

宇宙科学データの可視化・可聴化 ～教育・広報利用～

三浦 昭^{*1}, 宇野 伸一郎^{*2}, 木村 智樹^{*1}, 海老沢 研^{*1}

Visualization and Sonification of Space Science Data ～ For Education and Public Outreach ～

Akira MIURA^{*1}, Shin'ichiro UNO^{*2}, Tomoki KIMURA^{*1} and Ken EBISAWA^{*1}

Abstract

For the purpose of education and public outreach, this paper introduces methods of visualization and sonification of space science data in a time sequence. The data used in this paper are as follows: Observation data and orbital elements of X-ray astronomy satellites ASCA and Suzaku, PWS data observed by the aurora observation satellite AKEBONO, Geomagnetic Kp indices. X-ray observation data contains the attributes (position, time, pulse-height) of each X-ray events detected. In conjunction with the visualization of orbital elements of the satellite, it is possible to virtually experience the observation by means of visualization and sonification of the data. Also it is possible to hear the radio wave around the earth and geomagnetic variations by means of sonification of corresponding data. We used different method for sonification of the PWS data (wide-band distribution of radio waves) and that of Kp indices (described as musical diagrams).

Keywords: Visualization, Sonification, High-energy Astronomy, Solar-Terrestrial Physics

概 要

時刻データを伴う宇宙科学データの可視化・可聴化手法について、教育・広報目的の観点で述べる。可視化・可聴化の素材としたデータは、X線天文衛星「あすか」や「すざく」の観測データ、太陽地球物理観測衛星「あけぼの」のPWSデータ、地磁気の変動を表すKp指数である。X線天文衛星のデータは、観測された個々の光子の飛来方向、エネルギー、時刻の情報が記録されており、衛星の軌道要素も併せて提供されている。これらのイベントを、衛星軌道と照らし合わせながら、時刻に沿って描画もしくは可聴化することにより、天文観測の追体験が可能となる。PWSデータ及びKp指数は、それぞれの観測値を可聴化することで、地球の周囲を飛び交う電波や地磁気の変化を音の変化として体験することができる。本稿では、広帯域の電波強度分布を記録したPWSデータと楽譜様の変化を記録したKp指数それぞれについて、異なる可聴化を試みた。

1. はじめに

宇宙科学データの可視化は、従来からさまざまな手法で実現されており、データ理解の補助として役立てられている。しかしながら、可視化されたデータの多くは専門家向けのグラフ等であったり、観測された多次元データの限られた側面のみを可視化したものであったりする。広報・教育目的の映像等は、特定の目的のために整形されたものが多く、宇宙科学データに存分に触れられるものではない。

相模原キャンパスで毎年開催される特別公開にて、筆者らも宇宙科学データの解説や展示を行っているが、そのような場ではポスター展示よりも動画や音を交えた展示の方が来場者の興味を引く事が多く、中でも最も興味を持って頂けるのが、

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

² 日本福祉大学 健康科学部 (Faculty of Health Science, Nihon Fukushi University)

インタラクティブな展示である。専門外の方々や、学生さん等に興味を持って頂くためには、宇宙科学データをインタラクティブに提供することが肝要であると考えられる。

またデータのプレゼンテーションは可視化のみで事足りるとも考えられるが、可聴化を併用することで来場者に与えるインパクトは大きくなる。音の意外性によるところもあるが、音が見る人の興味を引き付けている側面も大きいと考えられる。また視覚障害者にとっては映像よりも音が重要な伝達手段であり、晴眼者と比較して視覚障害者は聴覚に秀でる傾向にある。また聴覚障害者にとっては視覚が重要な伝達手段である。すなわち同一データについて可視化と可聴化を併用することは、視聴者の興味を増進するのみでなく、障害者も含めて宇宙科学データに触れる機会を広げるものであると期待される。

本稿ではインタラクティブな可視化・可聴化併用の端緒として、時刻情報に着目した宇宙科学データの可視化・可聴化手法について述べる。本稿で述べる手法は、将来的に GUI 環境で利用者が操作しながら宇宙科学データの映像や音を体験できる環境を構築するための構成要素として検討しているものであるが、現時点では自動再生を前提としており、各手法同士の連携や GUI 環境の構築等は今後の検討課題である。

筆者らは従来から宇宙科学データの可視化・可聴化について様々な試みを行っているが^{[1][2][3]}、本稿で述べる手法は、X 線天文衛星の「あすか」や「すざく」、オーロラ観測衛星の「あけぼの」、地磁気擾乱を表す Kp 指数といったデータに適用されるものである。X 線天文衛星が取得した観測データは、検出された個々の光子（X 線イベント）について検出時刻が記録されている。また「あけぼの」の PWS データは地球近傍の電波について広帯域の観測を長期間行っている。Kp 指数は 3 時間毎の値が長期間計算されている。いずれも時間軸に沿った可視化・可聴化の効果が期待されるデータである。

次節以降に、可視化・可聴化手法の詳細を記す。

2. X 線天文衛星の観測データを用いた可視化・可聴化

この節では、X 線天文衛星が取得した観測データについて、その観測過程及び観測結果の可視化・可聴化手法を述べる。

2.1. X 線天文データの特徴

X 線望遠鏡の検出器で取得されるデータには、検出された個々の光子の検出時刻、飛来方向 (X-Y)、エネルギーといった多次元の情報が含まれている。これらのデータを解析することにより、一般の天体写真のような画像も作成可能であるし、スペクトル等の可視化も可能である。また各イベント毎に検出時刻が記録されているため、次節以降に述べるような時間軸に沿った可視化も可能となる。

X 線天文衛星は地球周回軌道上で長時間露光した結果を観測データとして記録している。X 線天文衛星が検出する光子数は、一般の写真等とは比較にならない程僅かなものである。広報資料等で公開される際には、擬似カラー写真が掲載されることが多く、一般の方には多少粗い天体写真とみなされる事が多いと思われる。高精細な X 線天文写真としては、Chandra 等の画像が有名であるが、X 線天文観測データ自体には、一枚絵では表現しきれない情報が含まれている。時間やエネルギー（波長）等、天文写真では見えないスケールも用いて可視化することにより、天文一般の興味のレベル上げるのみならず、様々な科学的興味を引き出すことも可能になると期待される。

可視化にあたっては、広報・教育の観点に立って、一般の方が想像するような映像を作成することを心がける。例えば研究者が用いるスペクトル等のグラフは、単色の 2 次元グラフとして精密な値を反映したものが作成されるが、一般の方が想像するスペクトルは、虹色の棒の濃淡もしくは幅の大小で表現したものであることが多い。

以下に X 線天文データの可視化・可聴化についての詳細を述べる。

2.2. 可視化の基本方針

X 線天文データの可視化は、以下の環境で行った。

- ハードウェア環境：Mac Pro (Early 2008), Xeon X5472 × 2, Radeon HD 4870
- 可視化ライブラリ：OpenGL
- 色深度：24 ビット (8 ビット × 3 原色)
- 各イベントのパラメータ：検出時刻, X 線の飛来方向 X, X 線の飛来方向 Y, X 線のエネルギー
- 可視化の座標軸：上記各パラメータの値もしくは該当するイベントのカウント数等

簡単のため、同一座標に複数のイベントがプロットされる場合は OpenGL の輝度加算の機能を使用した。このため各イベントのキャリブレーションを必要とする事象等では、本稿の方式でプロットした輝度と専門家の解析結果とに相違が生じ

る可能性がある。しかしながら可視化の過程では、再生ソフトで使用する色空間やモニタ等で使用される色空間、モニタのキャリブレーション状況等が再生環境によって異なるため、それら全体を考慮した精密なキャリブレーションは困難であると考えられるため、単純な輝度加算で代用することとした。

なお色深度については、8ビットでは十分なダイナミックレンジが得られない場合がある。ダイナミックレンジの拡張はOpenGLのライブラリとGPUのハードウェア機能の相性を検討する必要もあり、今後解決すべき課題となっている。

2.3. X線イベント検出過程の可視化

例えば、かにパルサーを観測したデータ（本稿の可視化例は「あすか」の観測、シーケンス番号10405000）では、1つの検出器が3時間半かけて露光した結果として、約35万個の光子を検出している。これは1秒間に数十個のオーダーとなり、一般の写真撮影と比べて非常に光量が少ないものとなっている。逆に言えば、このようなデータは、観測データを実時間もしくは適当な速度比率で再生すれば、光子の検出過程を映像として把握できる頻度であるとも言える。

検出されたX線は時系列でイベントが記録されている。これをX-Y平面にマップして行くと、観測時に検出されたのと同じシーケンスで、ノイズ状の画面から観測された天体が次第に明瞭に映し出されて行く様が再現できる。また検出された各光子のエネルギーと時刻からスペクトルが次第に明瞭に描かれて行く様も描画できる。観測は長時間に渡るため、再生速度は適宜調整するものとする。

観測データ可視化の結果を図1に示す。これは上記かにパルサーの観測データに基づいて、観測開始時点から終了時点迄の動画から2枚切り出したものである。

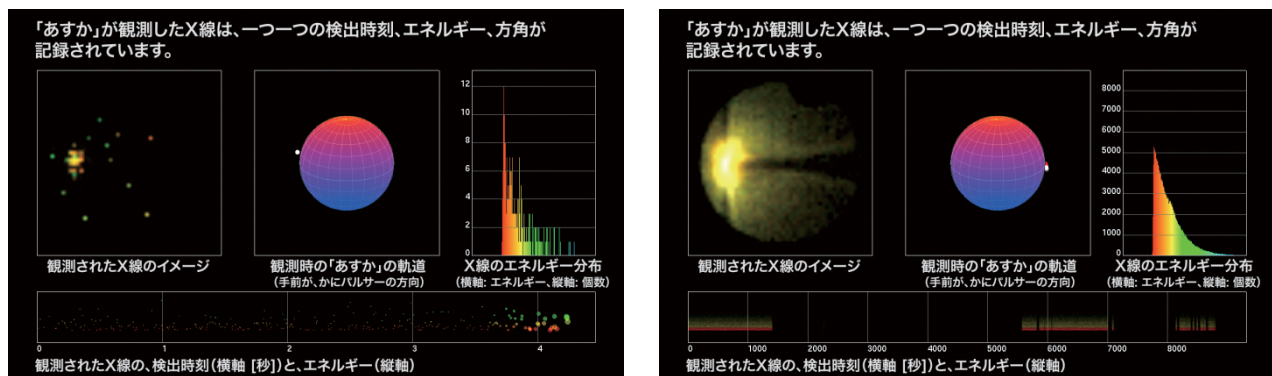


図1 観測データの再現：左は観測初期、右は観測の中頃

図1の画像について、構成要素を以下に示す。

- 画面下：検出されたX線の時系列表示

研究者が用いるライトカーブの代わりに、観測データの時刻変化をカラー表示した。

横軸は観測開始時刻からの経過時間[秒]を表す。縦軸はエネルギーを表す。可視光のスペクトルとのアナロジーで低エネルギー（超波長）側を赤、高エネルギー（短波長）側を紫に着色した。画面左上、画面右上の構成要素に関しても、同様の方針で着色している。それぞれのプロットは、各光子の観測時刻とエネルギーに基づいている。観測初期は、新たに検出された光子が明確になるよう、検出直後の輝度を高めに設定し、プロットの面積も大きくしている。以後は積算の輝度となっている。

- 画面左上：検出されたX線の飛来方向（検出器上の座標）

検出器上の座標で、検出された各光子の位置(X-Y)とエネルギー(色)をプロットした。天体写真の画像に相当するものが疑似カラーで描画される。色は観測開始時点からの積算の輝度であるが、観測初期は、新たに検出された光子が明確になるよう、検出直後の輝度を高めに設定した。また記録された検出器上の座標は離散値であり、そのまま描画したのでは画像が不連続になる。画像をなめらかに表示するために、隣の格子点との間で輝度を線形補間した。

- 画面中央上：観測時点の「あすか」の軌道

それぞれの観測時点の「あすか」の軌道を表示した。中央の球体が地球の大きさを表している。球上の座標は赤経赤緯を表しており、画面手前側が観測対象（かにパルサー）の方向である。

球体を周回している小さい丸は「あすか」の位置を表す。観測初期は1フレームで描画する観測期間を短く設定しているため丸になっているが、以後は、1フレーム当たりの観測期間を長く設定したため、長円となっている。白色は観

測データが取得された期間、赤色は観測データが取得されなかった期間を表す。

天文衛星は天体を観測している間も時々刻々その位置が変化していて、天文衛星がどのようにして天体観測しているのか、一般には想像し難いものである。このように軌道上の衛星の位置を並べて表示することで、天文衛星が固定された位置で観測しているのではなく、どの位置にあった時にどのイベントを観測したものなのかが把握できるようになる。例えば右側の画像の例では観測データが取得されなくなるタイミングを切り取っているが、動画で見ると「あすか」が地球の陰に隠れるため、一時的にかにパルサーの観測に欠落が生じることが容易に推測できるようになる。

● 画面右上：スペクトル分布

横軸はエネルギー、縦軸はそのエネルギーで検出された光子数を表す。縦軸は、スペクトル分布の形状が確認できるよう、観測初期は最大値を小さくし、以後検出された光子数に応じてスケールアップしている。

ここで検出直後の輝度や面積の増分は、X線イベント検出時からの経過時間の逆数としている。増分の具体的な倍率は、その都度可視化された映像を見ながら、新規のイベントが違和感なく視認できるような値に調整している。輝度の増分を自動的に計算する手法は今後の課題となっている。

このようにして作成される動画像により、X線天文という一般に馴染みのない分野の観測を追体験できるようになる。また観測時刻によって輝度が増えている天体もある。このような天体で図1と同様の可視化を行うと、観測の途中に生じたバースト的な輝度変化が確認できる。

天文衛星の軌道や、観測されるイベントのエネルギー分布等、一般の天体望遠鏡で撮影される画像とは異なる要素が絡み合っていることも、複数の側面を同時に可視化することで、理解が容易になると期待される。ただし静止画を見る場合と比べて1画面当たりの情報量が増えると、動画として全ての構成要素を同時に把握するのは難しくなる。そこで次節ではイベントの発生タイミングやエネルギー等の情報を聴覚で補うことを検討する。

2.4. X線イベント検出過程の可聴化

2.3で可視化した各イベントは様々な波長のイベントの連続であり、これを可聴化して同時に再生することで、さらに臨場感の高い映像を作成することができる。視聴者は図1の映像の内、画面下のX線イベントの検出過程を聴覚で補うことができるため、視覚を他の要素に集中することができるようになる。また視覚障害者にとっては、イベントの検出過程を把握する有効な手段となりうる。基本的な可聴化手法及びパルス周期の可聴化等については参考文献^[2]を参照されたい。ここではMIDIを用いたX線イベントの可聴化について述べる。MIDIとは、音楽再生のための規格であるが、奇しくもMIDIにおいても個々の音の発生タイミングや音階等の情報をイベントと称している。

X線イベント検出過程は、以下の条件で可聴化した。可聴化の実例はDARTSの解説ページ^[4]にある「X線で聞く激動の宇宙」を参照されたい。

MIDIデータの作成は、以下の条件で行った。

- MIDI再生速度は、元データのイベント発生間隔と比例する
イベントの頻度等を考慮して適宜速度を調整するものとする。
- 1つのX線イベントが発生する度に1つのMIDIイベントで楽器音を再生する。
各イベントはMIDIのチャンネルを複数使用し、直近でイベントが複数発生した場合も漏らさず再生できるようにする。
- 楽器音は一瞬で立ち上がり、減衰も早い音色を採用する
- 各イベントのエネルギーはMIDIのピッチモジュレーションを用いて音高に変換する。
実際に再生される周波数はMIDI機器の仕様によるため、一意に定まるとは限らないが、楽器の音階に縛られず細かい音高の指定が可能となる。

この手法を用いて、図1の可視化に用いたデータを可聴化した結果を図2に示す。

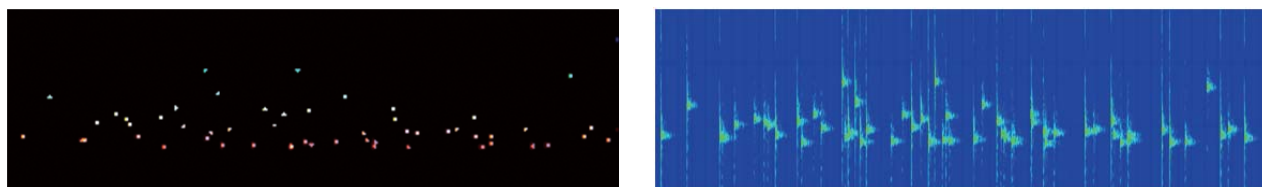


図2 観測データの可聴化
左はX線イベントの時系列（図1画面下の拡大）、右はMIDI再生音のスペクトル解析結果

図中、左の画像は図1の画面下にあるX線検出過程の画像を拡大したものである。右の画像は、当該イベントをMIDI化して再生ソフトで可聴化したものをスペクトルアナライザで解析したものである。解析に用いたソフトは、Apple社のSoundtrack Proである。両画像共に横軸が時刻を表している。時刻スケールは該当するイベントの位置関係を比較できるように調整した。また楽器音は正弦波と比べて高調波成分や歪を含んでいるが、ここでは基本波成分に相当する周波数のみ表示している。両画像を比較すると、元の観測データのエネルギーと相対的な時間関係がMIDIデータの再生音の中で再現されていることが見て取れる。

2.5. パルス周期の可視化

かにパルサーは1秒で約30回転していることが知られており、「あすか」の観測データからも、自転周期に対応した輝度変化を得る事ができる。可視化の例を図3に示す。

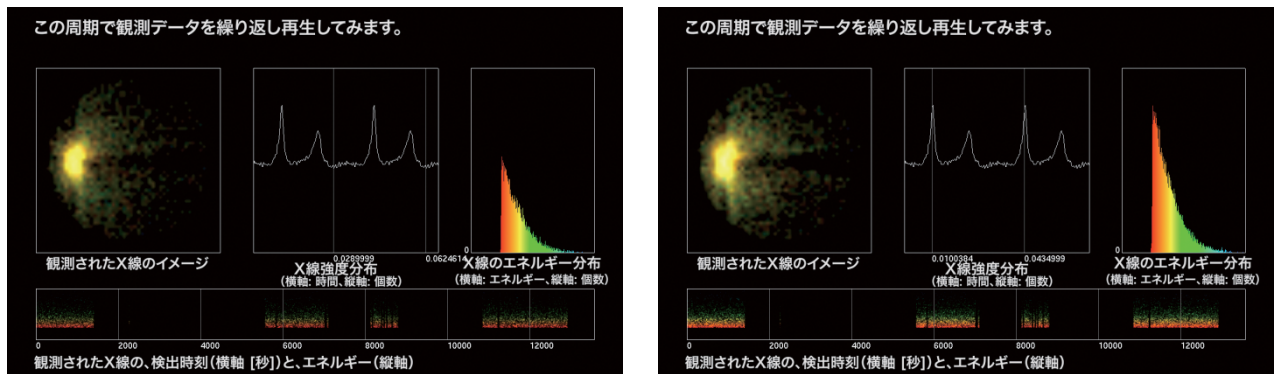


図3 パルス周期の可視化：左は低輝度の位相、右は高輝度の位相

これは観測データを自転周期で折り畳んで動画にしたもののスナップショットである。映像の構成要素は以下の通りである。

- 画面中央上：自転周期で折り畳んだデータの輝度変化

横軸は自転の位相を表す。ここでは2周期を1画面に表示している。縦軸は各位相における光子のカウント数を表す。2本の縦線は、描画対象時点の位相を表している。

他の構成要素は、図1と同様である。

この映像から、かにパルサーは自転に伴う輝度変化がスペクトル全体で同様に生じていることがわかる。また観測時刻によらず安定した輝度変化となっていることも画面下のグラフから見て取れる。パルサーの種類によっては輝度変化に伴いスペクトルの形状が変化する天体もある。このような天体で図3と同様の可視化を行うと、画面右上のスペクトル形状や画面左上の疑似カラー画像の色が時々刻々変化する様を描画できる。パルサーの明滅はCG等でしばしば紹介されることが多いが、この手法を用いれば、実観測データを元にして明滅を見てとることができる。現状は映像素材に留まっているが、今後の課題として、インタラクティブに観測データを選択しパルス周期を可視化できれば、パルサーの早見ツールとしても有益であると考えられる。

2.6. ドップラー効果と時刻補正

ひとつの観測の間にも、地球の太陽周回や衛星の地球周回の影響で、観測対象となる天体との相対位置が時々刻々変化している。いわゆるドップラー効果により、観測時刻にずれが生じているのであるが、X線天文専用の解析ツールでは、これらのずれを補正する機能(barycentric correction)が提供されており、一般の研究者等は定められた手順で解析ツールを使用することにより、ずれの影響を受けることはない。

前述のかにパルサーの自転周期は、観測結果をFFTすることにより大まかに求めることができる。周波数空間上では、自転周期に相当する箇所とその倍数付近に大きなピークが現れるが、観測期間を細かく区切ってFFTした結果を時系列で表示すると、衛星が対象天体に近づくもしくは離れる程度によって、みかけの自転周期が変動していることが見て取れる。これを前述の地球周回軌道の可視化と並行して提示すると、衛星の移動に伴うドップラー効果がわかりやすく説明できる。

ドップラー効果が自転周期の見積(FFT結果)に与える影響を図4に示す。図4左は、横軸が周波数空間(左:低周波、右:高周波)、縦軸が信号強度を表す。中央の縦線は観測期間全体のFFTから見積もられた自転周期を表す。折れ線は時

間帯を限った短時間の FFT 結果である。背景の6つの球体と黒丸は、当該時間帯における地球と「あすか」の位置関係を表す（上が上面、中央は左から順に、左側面、正面、右側面、背面、下が底面を表す）。図4右は、短時間の FFT 結果のアニメーションを合成したものである。横軸が周波数空間、縦軸が信号強度を表す。各 FFT 結果の上下関係は「あすか」の近点角に対応している。上側は「あすか」が相対的に観測対象に近づきつつある期間、下側が相対的に離れつつある期間に相当する。この図から、「あすか」と観測対象との相対的な位置関係によって、見かけの自転周期（信号強度が最大となる周波数）が変動していることが見て取れる。

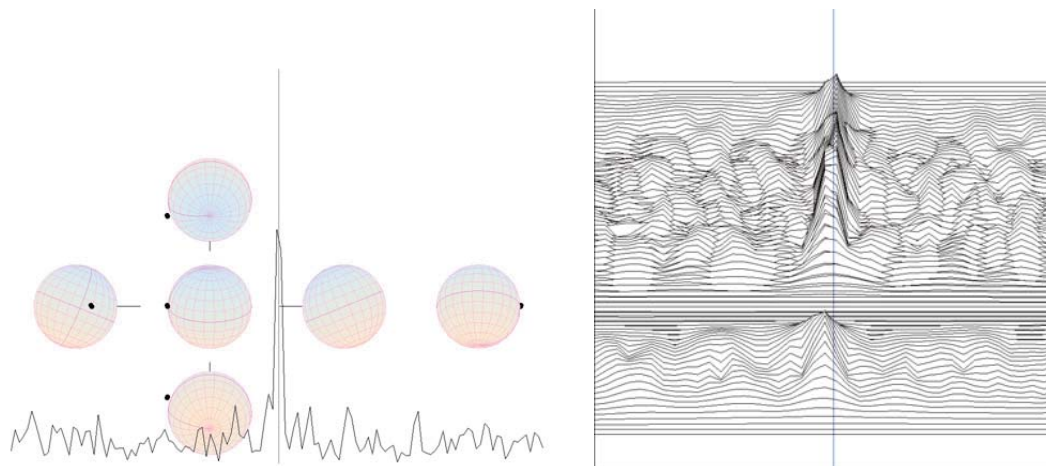


図4 ドップラー効果の影響

天文衛星が周回している地球そのものも太陽を周回している。観測時刻のずれを厳密に補正するためには、一般には太陽の位置から観測したと仮定して検出時刻の補正を行う。そのためには衛星の地球周回に伴う影響のみでなく、地球の太陽周回に伴う影響も補正する必要がある。ここで太陽を中心とした衛星の軌道を可視化すると、実際の衛星の軌道は、地球を周回しながら螺旋状に太陽の周りを移動して行くのではなく、地球にまわりつくようにしながら殆ど円状に太陽の周りを移動して行くのがわかる。

図4に示したドップラー効果の影響が、時刻補正により取り除かれた様を図5に示す。ドップラー効果補正前は、ドップラー効果の影響でみかけの自転周期が変動していたものが、ドップラー効果補正後は、観測の時間帯によらず一定の自転周期が算出されていることがわかる。

2.5で述べたパルス周期の可視化にあたっては、実際にはドップラー効果の影響を排除すること（時刻補正）が必須である。一般向けとしては高度な内容になるが、高等教育向けの素材としては、解析過程の可視化の一環としてドップラー効果や時刻補正の可視化も連携するのが有益であると考えられる。しかしながら一つのデータを複数の切り口で可視化するにあたって、同一画面で視聴者が把握できる要素数には限りがあると考えられ、現時点では本節および次節の手法を前節までの手法と統合するには至っていない。一画面内の表示要素をインタラクティブに選択する等の機能の実現が今後の課題である。

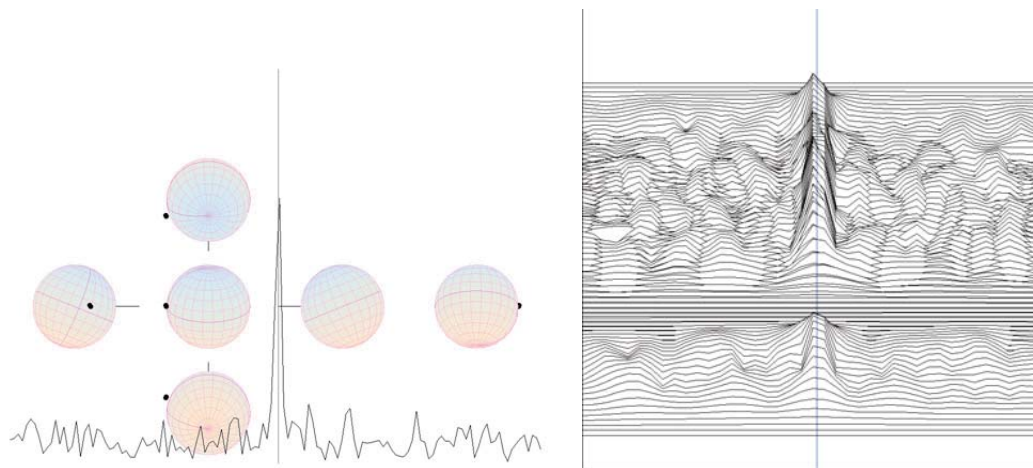


図5 時刻補正によるドップラー効果の相殺結果

3. 太陽地球物理の観測データを用いた可視化・可聴化

3.1. データの特徴

3.1.1. Kp 指数

Kp 指数は、地磁気の活動度を表すものである。オーロラが現れる付近の複数の観測所で地磁気擾乱の指数が計算されており、それらを重み付け平均したものが Kp 指数である。Kp 指数は、3 時間毎の値が公開されている。Kp 指数を図示したものは、楽譜様であることから、Bartels musical diagram と呼ばれている。

3.1.2. PWS

「あけぼの」に搭載された PWS(plasma wave and sounder) 観測機器は、宇宙空間を飛び交う電波を約 20kHz から約 5MHz の範囲で長期間に渡って観測している。観測結果は 2 秒間隔×2 チャンネル×256 周波数帯域に分割して、夫々の強度が記録されている。1 サンプル (2 チャンネル×256 周波数帯域) 当たりの記録例を図 6 に示す。それら観測データの強度分布をスペクトログラムで表した例を図 7 に示す。各チャンネル毎に、横軸が観測時刻、縦軸が周波数を表し、色は強度 (赤: 強→青: 弱) を表している。

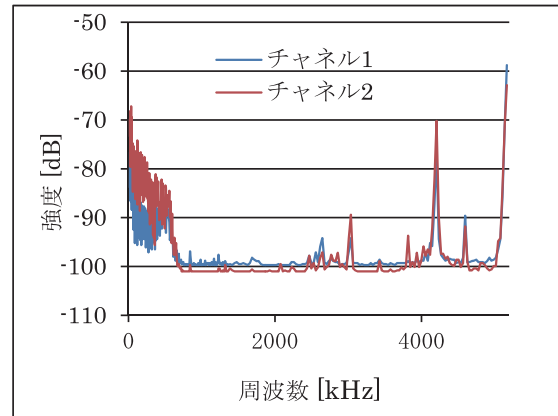


図 6 PWS 観測データ (例)

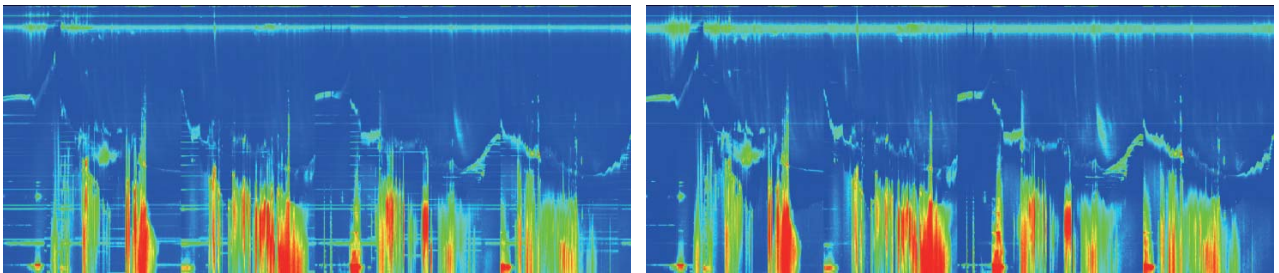


図 7 PWS データのスペクトログラム (例)

3.2. Kp 指数の可聴化

Kp 指数は、整数値に符号を付して 0, 0+, 1-, 1, 1+ のように表わされる離散的な指数であり、音階で表すのに適したものとなっている。Bartels musical diagram^[5] は Kp 指数を、単なるグラフではなく楽譜様に表現しており、音楽的要素を意図した可視化の良い実例であると考えられる。本稿では、これに呼応する可聴化について記す。Charles Dodge は Kp 指数を基にした音楽を制作し、その手法を公開している^[6]。Dodge の手法は芸術的要素も含んだ複雑なものであるが、本稿では Kp 指数の時間変化が的確に捉えられることとファイルの軽量化とを念頭に、MIDI を用いて以下の手順で可聴化を行った。可聴化の実例は DARTS の解説ページ^[4]にある「地球のまわりの音」を参照されたい。

- 3 時間毎に計算された Kp 指数を 1 区間として、区間毎の指数を、各音階 (白鍵) に割り当てる。
デフォルトでは Kp 指数 0 の段階に対応する音階を 48 (C3) とした。以後の各段階に対しては順次 D3, E3, F3, ... と割り当てる。
- 複数区間に渡って同じ音階が継続している場合は、同一値が継続する区間をまとめて連続音とする。
- 音色は、音の強度が持続する弦楽器を用いた。

MIDI 化するにあたって、1 区間当たりの持続時間は任意であるが、4～5 区間 / 秒程度が聞きやすい早さと思われる。2.4 で X 線イベントを可聴化したのと同様、可聴化結果をスペクトル解析すると、基本周波数成分が元の Kp 指数の変化を反映したものとなる。

Kp 指数の時間変化は、X 線イベントの可聴化とは異なり、音楽的な響きが強い。そのためデータの可聴化の範疇にとどまらず、音楽的な応用も可能である。展示等を行う際には、宇宙を連想させるようなリバーブ効果をかけて、宇宙科学映像の BGM として上演した。来場者の方の多くは、説明を受けるまでは普通の音楽のように感じておられた。

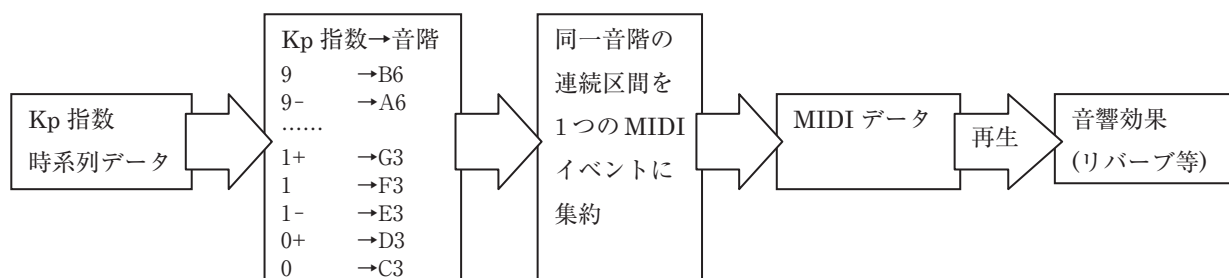


図 8 Kp 指数の可聴化手順

3.3. PWS データの可聴化

PWS データ電波の周波数帯域を 1/250 倍すると、80Hz～20kHz になり、ほぼ人間の可聴域に変換できる。実際には個人毎に聞こえる周波数に相違があり、またスピーカ特性によってはこの帯域全てを音として聞く事ができるとは限らない。電波の周波数帯域を非線形に音の周波数帯域に変換することも可能だが、観測された電波には高調波を含むと見受けられるものもあり、可聴域に線形変換することは、高調波成分（倍音）の周波数比を維持できるという利点がある。したがって、周波数変換は線形とし、環境に応じて可聴化する際の周波数および倍率を上下することとした。

Donald Gurnett は、地球・宇宙における類似の電波現象を可聴化したデータを収集・公開しており^[7]、本稿の可聴化結果との聴き比べは有益である。これらのデータにも一部見受けられるが、時系列サンプルの可聴化にあたっては幾つかの課題がある。例えば各サンプルから音を合成するにあたっては、周波数帯域毎に其々の強度に応じた複数の正弦波を重ね合わせる。その際、正弦波の各周波数がある程度近接していると、合成音にうねり（音の強弱）が生じる。また各サンプルから得た合成音を時系列で連結するにあたっては、サンプル間の音の連続性を確保する必要がある。単純にサンプル毎の合成音を連結したのでは、連結部分にノイズが発生する。またサンプル間の合成音の遷移が急激であると、その歪が本来存在しない周波数成分となって現れる。

可聴化に際しては、本来のデータに含まれない周波数成分や強弱は極力排除しなければならない。これらの課題を考慮し、片チャンネル分の可聴化手順を図 9 のように定めた。詳細は以下の通りである。

- FFT 用の周波数空間設定

合成音のうねり防止のため、周波数空間の長さは合成する音の持続時間より十分長くする。例えば 48kHz で毎秒 10 サンプル合成する場合、周波数空間長は 64K (2^{16}) 程度とする。

- 擬似白色ノイズの生成（周波数空間）

周波数空間において、信号強度一定・ランダム位相のノイズを生成する。

- ノイズの重み付け（周波数空間）

PWS データとして記録されている各周波数帯域（256 ステップ）毎に、観測された電波強度をノイズの強度に乘じる。

- 逆 FFT

重み付けされたノイズを逆 FFT により時間空間に変換し、波形を合成する。

- 時間変化の表現

合成された波形には、周波数分解能が良く時系列での連結が容易なハニング窓（raised cosine）を乗じる。例えば毎秒 10 観測を可聴化する場合、前後の観測との連続性を保つために、逆 FFT された音声波形 2/10 秒分を切り出して、ハニング窓を乗じる。前後の観測分とは、それぞれ 1/10 秒ずつ重複して合成することにより、偽の周波数成分を抑えながら、なめらかな波形変化を得ることができる。

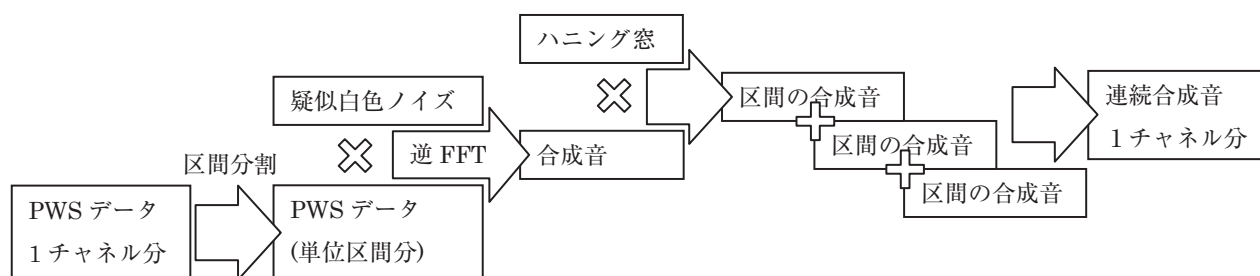


図 9 PWS データの可聴化手順（片チャンネル分）

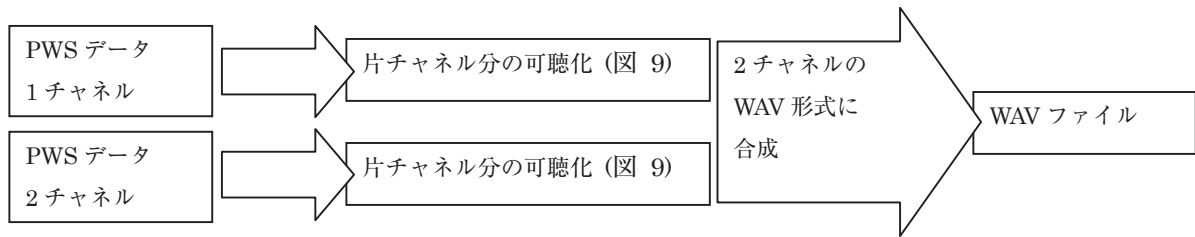


図 10 PWS データの可聴化手順 (2 チャンネル WAV ファイルの合成)

可聴化データは、各チャンネル毎に上記手順を繰り返し、左用、右用の合成音を WAV 形式のファイルに保存した。この WAV 形式ファイルを再生すると、PWS データの時間変化をステレオで可聴化できる。PWS データの可聴化結果は DARTS の解説ページ^[4]にある「地球と太陽が奏でる音楽」を参照されたい。可聴化後の WAV ファイルをスペクトルアナライザで解析した結果を図 11 に示す。横軸が時刻、縦軸が再生音の周波数を表す。色が表す強度は図 7 と同様である。解析の範囲は、図 7 に示した PWS データと同じ区間になるようスケールを合わせてある。PWS データのスペクトログラムと合成音のスペクトログラムは、周波数分布や強度変化において、相似する結果が得られた。アナライザのサンプル数が限られていたため低周波数の領域では十分な分解能で周波数成分を分離できていないが、強度のピークとなる周波数はお互いに良く一致している。このことから聴覚においても元の PWS データの周波数分布を的確に聞き取れる合成音になっていると考えられる。

一般向けの素材としては、生まれた日の宇宙の「音」を聴くこともできる。相模原キャンパスの特別公開においても、カレンダー様の Web 画面から日付をクリックすると、その日の PWS データを再生する展示を行って、好評を博した。

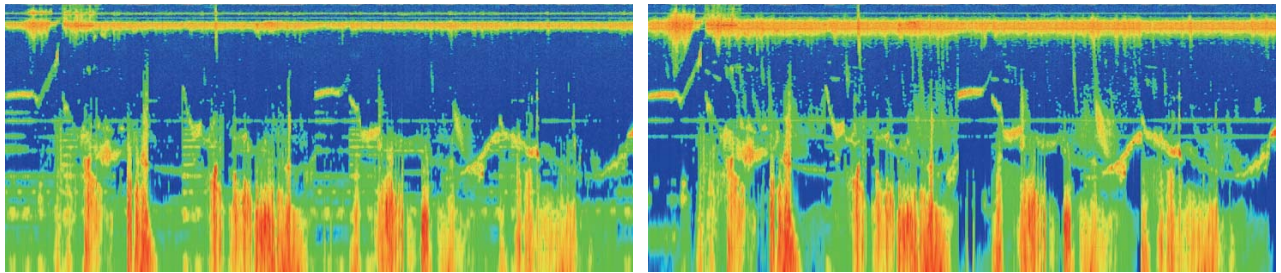


図 11 可聴化結果の検証：スペクトルアナライザの解析結果

3.4. PWS データの可視化

2 チャンネルの観測データを用いてステレオ音を合成したのと同様、可視化にあたっては、2 式のスペクトログラムを作成するだけでなく、疑似的に 2 次元の広がり表現を試みた。この動画に 3.3 で述べる合成音を同期して再生することにより、宇宙を飛び交う電波を映像として体験できるようになる。

可視化にあたっては、各周波数帯域において電波源は 1 つと仮定した。実際には、スペクトログラム上で複数の電波源が重畳したと思われる現象も見受けられるため、この仮定は必ずしも普遍的なものではない。厳密には各電波源を分離した上で、それぞれの広がりを可視化するのが妥当と思われる、今後の課題となっている。

座標軸は以下の通りである。

- 横軸：各チャンネルの同一周波数帯域（ステップ）における強度差を表す

各チャンネルの観測値を p_1 , p_2 としたとき、 $p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$ として、横軸の値は $\frac{p_2 - p_1}{p}$ とする。

- 縦軸：周波数（対数表示）を表す。

下端を約 20kHz、上端を約 5MHz とする。

この座標上に、各周波数帯域で観測されたデータをプロットする。プロットする円は、各周波数帯域で観測された値 p に基づいて、以下のように定める。

- 色： p の大～小に対して、赤～紫の虹色を割り当てる。
- サイズ： p の対数に比例したサイズとする。

可視化の例を図 12 に示す。これらは 2000 年 3 月 1 日の時系列データを可視化した動画から切り出したものである。映像の中央が前述のステレオ表示である。左右端は当該時刻のスペクトル及びその時刻付近のスペクトログラム、下端はデータ取得日時を表している。

このように観測データを可視化することは、教育目的としては、個々のチャネルの特徴を把握するのみでなく、2つのチャネルの相関関係を把握する手段としても有効であると考えられる。

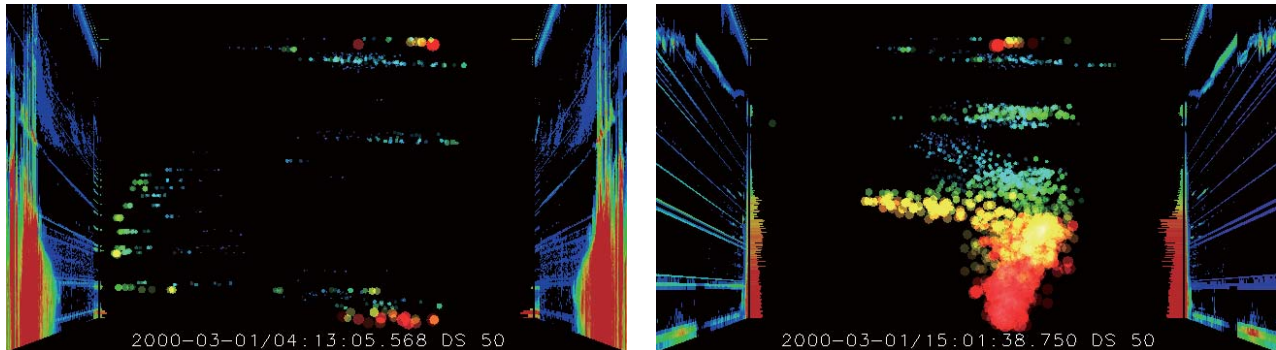


図 12 PWS データの可視化

4. まとめ

本稿では、教育・広報目的の観点から、宇宙科学データの可視化・可聴化手法について述べた。宇宙科学データを様々な切り口で可視化・可聴化することにより、従来は容易に知り得なかった宇宙科学データの醍醐味を体験できるようになると同時に、数値データのみでは読み解けなかった研究上の発見も期待される。

視覚障害者にとっては可聴化、聴覚障害者にとっては可視化が情報伝達や理解の有用な手段であり、この観点からも、同じデータで可視化・可聴化を併用することは意義の高いものであると考えられる。

可視化・可聴化にあたっては、表現を容易にするための仮定や近似が入っており、厳密な解析結果とのトレードオフは今後の課題である。また現段階では可視化・可聴化した映像を提示するに留まっており、データやパラメータの選択等、インタラクティブに操作できる環境構築は、今後の課題となっている。

合成された映像や音は、学術論文と比べて親しみやすくなっているとは言え、解説無しには意味不明の要素が多く残されており、適切な解説を付ける、もしくはさらに分かりやすい可視化・可聴化に取り組む必要がある。またアートの要素を取り入れることも一般に訴求する上で重要であると考えられる。

参考文献

1. 大規模宇宙科学データの特徴量抽出と映像・音声化－教育利用として－. 三浦昭, 海老沢研. 2011 年, 日本天文学会 2011 年春季年会予稿集.
2. 科学データ可聴化プロジェクト ～プロジェクト立ち上げと初期データ公開～. 宇野伸一郎, ほか. 2007 年, 日本福祉大学情報科学論集, 第 10 巻, ページ:1-9.
3. 宇宙科学データ可聴化プロジェクト 2 – 音声グラフ表示ソフトウェアの試作 –. 宇野伸一郎, ほか. 2011 年, 日本福祉大学健康科学論集, 第 14 巻, ページ:1-9.
4. C-SODA/ISAS/JAXA. 宇宙からのメッセージを聞いてみよう. DARTS. (オンライン) <http://darts.jaxa.jp/outreach/music/index.html>.
5. Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences. Indices of Global Geomagnetic Activity. (オンライン) http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/.
6. Dodge, Charles and Jerse, Thomas A. *Computer Music: Synthesis, Composition, and Performance*. U.S.A. : Schirmer Books, 1985.
7. Gurnett, Donald A. Space Audio. *The University of Iowa Radio and Plasma Wave Group*. [Online] <http://www-pw.physics.uiowa.edu/space-audio/>.