

## 消えた木星の縞を追う—SEB 14年ぶりの淡化—

佐藤 毅 彦\*

## 1. はじめに

プロの天文学者であれば自分の楽しみのために星を眺めるという時間は多くないかも知れないが、しかし誰でもその天文歴の最初の頃には望遠鏡で月のあばたや土星の環、金星の満ち欠けや木星の衛星の動きなどを胸を震わせながら見たことと思う。この原稿で紹介するのはそんな地球の兄弟星の長男とも言うべき存在、太陽系最大の惑星である木星面模様の変化についてである。読者の中には何を今更、木星については探査機の接近観測で十分に知り尽くされているのでは、と思われる方もあるかも知れない。が、現実には探査機観測で判ったこともあるが判らないことの方が相変わらず多いのであり(木星表面に見られる縞模様の変因すらいまだに判っていない!)、何よりも以下に述べるように年々変化する木星であってみれば探査機による時間的には「点」の観測と同等に地上からの「線」の観測を継続することが重要である。特に、最近の木星面は南赤道縞の淡化現象によって非常に注目を集めているのである。

木星はその大きな重力故に誕生当時の(つまり原始太陽系の)元素組成をほとんどそのままに保っていると考えられている。およそに言って、水素( $H_2$ ) 89パーセント、ヘリウム(He) 11パーセントからなる還元気体であり、固体核は存在しないか、あってもごく中心のみに限られている。従って、我々はその表面付近の雲の織りなす模様を通じて木星大気の動きを観測しているのである。木星の雲についてはLewisの先駆的な仕事(文献1)が有名で、太陽元素組成に断熱温度勾配を仮定した熱化学平衡計算から木星大気中には複数の雲が成層している可能性があることを示している。我々の眼に触れる最上層の雲はアンモニア( $NH_3$ )の氷晶粒子であるとしており、これは種々の観測からも広く支持されている。それよりも下層は不確定であるが、いずれにしる固体地面を持たないことからその表面模様は年々変化を繰り返し、我々観測者の目を楽しませてくれるのである。現在の木星が特に注目されているというのは、昨年1989年の合(地球-太陽-木星が一直線に並び、地上からは木星を観測できない期間)の頃わずか数カ月で近年には稀なほどにその表面の様子が一変してしまったからである。きわめて短期間に起こったその変化は、木星面にみられる帯

縞模様の本質を解きあかす手がかりを与えてくれると思われている。その詳細を多少なりとも学問的立場から紹介しようというのが本稿の目的なのである。

## 2. 木星面にみられる帯と縞、木星の風について

最初に木星面に通常見られる主な模様を紹介しておくことにしよう。図1(=表紙)には京都大学理学部附属飛騨天文台の65cm屈折望遠鏡を用い緑色光で撮影した、ここ数年の木星面の様子をまとめた。最も左側のa(1986年のもので典型的な木星面の帯縞模様を見せていた)について各帯縞の名称を示してある。眼視観測者は慣習的に明るく見える部分を帯(Zone)、暗く見える領域を縞(Belt)と呼んでいる。

さきに「木星の模様は年々変化している」と述べたが、しかし基本となる構造はあるわけで、それらは木星大気中に観測される風系と密接な関係がある。図2に示したグラフは木星の可視雲頂のレベル(対流圏上部)を東西方向へ流れる平均的な風の場合(帯状流と呼ばれる)で、惑星探査機ボイジャーの観測データからまとめられたものである(文献2)。東西への風が交互に現れ、しかもそれが帯の極寄りの縁では東向きの風、反対に帯の赤道寄りの縁では西向きの風になっていることが判るのである。地球ではハドレー循環による緯度方向への大気の動きがコリオリの力を受けて偏西風や偏東風になっているわけだが、木星でも大気の循環がその強いコリオリの力(自転周期が地球のタイムスケールで10時間弱なので)によって大きく東西に曲げられてその帯状流を作っていると考えられているのである。これら帯縞の明るさ(反射能)は年々変化をしていて(その最も激しいものが次に述べる南赤道縞の淡化・濃化現象である)、それが大気の力学とどのような関連があるのかは甚だ興味深い問題である。

## 3. 南赤道縞の淡化と濃化、今回の淡化の持つ意義

前節で紹介した帯縞の中で今回の主役となるのは南赤道縞(SEB)である。図1(=表紙)の最も右側dに掲げたのは1989年12月に撮影した木星像であるが、左の3つと比べるとその違いが一目瞭然である。つまり、本来濃い縞模様であるはずのSEBの位置がほとんど帯同然に明るくなってしまっていて、これを「淡化」と称している。1989年4月にはまだ濃いSEBの姿があったが(石橋力氏によればその時点でやや淡くなる兆しがあったという)、その後の合をはさんだ観測不能期間に淡化したらしく、7月のはじめに湧川哲雄氏(沖縄)の観測

\* 東京理科大学 Takehiko Satoh: Investigation of the Faded South Equatorial Belt of Jupiter—Episodic Disappearance of the SEB in 14 Years—

Voyager 1 & 2 Mean Zonal Flow (Violet)

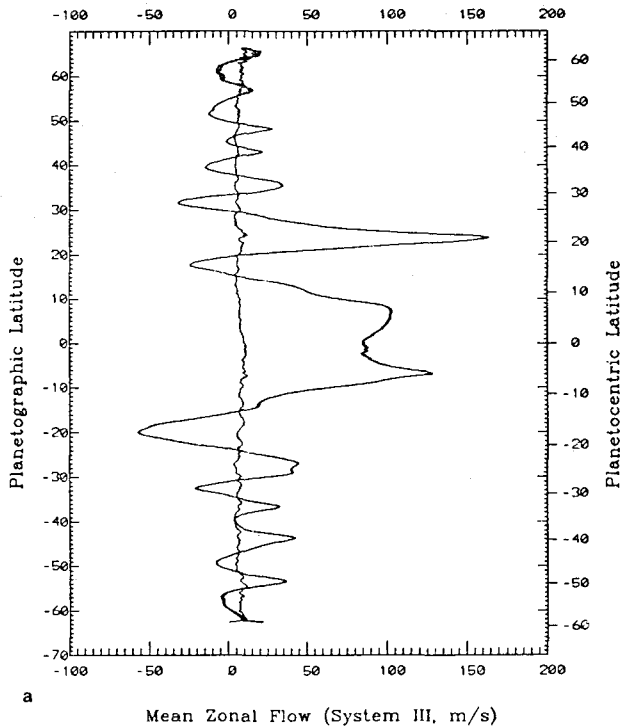


図 2 木星面の帯状流  
 探査機ボイジャーによる膨大な画像相関の手法によって Limaye (1986) が解析したものの、現在のところ最も精密な木星の帯状流プロフィールである。体系 III (木星が放射するデカメートル波の変動周期で、内部の自転を表わすと考えられている) に対する相対的な風速を表わしている。+ (右方向) が東向き、- (左方向) が西向きの風に対応する。北緯 21 度付近の強い東向きの風が本文中で述べられている北温帯流 C のジェットである。

では既に木星面の様子は一変していた。歴史的に見れば SEB の淡化は初めてのことでなく、今世紀の初頭から幾度か記録されている(文献 3)。そしてこれまでの例では、淡化した SEB はある期間を経ると突然 SEB 攪乱 (Disturbance) と呼ばれる暴発的な活動を起こして、わずか数カ月でもとの濃い縞へと復活してしまうのである。今回の淡化の特徴として「非常に短期間で淡化してしまった」ということ、そのタイム・スケールが通常の攪乱で SEB が復活する数カ月という期間に近似していることが注目を集めている。過去を振り返ってみると、SEB の濃化は攪乱によってはっきりと認識されているが、淡化の過程はいつの間にか徐々に淡化してしまうことが多かったようで記録もはっきりしない。ましてや、今回のようにきわめて短期間でというのは観測史上初めての出来事なのである。

最後の SEB 攪乱は 1975 年に起こり、それまで真っ白だった SEB がそれによって濃化して、以来ずっと濃い縞模様の状態が続いていた。つまり、この 14 年ほどの間に木星観測を始めた人々にとっては今回が初めての SEB 淡化現象経験ということになり、当然次に起こるであろう攪乱現象へと大きな期待がふくらんでいるのである。前回の淡化・濃化のプロセスからの 14 年という隔たりは、その間の観測機器・技術の進歩と惑星探査機

の活躍によって、今回の淡化現象をいっそう意義深いものとしているように思われる。つまり、1973~74 年にかけて米国の惑星探査機パイオニア 10 号と 11 号が相次いで木星接近 (このときは SEB は淡化状態にあった)、その後 1978 年には 2 機のボイジャーが木星接近 (このときは SEB は濃化状態にあった) を果たしている。地上からの木星観測に対する制限は地球大気によるゆらぎや吸収もさることながら (その点はハッブル望遠鏡によって克服されようが)、観測の位相角 (太陽-木星-地球のなす角) の制限の方が深刻な問題であった。地上から観測可能な木星の位相角は最大でも 12 度にしかならず (常に満月のような木星しか眺められない)、エアロゾル粒子の散乱位相関数のような角度依存を持ったパラメータはほとんど決定できなかったのである。それが探査機からの接近観測によりあらゆる位相角で測光・偏光観測が行われ、それまでの限られた知識が飛躍的に拡大した。従来ならば未知のパラメータが多すぎて十分に解釈しきれなかった地上観測データも、探査機観測から得た知識を駆使することで有効に活かせるようになったのである。加えて地上観測そのものも CCD デバイスの登場によってより高精度なデータを得られるようになっており、観測手段・解析能力の両面のこの 14 年の進歩は実に目ざましい。そこに久しぶりに起こった SEB 淡化

現象、そして次に起こるであろう攪乱現象をつぶさに観測し解析することで、これまで以上に帯縞の本質に深く切り込んだ研究ができると期待されているのである。

#### 4. 帯と縞の違い, SEB 淡化の意味するもの

この節では現在考えられている帯と縞の構造的な違いを簡単に紹介しよう。木星の帯と縞に関する一般的な議論は West et al. のレビュー (文献4) に詳しく、さらに詳細を知りたい方にはそちらを参照して頂くとして、ここではごく簡単なあらすじだけの紹介にとどめておく。

前述したように木星の対流圏上部を流れる風は帯、縞といった模様と強い相関を持っている。加えて電波による観測などから大気中の  $\text{NH}_3$  存在度は帯で大きく ( $\text{NH}_3$  蒸気で湿っている)、縞で少ない (反対に乾いている) と言われており (文献5)、これらのことから帯で上昇した大気が圏界面付近で浮力を失い水平方向に発散し、縞領域において下降してゆくという姿が描ける。豊富な  $\text{NH}_3$  蒸気を含んだ上昇気流は大量の雲 (大きな粒径の雲粒子を含む) を発生させ、帯の明るい姿をつくるであろう。一方の縞領域に移動した気塊中には既に  $\text{NH}_3$  蒸気は豊富には存在せず、十分な厚さの雲は形成されないに違いない (そのときの雲粒子は小さな粒径のものが主体となるであろう)。更に下降気流中での  $\text{NH}_3$  氷晶の溶解・蒸発のプロセスにおいて、それまで氷の中に封じ込められていた着色物質 (凝結核) が大気中に多量に解放されるなどの理由で縞の赤茶けた色調を形作っていると思われる。こうした描像は現在のところ、紫外~可視~赤外にわたる広い波長域での測光・偏光・分光観測を最も矛盾少なく説明するものとして支持されている。

上述したモデルは恒常的に観測される帯と縞の説明にはかなりふさわしいものと思われるが、しかしそれをふまえた上で、それでは SEB の淡化現象の本質はいったい何なのか? 帯と見違えばかりに明るくなった、いわば異常な SEB では雲は大気中の何処にどの様に分布しているのだろうか? そして、それが再びもの濃い縞に復活するとき、それまで存在していた白雲は何処へ消えてしまうのだろうか? これを明らかにすることは、帯や縞がどのようなメカニズムで形成され維持されているかという本質的な問題への重要なヒントとなり得ると思うのである。

#### 5. SEB 淡化後の観測データとその解析

木星のスペクトルを撮ると、可視~近赤外域にかけて連続光の他にメタン ( $\text{CH}_4$ ) の吸収が卓越している。 $\text{CH}_4$  は木星大気中では  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$  について多い分子であり、その存在比は約  $2 \times 10^{-3}$  である。この  $\text{CH}_4$  吸収帯では「反射能の高い雲粒子」と「吸収の大きな気体」との分離が容易なため、これと連続光でのデータとを組み合わせることで木星大気中での雲粒子の分布に関する情報を得る

ことが出来るのである。SEB 淡化現象をターゲットとした  $\text{CH}_4$  吸収帯での最近の観測例として、1990年3月に国立天文台岡山天体物理観測所で我々が得た木星の CCD 画像を図3に示す。使用器材は 188 cm 反射望遠鏡と CCD カメラ (RCA)、そして  $\text{CH}_4$  吸収帯の光だけを透過する干渉フィルター (日本真空光学) を組み合わせている。図の内 a が波長 7500 Å の連続光、b が 7250 Å (弱い  $\text{CH}_4$  吸収帯)、c, d が 8900 Å (強い  $\text{CH}_4$  吸収帯) の像である。a と b にはそれほど大きな違いはないが、その二つと後二者との間には一見して非常な違いがあることに驚かされよう。すなわち、連続光や弱い  $\text{CH}_4$  吸収帯では見えないほどに淡化してしまった SEB が、強い  $\text{CH}_4$  吸収帯ではあたかも何事もなかったかのような顔をして写っているのである。この連続光~ $\text{CH}_4$  吸収帯にかけての SEB のコントラストを説明できるような雲層モデルが必要になる。

現在までにこのデータを解析して得られた結果のアウトラインを紹介しておく (詳細は文部省宇宙科学研究所における第23回月惑星シンポジウムにて発表)。SEB に加えて赤道帯 (EZ) と、それをはさんで SEB と南北対称に位置する北赤道縞 (NEB) の三者を解析することで、SEB の特異性を浮き彫りにすることを目指している。解析に使用したモデルを図4に簡単に示した。木星大気は大気頂から順に気体層、薄い煙霧層 ( $P=120$  mb 付近)、気体層、 $\text{NH}_3$  氷晶雲層 (我々の目に見える雲層)、気体層、下部雲層 (ここでは光学的に半無限を仮定) のように続いていると考えられている。しかし、これだけの層を持った非均質大気のパラメーターは膨大な数であり、それらを同時に一意的に決定することはとても不可能である。そこで、我々は今回の  $\text{CH}_4$  吸収帯データの解析においては「煙霧層の光学的厚さ  $\tau_h$ 」、「雲粒子の一次散乱アルベド  $\omega_{e1}$  (上部雲層、下部雲層に共通)」、「上部雲層の位置  $P_1$ 」、「上部雲層の光学的厚さ  $\tau_{e1}$ 」、「下部雲層の位置  $P_2$ 」の5種類のパラメーターを可変とし、それ以外は妥当と思われる値に固定した。前述したように雲粒子などの散乱位相関数は地上観測からは決定不可能なので、パイオニア10号による幅広い位相角範囲からの測光データを Tomasko et al. (文献6) が解析して得たものを使用している。

モデル決定法は省略してかけ足で結果を述べてしまえば、上述のモデルで EZ と NEB の2領域は通常の帯縞としてきわめて妥当と思われる結果を得られた。いずれも光学的厚さが 0.4 程度の煙霧層と 5 程度の  $\text{NH}_3$  雲層を持ち、 $\omega_{e1}$  は EZ で 0.9975、NEB で 0.9950、更に下部雲層の位置が帯で高く縞で低いという点まできわめて常識的な結果が並んだ。一方 SEB に対しては、上記のモデルそのままでは周縁減光曲線の形状と明るさを同時

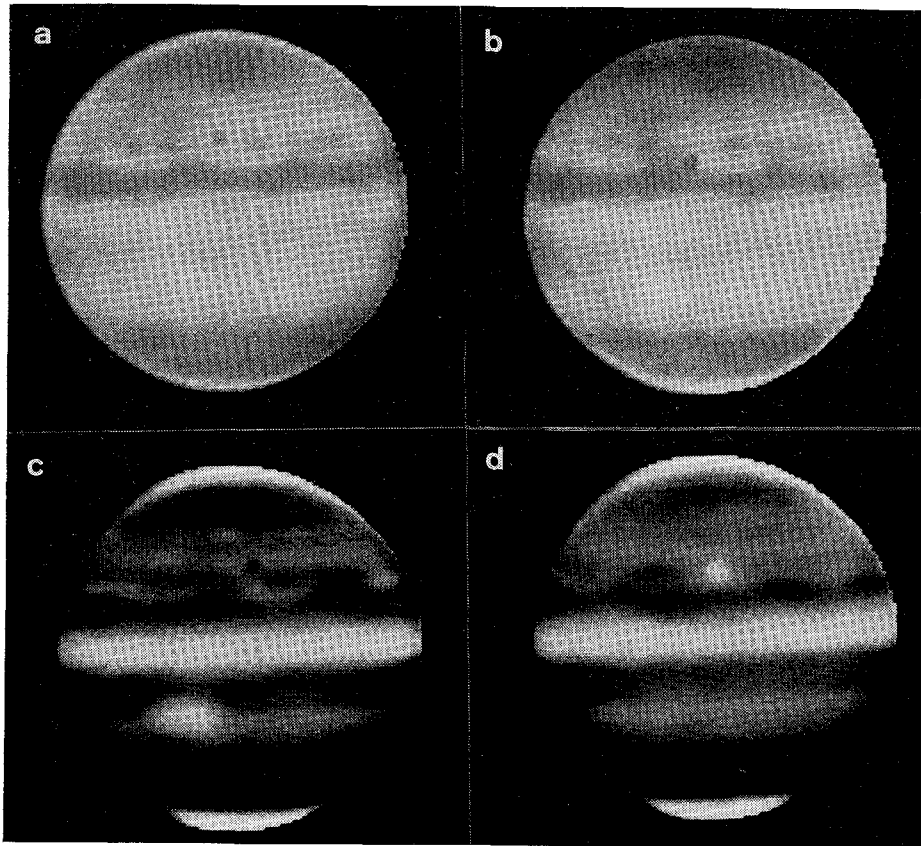


図 3 CH<sub>4</sub> 吸収帯による最近の木星像

1990年3月4日(JST)に国立天文台岡山天体物理観測所の188cm反射望遠鏡(ニュートン焦点)にCCDカメラ(RCA)を組合せて筆者らが得た最近の木星の画像. a) 波長7500Åの連続光, b) 7250Åの弱いCH<sub>4</sub>吸収帯, c), d) 8900Åの強いCH<sub>4</sub>吸収帯での画像(2枚)である. 最初の3枚はほぼ同じ時刻に撮影したもので(撮影時刻は各々23:28, 23:25, 23:32), 波長による見え方の違いが比較できる. 最後の1枚は北温帯流Cに乗った小白斑をほぼ中央子午線でもらえたもの(撮影時刻21:57). 北温帯流Cに乗った白斑のCH<sub>4</sub>吸収帯像は珍しい(筆者はまだ他に見たことがない). これらの画像をモニターに表示する際, 木星面からの反射光強度分布がランベルト面に従うと仮定して周縁減光を補正し, 模様を見やすくしている.

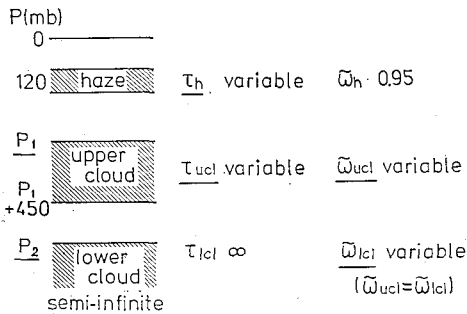


図 4 木星の雲層モデル

今回の解析に用いた木星大気の鉛直モデルを示した. 各層内での一次散乱に対する位相関数は Tomasko et al. (1978) に従った. アンモニア氷晶雲層の位置は可変であるが, その鉛直方向への広がり約 450 mb に固定している. 可変パラメーター(本文参照)は図中の記号に下線をひいて示している.

にうまく説明できるようなパラメーターが見つからず, その特異さを表わしていると思われる. 従って SEB についてはモデルそのものを見直さなければならないことになり, 次のように考えた. NEB を「縞の常態」と考え,

モデル中の可視雲層のパラメーターを変化させることで「異常態の SEB」を説明しよう. 淡化は上部雲層粒子のみが白くなって生じている可能性もあるので, SEB に限り上部雲層と下部雲層の  $\omega_{el}$  が異なることを許すこと

にしてみた。そしてそのままではパラメーターが更に増えるだけなので、下部雲層の  $\omega_{01}$  には NEB の値を用いながら上部雲層の光学的厚さと  $\omega_{01}$  を変化させて計算を実行してみた。その結果は次のような互いに矛盾する傾向を示し、観測を満足することは無かった。「下層の反射能が NEB 並に低いので、連続光での SEB の明るさを説明するためには上部雲層は 1 に近い  $\omega_{01}$  を持ち、かなり光学的に厚い (10 かそれ以上) ことが要求される」「CH<sub>4</sub> 吸収帯での周縁減光曲線形状は光学的厚さ 2 程度の上層雲層が良好である」この矛盾を解決するために SEB における上部雲層の鉛直方向への広がりを変えてやることにした。

連続光での条件を満足するには「半無限の雲を持つ一層モデル」がふさわしく扱いも簡単である。その上で、CH<sub>4</sub> 吸収帯での条件を満足するようにその層内での気体と雲粒子の混合比を調節してやれば良いであろう。モデル計算とデータとのフィッティングを繰り返し、次に挙げるような興味深い結果を得た。(1) SEB の雲粒子の  $\omega_{01}$  は帯のそれとほぼ同様の高反射能を持つ。(2) SEB における雲粒子と気体との混合比は EZ, NEB と変わらない。(3) SEB の雲頂高度として NEB と変わらない値が得られた。つまりこれらを総合して考えると、SEB の淡化現象は上部雲層から下部雲層までのスペースが白い雲粒子でおおわれたことにより生じていると考えられる。少なくとも上に述べた通り、通常の帯縞と同様の数 100 mb ほどの広がり雲では淡化した SEB は説明できないことが判った。赤外波長の観測から「SEB の放射輝度温度が淡化前に比べてかなり下がっている」という報告がある。我々の得た SEB モデルにおいて NEB と同高度に下部雲層の存在を仮定すれば、そこまでの光学的厚さは 15 以上と著しく不透明なものとなり、赤外での観測をも説明できよう。現在はさらに、それら大量の白雲が大気の力学とどのように関連しているのかを考察中である。

## 6. むすび

紙面の都合で触れずに来たが、現在木星面ではもう一つの珍しく興味深い現象が進行中であり、最後にそれを紹介しておく。

北熱帯 (NTrZ) と北温帯縞 (NTB) の境目に秒速 150 m/s に達する高速のジェットが存在する (図 2) が、これは地上からはめったに観測されない。つまり、ジェットそのものは常に存在していると考えられるがそれに乗って動くものが無いと観測にかからないわけで、ごく稀にそのジェットに乗った雲の模様が現われて観測者の注目を集めるのである。このジェットのことを北温帯流 C と呼んでいる。およそ 10 年余りに一度程度の頻度で出現し、太陽活動かあるいは木星の公転周期に関連している

とも言われるが、それもまだ定かではない。その北温帯流 C に乗った白斑が今年の 2 月に発生して (IAUC 4967) 木星面で最も速い自転周期で動いている。過去の記録によれば、北温帯流 C に乗った白斑は紫外波長において木星周縁で明るく観測されたことから高々度の雲であると言われていた。この 3 月の岡山での観測はちょうどその白斑の発生直後という好運な時期に当たり、CH<sub>4</sub> 吸収帯波長におけるその白斑の CCD 画像というきわめて貴重なデータを得ることに成功した (図 3d)。8900 Å 波長できわめて明るく写っており、間違いなく高々度に達した雲の塊であることが明らかになったのである (この観測については IAUC 4991 にて報じられている)。

探査機観測によって少しずつ判ってきたとは言っても、いまだに木星は大きな興味の対象であり、そこに繰り広げられる現象は多くの観測者・研究者を魅了している。太陽系の兄弟達を知ることは同時に我々の住んでいるこの惑星地球を知ることであり、木星を含めた太陽系科学全般の今後の発展を願ってやまない。筆者の未熟により決して十分な解説ではなかったろうが、本稿によって少しでも木星に興味をもち、そして現在の木星には面白い現象が起きているんだと読者の皆さんに感じて頂ければ幸いである。

## 参考文献

- (1) Lewis, J. S. (1969), *Icarus* **10**, 365-378.
- (2) Limaye, S. S. (1986), *Icarus* **65**, 335-352.
- (3) Peek, B. M. (1958), *The Planet Jupiter*, Faber&Faber, London.
- (4) West, R. A. et al. (1986), *Icarus* **65**, 161-217.
- (5) de Pater, I. (1986), *Icarus* **68**, 344-365.
- (6) Tomasko, M. G. et al. (1978), *Icarus* **33**, 558-592.

## 〔追記〕

新シーズン開幕 (7月15日に太陽と合) と同時に SEB に攪乱が起こっているという情報が 8 月中旬に入ってきた。発見者は淡化時と同じく宮崎氏で、同時期に海外でも F. Balella, D. Parker, S. J. O'Meara, J. Beish などの観測者らによって SEB の濃化が報告されている (IAUC 5079)。筆者もその直後に望遠鏡で眼視的に確認した。日本のアマチュア観測者の集まりである月惑星研究会では緊急会合を開き、最近の観測を総合してこの攪乱は、ほぼ合の頃に経度 270 度付近 (体系 II) で発生したらしいとしている。詳細はまだ不明で追観測が重要である。SEB はいま、攪乱によってクライマックスを迎えようとしているのである。