

ファジィ関係に基づく
サイクロトロン調整支援システム

7C-6

岡村 哲也、村上 亨

住友重機械工業(株) システム研究所

1. はじめに: サイクロトロンシステムは、電磁石、高周波装置など多数の機器から構成されており、運転開始時には各装置の設定値を微調整してビーム引出効率を最大にする作業が必要になる。この調整作業は、①操作パラメータが20~50個と多く、しかも計測量との因果関係が不明確である。②計測されたビームパターンの評価に熟練を要する。③熟練オペレータは勘に頼って試行錯誤的に調整しており、その調整規則が明確でない。そのため未熟練者によるオペレーションや調整の自動化が容易でなかった。

そこで本研究では計算機の支援により未熟練者でもそれが容易になるシステムを確立することを目的としている。本稿では有向グラフで表されたサイクロトロンの構造モデルより、操作パラメータから計測量へのファジィ関係を求め、それを逆演算することにより操作パラメータの選択をガイダンスする手法について述べる。

2. ビームパターンとその特徴量: ビームパターンは、サイクロトロンの加速領域の磁極間に設置された電流プローブを半径方向に走査して計測される。図1(a)にその

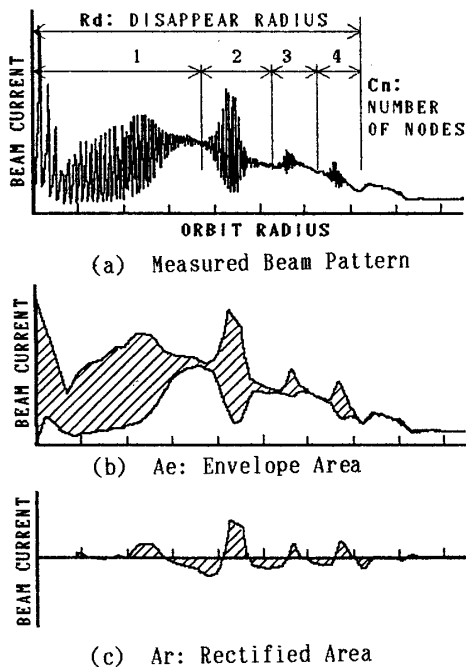


Fig. 1 Features of Beam Pattern

A Support System for Beam Adjustment of Cyclotron Based on Fuzzy Relation

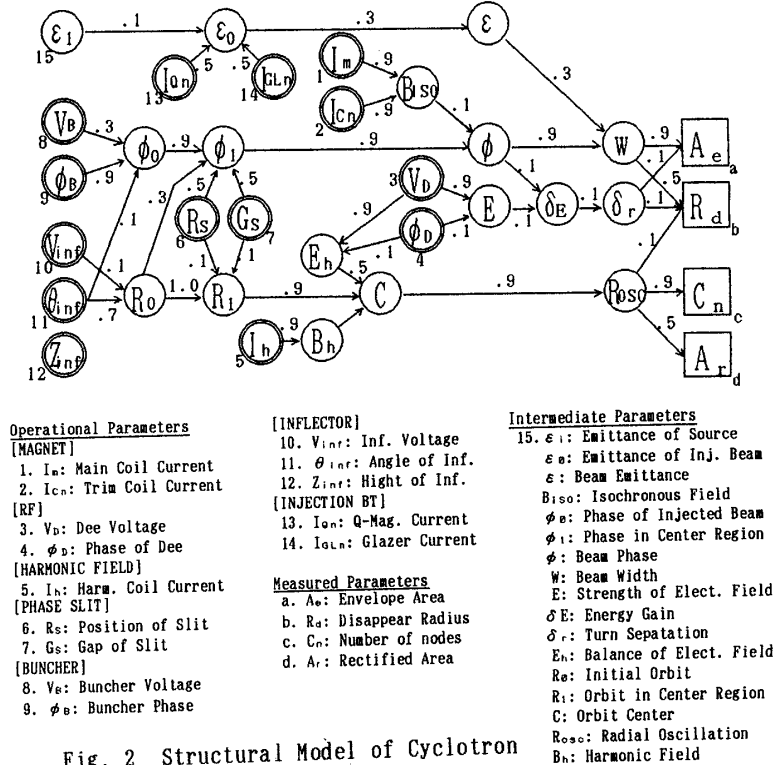
Tetsuya OKAMURA, Tohru MURAKAMI
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.,

例を示す。図よりビームパターンは、ターンに起因する空間周波数の高い凹凸(マイクロストラクチャ)とビート振動の様な空間周波数の低い成分(マクロストラクチャ)の合成であることがわかる。

熟練オペレータの着目点を分析して以下の4項目をビームパターンの特徴量とする。図1にこれらの特徴量を示す。

- (1) ビームパターンの包絡線面積: A_e
- (2) マイクロストラクチャの消失半径: R_d
- (3) 包絡線パターンの節の数: C_n
- (4) マクロストラクチャ波形の囲む面積: A_r

3. 有向グラフによる構造モデル: ビームパターンの特徴量と操作パラメータの因果関係を有向グラフにより表したモデルを図2に示す。ノードが操作パラメータ(◎)、中間ノード(○)、ビームパターンの特徴量(□)を示し、アークは因果関係の有無を、アークに付けられた重みはその強さを示す。因果関係の強さは、①理論的に決まる関係の強さ ②特徴量と操作パラメータの感度 ③不良な特徴量の改善に有効であった頻度 ④応答性、再現性など操作の容易性などを考慮して経験的に決めた。



Operational Parameters
[MAGNET]
1. I_m : Main Coil Current
2. I_{cm} : Trim Coil Current
[RF]
3. V_D : Dee Voltage
4. ϕ_D : Phase of Dee
[HARMONIC FIELD]
5. I_h : Harm. Coil Current
[PHASE SLIT]
6. R_s : Position of Slit
7. G_s : Gap of Slit
[BUNCHER]
8. V_b : Buncher Voltage
9. ϕ_b : Buncher Phase

[INFLECTOR]
10. V_{inf} : Inf. Voltage
11. θ_{inf} : Angle of Inf.
12. Z_{inf} : Height of Inf.
[INJECTION BT]
13. I_{on} : Q-Mag. Current
14. I_{gl} : Glazer Current

Intermediate Parameters
15. ϵ_s : Emittance of Source
 ϵ_e : Emittance of Inj. Beam
 ϵ : Beam Emittance
 B_{iso} : Isochronous Field
 ϕ_0 : Phase of Injected Beam
 ϕ_c : Phase in Center Region
 ϕ : Beam Phase
 W : Beam Width
 E : Strength of Elect. Field
 δE : Energy Gain
 δr : Turn Separation
 E_h : Balance of Elect. Field
 R_0 : Initial Orbit
 R_1 : Orbit in Center Region
 C : Orbit Center
 R_{osc} : Radial Oscillation
 B_h : Harmonic Field

Measured Parameters
a. A_e : Envelope Area
b. R_d : Disappear Radius
c. C_n : Number of nodes
d. A_r : Rectified Area

Fig. 2 Structural Model of Cyclotron

図2の重み付き有向グラフをファジィグラフと見なし、操作パラメータの集合($x=\{x_i\}, i=1, \dots, 15$)とビームパターンの特徴量($y=\{y_j\}, j=1, \dots, 4$)との関係を示すファジィ行列 $R=\{r_{ij}\}$ を求める。 r_{ij} は操作パラメータとビームパターンの特徴量の二項間の因果関係の強さを示す。まず、 x_i から y_j に到る一つのパス C 、及びそのパスの強さ l を定義する。(1)

$$C = (n_1=x_i, n_2, \dots, n_r=y_j) \quad (1)$$

但し、 $n_k \in E, k=1, \dots, r$

$$\forall (n_k, n_{k+1}): \mu_R(n_k, n_{k+1}) > 0, k=1, \dots, r-1$$

$$l(n_1=x_i, \dots, n_r=y_j) = \bigwedge_{k=1}^{r-1} \mu_R(n_k, n_{k+1}) \quad (2)$$

E は全ノードの集合、 $\mu_R(x, y)$ は順序対 (x, y) のメンバーシップ関数である。 $C(x_i, y_j)$ を x_i から y_j に到達する全パスの集合とすると r_{ij} は x_i から y_j への最強のパス $C^*(x_i, y_j)$ の強さ $l^*(x_i, y_j)$ で表される。

$$r_{ij} = l^*(x_i, y_j) = \bigvee_{C(x_i, y_j)} l(n_1=x_i, n_2, \dots, n_r=y_j) \quad (3)$$

表1に図2より求めたファジィ行列 R を示す。

4. ファジィ逆演算による操作パラメータの選択：各操作パラメータの選択可能性を示すメンバーシップ関数を $a_i = \mu_a(x_i)$ 、各特徴量の不良の程度を示すメンバーシップ関数を $b_j = \mu_b(y_j)$ とするとこれらの関係は、

$$b = a \cdot R, \quad a = \{a_i\} \quad i=1, \dots, 15, \quad b = \{b_j\} \quad j=1, 4$$

$$b_j = \bigvee_{i=1}^{15} (a_i \wedge r_{ij}) \quad (4)$$

というファジィ関係式で表される。

TABLE 1 Fuzzy Relation Matrix

x	y	a	b	c	d
		A_e	R_d	C_n	A_r
1	I_m	.1	.1	0	0
2	I_{Cn}	.1	.1	0	0
3	V_D	.1	.1	.5	.5
4	ϕ_D	.1	.1	.1	.1
5	I_h	0	.1	.3	.3
6	R_S	.5	.5	.1	.1
7	G_S	.5	.5	.1	.1
8	V_B	.3	.3	0	0
9	ϕ_B	.9	.5	.1	.1
10	V_{inf}	.1	.1	.1	.1
11	θ_{inf}	.1	.1	.7	.5
12	Z_{inf}	0	0	0	0
13	I_{Qn}	.3	.3	0	0
14	I_{GLn}	.3	.3	0	0
15	ϵ_j	.1	.1	0	0

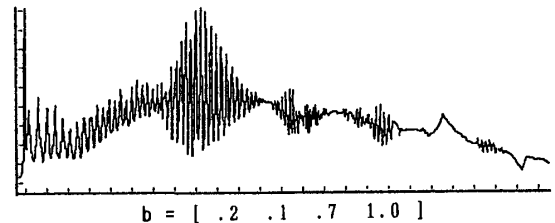
ビームパターンの不良を改善するために操作すべき操作パラメータの選択を b と R より a を求めるファジィ逆問題として定式化する。(2)(3)

いくつかのビームパターンについてこのアルゴリズムに基づいて算出した結果を図3に示す。図3(a)は半径方向振動の多いパターンであり、ビームセンタリングに關係の深い操作パラメータが選択されている。図3(b)はターンの分離の良くないパターンであり、ビーム位相に關係の深い操作パラメータが選択されている。いずれの場合も妥当な選択といえる。

5. おわりに：有向グラフを用いたサイクロトロン構造モデル、及びファジィ関係式の逆演算による操作パラメータの選択の手法を提案し、いくつかの例についてその有効性を確認した。今後、ファジィ関係のメンバーシップ値の決め方、修正方法について検討したい。

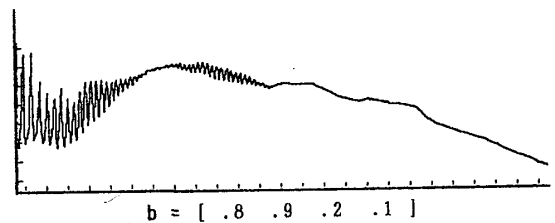
(参考文献)

- (1) A. Kaufmann: Introduction to the theory of fuzzy subsets, ACADEMIC PRESS, 1975
- (2) 村山、寺野：あいまい論理を用いた異常診断、システムと制御, Vol24, No11, 719, 1980
- (3) 塚本、田代：Fuzzy逆問題の解法、計測自動制御学会論文集, Vol15, No1, 22, 1979



Selection Possibility	Complementary Method
θ_{inf} : [0.7, 1.0]	θ_{inf} : 1.0
V_D : [0.5, 1.0]	V_D : 1.0
	ϕ_D : 1.0
	I_h : 1.0
	R_S : 1.0
	G_S : 1.0
	V_{inf} : 1.0

(a)



Selection Possibility	Complementary Method
ϕ_B : 0.8	ϕ_B : 1.0
R_S : [0.5, 1.0]	R_S : 1.0
G_S : [0.5, 1.0]	G_S : 1.0
	V_B : 1.0
	I_{Qn} : 1.0
	I_{GLn} : 1.0

(b)

Fig. 3 Examples of Operational Guidance