



原著

下肢動脈のCTアンギオ撮影

ダブルテストインジェクション法とボーストラッキング法の比較

松山実穂, 三輪俊弘, 枚田敏幸

済生会滋賀県病院 画像診断科

要旨

下肢動脈のComputed Tomography Angiography (CTA) は、閉塞性動脈硬化症 (Arteriosclerosis Obliterans : ASO) などの疾患を評価するうえで、低侵襲で有効な画像検査である。しかし、CTAでは撮影タイミングや造影剤の濃度により、血管の描出が大きく変化する。精度の高い血管構築を得るには、動脈を十分に濃染させる撮影方法が重要である。

今回、ボーストラッキング法 (Bolus Tracking : BT法) とダブルテストインジェクション法 (Double Test Injection : DTI法) で、動脈描出の比較・検討を行った。

適切な時相で撮影された症例の頻度は、DTI法で90% (18/20例)、BT法で60% (12/20例)であったが、両群に統計学的有意差は認められなかった ($p=0.0648$)。下肢動脈の各部位におけるCT値を比較した結果、DTI法の方がBT法より高く、CT値のばらつきは浅大腿動脈を除く部位でDTI法の方が小さかった。下行大動脈および前脛骨動脈では有意差は認められなかったが、浅大腿動脈および膝窩動脈では有意差が認められた ($p=0.012$, $p=0.007$)。

BT法では、下行大動脈に遠の血流は予測できないため、造影剤の到達前の撮影や静脈描出のある遅延撮影など造影不良の要因が多かった。DTI法は、血流に合わせた寝台移動速度を設定することができ、最適な撮影タイミングを狙うことができた。このことから、DTI法は、各部位において造影ピークを捉えた撮影タイミングで撮影でき、造影効果のばらつきを抑え、安定した血管描出が得られる可能性が示唆された。

背景と目的

ASOなどの患者を対象にしたCTA撮影では、撮影範囲が広いいため各部位における造影剤の濃度と撮影タイミングが非常に重要である¹⁾。しかし、患者の心機能や動脈閉塞の影響があるため、これらを完全に予測することは容易ではない。また、撮影技師の経験値や技術力に左右されることなく、ある一定以上の造影効果を得ることができる撮影方法が望ましい。目的血管描出不良のため画像再構成ができず再撮影を行う症例を減らす目的

から、CTAの造影方法で、Single shotによるBT法とDual shotによるDTI法を比較・検討した。

対象と方法

ASOを疑った患者に対して2022年1月から2023年12月にCTAを施行した男25名、女15名の40症例。BT法とDTI法をそれぞれ20症例において、末梢静脈が描出されておらず、最適な時相での撮影 (成功撮影) (図1)、造影剤の到達前の撮影 (図2)、静脈描出のある遅延撮影 (図3) の

症例数を、経験年数4-14年目の診療放射線技師4名で合議を行い評価し、造影成功率の比較にはフィッシャーの正確確率検定を行った。両側検定を行い、オッズ比と95%信頼区間を算出し、95%信頼区間が1を含まない場合を統計学的有意とした。

BT法、DTI法それぞれの各部位におけるCT値の平均値、標準偏差を比較した。造影剤の到達前のCT値は血管のCT値に近い。ため造影剤到達前の

撮影を除いた、最適な撮影と静脈描出のある遅延撮影でBT法、DTI法の横隔膜レベルの下行大動脈、大腿中央レベルの浅大腿動脈、膝窩動脈、下腿中央レベルの前脛骨動脈で各部位におけるCT値に対してt検定を行った。有意差は $p < 0.05$ を有意とした。

DTI法では横隔膜レベルの下行大動脈で造影剤の到達を確認した後、寝台を膝窩動脈の位置まで移動させることで、造影剤が下行大動脈および膝



図1 DTI法で撮影した適切な条件で撮影した画像再構成図(成功撮影)

DTI法で撮影した末梢静脈が描出されておらず、最適な時相での画像再構成図。



図2 BT法で撮影した造影剤の到達前の撮影

BT法で撮影した造影剤の到達前の撮影。撮影開始時間が早く、スキャンが造影剤を追い越してしまい、末梢動脈の描出不良が生じた画像再構成図。

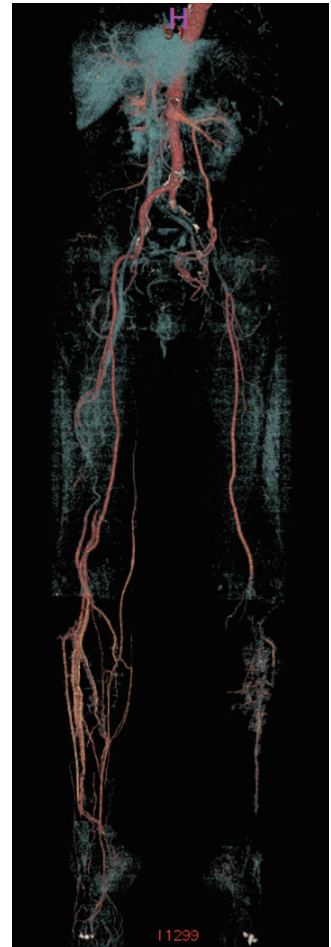


図3 BT法で撮影した静脈描出のある遅延撮影

BT法で撮影した静脈描出のある遅延撮影。撮影開始時間の遅延や、予想よりも末梢の血流速度が速く、末梢のスキャン時に造影剤が静脈に到達し末梢動脈の描出不良が生じた画像再構成図。

窩動脈に到達する時間を測定した。具体的には以下の変数を用いた。

Ta：造影剤注入後に造影剤が横隔膜レベルの下行大動脈に到達するまでの時間

Tb：造影剤注入後に造影剤が膝窩動脈に到達するまでの時間

Tc：横隔膜レベルの下行大動脈から膝窩動脈までの寝台移動時間

Td：造影剤注入開始からモニタリング終了までの時間

Te：インジェクターによる造影剤注入持続時間
撮影開始時間は、造影理論に基づき造影ピーク時間の10秒前と設定した。

撮影開始時間 = (Ta + Te) - 10秒

造影理論上、注入時間と造影ピーク時間はほぼ一致するため、このように設定した²⁾。

撮影所要時間 = |(Tb + Tc + Td) - Ta| × 1.7

膝以遠では血流速度が低下することが多いため、補正係数を用いた。下肢の範囲を以下のように3分割した。

1. 横隔膜レベルから骨盤底レベル
2. 骨盤底レベルから膝レベル
3. 膝レベルから足先

テストインジェクションにより横隔膜から膝までの血流速度が予測できるため、横隔膜レベルから足先までの血流速度が一定と仮定した上で、横隔膜レベルから膝レベルの速度に対する補正係数を1.5として足先までの血流速度を想定していた。しかし、造影剤到達前の撮影が多く、膝以遠の血流速度は遅延することが予測されるため、最終的に当院では補正係数を1.7として計算した。

BT法 平均年齢 71.4歳 (25歳～93歳)

DTI法 平均年齢 74.8歳 (51歳～92歳)

• BT法

BT法では、造影剤をSingle shot法で一度に総量100mL (注入速度3.0mL/sec) を注入した。造影剤の到達は、横隔膜レベルの下行大動脈で

スマートプレップ法により確認し、到達状況に応じて撮影技師の判断によって撮影を開始した。BT法は注入が単純で短時間に実施可能であるが、個体差による到達タイミングの変動に影響を受けやすい。

• DTI法

DTI法では、まずテストインジェクションとして少量の造影剤 (10mL) をDual shot法で注入し、後押しの生理食塩水を併用した。テストインジェクションにより横隔膜レベルの下行大動脈および膝レベルの膝窩動脈で造影剤到達をモニタリングした。ここで、上記で示したTa, Tb, Tc, Td, Teをそれぞれ算出し、これらの値を上記で示した計算式に適用して本番撮影の開始時間と撮影所要時間を決定した。

本番撮影では、残りの造影剤をDual shot法で注入し、造影剤量は体重に応じて480mgI/kg、注入時間は25秒に調整した。体重により注入時間が25秒に設定できない場合は、注入速度を調整し注入時間を25秒に設定した。DTI法は、個体差を考慮した正確な撮影タイミングの決定が可能である。

使用機器

- Light speed VCT 64列 (GE health care)
- Optima CT 660 64列 (GE health care)
- Dual shot (根元杏林堂)
- Single shot (根元杏林堂)
- AW4.7 Work station (GE health care)
- 日本薬局方 イオパミドール注射液 イオパミロンR 注370シリンジ 100mL
- DTI法では後押しの生理食塩水

結 果

成功撮影症例数は、BT法で20例中、12例(60%)、DTI法で20例中、18例(90%)であった。BT法における造影剤到達前の撮影症例数は20例中、3例(15%)。静脈描出がある遅延撮影症例数は20例中5例(25%)であった。一方、DTI法では造

影剤到達前の撮影症例数は20例中、1例(5%)。静脈描出がある遅延撮影症例数も20例中、1例(5%)であった(表1)。造影成功症例数の頻度には有意差は認められなかったが、DTI法の方がBT法より造影成功症例数は多かった。

造影成功率はBT法に比べDTI法で高く、DTI法の成功オッズはBT法よりも高かったが、有意差は認められなかった(オッズ比=6.0 95%信頼区間:0.95-34.9 フィッシャーの正確率検定, $p=0.0648$) (表2)。

下肢動脈の各部位におけるCT値を比較した結果、DTI法の方がBT法よりCT値は高く、CT値のばらつきは大腿中央レベルの浅大腿動脈を除く部位でDTI法の方が小さかった(表3)。

t検定の結果、横隔膜レベルの下行大動脈および下腿中央レベルの前脛骨動脈では有意差は認められなかったが、大腿中央レベルの浅大腿動脈および膝窩動脈では有意差が認められた($p=0.012$, $p=0.007$) (表4)。

考 察

下肢動脈CTAは撮影範囲が広く、造影剤の循環時間も個人差が多いため、検査毎に動脈が十分に造影されたタイミングで撮影することは難しい。

また、ASOでは、慢性的な動脈硬化性変化により下肢主幹動脈の狭窄や閉塞を来し、末梢血流を供給するさまざまな側副血行路の発達もみられるため、より複雑となる。

BT法は造影剤の到達をリアルタイムに確認してから撮影を開始するので、撮影技師により、そのタイミングが異なる。また、横隔膜レベルの下行大動脈以遠の血流は予測できないため、描出不良の可能性が高くなる。テストインジェクションで10mLの造影剤を注入し、横隔膜レベルの下行大動脈でモニタリングを行い、撮影を開始するテストインジェクション法(Test Injection : TI法)は横隔膜レベルの下行大動脈への造影剤到達時間は計算できるが、血流変化の多い下肢動脈への到

表1 BT法とDTI法でそれぞれ20症例撮影した結果

撮影方法	成功症例	造影剤到達前の撮影症例	静脈描出症例
BT法	12/20例(60%)	3/20例(15%)	5/20例(25%)
DTI法	18/20例(90%)	1/20例(5%)	1/20例(5%)

表2 DTI法, BT法における成功オッズおよび95%信頼区間の比較

群比較	成功症例数	オッズ比	95%信頼区間	p値
DTI vs BT	18/20 vs 12/20	6	0.95-34.9	0.0648

表3 BT法, DTI法それぞれの各部位におけるCT値の平均値と標準偏差

		下行大動脈	浅大腿動脈	膝窩動脈	前脛骨動脈
CT値	BT法	358.690	336.021	326.769	308.774
	DTI法	395.085	422.492	429.692	415.755
標準偏差	BT法	94.584	100.850	125.690	153.752
	DTI法	71.969	108.743	104.345	116.090

表4 BT法とDTI法で各部位におけるCT値に対して t 検定を行い、各部位におけるp値

-	下行大動脈	浅大腿動脈	膝窩動脈	前脛骨動脈
p値	0.178	0.012	0.007	0.056

達時間は計算できない。よって、下肢動脈撮影においては造影剤の到達前の撮影が生じやすい撮影方法である。

BT法、TI法の問題点として、両方法はどちらも末梢の血流速度を予測することが困難である。また末梢血管をターゲットにすると大動脈から膝下動脈レベルでの造影不良や末梢の静脈への造影剤の流入のリスクが高くなり、撮影技師によって描出される血管が変化する可能性が高くなる。そこで、TI法を応用し、テストで二部位でのモニタリングを行うDTI法で撮影を行った。

t 検定の結果、両方法はいずれも横隔膜レベルの下行大動脈でモニタリングを行っており、両方法ともに高い造影効果が得られていたため、横隔膜レベルの下行大動脈において統計的有意差を認めなかったと考えられる。DTI法では、末梢静脈描出をほぼ認められず、早期動脈相を目標時相としていたことから下腿中央レベルの前脛骨動脈の造影効果はやや低下していた。一方、BT法では、末梢静脈描出が認められたものの、末梢動脈の造影効果は一定程度維持されていたため、下腿中央レベルの前脛骨動脈において両方法間で有意差を認めなかったと考えられる。BT法において末梢動脈の時相で末梢静脈描出が認められたことは、大腿中央レベルの浅大腿動脈および膝窩動脈において、最も造影効果の高いタイミングよりも遅延した時相で撮影が行われていた可能性を示唆する。その結果、BT法における大腿中央レベルの浅大腿動脈および膝窩動脈のCT値は、DTI法と比較して低値となり、有意差を認めたと考えられる。さらに、膝窩動脈は関節近傍を走行し、血管径の変化や屈曲の影響を受けやすいことから、造影効果にばらつきが生じやすい部位である点も、差が生じた一因と考えられる。

造影成功率のオッズ比が6.0と高く、DTI法による造影成功の可能性がBT法と比較して高いことを示唆されたが、 $p=0.0648$ であり有意差は認められなかった。しかし、DTI法が造影成功に寄与する傾向を示しており、症例数が少なかったことが有意差を得られなかった一因である可能性

が考えられる。DTI法を用いた高精度な下肢動脈CTAが可能になることで、早期に病変を発見し、適切な治療につなげられる。特に、包括的高度慢性下肢虚血においては、血行再建術の術前計画に直結する情報を提供できる点で、DTI法の有用性は高いと考えた。

本研究は、症例数が限られており、単一施設研究であるため、今後さらなる症例の蓄積による検討が望まれる。また、ROI設定による測定誤差の影響を完全に除外できないという限界もある。

なお、本研究ではDTI法群の平均年齢がBT法群より高く、循環動態の差が結果に影響した可能性が否定できない。

今回、DTI法で撮影した中に1症例ずつ造影剤の到達前の撮影による静脈描出のある遅延撮影があった原因は、下肢動脈の血流が速すぎるためテストのタイミングで既に膝窩動脈に造影剤が到達していた症例であった。左右の血流に速度差が生じるようなAV shuntや下肢の炎症性疾患がある場合、造影剤の到達前の撮影では適切な評価ができないため、血流の遅い方に合わせて撮影を行う。一度の撮影で評価ができない場合、迅速に再度撮影を行い評価する必要があると考える。

今後、血流速度が極端に速い症例に対しては、モニタリング部位の再検討や、注入速度・タイミングの微調整が求められると考えた。

DTI法で造影剤到達前の撮影が一例生じたが、造影剤到達前の撮影が生じやすい膝に遠の血流が膝窩動脈から極端に遅くなる症例に対しては、モニタリング部位として脛骨動脈や足背動脈を追加することで改善できると考えるが、血管面積が狭く体動アーチファクトが生じやすいため正確な造影ピークを捉えることは難しく、適切な造影ピークだと判断する能力が求められると考えた。BT法に比べてDTI法は、血流に合わせた寝台移動速度を設定することができ、最適な撮影開始タイミングを狙うことができた。

当院のCT装置は2025年12月現在、64列装置であり、一度のスキャンで撮影できる撮影範囲が狭く、広範囲を撮影するには時間を要するため、造

影剤の到達前の撮影や、静脈描出による遅延撮影は技師の技術ではなく、装置の問題によるところもある。今後の課題としては320列CTや最新の動態追跡技術との比較や撮影プロトコルのAI制御による自動化の可能性も考えられる。また、本研究でのDTI法のインジェクターはDual shotを使用していたため、Single shotでは生理食塩水による後押しができないため同様の結果が得られない可能性がある。

結 語

DTI法は、各部位において造影ピークを捉えた撮影タイミングで施行でき、造影効果のばらつきを抑え、安定した血管描出が得られた。撮影開始時間やベッド移動速度など最適な撮影に必要なプロトコル設定が同じになるため、撮影技師による経験値や技術力に依存せず、誰が撮影しても安定した画質を担保できる撮影法として有用であると考えられた。

参 考 文 献

- 1) 日本放射線技術学会 編：X線CT撮像ガイドライン～GALACTIC～(改訂3版). オーム社, 2024.
- 2) 八町 淳 他：CT造影技術. メディカルアイ社 2013.

論文受付：2025年12月5日 論文受理：2026年1月20日