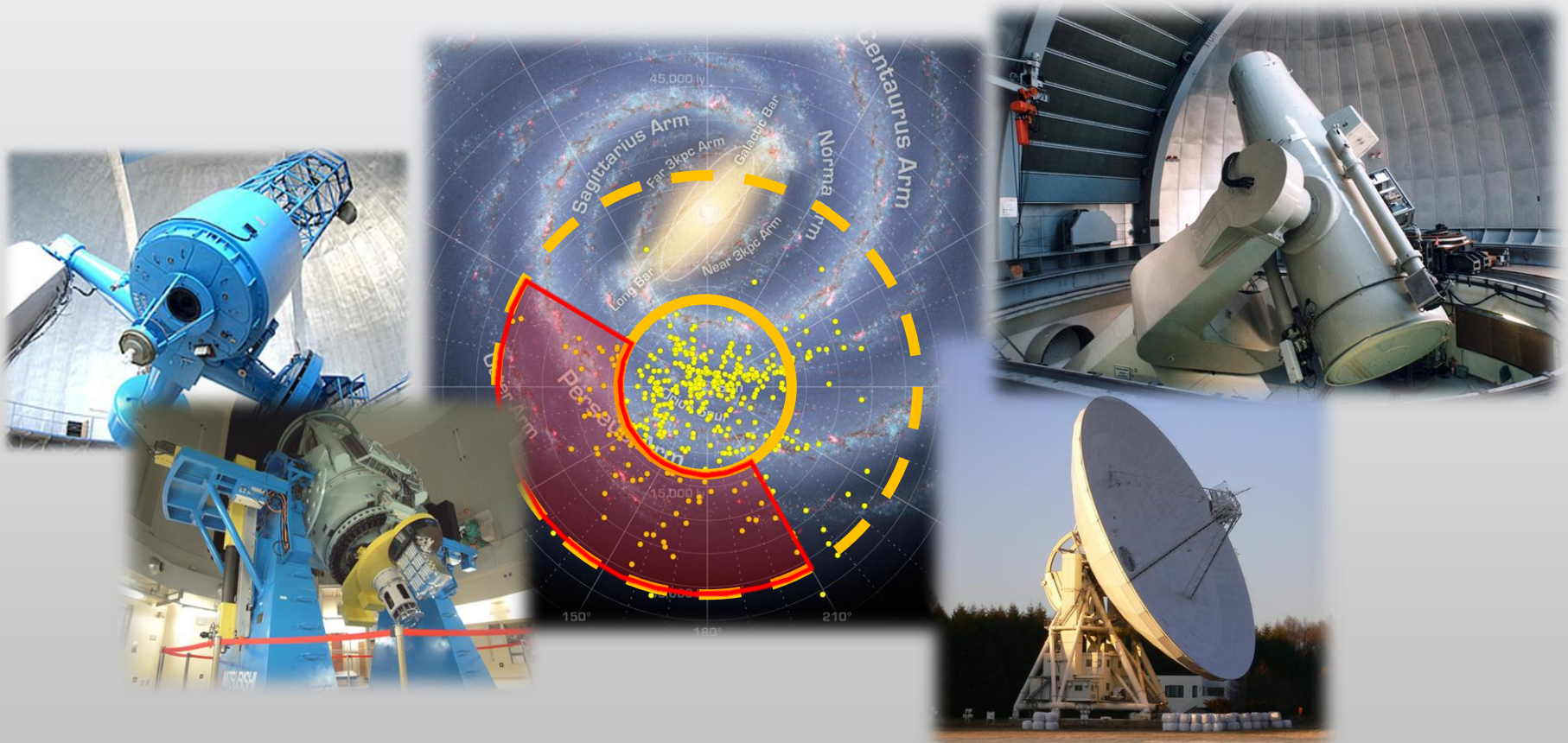


# KISOGP

## KWFC Intensive Survey of the Galactic Plane



松永 典之 (東京大学・天文学教室)

# 共同研究者

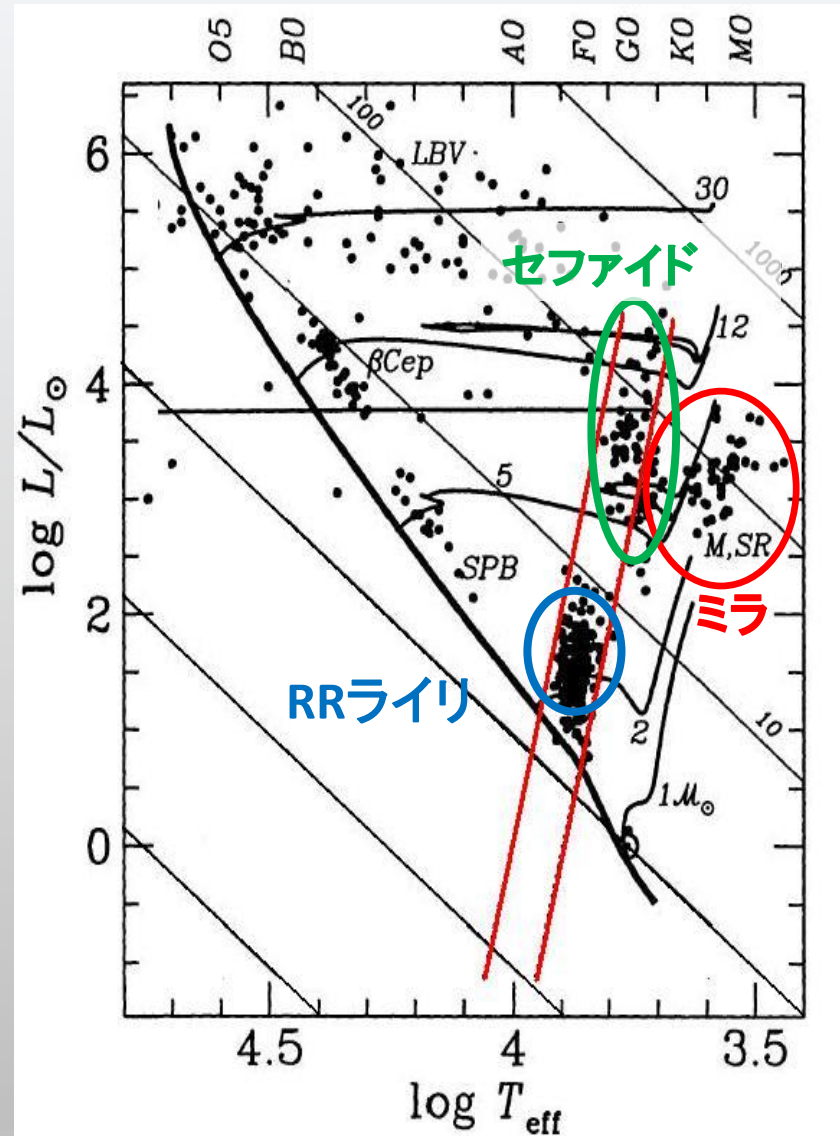
- 小林、三戸、猿樂、山本、諸隈(東大)
- 前原、浮田、柳澤、岩田、田中、泉、坂井、松本、Y. Wu、永山(国立天文台)
- 坂本(日本スペースガード協会→民間企業)
- 小野里、岩崎、花上、板(東北大)
- 福江、新井(京都産業大)
- 山下、面高、永山、中川、上杉(鹿児島大)
- 倉山(帝京科学大)
- M. Richmond(米・ロチェスター工科大)
- R. de Grijs, C. Ma, Y. Yao(中国・北京大)
- L. Deng, Z. Fan, K. Wang(中国・国家天文台)
- G. Bono(伊・ローマ大学)

# 内容

- KISOGPの目的と概要
- 5年間の観測のまとめ
- ミラ型変光星のSiOメーザ探査(野辺山)
- 今後の展望

# 脈動変光星 (radial variables)

- 距離や年齢がわかるので、銀河系のよいトレーサになる。
- ミラ型変光星
  - AGB ( $1 \sim 6 M_{\text{sun}}$ )
  - 周期 100~1000日程度
- 古典的セファイド
  - Blue loop ( $4 \sim 10 M_{\text{sun}}$ )
  - 周期 3~50日程度
- II型セファイド
  - post-HB ( $\sim 1 M_{\text{sun}}$ )
  - 周期 1~40日程度
- RRライリ変光星
  - HB ( $\sim 1 M_{\text{sun}}$ )
  - 周期 0.5~1日程度



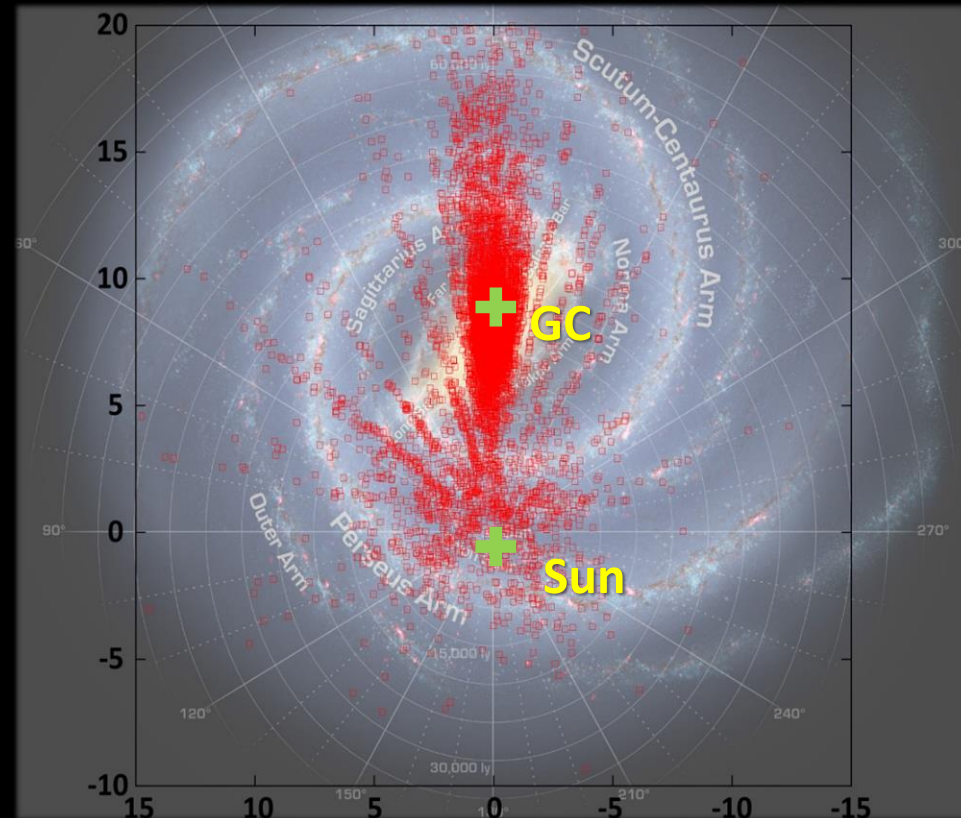
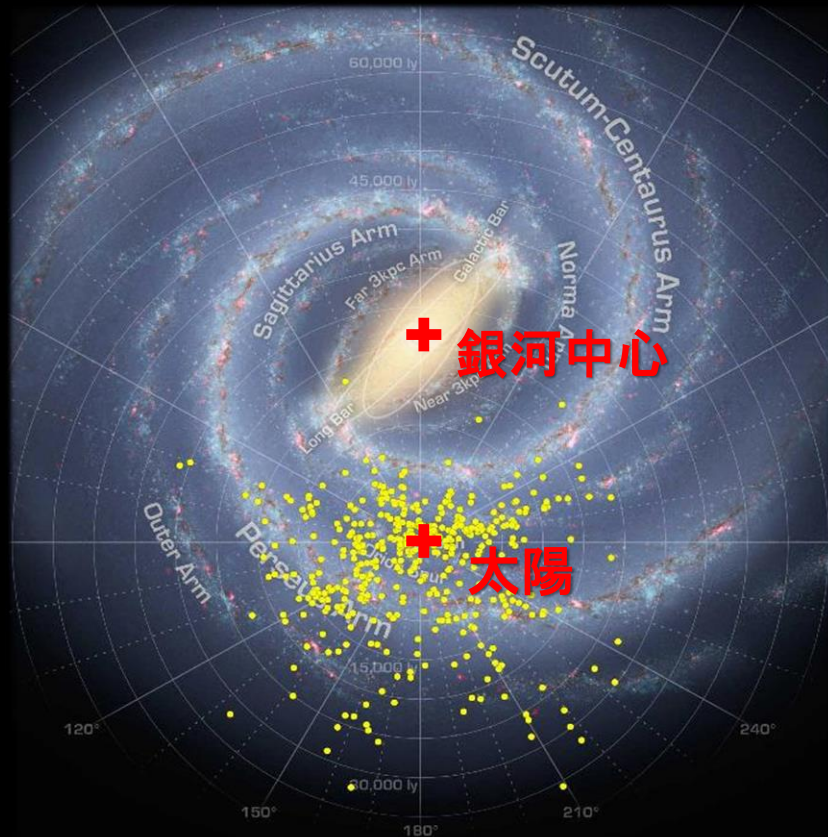
# 過去の探査の状況

星間減光などのため、探査は不完全。

過去(2011年以前)に知られていた約500個のセファイド(DDOデータベース)の分布

[www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/](http://www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/)

AAVSO Variable Star Indexに記載された銀緯が±5度以内のミラ(約8000個)の分布



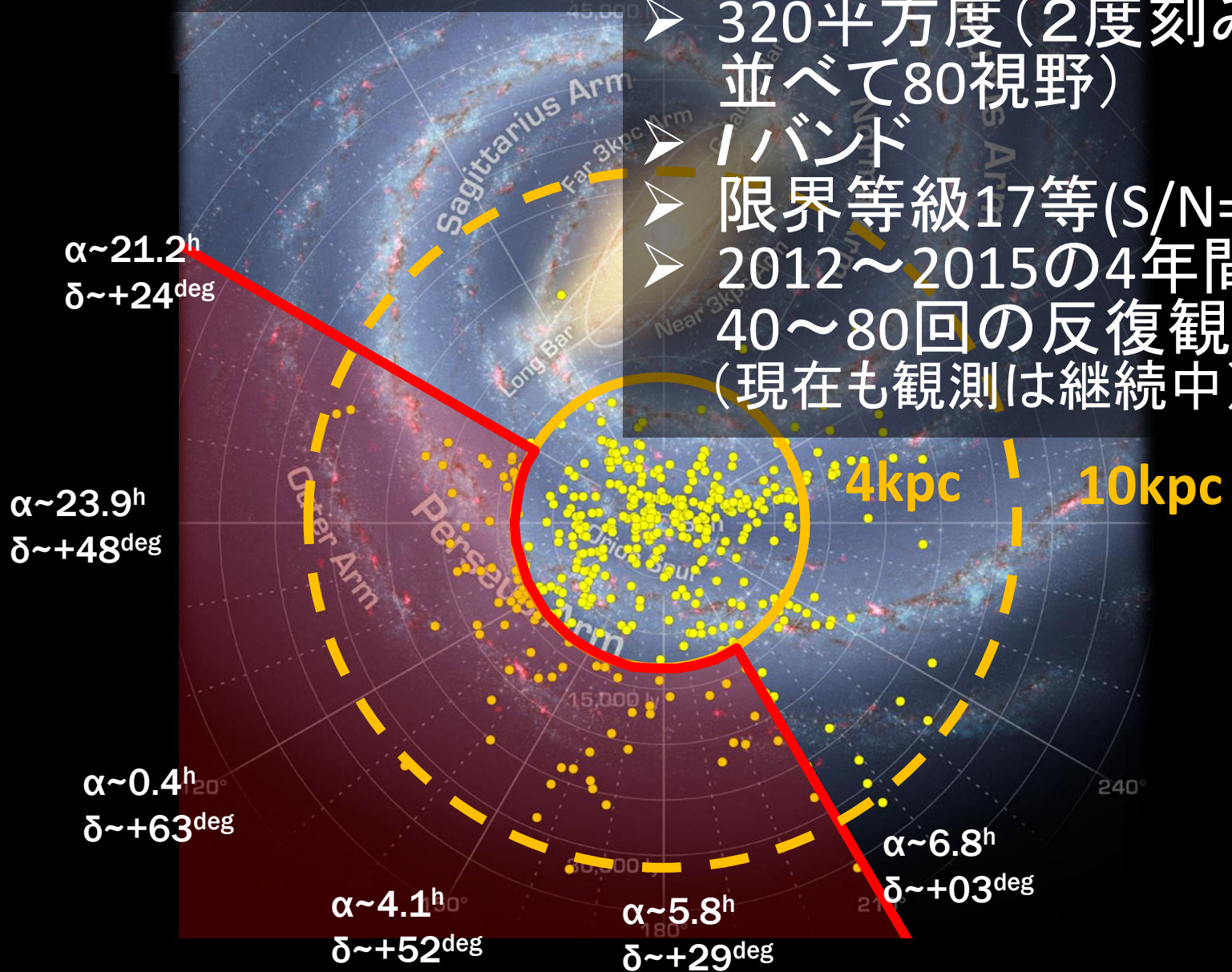
背景は、R. Hurt (NASA/JPL/Caltech)による銀河系の想像図

# KISOGPの目的と概要

- KWFC Intensive Survey of the Galactic Plane
  - 2012年度に始まった大規模観測課題のひとつ
- 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3000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。
  - (周期光度関係をもつ)変光星の分布から銀河円盤の構造を明らかにする。
  - 矮新星および新星のモニタリング
  - YSOなどその他の変光天体を探し出し、詳細研究へのサンプルを提供する。
- 見つけた変光星の追観測

# 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)
- バンド
- 限界等級17等(S/N=30)
- 2012~2015の4年間に40~80回の反復観測(現在も観測は継続中)



# 観測時間、積分回数

- 5年4ヶ月のKWFC観測のうち、約2割の観測

	KWFC全体	KISOGP
期間	2012/3—2017/6	2012/4—2017/3
観測日数†	1382 nights	428 nights
積分回数	173249 exps	—
積分回数 (BIAS,DARK,FLAT除)	102585 exps	25756 exps
総積分時間 (BIAS,DARK,FLAT除)	2733 hours	328 hours
総観測時間概算‡	—	1640 hours (~330 nights#)

† BIAS,DARK,FLATのみの日は除く。

‡ 5秒1回60秒3回の観測を完結させて連続する次の領域へ移るのに15分。

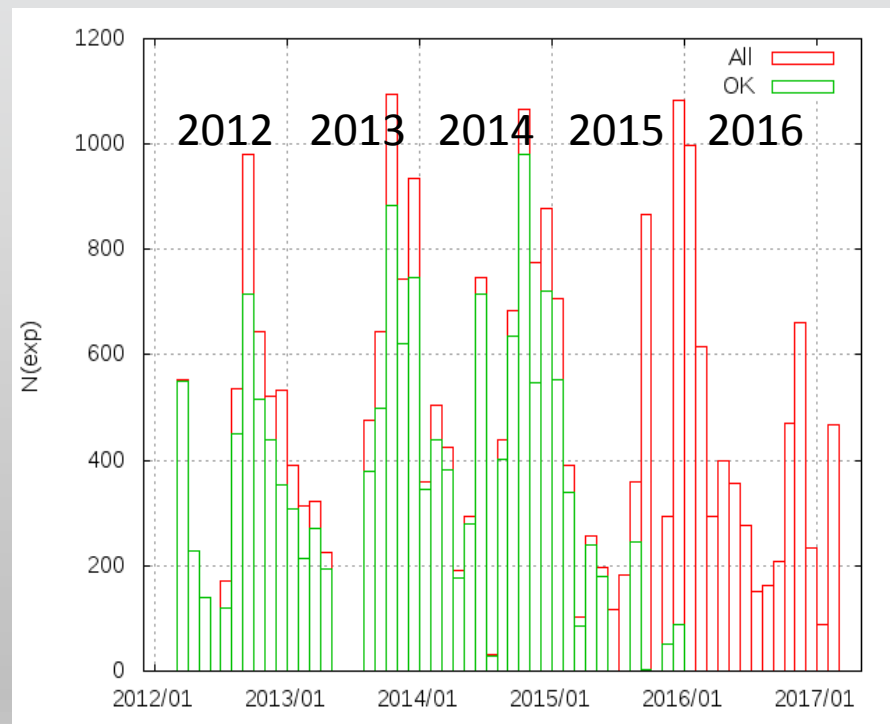
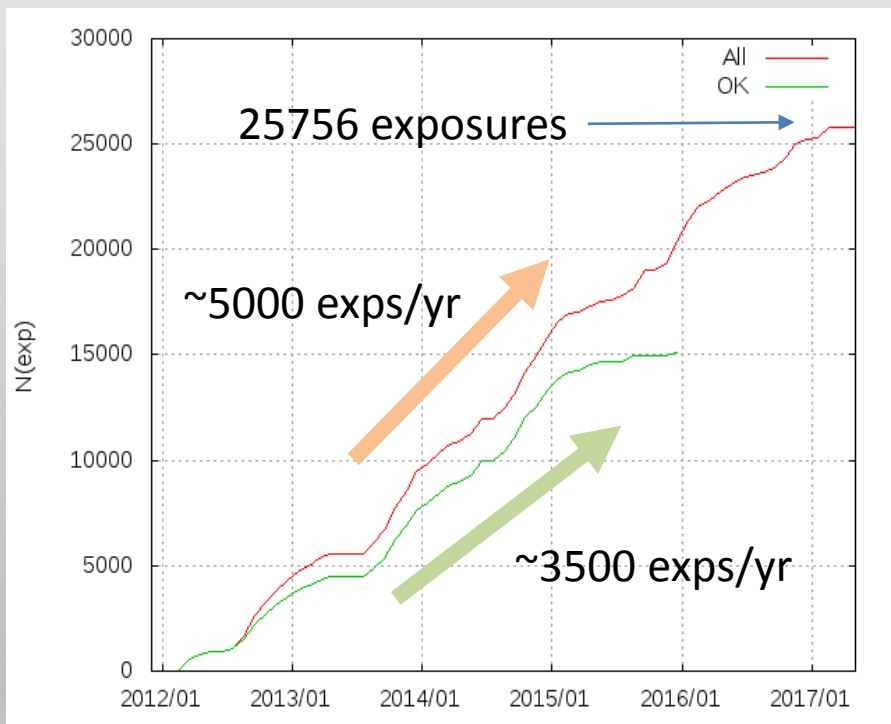
オーバーヘッド時間(望遠鏡操作、読み出し)は積分時間の約4倍に相当。

# 晴天率50%、1日あたり10時間で換算して、 $1640/10*2=328$  nights



# 観測量の推移

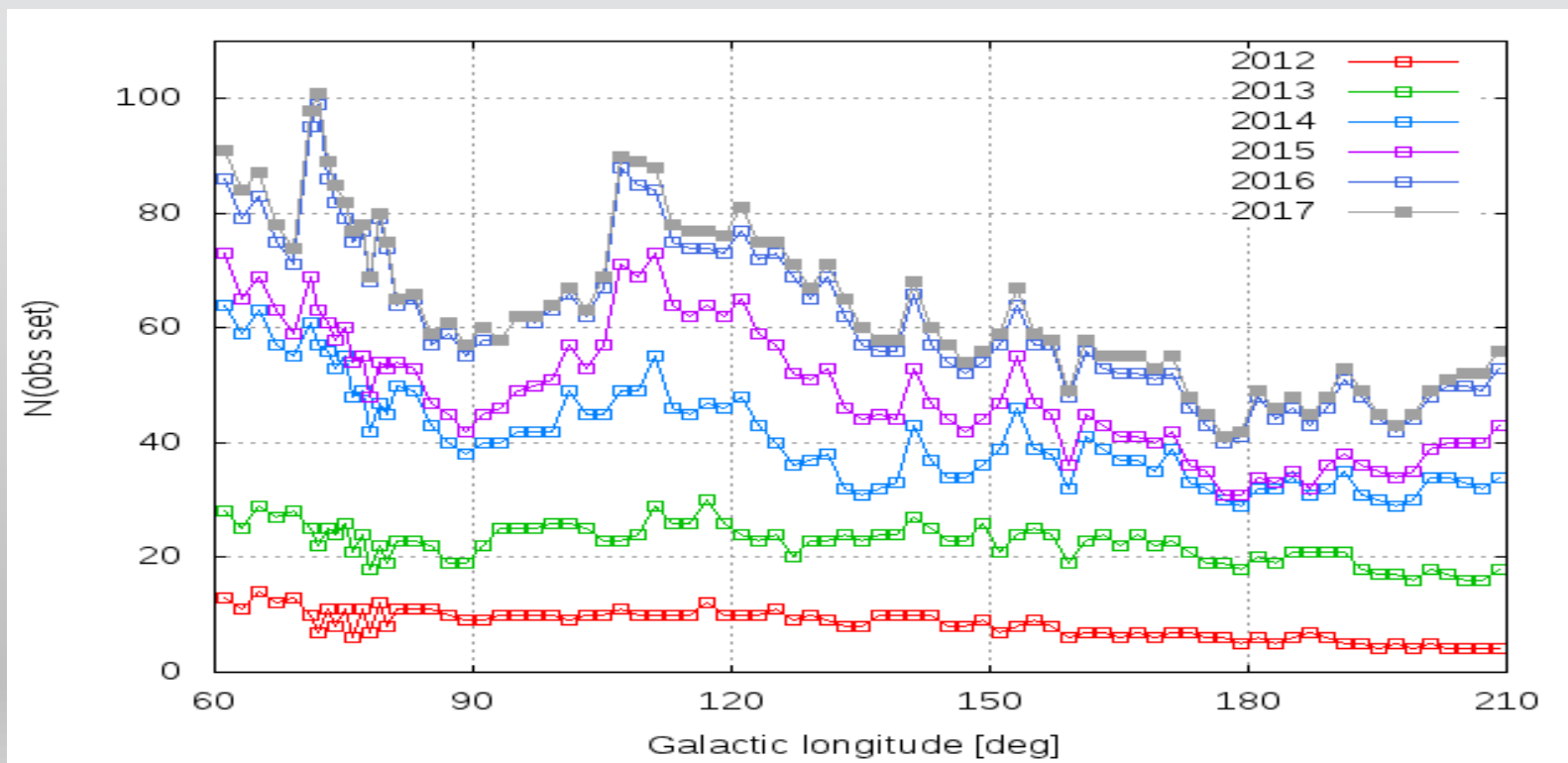
- 10～12月の観測が多いが、5年間を通してほぼ通年で観測を行ってきた。
- 2016年1月までの分では、測光結果の品質を確認した。7割程度のデータが利用できる。



多い月は1000 exps以上

# 各視野の観測回数

- 回数の少ない視野でも当初目標の40回に到達
  - 5秒露光1回、60秒露光3回のセットが揃っている数。
  - 2016年1月までの分では、測光結果の品質を確認した。その後は、単純にデータが取れた回数。



# 解析の流れ

- 全体の流れを見直してまとめようとしているところ。

パイプライン処理、WCS決定

SExtractorによる開口測光

~~IPHASとの比較によるゼロ点校正~~

~~基準画像と棄却画像の選択~~

~~基準カタログの作成~~

変光天体の探査

周期変光星の探査

PS1との比較による校正

基準画像の選択

基準カタログの作成

基準カタログに基づく  
再校正と棄却画像の選択

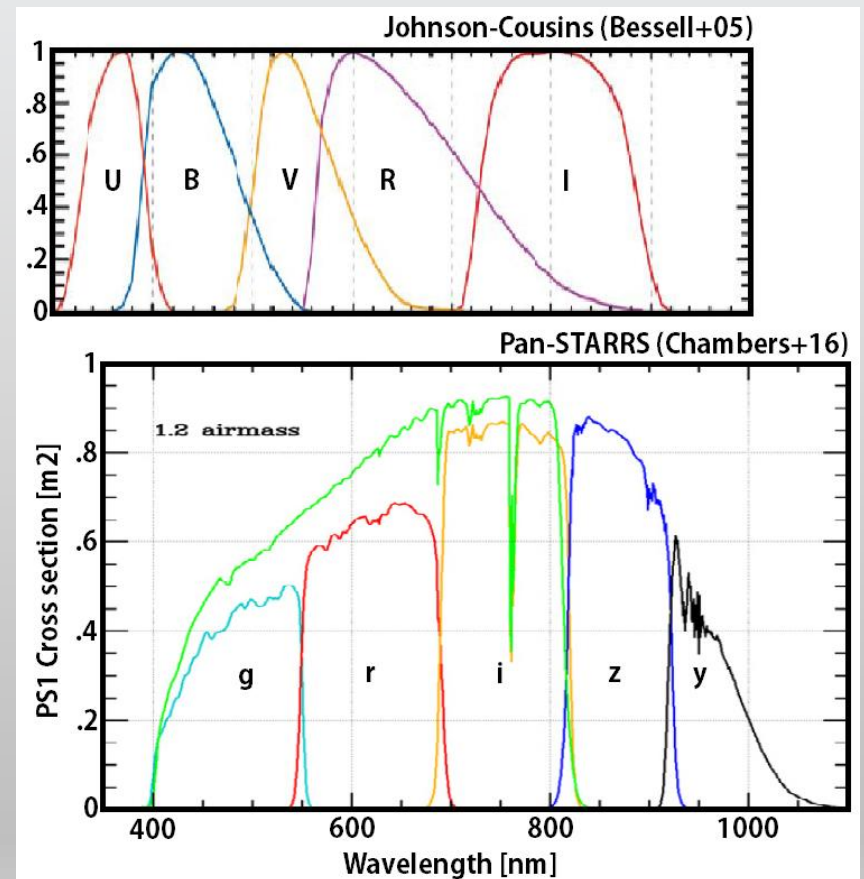
測光値精度の検証

# IPHAS vs Pan-STARRS

	IPHAS	Pan-STARRS
Site	La Palma	Haleakala at Maui
Telescope	2.5-m Isaac Newton	1.8-m PS1
Camera	WFC 32 Mpix, 0.33 arcsec/pix	GPC1 1.4 Gpix, 0.258 arcsec/pix
Seeing	Median=1.1 arcsec	Median=1.0—1.3 arcsec
Survey area	~1860 deg <sup>2</sup>	3pi str (dec>-30 deg)
Filters	3 (ri, Ha)	5 (grizy)
Detection limits	R=21.2, i=20.0, Ha=20.3	g=23.3, r=23.2, i=23.1, z=22.3, y=21.3
Saturation	R=13, i=12, Ha=12.5	12—14 mag
Data Release	DR2 in 2014 (We have used DR1.)	DR1 in 2016
Reference	Barentsen et al. (2014)	Chambers et al. (2016)

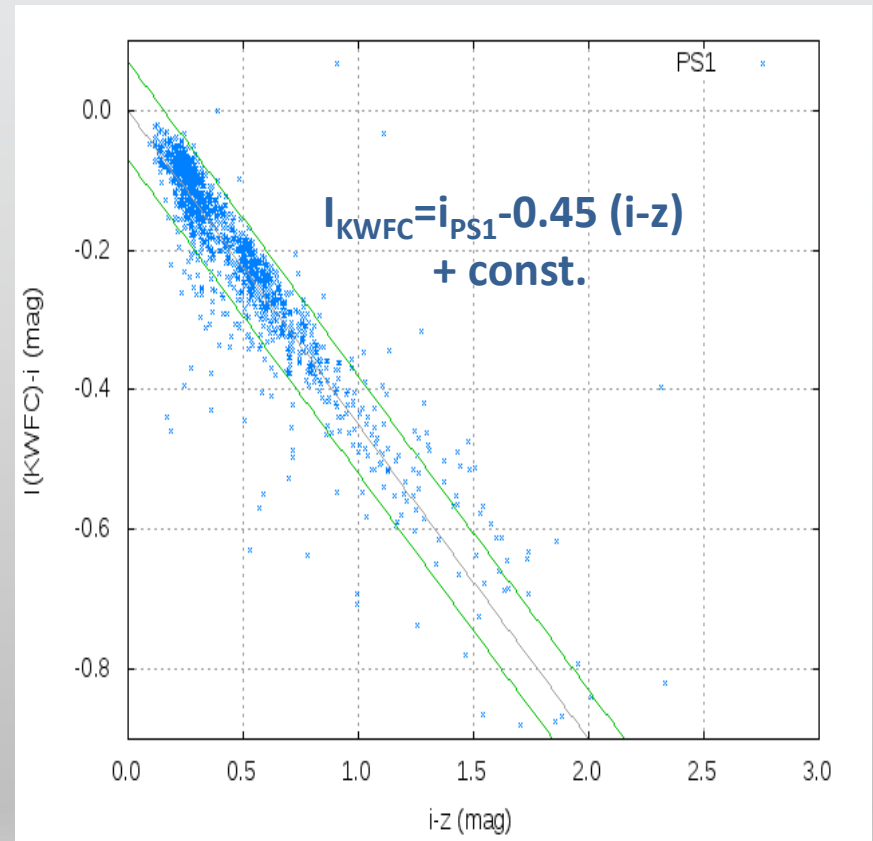
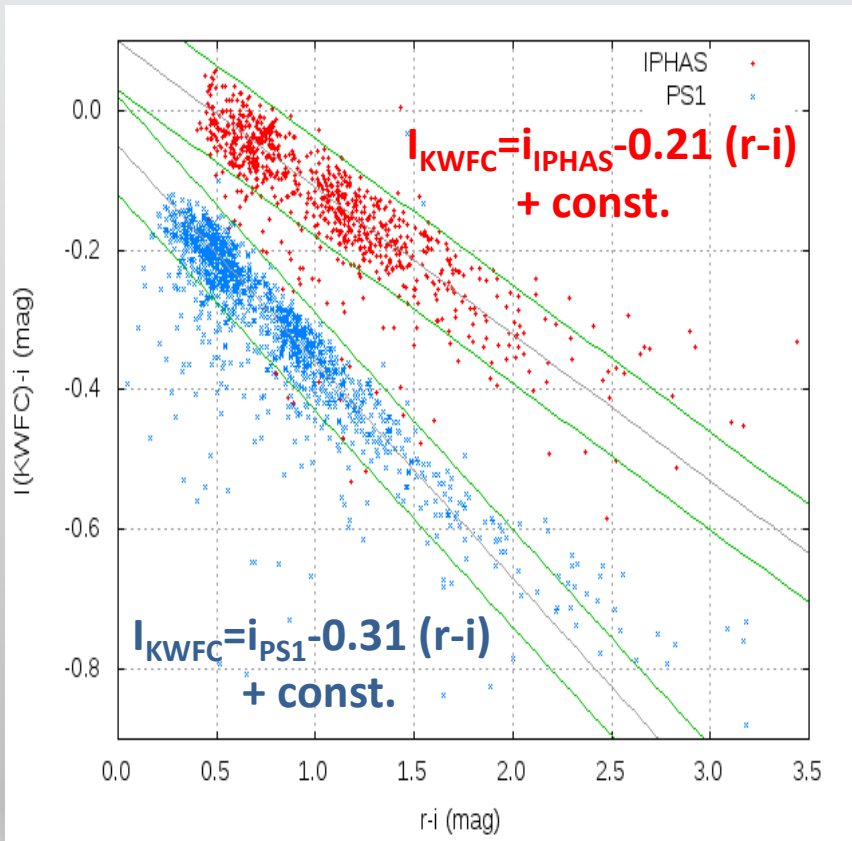
# 等級ゼロ点の較正

- PS1のizバンド(前はIPHASのriバンド)を利用して、Ic等級を予想する。
- PS1に飽和の影響が無く、KISOGPで十分な精度の出る等級範囲の星でIc等級のオフセット量を測る。



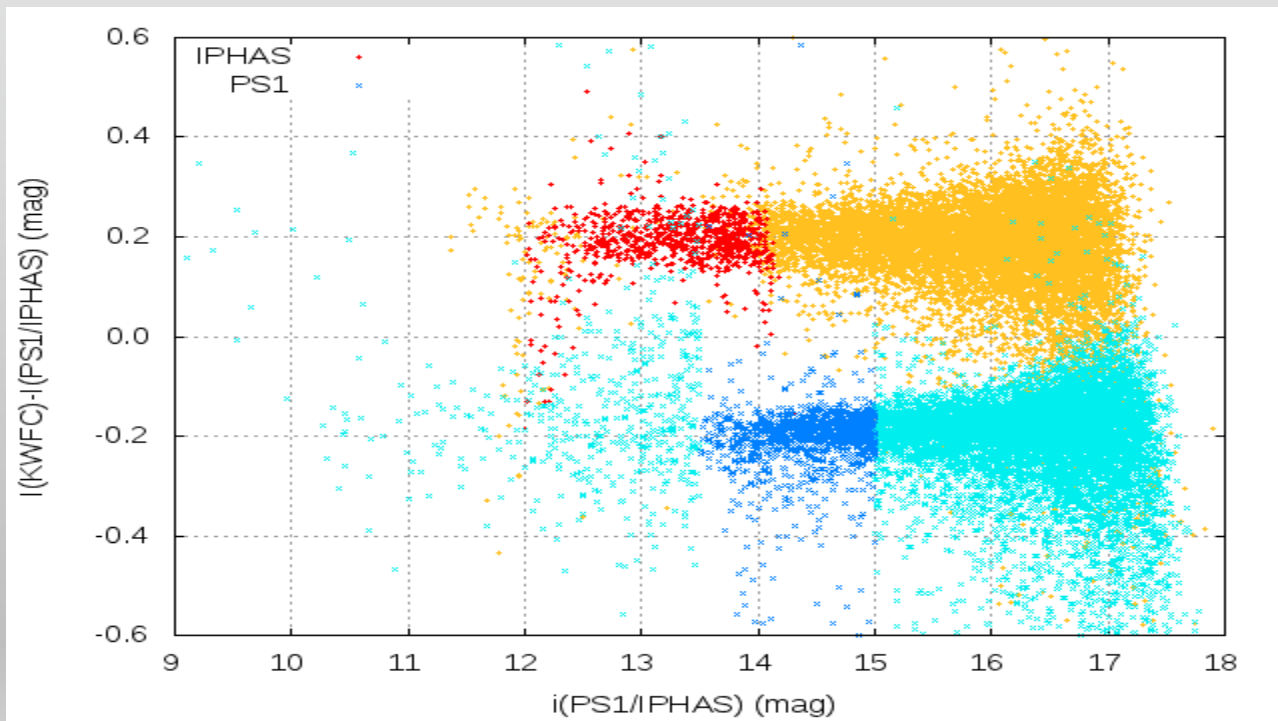
# PS1/IPHASによる較正の比較

- 較正の精度が大きく変わるわけではなさそう。
  - 完全性や等級の均質性を期待。今後、検証する。



# PS1/IPHASによる較正の比較

- PS1では  $i=13.5$  mag、IPHASでは  $i=12.5$  mag で飽和限界の影響が見える。
  - 5秒積分でも、 $13.5 \sim 15$  mag の範囲に較正に使う星が多数存在。

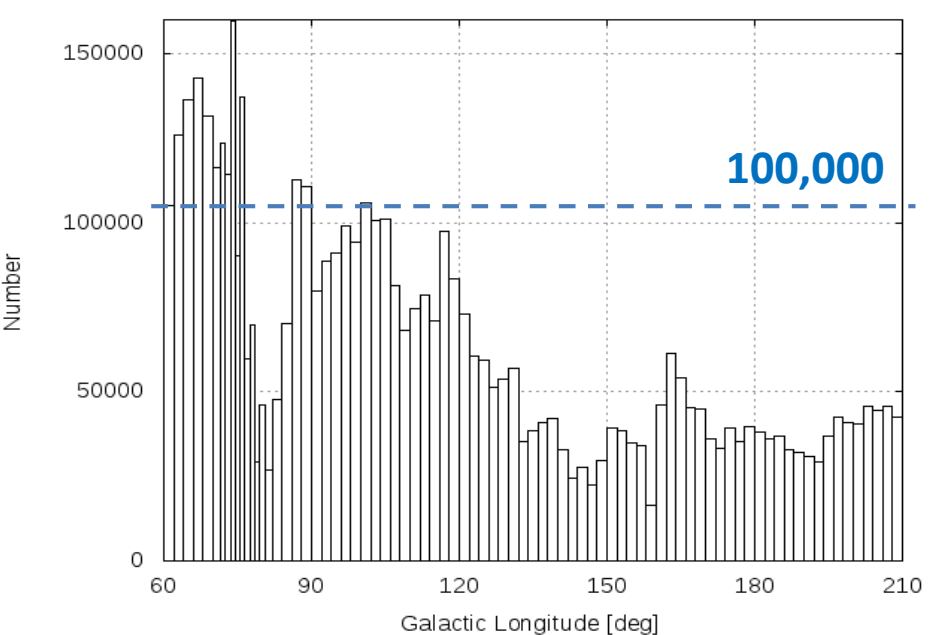
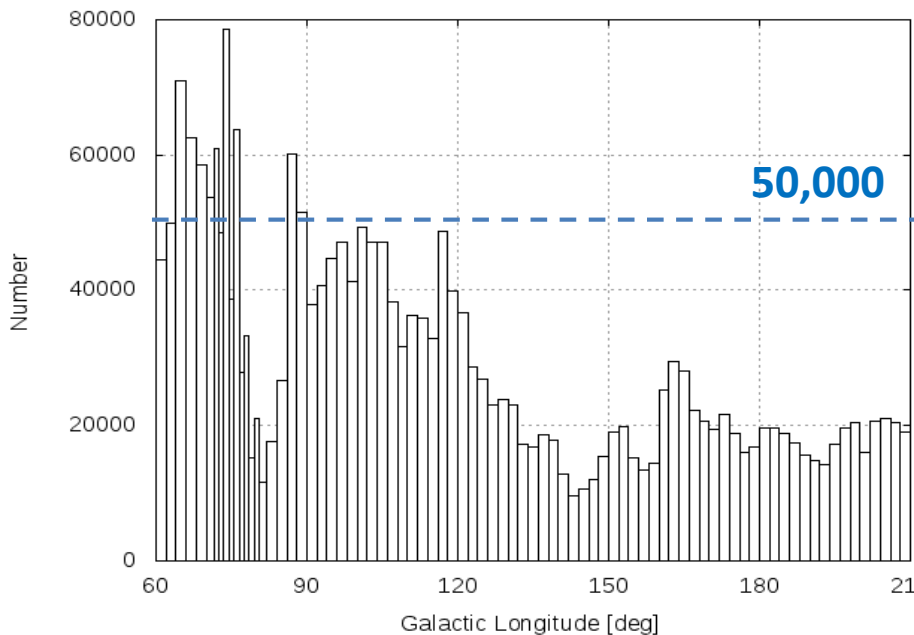


# 基準天体リスト

- 定常的にKISOGPで検出できた天体
  - 隣り合う領域の重複も含んでいる。

これ以降の発表は、  
IPHASでの較正に基づく  
古い解析結果。

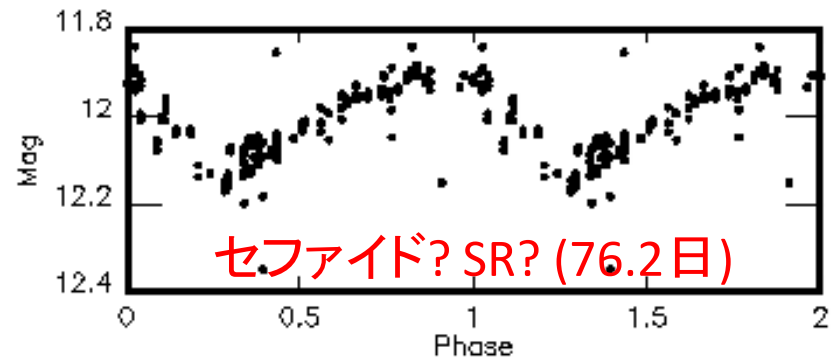
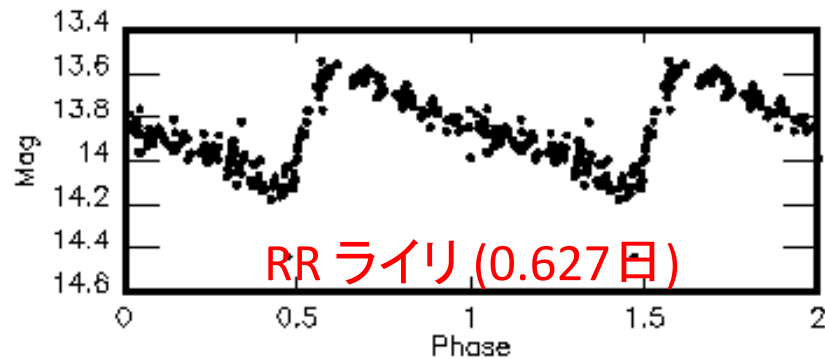
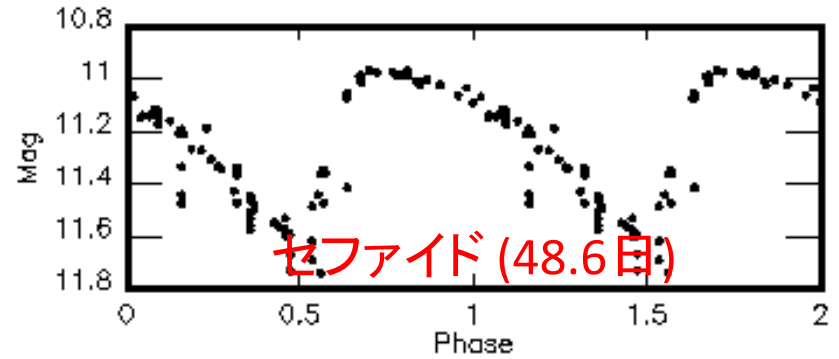
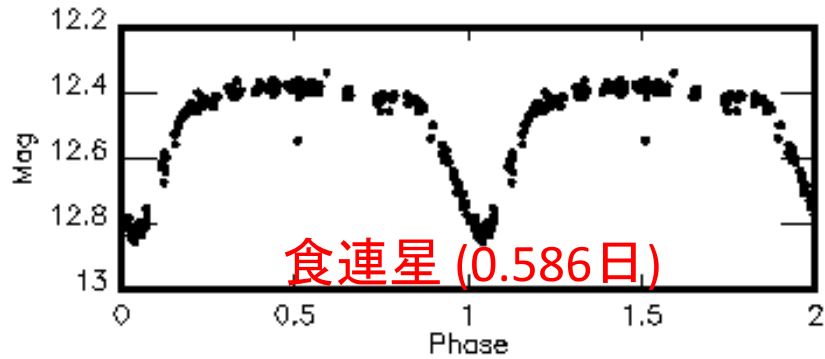
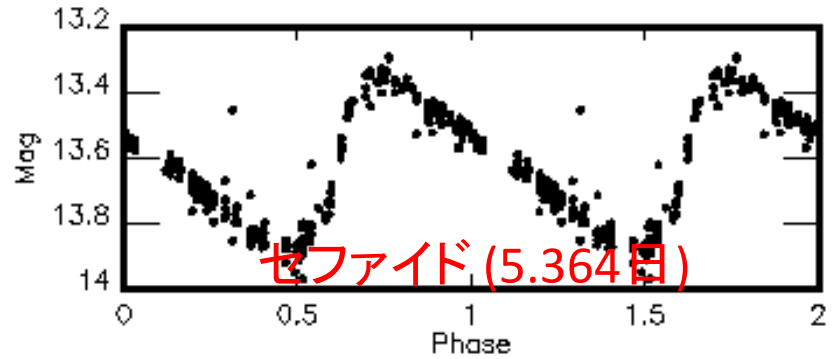
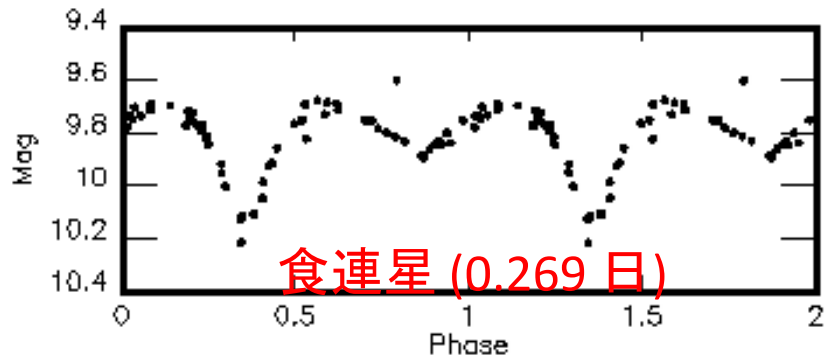
露光時間	基準天体	変光星候補
5 sec	2,383,537	15,702
60 sec	5,093,175	41,129



横軸：銀経、縦軸：各視野の基準天体の個数

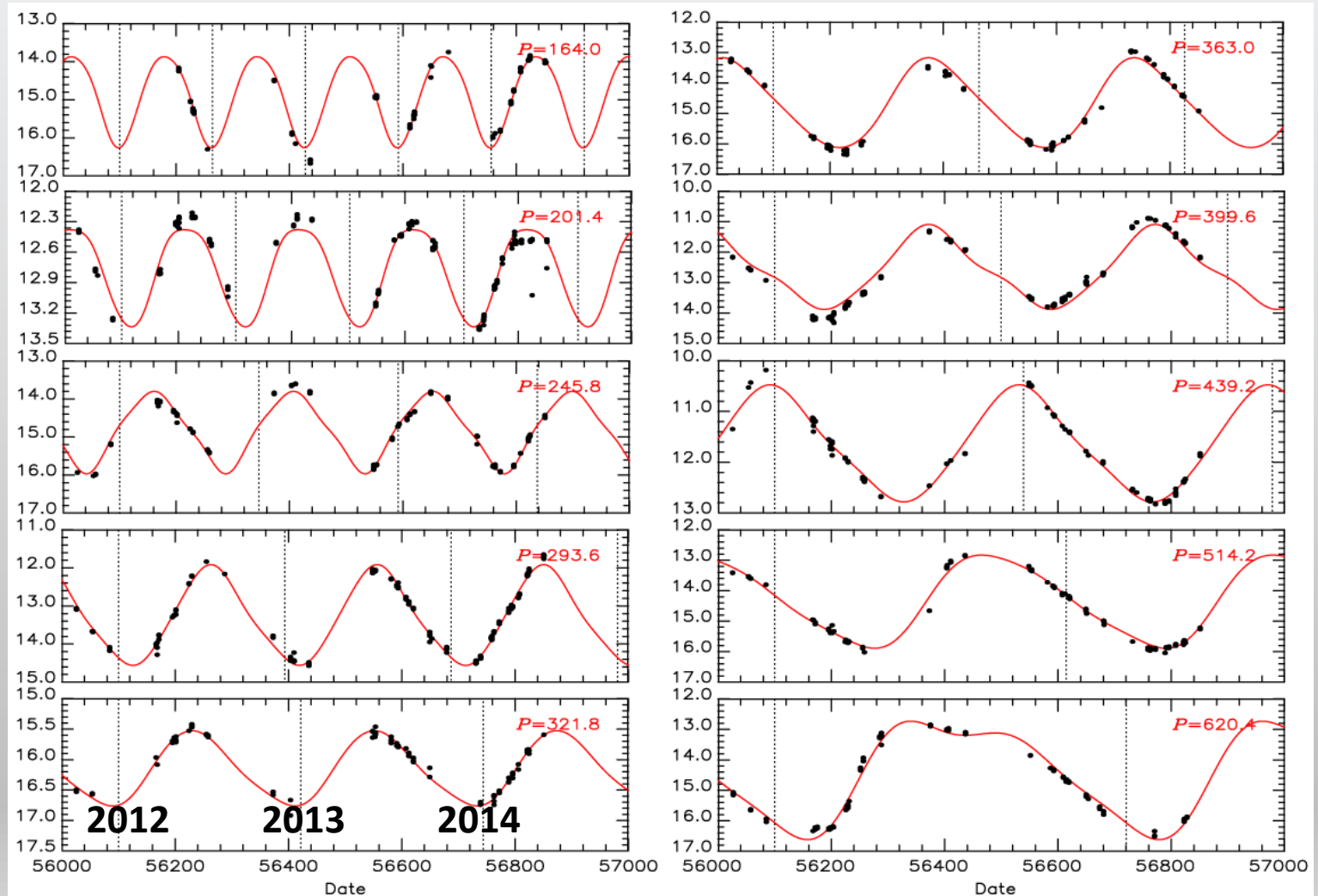


# 短周期変光星の例



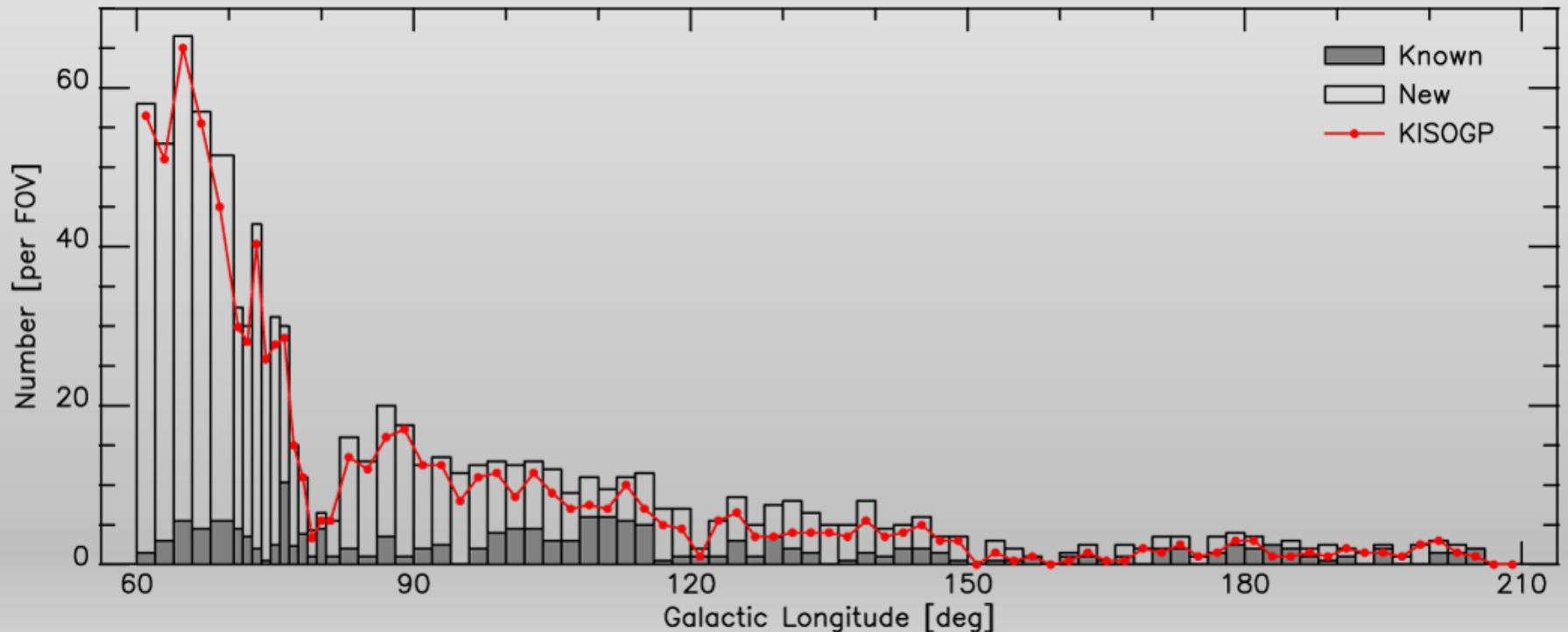
# ミラのライトカーブの例

- 多くのミラの周期がすでに決められる。



# ミラ型変光星の検出

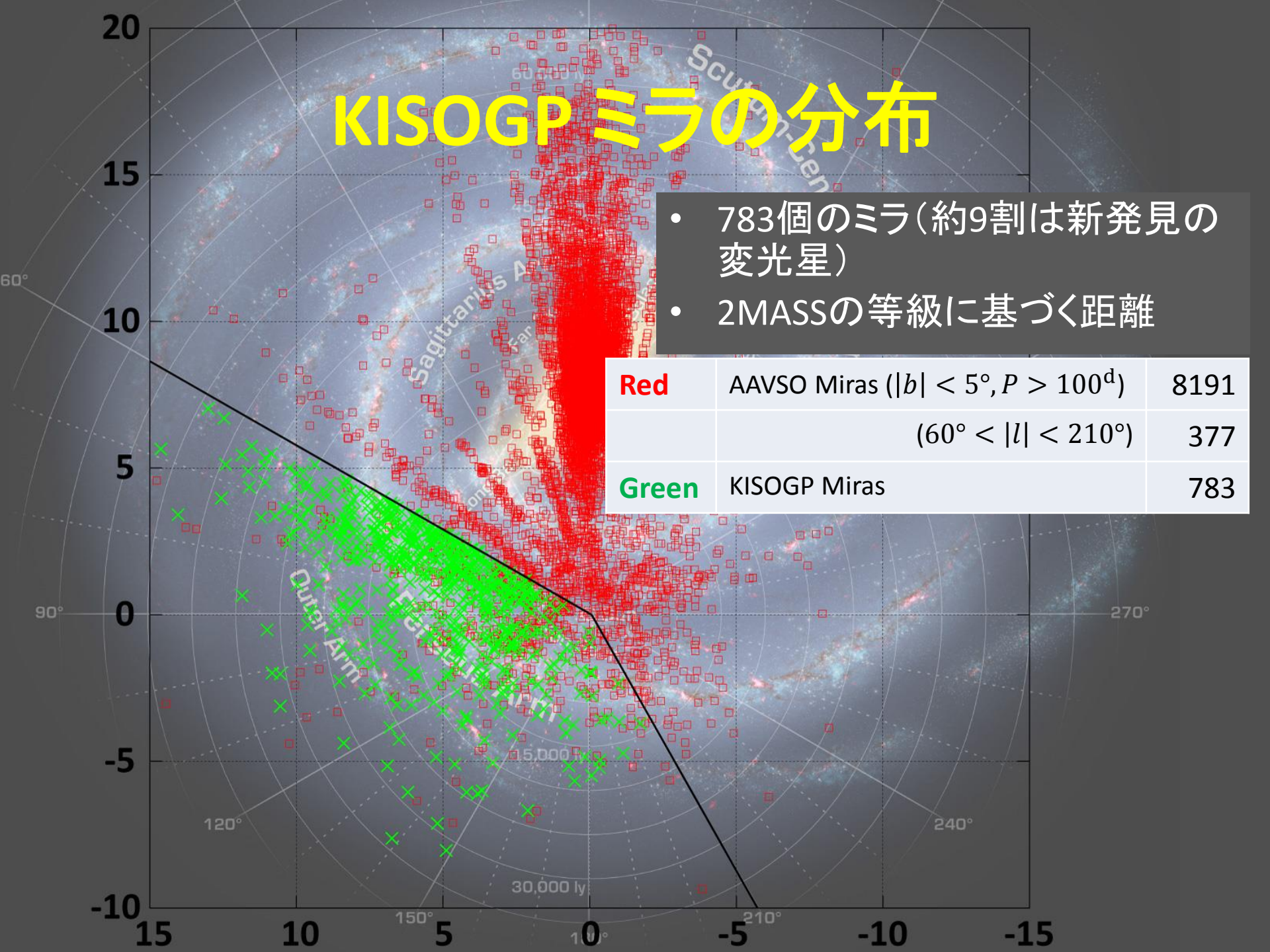
- 783個のミラ型変光星 ( $P > 100$ 日) を検出
  - 大振幅 (約0.4等級以上)
  - 686個がこれまでに知られていなかったミラ
- 領域内の既知ミラ (164個) を合わせると898個



# KISOGP ミラの分布

- 783個のミラ(約9割は新発見の変光星)
- 2MASSの等級に基づく距離

Red	AAVSO Miras ( $ b  < 5^\circ, P > 100^d$ )	8191
	( $60^\circ <  l  < 210^\circ$ )	377
Green	KISOGP Miras	783



# 追観測

天体	望遠鏡	Obs. Mode	Purpose
ミラ	鹿児島 1m 望遠鏡	近赤外線測光	Kバンド平均等級→距離
ミラ	岡山 1.88m 望遠鏡 西はりま 2m 望遠鏡	可視近赤外 低分散分光	炭素星・M型星の分類
ミラ	野辺山 45m 望遠鏡	電波	SiO メーザ探査
セファイド	中国の各望遠鏡 (50 BiN, Xinglong, LCOGT)	可視測光	平均等級
セファイド	すばる望遠鏡	近赤外線 高分散分光	視線速度と金属量
YSO	西はりま 2m 望遠鏡	可視光 低分散分光	分類

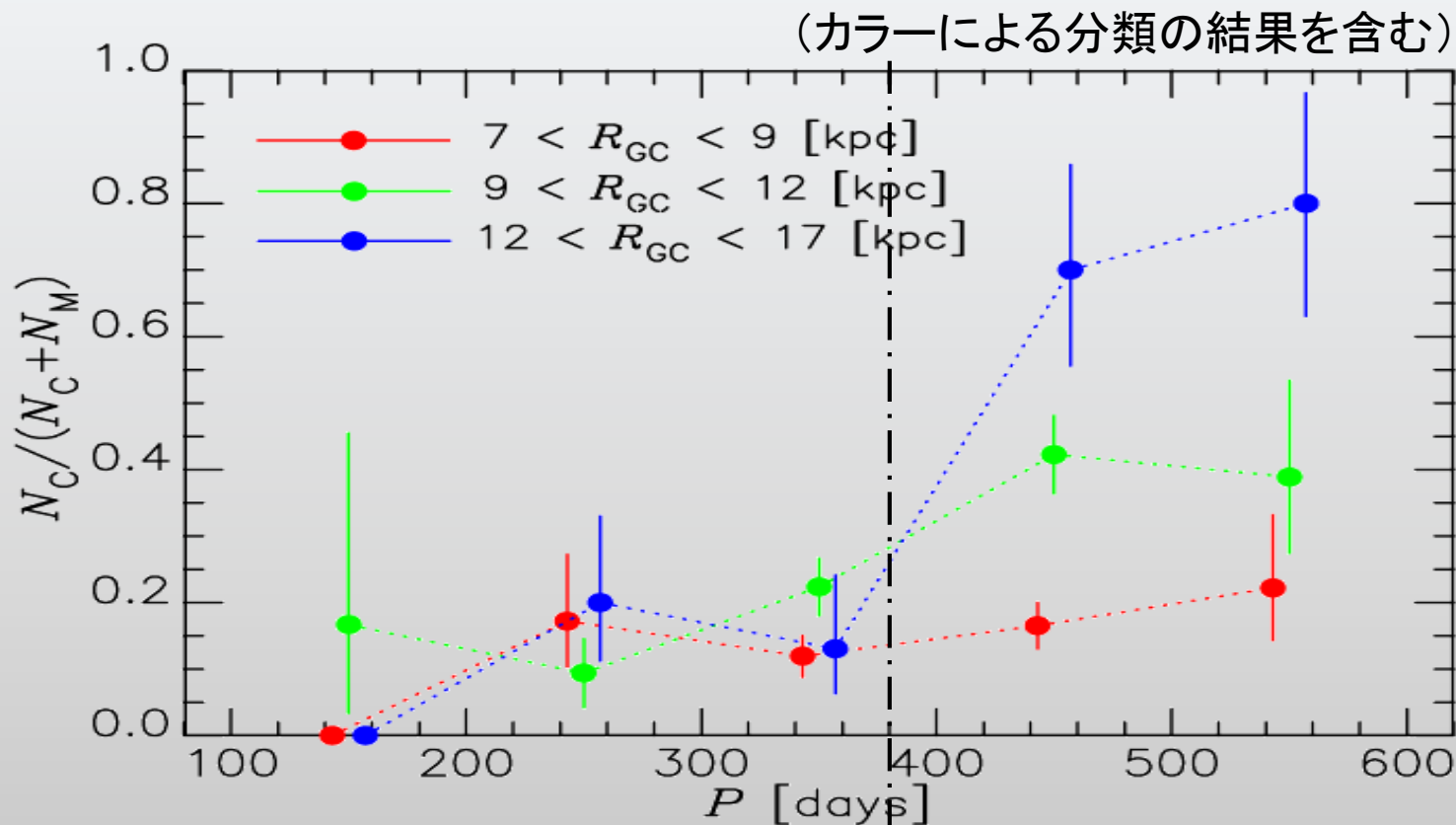
# 低分散分光観測による分類

- 2013年後期～2016年後期で観測終了
  - 国立天文台・岡山188cm望遠鏡(KOOLS/ISLE)—62夜
  - 兵庫県立大・西はりま2mなゆた望遠鏡(MALLS)—22夜
- 375個のミラを分光観測
  - 約100個のミラのスペクトル型は既知

観測装置	炭素星	M型星	未分類	合計
KOOLS	28	83	78	189
MALLS	21	93	51	165
ISLE	—	—	143	143
既知	41	66	—	102
<b>合計</b>	<b>56</b>	<b>167</b>	<b>243</b>	<b>368</b>

一部、複数装置で重複して観測した天体も含む。

# 銀河系中心からの距離による変化



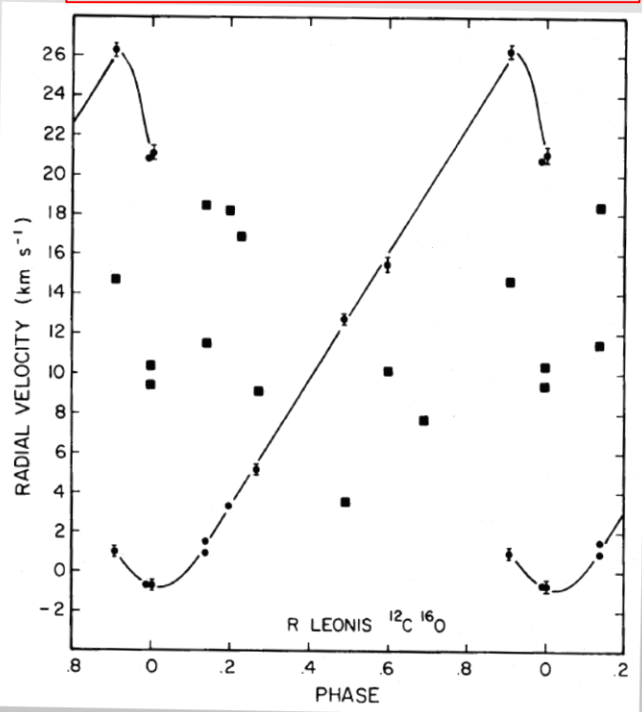
短周期のミラは、銀河系円盤の外側にいっても炭素星の割合が小さい。(マゼランは周期300dでほぼ全てが炭素星なのと対照的)

長周期のミラでは、円盤の外側にいくほど炭素星の割合が増える様子がはっきりわかる。

# SiOメーザ探査の目的

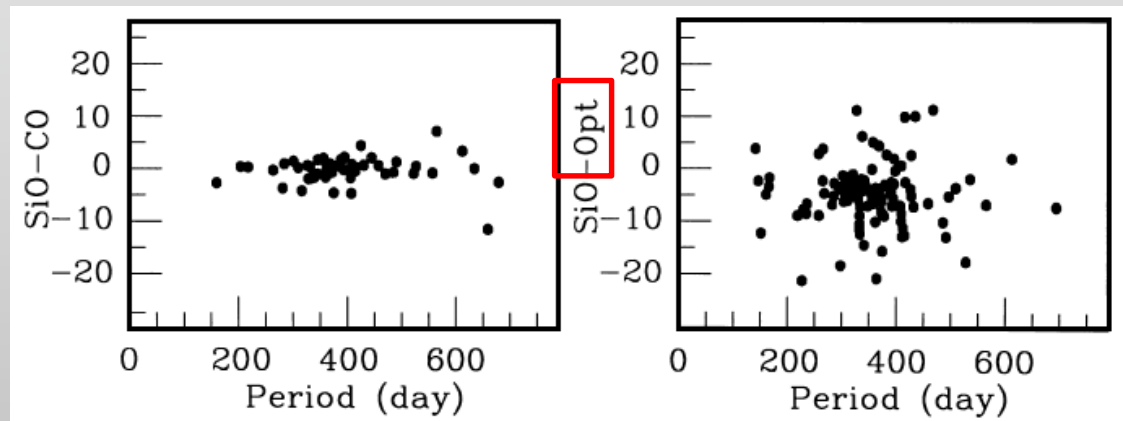
- 質量放出の大きいミラは、SiOメーザ輝線を出す。
- 視線速度が一度の観測で得られる。(光赤外の分光による視線速度には脈動の効果が入る。)

光赤外での速度の変化



Hinkle et al. (1978)

各手法で得られた速度の比較



Feast & Whitelock (2000)

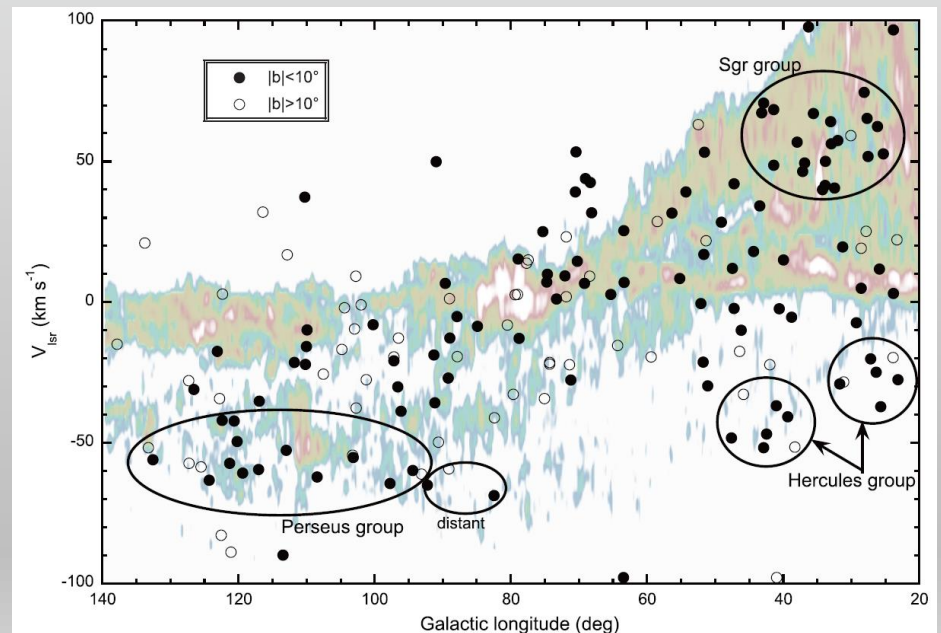
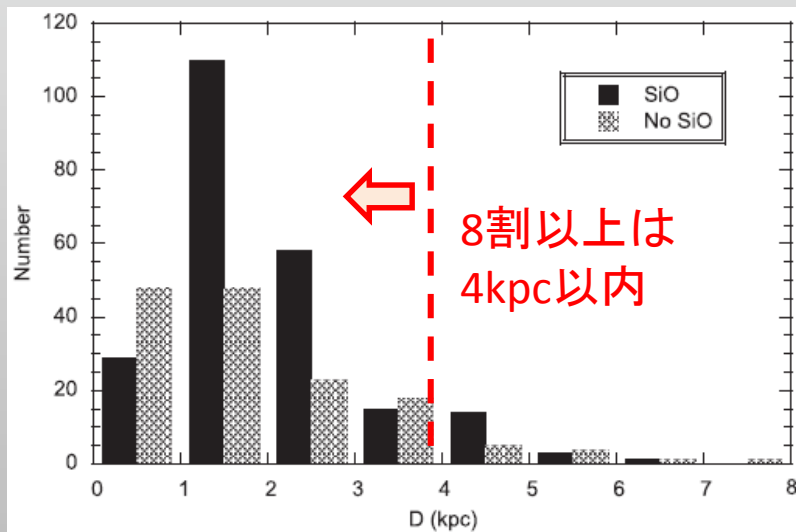


# SiOメーザに対する過去の研究の傾向

- 野辺山45m望遠鏡で多くの観測が行われた。
- 主に、赤外線で明るい天体がターゲット。
  - 距離の見積りは多くの場合、ミラ型変光星の周期光度関係を利用するのに比べれば不正確。
  - 同じ赤外線強度でも、ミラ型変光星の場合は、SiOメーザの検出率が高いと示唆されていた。
  - ミラ型変光星サンプルに対する研究の例：
    - Deguchi et al. (2004) : 銀河中心のミラ
    - Matsunaga et al. (2005) : 球状星団のミラ
    - Deguchi et al. (2012) : 北半球銀河面のミラ

# Deguchi et al. (2012)

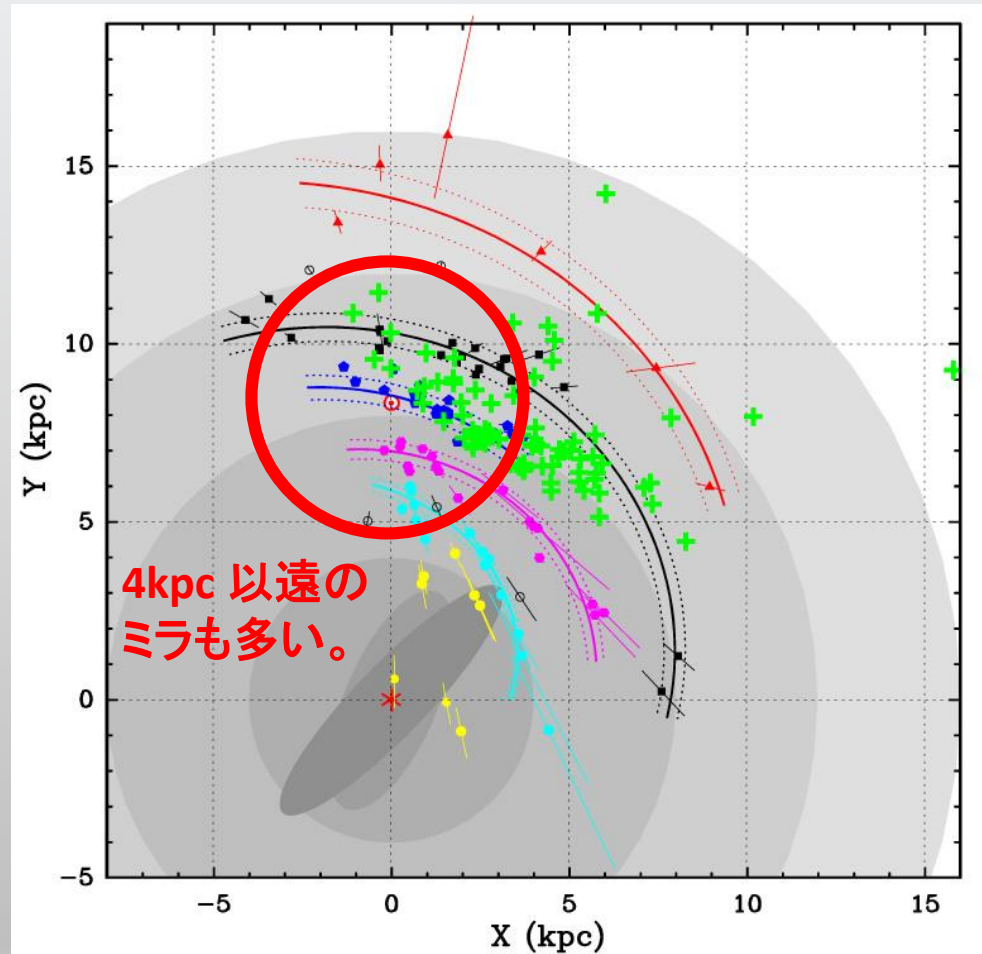
- 2つの変光星探査で見つかった変光星（主にミラ）を379個観測し、229個を検出。
  - NSVS (Northern Sky Variability Survey)
  - ASAS (All Sky Automated Survey)
  - KISOGPミラに比べれば、比較的明るく近い天体。



# ターゲットとするKISOGPミラの選出

- 中間赤外線（MSXカタログ）から、比較的強いSiOメーザが期待される115天体を選択。
- 太陽円（ $R_{GC} = R_{GC}(\text{Sun}) \sim 8 \text{ kpc}$ ）周辺か、円盤の外縁部に分布する天体。

Background:  
Spiral Arms traced by massive star-forming regions (Reid et al. 2014)



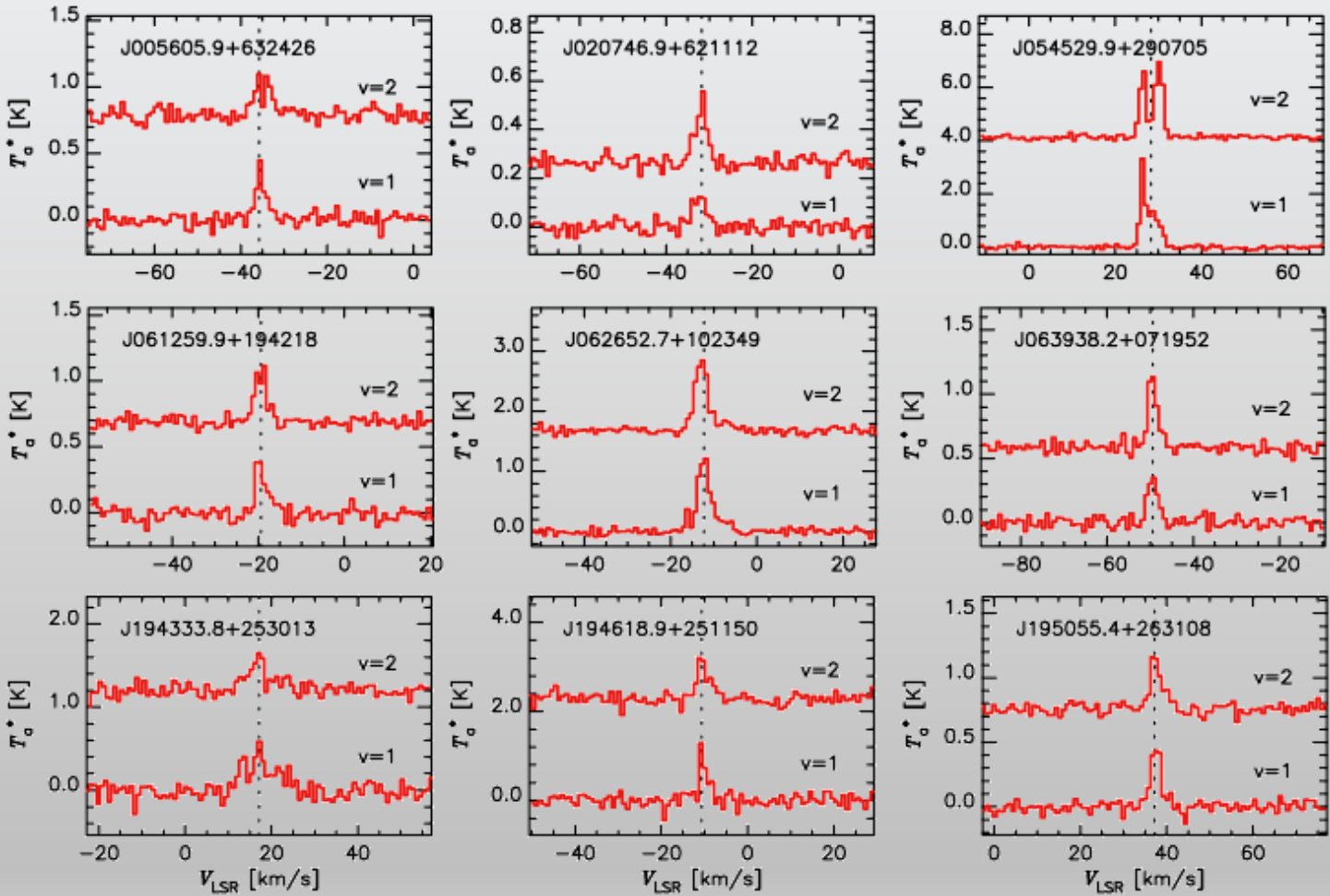
# 野辺山45m電波望遠鏡での観測



- SiOメーザ ( $J=1-0$ )
  - H40受信器
  - $\nu=1$  @ 43.122 GHz
  - $\nu=2$  @ 42.821 GHz
- 2016年2～3月の74時間
- 115個のターゲットのうち、109個を観測。

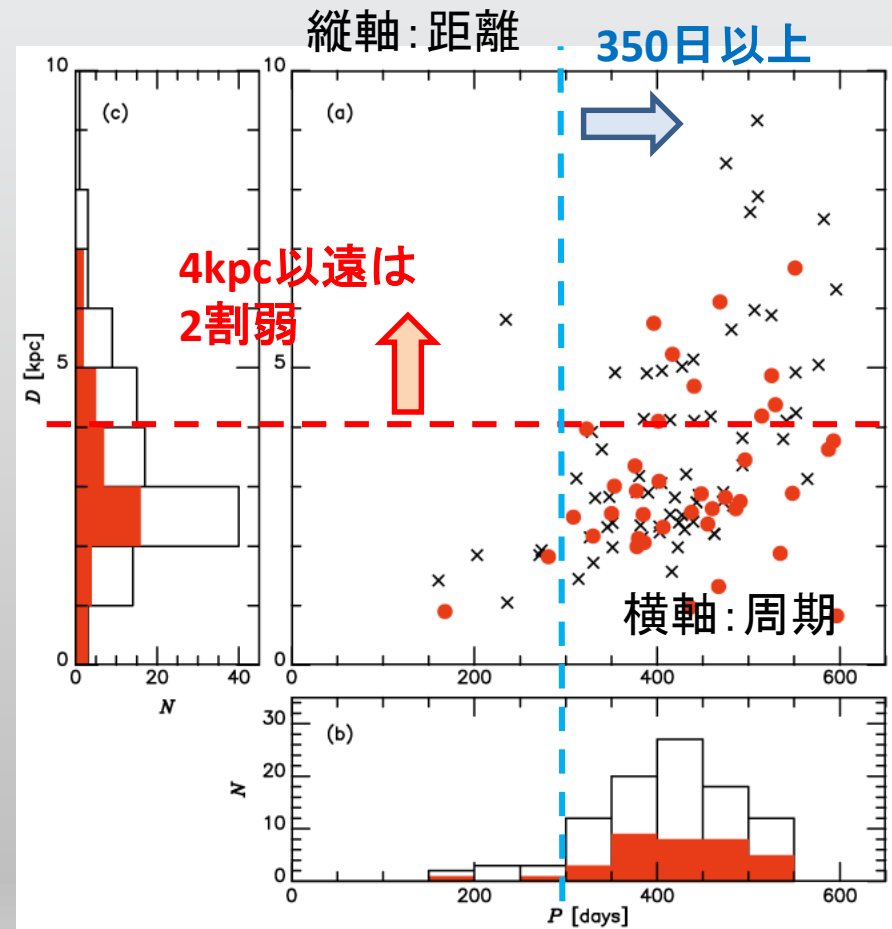
# 54天体からSiOメーザを検出

- $>5\sigma$ 以上で検出



# 検出したSiOメーザの距離と周期

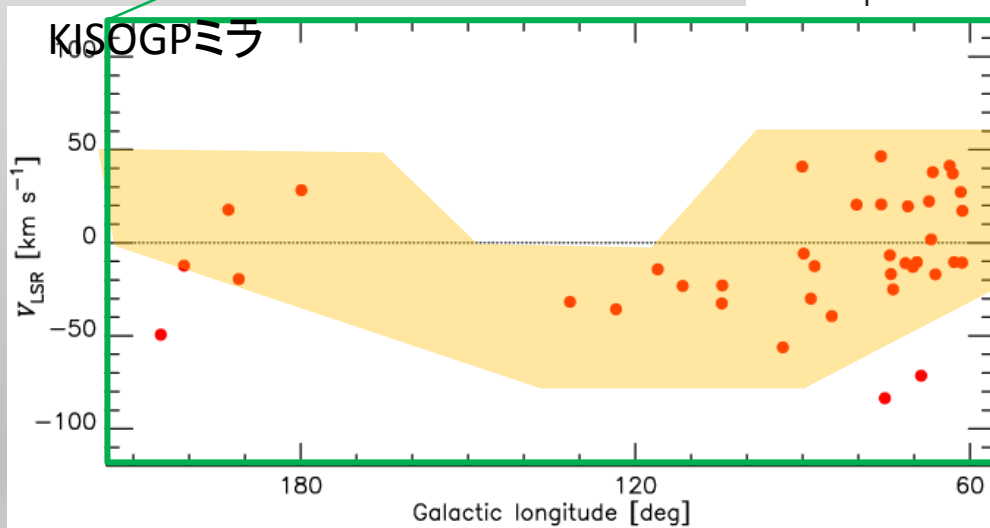
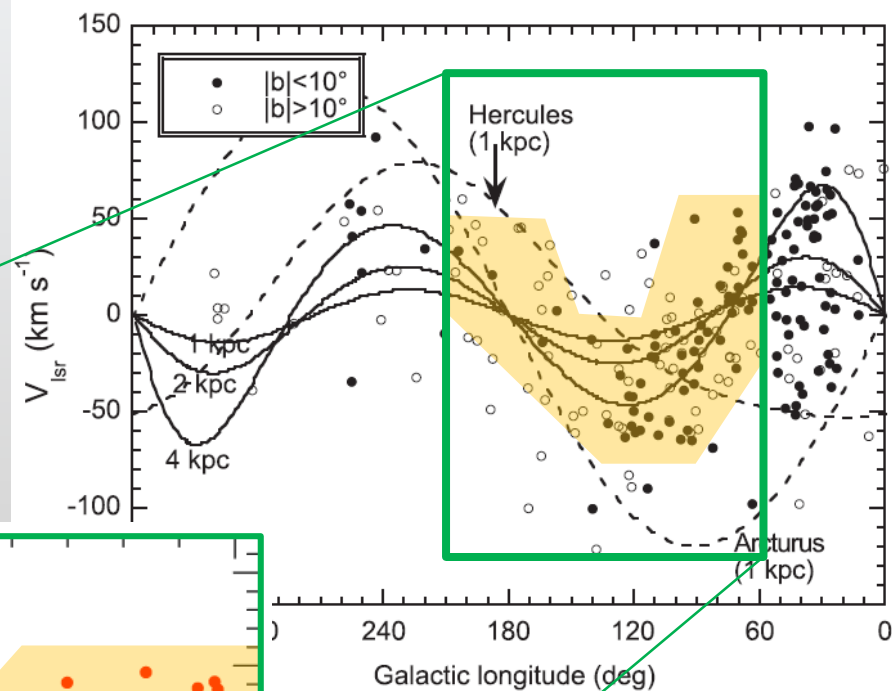
- 3kpc以内の近傍のものが多く、5kpcを超える天体からも検出。
- 周期は比較的長いものが多い。



# l-v図での分布

- 既知SiOメーザと同様の分布。
- おおまかに銀河回転に従っている様子がわかる。
- 距離の情報があるミラなので、もっといろいろわかるはず。

Deguchi et al. (2012)

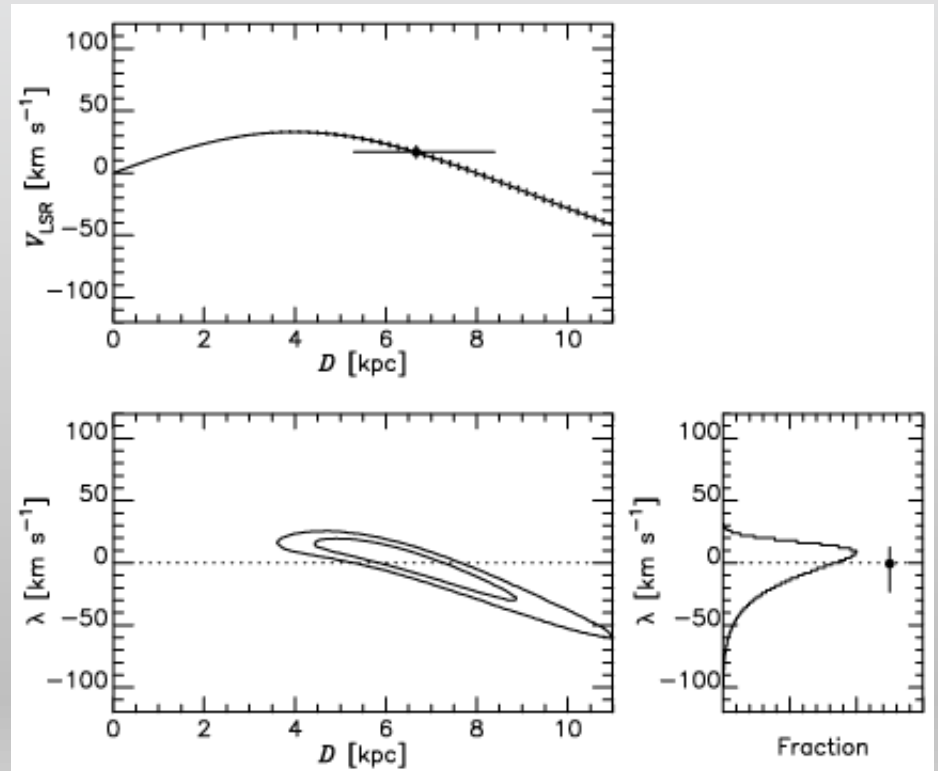


# 銀河回転との比較

- 距離指数の誤差 (0.5mag) や銀河系パラメータの不定性を考慮してモンテカルロ法
- Reid et al. (2014) の銀河系パラメータを利用

$\lambda$  = 銀河回転で予想される  $V_{\text{LSR}}$  との差。

- 銀河回転より回転方向に早いかどうかと  $\lambda$  の正負の関連は、象限(と距離)によって変わる。
- 本当は3次元(または円盤内の2次元)速度が欲しいので、固有運動を使う。少し遠いミラに対する精度のよい固有運動は Gaia DR2。

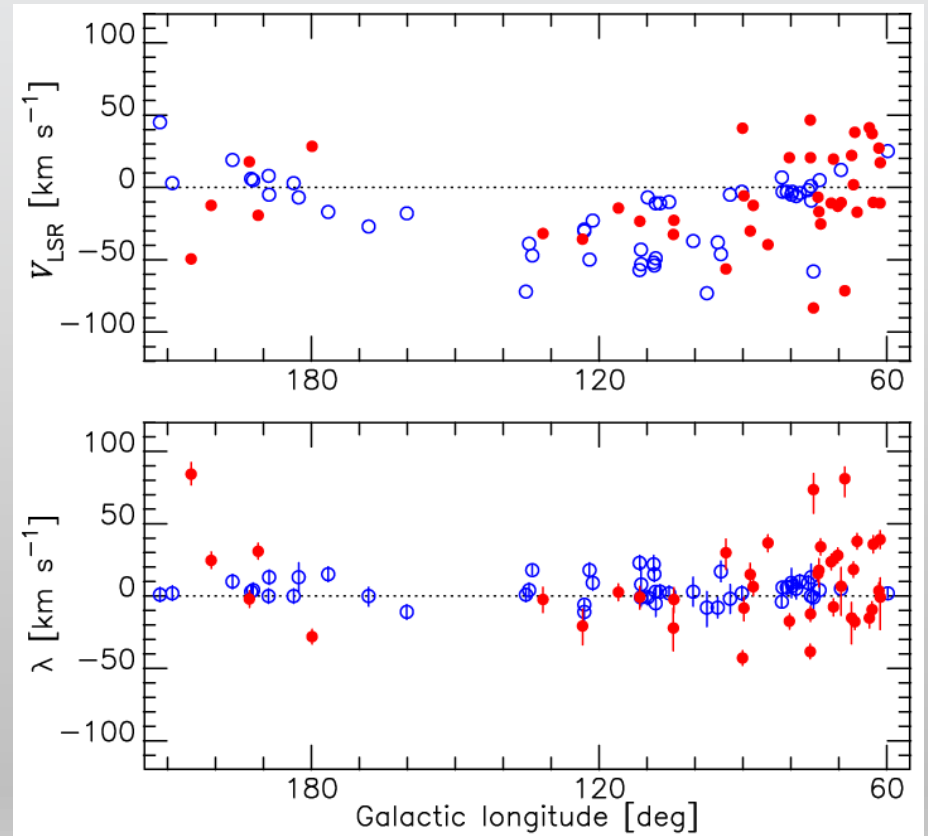




# 銀河回転からのずれ

- 少なくとも星形成領域より非回転成分が大きい。
- 進化した天体で期待される傾向。

- 星形成領域 (Reid et al. 2014)  
平均 5 km/s、標準偏差 8 km/s
- KISOGPミラ  
平均 10 km/s、標準偏差 30 km/s



# 今後の計画

- データ解析の改良、まとめ
  - PS1のカタログで較正をやり直し
  - 測光精度、外れ値などの検証
  - 変光星検出、周期決定のやり直し
- 論文A: 発見したセファイドのカタログ論文
- 論文B: 発見したミラのカタログ論文
- 論文C: SiOメーザ輝線の報告と議論の論文
- 論文D: 分光データ(たぶん可視だけ)によるミラの分類の論文
- 論文E: ミラの近赤外線スペクトルについての論文
- ミラ、セファイドの測光追観測や、セファイドに対するSubaru/IRCS分光データなどを用いた数本の論文

# まとめ

- KWFC、Iバンドで約320平方度の変光星探査
  - 約800個のミラ、約90個のセファイドを発見。
- 炭素星・M型星の分類
  - 長周期ミラでは円盤中の位置によってC/Mが変化
- SiOメーザ探査
  - 約100天体中50個のメーザ検出。
  - 銀河回転との比較を行っている。
- ゼロ点較正に使うカタログをPS1に変えるなど、改良を加えながら、データ解析をまとめている。
- 論文執筆中