

すばる次世代補償光学系の検討：  
多天体補償光学系の場合  
*Multi-Object Adaptive Optics*

Masayuki Akiyama  
(Astronomical Institute, Tohoku Univ.)  
2011/09/08 NGAO workshop 予定

1. 1年前に話したことのサマリ

# AO の方向性とサイエンス

## 個別天体の深観測 : HSCデータベースとの親和性は高い

高赤方偏移の銀河の分光: Ly $\alpha$  emitter @  $z=7$

QSOの中分散( $R \sim 10,000$ )高SN分光 : Gunn-Peterson trough of  $z=6-7$  QSOs

より高いSR (0.6-0.7 @ K-band = 1,000 elements) で、 **Direction 1**

=より短い波長 ( $\sim 9000\text{\AA}$ など) で、 **~ Keck-NGAO**

高い sky coverage (>50% : GS:R=18mag,60'',1GS ) で。 **~ Gemini-GEMS**

## 多天体の深観測 : MOIRCSなどの蓄積

中赤方偏移の赤い銀河の分光観測: Galaxies, AGNs @  $z=1-3$

そこそこのSR (0.1-0.3 @ K-band  $\sim 100$  elements) で、 **Direction 2**

広い視野(5-10' scale)で多天体同時に。 **Gemini-GEMS**

## 個別天体の高空間分解能観測 : わが道を行く？

銀河中心の高空間分解能観測: AGN, stellar pops in local galaxies

JWST の届かないより短い波長( $<9000\text{\AA}$ )で。 **Direction 3**

HSTで分解できなかつたものを分解(SR=0.1@1um)。 **Subaru-SCEXAO ?**

# JWST や TMT の時代にどのようにユニークな汎用AOを目指すのか?

それぞれのパラメータースペースで目指すべき数字

1) High-spectral resolution ? **R=3000 or higher** with wide spectral coverage, at least **one octave**.

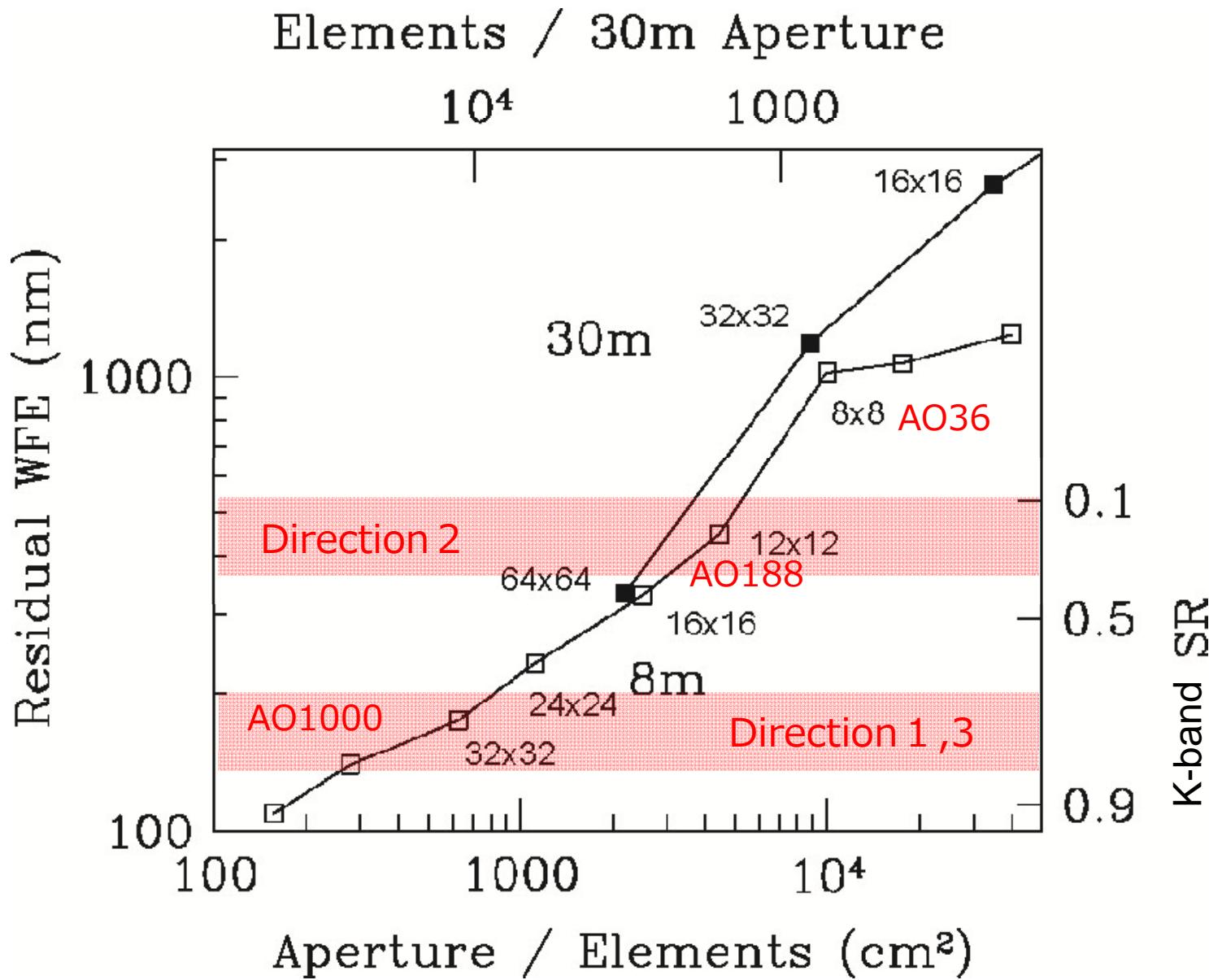
Ex.  $R < 1000-3000$   $0.1-0.2''$  sampling with JWST NIRspec  
Vs. TMT ?

2) Wide field ? **At least 5-10' scale FoV.** High-resolution version of NIR (prime-focus) wide-FoV camera.

Ex.  $2.2' \times 2.2' \times 2$   $0.03''$  sampling with JWST NIRcam

3) Shorter wavelength range ? High-spatial resolution observation in wavelength range **1um or shorter**.

# 波面誤差、ストレル比と素子数の関係



## 2. MOAO についてのシミュレーション結果

今回の提案は direction 2. に相当  
(GLAO も同じ)

MOAO を用いた場合に

- 1) どの程度良い補正が得られるのか？
- 2) どの程度まで視野を広げられるか？

をMAOS を用いてシミュレーションして検討した。

とりあえず半径5' 直径10' の中で評価を行った。用いた大気のパラメータは  
すばるの典型的なものと考えられるものを使用した(atm\_sbr50.conf)。

Vs. JWST

NIRCAM(2.2'x2.2'x2, 0.03" sample)  
or NIRSPEC(3'x3', 0.1-0.2" sample)

## 2.1 まずは Baseline simulation について

次のスライド：ガイド星の配置

波面誤差の結果：今の近似では波長によらない。

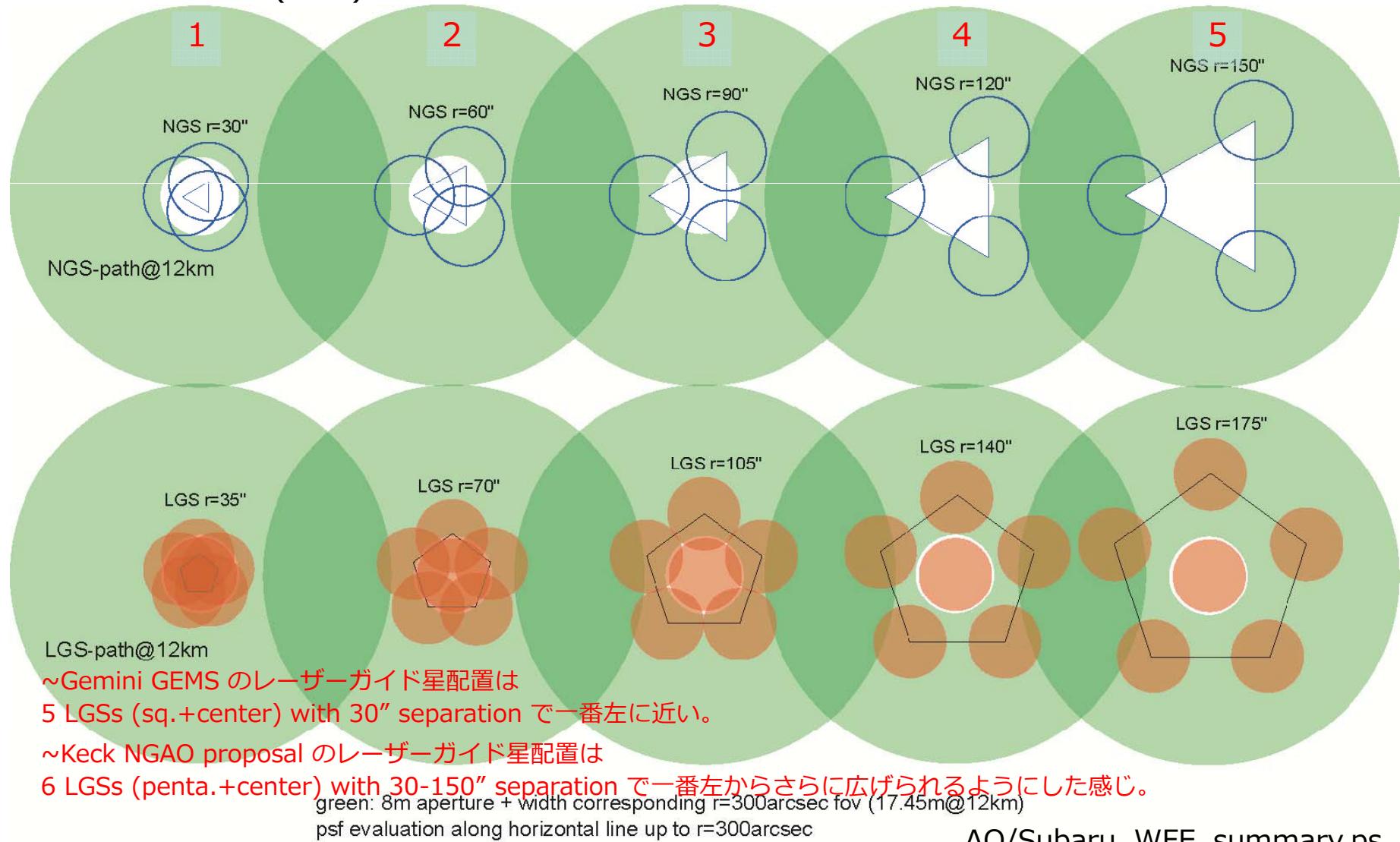
ストレル比の結果：波長ごとに示す。

Ensquared Energy の結果  $0.12 \times 0.12, 0.24 \times 0.24$ ：波長ごとに示す。

PSF の結果：波長ごとの形態を示す。

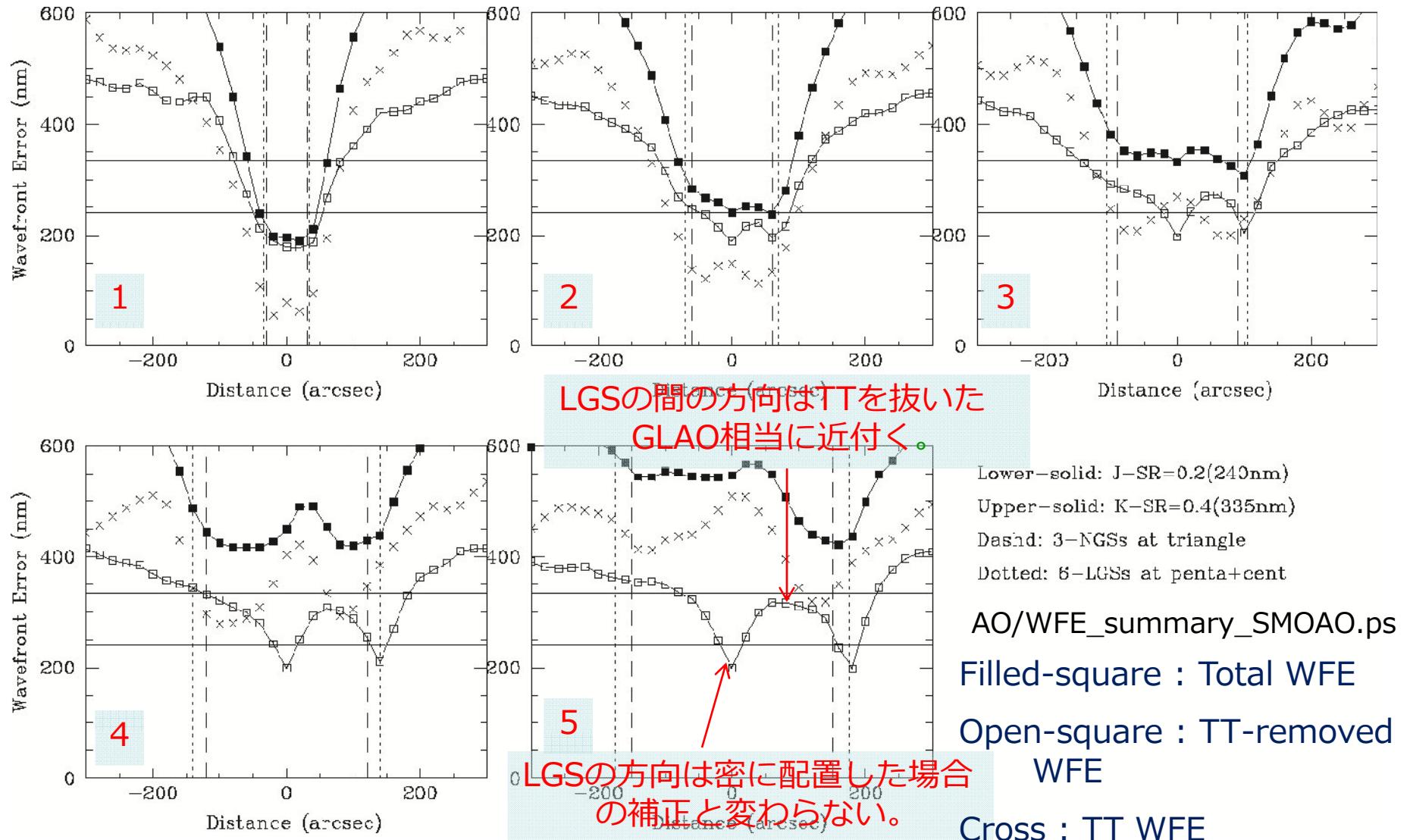
# Baseline AO simulations: ガイド星配置

- 3 NGSs (Tip-tilt 成分の推定) and 6 LGSs (Tomographic 推定) を配置した。下の図は 12km 上空でのそれぞれのガイド星からの光のパス(青丸、オレンジ丸)と視野  $r=5'$  の場合の光のパス(緑丸)の比較を示す。



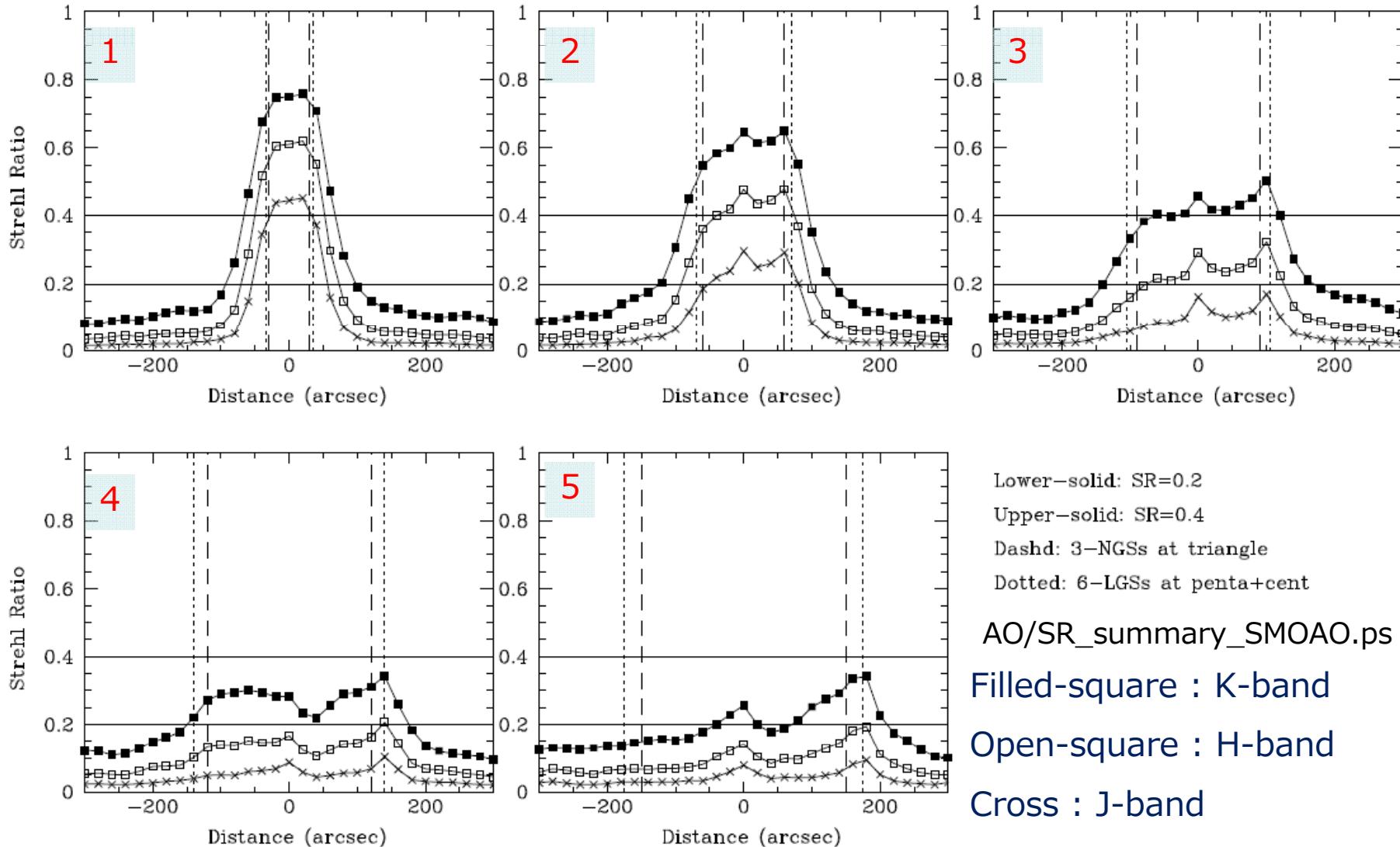
# Baseline AO simulations: 結果: 波面誤差

視野内の各ターゲットに対する波面誤差(WFE)の値を視野中心からの距離の関数として示す。黒四角が total WFE でこれが観測するもの。その内訳は、Tip-Tilt 成分のWFE (cross: 主にNGSで補正)とより高い次数のWFE(白四角:主にLGSで補正)に分けられる。視野は前のスライドで上下方向を考えていて、距離+の途中で LGS の方向と交わる。その付近で高い次数のWFEが局所的に小さくなる。WFE~350 が SR(K)=0.4, WFE~240nm が SR(J)=0.2 相当。



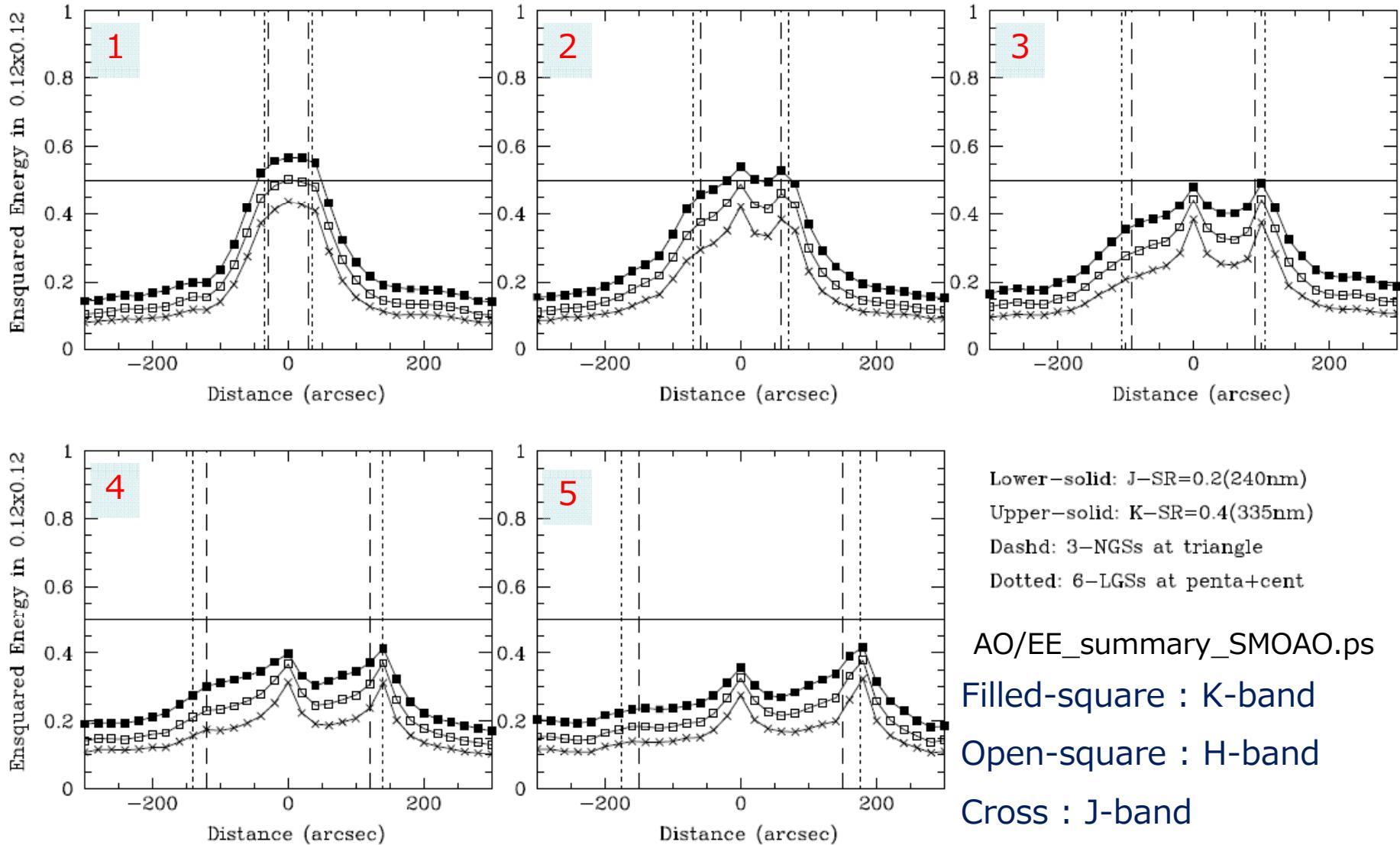
# Baseline AO simulations: 結果: ストレル比

同じ設定で、視野内の各ターゲットに対するストレル比の値を視野中心からの距離の関数として示す。黒四角(K-band)、cross(H-band)、白四角(J-band)を示す。これはPSFのシミュレーション画像から求めた値だが、前のスライドの波面誤差から予想される各波長でのストレル比とコンシスティントの値になっている。



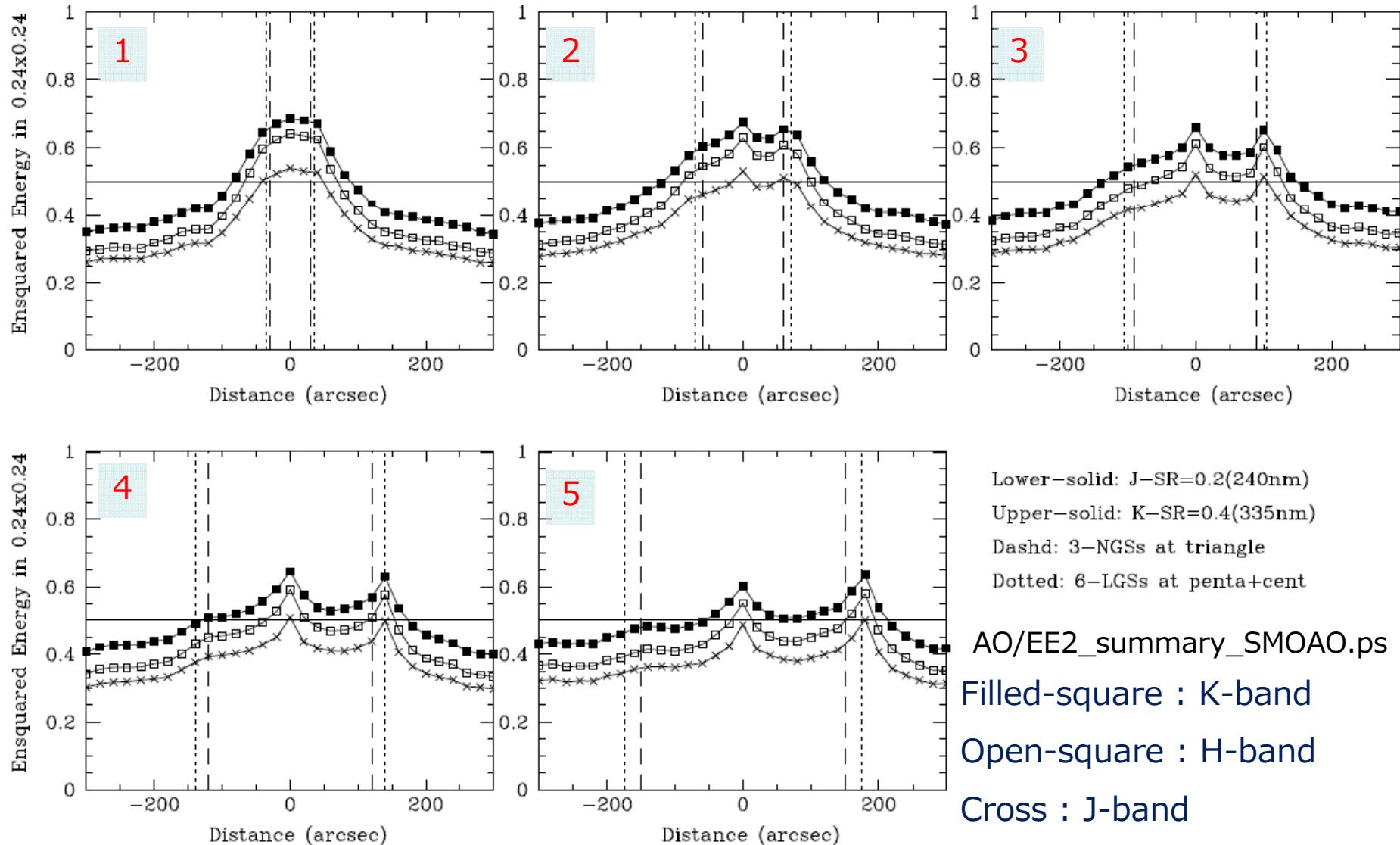
# Baseline AO simulations: 結果: EE(0.12'')

同じ設定で、視野内の各ターゲットに対して  $0.12'' \times 0.12''$  への Ensquared Energy を示す。IFUを用いた観測をする場合にはこのくらいの分解能を達成したいが、50% EE程度の制限を付けると  $r=60''$  程度の視野が限界。



# Baseline AO simulations: 結果: EE(0.24'')

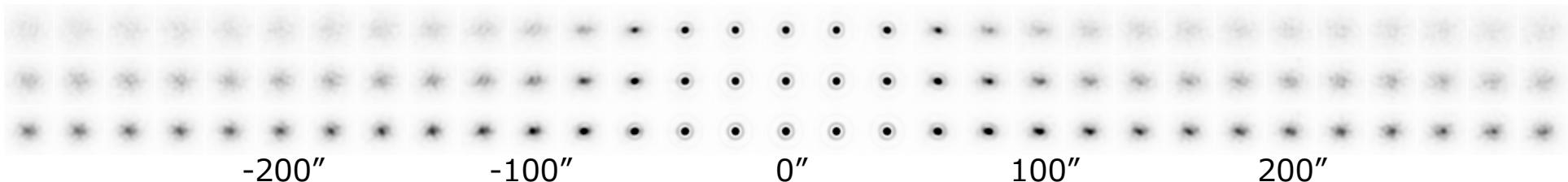
同じ設定で、視野内の各ターゲットに対して  $0.24'' \times 0.24''$  への Ensquared Energy を示す。広げることで50%EE程度の制限が  $r=100''$  程度の視野まで拡大。



# Baseline AO simulations: 結果: PSF

-300arcsec - +300arcsec までの20arcsec おきの PSF。J-band:0.44" x 0.44", H-band:0.58" x 0.58", K-band:0.77" x 0.77" (42pix x 42pix) の領域を示す。表示レンジはすべて0-0.15で固定(回折限界のときのピークが1.0)。

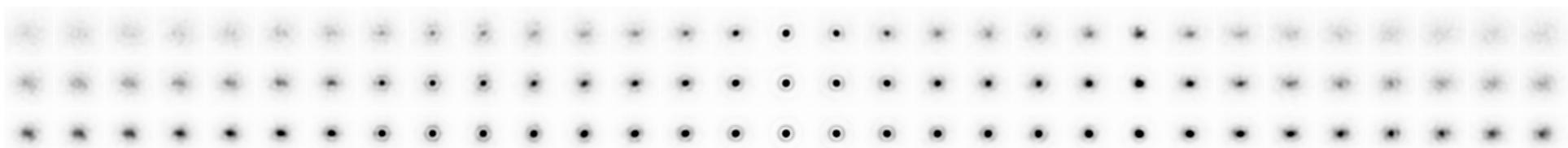
Baseline (1)のLGS配置の場合 (J-band, H-band, K-band)



Baseline (4) のLGS配置の場合 (J-band, H-band, K-band)



Baseline (4)-2 (6 TT-Gs 次のセクションのシミュレーション) の配置の場合



AO/maos/psffits\_SMOAO1.gif

2.1 をまとめると、

6 LGS の配置で GLAO より良い補正をするなら半径 3' 程度の視野が限界である。その場合でも  $0.2'' \times 0.2''$  EE は 40-50% 程度。6 LGS であれば半径 3' 程度を超えると補正は GLAO 的になってしまい MOAO のメリットはない。

- 視野を広げるためにはより多くのレーザーが必要。多数の LGS を打ち上げても Rayleigh scatter が避けられるようにしなければならない。パルス的にレーザー打ち上げれば可能かも？

視野を広げる場合には TipTilt 成分の波面誤差が結構効いてくる。TipTilt成分の測定は自然ガイド星を用いて行っている。自然ガイド星の数の影響について次のセクション 2.2 のシミュレーションで評価。

詳細についてのまとめ、

1. ガイド星が密に配置されている状態では w/o TT の WFE が支配的。視野内で一様に 200nm 程度。
2. ガイド星の間隔が  $100''$  を超えてくると TT の WFE も 200nm 程度で無視できなくなる。
3. w/o TT WFE については視野を広げていくと LGS と LGS の間の方向のトモグラフィックな推定誤差が大きくなり 400nm 程度になる。徐々に GLAO 的な補正に近付いて行っているようである。

LGS と LGS の間の方向の補正が 400nm 程度の w/o TT WFE を持つというのは次のページのスライドの手計算とおよそコンシスティント。

# 手計算でのチェック

シミュレーションでは  $r_0=0.156$  at 500nm, 0.923 at 2200nm の大気モデルを用いている。この場合 全波面誤差は Total WFE1(w/ tip-tilt)=2200nm, チップチルト成分をのぞいた波面誤差は WFE3(w/o tip-tilt)=792nm である。

この波面誤差 (WFE) をシミュレーションに入っている層構造で分配すると、

Height (m)	Weight	R0(2200) (m)	WFE1 (nm)	WFE3 (nm)
0	0.60	1.259	1695	607
500	0.10	3.675	692	250
1000	0.03	7.567	380	137
2000	0.03	7.567	380	137
4000	0.10	3.675	692	250
8000	0.10	3.675	692	250
16000	0.10	3.675	692	250

GLAO residual   MOAO residual

となるので、もし地上0mの層だけ補正した場合には残りの波面誤差はWFE1=1485nm, WFE3=536nm と推定される。

MOAOの場合高い層で波面センサーのパスがかぶらなくなり、カバーできない波面誤差がでる場合には WFE3=250nm 程度の波面誤差が残ると予想され、MOAOシミュレーションの結果とコンシスティント。

GLAO のように低層(0m-500m)の波面誤差だけを補正する場合には WFE1=1314nm, WFE3=474nm と推定される。GLAOでは実際には高い層のTT成分もある程度補正しているのでこの中間の値になると予想される。GLAOシミュレーションの結果とコンシスティント。

## 2.2 次に Baseline simulation の 4 番目の配置からスタートして TT ガイド星の数の影響についてチェック。

自然ガイド星はTip-Tilt成分の推定に用いられるが、個数が十分にない場合には TT 成分の anisoplanatism の影響により Tip-Tilt 成分の残差が大きくなることが予想される。特に銀極方向の場合、普通の領域では半径3'の視野に3個のガイド星を見つけるのは難しそう。数が少なくて大丈夫か? TT ガイド星を増やした場合と減らした場合で結果の違いを見る。

波面誤差の結果：今の近似では波長によらない。

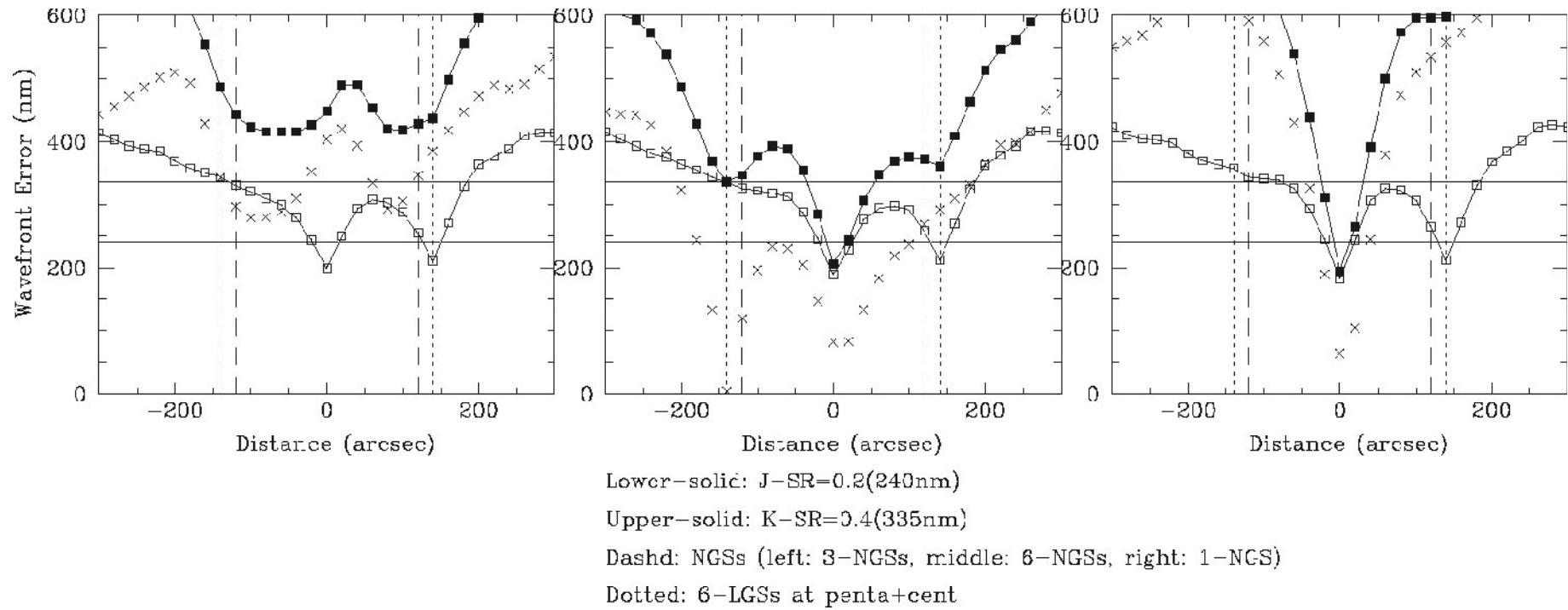
ストレル比の結果：波長ごとに示す。

Ensquared Energy の結果：波長ごとに示す。

その後ろに TT anisoplanatism についての解析的な計算による確認を付ける

# AO simulations TTガイド星依存性: 波面誤差

前のスライドのパターン4のLGS配置でTTガイド星の個数を3個(そのまま)、6個、1個とした場合。広い視野全体にわたってTT成分(cross)を抑えるにはTTガイド星も複数必要になる。

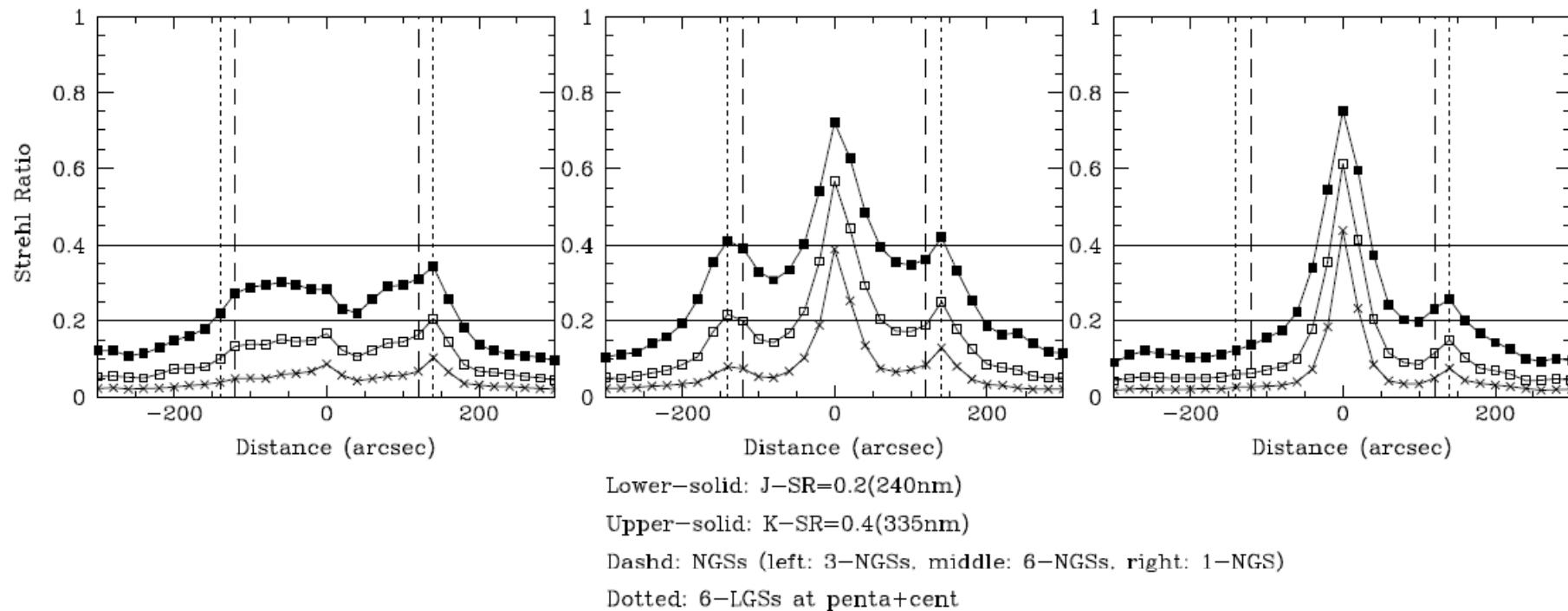


AO/WFE\_summary\_SMOAO2.ps

Gemini GEMS も  $d=2'$  視野内に 3 TTガイド星 with  $R=18.5$  が必要と言っているのとコンシスティント。この場合 10% sky-coverage @ galactic pole。ガイド星が少ない場合は GLAO 相当の補正になるのだろう。

# AO simulations TTガイド星依存性: ストレル比

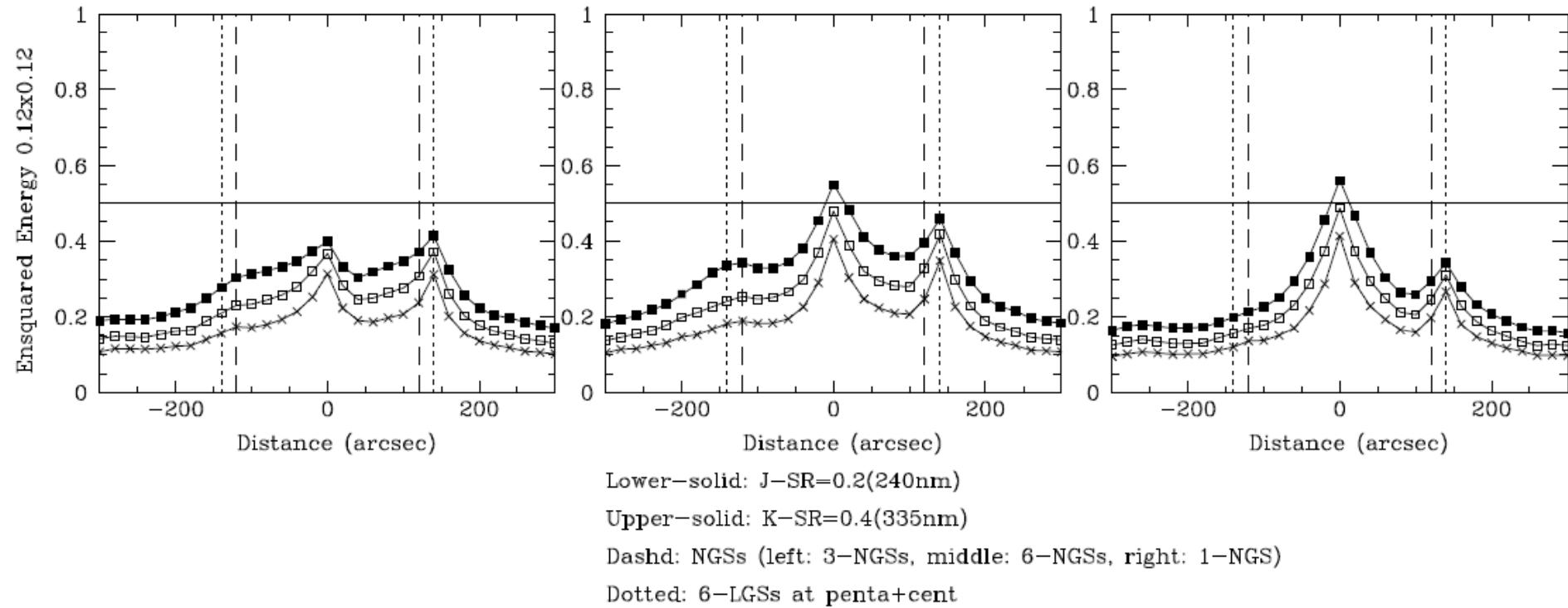
前のスライドの4のLGS配置でTTガイド星の個数を3個(そのまま)、6個、1個とした場合。  
広い視野全体にわたってTT成分(cross)を抑えるにはTTガイド星も複数必要になる。



AO/SR\_summary\_SMOAO2.ps

# AO simulations TTガイド星依存性: EE(0.12")

前のスライドの4のLGS配置でTTガイド星の個数を3個(そのまま)、6個、1個とした場合。

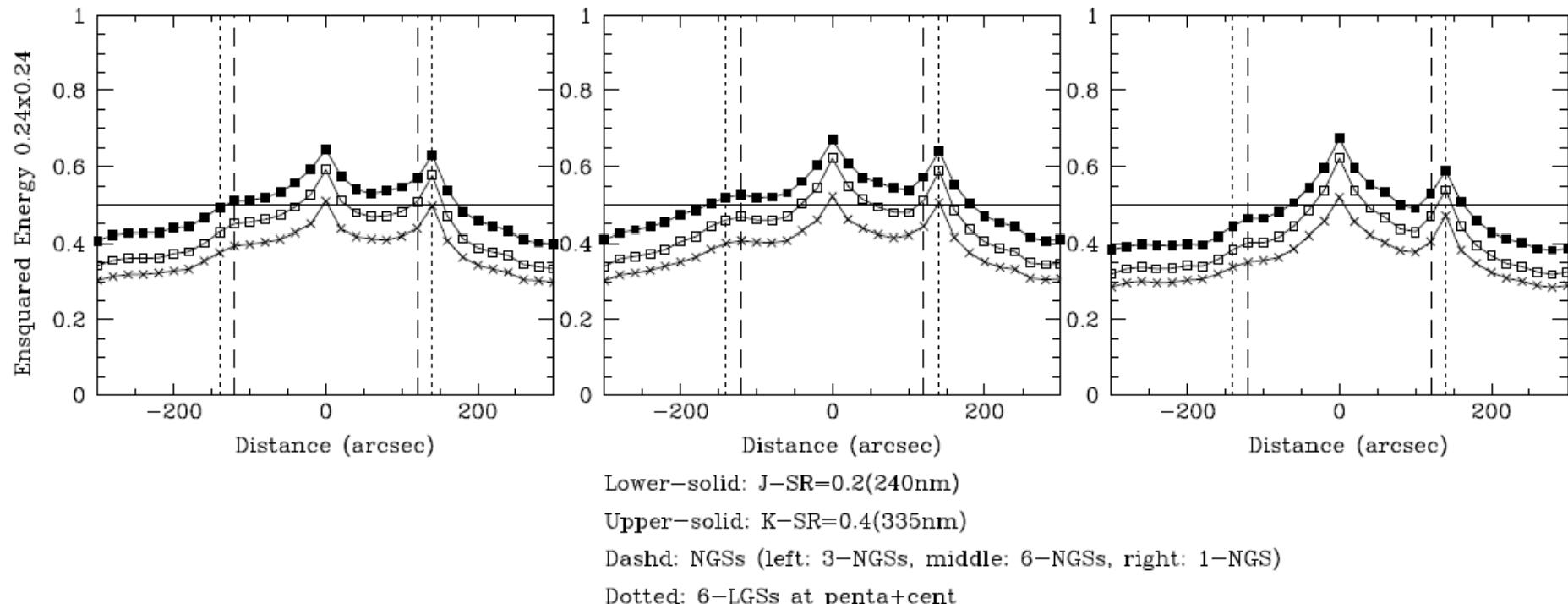


AO/EE\_summary\_SMOAO2.ps

# AO simulations TTガイド星依存性: EE(0.24")

前のスライドの4のLGS配置でTTガイド星の個数を3個(そのまま)、6個、1個とした場合。

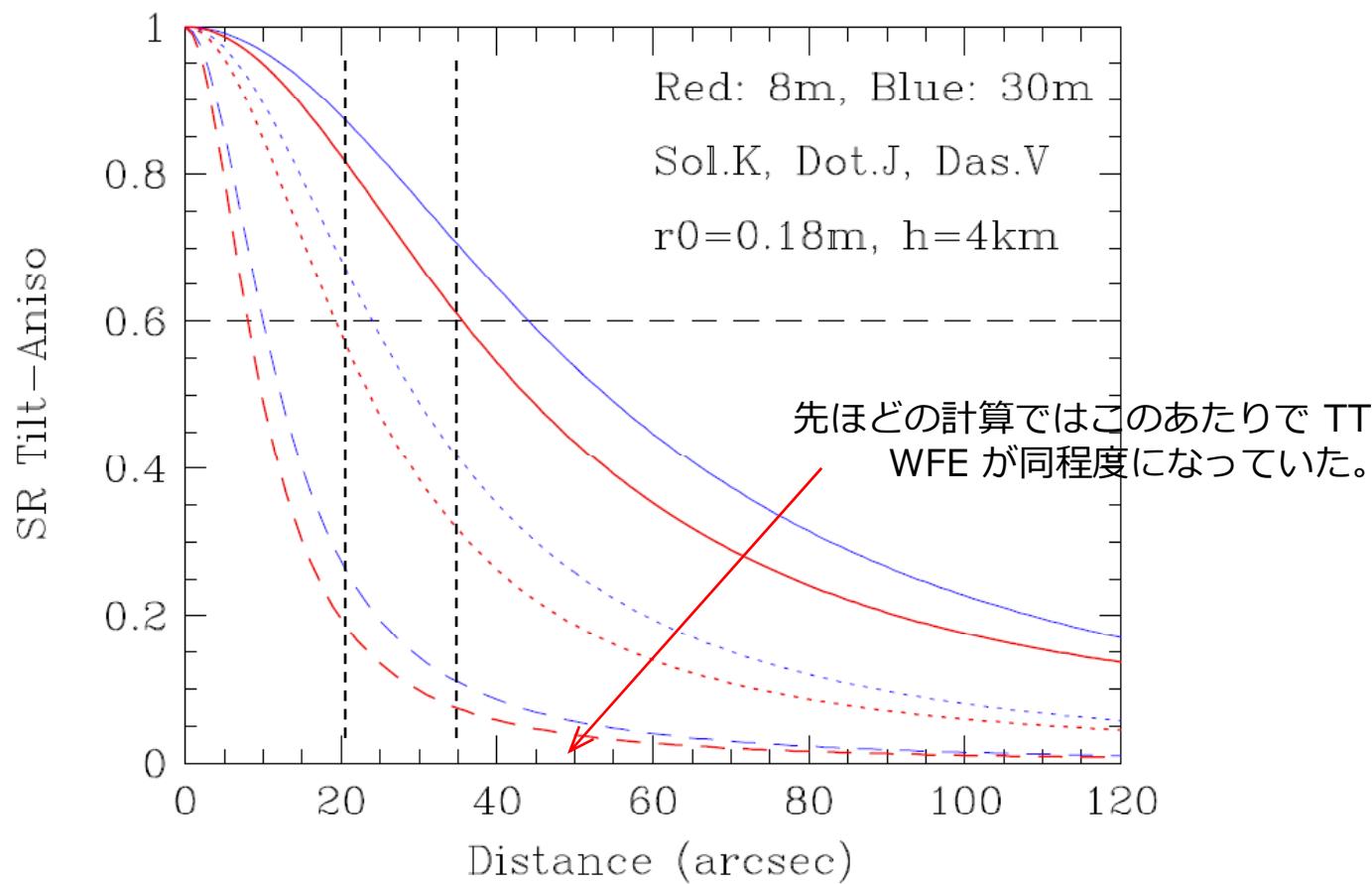
0.12" x 0.12" の EE に比べれば視野内での差は小さくなっているように見える。この結果はスリット幅が0.2"程度であれば TT の波面誤差が大きくて(自然ガイド星があまりなくても) 自然ガイド星が十分にある場合と同じ程度まで EEを上げられるという ESO でのスタディの結果(スライド26参照)とコンシスティントである。



AO/EE2\_summary\_SMOAO2.ps

# Tilt-anisoplanatism について解析計算

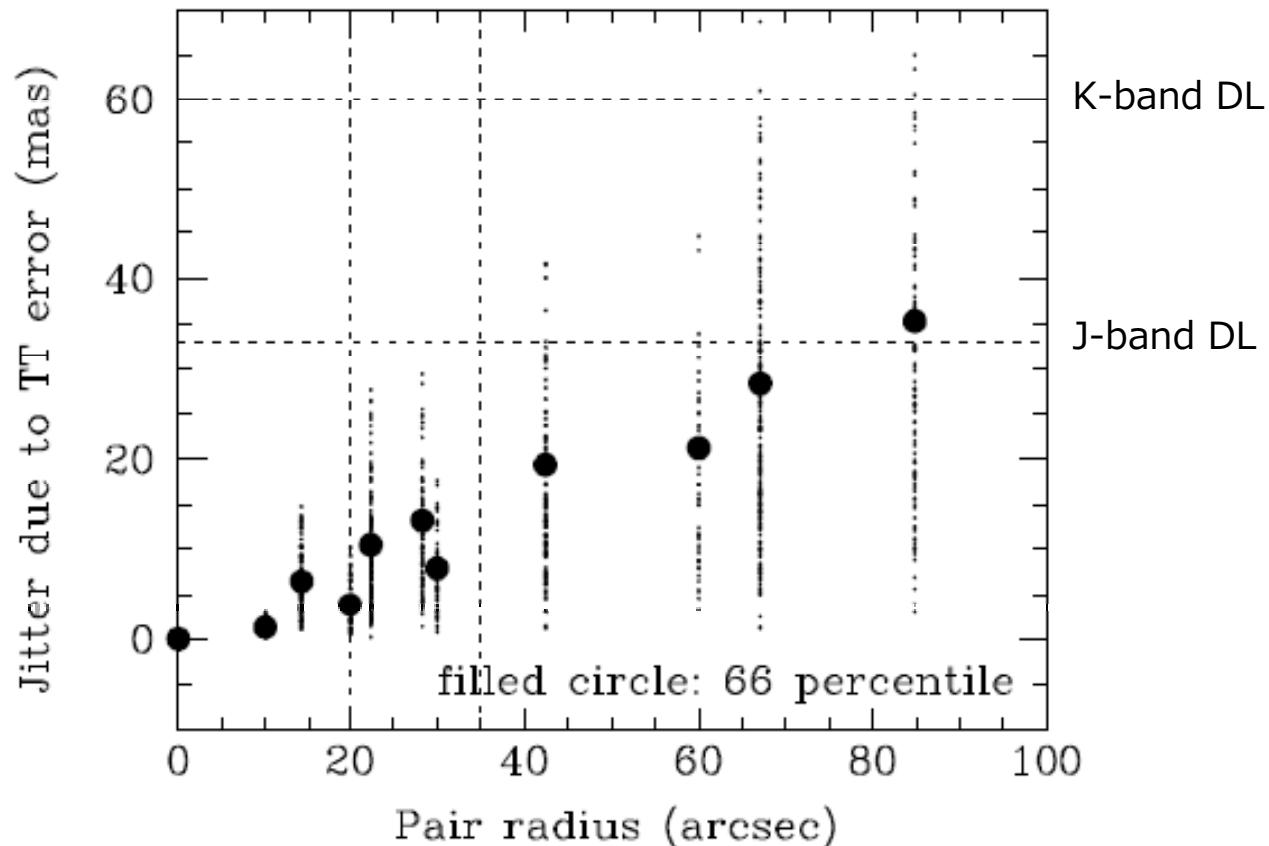
広い視野の同時観測では Tip-tilt 成分の anisoplanatism で TT ガイド星の必要数が決まる。下の図は TT ガイド星からの距離によって生じる SR の減少ファクターを解析的に求めたもの (LLT の振動などは含まない)。J-K の波長域で SR の減少をそこそこ抑える (SR~0.6) 時、一つの TT ガイド星でカバーできる視野はそこから半径 30" 程度の領域と推定される。シミュレーションの中で確認したのが次のスライド。



AO/TApot.eps : calculation following Sandler et al. 1994

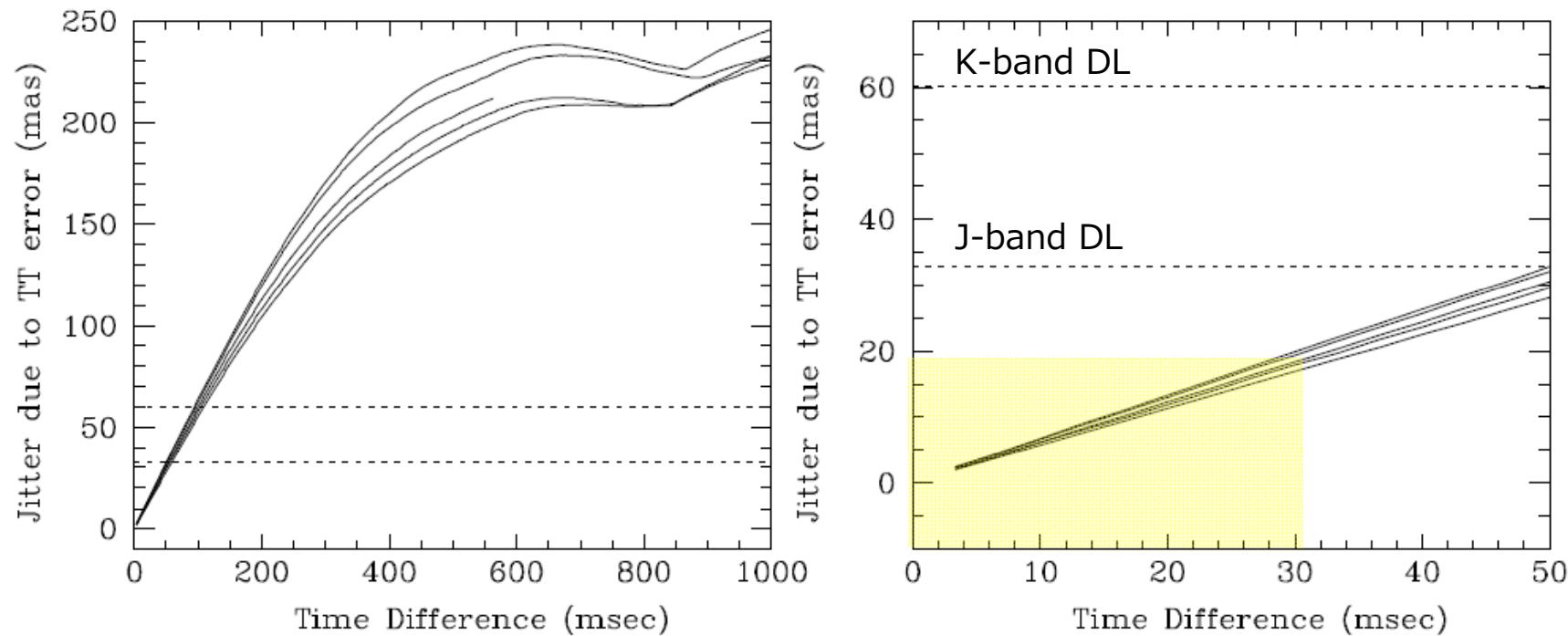
# Tilt-anisoplanatism シミュレーション詳細

シミュレーションの中でターゲット方向の Tip-tilt 成分をどの程度の精度で推定できるかを見るために中心の TT ガイド星を挟んでペアになる TT ガイド星を均等な距離に用意した。下の図はペアの TT ガイド星で測定される gradient の平均と中心のガイド星で測定される gradient の差を求めて星像の Jitter の量としてプロットしたもの。使った大気モデルはスライド 10 と同じ。



# Tilt-anisoplanatism シミュレーション詳細

Tilt-anisoplanatism の結果は TipTilt の補正ループの周期とも結びついている。Tip-Tilt 波面センサーに許される露出時間はこれにより制限される。時間差によって生じる TipTilt 誤差の成分を jitter 量に直してプロットしたものが下図。400msec 以上時間が離れると全く相関のない領域を見て残差が飽和する。回折限界から予想される星像よりも jitter 量を十分に小さくするには30msec 程度の時間間隔で補正ループを回す必要があり、TT 波面センサーの露出時間はこれ以下にする必要がある(ただし前のデータからの連續性を生かして高次の推定をすることでもう少し条件を緩められるかもしれない)。これらの結果は風速に大きく依存することには注意が必要。



# TT-WFSS ガイド星への要求

これまでの検討を見ると 1 個の TT-guide 星がカバーするエリアは最大でも  $R=60''$  程度。すると星の数密度として 1000 stars/sq.deg 程度必要。下の図にある銀極領域での星カウントから考えると、少なくとも  $V=24\text{mag}$ ,  $J\text{vega}=21\text{mag}$ ,  $K\text{vega}=20\text{mag}$  程度に到達する必要がある。それぞれの明るさでの星のカウントレートは先ほどの露出時間の制限30msから考えると、、、

$\text{RAB}=24\text{mag}$  : 10.1 photons/**30ms**/8.2m/3000A

$\text{IAB}=24\text{mag}$  : 7.7 photons/**30ms**/8.2m/3000A

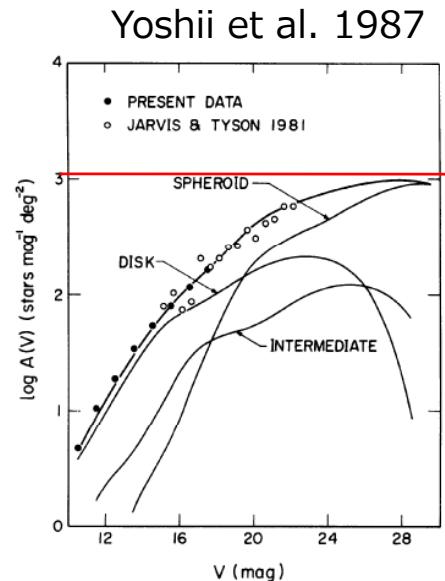
$\text{JAB}=22.4\text{mag}$  ( $J\text{vega}=21.4\text{mag}$ ) : 23.8 photons/**30ms**/8.2m/3000A

$\text{HAB}=22.2\text{mag}$  ( $H\text{vega}=20.7\text{mag}$ ) : 21.4 photons/**30ms**/8.2m/3000A

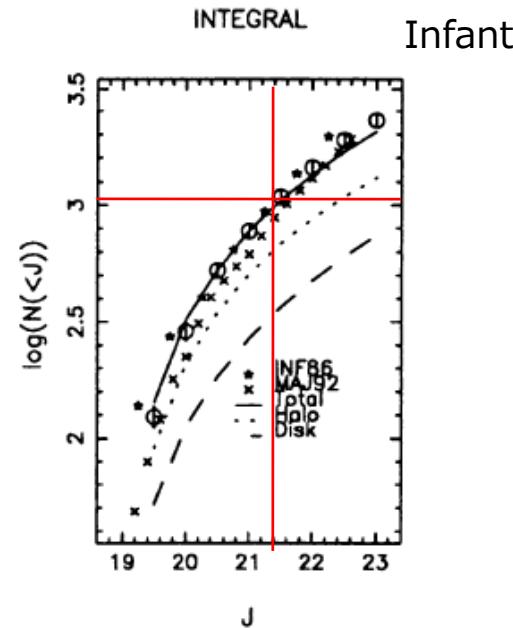
$\text{KAB}=22\text{mag}$  ( $K\text{vega}=20\text{mag}$ ) : 18.7 photons/**30ms**/8.2m/3000A

(現状で用いられる最も暗いガイド星:  $\text{RAB}=18\text{mag}$  : 28 photons/ms/8.2m/1000A)

Galactic pole 領域での星カウント

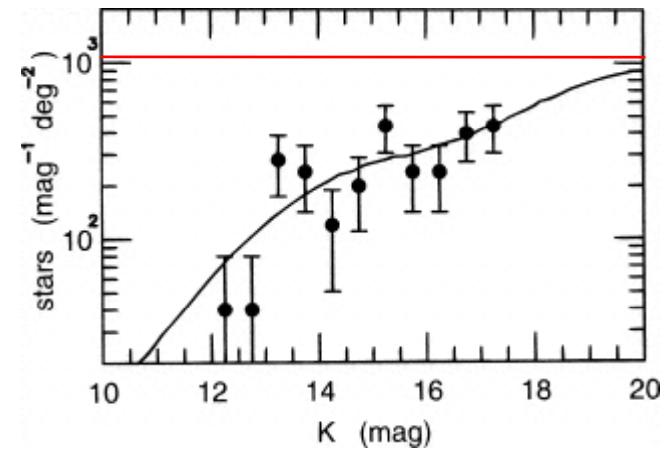


INTEGRAL



Infante et al. 1994

Minezaki et al. 1998



# TT-WFSs ガイド星への要求

暗い星を TT ガイド星として用いる場合にはバックグラウンドノイズが効いてくる。CFHT webpage から取ってきた 1) Mauna Kea でのバックグラウンドの明るさ(Vega?)、2) 0.5"x0.5"での明るさ、3) 0.2"x0.2" での明るさ、4) 0.1"x0.1"での明るさ、4) 予想されるバックグラウンド光子数、5) 要求されているガイド星の光子数、6) ガイド星の光子数とバックグラウンドの光子数のポアソンノイズの比を示す。可視光では 0.5"x0.5" の領域と比較、赤外では補償された星像を見る On-instrument WFS を仮定して 0.2"x0.2" or 0.1"x0.1" の領域と比較。

	1.0"x1.0"	0.5"x0.5"	0.2"x0.2"	0.1"x0.1"	bg/30ms	GS/30ms	GS/sqrt(bg)
R-band	20.3	21.8	23.8	25.3	76	10.1	1.15
I-band	19.2	20.7	22.7	24.2	161	7.7	0.61
J-band	14.8	16.3	18.3	19.8	1037	23.8	0.74
H-band	13.4	14.9	16.9	18.4	2825	21.4	0.40
K-band	12.6	14.1	16.1	17.6	1078	18.7	0.57

このままではガイド星自体の光子数も足りないし、バックグラウンドに対しても暗すぎる。J-band 付近では 0.1"x0.1" 程度まで星像を絞り込めれば R-band に対して補償された星像を見る赤外波面センターのメリットがあるかもしれないが、それでもまだ足りない。

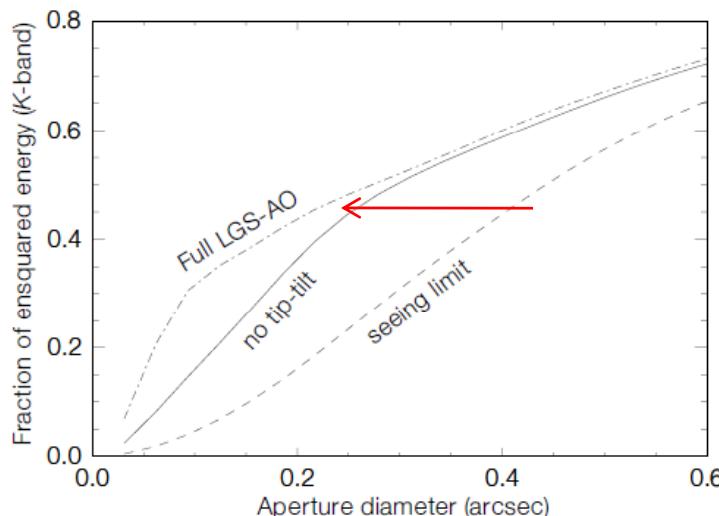
結局、TA の推定に新しいアルゴリズム(TT成分のサンプリングが荒くてもターゲット方向でのTT成分が推定できる)が入らない限り現状の LGS AO の困難と同じことに直面する。(複数のガイド星が要求される分さらに厳しい)

# TT-WFSs ガイド星への要求

まとめ、

MOAO で広視野で高い SR を目指すには TT ガイド星も多数必要。それぞれの TT ガイド星のカバーする領域は半径30"程度。複数のガイド星が必要な点で今のシステムよりも条件が厳しくなり、銀極方向では複数のガイド星を見つけることはかなり厳しい。

- となると結局 Gemini/GEMS や Keck/NGAO proposal のように比較的狭い視野で高い SR を狙うほうが良いのかも(シミュレーションのパターン1)。
- TT 補正無しでコアは立たなくなっても 0.2" 程度のスリットなら ensquared energy はあまり変わらない(シミュレーション TT ガイド星依存性のEE(0.2")あるいは下図のESOのスタディ)傾向が見られるので面分光はあきらめて多天体分光に特化すればよいかもしない。



Davies et al. 2008 ESO messenger

# TT-WFSs ガイド星への要求: 念のため注意！

TT ガイド星が多数必要になるために広視野のMOAOで高いSRを達成しにくいのは 8m 望遠鏡の場合のみ。

30m 望遠鏡の場合には

- 1) 口径が大きくなることにより暗い TT ガイド星が使えるようになる、
- 2) TT 成分の空間変動、時間変動が小さくなり、距離や積分時間への要求が緩くなる  
(さらに乱流のアウタースケールが口径と同じ程度であるメリットもある)、

ので、ガイド星が見つかる確率は上昇し、MOAO システムでの広視野の多天体同時観測は有効になる。

露出時間が 100ms まで許される、J,H-band で星像が $0.1'' \times 0.1''$ まで絞り込むとして 30m の場合。

	1.0'' $\times$ 1.0''	0.5'' $\times$ 0.5''	0.2'' $\times$ 0.2''	0.1'' $\times$ 0.1''	bg/100ms	GS/100ms	GS/sqrt(bg)
R-band	20.3	21.8	23.8	25.3	3403	449	7.7
I-band	19.2	20.7	22.7	24.2	7166	343	4.1
J-band	14.8	16.3	18.3	19.8	11629	1060	9.8
H-band	13.4	14.9	16.9	18.4	31666	956	5.4
K-band	12.6	14.1	16.1	17.6	48117	836	3.8

### 3. 装置について

1. MOAO ならやはり多天体IFU と考えた場合
2. TTガイド星の限界を考えてMOAOでも多天体分光に徹する場合

# Instrument Ideas with MOAO system: 1

1. Multiple-deployable IFUs within  $d=6'$  FoV
  - 2048x2048 Hawaii2 x4
  - 800 spectral-pixels or 1600 spectral-pixels
  - 10x10 IFUs with 0.05" sampling -> 0.5" fov
  - 8 to 16 objects at once
  - 8 to 16 DMs with order  $\sim 100$
  - 6 LGSs and 9 TT-NGSs with on-instrument IR-WFS ?
  - Kinematics of  $z=1-2$  galaxies

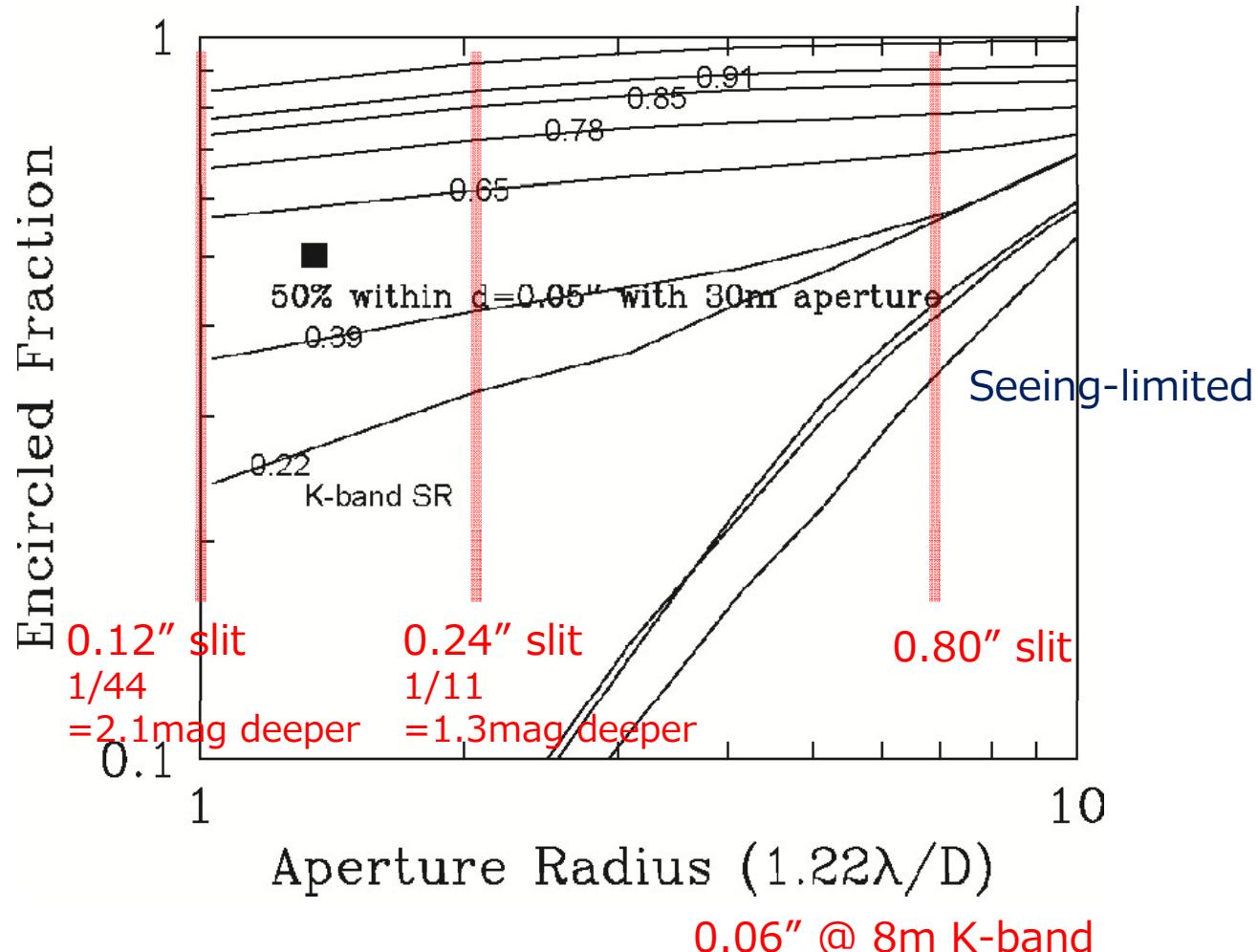
# Instrument Ideas with MOAO system: 2

2. Multiple-objects with fiber spectrograph with  $d=6'$  FoV
  - 2048x2048 Hawaii2 x2
  - 20-pixels per objects, two arrays to cover wide wavelength coverage (J+H or H+K)
  - 50 objects (+50 sky ?) at once
  - 100 MEMS DMs with order  $\sim 100$
  - 6 LGSs and 9 TT-NGSs with on-instrument-IR WFSs ?
  - Redshift surveys for  $z=1-3$  galaxies
  - Galactic stars ?

予備スライド

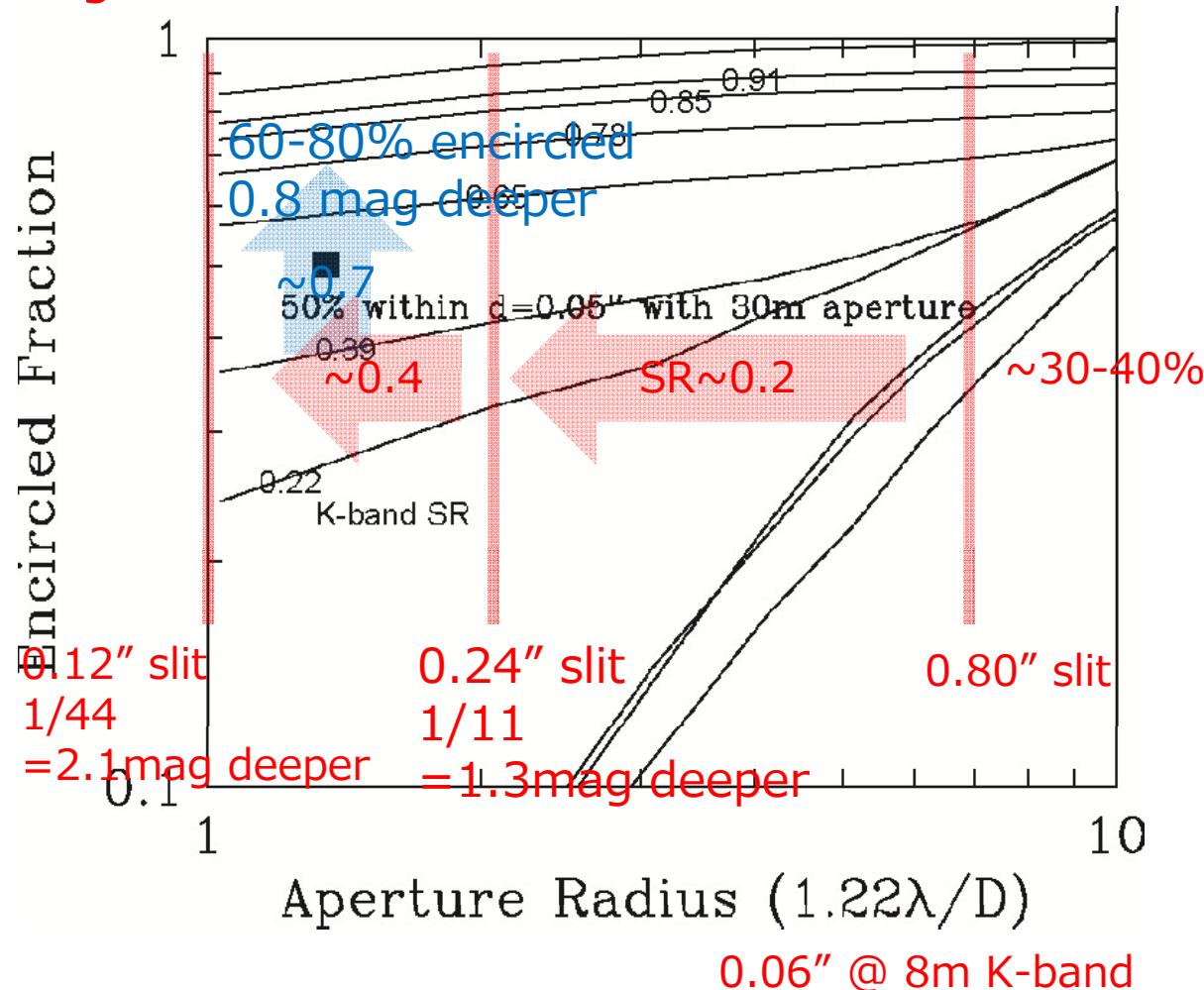
# What SR do we want ?

Fraction of light within a slit varies with slit width. Different lines represent different SR ratio (shown with small numbers)



# What SR do we want ?

If background limited and point source, then, 3 mag deeper than current seeing limited observation with SR=0.7-0.8



0.06" @ 8m K-band

ASJ2009/encircle.eps