

血管撮影装置を用いた脳循環動態に関する 定量的評価の有用性について ～¹²³I-IMPを用いた脳血流量との比較～

Usefulness of quantitative evaluation of cerebral hemodynamics using angiography equipment –Comparison with cerebral blood flow using ¹²³I-IMP–

先山 耕史¹⁾, 高橋 俊行²⁾, 中井 雄一²⁾, 松本 浩明³⁾, 佐藤 久弥⁴⁾, 加藤 京一⁵⁾

1) 昭和大学横浜市北部病院 放射線技術部
2) 昭和大学横浜市北部病院 放射線技術部/昭和大学大学院 保健医療学研究科
3) 昭和大学病院 脳神経外科
4) 昭和大学藤が丘病院 放射線技術部/昭和大学大学院 保健医療学研究科
5) 昭和大学大学院 保健医療学研究科/学校法人昭和大学 統括放射線技術部

Key words: 2D Perfusion, ¹²³I-IMP, CBF

[Abstract]

Carotid artery stenting placement is performed for treatment of internal carotid artery stenosis. It develops hyperperfusion syndrome as a complication and may induce cerebral hemorrhage. Quantitative evaluation of cerebral blood flow by nuclear medicine examination (cerebral blood flow scintigraphy) has been conducted for the purpose of predicting the onset.

An application (2D perfusion color mapping) which can quantitatively grasp cerebral circulation dynamics using angiography apparatus by color mapping has been developed.

Correlation coefficients of quantitative values calculated by 2D perfusion and cerebral blood flow scintigraphy were determined and compared.

There was a strong correlation between Area Under Curve of 2D perfusion and CBF of cerebral blood flow scintigraphic correlation coefficient $r=0.71$. In the visual evaluation, except for some cases, it was almost the same evaluation. It was suggested that the quantitative values of 2D Perfusion could be used clinically.

[要 旨]

内頸動脈狭窄症の治療には、頸動脈ステント留置術が行われている。合併症として過還流症候群を発症し、脳出血を誘発することがある。通常、発症の予測には核医学検査（脳血流シンチグラフィ）による脳血流の定量評価が行われている。近年、血管撮影装置を用いた脳循環動態を把握することができるアプリケーション（2D perfusion color mapping：2D perfusion）が開発された。2D perfusionのArea Under Curveと脳血流シンチグラフィで算出した脳血流量（Cerebral Blood Flow：CBF）の相関係数を求め比較を行った。2D perfusionのArea Under Curveと脳血流シンチグラフィのCBFは相関係数 $r=0.71$ と強い相関が見られ、視覚評価でもほぼ同様の評価であった。2D Perfusionの定量値は臨床的に使用できる可能性が示唆された。

SAKIYAMA Koshi¹⁾, TAKAHASHI Toshiyuki²⁾,
NAKAI Yuichi²⁾, MATSUMOTO Hiroaki³⁾,
SATO Hisaya⁴⁾, KATO Kyoichi⁵⁾

- 1) Department of Radiological Technology, Showa University Northern Yokohama Hospital
- 2) Department of Radiological Technology, Showa University Northern Yokohama Hospital/Showa University Graduate School of Health Sciences
- 3) Department of Neurosurgery Showa University Hospital
- 4) Department of Radiological Technology, Showa University Fujigaoka Hospital/Showa University Graduate School of Health Sciences
- 5) Showa University Graduate School of Health Sciences/Department of Unification Radiological Technology, Showa University

Received May 9, 2022; accepted September 12, 2022

緒 言

近年のインターベンショナルラジオロジー（interventional radiology：IVR）では、治療用デバイスの進歩と治療技術の向上により、脳血管疾患である脳動脈瘤や脳動静脈奇形に対して血管内手術が行われる。また頸動脈狭窄症に対しても頸動脈ステント留置術（carotid artery stenting：CAS）が施行される。CASに関しては、手術の適応判断や手術後の評価のため種々の検査が行われる。検査の種類としては、血管造影検査（digital subtraction angiography：DSA）、CT検査（computed tomography：CT）、MRI検査（magnetic resonance imaging：MRI）、核医学検査、エコー検査が患者の状態により選択されている。

頸動脈狭窄症を治療する上で重篤な合併症の一つに過還流症候群（hyper perfusion syndrome：HPS）

があり、発症頻度は0.2～18.9%と報告されている¹⁾。HPSは治療後に局所脳血流量が急激に増加することが原因で、症状としては、頭痛・痙攣・局所神経症状を呈し、発症すると脳内出血などの合併症を来す^{2, 3)}。そのため術前にHPSを予測することは重要とされており⁴⁾、脳循環動態や局所脳血流の評価を把握することが必要である。局所脳血流の評価には核医学検査の脳血流シンチグラフィーが用いられている⁵⁾。脳血流シンチグラフィーは局所脳血流の定量値評価は可能であるが、検査に伴う放射性医薬品の準備が必要であり、検査時間も1時間程度かかるため、緊急検査として実施するには制限がある。

現在の血管撮影装置は、Cアーム機能の発達により3次元での情報収集が可能となり、さらにCT画像としてのcone beam computed tomography (CBCT)を使用することで、頭蓋内組織情報や出血などの病的变化まで、血管造影検査を行いながら評価が可能となった。

さらに脳循環動態や局所脳血流の定量評価を把握することが可能な、新しいアプリケーション2D perfusion color mapping (2D Perfusion) が血管撮影装置に搭載され、有用性について報告されている^{6~8)}。2D Perfusionは、造影剤の動脈相から静脈相間の造影剤濃度変化を可視化して評価するアプリケーションであり、血行動態の評価や種々の血流に関する値を算出することが可能である。2D perfusionを用いることで、CASの術中・術後に局所脳血流の評価が可能であり、CASの手術直後にHPSの可能性を予測できるのでと期待されている⁹⁾。脳血流シンチグラフィーと2D perfusionの比較では定性評価の報告はあるが、脳血流シンチグラフィーで計測された定量値と2D Perfusionで算出される定量値に関して評価されていない現状がある。

本研究では、2D Perfusionと脳血流シンチグラフィーで算出された局所脳血流の定量値の相関係数を求め比較し、2D perfusionを用いることで、CASの術中・術後に局所脳血流を早期に評価することができ、また同時に視覚評価を用いた定性評価を行い、2D perfusionが脳血流評価法の一つとして臨床に用いることが可能か検討する。

1. 方法

1-1 2D Perfusionの原理

2D Perfusionは、血管撮影装置で撮影したdigital

subtraction angiography (DSA) 画像を、画像解析装置に搭載されている2D Perfusionソフトウェアで変換処理を行い、得られる組織灌流量を定量的に表示した血管造影画像である。造影剤が組織に流入する速度に応じて血流をカラーマッピングしており、造影剤の速度や分布に関するデータを通して血流を可視化したものである。また造影剤を一定の時間・量で注入を行い、横軸に時間、縦軸に造影剤濃度をプロットしtime density curve (TDC)を作成することで、定量的に血流を評価できる (Fig.1)。TDCからは各ファンクショナルパラメーターが同時に得られる。②Arrival Timeは“最初のフレームから造影剤が検出されたフレームまでの時間”とされ、組織灌流が始まる時間を示している。③Time to Peakは“Arrival Timeから造影剤濃度が最大になるまでの時間”とされ、最大血流量に到達するまでの時間を示している。④Wash in Rateは“造影剤流入速度”であり、outflowの血流の抵抗を示している。①Mean Transit Timeは“造影剤が組織内を通過するのに要する平均時間の目安”であり、その時間が短いほど、全体の組織灌流が早いと考えられる。⑤Widthは“造影剤の通過時間”とされ、造影剤の滞留時間を示している。⑥Area Under Curveは“総血流量の目安”とされている¹⁰⁾ (Fig.2)。本研究では、脳血流シンチグラフィーとの脳血流量との関係

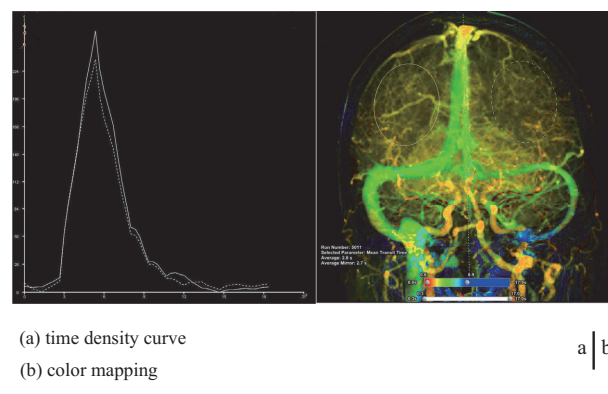


Fig.1 TDC and image information obtained by 2D Perfusion

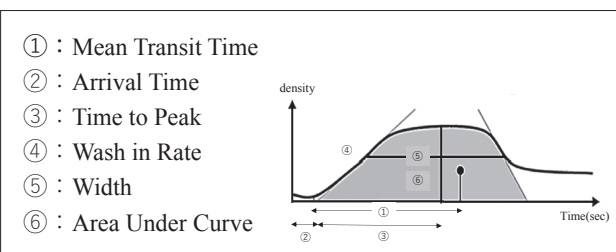


Fig.2 Parameters obtained by 2D Perfusion

を把握するため、⑥のArea Under Curveを用いて評価を行う。

1-2 使用機器, 使用医薬品

血管撮影装置として, Allura Clarity FD 2020 (フィリップス・ジャパン) を使用した。血管撮影画像より 2D Perfusion の処理を行う画像処理装置として, Xtra Vision (フィリップス・ジャパン) を使用した。核医学検査装置として E.CAM (シーメンスヘルスケア) を使用した。

脳血流シンチグラフィーでは放射性医薬品として, N-isopropyl-4-[^{123}I]iodoamphetamine (^{123}I -IMP, 日本メジフィジックス) を使用した。また脳血流の負荷として Acetazolamide Sodium アセタゾラミドナトリウム (商標名 DIAMOX, 三和化学研究所) を使用した。

1-2-1 2D Perfusion 撮影方法

2D Perfusion の撮影は, 血管撮影施行医師が上行大動脈に留置した pig tail catheter (4F ストレートピグテールカテーテル, テルモ) より, 経動脈的造影剤投与方法 (aortic arch injection 法) で造影した。撮影 FOV は 10.5 inch として, 撮影範囲は頭部全体が入るようにフレーミングをした。造影剤注入条件は, ヨード 300mg/ml の造影剤を用い, パワーインジェクターを使用した。造影剤の注入速度は 10ml/sec, 注入量 20ml で注入した。撮影レートはフレーム数 3 フレーム/秒で設定し, 撮影の時相は動脈相 (造影後約 2 秒), 毛細血管相 (造影後約 5 秒), 静脈相 (造影後

約 7 秒) が十分に灌流する時間 (20 秒) で撮影した (Fig.3)。

1-2-2 脳血流シンチグラフィーのデータ収集方法

脳血流シンチグラフィーの測定方法は, 低エネルギーの汎用コリメーターを装着した対向型ガンマカメラで頭部前面から撮像した。放射性医薬品は, ^{123}I -IMP 注射液 1.5ml/167MBq をボーラス投与した。その際, 約 20ml の生理食塩水でフラッシュをした。静注と同時に 2 分間, マトリックスサイズ 128 × 128, 拡大率 1.00 倍, 1 フレーム 2sec を 60 フレームでダイナミック収集をした。また静注 5 分後に 45 分間の SPECT 収集をした。SPECT 収集条件は, 回転半径 15cm の連続反復収集とし, マトリックスサイズ 64 × 64, 拡大率 1.78 倍, 1 サイクルを 147sec, 1 フェーズ 2 サイクルとし 9 フェーズ収集した。負荷時の画像収集方法として, 静注 15 分後に DIAMOX を注入し, 静注 25 分後に 2 回目 ^{123}I -IMP 注射液 1.5ml/167MBq を静注し, 生理食塩水 10ml で後押しした。エネルギーウィンドローは 159keV ± 15% の設定とした。画像再構成はフィルター逆投影法を用い, 前処理フィルターとして Butterworth を cutoff 0.51, Order 8 を吸収補正として Chang 法を使用した。

1-3 解析対象

2013 年 7 月から 2018 年 3 月までに, 昭和大学藤が丘病院で内頸動脈狭窄症 (internal carotid artery stenosis : ICA stenosis) 疑いおよび中大脳動脈狭窄症 (middle cerebral artery stenosis : MCA

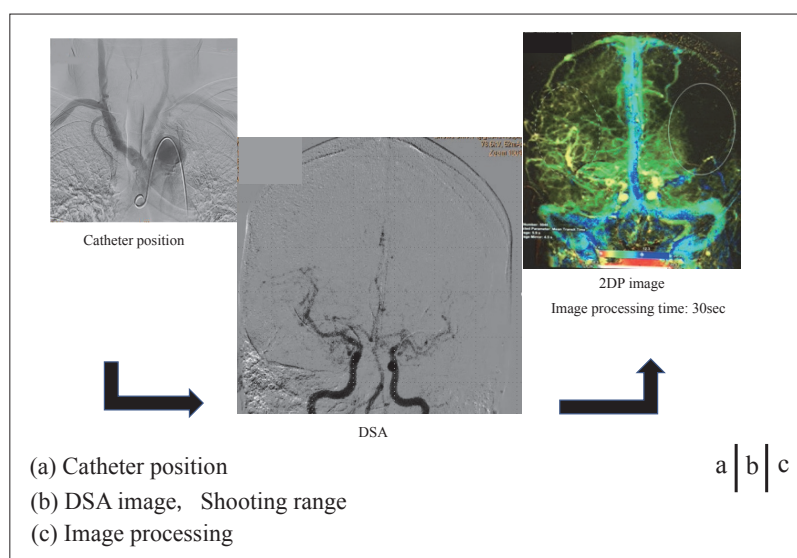


Fig.3 2D Perfusion Shooting image collection method

Table 1 Patient background and measurement results

No	case	ICA stenosis case	age	sex	123I-IMP		2D perfusion	
					REST	ACZ	Wash in rate	Area under curve
1	lt ICA stenosis	※	79	M	0.91	0.9	0.73	0.9
2	rt ICA stenosis	※	71	M	0.86	0.63	0.79	0.92
3	rt ICA stenosis	※	83	M	1.04	1.03	0.98	0.95
4	lt ICA stenosis	※	75	M	0.88	0.93	0.85	0.82
5	lt ICA stenosis	※	70	M	0.93	0.96	0.83	0.98
6	lt ICA stenosis	※	51	M	0.95	0.89	0.93	0.98
7	rt ICA stenosis, lt ICA occlusion	※	79	M	0.87	0.92	0.92	1
8	rt ICA stenosis	※	70	M	1.05	1	0.95	0.95
9	rt ICA stenosis	※	70	M	1.05	1	1.24	0.98
10	rt ICA stenosis	※	72	M	0.99	0.98	0.85	1.02
11	rt ICA stenosis	※	76	M	0.99	0.96	0.81	1.05
12	lt ICA stenosis	※	65	M	0.97	0.93	1.23	0.98
13	rt ICA stenosis	※	67	M	1	0.96	1.02	1.12
14	rt ICA occlusion, lt ICA stenosis	※	76	M	0.83	0.57	0.94	0.81
15	lt ICA stenosis	※	79	F	0.98	0.96	0.92	0.91
16	lt ICA stenosis, rt ICA occlusion	※	86	M	0.88	1.01	0.82	0.89
17	rt ICA stenosis	※	71	M	1.08	0.97	0.98	1.14
18	rt ICA stenosis	※	68	M	0.96	1.02	0.86	0.96
19	lt ICA stenosis	※	73	M	1.02	1.06	0.94	1.1
20	lt ICA stenosis	※	79	M	0.91	0.9	0.81	0.9
21	rt ICA stenosis	※	80	M	1.04	0.89	0.86	1.12
22	rt ICA stenosis	※	71	M	0.86	0.63	0.79	0.9
23	rt MCA stenosis	※	79	F	0.83	0.44	0.79	1.36
24	rt MCA stenosis	※	79	F	0.93	0.86	0.85	0.97
25	rt MCA stenosis	※	55	F	0.95	0.94	0.79	1.2
26	rt MCA occlusion	※	66	F	0.97	0.83	0.83	1.19
27	rt MCA occlusion	※	65	M	0.87	0.53	0.67	1.62
28	lt M1 stenosis	※	62	F	0.83	0.78	0.33	0.8
29	rt MCA occlusion	※	65	M	0.87	0.53	0.67	1.62
30	lt MCA stenosis	※	81	F	0.91	0.89	0.97	1.18
31	rt M1 stenosis	※	68	M	0.94	0.85	1	1.45

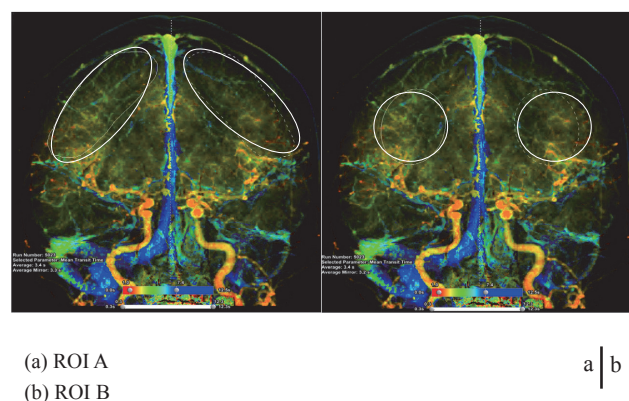


Fig.4 Comparison by ROI size and measurement location

stenosis) 疑いで血管撮影検査を実施した患者を対象とした。そして血管撮影時に2D Perfusionと事前に¹²³I-IMPを用いた脳血流シンチグラフィを施行した患者データ (31例) を用いた (Table 1)。なお、本研究は昭和大学藤が丘病院臨床試験審査委員会の承認を得てデータ収集を行った (承認番号: F2017C85)。

1-4 2D Perfusion 関心領域の大きさにおける測定誤差の検討

2D PerfusionのArea Under Curveの値を測定するためには、関心領域 (region of interest: ROI) を設定する必要がある。そこでROIの大きさの違いにおける測定誤差を検討した。2D Perfusionの撮影で得られたArea Under Curveのパラメーター画像上

に、臨床上重要になる中大脳動脈の血管支配領域にROIを設定し計測した。ROIの位置は右脳と左脳にそれぞれ一つずつ設定し、左右が対称になるよう設定した。ROIの大きさはROI A (3cm×3cmの円形) とROI B (3cm×6cmの楕円) の2種類とした (Fig.4)。ROIの設定は脳血管内治療認定医1人が実施し、1症例につき3回おのおのに設定した。測定に用いた症例は無作為に選択した5症例を用いて測定した。測定ごとに左右比を計算し、平均値を算出した。2種類のROIのデータの有意差検定は、Wilcoxonの符号順位検定を用いた。統計学的有意差はP値5%未満とした。

1-5 2D Perfusionと脳血流シンチグラフィとの定量値の比較

2D Perfusionより得られたArea Under Curveの値と、脳血流シンチグラフィより得られたCBFを比較した。2D PerfusionのROIは、方法1-4で設定した3cm×3cmの円形ROIのデータを用いた。

2D Perfusionで求めたArea Under Curveの値は患者固有の血流動態によって異なるため、左右の中大脳動脈領域における病変側と健常側との比率により求めた。

左右の比率を求めた式を (1) 下記に示す。

$$\text{治療側/健常側比} = \text{病側値/健側値} \cdots (1)$$

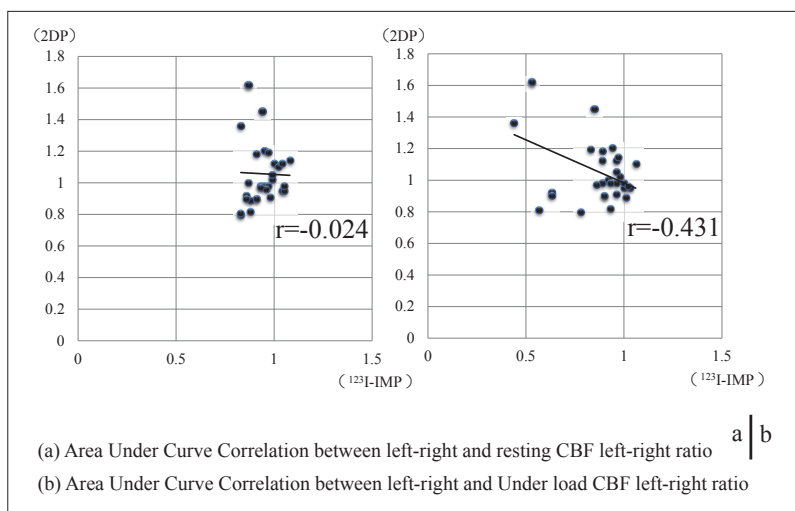
CBFはCASの術前に施行した脳血流シンチグラフィの測定値を用い、中大脳動脈領域におけるデータを使用した。またCBFは安静時に測定したCBFと、脳血管拡張物質アセタゾラミドを負荷した負荷時脳血流量CBFに関して、Area Under Curveの値を比較した。統計解析は、JMP®13を使用し相関係数を求めた。

1-6 2D Perfusionと脳血流シンチグラフィとの定量値の比較

同一患者の2D Perfusionで求めたArea Under Curveのカラーマッピング画像と脳血流シンチグラフィの画像を用いて、脳血流が低下している領域が一致しているかどうか視覚評価した。対象は検査を行った患者31症例の中から、無作為に10症例を抽出

Table 2 Measurement error at the ROI measurement site

AUC		1st		2nd		3rd		left-right ratio		
		measured value	left-right ratio	measured value	left-right ratio	measured value	left-right ratio	Average value		
1A	rt	3702	0.69	4244	0.69	3783	0.7	0.69	n.s	
	lt	2576		2945		2664				
1B	rt	3493	0.7	3621	0.7	3576	0.7	0.7		n.s
	lt	2464		2566		2509				
2A	rt	3405	0.92	3288	0.91	3355	0.89	0.9	n.s	
	lt	3138		2992		2985				
2B	rt	3334	0.92	3410	0.92	3150	0.9	0.91		n.s
	lt	3092		3137		2835				
3A	rt	3745	0.85	3956	0.87	4045	0.87	0.86	n.s	
	lt	3192		3441		3519				
3B	rt	3782	0.85	3562	0.85	3950	0.84	0.84		n.s
	lt	3218		3027		3318				
4A	rt	3512	0.82	3367	0.81	3290	0.82	0.8	n.s	
	lt	2888		2727		2697				
4B	rt	3759	0.79	3550	0.78	3280	0.8	0.79		n.s
	lt	3006		2840		2566				
5A	rt	2277	0.64	1980	0.63	2431	0.66	0.64	n.s	
	lt	3546		1247		1604				
5B	rt	2265	0.66	2372	0.65	2353	0.64	0.65		n.s
	lt	3398		3650		3766				

Fig.5 Comparison of 2D perfusion (Area Under Curve) and ^{123}I -IMP : All case groups

して比較した。視覚評価の実施者は、IVR検査に携わる診療放射線技師8人と脳血管内治療認定医2人とした。解析にはクロンバックの α 信頼性係数を用いて一致率を算出した。

2. 結 果

2-1 2D Perfusion関心領域の大きさにおける測定誤差の検討

2D Perfusionに設定したROI AとROI Bの、Area Under Curveの値の左右比について検討を行った。全測定中、ROI AとROI Bの左右比の差は、最大で0.03であった。ROI AとROI Bの左右比の平均値では、5症例ともROI AとROI Bの有意差は見られなかった (Table 2)。

2-2 2D Perfusionと脳血流シンチグラフィーとの定量値の比較

全症例群におけるArea Under Curve左右比とCBF左右比の相関係数は、安静時CBFで0.024、負荷時CBFで0.431となり、共に相関は見られなかった (Fig.5)。内頸動脈狭窄疑い症例群におけるArea Under Curve左右比とCBF左右比の相関係数は、安静時CBFで0.714、負荷時CBFで0.444であった。内頸動脈狭窄疑い症例群におけるArea Under Curve左右比と安静時CBF左右比において、比較的強い相関が見られた (Fig.6)。

2-3 臨床画像による視覚評価

2D Perfusionで求めたArea Under Curveのカラーマッピング画像と、脳血流シンチグラフィーの血流低下を呈していると思われる視覚評価の一致率

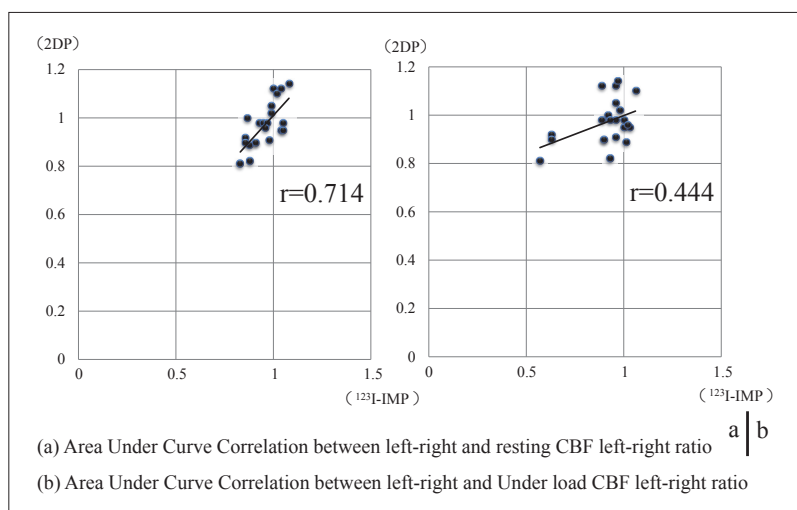


Fig.6 Comparison of 2D perfusion (Area Under Curve) and ^{123}I -IMP : Ictstenosis groups

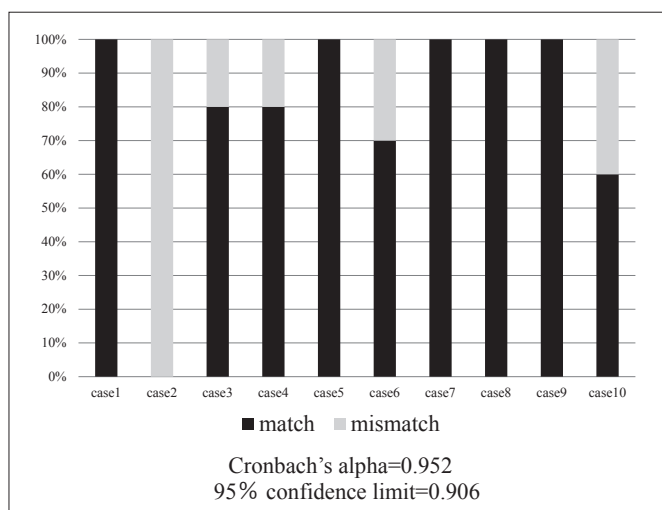


Fig.7 Match rate by visual evaluation

は、Cronbach's alphaは0.952, 95% confidence limitは0.906となり、10症例中9症例で一致が見られた (Fig.7)。1症例において完全な不一致を示した。

3. 考 察

2D Perfusionは、造影剤の経時的な変化をカラーマッピング画像として表示するものであり、CASなどの治療前後の画像を比較することで、血管撮影室にいる状態で血行動態の変化を容易に把握することができるアプリケーションである。またROIを設定することにより、定量的に造影剤の到達時間や脳血流量などをTDCと共に得ることが可能となる。各ROIでの測定値は、ROIの位置や大きさによって差が見られた。

しかし、頭部正中を分割点として左脳右脳に対称にROIを置き左右比を求めることで、ROIの大きさや位置の違いによる数値の有意差は見られなかった。これはROI内の測定値は、造影剤や撮影条件などの影響が考えられるのに対して、左右比は種々の影響は関係なく脳血流の左右比を計測できているためと考えられた。同様な計測方法において、FujimotoらはCAS術後に出血を来した症例を提示しているが、その中で出血を来した部分におけるC-arm CBVの左右比は、治療後に著明な上昇を示していたと報告している¹¹⁾。治療後のHPSの予測や治療前後での評価には、脳血流の左右比の値が重要であることが考えられた。

2D Perfusionと脳血流シンチグラフィーとの比較において、内頸動脈狭窄疑い症例群で比較強い相関が見られた。しかし、全症例では相関が得られなかった理由として、高木らは、CT Perfusionの問題点として、動脈狭窄の程度や側副血行路などによる造影剤到達の遅れが解析結果に影響を及ぼすと報告しており¹²⁾、2D Perfusionも同様に側副血行路や脳の反対側からの血流の補いなどが2D Perfusionの測定値に影響があったと考えられた。またCTを用いた灌流評価方法であるCT Perfusionと ^{123}I -IMP (N-isopropyl-p- ^{123}I -iodoamphetamine) 脳血流シンチグラフィーを比較した検討では、全脳において両者で良好な相関が得られていると報告されている¹³⁾。2D PerfusionもCT Perfusionと同様にヨード造影剤を用い、同様の取り込み形態を示すことから、脳血流シンチグラフィーと相関を示したと考えられた。

安静時CBFと負荷時CBFにおいて、負荷時で相関

が低くなったのは、負荷をする目的である脳循環自動調節の働きや脳循環予備能を見るために一時的に血流量を増加させているのに対して、2D Perfusionは負荷をかけての撮影ではないため、負荷時との相関は低くなったと考えられた。

臨床画像による視覚評価においては、内頸動脈狭窄症の症例においては高い一致率を示した。しかし、中には必ずしもカラーマッピング画像のみでは一致しない症例も存在した。その症例は左右の血流差があまり見られず、脳血流シンチグラフィにおいても負荷をかけないと左右差が分かりにくい症例であったため、負荷をかけない2D Perfusionとは差異が生じたと考えられた。2D Perfusionは過灌注症候群の予知に有用なアプリケーションである可能性があり、今後、症例を蓄積することで、治療後の血管撮影室にいる状態で、より早期にHPSの可能性を正確に検知が可能になると考えられた。

4. 結 語

2D PerfusionのArea Under Curveと脳血流シンチグラフィの脳血流量は左右比を算出することで、相関係数 $r=0.71$ と比較的強い相関が見られた。視覚評価では一部の症例を除き、ほぼ同様の評価であった。2D Perfusionの定量値は臨床的に使用できる可能性が示唆された。

5. 利益相反

筆頭著者および共著者全員に開示すべき利益相反はない。

6. 謝 辞

本研究のデータ解析にご協力いただいた昭和大学横浜市北部病院の診療放射線技師諸兄に深く感謝致します。ご助言を頂きました昭和大学横浜市北部病院および昭和大学藤が丘病院の脳神経外科の医師の方々に感謝致します。

表の説明

Table 1	患者背景および ^{123}I -IMP、2D Perfusion測定結果
Table 2	ROIの測定部位における測定誤差

図の説明

Fig.1	2D Perfusionで得られるTDCと画像情報
Fig.2	2D Perfusionで得られるparameter
Fig.3	2D Perfusion撮影画像収集方法
Fig.4	ROIの大きさ、測定箇所による比較
Fig.5	2D Perfusion (Area Under Curve)と ^{123}I -IMPの比較: 全症例群
Fig.6	2D Perfusion (Area Under Curve)と ^{123}I -IMPの比較: 内頸動脈狭窄症群
Fig.7	視覚評価による一致率

参考文献

- 1) van Mook WN, Rennenberg RJ, Schurink GW, et al.: Cerebral hyperperfusion syndrome. *Lancet Neurol*, 4: 877-888, 2005.
- 2) Piepgras DG, Morgan MK, Sundt TM, et al.: Intracerebral hemorrhage after carotid endarterectomy. *J Neurosurg*, 68: 532-536, 1988.
- 3) Schroeder T, Sillesen H, Boesen J, et al.: Intracerebral hemorrhage after carotid endarterectomy. *Eur J Vasc Surg*, 1: 51-60, 1987.
- 4) Ogasawara K, Yukawa H, Kobayashi M, et al.: Prediction and monitoring of cerebral hyperperfusion after carotid endarterectomy by using single-photon emission computerized tomography scanning. *J Neurosurg*, 99: 504-510, 2003.
- 5) Komoribayashi N, Ogasawara K, Kobayashi M, et al.: Cerebral hyperperfusion after carotid endarterectomy is associated with preoperative hemodynamic impairment and intraoperative cerebral ischemia. *J Cereb Blood Flow Metab*, 26: 878-884, 2006.
- 6) 糸川 博, 森谷匡雄, 藤本道生, 他: C-Arm CTを備えた脳血管撮影装置での経動脈的造影剤投与方法による脳血流量の計測 (Neuro PBV) および頭蓋内血流動態評価画像 (iFlow) の検討. *JNET*, 5: 134-141, 2011.
- 7) 糸川 博, 森谷匡雄, 藤本道生, 他: 50%希釈造影剤を用いた大動脈弓部造影剤投与方法によるC-arm CTでの脳血流量評価. *JNET*, 7: 145-155, 2013.
- 8) Katsunori Asai, Hirotohi Imamura, Yohei Mineharu, et al.: X-ray Angiography Perfusion Analysis for the Balloon Occlusion Test of the Internal Carotid Artery. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, Vol. 24, 7: 1506-1512, 2015.
- 9) 前田佳一郎, 越智 崇, 後藤芳明, 他: 脳血管内治療におけるflat detector CT perfusionの有用性. *脳卒中の外科*, 46: 294-298, 2018.
- 10) 米山文弥, 佐藤藤夫, 大坂基男, 他: 重症下肢虚血に対する下肢動脈バイパス術後2D Perfusion Angiographyを用いて末梢血流評価を行った1例. *日本血管外科学会雑誌*, 26(1), 9-12, 2017.
- 11) Fujimoto M, Itokawa H, Moriya M, et al.: Evaluation of cerebral hyperperfusion after carotid artery stenting using C-arm CT measurements of cerebral blood volume. *Clin Neuroradiol*, 2016. doi: 10.1007/s00062-016
- 12) 高木 亮, 佐藤英尊, 片山泰朗, 他: CT perfusion (脳循環測定とその適応). *脳循環代謝*, 16: 241-252, 2004.
- 13) Murayama K, Toyama H, Hayakawa M, et al.: Voxel-based Correlation between whole-brain CT perfusion with 320-row area detector ct and iodine 123 iodoamphetamine brain perfusion spect in patients with cerebrovascular disease. *J Comput Assist Tomography*, 38: 639-646, 2014.