

主 論 文

Image Evaluation of Free-breathing Navigator Echo and Triggered Cardiac-gated Delayed Myocardial Enhancement Magnetic Resonance Imaging in Sedated Infants (鎮静乳幼児における自由呼吸下でのナビゲータエコーと心臓同期心筋遅延造影 MRI における画像評価に関する研究)

[緒言]

単心室症は先天性の心臓血管異常であり、治療する為には生後数年のうちに 3 回の手術が必要である。各手術の前に、当院ではコンピュータ断層撮影 (CT; Computed tomography) および磁気共鳴断層撮影 (MRI; Magnetic resonance imaging) 検査を受ける。特に、心臓 MR 検査における遅延造影 (LGE; Late gadolinium enhancement) は、虚血性心疾患、心筋線維化の組織病理学的診断に有用である。この LGE の評価を行う理由には、対象患児を治療するためにより多くの情報を得ること、心筋線維症および外科的合併症が将来の治療結果に対して重要な因子であるかどうかを評価する、といった 2 つの理由がある。しかし、この検査には多くの制限がある。特に、幼児は呼吸停止が不可能であるため、LGE シーケンスの走査中の呼吸は、LGE 画像内の体動アーチファクトになる。そこで、冠動脈造影 MR 検査や腹部臓器の MR 検査で用いられるナビゲータエコーによる横隔膜同期撮影の使用に焦点を当てた。

本研究では、鎮静された自由呼吸小児集団における心電図同期 IR-T1TFE のナビゲータエコーによる横隔膜同期撮影法の有用性を画質評価と視覚評価の観点から評価した。

[方法]

・ 研究対象者

倫理委員会の承認は、後向き研究の開始前に取得された (1610-562)。この研究は、2013 年 11 月から 2014 年 10 月までの 76 件の LGE 画像について解析され、単心室症と診断された 33 名の乳幼児 (女児 : 15 名, 男児 : 18 名, 平均年齢 \pm SD), 2.3 \pm 1.4 歳, 0~5 歳) が対象とされた。

・ 撮影方法

1.5T MR スキャナー (Achieva 1.5T, Philips Medical Systems, Amsterdam, The Netherlands) を用いて画像化を行った。SENSE Flex-M コイルを心臓用コイルとして選択した。造影剤としてガドテリドール (Gd-HP-D03A, ProHance; Bracco Diagnostics Inc., Milan, Italy) を 0.4mL / kg の投与量で使用した。造影剤注入の 7 分後に TI 値を測定し、ナビゲータエコー併用 IR-T1TFE 法で撮影した。また、検査の最後に、ナビゲータエコーなしで撮影しました。撮影断面は心室短軸 (SA) で撮影した。シーケンスのパラメータは乳幼児の体格に合わせて調整し、横隔膜信号の取得は右横隔膜の頂点部で行った。

・画質評価

画質は、信号対雑音比 (SNR; Signal-to-noise ratio), コントラスト対雑音比 (CNR; Contrast-to-noise ratio), および視覚評価によって評価した。これらの評価の結果を、ナビゲータエコーを使用した場合と使用しない場合で得られた画像間で比較した。

SNR 値は、各群から得られた DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) 画像について、画像処理ワークステーション (Virtual Place Raijin Plus, AZE, Ltd., Tokyo, Japan) を用いて SNR を測定し、比較した。関心領域 (ROI; Region of interest) は、選択された3つの短軸平面 (Apex: 心尖, Base: 心基部, および Mid: 中間 (心基部と心尖部との間の位置)) について IR-T1TFE 画像上で著者によって 40 mm² (約 70 ピクセル) の面積を有するよう描かれた。これらの ROI は、前壁, 下壁, および側壁, および心室内に配置された。ROI の位置は、著者と共著者である専門医の間の相互同意によって決定されながら描かれた。9つの ROI における 630 ピクセルの信号強度を、心筋についての SNR の計算に使用した。ノイズ (N) は、関連する標準偏差とともに、これらの ROI のそれぞれについて測定された。この心筋の雑音 (N_M) と心筋の信号強度 (S_M) の除算によって心筋の SNR を計算した。従って、SNR は以下のように定義された: $SNR_M = S_M / N_M$ 。

CNR は心筋と心室の SNR (SNR_M, SNR_V) より計算された。CNR は、以下のように定義された: $CNR = |SNR_M - SNR_V|$ 。SNR の場合と同様に、各検査における最終的な CNR 値は、測定された3つの断面の平均値とした。

視覚評価は、著者と放射線科医 (心臓 MRI で 20 年以上の経験を有する共同研究者) によって行われた。Fig. 1 は、各視覚評価スコアに基づいた画像である。画質は以下のようにスコア化された: poor, 重度のモーションアーチファクトで診断が困難; good, 診断できるが、体動アーチファクトを伴う; excellent, 体動アーチファクトはなく診断が容易。最終評価は、2人の観察者によって合議の上決定された。

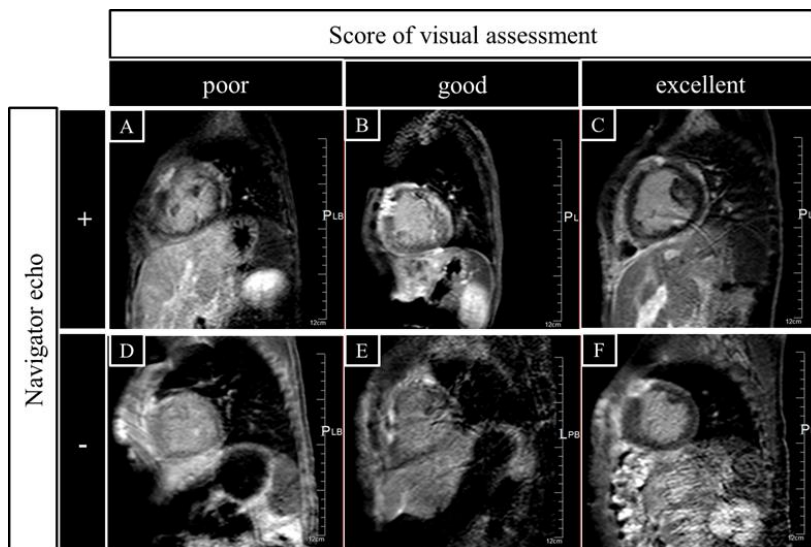


Fig. 1 視覚評価における画質評価スコアと臨床画像

・統計解析

SNR および CNR の評価のために、Wilcoxon 符号順位検定を採用した。また、視覚的評価結果を比較するために、Mann-Whitney U 検定を行った。0.05 以下の P 値は統計的に有意であると考えられ、すべての統計解析は、解析ソフトウェア R (R×64 ver.3.3.1, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) を使用して行った。

[結果]

SNR

SNR の結果を Table 1 に示す。ナビゲータエコーを使用した画像の SNR は $21.7 \pm 5.4\%$ (平均値 \pm 標準偏差 (SD)) であり、ナビゲータエコーなしでは $18.6 \pm 4.7\%$ であった。ナビゲータエコーを使用した画像の SNR は、ナビゲータエコーなしの SNR よりも有意に高いことが示された ($P < 0.01$)。

CNR

CNR の結果を Table 1 に示す。ナビゲータエコーを使用した画像の CNR は $16.9 \pm 7.1\%$ であり、ナビゲータエコーなしでは $13.7 \pm 8.1\%$ の平均 CNR となった。ナビゲータエコーで撮影された画像の CNR は、無しより有意に高いことが示された ($P < 0.05$)。

Table 1. SNR and CNR

| Heart measurement position | SNR | | P value |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------|
| | ECG, NE mean \pm SD (%) | ECG mean \pm SD (%) | |
| Average of three positions | 21.7 ± 5.4 | 18.6 ± 4.7 | <0.01 |
| Base | 21.6 ± 9.2 | 17.8 ± 5.9 | <0.05 |
| Mid | 20.8 ± 8.9 | 17.8 ± 6.9 | <0.05 |
| Apex | 22.4 ± 9.4 | 19.6 ± 6.8 | <0.05 |
| Heart measurement position | CNR | | P value |
| | ECG, NE mean \pm SD (%) | ECG mean \pm SD (%) | |
| Average of three positions | 16.9 ± 7.1 | 13.7 ± 8.1 | <0.05 |
| Base | 17.4 ± 10.5 | 13.9 ± 12.6 | 0.08 |
| Mid | 17.0 ± 12.8 | 14.3 ± 9.9 | 0.36 |
| Apex | 16.0 ± 12.0 | 12.8 ± 10.4 | 0.24 |

SNR, signal-to-noise ratio; CNR, contrast-to-noise ratio; ECG, NE, electrocardiogram-triggered and navigator-echo-triggered; ECG, electrocardiogram-triggered without navigator-echo-triggered; SD, standard deviation.

Statistical analysis: Wilcoxon signed rank test.

視覚的評価

視覚評価の結果を Table 2 に示す。ナビゲータエコーを用いた画像の視覚評価スコアは、無しよりも良好であった ($P < 0.01$)。被験者内で比較すると、ナビゲータエコーで撮影された画像の視覚評価スコアは、ナビゲータエコーなしの視覚評価スコアよりも優れていた。ナビゲータエコーを使用したシーケンスは、86%以上の確率で「良好」または「優れた」画像を提供した。

Table 2. Visual assessment scores

| | | Number of examinations (n = 76; %) | |
|-------------------------|-----------|------------------------------------|---------|
| | | ECG, NE | ECG |
| Visual assessment score | Poor | 11 (14) | 18 (24) |
| | Good | 37 (49) | 46 (61) |
| | Excellent | 28 (37) | 12 (16) |
| P value | | P<0.01 | |

Note: visual assessment scores associated with the navigator echo triggered sequence images were significantly higher than those obtained without navigator echo ($P < 0.01$).

ECG, NE, electrocardiogram-triggered and navigator-echo-triggered; ECG, electrocardiogram-triggered without navigator-echo-triggered.

Statistical analysis: Mann-Whitney U test.

[考察]

LGR を対象とした心臓 MR 検査で鎮静された乳児が引き起こす呼吸運動アーチファクトは、画像の劣化を引き起こす。本研究では自由呼吸下で操作されるナビゲータエコーに焦点を当て、アーチファクトを減少させる臨床研究を行った。33 人の乳児に実施された 76 例の LGE 画像について、SNR および CNR 評価および視覚的評価を行った。MR 信号強度による SNR と CNR の測定では、乳児の心筋が非常に薄いため、測定の精度を維持するために ROI の設定に注意を払った。SNR および CNR は、3 つの断面上の 9 つの ROI における 630 ピクセルの MR 信号強度で計算された。このデータ数は、有意性試験のために十分な試料を確保することができたと考えている。結果は、ナビゲータエコーの有効性を示した。さらに、視覚的評価では、画質が採点され、ナビゲータエコーを使用した画像は、視覚的評価において高得点画像を提供することが可能であった。本研究では、ナビゲータエコーシーケンスの有用性が確認された。

幼児は 1 分あたり 40~60 回の呼吸を行い、チアノーゼの幼児は呼吸回数が増加する。ナビゲータエコーは常に横隔膜の信号を検出するので、同じ横隔膜位置で MR 信号を取得することができ、体動アーチファクトを減少させることが可能である。

視覚的評価に関して、ナビゲータエコーシーケンスでは、「excekkent」スコアを有する画

像の占有率は 37%であり、ナビゲータエコーなしのシーケンス (16%) よりも高かった。この結果は、ナビゲータエコーの圧倒的な有用性を示している。診断が容易な画質レベルを「good」グレード以上に設定した場合、ナビゲータエコーの有無にかかわらず、LGE 検査が高い確率で成功したと言える。ナビゲータエコーシーケンスは、確率 86%の「good」および「excellent」画像を提供したが、ナビゲータエコーなしのシーケンスは、77%の確率でこれらの画像を提供した。差はわずか9%であるが、乳児にとって有意義であると考えられる。一方、ナビゲータエコーを使用すると走査時間が長くなるため、心筋の信号強度が回復することに懸念があった。撮影時間を延長しても、心筋のコントラスト低下は、線維症の診断を妨げるほどには観察されなかった。LGE 画像で診断する場合、画像内で心筋の形状と造影領域が明確であることが重要である。しかし、検査の 14%で「poor」画像が得られたため、この低い画質となった原因を考慮する必要がある。これらの画像では、心筋がぼけている、あるいは心室と心筋とのコントラストがなく、線維症の診断が困難であった。これに対して、ナビゲータエコーの観察位置と反転遅延時間の調整について言及する。通常、ナビゲータエコーの位置は、横隔膜が最も移動する場所でなければならない。横隔膜の運動性が小さい場合、ナビゲータエコーを心室のような別の場所に移動することが望ましい。心拍数が低く (80 bpm 未満)、呼吸回数が少ない場合、撮影時間が延長される。そのような場合は、反転遅延時間を長く設定する方が良い。

本研究は、遡及的なデザイン、少量のサンプル、視覚的評価に関与する観察者の数が少ないこと、および視覚的評価のスコア (評価基準を決定することが困難であったために不良、) といったいくつかの制限がある。心筋と心室との間のコントラスト、スライスの向き、および不整脈に起因する画像のぶれなど多くの要因が、LGE 画像の視覚検査の結果に影響を及ぼすことが懸念される。

[結論]

結論として、鎮静児の自由呼吸下におけるナビゲータエコーを用いる心臓同期 IR-T1TFE 撮影法は、空間分解能改善された臨床画像の取得を可能にする。