

コンピューター断層撮影 (CT) による心容積の測定

Measurement of cardiac volume by computed tomography

渡辺 滋	Shigeru WATANABE
山田 善重	Zenju YAMADA
西本 良博	Yoshihiro NISHIMOTO
吉田 秀夫	Hideo YOSHIDA
諸岡 信裕	Nobuhiro MOROOKA
高橋 長裕	Osahiro TAKAHASHI
宿谷 正毅	Masaki SHUKUYA
増田 善昭	Yoshiaki MASUDA
稲垣 義明	Yoshiaki INAGAKI
永瀬 佳子*	Yoshiko NAGASE*

Summary

Noninvasive cardiac volume measurement by computed tomography (CT) was attempted in this study. It was found that non-gated CT images were very close to the end-diastolic images by ECG-gated CT. Ten to fifteen non-gated scannings were obtained serially from the upper atria to the left diaphragm in 9 normal subjects and 72 patients (6 hypertensives, 7 aortic valvular diseases, 22 mitral valvular diseases, 5 shunt lesions and 33 ischemic heart diseases). To demarcate each chamber, contrast enhancement CT was performed by drip infusion in most cases, but it was done by 4-6 times bolus injections at the level of the left ventricle (LV) to visualize LV lumen in ischemic cardiac patients who had ventriculography.

The volume was calculated by summing each slice's volume which was obtained from the area times slice thickness (Fig. 2). The total cardiac volume and the volume of each chamber (LA, RA, RV and LV) were calculated. The interventricular septum and LV wall were included into LV volume.

There was a good relationship ($r=0.90$) between the total cardiac volume by CT and that by chest X-ray (PA and lateral views) (Fig. 4). Each volume by CT in 9 normal subjects was: 353 ± 30 ml/m² in total, RA: 53 ± 17 ml/m², LA: 54 ± 21 ml/m², RV: 90 ± 15 ml/m², and LV: 123 ± 15 ml/m² (mean \pm SD), respectively, and an increment of each volume was shown according to the hemodynamic features of various heart diseases: the total volume was increased significantly in valvular disease (Fig. 5), RA and RV volumes in mitral valvular disease with tricuspid regurgitation and ASD (Figs. 6, 7) LA volume in mitral valvular disease and shunt lesion (Fig. 8) and LV volume in aortic valvular disease and mitral regurgitation (Fig. 9). Between the left ventricular lumen volume by CT and its end-diastolic

千葉大学医学部 第三内科
千葉市亥鼻 1-8-1 (〒280)
*川鉄千葉病院
千葉市南町 1-11-12 (〒280)

The Third Department of Internal Medicine, Chiba University, Inohana 1-8-1, Chiba 280
*Kawatetsu Chiba Hospital, Minami-cho 1-11-12, Chiba 280

Presented at the 22nd Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Tokyo, March 25-26, 1981
Received for publication June 11, 1981

volume by ventriculography (area-length method), there was a good relationship ($r=0.81$) in 17 cases without cardiac aneurysms out of 22 ischemic cardiac patients examined by ventriculography (RAO and LAO views) (Fig. 11).

The cardiac CT was found very useful for measurements of cardiac volume, since it is noninvasive and quite simple yet reasonably accurate.

Key words

Computed tomography (CT) Cardiac volume Ventriculography Contrast enhancement

目 的

心機能を評価するさい、心の形態的变化のほか、心の容積を評価することも臨床的に重要なものの1つである。現在、種々の非観血的方法による心臓の、ことに心房、心室の容積測定が普及しつつある。今回、我々は近年循環器分野にも応用され始めたCTを用い、心容積の測定を試みた。

対象と方法

使用した機種は Siemens 製 Somatom 2 (スキャン時間 5 秒, スキャン幅 8 mm) および GE 製 CT/T (スキャン時間 10 秒, スキャン幅 10 mm) で、ともに心拍同期撮影の可能な第3世代スキャンである。撮影は被検者を仰臥位とし、吸気位にて呼吸停止させ、大動脈弓部から心と重なる横隔膜の出現するレベルまでの範囲を 8 mm, または 10 mm ずつ連続的にずらして、10~15 回の心拍非同期スキャンを行った。このさい、各心房、心室を分離するため、大部分の例に造影剤の急速点滴による enhancement を行ったが、虚血性心疾患で左室造影法を施行した症例では、運動の大きい心室レベルでの enhancement は、点滴法よりもさらに心室内腔を明瞭に描出できる bolus 注入法を行った。すなわち、末梢静脈から造影剤 20 ml を 3~5 秒で注入し、循環時間を参考に好機をみて、左室上部から下部まで 4~6 スライスのスキャンを行った (Fig. 1)。

CT は水平断のスライスを重ね合わせたものなので、Fig. 2-1A に示すように測定部分の断面枚数が十分に撮影されていれば、個々のスライスに

おける断面積にスキャン幅を乗じ、さらにそれらを加算することにより容積を測定することが可能である。この方法はすでに脳室、肝などの静止臓器の容積測定に使用されているが、我々はこの積算法を動く心に応用して、心全体、各心房、各心室定の容積を求めた。このさい、心全体の容積測定では単純胸部 X 線による計測と対比するため、計測に用いたスライスの上限は、大血管レベルを除外し心房上部の出現するレベル以下とし、心膜に囲まれた部分を計測した。心房の容積測定では、心房と心耳の境界が明らかに区別されない症例も少なくないため、心耳はそれぞれの心房の容積に加算し、また、心房壁はほとんど描出されないため心房壁も含めて心房容積とした。心室の容積測定では、心房と同様に心室壁を含めて心室容積とし、また、心室中隔の取り扱いには左室容積を含めて測定を行った。Bolus 注入によって左室内腔が明瞭に描出された例では、左室容積のほかに、左室内腔容積をも求めた。さらに、この左室内腔容積の計算にあたって、積算法のほかに得られた左室 CT 像のうち最大の断面をもつスライスにおいて、area-length 法をあてはめた計測法も試みた (Fig. 2-1B)。なお、数例に Somatom 2 による心拍同期 CT を行い、心室の非同期像は時相の長い拡張期のほぼ末期像に近いことを確認し、これを前提に容積測定を行った。一方、CT 施行前後 4 日以内に胸部 X 線撮影および左室造影法を行った。胸部 X 線写真は、正面像と左側面像ともに管球-フィルム距離を 2 m で撮影し、Mushoff の計算式¹⁾により心全体容量を求めた。左室造影は Siemens 製 Angioskop を用いて、

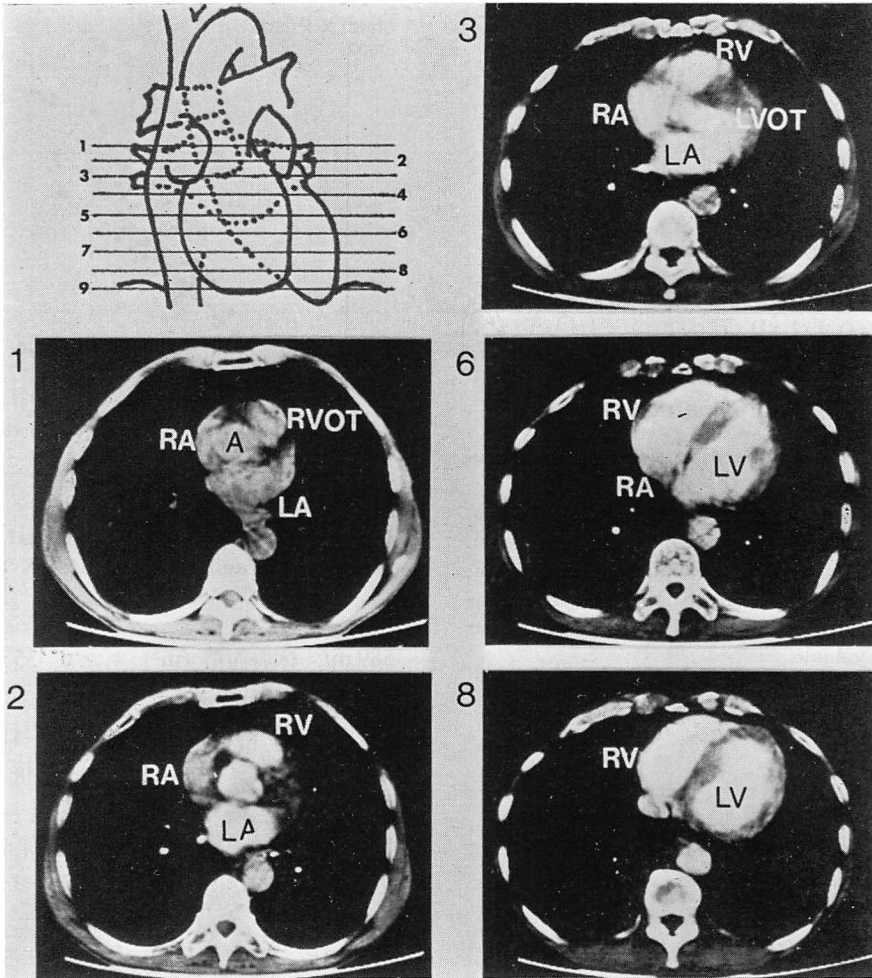


Fig. 1. Cardiac images by the contrast enhanced CT in each scanning level.

A=ascending aorta; RA=right atrium; LA=left atrium; RVOT=right ventricular outflow tract; RV=right ventricle; LVOT=left ventricular outflow tract; LV=left ventricle.

RAO および LAO の 2 方向から 35 mm シネフィルムに撮影し、Dodge らの area-length 法から、左室拡張末期容積および収縮末期容積を求めた。

対象は健常群 9 例 (45±12 歳)、高血圧症 6 例 (61±17 歳)、大動脈弁疾患 7 例 (49±22 歳)、僧帽弁疾患 22 例 (48±13 歳)、虚血性心疾患 32 例 (55±11 歳) および shunt 性心疾患 5 例 (55±12 歳) である。

結 果

予備実験として、大きさや形の異なる 4 個の簡単な粘土モデルを作成し、CT によるその容積を測定した結果、CT 容積は真の容積にきわめて近似した値を示し、両者の相関はきわめて良かった (Fig. 3). つぎに、大血管を除く心全体の容積測定を胸部 X 線写真と CT で行い、その測定値を比較したところ、両者間には $r=0.90$ の良い相関

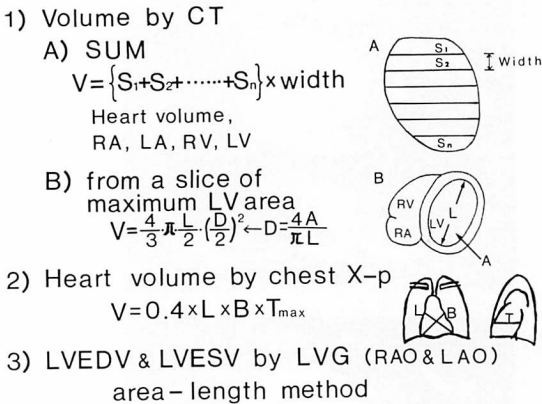


Fig. 2. Methods of cardiac volume measurement.

1) by CT 2) by chest X-P (PA and lateral views) 3) by left ventriculography (RAO and LAO views).
 S=sectional area; width=scanning slice thickness; D=short diameter; A=area; LVEDV=left ventricular end-distolic volume; LVESV=left ventricular end-systolic volume.

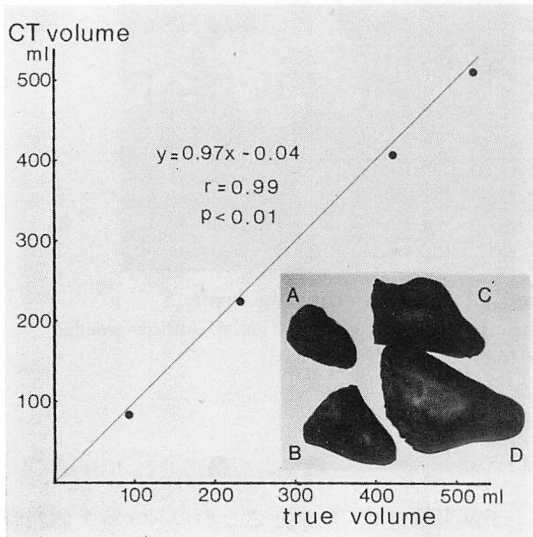


Fig. 3. CT volume and true volume in four heart models.

がみられた (Fig. 4). つぎに, 心全体, 各心房, 各心室について, CT による容積測定を行い, 各種心疾患で比較した. 健常群の心全体容積は平均

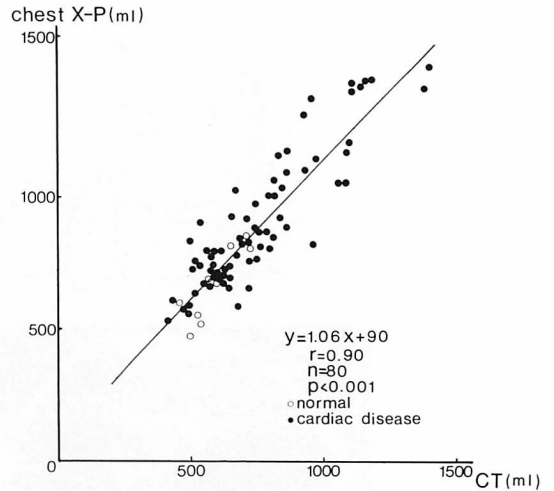


Fig. 4. Relationship between total cardiac volume by CT and that by chest X-P.

589 ml, 体表面積 (m²) あたり 353 ± 30 ml (平均 ± 標準偏差) であった.

大動脈弁疾患, 僧帽弁疾患例では健常者より有意に大きく, 三尖弁閉鎖不全を合併した僧帽弁閉鎖不全症の1例では 1,740 ml/m² と正常のほぼ5倍に達した. 高血圧症, 虚血性心疾患は正常より大きな傾向があるものの有意差はみられなかった (Fig. 5). 右房容積の比較では, 健常群のそれは平均 79 ml, 体表面積あたり 53 ± 17 ml であった. これに対し, 僧帽弁膜症および心房中隔欠損症で有意に大きく, とくに三尖弁閉鎖不全を合併した僧帽弁膜症例でその増大が著明であった (Fig. 6). 健常群の右室容積は平均 150 ml, 体表面積あたり 90 ± 15 ml であったが, 僧帽弁疾患の三尖弁閉鎖不全合併例と心房中隔欠損症群で有意に大であった (Fig. 7).

左房容積は健常群の平均が 81 ml, 体表面積あたり 54 ± 21 ml であったのに対し, 僧帽弁疾患で有意に大きく, ことに僧帽弁閉鎖不全症の中には 700~900 ml のいわゆる巨大左房を示す症例もみられた. Shunt 性心疾患では大きな傾向を示した (Fig. 8). 左室壁および心室中隔を含めた左

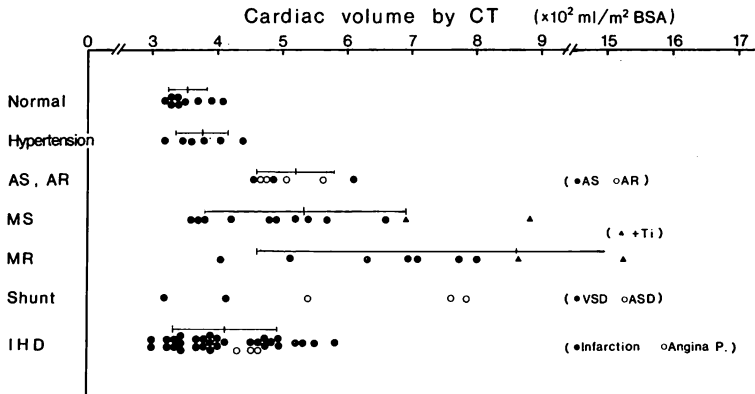


Fig. 5. Total cardiac volume per body surface area by CT in normals and in patients with heart diseases.

The indication of symbols is shown in the figure. ▲: mitral valvular disease combined tricuspid regurgitation.

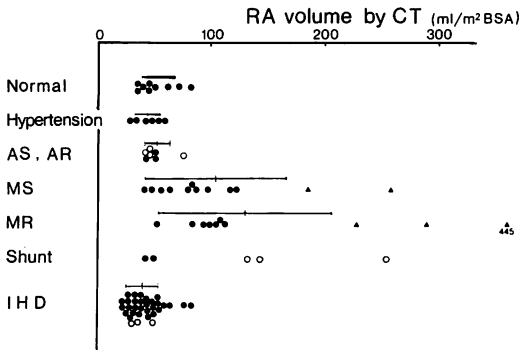


Fig. 6. RA volume by CT in normals and in patients with heart diseases.

The indication of symbols is shown as in Fig. 5.

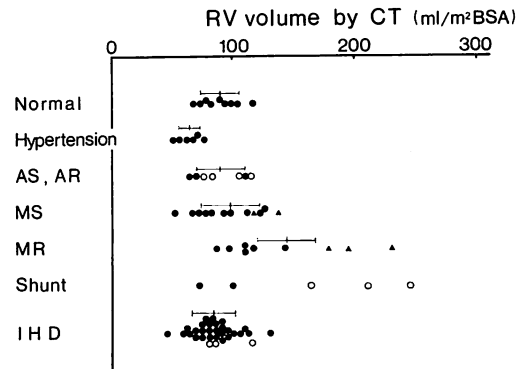


Fig. 7. RV volume by CT in normals and in patients with heart diseases.

The indication of symbols is shown as in Fig. 5.

室容積の比較では、健常群で平均 204 ml、体表面積あたり 123±15 ml であったのに対し、大動脈弁疾患と僧帽弁閉鎖不全症で有意に大であった。また、心筋梗塞症で増大のみられた症例の中に心室瘤を合併したものが 5 例あった。一方、僧帽弁狭窄症では小さい傾向を示した (Fig. 9)。

つぎに左室造影法を行った虚血性心疾患 22 例 (心筋梗塞 19 例、狭心症 3 例) については、左室内腔容積をも求め、左室造影法による収縮末期容積および拡張末期容積と比較した。CT 像から積算法によって求めた左室内腔容積は、Fig. 10 の

ごとく収縮末期容積と $r=0.79$ の関係があるが、CT 法による値が著しく大きく、心拍非同期 CT の左室容積は収縮末期容積を示すものでないことが認められた。一方、拡張末期容積との比較では Fig. 11 左図のごとく、心室瘤のない 17 例では関係式 $y=1.22x-14.4$ で、 $r=0.81$ の良い相関がみられたが、心室瘤合併例では右図のように両者の相関は $r=0.63$ に低下した。つぎに同一例について得られた左室 CT 像のうち最大断面を示すスライス像に area-length 法を応用して求め

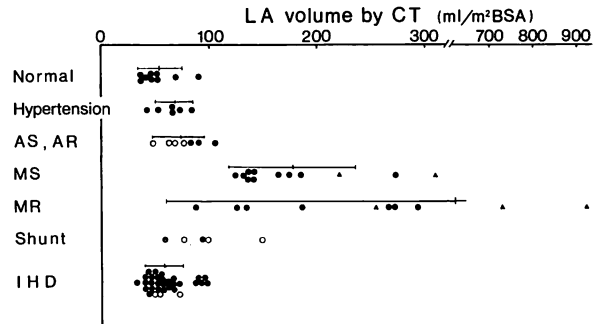


Fig. 8. LA volume by CT in normals and patients with heart diseases.
The indication of symbols is shown as in Fig. 5.

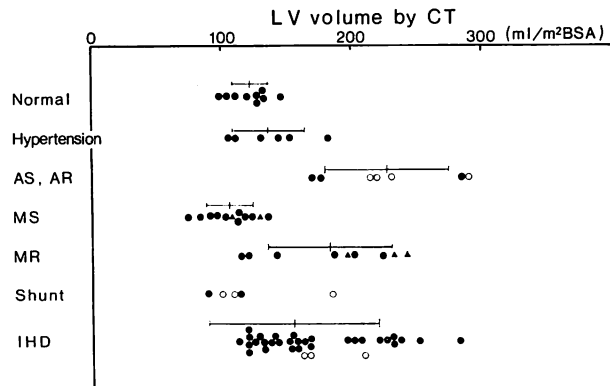


Fig. 9. LV volume by CT in normals and in patients with heart diseases.
The indication of symbols is shown as in Fig. 5.

た値と、左室造影による拡張末期容積を比較すると、両者の相関 ($r=0.63$) は積算法に比し低下していた (**Fig. 12**)。この一因として、最大断面積を示すスライスの左室 CT 像が、必ずしも左室長軸方向に一致するとはかぎらないことが考えられる。

考 案

非観血的検査法の 1 つである CT を用い、心容積測定を試みた。すでに 1977 年 Miller ら²⁾ はイヌ摘出心を用い、また、1978 年 Lipton ら³⁾ は human cast を用いて、CT から算出した左室容積を真の容積と対比し、 $r=0.998$ ときわめて良

い相関のあることを報告している。我々も、大きさ、形の異なる 4 つの粘土モデルを作成し、静止物体における CT 容積は真の容積にきわめて近いことが同様に認められた。

活発に動く心に対しては、50 msec 以内の超高速撮影が望まれるが、そのような装置は現在開発段階にあり、臨床的には利用されていない。現時点ではこれに代わるものとして、心拍同期 CT 法が行われているが、画像の処理になお問題が残る、また全症例にしかも多くのレベルで心拍同期を行うことは、検査時間、X線被曝、コンピュータ容量などの制約で、現在のところ不可能に近いように思われる。

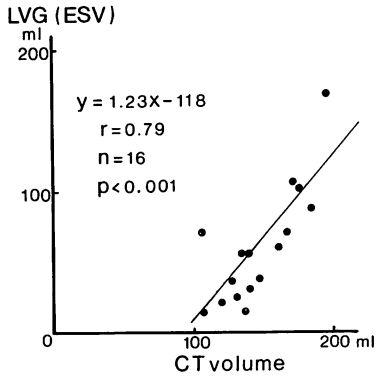


Fig. 10. Relationship between left ventricular lumen volume by CT and left ventricular and systolic volume by ventriculography (ESV).

There is a good relationship ($r=0.79$) in 16 ischemic cardiac patients without aneurysms. But large discrepancy of the volume by both methods is present in a few cases which seems to be due to a difference in cardiac phases.

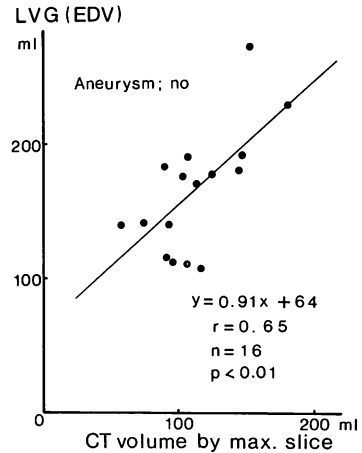


Fig. 12. The measurement of LV volume tried by area-length method on a computed tomogram showing maximum area of LV (CT volume by max. slice).

The relationship between the CT volume and left ventricular end-diastolic volume (EDV) is poor ($r=0.65$).

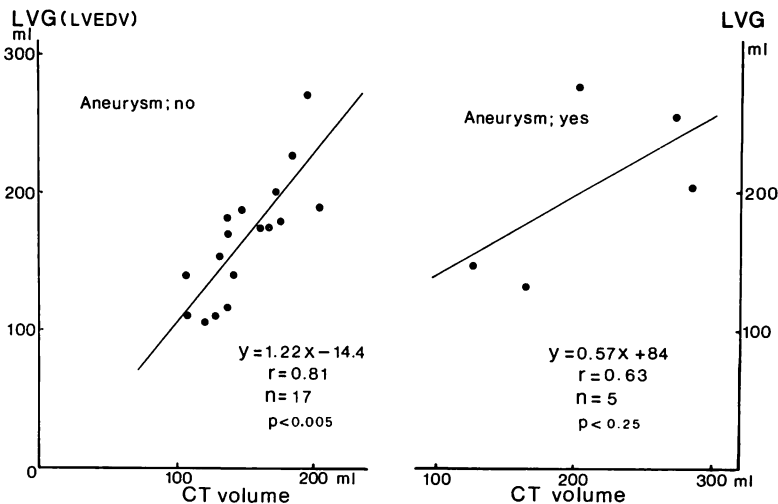


Fig. 11. Relationship between left ventricular lumen volume by CT and left ventricular end-diastolic volume (LVEDV) by ventriculography.

There is a good relationship ($r=0.81$) in 17 cases without cardiac aneurysms, but the relationship is not so good ($r=0.61$) in 5 cases with aneurysms. The volume by CT is slightly smaller than the angiographic volume in general.

数例ではあるが, 我々の心拍同期造影 CT による各心腔の大きさをみると, 非同期像はほぼ心室の拡張末期像に近く, また, 理論的にも長い時相である拡張期の点をとらえていることが推察される. そこで, 以上のような前提のもとで, より簡便で患者に負担を与えない非同期 CT を用いて心容積を測定した.

単純胸部 X 線写真から心容積を算出する方法は, 1916年の Rohrer⁴⁾ 以来古くから行われており, これまでに幾つかの計算式が提案された. 今回, 我々は管球-フィルム距離の等しい Musshoff⁵⁾ の式を用いて心容積を算出し, CT 法による心容積と比較したが, その関係は $r=0.90$ と良い相関を示した. この点, 心全体の容積測定に関し, CT は胸部 X 線写真によるものと大差はないことになるが, CT によれば心全体だけでなく各心腔の区別が可能であり, それぞれの容積を容易に算出することができる. 心造影法のさいの右房, 右室, 左室の容積測定に Simpson's rule を使用することが測定値の正確度を高めるといわれているが, それは積算法が原理的にきわめて単純で, 仮定を含んでいないためである. しかし, 心造影法にそれを応用することは時間がかかり, 現在余り用いられていない. CT による水平断層像は積算法が容易であり, 容積測定を行うのに最も適した方法と考えられる.

CT による各心腔の容積測定により, 各種心疾患における病態的变化をとらえることが可能であったが, 非同期 CT という点から絶対的容量としての評価には問題があるとはいえ, 各疾患群間の比較, あるいは同一症例の追跡のような相対的な評価には有用であろう. さらに, 心機能を表わす重要な指標の1つとしての左室容積では, 超音波断層法による測定と左室造影法による測定の対比が最近行われている^{5,6)} が, 我々は非同期 CT から得られた左室内腔容積と左室造影法の収縮末期および拡張末期容積とを対比した. CT の積算法から求めた左室内腔容積と拡張末期容積の比較では, 心室瘤のない場合, $r=0.81$ と比較的良好

相関がみられたが, これは CT 法と左室造影法が同一時点で施行されたものでないことを考えればほぼ満足すべき結果と思われる. 本法が非同期法という点で問題が残されているにしても, 非観血法であることを考えれば今後の臨床的有用性を示唆するものと思われる. 一方, 心室瘤のある場合, 両者の関係は薄らいだが, 左室造影法でも心室瘤のある場合は測定誤差が大きくなることが考えられるので, 今後, この点に関しても症例を重ねて検討していきたい.

以上のような心容積の測定は単に心の解剖学的変化をとらえるだけでなく, その背後にある病態生理的变化を知る上でも重要である. 我々はすでに CT による左房および肺動脈の大きさが肺動脈圧の指標として有用であることを示しており⁷⁾, また, 超高速 CT 装置や心拍同期法の進歩は心拍出量, 駆出率の測定を可能にすると思われる.

結 論

心 CT 法は非観血的で繰り返し検査ができ, 撮影方法もきわめて簡単で, しかも, 骨や肺の影響を受けず客観的に表示され, かつ, 拡大率の補正も要しない. 今回, 各種心疾患における心容積の測定, および胸部 X 線あるいは左室造影法による心容積測定と比較し, 非同期 CT でも定量的評価の点で臨床的に有用であると思われた.

要 約

非観血的方法である CT を応用して, 心容積測定を試みた. 心拍非同期 CT 像は心拍同期 CT による拡張末期像に類似している. 心房上部レベルから左横隔膜出現までの範囲を, 心拍非同期スキャンを連続的に 10~15 回施行した. 対象は健常 9 例, 心疾患 72 例(高血圧症 6, 大動脈弁疾患 7, 僧帽弁疾患 22, シヤント性心疾患 5, 虚血性心疾患 33)である. 各心腔を分離するため, 多くの例に造影剤点滴による enhancement CT を行ったが, 左室造影を施行した虚血性心疾患患者には, 左室内腔をさらに明瞭にするため bolus

注入を4~6回行った。

各スライスにおける面積にスライス幅を乗じ、それらを積算すれば容積が得られる (Fig. 2)。心全体および各心腔(左房, 右房, 右室, 左室)の容積を測定した。なお, 心室中隔, 左室自由壁は左室容積に含めた。

CTによる心全体の容積と胸部 X線写真(正面像と側面像)によるそれとの間には良い相関($r=0.90$)がみられた (Fig. 4)。健常9例のCTによる体表面積あたりの容積は, 心全体が $353 \pm 30 \text{ ml/m}^2$, 右房 $53 \pm 17 \text{ ml/m}^2$, 左房 $54 \pm 21 \text{ ml/m}^2$, 右室 $90 \pm 15 \text{ ml/m}^2$, 左室 $123 \pm 15 \text{ ml/m}^2$ であった。また, 各心腔容積の増加は心疾患の病態的特徴に応じてみられた。すなわち, 心全体の容積は弁膜疾患で有意に大きく, 右房および右室は三尖弁閉鎖不全を合併した僧帽弁疾患と心房中隔欠損症で (Figs. 6, 7), 左房は僧帽弁疾患とシャント性心疾患で (Fig. 8), 左室は大動脈弁疾患と僧帽弁閉鎖不全症で (Fig. 9) それぞれ容積の増大がみられた。CTによる左室内腔容積と左室造影による拡張末期容積を比較すると, 左室造影(右前斜位と左前斜位)を行った22例の虚血性心疾患のうち心臓瘤を合併しない17例の検討では良い相関($r=0.81$)がみられた (Fig. 11)。

非観血的で簡便かつかなり正確な心 CT は心

容積測定にきわめて有用であった。

文献

- 1) Musshoff K: Die Methoden der röntgenologischen Herzvolumenbestimmung und ihre Fehlerbreite. Fortschr Röntgenstr **100**: 165-180, 1964
- 2) Miller SW, Dinsmore RE, Wittenberg J, Maturi RA, Powell WJ: Right and left ventricular volumes and wall measurements: Determination by computed tomography in arrested canine hearts. Am J Roentgenol **129**: 257-261, 1977
- 3) Lipton MJ, Hayashi TT, Boyd D, Carlsson E: Measurement of left ventricular cast volume by computed tomography. Radiology **127**: 419-423, 1978
- 4) Rohrer F: Volumbestimmung von Körperhöhlen und Organen auf orthodiagraphischen Wege. Fortschr Röntgenstr **24**: 285-294, 1916
- 5) Fukaya T, Tomita Y, Baba K, Owaki T, Yoshikawa J: Computed-aided system analyzing left ventricular volume by real time cross-sectional echocardiograms. J Cardiography **8**: 431-438, 1978 (in Japanese)
- 6) Fujii J, Aizawa T, Kuboki M, Ono S, Watanabe H, Ohta A, Koyama S, Kato K: Measurement of the left ventricular volume by real time two dimensional echocardiography—Its application in the ischemic heart disease. Respiration & Circulation **29**: 177-183, 1981 (in Japanese)
- 7) Masuda Y, Yoshida H, Watanabe S: Measurement of the heart by computed tomography. Respiration & Circulation **29**: 251-260, 1981 (in Japanese)