

スプラディックE層内の 電子温度構造に関する研究

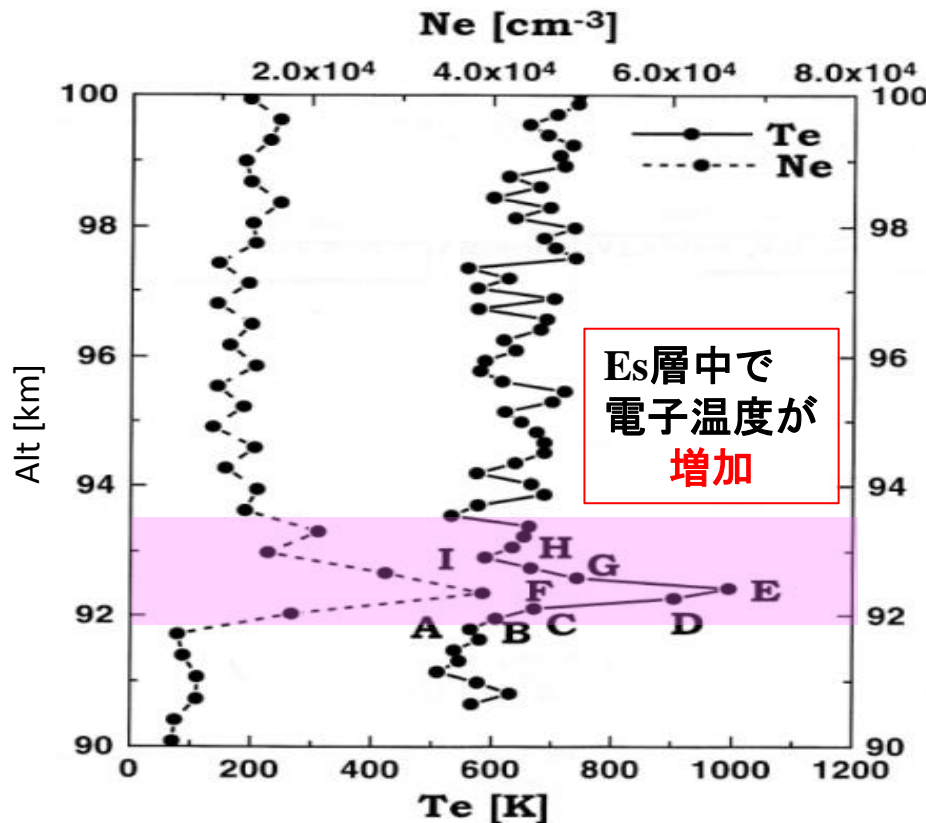
坂本優美花[1], 阿部琢美[2], 三宅亙[1]
東海大学大学院工学研究科航空宇宙学専攻[1]
宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所[2]

概要

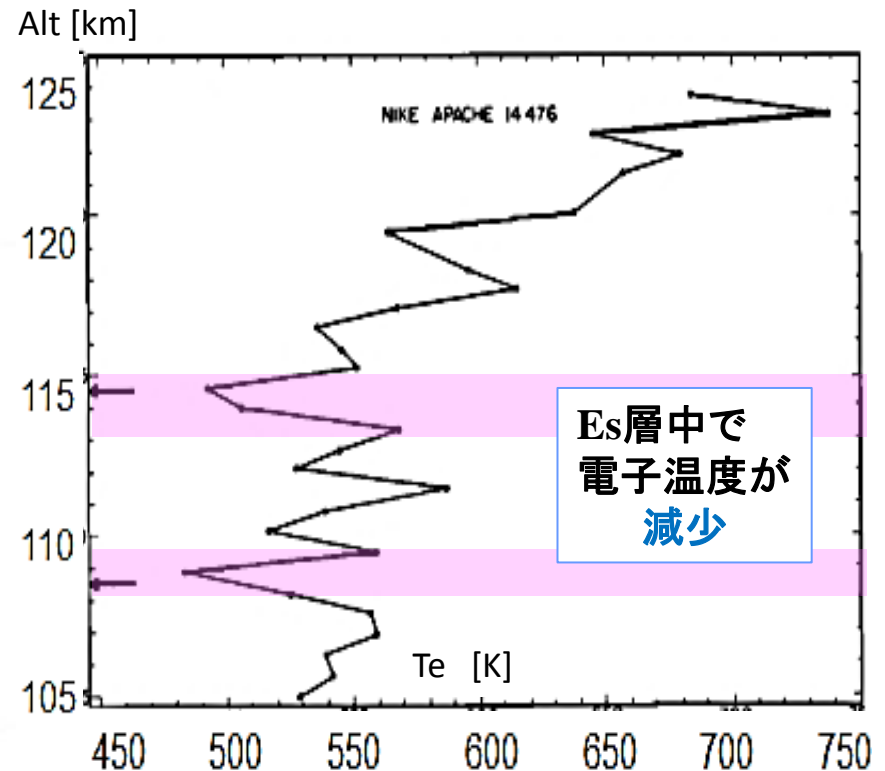
- ✳️ 下部電離圏に発生するスプラディックE層の空間構造解明を主目的として、観測ロケットS-520-29号機が打ち上げられた。
- ✳️ このロケットには高速サンプリングが可能なラングミュアプローブが搭載されたが、観測結果として、電子密度が増加するスプラディックE層内では、外部との境界付近から中心に向かって温度が次第に減少していく傾向が明らかになった。
- ✳️ 本研究ではスプラディックE層を含む一次元空間でエネルギー方程式を使用して密度が変化した場合の電子温度分布についての数値計算的検討を行っている。
- ✳️ その結果、電子密度が高くなるにつれて、背景に対する電子温度の減少幅が徐々に下がっていく傾向が見られた。しかし、その減少幅は観測値では約450Kであるのに対し、計算値では約2.4Kで差が大きい。
- ✳️ 数値計算で使用している多くのパラメータの中で、どの値を変化させれば電子温度減少幅が大きくなるかについて、検討を行なった。また、冷却率や加熱率が電子温度構造にどのような影響を及ぼしているか考察を行った。本発表ではそれらの結果について報告を行う。

先行研究

- * スポラディックE層(Es層)の生成機構についてはwind-shear理論が一般に受け入れられているが、この理論は電子密度の集積過程を説明するにとどまり、スポラディック層付近の熱収支についてはほとんど情報を与えない。
- * 熱収支を議論する上で、電子温度は重要なパラメータであるが、スポラディックE層内での正確な電子温度観測の例は極めて少ないうえ、信頼性に乏しい。



電子温度・密度の高度分布
(吉村玲子, 1999)



電子温度の高度分布
(S.R.SCHUTZ and L.G.SMITH, 1976)

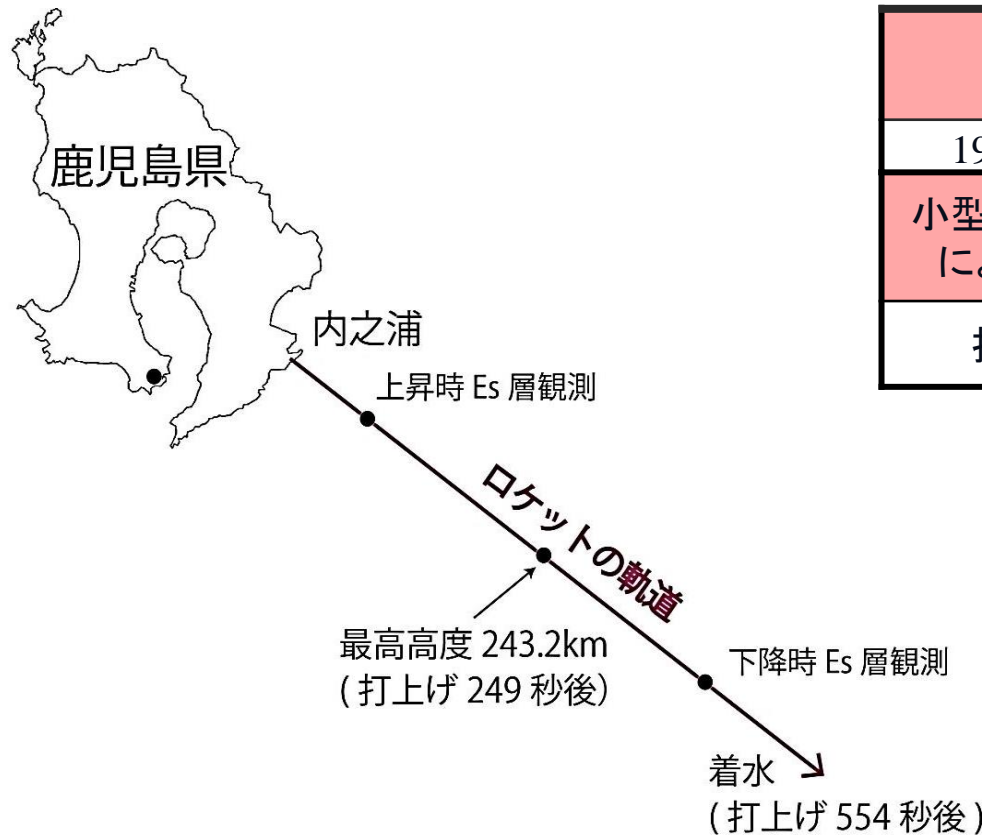
スポラディックE層内での電子温度変化

Rocket	Time (LT)	Site	Experimenter	Es Alt[km]	Back-ground N_e [cm^{-3}]	Peak N_e [cm^{-3}]	Back-ground T_e [K]	T_e increase /decrease	T_e [K] (IRI)	T_i [K] (IRI)	T_n [K] (MSIS)
Nike Apache 14.475	1971.8.2 04:19	Wall.	Schutz and Smith	118.7	4.0×10^3	2.7×10^4	600	decrease	368	368	359.7
Nike Apache 14.476	1971.8.20 4:44	Wall.	Schutz and Smith	114.6 108.5	5.7×10^3	2.9×10^4 8.0×10^3	540	decrease	235 307.5	235 307.5	233.5 305.7
Nike Apache 14.513	1973.8.3 11:00	Wall.	Schutz and Smith	101.6	1.1×10^5	2.6×10^5	530	decrease	208.1	208.1	219.3
Nike Apache 14.514	1973.8.10 10:05	Wall.	Schutz and Smith	100.5	1.3×10^5	2.7×10^5	540	decrease	201.3	201.3	207.5
Aerobee 150	1974.6.29 20:31	W.S.	Szuszczewicz and Holmes	106	6.0×10^7	3.0×10^5		increase	238.2	238.2	253.2
S-310-27	1998.1.25 17:35	USC	Yoshimura et al.	92.5	1.7×10^4	3.9×10^4	620	increase	179.7	179.7	178.3
S-310-31	2002.8.3 23:24	USC	Hibino et al.	103 105	1.5×10^3	1.4×10^5	1000	decrease	216.4 221.2	216.4 221.2	217.7 227.2
EQUIS II 29.036	2004.08.15 20:21	kwajalein atoll	Barjatya et.al	107 120	3.0×10^3	4.0×10^4 4.0×10^4	400 580	decrease	201.8 323.2	201.8 323.2	225.6 349.9
S-310-40	2011.12.19 23:48	USC	Yatsukawa et al.	105	2.1×10^5	2.8×10^5	800	decrease	198.5	198.5	195.2

枠線の2例のみ電子温度が**増加**している

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)

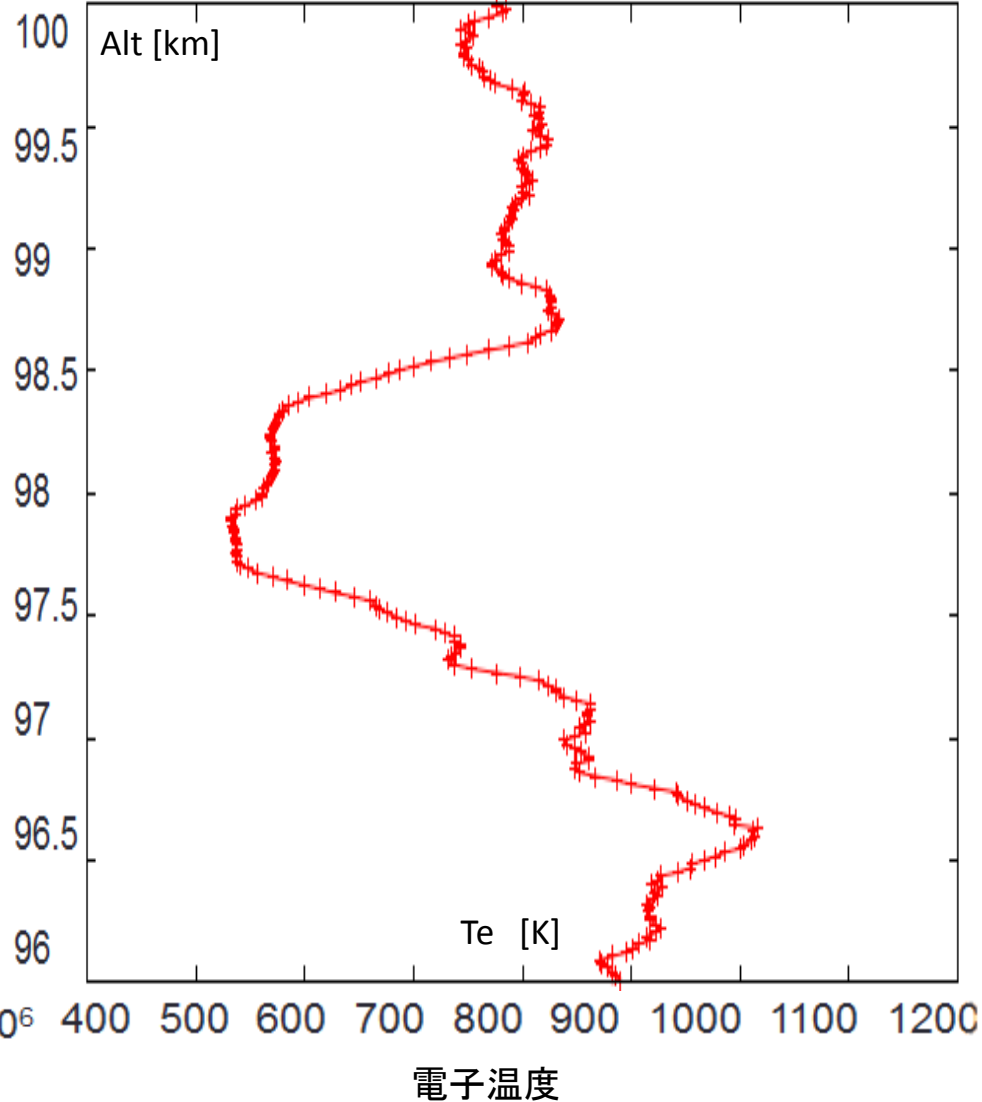
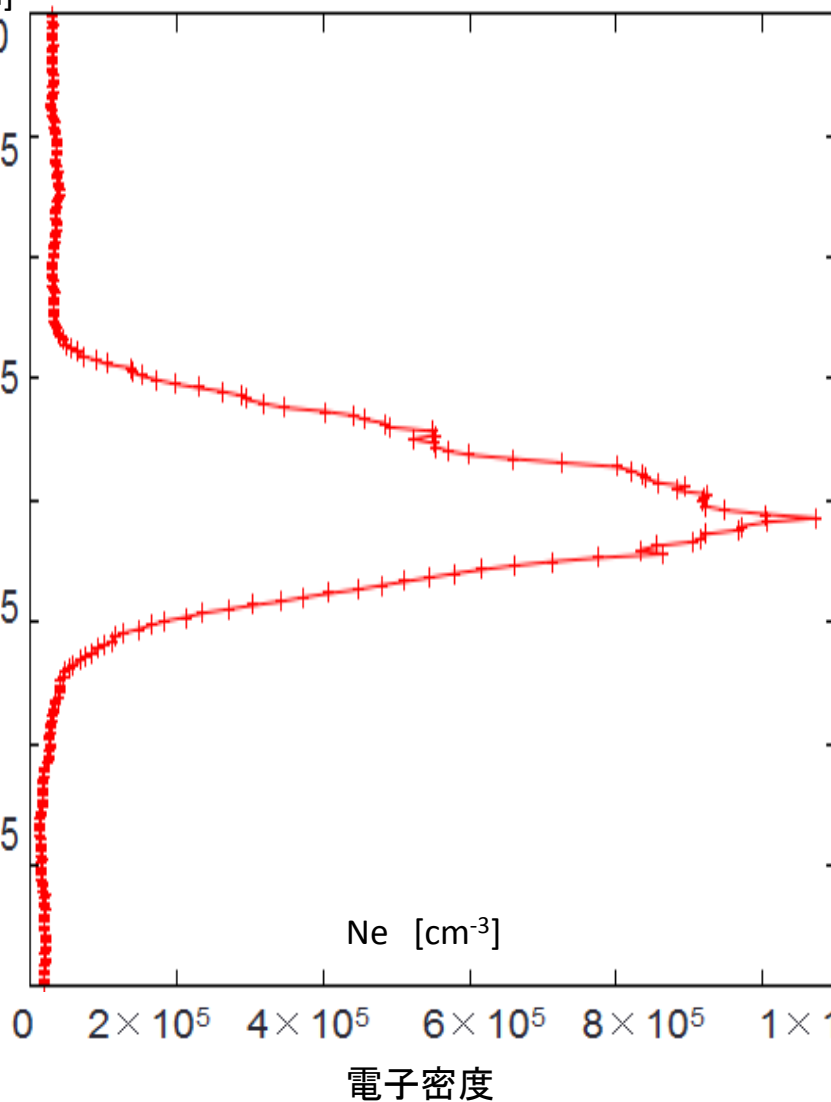
スポラディックE層の電子温度・密度構造の算出

- ※ 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(125ミリ秒)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。

新たな方法で導いた電子密度・温度プロファイル

Alt
[km]

100
99.5
99
98.5
98
97.5
97
96.5
96



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ポラディック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、スポラディックE層を含む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。

高度範囲	構成粒子	中性大気 の 温度・密度	電離大気 の 密度・イオン温度	電場
90-120 km	電子, イオン, 中性粒子	MSIS model	IRI model	0.15 V/m
加熱過程	冷却過程	境界条件		
・光電子による加熱 (高度115km以上) ・ジュール加熱	中性大気及びイオン との相互作用による 冷却	低高度側	高高度側	
		加熱率 Q_e = 冷却率 L_e	温度勾配 ($\Delta T_e = 0.01$ K/km)	

数値的検討 - 2

＊用いたエネルギー方程式

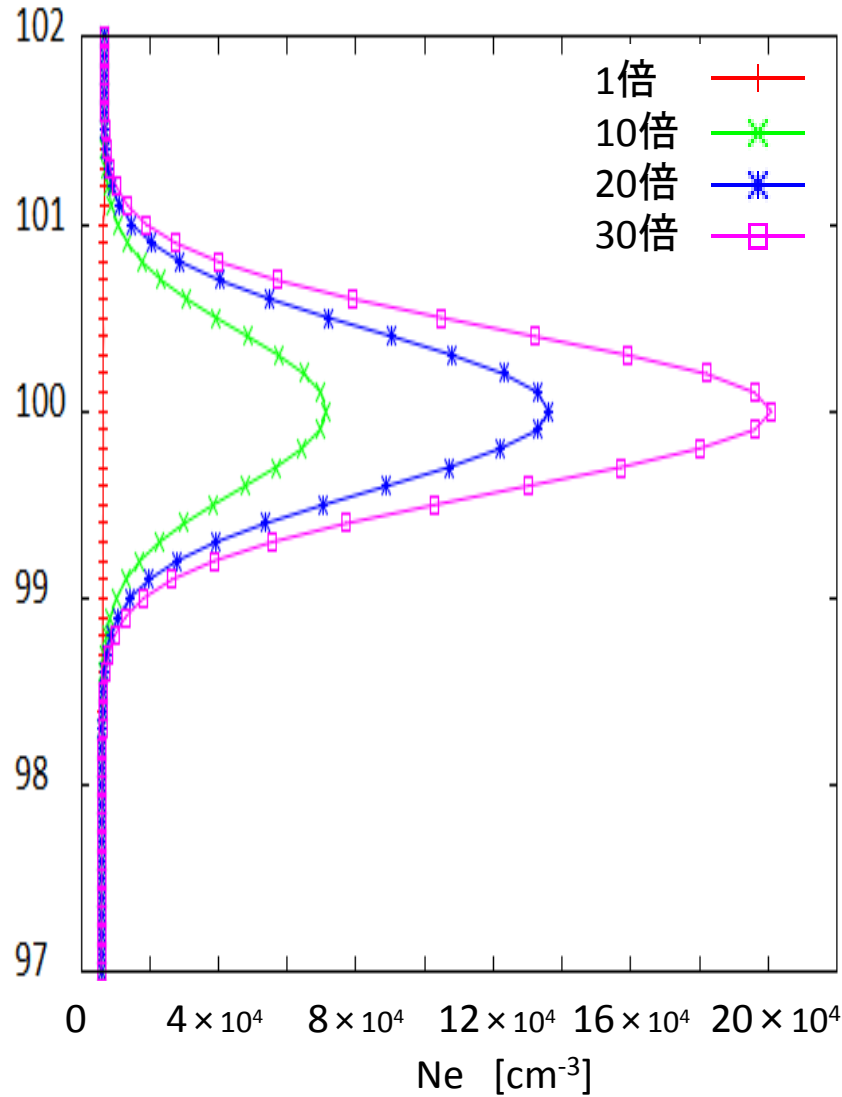
$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K^e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \Sigma Q_e - \Sigma L_e = 0$$

K^e : 熱伝導係数, Q_e : 加熱率, L_e : 冷却率
鉛直方向1次元, Heat Flowは無視

＊今回は高度100 km付近に厚さ約2kmのスプラディック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。

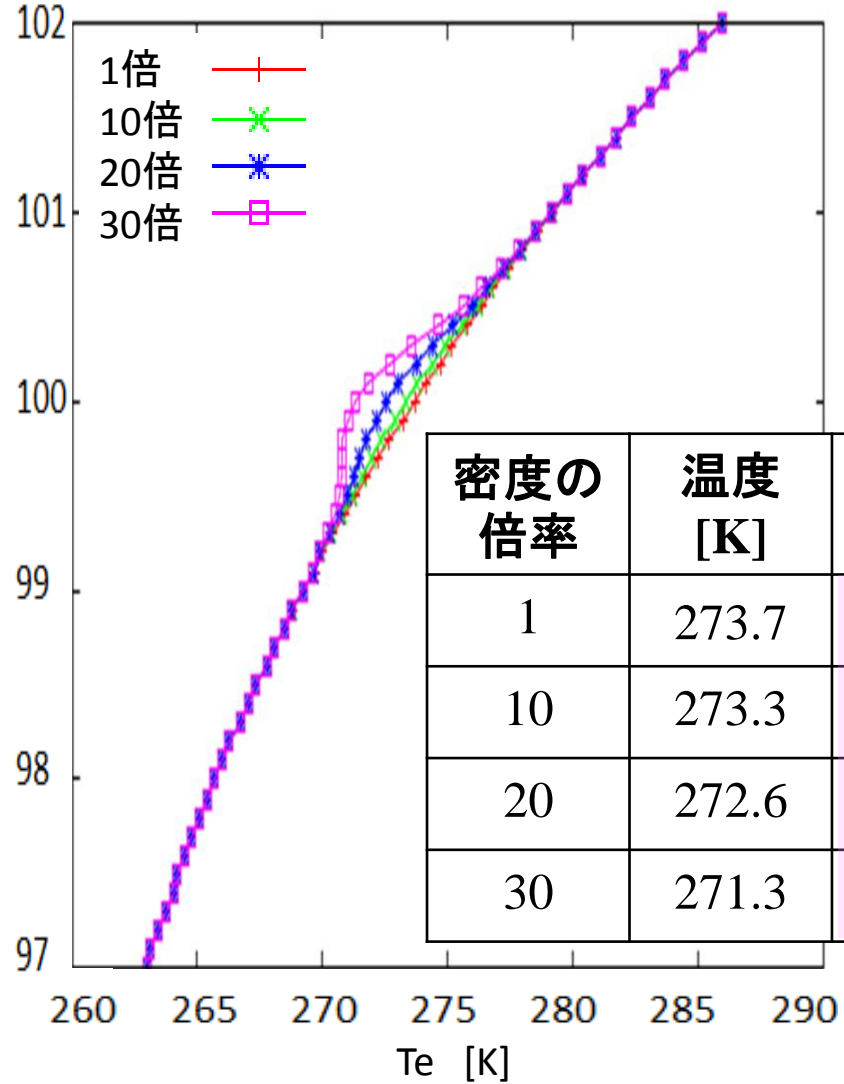
電子密度と計算結果

Alt [km]



電子密度

Alt [km]



電子温度

密度の倍率	温度 [K]	差 [K]
1	273.7	0
10	273.3	-0.4
20	272.6	-1.1
30	271.3	-2.4

考慮している冷却率

L0	rotational excitation of N ₂	$L(e, N_2)_{rot} = 2.9 \times 10^{-14} \underline{N_e} N(N_2) \cdot (T_e - T_n) / T_e^{1/2} eV cm^{-3} s^{-1}$	L5	elastic electron-neutral interactions (N ₂)	$L(e, N_2) = 1.77 \times 10^{-19} \underline{N_e} N(N_2) \cdot [1 - 1.21 \times 10^{-4} T_e] T_e (T_e - T_n)$
L1	rotational excitation of O ₂	$L(e, O_2)_{rot} = 6.9 \times 10^{-14} \underline{N_e} N(O_2) \cdot (T_e - T_n) / T_e^{1/2} eV cm$	L6	elastic electron-neutral interactions (O ₂)	$L(e, O_2) = 1.21 \times 10^{-18} \underline{N_e} N(O_2) \cdot [1 + 3.6 \times 10^{-2} T_e] T_e^{1/2} (T_e - T_n)$
L2	vibrational excitation of N ₂	$L(e, N_2)_{rot} = 2.99 \times 10^{-12} \underline{N_e} N(N_2) \exp\left(f \frac{T_e - 2000}{2000 T_e}\right) \cdot \left[\exp\left(-g \frac{T_e - T_n}{T_e T_n}\right) - 1 \right] eV cm^{-3} s^{-1}$	L7	elastic electron-neutral interactions (O)	$L(e, O) = 7.9 \times 10^{-19} \underline{N_e} N(O) \cdot [1 + 5.7 \times 10^{-4} T_e] T_e^{1/2} (T_e - T_n)$
L3	vibrational excitation of O ₂	$L(e, O_2)_{rot} = 5.196 \times 10^{-13} \underline{N_e} N(O_2) \exp\left(h \frac{T_e - 700}{700 T_e}\right) \cdot \left[\exp\left(-2770 \frac{T_e - T_n}{T_e T_n}\right) - 1 \right] eV cm^{-3} s^{-1}$	L8	elastic electron-neutral interactions (He)	$L(e, He) = 2.46 \times 10^{-17} \underline{N_e} N(He) T_e^{1/2} (T_e - T_n)$
L4	fine structure excitation of O	$L(e, O)_f = 8.629 \times 10^{-6} \frac{\underline{N_e} N(O)}{Z} \sum A(B!) T_e^{[B-(1/2)]} + \{\varepsilon(D_x - E_x)\} + 5.91 \times 10^{-9} (T_n - T_e) [(1+B)D_x + (E/T_e + 1 + B)E_x] eV cm^{-3} s^{-1}$	L9	elastic electron-neutral interactions (H)	$L(e, H) = 9.63 \times 10^{-16} \underline{N_e} N(H) \cdot [1 - 1.35 \times 10^{-4} T_e] T_e^{1/2} (T_e - T_n)$
			L10	electron cooling rate due to electron-ion interactions	$L(e, i) = 3.2 \times 10^{-8} \underline{N_e} \frac{(T_e - T_i)}{T_e^{3/2}} \ln \Lambda [N(O^+) + 4N(He^+) + 16N(H^+) + 0.50N(O_2^+) + 0.53N(NO^+)] eV cm^{-3} s^{-1}$

(R.W.Schunk, Andrew F.Nagy, 1978)

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が
関わっている

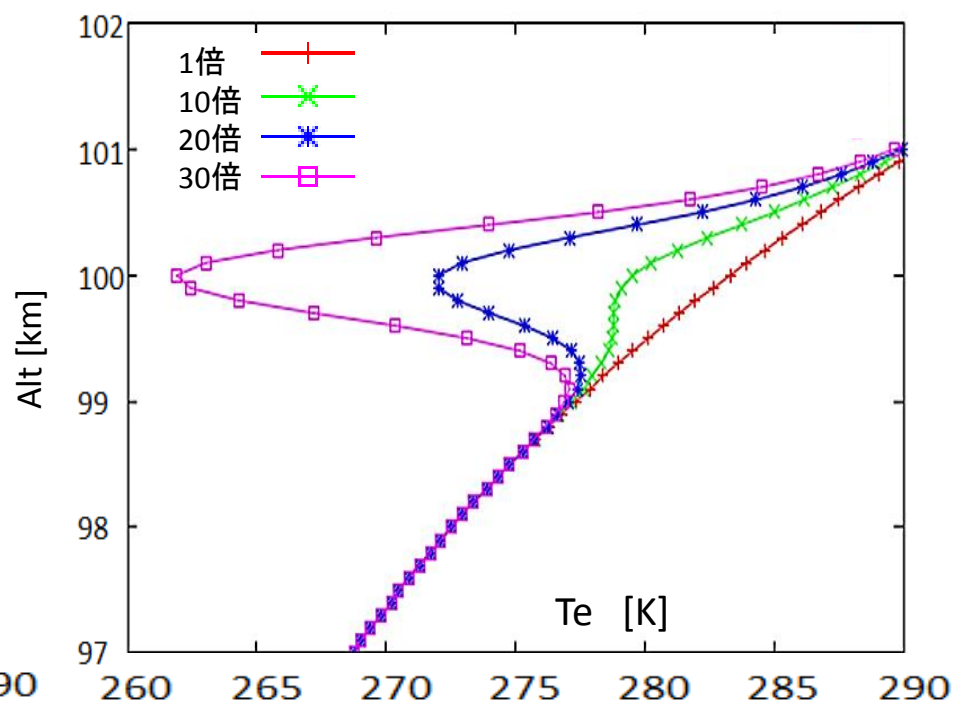
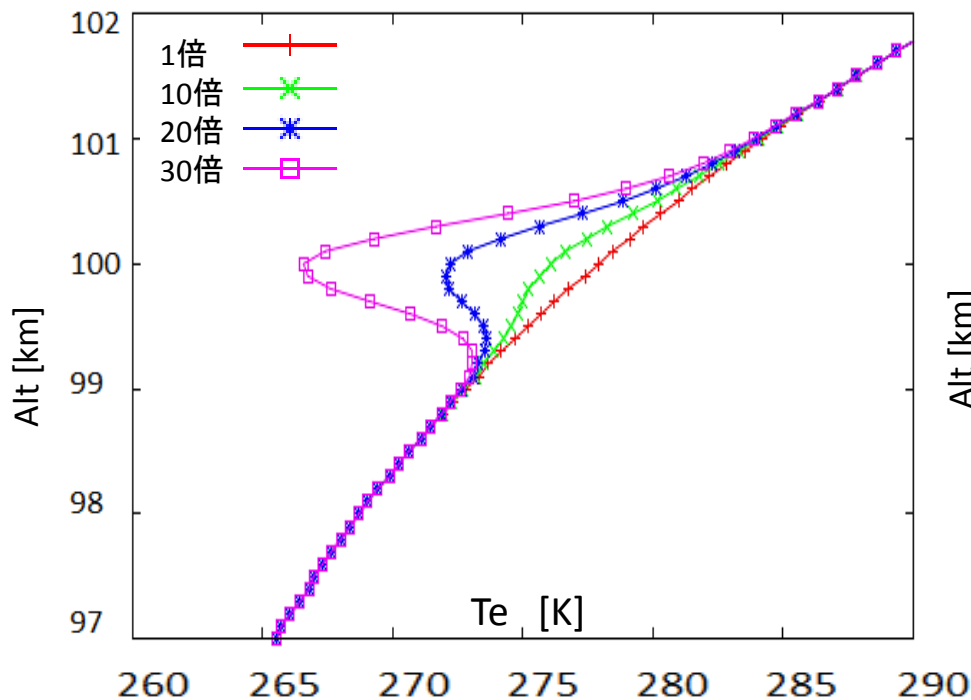
これまでの結果のまとめ

- ✳️ 数値計算によりスプラディックE層内で電子温度が減少する可能性があることを確認した.
- ✳️ しかし, 減少幅は観測値に比べ計算値の方がはるかに小さい.
- ✳️ そこでどのような条件で電子温度減少幅が大きくなるか調べた.

中性大気密度による変化

全ての中性大気密度を1/5にした場合

全ての中性大気密度を1/10にした場合



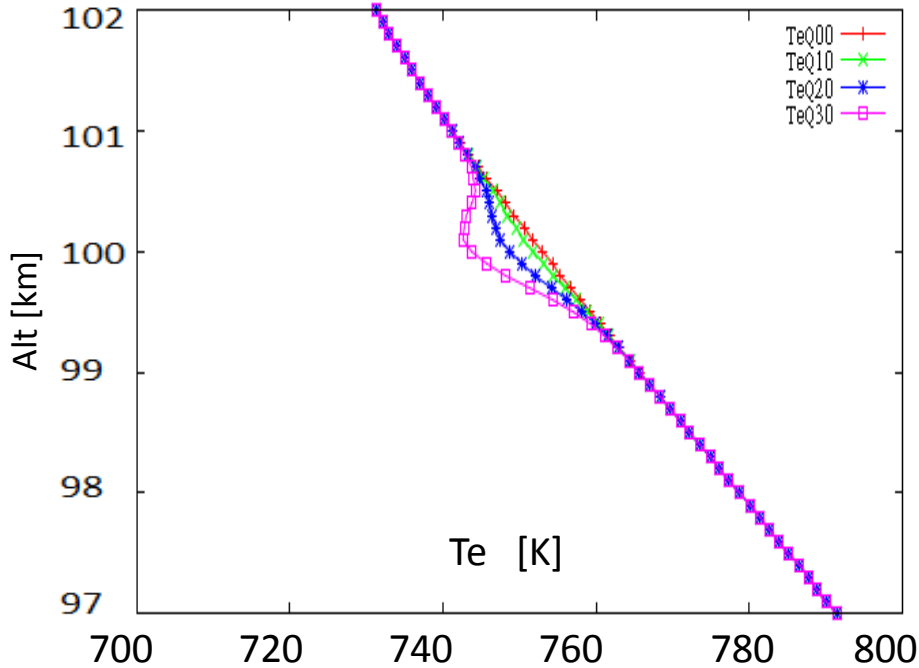
密度の倍率	温度 [K]	差[K]
1	277.9	0
10	276.1	-1.8
20	272.2	-5.7
30	266.6	-11.3

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

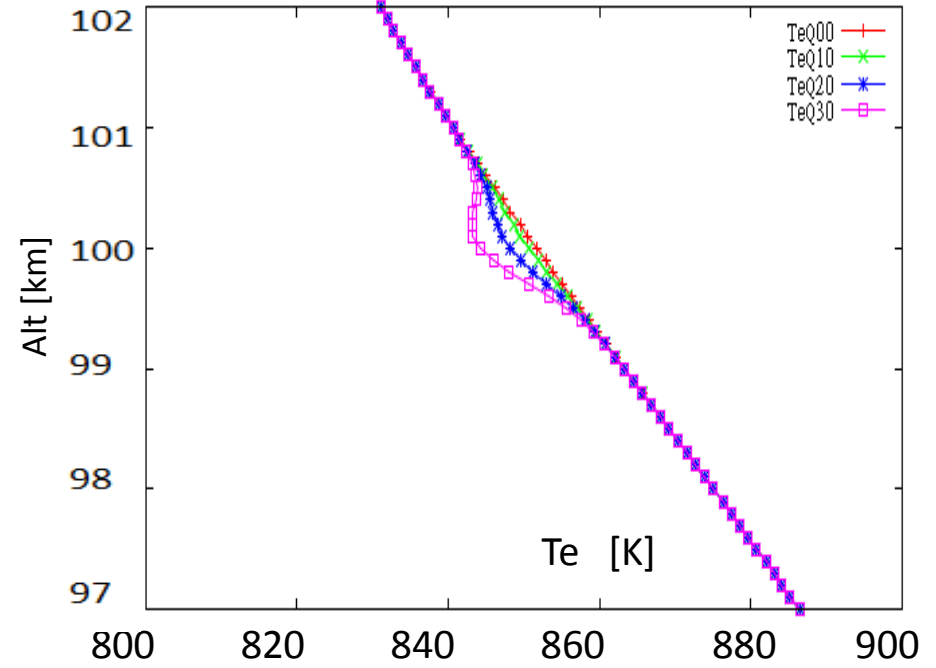
中性大気密度が低くなると電子温度減少幅は大きくなる

電子温度を観測値(800~900 K)に近づけた場合

電場 0.22 V/m



電場 0.23 V/m



密度の倍率	温度 [K]	差[K]
1	753.04	0
10	751.80	-1.24
20	748.74	-4.3
30	743.76	-9.28

密度の倍率	温度 [K]	差[K]
1	851.74	0
10	850.73	-1.01
20	848.26	-3.48
30	844.27	-7.47

電場を変化させ加熱率を増やすと電子温度が高くなり、 E_s 層内の温度減少幅が大きくなる

クーロン対数の正確な表現を使用

- * イオンとの衝突による冷却効果(L10)において, クーロン対数 $\ln\Lambda$ の値は17として計算していたが, Itikawa (1978)の式により算出した値を用いた.

$$L10 : \text{Cooling rate} = 3.2 \times 10^{-8} N_e \frac{T_e - T_i}{T_e^{3/2}} \ln\Lambda N_i$$

$$\ln\Lambda = \ln\left(\frac{4kT}{\gamma^2 z_i e^2 k_e}\right) - \frac{k_e^2 + k_i^2}{k_i^2} \ln\left[\frac{(k_e^2 + k_i^2)^{1/2}}{k_e}\right]$$

$$k_i^2 = 4\pi N_i z_i^2 e^2 / kT_i$$

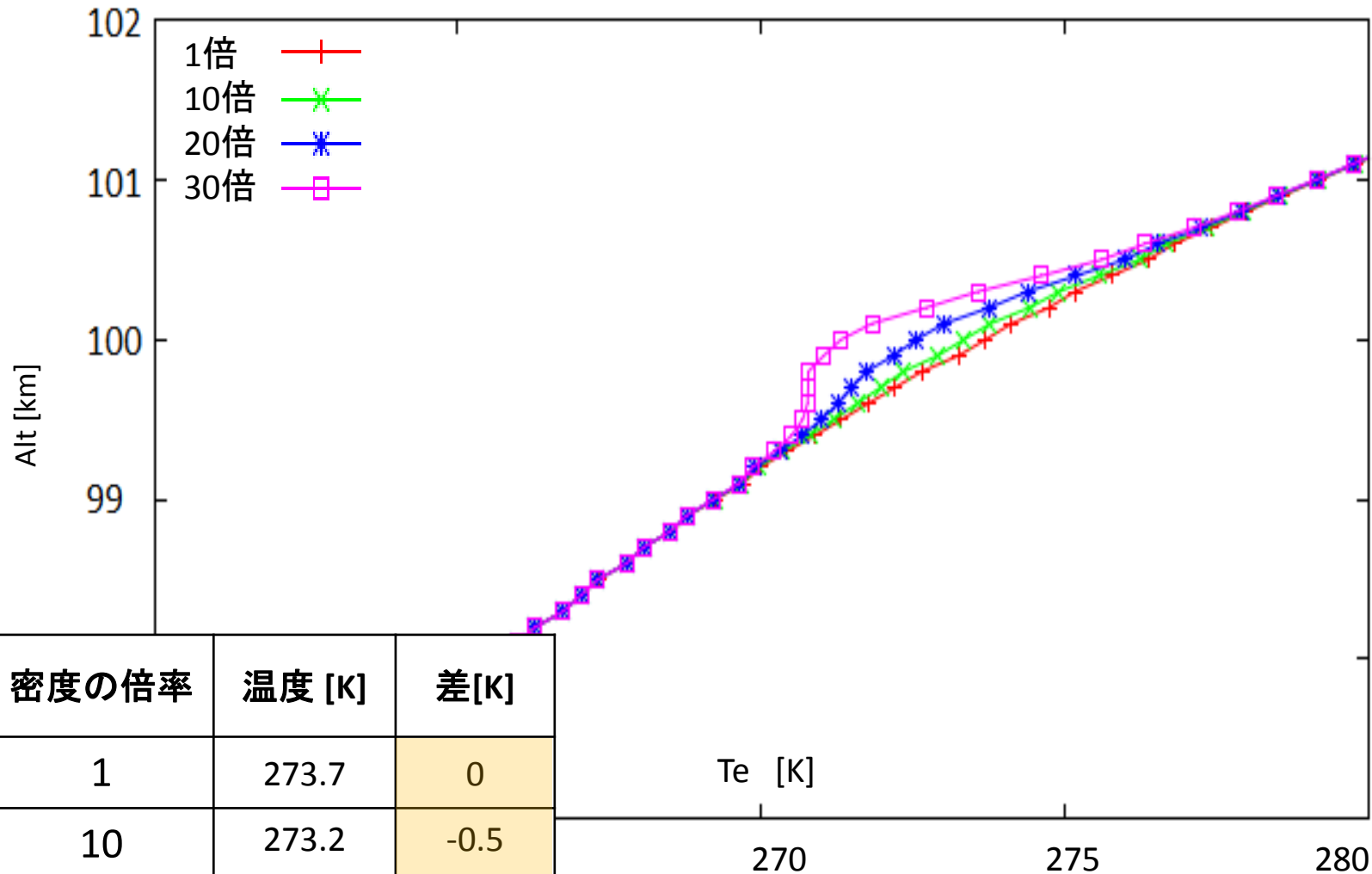
$$k_e^2 = 4\pi N_e e^2 / kT_e$$

$$\ln\gamma = 0.577 \text{ (Euler's constant)}$$

$$z_i = \text{the atomic charge number}$$

(Itikawa, 1971)

正確なクーロン対数を使用した場合



減少幅は若干大きくなった

ジュール加熱を一定にした場合

$$Q_{e\perp} = (E_{\perp}c/B)^2 N_e M_e \sum_n \langle \nu_{en} \rangle$$

E_{\perp} : the perpendicular electric field

B : the geomagnetic field strength

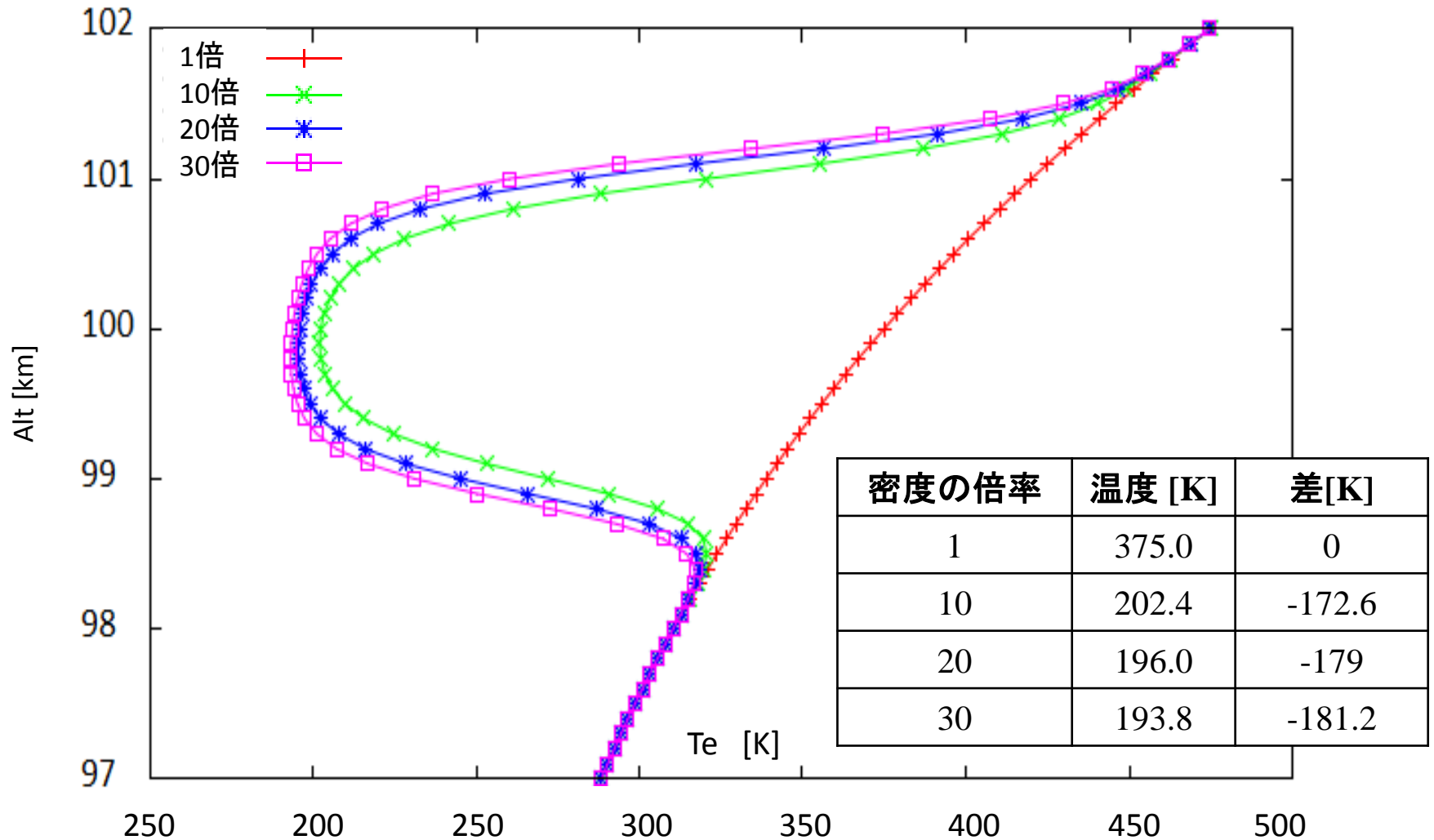
c : the speed of light

$\langle \nu_{en} \rangle$: the average electron-neutral collision frequency

(Rees and Walker, 1967)

- 電子密度によらず加熱率が一定の時、温度プロファイルがどのように変化するか計算を行った。
- Es層通過前である高度95 kmでの加熱率(Q=23600 J)を用いて計算を行った。

ジュール加熱を固定した結果



電子密度に依存しない一定の加熱率を与えると、Es層内の温度減少幅は著しく大きくなる

計算結果の考察

- * 高度100km付近のスプラディックE層内において、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確認できた。
- * 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。
- * ① 中性大気の密度を全体的に下げる
- * ② 背景温度に近づける
- * ③ クーロン対数としてItikawa[1971]のより正確な式を用いる
➡ 電子温度の減少幅が大きくなった。
- * パラメータを変え数値計算を行った結果、温度減少幅の観測値と計算値は多少近づいたが、いまだ大きな差がある
- * 電子密度によらず一定の加熱率を全高度範囲に与えた場合、Es層内の電子温度が周囲に比べ減少したことから、Es層内の電子密度増加による熱容量の増大が温度低下を引き起こしている可能性が考えられる。

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た結果、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Es層で大きくなった可能性が考えられる。
- ※ 中性大気の密度が全体的に下がる、或いは背景の電子温度が高いとき、電子温度の減少幅が大きくなった。
- ※ スポラディックE層中では、高い電子密度による熱容量の増大が、電子温度の現象を引き起こしている可能性がある。