Venus Express の紫外線画像を用いた風速推定の研究

*池川慎一(北大環境科学), 堀之内武(北大地球環境)

1. はじめに

金星大気におけるスーパーローテーション生成メカニズムの有力な仮説の一つとして、子午面循 環に着目したギーラシメカニズムがある.これを検証するためには、観測から乱流による運動量 輸送を見積もる必要がある. そのためには, 数千 km 以下の細かな空間分解能で風速を推定する 必要があると考えられる.しかし、今までの風速推定は、それに必要な空間分解能や精度が保証 されていない.本研究の目的は、相互相関法による風速推定の改良と風速推定の精度評価の確立 である.本研究で使用したデータは、欧州宇宙機関の金星探査機 Venus Express に搭載されてい る VMC (Venus Monitoring Camera)の紫外画像である. 風速推定を行う際は, 図1に示すような あかつき L3 チームによって作成された L3a プログラムを用いて緯度・経度変換したデータを使 用した(Ogohara et al., 2012). 過去の研究は, 1 ペアに基づいた風速推定が行われてきた(Rossow et al., 1990). この推定方法は、使用する画像間の時間間隔を広げることで、 ランダム誤差やサブ ピクセル推定にともなう系統誤差を低減することが可能となる.一方で、ペア画像間の時間間隔 を広げることは、相関係数の値の低下を引き起こす. そこで、本研究では多数のペアを使用して 風速推定を行うことで,推定誤差を低減するとともに相関係数の向上を試みる.画像ごとのノイ ズが無相関と仮定した場合、多数のペアを使用することでノイズは減少し、有効自由度は増加す る. 従って, 風速推定の精度は向上することが期待できる. 本研究では, 風速推定の精度は相関係 数の誤差をもとに求めた. また, 複数の評価指標を用いることにより, 客観的な推定結果の精度 評価が可能になった. その結果、多数の画像を使用することで風速推定の精度が向上することが 示された.

2. 風速推定

相互相関法に基づく自動風速推定手法は, Rossow et al. (1990)により確立されている. この手法 は,2枚のペア画像からシステマチックに風速を推定する手法である.1時刻目の画像に検査領域 と呼ばれる小さな矩形領域を設定する. そして,2時刻目の画像にサーチ領域と呼ばれる検査領域 より一回り大きな領域を設定する. そして,検査領域をサーチ領域内でずらしながら相関係数を 計算し,相関係数が最大値となる場所に検査領域が移動したとみなすことにより風速を算出する. しかし,この手法は,雲の不明瞭さ・雲の変形・ノイズの影響・筋状構造の雲の影響により周囲の ベクトルと比較して大きく異なるベクトルを算出する. 誤ベクトルは,風速推定の精度そのもの を著しく低下する要因の一つである. また,そのような状況から算出された風速に基づき推定さ れた運動量輸送の精度は低下する. このように1ペアの推定は,推定結果に対する信頼性向上が 困難である.本研究では,上記の誤ベクトル発生要因の一つであるノイズの影響について考慮し た.ノイズの種類は主に,CCD素子の電荷を読み出す際に生じた縦縞のノイズと太陽光による感 度の劣化に起因する2種類のノイズが存在する.本研究では,画像間のノイズは無相関であると 仮定し、ロバストな推定手法を確立する.図2に示すようにVMCの紫外画像は時間間隔の短い画 像が多く存在する.本研究では、ペア画像間のデータも使用し、ロバストな風速を算出する.ただ し、離散化誤差の影響を抑えるためにペア画像間の時間間隔が1時間よりも短いペア画像は使用 しない.本研究では、3時間以内であれば、風速は一定と見なし、複数の時刻から算出した相互相 関係数を重ね合せる.この手法のメリットは主に、誤ベクトルの追跡とノイズによる誤ベクトル 発生を抑えることである.実際に本研究の提案手法は、図3c,4aに示される誤ベクトルの発生を 防止する.これは、時間間隔が比較的短いペア画像を沢山使用しているからである.さらに、図4 からみてとれるように、相関係数も向上する.従って、複数の時刻の異なるペア画像を用いた風 速推定は、1ペアの推定と比較して信頼性が高く、信頼できる風速のデータセットを作成する上で は明らかに重要である.本研究の提案手法は、以下の(1)~(3)の手順で風速を算出する.

(1)1 時刻目の画像を固定し,時間間隔が1時間以上かつ3時間以内の2時刻目となる全ての画像 との相互相関係数を計算する.そして,各ペアから得られた相互相関係数を重ね合わせるため に,各ペア画像から算出された相互相関係数を時間間隔3時間のペア画像から得られた相互相 関係数と同じ大きさに拡大する.その際,相互相関係数の中心を基準に拡大する.

(2)1 時刻目の画像を次の時刻の画像に設定する. そして, (1)と同様の操作を繰り返す.

(3)1時刻目の画像と2時刻目の画像の時間間隔が1時間より短くなるまで(2)の操作を繰り返す. 最後に各1時刻目から算出した相互相関係数を平均する.各々の1時刻目に対する検査領域を 設定する際には,西向き100ms⁻¹ずらすことで空間分解能の低下を抑える.

最後に,得られた相互相関係数の雲移動点の候補は楕円放物面近似を用いてサブピクセル変位を 算出した.ただし,本研究では,Kouyama et al. (2012)で考慮されているサブピクセル推定の際に 生じる系統的誤差を低減させるようなことは行っていない.

3. 精度評価

風速の精度は、村地ら(2003)の手法をもとに改良し算出した.村地らは、観測誤差は十分に小さ いとみなし、画像処理(相互相関法)に起因する誤差に焦点を当てた.この手法は、候補領域におけ る相関係数の誤差をもとに、風速の精度を算出する方法である.つまり、相関係数に対する信頼 区間(雲移動点となる確率の高い領域)を推定し、その結果を風速の誤差に変換する. 本研究では、信頼係数 95%のもとで、相関係数の信頼区間を推定する.村地らの手法の問題点は、 相関係数の信頼区間を推定する際に必要となる有効自由度を一切考慮していないことや雲画像で よく見られる筋状構造の雲のパターンを考慮した誤差評価がなされていないという問題がある. 前者は、自己相関関数を用いて有効自由度を算出する(chelton, 1983).後者は、雲移動点の候補と なる領域が楕円放物面と同心円状の場合で、別々の計算方法で誤差を算出する.

(1) 相互相関係数におけるピーク近傍が楕円放物面に近い形状をとる場合は, 雲移動点の候補領 域を楕円放物面でフィッティングを行う. そして, 得られた長半径を緯度・経度に投影し算出 する. (2)相互相関係数におけるピーク近傍が同心円状に近い形状をとる場合は、最大相関係数を通り、 経度・緯度方向にそれぞれ平行な雲移動点の候補を放物線で近似する.雲移動ベクトルの取り うる範囲は、最大相関係数の信頼下限値と交わる範囲であり、誤差はその半分の値とする.そ して、この方法と(1)の方法で求めた誤差を比較し、大きい値を改めて誤差として採用する.

図6は1ペアによる風速の精度と本研究の提案手法から算出された風速の精度を示す.1ペアに よる推定は、自由度が低く精度が悪いことを示している.一方、多数のペアを使用した場合は、自 由度が高く風速の精度がよいことを示している.ただし、この結果に対する信頼性の保証がなさ れていない.そこで風速の推定結果から周囲(上下左右)との風速差の最大値を計算し比較した. その結果、1ペアの推定は、両者の結果について非常に変動が大きく、両者の結果に大きな差異が みられる.一方で、複数ペアを使用した場合は、両者の結果の値も近くなり、低緯度で精度が良く、 高緯度で精度が悪い傾向が一致している.従って、風速のペアを使用することで、風速の推定に 対する精度が向上することが期待できる.

参考文献

Chelton, D.B. 1983. Effects of sampling errors in statistical estimation. Deep-Sea Res., 30, 1083-1011

Ogohara, K., T. Kouyama, H. Yamamoto, N. Sato, M. Takagi, T. Imamura, 2012, Automated cloud tracking system for the Akatsuki Venus Climate Orbiter data, Icarus, 217, 661—668. Rossow, W.B., Del Genio, A.D., Eichler, T., 1990. Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. J. Atmos. Res. 46, 2053-2084

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. Plant. Space Sci., 60 (2012), pp. 207–216 村地, 今村, 樋口, 2003, 統計的手法を用いた惑星雲移動ベクトルの誤差評価法, 宇宙科学研究所報告, 125



図 1. 軌道 263 における 2007-01-09T01:57:04 及び 2007-01-09T04:57:04 の輝度分布を示す. (a)あかつき L3 チームの L3a プログラムを使用して作成した 1 時刻目の輝度分布.(b) あかつき L3 チームの L3a プログラ ムを使用して作成した 2 時刻目の輝度分布.



図 2. 軌道 263 における連続した時刻における緯度0~-20°経度150~170°の輝度分布を示す.

(a)2007-01-09T01:57:04 の輝度分布. (b) 2007-01-09T02:17:04 の輝度分布. (c) 2007-01-09T02:37:04 の輝度分布. (d) 2007-01-09T02:57:04 の輝度分布. (e) 2007-01-09T01:17:04 の輝度分布.



図 3. 時間刻み幅を変化させ1ペアの推定を行うことにより得られた相互相関係数を示す.

(a)時間刻み幅 3600s で推定した結果得られた相互相関係数.(b)時間刻み幅 7200s で推定した結果得られた相互相関係数.
(c)時間刻み幅 10800s で推定した結果得られた相互相関係数.



図 4. 風速推定に使用するペア画像を増やしたときの相互相関係数の変移を示す.

(a)1ペアから推定した相互相関係数.(b)2ペアから推定した相互相関係数.(c)2ペアから推定した相互相関係数.(d)3ペアから推定した相互相関係数.(e)4ペアから推定した相互相関係数.



図 5. 軌道 263 における 2 枚及び 8 枚の画像を使用して推定した東西風速と南北風速を示す. 欠損領域は,相関係数が 0.5 以下であり風速の誤差が 20ms⁻¹以上となる領域である. (a)1 ペアから推定した東西風速. (b)1 ペアから推定した南北風速. (c)28 ペアから推定した東西風速. (d)28 ペアから推定した南北風速.



図 6. 軌道 263 における 2 枚及び 8 枚の画像を使用して推定した風速の精度と周囲(上下左右)との最大風速差を示す. 欠損領 域は,相関係数が 0.5 以下であり風速の誤差が 20ms⁻¹以上となる領域である. (a)1 ペアから推定した風速の精度. (b)1 ペア から推定した風速に対する周囲との最大風速差. (c)28 ペアから推定した風速に対する周囲との最大風速差.