 HC: SDC 下部ハッチ閉鎖

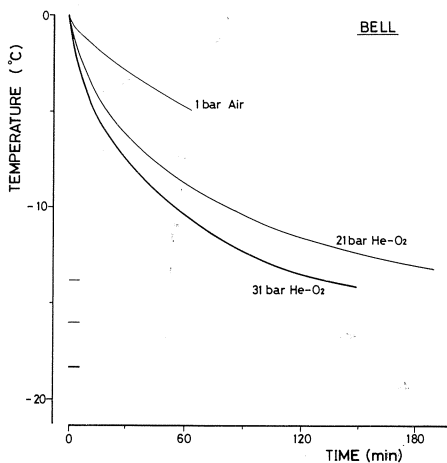


図9 加温用給湯停止時のSDC内部環境温低下度

深度 0m: 1気圧空気環境 初期温度26°C
 水温: 11.8°C (冬)
 深度200m: 21気圧ヘリウム酸素環境 初期温度28°C
 水温: 13.4°C
 深度300m: 31気圧ヘリウム酸素環境 初期温度29°C
 水温: 10.2°C

やテンダーの中腰姿勢の負担や高压環境下の平衡機能の研究を行っています。

さらにダイバーの生死に関連する温熱の問題として、海底にあるSDC：水中エレベータへの加温用温水供給が停止し、しかもSDCの回収が不可能な状況下で、内部にいるダイバーとテンダーの体温低下を試算しました。

日本周辺の水深と水温の関係において、浅海の水温は季節や海流の影響を受けますが、深度300m付近では季節差も少なく、約10°Cとかなりの低温です。深度200m, 300mの海中にあるSDC(高压ヘリウム酸素充填)の加温用温水を停止した場合、内部環境温は急速に低下します(図9)。そのようなSDC内のダイバーの体温を試算すると、深度300m条件下では、蘇生率50%といわれている直

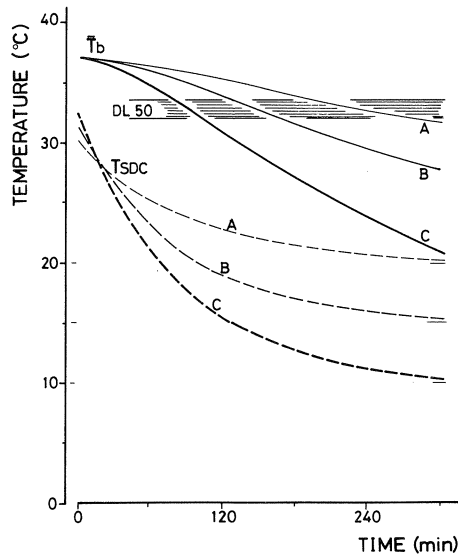


図10 加温用給湯停止時のSDC内部乗員の深部体温低下の推定

実線：深部体温 破線：SDC内部温

A：深度100m He-O₂

B：深度200m He-O₂

C：深度300m He-O₂

腸温が32～33℃に低下するのに、80～100分という短い結果を得ました(図10)。

以上のような、潜水者が直接水中で活動し、その身体は深度に相当する水圧を受ける環境圧潜水の他、潜水者は固い耐圧容器に守られ、常に大気圧空気下にいる大気圧潜水服のダイバーや、潜水調査船パイロットの潜水作業負荷について研究を行ってきました。負荷の少ない夢の潜水方式と思われるやすい大気圧潜水も、状況によっては、操作者にとってかなりの負担となることが判明しました。

数年前までは、世界各国で行われていた有人深海潜水の研究も、近年その最大の需要先である海

底油田開発において、原油価格の下落によるその採算性の問題、また潜水作業の機械化、自動化等により、その研究熱が世界的に低下していることも事実です。

これまでの飽和潜水技術の研究開発の方向は、より大深度へ、また潜水作業の内容が主として筋力的なものでありました。海洋科学技術センターでは、今後の飽和潜水研究の方向として、深海飽和潜水技術を保持しながらも、海底研究室などを含めた海中研究手段としての潜水技術、長期の観察等が必要な海洋生物学や生態学研究の支援技術としての、より負担の少ない浅海飽和潜水技術の確立を目指しています。