

● 現在でも色褪せない造影理論

埼玉医科大学総合医療センター 中央放射線部 | 中根 淳

1995年に八町らによって考案された「通称:体重当たりヨード量・注入時間固定法」は、被検者の体重に応じてヨード量を調整し、注入時間を一定にする造影剤注入方法である。この革新的な手法は、造影理論の中でも最も一般的な手法として知られ、現在でも多くの施設で採用されている。

この方法を用いることで、造影CT検査において再現性という付加価値を得ることができ、さらに安定した画像を提供することが可能となった。また、CT angiographyでは、Test injection、Bolus tracking、Test Bolus Trackingなどを用いて造影剤到達時間の補正が行われていますが、依然として、造影剤の注入方法は体重当たりヨード量・注入時間固定法が前提となることがほとんどである。

今回は、この注入技術がいまだに造影CT検査の重要な要素として支えられていることを再確認できればと考えている。

● はじめに

1995年に八町らによって提案された「体重当たりヨード量・注入時間固定法」という造影剤注入方法は、被検者の体重に基づいてヨード量を調整し、注入時間を一定にする手法である¹⁾。この方法は、造影理論の中でも最も一般的な手法として広く知られており、現在でも多くの施設で採用されている。この方法を採用することにより、造影CT検査における再現性が向上し、安定した画像の提供が可能となる。今回は、依然として重要な役割を果たすこの注入技術の素晴らしさを再確認してもらいたい。

冒頭に示した体重当たりヨード量・注入時間固定法では、被検者毎の造影効果を安定させることが期待されている。学術的に表現すると、被検者毎の時間当たりの血中ヨード濃度を一定に保つことが

目的とされている。そのため、異なる体型の被検者でも、Time Enhancement Curve (以下、TEC)と呼ばれるヨード濃度の体内循環動態を表すグラフで、同じ形状を示すように管理する必要がある。体内循環動態を管理するためには、自動注入器に設定する注入パラメータと、被検者の生体パラメータを考慮する必要がある。そこで、まず自動注入器の注入パラメータに焦点を当てて説明を進める。注入パラメータは、注入速度、注入時間、容量の3つで構成される。これらのパラメータのうち2つを設定すれば、残りの1つは自動的に決定されるので、臨床現場では2つのパラメータを設定することが一般的である。

ここでTECを管理する前段階として、これら3つの注入パラメータがTECに与える影響をイメージする必要がある。ただし、注入パラメータを無作為に変化させると、各パラメータとTECの関係を把握することが難しくなるため、注入パラ

メータを1つずつ変化させ、それぞれのパラメータがTECにどのような影響を与えるかを確認したい。具体的には、TEC全体の形状変化を捉えるのではなく、**図1**に示すように、臨床上必要とされる最大CT値、最大CT値到達時間、および60秒CT値に注目したい。まず、注入速度に焦点を当てる。注入速度は、造影CT検査時にオペレーターが最も気を配るパラメータと考えられる。なぜなら、注入速度によって留置針のサイズを変更する施設が多くあり、さらに造影剤の血管外漏出を考慮すると、速い注入速度では単位時間当たりの容量が増えてしまうからである。そこで、**図2**に示すように容量を60mLと固定し、注入速度を高くすると最大CT値が増加し、最大CT値到達時間が短くなることがわかる。ただし、容量が60mLで固定されているため、60秒CT値はどの注入速度でも同じである。

次に、注入速度を3mL/sで固定し、注

入時間を延長すると、**図3**に示すようにTECの形状が一部共通し、延長された形状を示すことがわかる。したがって、注入時間が長くなると最大CT値が増加し、最大CT値到達時間が遅くなる。注入速度を3mL/sで固定し注入時間を変化させているため、結果的に容量が増減し、注入時間が長いTECほど60秒CT値が高くなることを確認できる。最後に、注入時

間を30秒で固定し、容量を変化させた場合、**図4**に示すように容量が多いほど最大CT値が増加し、最大CT値到達時間はほとんど変化しないことが示されている。注入時間を30秒で固定し、容量を変化させているため、60秒CT値は容量の増減に比例して変化することが確認できる。

今までの事を踏まえ、注入パラメータ

がTECに与える主な影響をまとめると、注入速度は最大CT値と最大CT値到達時間、注入時間は最大CT値到達時間と60秒CT値、容量は最大CT値と60秒CT値に影響を与えることがわかる。したがって、異なる体型の被検者のTEC形状を揃えるために最も重要なことは、注入時間を揃えることになる。注入時間を揃えることで、TECの時間軸を管理することが可能

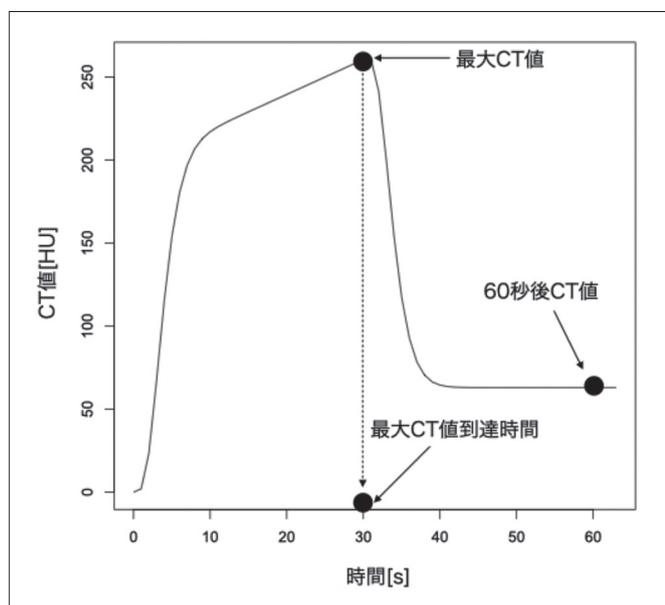


図1 臨床で必要となるTECのポイント

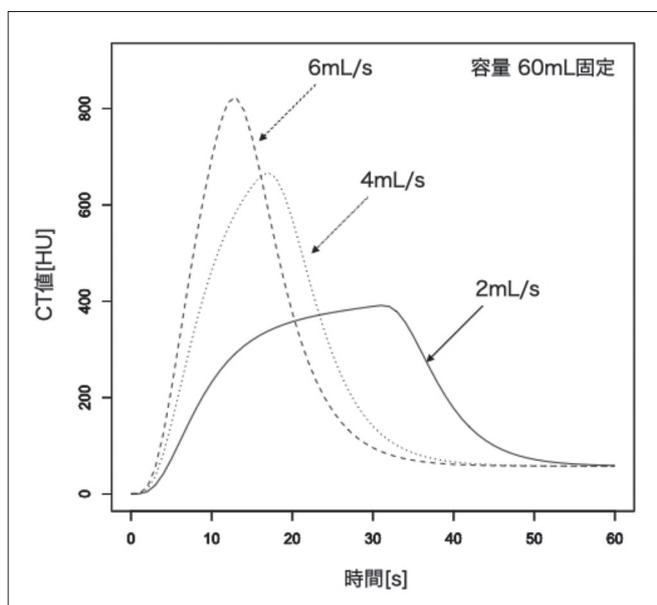


図2 容量60mLと固定した場合における注入速度がTECに与える影響

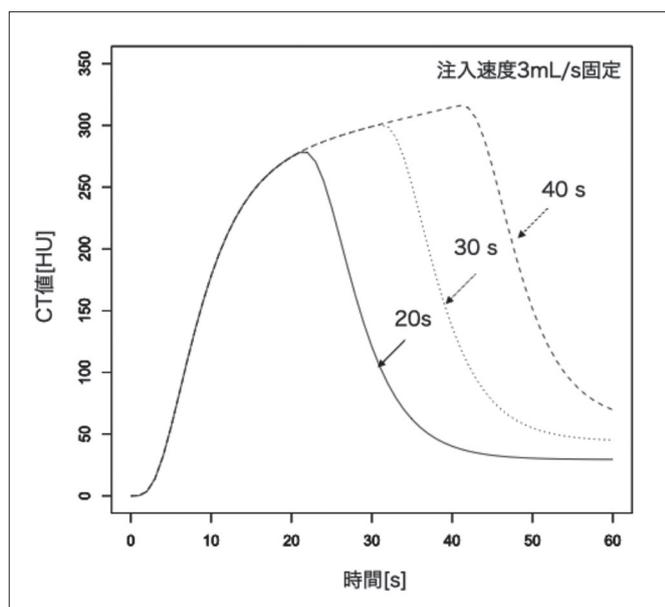


図3 注入速度3mL/sと固定した場合における注入時間がTECに与える影響

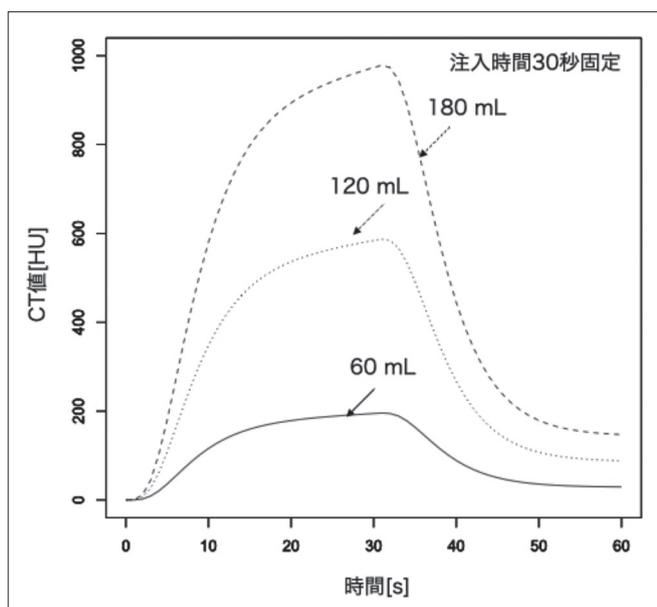


図4 注入時間30秒と固定した場合における容量がTECに与える影響

となる。そうすると、残りはTECのCT値の管理のみとなる。CT値の管理は、造影CT検査を実施している方であれば想像がつくと思うが、体重を基準として造影剤量を決定する手法が最も一般的である。なぜなら、ヨード造影剤は細胞外液に分布するため、一様にヨード造影剤を投与すると体格による造影効果のばらつきが生じるからである。したがって、細胞外液の容積と体重の関係を考慮し、体重を基準としてヨード造影剤量を決定することで、**図5**に示すように異なる体格の被検者間で一様な注入を行った場合と比べてTECを描えることができる。臨床上でも、一様な注入を行ったグループと比較すると、体重を基準としてヨード造影剤量を決定したグループでは、体重とCT値の間に相関関係が認められないことが示されている²⁾。以上のように、TECを管理するための基本的な注入方法は体重当たりヨード量・注入時間固定法である。

造影CT検査における造影剤の注入方法は、体重当たりヨード量・注入時間固定法を基本としている。しかし、CT angiography(以下、CTA)では、主に生体パラメータが要因となり、早期相におけるCT値のばらつきが後期相に比べて大きくなるが知られている。そのため、

CTAの際には、Test injection、Bolus tracking、Test Bolus Trackingなどのオプションが一般的に使用される。これらの技術は大まかに2つに分類され、Bolus TrackingとTest Bolus Trackingは、TECのX軸を調整することが可能であり、撮影タイミングの補正に役立つ。一方、Test injectionでは、X軸だけでなく、Test injectionで得られた体内循環動態の情報を利用してTECの推定も可能である³⁾。

今回はTEC推定の数式については紙面の都合上割愛するが、TECは少量の造影剤の注入によって形成される積分値として推定されることが前提となる。推定方法としては、少量の造影剤から得られたTECを単純に線形加算する方法と、伝達関数を求めて推定する方法の2種類が報告されている。理想的には両者に推定誤差は生じないが、単純線形加算法は自動注入器の注入速度が矩形派として駆動することを前提としているため、伝達関数法がより良好なCT値の推定精度をもたらすことが示唆されている。ただし、臨床的にはまだTest injectionから数学的にTECを算出する方法は一般的には使用されていない。そのため、煩雑な計算を回避しながらTECを推定するために、2筒式の自動注入器を活用し、造影剤と生理食塩水を同時に注入する技術が報告され

ている⁴⁾。この手法を用いることで、複雑な計算せずに最大CT値到達時間を把握でき、さらに、造影剤とCT値の間には線形関係があることから、希釈倍率を乗算することで最大CT値の推定も可能となる。この手法により、循環動態を把握することが難しい肺動脈と肺静脈においても、わずか21mLの造影剤量で循環動態に合わせた撮影が可能となる⁵⁾。

さいごに

最後に、TECを操作するための2つのテクニックを紹介する。1つ目は可変注入である⁶⁾。可変注入は、注入終了時の注入速度を注入開始時の注入速度で除算した値を可変定数として、リアルタイムに造影剤の注入速度を可変させる造影剤注入技術である。一様な速度の注入と比べると、TECの形状を変化させることができる。例えば、可変定数を0.5とすると、TECの形状が台形に変化する。これにより、下肢CTAなど撮影時間が長い検査においても、血管内のCT値を一定に保つ時間を確保できるメリットがある。

2つ目は多段階注入である⁷⁾。簡単に言えば、複数回に分割して造影剤を注入することである。この多段階注入のメリ

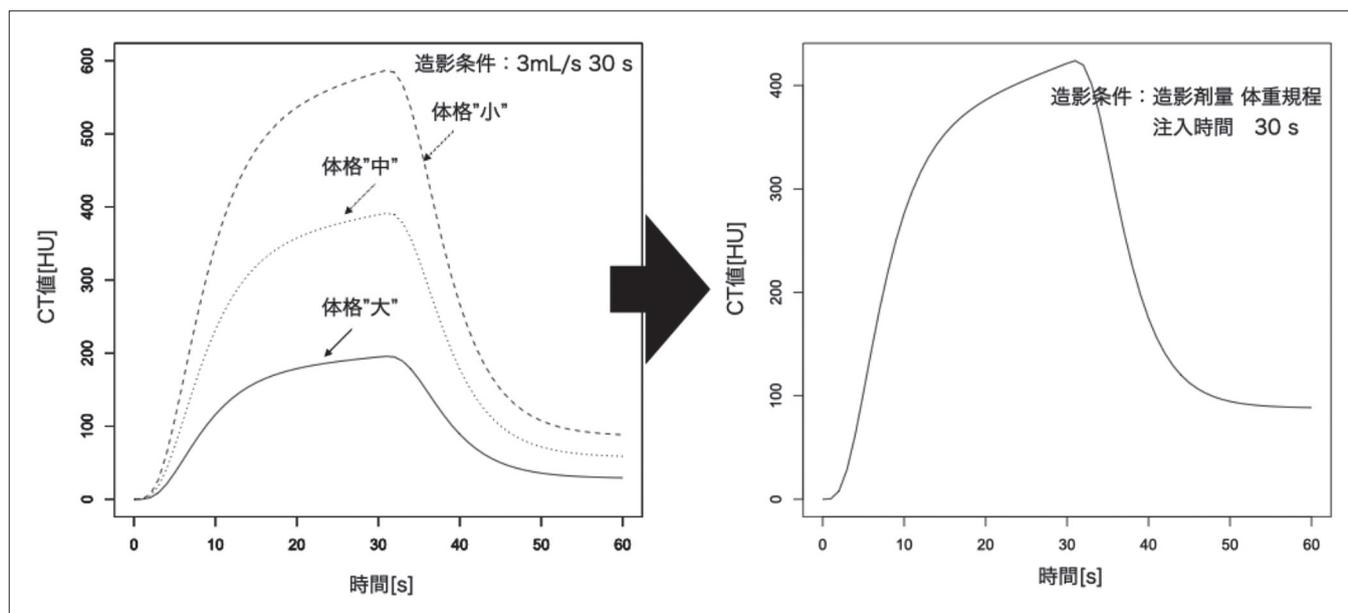


図5 体格の異なる被検者間における体重当たりヨード量・注入時間固定法によるTECの管理

ットは、1回の撮影で複数の時相における画像を得ることができる点である。例えば、整形領域における腰椎前外側椎体間固定術の前には、腹部領域の血管だけでなく、尿管の情報も把握することで、手術の安全性を向上させることができる。しかし、腹部の動脈、静脈、尿管の循環動態は異なるため、一様な注入では3D構築に十分なCT値を得ることができない。そこで、尿管、静脈、動脈それぞれに濃染された造影剤を分割して注入することで、循環動態の時間を操作し、最大CT値を一致させることで、1回の撮影で複数の時相の情報を含む画像を得ることが可能となる。

以上、体重当たりヨード量・注入時間固定法がいまだに造影CT検査の重要な要素として支えている現状をお伝えした。先人への恩返しのためにも、これらの技術を活用し発展させていただけたら幸いである。

<文献>

- 1) 八町 淳: 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 40(2): 109-124, 1995
- 2) K. Awai et al: The Optimal Body Size Index with Which to Determine Iodine Dose for Hepatic Dynamic CT: A Prospective Multicenter Study. Radiology 278(3): 773-781, 2016
- 3) J. Nakane et al: Effects of Mathematical Analysis of Test Injection on the CT Value Estimation of the Aorta, Japanese J. Radiol. Technol 73(4): 251-257, 2017
- 4) T. Masuda et al: Prediction of aortic enhancement on coronary CTA images using a test bolus of diluted contrast material. Acad Radiol 21(12): 1542-1546, 2014
- 5) J. Nakane et al: Computed tomography pulmonary angiography and venography with a low dose of contrast medium. Radiol Phys Technol 12(1): 61-68, 2019
- 6) K. Terasawa et al: A new method with variable injection parameters in contrast-enhanced CT: a phantom study for evaluating an aortic peak enhancement. Radiol Phys Technol 8(2): 248-257, 2015
- 7) H. Ozkurt: Split bolus method in computerized tomography, Sisli Etfal Hastan Tip Bul 57(1): 18-24, 2023