

金星表面はなぜ暑い？

HP 管理者 近藤邦明

CO₂ 地球温暖化仮説の正しさを説明する事実として、金星の表面温度が高いことを紹介する記事を見かけます。曰く、「金星の下層大気の組成は殆ど CO₂ (96.5%) なので、強い温室効果によって金星の表面温度は非常に高い」と説明されています。

例えば、権威ある研究機関である国立環境研究所のホームページでもそのように説明しています。http://www-cger.nies.go.jp/qa/4/4-1/qa_4-1-j.html

しかし、本当にそうなのでしょうか？地球表面と金星表面の大気環境の決定的な違いには大気組成のほかに大気圧の違いがあります。本稿では、大気圧の違いに着目してなぜ金星表面温度が高いのかを明らかにします。

1. 気体の断熱過程

1-1 気体の状態方程式

1mol の理想気体についての状態方程式は次の式で表されます。

$$pV = RT \quad \text{①}$$

1-2 定容比熱、定圧比熱、比熱比

圧力 p の下で 1mol の気体に、外部から微小な熱量 dQ を与えたとき、体積が dV だけ変化したとします。この時、1mol の気体の受け取った熱量 dQ は、圧力 p が気体の体積変化 dV に対してした仕事と内部エネルギー（気体分子の運動エネルギー） U の変化 dU の和に等しくなります。

$$dQ = dU + pdV \quad \text{②}$$

今、 dQ を与えることによって、気体の体積は変化しないものとします。この場合、②式において $dV = 0$ と置くことが出来ます。気体の体積が変化しない場合に dQ を与えられた気体の温度上昇を dT とすると、気体の定容比熱を C_v と置くと次の式が得られます。

$$dQ = C_v \cdot dT \quad \therefore C_v = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} \quad \text{③}$$

次に、 dQ を与えられた気体の圧力 p が一定の場合について考えます。このとき $dV \neq 0$ になります。圧力 p が一定の場合に dQ を与えられた気体の温度上昇を dT とすると、気体の定圧比熱を C_p と置くと次の式が得られます。

$$dQ = C_p \cdot dT \quad \therefore C_p = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT} = C_v + p \frac{dV}{dT} \quad (4)$$

ところで、気体の状態方程式を $p = (\text{一定})$ の条件で微分を求めると、次の式が得られます。

$$pdV = RdT \quad \therefore R = p \frac{dV}{dT} \quad (5)$$

④式と⑤式から、定容比熱と定圧比熱の関係は次のように表せます。

$$C_p - C_v = R \quad (6)$$

定容比熱と定圧比熱の比を比熱比と呼び、次式で定義します。

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_v + R}{C_v} \quad (7)$$

1-3 理想気体の断熱過程

外から熱を与えない場合の気体の変化を考えることにします。これは、②式において $dQ = 0$ とした場合になります。

$$dU + pdV = C_v \cdot dT + pdV = 0 \quad (8)$$

気体の状態方程式の微分を求めると次の通りです。

$$pdV + dpV = RdT \quad (9)$$

⑨式を用いて⑧式から dT を消去すると次の式を得ます。

$$\frac{C_v + R}{C_v} \cdot \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = \gamma \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0 \quad (10)$$

⑩式を積分すると次式を得ます。

$$\gamma \ln V + \ln p = \ln V^\gamma + \ln p = \ln pV^\gamma = \text{const.} \quad \therefore pV^\gamma = \text{const.} \quad \textcircled{11}$$

⑪式を Poisson (ポアソン) の法則と言います。

2. 金星の表面温度

前節で紹介した⑪式に気体の状態方程式①を使って V を消去すると次式を得ます (各自計算してみてください)。

$$T = a \cdot p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad a \text{ は比例定数} \quad \textcircled{12}$$

さて、⑫式は断熱変化をする気体の温度と圧力の関係を示しています。これを使って実際の地球の温度を計算してみましょう。地球大気の比熱比は $\gamma = 1.4$ です。

今、気温 (地上 1m 程度の大気温度、 $p = 1\text{atm} = 1013\text{hPa}$) が 15°C (288K) とします。これを⑫式に代入すると、

$$288 = a \cdot 1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \therefore a = 288 \quad \textcircled{13}$$

大気は乾燥しているとして、標高 1000m、気圧 $900\text{hPa} = 0.888\text{atm}$ の山の頂の気温を計算してみましょう。⑫式と⑬式から

$$T = 288 \cdot 0.888^{\frac{0.4}{1.4}} = 278.4\text{K} = 5.4^\circ\text{C} \quad \textcircled{14}$$

つまり、標高 1000m 当たりに $(15 - 5.4) = 9.6$ ($^\circ\text{C}/\text{km}$) だけ気温が低下することになります。これが地球大気の乾燥温度減率と呼ばれるものです。

さて、金星の表面気圧は 92 気圧程度、気温は 470°C (743K) 程度といわれています。⑫式にこれらの値を代入してみましょう。ただし、ここでは近似的に金星大気は CO_2 が 100% で構成されているものとし、比熱比 $\gamma = 1.30$ だとしておきます。

$$743 = a \cdot 92^{\frac{0.3}{1.30}} \quad \therefore a = 261.7 \quad \textcircled{15}$$

この金星表面大気を断熱的に地球の表面気圧にまで減圧した場合の温度を求めてみます。

$$T = 261.7 \cdot 1^{\frac{0.3}{1.30}} = 261.7K = -11.3^{\circ}\text{C} \quad \textcircled{16}$$

つまり、金星表面大気 1mol の持っている内部エネルギー量は、地球表面の 1 atm の常温 (15°C) の環境に置かれた 1 mol の CO₂ よりも小さいことがわかります。

もうお分かりですね？金星の表面温度が高温なのは、分厚い CO₂ の大気に包まれた金星表面における「大気圧が高いこと」であって、CO₂ の温室効果とはまったく関係ないのです。

(2010/07/16)