

# CTA報告151: CTA大口径望遠鏡初号機における カメラ集光器の量産と性能評価

鈴木萌（茨城大理）

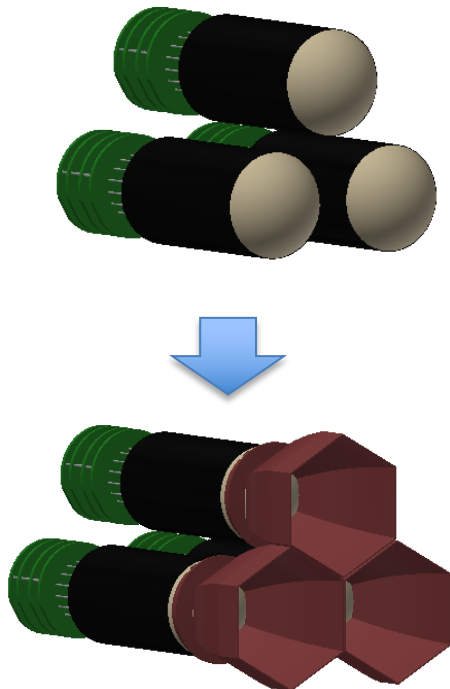
山本常夏<sup>A</sup>, 吉田龍生, 稲田知大<sup>B</sup>, 猪目祐介<sup>B</sup>, 岩村由樹<sup>B</sup>, 大岡秀行<sup>B</sup>, 岡崎奈緒<sup>B</sup>,  
岡知彦<sup>C</sup>, 奥村暁<sup>D</sup>, 折戸玲子<sup>E</sup>, 梶原侑貴<sup>C</sup>, 片桐秀明, 櫛田淳子<sup>F</sup>, 木村颯一郎<sup>F</sup>, 窪秀利<sup>C</sup>,  
郡司修一<sup>G</sup>, 小山志勇<sup>H</sup>, 齋藤隆之<sup>B</sup>, 櫻井駿介<sup>B</sup>, 澤田真理<sup>B</sup>, 砂田裕志<sup>I</sup>, 高橋光成<sup>B</sup>,  
田中真伸<sup>J</sup>, 田村謙治<sup>A</sup>, 町支勇貴<sup>A</sup>, 辻本晋平<sup>K</sup>, 手嶋政廣<sup>B, L</sup>, 寺田幸功<sup>I</sup>, 門叶冬樹<sup>G</sup>,  
中森健之<sup>G</sup>, 永吉勤<sup>I</sup>, 西嶋恭司<sup>F</sup>, 西山楽<sup>I</sup>, 野崎誠也<sup>C</sup>, 林田将明<sup>A</sup>, 馬場彩<sup>M</sup>, 平子丈<sup>C</sup>,  
深見哲志<sup>B</sup>, 古田智也<sup>F</sup>, 増田周<sup>C</sup>, Daniela Hadasch<sup>B</sup>, Daniel Mazin<sup>C</sup>,  
他CTA-Japan consortium

茨城大理, 甲南大理工<sup>A</sup>, 東大宇宙線研<sup>B</sup>, 京大理<sup>C</sup>, 名大ISEED, 徳島大理工<sup>E</sup>,  
東海大理<sup>F</sup>, 山形大理<sup>G</sup>, ISAS/JAXA<sup>H</sup>, 埼玉大理工<sup>I</sup>, KEK素核研<sup>J</sup>, 東海大総合理工<sup>K</sup>,  
マックスプランク物理<sup>L</sup>, 東大理<sup>M</sup>

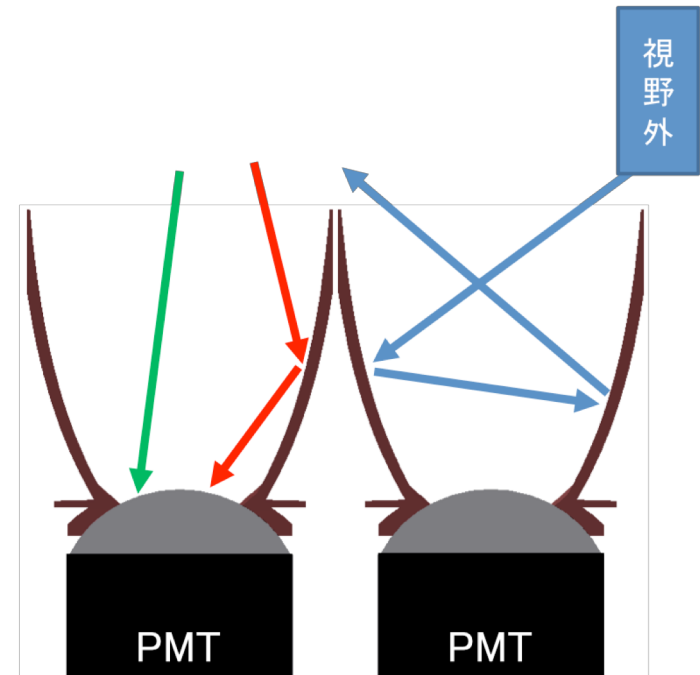
# Large-Sized Telescope(LST)におけるカメラ集光器

LSTのカメラ面には1855本のPhoto Multiplier Tube(PMT)が搭載されている  
それぞれのPMTには主鏡で反射したチェレンコフ光をより多く集光するためのカメラ集光器(ライトガイド)が取り付けられている

集光器の開口部を六角形にする事によりPMT間のデッドスペースを低減し主鏡での反射光以外がPMTの光電面に入らない形状(Winston cone形状)に設計されている



2019/3/17



2019年3月物理学会講演

# LSTにおける光学系の設計と要求仕様

## 光学系の設計

口径:23 m

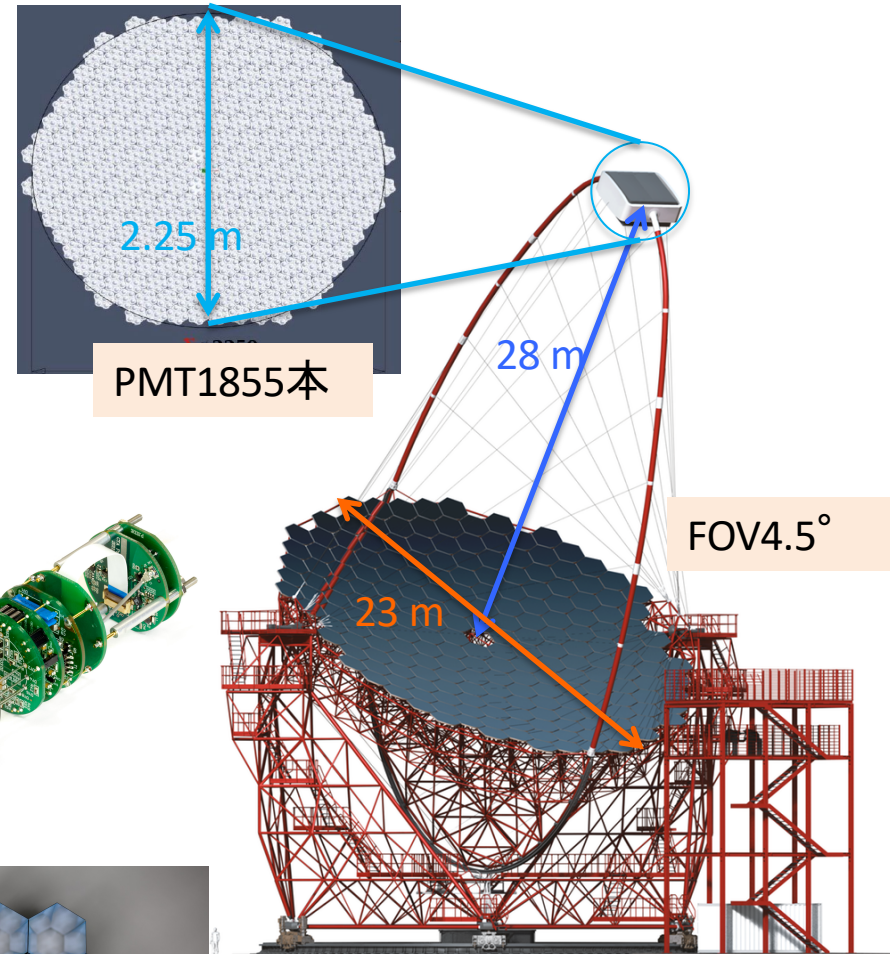
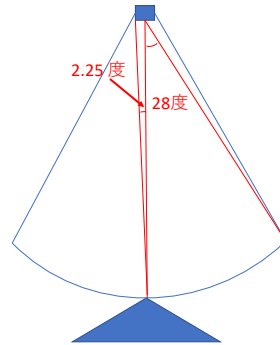
焦点距離:28 m

ピクセルサイズ:

対辺50 mmの正六角形相当

望遠鏡全体の視野角:4.5°

カメラから鏡への視野角:28°



## 望遠鏡全体の要求仕様

(鏡->カメラ窓->集光器->PMT)

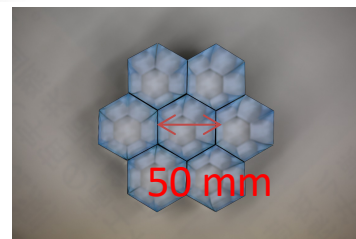
300-550 nmの波長に対して

15%以上の光子検出効率

## カメラの要求仕様

300-550 nmの波長に対して

20%以上の光子検出効率



# 集光器の設計と量産方法

## 集光器の設計

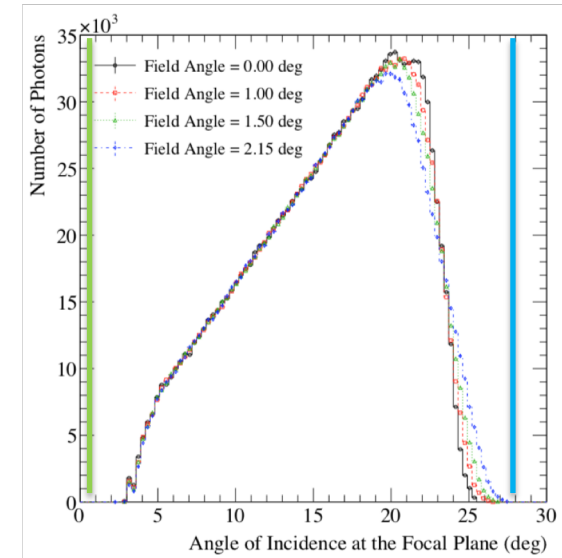
光の入射面の形状は対辺50 mmの正六角形

反射面の形状はOkumura (2012)やOkumura et al. (2017)を参考にベジエ曲線を使用した形状を採用

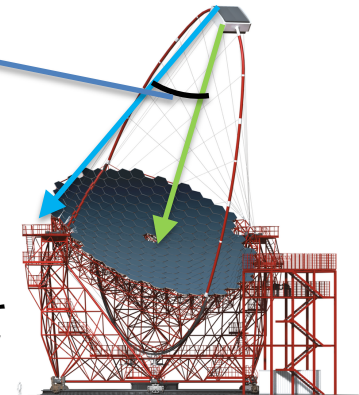
カメラから鏡を見込んだ際の視野は今後鏡の追加がある可能性を考慮して余裕を持ってcut-off angleを設計

## 量産方法

プラスチックコーンの作成→反射膜の低温蒸着→コーン組み立て



鏡からの光の角度分布図  
Okumura et al. (2017)



# 集光器の量産：プラスチックコーンの製作

精密切削による金型を製作



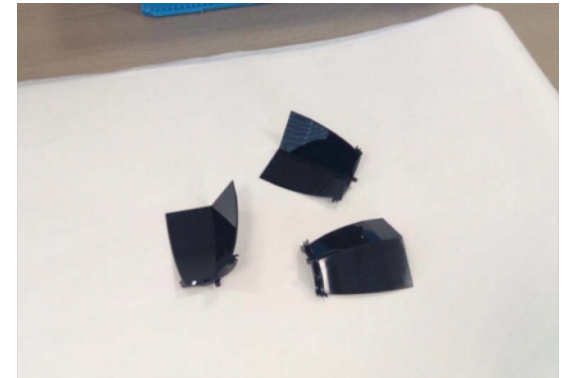
@共栄エンジニアリング

射出成型によるプラスチックコーンの製作

材質：ポリカーボネート

(三菱エンジニアリングプラスチックス株式会社製 PC S-3000R 9001)

コーンを3つに分割して作成することで蒸着が可能になる



分解された状態のプラスチックコーン

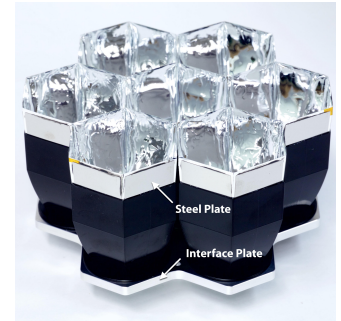
# 集光器の量産：反射面の低温蒸着

集光器開発当初はESR(Enhanced Specular Reflector)という  
反射フィルムを貼り付ける設計であった

問題点：品質管理、製造の難しさ



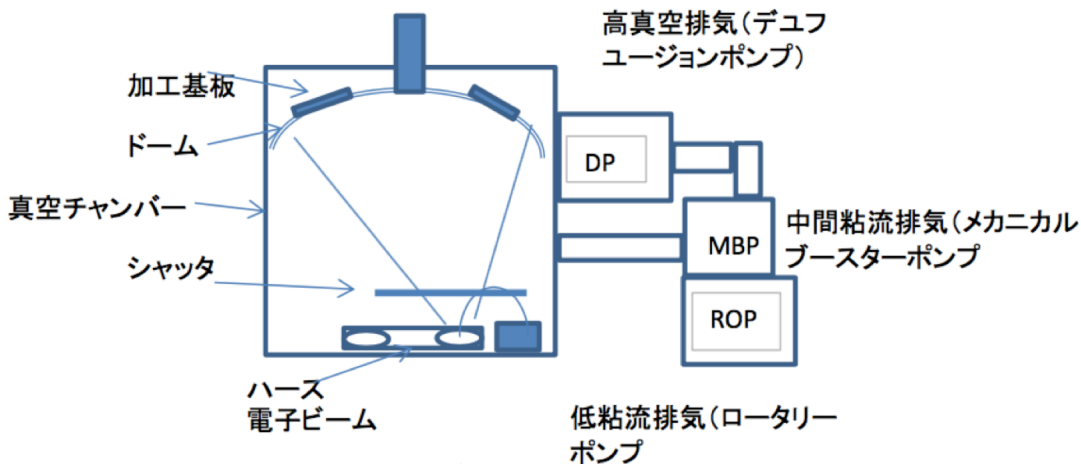
増反射膜の蒸着@東海光学



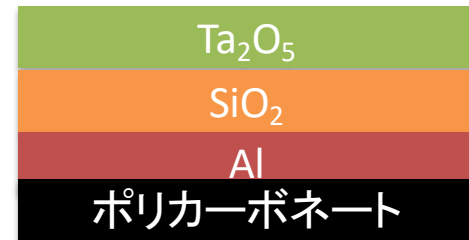
Okumura et al. (2017)

紫外線領域波長の光をエンハンスするAl, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の3層を蒸着

水晶式膜厚制御器



低温蒸着加工



蒸着層

# 集光器の性能評価指標定義

集光器の性能評価をするにあたり、Relative Anode Sensitivity(RAS)という指標を定義

$$RAS(\theta) \equiv \frac{\text{集光器装着時PMT出力値}(\theta)}{\text{マスク装着時PMT出力値}(0^\circ)} \times \frac{1}{\cos \theta} \times \frac{S_{mask}}{S_{pixel}}$$

これにより入射した光量に対するPMTで検出した光量の比を算出し  
集光器によりどれだけ光が集められるのかを測定可能



マスクを取り付けた  
PMTを真正面から  
見た図

RASの計算手順

①まずマスクを装着してPMT出力値を調べる



LED

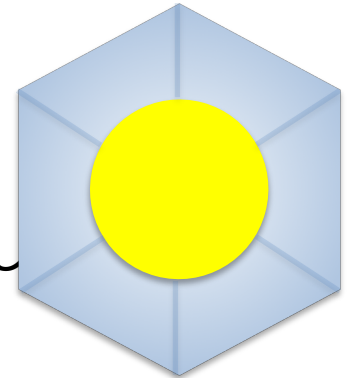


測定系を真上から見た図

# 集光器の性能評価指標定義

集光器の性能評価をするにあたり、Relative Anode Sensitivity(RAS)という指標を定義

$$RAS(\theta) \equiv \frac{\text{集光器装着時PMT出力値}(\theta)}{\text{マスク装着時PMT出力値}(0^\circ)} \times \frac{1}{\cos \theta} \times \frac{S_{mask}}{S_{pixel}}$$



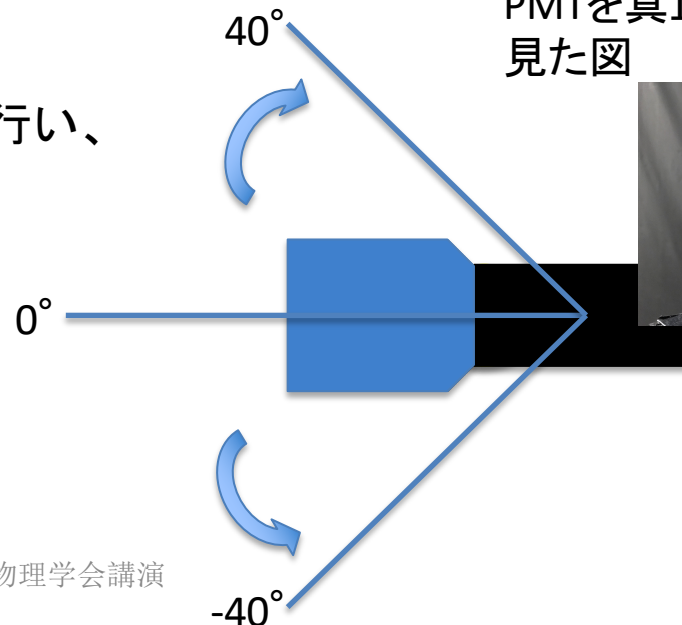
これにより入射した光量に対するPMTで検出した光量の比を算出し、集光器によりどれだけ光が集められるのかを測定可能

RASの計算手順

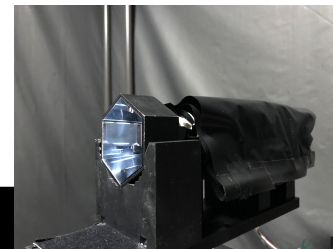
- ①マスクを装着してPMT出力値を調べる
- ②次に集光器をPMTに装着し回転測定を行い、回転角 $\theta$ 毎にPMT出力値を調べる



測定系を真上から見た図



集光器を取り付けたPMTを真正面から見た図



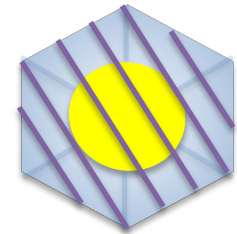


# 集光器の性能評価指標定義

集光器の性能評価をするにあたり、Relative Anode Sensitivity(RAS)という指標を定義

$$RAS(\theta) \equiv \frac{\text{集光器装着時PMT出力値}(\theta)}{\text{マスク装着時PMT出力値}(0^\circ)} \times \frac{1}{\cos \theta} \times \frac{S_{mask}}{S_{pixel}}$$

これにより入射した光量に対するPMTで検出した光量の比を算出し  
集光器によりどれだけ光が集められるのかを測定可能



RASの計算手順

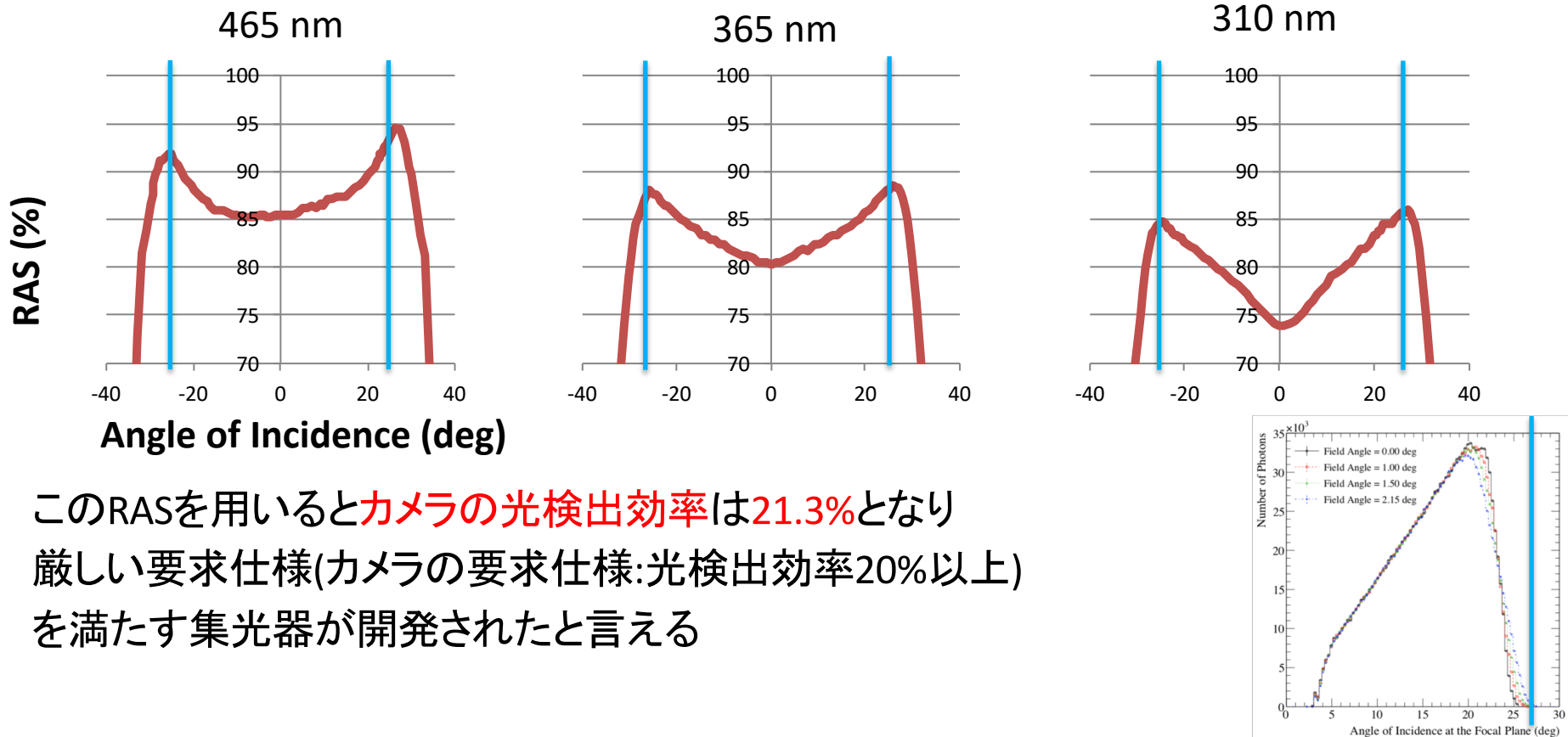
- ① マスクを装着してPMT出力値を調べる
- ② 次に集光器をPMTに装着し回転測定を行い、  
回転角 $\theta$ 毎にPMT出力値を調べる
- ③ 上式に①と②の値を代入し、RASを計算する

$S_{mask}$ (マスクをした際のPMT光電面の面積)と

$S_{pixel}$ (集光器を取り付けた際の光の入射面の面積)は設計時のデータを使用  
角 $\theta$ でのマスク装着時PMT出力値は $\cos\theta$ をかけることで補正可能

# 性能評価:RAS vs. Angle of Incidence

1号機用に量産された集光器について性能測定した  
入射光にはチェレンコフ光のピーク波長付近である465 nm、365 nm、310 nmの  
3波長のLEDを用いた



このRASを用いると**カメラの光検出効率**は**21.3%**となり  
厳しい要求仕様(カメラの要求仕様:光検出効率20%以上)  
を満たす集光器が開発されたと言える

# LST2号機以降用集光器での性能向上

東海光学側から1号機用に量産した集光器はAlの蒸着が十分でなかった可能性がある  
 があると報告を受けて、Alの蒸着精度を上げるため東海光学側へ

フィードバックをかけて蒸着のスピード変更や設定膜厚の変更などを試みた(A~I)

名称		1層目	2層目	3層目	4層目
1号機 量産品	膜種	Al (25 Å/s)	SiO2	Ta2O5 (3 Å/s)	
	設定膜厚 (Å)	1100	806	223	
A	膜種	Al (25 Å/s)	SiO2	Ta2O5 (1.5 Å/s)	
	設定膜厚 (Å)	1100	900	246	
B	膜種	Al (25 Å/s)	SiO2	HfO2 (IAD)	
	設定膜厚 (Å)	1100	774	276	
C	膜種	Al (25 Å/s)	SiO2	HfO2 (IAD)	SiO2
	設定膜厚 (Å)	1100	774	254	33
D	膜種	Al (25 Å/s)	SiO2		
	設定膜厚 (Å)	1100	258		

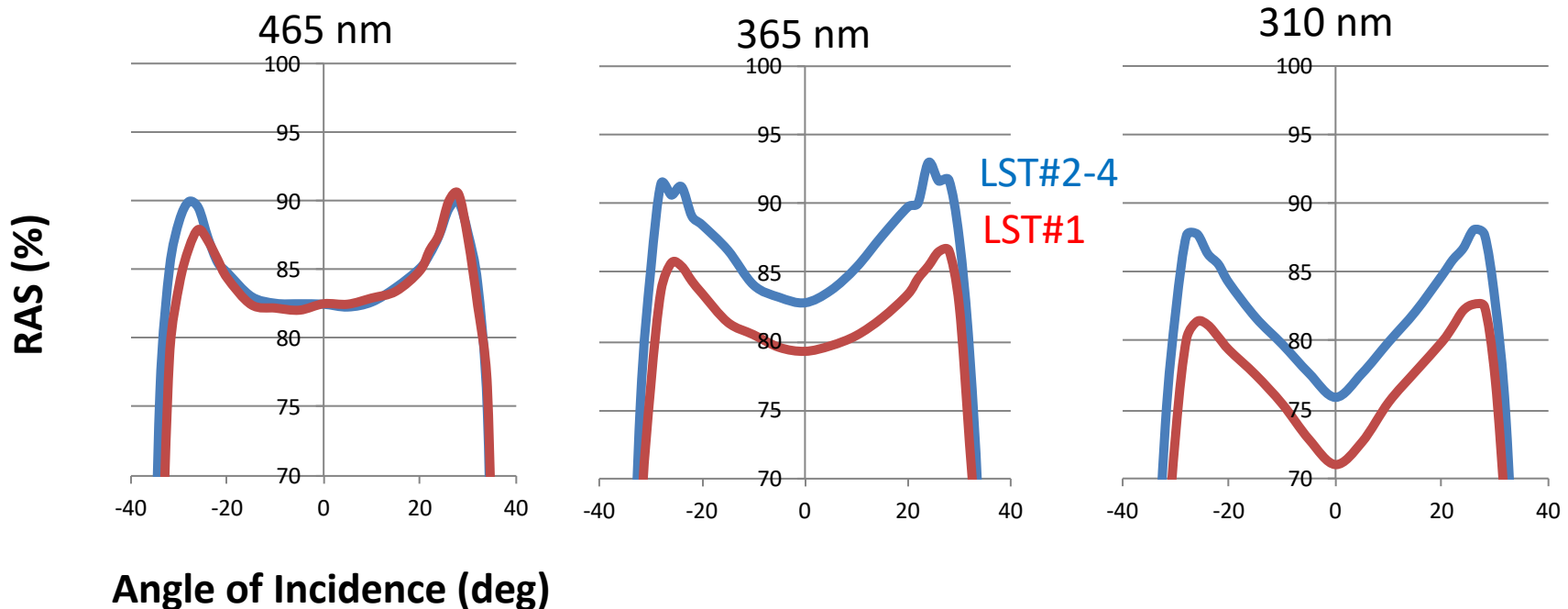
名称		1層目	2層目	3層目	4層目
E	膜種	Al (50 Å/s)	SiO2	Ta2O5 (1.5 Å/s)	
	設定膜厚 (Å)	1100	806	223	
F	膜種	Al (50 Å/s)	SiO2	Ta2O5 (1.5 Å/s)	
	設定膜厚 (Å)	1500	900	246	
G	膜種	Al (55 Å/s)	SiO2	Ta2O5 (1.5 Å/s)	
	設定膜厚 (Å)	1600(800×2)	900	246	
H	膜種	Al (55 Å/s)	SiO2	Ta2O5 (1.5 Å/s)	
	設定膜厚 (Å)	1100	806	223	
I	膜種	Al (55 Å/s)	SiO2	Ta2O5 (1.5 Å/s)	
	設定膜厚 (Å)	1100(550×2)	806	223	

この結果、Alの蒸着を2回に分けて蒸着スピードを速め、従来の設定膜厚に蒸着  
 することで性能の向上が確認できた→この条件(I)で量産決定

# 1号機と2号機以降の集光器の性能比較

1号機用に量産された集光器と2号機以降用に量産するために試作された集光器の性能を比較した

2号機以降では1号機に比べて2波長で性能向上が確認できた



# まとめ

- ・将来的に鏡を追加する必要性を考慮してカメラ視野を広めに設計した
- ・集光器のコーンを3つに分割する設計にして低温蒸着による量産を試みた
- ・ESRではなく蒸着膜で反射面とする理由は、製造の難しさを解消するためである
- ・プラスチックコーンにAl, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の3層からなる紫外線増反射膜を低温蒸着した
- ・集光器の性能測定結果から1号機におけるカメラの光検出効率 $\eta$ は21.3%である
- ・1号機のカメラは要求仕様を満たす
- ・1号機用に量産した集光器に適用した蒸着方法は最善ではなかった可能性がある
- ・反射膜の蒸着精度を上げるため東海光学にフィードバックをかけた
- ・フィードバックの結果、2号機以降用の蒸着条件の集光器では性能が向上した