

# New asymptotic giant branch models for a range of metallicities

北海道大学大学院理学院宇宙物理学研究室 修士1年 田染翔平

## 概要

漸近巨星分枝 (AGB) 段階における諸物理量が炭素星形成に与える影響を理解するために、本論文をレビューする。本論文では最新のデータに加え、初めて C/O 比に依存する不透明度 opacity を考慮した  $M = 1.0 \sim 6.0 M_{\odot}$  の AGB 星の恒星モデルを計算した。それぞれの質量には、 $Z = 0.0005 \sim 0.04$  の間の5つの金属量と、それぞれの金属量に対して太陽型と  $\alpha$  元素増強型の金属割合をもった10の化学組成を与えた。これらのモデルは過去のモデルによく一致したのみでなく、過去の post-AGB の計算を補うことが出来た。

## はじめに

漸近巨星分枝 (AGB) は、水素中心核燃焼の段階である主系列を離れ、赤色巨星を経てさらに中心で He も燃え尽きた後の段階である。図1はヘルツシュプルングーラッセル (HR) 図である。HR 図とは横軸表面温度の対数值 ( $\log T_{\text{eff}}$ ) 縦軸光度の対数值 ( $\log L$ ) をとったもので、ある初期質量の星表面の進化経路を示している。He 燃焼が始まってからの青線で囲っている部分を AGB 段階と呼ぶ。このように AGB は大きい光度を持つため population synthesis で AGB は重要である。また、AGB では脈動も観測されている。もう一つ重要なことは星の内部で合成した重元素を放出 (質量放出) することで星間空間の金属量を増やすことである。これもまた population synthesis に重要で、この質量放出は星表面での C/O 比に大きく依存する。

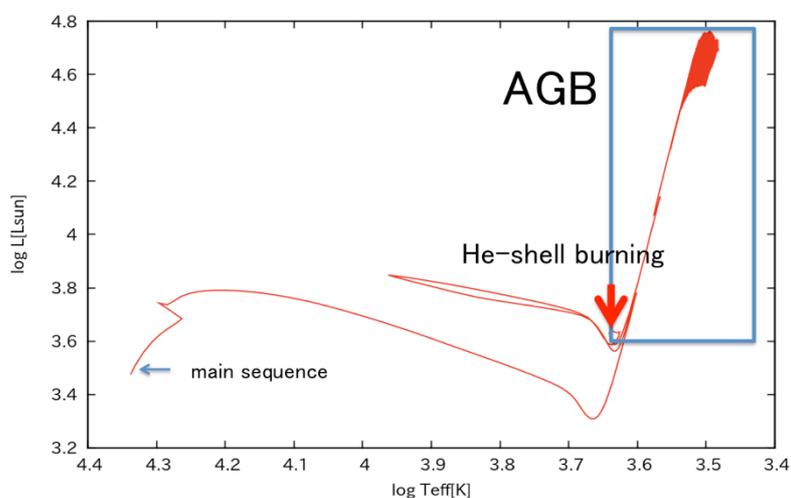


図1. ヘルツシュプルングーラッセル (HR) 図

質量放出はダストが放射圧で飛ばされて起こると考えられている (図2)。星表面のダストの種類によって飛ばされ方が異なるが、その種類は C/O 比によって異なる。したがって、質量放出には C/O 比を考慮する必要がある。もう一つ質量放出に影響があるものは opacity です。opacity は放射エネルギーの吸収しやすさとも言えるため、opacity が上がるとエネルギーを吸収して表面温度が上がり膨張する。すると表面での重力が小さくなるので質量放出が促進される。この opacity に大きく関わるのも、C/O 比である。このように C/O 比は星の膨張に効きくため光度にも影響を与える上、質量放出の形で星間空間の金属量にも影響を与える。

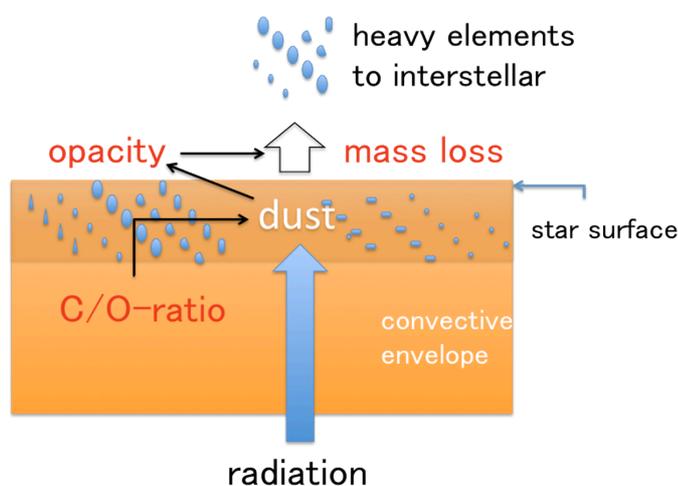


図2. 放射圧による質量放出の模式図

以上のように AGB は (1) 大きい光度を持ち (2) 重元素を放出することから population synthesis にとって重要である。そして、opacity と質量放出は C/O 比に依存している。population synthesis は恒星進化に依存するところが大きいので、より正確な進化を追うためには C/O 比に依存した opacity と質量放出を考慮した計算が必要である。これを動機として、本論文では最新かつ C/O 比に依存した opacity を用いて計算を行い、C/O 比に依存していないモデルとの比較を行った。

最後に、「なぜ AGB か」についてすなわち AGB 特有の現象について述べる。その現象とは、上で述べた重要な C/O 比を変化させる third dredge-up である。図1の潰れている部分を拡大したものが図3である。光度が上下しているが、これは thermal pulse (TP) と呼ばれる不安定な He 殻燃焼によるものである。

この燃焼では莫大なエネルギーが発生する。エネルギーを運ぶには放射と対流という2つの方法があるが、放射で運びきれないエネルギーは対流で運ぶ。TPもこの場合にあたり、燃焼の生成物である炭素と酸素がエネルギーとともに対流によって運ばれる。エネルギーが非常に大きい場合対流は外層まで達する。このとき、炭素とそれより少ない酸素が外層の対流に渡されて表面に運ばれる(図4)。このことを **third dredge-up (TDU)** という。このように星の内部からくみ上げることによって **C/O 比** が上昇する。

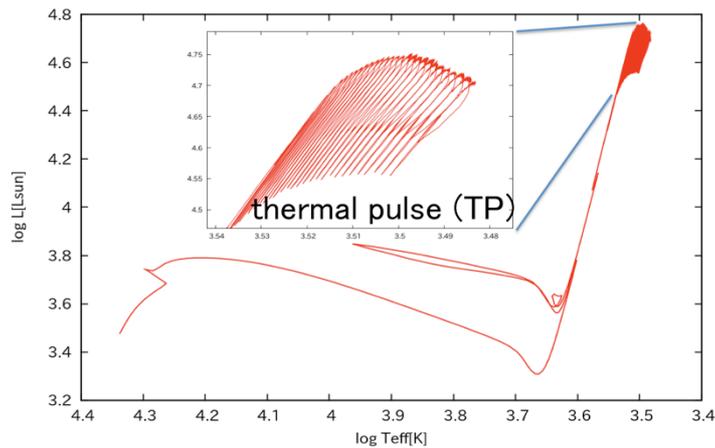


図3. HR 図トでの熱パルス

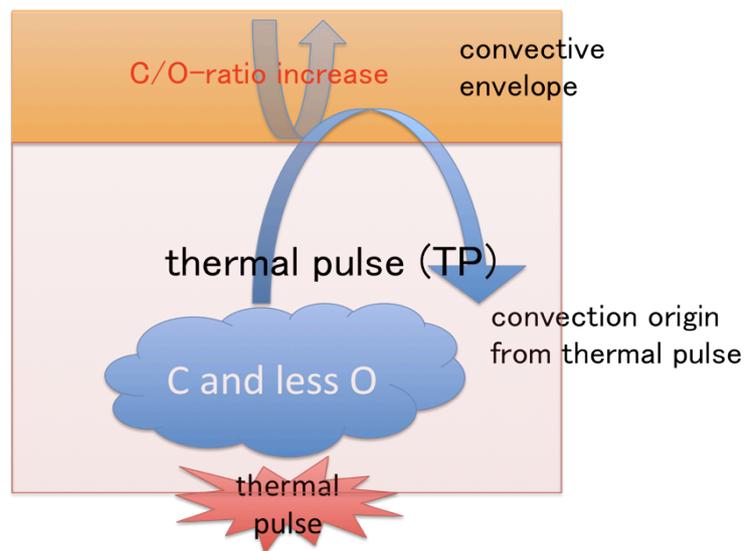


図4. third dredge-up の模式図

## 計算方法

本計算では Garching Stellar Evolution Code(GARSTEC)\*2 を用いた。AGB の質量範囲は  $8 M_{\odot}$  程度以下と言われているが、 $M = 1.0 \sim 6.0 M_{\odot}$  のうちの 1 の質量について計算した。金属量は太陽 ( $Z = 0.02$ ) と大マゼラン雲 ( $Z = 0.008$ )、小マゼラン雲 ( $Z = 0.004$ ) の金属量に加えて超太陽 ( $Z = 0.04$ ) と極端に少ない場合 ( $Z = 0.0005$ ) を計算した (表 1)。それぞれの初期組成は太陽型に加えて、 $\alpha$  元素増強型を用いた。

Initial compositions used for the model calculations.										
Metallicity	Super-solar		Solar		LMC		SMC		Metal poor	
Z	0.04		0.02		0.008		0.004		0.0005	
abundance scale	solar	$\alpha$	solar	$\alpha$	solar	$\alpha$	solar	$\alpha$	solar	$\alpha$

表 1. 初期金属量と組成

C/O 比の変化に寄与する TDU による重元素 (炭素以上の元素) 混入は GARSTEC で起こらないので、overshooting によって混入を起こさせる (図 5)。混入のスキームとして拡散を使います。拡散係数  $D_{ov}$  は

$$D_{ov} = v_0 \cdot H_p(0) \exp\left[\frac{-2z}{f \cdot H_p(0)}\right]$$

のように指数関数的に減衰する。ここで、 $f$  は free overshooting パラメータで混合効率の大きさを表し、 $z$  は放射領域の外側境界からの距離、 $H_p(0)$  は対流不安定領域の境界における圧力スケール高さ、 $v_0$  は対流エレメントの典型的な速さを表す。フリーパラメータ  $f$  はファクター 2 以内の変化ではさほど進化に影響ない (Herwig et al. 1997)。この計算では type PG1159 : post-AGB の abundance パターンから決めた  $f = 1.6$  (Herwig et al. 1999) 一定値をとった。

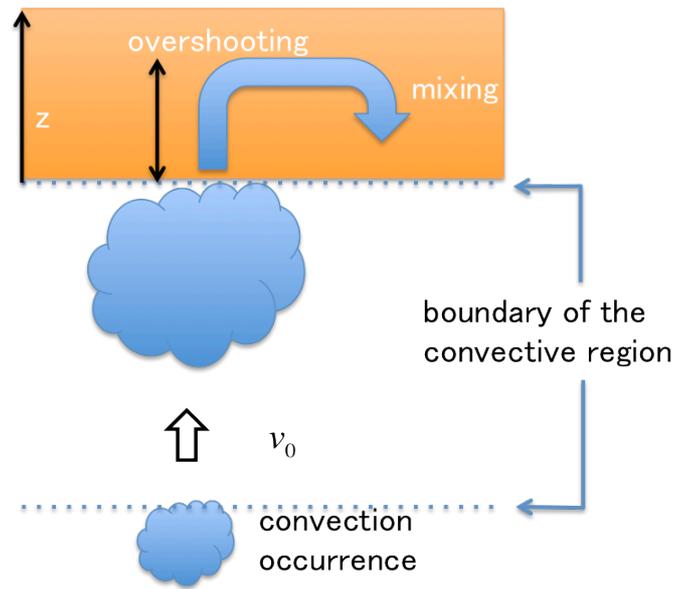


図5. overshooting による混入の模式図

opacity は  $\log T > 3.8$  では原子・イオンを考慮した OPAL (Iglesias & Rogers 1996 : the OPAL-website) の表、それ以下では原子・イオンに加え分子・ダストも考慮した Wichita State University (WSU) の表を用いた。ただし、オリジナルの WSU は C/O 比の変化を考慮していないので、この計算のために C/O 比依存した opacity を作成した。図6は  $X = 0.7, Z = 0.02$  の opacity の温度依存を計算したものである。酸素が多い ( $C/O < 1$ ) ときは  $H_2O$  の opacity が  $\log \leq 3.3$  で効いている。しかし、炭素が増えると酸素は opacity の小さい CO になり、 $H_2O$  が減少するため、全 opacity は小さくなる。CO は結合エネルギーが強いため C/O 比が 1 になるとほぼ全て CO 分子になり、全 opacity も小さくなる。炭素が増加して余るようになると、炭素質のダスト、主に CN を形成し、その opacity が効いてくるため、3.4 あたりで全 opacity は上昇する。このように C/O 比によって opacity が大きく変わることが分かる。

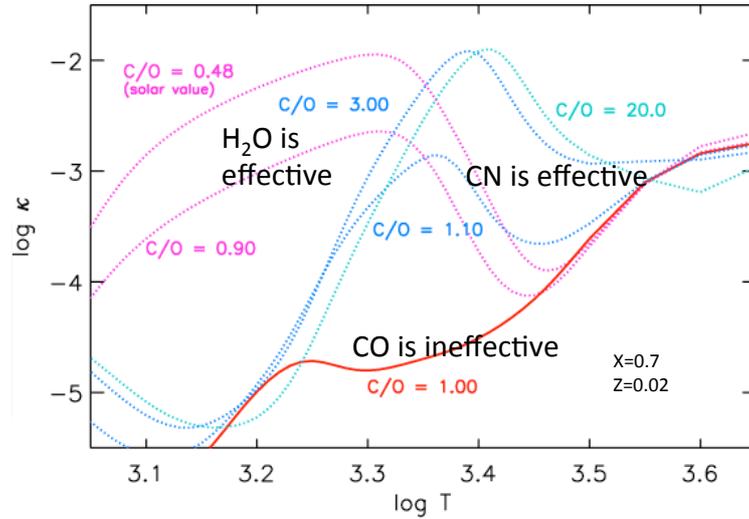


図6 . opacity の C/O 比による変化. 初期金属量は  $Z = 0.02$

質量放出が卓越するのは AGB 段階（本論文では脈動周期  $P > 400$  と定義）である。AGB 段階の質量放出は炭素星 ( $C/O > 1$ ) と酸素星 ( $C/O < 1$ ) に分けて計算した。炭素星は Wachter et al.(2002)、酸素星は van Loon et al.(2005)によるもので、それぞれ次のようになる。

$$\log \dot{M}_{AGB,C} = -4.52 + 2.47 \cdot \log\left(10^{-4} \frac{L}{L_{sun}}\right) - 6.81 \cdot \log\left(\frac{T_{eff}}{2600K}\right) - 1.95 \cdot \log\left(\frac{M}{M_{sun}}\right)$$

$$\log \dot{M}_{AGB,O} = -5.65 + 1.05 \cdot \log\left(10^{-4} \frac{L}{L_{sun}}\right) - 6.3 \cdot \log\left(\frac{T_{eff}}{3500K}\right)$$

AGB の質量放出の式は、光度が大きいほど、そして表面温度が小さいほど質量放出が大きくなることを示している。HR 図（図 1）で AGB は右上の方に位置し、光度が大きく、表面温度は小さい。つまり、AGB 段階では質量放出が大きいため、重元素が効率よく星間空間に放出される。図 7 は  $5M_{\odot}$ ,  $Z=0.02$  の質量放出を計算したもので、横軸は時間を縦軸は質量放出率を表す。酸素星（赤線）と炭素星（青線）の質量放出率の傾向は明らかに異なるため、C/O 比を考慮することが重要である。なお、AGB 以前 ( $P < 400$ ) に用いられた赤色巨星の質量放出率 Reimers (1975) は

$$\log \dot{M}_R = -6.3 \cdot \log \eta_R + 1.5 \cdot \log\left(10^{-4} \frac{L}{L_{sun}}\right) - 2 \cdot \log\left(\frac{T_{eff}}{5000K}\right) - \log\left(\frac{M}{M_{sun}}\right)$$

で AGB 段階後 ( $P < 100$ ) は Reimers と次の Pauldrach et al. (1988) の惑星状星雲の中心星 (central star of planetary nebulae : CSPN) からの放射による質

量放出率

$$\log \dot{M}_{CSPN} = -7.45 + 1.86 \cdot \log \left( 10^{-4} \frac{L}{L_{sun}} \right)$$

のうち大きい方を用いる。

なお、脈動周期  $P$  は次のように定められている(Ostlie & Cox 1986)。

$$\log P_0 = -1.92 - 0.73 \log M + 1.86 \log R$$

$$\log P_1 = -1.60 - 0.51 \log M + 1.59 \log R$$

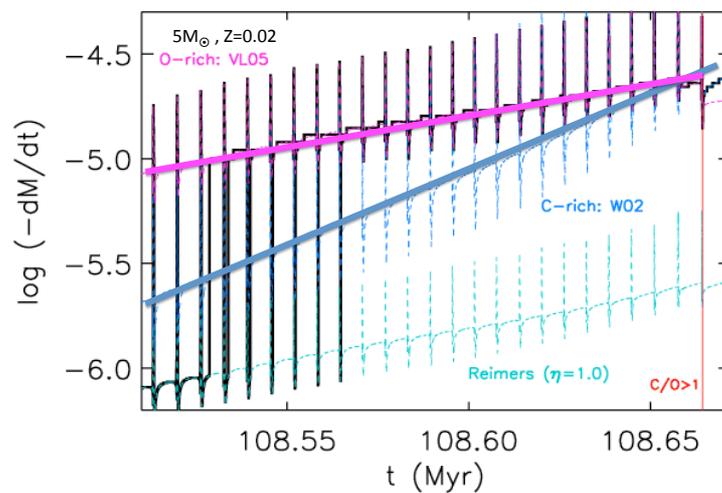


図7. それぞれの質量放出率の時間変化. 初期質量は  $5M_{\odot}$ 、初期金属量は  $Z = 0.02$ .

## 結果と考察

図8はTPの寿命とTPの回数を表すグラフで、横軸初期質量、縦軸TPの寿命と回数である。赤線はKarakas (2003) の計算で青い線はVassiliadis & Wood (1993)の計算、十字はこのモデルの計算である。このモデルには途中で計算が止まったものもあり、それについては残りの外層の質量と質量放出からTPの時間と回数を予測した。その結果が赤い三角である。全体的に時間や回数が一般に他のモデルに比べて低くなっている（とりわけより大きい質量で）。これは質量放出が他のモデルに比べて全体的に大きいためである。TPが少ないということは、表面にくみ上げられる重元素も小さいということで、population synthesisに影響がある。

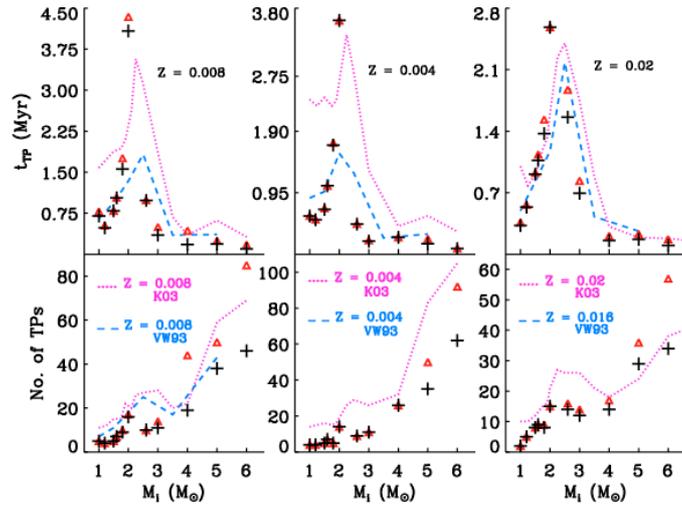


図8. TPの寿命と回数のグラフ

図9は表面温度へのC/O比の影響を表すグラフで、横軸時間、縦軸C/O比と表面温度である。黒線はこのモデルの計算で、青線はMarigo (2002) の計算である。Marigoのモデルでは、 $C/O > 1$ あるいは金属量が0.03を超えたときにのみ分子のopacitiesが考慮され、 $C/O$ 比が1より小さいときは分子のopacityは考慮されていない点がWSUとは異なる。赤い矢印のところで $T_{\text{eff}}$ が急に減少しているのは、金属量が0.03を超えたので、分子のopacityが導入されたことを示す。一方WSUでは、 $C/O \sim 1$ を超えても表面温度は滑らかに減少しています。それからC/O比が益々上昇していくと、opacitiesが上昇するので、 $T_{\text{eff}}$ の減少が目立つ。このようにopacityのC/O比依存性を考慮することによって表面温度にも影響を与えるので、C/O比はpopulation synthesisに影響を与える。

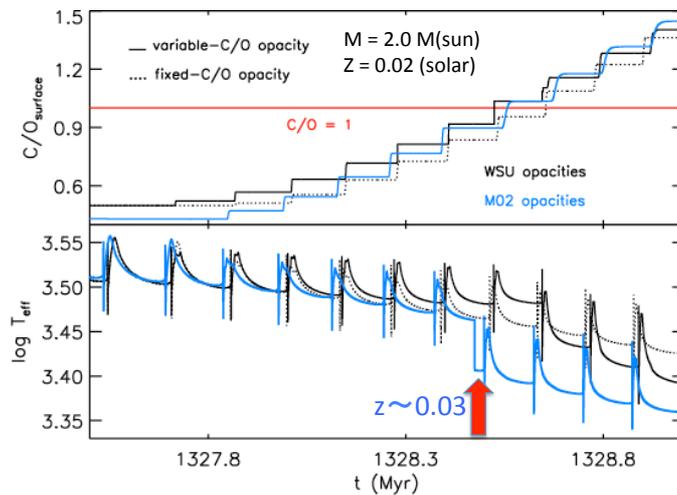


図9. 表面温度へのC/O比の影響

## まとめ

opacity と質量放出に C/O 比依存性を考慮した AGB の計算を行った。その結果 C/O 比は恒星進化、したがって population synthesis に多角的に影響があることがわかった。

C/O 比の重要性がわかったところで、わたしはどの初期金属量と初期質量範囲で C/O 比が 1 より大きくなるかどうか、つまり炭素星になるかどうかについて MESA コードを用いて研究しようと考えている。

## 謝辞

The authors thank the Yukawa Institute for Theoretical Physics at Kyoto University, where this work was initiated during the YITP-W-12-08 on "Summer School on Astronomy & Astrophysics 2012".

## 参照

- Herwig, F., Bloeker, T., Schönberner, D., et al. 1997, A&A, 324, L81
- Herwig, F., Bloeker, T., Langer, N., et al. 1999, A&A, 349, L5
- Iglesias, C., & Rogers, F. 1996, ApJ, 464, 943
- Marigo, P. 2002, A&A, 387, 507
- Ostlie, D. A., & Cox, A. N. 1986, ApJ, 311, 864
- Pauldrach, A., Puls, J., Kudritzki, R.-P., Mendez, R., & Heap, S. 1988, A&A, 207, 123
- Reimers, D. 1975, Mem. Soc. Roy. Sci. Liège, 8, 369
- van Loon, J., Cioni, M.-R., Zijlstra, A., et al. 2005, A&A, 438, 273
- Wachter, A., Schröder, K.-P., Winters, J., Arndt, T., & Sedlmayr, E. 2002, A&A, 384, 452
- Weiss, A., & Ferguson, J. W. 2009 A&A, 508, 1343
- Weiss, A., & Schlattl, H. 2008, Ap&SS, 316, 99