

## なぜdustiest evolved starsか?

### Dust Budget ProblemとEvolved Star

“星間空間 (ISM) のダストがどのような天体によって供給されているか?”

この問いはまだまだ論争的である。ダストを供給する主な天体としてはAGB星や超新星が挙げられるが、これらの供給量ではISMのダスト量を説明することはできない (Gerhz 1989, Tielens+2005, Draine 2009)。一方でPresolar grainsの中には同位体比から明らかにAGB星や超新星起源と思われるダストが含まれており、これらの貢献が全く無視できる量ではないことを物語っている。

近年、このdust budget problemの研究がMagellanic cloudsを対象に精力的に行われている。Magellanic cloudsは各天体が空間的に分離でき、また距離の不定性がないためダスト量が正確に求められるからである。たとえばSpitzerによるSAGE サーベイやHerschel HERITAGEサーベイなどによって、全銀河でのダスト供給量が推定され、AGB星が供給するダストの大半は非常に赤い ([3.6] - [8.0] > 0.8) extreme AGB星が担っていることが明らかとなってきた。たとえば Boyer+2012は、わずか3%のextreme AGB星がダスト供給量の80%を担っているとしている。

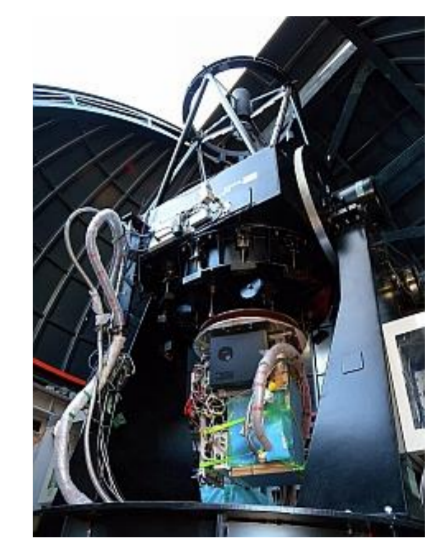
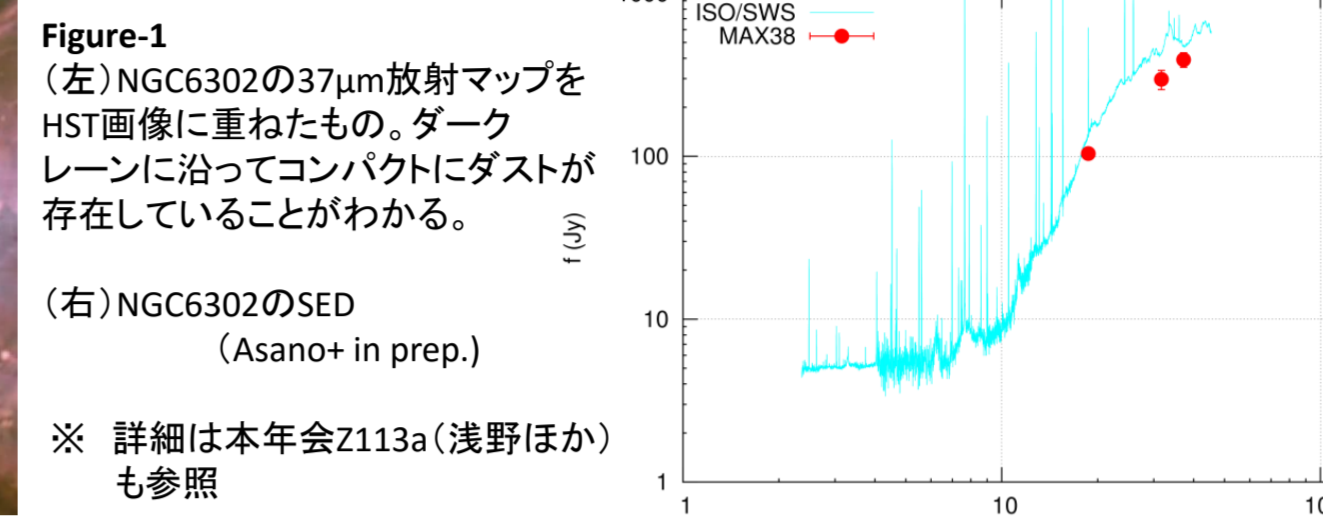
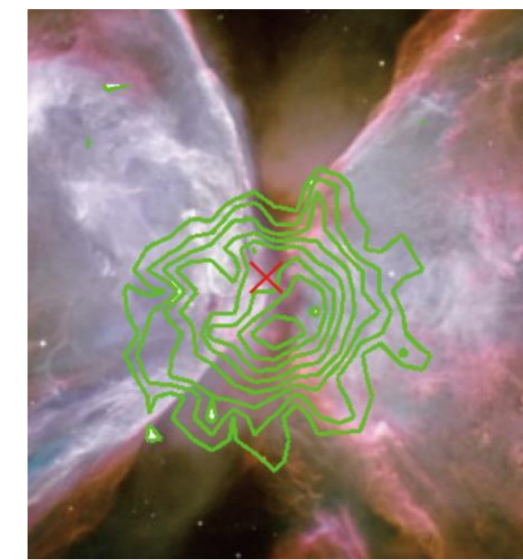
Table-1 LMCでのdust production rateの見積り (Boyer+2012)

Type	N	$\Sigma D$ ( $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ )	Percentage of Total	(D) ( $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ )
s-AGB	886	$8.62 \times 10^{-6}$	61.1	$9.7 \times 10^{-7}$
C-AGB	5190	$0.87 \times 10^{-6}$	6.2	$1.7 \times 10^{-10}$
O-AGB	8871	$0.63 \times 10^{-6}$	4.5	$7.1 \times 10^{-11}$
aO-AGB	6372	$0.32 \times 10^{-6}$	2.3	$5.0 \times 10^{-11}$
RSG	3908	$0.24 \times 10^{-6}$	1.7	$6.1 \times 10^{-11}$
FR	179	$3.40 \times 10^{-6}$	24.1	$1.9 \times 10^{-9}$
Total	25406	$14.1 \times 10^{-6}$	100	$5.5 \times 10^{-10}$
Total, no FR	25389	$10.7 \times 10^{-6}$	75.9	$4.4 \times 10^{-10}$

しかしこれらのダスト供給量は基本的に10  $\mu\text{m}$ 以下の波長でのIR excessを元に計測されており、より低温のダストシェルをまとった天体については見落とされている可能性がある。

### Bipolar Planetary Nebulaeで見られるmassive dust torus

我々がminiTAO/MAX38を用いて行った30  $\mu\text{m}$ 帯撮像観測によって、bipolar Planetary Nebulae (PNe) が中心星付近に非常に重いdust torusを伴っていることが確認された。bipolar PNeはその銀河系内の分布から比較的重い主系列星の進化最末期天体であることが予想されている。このようなdust torus形成メカニズムの詳細はまだまだ不明ではあるが、AGBの最末期に起きた非常に強い質量放出に関係していると考えるのが自然である。



近年、de Vriesらは69  $\mu\text{m}$ の結晶化シリケート放射を用いてダストの温度と距離の関係を導き、一部のAGB星が従来考えられていたよりも10-100倍強い質量放出段階を経ている可能性を示唆した (Hyerwind仮説)。このような質量放出が比較的重いAGB星で普遍的に起きるのならば、AGB星のダスト供給量を左右する可能性もある。

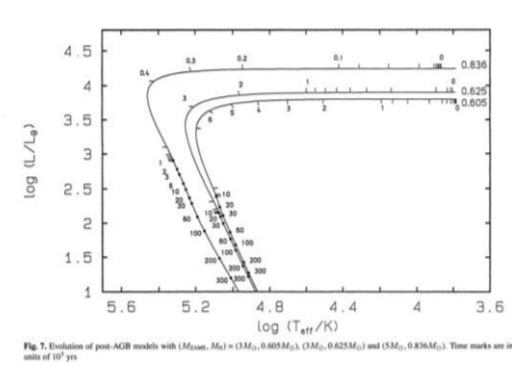
このような天体は非常に深く ( $A_V > 30 \text{ mag}$ ) 埋もれており、可視や近赤外線だけで同定することは難しい。実際、このような質量放出天体の捜査が近傍のFIRソースについてなされ、いくつか候補は上げられているものの (Ramos-Larios+ 2009/2012)、確たる天体は見つかっていない。

## 深く埋もれた晩期型星=dustiest evolved starsの探索観測が必要

## なぜdustiest evolved starsは見つけにくいのか?

### DUSTYによるSEDの見積り

強い質量放出はAGB期の最末期に起こる。その時期の光度はほぼ星質量によって決まっており、たとえば主系列質量3Moの星はおおよそ $10^{3.5} L_{\odot}$ 、7Moの星は $10^{4.5} L_{\odot}$ である (Blocker+1995)



このような深く埋もれた天体のSEDをモデルによって計算した。仮定したパラメータは以下の通り。計算にはDUSTY (Ivezic+1997)を用いた。

- 中心星は3000Kで光度 $10^{3.5} L_{\odot}$
- シェルは球対称、密度分布は半径の-1/2乗に比例 (一定膨張)
- シェルの半径は内径温度 $T_{in}$ で表現。  $T_{in}=800\text{K}$ と $300\text{K}$ について計算
- ダストは標準的なMRNのサイズ分布
- ダスト種別としては、C-rich: amorphous Carbon, O-rich: astronomical Silicate

の2種類を用いる  
- シェルの光学的厚みを変えて計算。厚みは $A_V$ によって表現  
- 距離はLMCを仮定

得られたSEDを図-2に示す。

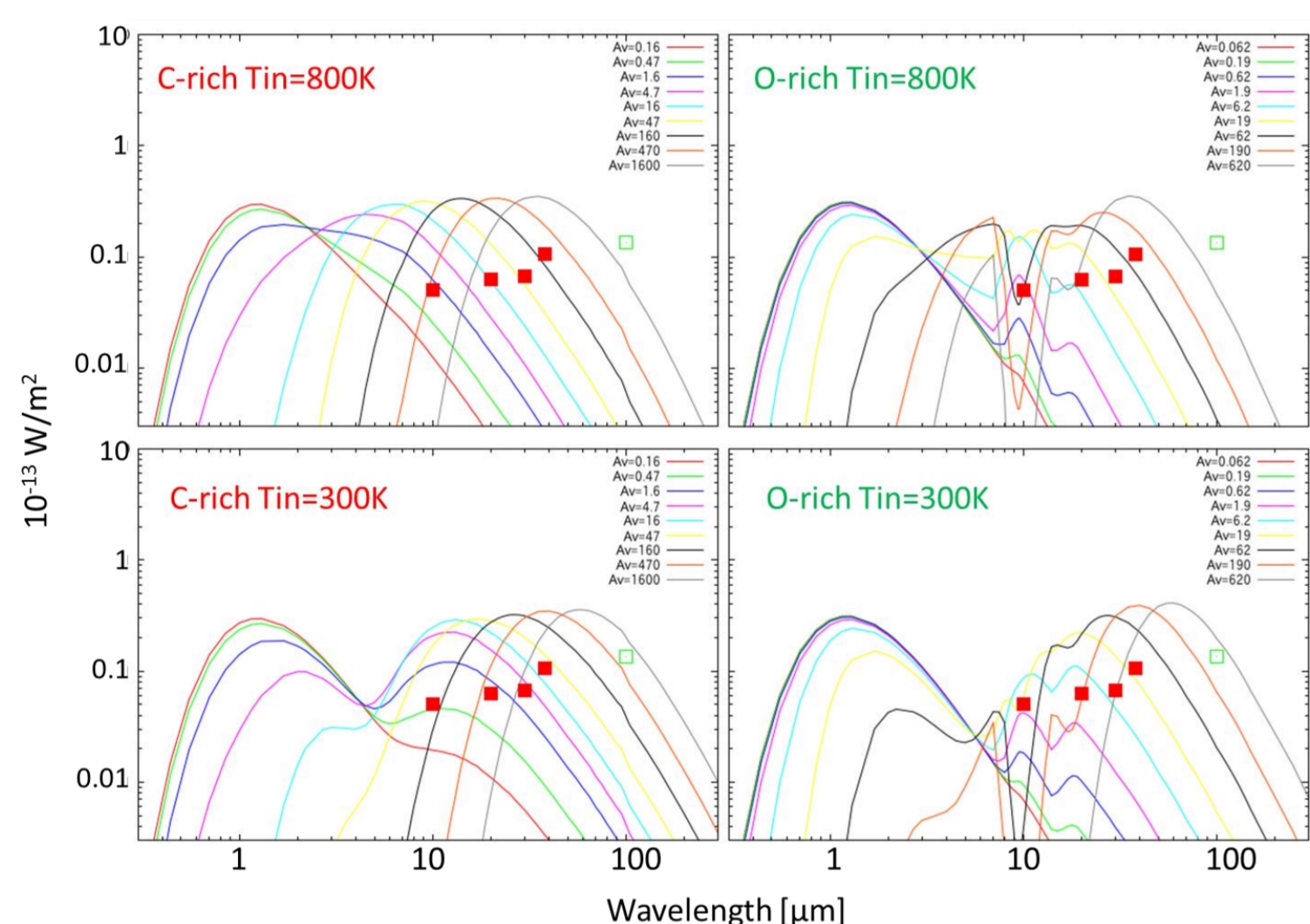


Figure-2 DUSTYで得られたSED。各線は $A_V$ の違いをあらわす。図中の赤四角はTAO/MIMIZUKUの感度(3sig100sec)、緑はHERITAGEの観測限界(>90% Completeness)

これをColor-Magnitude図に示す。比較のため、LMCでの各種天体の位置およびSAGEの観測限界も一緒にプロットした。

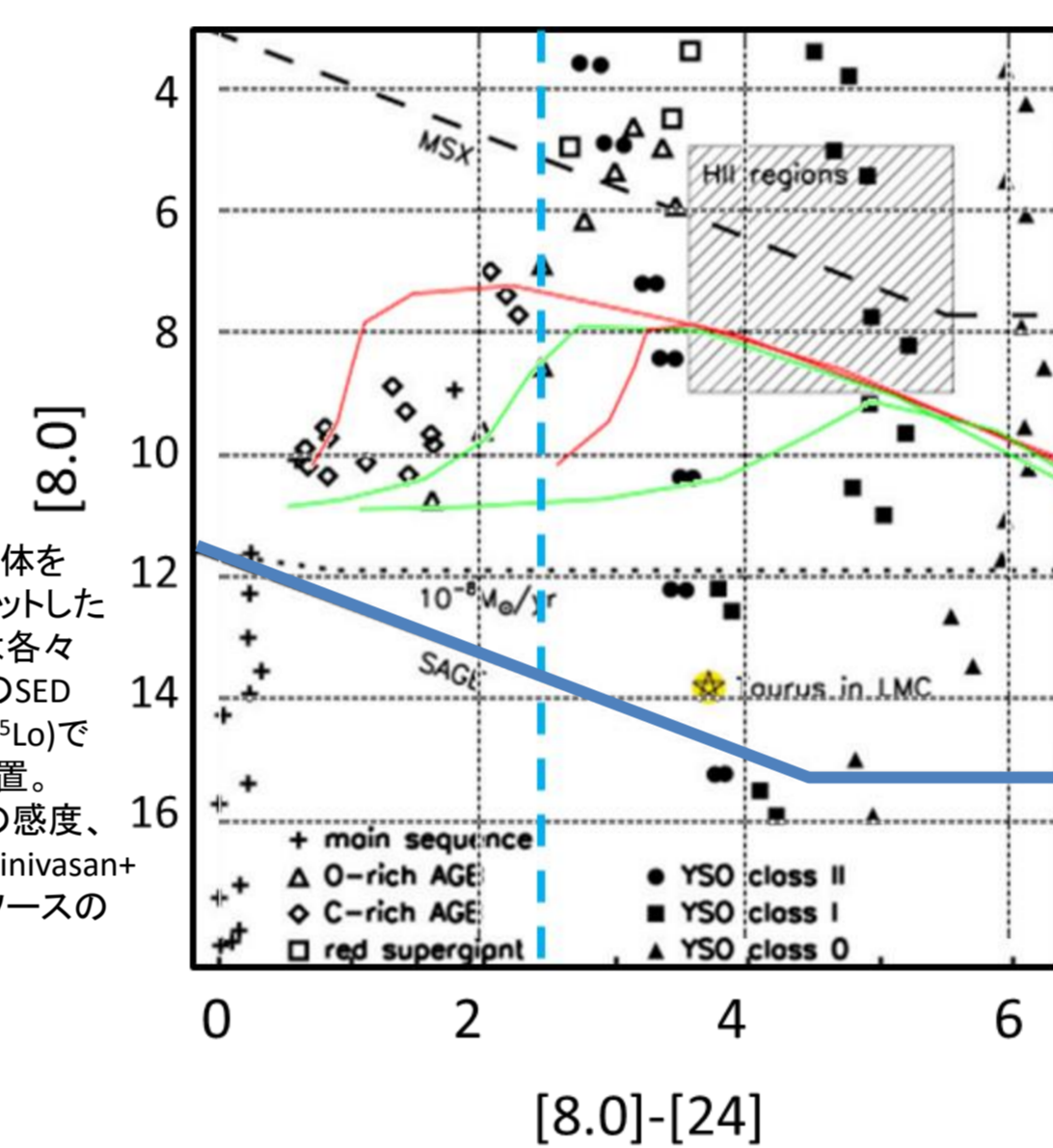


Figure-3 LMCの各種天体をCMD上にプロットしたもの。赤・緑は各々C-rich/O-richのSEDモデル( $L=10^{3.5} L_{\odot}$ )で予想される位置。青線はSAGEの感度、水色点線はSrinivasan+2016でのFIRソースのリミット。

Evolved starの周辺ダストシェルが濃くなって、SAGEの観測限界より十分に明るいことがわかる。また、シェルが濃くなると、AGB星の領域ではなくYSOの領域に入ってくることがわかる。

### YSOとの区別

深く埋もれたAGBとYSOの区別は非常に難しい。従来の研究 (Boyer+2011, 2012, Jones+2015, Srinivasan+2016など) では以下のような方法によってYSOを除外している。

- 星形成領域にある天体はYSOの可能性が高いので除外
- FIR (たとえば70  $\mu\text{m}$ ) で明るい天体はmassが大きくなりすぎるので除外
- YSOのSEDモデル (たとえばRobitaille+2007) に合うものは除外

これらは判別がつかない天体を誤ってAGBとしてしまわないという点では有効だが、埋もれたAGBを誤って除外してしまう可能性がある。埋もれたAGB、YSOとも外から見ると低温のdust cloudであり、中間赤外線より短波長では内部が見通せないため、これらをSEDだけで分類するのはおのずと限界がある。



### 本当に点源か?

SpitzerやHerschelによる観測は空間解像度が限られているため、背景光 (たとえば周辺のHii regionなど) からの放射が混ざりこむ危険性がある。この影響は特に長波長で顕著であり、SEDの形やダスト量の見積りに大きな不定性を与えている。

## 高解像度観測で正確なSEDを求めると同時に、YSOと区別する新しい手法が必要

## どうやってdustiest evolved starsを選び出すか?

### 変光による切り分け

AGB星のmass lossは星の変光と強く結びついたメカニズムであり、実際AGB星の多くは長周期変光星と分類されている。振幅は天体にもよるが光度換算で50-200%程度である。一方でYSOはこのような大きな変光を示さない。したがって変光の有無を確認できれば、YSOとAGBを分類できる。

### Magellanic Cloudsによる変光捜査観測

Magellanic cloudsではこれまでもOGLEやMACHO、IRSFなどで変光モニタ観測が精力的に行われている。しかしこれらの観測は可視もしくは近赤外線帯で行われたものであり、中間赤外線での系統的なモニタ観測はほとんど例がない。

唯一の例外がSpitzer IRCを用いて行われた変光モニタ観測SAGE-VAR (Riebel+2015) である。これは3.6/4.5  $\mu\text{m}$ でLMC/SMCを約6年間モニタした観測であり、LMCで2198個、SMCで571個の変光星を検出している。うち16個は新たにAGB星と認定されたものである。

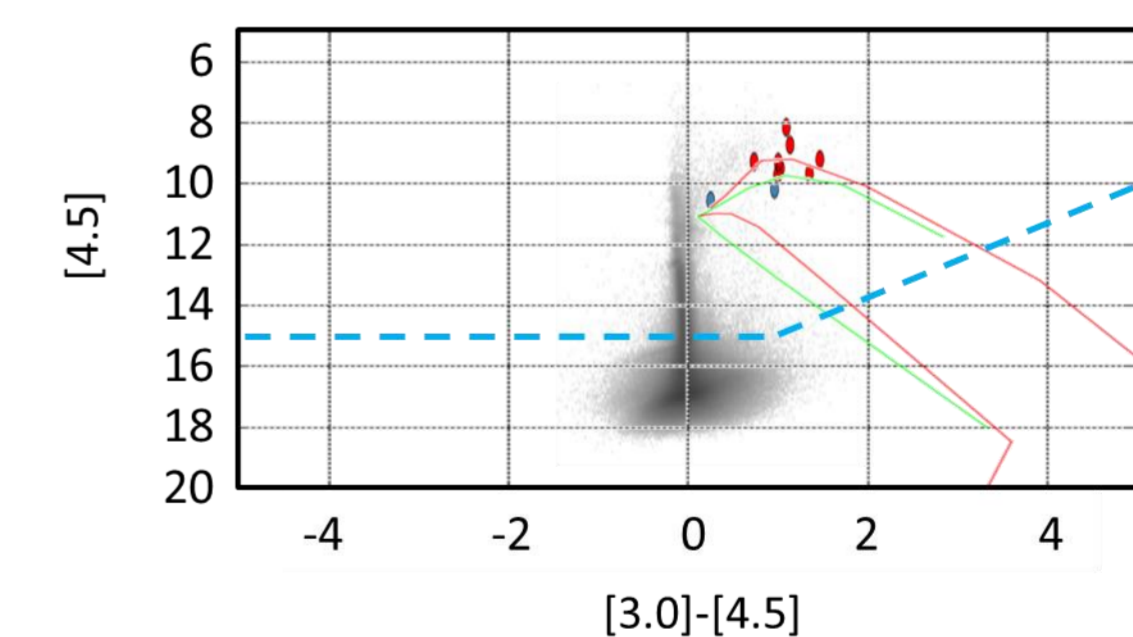


Figure-4 SAGE-VAR (Riebel+2015) で新たに発見されたAGBと思われる変光天体 (赤・青点)。赤・緑線は我々のSEDモデルの位置。変光天体は $T_{in}=800\text{K}$ のモデルとよく一致している。

これをさらに長波長に拡張できれば、より埋もれたAGBも同定できる可能性がある。

## 埋もれた天体の変光を精度よく描き出すための長中間赤外線モニタ観測が必要

## なぜTAO/MIMIZUKUか?

埋もれた天体を観測するための長波長観測能力



MIMIZUKUはTAOサイトの大気条件を最大限生かし、2-38  $\mu\text{m}$ という広い波長範囲をカバーできる。特に30  $\mu\text{m}$ はTAOのみが地上観測できる新しい波長帯である。感度はスペースに比して劣ってはいるが、LMC/SMCまでのAGB星を観測するには十分である。(図-2の赤四角)

背景からのコンタミネーションを防ぐ高い空間解像度



MIMIZUKUは地上望遠鏡のメリットを活かし、高い空間解像度が達成可能である。特に30  $\mu\text{m}$ 帯の解像度は約1秒角と、近未来の宇宙ミッションを含めても最高解像度となっている。

精度よく、かつ長期間にわたるモニタリング観測性能



MIMIZUKUには高精度測光観測を行うための新システムField Stackerが搭載されており、1%に迫る相対測光が可能である。地上観測なので長期のモニタ観測も実施可能である

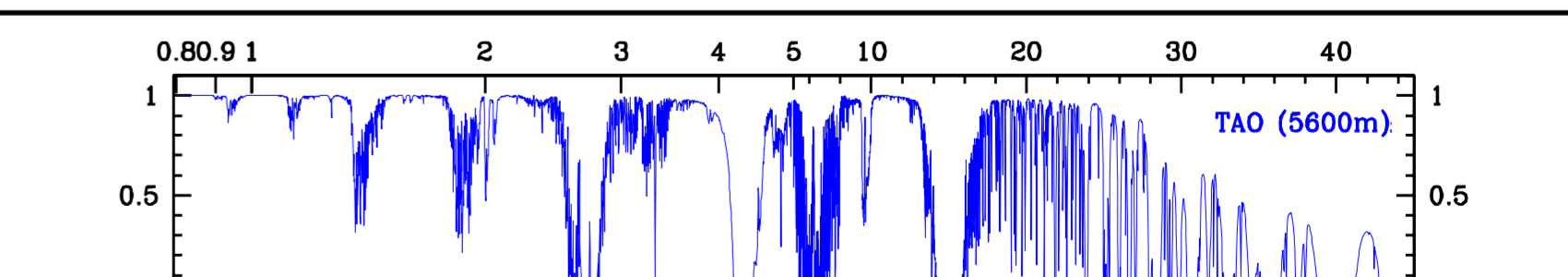


Figure-5 TAOの大気透過率とMIMIZUKUの観測波長

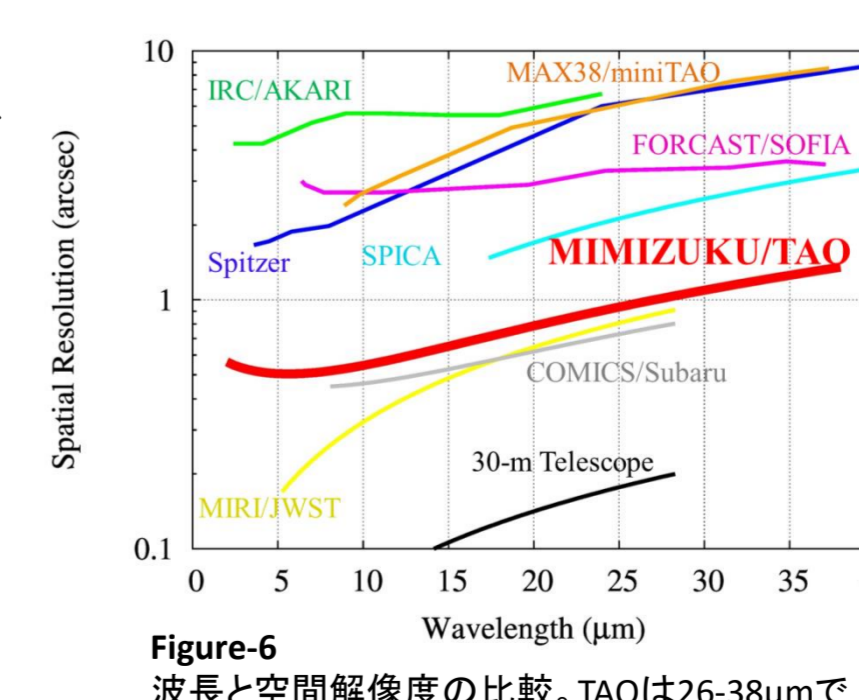


Figure-6 波長と空間解像度の比較。TAOは26-38  $\mu\text{m}$ で最も解像度が高い望遠鏡である。

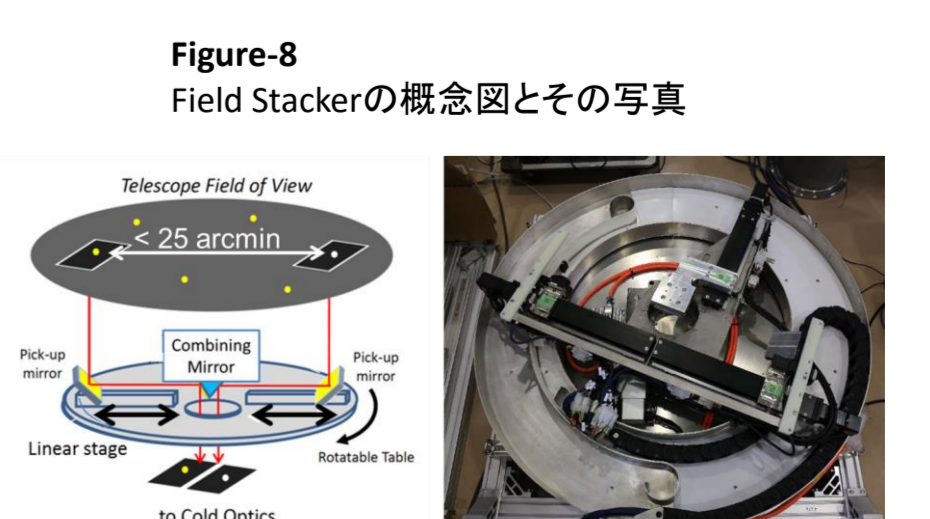


Figure-8 Field Stackerの概念図とその写真

※MIMIZUKUについては今年度V229b(上塚他)を、Field Stackerについては今年度V230a(内山他)を参照のこと

TAO/MIMIZUKUでdustiest evolved starsの捜査観測を行うことでAGBによるダスト供給量を正確に求め、dust budget problemに新しい制限を与えられる。