

構造解析可視化システムの開発

田尾 博幸, 坂元 康泰
tao@seibu-kg.pref.hiroshima.jp
広島県立西部工業技術センター システム技術部
〒737 呉市阿賀南2丁目10-1

多田村 克己
広島県立大学 経営学部
〒727 庄原市七塚町562

金安 俊哉
マイクロテクノ開発部
〒729-17 東広島市高屋町大字郷676

構造解析データの可視化にGUIを利用し、観察者の意向をインタラクティブに反映できる汎用性と拡張性をもつシステムを提案する。提案システムでは、解析結果の多彩な表現がインタラクティブな操作で可能であり、複数の物理量の同一画面上への同時表示、物理量の時間的変化のアニメーション表示、およびこれらのステレオ観察が可能である。提案システムの利用により、物体内および物体間の相関関係、複雑な形状変化、物体に生じる物理量の時間的な変化等を視覚情報としてとらえ、直感的な理解を深めることができる。

Development of a Visualization System for Structure Analysis

Hiroyuki Tao and Yasuhiro Sakamoto
Industrial Research Center of Hiroshima Prefecture
10-1, Agaminami 2 Chome, Kure, Hiroshima, 737 Japan

Katsumi Tadamura
Hiroshima Prefectural University
562, Nanatsuka-cho, Syobara, Hiroshima, 727 Japan

Toshiya Kaneyasu
Microtechno Co.Ltd.
676, Gou, Takaya-cho, Higashihiroshima, Hiroshima,
729-17 Japan

For displaying data of structure analysis, we propose a generalized visualization system with a graphical user interface (GUI) that reflects the intention of the observer interactively and is adapted to further extension. In this system, the analysis results can be expressed in various ways by interactive operations, plural physical quantities are displayed on the same screen simultaneously, changes of physical quantities over time are shown by animation and the display can be observed in stereo vision. More intuitive comprehension of the inter-object and intra-object relationships, the complicated variance of shape and changes of physical quantities through time in the objects, can be obtained.

1 はじめに

サイエンティフィック・ビジュアライゼーションに関する研究は、1974年に H.Christiansen が機械応力歪みを疑似カラー表示¹⁾して以来、その重要性が認識され、各方面で先駆的な開発が行われるようになった。特に、1987年に B.H.McCormick らが、'Scientific Visualization'²⁾を提唱したのを契機として、広範な分野において様々なソフトが開発・市販され、今日に至っている。例えば、3次元空間に分布するスカラー量およびベクトル量をインタラクティブにステレオで観察するものに、電磁界場を扱ったものが開発されている^{3) 4)}。

構造解析の分野でも GUI 機能を駆使したシステムが市販されている⁵⁾。しかし、これらのシステムでは、複数の情報を一度にインタラクティブに可視化できない、あるいはステレオ動画像表示が困難等の問題点があった。また現在存在している種々の解析ソフトは、それぞれの独自の目的に沿った可視化処理を行っているため、解析項目ごとに操作方法を習得する必要があり、一般性に欠ける面がある。このため、どの解析ソフトからの出力でも同一のユーザ・インタフェースで可視化でき、解析対象の多種複雑化にも対応できる、ユーザがカスタマイズ可能なシステムの開発が要求される。さらに、視点等の連続的な変化やアニメーション表示の際にも、観察者にストレスを与えない応答性の良いシステムであることが望まれる。

本論文では、これらの要求をできるだけ満足する GUI を中心とする可視化について、構造解析の例を挙げ、各観察段階における観察者の意向を直ちに反映でき、拡張性にも配慮したシステムについて提案する。

2 提案システムの概要

2.1 システムの構成

提案システムの構成と処理の流れの概要を図1に示す。

本報告の例では、構造解析機能で定評のある I-DEAS (SDRC 社製) システムにより解析計

算されたデータ (ユニバーサルデータファイル) を利用する。解析結果は、ユーザの観察を支援するため、解析データを表示データに変換した後、ビジュアライザにおいてインタラクティブに可視化する。解析は、富士通 S-4/10 で行い、可視化システムは、SGI IRIS Indigo2 Extreme 上で開発した。

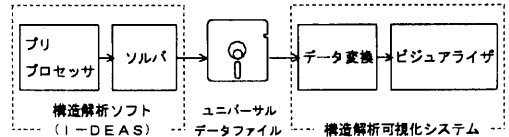


図1. 構造解析作業における提案システムの位置づけ

現在、提案システムで対応できる要素タイプは、四面体、二次四面体 (頂点の節点以外に2次節点をもつ)、六面体、四辺形要素の4種類である。なお、簡単な手続きで新たな要素タイプの追加が可能である。

提案システムのビジュアライザの画面構成を図2に示す。

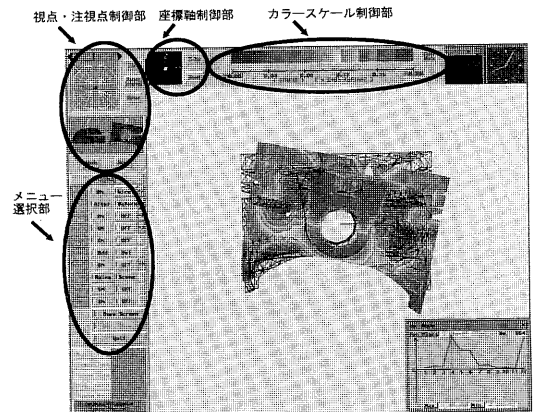


図2. 画面表示例

- (1) 視点・注視点制御部では、マウスを用いて視点と対象物体との距離、視点の回転制御、および注視点の設定ができる。注視点設定は、 x , y , z 各軸方向の移動の他に、画面上で左右、上下、前後方向への移動を可能とした。(図3(a))
- (2) 座標軸制御部は、対象物体の回転状態の把握、および各座標軸の制御が行える。(図3(b))

- (3) カラースケール制御部は、表示物理量の大きさと表示色の対応を示すカラースケールが表示され、2つのカラースケールの切替え、また、特定物理量領域の指定ができる。(図3(c))
- (4) メニュー選択部では、メニューボタンにより、次節以降で述べる多彩な表示方法の選択が可能である。

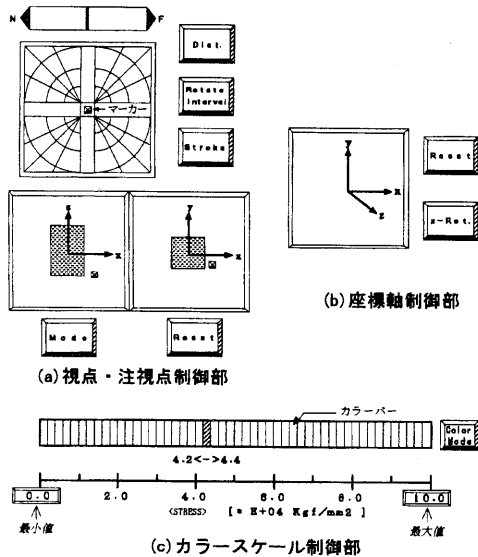


図3. インタラクティブ処理部

2.2 システムの特徴

提案システムは、以下の特徴をもつ。

- (1) 隠線情報を付加したワイヤーフレームと変形形状および表面応力分布の同時表示により、ユーザが変形の様子を直感的に観察可能。
- (2) 法線ベクトルを使用した要素外形表示法により、表面応力分布に要素外形を付加した際に生じる途切れが解消、また、要素外形表示の高速化が可能。
- (3) 物理量の時間的変化に対応した時系列データに基づくアニメーションのインタラクティブ表示が可能。
- (4) 画面上に表示した物体の任意の要素・節点における物理量値の表示が可能。特に時系列データは、時間軸と物理量の関係のグラフをアニメーション表示と同期して表示可能。

- (5) 対象物体の表面抽出により、表示の高速化が可能。

これらについては3節において詳述する。なお、本システムにおいては、視点の制御等インタラクティブな操作が、リアルタイムで応答可能であり、解析結果である変位と応力分布は、用途・対象に応じて多彩な表示ができる。また、ステレオ表示機能を備え、立体感のある表示が可能である。

2.3 システムの機能

提案システムのビジュアライザの機能を表1に示す。表中、インタラクティブ処理機能以外の項目は、メニュー選択部の操作で実現する。

表1. システムの機能

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ◎ 3次元形状での物理量表示
解析結果(変位・応力)の多彩な表示方法(11種類) ◎ インタラクティブ処理機能 <ul style="list-style-type: none"> ◇ カラースケールの切替 ◇ 指定物理量の分布表示 ◇ 視点の制御(回転、拡大・縮小) ◇ 注視点の設定 ◇ 座標軸の制御 ◎ グルーピング表示 ◎ 時系列変化事象のアニメーション表示 ◎ ステレオ表示 ◎ 任意箇所物理量値表示 |
|--|

2.3.1 物理量表示

提案システムで取扱う表示物理量は、3次元分布スカラー量(応力: Von Mises相当応力など)、3次元分布ベクトル量(変位)である。これらを観察するための表示に関して、変形図と応力分布(色塗り)図の重ね合わせ表示、原形図と変形図の同時表示、あるいは隠線処理なしの表示が考えられるが、適用対象および観察者の欲求に応じて最適な表示手法を随時選択できることが望ましい。

提案システムでは、ビジュアライザに、表2に示す11通りの表示方法を用意し、用途・対象に応じてインタラクティブに選択できるようにした。

2.3.2 グルーピング表示

I-DEASでは、解析の際にあるまとまった機能を持つ部分形状を一つのグループとし、対象

表 2. 応力・変位の表示方法

応 力	変 位	表 示 方 法		No
		変形前形状	変形後形状	
表 示 (変形前形状)	非表示 (要素外形)	応力分布 ワイヤフレーム(黒)		①
	表 示 (隠線非表示) (要素外形)	応力分布 ワイヤフレーム(黒)	ワイヤフレーム(白)	②
	表 示 (隠線表示) (要素外形)	応力分布 ワイヤフレーム(黒)	ワイヤフレーム(白) [隠線部分(赤)]	③
	非表示 (要素外形)	応力分布 ワイヤフレーム(白)		④
表 示 (変形後形状)	非表示 (要素外形)	ワイヤフレーム(黒)	応力分布 ワイヤフレーム(白)	⑤
	表 示 (隠線非表示) (要素外形)	ワイヤフレーム(黒)	応力分布 ワイヤフレーム(白)	⑥
	表 示 (隠線表示) (要素外形)	ワイヤフレーム(黒) [隠線部分(赤)]	応力分布 ワイヤフレーム(白)	⑦
	非表示 (変形前)	ワイヤフレーム(黒)		⑧
非 表 示 (ワイヤフレーム)	非表示 (変形後)		ワイヤフレーム(白)	⑨
	変位量色表示 (ワイヤフレーム)	ワイヤフレーム(黒)	ワイヤフレーム(変位量に 応じた色)	⑩
	変位量色表示 (接続線分)	ワイヤフレーム(黒)	ワイヤフレーム(白) 変位量に応じた色の部分で変形前後の形状の異なる部分を接続	⑪
	変位量色表示 (ベクトル)	ワイヤフレーム(黒)	変位量に応じた 大きさ/色ベクトル	⑫

*変形前(後)形状で応力分布表示

物体をグループの集まりとして定義している。

提案システムでは、この解析時のグルーピング定義のデータを利用してグループごとに表示・非表示が選択できる。これにより、必要に応じて全体のみでなく部品ごとの観察、あるいは表面だけでなく内部の物理量分布状態についても容易に観察することができる(図4参照)。

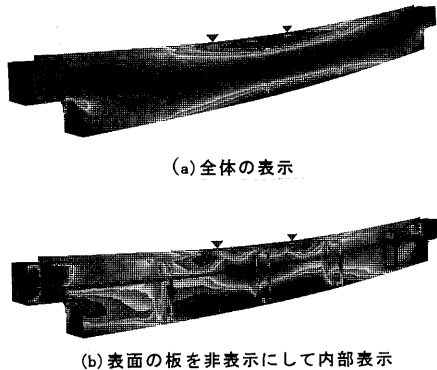


図 4. グルーピング表示適用例

なお、提案システムは、ステレオ表示機能を備

え⁶⁾、立体感のある表示により、観察者の3次元空間における現象の把握を支援する。この場合、表示対象とする物体や観察者の要求に合わせて、両眼視差および投影面の位置^{7) 8)}を変更することが可能であり、ステレオ表示による観察の利便性を向上している。

3 ユーザの観察を支援するための表示法

3.1 隠線情報を付加したワイヤフレームと変形形状および表面応力分布の同時表示

変形前あるいは変形後の形状で応力分布を表示して、もう一方のワイヤフレーム(変形後あるいは変形前)を重ね合わせてステレオ表示すると、物理現象の観察が容易な場合がある。しかし、これらの表示に、通常よく用いられるz-バッファ法をそのまま適用すると、ワイヤフレームの隠線部分が表示されない。

そこで、応力分布の疑似カラー表示を行いながら変形の様子を同時に観察することにより、理解を容易にするため、隠線情報を付加したワイヤフレームと変形形状および表面応力分布を同時に描く手法を提案する(表2③, ⑥)。

変形後のワイヤフレームと変形前の形状で応力分布を描く場合(表2③)について、その処理手順を以下に示す。

- (1) フレームバッファに、変形後のワイヤフレームを書き込む。
- (2) (1)の結果に、変形後の要素構成面を背景色で重ね書きすることにより、ワイヤフレームの隠線消去を行う(z-バッファ使用)。
- (3) フレームバッファに書き込まれているワイヤフレームを、画素単位ごとにz値とともに配列に格納する。
- (4) フレームバッファの内容を消去する。
- (5) 変形前の形状で、応力分布をフレームバッファに書き込む。
- (6) (3)で配列に格納した変形後のワイヤフレームと、(5)で書き込んだフレームバッファの内容について、同一画素のz値を比較する。この

結果、変形後のワイヤーフレームが、変形前の応力分布表示を行った要素構成面より、視点から見て遠くになれば赤色、そうでなければ白色を、フレームパツファの対応する画素に書き込む。

(7)対象となる全ての画素について(6)を繰り返す。

図5に、隠線の情報を付加した変形表現の例を示す。

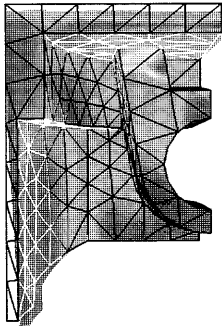
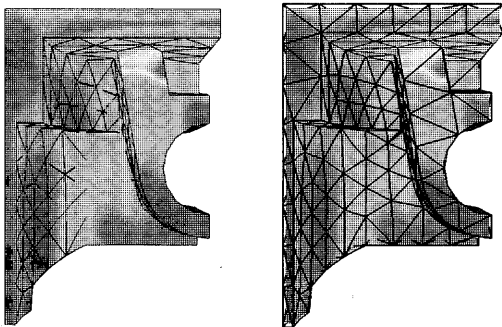
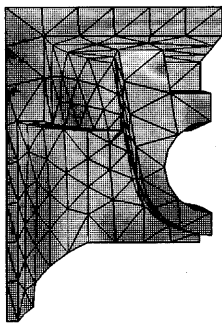


図5. 隠線情報を付加した変形表現例



(a) 同一頂点使用

(b) 頂点を視点方向に移動



(c) 提案手法 (法線ベクトル使用)

図6. 要素外形表示

3.2 要素外形(稜線)の表示法

同一頂点座標を使用して、要素構成面の色塗り、および要素の外形(稜線)表示を行うと、図6(a)のように視点の方向・角度によっては、数値計算誤差により外形線が途切れる。

これを避ける簡便な方法として、頂点を視点の方向に移動させる方法が考えられるが、頂点の移動量を大きくすると外形線が浮き上がった状態(図6(b))となり、逆に小さいと要素の面の向きによっては、外形線が途切れる。また、視点が変わるたびに、頂点座標の再計算を必要とする。

上述の問題を解決し、視点が連続変化する際に、要素外形表示をリアルタイムで行える方法を提案する。

すなわち、各頂点の法線ベクトルを新たに定義し、これを利用して、外形ワイヤーフレームを表示する。以下に具体的な頂点の法線ベクトルの計算手順を示す。

(1)各頂点の法線ベクトルを、その頂点を共有する全ての面の単位法線ベクトルの和により求める。

図7の例において、頂点 P_1 の法線ベクトル N は、面A, B, C, Dの各単位法線ベクトルを $N_A \sim N_D$ とすると、次式で与えられる。

$$N = N_A + N_B + N_C + N_D \quad (1)$$

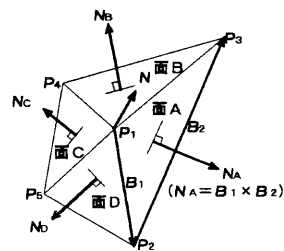


図7. 頂点の法線ベクトル

(2) (1)で求めた単位法線ベクトルを利用して新たな頂点の決定を行う。

すなわち、頂点の法線ベクトル N の単位ベクトルを N' とすると、外形線描画用の仮の頂点の座標 P_1' は次式で与えられる。

$$P_1' = P_1 + \varepsilon N' \quad (\varepsilon : \text{定数}) \quad (2)$$

ここで、 P_1 は本来の頂点座標である。

(3)要素を構成する全ての頂点について、同様にして上述の頂点を求め、これを利用して外形表示を行う(図6(c)参照)。

このように法線ベクトルの向き(要素の外側向き)に頂点を移動させることにより、視点の位置に依存しない外形表示が行える。この方法は、外形線描画用頂点の座標の計算を、最初に1度だけ行えばよいので、視点移動中の外形線をリアルタイムで表示することができる。

3.3 時系列変化する現象のアニメーション表示

時間的な変化を伴う構造解析データをアニメーション表示すれば、現象のより正確な把握が容易になる。また、応力分布あるいは形状の時間的な変化の様子を克明に観察することができ、静止画像の観察からだけでは、理解が困難な現象でも直感的に把握でき、理解を深めることが可能である。

提案システムでは、時系列解析データに基づき、ダブルバッファを使用して一定周期で描画・表示フレームを切り替えることにより、時系列変化する現象のアニメーション表示を実現している。

また、一定時間間隔で解析したデータ間で物理量変化を滑らかに表示するため、ユーザが指定した数だけデータ間の補間を行い、指定した周期で表示・フレームの切り替えを行う。この分割数、周期は、インタラクティブに変更できる。

分割したある時点における物理量は、線形補間によりリアルタイムで求める。

すなわち、連続する解析データの物理量を x_k 、 x_{k+1} とし、その間の分割数を n とすると、分割した i ($0 < i < n$) 番目の物理量 x_i は、次式で求められる。

$$x_i = x_k + i(x_{k+1} - x_k) / n \quad (3)$$

3.4 任意箇所の物理量の数値表示

分布・変形の表示結果を観察しながら、必要に応じて評価すべき要素・節点を特定し、その点の物理量の数値を知ることができれば、効率の良い

解析結果の評価が行える。

提案システムでは、画面上に表示した物体の任意の箇所を、ユーザが要素あるいは節点単位で指定すると、それに対応する物理量の数値を表示する機能を備えている。また、時系列データについては、時間とともに変化する物理量をグラフで表示し、アニメーション表示時に対象物体の動き(変化)と同期させて表示することにより、解析評価をより容易にすることができる。

任意の節点・要素の指定およびその物理量の数値表示のための手順を以下に示す。

(1)ユーザが、指定する対象が要素か、あるいは節点かを指示する。

(2)(a)指定対象が要素の場合

物体表面の各要素構成面を、要素番号に対応した色で描画(塗りつぶし)する。

(b)指定対象が節点の場合

物体表面の各節点を、節点番号に対応した色で描画(点)する。

(3)画面上に描画した要素・節点番号情報を配列(メモリ)に格納する。

(4)画面上の表示内容を消去する。

(5)選択されている物理量による分布図を表示し、ユーザがマウスにより簡単に指定できるように、要素単位でワイヤフレーム表示を行う。

(6)ユーザは、画面上に表示された物体の中から指定したい要素/節点をマウスで指示する。

(7)指示された座標に対応する配列内容(2)で格納した色)から、要素あるいは節点番号を求める。

(8)求めた要素あるいは節点を画面上に表示し、それぞれの情報を表示するためのウィンドウを開く。

(a)指定対象が要素の場合

指定要素に含まれる節点の物理量、変位量(絶対値)を表示し、時系列データの場合は、時間とともに変化する物体の形状表示(アニメーション)と同期して、指定した要素に含まれる節点の物理量、変位量(絶対値)をリアルタイムで表示する。

(b)指定対象が節点の場合

指定節点における全物理量を表示する。時系列データの場合は、図8に示すように、物体のアニメーション表示と同期して、指定した節点における物理量と時間との関係を折れ線グラフで表示する。同時に節点における物理量の最大・最小値を表示する。また、アニメーション表示中は、グラフ中での現在位置をリアルタイムで表示する(図中の○印)。

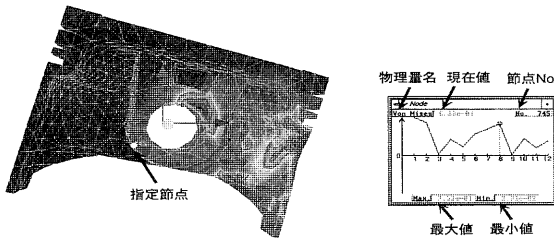


図8. 物理量の数値表示例

3.5 対象物体の表面抽出による表示の高速化

物理量の分布を表示する際、単純に隠れて見えない内部の面を含め、全ての要素構成面を表示すると、要素数の多い対象物体では表示に時間を要し、視点移動、アニメーション表示等の際、応答性が悪化する場合がある。一方、解析データの検証を行う場合、対象物体の表面のみの観察で十分なことが多い。

提案システムでは、要素タイプが(二次)四面体および六面体のものについて、対象物体の表面抽出を行い、物体内部の面の表示が不要な場合は、描画対象となる面を削減することにより、表示の高速化を実現している。

表面の抽出は、以下の手順で行う。

- (1)ある要素の一つの構成面について、他の要素と共有関係にあれば、この面を内部の面と判定する。
- (2)要素を構成する全ての面に対して、(1)の方法により共有関係を調べ、内部の面と判定された面を削除する。
- (3)全ての要素に対して(2)を繰り返す。

4 適用例

4.1 提案システムのインプリメント

提案システムは、シリコングラフィックス(SGI)社のIRIS Indigo2 Extreme(CPU:R4400 150MHz, 主記憶:128MB)上にインプリメントし、性能の評価を行った。

プログラムは、汎用性および拡張性を考慮してC++で記述し、ウィンドウシステム等グラフィックス機能に関しては、SGIのGLを使用している。

4.2 性能に関する評価

4.2.1 応答性に関する評価

各サンプルファイル表示にかかる時間を計測したものを表3に示す。サンプル1~5は、3.5の手法で抽出した表面データのみを使用している。

表中、④隠線表示は、3.1で述べた画素ごとの処理を伴う手法を使用しているため、2秒近く時間を要しているが、これを除けば、ユーザにあまりストレスを感じさせずに表示可能であることが分かる。

表3. 表示対象・方法による描画時間の比較 (単位:mS)

解析 ファイル	要素タイプ	要素数	① 応力分布	② ①+ 要素外形	③ ②+ 変形図	④ ②+変形図 (隠線表示)
サンプル1	四面体	4,099	80	165	230	2,030
サンプル2	二次四面体	4,226	115	190	240	2,480
サンプル3	二次四面体	738	60	80	95	1,465
サンプル4	二次四面体	111	50	55	60	1,260
サンプル5	六面体	16	40	45	50	1,110
サンプル6	四辺形	608	60	90	100	1,130
サンプル7	四辺形	3,338	95	320	400	1,590

4.2.2 時系列アニメーション表示に関する評価

表3のサンプル1およびサンプル7は、時系列データであり、この2つのデータについてアニメーション表示の際の平均フレーム描画時間を計測した。この結果、サンプル1で約5mS、サンプル

7で約15msだけ、表3に示したそれぞれのサンプルの各描画時間と比較して余分に時間を要した。これは、解析データ間の補間をリアルタイム処理しながら表示するために生ずる。したがって、表示内容が①、②、③の場合には、最悪でも2フレーム/秒のフレームレートを保証可能で、現状では実用上問題は無い。

4.3 高速化の評価

3.5で述べた表面抽出による高速化の効果を表4に示す。

この表から、表示すべき面の数が最低でも約60%、平均して約80%削減されていることが分かる。描画速度もサンプル1~4のようにある程度の要素数があれば、全データを表示した場合と比べて3倍以上高速になっている。

この結果、この手法が要素数の多い対象物体での回転、アニメーション表示にかなり有効であることが分かる。

表4. 表面抽出および適用結果

解 析 ファイル	要素タイプ	要素数	①		②		描画時間*		時 間 削減率 (%)
			全面数	表面数	面 数 削減率 (%)	(1)**	(2)**		
サンプル1	四面体	4,099	18,396	2,594	84.2	840	230	72.6	
サンプル2	二次四面体	4,226	16,904	2,126	87.4	1,100	240	78.2	
サンプル3	二次四面体	738	2,952	484	83.6	315	95	69.8	
サンプル4	二次四面体	111	444	72	83.8	180	60	66.7	
サンプル5	六面体	18	96	40	58.3	85	50	41.2	

* 応力分布+要素外形+変形図描画の場合で単位はms
** (1)①の全面を使用、(2)②で求めた表面のみ使用

5 おわりに

提案システムにより、3次元に分布したスカラー量およびベクトル量について、任意箇所を自由な方向から、かつ内部の面についてもグルーピング表示機能を用いて、観察者の思考を中断せずインタラクティブに観察することが可能になった。

解析結果である物理量（応力・変位）についても、多彩な表示方法を用意し、用途・対象に応じた選択が可能である。また、アニメーション表示により、解析結果の時間的変化が観察でき、機械

部分の形状あるいは機構の適否など、静止画だけからでは得られにくい新しい情報の獲得が可能になった。さらに、3次元空間内における解析結果をステレオ画像として表示でき、リアルタイムで変化するステレオ動画像も観察可能である。

このシステムは、物体内および物体間の相関関係、複雑な物体の形状、物体の時間的な変化等の理解を深めることができ、三次元空間に時間軸を付加した上で起こる物理現象の把握に有効である。

謝 辞

このシステムの開発にあたり、終始ご指導、ご助言を頂いた広島工業大学 中前教授、広島大学 山下教授、金田助教授に深謝します。

参考文献

- 1) H.Christiansen: Application of Continuous Tone Computer Generated Images in Structural Mechanics, Structural Mechanics Computer Programs Surveys, Assessments, and Availability, University Press of Virginia, Charlottesville, 1003/1015(1974)
- 2) B.H.McCormick, T.A.DeFanti, and M.D.Brown,eds.: Visualization in Scientific Computing, Computer Graphics, 21-6, 1/14(1987)
- 3) H.Yamashita, T.Joukoh and E.Nakamae: Interactive Visualization of Interaction between Magnetic Flux Density and Eddy Current in a 3D Steady State Field, IEEE Trans. on Magnetics, 28-2, 1778/1781(1992)
- 4) 山下, 上甲, 中前: 3次元交流定常場の相互作用のインタラクティブ可視化法, 情報処理学会論文誌, 32-5, 570/580(1991)
- 5) 清水, 長嶋: 構造解析の分野における可視化の現状, 日本機械学会誌, 96-6(1993)
- 6) CrystalEyes 2 Stereo Eyewear User's Manual, StereoGraphics Corporation
- 7) 中前栄一郎: コンピュータグラフィックス, オーム社(1987)
- 8) 中前, 西田: 3次元コンピュータグラフィックス, 昭晃堂(1986)