

新東北 DIMM と (広島大学) 教育学部 DIMM の同時比較観測

沖田博文 (東北大)

2012/8/15

1 Abstract

南極大陸内陸高原に位置するドームふじ基地 (東経 $39^{\circ}42'$ 、南緯 $77^{\circ}19'$ 、標高 3810m) は年平均 -54.4°C 、最低気温 79.6°C の極低温環境によって大気や望遠鏡自身からの熱放射が少なく、また大気中の水蒸気量が極めて少ないことから低いバックグラウンドノイズと高い大気透過率の期待できる、地球上で最も赤外線天体観測に適した場所であると考えられている。加えて大気中の乱流成分は雪面から高さ 10 数 m の接地境界層に局在していることがシミュレーションから示されており、接地境界層より上空では 0.3 秒角台の地球上で最も良いシーイングが得られると考えられている。しかし南極の極低温環境によって現地の観測条件調査はほとんど行われてこなかった。そこで我々は冬期に無人でシーイング測定を行う DIMM (便宜的に「新東北 DIMM」と呼ぶ) を全く新規に開発した。新東北 DIMM は第 54 次日本南極地域観測隊によって 2012 年 12 月にドームふじ基地に設置、2013 年に通年にわたってシーイング測定を実施する計画である。

ところで 54 次隊で設置予定の新東北 DIMM によって得られたシーイング値が正しい値かどうかは検証されていない。そこで測定結果が正しいか検証し必要に応じて校正を行う為、東広島天文台において同天文台所有の DIMM (千代延真吾学士論文より引用して「教育学部 DIMM」と呼ぶ) と同時比較観測を実施することとした。東広島天文台に新東北 DIMM を持ち込み、教育学部 DIMM と同時にシーイングを測定する事で新東北 DIMM の測定結果を検証した。

観測は 2012 年 7 月 23 日 ~ 27 日にかけて実施し同時比較観測に有効なデータを 3 夜分得ることが出来た。得られたシーイングを解析・比較したところ新東北 DIMM で得られたシーイング値は教育学部 DIMM で得られたそれとほぼ同様の時間変化を示し、統計的に同一の値を返していることが分かった。また同一時刻に得られた両 DIMM の観測結果の相関を調べたところ相関係数は 0.63 であり、強いとは言えないが良い相関があることがわかった。これらの結果から新東北 DIMM で測定されるシーイング値は正しい値であることが分かった。

2 DIMM の原理

DIMM (Differential Image Motion Monitor) は地球大気の異なる path を通ってきた天体からの光を観測し、検出器上に出来る複数の天体の相対的な位置の分散からシーイングを求める装置・技法である。実際にこれを行うため 1 つの望遠鏡の開口部に直径 D の穴を距離 d だけ離して 2 つ開けた「マスク板」を取り付けることで 1 つの望遠鏡・1 つの検出器で DIMM 観測を行う方法がよく用いられている。ただしこの方法ではマスク板を通った天体からの光は焦点位置において 1 点で結像してしまうため、少なくとも片方の穴にウェッジ

プリズムを取り付け望遠鏡内部の光路を曲げることで検出器上に2つの星像が出来るようにする必要がある。
 図1はDIMMの原理の概要を示したものである。

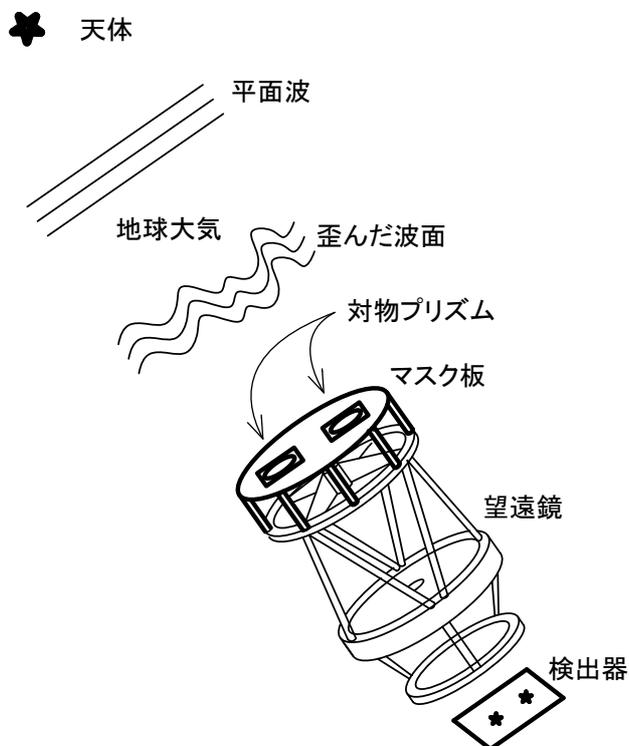


図1 DIMMの模式図

ここでDIMMの座標軸を定義する。2つの開口をつないだ方向を longitudinal 方向、それに垂直な方区を transverse 方向と定義する。図2に図示した。longitudinal 方向及び transverse 方向は「マスク板」に開けられた穴の物理的な位置関係に依存することになる。

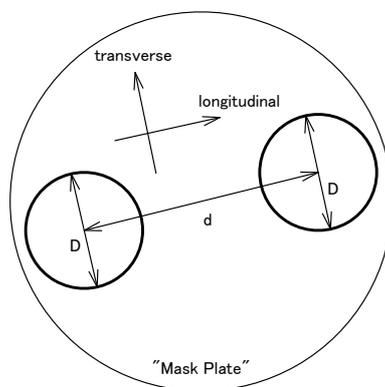


図2 longitudinal 方向と transverse 方向の定義

さて実際に検出器に出来た 2 つの星像の相対的な位置の分散からシーイングを求める方法であるが、これは M. Sarazin & F. Roddier, “The ESO differential image motion monitor”, A&A, 227, 294 (1990) に示されている通りである。ざっくり述べてと Kolmogorov を仮定して Fried parameter r_0 を求め、ここからシーイングを求める。新東北 DIMM では以下の式を用いて longitudinal 方向、transverse 方向の分散 σ_l 、 σ_t からシーイング θ_l 、 θ_t を求めた。

$$\theta_l = 0.646559\lambda^{-1/5} \left\{ \sigma_l^2 \cos(z) / \left(0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3} \right) \right\}^{3/5} \quad (1)$$

$$\theta_t = 0.646559\lambda^{-1/5} \left\{ \sigma_t^2 \cos(z) / \left(0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3} \right) \right\}^{3/5} \quad (2)$$

但し λ は観測に用いた光の波長、 z は天頂角、 D は開口直径、 d は 2 つの開口間距離を意味する。

なお σ_l 、 σ_t を実験的に求めるためには実際には有限の測定時間 Δt で有限の測定回数 N 回する必要がある。これら Δt と N も DIMM 観測では重要なパラメータと言える。

3 比較観測

新東北 DIMM は JARE54 でドームふじ基地に持ち込んで冬期に無人でシーイング測定を行うために全く新規に開発したものである。そのため新東北 DIMM で得られたシーイング値が正しい値かどうかは検証できていない。そこで大型望遠鏡または既にその値が正しいと評価されている DIMM と同一場所・同一時刻に観測を行いその結果を比較することで新東北 DIMM の測定結果が正しいかどうか検証する事を計画した。比較観測には広島大学宇宙科学センター東広島天文台を利用した。同天文台は口径 1.5m の「かなた望遠鏡」と「広大 DIMM」と呼ばれる市販の 20cm 望遠鏡を改造して作られた DIMM、及び広大 DIMM と同じシステムで望遠鏡が 25cm と一回り大きい「教育学部 DIMM」を所有している。そこで今回は新東北 DIMM を東広島天文台に持ち込み同時にシーイング値を取得することで比較観測を実施した。

なお「かなた望遠鏡」で得られるシーイングについてはドームシーイングによる悪化が無視できないという指摘があり、今回の比較観測ではその値を用いないこととした。

4 観測装置

新東北 DIMM、(広島大学) 教育学部 DIMM の主な仕様と観測に用いたパラメーターを表 1 に記す。測定の頻度はハードウェア・ソフトウェアに依存し、新東北 DIMM の場合約 17 秒に 1 回、教育学部 DIMM の場合約 10 秒に 1 回シーイング測定を行った。新東北 DIMM 及び教育学部 DIMM は図 3 のように東広島天文台 2 階観望用ウッドデッキ北東側のコンクリート基礎上に約 2m 離して設置した。表 2 に東広島天文台の経度、緯度と DIMM 観測を実施した位置でのおおよその標高を示す。

因みに今回の観測では望遠鏡の焦点距離の測定を行わず、新東北 DIMM ではメーカー公称値の 2000mm、教育学部 DIMM では 2007 年頃に最後に使用されたときのパラメーターをそのまま使用した。そのため測定されたシーイング値は焦点距離が正しくないことに起因する系統的な誤差がある。しかし焦点距離がどの程度変化するか光学レイアウトから単純に計算したところ、その変化は $\pm 3\%$ 程度であり、シーイングの誤差としては高々 $\pm 2\%$ 程度しか生じないことが分かった。そのため今回のレポートでは焦点距離が正しくないことに起因する誤差は無視することにした。

ところで式 (1)、式 (2) から分かるように測定されるシーイングは波長の -0.2 乗に比例する。そこで本レポートでは新東北 DIMM(波長 472nm) で得られたシーイング値を教育学部 DIMM(波長 650nm) と比較でき

るよう、測定結果を $(650/472)^{-0.2} \sim 0.938$ 倍して 650nm での値を推定し、考察に用いる事とした。



図 3 新東北 DIMM(右) と教育学部 DIMM(左)。東広島天文台 2 階観望用ウッドデッキ北東側のコンクリート基礎上に約 2m 離して設置した。

	新東北 DIMM	教育学部 DIMM
Telescope	LX200ACF-8"	LX200GPS-250
Accessories	Diagonal-Mirror	2x Extender, Diagonal-Prism
Focal Length f (mm)	2000	(5000)
Aparture Diameter D (mm)	60	50
Aparture Distance d (mm)	140	194
Camera	SBIG ST-i monochrome	Watec WAT-100N
Pixel scale (arcsec/pix)	0.763×0.763	0.2508×0.2755
Wave length (nm)	472	650
Exposure time Δt (sec)	0.001	0.001
Number of Exposures	40	50
Interval (sec)	~ 17	~ 10

表 1 新東北 DIMM、(広島大学) 教育学部 DIMM の主な仕様と観測で用いたパラメーター

観測場所	東広島天文台 2 階観望用ウッドデッキ
経度	$132^{\circ} 25' 48''$ E
緯度	$34^{\circ} 34' 26''$ N
標高	~ 510 m

表 2 観測場所の経度、緯度、DIMM 観測を実施した位置でのおおよその標高

5 観測

2012年7月23日(月)から2012年7月27日(金)の5夜観測を実施した。観測日当日は19時30分頃から東広島天文台へ車で上がり、準備ができ次第観測を開始、明け方28時頃から撤収を行った。できる限り多くの時間同時比較観測が成立するよう努めたが、初日の23日は新東北 DIMM のソフトウェアのバグ対策に時間を取られ同時比較観測を行う事が出来なかった。また最終日の27日は薄雲が広がっていて新東北 DIMM では天体をうまく検出出来ず、この日も同時比較観測は成立しなかった。しかしこれ以外の24日、25日、26日の3日間は同時比較観測を行いデータを得ることが出来た。

観測に用いた天体は新東北 DIMM はアルデバラン・アルタイル・カペラのいずれか、また教育学部 DIMM はベガを用いた。新東北 DIMM はソフトウェアのバグによって天頂より北で子午線通過する天体の導入が出来ず、ベガを用いる事は出来なかった。逆に教育学部 DIMM はソフトウェアの関係で観測可能な天体が少なく、ベガのみを用いて観測を行った。このような理由によって2台の望遠鏡はそれぞれ別の方向を向いて同時に DIMM 観測を行ったことになる。しかし新東北 DIMM ・教育学部 DIMM のいずれも観測に用いている天体の高度から air mass を計算し、測定結果を天頂において期待されるシーイングに変換するように作られている。その為2つの望遠鏡が異なる方向を向いて DIMM 観測していても、これに起因する測定誤差は生じない。

6 データ解析

教育学部 DIMM の観測データは観測日毎に cat で all というファイルにまとめ、以下のように kdrpkyoto_magnify を実行して解析した。

```
$ cat *.log > all
$ /home/dimm/prog/kdrpkyoto_magnify all 5 1 all
```

kdrpkyoto_magnify の引数は、(引数 1) 入力ファイル名、(引数 2) シーイングのしきい値、(引数 3) 定数倍するための定数、(引数 4) 出力ファイルのプレフィックス、を意味する。

新東北 DIMM は測定で用いるプログラムによって、天体の相対位置 (x,y) 、分散 σ_x^2 , σ_y^2 、共分散 σ_{xy} 、シーイング θ_l , θ_t が計算される。現段階で解析ソフトは用意していないので今回のデータ解析では awk で書いた簡単なプログラムで一時処理し、Excel 等で統計量を計算した。なお新東北 DIMM を制御する PC の時計が 20 秒進んでいたことが観測後に判明したため解析では測定時刻を 20 秒差し引いた。

なお DIMM 観測では longitudinal 方向と transverse 方向の2つのシーイング値が同時に得られることになるが、これらは本質的には同じ値になるはずであるため今回の解析ではこれらの平均をその時刻のシーイングとする事とした。

7 結果と考察

7.1 時系列データ

図 4、5、6、7、8 はそれぞれ7月23日、24日、25日、26日、27日ののシーイングを時系列で示したものである。横軸は観測時刻 (JST、24時以降は25時、26時、・・・と表示) で縦軸はシーイング値 (秒角) を表

す。観測結果を比較しやすくするため新東北 DIMM の測定値を 1 秒角オフセットして表示した。 図 5、6、7

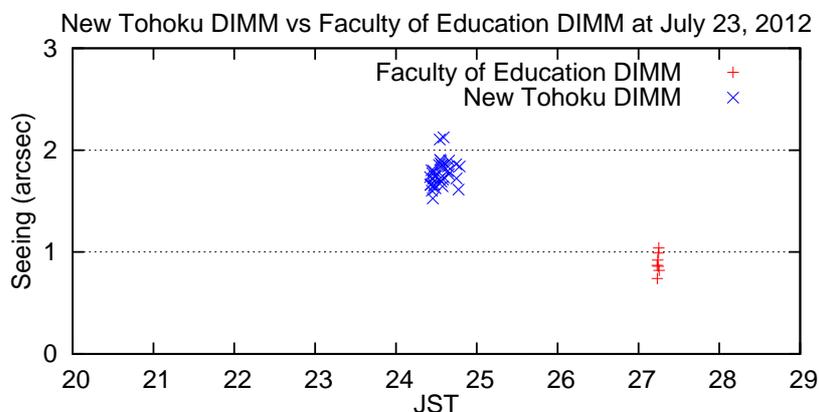


図 4 7月23日のシーイング測定結果。新東北 DIMM の測定値は 1 秒角オフセットして表示した。

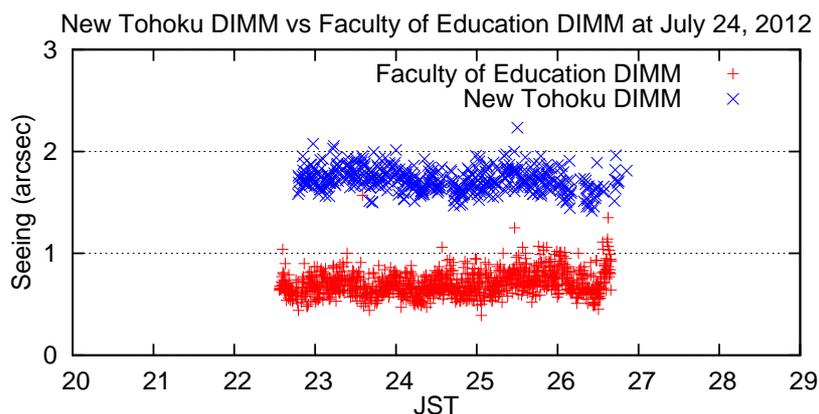


図 5 7月24日のシーイング測定結果。新東北 DIMM の測定値は 1 秒角オフセットして表示した。

から、ある時刻に新東北 DIMM と教育学部 DIMM で測定したシーイングはその値がほぼ同じ値であり、変化の傾向もほぼ等しいことが見て取れる。

7.2 ヒストグラム

新東北 DIMM・教育学部 DIMM で得られたシーイングについて、観測日毎及び全ての観測日のデータからヒストグラムを描いたものが図 9 である。赤が教育学部 DIMM、青が新東北 DIMM のヒストグラムを表す。

7月23日のヒストグラムは測定した時刻が違う事や、後述するように測定回数が少ないため意味のある図とは言えない。

7月24日・25日のヒストグラムからは両 DIMM の測定結果が良く一致している事が分かる。

26日のヒストグラムからは新東北 DIMM の値が教育学部 DIMM より明らかに小さいことがわかる。しかしこれは図 7 で示されているように、26日の測定では相対的に悪いシーイングの時間帯に新東北 DIMM によ

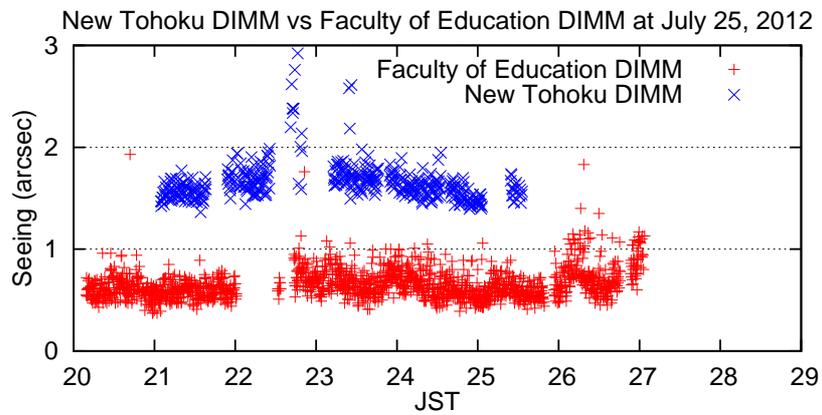


図 6 7月25日のシーイング測定結果。新東北 DIMM の測定値は1秒角オフセットして表示した。

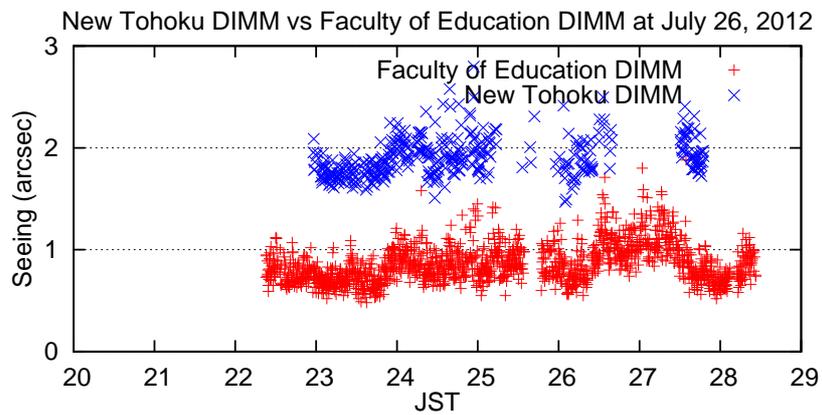


図 7 7月26日のシーイング測定結果。新東北 DIMM の測定値は1秒角オフセットして表示した。

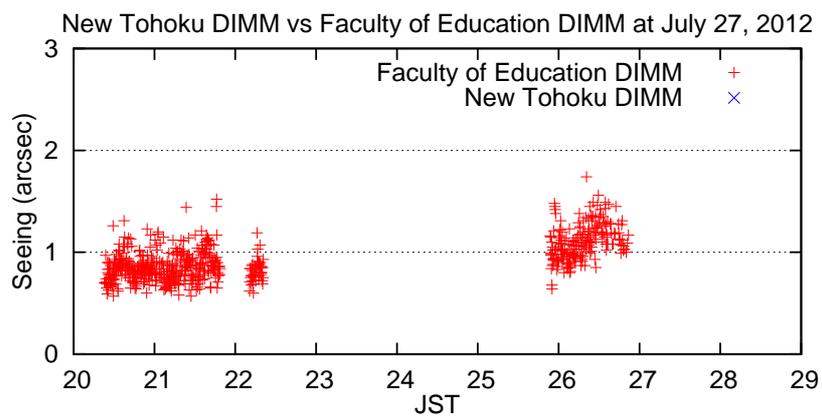


図 8 7月27日のシーイング測定結果。新東北 DIMM の測定値は1秒角オフセットして表示した。

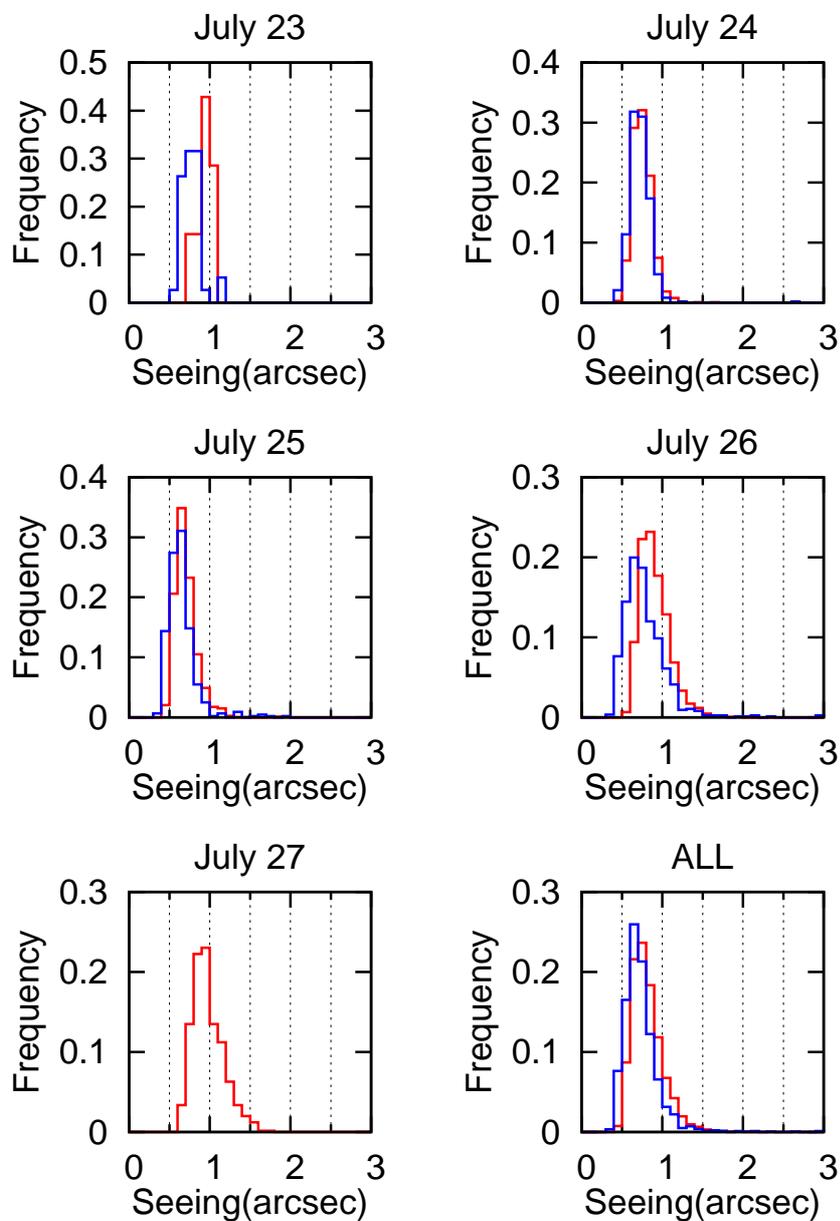


図9 新東北 DIMM と教育学部 DIMM で得られたシーイングのヒストグラム。左上から右下にかけて、7月23日、24日、25日、26日、27日、5日間の合計のシーイングのヒストグラムを表す。赤線が教育学部 DIMM、青線が新東北 DIMM によって得られたシーイングのヒストグラムを意味する。

る観測が無かったためによるものだと考えられる。

27日は前述の通り新東北 DIMM による観測は行えなかったため、ヒストグラムの比較は出来ない。

図9右下は5日間合計のヒストグラムである。今回の観測データからは、新東北 DIMM で得られるシーイング値は教育学部 DIMM に比べ若干小さいことがここから示される。

なおヒストグラムは bin の切り方で容易にその形が変わるため、ヒストグラムの「見た目」だけで測定結果が正しい正しくないの議論をする事は適切ではない。

7.3 統計量

測定したシーイング値の統計的な性質を議論するため測定日毎にシーイングの測定回数、平均、分散、Median を調べた。また 5 日間の合計についても平均、分散、Median を調べた。これらの統計量を表 3 に示す。

		23 日	24 日	25 日	26 日	27 日	5 日間の合計
新東北 DIMM	測定回数	38	481	435	824	0	1778
	平均	0.77"	0.72"	0.65"	0.77"	-	0.73"
	分散	0.12"	0.11"	0.19"	0.23"	-	0.20"
	Median	0.76"	0.71"	0.62"	0.72"	-	0.69"
教育学部 DIMM	測定回数	7	1126	1669	1531	652	4985
	平均	0.89"	0.70"	0.66"	0.86"	0.93"	0.76"
	分散	0.094"	0.12"	0.15"	0.19"	0.19"	0.19"
	Median	0.86"	0.69"	0.63"	0.83"	0.89"	0.73"

表 3 各測定日毎のシーイングの統計値

7 月 23 日は測定回数が新東北 DIMM が 38 回、教育学部 DIMM が 7 回と極めて少ないため表 3 の統計値は意味のある値とは考えられない。

7 月 24 日、25 日、26 日の 3 日間のデータでは新東北 DIMM は測定回数が 400 回以上ある為これらの統計量は十分妥当であると考えられる。

24 日・25 日の統計量からは新東北 DIMM と教育学部 DIMM に明らかなオフセットやバイアスは見られずシーイングの平均値・Median はほぼ一致していることが分かる。

26 日の結果から新東北 DIMM で得られるシーイングは 10 数 % 教育学部 DIMM より小さいことがわかる。しかし 26 日の観測は図 7 で示されているように相対的に悪いシーイングの時間帯に新東北 DIMM による観測が無かったため、結果として新東北 DIMM の統計量が小さい値になったと考えられる。

よって今回の同時観測から新東北 DIMM で得られたシーイング値は教育学部 DIMM で得られた値と統計的に有意な差を見つけることは出来なかった。よって新東北 DIMM は統計的には教育学部 DIMM で得られるシーイング値と同じ値を返すと考えられる。

7.4 相関

最後に新東北 DIMM で得られたシーイングと教育学部 DIMM で得られたシーイングの相関を調べた。図 10 は新東北 DIMM で得られたシーイングと教育学部 DIMM で得られたシーイングの相関図である。

横軸が新東北 DIMM によって得られたシーイング (秒角) で縦軸が教育学部 DIMM シーイング (秒角) を表す。直線は $y = x$ を表す。またピアソンの積率相関係数を計算すると 0.63 となった。図 10 や相関係数から、同時刻に測定した新東北 DIMM と教育学部 DIMM のシーイングには強いとは言えないが良い相関がある事がわかった。

なお新東北 DIMM と教育学部 DIMM は完全に測定時刻を同期させてシーイングを測定したわけではない。図 10 は 36 秒間=0.01 時間を 1 つの bin としてその bin の中の測定値の平均をその時刻におけるシーイング

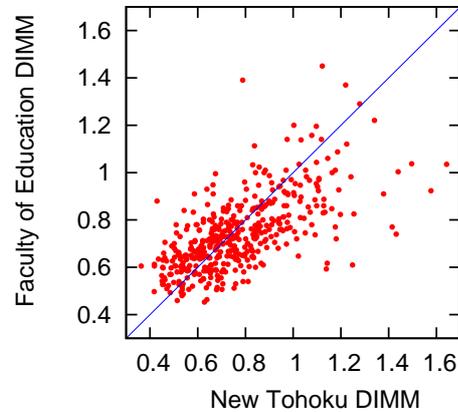


図 10 新東北 DIMM(横軸)と教育学部 DIMM(縦軸)のシーイングの相関図。単位は縦横共に (arcsec)。ピアソンの積率相関係数は 0.63 であった。

とすることで新東北 DIMM と教育学部 DIMM のシーイングを比較している。よって両 DIMM の測定時刻に最大 36 秒の差があったとしても同時と見なし相関を調べるのに用いたことになる。

8 まとめ

JARE54 でドームふじ基地に持ち込んで冬期に無人でシーイング測定を行う新東北 DIMM の校正を行う為、東広島天文台において教育学部 DIMM と同時比較観測を実施した。2012 年 7 月 23 日～27 日の 5 夜観測を実施し同時比較観測に有効なデータを 3 夜分得ることが出来た。得られたシーイングを解析・比較したところ新東北 DIMM で得られたシーイング値は教育学部 DIMM で得られたそれとほぼ同様の時間変化を示し、統計的に同一の値を返していることが分かった。また同一時刻に得られた両 DIMM の観測結果の相関を調べたところ相関係数は 0.63 であり、強いとは言えないが良い相関があることがわかった。これらの結果から新東北 DIMM で測定されるシーイング値は正しい値であることが分かった。

9 参考文献