

MASS-DIMMによる名寄の 大気擾乱高度プロファイルの測定

合田周平、渡辺誠、仲本純平(北大)
大屋真(国立天文台)、渡部重十(北大)



惑星観測用大気揺らぎ補償光学系

北海道名寄市に設置した、
北大1.6mピリカ望遠鏡に搭載するための
惑星観測用大気揺らぎ補償光学系の開発

約0.4"を可視0.5 μ mより長波長側で解像
(名寄の典型的なシーイングは**約1.8"**)
→補正視野は**1—2"**程度

木星の視直径サイズの視野(**約50"**)の補償
が目標



補正視野を広げる
補償光学系の検討

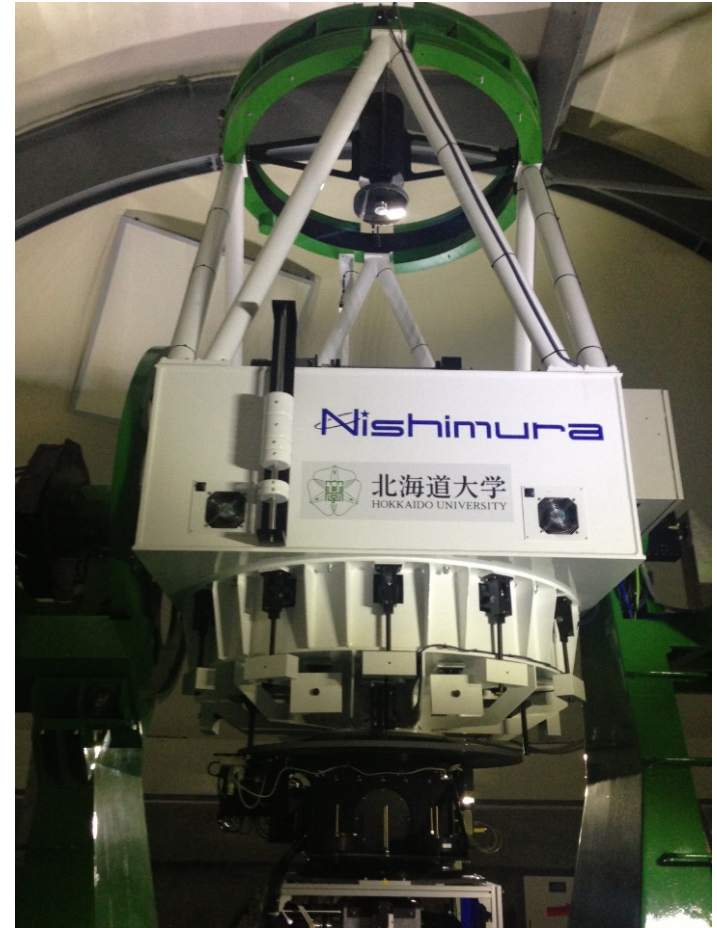
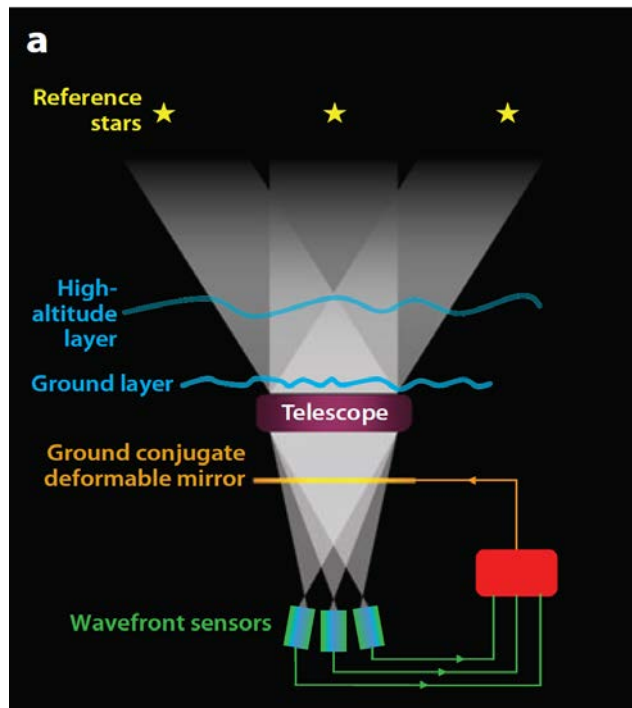


図1. ピリカ望遠鏡

広視野な補償光学系システムの例

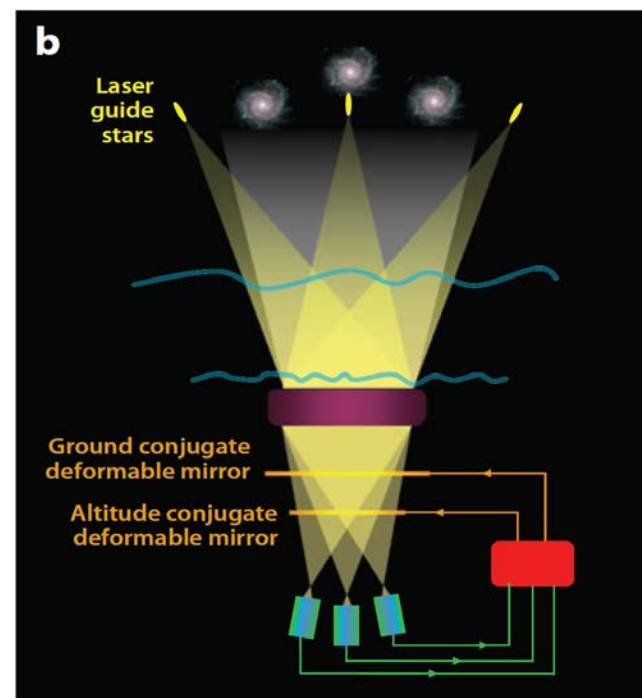
地表層補償光学系 (GLAO)



[Richard and Markus, 2007]

大気揺らぎの大部分が集中している地表層の大気揺らぎのみを補正することで、シンプルだが十分な分解能の向上が期待できる。

多層共役補償光学系 (MCAO)

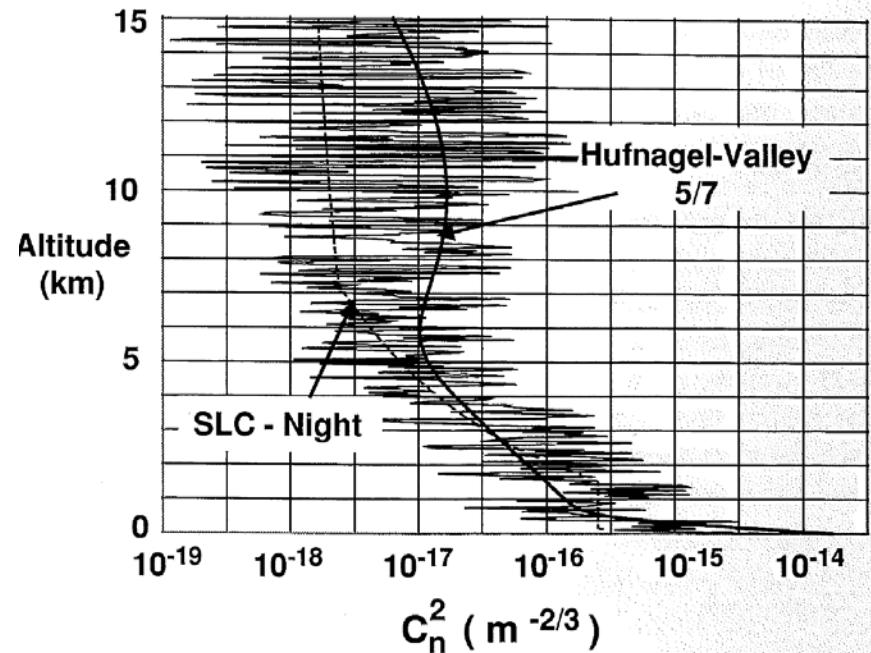


複数の高度の大気揺らぎを分離して、それぞれの高度に対応した複数の可変形鏡で補正する。

大気擾乱高度プロファイル

特定の大気の高層の乱流強度は
 C_n^2 (屈折率構造定数) で表す。

高度ごとに C_n^2 の値は異なり、季節、
月、更には分単位で値が変化する。



[K. Robert.,2000]

補償光学系システムの性能の検討のために、サイトの高度
ごとの大気揺らぎの統計データが必要になる。

→ 乱流プロファイルの1年間¹のモニタリング観測を行う。

本研究の目的

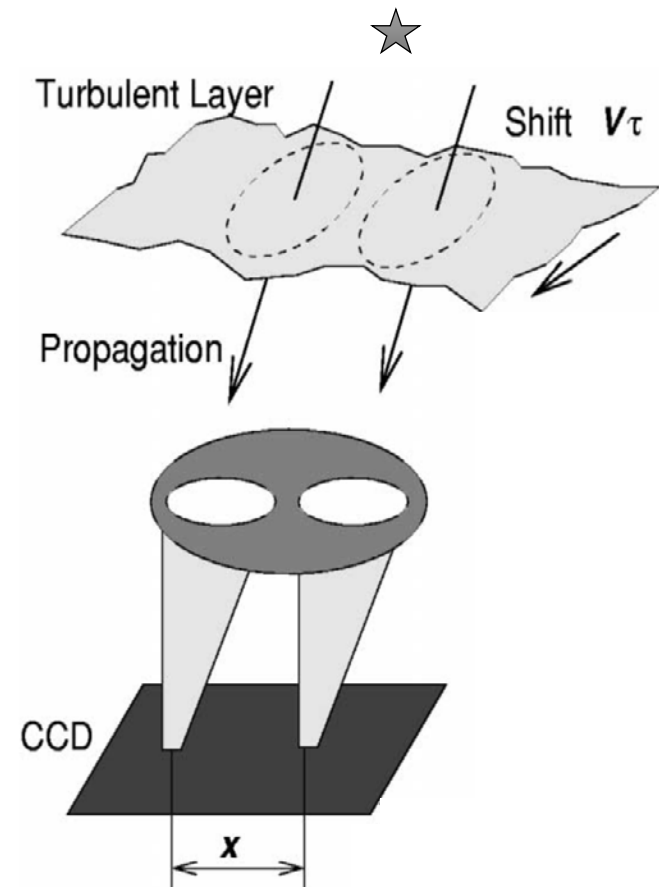
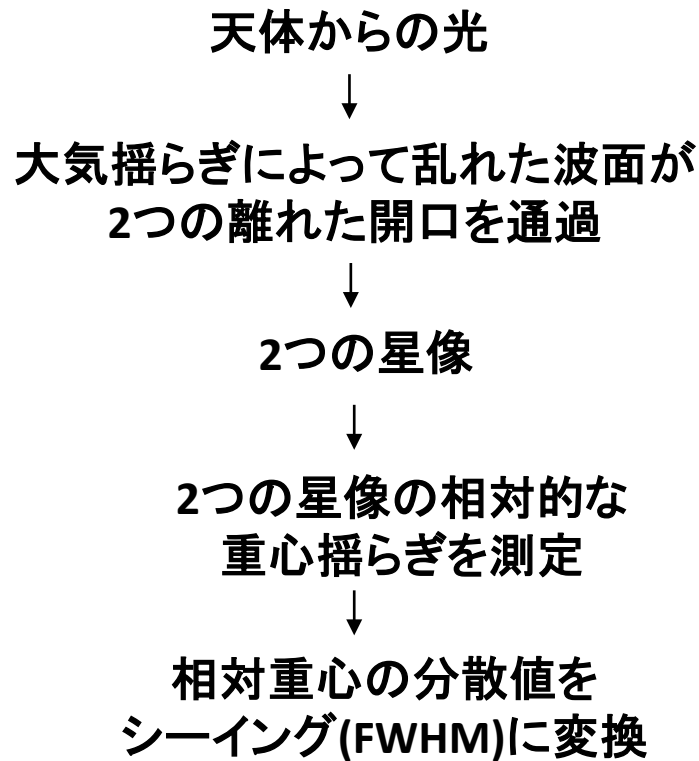
- ・北大で開発中の補償光学系の性能目標は、約50“の視野にわたって可視0.5 μm から長波長側で0.4“の分解能の達成
- ・補償光学系の性能の検討を行うために、天文台上空の大気揺らぎの有効高度を知る必要がある。



MASS-DIMM (Multi-Aperture Scintillation Sensor and Differential Image Motion Monitor)を使用して、
天文台上空の大気擾乱高度プロファイルの測定を行う。

DIMM (Differential Image Motion Monitor)

離れた開口を通った星像の相対的な重心揺らぎからシーイングを測定



[A.Tokovinin, 2002]

MASS (Multi-Aperture Scintillation Sensor)

天体のシンチレーションから高度ごとの乱流強度 C_n^2 を測定する装置

大気揺らぎの高度に応じて、
シンチレーションの空間スケールが大きくなる。

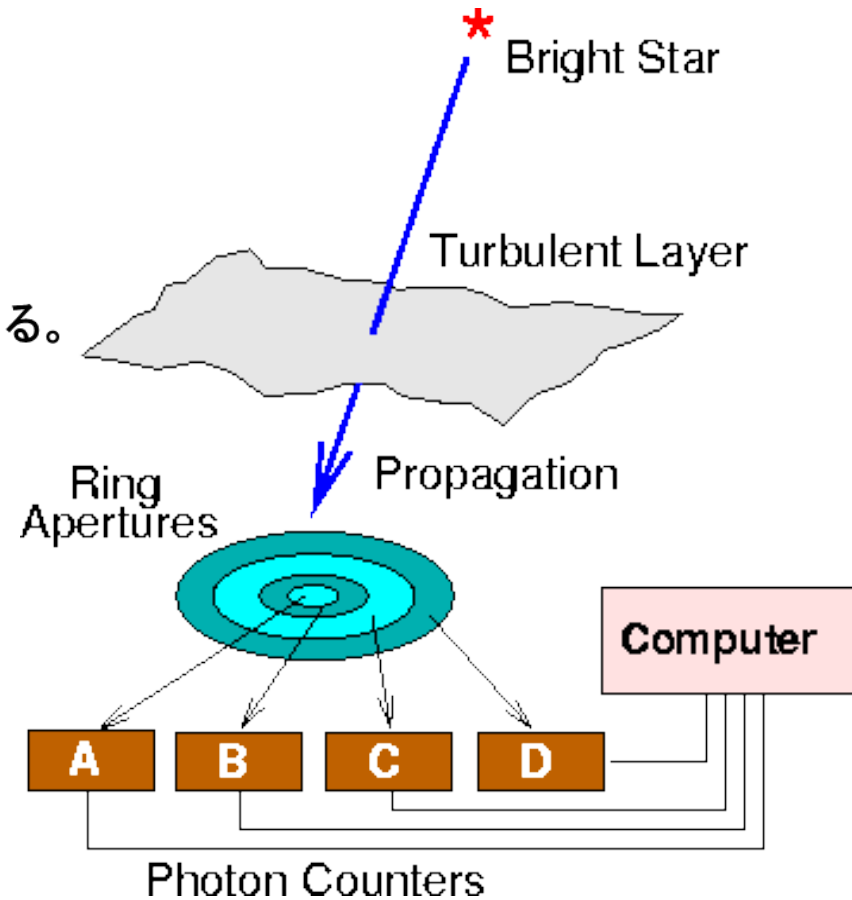


同心円で大きさの異なる2つのアパーチャで
シンチレーションを測定して、特定の高度の C_n^2 を求める。

低い高度(Ground Layer)の揺らぎには感度がない。

MASS-DIMMでは...

高度0.5km, 1km, 2km, 4km, 8km, 16km
の6つの層の C_n^2 を測定する。



MASSとDIMMの組み合わせ

$$J = \int_{path} C_n^2(z) dz \propto \varepsilon^{5/3} \quad \varepsilon \cdots \text{シーイング[arcsec]}$$

J_{DIMM} $\cdots$ **全高度**の大気揺らぎの積分値に相当。

J_{MASS} $\cdots$ **高度0.5-16km**の大気揺らぎの積分値に相当。

高度16km以上の大気揺らぎは非常に小さいと仮定

$$J_{GL} = J_{DIMM} - J_{MASS} \longrightarrow \varepsilon_{GL} = (\varepsilon_{DIMM}^{5/3} - \varepsilon_{MASS}^{5/3})^{3/5}$$

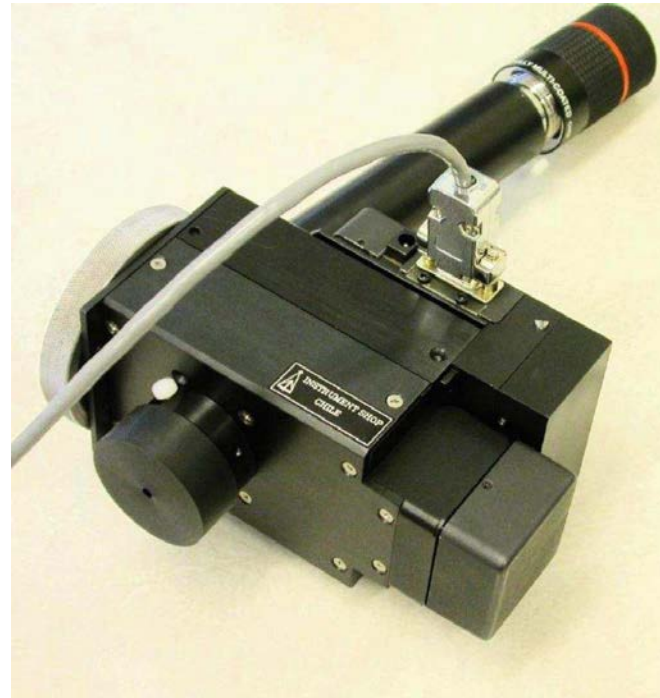
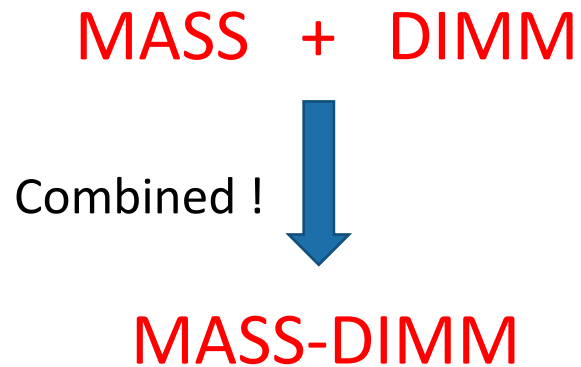
GLシーイングを求めることができる!

多くのサイトでは、全大気揺らぎの半分が地表面に集中しているといわれている。

GLシーイングは、GLAO,MCAOの性能の見積もりに必要なパラメータ

MASS-DIMM

MASSデータとDIMMデータを高い精度で減算するために、
同じ光路を使う必要がある。



本測定で使用するMASS-DIMMは、国立天文台がCerro Tololo天文台に製作を依頼したものを借用した。

小口径(25-30cm)のカセグレン式望遠鏡で、
1つの明るい恒星(> 2 mag)を観測

測定機器

- **Prosilica GE-680 (CCD)**

メーカー	Alied Vision Technologies
インターフェース	Gigabit Ethernet
アレイサイズ	640 [pixel] × 480 [pixel]
ピクセルサイズ	7.4 [μm]
露出時間	2.5 [μs] to 60 [s]
レンズマウント	C-mount
プリアンプゲイン	0 to 24 [dB]
A/D	12bit
最大フレームレート	205[fps]



- **Celestron C11 (望遠鏡)**

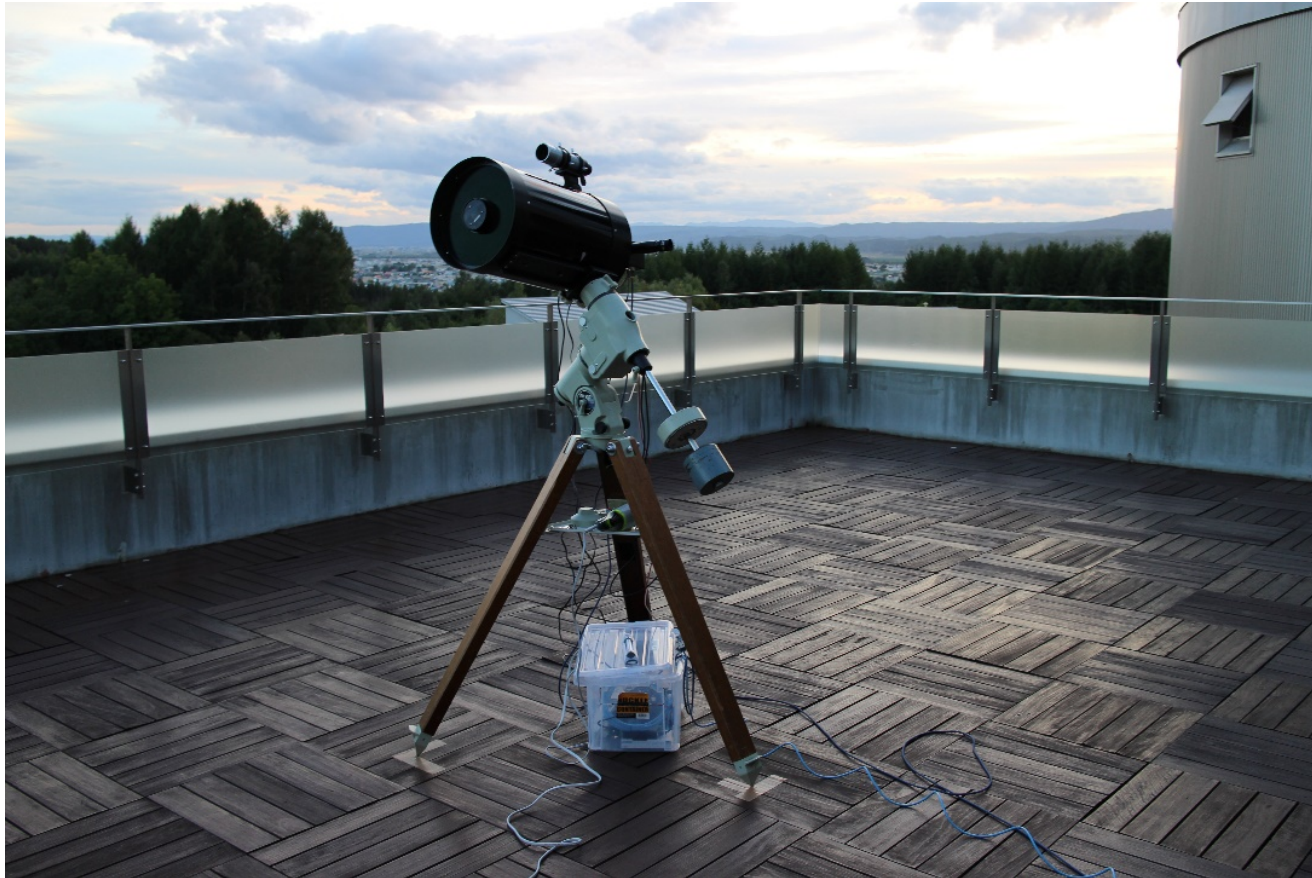
- シュミットカセグレン
- 口径28cm (F/10)

- **高橋製作所 EM-200 Temma2 (赤道儀)**



測定場所

建物の壁で発生する乱流の影響を減らす為に、
天文台2階のテラスの中央で測定を行った。



MASS-DIMMの測定

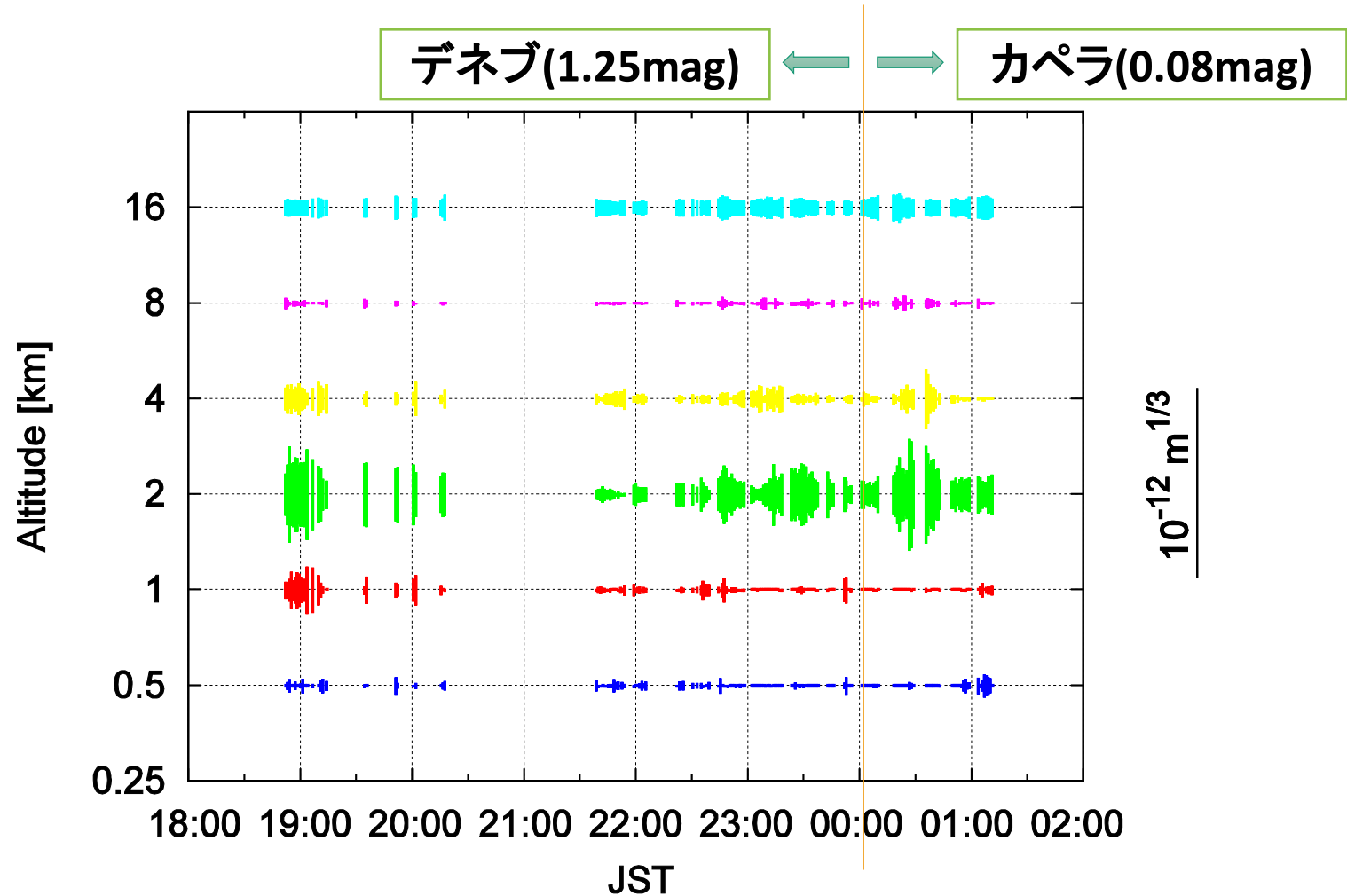
2013年09月から2014年02月にかけて、
ほぼ1ヶ月おきに約10日間の測定を行った。

測定期間	測定成功日	全成功日
09/13-09/22	17, 18, 19, 20, 21, 22	6日
10/15-10/25	16, 17, 18, 19, 21, 22, 23	7日
11/05-11/15	05, 11, 13, 15	4日
12/09-12/17	16	1日
02/03-02/12	04, 05, 07, 08, 12	5日

全51日中、23夜の測定に成功した。

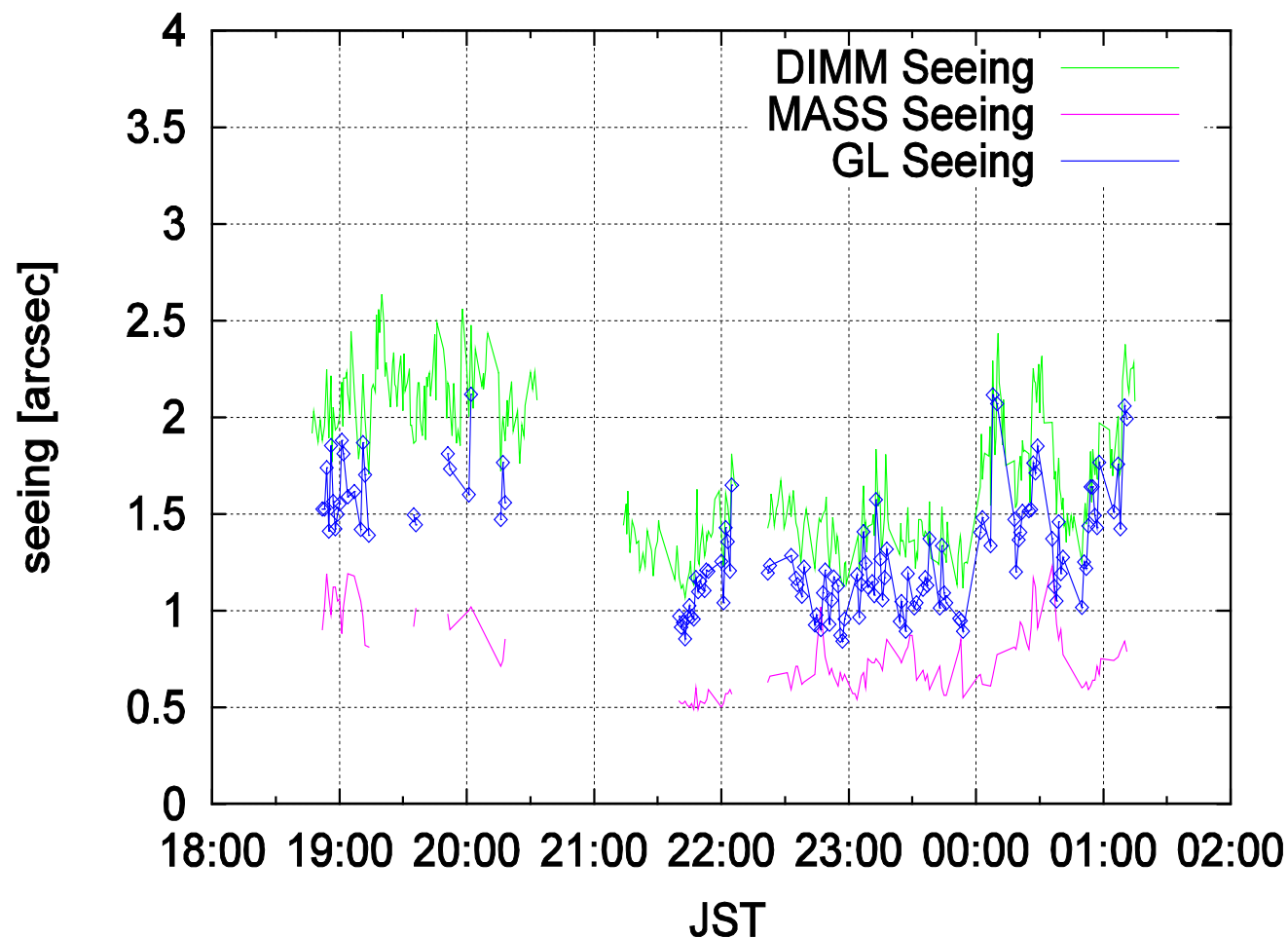
測定結果例 (2013/09/21)

・大気擾乱高度プロファイル



測定結果例 (2013/09/21)

・シーイングの時間変動



測定結果例 (2013/09/21)

・シーイングの中央値

DIMM median=1.72"
MASS median=0.72"
GL median=1.25"

J_{DIMM} と J_{GL} の比から、
全大気揺らぎ中のGLの大気揺らぎの
比率がわかる。

$$J_{GL}/J_{DIMM} \sim 0.59$$



そして各高度のの C_n^2 の中央値から
高度ごとの大気揺らぎの比率を求める。

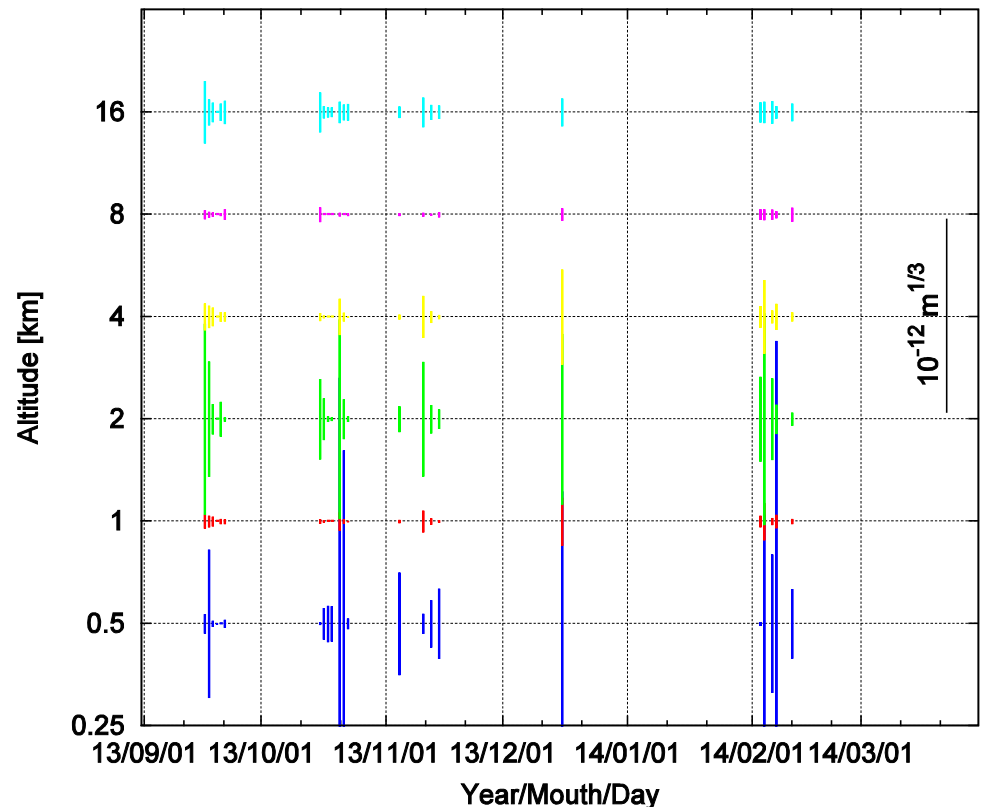
・09/21の高度プロファイル

高度	大気揺らぎの比率
16km	0.09
8km	0.01
4km	0.06
2km	0.19
1km	0.03
0.5km	0.02
GL	0.59
GL-16km	1.00

09-02月の測定結果のまとめ

09-02月の観測で計23日のデータを取得
09-02月の平均的なプロファイルを求める。

日毎の各高度の C_n^2 の中央値をプロット



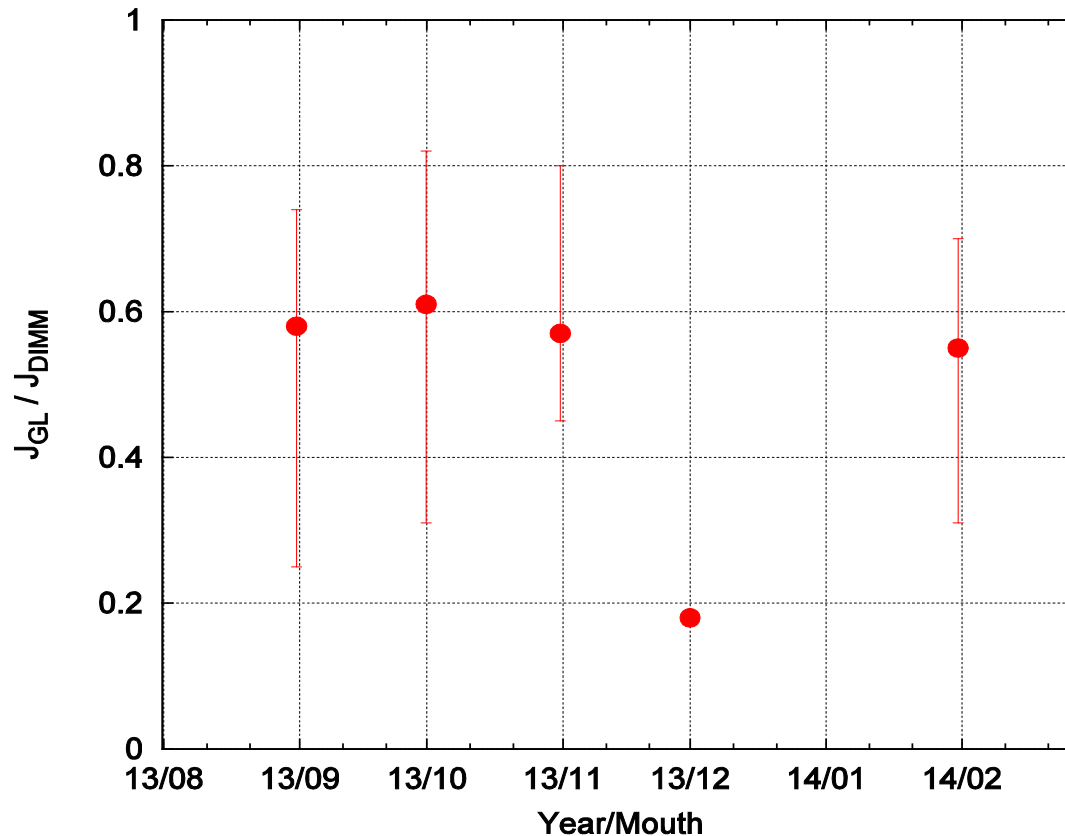
全測定日のシーイングの中央値

DIMM	median=2.13"
MASS	median=1.12"
GL	median=1.54"



高度	大気揺らぎの比率
16km	0.08
8km	0.01
4km	0.04
2km	0.16
1km	0.02
0.5km	0.17
GL	0.52
GL-16km	1.00

全大気揺らぎに対するGLの寄与の変動



エラーバーは
最大値・最小値

月毎でGLの寄与が大きく変動

GLの補正だけではほとんど改善できない日がある。

まとめ

- ・MASS-DIMM機器を使用して、名寄の09月から02月の平均的な乱流プロファイルを測定することができた。
 - GLで52%、高度0.5kmで17%、高度2kmで16%の寄与
 - GLの補正だけで、2.1“から1.1”までの改善が期待
 - 月毎でGLの寄与が大きく変動。
 - GLの補正のみではほとんど改善できない日もある。
 - ・最終的には、今回の測定データを含めた1年分のデータから、名寄の典型的な大気擾乱高度プロファイルを求める。
- 補償光学系システム(MCAO)の性能の見積もり

参考文献

- Kornilov, V., A. Tokovinin, N. Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, B. Safonov, "Combined MASS-DIMM instruments for atmospheric turbulence studies," MNRAS, 382, 1268-1278, 2007
- Kornilov, V., S. Potanin, N. Shatsky, B. Safonov, O. Voziakova, "ELT MASS/DIMM instrument for atmospheric turbulence measurements. Optical and mechanical design. Alignment," 2007
- A.Tokovinin, From Differential Image Motion to Seeing, PASP.114, 800, pp.1156-1166, April 2002
- Sarazin, M., F. Roddier, "The ESO differential image motion monitor," Astronomy and Astrophysic, 227, 294-300, 1990
- Tokovinin, A., "Differential Image Motion to Seeing," PASP, 114, 1156-1166, 2002
- Davies, R., M. Kasper, "Adaptive Optics for Astronomy," 2012
- Robert, K., "Introduction to adaptive optics," 2000

MASS-DIMMの利点

大気擾乱高度プロファイルを得るには・・・

- ・気球観測
- ・SCIDAR(Scintillation detection and ranging)
 - 2重星を観測する。口径**1m**以上の望遠鏡が必要。



上記の例は、高度分解能の高い高度プロファイルを得ることが出来るが、観測条件によりモニタリングを行うことが難しい。



高度分解能は低いが、小口径の望遠鏡(25-40cm)で1つの明るい恒星 ($> 2 \text{ mag}$) を観測する**MASS-DIMM**を使用することで、乱流プロファイルのモニタリング観測を達成することができる。

今後の課題

- ・最終的には、今回の測定データを含めた1年分のデータから、名寄の典型的な大気擾乱高度プロファイルを求めたいと考えている。
- ・稚内地方気象台では、毎日夜20時に気球を使った測定を行っている。高度ごとの風速、風向、温度などの気象データを、測定で得た大気擾乱高度プロファイルと比較してみる。
- ・測定で得た高度プロファイルの結果を使って、GLAOとMCAOの性能の見積もりを行う。