

●特集：安全な高気圧酸素治療のために

高気圧酸素治療加圧時の問題点

鎌田 桂*

キーワード：高気圧酸素治療，気圧障害，スクイーズ

Keywords：

Hyperbaric Oxygenation
Barotrauma
Squeeze

はじめに

高気圧酸素治療（Hyperbaric Oxygenation：HBO）では圧力の変化や環境ガス組成，濃度変化によって，身体だけでなく室内で使用される機器に対しても様々な影響が認められ，時として重大な障害をもたらす事がある。

HBOは高い圧力を使用する特性上，治療圧を得るための加圧操作は避けて通る事は不可能であり，治療中に発生するトラブルは加圧操作中に最も高頻度に見られる。高気圧障害は，大きく2種類の障害に分類されるが，一つは生体内部と環境圧の圧力差によって引き起こされる力学的障害でありスクイーズと呼ばれるものである。もう一つの障害は異常に高濃度になった酸素，窒素などの呼吸ガスによる生化学的な障害である。ここでは高気圧酸素治療を完全に行うために，加圧によってもたらされる生体への影響と，治療を行う上で注意をはらわねばならない問題点について述べる。

スクイーズの発生

加圧による圧力の上昇に伴って，外界との交通が遮断された状態では，体内の含気部にある気体

は内外の圧力差に反比例して気体の容積は減少する。このため加圧による含気部周辺からの圧迫によって，弾性の乏しい組織では組織の変形，うっ血，浮腫，出血がおこる。スクイーズの早期では異和感や疼痛を自覚するが，この状態でさらに加圧を続けると疼痛は次第に強く激しくなり，ついには組織が圧力のために破壊され障害を発生させる。スクイーズは中耳腔，副鼻腔，歯に一般的に認められるが，外耳道でもスクイーズが発生する事がある。

中耳腔のスクイーズは耳管の閉塞や狭窄によって中耳腔と環境圧の圧平衡が行われ難い場合に発生する。中耳腔と外界とは鼓膜によってへだてられているため，加圧によって環境圧が上昇すると鼓膜の外部に圧力が加わり鼓膜は内側に変位する。この時，耳管を開放して中耳腔内の圧力を環境圧と同等にできれば，鼓膜はもとの位置にもどることとなるが，耳管機能が不十分な場合には加圧の進行にともなって鼓膜内外の圧力差が大きくなり，鼓膜はより内側へ変位し内耳腔では相対的に陰圧化が進み，鼓膜の浮腫，出血がおこり，100mgHg以上の圧力差が生じると鼓膜の内側への変位は限界に達し穿孔する。副鼻腔のスクイーズは中耳腔のスクイーズに比べれば頻度は低い。副鼻腔は鼻道に開口しており，中耳腔に見られるような耳管の機能に相当する器官をもっていない。また副鼻腔の周囲は弾性をもたない骨組織によって構成されているため，開口部の閉塞や狭窄は容易に副鼻腔のスクイーズを発生させ鼻漏や鼻出血を起こす。歯のスクイーズは歯の治療を受けたものに見られるがまれである。歯根部に空洞があったり，装着された人工物と生体の間に間隙がある場合にその中の気体の収縮により周囲の組織

*岩手医科大学高気圧環境医学室

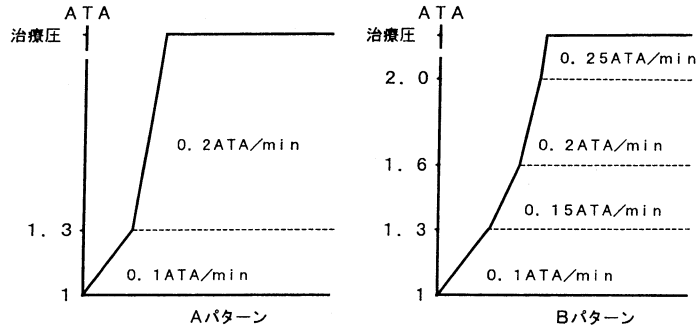


図1 加圧パターン

表1 加圧パターンとスクイーズ発生頻度

加圧パターン	A	B
圧力 (ATA)	症例数 (%)	症例数 (%)
1.0 < * < 1.3	49 (22.2)	15 (31.3)
1.3 ≤ * < 1.8	154 (69.7)	23 (47.9)
1.8 ≤ * < 治療圧	18 (8.1)	10 (20.8)
合計	221 (100)	48 (100)

*加圧中断圧力

の変形によって起きる。

スクイーズが発生すると発生した部位に疼痛がおこるため、意識のある患者では容易にそれとわかるが意識障害や言語障害のある患者では伝達手段が無いが、不十分なため対応が遅れる場合があり注意が必要である。

中耳腔スクイーズの発生頻度

中耳腔のスクイーズは加圧時に最も一般的に見られ、その後のHBOを継続する上で患者に障害を与えず、また不安感を少なくするための加圧操作を如何に行えば良いかの指標となるものである。

加圧方法の違いによってスクイーズの発生の様式に差があるか否かを、加圧速度の異なる2つのパターンを用いて加圧開始から治療圧に至る加圧中のスクイーズ発生のために加圧を停止、または減圧した回数から検討した。ここではスクイーズを解消するために加圧を中断したものをスクイーズとした。

ーズとした。

加圧パターンは1.3ATAまでは毎分0.1ATAの速度で加圧し、1.3ATA以後は毎分0.2ATAで治療圧まで加圧したもの(Aパターン)、他方は1.3ATAまでは前者と同様に毎分0.1ATAで、その後1.3から1.6ATAまでは毎分0.15ATA、1.6から2ATAまでは毎分0.2ATA、2ATA以上では毎分0.25ATAで加圧を行った(Bパターン)(図1)。

Aパターンで加圧を行った671例では221例に(32.9%)、Bパターンを用いた159例では48例(30.2%)にスクイーズの発生が見られた。初回の治療でスクイーズのために治療圧までの加圧が不可能なため、日を改めて数回試みたが加圧できずにHBOを断念した例はAパターンで5例、Bパターンで3例あった。スクイーズの発生にはパターンによる差は見られなかったが、加圧開始から1.3ATAに達するまでAパターンでは49例(22.2%)、Bパターンでは15例(31.3%)にスクイーズが見られた。この差は1.3ATAまでの加圧パターンはA、Bとも同様であるため症例内容の差によるものと思われる(表1)。すなわちAパターンを用いた症例では、意識の清明な難聴や顔面神経マヒと、多少とも意識障害を伴う疾患であるCO中毒、頭部外傷、脳血管症例とがほぼ同率であるのに比べて、Bパターンでは意識障害を伴わない疾患の割合が多いため軽度のスクイーズのために加圧を中断したためと思われる(表2)。1.3ATAから1.8ATAの加圧中に発生するスクイーズが加圧の全経過中、両パターンともに最も高頻

表2 中耳腔スクイーズの加圧パターンと疾患別発生頻度

加圧パターン	A		B	
	総数	スクイーズ症例(%)	総数	スクイーズ症例(%)
突発性難聴	159	59 (37.1)	49	19 (38.8)
内耳性難聴	51	15 (29.4)	19	8 (42.1)
顔面神経麻痺	42	12 (28.5)	30	9 (30.0)
CO中毒	64	27 (43.7)	6	1 (16.7)
頭部外傷	61	16 (26.2)		
脳梗塞	58	18 (31.0)	4	1 (25.0)
脳出血	72	15 (20.8)	1	
脳動脈瘤	60	13 (21.6)	14	4 (28.6)
その他	104	41 (43.2)	36	6 (16.7)
合計	671	221 (32.9)	159	48 (30.2)

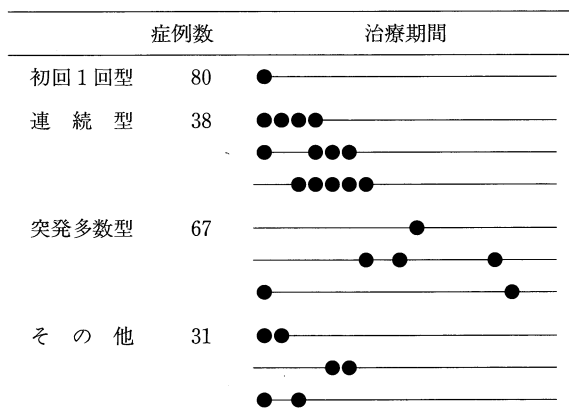


図2 治療期間におけるスクイーズ発生パターン

度に認められたが、特にAパターンでは約70%がこの領域に集中している。これは1.3ATAを境にAパターンでは加圧速度が2倍に変化しているのに対してBパターンでは同区間での圧力変化は、Aパターンの75%しか変化しないため、この変化率の差がAパターンによるスクイーズ発生率を高いものとしている要因と思われた。とくに1.3ATAを少し上回った地点でのスクイーズの発生は両パターンとも共通して、この区間でのスクイーズ発生の約4分の1を占めていた。Bパターンでは1.6と2.0ATAの所でさらに2回の加圧速度の変化があるが1.3ATAを少し上回った所に見

られたような、スクイーズが加圧速度の変化する所に集中する傾向は示さなかった。これは加圧速度が一定であるならば気体の体積の収縮率は単位時間あたり環境圧が高い程小さいために生体の受ける影響が少なくなるためと思われる。1.8ATA以上でのスクイーズの発生がBパターンではAパターンに比較して2倍以上であるのも加圧速度のわずかな差が影響しているものと思われる。

圧力の変化に対する気体容積の変化はボイルの法則にしたがい P (圧力) \times V (容積) = 一定であるから、1ATAから1.3ATAまで3分で加圧した時の容積変化は1ATAの時の76.9%に縮小する。

この程度の容積の変化がスクイーズを引き起こさないとする、1.3ATAから次の3分間で1.69ATAまでの約0.4ATAのさらなる加圧が可能であり、2ATAからは同様の時間で2.6ATAまで加圧が可能となる。安全基準では毎分0.8kg/cm²を最大変化とする加圧が許されているが当施設での経験では毎分0.3ATA以上の加圧では、スクイーズの発生が患者をはじめ医療スタッフにもほとんどの場合に起こりスクイーズを解消されるための加圧停止、一時減圧を行わなければならない。このため、特別の場合を除いては最大で毎分0.25ATA以下の加圧速度を用いている。

スクイーズはその発生形態も一定しておらず個々の患者で特有のパターンを示すが、治療期間の前半にはほぼ集中している(図2)。最も多いパターンは治療開始日だけに1回だけ発生するパターンでありスクイーズを起こした患者の80例(37%)がこのタイプであった(初回1回型)。日常生活で圧力変化を体験する事は少なく、スクイーズを起こさずに環境圧に順応する事は初めて高気圧酸素治療を受ける患者には困難な事である。耳管機能が正常であっても圧力の変化に対応した耳抜きタイミングが少しづれただけで耳管は開き難くなる。しかし、圧変化に応じた耳抜きのタイミングを覚えてしまえばその後は何等の障害もなく治療を継続する事が可能である。スクイーズが治療の毎に連続して起こるタイプは、慢性の耳管狭窄が最も疑われるグループであり38例(17.6%)にみられ、毎回の治療でほとんど同じ程度の圧力の所でスクイーズを起こし、その圧でのスクイーズが解消すると何等の障害もなく治療圧まで加圧する事が可能であった。このグループでは治療開始日からスクイーズを起こすものが見られる反面、治療開始日には何等の訴えもなしに治療を行い得たものが数日後から連続してスクイーズを発生するものも見られ、これらの症例では治療の初期に耳管機能の低下により中耳腔圧が環境圧に対して十分に平衡されていないため、その後の治療によって次第に障害が強くなっていったためと思われる(連続型)。治療期間中のある時に突然スクイーズが発生するタイプが67例(31%)に見られた(突発多数型)。これらはその日の体調が不良であったり、風邪の初期に自分では自覚しないまま治療を受けた患者に多く見られた。このグループの特徴

は、加圧の途中で複数回のスクイーズのために加圧の停止や減圧を行いながらも治療圧に達し、体調が良好になったり、風邪が治癒した後は何等問題なく治療を行う事ができた。その他のグループには加圧が全く不可能であったもの、治療期間に頻回にスクイーズのために加圧を停止しながら治療を行ったもの、毎分0.1以下の加圧速度であれば治療圧までの加圧が可能であったものなどが含まれる。

加圧時の気圧障害への対応

意識が清明である患者の場合には、中耳腔のスクイーズは耳の疼痛を訴え、副鼻腔のスクイーズでは前頭部、眼窩部、顔面に、歯ではその部分の歯痛を訴えるためにスクイーズが発生した事を知る事は容易であるが、意識障害のある患者や言語障害のために適確に意志を伝達する手段が乏しい患者を治療する際には、その発生を知る事は困難な場合が多い。このような患者の治療に際しては患者の示すわずかな変化、手を耳や顔面に持って行く、顔をしかめる、手指を強く握りしめる、呼吸や心拍数が増加する等に十分な注意をもって観察する事が必要である。

スクイーズの発生による疼痛は減圧によってほとんどの場合消失するが、例外的に疼痛が変化しない場合や増強する事がある。歯や副鼻腔でのスクイーズは解剖学的な特徴により内外の圧力差を軽減したり解消したりする手段がないため、治療を中止してスクイーズの原因となる疾病の治療を優先させなければならない。一方、中耳腔のスクイーズでは耳管を開放する手段を用いてスクイーズを軽減させ、解消しながら治療を行う事が可能である。中耳腔のスクイーズは耳閉感に始まり、次第に外部の音が聞こえ難くなって、それと同時に耳痛を自覚する。耳痛は加圧に伴って次第に激しくなる。このような症状が持続する場合には、水を飲んだりアメをしゃぶったりする事により嚥下運動を起こさせると耳管が開放されスクイーズが消失するが、それでも消失しない場合には自己耳管通気法を行わせる。いずれの場合にせよ症状が強くなってからでは効果が少ないため、加圧を一時中止したり、0.1~0.2ATAの減圧を行ってからスクイーズに対処した方が良い。加圧速度が遅い場合にはスクイーズを自覚してから耳痛まで

表3 加圧による流量の変化

差圧	室内圧			
	1 ATA	2 ATA	3 ATA	4 ATA
2kg/cm ²	5.18	3.37	2.84	2.46
4kg/cm ²	5.21	3.25	2.58	2.23
6kg/cm ²	5.18	3.11	2.37	1.96

(L)

酸素と室内圧の差圧を一定としたとき1ATAで設定した流量の室内圧の変化によって実際に流れる酸素量

に時間がかかるために耳抜きタイミングを失い、かえって加圧に時間がかかることもある。耳痛があるまま無理に加圧を行えば鼓膜の損傷を来さないまでも耳管周囲の炎症のためにその後の治療に際してスクイズが頻発し困難を極める事が多い。自己通気法としてバルサルバ法があり、一般にも水泳の時などに行われているが、この方法は強く行くと正円窓を損傷する危険性が指摘されている³⁾。前にも述べたがスクイズによると思われる疼痛に対して、減圧する事によってかえって疼痛が増強する場合が見られるが、このような患者ではバルサルバ法による通気を行って中耳腔の圧力が環境圧よりも高くなっている場合が多く、加圧する事によってスクイズが消失する事も経験する。

意識障害のある患者の場合は加圧刺激による疼痛による体動が、唯一の気圧障害が発生した事を知る手段となるが、この場合には気圧障害が相当程度進行しているため一時減圧する事が必要である。減圧したのち嚥下障害がなければ口腔内に水を少量流し込んで嚥下運動を起こさせながら加圧して行く必要がある。嚥下障害がある場合でも気管内チューブにより気道が十分に確保されている時には同様の方法で加圧が可能である事が多い。意識障害が強い症例や耳に損傷を与える危険性の高い場合は治療前に鼓膜穿孔、鼓膜切開が必要である。治療中にスクイズによる疼痛が激しかったり、疼痛の持続時間が長かったものには治療終了後速やかに検査を行い障害を最少に止めなければならない。

加圧による機器の特性の変化

医療用で使用される機器や器具は平圧下での使用を前提に製作されており、圧力の変化や高圧下での使用に対して対策を施されているものは極少数である。高気圧酸素治療の時に用いられる機会の多いカフ付き気管チューブ²⁾³⁾、点滴セット⁴⁾、酸素流量計⁵⁾、輸液ポンプ⁶⁾についての問題点はこれまでも報告されているが、気管チューブのカフは加圧によって内部の空気が縮小する事により次第に機能の低下を来す。このため加圧中はたえずカフ内の容量の減少を補って調節する必要がある。そうでないとカフと気道との間にすきまができて呼吸器が気管チューブと、口腔または鼻腔を通して交通する2つの流通路が形成される。カフ内部を液体と置換して圧力の上昇に対してカフの縮小を防止する事はカフの破損による患者への障害を防ぐ手段を持たないかぎり危険である。

高圧室内で点滴を行う場合の問題点は減圧時に発生する事が多いが、加圧中に問題となるのは治療圧中の操作と同様であり、点滴ボトル内が相対的に陰圧になる事に起因するものと、圧縮された気体が減圧的に膨張する事の2点である。陰圧の危険性は、点滴の交換時に不用意に空気針より先に輸液針を弾性のないボトルに刺した時におきる逆流であり、もう一つは加圧中にセットされた点滴回路の気体の量である。治療が終了し減圧時に気体の膨張によって薬液が通過する回路へ気体が入らないように最小限の空間を確保した回路としなければならない。酸素流量計の示度はその設置された環境圧に最も影響される。流量計は流路に設置されたバルブの位置によって、示度が室内

圧に影響されて変化するものとし、ないものに分類されるが、両者ともにその示度は実流量にたいして絶対圧の平方根に比例して高く指示しているため、実際に供給する酸素量は加圧とともに減少する(表3)。輸液ポンプについてはメカニカルスイッチを使用した機器が多くなり、加圧によるスイッチ表面への圧力の増加により勝手にスイッチが作動するための誤作動が問題となる。

おわりに

高気圧酸素治療の加圧時の問題点の多くは、患者の約30%に見られるスクイーズのための加圧の中断であり、加圧方法を如何にその患者に最適なパターンを選択するかが大切である。とくに1.5 ATA までの加圧初期の圧力変化は早すぎると高率にスクイーズが発生し、初回の治療時にはとくに注意を要する。圧力の増加につれて気体の収縮率は圧力の変化に比べて次第に減少するため、加圧速度を早めることができるが実用としては0.25 ATA/min が最大の加圧速度と思われる。一方、耳管狭窄等により僅かな圧変化でスクイーズを起こす症例では、よりゆっくりした加圧速度を選択しなければならないが、あまりに遅い加圧は反面耳抜きタイミングを失わせる。連続的な圧力変化による加圧が一般的であるが段階状に加圧を行っ

た方が加圧時間を短縮できる場合もある。スクイーズは加圧中の何れの圧でも起こし得るため、常に注意をもって対処し、患者への障害を回避できるように心がけねばならない。さらに治療に使われる機器についても、加圧による特性や状態の変化について十分に検討したうえで治療を行わなければならない。

〔参考文献〕

- 1) 日本高気圧環境医学会：高気圧酸素治療の安全基準，1995
- 2) 野口照義：救急医療と高気圧酸素療法，日高圧誌，Vol.20：25-37，1985
- 3) 佐藤 暢，長谷川敏久：カフ付気管挿入チューブにおけるカフ圧調節の自動化について，日高圧誌，Vol.21：147-152，1986
- 4) 榊原欣作：高気圧酸素治療の副作用，合併症および事故と，その対策，日高圧誌，Vol.28：243-270，1993
- 5) 鈴木英一，日沼吉孝，波出石弘，西野京子，安井信之：高気圧酸素治療中における酸素流量および吸気酸素濃度の低下について，日高圧誌，Vol.26：201-206，1991
- 6) 野原 敦，湯佐祐子，當山貴子，伊波 寛：高気圧治療装置内における輸液ポンプおよびシリンジポンプの安全性と正確性について，日高圧誌，Vol.24：139-143，1989