原 著

頭部3D-CTAにおける造影法
—TDCから考える撮像時間を基準にした造影方法の検討—

寺沢和晶・八町 淳

長野赤十字病院中央放射線部

論文受付
2008年2月8日論文受理
2008年4月7日

Code No. 251

緒 言

近年、マルチスライスCT(multi-slice computed tomography: 以下, MSCT)装置の急速な多列化に伴い, three-dimensional CT angiography(以下, 3D-CTA)検査による血管系の診断は従来の血管造影検査(angiography)に取って代わりつつある。これはCT検査が非侵襲的であることと、特に検出器列が16列を超える装置が登場したことによりほぼ全身の血管がカバーできるようになったことによる影響が大きい。その結果、3D-CTAなど血管系のMSCT診断は普及の一端をたどりはじめた。反面、MSCTは1998年に4列が

登場して以来、たった6年間で64列まで発展し多様化した。このため、CT装置は導入時期により施設間および施設内において大きな性能格差をもたらした。通常、三次元再構成において体軸方向に高い連続性を得るためには高い空間分解能が要求される。それゆえ、装置性能の多様化によって空間分解能を確保したうえで撮像プロトコルを作成するには、MSCTの検出器列数によって撮像時間が変化するといった不均衡が発生する。また、造影剤の注入時間^{1,2)}は撮像時間に左右されるためCT装置の性能差はその造影法に大きく影響を及ぼす。

Contrast Enhancement Technique in Brain 3D-CTA Studies: Optimizing the Amount of Contrast Medium According to Scan Time Based on TDC

Kazuaki Terasawa, and Atsushi Hatcho

Central Radiology Department, Nagano Red Cross Hospital

Received Feb. 8, 2008; Revision accepted April 7, 2008; Code No. 251

Summary

In three-dimensional CT angiography (3D-CTA), good reproducibility can be obtained by maintaining the maximum CT numbers (HU) at a specified level. However, the correlation between the scan time and the injection time showed that the maximum CT numbers increased and varied due to the additional contrast enhancement effect from recirculation of the injected contrast medium for longer injection times when the dose of iodinated contrast medium per unit time (mgI/s) was maintained at a specified level based on the time-density curve (TDC) of the phantom. The amount of contrast medium employed at our hospital has been optimized based on an iodinated contrast medium dose per unit time providing a contrast enhancement effect of 300 HU in the middle cerebral artery. Using this standard, a TDC phantom was employed to obtain an iodinated contrast medium dose per unit time, permitting equivalent maximum CT values (used as standard values) to be obtained by changing the injection time. A contrast-enhancement technique that accounts for the variation in the scan time was evaluated. Strong correlations were observed between the scan time and the injection time ($R^2=0.969$) and between the injection time and the dose of iodinated contrast medium per unit body weight ($R^2=0.994$). We conclude that adjusting the dose of iodinated contrast medium per unit body weight per unit time according to the scan time permits optimization of the contrast-enhancement technique.

Key words: Brain 3D-CTA, contrast-enhancement technique, reproducibility, time-density curve (TDC), multi-slice computed tomography (MSCT)

別刷資料請求先: 〒380-8582 長野県長野市若里5-22-1
長野赤十字病院 中央放射線部 寺沢和晶 宛

3D-CTAなど血管系の検査は最大CT値(HU)を一定にすることが、再現性を得るためには必要不可欠である。しかし、再現性を確保するために単位時間における単位体重毎ヨード量[以下、体重・時間毎ヨード量(mgI/kg/sec)]を一定にしても注入時間により最大CT値が変化する。つまり、撮像時間の違いによりCT値が変動することになる³⁾。したがって、撮像時間に応じて最大CT値を一定にするための造影法が必要と考えられた。そこで今回われわれは、血流評価用循環ファントムを用い、注入時間が時間濃度曲線(time-density curve: 以下、TDC)^{4,5)}の最大CT値に与える影響および3D-CTA検査における撮像時間を基準にした造影法を検討したので報告する。

1. 方 法

1-1 使用機器

CT装置は東芝メディカルシステムズ社製Asteion 4列MSCTシステム、Aquilion32列および64列MSCTシステムを使用した。また、自動注入器は根本杏林堂社製のDual Shot-GXで、血流評価用循環ファントムは同社製のTDCファントム⁶⁾を使用した(Fig. 1)。なお、3Dワークステーション(3DWS)はZIOSOFT社製ZIOSTATIONである。

1-2 TDCファントムによる造影プロトコルの検討

当施設において適正化して使用している体重・時間毎ヨード量は、Asteion 4列MSCTシステムにおいて中大脳動脈部で300HUを得る体重・時間毎ヨード量① 10mgI/kg/sec(45秒注入)としている⁷⁾。これを基準とし、TDCファントムにより体重・時間毎ヨード量を変化させ造影プロトコル② 35秒注入と③ 25秒注入において最大CT値が基準TDC①と同等になる体重・時間毎ヨード量を求めた。また、体重・時間毎ヨード量を同一にした場合における注入時間の変化による影響を観察するために10mgI/kg/secで25秒、35秒および45秒注入のTDCを求めた。

1-3 対象

当施設においてAsteion 4列MSCTシステム、Aquilion32列および64列MSCTシステムにより頭部3D-CTAを実施した170名(男性81名、女性89名)である。なお、除外した対象はいない(Table 1)。

1-4 撮像方法

撮像方法は、撮像時間が違い造影法を変化させたグループ(A、BおよびC)と撮像時間が違い同一の造影法を施行したグループ(B'とC)の二つの群とした。これらにより、ファントム実験による妥当性、注入時間が

Fig. 1 TDC phantom and experimental setup.

Table 1 Number of subjects and contrast medium injection protocols for each group

group	n	protocol number	protocol (mgI/kg/sec)
A	21	①	10
B	26	②	11
B'	17	③	12
C	106	④	12

* Scan time: Group A: approximately 25 sec, groups B and B': approximately 15 sec, group C: approximately 8 sec.

* CT systems used: Group A: Asteion 4-row MSCT scanner, groups B and B': Aquilion 32-row MSCT scanner, group C: Aquilion 64-row MSCT scanner.

* Contrast medium injection time = examination time - 15 sec = (trigger time + time for voice messages and couch movement + scan time) - 15 sec.

最大CT値に与える影響および撮像時間との関係を求めた。

一群は撮像時間が25秒程度となるグループA、撮像時間が15秒程度となるグループB、撮像時間が8秒程度となるグループCで、造影プロトコルは2-1よりグループAはプロトコル①、グループBはプロトコル②、グループCはプロトコル③を使用した。二群はグループBにおいてプロトコル③を使用したグループB'とCである。

撮像はボーラストラッキング法にてタイミングを捉えた。また、インジェクタ同期を使用し、撮像が終了する15秒前⁷⁾より生理食塩水(以下、生食)を注入した(Fig. 2)。

1-5 評価部位および評価方法

各グループにおける中大脳動脈M1領域(以下、MCA)のCT値と最終スライスにおける前大脳動脈(以下、ACA)のCT値を測定し比較した。また、得られた結果よりCT値低下率⁷⁾*を比較した。撮像範囲は、

Fig. 2 Flowchart of 3D-CTA study using SureStart and the injector synchronization scan system.

Fig. 3 (a) Scan range, (b) Anatomical regions to be evaluated.

a | b

Fig. 3(a)に示す。評価部位は、Fig. 3(b)に示す。

*CT値低下率：生食後押し時間がACAの造影効果に与える影響を観察するための値である。通常、血管径の変化に伴いパーシャルボリュームなどによってCT値に違いがあるため、MCAとACAのCT値を単純に比較することはできない。そこで、MCAとACAのCT値比の平均値から上昇したグループ(生食後押し時間：5, 10, 15, 20秒)において、ACAの血中濃度の低下が起こったとして評価した値である。15秒まではACAへの影響はなかったことから、生食は撮像終了の15秒前から注入することで造影剤の低減および適正化が可能になる。このときのCT値低下率は平均で約25%であり、当施設の検討ではバラツキを考慮して30%程度までであれば臨床上、ほぼ影響はないとしている。

$$\text{CT値低下率}(\%) = (\text{MCA} - \text{ACA}) / \text{MCA} \times 100$$

2. 結果

2-1 TDCファントムによる造影プロトコル

TDCファントムにより、② 11mgI/kg/sec(35秒注入)、③ 12mgI/kg/sec(25秒注入)の造影プロトコルで基準TDC ① 10mgI/kg/sec(45秒注入)とほぼ同一の最大CT値が得られた(Fig. 4)。また、体重・時間毎ヨード量を同一にした場合において注入時間を変化させるとTDCの最大CT値は撮像時間の延長により上昇した(Fig. 5)。これらのなかで、TDCは急激な上昇を呈した後、緩やかに上昇しピークとなる2段階の形成過程を示した。

2-2 撮像時間が違い造影法を変化させた一群(グループA、BおよびC)の造影効果

Table 2に一群における被検者データの平均値と標準偏差を表記した。A、BおよびCの各グループそれぞれのCT値を比較すると、MCAはグループA

Fig. 4 Relationship between the injection time and maximum CT numbers when the dose of iodinated contrast medium per unit body weight per unit time (mgI/kg/sec) was varied.

Fig. 5 TDCs in which recirculation of the injected contrast medium was added (relationship between injection time and maximum CT numbers).

295.5±29.9HU, グループB 293.3±25.1HU, グループC 297.5±29.7HUとなり, ACAはグループA 218.1±25.5HU, グループB 221.5±21.1HU, グループC 226.4±28.1HUであった. 各グループのMCA, ACAのCT値に有意な差は認められなかった. ただし, CT値低下率を比較すると, グループA 26.2±4%, グループB 24.4±4.5%, グループC 23.9±3.8%となり, グループAとCに有意差($P<0.05$)が認められた (Fig. 6). また, トリガータイミングを比較すると, グループAとB ($P<0.05$), グループAとC ($P<0.01$)に有意差が認められた. なお, Table 3に一群における性別の平均値と標準偏差を表記した. グループBとCにお

いて体重による性差があったがMCAのCT値とCT値低下率に有意な差は認められなかった.

2-3 撮像時間が違い同一の造影法を施行した二群 (グループB'とC)の造影効果

Table 4にプロトコルを同一にした二群における被検者データの平均値と標準偏差を表記した. グループC'に対しグループB'のCT値はMCAにおいて325.7±35.8HU, ACAにおいて246.4±28.1HUとなりMCAとACAのCT値が有意 ($P<0.01$) に上昇した. しかし, CT値低下率は, 24.3±3.7%であり有意な差は認められなかった (Fig. 7).

Table 2 Mean and standard deviation of all data sets of the first groups (groups A, B, and C)

group	protocol (mgI/kg/sec)	n	body weight (kg)	age (y)	trigger time (sec)	CT number MCA (HU)	CT number ACA (HU)	CT number reduction rate (%)
A	10	21	57.3±9.4	62.9±9.6	21.5±3★★*	295.5±29.9	218.1±25.5	26.2±4★
B	11	26	61.6±10.9	58.3±16.8	19.5±2.3	293.3±25.1	221.5±21.1	24.4±4.5
C	12	106	56.8±10.8	64.4±12	19.8±2.9	297.5±29.7	226.4±28.1	23.9±3.8

★★P<0.01 VS 12mg/kg/sec, ★P<0.05 VS 12mg/kg/sec, *P<0.05 VS 11mg/kg/sec

Tukey

Fig. 6 Comparison of the CT numbers (HU) in the MCA and comparison of the CT number reduction rates (%) in the first groups (groups A, B, and C).

Table 3 Gender differences in the data sets of the first groups (groups A, B, and C)

group A (10mgI/kg/sec)	n	body weight (kg)	age (y)	CT number MCA (HU)	CT number ACA (HU)	CT number reduction rate (%)
male	12	59±10.6	63.9±10.2	293.3±34.2	217.5±25.9	25.8±3.4
female	9	55±7.4	61.4±9.2	298.3±24.6	218.9±26.6	26.8±4.8
group B (11mgI/kg/sec)	n	body weight (kg)	age (y)	CT number MCA (HU)	CT number ACA (HU)	CT number reduction rate (%)
male	15	66.4±9.4★★	56.5±18.5	298.3±26.6	223.9±23.8	24.9±5.1
female	11	53.6±7.1	60.7±14.8	286.6±22.3	218.2±17.5	23.8±3.6
group C (12mgI/kg/sec)	n	body weight (kg)	age (y)	CT number MCA (HU)	CT number ACA (HU)	CT number reduction rate (%)
male	44	62.7±10.2★★	61.7±12.8★	294.8±33.1	222.6±30.3	24.6±3.7
female	62	52.6±9.2	66.4±11	299.4±27.2	229.1±26.3	23.6±3.8

★★P<0.01 vs female

★★P<0.01, ★P<0.05 vs female

Student's t-test

Table 4 Mean and standard deviation of all data sets of the second groups (groups B' and C) in which the same protocols were used

group	protocol (mgI/kg/sec)	n	body weight (kg)	age (y)	trigger time (sec)	CT number MCA (HU)	CT number ACA (HU)	CT number reduction rate (%)
B'	12	17	58.9±7.8	64.4±13.4	19.5±2.8	325.7±35.8★★	246.4±28.1★★	24.3±3.7
C	12	106	56.8±10.8	64.4±12	19.4±2.9	297.5±29.7	226.4±28.1	23.9±3.8

★★P<0.01 VS group C

Student's t-test

Fig. 7 Comparison of the CT numbers (HU) in the MCA and comparison of the CT number reduction rates (%) in the second groups (groups B' and C).

Table 5 Mean and standard deviation of the scan time and the amount of contrast medium for each group

group	protocol (mgI/kg/sec)	n	scan time (sec)	iodine volume 350mgI/mL (mL)
A	10	21	25.1±2	65.8±14.2
B	11	26	14.1±0.7	46.5±8.7
B'	12	17	14.2±0.9	51.9±9.8
C	12	106	8.3±0.8	35.1±6.7

2-4 一群と二群における撮像時間と造影剤使用量の関係

Table 5に各グループの撮像時間および造影剤使用量の平均値と標準偏差を表記した。一群となるA、BおよびCの造影剤使用量(mL：ヨード濃度350mgI/mL)を比較すると、グループAは65.8±14.2mL(23±4.9gI)、グループBは46.5±8.7mL(16.3±3.1gI)、グループCは35.1±6.7mL(12.3±2.4gI)であった。MCAのCT値と造

影剤使用量の関係をFig. 8に示す。また、撮像時間と注入時間および注入時間と体重毎ヨード量の関係をFig. 9に示す。ただし、撮像時間は8.3±0.8～25.1±2秒の範囲である。なお、二群となるB'とCを比較するとグループB'の造影剤使用量は51.9±9.8mL(18.2±3.4gI)となり、同一プロトコルでは撮像時間の延長によりヨード使用量が増加した。

Fig. 8 Comparison of the CT numbers (HU) in the MCA and comparison of the amount of contrast medium in the first groups (groups A, B, and C).

Fig. 9 Relationship between scan time and injection time and relationship between injection time and dose of iodinated contrast medium per unit body weight (mgI/kg).

3. 考 察

撮像時間に合わせ造影剤使用量を最適化するためには目標とする最大CT値を基準点とし、撮像時間を基に造影剤使用量を決定する必要がある。ただし、目標とする最大CT値は検査目的および施設ごとに基準があると考えられる。しかし、TDCの基準点が決定されれば、撮像時間が違い造影法を変化させた一群(グループA, BおよびC)の結果より撮像時間に合わせ体重・時間毎ヨード量を補正することで最大CT値のバラツ

キを小さくすることが可能となる。このことは、撮像時間が違い同一の造影法を施行した二群(グループB'とC)の造影効果を比較することから検証することができる。それは、2-3よりグループC'に対し撮像時間が長いグループB'においてCT値低下率は影響を受けることなくMCAとACAのCT値が有意に上昇したことである(Fig. 7)。つまり、撮像時間の延長によって最大CT値を上昇させたことになり、同一の造影法を用いた場合、MSCTの検出器列によって撮像時間が大きく変化

してしまうと高い再現性は得られないのである。この原因は、再循環分^{8,9)}の造影効果が加算され最大CT値が高くなるためと考えられる。Fig. 5よりヨード濃度が上昇した再循環血流に注入が持続されれば、ヨードが加算され緩やかに上昇する。この時間は造影剤の検出時間+10秒程度であるが、生体においても同様と考えられる。故に、体重・時間毎ヨード量を一定にした場合、撮像時間が変化すると同様の造影効果が得られないことから、最大CT値を一定にする因子として、撮像時間に対応させ体重・時間毎ヨード量を可変させることが妥当であり、再循環分の造影効果を補正できると考える。

トリガータイミングに違いが認められた原因としては、注入速度の違いによる影響と推測される。これは、Fig. 4より撮像時間が短くなると、短い時間に高いピークを得ようとするため注入速度が早くなる。したがって、単位時間当たりのヨード使用量が増加し、TDCの立ち上がりの傾き[単位時間当たり上昇CT値(HU/sec)]⁹⁾が変化する。このことから、TDCの立ち上がりの傾きが違っているとCT値の上昇速度も変化するためタイミングを捉えるトリガー時間に差が生じたと考ええる。

造影剤使用量について、2-4より撮像時間が違い造

影法を変化させた一群のヨード使用量を比較すると(Fig. 8)、TDCの最大CT値を揃える造影法によって撮像時間の短縮は、ある程度水準まで低減が可能になる。また、Fig. 9より撮像時間と注入時間($R^2=0.969$)および注入時間と体重毎ヨード量($R^2=0.994$)とも強い相関を認めたことから、回帰式を用いて撮像時間から最適な造影剤注入時間および体重毎ヨード量を決定できると考える。例えば、60kgの被検者で撮像時間を10秒、ヨード濃度350mgI/mLの造影剤を使用する場合、検査時間は $1.153 \times 10 + 16.73 = 28.3$ (sec)、体重毎ヨード量は $7.5 \times 28.26 + 115.8 = 327.3$ (mgI/kg)と計算される。そして、造影剤の注入速度は $(327.3 \times 60 / 350) / 28.3 = 2.0$ (mL/sec)となる。

結 語

今回の検討から、目標である最大CT値の変動を低く抑え再現性を確保することが可能になり、撮像時間を基準に体重・時間毎ヨード量(mgI/kg/sec)を可変させる投与法は、3D-CTA検査における造影法を最適化する方法として有用と考える。

なお、本論文の要旨は日本放射線技術学会第63回総会学術大会(2007年、横浜)において発表した。

参考文献

- 1) 八町 淳, 輪湖 正. 螺旋走査型CTにおける最適造影検査方法の検討. 日獨医報 1995; 40(2): 109-124.
- 2) 山口 功, 石田智一, 木戸屋栄次, 他. Time-density Curveの形成過程分析から考察する撮影タイミングの決定方法. 日放技学誌 2005; 61(2): 260-267.
- 3) 市川智章. CT造影理論. 東京: 医学書院, 2004.
- 4) Bae KT, Heiken JP, Brink JA. Aortic and hepatic peak enhancement at CT: effect of contrast medium injection rate—pharmacokinetic analysis and experimental porcine model. Radiology 1998; 206(2): 455-464.
- 5) Ono S, Akaizawa T, Gotou R, et al. Analysis of time-density curves of contrast media for improvement of chest dynamic incremental CT. J Comput Assist Tomogr 1999; 23(5): 753-757.
- 6) Awai K, Hatcho A, Nakayama Y, et al. Simulation of aortic peak enhancement on MDCT using a contrast material flow phantom: feasibility study. AJR Am J Roentgenol 2006; 186(2): 379-385.
- 7) 寺沢和晶, 八町 淳. 頭部および頭頸部3DCTAにおける造影検査法の検討. 日放技学誌 2004; 60(3): 423-428.
- 8) 山口 功, 林 弘之, 鈴木正行, 他. 薬物動態解析を用いた大動脈における造影剤濃度変化の推測: MDCTを使用した急速静注下造影検査. 日放技学誌 2007; 63(6): 621-627.
- 9) 八町 淳. CT造影理論—ヨード造影剤の濃度, 容量および注入速度がTDCに与える影響—. 映像情報(M) 2007; 39(6): 604-609.

図表の説明

- Fig. 1 TDCファントムおよびそのセッティング
- Fig. 2 リアルプレップとインジェクタ同期による3D-CTA検査の流れ
- Fig. 3 撮像範囲(a)および評価部位(b)
- Fig. 4 体重・時間毎ヨード量(mgI/kg/sec)を変化させた場合における注入時間と最大CT値の関係
- Fig. 5 再循環が加算されたTDC(注入時間と最大CT値の関係)
- Fig. 6 一群(グループA, BおよびC)におけるMCA(HU)とCT値低下率(%)の関係
- Fig. 7 二群(グループB'とC)におけるMCA(HU)とCT値低下率(%)の関係
- Fig. 8 一群(グループA, BおよびC)におけるMCA(HU)と造影剤使用量の関係
- Fig. 9 撮像時間と注入時間および注入時間と体重毎ヨード量(mgI/kg)の関係
- Table 1 各グループの被検者数と造影プロトコル
 *撮像時間 グループA:25秒程度, グループBおよびB':15秒程度, グループC:8秒程度
 *CT装置 グループA:Asteion 4列MSCT, グループBおよびB':Aquilion 32列MSCT, グループC:Aquilion 64列MSCT
 *造影剤注入時間=検査時間-15秒=(トリガー時間+音声・寝台移動時間+撮像時間)-15秒
- Table 2 一群(グループA, BおよびC)における被検者データの平均値と標準偏差
- Table 3 一群(グループA, BおよびC)における被検者データの性差
- Table 4 プロトコルを同一にした二群(グループB'とC)における被検者データの平均値と標準偏差
- Table 5 各グループにおける撮像時間および造影剤使用量の平均値と標準偏差