

## 第6章 総括

ヒトの心臓より発生する磁界を心磁といい、これは1963年 Baule と McFee によって最初に記録され、心磁図 (magnetocardiogram, MCG) と名付けられた。心磁の測定に超高感度のセンサである超電導量子干渉素子 (superconducting quantum interference device: SQUID) が用いられるようになって以来、心磁図に関する研究は盛んに行われるようになった。

心磁は、3次元ベクトルであり、胸壁に対して垂直な成分 (法線成分:  $B_z$  成分)、胸壁と平行な成分 (接線成分:  $B_x, B_y$  成分) に分けて考えることができる。しかし、生体磁場の測定は心磁に先立って脳疾患の分野で発展したという経緯もあり、従来心磁測定の対象は、多くの場合法線成分のみであった。法線成分測定で得られた磁気強度のマッピングパターンからいわゆる逆問題を解き、電流源を単一のダイポールに置き換えてその位置、大きさ、方向を推定するのである。この方法は、WPW 症候群の最早期興奮部位の推定など単一と考えられる信号源を推定するには有用であるが、三次元的広がりをもった心臓の複雑な電気生理学的活動を捉えるには、煩雑で少々無理のある作業であった。

一方、接線成分においては、心臓のように電流源が空間的に複雑に分布していても、常に一番電流が強い部位の直上で磁気強度が最大になるため、画像的に電流源と磁気強度パターンが対応する。このため、磁界の湧き出しと吸い込みを考慮する必要はなく、各センサの磁気強度パターンから心臓の電気生理学的現象を即座に可視化できるのである。また、センサの数を増やせばその分多くの局所的な電流ダイポールを推定することが可能になる。

磁気に関して生体の組織は、骨、臓器、皮膚等にかかわらずすべて真空とほぼ等しい透磁率を持っているので、空

間的に歪みのない信号が得られる。また、心電図と違い、心磁計測は体表面に接触せずに計測できる無侵襲な検査法なので、各センサの位置関係が常に固定でき、空間的に正確な情報が得られる。我々は、このような心磁測定の特長と、心磁の接線成分の特徴に着目し、心臓の複雑な電気生理学的現象を二次元的に視覚化、解析することにより従来の心電図や心磁の法線成分の解析から得られなかった、またはより精度の高い情報を得て、臨床の場に応用することを意図し、本研究を行うこととした。本研究では、臨床応用を意図し、高精度の情報が得られる一方システムの低価格化、サイズの縮小を図って新たに開発された 64 チャンネル SQUID システムを用いた。このシステムにより、成人の健常者、および心臓疾患患者(特に心臓外科的疾患患者)の心磁測定を行い、その有用性を検討すること、更に得られた心磁波形の新たな解析方法を探ることを目的とした。

#### 等磁場線図とベクトルアローマップー再構成法の比較ー

心磁の接線成分においては常に電流の一番強い部位の直上で磁気強度が最大になるため、画像的に電流源と磁気強度パターンが一致する。このため我々は、心起電力を表現する方法として、心磁の接線成分より求めた等磁場線図とこれに各測定点の電流強度と方向を表すアローを重ね合わせて表示したベクトルアローマップを用いた。各アローは、接線成分磁場ベクトル  $B_{xy} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  を Biot-Savart の法則にしたがって反時計回りに  $90^\circ$  回転させて電流の方向とした。

本研究では心磁の接線成分の解析を行っているが、実際の計測に用いた 64 チャンネル SQUID システムでは、システムの縮小化と測定時間の短縮、さらに測定結果の時間的空間的ずれを最小限にするために、法線成分を空間微分して、接線成分を導出するという方法をとった。このシステムに

よる測定結果を解析するに先立ち、まず、この方法で構成したベクトルアローマップと、以前我々が用いていた直接接線成分を測定して構成したベクトルアローマップを比較し、得られる情報の差異を検討した。その結果、シミュレーションおよび実際の心磁測定において、心起電力を表現する上で、両者に質的な差はないと考えられた。また、従来のダイポール推定法と比較すると、同方法は心臓のおおまかな興奮の様子は把握できるものの2次元的な広がりをもつ心起電力の視覚化という点では、ベクトルアローマップの方が優れていた。(第2章)

#### 健常者ベクトルアローマップの検討

64チャンネルSQUIDシステムを用いて、まず健常者に対して心磁測定を行い、ベクトルアローマップを作成して、心房脱分極、心室脱分極、および心室再分極に相当する時間帯ごとにその経時的変化を検討した。また、初の試みとして背部からの心磁測定を行い、その有用性を検討した。特にP波の時間帯においては、解剖学的に前胸部から最も距離のある左房の興奮が背部から視覚化できるか否かに注目した。

心房脱分極の時間帯のベクトルアローマップでは、洞結節の興奮とその広がり、左房への興奮の伝播の様子を視覚化し得た。特に、左房への興奮伝播の様子は、前胸部からの測定だけでは視覚化できない症例でも、背部からの測定により全例視覚化できた。

心室脱分極の時間帯のベクトルアローマップでは、心室中隔から始まり、左室自由壁、心室基部へと脱分極が進行していく様子を視覚化できた。

心室再分極の時間帯のベクトルアローマップでは、全例で前胸部、背部とも、終始左下向きベクトルが優位であった。

健常者の一症例において、前胸部ベクトルアローマップを MRI 画像と重ね合わせた結果、心房脱分極、心室脱分極、および心室再分極に相当する時間帯のいずれにおいてもアローの動向はほぼ解剖学的構造と矛盾することはなかった。  
(第 3 章)

## 等積分図

ある一定時間内に得られた心磁情報を 1 つの図として表示し、瞬時にその特徴がわかるような解析方法として心磁の等積分図を新たに考案した。これは、心磁波形における任意の区間で時間積分し、同じ積分値の点を結んで作成した図である。まず、健常者における接線成分心磁の QRS, ST-T の時間帯の等積分図を作成し、検討した。その結果、全例において、左室に相当する部位に最大値をもち、その形状は  $\int$ QRS 図,  $\int$ ST-T 図とも類似した左下方楕円となり、周囲にはほぼ均等な広がりをもった等積分値線を描いた。また、積分値の最大値に関しては、全例において  $(\int$ ST-T) $\max / (\int$ QRS) $\max = 1.49 \pm 0.37$  と  $(\int$ ST-T) $\max$  の方が  $(\int$ QRS) $\max$  よりも高値を示した。

接線成分心磁の等積分図においては、理論上電流の方向にかかわらず、ある一定時間に流れた電流量が多い箇所ほど積分値も大きく表現されることになる。また、シミュレーションでは、電流ダイポールの方向が一定でかつ集中しているほど、磁場強度が大きくなり、方向がばらばらで分散しているほど、磁場強度は小さくなった。これらの特徴より、等積分図にはベクトルアローマップだけから得られないような情報が含まれていると考えられた。(第 4 章)

## 心磁図を用いた各病態の評価

64 チャンネル SQUID システムを用いた心磁計測による、

以上のような解析方法を用いて、虚血性心疾患、弁膜症といった外科的疾患症例の病態の評価を試みた。その結果、虚血性心疾患症例では、①再分極相における電流アローの右方偏位、②再分極相における複数ダイポールの出現、③再分極相における積分値の相対的減少といった再分極相の異常を示した症例が多かった。また、安静時心電図で虚血所見のない6例のうち、3例で心磁図上前述の異常を示した。従って、心磁図により心電図よりも鋭敏な心筋虚血の評価が可能であることが示唆された。心臓弁膜症例では、左房負荷の評価にアローマップ、特に背部アローマップの有用性が示唆された。また、圧負荷症例で①QRSの時間帯のベクトルアローマップ上、左室に向かうベクトルの優位、②ST-Tの時間帯のベクトルアローマップ上アローの右方シフト、③等積分図において、①②を反映した形状と( $\int$ QRS)max、( $\int$ ST-T)maxの両者の高値という特徴を示し、左室負荷の有用な評価法となる可能性が示唆された。(第5章)

以上のように本研究では、64チャンネルという多チャンネルにおける心磁の同時測定を行い、得られた法線成分の情報から接線成分を導出して解析することにより、接線成分心磁の特徴を生かしつつ心磁計測の利点を最大限に活用したSQUIDシステムを用いた。そして、接線成分を直接計測した結果と質的な違いのないことを述べた上で、健常者のベクトルアローマップを検討し、心磁の前胸部および背部からの測定による心臓の正常な興奮伝播の時間的経過を明らかにした。次に、心磁計測で得られた総合的な情報を一つの図で表現することを目的として新たに等積分図を考案し、健常者における心室脱分極、再分極の特徴を明らかにした。最後に、数的、質的に限られた範囲ではあるが外科的心臓疾患症例に対して行った心磁計測の結果を解析し、虚血性心疾患、弁膜症に関して心磁図上の特徴を述べた。

心磁測定は、検査の無侵襲性、簡便性、また解析結果の

易視覚化という面から、心電図と並ぶ一般検査として発展していく余地があると考えられる。従来の不整脈の起源推定その他、ベクトルアローマップを用いた、特に心房位での調律異常や負荷の診断、虚血性心疾患における等積分図を用いた心室再分極異常の早期発見、心臓弁膜症における左室負荷の評価など、他検査にはない有用性をもつと考えられる。これは今後の症例の蓄積により更に明らかにされることと思われる。現時点では、心磁測定は装置のサイズが大きく、ランニングコストも高価であるため、将来的な臨床応用のためには、セラミックなどの高温超伝導体を用いたSQUID装置や低価格の測定システム開発などが必要であり、現在これらの研究が着々と進んでいる。また、解析方法もあくまで二次元平面上への投影であるため、三次元表現を含めた解析方法の開発も今後の課題である。

#### 結論

- 1 心磁の背部からの測定で、左房の心筋興奮伝播過程を視覚化できた。
- 2 新たに考案した心磁の等積分図では、虚血性心疾患症例において再分極相の異常を示す症例が多かった。心臓弁膜症症例では、左室圧負荷症例で特徴的な所見を示した。