

# 色等級図と金属量分布から探る 矮小銀河の化学進化



本間英智（国立天文台）、村山卓（東北大学）  
小林正和（呉工業高専）、谷口義明（放送大学）

つくば宇宙フォーラム@筑波大学（2016/12/5）

The dwarf galaxy IC 1613

(Credit: ESO Acknowledgement: VST/Omegacam Local Group Survey)

# アブストラクト

- 目的；  
矮小銀河で観測された星の色等級図、金属量分布、元素組成比を同時に説明できる化学進化について調べる
- 方法；  
色等級図から推定された星生成史に従って化学進化を計算するモデルを新しく作成し、モデル計算の結果を観測データと比較する
- 結果；
  1. 7つの矮小銀河についてモデルと観測データの比較を行い、各矮小銀河の星生成史と金属量分布を説明する化学進化を導いた
  2. Ia型超新星の最小遅延時間は約 **0.5—0.9 Gyr** である
  3. 矮小銀河で合成された重元素の大部分は流出しており、鉄の場合は約 **80—99 %** が失われている

# アウトライン

1. イントロダクション
2. 化学進化モデル
3. モデルによる観測データの再現結果
4. 考察
5. まとめ

# 1. イントロダクション

# 矮小銀河の特徴



## ➤ 矮小銀河

- ✓ 目立った構造はない
- ✓ 単純な形成過程
  - building blocks

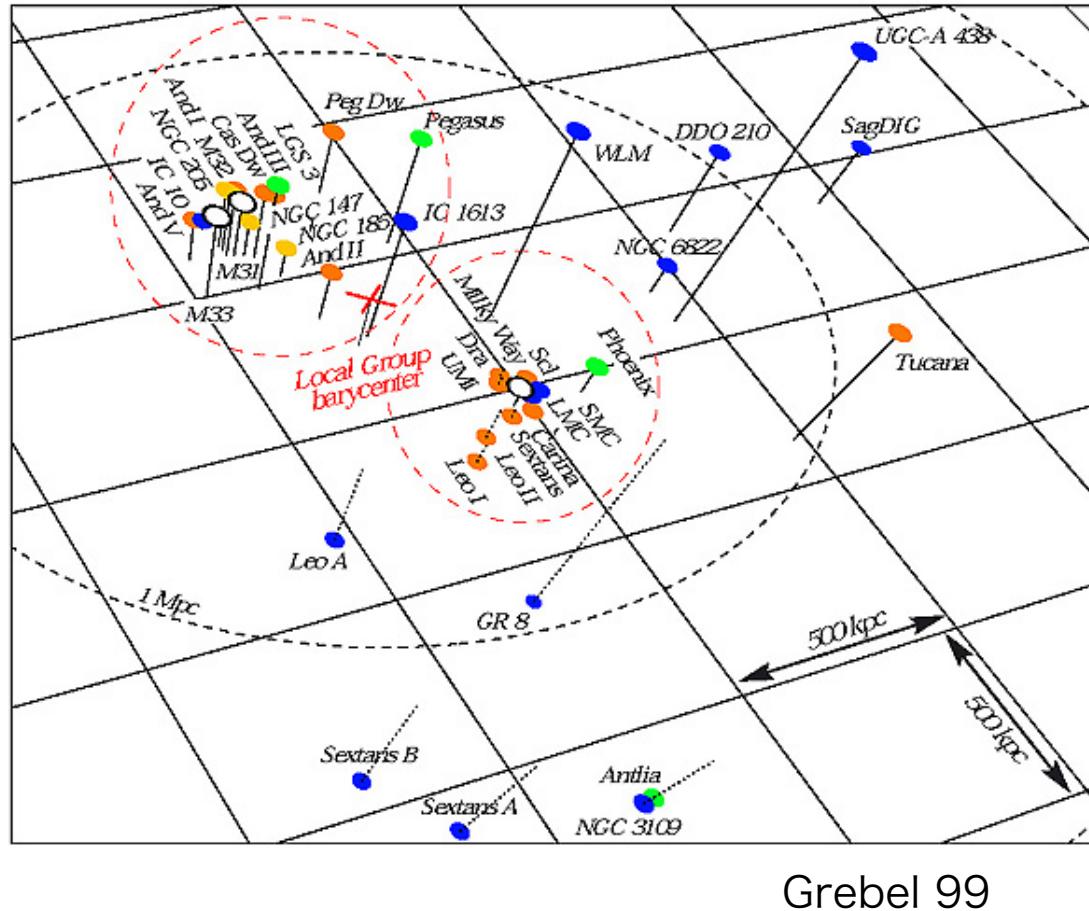
## ➤ 通常銀河

- ✓ 複雑な構造を持つ
  - ハロー、ディスク、バルジ
- ✓ 複雑な形成過程
  - major/minor mergers

矮小銀河を実験室として、  
銀河進化に関する物理過程を調べる

# 局所銀河群における矮小銀河

- 低光度 & 低質量
    - $M_B > -18$ ,  $M_\star < 10^9 M_\odot$
  - 低金属量
    - less than  $[Fe/H] \approx -1$
  - 近距離にも分布する
- 恒星分離にもとづく観測が可能



# 矮小銀河のタイプ

**dSph** (Leo I)



- Dwarf Spheroidal
  - ✓ ガスがほとんど無い
    - only stars
  - ✓ 星生成活動は無い
    - old stars dominate
  - ✓ 伴銀河として存在
    - around a massive galaxy

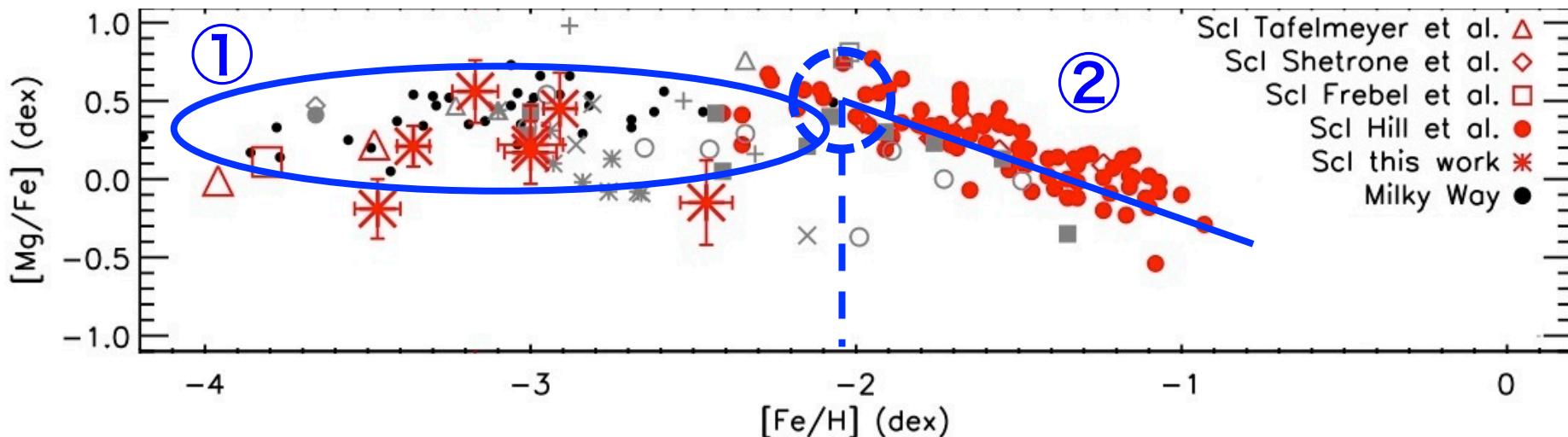
**dIrr** (IC1613)



- Dwarf Irregular
  - ✓ ガスを持つ
  - ✓ 星生成活動がある
    - young stars, HII regions
  - ✓ 比較的、孤立系である
    - distant from massives<sup>7/41</sup>

# 矮小銀河の化学進化の研究

Sculptor dSph における星の元素組成 (Starkenburg+13)



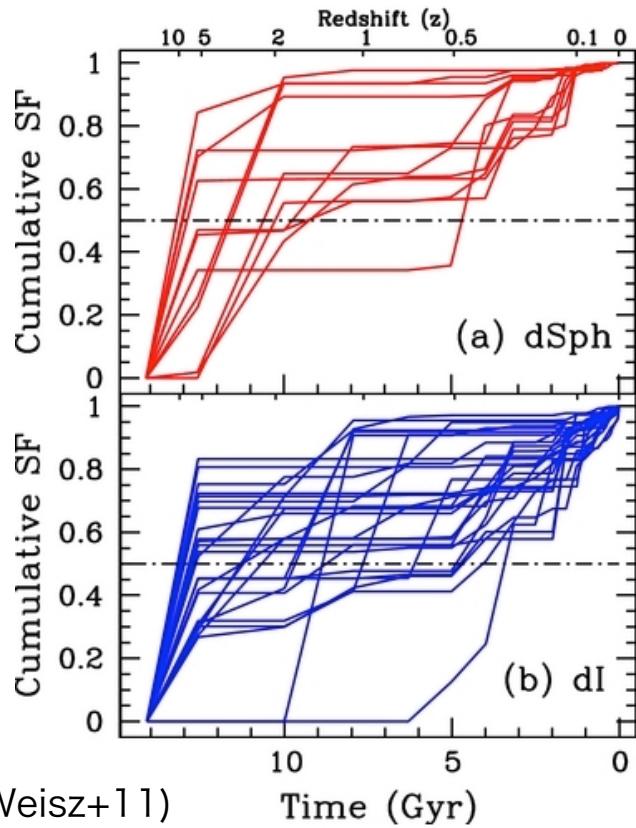
- ① II 型超新星による、星間ガスの化学汚染
- ② Ia 型超新星が発生し始め、組成が変化する

- $[Mg/Fe]$  のイールドが異なる :  $SN\text{ II} > SN\text{ Ia}$
- 発生までのタイムスケールが異なる :  $SN\text{ II} < SN\text{ Ia}$

$[Fe/H]$  at  $[Mg/Fe]$  changes  $\longleftrightarrow$  Delay time of SN Ia

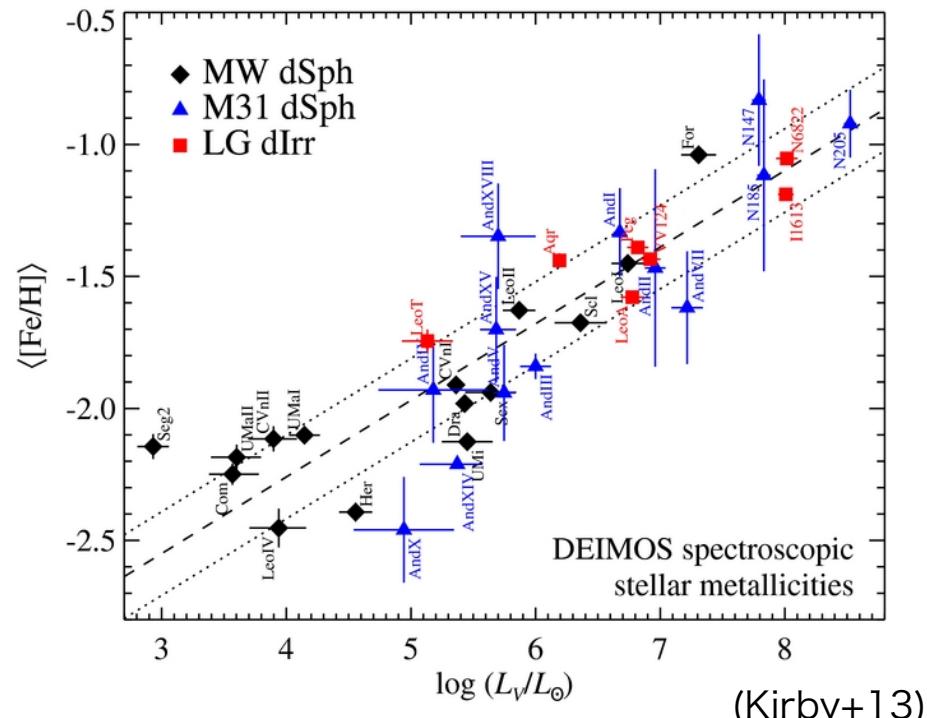
# 矮小銀河の観測的性質

# ① 星生成史



✓ タイムスケール ( $\gg$  1 Gyr)

## ② 光度・金属量関係



- ✓ dSph と dlrr は同じ相関に乗る

# 矮小銀河の先行研究

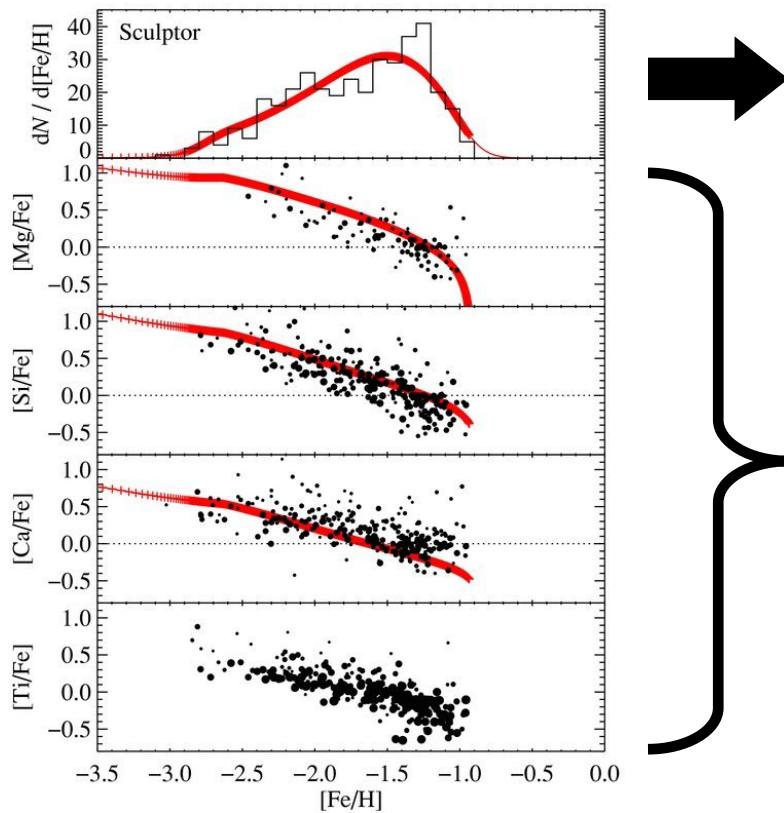
## ❖ 矮小銀河は、なぜ金属量が低いのか？

1. 重力ポテンシャルが小さいため、星からのフィードバックによる著しい outflow によって、重元素が流出した  
(Mac Low & Ferrara 99, Kirby+11, Homma+15)
  2. 星生成活動が弱いため、化学汚染が進むタイムスケールが長い  
(Ikuta & Arimoto 02, Lanfranchi & Matteucci 04, Gavilan+13)
- ✓ 化学進化モデルによる研究では、上記の効果を取り入れて計算を行い、結果を観測データと比較している

# 化学進化モデルによる観測データの再現

□ Kirby et al. (2011) :

- ・ 様々な効果を反映した詳しい化学進化モデルを構築した
- 8 dSphs で観測された星の金属量分布と元素組成比を同時に説明することに成功した



金属量分布の観測 (histogram) と  
モデル結果の比較 (red curve)

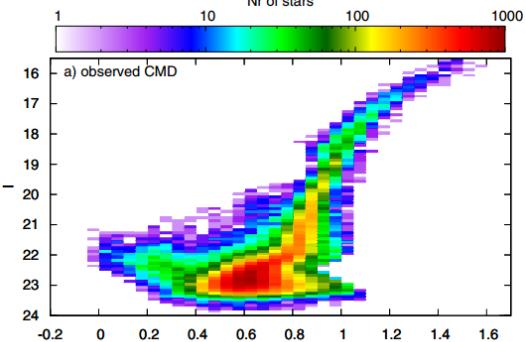
元素組成比の観測 (dots) と  
モデル結果の比較 (red curves)

# 先行研究での問題点

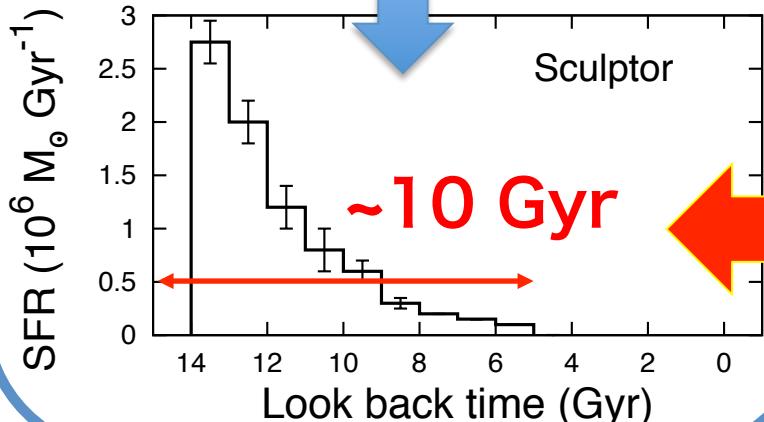
- 得られる星生成史のタイムスケールが異なる

de Boer+12

色等級図

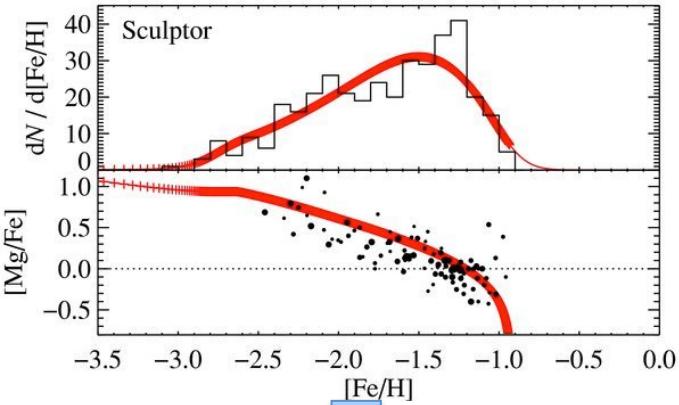


Model analysis

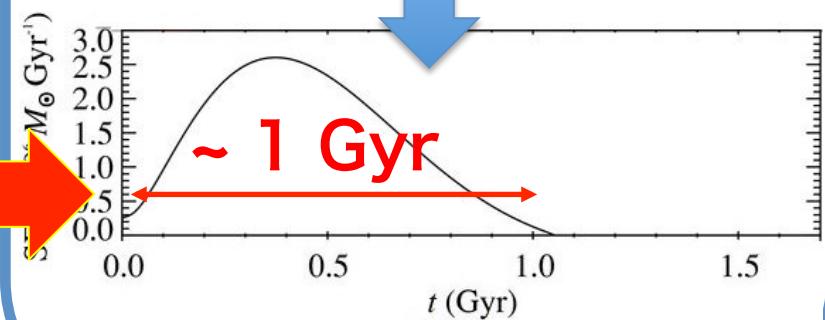


Kirby+11

金属量データ



Model analysis



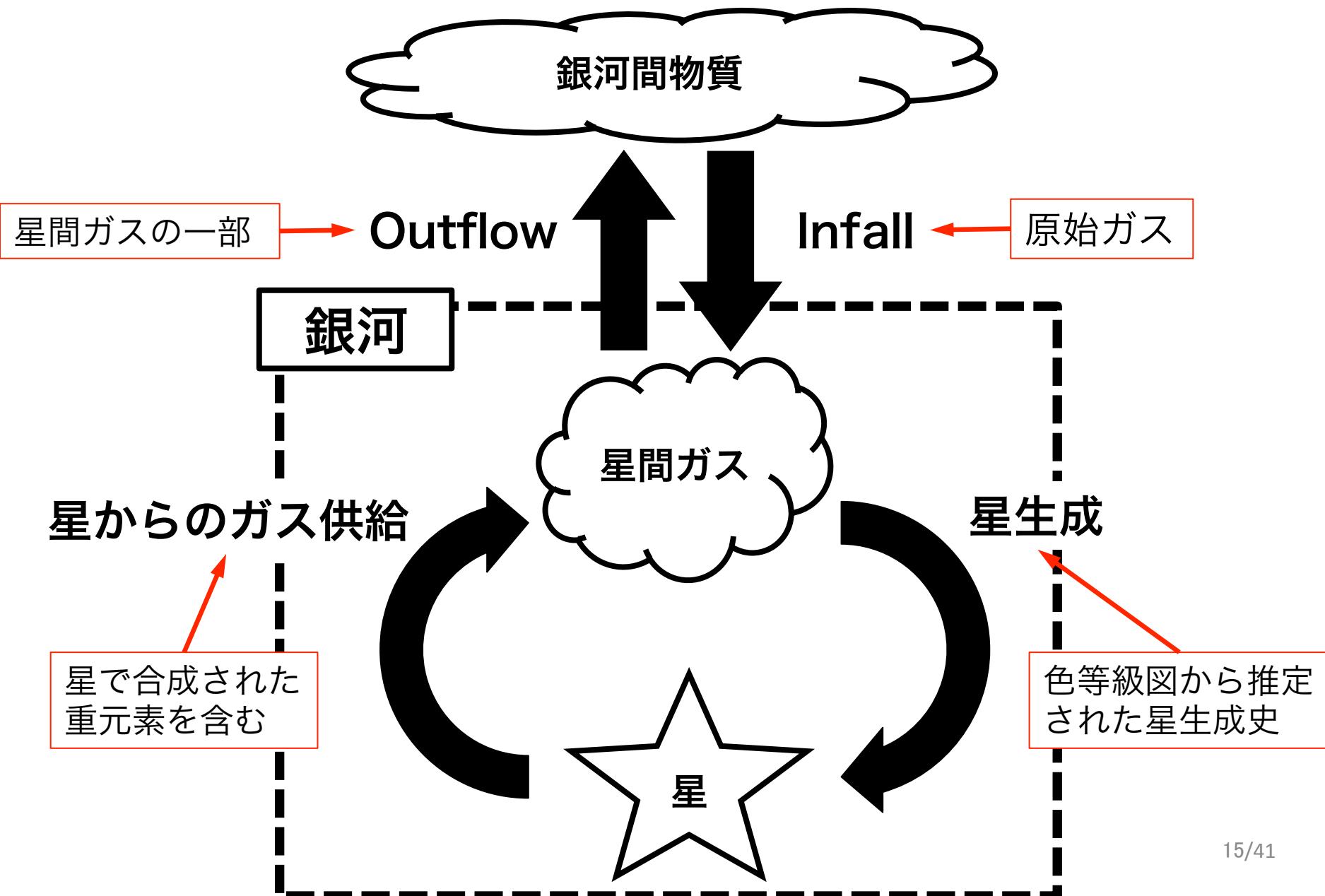
# 本研究の目的

矮小銀河で観測された色等級図と  
金属量分布を、無矛盾に説明できる  
化学進化について調べる

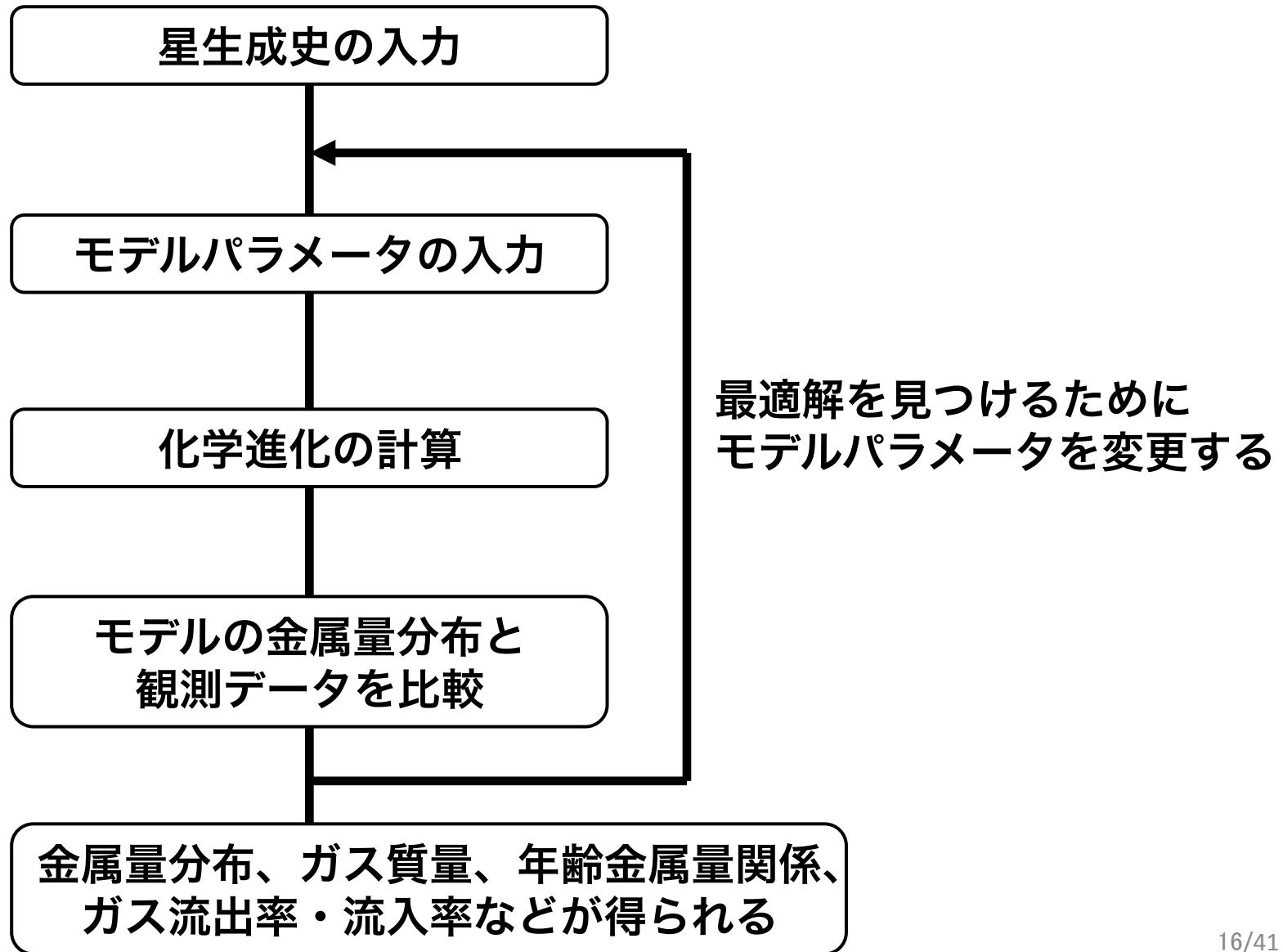
- ✓ 方法；
  1. 色等級図から推定された星生成史をもとにして化学進化を計算し、金属量分布を導く新しいモデルを作成する
  2. モデルの計算結果と観測データを比較し、データを再現する化学進化を導く

## 2. 化学進化モデル

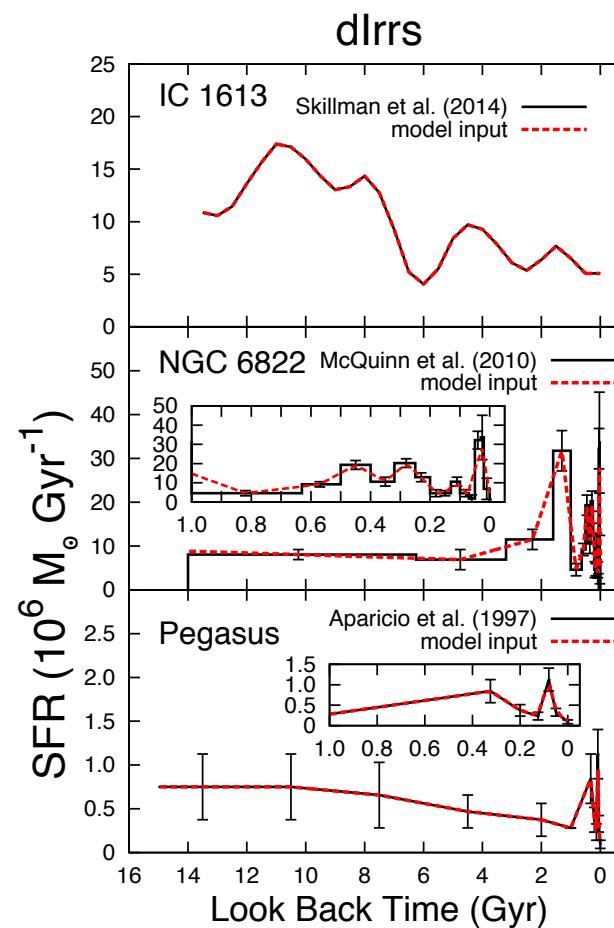
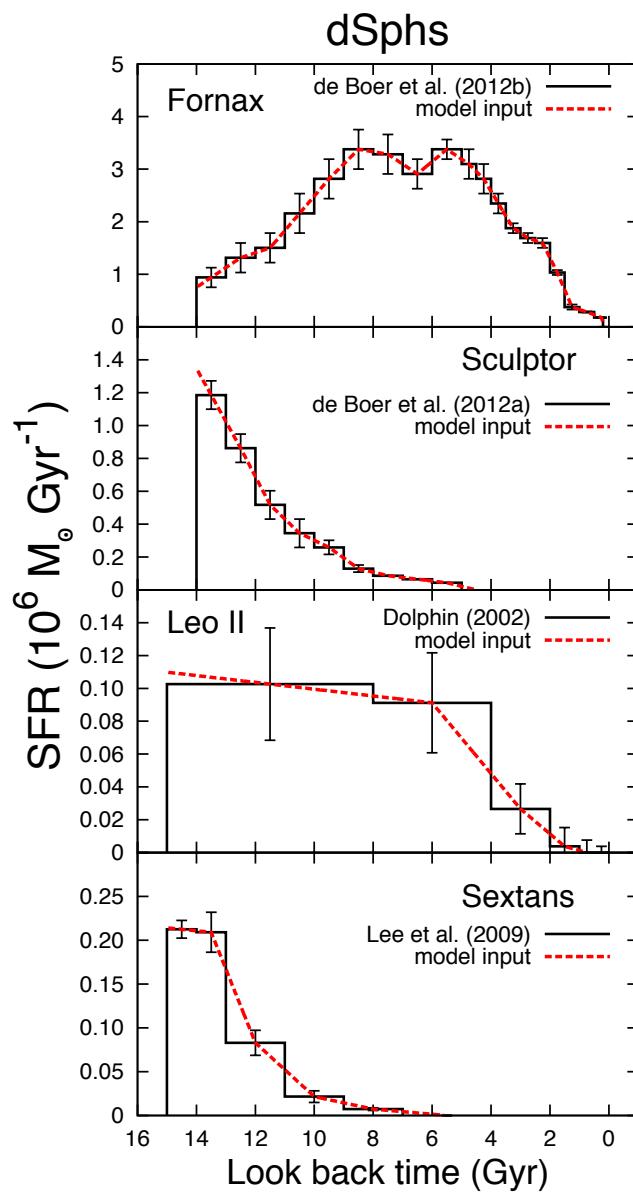
# 化学進化モデルの概念図



# モデル計算の流れ



# 各矮小銀河の星生成史



ヒストグラム：  
— 色等級図から推定  
赤線：  
— モデルに入力した値

- ✓ 入力値はデータの内挿で計算した
- ✓ 観測データの誤差は、反映されていない

# モデルの主な計算式

- 星生成率はガス質量に比例する；

$$\frac{\Psi(t)}{10^6 M_{\odot} \text{ Gyr}^{-1}} = A_{\star} \times \left( \frac{M_{\text{gas}}(t)}{10^6 M_{\odot}} \right)^{\alpha} \quad (\alpha=1)$$

- ガス流出率は、Ia型およびII型超新星の数に比例する；

$$\dot{M}_{\text{out}}(t) = A_{\text{out}} \times (\dot{N}_{\text{Ia}}(t) + \dot{N}_{\text{II}}(t))$$

- Ia型超新星の発生率は、観測的に得られた遅延時間分布(DTD)によって与える(Maoz+10)；

$$\text{DTD}(t_{\text{delay}}) = \begin{cases} 1 \times 10^{-3} \times (t_{\text{delay}}/\text{Gyr})^{-1.1} & (\text{SN Gyr}^{-1} M_{\odot}^{-1}) \quad \text{for } t_{\text{delay}} \geq t_{\text{delay,min}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- ガス流入率は、各時刻の質量の収支を満たすように与えられる；

$$\begin{aligned} \dot{M}_{\text{gas}}(t) &= -\Psi(t) + E(t) + \dot{M}_{\text{in}}(t) - \dot{M}_{\text{out}}(t) \\ \Rightarrow \dot{M}_{\text{in}}(t) &= \dot{M}_{\text{gas}}(t) + \Psi(t) - E(t) + \dot{M}_{\text{out}}(t) \end{aligned}$$

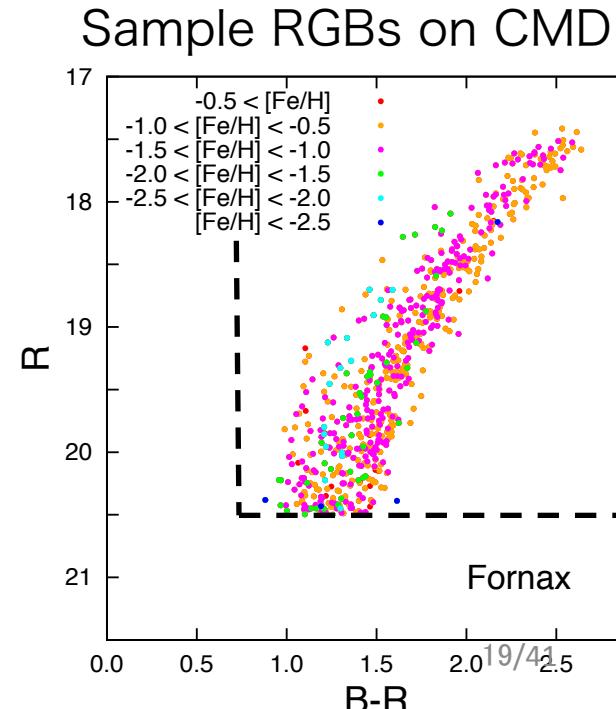
# 観測バイアスの考慮

❖ モデル計算に、サンプルセレクションを反映させた

- 金属量を測定した星 (Kirby+10, Kirby+13) ;
  - 色等級図を元に選定した red-giant branch stars (RGBs)
- セレクションの反映は、本モデルにおける特色の 1 つである
  - Kirby+11 のモデルでは、セレクションは反映されていない

本モデルにおける、サンプルセレクション

Galaxy	$(m-M)_0$ (mag)	$M_{\text{limit}}$ (mag)	Color (mag)
Fornax	20.72	$M_R \leq 20.5$	$(B-R) \geq 0.7$
Sculptor	19.67	$M_I \leq 19.5$	$(V-I) \geq 0.6$
Leo II	21.70	$M_I \leq 20.5$	$(V-I) \geq 0.2$
Sextans	19.90	$M_I \leq 21.5$	$(V-I) \geq 0.0$
IC 1613	24.34	$M_I \leq 23$	$(V-I) \geq 0.9$
NGC 6822	23.40	$M_I \leq 22$	$(V-I) \geq 0.5$
Pegasus	24.87	$M_r \leq 23$	$(g-r) \geq 0.4$



# 最尤法とフリーパラメータ

- 以下の likelihood を最大化するモデルを最適解とする

$$L = \prod_j \int_0^{t_{\text{fin}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta \zeta_{\text{Fe},j}} \exp \left[ -\frac{(\zeta_{\text{Fe},j} - \zeta_{\text{Fe}}(t))^2}{2(\Delta \zeta_{\text{Fe},j})^2} \right] \times \frac{\dot{M}_*(t)}{M_*} \times \underline{S(t)} dt$$

likelihood of the model

MDF weight

selection function

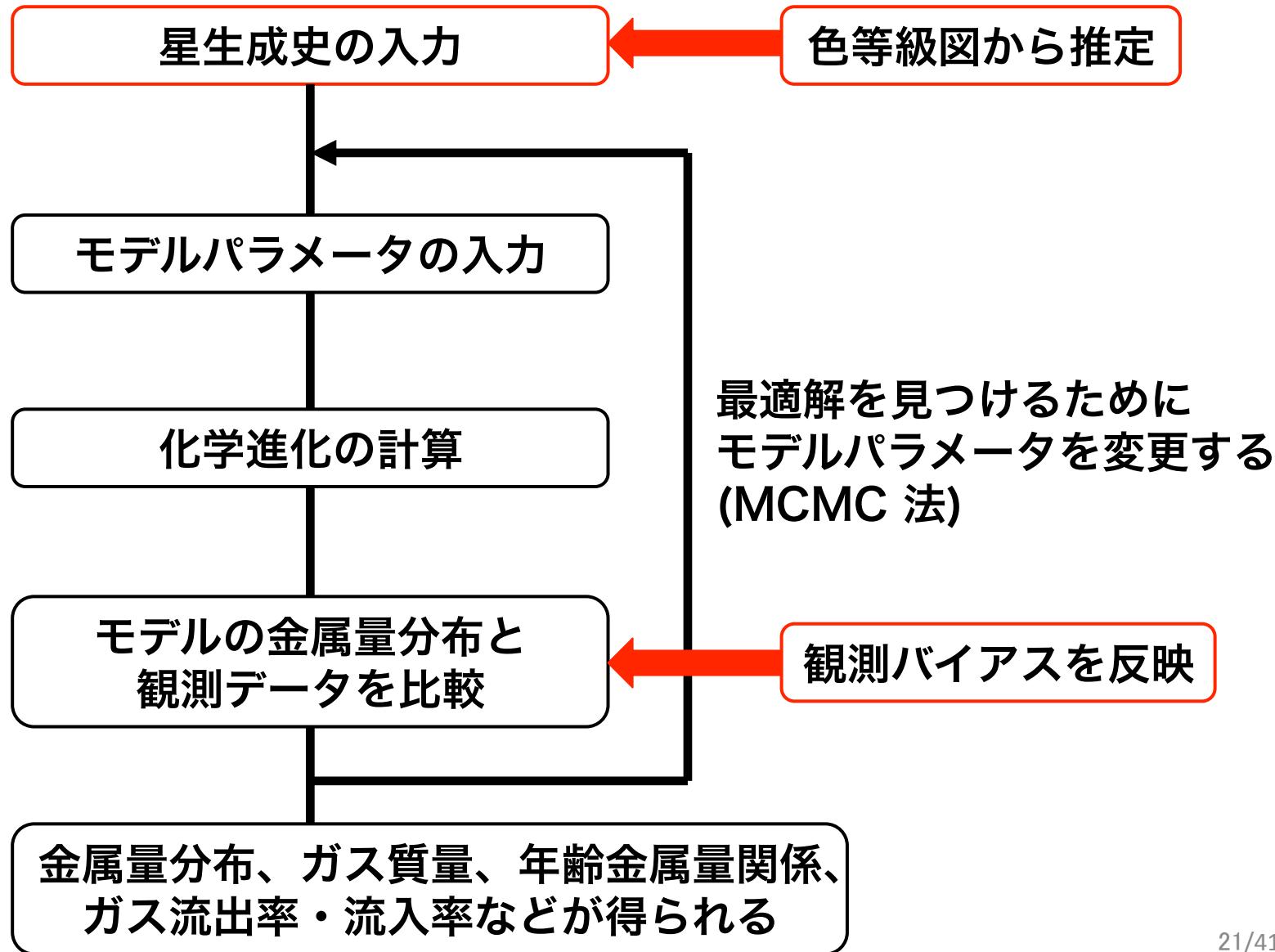
- 標準的なメトロポリス法による、Markov-Chain Monte-Carlo (MCMC) 法で最適解を探す

遷移確率 :  $P(x \rightarrow x') = \begin{cases} 1 & \text{for } L(x') \geq L(x) \\ \frac{L(x')}{L(x)} & \text{for } L(x') < L(x) \end{cases}$

- フリーパラメータ :  $A_\star$ ,  $A_{out}$ , and  $t_{delay,min}$  (= 0.1, 0.5 Gyr)

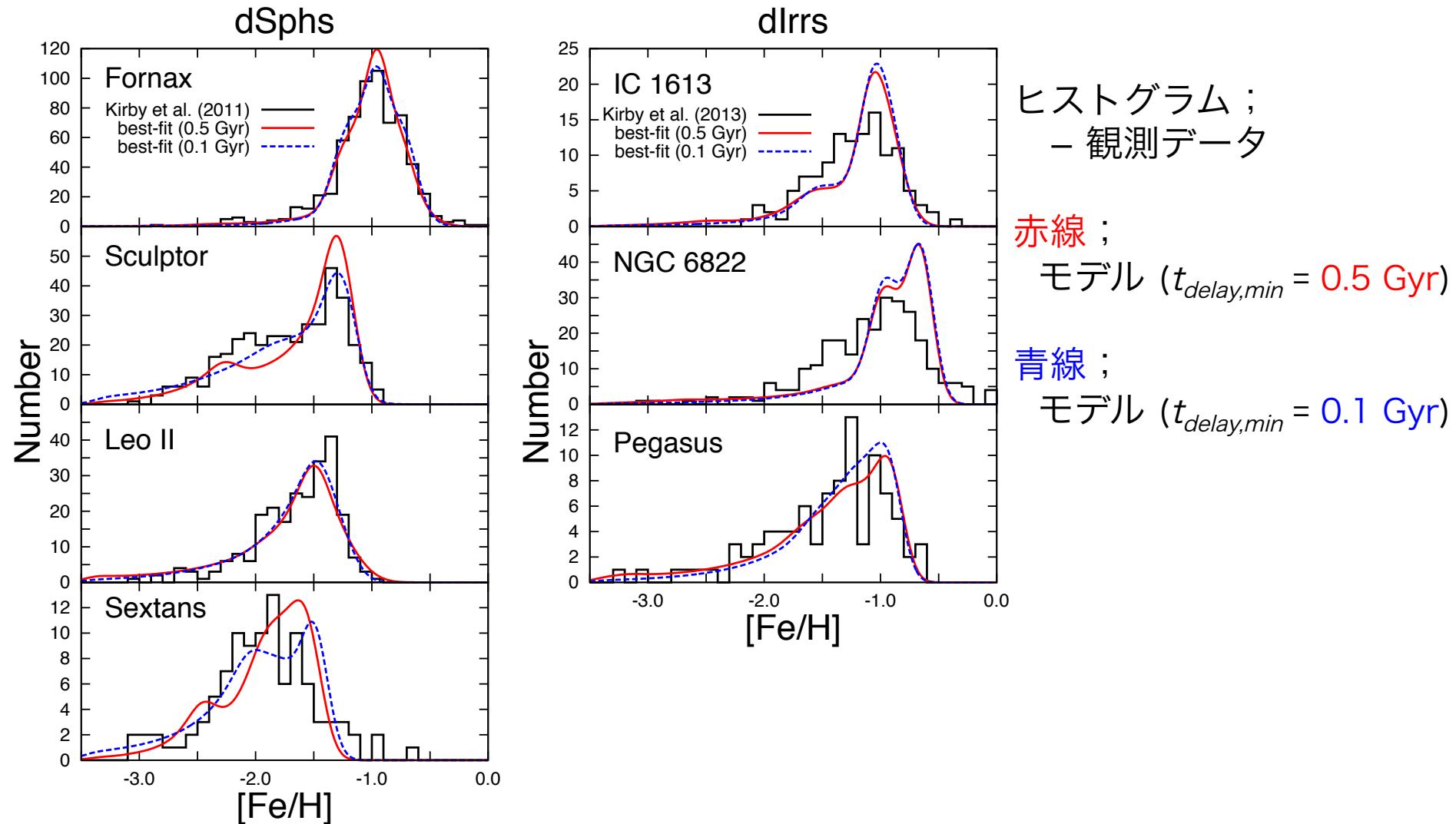
# モデル計算の流れ

□ 本モデルのオリジナリティ



### 3. モデルによる計算結果

# 金属量分布の比較



- 金属量分布のピークと幅の再現に成功した (NGC 6822を除く)
- $t_{delay,min}$  による金属量分布への影響は、ほとんど無い

# dSph の $[\alpha/\text{Fe}]$ との比較

青線 :  $t_{\text{delay,min}} = 0.1 \text{ Gyr}$

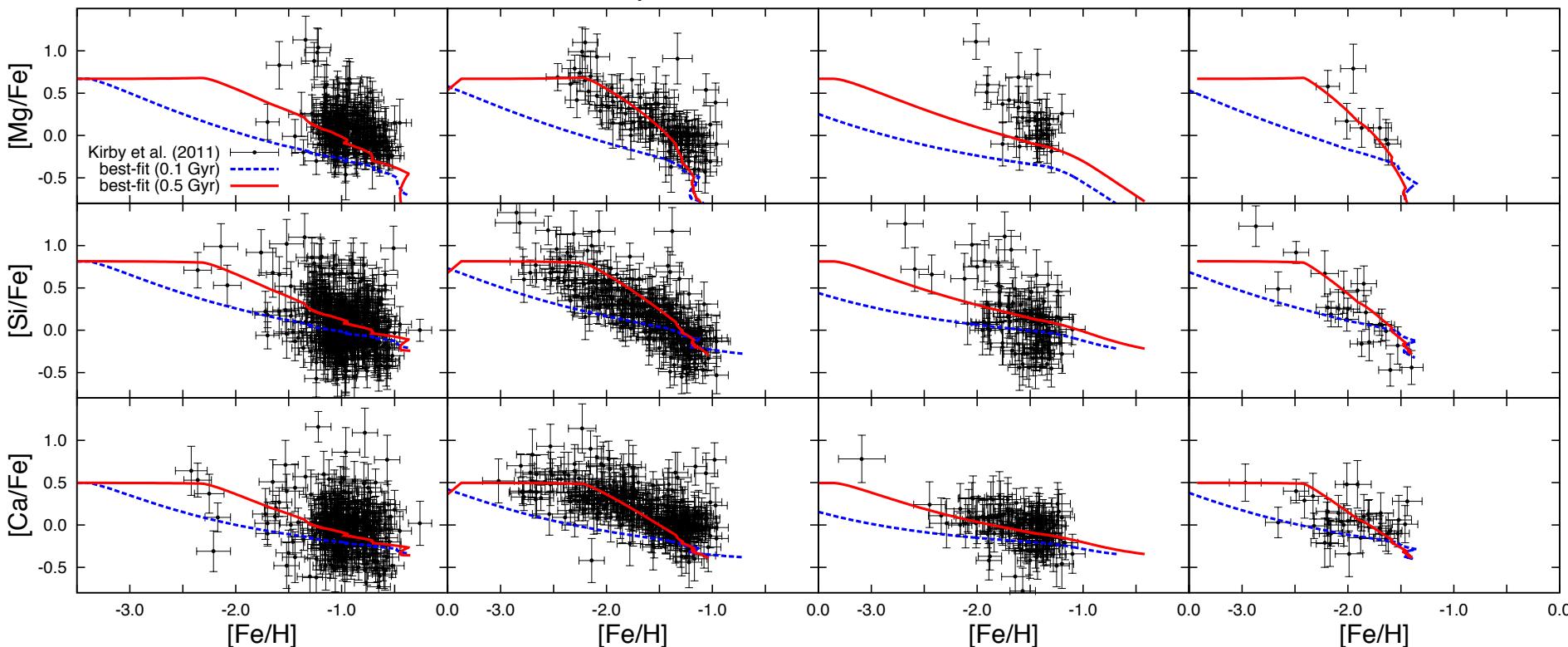
赤線 :  $t_{\text{delay,min}} = 0.5 \text{ Gyr}$

Fornax

Sculptor

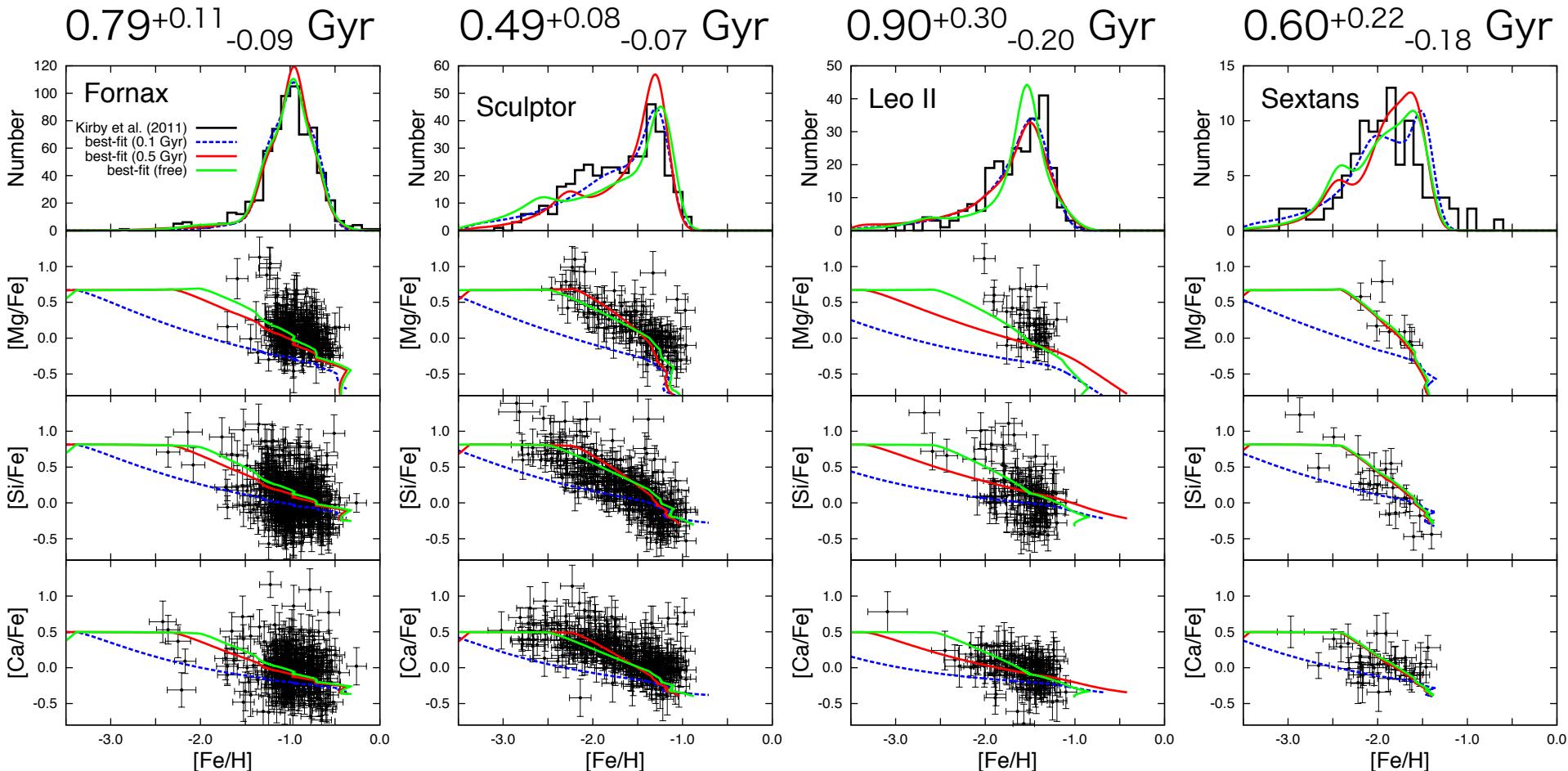
Leo II

Sextans



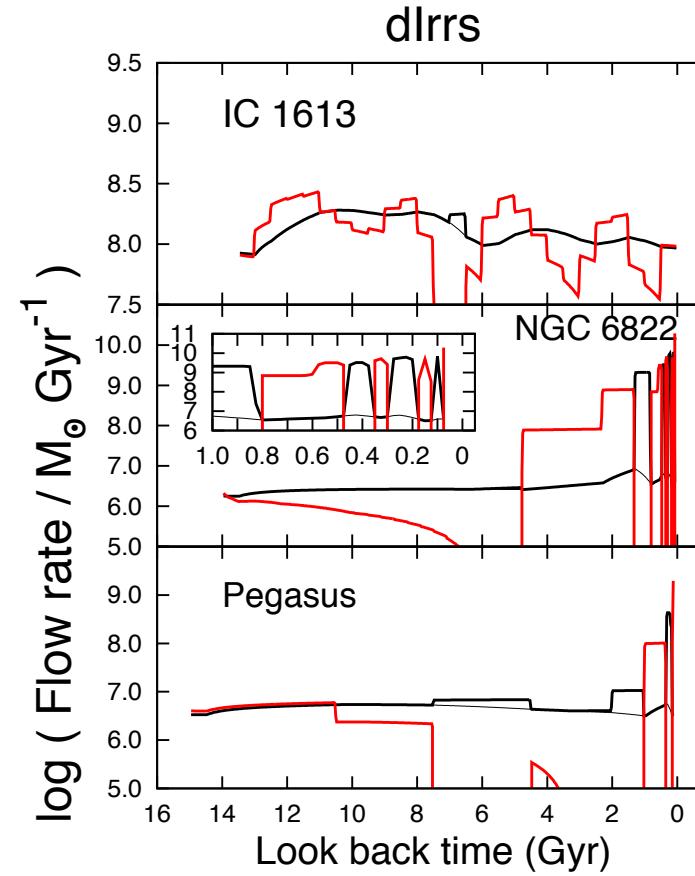
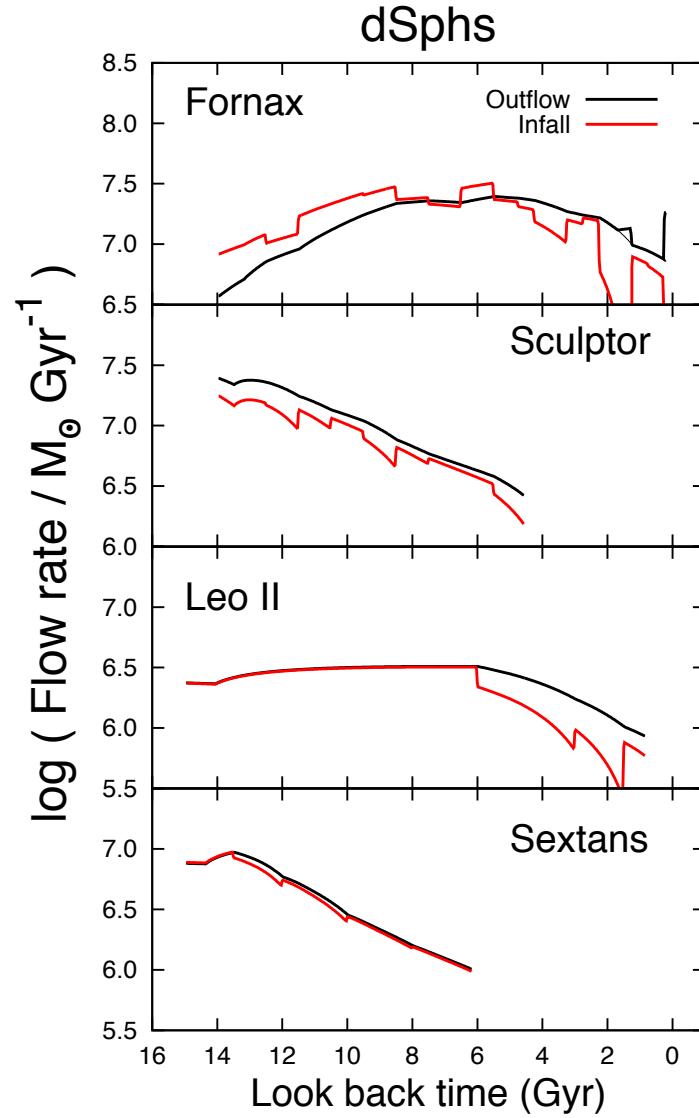
→ 観測された  $[\alpha/\text{Fe}]$  は、先行研究の値 (0.1 Gyr) では説明できず、より長いタイムスケールが必要である

# 金属量分布と $[\alpha/\text{Fe}]$ の再現



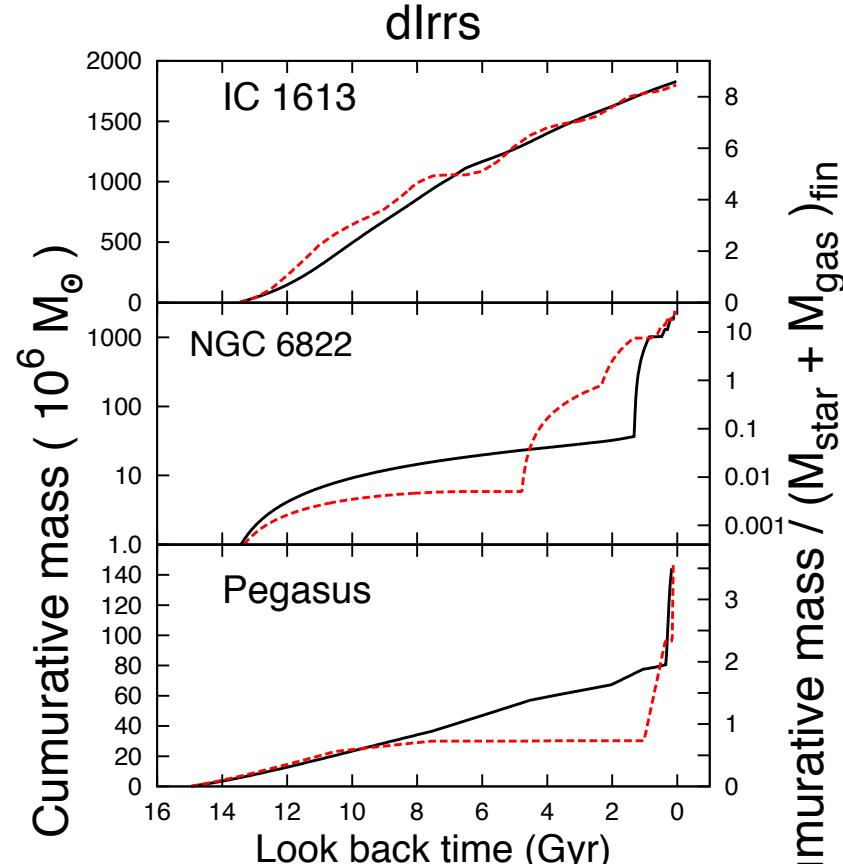
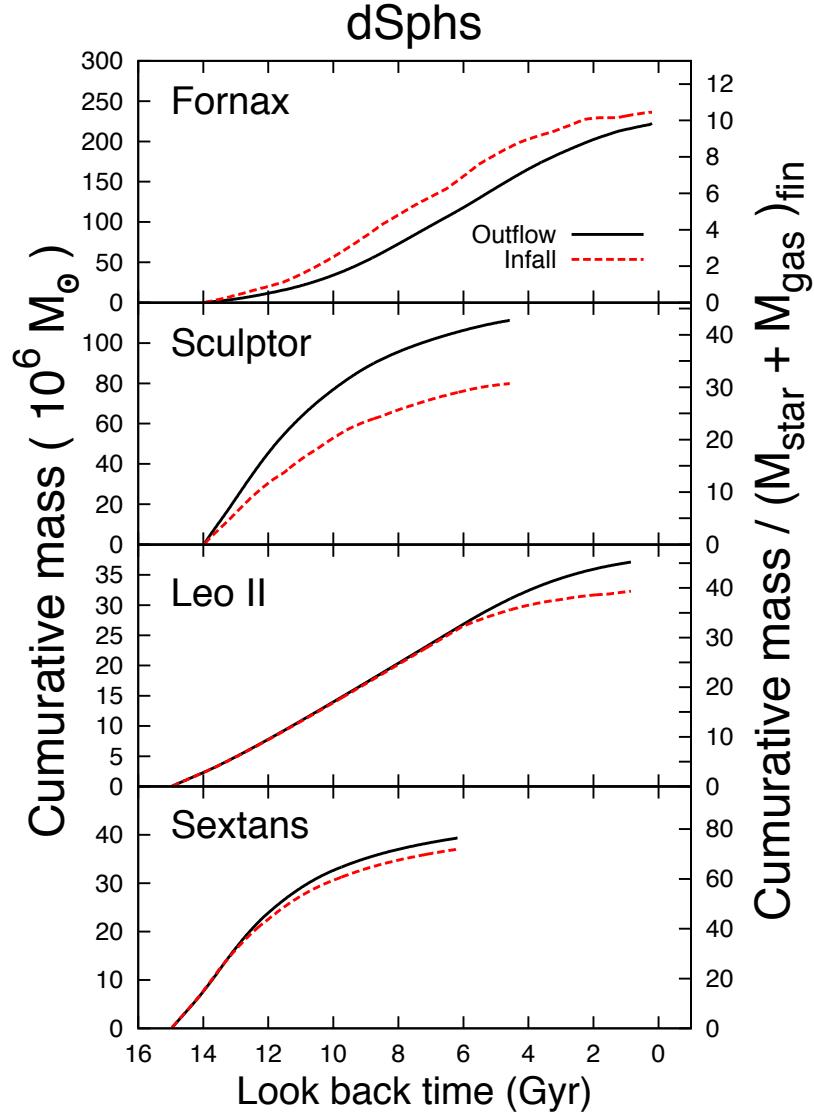
→  $t_{\text{delay},\min}$  の最適解は、0.1 Gyr より有意に長い

# ガス流出率・流入率の時間変化



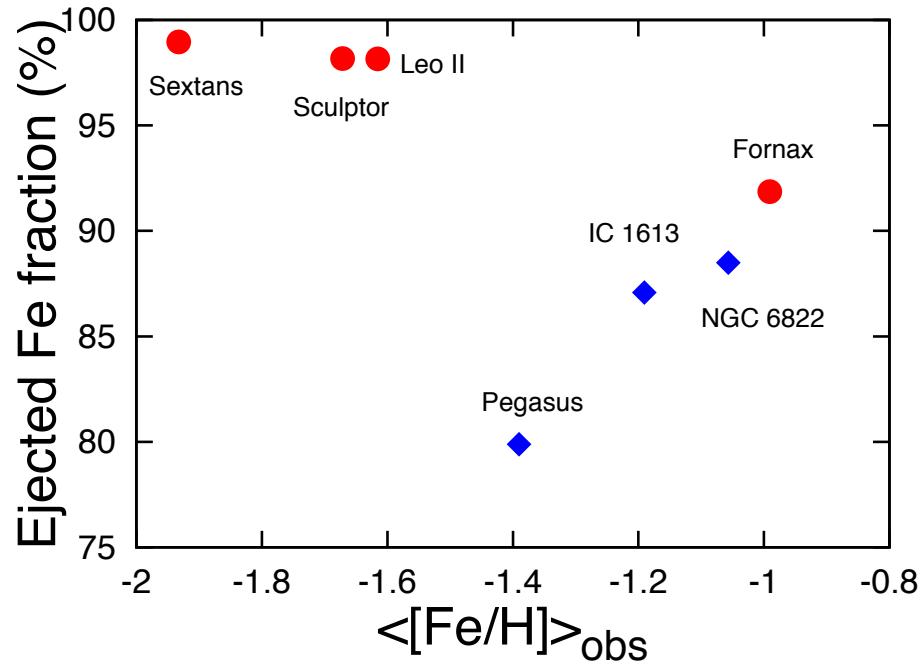
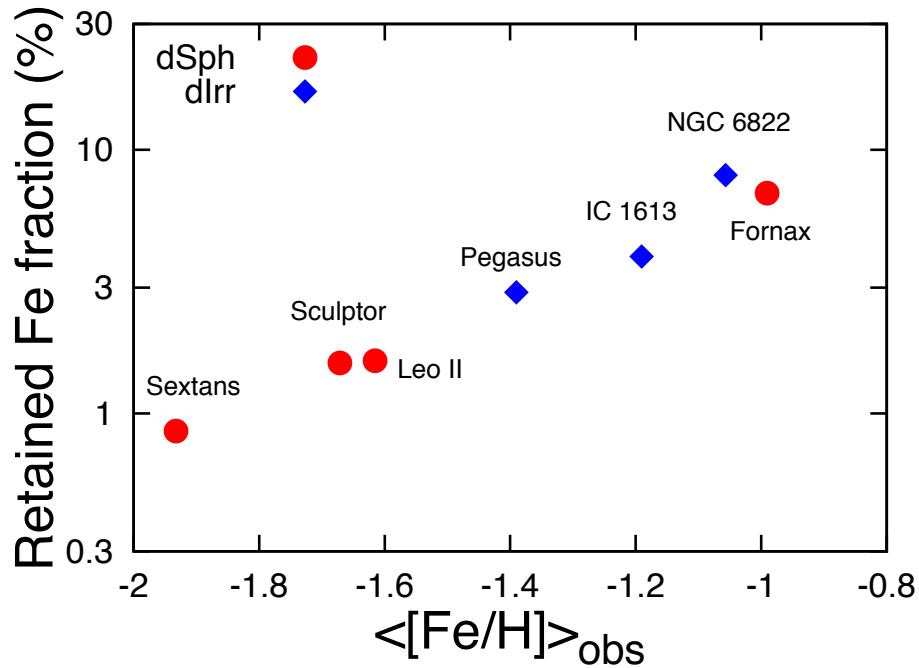
→ 流出したガスと、ほぼ同程度のガスが流入している

# 累積したガス流出・流入の質量



→ 流出したガスの総質量：現在のバリオン質量の 3~80 倍

# ガス流出による金属量の減少



- (左図) 合成した鉄のうち、星に含まれているのは微量 (< 10%)
  - (右図) 80—99% の鉄が矮小銀河から流出している
- 低金属量の銀河では、激しい outflow によって大量の重元素が流出している

## 4. 考察

# Ia型超新星の最小遅延時間

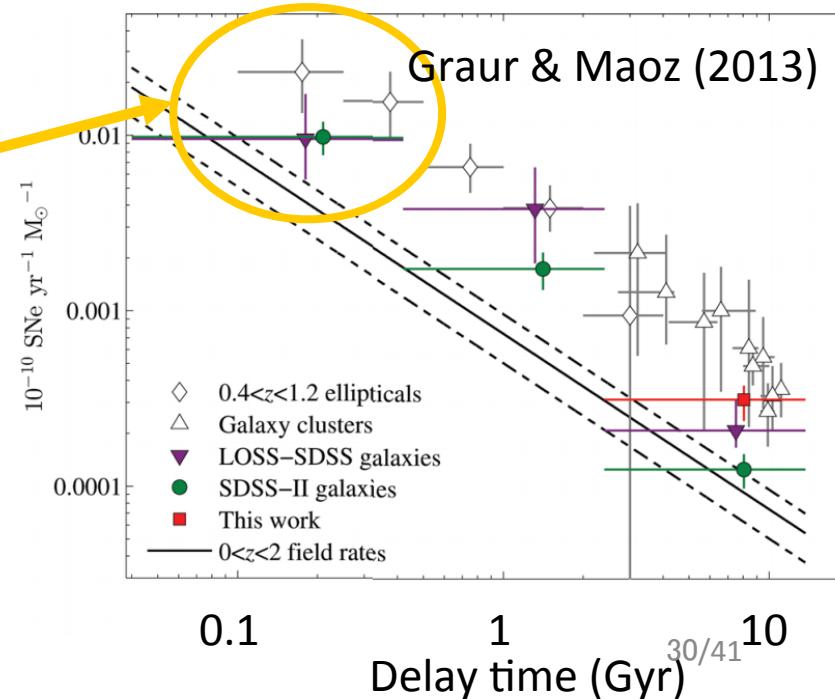
→最初の Ia 型超新星が発生するまでの時間

- 白色矮星への質量降着；
  - $8 M_{\odot}$  同士の連星が最も短く、30~40 Myr で発生し始める
- 銀河サーベイによる観測結果；

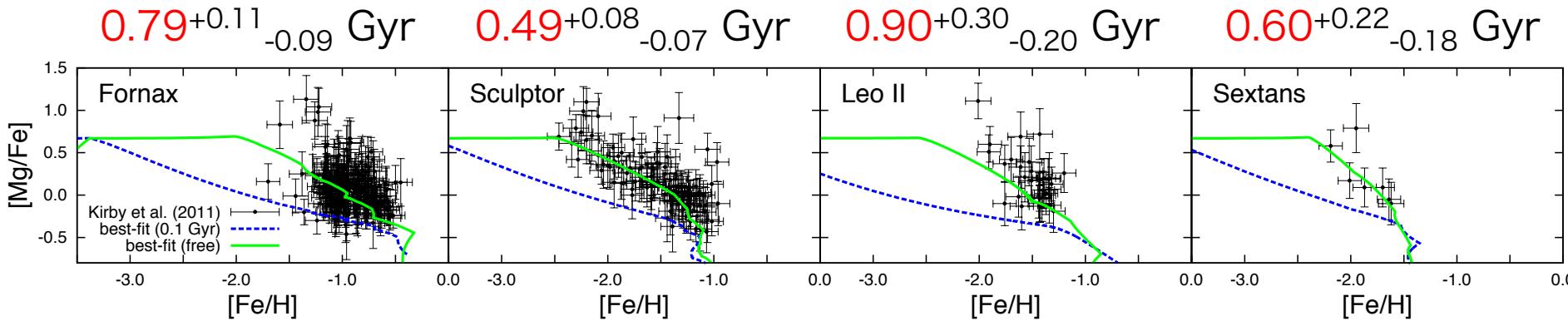
観測により見積もられた  
Ia 型超新星の最小遅延時間

$$t_{\text{delay,min}} \sim 0.1 \text{ Gyr}$$

(Totani et al. 2008, Maoz et al. 2010)



# 本研究による結果



- 色等級図による星生成史：長いタイムスケール
- 金属量分布：平均金属量が低く、幅が広い
- Ia 型超新星：鉄を大量に供給し、化学進化を促進

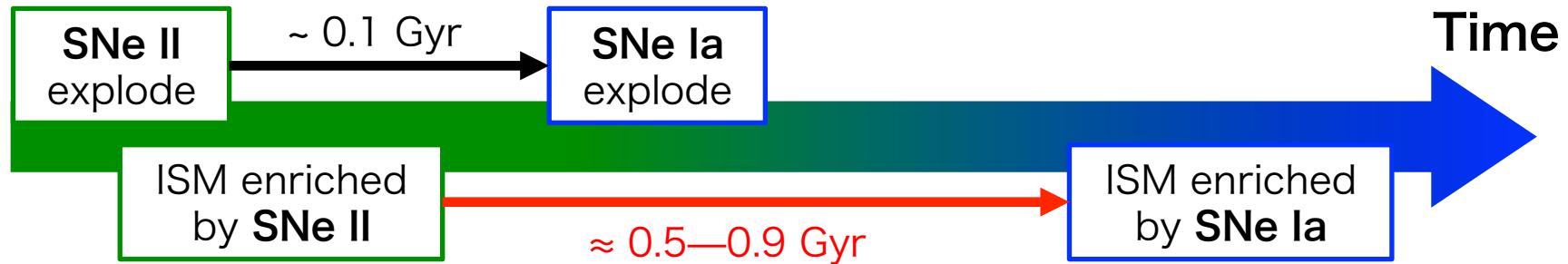
→ 早い段階で Ia 型超新星が発生してしまうと、矮小銀河で観測された低金属量星の数を説明できない

# 矮小銀河における Ia 型超新星

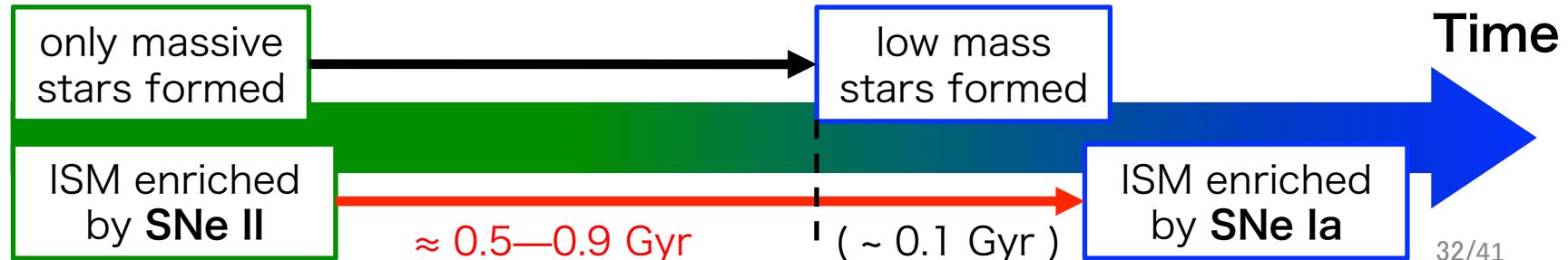
□ 遅延時間の違いを説明する 2 つの考察；

1. 我々のモデルの仮定が単純すぎた

- ・ 超新星によって、放出したガスと ISM との混合時間が異なる？



- ・ 進化初期には、Ia 型超新星の種 (i.e. 白色矮星) が存在しない？



# 矮小銀河における Ia 型超新星

2. 低金属量の環境では、遅延時間が長くなる？

❖ 理論的な研究 (Kobayashi & Nomoto 09, Meng+11)

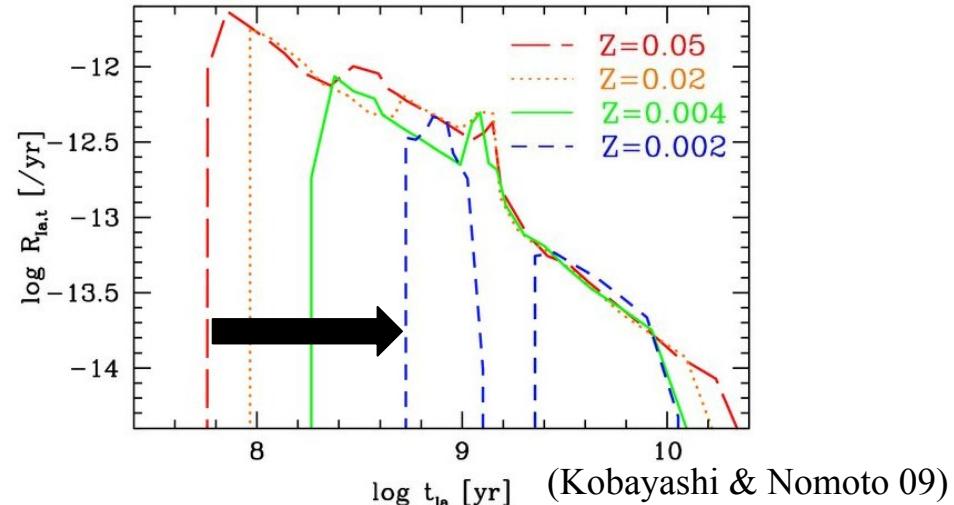
✓ 低金属量の連星系



質量輸送が非効率的



Ia 型超新星が減る

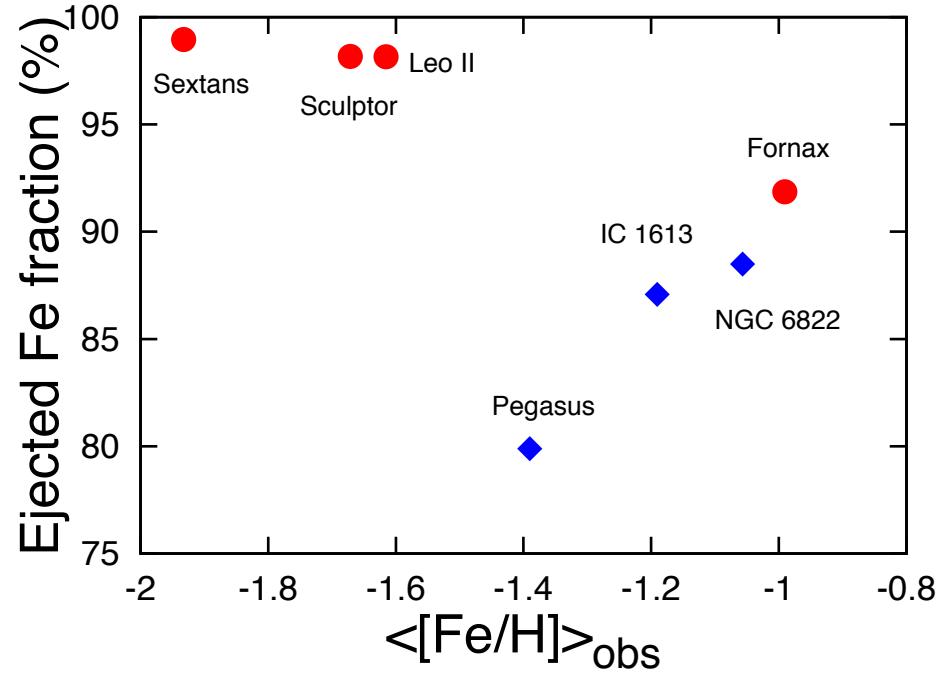
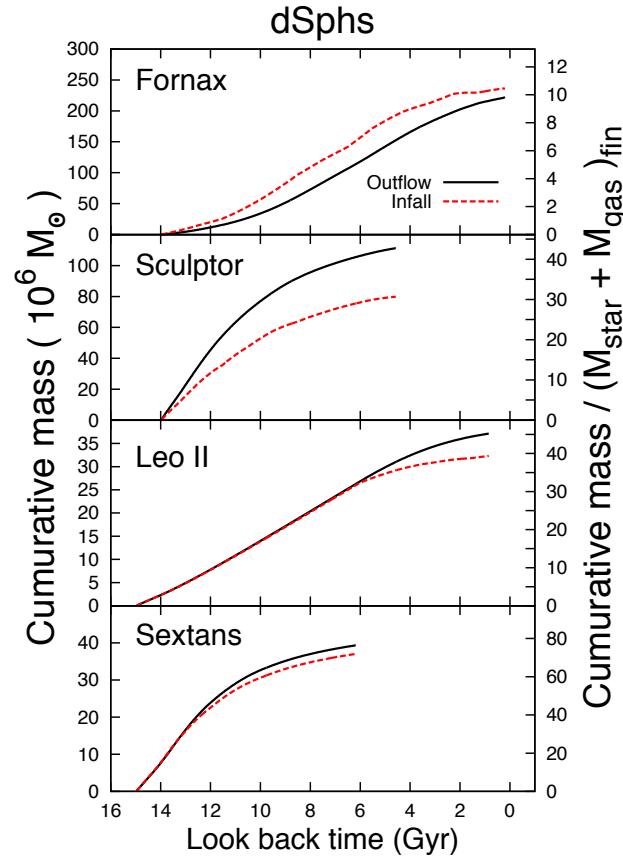


↔ ↔ ❖ 観測的な研究 (Cooper+09, Kistler+13)

- 低金属量な銀河において、Ia 型超新星の発生率は増加している

→ Ia 型超新星の影響を詳しく調べるために、低金属量星における  $[\alpha/\text{Fe}]$  を測定することが重要である

# 本モデルにおけるガス流出



- ガス流出：現在のバリオン質量の 3~80 倍
  - 金属流出：合成した鉄のうち 80% 以上が流出
- 激しい outflow によって金属が流出し、矮小銀河の  
金属量は低くなる

# 観測とシミュレーションでのガス流出

- dlrr の観測 (H $\alpha$ , HI, and X-ray) ;

(e.g., Maeburn+98, Lozinskaya+03, de Blok & Walter 06, Tennant 06)

→ No intense outflow

- 矮小銀河のシミュレーション；

(e.g., Mac Low & Ferrara 99, Recchi & Hensler 13)

→ SN ejecta outflows before mixed within ISM

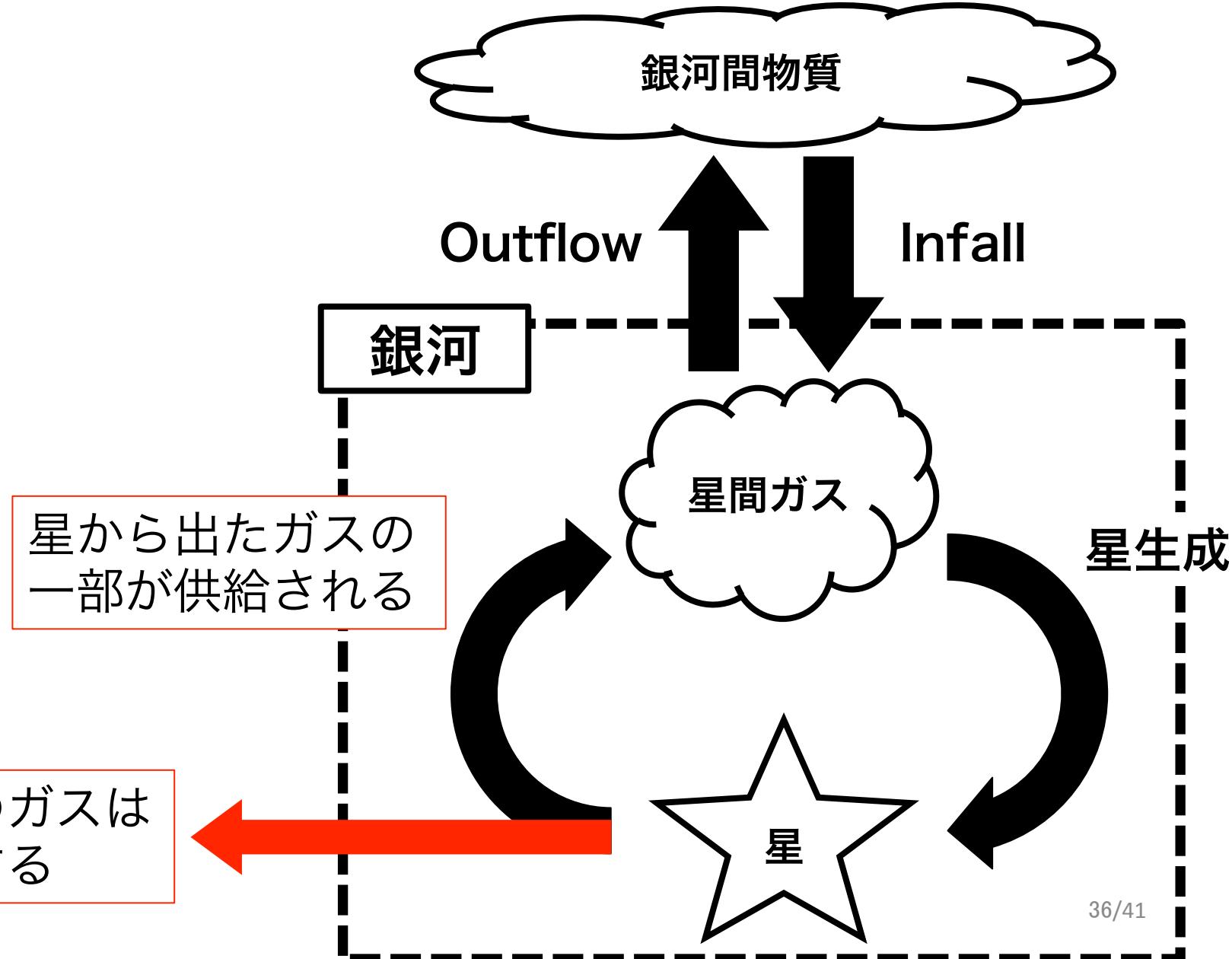
(“*Metal-enhanced outflow*”)

- “Metal-enhanced outflow” をモデルに適用してみる

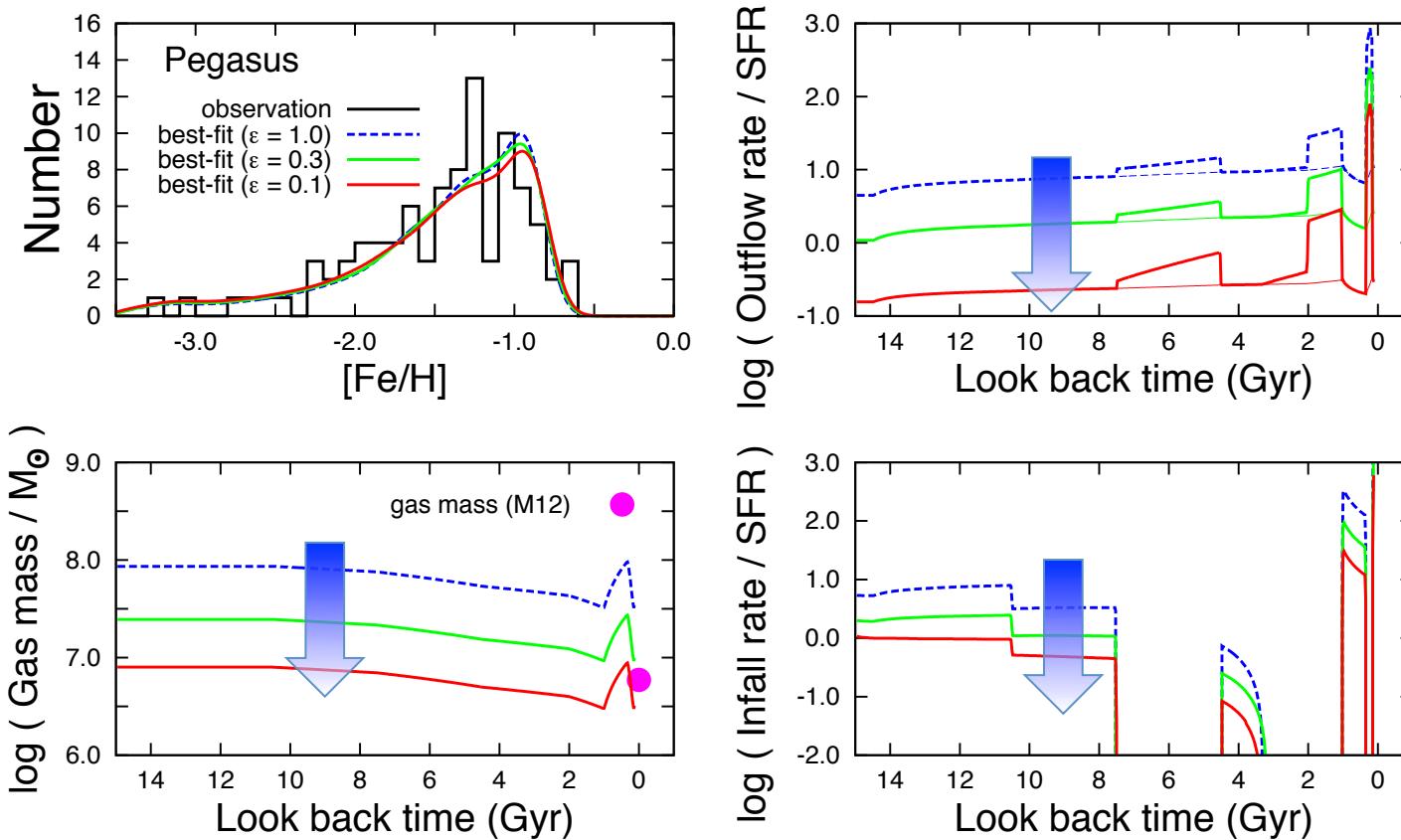
→ outflow rate : 
$$\dot{M}_{\text{out}}(t)X_i(t) + \frac{(1-\epsilon)(\dot{\xi}_{i,\text{Ia}}(t) + \dot{\xi}_{i,\text{II}}(t))}{\text{超新星ガスの一部}}$$

超新星ガスの一部

# Metal-enhanced outflow のモデル

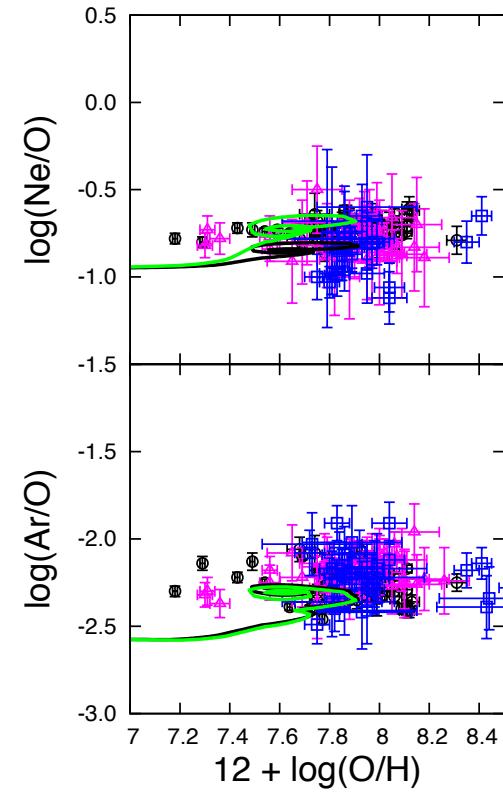
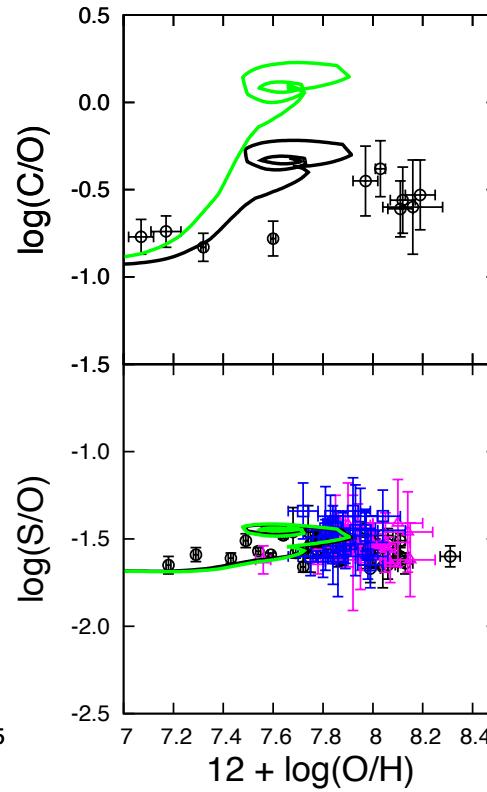
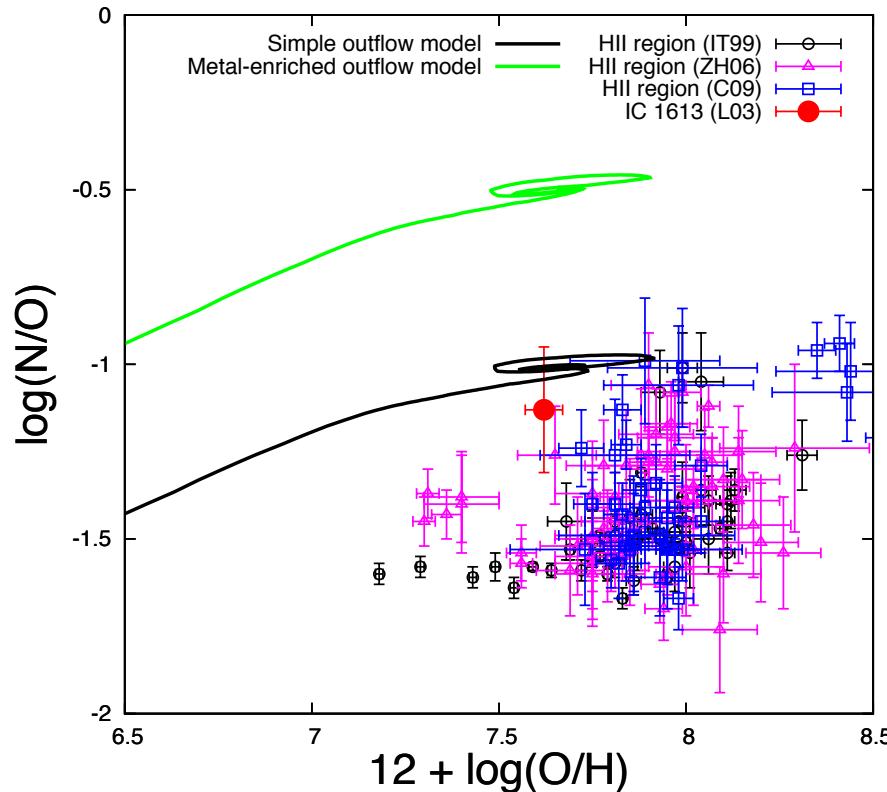


# Metal-enhanced outflow の効果



- （左上図）金属量分布への影響は小さい
  - （他）ガス流出率、流入率、ガス質量が、一様に減少する
- Metal-enhanced outflow は、小さなガス流出率であっても観測された金属量分布を再現できる

# Metal-enhanced outflow の問題点



- Metal-enhanced outflow model (緑線) は、HII region で観測された (N/O)、(C/O) を過大評価する
- 矮小銀河の星生成史、星の金属量分布、ガスの元素組成、ガス流出率、を同時に説明するためには、他の過程が必要である

# 5. まとめ

# 矮小銀河の化学進化

❖ 本研究によって明らかになった、矮小銀河の化学進化について、以下にまとめる

1. Ia 型超新星による化学進化への寄与は、大質量星の寄与よりも、約 0.5-0.9 Gyr 遅れて影響している
  - ✓ 低金属量の環境における Ia 型超新星の性質を詳しく調べるために、矮小銀河の低金属量星の  $[\alpha/\text{Fe}]$  を観測していく必要がある
2. 合成した重元素の大部分が流出したため、矮小銀河の金属量は低くなっている
  - ✓ Metal-enhanced outflow は、矮小銀河の星生成史、金属量分布、ガス流出率を説明できる可能性があるが、超新星ガスが優先して抜けるような過程では、HII region の元素組成を説明できない

# まとめ

- 我々は、矮小銀河で観測された星生成史と金属量分布を、同時に説明するための化学進化モデルを作成した
- モデルを 4 dSphs と 3 dIrrs に適用し、それぞれの化学進化を調べた
- 観測データのサンプルセレクションの効果をモデルに反映することで、先行研究よりも化学進化を精度よく調べた
- 本研究の主な結果は以下のようになる：
  1. 各矮小銀河について、星生成史と金属量分布を同時に説明する化学進化を得た
  2. 矮小銀河における Ia 型超新星の最小遅延時間は、 $\approx 0.5\text{--}0.9 \text{ Gyr}$  である
  3. 矮小銀河で合成された鉄のうち、 $\approx 80\text{--}99\%$  が失われている
  4. 超新星ガスが優先して流出するような過程は、矮小銀河の星生成史、金属量分布、ガス流出率を説明するには有効であるが、HII region の元素組成を説明できない