

## ●講 座●

呼吸管理のデバイス  
経皮ガスモニター

旗智武志・竹内宗之

キーワード：経皮，動脈血酸素分圧，動脈血二酸化炭素分圧，非侵襲

## I. はじめに

経皮ガスモニターは皮膚表面の酸素分圧や二酸化炭素分圧を測定し、温度による補正を行って、動脈血酸素分圧 (PaO<sub>2</sub>) および動脈血二酸化炭素分圧 (PaCO<sub>2</sub>) を推定し、経皮酸素分圧 (tcPO<sub>2</sub>) および経皮二酸化炭素分圧 (tcPCO<sub>2</sub>) として表示する機器で、非侵襲で連続的な測定が可能である。

1793年、英国の外科医 Abernethy は自身の腕を水銀に沈めて皮膚表面から気泡が出ていることを示した。また1851年、VonGerlach は気体を満たした馬の膀胱を自身の胸に張り付けて皮膚表面から二酸化炭素が出ていることを示し「皮膚の毛細血管が呼吸をしている」と述べた。1950年代になって Stow と Severinghaus が皮膚から拡散する二酸化炭素を測定し、動脈血の二酸化炭素分圧を推定する方法を考案した<sup>1)</sup>。この経皮ガスモニターは、皮膚を加温することでより正確に測定ができるようになり、1980年頃に製品化された。現在では tcPCO<sub>2</sub> と tcPO<sub>2</sub> を同時に測定する製品や、パルスオキシメーターを内蔵し tcPCO<sub>2</sub> と動脈血酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>) を同時に測定する製品があり、非侵襲かつ連続的に測定ができ、新生児から成人領域へ、呼吸の評価から循環の評価へと用途が広がってきている<sup>2)</sup>。

## II. 測定原理

皮下の動脈から分岐した毛細血管は、皮膚表面に向

けて組織を灌流した後にループを描いて皮下の静脈に戻っていく。毛細血管から拡散された酸素は一部が皮膚組織で消費され、毛細血管から拡散された二酸化炭素に産生された二酸化炭素が加わり組織を透過して皮膚表面に拡散している。

センサーにより皮膚を加温すると毛細血管が拡張し、毛細血管と動脈のガス分圧が近くなる。さらに毛細血管から組織、皮膚表面へのガスの透過性が上がり測定が安定する。しかしながら、加温は組織での酸素消費や二酸化炭素産生を亢進させ、組織液へのガスの溶解量やヘモグロビン結合量を変化させるため、それらを補正する必要がある。

皮膚表面のセンサーでは、テフロン製の電極膜を通して酸素が白金電極と銀電極により測定され、二酸化炭素は内部の緩衝液と化学反応を起こし水素イオンが発生する、その際の pH の低下をガラス電極と銀電極で捉えることで二酸化炭素が測定される (図1)。

## III. 呼吸管理における経皮ガスモニター

呼吸管理において動脈血を採取して血液ガス分析を行うのが標準的であるが、連続的な測定は難しく、血管穿刺や動脈カテーテルの留置が必要で、痛み、血腫、神経損傷、血管損傷、感染、採血による貧血などの侵襲性が問題となる。非侵襲で連続的な血液ガスモニターとしては、パルスオキシメーター、カプノグラフィ、経皮ガスモニターなどがある。

パルスオキシメーターは、ヘモグロビンの吸光度が酸素化により変化することを利用して動脈血酸素飽和

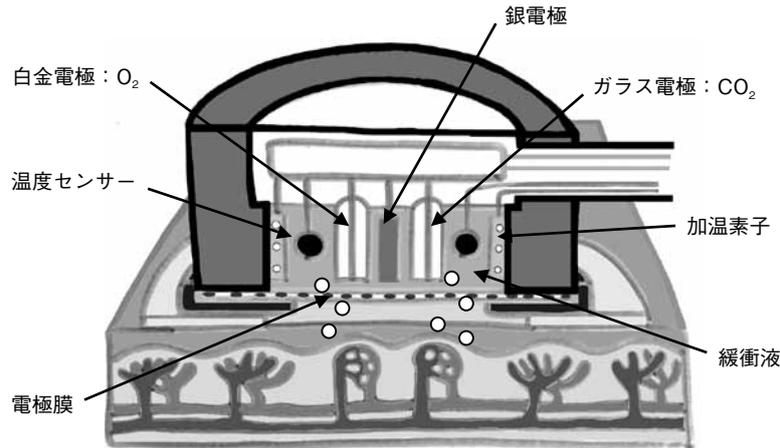


図1 皮膚とセンサーの模式図

度の測定ができ、臨床現場で広く普及している。しかしながら  $\text{PaCO}_2$  は測定できず、また  $\text{PaO}_2$  は測定できないため  $\text{SaO}_2$  が 100% に飽和するとそれ以上の高酸素血症の評価はできない。

カプノグラフィは気管チューブや特殊な鼻カニューレなどを使用して呼気を採取し、赤外光を当てて呼気終末二酸化炭素分圧 ( $\text{PETCO}_2$ ) を測定し  $\text{PaCO}_2$  を推定する。気管挿管された患者では有用であり、手術室や集中治療室では普及し、1呼吸ごとの評価が可能であるが、気管チューブがない、エアリークがある、高頻度振動 (high frequency oscillation : HFO) を使用しているなどの状況や、一回換気量が小さい小児などでは測定が不正確になる。

経皮ガスモニターは非侵襲で連続的に  $\text{PaO}_2$  と  $\text{PaCO}_2$  が推定できる。経皮ガスモニターによる  $\text{tcPCO}_2$  は  $\text{PaCO}_2$  より高めに表示される傾向があるが相関は良い<sup>1)</sup>。またカプノグラフィと比較してより正確とされ、小児において  $\text{PaCO}_2$  との差は、経皮ガスモニターが  $2.3 \pm 1.3$  mmHg で、カプノグラフィの  $6.8 \pm 5.1$  mmHg より小さかったと報告されている<sup>3)</sup>。換気血流不均衡がある片肺換気の場合や<sup>4)</sup>、チアノーゼ性の先天性心疾患でシャントがある場合<sup>5)</sup>でも  $\text{PaCO}_2$  をよく反映する。経皮ガスモニターは動脈血と比較して2分程度測定値が遅れる<sup>6)</sup>。

#### IV. 経皮ガスモニターの臨床応用

##### 1. 成人、小児における呼吸の評価

経皮ガスモニターはパルスオキシメーターでは測定できない  $\text{tcPCO}_2$  測定での有用性の報告が多く、人工呼

吸の評価にとどまらず、クループ症候群の治療効果判定や<sup>7)</sup>、気管支喘息の評価<sup>8)</sup>に有用であったと報告されている。

非侵襲的人工換気 (noninvasive ventilation : NIV) や睡眠時の呼吸の評価には、非侵襲で連続的な経皮ガスモニターはより有用と考えられ<sup>6)</sup>、神経筋疾患の患者や<sup>9)</sup>、長期 NIV の小児において<sup>10)</sup>、低酸素を伴わない、したがってパルスオキシメーターでは発見のできない夜間の低換気が診断できるため呼吸管理に有用であると報告されている。同様に、術後や検査時の鎮静における低換気の診断も可能で患者の安全管理に役立つ可能性がある。開頭手術後の高二酸化炭素血症が診断でき、予後と関連したとの報告<sup>11)</sup>、手術後の自己調節鎮痛法における低換気の診断<sup>12)</sup>、胸腔鏡検査、大腸内視鏡検査の鎮静による低換気の診断の報告がある<sup>13,14)</sup>。

##### 2. 新生児における呼吸の評価

経皮ガスモニターは高酸素血症が評価できるので未熟児網膜症の予防に、また  $\text{PaCO}_2$  が測定できるので、過換気や低換気を防ぎ慢性肺疾患や脳室周囲白質軟化症の予防に役立つ可能性がある。また、HFO による人工呼吸中は振動のためにパルスオキシメーターでの測定が難しい場合があり、また換気量が小さいためカプノグラフィでの測定も難しく、経皮ガスモニターが有用かもしれない<sup>15)</sup>。

##### 3. 循環の評価

循環不全で組織灌流が悪くなると組織に二酸化炭素が貯留し、経皮ガスモニターの測定値が  $\text{PaCO}_2$  より高



図2 コーケンメディカル iP9200



図3 ラジオメーター TCM4

くなる。この解離がショックの重症度を反映すると報告されている<sup>16)</sup>。また熱傷患者の皮膚移植において、移植片の血管新生が進むと  $tcPCO_2$  が低下していくとの報告<sup>17)</sup>、下肢虚血の評価での有用性の報告がある<sup>18)</sup>。

#### 4. その他の臨床応用

経皮ガスモニターは病院間搬送における呼吸のモニタリング<sup>19)</sup>、心肺蘇生での予後予測<sup>20, 21)</sup>、脳死判定の無呼吸試験における動脈採血のタイミングの決定<sup>22)</sup>などの報告があり、糖尿病性ケトアシドーシスでは呼吸性の代償のため過換気となっているが、 $tcPCO_2$  を用いることにより治療効果が判定できると報告されている<sup>23)</sup>。

### V. 測定上の注意点

#### 1. 電極膜の交換

電極膜の定期的な交換が必要である（10～14日経過した場合など）。

#### 2. 電極の安定化、皮膚加温

測定開始時に電極の安定化や皮膚加温に時間を要する。

#### 3. キャリブレーション

測定開始時、センサーの装着位置を変更した時、連続測定時間が長くなった時は、既知の濃度の酸素、二酸化炭素を含んだ校正用ガスでキャリブレーションが必要である。

#### 4. 誤差

皮膚の異常や浮腫がある場合、循環不全、低体温の患者では誤差が大きくなる。

#### 5. センサーの装着位置

皮膚の循環が良く、体動の影響を受けにくい部位に装着する。新生児では鎖骨下の前胸壁が多いが、肩、腹壁も選択できる。新生児以外では胸部、上腕、大腿などが選択できるが、四肢は皮膚の循環が不良になりやすく測定には適していない場合がある。測定誤差を小さくするため、泡が入らないようにコンタクトゲルをセンサーにつけ、皮膚接着用のリングで隙間のないように体表面に装着する。

#### 6. 温度設定

二酸化炭素は拡散しやすく  $37^{\circ}\text{C}$  から測定ができるが低温では応答時間が長くなる。酸素分圧を測定する場合は、酸素は拡散が温度に依存するため  $42^{\circ}\text{C}$  以上が必要である。熱傷予防のためセンサーの定期的な位置変更が必要で、新生児では  $42\sim 43^{\circ}\text{C}$  で4時間以内、小児や成人では  $43^{\circ}\text{C}$  以下で8時間以内、 $44\sim 45^{\circ}\text{C}$  で2～4時間以内であれば熱傷のリスクは低いとされる。最初の装着時には1～2時間後に皮膚の状態を確認し温度や連続測定時間を調節する。また循環不全、低体温、血管収縮薬、センサーが体の下に入るなどの圧迫で熱傷のリスクは高くなる。

### VI. 代表的な製品

代表的な製品には、コーケンメディカルの iP9200（図2）、ラジオメーターの TCM4（図3）、新生電子の PO-850A などがある。

### VII. まとめ

経皮ガスモニターは非侵襲で連続的に  $\text{PaO}_2$  と  $\text{PaCO}_2$  が推定でき、急性期の呼吸管理から、慢性期の呼吸管理、

## (参考) 保険収載

## 経皮的血液ガス分圧測定、血液ガス連続測定

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

ア 循環及び呼吸不全があり酸素療法を行う新生児（出生時体重が1,000g未満又は1,000g以上1,500g未満の新生児の場合は、それぞれ90日又は60日を限度）

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<sub>2</sub>を測定した場合。1入院につき2日を限度。

## 経皮的酸素ガス分圧測定

1日につき100点

重症下肢血流障害が疑われる患者に対し、虚血肢の切断若しくは血行再建に係る治療方針の決定又は治療効果の判定のために経皮的に血中のpO<sub>2</sub>を測定した場合に、3月に1回に限り算定。

組織循環の評価などに用途は拡大している。しかしながら、熱傷のリスクやキャリブレーション、電極膜の交換の煩雑さがあり、体温に近い低温での測定や<sup>24)</sup>、ガラス電極の代わりに光学センサーを用いるなどでキャリブレーションや電極膜の交換が不要になることなどが期待される<sup>25)</sup>。

本稿の全ての著者には規定されたCOIはない。

## 参考文献

- 1) Martin JT : Chapter 25 Transcutaneous monitoring of carbon dioxide tension. Principles and Practice of Intensive Care Monitoring. USA, McGraw-Hill Inc, 1998, pp 401-14.
- 2) Restrepo RD, Hirst KR, Wittnebel L, et al : AARC clinical practice guideline : transcutaneous monitoring of carbon dioxide and oxygen : 2012. Respir Care. 2012 ; 57 : 1955-62.
- 3) Tobias JD, Meyer DJ : Noninvasive monitoring of carbon dioxide during respiratory failure in toddlers and infants : end-tidal versus transcutaneous carbon dioxide. Anesth Analg. 1997 ; 85 : 55-8.
- 4) Tobias JD : Noninvasive carbon dioxide monitoring during one-lung ventilation : end-tidal versus transcutaneous techniques. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2003 ; 17 : 306-8.
- 5) Wilson J, Russo P, Russo J, et al : Noninvasive monitoring of carbon dioxide in infants and children with congenital heart disease : end-tidal versus transcutaneous techniques. J Intensive Care Med. 2005 ; 20 : 291-5.
- 6) Storre JH, Steurer B, Kabitz HJ, et al : Transcutaneous PCO<sub>2</sub> monitoring during initiation of noninvasive ventilation. Chest. 2007 ; 132 : 1810-6.
- 7) Fanconi S, Burger R, Maurer H, et al : Transcutaneous carbon dioxide pressure for monitoring patients with severe croup. J Pediatr. 1990 ; 117 : 701-5.
- 8) Holmgren D, Sixt R : Transcutaneous and arterial blood gas monitoring during acute asthmatic symptoms in older children. Pediatr Pulmonol. 1992 ; 14 : 80-4.
- 9) Nardi J, Prigent H, Adala A, et al : Nocturnal oximetry and transcutaneous carbon dioxide in home-ventilated neuromuscular patients. Respir Care. 2012 ; 57 : 1425-30.
- 10) Paiva R, Krivec U, Aubertin G, et al : Carbon dioxide monitoring during long-term noninvasive respiratory support in children. Intensive Care Med. 2009 ; 35 : 1068-74.
- 11) Drummond KJ, Fearnside MR, Chee A : Transcutaneous carbon dioxide measurement after craniotomy in spontaneously breathing patients. Neurosurgery. 1997 ; 41 : 361-5 ; discussion 365-7.
- 12) Kopka A, Wallace E, Reilly G, et al : Observational study of perioperative PtcCO<sub>2</sub> and SpO<sub>2</sub> in non-ventilated patients receiving epidural infusion or patient-controlled analgesia using a single earlobe monitor (TOSCA). Br J Anaesth. 2007 ; 99 : 567-71.
- 13) Chhajed PN, Kaegi B, Rajasekaran R, et al : Detection of hypoventilation during thoracoscopy : combined cutaneous carbon dioxide tension and oximetry monitoring with a new digital sensor. Chest. 2005 ; 127 : 585-8.
- 14) Heuss LT, Chhajed PN, Schnieper P, et al : Combined pulse oximetry/cutaneous carbon dioxide tension monitoring during colonoscopies : pilot study with a smart ear clip. Digestion. 2004 ; 70 : 152-8.
- 15) Berkenbosch JW, Tobias JD : Transcutaneous carbon dioxide monitoring during high-frequency oscillatory ventilation in infants and children. Crit Care Med. 2002 ; 30 : 1024-7.
- 16) Tremper KK, Shoemaker WC, Shippy CR, et al : Transcutaneous PCO<sub>2</sub> monitoring on adult patients in the ICU and the operating room. Crit Care Med. 1981 ; 9 : 752-5.
- 17) Greenhalgh DG, Warden GD : Transcutaneous oxygen and carbon dioxide measurements for determination of skin graft "take". J Burn Care Rehabil. 1992 ; 13 : 334-9.
- 18) Sugimoto I, Ohta T, Ishibashi H, et al : Transcutaneous carbon dioxide tension for the evaluation of limb ischemia. Surg Today. 2009 ; 39 : 9-13.
- 19) Hinkelbein J, Floss F, Denz C, et al : Accuracy and precision of three different methods to determine Pco2 (Paco2

- vs. Petco<sub>2</sub> vs. Ptcco<sub>2</sub>) during interhospital ground transport of critically ill and ventilated adults. *J Trauma*. 2008 ; 65 : 10-8.
- 20) Tatevossian RG, Wo CC, Velmahos GC, et al : Transcutaneous oxygen and CO<sub>2</sub> as early warning of tissue hypoxia and hemodynamic shock in critically ill emergency patients. *Crit Care Med*. 2000 ; 28 : 2248-53.
- 21) Choi SH, Kim JY, Yoon YH, et al : The use of transcutaneous CO<sub>2</sub> monitoring in cardiac arrest patients : a feasibility study. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2014 ; 22 : 70.
- 22) Lang CJ : Apnea testing guided by continuous transcutaneous monitoring of partial pressure of carbon dioxide. *Crit Care Med*. 1998 ; 26 : 868-72.
- 23) McBride ME, Berkenbosch JW, Tobias JD : Transcutaneous carbon dioxide monitoring during diabetic ketoacidosis in children and adolescents. *Paediatr Anaesth*. 2004 ; 14 : 167-71.
- 24) Aly S, El-Dib M, Mohamed M, et al : Transcutaneous carbon dioxide monitoring with reduced-temperature probes in very low birth weight infants. *Am J Perinatol*. 2017 ; 34 : 480-5.
- 25) Eberhard P : The design, use, and results of transcutaneous carbon dioxide analysis : current and future directions. *Anesth Analg*. 2007 ; 105 (6 Suppl) : S48-52.