

特集

非常時の人工呼吸とその対応

普段からの備え

磨田 裕

キーワード：人工呼吸器，用手換気，停電，非常電源，医療ガス，酸素ボンベ

はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、東北地方を中心に、多くの病院で停電などによって人工呼吸管理にも多大な影響が及んだ。規模こそ違っても、このような事態はいつどこで発生するかわからないので、人工呼吸管理においては普段から表1のように災害手順などの備えを立案しておく必要がある。ここでは一般的に必要な非常時への対策について記載する。

1. 人工呼吸管理を行う上での基本

人工呼吸患者、人工呼吸管理にかかわる以上、人工呼吸管理における基本事項を知っておかねばならない(表2)。それは、人工呼吸を必要としている病態、人工呼吸による効果、合併症、人工呼吸器の概略、操作方法、などである。

実際の人工呼吸では各種の換気モードが使用されている。人工呼吸器が停止した場合、自発呼吸の可否は重要な点の一つである。すなわち、筋弛緩薬使用、深い鎮静、呼吸筋麻痺などで完全な調節換気である場合は、直ちに無呼吸になるので、即座に用手人工呼吸を開始しなければならない。

パルスオキシメータなどの各種のモニタ、アラーム機能は人工呼吸中に用いるが、これらの取り扱い、特徴についても習熟しておく。例えば、人工呼吸器が停止して「電源異常」などのアラームが鳴っているだけ

なら、まだ患者状態の悪化はないが、SpO₂低下アラームが起動している状況では、非常に危険な状態であることを意味している。

表1 人工呼吸管理における非常事態への備え

- 非常事態対処マニュアルの整備と訓練実施
- 各関係職種（医師、看護師、臨床工学技士など）、関連部門（医療安全部門、病院施設管理部門など）が常に連携できること：呼吸ケアチーム（RST）の結成
- 教育システムの確立
人工呼吸器の使用方法、構造、電気、医療ガスなどを含む年間の教育プログラムの確立
- 病院設備の保守点検
医療ガス、非常電源
- 人工呼吸器の保守管理、始業点検、動作確認の実施
酸素アウトレットは2系統（または酸素分配器を使用）
- 非常事態対応備品の整備
病棟部署に配備：予備酸素ボンベ、酸素減圧弁、流量計、除細動器、気道確保用具、救急薬品、携帯式吸引器など
ベッドサイドに配備：用手換気器具（バグバルブマスク）と酸素流量計、懐中電灯など

表2 人工呼吸管理において必要な基本的知識

- 呼吸不全における一般的病態生理の知識
- 気道確保と用手換気器具の取り扱い方法
- 人工呼吸の適応
- 人工呼吸器の仕組み
- 換気モードの違い
- 人工呼吸の合併症
- 各種モニタの使用法、みかた

Ⅱ. 人工呼吸器の仕組みと動作

1. 人工呼吸器用の電源

ほとんどの人工呼吸器はガス源として酸素と圧縮空気を使用する。また器械の制御は電子回路によるので電気を必要とする。今日の多くの人工呼吸器はバッテリーを搭載しているが、古いタイプなどではそうでないものもある。停電になるとバッテリーを搭載しないすべての電気機器は停止する。したがってバッテリーを搭載しているか否かは停電時における動作で重要な問題となる。バッテリー搭載機種でも、バッテリーによる動作可能時間は 30 分～2 時間程度で、長時間の停電には対応しきれない。バッテリー非搭載機はもちろん、バッテリーを搭載していてもその電気容量が少ないこともあるので、人工呼吸器の電源は必ず「緑」または「赤」の無停電電源・非常電源（後述）に接続する。

2. 酸素、圧縮空気

酸素と圧縮空気、またはその片方が遮断されたとき、人工呼吸器の機種によっては動作状況が異なる。酸素または空気の供給が停止した場合、「ガス圧低下」または「ガス供給異常」などのアラームを発しながら、供給されている一方のガスで作動するものも多い。しかし、機械式の酸素濃度調節装置（酸素ブレンダー）を用いている機種では、その構造と設定値に依存する場合がある。

酸素が停止して、空気のみで換気ができたとしても、吸気酸素濃度は 21% になるので低酸素血症に陥りやすい。また両方のガスが停止すると、CMV、SIMV などの陽圧換気は停止し、自発呼吸のみ可能になる。なお、この自発吸気は室内空気を吸入できるだけなので、酸素濃度は 21% である。このような状況では直ちに用手換気の準備が必要である。

Ⅲ. 電源設備、ガス配管設備

1. 医療ガス

人工呼吸器が使用する中央配管の酸素、圧縮空気の圧力はおおよそ $0.4 \pm 0.04\text{MPa}$ ($400 \pm 40\text{kPa}$) である。何らかの原因でこの供給ガス圧が低下したり、供給が停止することがある。

1) 酸素

酸素中央配管が故障した場合は、酸素ポンペで駆動

しなければならない。しかしこれには大型（7000L）酸素ポンペが必要となる。また 1 本の酸素ポンペで複数の人工呼吸器を駆動することは可能だが、その場合、シャットオフバルブの操作などが必要で、アウトレットに酸素ポンペを接続して中央配管側へ逆送しなければならない。この逆送システムについては中央配管の配管図面の確認、各種接続部品の確保、試験実施などあらかじめシミュレーション・テストをしておかなければ実施は困難である。

また、人工呼吸器の酸素使用量は分時換気量、回路内定常流、設定酸素濃度に依存するが、それ以外に人工呼吸器内部でのガス消費、パージガスなどがあり、機種間でかなりの相違がある。

2) 圧縮空気

エアコンプレッサによって病院内で産生、または液体酸素と液体窒素からの混合による合成空気（人工空気）が使用される。停電時にエアコンプレッサが停止したり、圧縮空気配管設備が故障することもありうる。しかし酸素と違い、圧縮空気停止での実害は少ない。合成空気では何重もの安全機構により酸素濃度を $22 \pm 1\%$ に維持している。ただし、窒素濃度が上昇し酸素濃度が低下するということが絶対にないとは断言できない。

3) 吸引

停電などで吸引設備が停止することがある。この場合に備え、足踏み式吸引器、バッテリー駆動可能な電動式吸引器など電源の要らない装置を配備しておくことが必要である。

2. 電源の種類

病院では自家発電装置を設備し、停電に対応している。これは院内の非常電源として設備されている。

1) 非常電源とコンセントの色分け

これには以下のような数種類があり、停電時の動作が異なる。病院には非常電源についての基準を維持するため、自家発電装置、さらには無停電電源が設置されている。これらの電源はその機能がわかるようにコンセントの色で区別されている（表 3、日本工業規格 JIS）。一般用の通常電源は白色である。一方、自家発電や、無停電電源は赤または緑色のコンセントが使用される。しかし、その色分けが病院ごとに異なっており、必ずしも統一されていないのが現状である。たとえば、赤色コンセントは表の 1～3 の何れかであるが、

表3 非常電源の適用基準（JIS T1022：2006
による）およびコンセントの色分け

1. 一般非常電源 …………… 赤色
40秒以内に電源供給を回復、10時間連続運
転可能なこと
2. 特別非常電源 …………… 赤色
10秒以内に電源供給を回復、10時間連続運
転可能なこと
3. 瞬時特別非常電源 …… 赤色
0.5秒以内に電源供給を回復、10分間連続運
転可能なこと
交流無停電電源は緑色としてもよい

注：JISは表のように規定しているが、古い施設など
で、茶色コンセントが1、2または3に使用され
ている場合もある。白色コンセントは一般商用
電源に用いることになっている。

病院によってはすべてが白色のもの、一部に黒、茶色
を用いている場合もある。

2) 自家発電

停電になると発電機が起動する。しかし、起動する
まで、10～30秒程度時間を要するので、その間は停電
が起こる。この自家発電装置のみでは、バッテリーを搭
載しない人工呼吸器は一時停止する。なお、発電機用
の燃料備蓄量は1～7日間程度である。また発電機には
燃料だけでなく冷却水も必要で、冷却水切れで発電で
きなくなる場合もある。このように非常電源システム
が的確に作動することを平時の点検で確認しておくこ
とが必要である。

3) 無停電電源

バッテリーを介して一般にはインバータにより AC 電
源を供給するので、停電になってもそのまま決められ
た一定電圧（100V）、一定周波数（50または60Hz）の
交流電流を供給し続けることができる。これは「UPS」
（Uninterruptible Power System 〈Supply〉）と呼ばれ
る。図1に非常電源、無停電電源についての配電の概
略を示す¹⁾。ただし、バッテリー容量に限りがあるので、
電気を供給できる時間は10分間程度と短い。したがっ
てこの方式の電源を備えることは、一般非常電源、特
別非常電源と組み合わせた方式で、自家発電装置が起
動するまでの「つなぎ」という目的となる。

このように非常電源には各種のタイプがあるので、こ
れらの機能の違いをよく理解して使い分けなければ、せ
っかくの電源設備の機能を十分に引き出せない。すな
わち人工呼吸器など生命維持装置は無停電電源、それ

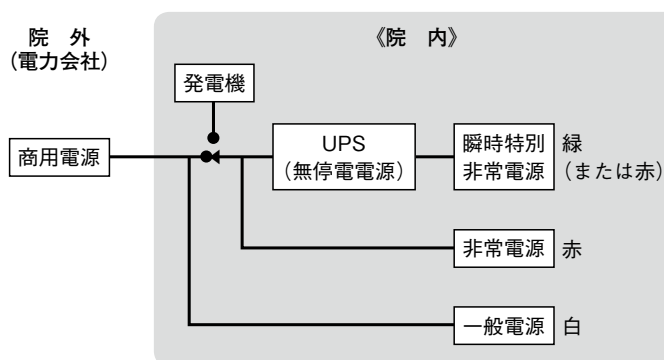


図1 病院での無停電電源、発電装置の概略

図の右の色は対応するコンセントの色を示す（表3参照）

（文献1より）

がなければ非常電源に接続する。一般の白コンセント
に接続してはならない。

なお、コンピュータ機器、AV機器などで使われる小
型安価なUPS電源が市販されている。しかし一部には
適正な正弦波交流が出力されない装置も存在し²⁾、こ
れらは医療機器の動作不良を引き起こす可能性もある。

IV. 非常事態のシミュレーションとトレーニング

非常事態を想定したシミュレーションを行っておく
ことは重要である。とくに夜間の発生では、マンパワ
ーの確保方法、当直医のコール方法、各種の器材の集
積方法などマニュアルを整備しておくだけでなく、実
際に有効な対処ができることが必要である。例えば酸
素ポンベの所在、大型ポンベの確保、用手換気の適正
な実施などである。

医療機器以外の設備についても地震、停電時にどの
ような状態になるかを確認しておく。通信設備や患者
搬送設備、すなわち、内線電話、院内PHS、一般電話、
エレベータ、自動ドアなど、地震や停電によって全面
あるいは部分的な障害を受けるものは多数ある。

1. 酸素ポンベ

中央配管に障害が発生したらポンベが必要になる。
人工呼吸器を駆動するとなると大型のポンベ（7000L）
が必要になる。したがってポンベを使う場合、酸素ポ
ンベに関する知識が必要になる。

酸素ポンベは酸素充填量として一般に500L、1500L、
7000Lがあり、ポンベの色は黒である（黒／銀／灰）
2色のものもある。なお、緑色のポンベは二酸化炭素

表 4 本邦における医療ガスの色分け

	パイピング・流量計	ボンベ
(管轄する規定)	(JIS T7001 : 2006)	(高圧ガス保安法)
酸素	緑	黒
圧縮空気	黄	ねずみ色
二酸化炭素	(だいたい)	緑
亜酸化窒素 (笑気)	青	ねずみ色 (青 / ねずみ) *
吸引	黒	—

*ボンベ上部を青色塗装してもよいことになっているため、ほとんどは 2 色である。

表 5 バッグバルブマスク (蘇生バッグ) とジャクソンリース回路の違い

	蘇生バッグ	ジャクソンリース回路
ガス源	不 要	必 要
ガス (酸素) 流量	0~10L/min	分時換気量の 2~3 倍 (10~15L/min 以上)
バッグの膨張	自 動	ガス流入による
CO ₂ 再呼吸	な し	あり (ガス流入量に依存)
高濃度の酸素吸入	リザーバを要す	容 易
中等度濃度の酸素	酸素流量による	不 可
肺の状態 (C、R) *把握	わかりにくい	感じ取りやすい
加圧圧力	わかりにくい (圧力計付きあり)	感じ取りやすい
構 造	一方弁を持つ	単 純
価 格	高 価	安 価

*C : コンプライアンス、R : 抵抗

(文献 3 より)

ボンベである (注意!、表 4)。

酸素ボンベの充填圧は 14.7MPa (150kgf/cm²) (35℃) であり、酸素ボンベ使用時は、常に酸素残量に注意する。残量 (L) は、

$$\text{ボンベ充填量 (L)} \times (\text{現在のボンベ内圧 (MPa)}) \\ \div \text{充填圧 (15MPa)}$$

から概算できる。たとえば小型の 500L ボンベの圧力が 10MPa であるとすれば、残量は 2/3 のおよそ 330L である。したがって 10L/分 で使用すると約 30 分で空になる。このように残量を把握して使用可能時間を考えながら使用する必要がある。

酸素ボンベを使用する場合は、酸素ボンベ用のレギュレータ、圧力計、流量計、ニップルナット、酸素接続チューブなどが必要である。またボンベと人工呼吸器を接続する場合はレギュレータにパイピング用の酸素アウトレットアダプタを接続する必要がある。これらがどこにあるかも把握しておく必要がある。また、さらにこれらパーツの取り付け取り外しのために、ス

パナ、レンチなどの工具も必要になる。

2. 用手換気器具

人工呼吸器が停止したら直ちに用手換気を行う。このとき用手換気器具としてはバッグバルブマスク (蘇生バッグ、Ambu[®]-bag など) またはジャクソンリース回路が使われる。表 5 にこれらの用手換気器具の特徴と違いを示す³⁾。

通常の酸素供給があればジャクソンリース回路のほうが使いやすい点が多いが、適正に使用するにはある程度のトレーニングが必要である⁴⁾。酸素源がない、または酸素ボンベで利用できる酸素量が限られているときは蘇生バッグ (バッグバルブマスク) を使用する。このとき吸入酸素濃度は酸素流量、換気量などに依存する⁵⁾ ので、必要以上の酸素流量は避けたい。

またバッグバルブマスクでは、リザーバ付の装置を使わなければ酸素濃度が上昇しない⁵⁾。このような状況を踏まえて普段から患者の酸素化の状態を把握し、P/F の意義をよく理解しておく必要がある。

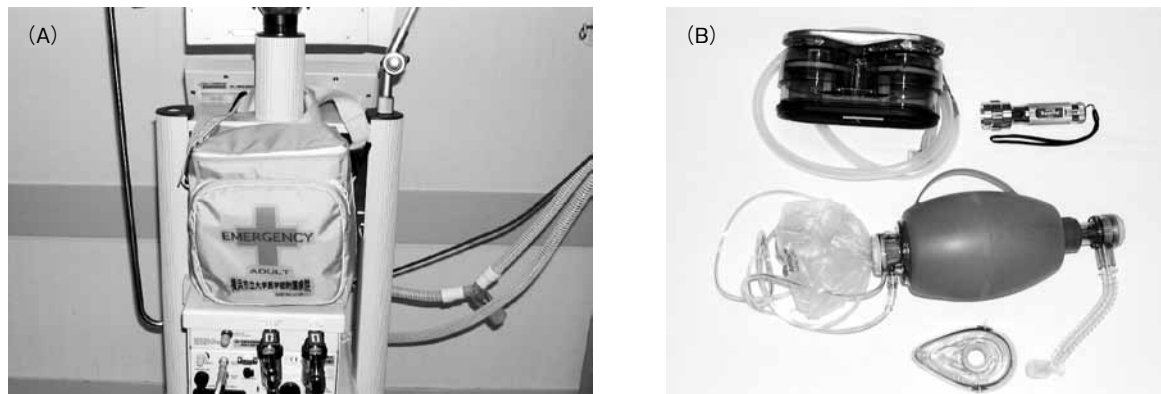


図2 非常時必要物品配置の一例

(A) 人工呼吸器背面に取り付けられた「Emergency Bag」。(B) バッグの内容：蘇生バッグ、マスク、懐中電灯、足踏み吸引器のほかに吸引カテーテルを収納している（横浜市立大学附属病院、全人工呼吸器に装備）。

（文献1より）

このように非常事態用に人工呼吸患者ごとにバッグバルブマスクの常備が必要である。図2はこのような非常事態に備えて、必要物品一式をバッグに収納してすべての人工呼吸器に搭載している例である¹⁾。この装備一式はあくまでも非常用であり、日常業務では使用しない。

3. 医療ガスの遮断、その他

すでに述べたように、人工呼吸器によって動作が異なる場合がある。普段使用している人工呼吸器がどのような動作になるか、テスト肺を換気しながら、酸素、圧縮空気のパイピングの一つまたは両者を外したときのアラーム起動、動作状況を確認しておく。

スパナ、レンチなどの工具は普段はあまり使用しない。しかし非常時には必要になることがあるので、その所在はスタッフの共有情報としておく。また除細動器などの所在も院内配置マップなどを作成しておくとう用である。

V. 実際の対応

1. 停電のとき

1) UPS が機能した場合

一部の照明や検査機器などが停止するが、人工呼吸器などUPS接続機器は停止しない。

2) UPS 設備がないかUPSが機能しなかった場合

バッテリーなしの人工呼吸器は停止する。直ちに用手換気を開始。自家発電の起動まで用手換気を継続する。

停電中にUPSや自家発電により電力が供給されてい

ても、いつそれが停止するかわからない。したがって、いつでも用手換気ができるように、器具、人員を確保しておく。また、発電機や配電設備が地震や浸水などで破損されれば、非常電源・無停電電源も機能しない。実際の事故はいくつかの故障が重なって起こっている。

なお、ほとんどの人工呼吸器はマイクロプロセッサ(CPU)で制御されている。これらは突然の停電の後、0.5～1秒して電源が入ると、CPUおよび装置が暴走することがある。これはUPSではない非常電源に切り替わる時に見られる場合がある。したがって、このように一瞬の停電の後、機器の「暴走」や「フリーズ」が起これば、機器のリセットのため、電源をもう一度完全にオフにして約10秒間待ってから再度電源を入れれば復帰する。

2. 人工呼吸器以外の影響

人工呼吸器以外では、ベッドサイドモニタ、電動ベッド、血液製剤用の冷蔵庫・冷凍庫、血液ガス分析装置など検査機器、X線診断装置、電子カルテ端末、画像ディスプレイなどが停止して影響を受ける。また圧縮空気供給源のエアコンプレッサも停止すれば空気供給が遮断される。なお、停電が復旧しても、たとえば血液ガス分析装置、CT装置などは、一定時間をかけてウォーミングアップ、較正を行うため、20～30分は安定した測定、使用ができなくなる場合が多い。

3. その他の原因で人工呼吸器が停止した場合など

換気が停止したら直ちに用手換気を行う。いかなる

場合も呼吸を継続することが最優先される。これは人工呼吸器停止、故障などの原因究明よりも優先しなければならない。用手換気を継続させながら、人を呼び、それから原因究明を進める。もちろん酸素が遮断されていたら、直ちに酸素ボンベを持ってくる。また、すでに心停止であったなら、心肺蘇生処置を実施する。

おわりに

大災害、非常事態はいつどこで発生するかわからない。「喉元過ぎれば熱さ忘れる」ということのないように、普段から準備、訓練をしておくことが重要である。

参考文献

- 1) 磨田 裕：1. 停電時の対策. 呼吸管理 専門医にきく最新の臨床. 丸川征四郎, 横田浩史編. 東京, 中外医学社, 2003, pp388-391.
- 2) 百瀬直樹：無停電電源の問題点—出力波形の観点から—, クリニカルエンジニアリング. 2010 ; 21 : 917-919.
- 3) 磨田 裕：呼吸管理における安全管理. 改訂新版 図説 ICU—呼吸管理編. 奥津芳人, 磨田 裕編. 東京, 真興交易医書出版部, 2007, pp498-508.
- 4) 大塚将秀, 磨田 裕：用手加圧練習装置の試作とその効果の検討. 人工呼吸. 2002 ; 19 : 46-49.
- 5) Nam SH, Kim KJ, Nam YT, et al : The changes in delivered oxygen fractions using Laerdal resuscitator bag with different types of reservoir. Yonsei Med J. 2001 ; 42 : 242-246.