1—D—16　　医用電子と生体工学　第19巻　特別号（1981）

非線形逆系を用いた 肺胞内炭酸ガス濃度を一定に保つ 呼吸制御系

New Method of Controlling Respiratory System with Its Inverse to Maintain Constant Alveolar CO_2-Concentration

○若松秀俊* 影井清一郎** 野城真理*　　*東京医科歯科大学　**横浜国立大学
H. Wakamatsu*, S. Kaguei** and M. Noshiro*　*Tokyo Medical and Dental University **Yokohama National University

緒言　呼吸器系を制御対象、肺胞内のCO_2濃度を制御量とするとき、体内の代謝量が変動しても、この制御量を一定に保つために必要な換気量を定める制御法則は双線形系である制御対象を線形近似して、それに対するPID制御方式として一般に与えられてきた。それゆえ制御法則を定めるパラメータ決定に難点があり、この方式による制御には限界がある。　ここでは、制御対象である呼吸器系が特殊な双線形系になっていることに注目し、その逆系を用いて、観測困難な代謝量を理論的に再現観測して、その平衡点からの変化量に伴う肺胞中のCO_2濃度変化を算出する。このときCO_2濃度の変化分を理論上相殺し得る換気量を動的補償系を用いて算出することによって制御量を一定に保つ制御方式を試みた[1]。

呼吸器系(制御対象)の記述　肺胞中のCO_2濃度をx、静脈中のCO_2平均濃度をy、CO_2体積に換算した単位時間あたりの体内の代謝量をm、単位時間あたりの換気量をu、また肺胞の全容積をV_1、体組織の等価全容積をV_2、血流量をQとすれば、呼吸器系は基本的に、(1)式で表記できることが知られている[2]。

$$
\begin{cases}
dx/dt = [u\{F^i(CO_2)-x\}+Q(y-B\alpha x-\beta)]/V_1 & (1.1)\\
dy/dt = [m-Q(y-B\alpha x-\beta)]/V_2 & (1.2)
\end{cases}
$$

$F^i(CO_2)$, B, α, β は定数である。

(1)式を $\mathbb{X}^T=[x, y]$ を状態変数、$\mathbb{U}^T=[u, m]$ を入力関数とする微分方程式(2)に書き改める。

$$d\mathbb{X}/dt = \mathbb{A}\mathbb{X} + u\mathbb{B}\mathbb{X} + \mathbb{C}\mathbb{U} + \mathbb{D} \qquad (2)$$

ただし
$$\mathbb{A}=\begin{bmatrix} -QB\alpha/V_1 & Q/V_1 \\ QB\alpha/V_2 & -Q/V_2 \end{bmatrix} \quad \mathbb{B}=\begin{bmatrix} -1/V_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbb{C}=\begin{bmatrix} F^i(CO_2)/V_1 & 0 \\ 0 & 1/V_2 \end{bmatrix} \quad \mathbb{D}=\begin{bmatrix} -Q\beta/V_1 \\ Q\beta/V_2 \end{bmatrix}$$

制御系の構成原理　制御対象を$\mathbb{H}$、代謝量mを観測する観測器としての逆系を$\mathbb{K}_m$、代謝量の変化分を補償し、目標値x_dを実現するための入力(換気量)uを発生させる補償系を$\mathbb{C}$とすれば、制御系はFig.1に示す構成になる。

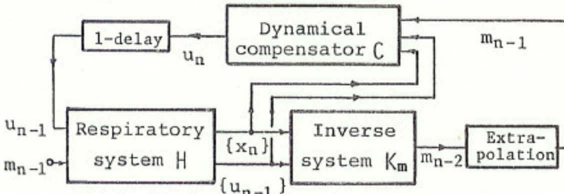

Fig.1 Respiratory control system

<逆システム$\mathbb{K}_m$>　制御対象$\mathbb{H}$が低次元の双線形系なので、離散化した(2)式より、(3)式に示すような条件付逆系$\mathbb{K}_m$を求めることができる[1]。

$$
\begin{aligned}
m_{n-2} = [\, & x_n-(2+a_{11}+a_{22}+b_{11}u_{n-1})x_{n-1}\\
&+\{(1+a_{22})(1+a_{11}+b_{11}u_{n-2})-a_{12}a_{21}\}x_{n-2}\\
&+\{-c_{11}u_{n-1}+(1+a_{22})c_{11}u_{n-2}+d_1a_{22}-d_2a_{12}\}]/c_{22}a_{12} \qquad (3)
\end{aligned}
$$

ただしパラメータ $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$, c_{11}, c_{22}, d_1, d_2 は、それぞれ$\mathbb{A}$, $\mathbb{B}$, $\mathbb{C}$, $\mathbb{D}$ の零でない要素に対応している。

<補償系$\mathbb{C}$>　(3)式より2-delayで再現できる代謝量を外挿して、m_{n-1}を求める。これを用いて一時刻未来の肺胞内のCO_2濃度を目標値$x_{n+1}=x_d$にするような換気量u_nを算出する系が補償系$\mathbb{C}$であり、(4)式で表記できる。

$$
\begin{aligned}
u_n = [\, & x_d - c_{22}a_{12}m_{n-1}-(2+a_{11}+a_{22})x_n\\
&+\{(1+a_{22})(1+a_{11}+b_{11}u_{n-1})-a_{12}a_{21}\}x_{n-1}\\
&+(1+a_{22})c_{11}u_{n-1}+d_1a_{22}-d_2a_{12}]/(c_{11}+b_{11}x_n) \qquad (4)
\end{aligned}
$$

結果　0.2 [min]をサンプル間隔として離散化した(2)式が定常状態に達した時点で代謝量mをステップ状に2倍にしたとき、これを逆系$\mathbb{K}_m$で再現し、さらに補償系$\mathbb{C}$を用いて換気量uを求め、肺胞内CO_2濃度xを一定に保つような制御を行った結果を以下の図に示した。

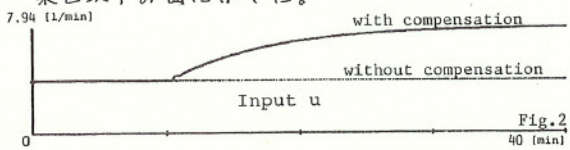

Fig.2

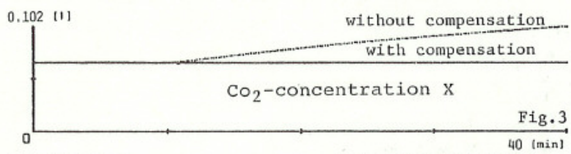

Fig.3

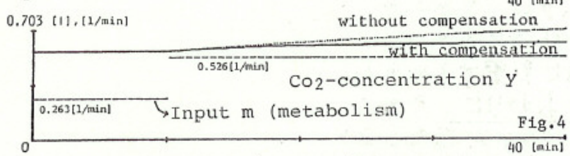

Fig.4

結言　本稿では、代謝量の変化分を制御対象への観測困難な外乱とみなし、その出力値(肺胞内CO_2)への影響分を他入力(換気量)で補償を行う非線形制御方式が双線形系でも有効なことを示した。

文献 1) 若松：離散化ボルテラ汎関数で表示した非線形系の逆系とそれを用いた制御系の構成、第5回SICEシステムシンポジウム論文集、53/58 (1979).
2) R.P. Mohler: Bilinear control processes, Academic Press, N.Y. (1973).