

第4章 等積分図

第1節 等積分図の概念

従来の心磁計測においては、これまで述べてきたように、測定結果を磁場成分の経時的変化波形、任意の時刻での磁場強度の等しい点を結ぶ等磁場線図により表示してきた。また、接線成分を解析して、任意時刻での電流源の位置、大きさ、方向をベクトルアローマップとして表現する方法も行われてきた。これらの方法は、各時刻における心臓の電気生理学的現象を捉えるのには、非常に有用であるが、心磁図による各疾患毎の特徴を検討する場合、あるいは症例同士を比較する場合など、ある一定時間内における総合的な情報を1つの図として表示し、瞬時にその特徴が理解可能な方法も必要であると考えられた。

一方、体表面心電図(Body Surface Potential Mapping: BSPM)は、体表面の多数の誘導点から心電図を記録し、その情報をもとに心電情報を解析してさまざまな疾患の診断に有用とされている。BSPMではこれまで、その膨大な心電情報を一枚の電位図に凝縮して表示する方法として、等時線図(Isochrone map)や等積分図(Isointegral map)が考案され、その有用性が検討されてきた。

現在よく用いられている等時線図には心室興奮時間(VAT: Ventricular activation time)等時線図がある。これは、1944年にWilsonら[100]により初めて記載され、臨床的にはSokolowとLyonらの診断基準を初めとして、古くから心室肥大の判定に用いられてきた[101]。

等積分図は、各誘導点毎に、ある一定区間内(P, QRS, ST-T, QRSTなど)の電位の時間積分値、すなわち心電図波形と基線

とに囲まれた面積を求め、この体表面上の分布を等積分値線 (isointegral line) として描き、表現したものである [102]。等積分図により、その区間の電位の増減の評価が可能であり、データ圧縮の方法としても有用性が注目されている。

現在 QRST 区間を積分した値から作成された電位図 (QRST isointegral map) は、危険な心室性不整脈を予知する手段としての応用が提唱されている他、心筋梗塞の部位診断と大きさの診断、特に心室内伝導障害を合併した心筋梗塞の存在とその大きさの診断 [103][104]、運動負荷試験における狭心症の診断、心室肥大の病態診断 [113]、WPW 症候群の副伝導路部位診断、心室期外収縮の発生部位との電気生理学的関連などの検討がなされている。

また、J 点の開始点から T 波の終末までの ST-T 部分を時間積分する方法は、Montague ら [105][106] によって初めて有用性が報告された。ST-T 積分値の計測は、ST 部を従来の等電位図で解析するのに比べ、time alignment を行う必要がなく、ノイズの混入にも強いとされ、特に心筋の再分極異常の有無の診断、およびその解剖学的部位の推定に用いられた [107]。臨床応用としては、心筋梗塞のない虚血性心疾患 [108][109]、陳旧性心筋梗塞患者の運動負荷前後の評価 [110]、QT 延長症候群 [111]、心肥大における二次性 ST-T 変化の診断 [112] などに用いられている。

体表面心電計測によって得られた等電位線図では、心臓内の電流源を 1 つのダイポールと仮定しておく、ダイポールの直上ではなくダイポールをはさんで離れた位置に陽極のピークと陰極のピークが存在する図形になる。更に、ダイポールの位置が変わらず方向が変化すると、陽極および陰極のピーク位置が変化してしまい、電位を積分する際に電流源と積分値のピークとの一致がみられない。一方、心磁の接線成分においては、電流源の位置と磁気強度分布が一致するため、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等積分図を作成すると、理論的に電流の方向が変化しても、その電流が多く流れた箇所と積分値分布が一致することになる。つまり、接線成分心磁の等積分図においては、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。

虚血性心疾患などによって心筋に傷害があり、局所心筋における電流ダイポールの方向がランダムになると、これにより発生する磁場はお互いに相殺されて小さくなる。図4-1~4-3に、近接するダイポールの方向や距離によって、作られる磁場の強度が異なってくる現象をシミュレーションした。図はいずれも、センサから10cmの距離に、図右上方向に向かう、 $1\mu\text{Am}$ の大きさの3つの電流源(ダイポール)を想定し、その集中度、指向性を変えて検出される磁気強度をみた。図4-1は、集中度の高いダイポールを0度、45度、90度の角度で分散させて、センサで検出される磁気強度と磁気パターンを示す。図4-2は、図4-1よりも集中度の低い、図4-3は図4-2よりも更に集中度の低いダイポールを同様の角度で分散させたものである。いずれの図においても、アローの方向は磁場ベクトルを90度回転させた電流の方向であり、図に示した磁気強度(pT/m)は検出される最大値である。これによると、ダイポールの方向が一定でかつ集中しているほど、磁気強度が大きくなり、方向がばらばらで分散しているほど、磁気強度は小さくなった。したがって、ある一定区間、特に個々の心筋が興奮からさめる過程をあらわす再分極相(ST-T)における積分値は、心筋傷害のある場合小さくなることが予想される。また、複数のダイポールの存在は、等積分図上、複数の積分値のピークとして表現されると考えられる。

第2節 健常者における等積分図

1) 目的

64チャンネルSQUIDシステムを用いて、健常者の心磁測定を行い、等積分図を作成する。ここではまず、前胸部からの測定のみを対象とした。

2) 対象と方法

対象は、心血管疾患の既往なく、標準12誘導心電図や身体所見上異常の認められない25名の成人（男性24名、女性1名）。年齢は、21～44歳（平均 30.4 ± 5.80 歳）。身長 171.4 ± 4.8 cm、体重 68.16 ± 9.93 kg、Body Mass Index (BMI)は、 23.17 ± 3.10 kg/m²であった。

筑波大学附属病院内に設置された64チャンネルSQUIDシステムを用いて心磁を計測した。測定手技の詳細は、第3章第2節で述べたものと同様である。30秒間の計測後、得られたデータ加算平均し、導出した接線成分から等積分図を作成した。64の各測定点毎に同時測定第II誘導心電図上QRS波の時間帯、ST-T波の時間帯における時間積分値、すなわち各時間帯におけるそれぞれの心磁波形と基線とに囲まれた面積を求め、同じ積分値を示す点を結んで等積分図を作成した（図4-4、4-5）。

3) 結果

全例で心磁計測可能であり、等積分図を作成できた。図4-6に典型的な一例を示す。

全例におけるQRS、ST-Tの時間帯の等積分図（以降 \int QRS図、 \int ST-T図と略す）とも、左下方楕円の形を示した。左室

に相当する部位に最大値をもち、その周囲にほぼ均等な等積分値線を描いた。

∫QRS 図、∫ST-T 図における積分値の最大値（以降（∫QRS）max、（∫ST-T）max と略す）は、図 4-7 に示した如く近接した測定点でみられたが、（∫ST-T）max を示す測定点の方が（∫QRS）max を示す測定点よりも右方に存在する例が多く認められた（図 4-8）。

（∫QRS）max の平均は、 $15963.86 \pm 7763.24 \text{pTms/cm}$ 、
（∫ST-T）max の平均は、 $22456.94 \pm 9620.30 \text{pTms/cm}$
と（∫ST-T）max が高値を示し、その比（∫ST-T）max/（∫QRSmax）は 1.49 ± 0.37 であった。

∫QRS 図、∫ST-T 図とも、複数のピークを示す例や左下方楕円以外の形状（例えば逆の右下方楕円など）を示す例は、1 例もなかった。

4) 考察

健常者接線成分心磁の QRS, ST-T の時間帯における等積分図を考案、作成し、検討した。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 ∫QRS 図、∫ST-T 図とも類似した左下方楕円となり、その周囲にほぼ均等な広がりをもった等積分値線を描いた。

∫QRS 図、∫ST-T 図とも最大値を示す部位はほぼ近接していたが、全く同一の測定点であったのは 4 例のみであった。これは、QRS は刺激伝導系を介して心筋が興奮していく、つまり脱分極していく過程、ST-T は個々の心筋が興奮からさめる、すなわち再分極していく過程という全く異なった電気生理学的現象を捉えているためであると考えられる。特に、∫QRS 図では刺激伝導系の興奮伝播過程の影響が強く画像化されていると考えられる。これは、脚ブロックを伴った症例におけるベクトルアローマップおよび等積分図をみると明確である。次にその一例を呈示する。

図 4-9 は、心房中隔欠損症で手術目的に当院に入院した 49 歳女性の QRS、ST-T の時間帯におけるベクトルアローマップ、図 4-10 は同症例の等積分図である。心電図では、不完全右脚ブロックを示し、V1、V2 で陰性 T 波を示した。心臓カテーテル検査では、肺体血流比 (Q_p/Q_s) = 2.28 であった。心房中隔欠損は、心臓超音波検査上約 20mm の二次孔欠損型であった。この症例に対し手術前に心磁を計測した。QRS の時間帯のベクトルアローマップでは、QRS の後半で、左室ベクトルに右脚ブロックによって遅延した右向きベクトルが重なり、QRS の最後まで持続した。ST-T の時間帯のベクトルアローマップでは、アローは終始左～左下方を向き、正常パターンを示した。これらを反映して、 \int QRS 図では遅延した右向きベクトルの影響による右下方楕円を呈する図が再構成された。一方、 \int ST-T 図は、左下方楕円の正常パターンを呈していた。

健常者等積分図では、積分値の最大値に関して全例において (\int ST-T) $_{max}$ の方が (\int QRS) $_{max}$ よりも高値を示した。磁場強度は周知のごとく、距離の二乗に反比例する。図 4-11 に SQUID システムにおけるセンサからの距離と検出される磁場強度の関係を示した。実際の心磁測定では、センサを擁したデュワの底面から体表面までの距離はおおよそ 1cm と一定であるが、症例によって皮下脂肪層の厚さや骨格が異なるので、体表面から心臓までの距離は一定にはできない。従って、検出される磁場の大きさ、更には (\int QRS) $_{max}$ や (\int ST-T) $_{max}$ も数値のばらつきは大きいため、単純に数値から症例同士を比較するには無理がある。そこで、(\int ST-T) $_{max}$ と (\int QRS) $_{max}$ の比を検討した。健常例では、(\int ST-T) $_{max}$ / (\int QRS) $_{max}$ = 1.49 ± 0.37 と (\int ST-T) $_{max}$ の方が (\int QRS) $_{max}$ よりも全ての例で 1.1 倍以上高値であった。これは、再分極相では、電流ダイポールの方向が左下向きに揃っていてもばらつきが少なく、検出される磁場強度が大きくなるものと考えられた。再分極相は、個々の心筋が興奮からさめる

過程であるので、虚血などにより傷害のある心筋が存在すれば、電流ダイポールの方向にばらつきが生じ、その結果発生する磁場強度の減弱や、マルチダイポールの出現などといった再分極異常として心磁により検出されることが予想される。以上のように、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る。

第3節 小括

心磁図による各疾患毎の特徴の検討や症例同志の比較などに用いるため、ある一定時間内において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考案した。

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。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∫QRS図, ∫ST-T図とも類似した左下方楕円となり、周囲にほぼ均等な広がりをもった等積分値線を描いた。また、 $(\int \text{ST-T})_{\max}$ の方が $(\int \text{QRS})_{\max}$ よりも高値を示し、その両者の比は、 $(\int \text{ST-T})_{\max} / (\int \text{QRS})_{\max} = 1.49 \pm 0.37$ と $(\int \text{ST-T})_{\max}$ の方が、 $(\int \text{QRS})_{\max}$ よりもすべての例で1.1倍以上高値であった。

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情報が含まれていると考えられる。

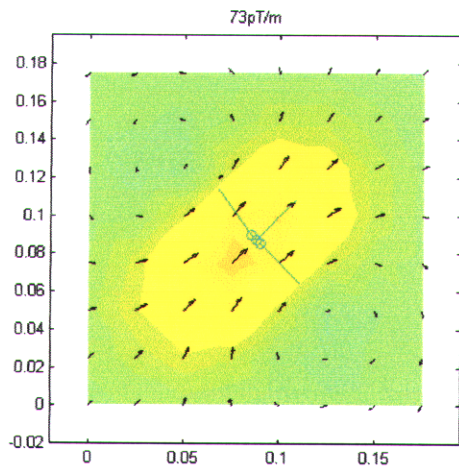
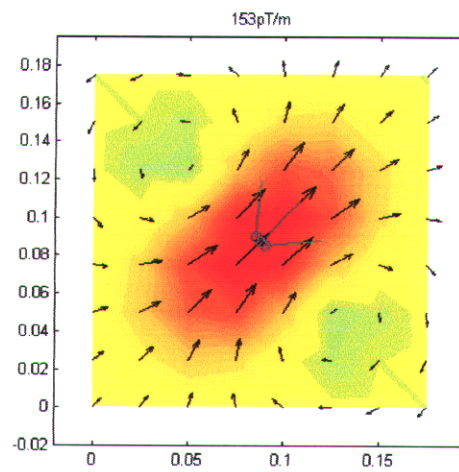
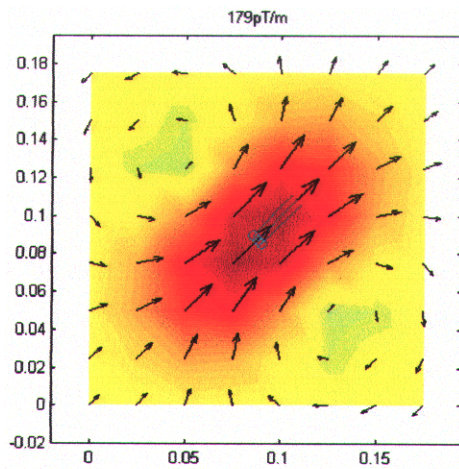


図 4-1 近接するダイポールの集中度、指向性による
磁場強度の違い-1

ダイポールの向きを上から順に 0 度、45 度、90 度の角度で分散させた。各図上の値 (pT/m) は最大磁場強度を示す。図の色調は、磁場強度の大きい順に暗赤色～赤色～黄色～黄緑色となっている。

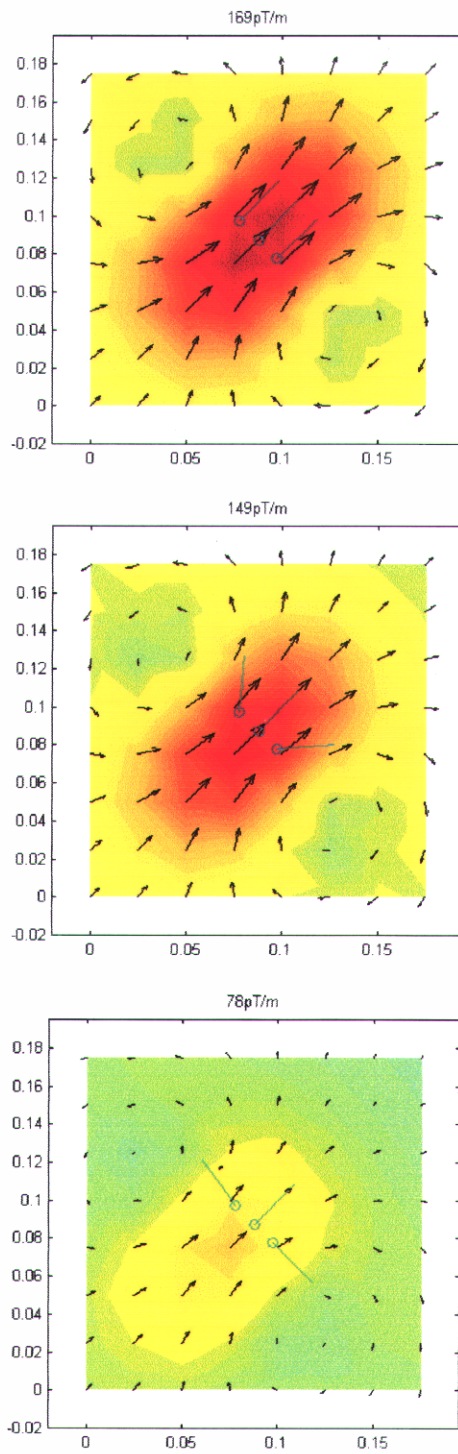


図 4-2 近接するダイポールの集中度、指向性による
磁場強度の違い-2

図 4-1 よりも集中度の低い3つのダイポール

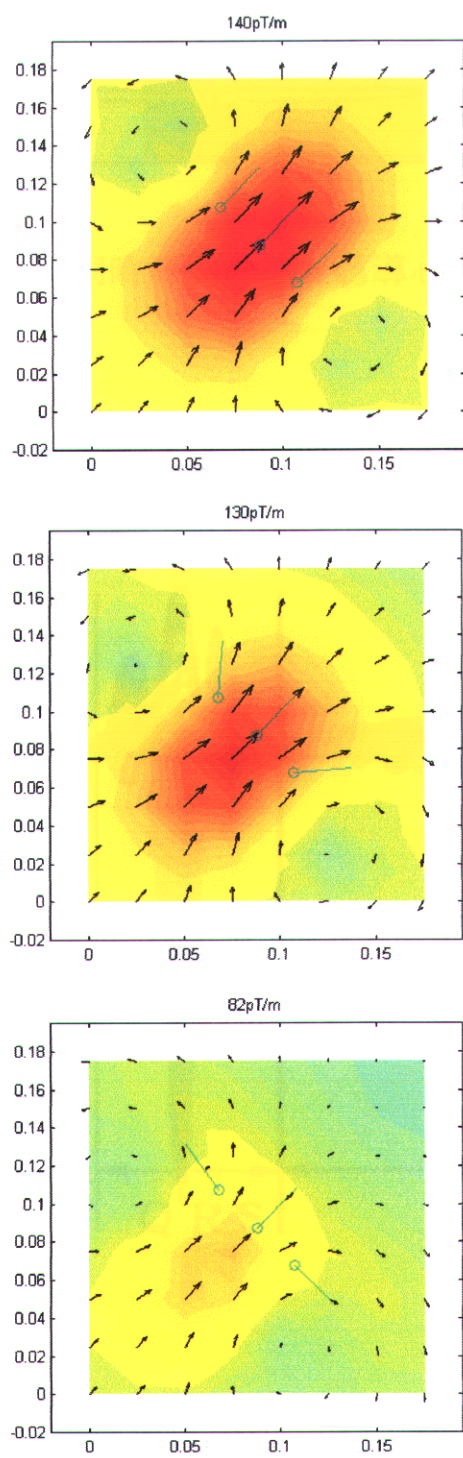


図 4-3 近接するダイポールの集中度、指向性による
磁場強度の違い-3

図 4-2 よりも更に集中度の低い 3 つのダイポール

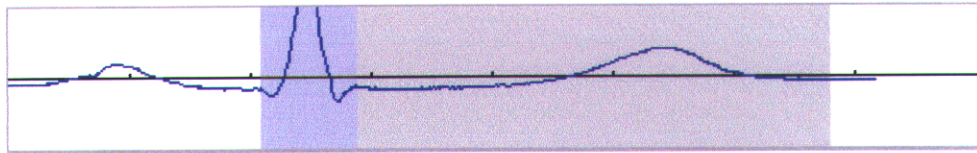


図4-4 同時計測の第Ⅻ誘導心電図と積分区分

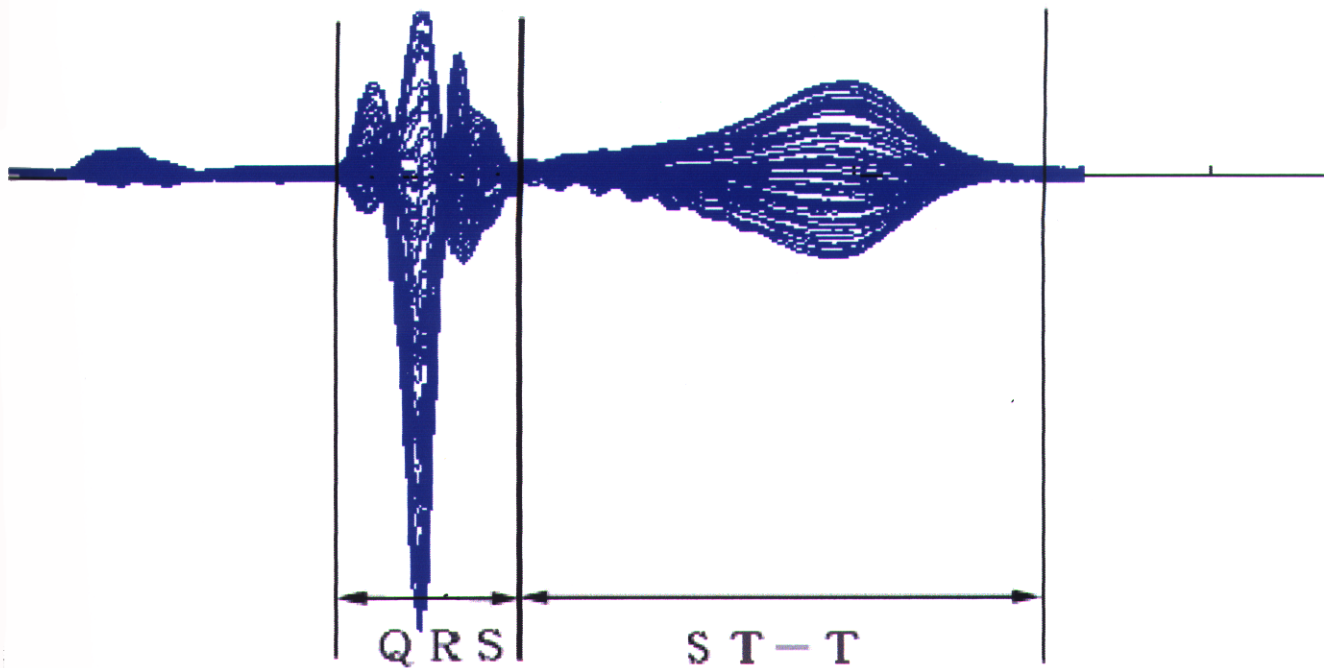


図4-5 心磁波形と積分区分

図は、64チャンネルの加算平均後の波形を同時に表示したものである。QRSの時間帯、ST-Tの時間帯におけるそれぞれの波形と基線に囲まれた面積を求め、積分値とした。

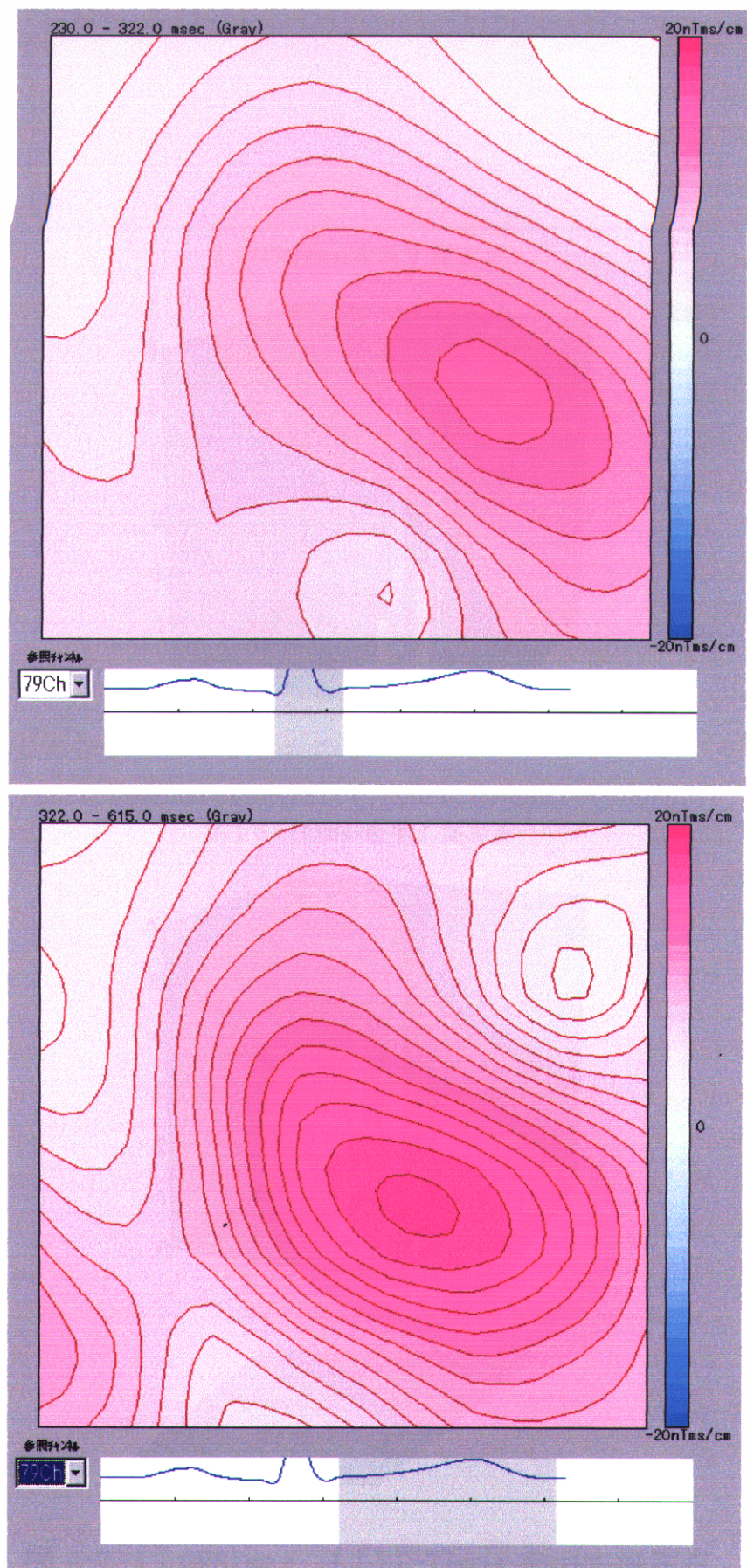
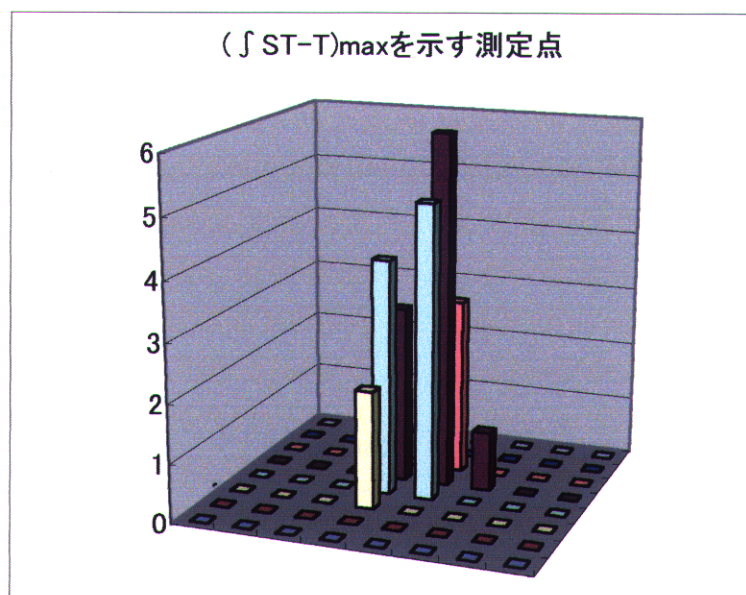
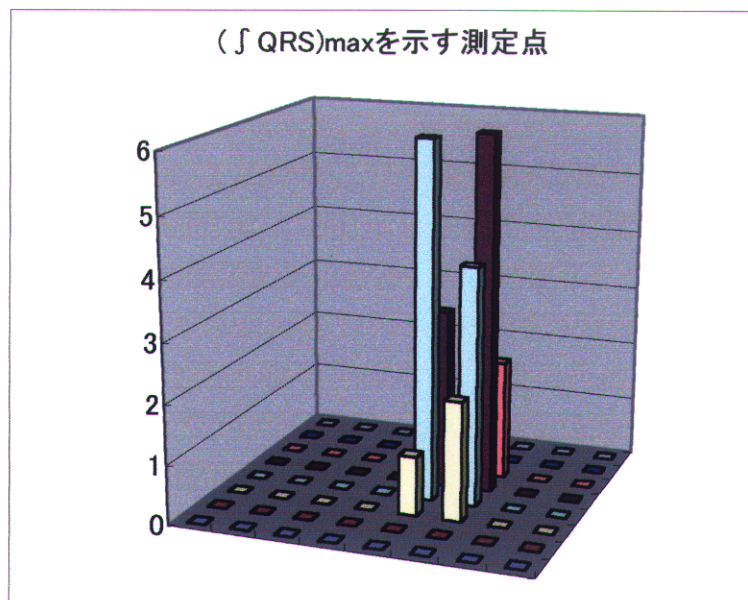


図4-6 健常者等積分図の一例
 上図：QRSの時間帯の等積分図
 下図：ST-Tの時間帯の等積分図



1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64
65	66	67	68				

図 4-7 (∫QRS)max、(∫ST-T)max を示す測定点
 (∫QRS)max は No. 30、37 チャンネルで最多の 6 例、
 (∫ST-T)max は No. 29 チャンネルで最多の 6 例であ
 った。

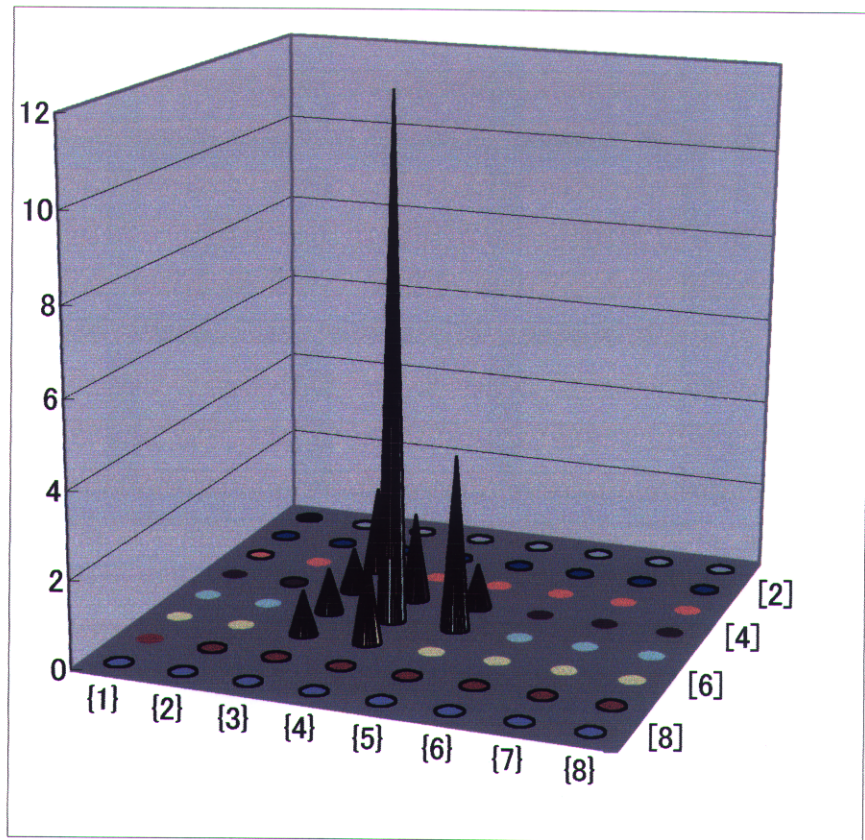


図 4-8 $(\int \text{QRS})_{\text{max}}$ 、 $(\int \text{ST-T})_{\text{max}}$ を示す測定点のずれ
 全症例で $(\int \text{QRS})_{\text{max}}$ を示した測定点を
 ($\{5\}[5]$) とし、 $(\int \text{ST-T})_{\text{max}}$ を示した測定点が
 この点からどれだけ離れていたかを表す図。
 $(\int \text{QRS})_{\text{max}}$ から $(-1, 0)$ ずれた点で $(\int \text{ST-T})_{\text{max}}$
 を示した例が最多の 11 例であった。

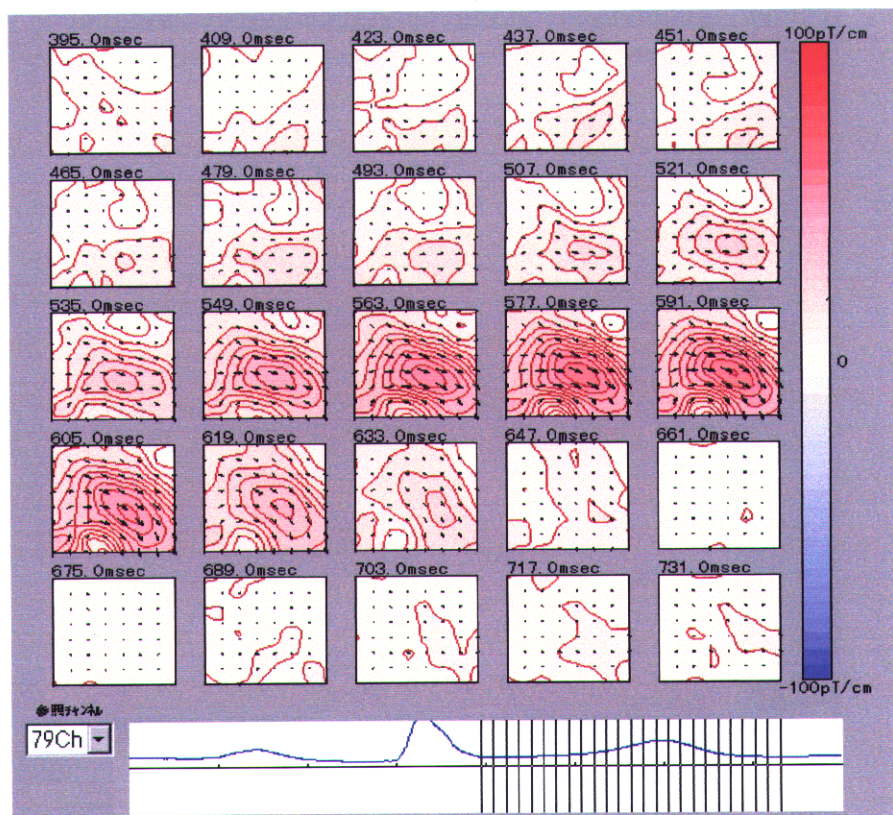
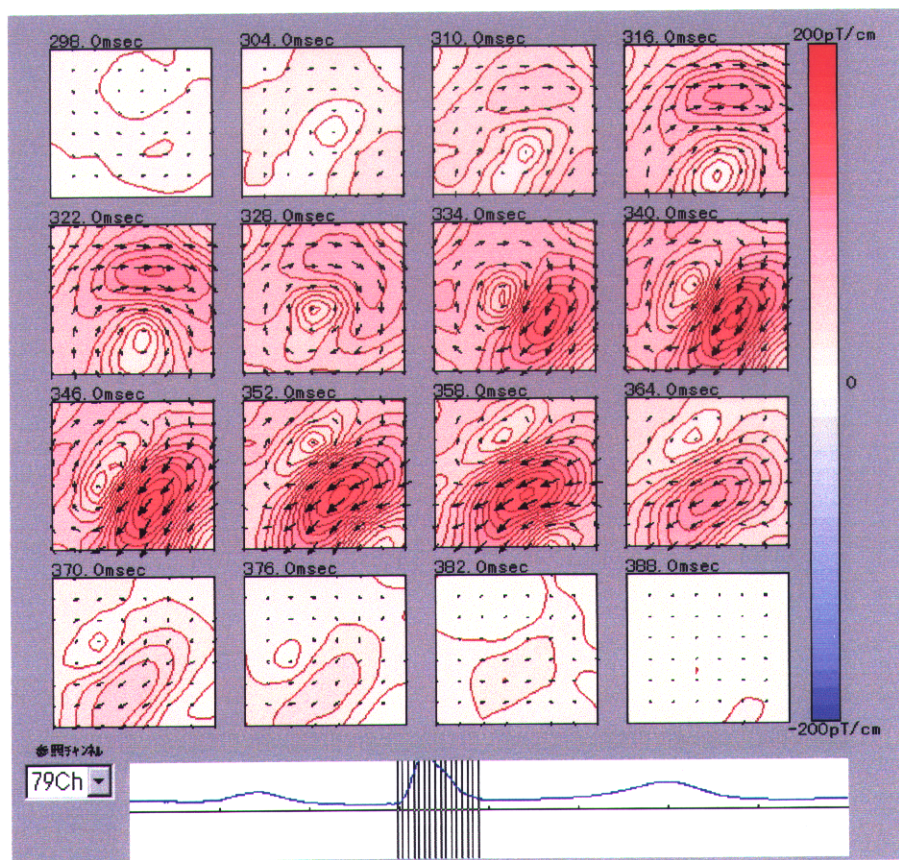


図4-9 不完全右脚ブロックを呈した心房中隔欠損症の一例
 上図：QRSの時間帯のベクトルアローマップ
 下図：ST-Tの時間帯のベクトルアローマップ

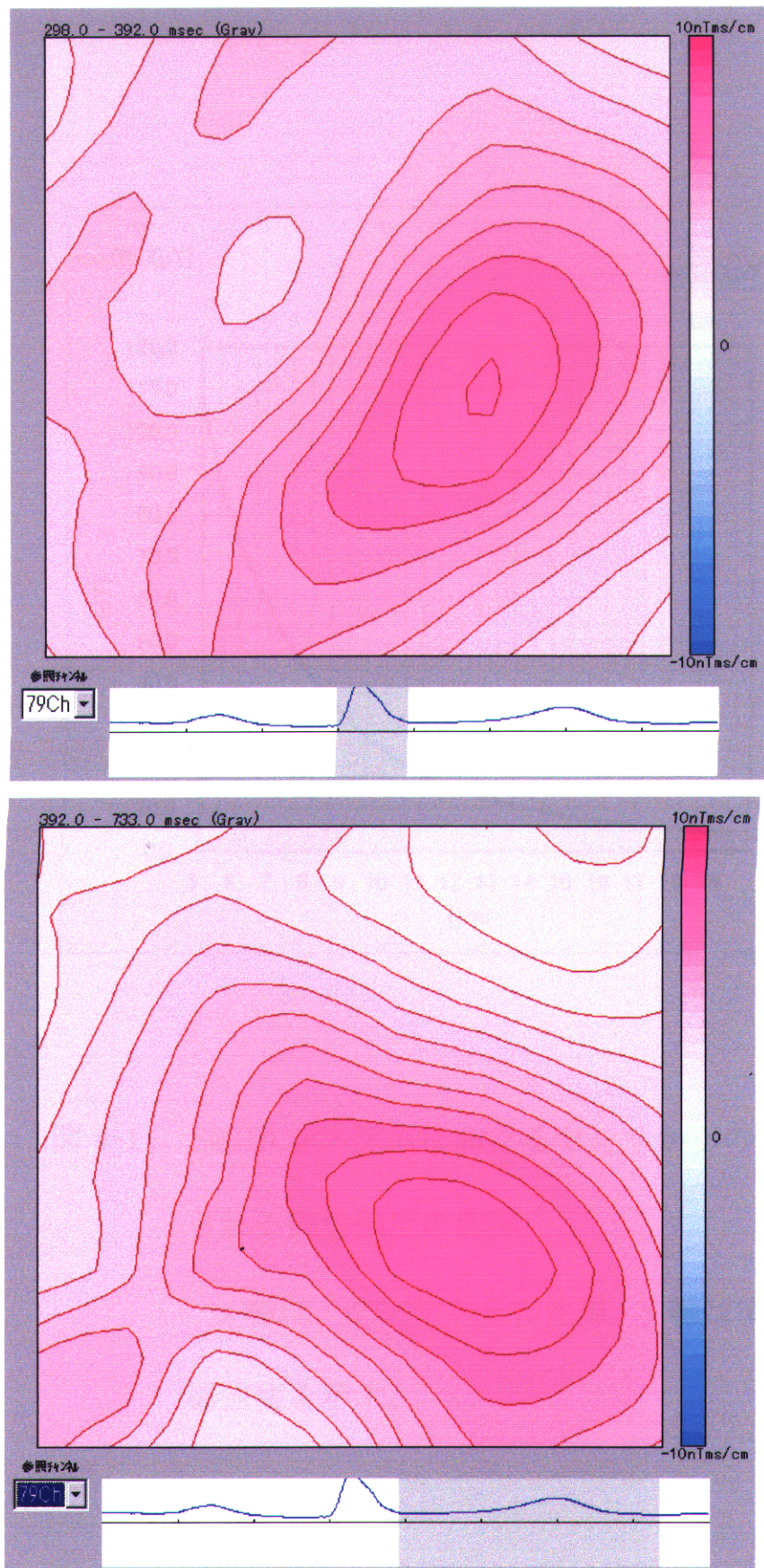


図4-10 不完全右脚ブロックを呈した心房中隔欠損症の一例
 上図：QRSの時間帯の等積分図
 下図：ST-Tの時間帯の等積分図

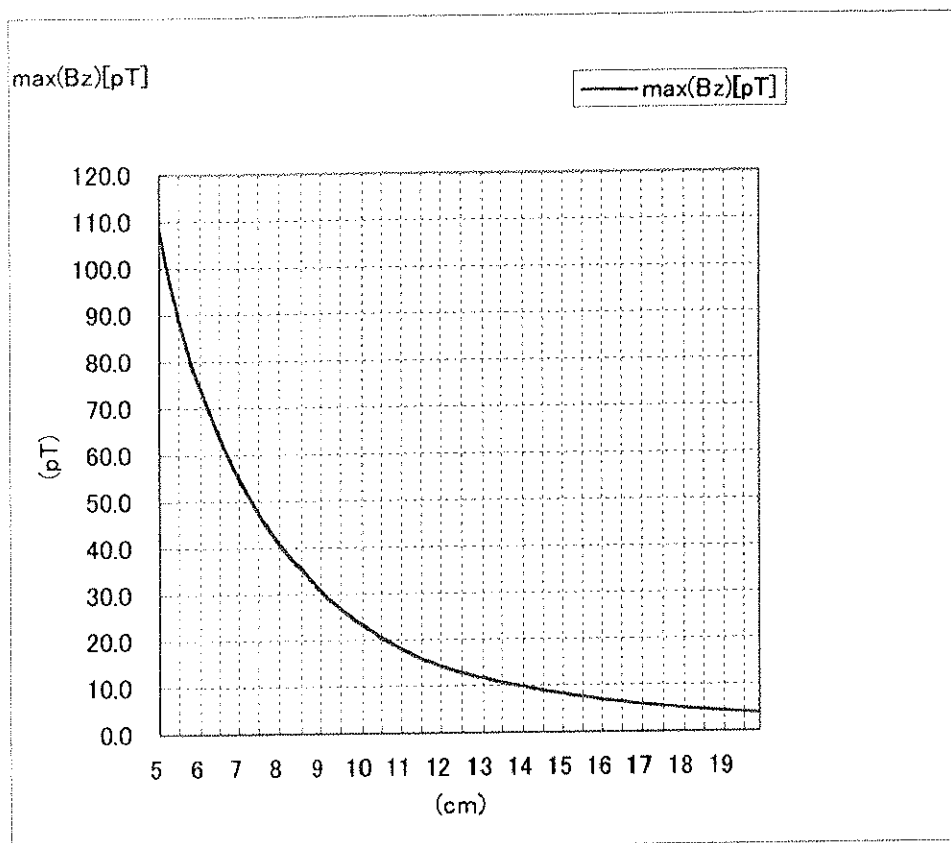


図 4-11 SQUID システムにおけるセンサからの距離と検出される磁場強度の関係

x 軸は、センサからの距離、y 軸は検出される磁場強度を示す。