

第2章 等磁場線図とベクトルアローマップ —接線成分による構成法と法線成分による構成法 の比較—

第1節 序論

本研究に使用した心磁計は、第1章第2節-3)に示した信号処理回路を経てデータが得られる。最初に得られる心磁波形は図2-1に示すような波形である。磁気シールドルーム内の計測にもかかわらず、病院内というさまざまな電磁ノイズが飛び交う環境下では、完全にノイズを消し去ることはできない。このため、我々は、30秒から2分間の計測で得られた波形を加算平均している。(図2-2)

これまでも、波形を解析して正常例[6][34][60]、心房心室負荷症例[34][35][84]～[86]、心室再分極異常症例[36][87][88]、心筋梗塞症例[61][89]、WPW症候群症例[43]、His-Purkinje系[48][49][90]～[92]、心室遅延電流[93]などに関する研究がなされている。しかし、波形のみから心臓のダイナミックな脱分極、再分極の過程を理解することは困難である。そこで、二次元平面上に法線成分磁場の等しい点を結んで作成した等磁場線図や、磁場の湧き出しと吸い込みから逆問題を解き、その中心に心磁場源を推定することによってdipoleの位置、方向、大きさを求めるといった方法が用いられてきた。

一方、第1章で述べたように、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マップ（以後単にベクトルアローマップと呼ぶ）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° 回転させて電流の方向とした。

接線成分ベクトルアローマップを構成するために、以前我々のグループでは、32 チャンネル SQUID システムを用いて直接心磁の接線成分を計測していた。このシステムでは、 x 、 y 方向の心磁を直接計測可能なように、それぞれの測定点で 2 方向に SQUID センサが配列されていた。しかし第 1 章第 2 節に述べたような利点があるため、本研究では 64 チャンネル SQUID システムを用いて心磁の法線成分を測定し、 x 、 y 方向にそれぞれ空間微分することによって導出した計算上の接線成分からベクトルアローマップを作成している。この章では、ベクトルアローマップに関し、接線成分による構成法と法線成分による構成法で得られた結果を検討するため、シミュレーションと実際の心磁測定、更に従来のダイポール推定法とを比較する。

第 2 節 シミュレーションによる比較

1) 目的

同一の電流ダイポールがつくる磁場の接線成分 (B_x, B_y) を直接測定して構成したベクトルアローマップと、磁場の法線成分 (B_z) を接線方向に空間微分することにより得られた計算上の接線成分 ($\partial B_z / \partial x, \partial B_z / \partial y$) から構成したベクトルアローマップをシミュレーションによって比較する。

2) 方法

二次元平面上に、右上方向（x 軸と 45 度の角度をなす）に向かう $1\mu\text{Am}$ のダイポールを想定した。深さは、センサより 10cm の距離で、実際の心磁測定におけるセンサと心臓との距離に近似した。このダイポールがつくる磁場の接線成分から構成したベクトル場と、法線成分を空間微分して構成したアローマップをシミュレーションし、図を作成した。

3) 結果と考察

図 2-3 に結果を示す。図中のアローの方向は、磁場の方向を 90 度反時計回りに回転させたものである。図の中央に存在するダイポール直上のアローは、いずれの図でもダイポールと同じ方向を示し、同部位で最大ベクトルを示した。アローの空間的分布は、法線成分から再構成した図の方がやや狭くなっているが、その特性はほぼ等しいと考えられた。さらに図 2-4 は、心筋の興奮による磁場の発生を、無限平面導体中の電流ダイポールでモデル化し、その時の導体の外に生じる磁場を表わす式 (Sarvas の式) を用いて、磁場の接線成分 (B_x , B_y) と法線成分 B_z の空間微分 ($\partial B_z / \partial x$, $\partial B_z / \partial y$) の空間分布を比較したものである。図では、電流ダイポールは座標原点の直下 5cm の深さにあり、xy 平面に平行な面内で x 軸から 45 度の方向を向いている時の x 軸上のそれぞれの磁場成分の磁場分布を、それぞれの最大値で規格化して表示してある。この図から、磁場の接線成分 B_x , B_y は、それぞれ $-\partial B_z / \partial x$, $-\partial B_z / \partial y$ と定性的に等しく、ともに直下の信号源の情報を大きく反映する性質を持つことが分かる。

第 3 節 実際の心磁計測による比較

1) 目的

二次元平面上へのダイポールの視覚化という観点で、32チャンネル心磁計で直接計測された接線成分心磁から構成したベクトルアローマップと、64チャンネル心磁計で計測された法線成分から接線方向に空間微分することにより導出した接線成分心磁で構成したベクトルアローマップ、さらに従来のダイポール推定法の3者の結果を比較検討する。

1) 対象と方法

対象：身体所見上、標準12誘導心電図で異常なく、心疾患の既往もない健常成人男性5名。

方法

同時測定第II誘導心電図上、R波のピークを示す点において各方法を比較した。

①32チャンネル心磁計測システム

このシステムでは、16箇所の各測定点はSQUIDセンサが2個ずつ、それぞれが接線成分の B_x 成分、 B_y 成分を独立して計測できるように配列されている。法線成分は測定できない。被検者を、時計やバックルなどの金属をはずして磁気シールドルーム内に入れ、中に備え付けの非磁性体ベッド上に仰臥位にした。測定範囲は図2-5に示す。レーザーポインターなどを使って剣状突起をメルクマールに位置合わせを行った。SQUIDセンサを擁したデュワはシールドルームに固定してあるため、ベッドの位置を移動させて適切な位置に合わせた。デュワと対象の前胸部は接することなく可能な限り接近させた。1回につき16点のみ測定可能なので、ベッドを平行移動させて4回測定し、64点のデータを得た。1回の測定時間は30秒とした。モニターとして、心

電図の第Ⅱ誘導を同時に測定した。心磁は、心電図のR波に同期して加算平均を行った。得られた接線成分 B_x, B_y を合成し、 $B_{xy} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$ から接線成分等磁場線図およびベクトルアローマップを作成した。ベクトルアローマップにおけるアローの方向は、理解しやすいように Biot-Savart の法則にしたがって反時計回りに 90° 回転させて電流の方向とした[81]。

②64チャンネル心磁計測システム

このシステムでは、64ヶ所の各測定点には、SQUID センサが1つずつ法線成分 (B_z) が計測できるように配列されている。被検者を①と同様に磁気シールドルーム内のベッドに仰臥位にし、位置合わせの後30秒間測定を行った。測定範囲は、32チャンネル心磁計測システムと同様である。同時測定の第Ⅱ誘導心電図のR波のピークをトリガーとして、得られた波形を加算平均した。 B_z 成分から空間微分により接線成分を導出 ($\partial B_z / \partial x, \partial B_z / \partial y$) [82][83] し、ベクトルアローマップを作成した。ベクトルアローマップにおけるアローの方向は、①と同様に反時計回りに 90° 回転させて電流の方向とした。

③従来のダイポール推定法

②で求めた64チャンネルの法線成分波形より、法線成分等磁場線図を作成し、磁場の湧き出しと吸い込みからダイポールを推定する従来行われてきた方法を行った。

以上3つの方法で求めたベクトルアローマップ、推定ダイポールを比較検討した。ただし、①と②③の心磁測定は、いずれも安静時の同一条件であるが、測定日時は異なる。

1) 結果

5例全例で心磁計測、ベクトルアローマップの作成、およびダイポールの推定が可能であり、同様の測定結果であった。1例を図2-6に示す。図はいずれも同時測定第Ⅱ誘導心

電図の R 波ピークにおけるものであり、アローは各測定点における電流の方向と大きさを表す。32 チャンネルシステムで接線成分を直接計測して求めたベクトルアローマップ (図 2-6 上) では、ベクトルは左下方向 (左室心尖部方向) を向き、最大ベクトルは、左室心筋の部位に一致していた。一方、64 チャンネルシステムで計測された法線成分から導出した接線成分を再構成して求めたベクトルアローマップ (図 2-6 下) では、同様にベクトルは左下向きを示し、最大ベクトルもほぼ同様の位置であった。さらに、従来の推定法により求めた電流ダイポールも、前 2 者と同様の左下向きであった。

4) 考察

接線成分の直接計測から求めたベクトルアローマップと、法線成分から導出した計算上の接線成分を解析して作成したベクトルアローマップを比較すると、電流アローのパターンに質的な差はみられなかった。また、法線成分の等磁場線図から従来のダイポール推定法で導出したアローは、接線成分ベクトルアローマップに表現されている分散したダイポールを心臓全体として一つのダイポールとして示されており、そのアローの方向や位置は、その時間帯のおおまかな興奮伝搬の様子を表していると考えられた。

我々は、接線成分から等磁場線図およびベクトルアローマップを構成する際、前述したように Biot-Savart の法則にしたがって反時計回りに 90° 回転させて電流の方向としている。この推定法に関しては、神鳥ら [81] が改良型ハミングウィンドウ関数を利用して 2 次元の FFT (Fast Fourier Transform) を行うことにより再構成した 2 次元の電流分布と比較しているが、ほぼ差はないという結果が得られている。

直接計測の接線成分から構成したベクトルアローマップ

と法線成分から導出した計算上の接線成分を解析して構成したベクトルアローマップに関しては、宮下ら[83]も報告しているように、後者のアローマップにおけるアローの空間的分布が狭くなっており全く同一のものにはならなかったが、これはむしろ解像度がよくなったとみることができ、電気生理学的現象の表現に質的な差はないと考えられた。

以上より、二次元平面上へのダイポールの視覚化という観点では、我々の行った接線成分ベクトルアローマップの構成法は、従来のダイポール推定法よりも優れていた。また、接線成分を直接計測する 32 チャンネルの SQUID システムでは、各チャンネルに 2 つのセンサが配列されているため計測回路も 2 つになり、システムサイズとしては大きなものになった。64 点のデータを得るためには 4 回の測定が必要であるため測定に要する時間もかかり、更に時間的空間的解像度に優れるといった心磁計測の利点も十分生かされていなかった。一方、64 チャンネルシステムでは、各チャンネルには 1 つのセンサが配列されている。直接計測による結果と質的に差がないのであれば、同一のデータを得るのに必要なセンサと測定回路の数は半分になり、測定時間は 4 分の 1 になる。将来的な臨床への応用を考えれば、この点は大きなメリットであると思われる。

第 4 節 小括

二次元平面上へのダイポールの視覚化という観点で、32 チャンネル心磁計で直接計測された接線成分心磁から作成したベクトルアローマップと、64 チャンネル心磁計で計測された法線成分から空間微分により導出した接線成分心磁で作成したベクトルアローマップ、さらにその法線成分等磁場線図から施行した従来のダイポール推定法の 3 者の結

果を比較検討した。その結果、

- 1 接線成分ベクトルアローマップは、接線成分の直接計測からの構成法、法線成分の空間微分により計算上の接線成分を導出した構成法のいずれの方法によるものも心起電力を表現する上で質的な差はなかった。
- 2 従来のダイポール推定法では、接線成分ベクトルアローマップに表現されている分散したダイポールが心臓全体として一つのダイポールとして示されており、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、接線成分ベクトルアローマップの方が優れていた。

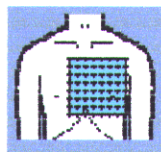


図 2-1 64 チャンネル SQUID システムによって前胸部から計測した法線成分の心磁波形(生データ)。外部の電磁ノイズの混入がみられる。図下の波形は、同時測定第Ⅱ誘導心電図である。

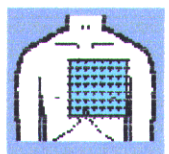
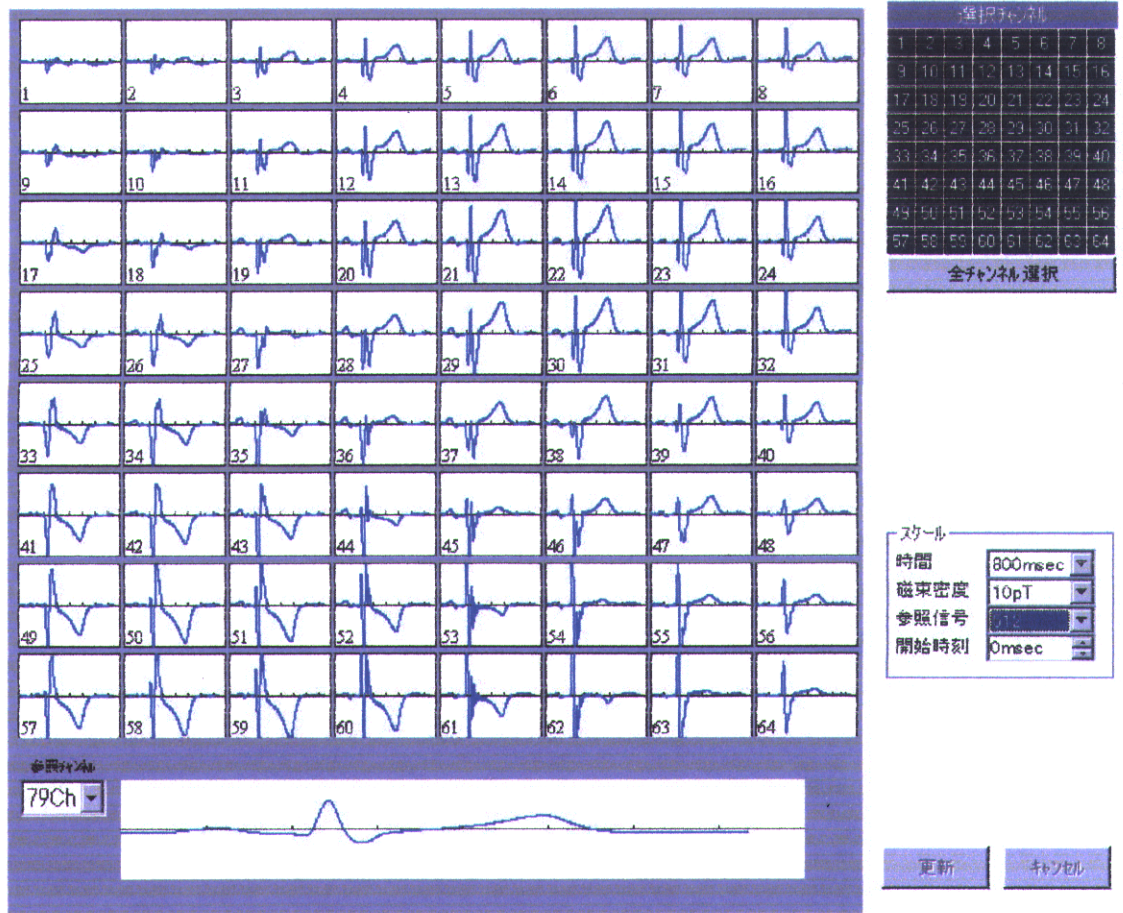
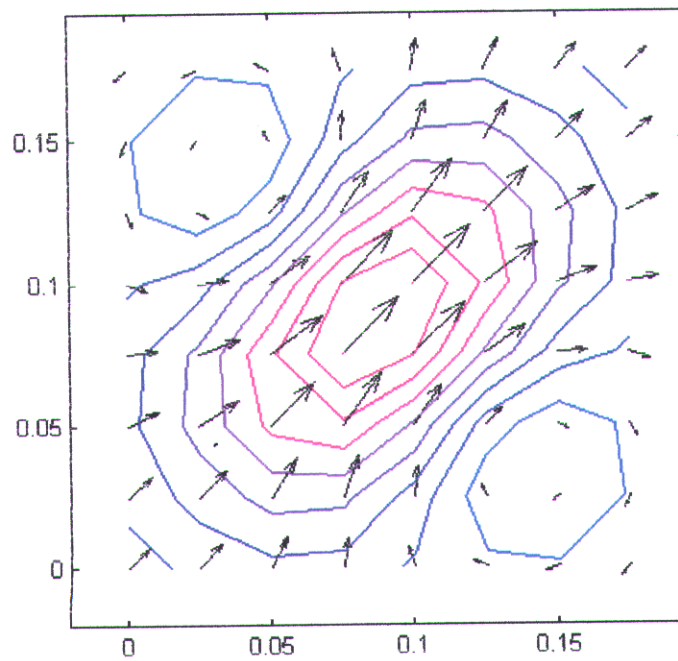
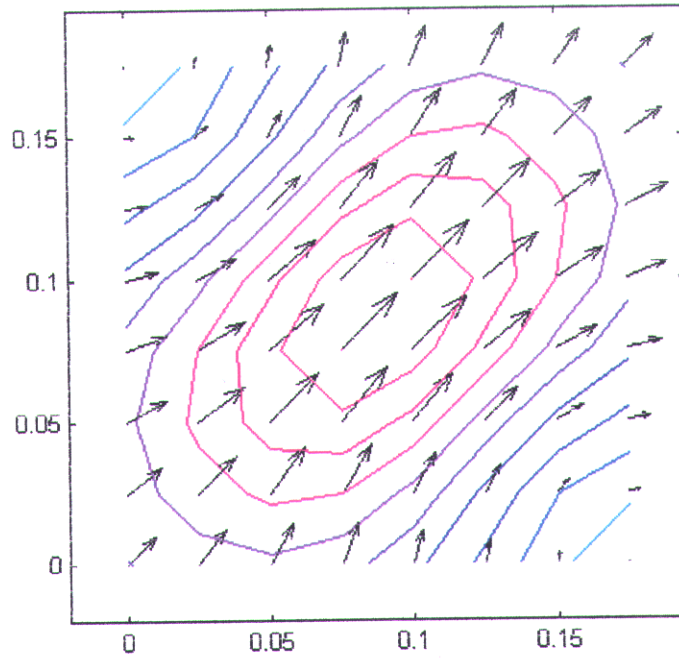


図 2-2 64 チャンネル SQUID システムによって前胸部から計測した法線成分の心磁波形(加算平均データ)。30 秒間の計測で得られた波形を同時計測第Ⅱ誘導心電図の R 波のピークをトリガーとして加算平均、基線補正した。



(図中の数字の単位:m)

図 2-3 シミュレーションによるベクトルアローマップの比較
 上図：直接計測した接線成分より構成したベクトルアローマップ
 下図：法線成分の空間微分から構成したベクトルアローマップ

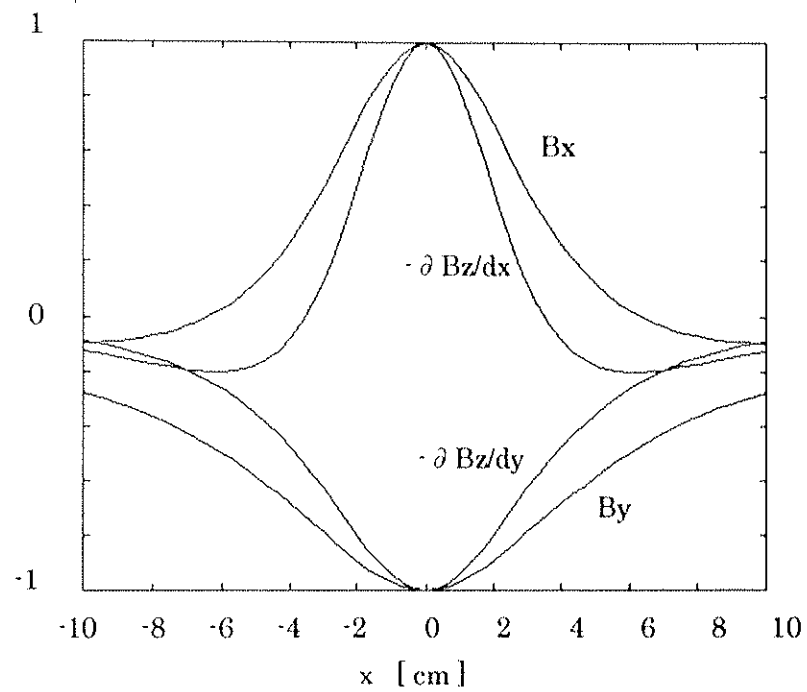


図 2-4 無限平面導体モデルにおける磁場成分

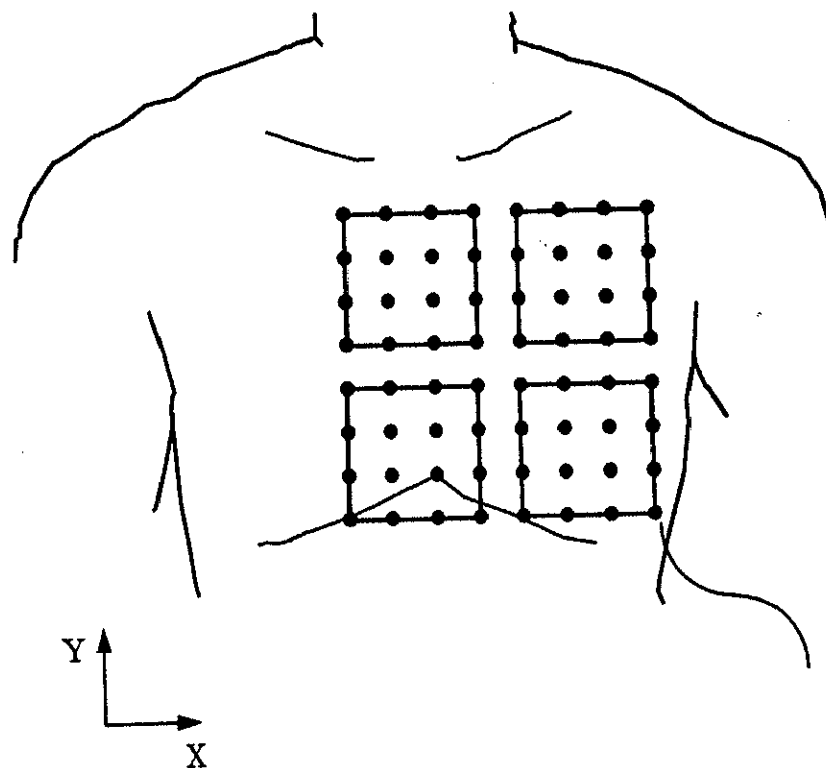


図 2-5 成人前胸部心磁測定範囲(32ch)

32チャンネルのシステムでは、16の測定点からなる正方形が1回で計測可能な範囲である。64点の測定には、4回位置を変えて測定する必要がある。

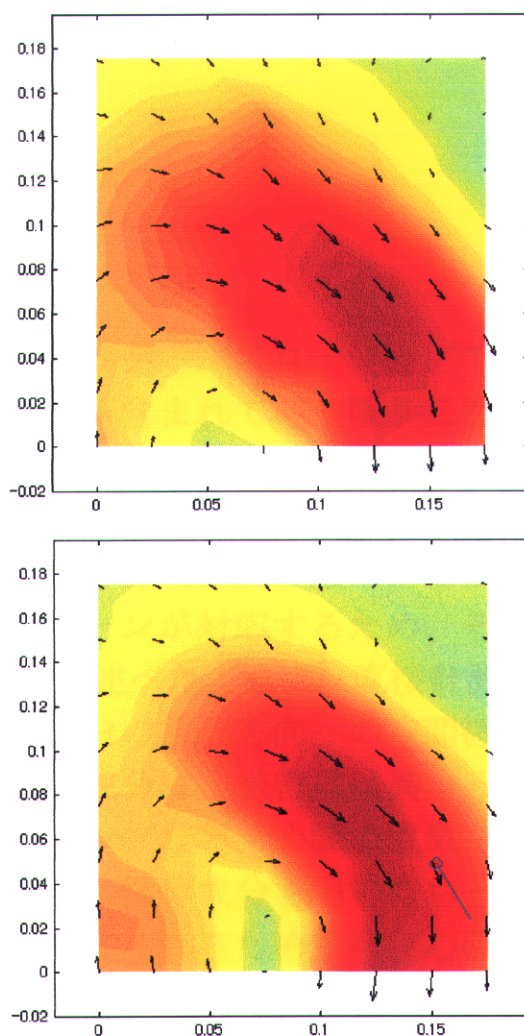


図 2-6 上図：32 チャンネルシステムで接線成分を直接測定して構成したベクトルアローマップ
 下図：64 チャンネルシステムで計測した法線成分から導出した接線成分から構成したベクトルアローマップおよび従来の磁場源推定により求めたダイポール（図右下、直線の方法が電流方向を示す）

両図とも、電流量の多い順に、暗赤色～赤色～黄色～黄緑色で表示されている。