

●症例報告●

サイドストリーム型カプノメータで観察された ラクダのコブ様カプノグラム

磨田 裕¹⁾・古田島 太²⁾・武居哲洋³⁾・佐伯有香⁴⁾

キーワード：人工呼吸，カプノメータ，カプノグラム，サイドストリーム，気道内圧，リーク

要 旨

異常な形のカプノグラムは時に認められるが、“ラクダのコブ様カプノグラム (triphasic capnogram)”はICU領域からの報告はない。

症例は87歳男性、脳幹出血のため気管切開人工呼吸中であった。換気モードはpressure control-synchronized intermittent mandatory ventilation (PC-SIMV)であったが自発呼吸はなかった。サイドストリーム型カプノメータで表示されたカプノグラム第3相は平坦ではなくラクダのコブ様の形で、呼気終末二酸化炭素分圧 (partial pressure of end-tidal carbon dioxide : P_{ETCO_2}) は28mmHgと表示されていた。サンプリングチューブ接続部分の接続緩みを疑い、修正したところカプノグラムは正常の形になり、 P_{ETCO_2} は44mmHgと表示された。

サイドストリーム型カプノメータではサンプリングチューブの接続緩み・亀裂などが原因で第3相の形が“tails-up”、“triphasic capnogram”になることがあるが、今までの報告はすべて麻酔症例であった。本症例の原因もそれらと同様であり、その P_{ETCO_2} は不正確で、加えてサンプリング流量変動と時間軸の歪を伴うことが推測された。

I. はじめに

カプノグラム第3相はほぼ水平、またはやや右上がりになる。通常、第3相の終末部分が最大値となり、この値は呼気終末二酸化炭素分圧 (partial pressure of end-tidal carbon dioxide : P_{ETCO_2}) で、カプノメータにはこの値が表示される。第3相が平坦でなく、終盤でオーバーシュートするような“tails-up”^{1~9)}、また2つのピークを示すもの¹⁰⁾、さらに「ラクダのコブ」のような“ラクダのコブ様カプノグラム (triphasic capnogram)”¹¹⁾などの異常な形状のカプノグラムを呈することも報告されている。これらはすべて全身麻酔中に

サイドストリーム型カプノメータを用いている症例で、その原因は呼吸ガスサンプリングシステムのリークの存在と説明されている。しかし今回はICUの人工呼吸患者でJaffeら¹¹⁾と同様の“triphasic capnogram”を観察した。従来の報告と同様にリークが原因と考えられたが、この特異な波形を呈した原因についてより詳細な考察を加えたので報告する。

II. 症 例

87歳男性。体重80kg、身長172cm。

現病歴：自宅で意識消失しているところを家人に発見され、当院に救急搬送された。当院到着時、GCS意識レベルE1V1M1、自発呼吸なく、直ちに気管挿管し、人工呼吸管理のため、脳神経系ICUに入室した。頭部CT検査で脳幹出血を認め、対光反射なく、自発呼吸は時折出現した。入院第23日、気管切開術が施行され、人工呼吸管理が継続された。

1) 元 埼玉医科大学国際医療センター 集中治療科
現 横須賀共済病院 集中治療科
2) 埼玉医科大学国際医療センター 集中治療科
3) 横浜市立みなと赤十字病院 救命救急センター集中治療部
4) 元 埼玉医科大学国際医療センター 集中治療科
現 埼玉石心会病院 救急総合診療科
[受付日：2018年3月1日 採択日：2018年4月2日]

入院第39日、人工呼吸器は Servo-i (MAQUET、スウェーデン)、換気モードは pressure control-synchronized intermittent mandatory ventilation (PC-SIMV)、吸気酸素濃度 40%、SIMV 7/分、PC 換気圧 10cmH₂O (above PEEP)、pressure support (PS) 5cmH₂O、PEEP 5cmH₂O であった。このとき一回換気量は 550mL であり、自発呼吸はなかった。患者モニタ IntelliVue MP70 (Philips Medical System、ドイツ)、および、MP70 組み込みの M3015A (Philips Medical System) サイドストリーム型カプノメータを使用し、カプノグラムは患者モニタ本体のディスプレイに表示されていた。

このとき、通常見られないカプノグラムを観察した (Fig.1)。モニタ上は SpO₂ 99%、PETCO₂ 28mmHg、心電図は洞性リズムで心拍数 60/分であった。Fig.1 のようにカプノグラムの第3相は平坦ではなくラクダのコブのように上に凸になる部分を認めた。すなわち第3相が3つに分かれる形、“triphasic capnogram”または“triple plateau”を呈した。サンプリングチューブとカプノメータの接続部分を一旦外し、双方に目視上の異常がないことを確認したので、緩みのないように再度接続をしたところ、カプノグラムは Fig.2 のように通常形になり、PETCO₂ は 44mmHg と表示された。なお、この一連の経過で自発呼吸は認めなかった。

Ⅲ. 考 察

サイドストリーム型カプノメータではサンプリングチューブの亀裂などが原因で第3相の終末部分のオーバーシュート波形を呈することが知られており、これは“tails-up”“dual plateau”などと呼ばれている。この異常波形は、Martin ら¹⁾が最初に報告し、その後、同一研究グループの Zupan ら¹²⁾はリークの大きさと二酸化炭素分圧 (partial pressure of carbon dioxide: PCO₂) の変化などについて詳細に検討した。そしてこの異常波形はすでに成書^{13,14)}にも記載されている。その後の Jaffe ら¹¹⁾は、これらと形状が異なる“triphasic capnogram”すなわち「ラクダのコブ」様のカプノグラムを報告した。これらの“tails-up”や“triphasic capnogram”の報告で共通しているのは、すべて全身麻酔中に陽圧換気を行い、サイドストリーム型カプノメータを使用していることである。そして原因は、サンプリングチューブやその接続部分、ウォータートラップの亀裂などカプノメータのガス流路にリークが存在していたと

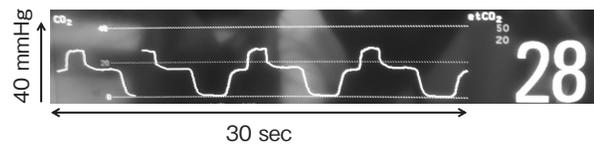


Fig. 1 Abnormal capnogram was noted in the ICU patient during mechanical ventilation

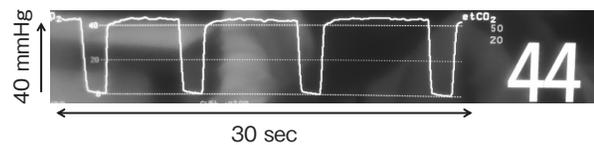


Fig. 2 The capnogram was returned to normal after reconnecting without the leak between the gas sampling tube and the capnometer

されている。このリーク部分から大気を引き込み、サンプリングガスが希釈され、大気吸引量に変化することで、PCO₂ 変化を生じるものである。すなわち陽圧換気吸気相の気道内圧伝播により、大気吸引量が減少・消失するとき、PCO₂ は上昇する。したがって自発呼吸では PCO₂ は低下するものの、形の異常は出現しないことも特徴である。なお、カプノメータ本体内部にリークが存在し、標準ガス較正をした場合、誤った較正值を記憶し、PETCO₂ は過大表示されることも指摘されている⁵⁾。

本症例で観察したカプノグラムは Jaffe らの報告¹¹⁾と同様の形であった。彼らはこの原因がウォータートラップの亀裂であったとしているが、本症例では、サンプリングチューブとカプノメータ本体の接続部の緩みが原因であった。

カプノグラム第3相の“tails-up”の出現では、気道内圧の周期的な変化が影響しているが、カプノグラムのタイムラグと気道内圧変化との関係によっては、PCO₂ 上昇点は変動しうる。従来^{1~9)}の報告は、たまたま第3相の終末付近に陽圧の影響が現れていたと推測できるが、Jaffe ら¹¹⁾はサンプリングチューブの長さを変えると「ラクダのコブ」の出現位置が異なることを示している。これは気道の陽圧がどの相に加わるかで、タイムラグが変化し形が異なることを示している。

本症例では陽圧の影響する部位が第3相の中央付近になり、そのため“triphasic capnogram”になったと考えられる。この点は以下のように推察される。本症例での人工呼吸は自発呼吸がなく実質は調節換気で、換

気回数 7/分、吸気時間 1.58 秒、呼気時間 6.99 秒であった。使用したカプノメータ M3015A はメーカー仕様書によれば、ガスサンプリング流量 50 (+14/-7.5) mL/分、公称遅れ時間 2.3 秒 (最大 3.0 秒) である。また、サンプリングチューブ M1921A (フィルタインラインセット H, 2m, Philips Medical System) は、後の実測値によると、長さ 2m18cm (フィルタ、ナフイオン®チューブを含む)、チューブ内容積 2.0mL (同) であった。そのためサンプリングガスの移動を考えると、サンプリングチューブだけで約 2.4 秒の遅れを生じる。そのため表示波形のタイムラグはモニタ本体内のガス流路、CO₂ 検出部、演算処理時間などの総計で、メーカー公称値 3.0 秒 (最大) となる。なお、大気開放のサンプリングチューブをモニタに接続した動作状態で、このチューブ接続部位で実測した陰圧は -30cmH₂O であった。

Fig. 1、Fig. 2 から、本来の第 3 相 PCO₂ は約 44mmHg で、リークによる希釈のため約 18mmHg に低下している。これはおよそ 41%なので、カプノメータ本体吸引流量が 50mL/分、そして大気の吸引流量が約 30mL/分、呼吸ガスの吸引流量が約 20mL/分であったと推測される。Fig. 3 はこのタイムラグの延長、気道内圧などの関係をイラストで示したものである。今回のリーク部位がサンプリングチューブ取り付け部位なので、そこまでの呼吸ガス吸引流量が 20mL/分に減少していれば、ここに到達するガスは本来の移動時間よりも遅延する。そのため、この部位までのタイムラグは本来 2.4 秒であるものが約 5.3 秒に延長していたと推測される (計算は補足参照)。そして気道内圧伝播のため、吸気相になった時間帯のみガスリークが減少し、その結果 PCO₂ の増加が起こる。これが第 3 相の中にある第 2 のプラトー (コブの部分) で、持続時間は吸気時間と近似し、PCO₂ は約 28mmHg である。

このようにモニタされるカプノグラムのタイムラグは、カプノメータシステム全体の本来のタイムラグに加えて、リークによる呼吸ガス吸引量低下による遅れが加わっている。すなわち、リーク量が多いほど PCO₂ は低下し、かつタイムラグは増大する。そして気道陽圧がどの時間帯に加わるかによって、第 3 相の PCO₂ 上昇がどの部分になるかが決まる。したがって、気道陽圧の影響が本症例のように第 3 相の途中に現れることも起こる。

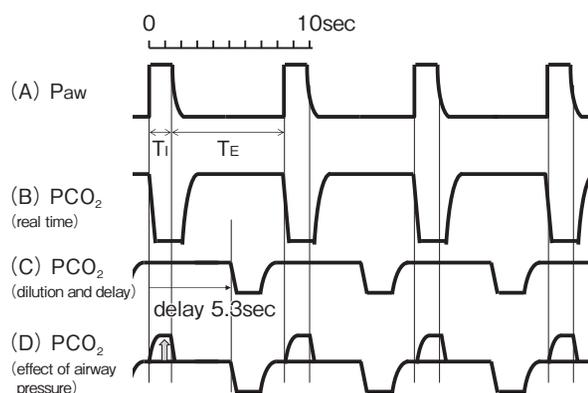


Fig. 3 Illustrated wave tracings for the formation of the dromedary shape in the capnogram

(A) Airway pressure : respiratory rate 7/min (cycle time 8.57 sec), T_i (inspiratory time 1.58sec), T_E (expiratory time 6.99sec). (B) Capnogram at the Y-piece without time delay, (C) Effect of air dilution and prolonged delay time on capnogram at the connecting port of the gas sampling tube. (time delay 5.3sec, see the details in the text and the appendix). (D) Capnographic tracing shows the elevated CO₂ during inspiratory phase by airway pressure. Although the time axis for capnogram may include distortion, the time distortion is not considered in the figure.

なお、呼吸ガス吸引流量が気道内圧によって変動し、タイムラグも一定ではなく変動している。したがって、表示されるカプノグラムは横軸方向の歪を持っている。すなわち時間軸は直線性ではなく時間的歪がある。なお、リークがサンプリングチューブ患者接続部位にあるときは、吸引流量は一定でそのままカプノメータ本体に到達するので、空気希釈効果のみでタイムラグの延長効果は起こらないと考えられる。カプノグラムも第 3 相の終末部分が上昇する“tails-up”になると推測される。Jaffe ら¹¹⁾もタイムラグの変化がカプノグラムの形状の違いを生じることを示しているが、時間軸の歪については言及していない。しかし、彼らの論文¹¹⁾のカプノグラムを見ると、同じ換気条件下であるにもかかわらず、「ラクダのコブ」の有無によって、吸気呼気時間比が異なることがわかる。すなわち時間歪が発生している。これは他の“tails-up”の波形を示している報告の中で、比較できるカプノグラムが掲載されている 2 論文^{6, 12)}で同様な時間歪が発生していることが確認できる。

すなわち、これらに共通しているのは異常を呈している波形上での吸気時間が延長している。これは吸気相の気道陽圧のため CO₂ を含まない吸気ガス吸引流量が増加し、サンプリングシステム内にガス体積として

多く存在するので、カプノグラム上、吸気時間は相対的に延長したように見えると推測される。なお、サイドストリーム型カプノメータでは、リークがなくても陽圧換気によってサンプリング流量が変動し、それは波形歪・時間歪が生じることが指摘されている¹⁵⁾。以上のように“triphasic capnogram”も“dual plateau”と同様に呼吸ガス吸引系統のガスリーク（大気吸引）によって出現するものだが、これまでの報告では、時間軸の歪などに言及したものはなかった。

このような異常波形が見られるときは、呼吸ガス吸引系統のリーク・亀裂などの有無を点検する必要がある。また、一般にカプノメータが表示する P_{ETCO_2} の値は、「呼気の終末」ではなく、呼気相での最大値を表示する。Fig.3でも P_{ETCO_2} 28mmHg は第2のプラトーの最大値を示している。したがって、このような値をもとに換気条件の評価や設定を変更することは不適切で、誤った対応をする危険性がある。さらに全身麻酔中であれば同時に測定される麻酔ガス濃度も不正確なので、これをもとに麻酔深度評価をすることは避けるべきである。

IV. 結 語

今回観察した“triphasic capnogram”は“tails-up”、“dual plateau”と同様にサイドストリーム型カプノメータにおいて、呼吸ガス吸引系統のリーク（大気吸引）および陽圧換気の影響によって形成されていた。この特異な波形は2例目の報告だが、ICUでの人工呼吸中の異常波形としては初めての報告になる。このようなカプノグラムは、大気希釈による CO_2 分圧低下だけでなく、タイムラグの延長、時間軸の時間歪を伴っている。サイドストリーム型カプノメータでは、呼吸ガス吸引系統の接続不良、亀裂などガスリークがないことを確認し、カプノグラムの形にも注意し、異常波形を観察したときは P_{ETCO_2} の値は不正確になっていると考えるべきである。

（補足）吸気相、呼気相での呼吸ガス吸引流量の変動とそれによるタイムラグの変化

呼吸ガス吸引流量の変動を補正するとき、厳密には一次応答などを考慮した方法¹⁵⁾を適用すべきであるが、ここではより単純化して計算した。また、この症例では PEEP が 5cmH₂O であり、PEEP は呼気相での呼吸

ガス吸引流量に影響を与えられ考えられるが、その条件下での検討である。

Fig.1 から呼気相後半での PCO_2 は約 18mmHg、吸気相の陽圧時での PCO_2 28mmHg、Fig.2 から本来の PCO_2 は 44mmHg とする。吸気時間 T_I 、呼気時間 T_E それぞれでのサンプリングチューブ内呼吸ガス吸引流量を \dot{V}_{SI} 、 \dot{V}_{SE} とすると、本来の呼吸ガス吸引流量 (50mL/分) はそれぞれ 28/44、18/44 に減少したと推測できる。 T_I 1.58 秒、 T_E 6.99 秒なので、チューブを流れる平均呼吸ガス吸引流量 \dot{V}_S を求めると

$$\begin{aligned}\dot{V}_S &= \dot{V}_{SI} \cdot 1.58/8.57 + \dot{V}_{SE} \cdot 6.99/8.57 \\ &= 50 \cdot 28/44 \cdot 1.58/8.57 + 50 \cdot 18/44 \cdot 6.99/8.57 \\ &\quad (\text{mL/分}) \\ &\approx 23\text{mL/分} \quad (0.38\text{mL/秒})\end{aligned}$$

したがって、リーク部位（すなわちサンプリングチューブと本体接続部位）までのタイムラグは $2 \div 0.38 \approx 5.3$ (秒) と推測される。

なお、カプノメータ全体のタイムラグは $5.3 + 0.6 = 5.9$ (秒) になり、観察したカプノグラムは実時間よりも 5.9 秒遅れていたことになる。

本稿の要旨は、第 38 回日本呼吸療法医学会学術集会（2016 年、名古屋）において発表した。

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 M, Zupan J, Benumof JL : Unusual end-tidal CO_2 waveform. *Anesthesiology*. 1987 ; 66 : 712-3.
- 2) Prevedoros HP, Morris RW : An interesting capnograph tracing. *Anaesth Intensive Care*. 1990 ; 18 : 271.
- 3) Sims C : An unusual capnogram. *Anaesth Intensive Care*. 1990 ; 18 : 272.
- 4) Sampson I : An unusual capnograph tracing. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 1994 ; 8 : 243-5.
- 5) Healzer JM, Spiegelman WG, Jaffe RA : Internal gas analyzer leak resulting in an abnormal capnogram and incorrect calibration. *Anesth Analg*. 1995 ; 81 : 202-3.
- 6) Brownlow HA, Bell JC : Abnormal capnograph trace. *Anaesthesia*. 2000 ; 55 : 832-3.
- 7) Tripathi M, Pandey M : Atypical “tails-up” capnograph due to breach in the sampling tube of side-stream capnometer. *J Clin Monit Comput*. 2000 ; 16 : 17-20.
- 8) Body SC, Taylor K, Philip JH : Dual-plateau capnogram caused by cracked sample filter. *Anesth Analg*. 2000 ; 90 : 233-4.
- 9) Apuya JS, Kanter G : A bizarre end-tidal carbon dioxide waveform. *Can J Anaesth*. 2002 ; 49 : 1098-9.

- 10) Rassam S, Hall J, Mecklenburgh J : The double 'tails-up' capnograph. *Anaesthesia*. 2004 ; 59 : 1034-5.
- 11) Jaffe RA, Talavera JA, Hah JM, et al : The dromedary sign—an unusual capnograph tracing. *Anesthesiology*. 2008 ; 109 : 149-50.
- 12) Zupan J, Martin M, Benumof JL : End-tidal CO₂ excretion waveform and error with gas sampling line leak. *Anesth Analg*. 1988 ; 67 : 579-81.
- 13) Eskaros SM, Papadakos PJ, Lachmann B : Respiratory monitoring. In : *Miller's Anesthesia*, 7th Ed. Miller RD (Ed). Philadelphia, Elsevier, Churchill Livingstone, 2010, pp1411-41.
- 14) Dorsch JA, Dorsch SE : Gas monitoring. In *Understanding Anesthesia Equipment*, 5th Ed. Dorsch JA, Dorsch SE (Eds), Philadelphia, Wolters Kluwer, Lippincott Williams & Wilkins, 2008, pp685-726.
- 15) Farmery AD, Hahn CE : A method of reconstruction of clinical gas-analyzer signals corrupted by positive-pressure ventilation. *J Appl Physiol*. 2001 ; 90 : 1282-90.

An unusual "dromedary shape" capnogram monitored with a sidestream capnometer during mechanical ventilation

Yutaka USUDA¹⁾, Futoshi KOTAJIMA²⁾, Tetsuhiro TAKEI³⁾, Yuka SAEKI⁴⁾

¹⁾ Department of Anesthesiology and Intensive Care Medicine, Saitama Medical University, International Medical Center

* Present affiliation : Department of Intensive Care Medicine, Yokosuka Kyosai Hospital

²⁾ Department of Anesthesiology and Intensive Care Medicine, Saitama Medical University, International Medical Center

³⁾ Department of Emergency and Critical Care Medicine, Yokohama City Minato Red Cross Hospital

⁴⁾ Department of Anesthesiology and Intensive Care Medicine, Saitama Medical University, International Medical Center

* Present affiliation : Department of Emergency and Critical Care Medicine, Saitama Sekishinkai Hospital

Corresponding author : Yutaka USUDA

Department of Intensive Care Medicine, Yokosuka Kyosai Hospital
1-16, Yonegahama-dori, Yokosuka, 238-8558, Japan

Key words : mechanical ventilation, capnometer, capnogram, sidestream, airway pressure, leak

Abstract

Abnormal capnograms are not unusual in clinical monitoring, however, the capnograms of "tails-up" or "dromedary sign" have not been reported in respiratory care settings. An 87-yr-old man with brainstem hemorrhage was mechanically ventilated through tracheostomy in the ICU. Although the ventilatory mode was pressure control-synchronized intermittent mandatory ventilation (PC-SIMV), his spontaneous breaths were absent. An abnormal capnogram with a single hump midplateau like a dromedary was being monitored with a sidestream capnometer. At that time, end-tidal (ET) CO₂ was 28mmHg on the monitoring display. Because a leak was suspected in the gas sampling system of the capnometer, the sampling tube was reconnected firmly, and therefore a normal capnogram appeared with 44mmHg of ET_{CO₂}.

Abnormal capnograms in the shape of "tails-up" or "dromedary shape" have been described as the result from room air aspiration into the sample line through the crack or the loose connection in the gas sampling system. All the previous cases were reported during general anesthesia sessions. The etiology of "dromedary" capnogram in this ICU patient was the same way of air dilution through the gas sampling system.

In such a situation, it is supposed that not only the displayed ET_{CO₂} value is incorrect, but also the variation in sampling rate could result in distortion in the time axis of the capnogram.

Received March 1, 2018

Accepted April 2, 2018