

特集／シューメーカー＝レビー第9彗星の木星衝突

SL9 衝突痕の時間変化

浅田 正¹, 宮崎 勲², 赤羽 徳英³

1. 観測目的と方針

我々は可視光で木星面のルーチン観測を行っている。木星表面にみえる斑点は渦であることが分かっているが、その形や位置の時間変化を追跡し数値シミュレーションと比較することで、木星大気の力学的パラメータを推定したり、斑点の力学モデルを作るためである。御存じのように、木星の模様には大赤斑のように長寿命で安定なもの、種々の攪乱のような活動的で変化の激しい現象があるが、変化を追跡するには活動的な現象の方が都合が良い。ところが活動的な現象の初期の状態というのは、小さくかすかな斑点である場合が多く、たいへん発見が難しい。現象がある程度進展して初めて気がつき、過去の画像をさかのぼって初期の状態を調べてみることになるが、意図して観測していないので欠測ということも過去にはたびたびあった。ところがSL9の衝突現象の場合いつ起こるのかははっきり分かっているため、もし衝突痕が模様として捉えられるなら、初期の段階から時間変化を追跡することができると思われた。SL9の衝突現象が話題になった時にまず頭に浮かんだのは、衝突痕を検出してみたい、またできれば時間変化を追跡してみたいということであった。(もっとも衝突する前には衝突痕がこれほど大きくなるとは予想できなかったが。)衝突期間中、HSTも高分解能の画像を撮影したが、いくら珍しい現象といってもいつまでもHSTを木星ばかりに向け

ておくことはできないだろうし、HSTの観測が終わってからの衝突痕の時間変化の記録は貴重な資料になると思われた。

一方MITのグループは衝突した時に発生する重力波の伝播する様子を数値シミュレーションして発表していた[2]。もし重力波の伝播が観測できれば、その伝播速度をコリオリパラメータで割ってロスビーの内部変形半径を求めることができる。木星大気の力学モデルで最も重要なパラメータがこの変形半径なので、重力波を検出し伝播速度を求めることができれば面白いと思っていた。(しかし結局我々は重力波らしい模様を検出することはできなかった。)

衝突痕を検出し時間変化を追跡するためには、できるだけ高分解能の画像を撮影する必要がある。ところがSL9の衝突する7月中旬は木星観測シーズンの終わりに近く、また近年は木星の赤緯が低いため、夕方の西空に1~2時間撮像ができる程度で観測条件は良くなかった。南へ行くほど南中高度が高く観測が可能な時間も長くなるので、筆者の一人(浅田)は衝突の期間中沖縄へ遠征して観測させてもらった。また可視域では検出できないほど小さくても、メタンバンドでは明るく見える可能性があったので、従来のRGBでの撮像に加えてメタンバンドによる撮像も行った。以下観測結果を紹介し、数値実験の結果と比較した考察を述べたい。

¹九州国際大学, ²東亜天文学会, ³飛騨天文台

2. 観測

2.1. 観測方法

観測に使用した望遠鏡・フィルターを表1.に示す。3人とも同じ型のCCDカメラ(SpectraSource社製Lynxx-PC型)を使用した。前述のように，浅田は7月17日から24日まで沖縄に滞在して宮崎と共同観測を行った。7月25日以降は，浅田は福岡で宮崎は沖縄でそれぞれ観測を続けた。

画像処理としてはThermal NoiseとFlat Fieldを補正した後，可視画像にはUnsharp Maskを2回かけて細部を強調した。

2.2. 衝突痕の初期状態

衝突痕は真っ黒ないしグレーに見えたので色による見え方の違いはほとんど無い。図1.(a)から(d)にL核の各フィルターでの見え方を示す。メタンバンドでは明るく見えた。

図2.(a)にL核，図3.(a)にA核とC核の衝突痕の発生初期の画像を示すのでご覧いただきたい。L核の衝突痕(右側のもの)は左側のG核とともに，三日月状暗部を伴った極めて濃い暗斑であった。またK核も同様の外見であった。一方A核やC核はかなりコンパクトであり濃くない暗斑であった。しかしHSTの画像ではA核の周りにも淡い三日月状暗部が見られた。

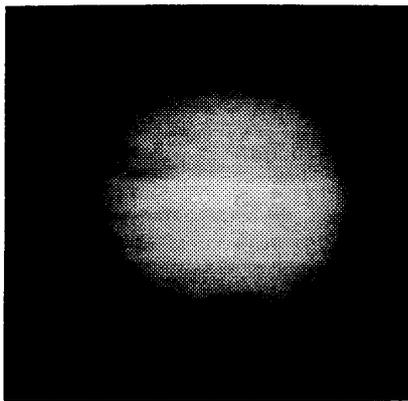
2.3. 衝突痕の時間変化

L核の衝突痕の時間変化を図2(a)から(c)に示す。7月20日には三日月状の暗部を伴った大変に濃い暗斑であった。(2つ並んでいるうちの右側。左側はG核。)7月27日の画像では中央やや左にL核，その左にG核，右端にK核の衝突痕が見える。L核の衝突痕の三日月状暗部の北の一部がちぎれて東へ移動し，南の一部も東へ引き伸ばされていた。また中心の暗斑は東西に長く引き伸ばされていた。8月3日の画像では右側の黒いかたまりがL核の衝突痕である。中心の暗斑と暗部が合体して東西に

赤羽 65cm屈折		
	λ	$\Delta \lambda$
Blue	426.5nm	10nm
IR Conti.	721.5nm	11nm
IR Conti.	751.2nm	4.5nm
CH ₄ Band	885.9nm	20nm
宮崎 40cm反射		
	λ	$\Delta \lambda$
Blue	(B390 + IR-Cut)	
Green	(PO1 + IR-Cut)	
Red	(R60 + IR-Cut)	
IR Conti.	604nm	5nm
CH ₄ Band	618.4nm	2.5nm
CH ₄ Band	727nm	2.5nm
IR Conti.	750nm	5nm
IR Conti.	829nm	5nm
CH ₄ Band	893nm	5nm
浅田 30cm反射		
	λ	$\Delta \lambda$
Blue	435.2nm	46.5nm
Green	545.4nm	43.8nm
Red	716.0nm	59.5nm
IR Conti.	750nm	5nm
CH ₄ Band	893nm	5nm
表1. 観測に使用した望遠鏡・フィルター		

図1. L核の衝突痕の発生初期の様子.

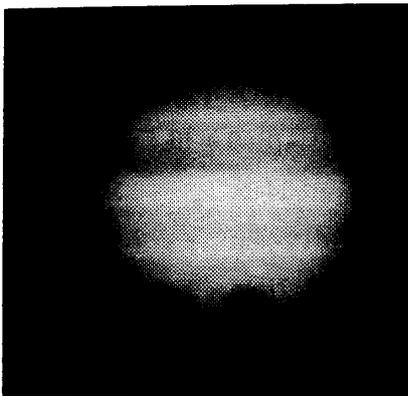
- (a)Red. 7月20日11時16分UT $\omega_3 = 358^\circ$
- (b)Green. 7月20日11時22分UT $\omega_3 = 2^\circ$
- (c)Blue. 7月20日11時24分UT $\omega_3 = 3^\circ$
- (d)メタンバンド. 7月20日11時28分UT $\omega_3 = 5^\circ$



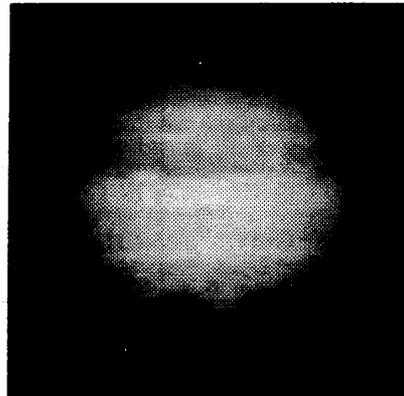
(a) ↑

図2. L核の衝突痕の時間変化.

- (a)7月20日11時40分UT $\omega_3 = 13^\circ$
- (b)7月27日11時15分UT $\omega_3 = 330^\circ$
- (c)8月3日13時3分UT $\omega_3 = 8^\circ$



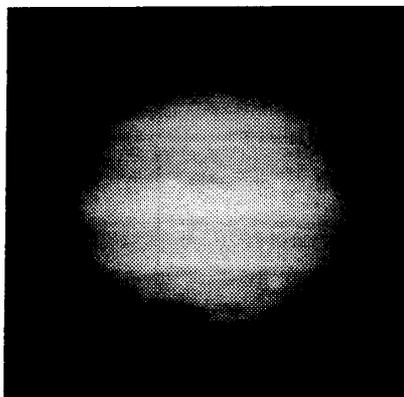
(b) ↑



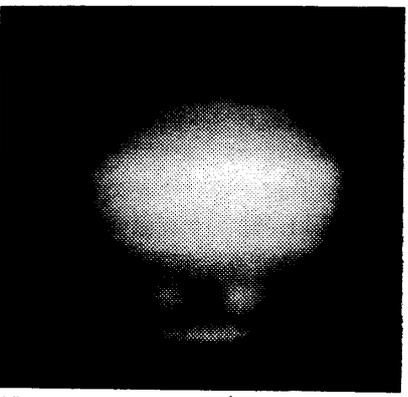
(a) ↑



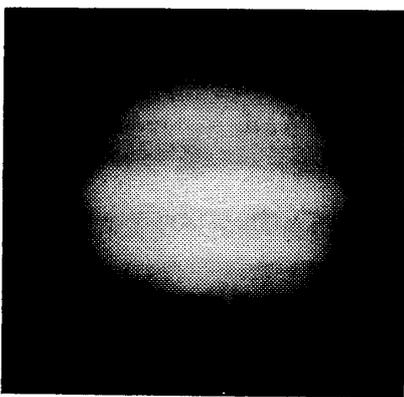
(c) ↑



(b) ↑



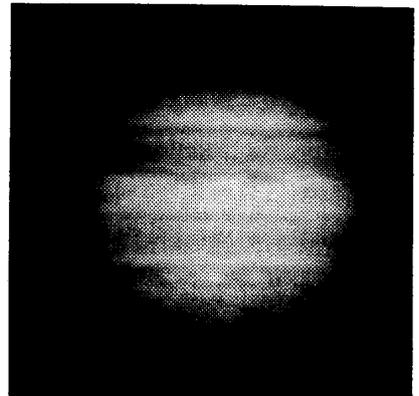
(d) ↑



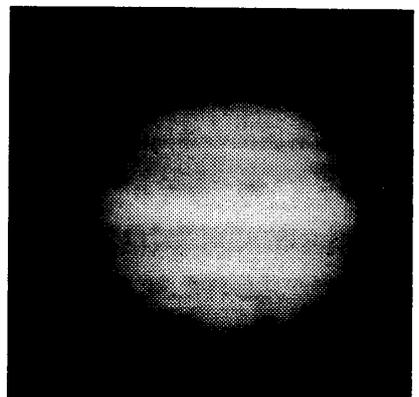
(c) ↑

図3. C核の衝突痕の時間変化.

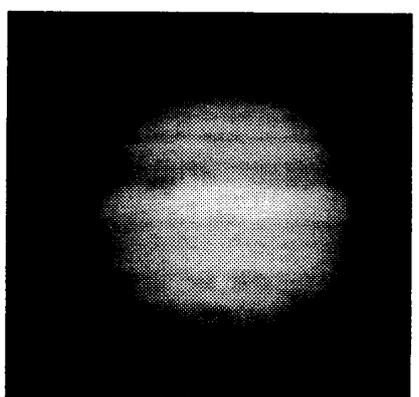
- (a)7月17日10時40.5分UT $\omega_3 = 245^\circ$
- (b)7月21日13時2.5分UT $\omega_3 = 213^\circ$
- (c)7月24日11時2分UT $\omega_3 = 231^\circ$



(a) ↑

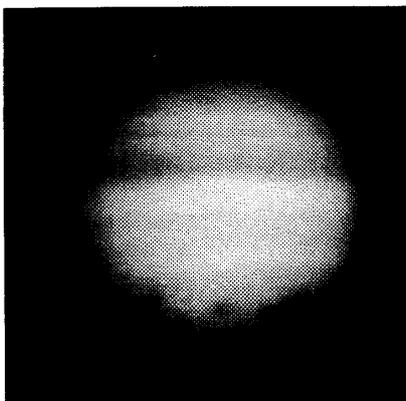


(b) ↑

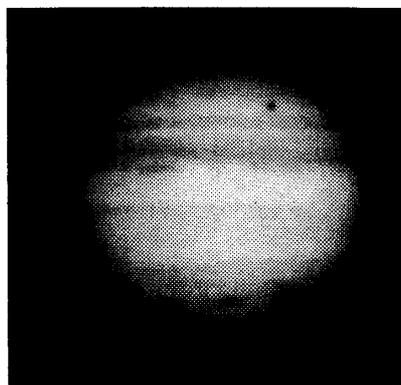


(c) ↑

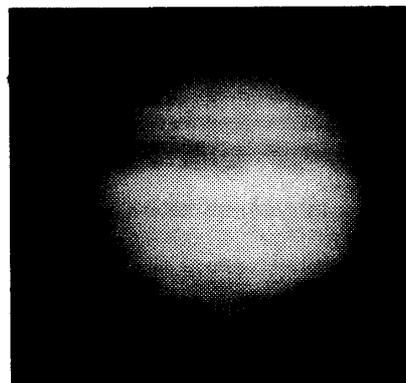
図4. H核の衝突痕の時間変化.

(a) 7月23日 10時48分 UT $\omega_3 = 72^\circ$ (b) 8月4日 10時52.5分 UT $\omega_3 = 80^\circ$ (c) 8月16日 10時53分 UT (Green) $\omega_3 = 84^\circ$ 

(a)



(b)



(c)



細長く見えていた。

C核の衝突痕の時間変化を図3.(a)から(c)に示す。7月17日の最初の観測では小さな暗斑であったが、7月21日には∪形に見えた。7月24日には徐々に引き伸ばされ、やや右下がり(東端が南に傾いた)の細長い模様となった。8月中旬はK核の衝突痕と接近して、存在が確認できなかった。

いささか変わった衝突痕として、H核の衝突痕の時間変化を図4(a)から(c)に示す。H核はHSTの観測で星型になった複雑な様子を示していた。我々の観測では、H核は7月23日にはかなり右上がり(東端が北に傾いた)の細長い暗斑であった。その後8月4日にはほぼ東西になり、8月16日にはやや右下がりになった。

他の衝突痕も含めた一般的な傾向として

- ・三日月状の暗部の東部が濃化し、幅広くなった。
- ・三日月状の暗部の北部と南部が東向きジェットに流されて東へ移動した。
- ・中心の暗斑は東西に長くなった。
- ・中心の暗斑と三日月状暗部が合体して細長くなった。

の点を指摘したい。

では

- ・なぜ衝突痕は東西に細長くなったのか?
- ・H核の衝突痕はなぜ星型だったのか? 時間変化と関係があるのか?
- ・衝突痕が右上がりや右下がりになったのはなぜか? 緯度の違いか? H核の衝突痕のように、右上がりから右下がりに変化した衝突痕は緯度変化したのか?

という点が疑問に思われた。

3. 数値実験

メタンバンドの画像で衝突痕が明るく見えたことから、衝突痕の場所には成層圏まで達するような強い上昇気流が存在したことが推測される。この上昇気流の水平スケールは数千kmにも達したので、コリオリ力によって運動方向が曲げられ、渦を巻いていたことが想像される。可視光で見える模様は対流圏上部、雲の表面の現象なの

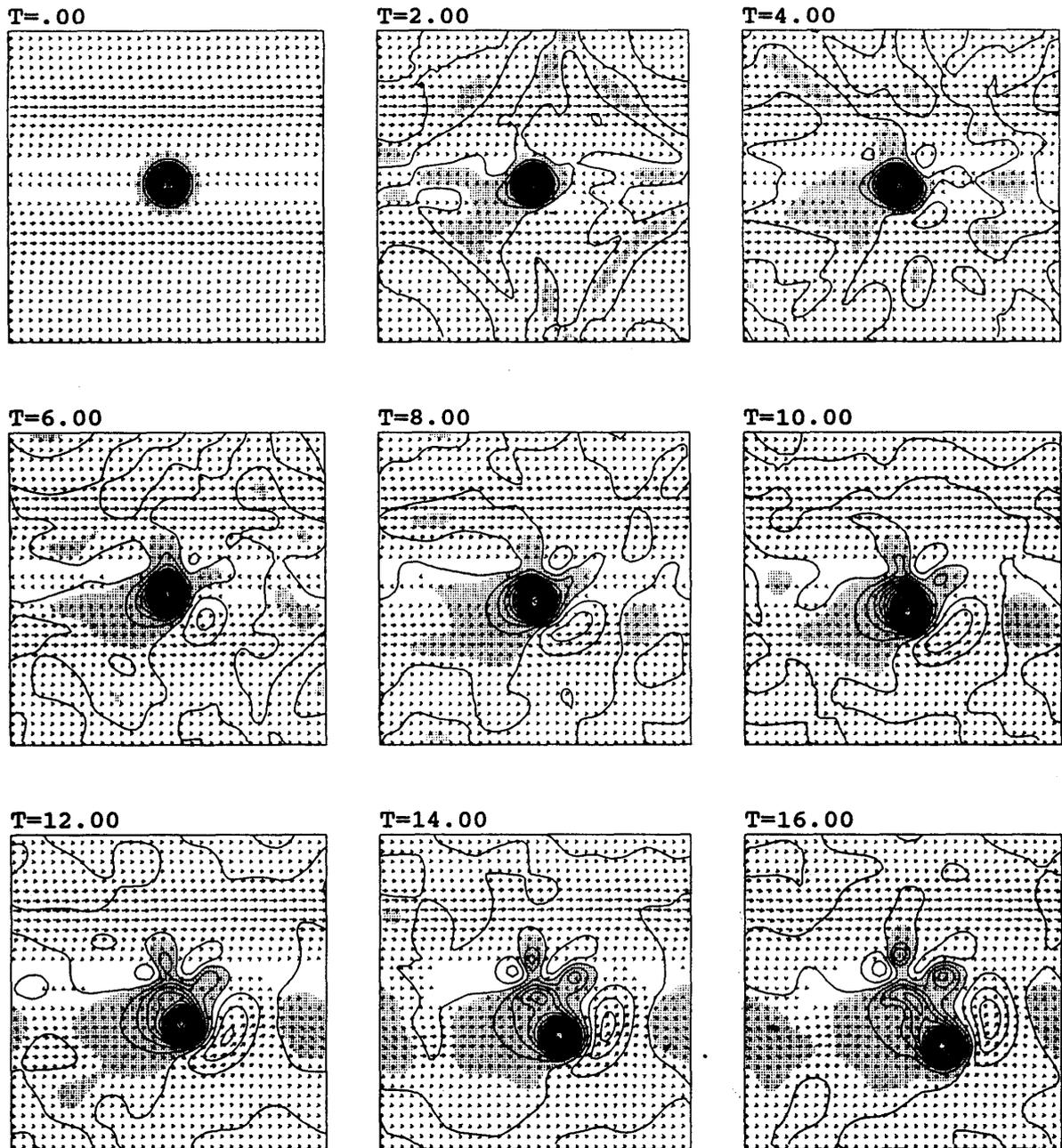


図5. 数値実験による渦の時間変化. $L_d = 1500\text{km}$. $U_{\text{eddy}} = 0.4\text{m/sec}$

で、衝突痕も木星の他の斑点と同様、雲の表面の渦であったと考えられる。

では渦は衝突痕のように振る舞うのであろうか？ということ調べるために数値実験を試みた。木星の大気モデルを考える場合、最も基本で重要な物理量であるロスビーの内部変形半径が求められていない。ここではこの変形半径を自由パラメータにして、渦の振る舞いがどのように違ってく

るかを調べた。

2層のRigid-Lidモデルを用いて帯状流の中の渦の振る舞いを調べ、衝突痕の時間変化と比較した。直径が約2000kmの円形の高気圧性渦を南緯50度付近の西向きジェット流の緯度に置き、変形半径の値を1500kmと200kmにして数値実験を行った。

変形半径が1500kmの場合を図5に示す。この図は2層の境界面の高度分布を上層の流れの場とと

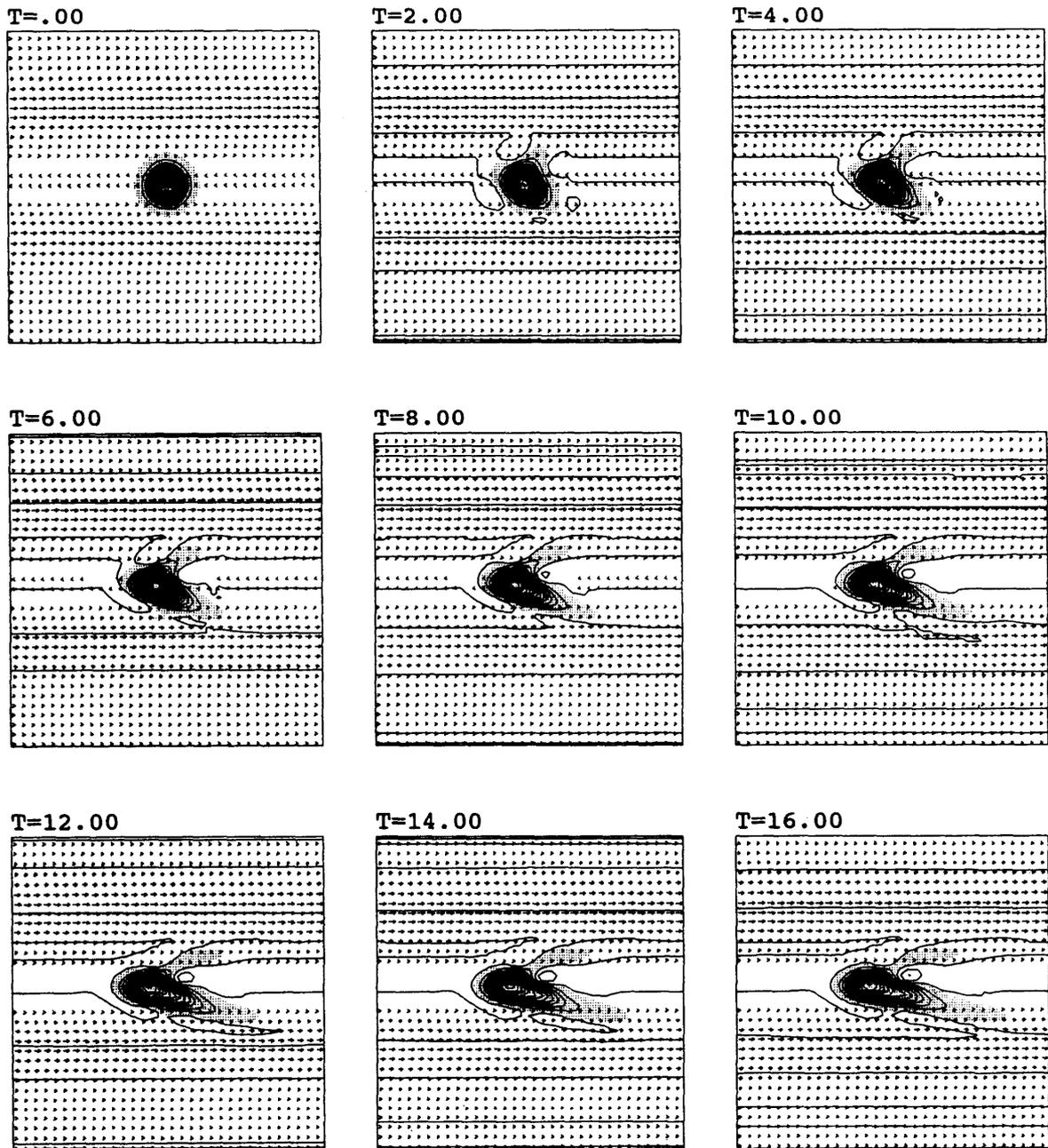


図6. 数値実験による渦の時間変化. $L_d = 200\text{km}$. $U_{\text{eddy}} = 0.4\text{m/sec}$

もに描いたものである。ハッチを入れた部分は高度が平均より低い領域である。渦は最後まで円形を保っていた。この場合、元の高気圧性渦の南東側に2次的な低気圧性渦ができ、元の渦はこの渦とともに南へ移動していった。また南側のジェット流は低気圧性渦付近で大きく蛇行していった。

変形半径が200kmの場合を図6に示す。渦は東西に引き伸ばされていったが、位置は元の緯度に

留まった。また大きな低気圧性の渦はできなかったし、南側の東向きジェット流の蛇行も見られなかった。この結果は衝突痕の中心の暗斑が東西に引き伸ばされたことと似ているように思われる。

図6の場合は渦を周る流れの最大速度が0.4m/secであったが、この最大速度を12m/secにしたものを図7に示す。T=2.0で渦が4本足の星型になったが、これはおそらく渦を周る流れの場の不安定の

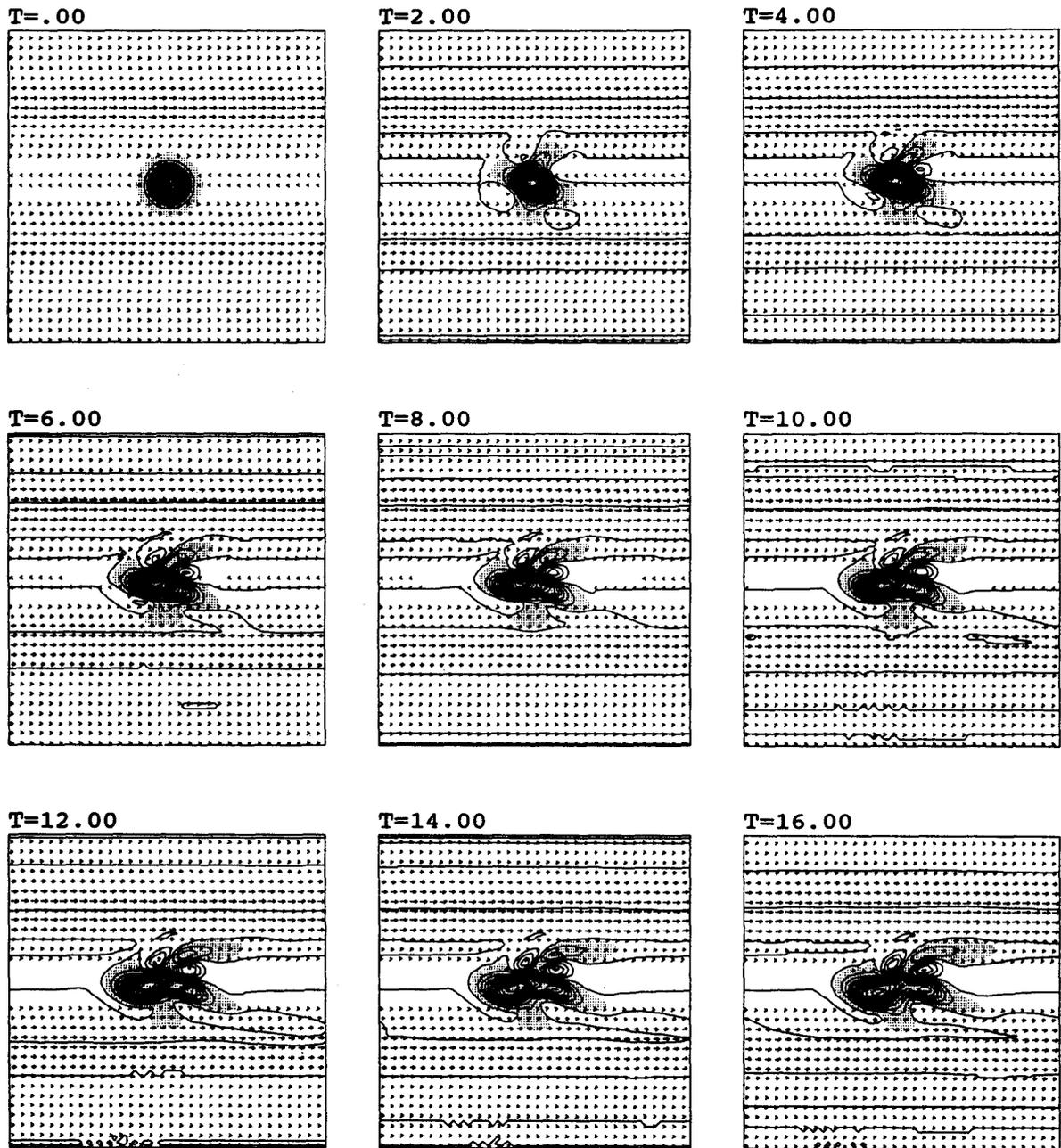


図7. 数値実験による渦の時間変化. $L_d = 200\text{km}$. $U_{\text{eddy}} = 12 \text{ m/sec}$

ためと思われる。衝突痕の中にはH核のように星型のものがあったが、それも渦を周る流れが不安定になってそのような形になったのかもしれない。しかしそれ以降の時間変化はH核の時間変化とかなり異なる。図7と同じ最大速度で変形半径が1500kmの場合はここでは示さないが、元の渦は円形のままであった。

4. 考察とまとめ

衝突痕の三日月状暗部は帯状流に流されて初期の形が崩れていった。また衝突痕の中心の暗斑は東西に引き伸ばされていったが、その過程で右上がりや右下がりになった。

変形半径が1500kmの場合(図5)の数値実験結果は、渦が円形の形を保つという点で衝突痕の時間

変化と似ていない。変形半径が200kmの場合は、渦が東西に引き伸ばされた(図6)点や渦流の不安定で渦が星型の形状になった(図7)点で、衝突痕の振る舞いと類似点がある。

Asada et al. [1]は北温帯縞に発生した活動現象から変形半径を300km以下、おそらく120km程度と推測している。今回の数値実験でも変形半径が200kmの場合の方が衝突痕の時間変化を良く説明できるので、木星大気の様子のあたりの高度の変形半径は従来よく使われていた1000km以上の値よりかなり小さな、100kmから200kmといった値かもしれない。しかし変形半径が小さいとなるとまた新たな疑問が生まれる。変形半径の小さな大気の中で、大赤斑や永続白斑(STB-Oval)のような数千kmから10000kmにもおよぶ巨大な渦がどのように形成され維持されているのだろうか？

なにはともあれ、木星の様子の時間変化の観測は19世紀から100年以上の伝統があるが、今回のSL9衝突現象は活動的な大気現象を初期の段階から(詳しく?)追跡できたという点で、観測史上画期的なものであったといえよう。来年5月のIAUのコロキウムがアメリカで開催されるが、HSTの成果やヨーロッパの研究者の研究成果が発表されるのが楽しみである。

参考文献

- [1] Asada, T. et al., 1993: Initial Development of Eddies in High-Speed Zonal Flow: One Interpretation for NTB Activity of Jupiter. *Icarus* 104, 60-68
- [2] Harrington, J. et al., 1994: Dynamic response of Jupiter's atmosphere to the impact of comet Shoemaker-Levy 9. *Nature* 368, 525-527.