

## ●特集・安全な高気圧酸素治療のために

## 高圧環境での医療

## —脳神経外科疾患を中心として—

合志清隆<sup>\*,\*\*\*</sup>, 木下良正<sup>\*</sup>, 安部治彦<sup>\*\*</sup>

高気圧酸素 (HBO) 治療に際して重要なことは、この治療法が呼吸循環器系に影響を及ぼすことである。特に呼吸器系の変化は重要であり、HBO 治療により過呼吸が引き起こされ低炭酸ガス血症を呈する。このことは調節呼吸下の患者管理において問題となり、HBO 治療中は低炭酸ガス血症を維持する必要がある。また、脳神経外科疾患の特徴は、脳神経系の異常所見だけでなく全身状態の変化を伴っていることである。さらに、頭蓋内病変に伴い頭蓋内圧の亢進や痙攣発作の合併が多いことである。このように頭蓋内病変がある場合には、HBO 治療で頭蓋内圧のリバウンド現象が顕著になることや痙攣発作を誘発しやすい。したがって、脳神経外科疾患の HBO 治療では、中枢神経系の病態生理を十分理解し、合併症の予防や偶発症への対処が要求される。

キーワード：脳神経外科合併症、高気圧酸素治療

### Precautions for accidents related to hyperbaric oxygenation in neurosurgical patients

Kiyotaka Kohshi<sup>\*,\*\*\*</sup>, Yoshimasa Kinoshita<sup>\*</sup>, Haruhiko Abe<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Neurosurgery, <sup>\*\*</sup>2nd Department of Internal Medicine, and <sup>\*\*\*</sup>Division of Hyperbaric Medicine, University of Occupational and Environmental Health

Hyperbaric oxygen (HBO) therapy is very effective for the patients with neurosurgical diseases, such as certain types of acute cerebral ischemia and malignant brain tumor. However, this therapy is occasionally accompanied by serious side effects and complications. The most important physiological change is that hypocapnia is induced by stimulating respiration during HBO inhalation. In controlled ventilated patients, hypocapnia must be maintained during HBO inhalation. Otherwise arterial PCO<sub>2</sub> increases following CO<sub>2</sub> accumulation in tissues. Secondly, intracranial pressure (ICP) is decreased by hypocapnia as a direct effect of oxygen merely during HBO inhalation, but ICP then shows tran-

sient elevation after inhalation (rebound phenomenon). ICP is increased by intracranial lesions in many neurosurgical patients, the rebound phenomenon in such cases becomes remarkable and may induce brain herniation. Thirdly, patients with intracranial lesions are usually accompanied by convulsive seizures. Because HBO therapy is generally liable to induce to seizures, patients should be controlled with antiepileptic drugs. In conclusion, the patients under controlled ventilation or neurosurgical patients with high ICP or at high risk for seizures must be monitored during and after HBO therapy.

### Keywords :

neurosurgical complications  
hyperbaric oxygenation

### 脳神経外科疾患の特徴

脳神経外科で治療対象となる主な疾患は、脳腫瘍、脳血管障害、頭部外傷や脊髄疾患などである。これらの疾患は検査により偶然に発見されることもあるが、ほとんどが中枢神経状を伴って発症する。このような脳神経外科疾患は、単に中枢神経

\*産業医科大学医学部脳神経外科

\*\*産業医科大学医学部第2内科

\*\*\*産業医科大学医学部高気圧治療部

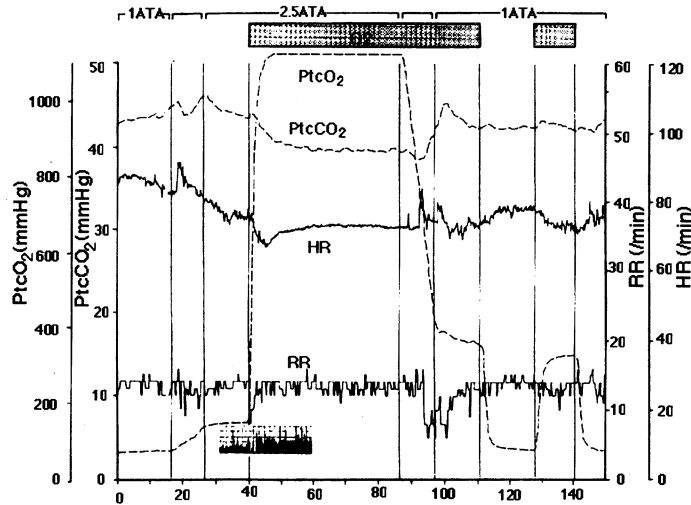


図1 HBO治療中の呼吸の変化

呼吸数には変化はないが、胸郭の動きが大きくなり、低炭酸ガス血症を示す。(Kohshi, 1991)

系の症状や所見だけではなく、全身状態の異常を高頻度に合併している<sup>9)</sup>。例えば、脳血管障害や頭部外傷の急性期には、意識障害や運動麻痺などの中枢神経症状以外に、呼吸循環器系の異常として肺浮腫による血液ガスの悪化や心電図と血圧の変化、さらに電解質異常などが高率に見出される。中枢神経障害により惹起されたこのような全身異常が重篤な状態で、致命的になることもよく経験される。また、このような疾患の手術は新たな外傷を脳に与えることでもあり、手術後に前述した全身異常所見が生じたり、あるいは手術前に見られたものが増強されることもしばしばである。したがって、脳神経外科疾患の治療は中枢神経系を含めた全身状態の把握とその対処であるが、中枢神経系以外の管理が極めて重要となる。

## 高圧酸素に伴う生理学的変化

### 1. 呼吸循環器系の変化

高圧酸素(HBO)に伴う生理学的変化のなかで、臨床的に最も重要なものは呼吸の変化である。HBO曝露によって低炭酸ガス血症が引き起こされるが、調節呼吸下のHBO治療に際して特に注意が必要となる。実際の治療中に測定した結果では、呼吸数に変化はなく一回換気量が多くなる。すなわち、過呼吸が誘発され低炭酸ガス血症が

HBO治療中に維持される(図1)<sup>10)</sup>。

HBO曝露により呼吸が刺激される機序は後述するが、その前に酸素運搬と炭酸ガス排出といった呼吸生理について簡単に述べる。大気圧下の空気呼吸では組織で必要とされる酸素の運搬に赤血球中のヘモグロビン(Hb)が大きな役割を担っている。肺で酸素化されたHb(酸化Hb)は動脈血によって組織に運ばれ、ここでは毛細血管を通過する際にその分圧差によって拡散し、一部のHbは還元された状態になる(還元Hb)。一方、組織で産生された炭酸ガスは、血漿内あるいはHbに移行する。血液内の炭酸ガスは液性成分には溶解型炭酸ガスや重炭酸として、Hbや血漿中の蛋白とはそのアミノ基と結合したカルバミノ炭酸として存在している。酸素化された血液は組織で炭酸ガスとのガス交換が行われると、静脈血として肺や腎臓に運ばれ、それぞれ炭酸ガスと重炭酸塩として排出される。以上が通常の酸素代謝とそれに伴って産生された炭酸ガスの排出である。

しかし、HBO治療では溶存酸素が動脈血に高濃度に存在しており、組織で必要とされる酸素の多くが溶存酸素によって供給される。動脈血が組織を通過しても、空気呼吸に比べて酸化Hbの割合が大きくなる。このように酸化Hbの多い血液では、炭酸ガスに対する酸化Hbの親和性は還元

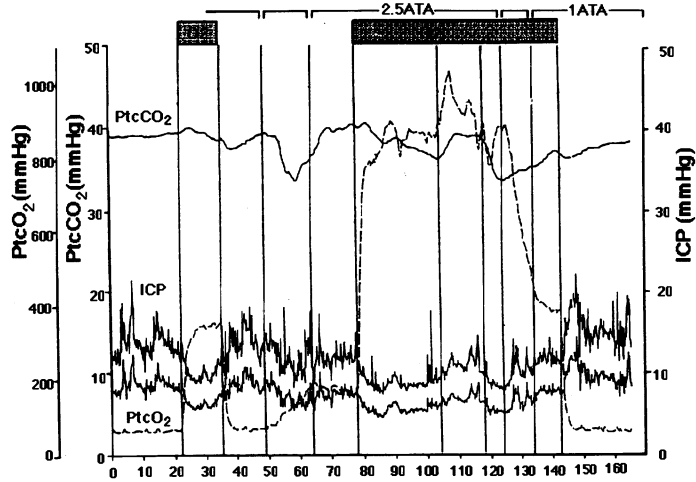


図2 HBO治療中の頭蓋内圧の変化

HBO曝露により頭蓋内圧(ICP)は低下するが、動脈血PCO<sub>2</sub>に大きな影響を受ける。HBO終了後はICPは一過性の上昇(リバウンド現象)を示す。(Kohshi, 1991)

Hbのそれより低いために、カルバミノ炭酸を作りにくくなる<sup>7)13)</sup>。すなわち、炭酸ガスの組織から血液への移行が抑制される。カルバミノ炭酸として運搬される炭酸ガスは、その全量からすれば多いものではないが、HBO治療ではカルバミノHbへの移行の抑制が大きな意味を持つ。さらに、HBOの直接作用によって血管が収縮し組織血流は少なくなるが<sup>15)</sup>、これも組織から血液への炭酸ガスの移行を抑制する大きな要因となる。このようにHBO曝露では赤血球の炭酸ガス運搬能の低下と組織血流低下によって、組織から炭酸ガスの排出抑制がはたらき、組織内の炭酸ガス分圧は上昇すると推測されている<sup>4)5)14)15)</sup>。LambertsenらはHBO曝露によって頸静脈血内の炭酸ガス分圧が上昇することを確認し、脳組織の炭酸ガス分圧上昇を意味するとしている<sup>11)</sup>。組織に限らず炭酸ガス分圧上昇は、pHの低下(アシドーシス)につながる。HBO曝露により脳組織あるいは呼吸中枢で炭酸ガス分圧上昇やアシドーシスが起これ、呼吸が促進され低炭酸ガス血症が誘発される<sup>11)</sup>。HBO曝露に伴うこのような呼吸の変化は、組織内炭酸ガス上昇を抑制する反応とされている<sup>3)9)16)</sup>。

循環器系での変化は心拍数と心拍出量の低下で

ある<sup>14)</sup>。HBO曝露に伴う血圧の変化は、動物では血圧上昇が報告されているが<sup>2)</sup>、ヒトでは血圧への影響はないといわれている<sup>14)</sup>。われわれはHBO治療中に血圧の観血的連続測定を行ってきたが、血圧上昇を示す症例も時に経験している。

## 2. 脳循環と頭蓋内圧の変化

脳血管のHBOに対する反応性は部位によって異なるにしても、全体的には脳血管は収縮し脳血流は低下する<sup>2)8)10)12)</sup>。この脳血管の収縮機序として、脳血管への酸素の直接作用と低炭酸ガス血症による作用の二つが考えられている<sup>10)12)</sup>。脳血流の低下によって頭蓋内圧(ICP)は低下するが、これが認められるのはHBO曝露中のみである。ICPはHBO曝露後にはむしろ上昇しICPのリバウンド現象と呼ばれるが<sup>8)</sup>、これには酸素と炭酸ガスの両者が関係していると考えられている(図2)<sup>10)12)</sup>。

## 脳神経外科疾患の管理

### 1. 全身一般状態への対処

呼吸循環器系が不安定な重症例のHBO治療では、治療中の患者監視とこの変動に対応する必要がある。

最初に、HBO治療前に全身状態を把握し、問題

があれば第2種治療装置で医師が同伴し対処する。第1種治療装置では呼吸循環系を考慮して治療を行うかどうかの判断が重要である。意識障害が認められる症例では、耳抜きが不十分であるため鼓膜穿刺を行い、体動が激しい時には四肢を抑制することが多い。鼓膜穿刺は第2種治療装置内では加圧中に状態を見ながら行ってもよいが、中等度以上の意識障害例や第1種治療装置では治療前に行っておく。重症例では舌根沈下や吐物による気道閉塞の恐れがあるため、気管内挿管を行う。この際、挿管チューブのカフを空気ではなく生理食塩水で満たしておけば、圧変化に伴うカフの容積を調節する必要がない。

次いで、ドレーン類であるが、問題になるのは胸腔と脳室内ドレーンである。第2種治療装置内に医師が同伴している場合には、これらを開放して管理してもよいが、廃液逆流や廃液バッグとの圧不均衡の問題もあり閉鎖しておく方がよい。また、各種ドレーンなどの付属物が生体に装着されていれば、些細な体動でも移動や抜去によって重篤な合併症を引き起こす可能性がある。したがって、治療前の慎重なチェックと治療中の慎重な監視が必要であることはいうまでもない。

## 2. 呼吸器系の管理

気管内挿管や気管切開だけで問題になることはないが、気道内の刺激によって喀痰が多くなり、これによって気道の狭窄や閉塞につながる可能性がある。刺激を少なくするために、表面麻酔剤のスプレーを気道内に噴霧することが多いが、HBO治療中の呼吸状態の監視と治療後の十分な去痰が必要である。

人工呼吸器が装着されている場合には、HBO治療中のその使用が困難であることが多い。数種類の人工呼吸器の使用を試みたが、現在では量依存性の人工呼吸器のみを用いている。しかし、この種の人工呼吸器でも1回換気量や呼吸数の設定が加圧とともに変化し、微妙な呼吸の調節が困難である。また、調節呼吸下での管理で最も問題となるのは、HBO曝露による組織や血液中の炭酸ガスの変化である。前述したように、自発呼吸下ではHBOにより呼吸が促進され、著明な低炭酸ガス血症が維持される。例えば、2.5絶対気圧下の酸素投与では、 $\text{PaCO}_2$ は平均して10mmHgほど低下している<sup>10)</sup>。調節呼吸下では、過呼吸あるいは

頻呼吸によって血中炭酸ガス分圧を自発呼吸で見られる程度に低く抑えておく必要がある。 $\text{PaCO}_2$ を30mmHg程度に下げればHBO曝露でも $\text{PaCO}_2$ の上昇はないが(図3-a)、35mmHg程度に調節すればHBO曝露とともに $\text{PaCO}_2$ は徐々に上昇する(図3-b)。虚血組織では通常アシドーシスを示すことが多いが、 $\text{PaCO}_2$ の上昇は組織内の炭酸ガス蓄積を促進し、これがさらに増強される結果となり致命的な障害も考えられる。したがって、調節呼吸の患者では $\text{PaCO}_2$ の問題は特に重要で、できれば経皮での連続モニターを行う方が安全である。

## 3. 血圧の管理

HBO曝露による体循環の変化については前述し、多くは心疾患を伴っていないければ大きな問題にならない。しかし、脳神経外科領域でも症例によっては、あるいは降圧剤などの循環器系薬剤を投与されている場合には、時にHBO治療中に血圧が変動することがある。図4は、脳血管障害に高血圧症を合併していた症例で、HBO治療中の血圧の変化を示したものである。Ca拮抗薬が投与されていたが、HBO治療を開始すると血圧が徐々に上昇し、酸素吸入を中止すると正常に復している。HBO曝露の期間だけ血圧上昇を示しているが、それ以外の期間では血圧は正常である。このような症例ではHBO治療前後で血圧を測定しても、血圧に変化がなかったものと判断してしまう。降圧剤等の循環器系薬剤を投与されている症例でのHBO治療による血圧変動は今後の課題である。

## 4. 頭蓋内圧の管理

脳神経外科疾患の特徴の一つは、頭蓋内病変によってICPが亢進していることが多いことである。通常は前述したりバウンド現象が問題となることはないが、ICPが亢進している症例ではこれが顕著になり症状が悪化することもある。図5は、ICP亢進例にHBO治療中のその変化を示したものである。HBO治療が終了すると、ICPはさらに上昇し脈打った波形に変化する。これは呼吸循環系にも影響を及ぼす危険なICP亢進を意味している。これによって頭痛や吐き気を訴え、血圧上昇や徐脈といったクッシング現象が引き起こされる。これが原因で意識障害の進行や症状悪化のことも時に経験する。したがって、ICPが亢進して

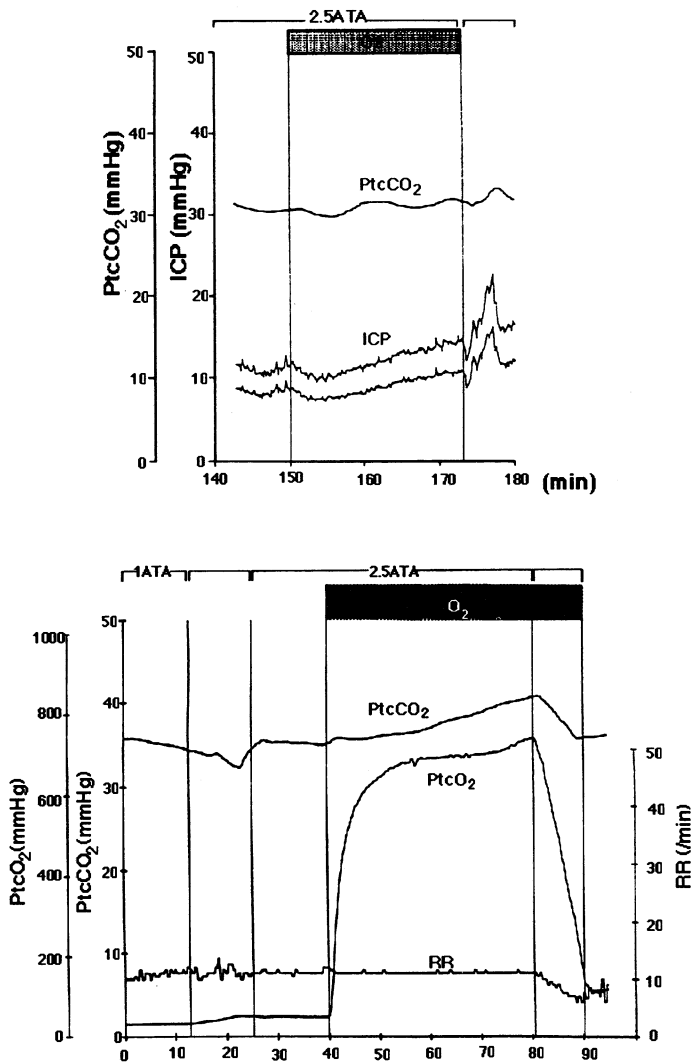


図3 調節呼吸下での動脈血 PCO<sub>2</sub>の変化

- (a) PCO<sub>2</sub>を30mmHgに調節すると HBO 治療中の上昇はないが,
- (b) 35mmHgではHBO治療開始とともに徐々に上昇する。(Kohshi, 1991)

いる症例では HBO 治療を見合わせる事が多いが、HBO 治療が必要な場合には ICP を下げる薬剤をこの治療後半や終了直後に投与することが重要である。また、このような ICP が亢進している症例では HBO 治療の効果はほとんど期待できない。

### 5. 酸素中毒の対応

中枢神経の酸素中毒は意識消失や痙攣発作としてよく知られているが、通常の HBO 治療でこれらが起こることはほとんどない<sup>14)</sup>。しかし、星状神経節ブロック後に HBO 治療を行うと、時に嘔気や嘔吐が増強したり、冷や汗と胸部不快感に引き続いて意識消失をきたすことがある。このような

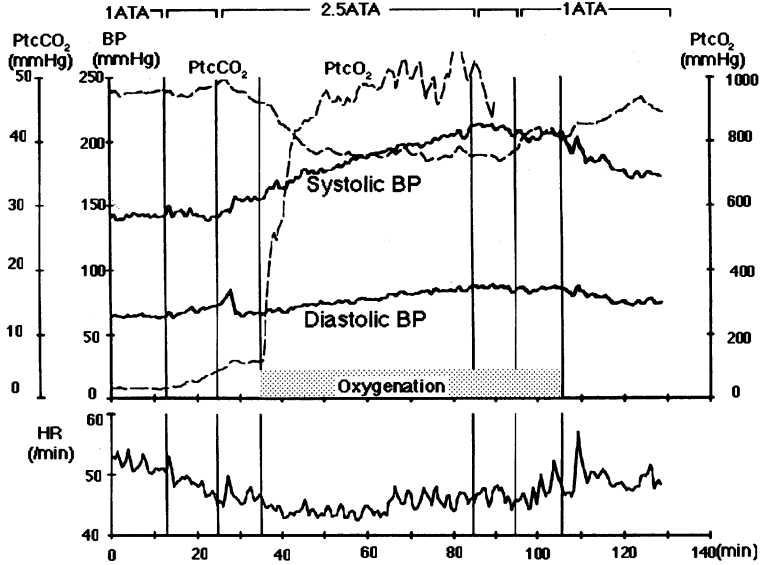


図4 HBO治療に伴う血圧上昇症例

HBO治療開始とともに徐脈と血圧上昇が認められる。酸素吸入中止で血圧は低下している。

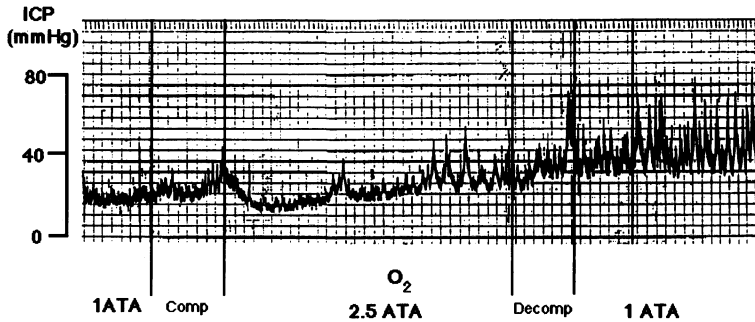


図5 HBO治療に伴う頭蓋内圧の変化

頭蓋内圧 (ICP) の亢進症例では HBO 治療開始と同時に ICP は低下するが、HBO 治療終了後に逆に上昇する (リバウンド現象)。

症状は中枢神経の酸素中毒の一つと考えられる。HBO 曝露によって脳血管は収縮し脳血流は低下するが、これは酸素中毒の防御機序として説明されている<sup>11)</sup>。星状神経節ブロックは自律神経の麻痺によって脳血流を増加させるが<sup>17)</sup>、HBO による正常の反応としての脳血管収縮が起こらない。したがって、高酸素分圧の血流が大量に脳に流れることになり、酸素中毒を起こしやすい。また、

前述した前駆症状を伴っていることが多く、このような症状があれば HBO 治療を中止する必要がある。

次いで、HBO 治療の酸素中毒で問題になるのは痙攣発作であるが、これは頭蓋内の種々の病変に合併している。また、頭蓋内病変があれば HBO 曝露によっても痙攣発作は誘発されやすく、このことは動物実験でも確認されている<sup>6)</sup>。脳神経外

科疾患の HBO 治療では、少なくとも痙攣発作は十分コントロールされていることは必要であるが、治療中にこれが生じた場合の対処が重要である。治療装置にかかわらず、全身痙攣の治療は早急な抗痙攣剤の静脈内投与である。第2種治療装置では医師が早急に入室し処置を行う。全身痙攣による重篤な呼吸障害は稀であるが、第1種治療装置では呼吸状態を見ながら急速に減圧し同様の処置が必要である。また、痙攣発作が部分発作である場合には抗痙攣剤の静脈内投与は必要としないが、全身痙攣への移行することもあり HBO 治療は中断せざるを得ない。脳神経外科疾患の HBO 治療を行う前には、痙攣発作の既往やその病型と抗痙攣剤の種類などを少なくとも確認しておく必要がある。

#### おわりに

全身の血管性疾患の増加によって、HBO 治療がその治療効果からも注目されてきている。また、脳神経外科で扱う疾患にも HBO 治療を応用している施設が急増している。しかし、このような脳神経外科疾患の HBO 治療を安全に行うためには、いくつかの問題を抱えていることを再確認しなければならない。

#### 【参 考 文 献】

- 1) 浅野孝雄, 佐野圭司: 術前処置. 佐野圭司, 半田肇 (編) 脳神経外科手術管理法, 医学書院. 1984, pp1-36
- 2) Bergo GW, Tyssebotn I: Cerebral blood flow and systemic hemodynamics during exposure to 2kPa CO<sub>2</sub>-300kPa O<sub>2</sub> in rats. *J Appl Physiol* 78:2100-2108, 1995
- 3) Bergofsky EH, Bertun P: Response to regional circulations to hyperoxia. *J Appl Physiol* 21:567-572, 1966
- 4) Christiansen J, Douglas CG, Haldane JS: The absorption and dissociation of carbon dioxide by human blood. *J Physiol (London)* 48:244-271, 1914
- 5) Dautrebande L, Haldane JS: The effects of respiration of oxygen on breathing and circulation. *J Physiol (London)* 55:296-299, 1921
- 6) Fenton LH, Robinson MB: Repeated exposure to hyperbaric oxygen sensitizes rats to oxygen-induced seizures. *Brain Res* 632:143-149, 1993
- 7) Ganong WF: Review of medical physiology, 9th ed. Maruzen Asia, 1979, pp510-516
- 8) Hayakawa T, Kanai N, Kuroda R, et al: Response of cerebrospinal fluid pressure to hyperbaric oxygenation. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 34:580-586, 1971
- 9) Heyman A, Patterson JL Jr, Duke TW, Battey LL: The cerebral circulation and metabolism in arteriosclerotic and hypertensive cerebrovascular disease. With observations on the effects of inhalation of different concentrations of oxygen. *N Engl J Med* 249:223-229, 1953
- 10) Kohshi K, Yokota A, Konda N, et al: Intracranial pressure responses during hyperbaric oxygen therapy. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 31:575-581, 1991
- 11) Lambersten CJ, Kough RH, Cooper DY, et al: Oxygen toxicity: effects in man of oxygen inhalation at 1 and 3.5 atmospheres upon blood gas transport, cerebral circulation and cerebral metabolism. *J Appl Physiol* 5:471-486, 1953
- 12) Ohta H, Hadeishi H, Nemoto N, et al: Transient effect of hyperbaric oxygen on cerebral blood flow and intracranial pressure. *J Hyperbaric Med* 5:3-13, 1990
- 13) 榑原欣作: 血液ガスの基礎知識(1) 一酸素について— *日高圧医誌* 27:87-98, 1992
- 14) 榑原欣作: 高気圧酸素治療の副作用, 合併症および事故と, その対策. *日高圧医誌* 28:243-270, 1993
- 15) Tindall GT, Willkins RH, Odom GL: Effect of hyperbaric oxygenation on cerebral blood flow. *Surg Forum* 16:414-416, 1965
- 16) Torbati D, Parolla D, Lavy S: Blood flow in rat brain during exposure to high oxygen pressure. *Aviat Space Environ Med* 49:963-967, 1978
- 17) Umeyama T, Kugimiya T, Ogawa T, et al: Changes in cerebral blood flow estimated after stellate ganglion block by single photon emission computed tomography. *J Auton Nerv Syst* 50:339-346, 1995