

# 最近 10 年間のエンペイについて

中 村 士\*

## はじめに

エンペイとは掩蔽のことか、ノオ。

従来、掩蔽とは、月が恒星またはせいぜい惑星を背後に隠す現象を主に指していたように思う。ところが最近、特にこの 10 年間程の間に、月と星以外のさまざまな天体（人工天体も含めて）間の掩蔽現象が予報され、観測解析されるようになって来た。人工天体の場合を別にすれば、色々な天体間の現象そのものが最近 10 年間で特に多いということはないから、この 10 年間の成果はやはり人間の方の努力の結果であるに違いない。

大型電子計算機が自由に使える様になり、今まで余り関心を引かなかった小惑星、衛星の短い時間間隔での精密な位置予報をしてくれる人（ヒマ人？）が現われてきたこと、感度の高い、ミリ秒の時間分解能を持った速い記録装置が容易に入手可能となったこと、この装置で得られた大量のデータを計算機で処理できたことなどがこの 10 年間の発展を支えたと言えよう。

さて、エンペイなどと変な言葉を使わずに、何々天体の掩蔽と言えば良いようなものだが、木星、土星の衛星同士の掩蔽では、その前後に、一方の衛星の影の中に他の衛星が入る食現象がしばしば起る。また解析方法は掩蔽でも食でも基本的には同じである。などの理由から、ある物（影でもよい）がある物を隠す現象を一括した呼び名が欲しくなる。英語では mutual phenomena（又は events）なる言葉を用いる人々が居る。直訳すれば相互現象。しかしこれでは言葉の内容が全然解らない。という訳で、この紹介記事では仮にエンペイという言葉を用いた。適当な訳語があれば御教示願いたい。

## エンペイのいろいろ

以上、エンペイのいろいろについて解説を加えてゆくと、筆者の多少関係したものは詳しくなり、余り知らないものが疎漏になることは避けられない。解説の多少がその分野のアクティビティを必ずしも反映しているのではないことを予めお断りしておきたい。

### (1) 月と恒星：視直径の決定と多重星の検出

古記録にある掩蔽の話、地球自転速度の不斉や月運動論の基本定数を求める話は既に幾度か紹介されているから、ここでは割愛する。

掩蔽以外に恒星の視直径を決定する方法には、マイケルソン干渉計、強度干渉計、また最近ではスペckル干渉（8月号参照）などがある。強度干渉計はマイケルソン干渉計に比べればずっと長い基線長が取れるし、大気のシンチレーションに対して格段に強い素晴らしい方法だが、低温度星については急激に SN 比が低下してしまう欠点がある。スペckル干渉計は有望らしいが現在までの所まだそれ程成果はあげていない。一方掩蔽の光電観測では、回折曲線の適合までルーチン化している所がいくつか在る程で、視直径を求めた恒星数、発見した二重星、多重星の数は圧倒的に多い。

1908 年にマクマホンは、恒星といえどもある大きさの視直径を持つはずだから、月に隠される時は瞬間的に消えるはずはない。その短い時間が測れば、視直径がわかるだろうというアイデアを英国天文月報に発表した。これに対し、当時新進気鋭のエディントンと同じ雑誌の次の号でただちに反論し、月縁での星の光の回折現象の為に、点光源といえども見かけ上約 0.008 の直視径を持つ様に見えるから、マクマホンのアイデアはダメであるとやっつけた。その後 1939 年頃になって、視直径に応じて掩蔽の回折模様の形が少しづつ異なることが認識され、同時にそれを記録する技術的な面も向上して、1950~52 年のアンタレスの一連の掩蔽では、南ア連邦のエバンズらはアンタレスの視直径を決めることができた。しかし月縁の凹凸の影響の方が大きいとしてエバンズらの結果に反対する人もいた。1968 年以降エバンズは米国マクドナルド天文台に移り、やがて現在の掩蔽光電測光の隆盛を見るに至った。掩蔽観測のある解説記事の中でエバンズは昔を回想して、当時彼に反対した人を名指して非難し、その人の為に、掩蔽で恒星の視直径を決める方法は 15 年間進歩を阻害されたと言っている。

今点光源が月縁に隠れる瞬間を考えると、縁に平行な明暗の縞が地上をサッと横切ってゆくことになる。フレネルの回折理論で、単色光の場合に明暗の明るさ分布を計算してみると、図 1(a) の実線の様になる。一つの山から谷までの距離は大ざっぱに

$$\sqrt{D\lambda}/2 \quad (1)$$

で与えられる（ $D$  は縁と観測者の距離、 $\lambda$  は光の波長）。月では  $\lambda=5000 \text{ \AA}$  として約 10 m になり、横軸はこの尺度で示してある。幾何学的な月縁を 0 m に取ってある。この位置の明るさは、掩蔽を起していない時の明る

\* 東京天文台 T. Nakamura: Mutual Phenomena of Celestial Bodies in Recent 10 Years

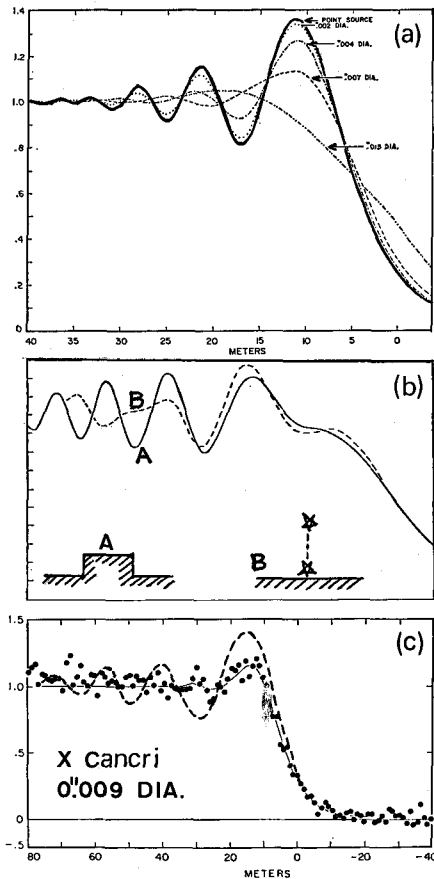


図 1 月による恒星の掩蔽曲線 (エバンズ等の結果より)

さの  $1/4$  であり、この値は  $D$  や  $\lambda$  に依らない。

月縁の先端の作る縞は、地表を、平均  $0.9 \text{ km/s}$  の速さで横切ってゆく。従って  $1/90$  秒の数倍程度が現象の継続時間の目安となる。月縁の進行方向に対し、恒星の潜入する位置角  $P$  が大きいほど、継続時間は  $\sec P$  に比例して延びるし、月が子午線附近にある時は地球自転の為に最大  $50\%$  程得をするから、実際の継続時間は数  $10 \sim 100$  ミリ秒位である。図 1 (a) に点線で示したのは、視直径がある時のカーブで、 $0.02$  より大きい時にはほぼ幾何光学と同じになる。また  $0.004$  以下では大気のシンチレーションで、点光源との区別が困難になる。事実現まで決った視直径の最低は  $0.003$  程度である。

今までの話は単色光の議論だった。現実には回折カーブのコントラストをナマらせるいくつかの要素がある。(1) 式によれば、波長によって回折カーブの横方向のスケールが変わる。星にはスペクトル型があるし、通常バンド中の広いフィルターで観測するから、明暗度(山と谷の高さの差)は悪くなる。暗い星まで観測しようとすると、大口径の望遠鏡が必要になるが、口径を大きくす

ると、山と谷を同時に望遠鏡に取り込んでしまい、やはり明暗度が低下する。バンド巾  $1000 \text{ \AA}$  で  $0.003$ 、口径  $2 \text{ m}$  で  $0.002$  程度の誤差が視直径決定の時に生じる。

波長の効果や口径の影響は、後からいく分補正可能である。観測された回折カーブの解釈を誤らせる最大の難物は月縁の凹凸である。筆者も 7 年ほど前、月縁の岩の影響を色々計算して見て、回折カーブから視直径や二重星の角距離を決めることに懐疑的になった。径数  $m$  の岩塊が最もひどくカーブを乱すが、当時アポロで撮られた写真には、この位の岩はゴロゴロしている様に感じられたからである。図 1 (b) に岩塊と二重星が同じ様な回折カーブを与える例を示す。

ところが、エバンズらは精力的に多くの掩蔽観測を行い、月縁の凹凸によるカーブの乱れは、実際にはむしろ稀であることを実証してしまった。案ずるより生むが易しである。月の地平線は予想外に滑らかだった。また月縁による乱れか、二重星かは多くの回折カーブを見ていると、大抵区別ができると彼らは言う。図 1 (c) に、視直径を求めた観測例を示す。点線が点光源に対応する。

エバンズらのシステムは、主に  $36$  インチ望遠鏡を使い、時間分解能  $1$  ミリ秒で、約  $500$  チャンネルのカウンターを持っている。観測の成否を計算機で判定し、成功ならば、最も良く適合する回折カーブと求めた他のパラメータを、観測データと共にすぐにディスプレイ上に表示するそうである。このシステムで彼らは今までに  $20$  個近い恒星の視直径を決定し、多くの二重星、多重星(月の進行方向に投影した角距離が求まる)を発見した。勿論、位置天文学に必要な接触時刻、縁の傾き(スロープという)も同時に決めている。また、キットピークのリッチウェイらは  $1976$  年から僅か  $2$  年間に、 $1.6$  と  $2.2 \mu\text{m}$  赤外領域で  $28$  個の視直径を求めている。特に赤外の為、昼間の観測 ( $4 \text{ m}$  鏡で) が多数含まれているのが興味深い。

最後に、星が暗く、かつ大気の状態が悪い時の観測から、多重星を検出する、単純だが有力なバルトルヂの方法を図 2 に紹介しておく。上の図の様な、雑音の多い観測の、測点全部の平均値を作り、各測点の値の、この平均値からのずれを、時間経過と共に順次加えていって下の図を作る。折れ曲りの所が星が隠される瞬間に対応する。この例は三重星と解釈できる。筆者も  $1973$  年の冥王星による掩蔽の観測データに適用してみて、はっきりした結果は得られなかったが、客観的判定の基準としては役立つような印象を持った。

(2) 月と惑星、衛星、小惑星

惑星が月の後に隠される現象そのものは、古代からの記録に多く残っている。1974 年の土星の掩蔽の例をあげる。土星本体は大きな視直径を持つし、隠す縁も複雑

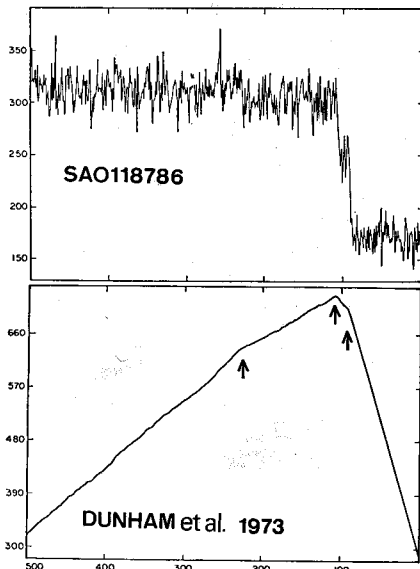


図2 バルトルチの方法による多重星の検出

な形状になるから、惑星の位置や大気構造についての情報は、解析が面倒なだけで精度は上らない。主として衛星の掩蔽の解析に力が注がれた。テティス、ディオネ、レア、タイタン、イアペタスの直径、イアペタスの表面輝度分布が求まった。タイタンでは周縁減光の割合も決り、得られた直径  $5832 \pm 53$  km は太陽系中最大である。

小惑星では、ケレスの直径を掩蔽で推定した例がある(1974年)。

### (3) 月とラジオ天体

アイデア自体は1950年頃出された。この方法で始めて観測されたのは3C 212(1961年)。構造を持った電波源の扱いは複雑だが、コンボリューションの方法で原理的には解決できる。インドのグループが熱心な様だ。但し電波の場合には、干渉計やVLBIなど他にずっと有力な手段があるから、重要性という点では光の場合と少しく意味合いが異なると思われる。

### (4) 惑星、衛星と恒星

この10年間に比較的詳しく解析された例として、さそり座 $\beta$ (多重星)と木星(1971年)、双子座 $\epsilon$ と火星(1976年)、HD 139409と海王星(1968年)、レグルスと金星(現象は1960年)、SAO 158687と天王星(1977年)などが挙げられる。海王星の掩蔽は日本の観測である(天文月報1968年11月号)。

惑星による掩蔽では、惑星大気が解析の際の主な興味の対象となる。惑星大気を星の光が通過して来る時は、回折や惑星大気の吸収はほとんど問題にならず、惑星大気中の光の屈折の効果だけが観測される光度曲線に現われる。潜入の時は光度曲線は、主に惑星大気のシンチレーションで、ジグザグ(スパイクと呼ぶ)しながら徐々

に落ちてゆく。この屈折角の変動から、惑星大気の高さに対する refractivity (=屈折率-1) や、大気のスケール・ハイトの変化が求まる。大気組成と静水圧平衡を仮定すれば、高さに対する温度分布、密度分布も決定できる。木星と火星の場合には地上の観測点が広く分布していたので、惑星上の色々な緯度に於けるスケール・ハイト、温度分布が求められた。火星の結果はパイキング1, 2号の値と一致している。

木星では副産物として、衛星イオの直径や大気圧の上限が得られた。また天王星の環が偶然発見されたのも記憶に新しいところである。

### (5) 小惑星と恒星

四大小惑星と恒星の掩蔽予報は、英国編暦局のテイラーが25年以上前から行っていた。エロスによる双子座 $\kappa$ の掩蔽(1975年)では、15ヶ所もの同時観測が成功し、エロスの大きさが  $21 \times 13$  km 程度のダンベル形として求まった。またパラスの掩蔽は7ヶ所で観測され、常時の変光曲線と組合せて、3次元楕円体としての大きさが決められた。

この場合にも、もっとずっと興味深く重要な発見は副産物の方にあった。予期しない二次的掩蔽がいくつもの小惑星に起ったのである。特にヘルクリナでは独立した二人が確認しているから衛星を持つのはまず間違いあるまい。パラス、エロスなど7個の小惑星にも、時には複数值の衛星の可能性があると云う。掩蔽が起れば必ず衛星が見つかると言って良いほどだ。余り多過ぎて少々首をかしげたくなるが、1920年代にファン・デン・ボスとフィンセンがエロスやパラスを二重星として認めた時期があったから、衛星は意外に本当なのかも知れない。もし本当なら、小惑星の衝突起源論にとっては説明困難な材料ではなからうか。いずれにせよ、太陽系の起源にかかわる重要な発見であった。

どのケースも平均距離1000kmぐらいで等級差も2~3等らしい。衝の附近で長焦点望遠鏡で拡大写真を撮り、適当な画像処理をすれば見つかるかもしれない。

### (6) 惑星と衛星、衛星同志の相互現象

木星と衛星の食、面経過は、ガリレオ以来衛星の運動の研究に利用されて来た。木星や土星の内衛星の軌道面は、赤道面にほぼ一致している。その赤道面内を地球が通過する(一公転周期中に2回起る)際に衛星同志の食や掩蔽が起る。ガリレオ衛星については、1934年にレビンが近似的な予報の方法を公表し、それに基づいた予報を英国天文協会のハンドブックに時々出していたが、利用する人としてなかった。予報自体も悪かったのである。

1973年の相互現象では、始めて電子計算機による誤差数分以内の予報が多数発表された。各衛星の精密な位置を例えば50秒間隔で計算し、現象が起るか否かをそ

の都度調べ、これを 12 ヶ月乃至 18 ヶ月繰返してエンペイを拾い出す。

ガリレオ衛星の視直径は約 1" に見える。光度変化が隠される円板の面積で決るとして、変化は 1% まで観測できる（現象は数分から 1 時間程度で進む）から、衛星間の相対位置は 0.01 の精度で知れるはずだ。もちろん衛星の大きさ、形、表面輝度分布も解るだろう。

1973 年の現象では、早くから国際共同観測が呼びかけられていたから、予想以上に多くの観測が成された。最も徹底的な解析をしたアクスネス、フランクリンは 100 個近い観測を利用しているが、その後もしばしば新しい観測を公表する人がいて、恐らく 130 個位になるのではなからうか。図 3 に日本での観測例を示す。ガニメデによるユーロパの皆既食である。この観測で今だに不思議に思うのは、食の中心附近でもユーロパの明るさが零にならなかったことである。ユーロパは木星の後方に居たから、月の地球照の様な現象とも違う。念の為、太陽光の木星大気からの散乱光の強さをカナダのある理論家に計算して貰った所、とてもそんなに明るくならない、測光で空の明るさの引き方が不十分なのだらうと言われてしまった。しかし奈良の Y さんは 30 cm 反射で皆既の時のユーロパを肉眼ではっきり見ているから、理論家氏の言も納得し難い。衛星半径は 1533 km (J2), 2608 km (J3), 2445 km (J4) となり（誤差は 2~3%）、平均経度、近木点、昇交点経度、固有軌道傾斜、固有離心率の改良も行なわれた。強制離心率の改良値から推定した衛星質量への補正も、パイオニア 10 号の結果と定性的には合うことがわかった。一部の衛星の粗っぽい表面輝度分布も求められた。ただ、これらの解析がなされた段階では、表面輝度と、軌道の光度曲線への影響が充分分離されず、互いに相手の結果に寄り掛っていた嫌いがあった。今では、ボイジャー 1, 2 号の鮮明な衛星写真が活用できるから、これを使って 1973 年の観測を整理し直すのも意義があろう。特にイオでの火山活動が木星の巨大な潮汐作用によるという説との関連で、1979 年の相互現象の観測も加えて、イオの軌道上の永年加速を検出する試みもなされるであろう。

土星の相互現象も、今年末から来年 6 月にかけて多

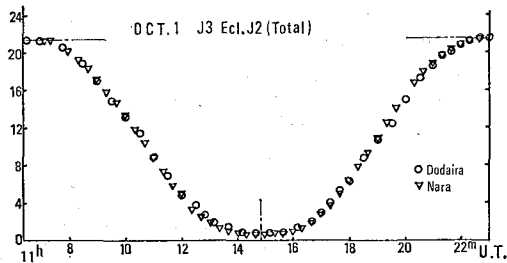


図 3 木星の衛星の相互食 (1973 年)

数子報されている。土星環の消失と共に今回は条件が良い。土星の衛星は、ガリレオ衛星ほど良く軌道が決っていない。NASA ではボイジャーのカメラを正しく衛星に向ける為に、できれば相互現象の解析結果を利用したい意向のようだ。

(7) その他

1557 年から 2230 年の間で、20 個程の惑星同志の掩蔽を計算した人がいる。ヒマジン!! 残念ながら今世紀は 1 個もない。過去の古記録を調べたら何か見つかるかも知れない。

無人探査船の出す電波が惑星大気を通る時の周波数の変化から、(4) と同様な手法で惑星上空の電子密度を求めた例がある。パイオニア 10, 11 号と木星、及びマリナー 10 号と金星がそれである。複数の周波数を使うやり方は、地震波の S 波と P 波を使って、地球内部の速度分布を求める方法と原理的に同じである。

変わった所でコホーテク彗星の尾の中を、銀河系外電波源からの電波が通過した際の電波強度のフラツキから、尾の中のプラズマ密度とその乱流状態を推定した例がある。

そのほか、太陽とナントカとか、落としているものもあるだろうが、話が余りに興味本位になり過ぎた嫌いもあるのでここで打ち切ることにする。

エンペイの将来

エンペイは今後増々多く予報され、観測の数もどんどん増加してゆくだろう。観測精度向上を阻んでいる主な要因は、地球大気の揺らぎである。現在も KAO の様な空飛ぶ望遠鏡があるが、将来はスペース・シャトルに積んだ望遠鏡で多くのエンペイが観測可能となろう。小惑星の衛星も大気外で写真を撮れば容易に検出できるかもしれない。

エンペイの致命的弱点は、観測対象、観測時間が天まかせであることだ。(1) 式によれば、D を 10 km とし、可視光に対し、明暗縞の間隔は 5 cm 位になる。1 cm 間隔位の分解能を持って相当暗い星まで測れる受光器は現在でもあるから、スペース・シャトルから雨戸の様な板をロープで引きずって、人工掩蔽ができないであろうか。人工掩蔽なら好きな対象を好きな時間に何度でも繰り返せる。

