

4次元数値シミュレーションデータ探索のための 対話的情報可視化

宮村(中村)浩子[†] 河村拓馬[†] 鈴木喜雄[†] 井戸村泰宏[†] 武宮博[†]

本稿では、時系列データのような4次元データから興味ある領域を対話的に選択して抽出するアプローチを提案する。大型計算機の性能の向上によって、数値シミュレーションは大規模化、複雑化し、高次元化している。ユーザは4次元データに対して、対話的な可視化によって観察するが、大規模な数値シミュレーションデータに対しては、膨大な時間を費やしたとしても観察できないことがある。そこで我々は、一目で4次元空間内のデータの変化を可視化するための4次元データの可視化技術を提案する。

Interactive Visualization Technique for 4 dimensional numerical simulation datasets

HIROKO NAKAMURA MIYAMURA[†] TAKUMA KAWAMURA[†]
YOSHIO SUZUKI[†] YASUHIRO IDOMURA[†] HIROSHI TAKEMIYA[†]

In this paper, we propose an interactive approach to select and extract interested regions from 4-dimensional datasets, such as time series datasets. As the performance of supercomputers had increased, numerical simulations have increased in scale and complexity, and have involved higher numbers of dimensions. A user can observe the 4-dimensional datasets with interactive visualization technique. However, occasionally, the user cannot observe such large-scale numerical simulation results, even though they have spent a great deal of time. Therefore, we propose a 4-dimensional data mapping technique by which the change in the data over 4-dimensional space can be visualized in a single display.

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、ある変数を軸として設定することで、その変数に沿った数値シミュレーション実験を実施でき、傾向を把握することができる。

しかし、このようにして得られたシミュレーション結果は、3次元形状に変量軸を1次元加えた4次元データとなり、可視化による解析に膨大な手間と時間を要する。これは、可視化による表示空間が一般的に2次元であるのに対して、探索空間が4次元であるために生じる問題である。このような可視化表示空間より高次元なデータを、可視化によって解析するには、対象データを2次元空間に投影する作業を繰り返し行なう必要がある。この繰り返し作業は、解析作業の手間を膨大化し、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。

上記のような可視化によるデータ解析、特徴領域探索の課題に対して、我々は3次元モデルの形状情報を破棄し、データを抽象化し、グラフとしてその特徴を表現する情報可視化技術を用いて解決する。情報可視化技術に関しては、空間3次元を8分木構造によって1次元化し、そこに変量軸の1次元を加えた2次元空間を作成し、マトリクス形式で情報を提示する。これによって、8分木で表現した空間分解能で空間内に存在する物理データの分布の様子を捉えることができ、その分布の様子を変量軸にそって観察できる。これは、空間および変量軸上の特徴領域の発見につな

がる。さらに、発見した特徴領域に対しては、サイエンティフィック・ビジュアライゼーション手法を用いて形状情報も含めた詳細情報を可視化する。

つまり、本研究では、新しい4次元データの情報可視化技術を提案し、その情報可視化技術とサイエンティフィック・ビジュアライゼーション技術双方を利用した、対話的4次元データ探索ツールを提案する。

2. 既存研究

4次元データから可視化によって特徴領域を発見する際には、2次元表示空間への繰り返し投影が必要となるため、対話的な繰り返し操作を妨げるデータの大規模化がボトルネックとなる。そこで、可視化によって探索する空間を絞り込めるような可視化手法が提案された。

まず、エントロピーを用いて特徴領域を効率的に探索するiViewが提案された[1]。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わびゲートしてくれる。この手法を用いることで、対象データを注意深く観察するのに必要な視線パラメータの決定に要する手間を大幅に削減できる。しかし、時系列データのような変量軸をもつ4次元データに対しては、複数の画像を並べて観察する必要がある。4次元データで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、時系列情報を埋め込み、1枚の画像で示す研究も提案された[2, 3]。しかしこれらの手法では大局的な特徴を

示せても、細かい特徴の見落としが発生する。また、特徴ある領域やタイムステップを可視化結果から正確に取得することが困難である。テキスト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[4]、他の手法同様に大局的特徴の提示にとどまる。

次に、情報可視化技術に注目すると、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ディネイトが提案された。この手法を用いた時空間全体の多変量データの可視化手法は、多変量軸を並列に配置し、各領域や時間を軸にプロットして複数の折れ線グラフとしてデータの傾向を提示する[5]。そのため、各軸（変量）間の相関を得て特徴ある変量の値を発見するには適しているが、特徴ある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[6]。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捉えられる。これは、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捉えることに長けているため、可視化パラメタの設定の指標として利用できる。しかし、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空間に対して分布する情報と変量に対して分布する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[7]。

3. 提案手法

本節では、大規模・複雑な4次元データの概要観察、特徴領域の発見を満たすための情報可視化技術を提案し、既存のサイエンティフィック・ビジュアライゼーションと組み合わせたデータ解析利用を提案する。

3.1 4次元データマップ

我々は、1枚の画像から4次元データの物理データの分布の概要を、まずは対話的な操作なしに一目で観察でき、特徴領域を発見し、注目したり選択したりできる4次元データマップを提案する。

可視化対象のシミュレーション結果は、3次元の空間情報と変量をもつ4次元データである。ここで双方の特徴領域を1枚の画像から特定するためには、双方の特徴をそれぞれある軸に反映させることが有効である。そこで、本研究では、3次元空間情報を1次元に投影し、変量をもう1次元にマッピングする2次元空間を使った情報可視化提示を用いる。

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Octreeによる階層構造表現を利用する。Octreeは、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1)。初めにデータ全体を囲んだ矩形領域をルートノードとし、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してTree Graphで表現できる。なお、この階層構造データは、ノードがもつ物理値を参照することで枝切ができ、観察者の興味に応じて領域ごとに分割する回数に反映される詳細度を調整できる。

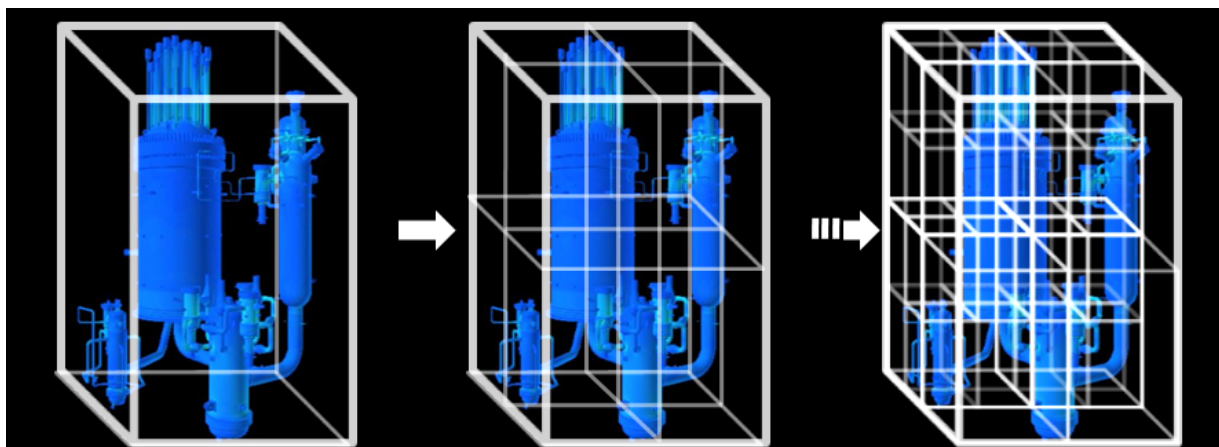


図1 原子カプラントデータの8分木表現

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した色を配置する。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。各格子には複数の節点が属し、節点の数だけ物理データの値が存在するため、代表値をとる必要がある。代表値としては、平均、最大、最小等、観察者が着目する対象に合わせて対話的に選択する。

この4次元データマップは、横軸に空間、縦軸に変量、色に物理データの値を反映させた2次元画像である。画像から、物理データの値に着目した際の空間、変量の特徴領域を探索できる。例えば、時系列データを対象とした場合には色に反映させたデータの値が変動し始めたタイミングや、値が変動する周期を4次元データマップの縦方向の値の変動パターンから発見できる。また、物理データの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。これら発見した領域は、縦軸から時間ステップ、横軸から空間範囲を特定できる。この情報をもとに、可視化する時間ステップ、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したりできる。

3.2 特徴領域の簡易提示

4次元データマップは情報提示の際に形状情報を破棄しているため、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、2つの機能を開発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、4次元データマップ上で選択した領域が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枚用意するだけでなく、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Octree表現であるため、細分化した部分矩形領域のID番号の割り当て方と、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2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対話的にマウスでクリックすると(図2上段白矢印)、その時間ステップと部分矩形領域の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、ブロック表現機能を開発する。これは、8分木の葉ノードレベル

での3次元モデルの提示である。葉ノードを構成する直方体を組み立てることで、元のモデルを直方体近似したモデルとして認識できる(図3)。本機能開発では、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。

本機能の特長は、4次元データマップで使用するデータだけで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対話的に変えた場合、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リンクして把握できる。もし、4次元データマップの階層を深くした場合には、元の3次元モデルの概形を把握できる精度にもなる。

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、サーバからのデータ転送量を増加させることなく、空間認識を高めることを実現する。

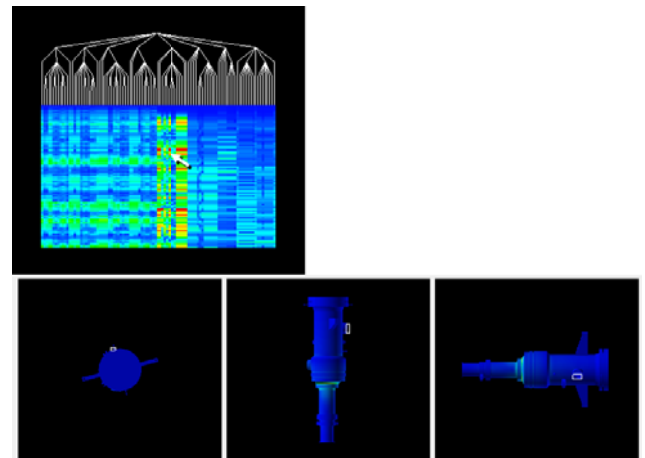


図2 ROIの三面図上での提示

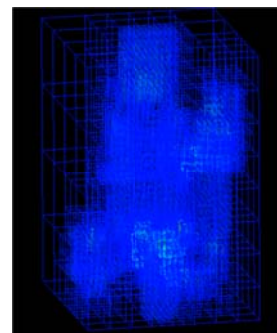


図3 ブロック表現による3次元形状の提示(図1に示す原子力施設)

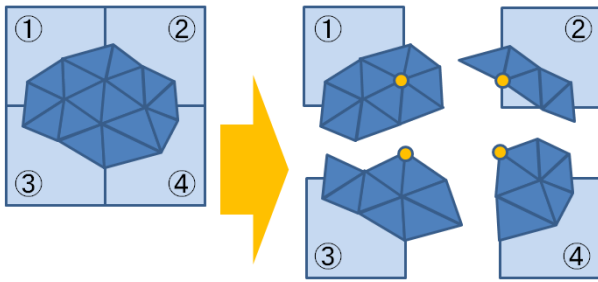


図4 領域分割によるデータの分配

3.3 4次元データマップを用いた3次元モデル参照

4次元データマップを用いた可視化システムを構築する。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だけをサイエンティフィック・ビジュアライゼーションによって解析する。なお、4次元データマップの作成については、可視化対象データの形状情報の次元や形式を問わないが、部分モデル作成に関しては、非構造格子データを対象としている。

特徴領域の部分モデル作成のために、まず、階層構造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もたせる。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もたせるためには、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。例えば、図4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境界上に存在する特徴の見逃しを防ぐことができる。

部分モデルは、葉ノードだけにもたせている。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も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もたせているため、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発生する。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、階層が変わる度に行なう段階的処理のため、例えば5階層の4次元データマップから3階層目の領域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実験した。なお、ここで使用するデータは原子力施設の一部を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。ここでは、モデル化やシミュレーション計算の精度から生じる誤差等は議論の対象としないこととする。

可視化の実験は Dell Precision T7500 (2 QUAD CORE 2.93GHZ XEON, 64GB 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 3.16GHZ, 32GB 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 26,047,774、四面体 127,077,003 である。時系列データの時間ステップは 200、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）をもつ。固有値解析結果に関しては、300 モード得られたシミュレーション結果の中から約 20Hz までの 100 個の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。

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 4.1GB 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5）。4次元データマップの色は矩形領域内の最大応力値を反映している。ここでは、4階層のデータマップを生成した。

最小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 7.5GB 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もたせているためである。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 36.5MB となった。

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な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。

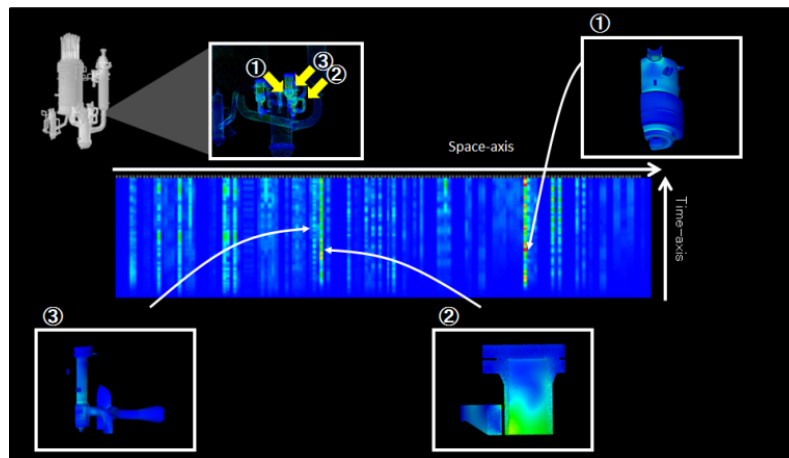


図5 耐震解析結果の4次元データマップと特徴分析

次に、発見した領域に焦点を当てる。図5から、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、従来の可視化による観察での発見は難しい。③の領域は、他の領域と比べて値の変動周期が短いという特徴があった。この領域に着目すると、細い部品が地面と水平に伸びていることがわかり、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注意深い分析を容易にできた。なお、今回発見した特徴領域は局在していた。このことは、三面図によって特徴領域を提示することで確認できた。

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6に示す。特徴を解析すると、4次元データマップ上の左端で、二重構造の配管の内側が低周波の4つのモードで共鳴的な反応をしていることがわかった。これらに対応する3次元モデルをオレンジ枠内に示す。共鳴的な反応をしている部分は共通していることがわかる。次に紫枠で示す領域では、複雑に接続された細い配管群が全体的に共振し、共鳴的な共振を示す周波数が低周波から高周波に分布していることがわかった。青枠で示す

領域では、制御棒を格納する配管群が幅広い周波数領域で共振し、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わかった。最後に黄枠で示す領域では、周波数が10Hzから20Hzの間で反応しており、実際の地震に近い周波数に共鳴的な共振をしていることがわかった。このように、それぞれの機器が共鳴的な共振を示す周波数を把握でき、さらにその部分領域をサイエンティフィック・ビジュアライゼーションによって可視化することで、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、変量、空間の特徴領域を効率的かつ効果的に発見する情報可視化手法を開発した。

また、4次元データマップの対話的操作によって発見した特徴の部分モデルを切り出す技術を開発したことで、超大规模データから観察すべき領域を絞り込むことに成功し、サイエンティフィック・ビジュアライゼーションによる解析の効率化を実現した。これは、情報可視化とサイエンティフィック・ビジュアライゼーション双方の技術を組み合わせたツールとしての利用を提案したことによって実現した。

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詳細分析を実施できた。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。また固有周波数解析によって様々な機器の周波数共振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、空間軸の定義について議論を進める。

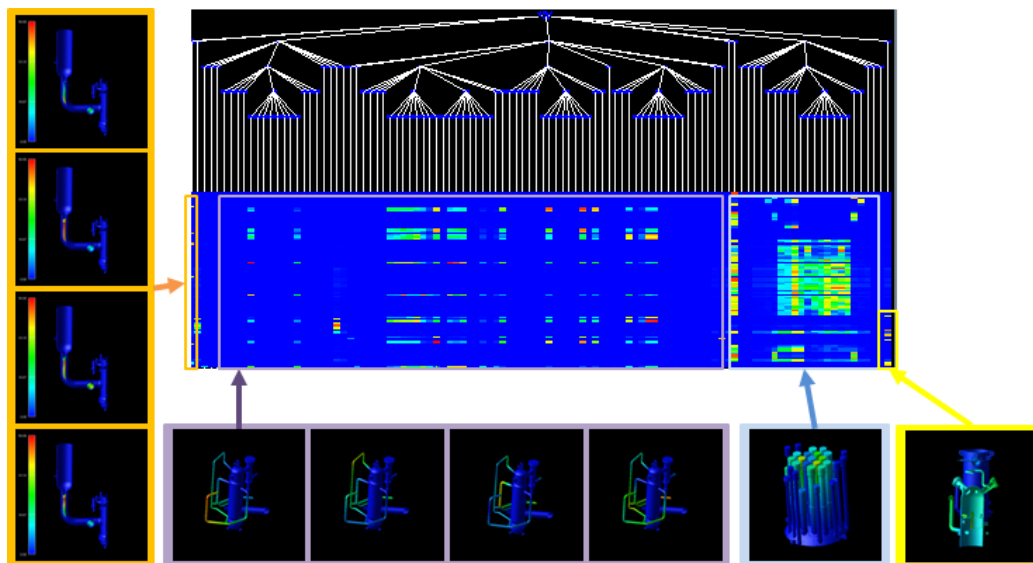


図6 周波数ごとの振動の特徴解析

謝辞

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運転管理課諸氏に感謝いたします。本研究を進めるにあたり、貴重なご意見をいただいた日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター 高度計算機技術開発室 西田 明美氏、岡田 達夫氏に感謝いたします。本研究の一部は科学研究費補助金若手研究B (24700110) の助成を受けたものである。

[7] R. Maciejewski, S. Rudolph, R. Hafen, A. M. Abusalah, M. Yakout, M. Ouzzani, W. S. Cleveland, S. J. Grannis, and D. S. Ebert, "A Visual Analytics Approach to Understanding Spatiotemporal Hotspots", *IEEE TVCG*, **16**(2):205-220, 2010.

参考文献

[1] Z. Zheng, N. Ahmed, and K. Mueller, "iView: Feature Clustering Framework for Suggesting Informative Views in Volume Visualization," *IEEE TVCG*, **17**(12):1959-1968, 2011.

[2] J. Woodring, and H.-W. Shen, "Multi-variate, Time Varying, and Comparative Visualization with Contextual Cues," *IEEE TVCG*, **12**(5):909-916, 2006.

[3] S. S. Barakat, M. Rutten, and X. Tricoche, "Surface-Based Structure Analysis and Visualization for Multifield Time-Varying Datasets," *IEEE TVCG*, **18**(12):2392-9162401, 2012.

[4] J. Caban, A. Joshi, and P. Rheingans, "Texture-based Feature Tracking for Effective Time-varying Data Visualization," *IEEE TVCG*, **13**(6):1472-1479, 2007.

[5] M. Tory, S. Potts, and T. Moller, "A Parallel Coordinates Style Interface for Exploratory Volume Visualization," *IEEE TVCG*, **10**(1):71-80, 2005.

[6] I. Fujishiro, R. Otsuka, S. Takahashi, and Y. Takeshima, "T-Map: A Topological Approach to Visual Exploration of Time-Varying Volume Data," *High-Performance Computing Lecture Notes in Computer Science*, **4759**:176-190, 2008.