

# 初代大質量星の最終進化における物質混合と 中質量元素合成への影響

吉田 敬

京都大学基礎物理学研究所

新学術「地下宇宙」2021年領域研究会  
2021年5月21日 オンライン

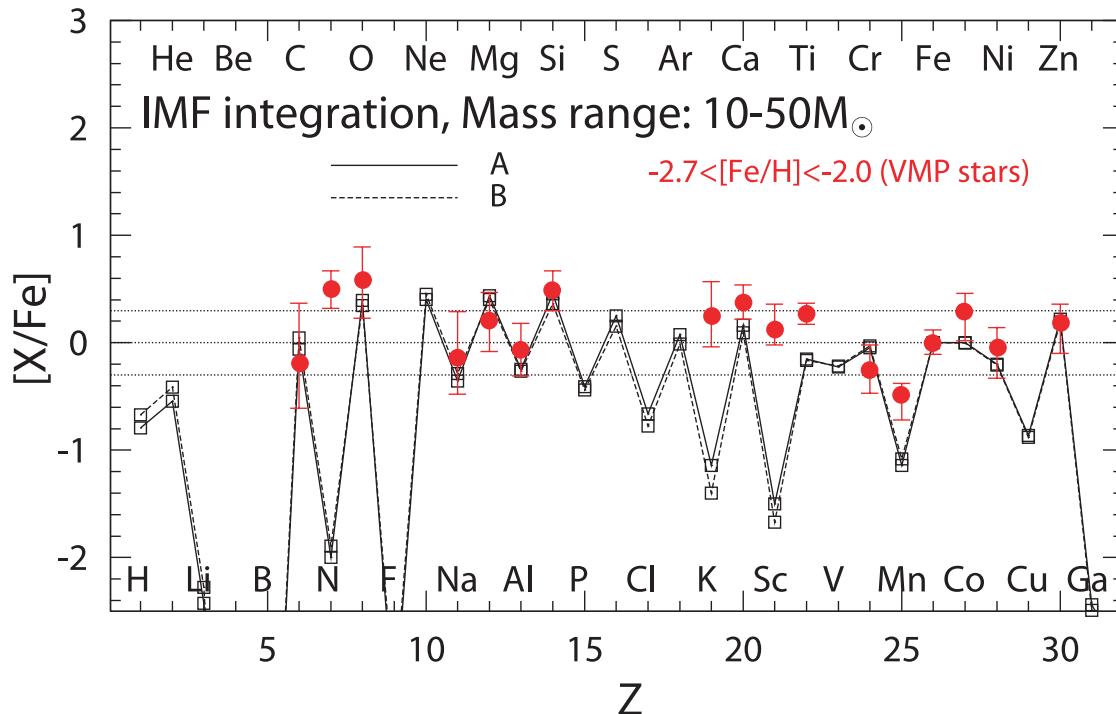
# Kの生成問題

## 大質量星でのK合成

→ 超新星爆発時の爆発的酸素燃焼

炭素燃焼, ネオン燃焼 (Woosley et al. 2002)

## 金属欠乏星におけるK存在度と生成問題



$$[X/Fe] = \log(N_X/N_{Fe}) - \log(N_X/N_{Fe})_{\odot}$$

A:  $[O/Fe] = 0.5$  for HN models

B:  $[Mg/Fe] = 0.2$  for  $> 30 M_{\odot}$  HN models

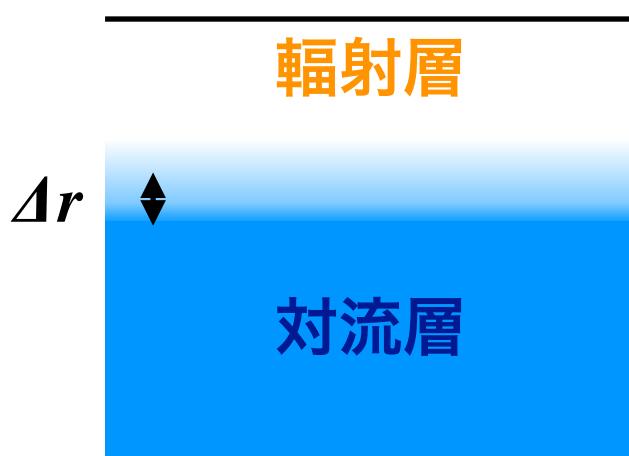
• Very Metal-Poor Stars の平均存在度

$-2.7 < [Fe/H] < -2.0$

→ 爆発モデルを工夫してもK存在度を再現するのが困難

# 対流層の物質混合と大質量星の最終進化

## 星の対流層における物質混合



- 物質混合 → 拡散近似

$$D_{cv} = \frac{1}{3} v_{MLT} \alpha_{MLT} H_P$$

$\alpha_{MLT}$ : mixing length parameter  
 $H_P$ : pressure scale height

- overshoot  
→ 対流領域の境界の少し外まで混合

$$D_{cv}^{ov} = D_{cv,0} \exp\left(-2 \frac{\Delta r}{f_{ov} H_{P0}}\right)$$

$f_{ov}$ : overshoot parameter

- 観測を再現するように  $\alpha_{MLT}, f_{ov}$  を決定

… 主に主系列星と赤色超巨星の性質

$\alpha_{MLT} = 1.8, f_{ov} = 0.03/(0 \text{ or } 0.002)$  until/after He burning

→ 後期進化の燃焼まで適用可能かはわからない

# 研究経過

---

大質量星の後期進化における対流層境界での物質混合に影響するovershootの効果に対する中質量元素(Kを含む)の生成量の依存性を調べる

- 太陽系金属量の星：大質量星の進化 + 超新星爆発

$M = 10, 12, 15, 20, 25 M_{\odot}$  stars

overshoot parameter:  $f_{ov} = 0, 0.002, 0.005, 0.010, 0.030$

(第7回超新星ニュートリノ研究会)

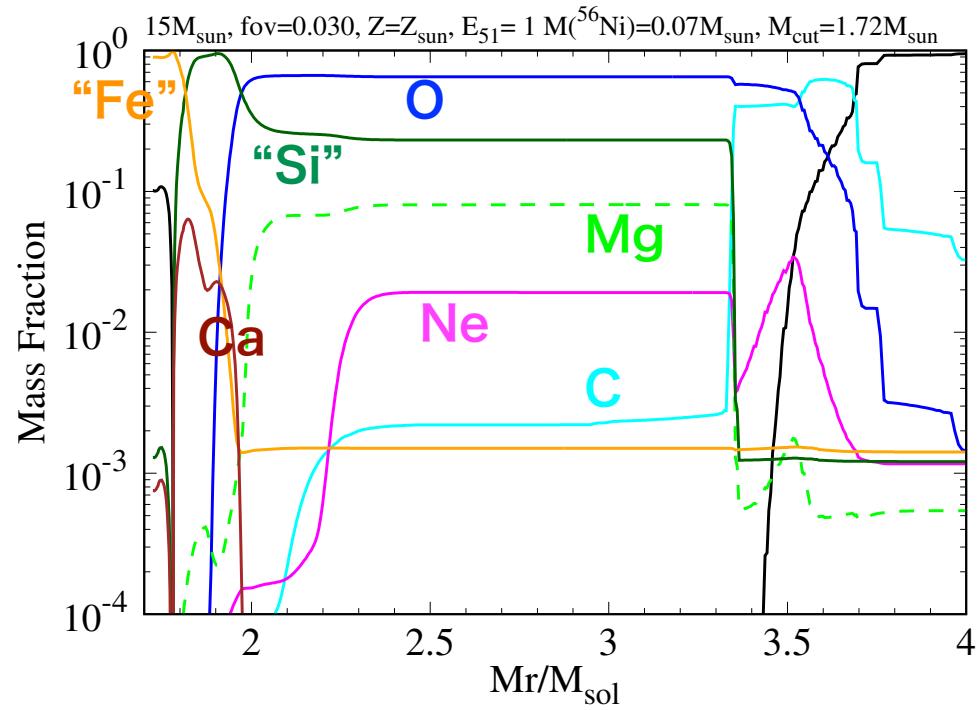
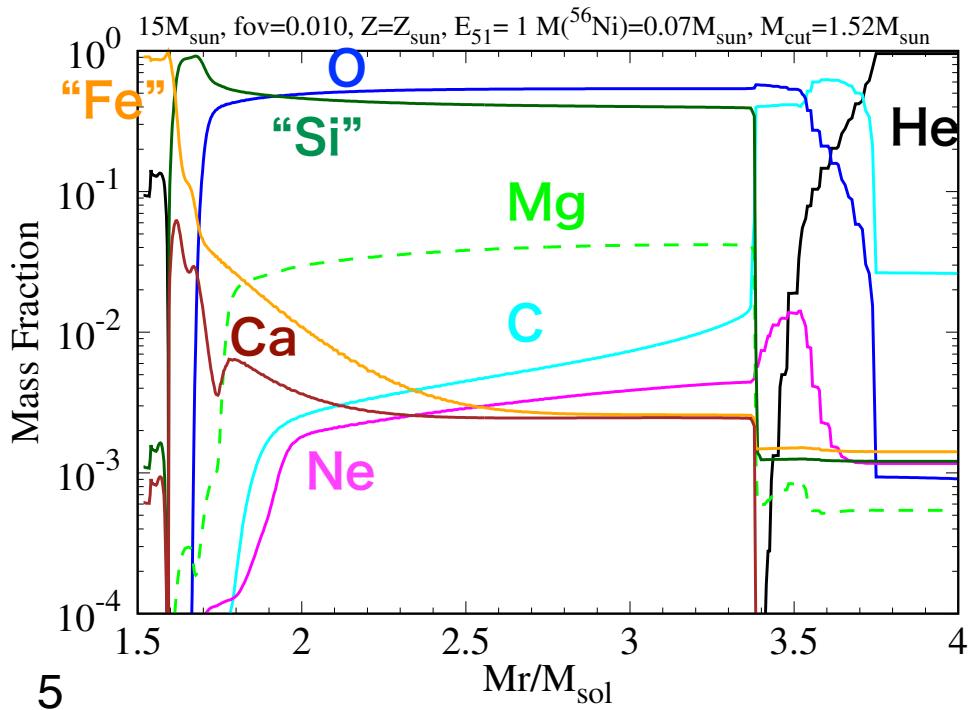
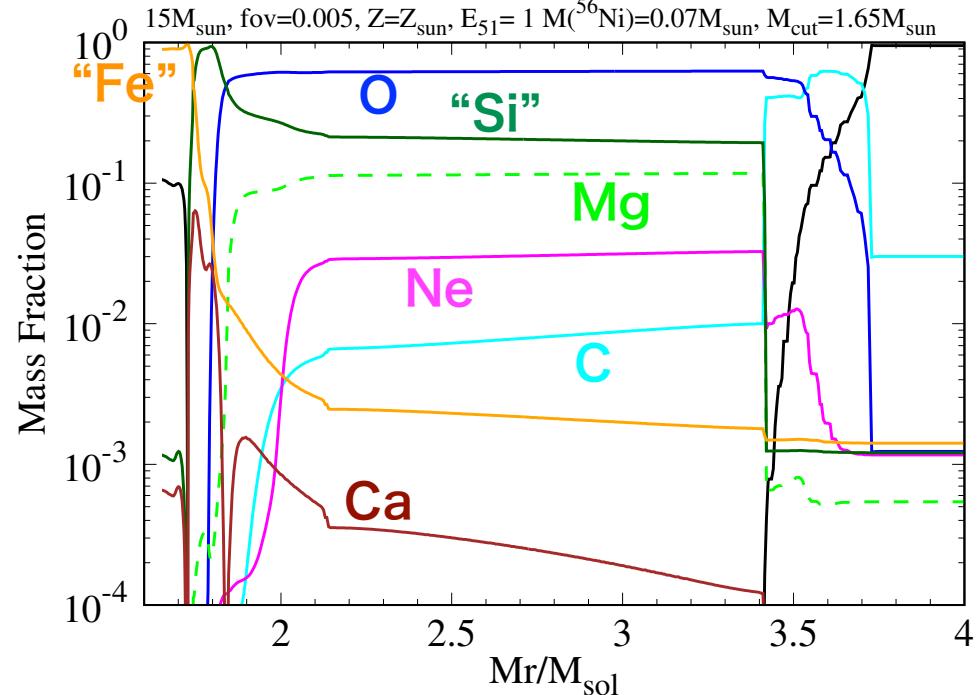
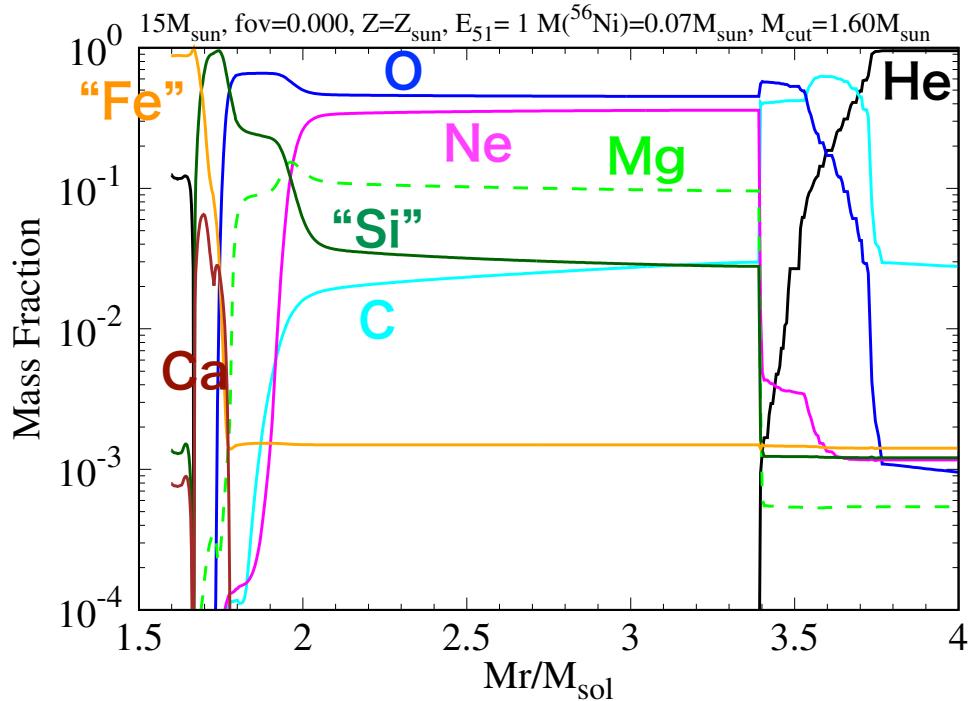
- 初代星(金属量0)：大質量星の進化

$M = 8, 9, 10, 12, 15, 17, 20, 22, 25 M_{\odot}$  stars

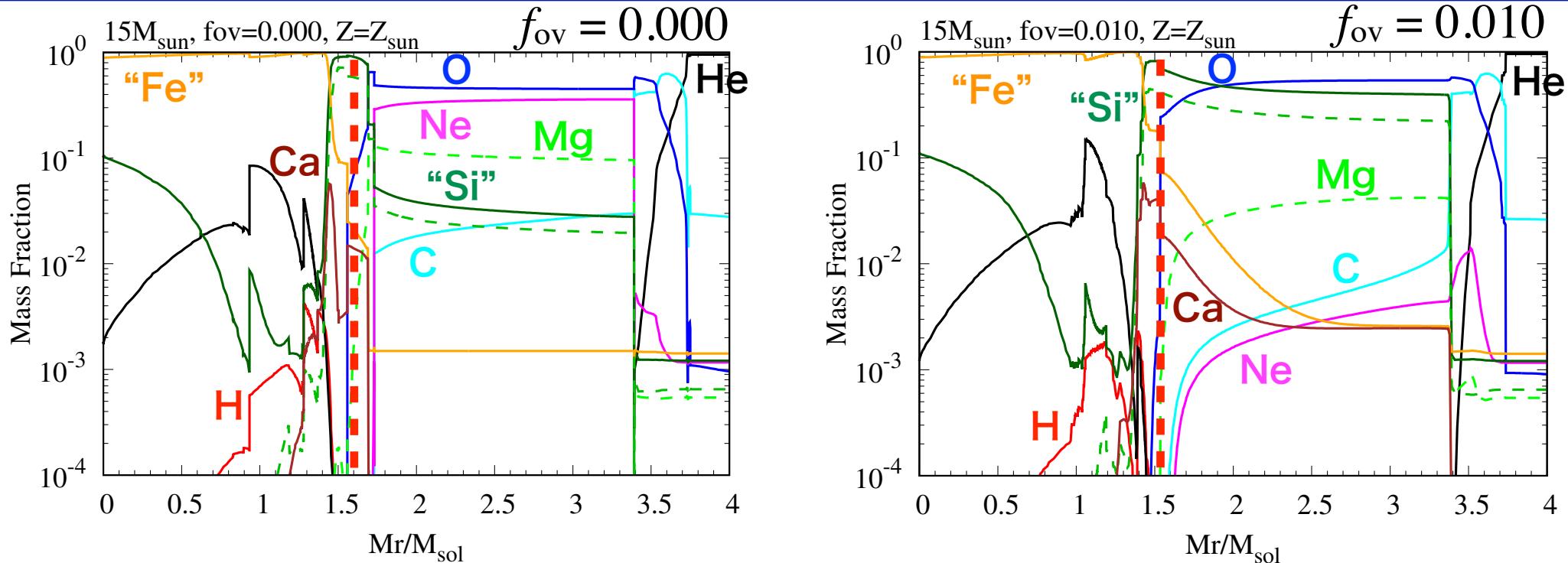
overshoot parameter:  $f_{ov} = 0, 0.002, 0.005, 0.010, 0.030$

→ 超新星爆発元素合成の計算へ

# 超新星ejectaの質量比分布: $15 M_{\odot}$ ( $Z=Z_{\odot}$ )

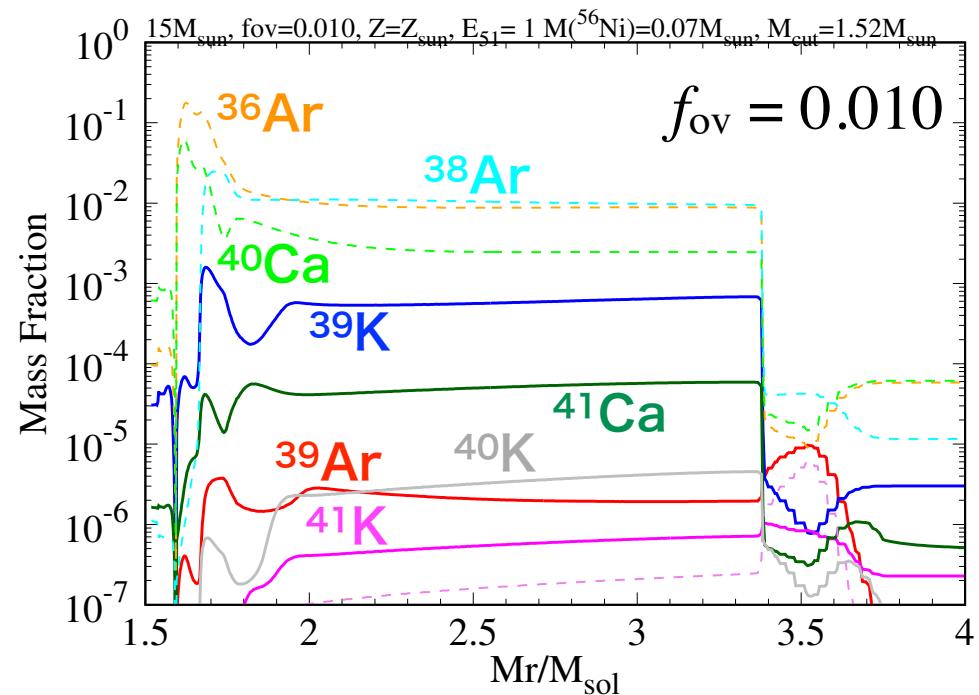
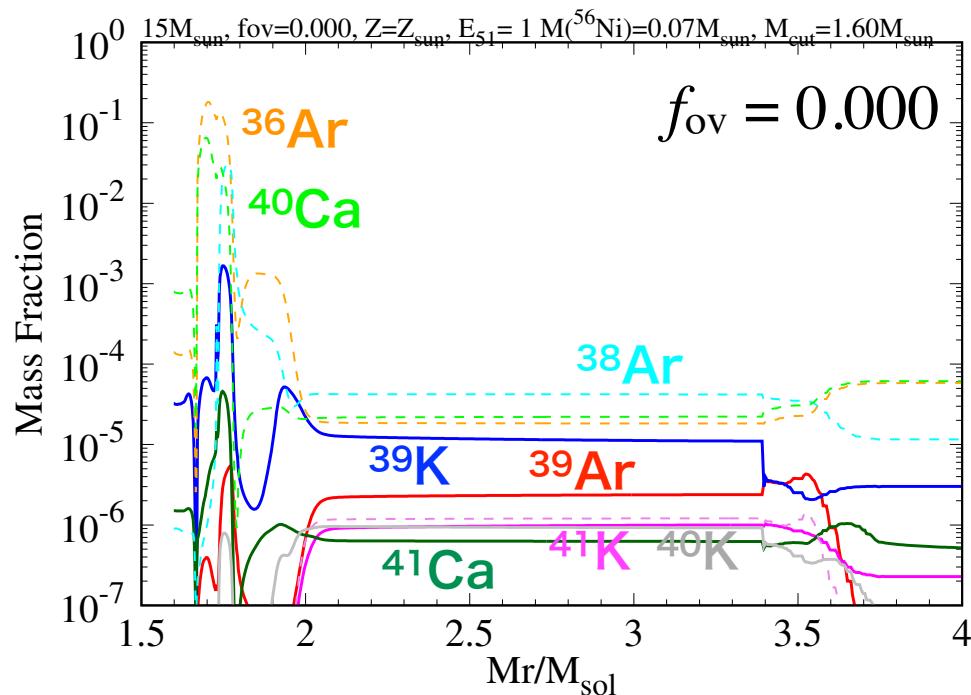


# Progenitorの質量比分布: $15 M_{\odot}$ ( $Z=Z_{\odot}$ )



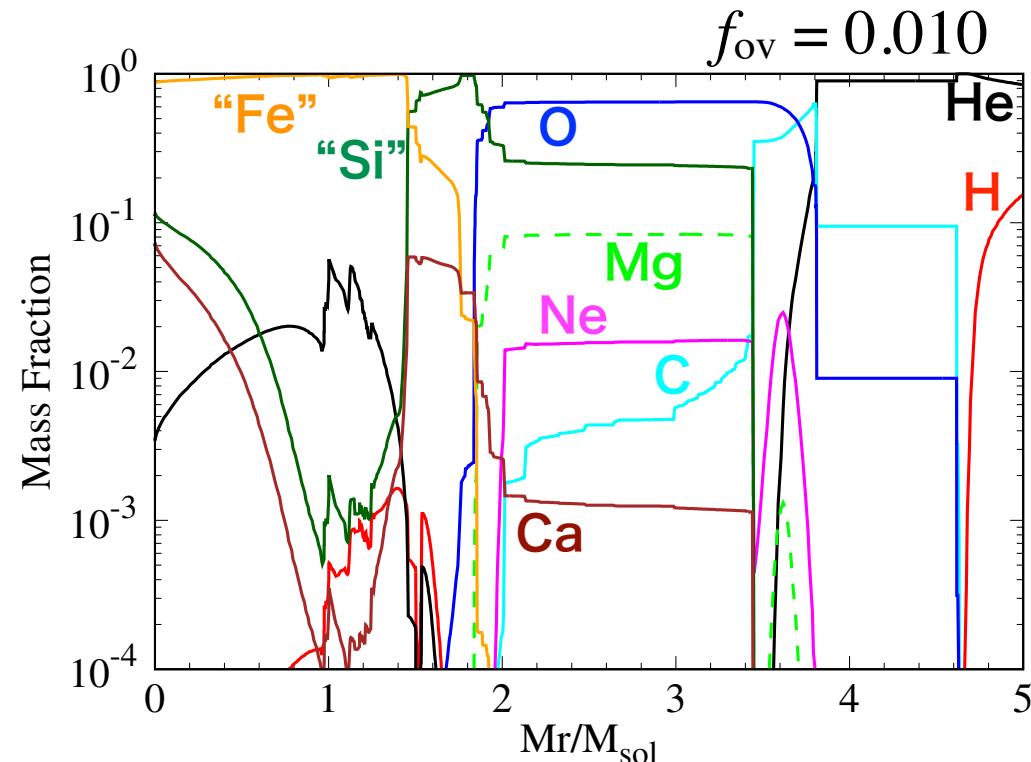
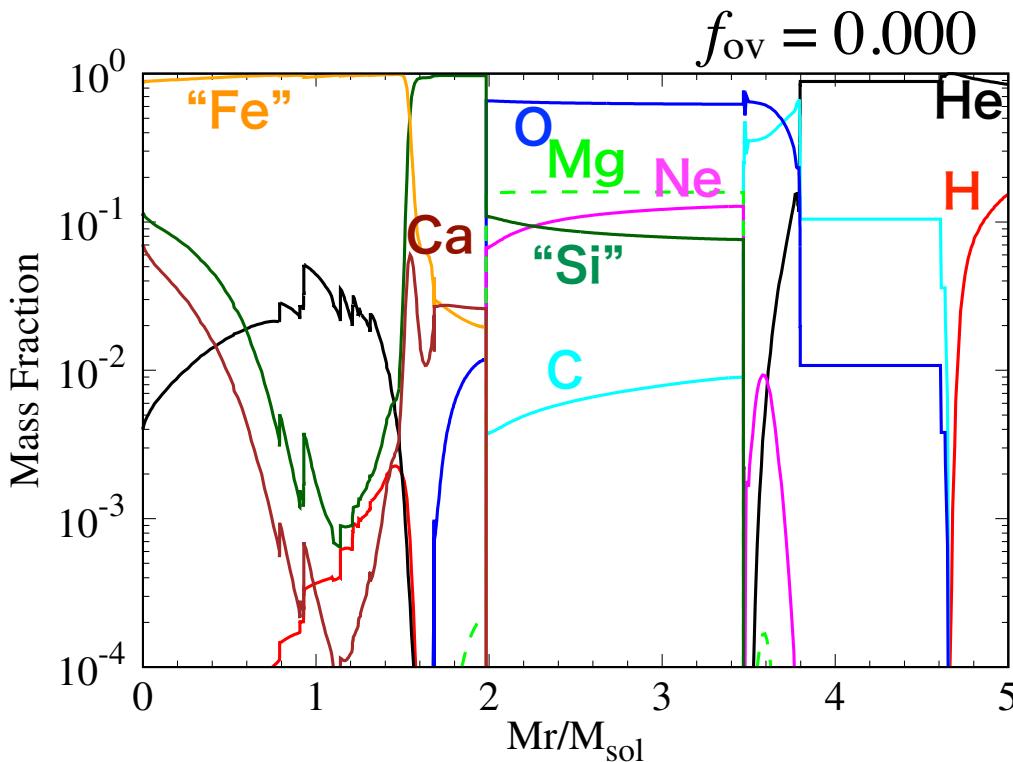
- 大きなovershootの効果
- Si層が薄くなる
- O-rich層の組成  
→ C,Ne,Mgの減少とSi,Sなどの増加  
O-shell燃焼の生成物がO-rich層に流入

# K合成: $15 M_{\odot}$ ( $Z=Z_{\odot}$ )



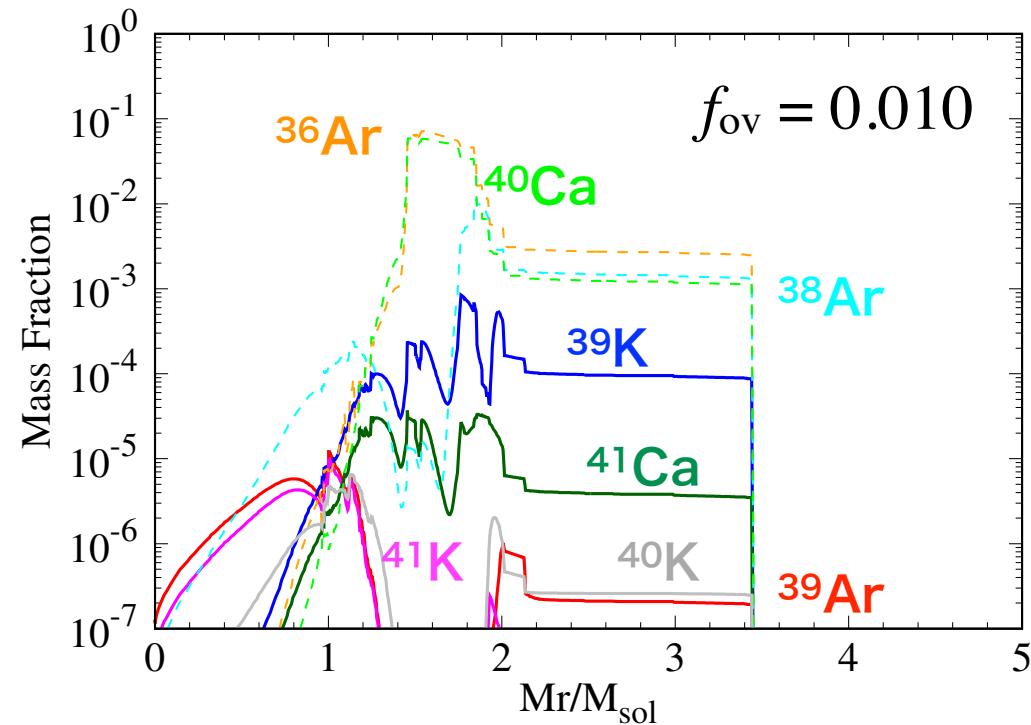
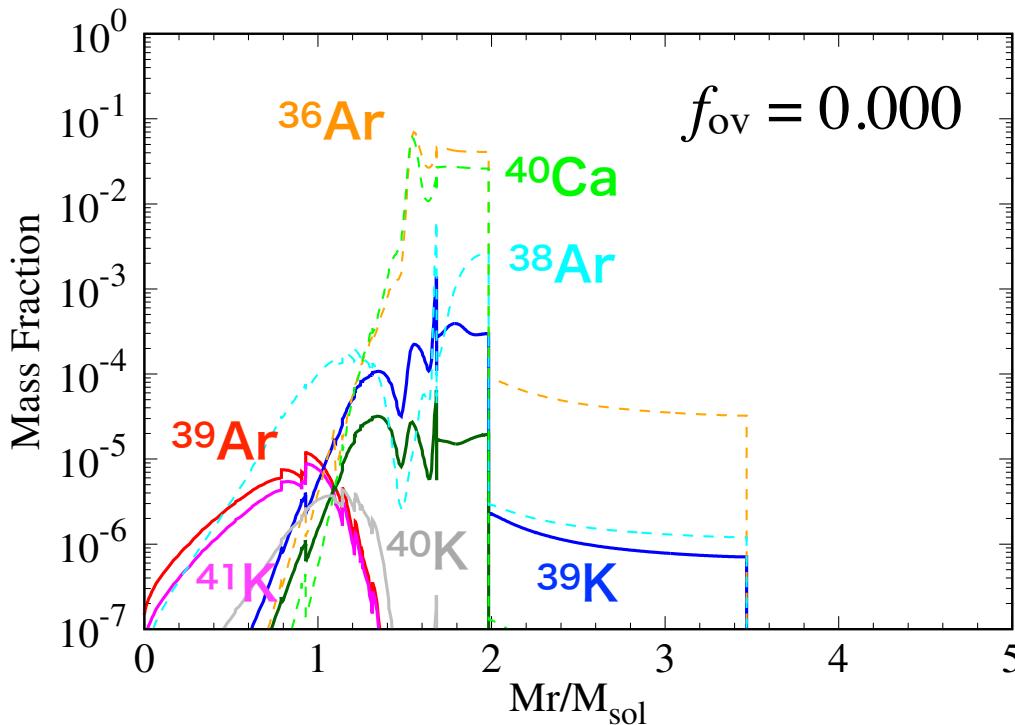
- $f_{\text{ov}} = 0.010$  case
- Kが多く合成される
  - O-shell燃焼により Si-Kが合成
- $f_{\text{ov}}$  依存性
- overshootが大きいと必ずKができるわけではない

# 初代星progenitorの質量比分布: $15 M_{\odot}$ ( $Z=0$ )



- O-rich層の組成  
→ C, Ne, Mgの減少と Si, Sなどの増加
- このモデルでは O/Si層と O/Ne層の間で混合 (dredge out)

# 初代星progenitorでのK合成: $15 M_{\odot}$ ( $Z=0$ )



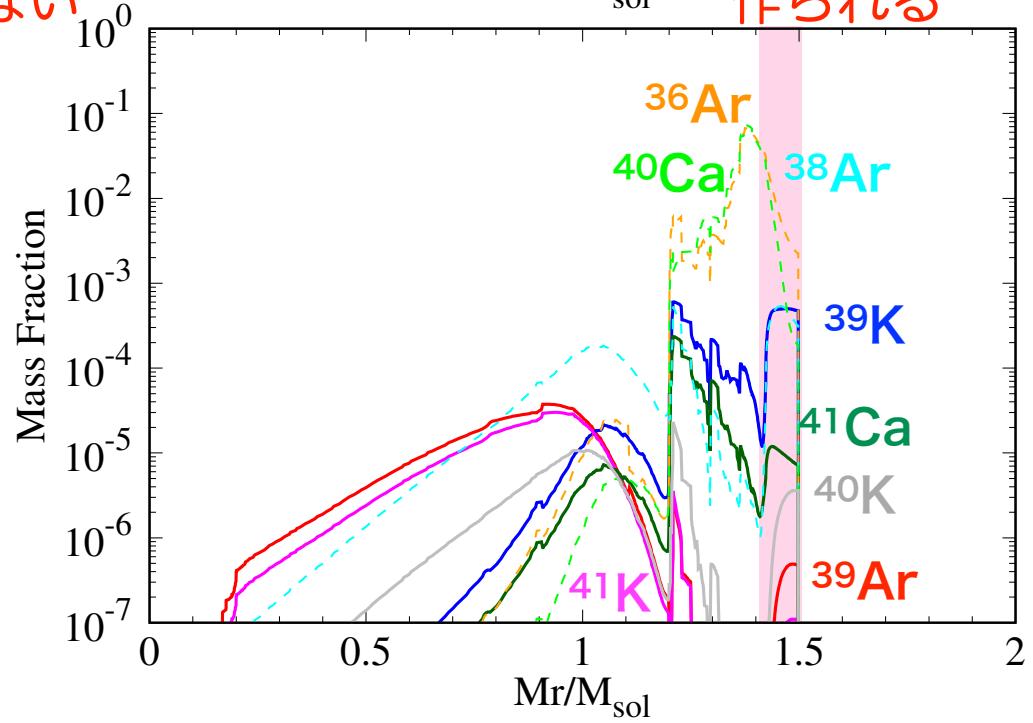
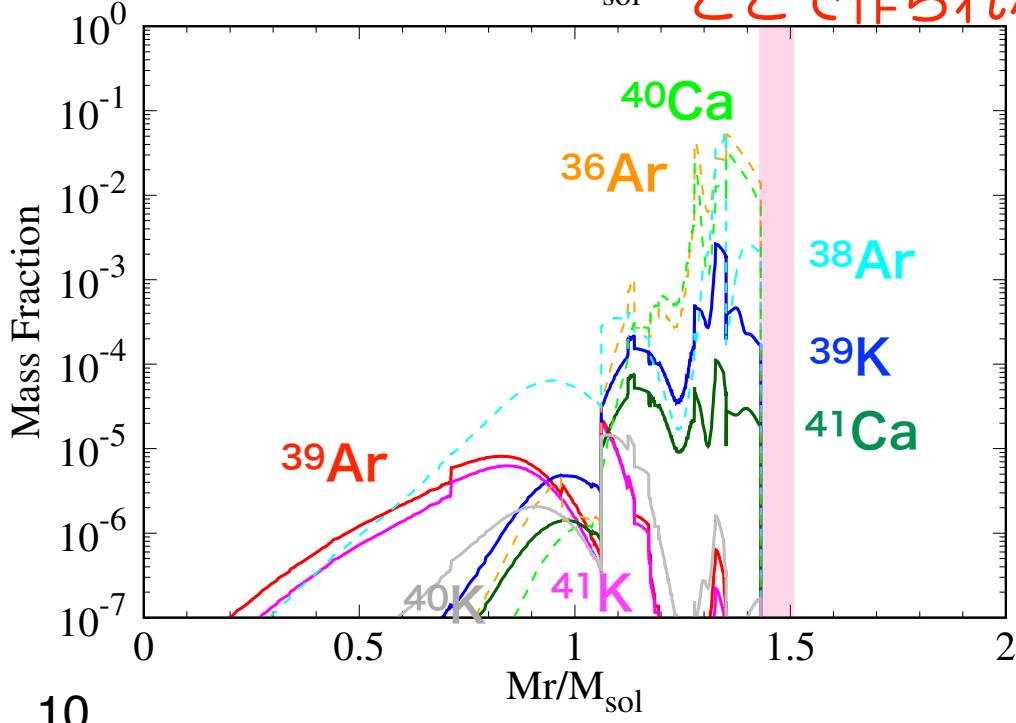
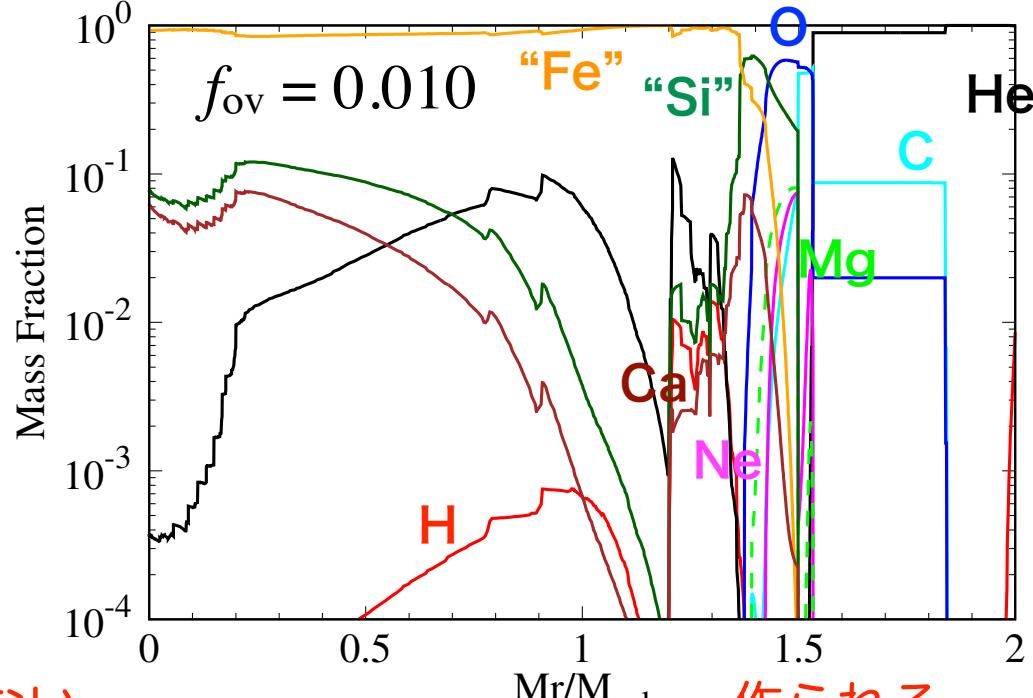
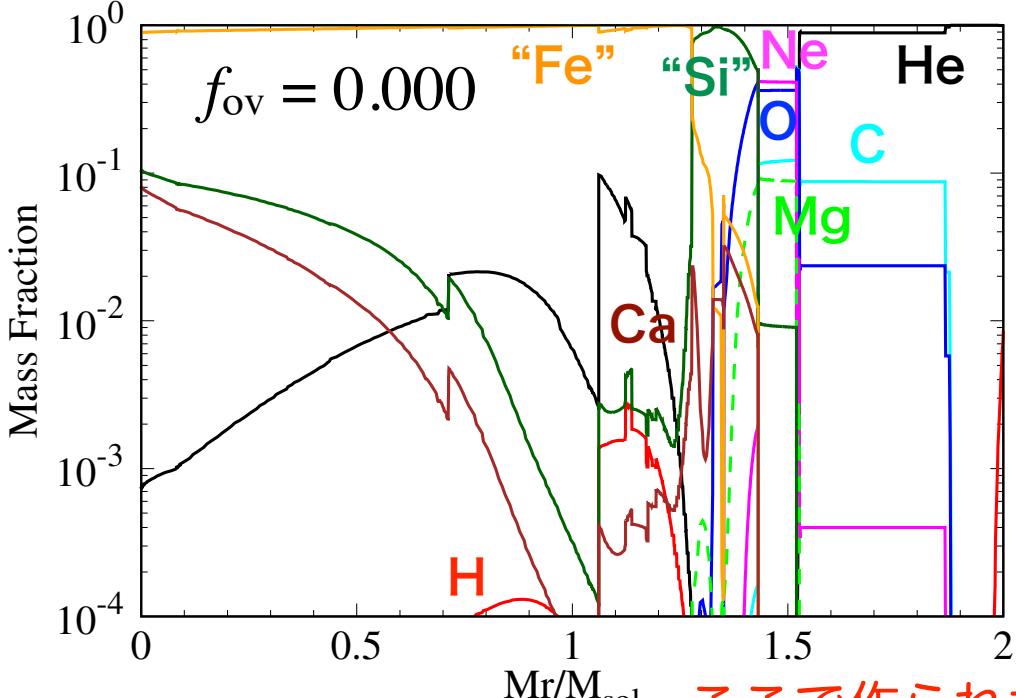
- 傾向は太陽系金属量の場合と同じ

- $f_{\text{ov}} = 0.010$  case

- Kが多く合成される

- O-shell燃焼によりSi-Kが合成

# 軽い初代星progenitorでのK合成: $8M_{\odot}$ ( $Z=0$ )

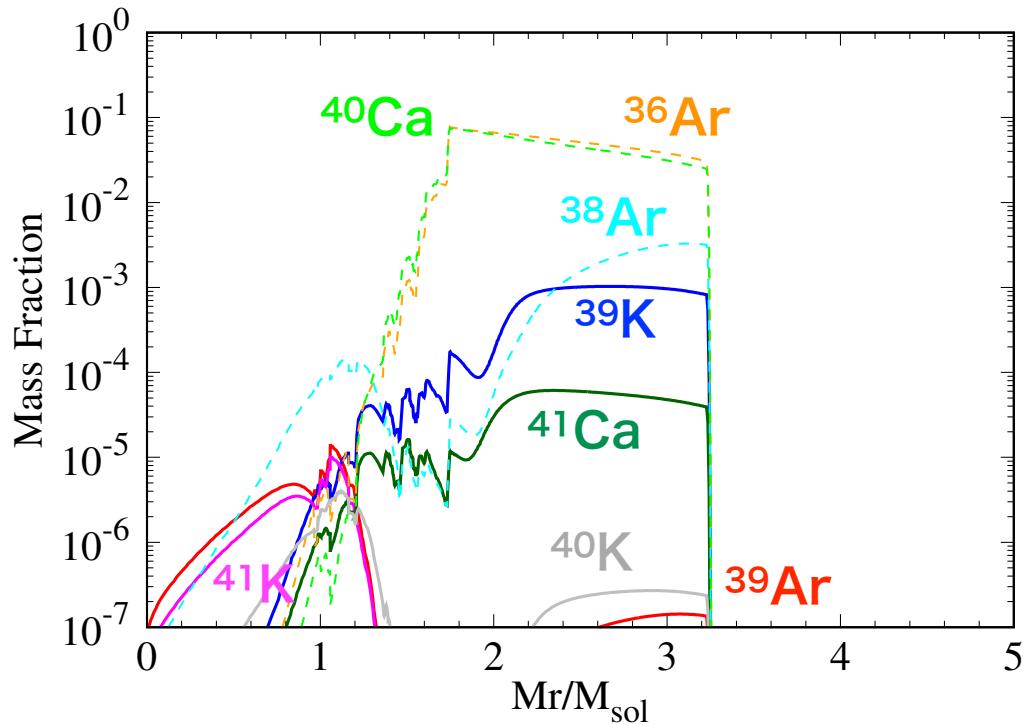
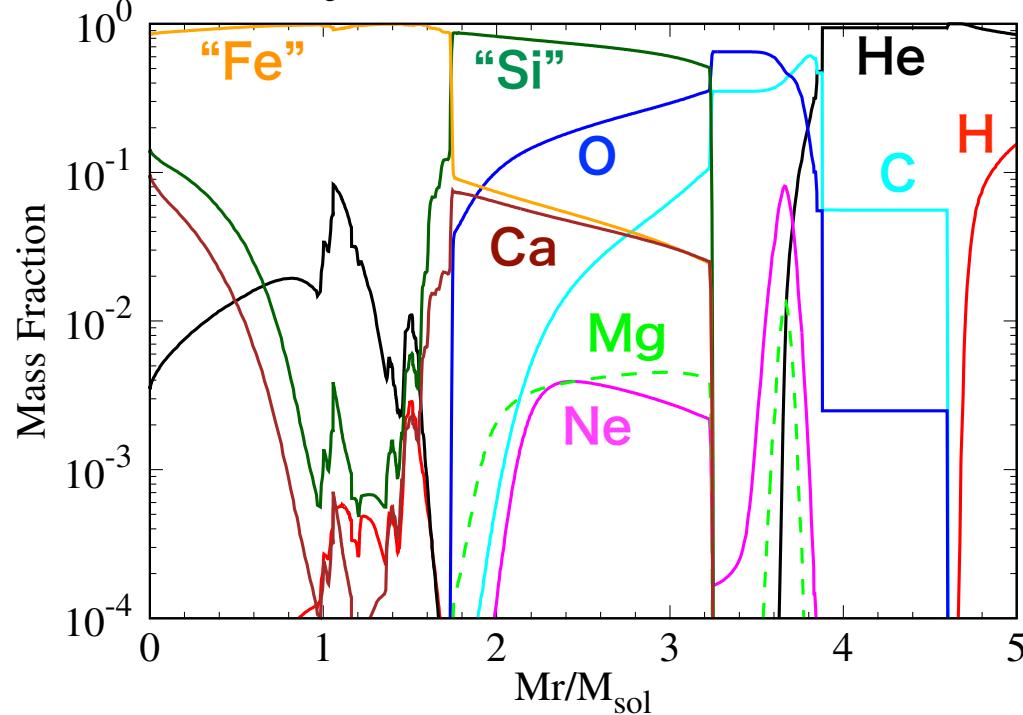


ここで作られない

作られる

# $f_{\text{ov}}$ が大きい場合の中間質量元素過剰問題

$15 M_{\odot}$ ,  $f_{\text{ov}} = 0.030$



- O-shell燃焼が大規模に進行
    - Kが多く合成される
    - O/Ne層全領域がSi/O層になる
- 金属欠乏星組成や銀河化学進化での検証が必要
- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率依存性

# まとめ

大質量星の後期進化における対流層境界での物質混合に影響するovershootの効果に対する中質量元素(Kを含む)の生成量の依存性を調べる

- 初代大質量星：超新星直前段階

O/Ne, O/Si層でのK質量比 $>10^{-4}$  (赤色は中質量元素過剰の可能性)

	8	9	10	12	15	17	20	22	25
0.000	×	×	×	×	×	×	×	×	×
0.002	×	×	×	○	×	×	×	×	×
0.005	×	○	×	○	×	×	×	×	×
0.010	○	×	○	○	○	○	×	×	○
0.030	○	×	○	○	○	○	○	○	×

# 今後の方針

---

- 初代星モデルでの超新星元素合成計算

→ 超新星ejectaの組成比

- 組成比の $f_{\text{ov}}$ 依存性

- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率

de Boer et al. (2018)

Kunz et al. (2002)

(太陽系組成モデル: Caughlan et al. (1988)  $\times 1.2$ )

→ 金属欠乏星の組成との比較

# 大質量星の進化モデル

## HO<sub>n</sub>go Stellar Hydrodynamics Investigator (HOSHI) CODE

(Takahashi et al. 2016, 2018, 2019, Yoshida et al. 2019)

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} - \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} \quad \frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

$$\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} = \min(\nabla_{\text{ad}}, \nabla_{\text{rad}}) \text{ 対流, 輻射} \quad \frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon_{\text{nucl}} - \epsilon_\nu + \epsilon_{\text{grav}}$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial M_r} \left[ (4\pi r^2 \rho)^2 D \left( \frac{\partial X_i}{\partial M_r} \right) \right] + \left( \frac{\partial X_i}{\partial t} \right)_{\text{nucl}}$$

組成変化      対流混合      元素合成

元素合成(ここでは~Brまでの300核種)

$$\left( \frac{\partial X_i}{\partial t} \right)_{\text{nucl}} = -\lambda_i X_i + \sum_j \lambda_j X_j - \rho \sum_j \langle \sigma v \rangle_{i,j} X_i X_j + \rho \sum_{j,k} \langle \sigma v \rangle_{j,k} X_j X_k + \dots$$

$\dot{M}(T_{\text{eff}}, L, [X_{\text{H}}, X_{\text{He}}, Z])$  質量放出率

- 自転を考慮した星の計算も可能