

## 非侵襲的陽圧換気 (Non-Invasive Positive Pressure Ventilation) における 経皮ガスモニタリングの有効性



近年、NICU領域においてNIPPVなどに代表される非侵襲的な補助換気法が導入されるケースが増えており、これらの治療下において呼吸の換気管理に欠かすことのできない経皮血液ガスモニタの有効性について、九州大学病院 総合周産期母子医療センターの落合正行先生にご執筆頂きました。

執筆者  
落合 正行 (おちあい まさゆき)

九州大学病院 総合周産期母子医療センター  
九州大学大学院医学研究院  
周産期・小児医療学 准教授

### CONTENTS

- はじめに
- 本邦NICUにおける  
経皮ガスモニタリングの現況
- NICUにおけるNIPPV
- NIPPVにおける経皮ガスモニタリング
- 自験例 <NICU> <小児科病棟>
- まとめ



九州大学病院

ラジオメーター株式会社  
本社  
〒140-0001 東京都品川区北品川4-7-35  
TEL : 03-4331-3500 (代表)

認証番号 : 228AABZX000600000  
販売名 : 経皮血液ガスモニタTCM5

- 最新の製品情報はこちらをご覧ください  
[www.radiometer.co.jp](http://www.radiometer.co.jp)
- アキュートケア支援サイト  
[www.acute-care.jp](http://www.acute-care.jp)

# 非侵襲的陽圧換気 (Non-Invasive Positive Pressure Ventilation) における 経皮ガスモニタリングの有効性

## はじめに

### 測定原理

経皮ガスモニタリングとは、加温したセンサーを皮膚に密着し、皮膚局所の毛細血管を拡張させることによって動脈血化し、動脈血化した血液から皮膚表面に拡散した酸素 (Oxygen; O<sub>2</sub>) と二酸化炭素 (Carbon Dioxide; CO<sub>2</sub>) を電気化学的に測定する機器である。この機器では、経皮酸素分圧 (Transcutaneous Partial Oxide Pressure; tcpO<sub>2</sub>) と経皮二酸化炭素分圧 (tcpCO<sub>2</sub>) が測定値として表示され、それぞれ動脈血酸素分圧 (Arterial Partial Oxide Pressure; PaO<sub>2</sub>) 、二酸化炭素分圧 (PaCO<sub>2</sub>) と高い相関が示されている。動脈血を採取することなく、非侵襲的かつ連続的に酸素化と換気をモニタリングすることが可能となる<sup>(1)</sup>。

理を行う。その主たる対象疾患は、サーファクタント欠乏による呼吸窮迫症候群 (Respiratory Distress Syndrome; RDS) およびRDSに続発する気管支肺異形成 (Bronchopulmonary Dysplasia; BPD) である。BPDの増悪要因として、圧損傷や容量損傷等などの人工呼吸器関連肺傷害 (Ventilator Associated Lung Injury; VALI) があり、VALI軽減のために非侵襲的陽圧換気法 (Non-Invasive Positive Pressure Ventilation; NIPPV) が試みられてきた<sup>(4)</sup>。

近年、より簡便かつ効果的にNIPPVが行える様式やディバイスが開発された。新生児蘇生法 (Neonatal Cardio-Pulmonary Resuscitation; NCPR) では、確実な呼吸心拍モニタリングと速やかなNIPPV導入が推奨され気管挿管は忌避されるようになった。NIPPVでは換気モニタリングが重要となるが、NICUにおける有効性は確立されていない<sup>(5)</sup>。そこで本稿では、自験例に基づいて、NIPPVにおける経皮ガスモニタリングの現況と将来性について概説する。

膚損傷を避けることが優先されており、測定値の正確性よりむしろ、その変動をモニターするために使用していることが特徴である。

### NICUにおけるNIPPV

日本蘇生協議会 (Japan Resuscitation Council; JRC) ガイドライン2015に準拠した新生児蘇生法 (NCPR2015) は、出生後60秒以内に遅延なく人工呼吸を行い、有効な換気と循環状態の回復と維持を目的に蘇生アルゴリズムが構成されている。「自発呼吸なし、あるいは心拍100拍／分未満」で出生した新生児に対しては、パルスオキシメーターあるいは心電図 (Echocardiogram; ECG) モニターを装着して人工呼吸が開始される。一方で「自発呼吸あり、かつ心拍100拍／分以上」であれば、呼吸障害やチアノーゼに応じて酸素または持続気道陽圧 (Continuous Positive Airway Pressure; CPAP) が行われる。

### 本邦NICUにおける 経皮ガスモニタリングの現況

#### 経皮ガスモニタと呼吸管理の歴史的変遷

経皮ガスモニタリングの開発の歴史は古く、1954年にStow RがpH電極とアース電極との間に、CO<sub>2</sub>を透過するラバー膜を挿入したpHモニターを作成し、CO<sub>2</sub>電極という新たな測定原理を発表した。この原理に改良が加えられ、Severinghaus JWらによって実用的なStow-Severinghaus電極が開発された<sup>(2)</sup>。1979年にHansen TNらは、両側の横隔膜神経が麻痺した小児において浅睡眠から深睡眠へ変化に伴うモニタリング推移や、慢性肺疾患 (Chronic Lung Disease; CLD) をもつ児の酸素負荷による変化を提示し、その有用性を示した<sup>(3)</sup>。本邦における開発の経緯は、仁志田博司先生の著書「わが国の近代新生児医療の発展の軌跡 (メディカ出版、2015年)」にも詳細が記されている。経皮ガスモニタリングとは、新生児医療のレジエンドが、後遺症なき救命を目指して取り組んだ橋渡し研究の重要な成果のひとつである。新生児集中治療 (Neonatal Intensive Care Unit; NICU) では、様々な人工呼吸器を駆使して呼吸管

NICUにおける経皮ガスモニタリングの意義は不要な採血を減らすことであろう<sup>(6)</sup>。筆者らが2016年に行った全国調査 (第19回新生児呼吸療法モニタリングフォーラム) では、全国の総合周産期母子医療センター69施設 (回収率65.1%) のうち、59施設 (85.5%) で経皮ガスモニタリングが行われていた。多くの施設では、tcpO<sub>2</sub>とtcpCO<sub>2</sub>同時測定より、むしろtcpCO<sub>2</sub>単独測定を行っていた。多くの施設で、在胎28週未満の超早期産児、あるいは出生体重1,000g未満の超低出生体重児から測定の適応としていた。特記すべき事項は、センサーの設定温度を38度未満としている施設が大半であり、メーカー推奨との乖離を認めた。平田ら (大阪府立母子保健総合医療センター/2014年) は、センサー温度38~40度に設定した場合のtcpCO<sub>2</sub>と動脈血液ガス値PaCO<sub>2</sub>との乖離は6mmHg (標準偏差5mmHg) センサー温度42度に設定した場合の乖離は3.9mmHg (標準偏差4.17mmHg) 高く表示されることを示している<sup>(7)</sup>。本邦NICUにおけるtcpCO<sub>2</sub>測定は、センサー加熱による皮

#### Tピース

NCPRで用いる開放型保育器には、Tピース蘇生装置が標準装備されるようになった。Tピースとは新生児にマスクを圧着するだけで、簡便に人工呼吸とCPAPを行うことができる機器である。Tピースあるいはマスク換気法を習熟できれば、ECGモニターで映し出される心拍数の変化と呼吸障害を観察する猶予が十分に得られ、結果として不急な気管挿管を忌避できるようになった。

#### Nasal-CPAP

NCPRの改定に伴い、非侵襲的なサーファクタントの投与方法が開発された。INSURE (INTubation SURfactant Extubation) は、挿管した気管チューブを通してサーファクタントを投与し、直ちに抜管する方法である。LISA (Less Invasive Surfactant Administration) やMIST (Minimally Invasive Surfactant Therapy) は、自発呼吸がある新生児に対して喉頭展開したまま細径チューブを介してサーファクタントを投与する方法で

ある。いずれの方法においても経鼻一持続気道陽圧 (Nasal-CPAP) などのNIPPVを併用することになるが、気管挿管による侵襲的陽圧換気法 (IPPV) と比較して、BPDを軽減する効果が示されている<sup>(8)</sup>。しかしながらこれらの投与法では、抜管後のNIPPV中に換気不全の危険性を考慮する必要がある<sup>(9)</sup>。

#### DPAP

NICUでは、さまざまなNIPPV方式やディバイスが導入された。呼気吸気変換方式気道陽圧 (Directional Positive Airway Pressure; DPAP) は、呼気時と吸気時で経鼻流の方向を変化させるディバイスを取り付けることで、二相性の流量を生み出す方式である。非同調式、あるいは腹壁の動きや横隔膜電位に同調して、二相性NIPPVが可能な人工呼吸器も普及している。しかしながら、BPDの予防効果はN-CPAPと同等であり<sup>(10)</sup>、症例ごとに使い分けているのが本邦NICUの現況であろう。

#### HFNC

高流量鼻カニュラ (High Flow Nasal Cannula; HFNC) とは、酸素と空気と混合したエアを充分に加温加湿して、高流量で経鼻的に投与する方式であり、他のNIPPVと同等のBPD予防効果を認める<sup>(11)</sup>。器具が安価であり、カニューレの装着が簡便であるためNICUにも急速に普及してきた。

### NIPPVにおける 経皮ガスモニタリング

他の非侵襲的換気モニタリング方法には、呼気終末二酸化炭素濃度 (End-tidal CO<sub>2</sub>; EtCO<sub>2</sub>) モニターがある。NICUベッドサイドモニターに装備できるため、気管挿管中の新生児にも適応される。しかしながら、新生児用のカフなし気管チューブでは、換気流のリードが発生するため換気モニタリングとしての有効性は乏しく、NCPRのIPPV時に限り推奨される<sup>(12)</sup>。

気管挿管を伴わないNIPPVで使用できる換気モニタリングは、現有のテクノロジーではtcpCO<sub>2</sub>測定に限定されるであろう。

慢性閉塞性肺疾患の成人例においては、HFNCを導入することで夜間tcpCO<sub>2</sub>が安定化することが示された<sup>(13, 14)</sup>。神経筋疾患患者における在宅NIPPVの換気モニタリングの有効性も報告された<sup>(15)</sup>。2016年度の診療報酬改定(\*)では、NICUのみならず「神経筋疾患

又は慢性呼吸器疾患の患者に対し、NIPPVの適応判定及び機器の調整を目的として経皮的に血中のpCO<sub>2</sub>を測定した場合」にも経皮ガスマニタリング(D222)が保険算定できるようになった。しかしながら、NICUから小児医療におけるNIPPV時の経皮ガスマニタリングの有効性は示されていない。

以降に自験例を提示する。

## 自験例1：<NICU> 抜管前後の経皮ガスマニタリング

### 対象

母体の切迫早産と胎児骨盤位のため、緊急帝王切開で出生した在胎24週6日、出生体重824gの女児。

### 治療経過

呼吸窮迫症候群のため出生後よりサーファクタント投与を行い、人工呼吸管理を開始した。急性期治療を経て、日齢72の抜管時の経皮ガスマニタリングの経過を図1に示す。

### 方法

測定機器はRadiometer社製TCM5 FLEXモニターを使用した。センサー温度は42度に設定し、背側腹部と大腿外側部に貼付、2時間ごとに測定部位を変更した。

### 結果

自発呼吸同調強制換気(Synchronized Intermittent Mechanical Ventilation; SIMV)からNIPPVへ移行した際にtcpCO<sub>2</sub>は上昇せず、再挿管の危険性の有無を有効にモニタリングできた。モニタリング値と血液ガス測定値の検証は必要であるが、習慣的な挿管後採血は減らすことはできる。一方でtcpO<sub>2</sub>は細やかに変動している。

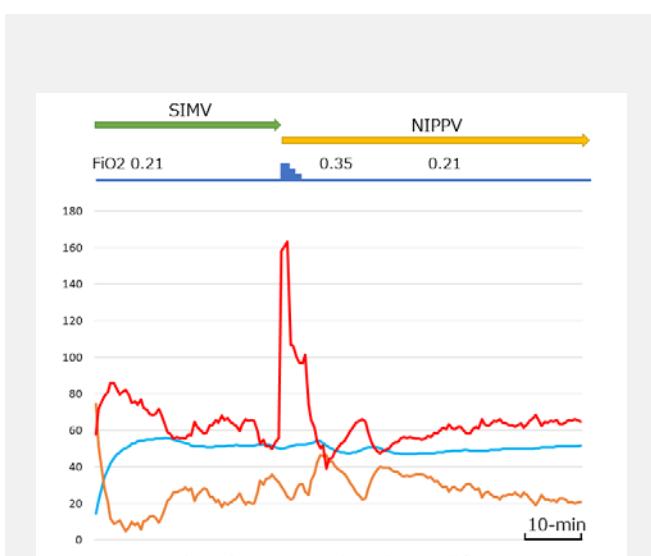


図1.  
超低出生体重児の抜管前後の経皮ガスマニタリングの推移

ここで、tcpO<sub>2</sub>とtcpCO<sub>2</sub>をそれぞれPaO<sub>2</sub>とPaCO<sub>2</sub>に置換して、肺胞気動脈酸素分圧較差(Alveolar-Arterial Oxygen Difference; AaDO<sub>2</sub>)の推定値を算出すると抜管直前後に二峰性で上昇し、その後低下して安定化していることが示されている。AaDO<sub>2</sub>は、吸入酸素濃度(Fraction of Inspired Oxygen; FiO<sub>2</sub>)の影響を受けるため解釈に注意を要するが、抜管直後に肺胞虚脱等による換気血流不均衡を示しているかもしれない。薬剤鎮静や呼吸筋疲労に起因する再挿管例等での検証が求められる。

## 自験例2：<小児科病棟> HFNC時の経皮ガスマニタリング

### 対象

重症BPDのため、次に在宅HFNC中の3歳男児。3歳時点での運動発達は、伝い歩きはできず座位が可能であった。呼吸器の設定を目的とした検査入院。

### 方法

測定機器は前症例と同様にTCM5 FLEXモニターを使用、センサー温度は38度に設定した。センサーは両側大腿部外側部に貼付、2~4時間ごとに測定部位を変更した。

### 治療経過・結果

呼吸器の設定を目的とした検査入院であり、確認のためにCPAP圧を変動させてtcpCO<sub>2</sub>の推移を追った。日勤帯に、患者のベッド上の活動度(座位での活動から睡眠まで)に併せて、家族が自由に圧設定を変更できるようにした。安静時はtcpCO<sub>2</sub>が50mmHg前後で推移、活動度等により60mmHgに上昇することもあるが、CPAP圧により大幅な変動は認めなかった。適宜静脈血による血液ガス分析でtcpCO<sub>2</sub>値との相関の検定を行った。センサー温度が低いため、測定値と10mmHg程度の大きな乖離を認めた。しかしながら、それぞれの測定値との乖離は一定であり、変動を評価するには有用であった。

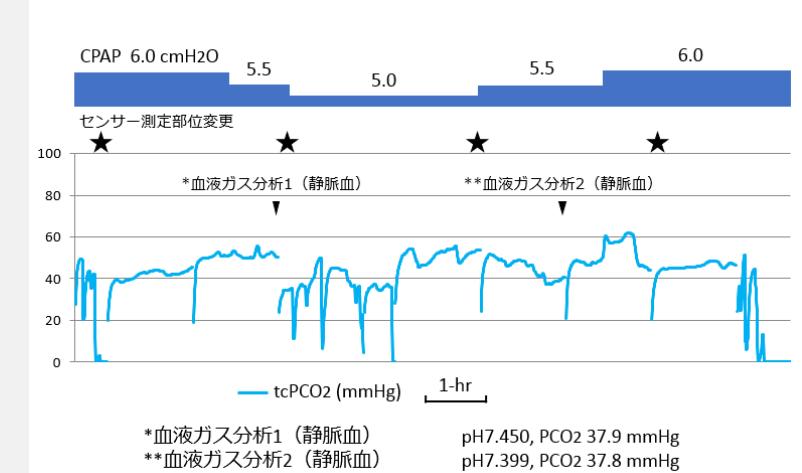


図2.  
在宅NPPV児に対する呼吸器設定時の経皮ガスマニタリングの推移

### おわりに

経皮ガスマニタリングは1950年代に測定原理が報告され、1980年代に測定機器が本邦で販売された。新生児医療の領域では歴史が深く、パルスオキシメーターやEtCO<sub>2</sub>モニターの登場によりその使用目的は変遷

したが、非侵襲的かつ連続的に換気モニタリングできる唯一の測定機器であることは変わりはない。一方で、NICUにおける呼吸管理も「あかちゃんにも肺にも優しい治療」を目指して、さまざまな変遷を遂げている。その治療効果は、生命予後やBPD発症率ではなく、モニタリング値の微妙な変化かもしれない。日々の診療の改善と、そのモニタリングを積み重ねることで新生児医療の進歩に尽力したい。

## 参考文献

1. Smallwood CD, Walsh BK. Noninvasive Monitoring of Oxygen and Ventilation. *Respir Care*. 2017 Jun;62(6):751-64.
2. Severinghaus JW, Astrup PB. History of blood gas analysis. III. Carbon dioxide tension. *Journal of clinical monitoring*. 1986 Jan;2(1):60-73.
3. Hansen TN, Tooley WH. Skin surface carbon dioxide tension in sick infants. *Pediatrics*. 1979 Dec;64(6):942-5.
4. Schmolzer GM, Kumar M, Pichler G, Aziz K, O'Reilly M, Cheung PY. Non-invasive versus invasive respiratory support in preterm infants at birth: systematic review and meta-analysis. *BMJ*. 2013 Oct 17;347:f5980.
5. Bruschettini M, Romantsik O, Zappettini S, Ramenghi LA, Calevo MG. Transcutaneous carbon dioxide monitoring for the prevention of neonatal morbidity and mortality. *Cochrane Database Syst Rev*. 2016;2:CD011494.
6. Mukhopadhyay S, Maurer R, Puopolo KM. Neonatal Transcutaneous Carbon Dioxide Monitoring--Effect on Clinical Management and Outcomes. *Respir Care*. 2016 Jan;61(1):90-7.
7. Hirata K, Nishihara M, Oshima Y, Hirano S, Kitajima H. Application of transcutaneous carbon dioxide tension monitoring with low electrode temperatures in premature infants in the early postnatal period. *Am J Perinatol*. 2014 May;31(5):435-40.
8. Stevens TP, Harrington EW, Blennow M, Soll RF. Early surfactant administration with brief ventilation vs. selective surfactant and continued mechanical ventilation for preterm infants with or at risk for respiratory distress syndrome. *Cochrane Database Syst Rev*. 2007 Oct 17(4):CD003063.
9. de Kort EH, Hanff LM, Roofthooft D, Reiss IK, Simons SH. Insufficient Sedation and Severe Side Effects after Fast Administration of Remifentanil during INSURE in Preterm Newborns. *Neonatology*. 2017;111(2):172-6.
10. Lemyre B, Laughon M, Bose C, Davis PG. Early nasal intermittent positive pressure ventilation (NIPPV) versus early nasal continuous positive airway pressure (NCPAP) for preterm infants. *Cochrane Database Syst Rev*. 2016 Dec 15;12:CD005384.
11. Wilkinson D, Andersen C, O'Donnell CP, De Paoli AG, Manley BJ. High flow nasal cannula for respiratory support in preterm infants. *Cochrane Database Syst Rev*. 2016 Feb 22;2:CD006405.
12. Hawkes GA, Kelleher J, Ryan CA, Dempsey EM. A review of carbon dioxide monitoring in preterm newborns in the delivery room. *Resuscitation*. 2014 Oct;85(10):1315-9.
13. Nagata K, Kikuchi T, Horie T, Shiraki A, Kitajima T, Kadokawa T, et al. Domiciliary High-Flow Nasal Cannula Oxygen Therapy for Patients with Stable Hypercapnic Chronic Obstructive Pulmonary Disease. A Multicenter Randomized Crossover Trial. *Annals of the American Thoracic Society*. 2018 Apr;15(4):432-9.
14. Kitajima T, Marumo S, Shima H, Shirata M, Kawashima S, Inoue D, et al. Clinical impact of episodic nocturnal hypercapnia and its treatment with noninvasive positive pressure ventilation in patients with stable advanced COPD. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2018;13:843-53.
15. Trucco F, Pedemonte M, Fiorillo C, Tan HL, Carlucci A, Brisca G, et al. Detection of early nocturnal hypoventilation in neuromuscular disorders. *J Int Med Res*. 2018 Mar;46(3):1153-61.

## 補足

### 謝辞

澤野徹先生、江上直樹先生（同院総合周産期母子医療センター新生児内科部門）、同部門の医師ならびに看護師には、自験例の測定にご協力頂きましたことを深謝申し上げます。

### 倫理的配慮

経皮ガスモニタリングを用いた臨床研究については、本院倫理審査委員会の承認（#28-343）を受けています。

### \* 経皮的血液ガス分圧測定

区分 : D222

検査項目名 : 経皮的血液ガス分圧測定、血液ガス連続測定

点数 : 1時間以内又は1時間につき 100点  
5時間を超えた場合（1日につき）600点

条件 : (1) 経皮的血液ガス分圧測定は、以下のいずれかに該当する場合に算定する。

イ 神経筋疾患又は慢性呼吸器疾患の患者に対し、NPPVの適応判定及び機器の調整を目的として経皮的に血中の  $pCO_2$  を測定した場合。その際には、1入院につき2日を限度として算定できる。

## 会社紹介

ラジオメーターは60年以上の歴史を持つ血液ガス分析のパイオニアメーカーです。

### 私たちの原点

#### 1952年

ヨーロッパを中心に猛威を振るったポリオにより多くの子どもたちが呼吸器の不全で命を失いました。ラジオメーターはコペンハーゲン大学との協働で血液のpHを測定する装置を開発し、診療に貢献しました。

1954年に世界初の市販血液ガス分析装置を発売以降、ラジオメーターの製品は130か国以上の病院、診療所、検査施設で使用されています。

ラジオメーター者の日本法人は全国11拠点に配属されたスタッフにより、緊急検査項目である血液ガス分析装置を安心してお使い頂けるよう、サポートを行っています。