

# レベルセットグラフに基づく区間型ボリューム分解

高橋 成雄<sup>1</sup> 藤代 一成<sup>2</sup> 竹島 由里子<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院総合文化研究科

<sup>2</sup> お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科

<sup>3</sup> 日本原子力研究所 計算科学技術推進センター

本報告では、区間型ボリューム分解器 (IVD) とよばれるインタフェースを示し、ボリュームデータ全体を、個々のボリューム特徴に対応する区間型ボリュームに分解する枠組みについて述べる。このボリューム分解器の特徴として、対話的あるいは自動的に、外側の区間型ボリュームから取り除くことで、ボリュームの内部を調べることができる点があげられる。これは、スカラーフィールド値に応じた等値面の変化をレベルセットグラフとして抽象化し、さらに分解により得られる区間型ボリュームの入れ子構造を正確に解析することによって実現される。ボリュームデータの分解例をいくつか示し、提案するインタフェースが効果的にボリュームの潜在的な構造を探索する道具となることを示す。

## Interval Volume Decomposition Based on Level-Set Graphs

Shigeo Takahashi<sup>1</sup>, Issei Fujishiro<sup>2</sup>, and Yuriko Takeshima<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

<sup>2</sup>Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

<sup>3</sup>CCSE, Japan Atomic Energy Research Institute

This report presents an interface called the Interval Volume Decomposer (IVD) and its associated framework for decomposing an entire volume into interval volumes each of which characterizes a distinctive volume feature. The advantage of the IVD is that it allows us to look inside the volume by peeling outer interval volumes from inner ones not only interactively but also automatically. This is achieved due to the rigorous analysis of nested structures of the decomposed interval volumes by constructing a level-set graph that delineates isosurface transitions according to the scalar field. Several decomposition examples of volume datasets are included so that the present interface effectively traverses the underlying structures of a given volume.

### 1 はじめに

一般的に、人が形状を把握する際には、絵やコンピュータディスプレイなどのような2次元の投影図を介して理解することがしばしばである。これに対し、ボリュームデータは厚みがあるため、内部に複雑な構造をもつ場合、その詳細まで直接外側から見通すことは難しい。マーチングキューブ法やレイキャスティング法など、ボリューム可視化手法の発展のおかげで、複雑な内部構造を浮き立たせる手法自体は確立されてきた。しかしながら、データが何重にも入れ子構造をなす特徴部分をもつ場合、その構造を描き出す方法は、可視化処理を試行錯誤的に複数回行うことで、直感的にその構造を把握したのち決める必要がある。

この問題を克服するために、ボリュームデータを外から削ったり変形するなどして、ボリューム内部を調べていくボリューム分解操作 (volume

peeling) が近年注目を集めるようになってきている。しかしながら、従来のこのようなボリューム分解操作では、ボリューム分解の基本単位が、ユーザの指定により場当たりに選択されており、ボリュームデータの大局的構造とは無関係なものに分割されることが多い。そのため、このようなボリューム分解操作はユーザの試行錯誤に頼らざるを得ず、その自動化は言うまでもなく実現不可能であった。

そのため本報告では、区間型ボリューム分解器 (interval volume decomposer, IVD) とよばれる、ボリューム分解のためのインタフェースを実現する枠組みを提示する。このインタフェースは、ボリュームデータ全体を適当な個数の区間型ボリュームに分解することで、ボリュームデータの潜在的な内部構造を反映した、ユーザにとって直感的にわかりやすいボリューム分解手順を提

示する．分解の基本単位として，区間型ポリウムを用いることで，特定のスカラフィールド区間ごとに特徴的な等値面をまとめることができ，結果としてポリウムデータの大局的な特徴を反映した，外から内への自動的なポリウム分解操作が実現可能となる．

我々の枠組みでは，ポリウムデータのレベルセットグラフを用いて，区間型ポリウムへの分解が実現される．レベルセットグラフは，スカラフィールド値に関する等値面の位相的变化を，抽象化してグラフ表現したものである．本手法では，高周波ノイズや退化した特異点を含むような扱いにくいポリウムデータからでも，レベルセットグラフを頑健に抽出するアルゴリズムを導入する．そして，重要度の低い小さな区間型ポリウムをまとめて，より大きな区間型ポリウムを構成することで，ポリウムデータの大局的な構造を反映した区間型ポリウムの集合を，限られた個数で構成していく．

本報告は，以下のように構成される．2節では，関連研究についてとりあげる．3節では，ポリウムデータ全体を，そのレベルセットグラフを用いて区間型ポリウムに分割し，さらに任意の区間型ポリウム間の包含関係の有無を求めるアルゴリズムを示す．4節で，区間型ポリウムに分解するインタフェースの詳細について紹介し，最後に，結論と今後の課題を5節で述べる．

## 2 関連研究

### 2.1 ポリウム操作・変形手法

ポリウム分解の最小基本単位は，言うまでもなくボクセルである．このボクセルを基本としたポリウム形状変形の枠組みとして，Yamaguchiら [1] が提案した八分木を階層的空間探索の道具として用いた先駆的な研究がある．その後，ポリウム形状変形の研究は，計算機性能の向上に伴い，仮想ポリウム形状を直接操作し変形を加えるポリウム彫刻 (volume sculpting)[2] の概念へとつながっていった．

一方，仮想現実感技術の発展により，触覚デバイスを通して，仮想的な物体とのインタラクションによって生じる力覚を呈示するプロセスとして，触覚レンダリング (haptic rendering) という考え方が，Iwata[3]らにより定義された．この触覚レンダリングは，AvilaとSobierajski[4]によって，初めてポリウム彫刻システムに組み込まれた．ポリウム分解操作は，このようなポリウム彫刻の局所形状変形操作のひとつとして考えられるようになった．

また，ポリウムデータを解剖操作のアナロジーを用いて分解する手法 [5] や，ハードウェア

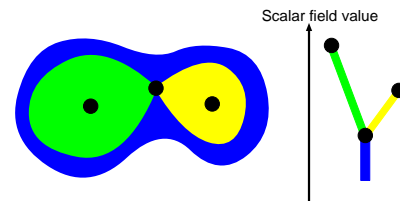


図 1: 等値面の推移 (左) とそれに対応するレベルセットグラフ (右)．レベルセットグラフのノードは，ポリウムの臨界点を表しており，ここではスカラフィールド値の大きさにより縦に配置されている．

を用いたポリウム変形の研究 [6] もいくつか提案されている．

しかし，上記にあげた手法はすべて，分解の基本単位として，意味付けが薄く，場当たりに選択されたポリウム断片が用いられていた．それに対し提案手法は，大局的構造を抽象化したレベルセットグラフを用いて，明確な定義をもつ区間型ポリウムへ分解している点で，よりポリウム特徴を反映した，系統的な分解をユーザに提供できる点が異なる．以下，レベルセットグラフと区間型ポリウムの関連研究についても述べる．

### 2.2 レベルセットグラフに基づく等値面追跡

レベルセットグラフは，スカラフィールド値の変化に対応する等高線 / 等値面の位相変化を抽象化したグラフであり，それらのデータ内の変化を追う道具として用いられている．図 1 は，2つの等値面が併合して1つになる等値面の推移と，それに対応するポリウムデータのレベルセットグラフを示したものである．レベルセットグラフのノードは，等値面が位相変化を起こすポリウムの臨界点に対応し，ここではスカラフィールド値の大きさにより上から下に配置されている．

このようなポリウムデータのレベルセットグラフは，近年ではCarrら [7]らによって，任意次元の形状に関するアルゴリズムとして整備され，さらに，等値面の位相 (種数) の変化を検出するアルゴリズムが，PascucciとMcLaughlinら [8]により考案された．また，Takahashiら [9]は，レベルセットグラフに単純化を施して，より大局的な等値面位相変化を表すレベルセットグラフを抽出する手法を提案している．

このように，レベルセットグラフは等値面の遷移を手がかりに，ポリウムデータの内部構造の様子を表現する．しかし，等値面自体には厚みがなく，ポリウムの大局的な特徴を部分ポリウムとして表現できないため，ユーザにポリウム分解に関する直感的な情報を提供できない問題点があった．

### 2.3 区間型ポリリューム

区間型ポリリューム [10] は、等値面を一般化した概念であり、スカラーフィールド値のある区間に対応する 3 次元部分ポリリュームと定義される。もしスカラーフィールド値の区間幅が 0 のときには、区間型ポリリュームは等値面になり、区間幅がスカラーフィールド値域全体になると、元のポリリュームデータ全体に対応する。等値面に厚みをもたせることにより、等値面そのものよりもポリリュームの関心領域 (region of interest, ROI) の解析を、より柔軟に行うことができる。本枠組みにおいては、分解の基本要素となる区間型ポリリュームが、レベルセットグラフのリンクに対応し、位相変化をとともなう等値面で区切られたものとして定義されることに注意されたい。

## 3 区間型ポリリュームの包含関係の抽出

外側から内側への区間型ポリリューム分解を実現するために、区間型ポリリューム同士の包含関係を求める必要がある。包含関係は、手前の物体が後ろの物体を隠す遮蔽関係<sup>1</sup>とは異なり、ある物体がもう一方を完全に覆う関係をさし、ここでは同じスカラーフィールド値を共有する区間型ポリリューム間の関係として定義する。これに加え、スカラーフィールド値に関する純粋な等値面の膨張 / 縮小などにより、異なるスカラーフィールド区間に対応する区間型ポリリュームが入れ子構造をもつ場合があるが、これは本稿では区間型ポリリュームの順序関係と呼ぶことにする。本節では、レベルセットグラフを抽出し [11]、さらにそのレベルセットグラフから区間型ポリリューム間の包含関係を自動的に抽出するアルゴリズム [12] について説明する。

### 3.1 ポリリューム骨格木の構築

本枠組みでは、ポリリュームデータを細かい区間型ポリリュームに分解し、それを組み上げることによってポリリュームデータが表す 3 次元スカラーフィールド場のレベルセットグラフを構築する。そして、そのレベルセットグラフを参照しながら、小さい区間型ポリリュームをより大きなものにクラスタリングすることで、最終的な大域的区間型ポリリューム分解を求めていく。

レベルセットグラフの構築アルゴリズムとしては、Takahashi ら [11] が提案する、位相的ポリリューム骨格化アルゴリズムを用いる。このアルゴリズムは、先に述べた Carr ら [7] の手法と、Pascucci ら [8] の手法に、Takahashi ら [9] の手法の拡張版を組み合わせて実現されたもので

<sup>1</sup>もし、ある物体が他の物体を遮蔽する場合は、インタフェースで視点を変更して、遮蔽されている物体を見ることができる。

ある。ここで得られるレベルセットグラフを、文献 [9] にならい、ポリリューム骨格木 (volume skeleton tree, VST) とよぶことにする。

具体的な位相的ポリリューム骨格化アルゴリズムは、次のようにまとめられる。

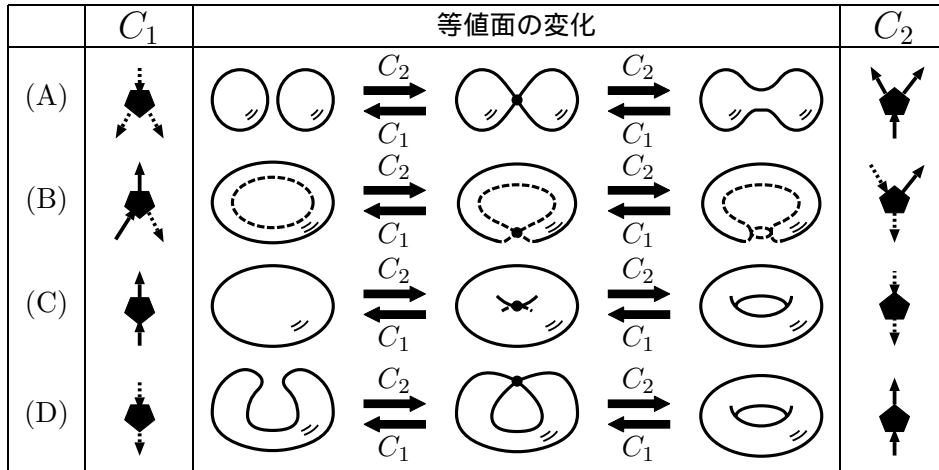
1. ポリリュームの適応的四面体分割
2. Join Tree と Split Tree の構築
3. 等値面の連結成分数の変化の抽出
4. 等値面の種数の変化の抽出
5. Contour Tree の構築
6. ポリリューム骨格木 (VST) の構築
7. 区間型ポリリュームのクラスタリング

詳細は、文献 [11] を参照のこと。

### 3.2 VST を用いた包含関係の抽出

ここでは、区間型ポリリュームの包含関係を自動的に抽出するアルゴリズムを説明する [12]。Takahashi ら [9] によると、ポリリュームの臨界点は  $C_3, C_2, C_1, C_0$  の 4 種類に分類され、それぞれ等値面の生成、併合、分割、消滅の位相変化に対応する。この中で、特に  $C_2$  と  $C_1$  の臨界点における等値面変化は、図 2 の中央のようにそれぞれ (A)~(D) の 4 種類に分類される。ただし、ここではスカラーフィールド値が減少する際の等値面変化を考えることにする。また、スカラーフィールド値が減少するときに等値面が膨張する場合は中実 (solid) な等値面、縮小する場合は中空 (hollow) な等値面であると定義する。図 2 の左右のグラフは、それぞれ VST における臨界点  $C_1$  と  $C_2$  回りの部分グラフを示しており、リンクに対応する等値面の中実 / 中空を、線を用いて区別している。このような等値面の膨張 / 縮小の区別により、区間型ポリリューム間の順序関係は簡単に抽出することができる。よって、ここでは区間型ポリリューム間の包含関係の検出について考える。

図 2 によると、そのような包含関係が生じるのは、(B) の等値面変化が生じる場合だけであることがわかる。ここで例として、図 3 (a) の VST が表す包含関係を調べてみる。ただし、ノード  $n_3$  は、後の処理の便宜上導入された仮想極小点であり、 $-\infty$  のスカラーフィールド値をもつと仮定する。我々のアルゴリズムにおける処理は、この仮想極小点  $n_3$  から VST のリンクをたどり、中空 / 中実の別を同定することから始まる。なぜならば、仮想極小点に接続するリンクは、中実な等値面に対応するからである。ここではまず、仮想極小点から上向きにたどって到達できる、すべての中実なリンクを調べる。すると、中実なリンク  $L_0$  を介して、まず臨界点  $n_1$  に到達する。ここで、 $n_1$  は下向きの分岐で、 $L_0$  が中実なので、図 2 から (B)- $C_1$  の臨界点に対応することが



..... : 中空      ———— : 中実

図 2: 等値面の空間配置を考慮にいたれた, 臨界点  $C_1$ (分岐) と  $C_2$ (合併) における等値面変化の分類 [9]. 矢印は, スカラフィールド値が減少したときの等値面の変化を示している. VST のリンクは, 対応する等値面が中実か中空かを線の種類を用いて分けている.

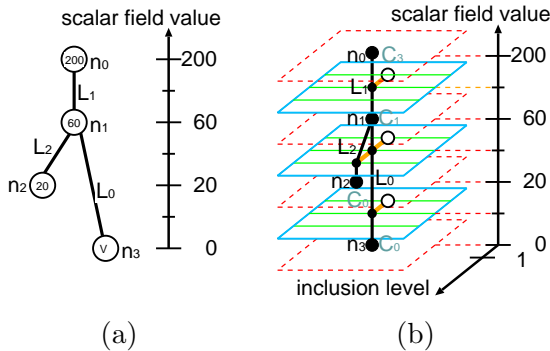


図 3: 等値面包含関係の計算: (a)VST の例と (b) 対応する区間型ポリウムの包含関係木.

わかる. これより, リンク  $L_1$  は中実,  $L_2$  は中空であり, さらにリンク  $L_0$  に対応する区間型ポリウムが  $L_2$  の区間型ポリウムを内包することがわかる. 次に, 中実なリンク  $L_1$  を上向きにたどるが, これは臨界点  $n_0$  で終点となる. さらに, 残ったリンク  $L_2$  は中空であるため下向きにたどるが, これも臨界点  $n_2$  で終点となる. 以上で, 図 3(a) の VST が表す, 区間型ポリウムの包含関係をすべて同定できたことになる.

我々のインタフェースでは, このような区間型ポリウムの入れ子構造を VST から自動的に抽出し, システム内に図 3(b) のような, 包含関係木とよばれるグラフ表現で保持している. この包含関係木は, 各区間型ポリウム間の包含関係を水平の木構造で表現したものである.

#### 4 ポリウム分解のためのインタフェース

この節では, ポリウムデータ全体を外側から内側へ区間型ポリウムに分解していく, インタフェースの詳細について説明していく. 図 4 は,

図 3(a) と同じかたちの VST をもつポリウムデータの分解を, インタフェースが表示している様子である. 左は骨格木用ウィンドウであり, VST とそのリンクに対応する区間型ポリウムの包含関係木を表示しており, ユーザが特定の区間型ポリウムを指定する際にも使われる. 右は区間型ポリウム分解用ウィンドウであり, 分解された区間型ポリウムが示され, 実際に外側から内側へと区間型ポリウムを取り除いていく際に使われる. ここで, VST のリンクと区間型ポリウムの対応を示すため, 両者に対し同じ色を割り当てている. 色は, 赤から青までの色相を, VST のリンク数だけ均等にサンプリングして用いている.

以降, 実際の区間型ポリウム分解を, ユーザがインタフェースをインタラクティブに用いて行う場合と, インタフェースが自動的に分解手順を計算し, アニメーションとして提示する場合に分けて, 説明を加えていく.

##### 4.1 インタラクティブな分解操作

インタラクティブな区間型ポリウムの分解操作は, ユーザがどの区間型ポリウムを取り除くか指定することで行う. 区間型ポリウムの指定は, 骨格木用ウィンドウで対応する VST のリンクをクリックするか, 分解用ウィンドウで区間型ポリウムそれ自体をクリックすることで行う.

図 4 は, 残っている区間型ポリウムのうち, 一番外側のものを取り除いた例である. ユーザは, 図 4(a) の左のウィンドウの矢印で示されているリンクを選択するか, 右のウィンドウの矢印で示されている一番外側のサブポリウムを直接選択することで, 取り除きたい区間型ポリウムをインタフェースに知らせる. インタフェース

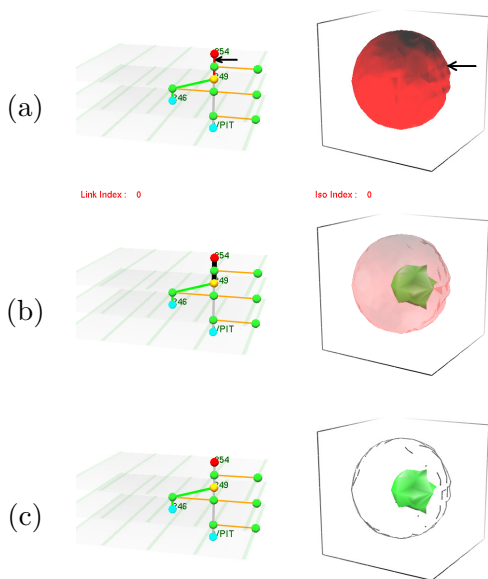


図 4: 区間型ポリウムのインタラクティブな分解: (a) 一番外側の区間型ポリウムをマウスで指定. (b) 選択された区間型ポリウムが半透明になり (右), 対応するリンクは強調される (左). (c) 除去されると輪郭線表示となる (右), 対応するリンクも見えなくなる (左).

は, 図 4(b) のように選択された区間型ポリウムがどれかを, ユーザに提示する. ここで, 左のウィンドウでは選択されたリンクが強調表示され, 右のウィンドウでは対応する区間型ポリウムが半透明表示され, 内部構造が透けて見えるようになる. ここで, ユーザが選択を確定すると, 図 4(c) のように, 指定されていた区間型ポリウムはデプスキューを用いた輪郭線表示に変わり (右), 対応するリンクの色も薄くなる (左). このようにして, ユーザは大局的な特徴に対応した区間型ポリウム分割のひとつひとつを, 外側から確認して取り除くことができ, ポリウムの入り組んだ構造を段階的に確認していくことができる.

## 4.2 自動分解操作

本枠組みにおける区間型ポリウムへの分解は, ポリウムの大局的構造を反映する VST を利用しているため, その空間的な位置関係についても情報を得ることができる. 特に, 3 節で述べた通り, 区間型ポリウムの包含関係を VST から抽出することができるため, 外側から内側へのポリウム分解手順を自動的に生成し, さらにアニメーション表示することが可能となる.

ポリウム分解における, 区間型ポリウムの除去の順番は, 3.2 節で VST から包含関係を抽出する際に従った, リンクをたどる順番と同

じになる. つまり, まず仮想極小点からスカラフィールド値が増加する方向に VST 上を移動したとき, 行き着くことができる中実なリンクを順番にリストに加えていく. ここで, 中実な等値面はスカラフィールド値が増加するに従い小さくなるため, この順番が順序関係をなす区間型ポリウムの外側から削除するという, 我々の意図にも合致することがわかる. 次に, もし, 今まで訪問したリンクに隣接する中空なリンクが存在したら, その中空なリンクを出発した順, つまりスカラフィールド値の小さい方から出発点として VST 上の移動を始める. そして, 各出発点において, 今度はスカラフィールド値が減少する方向に中空なリンクだけをたどっていく. もし, さらに途中で中実なリンクに遭遇する場合には, すべての中空なリンクを訪問し終えたあと, 再度そこからスカラフィールド値が増加する方向へ VST 上を移動していく. VST 上のリンクがすべて訪問できたとき, 得られたリンクのリストが区間型ポリウムを取り除く順番に対応する.

図 5 は, 原子  $^{16}\text{O}$ [13] における二体電荷密度分布を表すポリウムデータ ( $41 \times 41 \times 41$ ) の分解手順アニメーションを示している. ここでは, 先に得たリンクの順番に応じて区間型ポリウムを取り除くこととし, 実際に取り除く際には徐々に不透明度を下げて消していく. アニメーションでは, 一番外側の区間型ポリウムがある程度消えると, 次に外側にくる区間型ポリウムの不透明度を下げ始めるようにしている. このように連鎖的に区間型ポリウムを消し去ることで, ユーザが直感的にポリウムの内部構造を認識できるような, 分解操作の提示を実現している.

また, 外側から内側へと区間型ポリウムが除去されていくため, 分解処理が進むと自然と興味の対象となる区間型ポリウムの大きさは小さくなっていく. このため, 提案するインタフェースでは, 分解操作の際にズームインするような視点位置の自動的な移動も実現している.

## 5 おわりに

本報告では, ポリウムデータの特徴的な構造を直感的に把握する, 外側から内部へのポリウム分解のためのインタフェースを提案した. ここで, 分解の基本単位として用いられているのは, ポリウムのレベルセットグラフを基礎とした, 区間型ポリウムである. ポリウムの大局的な構造を反映したレベルセットグラフを用いることで, ポリウム特徴を効果的に捉えた区間型ポリウム分解が可能となっている. さらに, レベルセットグラフから区間型ポリウムの包含関係を抽出し, ユーザにその入れ子構造を示して分解

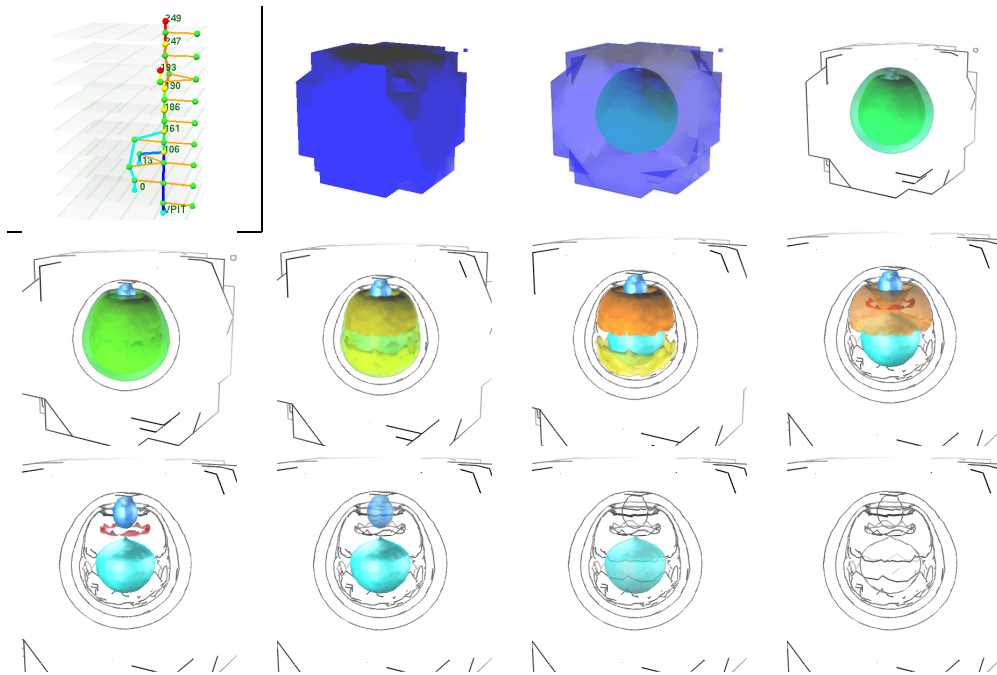


図 5: 核子データの骨格木 (左上) と分解手順

操作を支援をするとともに，外側から内側へのボリューム特徴分解の手順を自動生成しアニメーションとして提示している。

今後の課題として，区間型ボリュームの形状を変形するなど，区間型ボリュームの分解操作の選択子を増やし，よりユーザにやさしいインタフェースを実現することがあげられる。さらに，提案インタフェースを，レイキャスティングによるボリューム可視化の際の，区間型ボリュームを考慮にいれた伝達関数設計のサポートとして用いるように拡張することも，今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] Yamaguchi, K., Inamoto, N., Kunii, H. S., and Kunii, T. L.: Three-Dimensional Data Input by Selection of Hierarchically Defined Objects, *Proc. of Eurographics '84*, pp. 15–23 (1984).
- [2] Galyean, T. A. and Hughes, J. F.: Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique, *Computer Graphics (Proceedings of Siggraph '91)*, pp. 267–274 (1991).
- [3] Iwata, H. and Noma, H.: Volume Haptization, *Proc. of IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality*, pp. 16–23 (1993).
- [4] Avila, R. S. and Sobierajski, L. M.: A Haptic Interaction Method for Volume Visualization, *Proc. of IEEE Visualization 1996*, pp. 197–205, 485 (1996).
- [5] McGuffin, M. J., Tancau, L., and Balakrishnan, R.: Using Deformations for Browsing Volume Data, *Proc. of IEEE Visualization 2003*, pp. 401–408 (2003).
- [6] Kurzion, Y. and Yagel, R.: Interactive Space Deformation with Hardware-Assisted Rendering, *IEEE CG&A*, Vol. 17, No. 5, pp. 66–77 (1997).
- [7] Carr, H., Snoeyink, J., and Axen, U.: Computing Contour Trees in All Dimensions, *Computational Geometry*, Vol. 24, No. 2, pp. 75–94 (2003).
- [8] Pascucci, V. and Cole-McLaughlin, K.: Efficient Computation of the Topology of Level Sets, *Proc. of IEEE Visualization 2002*, pp. 187–194 (2002).
- [9] Takahashi, S., Takeshima, Y., and Fujishiro, I.: Topological Volume Skeletonization and Its Application to Transfer Function Design, *Graphical Models*, Vol. 66, No. 1, pp. 22–49 (2004).
- [10] Fujishiro, I., Maeda, Y., Sato, H., and Takeshima, Y.: Volumetric Data Exploration Using Interval Volume, *IEEE TVCG*, Vol. 2, No. 2, pp. 144–155 (1996).
- [11] Takahashi, S., Nielson, G. M., Takeshima, Y., and Fujishiro, I.: Topological Volume Skeletonization Using Adaptive Tetrahedralization, *Proc. of Geometric Modeling and Processing 2004*, pp. 227–236 (2004).
- [12] 徳永 百重, 竹島 由里子, 高橋 成雄, 藤代 一成: 位相解析に基づくボリュームビジュアライゼーションの高度化, *画像電子学会誌*, Vol. 32, No. 4, pp. 418–427 (2003).
- [13] Meißner, M.: [<http://www.volvis.org/>].