

ターニケット駆血解除時における 呼気終末炭酸ガス濃度測定

安田 誠一* 多田 羅恒雄* 重松 俊之*
宮沢 典子* 豊田 佳隆*

要 旨

ターニケットによる駆血解除時の患者の状態を呼気終末炭酸ガス濃度 (ETCO₂) から推測するために、片側膝関節置換術予定患者10例で、ETCO₂ を連続的にモニターした。麻酔は腰部硬膜外麻酔と吸入麻酔を併用し、一定の換気条件を駆血解除後測定終了時まで維持した。その結果、収縮期血圧は駆血解除2分後に最低値となり、pH は駆血解除1分後から低下して3分後には平均7.36となり乳酸も増加した。この間、ETCO₂ は駆血解除から平均30秒経過してから上昇し、駆血解除直前の34.29±1.39 mmHg から解除後130秒で最高値38.85±1.23 mmHg まで変化した。以上より、術中と同じ条件で調節呼吸を継続すれば、ETCO₂ の変化が、ターニケットによる駆血解除時の循環系や代謝系の変動に対する指標となることが示唆された。

はじめに

下肢の手術で止血目的で使用したターニケットの駆血解除時に、血圧低下がみられることはよく知られ、この時に血液ガス、電解質や乳酸値が一過性に増加することもすでに報告されている¹⁻⁵⁾。しかし、この変化を検出するためには頻回の血液採取を行う必要があり、臨床的に容易に実施することは困難である。ところで、呼気終末炭酸ガス濃度 (ETCO₂) がターニケット解除後に一過性的上昇を示すことは臨床的によく認められている^{5,6)}。

そこで、ETCO₂ を連続的にモニターし、この変化からターニケット解除時の患者の状態を推測することが可能であると考え、以下の検討を行った。

研究方法

片側膝関節置換術の ASA 1-2 の手術予定患者で、術中ターニケット使用を予定した10症例 (年齢20歳以上-70歳未満) を対象とした。前投薬として、手術開始1時間前に硫酸アトロピン 0.5 mg とハイドロキシジン 50 mg を筋注した。手術室で第3-第4腰椎間から硬膜外カテーテルを留置して1%メピバカイン 10 ml を注入した後、チオペンタール 5 mg/kg とサクシニルコリン 1 mg/kg で麻酔導入を行い気管内挿管した。麻酔中は笑気-酸素-エンフルレン-パンクロニウムにより呼気終末炭酸ガス濃度を一定 (30-35 mmHg) に保つように調節呼吸で換気を行った。換気条件は呼吸回数と一回換気量を一定にして、ターニケットの駆血解除後、測定が終了するまで維持した。橈骨動脈には 22 G テフロン針を留置し、ターニケット解除前後に表1に示すプロトコールに従って採血し、血液ガス、電界質 (Na,

表1 測定プロトコール

測定時刻	測定項目
①ターニケット解放直前 (0分)	血液ガス, 電解質, 乳酸
②解放1分後 (1分)	血液ガス
③解放2分後 (2分)	血液ガス
④解放3分後 (3分)	血液ガス, 電解質, 乳酸
⑤解放5分後 (5分)	血液ガス, 電解質
⑥解放7分後 (7分)	血液ガス, 電解質
⑦解放10分後 (10分)	血液ガス, 電解質

*都立大塚病院麻酔科

K, Cl), 乳酸値を測定した. また, 自動血圧計と直接動脈圧による血圧の連続測定を行い, $ETCO_2$ は CAPNOMAC[®] により連続測定し, RS232C インターフェースで10秒ごとにパーソナルコンピュータ (PC9801-F2: 日本電気製) に測定値を入力してフロッピーディスクに記録した. 結果はすべて (mean \pm S. D.) で表示し, 統計学的処理は Student の t-検定 (有意水準: $p < 0.05$) によった.

成績

対象とした10症例の年齢は55.8 \pm 7.6歳, 体重は 48.6 \pm 3.2 kg, 手術時間は70.3 \pm 7.9分であった. ターニケット駆血時間は68.7 \pm 10.1分で最長85分最短46分であった. 全対象症例の平均 $ETCO_2$ 値の連続変化を駆血解除前後時間で図に示す. $ETCO_2$ はターニケット解除後平均30秒後から急激

な上昇が認められ, $ETCO_2$ 平均値はターニケット解除直前の 34.29 \pm 1.39 mmHg から解除後130秒で最高値 38.85 \pm 1.23 mmHg まで変化した ($p < 0.05$). 最も大きな変化がみられた症例では, ターニケット駆血時間が77分で, 31.16 mmHg から 40.28 mmHg まで約 9 mmHg の上昇が認められた. 血液ガス所見では, 解除直前の $Paco_2 = 36.25 \pm 1.38$ mmHg から2分後には $Paco_2 = 43.65$ mmHg まで上昇 ($p < 0.01$) し, 3分後には $Paco_2 = 43.76$ mmHg と最大値 ($p < 0.01$) を示した (表2). PaO_2 は2分後に最低値を示し, 3分後にはほぼ開放前値に復したが有意な変化ではなかった (表2).

循環系の変化では, 収縮期血圧は2分後に最低値となり, 平均 28.5 mmHg 低下した ($p < 0.05$). 心拍数は2分後に最高値となり, 平均4.4/分の上昇が認められたが有意な変化ではなかった (表2).

代謝系では, pH がターニケット解放前の7.44 \pm 0.02から1分後には急激な低下を示して3分後には最低値7.36 \pm 0.02となった ($p < 0.01$) が, 10分後の値もターニケット開放前に比較してなお低値 (7.38 \pm 0.02 ($p < 0.01$)) であった. カリウムはターニケット開放前 3.55 \pm 0.19 mEq/l から次第に上昇傾向をとり, 5分後に最高値 3.75 \pm 0.21 mEq/l となった後低下傾向を示した. 乳酸はターニケット解放前 9.33 \pm 2.74 mg/dl から3分後には 21.22 \pm 6.86 mg/dl と増加した ($p < 0.01$) (表

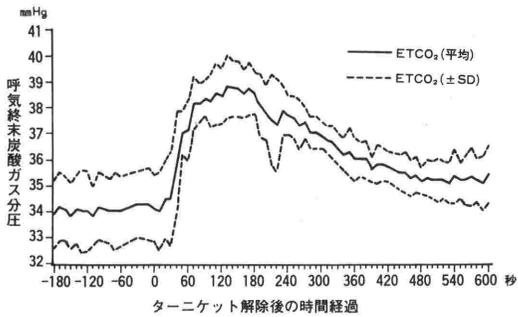


図 ターニケットによる駆血解除前後の呼気終末炭酸ガス分圧 ($ETCO_2$) の変化 (mean \pm SD)

表2 ターニケット解除前後の各指標の変動 (mean \pm SD)

(分)	0	1	2	3	5	7	10
収縮期血圧 (mmHg)	135 \pm 21	112 \pm 23*	107 \pm 23*	114 \pm 22*	122 \pm 26	123 \pm 26	122 \pm 22
心拍数 (/min)	79.6 \pm 12.1	80.2 \pm 12.5	84.0 \pm 10.7	82.4 \pm 10.8	78.9 \pm 10.6	78.4 \pm 11.4	78.0 \pm 11.2
pH	7.44 \pm 0.02	7.38 \pm 0.02**	7.36 \pm 0.02**	7.36 \pm 0.02**	7.37 \pm 0.02**	7.38 \pm 0.02**	7.38 \pm 0.02**
$PaCO_2$ (mmHg)	36.3 \pm 1.4	43.0 \pm 2.5**	43.7 \pm 2.0**	43.8 \pm 2.4**	42.6 \pm 2.5**	40.8 \pm 1.6**	40.5 \pm 2.5**
PaO_2 (mmHg)	142.2 \pm 22.4	132.1 \pm 21.6	130.3 \pm 42.0	143.9 \pm 18.0	143.0 \pm 15.2	141.9 \pm 16.0	142.2 \pm 17.4
K (mEq/l)	3.55 \pm 0.19			3.73 \pm 0.18	3.75 \pm 0.21	3.63 \pm 0.15	3.69 \pm 0.21
Na (mEq/l)	139.2 \pm 2.0			139.0 \pm 1.7	140.0 \pm 0.7	139.5 \pm 1.5	138.7 \pm 1.6
乳酸 (mg/dl)	9.33 \pm 2.74			21.22 \pm 6.86**			

0分: control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

2).

考 案

ターニケット解除時の循環動態変化は意外に大きく、本研究ではターニケット解放前収縮期血圧の21%もの血圧低下が認められ、心拍数もそれともなって上昇した。しかし、5分後には収縮期血圧が上昇して解除前と有意差がみられなくなり、重篤な循環不全に陥った症例はなかった。この血圧低下は一般的には、体血管抵抗減少や駆血肢への血液再流入、駆血肢の嫌気性代謝産物の産生などの代謝要因により説明されている。スワンガンツカテーテルを用いた検討では、低血圧の持続は体血管抵抗のためであり、pHの低下は主としてPco₂の上昇によるとされている⁷⁾。このような駆血解除後の短時間における循環系の変化は、麻酔管理上大きな問題となる。

このように循環系の変動の要因となっている代謝系の変化は、血液ガス所見や電解質、乳酸などの代謝産物の変化として検出されていたが、頻回の採血を行う必要があり、臨床的に適用するには非観血的な方法が望ましい。

ターニケットによる駆血解除により10 mmHg⁶⁾ または0.4%⁵⁾ 程度のETco₂上昇がみられると報告されているが、ターニケット解放時の代謝の変化とETco₂の変化を連続的に関連付けた報告はみられない。そこで、今回は膝関節置換術の患者で代謝系の変化を同時に測定し、ETco₂の連続的变化との関係を検討した。

これまで、ターニケットに関する呼吸、代謝の研究では、硬膜外麻酔などで自発呼吸下で測定する場合が多かった²⁾。自発呼吸下では、呼吸数や換気量は肺泡や血中の炭酸ガス濃度による他麻酔深度や他の薬剤などの影響によって変化するので、今回はターニケット解除に伴う血中および肺胞内の炭酸ガス上昇の影響が呼気に反映する様に、駆血解除後も一定の換気条件を保つこととした。

その結果、図1および表2から明らかなように、ETco₂とPaco₂の経時的变化は最大値を示した時刻が130秒後および180秒後と多少の違いはあったものの、ほぼ同様の形で推移することが明らかになった。従って、ETco₂の変化からPaco₂の変化を知ることができる。

本研究ではターニケット解除10分後でもETco₂およびPaco₂はコントロールに比較して増加した状態が続いていた。ターニケット解除後にPao₂、Paco₂およびpHが術前値に戻るの、駆血時間が30分で3-5分、60分で5-10分、90分で10-15分、120分では15分以上かかるとされている^{8,9)}。また、腰部硬膜外麻酔下で手術を行い自発呼吸を残した場合、成人における血液ガス所見からみたPaco₂種は、ターニケット解除1分後に低下したが、3分後にはコントロールに戻るとした報告²⁾では、代償性に呼吸状態が変化したためと考えられる。

調節呼吸のもとでは、一定の分時換気量がアシドーシスを軽減させるといわれている⁶⁾。特に小児では、調節呼吸を中止すると麻酔の影響のために残気量が減少し、十分な呼吸状態を維持できないために、よりアシドーシスに傾くとされる⁶⁾。本研究の対象は成人であり、調節呼吸を続けていたにもかかわらずpHは10分後でもコントロールに戻らず低値にとどまっていた。ETco₂が3分後にはコントロールに戻ってもpHは30分後まで低値が持続するといわれ²⁾、乳酸などの代謝産物の存在が持続的低pHの原因と考えられる。

ターニケットで駆血した患側肢ではPo₂は36.5から5.5 mmHg (25分後)¹⁾、さらに0~6 mmHg (2時間)⁴⁾へ、Pco₂は46.2から55.9 mmHg (25分後)¹⁾、さらに92~110 mmHgへと大きく変化する。このとき産生された嫌気性の代謝産物がターニケット解放により循環系に流入し、循環系の変化を引き起こすものと考えられる。ターニケット解除後にみられる血漿浸透圧の上昇は血管作動性物質放出の兆候であり、虚血後にみられる循環系の変化に大きな役割を果たしている³⁾。

今回は、血漿カリウムに関して有意な変化が認められなかったが、駆血解除2分後には増加し⁵⁾15分後にはコントロールに戻るとする報告⁶⁾や、30分は有意に増加したままであったとする報告²⁾など様々である。血漿カリウム増加は、虚血足側でのアシドーシスの結果増加したカリウムが放出される²⁾ばかりでなく、全身的なアシドーシスに対する生体の代謝作用の結果であると考えられる。

ま と め

以上、ターニケット解放時の循環系と代謝系の変化を $ETCO_2$ の連続的变化から検討を加えた。術中と同じ条件で調節呼吸を継続すれば、 $ETCO_2$ 変化が $Paco_2$ の変化を反映し、ターニケット解放時の循環系や代謝系の変動に対する指標となることが示唆された。また、成人においても pH、 $Paco_2$ 、乳酸などの値は、循環系の回復後もしばらくの間はコントロール値に戻らず、代謝系変化の影響が予想以上に大きいことが判明した。

なお、本論文の要旨は第10回循環制御医学会総会(1989年5月、東京)で発表した。

引用文献

- 1) Dery, R., Pelletier, J. & Jacques, A.: Metabolic changes induced in the limb during tourniquet ischemia. *Can Anaesth Soc J.* 12:367-378, 1965.
- 2) Modig, J., Kolstad, K. & Wigren, A.: Systemic reactions to tourniquet ischemia. *Acta Anaesthesiol Scand.* 22:609-914, 1978.
- 3) Larsson, J. & Bergstrom, J.: Electrolyte changes in muscle tissue and plasma in tourniquet ischemia. *Acta Chir Scand.* 144:67-73, 1978.
- 4) Wilgis, E. F.: Observations on the effects of tourniquet ischemia. *Bone Joint Surg.* 53A:1343-1346, 1971.
- 5) 遠藤拓男, 土肥修司, 松宮直樹・他: 空気駆血帯解除時の呼気炭酸ガス濃度, 筋内圧の変化. *臨床麻酔* 12:1649-1651, 1988.
- 6) Brustowicz, R. M., Moncorge, C. & Koka, B. V.: Metabolic responses to tourniquet release in children. *Anesthesiology.* 67:792-794, 1987.
- 7) 土屋正彦, 植田禾佐, 平川方久: ハロセン麻酔におけるターニケット解放時の血行および代謝動態. 第35回日本麻酔学会総会抄録. 1-A-14, 96, 1988.
- 8) Mullick, S.: The tourniquets in operations upon the extremities. *Surg Gynecol Obstet.* 1546:821-826, 1978.
- 9) Adams, J.P. & Wilgis, E. F. S.: Discussion. Observation on the effects of tourniquet ischaemia. *J Bone Joint Surg* 53:1343, 1971.

Measurement of end tidal CO_2 tension following deflation of the tourniquet

Seiichi Yasuda, Tsuneo Tatara, Toshiyuki Shigematsu
Noriko Miyazawa and Yoshitaka Toyoda

Department of Anesthesia Tokyo Metropolitan Ohtsuka Hospital

In this study we evaluated the cardiovascular and metabolic responses to tourniquet release by monitoring the change of end tidal CO_2 continuously in 10 patients undergoing lateral knee replacement surgery. Anesthesia was maintained with both of inhalation anesthetics and epidural anesthesia. After tourniquet deflation, controlled ventilation was maintained without change during measurement. There was a statistically significant decrease in systolic blood pressure (after 2

min.) and in pH value (after 3 min.). There was also a statistically significant increase in concentration of lactic acid. During these changes, the end tidal CO_2 increased significantly from 34.29 ± 1.39 mmHg to 38.85 ± 1.23 mmHg (130 sec. after tourniquet deflation). This study shows that, under the controlled ventilation maintained without change, cardiovascular and metabolic responses to tourniquet release can be evaluated by the value of end tidal CO_2 .

Key words: tourniquet ischemia, end tidal CO_2 , cardiovascular response to tourniquet release, metabolic response to tourniquet release, controlled ventilation