

【第42回学術総会ワークショップ2：ダイビングの安全基準】

水中で発症した酸素中毒と思われる痙攣発作の救命事例

田原浩一

Explorers nest

A case report of a successful underwater rescue of a diver hit by oxygen convulsion.

Kouichi Tahara

Explorers nest

はじめに

著者がリーダーを勤めたダイビングで事故があり、当初は事故者が心肺停止状態に陥るといった深刻な状況となった。しかし、幸いにも2日で完全に回復し、現在は後遺症もなく完全に社会復帰することが出来た。報告者が事故の状況を水中で直接把握できた貴重な事例と考え、その過程を報告する。

事故の日時・場所・参加メンバー・海況等

- ・日時／2006年4月
 - ・場所／サイパン（港から15分ほどのボートダイビングのダイブサイト）
 - ・参加メンバー／著者を含めて5名。全員がテクニカルダイビングインストラクターでリブリーザー（閉鎖式呼吸装置）講習の修了者。報告中では参加メンバーの事故者をA、参加メンバーの救助者の1人をB、もう一人の参加メンバーで救助者をC、現地在住の参加メンバーで救助者をDと表記する。
 - ・潜水目的／リブリーザーをより熟知するためのトレーニングを兼ねたファンダイビング。
 - ・使用器材／リブリーザー（純酸素を充填した3lタンクと希釈用の空気を充填した3lタンクを内蔵）
- ※リブリーザー（クローズドサーキット・リブリーザー）は通常のスクーバユニットと異なり、吐気を水中に放出することなくループ内で循環させ、予め設定された酸素分圧を維持しながら呼吸に再利用するシステム

である。循環の過程で、吐気内の二酸化炭素は二酸化炭素吸収剤により除去され、ソレロイドバルブからの酸素の放出によってユーザーが消費した酸素が補填される。酸素の補填は予め設定された酸素分圧を基本として行われ、潜降やガスのループ内への放出（マスククリア等）によって呼吸ガスのヴォリュームが不足した場合やループ内のガスの酸素分圧が高くなりすぎた場合は、希釈ガスの追加によって対応が行えるようデザインされている。

- ・海況／良好（晴天。波・うねりともほとんどなく、透視度は25m以上、水温28℃）

事故までの経緯

事故の前々日、著者を含む4名で日本を離れ、約3時間の飛行機搭乗でサイパンに入島。翌日から現地友人と合流し、リブリーザーによるダイビングを開始。事故当日は宿泊先ホテルで朝6時起床。参加メンバー全員、前日・当日の飲酒や喫煙はナシ。シリアルで朝食を取り7時に現地在住参加者であるDの自宅に移動。器材のセッティングとチェックを行い、8時15分、D宅を出発、港に向かう。8時30分頃、港に到着。船への器材の積み込みと最終チェックを行い、9時30分頃港を出航する。

出航から約15分で予定ダイブサイトに到着。アンカリング後、水深6mと水深4.5mの2段階の減圧バーを降ろし、バーに緊急減圧用の5.7lの酸素タンク（酸素

仕様レギュレーター付き)をセットする。その後、減圧ソフトを基本とした潜水計画を参加メンバー全員で確認。計画はリブリーザーを使った最大水深50m、ボトムタイム25分、総潜水時間53分の減圧ダイビングであった。現地在住の参加者Dよりダイブサイトの説明を受けてバディを決め、10時30分頃エントリー(ボトムタイマーによる潜降開始時間は10時31分)。事故者Aは著者のバディであった。

水深5mで一旦停止しバディチェックを行う。リブリーザーのシステムからのガスのリークが無いこと、リブリーザーシステムに問題が起きた場合のベイルアウト用のオープンサーキットスクーバシステムを含むシステム全体の正常作動を確認し、深度を下げる。深度を下げ始めたのは潜水開始から2分後(以降の時間の推移は著者がバックアップのボトムタイマーとして使用していたカシオ社製ログメモリーの記録を参照)、潜水開始から4分後に、水深22mのアンカー地点に到着。ここで再度バディチェック。リブリーザーシステムの酸素分圧のセットポイントを $PO_2=0.7$ 気圧(以下、単位省略)から $PO_2=1.3$ に変更する。バディでセットポイントの変更を確認。互いに異常の無いことを確認した後、潜水開始6分後に沖に泳ぎ始め水深を下げる。通常、このセットポイントの変更は最大深度付近で行うが、この時は地形の傾斜が緩やかであり、深度的にも最後の数メートルを除いて水深変化が穏やかなことと、トレーニングを兼ねたダイビングのため、早めにセットポイントを変更した。万一、潜潜中に PO_2 が極端に高くなった場合は、希釈ガスを手で追加、システム内のガスを希釈ガスに置換することで酸素分圧を適正值内に収めるためのフラッシングによって PO_2 を下げるという対応を行うよう、事前に打ち合わせがしてあった。なお、この対応は前日に水中でトレーニングを行って確認済みであった。

システムの PO_2 が正常値を上回ることもなく、潜水開始から9分後に目的水深に到着。大潮の引き潮の時間帯であったため、最大水深は当初の予定より3mほど浅く、最大水深は47mであった。目的エリアに到着してからは強固なバディシステムは取らず、10~15m四方の範囲に散らばって、それぞれがダイビングを楽しむ。

潜水開始から約11分後、事故者Aのリブリーザーのシステム異常を知らせるアラームが鳴る。著者がAに泳ぎ寄り、モニターをチェック。アラームの原因は、酸素センサーに対する警告で、3つある酸素センサーのうちの一つが他の二つに比べて小さい数値を示していることを確認。バックアップのモニターの表示もほぼ同数値であった。ちなみに他の2つと大きく違う数値を示していたのはNo.1のセンサーで、数値は0.9? (少数以下第二位の数値は思い出せず)。No.2のセンサーは1.24, No.3のセンサーの数値は1.29であったため、この時点では表示された PO_2 に0.3程度の違いがあったことになる。

なお、著者の酸素センサーの数値は1.2の後半~1.3で揃っており、大きな誤差は無かった。また、事故者のNo.2及びNo.3の酸素センサーの数値も正常の範囲内であった。

酸素センサーの数値の誤差は大きな水深の変化等を行った際に、各酸素センサーの反応時間の誤差によって起こる可能性がある現象であり、短時間で解消すれば大きな危険に直結する類の問題ではない。また、システムは3つある酸素センサーの内の、近似値を示す2つの酸素センサーの数値を元に作動を続けるようデザインされているため、近似値を示す2つの数値が正常の範囲内であれば、ひとつの酸素センサーが示す数値に異常があっても、問題なく正常な作動が続く。ただし、作動の基本となる2つの近似値が必ずしも正常の範囲内、つまり、実際の呼吸ガスの酸素分圧に極近い数値、であるとは限らない。そこで、状況によっては、システム内のガスを希釈ガスに置換して(フラッシング)酸素センサーの示す数値の精度を確認する必要がある。そのため、著者は、スレートに「フラッシングして PO_2 をかくにん 1.1~1.2のセルが正しい」(スレートに残っていた原文通り)。システム内のガスを希釈ガスである空気のみで置換した場合、 PO_2 は $0.21 * 5.7ATA$ で $PO_2=1.197$ となり、酸素センサーがこれに近い数値を示していればセンサー及びセンサーが示す数値に異常のないことが確認できる)と対応を指示。事故者Aもそれを理解し、了解のハンドシグナルを示した。

しかし、事故者Aがこの対応を行う前に数値の低

かったNo.1の酸素センサーの数値が1.2+まで上がり、アラーム音が止まる。著者はもう一度事故者のモニターの数値を確認。数値のバラつきが無くなっていたため、問題が解決したと考えた。事故者も数値を確認。OKのサインを出して再びファンダイビングに戻った。

事故の状況

当初の問題が解決した以降のダイビングは順調であったが、潜降開始から23分後、浮上のための集合を指示するためにメンバーの位置を確認している時、再びシステムの異常を知らせるアラーム音が聞こえる。事故者Aを見ると、ベイルアウト用タンクのレギュレーターを手に取りながら浮上ロープ方向にかなり早いペースで泳いでおり、それを他の参加者Bが自身のベイルアウト用タンクレギュレーターを手に取りながら追いかけて始めたのが見えた。その時点での著者と事故者の距離は恐らく7～8 m。著者も急いで事故者Aを追う。

二人との距離が2～3 mとなった時、水深約30mの中層で(ログメモリの深度変化から推測)参加者Bが事故者Aに追いついてAをホールド、Aに、Bのベイルアウト用のレギュレーターを与えようとしているのを後方から確認する。その直後、Aの両足が大きく痙攣し、続いて右手が痙攣から硬直するのを確認。酸素中毒を直感する。

著者はそのまま事故者Aに向かって泳ぎ、BがAを右側からホールドしていたため、左側に周ってAをホールドする。Bが自身のベイルアウト用タンクのセカンドステージをAの口元に当ててフローさせていたが、Aはマウスピースをかねていなかった。Aの口元を覗き込むと、唇は半開きだが、歯をかみ合わせた状態で硬直、すでに呼吸は停止しているように見えた。著者はAの口に指をこじ入れて歯を開かせ、マウスピースをくわえさせようとした。しかし、かなり強引に指先をこじ入れようとしても顎が硬直していて開かせることが出来なかった。この時点で中枢神経系の酸素中毒を確信する。

事故発生時の事故者の記憶

後で事故発生時の記憶をAに確認したところ、以下

のような説明があった。

「デジタルカメラで写真を撮っていると、突然、視界がぐらりと揺れ、異常を感じたので、すぐ横にいたBに×のサインを出して浮上ロープ方向に浮上を試みた。リブリーザーのアラームが鳴った記憶はない。酸素中毒の可能性が脳裏をよぎったので、リブリーザーのマウスピースを離し、ベイルアウトタンクのレギュレーターのセカンドステージを引き抜いて呼吸しようとする。しかし、その時点で右手が大きく痙攣を始め、うまく口元までセカンドステージを運べなかった。それでもセカンドステージを何とかくわえて1回か2回呼吸したような気がするが定かではない。直後に目の前にシャッターが降りたように視野が真っ暗になり、完全に意識を無くした。苦しさを感じることは無かった。以降、病院で意識を取り戻すまでの記憶は全くない」

事故発生後の対応

中枢神経系の酸素中毒による大痙攣の場合、気道も閉塞すると考えた著者は、そのまま浮上すると肺の過膨張～動脈ガス血栓を起こすと判断。Bと共にAをホールドしたまま水深を維持して浮上ロープ方向に移動する。移動しながら時々Aの口に指をねじ込み、硬直の状態をチェック。硬直がとけるまで水深を維持した結果、潜水開始から29分までの約4分間、水深30m付近に留まることとなった。

この間、様々な考えが頭の中をめまぐるしく交差したが、溺水後の呼吸停止とは違って、今件は高酸素状態でのいきなりの呼吸停止であるから、短時間で脳が低酸素状態に陥ることはなく、従って、引き上げを焦る必要はないと自分に言い聞かせた。

その後、Aの口に指をねじ込んだ際、Aの口元の硬直がややゆるくなったので、口元を注視しながら僅かに水深を上げる。しかし、口元から泡が出たり、口元の水に吸引や吐き出し等の大きな動きは感じられず、やはりその時点での早急な浮上は危険と判断。潜水開始から31分までの3分ほどをかけて水深22mまでゆっくり浮上する。

ここで、Aの口元から小さく気泡が出たのを確認、

著者はBからAの口元のセカンドステージを受け取って連続フローさせ、万一、呼吸が再開した際になるべく肺に水が入らない状態を作ろうと試みながら浮上のペースを上げる。

著者は浮上中2度ほど自分のBCの排気を行ったが、AのBC (buoyancy compensator) の排気は1度しか行うことが出来なかった。また、リブリーザーのPO₂をコントロールするためのセットポイントを、浅い水深にあわせてローセットに切り替えることを忘れたため、システムがグループ内のガスの酸素分圧を1.3に維持しようと酸素給気を行ったことで浮力が増加、恐らく、水深10mあたりから浮上速度コントロールが難しくなった。ログメモリーによると、潜水開始から32分で水深15m、33分で水深8m、34分には水面に浮上している。途中、BがAと著者の浮上速度を抑える対応を試みてくれたが、浮上の最後の2～3mはほとんど吹き上げ状態となった。

浮上後はAを仰向けにし、BCに給気して浮力を確保。仰向けにした時点でAの鼻と口から白濁した細かい泡が出たが、そこに血液の混入はないことを確認。肺の過膨張や完全水没はないと推測し、2回の吹き込みを行う。以降、器材を脱がせながら恐らく2分ほどかけてボートのラダーまで移動。この間、5～15秒毎に吹き込みを行う。

ラダー到着時点でダイバーCが浮上。その時点では著者がAの右側に位置していたため、まだ脱がせていなかったAのリブリーザーシステムの左肩ベルトをCが外してくれる。Cと同時に浮上していたダイバーBは先に船に上がり、自身の器材を脱いで事故者Aを船上に引き上げる。Bは事故者Aの呼吸停止を確認。2回の吹き込みを行い、Aに反応の無いことを確認してすぐにCPRを開始。

著者は水面で器材を脱ぎ、船に上がってCPRに参加。心臓マッサージを担当する。著者が15回心臓マッサージを行い、Bが2回の吹き込みを行うというA H A 2000のパターンでCPRを継続。2～3分このパターンでのCPRを続ける間に、すでに船に上がっていた現地在住参加者のDが緊急減圧用の酸素タンクを引き上げてくれたので、Bに、吹き込みの際は一旦

酸素を吸い、吸った酸素を吹き込む方法を取るよう指示する。この間にボートはポイントを離れて港に向かう。Dは操船を行いながら無線で救急車の出動を要請していた。

事故者の状態の推移

吹き込みに酸素を使用したCPRを5分ほど行った時点で事故者Aの自発呼吸が戻る。著者は心臓マッサージを中止。自発呼吸が弱いため、Bと著者が交互に酸素を吸いながら事故者Aの呼吸のタイミングに合わせて酸素を補助的に吹き込む。自発呼吸がある程度強くなった後は（船の揺れが激しくマウスtoマウスが行いにくいこともあって）Bが呼吸のタイミングに合わせて事故者Aの口元で酸素タンクに繋いだレギュレーターのセカンドステージをフローさせ、なるべく高濃度の酸素を呼吸できるようにする。減圧用の酸素タンクの残圧が無くなった際も、Cがリブリーザー内の酸素タンクを外し、酸素仕様レギュレーターに繋いでくれたため、継続的にAの口元で酸素をフローさせることが出来た。

吹き込みを中止後、著者は定期的に脈のモニターを行っていたが、当初は120回/分程度のペースだった脈拍が、港に到着する頃には100回/分程度まで落ち着いていた。

医療機関における対応

港に着くとすでに救急車が到着しており、救急車のスタッフとダイビングツアー参加者で事故者Aを船から救急車に移す。著者も同乗してAと共に病院の緊急処置室に搬入される。以降、Aには呼吸補助の装置や各種のモニターがセットされ集中治療が施される。著者は医療関係者にAの事故状況と事故後の対応の説明を行い、Aが必要な減圧を省略していることも伝える。著者も必要な減圧を省略していたため、ここからAと離されて、以降、著者も患者として扱われる。やがてAの意識が僅かに戻り刺激に対する反応が出てきたこと、Aと著者は、共に減圧症の可能性があり、ヘリコプターでグアムに搬送して再圧治療を受ける必要があることを告げられる。

病院に入って恐らく3時間ほどした後（時計が手元にないため時間の確認が出来ず、正確な経過は分からず）、Aと著者はヘリコプターに乗せられ、低高度を維持した飛行によってグアムに搬送される。

この時点でのAは呼吸器を取り付けられ、意識と呼吸をコントロールされた状態。グアムに着いた後は海軍病院に搬送され、再度の検査。続いて海軍の再圧施設に移される。

著者はここで再度の事情聴取を受けたが、この聴取によって再圧チャンバーによる減圧スケジュールが決められたようだ。著者に関しては、サイパンの病院に運ばれて以降継続して酸素を吸引し続けていたこともあったか、減圧症の症状は出ておらず、海軍のダイビングドクターにも再圧治療の必要はなしと判断された。ただし、医師の監視下に留まるよう指示され、その日は再圧施設のコントロールルームでAの再圧治療のサポートを行いながら夜を明かした。サポートの内容は、軍の医師の英語による指示をマイクを通して日本語でAに伝えることが主。例えば、右足を上げて下さいとか、気分が良ければ指を1本、悪ければ指を2本立てて下さいといった内容である。

Aの再圧治療は8時間ほどで終了。終了時は朝になっていた。この後、Aは再度海軍病院に移され、著者は一旦旅行代理店が用意してくれた街のホテルにチェックインする。Aは集中治療室に運ばれたようだが、その日のうちに意識も完全に戻り、翌日には退院可能と判断された。後遺症等も一切なく、医師も奇跡と言うほどの回復振りであったが、再圧治療を行っていたため、飛行機の搭乗は3日間控えるように指示される。医師の指示に従い、事故から4日後にグアムを離れ、サイパンを経由して無事日本に帰国した。事故者Aは帰国後も何の異常もなく、現在もダイビングを続けている。

事故原因に関する考察

今回の事故の原因として思い当たるのは、やはり、最初に酸素センサーの異常を知らせるアラームがあった時の対応である。その時点でフラッシングによる酸素センサーの精度の確認を行っていたら、少なくとも、そ

の時点でのシステムの異常の有無は確認できていたはずである。Aがフラッシングにかかろうとした時に数値の異常を示していた酸素センサーが正常値に戻ったこと、当日に限ってAが、呼吸ガスをモニターして減圧の演算を行う機能を持つダイブコンピューターのためにリブリーザーのシステムにセットする専用酸素センサーを装着していなかったのも不運だったと感じる。が、いずれにしる疑わしいことが少しでもある場合は一切の省略なく疑惑点の確認を行うことが大切であると実感する。

なお、仮にAのリブリーザーの異常が今回の事故の原因であったとした場合、最初のアラームが鳴る時点までが正常で、以降、異常が起きたとは考えにくい。なぜなら、仮に最初のアラーム以降、システムが異常を起こして呼吸ガスの酸素分圧が異常に高くなったとすると、アラーム以降にかなりのヴォリュームの酸素がプラスされたことになり、このことによる顕著な浮力の増加が起きているはずだからである。しかし、Aはそうした状態を認識していない。従って、設定値よりかなり酸素分圧の高い状態が潜水開始の早い時点から続いていなくて理屈に合わず、リブリーザーの異常が事故の原因であったとすれば、やはり最初異常の際にフラッシングを行い酸素センサーの精度を確認しておくことで、今回の事故は防げた可能性が高い。

また、Aが視界の異常を感じた時点のアラームが何の異常によるものかを確認する余裕があれば、原因に何らかの予測がついた可能性もあるが、事故の時点ではその余裕がなかった。あるいは、このアラームは、Aに異常をもたらした状態に対する警告ではなく、Aが浮上ロープに向けて泳ぐ過程で急速に深度を上げたことでシステム内のガスの酸素分圧が変化し、その際のセンサーの表示に誤差が出たためである可能性もある。著者がアラーム音に気付いてAを見た時点では、すでにAは深度を上げている状態であったため、アラームがなり始めたタイミングが定かでなく、今となっては、このアラームが鳴った原因の予測も難しい。

一方、事故当日の潜水前のキャリブレーションや、事故後に著者が行った酸素センサーの精度と酸素分圧

のコントロールシステム作動の確認（酸素センサーの電圧測定と、実際に酸素を通して測定した結果の酸素センサーの表示数値）に異常は見られず、事故の原因に繋がるような明確な異常の兆候は確認できなかった。また、潜降を含む潜水の過程で、Aがリブリーザーに、間違っただけの操作を行ったということも考えにくく（本人への確認、及び、システムの他の部分に異常がないことから、間違っただけの操作を行う必要性が全く考えられないことに加え、著者も少なくとも3回は、潜水中にAの酸素センサーの数値をモニターで確認している）、現時点では直接的な事故の原因の予想はついていない。

その後、ユニットをメーカーに送って状況を説明し、チェックをしてもらったが、システムの一部に水没がみられ、状況の再現が不可能なこともあって、事故の原因に関する言及はなかった。

システムの異常以外で原因を考えるとすれば、Aの酸素耐性が一般より低いという可能性が挙げられるが、Aはそれまでも今回と同様の酸素分圧でのリブリーザーによるダイビングを少なからず経験しており、大深度潜水や酸素減圧の経験も豊富、その過程で異常が起きた経験もない。また、今事故が起きた際の活動域での設定酸素分圧は $PO_2=1.3$ で、これはレクリエーションダイビングでの PO_2 の限界とされる1.4を下回るものである。さらに、事故が起きたダイビングでは激しい運動や過呼吸もなく、中枢神経系の酸素中毒の要因とされる高分圧酸素による酸素暴露も、ダイビング用に設定されている限界値の30%を超えてはいない。A自身、喫煙・飲酒の習慣もなく、前日の睡眠も十分で、朝食も取っており、体調不良による異常も考えにくい。また、二酸化炭素吸収剤も当日新品に交換しており、二酸化炭素の過剰な蓄積が酸素中毒の引き金となった可能性も考えにくい。さらに、帰国後Aは専門医による検査も行っているが、ここでも今回の事故の原因となりそうな体質的な異常は発見されなかった。従って、現在もこの事故の明確な原因は不明である。

しかし、いずれにしろ、中枢神経系の酸素中毒は突然の大発作として現れたり、前兆から大発作までの時間が極めて短い可能性がある等、トラブルとしては非

常に手ごわいことを実感している。

事故後の対応に対する考察

事故者の水面への引き上げのペースに関しては、今振り返ると、特に後半のペースが遅すぎたように感じる。より効率的な引き上げを行っていたら、心停止に至らなかったり、自発呼吸がより速い時点で戻ったといった可能性があるように思うが、このあたりは、専門家からアドバイスをいただきたい点である。

なお、CPRのペースは、今回、AHA2005の30：2を取らず、意図的にAHA2000の15：2を使った。呼吸停止からCPR開始までの時間が長かったため、血中の酸素濃度を上げるための吹き込みのインターバルをあまり長くしたくなかったのがその一番の理由である。また、特に、熱帯の炎天下でウエットスーツを着た状態では、確実な心臓マッサージが行えるのは30回連続ではなく、15回連続ではないかと思う。今回も心臓マッサージ中、著者自身がオーバーヒート気味となって、後半はペースと圧迫の強さを維持するのにかなりの努力が必要であった。仮に30：2のペースでCPRを行っていたとすると、後半の圧迫が弱くなったり、ペースが遅くなって結果は良い方向に向かわなかった気がする。こうした部分の判断（考え方）に関しても、専門家の方から、ケースに応じた望ましい方法についてアドバイスをいただきたいと思っている。

一方、今回の事故では、ダイブツアーへの参加者全員が経験豊富なダイバーでインストラクターであったため、水中を含む事故後の対応が極めてスムーズであり、各自がその時点で出来ることを確実に行ってくれたことが良い結果に通じたと感じている。さらに、ダイビングボート上に酸素が豊富にあり、CPR中、後を通して、常に高濃度の酸素を供給し続けられたことも、Aの後遺症を一切残さない全快に関係しているように思う。また、グアムの海軍病院スタッフの、シーマンシップ溢れる、暖かく、かつ確実な対応なくして、この結果は期待できなかったであろう。

事故後の対応、適切な対応が可能な環境の確保、が結果に及ぼす影響の大きさを改めて考えさせられる。