

大気揺らぎの高さ分布計測のための太陽 SLODAR 技術

大石 明*・三浦 則明*・鈴木 貴博*・桑村 進*・上野 悟**・仲谷 善一**・
一本 潔**

*北見工業大学 〒090-8507 北海道北見市公園町 165

**京都大学飛騨天文台 〒506-1314 岐阜県高山市上宝町蔵柱

Solar SLODAR Technique for Measuring Height Profiles of Atmospheric Turbulence

Akira OH-ISHI*, Noriaki MIURA*, Takahiro SUZUKI*, Susumu KUWAMURA*, Satoru UENO**,
Yoshikazu NAKATANI** and Kiyoshi ICHIMOTO**

*Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami 090-8507

**Hida Observatory, Kyoto University, Kamitakara, Takayama 506-1314

The slope detection and ranging (SLODAR) technique is modified for measuring height profiles of atmospheric turbulence in day time. The modified technique uses solar structures instead of binary stars as sensing targets and introduces cross-correlation operations for slope detections. Results of deriving height profiles are shown from observational data in the Hida Observatory.

Key words: atmospheric turbulence, height profile, solar observation, adaptive optics

1. はじめに

補償光学系 (AO) は大気揺らぎによる波面の乱れを実時間で補償するシステムとして、地上からの天体観測において必須の技術となっている^{1,2)}。しかしながら、従来型の AO では補償が有効な視野が狭いため、広視野での画像改善を実現するための多層共役 AO³⁾ や地表層 AO⁴⁾ などの研究開発が精力的に行われている。両者に共通して、上空層と地表層の揺らぎ位相分布を別々に決定するためのトモグラフィック波面センシング (TWFS) 技術が必要となる。われわれも太陽観測用の TWFS の開発を行っているが⁵⁾、その手法を用いる際、上空揺らぎ層までの距離をパラメータとして与えなければならない。現状では、距離をさまざまに設定して最適な解を実験的に求めているが、実際に用いる際には、揺らぎ層の高さを何らかの方法で計測しておく必要がある。

日中でも大気揺らぎの高さ分布を計測できる方法として、shadow band ranger (SHABAR) がある⁶⁾。これは、複数の光量センサーを適当な間隔で配置し、それらからの信号の相関を計算するものである。SHABAR には観測用望遠鏡を用いる必要がないという大きな利点があるが、数百 m より高い揺らぎ層の計測は困難である。他方、われわれ

は scintillation detection and ranging (SCIDAR) に基づく方法を提案している^{7,8)}。これは、望遠鏡瞳面における波面の明暗パターン (シンチレーション) の相関を用いるものであり、飛騨天文台ドームレス望遠鏡を用いた場合、5~10 km 程度の高さまでの計測が可能である。しかし、この方法は観測用望遠鏡を使用する必要があり、さらに、観測光学系とは別個に SCIDAR 用光学系を設置しなければならず、実際の運用時には問題となる可能性がある。

そこでわれわれは、二重星用に提案されている slope detection and ranging (SLODAR) 技術⁹⁾ をもとに、太陽 SLODAR 技術を今回開発した。SLODAR は、TWFS で用いるシャック・ハルトマン型波面センサーを利用して揺らぎ層の高さ測定を行うことができるため、計測用の光学系を追加する必要がないという大きな利点がある。観測時には、まず SLODAR を動作させ揺らぎ層の高さを求めておき、それを AO 動作時にパラメータとして入力するという利用法を考えている。

本報告では、太陽 SLODAR 技術について報告するとともに、飛騨天文台で観測されたデータに適用した結果を示す。

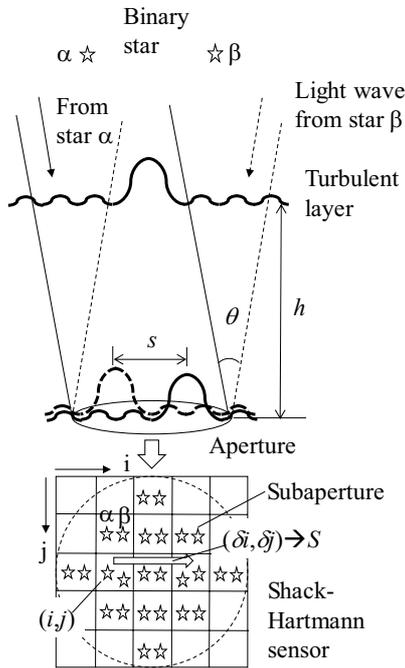


Fig. 1 Principal of the SLODAR technique.

2. 太陽 SLODAR 技術

本章では、従来提案されている二重星用の SLODAR 技術のレビューを行うとともに、太陽に適用するためにわれわれが行った変更点を述べる。また、SLODAR の結果の確認に用いる differential image motion monitor (DIMM) 技術について簡単に説明する。

2.1 二重星を用いた SLODAR 技術⁹⁾

説明を簡単にするために、高さ h の上空に単層の揺らぎがあると仮定する。角距離 θ だけ離れた星 α と星 β をもつ二重星を、高度角 φ で観測すると考えると、星 α からの光波が上空揺らぎによって印加される位相揺らぎのパターンは、星 β からのものと開口面上で距離 $S = h\theta/\sin\varphi$ だけずれている。つまり、開口面上で両者の位相パターンのずれ量 S を検出すれば、そこから高さ h が求められる。Fig. 1 は二重星が天頂にある場合 ($\varphi = 90^\circ$) の SLODAR の模式図である。以下の原理の説明においては $\varphi = 90^\circ$ とする。

SLODAR においては、 S の検出のためにシャック・ハルトマンセンサーを用いる。このセンサーは開口を小開口に分割し、小開口ごとにマイクロレンズによって結像したものを観測する。すなわち、小さな二重星像（小開口像とよぶ）がたくさん配列されたものが観測されることになる。この小開口像は、小開口内の局所的な波面の傾きによって位置ずれが生じ、大気揺らぎの時間変動によってその位置が時々刻々変動する。しかも、上空揺らぎがある場合に

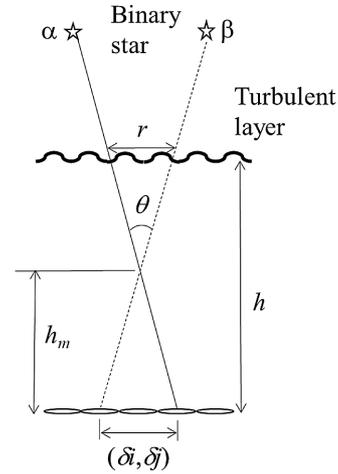


Fig. 2 Illustration of the case that discrepancy occurs between the height of a turbulent layer, h , and that of measurement, h_m .

は、同じ小開口内の星 α と星 β は異なる動きをすることになる。

そこで、距離 S 離れた小開口同士に着目すると、片方の小開口内の星 α と、もう一方の開口内の星 β は、同じ上空揺らぎ層を通過しているため、同じ動きをすることになる。同じ動きをしているかどうかを相関を使って検出するのが SLODAR の原理である。

いま、着目している小開口が (i, j) で示されるとして、時刻 t におけるこの小開口での星 α の位置を $s_{i,j}^{(\alpha)}(t)$ とする。また、その開口から $(\delta i, \delta j)$ 離れた小開口像での星 β の位置を $s_{i+\delta i, j+\delta j}^{(\beta)}(t)$ としたとき、両者の相互相関

$$C(\delta i, \delta j) = \left\langle \sum_{i,j} s_{i,j}^{(\alpha)}(t) s_{i+\delta i, j+\delta j}^{(\beta)}(t) / O(\delta i, \delta j) \right\rangle \quad (1)$$

を計算する。ここで、 $O(\delta i, \delta j)$ は相関計算に用いた小開口対の数であり、 $\langle \rangle$ は多数のフレームにわたる平均を表している。 $(\delta i, \delta j)$ がずれ量 S に対応し、高さ h に変換できる。同様に、星 α だけに着目した自己相関を計算する。

$$A(\delta i, \delta j) = \left\langle \sum_{i,j} s_{i,j}^{(\alpha)}(t) s_{i+\delta i, j+\delta j}^{(\alpha)}(t) / O(\delta i, \delta j) \right\rangle \quad (2)$$

Wilson は、 $C(\delta i, \delta j)$ を $A(\delta i, \delta j)$ でデコンボリューションしたものが屈折率構造定数 C_n^2 に比例すると述べている⁹⁾。Fig. 2 に示すように、揺らぎ層の高さ h と、 $(\delta i, \delta j)$ で決まる計測高さ h_m が一致していない場合、星 α と星 β からのビームは揺らぎ層上で $r = |h - h_m|\theta$ だけずれることになる。コルモゴロフ理論によると、揺らぎ層に沿って有限距離 r だけ離れた 2 つのビームの波面傾斜の相関は $r^{-1/3}$ に比例する^{10,11)}。つまり、単層の揺らぎであっても、その影響はさまざまな $(\delta i, \delta j)$ に広く分布することになる。ここでは、

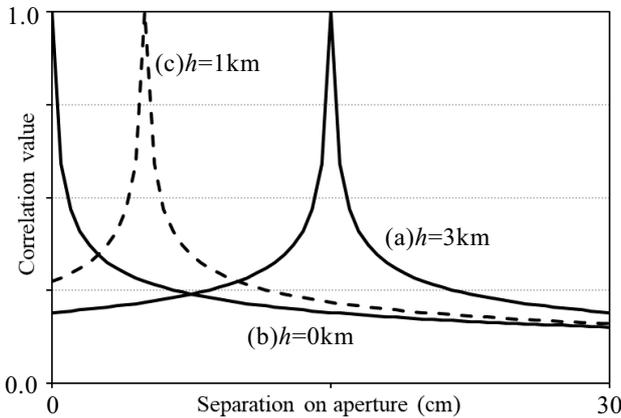


Fig. 3 Illustration of single-layer spread functions. Profiles show correlation values observed on the aperture plane when only a single turbulent layer exists at the height of (a) 3 km, (b) 0 km or (c) 1 km.

この分布を規定する関数を、単層揺らぎ分布関数 (single-layer spread function; SSF) とよぶことにする。デコンボリューションはこのSSFの影響を補正するために行われるものである。\$A(\delta i, \delta j)\$ は \$(\delta i, \delta j)\$ だけ離れた2つの平行ビームの波面傾斜の相関を計測しており、SSFを離散的に実測したもののみなしている。

ただし、デコンボリューションを実行するときは注意が必要である。前述の通り、SSFの影響の大きさは揺らぎ層を横切る2つのビームの間隔のみで決まる。SLODAR観測系では、揺らぎ層の高さ \$h\$ に対して、計測高さ \$h_m\$ が高いほうにずれた場合でも低いほうにずれた場合でも、揺らぎ層上でビーム間隔の広がりを生じさせる効果は同じである。このため、SSFは揺らぎ層の高さで決まる位置 (例えば、Fig. 3の曲線 (a) の 15 cm の位置) で最大値をもち、そこからずれた場合、左右で同じ応答を示す。一方、地表層揺らぎの場合 (\$h = 0\$ km), \$h_m\$ は \$h\$ より高い領域しか計測しないので、曲線 (b) のようにその影響は当然高いほうのみ片側の分布として現れる。その中間の揺らぎ層では、両者の中間の特徴をもったものとなる (曲線 (c))。つまりSSFの形状はシフトバリエーションであり、デコンボリューションにはシフトバリエーションなSSFでも適用可能な方法を使用する必要がある。

2.2 デコンボリューションへのCLEANの導入

ここで考えるデコンボリューション問題を定式化する。表記を簡単にするため、二重星が \$x\$ 軸方向に並んでおり、\$\delta i = l, \delta j = 0\$ とした一次元の場合を考える。すなわち、計測された相互相関は \$C(l)\$, 自己相関は \$A(l)\$ と表記される。いま、\$l'\$ で決まる高さに揺らぎがあるとして、この揺らぎによるSSFの分布を \$A_s(l; l')\$ と書くと、前節の議論

から \$A_s(l; l') = A(|l-l'|)\$ となる。求めたい揺らぎ層の高さ \$l'\$ における波面傾斜の相関を \$C_s(l')\$ とすると、計測された相互相関 \$C(l)\$ は以下の式でモデル化される。

$$C(l) = \int C_s(l') A_s(l; l') dl' \quad (3)$$

ここでデコンボリューションのためにCLEANを導入する。電波望遠鏡による観測では、点電波源が非常に広がったビーム (dirty beam) でコンボリューションされ、非常に劣化して観測される。CLEANは、このような状況下でも像改善するために用いられる方法である^{12,13)}。一方、SLODAR計測では、薄い揺らぎ層の影響が非常に広がったSSFでコンボリューションされて観測される。この状況が電波望遠鏡における観測に類似している。

CLEANでは、対象を離散的な点源の集合と仮定し、観測像中のdirty beamパターンを点に置き換えていく。ここではCLEANを一部修正して、以下の手順で上式の \$C_s(l')\$ を導出する。

- (i) \$C_s(l')\$ を格納する一次元配列を用意し、ゼロで初期化する
- (ii) 残差分布 \$E(l)\$ を格納する一次元配列を用意し、\$C(l)\$ で初期化する
- (iii) \$E(l)\$ 中で、正值の最大値 \$E_{max}\$ とその位置 \$l_{max}\$ を求める
- (iv) \$C_s(l_{max})\$ に、\$\epsilon E_{max}\$ を加える。ここで \$\epsilon\$ はゲイン係数である
- (v) \$E(l)\$ から \$\epsilon E_{max} A_s(l; l_{max})\$ を減ずる
- (vi) \$E(l)\$ の自乗総和値が閾値 \$t\$ より大きい場合は (iii) に戻る。閾値より小さくなったときの \$C_s(l')\$ が、求めたい相関値分布である。

本来のCLEANの手順からの変更点は (v) であり、位置 \$l_{max}\$ に応じてSSFの形状を変えることで、シフトバリエーションな処理を実現している。

アルゴリズムを駆動するためのパラメータ \$\epsilon\$ と \$t\$ は実験的に求める必要がある。Högbomは経験上、ゲイン係数 \$\epsilon\$ は安全のためには小さいほどよいが、0.5より小さくしても結果はほとんど改善されない、と述べている¹²⁾。われわれは \$\epsilon\$ を変えて実験し、\$\epsilon\$ が小さくなるとアルゴリズムはすべて収束し、得られる結果はほとんど変わらないことを確認した。また、結果が変わらなくなる \$\epsilon\$ の値はデータによって異なるので、その典型値より1桁以上小さくなるように設定した。4章の実験では、\$\epsilon = 0.01\$ を用いている。また、収束値はデータによってばらつきがあるが、今回の実験では、\$t = 10^{-15}\$ より小さくなると、すべてのデータにおいて得られる結果に有意な変化はみられなかった。

2.3 太陽への適用

二重星を用いた SLODAR では、各フレーム上でおのおのの星の重心を計算することで、各小開口上での位置変動が求められる。これに対して、太陽 SLODAR では、黒点、ポア、粒状斑などの太陽表面上の模様を参照パターンとして用いることになる。ただし、これらは孤立した模様ではないため、二重星の場合のように重心計算を用いることはできない。

そこでわれわれは、最初のフレームの参照パターンを基準として、2枚目以降の参照パターンの相対位置を、相関演算を用いて検出することにした。相関演算によって得られた相関マップ上で最大値をもつ画素位置を検出した後、その周りの画素を使った放物線近似によって最大値の画素間位置を決定した。ただし、1枚目の参照パターン位置には、大気揺らぎの影響が含まれたままとなっており、得られた相対位置全体にその揺らぎの影響が及んでいる。そこで、すべてのフレームの相対位置の平均値を求め、それをそれぞれの相対位置から減じ、それを $s_{i,j}(t)$ として用いることにした。

相関を用いた相対位置検出においては、時間的な揺らぎ状態の変動や局所的な揺らぎの大小によって、観察される参照パターン形状の変形が起こる。この場合、相関値が低下し、得られる相対位置そのものの信頼性が低くなる。このため、相関値が低いものは式(1)と式(2)の計算から除くことにした。

2.4 DIMM の概説

大気揺らぎの状態を計測するために頻繁に使用されているのが DIMM¹⁰⁾ である。これは2台の小望遠鏡を適当な間隔で離して設置し、同じ星を観測するものである。それぞれの望遠鏡で得られる星像の動きの差異を計測し、そこからフリードパラメーター r_0 ¹¹⁾ を導出する。フリードパラメーターは大気揺らぎの空間サイズを表す指標であり、大きいほど揺らぎの状態がよいことを表す。Kawate らはシャック・ハルトマンセンサーの小開口を個々の望遠鏡に見立てることで、太陽でも動作する太陽 DIMM を提案した¹⁴⁾。この技術を用いれば、われわれの SLODAR 光学系でも r_0 の計算が可能となる。DIMM では星像の動きを差分で評価するのに対して、SLODAR では相関で評価するという違いはあるものの、計測量は星像位置の時間変動と同じものなので、 r_0 と SLODAR で計測する相関値には密接な関係がある。

3. 観 測

観測は2016年9月に飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡を

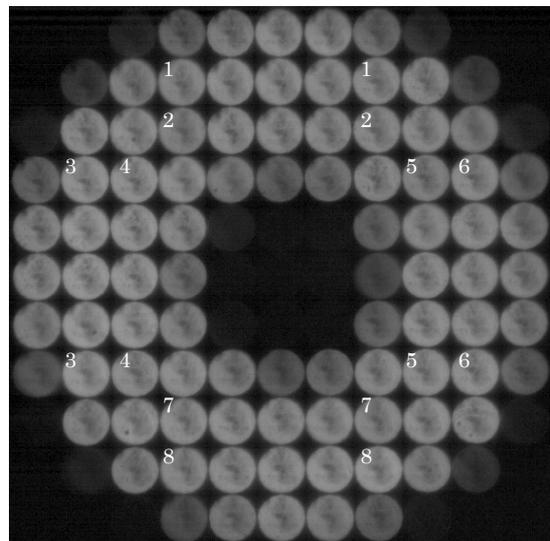


Fig. 4 Image observed with the wavefront sensor. The same labels indicate the pairs of sub-apertures used for DIMM calculations.

用いて実施した。望遠鏡焦点に波面センサーを設置し、およそ10分おきに900枚の画像を記録した。このとき、露光時間は1000分の1秒、フレームレートは100 fpsである。すなわちデータ取得は9秒間であった。観測波長は 430 ± 2 nm である。用いたマイクロレンズアレイは 11×11 であり、各小開口における視野は47秒角となるように設定した。Fig. 4に、9月10日に取得したフレームの1枚を示す。複数の黒点を含む太陽像がたくさん並んでいることがわかる。図中に付した同じ番号のラベルは、DIMM 計算に用いた小開口対を示している。4章で示される r_0 の値は、8対からの値を平均したものである。ここでの DIMM 計測は、5.5 cm 口径の2つの望遠鏡を21.8 cm 離れたものと等価である。

Fig. 5は小開口像の拡大図であり、(a)は9月10日、(b)は9月9日に観測されたものである。図中でラベル付けしてある黒点を参照パターンとして用いた。参照パターン間の距離は、(a) α - β : 10.4, α - γ : 18.0, β - γ : 10.0, (b) α - β : 9.7秒角であった。9日は観測時刻が夕方であり、太陽高度が非常に低いため大気揺らぎの影響が非常に大きく、黒点像もかなり劣化することが多かった。

4. 解析結果

Fig. 6とFig. 7は、9月10日の異なる観測時刻のデータを解析した結果であり、それぞれ大気揺らぎ状態が最も悪い場合とよい場合に対応している。(a)のグラフは、デコンボリューションして得られた相関値分布をプロットしたものであり、マークは相関計算に用いる黒点のペアの違い

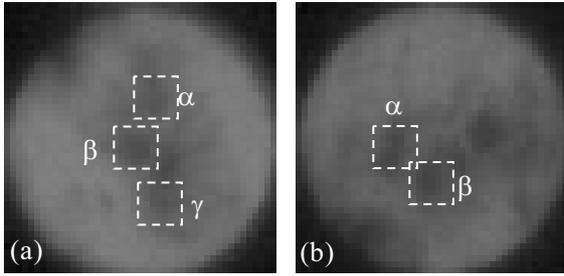


Fig. 5 Magnified sub-aperture images observed on September 10th (a) and 9th (b), 2016. The labels α , β , and γ indicate sunspots used in SLODAR analyses.

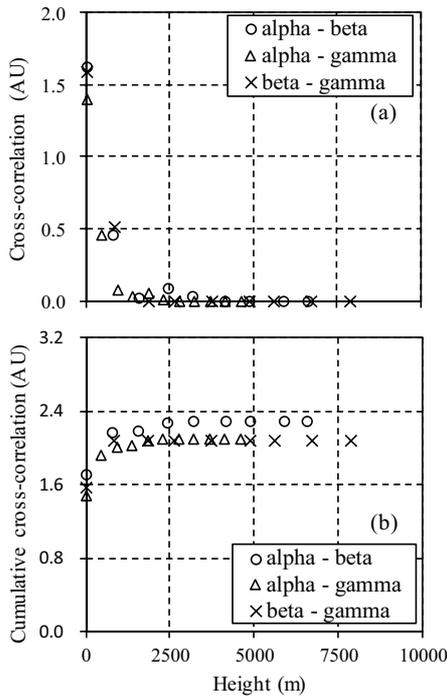


Fig. 6 Results of solar SLODAR in observations on September 9th, 2016. The observation was done at 10:17, which was under the worst state of atmospheric turbulence in the day. The graph (a) plot cross-correlation values $C(\delta_i, \delta_j)$, and (b) shows cumulative values of them from the ground. AU: Arbitrary unit.

を示している。黒点ペアの間隔によって、計測できる最高値および高さ方向のサンプリングの間隔は異なっている。高さの表示は飛騨天文台を基準とした値である（以下同様）。図中、 α - γ の組み合わせ（ Δ ）が他の場合に比較して小さな値になっている。これは、高さ方向のサンプリング間隔が短く、個々の相関値に寄与する揺らぎ層の幅が狭いためである。なお、相関演算に用いているデータ数が1000以下の結果は信頼性が低いため、プロットしていない。また、原理的に負の相関はありえないので、相関が負になった場合には、デコンボリューションの前に強制的にゼロとした。このような事例は、計算に用いるデータ数が

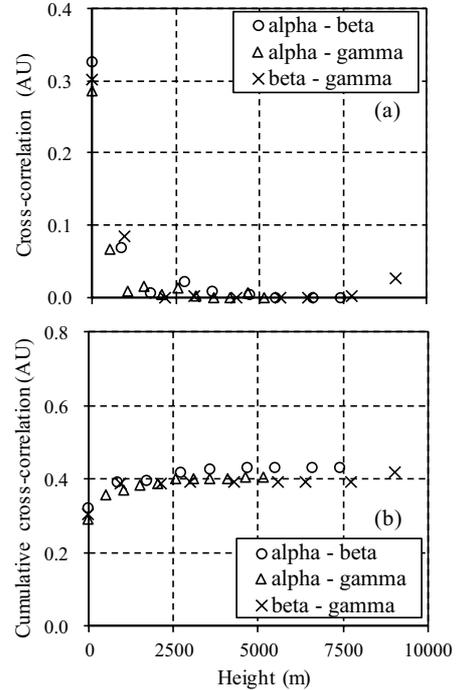


Fig. 7 Results of solar SLODAR. The observation was done at 10:59 on September 9th, 2016. The state of atmospheric turbulence was best in the day. The configuration of the figure is same as in Fig. 6.

少ないためと考えられる。

Fig. 6 (b) と Fig. 7 (b) のグラフは、それぞれ (a) に示す相関値を地表層から累積したものである。上空ほど相関値が小さくなるので、累積値は高度が高くなるにつれて、ある値に収束していくことがわかる。それぞれのマークが示す分布は、使用している参照パターンの組み合わせが異なるだけで同じ揺らぎを測っているのだから、理想的には同じようになるはずである。Fig. 6 (b) に示す大気の状態が悪い場合には、高度が低い場合は比較的一致しているが、高くなると差異が目立つ。これは、高度が高くなると計算に用いるデータ数が少なくなるため、揺らぎ状態が悪い場合には十分な精度で計算できなくなるためと考えている。他方、Fig. 7 (b) のように、大気の状態がよくなると、高度が高い場合でも比較的一致しているのがわかる。

Fig. 6 と Fig. 7 に示す累積相互相関の収束値を、自己相関 $A(0,0)$ に対してプロットしたものが Fig. 8 である。図中には観測時刻と、その時の太陽高度角を示してある。グラフからは明らかに線形の関係があることがわかる。相関係数は 0.98 であった。ただし、大気揺らぎ状態が悪い場合 (10:17) には、用いた参照パターンによってばらつきが大きいことがわかる。これは、計測している方向によって実際に揺らぎの状態が異なっていることと、揺らぎが大きい

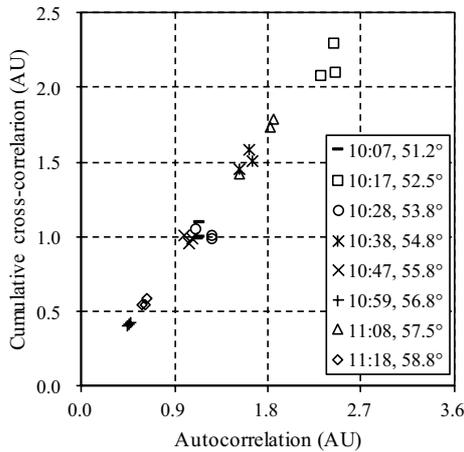


Fig. 8 Convergence values of cumulative cross-correlations versus autocorrelations $A(0, 0)$.

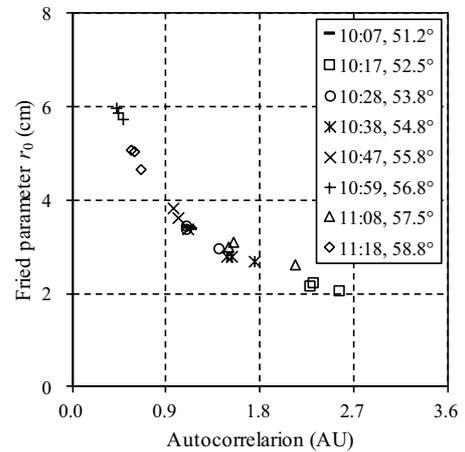


Fig. 9 Plots of Fried's parameters versus autocorrelations $A(0, 0)$.

ため測定誤差が大きくなることの2つが原因と考えている。Fig. 9は、自己相関値 $A(0, 0)$ に対してDIMMによって求めた r_0 をプロットしたものである。これらはほぼ反比例の関係にあり、 $A(0, 0)$ と $1/r_0$ の相関係数は0.97であった。Fig. 8とFig. 9の結果を総合すると、SLODARで計測される相互相関値を高さ方向に累積した値は、DIMMで計測される大気揺らぎ状態との間に密接な関係があるとみなすことができる。

Fig. 10は、9月10日に観測されたデータを処理した結果(黒点ペア α - β)である。太陽高度の変化につれて計測している高さが少しずつ変化しているのがわかる。観測時刻が正午に近いため、観測可能な高度は比較的高くなっている。どの時刻のグラフも地表～上空1 km付近で大きな値となっており、日中の大気揺らぎは地表面の熱の影響で地表層付近が卓越するという従来の知見に合致している。また、高度が高くなるにつれ、揺らぎの影響が低下する傾向にあることもわかる。一般化SCIDAR*を用いた夜の観測でも、同様の傾向がみとれる^{15, 16)}。また、2500 m付近で比較的大きな相関値を示す結果が多く、この高さに揺らぎ層が存在していた可能性は高い。なお、上空10 km付近にはジェットストリームの影響で大きな揺らぎがあるといわれているが、今回の計測では飛騨天文台の標高1280 mを加えても観測可能範囲が10 kmに届いていない。

観測時間中 r_0 の値は2~6 cmの範囲でかなり変動していたが(Fig. 9), Fig. 10における上空揺らぎの値はあまり変化せず、地表層に近い0~1 kmのみにおいて値が大きく変化していることがわかる。つまり、大気揺らぎ状態の変動

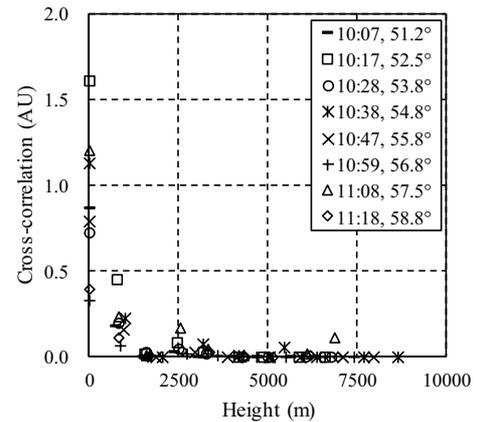


Fig. 10 Heightwise distributions of cross-correlations at every observational time on September 10th. The values were derived using the sunspot pair of α - β in Fig. 5(a).

のほとんどは、地表付近でのみ起きていたことを意味している。ただし、上空の結果は計算に用いたデータ数が少ないため、揺らぎを検出できていない可能性も残っている。この点については、データ数を増やしてさらに検証を続ける必要がある。

Fig. 11は9月9日の結果である。Fig. 10と同様に、地表付近で大きな値をとり、高くなると値が減少する傾向にあることがわかる。また、1500~3000 mにかけて比較的大きな相関をもっていたことがわかる。なお、この日は観測時刻が夕方近く太陽高度が低いため、計測できる高さが低くなる。相関値の大きさに着目すると、Fig. 10と比較して全般に値が小さくなっている。これに対して、DIMM計測で求めた r_0 は1.5~3.7 cmであり、9月10日より小

*初期のSCIDARでは、開口におけるシンチレーションに基づいて揺らぎ計測をするため、望遠鏡からの距離が短い領域(地表層)に対する感度を持っていなかった。これに対して、光学系を工夫して地表から数km下の地点での計測と等価なデータを得られるようにし、地表層揺らぎの検出を可能にしたものを一般化(Generalized)SCIDARという。

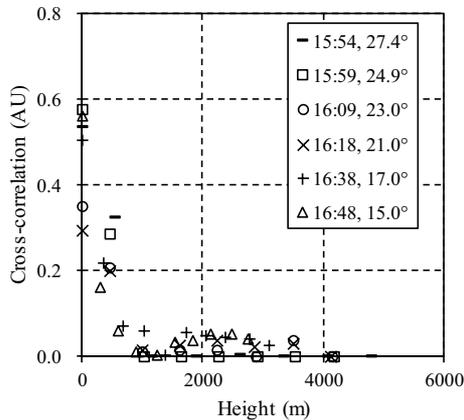


Fig. 11 Heightwise distributions of cross-correlations on September 9th.

さな値となっていた。これは、夕方に近くなると観測される画像の劣化度合いが大きくなるという従来の経験に合致している。Fig. 11の相関値が小さいにもかかわらず r_0 の値が小さくなっている理由は、太陽高度が低い場合、比較的揺らぎの大きい地表層中をビームが長い距離伝搬しているためと解釈できる。

なお、大気屈折率変動の構造関数は、コルモゴロフに従って $D_n(r) = C_n^2 r^{2/3}$ と表すことができる¹¹⁾。 r は大気揺らぎ中の任意の2点間の距離である。ここで、屈折率構造定数 C_n^2 は屈折率変動の大きさを規定する値である。この値は大気揺らぎ層の高さ h に依存するので $C_n^2(h)$ と書かれ、大気揺らぎの高さ方向のプロファイルを与えるものとして一般的に使われている。今後、相互相関値から太陽高度の依存性を除くとともに、 $C_n^2(h)$ に変換することが課題である。

5. まとめ

従来二重星用に用いられてきたSLODAR技術を太陽に適用するため、相関演算を用いて位置変動を検出するように修正を行った。また、デコンボリューションのためにCLEANを修正した方法を導入した。開発した技術を飛騨天文台で観測されたデータに適用した結果、地表付近で大きな揺らぎをもつという従来の知見に合致した結果を得ることができた。また、上空においても揺らぎ層が存在する可能性のある結果を得ることができた。ただし、解析の過程で特に上空に対応する結果の精度が悪くなっていることが判明し、より多くのフレーム数が必要であることがわかった。

提案手法の上空揺らぎ検出の性能を確認するため、存在がわかっているジェットストリーム層を使って手法のテスト

を実施することを計画している。すなわち、ジェットストリーム層まで計測可能範囲が届くような条件下での観測を実施し、その層の揺らぎが検出できるのかを確認する必要があると考えている。今回の実験の条件下では、十分な数の小開口対を得るためには、あまり離れた小開口対を用いることはできず、小開口7個分(開口上で38.5 cm)を上限としておくのが安全であることがわかった。この制限下で、飛騨天文台の標高を合わせて11 kmまで感度をもつように設計することを考える。7.5秒角間隔の黒点ペアを用いることを想定すると、太陽高度角が 68° 以上であれば計測可能となる。夏至での観測を想定すると、10:30~13:15においてこの条件を満たすことになる。また、日中のジェットストリーム層の揺らぎの大きさは報告例がなく、よくわかっていないが、一般化SCIDAR^{*})を用いた夜の例では、ジェットストリーム層と上空4 km付近で同程度の揺らぎが報告されている¹⁵⁾。最低限、上空数kmの揺らぎを計測できるように計測精度を向上させる必要がある。フレーム数を現状の10倍程度にして観測を実施することを考えている。

この研究の一部はJSPS科研費15K05016の助成を受けて行われた。

文 献

- 1) 服部雅之, 早野 裕: 光学, **44** (2015) 370-378.
- 2) 三浦則明: 光学, **44** (2015) 379-383.
- 3) D. Schmidt, N. Gorceix, X. Zhang, J. Marino, R. Coulter, S. Shumko, P. Goode, T. Rimmele and T. Berkefeld: Proc. SPIE, **9148** (2014) 91482U.
- 4) A. Tokovinin: Publ. Astron. Soc. Pacific, **116** (2004) 941-951.
- 5) N. Miura, A. Oh-ishi, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, S. Ueno, Y. Nakatani and K. Ichimoto: Proc. SPIE, **9909** (2016) 99092N.
- 6) J. M. Beckers: Exp. Astron., **12** (2001) 1-20.
- 7) N. Miura, A. Oh-ishi, S. Shionoya, K. Watanabe, S. Kuwamura, N. Baba, S. Ueno and K. Ichimoto: Mon. Not. R. Astron. Soc., **434** (2013) 1205-1219.
- 8) N. Miura, A. Oh-ishi, S. Kuwamura, N. Baba, S. Ueno and K. Ichimoto: *Imaging and Applied Optics, OSA Technical Digest* (2013) jTu4A.6.
- 9) R. W. Wilson: Mon. Not. R. Astron. Soc., **337** (2002) 103-108.
- 10) M. Sarazin and F. Roddier: Astron. Astrophys., **227** (1990) 294-300.
- 11) J. W. Hardy: *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (Oxford Univ. Press, New York, 1998).
- 12) J. A. Högbom: Astron. Astrophys. Suppl., **15** (1974) 417-426.
- 13) A. R. Thompson, J. M. Moran and G. W. Swenson, Jr.: *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* (Krieger Publishing, Malabar, 1986).
- 14) T. Kawate, Y. Hanaoka, K. Ichimoto and N. Miura: Mon. Not. R. Astron. Soc., **416** (2011) 2154-2162.
- 15) R. Avila, J. Vernin and E. Masciadri: Appl. Opt., **36** (1997) 7898-7905.
- 16) R. A. Jhonston, C. Dainty, N. J. Wooder and R. G. Lane: Appl. Opt., **41** (2002) 6768-6772.