

【総説 第44回日本高気圧環境・潜水医学会学術総会 教育講演】

# 減圧症にならない潜り方

## —減圧症の発症に影響する因子と予防方法—

山見 信夫  
医療法人信愛会山見医院

キーワード ダイバー, 潜水, 発症率

### 【Review】

#### Diving to minimize the risk of decompression sickness - a review

Nobuo Yamami  
Yamami Clinic

keywords diver, diving, incidence

### はじめに

減圧症は潜り方によって発症率が異なる。米国海軍の標準減圧表に従って潜水した場合の発症率は0.03～1.5%<sup>1)</sup>、作戦行動上の潜水における発症率は1.25～1.5%<sup>2)</sup>と報告されている。スウェーデンのPADI, NAUI, CMASに所属するダイブマスターとインストラクター(男性1,516名, 女性226名)を対象としたcohort研究<sup>3)</sup>では, 男性は1,000ダイブに1.52回, 女性は1,000ダイブに1.27回の割合で発症していた。ドイツのリクリেশョナルダイバー650名を対象に行った質問調査<sup>4)</sup>では, 完全に回答が得られた429名(インストラクター43%, テクニカルダイバー8.7%を含む)では, 5,463ダイブに1回の割合で発症していた。我々が伊豆

の大瀬崎で行った聞き取り調査<sup>5)</sup>(潜水活動中のダイバーを対象としているため, 減圧症に罹患したあと潜水に復帰していない者を含んでいない)は19,011ダイブに1回であった。

ダイバーはダイブコンピューターやダイブテーブルに従い潜水しているが減圧症に罹患してしまう。減圧症の発症は数学的なアルゴリズムだけでは予測し切れないからである。発症には, 潜水プロフィール, 身体の体質や生理現象, ダイバーを取り巻く環境など, 多くの因子が関わる(表1)。減圧症の発症に影響する因子と予防法について, 過去に報告された研究を基に説明する。

表1 減圧症発症に影響する要因

#### 基本因子

潜水深度 潜水時間 浮上速度 安全停止深度 安全停止時間 潜水回数 水面休息時間

#### 影響する因子

年齢 性差 肥満 体脂肪率 脱水 アルコール摂取 疲労 健康状態 減圧症の経験 喫煙 月経  
ピル服用 呼吸ガスの組成 二酸化炭素蓄積 最大酸素摂取量 運動(潜水前・中・後)  
潜水前の加温 水温 気温 寒冷曝露 潜水直後の温浴 潜水後の航空機搭乗 潜水後の高所移動  
潜水地の標高(気圧) 卵円孔開存などの体質(動脈ガス塞栓症の誘因)

## Deep-stop

Marroniら<sup>6)</sup>は、ドップラーエコーを用いて、ダイバーの静脈内気泡を拡張スペンサーグレード (Expanded Spencer Scale) によって評価した。潜水プロフィールは、1ダイブ目が82fsw (feet of sea water) (水深25m相当) に25分、水面休息3時間30分後、2ダイブ目は82fsw (水深25m) に20分とした。浮上速度は、10fsw/分 (3m/分)、33fsw/分 (10m/分)、60fsw/分 (18m/分) とし、deep-stop (減圧時、最大水深のおよそ半分程度で一旦浮上停止する行為) を行うダイバーは、50fsw (水深15m) に5分、shallow-stop (従来から行われてきた水深6m程度で行う減圧・安全停止) を行うダイバーは、20fsw (水深6m) に5分とした。潜水後、もっとも気泡グレード (グレードの数値は少ないほうが気泡数は少ない) が低かったのは、浮上速度が10m/分のダイバーで、deep-stopとshallow-stopの両方を行った者であった。3m/分、10m/分、18m/分で浮上したいずれのダイバーも、shallow stopしか行わなかったダイバーより、shallow-stop前にdeep-stopを行ったダイバーのほうが気泡グレードは低かった。

さらに、Bennettら<sup>7)</sup>は、水深25m (82fsw) に20分と25分の潜水について、減圧時に水深15m (50fsw) で1~10分のdeep-stopと、水深6mで1~10分のshallow-stopを行い、潜水後、静脈内気泡をドップラーエコーで評価した。その結果、2分30秒deep-stopをした群がもっとも気泡発生が少なく、1分しか停止しなかったダイバーは気泡発生が多く、時間が短すぎると述べている。また、shallow-stopは10分以上行っても気泡の減少は少なく効率的でないことを示唆した。水深25mに20~25分潜水した時は、deep-stopを水深15mに少なくとも2分30秒行い、その後、水深6mに3~5分のshallow-stopを行うことを推奨すると述べている。

一方、Schellartら<sup>8)</sup>は、最大深度20m、潜水時間40分、総潜水時間47分、浮上速度10m/分の潜水を行った56名のダイバーについて、静脈内の気泡グレードを検討した。Deep-stopを行ったグループでは、減圧時に水深10mで4分、水深4mで3分の安全停止をした。一方、shallow-stopを行ったグループでは、水深4mに7分の安全停止をした。潜水終了40分後と100分後にKisman-Masurel unitsにて評価した結果、40分

後も100分後も運動群において気泡は増加し、運動群では、40分後も100分後もdeep-stopを行ったグループのほうが、気泡がより多く発生していた。Spencer gradesについても、deep-stopを行ったグループのほうがグレードレベルは大きかった (大きい方が気泡発生は多い)。よって、水深20mの潜水におけるdeep-stopの有用性は疑問であり、さらに研究が必要と述べている。

さらにBlatteauら<sup>9)</sup>は、水深50~60mに潜水し、減圧時deep-stopを行ったダイバーをSpencer gradesで評価した結果、有意に気泡グレードが低下しなかったことから、deep-stopは注意深く行う必要があると述べている。

Undersea Hyperbaric Medical Societyのワークショップ<sup>10)</sup>では、deep-stopは水深25~30mに25分またはそれより短い潜水では有用であると考えられるが、それ以浅 (水深18-21m) またはそれ以深 (水深40m) の潜水で有用というevidenceが得られていないとしている。deep-stopを肯定する研究はDivers Alert Network (DAN) に直接関わる研究者によって行われ、Undersea Hyperb Medに掲載されており<sup>6, 7)</sup>、否定的な論文は他の研究者によって、Aviat Space Environ Medに掲載されている<sup>8, 9)</sup>。

## 減圧症に罹患しない深度

水深10mまでの潜水であれば減圧症は生じないといわれてきた。しかしながら、臨床の間では、水深10mより浅い潜水であったにもかかわらず減圧症の症状が出現するダイバーを見かける。

Ikedaら<sup>11)</sup>は、水深6m圧、7m圧、8m圧の各深度下で3日間に亘る浅海空気飽和潜水 (shallow air saturation diving) を行い、減圧停止をせずに大気圧復帰したダイバーについて、超音波Mモードエコーによる静脈系気泡検知と減圧症出現を観察した。水深6m曝露群10名では、自覚症状を訴えるものはなく、僅かな気泡所見が1名に観察されただけであった。水深7m曝露群10例では自覚症状を訴える者はいなかったが、4例で気泡を検知し、水深8m曝露群9例では全例に気泡を認め、そのうち4例は減圧症に罹患し再圧治療を行ったと報告している。

Van Liewら<sup>12)</sup>も、被験者586名について、浅海飽和潜水 (shallow saturation dive) を行い減圧症発症について検討した。水深12.0ft(3.66m)～20.5ft(6.24m)の潜水では減圧症の発症はなかったが、水深20.5ft(6.24m)より深い潜水では深度とともに発症率が増加し、水深30ft(水深9.14m)の潜水では27%が減圧症に罹患したと報告している。

「減圧症にならない潜り方」は、水深6m以上に潜らないことということもできる。

### Reverse diving profile (RDP)

RDPには、multi-level divingにおけるRDPとrepetitive divingにおけるRDPの2種類がある。multi-level divingのRDPは、浅い深度から潜水を始め、後半に深い潜水をするプロフィールであり、repetitive divingのRDPは、1ダイブ目に浅い潜水をして、2ダイブ目以降に深い潜水をするプロフィールである。たとえば、forward dive profile (FDP)と同様の潜水プロフィールをRDPパターンに置き換え、米国海軍の標準減圧表を引くと、反復グループ記号上、残留窒素が多くなる(発症リスクが高くなる)。よって古くから、スクーバダイビングなどでは、RDPよりFDPが推奨されていた。しかしながら、1999年にUndersea Hyperb MedのワークショップでRDPについて議論がなされた際、無減圧潜水では、RDPが減圧症の発症リスクを増加させるという明確なデータはないと結論づけられた<sup>13)</sup>。

そのため、McInnesら<sup>14)</sup>は、multi-level divingについて、guinea pigs11匹を使い、FDP(水深36m/30分→水深24m/30分→水深12m/30分)と、RDP(水深12m/30分→水深24m/30分→水深36m/30分)を検討した。FDPでは減圧症の発現はなかったが、RDPでは6匹(55%)に減圧症が発症し、一部は死亡した。Repetitive divingのRDPについては、series one (n=11)実験として、FDP(水深30m/30分→水面休息15分→水深20m/30分→水面休息15分→水深10m/30分)とRDP(水深10m/30分→水面休息15分→水深20m/30分→水面休息15分→水深30m/30分)を行い、RDPで1匹が死亡した。また、series two (n=10)実験として、FDP(水深36m/40分→水面休息15分→水深24m/40分→水面休息15分→水深12m/40

分)とRDP(水深12m/30分→水面休息15分→水深24m/40分→水面休息15分→水深36m/40分)を行ったところ、FDPでは減圧症を認めなかったが、RDPで6匹が重症減圧症を発症した。動物実験では、RDPはFDPより発症リスクが高いことが示唆されている。

### 年齢

Sulaimanら<sup>15)</sup>は、18～45歳の1,299名を11,500ft(3,505m)～30,000ft(9,144m)の圧に曝露する実験を行った。42歳以上では、18-21歳の被験者より3倍減圧症に罹患し、26-41歳では18-21歳より罹患率が高い傾向にあった。26-41歳の範囲では、罹患傾向に差がなかった。

Carturanら<sup>16)</sup>は、男性ダイバー50名について、水深35mの海域に25分潜水する実験を行い、浮上速度9m/分群と17m/分群を比較した。両群とも水深6mに3分、水深3mに15分安全停止をした。結果は、潜水後の静脈内気泡発生に、年齢と浮上速度が関係しており、気泡発生は年齢が高くなるにつれて増加していた。37歳未満と37歳以上の群を比較すると、37歳以上の群が有意に気泡発生が多かった。

### 性差

チェンバーを使用した低圧曝露実験で発生するaltitude decompression sicknessは、男性より女性のほうが罹患率が高いと考えられている。しかし、リクリエショナルダイバーでは男性のほうが高いかもしれない。

Altitude decompression sicknessについて、Basset<sup>17)</sup>は、女性は男性より10倍減圧症に罹患しやすいと報告し、Zwengelbergら<sup>18)</sup>も、wet diverでは性差はないが、dry環境では女性のほうが4倍罹患しやすいと報告している。Weienら<sup>19)</sup>も、528例について検討し、女性のほうが4.3倍罹患しやすいと報告している。

一方、Webbら<sup>20)</sup>とBoussugesら<sup>21)</sup>は、潜水後の静脈内気泡発生は、女性より男性に多いと報告している。St Leger Dowseら<sup>22)</sup>は、リクリエショナルダイバー2,250名を対象とした質問調査で、男性は女性の2.6倍減圧症に罹患していたと報告している。

Hagbergら<sup>3)</sup>は、男性1,516名、女性226名の質問紙による調査(回収率73%)において、減圧症の発生



率は、男性は1.52/1000dive、女性は1.27/1000diveで(性差に有意差なし)、年齢、気管支喘息、体重過多、アルコール摂取による差はなかったと報告している。

### 肥満と体脂肪率

従来から肥満は減圧症のリスクになることが知られている。Dembertら<sup>23)</sup>は、米国海軍のダイバー185名について、皮下脂肪厚と体重を測定し、過去5年間の減圧症罹患率を検討した結果、肥満は減圧症のリスクファクターになることを報告した。Lamら<sup>24)</sup>も、肥満は重要なリスクファクターになるが、年齢の影響は肥満によるものと考えられると述べている。Carturanら<sup>16)</sup>は、男性ダイバー50名が水深35mの海域に25分潜水する実験を行い、浮上速度9m/分群と17m/分群を比較した。両群とも水深6mに3分、水深3mに15分の安全停止を行った。潜水後に発生する気泡量は、体脂肪率と浮上速度に関係しており、体脂肪率が17.5%以上のダイバーは、それ未満のダイバーより気泡発生が多く、減圧症のリスクが高いと報告している。また、別の研究で、Carturanら<sup>25)</sup>は、体脂肪率より、年齢、体重、最大酸素摂取量のほうがリスクファクターに成り得るとも述べている。Webbら<sup>26)</sup>も、Body Mass Index (BMI)が高いダイバーほど減圧症になりやすいことを報告し、女性より男性のほうが潜水後の静脈内気泡は生じやすく、年齢は減圧症発症に影響しないが、健康状態の悪いダイバーは減圧症に罹患する可能性が高いと述べている。

### 脱水

Aharon-Peretzら<sup>27)</sup>は、脊髄型減圧症に罹患したスポーツダイバー68名について、脱水が誘因と考えられるダイバーが4名(5.9%)存在していたことを報告している。

Fahlmanら<sup>28)</sup>は、雄のYorkshire awine57匹にラシックス(2mg/kg)を静注し、脱水群(n=26)と非脱水群(n=31)を比較した研究を行っている。空気加圧で4.33ATAに22時間曝露後、0.91ATA/分の速度で安全停止をせずに減圧した。死亡、中枢神経障害型減圧症、呼吸循環型減圧症の発生を観察した結果、減圧症の総数は、非脱水群では10例(32.3%)に対し脱水群では19例(73.1%)、呼吸症状は、非脱水群で9

例(29.0%)に対し脱水群では19例(73.1%)、中枢神経障害は、非脱水群2例(6.5%)に対して脱水群は6例(23.1%)、死亡は、非脱水群が4例(12.9%)に対して脱水群で9例(34.6%)であった(重複例あり)。脱水群は、非脱水群より呼吸循環症状出現までの時間が有意に短い傾向があった。

Plafkiら<sup>29)</sup>も、脱水はレクリエーションダイバーにおける神経系減圧障害のリスクファクターであると述べ、潜水前に水分補給することを推奨している。

Williamsら<sup>30)</sup>は、水温30℃の海洋に最大水深13.6±3.7m、潜水時間39.5±4.5分潜水した男性ダイバー20名と女性ダイバー20名について、潜水の12.4±3.5分前と16.2±3.7分後に採血を行い、脱水の程度を検討している。結果は、ヘマトクリット値が潜水後に1.78%増加しており脱水傾向が認められ、最大水深と脱水の程度に相関が認められた。熱帯地方の潜水では、脱水に注意しなければいけないと述べている。

アルコールは利尿作用があるため、脱水を助長する可能性がある。潜水直前のアルコール摂取は、末梢血管を拡張させ組織への窒素分配を促進すると考えられる。よって、潜水前のアルコール摂取は減圧症のリスクを増加させるかもしれない。

### 潜水前の赤外線サウナ

Blatteauら<sup>31)</sup>は、チェンバー潜水の前にサウナに入ったダイバーの静脈内気泡評価を行った。16名のダイバーは、潜水の1時間前から30分間、65℃のサウナに入り、その後400kPaに25分滞在し、100kPa/分で減圧し、130kPaで4分間の安全停止を行った。潜水前にサウナに入ったダイバーでは、気泡形成が少なく、軽度の脱水、循環血液量の減少、体重減少、収縮期血圧の低下、脈圧の低下が認められた。

### 疲労

Aharon-Peretzら<sup>27)</sup>らは、脊髄型減圧症に罹患したスポーツダイバー68名を調査し、潜水前に疲労があったダイバーが7名(10.3%)、四肢の労作があったダイバーが3名(4.4%)存在したと報告している。疲労は減圧症の誘因になるとこれまで伝えられてきたが、疲労と減圧症についての研究は少ない。おそらく潜水前の疲

労を定量化することが困難だからであろう。

### 最大酸素摂取量

前述した研究であるが、Carturanら<sup>16)</sup>は、男性ダイバー50名について、水深35mの海域に25分潜水する実験を行い、浮上速度9m/分群と17m/分群を比較した。両群とも水深6mに3分、水深3mに15分の安全停止を行った。その結果、酸素摂取量40ml/分/kg以上のダイバーは、それ未満のダイバーより潜水後の気泡発生が少なかった。通常、成人では加齢とともに酸素摂取量は低下し、脂肪過多になって身体的な健康度 (physical fitness) は低下するが、当研究では、浮上速度、年齢、脂肪過多だけでなく、身体的な健康度 (aerobic fitness) も、潜水後の気泡形成に関与するファクターであるとしている。若くてスリムで健康的なダイバーは、年齢が高く太ったダイバーより気泡発生は少ないと述べている。

### 喫煙

Buchら<sup>32)</sup>は、減圧障害4,350名について、重症度を mild, moderate, severe に分類し、喫煙の程度を never (nonsmokers), light (15パック以下/年), heavy (16パック/年以上) に分けて検討した。Severe例で、heavy smokerの割合が多く、レクリエーションダイバーでは、喫煙が減圧障害を重症化させるリスクファクターになることを示唆した。Wilmshurstら<sup>33)</sup>も、喫煙は神経型減圧症のリスクを増加させる可能性があることを述べている。

### 月経、低用量ピル服用

Leeら<sup>34)</sup>は、23施設を受診したスポーツダイバーの減圧症150例を検討し、月経周期の1週目に罹患している例が多いと報告している。また、Boussugeら<sup>21)</sup>は、水深35mに25分潜水した男性52名、女性52名において、静脈ドップラーエコー検査を行い、Spencer scaleとKisman Integrated Severity Score (KISS) indexを用いて評価した。その結果、気泡産生は、女性より男性に多く、閉経期女性ではKISS indexが高く、年齢、体重、体脂肪量と相関していること、また、気泡の産生はピル服用と月経周期に関係しないことを

報告している。

### 潜水前の運動

Dujicら<sup>35)</sup>は、潜水前に運動した男性ダイバー12名について、潜水終了後の気泡グレードを評価している。ダイバーは、潜水の24時間前に、最大心拍数90%の強度で3分、その後50%を2分、この運動を8クール行った。チェンバーによる加圧曝露は、280kPaに80分、減圧速度は9m/分とし、130kPaに7分間の安全停止を行った。減圧終了直後から静脈系気泡を80分間モニターした結果、気泡グレードは、運動群において有意に低く、潜水前の運動が気泡発生を減少させることを示唆した。

Blatteauら<sup>36)</sup>は、16名の軍のダイバーについて、潜水2時間前から最大心拍数の60-80%強度の運動を45分間行い、その後、チェンバーにて水深30m(400kPa)に30分曝露したのち10m/分で減圧し、水深3mに9分間の安全停止をする実験を行った。減圧終了30分後と60分後、Spencer scaleで評価した結果、60分後は、controlが1.25に対してexerciseが0.44で、運動したダイバーの中に気泡が増加した者はひとりもいなかった。気泡の減少には、ガス核が影響しているのかもしれないと述べている。また、別の研究でBlatteauら<sup>37)</sup>は、男性ダイバー16名が、加圧の2時間前から水分補給を行いながら40分間ランニングを行い、その後、チェンバーにて400kPaに30分曝露する実験を行っている。曝露中は、心拍数を110-120beats/分に保つよう運動し、減圧は100kPa/分で行い、130kPaで9分間安全停止を行った。潜水後、ドップラーエコーにて右心系を検査した結果、KISS Indexは、座位群:運動群=12.26:5.36であり、運動群のほうが有意に気泡発生は少なかった。

### 減圧中の運動

減圧中の運動について、Jankowskiら<sup>38)</sup>は、29名の男性ボランティアダイバーを検討した。被験者は、水深45msw (450kPa)に30分間、延べ44回のwet diveを行った。28名は運動をせず、11名は下肢の運動のみ行い、5名は上肢の運動のみを行った。潜水終了30分後にドップラー検査をした結果、減圧中に運動したダイ

バーでは静脈内気泡が減少していた。また、上肢運動群と下肢運動群間において、気泡発生量と減圧症発生率に差はなかったと報告している。

### 潜水後の運動

Pollardら<sup>39)</sup>は、6グループに分けたrat20匹を240fsw (735kPa)に2時間曝露し3パターンの減圧を行った後、運動を行わせ減圧障害の発生を観察した。減圧速度は30fsw/分、45fsw/分、60fsw/分とした。曝露後の運動は、トレッドミルで1.6m/分を30分間行うこととし、減圧障害のサインは、呼吸器症状、歩行障害、運動麻痺、死亡とした。結果は、潜水後に運動した群で、死亡と減圧症発症頻度が有意に高く、30fsw/分の減圧群より60fsw/分のほうが早期に死亡しており、30fsw/分の減圧群より、45fsw/分群と60fsw/分群のほうが、死亡と減圧症発症頻度が高かった。

Balestraら<sup>40)</sup>は、卵円孔開存による右左シャントから生じる動脈ガス塞栓の観点から研究を行っている。15例のダイバーについて、下部食道にバルーンカテーテルを挿入し、各条件下で胸腔内圧を測定した。条件は、バルサルバ法の耳抜き(3段階の強度を設定)、咳、バルサルバ法を伴う膝屈曲、膝屈曲、等尺性運動とした。力強いバルサルバ法の耳抜き、咳、膝屈曲では胸腔内圧が上昇するが、軽いバルサルバ法であれば胸腔内圧は上がらなかった。ダイバー(特に卵円孔開存があるダイバー)には、潜水後の激しい四肢または腹部運動を控えるようアドバイスするべきであると述べている。

### 環境温度

Mekjavicら<sup>41)</sup>は、潜水後の寒冷曝露と熱いシャワー浴について検討している。水深9.14m圧(30fsw)に空気呼吸で12時間滞在し、安全停止をせずに減圧した被験者が、10℃と40℃の空気環境下に3時間曝露する実験である。結果は、10℃曝露(cold air exposure群)は、40℃曝露(warm air exposure群)と比較しても直腸温は低下しなかったが、皮膚温は低下した。静脈系気泡はcold air exposure群の4名中3名に観察され、warm air exposure群では1例だけに観察された。Cold air exposure群のうちhot showerを浴びた1例に

Type I 症状が出現した。潜水後の寒冷曝露は気泡発生を増加させ、減圧症発生リスクを増大させることが示唆され、潜水後の熱いシャワー浴も気泡発生と減圧症発生を増加させることが示唆された。Broome<sup>42)</sup>も、177名の減圧症を検討し、潜水後の地上気温(大気温)が低いほど減圧症が発症しやすい傾向があったと報告している。生理学的な観点から考察すれば、体が冷えた状態で潜水を開始すると末梢組織への窒素分配は減る。逆に暖かい海に体が保温された状態で潜水すると、窒素の分配は促進されると考える。安全停止中、体が冷やされ循環血液量が減少するような組織があれば、そのような組織は窒素の排泄が妨げられる可能性がある。

### 潜水後の航空機搭乗

潜水後の航空機搭乗の実験はDivers Alert Network (DAN) USAに関係する研究者が積極的に行っている。Vannら<sup>43)</sup>は、283名のトライアル実験を行った。1ダイブだけのトライアル実験は、60ft圧に55分曝露、2ダイブするトライアルは、1ダイブ目が60ft圧に55分、その後、水面休息を60分取った後、2ダイブ目が60ft圧に20分とした。3ダイブするトライアルでは、1ダイブ目が60ft圧に55分、その後、水面休息を60分取って、2ダイブ目は60ft圧に20分、その後、水面休息を60分取り、3ダイブ目が60ft圧に20分とした。低圧曝露は、8,000ft (2,438m)に4時間とした。1ダイブ/日では、潜水終了から航空機搭乗までの時間を12時間あければ減圧症は発症しなかったが、2ダイブ以上/日になると15時間目に搭乗しても発症が認められた。よって、第39回Undersea and Hyperbaric Medical Society annual meetingのworkshopで提唱されたガイドラインでは、搭乗前48時間以内に潜水の総合計時間が2時間未満かつ無減圧潜水であれば、水面休息時間を12時間確保すればよいとしていたが、この研究の結果から、2ダイブ以上/日する場合は、搭乗までの時間をさらに延ばさなければいけないとした。その後、Vannら<sup>44)</sup>は、dry環境のチェンバー潜水を3ダイブ/日する実験を行い、3～17時間後に8,000ft圧(75kPa)に4時間低圧曝露するトライアルを行っている。被験者495名に対して802回の曝露を行った結果、17時間



水面休息した52例には減圧症が発症しなかったと報告している。現在、DAN USAが提唱している潜水後の航空機搭乗ガイドライン<sup>45)</sup>は、無減圧潜水(減圧停止を必要としない潜水)の場合は、1ダイブ/日だけであれば最低12時間あけ、複数回/日または複数日潜水したときは最低18時間あける。また、減圧停止を必要とした潜水を行った場合は、基礎データが少ないため、慎重を期して18時間以上、十分な時間を確保することとしている。条件・注釈として、キャビン圧2,000～8,000ft(610～2438m)の航空機に搭乗する減圧症に罹患していないダイバーを対象としたガイドラインであり、減圧症発症リスクを減らすために作られたもので、減圧症を起こさないことを保証するものではないこと、航空機搭乗までの時間をさらに延長すれば減圧症の発症リスクを低下させることができるとしている。

Freibergerら<sup>46)</sup>も627名のレクリエーションダイバーについてcase-control studyを行っている。潜水終了から航空機搭乗までの時間と最終日の最大深度を検討した結果、減圧症罹患者の航空機搭乗までの時間は20.7時間で、非罹患者は27.1時間であった。搭乗までの時間が短いほうが障害例は多かったと述べている。また、最終日の最大深度は、減圧症罹患者は22.5mswに対して、非罹患者は19.0mswであった。最終日の深度は深いほうが障害例は多かったと報告している。

潜水後の航空機搭乗について、Vannら<sup>47)</sup>は、480名(男性331名、女性149名)について2種類の潜水プロフィールをテストし、8,000ft(2,438m)に曝露後、静脈内気泡と減圧症発症率を観察している。テスト1は、水深60ftに40分潜水後、安全停止せずに浮上した、米国海軍の反復グループ記号Gに該当するダイバーで、8,000ft(2,438m)の航空機搭乗までに12時間5分の水面休息時間が必要なダイバー、テスト2は、水深60ftに120分潜水し、水深10ftに26分減圧停止した米国海軍反復グループ記号Nのダイバーである。テスト1のダイバーでは、5時間以内に航空機搭乗した者に気泡を観察できたが、それ以降に搭乗した者では認められなかった。テスト2のダイバーでは、潜水後12時間以降に航空機搭乗した者であっても減圧症が発症した。よって、潜水後の航空機搭乗による減圧症の発

症には、潜水深度、反復潜水、減圧潜水が影響をすることが示唆された。

Sheffield<sup>48)</sup>は、潜水後の低圧曝露によって発症する減圧症を予防するためのガイドラインを解説している。予防の考え方には大きく2つあり、ひとつは、DAN USAが提唱している18時間ルールのような、潜水終了後、航空機搭乗するまで、ある一定の時間を設ける規準(時間規準)、もうひとつは、決められた反復グループ記号になるまで搭乗しないとする規準(反復グループ記号規準)である。我々も、日本人の航空機搭乗例について反復グループ記号を調べてみると、航空機搭乗後の発症例を含む108名の減圧症において、潜水終了時点の米国海軍反復グループ記号がA～Eのダイバーはいなかった<sup>49)</sup>。

#### 潜水後の陸上の高所移動

潜水後の高所移動による減圧症発症についての研究は少ない。海外では報告がなく、我が国の地理的な特徴と、多くのダイバーが日帰りなど短い期間で、自宅近くのポイントに潜るダイビングスタイルから生じる障害と考えられる。高所を移動する時間は、航空機搭乗より短く、気圧も低い。標高は400m台が多く、高くても1,000m程度である。潜水後の陸上の高所移動について、我々は、伊豆半島西海岸で潜水し、関東地方に帰宅して減圧症に罹患した98名のダイバーを検討した<sup>50, 51)</sup>。陸上の高所移動後に発症したダイバーには、反復グループ記号がA～Fのダイバーは存在せず、G～Lが14名(14.3%)、減圧停止が必要なダイバーまたは浮上速度が超過していたダイバーが84名(85.7%)存在した。よって、潜水後の高所移動による減圧症を予防するには(標高400mの高所移動の場合)、まず、減圧停止が必要な潜水をしないこと、浮上速度を超過しないこと(少なくとも毎分9m)を前提とし、高所到達時点の反復グループ記号がA～Cになるように潜水することである。潜水終了直後の反復グループ記号がA～Fであれば、潜水ポイントから高所地点に移動するのに通常3～5時間経過するので、高所到達時にはほとんどの場合A～Cになる(たとえGであっても、3時間経過するとCになる)。潜水深度と時間を控え、潜水終了時点の記号をA～Cになるように

潜れば、直ちに高所移動したとしても発症リスクはほとんどない。

### おわりに

我々もリクリেশヨナルダイバーの減圧症リスクファクターを調べてみると、最大水深, 1日の潜水回数, 水面休息時間の長さ, 潜水後の24時間以内の航空機搭乗, ダイブコンピューターの浮上速度超過警告アラーム, 安全停止の有無が, 減圧症発症に影響していることが示唆された<sup>52)</sup>。しかしながら, レクリেশヨナルダイバーは, 個体差があり, 潜水環境, 潜水プロフィール(女性より男性のほうが深く潜るなど)が大きく異なるため, 比較するcontrolの設定が難しい。これまで述べてきたように, 潜水する深度によってdeep-stopが有用であったりなかったり, altitude decompression sicknessかレクリেশヨナルダイバーの減圧症かでもリスクファクターが異なる。どのような症状と所見を減圧症と診断したのか, 障害部位や重症度にも影響される。減圧症の誘因をより詳しく検討するには, 減圧症罹患者の身体的特徴(卵円孔開存などの体質)をスクリーニングし, 潜水プロフィールが一致するバディのデータも収集するなど, 分析対象者の条件を絞る工夫が必要であろう。

### 謝 辞

本稿は, 第44回日本高気圧環境・潜水医学会学術総会(2009年, 東京)における教育講演をまとめたものである。講演の機会を与えてくださった会長の徳永昭先生に心から御礼を申し上げます。

### 文 献

- 1) Bassett BE : Decompression Procedure for Flying after Diving and Diving at Altitudes above Sea Level. Brooks AFB, TX : USAF School of Aerospace Medicine, 1982 ; USAFSAM TR 82-47.
- 2) Berghage TE, Durman D : U.S.Navy Air Decompression Schedule Risk Analysis. Bethesda, MD : Naval Medical Research Institute, 1980 ; NMRI Report no.80-1.
- 3) Hagberg M, Ornhagen H : Incidence and risk factors for symptoms of decompression sickness among male and female dive masters and instructors - a retrospective cohort study. Undersea Hyperb Med 2003 ; 30 : 93-102.
- 4) Kingmann C, Gonnermann A, Dreyhaupt J, Vent J, Praetorius M, et al. : Decompression illness reported in a survey of 429 recreational divers. Aviat Space Environ Med 2008 ; 79 : 123-128.
- 5) Nakayama H, Shibayama M, Yamami N, Togawa S, Takahashi M, et al. : Decompression sickness and recreational scuba divers. Emerg Med J 2003 ; 20 : 332-334.
- 6) Marroni A, Bennett PB, Cronje FJ, Cali-Corleo R, Germonpre P, et al. : A deep stop during decompression from 82 fsw (25m) significantly reduces bubbles and fast tissue gas tensions. Undersea Hyperb Med 2004 ; 31 : 233-243.
- 7) Bennett PB, Marroni A, Cronje FJ, Cali-Corleo R, Germonpre p, et al. : Effect of varying deep stop times and shallow stop times on precordial bubbles after dives to 25 msw (82 fsw) . Undersea Hyperb Med 2007 ; 34 : 399-406.
- 8) Schellart NA, Corstius JJ, Germonpre P, Sterk W : Bubble formation after a 20-m dive : deep-stop vs. shallow-stop decompression profiles. Aviat Space Environ Med 2008 ; 79 : 488-494.
- 9) Blatteau JE, Hugon M, Gardette B, Sainty JM, Galland FM : Bubble incidence after staged decompression from 50 or 60 msw : effect of adding deep stops. Aviat Space Environ Med 2005 ; 76 : 490-492.
- 10) Marroni A, Cronje FJ : The use of deep stops in recreational diving : DAN Europe and IDAN - overview of earlier studies and recent observations. In : Decompression and the Deep Stop Workshop Proceedings. June 24-25, 2008. Undersea Hyperb Med 2009 ; 36 : 418-419.
- 11) Ikeda T, Okamoto Y, Hashimoto A : Bubble formation and decompression sickness on direct ascent from shallow air saturation diving. Aviat Space Environ Med 1993 ; 64 : 121-125.
- 12) Van Liew HD, Flvnn ET : Direct ascent from air and N2-O2 saturation dives in humans : DCS risk and evidence of a threshold. Undersea Hyperb Med 2005 ; 32 : 409-419.
- 13) Lang MA, Lehner CE : Proceedings of the Reverse Dive Profile Workshop 29-30/October 1999. Kensington MD ; Undersea and Hyperbaric Medical Society, 2000.
- 14) McInnes S, Edmonds C, Bennett M : The relative



- safety of forward and reverse diving profiles. *Undersea Hyperb Med* 2005 ; 32 : 421-427.
- 15) Sulaiman ZM, Pilmanis AA, O'Connor RB : Relationship between age and susceptibility to altitude decompression sickness. *Aviat Space Environ Med* 1997 ; 68 : 695-698.
  - 16) Carturan D, Boussuges A, Vanuxem P, Bar-Hen A, Burnet H, et al. : Ascent rate, Age, maximal oxygen uptake, adiposity, and circulating venous bubble after diving. *J Appl Physiol* 2002 ; 93 : 1349-1356.
  - 17) Basset BE : Decompression sickness in female subjects exposed to altitude during physiological training. In : Preprints of the Aerospace Medical Association Annual Scientific Meeting. Alexandria, VA : Aerospace Medical Association 1973 ; 241-242.
  - 18) Zwingelberg KM, Knight MA, Biles JB : Decompression sickness in women divers. *Undersea Biomed Res* 1987 ; 14 : 311-317.
  - 19) Weien RW, Baumgartner N : Altitude decompression sickness : Hyperbaric therapy results in 528 cases. *Aviat Space Environ Med* 1990 ; 61 : 833-836.
  - 20) Webb JT, Kannan N, Pilmanis AA : Gender not a factor for altitude decompression sickness risk. *Aviat Space Environ med* 2003 ; 74 : 2-10.
  - 21) Boussuges A, Retali G, Bodere-Melin M, Gardette B, Carturan D : Gender differences in circulating bubble production after SCUBA diving. *Clin Physiol Funct Imaging* 2009 ; 29 : 400-405.
  - 22) St Leger Dowse M, Bryson P, Gunby A, Fife W : Comparative data from 2250 male and female sports divers : diving patterns and decompression sickness. *Aviat Space Environ Med* 2002 ; 73 : 743-749.
  - 23) Dembert ML, Jekel JF, Mooney LW : Health risk factors for the development of decompression sickness among U.S. Navy divers. *Undersea Biomed Res* 1984 ; 11 : 395-406.
  - 24) Lam TH, Yau KP : Analysis of some individual risk factors for decompression sickness in Hong Kong. *Undersea Biomed Res* 1989 ; 16 : 283-292.
  - 25) Carturan D, Boussuges A, Burnet H, Fondarai J, Vanuxem P, et al. : Circulating venous bubbles in recreational diving : relationships with age, weight, maximal oxygen uptake and body fat percentage. *Int J Sports Med* 1999 ; 20 : 410-414.
  - 26) Webb JT, Kannan N, Pilmanis AA : Gender not a factor for altitude decompression sickness risk. *Aviat Space Environ med* 2003 ; 74 : 2-10.
  - 27) Aharon-Peretz J, Adir Y, Gordon CR, Kol S, Gal N, et al. : Spinal cord decompression sickness in sport diving. *Arch Neurol* 1993 ; 50 : 753-756.
  - 28) Fahlman A, Dromsky DM : Dehydration effects on the risk of severe decompression sickness in a swine model. *Aviat Space Environ Med* 2006 ; 77 : 102-10.
  - 29) Plafki C, Almeling M, Welslau W : Dehydration-a risk factor for the decompression-accident in diving. *Dtsch Z Sportmed* 1997 48 : 242-244.
  - 30) Williams ST, Prior FG, Bryson P : Hematocrit change in tropical scuba divers. *Wilderness Environ Med* 2007 ; 18 : 48-53.
  - 31) Blatteau JE, Gempp E, Balestra C, Mets T, Germonpre P : Pre-dive sauna and venous gas bubbles upon decompression from 400 kPa. *Aviat Space Environ Med* 2008 ; 79 : 1100-1105.
  - 32) Buch DA, El Moalem H, Dovenbarger JA, Ugucioni DM, Moon RE. : Cigarette smoking and decompression illness severity : a retrospective study in recreational divers. *Aviat Space Environ Med* 2003 ; 74 : 1271-1274.
  - 33) Wilmshurst P, Davidson C, O'Connell G, Byrne C : Role of cardiorespiratory abnormalities, smoking and dive characteristics in the manifestations of neurological decompression illness. *Clin Sci (Lond)* 1994 ; 86 : 297-303.
  - 34) Lee V, St Leger Dowse M, Edge C, Gunby A, Bryson P : Decompression sickness in women : a possible relationship with the menstrual cycle. *Aviat Space Environ Med* 2003 ; 74 : 1177-1182.
  - 35) Dujic Z, Duplancic D, Marinovic-Terzic I, Bakovic D, Ivancev V, et al. : Aerobic exercise before diving reduces venous gas bubble formation in humans. *J Physiol* 2004 ; 555.3 : 637-642.
  - 36) Blatteau JE, Gempp E, Galland FM, Pontier JM, Sainty JM, et al. : Aerobic exercise 2 hours before a dive to 30 msw decreases bubble formation after decompression. *Aviat Space Environ Med* 2005 ; 76 : 666-669.
  - 37) Blatteau JE, Boussuges A, Gempp E, Pontier JM, Castagna O, et al. : Haemodynamic changes induced by submaximal exercise before a dive and its consequences on bubble formation. *Br J Sports Med* 2007 ; 41 : 375-

- 379.
- 38) Jankowski LW, Nishi RY, Eaton DJ, Griffin AP: Exercise during decompression reduces the amount of venous gas emboli. *Undersea Hyperb Med* 1997; 24: 59-65.
- 39) Pollard GW, Marsh PL, Fife CE, Smith LR, Vann RD: Ascent rate, post-dive exercise, and decompression sickness in the rat. *Undersea Hyperb Med* 1995; 22: 367-376.
- 40) Balestra C, Germonpre P, Marroni A: Intrathoracic pressure changes after valsalva strain and other maneuvers: implications for divers with patent foramen ovale. *Undersea Hyperb Med* 1998; 25: 171-174.
- 41) Mekjavic IB, Kakitsuba N: Effect of peripheral temperature on the formation of venous gas bubbles. *Undersea Biomed Res* 1989; 16: 391-401.
- 42) Broome JR: Climatic and environmental factors in the aetiology of decompression sickness in divers. *J Roy Nav Med Serv* 1993; 79: 68-74.
- 43) Vann RD, Gerth WA, Denoble PJ, Sitzes CR, Smith LR: A comparison of recent flying after diving experiments with published flying after diving guidelines. *Undersea Hyperb Med* 1996; 23: 36.
- 44) Vann RD, Gerth WA, Denoble PJ, Pieper CF, Thalmann ED: Experimental trials to assess the risks of decompression sickness in flying after diving. *Undersea Hyperb Med* 2004; 31: 431-444.
- 45) Vann RD, Pollock NW, Denoble PJ, Freiburger JJ: Flyng after diving. *Alert Diver* 2007; November/December: 36-39.
- 46) Freiburger JJ, Denoble PJ, Pieper CF, Ugucconi DM, Pollock NW, et al.: The relative risk of decompression sickness during and after air travel following diving. *Aviat Space Environ Med* 2002; 73: 980-984.
- 47) Vann RD, Pollock NW, Freiburger JJ, Natoli MJ, Denoble PJ, et al.: Influence of bottom time on preflight surface intervals before flying after diving. *Undersea Hyperb Med* 2007; 34: 211-218.
- 48) Sheffield PJ: Flying after diving guidelines: A review. *Aviat Space Environ Med* 1990; 61: 1130-1138.
- 49) 山見信夫, 芝山正治, 高橋正好, 他.: スクーバ潜水後の飛行機搭乗によって発症するスポーツダイバーの減圧症. *日本臨床スポーツ医学会* 2000; 8: 171-176.
- 50) Yamami N, Mano Y, Shibayama M, Takahashi M, Kawashima M: Peculiar diving activity on sport divers who live in Kanto area; Decompression sickness occurred by driving to altitude after diving. *United States-Japan Cooperative Program in Natural Resources*. Tokyo: Japan Marine Science and Technology Center 1999; 15: 203-213.
- 51) 山見信夫, 眞野喜洋, 芝山正治, 他.: 関東に在住するスポーツダイバーの特異的な潜水活動; 特に潜水後の高所移動による減圧症の発症について. *日本臨床スポーツ医学会誌* 1999; 7: 68-75.
- 52) 鈴木直子, 山見信夫, 外川誠一郎, 他.: レジャーダイバーを対象とした統計学的分析による減圧症の誘因探索. *日本高気圧環境・潜水医学会雑誌* 2009; 44: 153.