

心臓弁膜症の MR 画像診断支援システムの開発と その臨床応用に関する研究

岡山大学医学部放射線医学教室 (指導: 平木祥夫教授)

中 川 富 夫

(平成 3 年 11 月 29 日 受稿)

Key words : expert system, MRI, valvular heart disease

緒 言

心臓弁膜症において心臓内血流の状態, 心行動態, 心機能の評価は治療方針の決定や予後の予測に影響を与えるものであり, その診断評価には理学的所見の他に血管造影検査, ラジオアイソトープ検査, 心エコー法が用いられてきた。特に心ドップラーエコー法は心臓疾患の非侵襲的検査法として体外から心臓内血流の状態を定量的に捉え得るものである。しかし, 超音波を使用している性質上, 肋骨や肺により可視範囲が遮られることが欠点であり, また, 検者の技量により評価の異なることも問題となっている。

近年, 新たな画像診断装置として登場してきた MRI は心電図同期法の導入により心臓領域での適応が可能となった。核磁気共鳴現象を利用することにより骨や肺の影響を受けず, 任意の断面で撮像が可能であること, 視野が広範囲であることなどから心臓領域の新たな診断法として期待されている。さらに高速撮像法としてグラディエントエコー法が開発されてからは心臓の動きをシネ画像として表示可能となり, 弁逆流性疾患, 先天性心疾患および心機能評価に適応されるようになった^{1)~7)}。しかも, これによって得られる画像情報は従来の診断法によるものより極めて豊富であるため, 画像の読影には多くの診断知識を活用することが要求される。また, 心臓内血流および心機能の解析には手間のかかる処理過程を必要とする。心臓の状態の把握は画像情報を客観的に処理し, 定量的評価

に結び付けることによらなければ達成できないが, これを可能とするシステムは現存の MRI 装置上では未だ組み込まれていない。そこで心臓における MRI 診断のための画像処理による定量化と医学知識を備えた診断支援の一体化したエキスパートシステムの必要性が生じてくる。

本研究では最近, 心臓分野に応用されてきた MRI を対象として心臓弁疾患の画像診断支援システムの開発を行った。ここでは画像診断支援システムの構成およびその臨床応用について述べる。

方 法

1. MRI の撮像

使用 MR 装置は 0.5T 超電導 MRI である。撮像は心電図同期下にスピネエコー法により心臓を含む横断面および冠状断面にて行った。また, 弁逆流性疾患では心電図同期グラディエントエコー法により逆流を描出し得る断面にてシネ画像撮像を行った。撮像パルス系列は GRASS 法により心拍数に依存した TR, TE20ms, フリップ角 20°, 192×256 マトリックス, 加算回数 4 回にて行い, 平均 R-R 間隔の 75—80% を 13—16 分割した画像を得た。

2. 画像診断支援システムの開発

パーソナルコンピュータを用いた画像診断支援システムの開発を試みた。ここでは撮像した MR 画像に対して画像処理を行うためのシステム構成と画像の特徴パラメータを抽出するための画像処理の方法および診断知識ベースの構築について述べる。

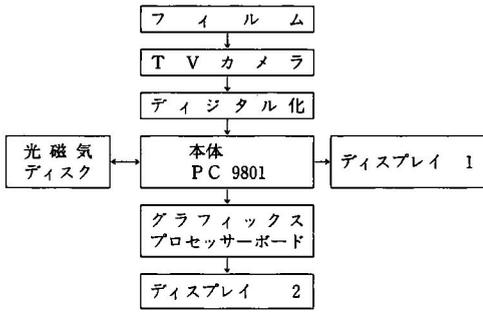
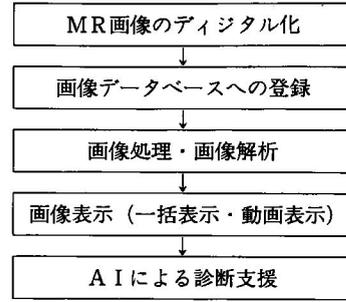


図1 画像診断支援システムの構成



AI : Artificial Intelligence

図2 画像診断支援システムの処理過程

1) システム構成

本画像診断支援システムの構成を図1に示す。本体のコンピュータには NEC 製 PC-9801を用いた。画像の収集はシャウカステンに掛けられたフィルムからテレビカメラを介して行う。収集された画像データは光磁気ディスク上に保存する。本体を経由してグラフィックスディスプレイ上に画像を出力する。もう一方のディスプレイ上では知識ベースの構築とその運用を行う。

本システムの画像処理過程を図2に示す。ディスプレイ上に表示された画像データに対し画像処理および画像解析を行う。画像は一括表示、動画表示が可能である。この後、AI(Artificial Intelligence) による診断支援を行う。

2) 画像診断のための特徴パラメータの算出

画像から得られる情報に定量的の評価を与えるためにはデジタル化し、画像処理を行い、ある特徴パラメータを算出する必要がある。心臓の弁逆流を画像より定量化するために逆流領域の検出とパラメータの算出を行う。画像診断のための特徴パラメータとして心臓における弁逆流の面積、弁口からの最大到達距離を用いる。

(1) 閾値処理

シネ MR 画像によって捉えられる逆流領域を検出するために、濃度ヒストグラムに対して閾値処理を行うことにより、逆流領域の輪郭を設定することが必要となる。図3に示すように平均値 u_1 と標準偏差 d_1 を持つ対象物と平均値 u_2 と標準偏差 d_2 を持つバックグラウンドに分けると、その S/N 比は次式によって与えられる。

$$S/N = |u_1 - u_2| / (d_1 + d_2) \dots\dots\dots(1)$$

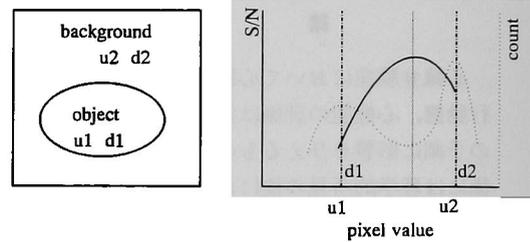


図3 閾値の設定

これにより最大の S/N 比を与える濃度値を閾値として設定する。

(2) 領域分割

閾値設定後、輪郭線を求める。輪郭線の追跡方法は、基本的には図形などの等色領域の境界線を検索しながら連結した点列として描出する方法である。

心臓弁逆流を捉えた MR 画像に対して逆流領域の検出を行うために、逆流領域の現れた部分の濃度値をヒストグラムより求め、その濃度値に対して2値化を行う。この2値化した画像に対して以下の処理を行い逆流領域の輪郭を求める。

バックグラウンドを黒画素、抽出したい領域を白画素とし、3×3画素の小領域での輪郭線検出について述べる。検出したい領域をマウスで指示すると、指示された点から左方向に移動し最初の黒画素を検出する。この黒画素のひとつ手前である白画素の点を輪郭追跡の開始点 P1とする(図4)。P1を中心に3×3画素の小領域を考える。図5の番号で示す順序で画素を

調べ、最初に見つかる白画素を P2 とする (図 6(a)). 次に P2 を中心に 3 × 3 画素の小領域を考える。ひとつ手前の点である P1 から反時計回りにひとつ進んだ点を①とし同方向に同様に画素を調べ、最初に見つかる白画素を P3 とする (図 6(b)). 点 Pn の検出後、次の点 Pn+1 を検出するときには同様に図 6(c)に示すように点 Pn-1 から始まり、反時計回りに①, ②, ……、⑦の順に画素の色を調べ、最初の白画素を点 Pn とする。こうして点 Pn と点 P1 が一致したときに輪郭線の検出を終了する。

(3) 逆流領域の特徴パラメータの抽出

画像より得られる心臓弁逆流の定量的指標として弁口からの逆流の最大到達距離および逆流領域の面積を用いた。面積は前述の処理により求めた輪郭内の領域について、1 pixel size に領域内の pixel 数を乗じて求める。

3) 心臓弁疾患診断支援知識ベースの構築

診断知識ベースの構築は人工知能言語 PROLOG を用いて行った。この言語は推論機能を持っていることが特徴であり、三段論法のように、あるふたつの事実から自動的にもうひとつの事実を導き出すことが可能である。原則を記したプロダクション・ルールの集合が互いの原則に従って、問い合わせされた事項につき自動的に解を導き出してくれるものである。このことは知識ベースの構築に有利な条件を備えていると考えられる。

心臓弁疾患に対する知識ベースは大動脈弁、

僧帽弁、肺動脈弁、三尖弁の部位別に従来からの基本的な医学知識に基づいて構築した。主に各プロダクション・ルールは主症状、理学的異常所見、各種検査所見、治療法等で構成した。このシステム上に記述された知識の削除、また新たな登録も可能である。図 7 に構築された知

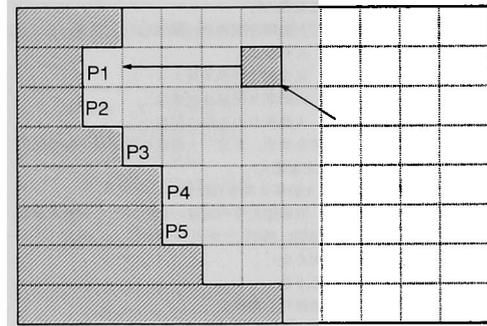


図 4 輪郭線検出の開始

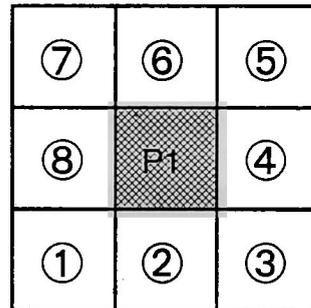


図 5 追跡の開始点における検索順序

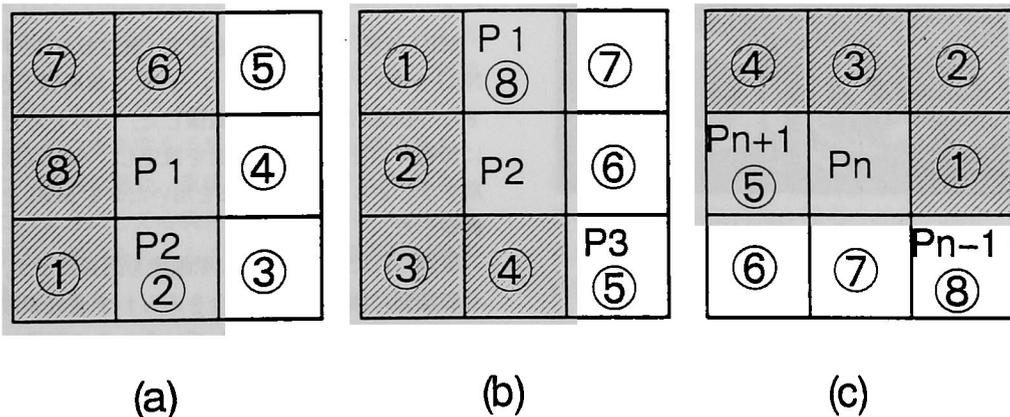


図 6 輪郭線の検索順序

自覚症状 (大動脈弁狭窄, 易疲労感).
 自覚症状 (大動脈弁狭窄, 体動時息切れ).
 自覚症状 (大動脈弁狭窄, 失神).
 自覚症状 (大動脈弁狭窄, 狭心痛).
 自覚症状 (大動脈弁狭窄, 左心不全に伴う呼吸困難).
 聴診 (大動脈弁狭窄, 収縮期駆出性雑音).
 聴診 (大動脈弁狭窄, 粗いダイヤモンド型駆出性雑音).
 聴診 (大動脈弁狭窄, II音の奇異性分裂).
 胸部 X 線 (大動脈弁狭窄, 上行大動脈の狭窄後拡張).
 胸部 X 線 (大動脈弁狭窄, 大動脈弁の石灰化).
 心電図 (大動脈弁狭窄, 洞性リズム).
 心電図 (大動脈弁狭窄, 左室肥大).
 心エコー (大動脈弁狭窄, 大動脈弁尖エコー増強).
 心エコー (大動脈弁狭窄, 左室肥大).
 心エコー (大動脈弁狭窄, 拡張期大動脈多重エコー).
 心エコー (大動脈弁狭窄, 大動脈弁閉鎖速度緩徐).
 心エコー (大動脈弁狭窄, 大動脈弁の先端の開放小).
 心カテーテル検査 (大動脈弁狭窄, 左室-大動脈の収縮期圧較差圧).
 MRI-se (大動脈弁狭窄, 左室肥大).
 MRI-se (大動脈弁狭窄, 大動脈弁狭窄後拡張).
 MRI-cine (大動脈弁狭窄, 収縮期左室内血液の信号に比し大動脈弁直
 上部の血液信号が著明に低下).
 合併症 (大動脈弁狭窄, 狭心症).
 合併症 (大動脈弁狭窄, 心不全).
 合併症 (大動脈弁狭窄, 細菌性心内膜炎).
 内科的治療 (大動脈弁狭窄, 抗生剤予防投薬).
 内科的治療 (大動脈弁狭窄, 安静).
 内科的治療 (大動脈弁狭窄, 利尿剤).
 内科的治療 (大動脈弁狭窄, シギタリス).
 外科的治療の適応 (大動脈弁狭窄, 失神).
 外科的治療の適応 (大動脈弁狭窄, 狭心症).
 外科的治療の適応 (大動脈弁狭窄, 大動脈-左室圧較差50mm Hg 以上).
 外科的治療 (大動脈弁狭窄, 弁置換).

図7 心臓弁疾患のための医学知識ベースの一部

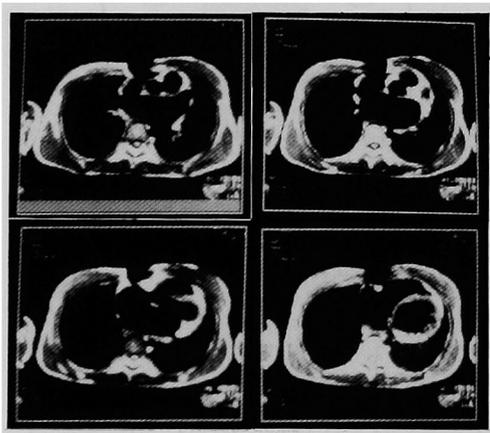


図8 スピンエコー法における横断像

識ベースの一部を示す。

担当医はここに構築された知識ベースに対して問い合わせを繰り返すことにより診断を進めていく。



図9 スピンエコー法における冠状断像

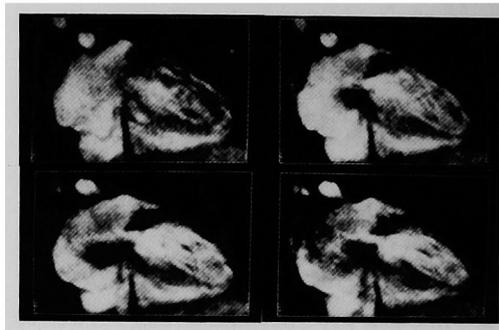


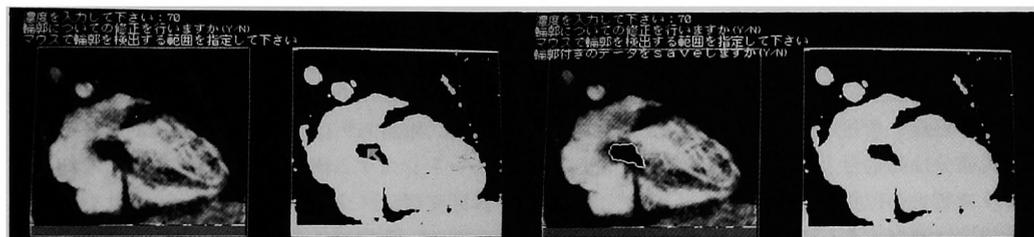
図10 シネ MRI における僧帽弁逆流

臨 床 例

症例は13歳女性。精密検査により先天性僧帽弁狭窄兼閉鎖不全症と診断された。1歳半の時、弁切開弁形成術を施行したが、逆流は残存している。

MRI 装置は0.5T 超電導装置 (横河製 RESONA) を用いた。スピンエコー法にて横断像 (図8), 冠状断像 (図9) を撮像した。これをもとに僧帽弁口を通る撮像断面を設定し, 心電図同期グラディエントエコー法を用いたシネ MRI を撮像した。

撮像されたシネ MRI の原画像を図10に示す。心収縮期に僧帽弁閉鎖不全をあらわす逆流領域が無信号領域として出現している。この画像に対して逆流の現れる濃度値で2値化したものが図11(a)である。この2値化した画像にマウスより領域を指定し, 輪郭線を求めたものが図11(b)



(a) (b)
図11 原画像を2値化した画像とマウスによる逆流領域の輪郭検出の過程

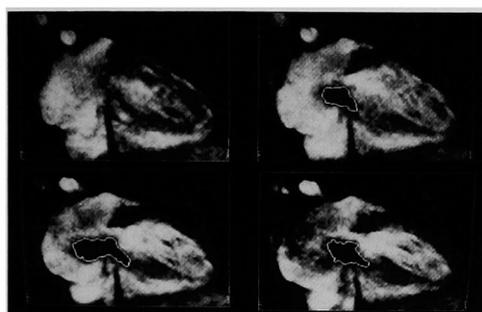


図12 各時相での逆流領域の表示

である。このように各時相のそれぞれの画像に対して輪郭線検出を行う(図12)。示した画像の弁逆流最大到達距離は2.8cm, 無信号領域の面積は4.5cm²である。

表示した画像を見ながら知識ベースへの問い合わせを行った診断過程の一部を図13に示す。スピエコー法の画像を観察することから、「左房拡大」を入力することにより可能性のある弁疾患が出力されてくる。また、「僧帽弁閉鎖不全症」という疾患名を入力することによりMRI-se法あるいはMRI-cine法における予想される所見が出力される。さらに、この症例の最大到達距離は弁口より2.8cmと算出されていることから、この値の重症度を予想することも可能である。この症例の場合、重症度はII度と判定される。このようにして心臓弁疾患のエキスパートシステムへ問い合わせることにより画像診断が効率よく行える。

考 察

(1) MRIは核磁気共鳴現象によって臓器を画像化する手法として急速に普及しつつある。電

```

| ?-MRI-se (X, 左房拡大),
X   =僧帽弁閉鎖不全症;
X   =僧帽弁狭窄症;
X   =大動脈弁閉鎖不全症;
no
| ?-MRI-se (僧帽弁閉鎖不全症, X),
X   =左房拡大;
X   =左室拡大;
X   =肺動脈拡張;
X   =肺静脈拡張;
X   =右室拡大;
no
| ?-MRI-cine (僧帽弁閉鎖不全症, X),
X   =収縮期に僧帽弁より左房内に広がる無信号域;
no
| ?-MRI-cine (僧帽弁閉鎖不全症, X, 到達距離, 2.8cm),
X   =逆流度II度;
no
    
```

図13 エキスパートシステムへの問い合わせ

離放射線による被曝がないこと、ヨード造影剤を用いることなく血管の描出が可能であることなどから非侵襲的検査法として各種臓器の診断に利用されている。さらに心電図同期法の導入により心臓領域への応用も可能となってきた。

これまで心臓の非侵襲的検査法として超音波ドプラー法の開発があり、心臓および大血管内の血流イメージが得られるようになった。しかし、超音波を用いた診断手法で体表面からの操作であるために肺や肋骨により可視範囲が制限されること、診断精度が検者の技量に依存する点が問題となっている。この点、MRIは任意の断面で撮像可能で、胸部全体の広い視野を確保できることからより客観的な評価が可能である。

(2) スピエコー法を用いたMRIでは流出効果により心筋壁と心内腔が明瞭に区別される。このため心筋壁の肥厚や心内腔の拡大の評価が

可能である。また、高速撮像法としてグラディエントエコー法が開発されてからは心電図同期法との組み合わせにより一心拍内の心血流動態の把握が可能となった。この方法によれば通常の血流成分は高信号として描出されるが、乱流によりスピンの位相がずれを生じるところでは信号強度は減弱する。これにより弁逆流の動態評価が行い得る。Sechtem⁹⁾は僧帽弁を含む各種弁疾患の評価にシネ MRI が有用であることを示している。また、久保田ら⁴⁾は心エコーと MRI による僧帽弁逆流の定量的評価を行い、両者の間に高い相関があることを指摘している。

このように心臓領域において MRI は非常に多様な診断情報を得ることができる。このことから従来からの画像診断の知識を集約的に扱う必要がある。また、弁逆流性疾患では重症度の定量的評価も可能とすることが望まれる。こうした状況から心臓弁疾患に関する MR 画像診断支援システムの開発を試みた。

(3) 本研究ではパーソナルコンピュータを用いた画像診断支援システムを開発した。画像診断のための特徴パラメータとして心臓における逆流領域の面積、最大到達距離を用いた。逆流領域の検出および面積・到達距離の算出は開発した画像診断処理手法により簡便かつ定量的に行えるようになった。さらに求めた特徴パラメータを診断支援システムへ問い合わせることにより、心臓弁逆流の重症度評価を行い得るようになった。

(4) 医学の進歩により診療上要求される医学知識のレベルは高度化し、これに対応するために医療は専門化、細分化される傾向にある。こうなると医師一個人での診療は困難となるが、それでも一定水準以上の医学知識は必要とされ

るであろう。この問題を解決するために医療の分野においても人工知能を用いた診断支援システムについての研究が盛んに行われている。例えば、堀野ら⁹⁾は心筋 SPECT に対してエキスパートシステム構築用ツール“源蔵”を用いて診断支援システムを開発している。また、桂川ら¹⁰⁾は X 線による肺疾患診断のためのコンピュータ支援システムの可能性について報告している。このような人工知能や知識情報処理のめざましい発展により、われわれの知識に基づいた判断、考察、推論などの扱いが可能となっている。今回、この一手法として人工知能言語 PROLOG を用いて心臓弁疾患のための診断知識ベースの構築を試みた。

結 論

心疾患の診断には従来からさまざまな方法が採られてきたが、近年 MRI の開発により心臓の画像診断法のひとつとして応用され始めている。本研究においてパーソナルコンピュータを用いた画像解析手法と診断支援システムを開発し、臨床応用についても検討した。画像解析は MR 画像をデジタル化することにより定量的特徴パラメータの算出を行った。また、人工知能言語 PROLOG を用いて構築した画像診断知識ベースへ問い合わせることで診断過程を支援することが可能となった。これにより心臓弁疾患に関する MR 画像診断は容易となる。

稿を終えるにあたり、御指導ならびに御校閲を賜った平木祥夫教授に深謝致します。又、研究に際して終始、懇切なる御指導をいただいた教育学部山本秀樹教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) Roderic I. Pettigrew : Dynamic Magnetic Resonance Imaging in Acquired Heart Disease. *Seminars in Ultrasound, CT, and MR* (1991) 12, 61—91.
- 2) 赤木禎治, 清松由美, 加藤裕久, 江藤仁治, 安陪等思, 西村 浩, 大竹 久 : 先天性心疾患におけるシネ MRI の有用性—形態診断と血行動態評価—. *日磁医誌* (1989) 9, 13—19.
- 3) 大西修作, 福井須賀男, 守田瑠璃子, 藤井謙司, 楠岡英雄, 北島 顕, 鎌田武信, 松浦 元, 滝沢 修 : シネ MRI 法における位相補正の意義—弁逆流疾患における検討—. *日磁医誌* (1989) 9, 175—181.

- 4) 久保田修平, 西村恒彦: シネ MRI による心疾患における弁逆流の評価—現時点での有用性の限界—. 日磁医誌 (1990) 9, 246—257.
- 5) 今野 述, 林 正博, 木庭新治, 桑原由美子, 広重壽一, 井上幸一, 山中 健, 長谷川武志, 望月 衛, 橋秀昭, 伊藤誠司, 片桐 敬, 白川豊美: Cine MRI による ASD の血流と心機能の評価. 日磁医誌 (1990) 10, 91—98.
- 6) 黒川 洋, 岡村正博, 近藤 武, 板倉一義, 安野直子, 安野泰史, 瓜谷富三, 菱田 仁, 渡辺佳彦, 水野康, 竹内 昭, 古賀祐彦, 杉石宗隆, 山口弘次郎, 梁島 隆: 心臓シネ MRI による定量的局所壁運動評価. 日磁医誌 (1990) 11, 46—53.
- 7) 西野雅巳, 大西修作, 長谷川新治, 伊藤達夫, 加藤順司, 枅形 尚, 戎野昌二, 棚橋秀生, 安野雅夫, 山田義夫, 阿部 裕, 大谷文夫: シネ MRI による下壁梗塞における右室局所壁運動の評価. 日磁医誌 (1991) 11, 113—119.
- 8) Udo Sechtem, Peter W. Pflugfelder, Richard G. Gould, et al.: Cine MR Imaging: Potential for the Evaluation of Cardiovascular Function. AJR (1987) 148, 239—246.
- 9) 堀野誠人, 細羽 実, 和弥秀信, 織内 昇, 館野 円, 井上登美夫, 佐々木泰人, 五十嵐均, 飯塚利夫: ^{201}Tl 運動負荷心筋 SPECT 診断支援エキスパートシステムの開発と応用. 核医学 (1990) 27, 93—106.
- 10) 桂川茂彦, 土井邦雄, H. MacMahon, 佐々木康夫, 柳澤 融: 間質性肺疾患のコンピュータ支援診断の可能性. 日医放誌 (1990) 50, 753—766.

**An expert system for valvular heart disease using MRI
and its clinical applications**

Tomio NAKAGAWA

**Department of Radiology,
Okayama University Medical School,
Okayama 700, Japan
(Director : Prof. Y. Hiraki)**

MRI is a valuable tool for diagnosing heart disease today. The cardiac blood flow is determined by an MRI image analysis and expert system. Image data are taken by a TV camera and digitalized. After gray level thresholding and region segmentation, the boundary of the regurgitant flow region is precisely extracted.

Using this expert system, a doctor can easily make an accurate diagnosis of the valvular heart disease.

This method should prove useful for the diagnosis of various heart diseases.