

労災疾病臨床研究事業費補助金研究報告書  
(160302)

# 高気圧作業に伴う船上(水上)減圧における減圧症発症状況等 人体影響に係る調査研究

平成 29 年度分

代表研究者 柳下 和慶

(東京医科歯科大学・医学部附属病院高気圧治療部・准教授・部長)

平成 30 年 3 月



## 目 次

### 総合研究報告

#### 高気圧作業に伴う船上（水上）減圧における減圧症発症状況等

##### 人体影響に係る調査研究

##### 研究代表者氏名・分担研究者

研究代表者氏名・分担研究者	-----	1
I. 背景・目的	-----	2
II. 期待される成果	-----	3
III. 船上減圧システム	-----	4
1. 必要な設備・備品	-----	4
2. 潜水方法および減圧プロフィール	-----	5
IV. 船上減圧の減圧プロフィール	-----	7
1. U.S.Navy(米国海軍)空気潜水プロフィール	-----	7
4-1-1 21.5m・90分作業のプロフィール	-----	7
4-1-2 36.8m・90分作業のプロフィール	-----	8
2. U.S.Navy 混合ガス潜水プロフィール	-----	9
4-2-1 46.0m・30分作業のプロフィール	-----	9
4-2-2 61.3m・30分作業のプロフィール	-----	10
3. DCIEM 空気プロフィール	-----	11
4-3-1 21.5m・90分の作業プロフィール	-----	11
4-3-2 36.8m・90分の作業プロフィール	-----	12
4. DCIEM 混合ガス潜水プロフィール	-----	13
4-4-1 46.0m・30分の作業プロフィール	-----	13
4-4-2 61.3m・30分の作業プロフィール	-----	14
5. A社の混合ガス潜水・船上減圧表	-----	15
4-5-1 46.0m・30分(酸素濃度20%)の作業プロフィール	-----	15
4-5-2 46.0m・30分(酸素濃度10%)の作業プロフィール	-----	16
4-5-3 61.3m・30分(酸素濃度20%)の作業プロフィール	-----	17
4-5-4 61.3m・30分(酸素濃度10%)の作業プロフィール	-----	18
表 4-1. 船上減圧の比較	-----	19
V. 調査対象および方法	-----	20
1. 調査対象	-----	20
2. 方法	-----	20

VI. 調査結果	-----	21
1. 調査期間と作業件数	-----	21
2. 減圧症発症率	-----	21
3. Heliox 潜水の船上減圧による潜水深度と作業時間との関係	-----	22
4. 空気潜水の船上減圧による潜水深度と作業時間との関係	-----	23
5. 減圧症発症誘因についての統計学的検討	-----	24
VII. 考察	-----	30
VIII. 結論	-----	32

労災疾病臨床研究事業費補助金

(総合) 研究報告書

高気圧作業に伴う船上(水上)減圧における減圧症発症状況等

人体影響に係る調査研究

代表研究者 柳下 和慶 (東京医科歯科大学 医学部附属病院高気圧治療部  
准教授、部長)

分担研究者 小島 泰史 (同大学医学部附属病院高気圧治療部 非常勤講師)

芝山 正治 (同大学大学院整形外科学 非常勤講師)

新関 祐美 (同大学医学部附属病院高気圧治療部 非常勤講師)

山本 尚輝 (同大学医学部附属病院高気圧治療部 医員)

## I. 背景・目的

船上減圧の歴史は、英国海軍によるエンプレスオブアイランド号 (Empress of Ireland) からの銀の回収作業 (1914 年) にあたり荒天等の理由から船上減圧を強いられた事例が最も古く、その後主に米国海軍によって技術の発展がなされてきた (BENNETT AND ELLIOTT'S PHYSIOLOGY AND MEDICINE OF DIVING)。

船上減圧とは、水中での所定の減圧停止時間をとらせることなく急速減圧し、その後直ちに船上の再圧室でダイバーをある深度レベルまで加圧した後、改めて減圧する方法である。船上減圧は水中減圧に起因する様々なリスク、例えば急激な天候の変化による水中減圧の中止、長時間低温の水中に滞在することによる体温低下等のリスクを最小限に抑制することができる。さらには特に水中での酸素減圧や、酸素が含まれる混合ガス潜水では、船上減圧により水中での急性酸素中毒の発症リスクを低減することができる。

船上減圧では減圧途中の最終段階で急激に減圧し大気圧に曝露するため、通常的水中減圧に比べて減圧症リスクが高まると可能性がある。そのため水中減圧深度を離脱してから一旦大気圧に曝露し、再圧室に入って所定深度まで加圧を完了までの時間を短時間としなければならない、5～7分ほどに制限されている報告もある (US Navy Diving Manual Rev.6, DCIEM Diving Manual: Defense and Civil Institute of Environmental Medicine)。

船上減圧における人体への影響、特に減圧症発生状況の調査のためには、船上減圧の実情等を把握し、減圧症等の発症について比較検討を要する。諸外国での船上減圧については、公的機関 (DCIEMやUS Navyなど) 以外でのデータを収集・把握するのは非常に困難である。国内では、公的機関での船上減圧の実績は少ない。一方、国内では1970年代、当時の海洋科学技術センター (JAMSTEC: 現国立研究開発法人海洋開発研究機構) において実施されたシートピア計画で混合ガス潜水の技術が導入されたが、その際の技術を基盤として深海潜水を実施している民間業者が、最も船上減圧の実績を有している。

以上の背景より、今回の研究目的は、主に十分に実績を有した民間企業での船上減圧 (混合ガス・空気潜水) の方法・実績を調査し、船上減圧による減圧症の発症状況等の人体への影響に係る情報を収集することである。さらに、安全に船上減圧を行う場合に配慮すべき事項の検討に資する知見を得ることを目的とする。

## Ⅱ．期待される成果

本事業により、船上減圧における減圧症を主とした人体への影響を評価することができる。船上減圧の安全性が評価されたならば、今後の船上減圧方法についての一定の指針を提示することが可能となる。結果として、減圧症発症率の低減、潜水作業者へのより良い労働環境の提供が可能となり、潜水作業の労働管理が高質となる。減圧症や他の疾病の発症率の低減に資することが考えられ、労災補償対象数、補償額が減少するなど、労災補償行政に直接的に反映する可能性が高い。

新高圧則における例外規定として、船上減圧を許容する一定の基準を提示できる。

### Ⅲ. 船上減圧システム

#### 1. 必要な設備・備品

船上（台船）に再圧室（DDC）、ダイバー潜降・浮上用のケージクレーン・混合ガスなどのガスシリンダー・ダイバーとの交信などの管理を行う管制室などを設置する。

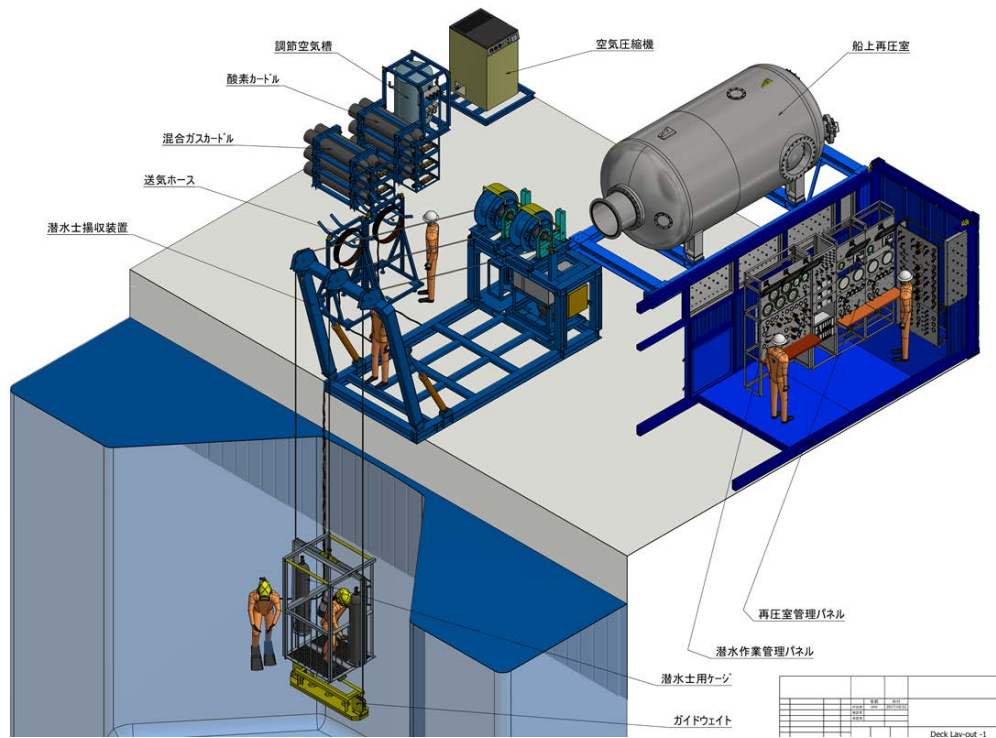


図 3-1 船上に設置された装置



## 2. 潜水方法および減圧プロフィール

送気式により潜水し、浮上は所定の浮上を行う。減圧深度 12m で水中に降ろされたゲージに乗り込み減圧を行う。12m で所定の減圧時間を終了したらゲージに乗ったまま浮上を行い船上に移動し、器材を取り外して再圧室に入室し、直ちに加圧する。12m の減圧地点から再圧室に入室するまでに要する時間は 5～7 分以内とする。再圧室で 12m まで加圧した時点で酸素吸入を開始する。酸素吸入を 30 分行った後 5 分の空気呼吸（酸素マスクを外す）に切り替え酸素 30 分、空気 5 分の間隔で酸素吸入を所定の減圧に応じて続ける。

### 4. 船上減圧プロフィール例

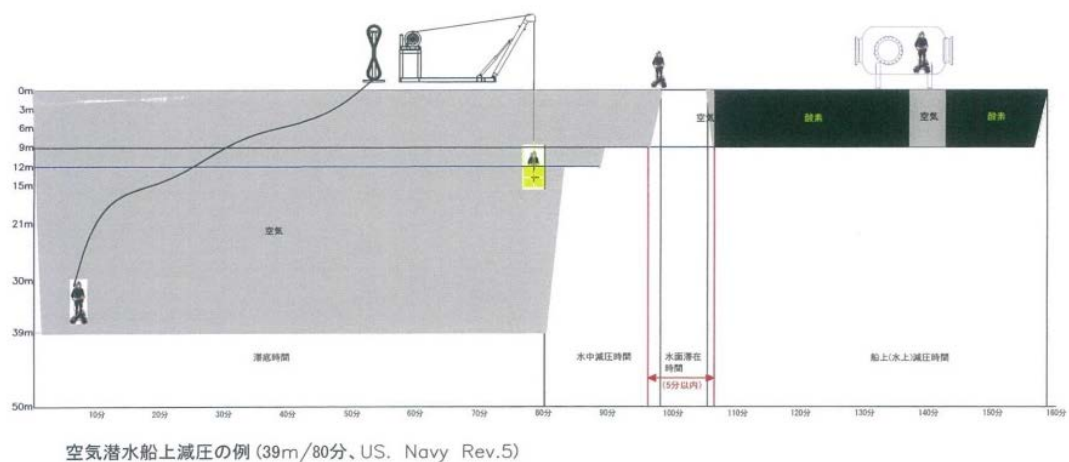


図 3-2 船上減圧システムを利用した潜水プロフィールと船上減圧方法



写真 3-1 ベルバンス方式によるケージを利用して浮上するダイバー



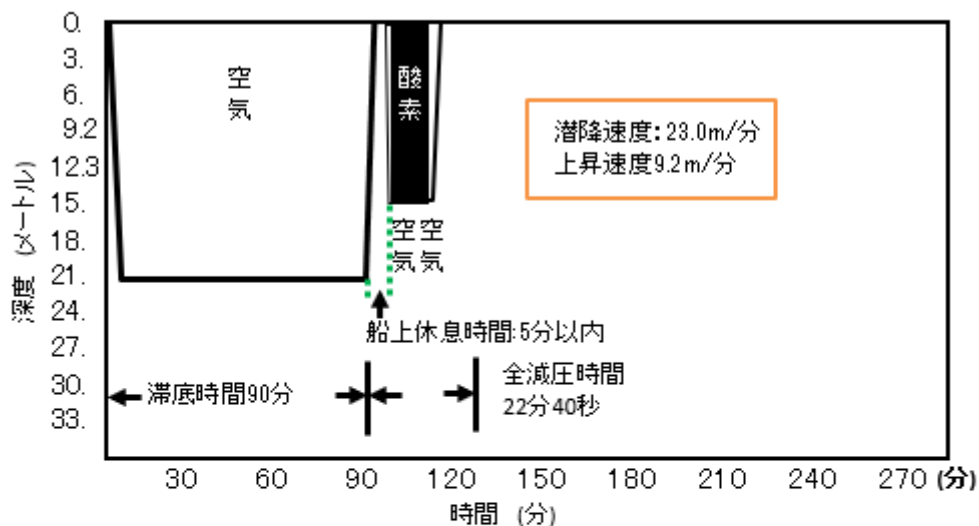
写真 3-2 船上減圧用のチェンバー

#### IV. 船上減圧の減圧プロフィール

##### 1. USNavy 空気潜水プロフィール

##### 4-1-1 21.5m・90分の減圧表の場合

USN 空気潜水・船上酸素減圧表 (21.5m/90分)

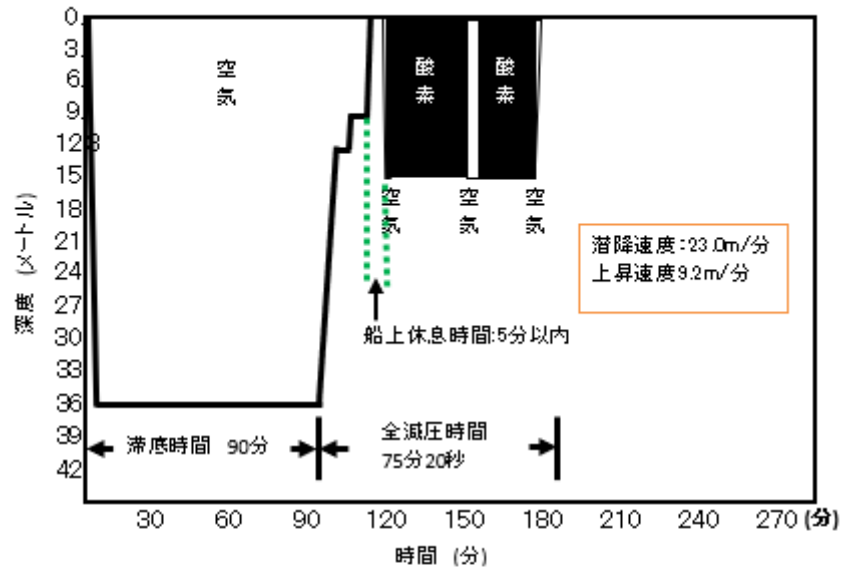


潜水スケジュール	21.5m/90分
減圧スケジュール	21.5m/90分
減圧停止時間	
船上	水中減圧点 12.3mから上昇してチャンバー 深度15.3m加圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-12.3m	30秒 空気
12.3m	15分 100%酸素
12.3m-0m	1分 空気

図 4-1 USNavy 21.5m・90分

4-1-2 36.8m・90分の減圧表の場合

USN 空気潜水・船上酸素減圧表 (36.8m/90分)



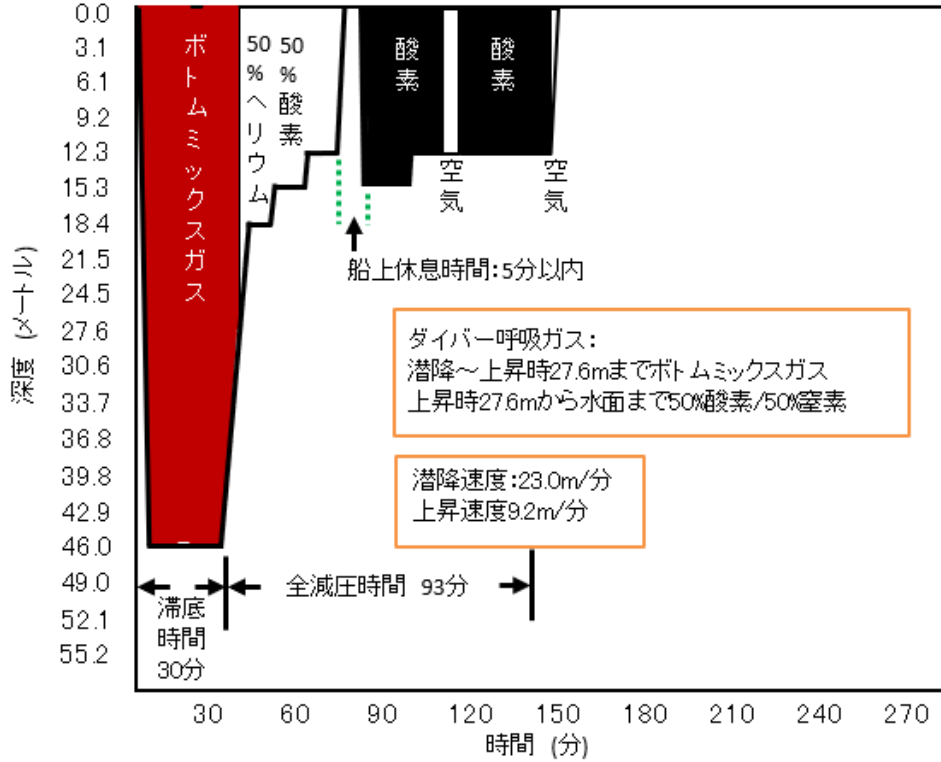
潜水スケジュール	36.8m/90分
減圧スケジュール	36.8m/90分
減圧停止時間	
水中	
12.3m	3分 空気
9.2m	7分 空気
船上	水中減圧点 9.2mから上昇してチャンバー 深度12.3m加圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-12.3m	30秒 空気
12.3m	56分 100%酸素51分-空気5分
12.3m	1分 空気

図 4-2 USNavy 36.8m・90分

2. USNavy 混合ガス潜水プロフィール

4-2-1 46.0m・30分の場合の減圧表の場合

USN 混合ガス潜水・船上酸素減圧表 (46.0m/30分)

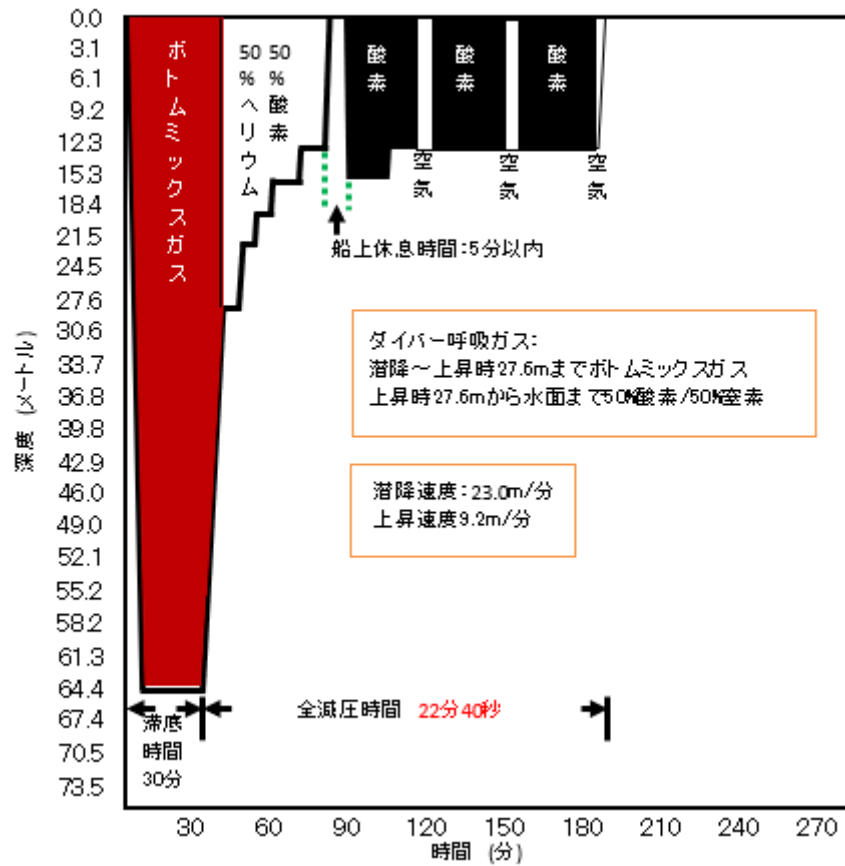


潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
18.4m 7分	50%酸素-50%ヘリウム
15.3m 10分	50%酸素-50%ヘリウム
12.3m 10分	50%酸素-50%ヘリウム
船上	水中減圧点 12.3mから上昇してチャンバー 深度15.3m加圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-15.3m 30秒	100%酸素
15.3m 15分	100%酸素
15.3m-12.3m 1分	100%酸素
12.3m 49分	100%酸素44分-空気5分
12.3m-0m 1分	空気

図 4-3 USNavy 42.9m・30分

4-2-2 61.3m・30分の場合の減圧表の場合

USN 混合ガス潜水・船上酸素減圧表 (61.3m/30分)



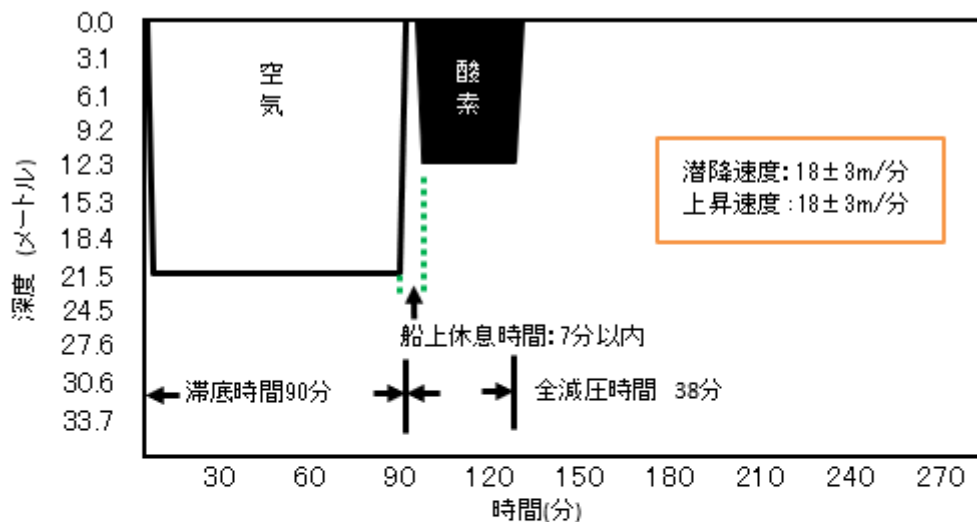
潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
27.6m 7分	50%酸素-50%ヘリウム
24.5m 0分	50%酸素-50%ヘリウム
21.5m 3分	50%酸素-50%ヘリウム
18.4m 7分	50%酸素-50%ヘリウム
15.3m 10分	50%酸素-50%ヘリウム
12.3m 10分	50%酸素-50%ヘリウム
船上	水中減圧点12.3mから上昇してチャンバー 深度15.3mまで圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-15.3m 30秒	100%酸素
15.3m 15分	100%酸素
15.3m-12.3m 1分	100%酸素
12.3m 84分	100%酸素74分-空気10分
12.3m-0m 1分	空気

図 4-4 USNavy 61.3m・30分

3. DCIEM 空気潜水プロフィール

4-3-1 21.5m・90分の減圧表の場合

DCIEM空気潜水・船上酸素減圧表 (21.5m/90分)

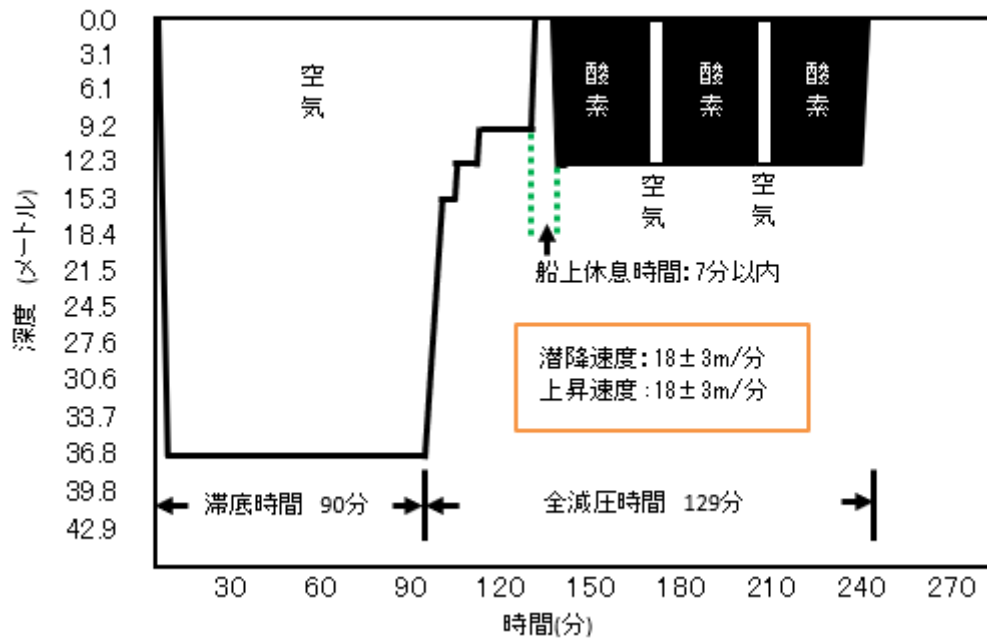


潜水スケジュール	21.5m/90分
減圧スケジュール	21.5m/90分
減圧停止時間	
水中	
21.5-0m	1分 空気 (減圧停止なし)
船上	最大深度 21.5mから上昇してチャンバー 深度12.3m加圧完了まで7分以内
チャンバー	
0m-12.3m	1分 100%酸素
12.3m	30分 100%酸素
12.3m-0m	1分 100%酸素

図 4-5 DCIEM 21.5m・90分

4-3-2 36.8m・90分の減圧表の場合

DCIEM 空気潜水・船上酸素減圧表 (36.8m/90分)



潜水スケジュール	36.8m/90分	
減圧スケジュール	36.8m/90分	
減圧停止時間		
水中		
15.3m	3分	空気
12.3m	7分	空気
9.2m	14分	空気
船上	水中減圧点 9.2mから上昇してチャンバー 深度12.3mか加圧完了まで7分以内	
チャンバー		
0m-12.3m	30秒	空気
12.3m	97分	100%酸素87分-空気10分
12.3m	30秒	100%酸素

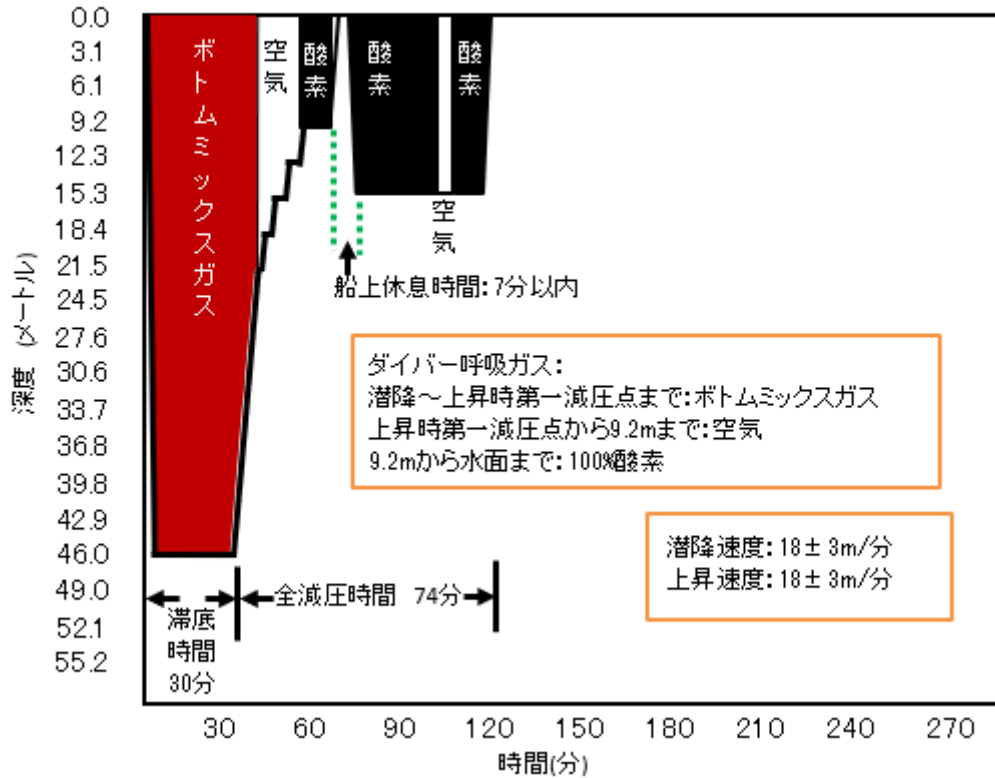
図 4-6 DCIEM 36.8m・90分



4. DCIEM 混合ガス潜水・船上減圧表

4-4-1 46.0m・30分の減圧表の場合

DCIEM 混合ガス潜水・船上酸素減圧表 (46.0m/30分)

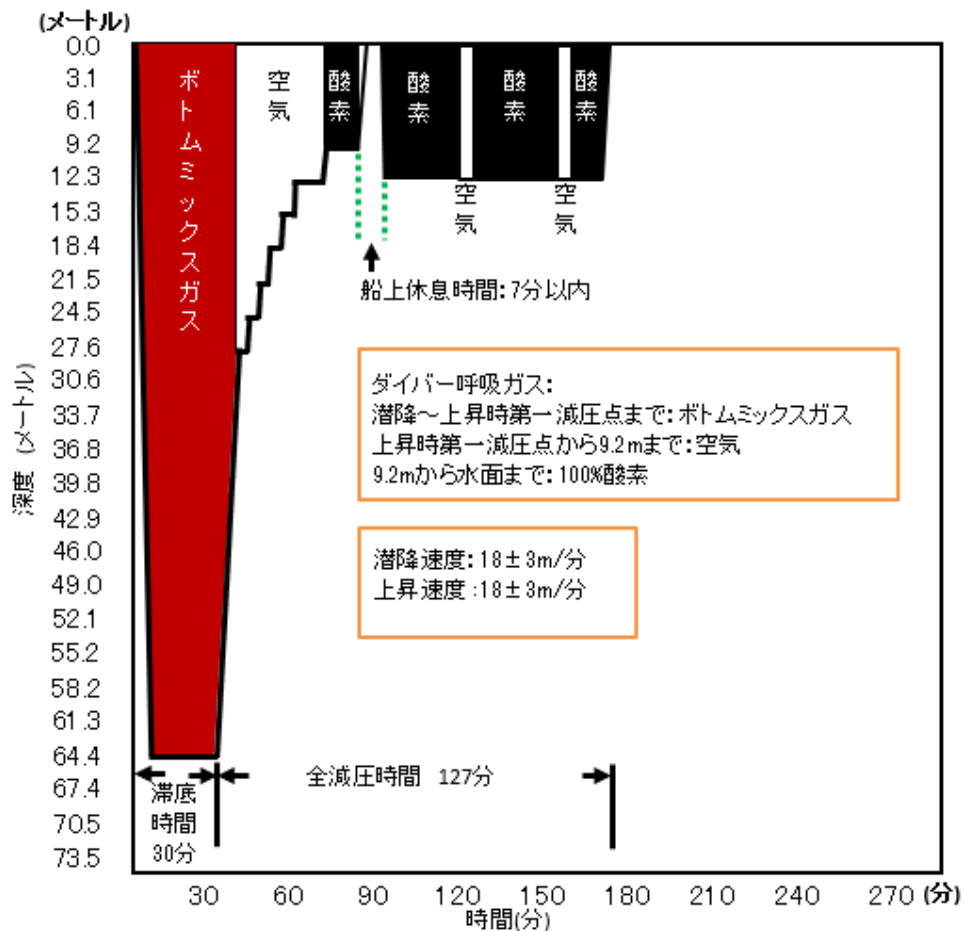


潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
21.5m 1分	空気
18.4m 3分	空気
15.3m 4分	空気
12.3m 4分	空気
9.2m 9分	100%酸素
船上	水中減圧点 9.2mから上昇してチャンバー 深度12.3m加圧完了まで7分以内
チャンバー	
0m-12.3m 30秒	100%酸素
12.3m 53分	100%酸素48分-空気5分
12.3m-0m 1分	100%酸素

図 4-7 46.0m・30分

4-4-2 61.3m・30分の減圧表の場合

DCIEM混合ガス潜水・船上酸素減圧表(61.3m/30分)



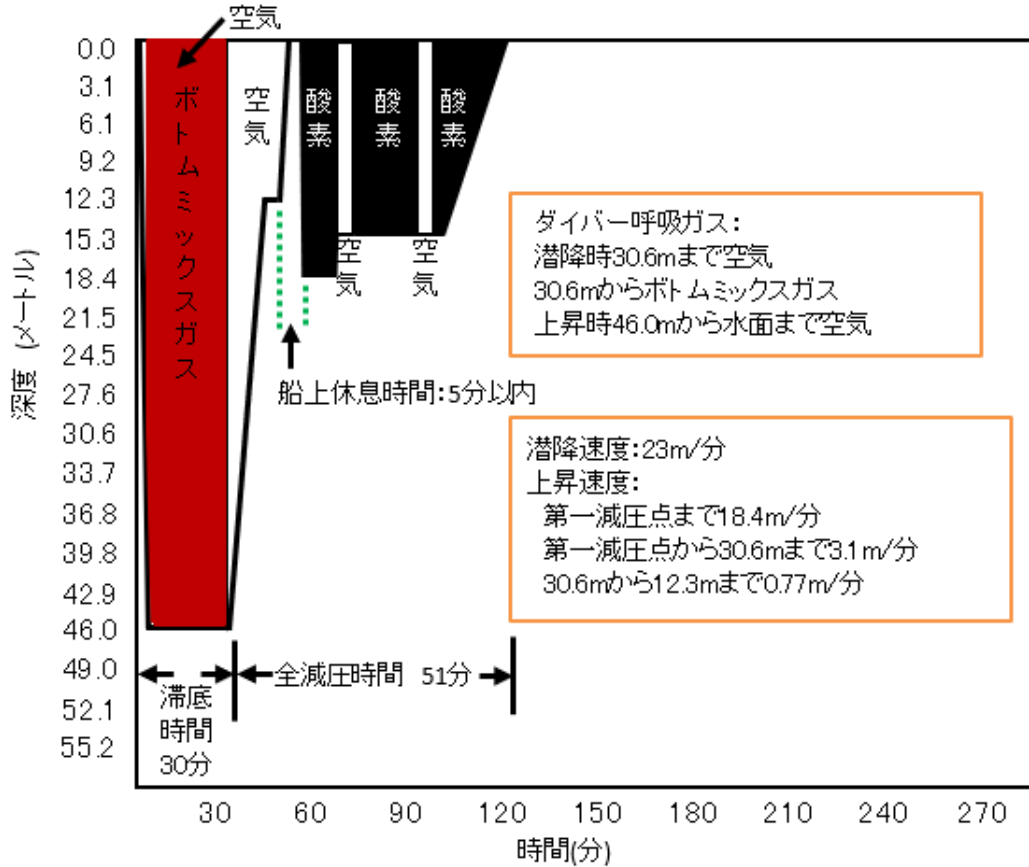
潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
27.6m 2分	空気
24.5m 3分	空気
21.5m 3分	空気
18.4m 3分	空気
15.3m 4分	空気
12.3m 10分	空気
9.2m 12分	100%酸素
船上	水中減圧点 9.2mから上昇してチャンバー 深度12.3m加圧完了まで7分以内
チャンバー	
0m-12.3m 30秒	100%酸素
12.3m 80分	100%酸素70分-空気10分
12.3m-0m 1分	100%酸素

図 4-8 61.3m・30分

5. OWA 社の混合ガス潜水プロフィール

4-5-1 46.0m・30分(酸素濃度 20%)の減圧表の場合

OWA Mark VI・船上酸素減圧表 (46.0m/30分 20%)

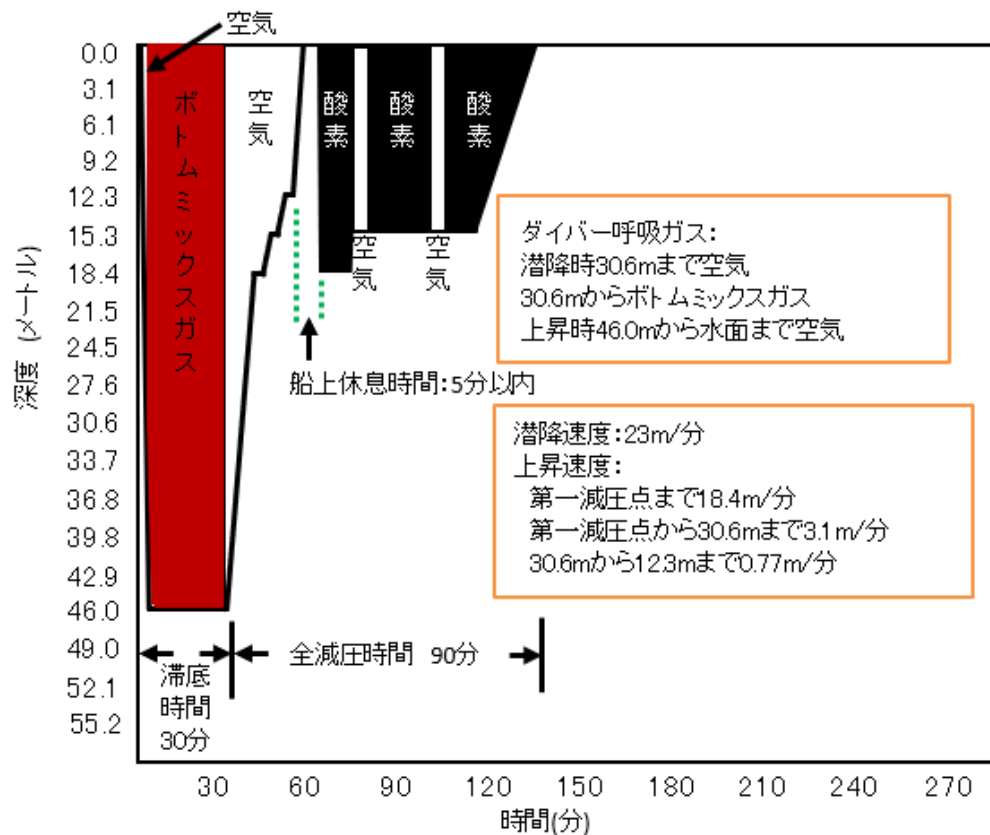


潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
12.3m 2分	空気
船上	水中減圧点 12.3mから上昇してチャンバー 深度15.3m加圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-15.3m 30秒	100%酸素
15.3m 10分	100%酸素
15.3m-12.3m 1分	100%酸素
12.3m 32分	100%酸素22分-空気10分
12.3m-0m 20分	100%酸素

図 4-9 46.0m・30分 吸入酸素濃度 20%

4-5-2 46.0m・30分(酸素濃度 10%)の減圧表の場合

OWA Mark VI・船上酸素減圧表(46.0m/30分 10%)

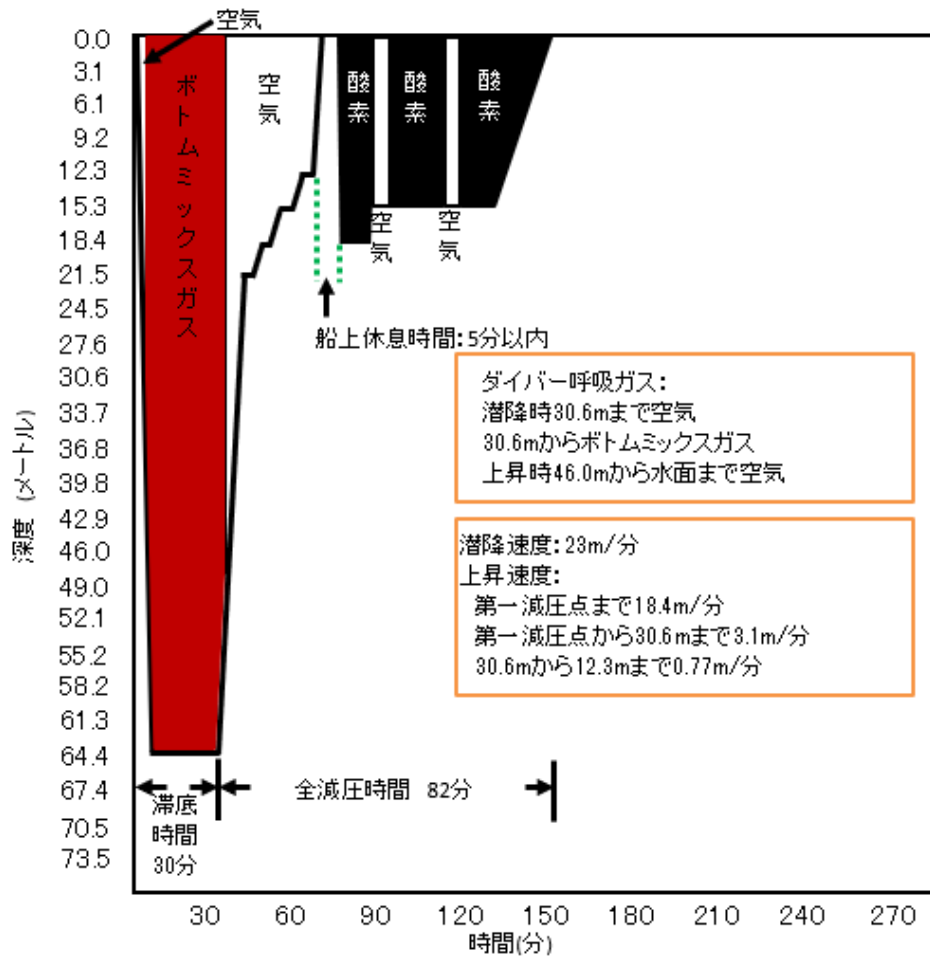


潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
18.4m 1分	空気
12.3m 2分	空気
12.3m 2分	空気 (注:減圧点間の上昇時間4分)
船上	水中減圧点 12.3mから上昇してチャンバー 深度15.3m加圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-15.3m 30秒	100%酸素
15.3m 10分	100%酸素
15.3m-12.3m 1分	100%酸素
12.3m 40分	100%酸素30分-空気10分
12.3m-0m 20分	100%酸素

図 4-10 46.0m・30分 吸入酸素濃度 10%

4-5-3 61.3m・30分(酸素濃度 20%)の場合

OWA Mark VI・船上酸素減圧表 (61.3m/30分 20%)

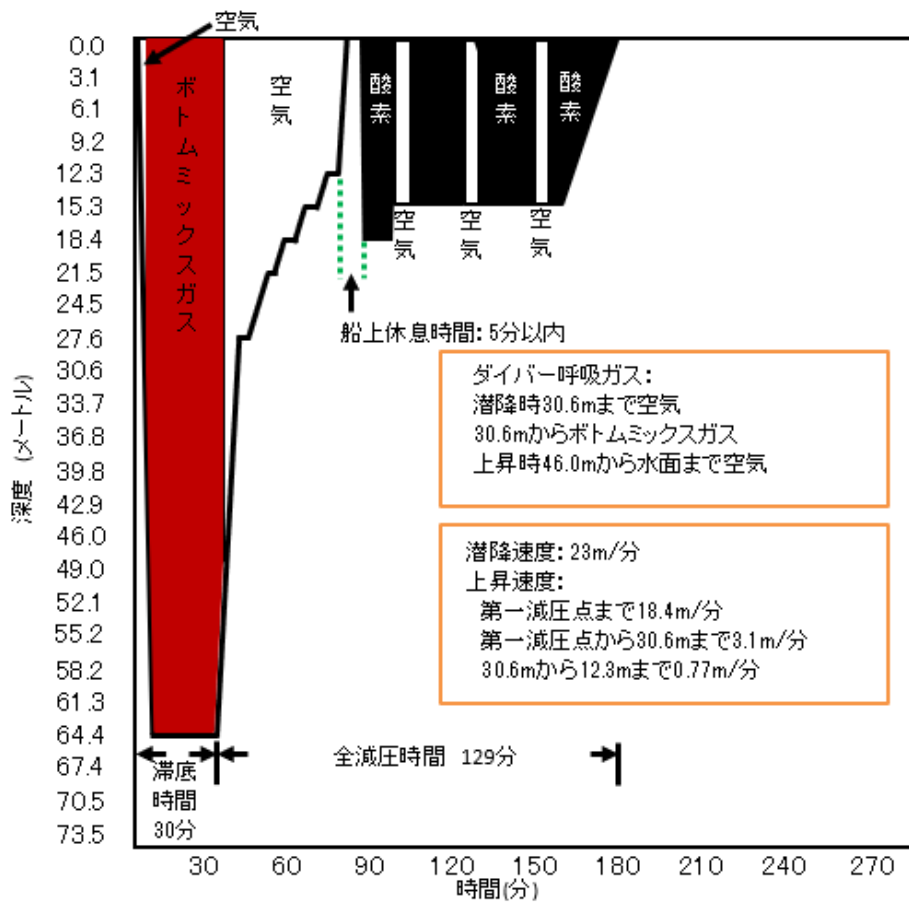


潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
21.5m 3分(5分)	空気
18.4m 2分(6分)	空気
15.3m 3分(7分)	空気
12.3m 3分(7分)	空気
	注:減圧点間の上昇時間4分を含む減圧停止時間
船上	水中減圧点12mから上昇してチャンバー 深度15m加圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-15.3m 30秒	100%酸素
15.3m 10分	100%酸素
15.3m-12.3m 1分	100%酸素
12.3m 42分	100%酸素32分-空気10分
12.3m-0m 20分	100%酸素

図 4-11 61.3m・30分 吸入酸素濃度 20%

4-5-4 61.3m・30分(酸素濃度 10%)の場合

OWA Mark VI・船上酸素減圧表 (61.3m/30分 10%)



潜水スケジュール	42.9m/30分
減圧スケジュール	42.9m/30分
減圧停止時間	
水中	
27.6m 1分(3分)	空気
24.5m 0分(4分)	空気
21.5m 2分(6分)	空気
18.4m 3分(7分)	空気
15.3m 3分(7分)	空気
12.3m 3分(7分)	空気
	注:減圧点間の上昇時間4分を含む減圧停止時間
船上	水中減圧点12mから上昇してチャンバー 深度15m加圧完了まで5分以内
チャンバー	
0m-15.3m 30秒	100%酸素
15.3m 10分	100%酸素
15.3m-12.3m 1分	100%酸素
12.3m 60分	100%酸素45分-空気15分
12.3m-0m 20分	100%酸素

図 4-12 61.3m・30分 吸入酸素濃度 10%

表 4-1 船上減圧の比較

	潜降～水中減圧							チャンバー加圧・減圧レート					
	潜降速度	ボトムミックスガス	水中減圧時呼吸ガス	上昇速度	減圧点間上昇時間	最終減圧深度	最終減圧点からの上昇速度	最終減圧点からの上昇時間	水面休息時間	加圧速度	加圧深度	減圧速度(減圧点間)	減圧速度(最終減圧点から水面)
USN 空気潜水	23.0msw/分	空気	空気	深度による変更なし 9.2msw/分	20秒	12.3msw	12.3msw/分	1分	5分	30.6msw/分	12.3msw	-	9.2msw/分
USN 混合ガス潜水	23.0msw/分	減圧表から選択	27.6mswまで空気で27.6msw～12.3mswまで50%ヘリオックス	深度による変更なし 9.2msw/分	20秒	12.3msw	12.3msw/分	1分	5分	30.6msw/分	15.3msw → 12.3msw	9.2msw/分	9.2msw/分
DCIEM 空気潜水	18.4msw/分	空気	空気	深度による変更なし 18.4msw/分	10秒	9.2msw	18.4msw/分	30秒	7分	18.4msw/分	12.3msw	-	18.4msw/分
DCIEM 混合ガス潜水	18.4msw/分	16%	9.2mswまで空気 9.2mswで100%酸素 9.2mswから水面まで空気	深度による変更なし 18.4msw/分	10秒	9.2msw	18.4msw/分	30秒	7分	18.4msw/分	12.3msw	-	18.4msw/分
OWA Mark VI 混合ガス潜水	18.4msw/分	20% 又は 10%	空気	第一減圧点まで 第一減圧点～30.6msw 30.6msw～12.3msw	4分	12.3msw	12.3msw/分	1分	5分	18.4msw/分	15.3msw → 12.3msw	3.1msw/分	0.61m/分

注：msw=3.26336fsw

## V. 調査対象および方法

### 1. 調査対象

十分に船上減圧の実績を有した下記協力団体を対象とする。

5-1-1 民間企業アジア海洋株式会社（A社）にて、1980年から高圧則が改正される前の2015年3月までに国内外で実施した船上減圧例。対象となる混合ガス潜水における船上減圧例は3,000例を予定した。空気潜水は実施されていなかった。

5-1-2 民間企業日本サルヴェージ株式会社（B社）にて、高圧則が改正される前の2015年3月までに国内外で実施した空気および混合ガスの船上減圧で、対象となる対象例は2,000例以上を予定した。

5-1-3 海上自衛隊潜水医学実験隊にて実施された船上減圧例を予定したが、収集は出来なかった。

### 2. 方法

潜水作業会社2社（A社、B社）に対し、過去（1994年～2015年3月）の船上減圧の記録を収集し、呼気ガスの種類と減圧症発症件数などを依頼収集した。

調査内容は、個人情報の観点からダイバーのプロフィールは自由記述とした。

表 5-1 調査項目

ダイバーのプロフィール	作業条件	減圧症罹患
氏名（アルファベットで匿名化） 生年月日（自由記述） 性別 身長 体重 BMI 経験年数 経験本数 既往歴	潜水作業日* 海拔* スーツの種類* 呼吸ガス（空気、ヘリウムなど）* 作業水深* 作業時間* 減圧表の種類* 浮上手段*	減圧症発症の有無*

\*印は必須項目



## VI. 調査結果

### 1. 対象調査期間と作業件数

総調査件数は 5,739 件であり、目標件数に達した。

調査された期間は、1994 年～2015 年 3 月までであった。

2 社合わせた作業人数は Heliox 潜水で 31 人、空気潜水で 41 人の計 72 人であった。

延べ作業件数で Heliox 潜水 3,554 件、空気潜水 2,185 件であった。

### 2. 減圧症発症率

Heliox 潜水は 1994 年～2015 年 3 月までの期間で、延べ作業件数 3,554 件であり、減圧症の発症件数は 5 件 (0.141%) であった (表 4-2)。空気潜水は 2005～2015 年までの期間で延べ作業件数は 2,185 件であり、減圧症の発症件数は 35 件 (1.602%) であった (表 4-3)。なお空気潜水作業で海拔 800m での高所潜水が 315 件 (潜水深度 20～60m) 実施されたが、減圧症の発症はなかった。

表 4-2 Heliox 潜水による船上減圧の減圧症発症率

深度(m)	作業人数	DCS	発症率
30≧	1	0	
40≧	44	0	
50≧	2,104	2	0.095%
60≧	445	0	
70≧	424	2	0.472%
80≧	530	1	0.189%
90≧	6	0	
計	3,554	5	0.141%

期間は 1994 年～2015 年 3 月

表 4-3 空気潜水による船上減圧 減圧症発症率

深度(m)	作業人数	DCS	発症率
30≧	20	0	
40≧	193	1	0.518%
50≧	271	3	1.107%
60≧	1,583	23	1.453%
70≧	76	8	10.526%
80≧	34	0	
90≧	8	0	
計	2,185	35	1.602%

期間は 2005～2015 年

海拔 800m の作業が 315 件あったが、DCS 発症はなかった(20～60m)。

### 3. Heliox 潜水の船上減圧による潜水深度と作業時間との関係 (n=3,554)

潜水深度は 14~83m であり、40m 未満の深度は 10 件 (0.3%) であった。作業深度が深ければ作業時間は短くなっていた。

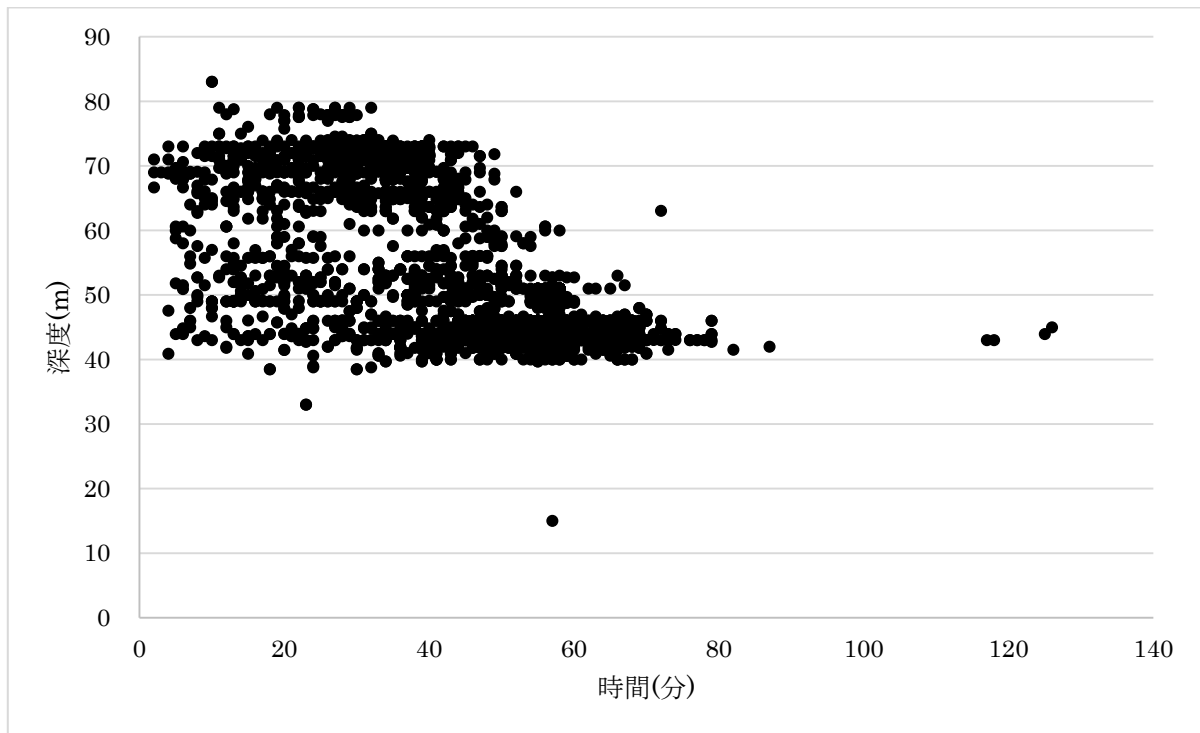


図 4-3 Heliox 潜水・船上減圧の潜水深度と作業時間の関係

4. 空気潜水の船上減圧による潜水深度と作業時間との関係 (n=2,285)

潜水深度は14~90mであり、40m未满是201件(9.2%)と9割以上が40m以上の作業であった。

減圧症発症の深度は60m前後(39.6~62.0m)に集中しており、潜水時間は30~60分に集中していた。空気呼吸による船上減圧では約40mを超えた深度より発症していた。

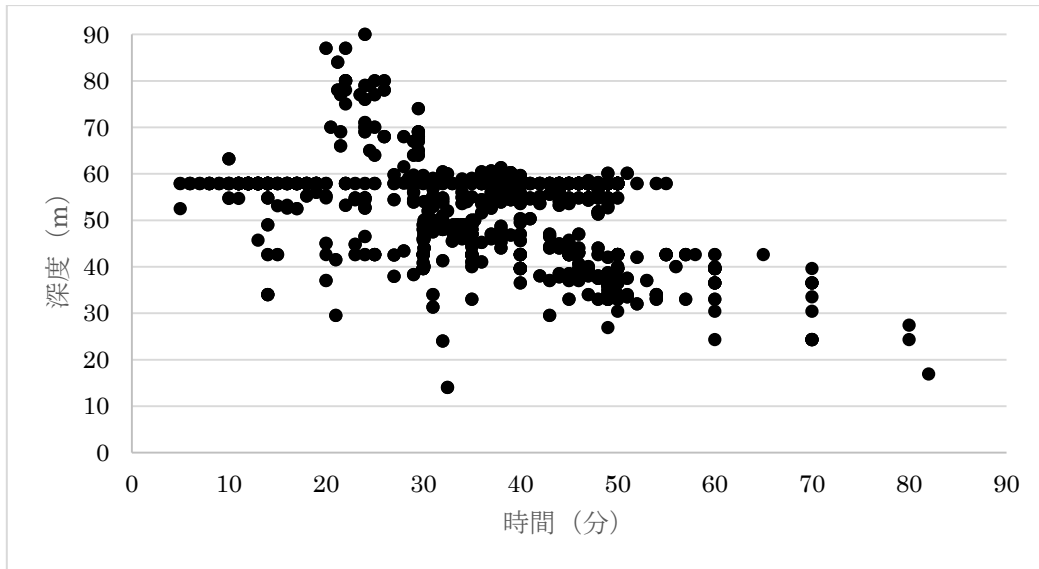


図 4-4 空気潜水・船上減圧の潜水深度と作業時間の関係

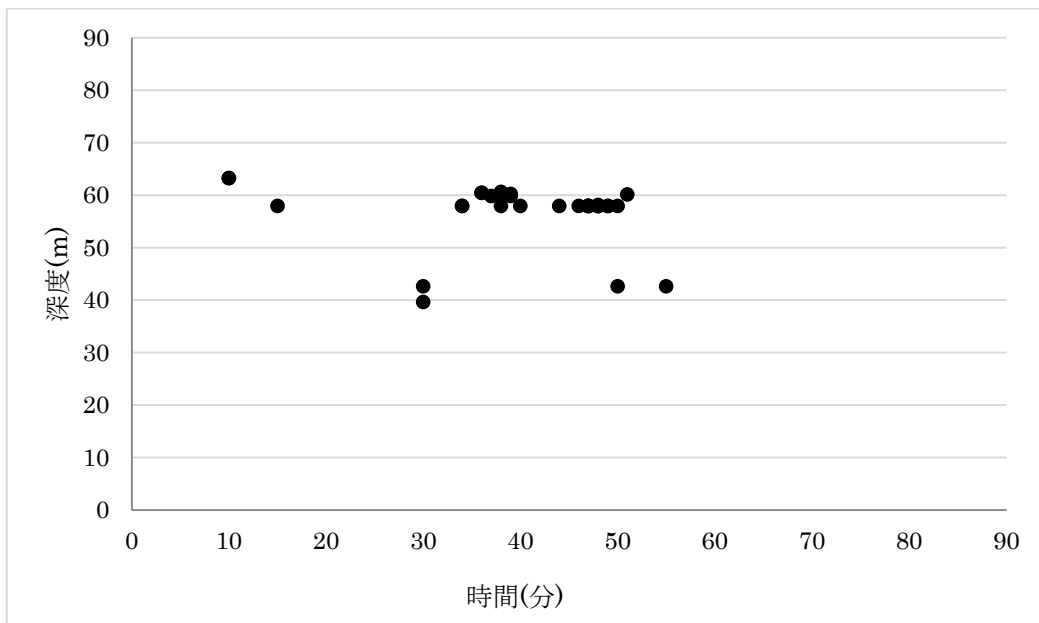


図 4-5 空気潜水・船上減圧における減圧症発症時の深度と作業時間の関係 (n=35)

## 5. 減圧症発症誘因についての統計学的検討

### 5-5-1 概要

減圧症の発症誘因の検討として、減圧症群(DCS)と対照群(CON)の比較にて、減圧症の既往症の有無、潜水海拔(3項目)、スーツ(3項目)、呼気ガス、水温(3項目)、深度(8項目)、作業強度(3項目)、潜水テーブル(3項目)、浮上手段(3項目)の28項目について、オッズ比(OR)を検討した。

解析1-1(表5-4)と解析1-2(表5-5)は、A社およびB社のアンケート項目をそれぞれ評価した結果であり、解析2-1(表5-6)と解析2-2(表5-7)は、空気潜水を行った者に限定して対象とした。

### 5-5-2 検定方法

解析1-1と解析2-1の検定方法は、カイ二乗検定である。解析1-2と解析2-2は、Welchのt検定である。

### 5-5-3 結果

#### (1) 解析1-1(表5-4)

呼吸ガスの比較では、空気は Heliox に比べ 11.523 倍減圧症を発症しやすい結果となった( $\chi=41.601$ ,  $P<0.001$ )。

水温が 0~10°C のとき、そうでない場合と比べ 2.698 倍減圧症を発症しやすい結果となった( $\chi=10.549$ ,  $P=0.050$ )。

深度が 40~50 m のとき、そうでない場合と比べ 0.201 倍減圧症を発症しやすい結果となった( $\chi=13.816$ ,  $P=0.004$ )。

深度が 60~70 m のとき、そうでない場合と比べ 3.548 倍減圧症を発症しやすい結果となった( $\chi=13.464$ ,  $P=0.049$ )。

U.S.Navy Revision 4 を使用したとき、そうでない場合と比べ 16.757 倍減圧症を発症しやすい結果となった( $\chi=63.865$ ,  $P<0.001$ )。

A社の減圧表を使用したとき、そうでない場合と比べ 0.090 倍減圧症を発症となり、安全率が高い結果となった( $\chi=32.687$ ,  $P<0.001$ )。

#### (2) 解析1-2(表5-5)

減圧症を発症しているグループは発症していないグループよりも潜水深度が深い結果となった( $t=3.195$ ,  $P=0.014$ )。

#### (3) 解析2-1(表5-6)

深度が 60~70 m のとき、そうでない場合と比べ 3.548 倍減圧症を発症しやすい結果となった( $\chi=39.931$ ,  $P<0.001$ )。

U.S.Navy Revision 4 と DCIEM は、減圧症発症者が各減圧表に偏っていたため、正確な評価をするにはデータを追加収集する必要があり、統計学的評価は出来なかった。

#### (4) 解析2-2(表5-7)

減圧症を発症しているグループは発症していないグループよりも経験年数が短い結果となった( $t=4.935$ ,  $P<0.001$ )。

#### (5) 潜水深度と減圧症発症率の関係(図5-6)

表 5-4 アンケート項目の(解析 1-1)結果一覧

変数名	全体						A社						B社								
	DCS		CON		OR	χ値	P値	DCS		CON		OR	χ値	P値	DCS		CON		OR	χ値	P値
	yes	no	yes	no				yes	no	yes	no				yes	no	yes	no			
既往症の有無	1	39	537	5168	0.247	2.236	1.000	1	3	537	2609	1.619	0.177	1.000	0	36	0	2559	N.A.	N.A.	N.A.
海拔(800 m)	0	40	320	5385	0.000	2.376	1.000	0	4	0	3146	N.A.	N.A.	N.A.	0	36	320	2239	0.000	5.135	0.985
海拔(260 m)	0	40	15	5690	0.000	0.105	1.000	0	4	15	3131	0.000	0.019	1.000	0	36	0	2559	N.A.	N.A.	N.A.
海拔(0 m)	40	0	5370	335	N.A.	2.494	1.000	4	0	3131	15	N.A.	0.019	1.000	36	0	2239	320	N.A.	5.135	0.985
スーツ(Dry)	37	3	4214	1491	4.364	7.168	0.284	1	3	1763	1383	0.261	1.562	1.000	36	0	2451	108	N.A.	1.585	1.000
スーツ(Hot water)	0	40	15	5690	0.000	0.105	1.000	0	4	15	3131	0.000	0.019	1.000	0	36	0	2559	N.A.	N.A.	N.A.
スーツ(Wet)	3	37	1476	4229	0.232	7.013	0.272	3	1	1368	1778	3.899	1.614	1.000	0	36	108	2451	0.000	1.585	1.000
呼吸ガス(yes: 空気 / no: Heliox)	35	5	2156	3549	11.523	41.601	0.000	0	4	0	3146	N.A.	N.A.	N.A.	35	1	2156	403	6.542	4.544	0.949
水温(21-30°C)	1	26	1246	3546	0.109	6.960	0.378	1	3	1144	2002	0.583	0.223	1.000	0	23	102	1544	0.000	1.518	1.000
水温(11-20°C)	18	9	2801	1991	1.422	0.746	1.000	3	1	1739	1407	2.427	0.629	1.000	15	8	1062	584	1.031	0.005	1.000
水温(0-10°C)	21	19	1658	4047	2.698	10.549	0.050	0	4	263	2883	0.000	0.365	1.000	21	15	1395	1164	1.168	0.209	1.000
深度(30 m以下)	0	40	21	5684	0.000	0.148	1.000	0	4	1	3145	0.000	0.001	1.000	0	36	20	2539	0.000	0.284	1.000
深度(40 m以下)	1	39	236	5469	0.594	0.269	1.000	0	4	40	3106	0.000	0.052	1.000	1	35	196	2363	0.344	1.206	1.000
深度(50 m以下)	5	35	2370	3335	0.201	13.816	0.004	2	2	2032	1114	0.548	0.372	1.000	3	33	338	2221	0.597	0.739	1.000
深度(60 m以下)	23	17	2005	3700	2.497	8.692	0.123	0	4	333	2813	0.000	0.473	1.000	23	13	1672	887	0.939	0.033	1.000
深度(70 m以下)	10	30	490	5215	3.548	13.464	0.049	2	2	404	2742	6.787	4.913	1.000	8	28	86	2473	8.216	36.176	0.001
深度(80 m以下)	1	39	563	5142	0.234	2.436	1.000	0	4	334	2812	0.000	0.475	1.000	1	35	229	2330	0.291	1.674	1.000
深度(90 m以下)	0	40	14	5691	0.000	0.098	1.000	0	4	2	3144	0.000	0.003	1.000	0	36	12	2547	0.000	0.170	1.000
深度(90 mより深い)	0	40	6	5699	0.000	0.042	1.000	0	4	0	3146	N.A.	N.A.	N.A.	0	36	6	2553	0.000	0.085	1.000
作業強度(重)	1	39	643	5062	0.202	3.070	1.000	0	4	574	2572	0.000	0.892	1.000	1	35	69	2490	1.031	0.001	1.000
作業強度(中)	34	6	4833	872	1.022	0.002	1.000	3	1	2546	600	0.707	0.091	1.000	31	5	2287	272	0.737	0.396	1.000
作業強度(軽)	5	35	229	5476	3.416	7.321	0.618	1	3	26	3120	40.000	27.471	0.948	4	32	203	2356	1.451	0.489	1.000
テーブ(US Navy Revision 4)	35	5	1681	4024	16.757	63.865	0.000	0	4	0	3146	N.A.	N.A.	N.A.	35	1	1681	878	18.281	15.759	0.002
テーブ(DCIEM)	1	39	878	4827	0.141	5.093	0.677	0	4	0	3146	N.A.	N.A.	N.A.	1	35	878	1681	0.055	15.759	0.002
テーブ(アジア①table)	4	36	3146	2559	0.090	32.687	0.000	4	0	3146	0	N.A.	N.A.	N.A.	0	36	0	2559	N.A.	N.A.	N.A.
浮上手段(ケージ)	27	9	4756	808	0.510	3.152	1.000	4	0	3146	0	N.A.	N.A.	N.A.	23	9	1610	808	1.283	0.398	1.000
浮上手段(ラダー)	9	27	767	4797	2.085	3.769	1.000	0	4	0	3146	N.A.	N.A.	N.A.	9	23	767	1651	0.842	0.189	1.000
浮上手段(その他)	0	36	41	5523	0.000	0.267	1.000	0	4	0	3146	N.A.	N.A.	N.A.	0	32	41	2377	0.000	0.552	1.000

表 5-5 アンケート項目による検定結果の一覧(解析 1-2)

変数	t値	自由度	P値	平均値の差 (DCS-CON)	差の標準誤差	CI		
						下限	上限	
全体	年齢	34.614	1.000	-1.611	2.012	-7.095	3.873	
	BMI	20.343	0.138	-0.967	0.408	-2.125	0.191	
	経験年数	20.047	0.214	-1.720	0.796	-3.984	0.543	
	深度 (m)	40.221	0.014	3.680	1.152	0.566	6.794	
	bottom time (分)	40.037	1.000	-1.133	1.772	-5.925	3.658	
	年齢	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
A社	BMI	2.056	0.260	-1.678	0.408	-5.550	2.195	
	経験年数	2.007	1.000	-1.570	3.789	-38.964	35.824	
	深度 (m)	0.388	1.000	2.620	6.748	-36.733	41.972	
	bottom time (分)	0.926	1.000	3.741	4.041	-19.635	27.116	
	年齢	-0.801	34.614	1.000	-1.611	2.012	-7.095	3.873
	BMI	-2.062	17.575	0.272	-0.966	0.469	-2.319	0.386
B社	経験年数	18.970	0.000	-3.811	0.766	-6.002	-1.620	
	深度 (m)	1.324	0.968	1.444	1.091	-1.515	4.403	
	bottom time (分)	1.519	0.688	2.828	1.862	-2.233	7.889	

表 5-6 解析 2-1 の空気潜水による検定結果一覧

変数名	空気潜水						
	DCS		CON		OR	χ値	P値
	yes	no	yes	no			
既往症の有無	0	35	0	2156	N.A.	N.A.	N.A.
海拔 (800 m)	0	35	320	1836	0.000	6.083	0.332
海拔 (260 m)	0	35	0	2156	N.A.	N.A.	N.A.
海拔 (0 m)	35	0	1836	320	N.A.	6.083	0.332
スーツ (Dry)	35	0	2054	102	N.A.	1.737	1.000
スーツ (Hot water)	0	35	0	2156	N.A.	N.A.	N.A.
スーツ (Wet)	0	35	102	2054	0.000	1.737	1.000
水温 (21-30℃)	0	22	102	1147	0.000	1.953	1.000
水温 (11-20℃)	14	8	665	584	1.537	0.939	1.000
水温 (0-10℃)	21	14	1389	767	0.828	0.294	1.000
深度 (30 m以下)	0	35	20	2136	0.000	0.328	1.000
深度 (40 m以下)	1	34	192	1964	0.301	1.568	1.000
深度 (50 m以下)	3	32	268	1888	0.660	0.473	1.000
深度 (60 m以下)	23	12	1560	596	0.732	0.758	1.000
深度 (70 m以下)	8	27	68	2088	9.098	39.931	0.000
深度 (80 m以下)	0	35	34	2122	0.000	0.561	1.000
深度 (90 m以下)	0	35	8	2148	0.000	0.130	1.000
深度 (90 mより深い)	0	35	6	2150	0.000	0.098	1.000
作業強度 (重)	0	35	30	2126	0.000	0.494	1.000
作業強度 (中)	31	4	1965	191	0.753	0.280	1.000
作業強度 (軽)	4	31	161	1995	1.599	0.776	1.000
テーブル (US Navy Revision 4)	35	0	1681	475	N.A.	9.846	0.037
テーブル (DCIEM)	0	35	475	1681	0.000	9.846	0.037
テーブル (アジア①table)	0	35	0	2156	N.A.	N.A.	N.A.
浮上手段 (ケージ)	22	9	1208	808	1.635	1.554	1.000
浮上手段 (ラダー)	9	22	767	1249	0.666	1.054	1.000
浮上手段 (その他)	0	31	41	1975	0.000	0.643	1.000

表 5-7 解析 2-2 の空気潜水による検定結果一覧

変数	t値	自由度	P値	平均値の差 (DCS-CON)	差の標準誤差	CI	
						下限	上限
年齢	-0.942	33.681	1.000	-1.861	1.975	-7.253	3.532
BMI	-2.363	17.656	0.149	-1.109	0.469	-2.462	0.245
経験年数	-4.935	19.331	0.000	-3.797	0.769	-5.994	-1.600
深度 (m)	2.392	36.770	0.110	2.361	0.987	-0.320	5.042
bottom time (分)	0.869	35.427	1.000	1.617	1.861	-3.448	6.681

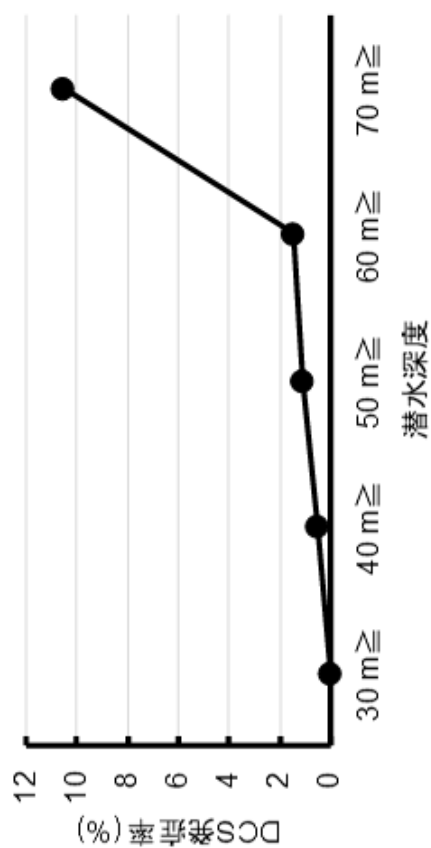


図 5-6 潜水深度と発症率の関係



#### 5-5-4 まとめ

現時点でも減圧症の発症率は低く抑えられているが、Heliox 吸入潜水とA社の減圧表を使用することで減圧症の発症率を下げる可能性がある。空気潜水では潜水深度が深くなるほど減圧症の発症率が高くなることが認められた。

## VII. 考察

船上減圧の方法は、所定の水中減圧停止時間をとらせることなく、深度 9~12m 以浅の減圧を行わず急速減圧（浮上）し、その後、短時間で船上に設置されている再圧室にダイバーを収容し、所定深度（圧力）まで再加圧した後、改めて酸素吸入による減圧を行う方法である。船上減圧は水中減圧に起因する様々なリスク、例えば急激な天候の変化による水中減圧の中止に対する対応、長時間減圧による水中滞在に伴う体温低下などの身体リスクを最小限に抑制することができる。

Thomas G Shields and William B Lee の報告による水中減圧と船上減圧の減圧症発症率は、水中減圧で 0.24%より船上減圧の 0.49%が高い。この要因は水中減圧では浅い深度が多いのに対し、船上減圧では深い深度および長時間潜水によることが挙げられる。

Bove and Davis (Diving Medicine 2004) の報告による減圧方法の違いによる減圧症発症率は、水中減圧で 0.027~1.265%に対して、船上減圧では 0.3~0.49%と Thomas G Shields and William B Lee の報告とほぼ同じ発症率である。

本調査研究における船上減圧の減圧症発症率は、Heliox 吸入の 90m 以浅で 0.141% (n=5/3,554) と前述報告よりも低い発症率であったが、空気吸入では 1.602% (n=35/2,185) であり、そのうち 40m を超える深度では 1.724%と高い発症率を認めた。高圧側改定後では空気吸入での潜水は 40m 以浅で認められており、今回 40m 以浅に限定すれば減圧症発症率は 0.470% (n=1/213) と比較的 low であり、前述した報告と比較して船上減圧での発症率は低く抑えられている。

高圧側改定後に報告された減圧症発症率は、船上減圧を用いない一般的な潜水作業で、空気潜水で 0.027% (n=1/3,765) であり、その内訳は減圧時の呼吸ガスの空気吸入で 0 件 (n=2,143)、水中で酸素を吸入する減圧で 0.062% (n=1/1,622) であった。混合ガス潜水では 0 件 (n=1,120) であった。このことから、船上減圧を実施する吸入ガス条件としては、40m 以深では Heliox 吸入による混合ガス潜水が必須であり、40m 以浅でも Heliox 吸入による混合ガス潜水とすることのほうが安全性を高めると考えられる。但し、90m を超える潜水では安全面を含め、ダイバーの身体リスクを考慮して飽和潜水システムを利用することが望まれる。

しかしながら、船上減圧は US Navy Diving Manual Rev.7 もしくは DCIEM の船上減圧表に記載されているように、水中より急速浮上してから再加圧完了まで 5~7 分以内に限定することが必須である。その具体的対応は次の通りである。

### (1) US.Navy 船上減圧の手順 (A 社も同様)

水中減圧点の 12.3m から浮上速度 12.3m/分で上昇を開始すると水面到着までに 1 分、再圧室において大気圧から 15.3m まで加圧速度 23.0m/分で加圧を完了するまでに約 40 秒を費やし、それらを規定されている 5 分から差し引くと、水面から船上へダイバーを回収し、船上で潜水装備を解除して再圧室に入室完了するまでの時間は 3 分 20 秒ほどとなる。

(備考：12.3m 以深の浮上時間は 9.2m/分、12.3m から水面までの浮上時間は 12.3m/分)

### (2) DCIEM 船上減圧の手順

水中減圧点の 9.2m から浮上速度 18.0m/分で上昇を開始すると水面到着までに 30 秒、再圧室において大気圧から 12.3m まで加圧速度 18.0m/分で加圧を完了するまでに約 40 秒を費やし、それらを規定されている 7 分から差し引くと、水面から船上へ潜水士を回収し、船上で潜水装備を

解除して再圧室に入室完了するまでの時間は 5 分 50 秒ほどである。

本調査で使われた US Navy Diving Manual Rev,4 の減圧表は、空気減圧表では減圧症発症率が高値を認めたが、現在は 2016 年発行の Rev,7 を用いているため、安全性は高い傾向を認められると考えられる。

実際の船上減圧時には、水中より急速浮上してから再加圧完了まで 5～7 分以内のため、安全かつ迅速な船上減圧システムの構築が重要である。例えば、潜水士を回収するケージと船上での再圧室との位置関係や移動方法は重要であり、スーツの脱衣や船上での移動方法など潜水士への十分な教育も必要であろう。また、船上移動は短時間に行われるため、転倒等の他の傷害発症を予防するための措置の構築も必要である。

潜水作業環境が高所（山岳地帯）である場合、高所補正表を用いなければならない。本調査では標高 800m での作業も含まれるが、高所補正を行い減圧症発症はゼロであった。また、高所での作業だけでなく、潜水作業後に高所移動および航空機搭乗は機内気圧が低下するため高所移動に該当するため、減圧症発症の危険がある。

海水温と減圧症発症率の関係は、0～10℃のときはそうでない場合と比べ、発症率が 2.698 倍に上昇したことから、低温における潜水時には、ダイバーに対してドライスーツや温水スーツなどの保温対策が必要と考えられる。

空気減圧表の US Navy Revision 4 を用いたとき、DSIEM と A 社を用いたときの減圧症発症率は 16.757 倍 USNavy の方が高いことが統計的に確認できたが、現在は US Navy Revision 4 は使われず、安全面が高くなった US Navy Revision 6 が使われている。A 社の減圧表は安全率を高めているので、そうでない場合と比べ 0.090 倍の発症が低く抑えられている。USNavy や DCIEM 減圧表をそのまま使用するのではなく、使用者判断で減圧表の安全率を高める努力が必要である。

以上の条件下にて、船上減圧は安全面や労働負荷軽減に寄与する実用性の高い作業方法と考えられる。

## VIII. 結論

高圧則改正前に実施された船上減圧に伴う減圧症発症率を調査した。その結果、次の結論が得られた。

1. 呼吸ガスにおいて空気は Heliox に比べ 11.523 倍の減圧症を発症することが認められ、船上減圧において空気潜水は避けるべきである。
2. 水温が 0~10°C のとき、そうでない場合と比べ 2.698 倍の減圧症発症を認め、冷水温環境では身体負荷の軽減を図る対策が必要である。
3. A 社の減圧表を使用したとき、そうでない場合と比べ 0.090 倍の低い発症であることから、減圧表に安全率を加えた減圧表を考慮する必要がある。
4. U.S.Navy Revision 4 を使用したとき、そうでない場合と比べ 16.757 倍の減圧症を発症しやすい結果となったが、現在は U.S.Navy Revision 4 の使用はされず、U.S.Navy Revision 7 が使われているので、安全率は確保され、減圧症の発症率は抑えられていると考えられる。
5. Heliox 吸入と減圧表の安全率を高めることにより減圧症発症率を下げる可能性がある。
6. 船上減圧から再加圧完了までの 5~7 分以内における安全かつ迅速な船上減圧システムの構築が必要である。

本調査研究で船上減圧方法はルールに準じて実施すれば安全に潜水可能であることが確認できた。

労災疾病臨床研究事業費補助金研究報告書  
(160302)

高気圧作業に伴う船上（水上）減圧における減圧症発症状況等

人体影響に係る調査研究

平成 29 年度 研究報告書

発行年 平成 30 年 3 月  
発行者 柳下和慶  
発行補助 厚生労働省 労災疾病臨床研究事業費補助金  
連絡先 柳下和慶  
東京医科歯科大学・医学部附属病院高気圧治療部  
東京都文京区湯島 1-5-45  
TEL 03-5803-5341  
Email yagishita.orth@tmd.ac.jp





