

シーイング測定装置開発計画

○萩野正興, 奥村真一郎(日本スペースガード協会/スペースガード研究センター)
大屋真, 都築俊宏(国立天文台), 木村剛一(京都大学), 宮良碧(茨城大学), 宮田ゆき乃(明星大学)

概要(Abstract)

我々日本スペースガード協会（スペースガード研究センター）では地球近傍の小惑星観測を行っている。小惑星は小さいため大型望遠鏡を必要とするが、周囲の環境が作り出す大気揺らぎ（シーイング）の影響を大きく受けてしまう。そこでシーイング測定装置 DIMM を作成し、観測精度向上の技術を獲得する。得られたデータにシーイング情報などを追加し、サイエンスのデータとして使用する判断基準とする。

1. はじめに

日本スペースガード協会では岡山県井原市美星にあるスペースガードセンターにおいて地球近傍に存在する衝突の可能性のある小惑星などの観測を行っている。地球に接近して発見される小惑星の多くは大きさが数mから数十m程度と小さく、月までの距離と同じ程度にまで近づいたとしても 17-18 等以下と暗いため、光学観測には口径が大きく集光力のある大型の望遠鏡が必要となる。口径 1 m を超える望遠鏡では回折限界が 0.1 秒角以下となり分解能が上がるが、大気揺らぎによる屈折率の時間変化（シーイング）による影響も大きくなる。このため、その性能を十分に発揮できていない可能性がある。我々はこのシーイングを定常的にモニタするための DIMM (DIMM : Differential Image Motion Monitor) を開発する。一般的に DIMM などを用いたシーイング測定は大型望遠鏡を建設するためのサイト調査に使われるが、既存の地上光学望遠鏡での安定した観測環境を維持するためにも必要不可欠である。また、シーイングの定常的な観測により取得データのデータ・クオリティを保証する意味もある。我々は DIMM によるシーイング測定の結果を用いて、小惑星観測の精度向上を目指すことが目的である。

サイト調査などに DIMM を用いた例は多く存在する。例えば、京都大学は DIMM を用いて岡山天文台のサイト調査を行い、広島大学では赤外シミュレータの設置サイトの決定に活用され、東北大学では赤外望遠鏡の設置サイトとして南極ドームふじでの調査が行われたという経緯がある。この東北大学の試験観測によると上述のサイトにおけるシーイングのサイズは、それぞれ岡山天体物理観測所で $1.2 \pm 0.2''$ 、東京大学木曾観測所で $2.3 \sim 3.2''$ 、ハワイすばる望遠鏡で $0.6''$ 、南極ドーム C で $0.5''$ と報告されている（上田 2003, 千代延 2005）。この中でも京都大学岡山天文台（ここでは京都大学岡山天文台と岡山天体物理観測所は同じサイトとして扱う）は我々が提案するシーイング調査のサイトから直線距離で約 12km の位置にあり良い比較対象となりうる。また、同時観測を行うことによりシーイングを変化させる原因となる気象や地形との関係の理解につながると考えられる。

2. DIMM 観測計画

まず、DIMM の仕組みについて説明する。DIMM とは Differential Image Motion Monitor の頭文字か

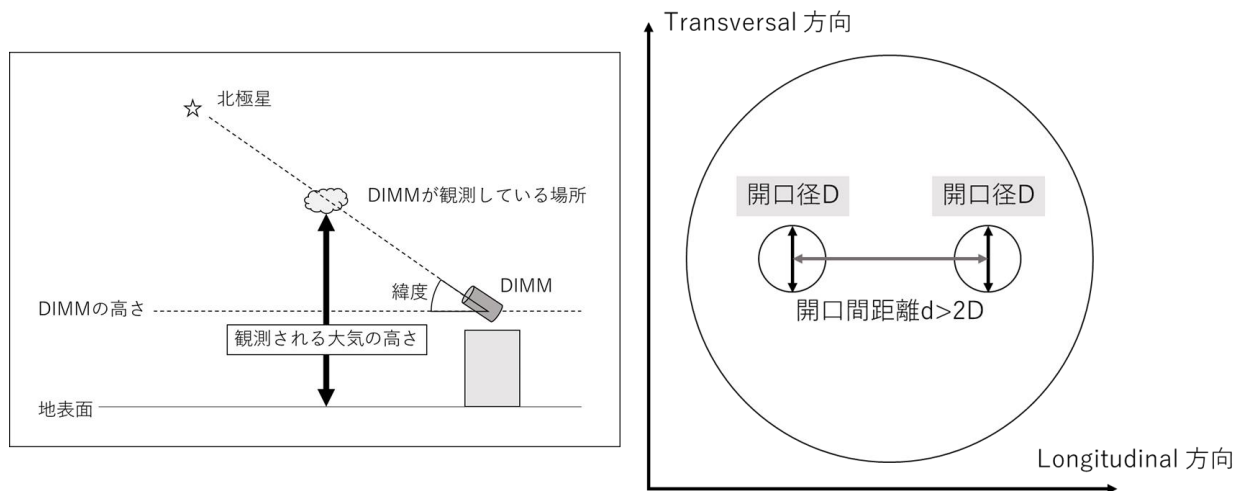


図 1 DIMM 原理の概念図 (左) と作成する DIMM 板の外観。

ら名付けられたシーイングモニタである。その構造はシンプルで複数の開口を持つ DIMM 板 (図 1 右図) を鏡筒の筒先に取り付けて観測を行う。この時、DIMM 板の開口部分にはウェッジプリズムを装着し、望遠鏡の光学系に入射した光路を曲げて同じ星から得られる 2 つの星像を同時観測する。この星像から揺らぎによる輝度分布の半値幅 (FWHM) を測定する。ここではこの FWHM をシーイングサイズと呼ぶ。慣例として開口の並んだ方向を Longitudinal 方向と言い、それに垂直な方向を Transversal 方向と言う。シーイングサイズはそれぞれの方向について測定される。また、開口の直径 D に対して開口間距離 d を $2D$ 以上に設定することにより、この 2 つの星像によるそれぞれの方向のシーイングサイズの共分散からシーイング揺らぎを表す Fried パラメータ r_0 (Fried 1965, Dierickx 1988, Tatarski 1971) を求めることができる。

$$r_0 = 0.98 \frac{\lambda}{\text{FWHM}}$$

$$r'_0 = (\cos \gamma)^{3/5} r_0$$

ここで、FWHM はシーイングサイズであり、 λ は観測波長である。また、天頂角 γ での補正を行うことにより、観測対象の位置補正を行うことができる。

次に我々が作成する DIMM について説明する。この DIMM では北極星をターゲットとしてその瞬間のシーイングを代表させる。北極星を用いる利点は望遠鏡をほとんど動かす必要がないため、追尾モータからのノイズやポインティングによる望遠鏡の揺れが少ない。北極星は 2 等級なので露出が短くできるため、高速撮像もできる。また周囲に明るい天体がなく星像の同定や解析の容易さも挙げられ、月などの影響も受けなため、季節に関係なく一年中、一晩中継続したデータの取得が行える。さらに観測地の北側の方角には中国山脈があり街がないため、空が暗いという点も利点である。

観測に使用する望遠鏡は美星スペースガードセンター既有で広島大学の DIMM でも使用された Meade 社製 LX200GPS-25 ($D=254\text{mm}$, $F=2500\text{mm}$ ($F/10$), $\text{plate scale}=82.5''/\text{mm}$) 準リッチークレチアン式 GPS 搭載自動導入天体望遠鏡の利用を予定している。光学系の収差を最小にするために DIMM 板に取り付けるウェッジプリズム以外の素子を挿入しない。すなわち、波長限定にはカメラの感度曲線を用いて行う。現時点では Imaging Source 社製の産業用 CMOS カメラ DMK23UX174 を使用している。このカメラ

はセンサとして Sony CMOS Pregius IMX174LL を採用し、100FPS 以上の高速撮像が可能である。カタログでの値は 520nm が最大感度なので、これを観測波長と考えることとする。DIMM 板はアルミ板や樹脂製 3D プリンターで治具を作成し、市販のウェッジプリズムを用いる。また、望遠鏡の格納庫としての観測室は気象条件（主に風）によるナチュラル・シーイングの観測を目指すよう室内で発生する擾乱を最小にするため南北に空気が抜けるような設計を予定している。

3. テスト観測

我々は実際に北極星を用いてテスト観測を行った。この観測は 2021 年 1 月 10 日 19:02 (JST) の 15 秒間の観測である。Meade 社製の ETX-125 (D=125mm, F=1900mm (F/15)) マクストフカセグレン光学系を用いて単開口にて、露出時間 10 ミリ秒、フレームレート 100FPS で観測した。図 2 の左図に観測された北極星の星像を示す。右図（下）には星像の重心位置でのカメラのダイナミックレンジ 12bit で規格化した明るさの時間変化を示す。右図（上）にはこの明るさの時間変化を用いたシンチレーションを示している。この観測時のフォーカス調整は手で星像は広がっているのに、シーイングの効果もスミージングがかかっているものと考えられる。また、ランダムに変化するダークノイズが星像の背景に常に存在するため、パワースペクトル密度を計算すると 10Hz 程度のノイズが常に表れている。

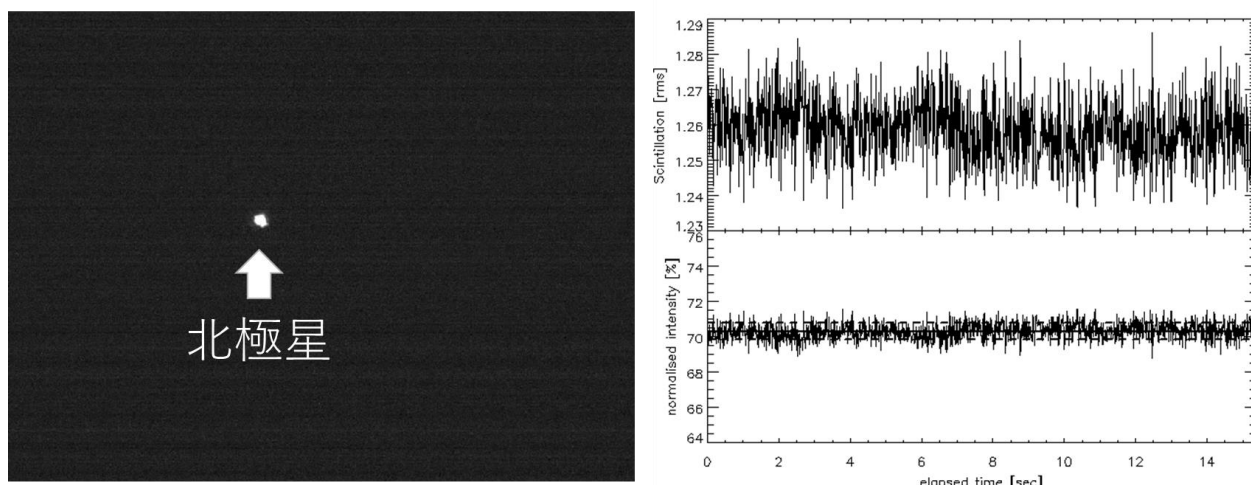


図 2 (左) テスト観測での北極星の星像、(右下) 星像の重心位置での明るさの時間変化、(右上) シンチレーション。

図 3 ではこの星像に対して 2 次元のガウスフィットを用いたその半値幅 (FWHM) の時間変化を示す。このテスト観測は単開口であるが DIMM による観測を想定した座標の表示で、青のプロットは DIMM の開口が並んでいる Longitudinal 方向 (実際は画像に対して横方向) の FWHM で、赤はそれに垂直な Transversal 方向 (実際は画像に対して縦方向) の FWHM である。像に対する横方向の広がりが常に大きくなっているが、これは光学系の収差によるものも含まれると考えられる。また、これらの FWHM は広がりをもつものの相関関係にあるので、方位に関係なく全体的にシーイングにより乱れた星像は十分に集光できずに広がっていると考えられる。また、図 2 に示した明るさとの相関はほとんど無相関ではあるものの、わずかに正の相関を示した。本来であれば、FWHM が小さくよく集光された星像は明るく、FWHM が大きい星像は十分に集光されずに暗くなるはずである。これらはフォーカスの不十分さの影響と考えられる。とにかく、現時点では岡山天文台での 1.2" とは大きくかけ離れているので、観測上の様々な条

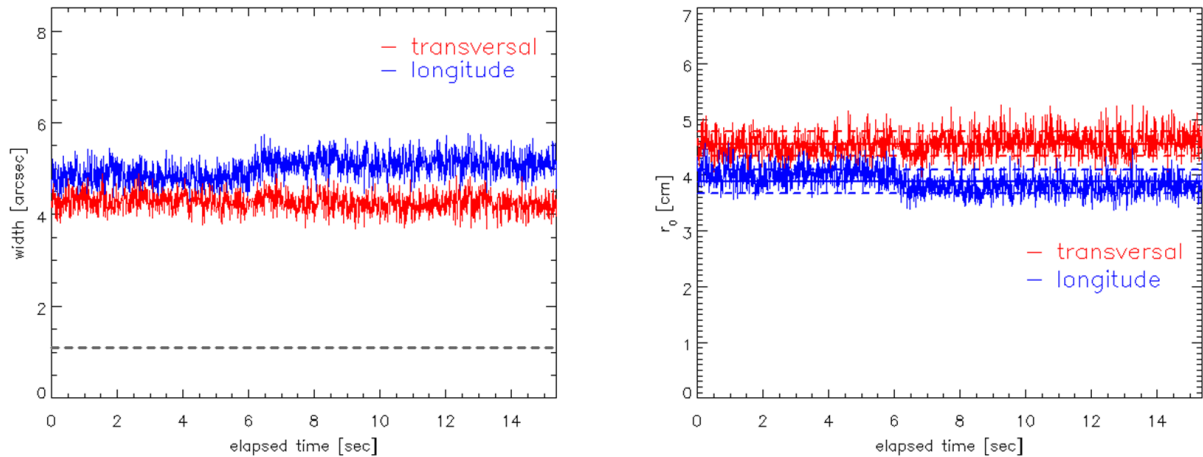


図 3 Longitude(青)と Transversal (赤) のそれぞれの方向に対応するシーイングサイズの推移。
(左) FWHM、(右) Fried パラメータ。

件を調べて観測精度の向上と観測の経験を積み重ねなければならない。図 3 の右図は左図の FWHM を上述の Fried パラメータの変換式で変換したものである。それぞれの色の違いは FWHM の取り方（横方向：青、縦方向：赤）の違いを示す。この Fried パラメータでは Longitudinal 方向は 4cm 程度で、Transversal 方向では 4.5cm 程度で推移している。このデータは天頂角による補正が行われていない。観測地の緯度から天頂角は $\gamma = 55.33[\text{deg}]$ なので、実際の値はここで表示される 70%程度になると考えられる。すなわち Fried パラメータは 3cm から 4cm で推移すると考えると悪いと言えないが、これはフォーカスなどの観測条件が大きく影響し過大に評価している可能性があると考えられる。

4. まとめ

我々の日本スペースガード協会では小惑星の観測精度向上及びデータ・クオリティや観測環境を維持するために、DIMM シーイング観測装置の開発を計画している。ここでは既存の望遠鏡などを利用してナチュラル・シーイングを測定するシステムの構築を行い、観測や解析の技術を獲得する。また、将来的には長期的で定常的なシーイングのモニタ観測を行うことを想定している。このようなデータは天文学としての利用は当然ながら、「揺らぎ場」の研究における基礎データとして、地形や気象などの観測環境条件と比較をおこない気象学や地理学などの地球物理的なサイエンスへの応用も考えたい。

参考文献

- Dierickx, P., 1988, *IMAQ 0.7, Diffraction Analysis Software Package*, ESO, Nov 1988
 Fried, D. L., 1965, *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, No.11, 1427
 Tatarski, V. I., 1971, *The effect of Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*, I.P.S.T., Jerusalem
 上田篤, 2003, 広島大学修士論文
 千代延真吾, 2005, 広島大学修士論文