

特 集

体外式陽陰圧式人工呼吸

小児への応用

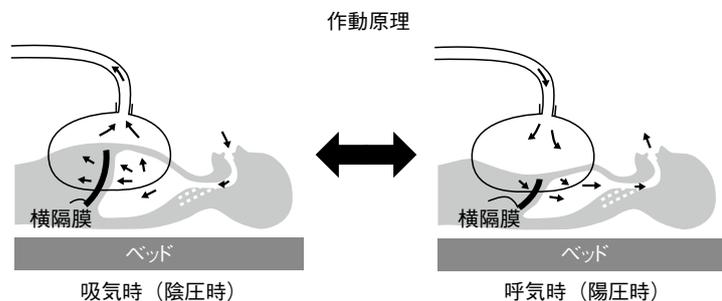
岡田邦之・植田 穰

はじめに

急性・慢性を問わず、成人と比較して気管挿管や気管切開、適切でない人工呼吸器使用による合併症や後遺症の多い小児領域において、陽・陰圧体外式人工呼吸（体外式陽陰圧式人工呼吸）器（Biphasic Cuirass Ventilation、以下：RTX[®]、英国メディベント社製、輸入代理店：アイ・エム・アイ株式会社）やNPPVによる侵襲の少ない呼吸管理は非常に有用であると考えられる。NPPVについては、慢性期使用が日本呼吸器学会のNPPVガイドライン¹⁾で使用法が記され、急性期においても一般的なガイドラインは未だないものの、気管挿管の回避や合併症の減少、生存率の上昇、ICUおよび入院日数の短縮等の報告がされている^{2, 3)}。

しかし、インターフェースが少なく、患児の協力が得られにくい小児においては、一般的な普及はしていないのが現状である。RTX[®]は、胸腹部に胸当て（キュイラス）を装着しキュイラス内を陰圧・陽圧の二相性にコントロールして呼吸を補助する人工呼吸器で⁴⁾（図1）、着脱が簡便であり、特別な手技も必要なくインターフェースも新生児期からの使用が可能である。

筆者らは、RTX[®]による人工呼吸管理を導入し、急性・慢性の呼吸障害に対する治療を行っている。RTX[®]は、気管挿管などの侵襲的な処置が必要ないばかりか、着脱が容易であるため、これまでなら気管挿管による人工呼吸管理を躊躇うような比較的軽症な症例に対しても、より早期から呼吸管理を行うようになり、結果として気管挿管の回避や入院日数の軽減など、患者の



キュイラスと言われる胸当てを胸郭に当て、陰圧と陽圧をかけることにより胸郭と横隔膜の動きをコントロールし換気の補助をする。

図1 RTX[®]とその作動原理

予後改善に貢献していると考えている。本稿では、小児の呼吸器の特徴を解説し、筆者らの経験をもとに、RTX[®]の使用法や文献的な現状を紹介する。

I. 小児の呼吸器の特徴

小児は成人と比べ急速に呼吸困難をきたす。小児の呼吸器の特徴を表1⁵⁾に示すが、この特徴がそのまま、小児が呼吸困難や呼吸不全をきたしやすい理由と言い換えることができる。小児では症状の進行も早いいため、小児の呼吸器の特徴を十分理解し、迅速に呼吸困難症状を見極めることは極めて重要である。表2に呼吸数の正常値と呼吸窮迫の症状を示す。もっとも重要な指標は、意識障害や皮膚や口唇のチアノーゼの有無、陥没呼吸や起座呼吸などの呼吸パターンの変化、食欲などであり、問診や診察時に注意深く観察する必要がある。

表1 小児の呼吸器の特徴

1. 解剖学的特徴
1) 気管・気管支の直径が細く末梢の平滑筋組織も十分に発達していない。
2) 咽頭・喉頭が柔らかく、狭い。
3) 気道が細いために呼吸抵抗が高い。
4) 胸郭も柔らかいために陥没呼吸が起こりやすい。
5) 感染などによる浮腫や分泌物により、容易に気道が狭窄・閉塞しやすく、呼吸困難や窒息を起こしやすい。
6) 粘液分泌腺が過形成。
7) 肋骨が水平で1回換気量が少ない。
8) 乳幼児では肝臓が大きく、横隔膜が下がらないため、肺が膨らみにくい。
9) 腹部が膨張しやすく、横隔膜の動きが制限されやすい。
10) 肺胞の数が少なく、サイズが大きいために換気能力に余力がない。
2. 生理学的特徴
1) 代謝が亢進し体重当たりの酸素消費量(6~8 mL/kg/min)は成人の約2倍と高い。
2) 呼吸運動による横隔膜の依存が高く、筋疲労を起こしやすい。
3) 低酸素血症、低体温や薬物等により容易に呼吸が抑制される。
4) 機能的残気量が少ない。
5) 死腔換気率が高い。
6) 赤血球ヘモグロビンの酸素運搬能力が低い。
3. 免疫学的特徴
感染防御機能が未熟で、気道感染の頻度が高く、重症化しやすい。

II. 当科における急性呼吸障害に対する RTX[®]使用の検討

筆者らの RTX[®] 使用法は、全例 -10cmH₂O の持続陰圧モード (Continuous negative mode) にクリアランスモード (Secretion clearance mode、バイブレーション:600回/分2分、陰圧-10cmH₂O 1分、咳モード:陰圧-10cmH₂O、陽圧+5 cmH₂O 1分、4サイクル) を4回/日の併用による治療を行っているが、RTX[®] を装着する基準をとくに設けているわけではない。表2に示したような呼吸窮迫の所見や SpO₂ の低下、血液ガス検査で低酸素血症や高炭酸ガス血症を認めた場合など、比較的軽症であっても主治医の判断で積極的に RTX[®] を装着している。筆者らが RTX[®] や NPPV を使用開始する 2006 年より以前は、呼吸管理が必要な場合、気管挿管による通常の陽圧換気法を施行

表2 呼吸数・脈拍の正常値と呼吸窮迫の症状

呼吸数	年齢	正常な呼吸数	正常な脈拍
	0~6ヶ月	30~60/分	120~160/分
	6~12ヶ月	25~45/分	100~130/分
	1~3歳	20~30/分	80~120/分
呼吸窮迫の症状			
1. 呼吸器系症状			
• 喘鳴、呻吟、鼻翼呼吸、多呼吸			
• 陥没呼吸 (胸骨上窩、鎖骨上窩、肋間)			
• シーソー呼吸や起座呼吸			
• 呼吸運動の減弱			
• チアノーゼ			
2. 循環器系症状			
• 安静時に回復しない頻脈、奇脈、不整脈			
• 四肢の冷感			
• 異常な発汗			
• 尿量の低下			
3. 神経系症状			
• 不穏、不機嫌、無欲様顔貌			
• 意識レベルの低下			
• 不眠			
• 筋緊張の低下			
4. 消化器系症状			
• 哺乳力の低下			
• 嘔吐			
5. 全身性の症状			
• 発熱や低体温など			

(文献5を改変)

していた。そこで、当科における呼吸管理を要した急性の呼吸障害症例について、RTX[®]を使用する以前の2005年に気管挿管下に呼吸管理を行った「2005年通常陽圧換気群」と、RTX[®]にて治療を行った「RTX[®]群」、NPPVによる治療を行った「NPPV群」、2006年以降に気管挿管下に陽圧呼吸管理を施行した「気管挿管換気群」に分け、後方視的に検討した。

1. 患者背景

表3に患者背景を示す。出生週数は気管挿管陽圧換気群がRTX[®]群と2005年陽圧換気群に対し有意に早期であり、年齢はいずれの群も乳幼児がほとんどで、2005年陽圧換気群が他の群と比較して年少の傾向は

あるが有意差は認めていない。性別、身長、体重、出生体重は呼吸管理法による違いは認められず、患者背景に大きな違いはないと思われた。

各治療群における急性呼吸障害の原因疾患を表4に、呼吸管理法の年次統計を図2に示す。呼吸管理を要した疾患のほとんどがRSウイルス感染症であり、2006年以降はRTX[®]による呼吸管理例が増加していることが判る。

2. 各呼吸管理法の導入時期と治療効果

各呼吸管理法の導入時期とその治療効果を確認するために、治療前と治療開始8時間後の、PCO₂ (図3)とSpO₂ (図4)について検討した。呼吸管理導入時

表3 急性呼吸障害で治療を要した患児の背景

(中央値)	全 体	RTX [®] 群	NPPV群	気管挿管陽圧換気群	2005年陽圧換気群
症例数	55	40	4	3	8
年 齢 [歳]	1.25 ± 0.36 (0.16)	1.42 ± 0.48 (0.17)	0.82 ± 0.67 (0.15)	2.75 ± 1.46 (2.83)	0.11 ± 0.03 (0.07)
性 別 [M:F]	27:28	22:18	0:4	2:1	3:5
身 長 [cm]	64.74 ± 3.0 (56.5)	66.38 ± 3.61 (57.9)	66.5 ± 15.5 (66.5)	75.5 ± 9.93 (82.0)	50.73 ± 2.18 (51.2)
体 重 [kg]	7.12 ± 0.77 (4.70)	7.65 ± 0.96 (5.05)	7.15 ± 3.85 (7.15)	9.83 ± 2.70 (11.0)	3.60 ± 0.28 (3.55)
出生週数 [週]	37.67 ± 0.37 (37.85)	37.86 ± 0.44 (38.0)	37.07 ± 0.07 (37.07)	32.0* (32.0)	37.83 ± 0.55 (37.42)
出生体重 [kg]	2.86 ± 0.60 (2.83)	2.92 ± 0.11 (2.94)	2.37 ± 0.21 (2.37)	1.80 (1.8)	2.86 ± 0.23 (2.72)

* p < 0.01 Compared to RTX[®]群 and 2005年 陽圧換気群

表4 急性呼吸障害に対する呼吸管理とその原因疾患

	RTX [®]	NPPV群	気管挿管陽圧換気群	2005年陽圧換気群	合計
RSウイルス感染症	30	3	1	7	41
インフルエンザ	3	0	0	0	3
肺 炎	6	1	2	1	10
喘 息	1	0	0	0	1
合 計	40	4	3	8	55

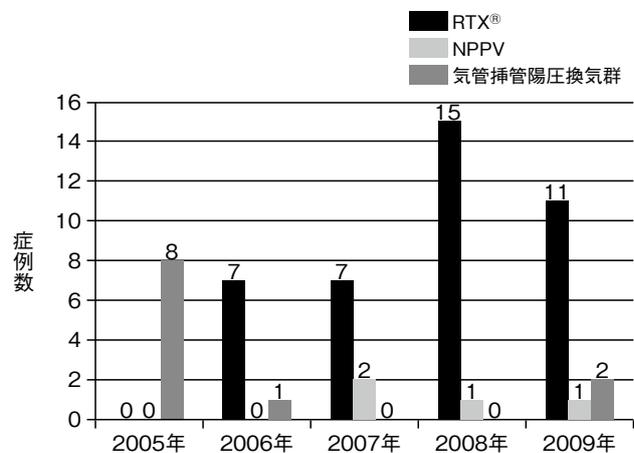


図2 呼吸管理法の年次変化

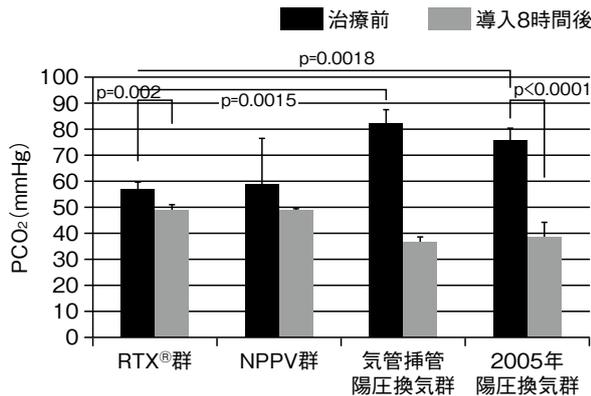


図3 各呼吸管理法における治療前後のPCO₂の変化

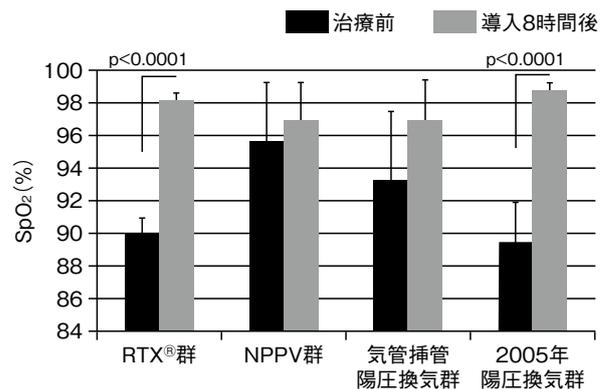


図4 各呼吸管理法における治療前後のSpO₂の変化

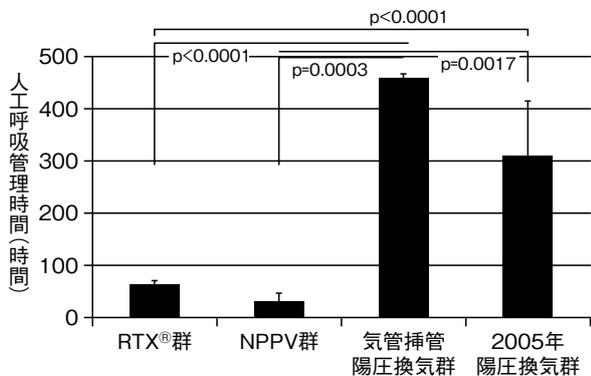


図5 各呼吸管理法における人工呼吸管理時間

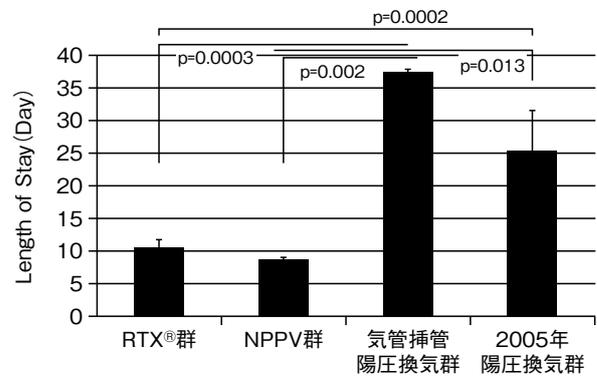


図6 各呼吸管理法における入院日数

のPCO₂は、2005年陽圧換気群と気管挿管陽圧換気群がRTX®群に比べ有意に高値であり、SpO₂では、NPPVではほぼ正常であったものの、その他の群では有意差は認められないがいずれも低く、低酸素状態であった。

RTX®の治療効果は、治療前後のPCO₂とSpO₂の推移より、気管挿管による人工呼吸管理と同等であると考えられた。

3. その他の効果

筆者らがRTX®を使用した呼吸管理で最も優れていると考えているのは、呼吸管理時間(図5)と入院日数(図6)の短さである。RTX®やNPPVという非侵襲的管理を施行した群では、挿管による人工呼吸管理を要した群と比較し、呼吸管理を施行した時間や入院日数が有意に短いという結果であった。

Ⅲ. 考 察

小児は成人と比べ解剖学的、生理学的、免疫学的な特徴により、急速に呼吸困難をきたす。とくに、RSウイルス感染に伴う細気管支炎では人工呼吸管理を必要とすることも多い。自験例でも、呼吸管理を必要とした疾患でRSウイルス感染症は最多であり、さまざまな呼吸管理法が施行されていた。しかし、非侵襲的で、治療が簡単に始められるRTX®による治療数が多い以外、疾患毎の呼吸管理法の違いや特徴は認められなかった。

RTX®は自発呼吸下の患者の胸腹部に胸当て(キューラス)を装着し、その内部を陰圧にすることで、患者の横隔膜の引き下げと胸郭の広がりによって吸気を、反対に内部を陽圧にすることで、横隔膜の押し上げと胸郭の収縮によって呼気を促進して呼吸を補助する人工呼吸器である(図1)⁴⁾。キューラスは1~10号があ

表5 RTX®の利点

1. 着脱の手技が簡単。
 - 気管挿管、気管切開の必要がない。
 - 早期から補助呼吸を開始できる。
 - 人工呼吸の開始、終了、再開が迅速かつ容易。
2. 人間の生理的な呼吸に近い。
 - キュイラス内を陰圧にし、横隔膜の引き下げと胸郭の広がりにより吸気を行う。
 - 陽圧式人工呼吸器では換気が不十分な下肺野のエアーエントリーが増加。
 - 胸郭を広げることにより気道内圧を低く保てる。
 - 呼吸補助や呼吸筋疲労改善効果。
3. 換気量の増加（酸素化の改善）。
4. 静脈還流量の増加（CVPの減少、心拍出量の増大、尿量増加）。
5. クリアランスモードによる気道浄化や気道・肺胞の再開通による効果。
6. 陽圧式人工呼吸器で生じる肺損傷や呼吸器関連肺炎などの合併症がない。
7. 肺全体に均一に圧がかけられる。
8. マスク装着の必要がなく、食事や哺乳、会話が可能など高いQOLを得ることもできる。

り、3 kg 程度の新生児から 100kg を越える成人まで使用することができる。筆者らが考える RTX®の利点を表 5 に示す。RTX®では、気管挿管や切開などの侵襲的な処置を必要とせず、治療の開始・終了・再開が迅速かつ容易であるばかりでなく、従来の陽圧式人工呼吸器では換気が不十分な下肺野のエアーエントリーが増加し、呼吸補助や呼吸筋疲労改善効果とともに自然な呼吸に近い換気を行うことができる⁶⁾。陽圧式人工呼吸器で生じるような肺損傷や呼吸器関連肺炎などの合併症がなく、食事や哺乳、会話などが可能で高い QOL を得ることもできる。さらに、クリアランスモードによる気道浄化や肺胞の再開通による効果や、尿量・心拍出量の増大効果⁷⁾も報告されており、急性呼吸不全^{8~10)}や急性肺損傷¹¹⁾、先天性心疾患術後¹²⁾、慢性閉塞性呼吸器疾患¹³⁾、神経筋疾患^{14~16)}などで、その有用性が報告されている。しかし、これらはいずれも陽・陰圧を使用するコントロールモードやクリアランスモードの使用による報告である。筆者らは、持続陰圧モードの持続装着と適宜のクリアランスモードの併用による治療を基本とし、それでも呼吸管理が不十分であれば、口鼻マスク等を使用する NPPV への変更または併用を行い、なおかつ呼吸状態の改善がみられない場合は、気管挿管下の陽圧式人工呼吸器の使用または併用を考慮している。自験例の検討では、気管挿管管理群は PCO₂ が RTX®群より高値であり、より重症例に気管挿管による呼吸管理を行い、RTX®は比較的軽症の時期より導入している可能性が示唆されたが、RTX®群の治療前 SpO₂ は NPPV 群や気管挿管陽

圧換気群より低く、筆者らは不必要な症例や時期より導入していることはないと考えている。

RTX®を早期軽症例に使用することで重症化を予防できるかは明確にされていない。今回の検討より、2005 年のみで 8 例あった気管挿管による人工呼吸管理例が、RTX®による呼吸管理開始後の 4 年間で 3 例と減少していること、さらにデータは示していないが、RTX®による治療では効果が不十分で NPPV や気管挿管による呼吸管理が必要になった症例は、基礎疾患を有する慢性呼吸不全児の数例のみであることを考えると、重症化の抑制効果を期待できると考えられる。最近では、PCO₂ が 90mmHg 以上の高炭酸ガス血症や高度の低酸素血症例でも、RTX®治療に速やかに反応する症例を多く経験するようになり、今後その導入の基準を検討する必要があると考えている。

筆者らは RTX®を使用した呼吸管理をあくまでも自発呼吸をサポートする「呼吸補助」と位置付けている。そのため、若干の鎮静を行うことはあっても、筋弛緩薬を使用することはない。気管挿管による人工呼吸管理が必要であった症例の中には、40 日間にも及ぶ長期挿管例もあり、人工呼吸管理時間や入院日数の平均値を増加させてしまっているが、それらの症例を除いても RTX®群の方が治療に要する時間が有意に短い。RTX®群では挿管例に比較し軽症例が多いことも関係すると思われるが、治療の開始・中止をキュイラスの着脱のみで行うため、抜管時に伴う weaning の必要がないことが大きな理由であると考えている。このことは、人工呼吸管理に伴う合併症や続発症を減

小さらせるだけでなく、医療経済的にも極めて有意なことである。

RTX[®]には持続陰圧モードの他に、短時間に陽圧と陰圧を交互にかけ、胸壁に振動を与えることにより気道分泌物の排出を促進し、肺理学療法を行うクリアランスモードや、強制的に陽圧と陰圧を交互にかける Control mode (コントロールモード)、自発呼吸に合わせて陽圧と陰圧を交互にかける Trigger mode (トリガーモード) などがある。筆者らは、呼吸管理が必要のない症例に対しても、クリアランスモードを使用することが多い。無気肺や気道分泌が亢進している気管支炎、肺炎、気管支喘息などによりかなり有効である。最近、無気肺と縦隔気腫を認め、ARDSを呈した重症インフルエンザ肺炎症例に対し、APRVにRTX[®]を併用したが、クリアランスモードを施行後に換気量が数倍に改善するという経験をした。

今回の検討からは除外したが、慢性呼吸障害や重症心身障害児など基礎疾患がある児の急性増悪時にもRTX[®]が有効であることが多い。側弯があり、キューラスを正中に装着できない場合は、側面にキューラスを装着し、体表面との隙間をタオル等で充填してしっかり密着できるようにすることで、RTX[®]による呼吸管理を行うことが可能で、気管挿管を回避できたと思われる症例も多く経験している。その他、抜管困難例に対しても使用し、良好な結果を得ている。

RTX[®]の欠点としては、①キューラス部分が長期圧迫されると皮膚損傷を生じることがある、②体格・体型によってはエアリークを生じ、低体温や作動音が大きくなることによる不快感を感じることもある、③キューラスの装着を続けるのに患児の協力が必要であり、我慢できない幼児では自己抜去してしまい、治療を断念しなければいけないこともあるなどである。皮膚損傷に関しては、タオルや皮膚保護剤の使用、キューラス装着をこまめに変更することなどで対応している。エアリークは、装着時にしっかり密着できれば問題はない。患児が非協力的な場合は、無理強いせずRTX[®]による治療を諦めていた。しかし近年、成人において短時間での使用でも効果があるとの報告がされるようになり^{14,17)}、一回数十分の装着を一日数回、両親と協力しながら行うことで施行できるようになってきている。

IV. まとめ

小児の急性呼吸障害に対するRTX[®]使用について報告した。RTX[®]は着脱が簡便であり、特別な手技は必要とせず、非侵襲的な呼吸管理方法であり、人工呼吸器による合併症や後遺症が起りやすい小児には極めて有用な人工呼吸器であると考えられる。また、抜管時に伴う weaning の必要が無い場合、人工呼吸管理時間や入院日数を大幅に短縮させ、医療経済的にも極めて有意である。しかし、RTX[®]はあくまでも自発呼吸をサポートする呼吸補助療法の一つであり、確立した方法ではない。RTX[®]を使用する際には、患者管理の徹底をはかり、必要に応じて気管挿管による人工呼吸管理を施行できる準備のもと治療しなければならない。

参考文献

- 1) 日本呼吸器学会 NPPV ガイドライン作製委員会編：NPPV (非侵襲的陽圧換気法) ガイドライン：小児。東京、南江堂、2006、pp87-92.
- 2) Make BJ : Mechanical ventilation beyond the intensive care unit : report of consensus conference of the American College of Chest Physicians. Chest. 1998 ; 113 : 289S-344S.
- 3) Norregard O : NIV : indication in case of acute respiratory failure in children. In : Noninvasive Ventilation. 2nd ed. Muir JF, Ambrosino N, Simonds AK (Eds) . Plymouth, European Respiratory Society, Monograph 41, 2008, pp110-132.
- 4) Lipton DM : Cuirass ventilation : a review and update. Crit Care and Resuscitation. 2005 ; 7 : 22-28.
- 5) 岡田邦之 : 小児喘息の見極めと対処法. 臨床免疫・アレルギー科. 2009 ; 52 : 402-410.
- 6) Krishnan J, Morrison W : Airway pressure release ventilation : a pediatric care series. Pediatr Pulmonol. 2007 ; 42 : 83-88.
- 7) Shekerdemian LS, Bush A, Shore DF, et al : Cardiopulmonary interactions after Fontan operations. Circulation. 1997 ; 96 : 3934-3942.
- 8) Al-Saady NM, Fenando SS, Petros AJ, et al : External high frequency oscillation in normal subjects and in patients with acute respiratory failure. Anaesthesia. 1995 ; 50 : 1031-1035.
- 9) Takeda S, Nakanishi K, Takano T, et al : The combination of external high frequency oscillation and pressure support ventilation in acute respiratory failure. Acta Anaesthesiol Scand. 1997 ; 41 : 670-674.
- 10) 山香 修, 坂本照夫, 菊池幹太ほか : 体外式人工呼吸 biphasic cuirass ventilation の併用が有用であった重症呼

- 吸不全の1例. 日臨救医誌. 2008; 11: 449-453.
- 11) 小谷 透、佐藤敏朗、斉藤まり子ほか：体外式陽陰圧人工呼吸BCVにより急性肺損傷が改善した1症例. 臨床呼吸生理. 2005; 37: 77-79.
 - 12) 高山雅至、小林宏伸、金子幸栄ほか：陰圧式体外呼吸器を使用した先天性心疾患術後の2例. 日本小児科学会誌. 2005; 109: 412.
 - 13) 佐藤庸子、栗生和幸、鹿間裕介ほか：胸郭形成術後慢性呼吸不全の急性増悪に体外式人工呼吸器が有用だった1例. 呼と循. 2008; 56: 957-960.
 - 14) 須藤英一、奥沢 健、奥仲哲弥ほか：陽・陰圧体外式人工呼吸器(RTX)使用により気管切開部からの人工呼吸器の離脱が可能となったと考えられる多系統萎縮症の1例. Geriatr Med. 2006; 44: 419-423.
 - 15) 石川悠加、石川幸辰、三浦利彦：体外式人工呼吸器による小児の呼吸管理. 救急・集中治療. 2009; 21: 1553-1559.
 - 16) 宮川沙織、萩野美恵子、飯ヶ谷美峰ほか：筋萎縮性側索硬化症／運動ニューロン病における陽・陰圧体外式人工呼吸器の有用性. 神経治療. 2009; 26: 607-612.
 - 17) 高杉尚志、矢野哲也、白井大輔ほか：高炭酸ガス血症に対して陽陰圧体外式人工呼吸器を試みた慢性呼吸不全の1例. 小児科臨床. 2008; 61: 431-436.