

3D-CTAにおける犬の脳血管造影方法*

柴 美穂路¹⁾ 三好 健二郎^{1, 2)} 中村 晃三¹⁾ 中出 哲也^{1, 2)}

Mihoro SHIBA Kenjiro MIYOSHI Kouzou NAKAMURA Tetsuya NAKADE

3D-CTA(three-dimensional CT angiography)における脳血管の造影方法について、ポジショニングおよび造影剤用量、注入条件、時間・濃度曲線(TDC :Time-Density Curve)を元に撮像時間の最適化とレンダリング法を用いた3D像の作成を試みた。脳血管の解剖学的形態および血流動態は個体差が存在した。また、3D-CTAにて細かな脳血管を描出するにはテストボーラスを行い、造影剤到達時間を確認し、撮影開始時間を決定することが有用であった。ポジショニングは頭部に対し冠状断面の撮影が可能な体位、撮影条件はヘリカルピッチ 0.562 およびスキャンタイム 0.8 秒、注入スピード 60mgI/kg/sec、投与量 3ml/kg のテストボーラス法が時間分解能と可能撮影時間の両面で優れていた。

キーワード：3D-CTA、TDC、脳血管

はじめに

材料および方法

ダイナミックCT撮影の動脈優位相や3D-CTAの場合、画像データは通常、造影剤のfirst passの間に収集される。高い診断能を持った情報を得るには造影効果を最適化、つまりは適正な撮影タイミングを選択することが重要である[1]。一方でCTの高速化に伴い、少しでも撮影タイミングを誤ると診断能の低い情報しか得られないことが予測される。また、個体により心機能に伴う血行動態の違いや造影剤の注入条件によって撮影タイミングは複雑に変化する。よって、個体に関係なく最適化した造影剤注入条件を考えることが重要になる。

今回我々は、3D-CTAにおける犬の脳血管造影方法について、ポジショニングおよび造影剤用量、注入条件の検討、標的とした血管のTDCを元に予測した撮像時間の最適化とレンダリング法を用いた3D像の作成を試みた。

【供試動物】

健康犬であるビーグル9頭を使用した。これらの供試動物は、身体検査および血液検査にて異常がないことを確認した。

【麻酔】

麻酔は、右撓側皮静脈に18G静脈留置針を設置、プロポフォール7mg/kgにて導入、気管挿管後100%O₂加セボフルラン吸入麻酔により維持した。モニタリングは、ルーチンでの測定項目を記録(実験中は心拍と血圧を一定に維持)した。また、間欠的陽圧換気による調節呼吸を実施した。麻酔深度は、造影剤刺激に対して不動化が維持できる程度(MAC1-1.5)とした。CT撮影時は、呼吸によるモーションアーチファクトを避けるため、息止めを実施した。

【CT装置】

Bright Speed SD elite 16ch (GE healthcare社)を使用した。また、造影剤注入器はSTELLANT (meDRaD社)、ワークステーションはAZE Virtual

* Contrast enhancement technique in Dog's Cerebral blood vessel 3D-CTA studies

¹⁾ 酪農学園大学獣医学群獣医学類伴侶動物医療教育分野：〒069-8501 北海道江別市文京台緑町 582-1

²⁾ 酪農学園大学付属動物病院：〒069-8501 北海道江別市文京台緑町 582-1

Place Lexusを用いた。

【造影剤】

非イオン性造影剤オムニパーク 300 (第一三共株式会社) を使用した。

今回の研究では、撮影条件を検討するにあたり3段階に分け予備実験を行い、その結果に基づき本撮影を行った。以下にそれぞれの実験における方法について述べる。

【実験1】

撮影断面方向による画質等への影響について2種類のポジショニングについて検討を行った。供試動物は各条件につき1頭ずつ用いた。撮影条件は、電圧120kV、線量200mAs、スライス厚0.625mm、撮影領域 (FOV) 25cmとし撮影を実施した。また、ヘリカルピッチを0.562、0.938およびスキャンタイムを0.8、1.0秒とした。まず、体位を伏臥位にし、頭部のポジショニングを行った。一つ目は脳底ラインに対し垂直断面 (横断面) が撮影できるように、水平耳道と鼻鏡を結んだ線が寝台と平行となるよう頭部を設置した。二つ目は脳底ラインに対して水平断面 (冠状断面) が撮影できるよう環椎を寝台に平行にして気管チューブが閉塞しない程度に可能な限り鼻先を下げ保定した。このポジショニングの際には、スカウト像にて水平耳道から鼻骨の先端を結ぶ線にスキャン断面が平行となるように設定し、ガントリの角度を調整した。以上、2種類のポジショニングに対しヘリカルピッチとスキャンタイムを組み合わせた4種類 (計8種類) の撮像条件について評価を行った。評価は、本院の画像診断科担当獣医師、放射線技師、本学獣医学類伴侶動物医療学分野画像診断担当教員および大学院生を含めた計6人で行った。評価方法は、すべての画像を比較しそれぞれの条件を5段階のスコアを設定し評価した。

【実験2】

この実験は、十分な造影増強効果を得るために最適な造影剤注入条件を検討した。供試動物は各条件3頭ずつ用いた。撮影条件は撮影部位決定のため単純撮影はヘリカルピッチ0.562、スキャンタイム0.8秒、120kv、250mAとした。Cineダイナミック撮影時では、16ch-non-helicalモード、スキャンタイム1.0秒、120kv、170mAと設定した。ポジショニングについては、標的血管の走行・部位を考慮し冠状断面とした。まず初めに、単純CT撮影を行った。その後、画像から大動脈輪 (Willis輪)、内頸

動脈・脳底動脈・前大脳動脈・中大脳動脈を含むスライス面を選択した。次に選択したスライス面を100秒間のCineダイナミック撮影を行った。撮影は、造影剤を自動注入器により注入した直後から40秒間は1秒毎に撮影し、それ以降は5秒毎に行う計52回の撮影を実施した。造影剤注入条件は造影剤投与量3ml/kgとした。注入スピードは120・90・60・45mgI/kg/secの4条件とした。

評価方法は、撮像より内頸動脈・脳底動脈・前大脳動脈・中大脳動脈におけるそれぞれのCT値の測定をすべてのスキャンに対して行った。内頸動脈のCT値測定部位は、海綿静脈洞によるパーシャルボリュームの影響が少なく、且つWillis輪に合流する直前の部位で測定した。脳底動脈は、腹側脊椎動脈が合流後の部位にて測定した。中大脳動脈は、Willis輪より出て大脳側面に走行し始める部位との中間地点にて測定した。前大脳動脈は、Willis輪からの距離が中大脳動脈の測定位置と同様となる位置とした。以上のように測定したCT値の結果より各部位における造影後CT値から造影前CT値を差したEnhancement unit (EU) を求めた。その値の中でピーク時のEUより造影効果指数 (CE index: Contrasts Effect index) を求めた。CE indexはEUを単位投与ヨード量 (mgI/kg) で除した値である。すなわち、単位体重 (1kg) 当たり単位ヨード量 (1g) を投与した場合、上昇が期待できるCT値 (HU/mgI/kg) を予測可能とする値である[2]。また、血管内のCT値の上昇は、体重・時間毎ヨード量 (mgI/kg/sec) で規定できるとされている[3]。よって、各条件でのCE indexを同条件時の体重・時間毎ヨード量 (mgI/kg/sec) で除した値を造影効果係数 (CEC: CE coefficient) とした。CECは1 mgI/kg/secの場合、上昇が期待できるCT値 (HU/mgI/kg) を予測するための値である。この値を元に、各血管での設定ピークCT値を得るために必要な造影剤投与量と速度を予測した。しかしながら、造影剤の血中濃度が同じであっても血管径の違いに伴うパーシャルボリュームなどの発生が起こりCT値に違いが生じる可能性が考えられる[4]。そこで、内頸動脈、脳底動脈、中大脳動脈、前大脳動脈のCT値変化を比較し血管部位によるCT値の差を評価した。評価法としては式1を用いて部位Aに対する部位BのCT値減弱率 (%) として求めた[1]。

$$\text{CT値減弱率} = (\text{部位B} - \text{部位A}) / \text{部位A} \times 100 \text{ (式1)}$$

この検討の結果より個体差や注入条件の違いを考慮して30%以内であれば血管部位による造影増強

条件として同条件部位として用いた。

【実験3】

実験2で算出したCECに基づいて、造影剤用量・注入条件、また標的とした血管のTDCを元に撮像時間の最適化を検討した。供試動物は各条件につき3頭ずつ用いた。撮影条件およびポジショニングについては実験2と同様に実施した。注入条件については、実験2の結果よりCECの変動が少なかった血管部位において300HU以上になる条件を求めた。また投与量2 ml/kgと3 ml/kgの場合を想定し注入条件とした。

実験結果の評価方法については、実験2と同様に標的血管におけるEUを測定した。そこから造影条件の安定性を確認するためCECを求め、その変動係数を比較した。変動係数は標準偏差を平均値で除し百分率で表した値であり、バラツキを相対的に表す。この値が20%以下であった場合、相対的にバラツキがないと判断した。さらに、撮像タイミングの最適化を検討するためにTDCを作成した。測定時間は、注入開始からCT値ピークまでの時間、注入開始から造影剤到達時間、造影剤到達時間からCT値ピークまでの時間とした。また、ヒトの脳血管3D画像を作成する際のCT値を参考にし、EUが150HU以上を示す時間帯を測定した(図1)。また、その時間帯におけるCT値ピーク時間に対する前後比率を求め撮影開始時間と至適撮影期間を決定した。

【本撮影】

実験1～3の結果を元に頭部3D-CTAを行い、レンダリング法を用いた3D画像を作成し、比較検討した。供試動物は各条件につき1頭を用いた。撮影条件およびポジショニングについては実験1の結果より冠状断面にて実施した。注入条件については実験3より求めた条件とした。また、実験3で求めた撮影開始時間と撮影至適期間を元に実際に必要な撮影時間に対して最適化をおこなった。実際の撮影は、条件毎に撮影開始時間固定法およびテストボーラス法を実施した。撮影開始時間固定法は、実験3の結果より造影剤注入開始からCT値ピークまでの時間を元に決定した撮影開始時間を用いて実施した。テストボーラス法は、人において標的血管の造影時CT値ピーク時間が同血管の造影剤到達時間に造影剤注入時間を加えた時間となることを利用し、撮影個体における造影剤到達時間を求める方法である[3]。この方法の犬における有用性については、犬の肝造影CT条件の検討として同回年次大会症例検討にて我々のグループが報告し

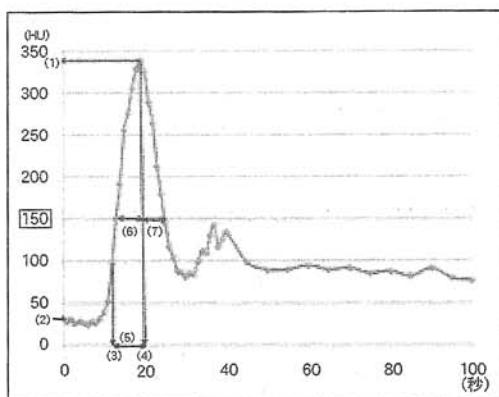


図1 TDCにおける測定時間について

(1) 最大CT値 (2) 造影前CT値 (3) 注入開始から到達時間 (4) 注入開始から最大CT値時間 (5) 到達時間から最大CT値時間 (6) 150HU以上を示す最大CT値前時間 (7) 150HU以上を示す最大CT値後時間

ている。本実験での具体的な方法としては、テスト撮影として投与量90mgI/kg、本撮影と同注入スピードでCineダイナミック撮影を実施し、標的血管における造影剤到達時間を求めた。その到達時間と実験3において造影剤到達時間からCT値ピークまでの時間を元に決定した撮影開始時間を用いて撮影開始時間を算出した。本撮影での標的血管は、前大脳動脈とした。

結 果

【実験1】

それぞれの撮像の5段階評価を行った結果、冠状断面におけるヘリカルピッチ0.5625、スキャンタイム0.8秒で平均 3.25 ± 0.5 となり他の条件に比べ良好な結果となった。横断面における同じ撮影条件では平均 2.63 ± 0.75 であった。画像を比較したところ、横断面の撮像では蝶形骨や側頭骨および顎関節の影響によるアーチファクトの出現があり、側頭骨による中大脳動脈のハードニングが確認された。冠状断面の撮像においてもハードニングは確認された。

【実験2】

各条件における標的血管のCECの平均値について図2に示した。この結果より90mgI/kg/secと60mgI/kg/secのCECが近似していた。CECが近似を示す場合、1mgI/kg/secあたりの期待できるCT値(HU/mgI/kg)の上昇がほぼ同じであることを示している。よって、統計学的に信頼性を持たせるために2条件を合算した。120と45mgI/kg/secの2条件

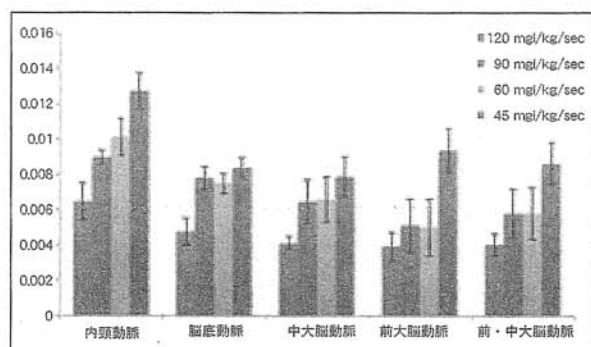


図2 各標的血管における撮影条件によるCECの変動

については個体差がありCEを出すには不適であった。また、90と60mgI/kg/secにおける前・中大脳動脈をCT値減弱率が30%以下であったことと測定部位の関係から同一標的血管条件とし、残りの内頸動脈、脳底動脈の3カ所における平均CECを求めた。その結果各平均CECは、内頸動脈 0.009551 ± 0.000962 、脳底動脈 0.007646 ± 0.000577 、中大脳動脈・前大脳動脈 0.005909 ± 0.001723 となった。

【実験3】

実験2の結果から90と60mgI/kg/sec条件下のCECがより安定していた脳底動脈と前・中大脳動脈の値より標的血管の最大EUが300HUになる体重・時間毎ヨード量 (mgI/kg/sec) を求めた。よって、実験3にて撮影を行った造影剤注入条件は以下の通りとなった。投与量2ml/kgでは脳底動脈から得たCECより注入時間7sec注入スピード85mgI/kg/sec、前・中大脳動脈より得たCECでは注入時間9sec注入スピード65mgI/kg/secが良好であった。また、投与量3ml/kgはそれぞれ15secの60mgI/kg/sec、20secの45mgI/kg/secとなり各条件下にてCT撮影を実施した。

得られた撮像より各条件の脳底動脈および前大脳動脈のCECを算出し、その変動係数を求めた。85mgI/kg/secにて前大脳動脈25%、脳底動脈13%、65mgI/kg/secでそれぞれ7%、12%、60mgI/kg/secでそれぞれ21%、8%、45mgI/kg/secでそれぞれ28%、21%となった。したがって、個体差による変動の少ない65および60mgI/kg/secを最適な条件であると判断した。また、最大EUは、65mgI/kg/secにおける脳底動脈では 415 ± 52.12 HU (変動係数13%)、60mgI/kg/secにおける前大脳動脈では 276.62 ± 59.41 HU (変動係数21%)であり、目標であった300HU前後で変動も少なかった。

TDCより注入開始からCT値がピークを示す時間が60mgI/kg/secでは26秒、65mgI/kg/secでは

21秒であった。注入開始から到達時間の平均値は前大脳動脈において、60mgI/kg/secでは14秒、65mgI/kg/secでは13.6秒であった。到達時間からEUのピークまでの平均時間は前大脳動脈において、60mgI/kg/secでは11秒、65mgI/kg/secでは6.3秒であった。ピーク値前後のEUが150HU以上を示す時間帯の比率は前大脳動脈では、60mgI/kg/secで6:6 (以後、ピーク前の時間 (秒):ピーク後の時間 (秒) とする。)、65mgI/kg/secで3:4であった。

【本撮影】

実験3の結果より、造影剤注入スピード65と60mgI/kg/secの2条件にて撮影を実施した(図3)。撮影開始時間固定法を行う場合、撮影開始時間を60mgI/kg/secでは20秒、65mgI/kg/secでは18秒となった。テストボーラス法の場合は、造影剤到達時間より60mgI/kg/secでは5秒後、65mgI/kg/secでは3秒後に撮影を開始することに決定した。撮影時間固定法よりもテストボーラス法にて実施した撮像では静脈もCT値150HU前後を示し3D-CTAにて細かい血管を描出することができた。とくに、投与量が60mgI/kg/secの条件の方がより良好な3D画像を作成することができた。

考 察

犬の頭部における3D-CTAを行うにあたって、まず問題となったのがポジショニングである。3D画像作成時にハードニングおよび骨によるアーチファクトの影響によって血管の抽出が困難になることが考えられるためである。今回の結果より脳底に対して平行に撮影するポジショニングと撮影条件によってそれらの軽減が確認できた。このことは、蝶形骨と顎関節が撮影スライス面に対し影響が少なくなることが要因として考えられた。また、動脈の血流動態と同じ方向で撮影が出来ることも大きな利点と思われた。よって、脳底に対して平行に撮影するポジショニングが最適と考えられた。しかし、このポジショニングにおいても側頭骨による中大脳動脈のハードニングは確認された。ワークステーションにてハードニングを軽減する方法[6]もあるが今回の研究では検討しなかった。今後、より頭蓋骨に近い細かい血管を描出するためにはハードニングの軽減についても検討が必要と考える。

次に、造影検査の標準化を行うためには、造影剤量および造影剤注入プロトコルの標準化が必要である。造影増強量の標準化は、体重・時間毎

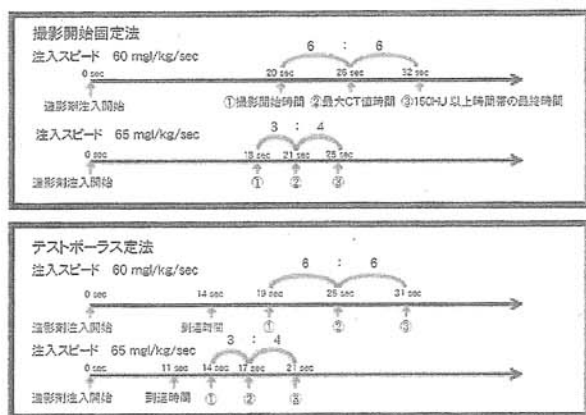


図3 実験1～3の結果より決定した本撮影方法

ヨード量 (mgI/kg/sec) を一定にすることで可能である[3]。また、その造影CT値の程度はCE indexから予測出来る[4]。よって今回我々は、その両条件を組み合わせて条件を検討出来るようにするためCECを求めた。実験2において4条件の中で90と60mgI/kg/secで値の多くが近似していた。このことより注入条件がある程度の範囲内にあれば、CECは一定した値となり造影条件の予測に利用出来る可能性が示唆された。しかし、これを基に設定した条件下での撮影結果では予想通りの造影増強量を得られた場合と得られなかった場合が存在していた。このことは、CT値測定部位における種々のアーチファクトや血管径の違いなど幾つかの要因が関わっているのかもしれない。特に、急速注入した条件では前大静脈内残存造影剤の影響により個体差のバラツキが出たと考えられる。しかしながら、本実験においては目標値以下の造影増強量を示した条件が無かった点から今回の造影条件を検討する上では十分に有用であったと考えられた。また各条件にて、脳底動脈および前大脳動脈のCEC変動係数が20%以下であった。つまり、65と60mgI/kg/secの条件であれば犬の頭部3D-CTAを行う為に、造影剤量の標準化という面からも十分な条件と言える。

撮像時間については、実験3にて体重・時間毎ヨード量が違えば、注入開始からCT値ピークまでの時間、注入開始から造影剤到達時間、造影剤到達時間からCT値ピークまでの時間が変化することが確認された。このことは、最大EU値を一定にする因子である体重・時間毎ヨード量に対し撮像時間を可変させることが妥当であり、それにより良好な至適撮像タイミングを得られることを示唆している。また、各条件にて造影剤到達時間に大きな変動が認められなかった。これは、本実験の供試動物が同犬種であったことが考えられる。よっ

て撮影開始時間固定法においても一定した造影像が得られることが予測された。しかし、ヒトにおいて造影剤到達時間の被検者間差異は20秒以上の幅をもっていることから、撮影開始時間固定法では画像に含まれる造影情報に大きな違いが生じることが予測された[1]。そこで、本撮影では撮影開始時間固定法とテストボーラス法を比較した。その結果、テストボーラス法を実施した画像に比べ撮影開始時間固定法で行った画像の方が微細血管の描出が劣っていた。このことより、テストボーラス法は安定して良好な造影像を得るために必要であると考えられた。

3D-CTAにおける犬の脳血管造影方法の最適な各条件は、ポジショニングについては頭部に対し冠状断面の撮影が可能な体位、撮影条件はヘリカルピッチ0.562およびスキャンタイム0.8秒、注入スピード60mgI/kg/sec、投与量3ml/kgのテストボーラス法が時間分解能と可能撮影時間の両面で優れており、再現性もあると考えられた。

参考文献

- 1) 山口 功、石田智一ほか：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、日本放射線技術学会雑誌、61、260-267 (2004)
- 2) 山口 功、森本 章ほか：造影剤増強効果に影響を与える被験者因子および造影剤因子について、日本放射線技術学会雑誌、58、517-523 (2002)
- 3) 市川智章、間市成人ほか：CT造影理論、市川智章、1、35-115・129-131、医学書院、東京 (2004)
- 4) 寺沢和晶、八町 淳：頭部3D-CTAにおける造影方法-TDCから考える撮像時間を基準とした造影方法の検討、日本放射線技術学会雑誌、64、681-689 (2008)
- 5) Kamino Maiko, Hayashi Hideyuki : Depicting Cerebral Veins by Three-Dimensional CT Angiography before Surgical Clipping of Aneurysms, *Am J Neuroradiol*, 23, 85-91 (2001)
- 6) Tomandl BF, Hammen T, Klotz E : Bone-Subtraction CT Angiography for the Evaluation of Intracranial Aneurysms. *Am J Neuroradiol*, 27, 55-59 (2006)