

【 二次出版 】

# 第1種装置を用いてHart-Kindwall治療表により加療した減圧障害の1例

犬塚義亮<sup>1)</sup>, 江戸直樹<sup>1),2)</sup>, 荒木祐一<sup>3)</sup>, 星 貴文<sup>4)</sup>, 丸田眞由子<sup>1)</sup>, 中本奈那<sup>4)</sup>, 鈴木信哉<sup>5)</sup>  
防衛省航空幕僚監部首席衛生官付<sup>1)</sup>  
帝京大学医学部臨床研究医学講座<sup>2)</sup>  
総合病院土浦協同病院救急集中治療科<sup>3)</sup>  
防衛省航空自衛隊第7航空団基地業務群衛生隊<sup>4)</sup>  
亀田総合病院救命救急科高気圧酸素治療室<sup>5)</sup>

## 【要約】

背景：重症航空減圧障害に対する高気圧酸素治療（hyperbaric oxygen therapy: HBO）は第2種装置で行うのが標準となっているが、第1種装置のみを保有する施設もある。今回、実飛行中に起きた急減圧による重症航空減圧障害に対し、第2種装置保有施設への速やかな搬送が困難だったことから、第1種装置保有施設でエア・ブレイクのない最小限のHBOであるHart-Kindwall治療表で治療した例を経験したので報告する。

症例提示：34歳男性操縦士が離陸後10分で高度10,058m (33,000ft)に到達。巡航態勢での飛行10分で急減圧が発生。即座に降下を開始し着陸。診察上、胸痛、手指の知覚異常、明識困難を認めため重症減圧障害が疑われた。直近の第2種装置保有施設は車両で3時間かかることから、近傍の第1種装置保有施設でHart-Kindwall治療表による緊急HBOを実施。急減圧発生から緊急HBOまで4時間だった。緊急HBOで症状は消失。後遺症なく経過。2週間後に航空業務に復帰。

結論：第1種装置でHart-Kindwall治療表を用いた緊急HBOは、特に第2種装置保有施設への迅速な移送が困難な施設での重症減圧障害への有用な治療代替案となりえる。ただし、症状が改善しない場合に備え、患者後送に関する第2種装置保有施設との事前からの病診連携構築が必須である。

キーワード 高気圧酸素治療, 航空減圧障害, 急減圧

## 【Second publication】

### Decompression Illness Treated with the Hart-Kindwall Protocol in a Monoplace Chamber

Yoshiaki Inuzuka<sup>1)</sup>, Naoki Edo<sup>1),2)</sup>, Yuichi Araki<sup>3)</sup>, Takafumi Hoshi<sup>4)</sup>, Mayuko Maruta<sup>1)</sup>,  
Nana Nakamoto<sup>4)</sup>, Shinya Suzuki<sup>5)</sup>

1) Surgeon General, Air Staff Office, Japan Air Self Defense Force, Ministry of Defense, Tokyo, Japan

2) Department of Clinical Research Medicine, Teikyo University School of Medicine, Tokyo, Japan

3) Department of Emergency and Intensive Care, Tsuchiura Kyodo General Hospital, Ibaraki, Japan

4) Medical Squadron, Air Base Group, 7th Air Wing, Central Air Defense Force, Air Defense Command, Japan Air Self Defense Force, Ministry of Defense, Ibaraki, Japan

5) Hyperbaric Oxygen Therapy Division, Department of Emergency Medicine, Kameda Medical Center, Chiba, Japan

**[abstract]**

Background: Hyperbaric oxygen (HBO2) therapy in a multiplace chamber is the standard treatment for severe altitude decompression illness (DCI). However, some hospitals may only have a monoplace chamber. Herein, we present the case of a patient with severe altitude DCI caused by rapid decompression during an actual flight operation that was successfully treated through emergency HBO2 therapy with the Hart-Kindwall protocol, a no-air-break tables with the minimal-pressure oxygen approach in a monoplace chamber due to unavailability of rapid access to a multiplace chamber.

Case Report: A 34-year-old male aviator presented with chest pain, paresthesia, and mild cognitive impairment following rapid decompression 20 minutes after take-off, which comprised 10 minutes of reaching a height of 10 058 m (33 000 feet) and 10 minutes of cruising at that altitude. He then initiated flight descent and landing. He visited a primary clinic, and severe DCI was suggested clinically. However, since the closest hospital with a multiplace chamber was a 3-hour drive away, we provided emergency HBO2 therapy with the Hart-Kindwall protocol in a monoplace chamber at a nearby hospital 4 hours after the initial decompression. He recovered fully and returned to flight duty 2 weeks later.

Conclusions: Emergency HBO2 therapy with the Hart-Kindwall protocol in a monoplace chamber may be a suitable option for severe DCI, especially in remote locations with no access to facilities with a multiplace chamber. However, prior logistical coordination must be established to transfer patients to hospitals with multiplace chambers if their symptoms do not resolve.

**keywords**

hyperbaric oxygen therapy, altitude decompression illness, rapid decompression

**【はじめに】**

減圧障害 (DCI: decompression illness) は、周囲の気圧の低下中あるいは低下後に血液や組織中に気泡が形成されることで発症する。DCIは、その病態生理から動脈ガス塞栓症 (AGE: arterial gas embolism) とより一般的な減圧症 (DCS: decompression sickness) の2つに分類される。AGEでは、肺胞内のガスによる肺胞毛細血管の拡張・破裂や左心系への気泡流入により惹起される症状を呈する。DCSは、溶存ガス (酸素や二酸化炭素、窒素、ヘリウム) と水蒸気圧の総和が上昇し、血管内外で気泡が形成・膨張することにより発症する<sup>1)</sup>。低圧訓練や飛行業務におけるDCIの発生率は0.1%以下という報告<sup>2)</sup>がある。一方、高高度飛行を行う米空軍操縦士を対象にした匿名調査の結果では、より高い発生率が示されている<sup>3)</sup>。したがって、覚知されていない症例が多く存在する可能性が懸念される。また、発症率が低いことや覚知に至らない症例がありえることから航空減圧障害の臨床的特徴を検討することは難しい部分がある。それでも、航空減圧障害の臨床的特徴として、操縦士では脳が障害されやすいのに対し潜水士では脊髄が障害されやすいと報告した先行研究

がある<sup>4)</sup>。重症DCIは神経系及び心肺機能へ長期に影響を与えうるため、航空業務に際し障害となりうる。極めて重症な症例では、後遺症が残る、あるいは死に至ることもある。

直近に減圧曝露歴を有しDCIに矛盾しない症状を呈する場合、緊急高気圧酸素治療 (hyperbaric oxygen therapy: HBO) による治療の適応となる<sup>1,5)</sup>。発症から治療開始までに遅れが生じると、完全治癒率が低下する<sup>5)</sup>。酸素中毒として、HBO中あるいは治療後のけいれん発作リスクはある<sup>6)</sup>ものの、そのような有害事象は比較的まれである。したがって、DCIと診断された場合には直ちにHBOが実施されるべきである。一般的にHBOに際しては、治療中の患者観察が可能でエア・ブレイクができるという点から、1人用の治療装置 (第1種装置) よりも第2種装置の方が望ましいとされる。しかし、地域によっては近隣に第1種装置を有する施設しか所在しないことがある。そういった場合には、エア・ブレイクがなく最小限に加圧して酸素を使う治療表による緊急HBOを第1種装置で実施することで、患者の予後が改善しうる<sup>7,8)</sup>。

本症例報告では、実飛行中の急減圧により重症航空減圧障害を呈した1例について、第2種装置による

速やかな治療が困難であったことから、第1種装置でHart-Kindwall治療表を用いた緊急HBOにより治療し得た症例を経験したので報告する。

**【症例提示】**

症例は34歳男性操縦士、四肢の痺れと明識困難（「ぼーっとした感じ」とのこと）を主訴に受診した。初診時の身体所見では、上記の訴えがあったもののGCS 15点、酸素マスク(5L/分)下で酸素飽和度99%であり、その他バイタルサインは正常範囲内であった。四肢の痺れと右耳違和感以外に、明らかな理学的及び神経学的異常所見は認められなかった。血液検査所見は表1のとおりで、CT検査で頭蓋内及び胸腹部に気泡形成は認められなかった。

既往歴は高尿酸血症（内服加療歴なし）のみであった。当該操縦士は単座高機動ジェット航空機での飛行中、離陸から20分後に急減圧に曝露された。急減圧は、離陸後10分で高度10,058m (33,000ft)に到達したのち、同高度で10分巡航態勢で飛行していたところ発生した。当該操縦士は即座に降下を開始し、約3分で4,572m (15,000ft)に到達した。右耳違和感は急減圧発生から10分で自覚された。急減圧から約13分経過した時点で2,438m (8,000ft)に到達し、近隣飛行場に着陸したのは急減圧発生から17分後であった。着陸直後に当該操縦士は胸痛と四肢の痺れを自覚し、医務室を受診した。

表1. Laboratory data obtained upon admission.

Blood cell count		Biochemistry			Coagulation function	
WBC	7520 $\mu\text{L}^{-1}$	AST	31 $\text{U}\cdot\text{L}^{-1}$	Fib	264 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	
RBC	$525 \times 10^4 \mu\text{L}^{-1}$	ALT	26 $\text{U}\cdot\text{L}^{-1}$	PT	10.8 s	
Hb	16.6 $\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$	T-chol	251 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	PT-INR	0.91	
Hct	47.6 %	HDL	71 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	APTT	24.2 s	
MCV	90.7 fL	LDL	130 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	FDP	<2.5 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	
MCH	31.6 pg	TG	247 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	D-dimer	<0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	
MCHC	34.9 %	Glu	100 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	<b>Urinalysis</b>		
Plt	$26.6 \times 10^4 \mu\text{L}^{-1}$	BUN	17 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	Protein	Negative	
		Cre	0.7 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	Blood	Negative	
		UA	8.5 $\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$	Glucose	Negative	

WBC, white blood cells; RBC, red blood cells; Hb, hemoglobin; Hct, hematocrit; MCV, mean corpuscular volume; MCH, mean corpuscular hemoglobin; MCHC, mean corpuscular hemoglobin concentration; Plt, platelets; AST, aspartate aminotransferase; ALT, alanine aminotransferase; T-chol, total cholesterol; HDL, high-density lipoprotein; LDL, low-density lipoprotein; TG, triglycerides; Glu, glucose; BUN, blood urea nitrogen; Cre, creatinine; UA, uric acid; Fib, fibrinogen; PT, prothrombin; PT-INR, prothrombin time-international normalized ratio; APTT, activated partial thromboplastin time; FDP, fibrin degradation products

臨床症状から減圧障害と診断し経静脈輸液を開始したが、胸痛、手指の知覚異常、明識困難を認めたことから重症減圧障害が疑われたため緊急HBOを要すると判断した。しかし、第2種装置を有する直近の医療施設は車両による移動で3時間を要することから、第1種装置を備えた近隣の救急病院で、Hart-Kindwall治療表<sup>7,8)</sup> (30分間の283.7kPa [2.8絶対気圧(ATA)]保圧ののち、30分かけて202.7kPa [2.0ATA]に減圧して60分間保圧、その後30分かけて大気圧まで減圧(図1))による緊急HBOを実施した。治療は急減圧発生から約4時間後に開始された。翌日から2日間は、遅発性の再発リスクを低減<sup>9)</sup>する目的で追加のHBOを実施した(202.7kPa [2.0ATA]で60分保圧、その後30分かけて大気圧まで減圧)。心エコー検査では静脈系の残存気泡及び卵円孔開存は認められなかった。初日の緊急治療後から症状は全

(a)



(b)

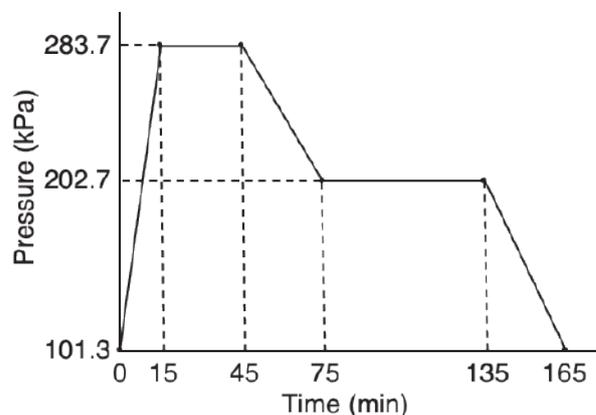


図1 : The monoplace chamber used and the Hart-Kindwall protocol. (A) Monoplace chamber used and (B) Hart-Kindwall protocol

て消失し、遅発性減圧障害の兆候も認められなかった。当該操縦士は治療終了後3日目に退院し、急減圧曝露から2週間後に航空業務に復帰した。

### 【考察】

今回、実飛行中にDCIとなり、第2種装置による迅速な治療が困難であったため第1種装置でHart-Kindwall治療表を用いた緊急HBOを実施した症例を報告した。本症例は、実機操縦中に生じたDCIに対して緊急HBOを実施したという点で特徴的である。

航空減圧障害は周囲の気圧の低下に伴い一連の病態生理学的な変化が生じて発症する<sup>1)</sup>、航空減圧障害は長期にわたる影響をきたしうるといって航空機搭乗員に固有の脅威となる。重度の神経障害や心肺機能障害を併発した場合、DCIは恒久的な障害や死に至ったりする可能性がある。

軍用機では差圧制御方式が採用されることが多く、機体重量や運動性能が特に考慮される高機動戦闘機においては構造上差圧を大きくとれない。このため機内外の差圧が比較的小さくなり、搭乗員は飛行中に酸素装置を使用しなければならない<sup>10)</sup>。

酸素装置の不具合等による低酸素症のリスクを最小限にしてDCI発症を防ぐため、一般に、機内差圧は34.5kPa(0.4ATA)以下に設定されているとされる<sup>10)</sup>。過去の研究結果によると、機内高度の急上昇によりDCIのリスクが高まることから、機内高度は5,486.4m(18,000ft)を超えないことが望ましいとされる<sup>1)</sup>。機内差圧を勘案すると、約15,910.6m(52,200ft)程度までであれば、機内高度は5,486.4m(18,000ft)を超えないのではないかと考えられる。本症例では、

急減圧後5,486.4m(18,000ft)以上での飛行時間は3分以下であったうえ、急減圧発生後に純酸素吸入を開始していることから、このような状況でのDCS発症は典型的ではない。しかし、本症例では持続する知覚異常と明識困難が着陸後も持続していた。

先行研究によると、操縦士では脳が障害されやすい一方、潜水士では脊髄が障害されやすいと報告されている<sup>4)</sup>。CT検査では脳、胸腹部の気泡形成は指摘されなかったが、症状とHBOへの治療反応性を考慮すると本症例での神経症状は肺型DCSと微小AGEよりも、肺圧外傷と微小AGEに起因した可能性を考えた。DCIのリスクは、脱窒素、運動、低圧環境への曝露期間と感受性などのさまざまな要因と関連する<sup>11)</sup>が、本症例では脱水や反復する低圧曝露を含むDCIのリスク因子は認められなかった。

現在では重症DCIに分類されるAGEを含むII型航空減圧症では、関節痛や神経学的変化、肺症状、皮膚症状などの幅広い症候を呈する<sup>1,12)</sup>(表2)。これらの中で関節痛が最も多く、II型DCS患者の70.7～86.1%で認められる。そして、感覚障害や痺れなどの神経症状がこれに続く(10.8～32.9%)<sup>2,13,14)</sup>。神経症状の頻度に幅があるのは、徴候や症状が多様であること、DCIで特定の神経系部位が障害されるわけではないこと、そして他の病因(過換気など)の可能性があることによると考えられる。本症例の身体所見は非特異的で、症状も一過性の胸痛、知覚異常、明識困難に限られていた。患者の中には認知障害を自覚していない場合があり、対面診察でのみ検出できるとの先行研究<sup>1)</sup>があることから、DCIが疑われるすべての患者に対し、CT検査などの画像検査を含めた神経学的検査を可能であれば実施すべきである。ただし、明らかに神経学的異常が急速に進行する場合は例外で、遅滞なくHBOを開始する必要がある。

HBOは、DCIに対する唯一の根本的治療である。病状の進行抑制、徴候や症状の速やかな改善、そして後遺症予防がその治療目的とされる<sup>1,5)</sup>。重症DCIに対するHBOは第2種装置での実施が推奨されている<sup>1)</sup>。急変時の患者対応が限られることや、エア・ブレイクを実施しないことによる酸素中毒の潜在的なリスクがあることから、重症DCIに対する第1種装置で

表2. Classification of decompression illness.

Decompression sickness:
The wide range of symptoms due to gas bubbles, which are formed by too rapid pressure release to pass out of the body
<ul style="list-style-type: none"> <li>Type I Decompression sickness (not life threatening) * skin, lymphatic system, muscle, and joints</li> <li>Type II Decompression sickness * nervous system, respiratory system, or circulatory system</li> </ul>
Arterial gas embolism:
The symptoms due to an obstruction of blood flow caused by gas bubbles (emboli) entering the arterial circulation

\* Symptoms of Type I and Type II decompression sickness may be present at the same time.

の治療は最適とは言い難い。しかしながら、第2種装置を備えた医療施設への移送に長時間を要する場合、治療介入が遅れるリスクと上記の第1種装置における欠点とのバランスを考慮しなければならない。Cianciら<sup>15)</sup>はDCI患者140例を対象とした研究で、エア・ブレイクを用いない短時間の高気圧酸素療法であるHart-Kindwall治療表について検討しその有効性を実証した。したがって、この治療表を用いた第1種装置でのHBOは、第2種装置によるDCI治療を迅速に実施できないような施設での治療代替案として有用である。さらに、第1種装置を用いた緊急HBOが奏功しない場合に備え、第2種装置を有する病院への患者搬送に関する事前からの病診連携の構築が必須である。

第1種装置でのエア・ブレイクを行わない短時間治療表の有効性・安全性について、無作為化試験で評価することはDCIの性質上困難である。このような治療表の有効性評価には、さらなる症例の蓄積が必要である。

#### 【結論】

本症例からは、特に第2種装置による速やかな治療が困難な場合、重症DCIの治療に際しHart-Kindwall治療表による第1種装置での緊急HBOが有用である可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) Vann RD, Butler FK, Mitchell SJ, Moon RE: Decompression illness. *Lancet* 2011;377:153-164.
- 2) Bason RD, Yacavone, Bellenkes AH: Decompression sickness: USN operational experience 1969-1989. *Aviat Space Environ Med* 1991;62:994-996.
- 3) Bendrick GA, Ainscough MJ, Pilmanis AA, Bisson RU: Prevalence of decompression sickness among U-2 pilots. *Aviat Space Environ Med* 1996;67:199-206.
- 4) Wirjosemito SA, Touhey JE, Workman WT: Type II altitude decompression sickness (DCS): US Air Force experience with 133 cases. *Aviat Space Environ Med* 1989;68:256-262.
- 5) Xu W, Liu W, Huang G, et al.: Decompression illness: clinical aspects of 5278 consecutive cases treated in a single hyperbaric unit. *PLoS One* 2012;7:e50079.
- 6) Bennett MH, Lehm JP, Mitchell SJ, Wasiaak J: Recompression and adjunctive therapy for decompression illness. *Cochrane Database Sys Rev* 2012;5:CD005277.
- 7) Hart GB: Treatment of decompression illness and air embolism with hyperbaric oxygen. *Aerosp Med* 1974;45:1190-1193.
- 8) Kindwall EP: Use of short versus long tables in the treatment of decompression sickness and air embolism. In: Moon RE, Sheffield PJ, ed. *Treatment of decompression illness. Proceedings of the 45th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop Kensington (MD); Undersea and Hyperbaric Medical Society, 1996; pp.122-126.*
- 9) Hampson N, Atik D: Central nervous system oxygen toxicity during routine hyperbaric oxygen therapy. *Undersea Hyperb Med* 2003;30:147-153.
- 10) Gradwell D: Principles of the pressure cabin and the effects of pressure change on body cavities containing gas. In: Gradwell D, Rainford D, ed. *Ernsting's aviation medicine. 4th ed. London; CRC Press, 2006; pp.84-116.*
- 11) Kumar KV, Waligora JM, Calkins DS: Threshold altitude resulting in decompression sickness. *Aviat Space Environ Med* 1990;61:685-689.
- 12) U.S. NAVAL SEA SYSTEMS COMMAND: U.S. Navy Diving Manual. Revision 7, Naval Sea Systems Command Publication NAVSEA 0910-LP-115-1921; Published December 2016.
- 13) Ryles MT, Pilmanis AA: The initial signs and symptoms of altitude decompression sickness. *Aviat Space Environ Med* 1996;67:983-989.
- 14) Weien RW, Baumgartner N: Altitude decompression sickness: hyperbaric therapy results in 528 cases. *Aviat Space Environ Med* 1990;61:833-836.
- 15) Cianci P, Slade JBJr: Delayed treatment of decompression sickness with short, no-air-break tables: review of 140 cases. *Aviat Space Environ Med* 2006;77:1003-1008.

\*本論文は「Inuzuka Y, et al: Decompression illness treated with the Hart-Kindwall protocol in a monoplace chamber. *Am J Case Rep* 2022;23:e935534」を和訳したものであり、英語版がオリジナルである。本翻訳は、*American Journal of Case Reports (AJCR)* が作成したものではなく、AJCRは本翻訳の内容について責任を負っていない。  
\*本症例報告に関して、本人から文書により同意を得ている。  
\*本論文の発表に関して開示すべき利益相反関連事項はない。