

# JVN高感度少數基線による 高赤方偏移AGNジェットの統計的研究

～大規模フリンジ検出探査観測の途中報告～

古谷庸介（山口大学）

共同研究者：藤澤健太、新沼浩太郎、鶴田大樹、松田将紀（山口大学）



# 導入：赤方偏移とAGNジェット

# 導入：高赤方偏移AGNジェット

AGNジェットの電波構造は宇宙史に渡って  
進化するか？

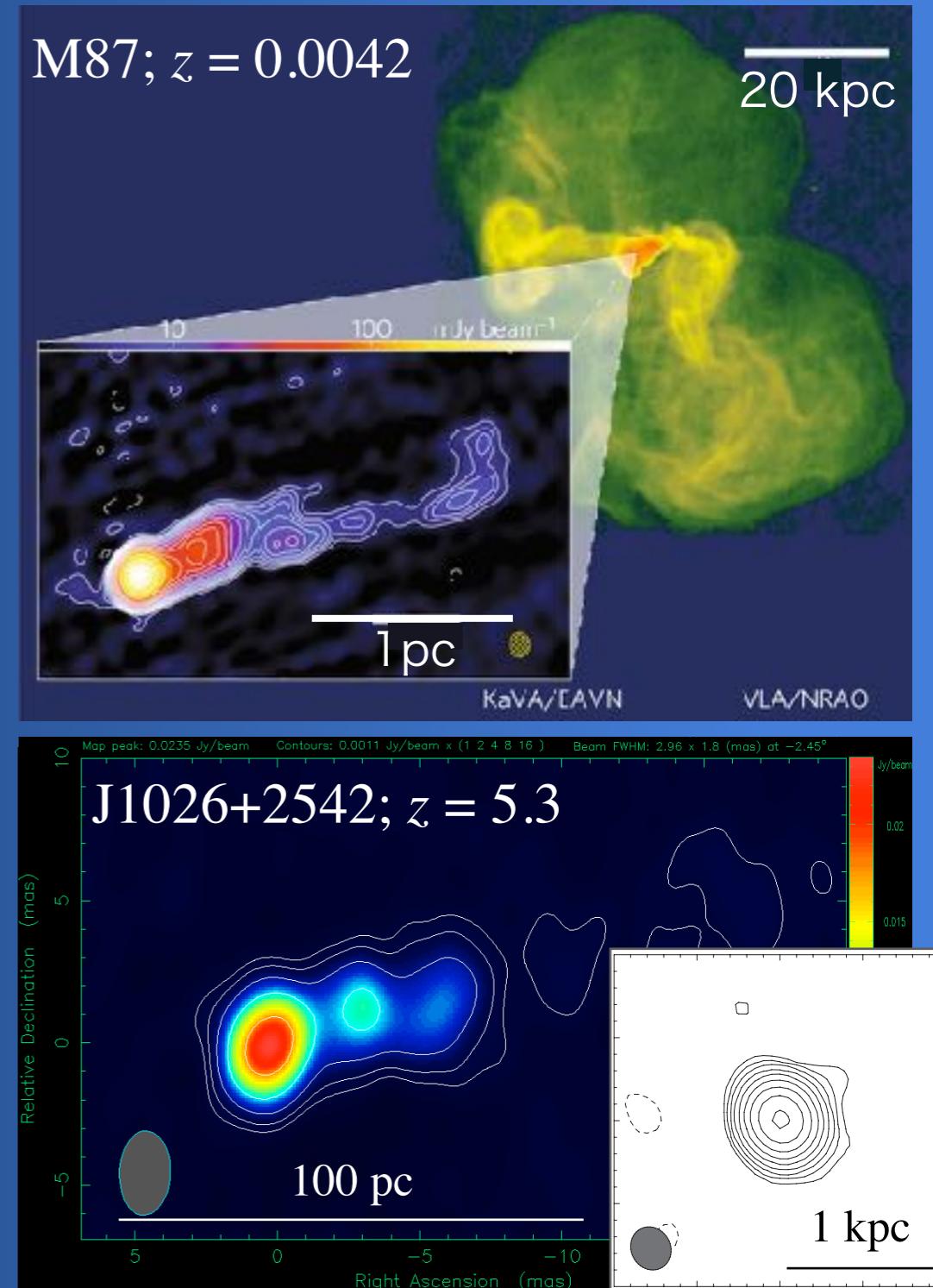
## 低赤方偏移AGN

- pc - kpcスケールに広がる電波ジェット
- 電波ロープを形成

## 高赤方偏移AGN

- kpcスケールに広がった電波構造はほとんど検出されていない
- pcスケールのコンパクトな電波構造
- 特異なスペクトルを持った天体が存在

周辺ガスによる閉じ込め効果が寄与？

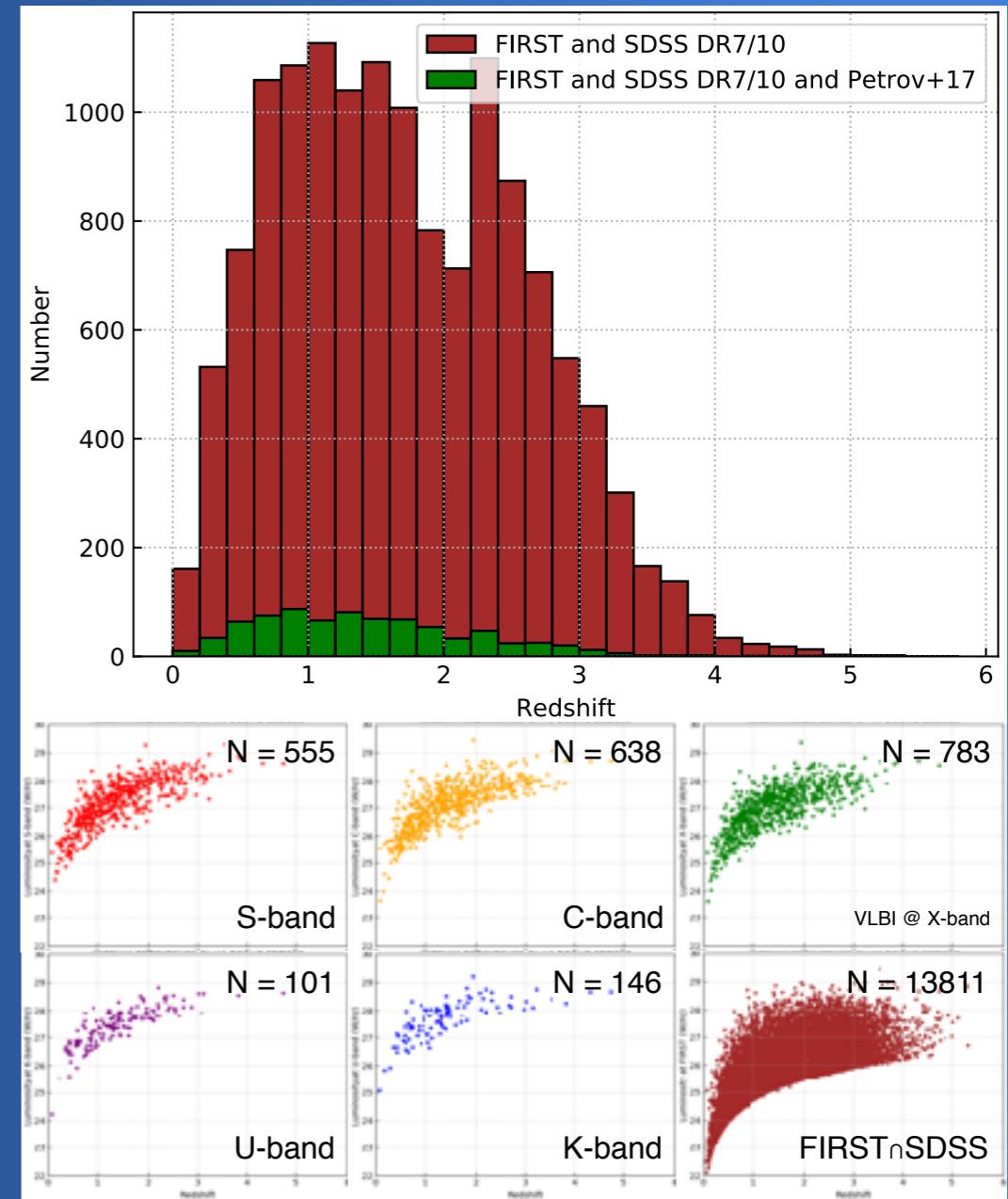


# 導入：多天体VLBI観測

これまでにVLBIイメージが得られた天体は赤方偏移3以上で84天体!  
(Petrov+17)

- 周波数ごとの検出数( $z > 3$ )
  - S帯: 19天体
  - C帯: 27天体
  - X帯: 26天体
  - U帯: 7天体
  - K帯: 5天体
- 高赤方偏移側で高光度の傾向  
& VLBI検出天体数が少ない
  - > 高光度な天体は宇宙初期には少ない?
  - > 宇宙初期の方が高光度である?

「天体選出基準が統一されていないため、  
セレクションバイアスの可能性大!」



# 導入：高赤方偏移AGNジェット

宇宙論的には . . .

- ・ 宇宙の平均ガス密度は $(1+z)^3$ に比例
- ・ CMB輻射場は $(1+z)^4$ に比例

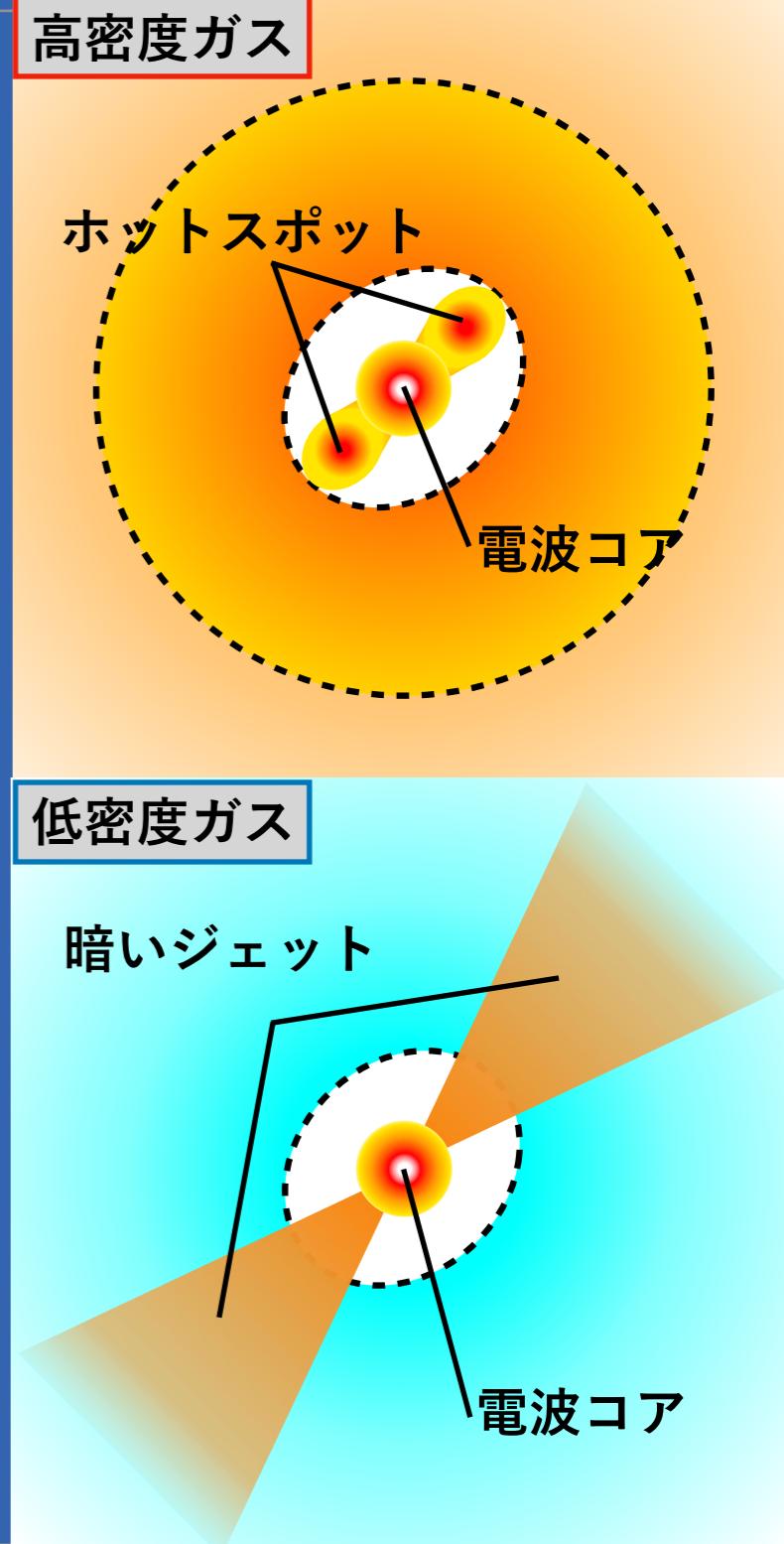
環境効果あり (高密度ガス)

- ・ コンパクトな領域でホットスポットを形成
- ・ ホットスポット外に広がるジェットは形成されない
  - 高周波で明るい
  - コンパクトな構造

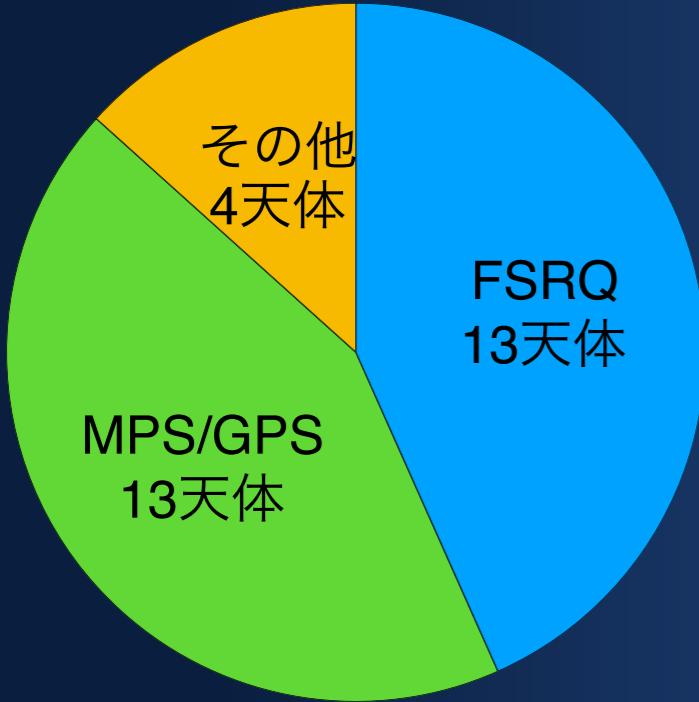
環境効果なし (低密度ガス)

- ・ コンパクトな領域でホットスポットを形成しない
- ・ 広がったジェット構造を形成
  - 低周波で明るい
  - 暗く広がった構造

多周波/高分解能/高感度/高ダイナミックレンジな  
VLBI観測が必要！



# 導入：多周波VLBI観測



多天体の統計的議論 ( $z > 4.5$  30天体 @ 1.7/5 GHz)  
(Coppejans+16)

- FSRQ (Flat Spectrum Radio Quasar) と MPS/GPS 天体がそれぞれ半数を占める。
- 低ダイナミックレンジの観測のため天体構造を検出できていない。

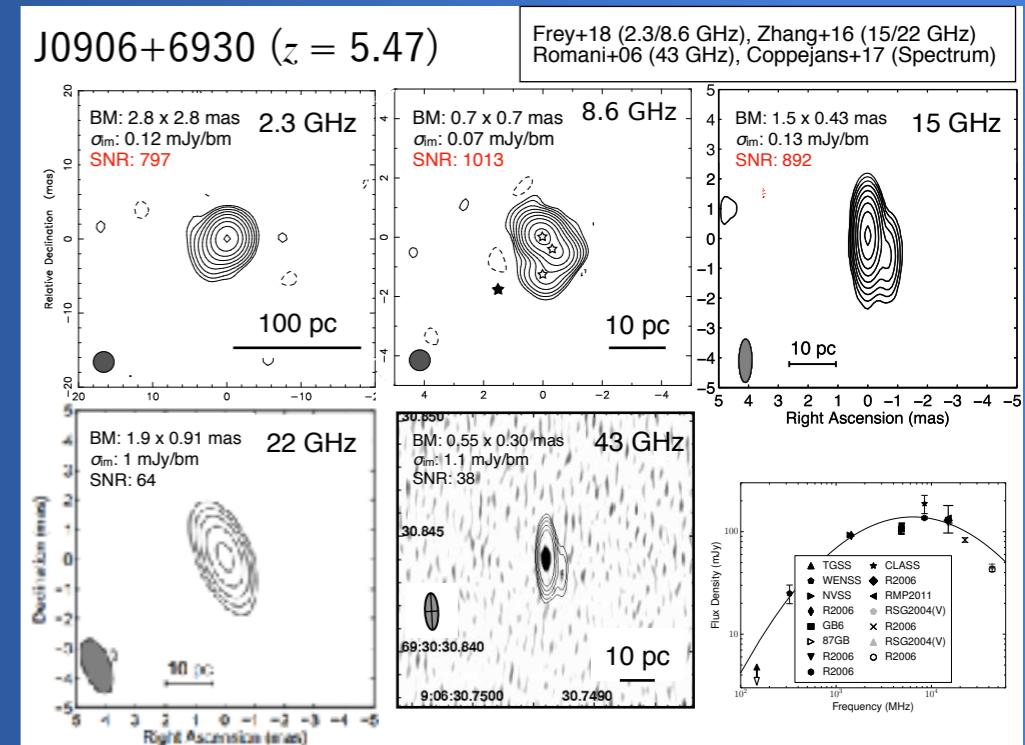
多周波数帯でのVLBI観測 (J0906+6930;  $z=5.47$ )

## 低周波数帯

- 高ダイナミックレンジな観測によって天体構造を検出

## 高周波数帯

- 高角度分解能な観測により天体構造を分解
- コアよりもジェット成分の方がスペクトルがフラット
- > ジェットと周辺ガスとのショックを示唆?



# 導入：観測計画

JVN/EAVN観測で多天体の高赤方偏移AGNジェットの電波構造を  
統計的に議論  
～フリンジ検出/高周波数帯/低周波数帯の3つの観測を実施～

	山口-茨城の1基線VLBI観測	EAVN観測	JVN観測
観測網			
周波数	8.4 GHz	22/43 GHz	6.9/8.4 GHz
特徴	高い基線感度/操作性	高い基線感度/イメージング感度	十分な基線感度
目的	無バイアスにVLBI天体の選出	pcスケールホットスポットの空間分解	広がった暗い電波構造の調査
方法	552天体への大規模探査	スペクトルでホットスポットの同定	VLBIイメージで電波構造を確認
進捗	142天体の観測が終了	EAVN2019bを提出予定	JVN2019bを提出予定

# 研究目的

高赤方偏移AGNジェットの電波構造やスペクトルは  
宇宙論的タイムスケールで進化するのか？

## 1. VLBI未検出天体に対する多天体VLBIサーベイ

- ・山口-茨城VLBI観測によって無バイアスなVLBI検出天体力カタログを作成
- ・光度/個数密度の赤方偏移依存性について統計的議論
- ・今後のイメージング観測天体の候補を選出

## 2. VLBI研修天体に対する多周波イメージング観測

多天体の多周波VLBIイメージの電波構造とスペクトルに着目することで、  
高赤方偏移AGNジェットへのガスの閉じ込め作用（環境効果）の寄与について統計的に考察。

# 観測：天体選出と観測概要

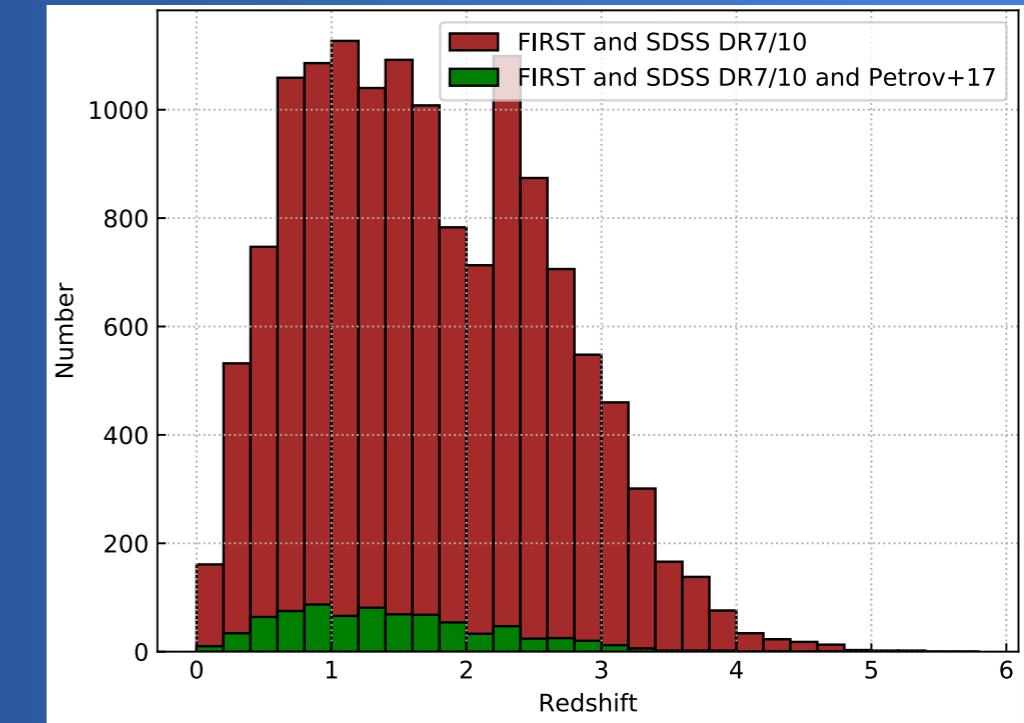
# 観測：観測天体の検出

これまでにVLBIイメージがある天体は  
700天体程度 ( $z < 5.3$  @ X帯)

## 天体選出条件

- FIRST の SDSS DR7 および DR10 のうち,
  - 赤方偏移が 3.0 以上.
  - 8.4 GHz の予想フラックス密度が 4.0 mJy 以上.

→ VLBI 観測が行われていない.



→ 554 天体選出

## 観測方法

- 554 天体を 10 回に分けて観測 (142/522 天体の観測が終了)
- 赤経赤緯順に近い天体から観測 (フラックス, 赤方偏移にバイアスなし)

# 観測：観測概要



	観測日時 (UT)	周波数 (MHz)	分解能 (mas)	感度 (mJy)	検出条件	観測 天体数	相關器
1	2017/12/05 16:45-27:15	8192-8704 (RHCP)	8.3	2.8	SNR > 7	69	ソフトウェア 相關器 "GICO3"
2	2018/06/28 03:15-13:15					73	

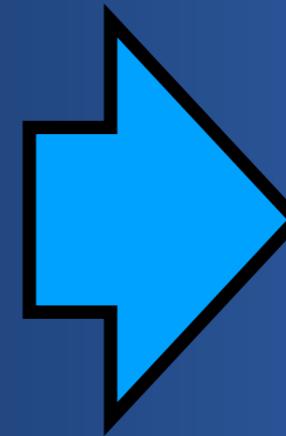
# 結果：山口-茨城VLBI観測結果

# 結果：検出状況

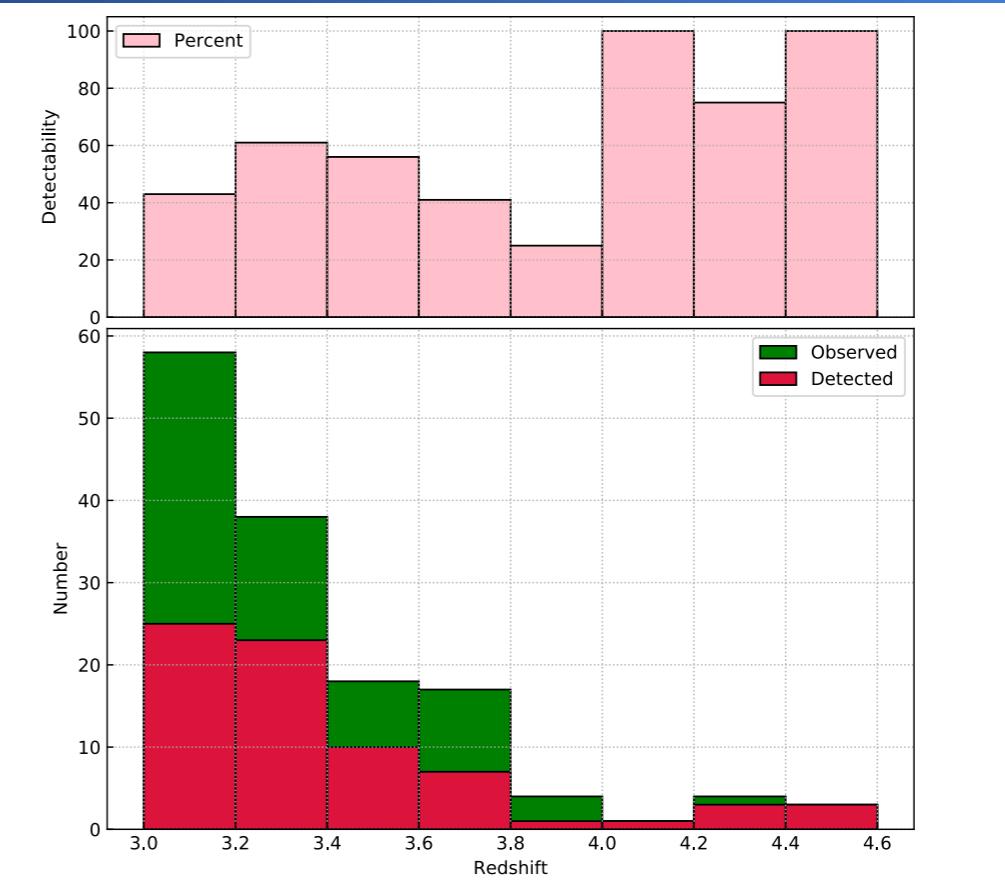
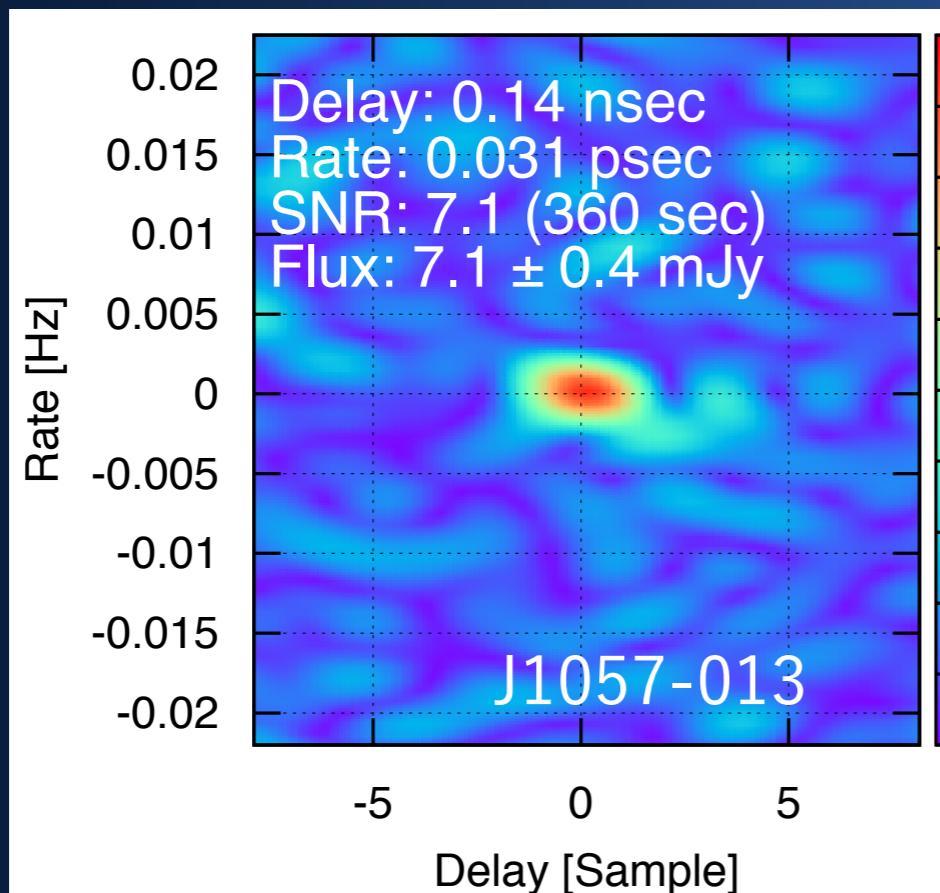
142天体中73天体が検出！

## 赤方偏移別の検出状況

- $z = 3.0-3.9$  : 50%程度
- $z > 4.0$  : ほぼ100%



K-S検定より、 $z = 4$ を境にした検出率の違いについては統計的ゆらぎ。

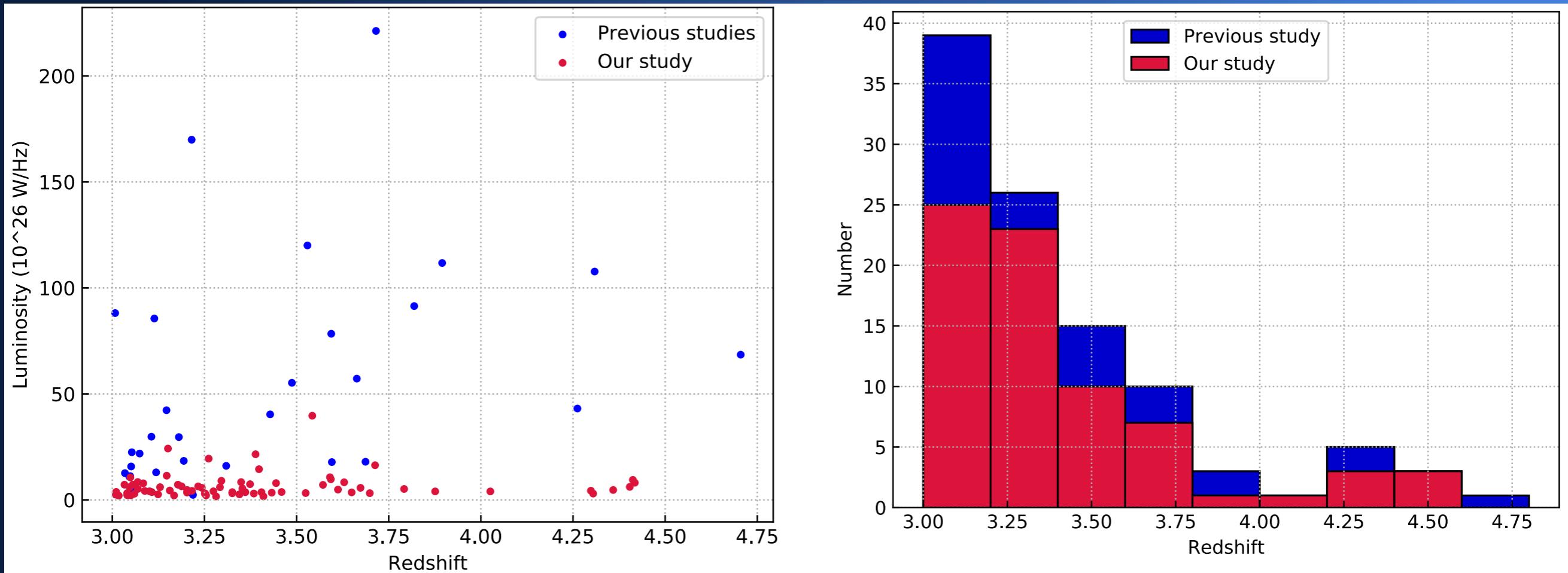


# 考察：光度/個数密度の赤方偏移依存性について

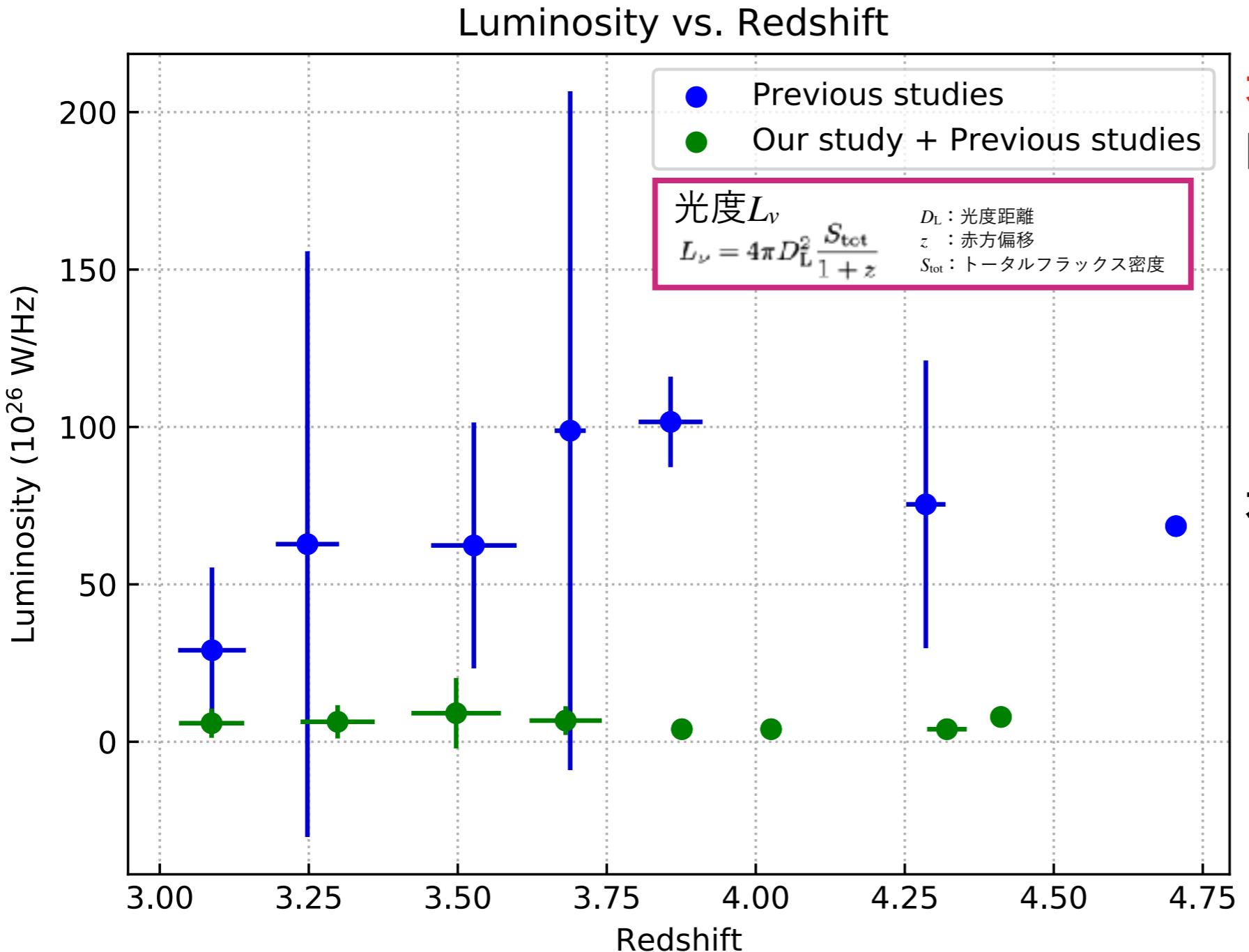
# 考察：VLBI天体の統計的議論

Petrov+17と合わせて赤方偏移3.0-4.6のVLBI天体について統計的議論

- ・天体サンプルは103天体 (先行研究の約3倍)
- ・光度は $\sim 10^{26} \text{ W/Hz}$ に集中 (FRI: $\sim 10^{23-25} \text{ W/Hz}$ , **FRII:  $>\sim 10^{25} \text{ W/Hz}$** )



# 考察：VLBI天体の統計的議論（光度）



光度

Petrov+17

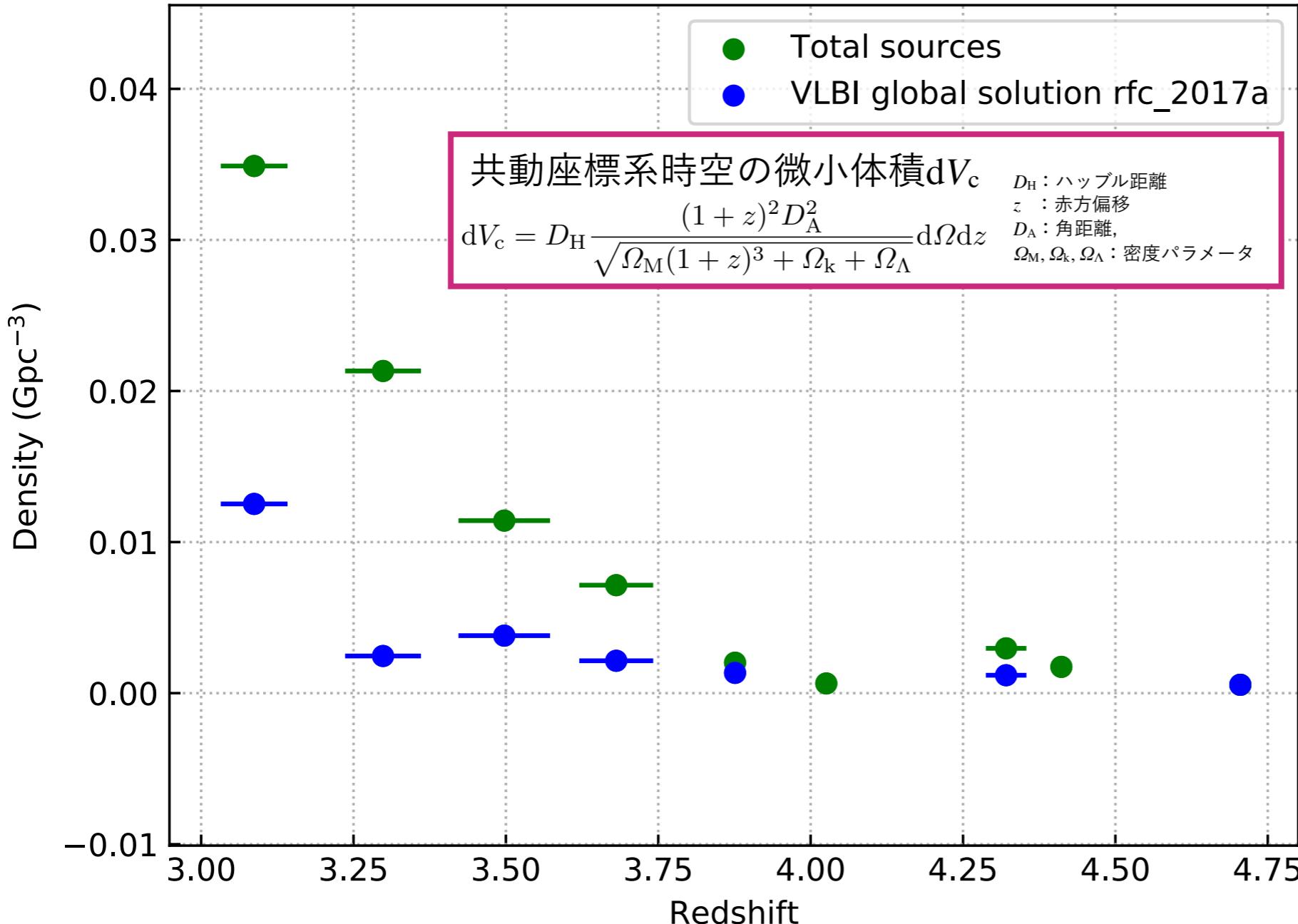
- $z=3.0-4.6$ にかけて光度が上昇
- エラーバーが大きい

本研究

- 赤方偏移によらず一定
- $\sim 10^{26} \text{ W/Hz}$

# 考察：VLBI天体の統計的議論（個数密度）

The number density of VLBI detected sources



個数密度

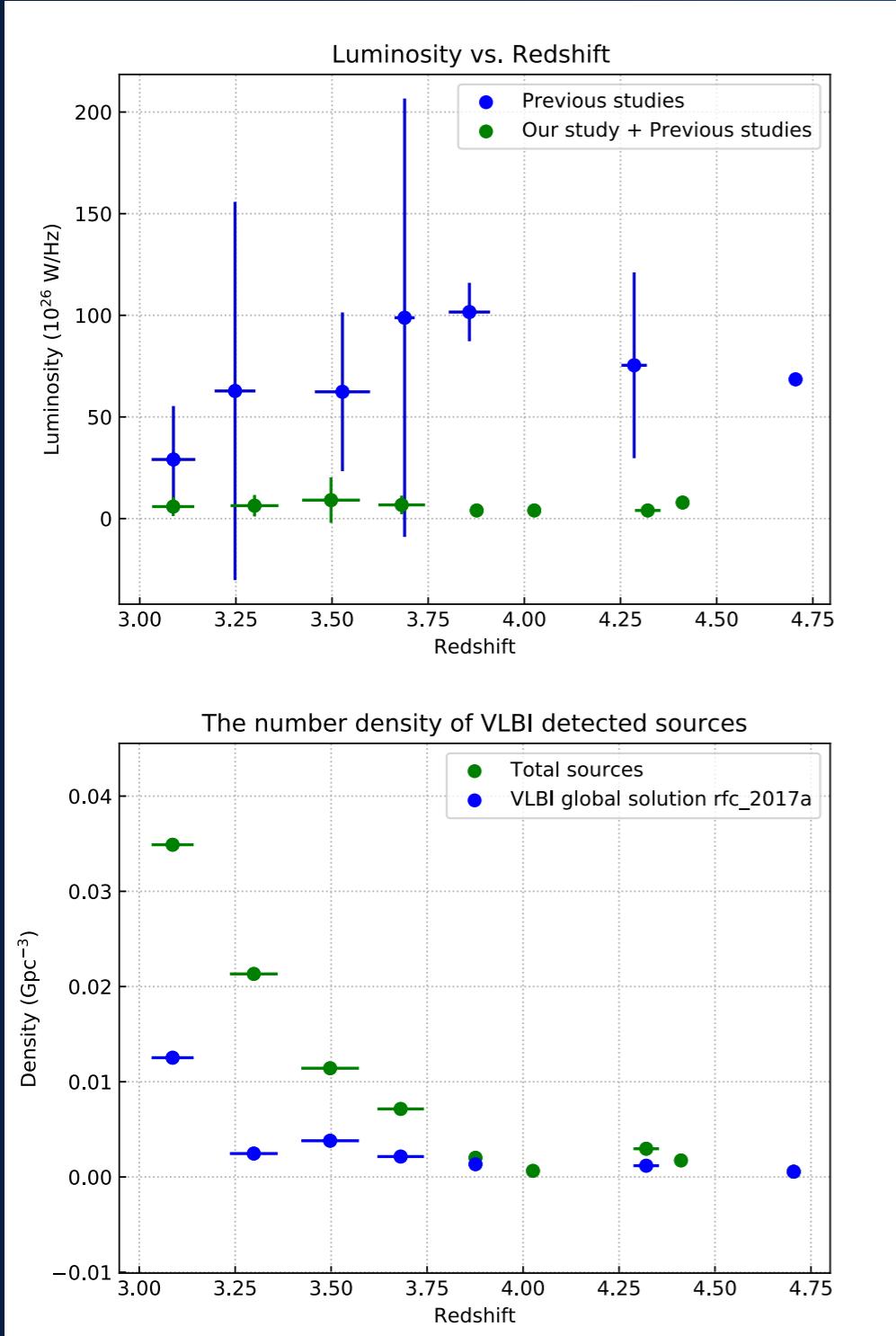
Petrov+17

- 密度によらずほぼ一定

本研究

- 赤方偏移が4未満で密度が~10倍に上昇!
- 赤方偏移が4以上での密度は先行研究と同程度（サンプル不足?）

# 考察：AGNジェットの光度と密度の進化



## 光度と個数密度に着目

- 光度は時間に依存しない。
- 個数密度は時間とともに増加。
  - AGNジェットは不連続なエネルギー変化をする
  - AGNジェットの光度には典型値が存在
  - 宇宙論的タイムスケールの周辺環境の変化に依存しない傾向

より広い赤方偏移の範囲かつ、多くのサンプルによる統計的議論が必要！

# 展望：EAVN/JVNによるイメージング観測

# 展望：高赤方偏移AGNジェットの撮像観測 (EAVN)

目的：pcスケールジェットの空間分解  
とホットスポット構造の検出

周波数

- 22/43 GHz (BW: 256 MHz)

観測局

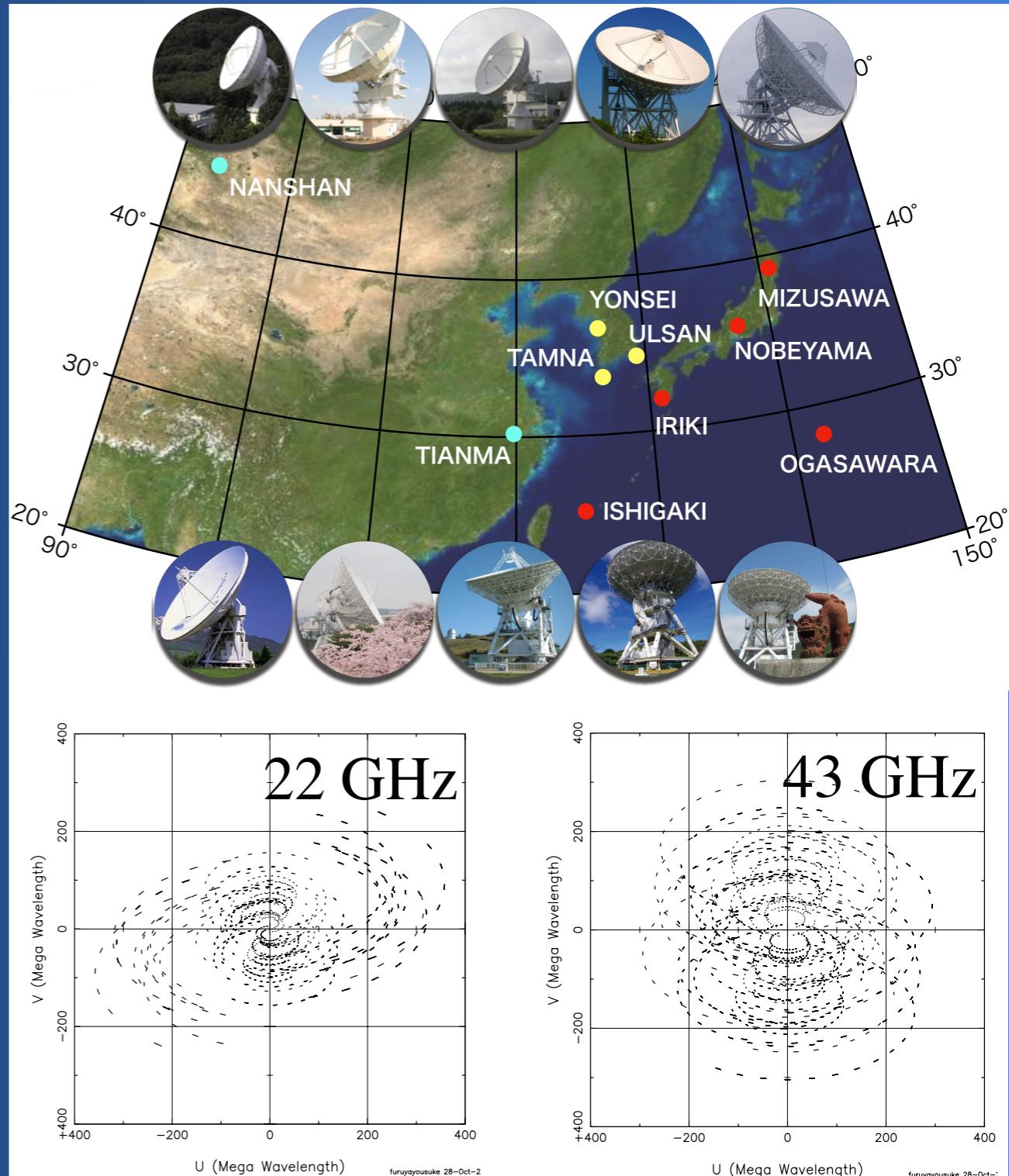
- 水沢, 小笠原, 入来, 石垣島,  
廷世, 蔚山, 殷羅, 野辺山,  
天馬, 南山 (22 GHzのみ)

角度分解能

- 0.55 mas @ 22 GHz
- 0.63 mas @ 43 GHz

イメージ感度 (on-source: 2 hr)

- $\sim 60 \mu\text{Jy}/\text{beam}$  @ 22 GHz
- $\sim 80 \mu\text{Jy}/\text{beam}$  @ 43 GHz



# 展望：高赤方偏移AGNジェットの撮像観測 (JVN)

目的：ホットスポットよりも外側に広がる  
暗いジェット構造の検出

周波数

- 6.9/8.4 GHz (BW: 512 MHz)

観測局

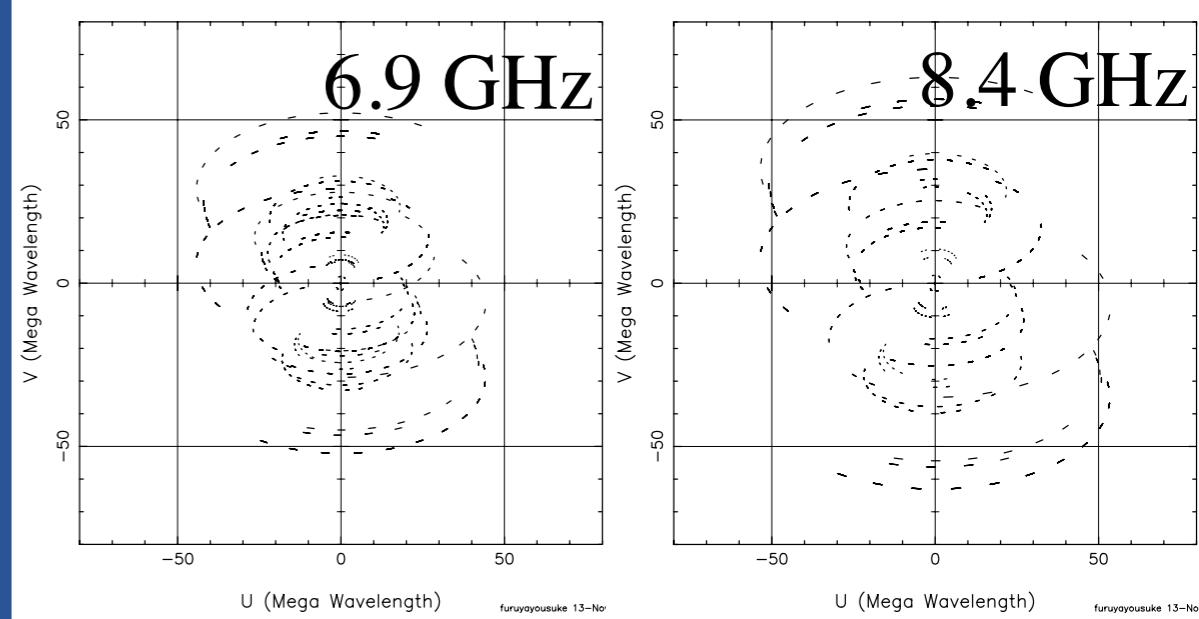
- 水沢, 小笠原, 入来 (6.9 GHzのみ),  
石垣島, 鹿島, 日立, (高萩), 山口第1,  
山口第2, (臼田)

角度分解能

- 3.2 mas @ 6.9 GHz
- 3.9 mas @ 8.4 GHz

イメージ感度 (on-source: 2 hr)

- $\sim 40 \mu\text{Jy}/\text{beam}$  @ 6.9 GHz
- $\sim 40 \mu\text{Jy}/\text{beam}$  @ 8.4 GHz



# まとめ

謎：AGNジェットの電波構造は宇宙初期の環境効果を受けるのか？

観測：高赤方偏移AGNジェットのコンパクト/広がったジェット構造を  
検出するため

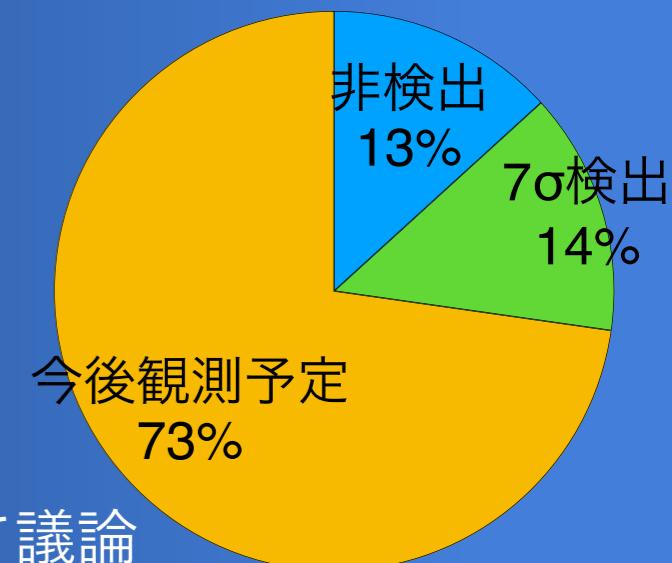
多周波数帯/高角度分解能/高感度/高ダイナミックレンジ

な観測が必要。

JVN/EAVNイメージング観測を計画！

現在：EAVN観測に適した天体の選出を目的とした  
JVN探査を実施中

現在までに142天体中74天体が $7\sigma$ 以上で検出！



先行研究と合わせた天体サンプルより、光度と個数密度について議論

- 光度の赤方偏移に依存した進化は本観測では見られない。
- 個数密度は赤方偏移3.0-4.0で~10倍に増加。

AGNジェットは宇宙論的に進化せず、高赤方偏移AGNジェットとしての活動には典型値が存在する可能性を示唆。