論文

飲酒後の呼気中アルコール濃度の ファジィ推論による予測

— 2 次遅れ+むだ時間要素によるモデル化—[†]

清澄 良策*¹ 芳村 敏夫*² 添田 喬*³

この論文は、健常人の飲酒後の呼気中アルコール濃度をファジィ推論により予測した。健常人の飲酒後の呼気中アルコール濃度のピーク値や消失の経時変化は本人の体重、年齢あるいはその時の飲酒条件によって違いがあり、数少ない測定値から簡単に濃度曲線を推定できない。種々の提案されているモデルでは、モデルの形やパラメータの決定には多くの曖昧さが存在しているので、たとえ各個人のモデルが最適に決定されたとしても、かなりの個人差が存在するからより一般的に適合するモデルを決定することは非常に難解な問題と考えられる。そのために、ここでは一般的に適合する経時変化のモデルをファジィ推論により作成した。被験者の肉体的差異や飲酒時の条件をファジィ推論の前件部変数として取り扱い、後件部関数に「2 次遅れ+むだ時間要素」のインパルス応答で表される関数を用いて、飲酒後の呼気中アルコール濃度の予測を行う。後件部関数として 16 種類を用い測定データに適合させることにより、一般的な予測モデルを作成した。

キーワード：ファジィ推論、呼気中アルコール濃度、予測

1. 緒言

アルコールの研究において濃度曲線が重視されるのは法医学(犯罪)の問題として、飲酒後の経過時間やその飲酒量を、簡単に、できるだけ正確に知ることであると言われている。しかしながら、健常人の飲酒後の呼気中アルコール濃度のピーク値や消失の経時変化は本人の体重、年齢あるいはその時の飲酒条件によって違いがあり^[1]、数少ない測定値から簡単に濃度曲線を推定できない。小林等の報告^[2]では、非定常時系列データの形状を高次遅れ要素のインパルス応答と見なしてモデルを当てはめている。また、近年体内アルコール動態モデルの研究が進み、2 コンパートメントモデルや Michaelis-Menten 型モデルなど種々のモデルが比較検討されている^[3]。しかしながら、これらのモデルでは各組の測定値に対して、そのモデルを構成するパラメータ値をその都度求めなければならず、そのモデルが複雑になればなる程パラメータの数が増え、それらを決定するのには多くの測定値が必要となる。また、各個人の肉体的差異はパラメータの決定に大きな影響

を及ぼすと考えられるが、すでに提案されているモデルにおいては考慮されていない。このように、モデルを決定してもモデルの形やパラメータの決定には多くの曖昧さが存在しており、たとえ各個人のモデルが最適に決定されたとしても、一般的に適合するモデルとして不適合である場合が多く、非常に難解な問題と考えられる。

したがって、ここでは一般的に適合する呼気中アルコール濃度の予測モデルをファジィ推論により作成することを目的とした。被験者の肉体的差異や飲酒時の条件をファジィ制御ルールの前件部変数とし、呼気中アルコール濃度の経時変化を表す後件部関数に「2 次遅れ+むだ時間要素」のインパルス応答関数を用いた。測定データより入力変数のメンバーシップ関数や後件部関数のパラメータを決定し予測モデルを作成した。

2. 計測データ

被験者(62 名)として健常成人(25 歳~58 歳)を選び、朝(8 時)に空腹状態で 117 ml のビール(アルコール度数 4.5%)を経口投与し、その後、呼気中に含まれるアルコール濃度(BrAC) (mg/l)をガスクロマトグラフ法で 10 分間隔で測定した^[4](これを食事なしのデータと呼ぶ)。その 4 時間後、昼食(寿司、味噌汁、アイスクリーム)を摂取し、20 分後にビール 117 ml を一気に飲み、その 10 分後より呼気中アルコール濃度を測定した(これを食事有りのデータと呼ぶ)。アルコール検知用ポリエチレン袋(≒2.5 l)を用いて捕集した呼気から、1 ml をガスクロマトグラフィー(充填剤、Chromosorb W-AW 60-80 mesh, クロマト工業。ガラ

[†] Prediction of Breath Alcohol Concentration after Drinking by Fuzzy Reasoning
Ryosaku KIYOZUMI, Toshio YOSHIMURA and Takashi SOEDA

*¹ 徳島文理大学家政学部生活環境情報学科
Department of Life, Environment and Information, Faculty of Domestic Science, Tokushima Bunri University

*² 徳島大学工学部機械工学科
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokushima

*³ 徳島文理大学
Tokushima Bunri University

スカラム, 内径 2.6 mm×長さ 2 m。検出器, FID。キャリアーガス, N₂, インジェクター, カラムおよび検出温度は, 200°C, 210°C, 65°C)により, そのエタノール濃度を分析した。検量線は, 混液を直接測定した。測定データ数は 110 個で, その一部を表 1 に抜粋した。

3. 呼気中アルコール濃度の予測

3.1 ファジィ推論

ここで使用するファジィ制御ルール R_i は if-then 形であり

$$R_i: \text{if } \alpha_1 = A_{1i} \text{ and } \alpha_2 = A_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } \alpha_m = A_{mi} \text{ then } \beta \text{ is } g_i(t) \\ (i=1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

のように記述されるものとする。ただし, $\alpha_1, \alpha_2,$

図1 ガスクロマトグラフによる分析

…、 α_m は前件部変数、 $A_{1i}, A_{2i}, \cdots, A_{mi}$ はファジィ集合である。後件部は呼気中アルコール濃度の経時変化とし「2次遅れ+むだ時間要素」のインパルス応答関数を用いる^{[1],[2]}。

「2次遅れ+むだ時間要素」の伝達関数を

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2)$$

または, $T_1 = T_2 = T$ の場合として

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{(1+Ts)^2} \quad (3)$$

とする。ただし, T, T_1, T_2 は時定数, L はむだ時間, K は定数であり, s はラプラス演算子である。インパルス応答関数は(2), (3)式より

$$g(t) = \frac{K}{T_1 - T_2} \{ e^{-(s-L)/T_1} - e^{-(s-L)/T_2} \} \\ (t \geq L) \quad (T_1 \neq T_2) \quad (4)$$

または,

$$g(t) = \frac{K}{T^2} (t-L) e^{-(s-L)/T} \quad (t \geq L) \quad (5)$$

ファジィ制御ルール R_i による推論結果は, 後件部関数 $\beta = g_i(t)$ で求められる。これは, 前件部変数は各個人の肉体的差異によって偏りがあるので, それをファジィ集合で表し, それらに適合するインパルス応答が $g_i(t)$ であることを意味する。また, 全体の推論結果は, β の非ファジィ化値 β^* として表され, 前件部の適合度を ω_i とすると, 各々のルールの後件部の重み付き平均を取ることにによって次のように求められる^{[5]-[7]}。

表1 計測データ

No.	呼気中アルコール濃度(mg/l)				年齢 (才)	体重 (kg)	身長 (cm)	BMI 肥満	食事
	10分後	20分後	30分後	60分後					
1	0.131	0.161	0.130	0.045	43	66	174	21.8	無し
2	0.102	0.159	0.104	0.039	29	55	165	20.2	無し
3	0.142	0.178	0.140	0.041	40	58	168	20.5	無し
4	0.120	0.167	0.110	0.050	25	75	178	23.7	無し
5	0.120	0.160	0.108	0.038	55	70	165	25.7	無し
6	0.090	0.159	0.120	0.059	39	60	167	21.5	無し
7	0.068	0.163	0.084	0.022	55	75	165	27.5	無し
8	0.114	0.160	0.109	0.032	40	70	175	22.9	無し
9	0.092	0.195	0.131	0.070	44	55	166	20.0	無し
10	0.131	0.161	0.140	0.041	25	73	176	23.6	無し
11	0.110	0.148	0.101	0.058	44	64	173	21.4	無し
12	0.150	0.165	0.128	0.042	29	50	165	18.4	無し
13	0.152	0.181	0.090	0.030	35	70	175	22.9	無し
14	0.121	0.178	0.143	0.042	58	58	159	22.9	無し
15	0.119	0.169	0.108	0.047	31	64	167	22.9	無し
16	0.090	0.110	0.100	0.038	43	66	174	21.8	有
17	0.080	0.090	0.089	0.035	44	64	173	21.4	有
18	0.058	0.090	0.080	0.010	10	58	168	20.5	有
19	0.070	0.081	0.071	0.023	25	75	178	23.7	有
20	0.060	0.080	0.059	0.031	55	70	165	25.7	有
21	0.070	0.089	0.079	0.043	55	64	168	22.7	有
22	0.056	0.062	0.061	0.000	58	75	174	24.8	有
23	0.090	0.080	0.090	0.061	29	50	165	18.4	有
24	0.061	0.150	0.091	0.030	25	73	176	23.6	有
25	0.059	0.088	0.091	0.058	40	60	170	20.8	有
26	0.104	0.076	0.092	0.055	35	50	165	18.4	有
27	0.056	0.086	0.080	0.039	25	58	168	20.5	有
28	0.090	0.083	0.064	0.025	31	75	176	24.2	有
29	0.080	0.087	0.098	0.052	31	58	168	20.5	有
30	0.093	0.111	0.082	0.037	39	64	167	22.9	有

$$\beta^* = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (6)$$

ここで、ルール R_i における適合度 ω_i は、前件部変数の適合度の積として

$$\omega_i = \mu_{1i}(\alpha_1^0) \mu_{2i}(\alpha_2^0) \cdots \mu_{mi}(\alpha_m^0) \quad (7)$$

のように表される。ここで、 $\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_m^0$ は $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ の測定値である。

3.2 ファジィ制御ルールのチューニング

ここでは、前件部変数を α_1 (体重)、 α_2 (年齢)、 α_3 (肥満度) とする。ただし、肥満度は次式で計算する^[8]。

$$\text{肥満度} = \frac{\{\text{体重(Kg)}\}}{\{\text{身長(m)}\}^2} \quad (8)$$

この肥満度の値が 26.4 以上であれば、一般に肥満であると言われている。

前件部変数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ に対するファジィ集合 A_{1i}, A_{2i}, A_{3i} のメンバシップ関数は次式で表される逆正接関数型

$$\mu_{1i}(\alpha_i) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1}[K_{1i}(\alpha_i - \bar{\alpha}_i)] + \bar{\mu}_{1i} \quad i=1, 2, 3 \quad (9)$$

とする。また、前件部変数のファジィ集合はそれぞれ 2 種類とし、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ に対してそれぞれ次のようなファジィ集合のラベルを与える。

$$\begin{aligned} \alpha_1 : & \text{L (Light), } H \text{ (Heavy)} \\ \alpha_2 : & \text{Y (Young), } NY \text{ (Not Young)} \\ \alpha_3 : & \text{F (Fat), } NF \text{ (Not Fat)} \end{aligned}$$

ただし、() はラベルの意味を示す。

制御ルールは表 2 のように設定する。食事無しの場合と有りの場合では、濃度変化のパターンに大きな差異が見られるので、ルールは同じとするが、後件部関数 $g_i(t)$ は異なる。

(9) 式で与えられるメンバシップ関数および、(4)、(5) 式で与えられる後件部関数のパラメータの調整は以下に行う。

- 1) 測定データを食事の有無により分類する。
- 2) それぞれの測定データを前件部変数により 8 つの集合に分類する。
- 3) 各々の集合に属する測定データに適合する後件部関数を決定する。
- 4) メンバシップ関数の初期値に標準的な値を与える。
- 5) (6) 式により非ファジィ化値を決定する。
- 6) 非ファジィ化値と測定値を比較してメンバシッ

プ関数のパラメータ値を調整する。場合によっては、後件部関数のパラメータ値を微調整する。

7) 5)、6) を繰り返す。

このようにして、求められた前件部変数のファジィ集合のメンバシップ関数を図 2 ~ 4 に示し、後件部関数を以下のように決定した。

食事無しの場合：

$$\left. \begin{aligned} g_1(t) &= 1.815 \{ e^{-(t-0.632)/1.237} - e^{-(t-0.632)/0.865} \} \\ g_2(t) &= 0.23 t e^{-t/1.863} \\ g_3(t) &= 0.585 (t-0.091) e^{-(t-0.091)/1.345} \\ g_4(t) &= 0.229 (t-0.142) e^{-(t-0.142)/1.62} \\ g_5(t) &= 0.311 (t-0.48) e^{-(t-0.48)/1.135} \\ g_6(t) &= 0.237 (t-0.101) e^{-(t-0.101)/1.656} \\ g_7(t) &= 0.264 t e^{-t/1.58} \\ g_8(t) &= 0.231 (t-0.201) e^{-(t-0.201)/1.614} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

食事有りの場合：

$$\left. \begin{aligned} g_1(t) &= 2.532 \{ e^{-(t-0.792)/1.118} - e^{-(t-0.792)/0.947} \} \\ g_2(t) &= 0.092 (t-0.376) e^{-(t-0.376)/2.485} \\ g_3(t) &= 0.933 \{ e^{-(t-0.405)/1.524} - e^{-(t-0.405)/1.239} \} \\ g_4(t) &= 1.473 \{ e^{-(t-0.326)/2.148} - e^{-(t-0.326)/1.835} \} \\ g_5(t) &= 0.163 t e^{-t/1.775} \\ g_6(t) &= 0.105 (t-0.198) e^{-(t-0.198)/2.081} \\ g_7(t) &= 0.159 \{ e^{-t/3.424} - e^{-t/0.591} \} \\ g_8(t) &= 0.128 t e^{-t/1.656} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

表2 制御ルール

$\alpha_3 = NF$				$\alpha_3 = F$			
		α_2				α_2	
		Y	NY			Y	NY
α_1	L	g_1	g_2	α_1	L	g_5	g_6
	H	g_3	g_4		H	g_7	g_8

図2 前件部のメンバシップ関数(体重)

図3 前件部のメンバシップ関数(年齢)

図4 前件部のメンバシップ関数(肥満)

3.3 Widmark のモデル

本手法の結果の妥当性を示すために、Widmark のモデル^[3]と比較する。これは、飲酒量に関係なく消失速度が一定であると仮定したものでよく用いられている。すなわち、血中アルコール濃度は、次式で表される。

$$C(t) = \frac{FD}{V_d}(1 - e^{-K_a t}) - Bt \quad (12)$$

ここで、 D は投与量、 K_a は吸収速度定数、 F は吸収率、 V_d は分布容量(人体の単位重量における血液量)、 B はアルコール消失速度定数であり主に肝臓で代謝される速度である。これは個体差が大きく個々に最適値を求めなければならないが、ここでは測定値と比較しながら測定値に適合する 2 つの値を使用した。ただ

し、実際の計算には F/V_d を体重×定数とする。血中アルコール濃度と呼気中アルコール濃度は比例しておりその比は 2100:1 とし、表 3 に使用したパラメータ値を示す。

3.4 予測結果

図 5(a)～(f) は食事無しの場合の呼気中アルコール濃度(BrAC)の予測結果の一部である。ただし、図中の黒丸は計測値、細線は Widmark のモデル、また太線は本手法で予測した BrAC を示す。計測データでは飲酒後 20 分に 0.15 前後のピークが現れているが、本手法での予測値は飲酒後 15 分頃にピークを示している。測

表3 Widmarkのモデルのパラメータ

No.	D	F/Vd	Ka	B	備考
1	4.16	144.8	0.085	7.5	図5(a)
2	4.16	139.2	0.085	7.5	図5(b)
3	4.16	137.0	0.085	7.5	図5(c)
4	4.16	139.2	0.085	7.5	図5(d)
5	4.16	141.8	0.085	7.5	図5(e)
6	4.16	131.6	0.085	7.5	図5(f)
7	4.16	101.3	0.085	4.5	図6(a)
8	4.16	94.5	0.085	4.5	図6(b)
9	4.16	74.3	0.085	4.5	図6(c)
10	4.16	86.2	0.085	4.5	図6(d)
11	4.16	75.6	0.085	4.5	図6(e)
12	4.16	67.5	0.085	4.5	図6(f)

図5(a) BrAC予測値、食事無し(表1-No.1)

図5(d) BrAC予測値、食事無し(表1-No.4)

図5(b) BrAC予測値、食事無し(表1-No.2)

図5(e) BrAC予測値、食事無し(表1-No.5)

図5(c) BrAC予測値、食事無し(表1-No.3)

図5(f) BrAC予測値、食事無し(表1-No.6)

定データ間隔は10分で、ピークは飲酒後10～30分の間に存在すると考えられ、本手法による予測のピークを示す位置は測定データに適合しているから作成されたモデルは良好であると考えてもよい。

図6(a)～(f)は食事有りの場合の予測結果の一部である。飲酒後10分～30分間のBrACの差は小さく、またピークが明確に現れていないもの(図6(b))もある。本手法では食事有りの場合と同様に飲酒後10～20分頃にピークを示しており、測定データに適合していることがわかる。

また、WidmarkのモデルではBrACが直線的に減少しているが、小林等^[2]の様に指数関数的に減少するモデルの方がより測定データに適合していることがわかる。

4. 結言

ここでは、ファジィ推論を用いて飲酒後の呼気中アルコール濃度を個人差による影響をできるだけ減少させ、より一般的に適合する予測モデルを作成した。測定データを分類して16種類の後件部関数を設計し、測

定データにほぼ適合できる推論結果を得ることができた。これにより、測定データの組数だけ必要なパラメータの数を減少させることができた。今回は測定データが110個しか得られなかったため、後件部関数を作成するために測定データを分類したときデータ数が少ないものが見られた。しかしながら、これらのデータ間には偏りが少なかったためそのまま用いたが、今後の研究としてはデータ数を増加し、一般的に十分適合できるモデルにより近づけたいと考えている。また、表2の制御ルールにおいて、 $g_1(t) \sim g_8(t)$ のように全て異なる関数を用いたが、食事無しの場合の $g_2(t)$ と $g_7(t)$ 、あるいは食事有りの場合の $g_5(t)$ と $g_8(t)$ の様に類似した特性を示す関数もあり、これらを統合することでより少ない後件部関数で推論することが可能であろう。

実際にこのモデルを適用して正確な予測を行うには、前件部変数として、この他にも食後どの程度の時間が経過しているのか、あるいは、食事の内容の違いによるアルコール濃度曲線の変化や、飲酒量、飲酒に要した時間など飲酒後の呼気中アルコール濃度に重大な影

図6(a) BrAC予測値、食事有り(表1-No.16)

図6(d) BrAC予測値、食事有り(表1-No.19)

図6(b) BrAC予測値、食事有り(表1-No.17)

図6(e) BrAC予測値、食事有り(表1-No.20)

図6(c) BrAC予測値、食事有り(表1-No.18)

図6(f) BrAC予測値、食事有り(表1-No.21)

響を与えると思われる要素を考慮することが必要である。ここでの測定時の飲酒量(117 ml)は、通常一口で飲む程度の量であり、実際の飲酒に近づけるにはここで行った程度の量のある時間間隔で飲酒を繰り返させるモデルを考察しなくてはならない。今後、このような場合について研究を行う予定である。

参考文献

- [1] 古本、原田、正満、大松：飲酒後の呼気中アルコール濃度の経時変化とピーク値について、システム制御情報学会論文集、Vol.4, No.5, pp.204-206, 1991
- [2] 小林、古本、原田：飲酒後の呼気中アルコール濃度のピーク値の経時変化に関するモデル化とシミュレーション、アルコール研究と薬物依存、Vol.26, No.5, pp.401-418, 1991.
- [3] 藤宮、古村：血中アルコール動態と法医学的諸問題、医学のあゆみ、Vol.154, No.13, pp.966-970, 1990.
- [4] MIZOI, Y. and FUKUNAGA, T.: Measurement of

blood and breath alcohol concentration. Rinsyo Kensa, Vol.29, pp.19-26, 1985.

[5] 菅野：ファジィ制御、日刊工業新聞社、1988.

[6] 日本ファジィ学会編：ファジィ制御、日刊工業新聞社、1993.

[7] 水本：わかりやすいファジィ推論、コンピュータール、コロナ社、No.28, pp.32-45, 1989.

[8] 白谷、西上：最新公衆衛生(第2版)、講談社、pp.70-72, 1996.

(1996年7月16日 受付)

(1997年2月4日 再受付)

[問い合わせ先]

〒770-8055

徳島市山城町西浜傍180

徳島文理大学 家政学部

生活環境情報学科

清澄 良策

TEL : 0886-22-9611(2384)

FAX : 0886-22-3217

著者紹介

清澄 良策 (きよすみ りょうさく)

徳島文理大学家政学部生活環境情報学科
1980年 徳島大学大学院修士課程修了。
1988年 徳島文理大学短期大学部講師、
1994年 同大学家政学部講師。環境データの
モデリングと予測などの研究に従事。
日本機械学会、計測自動制御学会、日本医
療情報学会、日本ファジィ学会の会員。

芳村 敏夫 (よしむら としお)

徳島大学工学部機械工学科
1963年 徳島大学工学部機械工学科卒
業工学博士。徳島大学工学部機械工学科
講師、助教授を経て1982年より教授。機械
構造物の振動制御、ファジィ制御に関す
る研究に従事。日本機械学会、計測自動制
御学会、自動車技術会、日本ファジィ学会
等の会員。

添田 喬 (そえだ たかし)

徳島文理大学

1949年 広島文理科大学数学科卒業工
学博士。徳島大学工学部教授、工学部長を
経て1982年 同学長、1988年 徳島文理大
学長。日本機械学会(名誉会員)、計測自動
制御学会(フェロー)、第13期日本学術会
議第5部等の会員

Prediction of Breath Alcohol Concentration after Drinking by Fuzzy Reasoning

by

Ryosaku KIYOZUMI, Toshio YOSHIMURA and Takashi SOEDA

Abstract :

This paper is concerned with the use of fuzzy reasoning in predicting breath alcohol concentration (BrAC) after drinking. Fuzzy reasoning is adopted to resolve the difficulties in concentration curve, where weight and age affect the maximum value and the time history of BrAC after drinking. The prediction model applied uses the human weight, age and body mass index (BMI) as input variables, and the impulse response functions with time-delay as the output in the fuzzy control rules. The defuzzified value of the output from eight kinds of function proposed in this paper could estimate weighted averages of all the outputs.

Keywords : Fuzzy Reasoning, Breath alcohol concentration, Prediction

Contact Address : **Ryosaku KIYOZUMI**

Department of Life, Environment and Information,

Faculty of Domestic Science, Tokushima Bunri University

180 Yamashiro-cho Tokushima, Tokushima 770-8055, Japan

TEL : 0886-22-9611(2384)

FAX : 0886-22-3217