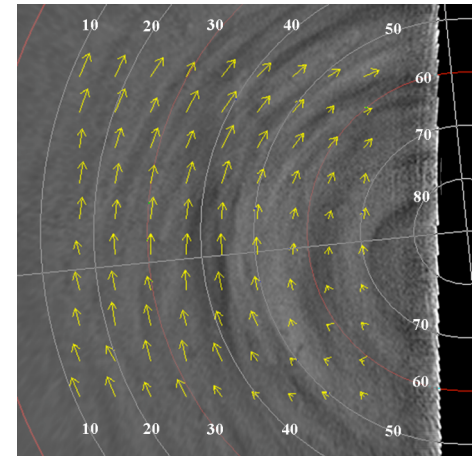
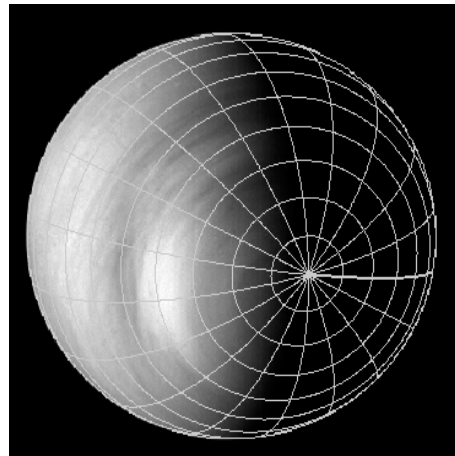
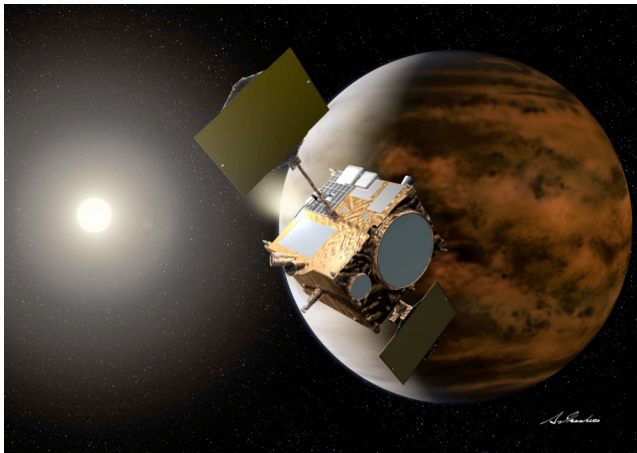


惑星大気の連続画像からの風ベクトル導出

東京大学・理・神山 徹
Planet-C プロジェクトグループ



イントロダクション

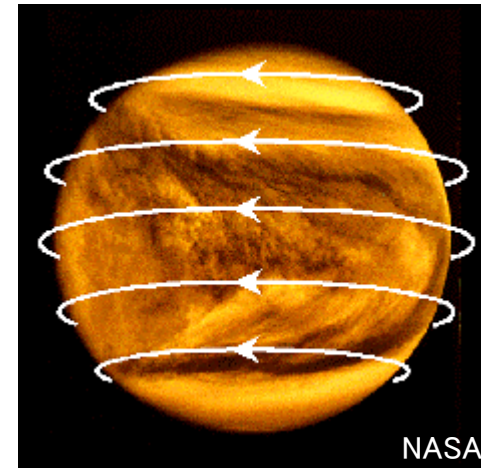
惑星の風速分布を探る

各惑星固有の大気循環

- ・金星 スーパーローテーション
- ・地球/火星 地衡風
- ・木星/土星 帯状ジェット流

プローブの投下による直接探査

- ・精度の高い測定が可能
- ・時間、空間的に制限
- ・観測は投下の1回に限られる



金星:スーパーローテーション模式図

宇宙空間からの撮像による観測

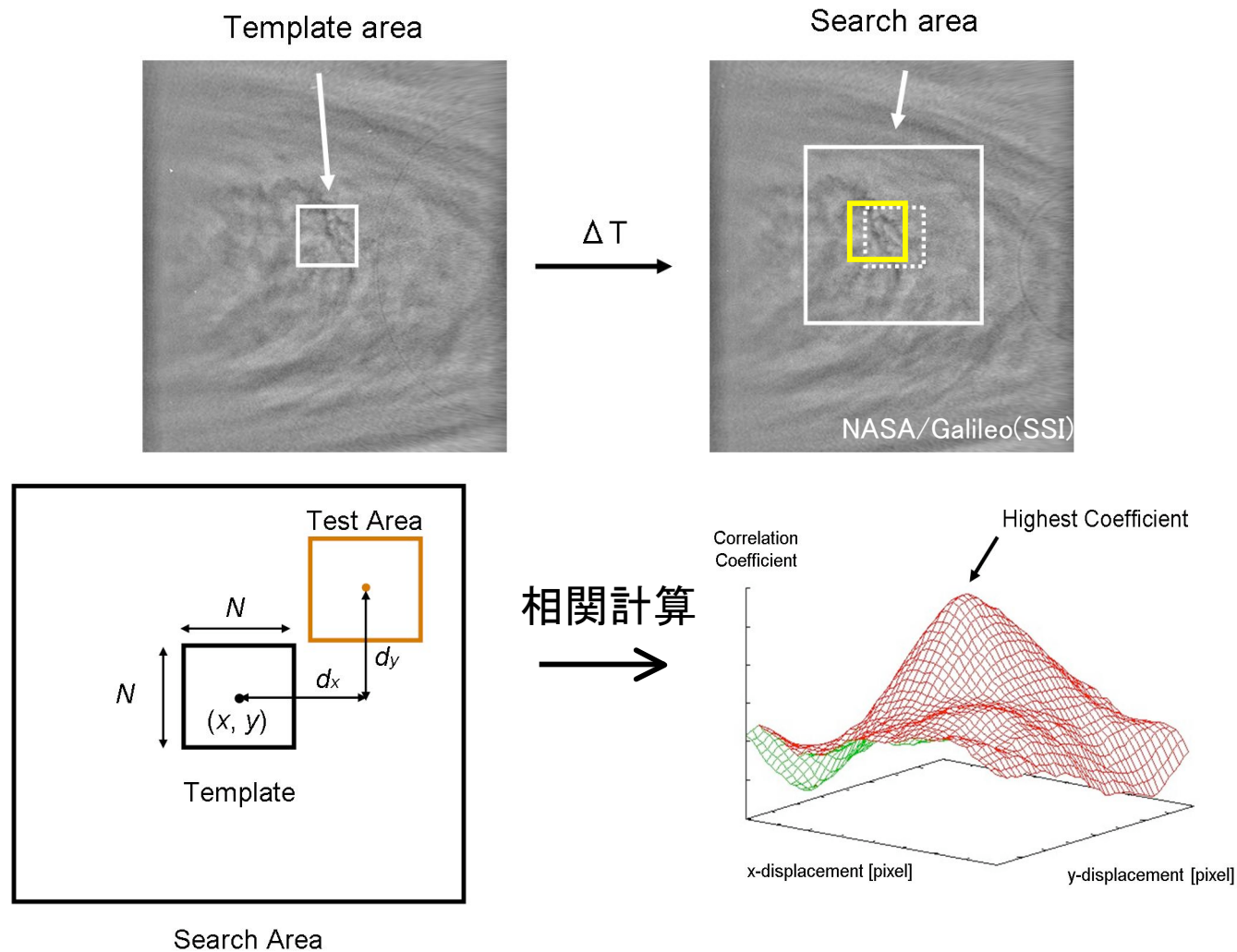
- ・長期間/広範囲
- ・観測機会に富む



数多くの惑星探査において活用

連続画像からの風ベクトル推定(原理)

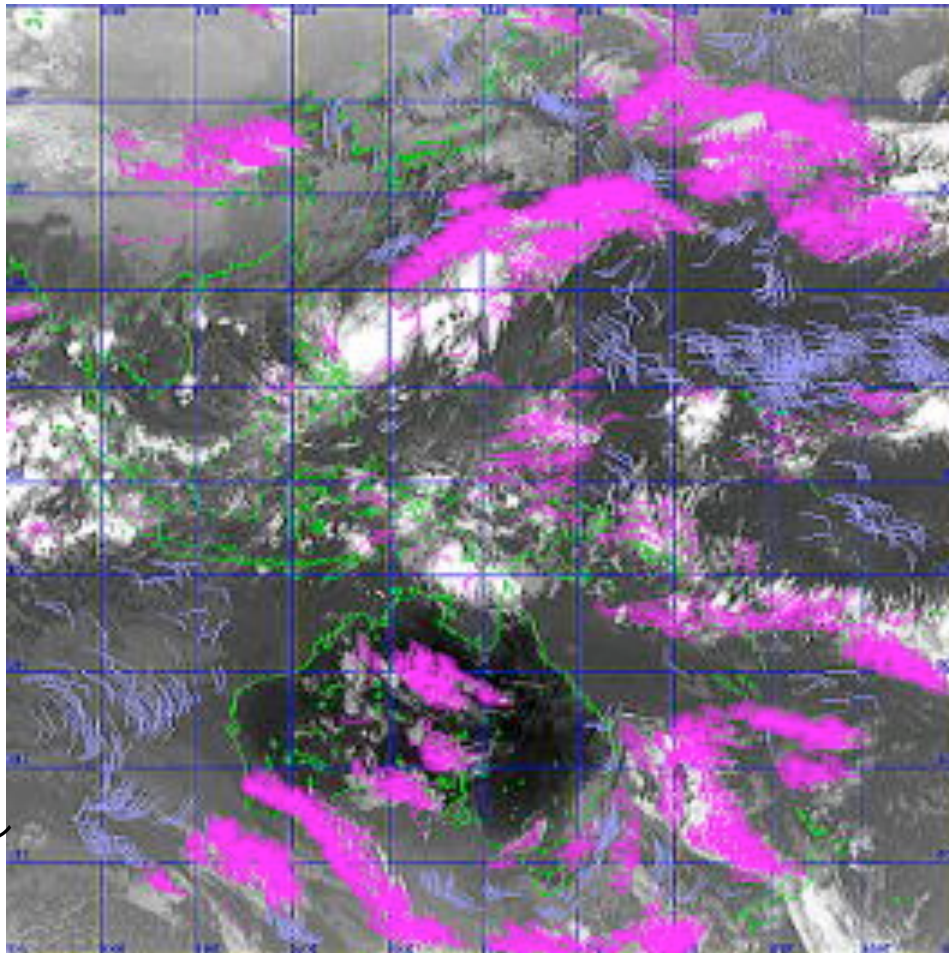
相互相関を用いた特徴追跡



地球：気象衛星撮像画像での運用

赤外画像

(気象衛星センター/ひまわり)



風速ベクトル

1時間毎に算出

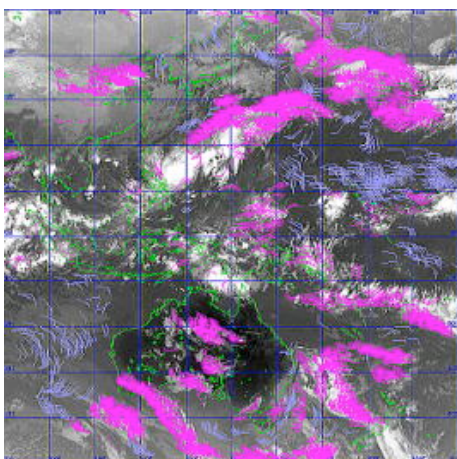
他の観測手段に乏しい海洋上の
観測値として重用

<http://mscweb.kishou.go.jp/panfu/product/product/wind/index>

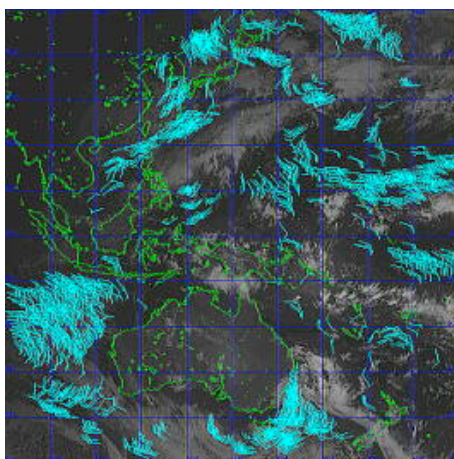
地球：気象衛星撮像画像での運用

<http://mscweb.kishou.go.jp/panfu/product/product/wind/index.htm>

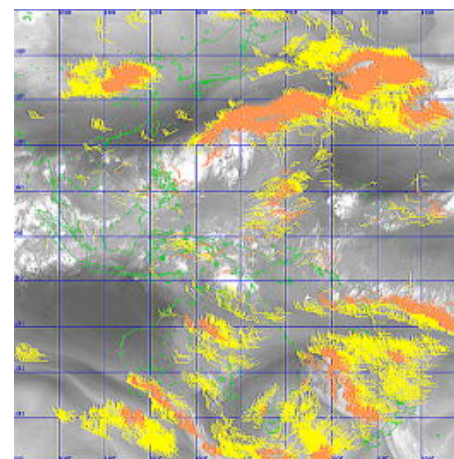
(気象衛星センター/ひまわり)



赤外画像

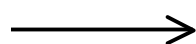


可視画像



水蒸気画像

- ・高度情報の付加
 - 追跡したターゲットの輝度温度と鉛直温度分布予報データとを比較
- ・品質指標の導出
 - 風ベクトルの時間変化
 - 空間的に隣接する風ベクトルとの整合性
 - 予報データとの整合性

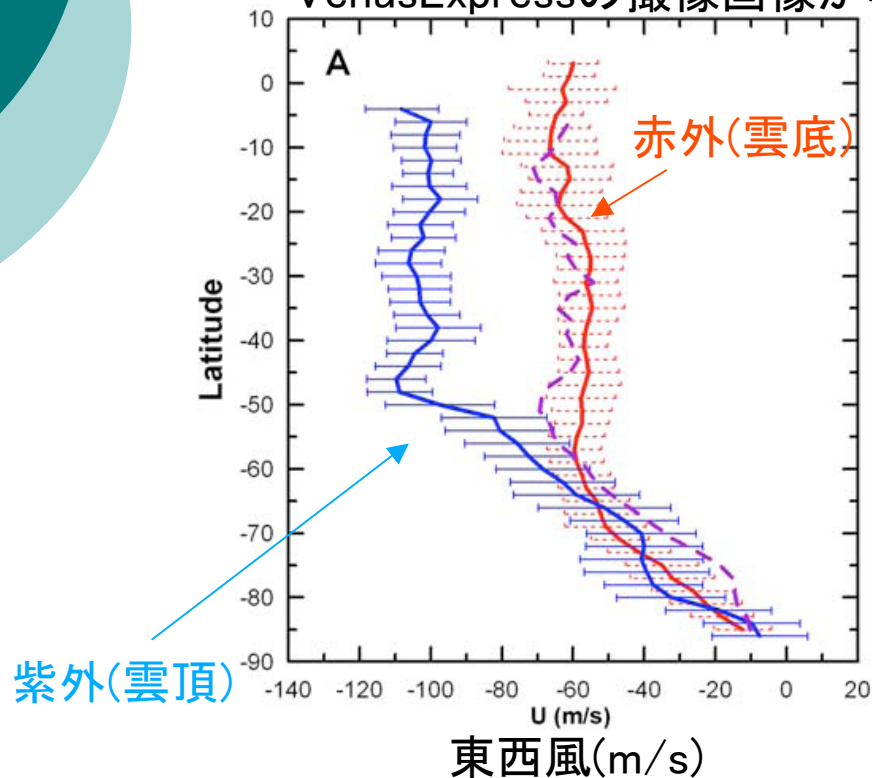


気象予報の初期値として活用

惑星撮像画像への適用

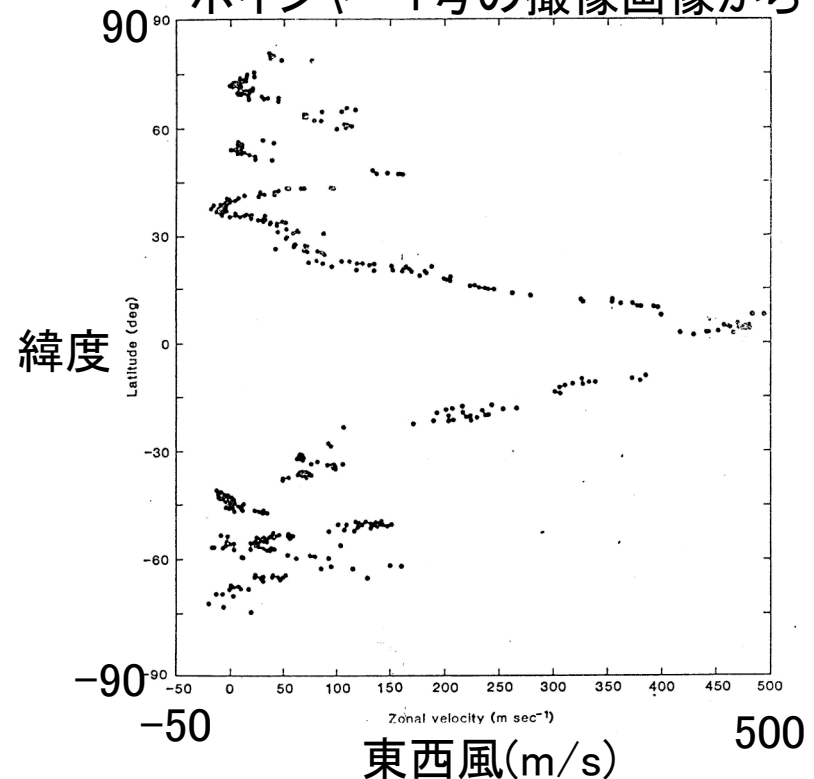
金星・木星・土星探査での利用

VenusExpressの撮像画像から



金星:東西風の緯度分布
[Sa' nchez-Lavega et al. 2008]

ボイジャー1号の撮像画像から



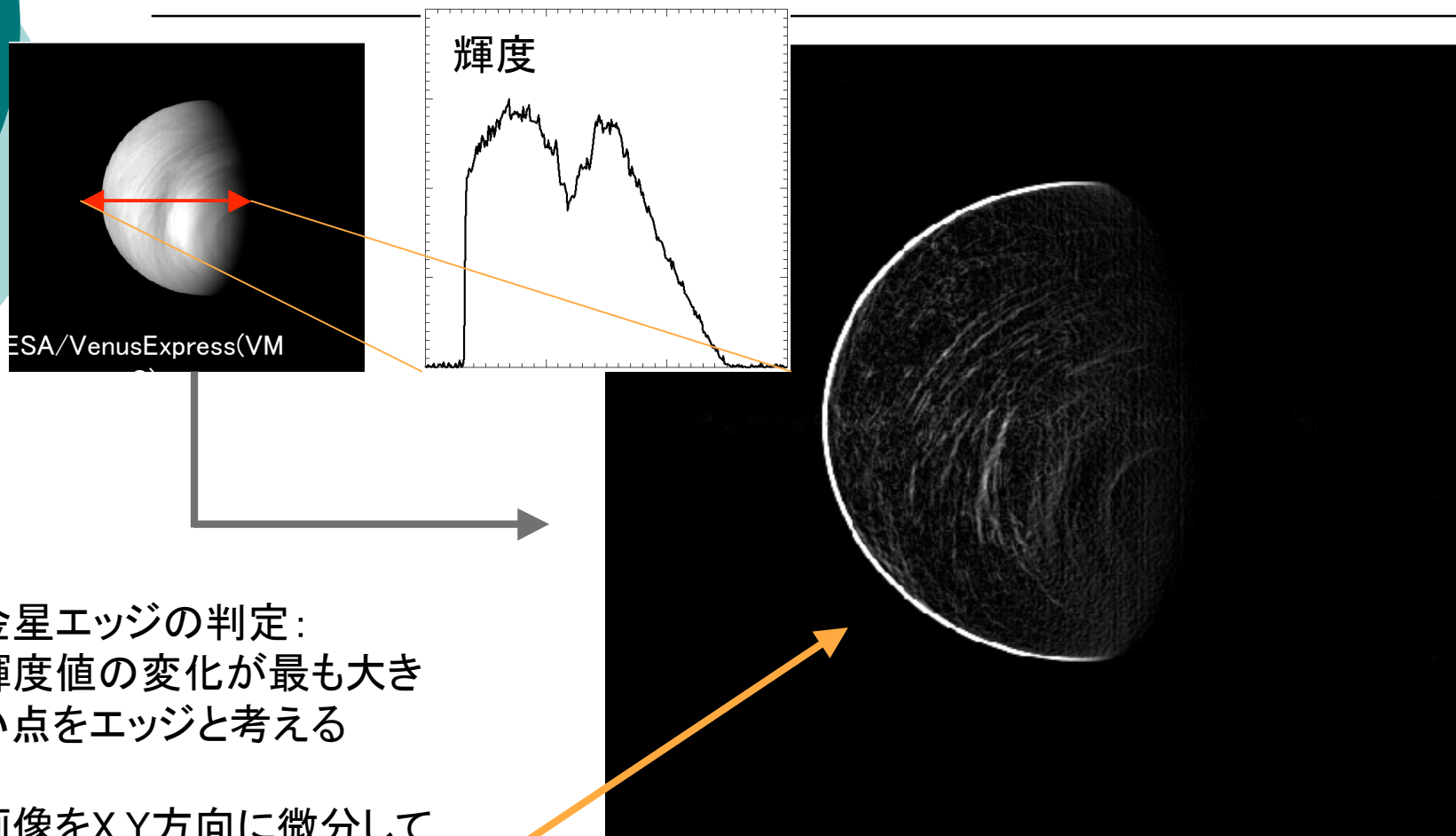
土星:東西風の緯度分布
[Smith et al. 1981]



連続画像からの風ベクトルの導出

- 前処理(撮像画像を扱いやすい画像へ変換)
 - 惑星中心の導出
 - 緯度・経度マッピング
 - 入射角・出射天頂角補正
- 風ベクトルの導出

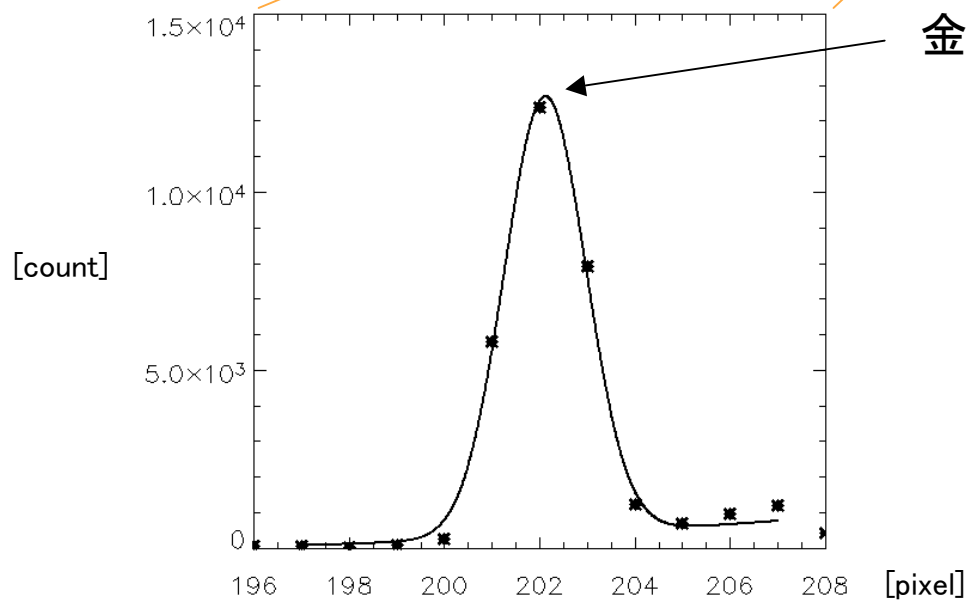
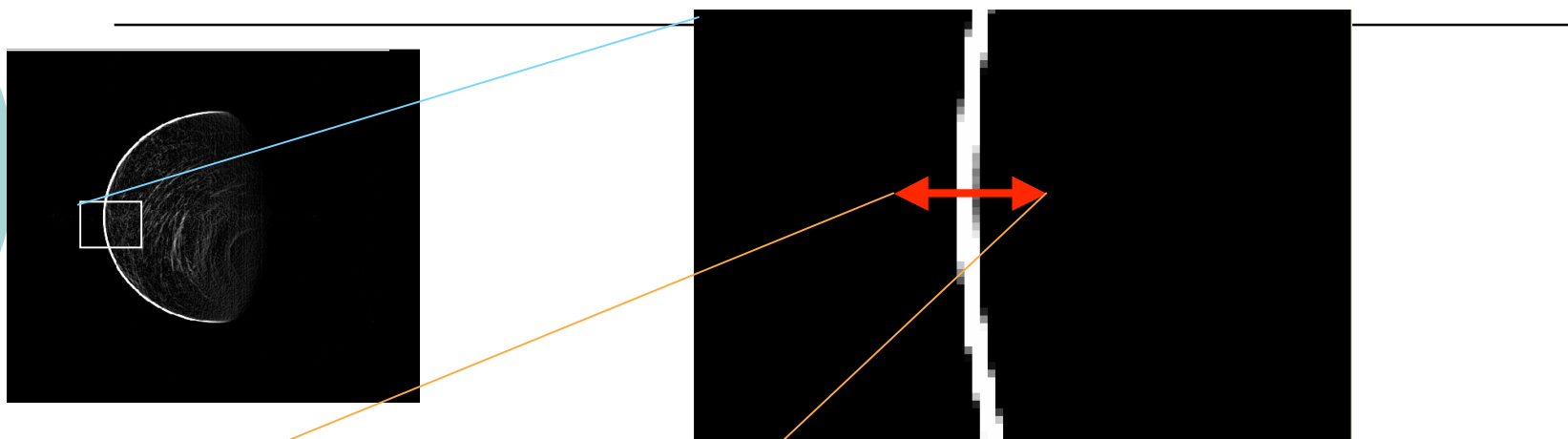
惑星中心の導出



金星エッジの判定:
輝度値の変化が最も大きい点をエッジと考える

画像をX,Y方向に微分して
金星エッジを強調させる
(Sobel 法)

惑星中心の導出



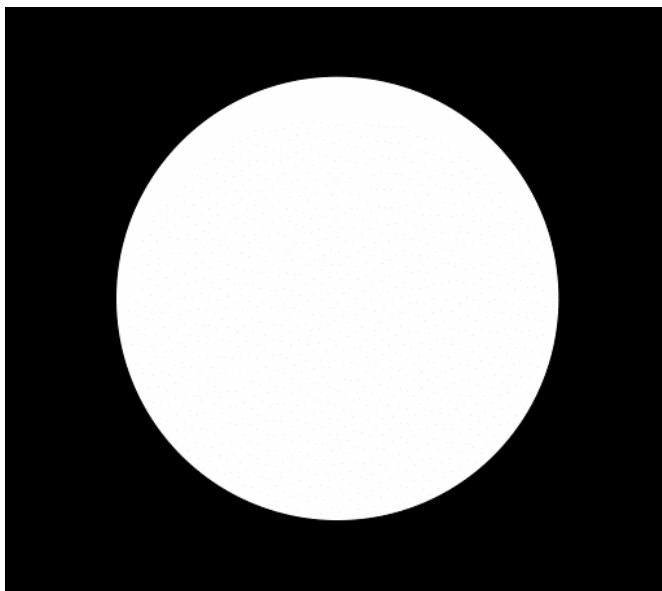
金星の縁と判定

円によるフィッティング (最小二乗法)

半径・中心座標(X,Y)

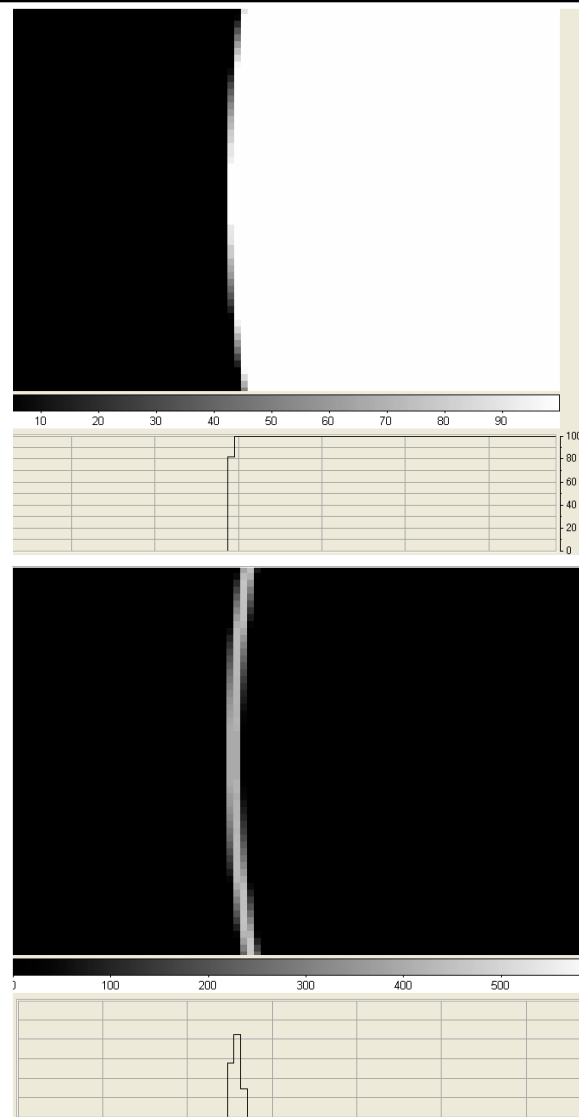
Radius 137.12870 pixel
Center X,Y (284.57445, 272.36277)

惑星中心の導出(精度評価)

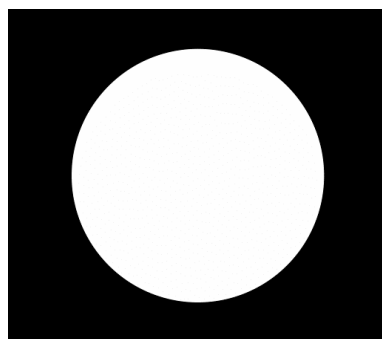


半径 128 pix の円

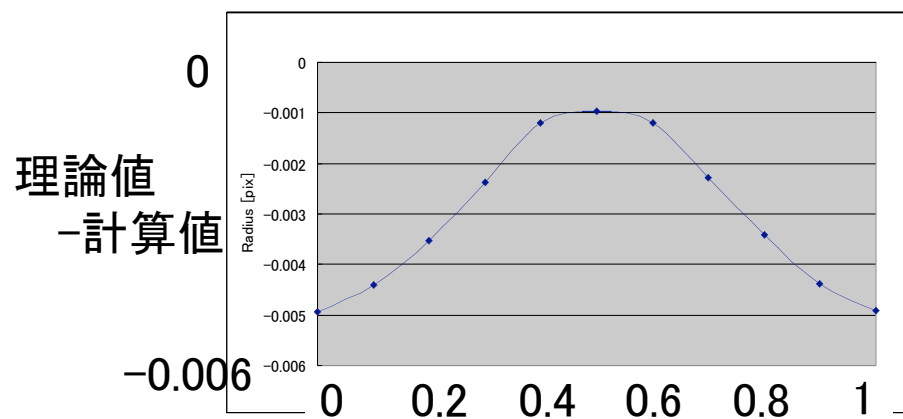
100倍の画素数でオーバーサンプリングした
後、画像を1/100に圧縮
中心座標を0.1pixずつずらして評価



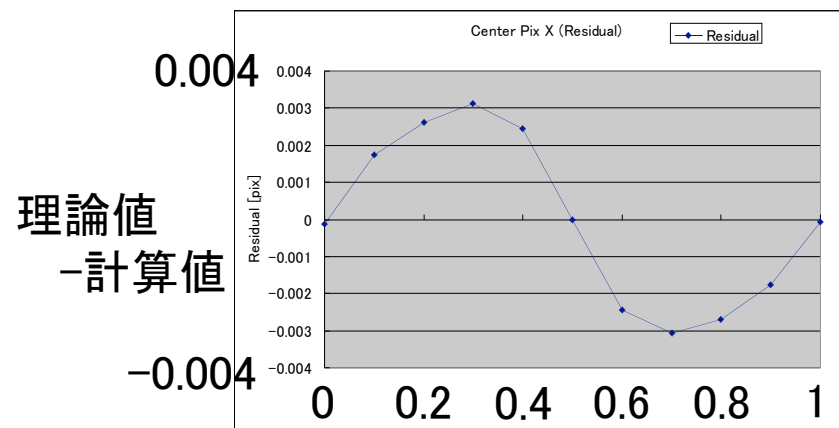
画像処理: 惑星中心の導出(精度評価)



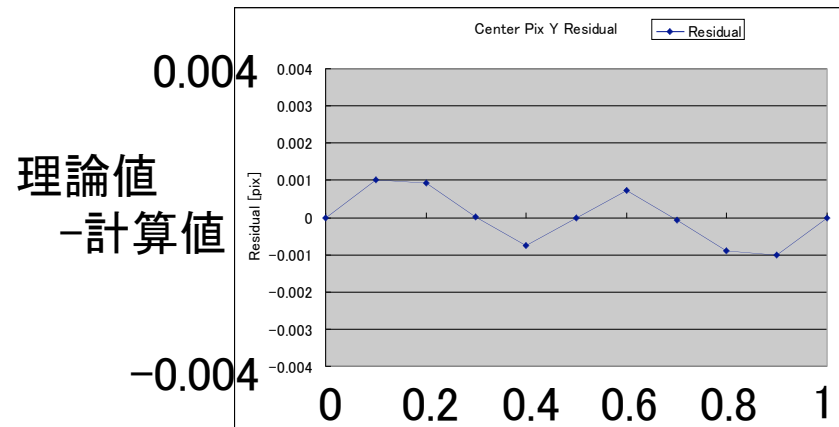
半径



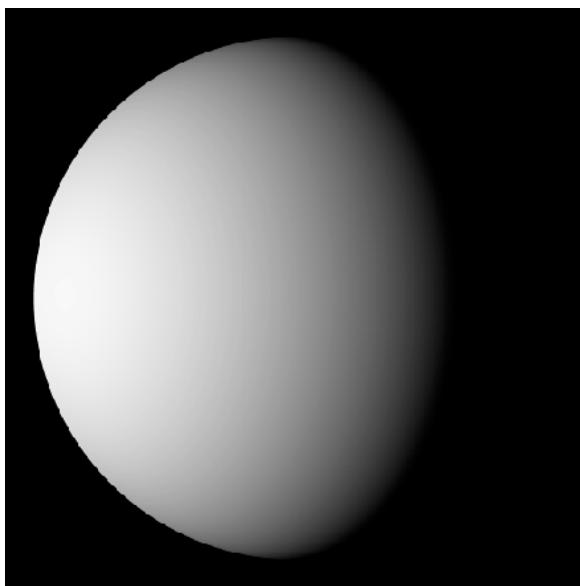
中心座標: X



中心座標: Y

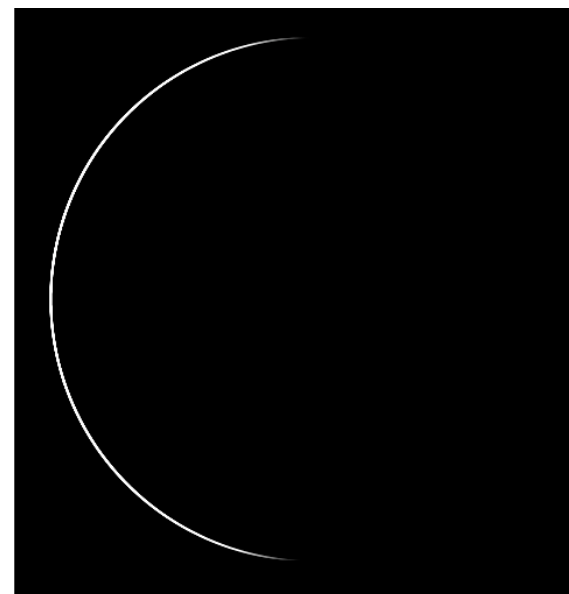


惑星中心の導出(精度評価)



太陽光入射角、衛星への出射天頂角を
考慮した模擬惑星画像

36倍の画素数でオーバーサンプリングした
後、画像を1/36に圧縮

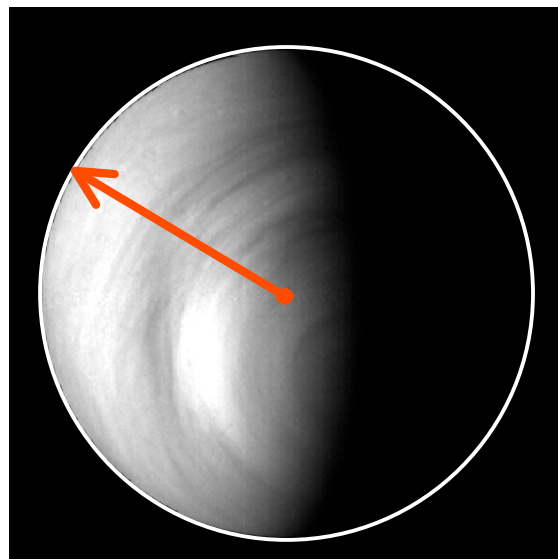


	計算値	与えた値
Center of Circle X:	256.06478	256.000
		256.000
Y:	255.99919	256.000
R:	224.11052	224.134

緯度・経度マッピング

画像処理から

画像上での惑星中心



ESA/VenusExpress(VM
C)

観測装置のスペックから

1画素当たりの視野角

衛星姿勢情報から

画像上での地軸方向

衛星軌道情報から

衛星-惑星間距離

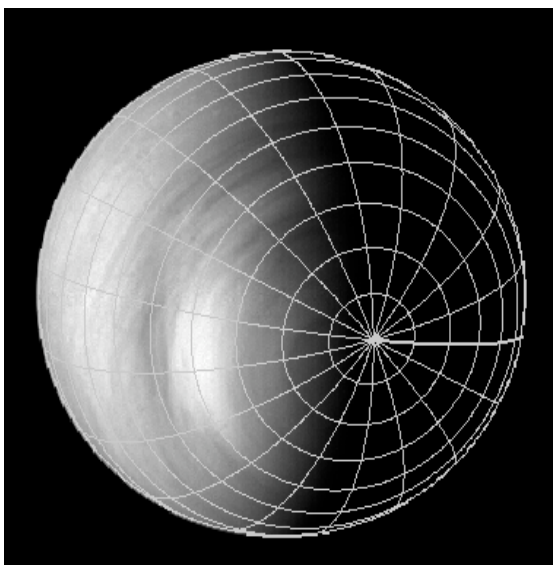
衛星直下点(緯度・経度)

画像に垂直方向への
地軸の傾き

緯度・経度マッピング

画像処理から

画像上での惑星中心



ESA/VenusExpress(VM
C)

観測装置のスペックから

1画素当たりの視野角

衛星姿勢情報から

画像上での地軸方向

衛星軌道情報から

衛星-惑星間距離

衛星直下点(緯度・経度)

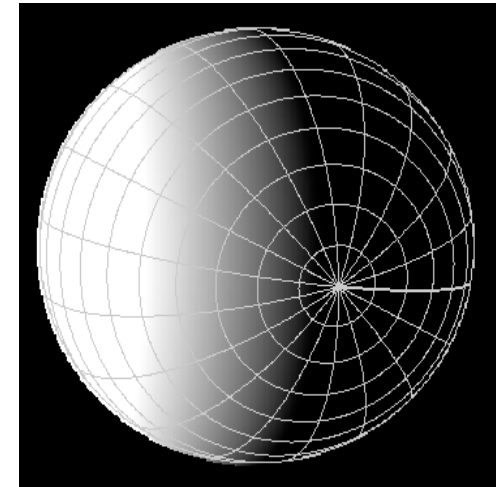
画像に垂直方向への
地軸の傾き

紫外画像：入射角・出射天頂角補正

金星軌道情報

/衛星軌道・姿勢情報(SPICE)

- ・太陽直下点の緯度経度
 - 太陽光入射角
- ・衛星直下点の緯度経度
 - 出射天頂角



$$I = B \frac{F_{\odot}}{\pi \mu} (\mu \mu_{\odot})^k \frac{1 - \exp(-\mu_{\odot}/a)}{1 - \exp(-\mu/b)}$$

$F_{\odot}$: 太陽光フラックス、 $\mu_{\odot}$: $\cos(\text{太陽光入射角})$ 、 μ : $\cos(\text{出射天頂角})$

Violet, $B = 0.59$, $k = 0.90$, $a = 0.0547$, and $b = 0.0039$

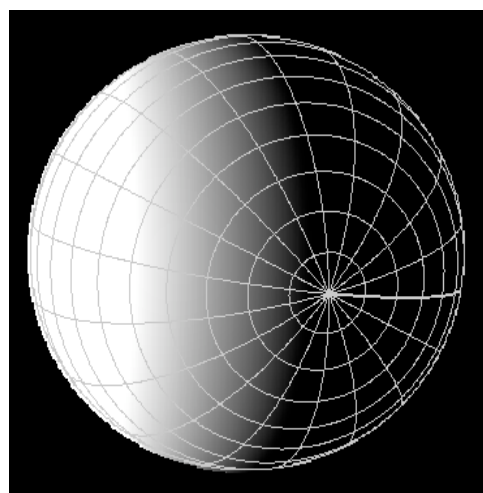
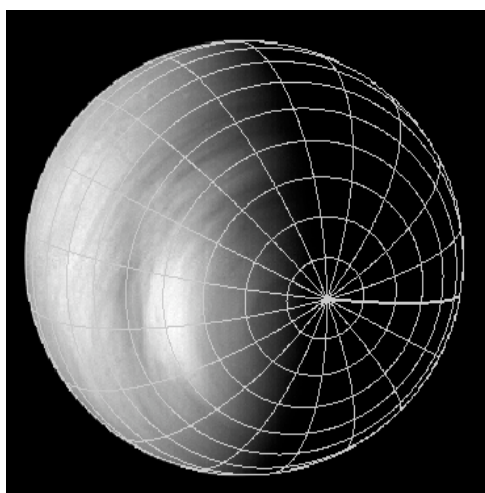
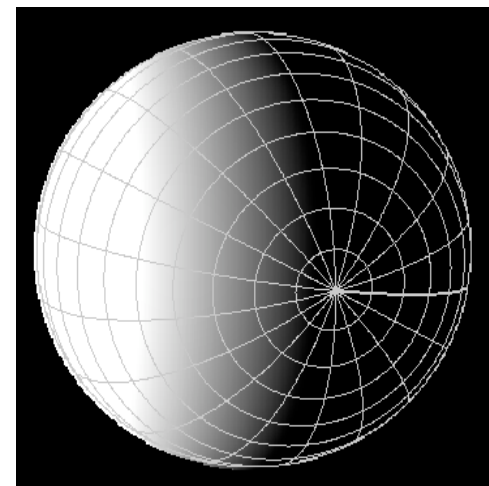
(Belton et al., 1990)

紫外画像：入射角・出射天頂角補正

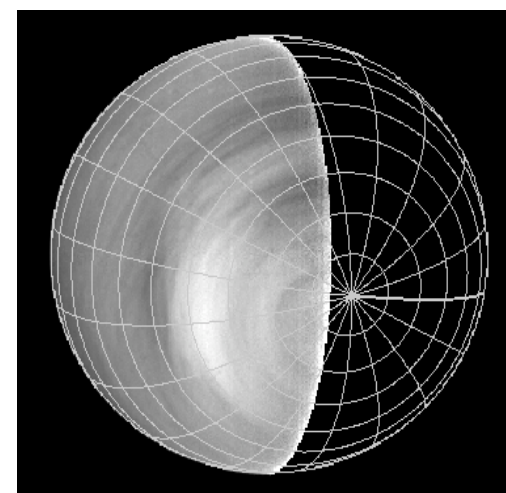
金星軌道情報

/衛星軌道・姿勢情報(SPICE)

- ・太陽直下点の緯度経度
 - 太陽光入射角
- ・衛星直下点の緯度経度
 - 出射天頂角

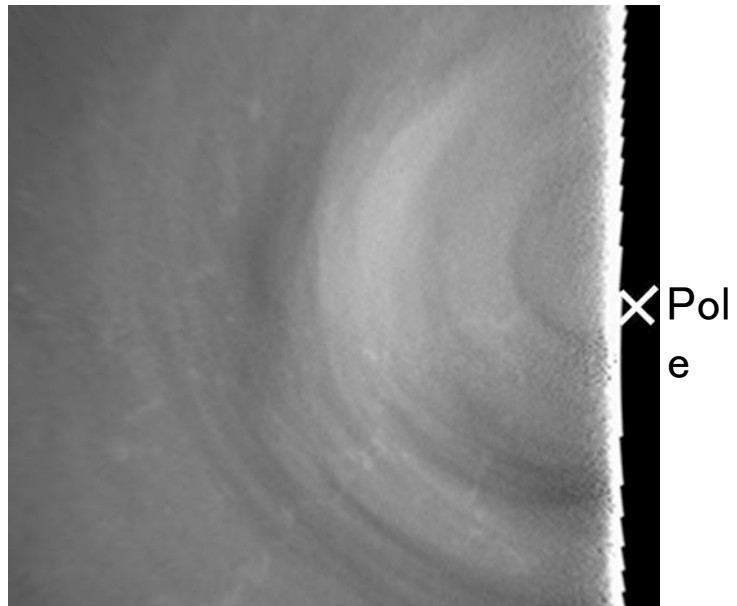


=

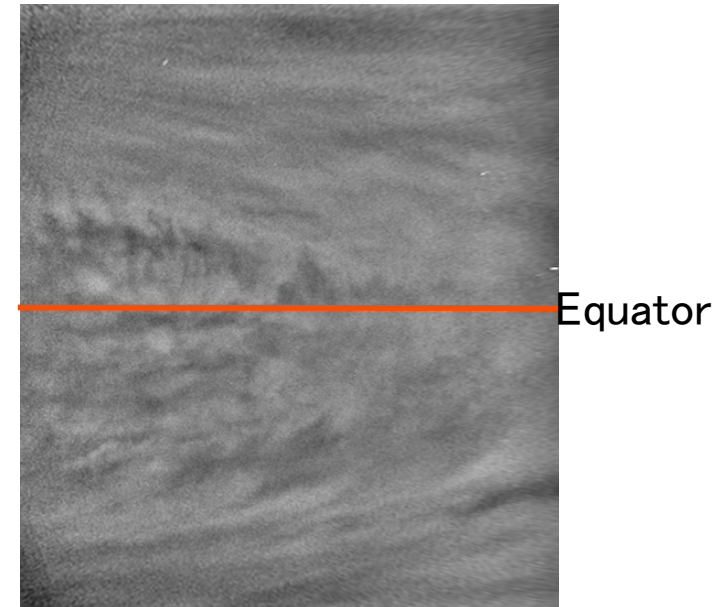


投影

Bicubic法
3次曲面による内挿



VenusExpress撮像画像
→正距方位図法



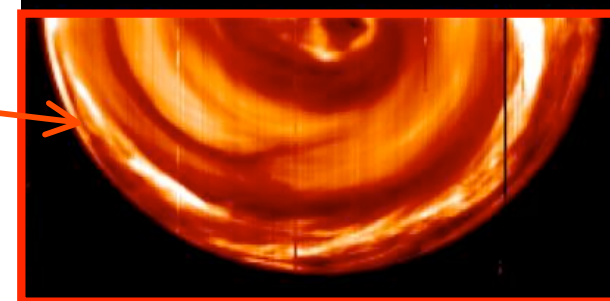
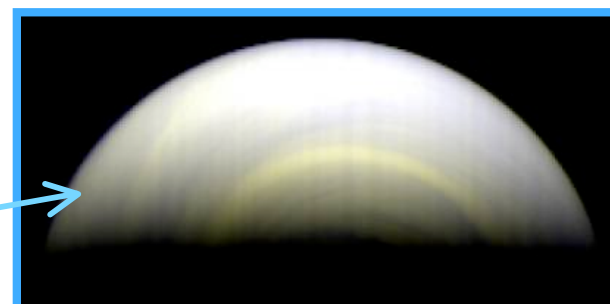
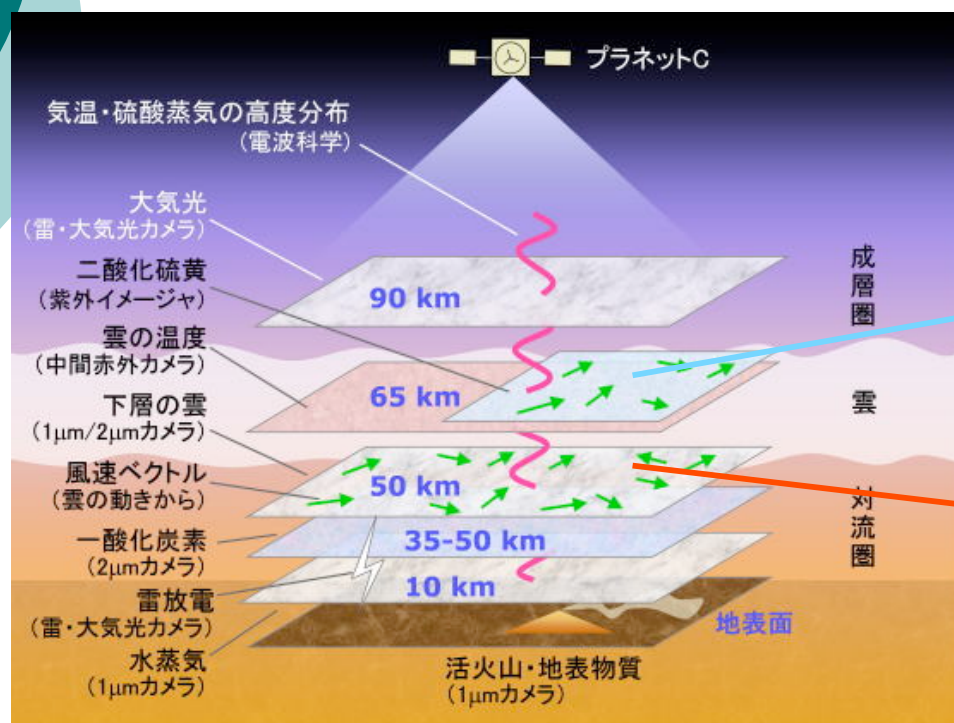
Galileo/Planet-C撮像画像
→メルカトル図法



連続画像からの風ベクトルの導出

- 前処理(撮像画像を扱いやすい画像へ変換)
 - 惑星中心の導出
 - 緯度・経度マッピング
 - 入射角・出射天頂角補正
- 風ベクトルの導出

金星雲画像への適用

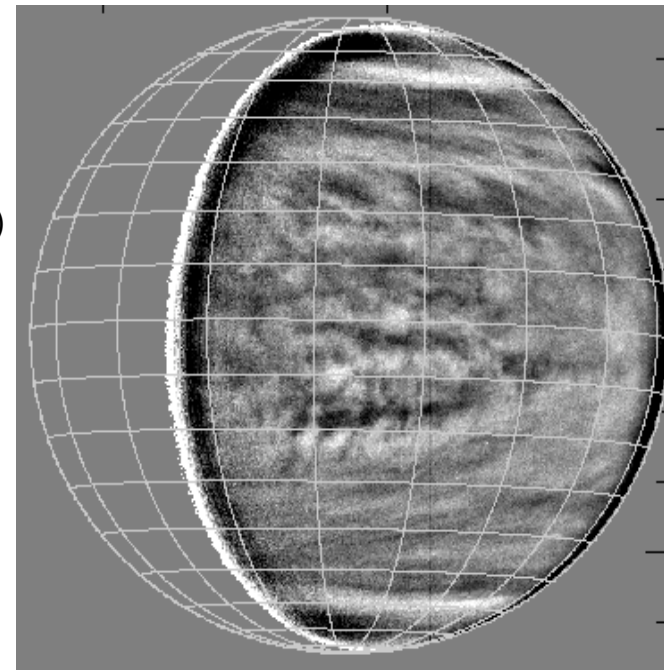


ESA/VenusExpress
上:紫外波長 (VMC)
下:1.27 μ m (VIRTIS)

金星雲画像への適用

様々な制限

- ・装置・観測機会:
 - 地球: 静止軌道+高い解像度(1 km/pix)
 - 金星: 周回軌道+制限のある解像度(15 km/pix)
- ・(紫外)弱いコントラスト
Galileo : $S/N \doteq 100$
(雲の模様)/N $\doteq 5$
- ・比較できる予報データや、
ラジオゾンデなどの同時観測データが無い



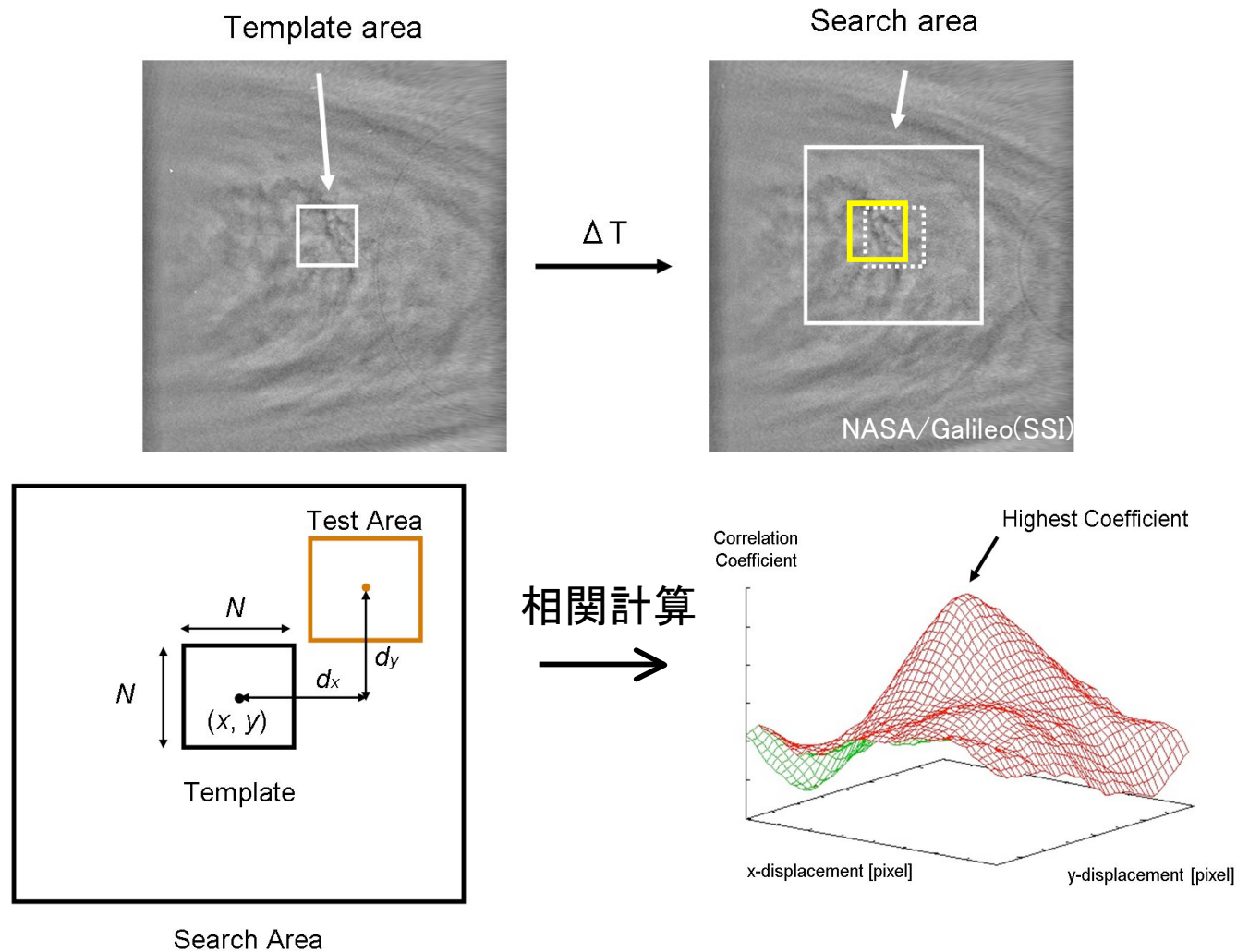
NASA/Galileo(SSI)



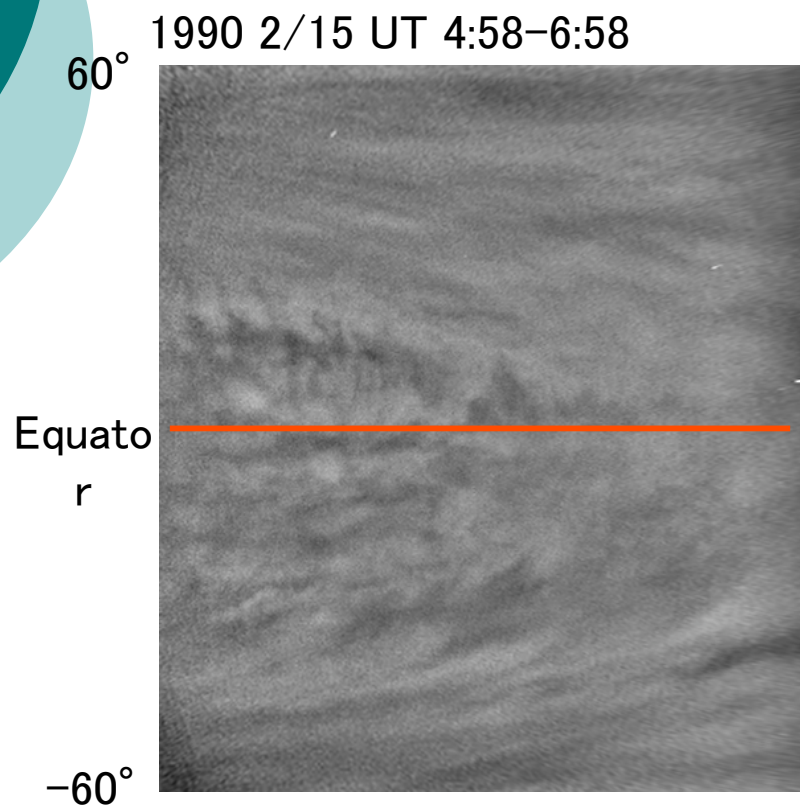
より金星に適した工夫が必要
あるいは信頼できる誤差評価の必要

連続画像からの風ベクトル推定(原理)

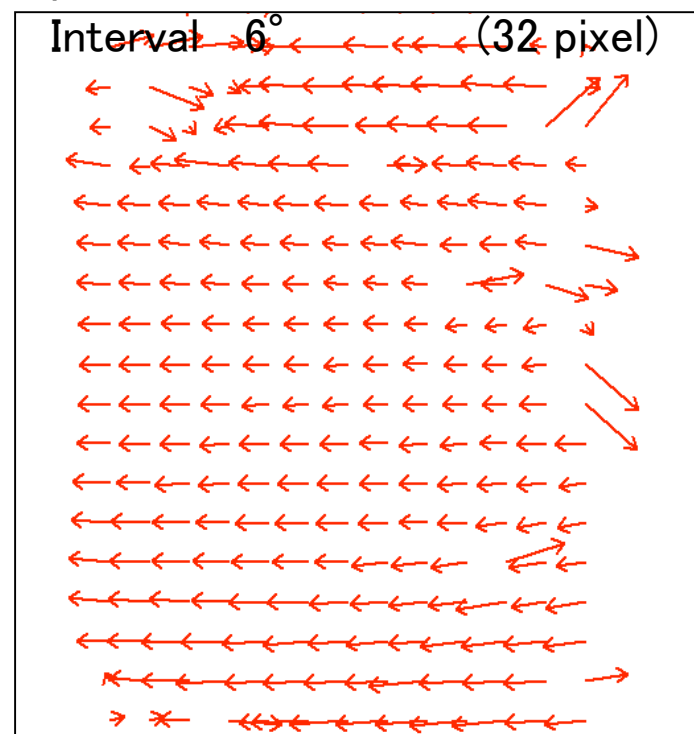
相互相関を用いた特徴追跡



相互相関を用いた雲の特徴追跡



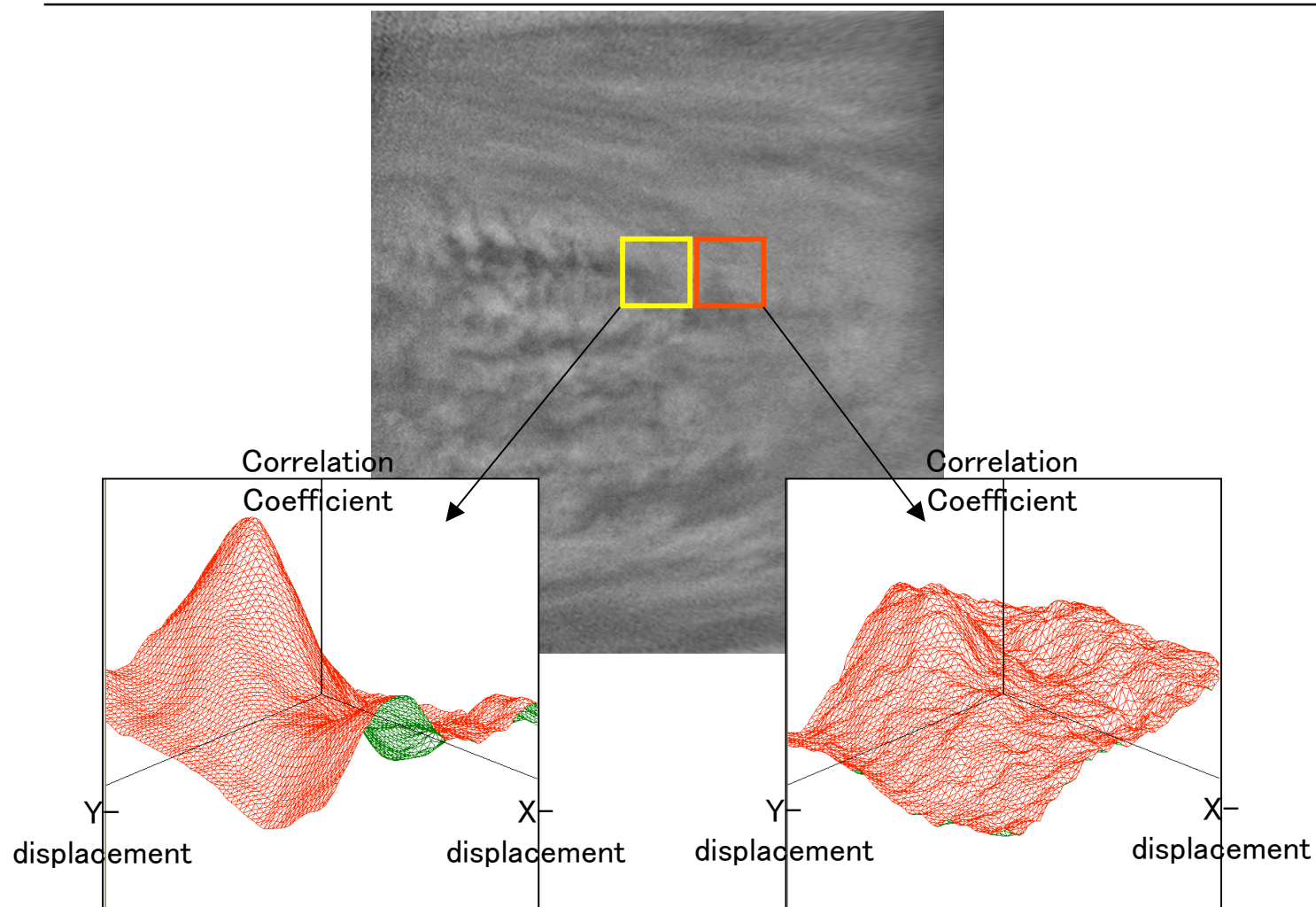
Template $12^\circ \times 12^\circ$ (64x64 pixel)



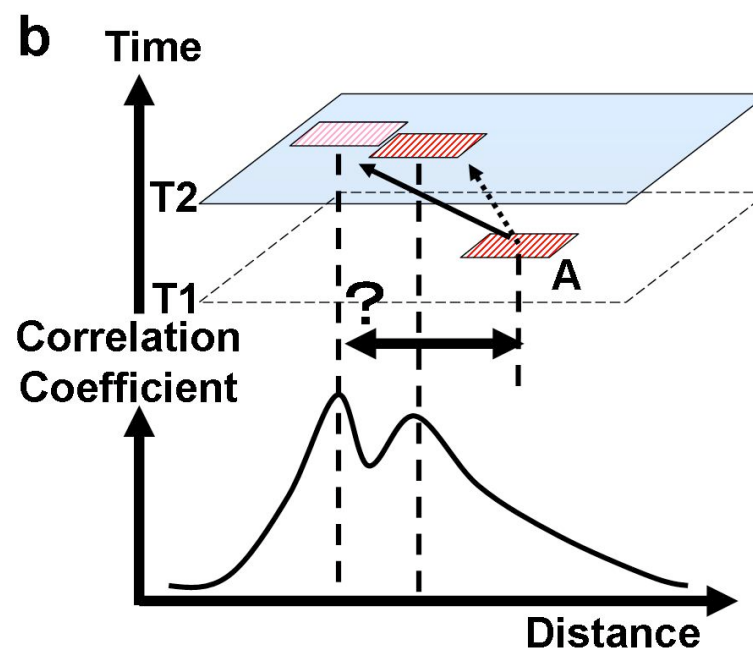
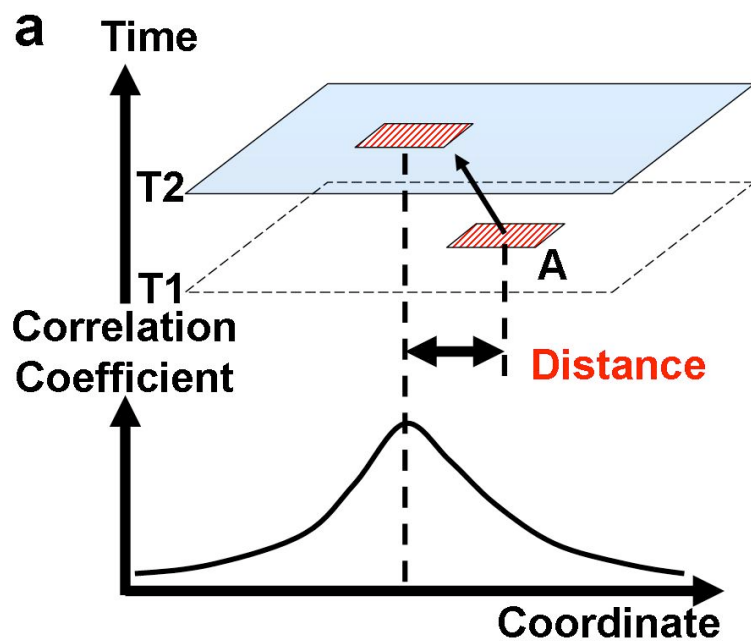
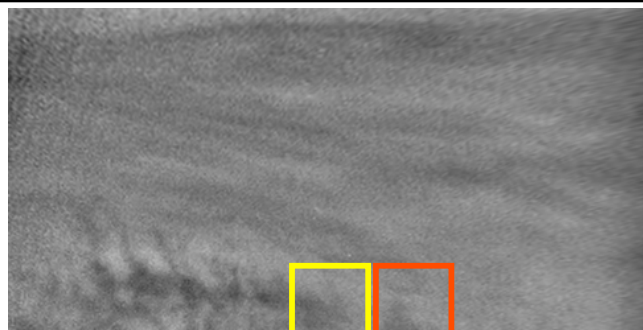
誤ベクトル→排除

- ・基準が観測者に依存
- ・風速データに多量の欠損

相互相関を用いた雲の特徴追跡

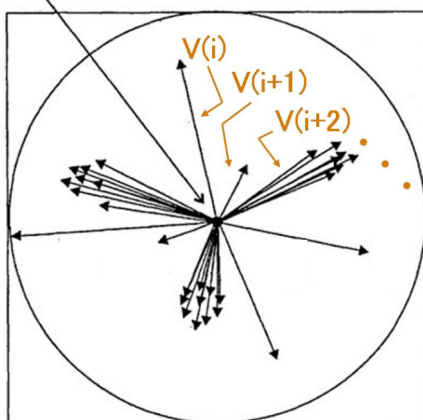


相互相関を用いた雲の特徴追跡

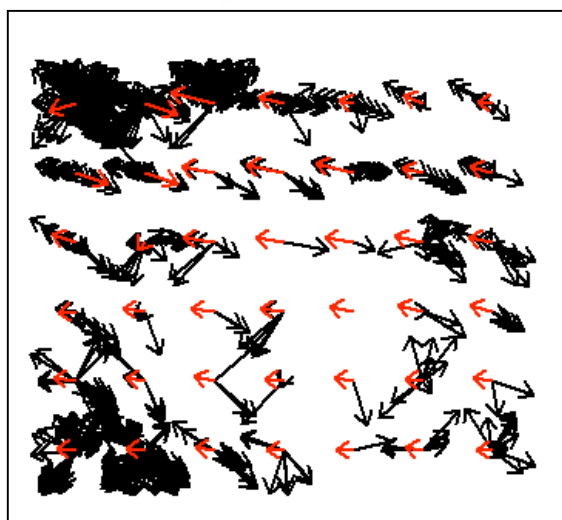


相互相関を用いた雲の特徴追跡

Centre of Template



Correlation Surface



ピークセレクションによる誤ベクトルの

修正

複数の隣接
テンプレート
に対して実
行

隣接テンプレ
ートのすべての
ベクトルと比較

隣接テンプレート
におけるベクトル

$$vcc(i) = \sum_n \sum_k \left\{ pr(k) \cdot \exp \left(\frac{-|v(i) - v_n(k)|^2}{\sigma^2} \right) \cdot \frac{g}{d_n} \right\}$$

隣接テンプレートにおける
各ベクトルの相関係数

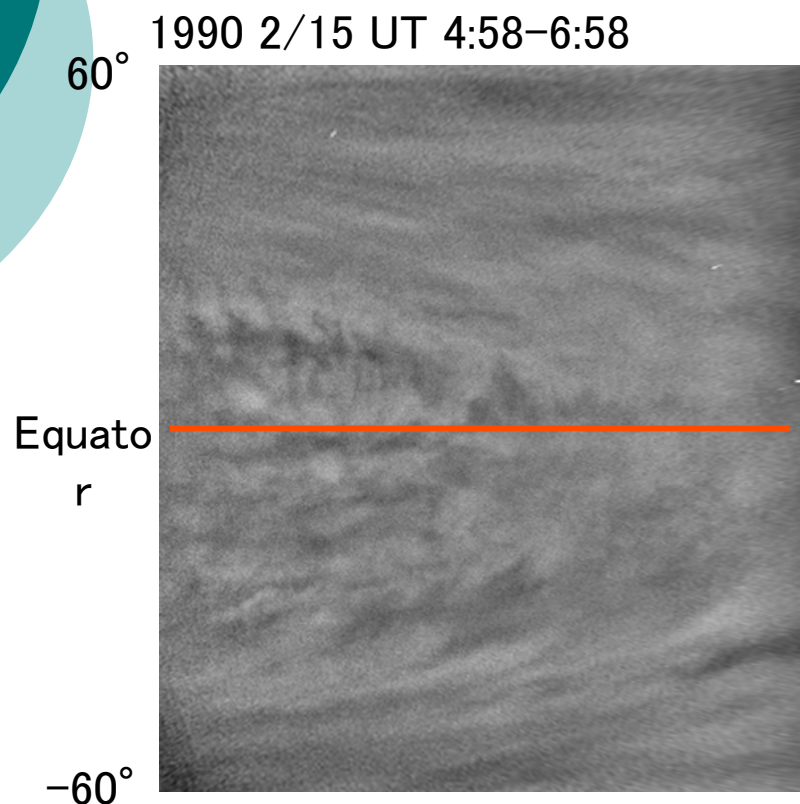
比較する隣接テンプレ
ートまでの距離

σ, g : 定数係数

[Qing, 1995, Young et
al., 2006]

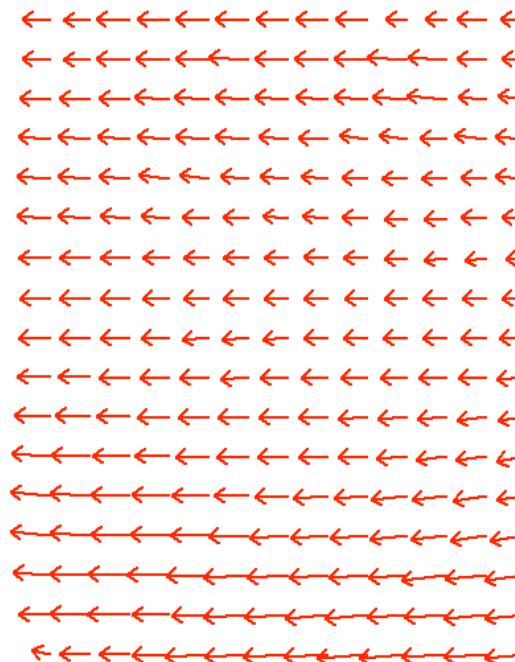
得られた $vcc(i)$ が最大となるベクトル $v(i)$ を
よりもっともらしいベクトルとして採用

相互相関を用いた雲の特徴追跡



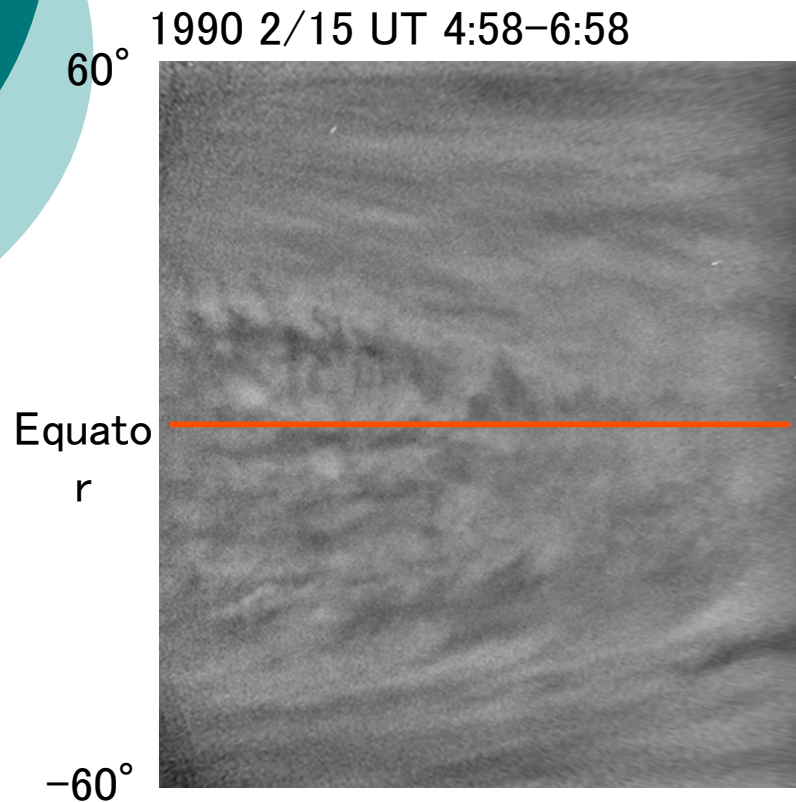
Template $12^\circ \times 12^\circ$ (64x64 pixel)

Interval 6° (32 pixel)

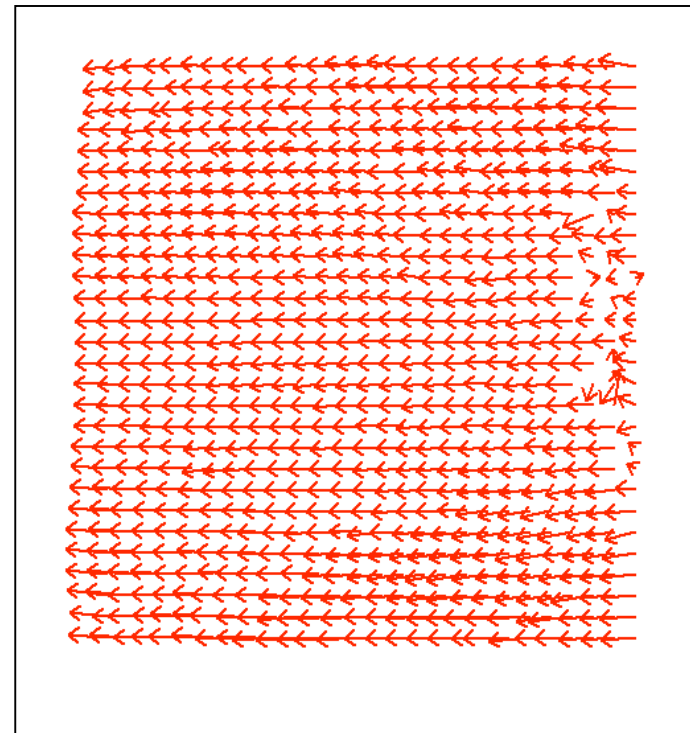


- ・より小サイズのTemplateへ適用
- ・信頼度・誤差評価へ

相互相関を用いた雲の特徴追跡



Template $6^\circ \times 6^\circ$ (32x32 pixel)
Interval 3° (16 pixel)



- ・より小サイズのTemplateへ適用
- ・信頼度・誤差評価へ



まとめ/今後の展望

- サブピクセル単位での惑星中心の導出
→ 緯度・経度のマッピングに活用
- ピークセレクションを用いた誤ベクトルの修正
- マッピングの精度評価
- 推定ベクトルの信頼度/誤差評価法の検討
- 低いS/Nにも安定する風ベクトル推定法の構築