

瘢痕組織関連続性心室頻拍に対するカテーテルアブレーション時ペースマッピング法について

花木裕一*

瘢痕組織関連心室頻拍(VT)の治療において、血行動態が安定している場合にはVTの旋回路を同定し、重要な緩徐伝導部位を焼灼することが目標となるが、不安定な場合には基質を同定して焼灼することが中心となる。その中でもペースマッピング法は、心室性不整脈の起源を同定することや、異常な電気伝導経路を特定することで、VTの基質を同定することができるために大変有用な手法で、カテーテルアブレーションの黎明期から広く用いられている。また、三次元マッピングシステムなどの技術の進歩によってVTの伝導回路が三次元的様相を呈することや、機能的基質マッピングにおける遅延伝導特性との関係などが示され、カテーテル治療時にマッピングシステムを駆使してVT回路を三次元的に描出し把握することが重要となっている。本総説では、ペースマッピング法の基本的な知見と臨床での活用方法、そしてその限界について、さらには我々の発表したVT回路の中での伝導遅延部位や障壁によって生じるペースマッピング波形の急激な変化(abrupt change)を参考にした三次元的なVT回路の推定についても概説をする。その他、最新の論文におけるペースマッピング法の新たな知見についても触れている。

(心電図, 2025; 45: 87-95)

I. はじめに

現在、瘢痕組織関連心室頻拍(Ventricular tachycardia: VT)に対するカテーテルアブレーションは広く行われるようになっており、その戦略も

- Keywords**
- 瘢痕組織関連心室頻拍
 - カテーテルアブレーション
 - ペースマッピング

筑波大学附属病院循環器内科
(〒305-8575 茨城県つくば市天王台1-1-1)
*は責任者を示す

Pace-mapping Methods for Scar-related Ventricular Tachycardia
Yuichi Hanaki

様々である。基本的には血行動態が安定したVTに対しては、その旋回路を同定し、必須緩徐伝導部位を焼灼することでVTの停止を試みるが、血行動態が不安定となるVTでは焼灼中の停止を得ることは困難なことが多い。そのような場合、頻拍回路の基質を同定し、焼灼することに重きが置かれる。近年のアブレーション技術の進歩により、この基質焼灼の有用性は多くの論文で示されるようになっている^{1)~3)}。

VTの基質の同定には、Voltage mapを参考に瘢痕組織と正常心筋、その境界部を同定する方法や⁴⁾、

昨今では伝導速度に焦点を当てて不整脈基質を同定する基質マップ(activation map, isochronal late activation mapなど)を作成することで、必須緩徐伝導部を同定する方法が用いられている^{5), 6)}。そのような不整脈基質で電極カテーテルからペーシングを行い得られた波形と VTのそれを比較するペースマッピング法は、以前から広く用いられ、現在も治療対象とする VTの基質の同定に不可欠な方法である^{5), 7)}。

本総説では、ペースマッピング法の基本やその注目すべき所見と臨床での活用方法について概説し、さらに高密度にペースマッピングを施行することで推察される VT回路について我々の近年の報告と最近のペースマッピングに関する知見についてまとめた。

II. ペースマッピング法の基本

ペースマッピング法は、治療対象とする心室期外収縮(VPC)またはVT波形と電極カテーテルからの電気刺激により得られた12誘導心電図波形の一致性/近似性を見ている。12誘導中10誘導以上⁸⁾で良好な一致と考え、12誘導全て一致する(perfect match)部位を VT回路のexitまたはVPCの起源と考えた^{7), 9)}。その一致性/近似性はラボシステム(BARD社製 LabsystemTM PRO)付属のTemplate Matching softwareを用いて一致率(%)で算出することができるが、三次元マッピングシステム内でも同様のシステム(CARTO PaSo module)が備わっており、各所で得られたそのscoreを三次元マッピングシステムに投影しカラーリングすることで、より視覚的に把握が可能となる。通常良好な pace-mapping scoreは赤に、その後橙・黄・黄緑・緑・水色・青・紫と一致率が低くなる。三次元マッピングシステムへ投影するもう一つの利点に、治療中に誘発された別のVPC/VTとの比較も可能であり、あらかじめ得た波形とその位置情報を用いて新たなカラーマップを作成することもできるため、起源やexitの同定が短時間で可能となる。

ペースマッピング法の注意点としては、ペーシングレートやペーシング出力、抗不整脈薬の効果による波形への影響がある。ペーシングレートは対象とする VTの頻拍周期と同一であることが理想だが、rapid VTを対象としている場合には速いペーシングレートに設定すると、他の VT/VFが誘発されてしまうこともある。設定すべきペーシング周期については各症例で検討すべきであるが、我々は周期の速い VT症例で、同一周期でのペースマッピングで誘発されやすい VTにおいては、ペーシング周期を400 ms程度に固定してペースマッピングを施行している。本内容についての最新の知見は後述する。VPC/VTの起源が心筋深部にある場合には、その起源のみを捕捉できず周囲心筋も捕捉してしまうことで、異なるペーシング波形となる可能性もある。周囲心筋が瘢痕化している場合には、通常用いる刺激出力(5~10 V/パルス幅1~2 ms)では捕捉できないこともあります。ペースマッピングの評価が困難なこともある。当院では出力を通常よりも上げた設定(最大20 V)やパルス幅を広くするなどして捕捉を試みるが、可能な限り局所心筋を捕捉した波形を採用するために、ペーシング出力を漸減し捕捉されなくなる直前の波形を確認することを心掛けている。

このペースマッピングによる心筋の捕捉範囲や不整脈起源の検出能力については様々に報告がある。Azegamiらによる研究では¹⁰⁾、右室流出路での心室性不整脈に対するペースマッピングの12誘導心電図比較で一致する点の最大距離は18 mm(範囲11~26 mm)であったが、activation mapによる空間分解能と同等であったと報告している。瘢痕組織関連VTについて、Yoshidaらによれば¹¹⁾、瘢痕内で、ペースマッピングの VT exitに対する平均空間分解能は2.9 cm²であったが、範囲は0~17.5 cm²と広く、患者間/VT間での違いも大きかったと報告している。Sinnoら¹²⁾も同様に虚血性心筋症に対する VTアブレーションを施行された患者において、1.5 mV未満の Low voltage領域にペースマップを行い、10/12リード以上のペースマップの一一致は、境界域

組織 exit 部位で 3.86 cm^2 と報告しており、分解能は決して高くないことは留意すべきである。

植込み型除細動器(ICD)によって検知された VT、つまり 12 誘導心電図で記録されていない VT を治療対象とせざるを得ないこともしばしば経験するが、その際にもペースマッピング法が役に立つ。ペースマッピング施行時に ICD 記録で示される EGM (near/far-field) と VT 時の波形を比較することで 12 誘導心電図波形が得られていない治療対象 VT の起源に迫る方法である。Santangeli らの報告では¹³⁾、ICD – EGM を参考に、瘢痕組織関連 VT に対して瘢痕周囲を系統的にペースマッピングした。その空間分解能は、平均 5 cm、信頼区間は最大で 10~15 cm と決して高くはない。しかしながら、near-field と far-field 電位を組み合わせることで、VT 起源の検出能は 12 誘導心電図波形と有意差はないとも報告しており、Voltage map による、瘢痕組織とその境界域の把握や局所電位の異常所見を組み合わせて治療対象部位を推察していくことで、治療効果を高めることはできるであろう。

良好なペースマッピング波形が得られた時に、ペーシング刺激-QRS (S-QRS) 時間にも注目すべきである。Stevenson らによって提唱された瘢痕モデルとその VT 回路についての検討より、ペースマッピング波形の変化と S-QRS 時間の変遷が示されており、VT の緩徐伝導路を推定することが可能である⁷⁾。特に、S-QRS $> 80 \text{ ms}$ であれば波形の一致に関わらず、VT の target site またはその近傍 2 cm 以内にあることを Brunckhorst らは示しており¹⁴⁾、ペースマッピング中の S-QRS 時間に注目することも重要である。しかしながら、この S-QRS の変遷が追えない症例もいくらか存在する。その症例は、三次元構造を呈する VT 回路の緩徐伝導部がマッピング可能な表層に存在していないことが関与しているかもしれない。

III. 機能的ペースマッピング反応

VT の必須緩徐伝導部を同定するためにペース

マッピング時の重要な所見として、Multiple Exit Site (MES) と Pace-Mapped Induction (PMI) を、2012 年に Tung らが報告している¹⁵⁾。

MES: 2 つ以上の QRS 波形が同一ペースマッピング中に得られ、それらの波形同士の一一致率は < 10/12 であること。各波形は 2 拍以上記録されるものとする。

PMI: ペースマッピングによって VT が誘発されること。

瘢痕関連 VT について、異常電位(遅延電位や分裂電位など)を記録される部位において高密度にペースマッピングを行った結果、MES と PMI はそれぞれ 57% (25/44)、30% (13/44) の患者で得られた。MES が得られた部位の平均双極電位波高は 0.24 mV であり、31% が scar 境界部 (0.5~1.5 mV) で、50% が dense scar (< 0.5 mV) 内部、19% が 0.1 mV 未満の極低電位領域で得られた(なお、S-QRS 時間の中央値は 86 ms と延長しており、各 MES 波形間の S-QRS 時間は中央値で 22 ms 異なっていた)。観察期間 9 カ月ではあるが、MES が記録できた症例において、有意に VT 再発なく経過した (MES あり 74% vs. MES なし 42% p = 0.024)。この MES で得られる 12 誘導心電図波形は、必ずしも治療対象としている VT 波形と一致しない。筆者らは、MES が得られた患者 25 人のうち、MES 時の波形のうちの一つが $\geq 10/12$ の一致を認めたのは 40% (10/25) であったと述べた。実際にペースマッピングが一致しない部位でも concealed entrainment が得られたり、ペースマッピングが一致していても entrainment pacing が manifest fusion ということがある⁷⁾。ペースマッピング波形は組織の不応期、伝導速度、そして捕捉された心筋量 (near field または far field capture) などに大きく左右され、瘢痕組織内のどの exit を介するかは、様々な影響を受ける。2 つの異なる exit を介した伝播が融合した結果という可能性もある。Multiple exit site と基質マッピングの関係については後述する。

PMIはこの研究中では30%(13/44)に認められ、そのペースマッピング波形が治療対象VTと完全一致したのは54%(7/13)、good matchは31%(4/13)であったが、15%(2/13)は一致しなかった。PMI siteもMESと同様に、双極電極波高で中央値0.2mVと低電位であり、29%(4/21)が境界域(0.5~1.5mV)であり、52%(11/21)がdense scar、19%(4/21)が<0.1mVの極低電位領域であった(S-QRS時間の中央値は102msとこちらも延長していた)。PMI siteでABLを試みられた19 site中18カ所でVTの停止が得られ、PMIはアブレーション治療中のVT停止と強い相関があったが、9ヶ月のフォローアップ期間中にVT再発なく経過したのは54%であり、臨床的成功の予測因子とはならなかった。

IV. ペースマッピング波形の Abrupt change

隣接する2点間でのペースマッピング波形が急激な変化を伴うことがあり、同部位がVTのisthmusと一致するという報告がde Chillouらによってされた¹⁶⁾。この現象は、過去のStevensonらの報告⁷⁾でもペースマッピング波形の急激な変化は示されており、非常に重要な所見である。必須伝導路のexitでペースマッピング波形はVT波形と一致するが、entranceではVT波形とは大きく異なる。多点で施行したペースマッピング波形の一致率を3Dマッピングシステムへ投影した「ペースマッピングマップ」を作成し、それがVTのactivation mapと同一の様相を呈し、波形の一致率が悪い点から良い点へと変化する部分が必須伝導路となることをde Chilloらは示した¹⁶⁾。この報告は、心内膜側の血行動態の維持が可能であったICM患者に限られた研究であり、心外膜側へのアプローチをしばしば要するようなNICMにおけるデータは示されていなかった。一方で、Tungらによって瘢痕組織関連VTのactivation mapを心内膜・心外膜の両方で作成したこと、NICMに限らず、ICM関連VTにおいても三次元的回路を呈していることが示され、心内膜・心外膜両側のマッピングを経ても描出されない

“activation gap”は心筋中層内での伝播を示していると推測された¹⁷⁾。このような三次元的構造を呈するとされるVT回路を、心内膜および心外膜側で多点ペースマッピングを施行し、どのように示されるかについての報告は、我々が知る限りこれまでになかったことから、2022年ICM/NICM患者に生ずる瘢痕組織関連VTに対し多点ペースマッピング法を心内膜側および心外膜側において適用し、その様相および有用性について検討した共同研究の結果をEuropaceへ報告した¹⁸⁾。

対象は、計37例(ICM17例、NICM20例：拡張型心筋症13人、肥大型心筋症5人、心臓サルコイドーシス2人)の瘢痕組織関連VTに対して、瘢痕組織内およびその周囲に詳細な多点ペースマッピングが施行された症例を調査した。瘢痕組織関連VTに対し、瘢痕組織内およびその周囲に詳細な多点ペースマッピングが施行された症例を後ろ向きに抽出し、治療開始時に誘発されたVT波形記録と、ペースマッピングで得られた12誘導心電図波形を、CARTOシステムのPaSoモジュールを用いて波形の一致率(Correlation score：12誘導心電図波形の各誘導の一致率の加算平均)を算出して、その一致率を投影したCorrelation score map(CSM)を作成後解析した[Correlation scoreは100%に近付くほど波形の完全な一致を示すが、逆に一致しない場合にはマイナスの値を示すこともある(最低値：-100%)]。過去の報告を参考に、30mm以内にCorrelation scoreが高い点(≥90%：赤で示される)から低い点(≤38%：紫で示される)へCorrelation scoreの急激な変化を有する部位をabrupt change(AC)と称し、ACを示すCSMを「AC型CSM」、ACを示さないCSMを「Non-AC型CSM」と分類した(図1)。心内膜側および心外膜側で作成可能であった計115CSM(心内膜側80、心外膜側35)を解析した(図2)。心内膜側CSM(計80VT)の検討で、AC型CSMはICMで有意に多くみられた(ICM 11/39[28%] vs. 1/41[2%]；p=0.001)。一方で心内膜・心外膜両側のCSMが作成できた35VTでは¹⁾、心

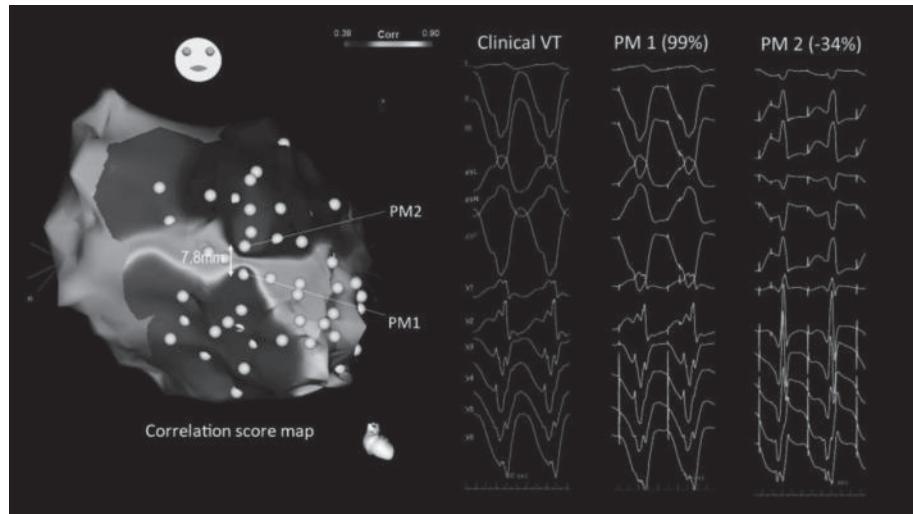


図1 AC型 Correlation score map の1例

図は虚血性心筋症を有する VT 患者において高密度ペースマッピングを行い、その一致率を map に投影した Correlation score map である。右脚ブロック上方軸型の clinical VT に対してペースマッピングを比較すると、PM1において 99% と一致した。その 7.8 mm 上方の PM2 では下方軸となり、-34% の一致率と急激な波形の変化 (abrupt change) が得られた。本症例は PM2 波形に一致する non-clinical VT も session 中に誘発され、abrupt change 部位を共通緩徐伝導路とする VT であり、同部位の通電によって VT は停止し非誘発性が得られた。

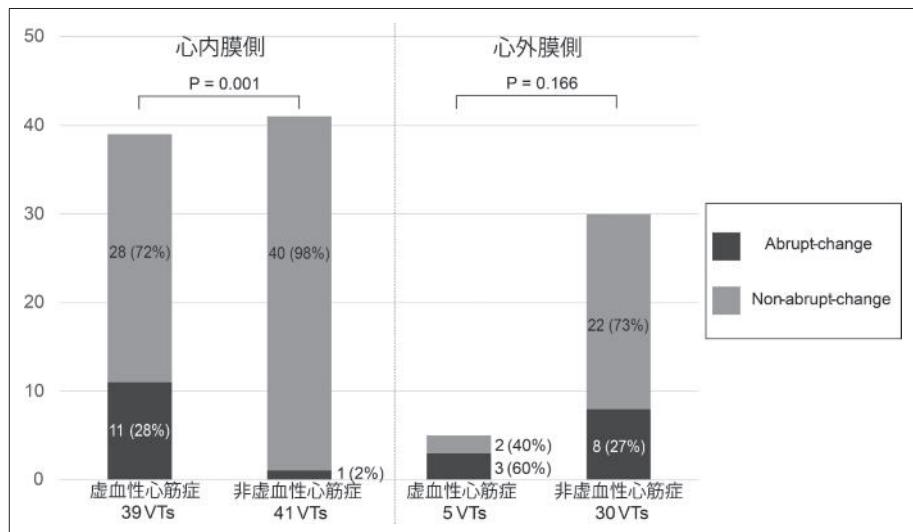


図2 心内膜 / 心外膜側における AC型 / Non-AC型 Correlation score map

心内膜側で 80 VT、心外膜側で 35 VT の合計 115 VT についての Correlation score map (CSM) を解析した。心内膜側は虚血性心筋症 (ICM) で 39 VT、うち 11 VT (28%) が AC 型 CSM を示した。一方で非虚血性心筋症 (NICM) では 41 VT 中 1 VT (2%) のみしか abrupt change を得られなかった。心外膜側では、ICM で 5 VT 中 3 VT (60%)、NICM で 30 VT 中 8 VT (27%) が AC 型 CSM を示した。

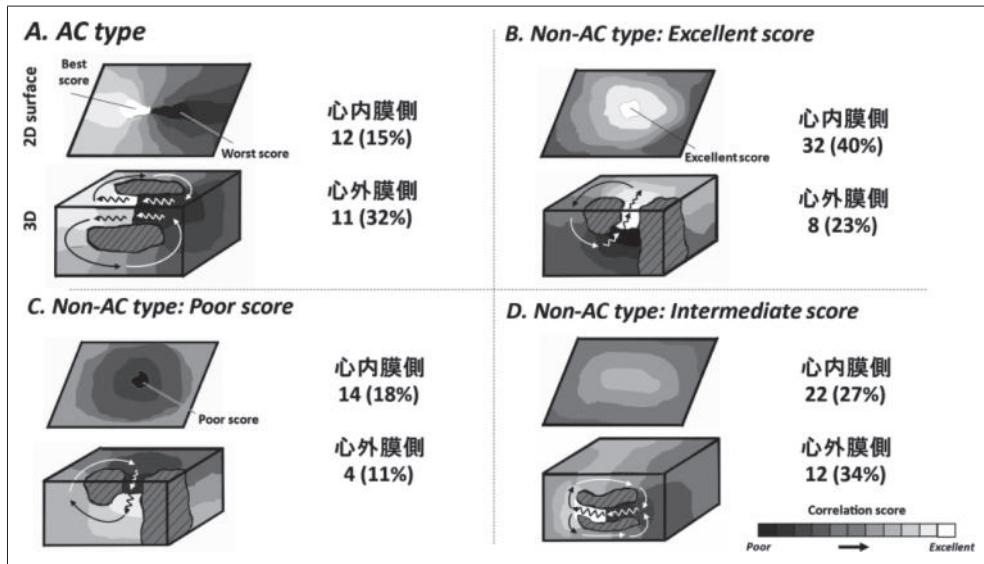


図3 心内膜 / 心外膜側 Correlation score mapによる VT回路の3次元的検討

- A : Abrupt change (AC)型 : マッピング表層においてペースマッピングの ACが得られるが、対側面においては見られない。
- B : Non-AC型 (Excellent score) : excellent score部の近傍に poor scoreがない centrifugal様の広がりを見せる。心筋内部の AC部の存在が示唆される。
- C : Non-AC型 (Poor score) : excellent scoreがなく、 poor scoreが centrifugal様に観察される。こちらも心筋内部の AC部の存在が示唆される。
- D : Non-AC型 (Intermediate score) : Excellent scoreも poor scoreもない中間値のみ観察される。心筋内部に限局した AC部の存在が示唆される。

内膜側で ACを認めず心外膜側で AC型 CSMを呈したのが10VTでそれらは心外膜側に VT isthmusを有していたが、心内 / 心外膜両側の同部位に AC型 CSMがあった VTがあり、これは貫壁性の頻拍回路が示唆された。残りの 24 VTは心内膜・心外膜両側とも AC型は得られず、頻拍回路の必須伝導路が心筋中層に存在すると考えられたが、そのうち 16 VTは一致率の高い点または低い点(すなわち頻拍回路の exitや entranceに相当する部位)が心内膜または心外膜側で得られた。一方で、8 VTは一致率の高い点と低い点のどちらも認められず、頻拍回路全体が心筋中層にあり、それらを有する症例では治療に難渋した。各マッピング層における CSMの分類の内訳(分類基準と構成比)を図3に示す。

これら CSMのパターンによる予後については、中央値 24ヵ月のフォローアップ期間中に最終手技

後に 21人(57%)の患者(12ICM/9NICM)が VT再発なく経過したが、Clinical VTについて心内膜 / 心外膜のいずれの CSMにおいても ACが認められなかつた症例は、VT再発率が高かった(ハザード非 3.59; 95% CI 1.02-12.63; p = 0.047)。心外膜アプローチを行った 18人の患者のうち 3症例(1ICM/2NICM)は、心内膜 / 心外膜の両方において AC型のみならず excellentも poorもどちらも認めなかつた症例であったが、この 3例の全てで VT再発を認めており、1例は心不全で死亡している。

この ACがどのような場所で生じるか、どういった機序で生じるのかについては、de Chillouらの論文中で考察されている¹⁶⁾。VT isthmus内に伝導遅延部位や伝導障壁が生じることによって、ペースマッピング時に VTの伝播方向とは逆の伝播が生じた際に全く異なる波形が生成され、障壁を挟んだ近

接2点間で急激な波形変化が生じていると考えられている。これはVT回路の必須緩徐伝導部位は伝導遅延を生じている部分に起こるという報告^{5), 6), 19)}と矛盾しない。我々の研究においても、ACが生じた2点の局所電位間の伝導速度は平均0.25m/sと過去に報告されている遅延伝導^{5), 19), 20)}と同等、またはそれよりも遅い結果であった。また、ペースマッピングの一致が複数の点で得られた場合は、よりS-QRSの長い波形がAC部の近傍で得られており、ACがVTの緩徐伝導部位で生じていることを支持する一つの所見と考えられる^{7), 14), 21)}。昨今広く用いられているfunctional substrate mapによる伝導遅延部の描出がVT治療への有効な手法とされていいるが、ペースマッピング波形の一致やその急激な変化を同時に捉えることで、critical siteを的確にとらえることができるものと考えられる。

V. ペースマッピングに関する最新の報告

ペースマッピングの所見と基質マップの比較については複数報告がある。Uedaらの報告²²⁾ではペースマッピング中のS-QRS潜時からVT isthmusを推定し functional substrate mapのslow conduction areaは、isthmus corridorのexitに位置していることを示した。さらに、multiple exitが得られた5例(26%)については、functional substrate mapのlate activation領域に長いS-QRSとともにMESが生じることを示しており、これはVTのexitではなくisthmusの中の、よりcentral～entranceにおいて生じうることを示しているものと思われる。Kotakeらの報告²³⁾では心内エコーを用いた瘢痕評価とPacemap correlation score mapを比較してabrupt change(AC) patternとcentrifugal activation(CA) patternの生じる傾向について論じている。AC patternは心内膜優位の瘢痕で11/21(52%)に生じ、心外膜側優位瘢痕[3/38(8%)]に比較して有意に多かった($p < 0.001$)。一方、CA patternは心膜内中層や心外膜側有意の瘢痕を反映していた(それぞれ $p = 0.005$, $p = 0.02$)。これは我々の論文で示す所見

と一致していた。また、ペースマッピング法の注意として、周期によるQRS波形への影響を詳細に検討したものがある²⁴⁾。VT周期に近いことでペースマッピングスコアは良好な一致を示していたが、特にペーシング周期が速い場合にT波とR波の融合(T-R fusion)が生じ、正確な評価ができないことを示している。QRS前半のスラーが32%で生じてしまい、心内膜側からのペーシングであっても69%が心外膜側起源の波形基準に合致してしまう。よりVT周期に近いペースマッピングレートで施行することで正確なscoreの算出が可能となるが、患者の血行動態やVTの易誘発性などによって周期の調整が必要である。

VI. 結語

以上、本総説では、我々の研究内容の概説と共に、様々なペースマッピング所見に関する報告について述べてきた。ペースマッピングによって至適焼灼部位とその方法についての有益な情報が得られることはよく知られているが、一方でその所見の解釈を間違えることや、この方法の限界についても把握しておく必要がある。そしてそれは、カテーテルアブレーションを行う医師だけでなく、EPラボや3Dマッピングを操作するコメディカルと共有することが重要である。

付記

本稿は、第28回日本不整脈心電学会学術奨励賞を受賞した論文をもとに総説としてまとめたものであり、図表については受賞論文より一部引用させて頂いた。

受賞論文

Hanaki Y, Komatsu Y, Nogami A, Kowase S, Kurosaki K, Sekiguchi Y, Aonuma K, Ieda M. Combined endo- and epicardial pace-mapping to localize ventricular tachycardia isthmus in ischaemic and non-ischaemic cardiomyopathy.

- 1) Reddy VY, Reynolds MR, Neuzil P, et al. : Prophylactic catheter ablation for the prevention of defibrillator therapy. *N Engl J Med*, 2007 ; 357 : 2657-2665
- 2) Makimoto H, Nakajima I, Miyamoto K, et al. : Clinical impact of mapping strategies for treatment of ventricular tachycardias in patients with structural heart disease. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2015 ; 38 : 630-640
- 3) Kumar S, Baldinger SH, Romero J, et al. : Substrate-Based Ablation Versus Ablation Guided by Activation and Entrainment Mapping for Ventricular Tachycardia : A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2016 ; 27 : 1437-1447
- 4) Marchlinski FE, Callans DJ, Gottlieb CD, et al. : Linear ablation lesions for control of unmappable ventricular tachycardia in patients with ischemic and nonischemic cardiomyopathy. *Circulation*, 2000 ; 101 : 1288-1296
- 5) Aziz Z, Shatz D, Raiman M et al. : Targeted ablation of ventricular tachycardia guided by wavefront discontinuities during sinus rhythm : a new functional substrate mapping strategy. *Circulation*, 2019 ; 140 : 1383-1397
- 6) Hattori M, Komatsu Y, Naeemah QJ et al. : Rotational Activation Pattern During Functional Substrate Mapping : Novel Target for Catheter Ablation of Scar-Related Ventricular Tachycardia. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2022 Jan ; 15 (1) : e010308
- 7) Stevenson WG, Sager PT, Natterson P, et al. : Relation of pace mapping QRS configuration and conduction delay to ventricular tachycardia reentry circuits in human infarct scars. *J Am Coll Cardiol*, 1995 ; 26 : 481-488
- 8) Bogun F, Good E, Reich S, et al. : Isolated potentials during sinus rhythm and pace-mapping within scars as guides for ablation of post-infarction ventricular tachycardia. *J Am Coll Cardiol*, 2006 ; 47 : 2013-2019
- 9) Calkins H, Kalbfleisch S, El-Atassi R et al. : Relation between efficacy of radiofrequency catheter ablation and site of origin of idiopathic ventricular tachycardia. *Am J Cardiol*, 1993 ; 71 : 827-833
- 10) Azegami K, Wilber DJ, Arruda M, et al. : Spatial resolution of pacemapping and activation mapping in patients with idiopathic right ventricular outflow tract tachycardia. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2005 ; 16 :
- 11) Yoshida K, Liu TY, Scott C, et al. : The value of defibrillator electrograms for recognition of clinical ventricular tachycardias and for pace mapping of post-infarction ventricular tachycardia. *J Am Coll Cardiol*, 2010 ; 56 : 969-979
- 12) Sinno MC, Yokokawa M, Good E, et al. : Endocardial ablation of postinfarction ventricular tachycardia with nonendocardial exit sites. *Heart Rhythm*, 2013 ; 10 : 794-799
- 13) Santangeli P, Alcalde O, Zado ES, et al. : Spatial resolution of defibrillator electrograms to detect distinct exit sites of scar-related ventricular tachycardia. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2014 ; 37 : 1256-1264
- 14) Brunckhorst CB, Delacretaz E, Soejima K, et al. : Identification of the ventricular tachycardia isthmus after infarction by pace mapping. *Circulation*, 2004 ; 110 : 652-659
- 15) Tung R, Mathuria N, Michowitz Y et al. : Functional pace-mapping responses for identification of targets for catheter ablation of scar-mediated ventricular tachycardia. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2012 ; 5 : 264-272
- 16) de Chillou C, Groben L, Magnin-Poull I et al. : Localizing the critical isthmus of postinfarct ventricular tachycardia : the value of pace-mapping during sinus rhythm. *Heart Rhythm*, 2014 ; 11 : 175-181
- 17) Tung R, Raiman M, Liao H et al. : Simultaneous Endocardial and Epicardial Delineation of 3D Reentrant Ventricular Tachycardia. *J Am Coll Cardiol*, 2020 ; 75 : 884-897
- 18) Hanaki Y, Komatsu Y, Nogami A, et al. : Combined endo- and epicardial pace-mapping to localize ventricular tachycardia isthmus in ischaemic and non-ischaemic cardiomyopathy. *Europace*, 2022 ; 24 : 587-597
- 19) Anter E, Kleber AG, Rottmann M et al. : Infarct-related ventricular tachycardia : redefining the electrophysiological substrate of the isthmus during sinus rhythm. *JACC Clin Electrophysiol*, 2018 ; 4 : 1033-1048
- 20) Kapel GF, Sacher F, Dekkers OM, et al. : Arrhythmogenic anatomical isthmuses identified by electroanatomical mapping are the substrate for ventricular tachycardia in repaired Tetralogy of Fallot. *Eur Heart J*, 2017 ; 38 : 268-276
- 21) Nishimura T, Shatz N, Weiss JP, et al. : Identification of Human Ventricular Tachycardia Demarcated by

- Fixed Lines of Conduction Block in a 3-Dimensional Hyperboloid Circuit. *Circulation*, 2023 ; 148 : 1354-1367
- 22) Ueda A, Soejima K, Nakahara S, et al. : Conduction slowing area during sinus rhythm harbors ventricular tachycardia isthmus. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2020 ; 31 : 440-449
- 23) Kotake Y, Bennett R, Silva K, et al. : Correlation of spatial patterns of endocardial pace mapping to underlying scar topography in patients with scar-related ventricular tachycardia. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2023 ; 34 : 638-649
- 24) Shinoda Y, Jameria ZA, Sahara N et al. : Rate-Dependent Pacemap Matching in Scar-Related Ventricular Tachycardia : Impact of "TR Fusion" Phenomenon. *JACC Clin Electrophysiol*, 2024 ; 10 : 2132-2144

Pace-mapping Methods for Scar-related Ventricular Tachycardia

Yuichi Hanaki

Department of Cardiology, Faculty of Medicine, University of Tsukuba

In the treating of scar-related ventricular tachycardia (VT), the goal is to identify the VT circuit and ablate critical slow conduction areas when their hemodynamics are stable. However, if the VT is hemodynamically intolerated, the focus shifts to identifying and ablating the substrate. Among available techniques, pace-mapping is particularly useful, as it helps identify the origin of ventricular arrhythmias and pinpoint abnormal conduction pathways, thereby aiding in the identification of VT substrates. This technique has been widely employed since the early stages of catheter ablation. However, with technological advancements such as three-dimensional mapping systems, it has become evident that VT conduction circuits exhibit three-dimensional characteristics, and there is a relationship between these circuits and delayed conduction properties in substrate mapping. Therefore, it is crucial to utilize mapping systems to visualize and comprehend the VT circuit in three dimensions during catheter treatment. This review provides an overview of the basic knowledge and clinical applications of the pace-mapping method, its limitations, and our findings on estimating three-dimensional VT circuits based on abrupt changes in the pace-mapping waveform caused by conduction delays and barriers within the VT circuit. In addition, we discuss recent insights into the pace-mapping method based on the latest studies.

Keywords : Ventricular tachycardia, Catheter ablation, Pace-mapping