

●原 著

気管挿入チューブ用呼吸圧重畳式カフ圧自動調節装置

佐藤 暢* 長谷川敏久*

カフ付き気管内チューブを患者に挿入して使用するに際して、高気圧治療のような急激な環境圧の変動に対しても、常に任意に設定した必要最低限のカフ圧（以下基底カフ圧という）を維持し、それに患者の気道内圧を自動的に重ね合わせるようにして調節できる装置を作成した。

その装置は、圧縮ガス配管からガス源を受ける第1室と、それとダイヤフラム付きの弁で隔てられた第2の室はカフに連結され、その第2室とダイヤフラムで画成された第3の室（背圧室）は患者の気管に挿入された気管内チューブの気道圧を導入できるように連結され、第4の室はカフに連結された回路内のガスを少量ずつ外部へ放出する小孔を持つ構造となっている。

第2の室と第3の室を隔てるダイヤフラムは基底カフ圧の調節ダイヤルに連がり、その調節ダイヤルによって第2の室からカフに連結された回路の圧を任意に調節でき、かつ気道内の呼吸圧変動が第3室へ導入されて、第3の室側からダイヤフラムにすでに加えられていた基底カフ圧相当分に、呼吸圧を追加するために、第2の室への圧力調節は、基底カフ圧と呼吸圧の和となって変動し、これに連結したカフの圧力も連動する。かくして、呼吸圧以外の要因でカフ圧が変動しても直ちに補正される。

また、ガス源の圧が一定以下に落ちると、第2室から第4室を経て外部に放出される小孔のガス通路が、小さいスプリングで押された遮断弁で自動的に閉じて、カフ圧を保持する安全装置をも備えている。

キーワード：カフ圧，圧調節装置，換気圧

Pressure regulator for tracheal tube cuff with automatic superposition of ventilating pressure change

Toru Sato* and Toshihisa Hasegawa*

*Tottori University Hospital, Yonago, Japan

A pressure regulator for controlling inflatable cuff pressure of tracheal tube was invented, which allowed to superpose the change of patient's ventilatory pressure upon controllable but stable basic cuff pressure according to the change of ambient pressure. This mechanism can be maintained even under rapid change of environmental pressure as OHP. This device comprises the first air-tight chamber with an input port from medical gas source, the second chamber connected to cuff, the third chamber leads to the inside of tracheal tube and the fourth chamber with an orifice open to the air for venting. A

diaphragm between the second and the third chambers is connected to a basic cuff pressure regulator so that the pressure in the second chamber can be set at a desired level and also be controlled in response to the pressure change in the third chamber equal to the ventilatory pressure.

Thus, cuff pressure can be maintained as the sum of preset basic pressure and ventilating pressure, and other influences can be eliminated. When medical gas supply pressure falls lower than a certain level, gas discharge from the second chamber to the air through the fourth chamber is automatically blocked by shut-off valve coupled to a small spring and the cuff pressure can be maintained.

Keywords : _____

cuff pressure
pressure regulator
ventilation pressure

*鳥取大学医学部附属病院麻酔科

緒 言

全身麻酔時や人工呼吸器を利用する時に使用されるカフ付気管内チューブや気管切開カニューラ（以下気管挿入チューブと総称す）のカフは、それによる気管内壁への圧迫圧力が高すぎると、カフ接触部における気管内壁の毛細血管を圧迫して血流を阻害し、圧迫部分における粘膜（繊毛上皮）細胞の機能障害を残したり、極端な場合にはその部分を壊死に至らしめることがある。また逆に圧迫圧力が低すぎると麻酔ガスや呼吸用の空気等が洩れて換気不足による障害を来したり、食道からの嘔吐物等が肺内部へ流入することがある。

したがって、カフ付気管挿入チューブにおいては、カフの気管内壁に対する圧迫圧力が毛細血管の血流を遮断するまでに至らない範囲で、しかも麻酔器や人工呼吸器から送気されたガスや空気が洩れない程度の一定の圧迫圧力を維持する方法（主に自発呼吸時に良い、人工呼吸時では比較的高圧でカフを膨ますことを要する）と、通常はカフ圧をガス洩れない必要最低限に保ち、気道内圧が高くなった時に合せてカフ圧をそれに負けない分だけ上昇させて、気管内壁に与える障害を少なくする方法（主に加圧人工呼吸時）とに大別される。

今迄にカフの材質や形状には種々な工夫が見られたが、長期にわたってしかも広範囲な環境圧変化および気道内圧変化に良く対応するだけの工夫はなかった。今回我々は、高気圧治療中に加圧人工呼吸を行う場合のように環境圧が急激に変化する過酷な条件の下でも常に自動的に対応して好適なカフ圧を維持できる装置を開発したので報告する。

装置と方法

医療配管等によって供給されている医療用の圧縮空気や酸素ガスを圧力供給源とし、低い圧力の範囲で調整できる減圧弁を利用して、当初に所望の必要最低限のカフ圧（以下基底カフ圧と云う）を設定しておき、その減圧弁の圧力調節用ダイヤフラムの背圧室へ、患者の気道内圧に相当する呼吸回路の内圧を導入することにより、減圧弁の二次側ひいてはカフ圧力を、加圧呼吸による気道内圧の変化分を基底カフ圧に重畳付加した圧に等し

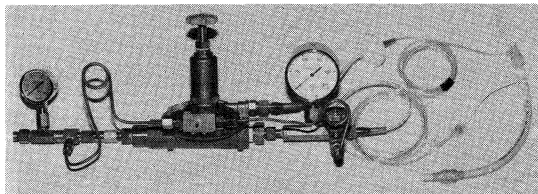


図1 試作した本装置を、気道内と気管内チューブ用カフの夫々に連結したところを示す。

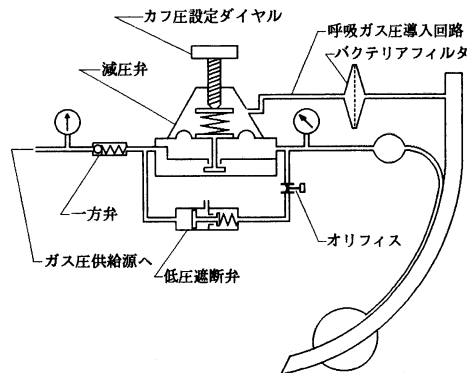


図2 呼吸圧重畳式カフ圧調節装置を気管内チューブに連結した所の模式図

くする装置を試作した（図1）。

今回試作したカフ圧調節装置の構造を模式図（図2）によって説明する。

まず、酸素ガス用のアウトレットに、カフ圧調節装置の一次側のガス供給ホースを接続すると、一次側の圧力計（酸素ガス用 NISSHIN 製 0~10kgf/cm²G）がその時の供給ガス圧を示す。その一次側の回路に一方弁を設けて下流側を二分岐して、その一方を減圧弁（FUJIKOKI CO.,LTD. 製 L.P.G.用 REGULATOR TYPE V120A に、酸素ガス使用を可能にするために防炎加工を施行したものに）に連結し、他方を安全装置の遮断弁（最寄りの鉄工所に依頼して試作）の制御室へ連通する。減圧弁に送気された酸素ガスは、カフ圧設定ダイヤル（減圧弁の圧力設定ダイヤル）で設定された所望圧力に調節されて、二次側圧力となる。

次に、減圧弁の二次側の出口に圧力計（NISSHIN 製 過圧防止型 0~1000mmH₂O）を設けてカフ圧視認用とする。その下流側を二分岐して、一方をカフ連結チューブに接続し、他方を放出用のオリフィス（Fujikin International, Inc.製のニー

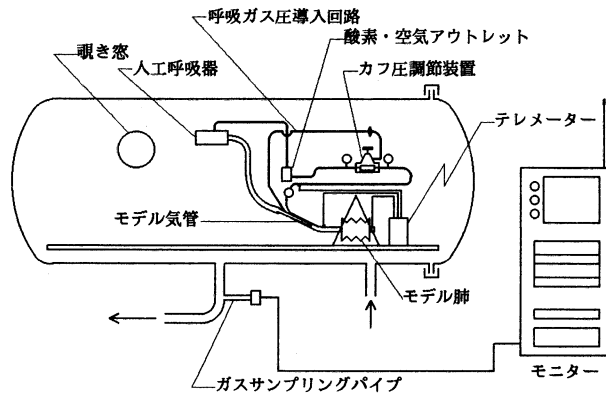


図3 高気圧治療装置内における実験器具の配置を示す模式図

ドルバルブの開度を固定して代用)に接続する。このオリフィスの下流側を前記の遮断弁に接続した構成である。

本装置の作動を説明すれば、気管挿入チューブから気道内圧を取り出して、減圧弁の圧力調節用のダイヤフラムの背圧室に導入する呼吸ガス圧導入回路を設けることにより、気道内圧の上昇分だけ、最初に設定しておいた基底カフ圧に相当するダイヤフラム押し圧に上乘せし、気道内圧が低下した時にはダイヤフラムの背圧が低下するために、減圧弁の圧力調節弁が閉じて二次側へガスは供給されなくなり、オリフィスから放出されるので、二次側の圧力ひいてはカフ圧は、ダイヤフラムの背圧側からの押し圧に相当するまで低下することである。

これにより、

基底カフ圧+気道内圧=現在のカフ圧
と云う算式が連続して成立することになり、呼吸に同期して気道内圧に相当する圧力分を、常にカフに上乘せすることが可能になり、また何らかの事由により遮断弁の制御室に働く一次側の圧力が所定の圧力よりも低下すると、遮断弁が閉鎖されてオリフィスから放出されていたガスを閉止することができる安全装置を具備している。

実験の方法

実験の方法は、カフ圧環境が激変する悪条件下の典型例として、高気圧治療装置内で行う方法を採用した(図3)。

人工換気はモデル肺(Medishield製)にモデル

気管(N.C.C. Adult Trachea Model.#109-21)を接続し、それにカフ付気管内チューブ(ポータックス・ブルーライン)を挿管して小型の人工呼吸器(ドレーゲル Oxylog)に分岐口を設けた接続用のアダプターで連結し、その接続用のアダプターの分岐口とカフ圧調節装置のダイヤフラム背圧室とをバクテリアフィルターを設けたチューブで連結しておき、このカフにカフ圧調節装置を連結して、高気圧治療装置(川崎エンジニアリング KHO-200型ワンマンチャンバー)内に設置した。

血圧測定用のトランスデューサ(日本電気三栄 P23 ID)を、肺内圧測定用としてモデル肺部分、気管内圧測定用としてモデル気管部分、およびカフ圧測定用としてカフ連結チューブの入口部分の3カ所に配置して、無線発信器によってこの3チャンネルの圧力信号を治療装置の外に設置したモニター(日本電気三栄 POLYGRAPH 361)へテレメータ(日本電気三栄 365-11)で送信し(ただし、この高気圧治療装置は鋼製容器形式であり、高気圧治療装置内から電波を発信しても外部の受信機へ到達しにくいために、心電モニター用の貫通端子に送信機のアンテナを接続して外部へ送信した)、また高気圧治療装置の室内圧は、モニターに接続できるように改造した工業用の圧トランスデューサ(日本電気三栄 TR305H, 5K)を、高気圧治療装置外に設けた高気圧治療装置内用のガスサンプリング・パイプの端部に設置してモニターに有線で接続し、4チャンネルの圧力を同時に測定記録した。カフ圧調節装置の圧力ガス供給源には、高気圧治療装置内の酸素用アウトレットを使

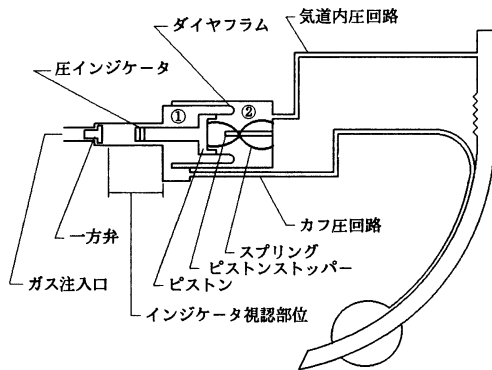


図4 米国セリダン社製カフトローラの模式図

用した。モデル肺は、コンプライアンスを $0.02\text{l/cm H}_2\text{O}$ 、気道抵抗を $5\text{cmH}_2\text{O/l/秒}$ とし、人工呼吸器は一回換気量を大気中で 600ml 、回数は20回/分に設定し、基底カフ圧力はモデル気管からの換気漏れが生じない最低限の圧力である $17\text{cmH}_2\text{O}$ に設定し、それらを予め高気圧治療装置内に設置しておき、圧縮空気により1ATA（大気圧）～3ATA までの加減圧操作を行った。

比較対照のために、同一カフを用いてカフに水を封入した方式についても実験をした。

また、米国においては、ヘリコプターにて患者を加圧呼吸を行いながら運ぶ時の急激な環境圧の変化に自動的に合せて、気管内壁に与える障害を少なくかつ有効な人工呼吸ができる工夫として、カフトローラ（セリダン社製のもの図4）が販売されている。このカフトローラについても高気圧治療装置内に設置して実験を行った。

日本ではまだ普及していないが、カフトローラは図4に見られるように、ダイヤフラムで画成され、かつスプリングで圧迫されている可変容積室①とカフとを連結し、この可変容積室①側から見てダイヤフラムの背部に設けられた室②と気管挿入チューブの気道とを、気道内圧回路で連結した構成である。

使用に際して、ガス注入口からシリンジ等を利用して空気等のガスを注入して、スプリングの押し圧（所望のカフ圧付近の押し圧に相当する張力になるように製作されている）に抗して所望の基底圧になるまで注入しておくことにより、気道内圧の変化をダイヤフラムを介して室①に反映させ

ることで、気道内圧をカフ圧に付加することができるカフ圧調節装置である。

結 果

カフ圧力が相対的に激変する高気圧治療装置の室内において、人工呼吸器に接続するモデル実験を行なった結果、考案試作したカフ圧調節装置は、予想以上の安定性を持って作動し、全く問題なく呼吸圧を上乗せすることが出来た。その結果を図5の下段に示す。

図5の上段は水封入式の場合の、1, 2, 3ATA 時における気道内圧、肺内圧、カフ圧の変化を同時記録したものを対比例として示し、下段は本呼吸圧重量式カフ圧調節装置の場合の、1, 2, 3ATA 時における気道内圧、肺内圧、カフ圧の変化を同時記録したものを示す。図5の下段に示すような圧力波形が得られたが、この内3ATA 時のカフ圧力波形に振動が表れているが、これはカフ圧調整装置として利用した減圧弁のダイヤフラムとスプリングが、その時のガス圧条件に対して共振現象を起こしているものと思われるが、その他の面ではほぼ満足すべきデータを得た。

カフトローラについては、高気圧治療装置内での実験の結果は、高気圧治療装置内の気圧を上昇させて行くと、1.8ATA 以上ではカフ内のガスが収縮してその機能を失った。

考 察

緒言に述べた如く、気管挿入チューブのカフを、気管に障害を与えることの少ないように膨らます工夫は、機能的に2種類に大別される。前者（すなわち従来の高圧カフのように恒常的に比較的高圧に維持する方法）における問題点は、全身麻酔時の笑気ガスのカフ内の拡散流入、高気圧治療や航空機輸送等による環境圧力の変化、長期人工呼吸時におけるカフ内のガス洩れ等、カフ圧が環境圧に対して相対的に著しく変化する要因が多く、当初に設定したカフ圧・形状が安定して保持されることが少いために、必然的にカフ圧を高く保つ傾向が強くなり、カフ圧による気管内壁に対する圧迫圧力の増加に伴って気管内壁の粘膜に障害が発生し易いことである。逆にカフ圧を下げすぎると気管挿入チューブと患者の気管内壁との気密性低下による換気不足や誤嚥といった障害が発生す

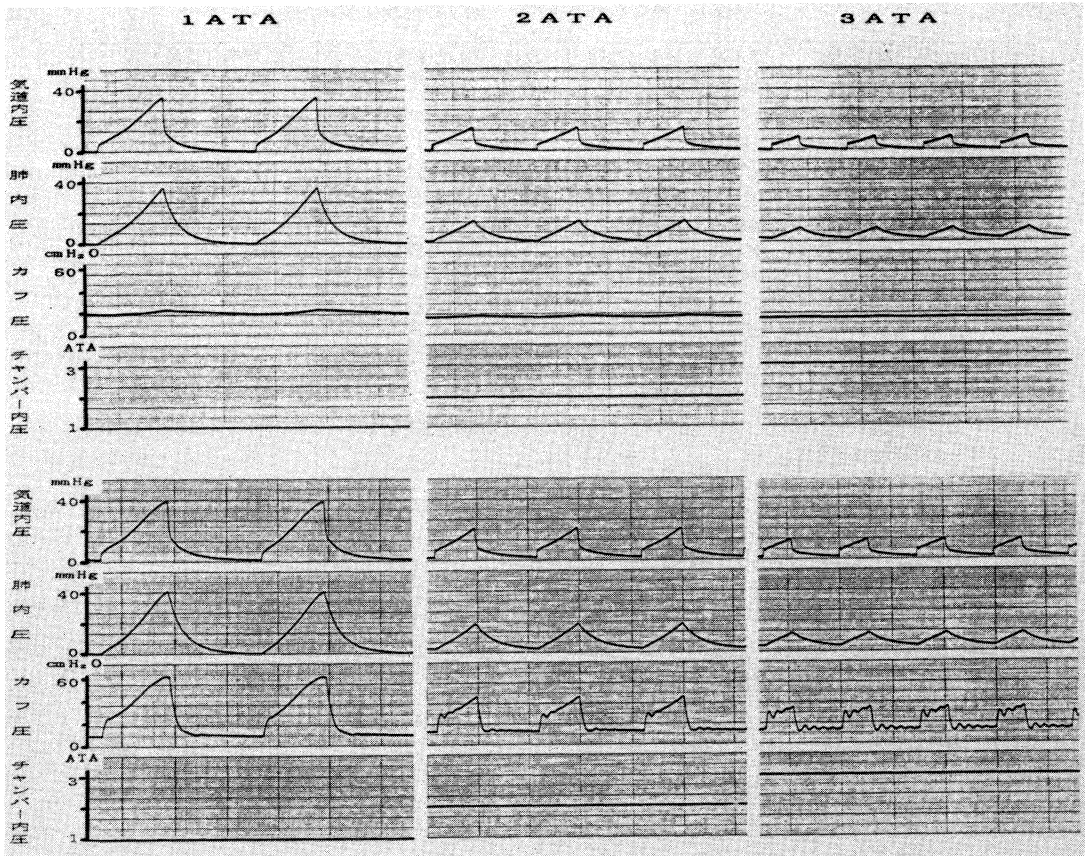


図5 各気圧環境下における圧力波形の記録を示す（上段は水封式，下段は本呼吸圧重畳式）。

るので、カフ圧のコントロールのためには多くの研究・考案¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾がなされている。なかでも、気管内挿管した患者を高気圧環境下に入れる前に、カフを水で充たす方法は、カフの圧縮を防ぐことはできるが、水の注入程度によるカフ圧の設定にはかなりの技術を要し、しかもガス注入方式のような弾力性がないためにカフ内圧の微妙な調節は不可能に近く障害を起こしやすいことがわかった。

一方、カフトローラに対する実験結果は、笑気ガスの拡散侵入やある程度環境圧の変化には対応することができて、高気圧治療装置内で行った実験の結果、大幅な環境圧の変化に十分に対応できるだけの能力はなく(表1)、このような条件下で使用する場合には問題があることが判明した。

そこで我々は、ガス体でカフを満たしたまま気管挿入チューブのカフ圧力を環境圧に対して自動

的に一定に調節する装置を考案して発表した⁷⁾。

その後、人工呼吸器等の陽圧呼吸によって患者の呼吸管理を行なう場合に使用するカフ付き気管挿入チューブのカフ圧を、当初に誤嚥等を防止できる最低限度付近の所望の基底カフ圧に設定しておき、その基底カフ圧に人工呼吸器等による患者の呼吸圧の変化分を上乗せできる方法や装置について研究を重ねた。

その結果、笑気ガスの拡散によるカフへの流入出や、温度変化による膨張収縮、患者の咳等による急激な圧迫圧力の変化、および高気圧治療時などに生じる環境圧の大幅な変化等によるカフ圧やカフの形状の変動要因が生じて、当初に設定しておいた所望の基底カフ圧に、呼吸に同期して呼吸圧の変化分を自動的に上乗せしてカフ圧力を維持することができ、かつ呼吸ガスの洩れによる換気不足を招くことなく、しかもカフ圧迫による気管内壁への障害を最小限に抑えることができる呼

表1 種々なカフ圧変動要因下の性能比較

カフ圧変動要因	ガス封入(従来)方式	CUFF-TROLLER方式	本呼吸圧重畳方式
麻酔中等で、カフに対する笑気ガスの拡散がある場合	時にはカフ圧が、再調節しなければならぬほどに変化することもある。	カフ圧の再調節を要するほどの圧力変化が生じることはない。	カフ圧および呼吸圧重畳機能は安定しており、調節の必要は全くない。
予圧室のない航空機等のキャビンで使用する場合	気圧の変化にしたがってカフ圧を調節する必要がある。	カフ圧を再調節しなければならないほどに変化することもある。	
1.3 ATAまで加圧した場合	カフの表面に皺が発生してその機能が阻害される。	カフ圧調節機能は働くが、呼吸圧重畳機能は作動しなくなる。	
1.5 ATAまで "	カフが萎み機能を失う	カフの表面に皺が発生して機能が阻害される。	
1.8 ATAまで "		カフが萎み機能を失う	
1.8 ATA以上 "			
カフ圧回路にピンホール等のガス洩れが発生した場合			

吸圧重畳式カフ圧調節装置⁹⁾を開発するに至った。

さらに、本装置によれば、いわゆる低圧カフ内の圧力を内部から積極的にガスを送って変動させるので、気管内圧の変動が肺側のカフ膜を押してカフの圧縮とずれを伴いながら、カフ圧が勝手に変動する場合⁹⁾に較べて、カフのずれや変形が少なく、それだけ理想的な形で効果を保持することが出来る。従って、従来普通のカフでは加圧人工呼吸の度に気管挿入チューブが移動して、蛇管やスリップジョイントの連結部がゆるみ勝ちになることも予防できる。これは、呼吸回路の脱離という致命的な事故を防ぐ意味で重要なことである。

我々は前回同様、周囲の環境圧を変化させる方法で、相対的にカフ圧力を変動させる厳しい条件を課して、その安定度を試すために、高気圧治療装置の室内で実験する方法を採用したが、その範囲では常に十分に対応できた。

尚、医療ガス配管から供給されるガスの圧力が低下した場合には、設定されていたカフ圧を自動的に保持する安全装置を備えているが、時として作動しないことがあった。これは試作品のために、遮断弁の制御機構に製作上簡単なピストン式を採用したためであって、ダイヤフラム式にすれば問題なく作動するものと考えている。

結 語

今回試作した人工呼吸時等の陽圧呼吸管理を目

的とした呼吸圧重畳式カフ圧調節装置は、急激に変化するカフ圧変動要因が生じたり進行中の環境下にあっても、何ら問題なく当初設定した基底カフ圧力を維持し、かつ呼吸圧を上乗せすることが出来た。

また、これらに較べて遥かに緩慢な笑気ガスや温度変化によるカフ圧変動要因が生じても、初期に設定された所望のカフ圧に呼吸圧を安定的に上乗せすることが出来ることをもこの実験によって明らかにした。

また、使用中に医療用の酸素ガスや圧縮空気の供給が断たれる事態が生じて、供給側回路のガス圧が所定の圧力以下に低下した場合には、オリフィスから放出されていたガスを自動的に止め、その時点のカフ圧力に保持できる構造となっている。したがって、このカフ圧力調節装置は広く実用に供することができるものと考えられる。

本論文の要旨は、第21回高気圧環境医学会総会(福岡)で報告した。

[参 考 文 献]

- 1) 宮本恒彦, 瀬戸屋健三, 山本巖: 気管内チューブカフ圧調整器, 日本医科器械学会誌, 51(12): 614-618, 1981
- 2) 清水幸雄, 並木昭義: 気管内チューブ・カフに関する研究 その1 気管チューブ・カフの材質による差異の検討, 笑気下における各種カフの内圧, カフ内ガス容積, ガス組成および濃度の変化について, 札幌医学雑誌, 50(4): 351-360, 1981

- 3) 清水幸雄, 並木昭義: 気管内チューブ・カフに関する研究 その2 笑気臨床麻酔中のカフ内圧, 側圧の変化および創作したカフ圧調節装置の効果について, 札幌医学雑誌, 50(5): 365-371, 1981
- 4) Kibby, R.R., Robinson, E.J. and Schulz, J.: Intermittent cuff inhalation during prolonged positive-pressure ventilation, *Anesthesiology*, 32(4): 364-366, 1970
- 5) Stanley, T.H., Foote, J.L. and Liu, W-S: A simple pressure relief valve to prevent increases in endotracheal tube cuff pressure and volume in intubated patients, *Anesthesiology* 43(4): 478-481, 1975
- 6) Revenäs, B. and Lindholm, C-E.: Pressure and volume changes in tracheal tube cuffs during anesthesia, *Acta Anesthesiol. Scand.* 20(4): 321-326, 1976
- 7) 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, 日本高気圧医学会雑誌21(3): 147-152, 1986
- 8) 発明者 佐藤暢, 長谷川敏久: 呼吸圧重畳式カフ圧調整装置 (国有特許), 出願番号61-029098, 特開62-186872
- 9) Crawley, B.E. and Cross, D.E.: Tracheal cuffs -A review and dynamic pressure study, *Anesthesia* 30(1): 4-11, 1975