

CT-FFR

Teppei Sugaya
管家 鉄平

華岡青洲記念心臓血管クリニック

1. CT-FFR とは

キヤノンメディカルシステムズ（旧東芝メディカルシステムズ）が開発した CT-FFR の大きな 2 つの特徴は、

1) 流体-構造連成解析が採用されていること、2) オンサイトで解析が可能であること、である。

1) 流体-構造連成解析

流体-構造連成解析とは、流体の流動と構造物の変形との相互作用を考慮した解析を行うための手法である。

CT-FFR における具体的な手法は、拡張中期から拡張末期までの 4 つの心位相データ（心位相の 70%、80%、90%、99%）を用いて、その間の血管断面積や血管体積

の変化量を求めることによって患者固有の境界条件を算出し、それをもとに流体解析を行って FFR 値を求めている。冠血流の変動は、冠動脈内の血管抵抗が生理的に最小かつ一定に維持される時相（wave free period）における血管変形に関連することが知られており¹⁾、そのため CT-FFR 解析では 70~99% までの心位相の画像を使用している。位置ズレのない 4 つの位相の画像を得るために、320 列 CT での撮像が必須となっている。

2) オンサイト解析

オンサイト解析が可能という点は、実際の日常臨床で CT-FFR を使用するにあたって非常に有利である。HeartFlow 社の FFR_{CT} は本国から米国にデータを転送

表 1 FFR_{CT} と CT-FFR の比較

	FFR _{CT} (HeartFlow)	CT-FFR (Canon)
CT 装置	64 列 CT 以上	320 列 CT が必須
必要な画像	モーションアーチファクトの少ない拡張期の位相の画像を一つのみ	4 つの拡張期の位相の画像 (70%, 80%, 90%, 99%)
最小解析対象血管径	1.8 mm	1.8 mm
FFR 値の任意のポイント解析	可能	可能
ステント留置後の患者の解析	一部可能	不可能
ステント留置血管の解析	不可能	不可能
主要血管以外の分枝の解析	可能	不可能
オペレーター	HeartFlow 社にてトレーニングを受けた技術者	各施設の放射線技師または医師
解析にかかる時間	4 時間以内 (データ受領にはさらに時間がかかる)	30 分~1 時間
解析のために必要な装置	大量の流体力学モデルを算出することができる スーパーコンピュータ	スタンダードなデスクトップパソコン

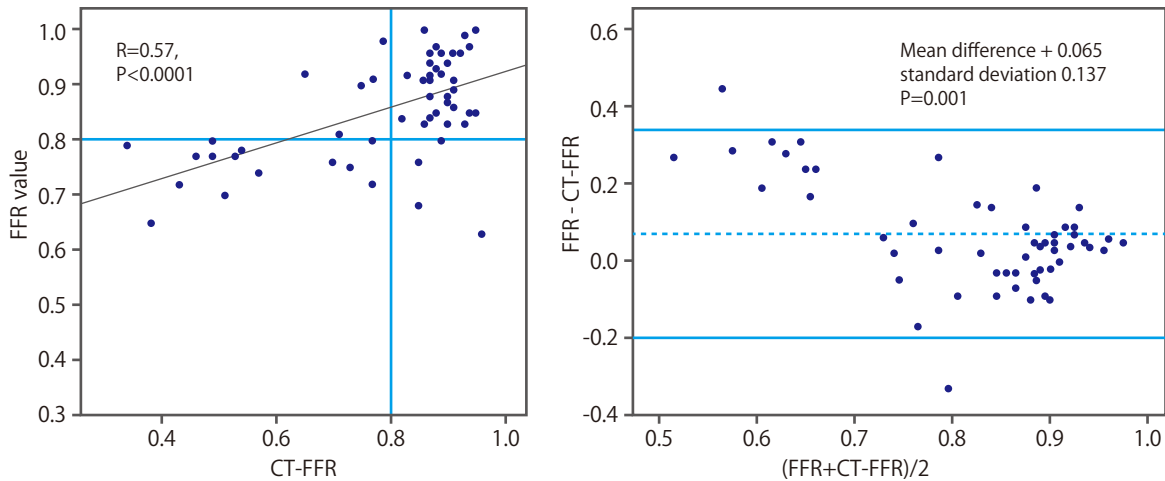


図1 CT-FFRと侵襲的FFRとの比較データ²⁾
良好な相関が得られている。

し、スーパーコンピュータによる解析を行い、結果を見るまでに時間がかかるため、検査当日に患者に結果を知らせることは困難である。さらに、1件あたり多大な費用がかかってしまうのも日常臨床には不利な点である。オンサイトの解析であれば短時間で解析結果を得られるため、通常の外来診療においても、検査当日に結果を患者に説明することができる。当院での使用経験では、30分以内に解析が終了することが多い。また、患者における追加の費用負担はない。解析もFFR_{CT}とは異なり、スーパーコンピュータは不要で、通常のデスクトップのパソコンにソフトがインストールされていれば可能である。

キャノンメディカルシステムズ社のCT-FFRと、HeartFlow社のFFR_{CT}との比較を表1にまとめた。

2. 実際の解析について

CT-FFRの解析は、大きく以下の4つのステップに分けられる。

- ステップ1：320列CTで撮像された70～99%までの4つの心位相の画像の読み込み
- ステップ2：任意の一つの位相の画像における、血管芯線および血管輪郭の設定
- ステップ3：各位相への血管芯線および血管輪郭の反映
- ステップ4：CT-FFR値の算出

ステップ1で重要なことは、まずモーションアーチファクトができるだけ少ないクリアな画像を撮像することである。そのためにわれわれの施設では、撮像時の心拍数を60以下にすることを目標に、積極的に短時間作用型のβブロッカーを静注している。そして、70%、80%、90%、99%の4つの心電図位相の画像をソフトに読み込ませる。

ステップ2では、4つの位相のうちモーションアーチファクトが最も少ない位相の画像を選び、まず自動抽出により血管芯線と血管輪郭を設定し、3つの主要冠動脈(LAD, LCX, RCA)を割り当てる。その後、血管芯線の修正、続いて血管輪郭の修正を行う。この修正はマニュアル操作である。よって、解析時間のばらつきが出るのはこの過程においてである。

ステップ3では、ステップ2で設定した血管芯線と血管輪郭の設定を、残りの3つの位相の画像に反映させる。その作業はすべて自動で行われ、1分程度で終了する。

最後のステップ4では、約5分間で主要3枝のCT-FFR値が自動的に算出され、血管径が1.8mmの部位を最も遠位の解析対象とする。CT-FFR値の任意のポイント解析は可能で、FFR値がjump upしている部位を同定することができる。

前述のように、当院の経験では以上の4つのすべてのステップが終了するまでの時間は多くが30分以内で済み、石灰化の少ない症例ならば20分以内でCT-FFR値

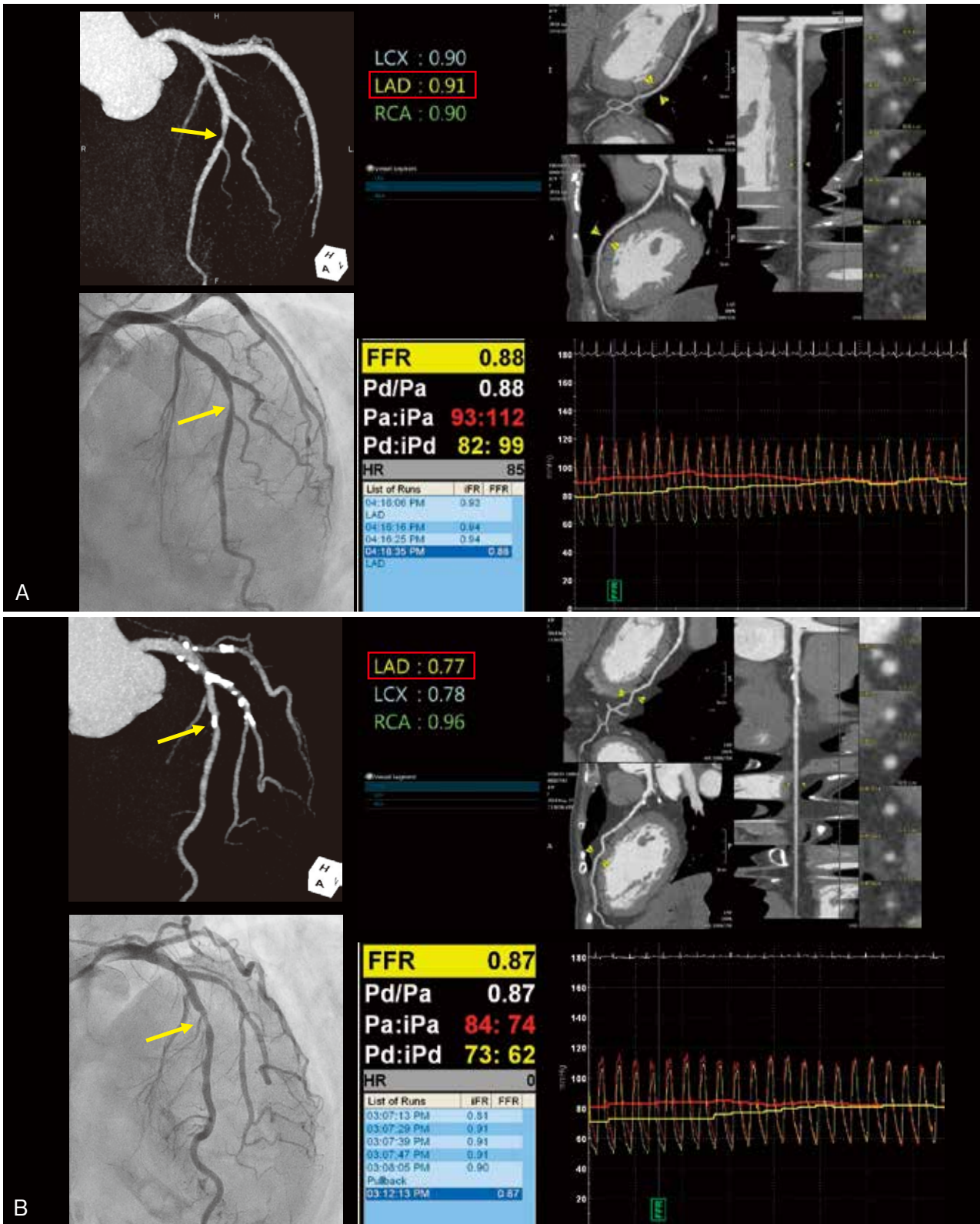


図 2

A の症例と B の症例は、CAG で見ると 2 例とも LAD の局所性病変だが、石灰化がある B の症例では CT-FFR の値と侵襲的 FFR の値に乖離が見られた。

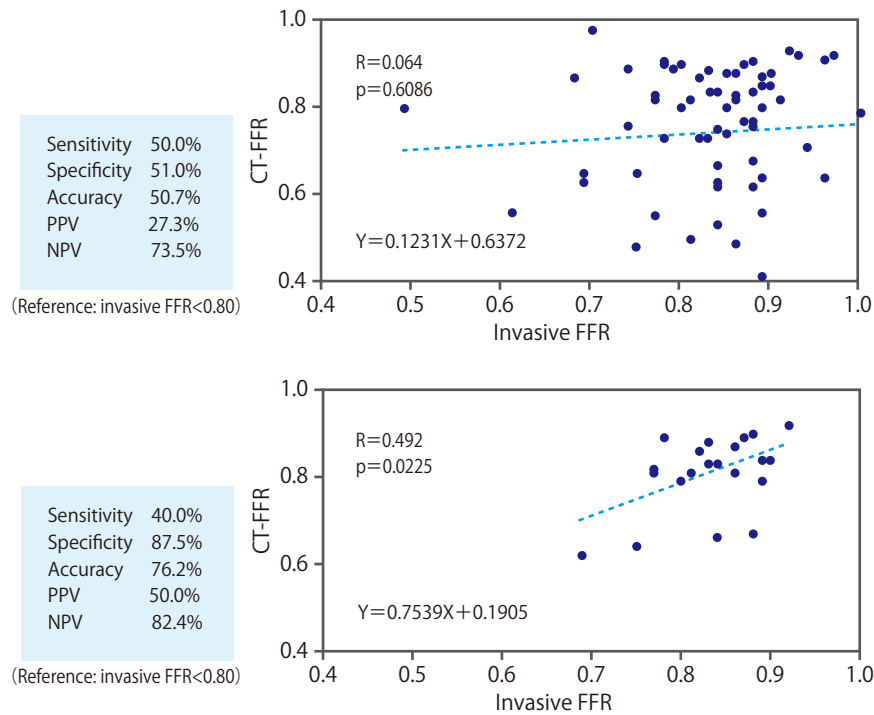


図3 除外基準を設けず CT-FFR 解析をした全ての症例の侵襲的 FFR との比較
 上：全病変 n=67
 下：LAD の Type A 病変に限った場合 n=21

を算出できている。CT-FFR の臨床的なデータの報告は徐々に増加しており、現在まで報告されているデータでは侵襲的な FFR と良好な相関が得られている (図 1)^{2,3)}。

3. CT-FFR の現状と課題

CT-FFR の解析方法は患者固有の境界条件が設定されるため、より精度の高い流体血流解析をできることが期待されている。そして何よりも、オンサイトで解析できる点が一番の魅力である。しかし実際に使用してみると、現状のシステムでは超えなければならないハードルがまだ多く残されている印象がある。

まず、解析のステップの中でも述べたように、血管芯線と血管輪郭を設定する際にはマニュアルによる操作が多く、多くの症例で必要であり、特に石灰化を含む症例では血管内腔の境界の設定が操作者間で一定となるのは難しい。血管の変形を考慮して解析を行っている以上、血管輪郭の設定時における再現性のないマニュアル操作は FFR 値の算出結果に大きな影響を与えてしまうことが考えられる。だが、解析担当者が短時間でも一定のトレーニングを受けるだけで、熟練した解析者の算出した結果

に近づくことができるという報告もあり⁴⁾、解析担当者の教育システムを確立させることも重要と考えられる。

次に、最小の解析可能血管径は FFR_{CT} と同じ 1.8 mm に設定されているが、当院での使用経験では、血管径が 2 mm 以下になると、狭窄がないにもかかわらず FFR 値が急激に低下してしまう症例が散見される。血管の変形を考慮している CT-FFR の解析では、小血管においては空間分解能・時間分解能による限界があるのかもしれない。

さらに当院の使用経験では、侵襲的 FFR と比較すると LAD に比べ、RCA と LCX における診断精度が低い印象がある。RCA と LCX はもともと、位相によってモーシオンアーチファクトが多く見られる血管であるため、複数位相の画像を使用している本解析法ではその影響を受けてしまうと推測する。また、びまん性病変よりも病変長の短い病変のほうが診断精度の高い結果が得られている。さらに、病変長が短かったとしても、病変に石灰化が含まれると診断精度が低下している症例を経験する。図 2 の 2 つの症例は、血管造影だけを見るといずれも LAD の同じような限局性病変であるが、CT における石

灰化の有無によって解析の精度が異なっていることが考えられた症例である。除外基準を全く設けず、高度狭窄病変や一部の位相でモーションアーチファクトを有する症例、透析患者を含む高度石灰化による症例なども含めて解析を試みたところ、CT-FFR 値の算出が可能であった当院における“本当の意味でのリアルワールド”のデータでは、LAD の石灰化のない病変長の短い病変（いわゆる Type A 病変）に絞ったところ、侵襲的 FFR と良好な相関が得られ、PCI による治療適応の診断精度も向上している（図 3）。

その他には、FFR_{CT}と同様に、ステントが留置されている症例に対する解析ができないことや、陳旧性心筋梗塞などの心筋バイアピリティ低下症例に対する算出結果の正確性の問題なども残されている。

最後に

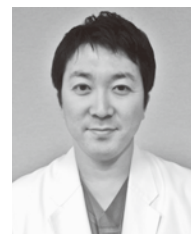
CT-FFR は、現状で実臨床に使用するためにはまだ改善が必要であるが、方法論としては非常に優れた解析法であり、CT の空間分解能や時間分解能が向上し、ソフトウェアのさらなる改善が繰り返されれば、間違いなく実臨床で有用な診断装置になると思われる。今後の進展を大いに期待したい。

参考文献

- 1) Hirohata K, Kano A, Goryu A, et al: A novel CT-FFR method for the coronary artery based on 4D-CT image analysis and struc-

tural and fluid analysis. *Physics of Medical Imaging*. 2015; doi: 10.1117/12.2081674.

- 2) Ko BS, Cameron JD, Munnur RK, et al: Noninvasive CT-Derived FFR Based on Structural and Fluid Analysis—A Comparison With Invasive FFR for Detection of Functionally Significant Stenosis—. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2017; 10: 663-673.
- 3) Fujimoto S, Kawasaki T, Kumamaru KK, et al: Diagnostic performance of on-site computed CT-fractional flow reserve based on fluid structure interactions: comparison with invasive fractional flow reserve and instantaneous wave-free ratio. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2018; doi: 10.1093/ehjci/jev104. [Epub ahead of print]
- 4) Ri K, Kumamaru KK, Fujimoto S, et al: Noninvasive computed tomography-derived fractional flow reserve based on structural and fluid analysis: Reproducibility of on-site determination by unexperienced observers. *J Comput Assist Tomogr* 2018; 42: 256-262.



菅家鉄平（すがや てっぺい）

2004 年 北海道大学医学部卒業、北海道大学病院
2005 年 釧路赤十字病院
2006 年 北海道社会保険病院心臓内科
2011 年 北海道大学大学院博士課程核医学講座
2014 年 独立行政法人地域医療機能推進機構北海道病院心臓内科
2016 年 医療法人春林会華岡青洲記念心臓血管クリニック
現在に至る