

あかつきの画像のための雲追跡ツールの開発

Development on a cloud-tracking tool for Akatsuki's images

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 村上真也 (Shin-ya Murakami)

北海道大学 地球環境科学研究所 堀之内武 (Takeshi Horinouchi)

産業技術総合研究所 人工知能研究センター 神山徹 (Toru Kouyama)

滋賀県立大学 工学部 小郷原一智 (Kazunori Ogohara)

京都産業大学 理学部 高木征弘 (Masahiro Takagi)

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 今村剛 (Takeshi Imamura)

千葉工業大学 惑星探査研究センター 山田学 (Manabu Yamada)

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 山崎敦 (Atsushi Yamazaki)

北海道情報大学 経営情報学部 渡部重十 (Shigeto Watanabe)

「あかつき」雲追跡研究チーム (Akatsuki cloud-tracking research team)

1 はじめに

本稿では、大気の運動を推定するために決定的に重要な要素である雲追跡アルゴリズムの概要を述べる。そして、あかつきに先行していた欧州宇宙機関 (ESA) の金星探査機 Venus Express (VEx) のデータを用いて、実際に雲追跡ベクトルを求めたテスト結果を報告する。

2 雲追跡アルゴリズム

雲追跡とは、雲の模様の移動を追跡して雲の移動ベクトル (雲追跡ベクトル, Cloud Motion Vector (CMV))^{*1}を導出することである。画像処理分野での移動体追跡と呼ばれるテクニックである。

雲が風に完全に馴染んで動いていると仮定すると、雲追跡ベクトルは風ベクトルと等しい (パッシブトレーサーの仮定)[2]。必ずしもこの仮定は正しくないことに留意する必要がある。具体的には、波に伴う運動を追跡してしまうと間違った結果を得ることになる。

^{*1} 地球気象業界では大気追跡風 (Atmospheric Motion Vector (AMV)) と呼ばれている [1]。

波は媒質の振動として伝わるが、媒質自体は伝播しないためである。

あかつきレベルデータ処理では簡単のため、雲追跡する画像として、等間隔の緯度経度格子にマッピングされたデータ (Level 3 プロダクト) を使う。

基本的なアルゴリズムは、移動体追跡で使われる古典的なテンプレートマッチングを用いる。テンプレートマッチングは、時刻 $t = t_0$ の画像からテンプレートと呼ばれる小領域を選び、時刻 $t = t_1$ の画像 (ターゲット) の部分領域と比較して類似度を計算し、もっとも類似度が高い領域を移動先と推定する方法である。類似度の計算には相互相関法を使う。相互相関法は、類似度としてテンプレートとターゲットの相互相関係数そのものを使う方法である。テンプレートの位置からターゲットの部分領域への移動距離をラグと呼ぶ。ラグ空間で相関係数が作る曲面を相関曲面と呼ぶ。時刻 $t = t_0, t_1$ の 2 枚の画像の移動距離を時間差で割ることで速度の次元を持つ量が求められる。

2.1 誤ベクトルを避ける方法

上述した雲追跡アルゴリズムをただ単純に実行すると、物理的でないベクトル (誤ベクトル) を得ることがある。どのようなベクトルを誤ベクトルであると判定するかは難しい問題であるが、全体的に西向きの強い風が吹いている領域の中で、1 点だけ東向きの強い風が吹いていることは考えにくい。このようなベクトルを誤ベクトルと想定して話を進める。

2.1.1 誤ベクトルの出現頻度を下げる

誤ベクトルを避けるには、二つの考えかたがある。一つ目は、アルゴリズムを工夫して誤ベクトルの出現頻度を下げるという考えである。

テンプレートサイズを大きくすると、経験的に誤ったマッチングが減る傾向がある。これは、テンプレートサイズを大きくすることでテンプレートが含む情報が増えるからだと考えられる。ただし、テンプレートサイズを大きくすると、空間スケールの大きな速度場を求めていることに注意する。大気現象の空間スケールと時間スケールはおおむね比例関係にある [3] から、求めたい時間スケールの現象に対応する空間スケールを持つテンプレートを選ぶ必要がある。

気象庁のひまわり 8 号では、大きなサイズと小さなサイズのテンプレートによって得られた相関曲面を重ね合わせる方法が採用されている。これによって、大きなスケールと小さなスケールの両方のスケールからの寄与を相関曲面に反映させられ、誤ったマッチングを防ぎつつ小さなスケールの大気の運動も捉えることに成功しているようである。

アルゴリズムの工夫として他には、金星大気への応用を見据えて開発された Ikegawa and Horinouchi(2016, 以後 IH16 と記す)[4] の方法がある。この方法は、3 枚以上の画像から複数の画像組について相関曲面を求め、それらを重ね合わせることでノイズの少ない相関曲面を得る。また、IH16 では得られた相関曲面を空間平均することでノイズを低減することも試みている。

別のアプローチとして、「各々の雲追跡ベクトルはまわりと似ている」という仮定をして、その仮定を満たすようにベクトルを訂正するという方法がある [5, 6]。

2.1.2 誤ベクトルを品質評価により棄却する

誤ベクトルを避ける二つ目の考えかたは、誤ベクトルを品質評価によって棄却するというものである。

地球気象業界の品質管理法として有名なのは Quality Indicator(QI)[7] である。ただし、この指標の理論的根拠は、地球の風が準地衡流的であることにある。金星は自転角速度が非常に遅いため、大気の流れが準地衡流的であることは期待できない。従って、金星の雲追跡ベクトルに QI をそのまま適用することはできないだろう。

IH16 は二つの品質評価を提案している。一つは、相関曲面のピーク形状を雲追跡ベクトルの確からしさの指標とする。二つ目は、複数枚の画像から構成される画像組を二群に分けて、その二群によってそれぞれ得られた雲追跡ベクトルの差の大きさから、雲追跡ベクトルの確からしさの指標を求める方法である。

3 雲追跡ツール

我々はこれらのアルゴリズムを実装したソフトウェアを作成した (Ogohara, *et al.*(2012)[8] の実装を引き継ぐ形で行なった)。開発は現在も進められており、新規に IH16、ひまわり 8 号方式の相関曲面の重ね合わせが実装された。また、誤ベクトルを訂正する手法の改良が行なわれ、ベクトル場が過修正される問題が部分的に解決された。

残された課題としては、雲追跡ベクトルの評価手法の開発・適用がまず挙げられる。また、より進んだ開発要素として、地図投影法に依存しない雲追跡が挙げられる。現在は、緯度についても経度についても等間隔の格子点に輝度値をいったん投影してから雲追跡を行なっている。投影方法によっては、人工的なノイズが生まれうることに注意しなければならない。現在は単に双線形補間を行なって得られた Level 3 データを用いているため、例えば 3 次スプライン補間のような高次の補間を用いるよりは問題が生じにくいと考えている。

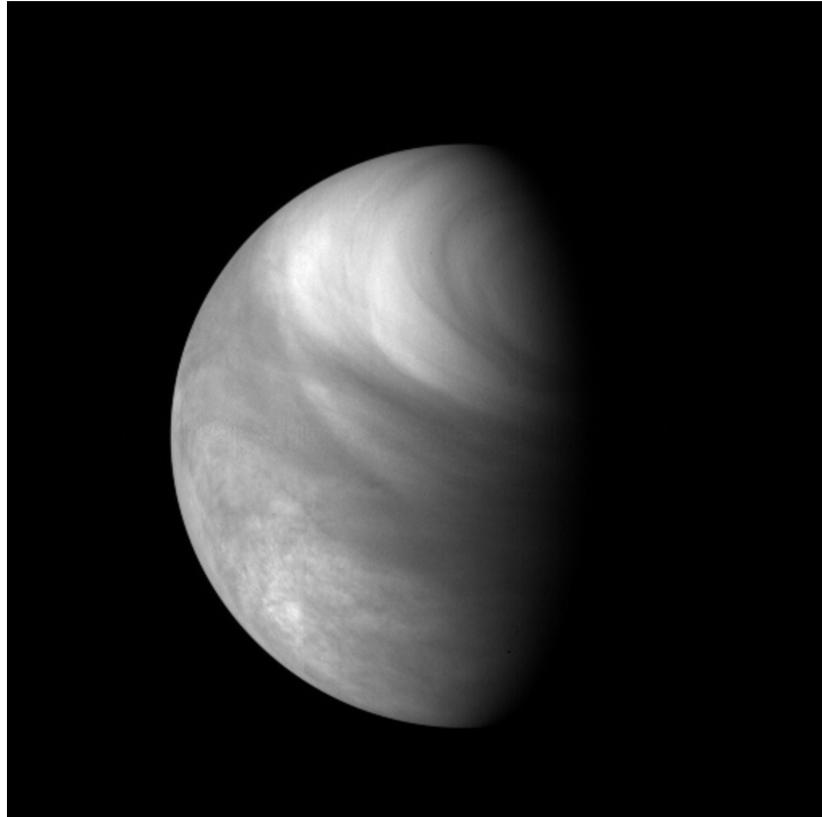


図1 VEx VMC 軌道番号 0265、画像インデックス 0009 の輝度画像。あかつき Level 2 相当データより作成。

4 VEx VMC UV データによる雲追跡テスト

開発した雲追跡ツールのテストのため、VEx の Venus Monitoring Camera (VMC) によって撮像された紫外画像 (波長 365 nm) を用いた。用いたデータの軌道番号は 0265、画像インデックスは 0009 と 0018 であり、この 2 枚の画像の撮像時刻の時間差はちょうど 1 時間である。このとき、金星の視直径は ~ 370 pixel である。あかつき Level 2b 相当のフォーマットのデータを用意し (図 1)、リムフィッティング、歪み補正を経て、金星ディスク領域のみが双線形補間によって 2880×1440 の格子データに変換され、あかつき Level 3b 相当のデータを得た (図 2)。

テンプレートサイズ 48×48 、相関曲面の空間平均 (IH16) なしの場合の雲追跡の結果を図 3 に示す。そのままプロットすると、スーパーローテーション、すなわちが西向きの風が卓越するため、ベクトルの細かい変動を見やすいように赤道で 100 m/s の剛体回転流

(degrees_north)

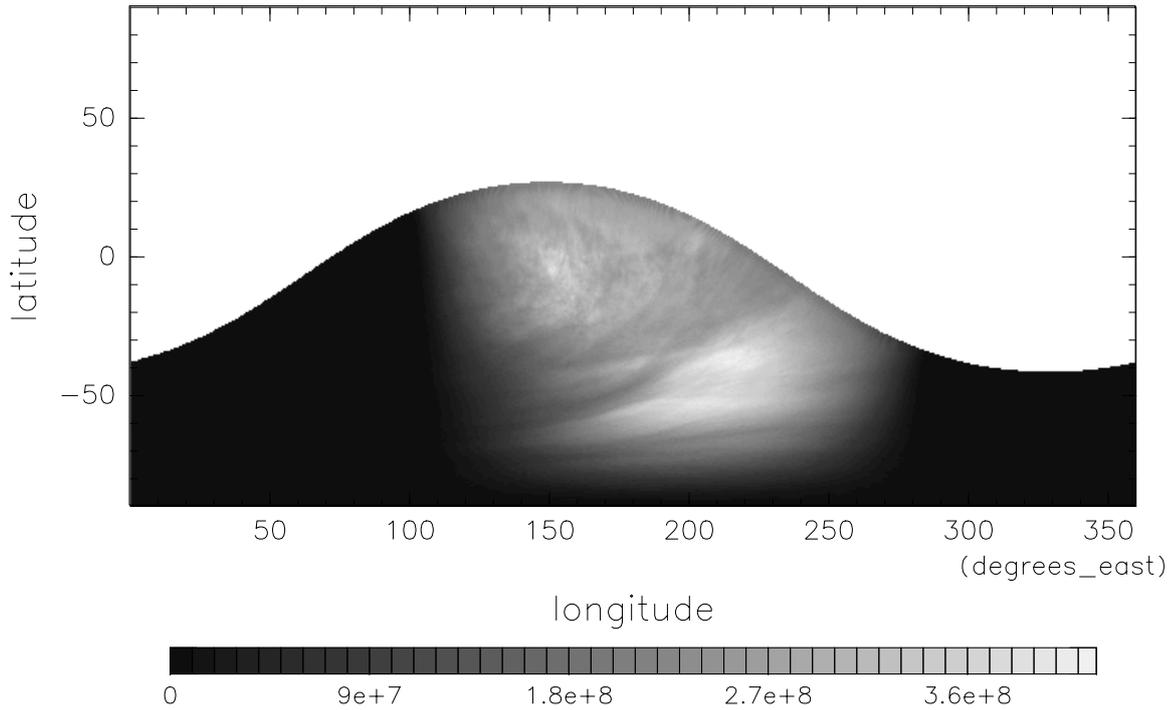


図2 VEx VMC 軌道番号 0265、画像インデックス 0009 の緯度経度マッピング済みの輝度画像。あかつき Level 3 相当データより作成。

を差し引いた $(U + 100 \cos(\text{緯度}) \text{ m/s}, V)$ をプロットした。ここで (U, V) は雲追跡ベクトルである。ベクトル場はあまりなめらかではなく、特に高緯度で不自然なベクトルが見受けられる。

テンプレートサイズを 60x60、相関曲面の空間平均 (IH16) を行ない、ベクトル訂正を行なった結果を図 4 に示す。不自然なベクトルはかなり少ないように見える。

実際に、雲追跡ベクトルが模様を追跡しているか、チェックするための画像を作成した (図 5)。初期時刻の輝度画像 (0009) に雲追跡ベクトルを重ねて描画し、十字マークを置いてある。1 時間後の輝度画像 (0018) には雲追跡ベクトルの分だけ移流させた十字マークを描画している。この 2 枚の画像の各十字マークを見比べることで、目で模様の類似性を確認し、類似していれば雲追跡ベクトルはもっともらしいと判別する。下の図は上の図に比べて、赤道で $100 \cos \text{緯度} \text{ m/s}$ の剛体回転場で流れる分だけ緯度がずらして描いてある。つまり、上の図で全体的に雲追跡ベクトルの大きさがあまり大きくないことと、上の図と下の図で模様が類似していることは整合的である。

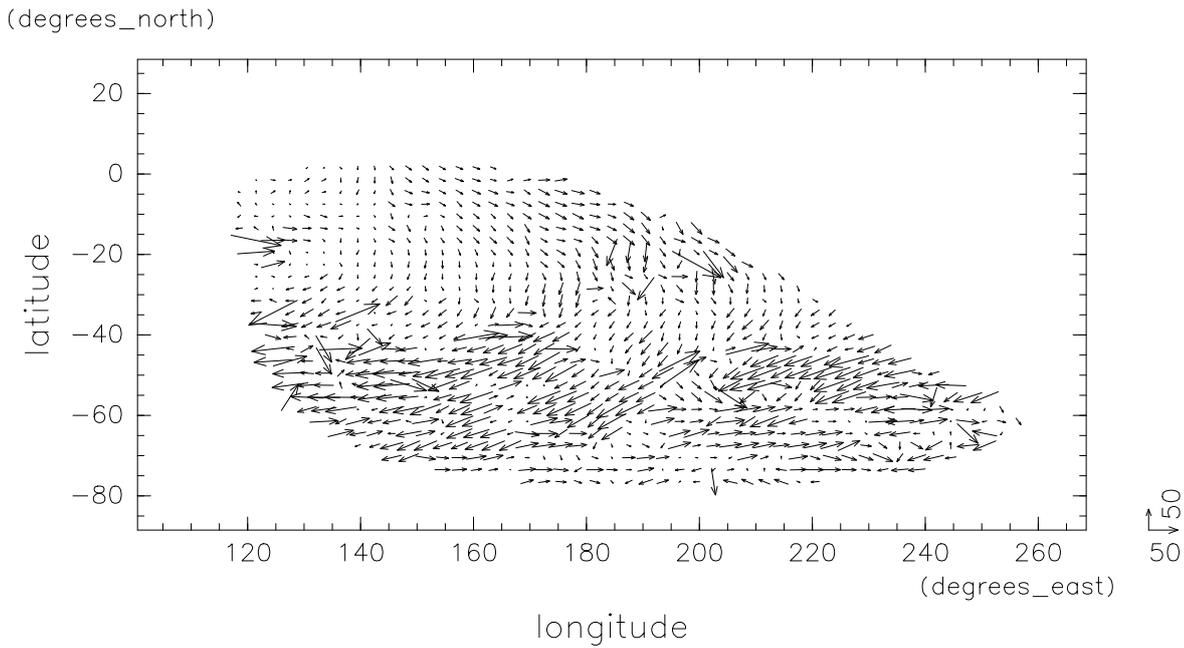


図3 VEx VMC 軌道番号 0265、画像インデックス 0009 と 0018 を用いて導出した雲追跡ベクトル。テンプレートサイズは 48x48。

5 まとめ

雲追跡ベクトルについて簡単に述べ、誤ベクトルを避ける代表的方法について言及した。雲追跡ベクトルを求めるツールの開発状況は順調であるが、品質評価についてはアルゴリズムのレベルで課題が残っている。VEx VMC の紫外画像を用いたテストでは、完全ではないものの、特定のパラメータでは概ねもっともらしい結果を得ることができた。

現在、あかつきの画像データを用いた雲追跡の試みを始めたところである。今後の定常観測で得られる撮像データから雲追跡を行なうことで金星大気運動の素過程を観察し、スーパーローテーションのメカニズムの解明に資することが期待される。

謝辞

Venus Express のデータを全世界に公開している欧州宇宙機関に感謝する。

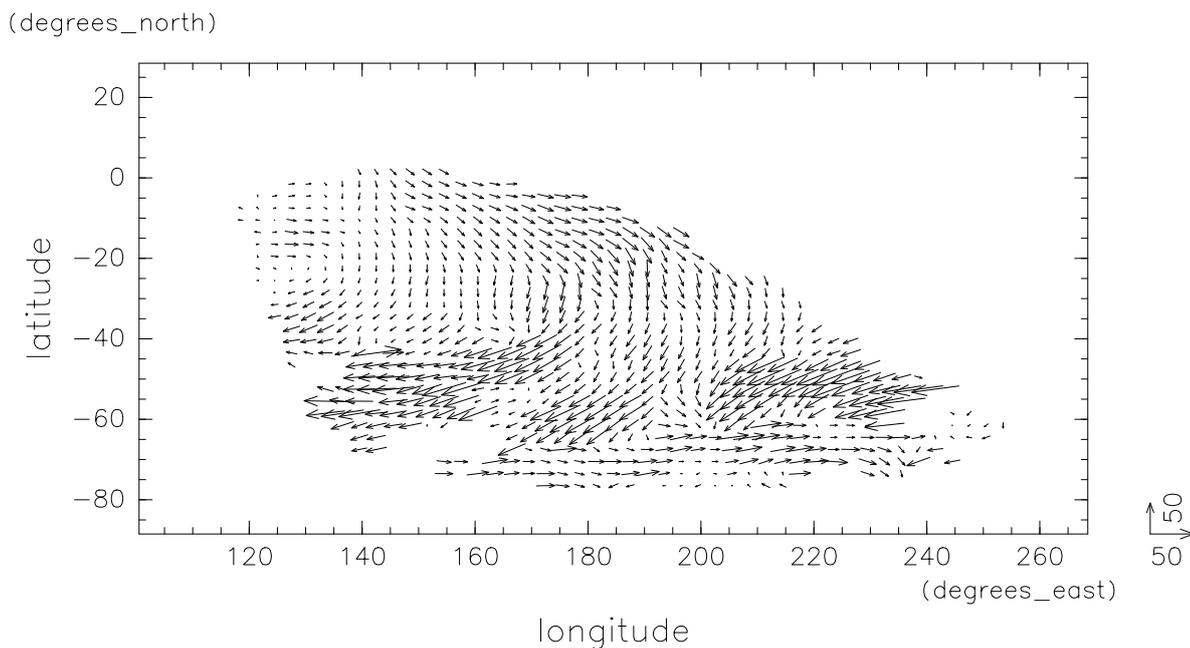


図4 VEx VMC 軌道番号 0265、画像インデックス 0009 と 0018 を用いて導出した雲追跡ベクトル。テンプレートサイズは 60x60 で、相関曲面の空間平均 [4] あり、ベクトル訂正 [5, 6] あり。

参考文献

- [1] 林昌宏, 下地和希, 2013: 大気追跡風算出アルゴリズム, 気象衛星センター技術報告, 第 58 号.
- [2] L. F. Hubert, L. F. Whitney, Jr., 1971: Wind estimation from geostationary-satellite pictures, *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 665 – 672.
- [3] I. Orlanski, 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **56**, 527 – 530.
- [4] S. Ikegawa, T. Horinouchi, 2016: Improved automatic estimation of winds at the cloud top of Venus using superposition of cross-correlation surfaces, *Icarus*, **271**, 98 – 119.
- [5] A. N. Evans, 2000: Glacier Surface Motion Computation from Digital Image Sequences, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **38**, 1064 – 1072.
- [6] T. Kouyama, T. Imamura, M. Nakamura, T. Satoh, Y. Futaana, 2012: Horizontal

structure of planetary-scale waves at the cloud top of Venus deduced from Galileo SSI images with an improved cloud-tracking technique, *Planet. Space Sci.*, **60**, 207 – 216.

- [7] K. Holmlund, 1998: The Utilization of Statistical Properties of Satellite-Derived Atmospheric Motion Vectors to Derive Quality Indicators, *Wea. Forecasting*, **13**, 1093 – 1104.
- [8] K. Ogohara, T. Kouyama, H. Yamamoto, S. Naoki, M. Takagi, T. Imamura, 2012: Automated cloud tracking system for the Akatsuski Venus Climate Orbiter data, *Icarus*, **217**, 661 – 668.

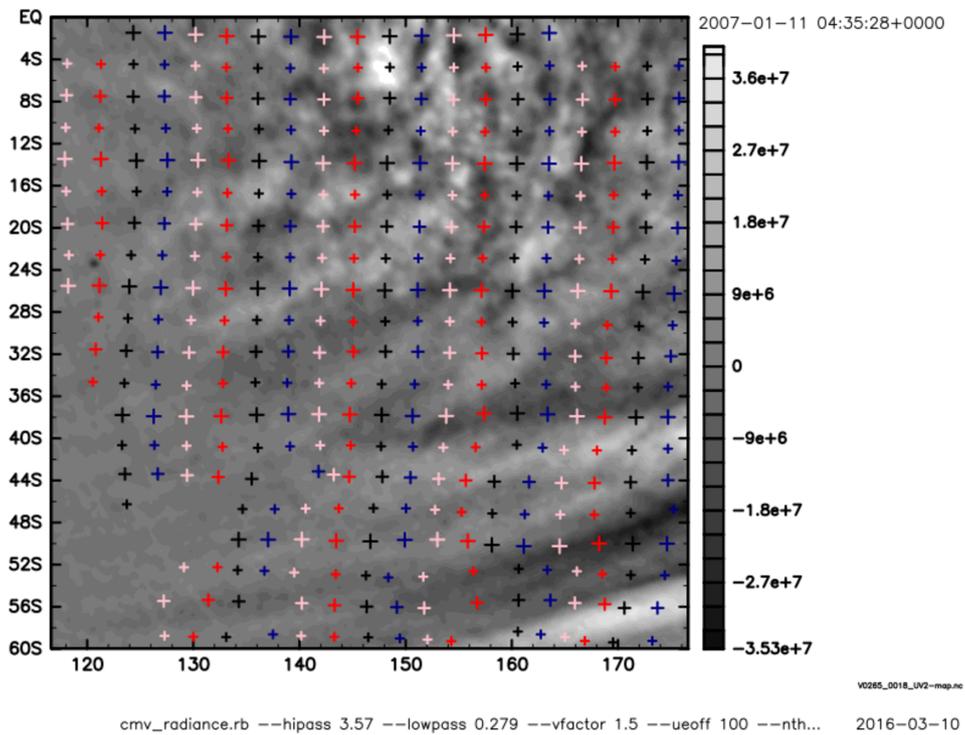
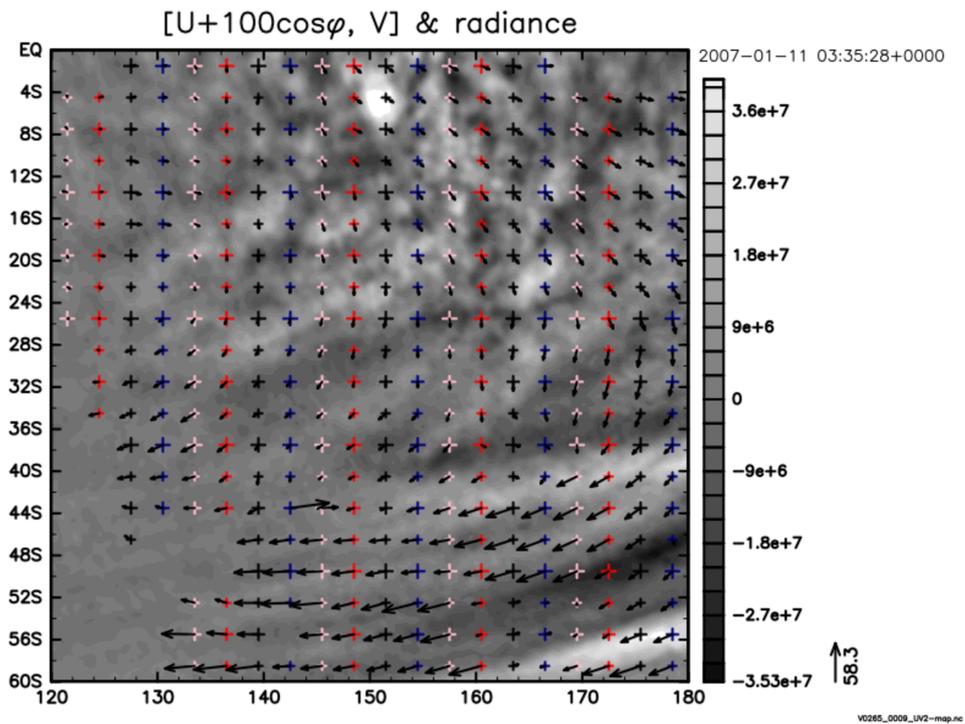


図 5 雲追跡ベクトルが模様を追跡しているかを確認するための画像。図 4 の雲追跡ベクトルのチェック画像の例。