

## Betelgeuse の放射分布について

加藤 賢一（星学館）

### 概 要

#### ■大気パラメータ

S. Alexeeva らが 2012 年と 2020 年に求めた Betelgeuse の大気パラメータをとりまとめている (Alexeeva et al. 2021)。それを見ると、

$$\begin{aligned} (T_{\text{eff}}, \log g, [\text{Fe}/\text{H}]) = & (3,632\text{K}, 0.11, 0.07), \\ & (3,476\text{K}, 0.22, 0.12), \\ & (3,534\text{K}, 0.25, 0.06), \\ & (3,611\text{K}, 0.17, 0.12), \\ & (3,646\text{K}, 0.24, 0.07) \end{aligned}$$

で、ミクロ乱流速度はいずれも 3.0 km/s となっている。平常光度期は 3,640K 前後で、減光期に 160K ほど下がったという結果になったと言う。単純に上の 5 データを平均すると  $(3,580\text{K} \pm 70\text{K}, 0.20 \pm 0.06, 0.09 \pm 0.03)$  となる。

そこで、放射分布を求める際の初期値として

$$(T_{\text{eff}}, \log g, [\text{Fe}/\text{H}]) = (3,600\text{K}, +0.20, +0.09)$$

を採用する。

ステファン・ボルツマンの法則の  $L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$  と重力加速度  $g = GM/R^2$  から Betelgeuse の太陽に対する光度の比  $L_*/L_s$ 、半径の比  $R_*/R_s$  との関係を求めることを考える。そのためには質量が欲しいが、直接観測から求める手段がなく、推定することになるが、Alexeeva et al. (2021) によれば太陽の 10~20 倍としている。Betelgeuse のスペクトル型から推定した値として太陽の 13 倍という値がある (Lang, 1992)。そこで、太陽の 10 倍と 20 倍の場合を想定することにすると以下ようになる。

#### ■ ステファン・ボルツマンの法則が成立すると仮定した場合の大気構造

ステファン・ボルツマンの法則の  $L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$  と重力加速度  $g = GM/R^2$  から、s で太陽、\* で対象となる恒星を表すと

$$\begin{aligned} L_*/L_s &= (R_*/R_s)^2 (T_*/T_s)^4 \\ g_*/g_s &= (M_*/M_s)(R_*/R_s)^{-2}, \text{ 故に } (R_*/R_s)^2 = (M_*/M_s)(g_*/g_s)^{-1} \end{aligned}$$

##### <太陽の 10 倍の場合>

$M_*/M_s = 10$ 、太陽の値  $\log(g_s) = 4.44$ 、ベテルギウスの値  $\log(g_*) = 0.20$  から

$$\begin{aligned} R_*/R_s &= 420, \\ L_*/L_s &= 26200 \end{aligned}$$

となる。

##### <太陽の 15 倍の場合>

$$\begin{aligned} R_*/R_s &= 511 \\ L_*/L_s &= 39300 \end{aligned}$$

##### <太陽の 20 倍の場合>

$M_*/M_s = 20$ 、 $\log(g_*/g_s) = -4.24$  から

$$R_*/R_s = 590$$

$$L_*/L_S = 52,400$$

である。

### <L-atlas および s-atlas による大気モデル>

大気パラメータとして  $(T_{\text{eff}}, \log g, [\text{Fe}/\text{H}]) = (3,600\text{K}, +0.20, +0.09)$  を採用して L-atlas12 により、また上記3種類のパラメータを採用して球状大気モデルを計算する s-atlas12 により大気モデルを求めてみた。

結果は図1のとおりで、rhox-temperature 関係はほぼ同じで、差異を認めることはできない。つまり、黒体放射を仮定すると、質量による光学的に見た場合の大気構造に違いはないと言える。もちろん、光度、半径には大きな違いがあるので幾何学的には大いに異なっている。

また、図2には放射分布を示したおいた。微妙な差異が見られる。ただし、s-atlas モデルに  $\Delta m_V = +0.05, +0.08$  の補正を施せば3者は完全に重なるので、色指数には差がなく、それで区別することはできない。

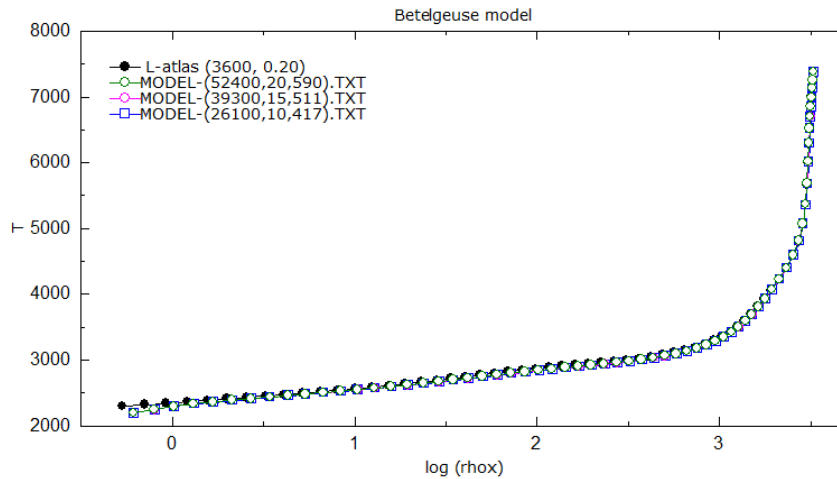


図1. 2モデルが示す深さ (rhox) 方向の温度分布  
ステファン・ボルツマンの法則が成立すると仮定

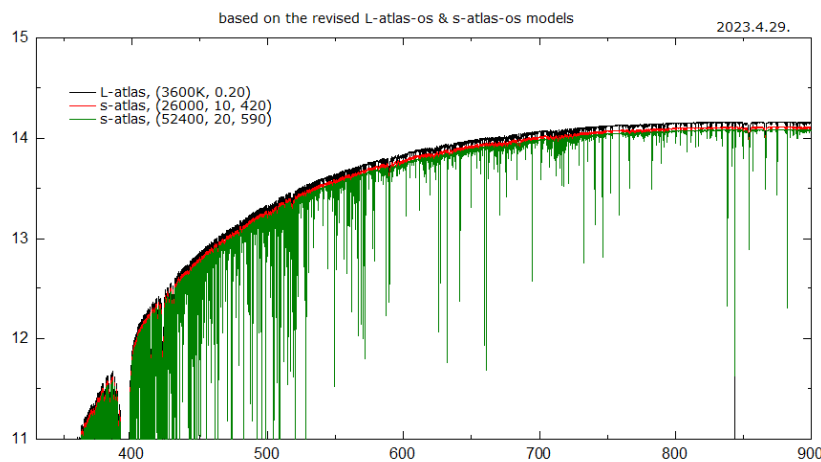


図2. 2モデルが示す放射分布  
ステファン・ボルツマンの法則が成立すると仮定

### ■Wikipedia の大気パラメータを採用した場合

$$L_*/L_S = 126,000 + 83,000 - 50,000, \quad 90,000 \sim 150,000$$

$$R_*/R_S = 764 + 116 - 62$$

$$M_*/M_S = 16.5 - 19$$

$$T_*(\text{eff}) = 3,600\text{K}$$

$$\log g = -0.5$$

### <L-atlas12による大気モデル>

Wikiに従い  $(T_{\text{eff}}, \log g) = (3600\text{K}, -0.5)$  として L-atlas にて計算。

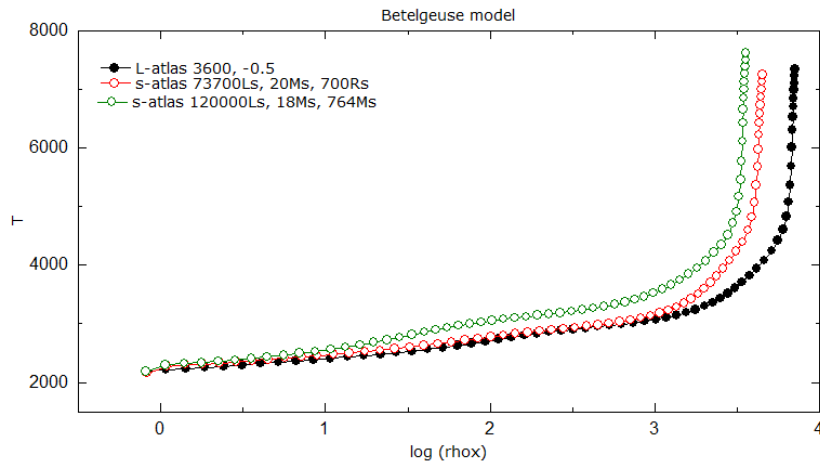


図3. L-atlas モデルと s-atlas モデルによる深さ-温度関係

Wikipediaの大気パラメータを採用した場合

### <s-tlas12による大気モデル>

上記の値のほぼ平均として以下のパラメータを採用する。

$$(L_*/L_S, R_*/R_S, M_*/M_S) = (120,000, 764, 18)。$$

$R_*/R_S$ と $M_*/M_S$ が与えられているから $\log g = -0.07$ と求まり、光度からは有効温度  $T_{\text{eff}}$  が 3890K となる。つまり、これに対応する L-atlas モデルの大気パラメータは  $(T_{\text{eff}}, \log g) = (3890\text{K}, -0.07)$  である。

### <Rho\_x-T-relation>

深さ  $Rho_x$  に対する温度の関係は図3のとおり。

$(T_{\text{eff}}, \log g) = (3600\text{K}, -0.5)$  と  $(L_*/L_S, R_*/R_S, M_*/M_S) = (120,000, 764, 18)$  はステファン・ボルツマンの法則で結ばれた関係ではないから、両者に差異が見られるのは期待どおりである。

### <フラックス分布>

表面からの放射分布は図4、図5のとおりである。

$(L_*/L_S, R_*/R_S, M_*/M_S) = (120,000, 764, 18)$  の方が  $(T_{\text{eff}}, \log g) = (3600\text{K}, -0.5)$  の場合より放射量は多く、また青い傾向が見えている。

図5には Valdes et al. (2004)による KPNO の 0.9m 鏡によるエシェル分光器観測の結果  $\text{TiO}$  を合わせて示した。見てのとおりで、観測との整合性が良いとは言えない。特に特徴的な  $\text{TiO}$  による深い吸収バンドが観測には見られるが、モデルの方には出ていないのは大きな齟齬と言わなければならない。

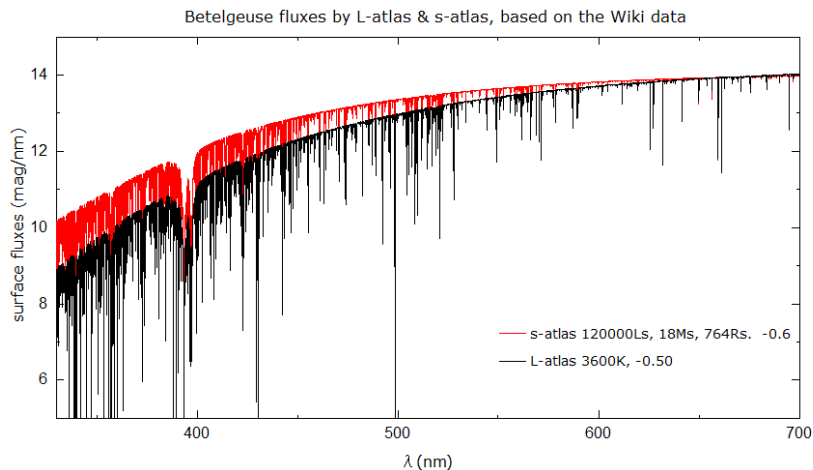


図4. L-atlas モデル、s-atlas モデルの表面放射分布

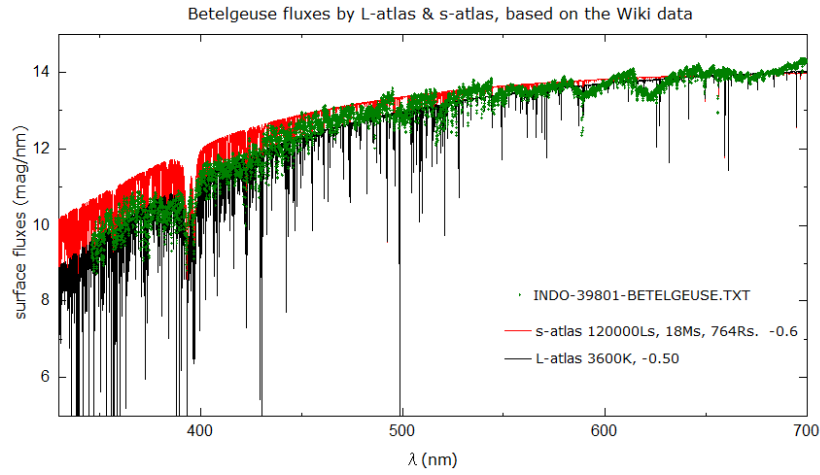


図5. 観測されたスペクトルとの比較

Wikipediaの大気パラメータを採用した場合

### ■有効温度とフラックスの関係

これまで見てきたように、モデルが示す放射分布は観測されたスペクトルと相当の差がある。特に TiO バンド線が観測では顕著に見られるが、モデル・フラックスにはなく、採用された有効温度が高かったことを示唆している。

そこで、有効温度によるモデル・フラックスの違いを計算してみた。結果は図6のとおりで、観測は $T_{\text{eff}} \leq 3500\text{K}$ を示している。

indo スペクトルと ATLAS12 モデル大気の結果を比較すると $T_{\text{eff}} = 3400\text{K}$  が適切な有効温度と思われる。

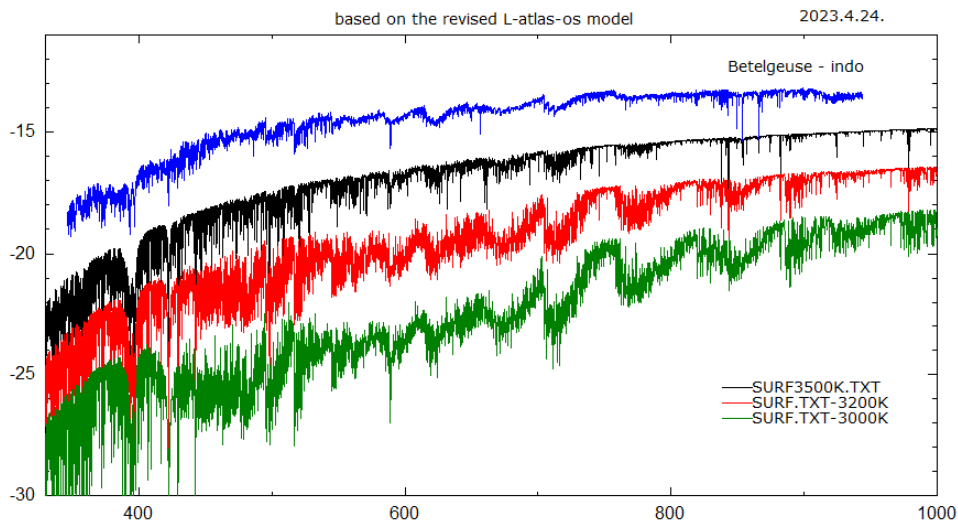


図6. 有効温度の違いによる放射分布の様相

L-atlas12 で計算、 $\log g = 0.00$  を採用

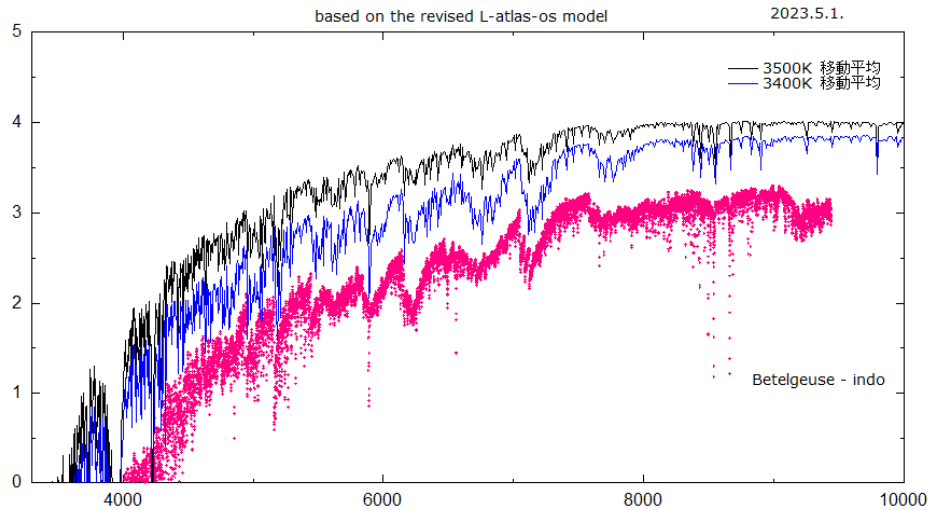


図7. indo スペクトルとモデル放射分布（等級）の比較

L-atlas12 で計算、 $\log g = 0.00$  を採用

### ■その他のスペクトル観測との比較

British Astronomical Association のホームページにある Betelgeuse の分光観測データベース (<https://britastro.org/specdb/>) からいくつかを採録した。その結果のうち2例を図8に掲げた。indo と良く似たスペクトルで、同様に  $T_{\text{eff}} = 3400\text{K}$  が適切な有効温度と思われる。

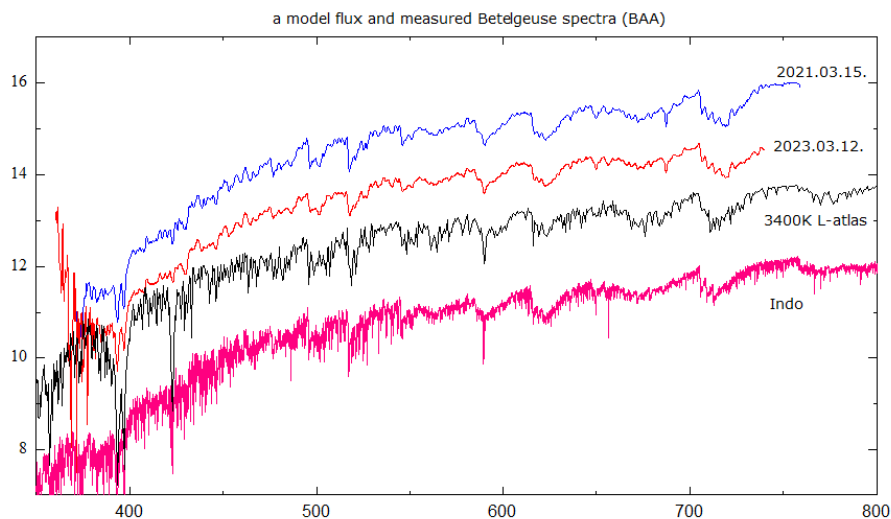


図8. 上の2つはBAAの観測、3400KのL-atlasモデル放射（等級）との比較

### ■Tio bands

深い吸収が主に TiO によることは L-atlas で TiO を抜いて計算してみればわかる。

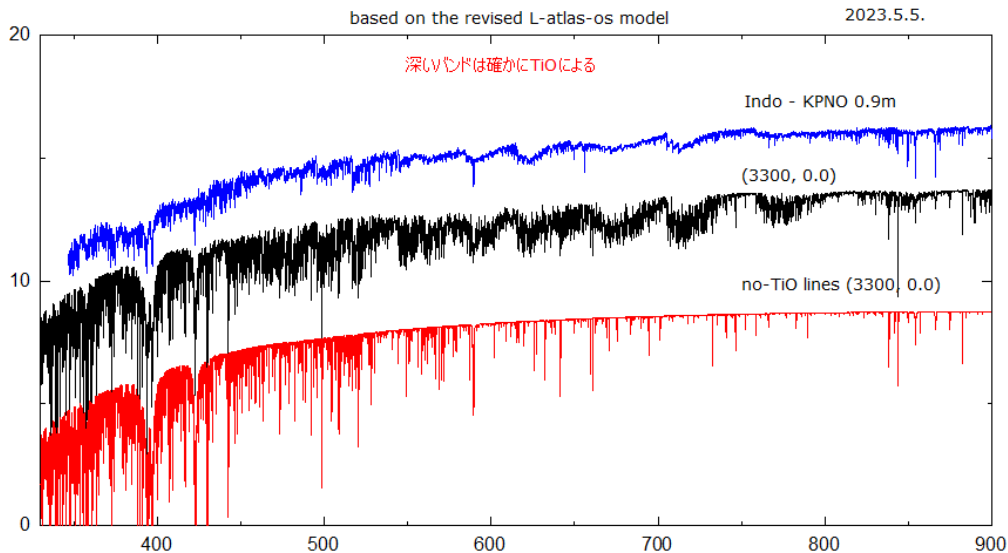


図9. L-atlas で TiO を抜いて計算した場合との比較

### ■ TiO バンドの $\log g$ への依存性

$T_{\text{eff}} = 3600\text{K}$  と設定し、 $\log g = 0.0$  と  $\log g = 1.0$  とした場合の表面放射分布を求めた結果が図 10 である。縦軸はこれまでの図と異なり、等級ではなく放射量の絶対値をとっている。微妙ではあるが、 $\log g = 1.0$  の場合の方が  $\log g = 0.0$  の場合より TiO バンドによる吸収が深くなっている。観測との比較は難しいが、ここだけに限定すれば  $\log g = 0.0$  の方が観測結果に近いようである。

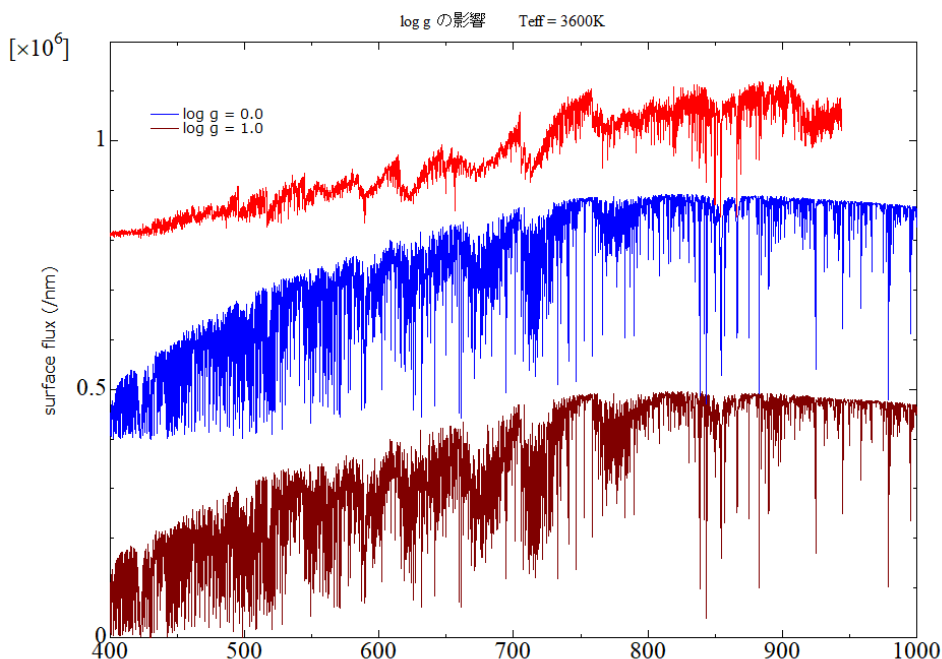


図 10. 放射分布の表面重力加速度への依存性

### ■ スペクトル合成法による TiO の効果

2023.5.7.現在、残念ながら深い吸収バンドを再現できていない。図 10。せいぜい 10% 程度の効果で、とても 40% にも及ぶと思われる吸収を再現できていない。

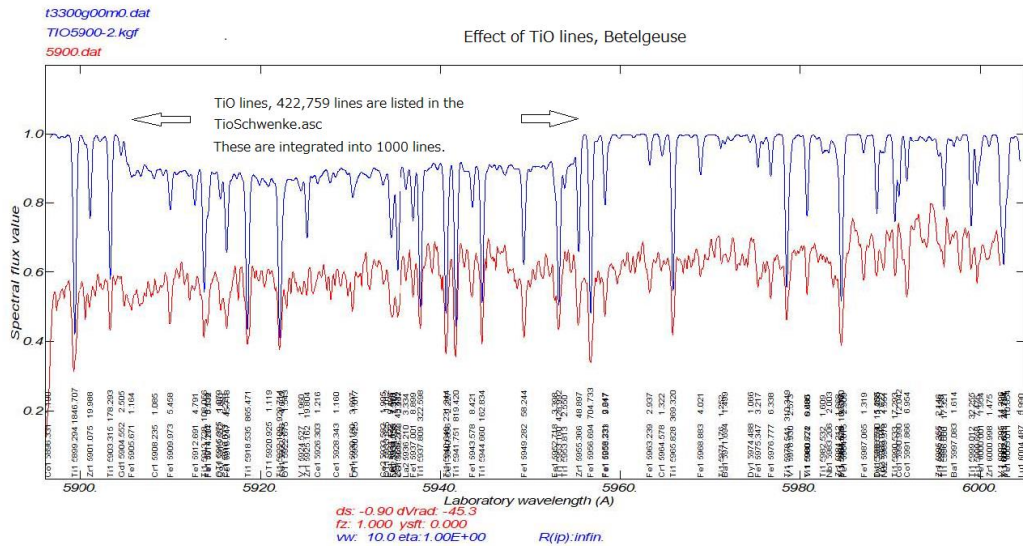
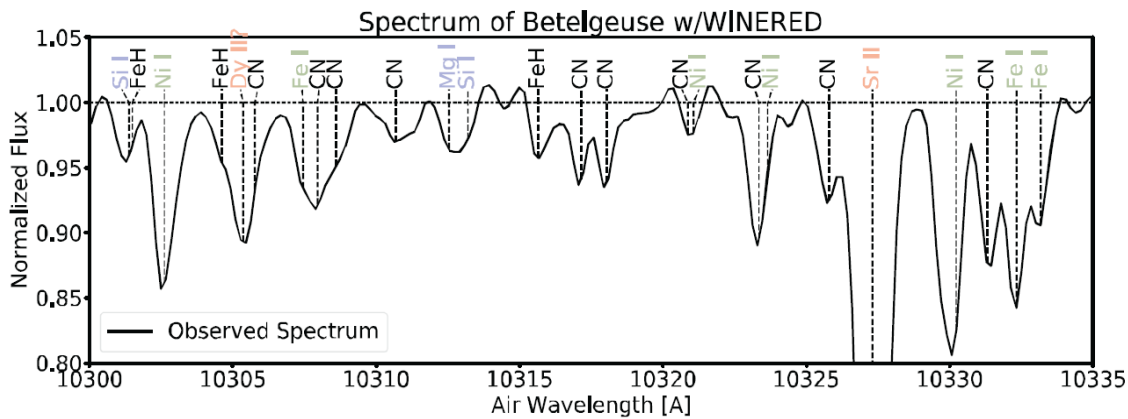


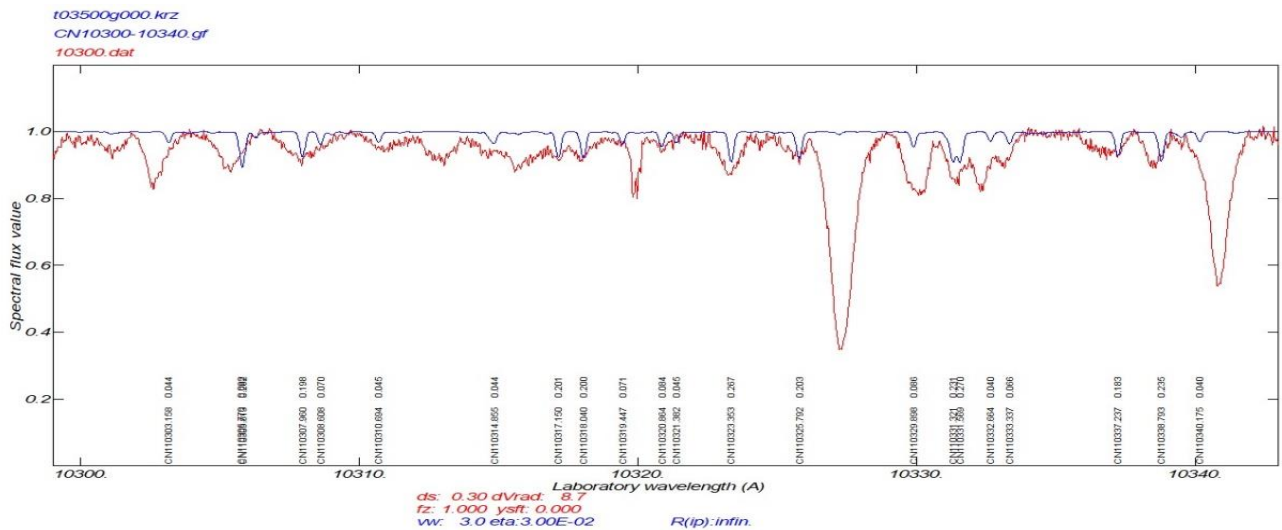
図 11. TiO 線の効果。Teff=3300K, log g = 0.0

この 0.45Å の間に 42 万余の TiO 線が登録されている。これらをそのままスペクトル合成に使うことはできないので、波長域が 0.05Å 内で合成し、1000 本に集約して計算。

### ■ CN 分子線



上の図は谷口大輔さん（2020、第 25 回天体スペクトル研究会集録、p.46）が示されたベテルギウスの近赤外部のスペクトルと同定された元素類である。観測は京都産業大学の近赤外線高分散分光器 WINERED によって行われた。この 35Å という狭い波長幅の中に多くの CN 線といくつかの FeH 線が同定されている。



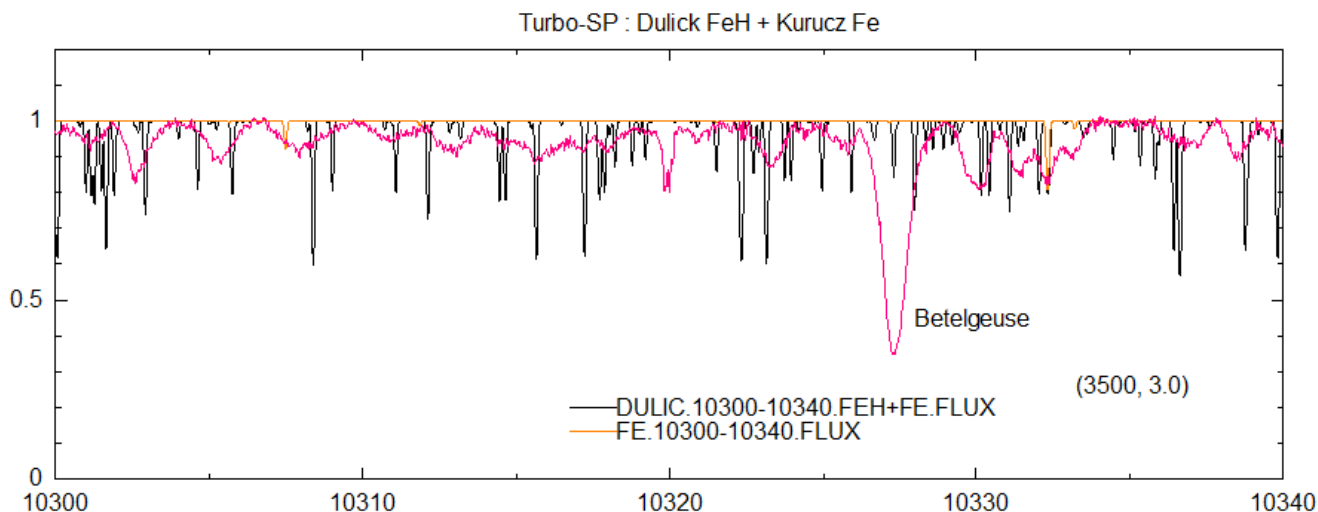
上は Kurucz の CN 線データの AX シリーズから採録した線データを用いて spshow によりスペクトル合成を行った結果で、観測されたスペクトルは CFHT の分光器 ESPaDOnS による。

谷口さんの同定が極めて妥当なものであることが確認できた。

なお、CN の扱いについては竹田洋一さんにも教えて戴いた。感謝！

## ■ FeH 線

FeH 線を取り入れたスペクトル合成計算を spshow はサポートしていない。そこで、それが計算できる Plez (1998, A&A 330, 1109) の Turbo-Spectrum 2019 version を用いて行った。



上がその結果だが、Turbo-Spectrum にはスペクトル線を広げるプロセスが入っていないので、観測との比較が容易ではない。それはさておき、谷口さんの同定に比べて明らかに FeH は卓越している。

基本の線データとして、Plez、Kurucz 共に

Dulick, M., Bauschlicher, C.W., Burrows, A., Sharp, C.M., Ram, R.S., Bernath, P. 2003. ApJ 594, 651-663.

を採用している。



■観測されたスペクトルとモデル・スペクトルの比較

