

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

### Analysis of planetary fluid images considering local rotation

(局所回転を考慮した新たな惑星流体画像解析)

氏名 武藤 圭史朗

惑星の大気中の運動は時間、空間的に様々なスケールで同時に発生している。それぞれのスケールでの運動は独立しておらず、小さなスケールでの運動が大きなスケールの運動に影響を与えており、その逆もある。そのような惑星大気の運動を理解しようとする場合大きなスケールの運動であってもそのスケールでの大気の動きだけでなくより小さなスケールでの運動を同時に理解することが重要となる。

惑星大気の運動を計測する手段として雲追跡というものがよく用いられている。雲追跡とは、惑星周回機などから取得された時間的に連続した雲画像を用いて雲パターンの移動を追跡しそれを基に雲の速度ベクトルを求める手法である。この手法を用いることにより、時間的に連続した2枚の画像があれば大気中で風速の直接計測を行わなくても風速を求めることができる。一般に雲は大気と同じ速度、向きで移動していると考えられるので、これにより風向と風速を求めることができるのである。この手法は地球において気象衛星による雲画像に対して利用されているだけでなく、金星や木星などの大気中での直接観測が難しい地球以外の惑星の大気の運動を求めるために使われている。

これまでの雲追跡手法は、相互相関法という追跡領域（ひとかたまりとして移動するとみなされる大気の小領域）の画像間の相互相関係数を用いて同一パターンを同定して移動ベクトルを計測する手法や、位相限定相関法という追跡領域の複素振幅スペクトルを用いて移動ベクトルを計測する手法などが存在している。このうち位相限定相関法は追跡領域の位相情報のみを利用しているため、全体的な明るさの変化やランダムノイズの影響を受けにくいという特徴がある。しかし、いずれの手法においても特徴的パターンの平行移動しか想定しておらず、特徴的パターンの回転や拡大・縮小などは検出できなかった。実際の惑星の大気運動においては特徴的パターンの回転運動や上昇流、下降流などによる雲の特徴的パターンの拡大、縮小などが存在しており、これらの動きを追跡することは重要であると考えられる。そこで、本研究では今

まで使われていた雲追跡アルゴリズムを改良し、新たに回転不変位相限定相関法を用いて惑星の雲追跡を行うアルゴリズムを開発した。回転不変位相限定相関法とは、追跡領域をフーリエ変換し、その振幅スペクトルを対数極座標変換した画像を用いて移動量を計測することで、追跡領域の回転角度を求め、その求めた角度だけ元の追跡領域を回転させたのちに位相相関限定法を用いて平行移動量を求める手法である。この回転不変位相相関限定法により、特徴的パターンの平行移動のみでなく回転運動も同時に検出できるようになった。

局所的な回転運動は、大気中の波動や乱流を反映しており、これらを検出することは前述のような異なるスケール間の相互作用を明らかにする上で重要である。これまでは、雲追跡をもとに大気回転運動を検出する場合には、並行移動を仮定した雲追跡によって求められた風速場から渦度を計算するという手順を取っていた。そのため、求められる空間スケールは追跡領域より大きいものになってしまう。また、小さい空間スケールでの運動を計測するため追跡領域を小さくすると、追跡領域内に追跡可能な特徴的パターンが乏しく雲追跡ができなくなってしまうという問題がある。しかし、本研究で用いた手法を用いることにより追跡領域とほぼ同じ空間スケールの回転を計測できる。

追跡の分解能向上も試みた。雲追跡の精度は相互相関法、位相限定相関法、回転不変位相相関限定法のいずれの場合でも1ピクセル程度となり、通常、サブピクセル単位での移動量の推定はできない。空間スケールが小さな大気運動を計測するためには1ピクセル単位では誤差が大きく、有意な変動が求まらないことが考えられる。位相限定相関法においては、理想的な相関曲面がsinc関数となることが知られており、それを利用して相関曲面をsinc関数でフィッティングしてサブピクセル単位で極大位置を推定することが考えられる。しかし、本研究で対象としている画像ではノイズの影響などにより相関曲面がきれいなsinc関数とならずフィッティングではうまくサブピクセル単位での推定を行えなかった。そこで、本研究ではアップサンプリングを用い、データ点数を増やすことによりサブピクセル推定を行った。アップサンプリングの方法としては、2画像の周波数空間での相関曲面においてゼロ埋めを行い、見かけのデータ点数を増やしたのちに、逆フーリエ変換してやることにより相関曲面のデータ点量を増やす方法を取った。これにより相関曲面での極大値付近でのデータ点数が増え極大位置を精度良く求めることができる。この手法によりこれまでの雲追跡に比べ精度良く風速が求められるようになった。

このような手法をまず模擬画像ペアに適用して有効性を評価した。本研究では風速場全体が剛体回転している場合、点渦の場合、緯度経度方向に正弦波的な風速擾乱が存在している場合について雲パターンの回転角度と風速場から導出した渦度を比較した。また、正弦波的な風速擾乱が存在している場合について、追跡領域のサイズと風速擾乱のスケールについて複数の場合において調べた。その結果、剛体回転している

場合の場合においては正しく風速場、回転角度が求まった。また、風速擾乱の空間スケールが追跡領域よりも大きい場合は回転角度、回転成分ともに綺麗に求まることが分かった。しかし、風速擾乱の空間スケールが追跡領域のサイズよりも小さくなると、回転速度は概ね求まるものの、渦度に関しては求まらない領域が増えてくることが分かった。これは渦度が風速の差分を基に導出していることによるものであり、風速を求めることができない点が少数でも存在するとその周囲でも渦度を求めることができなくなってしまうという問題のせいであると考えられる。風速場から渦度を導出する前に風速場を平滑化することによってデータ欠損なく渦度を求めることは可能であるが、その場合は小さな空間スケールでの大気の運動を追うことができなくなってしまう。また、風速擾乱の空間スケールが小さい場合、その擾乱を追跡するために擾乱の空間スケールよりも小さいサイズの追跡領域で雲追跡を行うということが考えられるが、追跡領域を小さくすると追跡領域内の特徴的パターンが減ってしまい、雲追跡が行えないということも分かった。

これらの結果より本手法によって雲追跡ベクトルの精度を上げつつ従来検出できなかった小スケールの回転運動を抽出することができることが確かめられた。

これらの模擬画像を用いた結果をもとに実際の金星、および木星の画像に対して雲追跡を行った。その結果、金星においては北半球で左回転、南半球で右回転といった南北対照的な構造が確認され、木星では赤道域において小規模な渦が連なっている様子が確認された。小規模な渦による典型的な回転速度の振幅は金星で  $1.0 \times 10^{-5}$  rad/s、木星で  $3.0 \times 10^{-5}$  rad/s 程度であった。この違いは木星と金星の惑星パラメータが原因と推測できる。木星の自転周期は 10 時間と早く、金星の自転周期は 243 日と遅い、これにより木星ではコリオリ力が大きく、金星では小さくなる。この影響により木星の渦は金星の渦よりも小さくなる。そのため、木星では金星に比べ小規模な渦運動が支配的になると予想される。別の原因として木星では雲の対流活動が雲頂に達していると考えられているのに対し、金星は雲頂周辺が安定成層しているため対流活動が雲頂に到達しないため小規模な渦運動が木星に比べ金星では少なくなっていると考えられる。

これまでも小規模な渦運動と惑星スケールの運動の相互作用の研究はある程度行われてきたが本手法を用いることでより広い波長範囲で空間スケール間の相互作用を調べることが可能になると考えられる。