

台風の3次元構造を観察するための対話的VRシステム

楊 安桐[†] 矢野 緑里[‡] 神山 翼[†] 伊藤 貴之[†]

お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

‡ 日本原子力研究開発機構 〒227-0871 千葉県柏市若柴 178-4 柏の葉キャンパス 148 街区 4

E-mail: † {yang.antong, tsubasa, itot}@is.ocha.ac.jp, ‡ yano.midori@jaea.go.jp

あらまし 気象の観測結果やシミュレーション結果の理解に可視化技術がよく用いられる。気象データの可視化には旧来からスカラ場（気温・気圧など）とベクタ場（風向）の2次元可視化手法が多用されてきた。一方で、気象現象の立体的なメカニズムを理解するには3次元的可視化による理解が不可欠である。

本報告では台風に焦点をしばって、その立体的な構造を観察するためのVRシステムを提案する。本研究では日本周辺の台風の3次元構造と進路を再現する。本報告ではこのシステムの概要を示すとともに、このシステムによって台風に関するどのような知見を得られるか、またどのようなメリットがあるかを議論する。

キーワード 気象, 台風, 3次元可視化, VR

1. 序 論

高性能な計算機が発達し、大規模な科学技術データの計算が容易になったことから、地球科学や、医学など、あらゆる領域において数値シミュレーションが適用されている。科学技術データを対象とする可視化はサイエンティフィック・ビジュアライゼーション (Scientific Visualization) と呼ばれる。その中に、直接的に観察することが難しい気体や液体などの現象を可視化するために、コンピュータを用いた計算流体力学 (CFD) のシミュレーション結果が広く適用されている。

流体シミュレーションは、気候モデリング、乱流燃焼、自動車設計など、多くの科学および工学分野で重要な役割を担っている[1]。その中でも、近年の気象観測・予報技術の進展により、気象の観測結果やシミュレーション結果の理解に可視化技術がよく用いられる。気象データの可視化には旧来からスカラ場（気温・気圧など）とベクタ場（風向など）が対象とされており、断面上に等高線や矢印などを描く2次元可視化手法が多用されてきた[2]。しかし2次元的可視化結果からは、気象現象の立体構造を理解するのが難しい場合が多い。したがって、気象現象の立体的なメカニズムを理解するには3次元可視化による理解が不可欠である。そこで我々は、仮想現実 (Virtual Reality) 技術を用いた3次元可視化手法に着目している。

ゲームなどの民生用のバーチャルリアリティ (VR) 機器が近年急速に普及しており、これに伴いVR技術を用いた科学的可視化を利用することがこれまで以上に容易になってきている[3]。科学技術データの可視化にVR技術を適用することで、視野が広く立体感のある可視化を実現できるので、より直観的に自然現象を理解することが可能となる[4]。清川ら[3]が述べるように、VR技術を用いた可視化では以下でいくつかのメリットがあげられる。

- 視野角と視点追従はVRディスプレイがPCモニターなどと最も顕著に異なるポイントである。特にヘッドマウントディスプレイ (HMD) は視点操作の面で優位性が高い。
- 2次元可視化技術と比較して、没入感・臨場感や立体感の面で優位である。

以上の利点により、HMDを用いたVRシステムを適用することで、ユーザがシミュレーション結果を没入的に観察すれば、気象シミュレーションの可視化においてもより直感的な理解が可能になると考えられる。

科学技術計算のためのVR可視化には、以前はCAVEに代表される高価なVR装置がよく使われてきた。しかし、費用や利便性などの理由から、VR装置を利用できるユーザは限られていた。それに対して近年では、OculusやHTC VIVEなどの安価で高性能なVR装置が普及しており、科学技術計算結果の可視化においても広く活用されている。また、ゲームエンジンであるUnityやUnreal EngineがHMDとの接続に対応したことや、HMDを含むVR機器ベンダーがゲームエンジン用プラグインを無償で公開していることもあり、VRの開発は以前と比較して容易なものとなった[5]。これらの背景から、本研究はUnityゲームエンジンとHTC VIVEを用いて、立体的に気象データを解析している。

我々は台風に焦点をしばって、その立体的な構造を観察するためのVRシステムを開発している。本研究は日本周辺の台風の3次元構造や進路を再現することを目標とするものである。本報告ではこのシステムの概要や構想、および現時点での進捗を示すとともに、このシステムによって台風に関するどのような知見を得られるかと今後の展望を議論する。

本報告の構成は以下の通りである。2章では関連研究について述べる。3章では提案手法について、4章で実行例と考察を述べる。そして5章では評価実験と結果を述べる。最後に6章は本研究のまとめと今後の課

題，展望について述べる．

2. 関連研究

2.1 等値面と流線の可視化手法

本研究では，台風の 3 次元構造を再現するために，風の流れ場や気圧などを 3 次的に可視化することが必要と考えられる．

気圧や気温などのスカラ場に対して，本研究では等値面による可視化を適用する．等値面とは，ボリュームデータ内のスカラ値の等しい位置を通過する曲面のことである．古矢ら[6]はスカラ場の特異点を抽出し，その周辺の数値分布を集中的に Marching Cubes 法を用いて等値面を生成する．

また，流速などのベクタ場に対して，本研究では流線による可視化を適用する．流線とは，ある瞬間における速度ベクトルが接線となるように描いた曲線である．流線を用いた可視化の一例として八反田ら[7]は，複数のシミュレーション結果から生成される流線を 3 次元空間に重ねて表示する手法を提案している．また，古矢ら[6]は等値面と流線の同時可視化において，等値面による遮蔽を考慮した視認性の高い流線選択手法を提案した．

2.2 気象現象の 3 次元可視化手法

気象データに特化した可視化ツールの開発事例として，Wang[8] は MeteoInfo という可視化と分析のツールを提案している．しかし，このツールでは気象現象を 2 次的な可視化手法で表現しているため，データに対する立体的な分析が足りなかった．新井[9]は，Fig.1 に示すような気象情報可視化ツール Weather Data Visualization Tool (Wvis)を開発している．このような 3 次元可視化ツールを用いることで，大気の立体的な構造を理解することが容易になる．専門家の利用に特化するだけでなく，教育現場や気象分野の初心者も含め，多様なユーザ層への活用が期待される．

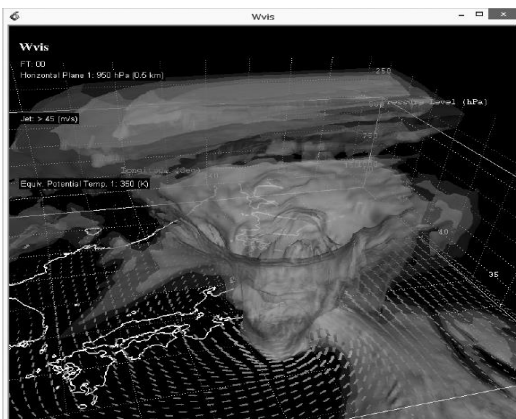


Fig.1 Wvis ツールで示した台風の 3 次元可視化結果[9]．

2.3 VR 空間における可視化手法

VR 技術は初期段階から科学技術データの可視化に用いられてきた．Donalek ら[10]は，火星の仮想歩行体験によってその地形に対する直感的理解を支援するために VR を適用している．このように，VR 空間は物体形状や位置関係の把握に適していると考えられる．また，複雑な 3 次元流れ現象をより正確にかつ対話的に可視化するために，CAVE 装置による VR システムの構築事例も報告されている[11]．

VR システム上での流線の生成手法について，澤田ら[12]は Unity で流体シミュレーション結果を読み込み，円柱で流線を描画する手法を提案した．太さをもたない曲線や折れ線で流線を描くよりも，円柱を用いて立体的に描画した方が，流線の奥行き方向の位置関係を把握しやすくなる．本研究でも同様な描画方法を採用している．

2.4 ゲームエンジンを用いた可視化方法

Unity はゲーム開発エンジンとして幅広く使われている[13]．使いやすいインタフェースや C# による開発環境を備え，Windows, MacOS, Android などの多様なプラットフォームで実行可能な実行ファイルを出力できる．豊富なアセットも公開されているため，開発をより容易にしている．また，PC の画面上だけでなく，Oculus や HTC VIVE, WindowsMR などの VR 装置に出力することも可能である．VR デバイスによる操作を Unity で実装することにより，両手の相対的な動きによる対象の移動，回転，拡大・縮小，あるいは片手の動きによる VR 空間内の移動などを操作することができる．

そこで我々は，Unity ゲームエンジン上で簡単に利用可能な形で気象現象を可視化するツールを実装した．このような開発環境を利用することにより，ビジュアルプログラミング環境でユーザが VR システムを構築することも可能となる．

3. 提案手法

本章では提案手法におけるデータの構造と処理手順について説明する．

3.1 気象データの前処理

台風を可視化するために必要な気象データは公開されており，ダウンロード可能である．本研究では気象庁のメソ数値予報モデル(MSM) のデータ[14]を用いている．MSM は研究教育目的であれば京都大学のサーバからダウンロードして NetCDF 形式で利用できる．現時点での本研究では，例として 2016 年 8 月の一ヶ月分の気象データを用いている．

当該データには，北緯 22.4 度～47.6 度・東経 120 度～150 度方向ともに 5km の解像度で，ジオポテンシャル高度，風向，気温などの情報が気圧座標系で提供さ

れている．本研究ではダウンロードした気象データを，鉛直方向に線型内挿・外挿することによって幾何学的な高度座標系に変換したのち，特定の時刻において可視化に用いる情報を抽出して保存している．ここで抽出したデータは気圧 p ，気温 $temp$ ，東西風 u ，南北風 v ，鉛直速度 w であり，東西風・南北風・鉛直速度の値を速度ベクトルとして使っている．本研究で適用した気象データでは，地上高度 100 メートルから 4900 メートルまでの各地点を可視化している．

MSM においては上昇・下降気流は鉛直 p 速度で表現され，上昇気流は負の値，下降気流は正の値となる．この変数は気圧座標になっているので，高度座標における速度 (dz/dt) に直すには，以下を近似式として用いている．

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{RT}{pg}w$$

ここで R は乾燥大気の水蒸気定数の値 $287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ， T は抽出した気温データ $temp(\text{K})$ ， p は抽出した気圧データ $p(\text{Pa})$ ， g は重力加速度の値 9.81 m/s^2 である．この近似式は，本来は台風のように対流活動の活発な領域のデータ解析に用いるのは望ましいとは言えないが，本報告では可視化の実施例を示すのが目的であるため，数値的な厳密さを犠牲にして最も簡便な変換公式を用いている．

3.2 スカラ場・ベクタ場の同時可視化

本研究では気圧や気温をスカラ場とみなし，風速をベクタ場とみなし，これらを同時に可視化する．本研究では古矢ら[6]の可視化手法にならって，等値面でスカラ場（気圧）を，流線でベクタ場（風の流れ場）を同時に可視化する．なお古矢らの研究では，ベクタ場可視化のための流線選択手法を提案しており，今後はこれを採用することも検討したい．

我々は等値面および流線の生成アルゴリズムを Java 言語で開発している．このプログラムでは等値面および流線の生成結果をファイルにエクスポートすると同時に，JOGL (Java binding for OpenGL) を用いて表示している．Fig.2 はこのプログラムで可視化した等値面と流線である．ピンク色の曲線群が風の流れ場をあらわす流線群であり，緑色の面が等圧面（気圧が同一である点の集合）である．この画面を観察することで，どのような台風をどのように再現するのかを議論できる．

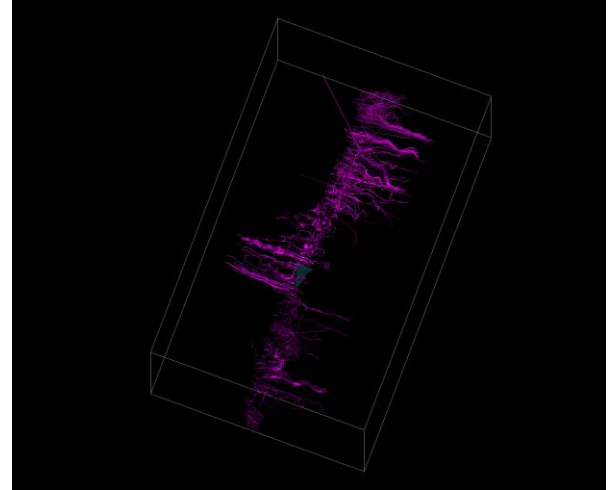


Fig.2 等値面と流線の生成結果の例．

3.3 流線の密度と不透明度の設定

流線で台風を表現するにあたり，以下の 2 点に注意する必要がある．

【課題 1】 流線を過剰に生成することで描画速度が低下するのを避けたい．

【課題 2】 台風の形状理解に直接関係ある部位のみを対象として風速を詳細に表現し，それ以外の部位では流線を表示しないか，あるいは目立たなくすることが望ましい．

本手法では課題 1 を解決するために，ズームイン用とズームアウト用に別々の流線群を生成する．ズームイン用の流線は気圧が極小となる台風中心付近のみ生成し，その領域から流線が外に出るときに流線の生成を中断する．これにより流線の長さを抑えて描画速度の低下を防ぐ．VR システムで台風付近に没入する時にはズームイン用の流線群をファイルから読み込む．ズームアウト用には頂点を間引いた流線をファイル出力する．これによって頂点の総数を抑えて描画速度の低下を抑える．VR システムで台風の全体像を遠目から眺める時にはズームアウト用の流線群をファイルから読み込む．

本手法では課題 2 を解決するために，流線の不透明度を調節する．本研究で用いるデータには偏西風に代表される定常的かつ一方向への流れも記録されている．このような定常的な流れを流線として表示してしまうと，台風の構造など注目すべき部位の理解を妨げることがある．そこで本手法では，定常的な流れを表す流線の不透明度を下げることで，台風が発生している地域での流線を強調する．本手法では一定期間（現時点では 2016 年 8 月の 1 ヶ月間の日本時間 0 時）の東西風・南北風の平均値を算出し，これと差分が大きい部位，あるいは台風の中心に近い部位にのみ高い不透明度を適用し，それ以外の部位に低い不透明度を適用する．

具体的には以下の式により不透明度 α を算出する．

$$\cos \theta = \frac{uu_{ave} + vv_{ave}}{\sqrt{u^2 + v^2} \sqrt{u_{ave}^2 + v_{ave}^2}}$$

$$\alpha = \alpha_{min} + (1.0\alpha_{min})(1.0 - f(\cos \theta)) \quad (if \ d \geq d_{max})$$

$$\alpha = \alpha_{max} \quad (if \ d < d_{max})$$

ここで $\cos \theta$ は現在の風向と平均の風向のなす角の余弦に比例する値、 u と v は現在の東西風と南北風の値、 u_{ave} と v_{ave} は算出した東西風と南北風の平均値、 α_{min} は不透明度の最小値、 d は台風からの距離、 d_{max} は台風からの距離の閾値を示す．

以上の処理によって、流線中の注目すべき部位のみを強調して描画する．なお、流線の不透明度は流線を構成する各頂点に対して設定する．つまり流線生成結果として各頂点の座標値と不透明度が出力される．

3.4 VR システム上の可視化

本研究では、2.4 節で述べたように、ゲーム開発エンジンである Unity3D を VR 環境の構築に採用している．3.2 節に示したシステムで出力した流線と等値面のデータファイルをインポートし、Unity で台風の 3 次元構造と進路を再現する．Unity では Fig.3 に示すように円柱を連結させて流線、三角ポリゴンメッシュを用いて等値面を表示している．流線 N_i を構成する頂点群を $N_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\}$ としたとき、隣接する 2 頂点（たとえば Fig.3 中の a_{i1} と a_{i2} ）を連結する円柱を生成し、この集合を 1 本の流線として描画する．このとき、あらかじめ頂点ごとに算出した不透明度 α を用いて、 α が 0 に近ければ不透明度が高い円柱を描画し、1 に近ければ不透明度が低い円柱を描画する．

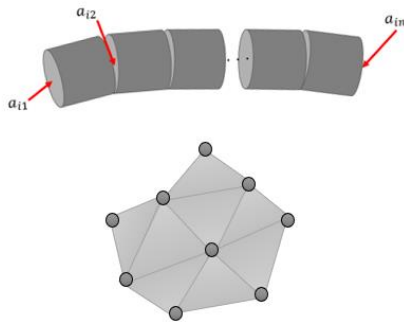


Fig.3 (上)連続した円柱で流線を描画．

(下)複数の三角ポリゴンメッシュで等値面を表示．

ところで、台風の進路は時系列に沿った計測データやシミュレーション結果から再現可能であるが、各時刻のスカラ場やベクタ場を可視化するだけでは時系列に沿った台風の現象を理解することが難しい．そこで本研究は台風の進路をさらに明確にするため、台風全体を一定時間（本研究で適用したデータでは 3 時間）ごとに移動することに加え、各時刻における台風中心

を矢印で連結することで台風の進路を表現している．

これに加えて本システムでは、日本付近の地図を表示することで、大陸と台風の位置関係を確認しやすくする．我々の実装では地図画像として、Blue Marble データセット[15]から日本付近のみの地形を切り出して作成した画像を採用している．この画像を Unity で読み込むことで、日本付近の地図を表示する．また、ユーザが VR 空間に没入して臨場感のある体験ができるように、本手法ではインタラクティブな仕組みを提供する．台風の 3 次元構造と進路を観察するために、Unity の UGUI を利用して Fig.4 に示すように操作画面を設計する．

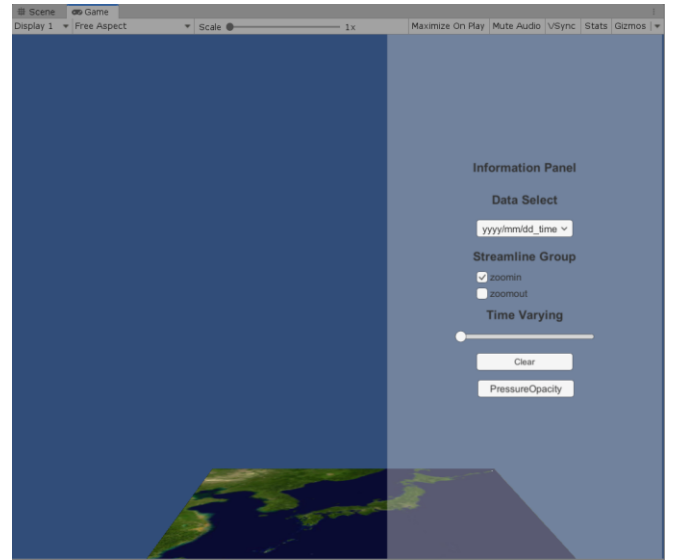


Fig.4 Unity で設計された UI ページ．

4. 実行例

本手法の実行例を示す．本システムは、VR 技術がもつ立体感や対話性、没入感などの特徴を利用し、VR 空間上で台風の 3 次元構造と進路を観察することを目指す．我々は VR システムで台風の構造をユーザ自分の手で回して観察することを想定しているため、HTC Vive のヘッドマウントディスプレイおよびコントローラを用いている．台風は回転する巨大な空気の渦巻きである[16]．Fig.5 に示すように、下層では反時計回りに中心に向かって空気が吹き込みながら上昇し、上層で時計回りに噴出している．台風の高さは発達したもので約 15km である．

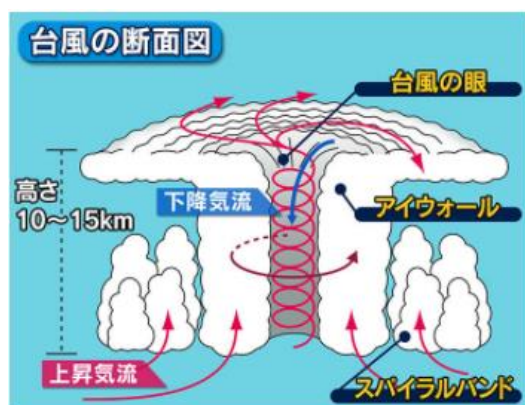


Fig.5 台風の断面図[16].

本報告では 2016 年の台風 10 号を例として、8 月 27 日の 3 時間ごとの気圧、気温、鉛直速度、東西風・南北風を入力し、3.2 節に示した実装で流線と等値面を生成した。これを Unity で表示することで、台風の 3 次元構造と進路を再現する。この可視化結果では観察したい日時と流線群を操作画面上で選択し、その時点の台風の形を Unity 上で再現している。

Fig.6 は 2016 年 8 月 27 日 0 時の台風全体を示した結果である。風の流れ場は白い流線で描画し、等圧面はピンク色の等値面を表現した。ここではズームアウト用の流線群を適用している。この可視化結果からみると、可視化した高度の上部と下部の風向はほぼ同じ方向であるが、中部は逆風向である。台風の中心付近では、不透明度の高い流線が渦と上昇気流を描いている。流線中のそれ以外の部分において不透明度が低くなっているため、台風の中心付近を集中的に観察することができる。

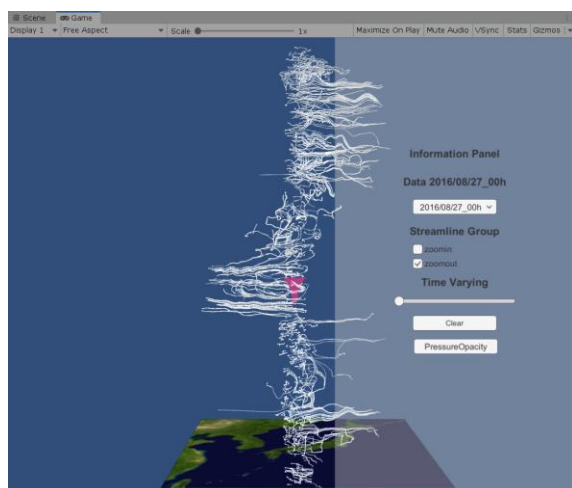


Fig.6 2016 年 8 月 27 日 0 時の台風全体像。

Fig.7(上)は VR 空間で台風の中心付近に入り込んだ例 (2016 年 8 月 27 日 0 時) である。気圧が極小となる台風中心付近は俗に「台風の眼」と呼ばれる。この

可視化を通して、「台風の眼」付近の流れ場に見られる顕著な渦を観察することで、眼の周辺に最も特徴的な流れ場があることを体験できる[17]。Fig.7(下)は台風中心近くにある小さな渦の近くに没入した例である。台風と乱流のような、空間スケールの異なる現象の相互作用については今後さらなる解析が期待される。

Fig.7 に示すように、ユーザが興味に合わせて日時を選択することで、異なる日時の台風の 3 次元構造を観察することができる。また、ここで表示している等値面は、台風の中心付近の中段の気圧に対応して生成されている。本システムでは、複数の気圧値に対応する複数の等値面を同時に生成し表示することができる。

本システムでは UI ページにもいくつかの操作機能を搭載している。UI ページ上の Time varying スライダーを操作することで、台風全体の一定時間 (本報告では 3 時間) ごとの移動を観察することもできる。3.4 節で述べた台風の進路表現の例を Fig.8 に示す。この表現では、台風中心が黄色の点で、進行方向が黒い矢印の線で表現されている。これによって、台風の進行方向への把握がさらに容易になっている。

本手法を用いることで、VR 空間に没入して台風の「形」を観察することができる。HTC Vive のヘッドセットでユーザの両眼に表示される VR 空間を Fig.9 に示す。ユーザは左手用のコントローラを用いて VR 空間を移動することで、台風周辺の任意の位置から台風の形を観察することができる。また、頭を動かすなどの動作によっても視点を自由に操作できる。一方で、右手用のコントローラによって UI ページを操作できる。ユーザとのインタラクションを容易にするために、UI ページはユーザの視線とともに移動可能な状態で実装されている。

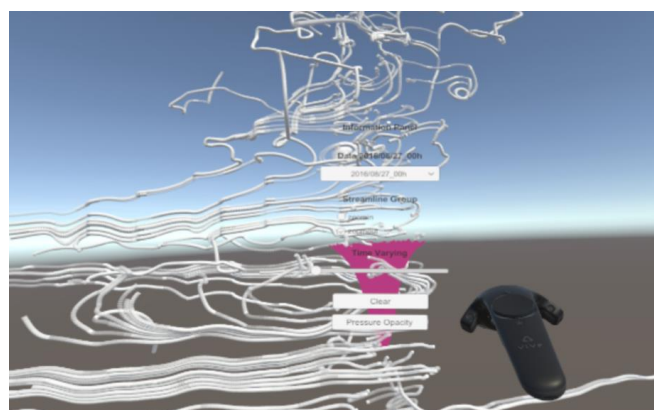




Fig.7 (上)VR空間で台風の中心付近に入り込んだ例.
(下)VR空間で台風中心近くの渦.

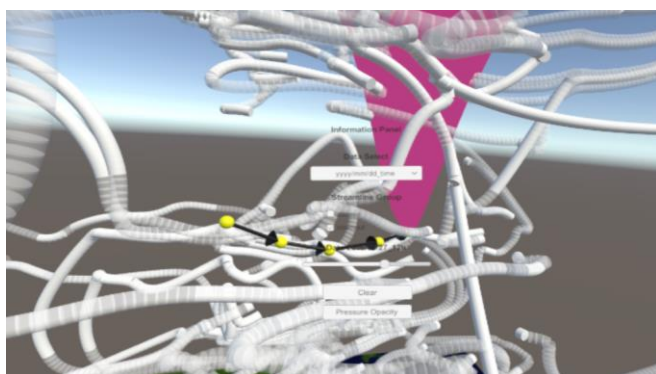


Fig.8 VR空間での台風の進路表現.

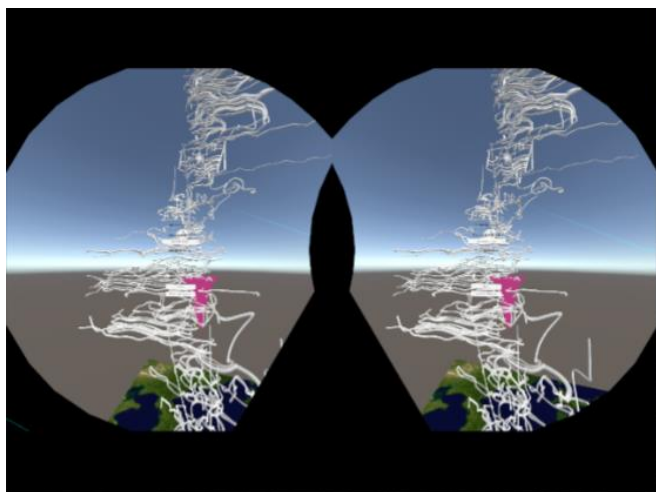


Fig.9 ヘッドセットでユーザの両眼に表示されるVR空間.

5. 評価実験と結果

5.1 実験の概要

本実験では、ユーザがどのように台風を観察するか、そしてユーザがどのような所感をもつか、といった点にもとづいて本システムを評価する。

本 VR システムでは、観察したいオブジェクトをユーザが自由に選ぶことを想定している。言い換えれば、台風周辺の空間の中から可視化したい部位を選択できる程度に専門性のあるユーザに向いていると考えられる。言い換えれば本研究では、気象学とデータ可視化にある程度精通している人をユーザとして想定している。そこで本実験では、2 人の気象専門家、1 人の可視化専門家を参加者として招待した。また、専門家ではない人にとっての本システムの使用感も調査するために、気象の専門知識を有さない 2 人も参加した。

本実験では 3.1 節にて紹介した気象データを使用する。使用したデータは 2016 年の台風 10 号が発生した時期のうち、8 月 27 日の 0 時から 21 時まで 3 時間ごとに記録されたものである。

5.2 実験の手順

本実験に先立って我々は、本研究の内容について、また使用するデータの詳細について、実験参加者に説明した。続いて我々は、デモンストレーション操作をしながら、VR システムの操作方法について簡単に説明した。その後に、参加者は本 VR システムを使いながら 5 分程度の自由練習をした。そして、我々が本システムの機能を逐一説明した上で、参加者は台風の 3 次元構造と進路を観察した。その過程で参加者に、どのような感想をもったか、あるいはどのような現象に興味をもったかを口頭で述べてもらった。最後にアンケートに回答してもらった。各参加者の実験時間は約 60 分だった。

5.3 実験結果

参加者らの共通した意見として、HTC VIVE の操作方法について、VR の経験の有無にかかわらず、慣れれば操作がしやすかったと答えていた。台風の 3 次元構造については、いずれの被験者も、普通のディスプレイよりは明らかに観察しやすかったと回答した。

気象専門家からは、普段見落としていた微細な渦構造を発見したり、上昇気流の強さを分析したりすることができた、という意見があった。台風の進路については、被験者のうち 3 人は等圧面と風の流れを同時に重ねて表示した方がわかりやすいと回答したのに対して、気象専門家は等圧面だけの場合の方がわかりやすいと回答した。可視化専門家は進路の理解だけなら 2 次元での可視化でも十分かもしれないことを指摘した。専門家ではない人に対して、専門的な知見や分析などを得ることが難しいことから、本システムは専門家に向いていることを実証した。

操作面において具体的にあげられた課題として、コントローラを利用して UI ページでの時間を選択する際に、コントローラの感度が高すぎたため、時間選択の操作に対して阻害されることがあった、という点が

あげられた。また、カメラから離れた位置の操作が難しかったという点もあげられた。

6. まとめと今後の課題

本報告では、台風の立体的なメカニズムを観察するための VR システムを提案した。我々は Java 言語で開発したプログラムで流線と等値面を生成し、これらを Unity でインポートすることにより、VR 空間内で台風の 3 次元構造と進路を再現した。本システムによって台風の 3 次元構造や進路などへの理解を促すことができる。

本システムを用いた台風可視化の特徴は以下の 3 点である。

- VR 空間で台風の 3 次元構造を再現することで、より効率的かつ詳細に観察できる。
- VR 空間で台風の構造・内部を平面的にではなく立体的に視覚化して理解を支援できる。
- 没入して台風を眺めることによって新たな視点で解析の手がかりを得られる。

たとえば、Fig.7(下)に示した台風中心付近の小さい渦のような現象を 3 次元的に観察しながら解析することで、台風内で生じているスケール間相互作用に関する解析の手がかりを得られる可能性が期待される。

今後の課題として以下の 3 点があげられる。1 つ目の課題として、台風の中心に没入することで台風の 3 次元構造への理解をさらに深められるかについて検討したい。

2 つ目の課題として、台風の時系列性の表現力向上があげられる。本研究で用いたデータでは、3 時間ごとの台風の進路を連続表示することができるが、流線のデータが大容量であるため、必ずしもスムーズな操作ができるとは限らない。そこで、時系列に沿った台風の変化をよりスムーズに観察するために、進路を再現する際にまず等値面だけを表示し、ユーザが風の流れ場を観察したい場合に流線の表示を手動選択する、という機能の追加を検討したい。

3 つ目の課題として、台風の 3 次元構造を再現するために、流線と等値面だけでなく、相対温度や降雨量などの多様な数値の適用、あるいは積乱雲の発生を加味して可視化する手法の適用を検討したい。また、台風の微細構造が台風の強度予測にも直接関係することから、VR システムでこれらの複合的な物理量を観察したい。さらに、4 章に述べた台風中心付近の小さい渦のような、台風微細構造の分析や解釈に利用できると考えられる。

参 考 文 献

[1] T. Jun, M. Jun, W. Chaoli and S. Ching-Kuang, "A Unified Approach to Streamline Selection and Viewpoint Selection for 3D Flow Visualization",

IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol.19, pp. 393-406, 2013.

[2] L. Li, H.-H. Hsieh, H.-W. Shen, "Illustrative Streamline Placement and Visualization", Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium 2008, pp. 79-86, 2008.

[3] 清川清: バーチャルリアリティ技術を用いた科学的可視化のメリット, 可視化情報学会誌, Vol.37, No.146, pp.2-7, 2017.

[4] 西村邦裕: VR 技術を用いた可視化—3 次元情報提示とインタラクション, 可視化情報学会誌, Vol.27, No.106, pp.168-173, 2007.

[5] 宮地英生, 川原慎太郎: ゲームエンジンを用いた VR 可視化フレームワークの開発, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol.12, No.2, pp.59-67, 2020.

[6] 古矢志帆, 伊藤貴之, スカラ場・ベクタ場同時可視化のための流線自動生成の一手法, 芸術科学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.120-129, 2009.

[7] K. Hattanda, A. kuwana and T. Itoh, "A Comparative Visual-ization for Flow Simulation of Airport Wind", NICOGRAPH international, 2015.

[8] Y. Q. Wang, "MeteoInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis", Meteorological Applications, Vol.21, pp.360-368, 2014.

[9] 新井直樹: 気象情報可視化ツールの開発, 可視化情報学会誌, Vol.34, No.135, pp.160-165, 2014.

[10] C. Donalek, S. G. Djorgovski, A. Cioc, A. Wang, J. Zhang, E. Lawler, Y. Stacy, S. Davidoff, J. S. Norris and G. Longo, "Immersive and Collaborative Data Visualization Using Virtual Reality Platforms", IEEE International Conference, pp.609-614, 2014.

[11] 山崎輔, 榎山和男, 陰山聡, 大野暢亮: バーチャルリアリティ技術を用いた非構造格子に基づく流れの対話的可視化システムの構築, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, pp. I_261-I_268, 2014.

[12] 澤田頌子, 伊藤貴之, 三坂孝志, 大林茂: 3 次元流体シミュレーション結果比較可視化のための流線選択, 第 9 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, 2017

[13] 宮地英生, 川原慎太郎: ゲームエンジンを用いた VR 可視化フレームワークの開発, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol.12, No.2, pp. 59-67, 2020.

[14] <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-netcdf.html>

[15] <http://agora.ex.nii.ac.jp/~kitamoto/research/rs/blue-marble.html.ja>

[16] <https://tenki.jp/docs/note/typhoon/page-2.html>

[17] <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/typhoon/2-1.html>