

木曾広視野CMOSカメラによる ふたご座領域の高速撮像 サーベイ

猪岡皓太

平成29年度 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 修士論文より

代理講演 酒向重行

2018/7/10-11, シュミットシンポ2018, 上松町ひのきの里総合文化センター

タイムドメインの天文学

- 可視光領域ではこれまでタイムスケール毎の変光を観測することによって様々な現象が解明された

例えば

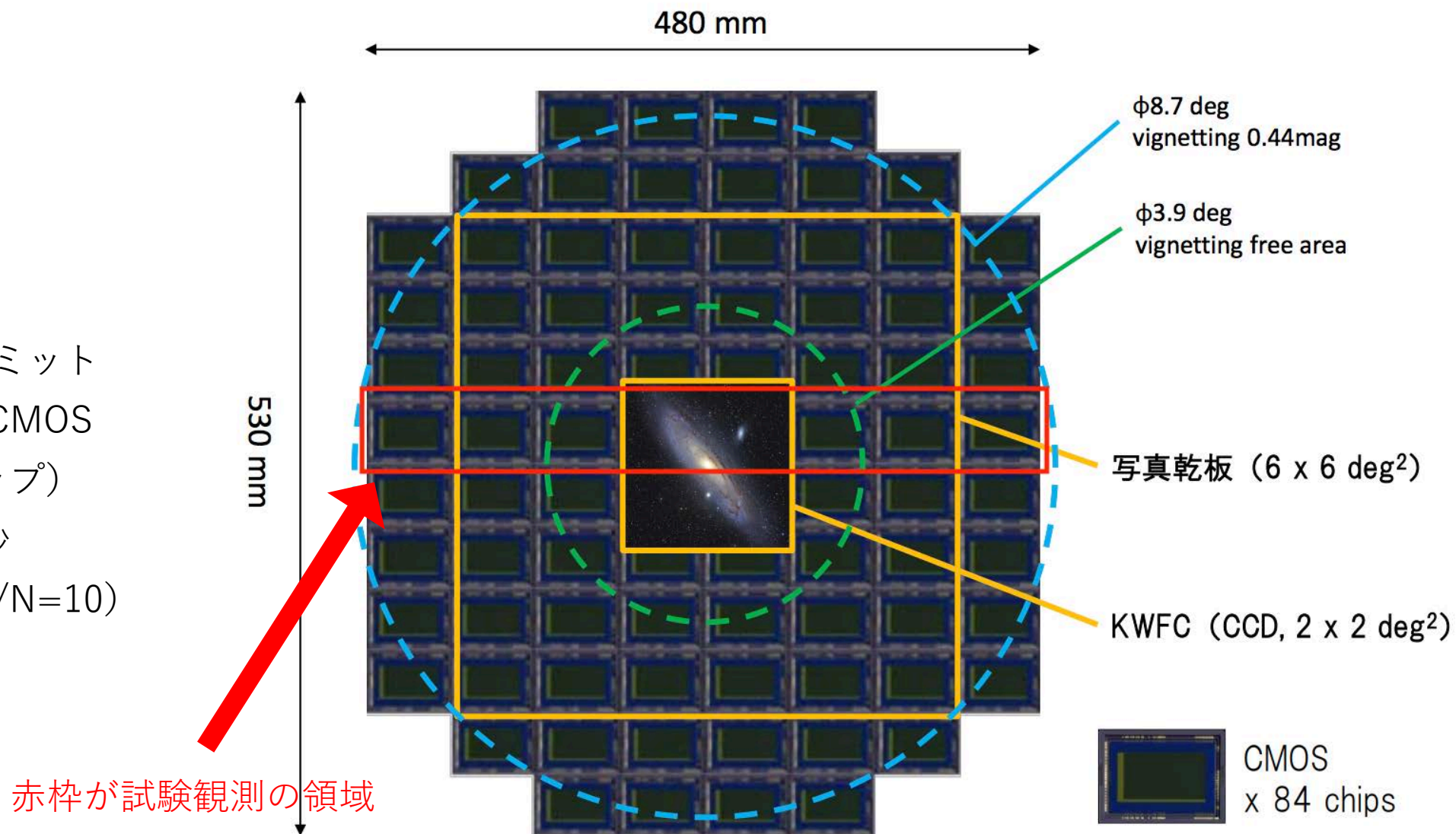
- **年**単位の恒星の変光→星の内部構造
- 数十**日**単位で輝く超新星爆発→距離、宇宙の加速膨張
- 数**時間**～**分**単位の減光→系外惑星の発見など

しかし

- 数**秒**～数十秒スケール→??? まだよく分かっていない

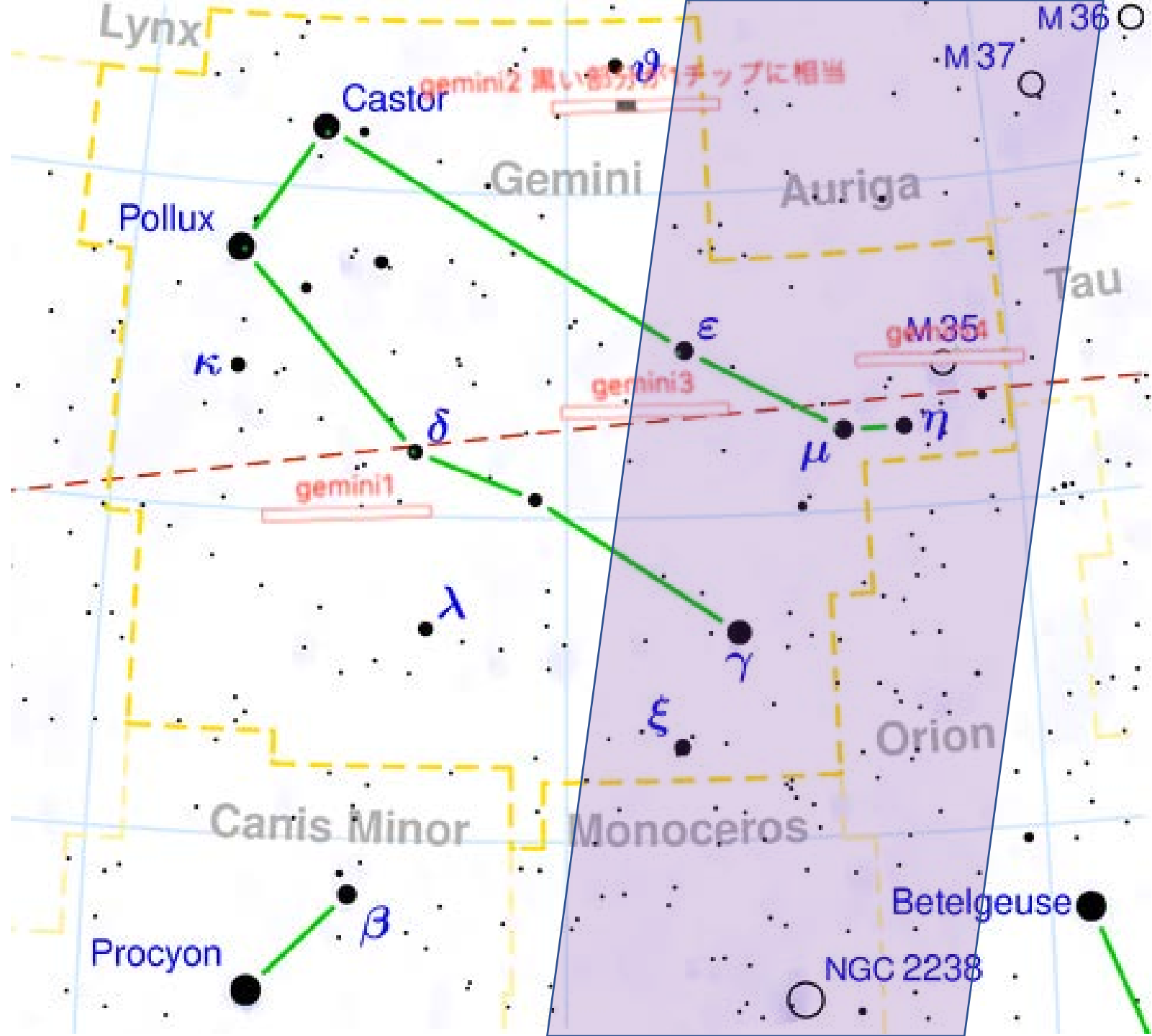
観測機器

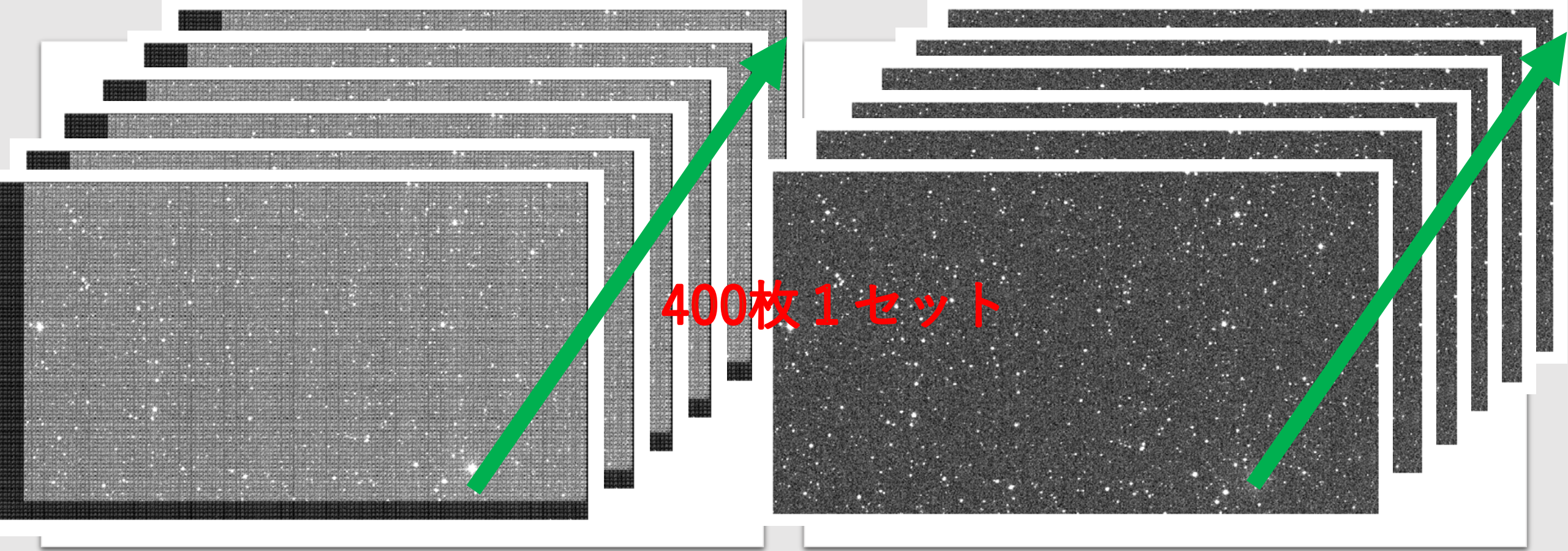
- Tomo-e Gozen
- 望遠鏡：木曾105cmシュミット
- センサ：35mm Full HD CMOS
- 視野：20 deg² (全84チップ)
- フレームレート：2枚/1秒
- 限界等級：17.6mag (S/N=10)
- 2018年運用開始予定



解析データ

- Tomo-eの試験観測データ
- 観測日：2015年12/1, 12/11
- **ふたご座の内 4 視野分**
($\sim 1.92 \times 4 \text{ deg}^2$)
- 赤い枠が観測領域
- 銀河面で星が多い (図の紫がかった部分が銀河面)
- フィルターなし





一次処理（バイアス・ダーク引き及びフラット割）前後の画像

- 画像は全8チップ中の1チップに対応している。~0.24deg²
- このフレームが0.5秒間隔で連続400枚（=200秒）撮られている。



星の検出と測光

検出

- SExtractor (Source-Extractor) で検出
- だいたい 1 画像 (1 センサ) に 900 個程度

測光

- 検出した星を SExtractor で測光
- Aperture 直径 = 平均 FWHM の 2.5 倍の初期設定

相対測光

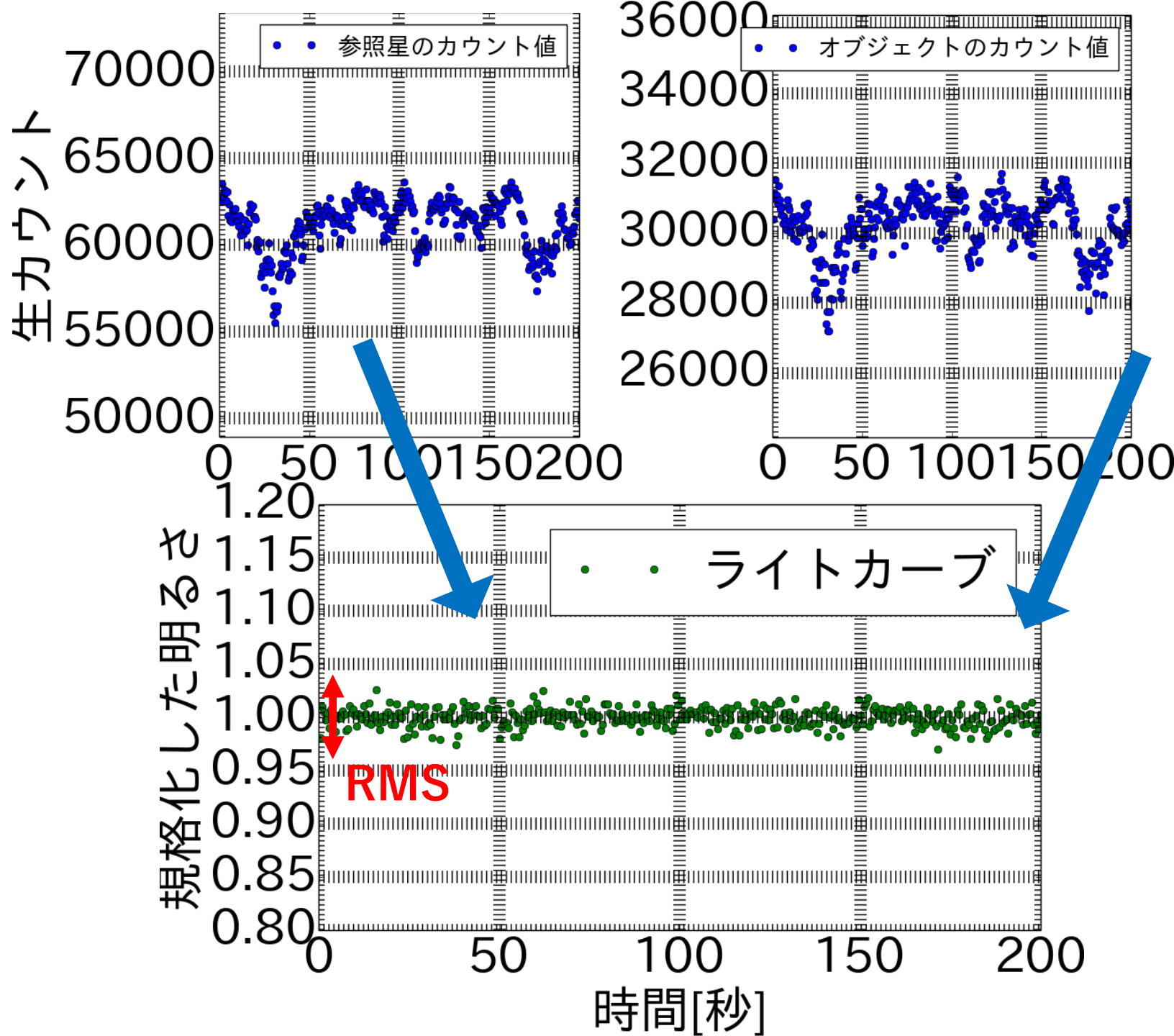
- 参照星とのカウント値の比を求める
- 変光している星を探し出す

相対測光

- 大気の影響（主に透過率の変化）で星の明るさは絶えず変化する（右上のグラフ）
- これを参照星のカウントで割ることで、星由来の変光（右下のライトカーブ）を見ることができる
- ただし、これは大気の影響が画像内ではほぼ一定である場合に有効

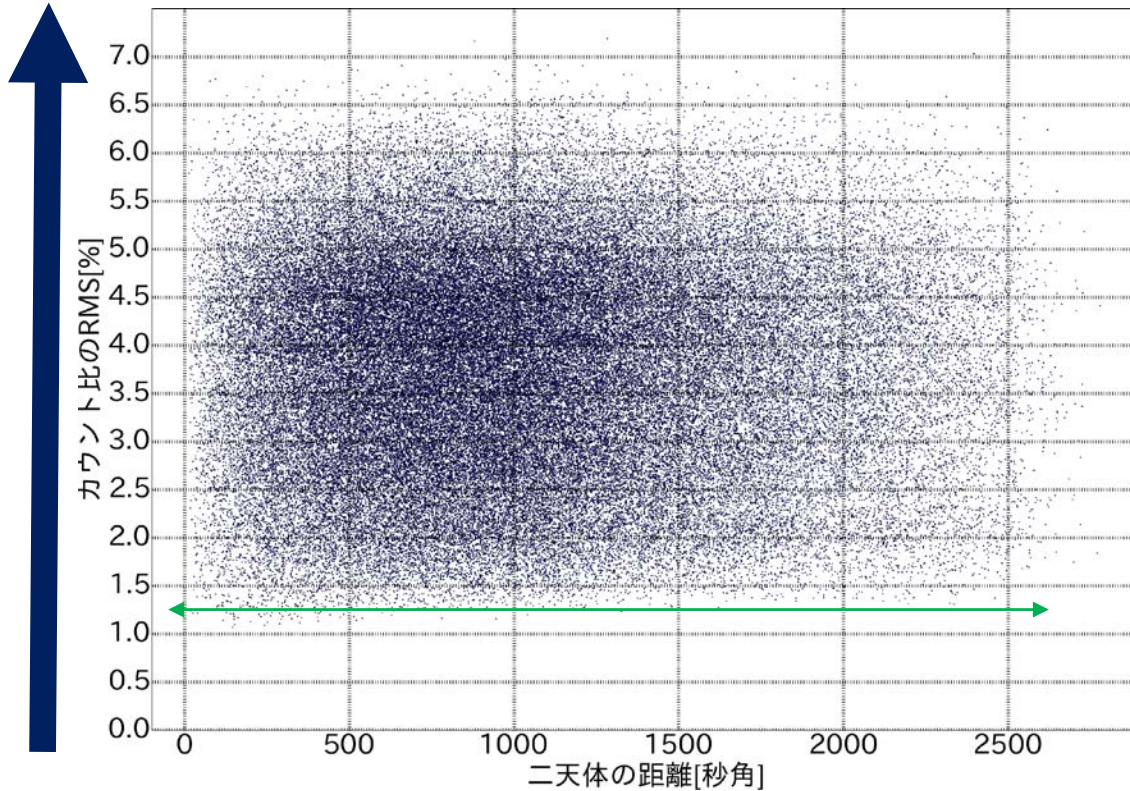
定義

- $\text{RMS} = \text{標準偏差} \div \text{平均値}$ （1に規格化）
- $\text{星の明るさ} = \text{オブジェクトのカウント値} \div \text{参照星のカウント値}$

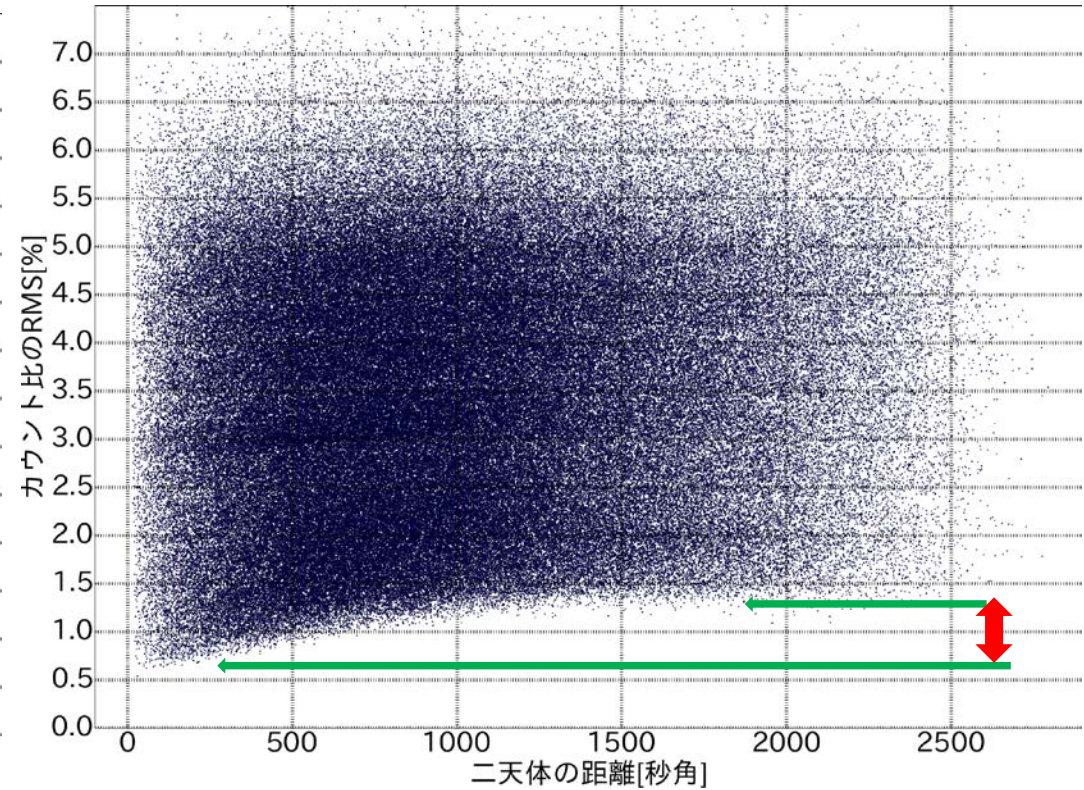


画像内の二天体のRMSと距離の関係

距離が近くなってもRMSの最小値がほぼ変わらない例



距離が近くなるとRMSが小さい組み合わせが出現する場合



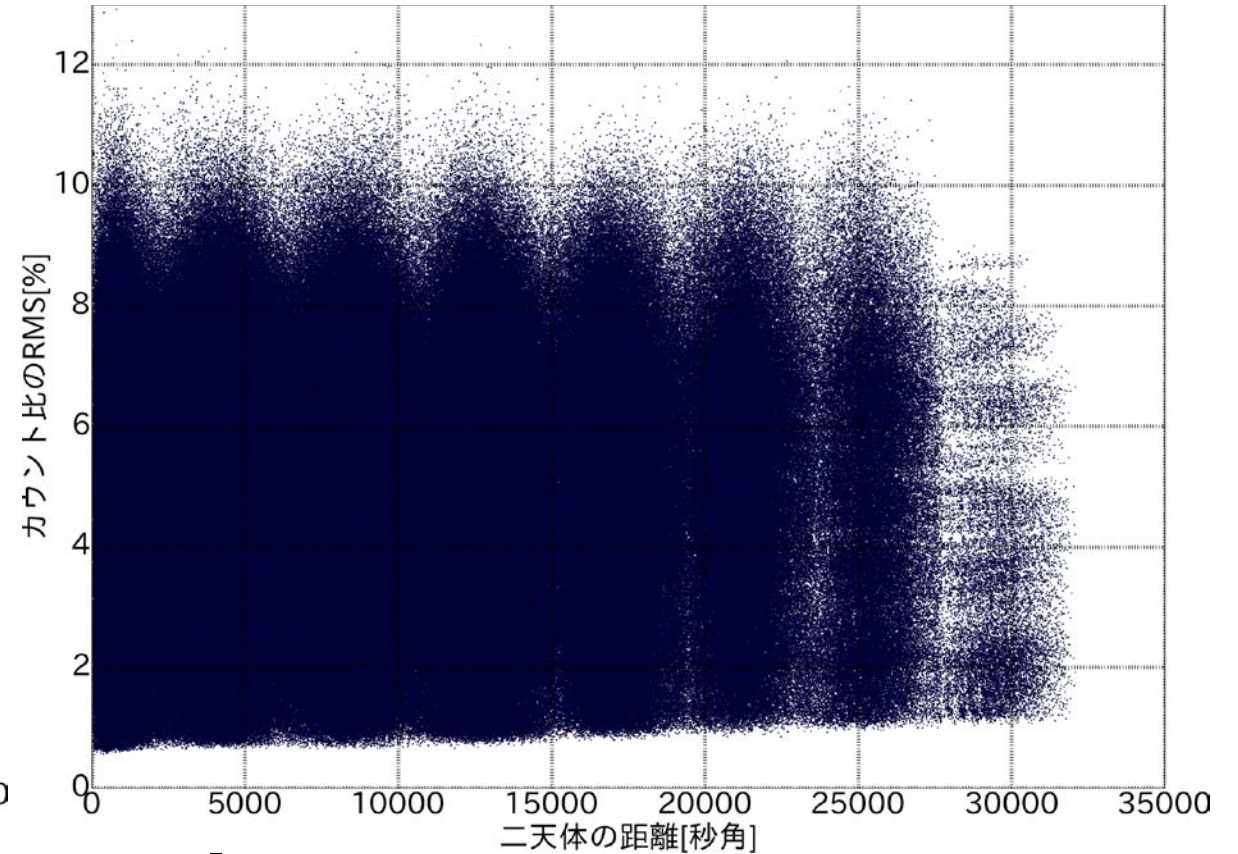
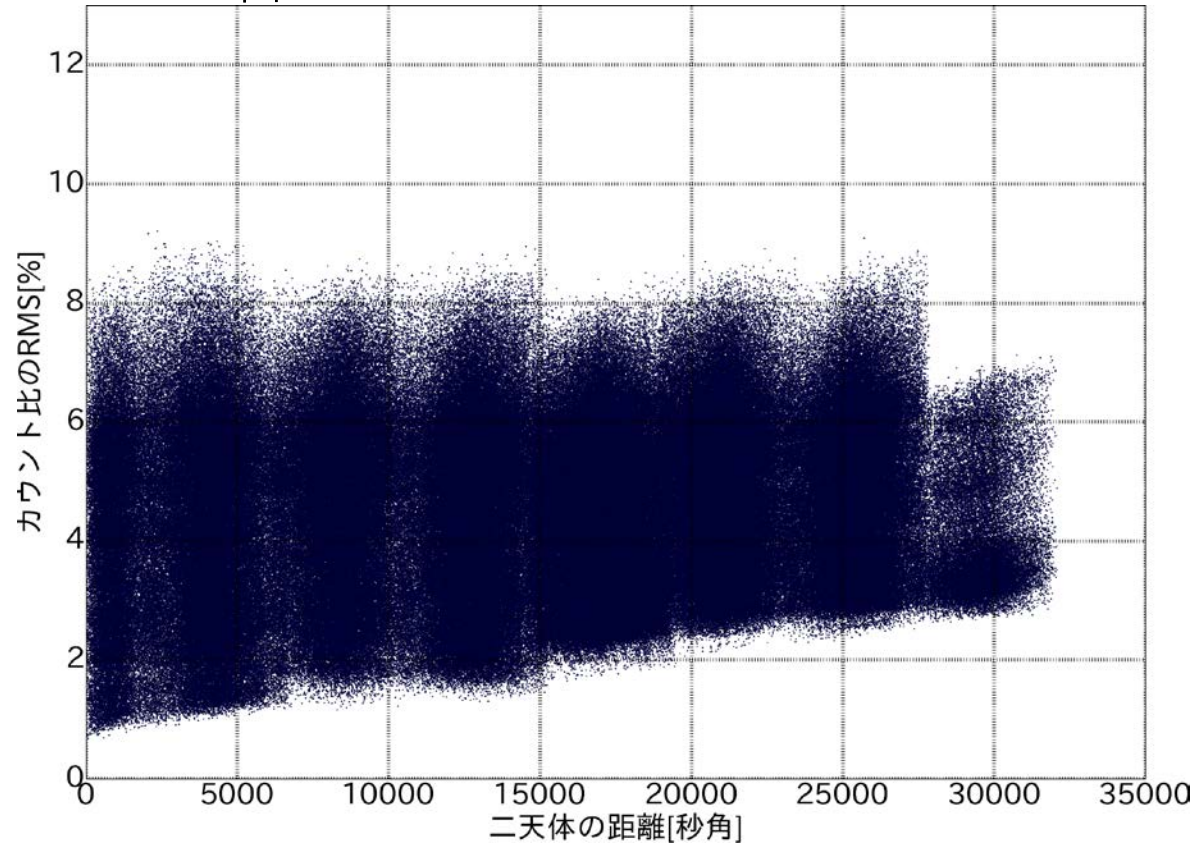
縦軸は星の暗さに対応

結論：どれだけ距離が離れても大気影響によるノイズ成分は1.5%程度である
赤い矢印がその度合いを示す

全チップで同じ参照星を使えるか

Gemini 4-4 (M35) の例

→Aperture($2.5 \times \text{FWHM}$)を広げればできそうだが、ノイズが増える



Apertureを
1.5倍

距離が離れた場合のRMSの変化

前の図の赤い矢印の幅

	Chip 0	Chip 1	Chip 2	Chip 3	Chip 4	Chip 5	Chip 6	Chip 7
G1-1	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.6-1.6	1.7-1.8
G1-2	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.7	1.6-1.7	1.7-2.0
G2-1	0.8-1.2	0.7-2.0	0.7-1.4	0.7-1.1	0.6-1.6	0.8-1.5	0.8-1.5	0.8-1.4
G2-2	0.7-0.9	0.7-1.0	0.7-0.8	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.8-0.8	0.7-0.8
G3-1	1.0-1.2	1.1-1.4	1.0-1.2	1.0-1.2	1.0-1.4	1.1-1.3	1.1-1.4	1.2-1.5
G3-2	1.0-1.5	1.1-1.7	1.0-1.5	1.0-1.3	1.0-1.6	1.1-1.8	1.1-1.7	1.1-1.7
G4-1	0.7-1.0	0.7-1.0	0.7-1.4	0.6-1.1	0.6-1.3	0.8-1.3	0.8-1.4	0.8-1.5
G4-2	0.7-0.9	0.6-0.9	0.6-1.0	0.6-0.9	0.5-1.1	0.7-1.1	0.7-1.0	0.8-1.1

どれだけ距離が離れても大気影響によるノイズ成分は1.5%程度である

- 緑：どこまで行ってもRMSは1%を下回る。極めて安定している状態。
- 赤：遠くに行くと二天体のRMSが大きくなる

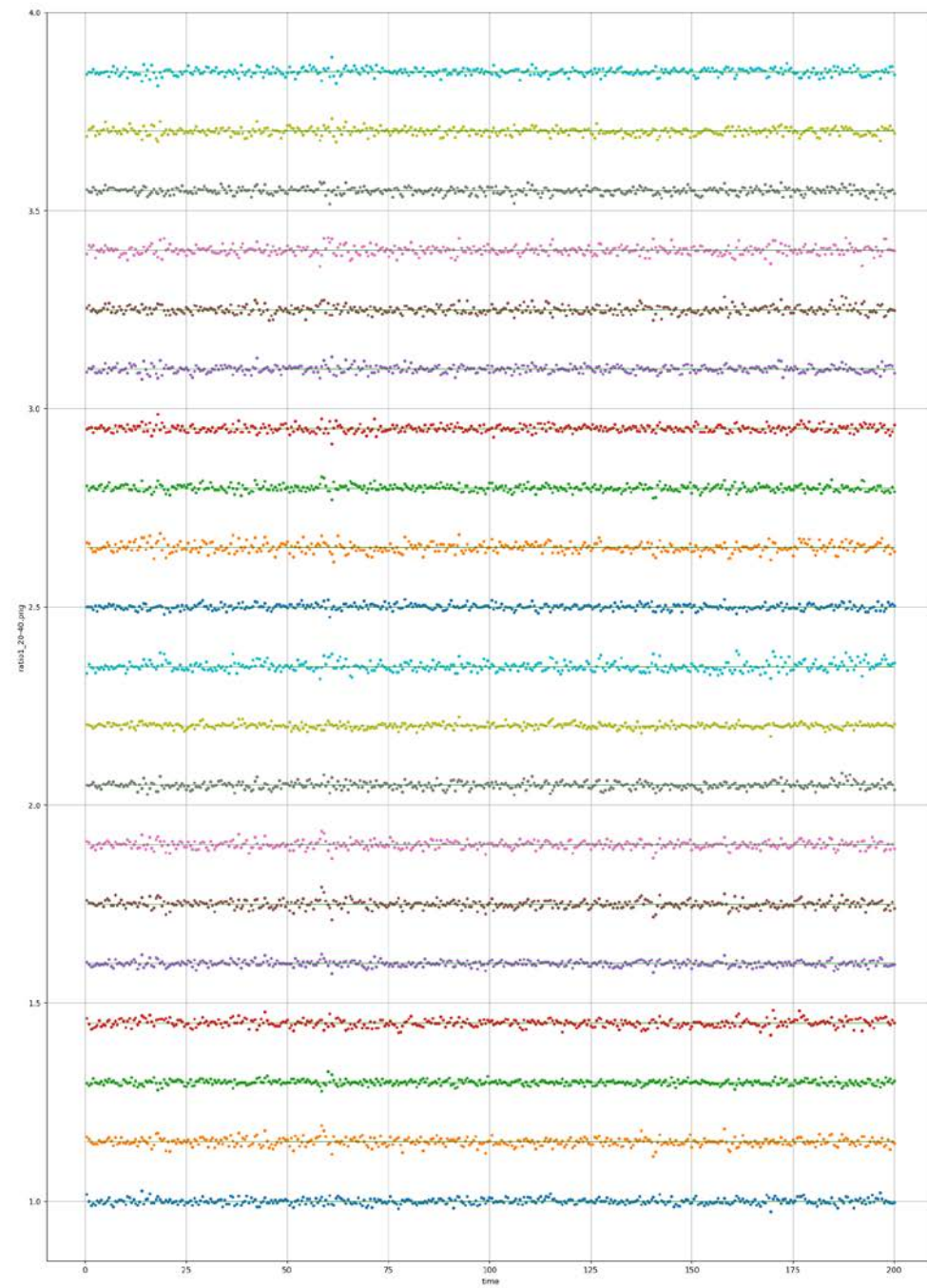
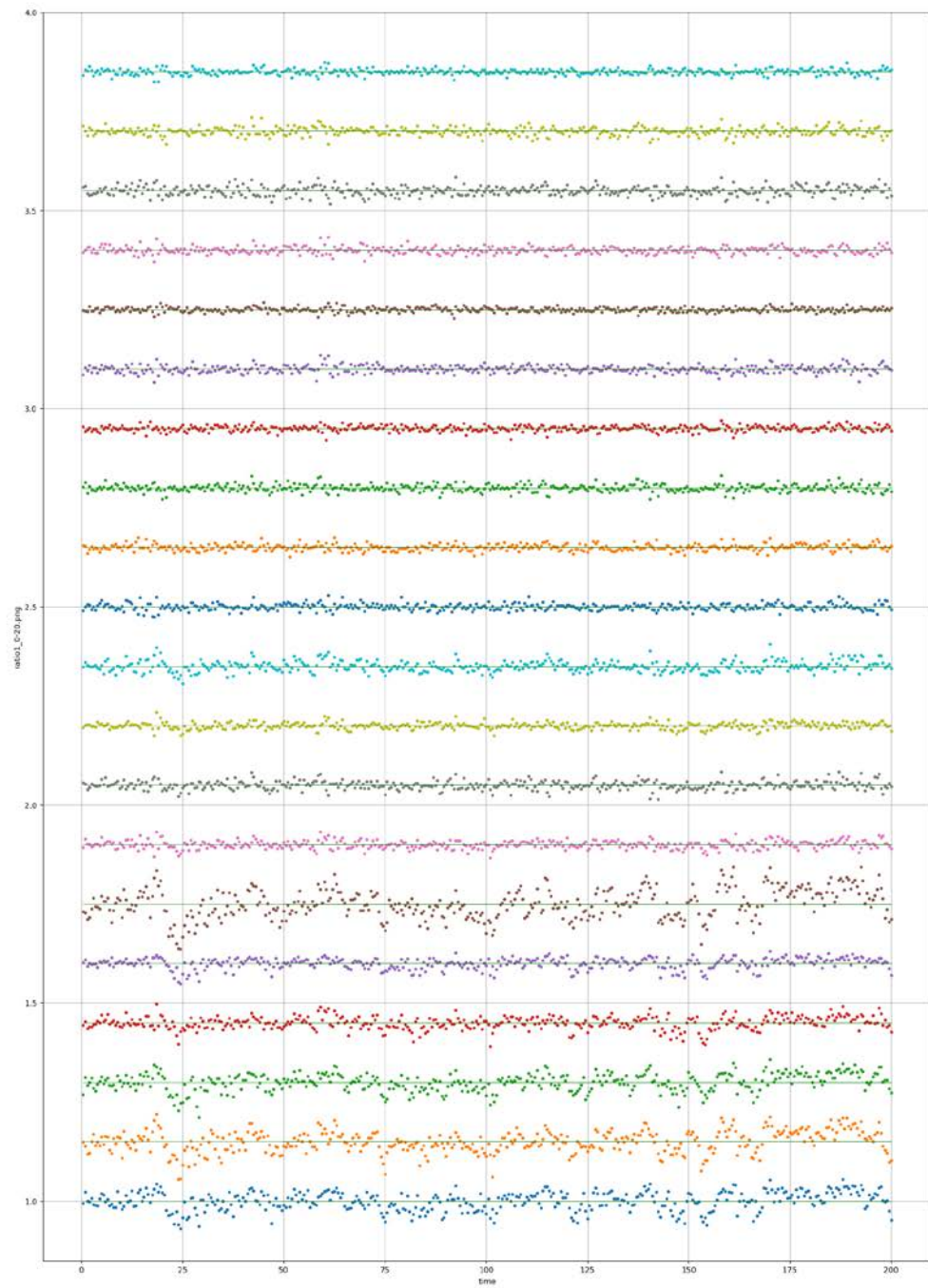
参照星を選び、星本来の明るさを求める

- ・ カウント値の上位11－70位の60個の明るい星について

$$\text{カウント比} = \frac{\text{カウント値}[60個の内の一つの星]}{\sqrt[59]{\text{残り59個のカウント値を掛け合わせた値}}}$$

- ・ この比のRMSが小さくて安定している星を3つ探し、最後はライトカーブのグラフを見て選んだ。

$$\rightarrow \text{オブジェクトの明るさ (時間軸に並べるとライトカーブ)} = \frac{\text{カウント値}[カタログ内のある星]}{\sqrt[3]{\text{参照星3つのカウント値を掛け合わせたもの}}}$$

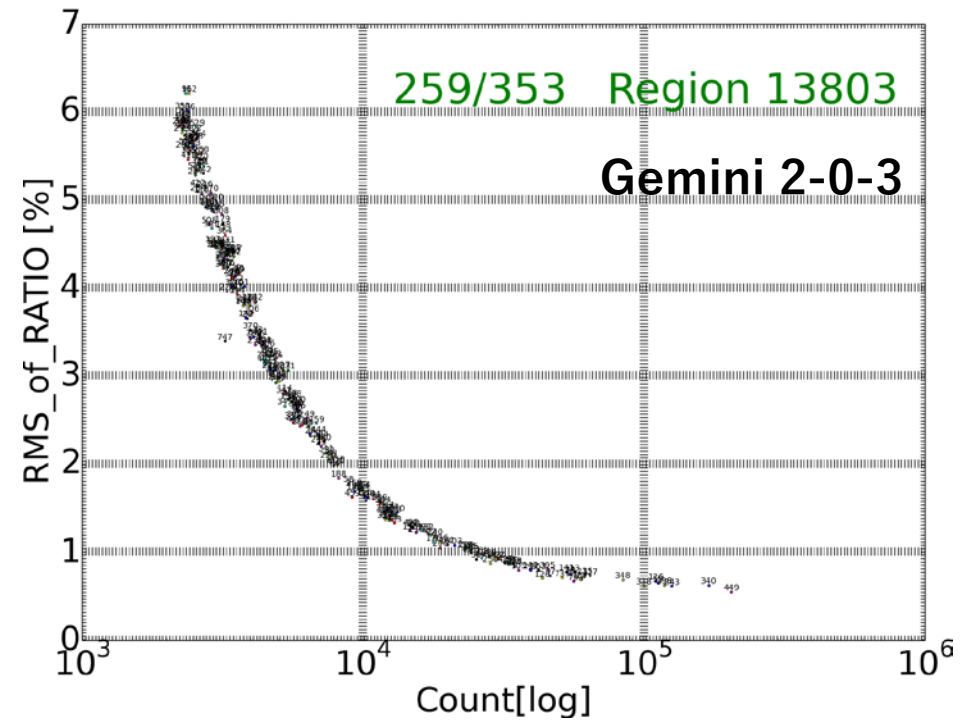
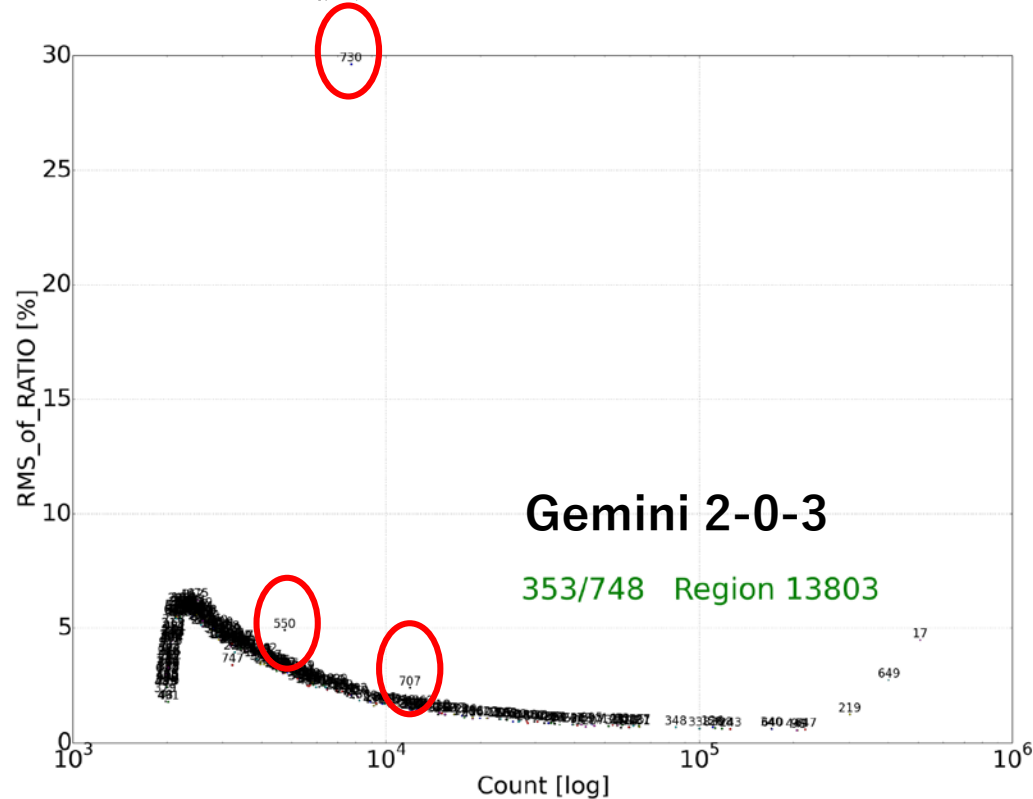


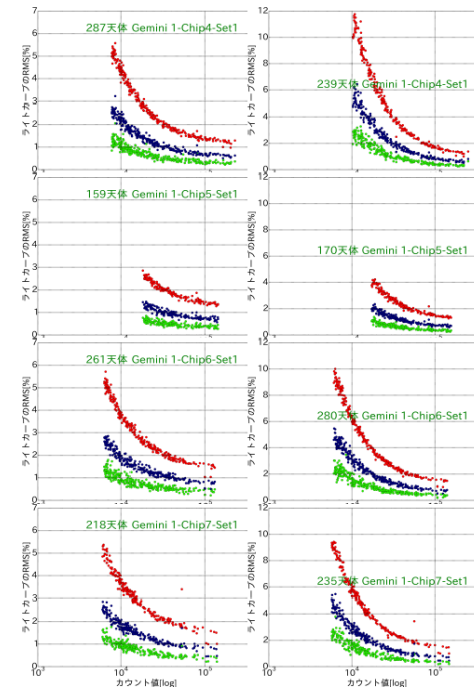
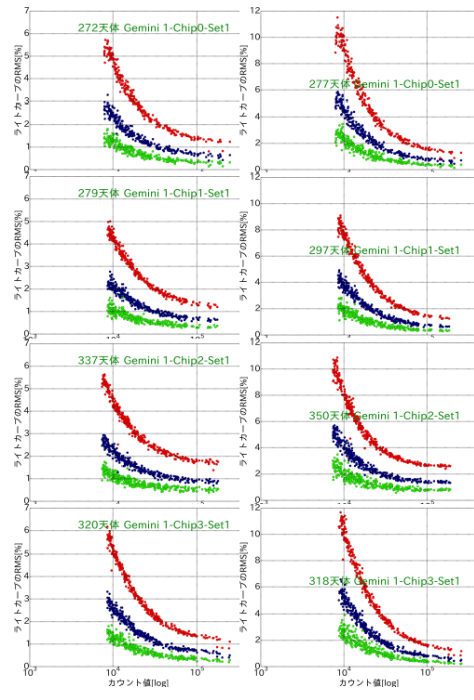
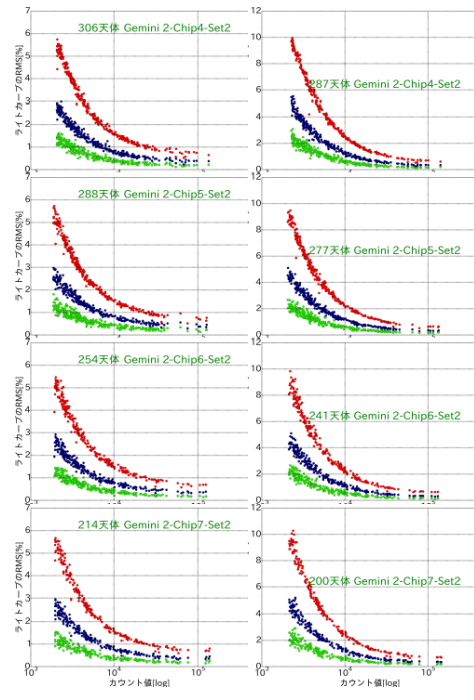
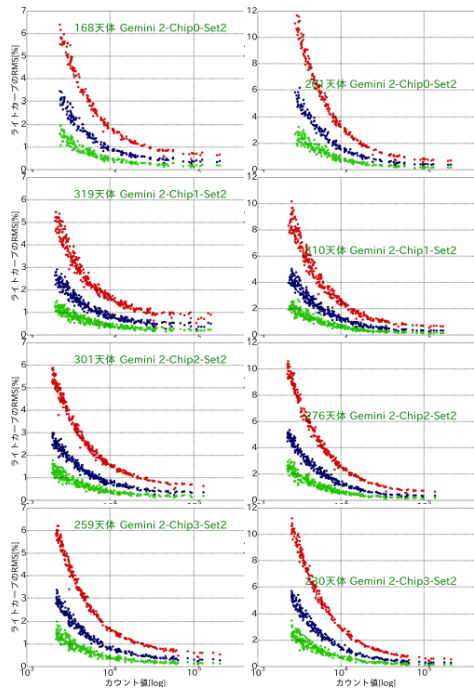
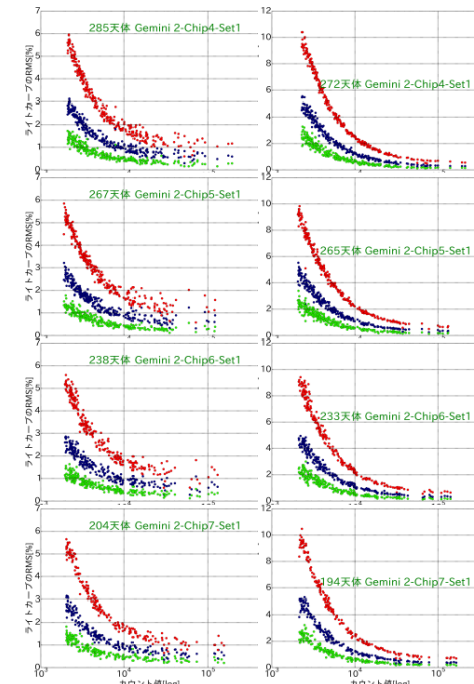
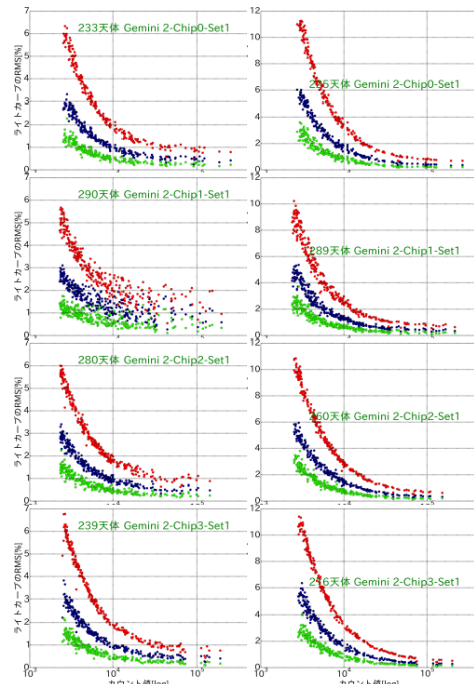
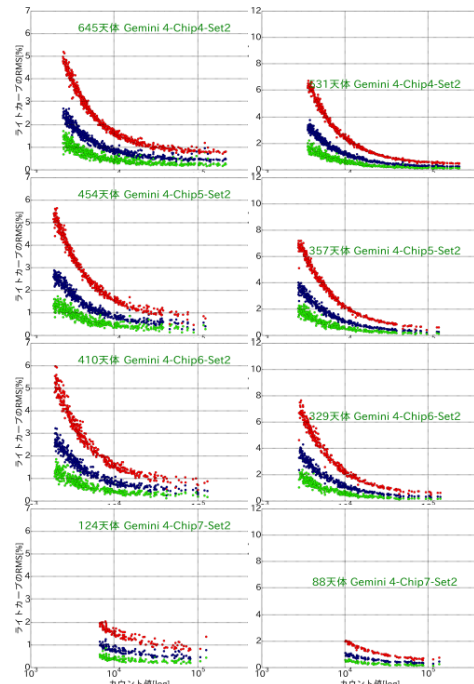
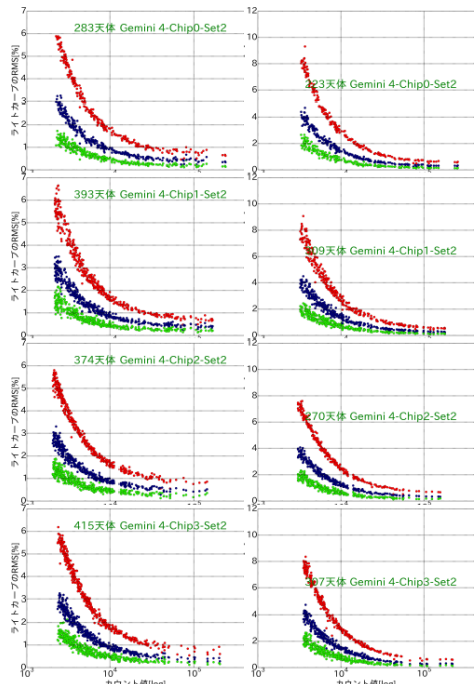
RMSーカウント値のグラフをかく

- オブジェクト外の明るさ（ライトカーブ）のRMS =

$$\sqrt{\left(\frac{1}{S/N}\right)^2 + \text{参照星由来の成分}^2 + \text{オブジェクトの変光成分}^2}$$

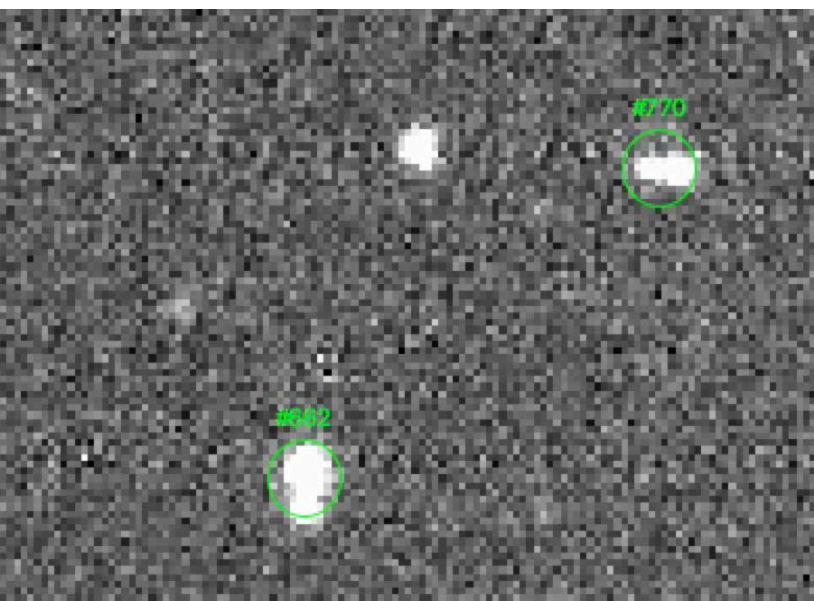
- 同じカウント値の星は同程度のRMSになるはず
- 赤丸は全て明らかな偽物（次ページで説明）。これらを取り除くと右図になって変光した星があれば検出できる



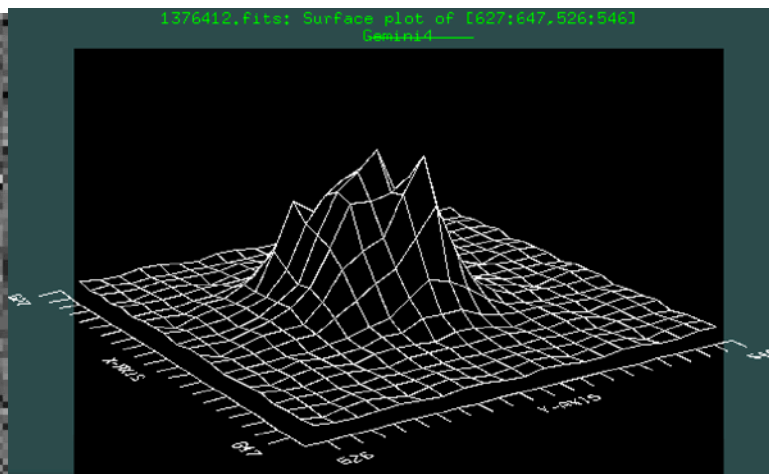


などなど

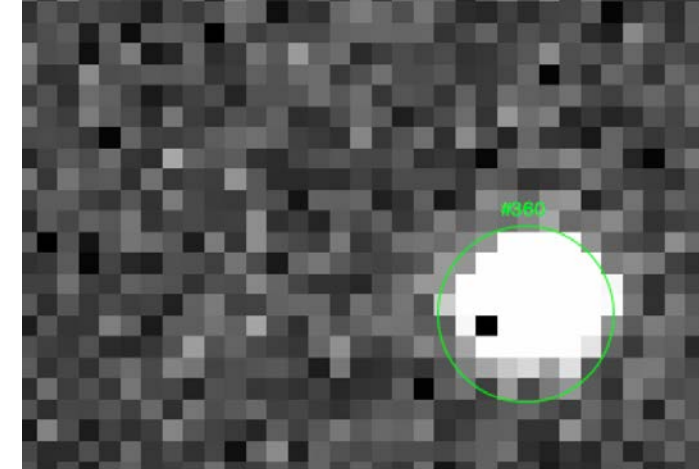
明らかにわかる偽の変光の例



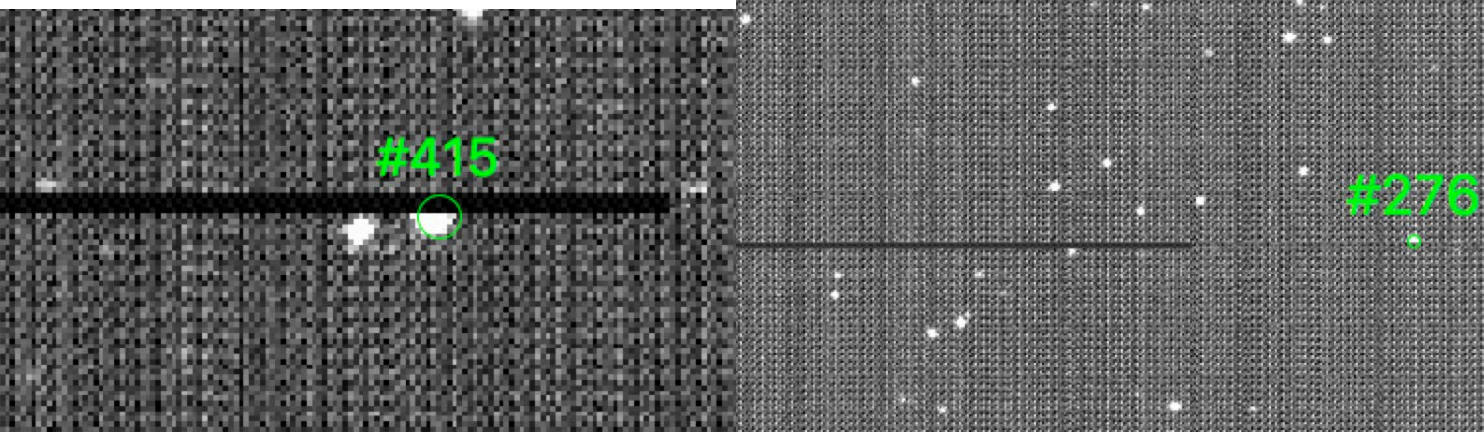
1 : 二重になっている星



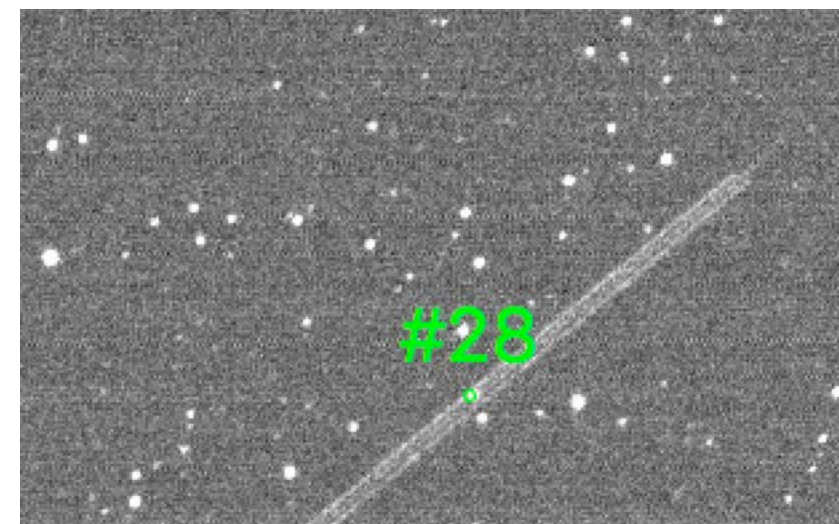
2 : FWHMが異常に高い星 (~周囲の2倍)



4 : ピクセルが死んでいた



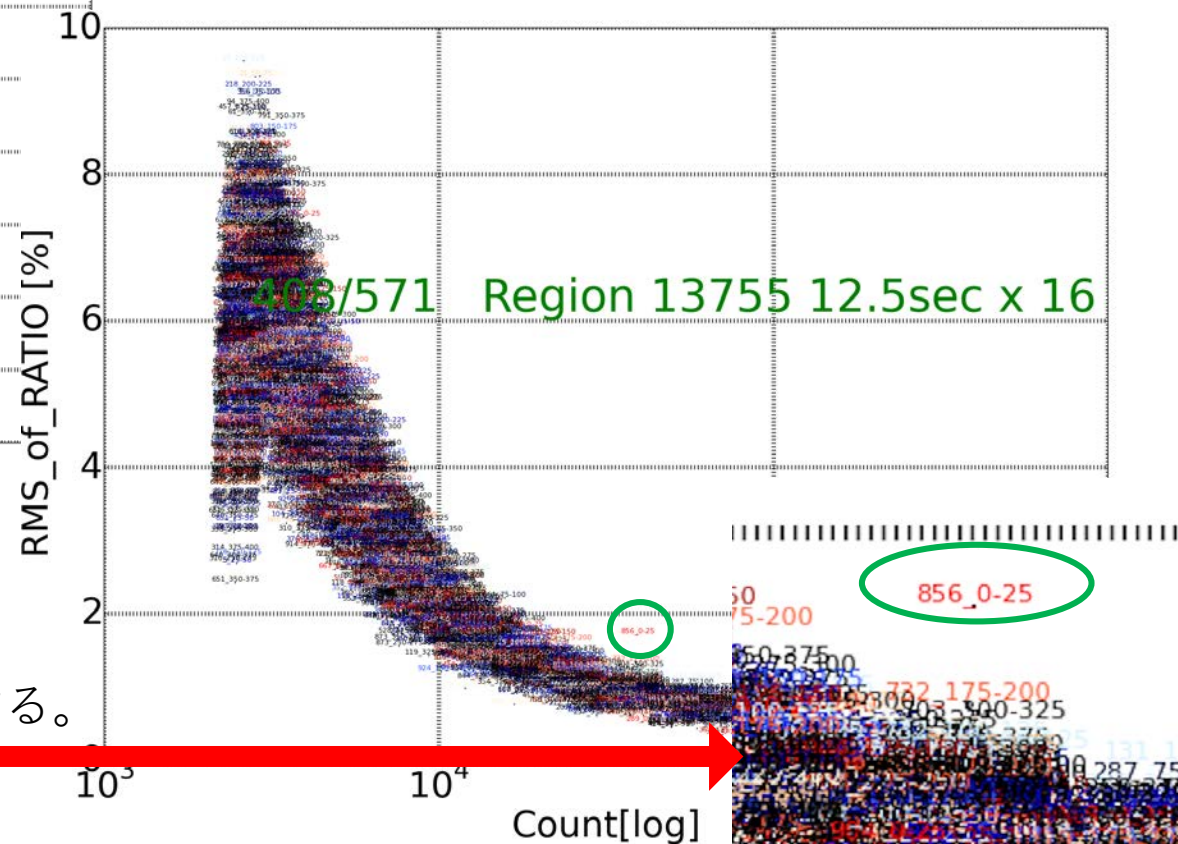
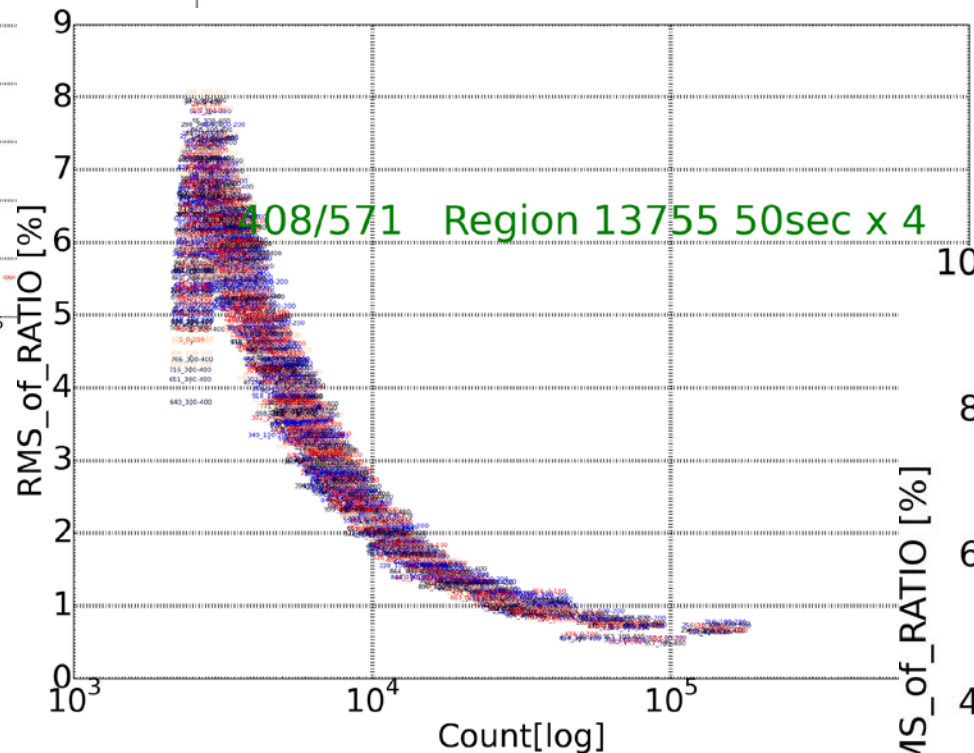
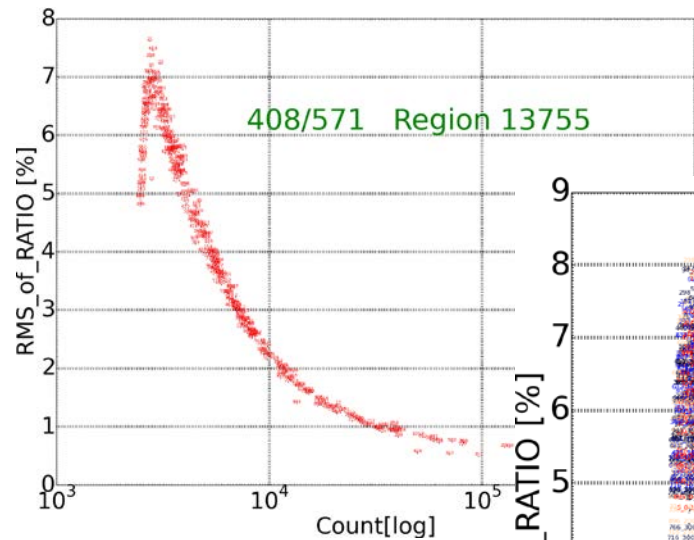
5 : 読み出し時の不具合 (画像は1次処理前)



3 : 流星が掛かった

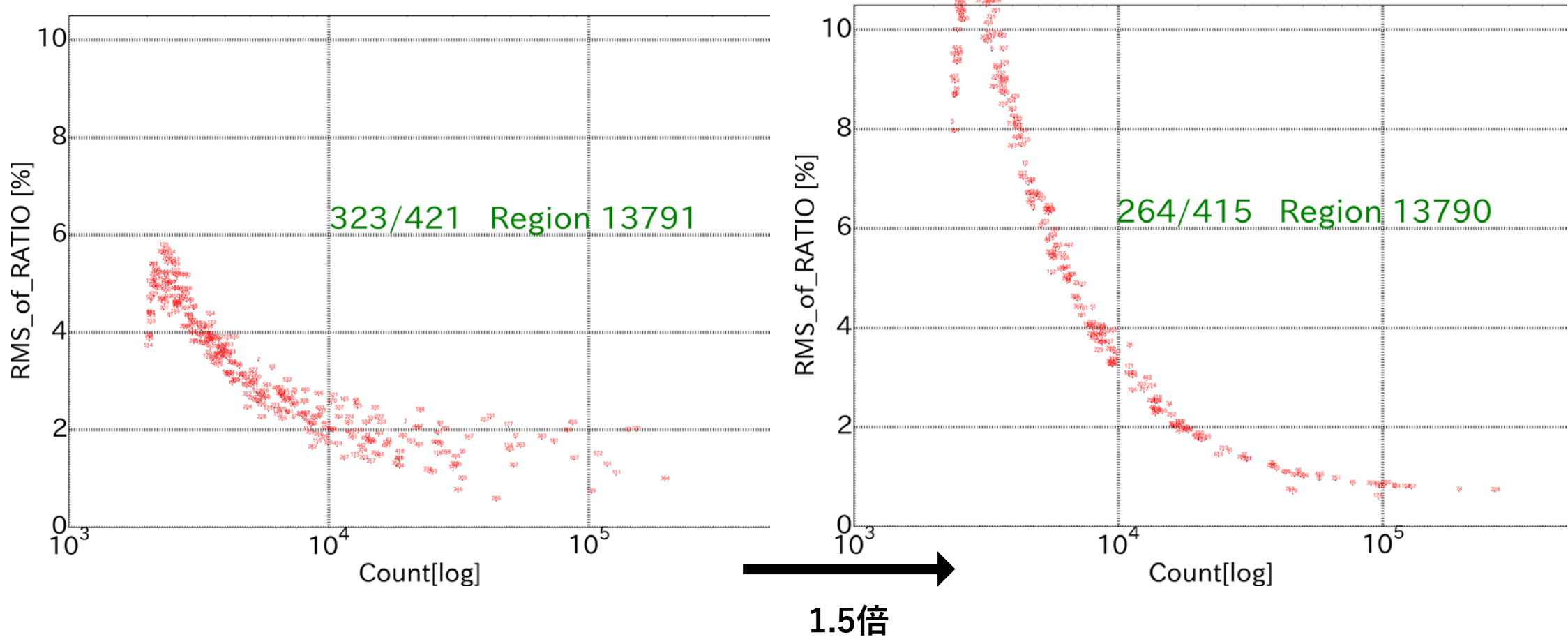
より小さな変光を探す

1. RMSを計算するタイムスケールを変えて埋もれた変光を探す



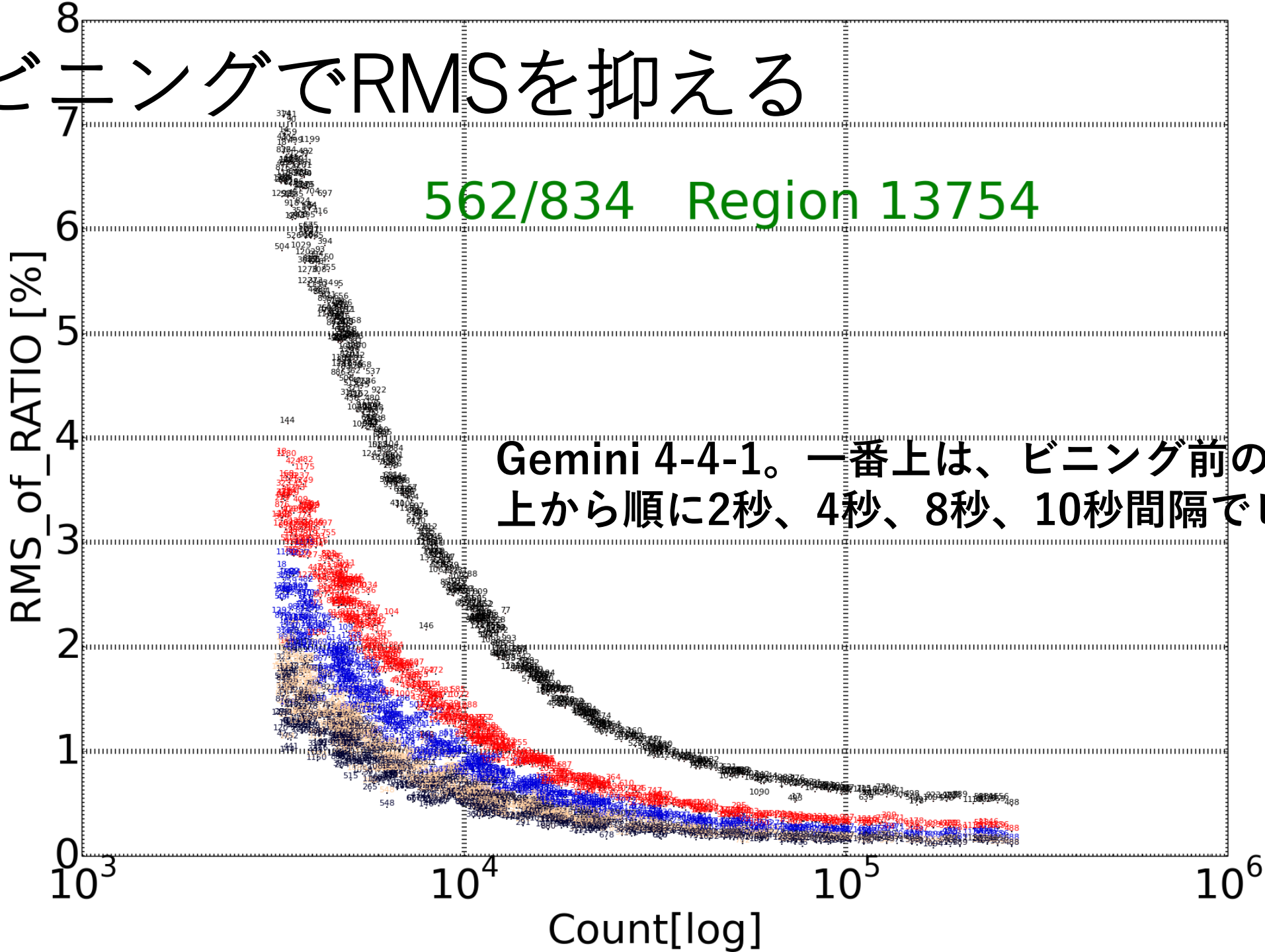
200秒のデータを分割して計算してオーバープロット。
左から順に200秒、50秒、12.5秒間隔のデータでRMSを計算する。

2. アパーチャーを変える



場所によっては明るい星で、アパーチャーが足りなくなる。(大気によるシーイングの変化が大きく出るため) 上の図でわかるように、暗い星のRMSは増えるが、明るい星では探しやすくなる。

3. ビニングでRMSを抑える

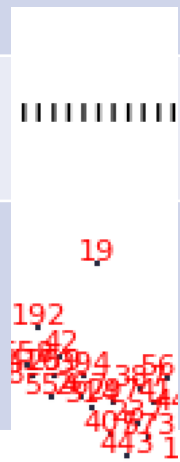


562/834 Region 13754

Gemini 4-4-1. 一番上は、ビニング前のもの。
上から順に2秒、4秒、8秒、10秒間隔でビニング

解析した天体の統計情報

	Gemini 1	Gemini 2	Gemini 3	Gemini 4
検出された星	5069	5572	9479	9304
変光天体を探した星	2251	2174	2997	3188
RMSが僅かに高かったが、原因が特定できなかったもの	10 (1)	15 (0)	26 (0)	18 (0)



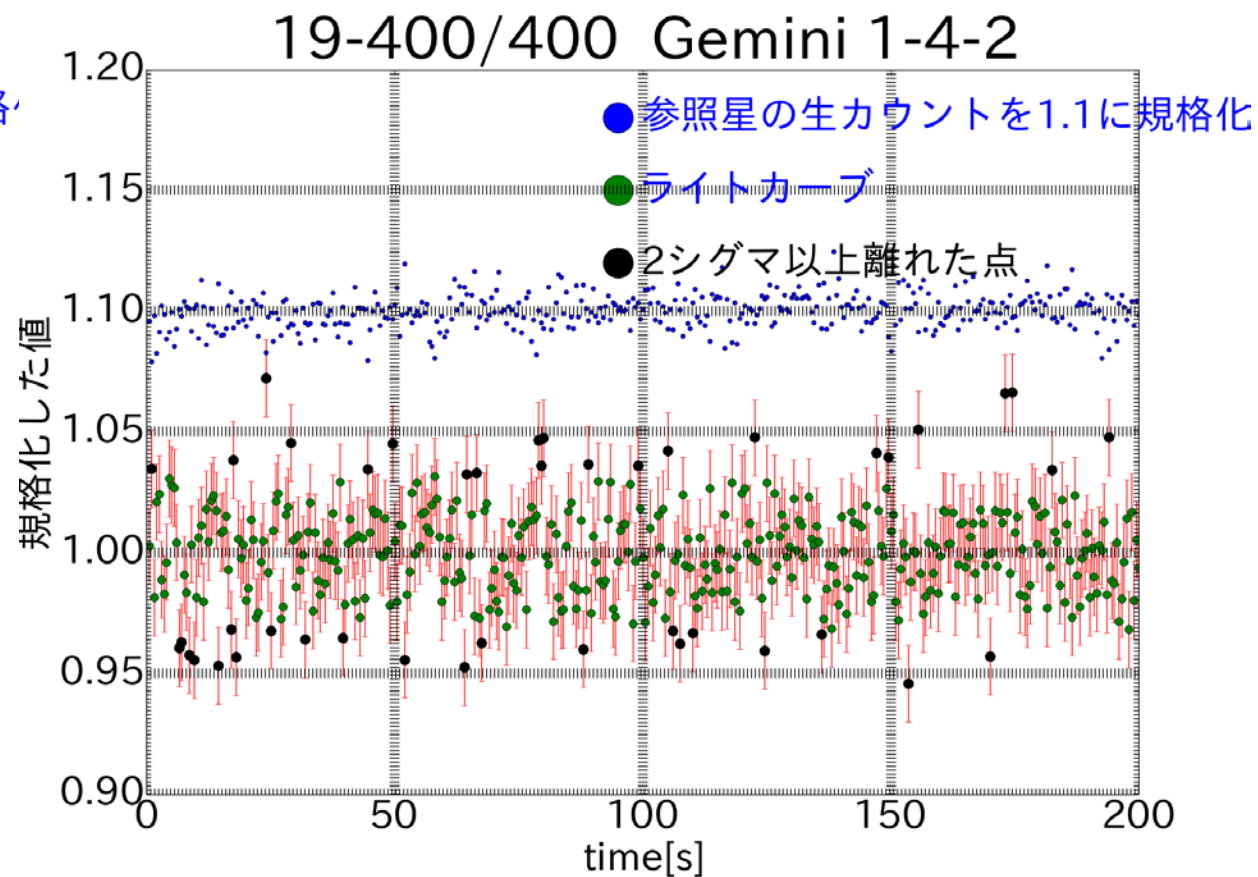
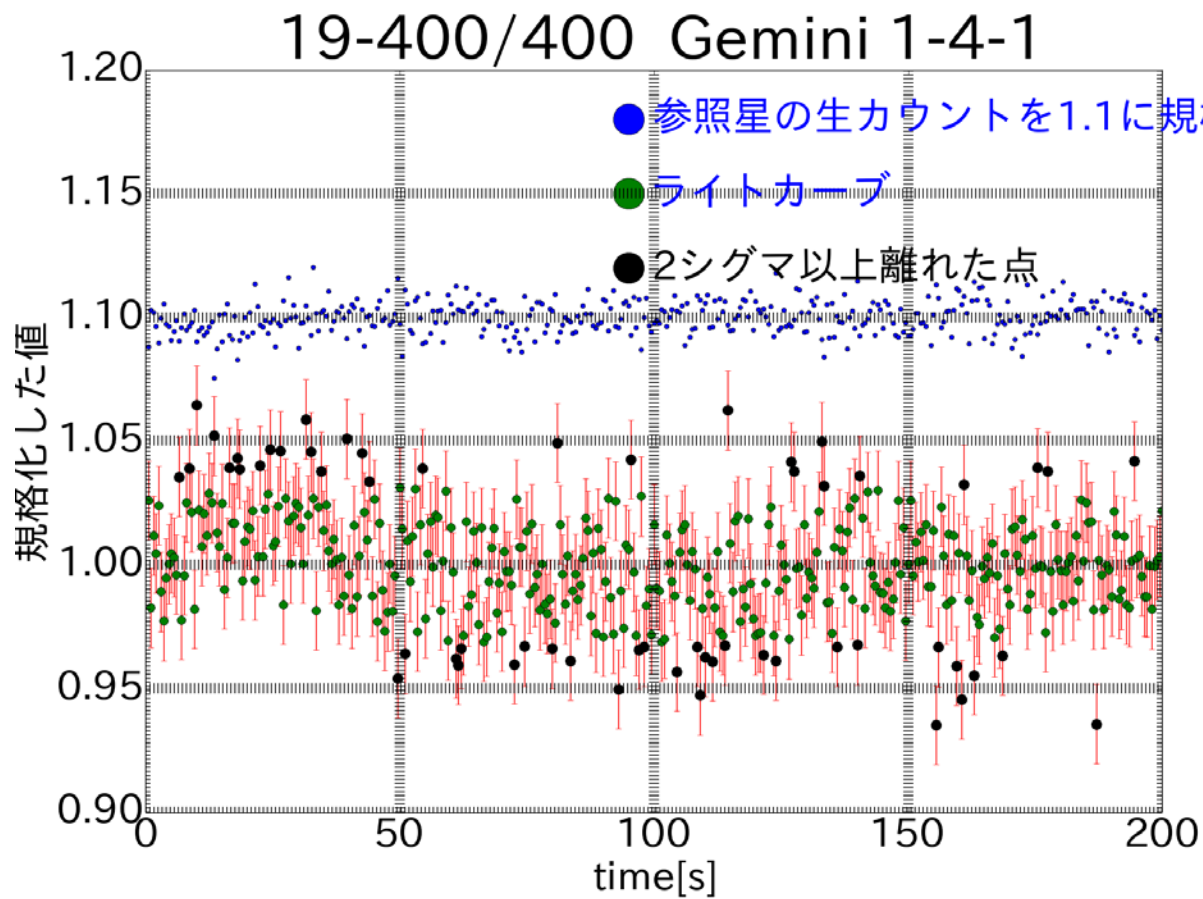
検出された星はおおよそ可視光で16.5~13.2等の範囲

- 赤色：SExtractorで検出された物の数（人工衛星なども含む）
- 緑色：そのうち相対測光し、ライトカーブのRMSを確かめた数
- 黒色：ライトカーブのRMSが同程度の明るさの星に対して僅かに（0.1~0.2%程度）高かったが、原因がわからなかったもの。特定のタイムスケールで変更しているというよりは、全体でバラツキが大きいものがほとんど。

→結果として200秒に対する変光成分として0.5%以上のものは一つもなかった。
 ただし、0.3%の変光成分が特定のタイムスケールに現れていそうな星が一つだけあった。

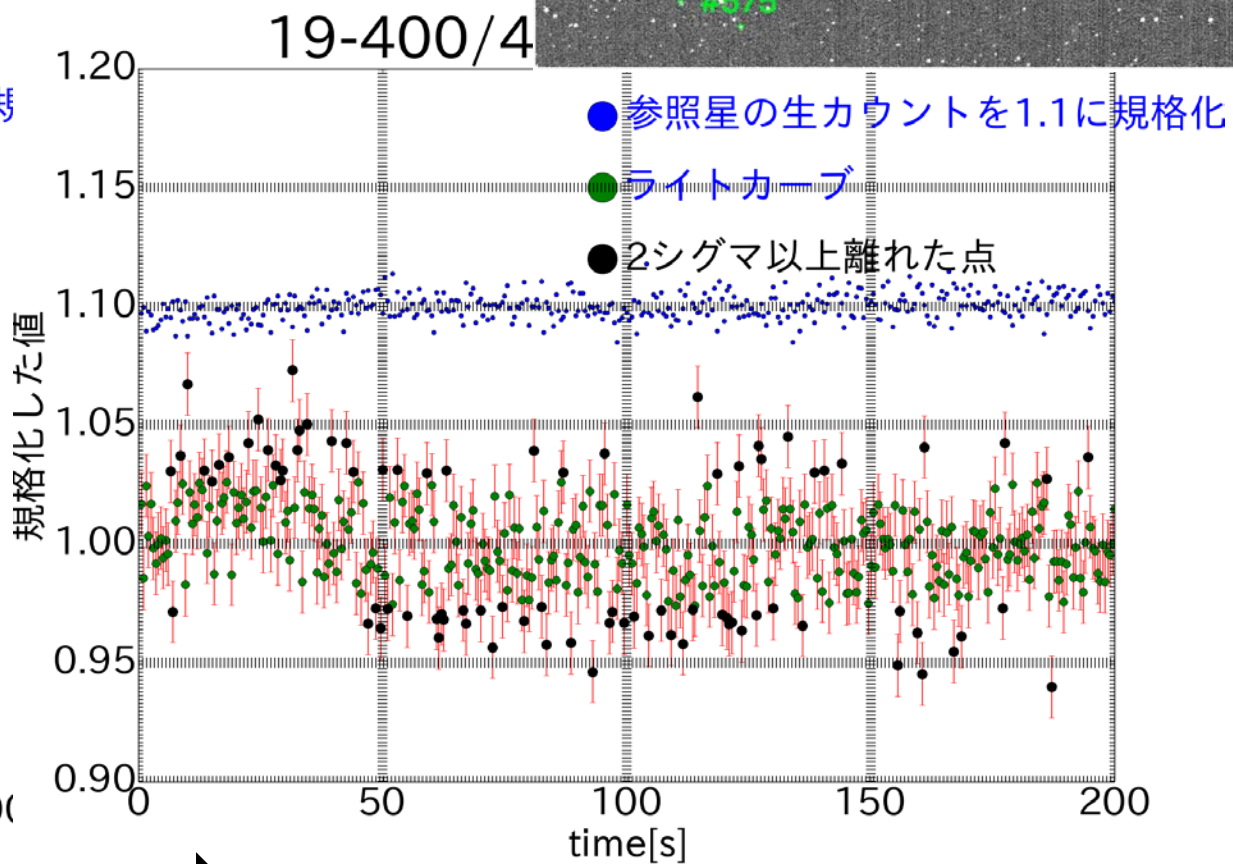
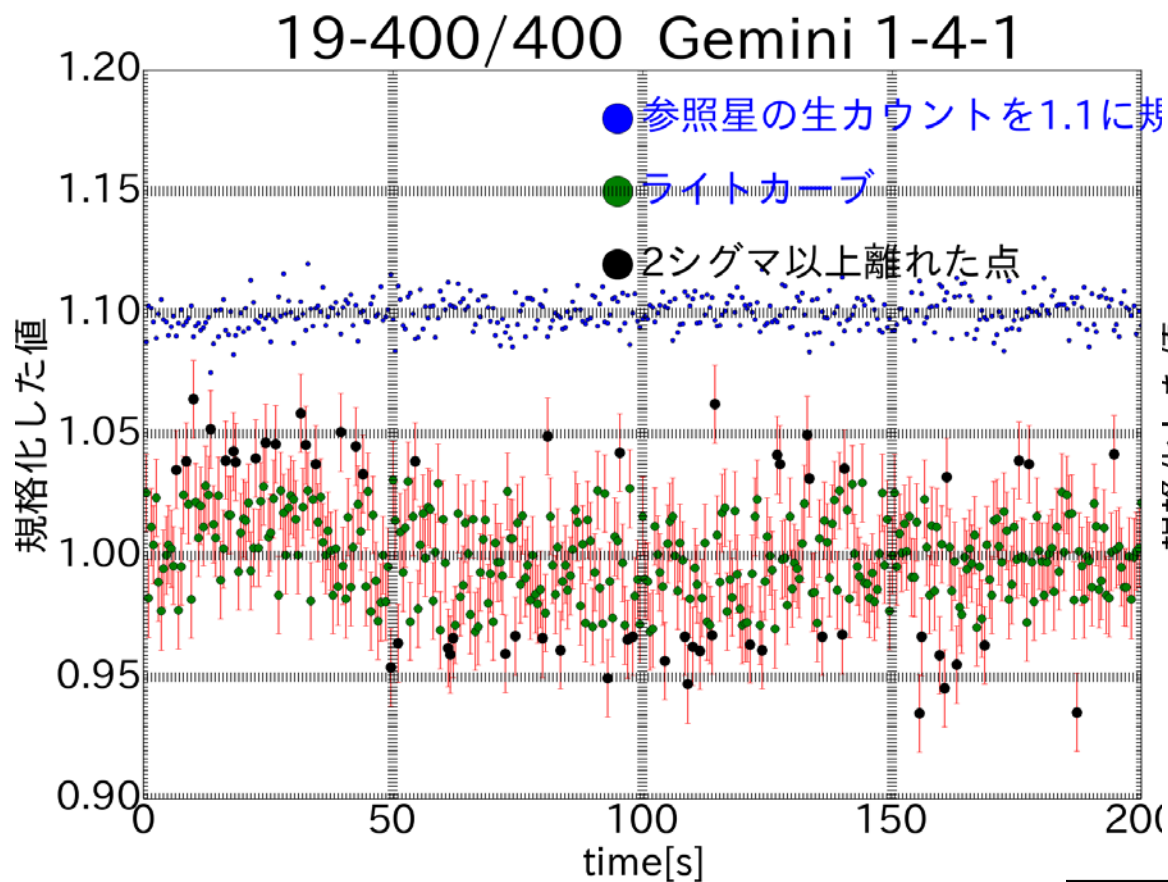
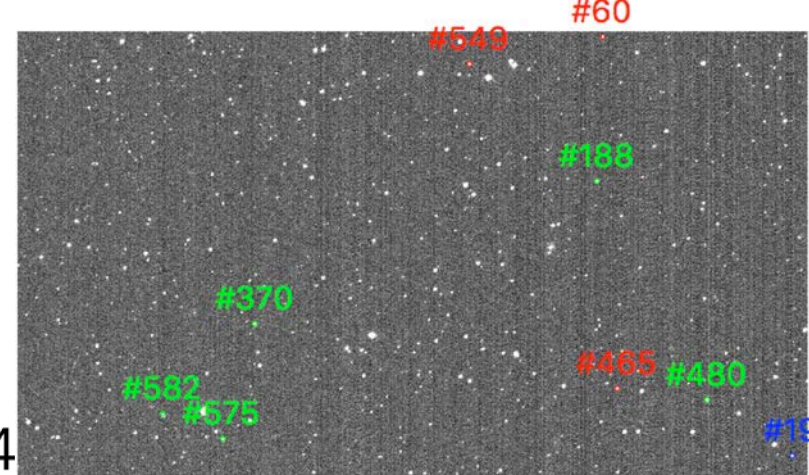
変光の疑いがあるGemini 1-4-1の19番

- 1セット目のみ0～50秒にかけて4%程度増光した。



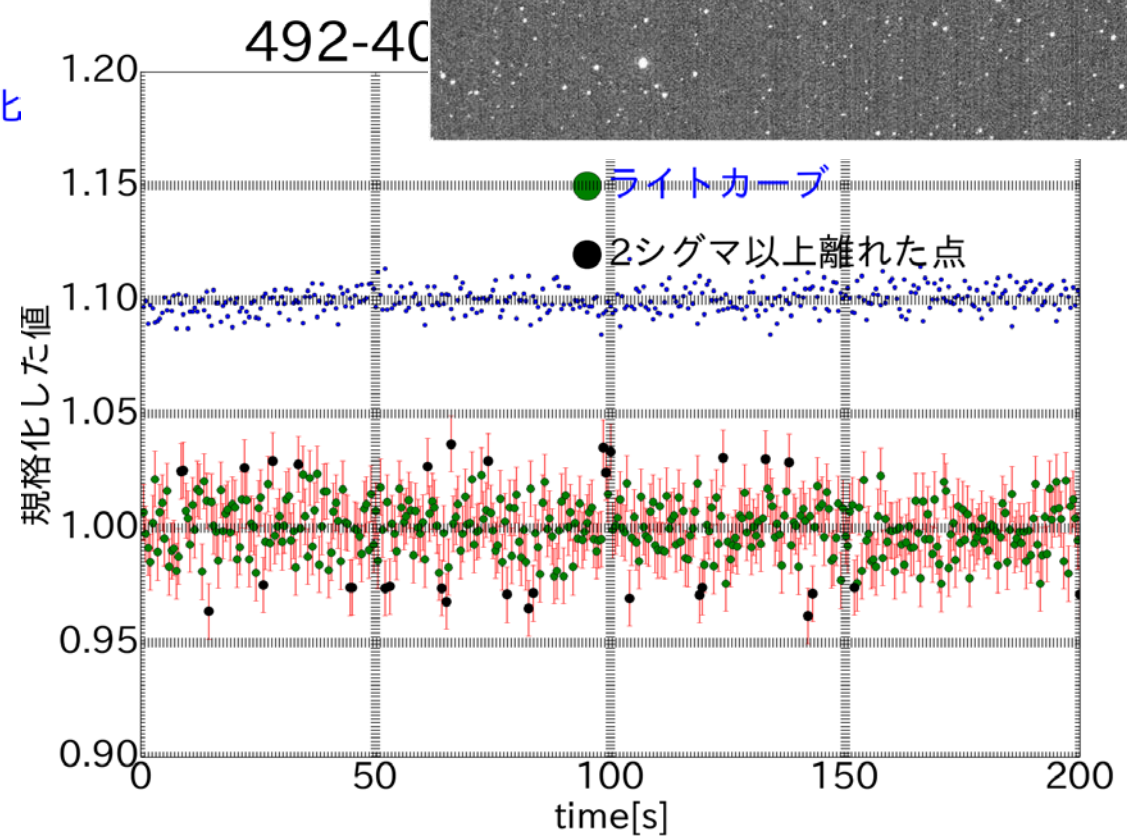
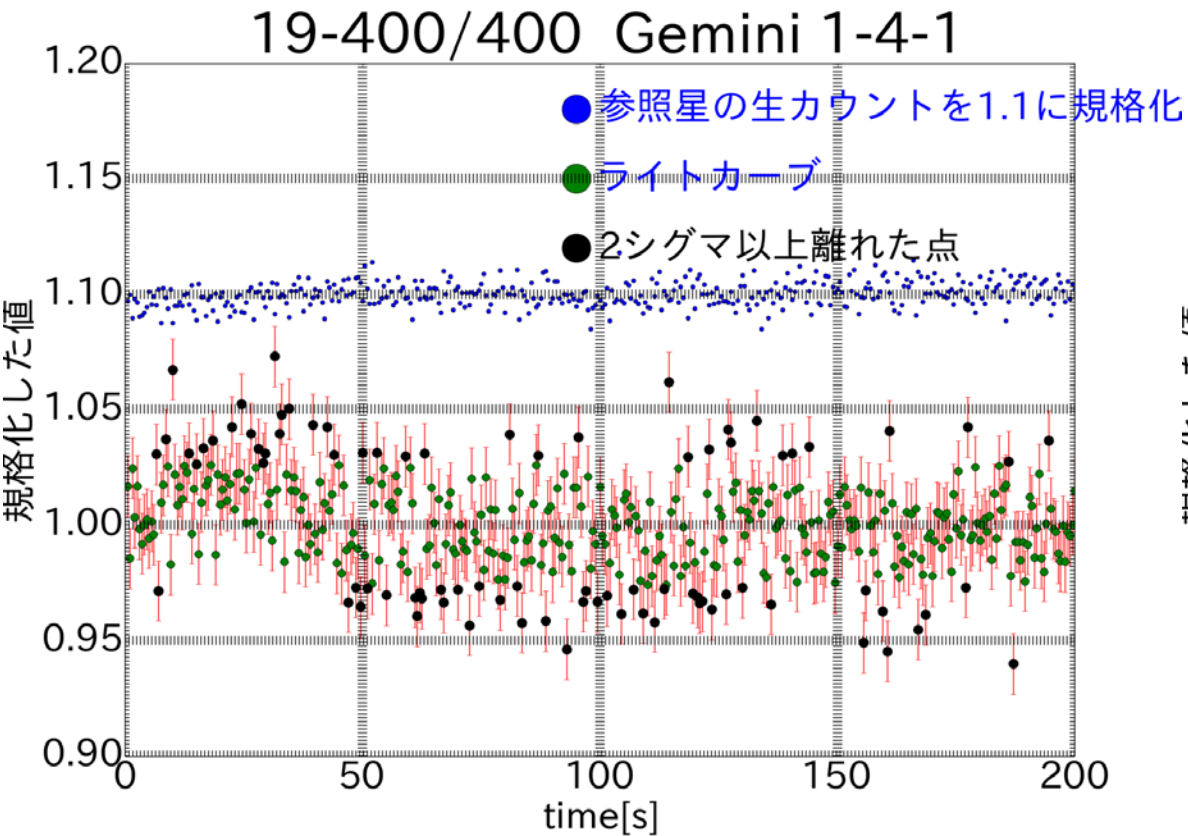
1セット目 (左) と2セット目 (右) の変化。

参照星を変えても同じ様子



参照星の組み合わせを赤色（左図）から緑色（右図）に変えても、同じ傾向が見える。

近くの星と比べた場合



同じくらい明るくてかつ近くにある星（492番）と比較。492番（右）とは大きく様子が異なる。

6.4 時間方向のビニング

ライトカーブのまとめとして最後に時間方向にビニングした結果を示す。図 34 にはセット間の変化を示した。これは図 29 のライトカーブを 8 秒毎にビニングしたものに相当する。また、3 シグマ以上離れた点にはそれに相当する数字を振ってある。ここでいうシグマは 4.1 で定義したエラーバーである。つまりある特定の点が 3 シグマ以上離れたとは、その点がライトカーブの 200 秒平均よりもエラーバーの 3 倍以上大きい（或いは小さい）値を示した場合を意味する。

見てわかる通り、1 セット目では 3 シグマ離れた点が 4 連続しているのがわかる。また、図 35 には図 33 のライトカーブを同様にビニングした結果を示した。こちらでは 3 シグマ離れた点の一つもなく、ライトカーブは非常に安定している。

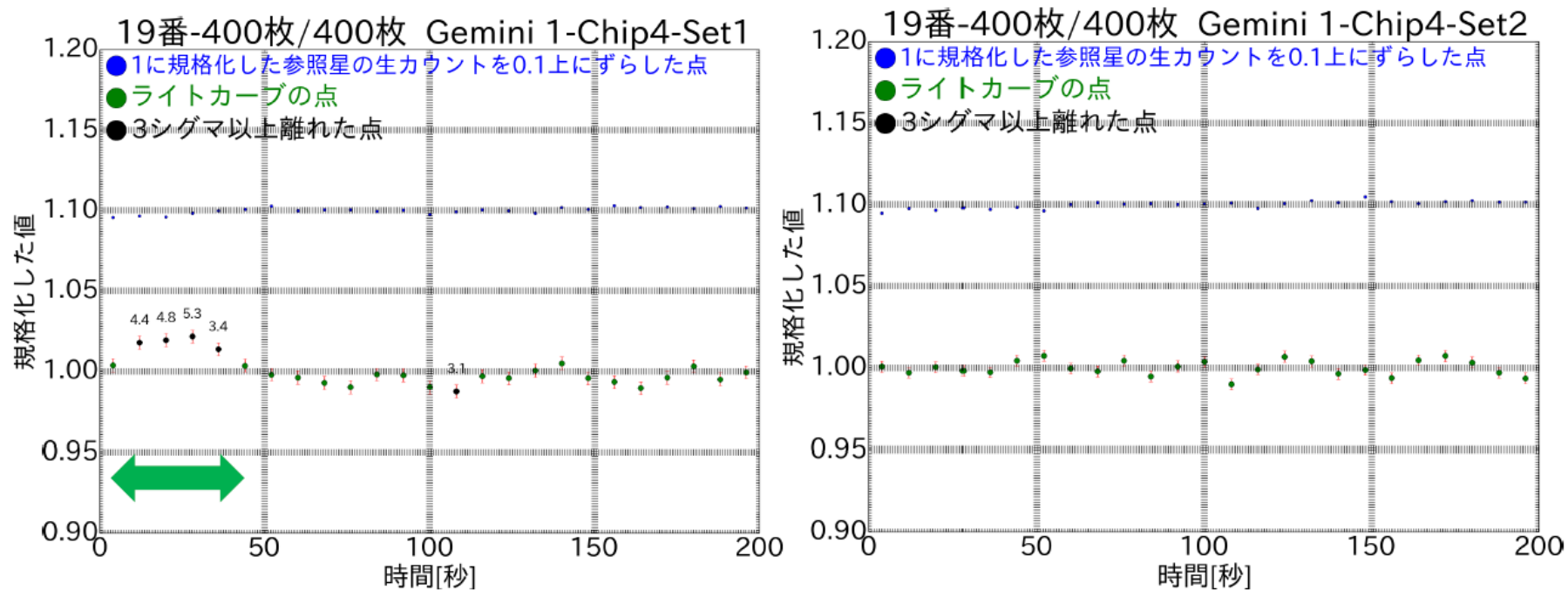


図 34: 図 29 のライトカーブを 8 秒毎にビニングした結果 (変光天体候補の 19 番の連続した 2 セット)。黒い点の上に振られた数字は、何シグマ離れたかを数値で表している。緑矢

6.5 増光現象が統計的エラーによって起こりうるかどうか

これまでの結果から、Gemini 1-チップ 4 の 19 番の天体が 0-40 秒においてカウント値が 200 秒平均に対して高く出ていることは明らかである。ここではこの増光現象がノイズである場合、統計的に起こりうるかを考える。図 34 の左図に示した増光部分（緑矢印）にプロットした点のうち、数字が降られているものは、3シグマ以上離れた場合の離れた値を表している。具体的にみると、4.4 – 4.8 – 5.3 – 3.4 と 3シグマ以上が 4 連続していることがわかる。この状態がどのような確率で再現されるかを計算すると以下のようなになる。

$$\text{このグラフで起こる確率} = (1 - 0.997)^4 \times 100 \times 22 \sim 1.8 \times 10^{-7} [\%]$$

概算のため 4 点は全て 3 シグマ (~99.7%) とした。一項目は 4 連続で 3 シグマ以内に収まらない場合の確率で、二項目は確率→%、三項目は 25 点から連続した 4 点を決める選び方の総数。これに調べた天体数（表 5 の緑色の数の合計×2 セット=21220 天体）をかけると

$$\text{この観測中に起こる確率} = 1.8 \times 10^{-7} \times 21220 \sim 0.004 [\%]$$

となり、これを統計的に起こりうる誤差として考えるにはとても小さいことがわかる。

この星の等級(2MASSによる)

2MASSの番号：07283605+1952537

バンド	Jバンド	Hバンド	Kバンド
等級(mag)	10.908~ 11	10.098~ 10	9.914~ 10

6.6 現在わかっている情報

ここでは、上記の変光天体候補について分かっている等級や座標を表 6 及び図 36 にまとめておく。等級及び座標は 2MASS のものを参考にした。なお V バンドも 2MASS のカタログに参考として載っているもので、元は ACT Reference Catalog の値。

またこの等級を元に、この天体が 2 カラーダイアグラムにおいてどこに位置するかを示したものが図 37 である。なお天体の変光成分が本物であると仮定した場合、40 秒で最大 2%

49

表 6：2MASS による等級。カタログ番号は 07283605+1952537。J,H,K バンドについては、エラーの値をカッコ内に示してある。

バンド	J バンド	H バンド	K バンド	V バンド
等級	10.908(0.022)	10.098(0.020)	9.914(0.017)	13.1

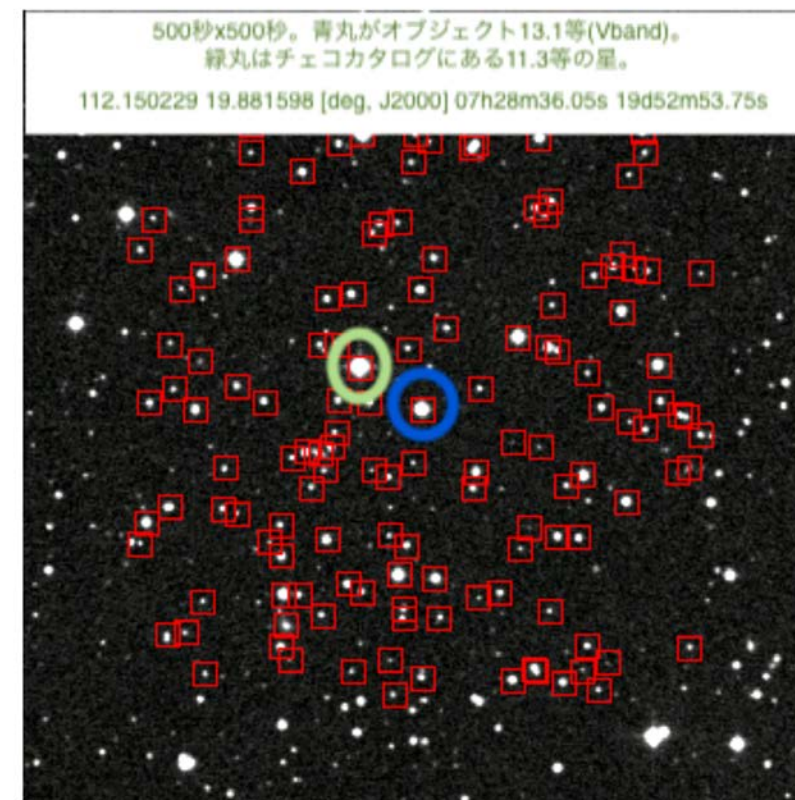


図 36：2MASS の画像（500 秒×500 秒）。青丸が変光天体候補で、緑丸はチェコカタログにある 11.3 等の星である。

まとめ

- 高速読み出しが可能な**CMOSカメラ**で撮られたデータを用いて、**高速変光天体**を探した
- (おおよそ可視光で16.5~13.2等の範囲の星に対して) **相対測光**を行い**ふたご座**を約**8平方度**サーベイした
- (200秒平均に対して0.5%以上の) **大きく変光した星は全て天体由来ではなかった** (読み出しエラー、流星、シーイング変化などが原因)
- 0.3%程度で、変光しているかもしれない天体が一つだけあった

終わり

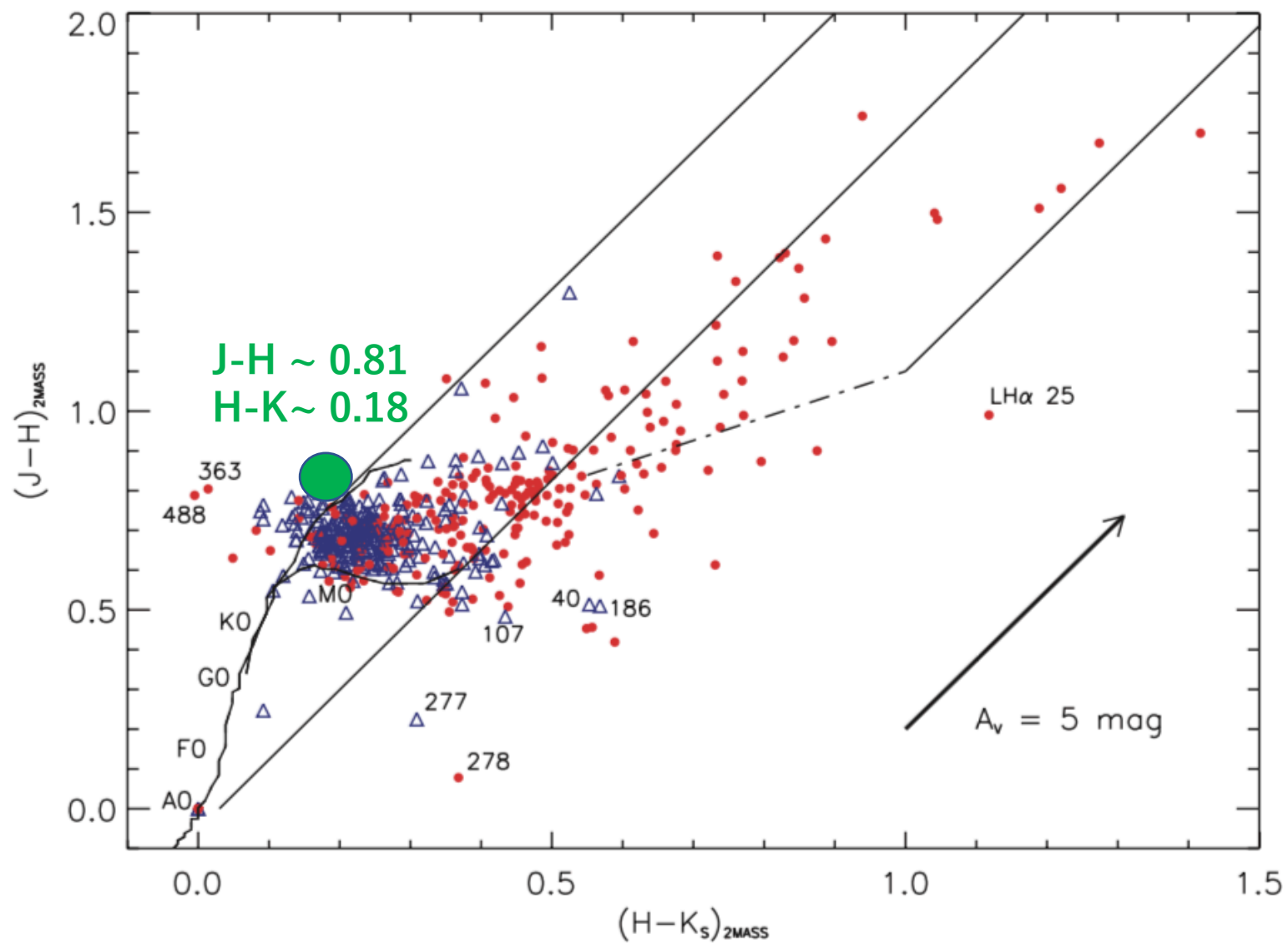
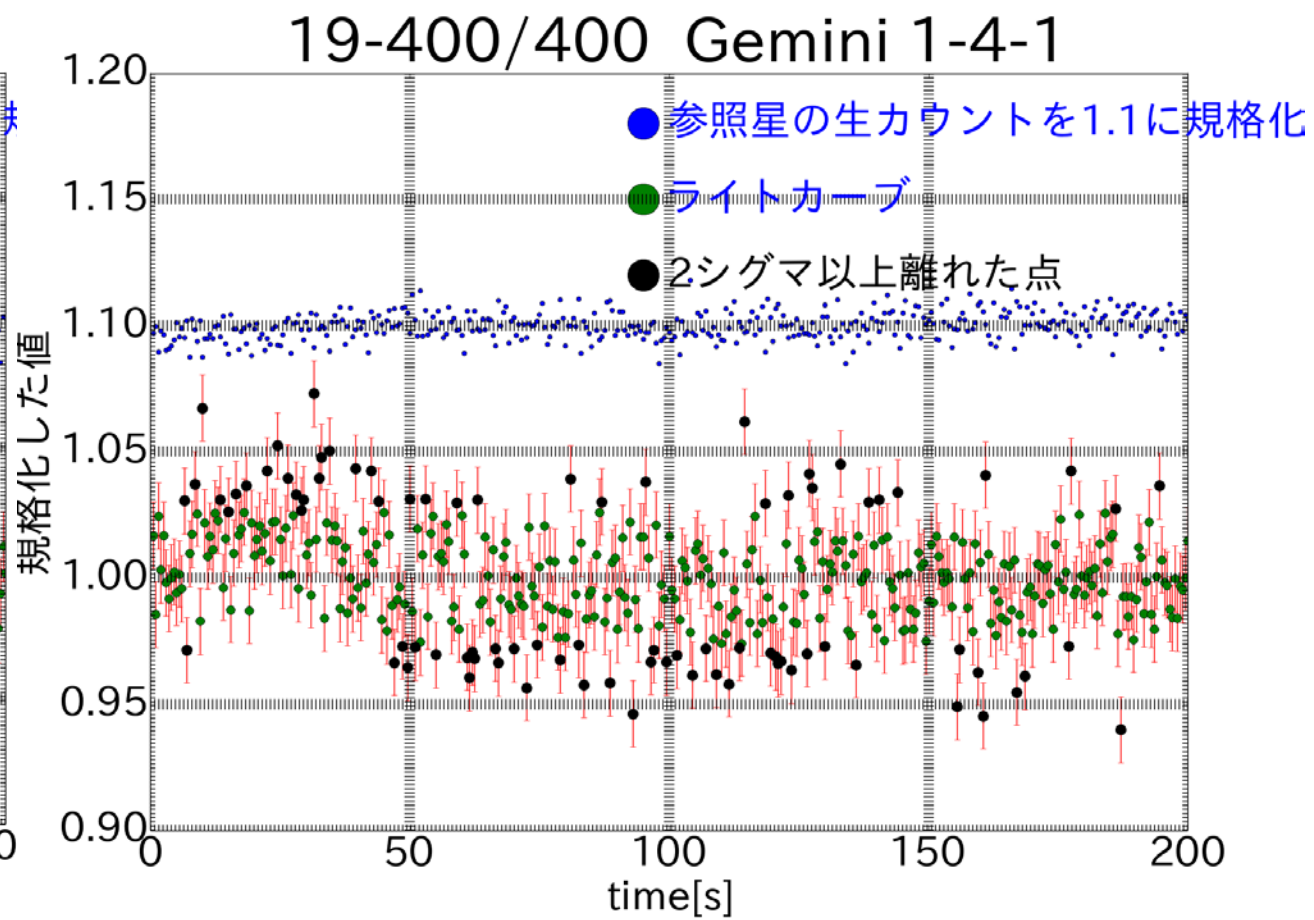
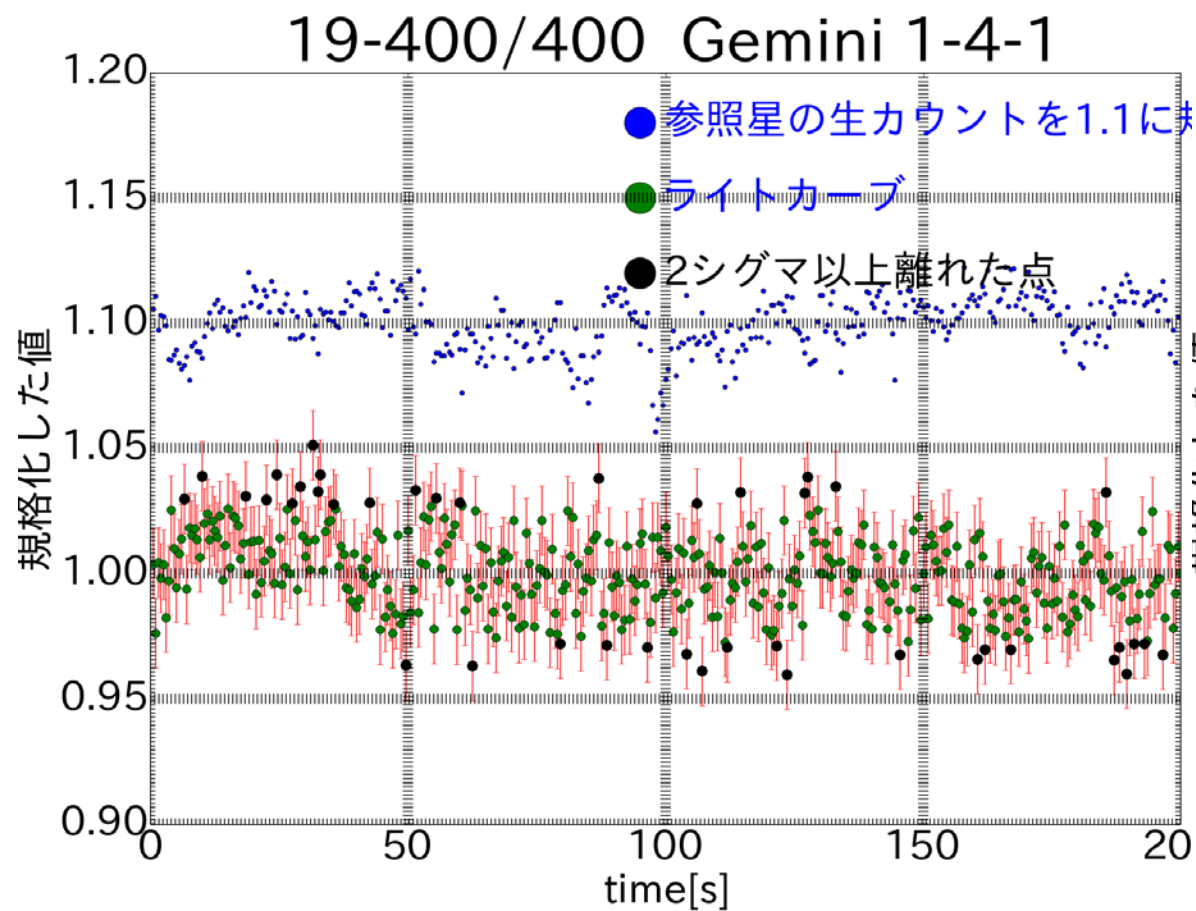


FIG. 16.—The $J - H$, $H - K$ two-color diagram for the TTSs listed in Table 1. The NIR colors plotted in the figure are from the 2MASS Point Source Catalog. CTTSs are marked by circles and WTTSs by triangles. The solid lines represent the normal colors for main-sequence stars and giants; the dashed lines mark the boundaries of the region through which normal stars are reddened. The dot-dashed line running nearly parallel to the abscissa is the dereddened CTTS locus of Meyer et al. (1997).

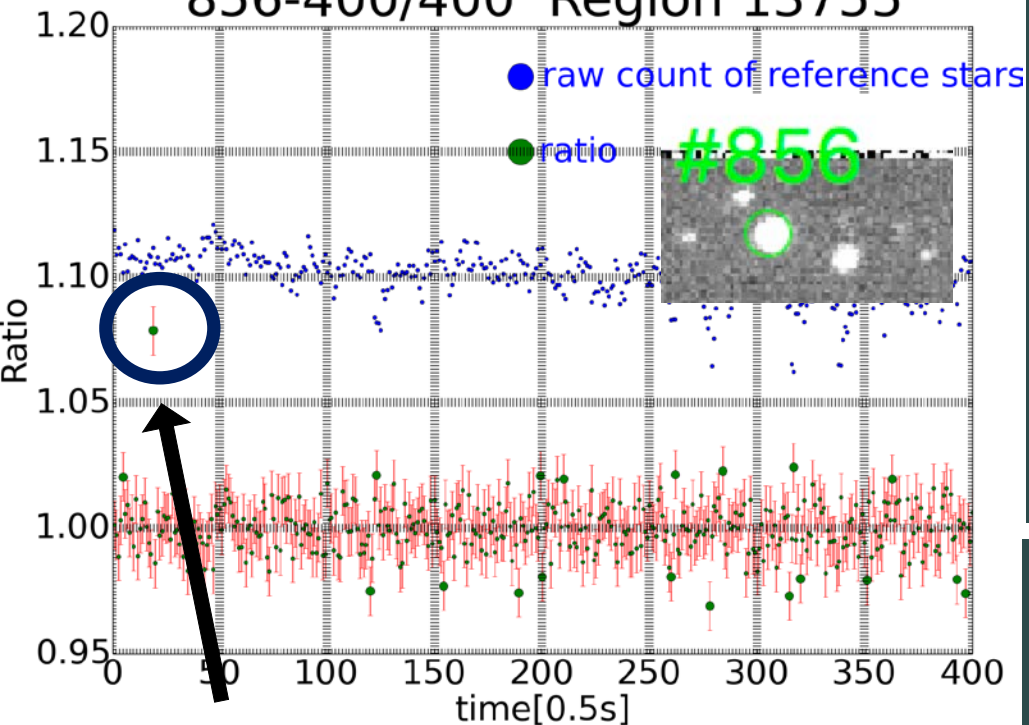
アパーチャーの変化



Apertureを1.5倍。同じ傾向が見える

856番の詳細

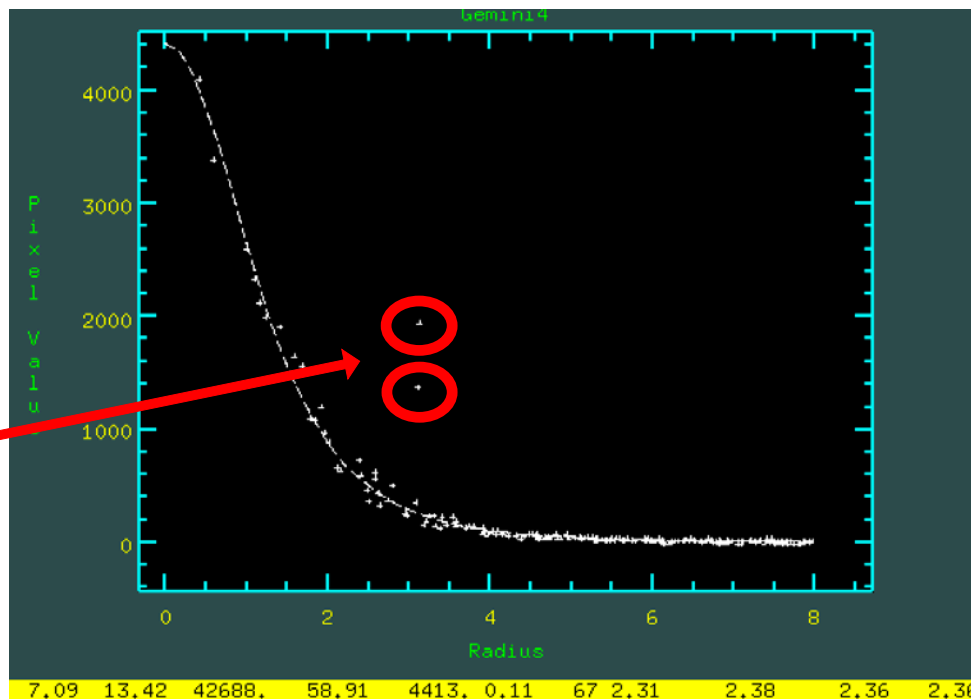
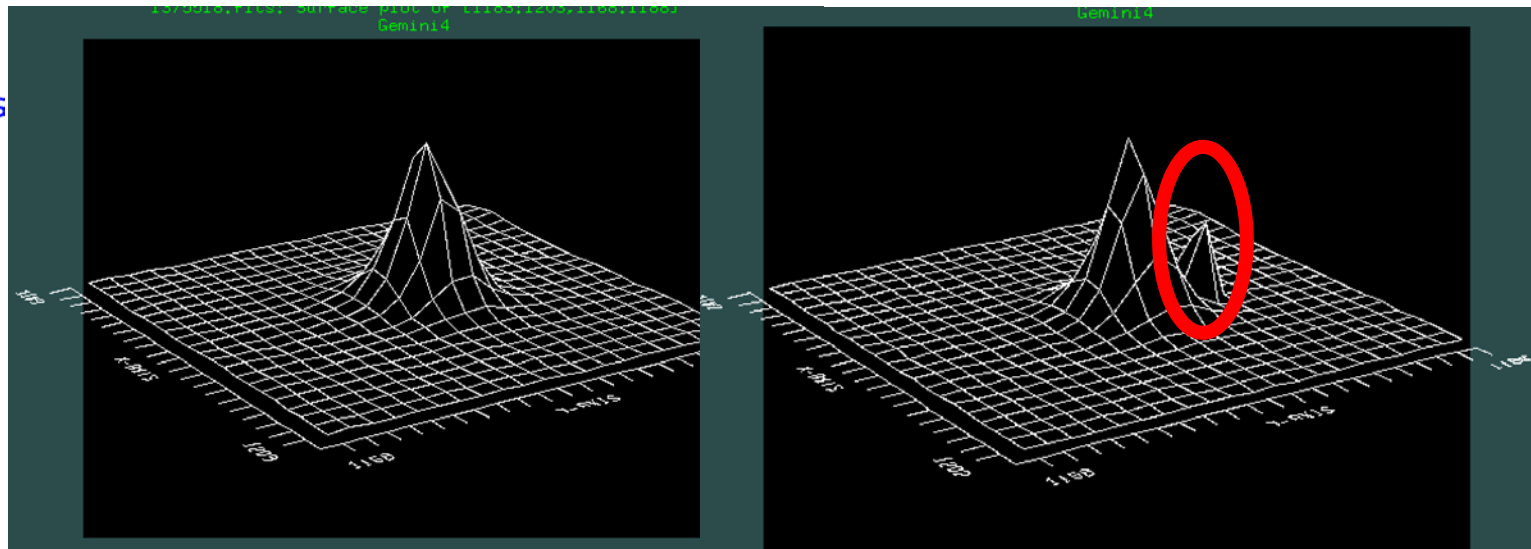
856-400/400 Region 13755



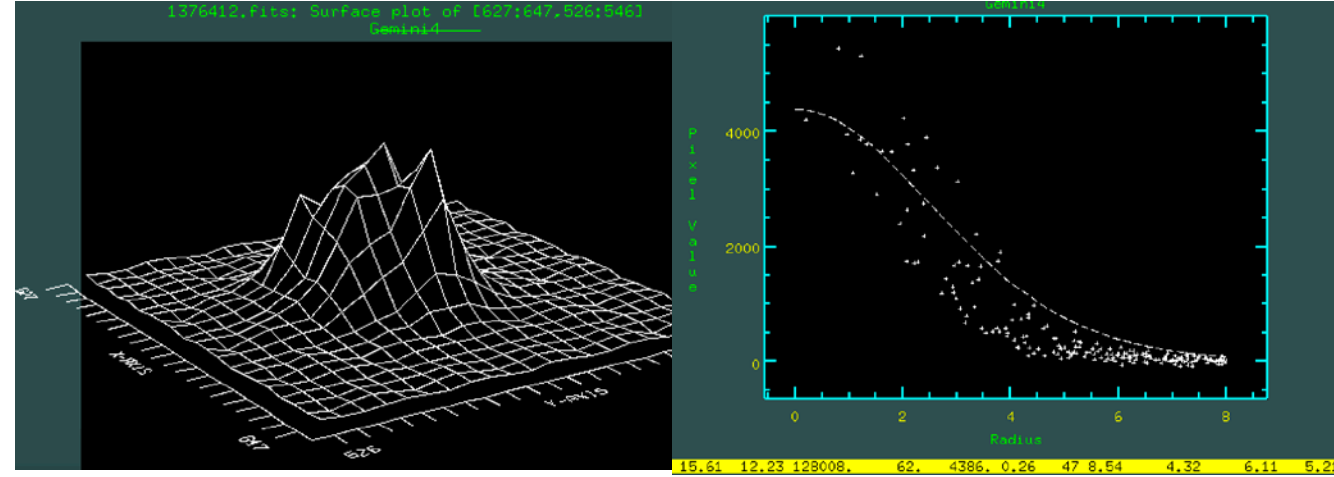
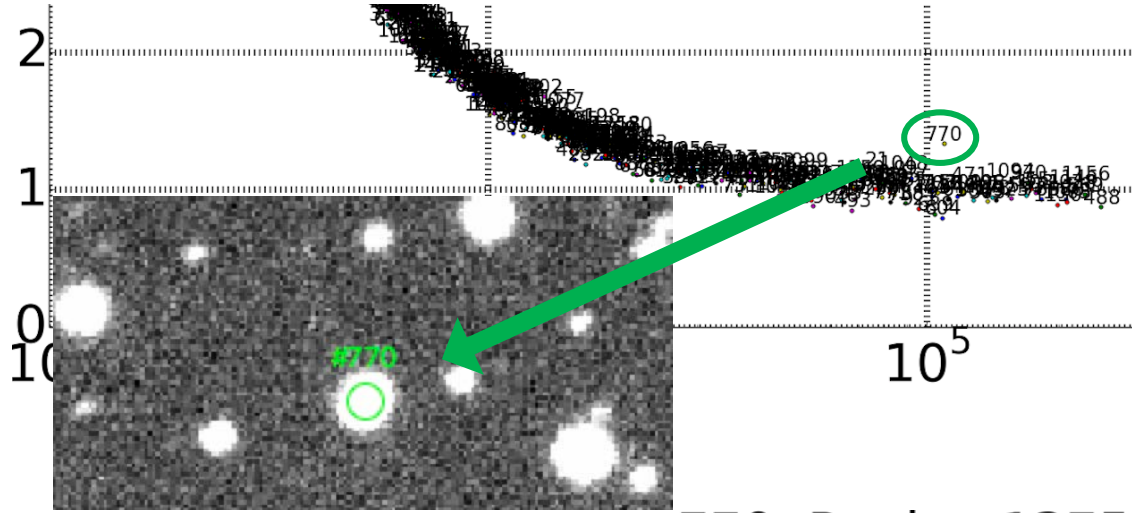
9.5 秒で 7% ほど変更している。

9.5 秒でのみ、同じ場所で 2 点だけ光っている。恐らくホットピクセル？

9秒と9.5秒の星像の様子。右の赤丸が変光成分。

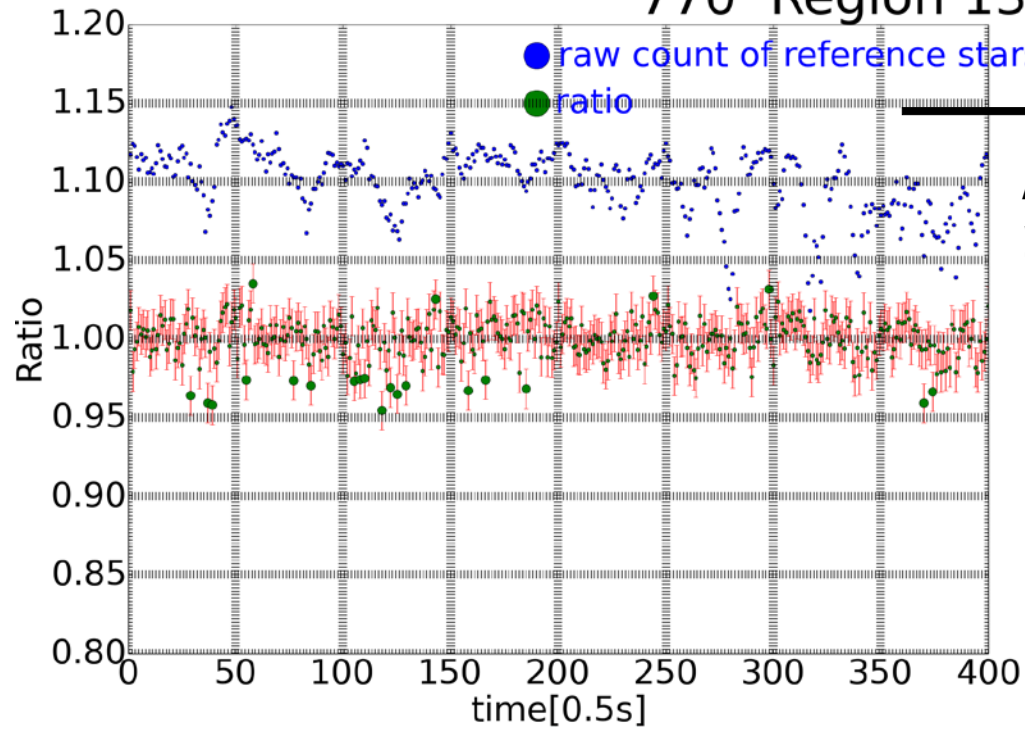


FWHMが異常に大きい星 (周囲の約2倍)

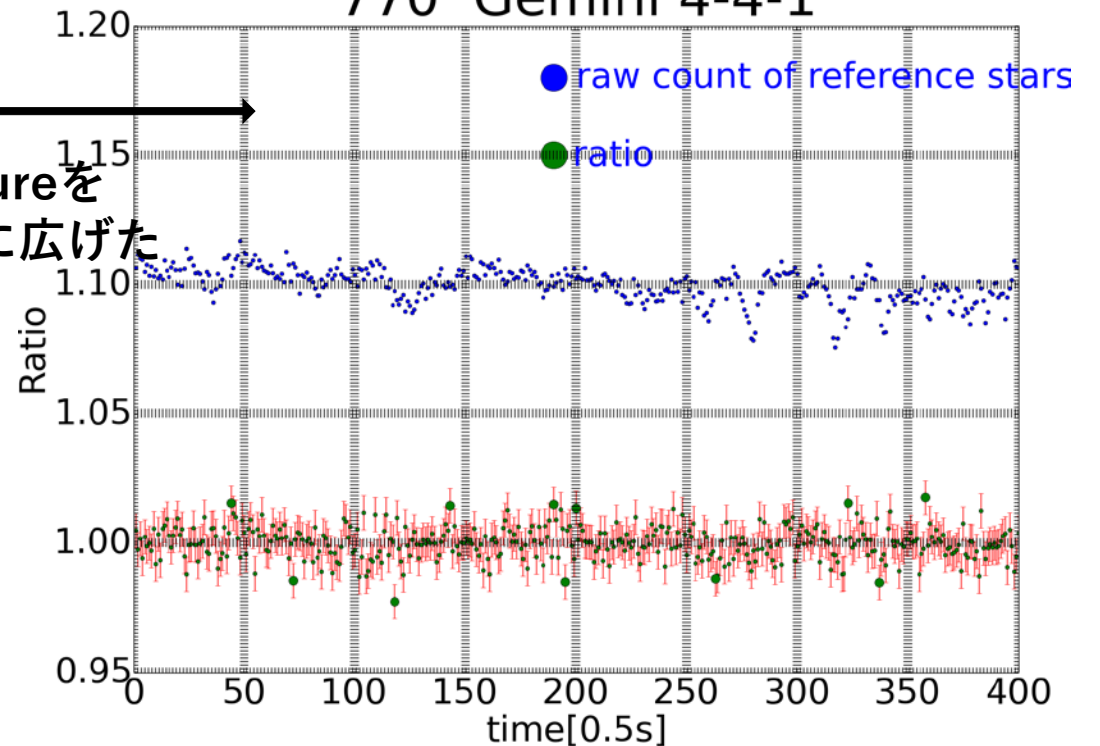


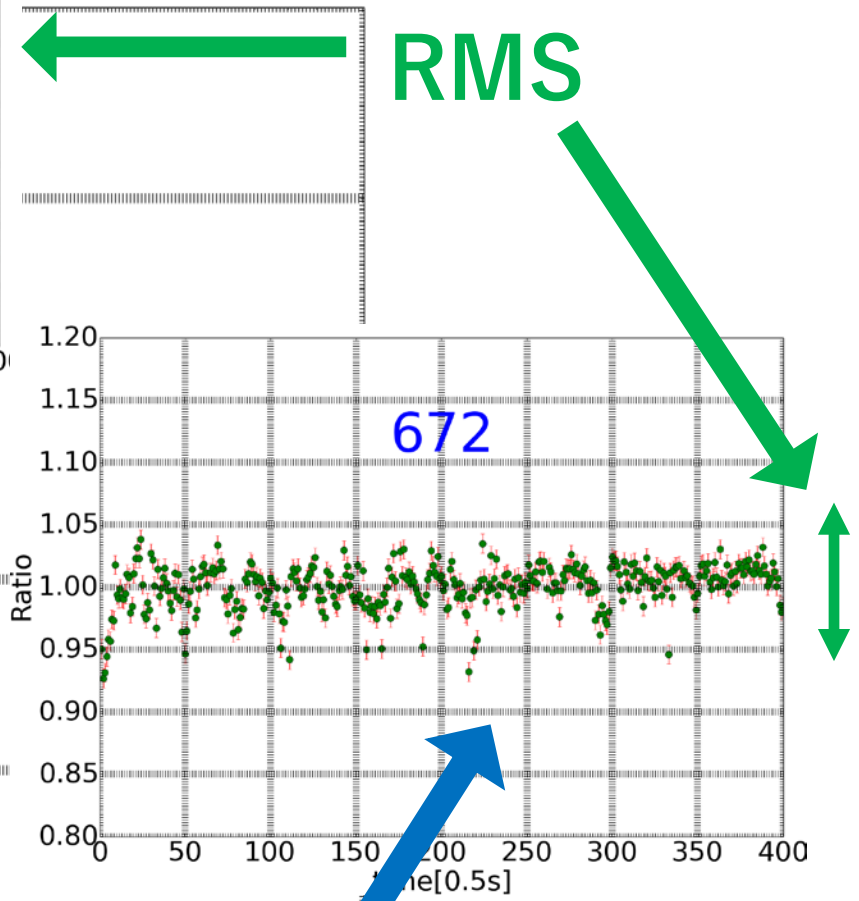
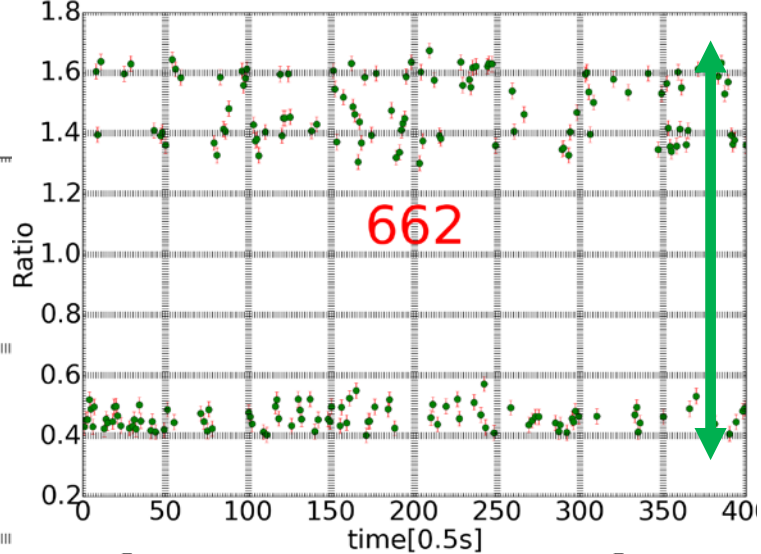
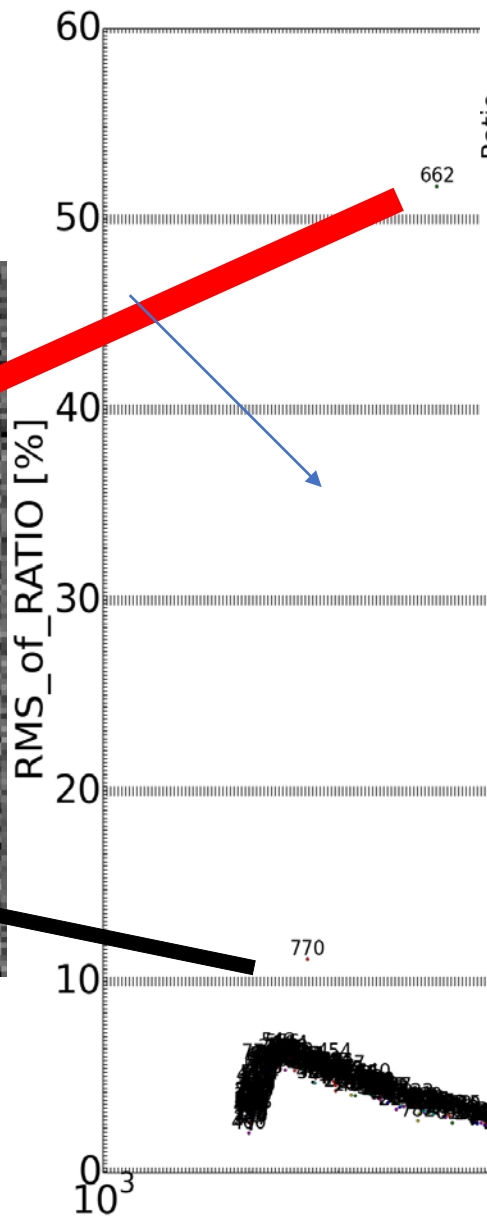
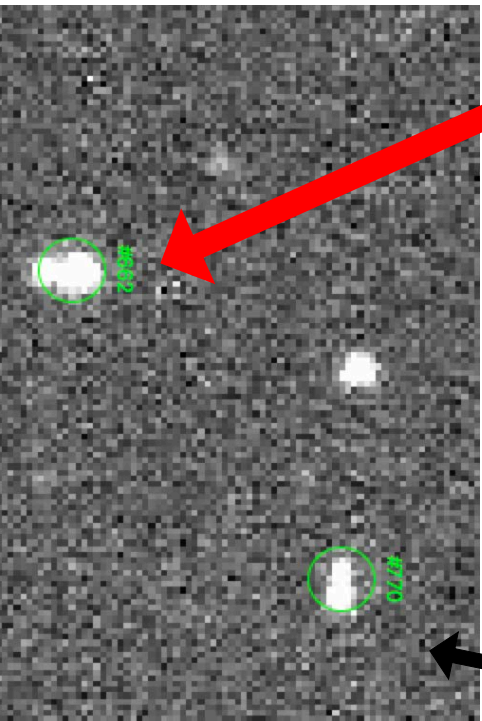
770 Region 13754

770 Gemini 4-4-1

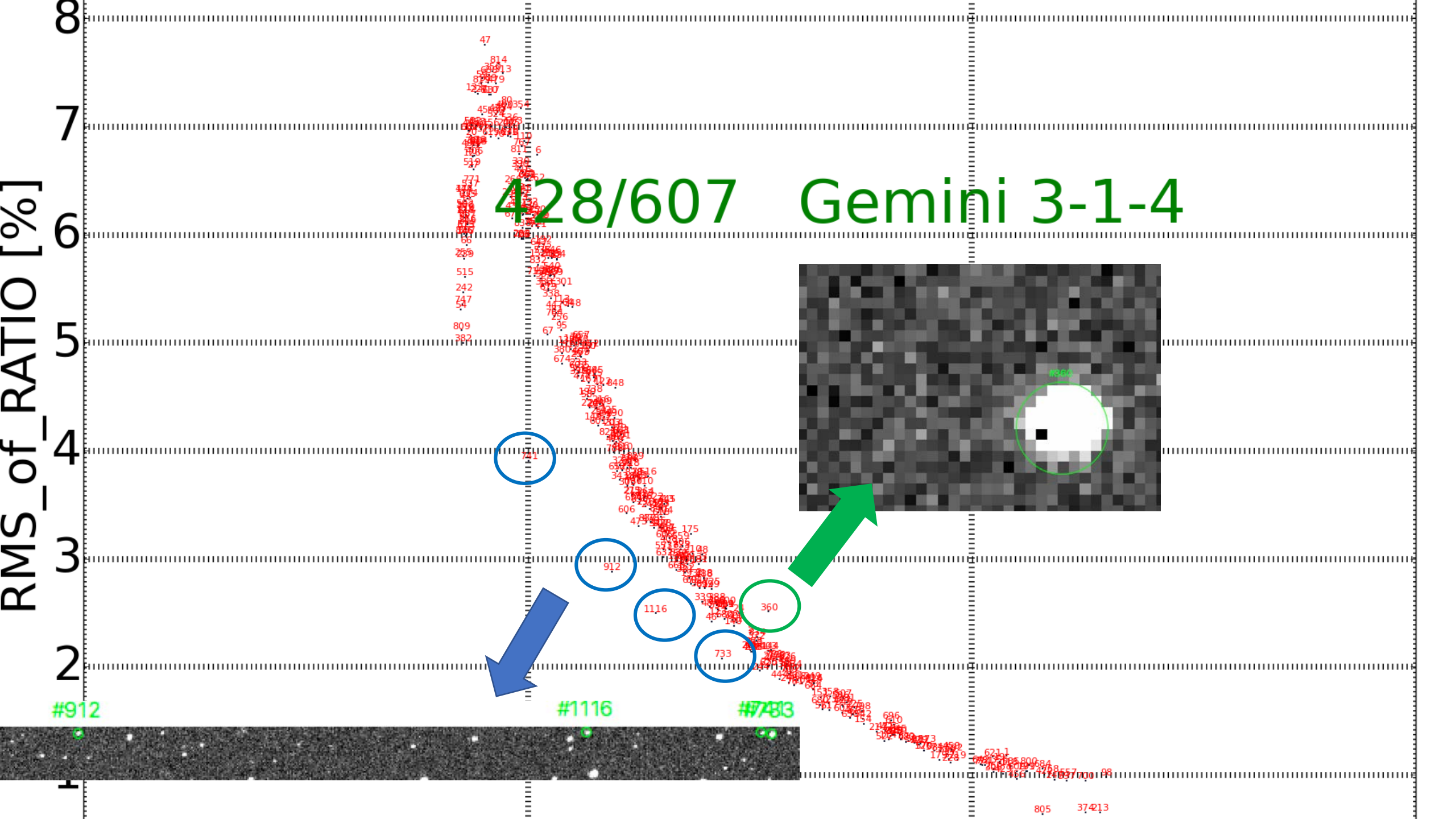


Apertureを
1.5倍に広げた





412 Stars Region 13750



読み出し時のエラー

