

実践報告

ブラックドロップの謎の解明

大西浩次（長野工業高等専門学校）

ブラックドロップ現象とは、内惑星の太陽通過の際に、内惑星（水星、金星）の影が太陽リム上で「しずく」の姿に見える現象である。長野高専天文部では、2006年11月9日に起きた水星の太陽面通過の現象を冷却 CCD カメラとデジタルカメラで観測し、これらのデータ解析と共に、太陽観測衛星 TRACE のアーカイブデータの解析、室内実験、シミュレーションを行うことで、このブラックドロップの原因が「光のもれこみ(contamination)」と太陽の周辺減光であることを突き止めた。これらは、鈴木敬吾、大日方利光、今井涼介、熊川銀河、柴田晃佐、山田英史（高専3）、青柳克道（高専2）、兒玉直人（高専1）らによる研究の一部の紹介である。

1. はじめに

地球・太陽間の距離(1AU)は、天文学における距離はしごの1段目である。ハレーは金星の太陽面通過時の太陽視差から、1AUを算出する方法を提案し、18世紀-19世紀の重要な観測テーマとなった。しかし、ブラックドロップ現象のために必要な精度が得られなかった。ここで、ブラックドロップ現象とは、内惑星の太陽面通過の第II, III接触(太陽リムの通過)時に惑星の影がしずくのように伸びる現象である(Pasachoff et al. 2004)。最近まで、この原因は、金星大気のためであると考えられていたが、太陽観測衛星 TRACE が 1999 年の水星の太陽面通過時にブラックドロップ現象を観測し、金星大気が原因ではないことがわかっている(Schneider et al. 2004)。Schneider (2004) たちは、TRACE による水星のブラックドロップ現象は、光学のもれこみ(contamination)によるものといっている。

本研究では、PSF(Point Spread Function)の異なる3セットの観測システムで、同時刻での水星の太陽面通過を測光観測し、ブラックドロップとPSF(あるいは、光学のもれこみ)の関係を明確にすることにある。

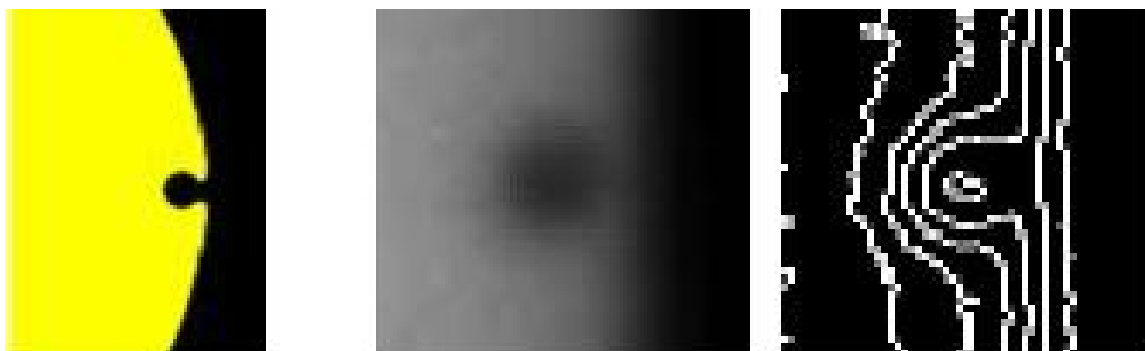


図1 ブラックドロップ現象の概念図(左)と実際の我々の観測例(中央)とその等高線(右)

	冷却CCD撮影	デジタルカメラ	実験	※TRACE
カメラ	FLI FE6300E	Canon EOS 5D	Canon EOS Kiss Digital N	
望遠鏡 (望遠レンズ)	Takahashi FC100 (D=10cm,F=8) 絞り 3cm	Takahashi FC76 (D=7.6cm,F=8)	CanonEF300 (D=7.5cm,F=4)	D=30cm,F=8.66
拡大	Vari-extender×3.2	Pentax XP14mm		
合成F	120	30		
Filter	BVR AstroSolar D3	AstroSolar D3		
露出	1/10 sec	1/1000 sec	1 sec	32/1000sec
1pixelあたりの秒角	0.66"	0.74"	0.74"	0.5"

表1 観測システム (2006年11月9日、長野高専屋上にて)

2. 水星の太陽面通過の観測と1次処理

長野高専天文部では2006年11月9日の水星の太陽面通過を表1のような装置で観測した。同様に、NASAの太陽観測衛星TRACEのアーカイブデータをHPより得た。冷却CCDカメラ、および、TRACEの画像はfitsデータである。また、デジタルカメラのデータは、RAWイメージをAstroArts社のステライメージ5でfitsデータに変換した。これらのfitsデータを、すばる画像処理ソフト「マカリ」を使って1次処理した。

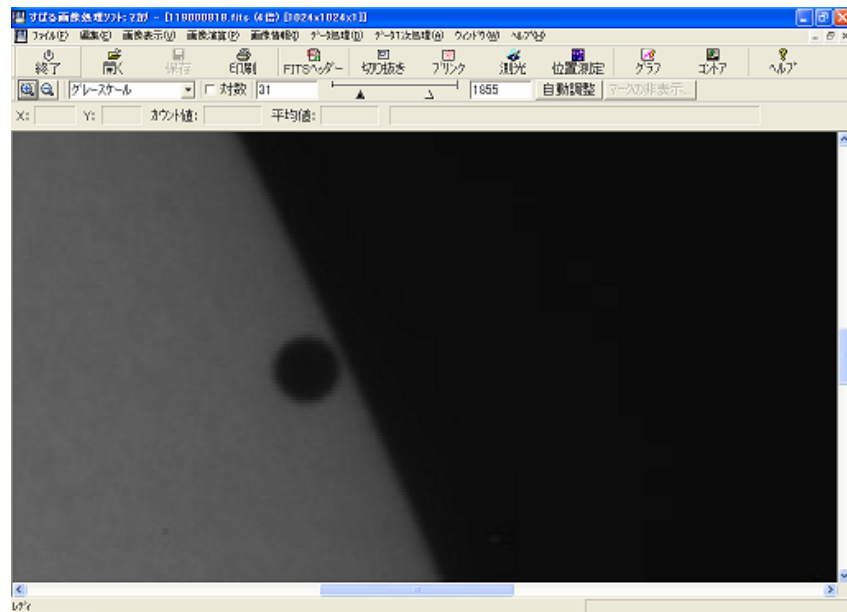


図2 解析中のTRACEの画像

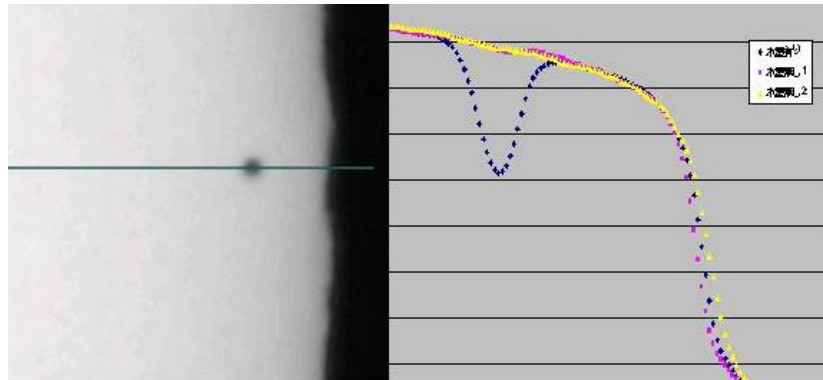


図3 解析手法、冷却 CCD カメラでの観測画像（左）とその輝度曲線（右）

画像解析の最初のステップとして、太陽リムしか写っていない各画像から、画像解析ソフト「マカリ」の位置計測の機能を使い、太陽の中心位置を求めた。ここでは、太陽リムの円弧を円でフィットすることで太陽の中心座標を決めている。次に、画像解析ソフト「マカリ」の測光機能を使用して、太陽中心と水星の中心を通る直線上の（太陽中心から動径方向）輝度曲線を求める。同様に、太陽の中心と水星の無い場所を通過した輝度曲線を求め、これらの両者を比較することで、水星像の広がりやブラックドロップ現象の影響を調べた。

3. 水星の太陽面通過時におけるブラックドロップ現象の解析

図4,5,6は、冷却 CCD カメラ、デジタルカメラ、太陽観測衛星 TERACE で撮影した第III接触時の画像/等高線(左)と等輝度マップ(右)である。両画像とも、太陽リム付近で水星の影が太陽リムに向かって伸びており、ブラックドロップが起きていることが確認できる。

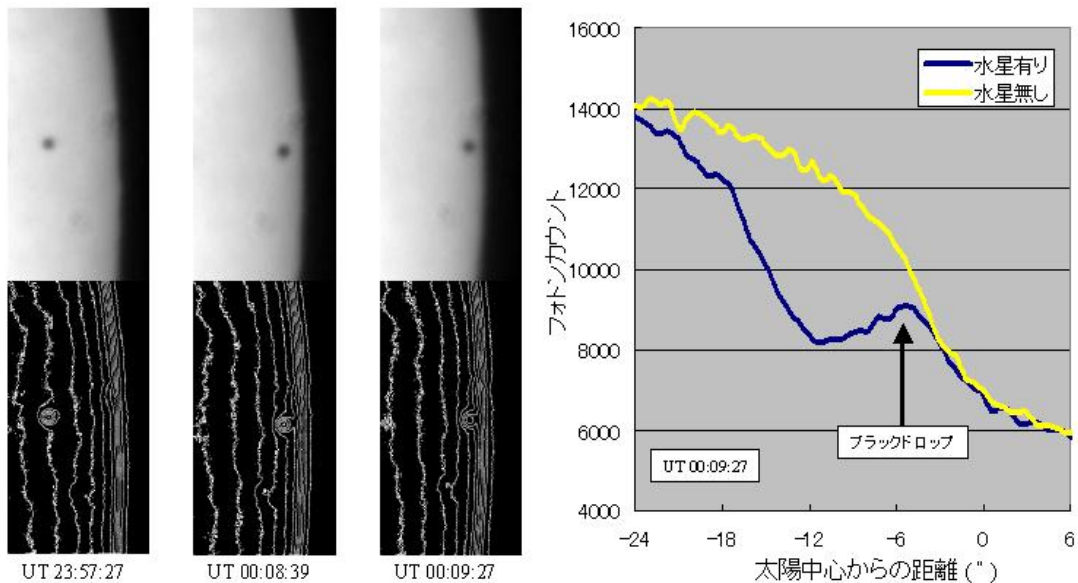


図4 冷却 CCD カメラの R-band 画像の画像/等高線と輝度グラフ (UT00:09:27)

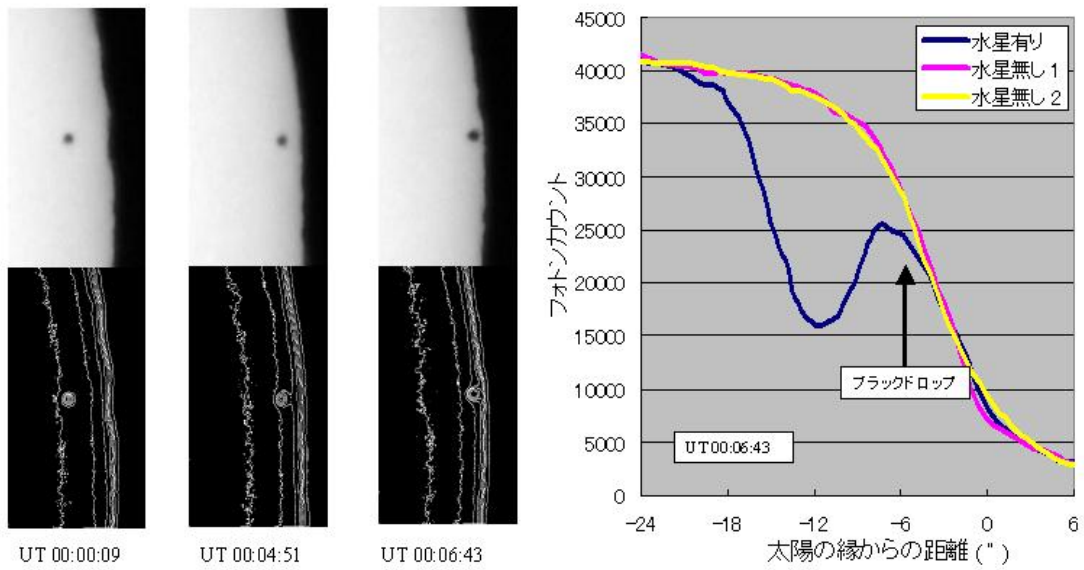


図5 デジタルカメラの画像/等高線と輝度グラフ(UT 00:06:43)と

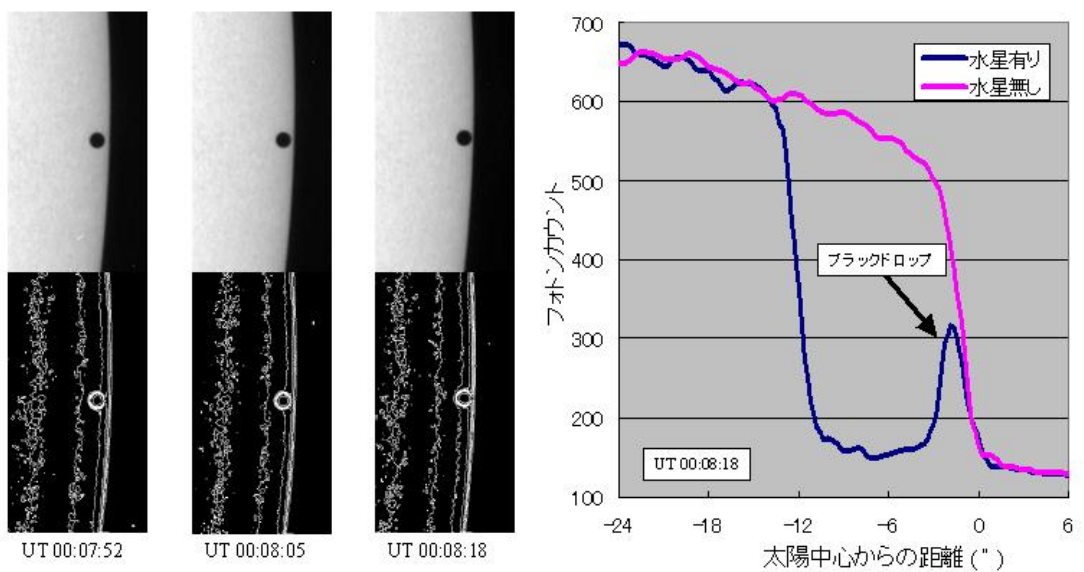


図6 TRACE のの画像/等高線と輝度グラフ(UT 00:08:18)

4. 「光のもれこみ(Contamination)」による水星像の広がり

太陽面上での水星の像は、光学系などに依存する PSF やシーイングによる像の広がり (PSF) などの重ね合わせの結果、実際の視直径に比べて 2 倍程度大きく広がって見える。これら「光の漏れこみ」による像の広がりを、次のようにして求めた。はじめに、太陽面上での水星像を測光し、太陽の周辺減光曲線を水星の位置で 1 次近似して差し引く。このグラフから水星による減光量が数% (3%) 以上の範囲を水星像の大きさとして、水星の実サイズの差を像の広がり定義する。

	水星半径	水星像の半径	像の広がり の半径	露出時間 (sec)
デジカメ	4.95"	11.1"	6.14"	1/800
CCD R		11.2"	6.27"	1/10
CCD V		11.2"	6.27"	1/10
CCD B		12.5"	7.59"	3/10
TRACE		8.00"	3.05"	32/1000

表2 水星像の広がり

これらの結果、冷却 CCD カメラでは、B-band が、R、V-band より像が広がっている事が判る。これは、波長による PSF の差が見えていいると考えられる。一方、デジタルカメラと冷却 CCD カメラによる像の広がりへの違いは露出時間の差によると考えられる。すなわち、シーイングサイズが大きく影響している。さらに、TRACE は大気圏外のため、シーイングの影響は受けず、おもに光学系の PSF による像の広がりが見えていいると考えられる（ただし、ここで定義している像の広がりには PSF の定義と異なっていることに注意）。

5. 水星像の広がり と ブラックドロップ現象

ブラックドロップの起きる位置と水星像の広がりとの関係を見るため、ブラックドロップの起きる位置を次のように定義し測定した。

ブラックドロップ現象とは、図7の様に、水星が太陽リム近傍に来たとき、水星が無いときの太陽の周辺減光曲線より、10%以上減光しているときと定義する。

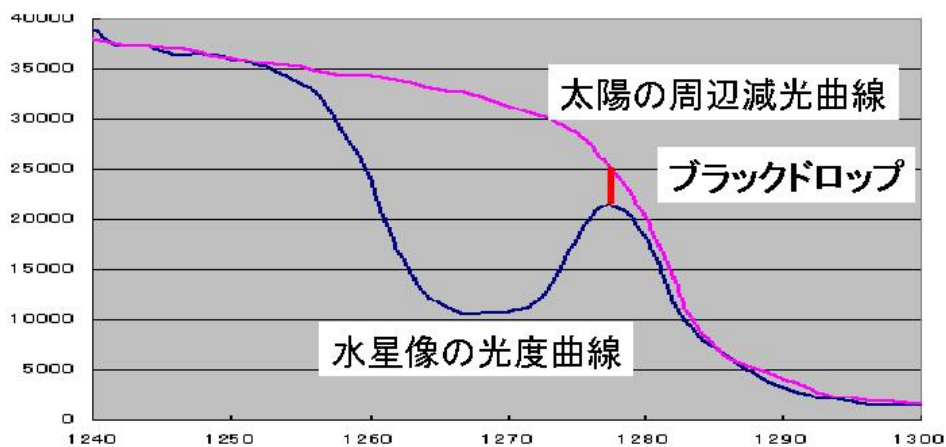


図7 (本研究での) ブラックドロップの定義

機器	水星の中心から太陽の縁までの距離	水星像の広がり
CCD	15.11" から10.49"	6.27"
デジカメ	9.40" から9.32"	6.14"
TRACE	6.92" から6.03"	3.05"

表3 水星像の広がり とブラックドロップの発生位置の関係

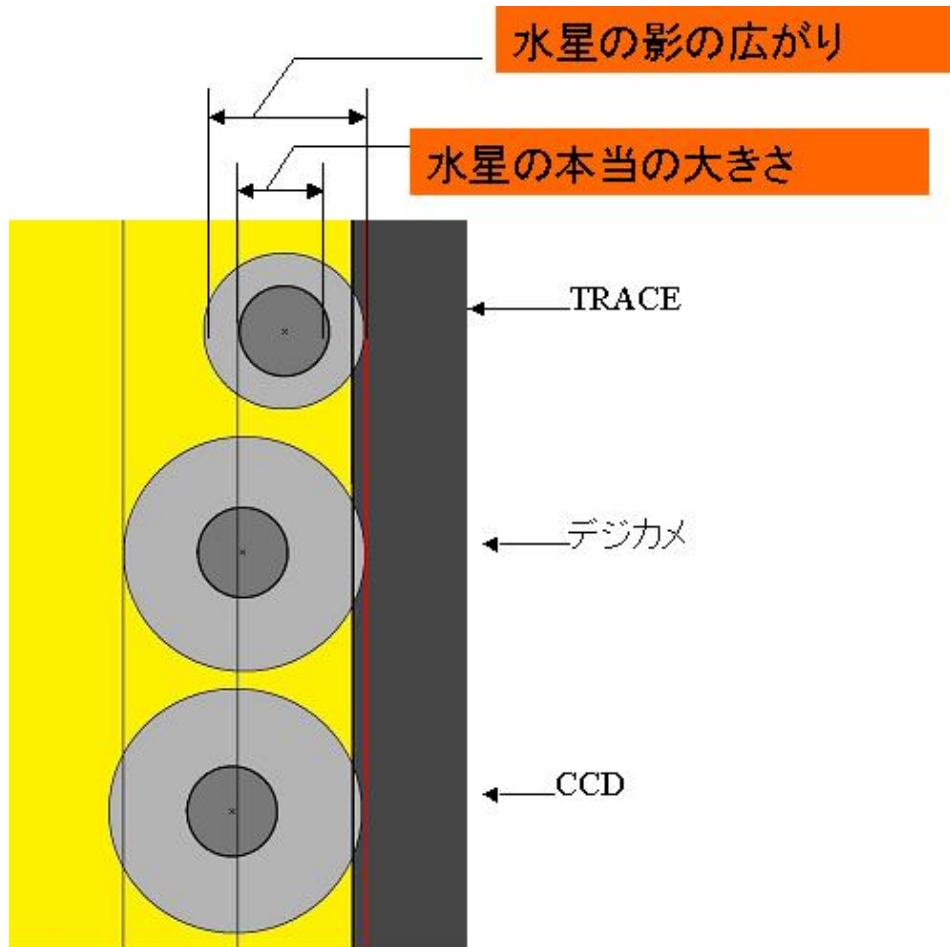


図8 ブラックドロップ発生位置と水星像の広がり (表3) の様子

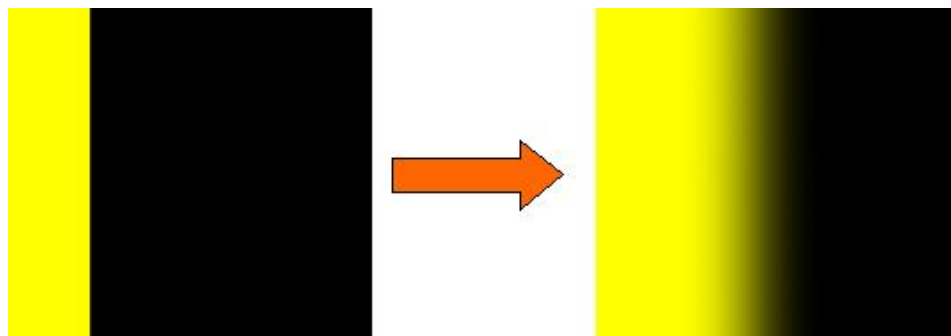


図9 太陽リムの様子、光の漏れこみの無い場合 (左)、光の漏れこみのある場合 (右)

図8は、ブラックドロップの発生位置と水星像の広がりを図示したものである。これから判ることは、太陽リムのところに水星像が接触したときに、ブラックドロップ現象が起きている。これは、次のように解釈することができる。図9の様に、太陽リム付近は、太陽光のもれこみを受けてぼやけている。ここで、水星による影で、太陽光の漏れこみ分をカットすると、太陽面（図8の右）からの太陽光の漏れこみが減り、水星と太陽リムの接触点付近が減光してしまう。これが、ブラックドロップ現象である。

6. ブラックドロップ現象のシミュレーション

前章では、ブラックドロップを光の漏れこみ現象と解釈した。この解釈は、シミュレーションで示すことが出来るだろうか。ここで、簡単に、1点での光の広がりをガウス分布で近似し、太陽の輝度曲線は、これらが光の和によって出来ていると仮定する。実際の状況では、太陽面の2次元（あるいは3次元の2次元投影）を考える必要があるが、ここでは1次元モデルで考えてみる（図10）。

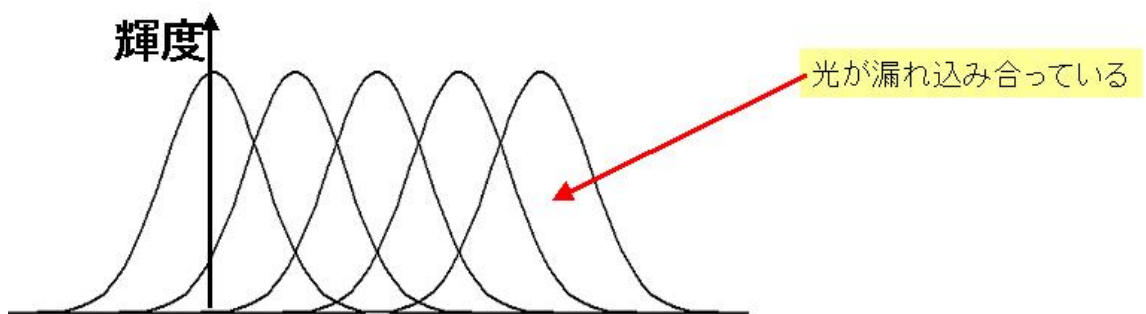


図10 太陽面輝度の1次元モデル

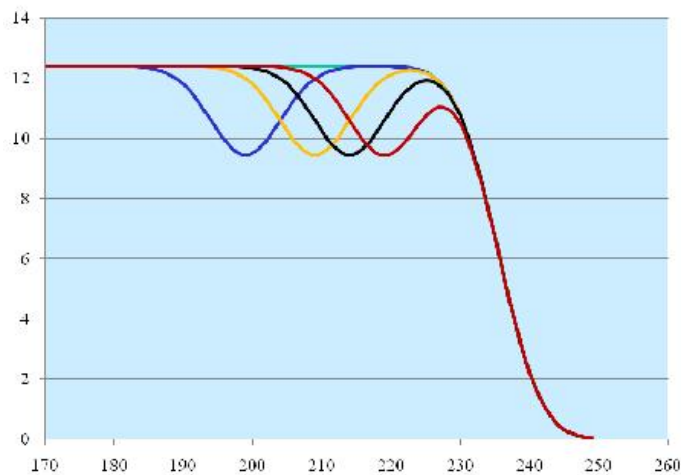


図11 (一定の) 太陽輝度を作り、水星のサイズ分だけ光源を除いたグラフ

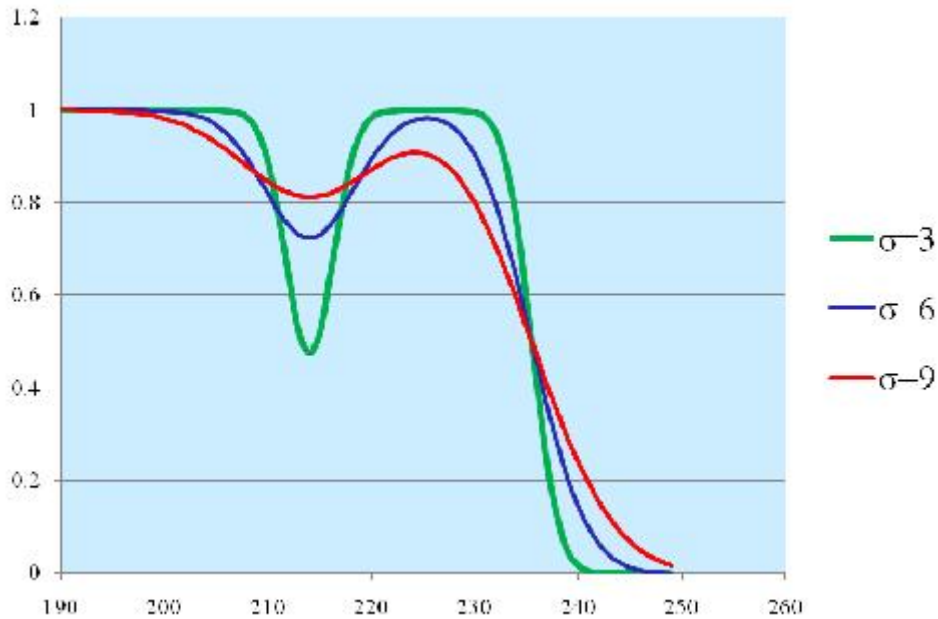


図 12 光の漏れこみの大きさ(ガウス分布の広がり)と輝度曲線の変化

図 11 の様に、各 230 点それぞれに広がり ($\sigma=9$ ピクセル) のガウス分布の光源があるとおく。そうすると、太陽リムは、 2σ 程度ぼやけている。ここで、太陽面上の水星として 5 ピクセル分を抜くと、あたかも水星の太陽面通過時における輝度曲線の変化と同じ様になる。ここで、水星の位置が太陽リムに近づくと水星の影で太陽リムの右に漏れこむ光が極端に減り、ブラックドロップのような現象を作り出す。さらに、図 12 の様に光の漏れこみの大きさ(ガウス分布の広がり)と輝度曲線の変化をみると、光の漏れこみの大きな観測システムでブラックドロップが顕著に起こることが理解できる。

7. まとめ

ブラックドロップ現象は、PSF や光の漏れこみなどによる水星像の広がりが大きくなるほど、太陽リムから遠いところで(早く)起きる。3つの観測システムによる水星像の広がりブラックドロップの起きる位置の関係を比較することで、ブラックドロップ現象は、水星の影で太陽リムに漏れこむ光を遮ることで起こる事が判った。これらの解釈は、室内実験やシミュレーションでも確かめられた。

参考文献

- Pasachoff, J. M., Schneider, G. and Golub, L., 2004 Proceedings IAU Colloquium No. 196, p243
 Schneider, G., Pasachoff, J. M., Golub, L.: 2004 Icarus 168 p.249

終わりに

この研究は、2006年11月9日の水星の太陽面経過の観測にあわせてスタートし、天文部の1年生から3年生が、日本天文学会2007年春季年会のジュニアセッションの発表に向けて行った研究がベースになっている。その後、平成19年度になり、2.3年になった2人が中心になり、TRACEのデータ解析を行い、2007年5月の地球惑星科学連合大会2007年「高校生によるポスター発表会」で発表した内容である。この時点では、2006年に打ち上げられた日本の太陽観測衛星「ひので」による観測データのアーカイブがなく、人工衛星としてはTRACEのみの解析であった。しかし、現在では、「ひので」データは自由に取る事ができる。図13は、「ひので」アーカイブデータからの画像である。「ひので」でもブラックドロップが起きていることが判る。このデータの解析すれば、ブラックドロップの解釈が正しいかどうか決着がつくだろう。さらに、次回の金星による太陽面通過（2012年6月6日）の研究対象としても興味深いと考える。

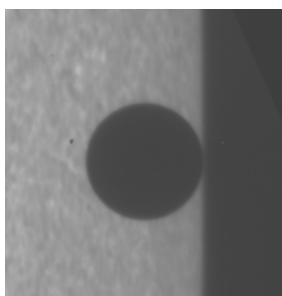


図13 太陽観測衛星「ひので」2006年11月9日00h08m01s(UT)の水星画像

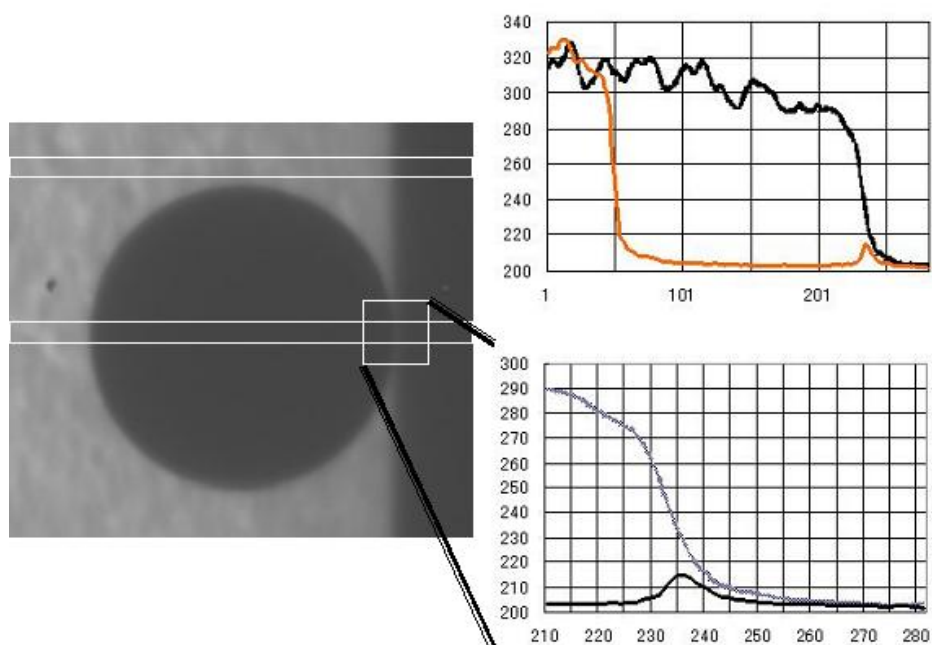


図14 00h08m01s(UT)の水星画像の解析画像。ブラックドロップが見えている。左の輝度曲線は、水星像の上部と、水星像の中心を通過する領域の輝度曲線である。切り取った画像の235ピクセル付近で、ブラックドロップが起きていることが判る。