原著論文

麻酔の自動制御の試み

管 桂一* 奥秋 晟* 田勢長一郎*

藤井真行* 鈴木美保子*

要旨 血圧をパラメーターとしてハロセンの濃度をコントロールする自動制御装置を試作し、動物実験並びに臨床応用を行い、麻酔における自動制御の導入について検討した。制御装置は sampling time ごとに観血的動脈圧から得られる収縮期血圧と、あらかじめ入力された基準血圧を比較し、基準値より 10%以上高い場合にはハロセン濃度を 0.2%ずつ上げ、10%以上低い場合には濃度を 0.2%ずつ下げるように制御した。

その結果、雑種成犬を用いた実験において制御装置は設計どおりに作動した。臨床例においては、手術開始後麻酔深度も十分に循環が安定している時から自動制御に移った場合は、その後も血圧は一定に保たれ麻酔も安定していた。しかし手術開始時の麻酔深度が安定しない時期や循環が変動している時期に自動制御を開始したものは、血圧の変動に合わせ濃度が変化するものの十分な麻酔深度は得られなかったり、また急激な血圧変動に追従できずに自動制御を中止する場合があった。

以上より一部の麻酔においては自動制御が可能なものの、実際に安全な麻酔を行うためには種々の問題が残った。第1に sampling time の長さ、第2に入力された血圧の処理の方法、第3にハロセン濃度の変動幅などの問題である。今後これらの問題を含め更に検討が必要であると思われる。

I はじめに

今日のコンピューターの進歩は著しく、それに伴い多変量解析が可能となり自動制御が多方面に応用されると同時に、麻酔科領域においても同様に自動制御の応用が種々試みられている。しかし麻酔は非常に多くの情報を瞬間的に

総合判断し、それをもとにして適切な処置を行うことが必要であり、多変量解析の中でも最も複雑なものの1つである。それゆえ麻酔を完全に自動制御することは不可能に近いと思われるが、今回我々は実際の麻酔に自動制御をどこまで導入でき得るかという問題に対し興味を持ち、麻酔時の血圧および心拍数をパラメーターとしてハロセン濃度をコントロールする自動制御装置を試作した。そして動物実験並びに臨床応用を行い、若干の知見を得たので報告する。

*福島県立医科大学麻酔科学教室

II 方 法

1. 装置

写真1は制御装置と気化器の外観、写真2は装置の表示部分である。また図1にそのブロックダイヤグラムを示す。この装置はパラメーターとして収縮期血圧のみ、心拍数のみ、またはその両者という3通りの選択が可能である。また目標とする血圧及び心拍数の基準値は0～400、sampling timeは0～999秒の範囲で設定可能な様に設計されており、実際に観血的動脈圧と心電図が入力されれば、収縮期および拡張期血圧と心拍数がデジタルに表示される。制

写真1 制御装置の外観

写真2 制御装置の表示部

図1 ブロックダイヤグラム

御装置は sampling time ごとにこれらの値と基準値を比較し、基準値より10%高い場合は上向きの、10%以上低い場合は下向きの、±10%未満の場合は水平方向の矢印を表示する。この矢印に従い制御装置がパルスモータを通じて気化器のダイヤルを連動させ、ハロセンの濃度を0.2%ずつ変化させる。その結果血圧や心拍数が上昇すればハロセンの濃度は上昇し、逆に血圧や心拍数が低下すればハロセンの濃度は低下する様に作動する。今回はパラメーターを血圧のみとし、sampling timeは30、60、90秒間の3通りについて自動制御を試みた。

2. 動物実験

雑種成犬を用いペントバルビタールで麻酔導入後気管内挿管を行った。次に心電図と観血的動脈圧を制御装置に入力してGOF麻酔の自動制御を開始した。まず血圧の変動に対応してハ

ロセン濃度が設計通りに変化するか否かを検討した。次にアドレナリン投与による急激な血圧の上昇に対する制御状態や、あるいは自動制御中に基準の血圧を変化させた場合の反応を観察した。

3. 臨床応用

ASA 1～2度の症例においてサイオペンタール, S.C.C. を用い気管内挿管後, パンクロニウム投与下に人工呼吸器を使用して一定換気とし, 維持麻酔は GOF で行った。次に心電図と橈骨動脈からの観血的動脈圧を制御装置に入力し, 自動制御を開始した。基準の血圧は個々の症例に応じ決定したが, およそ術前の収縮期血圧を目安にした。自動制御の開始時期は手術開始時および手術開始後循環の安定した時に分けた。これらの臨床例においては安全性を考慮し, 自動制御装置の気化器を使用せず, 装置に示されたハロセン濃度に実際の麻酔器に接続されている気化器を手動で合わせた。ただし自動制御が困難と思われた時には, 直ちに自動制御を中止した。なお輸液は症例により乳酸加リンゲル液 5～10 ml/kg/h を単独で, またはそれに 5% グルコース 3～5 ml/kg/h を併用し, 必要に応じ輸血も行った。

図2 アドレナリンにより血圧を上昇させた時の制御ハロセン濃度

III 結 果

1. 動物実験

血圧の変動に従ってハロセン濃度は設計通りに変化し, 血圧はほぼ基準値に保たれた。アドレナリンを投与し血圧を急激に上昇させた時の血圧の変化と制御ハロセン濃度を図2に示す。アドレナリン投与により収縮期血圧が 110 mmHg から 270 mmHg まで上昇した場合, sampling time 60 秒ではもとの血圧に戻るまでに約 9 分間必要とした。また収縮期血圧 110 mmHg・ハロセン濃度 0.2%の時に, 基準血圧を 80 mmHg に変化させると, 基準値 $\pm$ 10%になるまで sampling time 30 秒では約 3 分, 90 秒では約 9 分を要した。

2. 臨床応用

症例のなかから 2 例の麻酔記録を図3, 4, 5, 6に示す。図3は手術中麻酔深度が十分に循環が安定している時期に自動制御を開始した例である。基準血圧 110 mmHg・sampling time 60 秒に設定したが, 血圧はほぼ一定で麻酔は安定しており, 自動制御はうまく行われた。しかしながら臨床的に安定していても, 制御装置はわずかな血圧変動にも反応してハロセン濃度は頻繁に変化した。図4は図3の点線内の自動制御状態である。血圧はほぼ一定であるが制御装置の矢印表示が頻繁に変化した。

図5は手術開始時から自動制御を行った例である。血圧の変動に従いハロセンの濃度が徐々に変化するものの, 手術の刺激に麻酔深度が追従できず心室性期外収縮が出現した。リドカインの静注により不整脈は消失し, 基準の血圧を設定しなおして自動制御を続けたが, 2 段脈も出現したため, このまま続けるのは無理と判断して自動制御を中止した。ハロセンをエーテル

No. 一 57 年 9 月 6 日。 姓名、性別、年齢、身長、体重、血圧、心電図、検査結果、手術経過

氏名 M.T 男 ④ 年齢 23才 体重 61kg 術後要約方法
病室 No. 218 8°
身長 163cm ユーロジン 2mg (P.O.)

術前診断 左真珠腫性中耳炎
術後診断 同上
予定手術 シロキサン膜除去 伝音連鎖再建

薬剤 アトロピン 0.4mg
ベチロールファン 50 mg
アタラックス P 50 mg
効果 good

時間 8° 30' 10° 30' 11° 30'

O₂

N₂O

ETHER

FILIOTHANE

PENTHRANE

MTRA-VEN
Thiopental SCC
PARBROMUM

VIN

X線撮影
X線造影
X線透視
X線拍
X線体位
X線手鏡
X線T検査
X線S吸引

備考

単位固定
local 25m
05×プロカイ
万痛
ボスミン入
自動制御

総計
酸素リテール 1000
輸血 0 ml
出血量 γ ml
尿量 500 ml

吸入 Thiopental, SCC 維持 GOF 麻酔法 Partial rebreathing
マスク(エウエ) : 喉頭挿入 V L NN Mi
換気 経口・経鼻・経皮呼吸器開孔 経口・経鼻・経皮・目下・スプレー チューブ B-5
手術方法: シロキサン膜除去, 外耳道後壁形成 体位 Supine P.
手術時間 2 時間 00 分 麻酔開始時間 2 時間 40 分 麻酔薬 Heidbrink
麻酔終了時: 血圧 120 - 68 mmHg 脈搏数 76 分 呼吸数 16 分
反射 咽反射 (-) 欠乏 (-) 結膜 (-) その他 応答 (+) 瞳孔 (+)

手術医 O, H, K 麻酔医 K, K

図3 制御に成功した症例の麻酔記録

図 4 制御に成功した症例の血圧とハロセン濃度変化

[illegible]

図5 制御不能だった症例の麻酔記録

図6 制御不能だった症例の血圧とハロセン濃度変化

に変え、換気も手動に切り換えその後の麻酔は問題なく続行された。図6は図5の点線内の自動制御状態である。

IV 考 察

麻酔科領域における自動制御の導入は古くから試みられ、1957年にはFrumin¹⁾が酸素・笑気の混合ガスをを用いた麻酔において、呼気終末のCO₂濃度が一定となるよう自動制御する人工呼吸器を試作している。近年国内でも人工呼吸^{2),3)}、麻酔器^{4),5)}などに自動制御の応用がみられているが、実際に麻酔薬の濃度を自動制御したものは少く⁶⁾、また臨床応用を行ったものはみあたらない。実際に麻酔を行うにあたっては呼吸、循環、代謝など多数の情報を総合判断することが必要で、麻酔に自動制御を導入する際に何をパラメーターに選び、パラメーターどうしの関係をどのように位置づけるかは非常に難しい。我々は麻酔中最も重要なモニターのなかから血圧および心拍数を選び、これらをパラメーターとする自動制御装置を試作した。この装置は両者のパラメーターが相反する情報を提示した場合には、血圧を優先するよう設計されているが、今回は血圧のみを用い自動制御を行った。その結果長時間手術刺激が一定であるような場合において自動制御は可能と思われた。しかし麻酔の深度が十分手術刺激に耐えられない場合、つまり麻酔深度が浅い時や、急激な大出血および不都合な反射が出現するような循環の変動が大きい場合においては、使用が困難であると思われた。今回使用した装置に至るまで再三にわたる改良がなされたが、実際臨床に安全に使用できるためには、以下のような問題を含んでいると考えられる。

第1には'sampling time'の間隔である。今回

は30~90秒の間で設定したが、図2・3のように麻酔が安定している場合にも頻繁に濃度が変化してしまうので、間隔を延長しても良いと思われた。ところが'sampling time'を長くすればする程、急激な血圧の変動に追従できなくなる危険性が増すため単純に延長することはできない。症例に応じ適宜変化させるか、あるいは一拍ごとの収縮期血圧をパラメーターにして⁷⁾ 'sampling time'の概念をかえるのも1つの方法である。

第2は入力される血圧をどのように処理してパラメーターとして用いるかという問題である。今回は収縮期血圧を用いたが、血圧の呼吸性動揺を少なくするため積分時定数を変更し、さらにわずかな血圧の変動に応じてハロセン濃度が頻繁に動かないように、基準値±10%以上の変動に対し濃度が変化するように設計した。しかしそれでもなお麻酔が安定した状態でさえ濃度は頻繁に変わった。通常臨床においてはよほど循環が不安定な時以外、吸入麻酔剤の濃度を短時間で変えることはない。ただしこのような濃度の変化は血圧の変化が基準値±10%の範囲をわずかでも越えたことに対応し、装置が十分制御していることの現われでもある。この問題を解決するためには収縮期血圧の代わりに平均動脈圧を用いれば変化も少いであろうし、また時間経過に対し微分や積分⁸⁾を用いて制御するのも1つの方法である。

第3にハロセン濃度の変動幅があげられる。我々はハロセン濃度のきざみが0.2%ずつであること、パルスモーターと連動させやすいことなどの理由から、気化器としてPenlon社製のslingsdon気化器を用いた。しかし今回の方法では1回に変化する濃度を0.2%に固定したため、急激な血圧変動には対応できない。この点

を改善するためには血圧変動の程度に応じたアルゴリズムを予め用意しておき、対応させるような機構を加える必要がある。あるいはまた、ダイヤルを回転させ濃度を決定している現在の方法以外に、濃度をコントロールする方法も考えられ、気化器のダイヤルを一定にしたままで、気化器を通るガスと通らずにバイパスするガスを混合して濃度をコントロールすることも可能である⁶⁾。

以上のような問題点をふまえた上で今後装置は多少複雑となるが、呼気中の麻酔ガス濃度もパラメーターの1つとして検討中であり、また古和田ら⁹⁾の報告のように、麻酔時の脳波も自動識別することが可能であれば応用できるのではないと思われる。最近、前頭筋の自発筋電図、脳波、Train of Fourによる神経伝導および呼気CO₂濃度の4種類のパラメーターが、経時的にブラウン管に表示される麻酔深度モニターが発売されている。今後我々の装置との持続も可能かもしれない。しかしいずれにしても機械的に麻酔の深度を総合判断し、さらに適切に対処することは非常に難しい。

本実験の目的は麻酔を全て機械にまかせることではなく、自動制御がどこまで可能であるかを検討したものである。あくまで麻酔は人間が行うものであるが、ただ長時間緊張の連続である麻酔の一部を自動制御することにより、麻酔科医をより高度な患者監視に専念させ、その結果麻酔の安全性を高めることができれば良いと思われる。しかし使用を誤まれば間違った情報の五感から得られる情報の重要性を忘れてはならない。

に振り回される危険性があること、そして人間

V おわりに

血圧をパラメーターとして麻酔剤の濃度をコントロールする自動制御装置を試作し、麻酔における自動制御の導入を試みた。その結果一部には使用可能であるが多くの問題を含んでおり、今後更に検討が必要であると思われる。

参考文献

- 1) Frumin, M.J.: Clinical use of physiological respirator producing, N₂O amnesia-analgesia. *Anesthesiology* 18: 290~299, 1957
- 2) 山村剛康, 木村智政, 古川幸道: コンピューターによる人工呼吸器の自動制御。呼吸と循環 30: 777~780, 1982
- 3) 吉矢生人, 大楠陽一, 小早川護他: 従量式自動換気装置による動脈血炭酸ガス分圧の制御。麻酔 23: 441~447, 1974
- 4) 森岡亨, 伊佐二久, 榑山三蔵他: 電子制御によるレスピレーターつき麻酔器の研究。麻酔 23: 553~557, 1974
- 5) 住友雅人, 古屋英毅, 児新毅: マイクロコンピューター制御によるNDU A-I型全身麻酔器について。臨床麻酔 5: 1376~1380, 1981
- 6) 福井康裕, 辻隆之: 麻酔ガス(Halothane)のオンライン適応制御。第19回日本ME学会大会。634~635, 1980
- 7) 光藤努, 田中義文, 宮崎正夫: 血圧自動制御の試み。循環制御。2: 67~71, 1981
- 8) Noodergraaf, A.: *Circulatory system dynamics*. Academic Press, Inc., New York, 1978, 264~268
- 9) 古和田正悦, 佐藤成和, 松岡茂他: 麻酔時の脳波の自動識別。麻酔。20: 715~720, 1971

著者連絡先 管 桂一

〒 960 福島市杉妻町 4-45

福島県立医科大学 麻酔科学教室

A Self-Regulating System of Halothane Vapor Concentration

Keiichi KAN
Akira OKUAKI
Choichiro TASE
Masayuki FUJII
Mihoko SUZUKI

Department of Anesthesiology, Fukushima Medical College, Fukushima, Japan

An apparatus has been devised to control halothane anesthesia. It was designed that according to the change of blood pressure, the concentration of halothane vapor changed automatically.

The procedure of anesthesia was stable while variations of blood pressure was a little, but it was difficult to control anesthesia when blood pressure was fluctuated widely. So further improvement was felt to be necessary.

The Journal of Japan Society for Clinical Anesthesia Vol.4 No.1, 1984