

静止器
回転機 合同研究会資料

資料番号	SA-97-16 RM-97-75
------	----------------------

3次元空間に分布する物理量の等値面作成とその半透明表示

松田宏徳, Cingoski Vlatko, 金田和文, 山下英生 竹原 淳, 帯刀郁夫
(広 島 大 学) (中国電力)

1997年8月5日

社団法人 電 気 学 会

東京都千代田区五番町6-2

3次元空間に分布する物理量の等値面作成とその半透明表示

松田 宏徳*, Cingoski Vlatko, 金田 和文, 山下 英生
(広島大学)

竹原 淳, 帯刀 郁夫
(中国電力 (株) 技術研究センター)

Generation and Semitransparent representation of Isosurfaces
for 3-D distributed scalar variables

Hironori Matsuda Vlatko Cingoski Kazuhumi Kaneda Hideo Yamashita (Hiroshima University)

Jun Takehara Ikuo Tatewaki (Chugoku Electric Co.,Inc.)

In this paper, a new method for observation of distributed 3D scalar values for electromagnetic field analysis using semitransparent isosurface representation is presented. Each isosurface is constructed of large set of primitive triangular patches previously generated by means of MarchingCube algorithm. Due to its semitransparent representation, the proposed method enables display of several overlapped isosurfaces simultaneously with high visibility. The proposed visualization method also enables interactive movements of a viewpoint inside the entire visualization area, providing highly 3D physical variables even for inexperienced users.

キーワード: 等値面, マーチングキューブ, 半透明表示
keyword: isosurface, Marchingcube, semitransparent

1. はじめに

計算機性能の向上と数値解析技術の進歩により, 複雑で大規模な物理現象の解析をシミュレーションにより実行する機会が多くなってきている。その結果, 計算機からシミュレーション結果として出力される数値データも膨大な量になり, その現象を解析者に分かりやすく表示する可視化システムの重要性が指摘され, 種々の可視化法が提案されている[1].

3次元空間に分布するスカラー物理量の可視化法としては,

- (1) 物理量の大きさを色に対応付け, 3次元空間に設定した複数の平行又は格子状切断面上のスカラー量の分布を透視画像として表示する方法[2].
 - (2) 任意に指定した切断面と表示空間表面のスカラー量の分布を透視画像として表示する方法[2].
 - (3) ボリュームレンダリングによる密度分布表示法[3].
- などが一般的によく用いられている。(1), (2)は指定あるいは設定された切断面上の分布を観察するには非常に有効な方法であり, 詳しい観察が可能である。しかし切断面に隠された部分は観察できないため全体の分布を把握しにくい。また(3)の方法では空間全体に分布する物理量の状況を観察することができるが, 表示処理に時間がかかる問題点がある。そこで3次元空間全体のスカラー量の分布状況を観察する方法として, 本稿では複数の等物理量の面, すなわち等値面を高速に作成することにより解析領域

内部の物理量の分布の観察を容易にし, 直観的に理解できるような表示方法を提案する。また複数の面が重なる部分を分かりやすく表示するために, 作成した面を半透明表示する手法について提案する。

2. 等値面作成方法

物理量が分布する空間を図1に示すような格子状に分け, 六面体を構成する。その各頂点に物理量が割り当てられている場について, 任意の等物理量の面(等値面)を作成する手法としてMarchingCube法(M-C法)[4]がある。提案手法ではこの方法を用いて等値面の作成を行う。以下にこの手法について述べる。

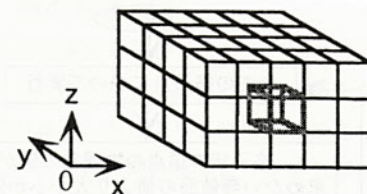


図1 観察空間の格子分割と六面体

この手法は等値面を多角形の面で近似し, その面を三角形面の集合として表現する手法である。この手法の利点は所望の物理量の値, すなわち図1の六面体の頂点の値が等値面の値に対して, 大か小の情報(図2に例を2つ示す)を辺の情報に変換するテーブルと, 辺の情報から等値面を

作成するために三角形面の頂点へ変換するテーブル（図3参照）をあらかじめ作成しておけば、それを読み取るだけで等値面を構成できるため、正確で高速な処理が保証される点である[5]。また、この面を構成する三角形面を作成する際、六面体ごとに処理が独立しているため、並列に処理することができる。図4にM-C法の処理手順を示す。

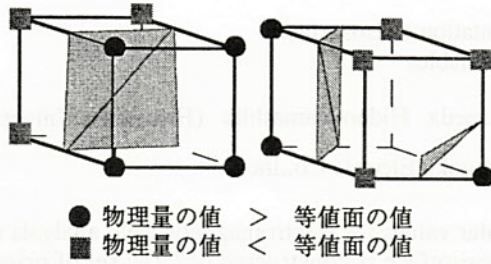


図2 頂点と等値面の関係

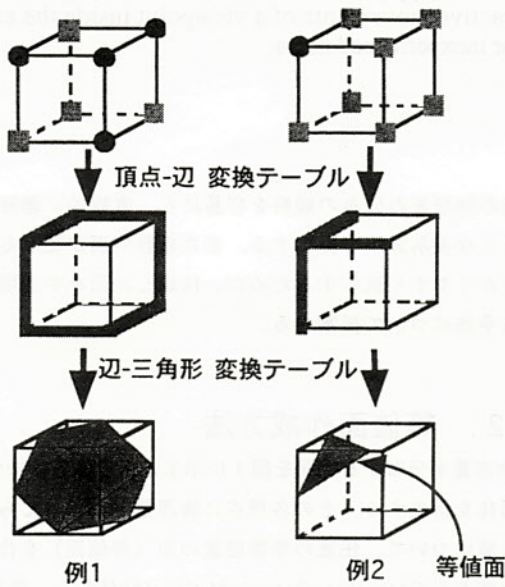


図3 変換テーブル

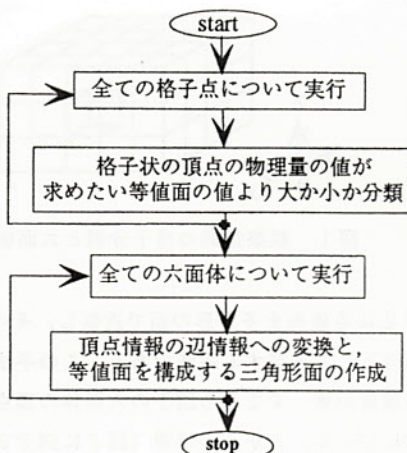


図4 M-C法のフローチャート

ここで三角形面の頂点の座標は、その頂点を含む辺の両端の値と等値面の値を線形補間することにより決定する。線形補間を行う理由は、有限要素解析結果から頂点の物理量を計算する際に、線形補間により求めるためである。またその他の理由として、処理が簡単で、高速な計算が行えるからである。

3. 3次元可視化表示

M-C法により作成した、三角形面により構成される等値面はグラフィックスエンジンによって画面に表示される。本章ではこの計算された三角形面から構成された等値面を高速表示するために必要な処理について述べる。その後、その面の表示色の決定法についての処理手順を述べる。

3-1 面の優先順位付け

本手法では構成された複数の等値面の相互関係をわかりやすく表示するために等値面を半透明表示する。複数の三角形面を半透明として重ねて、描写するとき、視線上の視点から遠い面より順に描写する。ここで半透明表示の本手法における定義を述べる。今、ある画素に三角形面Bを描く場合を考える。この等値面より後方にある複数の面の色を混合した色 $A(r,g,b)$ が、その画素に与えられているとする。その画素に等値面Bの色 $B(r,g,b)$ を重ねて描く。その時、その画素での色 $C(r,g,b)$ は次式で与えられる。

$$C(r,g,b) = \alpha \cdot B(r,g,b) + (1 - \alpha) \cdot A(r,g,b) \quad (1)$$

ここで α は等値面Bの透過率を、 r,g,b はそれぞれ赤、青、緑の三原色の成分を示している。

つまり、三角形面が重なった画素の色は、三角形面を描写する順序に依存し、順序が異なれば表示される色が異なる。そのため視点の位置から見た、全ての三角形面についての優先順位を決定する必要がある。一つの三角形面について、残りの全ての三角形面を対象に前後判定を行うとすれば大半の処理が無駄となる。つまり一つの三角形面が他の三角形面を隠す割合は全体の数%にも満たず、残りの大多数の三角形面とは無関係である。そこで優先順位付け処理を無駄なく効果的に、かつ高速に行うために、以下の手順によって優先順位付けを行う。

- ① 空間をz軸方向に層状に分割
- ② 層に含まれる三角形面の優先順位付け (3-1-2節)
 - ②-1 簡易前後判定
 - ②-2 MIKADOアルゴリズムを用いた前後判定
- ③ 各層間の優先順位付け (3-1-3節)

3-1-1 層構造を考慮した優先順位付け

M-C法で作成された三角形面は図1に示した格子状データから構成されるので、図5に示すようにz軸について層

状に分割した各層ごとに三角形面を格納する。優先順位付けは、その各層に含まれる三角形面についてのみ行えば効率的に処理できる(図6参照)。その後、各層に視点との位置関係により優先順位をつける。こうして全ての三角形面の優先順位を一意に決定することができる[6]。次節以降に処理方法の詳細について述べる。

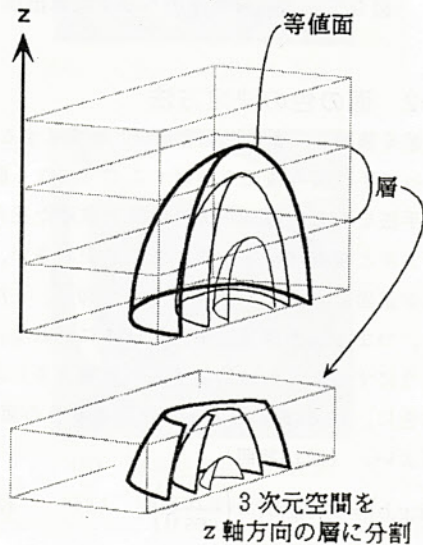


図5 等値面データの格納法

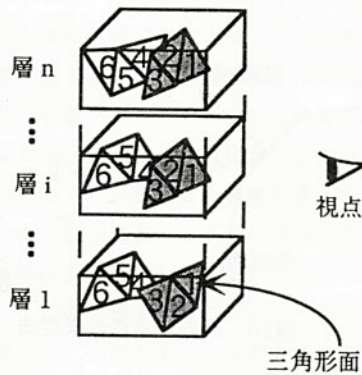


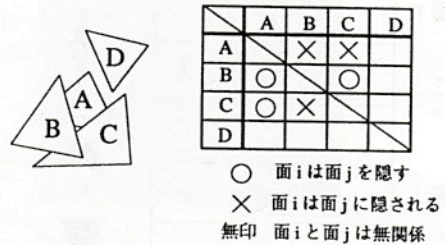
図6 層内の三角形面

3-1-2 層内の優先順位付け

まず層内の三角形面についての優先順位付けの方法について述べる(図6参照)。

高速処理を実現するため2段階からなる前後判定を行う。まず1段階目は簡易前後判定であり、これは優先順位付けが正確である保証は必ずしも無い。が、処理時間が短い利点がある。この手法は、視点と各層に含まれる三角形面の重心座標までの距離を計算し、それをソートし、距離の大きい順に並び換えることにより三角形面に優先順位を付ける。2段階目の手法は完全な前後判定を行う必要のあるときに行う。この手法にはMIKADOアルゴリズム[7]を用い

る。この手法はあらかじめその層に含まれる全ての三角形面について図7(b)のようなテーブルを作成する必要がある。



(a)ある視点位置から見たときの透視図 (b)テーブル

図7 MIKADOアルゴリズム

このアルゴリズムを、図7(a)の例を用いて説明する。三角形Aは他の三角形を隠さないで、図7(b)のAの行には×印が付けられる。また三角形Bは他の三角形に隠されていないので、Bの行には○印が付けられる。三角形Dは他の三角形に隠しても隠されてもいないので、行、列とも印が付けられていない。このようにして層内の各々の三角形の1対1の前後関係を求め、それをテーブルにして記憶する。

つぎに、このテーブルを用いて次のように処理を行う。三角形Bの行は○印のみであるから三角形Bは他のA, C, Dの三角形より優先順位が高い。次にその三角形Bの行と列を取り除く。すると三角形Cの行は○印のみであるので、その次に優先順位が高い。このようにし、同様の処理を繰り返す。この処理を全ての三角形について行うことにより正確にかつ一意に優先順位を決定することができる。しかし、この手法の欠点は、視点が移動するたびに図7(b)のテーブルを作成しなおす必要があり、そのぶん処理時間が長くなる点である。そのため通常は簡易前後判定で優先順位付けを行い、この方法で判定不能だと判断された際は、このMIKADOアルゴリズムを用いるようにする。

3-1-3 層の前後判定

次に各層単位の優先順位付けを行う(図8参照)。それぞれの層のうち、視点のz座標値と同じz値を含む層iが最も優先順位が高く、それよりz座標値の大きい方向、またはz座標値の小さい方向に行くにつれ優先順位を低く設定する。

以上の処理により、等値面を構成する三角形面の優先順位が決定される。これを用いて描画は優先順位の低い層から、またその層内における三角形面の優先順位が低い面から処理すれば、本手法での半透明表示を行うことができる。

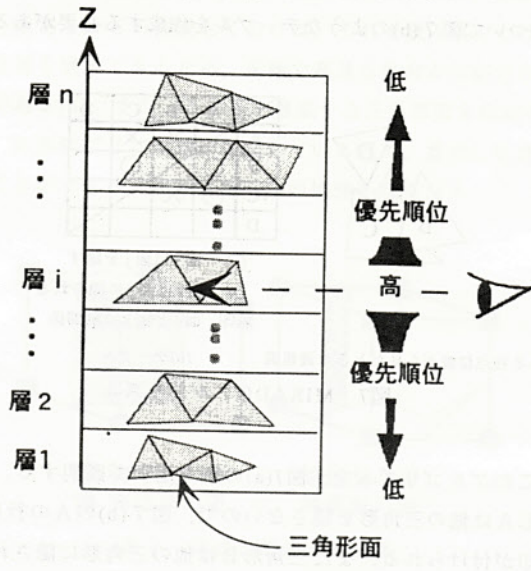


図8 層の優先順位付け

3-2 表示処理

複数の重なった半透明の曲面を表示する一手法として、ライトによりこれらを照射した状態を考え、光の屈折、反射などの現象を忠実に考慮して表示する方法が考えられる。しかし、この表示法の場合、等値面が重なった状況の観察が困難になる場合が多い。

そこで本手法は、複数の等値面が重なっても、その前後関係が容易に観察できるように、仮想的な半透明表示を行う。まず本手法により表示を行う際、必要となる法線ベクトルについて先に述べ、そののち、仮想的半透明表示処理について述べる。

3-2-1 法線ベクトルの算出

あらかじめM-C法により三角形面を構成するとき、その三角形の頂点の番号付けを次のように行う。図2において六面体の頂点のうち●で示される一つの頂点から三角形面を見たときに頂点番号を右まわりに記憶しておく(図9参照)。そして頂点2から頂点1への辺をA、頂点2から頂点3への辺をBとし、三角形面の法線ベクトルNを外積 $A \times B$ によって求める。つぎにそのベクトルNを用いて三角形面の頂点における法線ベクトルを求める。提案手法では頂点における法線ベクトルはその頂点を取り囲む複数の三角形要素の法線ベクトルの平均として求めることにする。

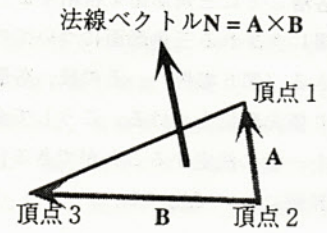


図9 三角形面の法線ベクトル算出法

3-2-2 面の色の決定方法

半透明感を強調し、面の形状を把握しやすくするために、光源によって半透明等値面を照射するのではなく面自体が発光する手法をもちいる。つまり前節で求めた三角形面の法線ベクトルと視線ベクトルのなす角 θ が小さい、つまり三角形面が正面にあるときは、明るさを抑え、 $\pi/2$ に近くなるとき、つまり面が視線と平行になるにつれて、明るさを増すようにする。これは等値面ごとに指定された三角形面の基本色に、 $1/\cos \theta$ を乗ずることによりその面の色を決定すればよい。(図10参照)

$$I_d(r,g,b) = I_p(r,g,b) \times \left(\frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (2)$$

ここで I_p はその等値面の基本色、 I_d は表示色、 r,g,b はそれぞれ赤、青、緑の三原色の成分を示している。

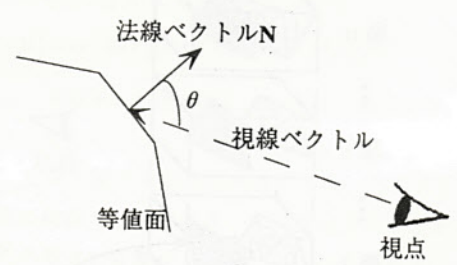
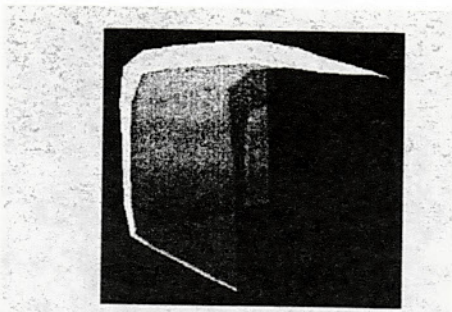
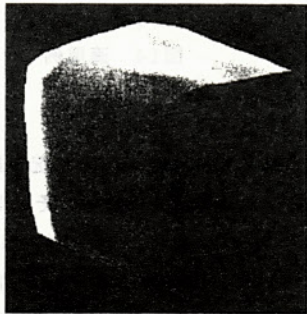


図10 面の表示色の決定法

上記の表示法において θ が $\pi/2$ を越える三角形面は裏の面であり、 I_d が負となり、本来は見えない面である。ここでは仮想的な半透明表示を行うために θ が $\pi/2$ を越える三角形面は $\cos \theta$ に-1をかけ、法線ベクトルが視点の方向を向いていない三角形面も表示するようにしている。提案手法の有用性を示すために、ライトにより照射することにより表示した方法との比較を図11に示す。図から明らかのように、提案手法は面の境界付近の輝度が高くなっており面の境界がはっきりとし、等値面の構造がよく理解できる。



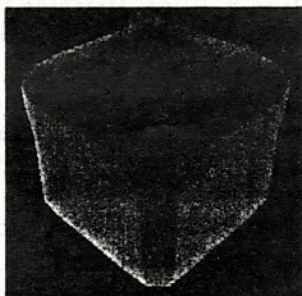
(a) 光源により照射した表示



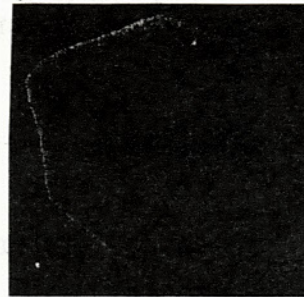
(b) 境界を強調した表示

図11 半透明表示法の比較

また表示の際、三角形面の法線ベクトルを用いて色の決定を行うフラットシェーディングでは、その三角形面内の色が一定になるため面と面の境界がはっきりとわかり等値面に不必要な皺が生じる(図12(a)参照)。これを防ぐために、頂点における法線ベクトルを用いて三角形面の色の決定を行う。すなわち三角形面の頂点における表示色を、その頂点の法線ベクトルと、視点との角度によって上述した方法で決定する。3頂点における表示色が決定されれば三角形面内の色はその3頂点の色から補間するスムーズシェーディングを行う。この処理を行うことにより三角形面内で色が連続的に変化し、三角形面の形状が直接表示されず等値面は滑らかな曲面状に表示され、観察しやすい画像が得られる(図12(b)参照)。



(a) フラットシェーディング



(b) スムースシェーディング

図12 フラットシェーディングとスムーズシェーディングの比較

3-3 表示領域

通常、解析対象の幾何学的形状は x 軸、 y 軸、 z 軸対称になるように選ばねばならない。このような場合、解析領域は、モデル全体の1/8領域となる。しかし可視化処理を行う際は、モデルに対して1/8領域だけを表示して観察するのでは理解しにくい場合がある。よって本手法では、解析領域の x 軸、 y 軸、 z 軸対称領域もあわせて表示することを可能にしている。

4. 適用例

4-1 適用モデル

電気学会の渦電流場数値計算技術調整専門委員会が定めた穴あきモデル[8]を3次元辺有限要素法により解析した結果に提案手法を適用する。このモデルは図13に示すように矩形のコイルの中心に鉄心、その上下に穴の空いたアルミ板を対称に配置したモデルであり、表示しているスカラー物理量は磁束密度である。

図14(a)に従来法の一つである断面画像表示例を、図14(b), (c)に解析領域の y が正の1/2領域の等値面(6枚)を二つの異なる視点から表示した例を示す。

4-2 結果と考察

従来法による表示では切断面上の磁束密度分布を詳細に観察することができるが空間全体の密度分布状況は観察できない。一方提案手法では等値面により磁束密度の分布状況が一目で分かり、面が複数枚重なる部分でも半透明となっているため、内部までよく把握できる。

また表1に、図14(b), (c)の場合の三角形面数、処理時間などのデータを示す。提案手法は描画処理がポリウムレンダリングとは異なり、三角形という基本図形を描画するのみで処理時間が短く、インタラクティブな観察を行うことができる。

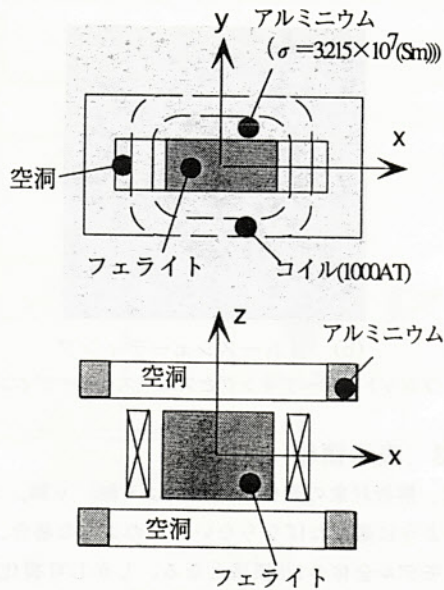
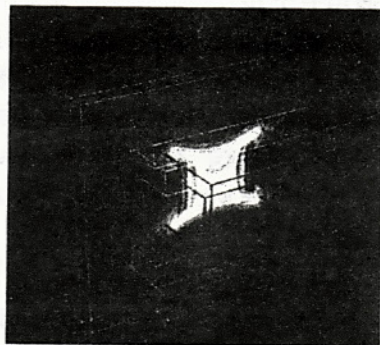


図13 適用モデル

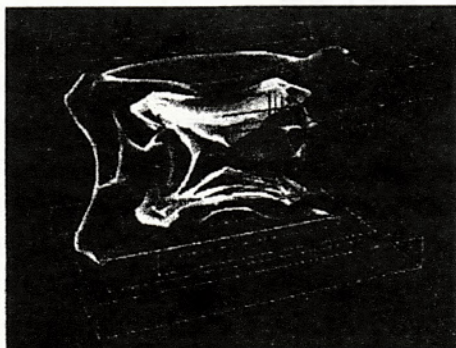
表 1

等値面数	三角形パッチ数	三角形頂点数	処理時間(s)
6	582	437	0.03

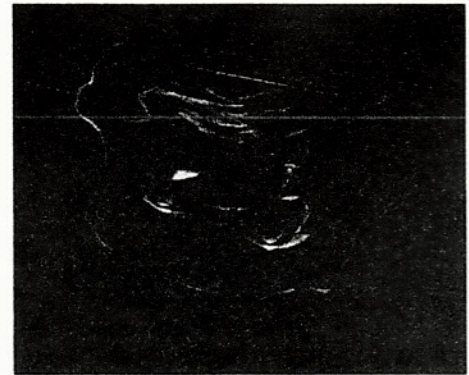
使用計算機 SGI INDIGO2 IMPACT



(a) 断面画像表示



(b) 提案手法 (視点1)



(c) 提案手法 (視点2)

図14 適用例

5. おわりに

3次元空間全体のスカラ量の分布状況を観察する方法として、複数の等物理量の面を作成し、その等値面を半透明表示する手法について提案した。本手法では等値面が複数枚重なっても、その前後関係を容易に観察可能にするため、かつ面の構造を把握しやすくするため仮想的な半透明表示を行っており、その有用性を示した。また高速表示が可能であるので視点を変更しながらインタラクティブに空間の現象を観察することができる。

今後の課題として、操作性の良いGUI (グラフィックユーザインタフェース) の開発、および立体的に観察を行う、ステレオ表示の適用があげられる。

文献

- [1] 中前, 山下: シミュレーション技術へのCGの応用, 計測と制御, Vol. 34, No. 7, pp. 546-552 (1995)
- [2] H. Yamashita, T. Johkoh, E. Nakamae, "Interactive Visualization of Interaction between Magnetic Flux Density and Eddy Currents in a 3D Steady State Field", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No. 2, pp. 1778-1781 (1992)
- [3] 大東, 金田, 山下, 栗林, "3次元渦電流像の算出法とそのボリュームレンダリングを併用した可視化手法", 電気学会 静止器 回転機合同研究会資料, SA-96-7, RM-96-57 (1996)
- [4] W. Lorentson, H. Cline: Marching Cubes: a High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, July 1987
- [5] M Bartsch, T. Weiland, M. Witting "Generation of 3D Isosurfaces by Means of the Marching Cube Algorithm", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 32, No. 3, pp. 1469-1472, May 1996
- [6] 金田: "多重構造物の半透明表示手法に関する研究", 広島大学 大学院工学研究科 修士論文, pp. 34-40 (1984)
- [7] Georg Glaeser "Fast Algorithms for 3D-Graphics", Springer-Verlag, pp. 143-149, 1994
- [8] 渦電流場数値計算技術調整専門委員会, "3次元渦電流場数値計算基礎技術", 電気学会緒言 (II部) 第384号 (1991)