

原 著

ブタにおける気腹が循環動態に及ぼす影響

— 気腹ガスによる差異 —

松本 早苗*, 藤瀬 久美子*, 加藤 晶*
新宮 興*, 三上 修**, 松田 公志**

要 旨

腹腔鏡下手術中の循環動態の変動は、気腹に用いる二酸化炭素 (CO₂) により引き起こされる影響が多いとされる。本研究では、ブタを用いて空気、亜酸化窒素、CO₂の3種類のガスによる気腹が循環動態に及ぼす影響の差異を検討した。低腹腔内圧 (10 mmHg) における心拍出量の増加、高腹腔内圧 (20 mmHg) における心拍出量の減少などはいずれの気腹ガスでも観察され、腹腔内圧上昇の循環動態に及ぼす機械的影響と考えられた。CO₂による気腹では、肺動脈圧、中心静脈圧、肺動脈閉塞圧の上昇が観察され、さらに亜酸化窒素では高腹腔内圧で肺動脈閉塞圧の上昇が見られた。これらは血液内に吸収されたCO₂および亜酸化窒素による交感神経刺激作用の影響と考えられた。

緒 言

腹腔鏡下手術は、患者への外科的侵襲の少なさや、入院期間の短縮など患者に対する利点が多く、多くの施設で施行されてきている。気腹法は、呼吸循環動態に様々な変化をもたらすが、これらの変動は、二酸化炭素 (CO₂) を気腹に用いることにより引き起こされる場合が多いとされる¹⁾。本研究では、気腹の循環動態に及ぼす影響は、腹腔内圧上昇による腹腔内臓器および大血管に対する機械的圧迫による影響と血液内へ吸収された気腹ガスの循環系への直接作用さらに神経内分泌系に

対する影響とに分けられると考え、ブタに順次、空気、亜酸化窒素 (N₂O) および CO₂を用いた気腹を行い、3種類の気腹ガスによる循環動態の変動の違いを検討した。

実験方法

体重17~20 kg (18.2±1.8 kg, 平均±標準偏差) のメスハイブリッドブタ5頭を用いた。ケタミン20~25 mg/kg及びアトロピン0.5 mg筋注により麻酔を導入後、マスクによるイソフルラン1~2%吸入および耳静脈からのケタミン間欠の静注下に、気管切開を行った。ベクロニウムにより筋弛緩を得て、酸素、空気、イソフルラン1% (吸入酸素濃度50%) を、人工呼吸器 (サーボベンチレーター-900C) により吸入させ麻酔を維持した。一回換気量10 ml/kg, 呼吸数50回/分の換気条件で、実験の終了時まで維持した。ブタを仰臥位に固定したのち、総頸動脈へカテーテルを、右内頸静脈より肺動脈カテーテル (5 Fr) をそれぞれ留置した。心電図、観血的血圧、心拍数、肺動脈圧、中心静脈圧、終末呼気CO₂分圧、呼気麻酔ガス濃度、気道内圧および直腸温をモニターした。乳酸リンゲル液20 ml/kg/hrを輸液し、手術台の加温により、体温低下を予防した。

気腹針の刺入の1時間後、循環動態の安定を確認した後測定を開始した。気腹には空気、N₂O、CO₂を順に用いた。まず空気を用いて、腹腔内圧10 mmHg (IAP10) で5分間維持した後、さらにIAPを上昇させ20 mmHg (IAP20) で5分間維持した。この後腹腔内ガスを気腹針よりできるだけ吸引し、IAPが0 mmHgに復帰していることを

*関西医科大学麻酔科学教室

**関西医科大学泌尿器科学教室

確認した時点を気腹解除とした。気腹前, IAP10 および20での腹腔内圧安定より5分後, および気腹解除5分後の4点において平均動脈圧, 心拍数, 平均肺動脈圧, 中心静脈圧, 肺動脈閉塞圧, 心拍出量, 終末呼気CO₂分圧の測定, および動脈血ガス分析を行った。気腹解除後1時間の循環動態の安定後, 同じ手順を用いてN₂Oで気腹を行い同様の測定を行った。N₂Oによる気腹解除後1時間の循環動態の安定後, CO₂を用いて気腹を行い, 同様の測定を行った。(図1)

結果は平均±標準偏差で表し, 有意差検定には同一ガスによる気腹については repeated measure ANOVA を用い, 異なる気腹ガス間では同一の腹腔内圧における各値について factorial ANOVA を用いた。有意水準を0.05として判定した。

結 果

1. 動脈血CO₂分圧(PaCO₂)・酸素分圧(PaO₂)の変化

PaCO₂は, CO₂を用いた気腹では, 気腹前に比しいずれのIAPにおいても有意に上昇し, 気腹解除により低下した。空気による気腹では, IAP10に比しIAP20で有意に上昇したが, いずれも気腹前値との有意差は認められなかった。N₂Oによる気腹では, 気腹前に比し, ほとんど変化しなかった。

PaO₂は, 空気およびN₂Oを用いた気腹により有意に低下し, N₂Oでは気腹終了後も有意に低下していた。CO₂による気腹でも, 有意ではないが低下する傾向が見られた(図2)。

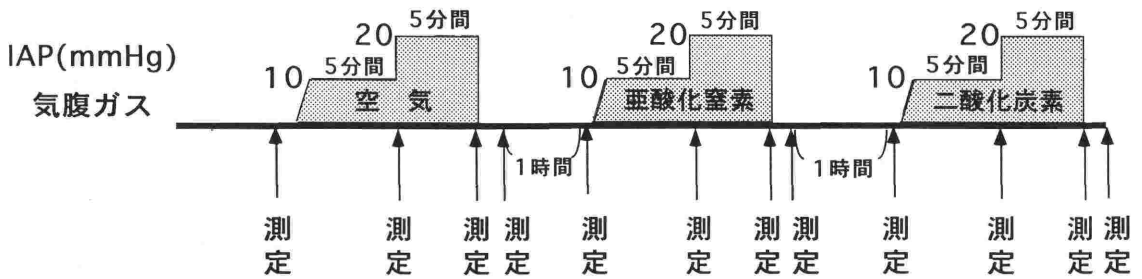


図1 実験方法

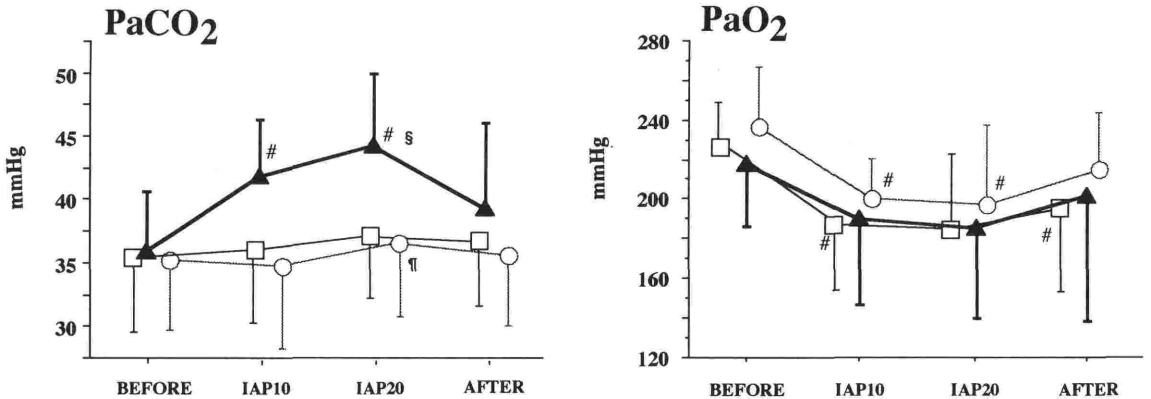


図2 動脈血二酸化炭素分圧および酸素分圧の変化(mean ± SD (n=5))
 # : P < 0.05 (vs before) § : P < 0.05 (vs after) ¶ : P < 0.05 (vs IAP 10)
 ○ : air □ : N₂O ▲ : CO₂

2. 平均動脈圧 (MAP), 心拍数 (HR) の変化
 平均動脈圧は, CO₂を用いた気腹により, 有意の変化ではないが気腹前値に比して上昇し, 気腹解除により気腹前値に回復する傾向が見られた. 他のガスによる気腹ではほとんど変化しなかった.

心拍数は, いずれのガスによる気腹でもほとんど変化を示さなかったが, 空気による気腹では徐脈になる傾向を認めた (図3).

3. 心拍出量 (CO) の変化

心拍出量は, いずれのガスを用いた気腹においても, IAP10にて増加, IAP20にて減少, 気腹解除により気腹前値に回復する傾向が見られた (図4).

4. 肺動脈閉塞圧 (PAOP) の変化

CO₂による気腹では, 各 IAP で有意に上昇し, 気腹解除により気腹前値に回復した. N₂O による気腹でも, IAP20で有意に上昇し, 気腹解除により回復した (図4).

5. 平均肺動脈圧 (MPAP) ・ 中心静脈圧 (CVP) の変化

MPAP は, CO₂による気腹では, 各 IAP で気腹

前に比して有意に上昇し, 気腹解除により気腹前値に復帰した. 他のガスによる気腹では, 気腹により軽度上昇する傾向があった.

CVP も同様に CO₂による気腹により各 IAP で有意に上昇し, 気腹解除により回復した. 空気による気腹ではほとんど変化せず, N₂O による気腹では軽度上昇する傾向が見られた (図5).

6. 体血管抵抗 (SVR), 肺血管抵抗 (PVR) の変化

SVR は, CO₂による気腹では, IAP10で気腹前値に比し有意に低下し, IAP20では IAP10に比し有意に増加し, 気腹解除により回復した. N₂O による気腹では, 気腹前値に比し IAP20で有意に増加した. 空気による気腹ではほとんど変化しなかった.

PVR は CO₂による気腹において, 有意ではないが増加する傾向を示し, 他のガスによる気腹では, ほとんど変化しなかった (図6).

考 察

腹腔鏡下手術においては, 気腹操作により種々

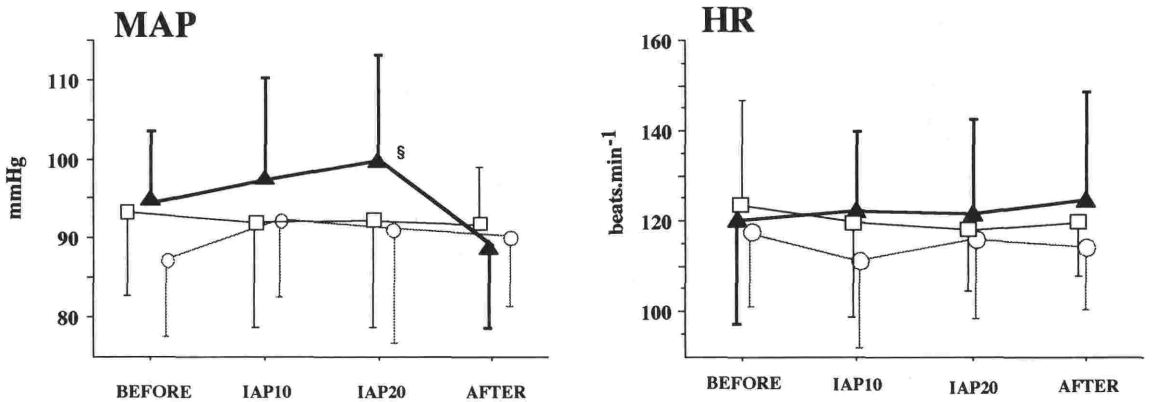


図3 平均血圧および心拍数の変化(mean ± SD (n=5))
 § : P < 0.05 (vs after)
 ○ : air □ : N₂O ▲ : CO₂

の循環反応が引き起こされる²⁻⁴⁾。現在気腹には炭酸ガスが多く用いられているが、気腹による腹腔内圧上昇に伴う腹腔内臓器や大血管に対する機械的圧迫による影響と、使用ガスの血中移行による循環系への直接作用および神経内分泌系を介す

る影響を、それぞれ使用ガスによって検討した報告はない。本研究では、気腹の機械的影響は空気をういた気腹で観察され、CO₂やN₂Oによる気腹は、これに加えてこれらのガスの血中移行の影響を受けると仮定した。気腹にこれら3種類のガス

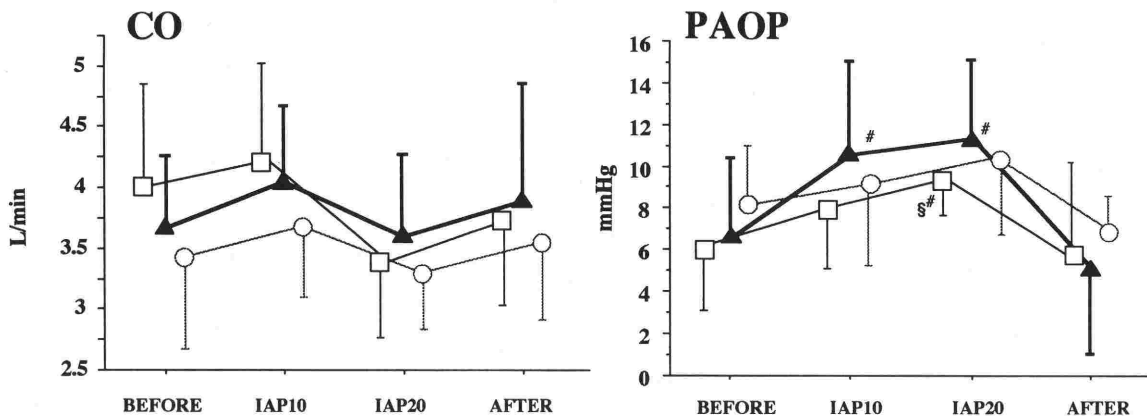


図4 心拍出量および肺動脈閉塞圧の変化(mean ± SD (n=5))
 # : P < 0.05 (vs before) § : P < 0.05 (vs after)
 ○ : air □ : N₂O ▲ : CO₂

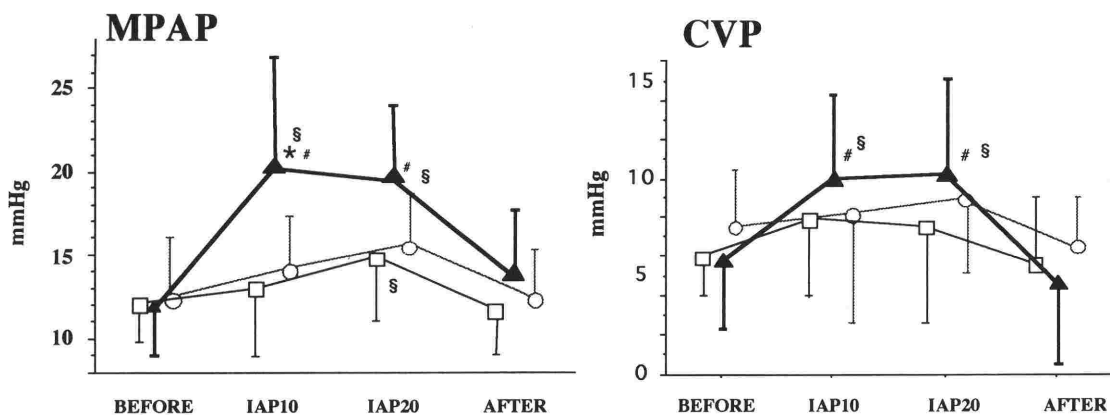


図5 平均肺動脈圧および中心静脈圧の変化(mean ± SD (n=5))
 # : P < 0.05 (vs before) § : P < 0.05 (vs after) * : P < 0.05 (vs other gases)
 ○ : air □ : N₂O ▲ : CO₂

を用いて、その循環反応を比較することにより、それぞれのガスの循環に及ぼす影響を区別することができると考え、実験を行った。

PaCO₂はCO₂を用いた気腹により、IAP10で約6 mmHg (16%)、IAP20で約8 mmHg (23%)有意に上昇した。他のガスを用いた気腹ではCO₂分圧の上昇は認められなかった。大岡らの報告でも、換気条件を一定にした場合、N₂Oを用いた気腹ではPaCO₂は不変であったが、CO₂による気腹開始20分後にはPaCO₂が有意に上昇している⁵⁾。また、西尾らも一定の換気条件下では、CO₂による気腹10分でPaCO₂が有意に上昇したが、N₂Oでは不変であったと報告している⁶⁾。一定の換気条件下における今回の結果で見られたPaCO₂の上昇は、気腹に用いたCO₂の腹膜からの吸収によると思われる、気腹による循環動態の変化の差異に参与したと考えた。

PaO₂は、N₂Oや空気をを用いた気腹により有意に低下し、CO₂による気腹でも低下する傾向を示した。気腹時のPaO₂の低下の原因として、Cunninghamらは気腹による低換気、肺内シャントの増加(横隔膜の上昇に伴う機能的残気量の低下)と、心拍出量の減少(下大静脈圧迫に伴う心拍出量の減少による混合静脈血酸素分圧低下、不整脈

による心拍出量の低下)をあげている⁷⁾。しかし、今回の結果では心拍出量は、IAP20では低下する傾向が見られたが、IAP10ではむしろ増加する傾向が観察されたにも拘わらず、PaO₂はIAP10において低下した。このことから、PaO₂の低下には機能的残気量の低下の関与が大きいと考えられた。ただし、循環動態に影響を与えるほど重篤な低酸素血症には至らなかった。

平均動脈圧や心拍数は、気腹による上昇の報告が多く、PaCO₂高値による交感神経刺激が原因と考えられている³⁾。今回の結果でも有意差はなかったが、CO₂気腹で平均血圧の上昇が大きく、他のガスによる気腹ではほとんど変化が見られなかった。したがって、CO₂の交感神経系への影響が大きい可能性が考えられた。心拍数はCO₂およびN₂Oによる気腹では不変であり、空気による気腹ではIAP10で減少傾向を示した。したがって空気気腹による徐脈傾向には腹膜過伸展による迷走神経反射などが作用した可能性が考えられた^{8,9)}。

気腹による心拍出量への影響には、増加と減少の両方の報告があるが、気腹圧、気腹ガス、体位や麻酔方法など多くの条件が関与していることが知られている^{3,4,10)}。気腹圧に関して、Smithらは犬を用いてCO₂気腹を行い、IAP 5-25 cmH₂O

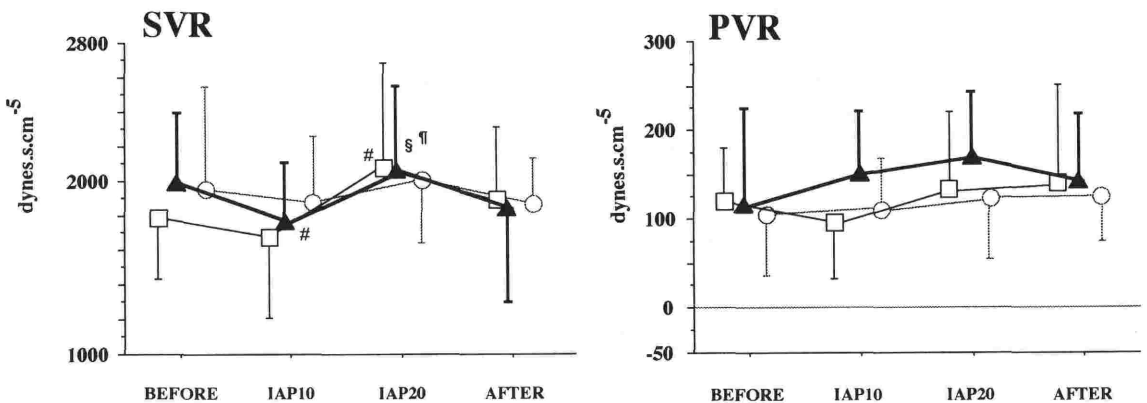


図6 体血管抵抗および肺血管抵抗の変化(mean ± SD(n=5))
 # : P < 0.05 (vs before) § : P < 0.05 (vs after) ¶ : P < 0.05 (vs IAP 10)
 ○ : air □ : N₂O ▲ : CO₂

では心拍出量は増加するが、30 cmH₂O を越えると減少すると報告した³⁾。低気腹圧においては、腹腔内圧上昇に伴い、腹腔内臓器からの血液が下大静脈にシフトする結果、静脈還流が増加し、心拍出量が増えるが、高气腹圧においては下大静脈が圧迫されて心拍出量が減少すると説明している。鈴木らは犬を用いて、CO₂による気腹下では、気腹圧が20 mmHg を越えると低下すると報告した¹¹⁾。Ivankovich ら¹⁰⁾、El-Minai ら¹²⁾の N₂O を用いた気腹では心拍出量の減少が、また山田らの空気をういた気腹では、IAP20 mmHg までは増加、IAP30 mmHg 以上では減少が報告されている。前述のメカニズムに加え、気腹に CO₂ を用いた場合は交感神経刺激の影響によって、より高腹腔内圧まで心拍出量が維持される可能性があると考えられる^{10,12,13,16)}。

我々の結果では、心拍出量はいずれのガスでも IAP10 で増加、IAP20 で減少する 2 相性の傾向が見られた。高气腹圧では、気腹の大血管の圧迫による静脈還流の減少や、下肢への血液貯留などの機械的影響がより著明になると考えられた。IAP20 において CO₂ 気腹で、心拍出量が他のガスより高値に維持されたのは炭酸ガスの交感神経刺激が関与している可能性がある。N₂O を用いた気腹では、IAP20 において心拍出量が著明に低下する傾向が見られた。N₂O は軽度の交感神経刺激作用¹⁴⁾ および直接作用として心筋収縮力抑制作用²²⁾ あることが知られている。IAP20 においては気腹の機械的作用に加えて、心筋の直接抑制作用が関与した可能性が考えられた。

また、SVR も、心拍出量に影響を及ぼすが、今回の結果では、IAP20 において炭酸ガス及び N₂O を用いた気腹により SVR は有意に増加した。この変化は空気をういた気腹では認められなかったことから、気腹による機械的影響だけでは説明できない。SVR は IAP10 において、CO₂ で有意に低下したことから、体動脈に対する CO₂ の血管拡張作用がまずおこり、さらに気腹を続けると、交感神経刺激作用が著明になり、体血管抵抗が増加すると思われた¹⁵⁾。N₂O についても IAP20 での上昇が見られ、N₂O の交感神経刺激作用¹⁴⁾ が関与している可能性がある。

平均肺動脈圧、中心静脈圧、肺動脈閉塞圧は、気腹による胸腔内圧上昇にともなう心外圧の上昇

や、静脈還流の変化、心機能、内分泌変化等が関与して変化するとされる^{15,17)}。高 CO₂ 血症やそれに伴うアシドーシスは肺血管抵抗を上昇させ、肺動脈圧を上昇させることが報告されている^{18~20)}。今回の結果では、MPAP、CVP、PAOP ともに CO₂ による気腹により、有意に上昇した。PVR も CO₂ 気腹時のみ増加する傾向があった。このことから、気腹による機械的影響に加え、肺動脈に対する CO₂ の直接作用の関与も考えられた。N₂O については、PAOP が IAP20 でのみ有意に上昇したが、それ以外は空気との差があまり認められなかった。肺高血圧症を有する場合、N₂O 吸入にて肺血管抵抗が増加するとの報告があり、交感神経系刺激を介すると説明されている²¹⁾ が、我々の結果からは N₂O が肺循環に対して強く作用するとは考えられなかった。また Ivankovich ら¹⁰⁾ は、気腹に N₂O を用いた場合、CO₂ を用いた場合と同様の変化をするとしているが、IAP が 20 から 40 mmHg と高圧であり、本研究の結果と異なるのは気腹圧の違いのためかもしれない。

まとめ

3 種類の異なるガスを気腹に用いて、それぞれのガスによる気腹の循環動態への影響の差異を比較した。高腹腔内圧による気腹の機械的影響は心拍出量の減少として空気、N₂O、CO₂ のいずれのガスにおいても認められた。MPAP、CVP、PAOP は、CO₂ 気腹時に有意に上昇し、また N₂O による気腹時も PAOP が上昇した。さらに CO₂ や N₂O による気腹では、SVR も高腹腔内圧で上昇したことから、血液中に吸収された両ガスの交感神経刺激作用が循環動態の変化に関与すると思われる。

本稿の要旨は、第16回日本循環制御医学会総会 (1995年、京都市) において発表した。

文献

- 1) Joris JL : Anesthetic management of laparoscopy. In : Anesthesia. 4th ed Miller RD eds. New York, Churchill Livingstone, 1995, pp2011-2029
- 2) Marshall RL, Jebson PJR, Davie IT, et al : Circulatory effects of carbon dioxide insufflation of the peritoneal cavity for laparoscopy. Brit J Anaesth 44 : 680-684, 1972
- 3) Smith I, Benzie RJ, Gordon LMN, et al : Cardiovascular

- effects of peritoneal insufflation of carbon dioxide for laparoscopy. *Br Med J* 14: 410-411, 1970
- 4) Joris JL, Noirot DP, Legrand MJ, et al : Hemodynamic changes during laparoscopic cholecystectomy. *Anesth Analg* 76: 1067-1071, 1993
 - 5) 大岡卓司, 川野美子, 小坂義弘ほか: 腹腔鏡的胆嚢摘出術時の動脈血ガス分圧の変動. *麻酔* 42: 398-401, 1993
 - 6) 西尾一寿太, 野口純一, 小西睦美ほか: 腹腔鏡時の気腹ガスの種類および麻酔法が呼吸器系に及ぼす影響. *麻酔* 42: 862-866, 1993
 - 7) Cunningham AJ, Brull SJ : Laparoscopic cholecystectomy : Anesthetic implications. *Anesth Analg* 76 : 1120-1133, 1993
 - 8) Arthure H : Laparoscopy hazard. *Br Med J* 21 : 492, 1970
 - 9) Carmichael DE : Laparoscopy-cardiac considerations. *Fertil Steril* 22 : 69-70, 1971
 - 10) Ivankovich AD, Miletich DJ, Albrecht RF, et al : Cardiovascular effects of intrapreitoneal insufflation with carbon dioxide and nitrous oxide in the dog. *Anesthesiology* 42: 281-287, 1975
 - 11) 鈴木孝典, 井戸健一, 川本智章ほか: 実験的高気腹圧操作による呼吸循環系の変動. *麻酔* 43: 873-879, 1994
 - 12) El-Minai MF, Wahbi O, Edbagouri IS : Physiologic change during CO₂ and N₂O pneumoperitonium in diagnostic laparoscopy: A comparative study. *J Reprod Med* 26: 338-343, 1981
 - 13) 山田則道: 気腹時の循環動態に関する実験的研究. *東女医大誌* 56: 1062-1081, 1986
 - 14) Fukunaga AF, Epstein RM : Sympathetic excitation during nitrous oxide-halothane anesthesia in the cat. *Anesthesiology* 39: 23-36, 1973
 - 15) Johannsen G, Andersen M, Juhl B : The effect of general anaesthesia on the haemodynamic events during laparoscopy with CO₂-insufflation. *Acta Anaesthesiol Scand* 33: 137-141, 1989
 - 16) Rasmussen JP, Dauchot JP, DePalma RG, et al : Cardiac function and hypercarbia. *Arch Surg* 113 : 1196-1200, 1978
 - 17) Kelman GR, Swap GH, Smith I, et al : Cardiac output and arterial blood-gas tension during laparoscopy. *Br J Anaesth* 44: 1155-1162, 1972
 - 18) Fishman AP, Fitts HW, Cournand A : Effects of breathing carbon dioxide on the pulmonary circulation. *Circulation* 22: 220-225, 1960
 - 19) Kilburn KH, Asmundsson T, Britt RC : Effects of breathing 10 percent carbon dioxide on the pulmonary circulation of the human subjects. *Circulation* 39 : 639-653, 1969
 - 20) Viles PH, Shephard JT : Relationship between pH, PO₂ and PCO₂ on the pulmonary vascular bed of the cat. *Am J Physiol* 217: 1170-1176, 1968
 - 21) Heerdt PM, Caldwell RW : The mechanism of nitrous oxide-induced change in pulmonary vascular resistance in a dog model of left atrial outflow obstruction. *J Cardiothorac Anesth* 3 : 568-573, 1989
 - 22) Price HL : Myocardial depression by nitrous oxide and its reversal by Ca⁺⁺. *Anesthesiology* 44 : 211-215, 1976

Hemodynamic Changes during Intra-abdominal Insufflation in Pigs — Comparison of Air, Nitrous Oxide and Carbon Dioxide —

Sanae Matsumoto, Kumiko Fujise, Akira Kato
Koh Shingu, Osamu Mikami*, and Tadashi Matsuda*

Departments of Anesthesiology and *Urology, Kansai Medical University, Moriguchi
Osaka, Japan

We investigated cardiovascular changes induced by intra-abdominal insufflation of three different inflating gases in five pigs. Anesthesia was induced with intramuscular ketamine and maintained with isoflurane in a mixture of O₂/air (FiO₂ 0.5) and vecuronium. Ventilation was maintained with a fixed volume per minute. Pneumoperitoneum was induced in each pig with air, nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) after deflation, at 60 min intervals. Heart rate, mean arterial pressure, central venous pressure (CVP), mean pulmonary arterial pressure (MPAP), pulmonary artery occlusion pressure (PAOP) and cardiac output were measured before insufflation, 5 min after inducing pneumoperitoneum : (intra-abdominal pressure (IAP) of 10 mmHg and then of 20 mmHg each for 5 min), and af-

ter deflation of each gas. PaCO₂ increased during CO₂ insufflation. Cardiac output increased during insufflation at an IAP of 10 mmHg and decreased when IAP was increased to 20 mmHg regardless of the gas employed. MPAP, CVP and PAOP during CO₂ insufflation, and PAOP during N₂O insufflation at an IAP of 20 mmHg, increased. Systemic vascular resistance decreased during CO₂ insufflation at an IAP of 10 mmHg and increased during CO₂ and N₂O insufflation at an IAP of 20 mmHg.

In conclusion, all gases exerted a mechanical effect, i.e., restriction of venous return when the IAP was 20 mmHg. In addition, absorbed CO₂ and N₂O seemed to have stimulated sympathetic nervous system and the elevated CO₂ probably dilated the vessels directly.

Key words : Pneumoperitoneum, Hemodynamics, Carbon dioxide, Nitrous oxide, Air

(Circ Cont 17 : 189~196, 1996)