



Title	ECG Gated MDCTにおける時間分解能と測定精度との相関に関する基礎検討
Author(s)	沈, 雲; 陣崎, 雅弘; 佐藤, 浩三 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 2005, 65(3), p. 233-239
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/16405
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ECG Gated MDCTにおける時間分解能と測定精度との相関に関する基礎検討

沈 雲¹⁾ 陣崎 雅弘²⁾ 佐藤 浩三²⁾ 栗林 幸夫²⁾

1)GE横河メディカルシステム株式会社 2)慶應義塾大学医学部放射線診断科

Correlation of Effective Temporal Resolution and Accuracy of Volume Ejection Fraction on the ECG-gated Cardiac MDCT

Yun Shen¹⁾, Masahiro Jinzaki²⁾, Kozo Sato²⁾, and Sachio Kurabayashi²⁾

Purpose: ECG-gated cardiac MDCT offers many cardiac clinical applications. The goals of this report are 1) to introduce a new concept of effective reliability (ER) from effective temporal resolution for the evaluation of ejection fraction (EF) and evaluation of image quality (IQ) of coronary arteries, and 2) to show the correlation of ER and the accuracy of EF with different cardiac reconstruction algorithms and different rotation speeds.

Methods and Materials: To assess the accuracy of EF, helical scanning was performed with a gated cardiac MDCT (GE LightSpeed, 8/16 slice) on pulsating cardiac coronary phantoms (0.5 and 0.6 sec rotation speed for each 50-110 bpm, 5-bpm step). We define effective reliability (ER) from effective temporal resolution (%) as follows: $ER = (1 - TR/HC) \times 100$; TR: Effective temporal resolution, HC: time of heart cycle in each bpm.

Results: From the results of the EF measurement and calculated ER, high accuracy was obtained by using optimal scan conditions (optimal rotation speed and cardiac reconstruction algorithm) in a wide range of heart rates (heart rate < 90: EF & ER > 81%; heart rate < 110 bpm: EF & ER > 73%). Results showed that the calculated ER is closely correlated with the measurement results of EF based on the phantom experiment ($R^2 = 0.901 \pm 0.075$; Max: 0.994, Min: 0.738). Optimal reconstruction thickness can reduce total image number for the evaluation of EF.

Conclusion: We concluded that the ER is useful to evaluate EF accuracy and the IQ of images of coronary arteries.

Research Code No.: 206.1

Key words: MDCT, Cardiac phantom, Ejection fraction, Function, Temporal resolution

Received Aug. 26, 2004; revision accepted Mar. 14, 2005

1) GE Yokogawa Medical Systems, Ltd.

2) Department of Radiology, Keio University

別刷請求先

〒191-8503 東京都日野市旭が丘4-7-127

GE横河メディカルシステム株式会社

沈 雲

緒 言

心臓・冠動脈への応用はMDCT¹⁾⁻⁶⁾による臨床応用中にもっとも注目されている⁷⁾⁻¹⁷⁾。心臓診断領域に応用する場合は、一回の息止めを容易に行える(<20s)スキャン時間で、高い時間分解能/高い空間分解能/広い範囲の三者が同時に達成することが重要であるので、心臓診断はMDCTの多列化、ならびに40mm VCT(Volume CT)の実用化の恩恵をもつとも受けける部位と思われる。一方、心機能を評価するためには、従来において核医学並びにMRによる駆出率(EF: ejection fraction)などの測定が行われているが、最近はMDCTを用いて、心駆出率の評価も注目されている。異なる心拍数領域において、異なる心電図同期画像再構成アルゴリズムで得られた時間分解能は、いかに心駆出率の測定精度に影響を及ぼすか。それについての定量評価並びに定量解析は、MDCTによる心機能の評価である心駆出率の診断手法の確立には重要と考えられる。本論文の目的は撮影・再構成条件で計算された時間分解能と実際の測定で得られた心駆出率の相関を調べるものである。ここで、まず、撮影・再構成条件(心拍数、回転速度、再構成アルゴリズム)で得られた実効時間分解能を基に考案した実効信頼度の概念を導入し、心臓動態ファントムを用いて異なる撮影・再構成条件で得られた心駆出率の結果との比較を行う。

方 法

1. 実験方法

実験で使われていた心臓動態ファントム¹⁸⁾は、主に心電図同期CTのために開発され、6つの部分によって構成されている(Fig. 1)。①サーボモータを主とし、X-Y方向およびZ方向に駆動する駆動部；②駆出率、心拍動の形状(Fig. 1B), 1 Loop(スキャン)中の心拍の変動(Fig. 1C), 不整脈(Fig. 1C)などの心拍データをプログラム化するための制御部；③実験タンク部分およびファントムの形状を支えるサポート部；④心室を模擬する心室ファントム部；⑤模擬冠動脈並びに心室ファントム周囲に模擬冠動脈を固定するための冠動脈部；⑥心電図同期信号出力、心拍数モニター、

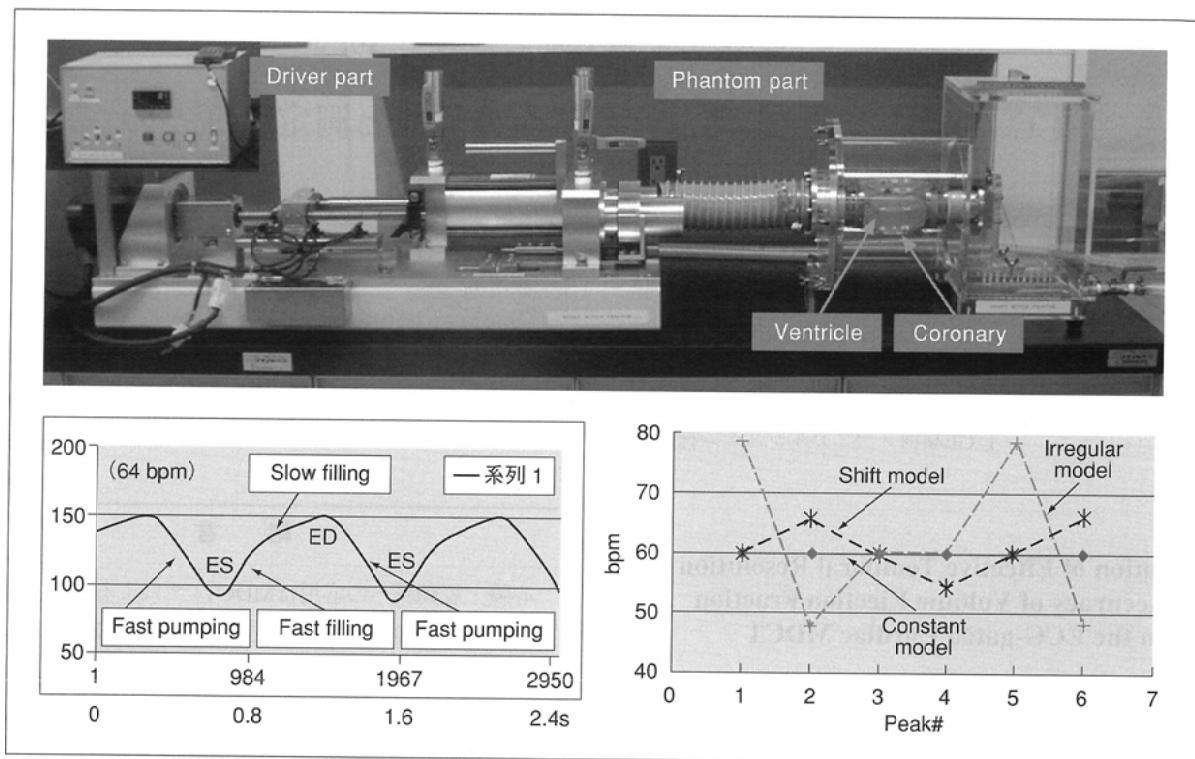


Fig. 1 Pulsating cardiac phantom and key advantages.
A: View of pulsating cardiac phantom.

B: Motion shape of phantom with three phases. x-axis is time and y-axis is volume.

C: Shift model and irregular model of heartbeat. x-axis shows cycle numbers of heartbeat, y-axis shows bpm.

The real heart wave with fast pumping, fast filling, and slow filling phases can be incorporated by using the driver sequence, and the variation in patient heartbeat or irregular pulse can be designed by using different driver sequence cycles.

および計16種類の心拍動パターンを選択できる表示操作部。このファントムの大きな特徴の1つはピストンを駆動することで心拍を発生させているが、正弦波形ではない実際の左心室の動き(Fig. 1B: three of fast filling and slow filling, fast pumping)を模擬することが可能である。さらに、このファントムにおいて、心拍数の増加に従い、拡張期は短くなり、拍動の形状は正弦波(two phase: fast filling & fast pumping)に近づくことになる。

開発されたこの心臓動態ファントムを用いて、EFの評価を行う。ヘリカルピッチは0.275:1, 120kV, 0.5s/300mA, 0.6s/250mAを使用する。検出器の構成は8×1.25mm(GE LightSpeed Ultra)と16×0.625mm(GE LightSpeed Ultra 16)に固定している。心臓動態ファントムの心拍数を50～110bpmに拍動させ(step 5bpm)，それぞれの心拍数に対して0.5s/rと0.6s/rの両方の回転速度でスキャンを行う。2. で述べる3つの心臓再構成アルゴリズム(CHR: SnapShot Segment; MSR-2: SnapShot Burst; MSR-4: SnapShot Burst Plus)による画像再構成を行い、EFを計測し、実効時間分解能との相関を定量的に検討する。

心駆出率であるEFは次の式を用いて定義することができる。

$$EF(\%) = 100 \times (ED - ES)/ED \dots \dots \dots (1)$$

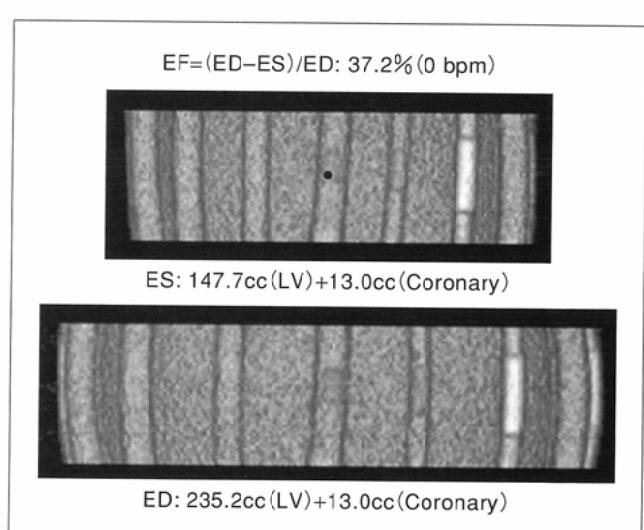


Fig. 2 Typical example of ejection fraction (EF) measurement.

A: Volume and 3D image of ES phase.
B: Volume and 3D image of ED phase.
Scan mode: 16×0.625 mm.

ここで、EDは拡張末期、ESは収縮末期である。この心臓動態ファントムのESの位相が40%となり、EDは90%になる。測定期として、静止状態(0bpm)のときのEFはFig. 2で示され、37.2%になる(ED: 235.2cc; ES: 147.7cc)。一方、

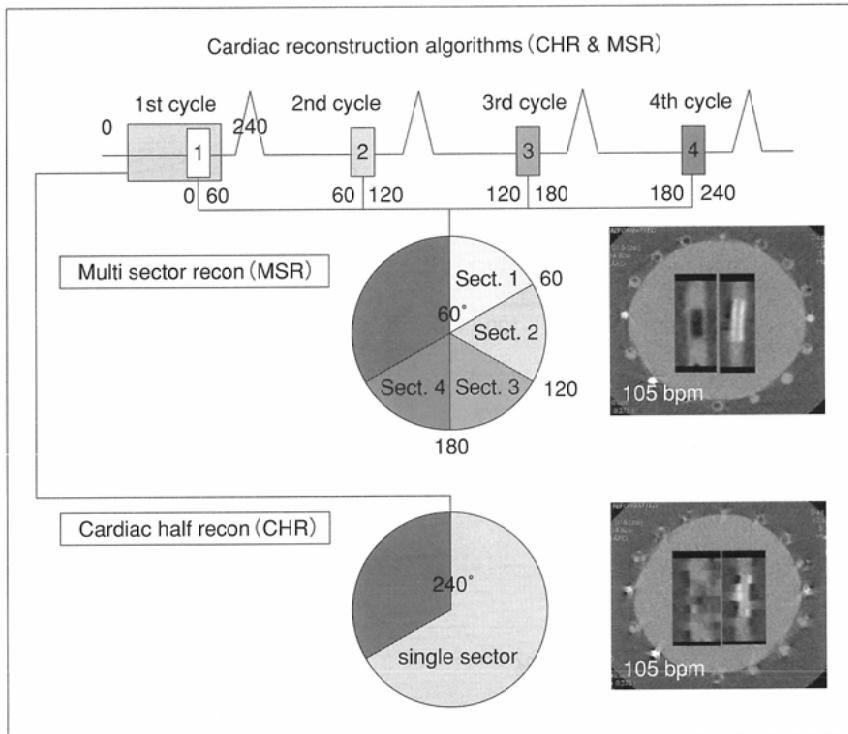


Fig. 3 Two cardiac reconstruction algorithms.
The cardiac half-reconstruction algorithm uses a single sector and information from one ECG; the multi-sector reconstruction algorithm uses multiple sectors and information from multiple ECG cycles.

通常のMR並びにCTによる左心室機能を評価する際、多段面短軸シネ画像を基に、内腔を閾値設定によってトレースさせて、各断層像の左心室面積×スライス厚を積算することによって求めるシンプソン(Simpson)法という手法が採用されている¹⁹⁾。

また、異なるEFでの異なる実験間を比較するために、次の定義でEFの正規化を行うことが可能である。

$$EF_{nor} (\%) = 100 \times EF / EF_{0bpm} \dots \dots \dots (2)$$

従って、静止状態である0bpmのときの EF_{nor} は100%になる。

2. 心臓専用画像再構成アルゴリズム^{4), 5)}

MDCTによる心臓領域での画像再構成を行うとき、EBCTと同じように、ECG(心電図同期)ゲートスキャン機能は不可欠である。心拍動の影響を最小限に抑えるために開発された心電図同期画像再構成アルゴリズムは、主に低心拍数用のcardiac half reconstruction (CHR)と中・高心拍数用のmulti sector reconstruction (MSR)の2種類がある(Fig. 3)⁴⁾。CHR(SnapShot Segment)はECGゲートスキャン機能と180°+ファン角分(約3分の2回転)のデータから画像再構成するハーフ再構成アルゴリズムを組み合わせることによって実現されたのに対して、MSRは複数の心拍周期から同位相であるが異なる回転角度のデータを抽出し、これらを組み合わせることで再構成用データ(180°+ファン角分)を作成しているので、CHRより高い時間分解能を有する(最大CHRの4倍で、0.5s/rの場合に63ms)。なお、MSRの時間分解能は、再構成に許される最大セクタ数によって制限された。本研究においては、最大2セクタであるMSR-2(SnapShot Burst)と、最大4セクタであるMSR-4(SnapShot Burst Plus)が採用された。

作成しているので、CHRより高い時間分解能を有する(最大CHRの4倍で、0.5s/rの場合に63ms)。なお、MSRの時間分解能は、再構成に許される最大セクタ数によって制限された。本研究においては、最大2セクタであるMSR-2(SnapShot Burst)と、最大4セクタであるMSR-4(SnapShot Burst Plus)が採用された。

3. 実効時間分解能と実効信頼度

異なる撮影・再構成条件(心拍数、回転速度、再構成アルゴリズム)で計算された実効時間分解能はFig. 4で示し、横軸は心拍数(bpm)であり、縦軸は実効時間分解能(TR)である。MSR-4の実効時間分解能において、心拍領域によって0.5s/rが高時間分解能を示し、あるいは0.6s/rが高時間分解能を示していることが確認できる。一方、CHRは異なる心拍に対してその実効的な時間分解能(TR)は一定であるが、心拍数が高くなるにつれてRR間隔(THC)が短くなり、CHRで得られた実効時間分解能(TR)の割合が相対的に低くなり、画質並びに測定精度の劣化が予測される。ここで、このように心拍数のRR間隔に対する時間分解能の相対値の確からしさは信頼度(reliability)として以下のように定義する。

$$ER (\%) = 100 \times (1 - TR / THC) \dots \dots \dots (3)$$

式(3)において、実効時間分解能であるTRを使用するので、ここで実効信頼度(ER: effective reliability)と呼ぶことになる。静止状態である0bpmのときのERは EF_{nor} と同じ100

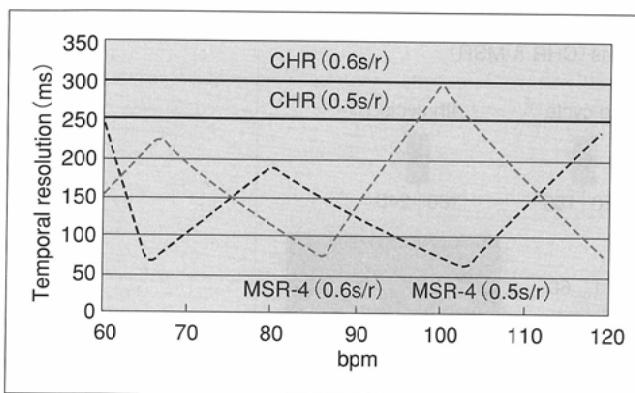


Fig. 4 Effective temporal resolution (TR) with different gantry rotation speeds and reconstruction algorithms. The solid lines show results of the cardiac half-reconstruction (CHR) algorithm; and the dotted lines show results of the multi-sector reconstruction with maximum 4 sectors (MSR-4) algorithm.

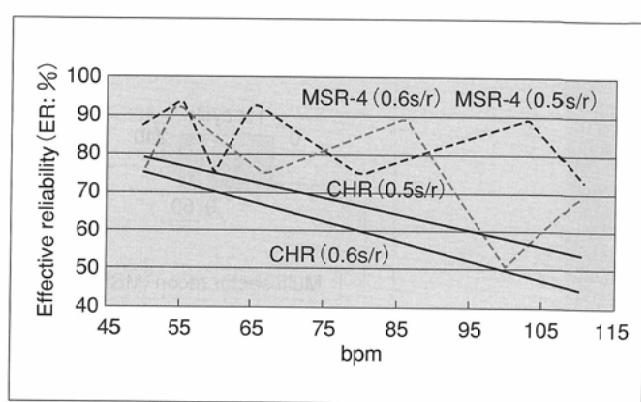


Fig. 5 Effective reliability (ER) with different gantry rotation speeds and reconstruction algorithms. The solid lines show the result of the cardiac half-reconstruction algorithm (CHR); the dotted lines show the results of the multi-sector reconstruction with maximum 4 sectors (MSR-4) algorithm.

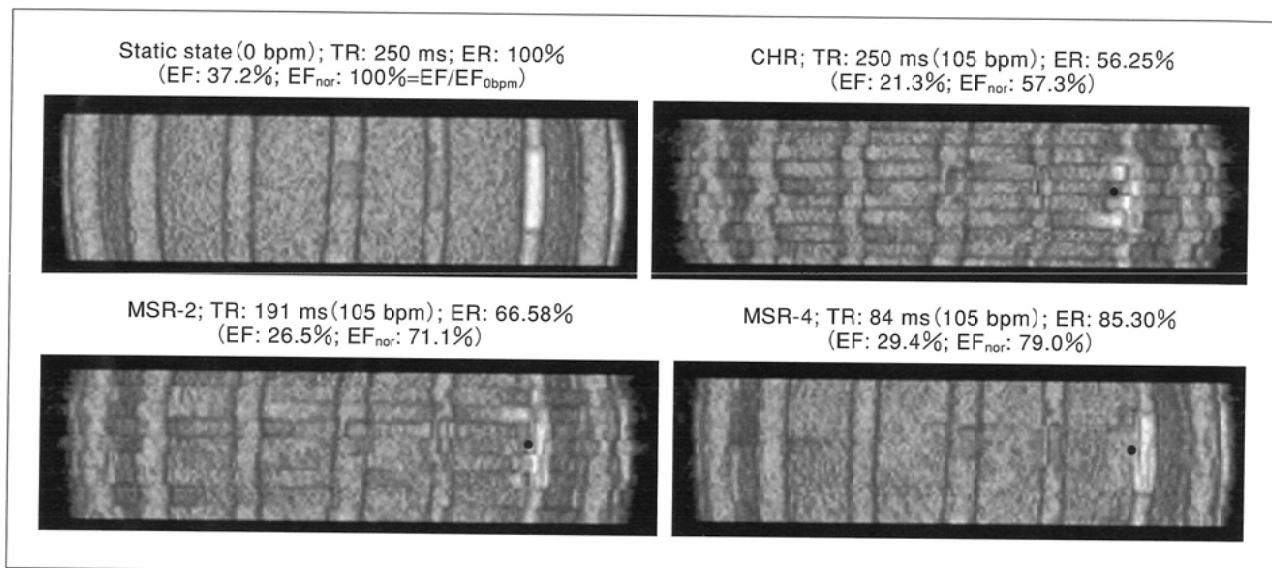


Fig. 6 Three-dimensional (3D) image and the results of measured ejection fraction (EF) and calculated effective reliability (ER) with different cardiac reconstruction algorithms.
A: Result with static state.
B: Result with cardiac half-reconstruction (CHR).
C: Result with multi-sector reconstruction with maximum 2 sectors (MSR-2).
D: Result with multi-sector reconstruction with maximum 4 sectors (MSR-4).
Scan mode: 16×0.625 mm.
The cardiac image quality and accuracy of EF and ER were improved by using the high temporal resolution cardiac reconstruction algorithms.

A	B
C	D

%になる。

Fig. 4は式(3)を使用するとFig. 5になる。横軸は心拍数(bpm)であり、縦軸は実効信頼度(ER)である。Fig. 4のCHRの時間分解能(TR)と比較して、Fig. 5で示されているCHRの実効信頼度(ER)は、心拍数の増加に伴い、単調的に低下していく。

Fig. 5から分かるように、異なる心拍数領域において最適な回転速度とMSR-4を使用することによって、90bpmまで、81.2%以上、110bpmまででも、73.9%以上の実効信頼度(ER)を有することが確認された。

結 果

1)異なる撮影・再構成条件での心駆出率の測定結果

Fig. 6は105bpmのときの異なるアルゴリズムで得られた心駆出率(EF_{nor})の結果を示す。Fig. 6の(A), (B), (C), (D)はそれぞれ静止状態、105bpmのときのCHR, MSR-2, MSR-4のときの画像を示す。Fig. 6には、EF_{nor}、計算で得られた実効信頼度(ER)と実効時間分解能(TR)もまとめられている。静止状態(EF_{nor}, ER: 100%)と比較して、CHR, MSR-2とMSR-4の順で、時間分解能の改善とともに、EF_{nor}とERも

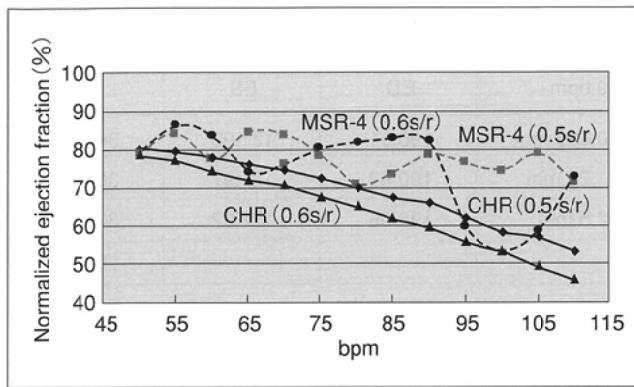


Fig. 7 Results of ejection fraction (EF) with different gantry rotation speeds and reconstruction algorithms. The solid lines show the results of the cardiac half-reconstruction (CHR) algorithm; the dotted lines show the results of the multi-sector reconstruction with maximum 4 sectors (MSR-4) algorithm. Scan mode: 16×0.625 mm.

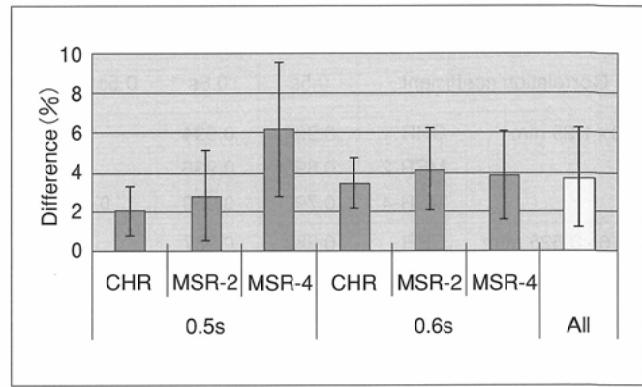


Fig. 8 Difference between the measured ejection fraction (EF) and calculated effective reliability (ER) with different gantry rotation speeds and reconstruction algorithms at all bpm (50–110 bpm). It was shown that ER has a good correlation with EF (for all cases: $3.78\% \pm 2.52\%$).

改善され、また、banding artifactの低減を主とする画像の画質も改善された。Fig. 7は異なる心拍数の心駆出率(EF_{nor})の測定結果が示されている。横軸は心拍数であり、縦軸は EF_{nor} である。異なる心拍数領域において最適な回転速度とMSR-4を使用することによって、90bpmまで、80.6%以上、110bpmまででも、72.9%以上のEFの測定精度を有することが確認された。CHRより、MSR-4のはうがより高いEF測定精度があることが確認された。MSR-4において、心拍数(bpm)の増加に伴って、EFの測定精度がCHRのように単調的に劣化していくのではなく、そのときの実効時間分解能との相関があることが考えられ、75~90bpmの心拍領域において、早い回転速度(0.5s/r)で得られたEFより、むしろ遅い回転速度(0.6s/r)で得られたEFのはうがより良い精度を有することが確認された。Fig. 5の実効信頼度(ER)の結果と比較すると、傾向的によく一致することが確認された。

2. 心駆出率の測定精度と実効信頼度との相関

すべての心拍数(50~110bpm)について、異なる撮影・再構成条件において、提案された実効信頼度(ER)と実際の測定結果(EF_{nor})の比較(両者の差:difference)はFig. 8で示されている。すべてのスキャン条件において、かなりよく一致することが確認された(両者の相違: $3.78 \pm 2.52\%$)。

EFの測定結果と実効信頼度との相関関係を定量的に評価する結果は、Fig. 9にまとめられた。上段は0.5s/r、CHRのときの結果を示し、横軸は計算で得られた実効信頼度、縦軸はEFの測定結果、0.9938という非常に良い相関が確認された。下段はすべてのデータを使ったときの相関係数を示している。それでも、0.8675という高い相関が確認された。

それぞれのスキャン条件ときの相関係数はTable 1にまとめられている。 0.901 ± 0.075 という非常に高い相関係数が得られ、導入した実効信頼度(ER)を用いて心機能(EF)の測定精度を評価することが可能であることを示している。

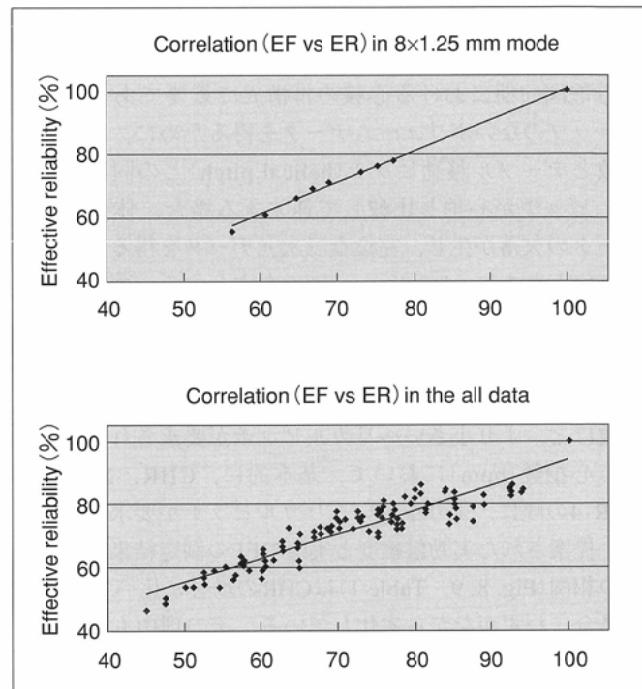


Fig. 9 Correlation coefficient of ejection fraction (EF) and effective reliability (ER). A: The results of correlation ($R^2=0.9938$) between EF and ER in the cardiac half-reconstruction (CHR) and 8×1.25 mm mode. B: The results of correlation ($R^2=0.8675$) between EF and ER for all data (different scan modes, rotation speeds, and cardiac reconstruction algorithms). Good correlation coefficients were confirmed ($R^2=0.901 \pm 0.075$; Max: 0.994, Min: 0.738).

3) 心駆出率の測定精度と再構成スライス厚との相関

Table 2 は異なる再構成スライス厚でのEFの測定結果を示している。Table 3にはCHRでの異なる心拍数でのEFの結果を示し、心拍数の増加(50~70bpmまで)に伴って、4.5%の測定精度の劣化が確認された。それに対して、スライス厚の変化によるEFの測定精度への影響は、無視できる程度

Table 1 Correlation coefficient of ejection fraction (EF) and effective reliability (ER) under different scan conditions

Correlation coefficient		0.5s	0.6s	0.5s & 0.6s
8×1.25 mm	CHR	0.994	0.994	0.872
	MSR-2	0.890	0.936	
	MSR-4	0.792	0.950	
16×0.625 mm	CHR	0.983	0.987	0.880
	MSR-2	0.852	0.936	
	MSR-4	0.738	0.932	
All		0.808	0.910	0.868

(0.2%)であることが確認された。

一方、Table 4は異なる再構成スライス厚でのノイズの測定結果が示され、再構成スライス厚の増加とともに、著しくノイズの低減(>40%)は確認された。

考 察

心電図同期における心臓の再構成で重要なのは、ギャップのないボリュームデータを得るために、患者の心拍数とテーブル移動ピッチ(helical pitch)との同期性である。ピッチが心拍と比較して速すぎる場合、体軸方向にデータの欠落が生じ、完全な三次元データを得ることができないとともに、banding artifactを主とする、画質の劣化に繋がると考えられる。逆にピッチを抑えすぎると、患者の被曝(DOSE)を増加するか、スキャン範囲が制限されてしまうことになる。同じ再構成アルゴリズムにおいて、低心拍数ほど、より小さいヘリカルピッチが要求されている。同じ心拍数(bpm)において、基本的に、CHR, MSR-2とMSR-4の順に、より小さいヘリカルピッチが要求されている。提案された実効信頼度と実際のEFの測定結果から、両者の相関(Fig. 8, 9, Table 1)はCHRの場合に比べて、MSRの場合にわずかながら劣化している。その理由もこの心拍数とテーブル移動ピッチとの同期性(ギャップのない)によるものと考えられる。今回のEFの測定に、すべてのスキャン条件において、MDCTで設置可能の一番小さいヘリカルピッチである0.275を使用する。それにもかかわらず、心拍数によって、MSRを使用するときに、そのギャップを生じる場合があるが、それを防ぐために、MSRのセクタ数の自動調整を行っている。しかし、提案された実効信頼度の根拠である実効時間分解能はそのギャップの効果を考慮しない、言い換えるとギャップを生じない、十分小さいヘリカルピッチの基で計算された。

通常、一つの最適なphaseのみでの冠動脈の評価と違い、EFをはじめ心機能の定量評価には通常10~20 phaseが必要であるので、1 phaseは200枚の画像とすると、心機能の評価のための一症例(10 phase)には、2,000枚の画像が必要になる。一方、厚いスライススキャンモード(16×1.25mm)は心臓検査で重要である総スキャン時間の短縮とともに、

Table 2 Results of ejection fraction (EF) with different reconstructed slice thicknesses

0 bpm	ED	ES	EF
0.625 mm	190.91	121.93	36.13%
1.25 mm	190.92	121.97	36.11%
2.5 mm	198.66	127.02	36.06%
			0.2%

Table 3 Results of ejection fraction (EF) with different bpm (heart beat)

0.625 mm	ED	ES	EF
50 bpm	184.09	133.25	27.62%
60 bpm	183.69	134.52	26.77%
70 bpm	182.08	134.03	26.39%
			4.5%

Table 4 Results of noise (SD) reduction with different reconstructed slice thicknesses

SD (Noise)	CHR	MSR
0.625 mm	25.49	25.89
1.25 mm	18.33	19.99
2.5 mm	12.98	15.46
	49.1%	40.3%

ノイズの低減にも非常に有効であるが、空間分解能は、重視されている冠動脈の診断装置に装備されている一番薄いスキャンモード(LightSpeed Ultra 16の場合に、16×0.625mm)を採用するのが一般的である。また、MDCTにおいては、冠動脈診断と同時に心機能の評価が行われているので、スキャンは、通常、一番薄いスキャンモードである16×0.625mmを採用することになる。従って、心機能評価のために、ノイズの低減と画像枚数の低減のために、厚い再構成スライス画像の有用性の検討は重要である。本研究において、0.625~2.5mmの再構成画像厚の増加に伴って、EFの測定精度は0.2%(Table 2)という無視できるほど僅かに劣化するが、10 phaseでの全画像の枚数も2,000枚から500枚まで削減することが可能になるので、心機能評価には実用的な再構成厚の画像の選択は重要であることが考えられる。

結 語

MDCTによる心駆出率をはじめとする心機能評価の診断手法の確立のために、本研究は異なる撮影・再構成条件(心拍数、回転速度、再構成アルゴリズム)で得られた時間分解能は如何に心駆出率の評価精度に影響を及ぼすかについて検討し、実効時間分解能を基に考案した実効信頼度の概念を導入した。異なる心拍数領域において最適な回転速度を使

用することによって、高い実効信頼度(ER)を有することが確認された(90bpmまで、81%以上；110bpmまで、74%以上). 一方、実際のEFの測定においても最適な撮影・再構成条件を使うと、高い精度を有する結果が得られた(90bpmまで、81%以上；110bpmまで、73%以上). 提案された実効信頼度(計算値)と実際のEFの測定結果(実測値)との比較を行い、両者を良く一致することが確認された(両者の相違であるdifference : $3.78\% \pm 2.52\%$; 相関係数 : $R^2 = 0.901 \pm 0.075$; Max: 0.994, Min: 0.738). さらに、再構成画像厚の増加(0.625~2.5mmまで)に伴って、EFの測定精度は0.2%という無視できるほど僅かに劣化することが確認され、それによって、10 phaseでの全画像の枚数も2,000枚から500枚まで削減することが可能であることが確認された.

本研究を通して、EFの測定結果と実効信頼度(ER)の両方

において、最適な撮影・再構成条件を使用することで、高い時間分解能を維持することによって、MDCTでの高い測定精度を有することが確認された. また、EFの測定結果と実効時間分解能との高い相関が明確にされたことによって、提案された実効信頼度を用いて心機能の測定精度を評価することが可能であることが示されている. さらに、心機能評価には、最適な再構成厚の画像の選択が重要であることが示されていた.

謝 辞

本研究にあたり、終始ご協力並びにご助言をいただいた慶應義塾大学岡野義幸氏、杉澤浩一氏、山田 稔氏、GE横河メディカルシステム佐々木公祐氏、竹内昌平氏、門田尚也氏に厚く御礼申し上げますとともに、深く感謝いたします.

文 献

- 1) Hu H: Multi-slice helical CT: scan and reconstruction. *Med Phys* 26: 5–18, 1999
- 2) Hu H, Shen Y: Helical CT reconstruction with longitudinal filtration. *Med Phys* 25: 2130–2138, 1998
- 3) Taguchi K, Aradate H: Algorithm for image reconstruction in multi-slice helical CT. *Med Phys* 25: 550–561, 1998
- 4) 沈 雲: マルチスライスCTの再構成アルゴリズム. *Medical Imaging Technology* 19: 3–10, 2001
- 5) Taguchi K, Anno H: High temporal resolution for multislice helical computed tomography. *Med Phys* 27: 861–872, 2000
- 6) 沈 雲, 萩原 明, 竹内昌平: Volume (3D/4D)X線CTの現状と展望. *Medical Imaging Technology* 23: 3–8, 2005
- 7) Becker CR, Ohnesorge BM, Schoepf UJ, et al: Current development of cardiac imaging with multidetector-row CT. *Eur J Radiol* 36: 97–103, 2000
- 8) Nieman K, Oudkerk M, Rensing BJ, et al: Coronary angiography with multi-slice computed tomography. *Lancet* 357: 599–603, 2001
- 9) Achenbach S, Giesler T, Ropers D, et al: Detection of coronary artery stenosis by contrast-enhanced, retrospectively electrocardiographically-gated multislice spiral computed tomography. *Circulation* 103: 2535–2538, 2001
- 10) Becker CR, Knez A, Ohnesorge BM, et al: Imaging of noncalcified coronary plaques using helical CT with retrospective ECG gating. *AJR* 175: 423–424, 2000
- 11) Nieman K, Pattynama PM, Rensing BJ, et al: Evaluation of patients after coronary artery bypass surgery: CT angiographic assessment of grafts and coronary arteries. *Radiology* 229: 749–756, 2003
- 12) Storto ML, Marano R, Maddestra N, et al: Multislice spiral computed tomography for in-stent restenosis. *Circulation* 105, 2005, 2002
- 13) Shaohong Z, Yongkang N, Zulong C, et al: Imaging of coronary stent by multislice helical computed tomography. *Circulation* 106: 637–638, 2002
- 14) Stanford W, Thompson BH, Burns TL, et al: Coronary artery calcium quantification at multi-detector row helical CT versus electron-beam CT. *Radiology* 230: 397–402, 2004
- 15) 那須平広, 吉岡邦弘: 電子ビームCTによる冠動脈石灰化指数を用いた虚血性心疾患の診断—日本人での検討—. *日本医学会誌* 62: 701–706, 2002
- 16) Horiguchi J, Nakanishi T, Ito K: Quantification of coronary artery calcium using multidetector CT and a retrospective ECG-gating reconstruction algorithm. *AJR* 177: 1429–1435, 2001
- 17) Horiguchi J, Nakanishi T, Tamura A, et al: Coronary artery calcium scoring using multicardiac computed tomography. *J Comput Assist Tomography* 26: 880–885, 2002
- 18) 木村文子, 沈 雲, 佐藤宗邦: 左心室の動きを模倣した心臓ファントムの開発とその評価. *日本医学会誌* 61: 29–32, 2001
- 19) 岡部哲夫, 藤田広志編: 医用画像工学第2版. 203–219, 2004, 医歯薬出版, 東京