

スポラディックE層内の 電子温度変化に関する 数値解析的考察

坂本優美花[1], 阿部琢美[2], 三宅亙[1]
東海大学大学院工学研究科航空宇宙学専攻[1]
宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所[2]

背景・目的

- ✳ スポラディックE層の観測・研究には長い歴史があり、その生成メカニズムやそのイオン組成などが議論されてきた。しかし、過去にはスポラディックE層での十分に信頼性のある電子温度観測データが数えるほどしか存在しなかったため、内部での熱エネルギー収支に関する議論は非常に少ない。
- ✳ 平成26年8月17日19時10分00秒(日本標準時)に宇宙航空開発機構内之浦宇宙空間観測所より観測ロケットS-520-29号機が打ち上げられた。
- ✳ スポラディックE層を含む一次元空間で電子、イオン、中性粒子を与え、エネルギー方程式を使用して密度が変化した場合の電子温度分布についての数値計算的検討を行った。更に、イオン密度や電場等のパラメータを変化させ、どのような条件で電子温度の変化量が大きくなるかを検討した。本発表では、これらの検討結果についての報告を行う。

S-520-29号機観測ロケット実験

- 平成26年8月17日19時10分00秒に宇宙航空開発機構内之浦宇宙空間観測所より観測ロケットS-520-29号機が打ち上げられた。ロケットの飛翔並びに搭載した実験装置の動作は正常に行われ、内之浦南東海上に落下した。



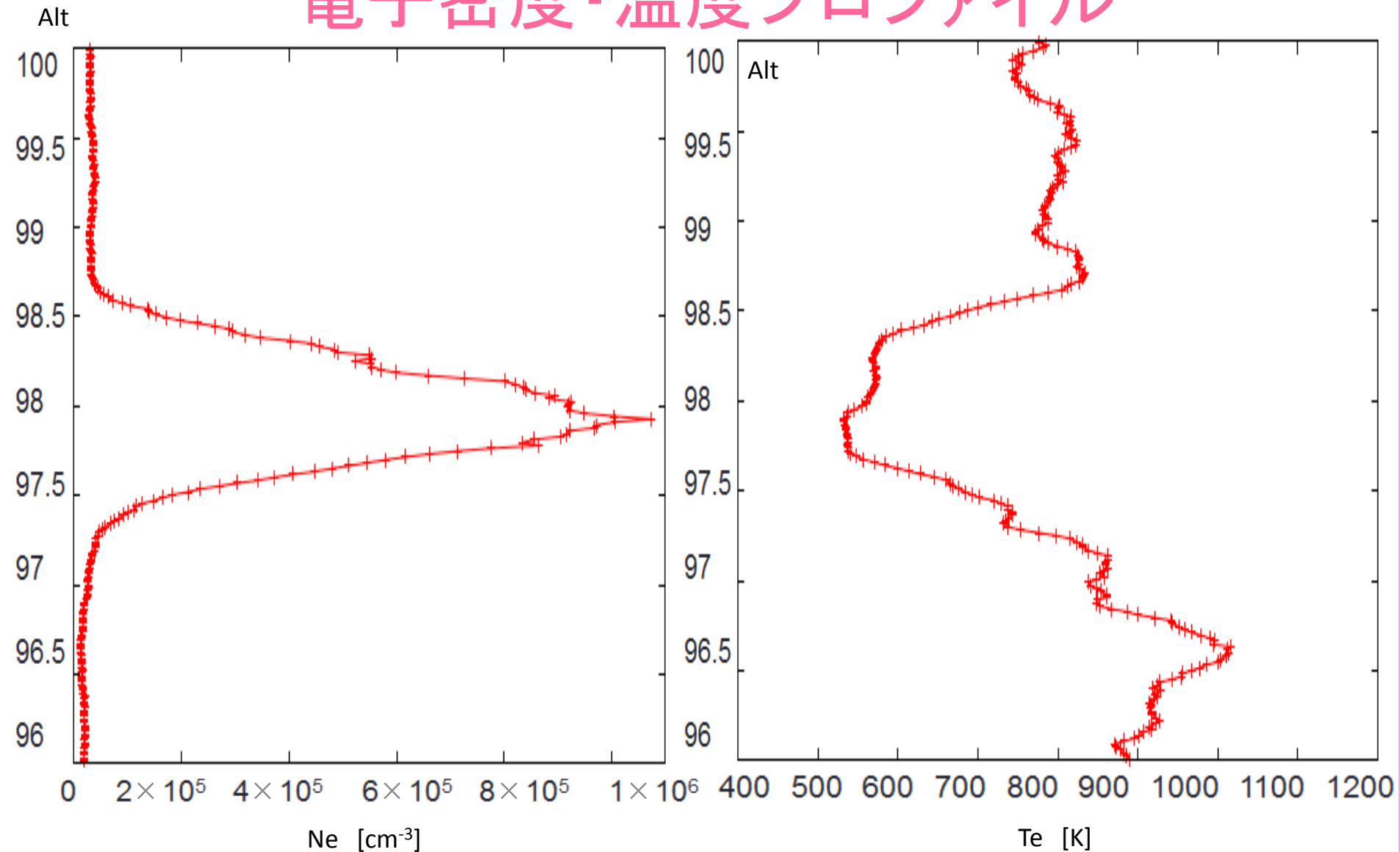
| 打上時刻 | 発射上下角 | 観測開始時刻 |
|-----------------|--------|---------|
| 19時10分00秒 | 80度 | 打上後55秒 |
| 小型姿勢制御装置による制御開始 | 最高到達高度 | 着水時刻 |
| 打上後61秒 | 243km | 打上後554秒 |

| 搭載機器 |
|----------------------|
| MII(マグネシウムイオンイメージャ) |
| LMR(長波・中波帯電波受信機) |
| NEI(インピーダンスプローブ) |
| FLP(高速ラングミュアプローブ) |
| DFG(デジタルフラックスゲート磁力計) |
| SAS(太陽センサー) |

スポラディックE層の電子温度・密度構造の算出

- ※ 今回の実験においてスポラディックE層内で取得されたプローブの電圧-電流特性を見ると、電圧掃引時間内に電子密度が変化したためと思われる電流の変化が見られ、従来の方法では電子温度と電子密度が推定できないことが分かった。
- ※ そこで、このように急激に電子密度が変化する場合でも正確な推定を可能にする新たな解析方法を考案し、スポラディックE層付近で取得された実際のデータに適用した。
- ※ 新たな方法ではデータ補間を用いることで、掃引時間よりも短い時間間隔で電子温度と密度を推定することが可能となった。

電子密度・温度プロファイル



外部との境界付近から中心に向かい電子温度が次第に減少していく傾向があることが明らかになった。

数値的検討 - 1

- ＊ 観測結果として得られたスホラディックE層内での電子温度低下がどのようなメカニズムによるものか議論するために、スホラディックE層を含む一次元空間で電子に関するエネルギー方程式を用いた数値検討を行った。
- ＊ 構成粒子 : 電子, イオン, 中性粒子の3種類
- ＊ 中性大気の密度と温度 : MSISモデル
- ＊ 電離大気の密度と温度 : IRIモデル
- ＊ 用いたエネルギー方程式は以下の通りである。

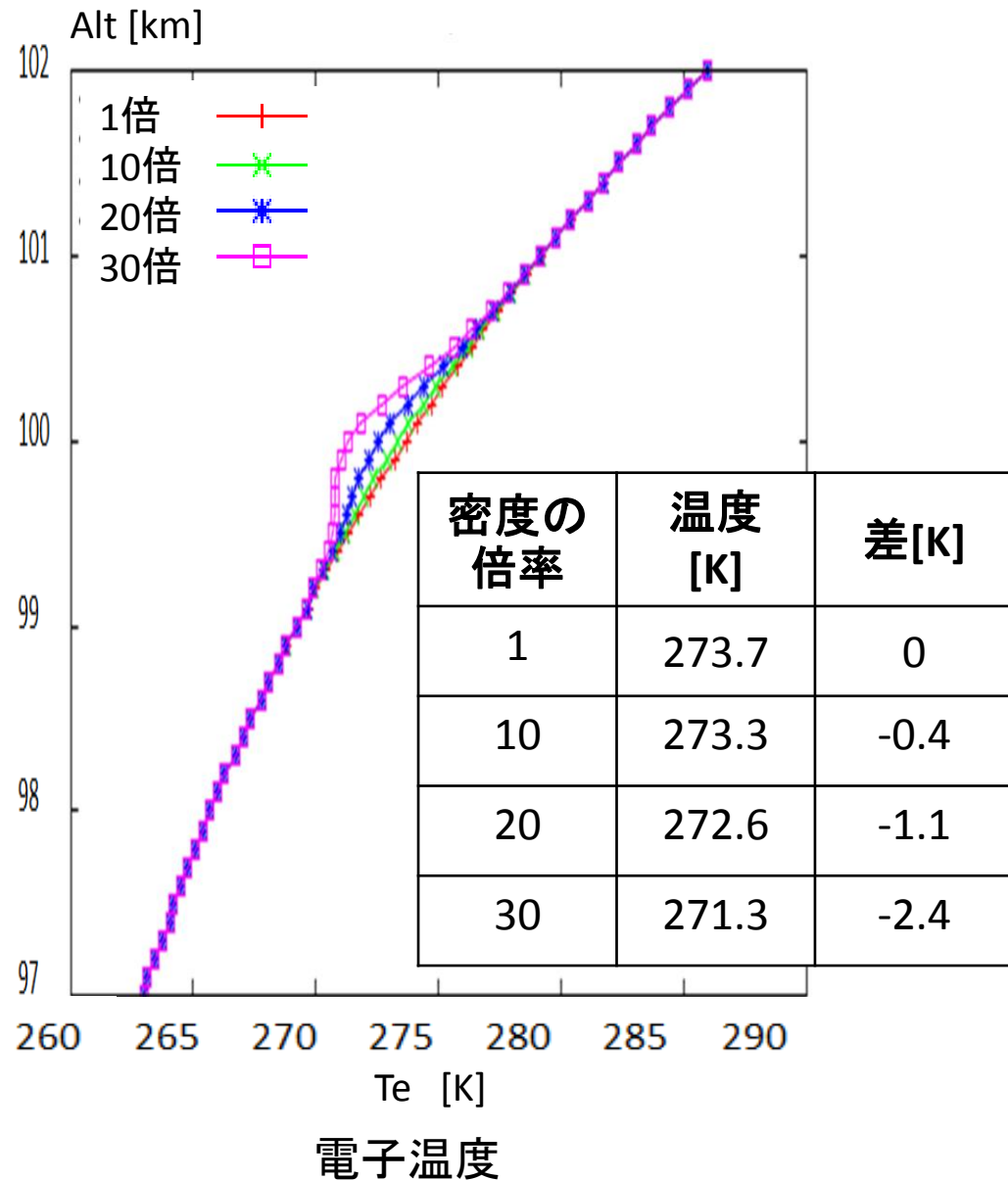
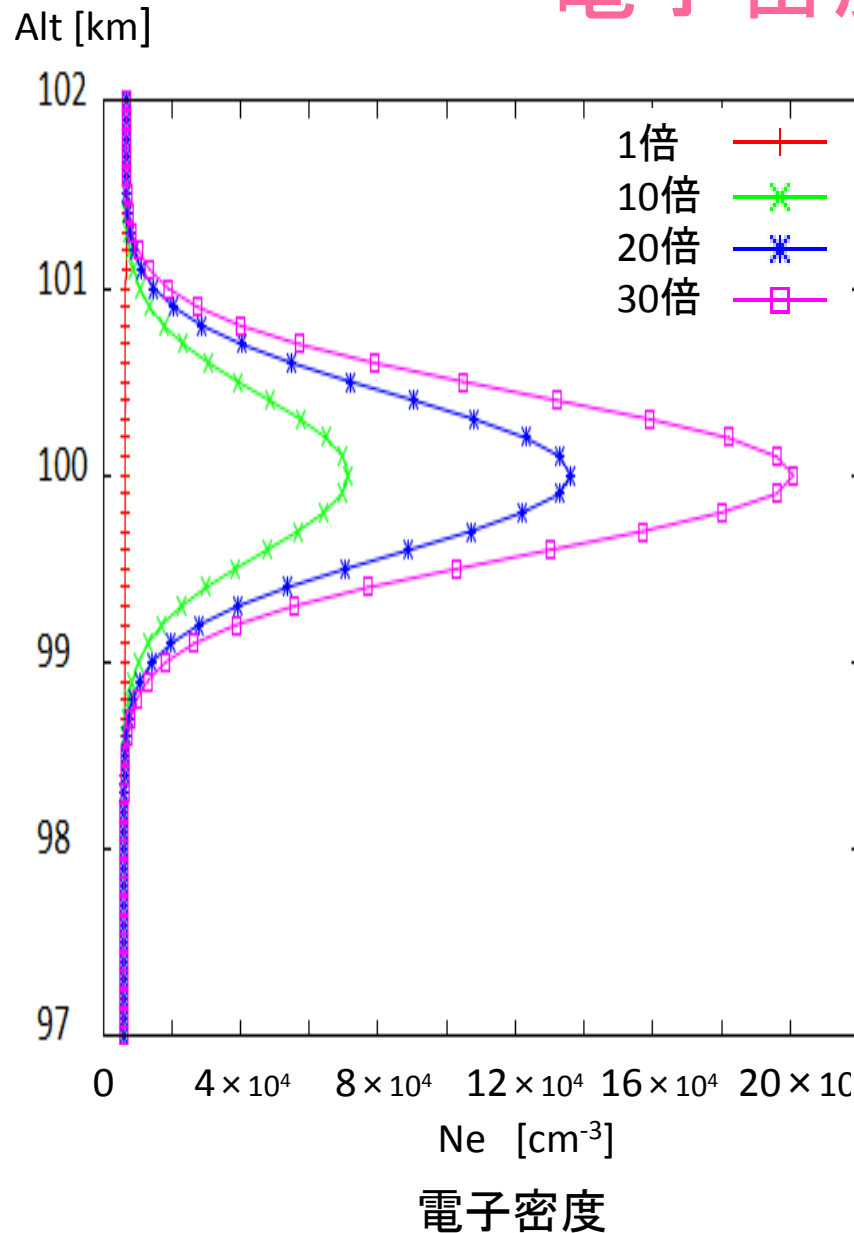
$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K^e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \Sigma Q_e - \Sigma L_e = 0$$

(K^e :熱伝導係数, Q_e :加熱率, L_e :冷却率)

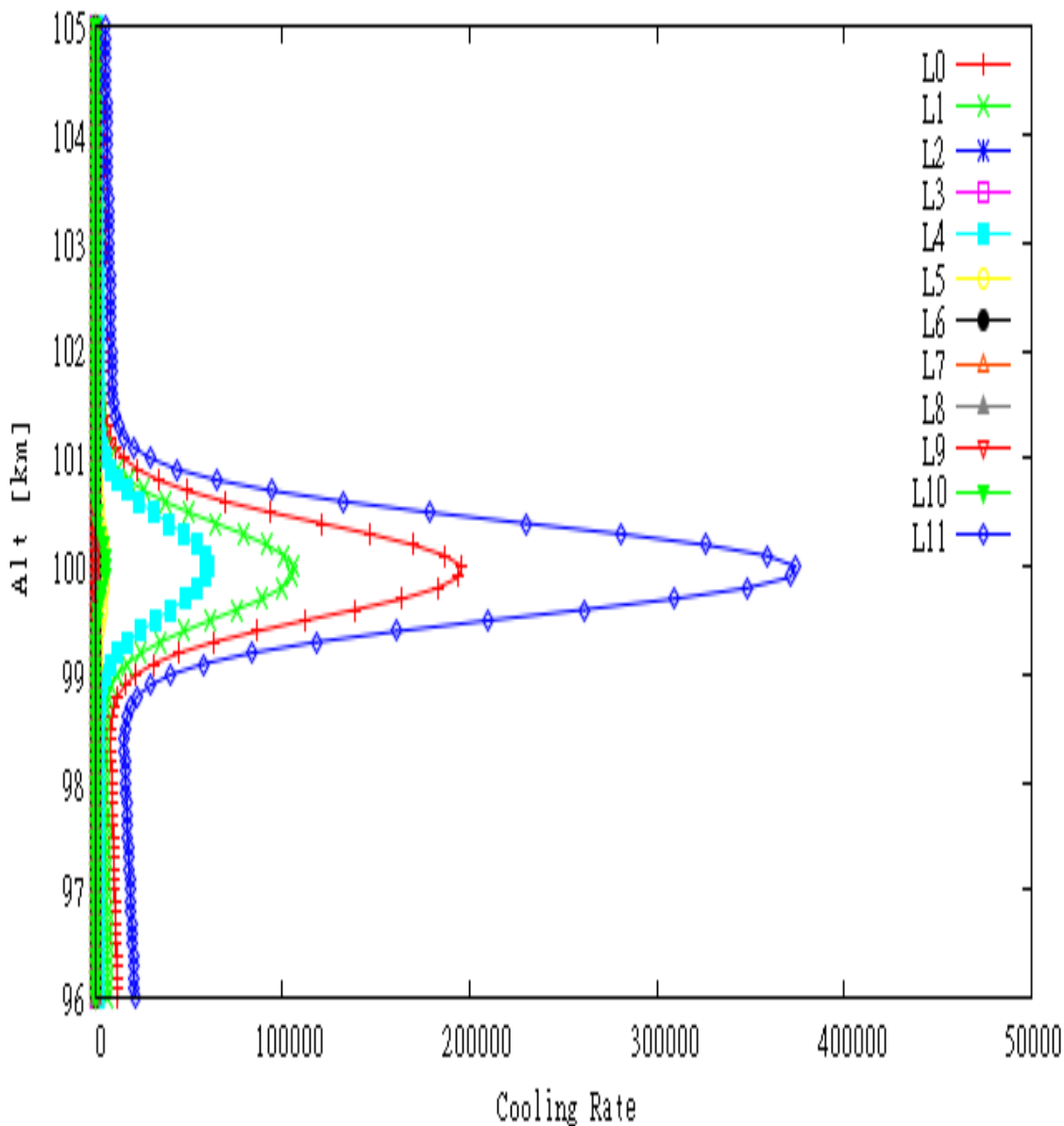
数値的検討 - 2

- ✳️ 加熱過程 : 光電子による加熱とジュール加熱
 - ✳️ 冷却過程 : 中性大気およびイオンとの相互作用による過程(中性大気はO, H, He, NO, O₂)
 - ✳️ 高度範囲 : 90~120 km
 - ✳️ 電場 : 0.15 V/m
 - ✳️ 今回は高度100 km付近にスポラディックE層が存在することを想定した。また, その最大値が背景の10倍, 20倍, 30倍となるような電子密度分布を与えた場合の比較を行った。
- (R. W. SCHUNK, ANDREW F. NAGY, 1978)

電子密度と計算結果



考慮している冷却率



L0, L1 : rotational excitation
(N_2 , O_2)

L2, L3 : vibrational excitation
(N_2 , O_2)

L4 : fine structure excitation of O

L5 ~ L9 : elastic electron-neutral
interactions (N_2 , O_2 , O, He, H)

L10 : electron cooling rate due to
electron-ion interactions

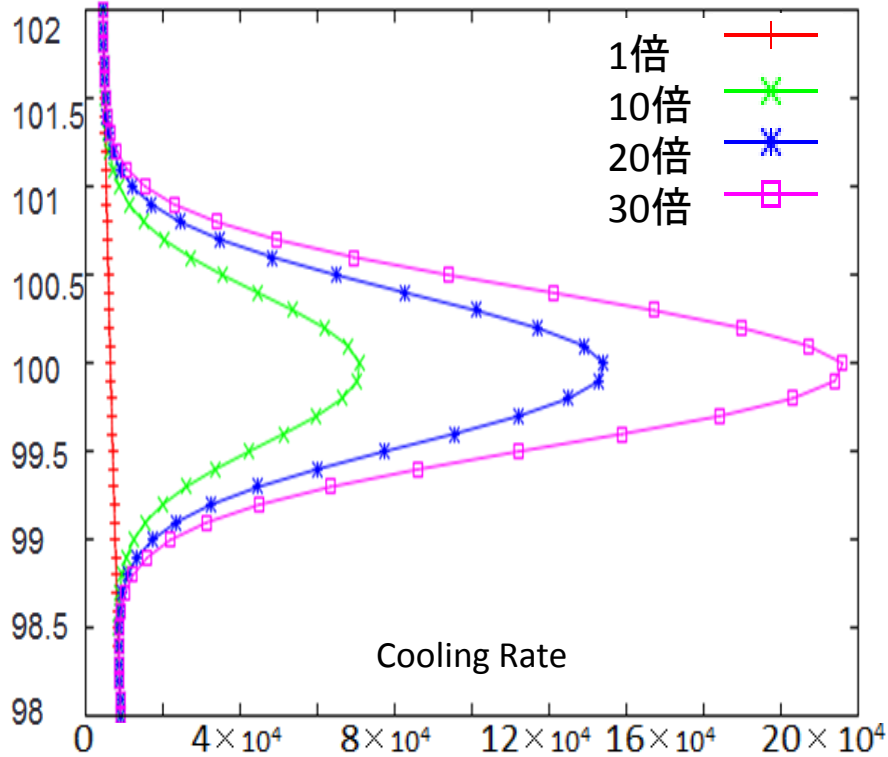
L11 : The sum of the cooling rate

大小関係は
 $L11 > L0 > L1 > L4 > L10$

どの項が電子温度の減少に
関係しているか、
調べる必要がある

電子温度に影響を与えるプロセス

Alt [km]

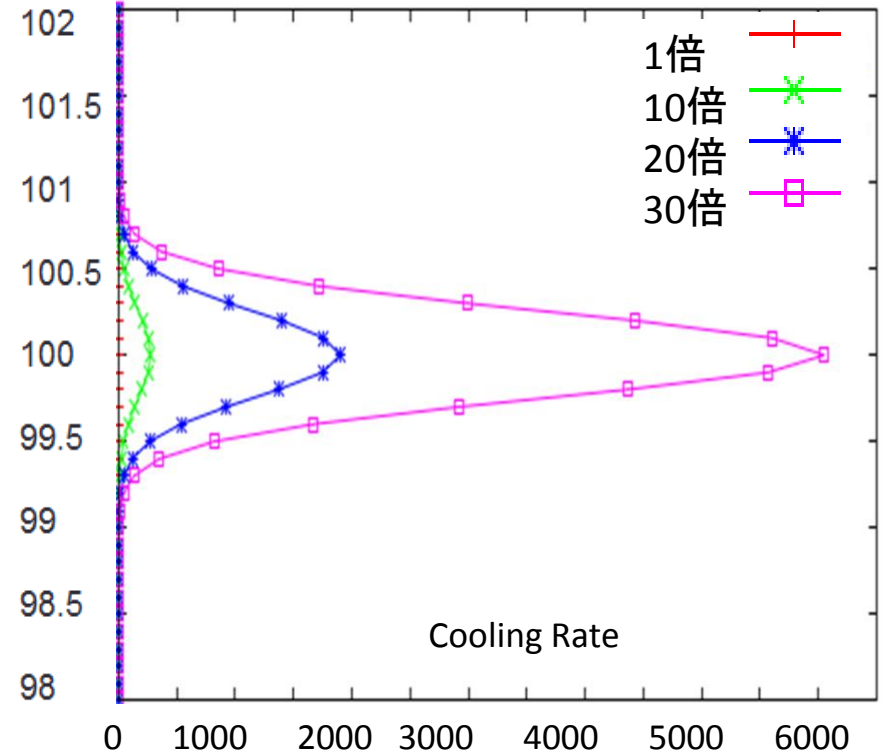


L0 : N₂による回転励起

$$L(e, N_2)_{\text{rot}} = 2.9 \times 10^{-14} N_e N(N_2) \cdot (T_e - T_n) / T_e^{1/2}$$

同様に, L1~L9も電子密度N_eに比例

Alt [km]



L10 : イオンとの衝突による冷却効果

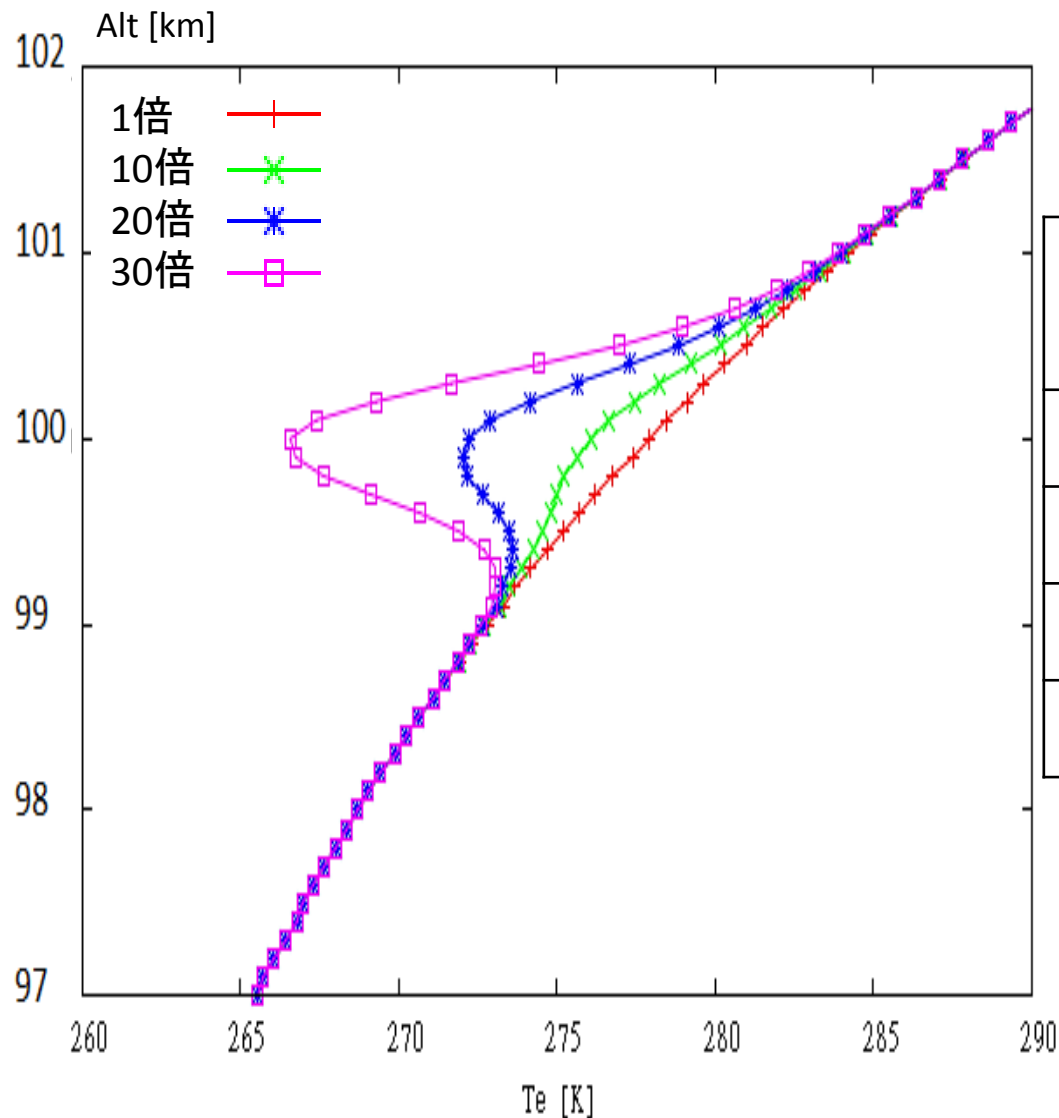
$$L(e, i) = 3.2 \times 10^{-14} N_e \frac{(T_e - T_i)}{T_e^{3/2}} \ln \Delta [N(\text{O}^+) + 4N(\text{He}^+) + 16N(\text{H}^+) + 0.50N(\text{O}_2^+) + 0.53N(\text{NO}^+)] \text{ eV cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

L0~L9 までは電子密度に比例するが,
L10のみ電子密度とイオン密度の積に比例



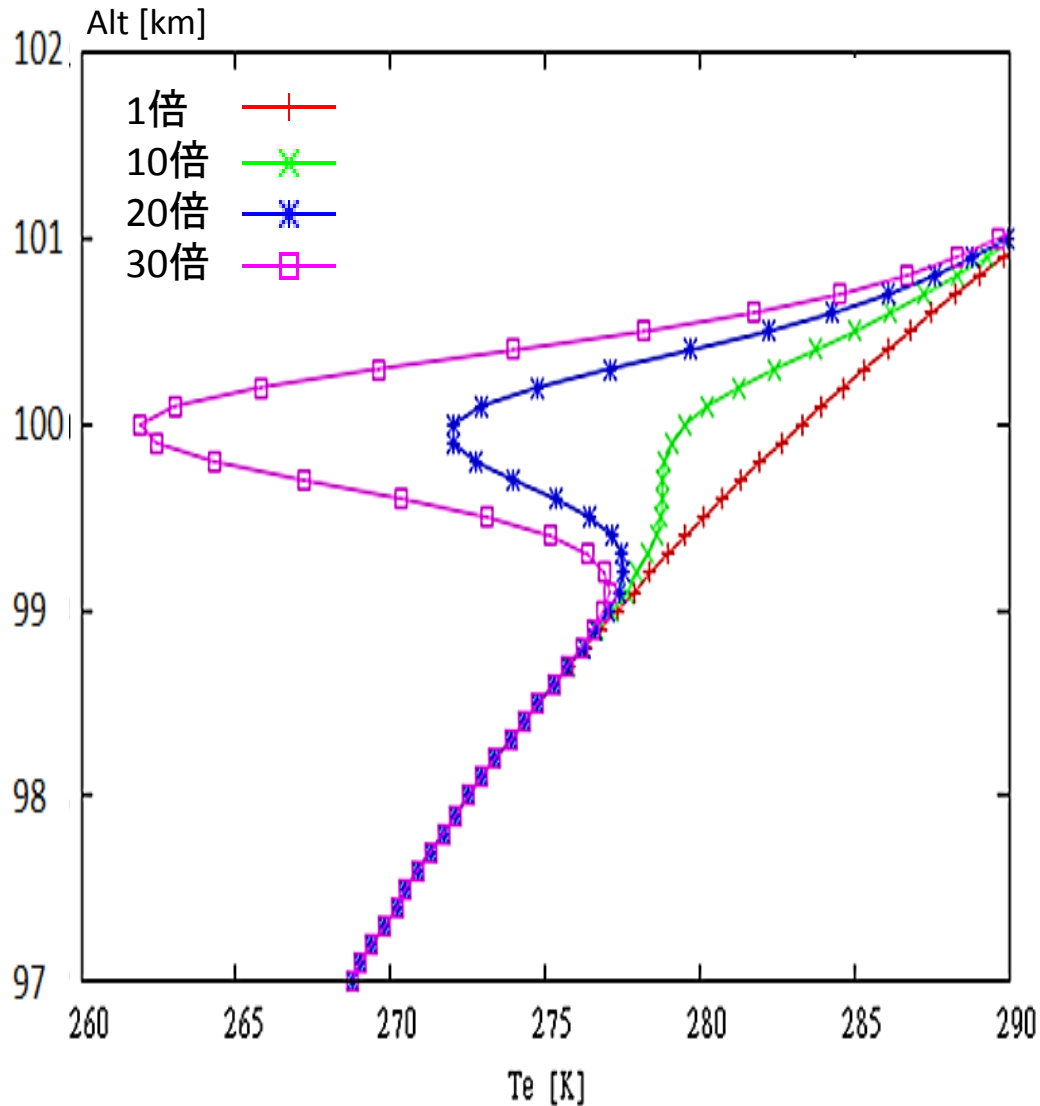
電子温度減少の過程には, イオンとの
衝突による冷却率に関わっている

① 全ての中性大気密度を1/5にした場合



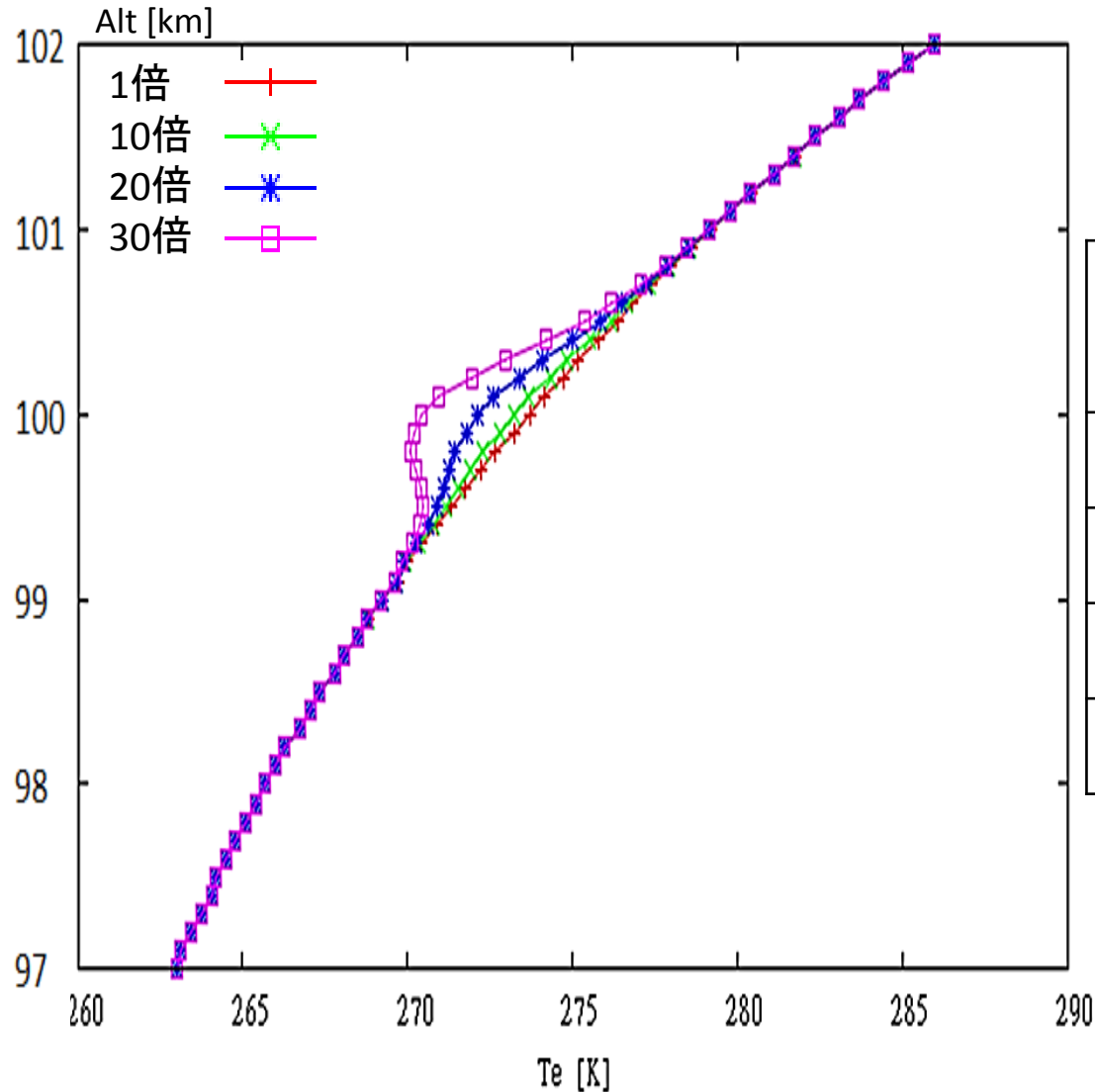
| 密度の倍率 | 温度 [K] | 差[K] |
|-------|--------|-------|
| 1 | 277.9 | 0 |
| 10 | 276.1 | -1.8 |
| 20 | 272.2 | -5.7 |
| 30 | 266.6 | -11.3 |

② 全ての中性大気密度を1/10にした場合



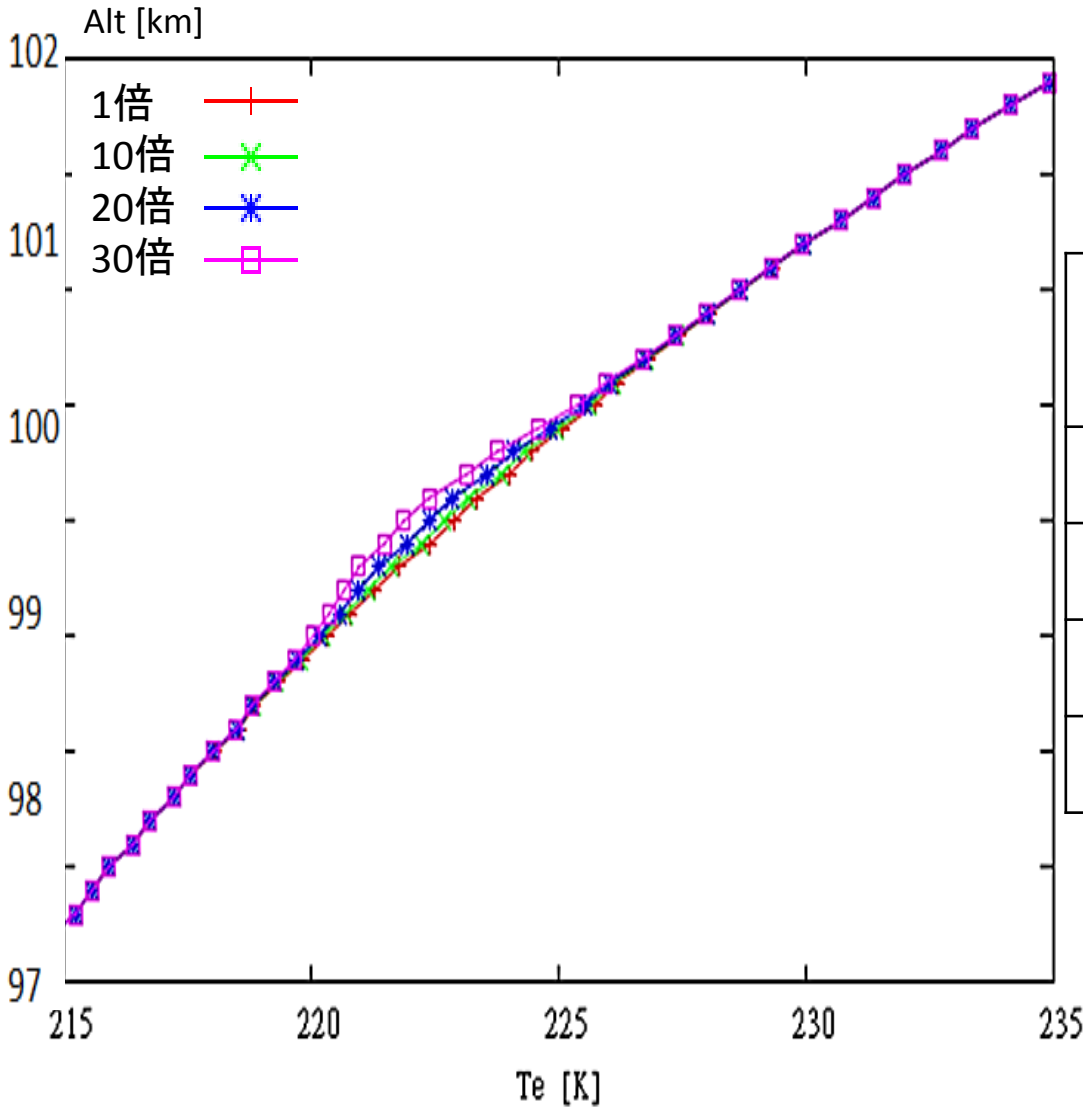
| 密度の倍率 | 温度 [K] | 差[K] |
|-------|--------|-------|
| 1 | 283.3 | 0 |
| 10 | 279.6 | -3.7 |
| 20 | 272.0 | -11.3 |
| 30 | 262.0 | -21.3 |

③イオン温度をIRIモデルより30[K]小さくした場合



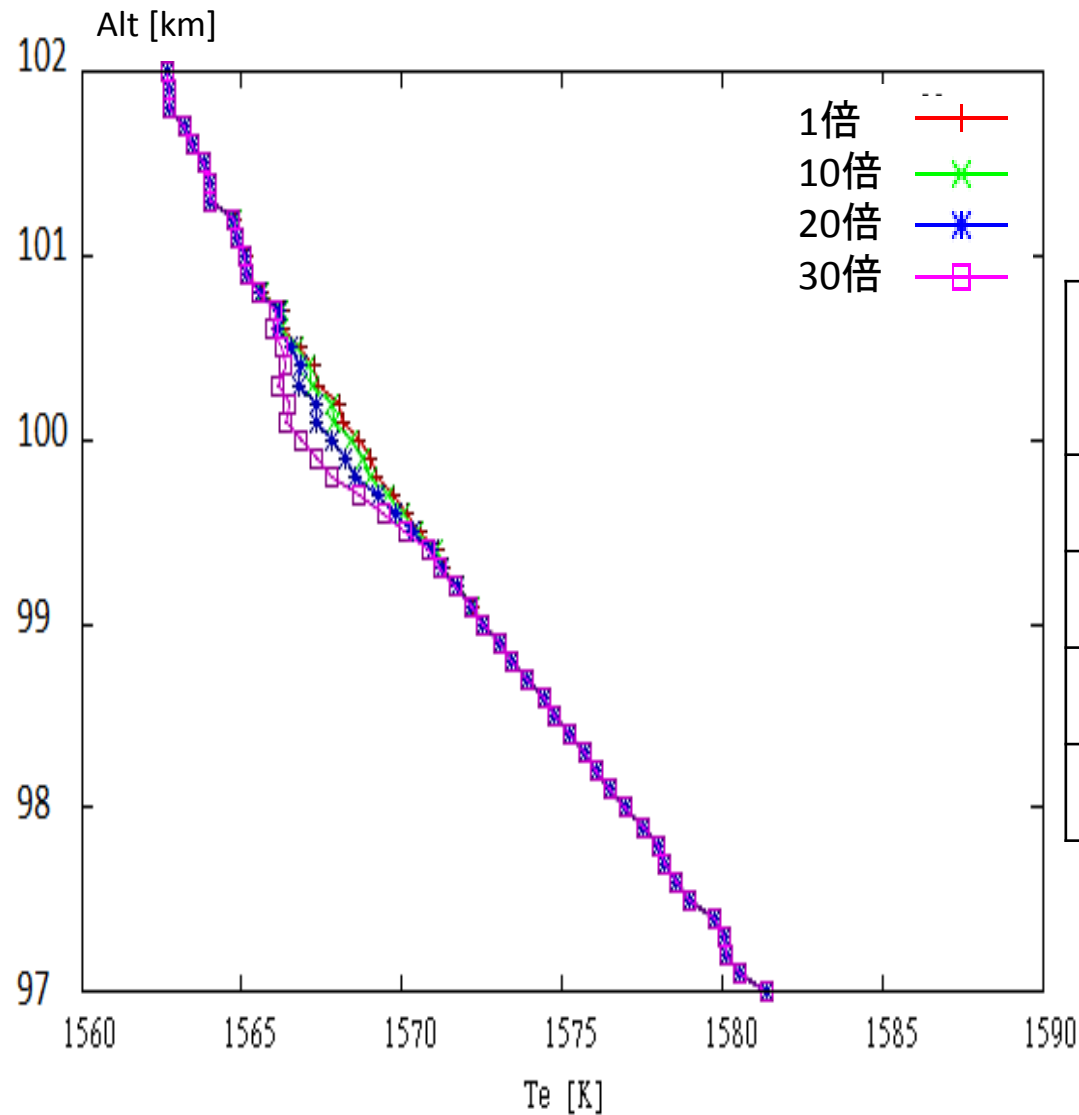
| 密度の倍率 | 温度 [K] | 差[K] |
|-------|--------|------|
| 1 | 273.7 | 0 |
| 10 | 273.2 | -0.5 |
| 20 | 272.1 | -1.6 |
| 30 | 270.4 | -3.3 |

④ 中性大気温度をMSISモデルより30[K]引いた場合



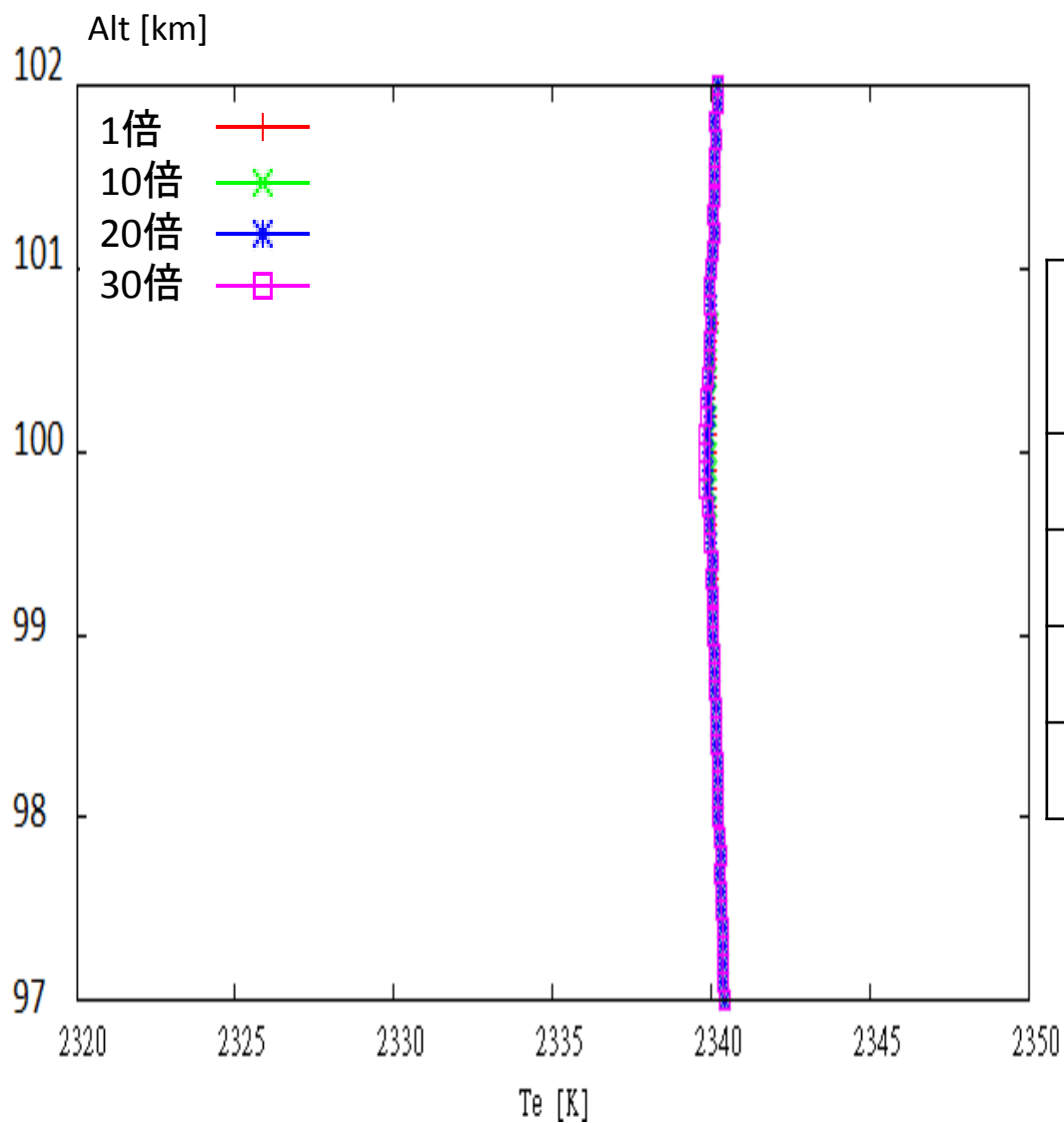
| 密度の倍率 | 温度 [K] | 差[K] |
|-------|--------|------|
| 1 | 222.9 | 0 |
| 10 | 222.7 | -0.2 |
| 20 | 222.4 | -0.5 |
| 30 | 221.9 | -1.0 |

⑤電場を0.3V/mにした場合



| 密度の倍率 | 温度 [K] | 差[K] |
|-------|--------|------|
| 1 | 1568.7 | 0 |
| 10 | 1568.4 | -0.3 |
| 20 | 1567.8 | -0.9 |
| 30 | 1566.9 | -1.8 |

⑥電場を0.45V/mにした場合



| 密度の倍率 | 温度 [K] | 差[K] |
|-------|--------|------|
| 1 | 1568.7 | 0 |
| 10 | 1568.4 | -0.3 |
| 20 | 1567.8 | -0.9 |
| 30 | 1566.9 | -1.8 |

計算結果の考察

- ✳️ 高度100km付近において、電子密度が大きくなるにつれ電子温度も低くなることが分かった。
- ✳️ 電子温度が低くなる原因として、電子とイオンの衝突による冷却効果が考えられる。
- ✳️ 中性大気の密度が全体的に下がると、電子温度の減少幅が大きくなった。
- ✳️ 中性大気温度とイオン温度を比較すると、イオン温度の方が温度変化により影響していると考えられる。
- ✳️ 電場が大きいと電子温度も高くなり、結果的に電子温度の変化が小さくなる。

まとめ

- ✳ 観測ロケット実験の結果として、電子密度が増加するスポラディックE層内では、外部との境界付近から中心に向かい電子温度が次第に減少していく傾向があることが明らかになった。
- ✳ 高度90-120 kmにおいて、一次元空間で電子、イオン、中性粒子を与え、電子に関するエネルギー方程式を使用してスポラディックE層が存在すると仮定した場合の電子温度分布についての数値的な検討を行っている。
- ✳ 電子温度が低くなる原因として、電子とイオンの衝突による冷却効果が考えられる。
- ✳ 中性大気の密度が全体的に下がると、電子温度の減少幅が大きくなった。