

島津線量分布計算システム DOSE PAC-1000

島津製作所 医用電子機器工場
山岡 信行

1. はじめに

わが国における死因の第1位は脳卒中であり、悪性新生物は第2位である。

放射線が癌の発見から診断および治療に大きな貢献をしているが、一方、放射線は健康組織を破壊し、遺伝上にも悪影響を与える。したがって、放射線診断はもちろんのこと放射線治療においても細心の注意をはらって健康組織への被ばくを少なくしなければならない。

上述のような目的で放射線治療計画を効率よく行なえるように開発した当社の線量分布計算システム(図1)について述べる。

2. 計算方式

2.1 外部照射

デジタル電子計算機を用いて線量分布図を算出する場合、計算方式としては、実測した線量分布をメッシュ状にサンプリングし、各点での線量比を表の形で記憶しておき、必要に応じて体の輪郭などの補正を行なっていく方法(Grid法)と、理論的もしくは実験的に求めた計算式を用いる方法とがある。また、計算にあたっては、線源と患者の皮膚の距離を基準とする方式(SSDモード)と、線源-腫瘍間距離を基準とする方式(TSDモード)を、それぞれ必要に応じて使い分けることが必要である。

コバルト60やLINACなどによる遠隔照射における組織内線量分布については多くの研究がある。これらは分布の形が比較的単純であるため、近似式による計算でも十分な精度が得られている¹⁾²⁾³⁾。しかし、高エネルギー電子線は、その線量分布を決定する因子が多く、しかもその影響が大きい。したがって、すべての電子線発生装置に適用できる近似式⁴⁾を見つけたことは非常に困難である。

そこで、実際に測定して得られた線量分布を、計算すべき組織断面に“複写”する方式を採用した。この方式によれば、あらゆる放射線源に対して適用することができ、さらに、コバルト60治療装置の半影除去絞りの使用、不使用を区別する場合でも、それに応じたデータ呼び出し、使用することによって、それぞれ正確な線量分布を再現できる。

2.1.1 データの形式

1組のデータは、照射野内および半影部分を含む、数百の代表点のデータから構成される。図2に示すように、線源位置あるいは仮想焦点位置に中心を持つ放射状の直線群(FAN LINE)と、一定間隔の深度線(DEPTH LINE)の交点におけるパーセント値をデータとして記憶し、これらのデータを一組として個有の番号あるいは記号を付けて検索できるようにした。これら2組の直線群の本数と間隔は、深部線量分布の状態に応じて適当な数に選ぶことができ、放射状の線を41本、深度線を24本まで選定することができる⁵⁾。

2.1.2 補正

基準とするデータは、放射線が立方体状の組織等価物質の中心に向かって、面に垂直に入射した場合のものである。しかし、実際には、身体の表面は曲面であり、しかも、断面は矩形でも円でもない。



図1 DOSE PAC 外観図

また、振子照射や回転照射の場合には、焦点から皮膚表面までの距離は一定ではない。したがって、このような場合には、基準データからの補正が必要である。

図3に示すように、皮膚表面にあるBは、基準データのA点よりも線源から遠いから、B点の線量は、A点の線量の

$\left(\frac{SP}{SA+AB}\right)^2$ 倍である。計算点が基準データの点よりも線源に近い場合には、上式のABは負となり、線量は増加する。

ウェッジを使用する場合に対しては、ウェッジの厚さだけ、放射状の線を線源側へ移動させて補正をおこなった。この場合、ウェッジの先端は、照射野の端に一致しているとして計算しているので、その装置の最大照射野に合わせた一定位置にウェッジが固定されている場合には補正不足となる。このような場合には、照射線量をインプットするときに考慮する必要がある。もちろん、ウェッジが入った線量分布そのものをデータとして記憶させた場合には、このような補正は不要である。

2.1.3 計算面積および計算密度

身体の横断面の大きさは、頸部がもっとも小さく、腰あるいは胸部で最も大きい。その大きさは20×30cmより小さい場合が多いが、余裕をもたすため最大計算面積を32×40cmとした。

放射線治療計画においては、ただ単に等線量曲線を求めるのみに止まらず、任意の点の吸収線量や、任意の領域の総吸収線量を求め得ることが必要である。この計算を正確に行なうために、32×40cmの面積を、たておよびよこ方向2.5mm間隔で配置した点について計算することにした。

すなわち、たて128、よこ160の点群は、それぞれの点の吸収線量を計算した後、蓄積管形ブラウン管ディスプレイ装置(以下CRTと略称する)の画面に約19×14cmの大きさに、種々の方法で表示される。

2.1.4 データ採集

本システムでは、

- (a) 等線量曲線から入力する方法。
- (b) フィルム等濃度記録装置からオンラインでインプットする方法。

の二つの方法がとれるようにしている。

(1) 等線量曲線から入力する場合

線源の等線量曲線が得られている場合には、図形入力装置の指針で、等線量曲線をトレースすることにより、メッシュポイントでの線量値を自動的にとり込むことができるようにしている。

(2) フィルム等濃度記録装置を使用する場合

フィルム法による線量分布測定に関する報告は多く⁶⁾⁷⁾、問題点も多いが、測定時間が短く、急峻な線量分布も測定できるなどの利点がある。

そこで、フィルム等濃度記録装置(図4)にアダプタをとりつけ、測定したフィルムからオンラインでデータを採集することができるようにした。

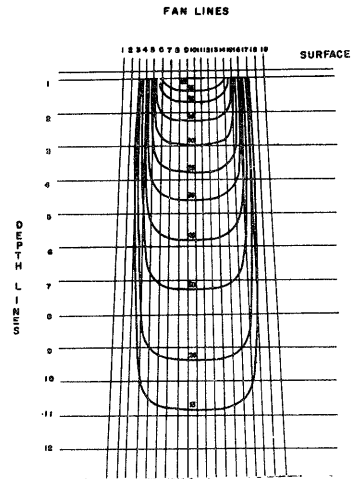


図2 データサンプリングの形式

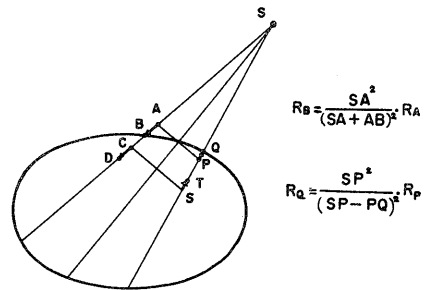


図3 距離による補正

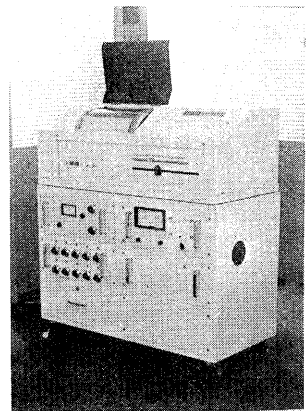


図4 フィルム等濃度記録装置

そしてこの採集したデータを Build-up カーブと一致するように補正する。これにより現象条件の変化やフィルムによる特性の差の影響を少なくした。

測定フィルムからデータを作成するのに、ビームの照射野によっても異なるが5分以内で採集が可能である。このようにして得られたデータを図5に示す。

2.2 小線源による線量分布

ラジウムやコバルト60などの小線源を、組織内あるいは体腔内に置く治療法は古くから使われ、放射線治療の中でも成功率の高いものとして知られている⁸⁾⁹⁾。

点線源による線量分布は、ごく簡単に距離の逆2乗則によるだけで考えてもよい近似値が得られる。しかし、実際には、組織による減弱と、散乱による Build-up があるため、これらの補正をすることが望ましい。

Q キュリー (Ci) の点線源から L (mm) の距離にある点における線量率 D (rad/s) は、この空間が水または組織等価物質で満たされているとしたとき、つぎのように表わされる。

$$D = \frac{kQ}{L^2} \cdot B(L) \cdot e^{-\mu L} \quad (1)$$

ここで k は常数、B は Build-up 係数、 μ は水の線吸収係数である。これまでに発表された文献や実測結果から、実際的な式として、

$$D = \frac{k}{L^2} (1 + 0.063L) e^{-0.063L} \quad (2)$$

$$k = 224 (\text{Ra}) \\ = 342 ({}^{60}\text{Co})$$

を採用した。

(2)式において、 $(1 + 0.063L) e^{-0.063L}$ と L^2 の関係が、ほぼ直線に近いことを利用し、(2)式をさらに簡略化して

$$D = \frac{kQ}{L^2(1 + 0.0014L^2)} \quad (3)$$

として計算することにした。図6に実験式(2)式と、近似式(3)の比較を示したが、実用範囲内では十分な精度を持っている。

ラジウムのような針状線源に対しては、その中心線上に並んだ複数個の点線源列として近似することができる。

3. ハードウェア

本システムは高速のミニコンと、磁気ディスクを中心に構成されている。

カートリッジ式磁気ディスクは、多数の深部線量分布データ、各患者の身体の輪郭や内部臓器の形、治療データおよびプログラムを記憶するのに用いられている。CRT ディスプレイは、計算条件の設定をはじめとするシステム制御と計算あるいは検索結果の表示に用いられている。図形入力装置は身体の輪郭や内部臓器の情報の入力と、別に作成した等線量曲線から、その線束の線量分布データを作成するのに用いられる。CRT の画像は、ハードコピー装置によって、直ちに記録紙に残せるが、実寸大ではないので、実寸のハードコピーが必要な場合にはデジタルプロッタによって画かせる。

以下、本システムを構成する機器のうち、とくに開発されたものについて述べる。図7にシステムのブロック図を示す。

3.1 CRT ディスプレイ

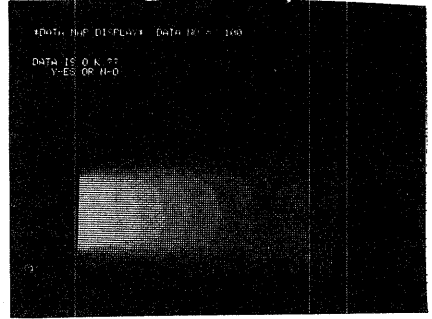


図5 データ採集例

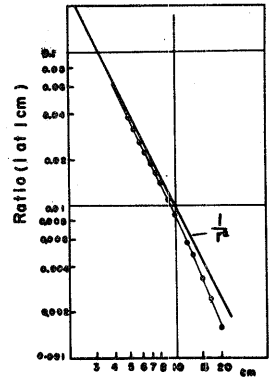


図6 実験式と近似式の比較

- 実験式
- 近似式

このシステムには、ソニーエレクトロニクス社の 4010-1 形蓄積管式のディスプレイを用いているが、本来の機能だけでは表示方法に制限が多いので、インターフェイスおよびコントローラを追加して、つぎのような機能を持つようにした。

- (a) 信号の並列転送による転送速度の増加
- (b) 非蓄積モードによる文字、記号の表示

(WRITE THROUGHモード)

- (c) 多点記録モードによる濃度変調画面の作成

(INCREMENTAL PLOTモード)

この結果、本システムにおける CRT ディスプレイは、つぎのような利点が得られるようになった。

- (a) 線束の入射方向や位置の条件設定のとき、非蓄積モードでその条件を表示し、条件設定を容易にした。
- (b) 濃度変調画面の作成時間を約 1/5 に短縮した。
- (c) 文字の出力が多い場合の画面作成時間を短縮した。

3.2 図形入力装置

身体の輪郭や内臓の形、位置などを入力するための図形入力装置は、最大入力面積が $40 \times 50 \text{ cm}$ であるので、回転横断面撮影装置で得た X 線フィルムをトレースすることによってデータを取り入れることができる。このときの縮小率はあらかじめ調整しておく。もちろん、現寸大の像からのインプットも倍率をスイッチで切りかえることによって可能である。

回転横断面フィルムを 35 mm フィルムに縮写しておくことと保存整理に便利であるが、このスライドを画像入力面に映写し、これをトレースすることもできるようにした。本装置では左側にスライドプロジェクタを置き、映写レンズにはズームレンズを使って実寸大の投影を可能にした。

このシステムでは、前に述べたフィルム等濃度記録装置によって線束のデータを作ることができるようにしているが、線量計法その他で得た等線量曲線を、この図形入力装置で順次トレースし、線束データを作ることにもできる。

その他の構成機器の仕様は表 1 に示すとおりである。

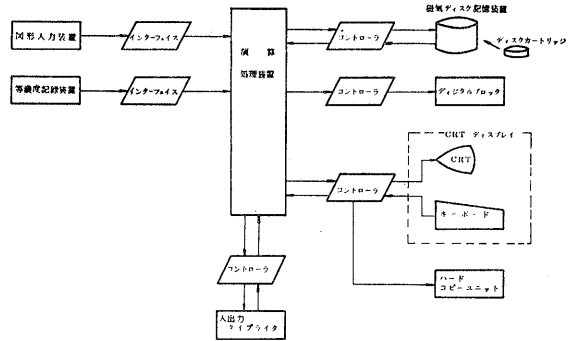


図 7 ブロックダイアグラム

項目	説明	
コンピュータ	形名	NOVA-01
	サイクルタイム	1.2μs
	語長	16ビット
	演算レジスタ	4個(内2個はインデックス可)
	命令数	基本22.組み合わせにより2086種
容量	12KW (32KW まで増設可)	
磁気ディスク	形式	可動ヘッド, 単一ディスクカートリッジ形
	記憶容量	1.2MW
	アクセスタイム	20msec (平均)
	ヘッドの位置決め時間	70msec (平均)
プロッタ	形式	インクリメント形
	有効範囲	270mm (幅)
	プロット速度	400 (ステップ/sec) 以下 10 (打点/sec) 以下
タイプライタ	形名	モデル ASR-33
	プリンタ	10字/sec, 72文字/行
	リダ	10字/sec
	パンチ	10字/sec

表 1 主な構成機器性能表

4. ソフトウェア

4.1 外部照射

システムの操作は、オペレータが CRT に表われてくるメッセージと対話しながら治療歴の作成から線量分布の良否の判定までができるように設計してある。

ソフトウェアは他の目的にもシステムを使うことができるようにするため、カートリッジ式の磁気ディスク装置をベースとして作成している。

1 枚のディスクカートリッジの中には、各種治療計画プログラムのほか、150 人分の患者の輪郭、臓器、治療歴および 300 種類の基準データが記憶可能である。

ディスクファイルのレイアウトは図 8 に示す。ファイルはディスクの使用状態をビット対応で管理しているファイル (MAP)、患者のインデックスファイル、そして個々の患者の治療歴をシーケンシャルに記憶しているファイル (HIST)、そしてランダム形式で記憶している身体の輪郭ファイル (BODY) と採集データファイル (DATA) よりなっている。

また、腫瘍に吸収されるべき線量を、指示することにより、isocenter における空中線量を計算し、表示することができるようにした。この方式を用いれば、治療装置のアウトプット→腫瘍線量の計算→治療装置の積算線量計のプリセット値の計算……という手数を省くことができ、実用上便利である。

4.1.1 治療計画の立案

治療計画を作成するときは、まずその患者に個々の ID 番号をつける。この ID 番号をシステムに与えると、システムはその患者がすでに登録している旧患者か、それとも新患者かを判定する。もし、旧患者ならばインプットされている体の輪郭やいままでに照射した総線量などをオペレータに知らせ、これでよいのか確認する。新患者の場合にはその患者の情報をオペレータがつぎつぎにインプットする。そうすると、それらの情報は患者 ID 番号と結びつけられて自動的にファイルされる。

なお、このときインプットした情報から逆に ID 番号などを検索することもできる (4.1.5 項参照)。照射条件の設定は、体の輪郭を表示している CRT 管面上にマークを出し、そのマークをキーボードで操作して上下左右に移動もしくは回転させ、実際に装置を動かしているような感じで、照射位置および方向を決めるようにしている。

線量および線源の種類はキーボードからインプットする。線源の種類は原則として、データ番号によって指定できるようにしているが、番号のみだとオペレータにかかる負担が大きいため、任意の 6 文字までの名前付けができるようにもしている。たとえば、 ^{60}Co 5×5 cm の線源であれば、C5*5 というような覚えやすい名前にすることができる。

線量分布の計算において、病気の種類、病巣の位置などの条件によって、オペレータは“TSD”モードで治療計画を行なうのか、“SSD”モードで行なうのかを決定しなければならない。この両者では多少計算の仕方が異っており、計算プログラムを一部入れ替えねばならないが、DOSEPAC 1000 では、ただ一つのキーを押すだけで両者の切り換えを、ごく簡単に行なうことができる。

計算条件の設定は、一度に 10 門まで (ただし、回転照射、振子照射もそれぞれ 1 門と数える。) 可能である。

回転照射、振子照射は 10 度おきの固定照射の重ね合せとして計算を行なっている。

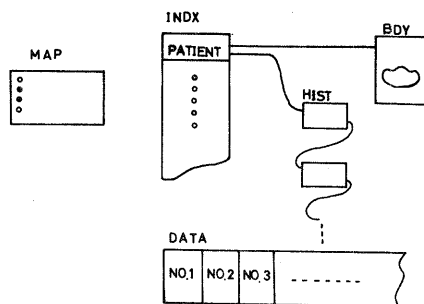


図 8 ファイルレイアウト

4.1.2 表示

表示は、線量の強さを明るさに対応づけて表示する方法(MAP表示)と等線量曲線表示とが行なえる(図9、図10参照)。

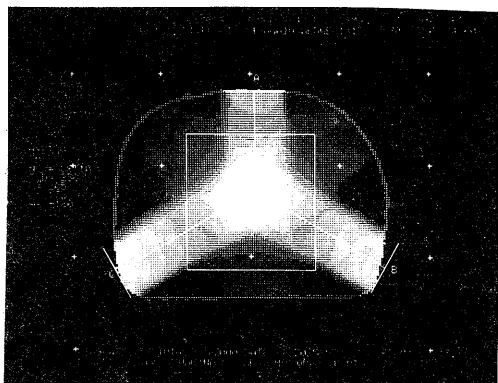


図9 輝度変調(MAP)表示

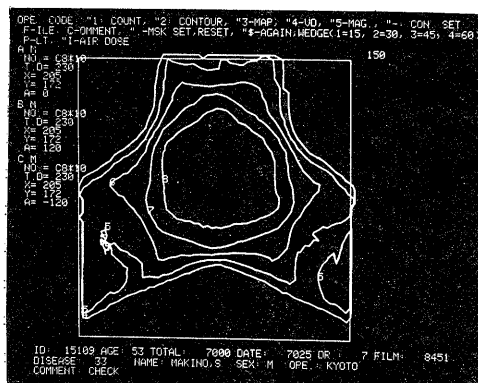


図10 等線量曲線表示
(図9を拡大したもの)

等線量曲線表示の指定は、任意の線量値、もしくは多値でも可能であり、指定した点を通る等線量曲線も描くことができ、同時にその面積も算出することができる。

また、上記の二つの表示のほか、任意の形状の領域を指定し、その領域内での吸収線量とその領域内の単位体積当りの吸収線量も算出できる(図11)。ただし、図11の計算においては、体の厚みの補正は行っていない。

4.1.3 線量分布の良否の判定

線量分布の良否の判定は、前述の二つの表示法により視覚的に判断することができる。このほかに、定量的に判断する重要な資料として、病巣線量や容積線量がある。

しかし、これらの線量は三次元的な体積に関係したものであるから、一般に線量分布が計算されている“平面”では求めることができない。だが、この平面での病巣と身体輪郭で吸収される線量は、比較的簡単に計算ができ、これによって病巣線量と容積線量の概算に利用できるものと思われる。

そこで、本システムでは、あらかじめオペレータが重要臓器の輪郭と病巣の輪郭を指定し、その領域内での総線量と面積、単位面積当りの線量を各治療プランに対しすぐ計算して出せるようにした。また、同時に体の輪切り断面全体の受けている線量も計算することができる。これらの比率は、オペレータが各線量分布図を比較検討するときの一つの定量的な要素となるものと思われる。

4.1.4 ファイリングと治療歴

本システムでは、ファイル命令のキーを一つ押すだけですぐ治療情報をファイルすることが可能であり、また、治療歴もID番号を打ち込むだけで、ただちにCRTに表示されるようにしている。したがって、複雑なデータ整理の手間を大いに軽減することができる。

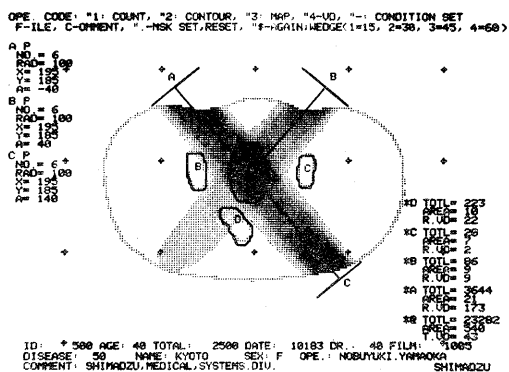


図11 指定領域内の吸収線量

4.1.5 検索

本システムでは、患者の個人情報と治療歴のデータをすべてファイルとしてカートリッジ中に記憶しており、そのデータとのやりとりは ID 番号をもとに行なっている。

したがって、患者名や性別から ID 番号を調べることが必要となってくる(図 12(a)(b)参照)。これらの操作も簡単で、キーを 2, 3 個押すだけで行なうことができる。

また、病名コードなどによっても検索ができるので、簡単な治療統計の作成に便利である。

4.2 内部照射

内部照射の治療計画も、外部照射の場合と同様の手順で進められるのが望ましい。しかし、身体の輪郭を記憶させる必要もなく、計算面積も小さいので CRT 画面での縮小率も異なり、線源位置の与え方などの点で差異を生じるのはやむを得ない。

線源の位置は三次元的な情報として与える。X, Y 座標は CRT のカーソルで、Z 座標と線源の強さ ($C_i \times \text{sec}$) はキーボードから与える、計算結果の表示は 10 レベルの等線量曲線表示で行なう。また指定した点の吸収線量や、指定した点での吸収線量を 100% とした等線量曲線、指定したパーセントもしくは rad 値の等線量も画ける(図 13, 図 14)。

```

REFERENCE
DISE CODE 1-D, 2-AGE, 3-DISE, 4-SEX, 5-TCNO, 6-FLM, 7-POP
LIST: 1-1-75

```

ID	NAME	SEX	AGE	DISE	TCNO	TOTAL	FLM
10	SHIBAZU	M	30	11	10	500	1010
20	TAJIMA	M	30	11	11	200	1011
30	YOSHIDA	M	30	10	10	400	1012
40	YAMAZAKI	M	30	11	11	300	1013
50	YAMAMOTO	M	30	11	11	300	1014
60	YAMAZAKI	M	30	11	11	300	1015
70	YAMAMOTO	M	30	11	11	300	1016
80	YAMAZAKI	M	30	11	11	300	1017
90	YAMAMOTO	M	30	11	11	300	1018
100	SUZUKI	M	30	11	11	300	1019

a) 全員のリストアップ

```

REFERENCE
DISE CODE 1-D, 2-AGE, 3-DISE, 4-SEX, 5-TCNO, 6-FLM, 7-POP
LIST: 1-1-75

```

ID	NAME	SEX	AGE	DISE	TCNO	TOTAL	FLM
60	TANAKA	F	29	11	11	300	1002
70	FURUKA	F	27	10	11	300	1003
80	YAMAZAKI	F	27	10	11	300	1004
100	SUZUKI	F	28	10	11	300	1011

b) 女性だけのリストアップ

図 12 検索の例

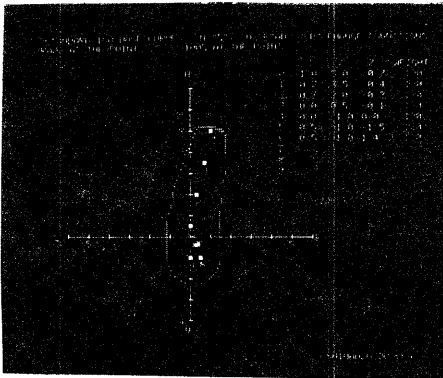


図 13 小線源線量分布

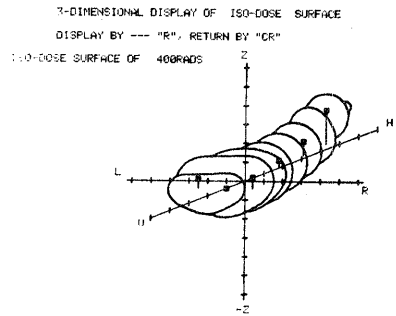


図 14 三次元表示

ラジウム針の場合も上述と同様な方法で計算および表示ができる(図 15)。

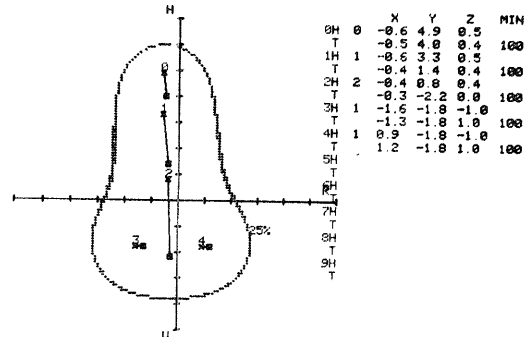


図 15 ラジウム針の線量分布

5. オプション

DOSEPAC は他の処理プログラムの入ったディスクカートリッジを準備し、周辺装置を追加することにより、他の目的に使用することも可能である。

以下ユーザがコンピュータを利用できる高級言語と、他分野での使用例について述べる。

5.1 FORTRAN IV 言語

FORTRAN の CALL 文を使ってシステムの構成機器である、CRT、ディスク、TTY、図形入力装置、フィルム等濃度記録装置などを働かせることができる。

FORTRAN のレベルは JIS 7000 以上である。

ディスクオペレーティングシステム “NOVA RDOS” の管理のもとで、プログラムの作成からデバッグ、実行までを TTY との対話で簡単に行なうことができる。

“NOVA RDOS” は低速入出力機器の SPOOLING 処理機能など中型計算機なみの処理能力を持っている。

この FORTRAN の機能を十分に利用するにはメモリが 24 kw 以上必要であるが、プログラムスワップ、チェーン、マルチタスクリアルタイム処理などが可能である。また、BINARY モードでの入出力、ASSEMBLER 文の混合が可能などミニコンの領域を大きく越えた FORTRAN である。

5.2 MUMPS 言語

MUMPS (Massachusetts General Hospital Utility Multi-Programming System) は米国の病院で生まれたコンピュータ言語であり種々の特徴を持っている。特に病歴管理や窓口業務に威力を発揮するものである。

普通、病院でのコンピュータを利用した病歴処理などの場合、あらかじめ確定した検査項目やその時にインプットする文字数などが前もってわかっている場合は少ない。従って FORTRAN 言語や BASIC 言語で、そのような汎用性のあるプログラムを作成することは大変難しい。

MUMPS はキャラクタ処理機能があり、医師がカルテに患者の情報を記入するのと同様にインプットすることが可能である。また、文字列の抜き出し、結合などの機能もあるので簡単に検索のプログラムが作成できる。

MUMPS には FORTRAN の DIMENSION に相当する命令が必要ないので、プログラム作成時にファイルのディメンジョンを増やすことができる(トリー構造)。従って、ディスクファイルの追加や削除が非常に簡単であり、情報の大きさが確定しないものを処理するには便利である。

プログラム言語は英文形式の言語であるため、非常におぼえやすくプログラムの修正も簡単である。

現在 DOSEPAC 用の MUMPS としては、米国ダートマス大学で開発されたものを一部修正したもので、TTY と CRT からタイムシェアリングで同時に 2 つの端末から別々にプログラミング出来るようにしている。

5.3 左心室機能計測処理

図形入力装置にフィルム送り装置を付加することにより、高速シネアングيوفイルムにおける左室像をトレースしてミニコンピュータに入力し、その処理を行なうことができる。従来極めて単調かつ長時間の作業を短時間で行ない、一連の心機能のパラメータを算出する定量的な心機能の解明ができる。

シネアングيوفイルム像はイメージ管等のひずみを含んでいるため、あらかじめこのひずみを測定しコンピュータでひずみを補正するようにした。

左室容量の算出は Dodge ら¹⁰⁾ の左室を楕円体と仮定した Area - Length - Method を用いて算出した。

各種のデータ処理後、表示されるデータには以下のものがある。

1. 左室容量、短径、長径、面積の時間変化曲線
2. その微分曲線
3. 数値データの打出し
4. 心機能をあらわすパラメータ
5. 患者情報 等 (図 16, 図 17 参照)。

5.4 核医学データ処理

核医学機器用のインターフェイスを追加すれば、核医学データ処理システム SCINTIPAC¹¹⁾ として使用することができる。

SCINTIPAC ではシンチカメラ、シンチスキャナ、レノグラム検査装置からのデータをオンラインで採集し、各種のデータ処理を行なう。等高線表示、MAP 表示、三次元表示などのスタティックな画像処理や、局所動態曲線の算出などの動態解析の他、心臓などの動きの早いものも心電波形と対応させて処理することも出来る。

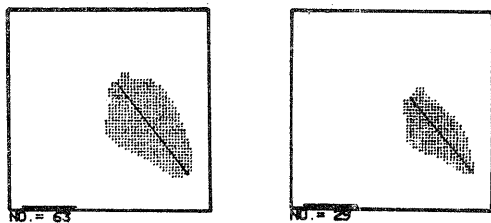


図 16 拡張末期・収縮末期の左室像

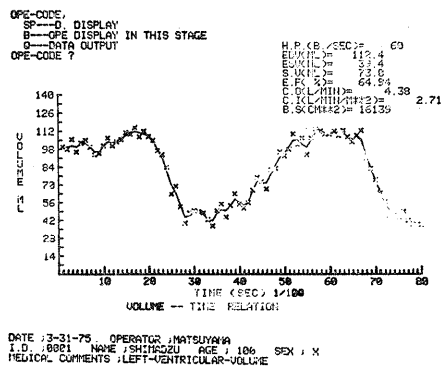


図 17 左室容量 - 時間変化曲線

6. む す び

以上 DOSEFAC のシステムについて概要を報告した。

臓器や骨の補正、などまだまだ改良を要する点はあるが、拡張性、汎用性に富み、またユーザがプログラム開発に利用できる点など、放射線科全体のシステムとして利用していただけるものと思う。

最後に、いろいろ有意義なご指導をいただいた、東京都養育院の松井・外山両先生および京都府立医大 小川先生に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 安河内 浩ほか：“遠隔照射治療の線量計算（電子計算機による一般化の試み）” 日医放会誌，29，1047，（1969）。
- 2) 尾内能夫ほか：“デジタル型電子計算機による線量分布の計算 第3報” 日医放会誌，30，718，（1970）。
- 3) 稲邑清也ほか：“デジタル計算機による線量分布の実時間表示” 日医放会誌，30，315（1970）。
- 4) 河内：“電子線の媒質中における線量分布の計算法” 第30回 日医放会抄録集，436（1971）。
- 5) Holmes, W.F.：“External Beam Treatment Planning with the Programmed Console” Radiology 94, 391,（1970）。
- 6) 尾内ほか：“写真フィルムによる高エネルギー X 線の線量分布測定法の再検討” 日医放会誌，28，1224，（1972）。
- 7) 森：“フィルム法による線量分布の測定と照射術式の差による線量分布” 日放技会誌，27，47，（1971）。
- 8) 真崎規江：“電子計算機を用いて放射線治療を合理化する方法” 日医放誌，23，197，（1963）。
- 9) 尾内能夫ほか：“デジタル型電子計算機による線量分布の計算” 日医放誌，28，1629（1969）。
- 10) Dodge H.T. et al “The use of Single Plane Angio-cardiograms for Calculation of Left Ventricular Volume in Man” Am Heart. J. March 1968
- 11) 木下ほか：“島津核医学データ処理システム SCINTIPAC-200” 島津評論，Vol 30，No 4（1973）。