

「惑星大気における輻射エントロピーの 流れとエントロピー生成」

大阪医大・教養 青 木 一 郎*

ア ブ ス ト ラ ク ト

惑星における輻射エントロピーの吸収、放出の収支から、各惑星におけるエントロピー生成の値を計算した。地球に対する値は、 $1.2 \times 10^{-4} [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}]$ である。また、地球に対して地表、大気上層、大気下層における輻射エントロピーの流れ、および地表、大気におけるエントロピー生成を求めた。大気におけるエントロピー生成の大きさは、地表におけるその約4.4倍である。

§ 1 序

大気におけるエネルギーの流れについての考察は、種々の興味ある気象学的知識をもたらした¹⁾が、他方、物理的にはエネルギーにおとらず重要な概念であるところのエントロピーについては、その気象学的含意はほとんど何も知られていない。

エントロピーの基本的性質は、熱力学第2法則で述べられている。第2法則は、エントロピーが孤立系では一定かあるいは常に増大することを主張している。孤立系でない一般の系については、第2法則は、有限の熱力学的力の勾配が存在するところでの有限の時間内に起こる過程において、常に正のエントロピーが生成されるということを主張する^{2,3)}。理想化された可逆過程を除いて、現実にかかるすべての過程はそのような本性をもったものであるから、エントロピー生成は、実際に起こった種々の運動、反応の激しさを表わす一つの尺度であるとみなすことができる。

大気におけるエントロピー生成およびエントロピーの流れを定量化し、それらを気象学的諸特性と関係づけることは興味あることである。この論文では、大気における輻射エントロピー⁴⁾の流れおよびエントロピー生成のパターンについて論ずる。

§ 2 太陽エントロピー

太陽輻射は近似的に黒体輻射とみなされる⁵⁾。温度 T の黒体が、単位面積あたり単位時間に

* Ichiro AOKI

放射する輻射のエネルギーは、Stefan-Boltzmann の法則により、 σT^4 であり、単位面積あたり単位時間に放射する輻射のエントロピーは、 $(4/3) \cdot \sigma T^3$ である⁴⁾から(ここに σ は Stefan-Boltzmann 定数)、太陽を温度 T 、半径 r の球状黒体とすると、太陽が放射する単位時間あたりの輻射のエネルギー E 、エントロピー S は、それぞれ、

$$\begin{cases} E = 4\pi r^2 \cdot \sigma T^4 \\ S = 4\pi r^2 \cdot \frac{4}{3} \sigma T^3 = \frac{4}{3} \frac{E}{T} \end{cases}$$

となる。

太陽輻射は太陽からその周囲へ四方に拡って行く。エネルギーが保存されることを考慮し、また、太陽系の空間は真空であるとし、真空中での伝播において輻射のエントロピーは増大しない(光-光散乱は無視する)ことを考慮すると、輻射のエネルギー E およびエントロピー S はそれぞれ、輻射が定常的であれば、 r より大きいある半径 R の仮想的球面を単位時間に通過するエネルギー E_1 およびエントロピー S_1 に等しい。半径 R の球面上での輻射のエネルギー flux, エントロピー flux をそれぞれ e_1, s_1 とすると、

$$\begin{cases} E_1 = 4\pi R^2 e_1 \\ S_1 = 4\pi R^2 \cdot s_1 \end{cases}$$

であるから、これらを E, S と等置して、

$$\begin{cases} e_1 = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \sigma T^4 \\ s_1 = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \frac{4}{3} \sigma T^3 = \frac{4}{3} \frac{e_1}{T} \end{cases}$$

が得られる。 R を太陽-地球間の平行的距離とすると、 e_1, s_1 はそれぞれ地球上における太陽輻射のエネルギー flux, エントロピー flux を表わす。 e_1 は「太陽定数」として測定されていて、その値は、

$$e_1 = 2.00 \text{ [cal/cm}^2 \cdot \text{min]}$$

$$= 0.1395 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s]}$$

である。これを用いて、太陽の輻射温度 T および地球上での太陽輻射のエントロピー flux s_1 が求められる：

$$\begin{cases} T = \left[\left(\frac{R}{r} \right)^2 \frac{e_1}{\sigma} \right]^{1/4} = 5800 \text{ [K]} \\ s_1 = \frac{4}{3} \frac{e_1}{T} = 3.207 \times 10^{-5} \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K]} \end{cases}$$

エントロピー flux s_1 は「第2太陽定数」とでもよばれるべき量である。

地球が受ける太陽輻射のエネルギー、エントロピーは、地球半径を r_1 として、それぞれ

$$\begin{cases} \pi r_1^2 \cdot e_1 = 1.783 \times 10^{17} \text{ [J/s]} \\ \pi r_1^2 \cdot s_1 = 4.098 \times 10^{13} \text{ [J/s} \cdot \text{K]} \end{cases}$$

これらを地球全表面にわたって一様にならすと、単位面積あたりに受ける平均の太陽輻射のエネルギー、エントロピーは、それぞれ

$$\begin{cases} \bar{e}_1 = \pi r_1^2 \cdot e_1 / 4 \pi r_1^2 = e_1 / 4 = 3.488 \times 10^{-2} \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s]} \\ \bar{s}_1 = \pi r_1^2 \cdot s_1 / 4 \pi r_1^2 = s_1 / 4 = 8.018 \times 10^{-6} \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K]} \end{cases}$$

となる。

§ 3 惑星大気におけるエントロピー生成

大気—地球を一つの系と考え、これで温度 T_1 、半径 r_1 の球状灰色体 (grey-body) とみなすと、単位面積あたり単位時間に放出されるエネルギー、エントロピーは、

$$\begin{cases} e_2 = \varepsilon \sigma T_1^4 \\ s_2 = \varepsilon \frac{4}{3} \sigma T_1^3 = \frac{4}{3} \frac{e_2}{T_1} \end{cases}$$

である。ここに ε は放射率。

大気—地球がエネルギー的に定常であるとする、[吸収するエネルギー] = [放出するエネルギー] でなければならないから、大気—地表による太陽輻射の反射率 (アルベド) を a とすると、

$$(1-a)\pi r_1^2 e_1 = 4\pi r_1^2 e_2$$

すなわち,

$$e_2 = \frac{1}{4}(1-a)e_1$$

が成り立つ。

観測により,

$$a \simeq 0.70$$

であるから,

$$e_2 = 0.02441 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s]}$$

また, 大気, 地表はともに赤外領域の輻射に対して入射した輻射のそれぞれ約 90 % あるいはそれ以上を吸収する⁶⁾ ので, この波長領域の輻射に対しては, 大気-地表は黒体とみなしてよいから,

$$\varepsilon \simeq 1$$

したがって,

$$T_1 = \left[\frac{e_2}{\sigma} \right]^{1/4} = 256.2 \text{ [K]}$$

これは, 地表の平均温度 288 [K] より低い, 大気の圏界面の平均温度 210 [K] よりも高く, 対流圏の平均温度にほぼ等しい。これは, 輻射放出の観点から見た, 大気-地表系の effective な温度を表わしており, 地球の有効温度あるいは輻射温度とよばれる。 e_2 , T_1 からエントロピー flux s_2 が求まる:

$$s_2 = \frac{4}{3} \sigma T_1^3 = \frac{4}{3} \frac{e_2}{T_1} = 1.270 \times 10^{-4} \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K]}$$

次に, 大気-地表が吸収する輻射のエントロピーは, 単位時間あたり,

$$(1-a)\pi r_1^2 s_1 - 4\pi r_1^2 s_2 = \pi r_1^2 [(1-a)s_1 - 4s_2]$$

$$= -6.206 \times 10^{14} \text{ [J/s} \cdot \text{K]}$$

となり、これを地球表面積全体にわたってなると、単位面積あたり、

$$\begin{aligned}\frac{d_e S}{dt} &= \frac{1}{4\pi r_1^2} \pi r_1^2 [(1-a)s_1 - 4s_2] \\ &= \frac{1}{4} [(1-a)s_1 - 4s_2] \\ &= -1.214 \times 10^{-4} [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}] \\ &= -3828 [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]\end{aligned}$$

となる。このように、地球から出て行く輻射のエントロピーは、地球へ入って行く輻射のエントロピーよりも大きく、地球へ流れこむ正味の輻射のエントロピーは負になる。すなわち、地球は、生物のように、環境からネグエントロピー⁷⁾を吸収している。したがって、地球は、大気、地表に種々の秩序構造を形成し維持して行く能力を有することになる。

大気-地表がエントロピー的に定常であるとする、この負のエントロピーの流れ $d_e S/dt$ を打消してエントロピーの変化をゼロとするような、正のエントロピー生成 $d_i S/dt$ が存在しなければならない。すなわち、大気-地球に、

$$\begin{aligned}\frac{d_i S}{dt} &= -\frac{d_e S}{dt} = 1.214 \times 10^{-4} [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}] \\ &= 3828 [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]\end{aligned}$$

なるエントロピー生成が起っていなければならない。

同様の計算を、他の太陽系惑星についても行った結果を表に示す。この表において、惑星における太陽輻射のエネルギー式 flux e_1 は、

[地球上での太陽輻射のエネルギー flux]

$$\times \left[\frac{\text{太陽-地球間の平均距離}}{\text{太陽-惑星間の平均距離}} \right]^2$$

により求めた。アルベドの値は、地球については Battan⁸⁾ から、金星、火星、木星については Mason⁹⁾ から、その他の惑星については Goody & Walker¹⁰⁾ からとった。また、地球と同様各惑星も赤外輻射に対して黒体であるとした。表からわかるように、エントロピー生成の大きさは、水星では 10^{-3} 、金星から火星までの惑星では 10^{-4} 、木星から冥王星までの惑星で

表

	e_1 [J/cm ² ・s]	a	T_1 [K]	$\frac{d_i S}{dt}$ [J/cm ² ・s・K]
水 星	0.9310	0.058	443	6.09×10^{-4}
金 星	0.2667	0.77	228	8.62×10^{-5}
地 球	0.1395	0.30	256	1.21×10^{-4}
火 星	0.6011×10^{-1}	0.20	215	7.19×10^{-5}
木 星	0.5154×10^{-2}	0.42	107	9.13×10^{-6}
土 星	0.1533×10^{-2}	0.76	63	1.91×10^{-6}
天 王 星	0.3788×10^{-3}	0.93	33	2.67×10^{-7}
海 王 星	0.1544×10^{-3}	0.84	32	2.53×10^{-7}
冥 王 星	0.8926×10^{-4}	0.14	43	5.92×10^{-7}

は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ のオーダーである。大別して地球型惑星と木星型惑星とで1桁あるいはそれ以上のちがいがある。オーダー 10^{-4} 程度のエントロピー生成は、地球にみられるような秩序的な大気、地表、生物の諸活動が存在するための、エントロピー的観点からする一つの必要条件を与えるものである。水星ではエントロピー生成が大きすぎて、すなわち惑星的諸活動、諸運動が激しすぎて、また木星から外側の惑星ではそれが少なすぎて（死の世界）、適当な秩序構造の形成が阻害されるのであろう。

§ 4 地球大気におけるエネルギーバランス

次に、よく調べられている地球大気の場合について、エネルギー、エントロピーの流れの様子を細かく見てみよう。エネルギーの場合についてはすでに次のようにわかっている。

地球大気の上縁の単位面積に流入する太陽輻射の平均のエネルギー、エントロピーは、それぞれ

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{e}_1 = e_1/4 = 3.488 \times 10^{-2} \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s]} \\ \phantom{\bar{e}_1 = e_1/4 =} = 1100 \text{ [kJ/cm}^2 \cdot \text{yr]} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{s}_1 = s_1/4 = 8.018 \times 10^{-6} \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K]} \\ \\ = 253 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K]} \end{array} \right.$$

である。これらのうち、約30%は、空気、雲、地表により反射されて宇宙空間へ去り、約19%が空気、雲によって吸収され、残りの約51%が地表に吸収される^{8, 11)}。入射した太陽輻射のエネルギー、エントロピーの流れの様子を図1に示す。図1-(1)は、太陽輻射のエネルギーの流れを入射量 $\bar{e}_1$ を100として%で表わしたもの、図1-(2)は、太陽輻射のエネルギーの流れを $[\text{kJ/cm}^2 \cdot \text{yr}]$ を単位として表わしたもの、図1-(3)は、太陽輻射のエントロピーの流れを $[\text{J/cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$ を単位として表わしたものである。

他方、地表も赤外領域の輻射を放射している。これを惑星輻射あるいは地球輻射という。惑星輻射の一部は「大気の窓」から宇宙空間へ放出され、残りは大気に吸収される。大気もまた、地表および宇宙空間に向って赤外輻射を放出している。これを大気輻射という。惑星輻射および大気輻射のエネルギーの流れの様子を $[\text{kJ/cm}^2 \cdot \text{yr}]$ を単位として表わしたものを図2に示す^{8, 11)}。

これを、入射した太陽輻射のエネルギーの流れ(図1-(2))と比べてみると、正味のところ、地表に $330 [\text{kJ/cm}^2 \cdot \text{yr}]$ のエネルギーが与えられ、大気からは同量のエネルギーがうばいとられていることがわかる(図3)。

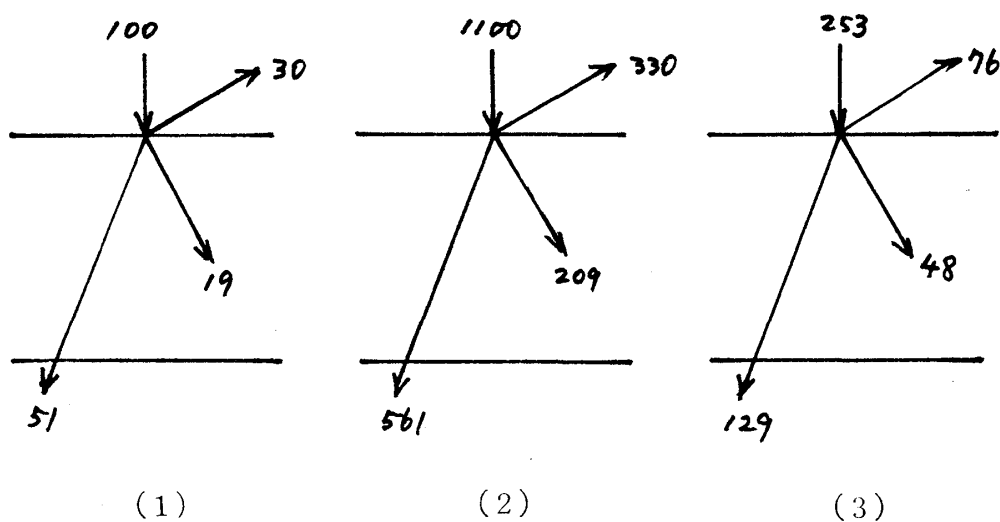


図1

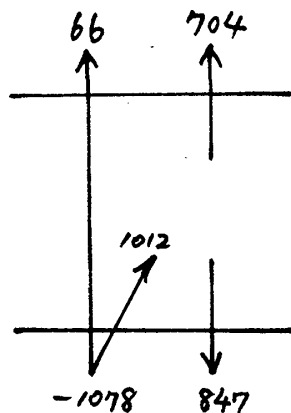


図 2

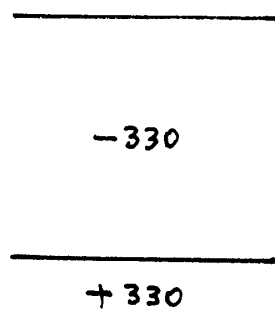


図 3

この輻射のエネルギーの、地表と大気との間での不均等配分によって、それにひきつづいて地表から大気へ向うエネルギーおよび物質の非輻射的輸送が誘起される。地表のエネルギー $330 \text{ [kJ/cm}^2 \cdot \text{yr]}$ のうち、水の蒸発によって $\bar{e}_1$ の 23 % にあたる $253 \text{ [kJ/cm}^2 \cdot \text{yr]}$ が、大気の対流および伝導によって $\bar{e}_1$ の 7 % にあたる $77 \text{ [kJ/cm}^2 \cdot \text{yr]}$ が、それぞれ地表から大気へと輸送され¹¹⁾、それによって、地表および大気のエネルギー的定常性が保たれることになる。

§ 5 地球大気におけるエントロピーバランス

前節の結果を用いて、惑星輻射によるエントロピーの流れの様子を調べてみよう。地表は、

$$e_2 = 1078 \text{ [kJ/cm}^2 \cdot \text{yr]}$$

のエネルギーを放出しているから、Stefan-Boltzmann の法則：

$$e_2 = \sigma T_1^4$$

により、地表の輻射温度は、

$$T_1 = \left[\frac{e_2}{\sigma} \right]^{1/4} = 279 \text{ [K]}$$

となり、したがって、地表からのエントロピー flux は、

$$s_2 = \frac{4}{3} \sigma T_1^3 = \frac{4}{3} \frac{e_2}{T_1} = 5158 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K]}$$

となる。そのうち、 $(66/1078) \times 100 = 6.1\%$ すなわち $316 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K]}$ は宇宙空間に放出され、 $(1012/1078) \times 100 = 93.9\%$ すなわち $4842 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K]}$ は大気に吸

収される（図 2 参照）。

次に、大気輻射によるエントロピーの流れを考える。それには大気を上層と下層の二層に分けて考えると都合がよい¹⁰⁾。大気下層は、

$$e_2 = 847 \quad [\text{kJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr}]$$

のエネルギーを地表に向けて放出しているから、その輻射温度は、

$$T_1 = \left[\frac{e_2}{\sigma} \right]^{1/4} = 262 \quad [\text{K}]$$

となり、大気下層から地表に向けて放出されるエントロピー flux は、

$$s_2 = \frac{4}{3} \frac{e_2}{T_1} = 4306 \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$$

となる。また、大気上層は、宇宙空間に向けて、

$$e_2 = 704 \quad [\text{kJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr}]$$

のエネルギーを放出しているから、その輻射温度は、

$$T_1 = \left[\frac{e_2}{\sigma} \right]^{1/4} = 251 \quad [\text{K}]$$

となり、大気上層から宇宙空間に向けて放出されるエントロピー flux は、

$$s_2 = \frac{4}{3} \frac{e_2}{T_1} = 3747 \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$$

となる。大気上層と大気下層との間には、下層から上層へ向って、それぞれの層からのエントロピー flux の差の $559 \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$ のエントロピーの流れが存在する。以上を図 4 で示す。

これを、入射した太陽輻射のエントロピーの流れ（図 1-(3)）と比べてみると、正味のところ、地表は $723 \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$ のエントロピーを失い、大気は $3163 \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$ のエントロピーを失い、両者の和の $3886 \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$ のエントロピーが宇宙空間に向けて放射されることになる。以上の関係を図 5 で示す。

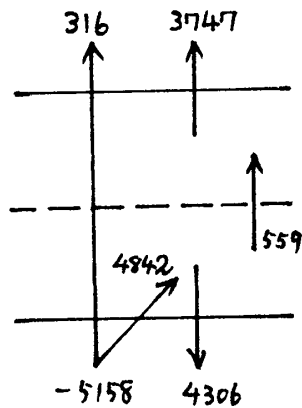


図 4

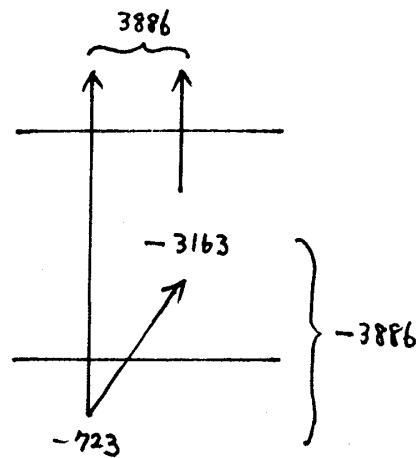


図 5

以上により，地表および大気がエントロピー的に定常であるとする，地表で $723 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$ ，大気で $3163 \text{ [J/cm}^2 \cdot \text{yr} \cdot \text{K}]$ のエントロピーが生成されていなければならない。このように，大気では地表に比べて約 4.4 倍の大きさのエントロピー生成が起っている。このことは，大気中では地表に比べて，エントロピー生成という尺度で測って，約 4.4 倍の激しい

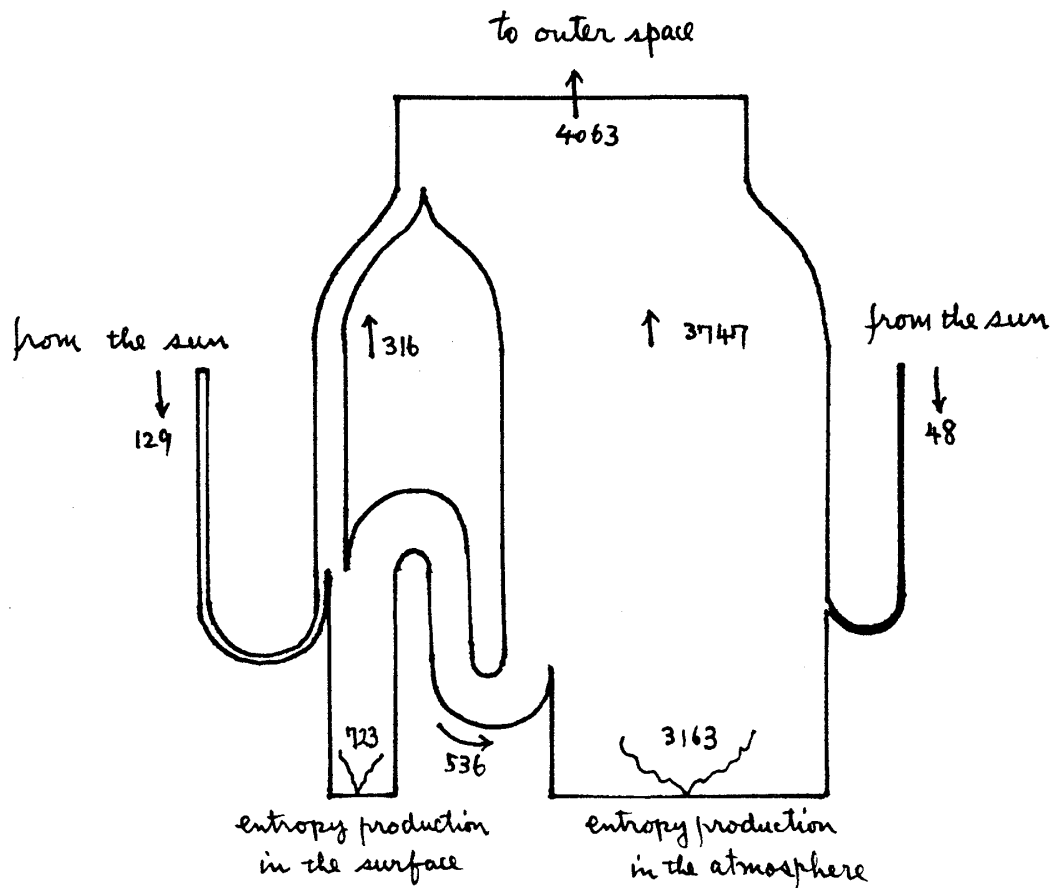


図 6

運動が起っているということを意味している。地表、大気両者のエントロピー生成の和は、 $3886 \text{ [J/cm}^2 \text{ yr} \cdot \text{K}]$ となり、これは § 3 で得られた値 3828 と有効数字の範囲内で一致している。

以上により明らかにされた地表、大気におけるエントロピーの流れおよびエントロピー生成のパターンをダイアグラムで示す(図6)。太陽から流れこむ輻射のエントロピーは、地表、大気で生成されるエントロピーに比べて非常に小さいことがわかる。地表で生成されたエントロピーは、熱輻射の形で一部は直接宇宙空間に放出され、残りは大気に吸収される。地表から大気に吸収されたエントロピーおよび大気で生成されたエントロピーは、大気上部へ輸送され、最終的に赤外輻射として宇宙空間に放出される。

文 献

- 1) Sellers, W. D., *Physical Climatology*, Chap. 2–8 (The University of Chicago Press, 1965).
- 2) Prigogine, I., *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, Third Edition (Interscience, 1961).
- 3) Haase, R., *Thermodynamics of Irreversible Processes* (Addison–Wesley, 1969).
- 4) Planck, M., *Theory of Heat Radiation* Chap. IV (Dover, 1959).
- 5) 押田勇雄, 太陽エネルギー, 第2章(生産技術センター新社, 1975)
- 6) Sellers, W. D., *ibid.*, chap. 4.
- 7) Schrödinger, E., *What is Life*, chap. 6. (Cambridge University Press, 1944).
- 8) Battan, L. J., *Fundamentals of Meteorology*, chap. 3 (Prentice–Hall, 1979).
- 9) Mason, B. J., *The Met. Mag.*, **107**, 69–88 (1978).
- 10) Goody, R. M. and Walker, J. C. G., *Atmospheres*, chap. 3 (Prentice–Hall, 1972).
- 11) 小倉義光, 気象力学通論, 第8章(東京大学出版会, 1978) .