

# 64列多列化 CT を用いた 新しい定量的心筋灌流イメージング法

中内 祥文 岩永 善高 生田 新一郎 工藤 正幸<sup>1,2</sup>  
村上 卓道<sup>3</sup> 宮崎 俊一

近畿大学医学部内科学教室 (循環器内科部門) <sup>1</sup>GE ヘルスケアジャパン株式会社  
<sup>2</sup>近畿大学医学部解剖学教室 <sup>3</sup>近畿大学医学部放射線医学教室 (放射線診断学部門)

## 抄 録

目的: コンピューター断層撮影(CT)と逆積分解析法を用いた定量的な組織灌流定量的評価法が心筋灌流分析に適用できるかは不明である。今回、我々は64列多列化 CT と逆積分法を用いて算出した定量的心筋灌流イメージング法の評価を行った。

方法: 正常例10例と急性心筋梗塞(AMI)患者19例で組織血流量(TBF), 組織血液量(TBV), 平均通過時間(MTT)の3つの灌流指標を逆積分解析によって算出し, single photon emission computed tomography (SPECT) 像を含む臨床指標との比較を行った。

結果: 正常例における左心室心筋の TBF は,  $128.44 \pm 20.79$  ml/100 g/min であり, 従来の報告と近似していた。AMI 患者では, 梗塞領域の TBF と TBV は非梗塞領域より有意に低値であった ( $p < 0.01$ )。梗塞領域の MTT は, 非梗塞領域より延長していた ( $p < 0.01$ )。TBV カラーマップにおける血流低下領域の面積は, 血清クレアチンキナーゼピーク値, QRS スコア, SPECT 欠損スコアと有意な正の相関を示した ( $p < 0.05$ )。TBF の心外膜側/心内膜側比は, 側副血行路が発達した群で乏しい群と比較して有意に高値であった ( $p < 0.01$ )。

結論: AMI 患者における心筋灌流異常を, 当方法を用いて初めて定量的に検出できた。当方法は AMI の臨床評価に有用であることが示唆された。

**Key words:** 多列化 CT, 心筋灌流イメージング, 心筋梗塞

## 緒 言

近年, 脳灌流分析においてコンピューター断層撮影(CT)と逆積分解析法を用いた定量的評価が行われている<sup>1</sup>。脳灌流分析においては, 標準的なヨード造影剤を急速静注し, 脳組織のファーストパスをモニタリングし CT 値の時間濃度曲線(TDC)を描き, この曲線と流入動脈の TDC を入力関数として用いて, 逆積分解析することによって, 組織血流量(TBF), 組織血液量(TBV)と平均通過時間(MTT)が算出される。この CT 脳灌流分析は虚血性脳疾患の非侵襲的な診断や, くも膜下出血後の血管痙攣評価, また, 頭蓋内動脈狭窄病変を有する患者の脳血流予備能や頭蓋内新生物の微小血管の透過性の評価等に有用であると報告されている<sup>2</sup>。

心筋灌流イメージング(MPI)は, 冠動脈疾患(CAD)患者の予後予測に有用な確立された検査法である。MPI としては放射性同位元素を用いた single photon emission computed tomography (SPECT) と positron emission tomography (PET) が臨床的に用いられている<sup>3,4</sup>。しかし, 両者ともに空間分解能に限界があり, 特に SPECT は心筋血流を定量化することができない。PET は心筋血流量と冠血流予備能の定量的測定ができるが, <sup>13</sup>N や <sup>15</sup>O などの PET 用核種は本邦においては保険適応がなく広く利用できる現状ではない<sup>5</sup>。

一方, 64列多列化 CT (MDCT) はより高い時間, 空間分解能を有し, CT 冠動脈血管造影法(CTA)により非侵襲的に冠動脈狭窄病変の評価が可能である。そして, 冠動脈疾患(CAD)が疑われる患者の

診断において、CTAは96-99%の高い陰性的中率を有する<sup>6</sup>。しかしながら、現在MDCTを用いた定量的な心筋灌流の評価法は確立されていない<sup>7</sup>。そこで、今回我々は正常例と急性心筋梗塞(AMI)患者で64列MDCTと逆積分解析法に基づいたアルゴリズムを用いて、TBF, TBV, MTTを算出し、心筋灌流像をカラーマップとして再構築した。

各数値を臨床的指標と比較し、この方法が左心室壁内の局所血液灌流の差を検出できるか否かを検討した。

## 方 法

2006年8月から2007年11月の期間に胸痛、胸部不快感を主訴に近畿大学医学部附属病院を受診した胸痛症候群(正常例)10例とAMI患者19例にCT MPIを施行した。胸痛症候群の患者のうち、心筋<sup>201</sup>Thallium(Tl)SPECTで異常所見を認めず、さらにCTAで冠動脈に狭窄病変を認めなかった症例を正常例とした。また、以下の3つの基準:i)30分以上持続する胸痛、ii)異常Q波を認めるか、2つ以上の連続した誘導でSTセグメントの上昇または低下の心電図変化、iii)正常上限の3倍以上の血清クレアチンキナーゼ(CK)値の上昇、のうち少なくとも2つを満たしたときにAMIと診断した。心臓カテーテル検査法は標準的な大腿動脈からのアプローチで施行され(後述)、急性期に再灌流治療(17例で経皮的冠動脈形成術、2例での血栓溶解療法)が施行された。側副血行路のRentrop分類<sup>8</sup>を選択的な冠動脈血管造影法で評価した。AMI患者を側副血行路が乏しい群(Rentrop分類0またはI度の13例)と発達した群(Rentrop分類IIまたはIII度の6例)の2つの群に分けた。MDCTと安静時SPECTは心筋梗塞(MI)発症から14日以内に施行された。本研究は院内の倫理委員会の承認を得て、すべて患者にインフォームドコンセントを行い書面で同意を取得した。

### 冠動脈造影法：装置及び手技

X線撮影装置はX線高電圧装置KXO-100G(東芝, 日本)、天井走行式Cアーム型保持装置CAS-8000V(東芝, 日本)、デジタルフルオログラフィ装置DFP-2000A(東芝, 日本)、X-RAY TELEVISION CAMERA MTV-32D(東芝, 日本)を用いた。冠動脈造影検査は右または左大腿動脈を穿刺し、シースイントロデューサー挿入後、Judkinsカテーテルを用いて行った。冠動脈造影検査前にヘパリン5,000単位を静脈投与し、硝酸イソソルビド(エーザイ, 日本)を2.0mgずつ左右冠動脈内に投与後、

造影剤(iopromide, 350mgI/ml)5.0-8.0mlを手動注入することで左右冠動脈造影を施行した。対角枝の完全閉塞の1例を除いて、AMI患者はACC/AHAガイドラインに基づき、急性期に責任冠動脈に有意狭窄病変が残存しないようにバルーンカテーテルまたはbare metal stentを用いて血行再建を施行された。AMI発症から血行再建(guide wire cross)までの平均時間は8.1±6.9時間であった。

### 梗塞領域の評価

CKピーク値は、入院時と再灌流治療後3時間毎に血液検査を施行し求めた。2例においては最大CK値が入院時に観察され、CKピーク値が確定できなかったため、直線回帰分析から除外した。また、Wagnerら<sup>9</sup>の報告した方法を用いて、退院前の慢性期12誘導心電図からQRSスコアを算出した。

### SPECTを用いた梗塞領域の評価

正常例には標準的なトレッドミル運動プロトコルを用いて、負荷Tl SPECTが施行された。AMI症例には発症から14日以内に、CTスキャンとは別日に安静Tl SPECTが施行された。心電図同期SPECT画像データは、垂直長軸、水平長軸と短軸像の3断面に再構築された。米国心臓協会が推奨する17セグメントモデル<sup>10</sup>を用いて、0から4ポイント(0=集積低下無し、1=軽度集積低下、2=中等度集積低下、3=高度集積低下、4=取り込みの欠如)でトレーサーの集積度をスコアリングした。17セグメント全体におけるスコアと責任冠動脈領域におけるスコアを算出した。

### CT心筋灌流像撮影法と解析法

300mgI/ml濃度の造影剤(Iohexol, 第一三共, 日本)40mlを4ml/secの速度でインジェクターを用いて肘静脈から注入し、64列MDCTスキャナ(LightSpeed VCT, GE Healthcare, 米国)を用いて心電図非同期シネスキャンを施行した。シネスキャンは左冠動脈起始部から1cm尾側の4cm幅(厚さ5mmの8枚のスライス)を、造影剤の注入開始8秒後から30秒間撮影した。その他の撮影条件は、管球電圧120kV、管球電流40mA、ガントリ回転時間は500msecで吸収線量の平均は5.7mSVであった。

逆積分解析に基づいたソフトウェアで再構成と解析を行うために、得られた造影画像をワークステーションに転送した(Advantage Workstation 4.3, 4.4 and CT Perfusion 4 research version, GE Healthcare, 米国)<sup>1,11,12</sup>。

シネスキャンにより得られた画像は0.1秒毎に再構築され、心臓の運動アーチファクトを低減するための retrospective gating と、左心室腔の造影剤から心筋へのハレーションノイズの軽減のために beam hardening correction が施行された。

解析に用いるスライスが8枚の中で左心室腔サイズが最大のものを選択した。0.1秒毎に再構成された30枚のイメージは、ソフトウェアにより左心室壁と肺の境界線の変化を用いて ECG の RR 間隔の10% 毎相当の10位相に仕分けられた。左心室腔の大きさが拡張末期にあたる時相で、ファーストパスで左心室が濃染する前から造影剤が洗い出されるまでの30枚を解析に用いた。

大動脈上に設定した円形の関心領域 (ROI) は、定量解析のための入力関数として用いた。前述の30枚から左心室壁 (心筋) の TDC を求め、入力関数とともに逆積分解析が行われた。

我々の用いた流量解析の原理は Cenic らの報告で詳述されている<sup>11,13,14</sup>。簡便に述べると、動脈から臓器に流入した造影剤は、短時間のうちにある速度を持って組織内に広がり、緩やかに流出していく。

この流出の状態を捉えた計算方式が (式1) であり、下記に示す。

$$Q(t) = F \times Ca(t) \otimes R(t) \quad \text{--- (式1)}$$

$\otimes$  は積分操作を、 $F$  は血流速度を、 $Q(t)$  は心筋組織の造影剤濃度を、 $Ca(t)$  は動脈内血中の造影剤濃度を、 $R(t)$  は単一パルス残留関数 (Impulse Residue Function: IRF) をそれぞれ示している。 $Ca(t)$  と  $F$  の積に  $R(t)$  を積分操作したものが、 $Q(t)$  に相当する。 $R(t)$  は動脈を入力、実質臓器を出力とした組織における血行動態を表す組織固有の関数で、造影剤の流出もしくは残留の程度を示す。 $R(t) = \text{IRF}$  の概要図を図1Aに示す。 $\text{FR}(t)$  のプラトーの高さが  $\text{TBF}$  となり、curve の下の面積が  $\text{TBV}$  となる。 $\text{MTT}$  は  $\text{MTT}(\text{sec}) = \text{TBV}(\text{ml}/100\text{g}) / \text{TBF}(\text{ml}/100\text{g}/\text{min})$  の数式で計算される。すなわち、 $\text{IRF}$  を求めることができれば  $\text{TBF}$ 、 $\text{TBV}$ 、 $\text{MTT}$  の各数値が得られる。図1Bに示すように、動脈からの造影剤の流入が一定であると仮定すると組織の反応もプラトーを持つ一定の関数  $R(t)$  となる (B-a)。しかし、実臨床では動脈からの連続した造影剤の流入は一定ではなく、直接  $\text{IRF}$  を求めることはできない。

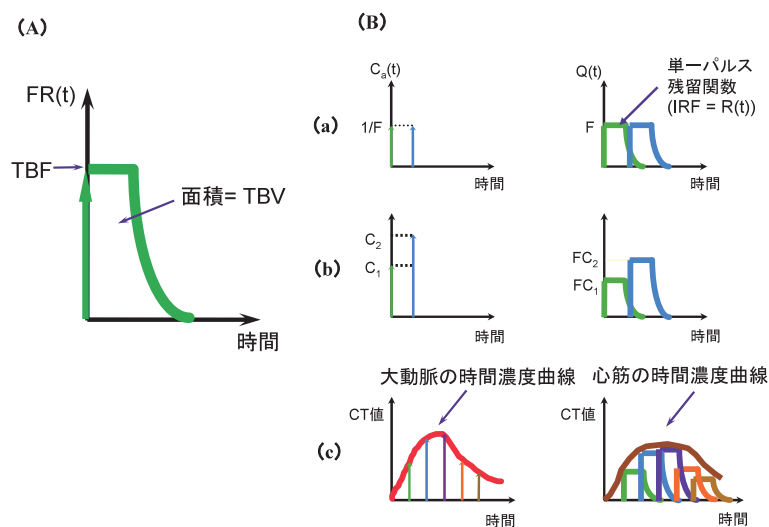


図1 逆積分流量解析の原理の概要図。(A) 単一パルス残留関数 (Impulse Residue Function: IRF) と TBF, TBV の関係、(B) 動脈からの造影剤の流入と組織反応の関係。

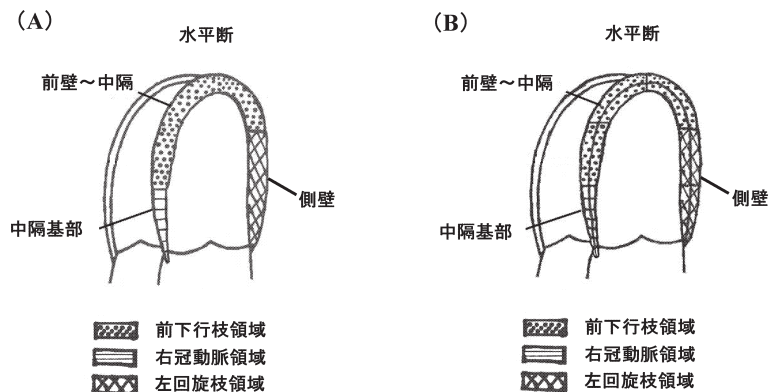


図2 冠動脈血流分布図。(A) CT 水平断の左心室壁を冠動脈血流分布によって分割した (文献15から引用)、(B) 中央で心外膜側と心内膜側に2分割した (合計12セグメント)。

C1 や C2 の造影剤の流入に対する心筋組織の反応が FC1 や FC2 であり (B-b), これらが重なって積分され, 大動脈と心筋組織の TDC (B-c) となる。

Ca(t) と Q(t) は, 大動脈と心筋の TDC からそれぞれ求めることができ, それらを逆積分操作することによって  $R(t) = IRF$  を求めることができる。

上記の原理に基づいて, TDC から IRF を求め, TBF, TBF, MTT が 1 ピクセル毎に算出され, 左心室壁全体が色分けされたカラーマップとして描出された。CT 値 (HU) の測定は前述の拡張末期時相の 30 枚から, 造影剤が左心室壁から洗い出される前の early defect が最も明瞭に観察できる 1 枚を選び測定した。

左心室心筋における ROI の設定は以下のとおりに行った。

1. 正常例: 左心室壁全体に ROI を設定し, TBF, TBF, MTT の 3 指標を測定した。
2. AMI 患者: ドブタミン負荷心エコー図の研究においてすでに報告されているように<sup>15</sup>, 図 2 A のごとく左心室壁を右冠動脈 (RCA), 左冠動脈前下行枝 (LAD) と左冠動脈回旋枝 (LCx) の 3 領域に分け, TBV カラーマップ上で責任冠動脈領域において, TBV 値が隣接した非梗塞領域と比較して 50% 以上減少した部位を梗塞領域と定義し, その部位に ROI を設定し, ROI の面積 (mm<sup>2</sup>) と 3 指標を求めた。また, 非梗塞領域 (非責任冠動脈領域)

には 20 mm<sup>2</sup> の円型 ROI を設定し同様に算出した。

さらに, 左心室壁を図 2 B で示すように心外膜側と心内膜側 (合計 12 セグメント) に分け, CT, TBF, TBV, MTT を全セグメントで測定し, それぞれの心外膜/心内膜側比を算出した。Rentrop 分類で分けられた 2 群間で, CT 値を含む上記 4 指標の責任冠動脈領域における心外膜/心内膜側比の平均値を比較した。

### 統計解析

連続変数の群間は  $\chi^2$  検定, Mann-Whitney U 検定または分散分析 (ANOVA) を用いて比較した。

2 変数の関係は, 線形回帰分析とピアソン相関係数によって評価した。P < 0.05 を有意とした。結果は平均値 ± 標準偏差 (SD) で示した。

## 結 果

### 患者背景

正常例 (10 例) の平均年齢は 65.3 ± 10.5 歳であり, 70% は男性であった。AMI 患者 (19 例) の平均年齢は 64.9 ± 11.3 歳であり, 74% は男性であった (表 1)。正常例と AMI 患者の平均年齢に有意差を認めなかった。責任冠動脈の比率は LAD が 42.1%, RCA が 47.4%, LCx が 10.5% であった。ステントは 89.5% の患者に留置された。AMI の発症から MDCT スキャンと安静 T1 SPECT スキャンまでの平均期間は,

表 1 正常例と急性心筋梗塞症例の患者背景

	正常例 10例	急性心筋梗塞症 19例
年齢	65.3 ± 10.5	64.9 ± 11.3
性別 (男性)	7 (70.0)	14 (73.6)
糖尿病	4 (40.0)	7 (36.8)
高血圧	8 (80.0)	12 (63.1)
脂質異常症	7 (70.0)	15 (78.9)
喫煙	3 (30.0)	14 (73.6)
肥満 (BMI ≥ 25)	1 (10.0)	9 (47.4)
責任冠動脈		
LAD	—	8 (42.1)
LCx	—	2 (10.5)
RCA	—	9 (47.4)
非 Q 波梗塞	—	9 (47.4)
CK ピーク値 (IU/l)	—	2617 ± 2287
Killip 分類 ≥ 2	—	2 (10.5)
Rentrop 分類 ≥ 2	—	6 (31.5)
TIMI flow 分類 (pre PCI) ≤ 1	—	8 (42.1)
TIMI flow 分類 (post PCI) ≥ 3	—	18 (94.7)

データは平均 ± 標準偏差または症例数 (%) として示す。

BMI: 肥満度指数, LAD: 左冠動脈前下行枝, LCx: 左冠動脈回旋枝, RCA: 右冠動脈, CK: クレアチンキナーゼ, TIMI: Thrombosis in Myocardial Infarction, PCI: 経皮的冠動脈形成術

それぞれ7.6±2.7日, 8.1±2.5日であった。

#### 心筋灌流指標測定値 (表 2)

正常例の心筋灌流指標の各数値は, TBF が 128.44±20.79 ml/min/100 g, TBV が6.25±1.36 ml/100 g, MTT は4.73±1.09 sec であった。

代表的 AMI 症例における造影 CT 元画像と CT MPI のカラーマップを図 3 に示した。左心室前壁から心室中隔にかけて TBF と TBV の血流低下領域を認め, MTT の延長を認めた。全ての AMI 症例において, 造影 CT 元画像の early defect と同様の範囲で血流低下領域を示したのは TBV カラーマップであり, TBF カラーマップでの血流低下領域と MTT カラーマップでの通過時間延長を示す領域は, TBV カラーマップでの血流低下領域の範囲より小さかった。AMI 患者においては梗塞領域で TBF が90.40±42.90 ml/min/100 g, TBV が3.88±1.18 ml/100 g, MTT は5.59±3.61 sec であり, 非梗塞領域でそれぞれ167.84±61.10 ml/min/100 g, 7.24±2.68 ml/100 g, 3.54±1.43 sec であった。AMI 患者の 3 指標全てにおいて, 梗塞領域と非梗塞領域間に有意差を認めた (TBF, TBV : p<0.01, MTT : p<0.05)。

#### 梗塞領域の推定

TBV カラーマップで TBV 値が50%以上減少した部位を梗塞領域と定義し, 面積 (mm<sup>2</sup>) を算出した。算出した面積は, 梗塞範囲を反映する臨床指標の CK ピーク値または QRS スコアと有意な正の相関を示した (CK ピーク値 : R=0.37, p<0.01, QRS スコア : R=0.30, p<0.05)。更に, SPECT 像における17セグメント全体における欠損スコア, あるいは責任冠動脈領域における欠損スコアのいずれとも有意な正の相関を示した (17セグメント全体 : p<0.05, R=0.22, 責任冠動脈領域 : p<0.01, R=0.39, 図 4)。

#### 側副血行路と心外膜/心内膜比の関係 (図 5)

非梗塞領域における TBF と TBV の心外膜/心内膜側比の平均はそれぞれ, 0.94±0.26と0.94±0.16であった。梗塞領域における CT 値と MTT の心外膜/心内膜側比については, 側副血行路が乏しい群 (Rentrop 分類 0 または I 度の13例) と側副血行路が発達した群 (Rentrop 分類 II または III 度の 6 例) の間に有意差を認めなかった (p=0.30, p=0.58)。しかし, 梗塞領域における TBF と TBV の心外膜/心内膜側比については, 側副血行路が発達した群で, 側副血行路が乏しい群に比較して有意に高値であった (TBF : 1.48±0.40 vs. 0.87±0.23, p<0.01,

表 2 心筋灌流指標測定値

	急性心筋梗塞例		正常例
	梗塞領域	非梗塞領域	
TBF (ml/100 g/min)	90.4±42.9*	167.8±61.1*	128.4±20.8
TBV (ml/100 g)	3.88±1.18*	7.24±2.68*	6.25±1.36
MTT (sec)	5.59±3.61 <sup>#</sup>	3.54±1.43 <sup>#</sup>	4.73±1.09

データは平均±標準偏差として示す。

\*p<0.01, #p<0.05

TBF : 組織血流量, TBV : 組織血液量, MTT : 平均通過時間。

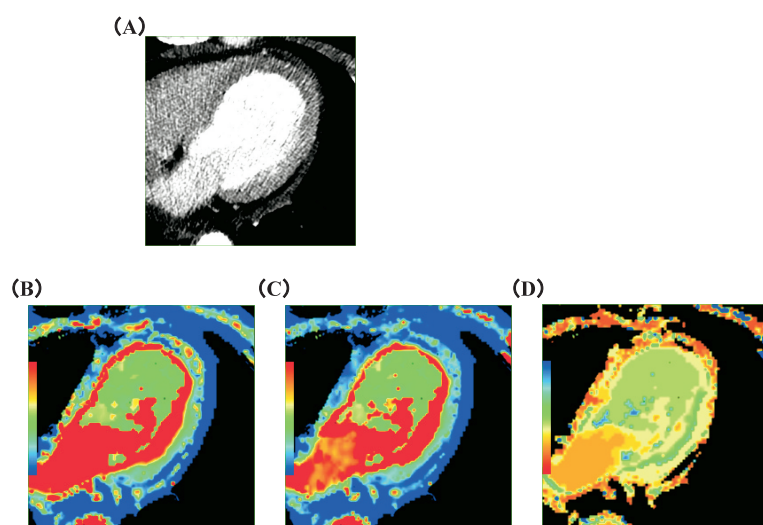


図 3 代表的な68歳男性, 前壁 AMI 症例。

(A) 造影 CT 元画像,  
(B) TBF カラーマップ,  
(C) TBV カラーマップ,  
(D) MTT カラーマップ。

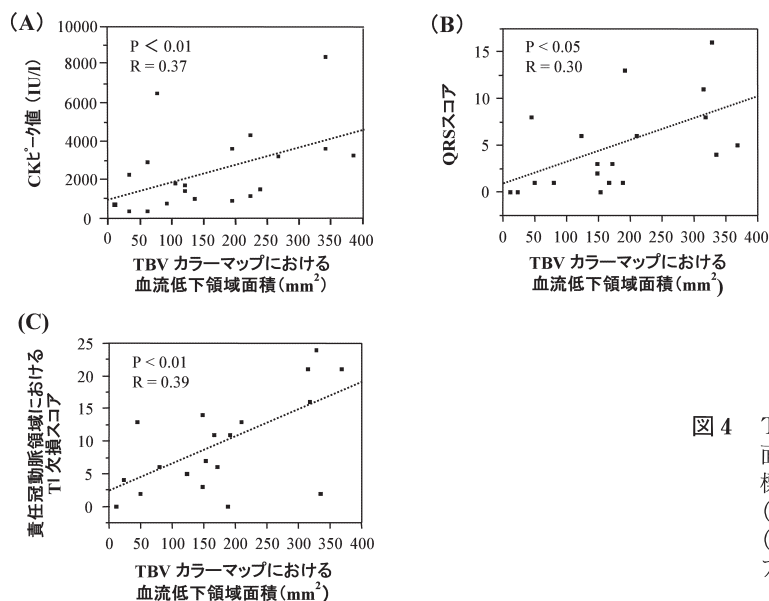


図4 TBV カラーマップにおける血流低下領域の面積 ( $\text{mm}^2$ ) とリスクエリアを示す各臨床指標との相関図。(A) CK ピーク値、(B) QRS スコア、(C) 責任冠動脈領域における T1 欠損スコア。

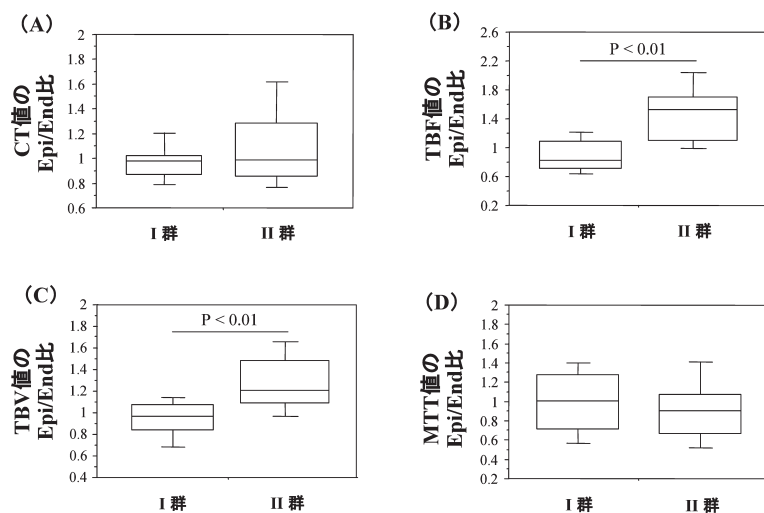


図5 側副血行路の発達と各指標における心外膜/心内膜 (Epi/End) 比の関係。(A) CT 値、(B) TBF、(C) TBV、(D) MTT。AMI 患者を Rentrop 分類により、(I) 側副血行路が乏しい群の13例と (II) 側副血行路の発達した群の6例に分けた。

TBV:  $1.27 \pm 0.19$  vs.  $0.94 \pm 0.27$ ,  $p < 0.01$ ).

## 考 察

$^{201}\text{Tl}$  や  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  の放射性核種を用いた SPECT MPI による心筋灌流評価は臨床的に確立されている。しかし、SPECT は心筋灌流を定量化することができず、空間分解能にも限界がある。PET では定量化が可能であり、SPECT に比べると空間分解能の改善を認めるが、心筋血流を測定するための  $^{13}\text{N}$  や  $^{15}\text{O}$  の PET 用核種を利用できる施設は本邦では限られており汎用的ではない。また、左心室壁内の心筋灌流の差を定量化できるほどの解像度は有さない<sup>4</sup>。

一方、Magnetic resonance imaging (MRI) は左心室壁内の心筋灌流の差を視覚化できる唯一の modality であると考えられる。遅延造影 MRI によ

る梗塞領域の心筋バイアビリティ評価の有用性は、ここ数年間で多数報告されている<sup>16</sup>。MRI ではガドリニウム注入後のファーストパスの間に高速撮影することにより、2-3 mm の空間分解能で心筋灌流が評価することができるが、正確な定量には限界がある<sup>17</sup>。近年、Choe らは心筋梗塞領域の検出とサイズの測定能力を MRI と MDCT とで比較した。彼らは灌流障害を描出する能力は、MDCT の早期造影像が MRI のファーストパス像より上回っており、MDCT が有用であることを示唆した<sup>18</sup>。ファーストパス時の MRI の高速撮影で得られる画像は、ノイズとアーチファクトに影響を受け低解像度になったためと考えられた。

MDCT を用いた虚血心筋の評価は、早期造影像の造影不良 (early defect) と遅延造影像の濃染像 (delayed enhance) によるものが報告されている。

遅延造影像については動物の急性期と慢性期 MI 実験モデルを用いて、Lardo らは心筋障害の範囲が正確に評価できたと報告している<sup>19</sup>。Gerber らもまた、ヨード造影剤とガドリニウム DPTA がブタの梗塞心筋で同様の動態を示すことと、ヒトの MI 症例において MDCT の遅延造影像が、MRI の遅延造影像と同様の増強パターンを示すことを報告している<sup>20</sup>。

George らは LAD に狭窄病変を有する犬実験モデルにおけるアデノシン負荷 MDCT MPI に関して、ファーストパス時の画像で心筋灌流の半定量的な測定が可能であると報告している<sup>21</sup>。また、彼らは心筋の信号強度比がマイクロスフィアを用いて測定された心筋血流量 (MBF=TBF) とよく相関することを示した。Nagao ら<sup>22</sup> と George ら<sup>23</sup> は、心内膜減衰値 (収縮期の心内膜下/平均値または心内膜/心外膜値) を用いた MDCT MPI 解析は、CAD が疑われる患者で虚血心筋の検出に有用であると報告している。最近、Kido らは ATP 負荷後のファーストパス時の MDCT シネスキャンにより得られた左心室心筋の TDC を、Patlak 法に基づいて線形回帰解析を行い、得られた傾斜から MBF が算出できることを示した<sup>24</sup>。彼らは ATP 負荷後の MBF のみの報告であったが、有意冠動脈狭窄病変を有する領域と有しない領域の MBF はそれぞれ、 $1.19 \pm 0.36$ ,  $2.06 \pm 0.54$  ml/g/min であった ( $p < 0.01$ )。

今回の研究においては、TBF, TBV と MTT が算出され、各々のカラーマップも描出することができた。AMI 症例において TBV カラーマップ上で局所的な異常を示す範囲は、TBF カラーマップと MTT カラーマップ上で異常を示す範囲より広範囲であった。CT による脳灌流分析において、cerebral blood flow (CBF=TBF) カラーマップが虚血と予後評価において最も高い相関を示したが、MTT カラーマップは脳卒中の検出において最も鋭敏であった<sup>1</sup>。今回の結果の Rentrop 分類別の群間の差違も側副血行路により救済された心筋組織の差違を示した結果と考察されるが、心筋組織は脳組織と比べ側副血行路も発達しやすく多血管で血流が供給されており、その組織性状の違いにより脳と心臓の結果に差が生じたと推察される。さらに症例を追加した上で実臨床に基づく各指標の詳細な検討が必要である。我々の CT 心筋灌流スキャンプロトコルは CTA のテストスキャンを兼ねており、心筋灌流像と冠動脈性状が 1 回の撮影で評価することが可能である。したがって、より正確な診断が AMI だけでなく、他の CAD においても可能になることが予想される。

SPECT 欠損スコアは、MI 患者の予後予測因子で

あることが以前より報告されている<sup>25</sup>。本法においては、TBV カラーマップにより定量的に求めた血流障害領域を梗塞領域として評価することができ、またそれは、SPECT 欠損スコアと良好な相関を示したので、今回の方法で示す血流障害領域は MI または CAD の患者において予後予測と関連があると推定される。CT MPI の臨床における有用性をより明確とするためには、今後、臨床追跡調査が必要である。

我々の今回の研究にはいくつかの限界がある。最初に、この報告は first trial であり、対象は少数例で、CAD については AMI 患者のみの解析であった。今後、CT MPI は他の CAD 患者を含むより多くの患者で評価する必要がある。また、定量化が可能な他の modality との比較検証実験は、今回の研究において施行していない。現在、ヒトの心筋血流量測定において最も信頼できる modality は PET である。PET を用いた測定でヒトの正常心筋の安静時 TBF は  $1.0-1.5$  ml/g/min との報告があり<sup>4</sup>、我々の今回の結果とかなり近似していた。また、Maes らは C11-アセテート PET を用いた検討で、TIMI 分類 3 度に再灌流療法を施行された AMI 患者の梗塞領域と非梗塞領域の TBF がそれぞれ、 $0.46 \pm 0.11$  と  $0.83 \pm 0.18$  ml/g/min であったと報告している<sup>26</sup>。我々の方法と特に定量的 PET との直接比較試験は必要であろう。

今回の我々の研究で初めて、ファーストパス時のシネスキャンにより得られた心筋造影像と逆積分解析法を用いて、定量的に MDCT MPI カラーマップを描出することができた。そしてまた、AMI 患者において左心室壁内の灌流の差違を定量的に、かつ合理的に評価することができた。CTA の際にテストスキャンとして定量的 MPI を同時に実行するプロトコルは、将来的に MI を含む CAD 患者の診断と治療において、より詳細な心筋血流情報を提供することが期待される。

## 謝 辞

本稿を終えるにあたり、本研究に御協力、御指導をいただきました近畿大学医学部内科学教室循環器内科部門の各先生方、同放射線科診断学部門の各先生方ならびに近畿大学医学部附属病院中央放射線部門の診療放射線技師の皆様に深甚な謝意を捧げます。

本研究の要旨は平成21年の米国内臓協会年次学術集会にて発表を行った。

## 文 献

1. Hoeffner EG, Case I, Jain R, Gujar SK, Shah GV, Deveikis JP, Carlos RC, Thompson BG, Harrigan MR, Mukherji SK (2004) Cerebral perfusion CT : technique

- and clinical applications. *Radiology* 231 : 632-644
2. Cenic A, Nabavi DG, Craen RA, Gelb AW, Lee TY (2000) A CT method to measure hemodynamics in brain tumors: validation and application of cerebral blood flow maps. *AJNR Am J Neuroradiol* 21 : 462-470
  3. Cuocolo A, Acampa W, Imbriaco M, De Luca N, Iovino GL, Salvatore M (2005) The many ways to myocardial perfusion imaging. *Q J Nucl Med Mol Imaging* 49 : 4-18
  4. Beller GA, Zaret BL (2000) Contributions of nuclear cardiology to diagnosis and prognosis of patients with coronary artery disease. *Circulation* 101 : 1465-1478
  5. Bengel FM, Higuchi T, Javadi MS, Lautamäki R (2009) Cardiac positron emission tomography. *J Am Coll Cardiol* 54 : 1-15
  6. Hamon M, Biondi-Zoccai GG, Malagutti P, Agostoni P, Morello R, Valgimigli M (2006) Diagnostic performance of multislice spiral computed tomography of coronary arteries as compared with conventional invasive coronary angiography: a meta-analysis. *J Am Coll Cardiol* 48 : 1896-1910
  7. Tsai IC, Lee WL, Tsao CR, Chang Y, Chen MC, Lee T, Liao WC (2008) Comprehensive evaluation of ischemic heart disease using MDCT. *AJR Am J Roentgenol* 191 : 64-72
  8. Rentrop KP, Cohen M, Blanke H, Phillips RA (1985) Changes in collateral channel filling immediately after controlled coronary artery occlusion by an angioplasty balloon in human subjects. *J Am Coll Cardiol* 5 : 587-592
  9. Wagner GS, Freye CJ, Palmeri ST, Roark SF, Stack NC, Ideker RE, Harrell FE Jr, Selvester RH (1982) Evaluation of a QRS scoring system for estimating myocardial infarct size. I. Specificity and observer agreement. *Circulation* 65 : 342-347
  10. Berman DS, Abidov A, Kang X, Hayes SW, Friedman JD, Sciammarella MG, Cohen I, Gerlach J, Waechter PB, Germano G, Hachamovitch R (2004) Prognostic validation of a 17-segment score derived from a 20-segment score for myocardial perfusion SPECT interpretation. *J Nucl Cardiol* 11 : 414-423
  11. Cenic A, Nabavi DG, Craen RA, Gelb AW, Lee TY (1999) Dynamic CT measurement of cerebral blood flow: a validation study. *AJNR Am J Neuroradiol* 20 : 63-73
  12. Sheikh K, Schipper MJ, Hoeffner EG (2009) Feasibility of superficial temporal artery as the input artery for cerebral perfusion CT. *AJR Am J Roentgenol* 192 : W321-329
  13. Roberts GW, Larson KB, Spaeth EE (1973) The interpretation of mean transit time measurements for multi-phase tissue systems. *J Theor Biol* 39 : 447-475
  14. Axel L (1980) Cerebral blood flow determination by rapid-sequence computed tomography: theoretical analysis. *Radiology* 137 : 679-686
  15. Segar DS, Brown SE, Sawada SG, Ryan T, Feigenbaum H (1992) Dobutamine stress echocardiography: correlation with coronary lesion severity as determined by quantitative angiography. *J Am Coll Cardiol* 19 : 1197-1202
  16. Ibrahim T, Nekolla SG, Hörnke M, Bülow HP, Dirschinger J, Schömig A, Schwaiger M (2005) Quantitative measurement of infarct size by contrast-enhanced magnetic resonance imaging early after acute myocardial infarction: comparison with single-photon emission tomography using Tc99m-sestamibi. *J Am Coll Cardiol* 45 : 544-552
  17. Jerosch-Herold M, Seethamraju RT, Swingen CM, Wilke NM, Stillman AE (2004) Analysis of myocardial perfusion MRI. *J Magn Reson Imaging* 19 : 758-770
  18. Choe YH, Choo KS, Jeon ES, Gwon HC, Choi JH, Park JE (2008) Comparison of MDCT and MRI in the detection and sizing of acute and chronic myocardial infarcts. *Eur J Radiol* 66 : 292-299
  19. Lardo AC, Cordeiro MA, Silva C, Amado LC, George RT, Saliaris AP, Schuleri KH, Fernandes VR, Zviman M, Nazarian S, Halperin HR, Wu KC, Hare JM, Lima JA (2006) Contrast-enhanced multidetector computed tomography viability imaging after myocardial infarction: characterization of myocyte death, microvascular obstruction, and chronic scar. *Circulation* 113 : 394-404
  20. Gerber BL, Belge B, Legros GJ, Lim P, Poncelet A, Pasquet A, Gisellu G, Coche E, Vanoverschelde JL (2006) Characterization of acute and chronic myocardial infarcts by multidetector computed tomography: comparison with contrast-enhanced magnetic resonance. *Circulation* 113 : 823-833
  21. George RT, Silva C, Cordeiro MA, DiPaula A, Thompson DR, McCarthy WF, Ichihara T, Lima JA, Lardo AC (2006) Multidetector computed tomography myocardial perfusion imaging during adenosine stress. *J Am Coll Cardiol* 48 : 153-160
  22. Nagao M, Matsuoka H, Kawakami H, Higashino H, Mochizuki T, Murase K, Uemura M (2008) Quantification of myocardial perfusion by contrast-enhanced 64-MDCT: characterization of ischemic myocardium. *AJR Am J Roentgenol* 191 : 19-25
  23. George RT, Arbab-Zadeh A, Miller JM, Kitagawa K, Chang HJ, Bluemke DA, Becker L, Yousuf O, Texter J, Lardo AC, and Lima JA (2009) Adenosine Stress 64- and 256-Row Detector Computed Tomography Angiography and Perfusion Imaging: A Pilot Study Evaluating the Transmural Extent of Perfusion Abnormalities to Predict Atherosclerosis Causing Myocardial Ischemia. *Circ Cardiovasc Imaging* 2 : 174-182
  24. Kido T, Kurata A, Higashino H, Inoue Y, Kanza RE, Okayama H, Higaki J, Murase K, Mochizuki T (2008) Quantification of regional myocardial blood flow using first-pass multidetector-row computed tomography and adenosine triphosphate in coronary artery disease. *Circ J* 72 : 1086-1091
  25. Iskander S, Iskandrian AE (1998) Risk assessment



using single-photon emission computed tomographic technetium-99m sestamibi imaging. *J Am Coll Cardiol* 32: 57-62

26. Maes AF, Van de Werf F, Mesotten LV, Flamen PB, Kuzo RS, Nuyts JL, Mortelmans L (2001) Early assessment of regional myocardial blood flow and metabolism in thrombolysis in myocardial infarction flow grade 3 reperfused myocardial infarction using carbon-11-acetate. *J Am Coll Cardiol* 37: 30-36