

木星大気の静的安定度

理学部 地球惑星科学科 地球および惑星大気科学研究室 松村 佳明 (指導教員 林 祥介)

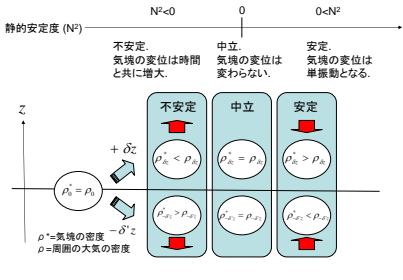
1. はじめに

本研究の目的

- 木星大気において、大気中の凝結成分(水) 割合が増えるに従って、大気の上方向の混ざりやすさがどのように変化するかを、静的安定度の値を計算することにより調べる。
- 凝結成分の少ない場合、多い場合の近似式をテイラー展開を使って求め、近似なしの式と比較する。

静的安定度 (N^2)

- 浮力振動数 N の2乗で定義
- 大気の安定性を表す指標
- 大気の上方向の混ざりやすさを示す



凝結による静的安定度への影響

潜熱による加熱

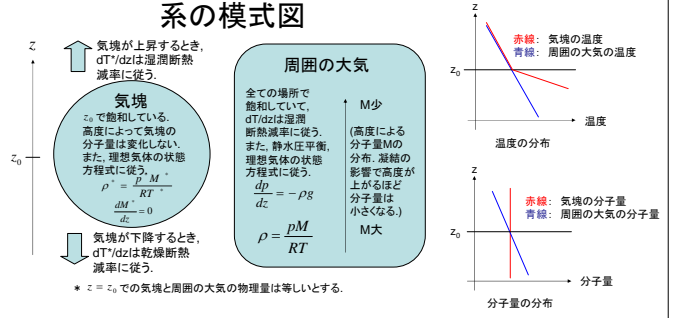
凝結が生じることにより潜熱が解放され、大気が温められることにより、大気の密度に影響を及ぼす。

分子量の変化

凝結が生じることにより、大気の分子量が変わり、大気の密度に影響を及ぼす。

2. 系の設定

系の模式図



式の導出

扱う物理量は、 M : 分子量, p : 圧力, ρ : 密度, T : 温度, C_p : 定圧モル比熱, R : 普遍気体定数, g : 重力加速度とする。なお、気塊の物理量は * をつけ記述する。

乾燥成分と凝結成分の分子量をそれぞれ M_d, M_c 、また、比熱をそれぞれ $C_{p,d}, C_{p,c}$ とおくと、大気の分子量 M と比熱 C_p は、乾燥成分と凝結成分のモル比 X の関数として以下のようにかける。

$$M = M_d(1-X) + M_c X \quad C_p = C_{p,d}(1-X) + C_{p,c} X$$

乾燥成分と凝結成分の分子量をそれぞれ M_d, M_c 、また、比熱をそれぞれ $C_{p,d}, C_{p,c}$ とおくと、大気の分子量 M と比熱 C_p は、乾燥成分と凝結成分のモル比 X の関数として以下のようにかける。

$$\frac{dT^*}{dz} = -\frac{Mg}{C_p} \left(\frac{1 + \frac{\lambda X}{RT^*}}{1 + \frac{\lambda M_c X}{C_{p,c} RT^*}} \right) \quad (4)$$

これを N^2 を X の関数として書くと以下のようになる。

$$N^2 \equiv \frac{g}{T} \left(\frac{dT^*}{dz} - \frac{dT^*}{dz} \right) - g \left(\frac{1}{M} \frac{dM}{dz} \right) \quad (2)$$

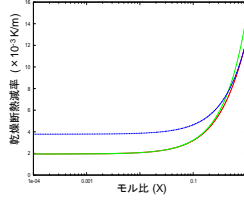
3. 計算結果

計算に用いた定数

乾燥成分		湿潤成分	
分子量: M (kg/mol)	2.323×10^{-3}	分子量: M (kg/mol)	18.00×10^{-3}
比熱: C_p (J/K mol)	27.66	比熱: C_p (J/K mol)	33.50
重力加速度: g (m/s ²)			23.20
気体定数: R (J/K mol)			8.314
温度: T (K)	相変化のエンタルピー: λ (J/K mol)		
case1	200	54417	
case2	300	44492	
case3	400	40518	
case4	500	38384	

- 乾燥成分: 水素とヘリウム (He/H=0.095)
- 凝結成分: 水
- 温度に関して得に記述のないグラフは $T=300K$

乾燥断熱減率



乾燥断熱減率の式

$$\frac{dT^*}{dz} = -\frac{Mg}{C_p} \quad (3)$$

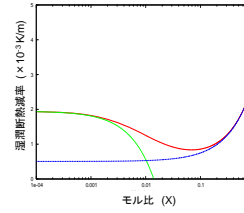
- 赤線: 近似なしの式
- 緑線: 凝結成分の少ない近似
- 青線: 凝結成分の多い近似

近似式の精度

凝結成分の量	誤差が1割以内の範囲
少ない	$0 \leq X \leq 0.6$
多い	$0.4 \leq X \leq 1$

- 凝結成分のモル比が大きくなると乾燥断熱減率の値は増加する。
- 近似式は、凝結成分が少ない場合、多い場合とも広い範囲で精度良く近似できている。

湿潤断熱減率



湿潤断熱減率の式

$$\frac{dT^*}{dz} = -\frac{Mg}{C_p} \left(\frac{1 + \frac{\lambda X}{RT^*}}{1 + \frac{\lambda M_c X}{C_{p,c} RT^*}} \right) \quad (4)$$

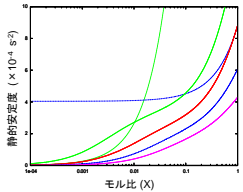
- 赤線: 近似なしの式
- 緑線: 凝結成分の少ない近似
- 青線: 凝結成分の多い近似

近似式の精度

凝結成分の量	誤差が1割以内の範囲
少ない	$0 \leq X \leq 0.004$
多い	$0.13 \leq X \leq 1$

- 湿潤断熱減率の値は、モル比が0.1あたりまでは減少しているが、そこからまた増加に転じる。

静的安定度とその近似式



静的安定度の式

$$N^2 \equiv \frac{g}{T} \left(\frac{dT^*}{dz} - \frac{dT^*}{dz} \right) - g \left(\frac{1}{M} \frac{dM}{dz} \right) \quad (2)$$

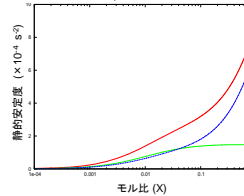
- 赤線: 近似なしの式
- 緑線: 凝結成分の少ない近似
- 青線: 凝結成分の多い近似

近似式の精度

凝結成分の量	誤差が1割以内の範囲
少ない	$0 \leq X \leq 0.001$
多い	$0.4 \leq X \leq 1$

- 気塊が下降するときの静的安定度、凝結成分のモル比が増えるにつれて、その値は大きくなる。
- 近似式が1割以内の誤差で収まる範囲は、凝結成分が多い場合は $0.4 \leq X \leq 1$ の範囲で成り立つが、少ない場合は $0 \leq X \leq 0.001$ となり、誤差が1割以内となる範囲は狭い。

静的安定度 (潜熱と分子量の効果)



静的安定度の式

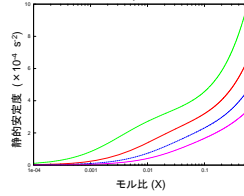
$$N^2 \equiv \frac{g}{T} \left(\frac{dT^*}{dz} - \frac{dT^*}{dz} \right) - g \left(\frac{1}{M} \frac{dM}{dz} \right) \quad (2)$$

潜熱の効果 分子量の効果

- 赤線: 静的安定度 (N^2)
- 緑線: 分子量の効果
- 青線: 潜熱の効果

- 静的安定度の値一凝結成分の割合が増えるほど大きくなる。
- 潜熱の効果一凝結成分の割合が増えるほど大きくなる。
- 分子量の効果一凝結成分のモル比が0.1あたりまでは増えるが、モル比が0.1を超えたらほとんど変化しなくなる。

静的安定度 (温度を変えたとき)



静的安定度の式

$$N^2 \equiv \frac{g}{T} \left(\frac{dT^*}{dz} - \frac{dT^*}{dz} \right) - g \left(\frac{1}{M} \frac{dM}{dz} \right) \quad (2)$$

- 緑線: case1 ($T=200K$)
- 赤線: case2 ($T=300K$)
- 青線: case3 ($T=400K$)
- 紫線: case4 ($T=500K$)

- 静的安定度は温度の逆数に比例するので、温度が高くなるほど静的安定度の値は小さくなる。

4. まとめ

- 凝結成分のモル比が多くなるほど、静的安定度の値は大きくなり、大気は上下方向により混ざりにくくなる。
- 凝結成分のモル比が0.1あたりまでは温度による効果、分子量効果が同じくらいの割合で影響しているが、モル比が0.1を超えたらからは温度による効果の影響のほうが大きくなる。
- 静的安定度の近似式をテイラー展開を使って求めると、凝結成分が少ない場合は近似なしの式と1割以内に収まる範囲は $0 \leq X \leq 0.001$ と狭いが、凝結成分の多い場合は $0.4 \leq X \leq 1$ という比較的広い範囲で精度良く近似できる。

参考文献

- Atraya, S.K. and Romani, P. N., 1985: Photochemistry and clouds of Jupiter, Saturn and Uranus, in *Recent Advances in Planetary Meteorology*, edited by G. E. Hunt, Cambridge Univ. Press, London, pp. 17-68.
- Weidenschilling, S. J. and Lewis, J. S., 1973: Atmospheric and cloud structure of the Jovian planet, *Icarus*, **20** 456 - 476.
- 小倉龍光, 1984: 一般気象学, 東京大学出版会, pp. 50 - 73.
- 小出昭一郎, 1980: 基礎物理学2 熱学, 東京大学出版会, pp. 1 - 46.
- 杉山一博, 2005: 静的安定度の計算(熱力学計算一: oboro 解説文書), <http://www.gfd-dennou.org/library/oboro/doc/Stability.pdf>
- 日本化学会, 1993: 化学物質改訂第4版基礎編, pp. 117 - 124.