

### 3次元交流定常場相互作用のインタラクティブ可視化法†

山下英生<sup>††</sup> 上甲達也<sup>††</sup> 中前栄八郎<sup>††</sup>

数値解析シミュレーションの対象はより複雑化、多次元化し、解析結果の可視化の必要性はますます増大している。3次元交流定常場における磁束密度と渦電流のように、相互に作用する物理量は時間の経過とともに複雑な振舞いをする。このような二つの物理量の相互作用の理解のためには、両者の時空間における現象を、同時に観察することが望ましい。本論文では、交流定常場における1サイクル間の瞬時密度分布の観察に、グラフィックスワークステーションを利用した可視化法について提案する。すなわち、密度分布の瞬時値の高速算出法を用いて、相互に作用する物理量を観察する三つのステレオ表示法を提案し、相互作用の観察を容易にする操作性に優れた会話処理機能について提案している。本可視化法の特徴は以下のとおりである。①相互に作用する複数の物理量に関して、時間的な変化を観察するためのアニメーション表示、異なる時刻の相違を観察する並列同時表示、および指定された2時刻における密度分布の微妙な差を観察する切り替え表示法が準備されており、観察者は必要に応じて適宜速やかに選択できるので、相互作用の詳細な観察が可能である。②時間的に変化する3次元空間の相互作用を、観察者のその時々意志のおもむくままに、自在に、かつ即応的に、望む方向および距離から、望む断面の分布状況を観察できる操作機能を持っている。

#### 1. はじめに

計算機の高速化とメモリの増大化にともなう、科学技術分野の数値解析シミュレーションの対象はより複雑化・多次元化し、解析結果の可視化の必要性がますます増大している。一般に、物理現象は複数の物理量の相互作用に基づくものが多く、時間の経過と共に複雑な振舞いをする。たとえ、その現象が定常状態であっても、1サイクルの間に生じる相互作用の理解のためには、相互作用し合うこれらの物理量を同時に、多角的に観察することが望まれる。本論文では、このような相互に作用する複数の物理量の時間的な振舞いを、インタラクティブに観察するための可視化手法を提案する。

可視化については、1974年にH. Christiansenが機械応力の可視化を行い<sup>1)</sup>、サイエンティフィックビジュアライゼーションの先駆者の役割を果たした。その後、各分野においても可視化技法が開発されてきたが、1985年から始まったNSFnetの構築に端を発し、可視化技法の開発が緊急課題となり、87年に“科学計算におけるビジュアライゼーション”<sup>2)</sup>が提唱され、その位置づけが明確にされた。

従来の表示法のうち、3次元空間に分布するスカラー量の表示は、表示空間内の物体の表面や断面に対して、等高線や等高値を色で表示するカラーコンター

(Color contour)が用いられてきた。また、近年、多くの複雑な形状要素からなる物体の内部構造の可視化にボクセルの概念を導入したポリウムレンダリングの技法<sup>3)</sup>が開発され、注目されている。その後、この技法を発展させたものとして、3次元空間に分布するスカラー量(応力分布や圧力分布)のレンダリングにレイトレーシングアルゴリズムを用いた方法<sup>4)</sup>や、スカラー量の等値面(複数)を半透明表示する方法<sup>5)</sup>などが提案されている。これらの半透明表示方法は、スカラー量の等値面の形状を観察するのに適しているが、半透明等値面が多重に表示されるため、スカラー量の数値的な把握には不向きである。

また、ベクトル量の可視化法として、著者らは、矢印でその方向を表し、大きさをその長さまたは色で表す方法、および流線に色彩情報を加えたものを開発し<sup>6)</sup>、さらに、3次元空間に分布するベクトル表示のためのステレオ表示法<sup>6),7)</sup>を開発してきた。

以上述べたように、3次元空間に分布する物理量の可視化法として種々の方法が開発されている。しかし、これらの方法は、任意の視点からではあるが、ある与えられた一つの視点からみたある一つの物理量の分布状況を可視化するものであって、時間的な変化をともしなう複数の物理量の相互作用の状況を観察することはできない。また、視点を観察者の希望に応じて速やかに変更することができない。したがって、観察者が臨場感を持って3次元空間内の物理量を自在かつ詳細に観察し把握するにはまだ不十分である。

近年のグラフィックスワークステーションの性能の向上は、会話的なリアルタイムのアニメーションが可

† Interactive Visualization of Interaction in a 3-D Alternating Steady State Field by HIDEO YAMASHITA, TATSUYA JOHKO and EIHACHIRO NAKAMAE (Electric Machinery Laboratory, Faculty of Engineering, Hiroshima University).

†† 広島大学工学部第二類(電気系)

能なまでに進歩した。著者らは、3次元空間内に分布する物理量の可視化法として、グラフィックスワークステーションを活用する場合、次の点を考慮する必要があることを指摘し、その対策を提案してきた<sup>8)~11)</sup>。すなわち、

(1) 3次元空間の物理現象を観察する場合、ある一方向からのみの観察では不十分であり、観察者の望む位置から、望む表示手法(2.1節参照)によって、その時々意志に応じて即座に観察できる会話性、操作性をもつこと。

(2) 複数の物理量のステレオ動画像をリアルタイムに観察できること。

上述の問題を解決するために、渦電流解析結果のポストプロセッサを開発し、3次元空間におけるベクトル量の大きさ、方向、流線を観察者の望む方向から自由自在に観察することができるようになった。しかし、このポストプロセッサは物理量の実効値分布や、ある一時刻の物理量の分布状況を可視化するものであり、これらの物理量が時間的に変化する様子までは可視化できなかった。

観察者が、3次元空間に分布し相互に作用する複数の物理量の時間的な振舞いを十分理解し把握するためには、その時間的な変化を観察者が実感できることが重要であり、またその詳細な観察には異時刻の現象の静止面を同時並列表示することによって比較観察できることが望ましい。本論文では、これを実現するために、時空間中の仮想体験による複数の物理量の相互作用の観察手法を提案する。すなわち、①3次元空間内において、時々刻々お互いに影響し合う現象を、時空間的に捕らえて観察できる仮想空間を実現するための分布ベクトル瞬時値の高速表示法、複数の異時刻の現象を詳細に観察するための同時並列表示法、微小時刻変化に伴う分布変化を観察するための任意時刻瞬時切り替え表示法、②観察者が、その感性を十分に活用しながら、その思考過程が中断されないように観察できるための操作性のよい会話処理機能、を提案し、今回新たに採用したステレオ観察システムの有用性を示す。最後に、適用例を挙げて本手法の有用性を示す。なお、本論文では、表示対象として渦電流密度および磁束密度を例にとり、3次元交流磁場解析には、A-φ法による2次四面体要素有限要素解析法<sup>12)</sup>を用いる。なお、本可視化法は、高機能グラフィックスワークステーションIRIS 4 D-120 GTX (10 MIPS)上に構築されている。

## 2. 分布ベクトルの瞬時値表示手法

### 2.1 相互作用観察のための分布ベクトルの瞬時値表示手法

著者らは、3次元空間に分布する磁束密度と渦電流のようなベクトル量やその大きさ分布の表示法として、以下に述べる二種類の表示法の併用法について既に提案している<sup>11)</sup>。すなわち、

(a) 磁束線または渦電流線の擬似カラー表示。

(b) 任意に指定した3次元表示空間内の物体表面、または任意に設定した切断面上の、磁束密度または渦電流密度分布の擬似カラー表示、および切断面の連続移動表示。

(a)の流線は、ある時刻における空間分布ベクトルが接線となる曲線であり、これをカラー表示することにより、ベクトルの大きさ、方向、流線を同時に観察できるという長所がある。しかし、この手法によって時間的に変化する空間分布ベクトルの観察を試みる場合、多数の流線を同時に表示する必要があり、表示空間が流線で埋まり、3次元空間全体の把握がかえって困難になる。したがって、何らかの工夫が必要である。

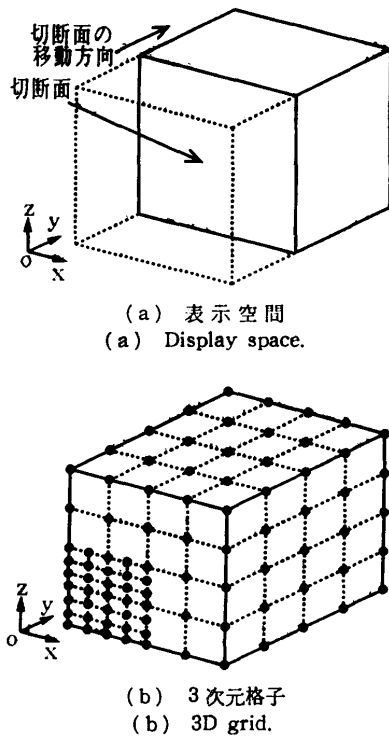
(b)の密度分布表示は、任意に指定した表示空間のベクトル量の大きさの分布状況を観察することができる。すなわち、スカラー量として観察できるので、定常状態における実効値、またはある時刻の瞬時値の分布状態を表現できる利点がある。しかし、ベクトルの方向の観察はできない。

本論文では、時間的な変化状況の観察を目的としているので、(b)の表示法を採用する。

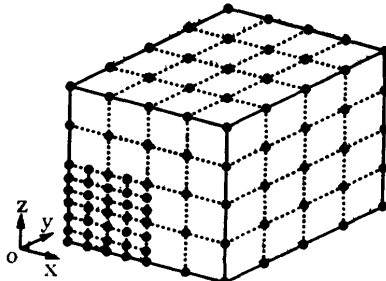
複数の物理量の相互作用を観察する場合、それらを同時に表示し、しかも時空間的な変化を、観察者の感性に訴えながら観察する必要がある。したがって、時々刻々の密度分布を高速に表示することが望まれる。以下、グラフィックスエンジンを用いて高速表示するための方法、瞬時値算出法、および、相互作用観察のための三つの表示法について述べる。

#### 2.1.1 3次元格子状データによる密度分布の高速表示法

密度分布の時間的な変化を表示するために、3次元空間に図1(a)に示すような直方体形状の表示空間を設定する。この切断面を移動させることによって、任意切断面のベクトルの大きさ(密度値)を表示する。この場合、観察者の感性を十分に活用するためには、切



(a) 表示空間  
(a) Display space.



(b) 3次元格子  
(b) 3D grid.

図1 密度分布表示法

Fig. 1 Display method of density distribution.

断面の移動に合わせてその切断面上の分布をできるだけ速やかに表示する必要がある。これを実現するために本論文では、表示空間に張られた3次元格子の各格子点における密度の大きさをあらかじめ求めておき、密度分布表示はこの密度データを、グラフィックスエンジンを用いて線形補間して高速に行う方法を提案する。有限要素解析における四面体要素分割は、一般にポテンシャルの変化の大きいところでは密分割にする必要があり、解析空間内の要素分割は一様ではない。結果の表示においても、表示の精度を向上させるためには、ポテンシャル変化の大きいところでは、補間表示のための点間隔は密である必要がある。この場合、解析に用いた分割をそのまま表示に用いることは以下の理由により、得策ではない。切断面の移動につれ、その切断面と錯交する四面体要素を逐次抽出する必要がある。しかし、上述のように、要素分割は一般に一様ではないため、この抽出処理に計算時間がかかり、その結果リアルタイムで切断面を移動させて分布状態を表示することは困難である。

表示のための格子点間隔は、表示精度と表示速度を考慮して設定することが望ましい。すなわち、空間全体の現象を時間的な変化として観察するときには表示速度が重要である。また、密度分布の詳細な観察の場

合には、逆に、表示精度が重要である。本手法では、表示の際に、格子点間隔を間引いて高速に表示できる機能を備えた（ただし、ポップアップメニューで行っている）。また、図1(b)に示すように、表示空間を複数の直方体の集合として構成し、それぞれの直方体に対して、表示精度、表示速度を考慮した格子間隔を与える。また、複数の直方体を取り扱えるので表示空間形状の自由度も大きくなる。

### 2.1.2 密度分布の瞬時値算出法

交流定常場の瞬時分布密度値を表示するためには、前項に述べた各格子点における密度値データとして複素数形式のデータを用いればよい。すなわち、時刻を角度 $\theta$ で表し、 $\theta=0^\circ$ における格子点 $i$  ( $i=1\sim n$ ,  $n$ : 総格子点数)の密度ベクトルの3方向成分 $V_{xi}$ ,  $V_{yi}$ ,  $V_{zi}$  (複素数)を前もって記憶しておく。角度 $\theta$ における格子点 $i$ の密度ベクトルの瞬時値の大きさ $|v_i(\theta)|$ は、次式で与えられる。

$$|v_i(\theta)| = \sqrt{\text{real}(V_{xi} * \exp(j\theta))^2 + \text{real}(V_{yi} * \exp(j\theta))^2 + \text{real}(V_{zi} * \exp(j\theta))^2} \quad (1)$$

時間の経過、すなわち、各 $\theta$ に対して、格子点における密度の瞬時値を(1)式により求め、指定された切断面や表示面の密度分布の擬似カラー表示を行う。

### 2.1.3 相互作用観察のための表示法

時間軸をともなう相互作用をする物理量は、それが定常状態であっても、一般に位相差をもち、複雑な振舞いを呈する。したがって、1サイクル中に生じる相互作用を理解するためには、多角的な観察が要求される。例えば、(1)時間的な経緯を直接時間的な変化として体験的に捕らえたい場合、(2)複数の異なる時刻の密度分布の相違を詳細に観察したい場合、(3)二つの時刻間の分布の差を精密に観察したい場合、(4)非常に接近した2時刻における類似した密度分布の微妙な差を観察したい場合などがある。(1)は、観察者の感性に直接訴えて、現象の全体的な理解を与えることができ重要である。(2)、(3)の場合、複数の時刻の分布図を同時並列的に表示することによって、その観察を容易にする。(4)の場合、同時並列表示を用いても、その微妙な差が把握しにくい。この場合、2時刻の分布を瞬時に切り替えることにより観察者の残像を利用して観察することができる。上述のように、観察者の観察目的に合わせて、観察者のその時々要望にしたがって、随時に適切な表示方法を選択することが有用である。本論文では、次の三つの表示方法を提案

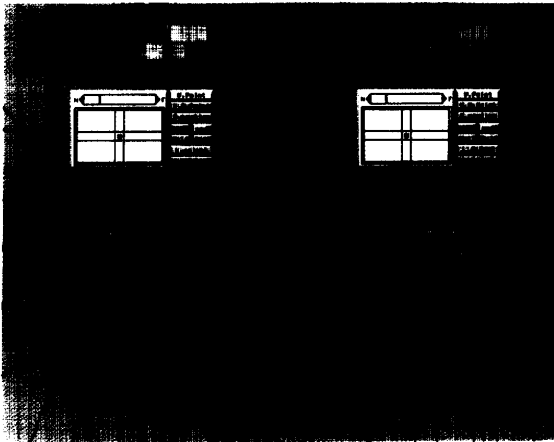


図 2 ステレオ表示の一例 (左右両眼透視画像の並列表示)

Fig. 2 An example of a stereo display (Parallel display of left and right perspective views).

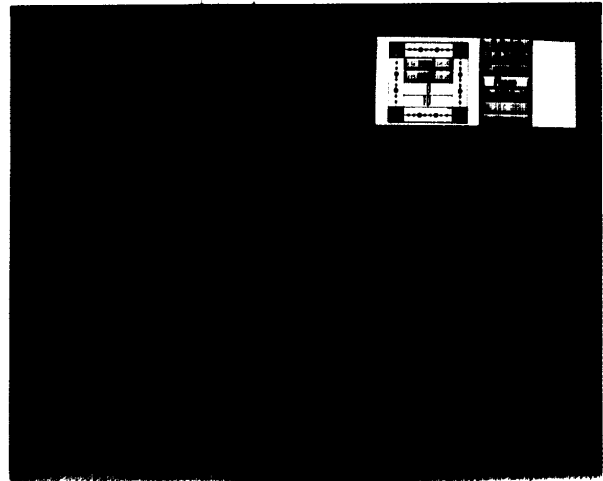
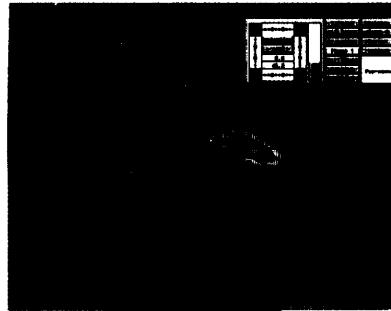
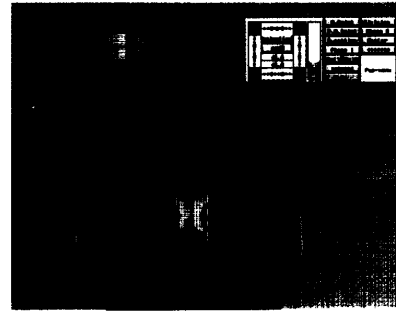


図 3 ステレオ表示の一例 (左右両眼透視画像の重ね表示)

Fig. 3 An example of a stereo display (Overlapping display of left and right perspective views).



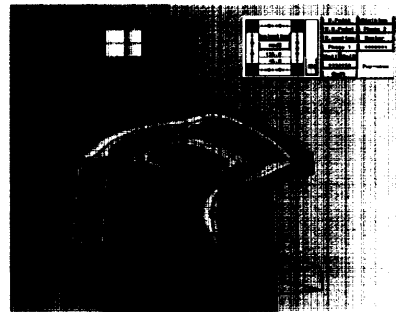
(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$



(c)  $\theta = 90^\circ$



(d)  $\theta = 135^\circ$

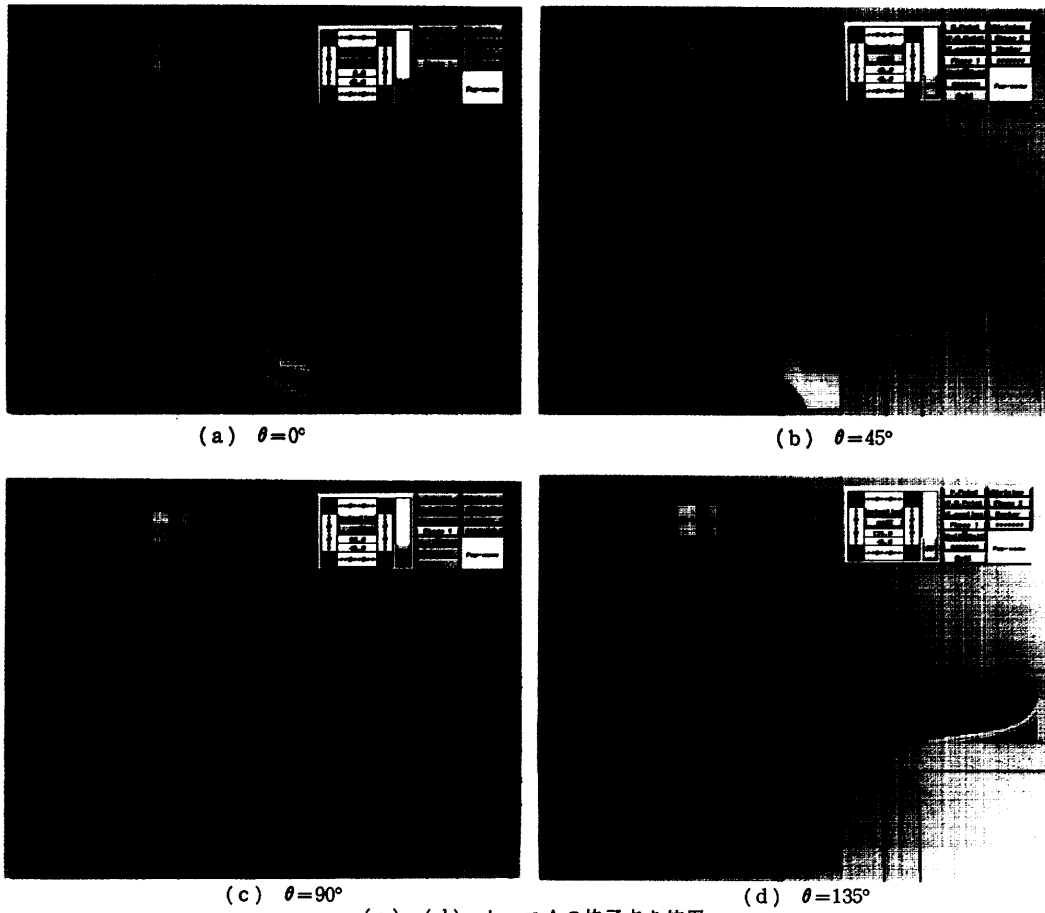


(e)  $\theta = 0^\circ$

(a)~(d): ケースBの格子点を使用, (e): ケースAの格子点を使用.

図 8 渦電流および磁束密度分布表示

Fig. 8 Display of eddy current and magnetic flux density distributions.



(a)~(d): ケースAの格子点を使用。

図 9 渦電流および磁束密度分布拡大表示

Fig. 9 Magnified display of eddy current and magnetic flux density distributions.



図 10 複数時刻同時並列表示の一例

Fig. 10 An example of simultaneous display of several momentary distributions.

する。

①各時刻における密度分布を時々刻々表示する方法 (アニメーション表示)。

②異なる幾つかの時刻における密度分布を同時に CRT 上に表示する方法 (複数時刻値の並列表示)。

③2時刻密度分布を瞬時に切り替え表示する方法 (スイッチング表示)。

①により、時々刻々変化する複数の物理量を適切な速度 (例えば、1周期12秒~8秒位が適切) で CRT 上に表示することによって、物理量の相互作用を時間感覚的に捕らえることができる。アニメーション表示において、観察者がリアルタイムとして把握できる画面の表示速度は1秒間に4枚以上が望まれる<sup>13)</sup> (フィルム: 24 フレーム/秒, ビデオ: 30 フレーム/秒)。しかし、1フレームの表示時間  $T_0$  は、計算機の CPU 能力のほかに、CRT 上に表示されるモデルの大きさ (視点、注視点の位置関係から決まる)、2.1.1 項で述べた格子点間隔により決まる。後述の表1に示すように適用例のモデルでは5フレーム/秒が可能であるが、格子間隔、表示する画像の大きさにより異なる。したがって、1サイクルの現象を観察する場合、1周期の表示時間が8~12秒位になるように、その表示間隔  $\Delta\theta$  [度] を、観察者が適宜選択できるような会話処理機能が必要である。

なお、①の方法は、時間的な流れとしての相互作用観察には極めて有効であるが、各瞬時値または、異なる時刻における密度分布の相違を詳細に観察するには不向きである。

②は、CRT 画面を数区画に分割し、時刻の異なる密度分布を同時並列的にステレオ表示し、これを観察するものである。この方法によって、異なる時刻における密度分布の分布状況を同時に比較しながら詳細に観察することができる。なお、同時並列区画数は、二つの時刻間の違いを観察したい場合、複数の時刻における分布状態を時系列的に観察したい場合など、観察目的により異なる。したがって、観察者の希望により、会話的に随時選択でき、しかも、観察者の思考が中断しない程度の応答速度が望まれる。なお、②の方法は、①に比べて密度分布の解像度が低下するのが欠点である。

③は、指定された2時刻における密度分布の微妙な差を残像を利用して詳細に観察するためのものである。①のアニメーション表示法の機能を用いて、指定した2時刻において表示を停止することにより観察す

ることもできるが、この場合、観察者は、その操作のためにメニュー画面に目を逸すことになる。したがって、分布状態のわずかの差を観察するのは困難である。ここでは、2指定時刻の画像をフレームバッファメモリに記憶した状態で、マウスをクリックすることにより交互に瞬間的に切り替え表示することにより実現した。

観察者は、その目的に応じて、①、②、③を適宜選択して相互作用の観察を行うことができる。

## 2.2 ステレオ表示

3次元空間内における物理現象を観察者に分かりやすく表示するためには、ステレオ表示を行う必要がある。著者らは、これを実現するために、以前に、静止画像として観察するための手法<sup>7)</sup>を提案した。また、さらにこれを発展させ、グラフィックスワークステーション上で、会話形式のステレオ表示法<sup>8)~11)</sup>を実現した (図2にステレオ表示の一例を示す)。この手法の利点は、一般の CRT を用いてステレオ観察ができる点である。しかし、観察者は CRT の正面に位置しなければならず、そのため複数の観察者が同時にステレオ観察することは困難であり、また観察者によっては、ステレオ観察がやや困難であると訴える人がいた。

そこで、最近市販されるようになったステレオ装置、すなわち、左右両眼からの透視図を 120 Hz で交互に CRT 上に表示し、左右の画像と同期する液晶シャッター付きメガネにより、これを観察することのできるシステムを採用した (このシステムによるステレオ表示画面の一例を図3に示す)。このシステムでは、垂直方向に画像を約 1/2 に圧縮し、左右の画像をフレームバッファ内に構成することにより、フリッカのない時分割ステレオ表示が可能である。ただし、従来<sup>11)</sup>の方法に比べて垂直解像度が約半分になるが、左右の解像度は約2倍になる。このシステムの利点は、液晶シャッター付きメガネを複数用意すれば、多人数の観察者が同時にステレオ観察することが可能であり、したがって、表示された物理現象に対する討論が容易に行えることである。

## 2.3 会話処理機能

3次元空間内の物理現象を観察する場合、その空間全体の物理現象を把握したい場合と、ある特定の部分を詳細に観察したい場合がある。したがって、可視化法としては、観察者が望む場所を、望む方向と距離から、随時観察できる対話性、操作性に優れている必要

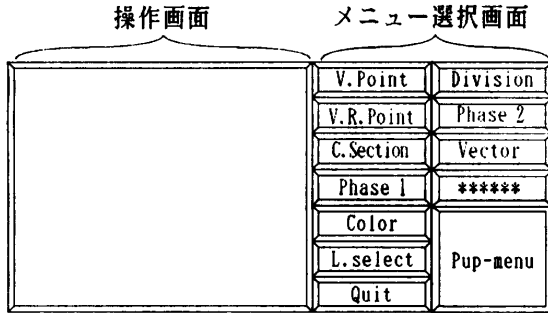


図4 メニュー画面  
Fig. 4 Window for menu selection.

がある。本手法では、図4に示すように、メニュー画面と操作画面から構成される会話機能を構築した。すなわち、メニュー画面の一つの機能を選択すると、このメニューに対応する操作画面が表示される。この操作画面とメニュー画面は、観察者がステレオ観察中の表示画面の右上隅に常に現れている(図3参照)。したがって、観察者は、ステレオ表示画面に注意を集中したままほとんど視線を逸すことなく操作が可能である。

本システムにおいて、時間的に変化する現象に対して、その観察目的に適した表示法が適宜選択できる新しい機能を開発した。すなわち、アニメーション表示、スイッチング表示 [Phase 1] と同時並列表示 [Phase 2] を行うための操作メニュー(次章参照)である。なお、次に示す会話処理機能は、既に文献8)~11)において開発したものであるが、本システムにおいてもそのまま有効に活用される。

1) 視点移動 (V. Point), 2) 注視点移動 (V. R. Point), 3) 切断面の表示方式の選択 (C. Section): 切断面の連続移動方式または特定位置の切断面の指定方式, 4) 連続または不連続のカラースケールの選択 (Color), 5) カラースケールの最小値, 最大値の変更機能, 6) 指定密度値の分布表示機能: 観察者が希望する等密度分布領域の表示

### 3. 密度分布ベクトルの瞬時値観察用会話処理機能

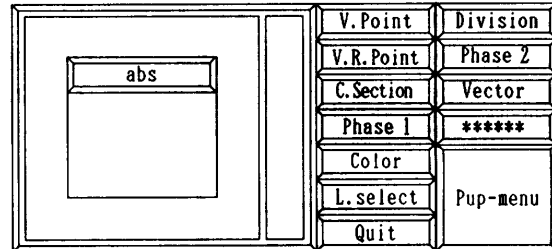
2.1.3 項で述べた表示法は、それぞれ観察目的が異なる。一つの表示法のみによって得られる情報には自ずから限界がある。人間の感性を有効に働かせるためには、観察者の望む表示法を即座に選択できる操作性のよい、会話機能が必要である。何故なら、この操作

にあまり手間取ると、思考が中断し、十分に観察者の感性を活かし切れないからである。以下では、時間的に変化する物理現象を観察するための、アニメーション表示、スイッチング表示、複数時刻並列同時表示の三つの表示方式のための会話機能について述べる。

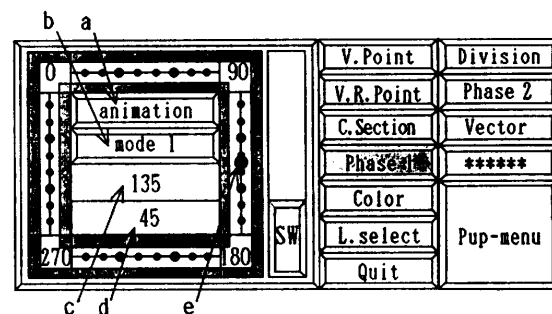
#### 3.1 アニメーション表示およびスイッチング表示 (Phase 1)

本論文で提案するアニメーション表示とスイッチング表示は、メニュー画面の [Phase 1] ボタンを選択することにより行われる。操作画面に、まず、図5(a)の abs モード(実効値表示モード、文献8)~11)参照) または(b)の animation モードのいずれかの操作画面が現れ、[abs] または [animation] をピククすることにより、この二つのモードの切り替えが行われる。

アニメーション表示においては、一定間隔時刻の密度分布が連続的に表示される。図5(b)の操作画面の外枠に示される正方形の各四隅にある数字(0, 90, 180, 270)が1サイクルを表す角度である。表示時刻(角度)は、図5(b)中の e のマークが赤色で表示され、1サイクルを表す正方形のループ中を移動するので、観察者による表示時刻の確認は容易に行われる。



(a) abs モード  
(a) abs mode.



(b) アニメーションモード  
(b) Animation mode.

図5 表示モード  
Fig. 5 Display modes.

なお、この時刻（角度）は、図5(b)のcに表示される数値によっても確認できる。表示間隔角度 ( $\Delta\theta$ ) は図5(b)のdに示される。なお、この値は keyboard 入力により自由に変更可能である。また、アニメーション表示による観察は、任意の指定時刻から開始できることが望ましい。すなわち、図5(b)の操作画面の外枠に示される斜線で囲まれた領域中の任意の位置（時刻）をマウスでピックすると、その時刻からアニメーション表示が始まる。なお、この開始時刻は、図5(b)のcの値を keyboard 入力することによっても指定可能である。また、図5(b)のbの位置をピックし mode 2 に変更することにより、アニメーションを停止し、その時刻の瞬時値を静止画として観察することができる。

スイッチング表示は、図5(b)の操作画面中の [SW] ボタンを用いて、次の手順によって行う。すなわち、1) 図5(b)のbを mode 2 にして、表示したい時刻を指定する。2) [SW] をクリックし、その時刻の画像をフレームバッファメモリに記憶する。3) 2番目の時刻を指定した後、[SW] を再びクリックし、その時刻の画像をフレームバッファメモリに記憶する。4) マウスの左ボタンをクリックすることにより、2画像の瞬時切り替え表示を行う。

3.2 複数時刻並列同時表示 (Phase 2)

CRT 画面を数区画に分割し、複数の時刻における密度分布を同時に立体表示し、時間変化による分布の様相を詳細に比較するための機能である。メニュー選択画面の [Phase 2] を選択すると、操作画面は図6の操作画面に変わる。複数時刻並列表示法においては、2, 4, 6, 9, または 12 種類の、異なる時刻における密度分布を、CRT 画面上に同時に表示することが可能である (図6は並列表示数=6 の場合)。①の[2],

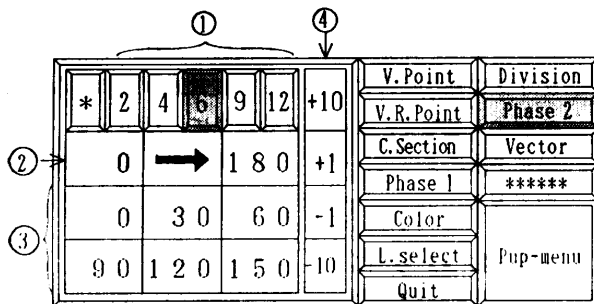


図6 複数時刻並列同時表示のための操作画面  
Fig. 6 Window for manipulation of simultaneous display of several momentary distributions.

[4], [6], [9], [12] は、それぞれ時刻の異なる画像を同時に並列表示する枚数を表す。これらをマウスで選択することにより並列表示数を指示する。②の数値は、表示時刻（角度）の最小値、最大値 (degree) を表し、③の数値は、CRT 画面上に表示される密度分布の各時刻の値を示す。なお、これらの表示時刻値の変更は、③の中から変更したい時刻を選択した後④に示す増分パラメータ（マイナスは減分）を選択することにより任意に変更することができる。例えば、 $30^\circ$  を  $32^\circ$  に変更したい場合は、③の 30 を選択後、④の [+1] を 2度ピックする。

4. 適用例

図7は、コイルと鉄心の上下に、アルミ導体板が対称に配置されたモデルを示す。交流定電流源から 1,000 [AT] の起磁力 (50 Hz) をコイルに与えたときの 3次元場磁界解析を行い、アルミ導体中の渦電流と磁束密度分布の可視化と、その物理現象についての考察を行う。なお、この物理現象は、コイルの励磁電流により誘起される。したがって、二つの物理量（磁束密度、渦電流密度）の同時表示のほか、コイルの形状を表す線画を、コイルに流れる励磁電流の瞬時値の大きさに対応した色により表示する。これにより、観察者は渦電流密度分布、磁束密度分布およびコイルに

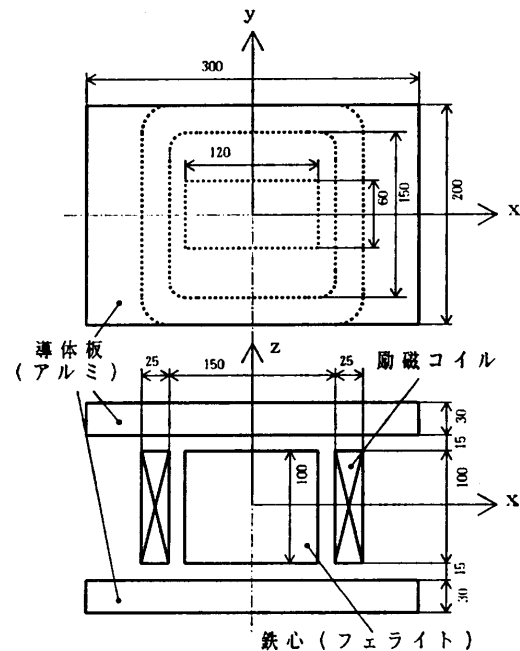


図7 解析モデル  
Fig. 7 Analysis model.



流れる電流値の時間的変化の状況を同時に観察することができる。

観察者は、グラフィックスワークステーション上に観察対象画像を表示して、会話形式により、視点、注視点の移動、表示切断面の選択、および時刻を変化させながら、これを液晶シャッター付きメガネを用いた立体視システムによりステレオ観察する。この場合、CRT画面上には図3に示すような左右両眼からの透視図が120 Hzのサイクルで交互に表示されるが、ここでは両眼視差を零とした静止画像のいくつかを示す。

なお、以下に示すいくつかの時刻の静止画像の観察のみでは、時刻間の変化を実感として把握することはできない。これは実際にアニメーション表示することにより、初めて各物理量の位相関係やその相互作用を理解することができることをお断りしておく。

図8(a)~(d)は、上部アルミ板表面の渦電流密度分布と、モデルの中心を軸とする座標系の1/4象限の境界面の磁束密度分布について、アニメーション表示した際の角度 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ の静止画を示す。また、表1は渦電流および磁束密度の表示空間の3次元格子点数と1フレームの表示時間を示す。ケースAの3次元格子を用いてアニメーション表示した場合、 $\Delta\theta=10^\circ$ として1サイクルの表示に約1.5分かかり、動画像として観察することには無理がある。しかし、ケースBの3次元格子を用いた場合、1フレームの表示にかかる時間は約0.2秒であるので、 $\Delta\theta$ を $6^\circ\sim 9^\circ$ に選べば、1サイクル12秒~8秒で表示できるから、動画像として人間の感性に訴えることができる。ケースA、Bの表示精度の比較を、図8(a)と(e)に示す。当然、図8(a)の表示精度は、図8(e)に比べて画質は低下しているが、アニメーション表示により時間感覚的に観察する場合には問題にならない程度である。

表1 表示空間の3次元格子点数と1フレームの表示時間  
Table 1 The number of 3D grid nodes of display space and display time for one frame.

表示空間 (X*Y*Z [mm])	ケース A			ケース B		
	x	y	z	x	y	z
渦電流の表示空間 (150*100*300)	31	21	8	11	7	4
磁束密度の表示空間 (200*150*150)	41	31	31	13	11	11
1フレームの表示時間 (図8のアニメーション表示の場合)	2.49秒			0.20秒		

アニメーションとして観察すると磁束密度分布とコイルの励磁電流は、ほぼ同相になっているが、アルミ板の鉄心に近い表面の渦電流は、コイルの励磁電流に比べて約 $130^\circ\sim 140^\circ$ の遅れがあることを感覚的に把握することができる。この現象を、図8(a)~(d)の静止画から観察することは困難であり、アニメーション表示の有用性がわかる(本誌において、アニメーションから体得できる情報の有効性を具体的に提示することはできないが)。

図9(a)~(d)(ケースAの格子点を用いた表示)は、アルミ板内部の渦電流密度分布を観察するために、yz平面上の上部アルミ板内部の渦電流分布と、yz平面の右半平面の磁束密度分布を同時に拡大表示したものである。表示角度は、それぞれ図8(a)~(d)と同じである。 $\theta=0^\circ$ のとき、アルミ板内の渦電流はコイルの励磁電流の向きとは逆方向に流れており、アルミ板の端の影響によりアルミ板の両端で渦電流密度が高く、アルミ板の厚さ方向への浸透も両端で大きくなっている。これに対して、 $\theta=45^\circ$ ではアルミ板の下表面の電流はほとんど零になっているが、アルミ板内部の渦電流は、 $\theta=0^\circ$ のときと同じ方向に流れている。このように渦電流密度の最大値の部分が、アルミ下表面( $\theta=0^\circ$ )から、時間経過とともに次第にアルミ板内部に移動する。このような現象は、アニメーション表示することにより初めて実感として体得できる。 $\theta=90^\circ$ になると、 $\theta=0^\circ$ のときとは逆向きの渦電流がアルミ板下表面に現れ、アルミ板内部の渦電流が減少している。 $\theta=135^\circ$ になると、アルミ板下表面の渦電流がほぼ最大になり、内部に存在していた渦電流は消滅していることが観測される。

図10に複数時刻同時並列ステレオ表示(並列表示数=6)の一例を示す。 $30^\circ$ 間隔の渦電流、磁束密度の分布状況を同時に詳細に観察できる。

以上、渦電流密度と磁束密度分布の時間的変化の一例を示した。観察者は本可視化法により、インタラクティブな操作を行いながら、観察対象からほとんど目を離すことなく、その時々々の希望にしたがって、望む表示手法によって、いろいろな角度から観察することができる。

## 5. おわりに

3次元空間の複雑な現象の観察においては、観察者の思考を中断することなく、その感性を十分に活かしながら観察することが重要である。本可視化システム

では、メニュー画面が常にステレオ表示画面にあるので、観察対象から視線をほとんど逸すことなく、インタラクティブに観察目的に適した表示法を随時選択して、希望する場所を、希望する大きさであたかも仮想空間に入り込んだ感覚で観察することができる。以下に本可視化法の特徴をまとめる。

(1) 複数の物理量に関して、時間的変化の状況が観察可能：相互に作用する物理量の関係が三つのステレオ表示法により詳細に観察できるので、物理現象の理解、把握が容易である。

(2) 動画、ステレオ表示の採用：3次元空間の現象の時間的変化を極めて鮮明に把握できる。

(3) 会話性・操作性の優れた多機能メニュー画面：観察者が望む表示形式を会話的に選択することができ、その意志に従って、自在に、かつ任意の角度から観察できるから、(2)と合わせて仮想空間を体験する感覚で観察対象を把握することができる。

なお、本提案手法では、空間分布ベクトルの瞬時値の大きさを観察することはできるが、ベクトルの方向を観察することはできない。瞬時値の大きさと同時に瞬時ベクトルの方向をも観察できる手法の開発が今後の課題と言える。

### 参 考 文 献

- 1) Christiansen, H.: Application of Continuous Tone Computer Generated Images in Structural Mechanics, *Structural Mechanics Computer Programs-Surveys, Assessments, and Availability*, pp. 1003-1015, University Press of Virginia Charlottesville (1974).
- 2) McCormick, B. H., DeFanti, T. A. and Brown, M. D.(eds.): Visualization in Scientific Computing, *Comput. Gr.*, Vol. 21, No. 6, pp. 1-14 (1987).
- 3) Drebin, R. A., Carpenter, L. and Hanrahan, P.: Volume Rendering, *Comput. Gr.*, Vol. 22, No. 4, pp. 65-74 (1988).
- 4) Sabella, P.: A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields, *Comput. Gr.*, Vol. 22, No. 4, pp. 51-58 (1988).
- 5) Gallagher, R. S. and Nagtegaal, J. C.: An Efficient 3-D Visualization Technique for Finite Element Models and Other Coarse Volumes, *Comput. Gr.*, Vol. 23, No. 3, pp. 185-194 (1989).
- 6) Nakamae, E., Yamashita, H., Kawano, N. and Nakano, S.: Color Computer Graphics in Magnetic Field Analysis by Means of the Finite Element Method, *Comput. & Graphics*, Vol. 7, No. 3/4, pp. 295-306 (1983).

- 7) Yamashita, H., Harada, K., Nakamae, E., Itano, J. and Hammam, M. S. A. A.: Stereographic Display on Three Dimensional Magnetic Fields of Electromagnetic Machines, *IEEE Trans. on Power Appl. and Systems*, Vol. PAS-100, pp. 4692-4697 (1981).
- 8) 中前, 山下, 谷詰, 上甲, 野崎: 三次元場渦電流のカラー表示法, 電気学会静止機・高電圧合同研究会資料, SA-89-32, HV-89-33 (1989. 6).
- 9) 山下, 上甲, 中前: 格子状データを利用した3次元分布渦電流アニメーション表示, 電気学会静止機・回転機合同研究会資料, SA-89-63, RM-89-52 (1989).
- 10) 上甲, 一ノ瀬, 山下, 中前: 磁束密度・渦電流密度ベクトル量の同時ステレオ表示, 日本シミュレーション学会第11回計算電気・電子工学シンポジウム, No. II-17, pp. 305-310 (1990).
- 11) Yamashita, H., Johkoh, T., Takita, S. and Nakamae, E.: Interactive Visualization of Three Dimensional Magnetic Fields, *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 2, No. 1, pp. 34-40 (1991).
- 12) 電気学会三次元電磁界計算技術調査専門委員会; 三次元静磁界数値計算技術, 電気学会技術報告(II部), 第286号 (1988).
- 13) Graphics Library Reference Manual (IRIS-4 D Series), Silicon Graphics, Inc. (1990).

(平成2年10月1日受付)

(平成3年4月9日採録)

#### 山下 英生 (正会員)



昭和16年生。昭和39年広島大学工学部電気工学科卒業。昭和43年同大学院修士課程修了。広島大学工学部電気工学科助手。現在、第二類(電気系)電気機器工学教育科目助教授。この間、昭和56年2月より1年6か月間アメリカ・クラークソン工科大学へ出張。主として、有限要素法による電気機器の電界・磁界解析に関する研究に従事。工学博士。IEEE, 電気学会, 電子情報通信学会各会員。

#### 上甲 達也



1989年広島大学工学部第二類(電気系)卒業。1991年同大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程修了。同年、ダイキン工業(株)入社。電気学会会員。

**中前栄八郎 (正会員)**

昭和4年生。昭和29年早稲田大学第一理工学部電気工学科卒業。昭和31年同大学院修士課程修了。昭和31年広島大学工学部電気工学科助手。昭和43年同教授。現在、第二类(電気系)電気機器工学教育科目担当。この間、昭和48年1年間、アメリカ・クラークソン工科大学へ出張。主として、電気機器の電界・磁界解析、コンピュータ・グラフィックスに関する研究に従事。工学博士。IEEE, ACM, 電気学会, 電子情報通信学会, テレビジョン学会, 照明学会, 日本シミュレーション学会各会員。

---