

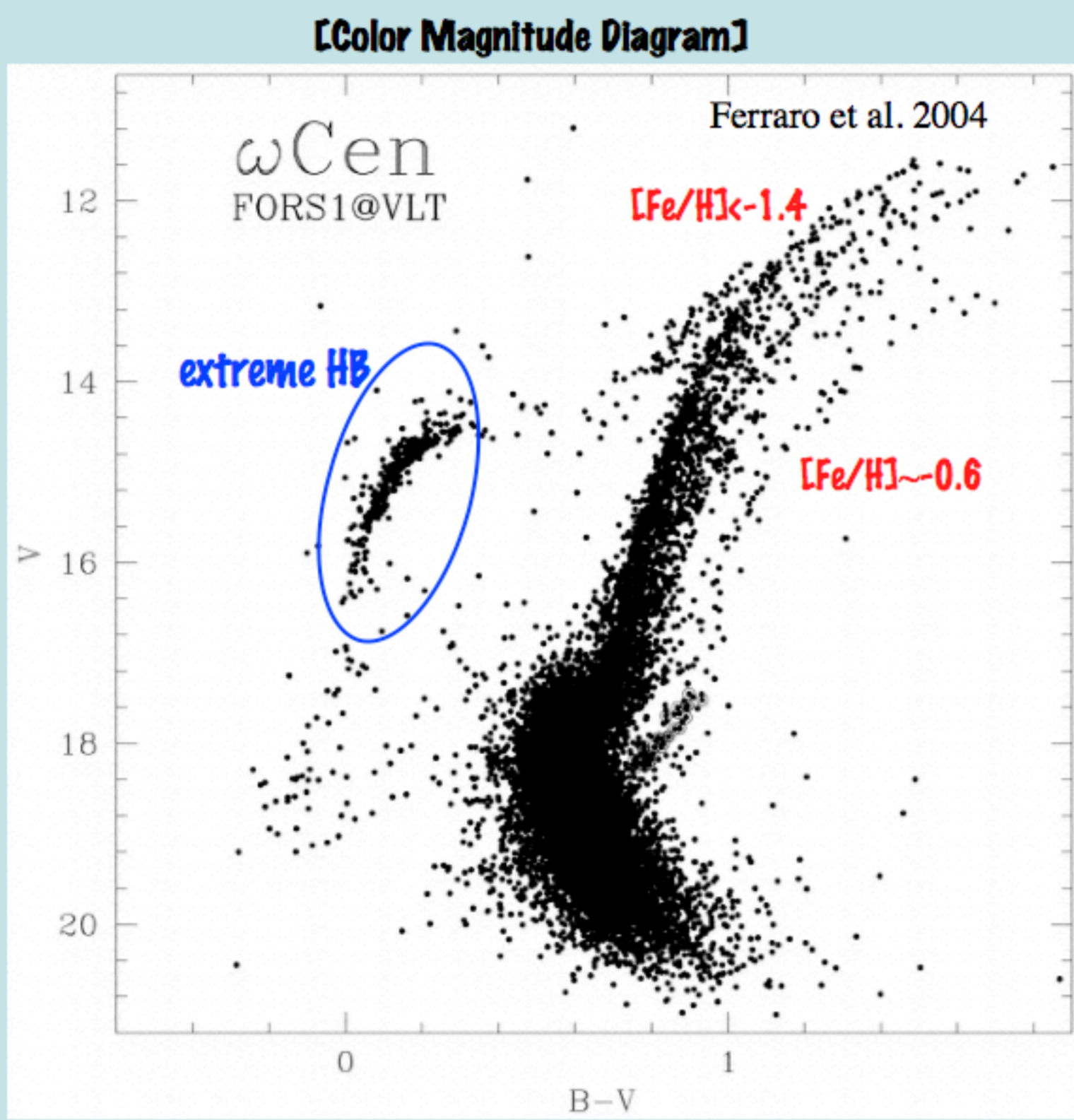
# 球状星団におけるヘリウム降着と物質混合モデル

## $\omega$ Cenに見られる二重主系列、組成異常、青い水平分枝星の起源

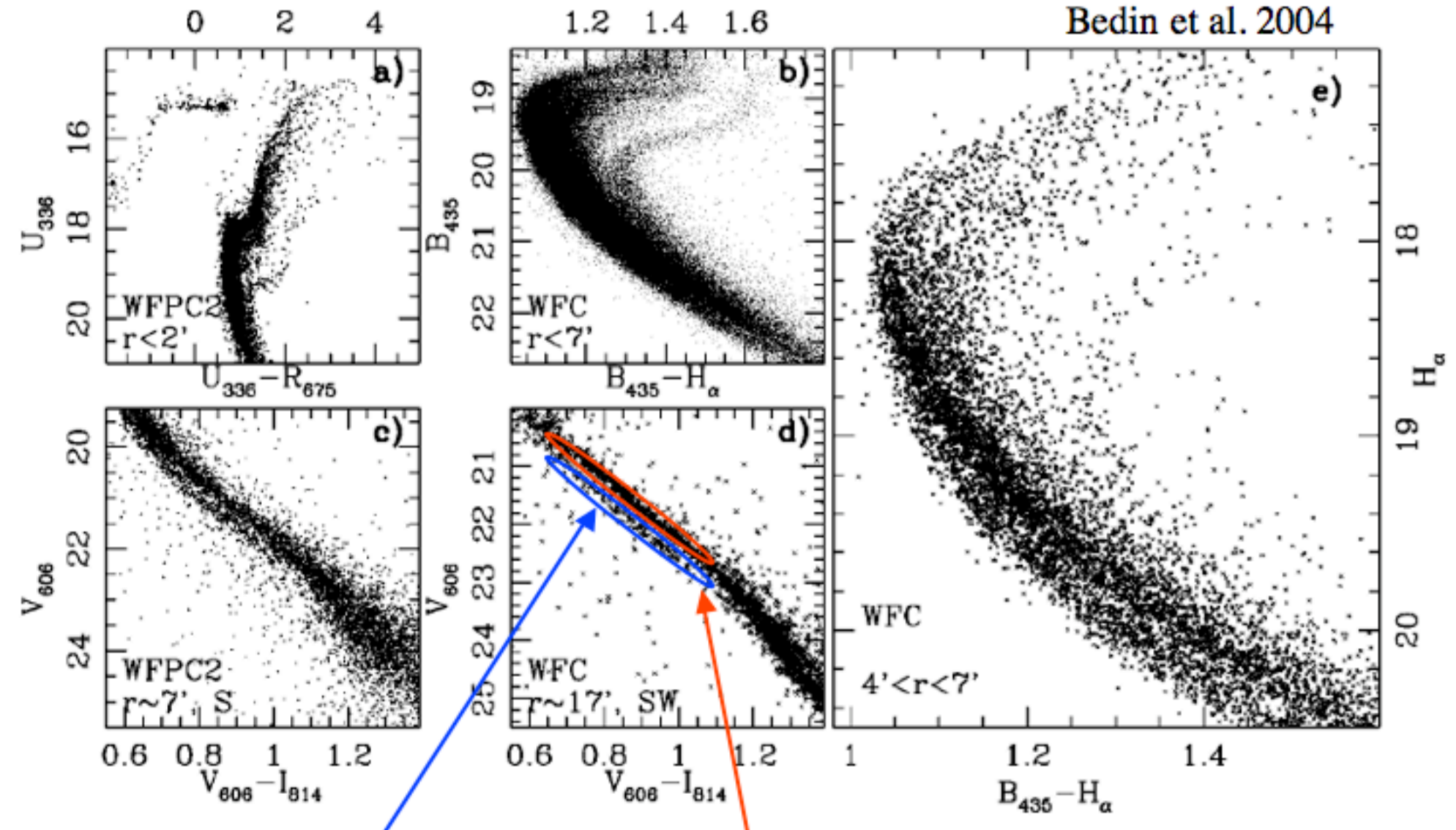
須田 拓馬(東大), 辻本 拓司(国立天文台), 茂山 俊和(東大), 藤本 正行(北大)

$\Omega$  Cenは銀河系の球状星団の中でも質量や鉄組成において特異な性質を示す。特に近年発見された質量の大きい星団の主系列で見られる二重主系列の存在や、他の球状星団中の恒星にも見られる特異な元素組成、青い水平分枝の起源は個別に模索されているが、統一的な解釈はまだ行われていない。本研究では、質量の大きい球状星団に特有の現象と考えられるA0B星からの物質降着と恒星内部における物質混合機構によって $\Omega$  Cenに見られるこれらの特徴を説明する。このモデルは、銀河形成において球状星団が果たした役割について理論的な制限を与えるための足がかりになると期待できる。

### 1. $\omega$ Cen



### Double Main-Sequenceの発見



Blue Main-Sequence (bMS)  
[Fe/H]  $-1.3$   
fraction ~ 20-30%

Red Main-Sequence (rMS)  
[Fe/H]  $-1.3$   
fraction ~ 70-80%

- 銀河系の球状星団の中で唯一metallicityの広がりを持つ。
- 質量が銀河系の球状星団で最大( $\sim 10^6 M_{\odot}$ )。
- 複数の主系列、赤色巨星分枝を持つ。
- 他の球状星団同様、元素の組成異常を示す。
  - C, N, Mg-Al anti-correlation, s-process element
- 青い水平分枝を持つ。

二重主系列以外は古くから知られている球状星団 (あるいは $\omega$  Cen特有) の未解決の謎

### 2. Origin of bMS

- He-rich stars (Bedin et al. 2004, Norris 2004)
  - 平均分子量大  $\rightarrow$  半径小  $\rightarrow$  有効温度大
  - $Y > 0.35$
- Heはどこから来るのか?
  - A0B stars (Super Wind)
  - Massive stars (Stellar Wind)

#### 1) Primordial Scenario

- He-rich gasから星形成
  - 等時曲線を用いてCMDをうまく再現可能 (Lee et al. 2005)
  - Extreme HBの分布をうまく再現
    - Extreme HBの数の比がbMS fraction ( $\sim 0.25$ )と似ている。
- He yieldの需給関係で難点
  - bMSを作るのに必要なHeの総量
    - $Y \times f_{bMS} \times M_{\omega} \sim 0.4 \times 0.3 \times M_{\omega} \sim 0.1 M_{\omega}$  (A0B yieldだけではHeの供給量不足)
  - A0Bのみから供給されるHeの総量
    - $Y_{A0B} \times f_{MS} \times f_{A0B} \times M_{\omega} \sim 0.4 \times 0.7 \times 0.1 M_{\omega} \sim 0.03 M_{\omega}$

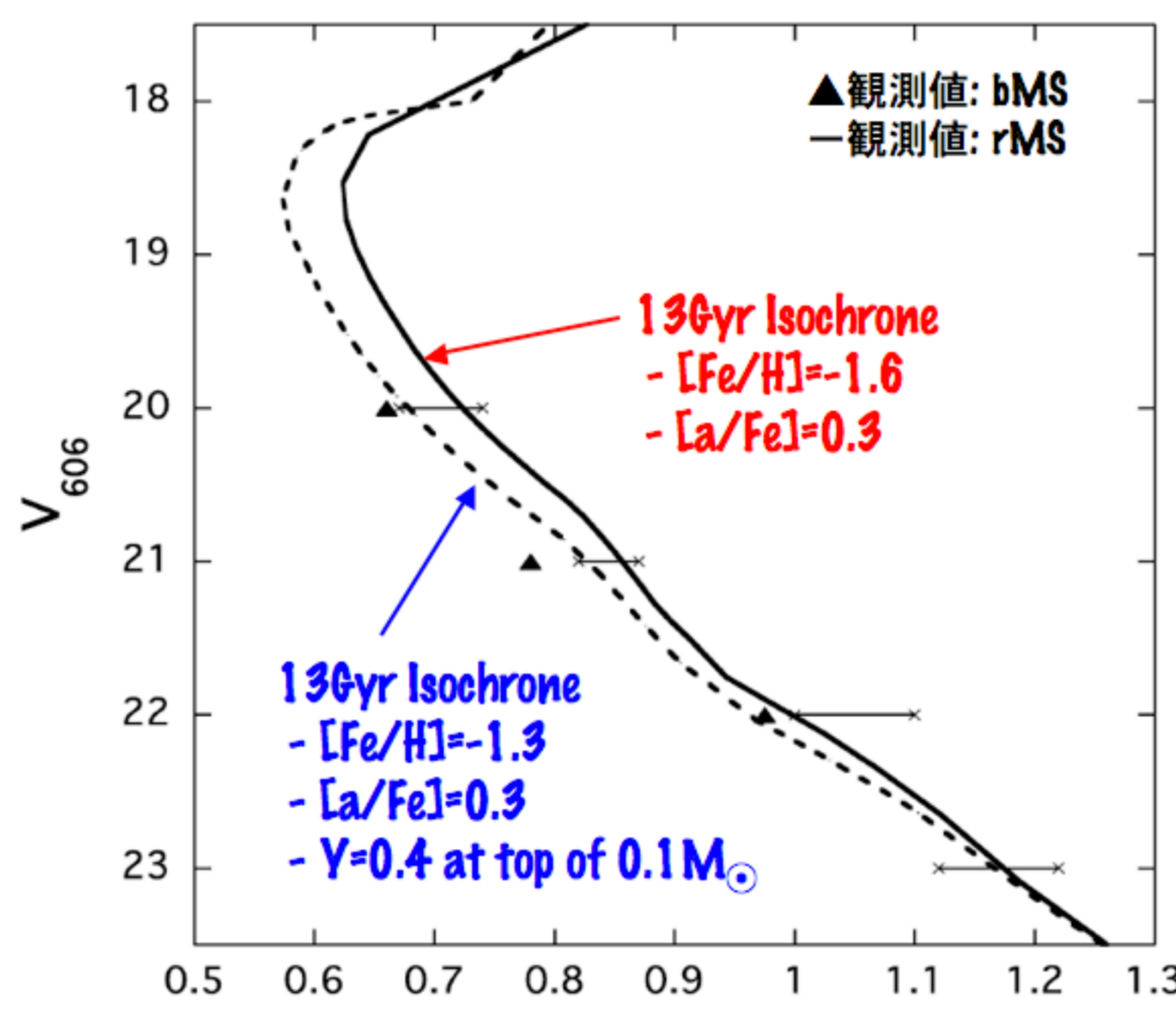
#### 2) Surface Pollution Scenario

- He-rich gasが主系列星に降着
  - 等時曲線を用いてCMDが一応再現可能
  - 少ないHe量でbMSを実現可能
- Extreme HBの再現で難点
  - 進化すると表面对流層の深化によってHe-rich層が希釈

### 3. Surface Pollution Model

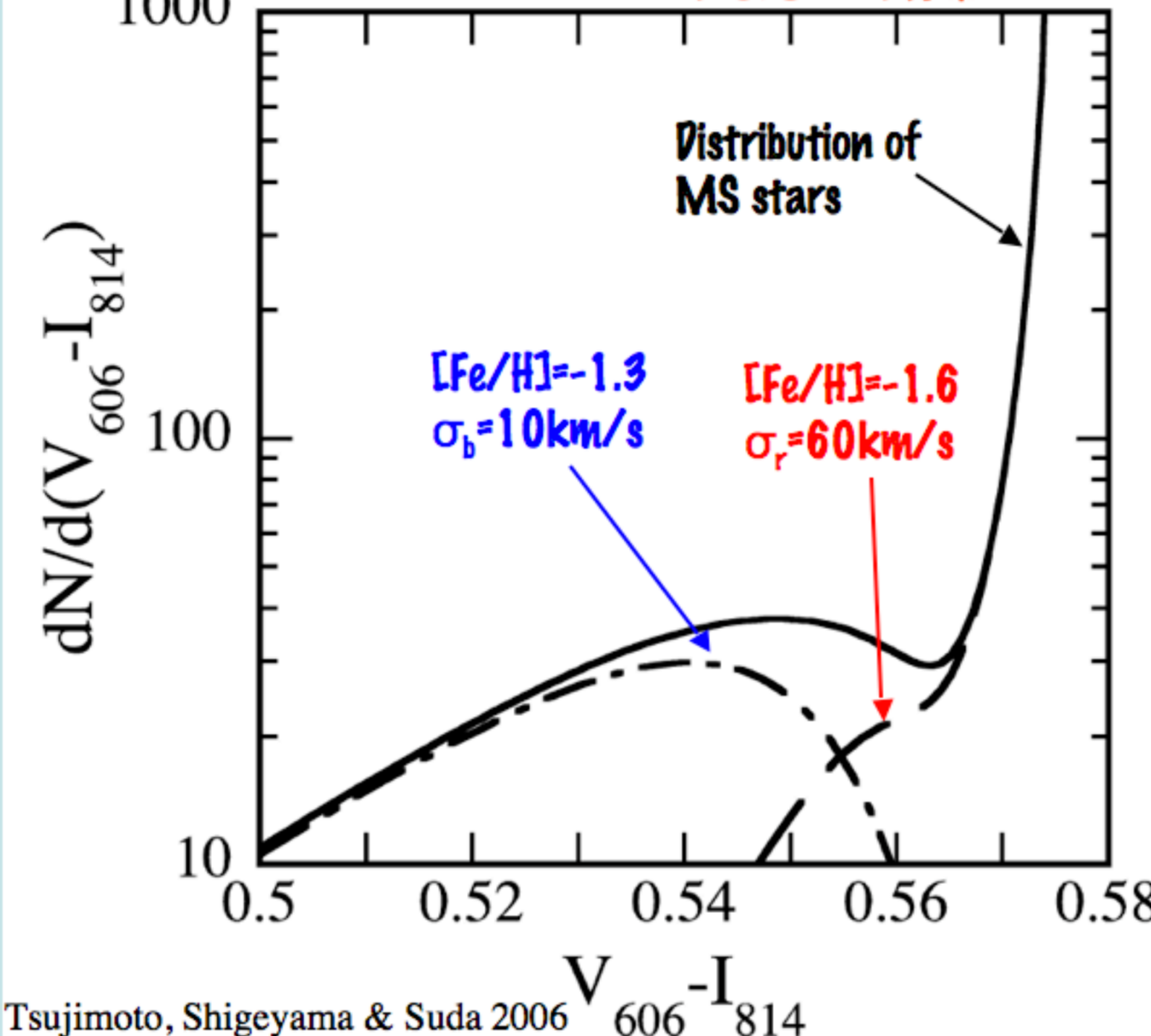
- He-rich表面对流層
  - 表面对流層の質量  $\sim 10^{-3} M_{\odot}$
- A0B ejecta ( $Y=0.4$ )の降着
  - Bondi降着: 降着率  $\propto v^{-3}$
  - $M_{acc} = \dot{m} \times R_{A0B} / v \times N_{A0B} \sim 0.2 M_{\odot}$
- 星団の星のVelocity dispersion
  - metal-rich stars < metal-poor stars

#### Surface Pollution Modelによる等時曲線



Tsujimoto, Shigeyama & Suda 2006

#### Surface Pollution ModelによるMSの分布

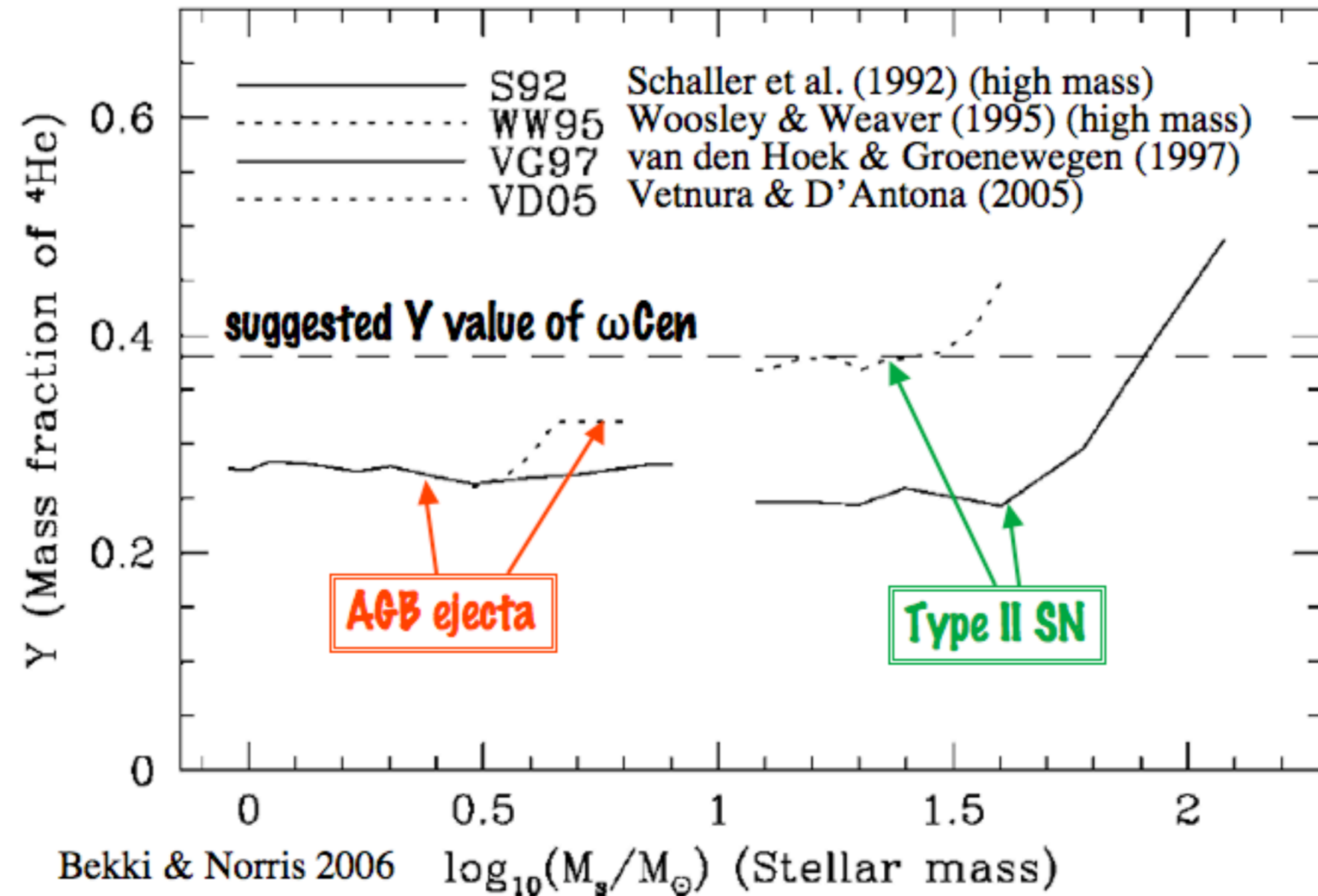


Tsujimoto, Shigeyama & Suda 2006

### 4. Helium Source Problem

- $Y \sim 0.4$ をどうやって調達するか?
  - Stellar wind from A0B stars
    - too small  $Y$  after 2nd dredge-up
  - Stellar wind from massive stars
    - requires very short duration of star formation ( $< 10^7$  yr)
  - Supernova remnant of Type II SNe
    - ejecta will mix with interstellar gas

#### He yield from stellar wind



Bekki & Norris 2006

そこで...

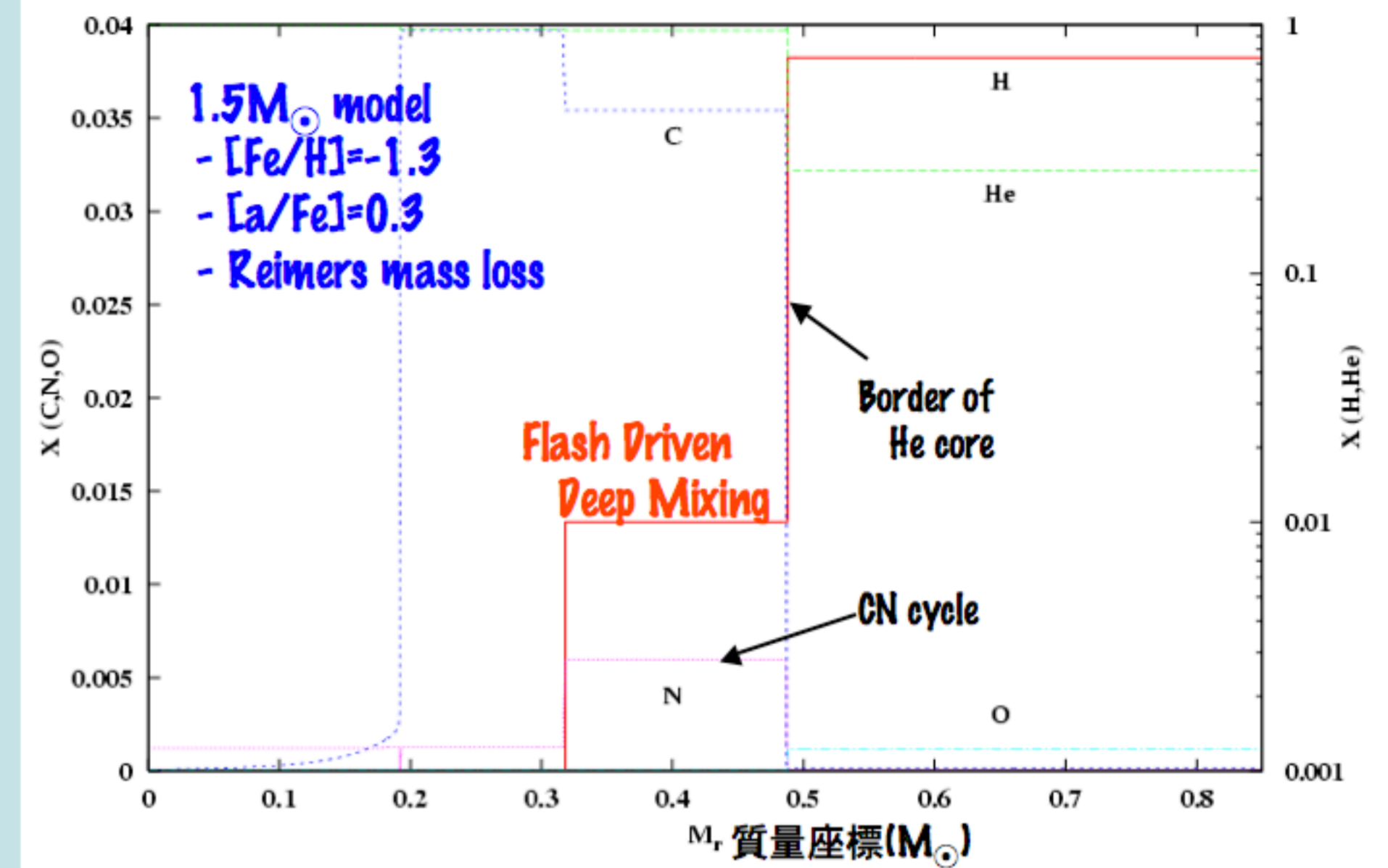
#### Extra mixing in red giants of $\omega$ Cen

- Extra mixing driven by rotational instability of helium core and envelope
  - 球状星団内における巨星と主系列星との相互作用
- He-rich horizontal branch stars
  - Blue horizontal branch  $\rightarrow$  主系列の個数比とconsistent
- Abundance anomalies in red giants of  $\omega$  Cen
  - CNO, MgAl逆相関, s-process elementsが再現可能。
- He yieldにLow-massの寄与が加算される。

$$\frac{\int_{1.3M_{\odot}}^{2.0M_{\odot}} m^{-1.35} dm}{\int_{3.5M_{\odot}}^{8.0M_{\odot}} m^{-1.35} dm} \approx 0.8$$

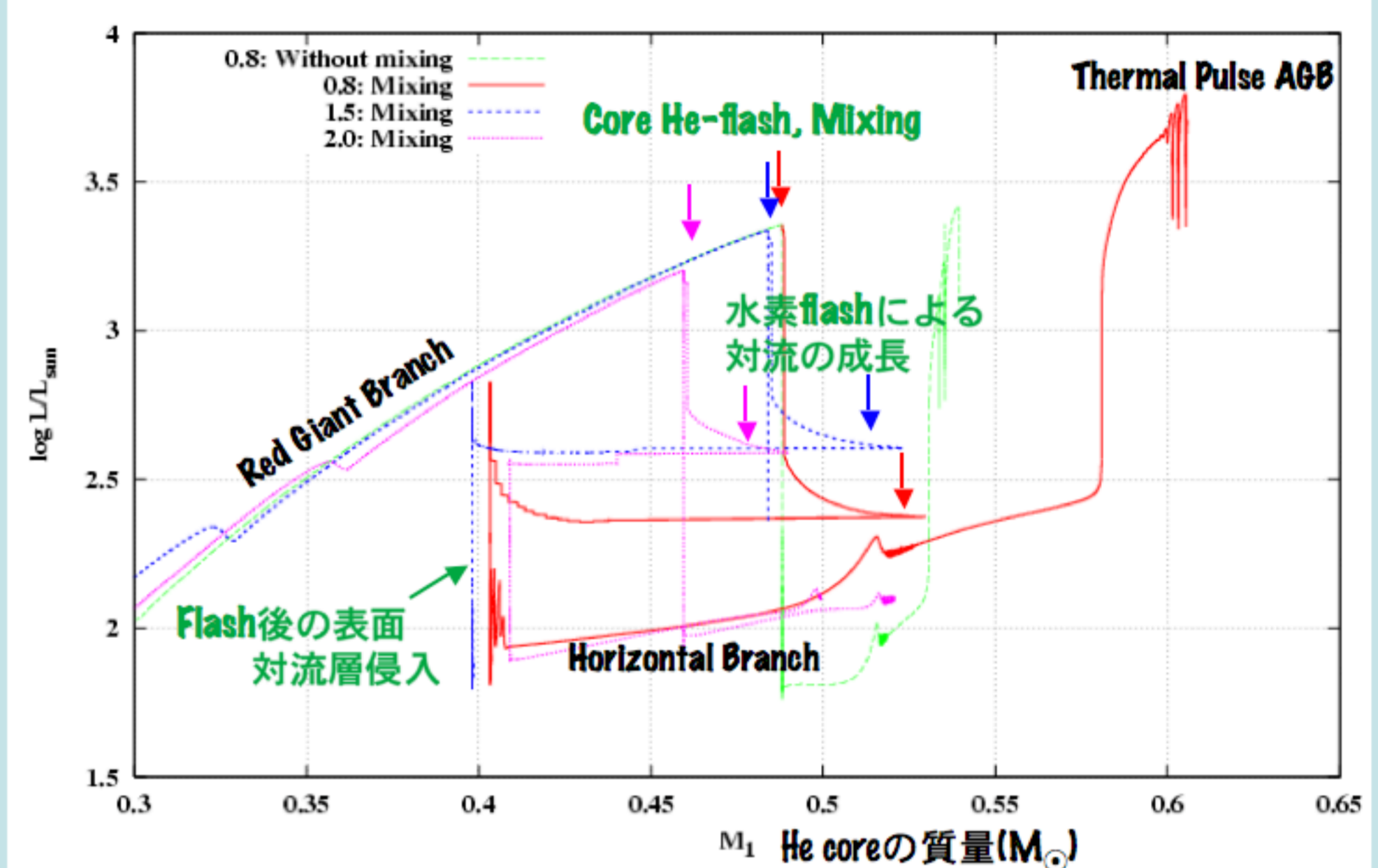
### 5. Helium Enrichment by the Extra Mixing

#### Mixing時における星の内部組成

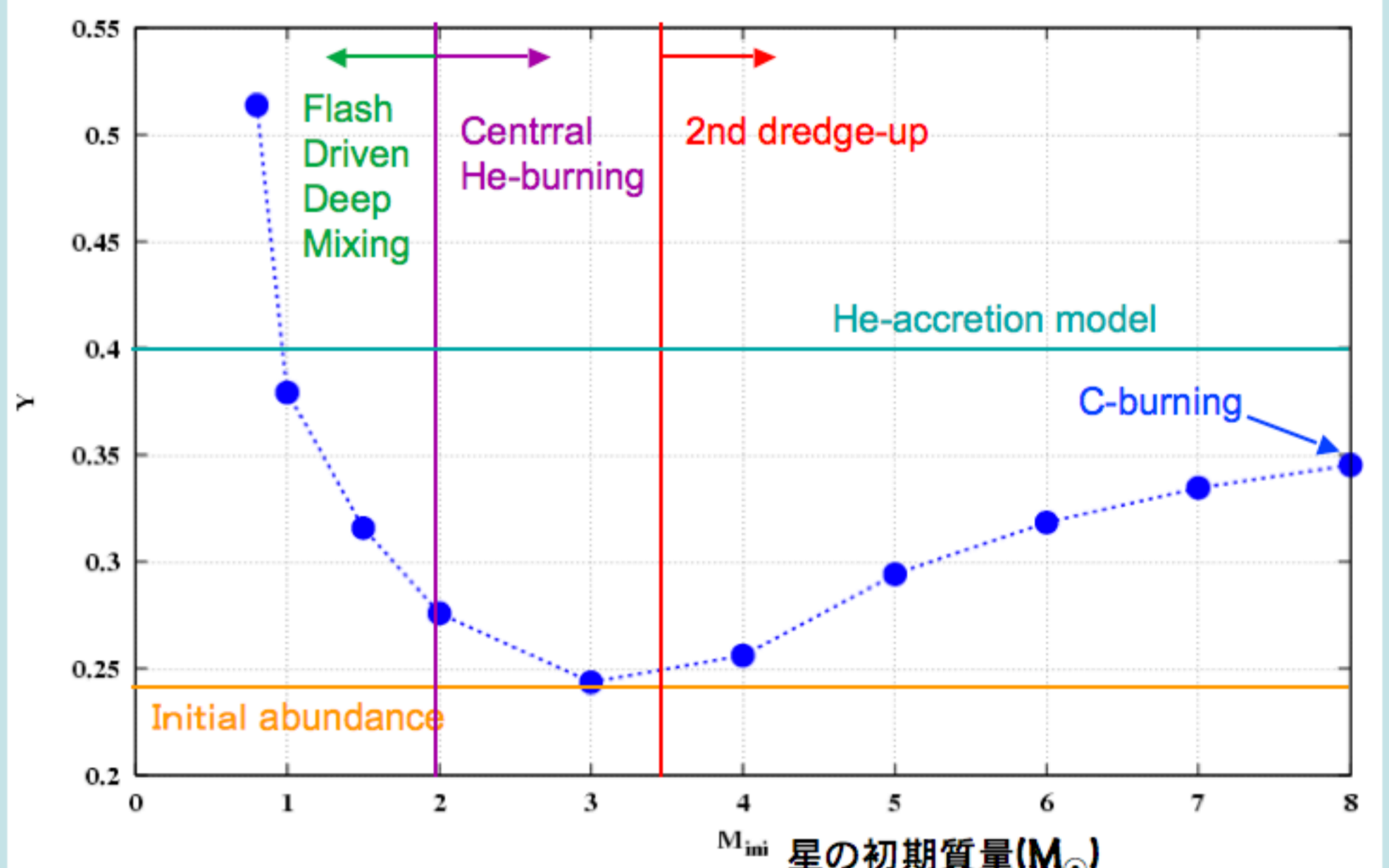


- R0B tipで水素がHe coreに混入したと仮定
- Mixingを起こす量はfree parameter
  - 今回はblue HBを再現できる $X_{mix} = 0.01$ を採用。
- MixingのタイミングはHe flash convectionが最も水素層に近づいた時。
  - 混ざった水素はnuclear timescale < convective turnover timescaleとなる層で燃える。(図では $M_r = 0.32 M_{\odot}$ )

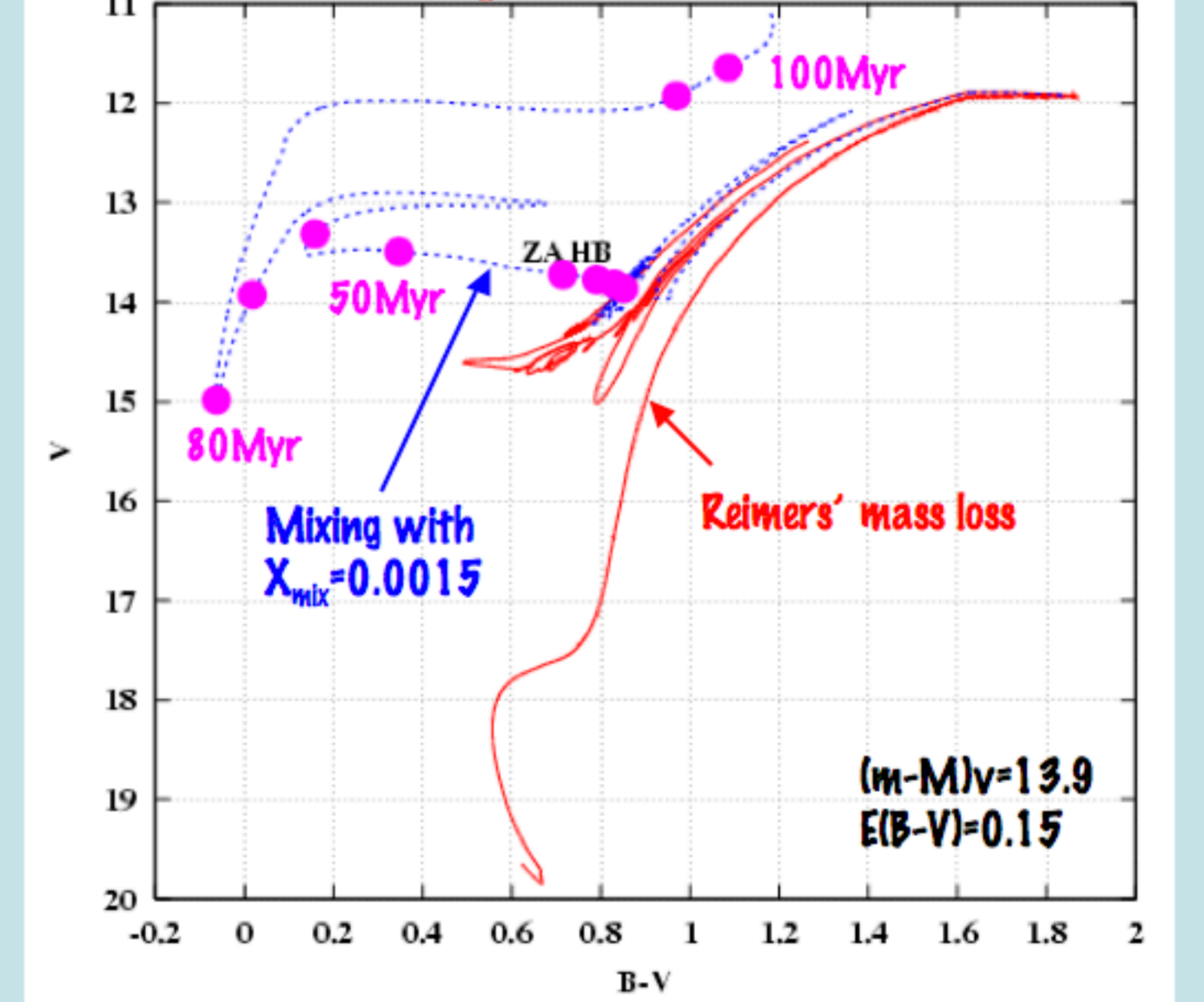
#### Helium core massの進化



#### Surface Helium Abundance



#### 0.8 Msun Mixing Model



### Conclusions

- $\omega$  Cenの二重主系列はHe accretion modelで説明可能。
- 少ないHe-rich yieldで二重主系列が再現される。
- low-mass A0Bの2nd dredge-upでは $Y < 0.35$ となり、二重主系列を再現不可能。
- 赤色巨星段階におけるExtra mixingによって (2nd dredge-upのみよりは)  $Y > 0.35$ が調達可能。
- Blue horizontal branchも同時に再現できる。

### References

T. Tsujimoto, T. Shigeyama, & T. Suda, 2006 ApJL accepted  
T. Suda & M. Y. Fujimoto 2006, ApJ, 643, 897  
T. Suda, T. Tsujimoto, T. Shigeyama, & M. Y. Fujimoto in prep.