

電離圏電気伝導度とChapman理論

家田章正 (名大STEL)

目的:

電気伝導度の太陽天頂角依存性を、理解する。

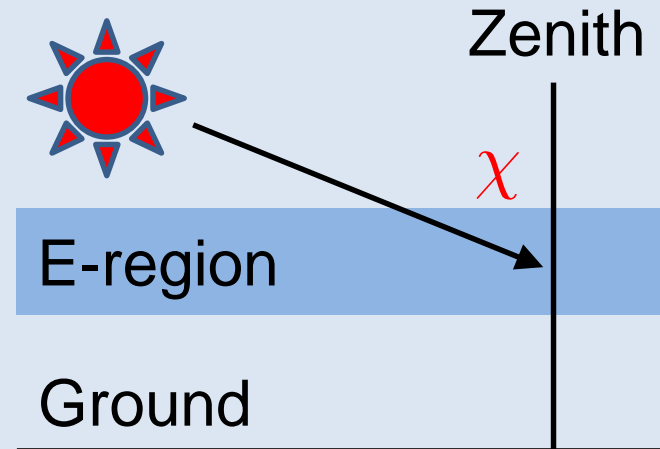
結論:

Chapman理論に基づき、近似式を導出:

$$\Sigma_P = \Sigma_{P,\chi=0} (\cos \chi)^{\frac{1+\Gamma}{2}}$$

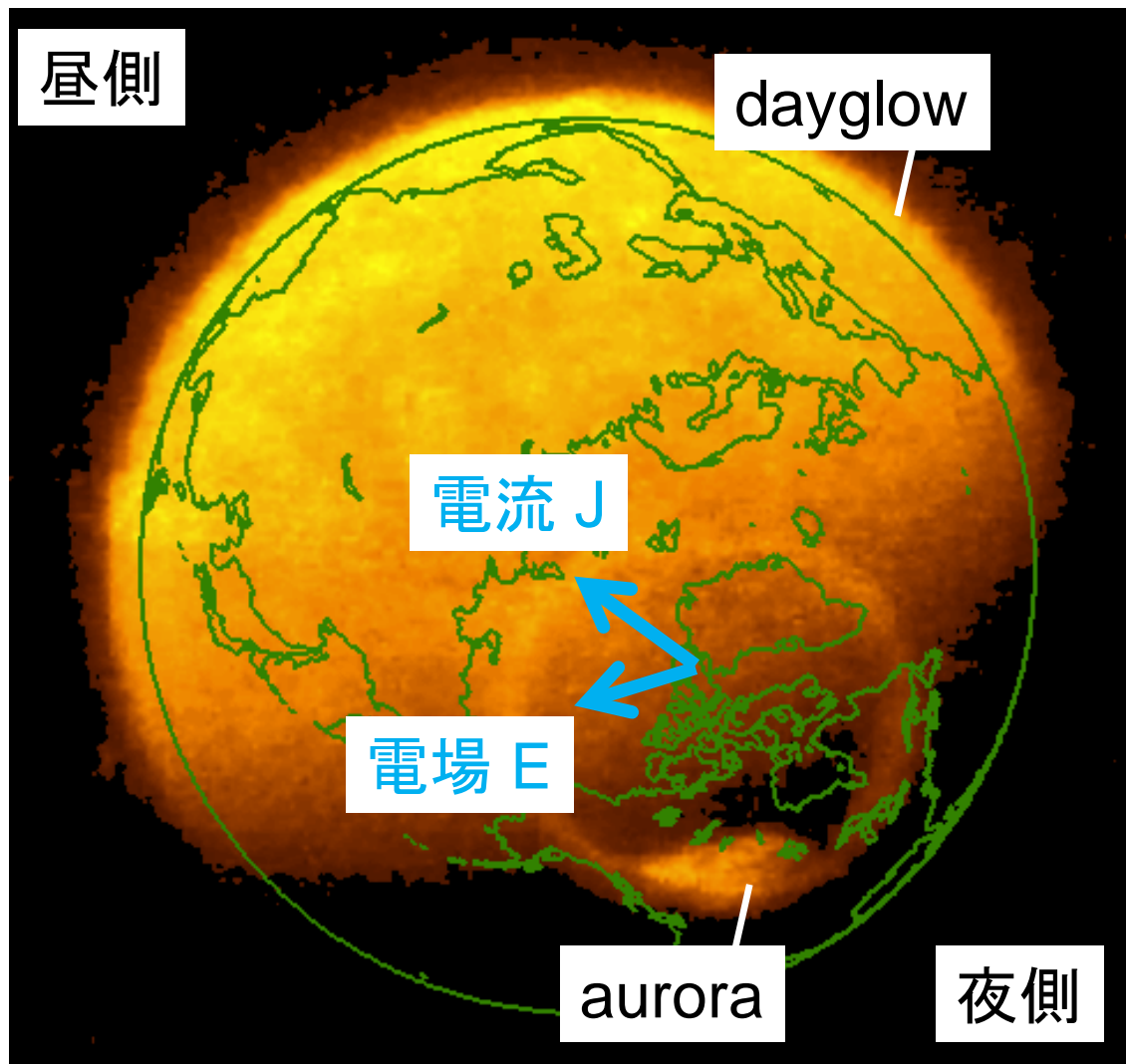
$$\Sigma_H / \Sigma_P = (\Sigma_H / \Sigma_P)_{\chi=0} + C \left[(\cos \chi)^{-\Gamma} - 1 \right]$$

$$\Gamma \equiv dH / dh$$



Ieda, A., et al., JGR, 2014.

電離圏電気伝導度



電気伝導度 Σ

- 電流の流れやすさ。
→ \propto 電子密度。
- 電場 E と電流 J を、
オームの法則 $J = \Sigma E$
により関係づける。
- 定常でのイオン・電子の
運動方程式。
→ 電離層の本質。

Polar/VIS, U of Iowa

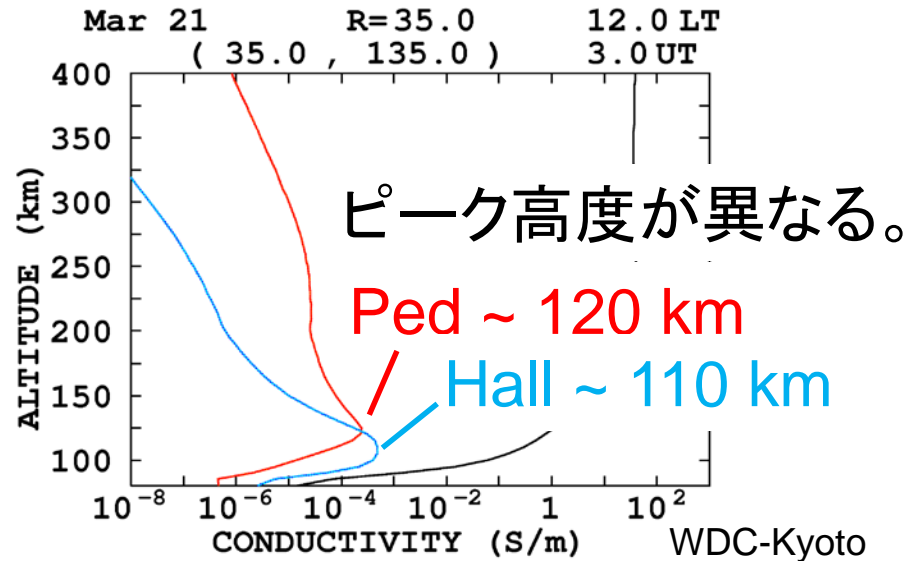
電離圏の電気伝導度:

Conductivity: $\mathbf{j} = n(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e) = \sigma_P \mathbf{E} - \sigma_H \mathbf{E} \times \mathbf{B}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_P = \frac{\epsilon n}{B} \left(\frac{\nu_e \Omega_e}{\nu_e^2 + \Omega_e^2} + \frac{\nu_i \Omega_i}{\nu_i^2 + \Omega_i^2} \right) \\ \sigma_H = \frac{\epsilon n}{B} \left(\frac{\Omega_e^2}{\nu_e^2 + \Omega_e^2} - \frac{\Omega_i^2}{\nu_i^2 + \Omega_i^2} \right) \end{array} \right.$$

磁場・中性との衝突項。

∝ 電子密度

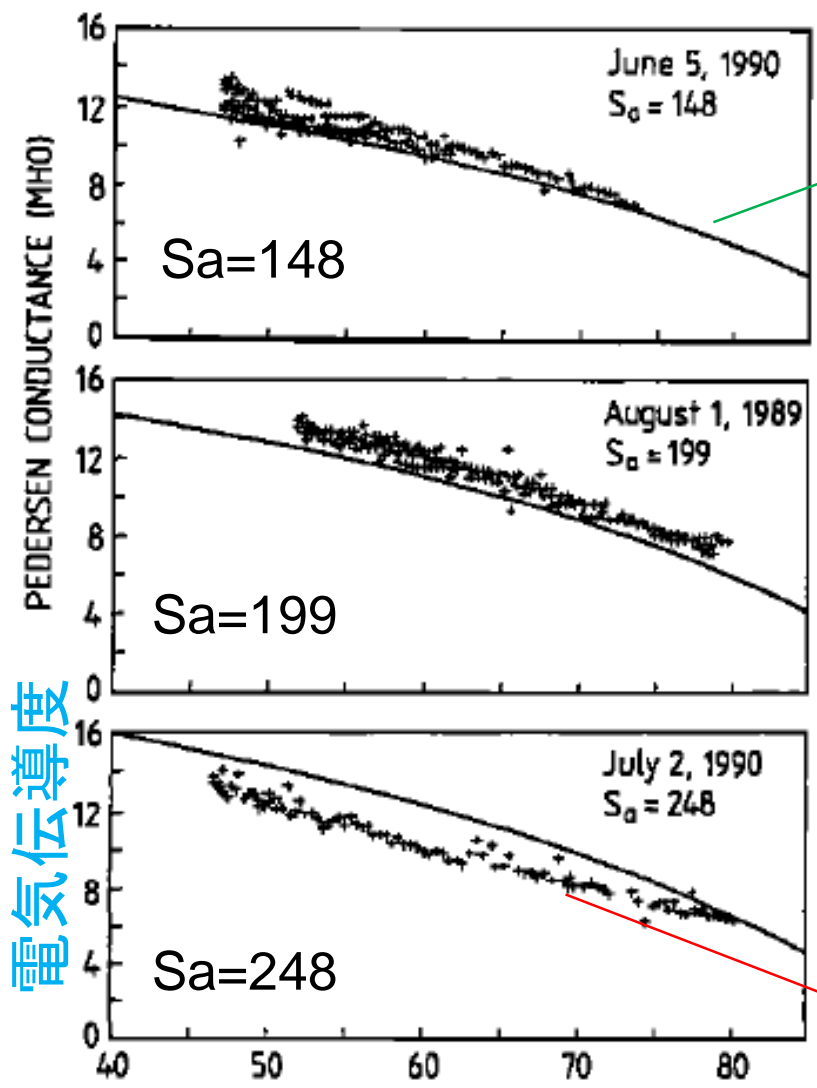


Conductance:

conductivityの高度積分: $\Sigma = \int_{80km}^{300} \sigma dh$

この量の、太陽天頂角依存性を理解したい。

電気伝導度の、太陽放射(F10.7)・太陽天頂角依存性:



Moен and Brekke (1993):

$$\Sigma_P = S_a^{0.49} \left(0.34 \cos \chi + 0.54 \sqrt{\cos \chi} \right)$$

$$\Sigma_H = S_a^{0.53} \left(0.81 \cos \chi + 0.93 \sqrt{\cos \chi} \right)$$

- EISCATレーダー観測。
- 電気伝導度を、F10.7と太陽天頂角で表す。
- 2つのChapman層を想定。
- 関数の形が、理論的におかしい。

実測された電気伝導度。
理論値より小さい。

太陽が頭上
太陽天頂角
太陽が地平線に近い

電気伝導度

大規模データ解析の意義:

多様な、時間・空間・物理量のデータ。

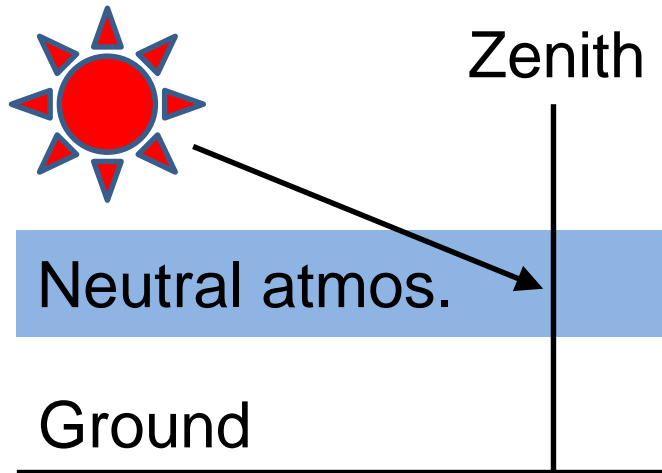
定性的な相関関係を発見。
Solar-maxでは増えるなど。

ロバストな**経験式**。
実用目的。

ロバストな**理論**の同定。
理屈っぽい関数。

今日の話は、こちら。

Chapman theory of electron productions:



Assumption:

Hydrostatic
neutral atmos.:

$$p_n = p_{n,0} \exp\left(-\frac{h}{H}\right)$$

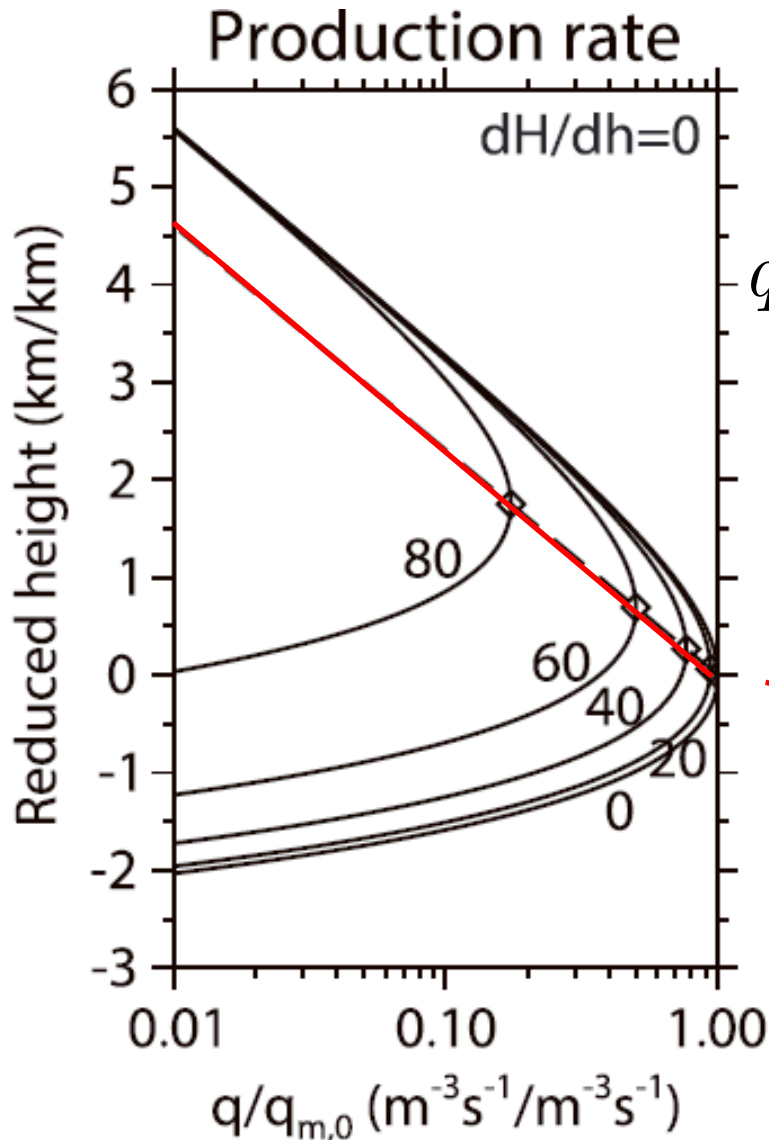
Solar radiation:

$$\frac{dI}{ds} = -n_n \cdot \sigma \cdot I$$

Electron production:

$$q = -C \cdot \frac{dI}{ds}$$

Chapman theory on the SZA dependence:



Chapman's electron production rate:

$$q = q_{m,0} \exp \left(1 - z - \frac{1}{\cos \chi} \exp(-z) \right)$$

where $z \equiv \frac{h - h_{m,0}}{H}$

Peak production rate:

$$q_{\max}(\chi) = q_{\max, \chi=0} \cos \chi$$

Peak height:

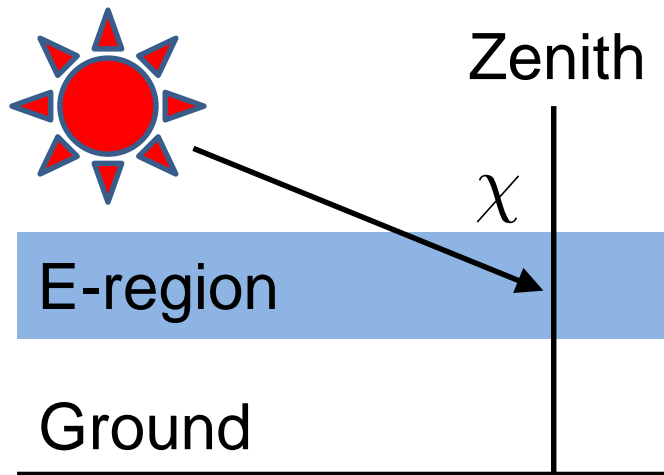
$$z_{\max}(\chi) = -\log(\cos \chi)$$

Chapman theory on the SZA dependence:

Solar-EUV-associated electrons:

Equilibrium:

Production = Loss



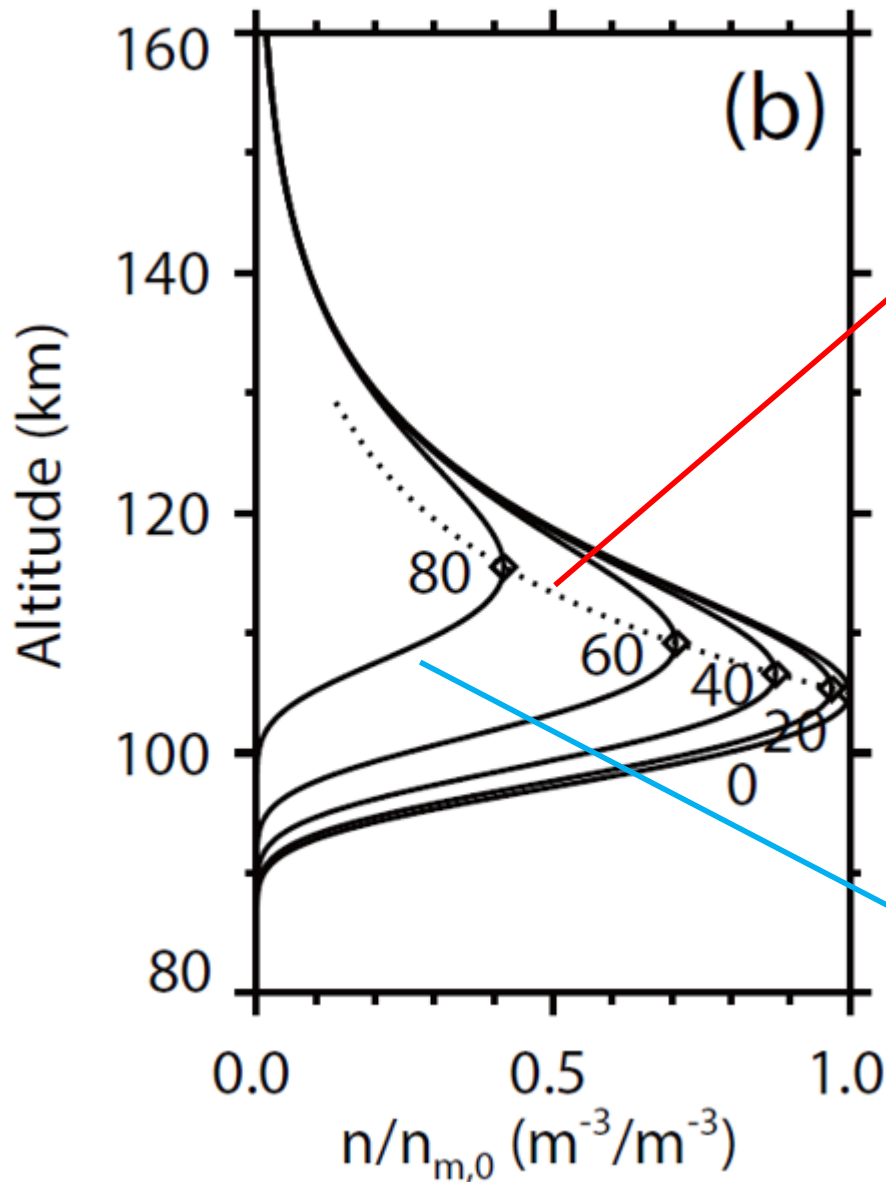
Loss rate:

E-region: (Chapman- α)

$$L_E \propto N_e^2 \rightarrow N_{e,\max} \propto \sqrt{\cos \chi}$$

(classic)

Chapman理論による、電子密度(E層)



最大密度: $n_{\max} \propto \sqrt{\cos \chi}$
夜に近づくと、その高度 h_m は高くなる。

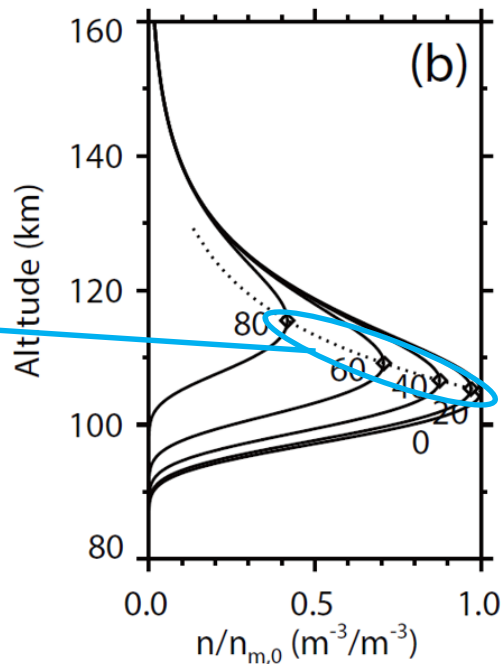
太陽天頂角が80度(地平線近く)での、電子密度プロファイル。

高度積分した電気伝導度の、太陽天頂角依存性

過去の研究: Vickrey+ 1981

$$\Sigma \propto \sqrt{\cos \chi} \propto n_{\max}$$

Chapmanのピーク電子密度のみで、高度積分値を表現。



高度積分した電気伝導度の、太陽天頂角依存性

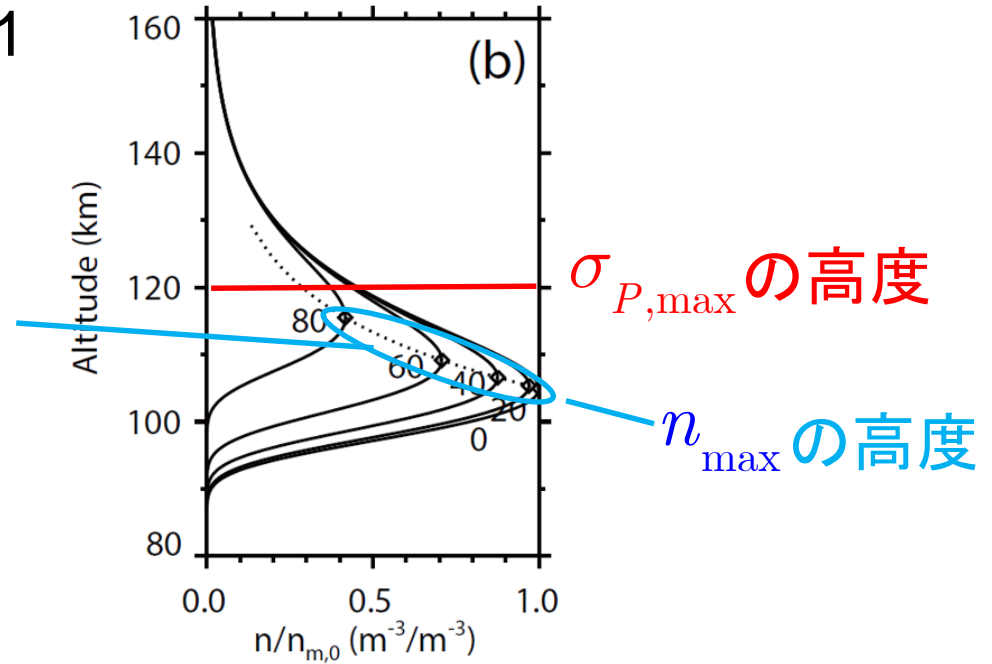
過去の研究: Vickrey+ 1981

$$\Sigma \propto \sqrt{\cos \chi} \propto n_{\max}$$

Chapmanのピーク電子密度のみで、高度積分値を表現。

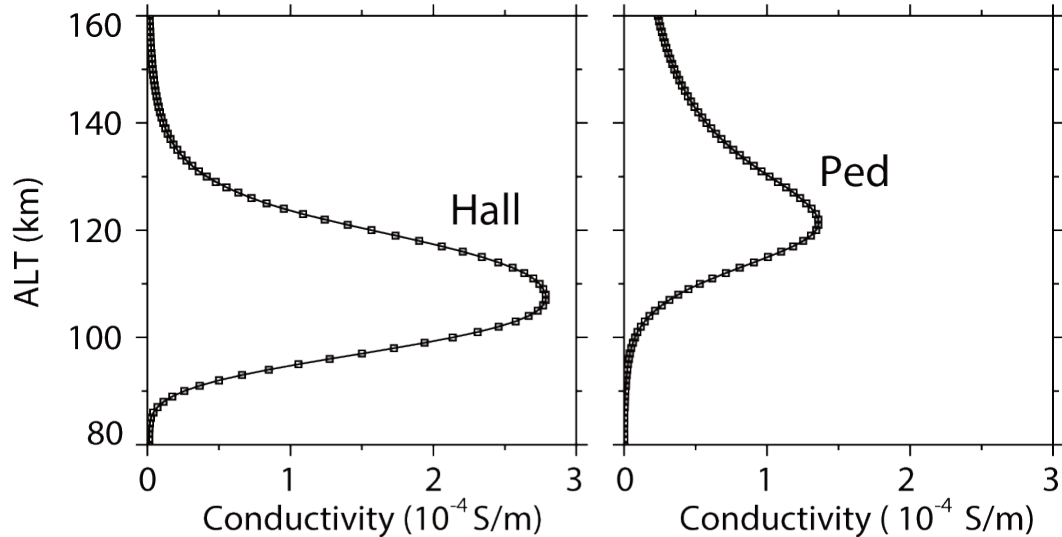
疑問:

- 厚み一定と仮定。
- $\sigma_{\max} \propto n_{\max}$ と仮定。



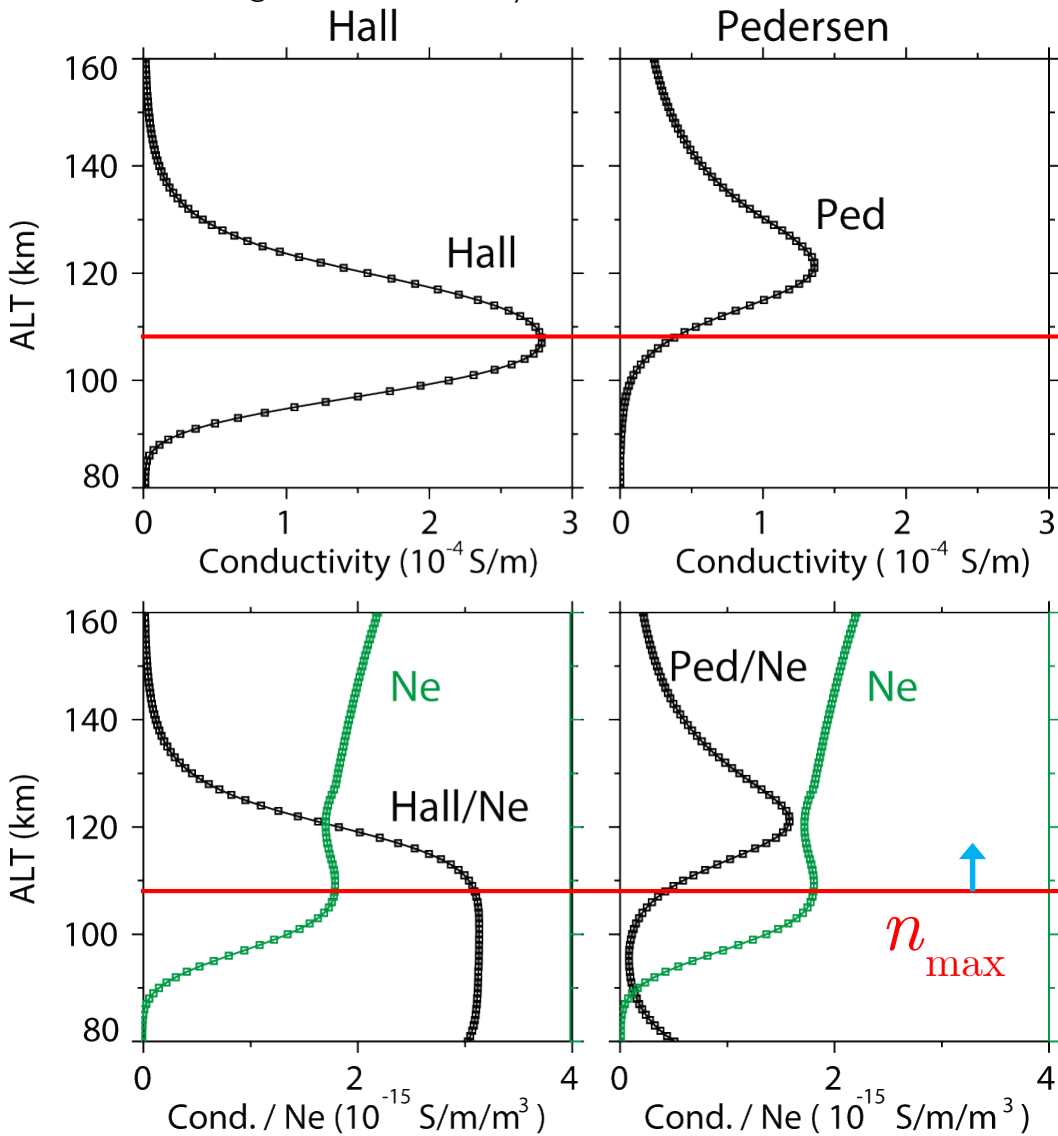
Hall

Pedersen



天頂角依存性の新解釈:

電気伝導度の
高度プロファイル。



天頂角依存性の新解釈:

電気伝導度の
高度プロファイル。

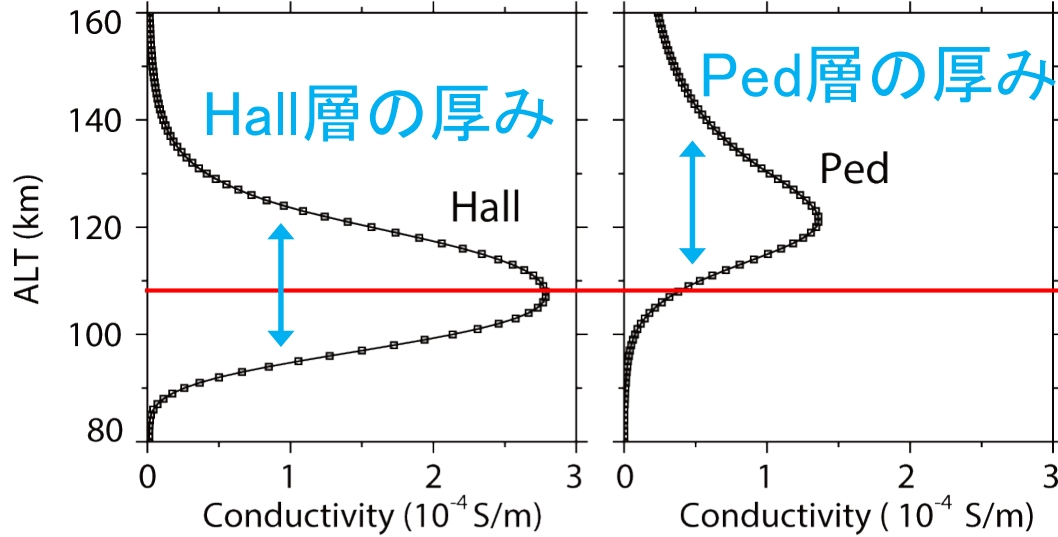
天頂角が上がると、
 n_{max} 高度が上がる。

E層上部では、電子密度は、
ほぼflat。

→ だから、 $\sigma_{P,max} \propto n_{max}$

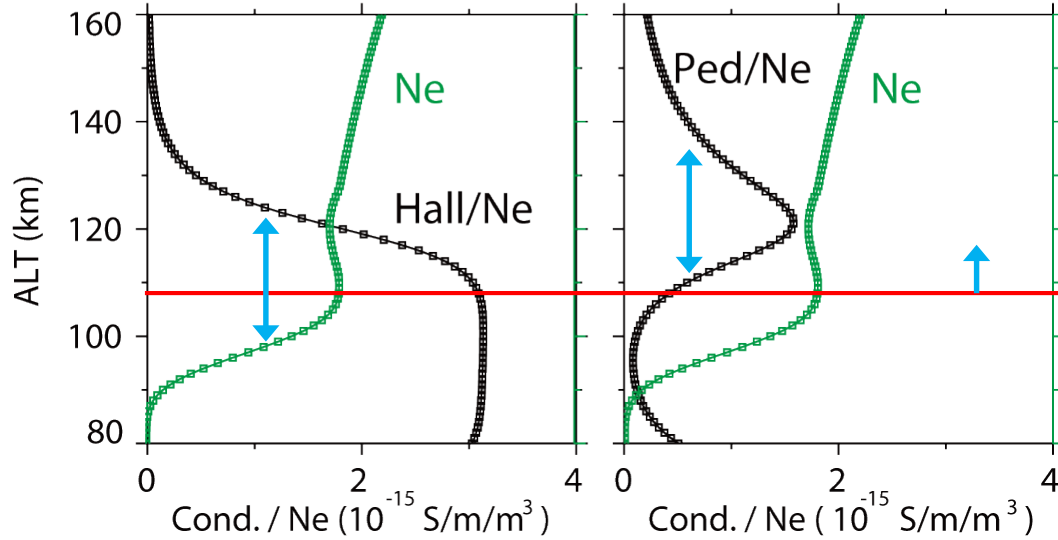
Hall

Pedersen



天頂角依存性の新解釈:

電気伝導度の
高度プロファイル。



天頂角が上がると、
 n_{\max} 高度が上がる。

- Hall層のみ薄くなる。
- Hall伝導度は、急激に下がる。

高度積分した電気伝導度の、太陽天頂角依存性

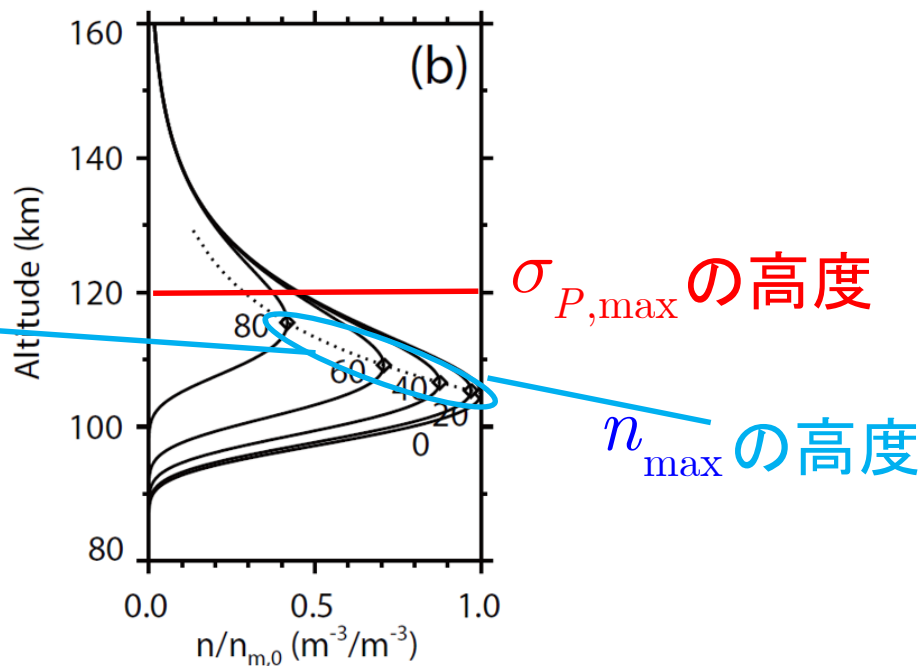
過去の研究: Vickrey+ 1981

$$\Sigma \propto \sqrt{\cos \chi} \propto n_{\max}$$

Chapmanのピーク電子密度のみで、高度積分値を表現。

疑問:

1. 厚み一定と仮定。
2. $\sigma_{\max} \propto n_{\max}$ と仮定。



本研究: Chapmanのピーク高度で、Hall層の厚みを表現。

1. Chapmanのピーク高度で、Hall層の厚みを表現。
2. E層topsideで電子密度一様。
3. 中性大気のスケールハイト
Hの高度変化 $\Gamma \equiv dH / dh$ を考慮。

$$\Sigma_P = \Sigma_{P,\chi=0} (\cos \chi)^{\frac{1+\Gamma}{2}}$$

$$\Sigma_H / \Sigma_P = C_1 + C_2 (\cos \chi)^{-\Gamma}$$

Chapman theory on the SZA dependence:

$$z \equiv \frac{h - h_{m,0}}{H}$$

production rate:

なぜスケールハイトが関係あるか：
中性大気の圧カプロファイルは固定。
→ 上方ほど温度が高いと、密度は低い。
→ 電子生成率が変わる。

Ideal Chapman:

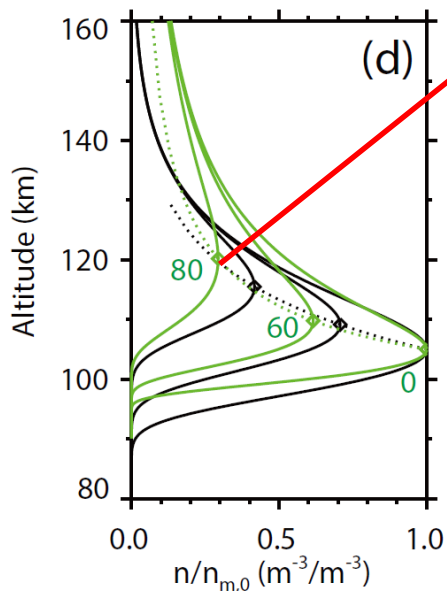
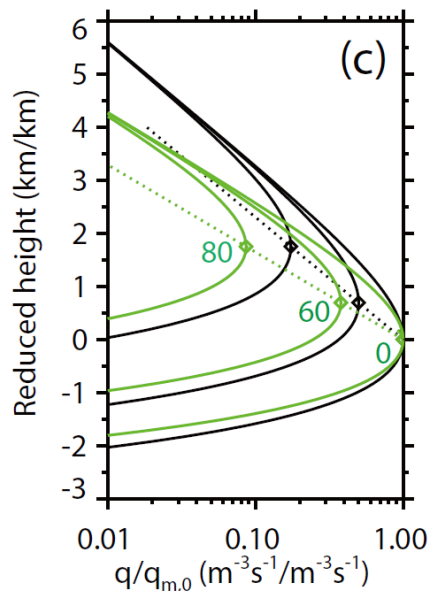
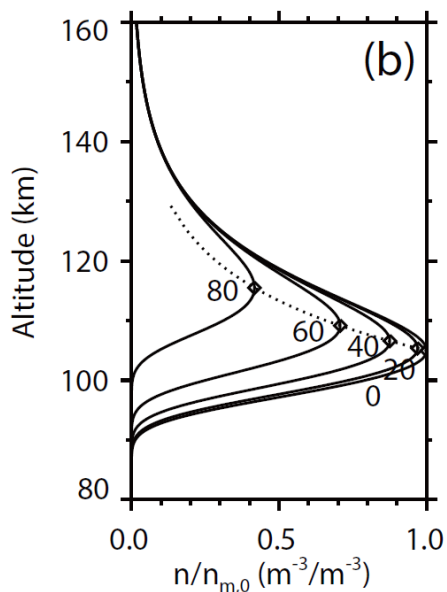
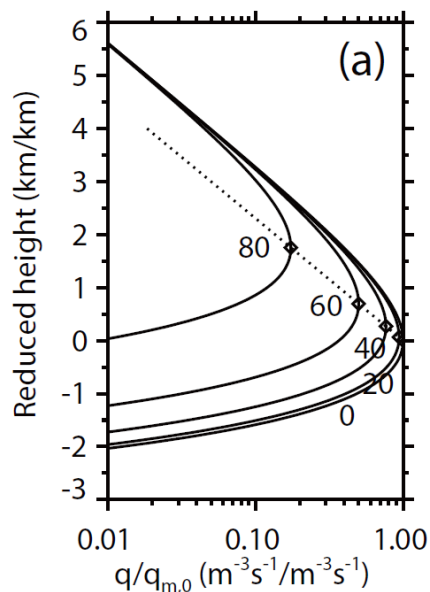
$$q = q_{m,0} \exp\left(1 - z - \frac{1}{\cos \chi} \exp(-z)\right)$$

Modified Chapman (variable neutral scale height):

$$q = q_{m,0} \exp\left(\left(1 + \frac{dH}{dh}\right)\left(1 - z - \frac{1}{\cos \chi} \exp(-z)\right)\right)$$

プラズマ生成率

密度 (E領域)



Chapman理論の補正:
中性大気のスケールハイトの、
高度変化による効果。

スケールハイトが、
高度と共に長くなる場合。

→
最大密度は低くなり、
最大密度の高度は高くなる。

伝導度に、Chapman理論は関係無いことを主張したが、式が間違い。

Original paper: (in error)

Should be:

Chapman production rate:

Chapman production rate:

$$q = q_m \exp\left(1 - x - e^{-x} / \cos \chi\right)$$

Not q_m but should be

where $q_m = cste \cdot \cos \chi$

$$q_{m,0} = const$$

Conclusion:

Not Chapman-peak-like:

$$\sum_H \propto (\cos \chi)^{1.1}$$

$$\sum_P \propto (\cos \chi)^{0.8}$$

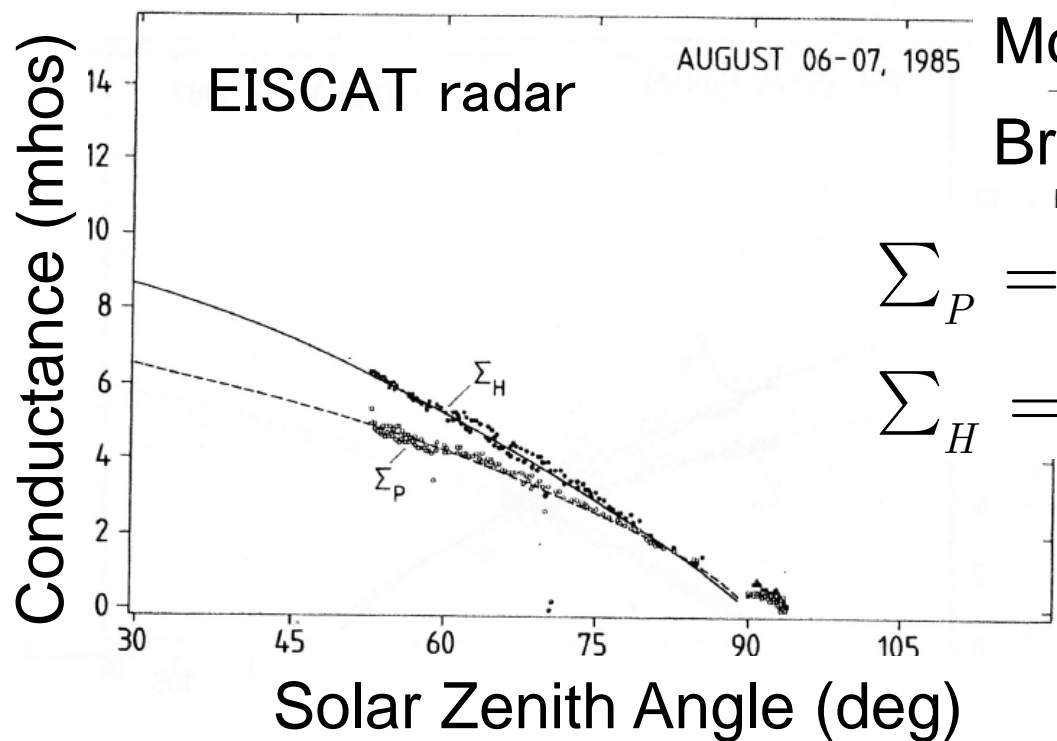
Conclusion:

Hall is modified Chapman-like:

$$\sum_H \propto (\cos \chi)^{0.6}$$

$$\sum_P \propto (\cos \chi)^{0.3}$$

過去の研究について: Moen, Brekke: 2つのChapman層



Moen and Brekke (GRL, 1993):

Brekke and Hall (AGU, 1988):

$$\Sigma_P = 3.05 \cos \chi + 4.06 \sqrt{\cos \chi}$$

$$\Sigma_H = 6.28 \cos \chi + 2.85 \sqrt{\cos \chi}$$

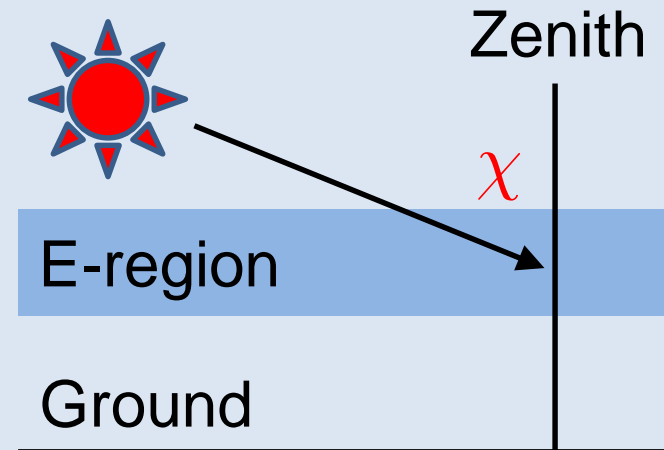
F-type

E-type

- 伝導度について、F層の寄与が、E層の寄与と同等でおかしい。
- F2層の電子ピークが、電子生成ピークであると、勘違いしている。
- 独立変数に相関があるので、純粹経験式としても好ましくない。

まとめ：電離圏電気伝導度の太陽天頂角依存性

1. 古典的には、電気伝導度は、Chapman理論の最大電子密度だけで記述されてきた。厚みなどは議論なし。
2. その後、Chapman理論で電気伝導度が記述できるか否か、二流派があった。→ どちらも勘違い。
3. 本研究では、E層topsideで、Chapman理論を修正すれば良いことを示した。
4. また、二流派の混乱の、他の原因は、
 - ・Hall層の厚みの変化
 - ・中性大気スケールハイトの無視であることを議論した。



**Study on the Solar Activity Dependence
of the *E* Region Peak Electron Density
and Some Atmospheric Parameters**

Ken-ichi MAEDA and Shoichiro FUKAO

Kyoto University, Kyoto, Japan

■ Chapman電離層についての、最先端の議論。

イオゾンデから、単純に推定した、
中性大気スケールハイトの
上向き勾配。

太陽光が多波長であることを
考慮した、正しい値は、小さい。

Table 2. List of N_{00} and Γ ; and Their Corrected Values

| Group | N_{00} (10^5 cm^{-3}) | N_{00}^{cor} (10^5 cm^{-3}) | Γ | Γ_{cor} | Season |
|----------------|--|---|----------|-----------------------|------------|
| A | 1.49 | 1.20 | 0.22 | 0.12 | Whole year |
| B | 1.44 | 1.16 | 0.33 | 0.24 | „ |
| C ₁ | 1.31 | 1.06 | 0.24 | 0.16 | Summer |

中性大気温度

高度110kmと120kmの、温度差:

- 米国標準大気1975モデル: 120 K ($\Gamma = dH/dh = 0.4$)
- 前田憲一先生のイオノゾンデ: 60 K ($\Gamma = 0.2$)
- 前田憲一先生の修正値: 40 K ($\Gamma = 0.13$)

- 過去の文献では、大気モデルとイオノゾンデ観測の、違いについての、議論は見当たらない。
- 前田先生の修正によると、さらに違いは大きい。
- 前田先生の修正について、引用が見当たらない。

→ E層密度の高度プロファイルの基礎が確定していない。

→ 何かご記憶の方？