

水星の日面通過を利用した黒点の温度測定*

(第5回科学部研究報告)

Temperature Measurements of a Sun Spot using the Mercury Transit on the Solar Surface
(The 5th Report of the Science Club of Yonago National College of Technology)

中江 祥平***, 和田泰治***, 近藤直弥****, 大島功也***,
Shouhei NAKAE, Taiji WADA, Naoya KONDO, Katsuya OHSHIMA,

小松紀由***, 近藤涼介**, 堀江麗**, 竹内 彰継*****
Motoyuki KOKMATSU, Ryousuke KONDO, Rei HORIE, Akitsugu TAKEUCHI

概要

水星の日面通過とは水星が太陽と重なって見える珍しい現象のことである。私たちは2006年11月9日に起こった水星の日面通過を観測し、太陽黒点の正確な温度測定を試みた。

太陽光球からの放射はプランク関数で表せるので、黒点と光球の明るさの比をとり光球が5780Kであることを利用すると黒点の温度を求めることができる。しかし、黒点の明るさには地球大気による散乱光が混入するため、この方法では正しい黒点温度を求めることはできない。一方、水星の日面通過では水星の明るさはゼロのはずなので、画像上の水星の明るさは地球大気による散乱光のみを表すことになる。そこで、水星の日面通過のデータを使用して地球大気による散乱光を補正し、黒点の温度を正確に求めてみた。その結果、水星の日面通過時に太陽面に出ていた黒点NOAA10930の温度が $4056\pm 60\text{K}$ であることがわかった。

1. はじめに

太陽光球からの放射はプランク関数で表せる。したがって、太陽の黒点と光球の明るさの比をとり、光球が5780Kであることを利用すると黒点の温度を求めることができる。しかし、この方法では黒点の明るさに地球大気による散乱光が混入するため、黒点が実際より明るくなりその温度も実際より高めに求まってしまう。

ところで、水星の日面通過では水星の明るさはゼロのはずなので、画像上の水星の明るさは地球大気による散乱光のみを表すことになる。したがって、水星の日面通過のデータを利用すると大気による散乱光を補正して黒点の温度を正確に求めることが可能となる。

そこで、我々は2006年11月9日に起こった水星の日面通過を観測し(図1)、その際に出現していた黒点NOAA10930の散乱光補正を行い、この黒点の正確な温度を求めた。以下ではその結果について報告する。

なお、この研究は2007年日本天文学会春季会ジュニアセッションにて発表したものである。(図2)

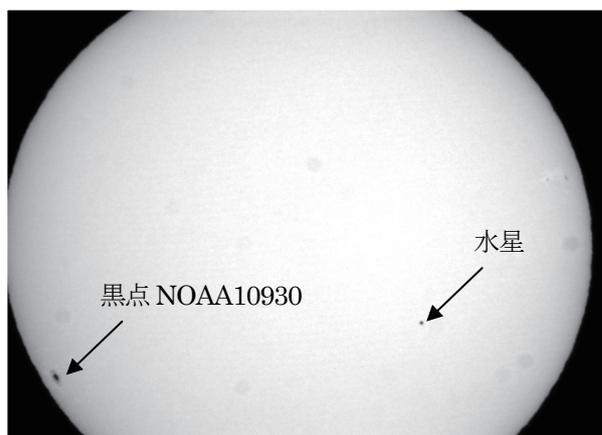


図1. 2006年11月9日の水星の日面通過の様子。左下が今回温度測定を行った黒点NOAA10930で、その右にあるのが日面通過中の水星である。太陽の直径が140万kmであるのに対し、水星の直径は5千kmしかないので点のようにしか見えていない。

* 原稿受理 平成19年10月1日

** 電気情報工学科学生

*** 電子制御工学科学生

**** 物質工学科学生

***** 一般科目



図2. 2007年日本天文学会春季年会ジュニアセッションポスター会場にて。右から2D 小松、3D 和田、4D 中江、2D 大島、2E 堀江。

2. 観測

2.1. 観測装置

本研究では、2005年に科学研究費補助金（基盤研究C）の支給を受けて本校に設置された「太陽彩層速度場観測望遠鏡」（図3）を用いて観測を行った（竹内&山脇 2006）。この望遠鏡の仕様は以下のとおりである。

光学系

ビクセン製アクロマート屈折望遠鏡 A80MWT 鏡筒 3 本
(D=80mm, F1=910mm)

赤道儀

タカハシ製作所製 J P 型赤道儀（駆動装置 PD5-XY）

H α フィルタ

ソーラーспекトラム社製ファブリ・ペロ型
H α フィルタ AS0-1（半値幅 0.3Å）

冷却 CCD カメラ

ビットラン製 冷却 CCD カメラ BJ-41L

減光フィルタ

ケンコー製 シャープカットフィルタ R-60
ケンコー製 減光フィルタ ND-2, ND-4

2.2. 観測方法

観測では太陽彩層速度場観測望遠鏡の中央の一本だけを使った。まずその口径を 40 mm に絞り、さらに ND8 フィルタで減光し、H α フィルタと冷却 CCD カメラをとりつけた。続いて、H α フィルタの設定温度を変更し、透過波長を 6560 Å として彩層ではなく光球が観測できるようにした（図4）。太陽光球からの放射はプランク関数で表せるので、このように観測波長を固定すると黒点と光球の明るさの比をとるだけで黒点の温度が求められる。

今回の水星の日面通過は 2006 年 11 月 9 日に起こり、我々は米子高専屋上で観測を行った。水星は日出時にすでに太陽面上にあり、日面通過は 9:10 (JST) まで続いた。そこで、観測は太陽高度が十分高くなる 07:22 から、現象が終わる 09:12 にかけて行った。

観測では太陽を直接焦点で撮像し、Fits ファイルとして保存した。このとき、露光時間は 0.03 秒として 1 分間に一コマずつ撮像し、合計約 90 コマのデータを得た。なお、途中 2 回観測を中断し、ダーク、フラット、フラットダークをそれぞれ 10 コマずつ撮像した。

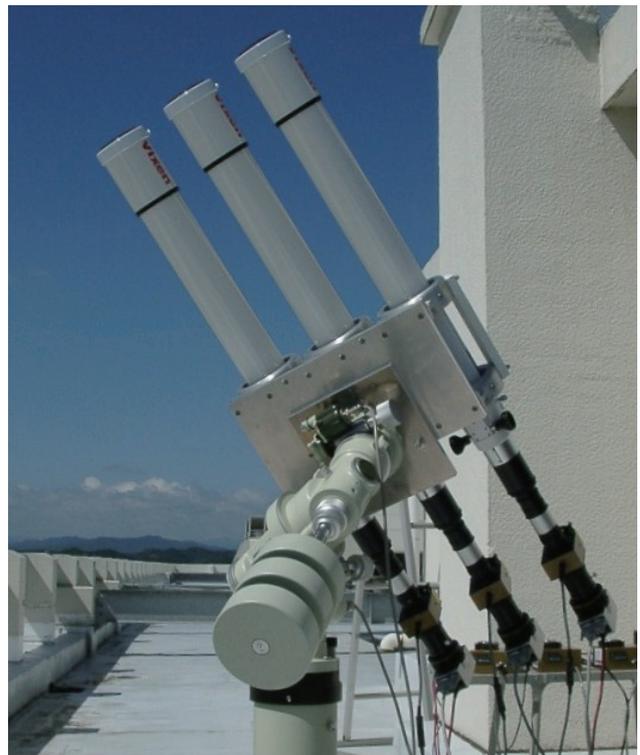


図3. 米子高専の太陽彩層速度場観測望遠鏡。3本の望遠鏡でH α 線の線中心、青側ウイング、赤側ウイングの光の強度を測定し、H α 線の視線速度、線強度、線幅を推定する。なお、今回の観測では中央の一本だけを使用した。

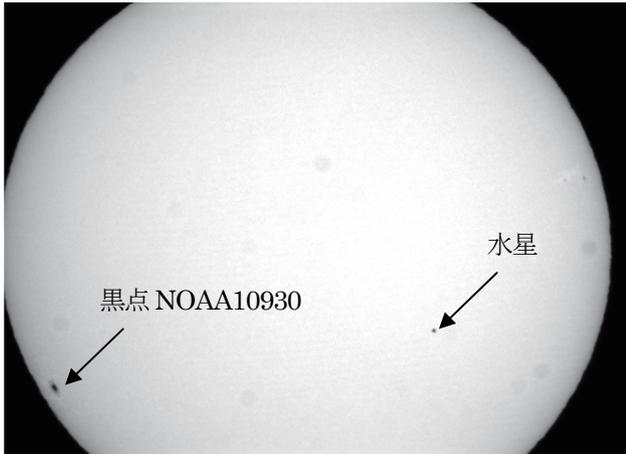


図4. 今回撮像した太陽画像の例。H α フィルタの設定温度を変更し、透過波長を 6560 Å としたため彩層ではなく光球が見えている。このように観測波長を固定すると、太陽光球からの放射はプランク関数で表せるので、黒点と光球の明るさの比をとるだけで黒点の温度を求められる。

3. 解析と結果

3.1. 温度測定の実理

図5に黒点の温度測定の実理を示す。太陽光球や黒点からの放射はプランク関数で表せるので、その明るさは温度 T と波長 λ のみの関数となる。したがって、観測波長をある一定値 λ_0 に固定すると光球の明るさ I_p と黒点の明るさ I_s の比は両者の温度だけで決定される。一方、太陽光球の温度 T_p は 5780K であることが分かっているので、それを考慮するとプランク関数を変形した①式で黒点の温度 T_s を求めることができる。すなわち、黒点の温度 T_s は光球と黒点の明るさの比 I_p/I_s を測定すれば求められる。

$$T_s = \frac{\frac{hc}{\lambda_0 k}}{\log \left[\frac{I_p}{I_s} \left\{ \exp \left(\frac{hc}{\lambda_0 k T_p} \right) - 1 \right\} + 1 \right]} \dots \textcircled{1}$$

なお①式において h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 c は光速、 λ_0 は観測波長で今回は 6560 Å である。

また、我々が温度測定した黒点は 2006 年 11 月 9 日の水星の日面通過時に太陽面上にあった NOAA10930 である。

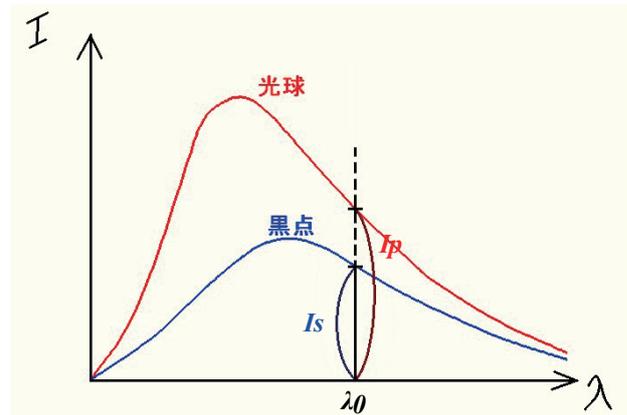


図5. 黒点の温度測定の実理図。太陽光球や黒点からの放射はプランク関数で表せるので、その明るさは温度 T と波長 λ のみの関数となる。したがって、観測波長をある一定値 λ_0 に固定すると光球の明るさ I_p と黒点の明るさ I_s の比は両者の温度だけで決定される。一方、太陽光球の温度は 5780K であることが分かっているので、それを考慮すると黒点の温度を求めることができる。

3.2. 解析と結果

まず、各 10 コマ撮像したフラット、ダーク、フラットダークをそれぞれ平均し、平均フラット、平均ダーク、平均フラットダークを作った。続いて、撮像した 90 コマすべてのデータから平均ダークを引算しダーク処理を行った。さらに、それらを平均フラットから平均ダークを引算したもので割算してフラット処理を行い、解析用データを作った。

ところで、太陽光球の明るさには周辺部に行くほど暗くなる「周縁減光」という効果がある。したがって、光球と黒点の明るさの比をとるとき、光球の明るさは太陽中心からの距離が黒点と同じ点でとらなければならない。そこで、太陽のリム上の 3 点をクリックするとそれらの座標を読み込んで円をフィッティングし、中心座標と半径を求めるプログラムを作った。そして、そのプログラムでは黒点中心をクリックすると、クリックした場所の黒点の明るさ I_s と黒点の両脇で太陽中心からの距離が黒点と等しい点での光球の明るさ I_p を読み込めるようにした。一方、黒点内部にも明るさのムラがあるので、撮像した全フレームを部員全員で独立に測定し、目測誤差の軽減に努めた。その結果、表 1 のように黒点の温度として $T_s = 4312 \pm 18 \text{ K}$ が求まった。

なお、解析には画像処理言語 IDL を使用し、解析は Sony VAIO PCG-GRX71 上で行った。

4. 考察

約 4300K という温度は黒点としてはやや高めである (Foukal 1990)。したがって、黒点の明るさには地球大気による散乱光が混入しており、これを補正しないと正確な黒点温度は求まらないと考えられる。そこで、水星の日面通過のデータを利用して黒点温度の散乱光補正を行った。

図 6 に水星の日面通過を利用した地球大気の散乱光補正の模式図を示す。水星の日面通過では水星は太陽の光を完全にブロックするので、地球の大気圏外で観測すると水星の明るさはゼロになるはずである。しかし、我々は大気圏内で観測しているため地球大気による散乱光が混入し画像がぼやけ、画像上の水星の明るさはゼロにはならない(図 6)。逆に言うと、日面通過時の水星の明るさを測定すると地球大気による散乱光が求まることになる。したがって、それを利用すれば黒点に混入している散乱光が推測でき、それを消去することによって黒点の温度を正確に求めることが可能となる。

まず、地球大気の散乱による点光源拡散関数を②式のようにガウス関数と仮定した。ここで、 σ は点光源拡散関数のカーネルの幅である。

$$f(x, y, x_0, y_0) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\sigma^2}\right] \quad \dots\textcircled{2}$$

この点光源拡散関数さえ与えられれば画像上での水星中心の明るさ $I_M^{Obs}(0,0)$ と黒点中心の明るさ $I_S^{Obs}(0,0)$ はそれぞれ③、④式で与えられる。

$$I_M^{Obs}(0,0) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} I_M^{Real}(x, y) f(x, y, 0, 0) dx dy = I_p \exp\left\{-\left(\frac{R_M}{\sigma}\right)^2\right\} \quad \dots\textcircled{3}$$

$$I_S^{Obs}(0,0) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} I_S^{Real}(x, y) f(x, y, 0, 0) dx dy \approx I_S + I_p \exp\left\{-\left(\frac{R_S}{\sigma}\right)^2\right\} \quad \dots\textcircled{4}$$

このとき、 R_M 、 R_S はそれぞれ水星、黒点の画像上での半径で測定可能な量である。したがって水星中心での明るさを測定すると③式からカーネルの幅 σ が求まる。続いて、黒点中心での明るさを測定すると④式から黒点の真の明るさ I_S が求まり、あとは①式を利用して黒点温度 T_b が計算できる。

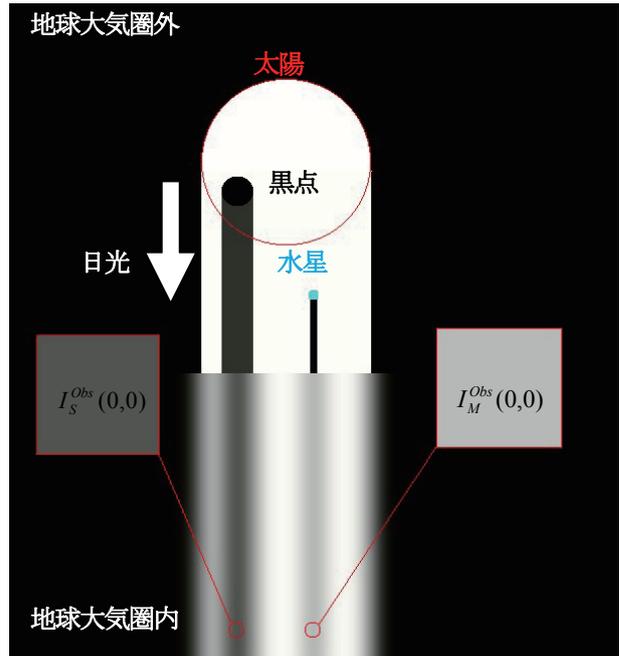


図 6. 水星の日面通過を利用した地球大気の散乱光補正の模式図。水星の日面通過では水星は太陽の光を完全にブロックするので、地球の大気圏外で観測すると水星の明るさはゼロになるはずである。しかし、我々は大気圏内で観測しているため、大気での光の散乱のため画像がぼやけ、観測された画像上の水星の明るさはゼロにはならない。したがって、日面通過時の水星の明るさを測定すると地球大気による散乱光の強さが求まり、それを利用して黒点内に混入している散乱光を引算し、黒点の温度を正確に求めることが可能となる。

表 1. 黒点温度の測定結果(K)

	散乱光補正なし	散乱光補正あり
中江	4296±17	4044±58
和田	4291±16	4040±58
小松	4297±16	4040±58
大島	4335±17	4084±60
堀江	4342±25	4073±67
平均	4312±18	4056±60

部員全員が全データ 90 フレームすべてを測定した。その結果黒点温度は、散乱光補正なしでは 4312±18K とやや高めであったが、散乱光補正をすると 4056±60K と極めて妥当な数値となった。

この補正法を用いて、部員全員が全データ 90 フレームすべてを再度測定した (表 1)。その結果、黒点の温度は $4056\pm 60\text{K}$ となった。Foukal(1990)は黒点温度を $3900\sim 4100\text{K}$ と報告しており、我々の結果はその報告と一致するものである。したがって、水星の日面通過を利用した散乱光の補正は正しく行われており、この方法は黒点温度を正確に測定する極めて有効な手段であると考えられる。

5. まとめ

我々は 2006 年 11 月 9 日に起こった水星の日面通過を観測し、その際に出現していた黒点 NOAA10930 の正確な温度測定を試みた。

太陽光球からの放射はプランク関数で表せる。したがって、太陽の黒点と光球の明るさの比をとり、光球が 5780K であることを利用すると黒点の温度を求めることができる。しかし、この方法では黒点の明るさに地球大気による散乱光が混入するため、黒点が実際より明るくなりその温度も実際より高めに求まってしまう。ところで、水星の日面通過では水星の明るさはゼロのはずなので、画像上の水星の明るさは地球大気による散乱光のみを表すことになる。したがって、水星の日面通過のデータを利用すると大気による散乱光を補正して黒点の温度を正確に求めることが可能となる。

我々はまず散乱光補正なしで、黒点 NOAA10930 の温度測定を行った。その結果、温度は $4312\pm 18\text{K}$ と黒点温度としてはやや高めとなった。すなわち、黒点の明るさには地球大気による散乱光が混入しており、これを補正しないと正確な黒点温度は求まらないとわかった。そこで、水星の日面通過のデータを利用して黒点温度の散乱光補正を行った。その結果、黒点の温度は $4056\pm 60\text{K}$ となった。

Foukal(1990)は黒点温度を $3900\sim 4100\text{K}$ と報告しており、我々の結果はその報告と一致するものである。したがって、水星の日面通過を利用した散乱光の補正は正しく行われており、この方法は黒点温度を正確に測定する極めて有効な手段であると考えられる。

参考文献

Foukal P. V., 1990, *Solar Astrophysics*

竹内彰継 & 山脇貴士, 2006, 米子高専研究報告, **42**, 6