

4次元データにおける特徴領域探索のための2次元可視化

宮村 (中村) 浩子^{1,a)} 河村 拓馬¹ 鈴木 喜雄¹ 井戸村 泰宏¹ 武宮 博¹

受付日 2013年12月16日, 採録日 2014年6月17日

概要: 数値シミュレーションでは, ある変量軸を設定して計算を実行し, その変量の変化に応じてシミュレーション結果が変化する様子を観察することがしばしば行われる. 対象となるモデルが3次元である場合, シミュレーション結果は4次元となる. このような4次元以上の多次元データの解析は, 空間軸と変量軸で構成された多次元空間内を精査して特徴領域を特定する必要がある. しかし, 多次元かつ大規模な対象データから特徴領域を探し出す作業は, 膨大な手間と時間を要する. さらにすべての特徴領域を見逃しなく発見することは困難である. そこで, 本研究では, 4次元データから特徴領域を見逃しなく発見するために, 動画解析技術として利用されている時空間画像を応用した2次元可視化手法を提案する. 具体的には, 8分木構造を用いて空間軸を作成し, その軸とは垂直に変量軸を作成することで, 4次元データを2次元画像として可視化する. この2次元画像を観察することで, 見逃しなく特徴領域を発見できる. 実際に提案手法を原子力施設の時系列耐震シミュレーション結果と固有値解析シミュレーション結果に適用し, 応力値が相対的に高い領域の発見や, 周波数ごとに影響を受ける領域の探索を実施した. その結果, 提案手法を用いることで複雑かつ大規模な4次元データから特徴領域を効率的に発見できることを確認した.

キーワード: 可視化, 興味領域, 多次元データ, 大規模データ, 数値シミュレーション

2-Dimensional Visualization Technique for Exploring Region of Interest in 4-Dimensional Data

HIROKO NAKAMURA MIYAMURA^{1,a)} TAKUMA KAWAMURA¹ YOSHIO SUZUKI¹
YASUHIRO IDOMURA¹ HIROSHI TAKEMIYA¹

Received: December 16, 2013, Accepted: June 17, 2014

Abstract: In numerical simulations, variations of calculation results with respect to a variable axis are often observed. When the target model is given in 3D, the simulation results become 4D datasets. Such a multi-dimensional dataset given in more than 4D space is analyzed by detailed explorations of regions of interest (ROIs) in multi-dimensional space, which is composed of the space axes and the variable axes. However, for high-dimensional and large-scale datasets, this approach requires enormous processing time and effort, and may have difficulty in capturing all the ROIs with no omission. Therefore, we propose a 2D visualization technique that is based on a concept of spatiotemporal image used as a time-series image analysis technique for finding ROIs. In our technique, a space axis is created by hierarchical octree, a variable axis is defined in the direction perpendicular to the space axis, and a 4D dataset is represented on the plane with these axes. From this 2D image, we can easily find ROIs without missing important features. Our technique is applied to the results of time-series analysis and eigenvalue analysis of 3D seismic simulations of a nuclear plant, and regions with higher stress and characteristic frequency responses of each region are analyzed, respectively. Through the analyses, it is demonstrated that our technique can effectively capture ROIs from complicated and large-scale 4D datasets.

Keywords: visualization, regions of interest, multi-dimensional dataset, large-scale datasets, numerical simulation

¹ 独立行政法人日本原子力研究開発機構
JAEA, Kashiwa, Chiba 277-8587, Japan
^{a)} miyamura.hiroko@jaea.go.jp

1. はじめに

数値シミュレーションでは, シミュレーション時にある

変数を変量軸として設定することで、その変量の変化に応じたシミュレーションを実施でき、その変量値に対するシミュレーション結果の傾向を把握することができる。たとえば時刻歴を変量として設定することで、時系列シミュレーションの時間変化を把握できる。また、構造解析では、構造物の特性を表す値を変量として設定することで、特性の違いが現象に与える影響を把握できる。このように、3次元モデルの空間3次元に、ある変量軸を加えることで、4次元のシミュレーション結果が得られる。

シミュレーションによって得られた結果は、3次元モデルの形状特徴や変量の与え方の詳細度によっては膨大化する。そのため、結果を可視化によって解析する際に膨大な手間と時間を要する。これは、解析対象のデータが4次元データであるのに対して、可視化表示空間は一般的に2次元であるため、4次元変数空間内を探索しながら2次元平面に投影する作業を繰り返し行う必要があるためである。この繰り返し作業が、可視化結果の解析作業にかかる手間を膨大化し、可視化処理や可視化結果の解析作業にかかる時間を長大化するだけでなく、特徴領域の見落としを引き起こす要因となっている。

このようなデータ解析、特徴領域探索の課題に対して、様々な取り組みがなされている。従来から用いられている3次元幾何情報を保持したまま変量軸に沿った変化を可視化するアニメーションや、元の3次元モデルのデータサイズを削減することで実現する対話的可視化が有効とされてきた。しかし、幾何情報の複雑化により、従来の取り組みではオクルージョンを完全には排除できず、特徴領域を見落とししてしまう可能性が残る。

そこで、本研究では、可視化結果からオクルージョンを排除するために3次元モデルの幾何情報を破棄し、2次元可視化によって情報を提示する方法をとる。その際、ビデオ画像のような動画像解析技術として利用される時空間画像を利用し、空間軸と変量軸の2軸によって構成された2次元画像による情報提示を実施する。これによって大規模4次元データから特徴領域を探索し、発見できる。

また、提案手法を原子力施設の時系列耐震シミュレーション結果と固有値解析シミュレーション結果に適用し、その効果を検討する。それぞれ頂点数 26,047,774、四面体数 127,077,003 である3次元モデルが、時刻歴、または周波数ごとに得られるシミュレーション結果に対して、提案手法を適用することで1枚の画像から興味ある領域（ここでは応力値が相対的に高い領域や変位量の大きな領域）を発見できたので、あわせて報告する。

2. 既存研究

大規模複雑データから特徴領域を探索するには、探索空間を狭めるために対象データを圧縮する手法や、探索次元を圧縮する情報可視化手法や時空間画像等がある。これら

既存の可視化技術について紹介し、本手法と比較する。

2.1 圧縮による可視化探索の効率化技術

大規模データの可視化による解析では、データサイズがボトルネックとなる。これは、データサイズが大規模化するにつれて描画に要する時間が長大化し、対話的な操作を受け付けなくなるためである。そこで、可視化に要する時間を削減するデータ圧縮技術が多く提案された。

まず、元のデータの要素形態をそのまま引き継ぎながら要素数を削減する手法が提案された [1]。この手法は、四面体要素で構成されたボリュームデータに対して稜線縮退化操作によって、大きな特徴を残しつつ全体の要素数を削減する。要素数が削減されたことで可視化処理に要する時間を大幅に短縮でき、視線移動等の対話的操作が可能となる。しかし、複雑形状であったり、複雑な値の分布を持っていたりするデータは、簡略化による圧縮後のデータも複雑であり、特徴領域を発見するのは困難である。一方、データを構成する要素の形態そのものを変えることでデータ圧縮を実現した研究もある。ボリュームデータをポイントベースの表現形式に変換し、可視化する手法が提案された [2]。しかし、先の研究と同様に形状や値の分布が複雑である場合には、特徴領域を発見するのは困難である。特に時系列データのような変量軸を持つ4次元データに対しては、各変量値で特徴領域を探索する必要が生じてしまう。特徴領域を効率的に探索するということに着目した手法として iView が提案された [3]。ボリュームデータから球面投影によるエントロピーマップを作成し、そのマップから視線方向を決定する。つまりどの方向から観察すると特徴量が大きいか計算し導いてくれる。この手法を用いることで、3次元形状を注意深く観察するのに必要な手間を削減できるが、時系列データのような変量軸を持つデータに対しては、やはり複数の画像を並べて観察する必要がある。

時系列のボリュームデータをボリュームやサーフェイス情報として1枚の画像で示す試みもなされているが [4], [5]、大局的な特徴を示すことはできても、細かい特徴を解析するには、特徴の見落としが発生する可能性が残る。また、特徴ある空間領域や時刻を可視化結果から正確に取得することが困難である。テクスチャベースの時系列特徴を追跡する手法も提案されているが [6]、他の手法同様に大局的特徴の提示にとどまる。

2.2 情報可視化による特徴解析技術

科学的可視化手法だけでは、4次元以上の多変数値シミュレーション結果の概要と詳細を同時に観察することが困難であるために、データを抽象化して扱う情報可視化技術の利用が注目されている。

まず、すべての変量に対する情報を提示できるパラレルコーディネイトが提案された [7]。この手法を用いて時空

間全体の多変量データの分布を提示する手法が提案された [8]. これは、多変量軸を並列に配置し、サンプリングデータを軸にプロットして複数の折れ線グラフを提示する. そのため、各軸 (変量) 間の相関を得るのには非常に適しているが、特徴ある時空間を特定するのは難しい. また、T-IS (Topological Index Space, 位相索引空間) とよばれる時系列データプロファイルによって時系列データの位相変化を示す手法が提案された [9]. これによって時系列データのある変量に対して、等値面を抽出した際の位相が変化するタイミングをとらえられる. この手法は、元のデータの構造を把握するのに適した変量の値やそのタイミングをとらえることには長けているため、可視化パラメータの設定の指標としての利用が効果的である. しかし、時間軸のように、変量軸に対して徐々に変化するデータを対象としており、軸方向に不連続に変化するようなシミュレーション結果の解析には不向きである. また、多次元データの特徴探索に関しては、様々な手法が提案されているが、単独の可視化手法によって多次元情報を同時に示すことが困難であるため、複数のウィンドウと複数の可視化手法を用いて対話的操作によって特徴領域を探索する手法が主流となっている [10].

2.3 時空間画像

ビデオ画像に代表されるような時系列動画像を解析する際に、画像に映る動物体の動きを 2次元画像としてとらえられる時空間画像が利用されてきた. 図 1 に示すように、時空間画像では、画像列を時間軸方向に並べることで 3次元ボリュームデータを作成する. このボリュームデータを時空間画像とよぶ. 時空間画像から図 1 右に示すように断面を切り出すことで、同物体がある位置 (または高さ) を通過する様子を時刻歴方向の軌跡として観察できる.

この時空間画像の断面を観察することで、動物体を追跡する研究がなされている [11], [12]. また、時空間特徴領域を発見し、画像内で起こっているイベントを検出する研究もなされている [13]. これらの研究は、従来アニメーション機能によって膨大な数の画像を注意深く観察して解析していた作業を、静止画像 1 枚を観察することで解析できる

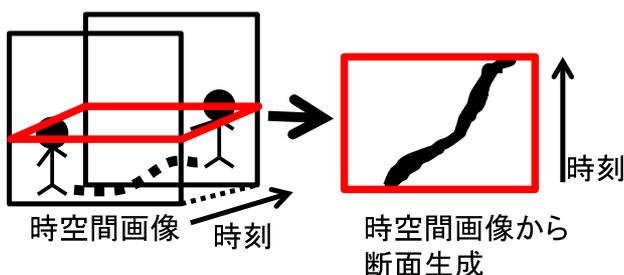


図 1 時空間画像生成の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of the creation of spatio-temporal image.

ようにした. しかし、時空間画像の利用は 2次元時系列画像に対する解析にとどまっており、3次元時系列データへの利用は見られない.

我々は、オクルージョンやアニメーションによる見落としを回避するために、時空間画像の考え方を利用し、2次元可視化を採用する. 4次元データを対象として、2次元画像に時刻や変量による変化の様子を 2次元画像上に投影する. 4次元データの 2次元可視化を実現するために、形状モデルの抽象化、マトリクス表示等の情報可視化技術を利用する.

3. 提案手法

本章では、大規模複雑な 4次元データから特徴領域を発見するための 2次元可視化手法を提案し、既存の科学的可視化と組み合わせた 4次元データ可視化ツールを紹介する.

3.1 4次元データマップ

可視化対象であるシミュレーション結果は、3次元の空間情報と変量を持つ 4次元データである. ここで双方の特徴領域を 1枚の画像から発見し、特定するためには、双方の情報をそれぞれ軸に反映させることが有効である.

ここで、空間 3次元を 1次元に次元圧縮するために、3次元モデルの 8分木構造表現を利用する. 8分木の作成は、まず、データ全体を覆い囲む矩形領域を作成し、各軸方向に二等分し、8つの部分矩形領域に分割する. 以降、分割を再帰的に繰り返す (図 2). 初めにデータ全体を囲んだ矩形領域をルートノードとすると、分割された部分矩形領域は分割前の矩形領域を親ノードとする階層構造データとなり木構造グラフで表現できる. このとき、同じ親ノードを持つ 8つの矩形領域は図 2 に示すように、木構造義グラフで隣り合う 2つの矩形領域が実空間でもつながっているように並べる. つまり、木構造グラフで隣り合うノード間は極力隣接するように配慮している. しかし、実空間で隣接する 2点が木構造グラフ上で遠くに配置されることがし

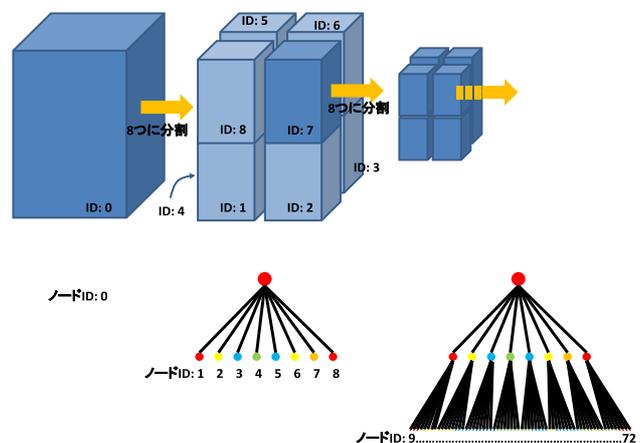


図 2 8分木構造表現と木構造グラフ

Fig. 2 Octree representation and tree graph.

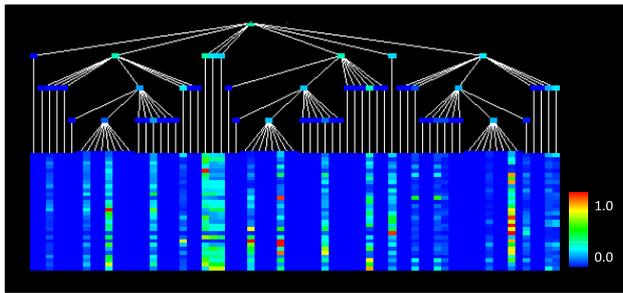


図 3 4次元データマップ；縦軸：時間ステップ，横軸：空間情報，8分木階層数：3階層

Fig. 3 4D datamap; the vertical axis: time steps, the horizontal axis: spatial information, the number of octree hierarchies: 3.

ばしば生じてしまう。

この階層構造データは、ノードが持つ物理値を参照することで枝切りができる。この枝切りを実施することで、表示解像度に合わせた詳細度で情報を提示したり、注目すべき物理データのある値に着目したときの詳細度で情報を提示したりできる。たとえば、矩形領域内にデータが存在しない枝を切ったり、表示解像度に合わせた数の葉ノードになるように枝切りを実施したりできる。さらに、弾塑性解析の場合には、弾性から塑性域に代わるタイミングの値で枝切りを実施することで、塑性域に達する領域を選択して観察できる。このように観察する際の環境に合わせて表示する詳細度を調整することもできる。なお、観察しながら観察対象となる枝切りの基準を変えたい場合は、対話的操作によっても実施できる。

変量軸は1次元情報を1次元軸に割り当てる。これによって空間軸と変量軸からなる2次元空間が生成でき、この2次元空間の各格子に、観察したい物理データの値を反映させた色を配置するマトリクス表示を用いる(図3)。ここで、横軸は3次元モデルの節点ではなく部分矩形領域の並びとなっている。各矩形領域には複数の節点が属し、節点の数だけ物理値が存在するため、代表値をとる必要がある。代表値としては、物理値の平均、最大、最小等、観察者が着目する対象に合わせて設定する。

このようにして生成した4次元データマップを観察することで、特徴領域を発見できる。たとえば、時系列データを対象とした場合には色に反映させた物理値が変動し始めた時間タイミングや、物理値が変動する周期を縦方向の縞模様から把握できる。また、物理値が相対的に高い領域は4次元データマップ上の点として発見できる。これらの発見した領域は、縦軸から時刻、横軸から空間範囲を特定できる。この情報をもとに、可視化する時刻、アニメーションの開始、終了時刻を決定したり、観察したい領域が正面になるようにモデルを回転させたりできる。

4次元データマップは、空間8分割を利用しているため、データが規則的に並んでいるか否か等対象モデルの形式は

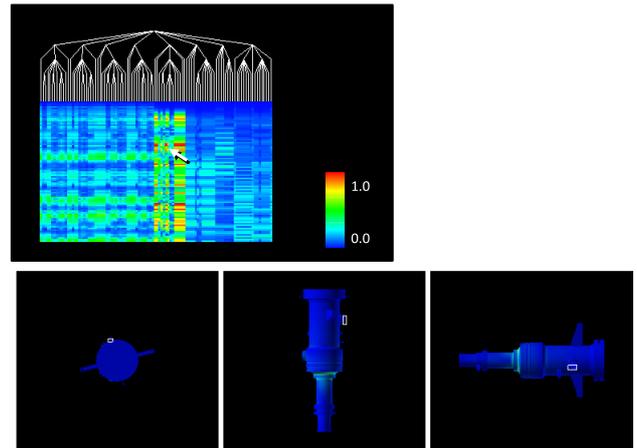


図 4 特徴領域の三面図上での提示

Fig. 4 Location of a selected ROI on the original model.

問わない。ただし、矩形領域から代表値だけを提示しているため、観察したい対象が代表値で表現できない場合には特徴領域を発見できない。たとえば、値が大きな領域を発見したい場合には、最大値を代表値として設定することで発見できるが、値の空間的な広がりから特徴領域を特定したい場合には本手法は向いていない。

3.2 3次元形状情報の簡易提示

4次元データマップは情報提示の際に形状情報を破棄するため、選択した特徴領域の3次元空間内での位置や形状を把握できない。この問題に対しては、三面図表現とブロック積み上げ表現の2つの機能を実装することで対応した。

(1) 三面図表現

元データである数値シミュレーション結果の三面図を用意し、三面図上のどの位置であるかを提示する。これによって、4次元データマップ上で選択した特徴領域が3次元上のどの位置であるかを瞬時に把握できる。なお、この機能の追加にあたって、三面図の提示は2次元画像を3枚用意するだけでよく、4次元データマップで扱うデータの増大化はほとんど生じない。また、三面図上の位置は、各次元の再帰的な等分化による8分木構造表現であるため、細分化した部分矩形領域のID番号の割当て方(図2)と、ID番号に対する8の除算によって瞬時に求めることができる。

図4に、4次元データマップ上から選択した領域を三面図上で示した結果を提示する。4次元データマップ上から特徴ある領域をマウスでクリックすると、その時刻と部分矩形領域のIDが取得できる。このIDから対応する領域を特定し、白枠で示す。

(2) ブロック積み上げ表現

三面図での空間的な位置の提示に加えて、より直感的に3次元空間の位置を把握できるようにするために、ブロッ

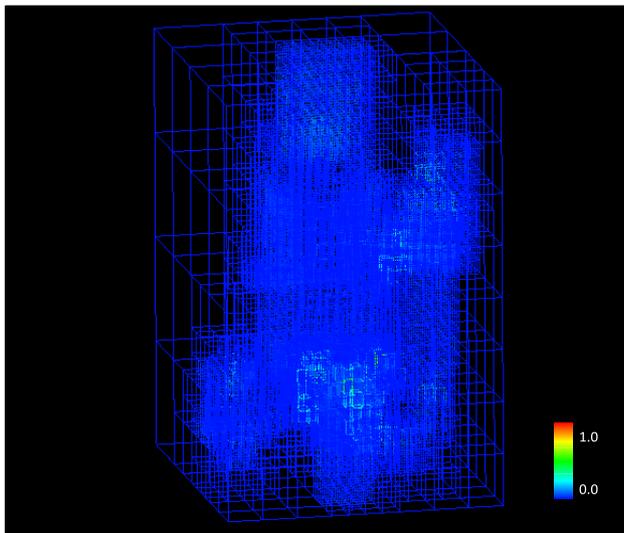


図 5 ブロック積み上げ表現による 3 次元形状の提示

Fig. 5 Representation of three-dimensional shapes by blocks.

ク積み上げ表示を実装する。これは、8分木構造の葉ノードを利用した 3 次元モデルの提示である。葉ノードに属する部分矩形領域の直方体のフレームを積み上げることで、元のモデルを比較的大きな直方体近似したモデルとして認識できる (図 5)。本機能では、葉ノードの (x,y,z) 各軸方向の範囲は容易に求まるため、やはり瞬時に 3 次元近似モデルを生成できる。直方体の色付けは、4 次元データマップで観察している色を割り当てることとする。

本機能の特徴は、4 次元データマップで利用しているデータだけで 3 次元空間内のおおよその位置を把握できることにある。また、4 次元データマップの詳細度を閾値によって適応的に変えた場合、ブロック積み上げ表現の詳細度も連動して変わる。これによって 4 次元データマップから発見した特徴領域と 3 次元空間内での位置情報を関連付けて把握できる。

これらの 2 つの機能を開発したことで、発見した特徴領域の 3 次元空間内での元のモデルの位置や形状をおおよそ把握できるようになる。また、どちらの機能も、ほぼ 4 次元データマップが必要とするデータから作成できるため、データ量を増加させることなく、空間認識を高めることができる。

3.3 4 次元データマップを用いた 3 次元形状モデル参照

4 次元データマップを用いた、可視化ツールを構築する。この構築にあたって 4 次元データマップから発見した特徴領域に属するデータだけを抜き出して部分矩形領域に属するモデル (部分モデル) を作成し、作成した部分モデルは商用の科学的可視化ソフトウェア AVS/Express (AVS は、Advanced Visual Systems, Inc. の登録商標) によって観察する機能を実装する。

特徴領域の部分モデル作成のために、まず、8 分木構造

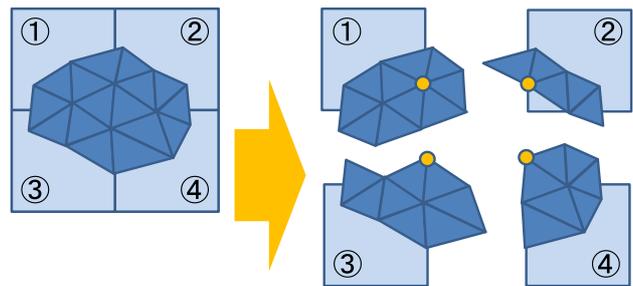


図 6 領域分割によるデータの分配

Fig. 6 Distribution of data by domain decomposition.

データの最下層である葉ノードには、葉ノードの矩形領域に属する部分モデルを持たせる。これを部分モデルの最小単位とする。葉ノードに部分モデルを持たせるためには、葉ノードの矩形領域に含まれる要素を各葉ノードに分配する。この際、特徴領域が領域分割の際の境界上に存在した場合を考慮し、各要素の一部でも含まれている場合 (四面体要素の 1 節点でも部分矩形領域に属する場合は、その領域に属するものとする。たとえば、図 6 に示すような分割が実施された場合 (ここでは簡単のため 2 次元での説明とする)、オレンジの丸で示す頂点は、領域 ① から ④ すべての領域に属することとなる。これはこの頂点を構成要素とする三角形要素がすべての領域にかかっているためである。こうすることで、この頂点の特徴量が大きかった場合、どの葉ノードを特徴領域として可視化した場合にも発見できる。

部分モデルは、葉ノードだけに持たせている。つまり、上位階層が 4 次元データマップから特徴領域として指定された場合には、選択された領域の子孫ノードである葉ノードが持つ部分モデルを統合して上位階層の部分モデルを生成する。この際、先に述べたように境界上では重複して要素を持たせているため、統合の際に同じ要素 (要素の重なり合い) が発生する可能性がある。要素の重なり合いが生じたまま描画すると、無駄な描画が生じて可視化処理時間が増加するだけでなく、得られた可視化結果画像にちらつきが生じる。これを回避するために、領域に属する部分モデルを生成する際に、異なる領域間にかかる要素に関しては、その情報を別途重複情報として記録しておく。この重複情報を参照し、統合の際の重なりを除去する。

この統合処理は、階層が変わるたびに行う段階的処理のため、たとえば 5 階層の 4 次元データマップから 3 階層目の部分モデルを作成する場合、該当する葉ノードに対して、8 個の部分領域を統合して 4 階層目の部分モデルを作成し、さらに 4 階層目の 8 個の部分モデルを統合してターゲットとなる 3 階層目の部分モデルを生成することとなる。

4. 実験

提案手法を原子力施設の時系列耐震シミュレーション結果と固有値解析シミュレーション結果に適用した。なお、

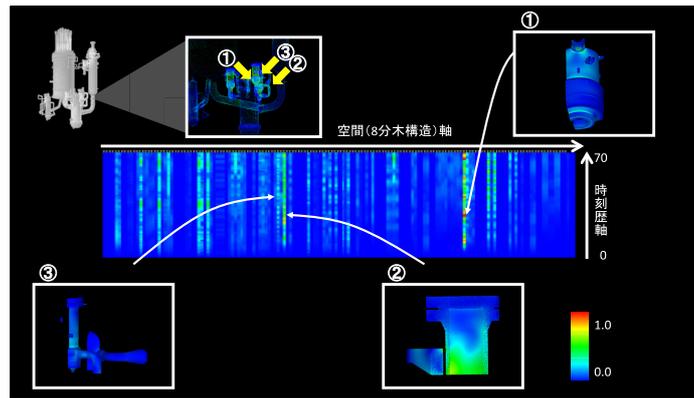


図 7 原子力施設の耐震解析結果の 4 次元データマップにおける特徴分析；縦軸：時間ステップ，横軸：空間情報，色：規格化したミーゼス応力

Fig. 7 Feature analysis of 4D datamap of seismic simulations of a nuclear plant; the vertical axis: time steps, the horizontal axis: spatial information, the color wedge: normalized von Mises stress.

ここで使用するデータは原子力施設を 3 次元モデル化し、シミュレーション実験を実施した結果である。

可視化環境には Dell Precision T7500 (2 QUAD CORE 2.93 GHz XEON, 64 GB RAM), を用い、3.3 節で述べた分割、統合実験には Dell Precision T5400 (2 QUAD CORE 3.16 GHz, 32 GB RAM) を用いた。また、実験に使用したシミュレーション結果のサイズは、頂点数 26,047,774, 四面体数 127,077,003 である。時系列耐震シミュレーション結果データの時刻歴は 70, 物理値としてミーゼス応力, 変位ベクトル (ベクトル成分 3) を持つ。今回の実験ではミーゼス応力を可視化対象とし、最小値から最大値を 0 から 1 に正規化し、青から赤の色を割り当てた。固有値解析シミュレーション結果データに関しては、300 モード得られたシミュレーション結果の中から約 1.3926 Hz から 22.0420 Hz までに対応する 100 モードを解析対象とした。物理値としては、変位量 (変位ベクトル長) とした。ここでの変位量は各モードで最小値から最大値を 0 から 1 に正規化し、青から赤の色を割り当てた。

4.1 原子力施設データの時系列耐震シミュレーション結果への適用

原子力施設の耐震シミュレーション結果 1 ステップ分のデータサイズは 4.1 GB であった。このシミュレーション結果から 4 次元データマップを生成した (図 7)。縦軸は時刻歴, 横軸は 8 分木構造によって表現された空間, 色は 8 分木構造のノードにあたる矩形領域内の最大応力値を表している。ここでは、4 階層のデータマップを生成した。

4 階層目の矩形領域内にシミュレーション結果データを含む領域は 3,932 個であったため、3,932 個の部分モデルが生成された。この部分モデルデータの総データサイズは 7.5 GB であり、元のシミュレーション結果の 2 倍近く増加している。この要因は、境界上では重複して要素を持たせ

表 1 選択した特徴領域の統合処理時間

Table 1 Processing time for integrating sub-volumes in a specified ROI.

階層	処理時間 (秒)	モデルサイズ (MB)
2	9,365	495.6
3	1,791	196.0
4	104	91.2

ているためである。また、統合の際に用いる重複要素の除去に必要な重複情報は 36.5 MB となった。

さらに、統合に要する時間を測定した。部分領域ごとに属する四面体数にばらつきがあるが、3 階層目の特徴領域に対する部分モデルを作成するには、8 個の部分モデルを統合処理し、2 階層目の特徴領域部分モデルを作成するには、8 個の部分モデルの統合処理を、8 + 1 回必要とする。表 1 に 4 次元データマップからミーゼス応力値の最大値が相対的に高い領域を選択し、統合にかかる処理時間を測定した結果を示す。その結果、あるケースでは 3 階層目の部分モデル作成には約 100 秒要し、以降階層が上がるごとに 1 ケタ処理時間が増加する傾向にあった。ただし、これらは選択した領域が上位階層であった場合にだけ必要な処理である。観察対象となる特徴領域は 4 次元データマップ上では最下階層であることが多く、最下階層の領域が選択された場合には、統合処理は発生しない。

シミュレーション結果を、提案技術を用いて分析する。本分析では、機器や建屋にかかる応力の分布や変化の状況を把握することが重要であることから、4 次元データマップ作成の際には、分割した各部分領域の最大ミーゼス応力値に応じて色付けを行った結果を観察する。その結果、ところどころ最大ミーゼス応力値が相対的に高い領域を発見できる。

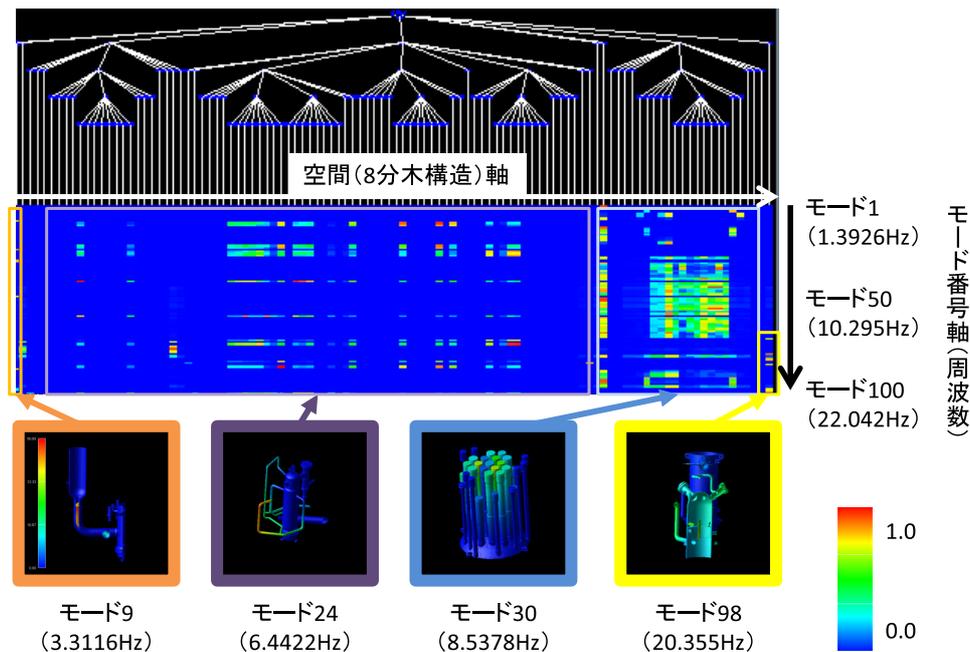


図 8 原子力施設の固有周波数データの 4 次元データマップにおける周波数ごとの特徴分析；
縦軸：固有モード番号，横軸：空間情報，色：規格化した固有モードの変位量

Fig. 8 Featured frequency analysis of 4D datamap of eigenvalue data of a nuclear plant;
the vertical axis: eigenmode number, the horizontal axis: spatial information,
the color wedge: normalized displacement of eigenmodes.

次に，発見した領域に焦点を当てる．図 7 から，たとえば ① から ③ の領域に特徴を発見した．まず，最大ミーゼス応力値が最も高い ① の領域について観察すると，機器に接続する配管の付け根の下部に相対的ミーゼス応力値が高い領域を見つけることができた．この領域は下から見上げるように観察しないと発見できない領域であるとともに，非常に微小領域であるため，シミュレーション結果全体を対象とした観察では発見が困難である．次に，やはりミーゼス応力値が相対的に高かった ② の領域に注目すると，配管の内側にミーゼス応力値が相対的に高い領域を発見した．この領域は原子力施設内部に視線を潜らせて詳細に観察しないと発見できないため，ウォークスルーによって視線を潜らせるか，断面生成や等値面生成等の可視化マッピング処理によって周りを囲む領域を排除しなければ発見が難しい．また，ミーゼス応力の値の変動を観察するために，縦方向の色の縞模様の間隔に注目すると，縞模様の間隔が他の領域と比べて狭い ③ の領域を発見することができる．この領域は，青と水色の縞模様であるため大きな力がかかっているわけではないが，破線が他の領域と比較して規則的に生じているように認識でき，長時間にわたって短い間隔で力が加わっていることが分かる．なお，この領域を実空間で可視化すると，細い部品が地面と水平に伸びていることが分かり，形状の特徴によって生じた現象であることが予測できる．このように，詳細に観察すべき領域を絞り込むことで，従来手間と時間を要する作業で

あった可視化による解析が容易になった．なお，今回発見した ①～③ の特徴領域は実空間で可視化してみると近くに存在していることが分かった．これは，3.1 節でも述べたように，実空間で近い 2 点が必ずしも 8 分木構造上で近くに配置されるわけではないためである．

なお，提案手法を用いないで元データの全領域を AVS/Express を用いて表面コンタ可視化した場合，描画速度は約 1.5 fps であった．上述したような特徴領域を発見するためには，上下左右あらゆる方向から注意深く観察する必要があるだけでなく，断面生成や等値面生成のような可視化マッピング処理が必要となる．その場合には上述の描画速度に加えて，可視化マッピング処理に要する時間もかかる．これに対して，提案手法によって部分モデルを同様に表面コンタで可視化した結果では，3 階層目の部分モデルで約 30 fps であった．

4.2 原子力施設の固有値解析シミュレーション結果への適用

原子力施設の振動解析では，周波数ごとに影響を受ける機器が異なるため，固有値解析による各機器の影響を分析している．この数値シミュレーション結果に対して，周波数と振動する機器の関係を可視化によって分析する．

4次元データマップを図 8 に示す．縦軸は周波数を示すモード番号であり，上から下に向けて周波数が高くなる．横軸は 8 分木構造によって表現され，色は 8 分木構造の

ノードにあたる矩形領域内の最大変位量を表している。

4次元データマップから1階層目(全領域を8分割した矩形領域)を観察する。それぞれの領域での代表的な画像を図8に示す。左端(オレンジ枠:図2におけるID=1,以降ID番号は図2で示す位置を表している)の領域は原子力施設の下部に位置し,この領域で低周波振動において最大変位量が比較的大きな値が断続的に現れている。発見した時空間情報から3次元形状を可視化した結果を左端に示す。この領域は2重配管であり,内側の配管がこれらの周波数に対して共鳴的な反応をしていることが分かった。この領域の隣にあるID=2の領域は値の分布があまりみられない。次に紫枠で示す領域(ID=3,4)では,複雑に接続された細い配管群が属する矩形領域であり,4次元データマップから複数の周波数で値が変化していることが分かる。このことから,この領域は1.3926 Hzから22.0420 Hzの振動に対して配管が共鳴的な応答を示すことが分かった。また,元の3次元形状モデルを可視化し,確認すると,変位が生じているのは細い配管であることが分かった。この領域の隣にあるID=5の領域は値の分布があまりみられない。青枠で示す領域(ID6,7)では,制御棒を格納する配管群が属する領域である。この領域は広範囲にわたって色の変化がみられるだけでなく,多くの周波数で色が変わっており,この範囲の周波数で共鳴が起こりやすいことが分かる。また実空間で可視化すると,幅広い周波数領域で応答し,その変位分布は周波数に応じて周辺部,もしくは中央付近に集中していることが分かった。最後に黄枠で示す領域(ID=8)では,周波数が12.9479 Hzから22.0420 Hzの間で色が変わる領域を発見できる。このことから20 Hz周辺の周波数で反応しており,実際の地震に近い周波数に共鳴的な応答をしていることが分かった。このように,それぞれの領域が共鳴的な応答を示す周波数を把握することができ,さらに部分領域を実空間上で可視化することで,共鳴の様子を把握できる。

5. おわりに

我々は,3次元幾何情報と変量軸からなる4次元データの概要を把握し,特徴領域を発見する4次元データマップを提案した。提案手法である4次元データマップによって発見した特徴領域に含まれる部分モデルを切り出す技術をあわせて実装したことで,大規模データから観察すべき領域を絞り込むことができ,可視化による解析作業の効率化を実現した。

本論文では,原子力施設の耐震解析を実施したシミュレーション結果に提案手法を適用し,シミュレーション結果全体に対しては対話的な可視化が困難であったデータに対しても対話的処理を実現し,4次元データマップから発見した特徴領域の実空間可視化による観察を可能にした。その結果,配管の下部や内部のような,発見しにくい特徴

領域の発見につながった。また固有値解析結果の可視化によって様々な機器の周波数応答の傾向を分析できた。

今後は,さらなる大規模化を想定し,切り出した部分モデルに対しても,詳細度を調整する技術を検討する。また,現在8分木構造によって3次元空間を1次元に圧縮して表現している空間軸の定義について議論を進める。

謝辞 本研究の一部は,文部科学省HPCI戦略プログラム次世代ものづくり分野4課題5「原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発」(課題番号:hp130029),平成26年度文部省科学研究費補助金若手研究B(課題番号24700110)の元で実施したものです。また,本研究を進めるにあたり,データを提供していただいた日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター高温工学試験研究炉部HTTR運転管理課諸氏,システム計算科学センター西田明美氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Staadt, O.G. and Gross, M.H.: Progressive Tetrahedralizations, *Proc. IEEE Visualization '98*, Durham, North Carolina, USA, pp.397–402 (1998).
- [2] Sakamoto, N., Kawamura, T. and Koyamada, K.: Improvement of Particle-based Volume Rendering for Visualizing Irregular Volume Data Sets, *Computers & Graphics*, Vol.34, No.1, pp.34–42 (2010).
- [3] Zheng, Z., Ahmed, N. and Mueller, K.: iView: Feature Clustering Framework for Suggesting Informative Views in Volume Visualization, *IEEE TVCG*, Vol.17, No.12, pp.1959–1968 (2011).
- [4] Woodring, J. and Shen, H.-W.: Multi-variate, Time Varying, and Comparative Visualization with Contextual Cues, *IEEE TVCG*, Vol.12, No.5, pp.909–916 (2006).
- [5] Barakat, S.S., Rutten, M. and Tricoche, X.: Surface-Based Structure Analysis and Visualization for Multifield Time-Varying Datasets, *IEEE TVCG*, Vol.18, No.12, pp.2392–2401 (2012).
- [6] Caban, J., Joshi, A. and Rheingans, P.: Texture-based Feature Tracking for Effective Time-varying Data Visualization, *IEEE TVCG*, Vol.13, No.6, pp.1472–1479 (2007).
- [7] Inselberg, A.: The plane with parallel coordinates, *The Visual Computer*, Vol.1, pp.69–91 (1985).
- [8] Tory, M., Potts, S. and Moller, T.: A Parallel Coordinates Style Interface for Exploratory Volume Visualization, *IEEE TVCG*, Vol.10, No.1, pp.71–80 (2005).
- [9] Fujishiro, I., Otsuka, R., Takahashi, S. and Takeshima, Y.: T-Map: A Topological Approach to Visual Exploration of Time-Varying Volume Data, *High-Performance Computing Lecture Notes in Computer Science*, Vol.4759, pp.176–190 (2008).
- [10] Maciejewski, R., Rudolph, S., Hafen, R., Abusalah, A.M., Yakout, M., Ouzzani, M., Cleveland, W.S., Grannis, S.J. and Ebert, D.S.: A visual analytics approach to understanding spatiotemporal hotspots, *IEEE TVCG*, Vol.16, No.2, pp.205–220 (2010).
- [11] Patras, I., Hendriks, E.A. and Legendijk, R.L.: Video segmentation by MAP labeling of watershed segments, *IEEE TPAMI*, Vol.23, No.3, pp.326–332 (2001).
- [12] Ricquebourg, Y. and Boutheymy, P.: Real-time tracking

of moving persons by exploiting spatio-temporal image slices, *IEEE TPAMI*, Vol.22, No.8, pp.797–808 (2000).

- [13] Laptev, I. and Lindeberg, T.: Apace-time interest points, *Proc. IEEE ICCV 2003*, p.432 (2003).



宮村 (中村) 浩子 (正会員)

平成 16 年お茶の水女子大学大学院人間文化研究科複合領域科学専攻博士後期課程修了。同年より東京農工大学大学院生物システム応用科学府助手，助教を経て，平成 21 年 11 月より (独)

日本原子力研究開発機構研究員。平成 25 年 7 月より同機構副主幹研究員。可視化の研究に従事。博士 (理学)。日本原子力学会，日本電気学会各会員。



河村 拓馬

平成 20 年京都大学大学院工学研究科博士前期課程修了。平成 23 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。同年より日本原子力研究開発機構研究員。可視化に関する研究に従事。博士 (工学)。日本原子力学会，日本シミュレーション学会各会員。

シミュレーション学会各会員。



鈴木 喜雄

平成 8 年広島大学大学院理学研究科物性学博士課程修了。同年より日本学術振興会特別研究員 (所属，核融合科学研究所)。平成 11 年 1 月より日本原子力研究所那珂研究所博士研究員。平成 14 年 1 月より科学技術振興事業団特別研究員 (所属，日本原子力研究所)。

平成 14 年 4 月より日本原子力研究所研究員，平成 16 年 4 月より同研究所副主任研究員，平成 16 年 9 月より文部科学省研究振興局情報課専門職，平成 17 年 10 月より日本原子力研究開発機構副主任研究員を経て，平成 21 年 7 月より同機構主任研究員。原子力施設の耐震シミュレーションの研究に従事。博士 (理学)。日本原子力学会，日本計算工学会各会員。



井戸村 泰宏

平成 12 年京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻博士後期課程修了。同年より日本原子力研究所那珂研究所研究員，研究副主幹，日本原子力研究開発機構システム計算科学センター研究副主幹を経て，

平成 25 年 7 月より同センター研究主幹。核融合プラズマシミュレーション等，大規模流体解析に関連する HPC 技術，可視化技術の研究に従事。博士 (エネルギー科学)。日本物理学会，日本原子力学会，プラズマ・核融合学会各会員。



武宮 博

昭和 61 年東北大学大学院理学研究科天文学博士前期課程修了。平成元年同博士後期課程中退。同年日立東日本ソリューションズ (株) 入社，平成 14 年より産業技術総合研究所グリッド研究センターへ派遣，平成 20 年 7 月より (独) 日本原子力研究開発機構入社システム計算科学センター高度計算機技術開発室室長，研究主席。大規模並列計算，大規模データ処理の研究に従事。石川賞受賞。博士 (電気)。日本原子力学会各会員。

大規模並列計算，大規模データ処理の研究に従事。石川賞受賞。博士 (電気)。日本原子力学会各会員。