

新しい呼吸停止法による 全冠動脈 magnetic resonance angiography

安田 剛

【目的】呼吸停止 coronary magnetic resonance angiography (CMRA) による全冠動脈描出能を評価する。【対象と方法】模擬血管での基礎実験後、健常ボランティア 5 例 (男性 5 人, 平均年齢 41.4 歳, 23~54 歳) に呼吸停止 CMRA を施行した。【結果】健常ボランティアでは、右冠動脈中枢側は全例で良好に描出された。末梢側は 1 例で描出されなかった。左冠動脈の主幹部と前下行枝は全例で末梢側まで良好に描出された。左冠動脈回旋枝は 3 例で中枢側が描出され、末梢側まで描出できたのは 1 例のみであった。【結語】本法は全冠動脈のスクリーニングには不適であったが、中枢側の冠動脈描出には利用可能であった。

KEY WORDS: coronary magnetic resonance angiography, coronary arteries, breath-hold

Yasuda T: Coronary magnetic resonance angiography with multiple breath-holds technique in the whole heart. J Jpn Coron Assoc 2006; 12: 95-99

I. はじめに

Magnetic resonance imaging (MRI) による血管描出法の一つである coronary magnetic resonance angiography (CMRA) は冠動脈を非侵襲的に描出できる有効な手段である^{1,2)}。しかし、心臓自身の拍動と呼吸による動きのために微小な血管を良好に描出することは難しく、いろいろな撮影法が工夫されてきた。心臓の動きによるアーチファクトの低減には心電図同期法が工夫され、もっとも心臓の動きが少ない時相に撮影することが可能になった³⁾。一方、呼吸によるアーチファクトの低減には、もっとも簡単な方法である呼吸停止法⁴⁻⁸⁾と、安静呼吸下に横隔膜の位置をモニターして、その情報を基に繰り返して画像信号を得るナビゲーター法⁹⁻¹¹⁾が開発されてきた。呼吸停止では、20 秒の呼吸停止中に横隔膜は最大吸気で 29.9±19.0 mm (平均±標準偏差)、最大呼気で 2.6±2.9 mm (平均±標準偏差)の変動があると報告されている¹²⁾。そこで、横隔膜の動きが少ない呼気での撮影が必要であるが、呼気での呼吸停止時間は 20~30 秒が限界なので、CMRA には冠動脈の走行に沿ったスライス面を選択して、右冠動脈、左冠動脈前下行枝と回旋枝ごとに別々の断面内に描出する方法が用いられてきた^{7,8)}。

最近、ナビゲーター法では心臓全体の冠動脈を高い信号-雑音比で描出する方法が開発された¹³⁾。これを利用した両者の比較では、各部位に分けた冠動脈の描出率は呼吸

停止法 44.7%、ナビゲーター法 79.4%であった。冠動脈狭窄率 50%以上の描出能は、呼吸停止法とナビゲーター法でそれぞれ感度 63%対 72%、特異度 82.3%対 91.7%とナビゲーター法が有意に優れていた¹⁴⁾。ナビゲーター法では冠動脈描出に特化した MRI の技術が必要となるが、一般の汎用機 MRI 装置にはそうした機能は装備されていない。われわれの MRI にもナビゲーター法に必要な機能は装備されていない。そこで、われわれはナビゲーター法がない装置でも、呼吸停止を複数回繰り返すことで心臓全体の冠動脈を描出することが可能ではないかと考え、この方法による CMRA を初めて考案したので報告する。

II. 対象

心疾患の既往歴がなく、心電図に異常のない日本人健常ボランティア 5 例 (男性 5 人, 平均年齢 41.4 歳, 23~54 歳) を対象に呼吸停止 CMRA を施行した。

III. 方法

使用装置は Philips 社製 Intera Nova (1.5 T, 最大傾斜磁場 33 mT/m, maximum slew rate 160 T/m/s, specifically designed software release 10)、前胸部に 5 チャンネル SENSE cardiac coil を配置した。心電図モニターに vectorcardiogram を使用した。撮影には steady state free precession sequence (SSFP) 法の一つである balanced turbo field echo を用いた。おもな撮影パラメーターは、TR/TE/FA 4.7 ms/2.3 ms/80.0°, sensitivity encoding factor 2.5, fat saturation pulse, FOV 300 mm, matrices 126×256, スラブ厚 11 mm, スライス厚 1 mm, 再構成 voxel size 0.55×0.55×1.00 mm であった。呼吸停止は最大呼気で

宇賀岳病院画像診断・IVR センター (〒869-0502 宇城市松橋町松橋 1455-1) (本論文の要旨は第 18 回日本冠疾患学会学術集会, 2004 年 12 月・熊本で発表した)
(2005.8.31 受付, 2005.12.7 受理)

1回10~30秒程度とし、約12~15回の呼吸停止を繰り返して心臓全体を撮影した。スラブとスラブを単純に並べて表示する multi-stack 法で連続性のある画像に再構成した。Curved multiplanar reformatted (curved MPR)への再構成には Terarecon 社製 Aquarius net を使用した。

冠動脈は American Heart Association guideline¹⁵⁾に従って、右冠動脈は中枢側 #1, #2, 末梢側 #3, 左冠動脈は中枢側 #5, #6, #7, #11, 末梢側 #8, #9, #12, #13 に分類した。肉眼的評価は、good: 中枢側と末梢側がともに描出される, fair: 中枢側は描出されるが、末梢側は描出されない, poor: 中枢側も末梢側も描出されない、の3段階で評価した。

IV. 結 果

Multi-stack 法ではスラブ(撮影の範囲)ごとにベネチアン・ブラインド状の信号低下領域(ベネチアン・ブラインド・アーチファクト)(図1)が存在したので horizontal と double oblique の2方向を撮影して、信号低下領域を相補的に評価した(図2)。その結果、右冠動脈は全例で中枢側は良好に描出された。末梢側は1例で描出されなかったが、他の4例で良好に描出された。左冠動脈の主幹動脈と前下行枝は5例全例で末梢側まで良好に描出された(図3)。左冠動脈回旋枝は周囲の心嚢液と冠静脈洞との重なりのために、3例で中枢側が描出され、末梢側まで描出されたのは1例のみであった(表1)。

V. 考 察

最近の冠動脈の描出能は以下の方法で飛躍的に上昇した。SSFP 法¹⁶⁾によって、電磁波を印加する間隔である繰り返し時間(TR)と印加後に信号を得るまでの時間であるエコー時間(TE)が TR/TE; 4.7 ms/2.3 ms と極めて短くなっ

たにもかかわらず、血管腔などの水の信号が T2 強調像に類似した高信号になった。SENSE 法¹⁷⁾によって、多数の受信コイルを同時に使用することで信号やコントラストを問題になるほど低下させずに受信コイル数に応じた撮像時間短縮が可能になった。T2 preparation 法¹⁸⁾によって、心筋や静脈の信号を減弱させる信号を付加することで、冠動脈のコントラストがさらに高くなった。これらの技術にナビゲーター法が加わって、全心臓の冠動脈描出が可能になった。

しかし、汎用機 MRI 装置にはナビゲーター法が装備さ

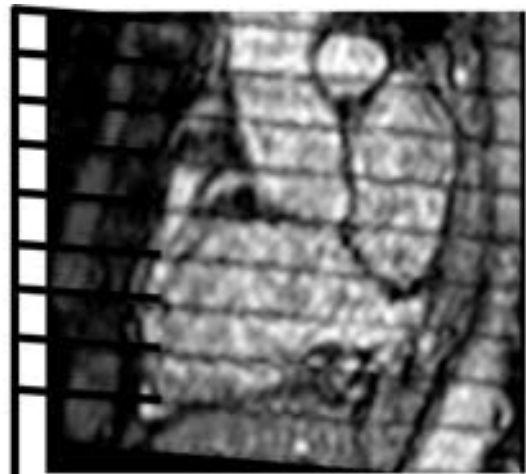


図1 Multi-stack 法による矢状断の再構成画像
Multi-stack 法ではスラブとスラブの間にベネチアン・ブラインド・アーチファクトという信号低下領域による縞模様出現する。



図2 症例1, 42歳健常男性の multi-stack 法による CMRA
(a) Horizontal から作成した右冠動脈-左冠動脈の curved MPR(矢印, 右冠動脈; 矢頭, 左冠動脈)。右冠動脈中枢側と左冠動脈前下行枝末梢側の描出は不良である。
(b) Double oblique から作成した右冠動脈では中枢側が描出されている。
(c) Double oblique から作成した左冠動脈前下行枝の curved MPR では末梢側が描出されている。

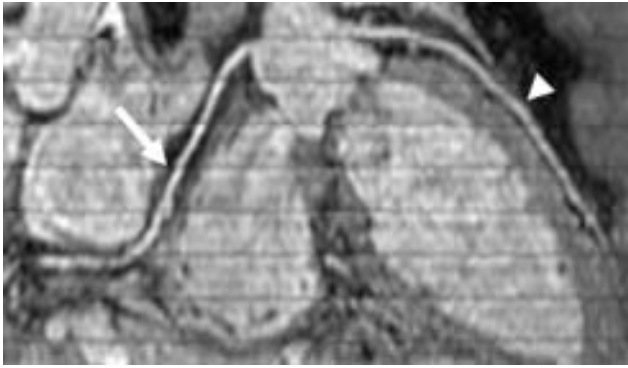


図3 症例3, 23歳健常男性の multi-stack 法による CMRA Horizontal から作成した右冠動脈-左冠動脈の curved MPR を示す(矢印, 右冠動脈; 矢頭, 左冠動脈). 右冠動脈と左冠動脈前下行枝の描出は良好である.

れていないので, われわれは呼吸停止を複数回繰り返し, それを連続画像として再構成することで, 心臓全体の冠動脈の画像を得る方法を考案した. これは SSFP 法¹⁶⁾ と SENSE 法¹⁷⁾ によって狭いスラブ厚でも良好な信号-雑音比が得られることにより成立した方法である. 残念ながら, われわれの MRI には T2 preparation 法¹⁸⁾ は備わっていないので, T2 preparation 法は使用していない.

健常ボランティアでは中枢側の描出は良好な結果であった. 右冠動脈領域と前下行枝領域においては末梢側も比較的良好に描出されていた. もっとも問題となるのは複数回の呼吸停止に伴う横隔膜の位置ズレの発生であるが, 今回の実験では横隔膜の位置ズレによると考えられる冠動脈の不連続は生じていなかった. 協力的な患者では横隔膜の位置ズレによる冠動脈の不連続は少ない可能性が示唆された. 過去の報告では, 呼気で呼吸停止をした場合, 横隔膜

表1 冠動脈の肉眼的評価

症例	左主幹部	前下行枝	回旋枝	右冠動脈
1	good	good	fair	good
2	good	good	fair	good
3	good	good	good	good
4	good	good	poor	fair
5	good	good	poor	good

good: 中枢側と末梢側がともに描出される
 fair: 中枢側は描出されるが, 末梢側は描出されない
 poor: 中枢側も末梢側も描出されない

の位置ズレは 2.6 ± 2.9 mm や 1.7 ± 0.4 mm 程度^{12,19)} なので冠動脈の不連続が生じない可能性がある. また, 呼気で呼吸停止をした場合でも横隔膜の位置の変化は上方へ向かうとされているので, 十分な最大呼気では複数回の呼吸停止を行っても冠動脈に不連続が生じるほどの横隔膜の位置ズレは少ないと考えられる²⁰⁾.

しかし, この方法の限界は, 画像再構成に使用した multi-stack 法ではベネチアン・ブラインド・アーチファクトが存在することであった. SSFP 法¹⁶⁾ では最後のスライスに信号低下が起きるので, スラブとスラブを単純に並べて表示する multi-stack 法ではこのベネチアン・ブラインド・アーチファクトが避けられなかった. このため, 2方向撮影が必要であったが, 2方向撮影でもベネチアン・ブラインド・アーチファクトが重なった領域での評価は困難である. そこで, 今回評価はできていないが, ベネチアン・ブラインド・アーチファクトを低減する目的で, 再構成に multi-chunk 法を使用した例を図4に示す. Multi-chunk 法はスラブとスラブを単純に並べるのではなく, スラブとスラブとの間に 25~50%の重なりをもたせて, 信

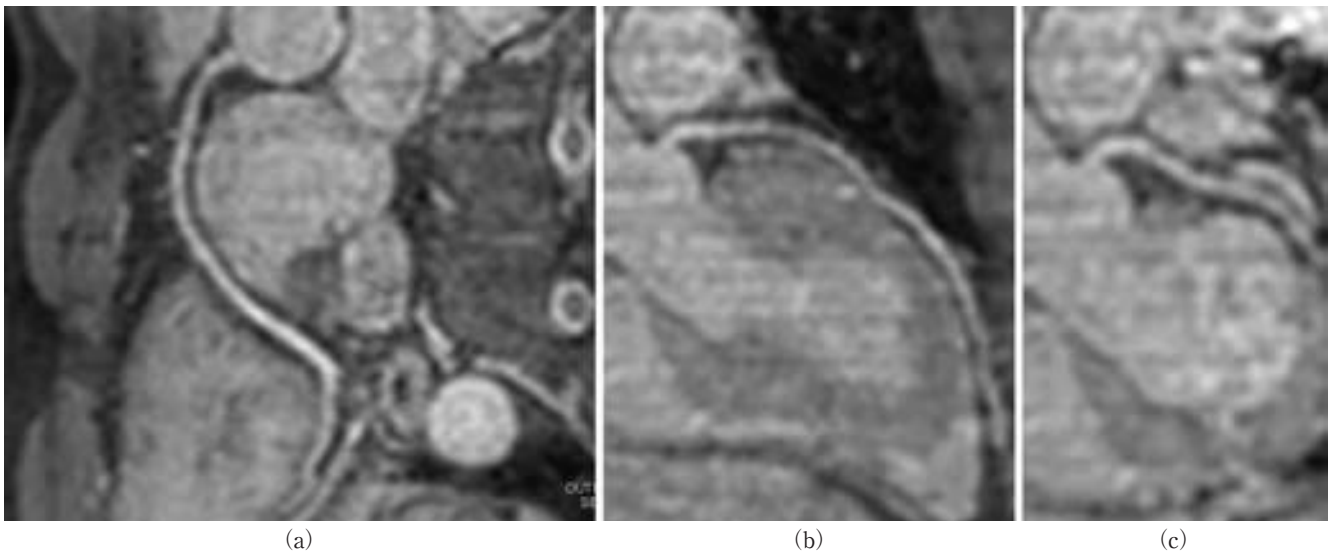


図4 症例1, 42歳健常男性の multi-chunk 法による CMRA 右冠動脈(a)と左冠動脈前下行枝(b), 回旋枝(c)の horizontal から作成した curved MPR を示す. ベネチアン・ブラインド・アーチファクトが低減され, 末梢側の冠動脈まで連続して描出されている.

号低下領域のスライスを除いて残ったスライスを抽出して組み合わせる方法である。図4の症例は図2と同様の症例であるが、multi-chunk法ではベネチアン・ブラインド・アーチファクトが低減され、冠動脈が連続して良好に描出できることがわかる。今後は、このmulti-chunk法を再構成に使用した呼吸停止CMRAの評価が必要である。

最近、cardiac CT angiographyでは、64マルチスライスCTの優位性が報告されている²¹⁾。今後、冠動脈を高い確率で良好に描出するには、冠動脈描出に特化した64マルチスライスCTが要求されるであろう。しかし、16マルチスライスCTも、汎用機として全身CTと併用で冠動脈の描出に用いられる十分な性能を有している。同様に、MRIにおいても、今後冠動脈描出に特化した高度な機能を装備したMRI装置が要求されてくることが予想される。しかし、われわれの実験は、高度な機能を装備しない汎用機MRI装置を使用しても冠動脈の中核側は描出されることを示した。

また、最近のアメリカ科学アカデミーの報告によると、100ミリシーベルトの被曝で100人に1人ががんを発症する危険がある²²⁾。このことは、cardiac CT angiographyを行うに当たっては、危険性に見合う十分な利益が必要であり、CTの適応が厳しく求められる。それ故、若年者などの冠動脈疾患の低リスク者にはCMRAによるスクリーニングが適応となる。今後は冠動脈疾患のスクリーニングにMRIが多く要求されてくるであろう。そのときに全施設で冠動脈用の高度な機能を装備したMRI装置を提供することは不可能なので、汎用機MRI装置におけるわれわれの方法もCMRAの選択肢の一つとなり得る。

VI. まとめ

今回のわれわれの結果から、呼吸停止CMRAは末梢側の冠動脈描出には不十分であったが、中核側の冠動脈描出には利用可能であることが示唆された。今後、多くの施設でCMRAが施行されることで新しい知見を確立することが期待される。

文 献

- 1) Kim WY, Danias PG, Stuber M, Flamm SD, Plein S, Nagel E, Langerak SE, Weber OM, Pedersen EM, Schmidt M, Botnar RM, Manning WJ: Coronary magnetic resonance angiography for the detection of coronary stenoses. *N Engl J Med* 2001; **345**: 1863-1869
- 2) Danias PG, Roussakis A, Ioannidis JPA: Diagnostic performance of coronary magnetic resonance angiography as compared against conventional X-ray angiography: a meta-analysis. *J Am Coll Cardiol* 2004; **44**: 1867-1876
- 3) Fischer SE, Wickline SA, Lorenz CH: Novel real-time R-wave detection algorithm based on the vectorcardiogram for accurate gated magnetic resonance acquisitions. *Magn Reson Med* 1999; **42**: 361-370
- 4) Edelman RR, Manning WJ, Burstein D, Paulin S: Coronary

- arteries: breath-hold MR angiography. *Radiology* 1991; **181**: 641-643
- 5) Liu YL, Riederer SJ, Rossmann PJ, Grimm RC, Debbins JP, Ehman RL: A monitoring, feedback, and triggering system for reproducible breath-hold MR imaging. *Magn Reson Med* 1993; **30**: 507-511
- 6) Shea SM, Kroeker RM, Deshpande V, Laub G, Zheng J, Finn JP, Li D: Coronary artery imaging: 3D segmented k-space data acquisition with multiple breath-holds and real-time slab following. *J Magn Reson Imaging* 2001; **13**: 301-307
- 7) Watanabe Y, Nagayama M, Amoh Y, Fujii M, Fuku Y, Okumura A, Van Cauwenhove M, Stuber M, Dodo Y: High-resolution selective three-dimensional magnetic resonance coronary angiography with navigator-echo technique: segment-by-segment evaluation of coronary artery stenosis. *J Magn Reson Imaging* 2002; **16**: 238-245
- 8) 東 将浩, 山田直明, 堀 祐郎, 平井伸彦, 田中良一, 岡本 淳: 3D true FISP法を用いた冠動脈MRアンギオ. *日医放会誌* 2002; **62**: 490-491
- 9) Taylor AM, Jhooti P, Wiesmann F, Keegan J, Firmin DN, Pennell DJ: MR navigator-echo monitoring of temporal changes in diaphragm position: implications for MR coronary angiography. *J Magn Reson Imaging* 1997; **7**: 629-636
- 10) Stuber M, Botnar RM, Danias PG, Sodickson DK, Kissinger KV, Van Cauwenhove M, De Becker J, Manning WJ: Double-oblique free-breathing high resolution three-dimensional coronary magnetic resonance angiography. *J Am Coll Cardiol* 1999; **34**: 524-531
- 11) Botnar RM, Stuber M, Danias PG, Kissinger KV, Manning WJ: Improved coronary artery definition with T2-weighted, free-breathing, three-dimensional coronary MRA. *Circulation* 1999; **99**: 3139-3148
- 12) Holland AE, Goldfarb JW, Edelman RR: Diaphragmatic and cardiac motion during suspended breathing: preliminary experience and implications for breath-hold MR imaging. *Radiology* 1998; **209**: 483-489
- 13) Weber OM, Martin AJ, Higgins CB: Whole-heart steady-state free precession coronary artery magnetic resonance angiography. *Magn Reson Med* 2003; **50**: 1223-1228
- 14) Jahnke C, Paetsch I, Schnackenburg B, Bornstedt A, Gebker R, Fleck E, Nagel E: Coronary MR angiography with steady-state free precession: individually adapted breath-hold technique versus free-breathing technique. *Radiology* 2004; **232**: 669-676
- 15) Austen WG, Edwards JE, Frye RL, Gensini GG, Gott VL, Griffith LSC, McGoon DC, Murphy ML, Roe BB: A reporting system on patients evaluated for coronary artery disease: report of the Ad Hoc Committee for Grading of Coronary Artery Disease, Council on Cardiovascular Surgery, American Heart Association. *Circulation* 1975; **51** (4 suppl): 5-40
- 16) Thiele H, Nagel E, Paetsch I, Schnackenburg B, Bornstedt A, Kouwenhoven M, Wahl A, Schuler G, Fleck E: Functional cardiac MR imaging with steady-state free precession (SSFP) significantly improves endocardial border delineation without contrast agents. *J Magn Reson Imaging* 2001; **14**: 362-367
- 17) Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MB, Boesiger P: SENSE: sensitivity encoding for fast MRI. *Magn Reson Med* 1999; **42**: 952-962

- 18) Brittain JH, Hu BS, Wright GA, Meyer CH, Macovski A, Nishimura DG: Coronary angiography with magnetization-prepared T2 contrast. *Magn Reson Med* 1995; **33**: 689–696
- 19) McConnell MV, Khasgiwala VC, Savord BJ, Chen MH, Chuang ML, Edelman RR, Manning WJ: Prospective adaptive navigator correction for breath-hold MR coronary angiography. *Magn Reson Med* 1997; **37**: 148–152
- 20) Holland AE, Goldfarb JW, Edelman RR: Diaphragmatic and cardiac motion during suspended breathing: preliminary experience and implications for breath-hold MR imaging. *Radiology* 1998; **209**: 483–489
- 21) Leber AW, Knez A, von Ziegler F, Becker A, Nikolau K, Paul S, Wintersperger B, Reiser M, Becker CR, Steinbeck G, Boekstegers P: Quantification of obstructive and nonobstructive coronary lesions by 64-slice computed tomography: a comparative study with quantitative coronary angiography and intravascular ultrasound. *J Am Coll Cardiol* 2005; **46**: 147–154
- 22) BEIR VII: Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. The National Academies report in brief 2005