

血圧自動制御の試み

光藤 努* 田中義文* 宮崎正夫*

要 旨

術中に低血圧を得るために、患者血圧を入力とした血管拡張剤の持続注入をコントロールする装置を開発し、臨床に用いた。制御方法は、① ON-OFF 制御、② 比例制御、の二法で、薬剤は trimethaphan, sodium nitroprusside, trinitroglycerin の3種を用いて血圧の自動制御に成功したが、①法においては、症例によって after drop を生じ、血圧の安定しないものがあった。②法では目標設定圧に達しない症例があったが、血圧の安定性はすぐれていた。

はじめに

低血圧麻酔法は術中大量出血の予防、動脈瘤などの血管壁緊張緩和による手術操作の容易さのためなどに、しばしば用いられる。とくに trimethaphan, sodium nitroprusside や nitroglycerin の持続点滴によって低血圧を得る方法が広く用いられている。さらにこれら薬剤は、術中のみならず、術前・術後における高血圧管理にも使用されている。しかし、投与を受ける患者の循環動態等に差があるため、投与速度を決定し安定した低血圧を得ることが

困難であり、また麻酔中絶えず薬剤の注入と血圧に気を配っていなければならない繁雑さがある、そのためにわれわれは、血管拡張剤注入を自動化させ低血圧を安定させることを試みた。

研究 方法

患者の橈骨動脈に 20 G テフロン針を留置し、圧トランスデューサーにて観血的に動脈圧をモニターする。この圧波形は 0~200 mmHg に対して 0~2.0 V の電圧として出力されている（三栄測器心電血圧計）ので、これを入力とした。

この入力と目標設定圧 (reference pressure) の差で infusion pump の回転を制御するのであるが、ここで2種類の制御方法を考え、機械を作製した。ひとつは圧差の有無にて infusion pump の回転を開始・停止する方法 (ON-OFF 制御) と、他は圧差に比例して infusion pump の回転を増減させる方法 (proportional control, 比例制御) である。

ON-OFF 制御では、operator Amp を voltage

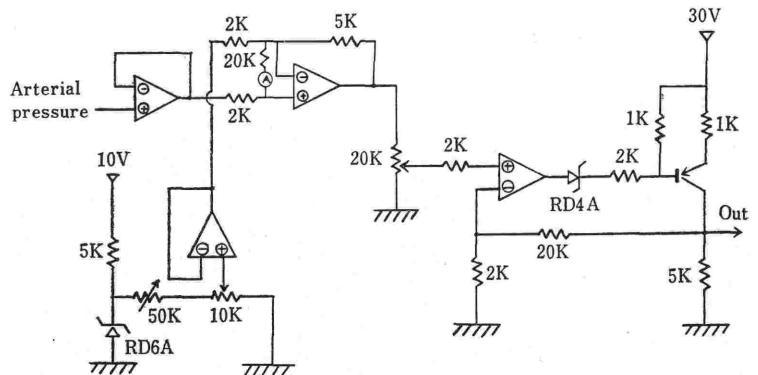


図 1. 比例制御装置の回路

* 京都府立医科大学麻酔学教室

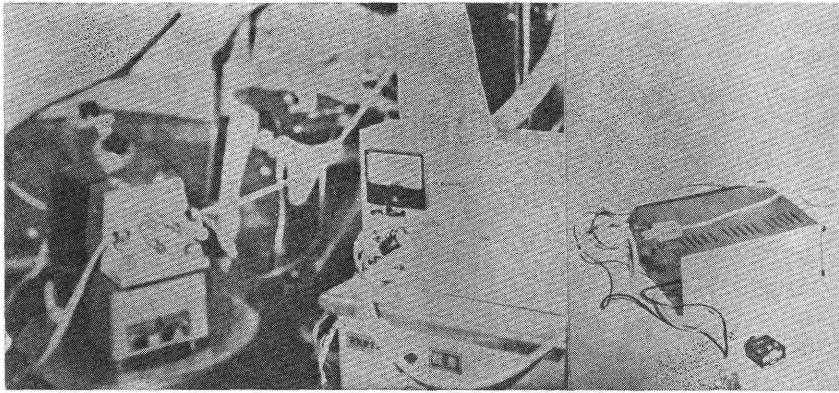


図 2. 左より, Infusion pump (Watson-Marlow). 比例制御装置, ON-OFF制御装置

comparater として作動させ, リレーの使用にて infusion pump の電源を ON, OFF する装置を作った. 比例制御では, 入力電圧 (患者血圧) と目標圧の差を operator Amp にて増幅し, infusion pump (Watson-Marlow, MHRE 200) の速度コントロール端子へ接続して pump の回転を制御する装置を作製した(図 1, 2).

入力サンプルとしての血圧は, 1 拍ごとの収縮期血圧を用いた. 目標設定圧は症例に応じ収縮期血圧 80~100 mmHg とした.

使用薬剤は, 0.01% sodium nitroprusside の 5% ブドウ糖溶液, 0.125% trimethaphan の lactate-Ringer 溶液, 0.025% trinitroglycerin の lactate-Ringer 溶液の 3つを使用した. 注入経路は肘正中静脈に確保した輸液路の, もっとも

近部位に三方活栓を用いて, 術中輸液と同時に注入できるようにした(図 3).

対象症例は, 4 例が脳動脈瘤クリッピング 1 例が meningioma 摘除術で, 麻酔法は前者が GOF, 後者が NLA である.

成 績

1) 制御装置の検定

i) ON-OFF 制御装置 三栄測器製の心電血圧計には, 表示された血圧の上限・下限の警報が内装され, 出力端子にもこの警報の ON-OFF が出力されている.

そこでこれを利用して infusion pump の電源を ON-OFF できるようにした. われわれの装置では, 設定圧-患者血圧の差の有無, 警報の有無, われわれの制御装置による infusion pump の ON-

OFFの三者はすべて時間のずれなく一致し, また infusion pump の回転は, ON のとき常に設定どおり一定していた.

ii) 比例制御装置 この装置も患者血圧との反応に時間ずれはなかったが, infusion pump の回転が, 血圧差が 40mmHg 以下のときは 0.036ml/min/mmHg であるのに対し, 40mmHg 以上では, 0.089ml/min/mmHg と比例定数が一定しなかった(図 4).

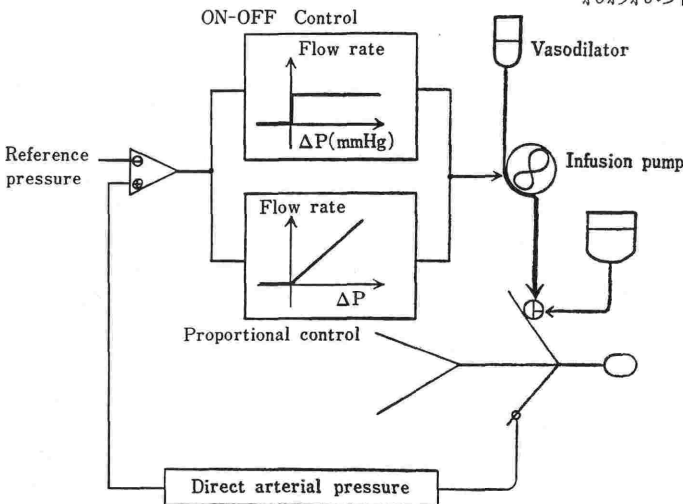


図 3. ON-OFF 制御と比例制御の模式図

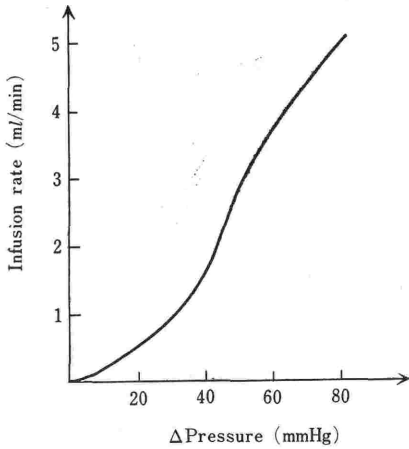


図 4. 比例制御装置における圧差と注入速度との関係
 圧差が 0~30 mmHg まで徐々に比例定数が増加し 30~50 mmHg で急激に増加, それ以上ではほぼ一定となる.

2) 臨床使用症例

i) ON-OFF 制御による低血圧麻酔症例

症例 1 (図 5): 39歳男性. 投与前血圧が 150/95. 目標収縮期圧を 110 mmHg として, sodium nitroprusside を $5 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ にて投与を開始した. 1分後より血圧下降し, 2分後には目標圧に達し呼吸性血圧変動に合わせて注入が ON-OFF されている. 3分後には全く注入が停止し, 血圧は 100 mmHg まで下降した. 4分後より血圧が回復し, 注入の ON-OFF が再び細かく行われ, その後収縮期血圧が 100~130 mmHg の範囲で約 3分周期の増減を繰り返した. 結局平均投与速度は $2.5 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ であった. 約20分投与した後中断すると, 血圧は速やかに 125~130 mmHg に回復した.

つぎに trimethaphan を $100 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ で目標

収縮期圧を 100 mmHg として注入した. Sodium nitroprusside と同じく 1分後に血圧下降し, 2分後に目標圧に到達し, 注入の ON-OFF が始まった. その後呼吸性の約 10 mmHg の変動を除いては, 変動幅は 5 mmHg 以内できわめて安定していた. このときの平均投与速度は $55 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ であった.

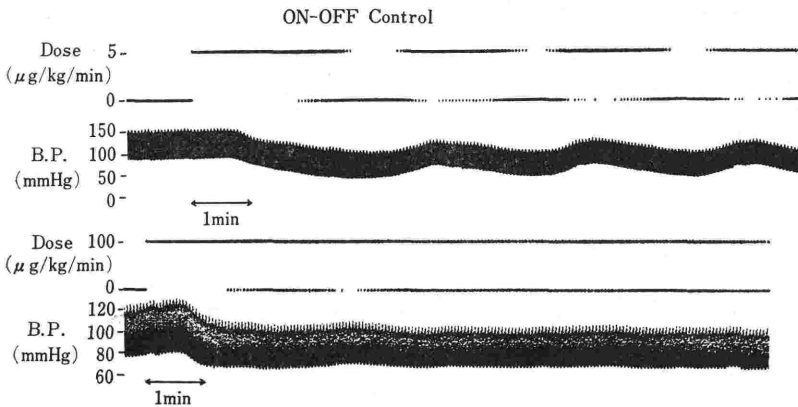


図 5. 症例 1

上が sodium nitroprusside 投与時, 下が trimethaphan 投与時. それぞれの上段の 2本の線は制御装置の ON-OFF を示している.

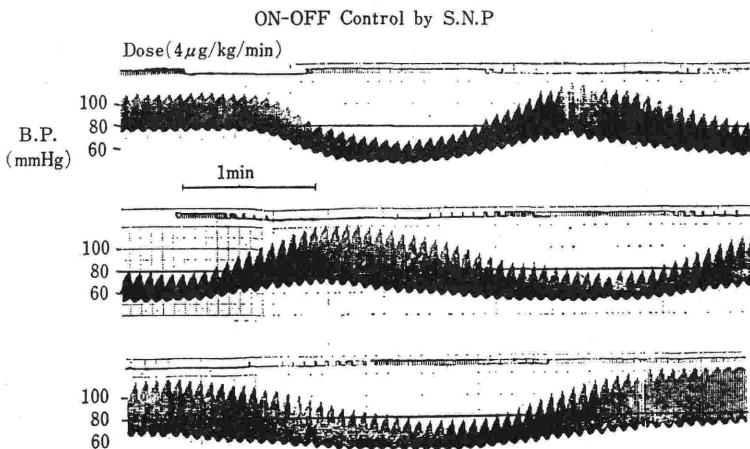


図 6. 症例 2

少し不鮮明であるが上部に制御装置の ON-OFF を記録してある. 安定した低血圧がえられなかったため, この後, 投与を中止し, GOF の深麻酔にて低血圧を維持した.

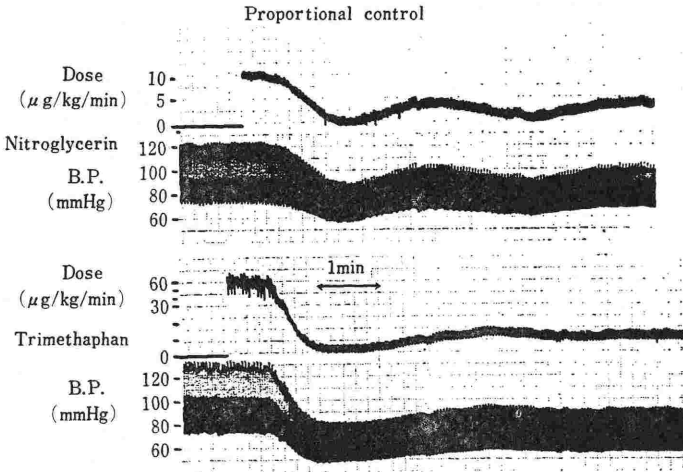


図 7. 症 例 3

上段に投与速度, 下段に血圧を記録している. 投与速度の目盛りが比例していないので注意を要する.

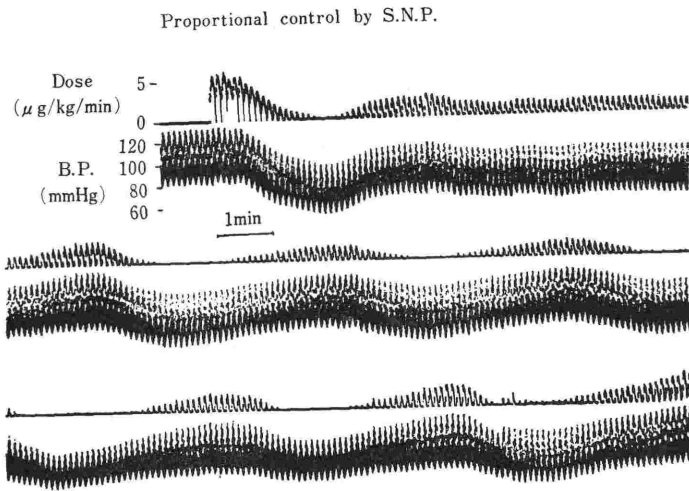


図 8. 症 例 4

呼吸性変動が非常に大きく 20mmHg に達し, 数分周期の注入期間でも一呼吸ごとに注入・停止が繰り返されている.

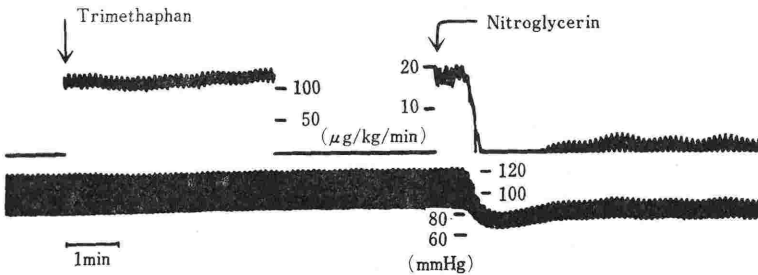


図 9. 症 例 5

Trimethaphan 無効例に nitroglycerin が著効した症例.

症 例 2 (図 6): Sodium nitroprusside 使用例.

36歳の男性. 投与前血圧110/80. 4 µg/kg/min で投与すると, 1分後に目標圧 80 mmHg に達したがさらに 65 mmHg まで下降した. その後血圧は上昇し, むしろ投与前より高い 115/80 に達し, 再び下降に転じた. この上昇・下降を約 3分周期で繰り返す, 血圧が安定しなかった.

ii) 比例制御による低血圧麻酔症例

症 例 3 (図 7): Trimethaphan と nitroglycerin 使用例.

62歳の女性. 投与前血圧 125/75, 目標収縮期圧 80 mmHg で nitroglycerin 11.5 µg/kg/min で注入を開始, 約30秒後より血圧下降をはじめ, 約2分後には目標血圧より少し高い 85/55 に達したが, すぐに回復し, その後は収縮期圧 90~100 mmHg, 投与速度 1.5~3.0 µg/kg/min で平衡に達した. この後投与を中断すると血圧は 130/75 と回復した.

つぎに trimethaphan を 60 µg/kg/min で投与を開始, 1分後より血圧下降をはじめ, 2分後に 90mmHg に達したが, その後は 95 mmHg, 11.3 µg/kg/min で安定した.

症 例 4 (図 8): Sodium nitroprusside 使用例.

Meningioma 摘除術施行の 46 歳の女性. NLA で維持したので血圧を低く安定させるために使用した, 目標収縮期圧を 100 mmHg とし, 投与前血圧が 120~130mmHg で, 約 3.5 µg/kg/min の速度で開始, 2分後に目標圧に達し, 90~110mmHg の範囲で安定した. 約10分後より数分ごとの血圧変動の周期がみられたが, 極端な血圧の変化はなかった. 約2時間投与し, 平均投与

速度は $0.6 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ であった。

症例 5 (図 9): Trimethaphan と nitroglycerin 使用例。

46歳の女性。投与前血圧 125/85 で目標圧 85 mmHg で trimethaphan $120 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ を約 4 分投与しても無効であったため、nitroglycerin に変更すると、投与後約 30 秒で急激に血圧下降し、80 mmHg に達したが、1 分後に回復、その後 90 ~ 95 mmHg、投与速度は $2.5 \sim 3.0 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ で安定した。

考 案

血圧を変動させる要素は数多く、古くからその研究が行われているが、これらを simulate する試みもなされている^{1,2)}。しかし実際に血圧を制御した報告は少ない。Noodergraaf³⁾は血圧の制御方法として、血圧と目標血圧の差と時間経過に対し、比例制御、微分制御、積分制御の 3 つをあげている。McNally ら⁴⁾は、イヌに対し、比例制御と微分制御を併用し数分間の血圧コントロールに成功している。

今回われわれはこれらとちがう ON-OFF 制御を考えたのは、実際の臨床では、投与速度を微妙に変化させて血圧をコントロールするよりむしろ、after drop を生じるときに投与を中断して血圧をコントロールすることが多いという経験による。

今回の症例より二、三検討を加えてみる。まず入力サンプルに 1 拍ごとの収縮期圧をとったことについて、もちろん平均動脈圧でも制御可能なのであるが、もっともちがう点は呼吸性変動の介入である。平均動脈圧では、3 秒間の damping された値 (三栄測器製心電血圧計) のため呼吸性変動は $2 \sim 3 \text{ mmHg}$ であるのに対し、1 拍ごとの収縮期では 10 mmHg 以上にも達する。このため、収縮期サンプルで微分制御を行うことは不可能である。しかし、ON-OFF 制御では血圧が目標収縮期圧に達すると、この呼吸性変動内で ON-OFF が行われ、結果的に血圧がその範囲内で安定して維持される。つまり、mechanical ventilation が制御方法に大きな役割を果たしているのである。

つぎに出力としての薬剤の投与方法について、われわれは末梢静脈路より投与したが、大循環に達するまでに死腔があるため、入力-出力と効果

発現までに時間ずれが生じ、これが症例 2 と 5 の after drop を生じるもっとも大きな原因と考えられる。さらに症例 1, 2, 4 にみられる血圧周期変動も、時間ずれが原因であろう。ただこの周期変動が sodium nitroprusside に著明なのは、その作用発現時間と持続時間の長さも大いに考えられるので、このような薬剤は中心静脈路から投与するのが効果的であろう。

最後に ON-OFF 制御と比例制御を比較する。われわれの用いた比例制御回路では、圧差が少なくなるほどポンプの回転が落ち投与速度が激減するという装置そのものに改善の余地はあるが、どうしても目標設定圧より高く維持されてしまう。しかし投与速度が適正量よりはずれてもいても、速やかに安定した血圧と適正投与速度が平衡する点で、非常に安全かつ有用であると思われる。ON-OFF 制御では、投与開始速度があまりに速過ぎない限り、目標血圧への到達性と、mechanical ventilation を併用したときの血圧の安定な維持においてすぐれている。さらに速度コントロール端子をもたない一般の infusion pump でも使用できる長所も特記すべきであろう。

ま と め

観血的動脈圧のみを入力とする自動血管拡張剤注入装置を作製し、ON-OFF 制御、比例制御の 2 方法によって低血圧麻酔症例に使用したが、ともに低血圧の導入・維持に満足すべき結果が得られた。今後臨床に大いに活用しうると考えられる。

文 献

- 1) Guyton, A. C.: Textbook of Medical Physiology, 5th ed. W. B. Saunders, Philadelphia, p. 265 ~ 294, 1976.
- 2) 諏訪邦夫: 循環動態のシステム解析 1. 麻酔 23: 1281~1286, 1974.
- 3) Noodergraaf, A.: Circulatory System Dynamics, Academic Press, Inc., New York, p. 250~277, 1978.
- 4) McNally, R.T., Engelman, K.: Controlled reduction in blood pressure through an automated drug infusion system: Baan, J., Noodergraaf, A., Raines, J., eds: MIT Press, Cambridge, p. 458, 1978.

Automated vasodilator infusion system for the control of blood pressure

Automated vasodilator infusion system that input is only direct arterial pressure was devised, and used for the clinical cases of induced hypotension.

Two control methods which the authors used were ON-OFF and proportional. In the former control, infusion pump is switched by the presence of the difference between reference and patient's blood pressure. In the latter, infusion rate is determined proportionally by the pressure difference.

Blood pressure of the patients was well controlled by both methods, particularly by ON-OFF control.

Key Words ; Automated induced hypotension
Vasodilators
ON-OFF control
Proportional control

なお、本論文の要旨は第27回日本麻酔学会総会で発表した。