

Venus Express 紫外データを用いた 風速推定

(あかつき観測ブレーンストーミングにむけて)

堀之内 武・池川慎一

(北大地球環境)

論文: Ikegawa & Horinouchi (2015) *Icarus* 投稿中

- VEX VMC (Venus Monitoring Camera)
 - 365 (紫外), 513, 950, 1010 nm。各512x512 px
 - 20~30分に一回撮像（従来ミッションより高頻度）

研究目的:

- 一度に多数の画像を使ってデジタル雲追跡を改良できないか？

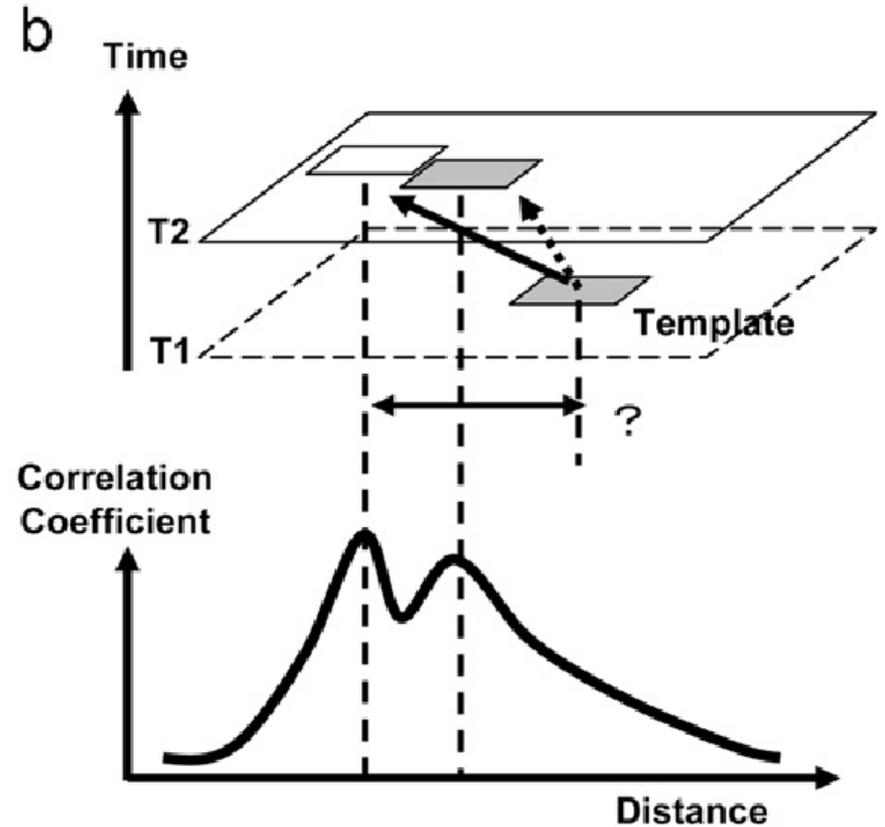
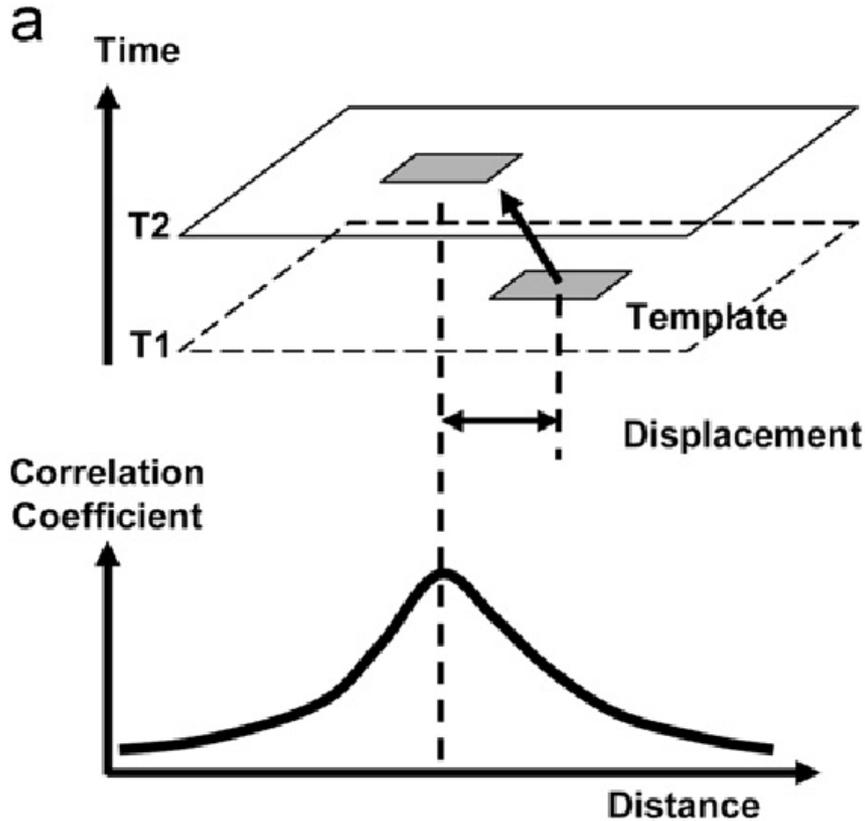
結論:

- できる／できた（誤推定減。精度向上）。

VMCデータ(v.2.0)使用時の前処理

- 使用画像は直下点分解能が40-20km (⇒直下点緯度66S-47S)に限定。(遠点は南極上空。観測は常に北上時のみ)
- 目で不良画像スクリーニング(ひどいのは使わない。その後ピクセル単位の抜けを自動処理で穴埋め。)
- 時間間隔が細かすぎる(10分未満)ときは間引く
- 光学補正(Kouyama et al 2013), 視線補正(Ogohara et al 2012; by リムフィッティング):「あかつきL3処理プログラム」使用
- 衛星 & 太陽天頂角に応じた輝度補正(Belton et al 1990)。(各々75°, 80°以上の場合のみ使用)
- 0.125°間隔で緯度経度格子化

相互相関法における誤推定



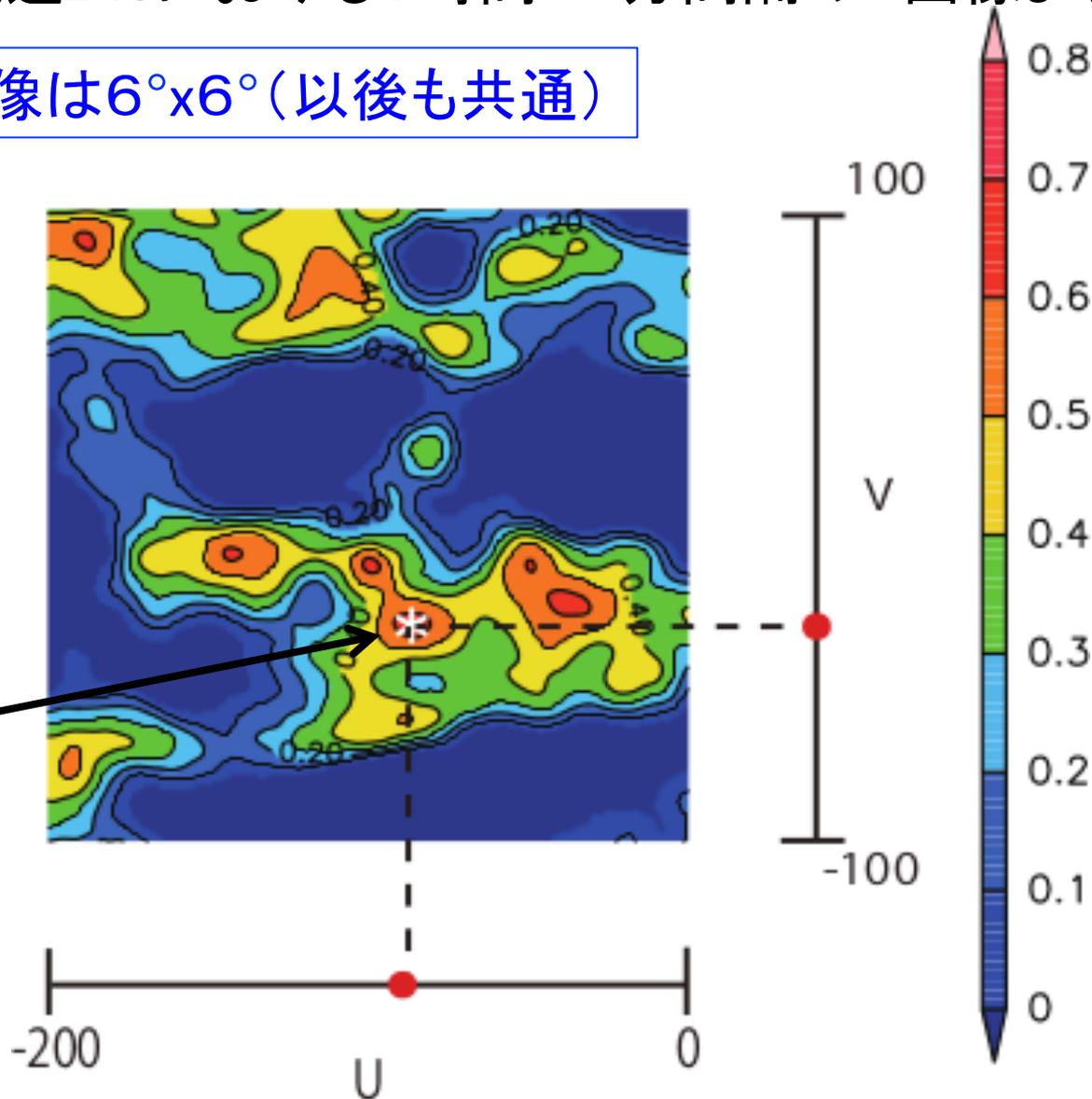
Kouyama et al. (2012) の模式図

移動先が一意に決まらない相関曲面の例

(VMC 軌道246における3時間20分間隔の2画像より)

テンプレート画像は $6^\circ \times 6^\circ$ (以後も共通)

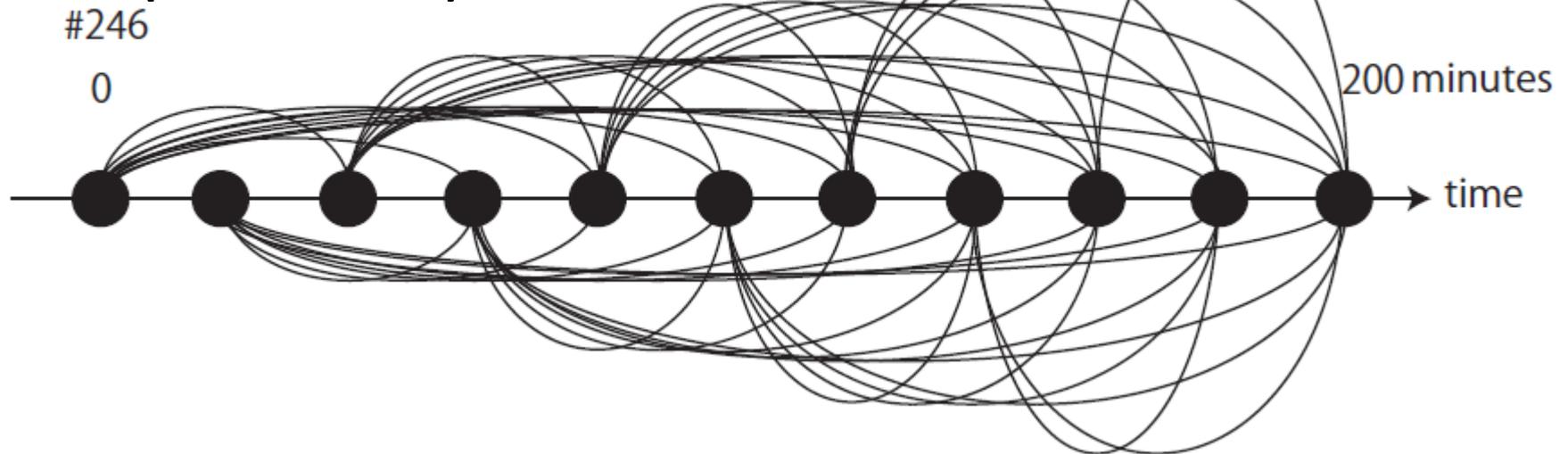
最大はここ。
実は誤り。



多画像を用いた推定

- (一定時間間隔(本研究では40分)以上の) 二画像を用いた相関曲面を網羅的に重ね合わせる。
 - 移動速度 (u,v) を揃えて重ねるのがポイント

#246 (約20分間隔)



$t_n + 40$

$t_n + 60$

$t_n + 80$

...

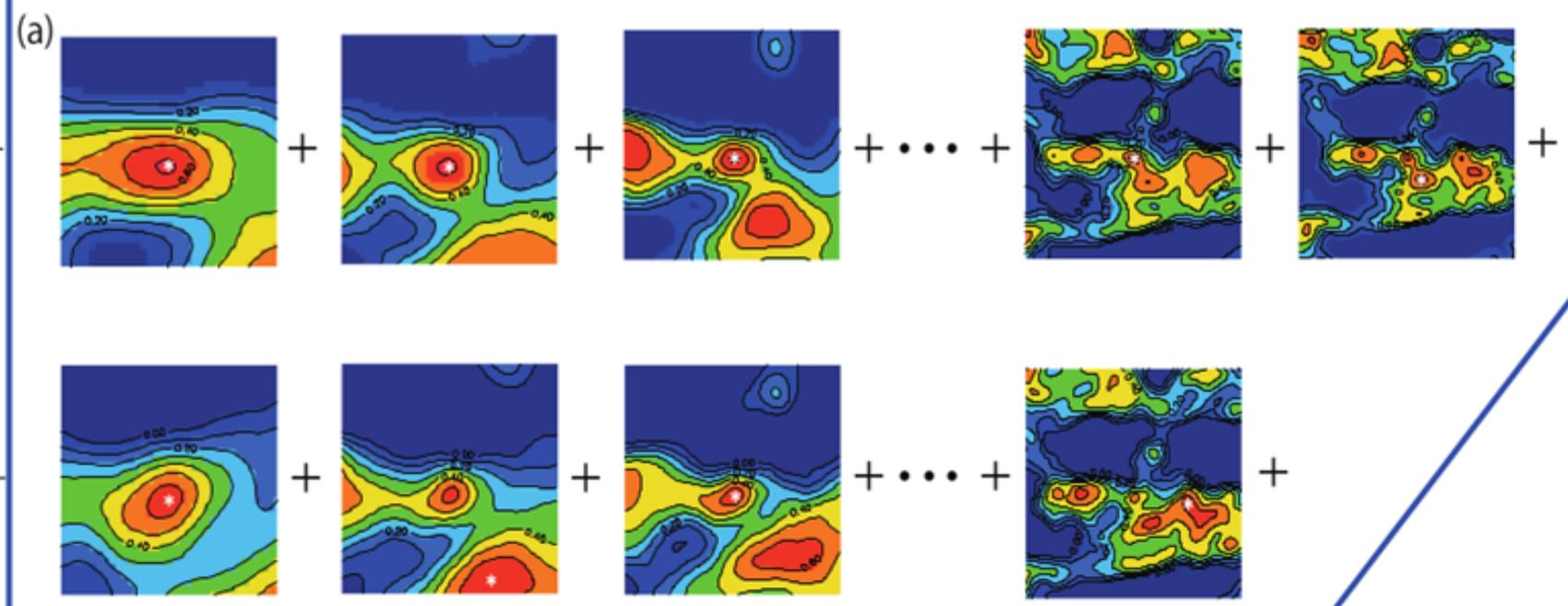
$t_n + 180$

$t_n + 200$

$t_n + k$

t_0

t_1

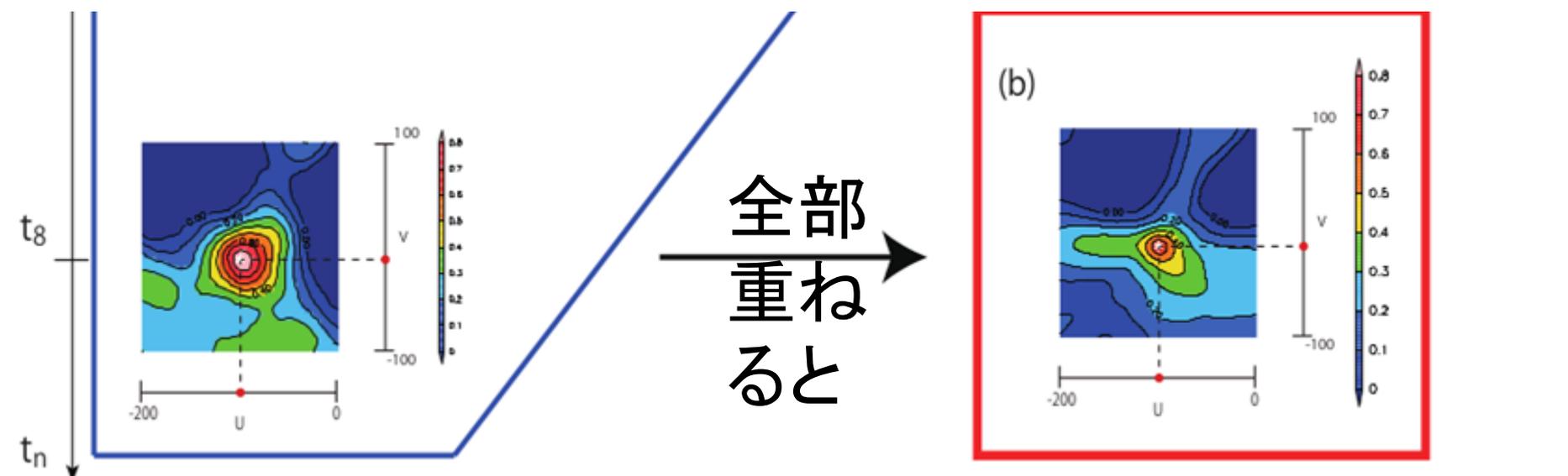
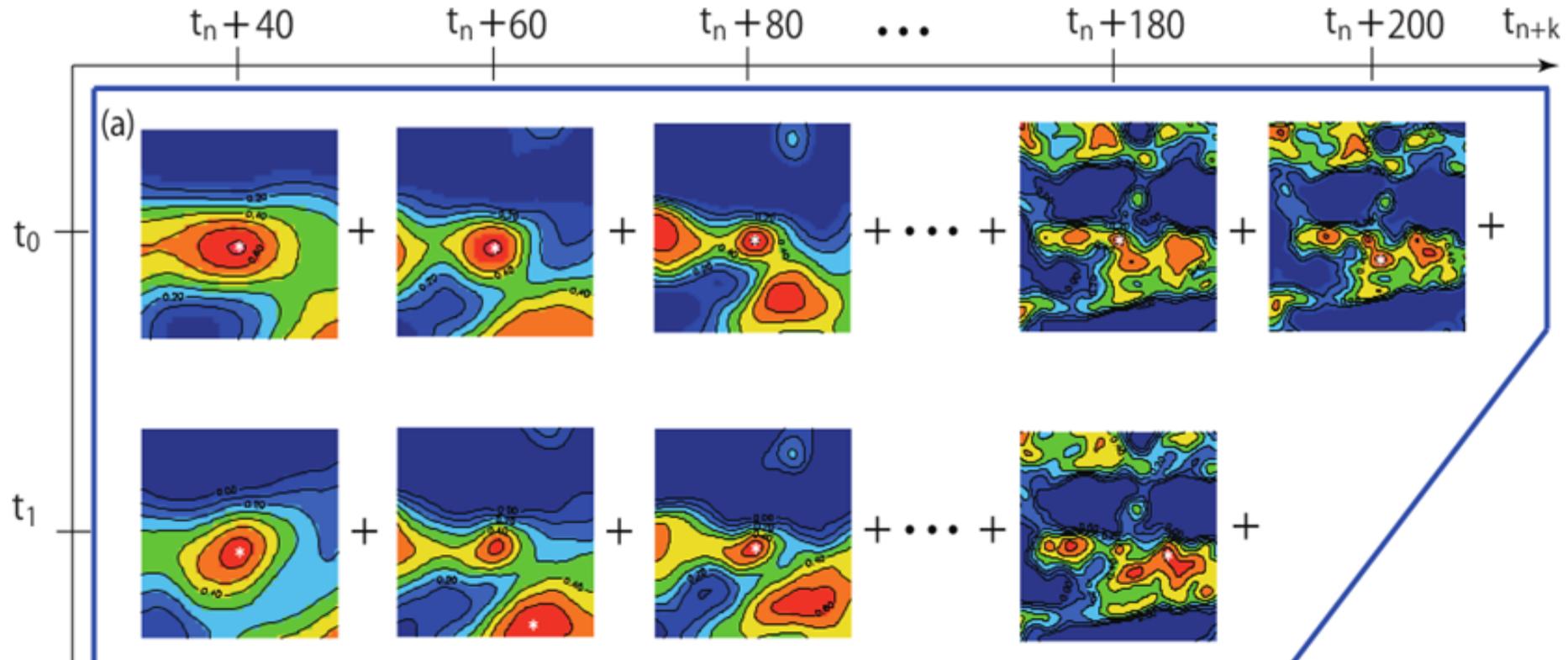


時間間隔大

初期時刻

⋮

⋮

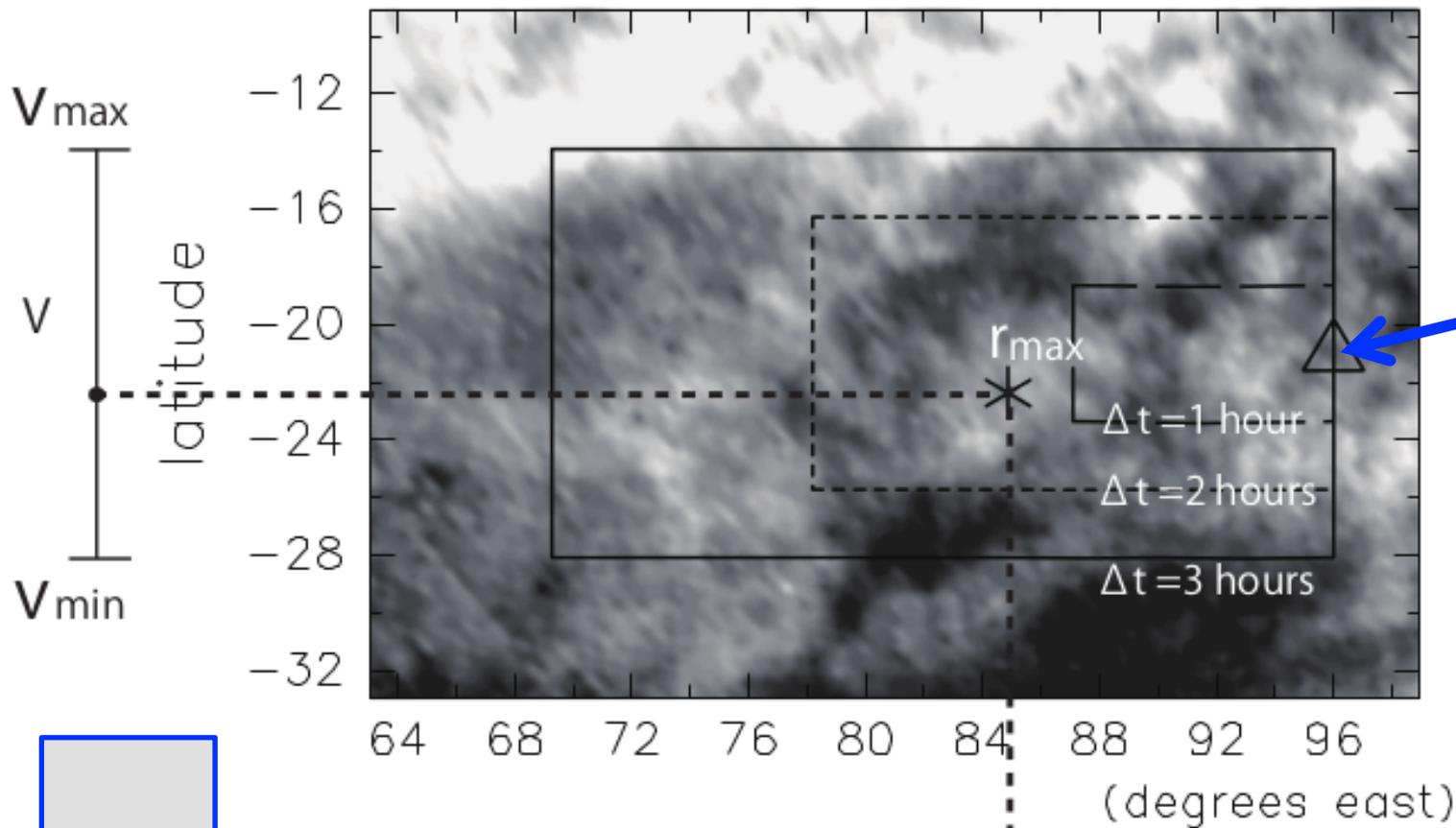


Δt 大 \Rightarrow 探索範囲大

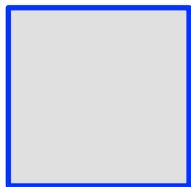
四角: Δt が1,2,3時間のときに中心をずらす範囲

(degrees north)

Search region



中心の初期位置



使用したテンプレート
画像サイズ: $6^\circ \times 6^\circ$

U_{min} | U | U_{max}

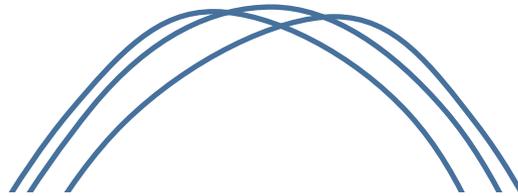
$\Delta t=3$ 時間のときの換算速度

重ね合わせで正しいピークが残る理由

- 時刻 $t \downarrow 0$ に位置 (x, y) と $(x+c, y+d)$ に似た模様 (それぞれ A, B とする) があり, (近くなので) 共に速度 (u, v) で流されるとする。
- A at $t \downarrow 0$ と B at $t \downarrow 0 + \Delta t$ の相関 \rightarrow 速度 $(u + c/\Delta t, v + d/\Delta t)$ にピーク
 - $c=d=0$ でなければ (「偽」のマッチなら), ピークの位置は Δt により変化: 重ねあわせで消えやすい。

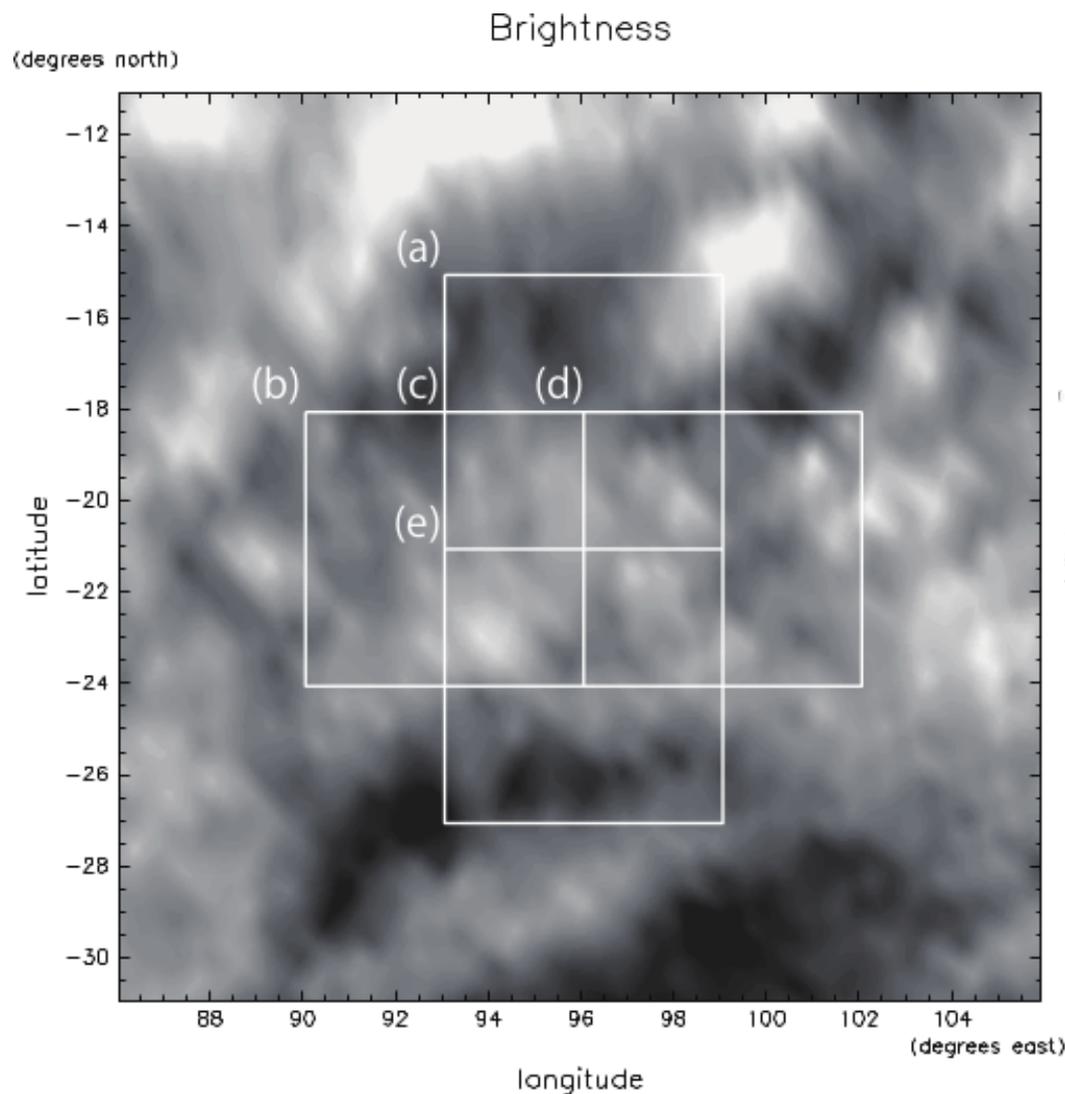
重ね合わせで精度向上も期待できる理由

- ノイズや離散化によるピークのランダムなずれは、重ねあわせで減少するから。



相関曲面の「移動平均」

- 所望の空間分解能がテンプレート画像サイズより粗い場合。
- 相関曲面を重ね合わせる。(→風速導出)
 - 空間分解能と精度のトレードオフ
 - 以下で示す結果にはこれも使用



精度・誤差評価

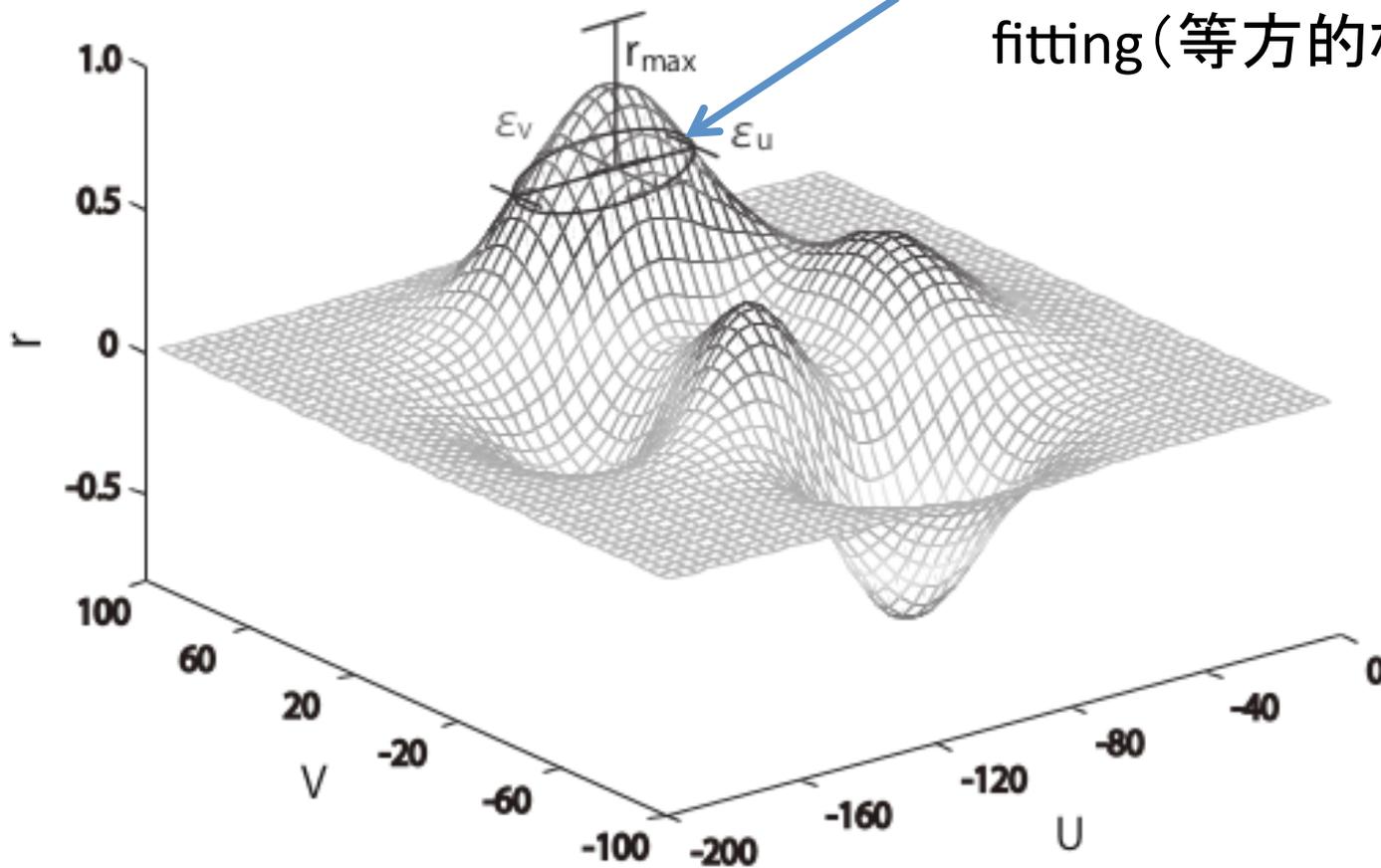
- それがないと、「どこまで」、「なにが」できるかわからない。
- 水平風速の波数スペクトルはredと考えられる ⇒ **実質的な分解能は精度如何** (得られたデータの格子間隔でなく)
- 雲模様によって、追跡可能性は(∴精度も)まちまち
 - **各ベクトルの信頼度が知りたい** (代表的な精度だけでなく)
- これまでの研究は標準偏差 (例えば経度平均にかかる) → 誤差のほうが実際の変動より十分大きい場合はいいが... (我々は物理的擾乱がどれくらいなのか知りたい)

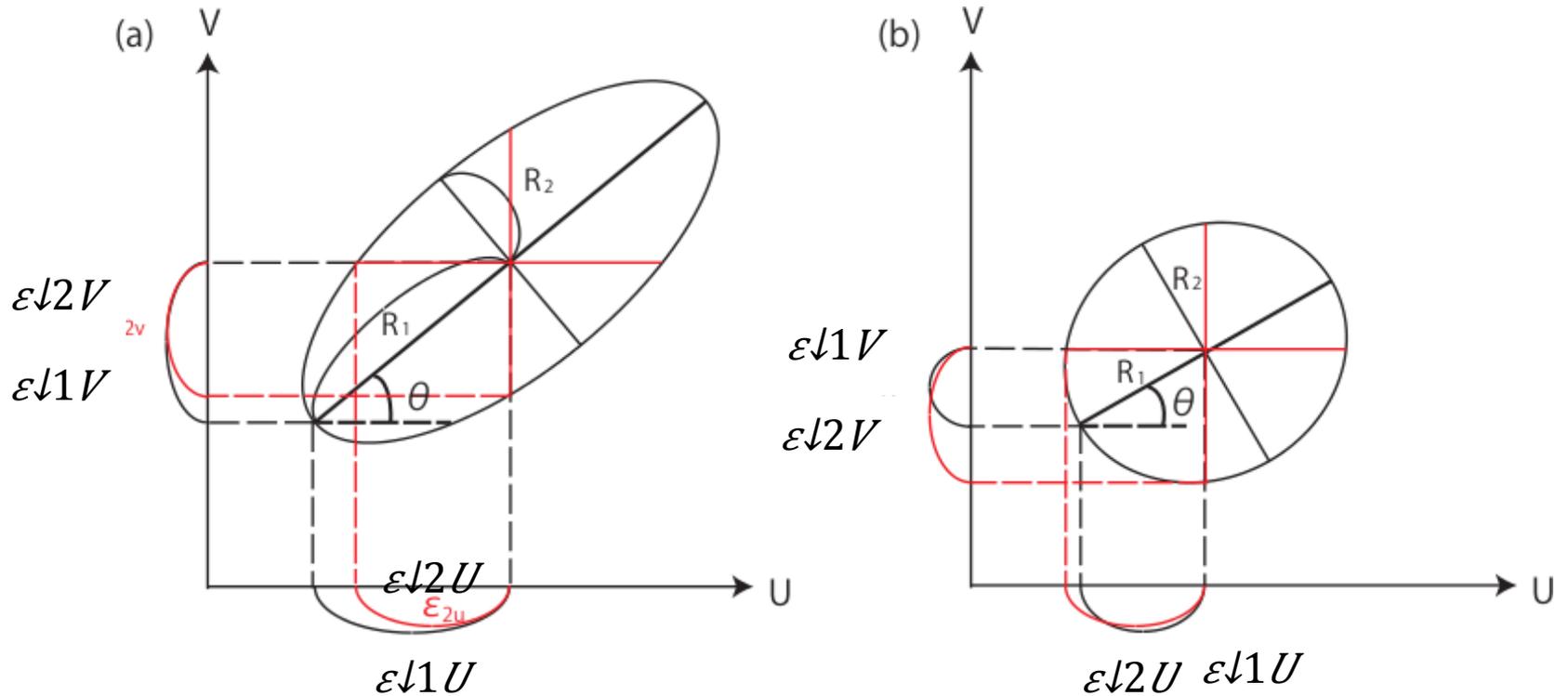
精度評価1

- 相関係数の信頼下限を利用(元のアイデアは村地ら:修論)
- 本研究では
 - 実質的(effective)な自由度を算出して使う(重ね合わせ対応)
 - 筋模様にも対応(雲が筋→相関曲面も筋)
 - 注:完全な筋なら流速は直交成分しか求まらない

信頼下限より上を:

1. 楕円放物面fitting (筋対応)
2. U軸, V軸に沿って放物線fitting (等方的な場合対応)

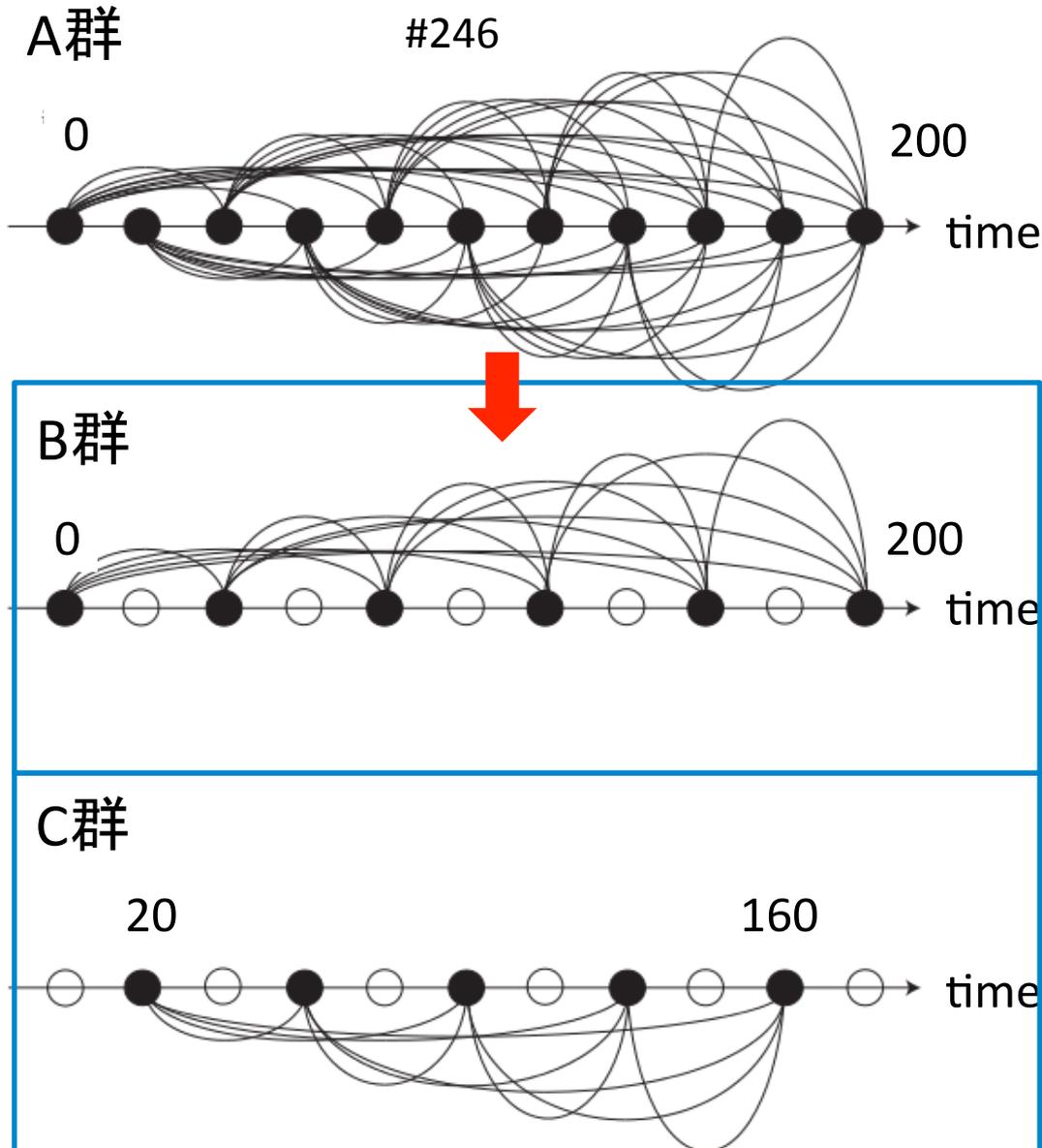




$\epsilon \downarrow 1U, \epsilon \downarrow 1V, \epsilon \downarrow 2U, \epsilon \downarrow 2V$ のうち最も悪いのを目安 ϵ として採用

あくまで相関係数の信頼区間による: **風速の精度ではない**。
 しかし, ϵ 大なら「移動先を絞りにくい状況」なので, 相対的に
 精度が低いと考えられる。

精度・誤差評価2



- 推定に用いる画像群 (A)を2つ(B,C)に分割し, それぞれから速度導出。
 - 推定B,Cはデータの的には独立 → その差のrmsから誤差推定。

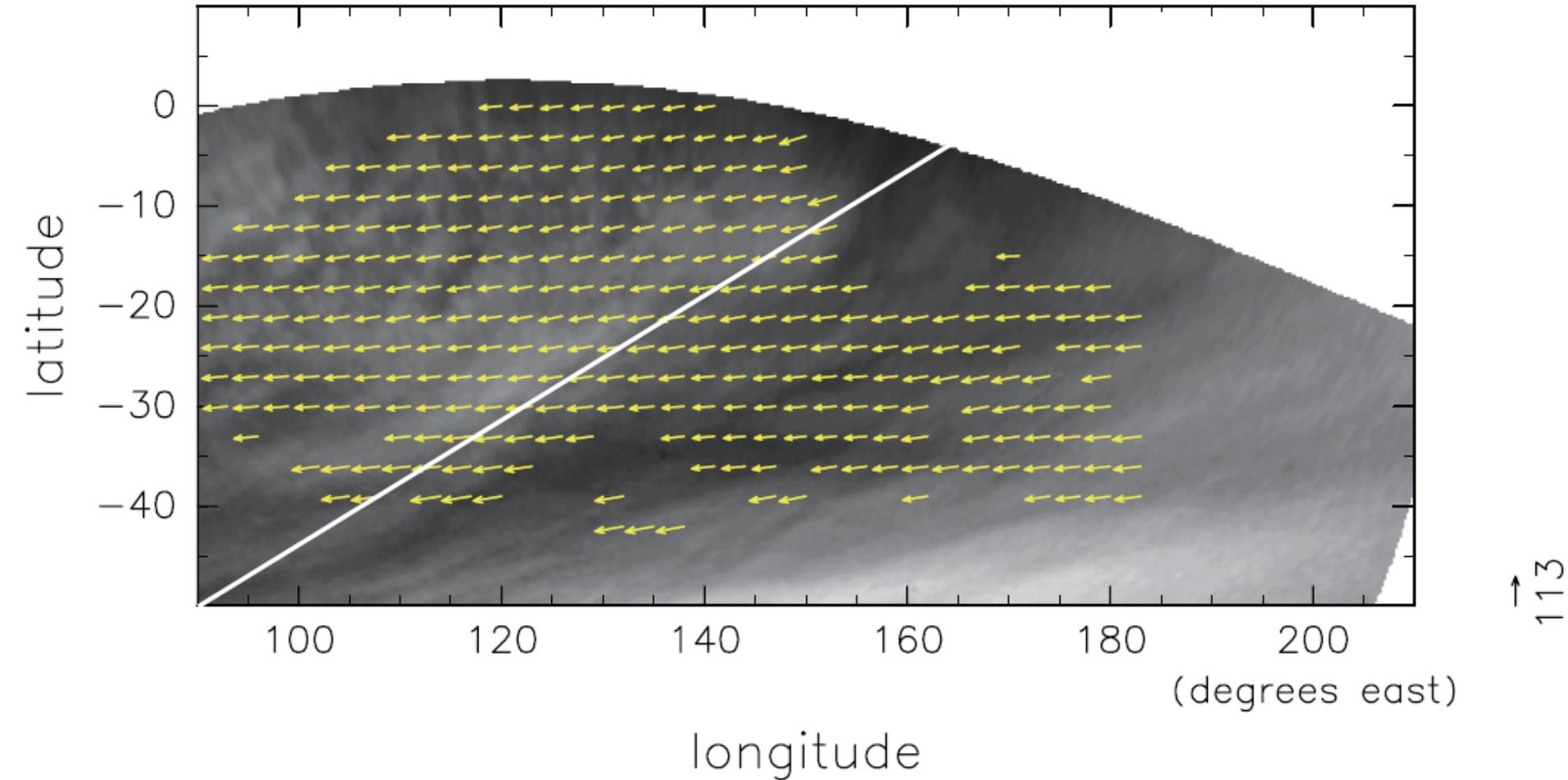
$$\chi(\lambda_a, \phi_b) \equiv 1.96 \left(\frac{P}{P_B} + \frac{P}{P_C} \right)^{-\frac{1}{2}} \sigma_{BC}(\lambda_a, \phi_b)$$

P, P_A, P_B はA,B,C群のペア数

「風速」導出例 (軌道246)

(degrees north)

No. 246: Brightness & CMVs (U, V)

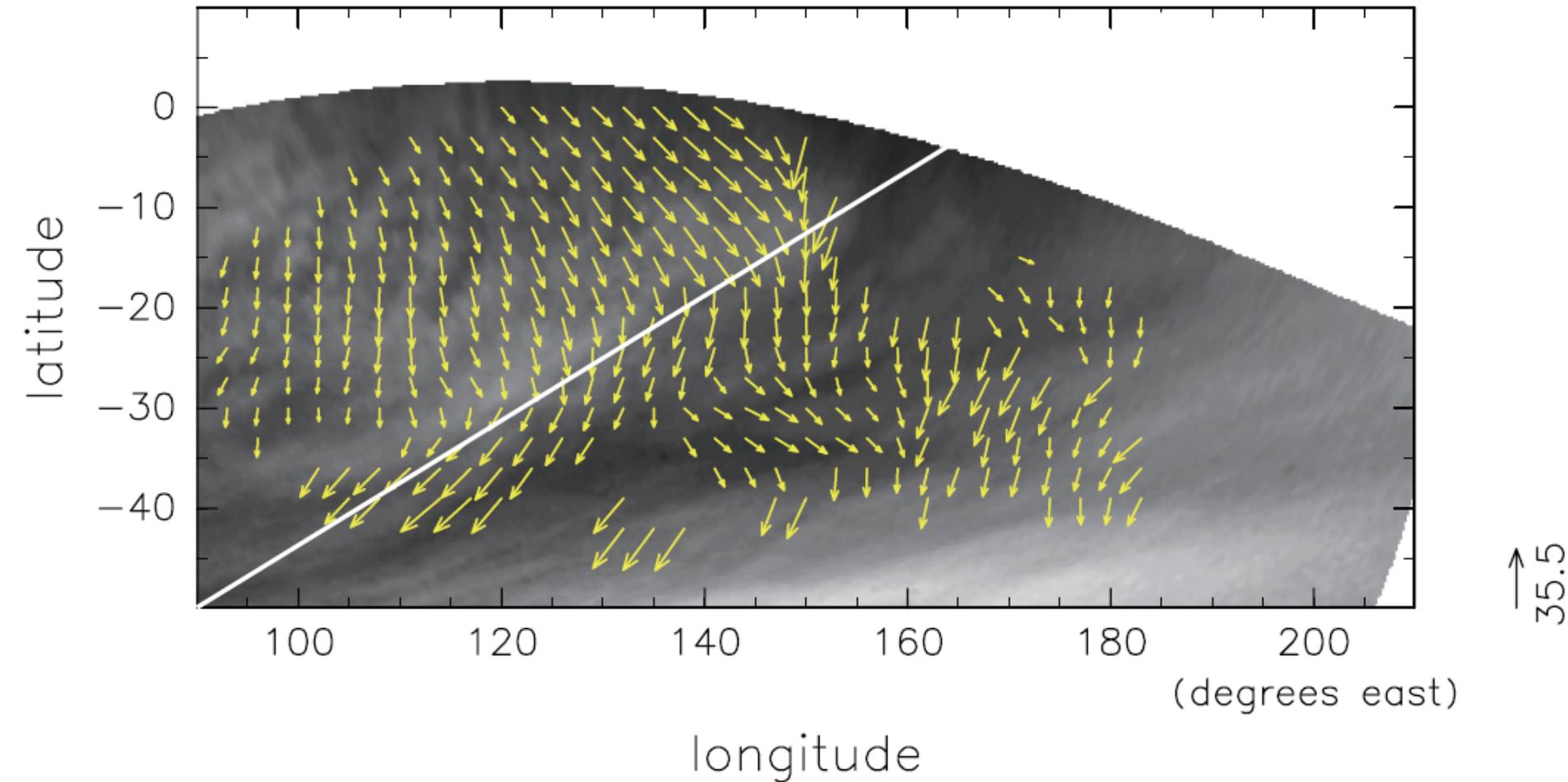


精度・誤差評価スクリーニング ($r_{\max} \geq 0.6$, $\varepsilon < 20$ m/s, $\chi < 10$ m/s) をパスしたもののみ表示

一様流(90,0) m/sを加えると

(degrees north)

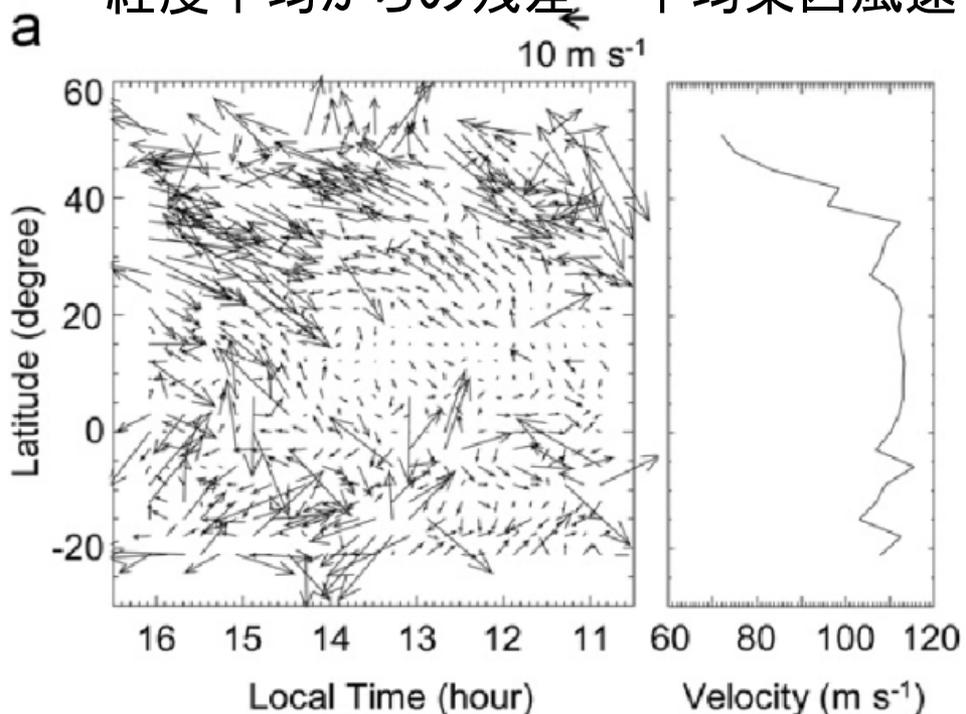
No. 246: Brightness & CMVs (U+90, V)



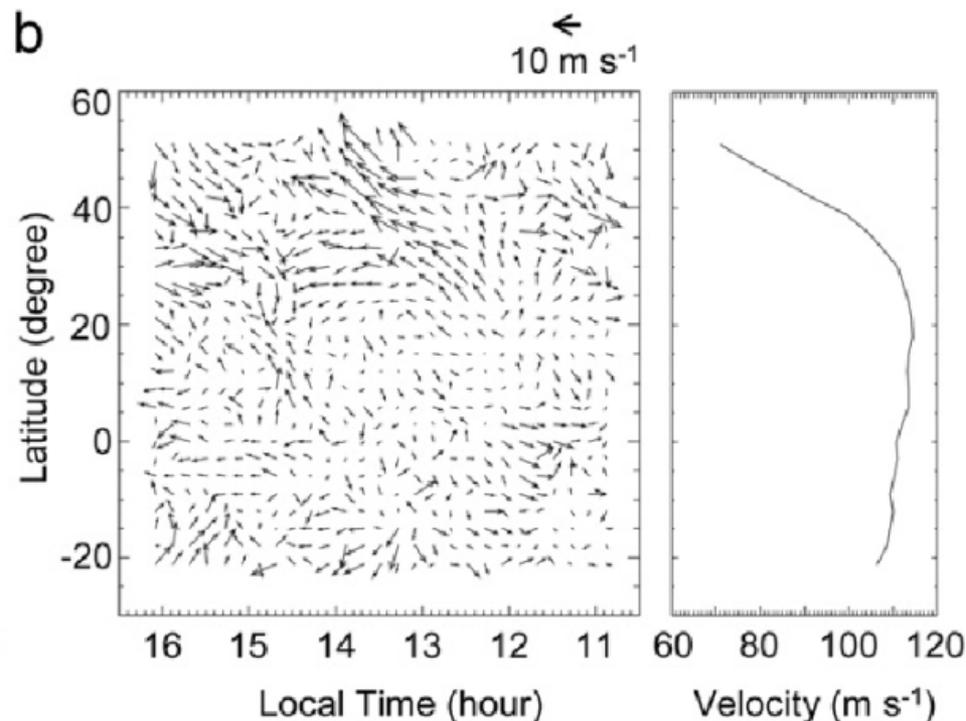
精度・誤差評価スクリーニング ($r_{\max} \geq 0.6, \varepsilon < 20 \text{ m/s}, \chi < 10 \text{ m/s}$) をパスしたもののみ表示

参考：Kouyama et al (2012) Galileo撮像(紫)から導出された風速の例 (VEX使用研究ではスナップショットはないよう)

経度平均からの残差 平均東西風速



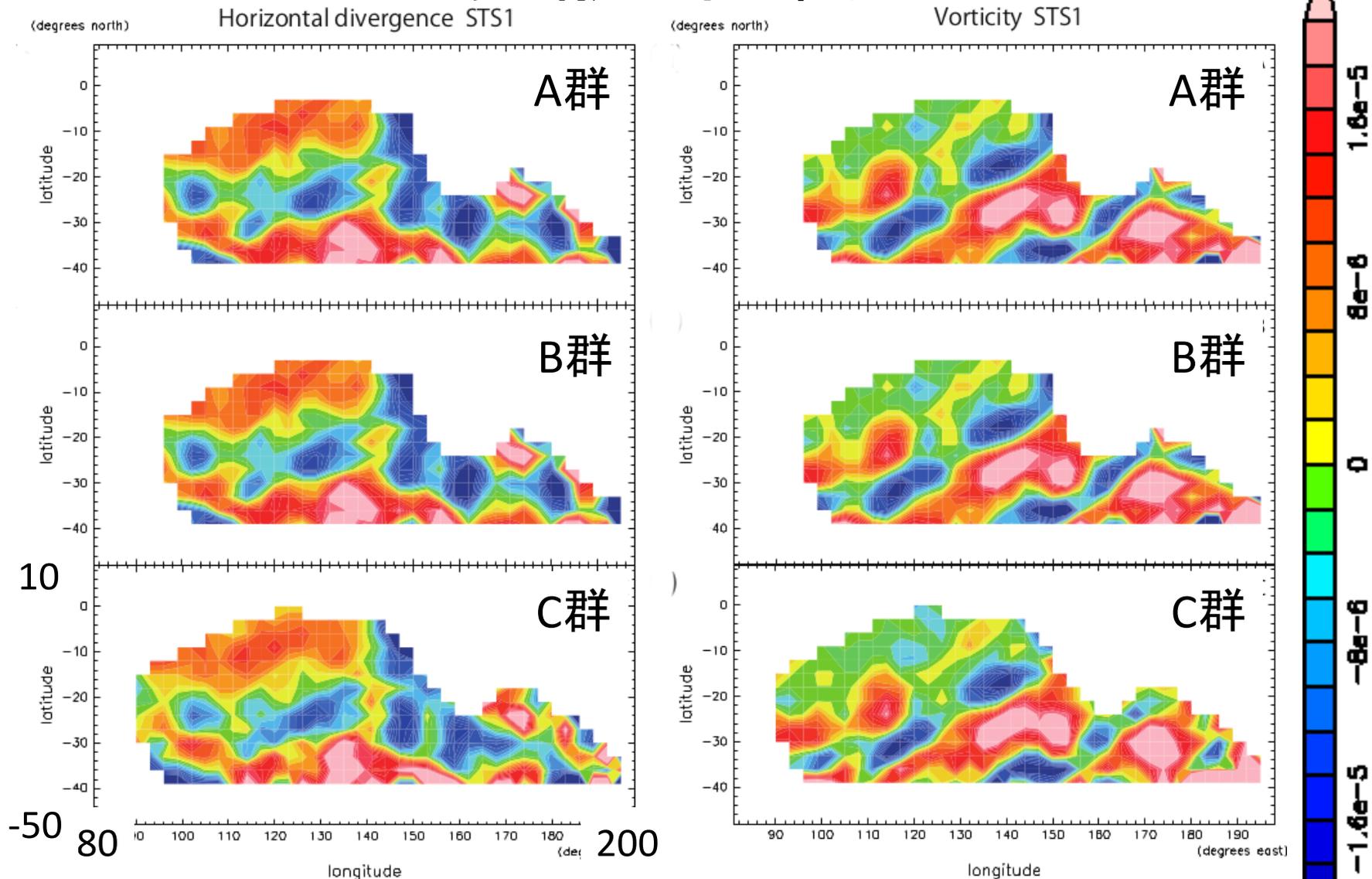
r_{\max} をそのまま採用した場合



周囲との比較で採用ピークを選んだ場合

r_{\max} のみでスクリーニング

発散と回転



– 小さな特徴が強調されるにも関わらず良い一致。
(だからすべて信用できるわけではないが。)

精度誤差評価指標まとめ(スクリーニング後, 軌道243-267)

二群の差による誤差評価 χ

	low latitude		mid latitude	
	rms value	median value	rms value	median value
wind velocity (χ)	2.4 m s ⁻¹	1.5 m s ⁻¹	3.0 m s ⁻¹	2.0 m s ⁻¹
horizontal divergence (χ_δ)	7.7×10^{-6} s ⁻¹	2.9×10^{-6} s ⁻¹	1.8×10^{-5} s ⁻¹	6.4×10^{-6} s ⁻¹
vorticity (χ_ζ)	7.8×10^{-6} s ⁻¹	3.0×10^{-6} s ⁻¹	1.6×10^{-5} s ⁻¹	5.3×10^{-6} s ⁻¹

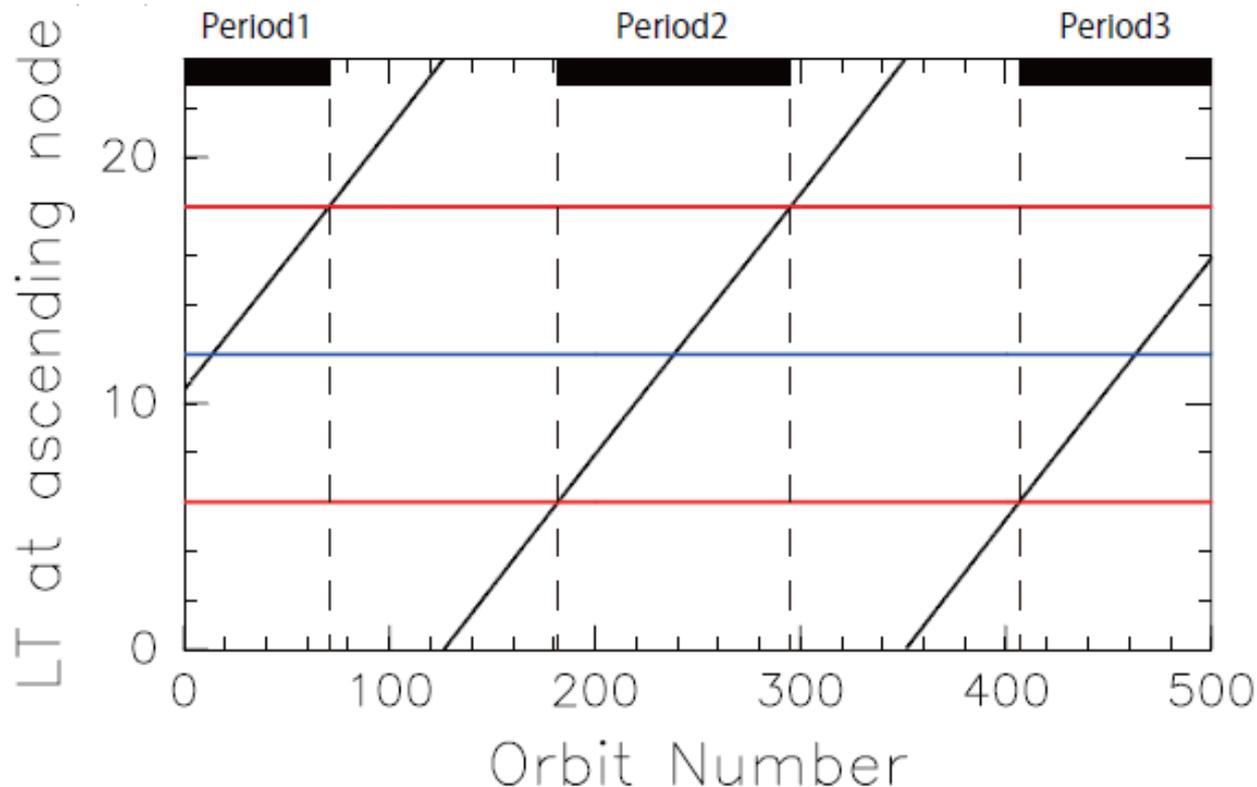
統計的精度評価 ε

accuracy evaluation	low latitude		mid latitude	
	rms value	median value	rms value	median value
statistical accuracy	9.4 m s ⁻¹	7.8 m s ⁻¹	14.8 m s ⁻¹	15.0 m s ⁻¹

- 全般に $\chi < \varepsilon$ 。
- χ で評価していいなら, 典型的な精度は 2 m/s。(目でマニュアルトラッキングを試みるとそこまで区別できない。目の限界か, χ が良すぎるか..)
- 低緯度(EQ-30S)のほうが中緯度(30S-45S)より良好
- χ では, メディアン < rms (∵ 値が大きいのが少数:はずれ値)

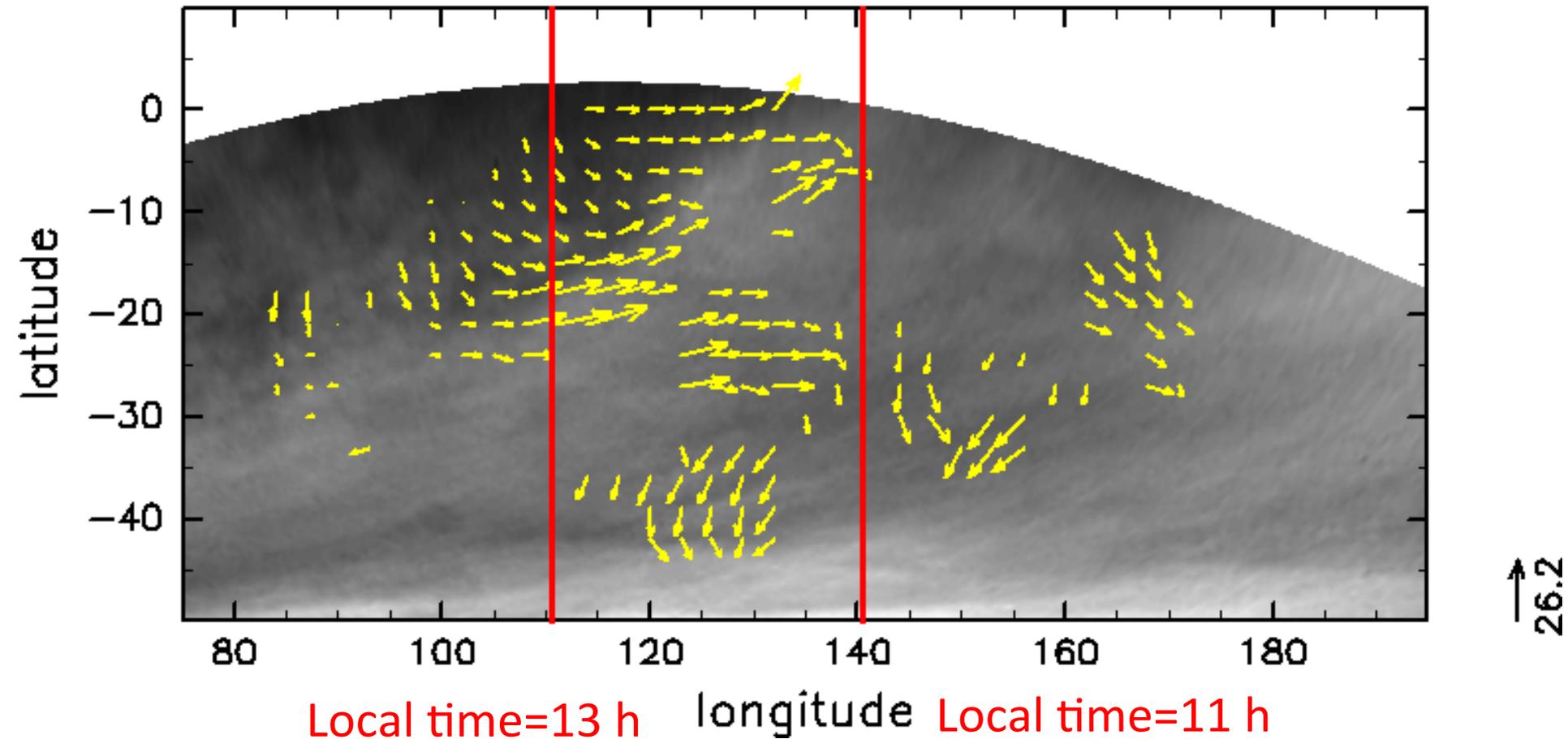
200番台の結果(次頁より)

- 軌道243-267までの10ケース
 - 他の軌道では [使用できる画像<4枚] なため導出不能
 - この10ケースでは 8-11 枚使用
 - Caveat(主観検討より): χ は小さくても明らかにまずい(χ が示唆するより大きく間違ってると思われる)場合が所々ある。



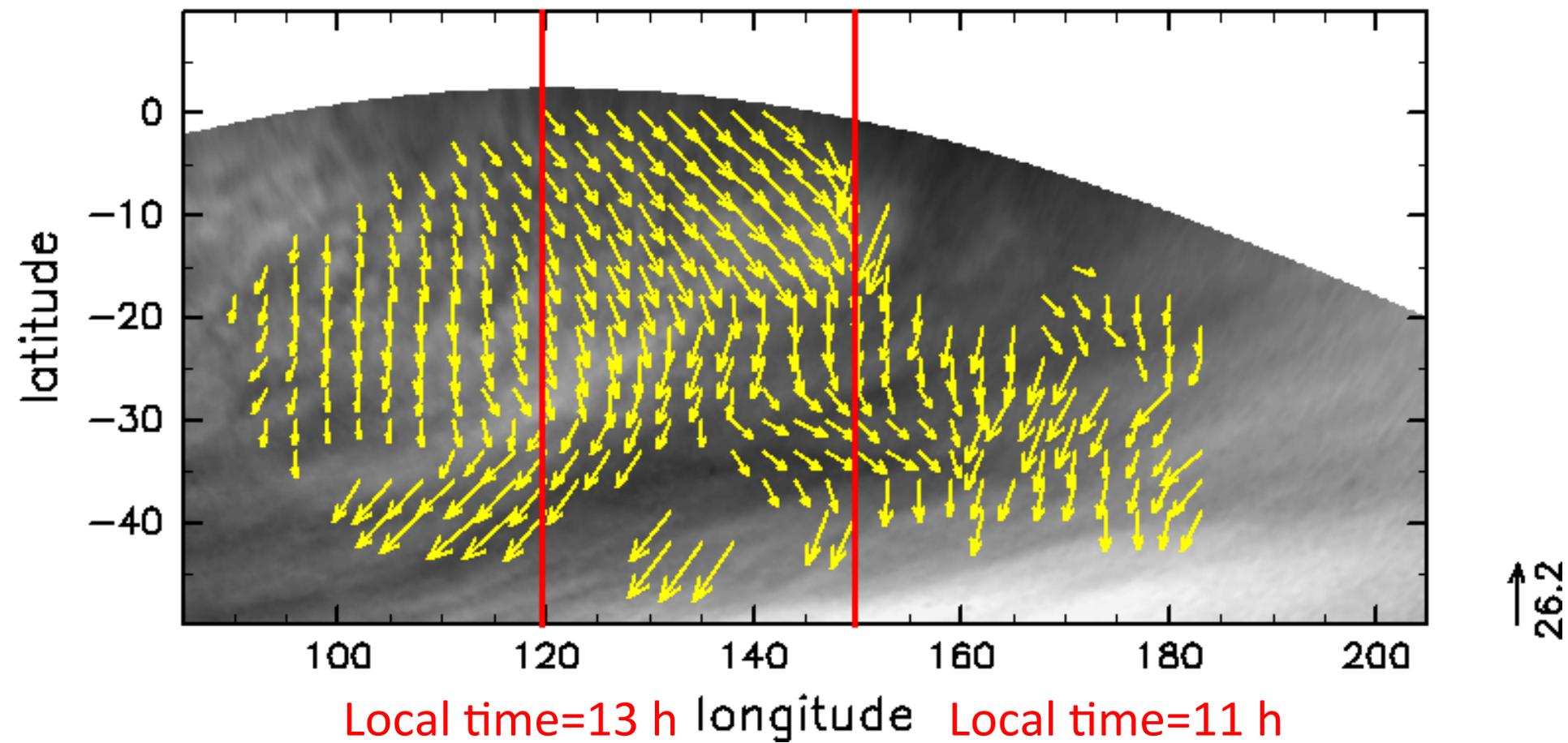
風速の水平分布(#243)

(a) No. 243 Brightness & (U+90, V) STS123



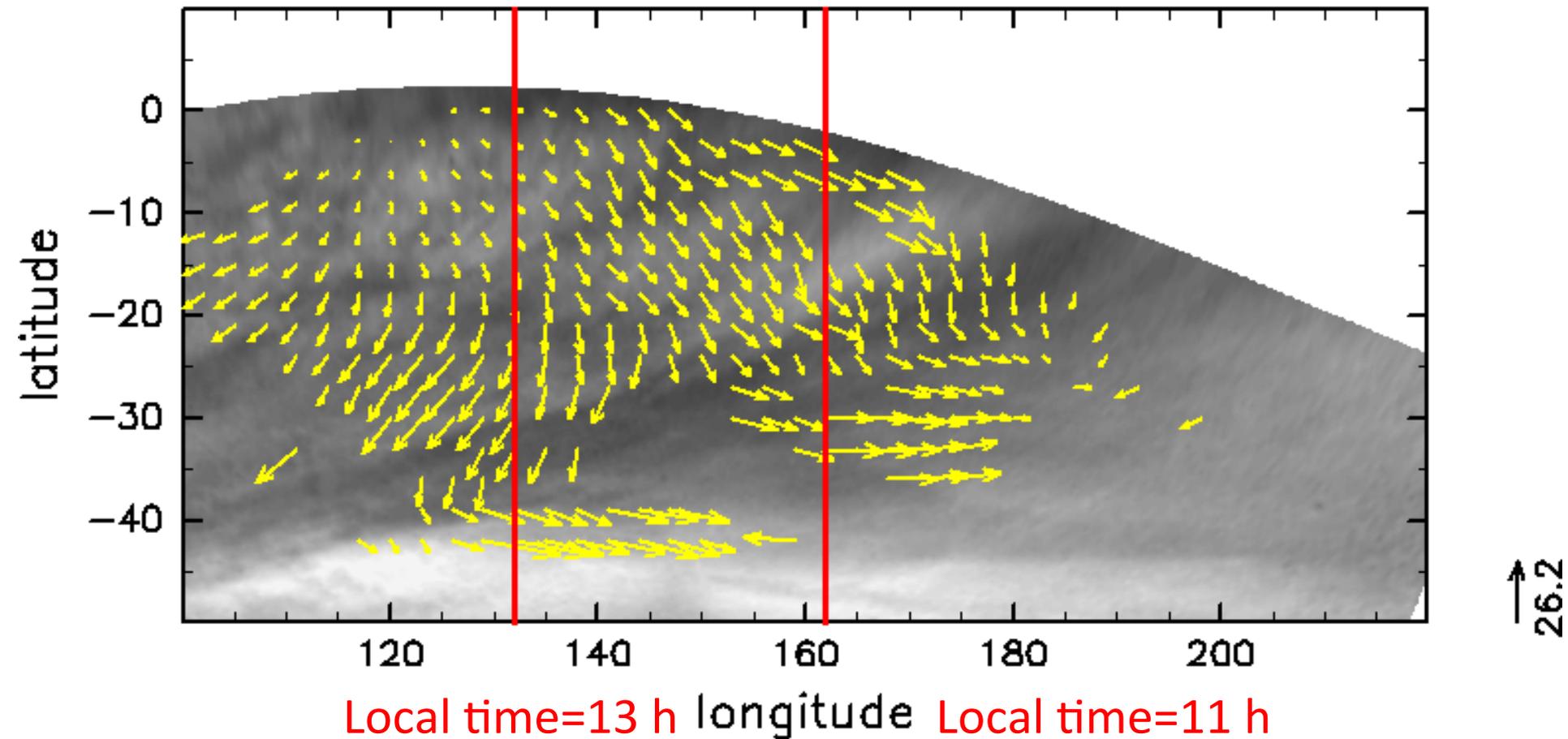
風速の水平分布(#246)

(b) No. 246 Brightness & (U+90, V) STS123



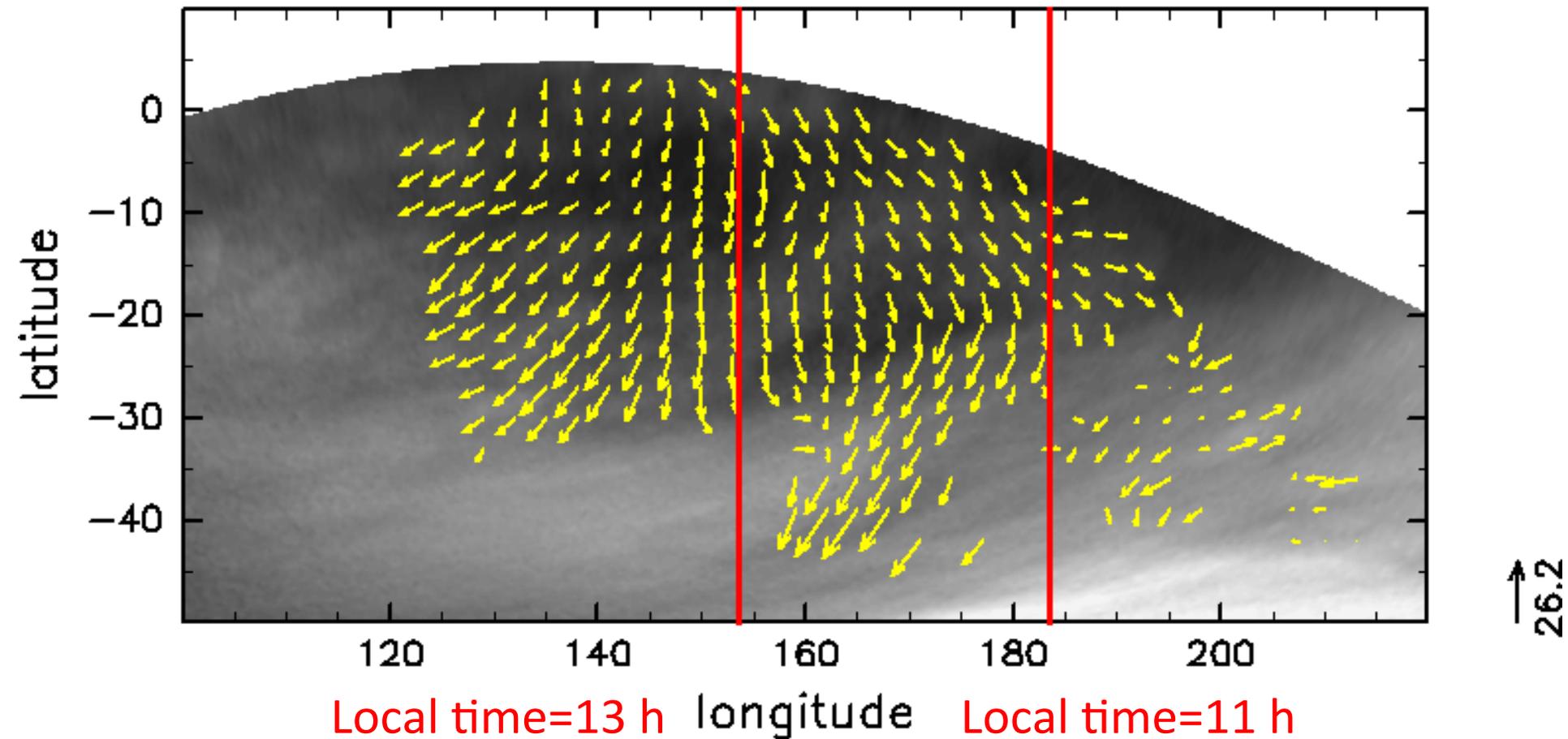
風速の水平分布(#250)

(c) No. 250 Brightness & (U+90, V) STS123



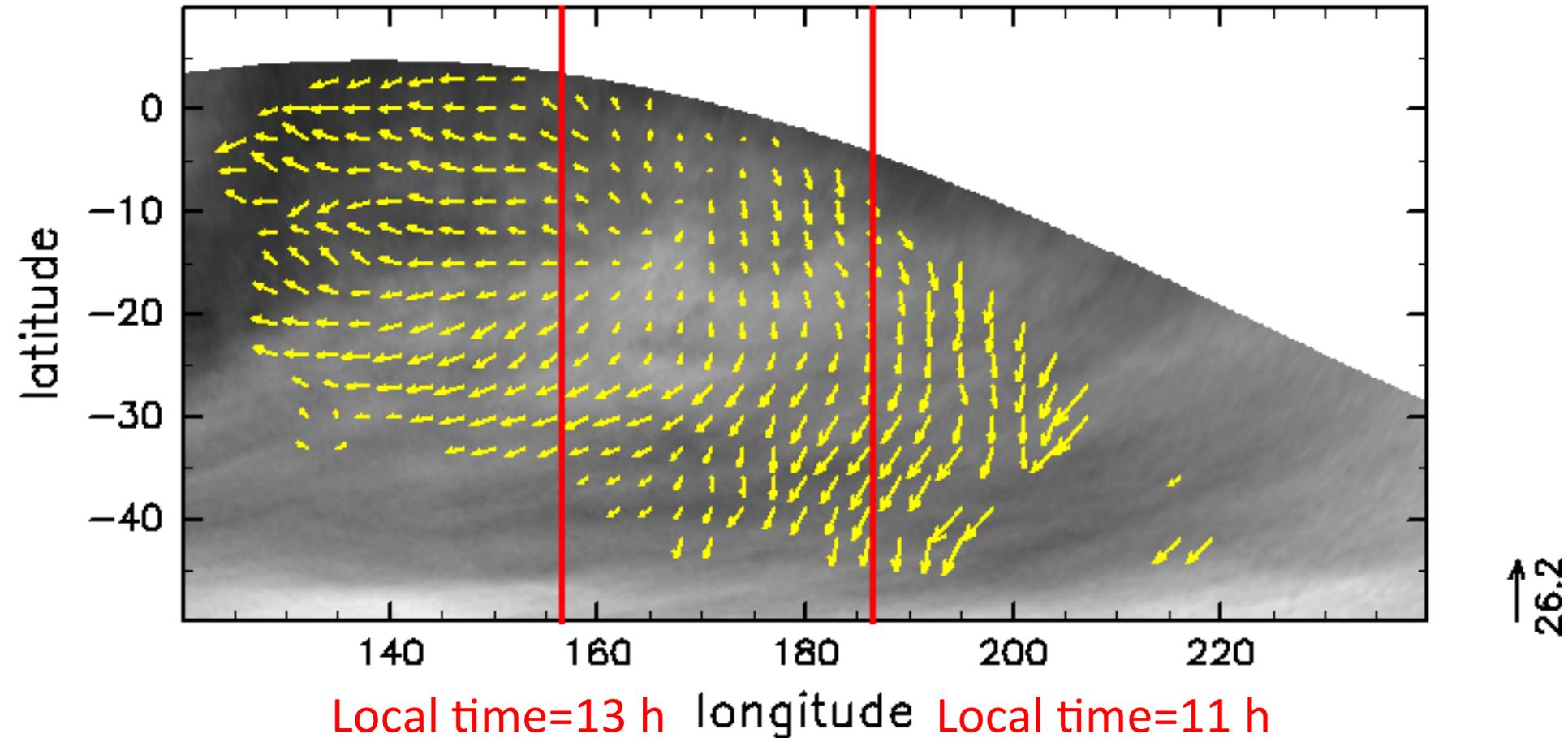
風速の水平分布(#257)

(d) No. 257 Brightness & (U+90, V) STS123



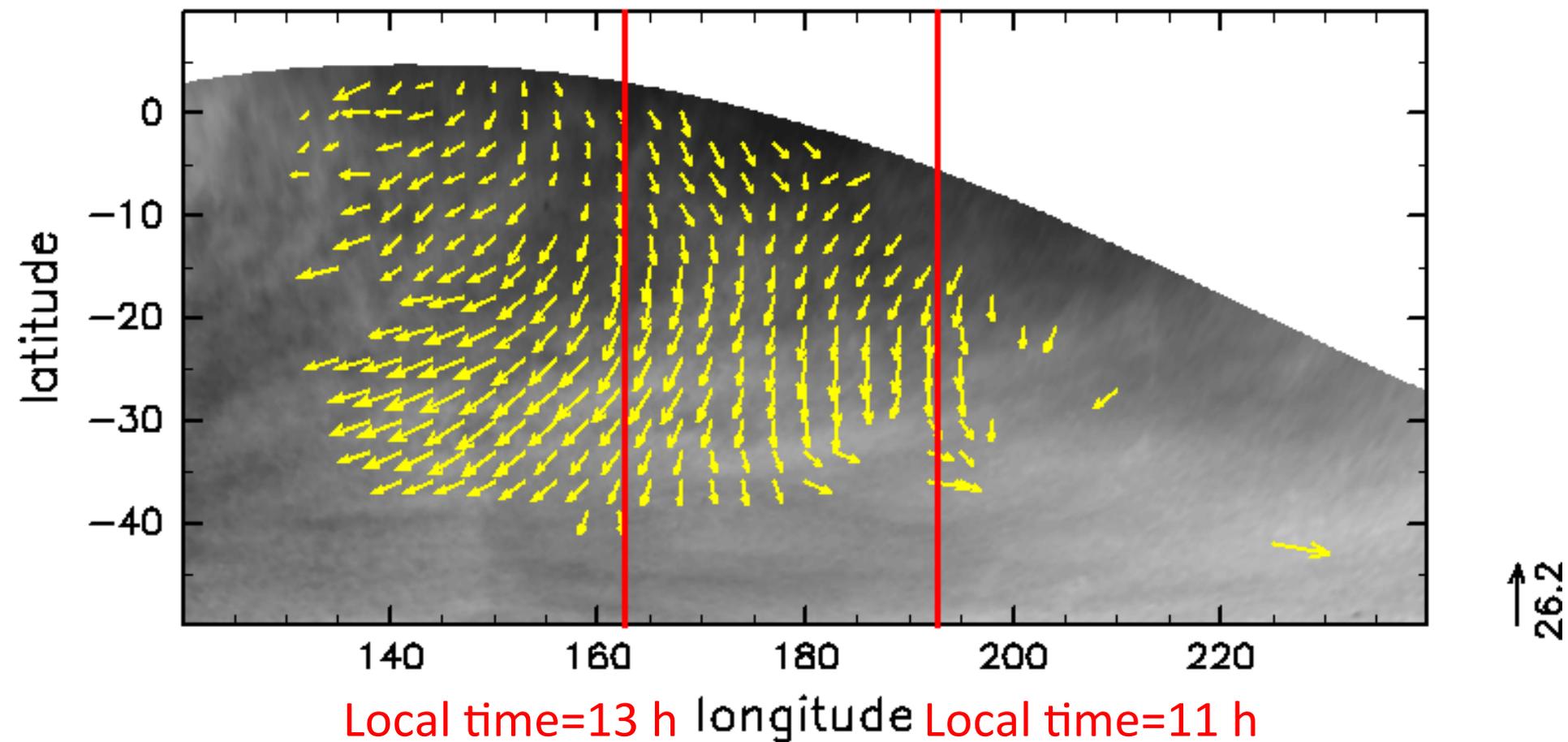
風速の水平分布(#258)

(e) No. 258 Brightness & (U+90, V) STS123



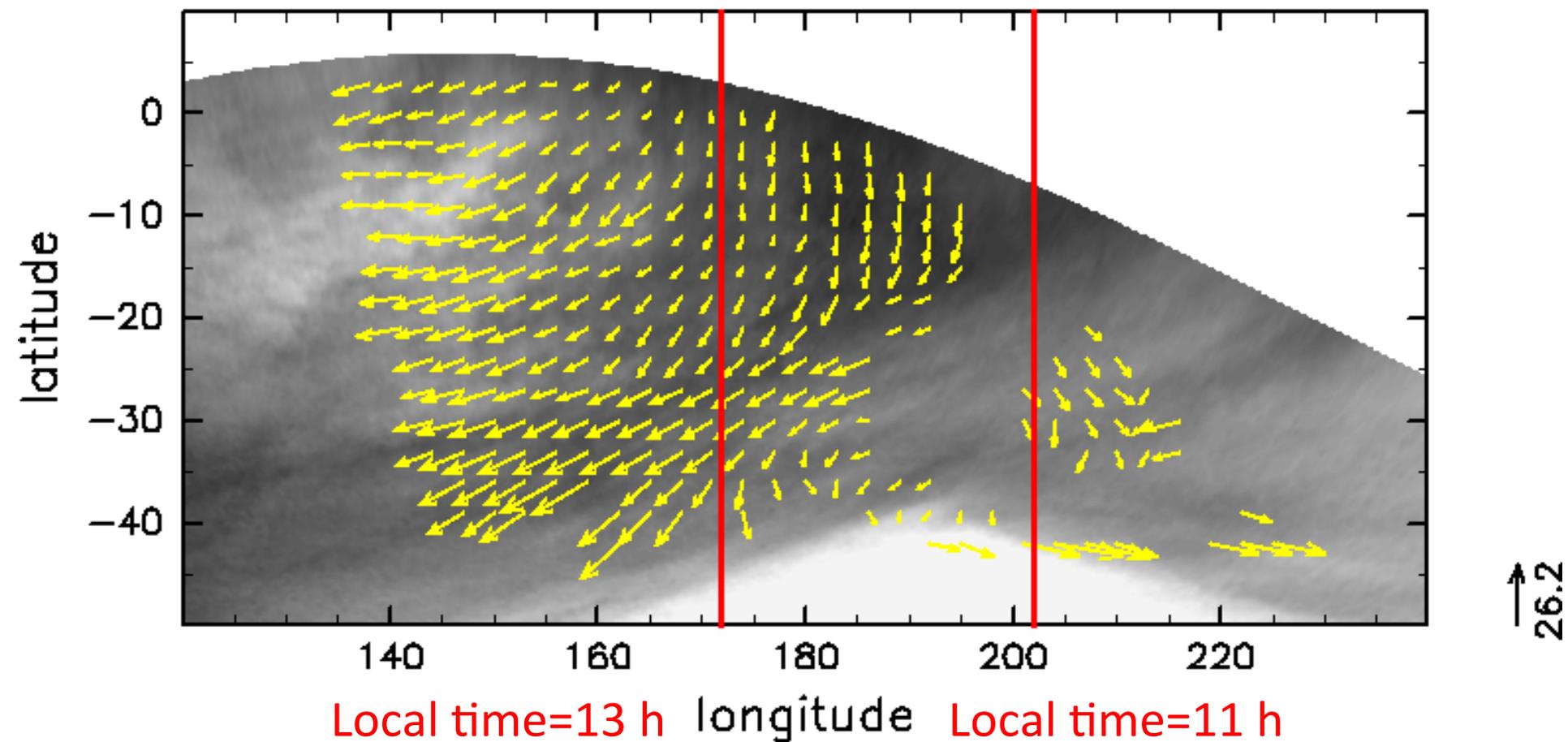
風速の水平分布(#260)

(f) No. 260 Brightness & (U+90, V) STS123



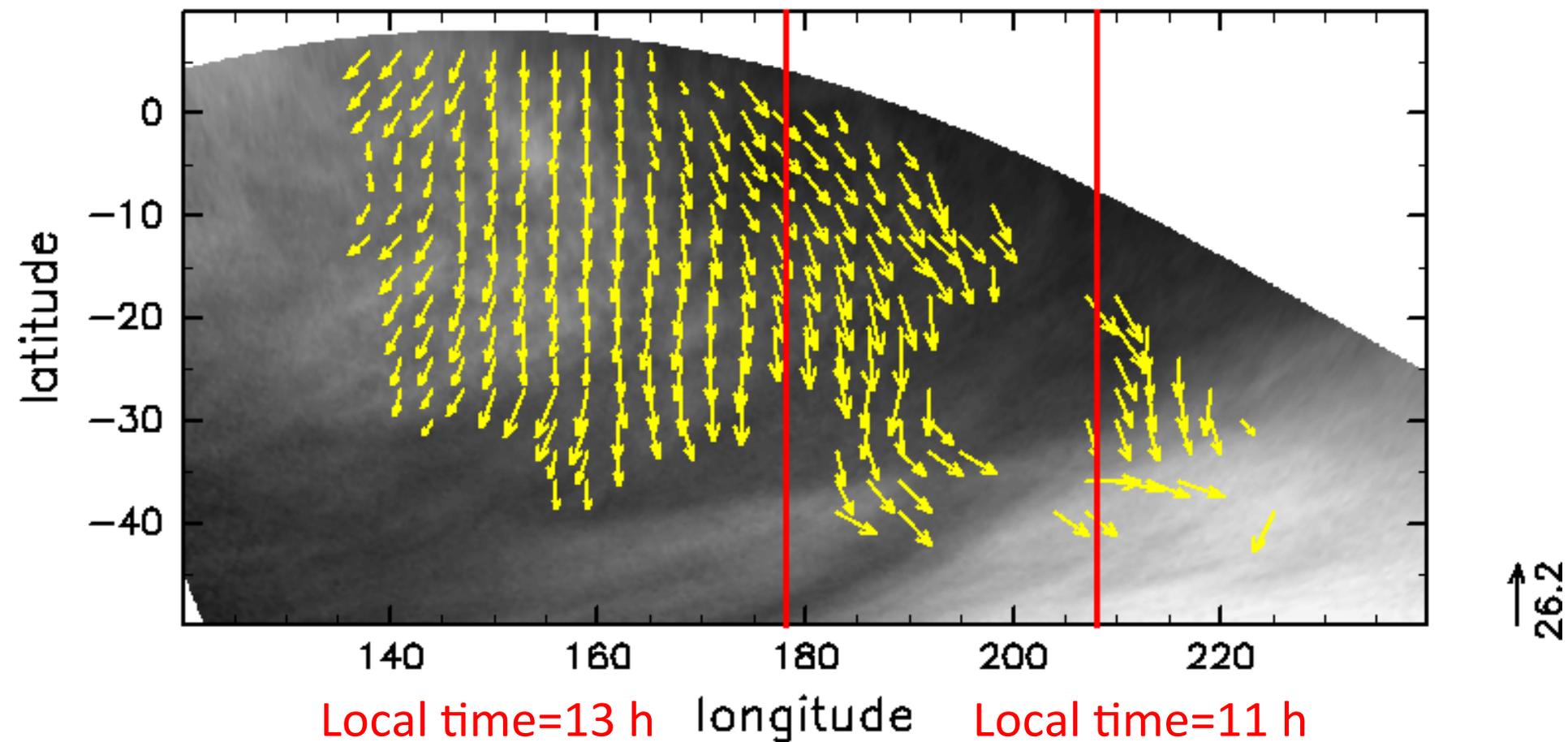
風速の水平分布(#263)

(g) No. 263 Brightness & (U+90, V) STS123



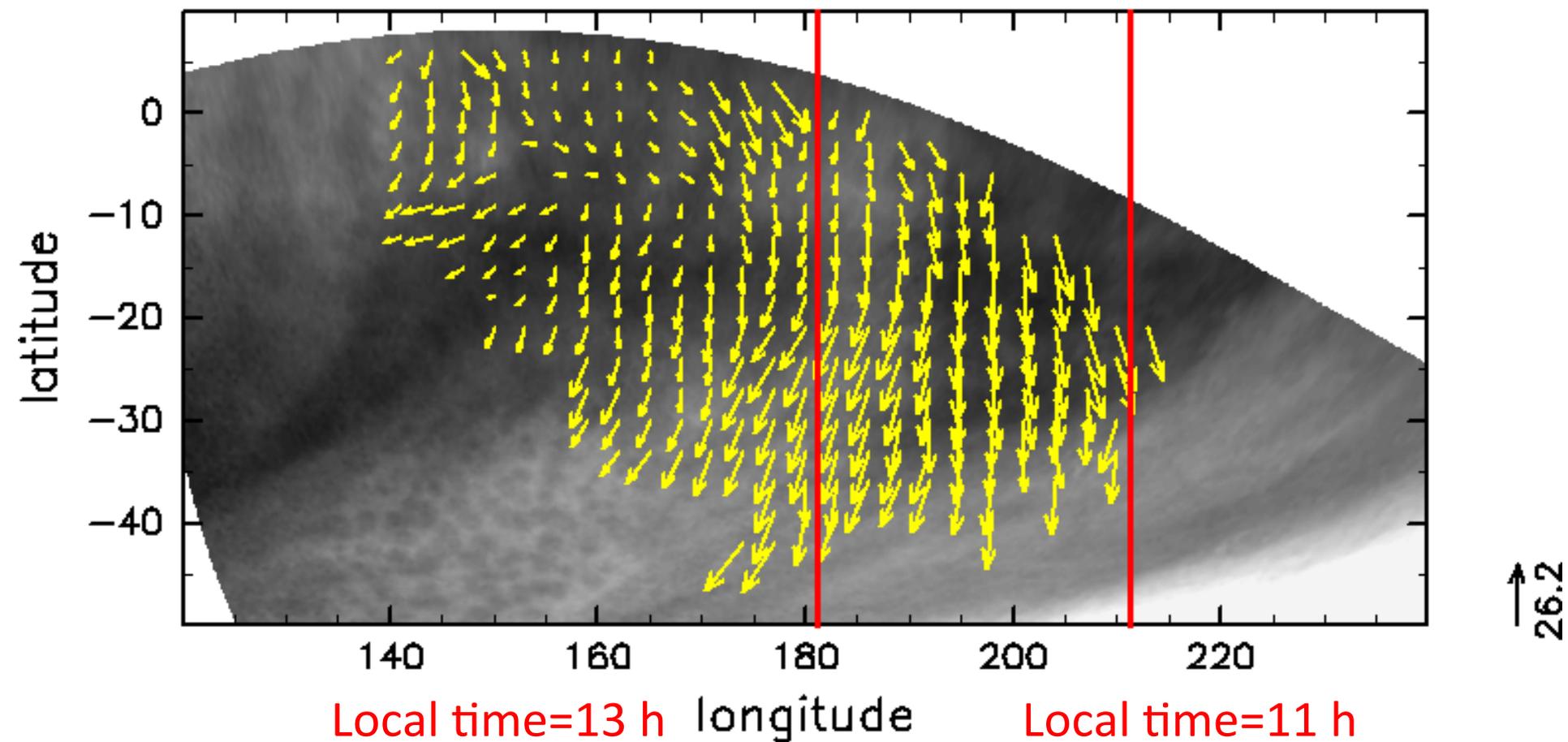
風速の水平分布(#265)

(h) No. 265 Brightness & (U+90, V) STS123



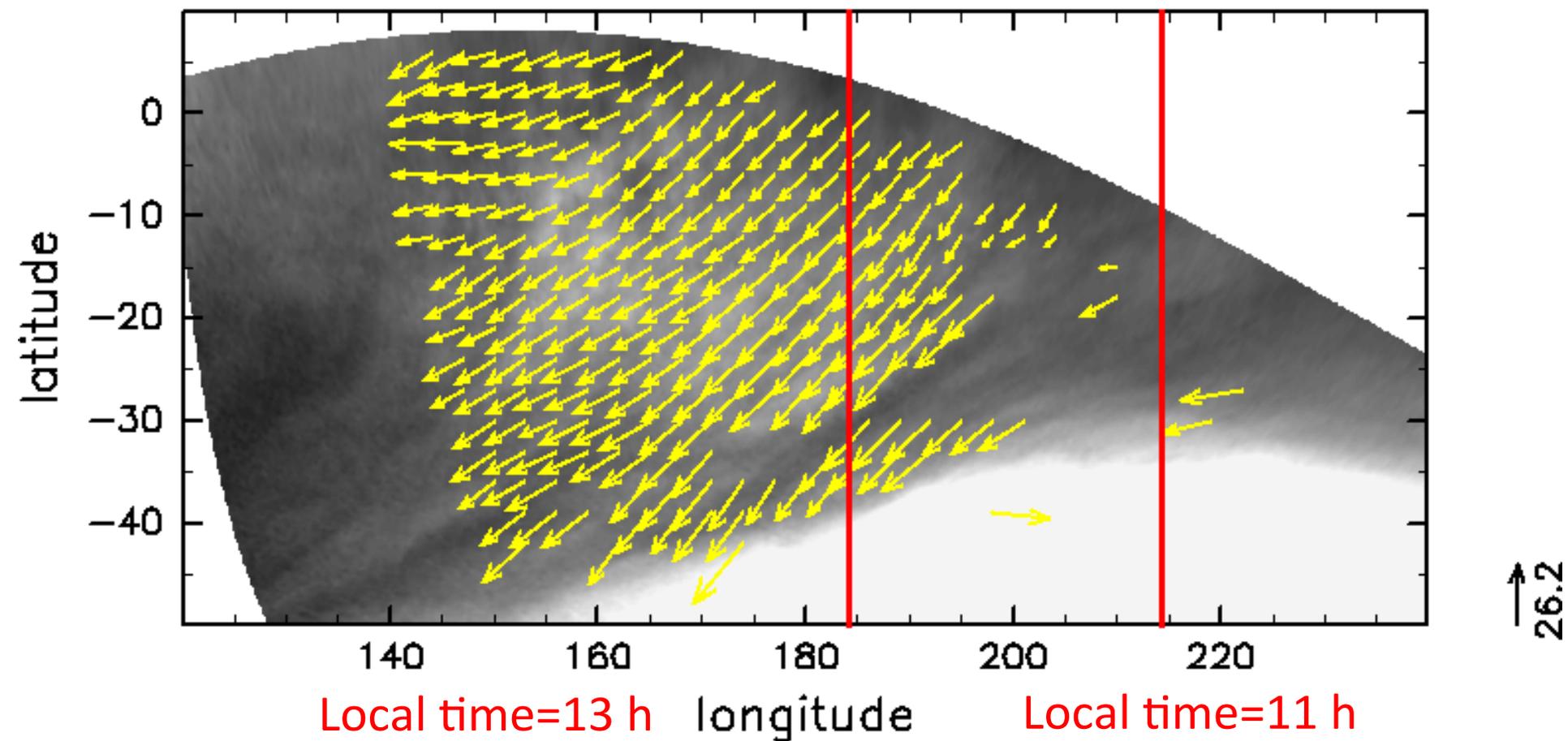
風速の水平分布(#266)

(i) No. 266 Brightness & (U+90, V) STS123



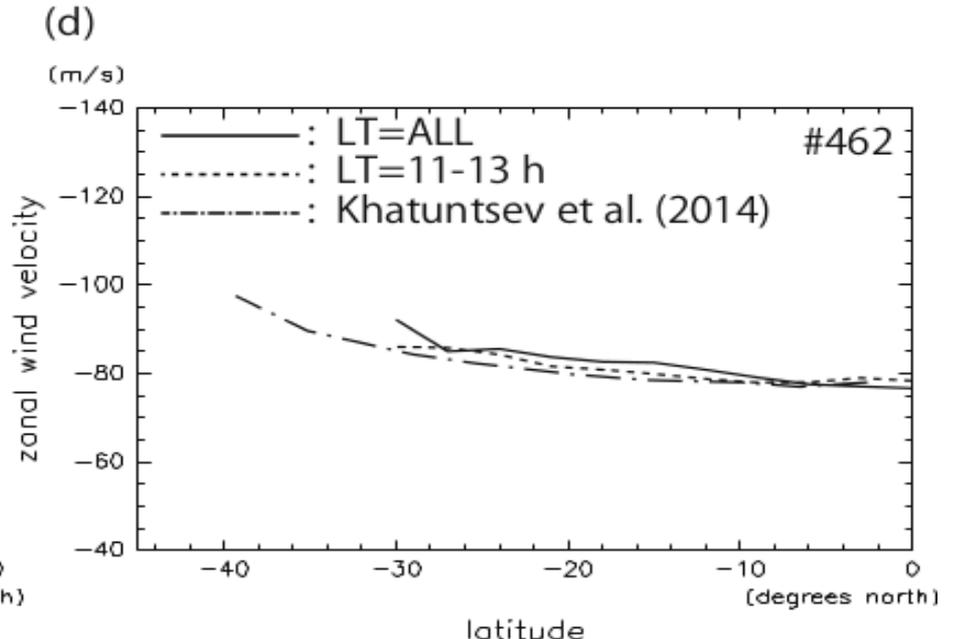
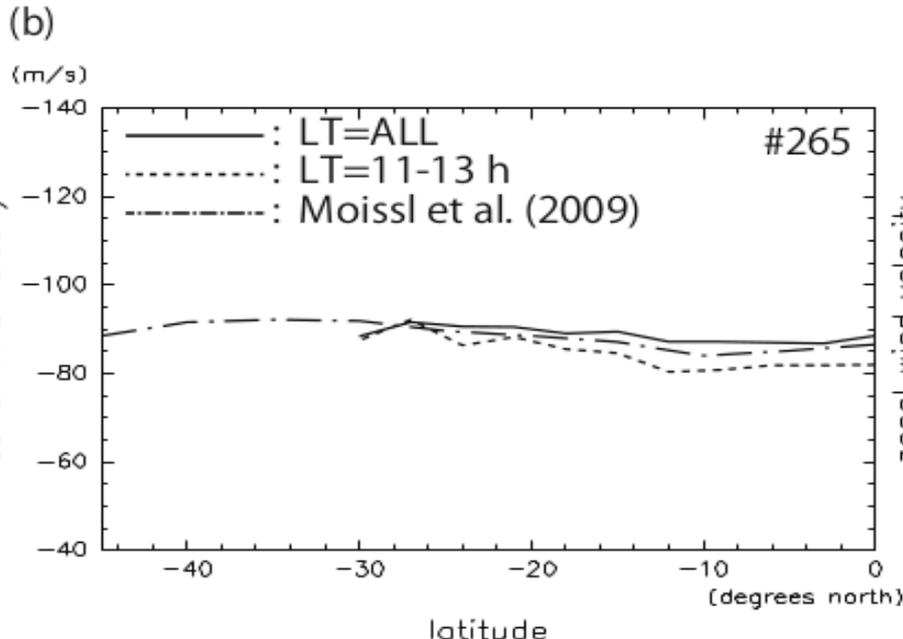
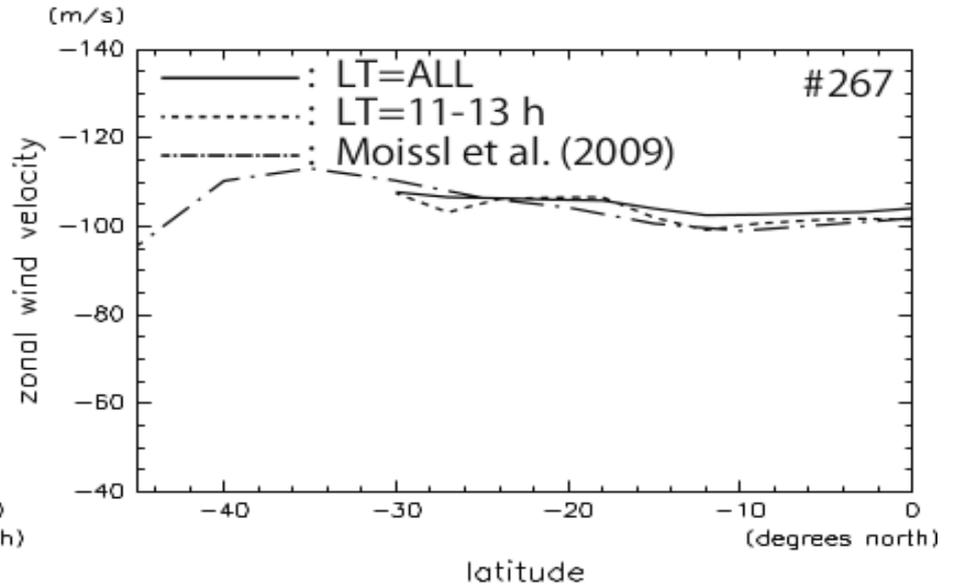
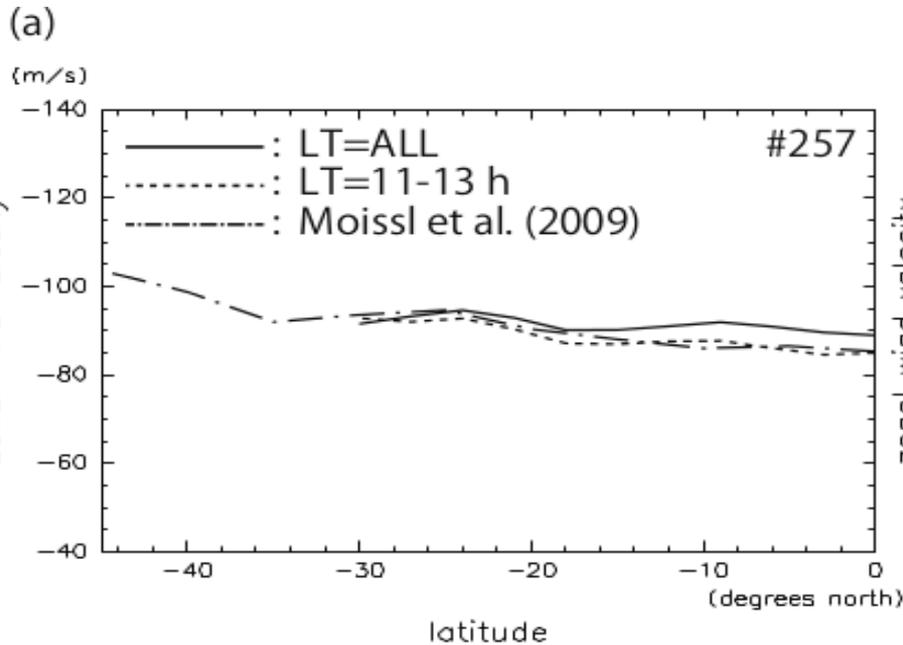
風速の水平分布(#267)

(j) No. 267 Brightness & (U+90, V) STS123

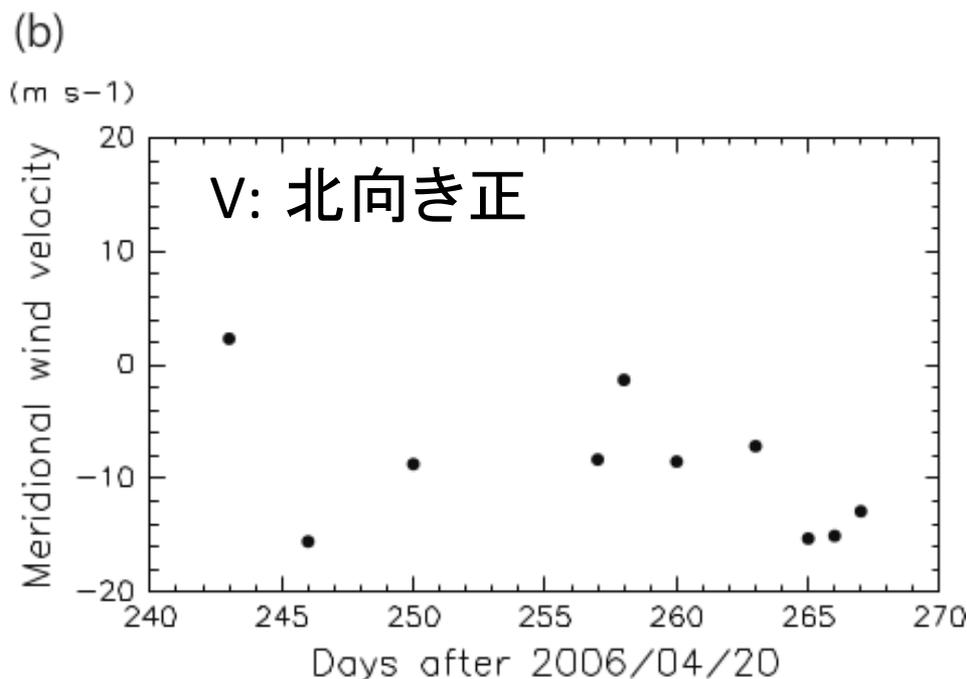
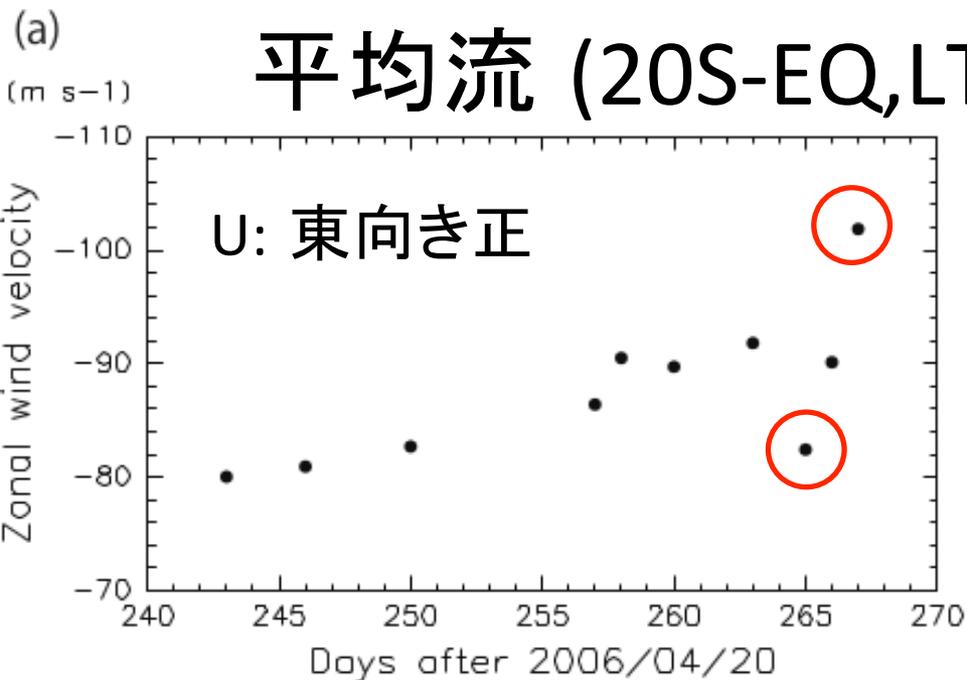


先行研究との比較 (平均東西風)

(c) 先行研究の「帯状平均」の経度範囲は不明



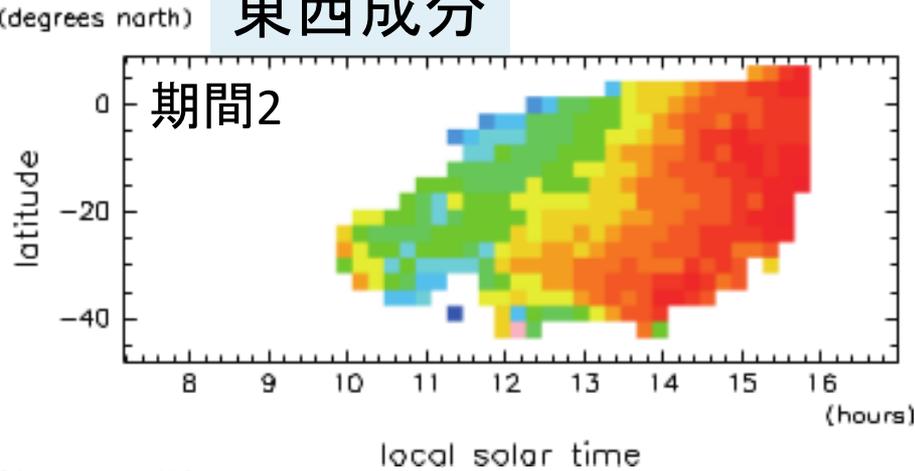
平均流 (20S-EQ,LT11-13h)の時系列



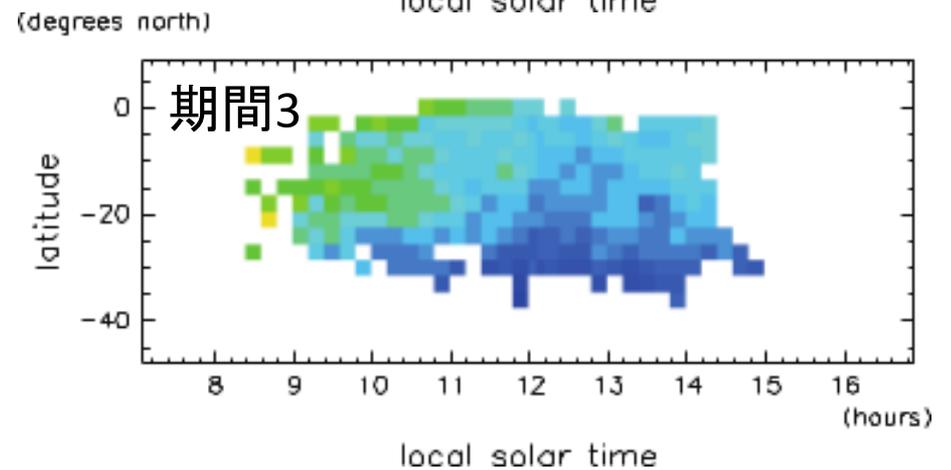
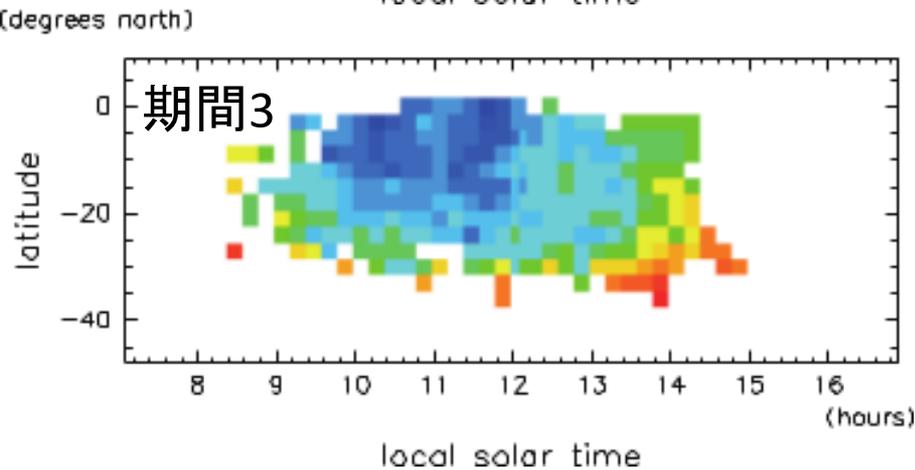
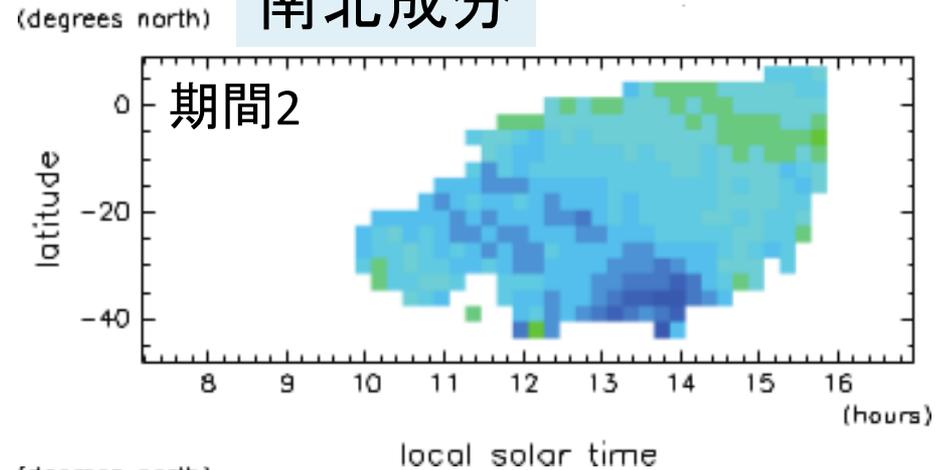
- 低緯度の平均東西風速は日々変動
 - 明白な周期性なし → 単一の惑星規模の波では説明できない
 - U, V 同程度に変動
 - ○ Moissl et al (2009)が指摘した2日間での急な風速増大は実在

潮汐成分(LTを揃えて平均)

東西成分



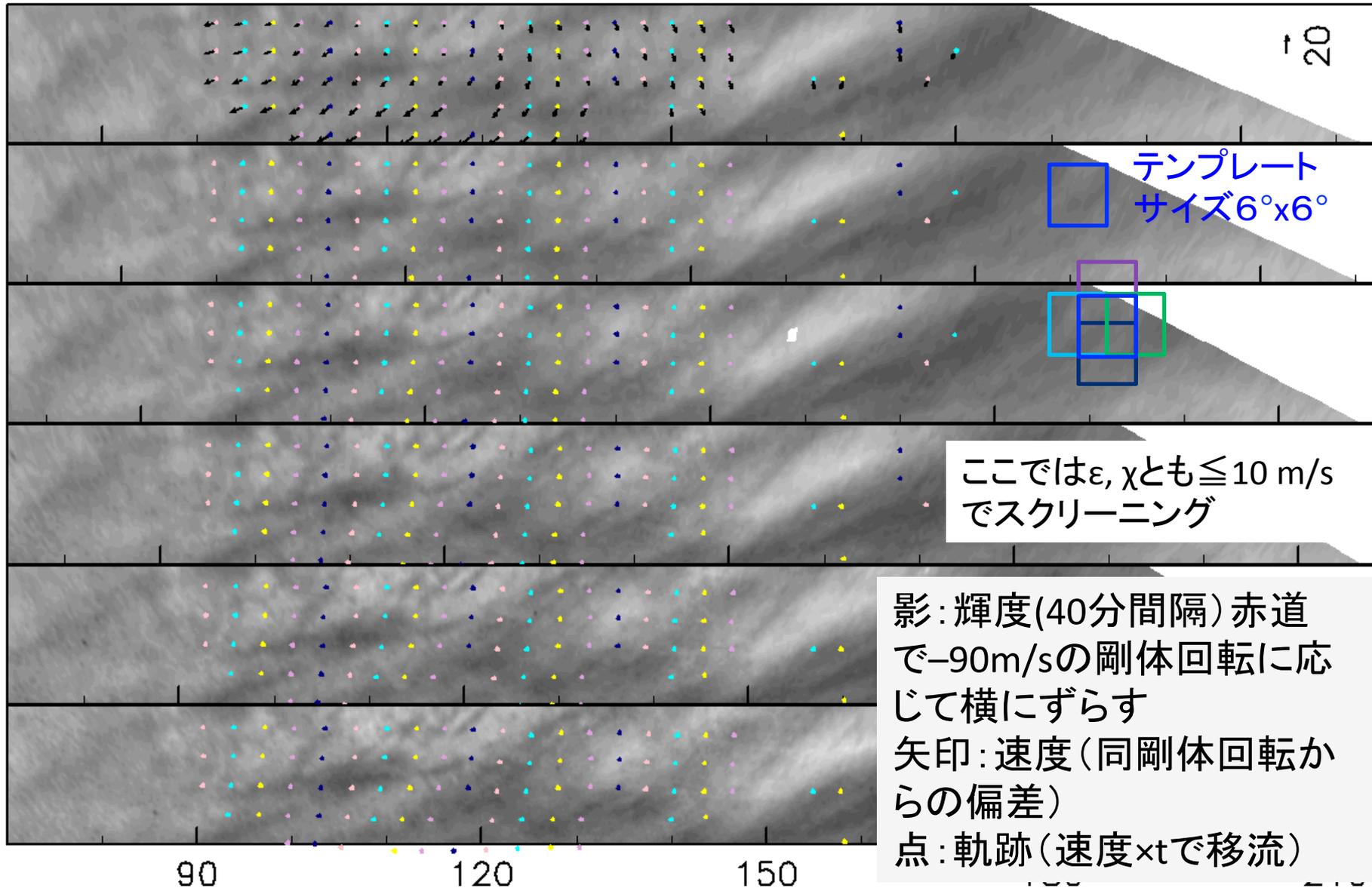
南北成分



- 平均風速:期間2>期間3
- Moissl et al. (2009) (uのみ) と Khatuntsev et al. (2013) の結果と概ね整合的

実際どんな模様を追跡してるのか (#246)

orbit:250 lat:-25..-10 ueoff=90 step=2



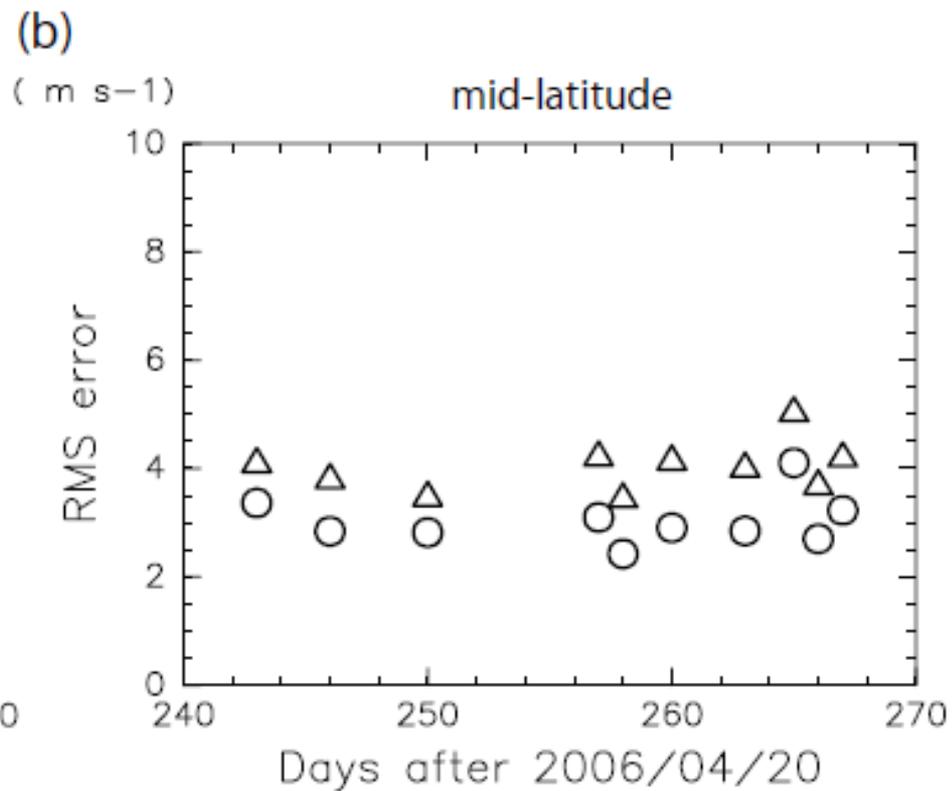
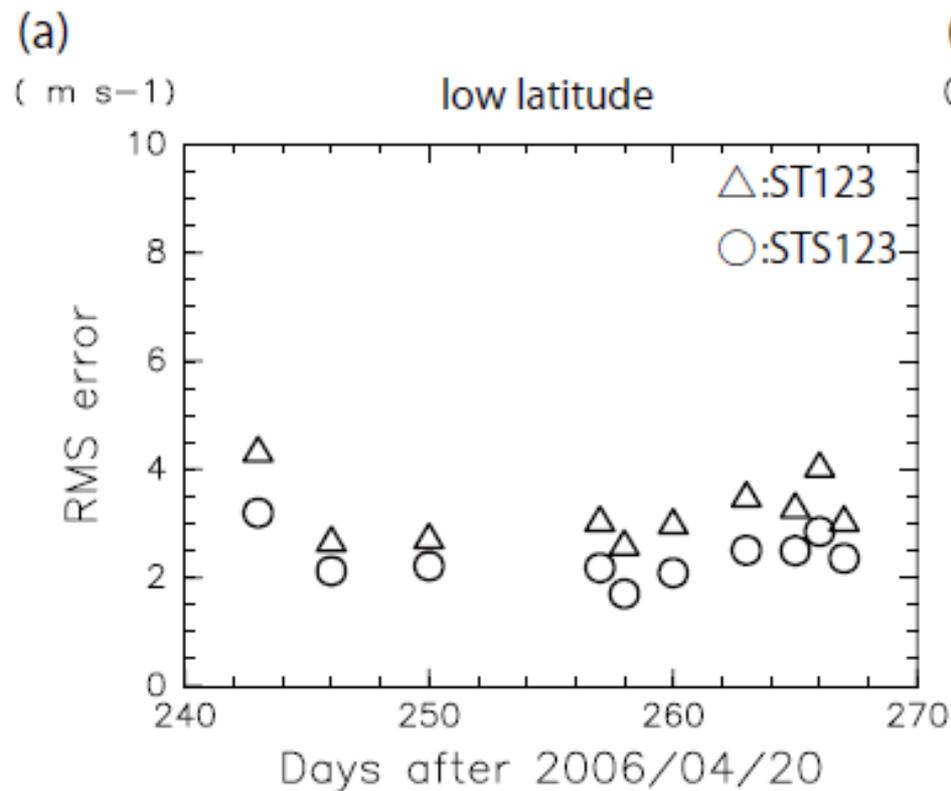
まとめ, 問題点, 今後の課題

- 数10分間隔の多画像を用い, 相関曲面を適切に重ねることで, 雲追跡の誤推定を減らし精度を高めることができる(できた)。
- 雲追跡風の精度・誤差を個別に(ベクトルごとに)見積もる手法を開発した。
 - 相関係数の信頼区間による推定(ϵ)と, 画像群を2つに分けて行った雲追跡を比較する評価(χ)。併用可。
 - VEX 200番台に適用した結果, χ の典型値は 2 m/s。
 - これが本当に誤差の大きさなら画期的で, 惑星規模より小さなスケールの風速擾乱を初めて観測的に研究できる(渦運動量輸送, 二次元乱流, 順圧不安定 etc)。
- それは本当か?(例えば, 水平移流以外による時間的に滑らかな模様変化は, 相関曲面重ねあわせでは除去できないし, 風速との違いを χ で見積もることはできない。)
- 推定手法の改良(例えば異なるテンプレートサイズの結果を比較・統合, 神山方式併用, 反復法, Affine変換...), さらなる誤差評価法の開発。
- あかつきへの期待(より良質な撮像。近接時に数時間確保可)

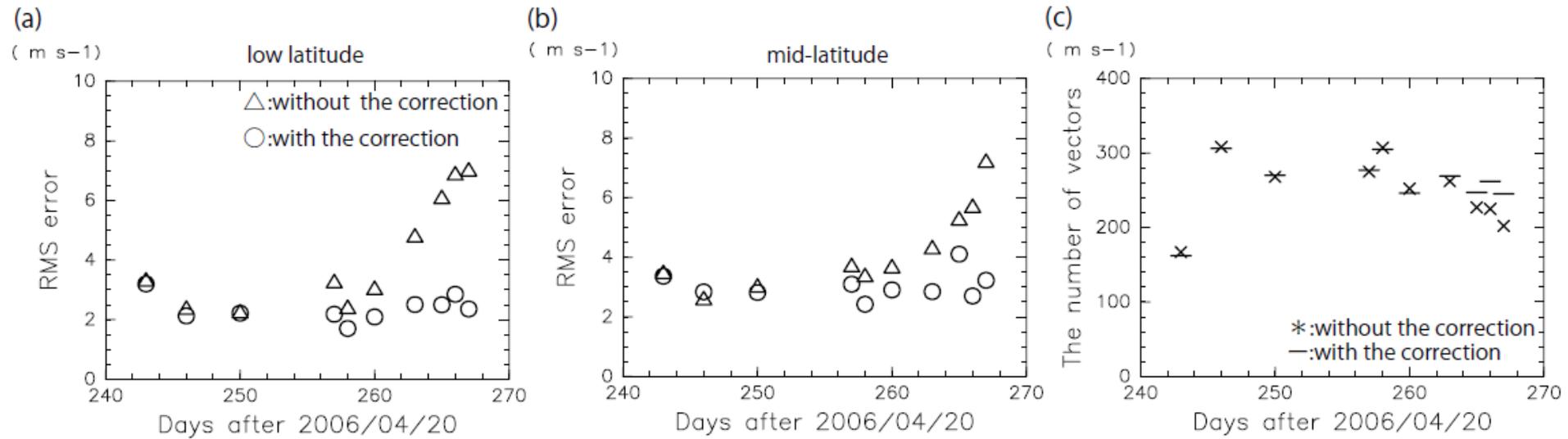
おわりに

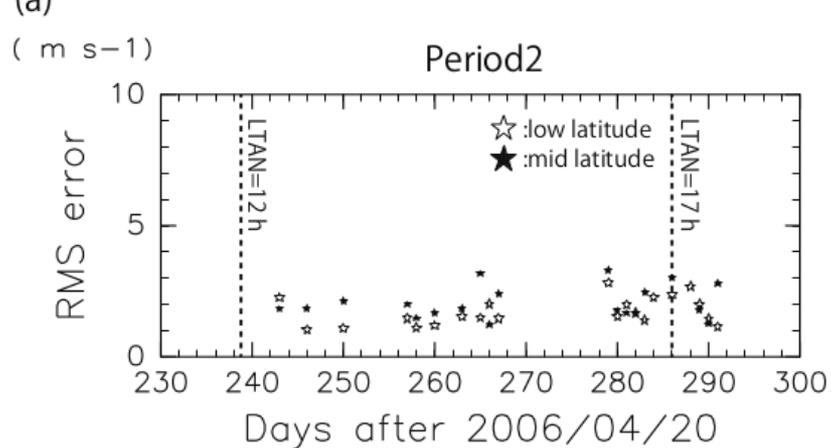
- 雲追跡風関連では、**よいデータを出すことこそが最大の科学的課題です。**
 - 科学的な成果は自動的についてきます。(エポックメイキングな成果は良いアルゴリズム・誤差評価開発から！)
- 興味のある方は、やってみませんか、一緒にやりませんか。

相関曲面空間重ね合わせ(移動平均)の効果

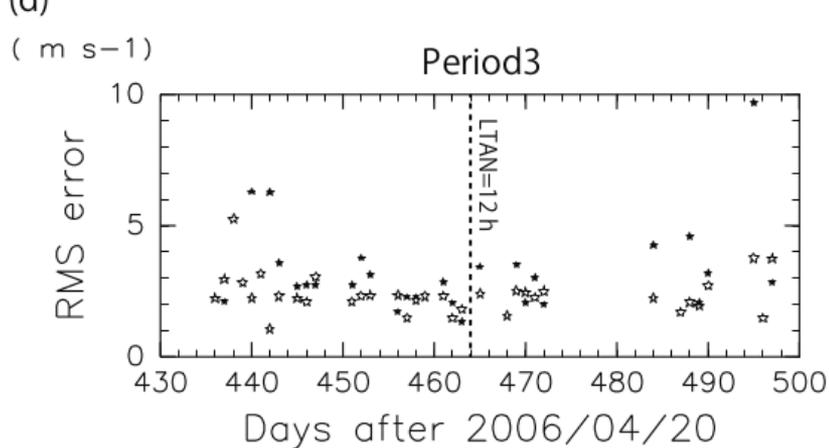
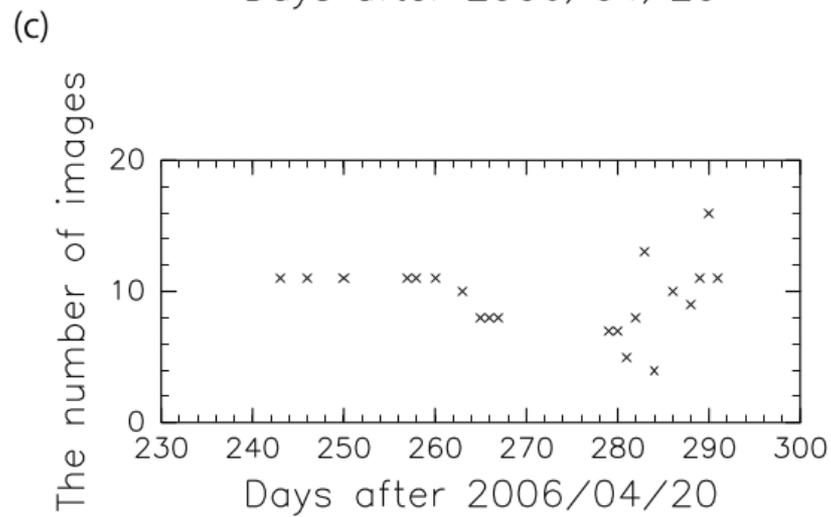
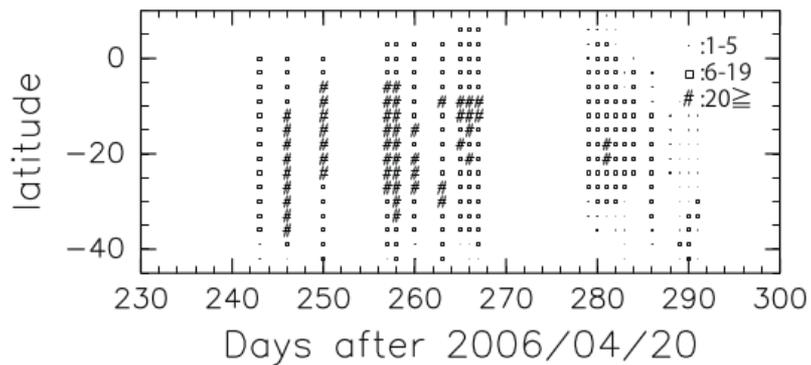


光学・リム補正の効果





(b)
(degrees north)



(e)
(degrees north)

