

# VMC を用いた金星における雲層の風分布解析

土屋克彰(東京学芸大学)

佐藤尚毅(東京学芸大学)

松田佳久(東京学芸大学)

あかつき L3 チーム

## 1. はじめに

### 1-1. 金星における風

金星の大気観測が行われる前までは、金星の自転速度が遅いことに着目して、太陽の地面に対する動きを無視した理論が展開された。それは、昼側で大気が加熱されて上昇し、夜側では冷却されて下降するという考えである。これを夜昼間対流と呼ぶ。

しかし、1960年代に大気紫外線観測が行われ高速な東西流が発見された。上空 65km (雲層上端) で 100m/s の自転と同じ方向の風 (太陽の動きと逆方向) が吹いていることが分かった。これは、大気が個体部分の 60 倍の速さで回転していることを示しており、スーパーローテーションと呼ばれるようになった。

金星には子午面循環も考えられており、スーパーローテーション生成を考えた場合、夜昼間対流に着目するよりも優位な点がある。金星では高速な東西風が吹いているため、東西方向の温度差は均されると考えられる。そのため、夜昼間対流は、夜昼間の温度差は小さくなり、対流も弱くなる。経度間対流も同様。しかし、子午面循環は、極と赤道の間の温度差に起因するため、高速な東西風が吹こうと温度差の一様性は保たれ影響を受けない。

### 1-2. 研究目的

以上のように金星には、特殊な気象現象が存在している。金星の気象について理解を深めることは、気象学の普遍的メカニズムを発見することにつながり、地球の未知なる気象現象の謎を解くのに役立つと予想される。しかし、未だに観測と解析結果が少ないのが現状である。そこで、本研究の目的は、観測と解析結果が未だに少ない、金星気象の解析データを得ることである。

## 2. 使用データ

ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の衛星 Venus Express に搭載されている VMC (Venus Monitoring Camera) による風速測定の結果を用いる。風速測定の方法は、紫外画像に写った雲を追跡することで雲の速度場を出す手法である。連続した画像間で雲の移動の相関から風速を導き出している。

データは、金星の北半球低緯度から南半球中緯度の昼側における雲頂高度の東西風速と南北風速を求めたものを扱う。また、2006年5月～2006年6月(軌道29～72)の内、軌道30、31、34、38、46、51、56、60、61の9つを使用した。

### 3. 解析方法

#### 3-1. 解析方法の概要

fortran によるデータ解析を行った。軌道毎と軌道全てについて、時間平均したものを grads で出力し、時間平均と東西平均両方した結果とそのエラーバーを gnuplot で出力した。緯度幅、経度幅はそれぞれ  $3.75^\circ$  である。ただし、夜昼間対流の解析については、時間平均のみのデータを計算した。

東西風については、角速度一定の場合と角運動量一定の場合の東西風をそれぞれ求め、gnuplot で出力。時間平均と東西平均した東西風の風速は、どちらのカーブに近いかを比較した。また、回転周期を求めた。

#### 3-2. 求めたパラメータ

- ① 東西風 :  $u$
- ② 回転周期 :  $T = 2(r \cos\varphi)\pi/u/60/60/24$
- ③ 南北風 :  $v$
- ④  $uv$
- ⑤  $u'v' = (u - \bar{u})(v - \bar{v})$
- ⑥ 東西風の角速度 :  $\omega$
- ⑦ 東西風の角運動量 :  $M$
- ⑧ 夜昼間対流 :  $u'v \cdot u'$

#### 3-3. エラーバー

標本の不偏分散を標本数のルートで割った値。つまり、大きさ  $n$  の標本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  とすると、

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x}) \cdots (x_i - \bar{x})}}{n-1} / \sqrt{n}$$

である。

この式の  $x$  にデータの値を  $n$  にデータ数を代入する。

## 4. 結果

時間平均において、太陽直下点 (172.3180°W) を 12:00、120°W 付近を 8:30、120°E 付近を 16:30 とする。

北向きと東向きを正とする。

### 4-1. 東西風

#### 4-1-1. 東西風の時間平均と東西平均

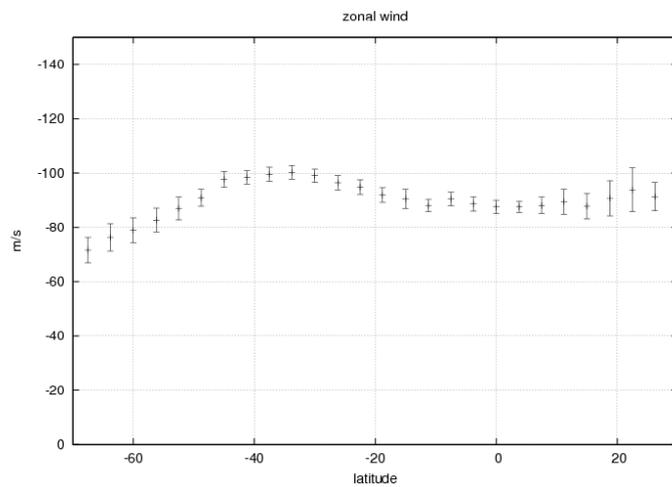
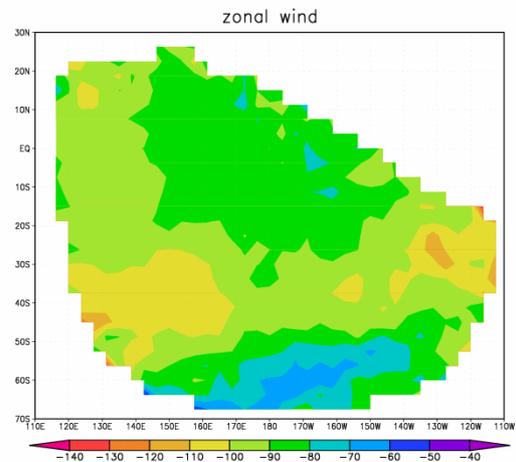
北、南両半球の 0°~20°について述べる。太陽直下点よりやや午前側に極小域 (-70 ~ -80 m/s) が見られる。正午から午後にかけて加速する。

20°S~50°S では、午前から正午にかけて減速し、その後再び加速する。風速は、20°N~0° と 0°~20°S よりも強い。正午では、-90~-100 m/s であるが、午前、午後では、-100 m/s 以上の風が吹いており、場所によっては、-110~-120 m/s の風速となる。この領域には、中緯度ジェットの存在が示唆される。

50°S 以南では、風速は-90 m/s 以下に落ちる。しかし、午前から正午にかけて減速し、再び午後には加速するパターンは、20°S~50°S で同様に見られる。

これを東西平均すると、北、南両半球の 0°~20°では、約-90 m/s で一定。南半球において、20°S~45°S にかけて加速する。33.8°S でピーク値-100.3 m/s となり、その後 45°S までは約-100 m/s で、その後、単調に減速する。

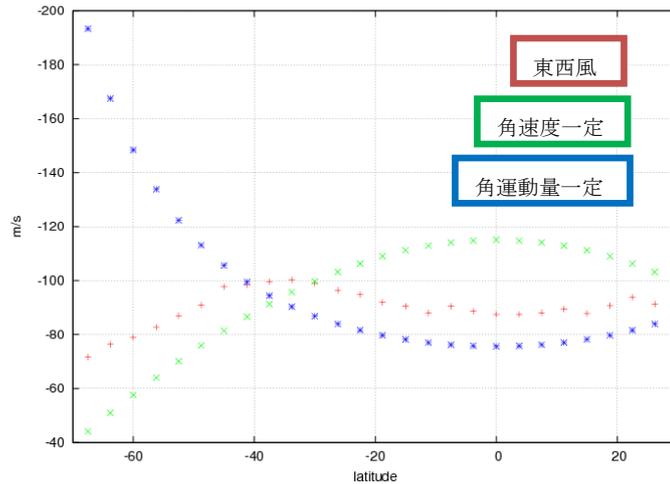
軌道別に見ても、低緯度で一定、その後加速し減速するというパターンはだいたい一致している。ピーク値は 30°S~48.8°S でみられる。



#### 4-1-2. 等角速度と等角運動量の場合との比較

赤線が東西風速、緑線が等角速度の場合の東西風速、青線が等角運動量の場合の東西風速である。

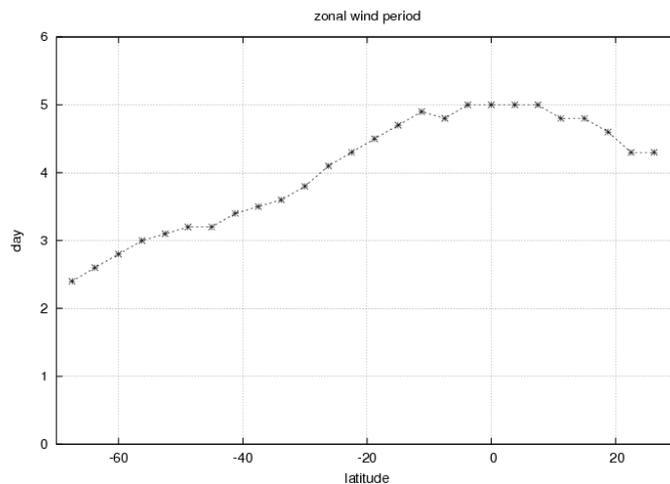
20°N~30°S 付近の範囲では、等角運動量に近いカーブで東西風が吹いており、その後等角速度に近いカーブとなる。



#### 4-1-3. 回転周期

0°付近では、5日で一定。それより高緯度では、北、南両半球において減少する。つまり、高緯度ほど大気は速く回転していることが分かる。

スーパーローテーション観測初期の報告では、スーパーローテーションが4日循環と呼ばれ、周期は4日とされている。しかし、本研究では30°S付近で4日、それより低緯度側では周期は長くなり、最大で1日ほど長い。30°Sより高緯度側では短くなり最大で2.5日ほど差がある



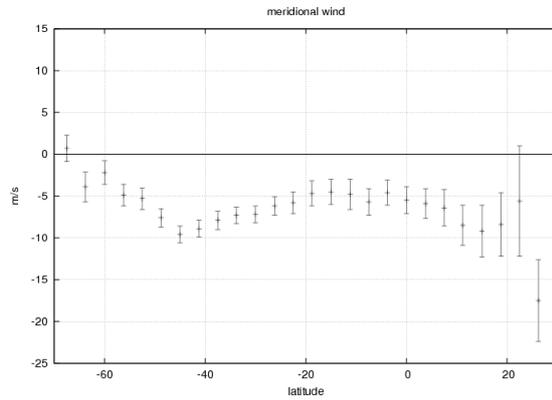
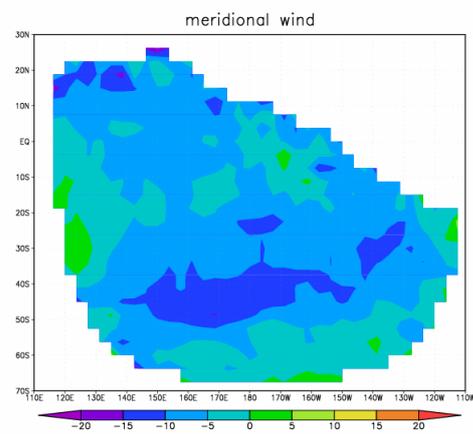
#### 4-2. 南北風

北半球と南半球ほぼ全域が北風となった。

高緯度と低緯度で弱く、太陽直下点付近は周りより風速は小さい。30°S~50°Sで午前、午後ともに極大域が存在。大きさは、-10~-15 m/sである。午後の方が極大域は顕著である。50°S以南では弱くなる。

これを東西平均すると、0°~20°Sでは約-5 m/sで一定。20°S~45°Sで加速し、45°Sで-9.6 m/sの極大値をとる。その後は減速し、67.5°Sでは、0.7 m/sの南風に転じている。低緯度で一定、その後加速し減速するのは、東西風のパターンに似ている。

20°N～0°では、加速し、一旦減速。その後急激に加速するという結果が得られた。しかし、20°N 付近のエラーバーが他と比べて大きく、信頼性は低い。

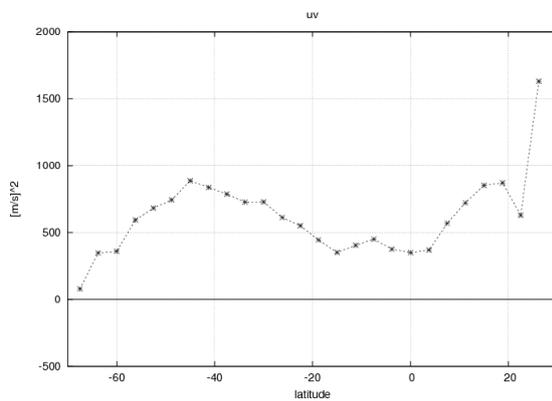
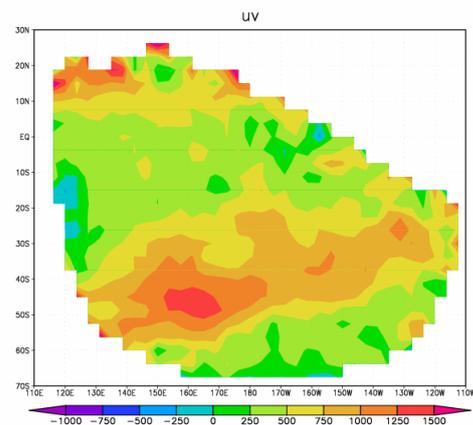


#### 4-3. uv

全域で正となった。0°～20°S では一定で、20°N～0°よりも小さい値をとっている。20°S～60°S にかけて増加していき、30°S～60°S では極大値が存在。その後は減少する。全体的に午後ほど、大きい値は高緯度へシフトするようである。

これを東西平均すると、0°S～20°S で一定。20°～45°S で増加する。45°S 付近でピークを迎え、減少する。

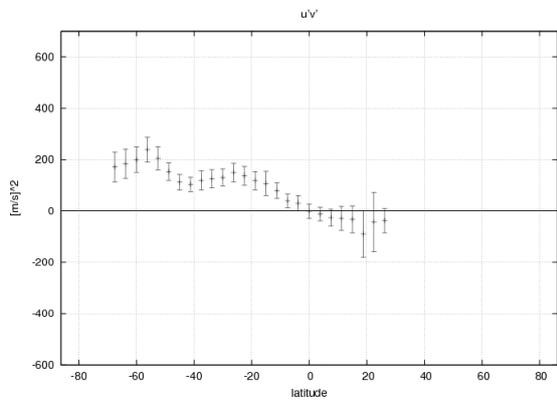
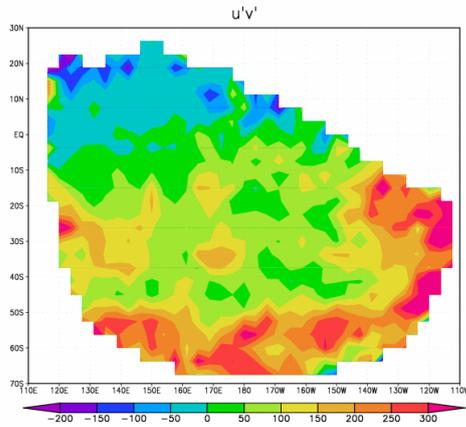
北半球では、増加傾向にあるが、20°N 付近で減少と急激な増加と減少がある。



#### 4-4. $u'v'$

北半球で負、南半球で正となっている。50°S以南と午前で大きくなっている。

これを東西平均すると、北半球で負、南半球で正となった。0°~20°Sまで増加し、20°S~40°Sまでは減少。40°S~60°Sで再び増加し、その後減少する。増加と減少を繰り返している。北半球では、0°~20°Nで減少し、その後増加する。0°~20°の範囲において、大きさは南半球の方が大きい、対称的である。

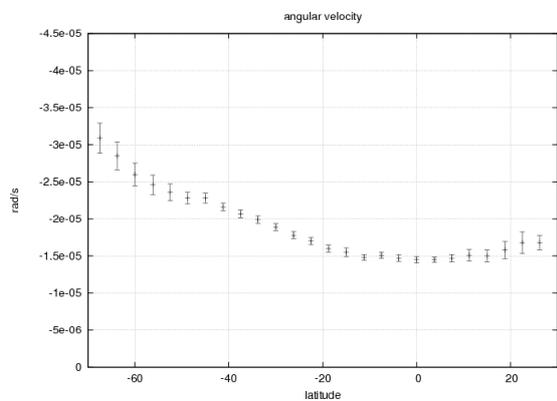
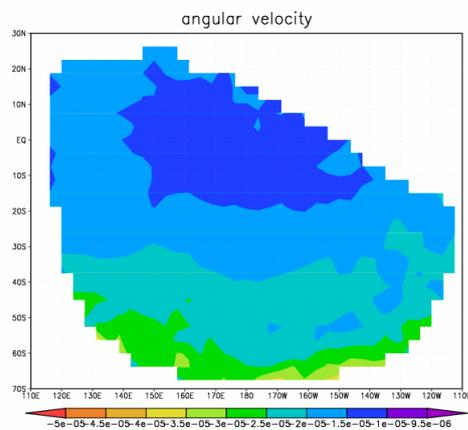


#### 4-5. 東西風の角速度

北、南両半球の0°~20°では、正午から午後にかけて増加する。

20°S以南では高緯度に向かって増加。30°S~60°Sで、 $-2 \times 10^{-5} \sim -2.5 \times 10^{-5}$  rad/s。60°S以南では $-2.5 \times 10^{-5}$  rad/sより、大きな値となる。

これを東西平均すると、両半球において、0°~15°まではほぼ一定。それより高緯度側は、増加している。しかし、南半球の45°S~50°S付近では一定となる。

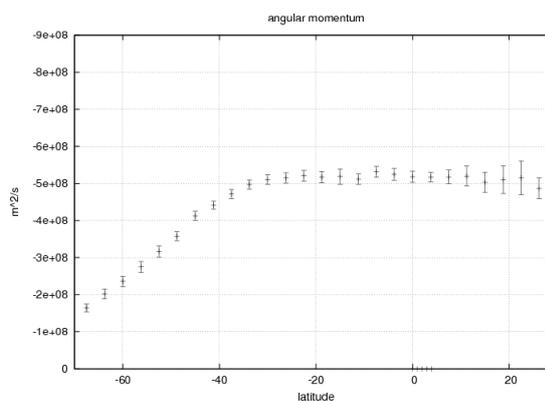
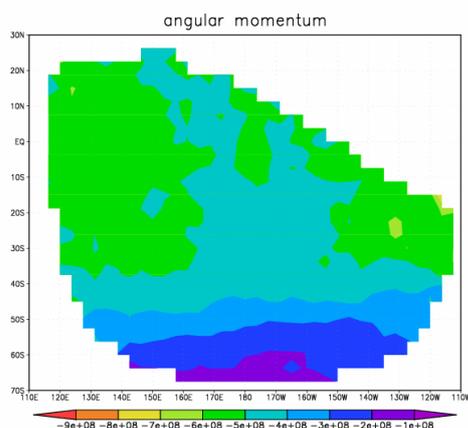


#### 4-6. 東西風の角運動量

20°N~0°、20°S~40°S では、正午から午後にかけて増加。太陽直下点付近では周囲より値が大きい。40°S 以南では、高緯度ほど減少していく。

これを東西平均すると、北、南両半球 0°~30°で平均 $-5.19 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{s}$  の一定値をとり、30°S 以南で単調に減少する。

軌道ごとでも、平均の結果と一致する。ただし、軌道 6 1 については、低緯度の一定値が若干大きく、平均で $-5.64 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{s}$  である。

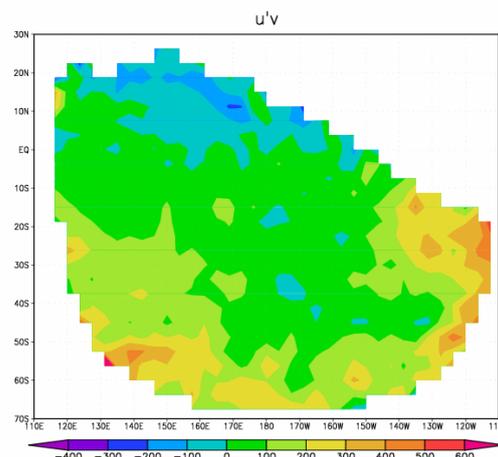


#### 4-7. 夜昼間対流

##### 4-7-1. 時間平均(u'v)

夜昼間対流は、温度最高点で上昇し、放射状に広がるので、 $u'v$  の正負で検知できると考えられる。温度最高点は、地球と同様に考えると太陽直下点よりもやや午後側と予想できる。もし、完全に検知できたとすると、北半球では温度最高点より午前側で正、午後側で負。南半球では午前側で負、午後側で正となるはずである。

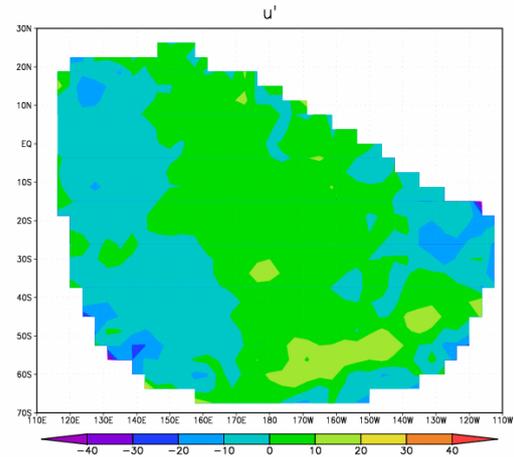
今、温度最高点を赤道上の 175°E 付近と考える。結果は、北半球午後側で負、南半球では午前側と午後側で正となり、南半球午前側では予想と反した結果が出てきた。しかし、20°S 以南において、175°E を基準に午前側と午後側を比べると、午後側の方が値は大きい。また、午前域には、僅かながら負の領域も解析されている。ただし、9:00 付近では、大きい値が存在する。



#### 4-7-2. 時間平均( $u'$ )

$u'$  は、夜昼間対流の東西成分で、午前側で正、午後側で負であると予想される。

ここで温度最高点を  $160^{\circ}\text{E}$  付近と考えると、夜昼間対流の東西風の検知は成功している。しかし、 $10^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{S}$  の  $9:00$  付近では、負となる値が解析された。



### 5. 考察

#### 5-1. 東西風

スーパーローテーションが解析された。東西風の回転周期は、 $2.4\sim 5.0$  日と分かった。高緯度ほど周期は短い。自転周期は 243 日なので、48 倍 $\sim$ 101 倍の速さで大気は回転していることになる。

時間分布は午前から正午にかけて減速し、正午から午後にかけて加速、各緯度の太陽直下点付近では極小となることが分かった。緯度分布は、高緯度 $<$ 低緯度 $<$ 中緯度の順に風速は強くなる。

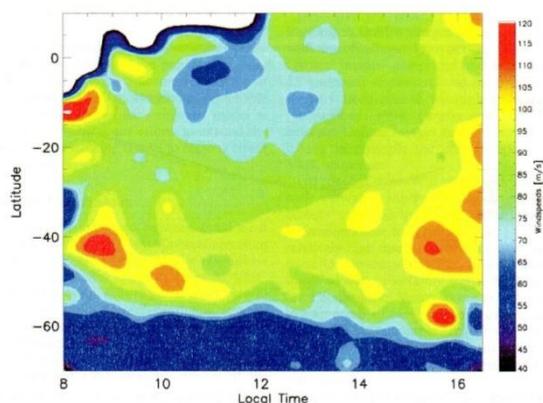
#### 5-2. 南北風

解析した全域で北風となり、子午面循環は解析されなかった。

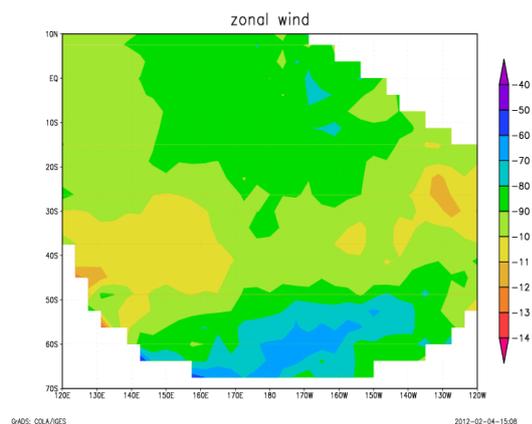
風速の変化する傾向は、東西風に似ていることが分かる。高緯度 $<$ 低緯度 $<$ 中緯度の順に風速は強くなることや低緯度で一定、中緯度にかけて加速しピーク後は減速するということである。

### 5-3. Moissl *et al.* (2009) との比較

#### 5-3-1. 東西風の時間平均



Moissl *et al.* (2009) における  
東西風の時間平均

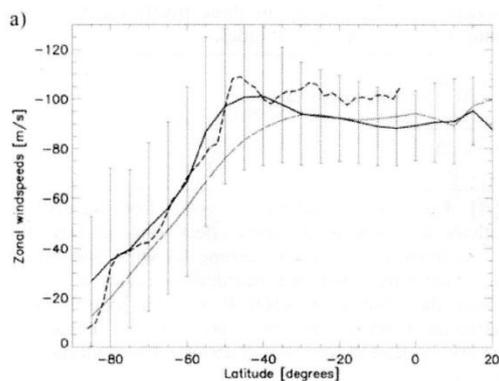


本研究における  
東西風の時間平均

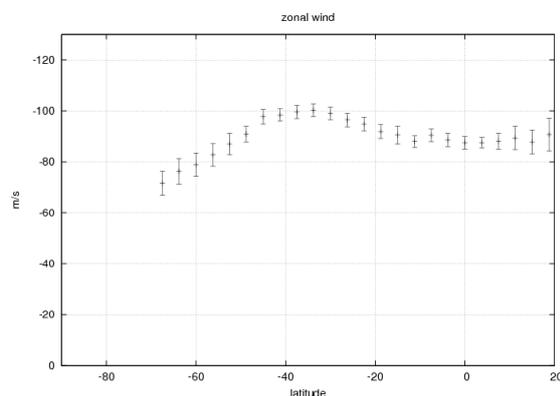
左図は先行研究の東西風の時間平均である。0°~20°S では、11:30 辺りで最小。20°S~40°S では、観測された全時間において一定である。40°S~60°S では、8:00 と 16:00 付近が最大であり、昼間はそれよりも遅くなる。全体的な傾向としては、午後に加速。60°S 以南では急激に風速は減少する。

全体的に本研究は一致した。東西風速の時間平均は、0°~20°S における最小値の出現する場所や、午後に加速するという風速の変化傾向がよく一致した。

#### 5-3-2. 東西風の時間平均と東西平均



Moissl *et al.* (2009) における  
東西風の時間平均と東西平均



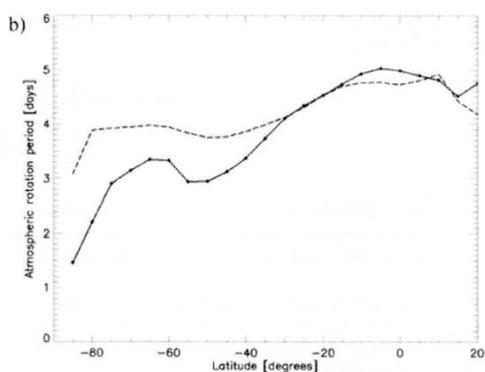
本研究における  
東西風の時間平均と東西平均

左図は、先行研究の東西風の時間平均と東西平均である。実線が VMC 可視解析、点線が VMC デジタル解析、破線が VIRTIS であり、VMC から得た解析結果と VIRTIS から得た解析結果は、後者の方が 10 m/s ほど風速が強いが、よく一致している。低緯度では、水平

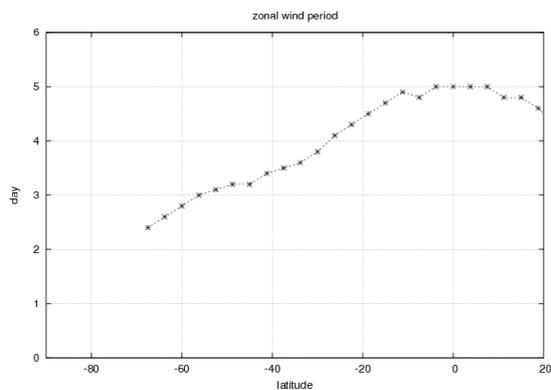
風速は 85~90 m/s でほぼ一定。20°S 付近から、徐々に風速は増加し、45°S でピークに達する。その風速は、100 m/s で、中緯度ジェットが存在を示唆。45°S 以南では減少する。標準偏差は、高緯度に向かって増加する。理由は雲トラッキングが難しいからである。

結果はよく一致したが、100 m/s 以上の風が出現する範囲が本研究の方が広く、33.8°S~45°S である。また、高緯度の減速が本研究では弱い。

### 5-3-3. 東西風の回転周期



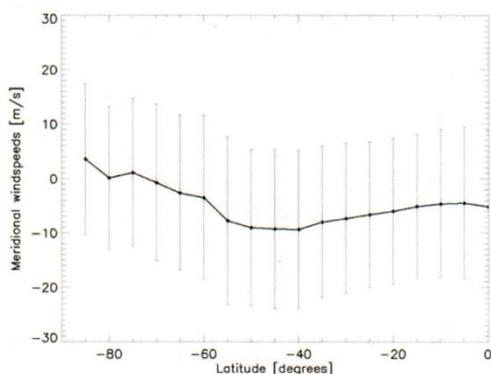
Moissl *et al.* (2009) における  
東西風の回転周期の時間平均と東西平均



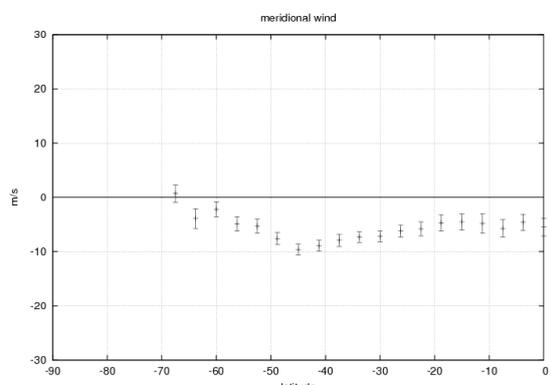
本研究における  
東西風の回転周期の時間平均と東西平均

左図は、先行研究における東西風の回転周期である。実線が VMC 可視解析、点線が VMC デジタル解析である。低緯度から 50° S 付近の範囲では、値の大きさは近い。しかし、50° S 以南では異なる。本研究の方が周期は短くなる。

### 5-3-4. 南北風の時間平均と東西平均



Moissl *et al.* (2009) における  
南北風の時間平均と東西平均



本研究における  
南北風の時間平均と東西平均

左図では、先行研究の南北風の時間平均と東西平均が示されている。なお、北半球のデータは含まれていない。風速は 0~10 m/s の範囲で変化し、赤道で -5 m/s で、高緯度に向

かい徐々に増加。45°S~55°S間でピーク値の-10 m/sとなり、そこからは極に向かい減少する。このデータから、赤道と中緯度間でハドレー循環セルが立っていることが推定される。

しかし、子午面風のデータは精度が悪く、標準偏差は13 m/sにもなる。また、夜側のデータを省いて子午面風速を導き出しているため、この点においても誤差が生じている。

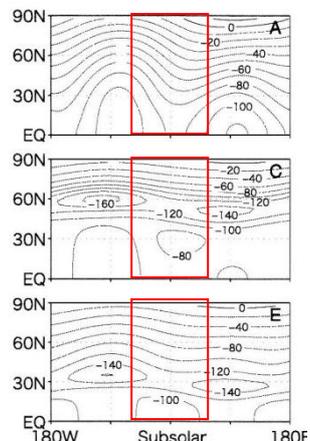
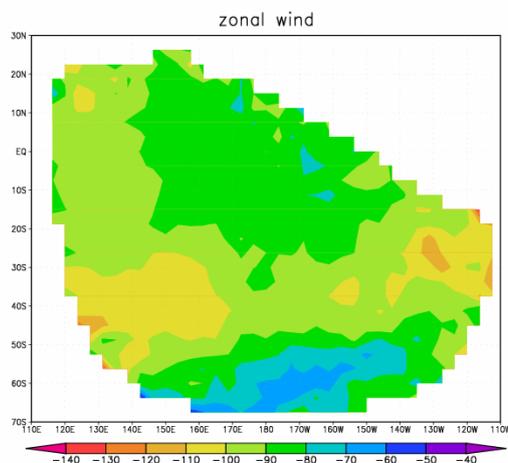
全体的に一致した。本研究でも夜側のデータを省いて南北風を導き出している。従って、熱潮汐波に伴う風である可能性がある。分離ができないので誤差が生じる。

#### 5-4. Takagi and Matsuda (2005) との比較

熱潮汐波によって生じる風をモデルで求めている。両半球対称な結果であり、南北風は北風と南風が入れ替わる。A~Fは初期値などの違いである。

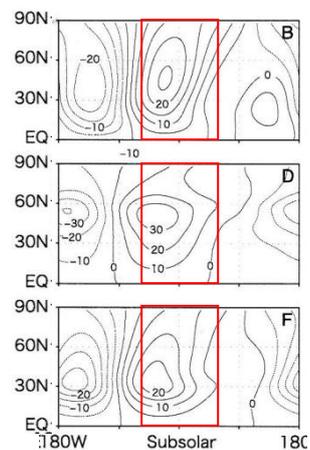
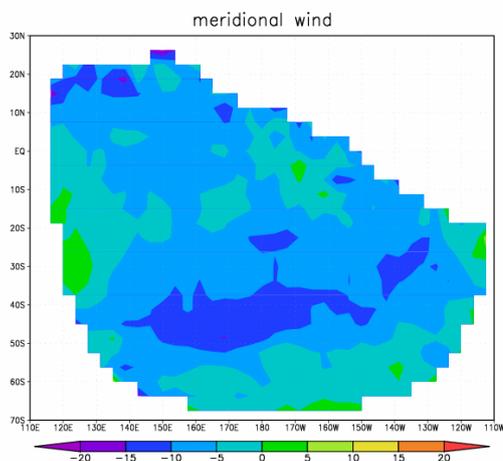
東西風に関しては、中緯度、低緯度、高緯度の順で風速は大きいことや午前よりも午後で風速が大きいことなどの変化傾向が一致した。

南北風についても変化傾向が一致した。



Takagi and Matsuda (2005)

東西風



Takagi and Matsuda (2005)

南北風

### 5-5. Rossow *et al.* (1990) との比較

アメリカ航空宇宙局が打ち上げた金星探査衛星で、OCPV 画像によって風速の解析を行ったものである。OCPV とは、金星の雲分布を測定する機器のことである。以下の図が結果である。

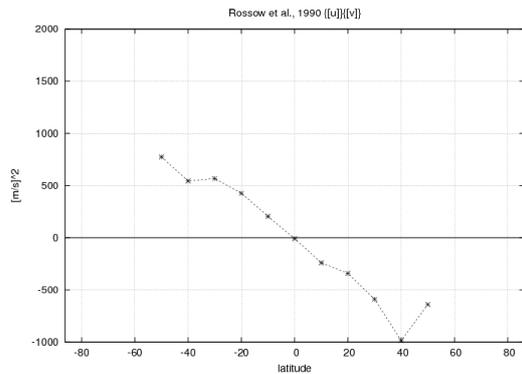
TABLE 8. Components of the time-averaged momentum transport in  $m^2 s^{-2}$ ; positive values indicate northward transport of retrograde momentum. See (13) and (14) for definitions of the components.

Lat (deg)	$[U][V]$	$\{[U^*][V^*]\}$	$\{[u][v]\}$	$\{[u'v']\}$	$[UV]$	$\{[U^*V^*]\}$	$-[U^*][V^*]$
-50	-603.1	-171.5	-774.6	172.8	2.0	-0.7	171.5
-40	-477.1	-67.2	-544.3	58.6	0.9	-9.5	67.2
-30	-474.3	-93.1	-567.4	95.1	-0.2	2.2	93.1
-20	-507.1	81.5	-425.6	-85.9	0.0	-4.4	-81.5
-10	-268.8	63.8	-205.0	-58.1	2.1	3.6	-63.8
0	-5.7	14.1	8.4	-13.3	0.8	0.0	-14.1
10	302.9	-63.2	239.7	77.8	1.0	13.6	63.2
20	414.3	-73.1	341.2	85.1	1.8	10.2	73.1
30	606.0	-16.6	589.4	37.5	0.6	20.3	16.6
40	894.7	90.1	984.8	-59.2	5.3	25.6	-90.1
50	699.9	-59.8	640.1	91.3	-10.2	41.7	59.8

Rossow *et al.* (1990) における

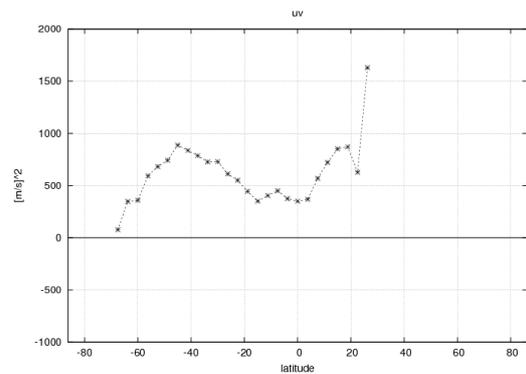
$uv$  と  $u'v'$  の時間平均と東西平均の結果

北向きと西向きを正とした場合、南半球における  $uv$  は北半球で正、南半球で負。 $u'v'$  は、 $10^\circ N \sim 30^\circ N$ 、 $50^\circ N$  で正、 $40^\circ N$  で負。 $0^\circ \sim 20^\circ S$  で負、 $30^\circ S \sim 50^\circ S$  にかけて正となり、南半球において、 $u'v'$  は中緯度ジェットを強化するという報告がある。



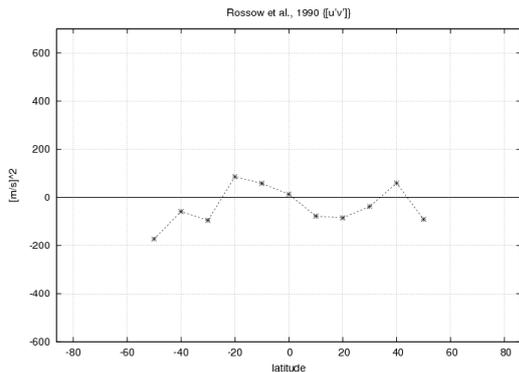
Rossow *et al.* (1990) における

$uv$  の時間平均と東西平均のグラフ

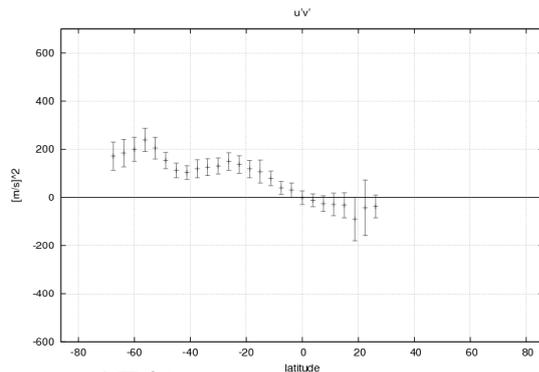


本研究における

$uv$  の時間平均と東西平均のグラフ



Rossow *et al.* (1990) における  
 $u'v'$  の時間平均と東西平均のグラフ



本研究における  
 $u'v'$  の時間平均と東西平均のグラフ

左図は表の結果をグラフで出力したものである。北向きと東向きを正にした。本研究の結果とは、南半球の  $uv$  の符号と変化傾向が一致し、 $20^{\circ}\text{S}$  と  $40^{\circ}\text{S}$  では値が近い。 $u'v'$  は一致しなかった。

## 5-6. $u'v'$ の効果

等角速度と等角運動量の場合との比較より、東西風ピーク値の出る  $33.8^{\circ}\text{S}$  から低緯度側は等角運動量に近く、高緯度側は、等角速度に近いことが分かった。 $u'v'$  は、高緯度で大きい値を示している。つまり、高緯度ではかき混ぜの効果が卓越し、角速度一定に近づけられていると考えられる。

$uv$  の時間平均と  $u'v'$  の時間平均より、 $uv$  は北半球と南半球で正だが、低緯度では南半球における同緯度の値より大きい。 $u'v'$  は北半球で負、南半球では正である。低緯度において  $uv$  が南半球よりも北半球で大きくなる原因は、 $u'v'$  が運動量を輸送したためであると考えられる。つまり、 $u'v'$  は西向き運動量を北半球では赤道側に、南半球では極側に輸送する。

## 5-7. 夜昼間対流

夜昼間対流は完全には言えないが解析できた。 $u'v'$  では、午後側のみ解析でき、 $u'$  ではよく解析できた。

$u'v'$  は午後側では夜昼間対流を示す分布となったが、午前側では示さない。しかし、 $20^{\circ}\text{S}$  以南において、 $175^{\circ}\text{E}$  を基準に午前側と午後側を比べると、午後側の方が値は大きい。また、午前域には、僅かながら負の領域も解析されている。従って、夜昼間対流の存在は示唆される。

$u'$  では、 $10^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{S}$  の 9:00 付近を除くと予想された結果を得ることが出来た。

温度最高点は、 $u'v'$  では、およそ 1 時間分午後側に移動させ 13:00 付近とし、 $u'$  ではおよそ 2 時間分移動させ 14:00 とした。以上から温度最高点は午後に傾くことが推測される。

## まとめ

### ①東西風

- ・スーパーローテーションが解析された。
- ・回転周期は、2.4~5.0 日で固体部分の 48 倍~101 倍の速さで大気は回転している。
- ・時間に着目した変化傾向：午前から正午にかけて減速、正午から午後にかけて加速。
- ・緯度に着目した変化傾向：高緯度<低緯度<中緯度の順で風速は強くなる。
- ・東西平均すると、両半球 0°~20°で一定、20°S~40°S で加速し、40°S 付近で中緯度ジェットが存在が示唆される。40°S 以南では減速する。
- ・30°S より低緯度側では、等角運動量の場合の東西風と近く、30°S より高緯度側では、等角速度の場合の東西風と近い。
- ・先行研究とよく一致する。

### ②南北風

- ・両半球で北風となり子午面循環は解析されなかった。
- ・緯度に着目した変化傾向：高緯度<低緯度<中緯度の順で風速は強くなる。
- ・軌道別では、南半球の一部において南風が解析され、高緯度に存在する確率が高い。
- ・東西平均すると、両半球 0°~20°で一定、20°S~45°S で加速し、45°S で極大となる。その後は減速し、高緯度で南風に転じる。
- ・先行研究とよく一致する。

### ③ $uv$ と $u'v'$

- ・先行研究 (Rossow *et al.*, 1990) と比較すると、南半球の  $uv$  の符号と変化傾向が一致し、20°S と 40°S では値が近い。 $u'v'$  は一致しなかった。
- ・ $u'v'$  は、高緯度でかき混ぜの効果が大きい。
- ・ $u'v'$  は、西向きの運動量を北半球では赤道側に、南半球では極側に輸送する。

### ⑤角速度と角運動量

- ・角速度：ほぼ一定。
- ・角運動量：高緯度で小さい。

### ⑥夜昼間対流

- ・夜昼間対流は温度最高点付近でのみ解析された。
- ・ $u'v$  は午後で解析できた。午前ではできなかったが、傾向はみられる。
- ・ $u'$  は 10°S~40°S の 9:00 付近以外でよく解析できた。
- ・温度最高点は午後に傾く。