

【 原 著 】

高圧ヘリウム・酸素混合ガス環境下における 視覚事象関連電位のP300成分の特徴

小沢浩二¹⁾, 岩川孝志²⁾水中科学研究所¹⁾防衛省 海上自衛隊 潜水医学実験隊²⁾

【要約】

高圧環境が事象関連電位のP300成分に及ぼす影響について検討するために、2回の4.5 MPa (440 msw) ヘリウム・酸素混合ガス模擬飽和潜水時に、12名の職業潜水員から3チャンネル (Fz, Cz, Pz) の脳波を測定した。脳波の測定は4.5 MPa 保圧第1日に行い、視覚オドボール課題によってP300を誘発した。4.5 MPa 環境下では、視覚オドボール課題は加圧前と同程度の正確さで行われていたが、標的刺激に対する短母指屈筋の筋放電潜時と反応時間には遅延が生じており、認知機能の低下が示唆された。P300は4.5 MPa 環境下においても全ての職業潜水員に認められ、聴覚オドボール課題を用いた先行研究により報告されていた高圧環境下でのP300欠落現象は起こらなかった。本研究では、視覚刺激の処理が必要な課題を用いたことにより、4.5 MPa 環境下での測定中にも然るべき覚醒水準が維持されたために、P300が出現したものと考えられた。4.5 MPa 環境下のP300には、頂点振幅に変化はなかったものの、頂点潜時に僅かな遅延が認められた。このような特徴から、高圧ヘリウム・酸素環境下では外部刺激を評価する機能が軽度に低下しているのではないかと推論された。

キーワード

深深度模擬飽和潜水, 大脳誘発電位, 筋電図, 反応時間, 認知機能

【Original】

Characteristics of P300 component of visual event-related potential under hyperbaric heliox environment

Koji Ozawa¹⁾, Takashi Iwakawa²⁾

1) Research Institute for Underwater Science

2) Undersea Medical Center, Japan Maritime Self-Defense Force, Ministry of Defense

Abstract

Effects of hyperbaric heliox environment on the P300 component of event-related potential (ERP) were investigated in 12 professional divers. Three channels of EEG (Fz, Cz and Pz) were recorded during two simulated 4.5 MPa (440 msw) heliox saturation dives. EEG measurements were done on the first day of the pressure-holding stage and a visual oddball task was used to elicit P300. Changes in the performance of the visual oddball task indicated that hyperbaric pressure caused mild deterioration in cognitive function under 4.5 MPa. Although P300 omission under hyperbaric heliox environment was reported in a previous study using an auditory oddball task, P300 was distinctly recorded from every diver under 4.5 MPa. We inferred that performing the visual oddball task helped maintain an adequate arousal level and thus led to the appearance of P300. A notable characteristic of P300 under 4.5 MPa was a slight delay of the peak latency; in contrast, its peak amplitude remained unchanged. These results indicate that the hyperbaric exposure slows down the speed of the stimulus evaluation process. However, it appears that from the practical viewpoint, this cognitive change exerts only a minor influence on human performance in hyperbaric heliox environment.

keywords

simulated deep-sea saturation diving, brain evoked potential, EMG, reaction time, cognitive function

I 緒言

加圧方法によっても異なるものの、約1.6 MPa以上の高圧ヘリウム・酸素混合ガス（ヘリオックス）環境下では、高圧神経症候群（HPNS: high pressure nervous syndrome）の症状の一つである振戦のために運動作業が阻害される一方、精神作業には特異的な変化や目立った低下が認められないことから、精神機能には加圧による大きな影響はないとされている¹⁾。また、この高圧ヘリオックス環境下での作業能力の特徴は、高圧空気環境下で発生する窒素麻酔時のそれ（精神作業への影響が大きく、運動作業への影響は少ない）とは著しく異なっているため、高圧生理学研究の当初には、HPNSを不活性ガス麻酔とは異なる現象とする説の論拠ともされた¹⁾。より新しい研究では、高圧ヘリオックス環境下においても記憶や推論を要する精神作業に明確な影響が認められることが指摘されてはいるものの^{2,3)}、精神作業の遂行には感覚機能（外部刺激の受容）、精神機能（刺激情報に基づく心的処理）及び運動機能（身体反応による応答）の全てが関与しており、しかも高圧ヘリオックス環境下ではこれら全ての機能への影響が想定されるので⁴⁾、作業能力の測定結果から精神機能への影響を分離して把握することは困難である。

大脳誘発電位の成分の一種である事象関連電位は、提示された刺激の物理的特性ではなく、それによって引き起こされる精神活動に伴って出現する内因性成分であり、精神機能の客観的指標とみなされている⁵⁾。特に、刺激の弁別課題時に出現するP300（刺激提示から約300 msec後に頭頂部優位に出現する陽性電位）は、測定が比較的容易なこともあり、神経生理学のみならず精神医学、心理学や人間工学等の幅広い分野の研究に応用されている^{6~8)}。しかるに潜水医学の研究に関しては、環境制御装置からの様々な電気ノイズによって微弱な生体電気現象の測定自体が困難であることに加え、高圧環境への研究機器類の持ち込みが電氣的安全性の見地から制限されてい

ること等の理由により、P300は360 msw（3.7 MPa）ヘリオックス飽和潜水時⁹⁾、180 msw（1.9 MPa）ヘリオックス短時間潜水時¹⁰⁾、そして窒素麻酔の研究のための90 msw（1.0 MPa）までの空気潜水時¹¹⁾において測定されているに過ぎない。

これらの先行研究のいずれもが高圧環境下でのP300の変化を指摘しており、特に3.7 MPa環境下の測定では、過半数の研究参加者でP300そのものが欠落してしまうことが報告されている⁹⁾。この欠落現象は、高圧ヘリオックス環境下では精神機能に特異的な変化が生じうることを示唆する重要な所見と考えられる。そこで、本研究では、より高圧の4.5 MPa（440 msw）ヘリオックス飽和潜水時にP300を測定し、その欠落がどの程度の割合で認められるのか、またP300が出現した場合には、それに如何なる変化が生じているのかについて検討した。3.7 MPa環境下の測定ではP300の誘発に聴覚刺激課題が用いられていたが、高圧環境下での聴覚刺激課題の遂行には方法論的な問題があると考えられたので、本研究では視覚刺激課題を採用した。

II 方法

1. 研究参加者等

研究参加者は、2回の4.5 MPa 飽和潜水訓練に参加した12名（各回に6名）の海上自衛隊所属の職業潜水員であり、平均年齢は35（±6.2）歳であった。彼らは飽和潜水に関する6ヶ月間の教育課程を修了しており、飽和潜水技術を習得するとともに高圧ヘリオックス環境下で出現する可能性のある生理的及び心理的諸現象についての全般的知識を有していた。また、各回の訓練参加者の中には准看護師の資格を有する者が1名含まれていた。彼は4.5 MPa 飽和潜水の開始前に誘発電位測定の訓練を受け、電極装着等の測定準備作業は彼によって実施された。ただし、彼自身が被測定者になった場合には、やはり事前に測定訓練を受けていた別の者によって準備作業が行われた。

研究参加者には研究の目的と意義、測定方法の詳細と起こり得る悪影響等について説明し、彼らから研究参加の同意を得た。そして、研究の実施にあたっては研究倫理審査委員会の承認を受けた。

2. 加減圧、環境制御及び測定時期

加減圧法及び環境制御法は、総加圧時間が40時間から39時間に短縮されたこと以外には、別論文¹²⁾に記述されている方法と同一であった。0.2 MPaまでは空気、それ以降はヘリウムにより加圧し、加圧第1日目に3.1 MPa、第2日目に4.5 MPaに到達した。P300の測定は、4.5 MPa到達が夜間(22:00)であったため、その翌日(保圧第1日)の午前中に行った。4.5 MPa保圧中には、測定が行われた深海潜水訓練装置の高圧居住室内の温度は、ヘリオックス環境での快適温度である31℃に保たれた。なお、比較のための通常環境下(0.1 MPa 空気)での測定は加圧開始日の1週間前に実施し、この測定にも高圧居住室を用いた。

3. P300誘発のための課題等

P300は視覚オドボール課題により誘発した。本研究では、標準刺激として緑色発光ダイオードの点灯を、標的刺激としては赤色発光ダイオードの点灯を用いた。刺激光の持続時間は共に100 msecであった。標準刺激と標的刺激を4対1の割合で、無作為の順序により平均2秒の間隔で提示し、研究参加者には標的刺激に対する反応を求めた。

刺激光の点灯と反応の記録には、手のひらサイズの刺激・反応端末(DKH製PH-1150 op)を使用した。この端末の下部にはボタンスイッチが、上部には緑色発光ダイオードと赤色発光ダイオードが密着して設置されていた。これらの発光ダイオードの設置箇所は半透明の半球形カバーで被われていたので、緑色光と赤色光は同一箇所から提示されているように見えた。研究参加者には、非利き手でこの端末を持って眼前に保持し、課題の実施中にはなるべく瞬きをせず刺激の提示箇所を注視していること、そして標的刺激に対して利き手の母指により、できるだけ素早くボタンスイッチを押すように教示した。

この端末を誘発電位検査装置(日本光電製MEB-2208)に接続し、刺激提示の制御と反応時間の測定を実施した(後述の生理学的測定と加算平均処理にもこの検査装置を使用)。この端末は直流5 Vで作動し、最大電流は10 mA前後であったので、高圧環境下での使用に際しても、電気的安全性に問題(発熱やスパークの発生)はなかった。

4. 生理学的測定とP300の抽出

1) 電極の装着等

P300の測定のための電極は、学会等の指針^{5), 13, 14)}に準拠して配置した。電極には生体電気測定用の銀-塩化銀電極を用いた。脳波用の電極は、国際式10-20法による正中前頭部(Fz)、正中中心部(Cz)及び正中頭頂部(Pz)に装着し、両耳朶連結を基準とした導出を行った。眼球運動と瞬目をモニタするための眼電図用の電極を左眼窩下縁に、接地用の電極は正中前頭極(Fpz)に装着した。

これらの部位に加えて、利き手の短母指屈筋にも電極を装着した。通常のP300研究においては筋電図が測定されることはないが、高圧環境下では筋力の低下¹⁵⁾によってボタンスイッチの押し込みが十分な強度で行えず、反応に遅延が生ずる、あるいは無反応となってしまう可能性が考えられたため、課題の遂行中、特に標的刺激に対する反応時の筋電図をモニタした。

なお、高圧居住室の内部に設置されたMEB-2208の電極接続箱については、電気的安全性及び高圧による性能変化の可能性を考慮して、内蔵されていた前置増幅回路を撤去し、その代替品を高圧居住室外部の電気貫通部直近に設置した。

2) 増幅器の設定とデータサンプリング

脳波と眼電図では0.1~50 Hz、筋電図では10~5 kHzのフィルタ設定で増幅し、1 msecの間隔でサンプリングしてA/D変換を行った。サンプリング区間は、刺激提示の100 msec前から、刺激提示後の900 msecまでとした。

3) 加算平均処理

標的刺激に同期して測定脳波を加算平均することにより誘発成分を抽出した。学会の指針¹³⁾に従って、眼電図に100 μ V以上の変化が記録された場合には自動

的に加算処理から除外し、有効な加算回数が30回に達するまで課題遂行を継続した。比較のために、加算対象となった標的刺激の直前の標準刺激に対しても加算平均を行った。誘発成分の再現性の確認が推奨されていること^{5), 14)}に加え、高圧環境下での測定という特殊性も考慮して、5分間の休憩後に2回目の測定(及び加算平均処理)を実施した。

4) 測定指標と統計検定法

課題遂行の指標として、提示刺激に対する正反応率と標的刺激に対する応答時間(短母指屈筋の筋放電潜時及びボタン押しによる反応時間)を測定した。P300については、P300出現率(P300を抽出できた研究参加者の割合)を把握した後に、その頂点潜時と頂点振幅を測定した。視覚オドボール課題は反復して実施されたので、2回の測定結果の平均値を各指標の測定値とした。

環境圧が課題遂行の指標に及ぼす影響の分析には対応のある場合の*t*検定を適用した。P300の指標には、2要因分散分析(2要因とも対応のある場合)を適用し、環境圧要因による主効果、測定部位要因による主効果、そして環境圧要因と測定部位要因との交互作用について検討した。これらの統計処理には市販のソフトウェア(SPSS 11.0J)を用いた。

Ⅲ 結果

1. 課題遂行の指標

1) 正反応率

いずれの環境圧下においても、オドボール課題は概ね正確に遂行されていた。正反応率の平均値(±標準偏差)は、0.1 MPa環境下では95.0(±3.35)%, 4.5 MPa環境下では94.2(±3.54)%であり、*t*検定の結果、この二つの平均値間に有意差は認められなかった($t=1.033$, $df=11$, $p=.324$)。

2) 筋放電潜時と反応時間

高圧環境下では、標的刺激に対する筋放電潜時(EMG Discharge Latency)と反応時間(Reaction Time)のいずれにも遅延が生じていた(Fig.1)。筋放電潜時の平均値(±標準偏差)は、0.1 MPa環境下での189.7(±18.07) msecから4.5 MPa環境下での199.6(±22.24) msecへと延長し、*t*検定の結果、こ

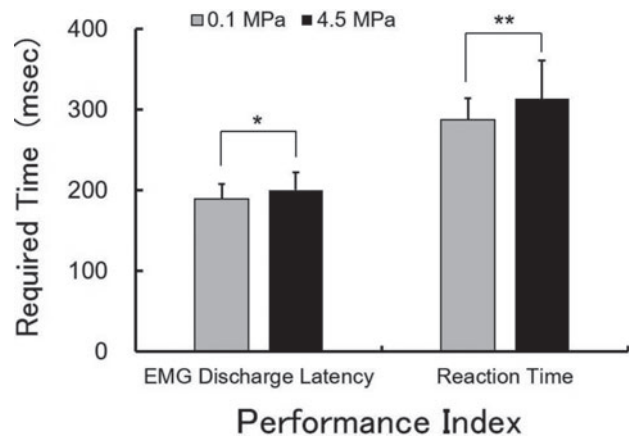


Fig. 1. Effects of ambient pressure on behavioral indices. Not only reaction time but also EMG discharge latency increased under 4.5 MPa. (* .01< p <.05 ** .005< p <.01)

の二つの平均値間には有意差が認められた($t=2.56$, $df=11$, .01< p <.05)。反応時間の平均値(±標準偏差)も、0.1 MPa環境下での287.3(±26.69) msecから4.5 MPa環境下での311.5(±47.4) msecへと延長し、*t*検定の結果、この二つの平均値間にも有意差が認められた($t=3.100$, $df=11$, .005< p <.01)。

なお、0.1 MPa環境下のみならず4.5 MPa環境下においても、標的刺激に対して無反応にもかかわらず短母指屈筋の筋電活動が明らかに増加しているような現象は、いずれの研究参加者にも認められなかった。

2. P300の指標

1) 事例と出現率

Fig.2に1名の研究参加者から測定したP300の事例を示した。0.1 MPa環境下では、標的刺激(target stimulus)の提示から350 msec前後にピークのある陽性方向(下向き)の変化、すなわちP300が出現しており、再現性も良好であった。一方、標準刺激(standard stimulus)に対してはP300に相当する成分は出現していなかった。4.5 MPa環境下においても、再現性はやや劣っていたものの、標的刺激に対してのみP300が認められた。

他の11名の研究参加者からも、0.1 MPaと4.5 MPaの両環境圧下で、この事例と同程度に明瞭な形状のP300が認められた。すなわち、4.5 MPa環境下におけるP300の出現率は100%であり、先行研究で報告されていた高圧環境下でのP300欠落現象は認め

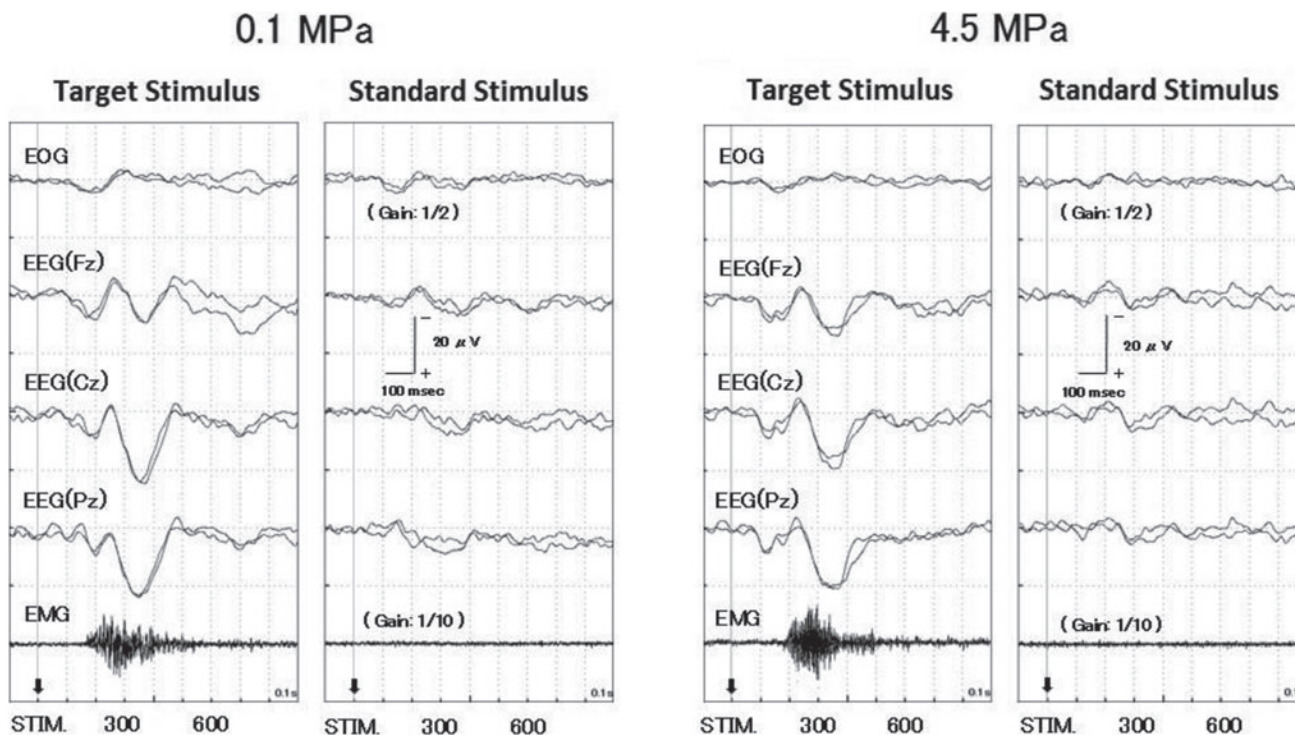


Fig. 2. Examples of P300 recorded from one diver. ERP tracings were replicated twice and superimposed in order to confirm the reproducibility of the components. P300s, or large downward deflections around 350 msec after the target stimulus, were distinctly noted under both ambient pressure conditions. EMGs were recorded at the short flexor muscles of the thumb.

られなかった。

2) 頂点潜時

0.1 MPa環境下で測定された頂点潜時の平均値(±標準偏差)は、Fzで349.8(±19.31) msec, Czで352.3(±19.25) msec, Pzで345.8(±21.29) msecであり、4.5 MPa環境下での測定ではFzで369.8(±29.96) msec, Czで367.7(±30.89) msec, Pzで366.4(±29.68) msecであった。全ての測定部位において4.5 MPa環境下では遅延が生じていたが、部位差はいずれの環境圧下においても見られなかった(Fig. 3-(A))。2要因分散分析の結果、環境圧要因の主効果は有意であったが($F(1,11)=11.694$, $.005 < p < .01$)、測定部位要因の主効果($F(2,22)=1.713$, $p=.204$)と交互作用($F(2,22)=2.830$, $p=.081$)は有意ではなかった。環境圧要因についての下位検定の結果、FzとPzについては0.5%の、Czについては5%の危険率で有意差が認められた。

3) 頂点振幅

0.1 MPa環境下で測定された頂点振幅の平均値(±

標準偏差)は、Fzで17.4(±6.14) μV, Czで21.2(±7.04) μV, Pzで22.8(±6.79) μVであり、4.5 MPa環境下での測定ではFzで16.3(±6.71) μV, Czで20.2(±7.56) μV, Pzで21.5(±7.39) μVとなった。頂点振幅は、いずれの環境圧下においても頭頂部優位の分布であり、また、いずれの測定部位においても4.5 MPa環境下では1 μVほど低くなっていた(Fig. 3-(B))。2要因分散分析の結果、測定部位要因の主効果は有意であったが($F(2,22)=29.999$, $p < .0005$)、環境圧要因の主効果($F(1,11)=1.672$, $p=.222$)と交互作用($F(2,22)=0.069$, $p=.934$)は有意ではなかった。測定部位要因についての下位検定では、いずれの環境圧下においても5%の危険率でFzとCz, FzとPzの間に有意差が認められた。

IV 考察

1. 高圧環境下におけるP300の出現

Værnesら⁹⁾は、3.7 MPa環境下で聴覚オドボール課題を実施させたところ、1回目の測定では5名中の4

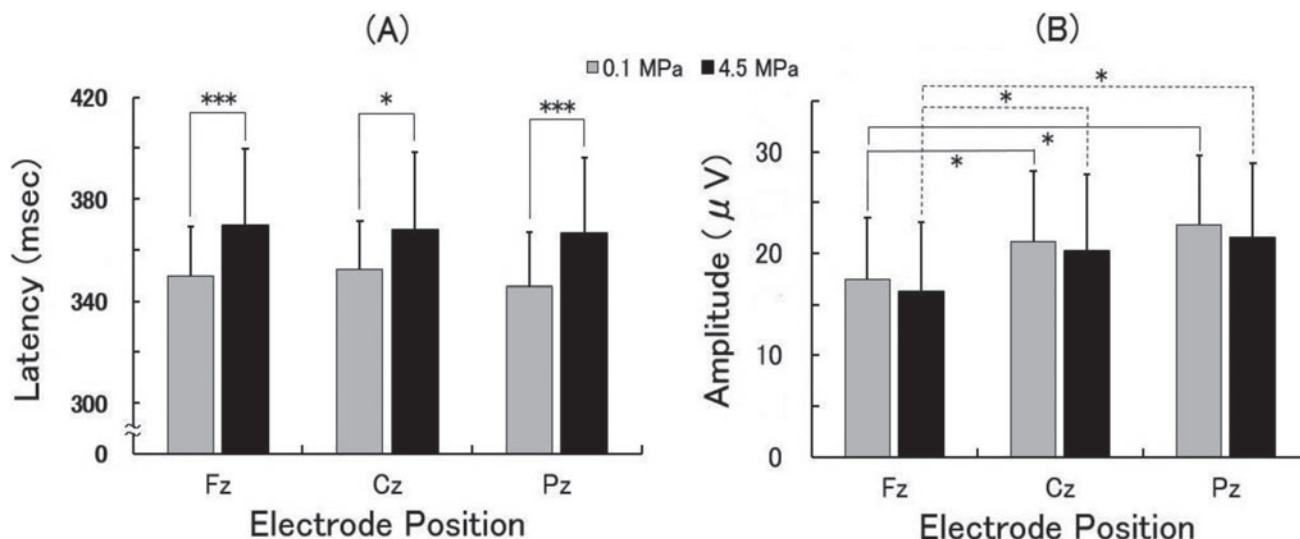


Fig. 3. Changes in P300 indices. (A) The peak latency increased under 4.5 MPa at any of the electrode positions. (B) The peak amplitude tended to increase toward Pz under both ambient pressure conditions. (* .01 < p < .05 *** .001 < p < .005)

名に、そして2回目の測定でも4名中(1名については2回目の測定は不可能)の2名にP300が欠落していたことを報告している。一方、本研究では、4.5 MPa環境下で視覚オドボール課題を実施させたところ、12名全員にP300が出現しており、P300の欠落現象は起こらなかった。P300は課題刺激のモダリティに依存しない内因性成分であって、学会の測定指針^{13, 14)}にも視覚刺激を用いることに特段の問題はないことが明記されている。それゆえ、本研究で視覚オドボール課題を用いたことがVærnesらの研究結果との不一致の原因ではない。さらに、設定した環境圧も本研究の方が高く、その影響も大きく現れるはずなので、環境圧の違いも不一致の原因とは考えられない。このように、実験結果を左右する条件設定には不一致の原因が見当たらないことから、この先行研究でP300欠落現象が起こったのは、測定の実施の段階で何らかの問題があったためではないかと推測される。

この先行研究では、聴覚オドボール課題を閉眼状態で実施させ、反応時間の測定は行っていない。通常環境下の測定においても、瞬目や眼球運動に伴うアーチファクトの混入を防止するために、聴覚オドボール課題を閉眼状態で実施することも認められており、また、研究の内容によっては反応時間の測定が行われないこともある¹³⁾。従って、この先行研究の測定手続

き自体に問題はないのであるが^(注1)、それを高圧という特殊環境下での測定に、そのままの形で適用したことに難点があったのではないかと考えられる。

高圧環境下で発生するHPNSの典型的症状の一つに覚醒水準の低下(注意力の低下や傾眠等の自覚的変化、脳波の徐波化)があり、特に加圧時に顕著であるものの、保圧中にもある程度の残存が認められている^{1), 4), 16)}。覚醒水準がP300に大きく影響する要因であることはHarshら¹⁷⁾の研究によって明らかにされており、彼らは、覚醒状態から睡眠状態への移行に伴い、標的刺激への反応性が減少するとともにP300も消失することを報告している。そこで、学会の測定指針¹⁴⁾には、P300の測定にあたっては覚醒水準の変動に留意しなければならないとの指摘がなされている。

本研究では、開眼注視が必要とされる視覚オドボール課題を採用しており、4.5 MPa環境下においても然るべき覚醒水準が維持されていたことは、正反応率に低下が認められなかったことから明らかである。一方、先行研究の手続きでは、聴覚オドボール課題が閉眼状態で実施され、しかも運動反応が要求されていなかったため、高圧による覚醒水準の低下作用が助長されてしまったのではないかと考えられる。この先行研究にはオドボール課題がどの程度の正確さでなされたのかについての言及がないので、あくまでも推

測の域を出ないが、研究参加者の中に測定の中で入眠状態に陥ってしまいオドボール課題を継続できなかった者がいたために、P300の欠落現象が起きた可能性が高いと考えられる。

ところで、1.9 MPa環境下で行われた研究¹⁰⁾においても聴覚オドボール課題が用いられており、測定が行われた2名にはP300が出現したことが報告されている。この論文には開閉眼の設定についての記述はないものの、どのように設定されていたにせよ、環境圧が比較的になかったため覚醒水準の低下作用も小さく、オドボール課題が適切に遂行されてP300が出現したものと推測される。

2. 高圧環境下の認知機能とP300

1) 課題遂行指標と認知機能

正反応率に環境圧による有意な差異が認められなかったことは、4.5 MPa環境下においても、オドボール課題の遂行に関わる認知処理自体は支障なく行われていたことを意味している。ただし、4.5 MPa環境下での平均反応時間と平均筋放電潜時の若干の遅延(平均反応時間:24.2 msec, 平均筋放電潜時:9.9 msec)は、高圧によって認知処理時間が僅かに遅延していたこと、すなわち認知機能に軽度の低下が生じていたことを示唆している。

反応時間には、認知処理以外にも反応動作に関わる諸要因が寄与しており、特に筋力の発揮が大きな影響を及ぼすので、高圧環境下における反応時間の変化の解釈には筋力低下¹⁵⁾の影響を考慮しなくてはならない。一方、筋収縮の開始時点の指標である筋放電潜時にはその必要はないため、高圧による中枢レベルでの認知機能の低下がより直接的に反映されていると言える。もっとも、筋放電潜時には運動皮質から短母指屈筋までの遠心性伝導時間も含まれているので、その変化を考慮に入れる必要がある。

高圧が神経伝導やシナプス伝達に影響を及ぼすことは十分に確立された事実であることから^{18, 19)}、遠心性伝導時間にも変化が生じていると考えられるが、今までに高圧環境下において遠心性伝導時間が測定されたことはない。一方、求心性伝導時間については、手関節部正中神経の電気刺激による短潜時体性感覚

誘発電位を指標とした研究¹²⁾により、4.5 MPa環境下では一次体性感覚皮質起源のN20潜時に1 msecほどの遅延が発生することが報告されている。言うまでもなく、遠心路と求心路には神経解剖学的な違い(経路長、シナプス結合等)があるものの、いずれの伝導路においても神経伝導とシナプス伝達は共通するメカニズム²⁰⁾で作動していることから、4.5 MPa環境下において遠心路で生ずる遅延は、求心路で生ずる遅延と大差はないのではないかと考えられる。この推論を正しいとするならば、高圧環境下で発生した筋放電潜時の遅延の大部分は中枢レベルで生じた変化であって、認知機能の低下を正確に反映していることになろう。

2) P300指標と認知機能

P300の指標には、加齢と老化に対応した変化や、痴呆患者群と年齢適合対照群との間に差異のあることが認められている^{5), 14)}。従って、P300が認知機能を何らかの形で反映していることは確実であるが、その発生メカニズムの詳細は未だに解明されていない⁵⁾。実験条件の設定にもよるものの、P300潜時よりも反応時間の方が短い場合もあることが以前より報告されており²¹⁾、この事実から、P300が個々の刺激に対する認知処理(反応の必要性の判断等)を直接的に反映しているのではないことは明らかである。本研究の事例(Fig.2)では、標的刺激に対する筋放電はP300に先行するN20と概ね同じタイミングで増加している。そこで、P300は外部刺激に対する認知処理全般、すなわち注意と記憶が関与した認知処理のカスケード(刺激系列の評価や短期記憶の更新等)に伴って発生しているのではないかと考えられている²²⁾。

高圧ヘリオックス環境がP300の頂点潜時に及ぼす影響は、2つの環境圧条件(1.9 MPaと3.7 MPa)の下で研究されている。1.9 MPa環境下¹⁰⁾では測定された2名中の2名にP300が出現し、両名に頂点潜時の遅延が認められた。また、3.7 MPa環境下⁹⁾では5名に対し2回の測定が行われ、2名にのみP300が認められたが、頂点潜時については遅延(35 msec以上の増加)もしくは不変(6 msec以内の増加)であった(1名では2回とも遅延。他の1名では初回には欠落、2回目には不変)。本研究では12名に対して測定を行っ

たところ、4.5 MPa環境下では全ての測定部位において頂点潜時の平均値に有意な遅延が認められた。このような研究結果から、高圧ヘリオックス環境下ではP300頂点潜時に遅延が生ずることは概ね確実であると言えよう。P300頂点潜時が外部刺激の評価時間を反映していることが多くの研究^{7), 11), 22)}によって明らかにされているので、4.5 MPa環境下では提示された刺激の評価に通常環境下よりも多くの時間を要していたことになる。ただし、4.5 MPa環境下での平均頂点潜時は、いずれの測定部位においても成人標準値の範囲内(250~500 msec)^{5), 14)}にあり、かつ、その遅延自体(Fz:20.0 msec, Cz:15.4 msec, Pz:20.6 msec)も加圧前の測定値の4~6%の増加に過ぎなかったことから、高圧ヘリオックス環境がオドボール課題のような簡単な認知判断に大きな影響を及ぼすことはないと考えられる。

P300頂点潜時の部位差については、P300以外の成分の影響が測定部位によって異なることによる見掛け上の違いである可能性が高いため、積極的に分析されることはない²³⁾。本研究では、測定部位要因による有意差はいずれの環境圧下においても認められず、さらに、測定部位要因と環境圧要因との交互作用も有意ではなかったことから、高圧ヘリオックス環境は頂点潜時の部位特性に影響を及ぼさないのではないかと推測される。

P300の頂点振幅については、3.7 MPa環境下で行われた研究⁹⁾では検討されていないが、1.9 MPa環境下で行われた研究¹⁰⁾では環境圧による影響の無いことが示唆されている。本研究でも、頂点振幅には環境圧要因による有意な差異が認められなかったので、高圧ヘリオックス環境は頂点振幅に影響を及ぼさないのではないかと考えられる。P300の頂点振幅が認知機能の如何なる側面と関連しているのかについては、現在でも見解は一致していないものの、二重課題法やプローブ刺激法を用いた実験結果に基づき、それが心的処理資源^(註2)を反映しているという仮説が有力視されている^{7), 22), 24)}。この仮説に立脚するならば、高圧ヘリオックス環境は心的処理資源の供給には影響を及ぼさないと考えることもできよう。

P300の頂点振幅が頭頂部で最大となることは、

P300の基本的な性質の一つである^{5), 14), 22)}。本研究においても測定部位による有意な差異が認められ、いずれの環境圧下でもFzからPzにかけて振幅が高くなる傾向が見られた。また、測定部位要因と環境圧要因との有意な交互作用が認められなかったので、4.5 MPa環境下においても頂点振幅の分布特性に変化は起こらなかったことになる。頂点潜時の部位特性にも環境圧要因による変化が認められなかったことを考え合わせると、高圧ヘリオックス環境はP300の発現機序自体には影響を及ぼさないと推測されるが、この点に関しては、より多導出の脳波測定による検討が必要である。

V 結語

4.5 MPaのヘリオックス環境下においてもP300は全ての研究参加者に認められ、先行研究によって報告されていた高圧環境下でのP300欠落現象は起こらなかった。本研究ではP300誘発法として視覚オドボール課題を用いたが、そのことによって測定中に然るべき覚醒水準が維持された結果、P300が出現したものと考えられた。4.5 MPa環境下のP300には頂点潜時に遅延が起こっていたことから、高圧ヘリオックス環境が外部刺激を評価する機能の低下を引きおこすことが示唆された。ただし、頂点潜時の遅延は僅かであり、簡単な認知判断に基づく作業に対しては、4.5 MPaまでの高圧ヘリオックス環境が実質的な影響を及ぼすことはないのではないかと考えられる。

現在、深海飽和潜水員が実施している作業の多くが、遠隔操作のマニピュレータでは対処が困難な種類の手作業であるため²⁵⁾、巧緻性等の運動機能が主要な課題として研究されている。しかしながら、その機会は多くはないものの、飽和潜水が深海底の遺失物の捜索や回収、海難事故への対応に適用されることもある。このような事態では想定外の事象も起こりうるため、現場の深海底で複雑な認知判断に基づく作業が必要となる²⁶⁾。そこで、水中高圧環境が認知機能全般に及ぼす影響の把握は、深海底での作業を安全に実施するための不可欠な要件であると考えられる。高圧環境下では、運用上の安全性を確保するために研究方法にも様々な制限が設けられているが、電気生

理学の手法は、電気的安全性の規定をクリアしさえすれば基本的に適用が可能なので、高圧環境下の認知機能の研究にP300を含めた各種事象関連電位の測定が有用であろう。

(注1)

高圧ヘリオックス環境下では、音の媒体が空気からヘリウム・酸素混合ガスになるために、音に若干の変化が生ずる。そこで、聴覚オドホル課題を用いてP300を誘発する場合には、高圧ヘリオックス環境下で提示される標的刺激（及び標準刺激）が1気圧空気環境下で提示されるそれと同一ではなくなってしまう、という問題が発生する。ただし、P300は標的刺激的物理的性質ではなく、それが担っている心理的情報（反応の必要性）に対する反応なので、この問題が研究結果に影響を及ぼすことはないと考えられる。

(注2)

心的処理資源（注意の容量）は精神作業に関連する説明概念の一つである。類比的に説明するならば、電気機器が所定の性能を発揮するためには、そのメカニズムが正常であることに加え、然るべき電力の供給が必要であるが、心的処理資源はこの電力に相当する概念である。

(付記)

本論文は、筆頭著者が海上自衛隊潜水医学実験隊に勤務していた時に実施した研究に基づいており、その一部は第51回日本高気圧環境・潜水医学会学術総会にて発表されている。なお、本論文で表明した意見等は著者らの個人的見解であり、潜水医学実験隊、海上自衛隊、並びに防衛省の公的見解ではない。

引用文献

- 1) Bennett PB, Rostain JC: High pressure nervous syndrome. In: Brubakk AO, Neuman TS (Eds.), Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving. London: Saunders. 2003; pp.323-357.
- 2) 影山望 箱田祐司 小沢浩二: 長期間の高圧環境暴露が認知能力に及ぼす効果. 認知心理学研究 2010; 8: 63-72.
- 3) Hou G, Zhang Y, Zhao N, et al.: Mental abilities and performance efficiency under a simulated 480-m helium-oxygen saturation diving. Front Psychol 2015; 6: 1-8.
- 4) 小沢浩二: 窒素麻酔と高圧神経症候群. In: 赤松知光, 足立一彦, 緒方克彦ら(編), 防衛医学. 所沢: 防衛医学振興会 2007; pp.356-361.
- 5) 加賀佳美 相原正男: P300基礎. 臨床神経生理学 2013; 41: 80-85.
- 6) 山口修平: 認知機能と事象関連電位. 認知神経科学 2006; 8: 50-55.
- 7) 入野野宏: P300応用 - 認知科学の立場から. 臨床神経生理学 2013; 41: 86-92.
- 8) Tsang PT, Vidulich MA: Mental workload and situation awareness. In: Salvendy G (Ed.), Handbook of Human Factors and Ergonomics. Chichester: John Wiley & Sons. 2006; pp.243-268.
- 9) Værnes RJ, Hammerborg D: Evoked potential and other CNS reactions during a heliox dive to 360 MSW. Aviat Space Environ Med 1989; 60: 550-557.
- 10) Wada S, Urasaki E, Kadoya C, Matsuoka S, Mohri M: Effects of hyperbaric environment on the P300 component of event-related potentials. J UOEH 1991; 13: 143-148.
- 11) Fowler B, Pogue J, Porlier G: P300 latency indexes nitrogen narcosis. EEG J 1990; 75: 221-229.
- 12) 小沢浩二: 高圧ヘリウム・酸素混合ガス環境（440 msw）が短潜時及び中潜時体性感覚誘発電位に及ぼす影響. 日本高気圧環境・潜水医学会雑誌 2017; 52: 1-11.
- 13) 投石保広 下垣内稔: 誘発電位測定指針（4）事象関連電位（1998年改訂版）. 脳波と筋電図 1998; 26: 195-200.
- 14) Heinze HJ, Münte TF, Kutas M, et al.: Recommendations for the Practice of Clinical Neurophysiology. Chap 2-5 Cognitive event-related potentials. EEG J Suppl. 1999; 52: 91-95.
- 15) 岩川孝志: 潜水員の基礎的運動能力に関する研究. 潜水医学実験隊研究報告 2011; 27: 10-15.
- 16) Lemaire C, Rostain JC: The High Pressure Nervous

- Syndrome and Performance. Marseille: Octares. 1988; pp. 1-74.
- 17) Harsh J, Voss U, Hull J, Schrepfer S, Badia P: ERP and behavioral changes during the wake/sleep transition. *Psychophysiol* 1994; 31: 244-252.
- 18) 小沢浩二: 高圧下の神経機能. In: 関邦彦 坂本和義 山崎昌廣 (編), 高圧生理学. 東京: 朝倉書店 1988; pp.155-172.
- 19) Grossman Y, Aviner B, Mor A: Pressure effects on mammalian central nervous system. In: Sébert P (Ed), *Comparative High Pressure Biology*. New Hampshire: Science Publishers. 2010; pp.161-186.
- 20) Longstaff A: 神経科学キーノート. 東京: シュプリンガー・フェアラーク 2003; pp. 1-472. (桐野豊, 川原茂敬, 渡辺恵, 松尾亮太 (訳) *Instant Notes on Neuroscience*. BIOS Scientific Publisher Limited. 2000)
- 21) Desmedt JE: P300 in serial tasks - an essential post-decision closure mechanism. *Prog Brain Res* 1980; 54: 682-686.
- 22) Polich J: Updating P300 - an integrative theory of P3a and P3b. *Clin Neurophysiol* 2007; 118: 2128-2148.
- 23) 入野野宏: 心理学のための事象関連電位ガイドブック. 京都: 北大路書房2005; pp.1-190.
- 24) Kok A: On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiol* 2001; 38: 557-577.
- 25) Swann C: *The History of Oilfield Diving*. Santa Barbara: Oceanaut Press. 2007; pp.1-863.
- 26) 小沢浩二: 深深度飽和潜水における神経心理学的問題 - 脳波変化に基づいた安全かつ迅速な加圧法の確立及び水中での作業能力の評価. *日本臨床高気圧酸素・潜水医学会雑誌* 2019; 16: 7-15.