



# Updated AGN Picture with Dusty/Dust-free Gas Structure and Effects of the Radiation Pressure

(Mizukoshi et al. submitted)

水越 翔一郎 (東京大学)

*Unobscured*

ブラックホール大研究会 @御殿場

*Obscured*

# AGN周囲の dusty gas 構造

## ダストトールラス

- 統一モデルにおける遮蔽構造
- SMBHへの質量供給源
- アウトフローによるフィードバック

## Dusty gas の 有効Eddington限界

- ダスト粒子の放射に対する断面積はガスより大きく、**Eddington限界より低い光度** で飛ばされる

= **有効Eddington限界  $L_{\text{Edd}}^{\text{eff}}$**  (e.g. Fabian+08)

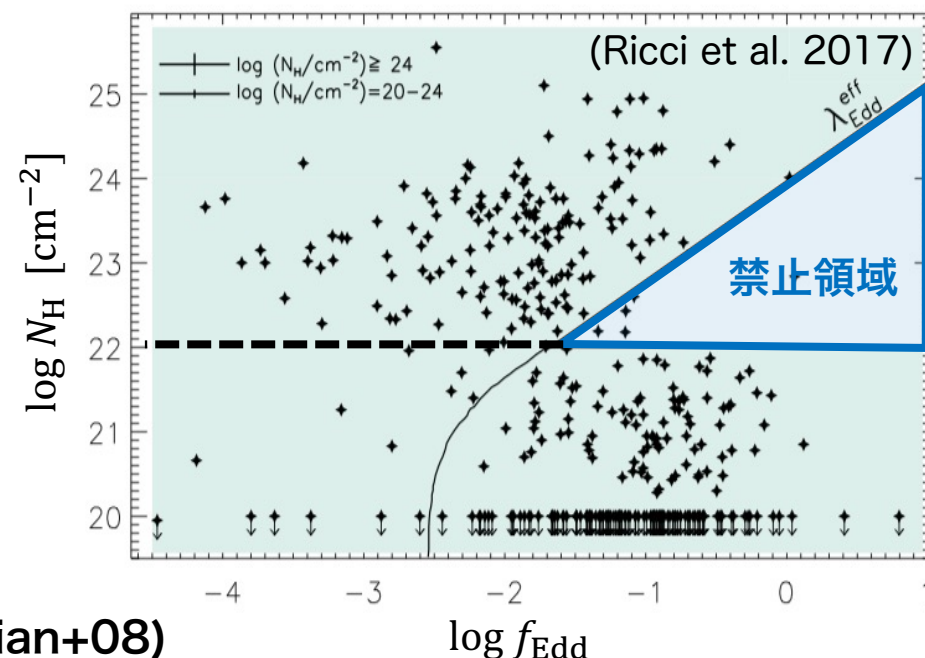
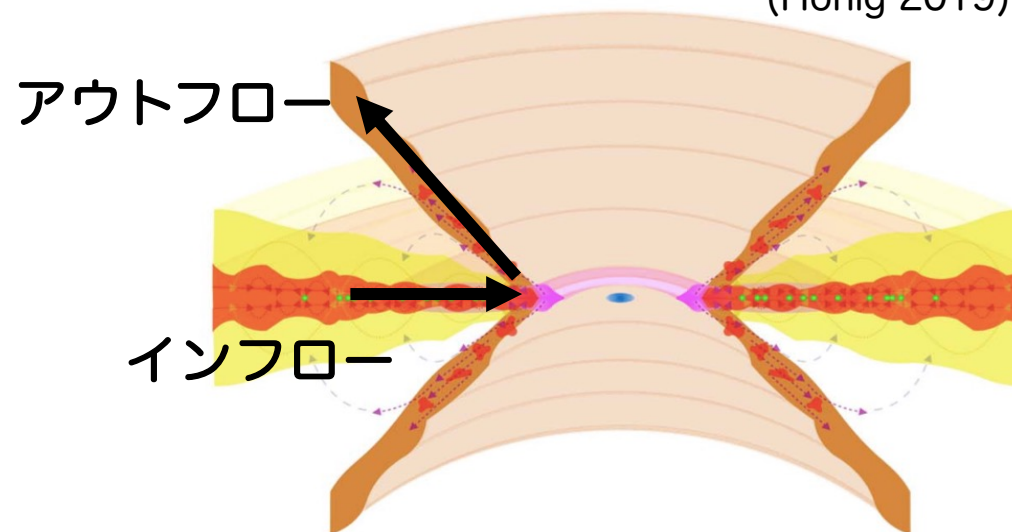
- Eddington比 ( $f_{\text{Edd}}$ ) vs 中性ガス柱密度 ( $N_{\text{H}}$ )

▶ 柱密度が増えるとガスが「重荷」となり、 $L_{\text{Edd}}^{\text{eff}}$  は増加

▶  $L_{\text{bol}} > L_{\text{Edd}}^{\text{eff}}$  の領域 (**禁止領域**) には ほぼ天体なし

▶ 禁止領域に入ると放射圧で周囲のガスが飛ばされる (e.g. Fabian+08)

(Honig 2019)



# 本研究のモチベーション

## dust-free gas の存在

- dust-free gas は X-ray  $N_H$  のみに寄与

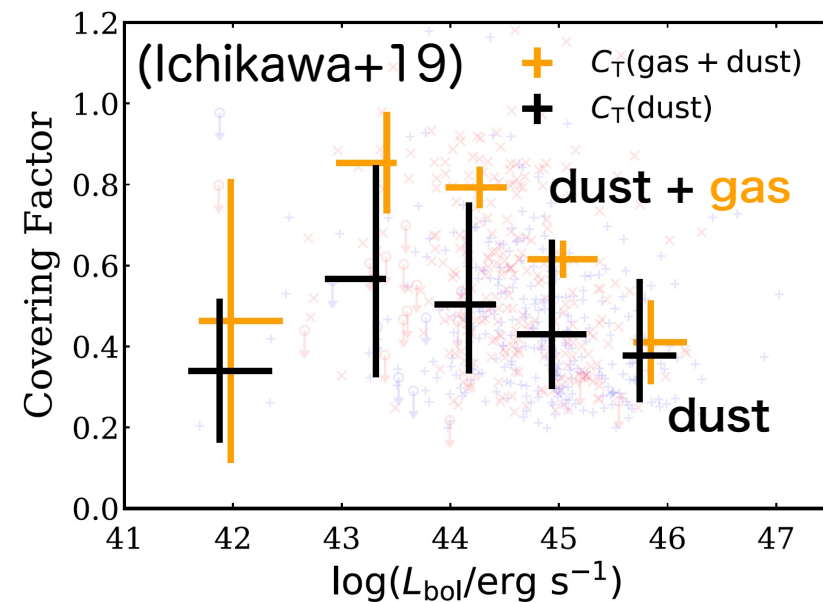
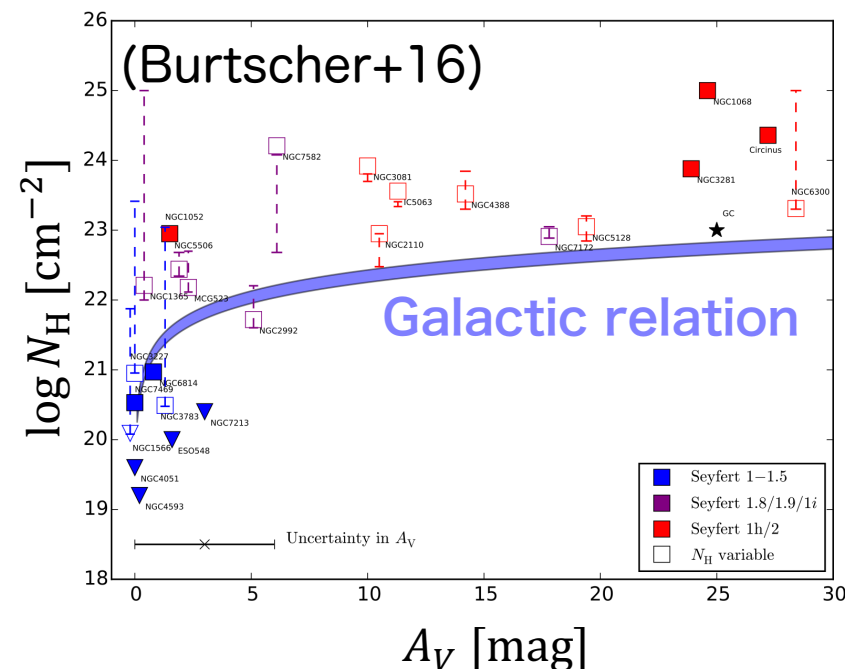
- ▶ ガス柱密度  $N_H$  とダスト減光量  $A_V$  の比較 (e.g. Burtscher+16)
- ▶ IR SED から推定した covering factor と X-ray SED から推定した covering factor の比較 (e.g. Ichikawa+19; Ogawa+21)

→ **dusty gas outflow**の性質を正確に調査するためには、**X-ray  $N_H$  ではなくダスト減光量  $A_V$  を用いるべき。**

## 本研究における重要な仮定

- $N_H(\text{observed}) = N_H(\text{dusty}) + N_H(\text{dust-free})$
- $N_H(\text{dusty}) = A_V \times (N_H/A_V)_{\text{MW}}$       $(N_H/A_V)_{\text{MW}} \sim 2.24 \times 10^{21} \text{ [cm}^{-2}\text{mag}^{-1}]$   
:  $N_H/A_V$  of the Galactic ISM

→ **まず各天体の  $A_V$  を推定し、X-ray  $N_H$  との比較から dusty/dust-free gas 各々の性質を探る。**



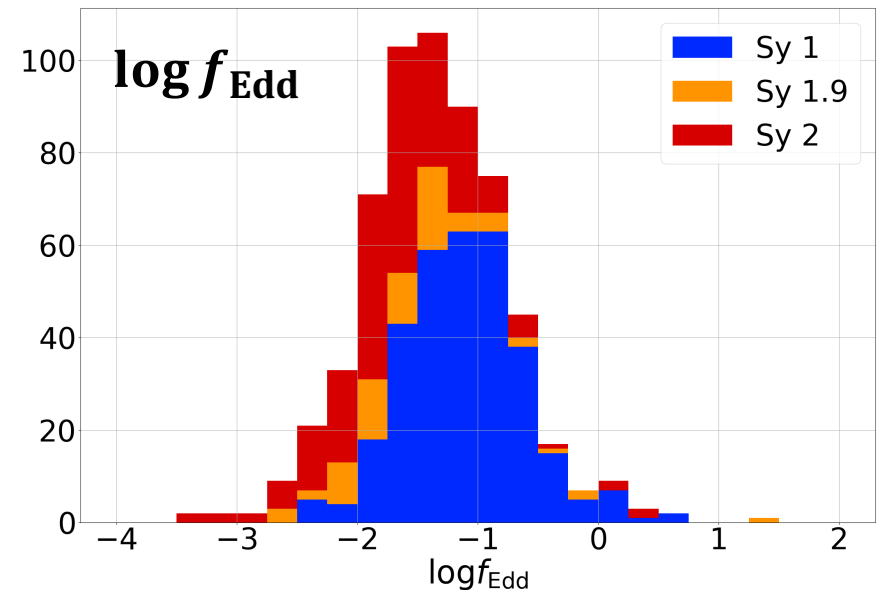
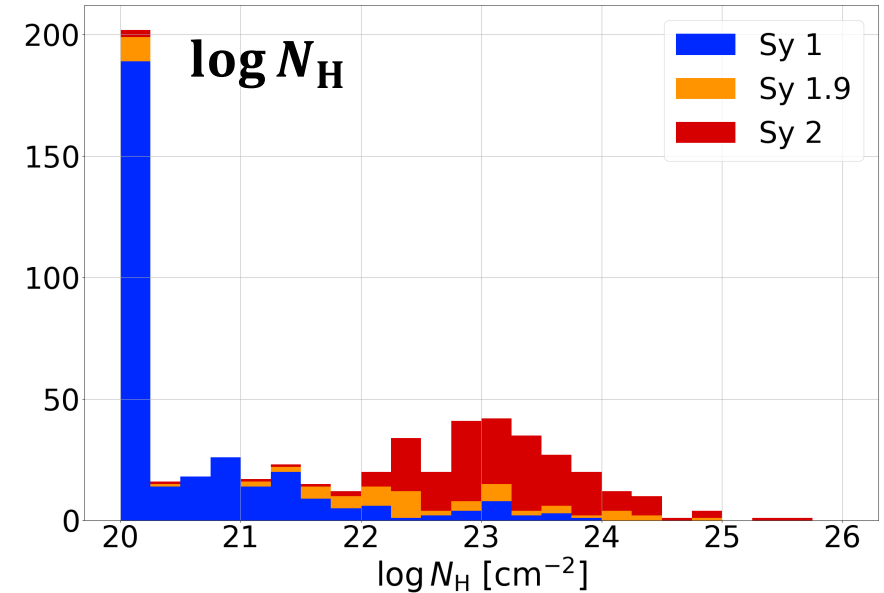
# サンプルとデータ

## サンプル

- 母サンプル：BASS DR2 (Koss+22a,b)
  - ▶ Swift/BAT X-ray selected AGN
  - ▶ WISE赤外線データ精度、redshiftなどに基づきセレクション
  - ▶ 最終サンプル：598天体 (BASS DR2 858天体の約70%)

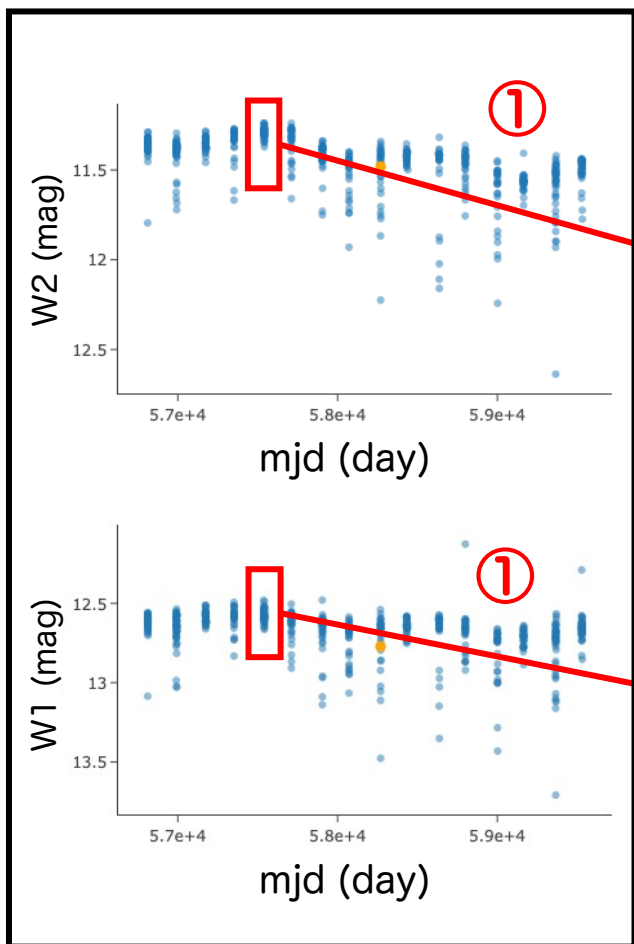
## データ

- *WISE* 赤外線モニタリングデータ
  - ▶ 変動成分のカラーから各天体の  $A_V$  を推定 (Mizukoshi+22)
- BASS DR1 (Koss+17; Ricci+17b)
  - ▶  $\log N_H$  (total)
- BASS DR2 (Koss+22a,b)
  - ▶ Seyfert type (Sy1, Sy1.9, Sy2), Eddington ratio



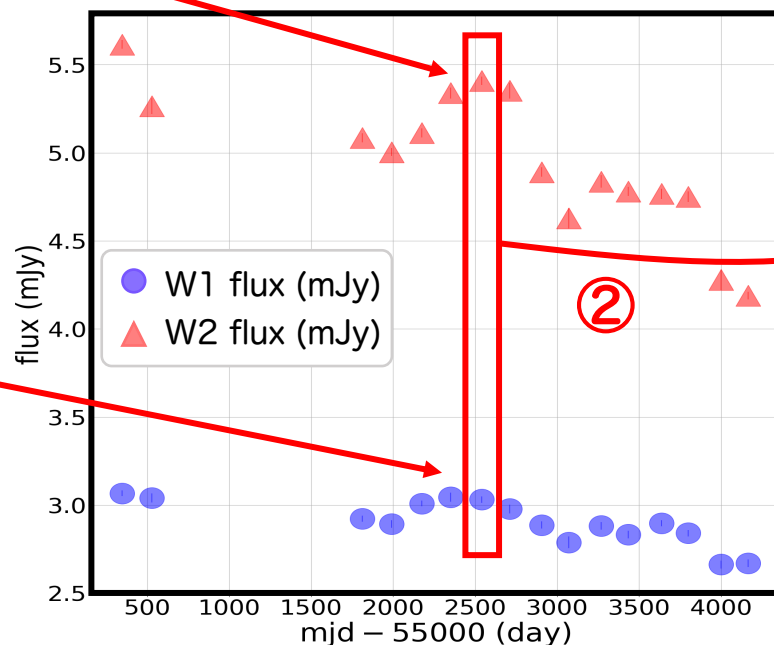
# flux-flux plot による flux の時間変動解析

## flux-flux plot の作成

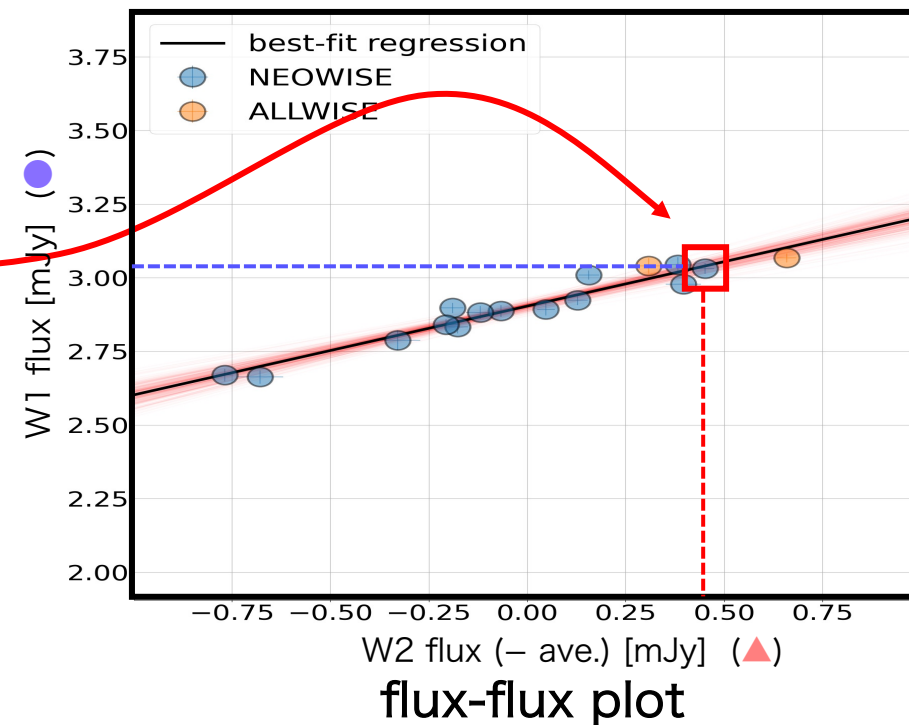


original light curve data

- ① 2バンドにおける light curve data の校正 (外れ値除去 & 平均計算)
- ② 縦軸、横軸に各バンドの同時期の light curve data をとる



calibrated light curve data



flux-flux plot

# ダスト減光量の推定 (Mizukoshi+22)

## FVGを用いた $A_V$ の推定

- **Flux Variation Gradient (FVG)** :  
= 2バンドにおける典型的なflux変動振幅の比
- unobscured AGN の FVG は optical (Winkler+92)、  
NIR (Glass04) で 天体によらずほぼ一定  
→ **obscured AGN で reddening**  
→ **FVG の reddening を測定し,  $A_V$  に変換**

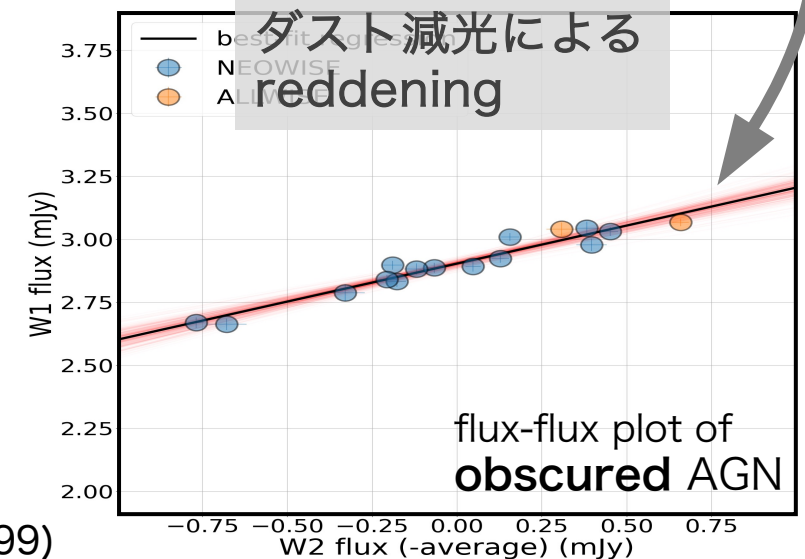
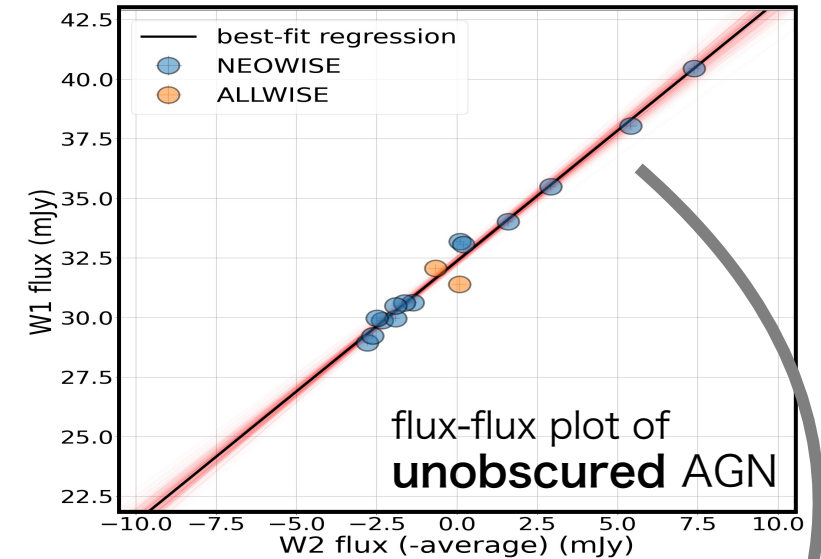
## Flux-flux plot に対する線形回帰解析

- 回帰直線の傾きの測定 (= NIR FVG  $\beta$ )
- 測定した傾きから  $A_V$  を計算

$$A_V(\text{M22}) = -\frac{5}{2(k_{W1} - k_{W2})} \log\left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)$$

※  $k_{W?} = A_{W?}/A_V$

※  $k_{W?}$  based on the Galactic extinction curve (Fitzpatric+99)



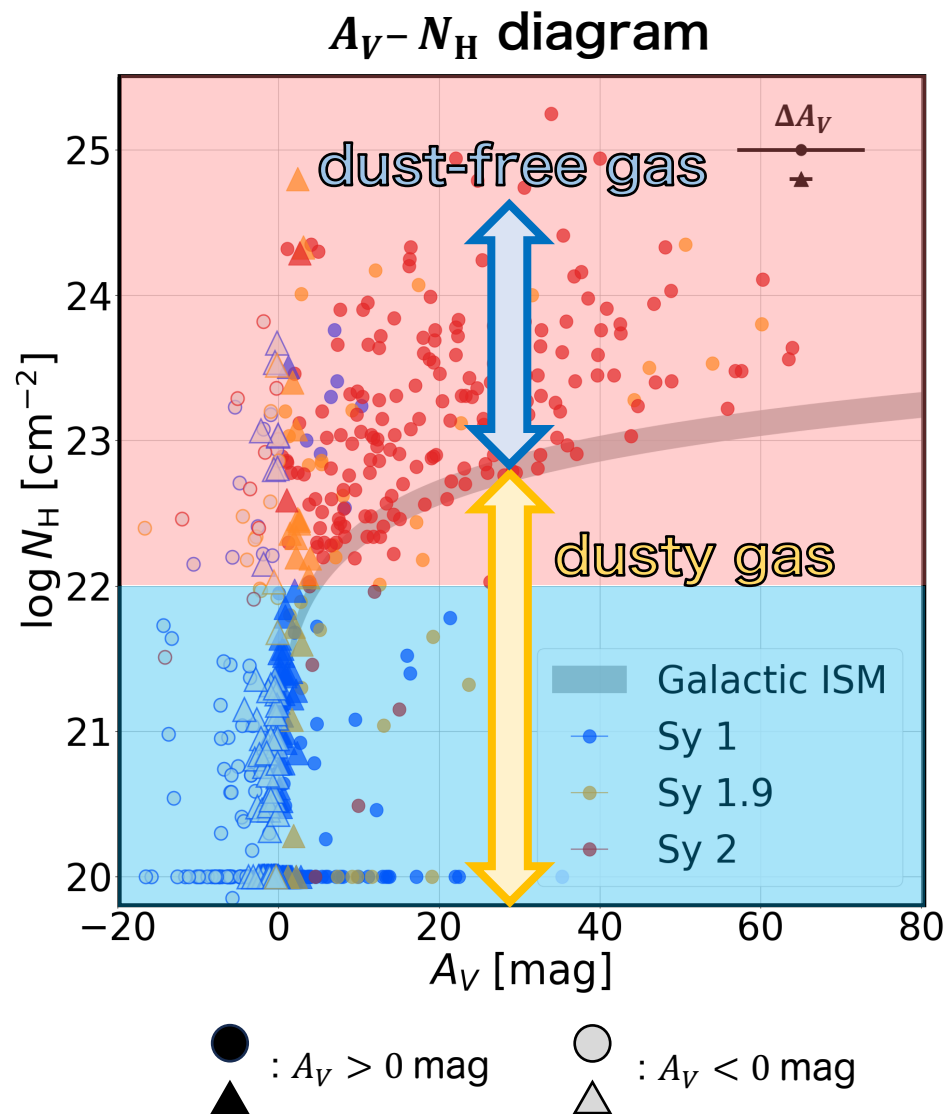
# $A_V$ と $N_H$ の関係

## $A_V$ の $N_H$ 依存性

- $\log N_H \leq 22$  :  $A_V$  は  $N_H$  によらず  $A_V = 0$  mag 付近に分布
- $\log N_H \geq 22$  :  $A_V$  は  $N_H$  の増加に伴って増加

## obscured AGN の振る舞い

- Galactic value よりも  $N_H/A_V$  が **大きい**
  - $N_H/A_V$  の lower envelope が Galactic value に **等しい**
- 先行研究と consistent (e.g. Burtscher+16)  
さらに本研究ではより多くのサンプルでこの傾向を確認
- **dust-free gas シナリオ** を支持



# Dusty/dust free gas $N_H$ ヒストグラム

## 結果

- dusty/dust-free gas いずれも  
Sy typeにより典型的な  $N_H$  が変化

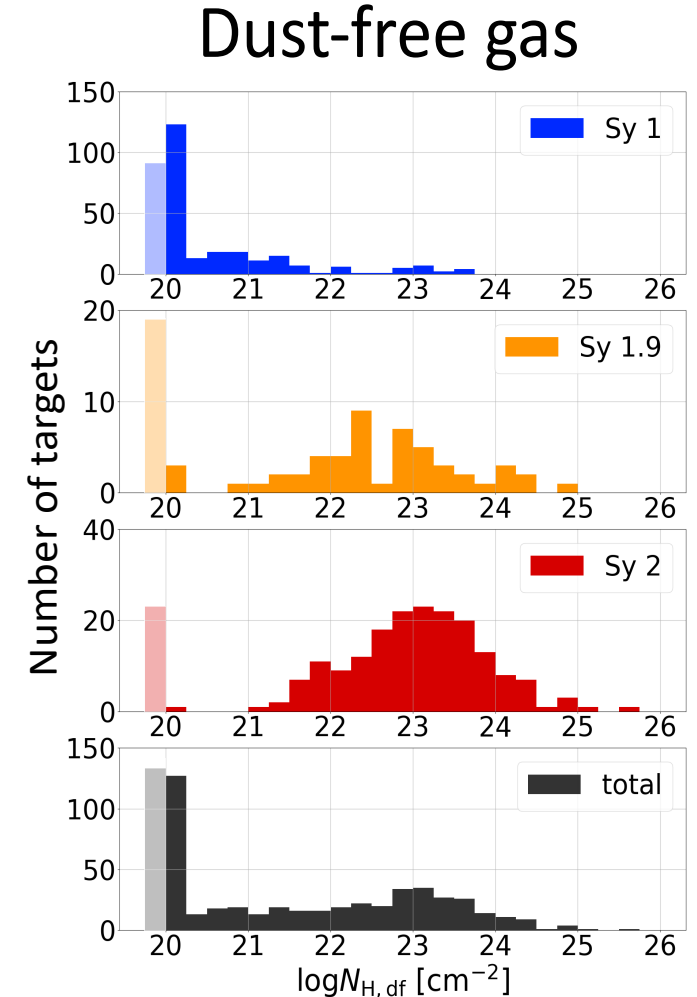
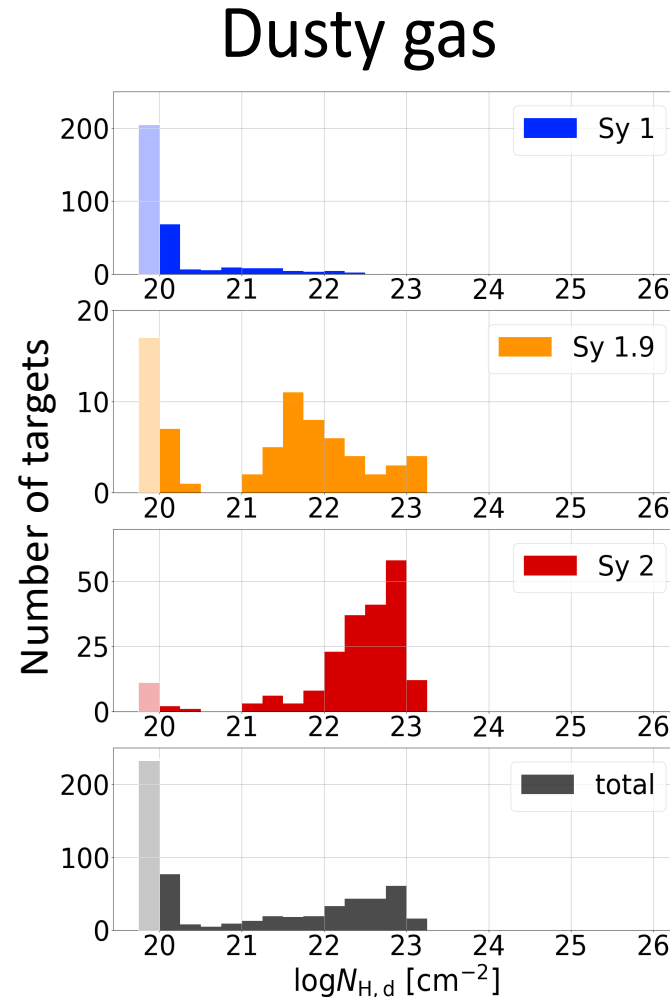
▶ many Sy1 :  $\log N_{H,dusty/dfree} \lesssim 22$

▶ many Sy2 :  $\log N_{H,dusty/dfree} \gtrsim 22$

-  $\log N_{H,dusty} > 23$  を持つ天体が  
ほとんど見られず

▶ 本研究は、Compton-thick  $N_H$  が主に  
dust-free gas に起因することを示唆

▶ ただし、 $A_V$  の測定限界 ( $A_V \sim 70$  mag)  
に起因する可能性もある



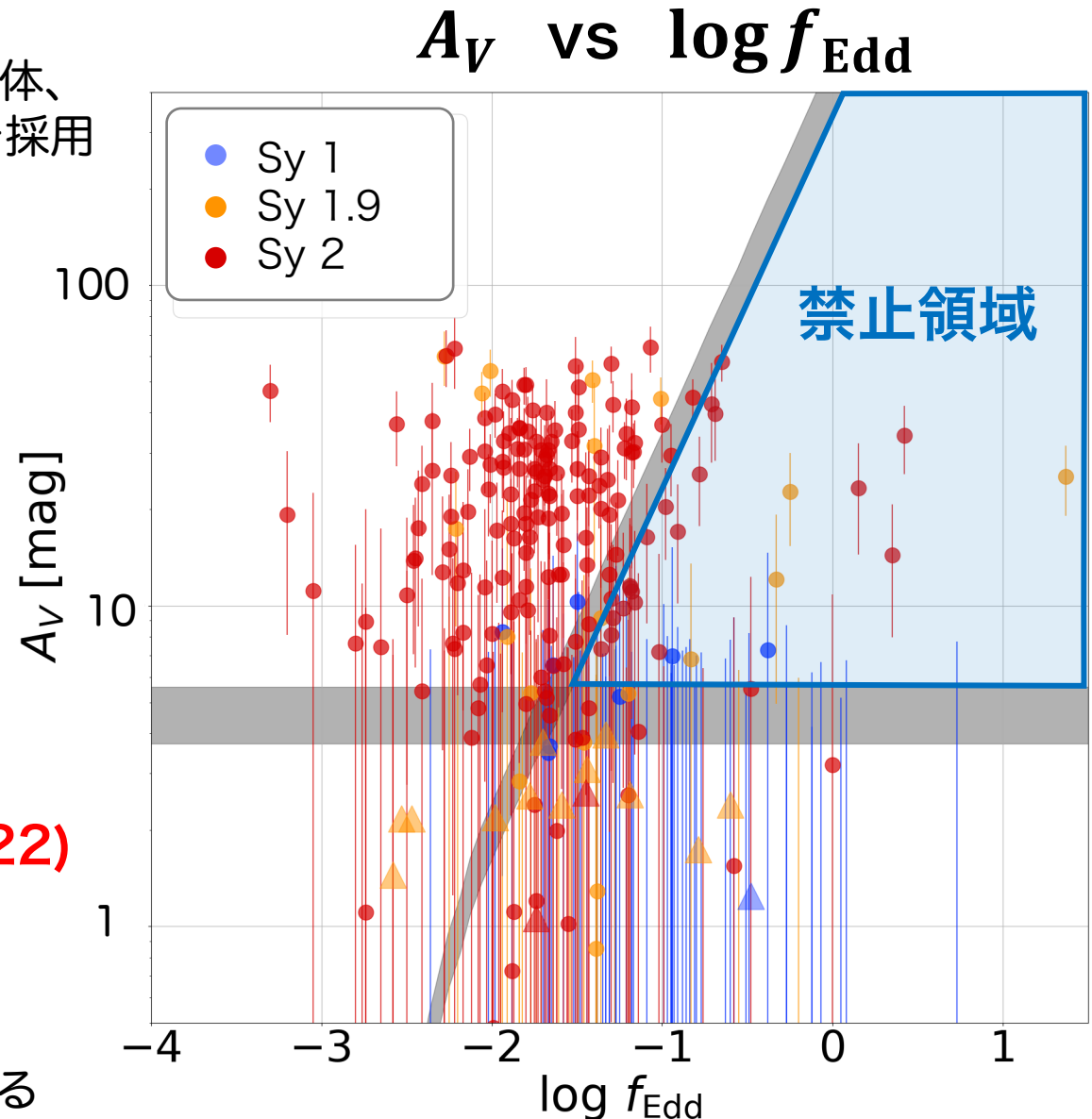


# $A_V$ と $f_{\text{Edd}}$ の関係

- 以下では、銀河系ISMの  $N_{\text{H}}/A_V$  より下側に分布する天体、 $A_V(\text{M22})$  or  $A_V(\text{S18}) < 0 \text{ mag}$  の天体には  $A_V = 0 \text{ mag}$  を採用

## 結果

- **禁止領域** に分布した天体は全体の **約4%** のみ
    - ▶ さらにこれらの半数以上が左側境界付近に分布
    - ▶  $A_V \geq 5 \text{ mag}$  を持つ大半のAGNは境界線を envelope として禁止領域外に分布
  - 先行研究の  $f_{\text{Edd}} - N_{\text{H}}$  図の結果と一致し、より明確な禁止領域が見られた
- **先行研究のシナリオを支持 (e.g. Ricci+22)**
1. AGNのガス降着が進むと  $A_V$ ,  $f_{\text{Edd}}$  がともに増加
  2. 禁止領域に入ると dusty gas outflow が発生
  3. 短いタイムスケールで dusty gas が吹き飛ばされる



# Covering factor (CF) of dusty gas

## $f_{\text{Edd}}$ vs fraction of obscured AGN

- 統一モデルに従えば、obscured fraction は dusty gas の covering factor (CF) に相当

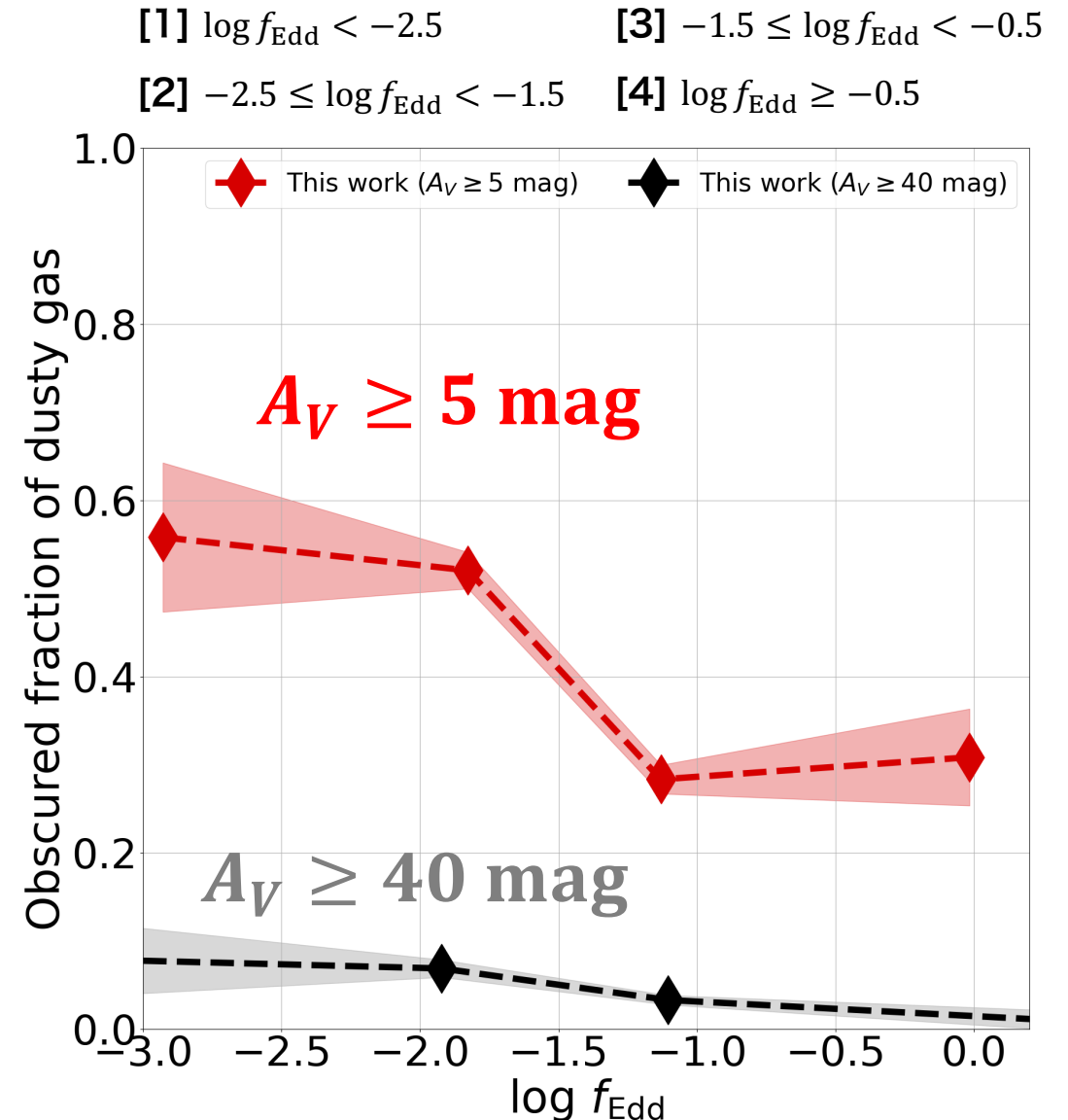
### $A_V \geq 5 \text{ mag}$ の結果

- $\log f_{\text{Edd}} < -2$  : CF  $\sim 0.6$
- $\log f_{\text{Edd}} \sim -1.5$  : CF が 減少
- $\log f_{\text{Edd}} > -1$  : CF  $\sim 0.3$

→  $\log f_{\text{Edd}} \sim -1.5$  付近で dusty gas outflow により dusty gas 構造が変化することを裏付け

### $A_V \geq 40 \text{ mag}$ の結果

- 比較的小さな値 ( $\sim 0.05$ ) でほぼ一定
- 光学的に厚い dusty gas 構造は比較的薄く、dusty gas outflow の影響を受けにくい
- ▶  $N_{\text{H}}$  を用いた研究結果 (Ricci+17c) と類似



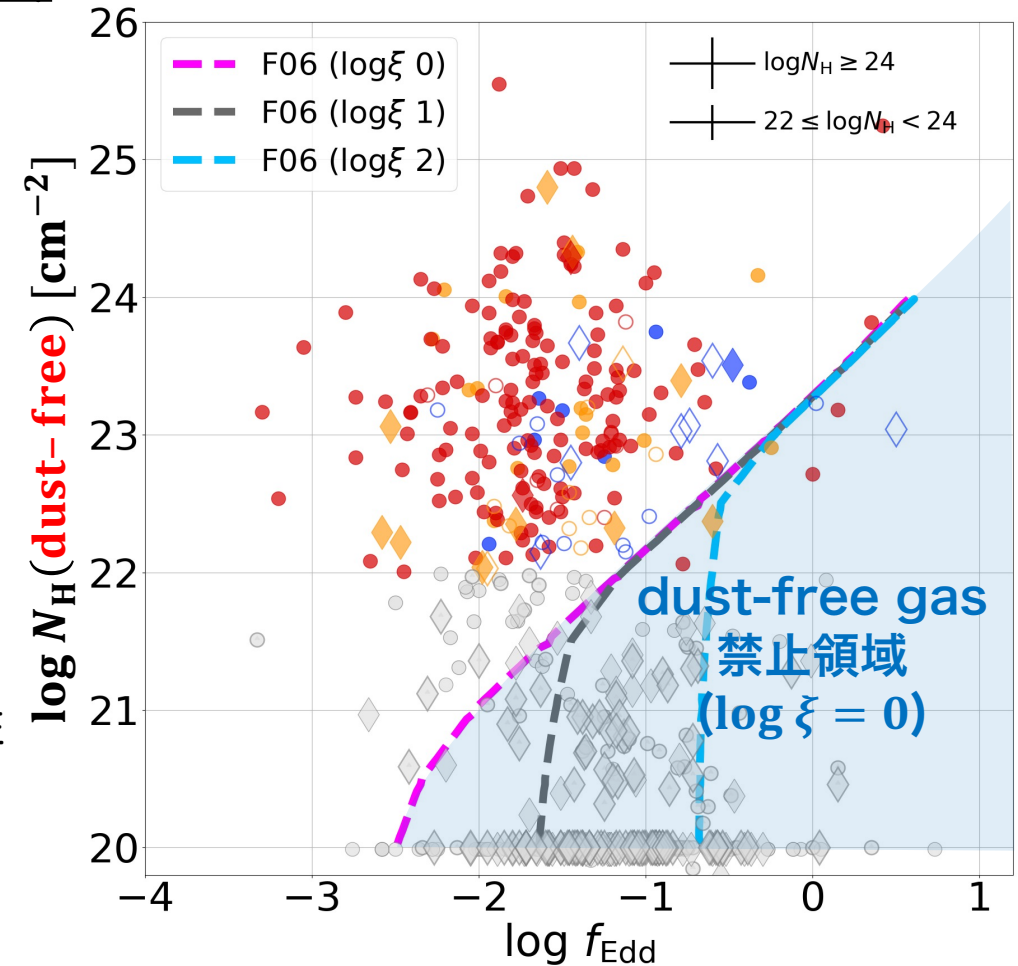
# Dust-free Gas と $f_{\text{Edd}}$ の関係

## Dust-free gas の有効Eddington限界 (Fabian+08)

- 中性・低電離ガスは完全電離ガスよりも断面積が大きい
  - ▶ 柱密度が小さい場合、電離度が小さいほど断面積が大きい
  - ▶ 柱密度が大きい場合、電離度による差は減少

## 結果

- $\log N_{\text{H}}(\text{dust-free}) \geq 22$  では  $\log \xi = 0$  の禁止領域に分布する天体はわずか
  - ▶ Sy2 AGNの dust-free gas は主に 中性 or 低電離
  - ▶ dust-free gas 構造も輻射駆動 outflow に制限される可能性
- $\log N_{\text{H}}(\text{dust-free}) \lesssim 22$  では  $\log \xi = 0$  の禁止領域にも多くの天体が分布
  - ▶ Sy1 AGNの dust-free gas は Sy2 AGNよりも高電離の可能性



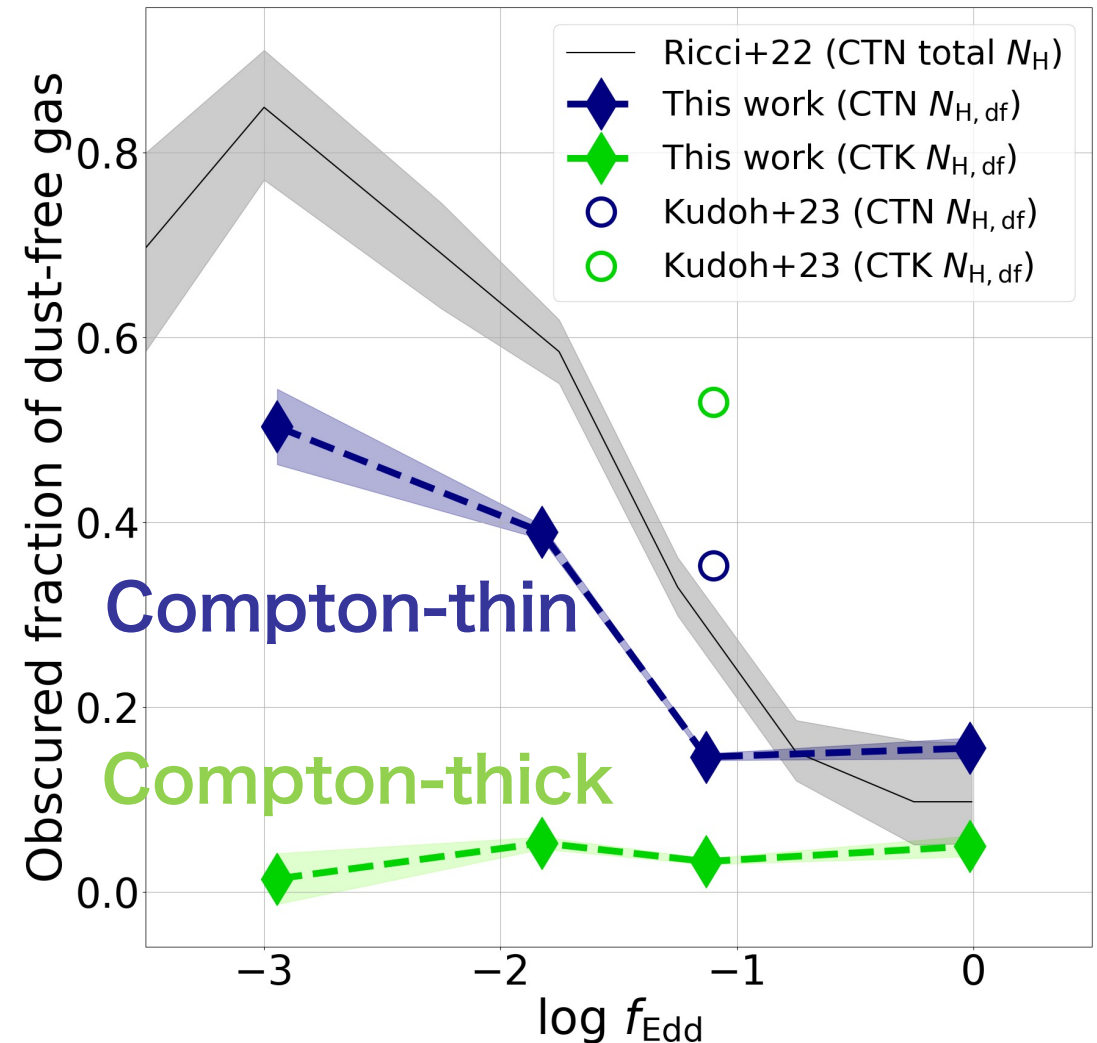
# Covering factor (CF) of dust-free gas

## Compton-thin 成分の結果

- $\log f_{\text{Edd}} \lesssim -1$  で CF は連続的に減少
  - ▶ dusty gas と同様、outflowによる影響の可能性
  - ▶ しかし、dust-free gas に対する輻射圧は  
この Eddington ratio の範囲では あまり効かない  
→ 輻射圧以外の機構 (磁場, 降着円盤風, ..) による可能性
- $\log f_{\text{Edd}} \gtrsim -1$  で CF は ほぼ一定
  - ▶ サンプル数が少ないので、不定性は大きい

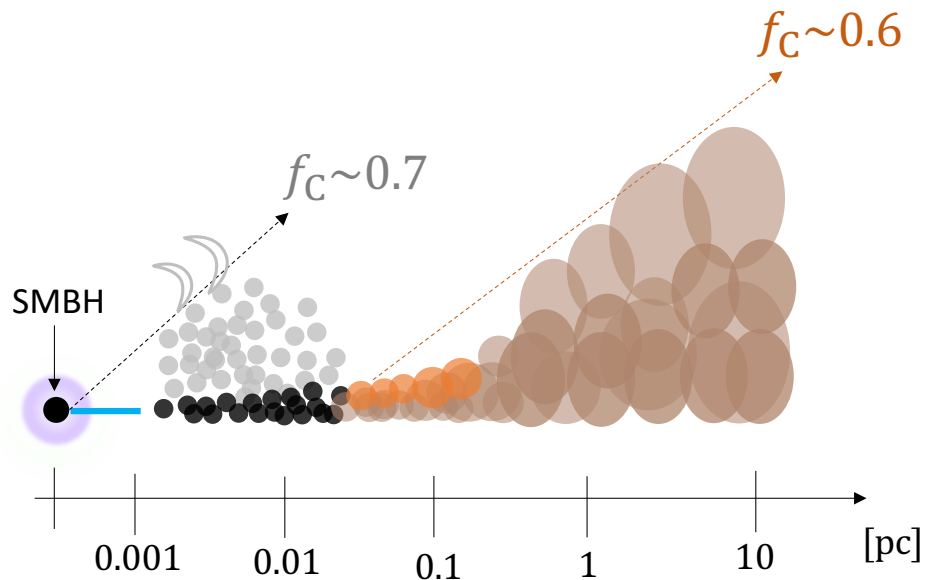
## Compton-thick 成分の結果

- 比較的小さな値 ( $\sim 0.05$ ) で ほぼ一定
  - ▶ total  $N_{\text{H}}$  の研究結果 (Ricci+17c) と定性的に一致

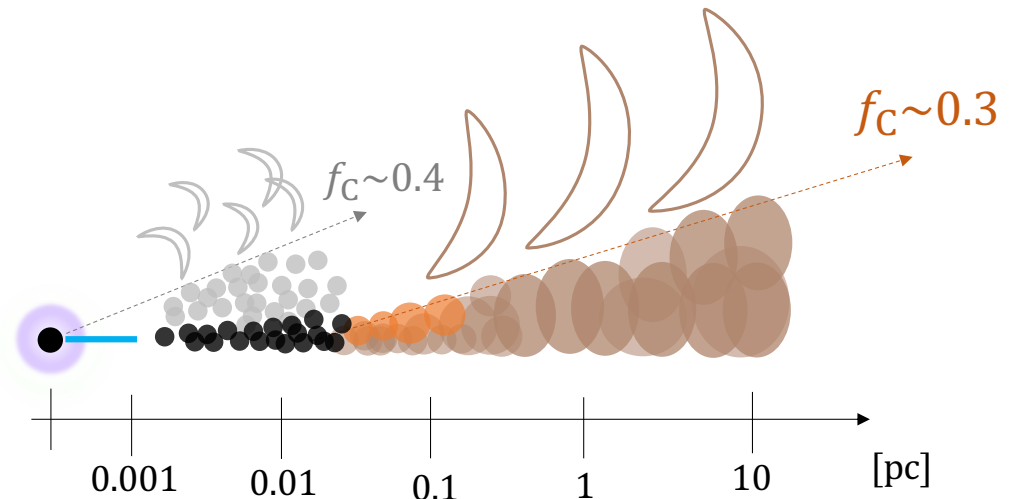


# dusty/dust-free gas 構造の概念図

low Eddington ratio



high Eddington ratio



# まとめ

## dusty gas の結果

- ▶  $\log N_{\text{H,dusty}} > 23$  を持つ天体は 非常に少ない.
- ▶  $f_{\text{Edd}}-A_V$  図の 禁止領域に分布する天体は 非常に少ない.
- ▶ dusty gas の covering factor は  $\log f_{\text{Edd}} \sim -1.5$  付近で大きく減少.  
→ radiation-driven dusty gas outflow によって 構造が変化することを示唆.

## dust-free gas の結果

- ▶ Sy type によって 典型的な柱密度に違いが見られる.
- ▶ 柱密度の違い (Sy typeの違い) により 禁止領域に分布する様子が大きく異なる.  
→ Sy type により dust-free gas の電離状態が異なることを示唆.
- ▶ Eddington ratioの増加に伴い、covering factorが滑らかに減少  
→ 輻射圧以外に駆動される dust-free gas outflow によって 構造が変化することを示唆.



# Dust-free gas 成分の存在

## ダスト減光量 vs ガス柱密度 (Mizukoshi+22)

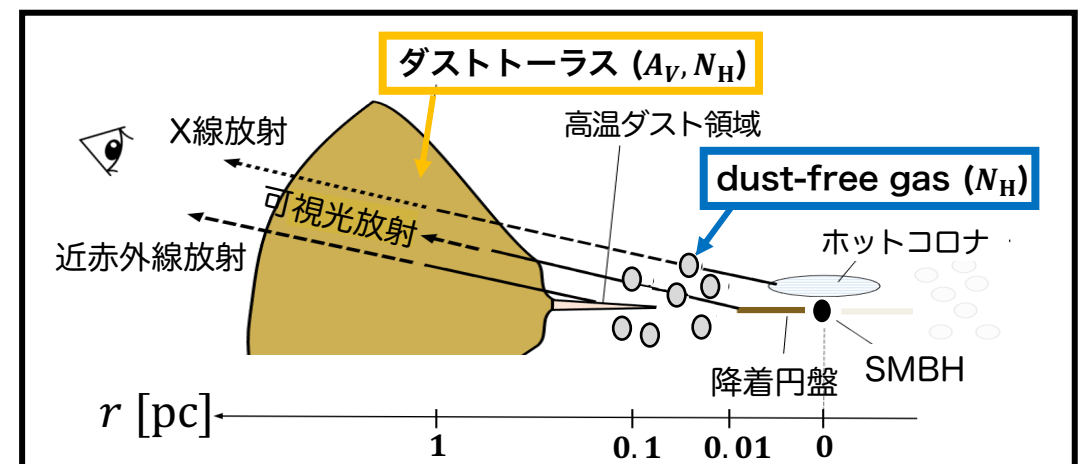
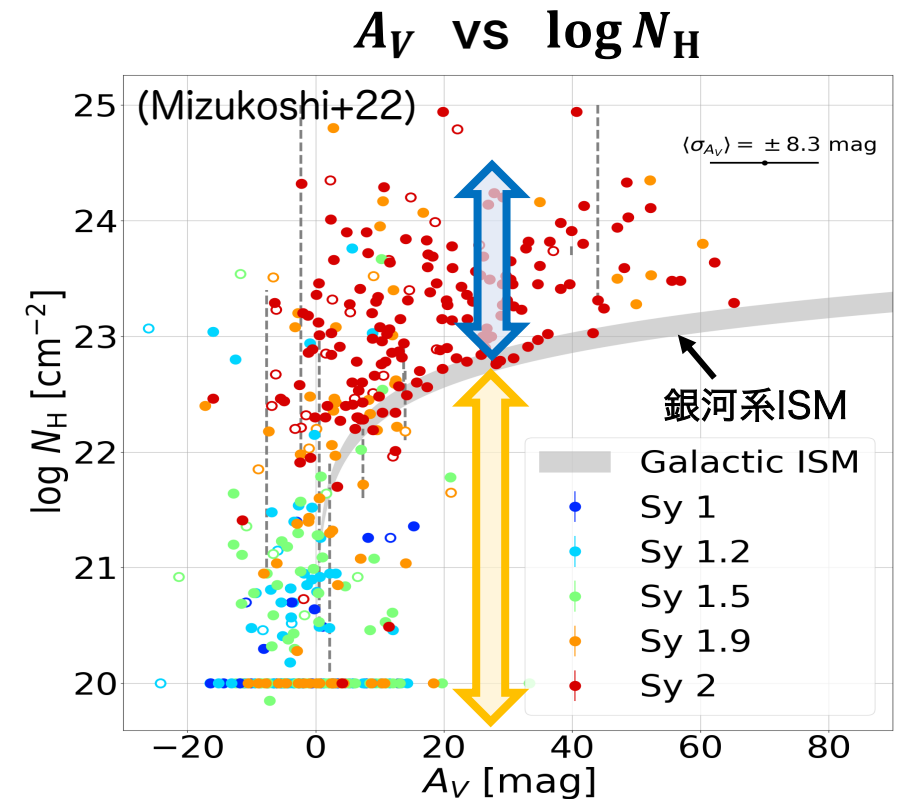
- obscured AGN の分布下端が 銀河系ISMの  $N_H/A_V$  と一致
- 多くの obscured AGN で  $N_H$  が超過
- $N_H$  が数ヶ月-数年スケールで変動 (Burscher+16)

→ dust-free gas の存在を示唆

→ **dusty gas outflow** の性質を考えるには  
 **$N_H$  よりも ダスト減光量  $A_V$  の方が適切であるはず**

## 本研究

- 各天体のダスト減光量  $A_V$  を推定
- 推定された  $A_V$  に基づき、dusty gas と dust-free gas を分離
- **各ガス成分に対するAGN放射の影響を調査**





# ダスト減光量の計算

## Mizukoshi+22 の手法

- 赤外線変動成分のカラーの赤化を  $A_V$  に変換 ( $A_V(\text{M22})$ )

▶  $A_V \lesssim 70 \text{ mag}$  の大きな減光量を測定可能

▶ 誤差は比較的大きい ( $\sigma_{A_V} = 7.7 \text{ mag}$ )

## Shimizu+18 の手法 (Sy1, 1.9の~50%程度)

- broad  $\text{H}\alpha$  輝線とX線の光度比を利用 ( $A_V(\text{S18})$ )

▶  $A_V \lesssim 5 \text{ mag}$  の小さな減光量を小さな誤差 (1.2 mag) で測定可能

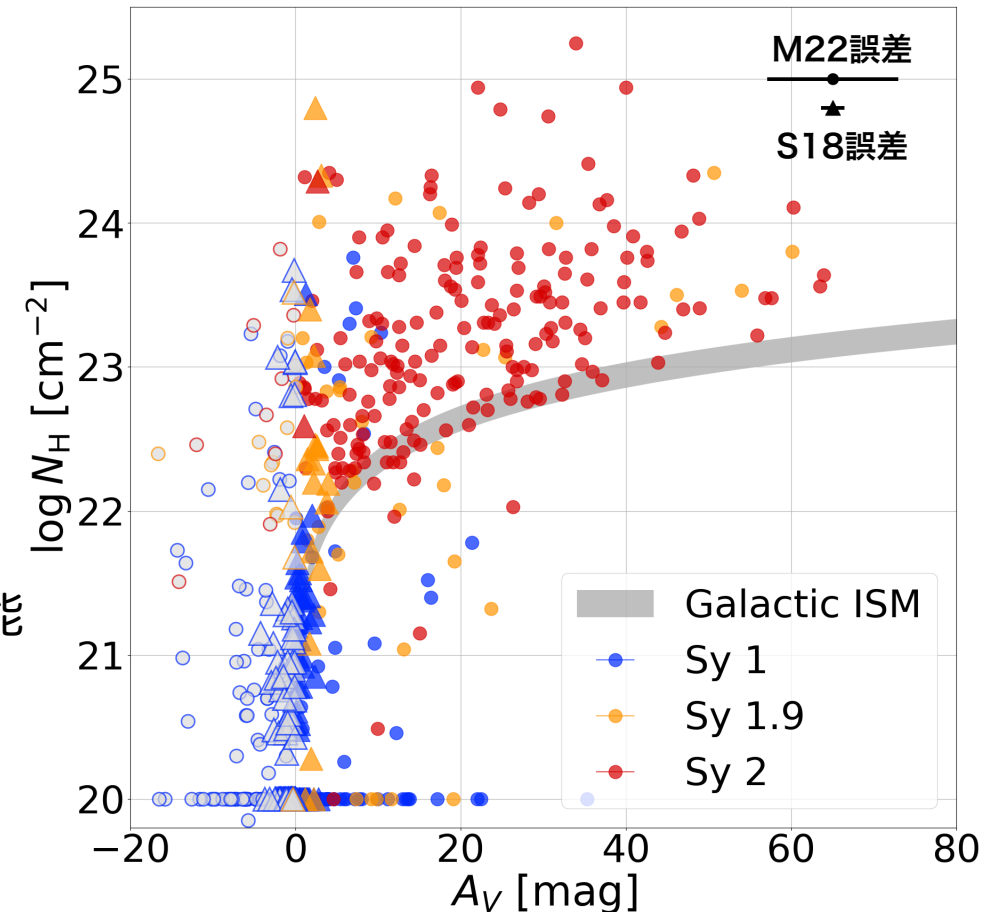
▶ BASS DR1 データが利用でき、 $A_V(\text{M22}) < 15 \text{ mag}$ 、 $A_V(\text{S18}) < 4 \text{ mag}$  が成り立つ場合は  $A_V(\text{S18})$  を採用

## 結果

- 全体的な振る舞いは Mizukoshi+22 に一致

-  $A_V(\text{S18})$  を導入したことで、特に  $\log N_H \lesssim 22$  において多くの天体が  $A_V \sim 0 \text{ mag}$  付近に分布

本研究サンプルの  $A_V - N_H$  図



●  $A_V(\text{M22}) > 0 \text{ mag}$     ▲  $A_V(\text{S18}) > 0 \text{ mag}$   
 ○  $A_V(\text{M22}) < 0 \text{ mag}$     △  $A_V(\text{S18}) < 0 \text{ mag}$

# Covering factor (CF) of dusty gas

## 先行研究との比較

### - Sy2 AGN の割合との比較 (Ananna+22b)

- ▶ 定性的には本研究と consistent :  
 $\log f_{\text{Edd}} \sim -1.5$  付近で CF が減少
- ▶ high-Eddington 側で本研究のCFの方が大きい  
Eddington bias, high- $A_V$  Sy1.9 AGN の影響の可能性

### - 輻射流体シミュレーションとの比較 (Kudoh+23)

- ▶  $A_V \geq 5 \text{ mag}$  の dusty gas covering factor は  
本研究の obscured AGN の割合より大きい
- ▶ Kudoh+23の結果は時系列シミュレーションデータの  
単純な時間平均  
→  $N_H$  の短期的な急増により、平均値は過大評価される  
(Mizukoshi+prep)

