技術論文

JEUNESSE: 年齢依存型人体模型を用いた 光子外部被曝線量計算コード

山口 恭 弘^{*1}

(1992年3月5日受理)
(1992年7月6日再受理)

JEUNESSE: A Computer Code to Calculate Photon External Doses Using Age-Specific Phantoms

Yasuhiro YAMAGUCHI^{*1}

A computer code, JEUNESSE, was developed to calculate the equivalent doses in organs and tissues H_T and the effective dose E in various ages for photon external exposures by the Monte Carlo method. Six age-specific phantoms, 0-, 1-, 5-, 10- and 15-year-old children and adult, are used in the calculation, which were originally designed by Cristy for internal dose calculation and revised by the author for the present purpose. The MORSE-CG code is incorporated in the JEUNESSE code to calculate the photon transport from a source to the organs or tissues of the phantom. The way of calculation of H_T and E is based on the ICRP Publication 60. Some examples of calculation of E are presented, which were obtained for photon broad parallel beams of 23-8,500 keV incident on the right side of each of the above phantoms.

KEY WORDS: computer code, equivalent dose, effective dose, Monte Carlo method, age-specific phantom, external photon, MORSE-CG

I 緒 言

光子外部被曝に対する人体各臓器・組織の線量当量および実効線量当量が、成人の数学人体模型とモンテカルロ法を用いて計算されている¹⁾。また、環境γ線からの被曝に関しても、上記線量当量が生後8週、7歳および成人男女の人体模型について計算されている^{2,3)}。これらの線量計算に用いられた成人の人体模型は、MIRD-5型人体模型⁴⁾を基にしたものである。これに対して、生後8週および7歳の人体模型は、コンピュータ・トモグ

ラフィのデータに基づいて作成されたより実際の人体形状に近いものである⁵⁾。これらの計算結果は、国民線量をより詳細に評価する上で有益である。

一方、国際放射線防護委員会(ICRP)はICRP Publ. 56⁶⁾のなかで、公衆の内部被曝線量を六つの年齢群に対して計算している。これは、年齢による体格および放射性核種の体内動態の違いが被曝線量に大きく影響することが知られてきたためである。また、ICRPは、1990年に新たな基本勧告(ICRP Publ. 60⁷⁾)を採択した。このなかで、放射線荷重係数 w_R を用いて各臓器・組織の等価線量 H_T が定義されるとともに、改定された組織荷重係数 w_T を用いて実効線量 E を計算することが勧告された。したがって、今後は公衆に対して年齢群別に H_T および E を評価する方向にある。

^{*1} 日本原子力研究所保健物理部; 茨城県那珂郡東海村 (〒319-11)

Department of Health Physics, Japan Atomic Energy Research Institute; Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

Fig. 1 Age-specific phantoms used in the JEUNESSE code. The origin of the coordinate system is taken at the center of the base of the trunk section of each phantom.

公衆の各年齢群の外部被曝と内部被曝による合計実効線量を求める場合、両者に共通の人体模型を用いることが望ましい。また、 H_T および E の年齢依存性を調べるためには、同一の設計方針に基づいた多種類の人体模型を用いて線量計算を行う必要がある。ICRP Publ. 56 では、設計概念を同じくする 0, 1, 5, 10, 15 歳および成人の数学人体模型⁹⁾ が用いられている。

以上の状況を踏まえ、内部被曝線量評価に用いられている上記 6 体の年齢依存型人体模型を対象として、光子外部被曝による H_T および E をモンテカルロ法を用いて計算する JEUNESSE コードを開発した。本論文では、上記年齢依存型人体模型および計算コードの概要を述べるとともに、幾つかの計算実行結果を示す。

II 年齢依存型人体模型

JEUNESSE コードでは、CRISTY によって内部被曝評価用に設計された 0, 1, 5, 10, 15 歳および成人の欧米人の体格に対応する人体模型⁹⁾ を改良したものを用いる。これらの人体模型は、臓器形状の年齢依存性に関する多くのデータに基づいて設計されており、MIRD-5 型人体模型⁴⁾ を基本にしている。すなわち、各臓器・組織

の形状は、一次または二次の方程式で表される幾何形状の組合せで表されている。また、それらの媒質は、密度および元素組成が異なる 3 種類の人体組織（骨、肺、軟組織）で近似されている。これら 6 体の人体模型の外観図を **Fig. 1** に、1 歳児の人体模型の断面図を **Fig. 2** におのおの示す。また、人体模型の身長および体重を **Table 1** に示す。これらの人体模型は、男女両器官を兼ね備えた中性の模型である。

これらの人体模型には、以下の改良が施されている。ICRP Publ. 60 に基づいて E を評価するには、食道の H_T を計算する必要があるが、CRISTY が設計した人体模型には食道が定義されていない。そこで、ICRP Publ. 23⁹⁾ にある ICRP 標準人の食道の質量および壁厚のデータを参考にして食道を定義した。その他の人体模型に関しては、成人模型に対する各年齢の模型の胴体幅の比から食道の壁厚を決めた。喉から脊柱に沿って横隔膜まで下がる楕円管および横隔膜から胃上部まで斜めに下がる円管で食道の形状を表し (**Fig. 2** 参照)、その媒質は人体軟組織とした。各人体模型の食道の長さおよび質量を **Table 2** に示す。追加された食道は、結果的に ICRP 標準人のものより長い。このことは、LEWIS ら¹⁰⁾ が定義

Fig. 2 Perspective cross sections of the 1-year-old phantom.

した食道も同様である。これは、ICRP 標準人のデータを用いると、食道が短すぎて、喉と胃上部がつかないという不合理が生じるためである。

甲状腺の H_T をより正確に評価するために、人体模型の頭部の顔面下部を削り取り、新たに首部を設けた (Fig. 1 参照)。この削り取る厚さは、成人に関しては男性模型 ADAM¹¹⁾ を参考にした。その他の年齢に関しては、頭部楕円柱の長半径と削り取る厚さの比が、成人と同じになるようにした。各人体模型の顎と首表面の間の距離 (削り取った厚さ) を Table 2 に示す。首部の設置にともない、甲状腺の位置をこの削り取った厚さの分だけ人体後方にずらした¹¹⁾。また、次章で述べる幾何形状パッケージ (CG) を用いて各臓器・組織の形状定義をする都合上、甲状腺の形状を体積が保存された楕円体に置き換え単純化した。

水晶体の H_T を計算するために、人体模型の顔面に一對の水晶体および眼領域を設置した。水晶体の大きさおよび位置は、成人に関しては POSTON らの模型¹²⁾ を参考にした。その他の年齢に関しては、頭部を表す楕円柱の短半径と水晶体の横の長さおよび楕円柱の高さと水晶体の縦の長さの比が成人とおおの同じになるようにした。各人体模型の水晶体の面積および質量を Table 2 に示す。

以上の追加または改良された臓器・組織の形状を表す

Table 1 Data to be prepared by users for specifying the conditions of dose calculation.

Phantom	1. Age of phantom
Photon source	1. Type of photon source
	2. Initial photon energy
	3. Photon incidence angle
	4. Source-to-phantom distance
	5. Number of photons to be generated

Table 2 Height and weight of the phantoms.

Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
0	51.5	3.51
1	75.0	9.35
5	109.0	19.1
10	139.0	32.1
15	164.0	54.5
Adult	174.0	71.1

数式表現および各パラメータの値を Appendix に示す。

III 計算コード

JEUNESSE コードは、Fig. 3 に示すように、プリプロセッサ部、モンテカルロ計算部、ポストプロセッサ部の三つの演算処理部と、これらの演算処理に使われる三つの保存ファイルから構成される。各臓器・組織の H_T を計算するためには、線源から各臓器・組織までの光子輸送計算を行い、各部の吸収エネルギーを求める必要がある。この光子輸送計算のために、モンテカルロ計算コード MORSE-CG¹³⁾ がモンテカルロ計算部に組み込まれている。

MORSE-CG コードの入力データは非常に複雑なので、プログラムによってこの入力データを作成するようにプリプロセッサ部を設けた。また、光子輸送計算の結果を基に H_T および E を計算するポストプロセッサ部を設けた。以下に、各演算処理部の機能および用いられるデータファイルについて述べる。なお、プログラムはすべて FORTRAN 言語で書かれている。

1. プリプロセッサ部 (輸送計算用入力データの作成)

人体模型に関し光子輸送計算を行うには、次の3種類

の入力データが必要である。

- ① 人体形状定義データ
- ② ランダム・ウォーク制御データ
- ③ 光子断面積データ

人体模型の年齢や線源条件（光子エネルギー，入射方向等）を変えて計算を行うには，①のデータの置換えおよび②のデータの一部書換えをその都度しなくてはならず，間違いを起こしやすい。プリプロセッサ部は，光子輸送計算用の完全な入力データを作成するために，予め用意された①および②のデータの雛形を保存ファイルから読み込み，ユーザーの指定する計算条件に基づきこれ

らのデータを書き換え，モンテカルロ計算部に引き渡すための二つの一時的なファイルに出力する機能をもつ。したがって，ユーザーは非常に少ない数の計算条件指定データを用意するだけで計算を実行できる。

ユーザーが用意する計算条件指定データのおもな項目を **Table 3** に示す。計算条件指定データは，人体模型に関するものおよび線源に関するものの2種類である。前者は，人体模型の年齢を指定するためのものであり，①のデータを保存ファイルから読み出すときに使用される。後者は，線源種類，線源の方向，光子エネルギーおよび発生光子数を指定するためのものであり，保存ファイルから読み出された②のデータの雛形の対応する部分を書き換えるときに使用される。点等方線源または平行ビーム線源を選択でき，前者の場合は線源位置を r （座標原点からの距離）， θ および η で，また後者の場合はビーム入射方向を θ および η でおのおの指定する（**Fig. 1** 参照）。

2. モンテカルロ計算部（光子輸送計算）

モンテカルロ計算部は，プリプロセッサ部で作成された二つの入力データおよび光子断面積データを読み込み，MORSE-CG コードを用いて光子線源から各臓器・組織までの輸送計算を行う。MORSE-CG コードに以下の改良を施した。MIRD-5 型人体模型を扱えるように，幾何形状パッケージ（CG）^{13）} に新たに一般楕円体，楕円錐台，トーラスの幾何形状要素（body）を追加した。また，点等方線源および平行ビーム線源から光子を発生させるルーチンを追加した。

モンテカルロ計算部は，指定された発生光子数に対するヒストリーを終了すると，各臓器・組織の光子エネルギー群ごとの平均フルエンスおよびその標準偏差のデータをポストプロセッサ部に引き渡すための一時的なファイルに出力する。平均フルエンスの評価には，トラックレングス・エスティメータ（定義された領域を通過した

Fig. 3 Flow diagram of the JEUNESSE code.

Table 3 Data on added parts of the phantoms.

Age (years)	Oesophagus		Eye lense		Neck
	length (cm)	mass (g)	area (cm ²)	mass (g)	chin-to-neck distance (cm)
0	13.1	6.54	1.42	0.099	1.73
1	18.2	9.09	2.62	0.208	2.35
5	23.3	17.8	3.28	0.292	2.71
10	28.2	25.5	3.88	0.384	2.82
15	34.6	31.4	4.26	0.716	2.93
Adult	38.2	44.1	4.59	0.909	3.00

光子の通過距離の合計をその領域の体積で除してフルエンスを求める方法)を用いた。輸送計算に使用する光子断面積は、DLC-15 ライブラリー¹⁴⁾を RADHEAT-V4 コードシステム¹⁵⁾の FAIRCROSS モジュールを用いて 24 群 (5 keV~12 MeV) に縮約編集したものである。縮約には、定数重み関数を用いた。

3. ポストプロセッサ部 (線量計算)

ポストプロセッサ部は、モンテカルロ計算部で求められた各臓器・組織の平均フルエンスのデータから、各臓器・組織の H_T を計算し、さらにこの H_T を用いて E を計算する。

H_T は、カーマ近似を用いて次式で計算される。

$$H_T = w_R \sum_i \phi_T(\varepsilon_i) \cdot k_T(\varepsilon_i) \quad (1)$$

ここで、

w_R ：放射線荷重係数 (光子に対しては、 $w_R=1$)

$\phi_T(\varepsilon_i)$ ：臓器・組織 T の平均光子フルエンス

$k_T(\varepsilon_i)$ ：臓器・組織 T のカーマ係数

ε_i ：光子エネルギー

$k_T(\varepsilon_i)$ は、軟組織、肺組織、骨組織、赤色および黄色骨髄に対して用意されている¹⁶⁾。対をなす臓器 (肺等) および人体中に分布する組織 (赤色骨髄等) に対しては、各部の H_T の質量重み平均値をその臓器・組織の H_T とする。また、生殖腺の H_T は、睪丸と卵巣の H_T の質量重み平均値とする。

E は、次式で計算される。

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (2)$$

ここで、

w_T ：臓器・組織 T に対する組織荷重係数

この w_T は、ICRP Publ. 60¹⁷⁾ の値を用いた。各年齢とも共通の w_T を用いて E を計算する。これは、ICRP Publ. 60 では年齢および性別に関して平均化された w_T の値のみが示され、現在年齢別のデータが利用できないためである。また、残りの臓器・組織の扱いに関しては、ICRP Publ. 60 に従った。

以上の計算が終了すると、ポストプロセッサ部は、計算条件、各臓器・組織の H_T 、 E およびそれらの標準偏差を出力する。

IV 計算実行例および検討

JEUNESSE コードの実行結果の例を以下に示す。計算には、日本原子力研究所東海研究所の大型計算機 FACOM M-780 システムを用いた。このとき、計算の実行領域として 2 メガ・バイトを使用した。計算は、Fig. 1 に示す各人体模型の右側方 (LAT) から光子平行ビ-

Fig. 4 Effective dose per air absorbed dose in free air for six age-specific phantoms for photon broad parallel beam incident on the right side of the phantom.

ムが入射するとして行った。入射光子エネルギーは、23, 36.5, 56, 90, 160, 510, 1250, 2700, 5900 および 8500 keV である。ここでは、この照射条件に対する E の計算結果の定性的な傾向について述べ、詳しい解析結果は他の照射条件に関する計算結果とあわせて別の論文で述べる。

各年齢に対する E の計算結果を Fig. 4 に示す。 E は、空気吸収線量当りの値 (Sv/Gy) に換算されている。ここに示された計算結果に関して、相対標準偏差は H_T に対して 7% 以内、 E に対して 3% 以内であった。 E は入射光子エネルギーが増加するにつれ、100 keV までは急激に増加し、その後約 1,000 keV までは大きく増減することなく、さらにそれ以上では緩やかに増加する傾向が、各年齢に共通して見られる。また、年齢の増加とともに、 E が下がることははっきりと見られる。なお、これらの計算結果と直接比較できる他の計算例や実験結果は、現在のところない。

成人の人体模型に関しては、実効線量当量 H_E を他の計算結果と比較することが可能である。JEUNESSE コードを用いて、成人の人体模型に前方 (AP)、後方 (PA)、右側方 (LAT) の各方向から光子平行ビームを照射し各臓器・組織の H_T を計算した後、ICRP Publ. 26¹⁷⁾ に示された w_T の値を用いて H_E を求めた。入射光子エネルギーは、17, 29.5, 45, 71, 90, 115, 230, 510, 1250, 2700 および 8500 keV である。この計算結果に関して、相対標準偏差は H_T に対して 7% 以内、 H_E に対して 3% 以内であった。この H_E の計算結果と ICRP Publ. 51¹⁾ にあるデータとの比較を Fig. 5 に示す。両者の差は、最大でも 7% 以内である。このことから、成人の人

Fig. 5 Effective dose equivalent per air absorbed dose in free air compared to that in the ICRP Publication 51. Data are shown for irradiations of photon broad parallel beam incident on the front (AP), back (PA) and right (LAT) side of the adult phantom.

体模型に関しては、両者は全体的によく一致しているといえ、JEUNESSE コードの妥当性の傍証となる。

以上に述べたとおり、JEUNESSE コードを用いて異なる年齢の人体に対して H_T および E を計算することが可能となった。今後、より多くのケースについて計算し、計算結果を他の計算コードに依るものと比較するといった方法で、本コードの妥当性を評価するとともに、一般環境 γ 線に対する H_T および E の計算といったより現実的な問題に適用していく必要がある。

V 結 言

内部被曝線量評価に用いられている 0, 1, 5, 10, 15 歳および成人の人体模型を対象として、光子外部被曝に対する各臓器・組織の等価線量 H_T および実効線量 E をモンテカルロ法を用いて計算する JEUNESSE コードを開発した。本コードでの H_T および E の評価方法は、ICRP Publ. 60 に基づいている。計算実行例として、各年齢の人体模型に右側方から 23~8500 keV の光子平行ビームが入射する場合の E の計算結果を示した。また、成人の人体模型に関して、本コードを用いて実効線量当量 H_E を計算し、ICRP Publ. 51 の値と比較した結果、前方、後方、右側方の各照射ジオメトリーに対してよい一致が見られ、本コードの妥当性を示す傍証が得られた。本コードの妥当性評価およびより現実的な問題への適用といった問題が、今後の課題として残されている。

参 考 文 献

- 1) ICRP; ICRP Publication 51, Ann. ICRP, 17, 2/3, Pergamon Press, Oxford (1987).
- 2) N. PETOUSSI, P. JACOB, M. ZANKL and K. SAITO; *Radiat. Prot. Dosim.*, 37, 31 (1991).
- 3) K. SAITO, N. PETOUSSI, M. ZANKL and R. VEIT; *J. Nucl. Sci. Technol.*, 33, 627 (1991).
- 4) W.S. SNYDER, M.R. FORD, G.G. WARNER and H.L. FISHER; MIRD Pamphlet No. 5, *J. Nucl. Med.*, 10, Supplement 3 (1969).
- 5) R. VEIT, M. ZANKL, N. PETOUSSI, E. MANNWEILER, G. WILLIAMS and G. DREXLER; GSF-Bericht 3/89 (1989).
- 6) ICRP; ICRP Publication 56, Ann. ICRP, 20, 2, Pergamon Press, Oxford (1989).
- 7) ICRP; ICRP Publication 60, *ibid.*, 21, 1-3, Pergamon Press, Oxford (1991).
- 8) M. CRISTY; NUREG/CR-1159 (1980).
- 9) ICRP; ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford (1975).
- 10) C.A. LEWIS and R.E. ELLIS; *Phys. Med. Biol.*, 24, 5, 1019 (1979).
- 11) R. KRAMER, M. ZANKL, G. WILLIAMS and G. DREXLER; GSF-Bericht S-885 (1982).
- 12) J.W. POSTON and G.G. WARNER; ORNL-TM-

Table 4 Values of parameters (in centimeters), used in geometrical definition of head part of the phantoms.

Age	A _H	B _H	B _H '	C _{H1}	C _{H1} '	C _{H2}	C _T	S	z ₁	z ₂	z ₃	z ₄	x ₁	x ₂	x ₃
0	4.52	5.78	4.05	9.10	2.05	3.99	21.6	0.07	6.27	8.45	6.815	7.905	4.072	1.491	2.581
1	6.13	7.84	5.49	12.35	2.79	5.41	30.7	0.08	8.51	11.5	9.265	10.75	5.545	2.033	3.513
5	7.13	9.05	6.34	13.91	3.14	6.31	40.8	0.09	9.59	12.9	10.41	12.08	6.233	2.282	3.950
10	7.43	9.40	6.58	15.19	3.43	6.59	50.8	0.10	10.4	14.1	11.34	13.16	6.422	2.303	4.119
15	7.77	9.76	6.83	15.97	3.60	6.92	63.1	0.17	10.9	14.8	11.89	13.81	6.441	2.263	4.179
Adult	8.00	10.00	7.00	16.85	3.80	7.15	70.0	0.20	11.5	15.5	12.50	14.50	6.416	2.208	4.208

3986 (1972).

13) M.B. EMMET; ORNL-4972 (1975).

14) E. STORM and H. ISRAEL; Nuclear Data Tables, A7 (1970).

15) N. YAMANO, K. MINAMI, K. KOYAMA and Y. NAITO; JAERI 1316 (1989).

16) W.C. ROECH(ed.); Final Report on Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry, Chap. 8, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987).

17) ICRP; ICRP Publication 26, Ann. ICRP, 1, 3, Pergamon Press, Oxford (1977).

Appendix 変更または追加された臓器・組織の形状の数式表現

本文中の年齢別人体模型の改良に関し、変更または追加された臓器・組織の形状の数式表現を以下に示す。なお、座標系の定義は本文 Fig. 1 のとおりであり、長さの単位は cm である。

1. 頭 部

① 首部より上部

$$\left[\frac{x}{A_H}\right]^2 + \left[\frac{y}{B_H}\right]^2 \leq 1,$$

$$C_T + C_{H1}' \leq z \leq C_T + C_{H1}$$

および,

$$\left[\frac{x}{A_H}\right]^2 + \left[\frac{y}{B_H}\right]^2 + \left[\frac{z - (C_T + C_{H1})}{C_{H2}}\right]^2 \leq 1,$$

$$z > C_T + C_{H1}$$

② 首部

$$y \geq 0 : \left[\frac{x}{A_H}\right]^2 + \left[\frac{y}{B_H}\right]^2 \leq 1,$$

$$y < 0 : \left[\frac{x}{A_H}\right]^2 + \left[\frac{y}{B_H'}\right]^2 \leq 1,$$

$$C_T \leq z \leq C_T + C_{H1}'$$

③ 前眼領域

$$\left[\frac{x}{A_H}\right]^2 + \left[\frac{y}{B_H}\right]^2 \leq 1,$$

$$\left[\frac{x}{A_H - S}\right]^2 + \left[\frac{y}{B_H - S}\right]^2 \geq 1,$$

$$C_T + z_1 \leq z \leq C_T + z_2,$$

$$|x| \leq x_1$$

④ 水晶体

$$\left[\frac{x}{A_H}\right]^2 + \left[\frac{y}{B_H}\right]^2 \leq 1,$$

Table 5 Values of parameters (in centimeters), used in geometrical definition of thyroid of the phantoms.

Age	x_0	y_0	z_0	a	b	c
0	0.4	-2.52	22.60	0.3847	0.3847	1.00
1	0.5	-3.30	31.80	0.4308	0.4308	1.10
5	0.6	-3.85	42.18	0.5367	0.5367	1.38
10	0.8	-4.27	52.62	0.7069	0.7069	1.82
15	0.9	-4.73	65.20	0.8224	0.8224	2.10
Adult	1.0	-5.00	72.50	0.9747	0.9747	2.50

Table 6 Values of parameters (in centimeters), used in geometrical definition of oesophagus of the phantoms.

Age	a	b	c	d	y_0	z_1	z_2	e	f	x_e	y_e	z_e
0	0.60	0.30	0.20	0.10	1.10	14.30	23.65	0.45	0.20	1.793	-1.060	11.83
1	0.60	0.30	0.20	0.10	1.45	20.32	33.49	0.45	0.20	2.391	-1.369	16.94
5	0.70	0.40	0.20	0.10	1.75	27.01	43.94	0.55	0.20	3.087	-1.552	22.56
10	0.80	0.40	0.20	0.10	2.02	33.59	54.23	0.60	0.20	3.727	-1.686	28.10
15	0.80	0.40	0.20	0.10	2.44	41.75	66.70	0.60	0.20	4.802	-1.987	34.65
Adult	1.00	0.40	0.20	0.20	2.50	46.00	73.80	0.70	0.30	5.541	-2.002	38.38

$$\left[\frac{x}{A_H - S} \right]^2 + \left[\frac{y}{B_H - S} \right]^2 \geq 1,$$

$$C_T + z_3 \leq z \leq C_T + z_4,$$

$$x_2 \leq |x| \leq x_3$$

以上の頭部各部の定義式中の各パラメータを **Table 4** に示す。

2. 甲 状 腺

$$\left[\frac{x \pm x_0}{a} \right]^2 + \left[\frac{y - y_0}{b} \right]^2 + \left[\frac{z - z_0}{c} \right]^2 \leq 1$$

以上の甲状腺の定義式中の各パラメータを **Table 5** に示す。

3. 食 道

① 食道上部（喉から横隔膜まで）

$$\left[\frac{x}{a} \right]^2 + \left[\frac{y - y_0}{b} \right]^2 \leq 1,$$

$$\left[\frac{x}{c} \right]^2 + \left[\frac{y - y_0}{d} \right]^2 \geq 1,$$

$$z_1 \leq z \leq z_2$$

② 食道下部（横隔膜から胃上部まで）

$$\zeta^2 + \lambda^2 \leq e^2,$$

$$\zeta^2 + \lambda^2 \geq f^2,$$

$$0 \leq \xi \leq \xi_0$$

ここで、直交座標系 (ζ, λ, ξ) は、座標系 (x, y, z) を並進回転したものであり、その座標原点は胃表面上の点 (x_e, y_e, z_e) に、また $(0, 0, \xi_0)$ は食道上下端 $(0, y_0, z_1)$ にそれぞれ一致する。以上の食道の定義式中の各パラメータを **Table 6** に示す。