心臓 CT における心拍-時間分解能特性の解析

要旨

心臓 CT における時間分解能とは，動きを伴う心臓に対して如何に詳細な画像が得られるかという重要な指標であり，その正確な評価方法も重要であるといえる．今回，心臓 CT 用に開発した時間分解能測定システムを用いて心拍数-時間分解能特性を解析した．模擬心電図に同期して金属球を発射する時間分解能測定システムを CT に接続し，59bpm から 110bpm まで，1bpm ずつ心拍数を変化させてデータ収集を行った．得られた各心拍数の画像より time sensitivity profile (TSP)を測定し，さらに TSP をフーリエ変換することで MTF を算出した．そして，心拍数による TSP の 40%幅（TSP の複雑な形状から半値幅が使用不可であったため）の変化と MTF の変化から心拍数-時間分解能特性を解析した．また，68bpm から 80bpm まで，2bpm ずつ動態画像による評価を行った．TSP の 40%幅は，メーカー公称値とほぼ等しくなった．しかし，MTF 値は時間分解能の高い領域において 40%幅とは異なる変化を示した．画像による評価では，40%幅よりも MTF に近い変化を示した．TSP の 40%幅と MTF の画像比較により，MTF の方が時間分解能の変化をより正確に反映していることが示唆された．そのため,心拍数-時間分解能特性は時間領域の MTF で示すことが望ましいと考えられた．

Ⅰ．緒言

近年，多くの施設で心電図同期による心臓 CT 検査が行われている．心臓 CT において，時間分解能は画質に大きく影響を与えるため，その正確な測定法も同様に重要となっている．CT の時間分解能は，市川 [1)]らによって開発された金属球体による時間分解能測定法によって測定でき，金属球をガントリ中心部に素早く通過させることで時間的なインパルス信号を CT に与え，その応答を画像から測定し，時間分解能の指標である time sensitivity profile (TSP)を測定する方法である．これを心臓 CT 用とするためには，模擬心電図に合わせて球体を連続発射する必要がある．本研究では，この改良を行った装置により，心臓 CT における心拍数-時間分解能特性を解析し，加えて新たに作成したアクリル棒動態ファントムにより画像解析を行い，測定結果を検証した．

Ⅱ．使用機器

使用機器は以下に示す通りである．

- X 線 CT 装置：16 列マルチスライス CT（SIEMENS 社　SOMATOM Emotion16 ）
- 心臓 CT 時間分解能測定用金属球連続発射装置（Fig.1）
- 金属球（直径 11mm，鋼製）
- アクリル棒動態ファントム（Fig.2）

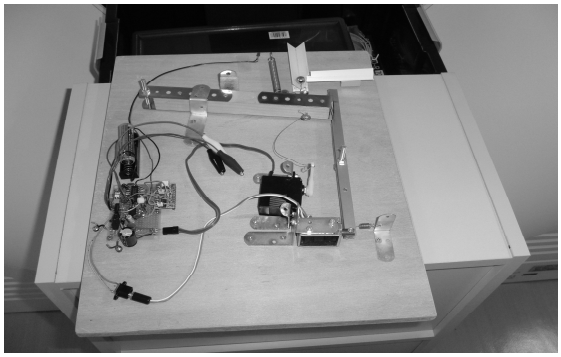

Fig.1　金属球連続発射装置

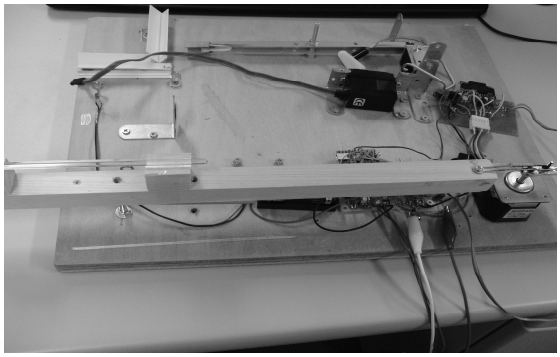

Fig.2　アクリル棒動態ファントム

Ⅲ．実験方法

1）TSP の取得

X 線 CT 装置の X 線管回転速度は 500 ms/rot.として，模擬心電波形と同期して金属球を発射することで画像を取得した．心拍数は 59bpm から 110bpm まで 1bpm ずつ変化させた．取得した画像の例を Fig.3 に示す. 取得した画像の中心部に ROI を設定，CT 値を測定し，対応する時間との関係から TSP を取得した．一般的に取得した TSP より得られる半値幅により実効分解能は評価されるが，心拍数によっては半値幅の適用が困難な場合があったため，40％レベルの幅（full width at 40%：以下，FW40）を採用した．

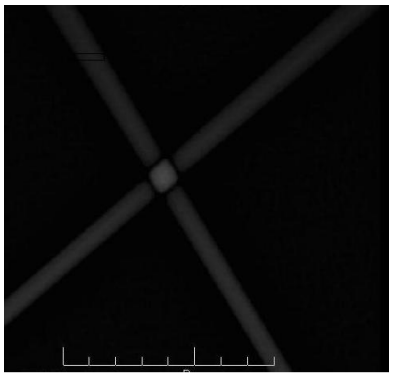

Fig.3　再構成画像例

2）時間領域 MTF の算出

TSP から時間領域の MTF（modulation transfer function）を算出するため，前処理として，得られた TSP の両端を 0 で外挿し，データ数を 512 個とした．これは，周波数分解能を向上させるためと，後に高速フーリエ変換を行うためである．この TSP をフーリエ変換し，各値の絶対値を周波数 0 の値にて正規化した．画像間の時間間隔 *TI*（60/心拍数/100）を用いて式(1)により周波数間隔 $f_{int.}$を求め，$f_{int.}$ごとに時間軸に各値をプロットして時間 MTF 曲線を求めた．求めた MTF 曲線より，各心拍数の 1Hz，2Hz，3Hz の MTF を測定し比較を行った．

$$f_{\mathrm{int.}} = \frac{1}{TI \times 512} \qquad \cdots (1)$$

3）動態画像の作成

アクリル棒動態ファントムは，目的位相で約 31m/s の移動速度となるようにした．これを，68bpm から 80bpm までを 2bpm ずつ変化させ模擬心電波形と同期して動作させることで動態画像を作成した．作成した画像に対して，視覚的な評価と円形度による評価を行った．

Ⅳ．結果

得られた TSP 例を Fig.4 に示す．心拍数により TSP の形状は変化をみせ，そのため FW40 の値も変化した．FW40 の変化について実測値と理論値をプロットした図とメーカーが公称している時間分解能の比較を Fig.5 に示す．FW40 の実測値は心拍数により変化したが，理論値，メーカー公称値（500ms）ともほぼ一致した．次に，各心拍数の 1Hz，2Hz，3Hz の MTF をプロットした図を Fig.6 に示す．FW40 と同様に値に変化が見られた．ここで，FW40 のグラフとその比較のため 3Hz での MTF の逆数を取った図を Fig.7 に示す．似た変化がみられたが、時間分解能が良い領域では FW40 の変化に対し、MTF の変化が小さくなるという結果が得られた．作成した動態画像例を Fig.8 に示す. 画像からは 76bpm より円形が崩れ画像が劣化しているという結果が得られた．動態画像の円形度をプロットした図を Fig.9 に示す．視覚による評価と同様に，74bpm と 76bpm の間で円形度の低下が見られた．

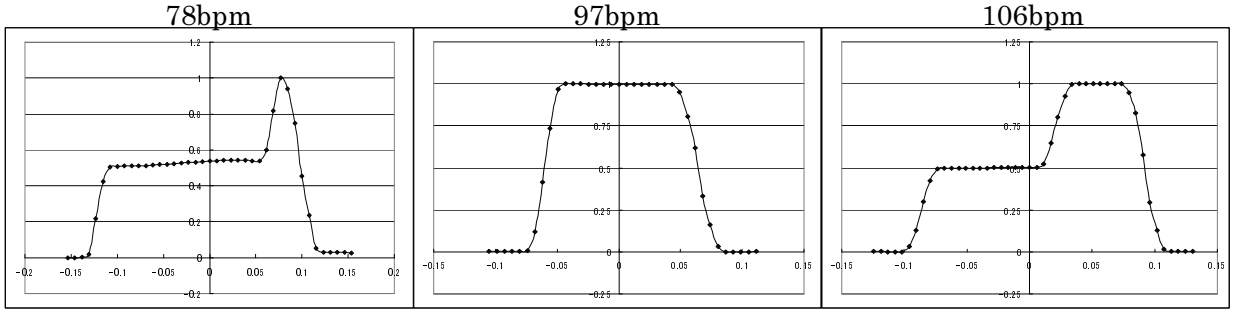

Fig.4　各心拍数における得られた TSP の例

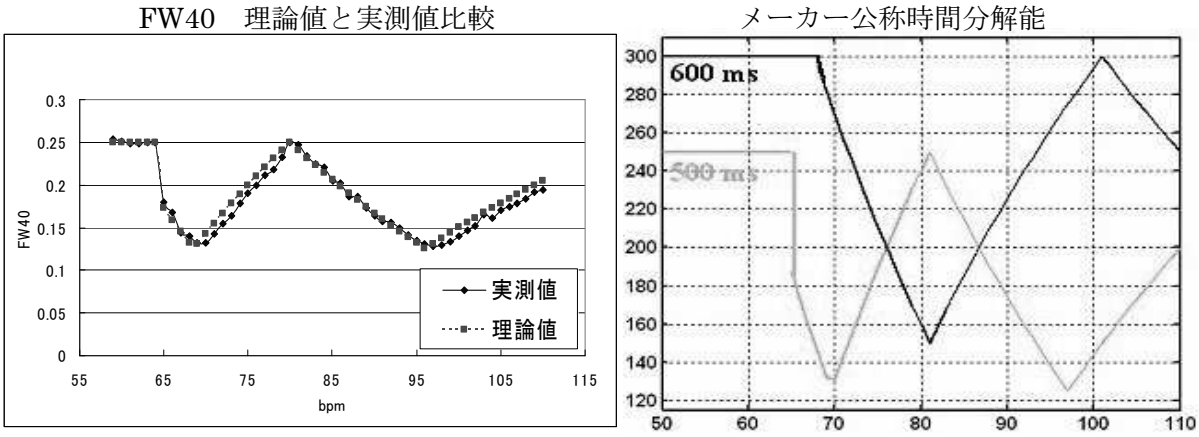

Fig.5　FW40 とメーカー公称時間分解能の比較

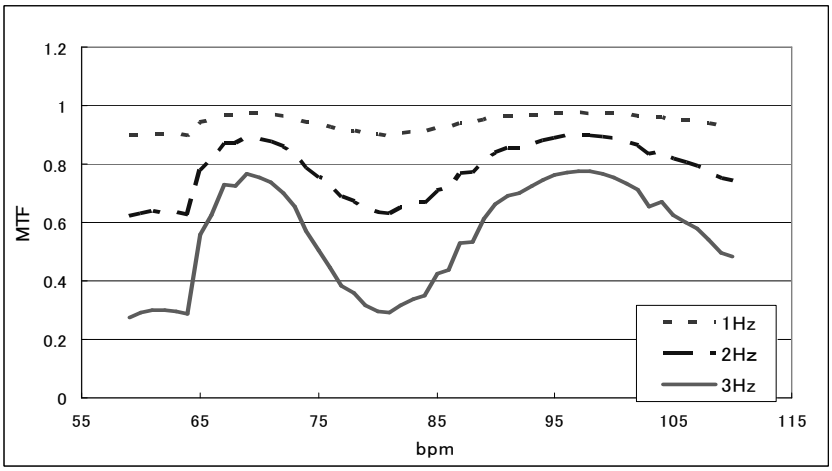

Fig.6　1Hz,2Hz,3Hz の MTF の心拍数による変化

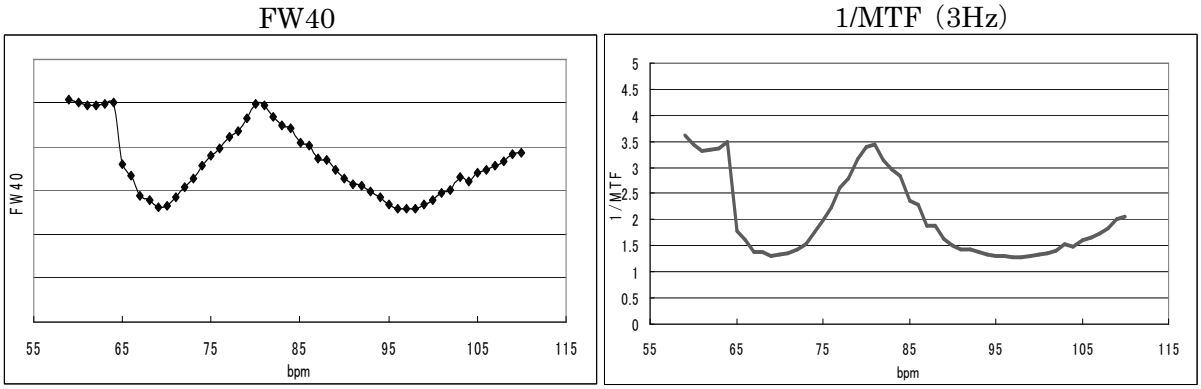

Fig.7　FW40 と 1/MTF 値による心拍－時間分解能特性の比較

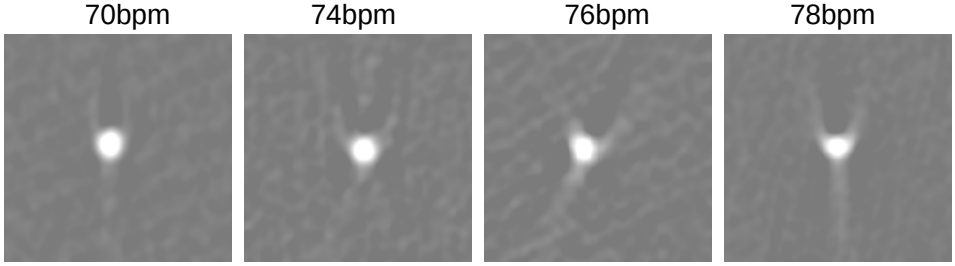

Fig.8　各心拍数における動態画像例

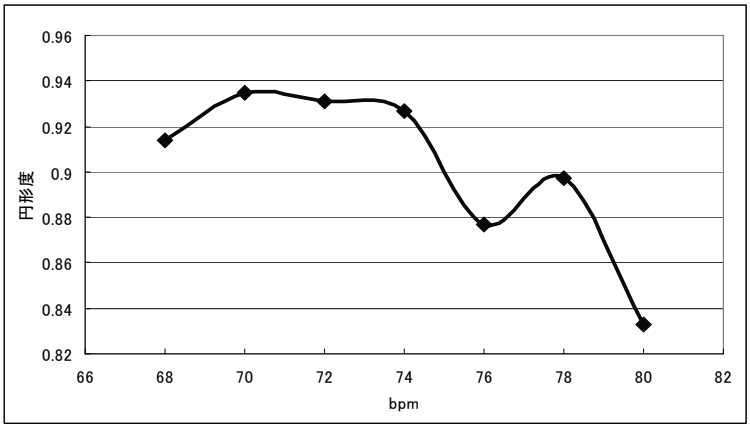

Fig.9　アクリル棒の動態画像の各心拍数における円形度評価結果

Ⅴ．考察

測定した時間分解能がメーカー公称値，理論値とほぼ一致したことにより，金属球連続発射装置により正確な時間分解能を取得できた．FW40 の実測値と理論値における微小な誤差は，金属球連続発射装置による金属球の発射タイミングにより生じたと考えられる．

TSP より算出した FW40 と時間領域の MTF の間には違いがみられ，時間分解能の良い領域で FW40 の変化に対し，MTF の変化が小さくなっていたことより，MTF のほうが時間分解能の良い領域が広いという結果が得られた．

動態画像について，アーチファクトを円形度でみた結果，74bpm と 76bpm の間で急激な変化が起こっており，画像の印象とほぼ一致した．

FW40，MTF，動態画像について比較したところ，動態画像は MTF に近い変化を示していたことにより，FW40 より MTF のほうが正確な時間分解能の変化を示していることが確認された．

Ⅵ．結語

模擬心電図に同期して金属球を連続発射する心臓 CT 対応時間分解能測定装置により，正確な心臓 CT の時間分解能測定が可能となった．測定結果において実効的時間分解能である FW40（半値幅を近似）と MTF の間に違いがみられ，動態画像による比較から，FW40 と時間領域の MTF では，MTF のほうが時間分解能の変化をより正確に反映していることが確認できた．そのため，心拍数-時間分解能特性は時間領域の MTF で示すことが望ましいことが示唆された．

Ⅶ．参考文献

１）市川勝弘，高田忠徳，原孝則，他：CT における時間分解能の新しい測定法，日本放射線技術会雑誌 64(9)：1172-1176，2008