

# KWFC変光星探査 (KISOGP)

松永典之, 前原裕之, 三戸洋之, 小林尚人, 泉奈都子, 福江慧, 山本遼  
青木勉, 征矢野隆夫, 樽澤賢一, 酒向重行, 諸隈智貴, 土居守(東京大)  
坂本強(スペースガード協会), 浮田信治, 田中雅臣, 岩田生(国立天文台)  
板由房, 小野里宏樹, 岩崎仁美, 花上拓海(東北大), 山下智志(鹿児島大)  
新井彰(兵庫県立大)

# 目次

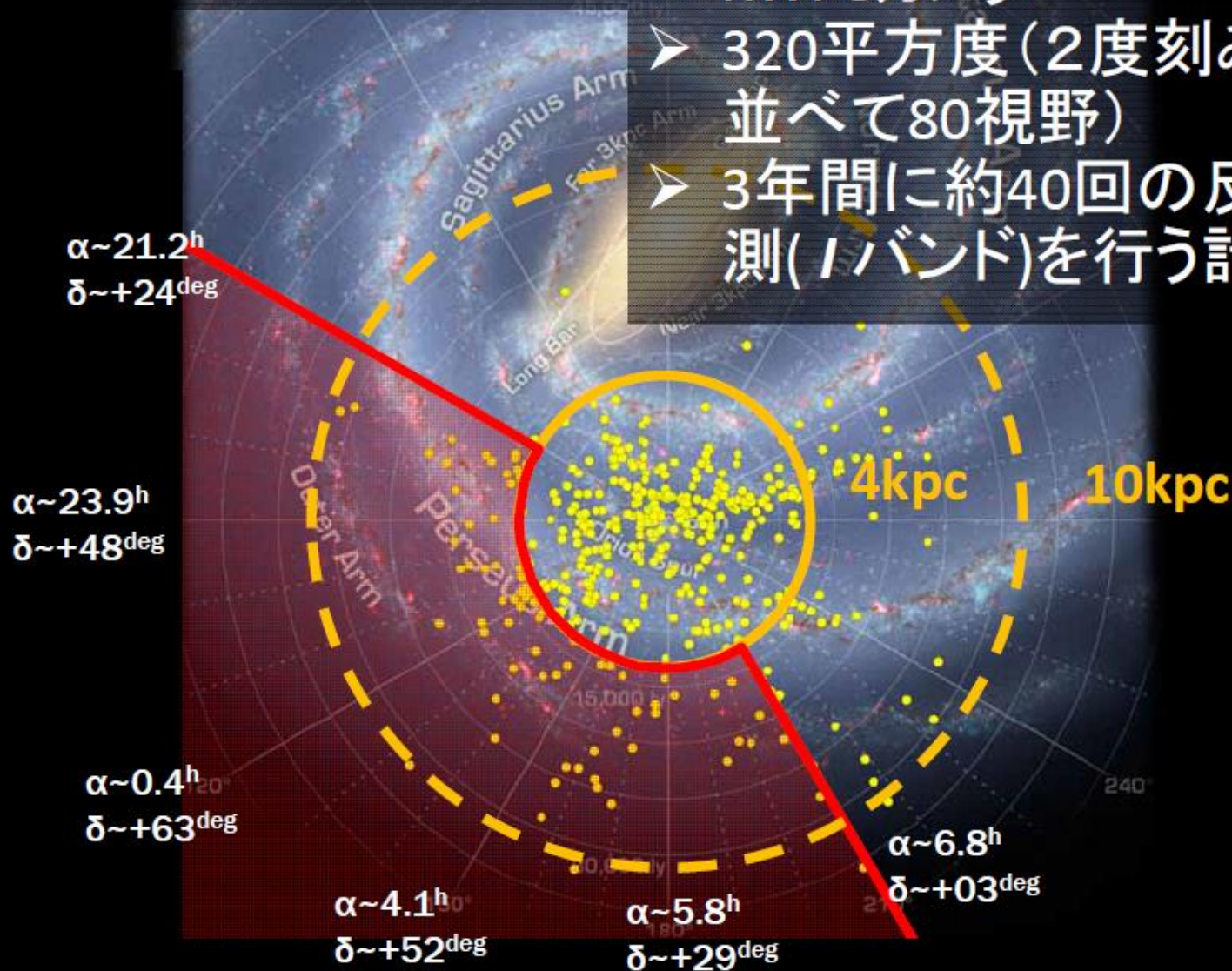
- KISOGPの観測状況
- KISOGPの解析パイプライン、データベースの概要
- 測光精度
- 検出された変光星
- 分光観測
- 突発天体検出への応用

# KISOGPの目的と概要

- 円盤部(銀河系の骨格)にある変光天体探査
  - 320平方度。現在約1200個の変光星が知られている領域内で、数千個の新しい変光星の発見を目指す。
  - 銀河円盤(主に外縁部)の構造を、(周期光度関係をもつ)変光星の分布から明らかにする。
  - これまでよりも暗いand/or遠い新星・矮新星の発見。
- 見つけた変光星の分光追観測
  - 分類をすばやく行い、詳細研究に結びつける。
  - ミラなどの変光星に対してM型星と炭素星の分類を行って、銀河系中の分布・運動を比較する。

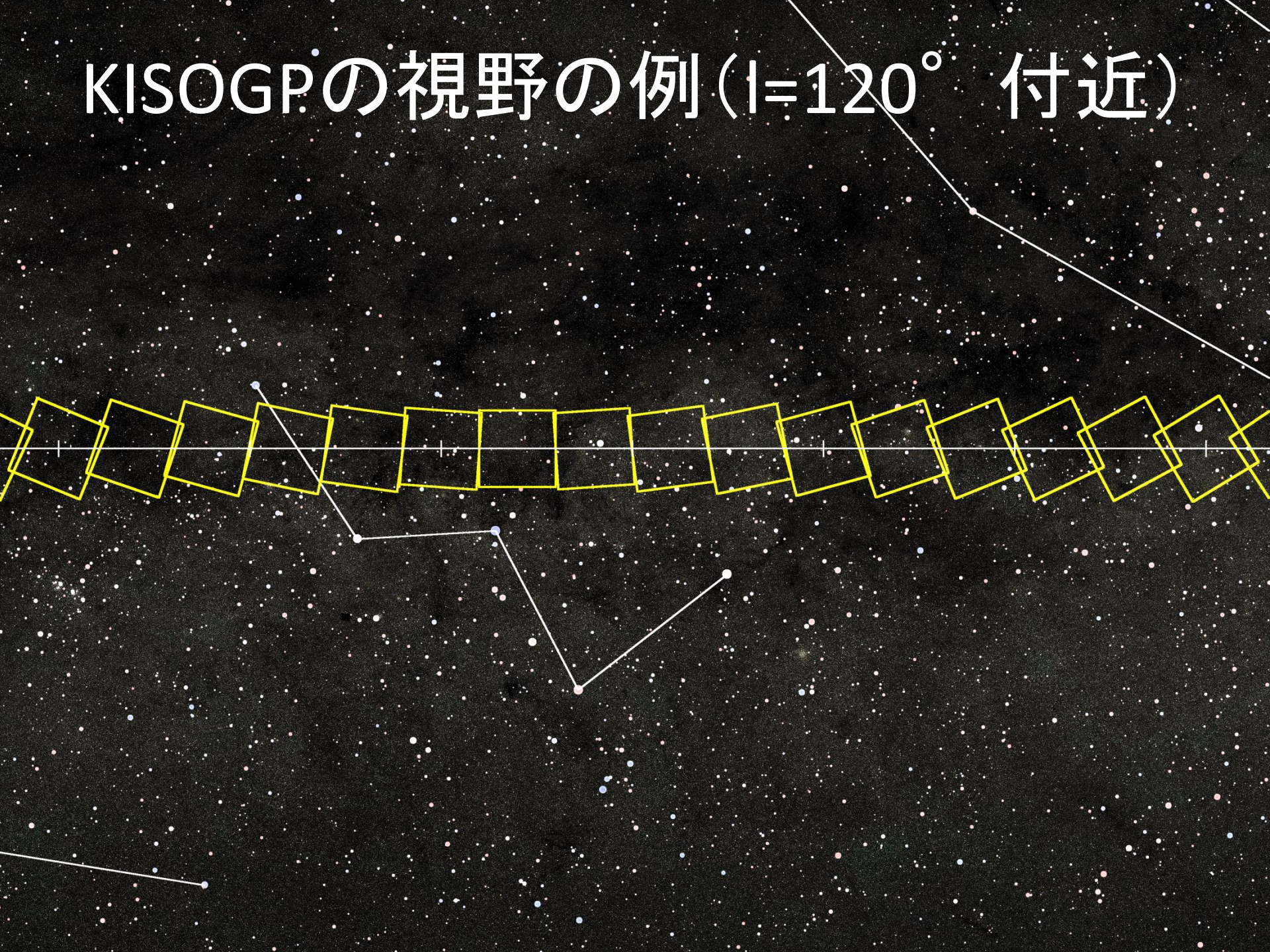
# KISOGPの観測

- 木曾シュミット望遠鏡とKWFCカメラ
- 320平方度(2度刻みに並べて80視野)
- 3年間に約40回の反復観測(バンド)を行う計画





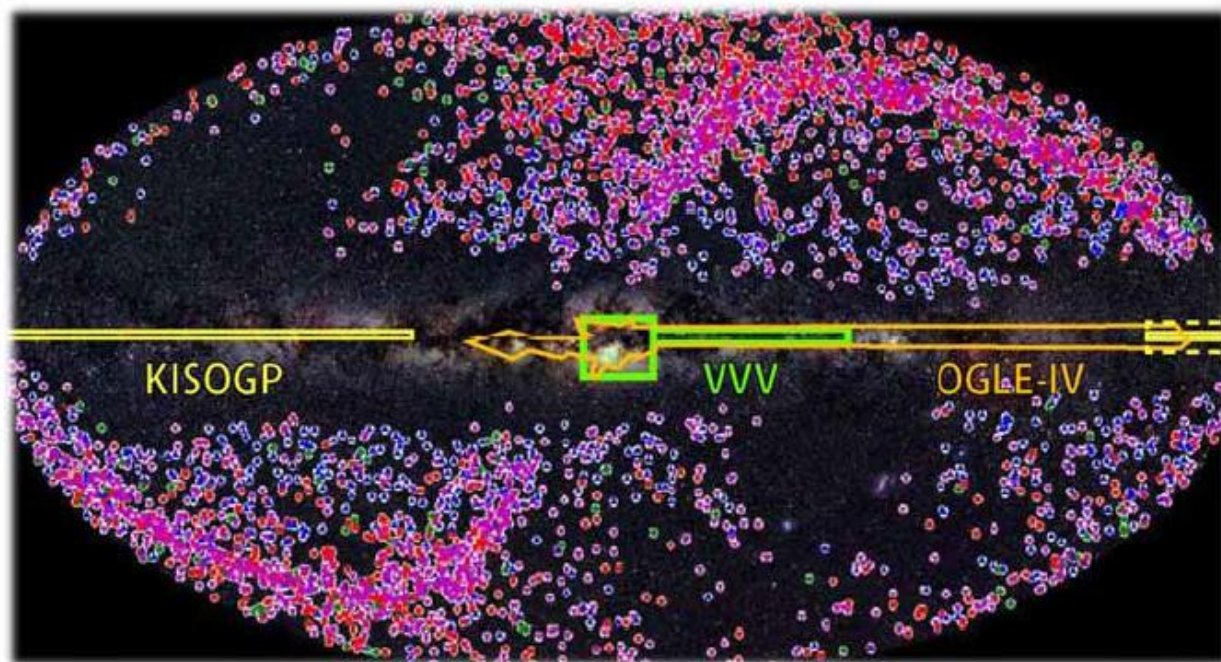
# KISOGPの視野の例 ( $l=120^\circ$ 付近)





# KISOGPの位置づけ

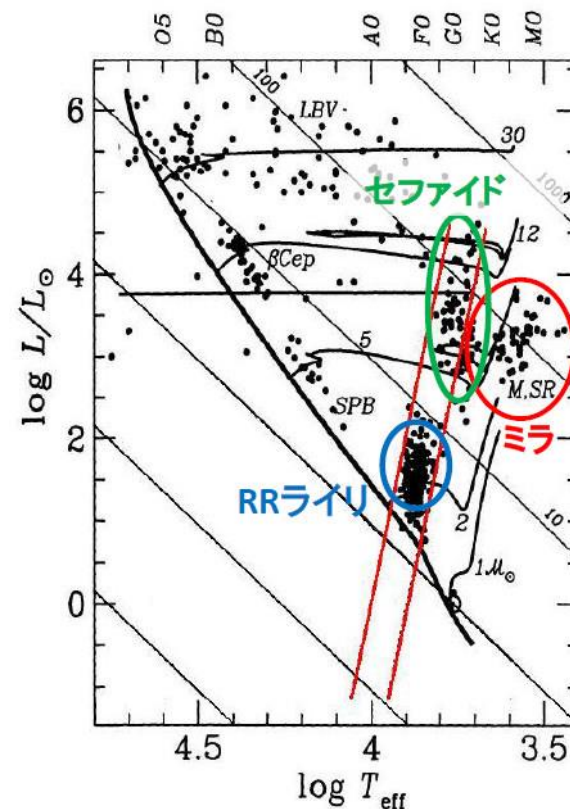
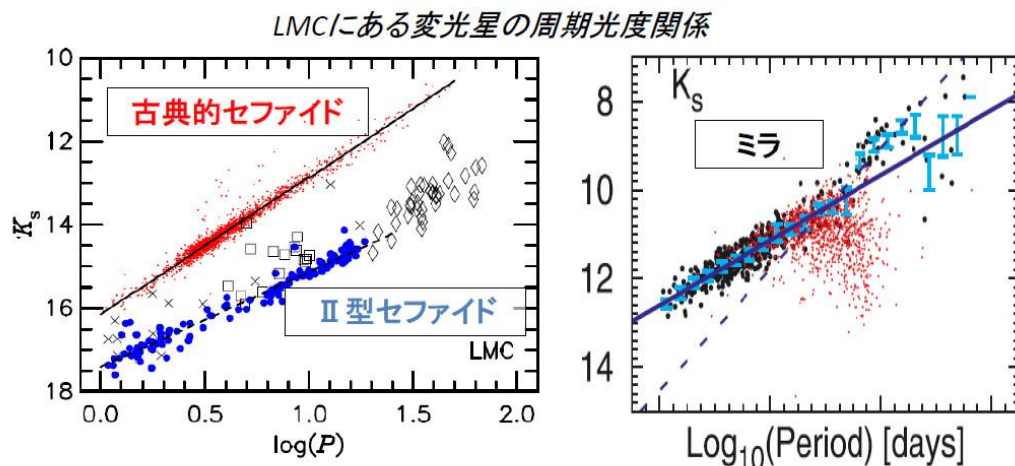
- 銀河系の変光星探査は不十分だが、今後10年程で（比較的明るい）変光星の多くが見つかるだろう。
- 3年以内に報告すれば、北半球で見える銀河面の変光星探査として先駆的な成果を上げられる。



Catalinaサーベイの発見した約8000個の突発天体（超新星、新星など）と、銀河面の各変光星探査の領域

# 脈動変光星：銀河系研究への応用

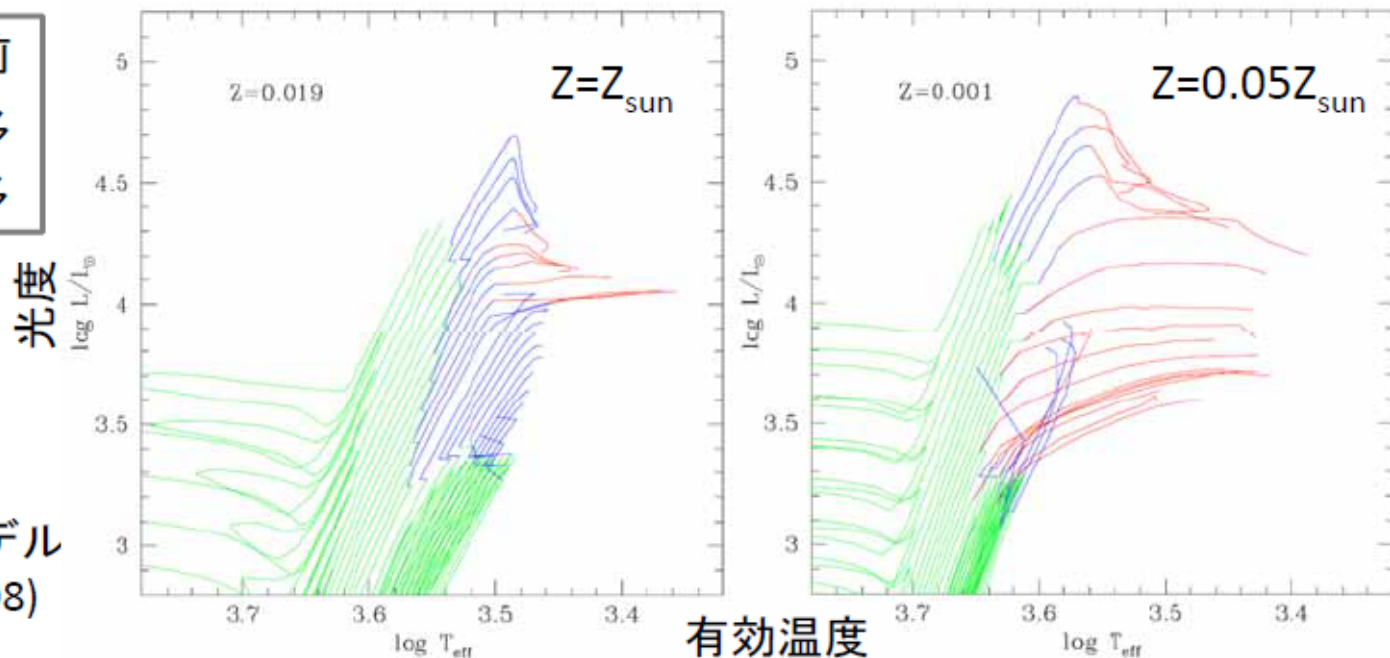
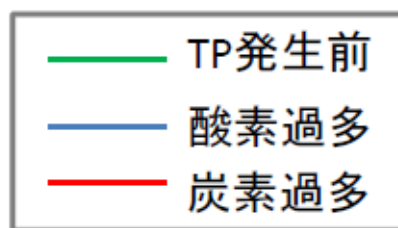
- 銀河系構造のトレーサー
  - 周期光度関係
- 恒星種族のトレーサー
  - 脈動変光星のタイプ
  - 星の質量や年齢が分かる





# AGB星の酸素過多／炭素過多

- 熱パルス(TP)に伴う炭素の汲上げで、表面組成が変化する。
  - 炭素星になるかどうかは金属量・質量に依存。
  - 太陽金属量では2~3  $M_{\text{sun}}$  の星が炭素星へ進化
- 一部の炭素星は、AGB星ではなく、連星系中での質量輸送で生じたもの。

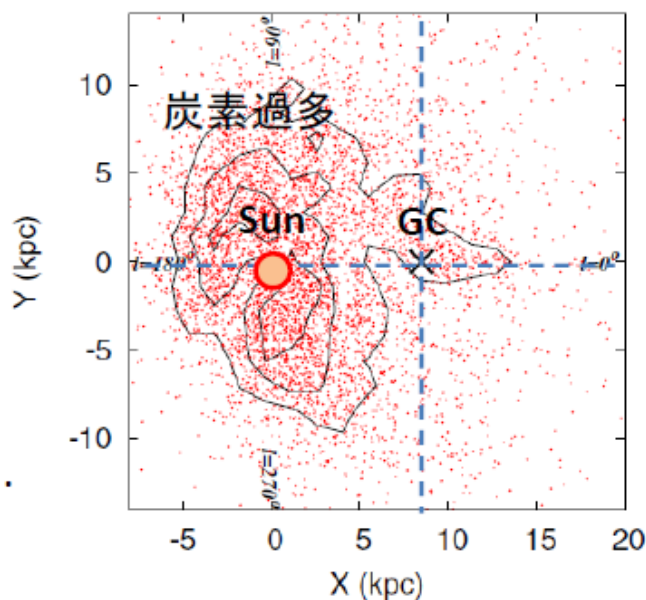


AGB星の進化モデル  
(Marigo et al. 2008)

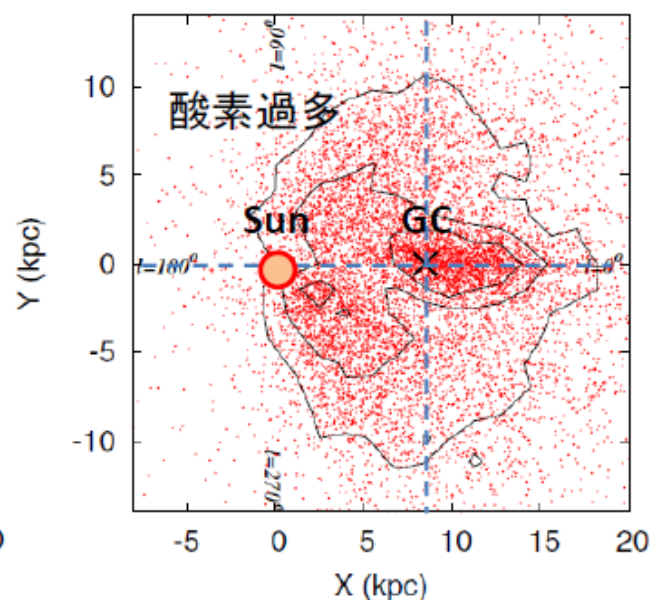


# 炭素星の応用と本研究の特徴

- 恒星種族の手がかりとなる。
  - 銀河系中の銀経分布
  - 近傍銀河のC/M比
- 本研究: ミラ(末期のAGB段階)に注目
  - 分光観測による確実な分類
  - 正確な距離の見積もりによって三次元的な密度分布

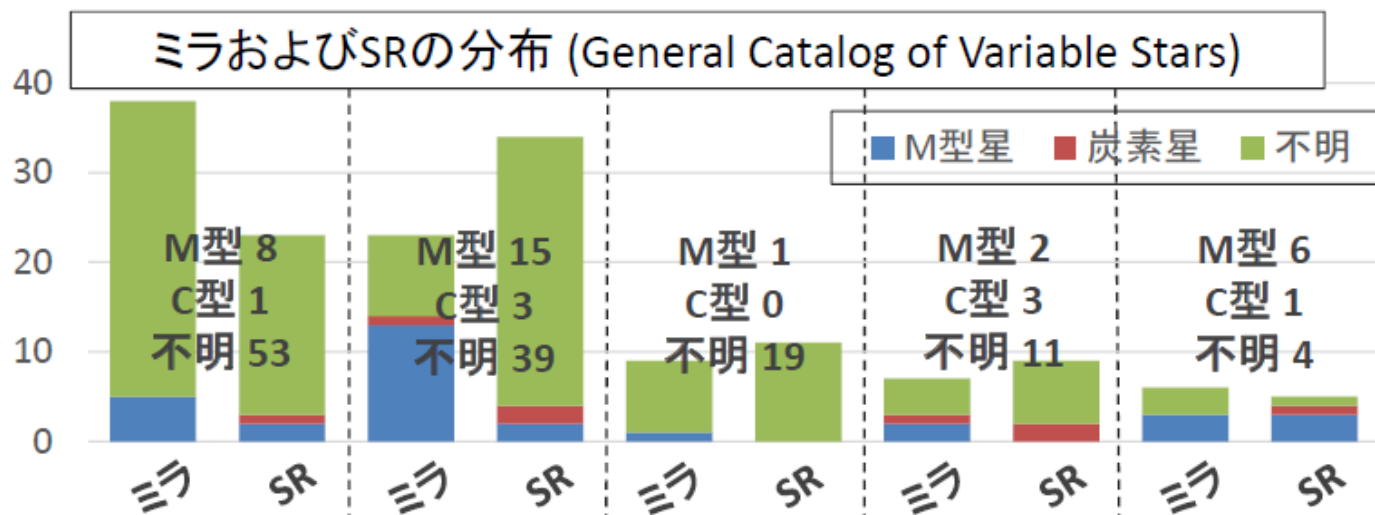


Ishihara et al.  
(2011)

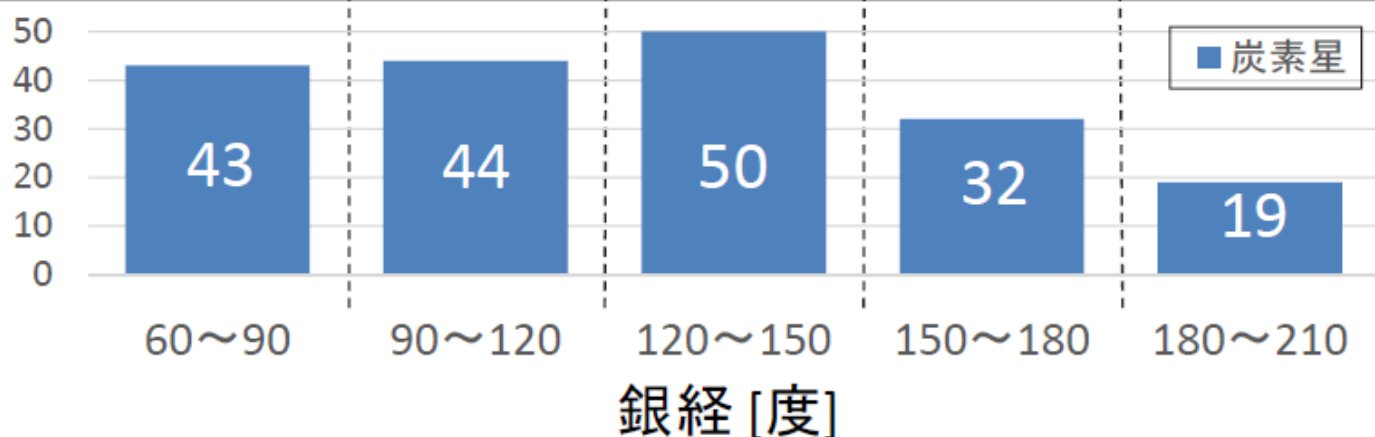


# 既知のミラと炭素星

- 約100個のミラと約200個の炭素星KISOGP領域内で既知



炭素星(含非変光星)の分布 (General Catalog of Galactic Carbon Stars)





# 観測

- 105cmシュミット+KWFCを用いてIcバンドのみ
- チップ8枚を使用して観測(12.5 min / field)
  - 5秒積分 × 1 frame:2.3分
  - 60秒積分 × 3 frames:3.2分 × 3
    - 各チップの隙間が約1'あるので、視野をずらして3回撮る
    - 基準座標 × 1
    - (+180", +180") × 1 frame
    - (-180", -180") × 1 frame
  - 読み出しに時間がかかる(wipe + readoutで2分強)
    - 2013年1月より読み出し中に次の視野の移動を実行するようにプログラムを改良

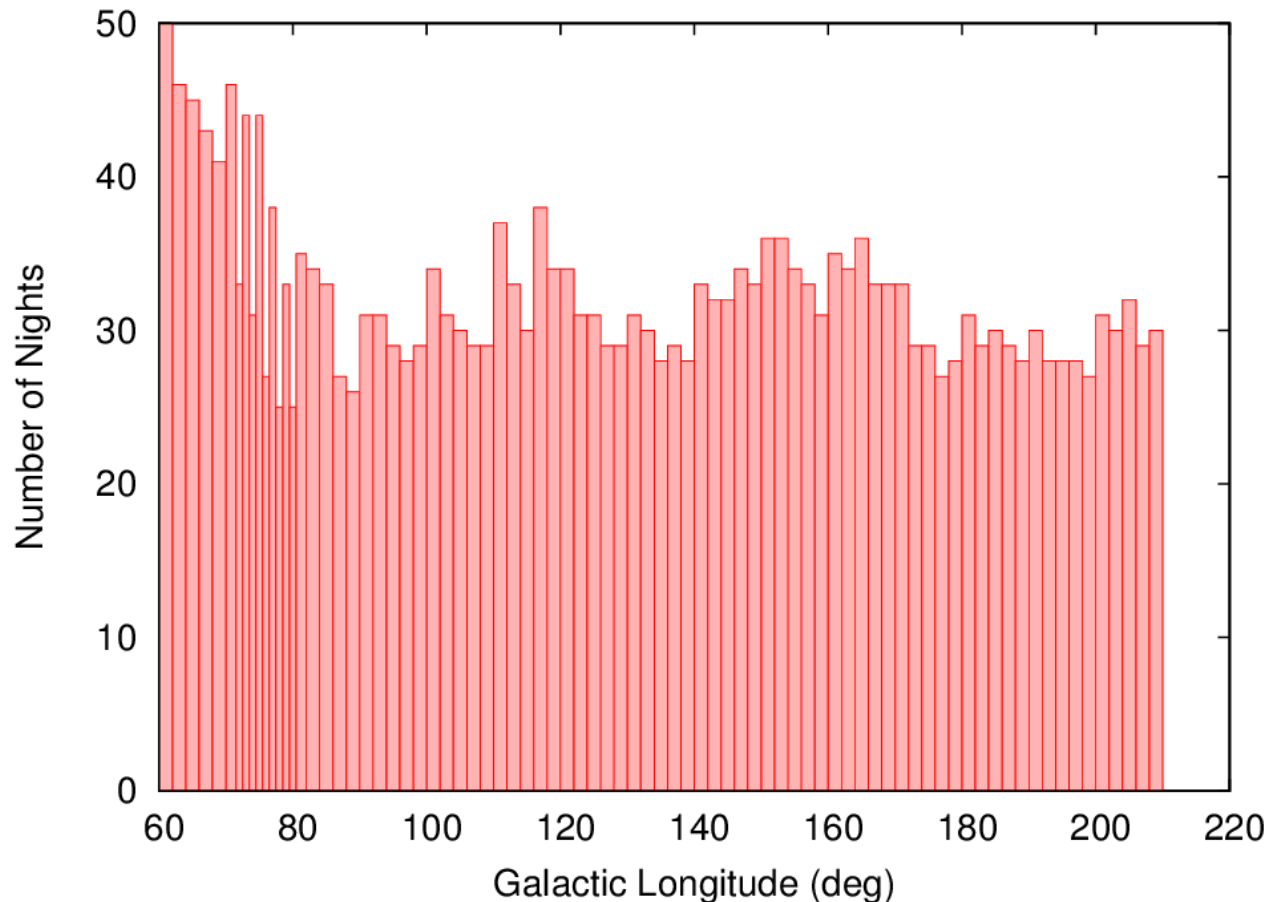
# 観測視野の例 ( $l=63^\circ$ , $b=0^\circ$ )





# これまでの観測統計(2014/06まで)

- 各フィールドについて30-50夜の観測を実施
  - L=61-80は春に観測可能になる関係で観測回数が多い
  - 他の領域も30夜程度の観測を実施



# 解析パイプライン

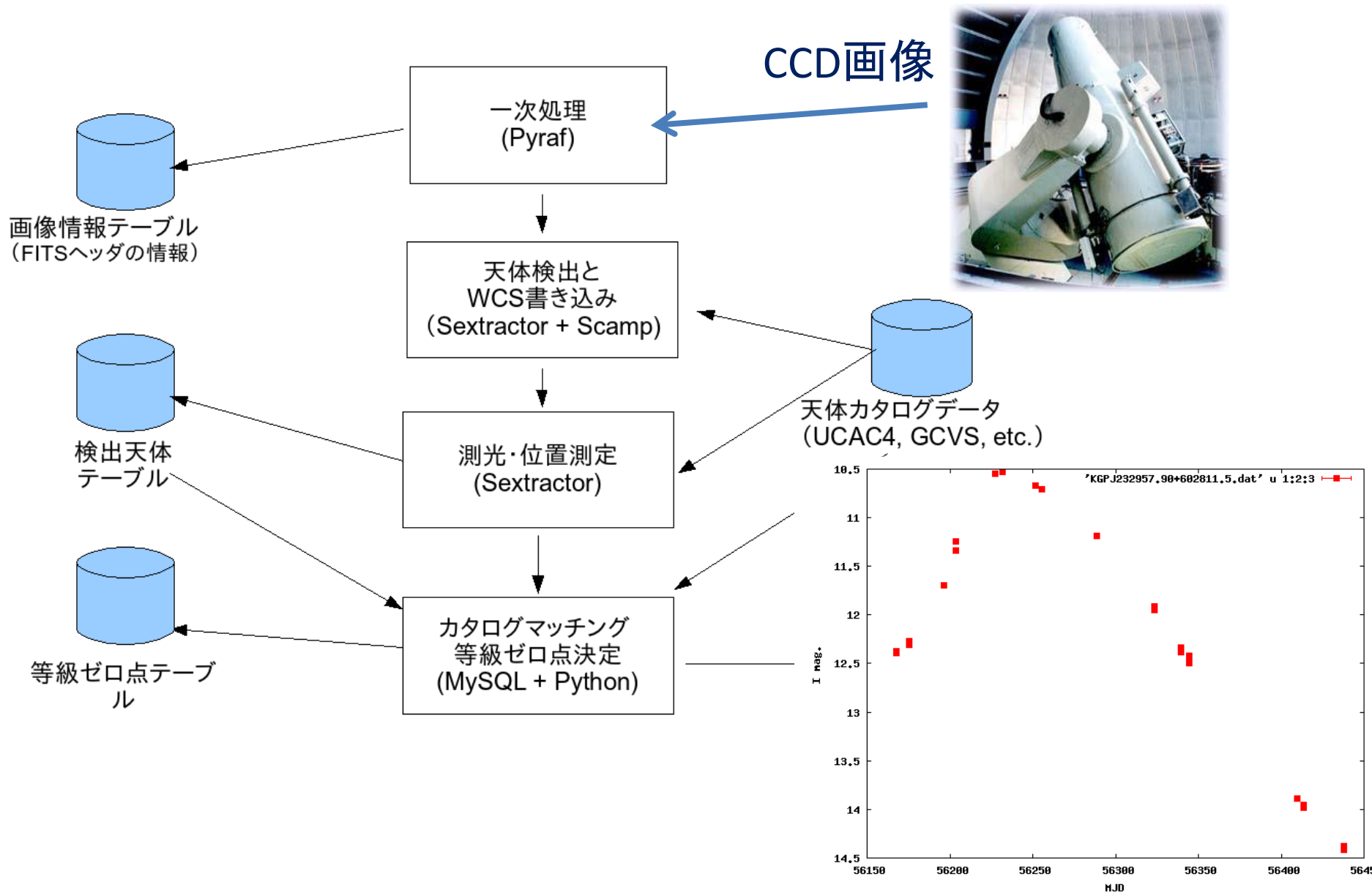
- 一次処理 : Pyraf
- 天体検出 : SExtractor
- WCS : Scamp
  - カタログにはUCAC3を使用(固有運動の補正済)
- 測光 : SExtractor (aperture photometry)
  - PSFEx、DOAPHOTO II を使用したPSF photometryを行う機能も作成中
  - 現時点では、個々のフレームについて個別に天体検出、測光を行っている



# 観測データベース

- 観測データ、検出天体データは全てMySQLデータベースに格納
  - データ量:  $5.1 \times 10^8$  objects
    - $\sim 10^4$  objects/frame (@ $5\sigma$  detection threshold)
    - $\sim 8.3 \times 10^4$  frames (2012/04~2014/06)

# 解析処理の流れ



# データベースのテーブル構造

※M: 1フレームの検出天体数

N: 測光手法(aperture, PSF1, PSF2)の種類

データ件数の比

1

:

M

:

N

●画像情報テーブル  
frameid (primary key)  
観測日時  
他のFITSヘッダの情報

●検出天体テーブル  
oid (primary key)  
frameid  
photo\_type  
天体の位置  
機械等級

●等級ゼロ点テーブル  
frameid (key1)  
photo\_type (key2)  
等級ゼロ点  
誤差  
ゼロ点を求めるために  
使った星の数

観測データ

ix, iy, iz

天体の等級

UCAC4テーブル  
u4\_id  
B, V, r, i等級  
位置 ( $\alpha, \delta$ )  
ix, iy, iz

変光星テーブル  
var\_name  
等級, タイプ等  
位置 ( $\alpha, \delta$ )  
ix, iy, iz

カタログデータ



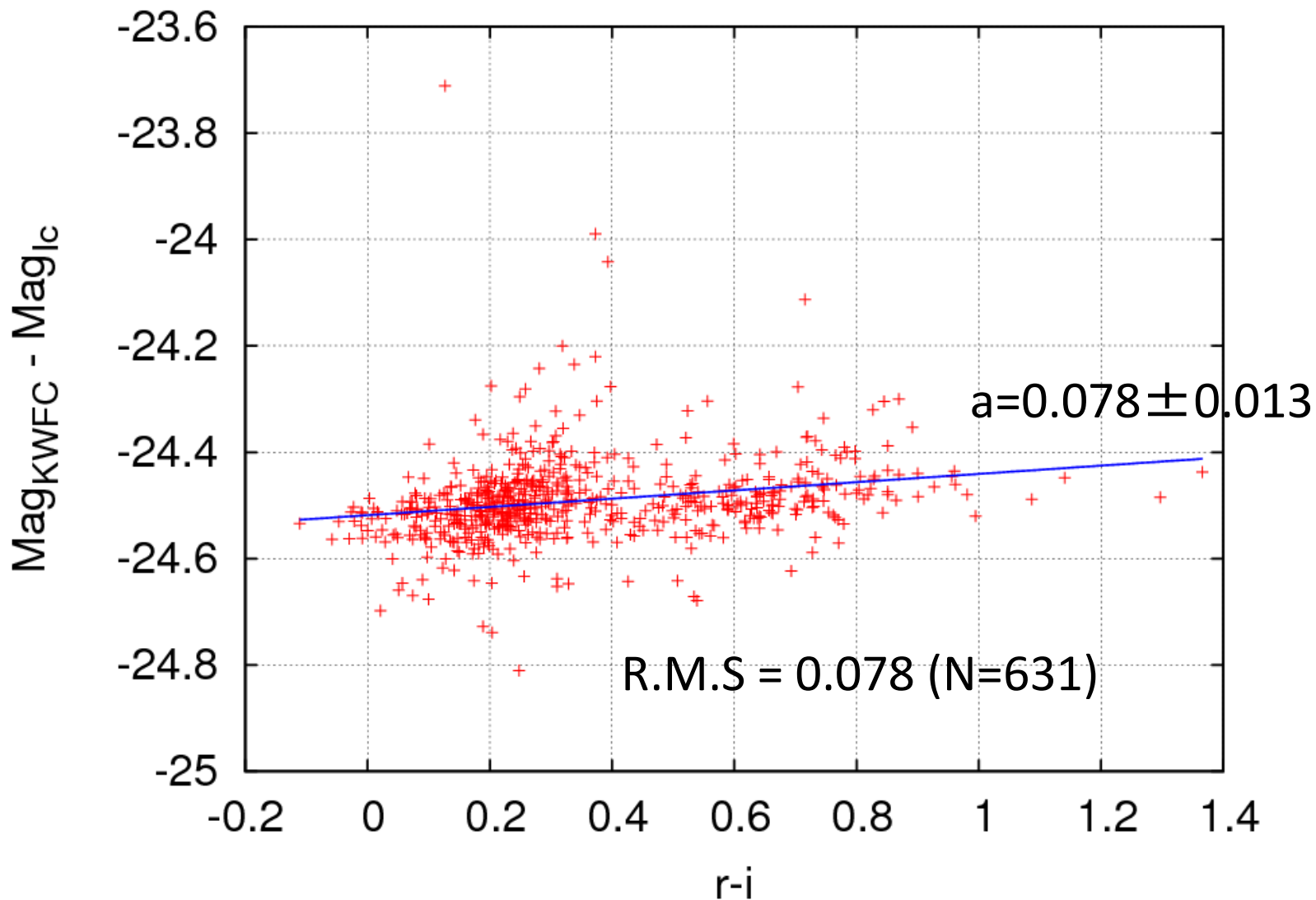
# 天体のマッチング方法

- Yamauchi, PASP 123, 1324(2011)のXYZ法
  - 天球を半径 $10^5$ の球として、天体の位置 $(\alpha, \delta)$ を直交座標系 $(x, y, z)$ に変換、さらに整数値にする
    - $x = \cos\alpha \cos\delta \rightarrow ix$
    - $y = \sin\alpha \cos\delta \rightarrow iy$
    - $z = \sin\delta \rightarrow iz$
    - KWFCのpixel scaleは $0.946''/\text{pixel}$ なので、xyzは $10^{-5}$ の桁まで必要
    - データベースではix, iy, izについてインデックスを作成
- ある天体 $(ix', iy', iz')$ に同定できる天体候補を検索する
  - $ix = ix' - 1, ix', ix' + 1$
  - $iy = iy' - 1, iy, iy' + 1$
  - $iz = iz' - 1, iz, iz' + 1$を検索すればよい( $ix, iy, iz$ の組み合わせは27通り)

# 測光システムと参照カタログ

- 測光標準星としてUCAC4カタログの $r, i$  magを採用
  - 測光データはAPASSがもとになっている
    - BVgri等級が利用可能
    - 一部データがない領域が存在？
  - $-10 < b < 10$ 、 $50 < l < 220$ の天体で、APASSの測光値があるものをデータベースに登録 ( $N \sim 300$ 万)
  - KISOGP: Bessell  $I_c \rightarrow$  Lupton (2005)を使って、 $I_c$ に変換
  - $I_c = r' - 1.2444 * (r' - i') - 0.3820$  ( $\sigma = 0.0078$ )
- $\text{Mag}_{\text{KWFC}} - \text{Mag}_{I_c}$  の中央値を求めて等級ゼロ点を決定
  - 1frameの天体数:  $\sim 10^4$
  - UCAC4カタログのうちデータベース登録済みの天体数:  $\sim 3 \times 10^6$
  - 処理時間  $\sim 1\text{-}5$ 秒/frame  $\rightarrow \sim < 40$ 秒/exposure (8 frames)

# 測光システムと参照カタログ

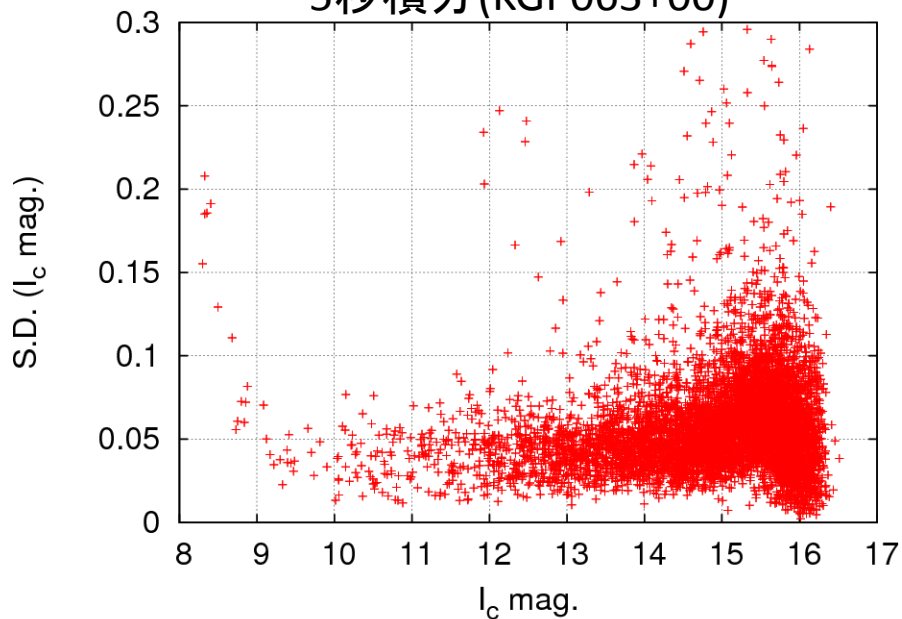




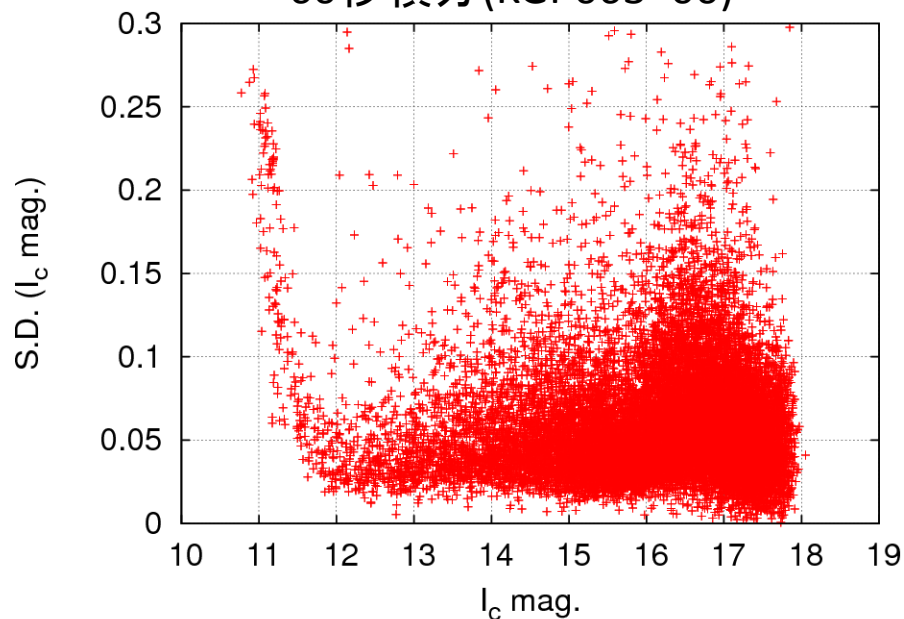
# 検出限界・飽和限界等級

- 5秒積分:  $9.5 < l_c \text{ mag.} < 15-15.5$
- 60秒積分:  $11.5-12 < l_c \text{ mag.} < 16-17$ 
  - おおむね当初予定していた限界等級を達成できている

5秒積分(KGP063+00)

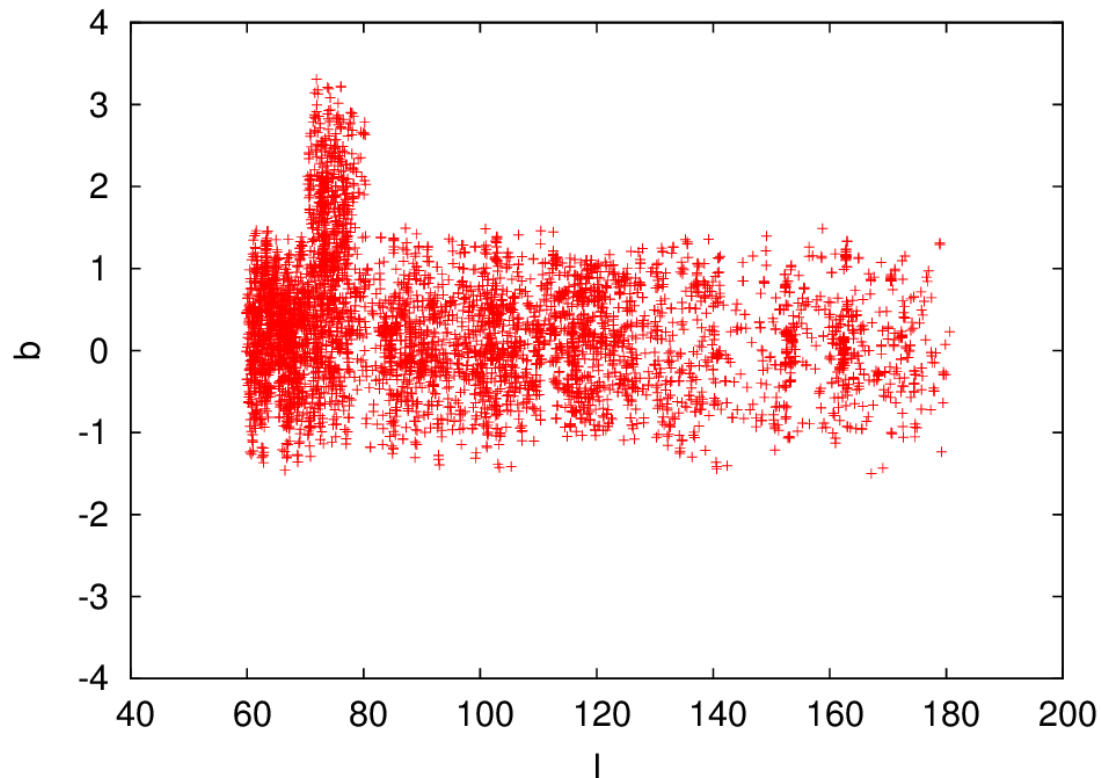


60秒積分(KGP063+00)



# 検出した変光星

- 振幅0.8等以上の変光星候補: **約6000個**
  - 銀経:  $61-179^\circ$  の範囲
  - Icバンドで11-17等くらいの天体(明るいほうは観測できない)
  - うち100個程度はGCVSに登録済みの変光星



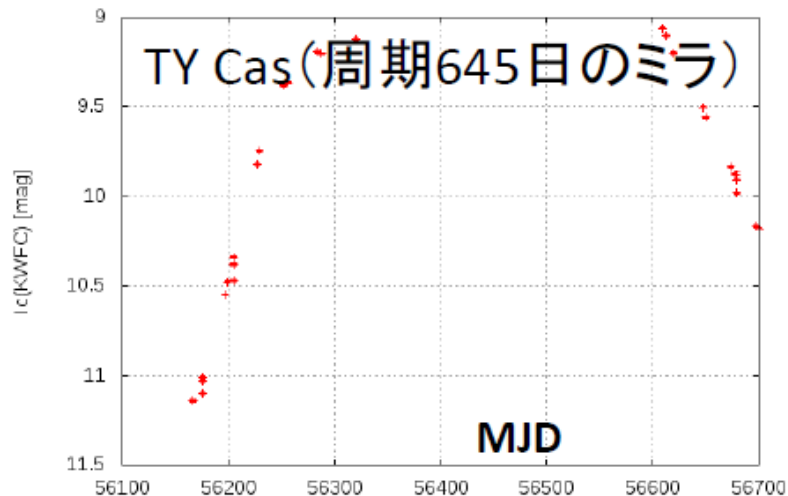
# 既知の変光星

- KISOGPで観測データのある既知変光星
  - GCVS: 890
  - NSV: 270
  - ASAS: 4
  - ミラ、SR、DCEP等が多い

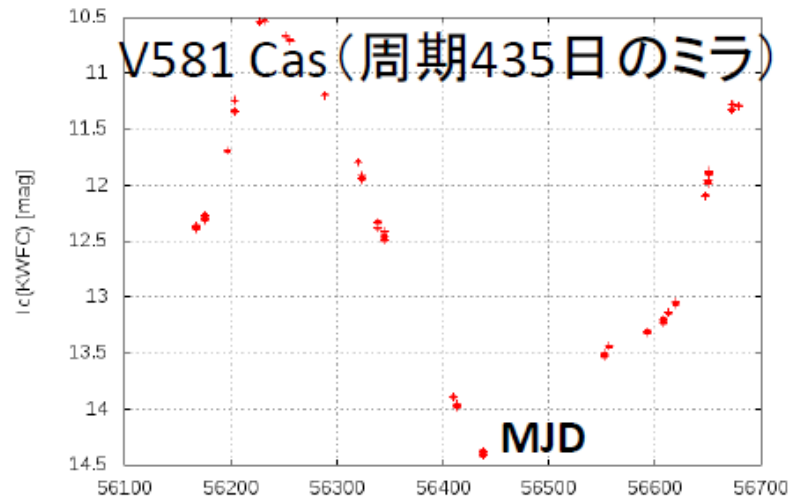


# ライトカーブの例（既知天体）

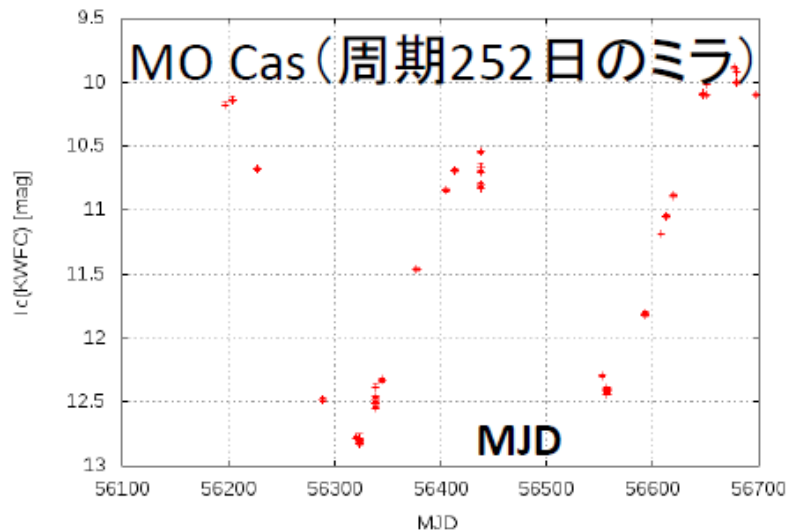
GCVS160032 (VTyp=M, SpTyp=M6, P=645.0)



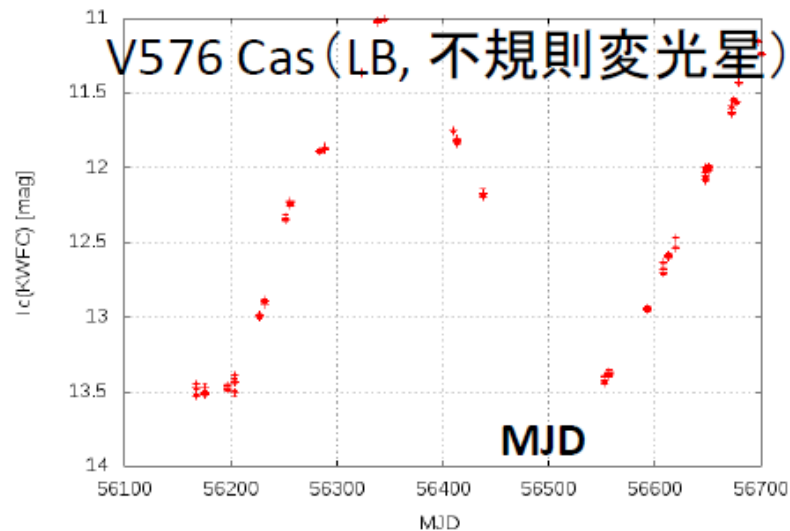
GCVS160581 (VTyp=M, SpTyp=M8, P=435.)



GCVS180277 (VTyp=M, SpTyp=M8, P=252.25)

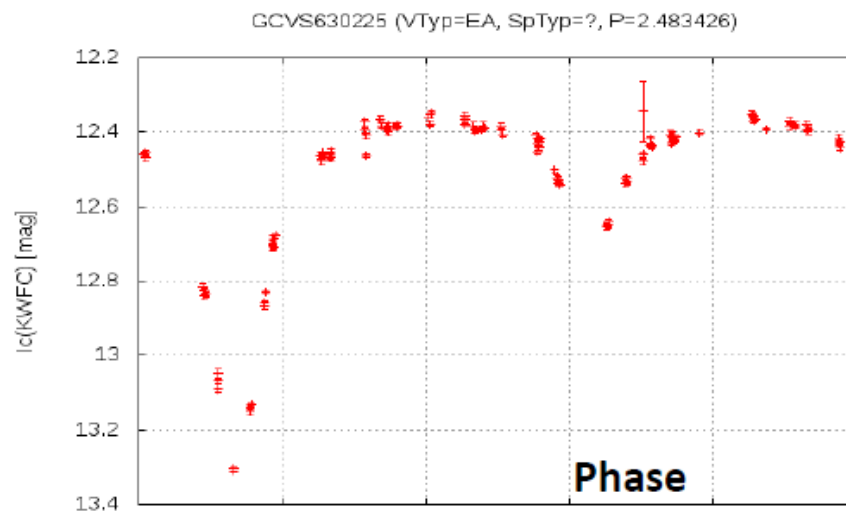
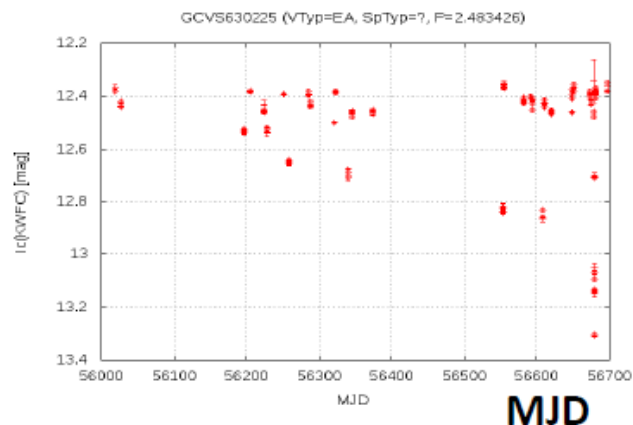


GCVS180576 (VTyp=LB, SpTyp=M6, P=?)

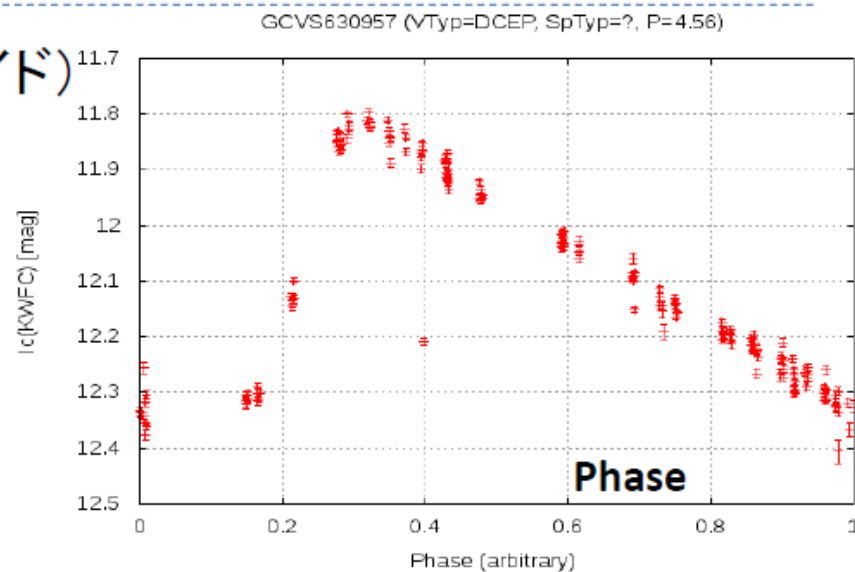
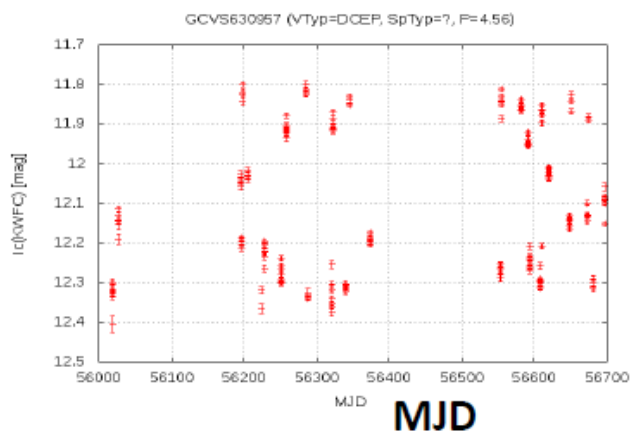


# ライトカーブの例 (既知天体)

## HY Per (周期2.48日の食連星)



## V957 Per (周期4.56日のセファイド)



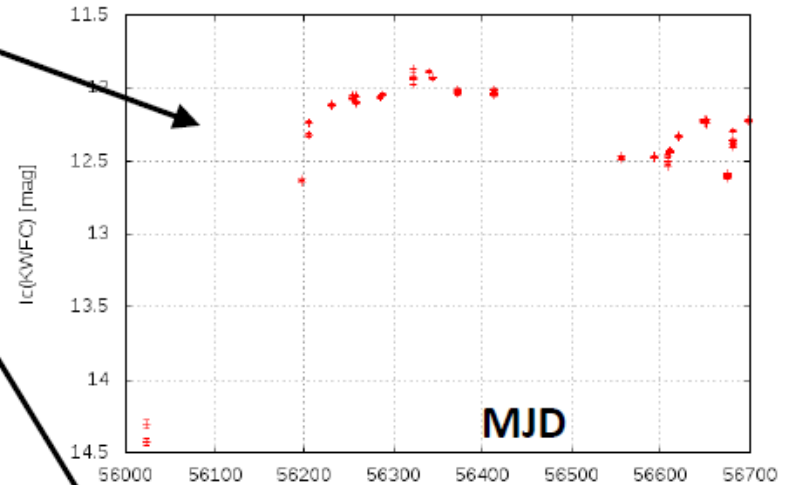
# ライトカーブの例 (既知天体)

V582 Aur (FU Ori type:)

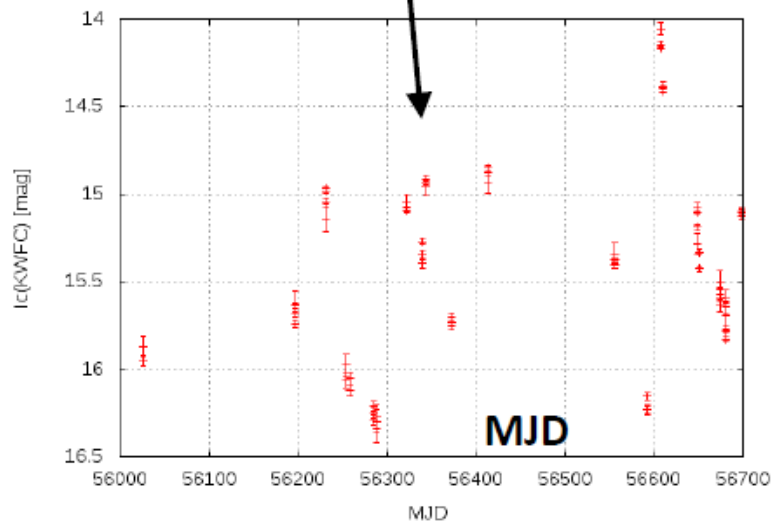
V635 Cas (XNGP, high-mass  
X-ray binary)

IV Aur (IA: poorly studied irregular  
variables of early (O—A) type)

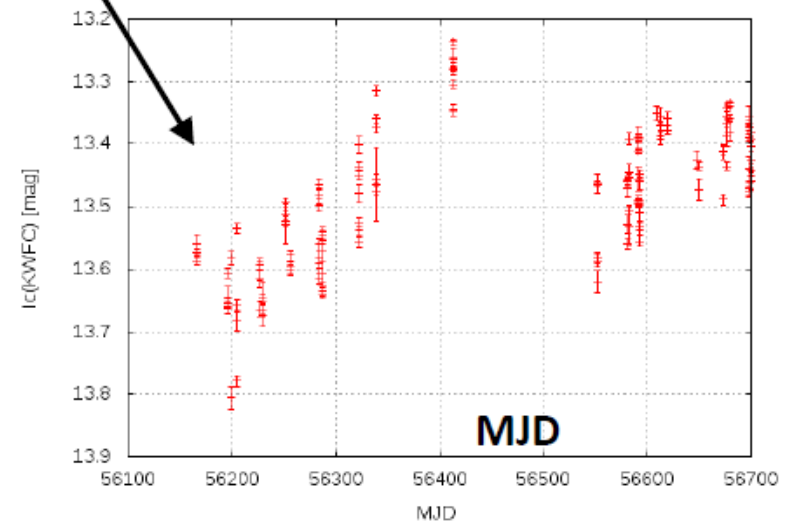
GCVS080582 (VTyp=FU, SpTyp=?, P=?)



GCVS080239 (VTyp=IA, SpTyp=?, P=?)



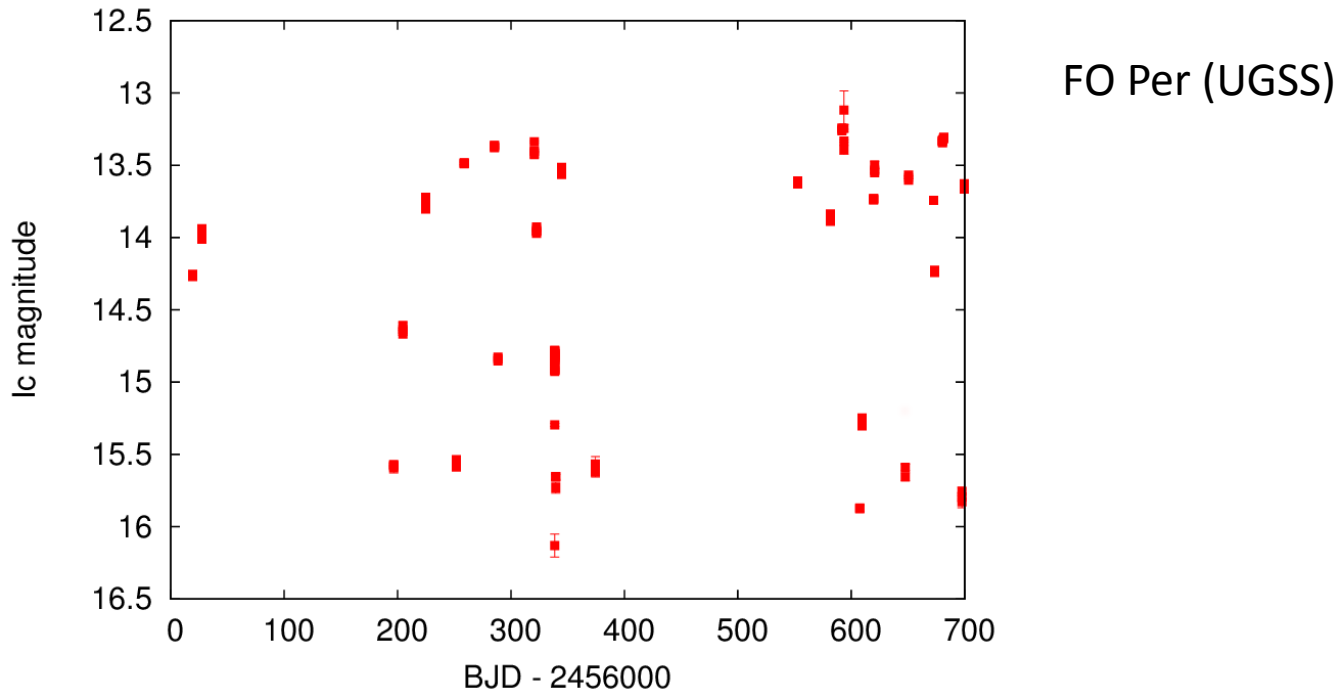
GCVS180635 (VTyp=XNGP, SpTyp=Be, P=?)



# 既知の矮新星

- 15 天体

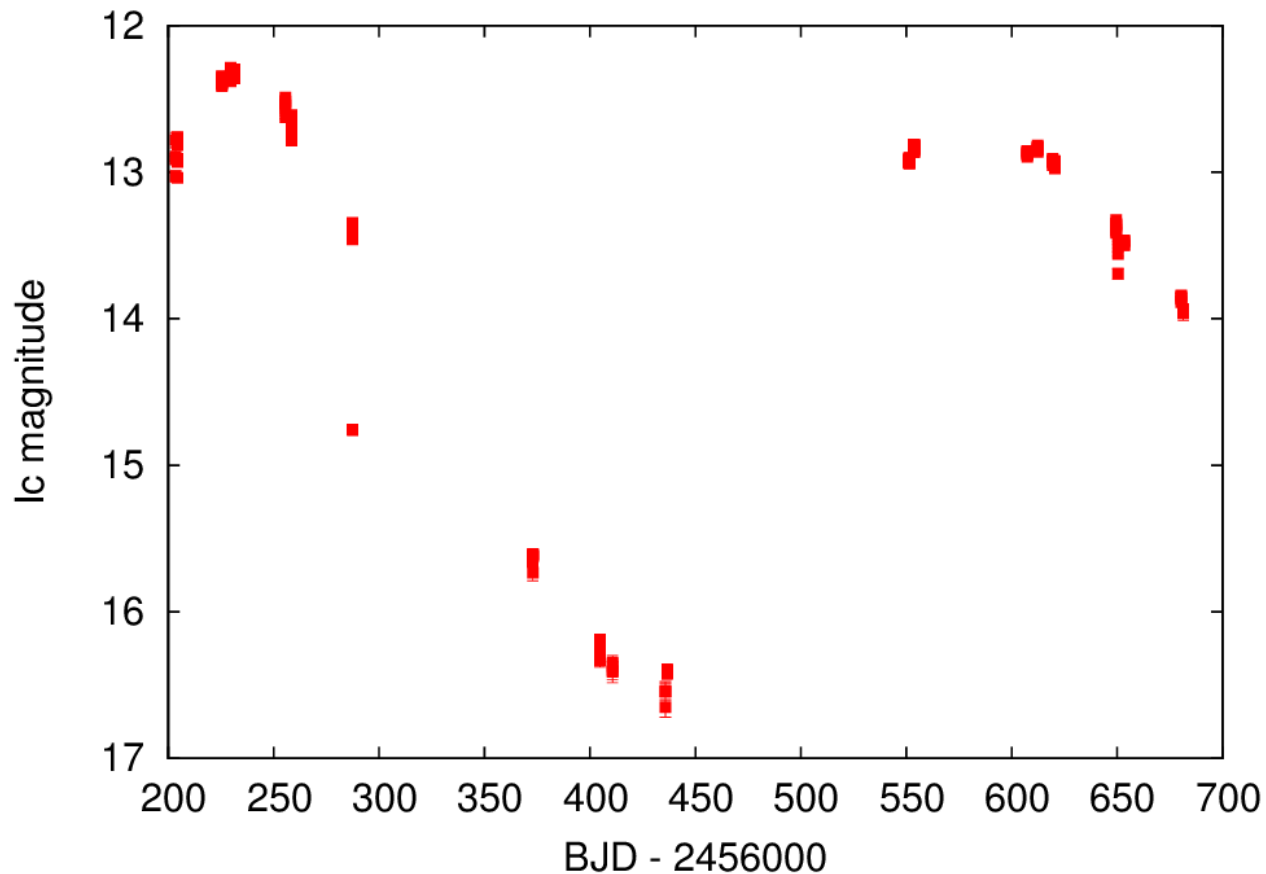
- FS Aur, V516 Cyg, V550 Cyg, V823 Cyg, V1363 Cyg, V1377 Cyg, V1390 Cyg, V1711 Cyg, V502 Cas, HM Gem, KM Lac, CZ Ori, V344 Ori, FO Per, NS Per





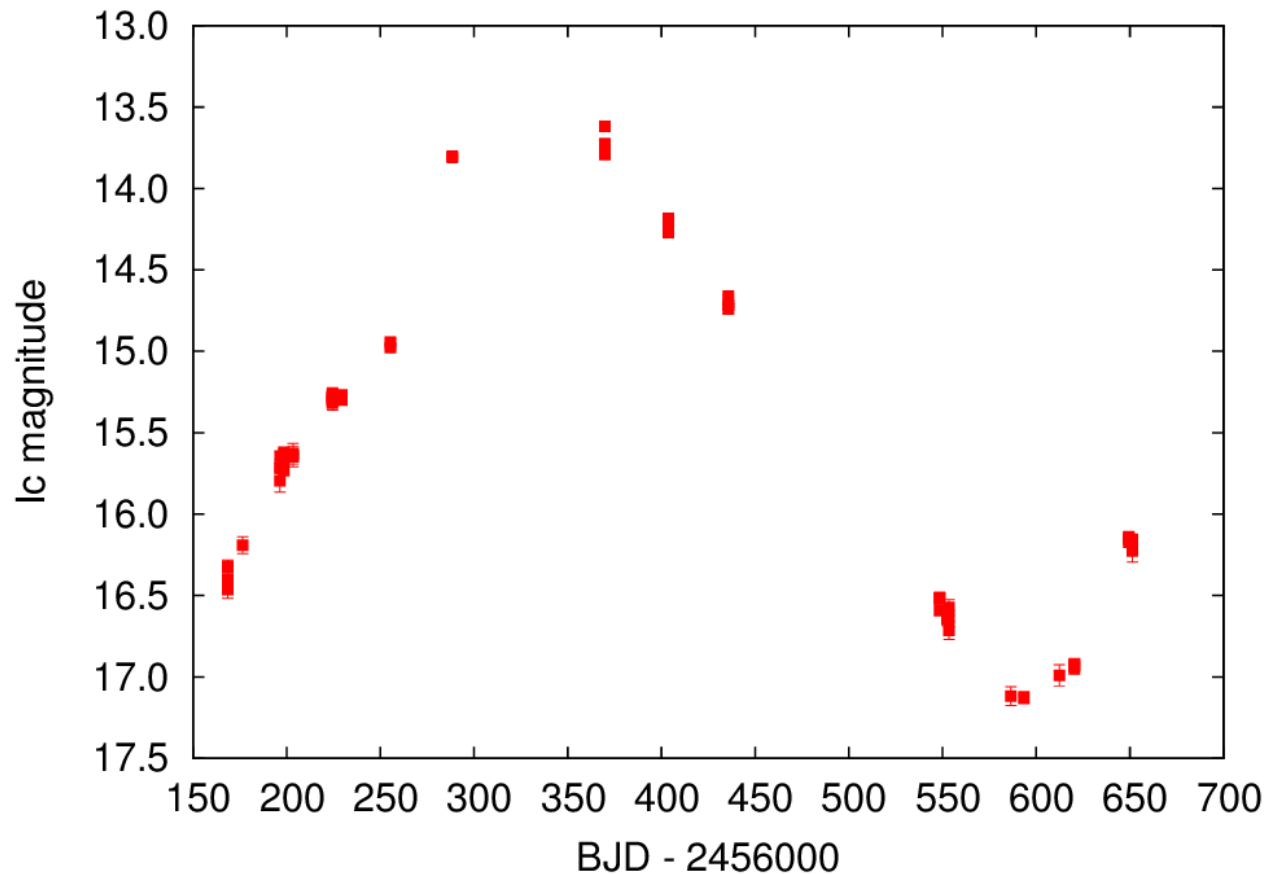
# 大振幅の変光星の例1

- KGP J200746.9+354759
  - 既知の変光星ではない
  - 2MASS, AKARI, WISEカタログにデータ有



# 大振幅の変光星の例2

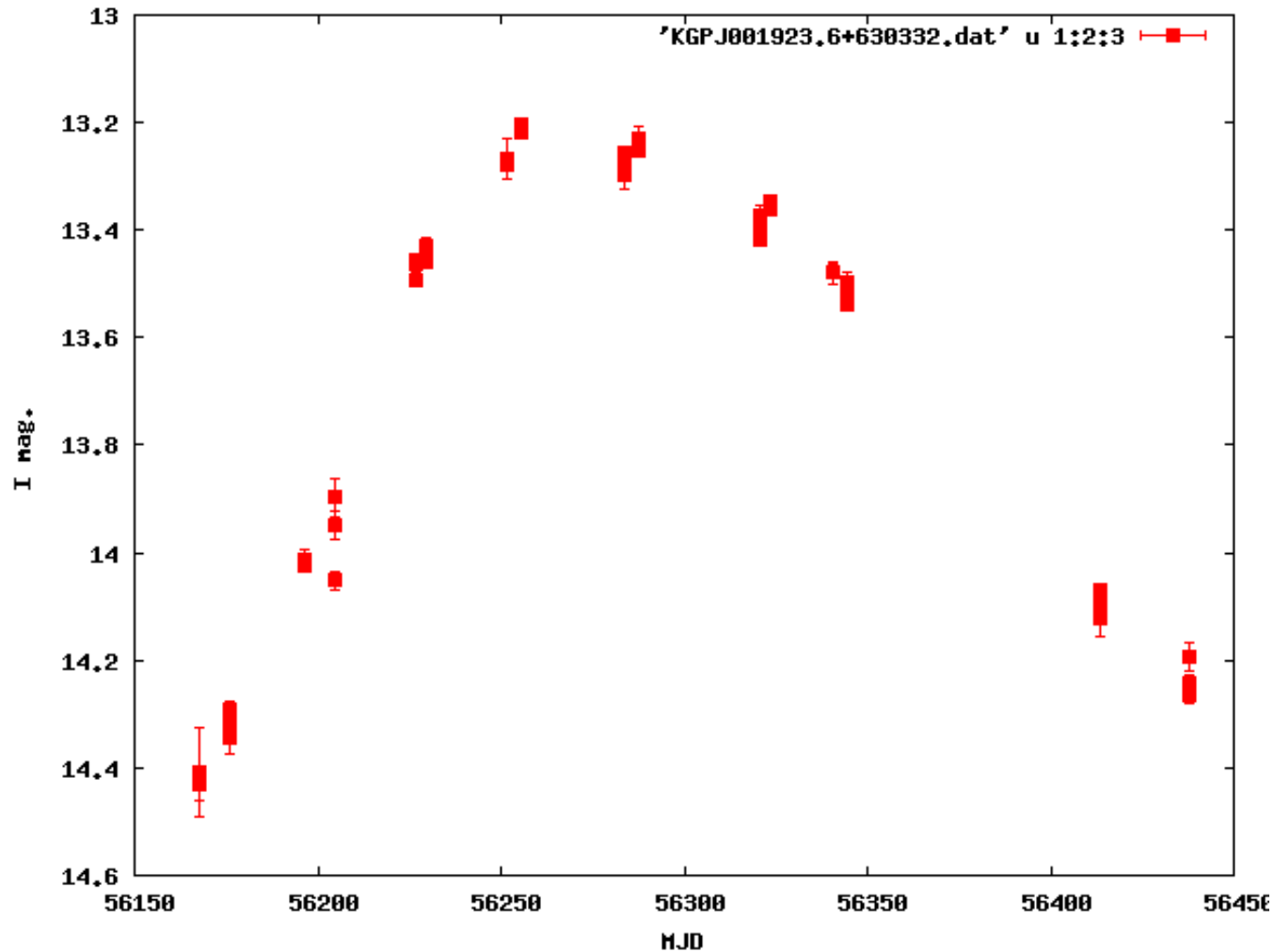
- KGP J194910.0+260405
  - 既知の変光星ではない
  - 2MASS, IRAS, AKARI, WISE, MSX等のカタログにデータあり



# KGPJ001923.6+630332

- ミラ型？

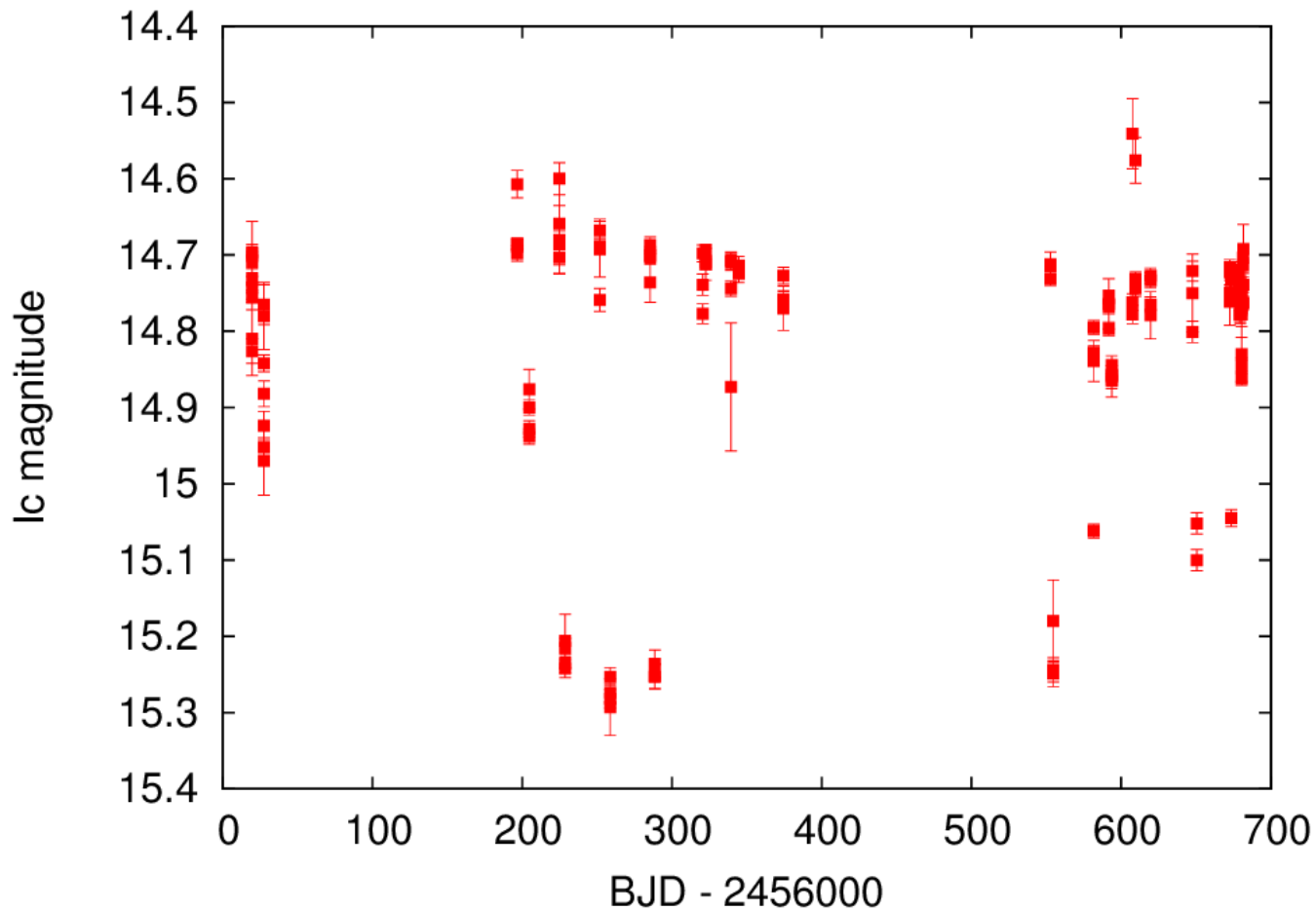
– MSX, AKARI, WISEカタログに対応天体あり



# 短周期変光星の例

- KGPJ041954.2+502440

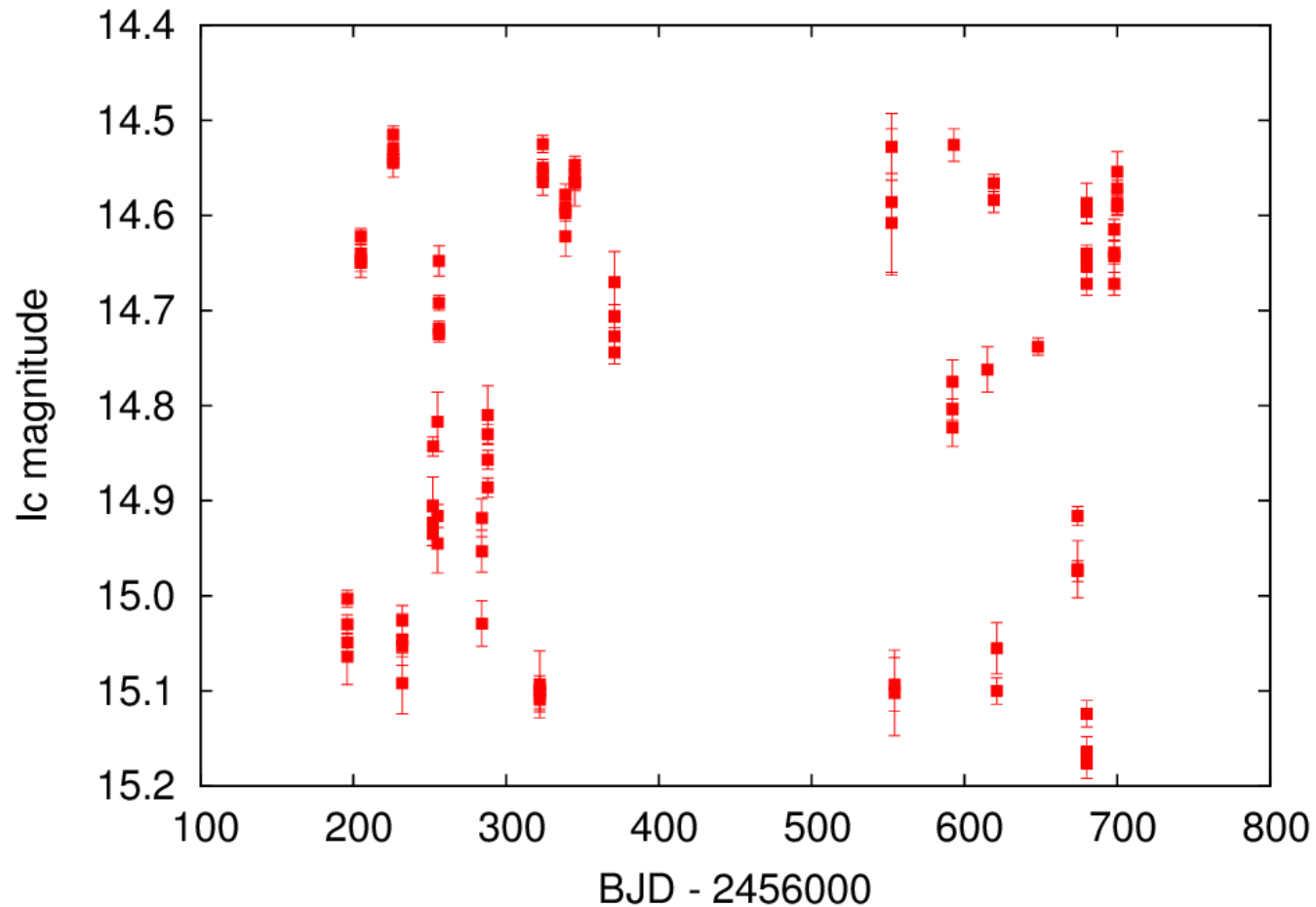
– 食連星？





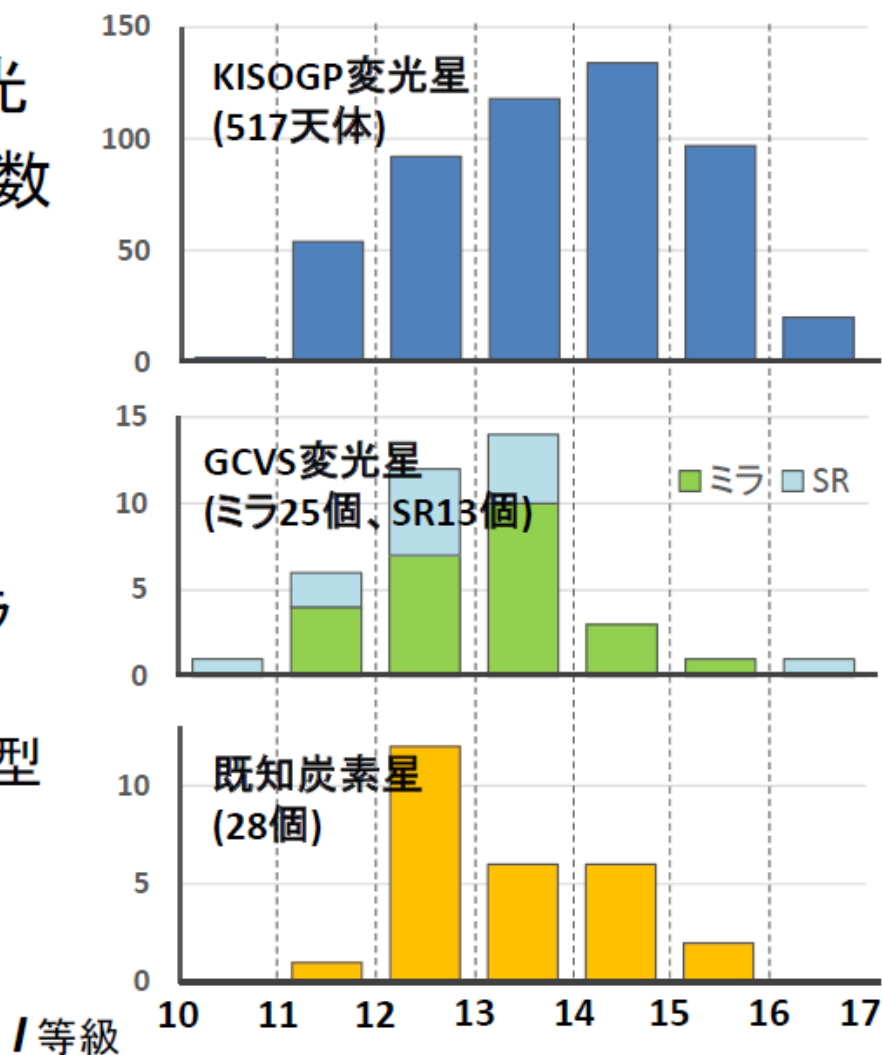
# 短周期変光星の例

- KGPJ015515.8+610348
  - 食連星 or RR Lyr-type ?



# 大振幅長周期変光星の検出(予備解析)

- SExtractorによる開口測光
- 振幅1等級以上、検出回数20点以上
- 100日以上スケールの変光を目で見て確認
- 517個
  - 既知の変光星は52個(ミラは25個)
  - 既知の炭素星は28個、M型星は23個



# 分光追観測

- 国立天文台 岡山天体物理観測所 188cm望遠鏡
  - KOOLS(可視低分散分光器)
  - ISLE(近赤外線撮像分光装置)
  - 2013年10月(KOOLS・5晩)
  - 2014年1~2月(KOOLS・5晩、ISLE・5晩)
- 兵庫県立大学 西はりま天文台 なゆた望遠鏡
  - MALLS(可視中低分散分光器)
  - 2013年11月に公募観測(4晩)



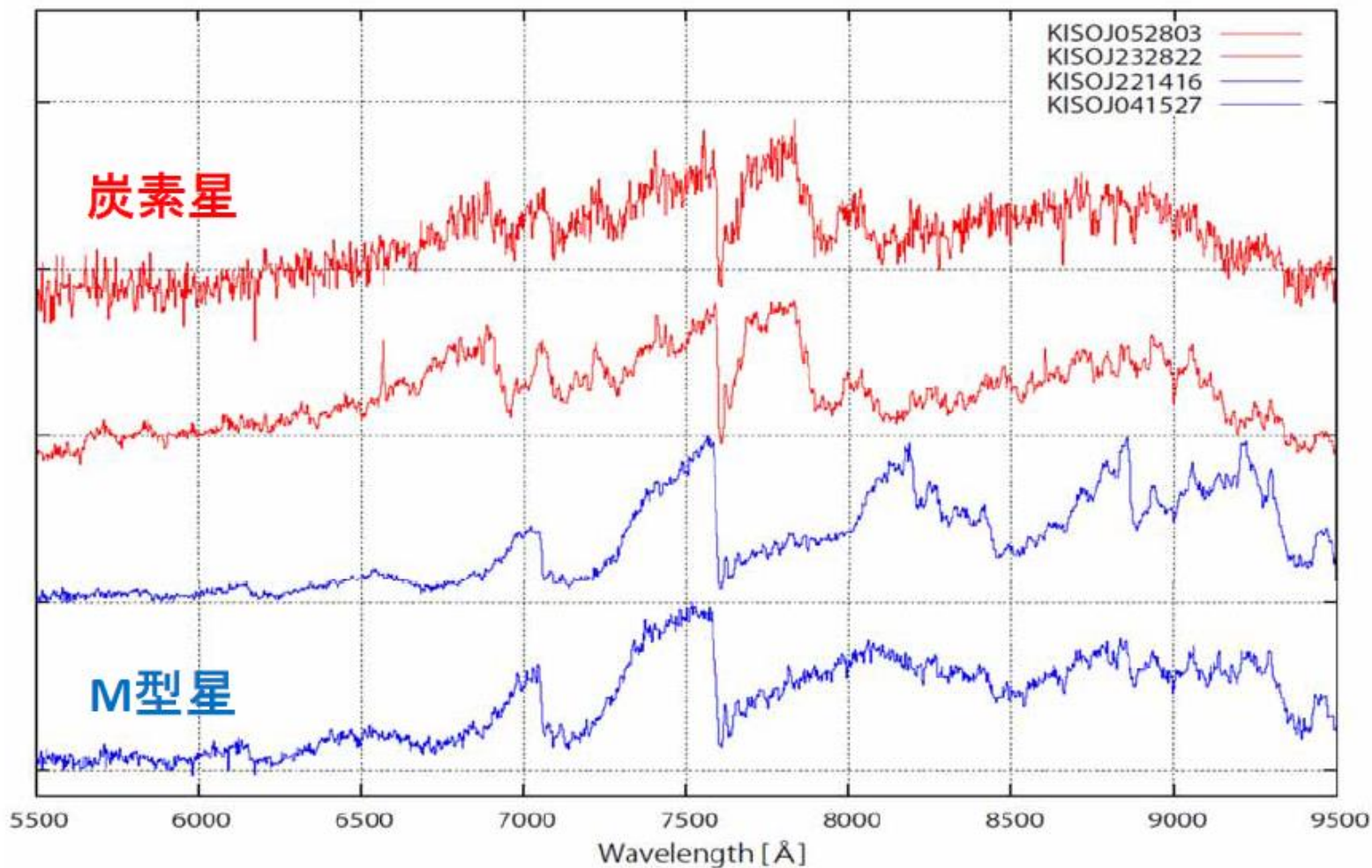
# これまでの分光観測

- 岡山 13B: KOOLS 5晩(2013年10月)
  - KISOGP天体 **19**個、参照星 約20個 (KOOLS)
- 西はりま13後期: MALLS 4晩
  - KISOGP天体 **75**個、参照星 3個 (MALLS)
- 岡山14A: KOOLS 5晩、ISLE 5晩(2014年1, 2月)
  - KISOGP天体 **16**個、参照星 3個 (KOOLS)
  - KISOGP天体 **32**個、参照星 約10個 (ISLE)



# M型星と炭素星のスペクトル

西はりま天文台なゆた望遠鏡+MALLSで取得したスペクトル



# M/Cの区別(予備解析)

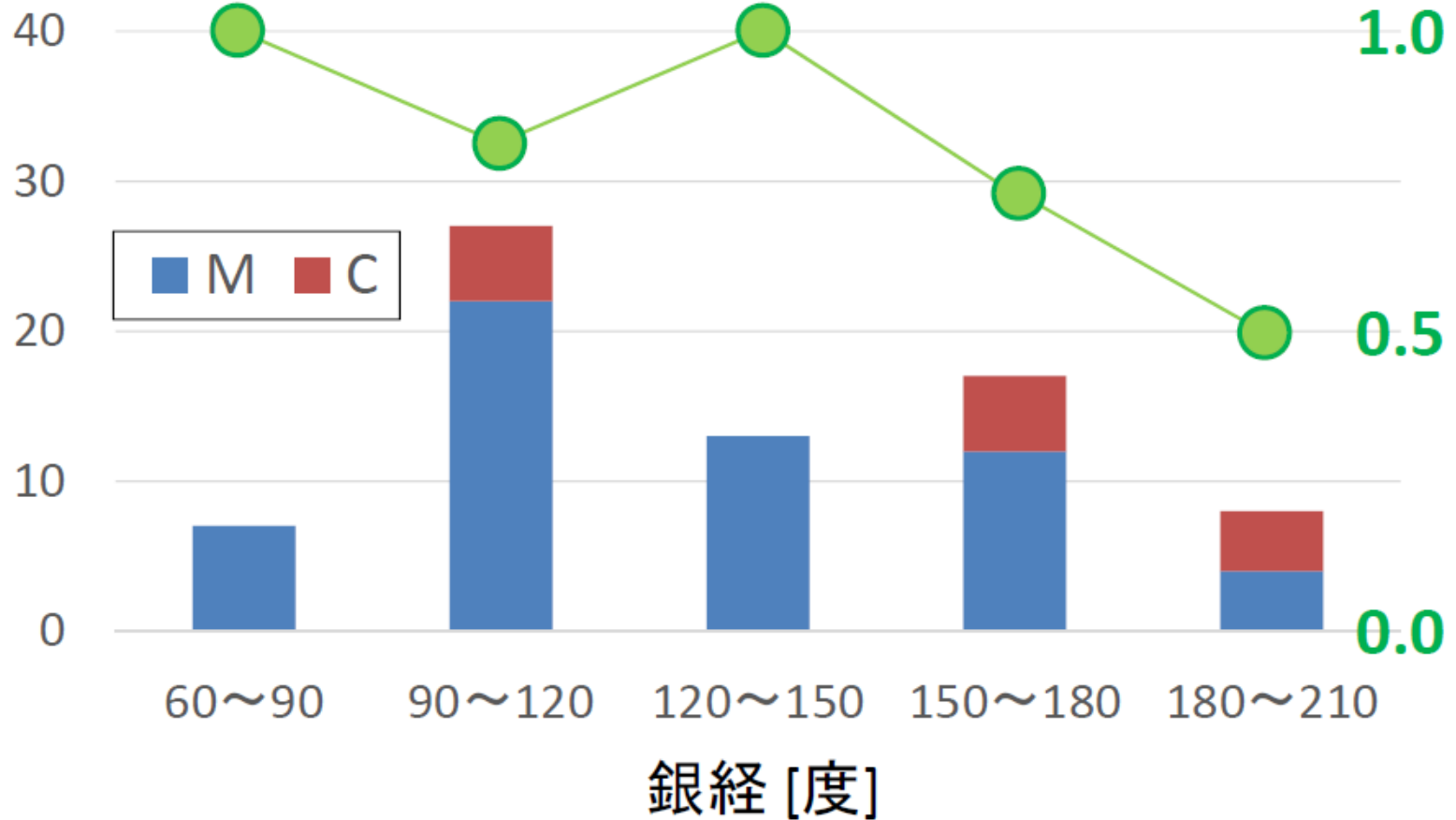
観測時期 (装置)	M型	C型	その他	計
2013年10月 (KOOLS)	9* (1)	1 (0)	9 (2)	19
2013年11月 (MALLS)	42 (8)	10 (8)	23 (10)	75
2012年1~2月 (KOOLS)	7 (0)	3 (2)	6 (5)	16
2014年1~2月 (ISLE)	近赤外線分光での分類はまだ			32
計	58 (9)	14 (10)	38 (17)	142

\* 1天体はC型の記載があったが、取得したスペクトルはM型に見える。

# M/C比の銀経依存性

天体数

M/C



# 短周期変光星の周期決定

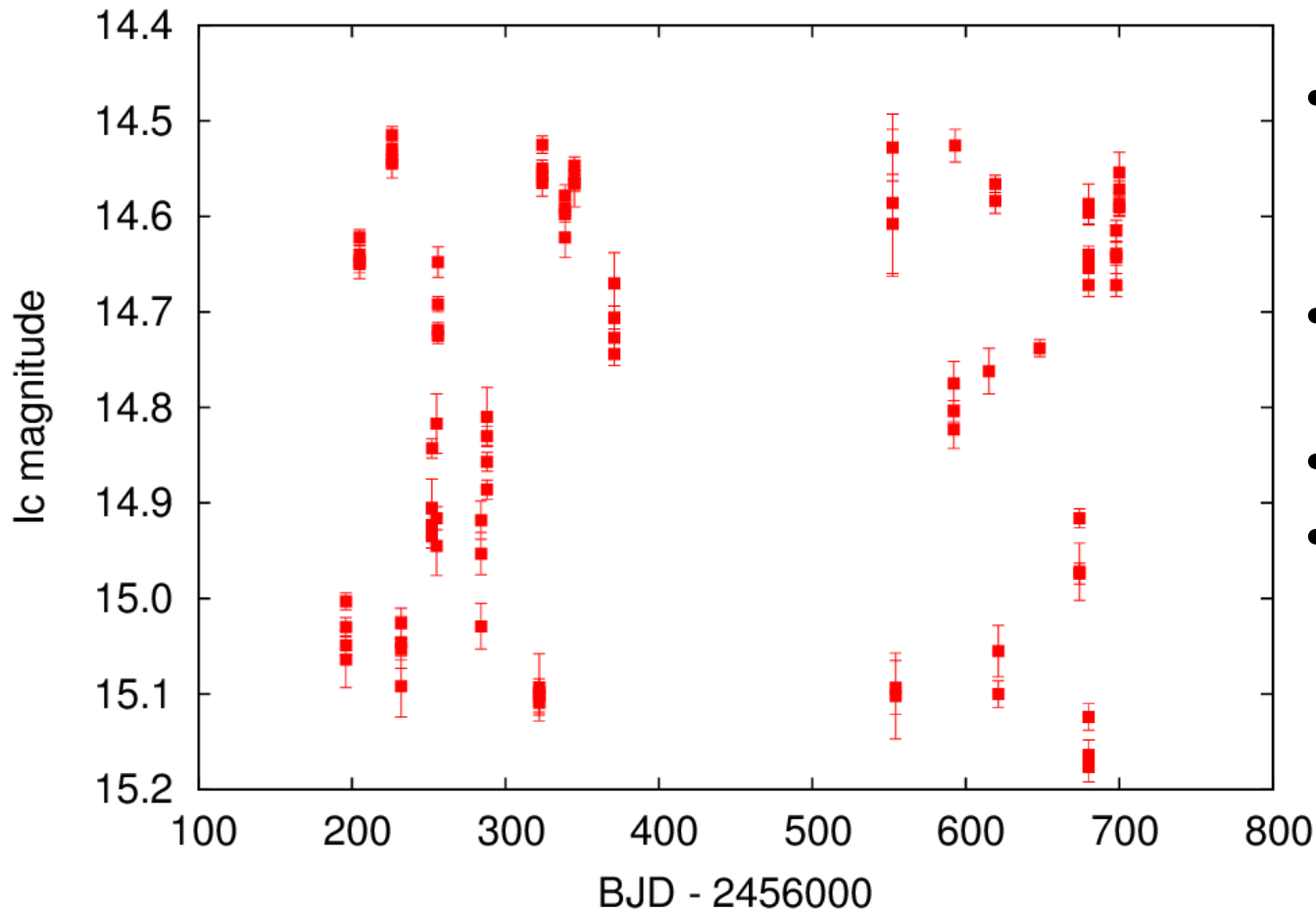
- KISOGPの観測間隔
  - 1視野あたり1日1回
    - 5秒積分 × 1 + 60秒積分 × 3
  - サンプルング間隔が $\sim 1/\text{day}$
  - ナイキスト周波数  $\sim 0.5 \text{ cycle / day}$
- 短周期 ( $P < 1 \text{ 日}$ ) の変光星 (RR Lyr型など) の周期決定や変光星のタイプの決定が困難

# 時間分解能を上げた観測

- 変光星の検出にはすでに十分なデータがある
- 変光星のタイプや周期の決定のために時間分解能を上げた観測を2014年1月に実験
  - 特定視野を1-2時間に1回、1晩に3回程度観測

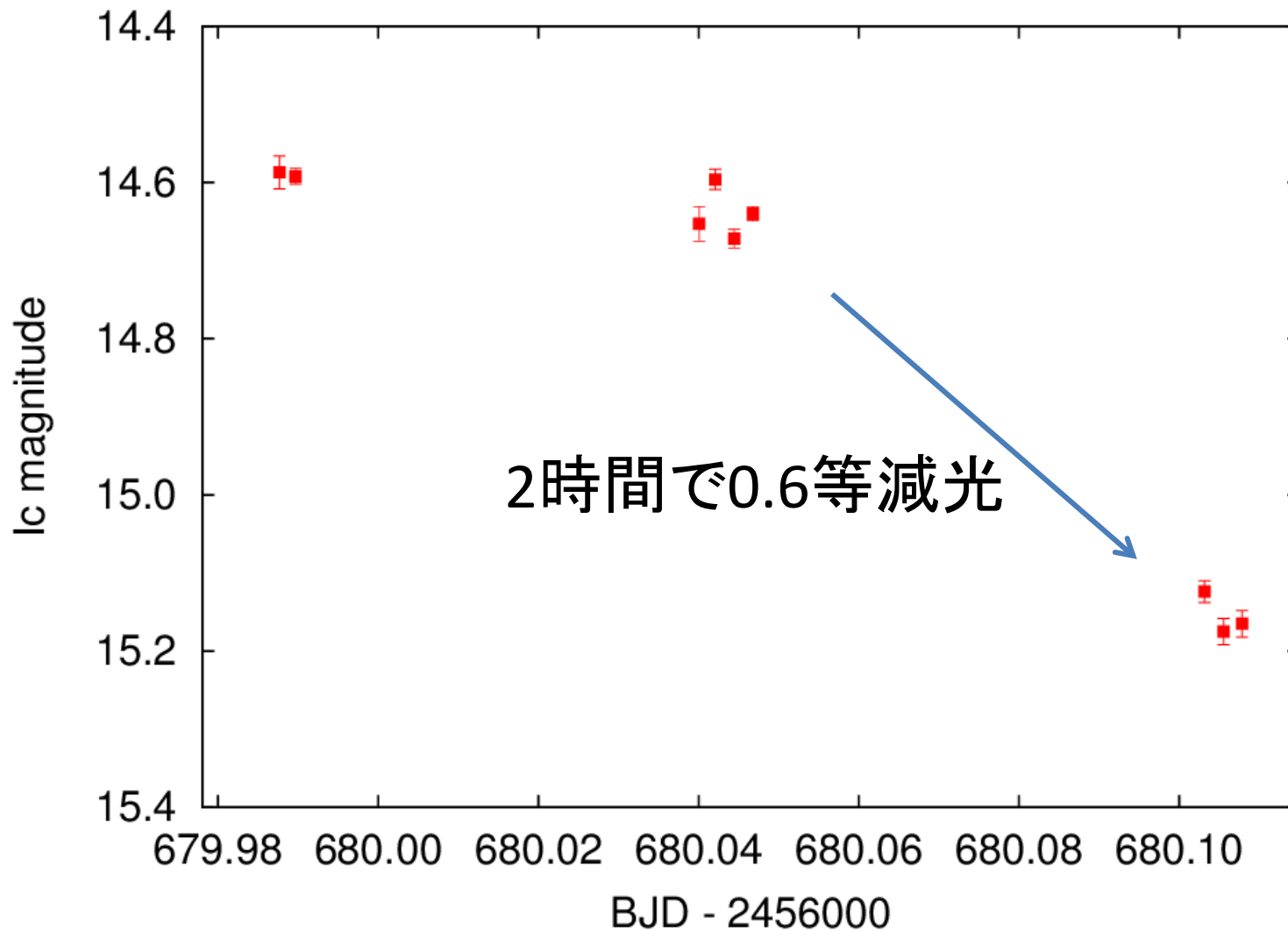


# KGPJ015515.8+610348

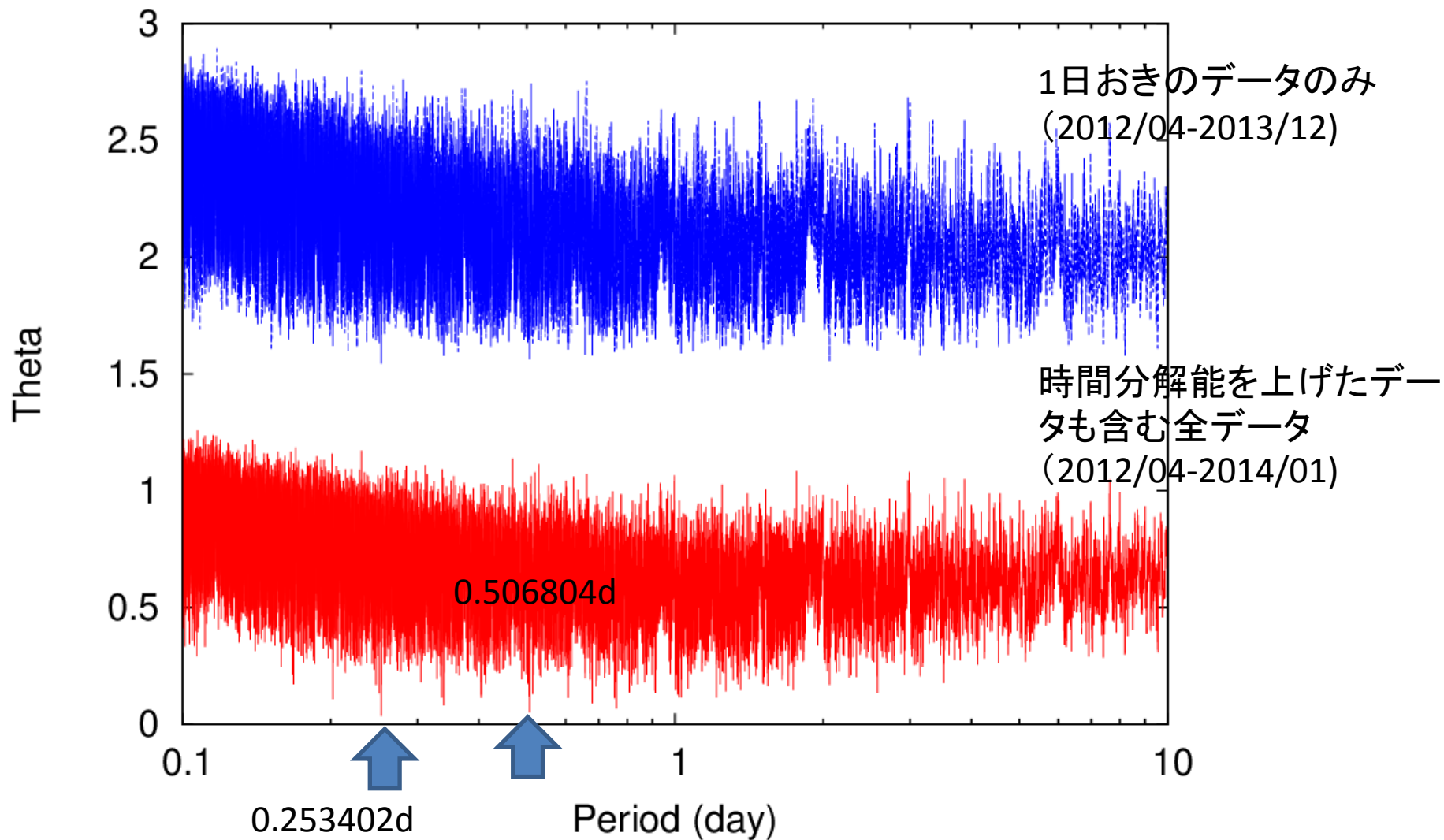


- SDSSカタログにデータがある
  - $g-r=1 \rightarrow K$ 型?
- 観測日毎に明るさが違う
- 変光範囲: 0.6等
- W UMa-type?

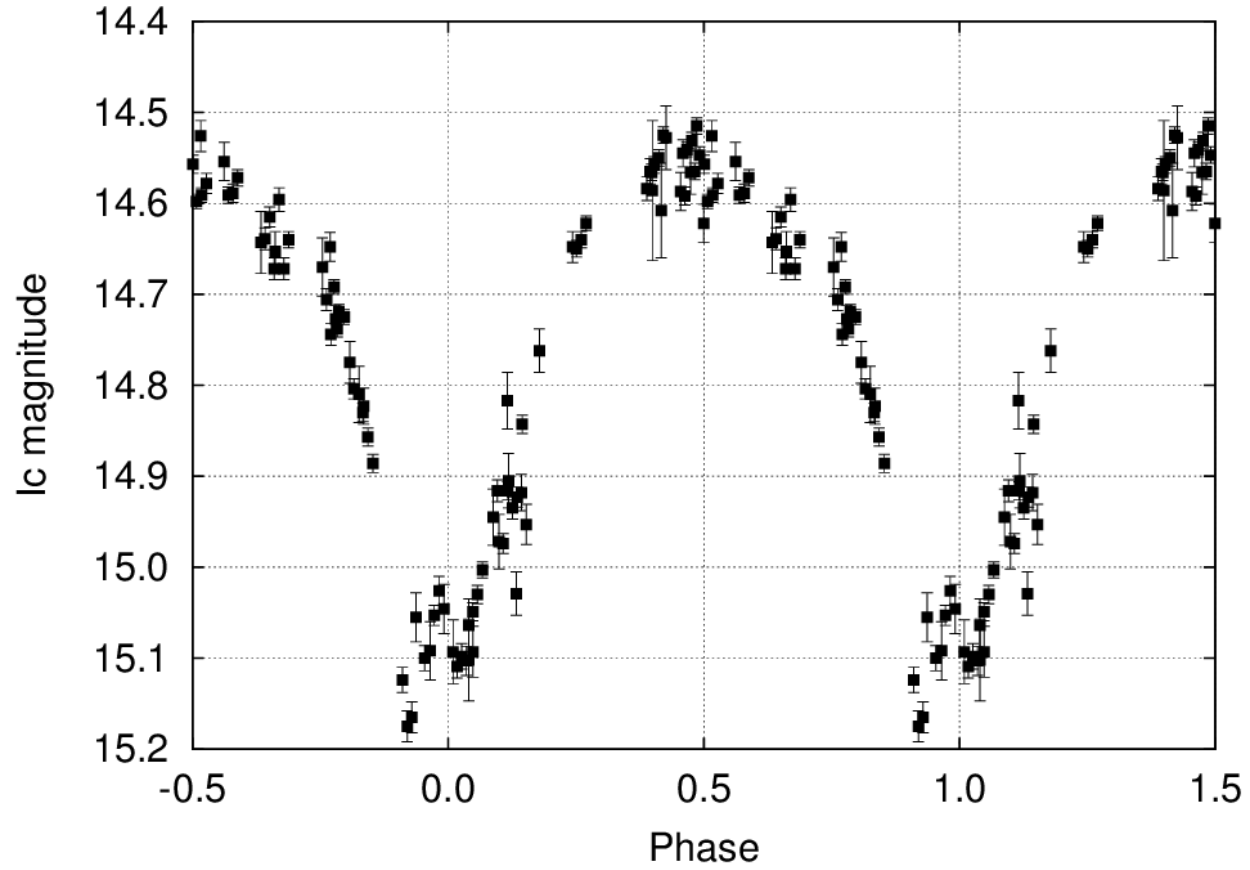
# 時間分解能を上げた観測



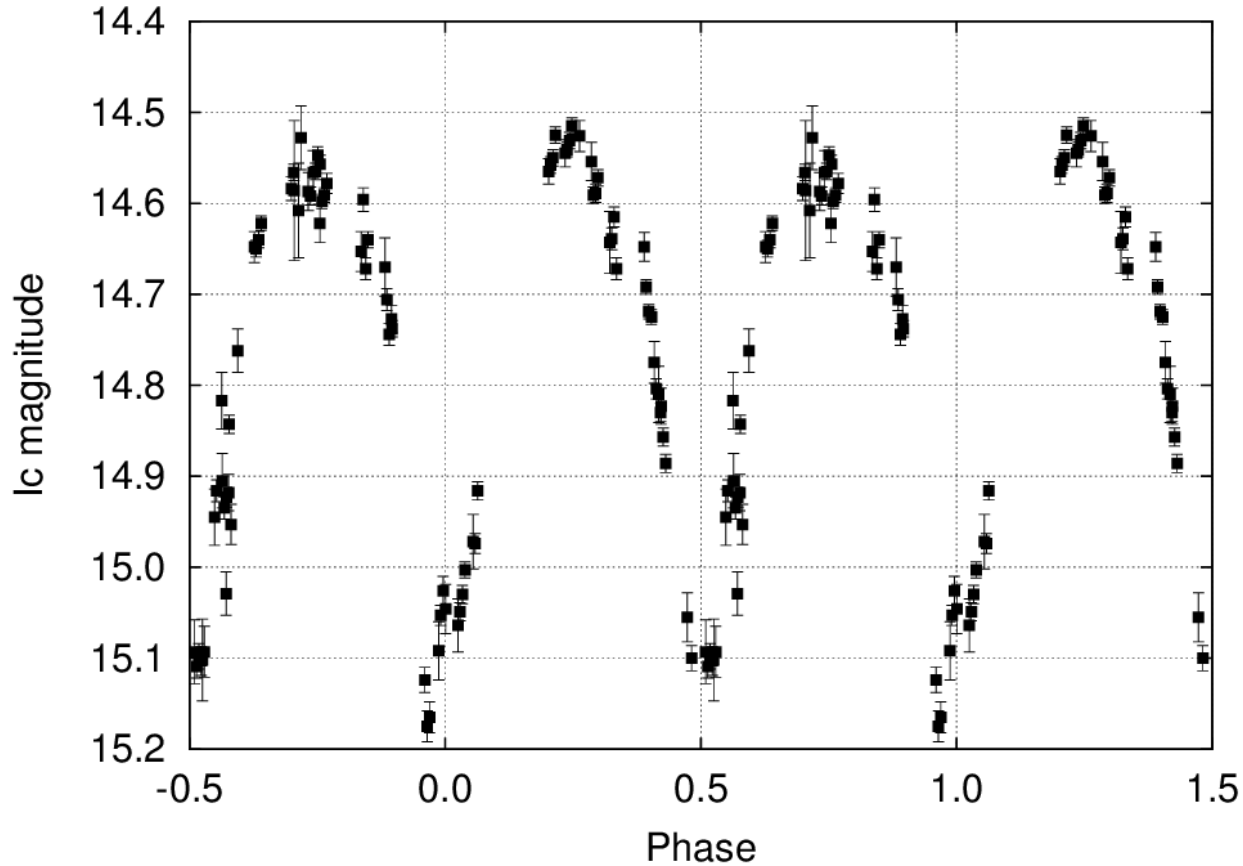
# PDMによる周期解析



P=0.253402d



# P= 0.506804d



- W UMa型ならこちらの周期が正しい？
- 極小光度のばらつき→別な周期の可能性？



# 突発天体検出への応用

- 現在の観測：1視野あたり4 dithering
  - 所要時間：12.5分
- 検出した全天体（1exposureあたり $\sim 10^5$ ）について
  - 2回以上の検出があるものを選択



- 過去90日以内の検出の有無をチェック
  - 検出がなければ新天体候補と認定



- 過去60日以内の検出がある天体について、平均光度を計算
  - 観測時の光度と0.5等以上の差があれば増光/減光天体候補と認定

# 変光星検出への応用

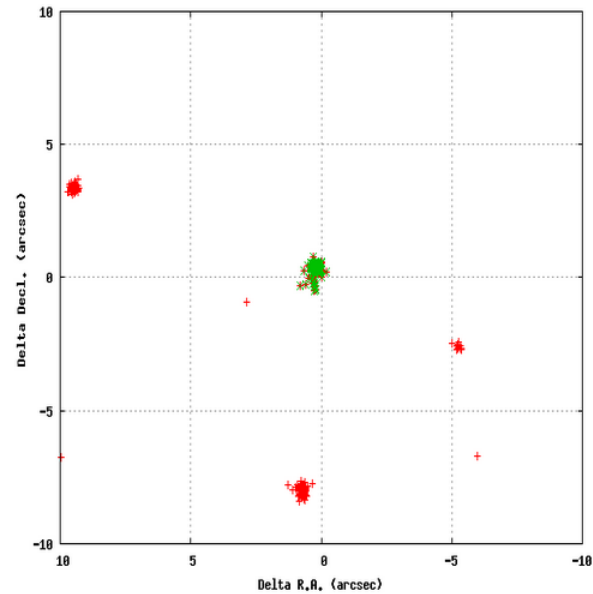
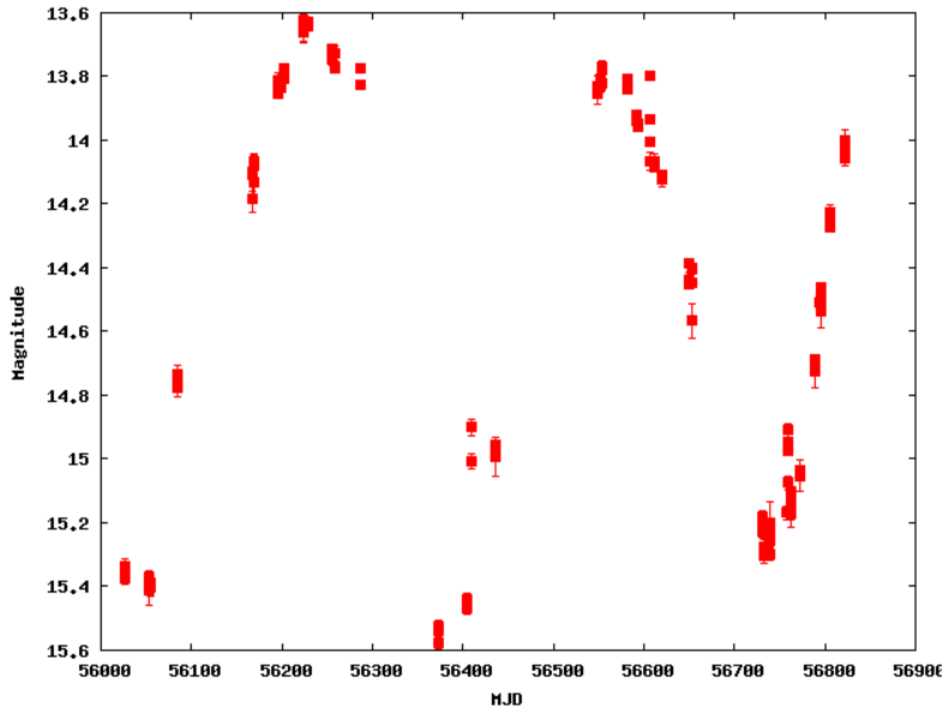
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 履歴(S) ブックマーク(B) ツール(T) ヘルプ(H)

query result

vega.kiso.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kwfc/LCG.py?coord=301.83126617+33.694826548&object=

Google

## Query result (301.83126617 +33.694826548)



Object	Obs date (MJD)	Mag.	Error	X	Y	OID	Frame
200719.5+334142	56025.74705	15.335	0.022	2180.05	1504.08	<a href="#">220735273</a>	KWFC00083270
600719.5+334142	56025.74929	15.270	0.022	6402.01	1201.82	<a href="#">600730009</a>	KWFC00083280

vega.kiso.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kwfc/obj\_plot.py?ra=301.83126617&de=+33.694826548

Fading? [201013.4+340809](#) 16.1564884 0.0 15.5640734308/15.4641304/15.6418312 3728.319 1326.387

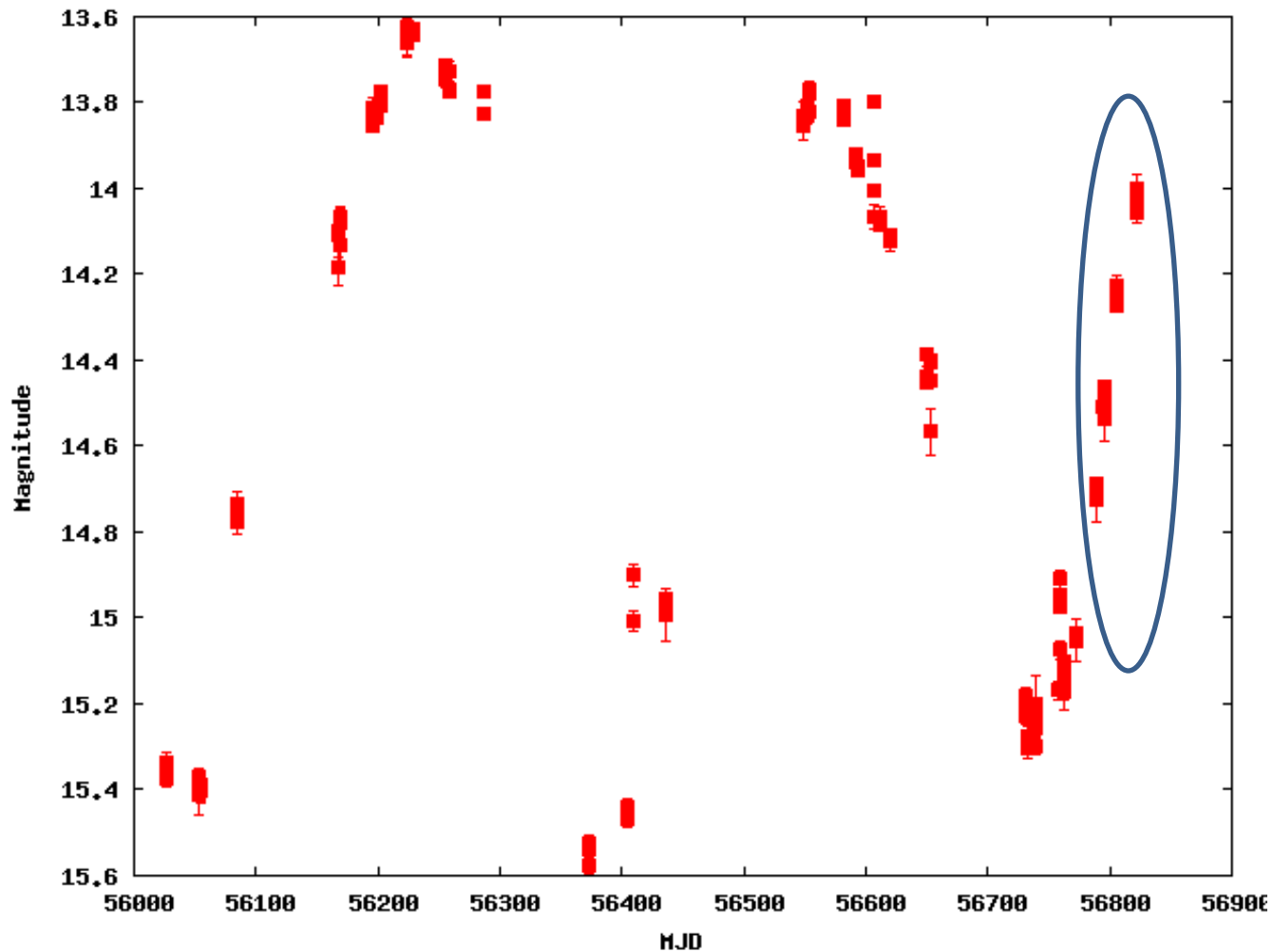
Fading? [200952.4+321236](#) 15.1937076 0.0 14.156509329/13.5450928/14.728612 163.971 29.622

Fading? [200952.4+321235](#) 15.2725264 0.0 14.156509329/13.5450928/14.728612 3932.659 401.721

Fading? [200441.4+321357](#) 16.8164708 0.0 15.9552798545/15.2931124/16.290082 3953.685 464.109

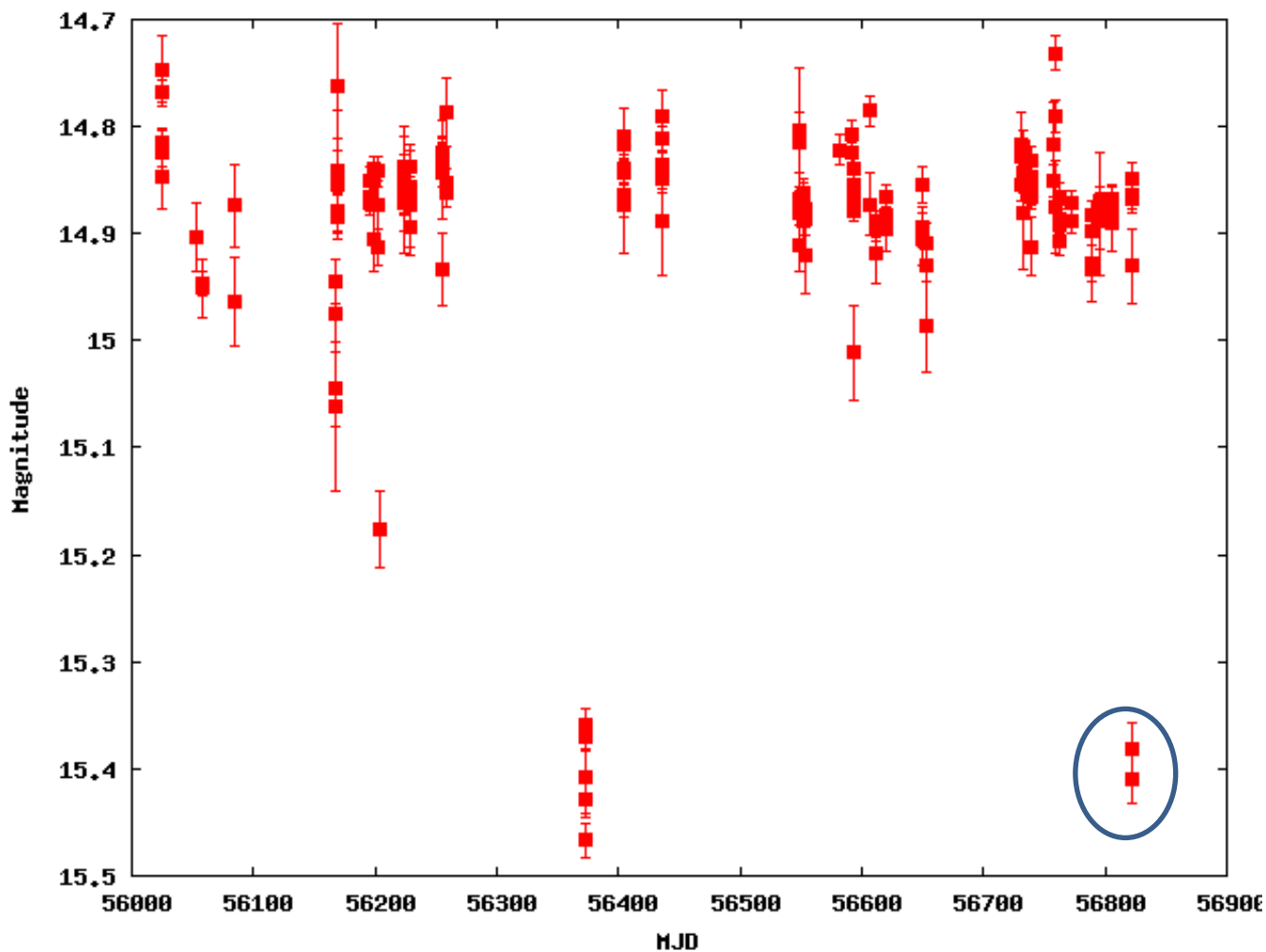
# 検出天体の例(1)

- ミラ型星の増光部分



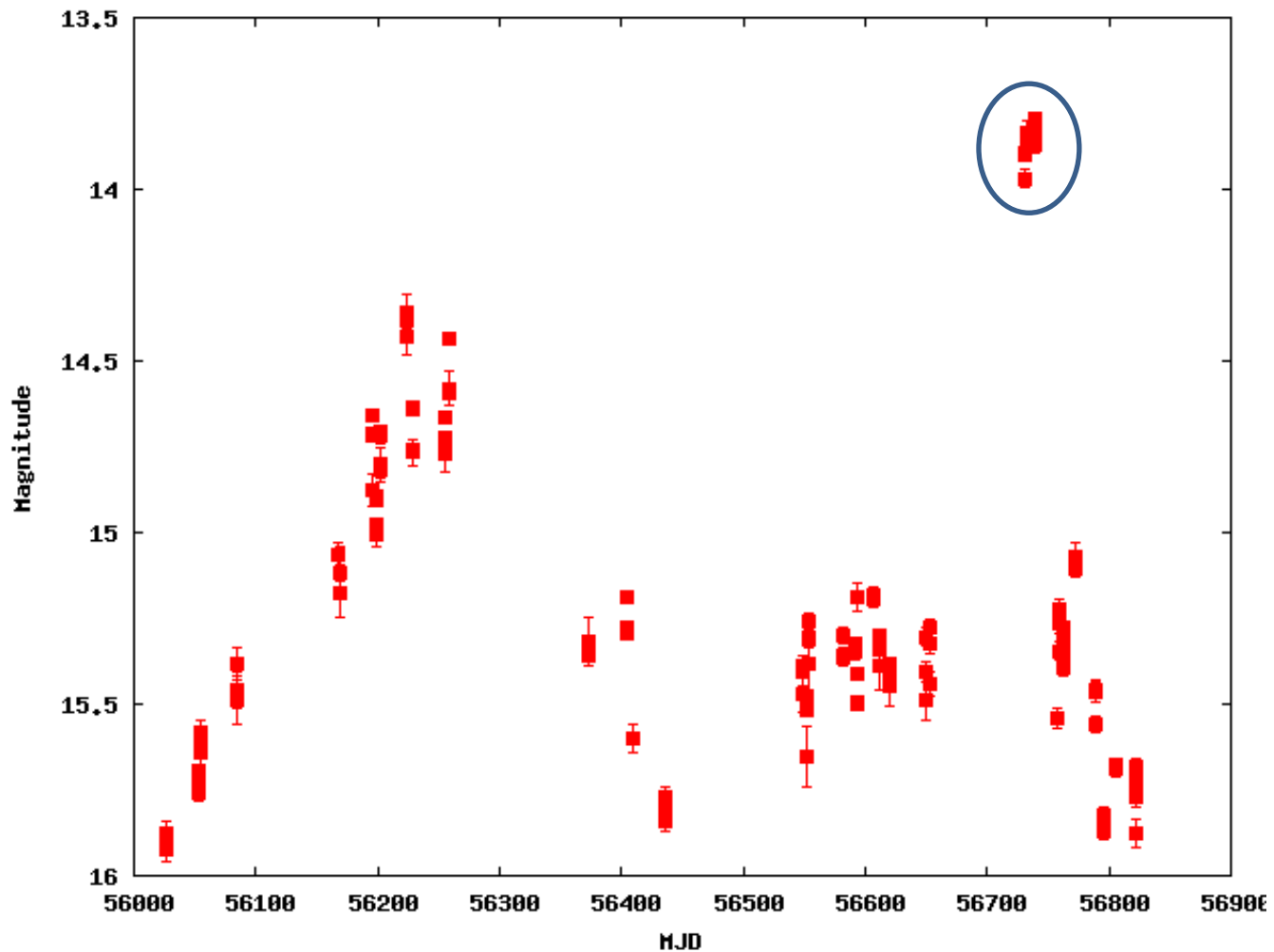
# 検出天体の例(2)

- 食連星 (or YSO?)



# 検出天体の例(3)

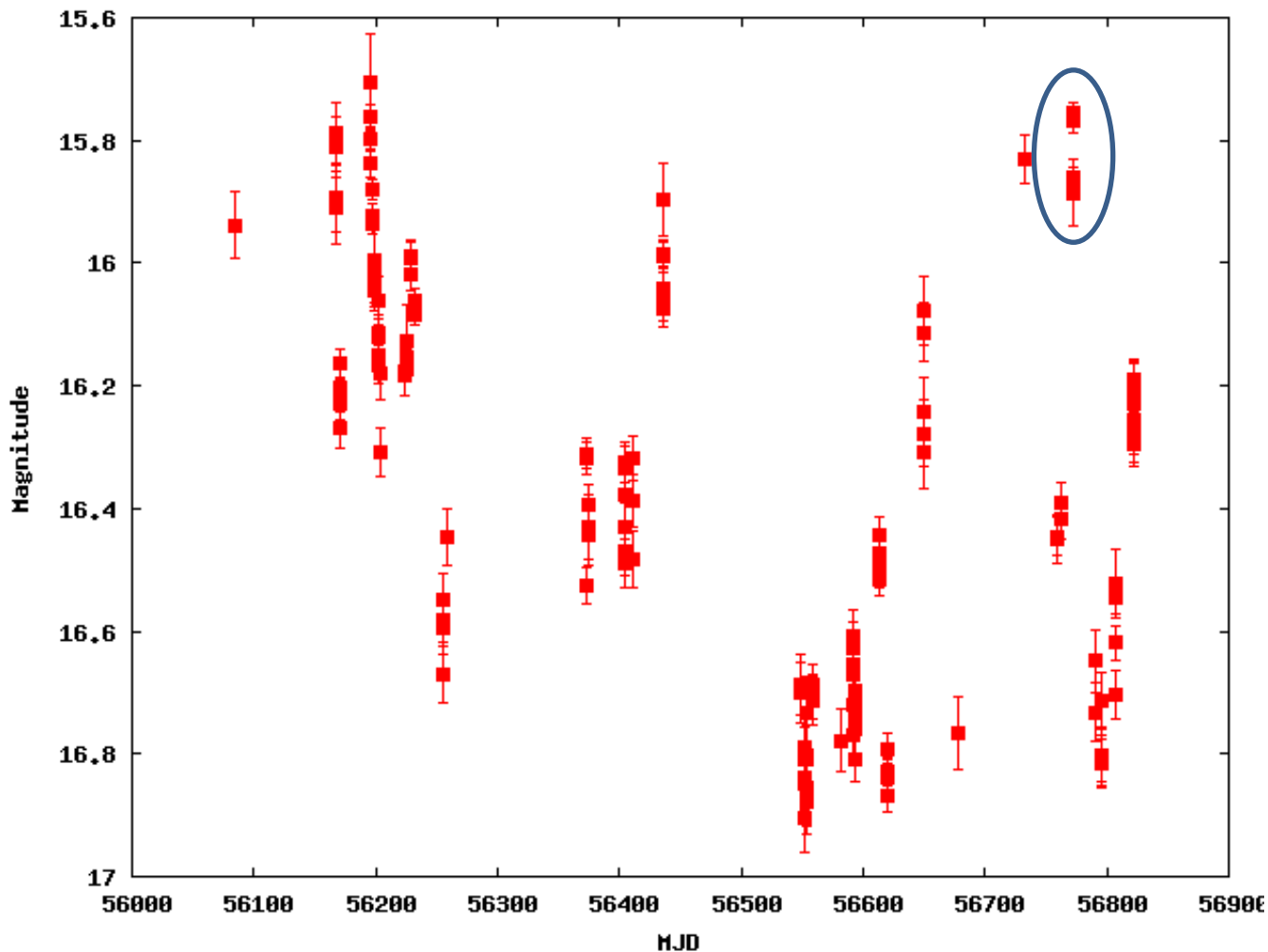
- 矮新星 (V1363 Cyg)





# 検出天体の例(4)

- AGN候補天体 (WISE J201719.79+355642.8)



# 検出にかかる時間

- 現在のところ約20分/領域（天体数： $\sim 10^5$ 個）
  - これにさらに1次処理＋天体検出・測光等の処理時間が必要（4-5分/領域）
  - トータルでは1領域当たり25分程度必要
    - 観測時間（12.5分）の約2倍
  - リアルタイム検出は現在のところ困難
- 天体の同定後のチェック計算がボトルネック
  - 並列処理可能なのもう少し高速化できる可能性あり
  - データベースのテーブルスペースをSSD上に構築して高速化

# まとめ

- KISOGPで多数の新変光星が見つかっている
  - 振幅1等以上で確実なミラ/SRだけでも500個以上
  - 今年度末-来年度初めくらいにはカタログ/データベースを公開したい
  - 食連星のような短周期系も見つかっている
- 分光によるタイプの判別の進展
  - M型、C型の分類と銀河系内での分布の違い
- 突発天体の検出パイプライン
  - まだリアルタイム検出まではできていない
  - 新星、矮新星、YSOの増光検出等には十分なポテンシャルがあると考えられる
    - 今後は高速化+リアルタイム検出