

情報爆発時代に向けた大気科学分野のための 3次元可視化モデルの提案

当麻 英梨子[†] 高田 雅美[†] 城 和貴[†]

本稿では、Shneiderman が提唱する情報可視化に求められる 7 種の主要な操作機能を基にした 3 次元可視化モデルを提案する。提案する可視化モデルでは、情報爆発が生じている分野の 1 つである大気科学分野を対象とし、大量のデータ分析を可能とする。そのために、全体像と詳細情報の 2 種類の表示を用いる。この 2 種類の表示を効果的に使い分けることによって、大量のデータの中から効率良く特徴的な現象を発見することが可能となる。インタフェースにおいては、Shneiderman が提唱する対話設計における 8 つの黄金律を採用する。提案モデルの有効性を示すために、モデルの適用によって開発した大気科学分野のための 3 次元可視化システムを用い、実際に生じた大気現象の可視化を行う。

A 3D Visualization Model for Information-explosion in the Atmospheric Science Field

ERIKO TOUMA,[†] MASAMI TAKATA[†] and KAZUKI JOE[†]

In this paper, we propose a 3D visualization model, based on seven tasks for information visualizations proposed by Shneiderman. This 3D visualization model can analyze huge data in the atmospheric science field, which is one of fields where information-explosion has happened. Our model is composed by two kinds of displays: Overview and Details. The appropriate use of these displays enables effective analyses of huge data and discoveries of feature phenomena. We adopt Shneiderman's "Eight Golden Rules of Interface Design" for interface design of our model. In order to demonstrate the effectiveness of our model, atmospheric phenomena are visualized by the 3D visualization system based on our model.

1. はじめに

情報爆発時代¹⁾の到来にともない、大量のデータを分析する必要性が高まってきている。つまり、爆発する情報の中から必要とされる情報を効率良くかつ迅速に見つけ出す技術が必要である。そのための方法として、コンピュータを用いた視覚的なデータ分析のための可視化がある。これを情報可視化と呼ぶ。情報可視化を用いることによって、短時間に大量のデータを理解することができ、特徴的な性質や変化の発見が促される。この情報可視化を実現するために、Shneiderman は 7 種の主要な操作機能²⁾を提案している。これらの機能を満たすことによって、効率的なデータ分析を実現するシステムを開発することができる。この際、適切なインタフェースや操作順序の決定が必要となる。そこで、本稿では、Shneiderman の 7 種の操

作機能を基に 3 次元可視化モデルを提案する。

我々の提案するモデルでは、情報爆発が生じている分野の 1 つである大気科学分野を対象としている。大気科学分野では、人工衛星などにより地球観測が行われ、種類、観測数、解像度がともに増大する傾向にある³⁾。よって、大気に関する数値データは急速に増加している。さらに、気候における予測や診断のための数値シミュレーションの重要性も増しており、大規模な計算による大量のデータが産み出されている。また、大気科学者間のネットワークの広がりによって、データを中心としたグリッド環境が構築されつつあり、扱われるデータ量が爆発的に増えると予想される。そこで、大量のデータを効率良く処理するために、2 種類の表示による構成を行う。この 2 種類の表示を切り替えながら分析することによって、大量のデータを処理し、特徴的な現象の発見へと導くことが可能となる。インタフェースには、主にボタンとスライダで構成される GUI (Graphical User Interface) を用いる。このような簡明な GUI を用いることにより、マニユア

[†] 奈良女子大学大学院人間文化研究科
Graduate School of Human Culture, Nara Women's
University

ルを必要とせず、インタラクティブに使い方を学習できるシステムを構築する。

提案するモデルの有効性を検証するために、大気科学分野のための 3 次元可視化システムを開発し、Gateau^{4)~6)} と名付けた。この Gateau を用いて、実際の大気現象の可視化と既存の論文掲載図の可視化を行う。

以下、2 章で Shneiderman の情報可視化技法について述べる。3 章で大気科学分野のための 3 次元可視化モデルを提案し、4 章でモデルの適用を行う。5 章で、本システムモデルの有用性について検討を行う。6 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. Shneiderman の情報可視化技法

Shneiderman は情報可視化に求められる 7 種の主要な操作機能として以下のものを提唱している。

Overview データ集合の全体像を把握する。

Zoom 注目すべき要素や部分を拡大する。

Filter 興味のない要素や部分を削除する。

Details-on-demand 必要とされたときに、要素やグループを選択し詳細な情報を得る。

Relate 要素間の関係を表示する。

History 操作のやり直しや繰返しをサポートするためにユーザの操作履歴を管理する。

Extract データ中の特定の局所を抽出する。

人間が 1 度に理解可能な情報量は限られている。そのため、大量のデータの中から必要最小限の情報を得る必要がある。そこで、*Overview* では、このデータをすべて可視化するのではなく、大まかな可視化を行い、データ集合の全体像を把握する。

解析対象が明確な場合は、より詳細な情報を得るために、その対象を拡大表示することが必要である。また、未知の解析対象に関しても、着目すべき部分を見出すために図の拡大は有効である。Shneiderman は、このための操作機能を *Zoom* と定義している。

データ解析においては、意味のある性質や特徴を探し出すことが必要である。そこで、大量のデータから不要な部分を削除し、着目する部分のみを観察すべきである。そのために、*Filter* によるデータの表示・非表示の選択が必要である。

着目すべき特定部分が決定している場合には、*Overview* で得られる大まかな全体像に対して *Zoom* や *Filter* を適用しながら詳細な情報を得るよりも、*Details-on-demand* と呼ばれる機能を適用することが効果的である。*Details-on-demand* は、必要に応じて特定部分を選択し、その選択部分に関連する詳細な

情報を表示させることができる。

Relate は、与えられたデータに含まれる属性を利用することにより、要素間の関係を表示する機能である。データに含まれる属性として考えられるものは、日時に関する情報や数値データの値である。各属性に関連するデータのみを可視化することによって、要素間の比較検討の効率が向上する。

History では、ユーザの操作履歴を管理する。この機能を使うことによって、操作のやり直しや繰返しなどの際、操作履歴から情報を取り出すことができる。取り出された情報を基に可視化することによって、再操作の手間を省くことができる。

Extract の機能を使うことによって、必要とされるデータの一部を抽出し、適切なフォーマットで保存することが可能となる。これにより、データの一部を他の用途で使用することができるようになる。

3. 大気科学分野のための 3 次元可視化モデルの提案

近年、解析する必要のあるデータ量が増加し情報爆発が生じている分野の 1 つとして、大気科学分野がある³⁾。大気科学分野では、年々観測データばかりでなく、シミュレーションデータも増大している。この膨大な量の数値データを探索し解析することは大変困難な作業である。そこで、我々は Shneiderman による 7 種の操作機能を基に、大気科学分野を対象とする 3 次元可視化モデルを提案する。この可視化モデルを用いることによって、莫大なデータの中から特徴的現象や目的とする大気現象を容易に見出すことが可能である。このモデルから作成される 3 次元可視化システムにおいてマニュアルを必要としないために、単純なインタフェースと操作を実現させる。

3.1 節では、Shneiderman の 7 種の操作機能を基に新しい可視化モデルを提案する。3.2 節では、その可視化モデルで用いるインタフェースについて述べる。

3.1 可視化モデルの提案

我々の提案する可視化モデルでは、Shneiderman が提唱する“Overview first, zoom and filter, then details-on-demand”という視覚的情報検索のための基本原理 Visual Information Seeking Mantra²⁾を用いる。これは、全体像の表示を用いた分析を行った後、必要に応じて詳細な情報を表示することを意味する。この基本原理を適用することによって、扱うデータの範囲を絞ることが可能となる。

本節では、Shneiderman の 7 種の操作機能を基に新しい可視化モデルを提案する。この可視化モデルで

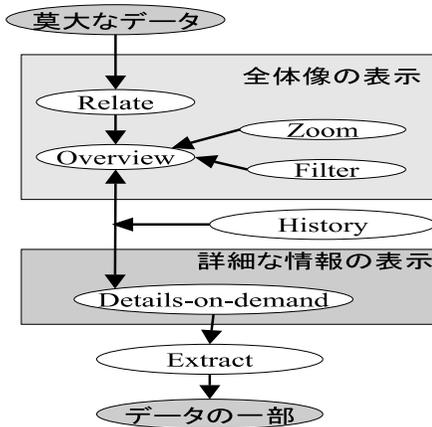


図 1 可視化モデルの構成

Fig. 1 The structure of visualization model.

は、基本原理を実現するために、全体像の表示と詳細な情報の表示の 2 段階に分けて構成する。この 2 段階の表示を使い分けることによって、大量のデータを効率良く解析することが可能となる。図 1 は、提案する可視化モデルを表す。矢印はそれぞれの機能における従属関係を示す。

3.1.1 項と 3.1.2 項ではそれぞれ、全体像の表示モデルと詳細な情報のための表示モデルについて説明する。

3.1.1 全体像の表示モデル

Overview では全体像の表示を行う。ここでは最も多くのデータを扱うため、直感的に理解可能な可視化が求められる。大気科学分野では、4 次元データを扱うことが多い。簡潔にこのデータ情報を可視化するためには、データ次元数と可視化する次元数を統一すればよい。そのための方法として、立体図のアニメーションの利用があげられる。

大量のデータをすべて可視化するためには、計算コストがかかりすぎる。また、すべてのデータの可視化から、全情報を読み取ることは難しい。そこで、データに含まれる属性によって分類し表示するために、*Relate* を用いる。分類のための属性として、大気科学では一般的に、経度、緯度、高度、時間などがあげられる。たとえば、3 次元格子の時間の流れによる観測を重視する場合には、日時による分類を行う。このように、表示されたデータの比較検討を行うべき要素を明示することが可能となる。さらに、1 枚の図に表示させる適切なデータ量を選択することができるので、計算コストの削減へとつながる。

Relate を用いることにより、表示されるデータ量は削減されるが、詳細な情報を得るためには、より細かく観察する必要がある。そこで、*Zoom* と *Filter* が必

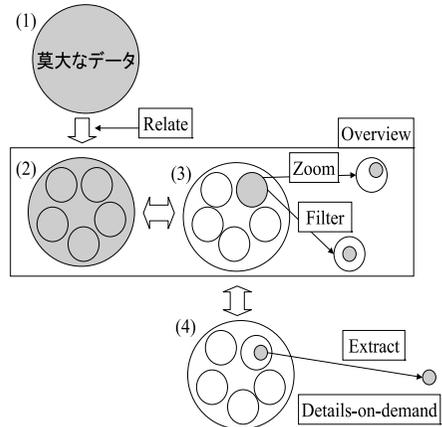


図 2 データ量の変化

Fig. 2 Vary the volume of data.

要となる。*Zoom* を用いることによって、着目したい部分を拡大することが可能となる。これにより、*Relate* によって発見することができる小さなデータの変化を明らかにすることができる。また、*Filter* では、データの値に着目する。条件を満たすデータの値のみを表示するため、大量の情報の中に埋もれている特徴的なデータの値の変化をより鮮明に表すことを可能とする。

図 2 は、可視化の流れと処理する必要があるデータ量の変化を示している。灰色に塗られているところがその状態において扱われるデータ量を示している。

(1) は、分析対象である大気科学データの全体を示している。まず、この莫大なデータを認識させる。次に、*Relate* を使用し、(2) のようにデータに含まれる属性ごとに分類する。その後、分類されたデータの中から任意のデータを選択し、(3) において初めて可視化が行われる。表示するデータを切り替えながら、全体像の把握を行う。さらに、*Zoom* や *Filter* を適宜用いて特徴的現象の手がかりを発見する。*Zoom* や *Filter* による表示では、選択されているデータの任意の部分を取り出して扱うことになる。最後に、詳細情報の表示として (4) を行う。(4) に関しては次項で説明する。

(1) ~ (3) を用いることによって、我々の提案するモデルでは、莫大なデータから着目するデータ範囲を段階的に絞り込むと同時に、システムが処理するデータ量も削減していくことが可能となる。

3.1.2 詳細情報の表示モデル

3.1.1 項のモデルによって、全体像から特徴的な現象のおおまかな座標情報を見出すことが可能となる。本項では、この特徴的現象をより鮮明に表示させるために、*Details-on-demand* を用いたモデルについて述べる。

Details-on-demand では、より詳しい情報を得るために、特徴的な現象の正確な位置、値の変化などを理解する必要がある。そのために、可視化に必要なとされる種々のパラメータを適切に設定し効果的な分析を実現する。パラメータとしては、色に関するもの、数値に関するもの、視点に関するものなどがあげられる。

可視化された画像に関して、色を適切に設定する必要がある。各値にそれぞれ色を割り当てれば、値や位置の分布を理解できる。さらに、着目する部分とそれ以外の部分に異なる色を配色することによって、直感的な比較が可能となる。

データの数値に関するパラメータとして、各軸に割り当てる要素、縮尺、表示する範囲などがある。軸に関するパラメータでは、必要とされる情報を含む次元のみを選択し、その次元を適切な軸に割り当てる。これにより、必要最低限の次元数で可視化することが可能となる。縮尺に関するパラメータでは、適切な可視化格子の大きさに調節できる。表示する範囲の指定では、格子から必要な情報の切り出しを可能とする。これらのパラメータの設定によって、不要なデータ表示を削除することが可能である。

視点に関するパラメータとして、カメラの位置の設定、角度がある。視点によって、情報量は変化する。そこで、必要とする情報を最大限得るために、適切な視点を選択する必要がある。また、様々な視点から観察することによって、新しい現象を発見することが期待される。

Details-on-demand で得られた特徴的な現象が明確に見られる部分のみを取り出すために *Extract* を適用する。*Extract* はデータの一部を抽出し保存する。このデータを再読み込みすれば、データ全体を表示する場合と比べ、特徴的な現象のみを大きく可視化することが可能となる。さらに、保存されたデータは他のソフトで使用することもできる。

詳細情報の表示では、*Overview* において見当をつけておいたデータについて詳細な情報を得ることが目的である。*Details-on-demand* では、図 2(4) のように *Overview* で目星をつけておいた範囲のみの表示を行えばよいので、高い操作性を実現することが可能となる。

基本原理である“Overview first, zoom and filter, then details-on-demand”は、繰り返されることによってより効果が引き出される。そこで、*Details-on-demand* においてあるデータの詳細情報を可視化後、別のデータを検証したい場合に、図 2(4) の矢印が示すように *Overview* に戻る。この作業を何度も繰り返

すことにより、特徴的な現象を発見し、可視化することが可能となる。詳細情報から全体像への切替えにおいて、*History* を用いることによって、*Overview* を最初からやり直す手間を省くことが可能となる。

3.2 インタフェース

GUI は、Shneiderman が提唱する「対話設計における 8 つの黄金律」⁷⁾ を満たすように設計する。8 つの黄金律は以下のとおりである。

- (1) Strive for consistency
一貫性を保持
- (2) Enable frequent users to use shortcuts
頻繁に使うユーザのための支援
- (3) Offer informative feedback
有益なフィードバックの提供
- (4) Design dialog to yield closure
段階的な達成感を与える
- (5) Offer simple error handling
簡潔なエラー処理
- (6) Permit easy reversal of actions
逆操作の許可
- (7) Support internal locus of control
ユーザの主体的な制御権
- (8) Reduce short-term memory load
短期記憶領域の負担の軽減

インタフェースとして、スライダとボタンの 2 種類の GUI を用いる。同じ操作には同じ GUI を用いることによって、システム全体で一貫性を持った操作を実現する。これは、黄金律 (1) に相当する。基本的に数値の入力にはスライダを使用し、選択にはボタンを用いる。また、ボタンとスライダを用いた GUI で、黄金律 (5) を可能とする。インタフェースをボタンとスライダに限定することで、操作を制限する。これにより、不正な数値入力などのエラーを防ぐことが可能となる。なお、最低限必要なコマンド入力には、適切なエラー処理を実装する。

GUI からの入力はインタラクティブに画面に反映させる。これによって、黄金律 (3) が得られる。そのため、黄金律 (8) にあるように、各 GUI の機能をマニュアルなしで理解することが可能となる。さらに、フィードバックが速いため、操作の結果を即座に知ることができ、次の GUI 入力に反映させることができる。これにより、黄金律 (4) が実現される。

適切なパラメータが既知の場合、システム起動時にオプションとして指定する。これにより、黄金律 (2) を満たすことができ、GUI を使ったパラメータ調整を回避することが可能となる。

表示方法には、全体像の表示と詳細情報の表示がある。それぞれの表示にあわせて必要とされる GUI のみを表示する。これによって、誤操作を防ぐことができる。さらに、それぞれの表示で変更可能なパラメータを一目で理解することが可能となる。2つの表示は容易に切り替えられるため、黄金律(6)ができる。その際、操作履歴を用いることによって、パラメータを決定する。

3次元可視化では、カメラをインタラクティブに操作し、あらゆる角度からの観察を可能とすべきである。そこで、カメラのズーム、回転、移動などはマウスアクションで自由に調節させる。これにより、黄金律(7)を実現することができる。

以上をまとめると以下ようになる。

- GUIは基本的にスライドとボタンのみで構成する。
- GUIは必要なときに必要とされるものだけ表示する。
- キーボード入力を採用する場合は、適切なエラー処理を行う。
- 入力をインタラクティブに画面に反映する。
- カメラ(視点)操作はマウスにより、回転、ズーム、移動を行う。
- やり直し操作は操作履歴を基にして、円滑に前の状態に戻る。
- 起動時に既知のパラメータを設定するショートカット機能を用意する。

我々の提案する可視化モデルを採用することによって、マニュアルを必要としないシンプルなシステムを構築することが可能である。大気科学分野では、独自の研究に時間を割くために、学習コストのかからない可視化システムが求められている。よって、我々の可視化モデルを取り入れた可視化システムであれば、システムを使いこなすために膨大な時間を費やすことなく、データ解析を効率良く行うことが可能となる。

4. モデルの適用

本章では、3章で提案した大気科学分野のための3次元可視化モデルの有効性を示すためにモデルを基にした3次元可視化システム Gateau を開発する。

有効な可視化ソフトを開発するために、4.1節で大気科学分野で求められる可視化システムについてまとめる。4.2節で我々の提案するモデルを基にしたシステム設計について説明する。

4.1 大気科学分野で求められる可視化システム

大気科学分野のデータには、次元数、次元の名前、格子数、欠損値などの情報が含まれている。このデー

タは、4次元で、経度、緯度、高さ(気圧)、時間が含まれているものが多い。時間を t とすると、(経度、緯度、高度、時間) = (144, 73, 17, t) で、約 $1.66t$ MB 程度が代表的なサイズである。

大気科学分野で扱うデータのフォーマットには、バイナリ形式とテキスト形式がある。現在、既存のデータフォーマットと新しいデータフォーマットが混在するため、データフォーマットの種類は、増加の一途をたどっている。バイナリ形式の代表的なものとして、NetCDF (Network Common Data Form)⁸⁾、GRIB⁹⁾、HDF (Hierarchical Data Format)¹⁰⁾などがあげられる。これらは独自のライブラリを使用することで読み書きが可能となる。これらのデータフォーマットは、ECMWF、NCEP、NASAなどの機関で配布フォーマットとして使用されている。テキスト形式は、データ作成者が自由に設定することができるため、決まったフォーマットが存在しない。

従来、大気科学者は、データ分析を2次元図によって行っている。2次元図は4次元データから2つの次元を選択し等値線やカラーマッピングを用いて表示される。2次元図には主に空間断面図とタイムセクション図の2種類がある。これらの2次元図は、3次元格子から生成されるため、それぞれ3通り存在する。空間断面図によって3次元的な値の分布や位置関係を、タイムセクション図によって時間の流れを理解することができる。

2次元図を作成するために、大気科学者は様々な可視化システムを利用している。近年では、計算機能力の向上にともなって、3次元可視化システムの開発が進み、2次元図以外の可視化手法を用いたデータ分析も利用されるようになってきている。主に利用されている可視化システムとして、2次元可視化システムとしては GrADS¹¹⁾ が、3次元可視化システムとしては Ncvtk¹²⁾、Vis5D¹³⁾、IDV¹⁴⁾、AVS/Express¹⁵⁾などがあげられる。これらの既存の可視化システムを考察しながら、大気科学分野で求められている可視化システムについてまとめる。

Vis5Dはデータ読み込みにおいて、バイナリ形式の独自フォーマットを採用している。そのため、大気科学分野で扱われているその他のフォーマットを読み込むためには変換を行う必要がある。特に、バイナリ形式のフォーマットからの変換は大変困難な作業である。一方、GrADSにおいてはGRIB、NetCDF、HDF-SDSが、NcvtkにおいてはNetCDFが、IDVにおいては、NetCDF、GRIB、Vis5Dなどのバイナリ形式のデータフォーマットに対してサポートがなされて

おり、直接読み込むことが可能である。大量のデータを読み込むことを考慮すれば、有名なバイナリ形式のデータフォーマットへの対応が必要である。また、その他のフォーマットに対しても柔軟な対応を可能とする工夫が求められる。

データ分析を行う際には、複数のデータ間の比較が行われる。よって、必要とするすべてのデータを選択し、読み込む必要がある。ここであげている 3 次元可視化システムのインタフェースは GUI が採用されている。データ読み込みはファイルダイアログによって行われる。一方 GrADS は、コマンドベースの入力による可視化システムであり、シェルスクリプトを利用し複数のファイル読み込みを簡単に行うことが可能となるが、シェルスクリプトに関する知識など学習コストがかかる。そのため、IDV のように、複数選択を可能とし、なるべく数少ない手間でデータファイルを読み込むことが可能な GUI が望まれている。

データ可視化において必要な機能として、クイックルックがあげられる。クイックルックでは、見た目は重視されず、機敏な操作性が求められる。IDV では、読み込んだデータがリストに表示され、リストによる簡単なデータの切替えが可能である。

Ncvtk, Vis5D, IDV, AVS/Express のいずれの 3 次元可視化ソフトも 2 次元図の表示を可能としている。データ分析の基本となっている 2 次元図を採用することによって、データ分析のスタイルを変えることなく 3 次元可視化ソフトを利用することができる。さらに、3 次元可視化によって 2 次元図の直感的理解を助けることが可能となる。

2 次元図をより詳細に分析するためには、カラーマッピングの色のコントラストや 2 次元格子の大きさなどのパラメータを調節し、最適な 2 次元図を得る必要がある。IDV は、非常に多機能で、詳細なパラメータの設定が可能であり、見栄えの良いプレゼンテーション用として利用可能な 2 次元図の作成が可能である。その一方で、多機能すぎるために大気科学者がすべての機能を使いこなせないという問題がある。この問題を解決するためには、必要となるパラメータ設定を厳選する必要がある。また、Ncvtk においては、設定するパラメータに応じて異なるウィンドウが開かれる設計がなされている。多数のウィンドウを開けば、画面が乱雑になり、必要とするウィンドウを探し出さなければならない。よって、必要となるパラメータごとにできる限りまとめてウィンドウに配置し、開かれるウィンドウ数を最小限にする必要がある。

GrADS, Ncvtk, Vis5D, IDV はフリーソフトであ

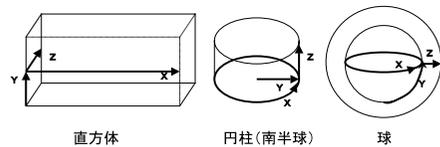


図 3 3 種類の 3 次元格子

Fig. 3 Three kinds of visualization types.

るが、AVS/Express は、KGT が著作権を持つ商用ソフトである。様々な分野で利用可能な多機能なソフトであり、多数のデータフォーマットへの対応もなされている。また、大量のデータ分析も得意とされている。しかし、非常に高価であるため利用できる研究者が限られている。

4.2 大気科学分野のための 3 次元可視化システム
我々の提案するモデルを基にして大気科学分野のための 3 次元可視化システムを設計する。4.2.1 項でシステムのコンセプトを述べる。4.2.2 項で、入力データについて述べる。4.2.3 項で全体像の表示モデルを用いたデータ分析システムを設計する。4.2.4 項では、詳細情報の表示モデルを適用する。4.2.5 項において、大気科学分野に特化した可視化技術について説明する。

4.2.1 システムのコンセプト

3 章で提案したモデルを基に、大気科学分野のための 3 次元可視化システム Gateau を開発する。Gateau は、Kitware 社の提供するオープンソースの可視化ライブラリである The Visualization Toolkit (VTK)¹⁶⁾ バージョン 5.0 を使用し Java によって開発する。様々な地図を表示可能とするために、Gateau では National Geophysical Data Center (NGDC)¹⁷⁾ の海岸線データを使用し、VTK で独自のフィルタを作成する。3 次元格子の形として、図 3 のように軸をとり、直方体、円柱、球の 3 種を用意する。データを分析する際、着目する場所に応じて、赤道は直方体、極域は円柱、全体は球と切り替える。これにより、効果的な分析を可能とする。

開発するシステムでは、Shneiderman の情報可視化技法を実現しているため、視覚的にデータを理解し、全体の概要を把握し、特徴的現象の発見へと導くことができる。インタフェースは、Shneiderman の 8 つの黄金律を満たし、マニュアルを必要とせず、インタラクティブに使い方を学習することが可能であるため、容易に利用できる。

専門家が分析に利用するためには、その分野に特化した機能を持つシステムを開発すべきである。大気科学者は、データ分析の際 2 次元図を主に利用している。そこで、我々の 3 次元可視化システムにこの 2 次元図

を取り入れることによって、直感的なデータ分析を実現する。その結果、2次元図を使い慣れた専門家にも、2次元図を学ぶ必要がある学生などにも気軽に使用できるシステムとなる。また、様々なデータフォーマットを大気科学分野において扱うため、フォーマットに依存しない柔軟なシステムとする。

以上より、Gateau は提案するモデルと特化した機能を追加するために、以下の3つのステップで構成する。

Step-1 Overview (全体像の可視化) 入手したデータの全体の概要を把握し、特徴的な現象が見られそうな位置、値、時刻のたまかな手がかりを発見する。

Step-2 Detail (詳細情報の可視化) Step-1 で得られた手がかりをもとに明確に特徴的な現象が現れる位置、値、時刻をより狭い範囲で絞り込み、特徴的な現象が観察できる最適な2次元平面を決定する。

Step-3 Time Section (特化した機能) Step-2 で選択された2次元平面を重ね合わせて、時間軸を含んだ新しい格子を作成することにより時間の流れを擬似的アニメーションとして観察する。

Gateau では、ステップを逆方向に進むことも可能とする。その際、*History* を用いることによって、繰り返し作業を省く。

なお、上記で述べたコンセプトは、すべてのステップにおいて適用される。

4.2.2 入力データ

大気科学分野では、気温、二酸化炭素濃度、オゾン濃度などが観測され、数値データとして蓄積されていく。これらの数値データは、様々なデータフォーマットに保存され、ECMWF、NCEP、NASA などの機関からの配布や大気科学者間でのやりとりから入手される。

Gateau はこの何種類にも及ぶデータフォーマットに柔軟に対応するための基盤フォーマットとして、Dat フォーマットと Gat フォーマットを用いる^{4)~6)}。この2種類のフォーマットは非常に単純な構造のテキスト形式である。そのため、どのようなフォーマットからも簡単に作成可能である。Dat フォーマットは、格子数とデータのみで構成されている。Gat フォーマットは、格子数のほかに軸に関する情報とデータの向きを保存することができる。このデータの向きという情報により、たとえばデータが北極から開始するものかあるいは南極から開始するものかを区別することができる。Gateau では、経度が0度~360度、北極が上

になっている地図をデフォルトとしているため、データをこの順序で入れておく必要がある。しかし、Gat フォーマットでは、データの向きを入力することにより自動的に地図にあうようにデータが並べ替えられる。Gat フォーマットには、気圧のような非連続な軸の値に関する情報も保持される。

この2種類のデータフォーマットは基本的には3次元データを扱っているが、格子数を指定すれば、2次元データ、さらに1次元データも作成することが可能である。また、4.1節で述べたように、大気科学分野では扱われるデータは経度、緯度、高さ(気圧)、時間の属性を持つ4次元のものが多い。このような4次元のデータ分析を効率良く行うためには、比較を行う属性によって分類し、それぞれファイルを作成する必要がある。

Gateau のデータフォーマットは、さらに、読み書きに独自 API を必要とするバイナリ形式の HDF-EOS¹⁸⁾ と NetCDF に対してもサポートする。Gateau では、NetCDF を Gat フォーマットに変換するコマンドを用意する。HDF-EOS に対しては、直接読み込めるように開発することで HDF-EOS の3次元 Viewer として利用されることも期待できる。

大気科学分野で扱っている地球観測データは、欠損値を含むことがある。そこで、Gateau では欠損値を除いた表示を可能とする。最小値と最大値の範囲が1,000を超える場合は欠損値処理を行うかどうかの確認ダイアログを表示させる。欠損値がある場合はコマンドで欠損値を入力させる。

大気科学分野では、4次元の格子点データだけではなく swath データも利用されている。swath データとは、リモートセンシングで扱われるデータで、軌道面に垂直にスキャンした帯状のデータである。swath データには、一般的に、四辺形の頂点座標とデータ値が含まれる。Gateau では、任意の数のデータを取り込み、地図上に四辺形をデータ値に割り当てられた色で塗りつぶし可視化する。

4.2.3 全体像の表示モデルの適用

Gateau は入力データを読み込み3つのステップによって解析を行う。Step-1 では、3章で提案した全体像の表示モデルを適用する。その際、3次元格子データをボリュームレンダリングで可視化し時系列にそってアニメーション化する。

ボリュームレンダリングとは、ボリュームデータ全体を分かりやすく表示する手法として広く利用される可視化手法である。ボリュームレンダリングは、各格子上の色と透明度をその物理値に応じて設定する。こ

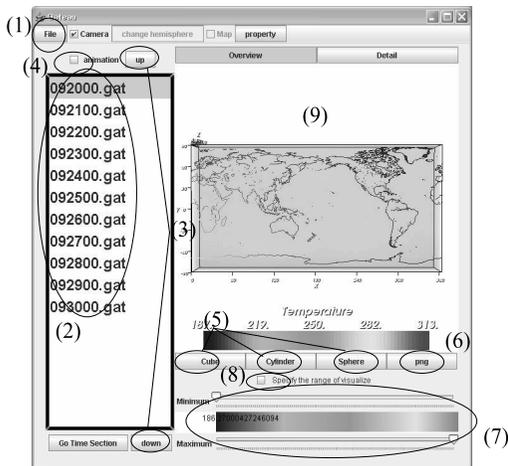


図 4 Step-1 Overview

Fig. 4 Step-1 Overview.

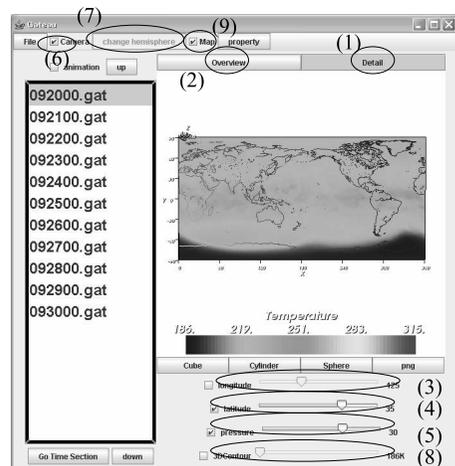


図 5 Step-2 Detail

Fig. 5 Step-2 Detail.

れにより、ボリュームデータの内部構造まで透視できる。そのため、データ分析の明確な目的や手がかりがなくデータの全容を見たい場合や、何かの手がかりや兆候を見つけたい場合に、全体の分布を大まかに把握する手段として有効である。

図 4 は Step-1 のユーザインタフェースを示す。Gateau では、次のような機能を持たせる。

- (1) 必要なファイルの読み込み
- (2) 読み込んだファイルのリスト
- (3) 表示するファイルの切替え
- (4) 読み込んだファイルのアニメーション表示
- (5) 表示する形の選択
- (6) 表示中の画像の PNG 形式保存
- (7) データの表示する値の範囲を選択
- (8) 選択された値の範囲を適用
- (9) 可視化結果の表示

大気科学では、1 度に膨大な量のデータを分析する必要がある。7 種の主要な操作機能の *Relate* として、データの属性によって分類が行われる。図 4 (2) では、日時による分類の結果がリストに表示されている。リスト内には、読み込みファイルの量によって、スクロールバーが現れる。さらに、リストから直接データの切替えを行うことも可能である。これにより、データを切り替えながら日時に関する比較検討を行うことができる。*Filter* として、表示させたい値の範囲をスライダによって選択させる。この機能を用いれば、特徴的現象を発見した際に、必要な範囲だけをボリュームレンダリングにより表示させ、観察することが可能となる。

4.2.4 詳細情報の表示モデルの適用

Step-2 では、3 章で提案した詳細情報の表示モデルを適用する。ここで、詳細な情報を得ることによって、Step-1 で目星をつけた特徴的現象の明確な位置、値、時刻などを発見する。

従来の 2 次元図を作成するために、3 次元格子から 2 次元図を切り出し可視化する。この切り出し作業によって、切り取られた平面の情報だけが可視化される。そのため、平面上の値の分布が正確に把握できるという大きな利点がある。

切り出された 2 次元図はカラーマッピングによって可視化する。カラーマッピングでは、各点の持つ値に対応する色分けが行われる。2 次元図の切り出しに対して、さらに、3 次元で利用される等値面の情報を追加する。等値面とは、ある値を持つ点をつなげて生成する多面体のことで、その値の分布を明示するのに有効である。まず、2 次元図の切り出しによって平面上で特徴のある値の分布を発見する。次に、その値を含む等値面を 3 次元空間内に表示する。これにより、3 次元空間での広がりを観察することができる。また、等値面の形状を基に 2 次元図を切り出すべき適切な面の位置を把握することが可能である。以上より、Step-2 では、Step-1 でシステムに読み込んだデータを用いて、3 次元格子からの 2 次元図の切り出しと等値面表示を行い、詳細な情報を得る。

図 5 は Step-2 のユーザインタフェースを示す。Gateau では、次のような機能を持たせる。

- (1) Step-2 への切替え
- (2) Step-1 への切替え
- (3) 緯度高度断面図の表示

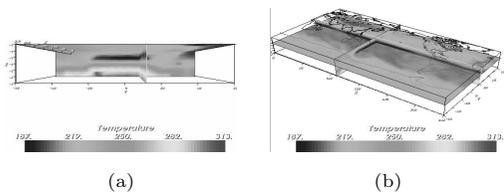


図 6 視覚的な位置の理解
Fig. 6 Visual understanding of the position.

- (4) 経度高度断面図の表示
- (5) 経度緯度断面図の表示
- (6) カメラの切替え
- (7) 北/南半球切替え
- (8) 等値面の表示
- (9) 地図の表示

Gateau では緯度-高度断面，経度-高度断面，経度-緯度断面の 3 種類を切り出すことができる．2 次元図の切り出し用スライダ 3 つと等値面用スライダ 1 つが用意されており，それぞれ独自にインタラクティブな表示が可能となる (3)~(5)．特定の 2 次元平面の 3 次元的な位置を直感的に認識するために，3 次元格子の内部に 3 つの断面を表示する．図 6 (a) の面は図 6 (b) のように視点を変えることによって位置を把握することができる．デフォルトでは 3 種類すべての面が表示されている．スライダの横のチェックボックスを使って，2 次元断面の表示・非表示を制御できる．

パラメータの設定として，色と格子の大きさの調整が可能である．使用する GUI は「property」というボタンを押すと開く．色の割り当て方は，最小値に青色，最大値に赤色とし，青から赤のグラデーションでカラーマッピングを表示させる．この最小値と最大値はスピナを使って変更する．格子の大きさの変更においては，画面を見ながらスライダで切り出したいデータ範囲を指定することによって，新しい大きさのデータ格子を抽出し保存する．つまり，Extract にあたる．

4.2.5 大気科学分野に特化した可視化技術

大気科学分野では，時間による変化が重視される．そのために，全体像の表示と詳細情報の表示に加えて時間による大気の動きを可視化するために Step-3 を用意する．

(経度，緯度，時間) 格子を作成し，2 次元図の切り出しを行うと (経度，時間) 断面と (緯度，時間) 断面が表示される．これらの断面は従来のタイムセクション図に相当する．時間軸の値を変更しながら (経度，緯度) 面を切り出せば，擬似アニメーションとして時間の流れによる大気の動きを直感的に理解できる．

Step-3 の手順は，以下のとおりである．図 7 (1) は，

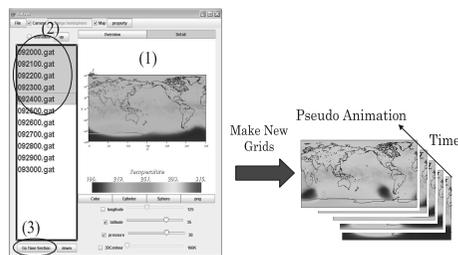


図 7 Step-3 Time Section
Fig. 7 Step-3 Time Section.

Step-2 で選択された 2 次元平面である．読み込んだファイルのリストから時間の流れを確認したいファイルを図 7 (2) のように選択する．図 7 (3) のボタンをクリックすることにより，Step-2 で選択した特徴的現象を観察できる 2 次元平面を縦軸と横軸に対応させ，高さに時間軸をとった新しい格子が作成される．この格子のために，Step-2 と同様，2 次元図の切り出し用スライダと等値面用スライダが用意されている．

5. 本システムモデルの有用性

本章では，Gateau が実際に大気科学分野で有効に利用できることを確かめることによって，我々の提案する 3 次元可視化システムモデルの有効性を検証する．5.1 節で，3 つのステップを用いてデータを分析し，実際に生じた大気現象を発見できるかどうかの検証を行う．5.2 節では，論文掲載図と類似する 2 次元図を Gateau が作成できることを示す．

5.1 Gateau を用いたデータ分析

2002 年 9 月下旬，南半球において，成層圏突然昇温とよばれる特徴的現象が生じた¹⁹⁾．突然昇温とは成層圏 (高度約 10~50 km の大気領域) において極域の気温が突然上昇する現象である．この突然昇温を Gateau の可視化によって観察する．入力データは，9 月の ECMWF 気温データとする．1 日分のデータの格子数は (経度，緯度，気圧) = (144, 73, 21) であり，約 1.66 MB である．そのため，1 カ月分のデータは約 49.8 MB となる．通常大気科学者が可視化を行う際には，経験や知識を基にしてこのデータの中から目的の現象が見られる位置を探し出さなければならない．一方，Gateau による可視化では，全体像の表示において 3 次元格子のアニメーションを行うため，すべてのデータを観察することが可能である．よって，目視による目的の現象の発見が可能となる．また，データ変更の際，CPU クロック数が 1.6 GHz，メモリが 512 MB の PC を使用した場合，1 日分のデータを直方体で表示し，データ変更を行うための時間は，0.469

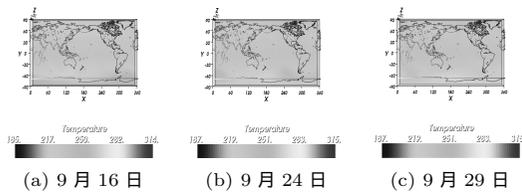


図 8 Step-1 における可視化結果 (直方体)

Fig. 8 The visualization results (Cube) in Step-1.

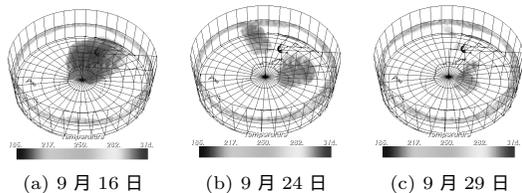


図 9 Step-1 における可視化結果 (円柱)

Fig. 9 The visualization results (Cylinder) in Step-1.

秒である．そのため，大量のデータを処理する場合においても，短時間に観察することができると考えられる．また，全体像の表示と詳細な情報の表示を使い分けることで，段階的に目的の現象の観察へと導くことができる．

これらの効果を検証するために，我々は，Gateau を利用することによって，大気科学の専門的知識なしにこの突然昇温を確認できることを示す．Gateau を用いたデータ分析は，4 章で説明したように 3 つのステップによって行われるため，ステップごとに検証する．

まず Step-1 で 9 月のデータを大まかに観察する．図 8 の (a)~(c) は，それぞれ 9 月 16 日，24 日，29 日のデータを直方体で可視化している．図 8 より，南半球の極渦とよばれる低温部に動きが見られる．この低温部は，9 月下旬になるに従って小さくなり，9 月 29 日にはほとんど見られない．南半球にある特徴的現象をより詳細に観察するために，表示方法を図 9 のように円柱へと切り替える．低温部の情報を得るために，215 K 以下のデータのみを表示させる．9 月下旬に低温部が 2 つに分かれ，29 日にはほぼ消滅していることが分かる．これは，2002 年の 9 月下旬に見られた極渦が 2 つに分裂し，一方が完全に崩壊した現象であると考えられる．

次に Step-2 において，Step-1 で見出した低温部を詳細に調べる．図 10 は，9 月 20 日のデータを円柱で表示している．図 10 (a) は南極の緯度高度断面図と経度高度断面図である．図 10 (a) より，低温部が成層圏に存在することが分かる．図 10 (b) が示している

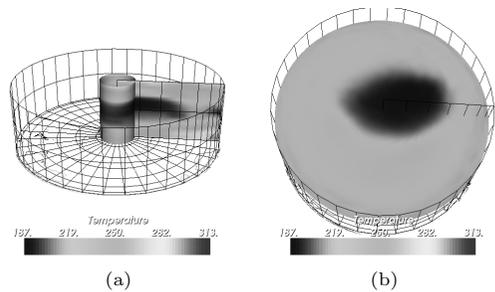


図 10 Step-2 における可視化結果

Fig. 10 The visualization results in Step-2.

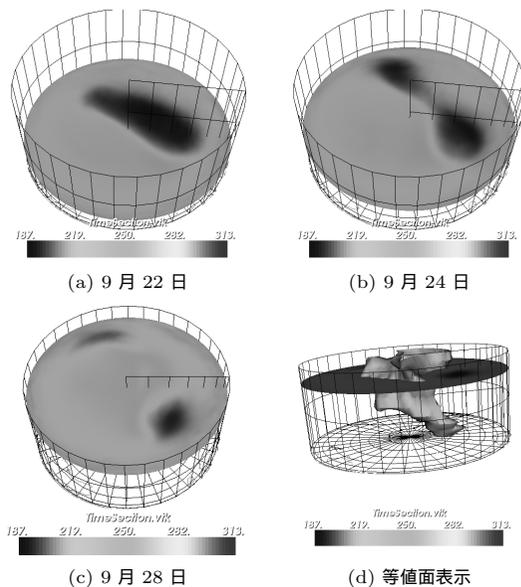


図 11 Step-3 における可視化結果

Fig. 11 The visualization results in Step-3.

のは気圧 30 hPa (高度約 24 km) における経度緯度断面図である．低温の大きな極渦が見られ，その周りにはほかより温度が高い部分が見られる．これが突然昇温であると考えられる．

そこで，Step-3 において，突然昇温と極渦が見られる図 10 (b) の切り出し面の時間の流れを観察する．9 月 20~30 日のファイルを選択し，気圧 30 hPa の経度緯度断面図を時系列にあわせて積み重ね，新しい格子を作成する．図 11 の (a)~(c) は，9 月 22 日，24 日，28 日の経度緯度断面図である．突然昇温のために極渦が 2 つに分裂し片方が崩壊するまでを観察することができる．図 11 (d) は 238 K の等値面表示を追加した図である．突然昇温が 9 月下旬になるほど広範囲になることが分かる．

以上より，次のことが確認される．Step-1 では，低温部の特徴的な動きを発見できる．また，この極渦に

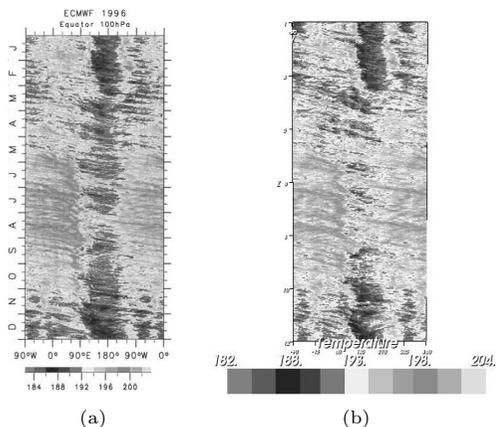


図 12 論文掲載図との比較

Fig. 12 Comparison between conventional and Gateau generating 2D cross sections.

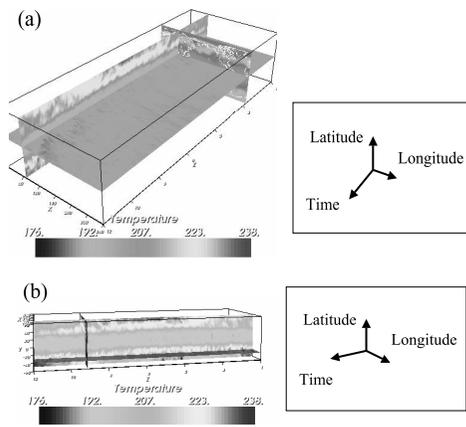


図 13 (経度, 緯度, 時間) 格子

Fig. 13 (longitude, latitude, time) grids.

あたる低温部が2つに分裂し、一方が完全に崩壊する様子を観察することができる。Step-2では、極渦と突然昇温が成層圏で見られることが分かる。Step-3では、9月下旬になるほど突然昇温の範囲が広がることが確認できる。さらに、突然昇温の影響で、極渦が2つに分裂し、一方が完全に崩壊する様子を観察することが可能である。以上より、提案するモデルを基に開発した Gateau の可視化により、大気科学者が必要な情報を得られることが確かめられた。

5.2 論文掲載図との比較

Fujiwara らによる大気科学に関する論文²⁰⁾ の掲載図と Gateau で作成した図を比較する。

論文 20) の掲載図は、図 12 (a) である。ECMWF の 1996 年の赤道における 100 hPa の等圧面高度の気温データを表している。気温データは、1日2回、経度 2.5° ずつの地点で1年間観測されたものである。図 12 (a) において、横軸が経度、縦軸が時間を表す。縦軸は上から下に向けて時間が進む。横軸の 90° W-0° の範囲は重複して描かれている。

図 12 (a) には、右下方向にむけた縞模様がある。この縞模様から、時間の経過にともなって波の位相が東に進むことが分かる。

図 12 (b) は Gateau で 1996 年の気温データを同様に可視化したものである。図 12 (a) と同様の色のトーンを用いて再現している。また、東進性の特徴を見出すことが可能である。

Gateau では、3次元格子の内部に様々な2次元図を描画させることが可能である。図 13 (a) は 100 hPa における(経度, 緯度, 時間)格子である。この格子では、図 12 では見ることができない経度の断面図を

スライドの調節によって簡単に観察することが可能となる。また、図 13 (b) のように回転させることによって、あらゆる方向からの観察が可能なので、経度時間断面図や経度緯度断面図と照らし合わせることで、3次元格子の直感的理解が可能となる。

以上より、モデルを基に開発した Gateau が論文掲載図と類似する2次元図を作成できることを確認した。また、3次元可視化を用いることにより、4次元データの直感的理解が可能となり、新たな発見が期待できる。

6. まとめと今後の課題

本稿では、Shneiderman が提唱する情報可視化に求められる7種の主要な操作機能を基に、大量のデータを効率良く分析することができる大気科学分野のための3次元可視化モデルを提案した。機能の操作手順は、Shneiderman が提案する基本原理 Visual Information Seeking Mantra を基にした全体像と詳細情報の2種類の表示で構成した。この2種類の表示を使い分けることによって、情報爆発に対応しうるデータ分析のための可視化を可能とした。インタフェースにおいては、Shneiderman が提唱する8つの黄金律を基にしている。このシステムモデルの有効性を調べるために、大気科学分野を対象とする可視化システム Gateau を開発した。この Gateau を用いて、突然昇温の可視化と既存の論文掲載図の可視化を行った。突然昇温の可視化では、大量のデータを扱う大気科学分野において、大気科学に関する知識のない我々においても目視によって、目的の特徴的な現象を可視化できることを示した。既存の論文掲載図の可視化では、開発したシステムによって従来の可視化を再現できるこ

とを実証した。また、3次元可視化により、従来の2次元図より多くの情報量を持てるため、直感的なデータ分析が可能となる。さらに、GateauはインタラクティブにGUIで操作できるため、効率の良いデータ分析が実現できた。

今後、Gateauを実際に大気科学者に使用してもらい、そのログをとることによって、どのような機能が頻繁に利用されているかなどの情報を得る。このログの情報や大気科学者の意見を基に、さらにカスタマイズされた使いやすいシステムを目指す。また、Gateauは一般的に利用されているデータサイズは問題なく読み込み可能であるが、さらなる大容量データを扱えるよう改良を加える必要がある。そのために、ファイルキャッシュを作成し、メモリサイズに依存しないデータ入力を実現し、Gfdnavi³⁾へと統合する予定である。さらに、システムを最適化、高速化させるモデルを検討し、より使いやすい情報可視化モデルの考案が望まれる。

謝辞 気温データECMWF-ERA40は、京都大学のKAGプロジェクトから提供していただきました。また、本研究の一部は科研費特定領域「情報爆発時代に向けた新しいIT基盤技術の研究」課題A01-14(課題番号18049043)による。

参 考 文 献

- 1) 情報爆発。
<http://i-explosion.ex.nii.ac.jp/i-explosion/index.php>
- 2) Shneiderman, B.: The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualization, *Proc. IEEE Symposium on Visual Languages*, pp.336-343 (1996).
- 3) 堀之内武, 西澤誠也, 渡辺知恵美, 森川靖大, 神代剛, 石渡正樹, 林 祥介, 塩谷雅人: 地球流体データベース・解析・可視化のための新しいサーバ兼デスクトップツールGfdnaviの開発, *Proc. Data Engineering Workshop (to appear)* (2007).
- 4) Watanabe, C., Touma, E., Yamauchi, K., Hayashida, S. and Joe, K.: Development of an Interactive Visual Data Mining System for Atmospheric Sciences, *Proc. International Symposium on High Performance Computing VI (CD proceedings)* (2005).
- 5) Touma, E., Yamauchi, K., Kamo, H., Nide, N., Hayashida, S. and Joe, K.: Gatau: A 3D Visualization System for Intuitive Analysis of Atmospheric Science, *The 2006 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications*, Vol.II, pp.860-866 (2006).
- 6) Yamauchi, K., Touma, E., Kamo, H., Nide, N., Hayashida, S. and Joe, K.: Design and Implementation of Gatau API for HDF-EOS, *The 2006 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications*, Vol.II, pp.867-873 (2006).
- 7) Shneiderman, B.: *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction*, 3rd ed., Addison-Wesley Publishing, MA (1998).
- 8) NetCDF.
<http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
- 9) GRIB.
<http://www.globalmarinenet.net/grib.htm>
- 10) HDF.
<http://www.hdfgroup.com/>
- 11) GrADS.
<http://www.iges.org/grads/>
- 12) Ncvtk.
<http://ncvtk.sourceforge.net/>
- 13) Vis5D.
<http://www.ssec.wisc.edu/~billh/vis5d.html>
- 14) IDV.
<http://www.unidata.ucar.edu/software/idv/>
- 15) AVS/Express.
<http://www.kgt.co.jp/feature/express/>
- 16) The Visualization Toolkit.
<http://public.kitware.com/VTK/>
- 17) National Geophysical Data Center.
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>
- 18) HDF-EOS Project.
<http://hdf.ncsa.uiuc.edu/hdfeos.html>
- 19) Nishii, K. and Nakamura, H.: Tropospheric Influence on the diminished Antarctic Ozone Hole in September 2002, *Geophys. Res. Lett.* 31 (2004).
- 20) Fujiwara, M. and Takahashi, M.: Role of the equatorial Kelvin wave in stratosphere-troposphere exchange in a general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, Vol.106, No.D19, pp.22763-22780 (2004).

(平成 18 年 11 月 23 日受付)

(平成 19 年 1 月 11 日再受付)

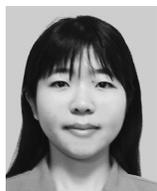
(平成 19 年 4 月 23 日再々受付)

(平成 19 年 6 月 18 日採録)



当麻英梨子 (学生会員)

昭和 57 年生。平成 18 年奈良女子大学理学部情報科学科学士取得。平成 18 年奈良女子大学大学院人間文化研究科情報科学専攻修士課程入学。現在同大学院に在学中。大気科学を対象とする 3 次元可視化システムの開発に関する研究に従事。



高田 雅美 (正会員)

昭和 52 年生。平成 13 年奈良女子大学大学院人間文化研究科情報科学専攻修士課程修了。平成 16 年奈良女子大学大学院人間文化研究科複合領域科学専攻修了。博士 (理学) を同大学より取得。平成 16 年独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造事業の委嘱研究員として、京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻数理解析分野にて従事。分散メモリ環境を対象とする並列プログラムの開発に関する研究に従事。



城 和貴 (正会員)

大阪大学理学部数学科卒業。日本 DEC, ATR 視聴覚研究所 (日本 DEC より出向) (株) クボタ・コンピュータ事業推進室で勤務。平成 5 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程入学。平成 8 年博士 (工学) を同大学院大学より取得。平成 8 年同大学院大学情報科学研究科助手。平成 9 年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科講師。平成 10 年同学科助教授。平成 11 年奈良女子大学理学部情報科学科教授。画像処理, 文字認識, ニューラルネットワーク, 並列計算機アーキテクチャ, 自動並列化コンパイラ, 並列計算機の解析モデル, 視覚化等の研究に従事。IEEE, ACM 各会員。