

スペースコロニー内の気象について

—大気循環を説明する実験装置の工夫—

吉村 高男

〈山口県立大津高等学校 〒759-41 山口県長門市東深川田屋〉

スペースコロニー内の気象について考えることは、地球上でのそれとの比較をすることで教育的にも興味深いものとなる。コロニーのモデルの取り方で具体的にはいろいろな差が出てくるが、筆者は円筒型のオニールモデルについて実験装置を工夫することにより、大気循環のパターンを出すことを試みた。

1. はじめに

気象の基本は、まず大気循環を考えることから始まる。地球上での大気の大循環は、基本的には異なる緯度に対応した日射量の違いによる温度差と自転による影響で生じる。同様に、スペースコロニー（オニールモデル）内においても、陸部分と窓部分の温度差とコリオリ力が原因で、大気の循環が生ずることが考えられる。地上で、直射日光を用いてガラス板とそれを通した地面の温度差を測定すると、夏の日差しではその差が30度近くまでになる。

よって、コロニー内では温度の高い陸部分の上昇気流と温度の低い窓部分の下降気流が回転による影響を受けて、図1に示すような地球上での対流圏に相当する大気循環のパターンが生じることが考えられる。このコンピューターシミュレーションは、すでに京都大学（現在神戸大学）の松田卓也先生により行われている（Takuya Matsuda; 1983, Journal of the Phys. Soc. of Japan, Vol. 52, 1904）。その中では、窓部分から陸部分に向けて十数メートル毎秒の強風が発生することも指摘されている。

さて、コロニー内の気圧分布について考える。円筒部の内壁面上での気圧を P_0 とする。コロニー内の任意の場所における気圧 P は、コロニーの半径を l とした中心からの距離（割合）を r として次のように表される。

$$P = P_0 \exp [G_0 (r^2 - 1) / 2] \quad (1-1)$$

$$\text{ただし,} \quad G_0 = \gamma (V / V_s)^2 \quad (1-2)$$

ここに、 γ は比熱比、 V はコロニーの外周部の速さ、 V_s は音速を示す。コロニーの中心部における気圧は P_0 を1気圧とすると、これらの式を用いて、約0.84気圧となる。

一方、コロニー内の温度分布を示す方程式は、陸・窓部に一定の熱源を与えて、伝導作用でのみ

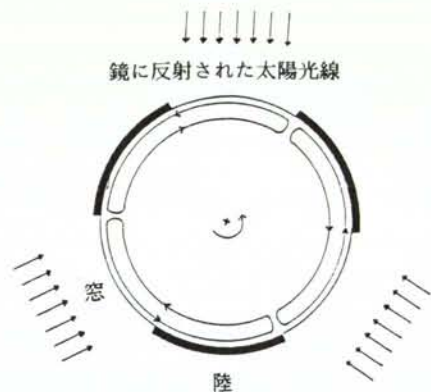


図1 コロニー内の大気循環のパターン

Takao Yoshimura: On the Meteorology in a Space colony—Device of an Apparatus to Show a Pattern of Atmospheric circulation—

熱分布が生じると仮定することにより、次のようになる。

$$(\partial^6/\partial \xi^6 + 4h\partial^2/\partial \theta^2) T(\xi, \theta) = 0 \quad (1-3)$$

$$\xi = (1-r)/E^{1/3} \quad (1-4)$$

$$h = (\gamma - 1)PrG_0/4 \quad (1-5)$$

ここに、EはEkman数、PrはPrandtl数である。これらの式を用いて解析すると、地球の対流圏に相当する大気の循環が3つほど約600mの厚みで半径3kmの円筒型コロニー内に生じることがわかる(図1)。次に示すように、筆者はこのパターンを得るために実験装置を工夫した。

2. 大気循環を示す実験装置の工夫

既に示した、図1のスペースコロニー内における大気循環のパターンを実験的に得るために、図2のような装置を製作した。地球の大気の大循環のパターンを得るために用いる「回転水槽の実験」を参考にしたものである。「回転水槽の実験」では極地方に相当する中心部分に氷水、赤道地方に相当する周辺部分に湯を入れて回転させるわけである。筆者が製作した図2の装置の場合は、内部の円筒部分がコロニー内に対応している。その周囲を発泡スチロール(断熱材)で6分割して、湯と氷水を交互に入れてコロニー内の陸部分と窓部分に相当する温度差を与えるわけである。内部の円筒部の中に水を入れて、アルミニウムの粉を水面に浮かせて装置全体を回転台の上に乗せて回転させる。

地上の重力の効果があり、コロニー内の条件とは正確には一致しないが、装置の上から見る流体の動きの成分についてはコロニー内と同じような現象が生じることが期待される。

実際のスペースコロニーに対応する現象が実験装置内でも起きるように、「回転水槽の実験」で使う無次元量のロスビー(Rossby)数をコロニーの場合にも用いることにする。実際のコロニーに対するロスビー数 R_c は、 v を大気の流れの速さ、 ω を角速度の大きさ、 r をコロニーの半径とすると、

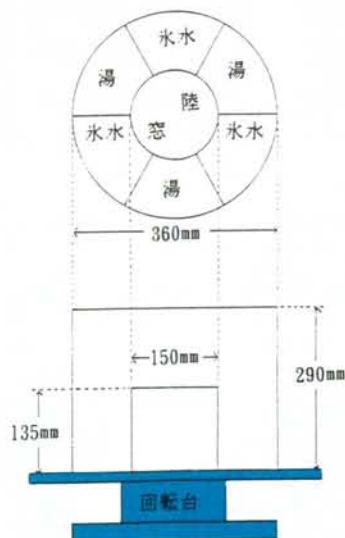


図2 コロニー内の大気循環を示す実験装置 (回転水槽型実験装置)

今の場合、 v は10m/s、 r は3kmとして、

$$R_c = v/2 \omega r \quad (3-2-1)$$

$$\approx 0.03 \quad (3-2-2)$$

となる。実験装置の回転周期を求めるために、実験装置に対するロスビー数 R_E が R_c に等しくなるようにする。窓部分と陸部分の温度差を30度程度に保つと、上の v に対応する水の流れの速さ v' は0.5cm/s程度になる。また、実験装置のコロニー部分に相当する半径は7.5cmなので、求める角速度の大きさ ω' は次のようにして決まる。

$$R_E = v'/2 \omega' r' \quad (3-2-3)$$

$$= 0.5 / (2 \times \omega' \times 7.5)$$

$$= R_c \approx 0.03 \quad (3-2-4)$$

より、

$$\omega' \approx 1.1 \text{ (rad/s)} \quad (3-2-5)$$

となる。

よって、求める実験装置の回転周期 T は、

$$T = 2\pi / \omega' \approx 5.7 \text{ (s)} \quad (3-2-6)$$

となる。

以上のように条件を設定して実験を実施したところ、図1に予想したパターンが現れることを確認することができた。図3、写真1のように、回

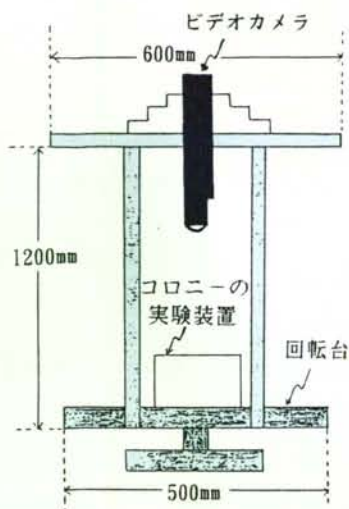


図3 回転台上にビデオカメラを設置した実験装置



写真1 ビデオカメラを設置した実験装置

回転台の上にビデオカメラを設置することで、その現象をより明確に見ることができる。窓部分と陸部分の温度差が30度程度になるようにして、ビデオを再生して観察したところ、まず回転にコロニーの水が馴染むのに7～8分を要した。次の7～8分で期待された大気循環のパターンが得られた。この時、ビデオテープを早送りになるとより明確にその動きを確認することができる。それ以後は、窓部分と陸部分の温度差が次第になくなり、大気循環のパターンが崩れてきた。

3. 実験装置の応用

ビデオカメラをセットしたこの装置は、いろいろな回転系（非慣性系）の物理現象を観察することに役立つ。例えば、回転板の上にボールを投げ入れると、回転系で働くコリオリの偏向力を実際に目で見るることができる。地球上では、その見かけの力のために、台風や海流が、北半球においては進行方向の右（時計回り）側に、南半球においては逆の左（反時計回り）側にずれて行くが、この装置の回転台の回転の向きを変えることで、それらを確認することができる。

一方、回転台の中心からおもりをつけたバネを

設置して回し、その様子をビデオに撮影する。すると、バネが伸びる様子が見られ、いわゆる遠心力を実際に確かめることができる。バネの伸びから、遠心力の大きさを求め、その時の回転の周期から向心力を計算して、両者の値を比較すると一致していることを確認することができる。

4. 雲の発生および降雨の可能性

よく知られているように、地球上での雲の発生は、水蒸気を含む空気塊が上空に行くほど断熱膨張により温度が下がるので、上昇気流の中で起こる。下降気流では、逆に雲の消失が起こる。地上での雲の分類については、おおまかに、層状雲（上層雲、中層雲、下層雲）と対流雲（積雲、積乱雲）に分けられる。コロニー内においては、温度が氷点下になることはなく、既に述べたように半径3 kmのコロニーでは、対流圏に相当する領域が600 m程度であるので、地球上のような完全な雲の発生は考えられない。あるとしても、高度の低い所で発生する下層雲のうち、層雲か乱層雲のパターンであろう。オニール論文（1974年）では、

コロニー内上空 1000 m 以上で雲の発生があるだろうと簡単に述べられているが、一般に上昇気流はそのレベルまで達せず、オニール博士のこの部分の記述については注意を要する。むしろ、筆者は、温度の低くなる窓部分の下降気流で霧や雲の発生があると考えている。そして、風が入り込む窓部分から陸部分へかけての境界に前線が発生するであろう。さらに、もっとも温度が低くなる窓には水滴が付着するであろう。よって、巨大なワイパーがスペースコロニーには必要になる。

また、窓部分における雲の発生は、太陽光線を遮るために、コロニー内の温度分布を変えて、温度が一樣化され雲が消失して、再び元のパターンにもどるといふ振動現象がコロニー内の気象については生じる可能性がある。

一方、コロニー内における降雨の可能性についてであるが、まず地上の場合を考えてみよう。地上では、雨滴の形成に二通りの形態がある。一つは、上空で氷点下になり氷が成長して地上に解けて雨となる「氷晶過程」であり、もう一つが、氷点下まででなくても水滴が一緒になり雨として地上に降ってくる「併合過程」である。一般に、高緯度では氷晶過程で、低緯度では併合過程で降雨が生じる。

コロニー内では気温が氷点下にならないので、もし雨が降るとすれば、併合過程による降雨となる。しかし、半径 3 km のコロニー内では雲の発生が地上ほど完全でないと思われるので、降雨までに至ることは可能性として薄い。

5. 人工雨の軌道モデル

コロニー内では、特に陸部分への降雨の可能性がほとんどないので、気化熱で陸部分の熱を奪うために人工雨について考える必要がある。仮に、人工雨をスプリンクラー方式で降らすものとして、前回¹⁾の最初に述べた空気抵抗を考慮した場合の一般的な物体の軌道のシミュレーションを用いる。

具体的な例として、人工雨の投射点を m 単位で、座標 (0, 1500) にとり、投射角を 12 度ずつで、30 本の雨の軌道を描くことにする。ただし、初速を 10 m/s と 20 m/s の 2 通りでシミュレーションしてみた (図 4, 図 5)。

このシミュレーションにより、スプリンクラー方式を用いる場合、人工雨を、望む限定区域に降らせることが可能となることがわかる。

6. コロニー内の熱収支・エントロピー問題について

コロニー内に生活する人間をはじめとする生命体などからの発熱もあるが、結局、コロニーが太陽から受け取る熱エネルギーのオーダーが圧倒的に多い。最終的に、その熱を効率よく宇宙空間へ廃熱させなければコロニー内で快適に生活することはできない。つまり、コロニーからの宇宙廃熱のメカニズムを慎重に考える必要がある。

地球の場合には、全地球の平均で、入射する太陽の放射エネルギーのうち約 34% は、雲の上面や地表・大気から反射される。約 47% は地表に吸収され、残りの 19% が雲や大気に吸収される。すなわち、入射した太陽エネルギーの 66% が地球に受けとめられるのである。しかし、やがて赤外線による放射というかたちで、地球から宇宙空間へその 66% がもどされ、地球における熱収支が保たれているのである。その際、大気中の水の働きに注目する必要がある。海面や地表から蒸発する時、水は周囲から多量の熱を奪い、大気中で凝結する時に潜熱を放出して地表から大気への熱の輸送(潜熱輸送)をする。この量は太陽放射の約 23% にも達する。地表で温められた空気が上昇するような対流現象を含めた広い意味の熱伝導による熱の輸送(顕熱輸送)が約 10% なので、いかに水の存在が重要かがわかる。

コロニーの場合には、太陽光を赤道板(円筒部の太陽があたる側)からと、鏡による反射で、内部に熱が供給される。それをいかに低熱源の極板

(円筒部の太陽があたらない側)に熱輸送して宇宙空間に廃熱するかが問題である。コロニーの建設場所は地球・月系のラグランジュ点(地球と月を一辺とする正三角形の他の頂点)に考えているので、コロニーが受け取る太陽エネルギーは、地球

で受け取る太陽定数 $2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ とほぼ同じと考えてよい。鏡の角度を 45 度、鏡の長さを 30 km として、太陽エネルギーを受け取るコロニーの断面積は、円筒部分の断面積を加えて、
 $\pi \times 3^2 \times 10^6 + 3 \times 21 \times 10^6 \times 3 = 2.2 \times 10^8 (\text{m}^2)$ (6-1)

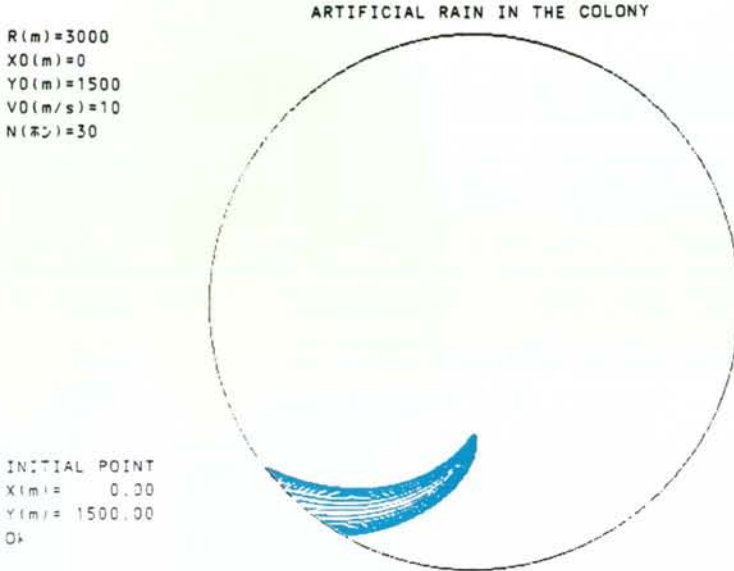


図4 人工雨のシミュレーション(初速10m/s, 30本)

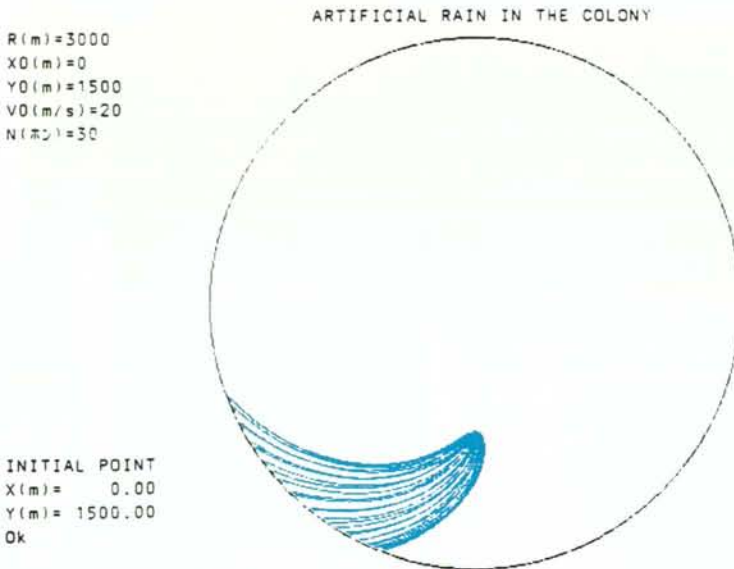


図5 人工雨のシミュレーション(初速20m/s, 30本)

となる。よって、スペースコロニーが1分間に受け取るエネルギーは、

$$2 \times 2.2 \times 10^8 \times 10^4 = 4.4 \times 10^{12} (\text{cal/min}) \quad (6-2)$$

$$\approx 1.8 \times 10^{13} (\text{J/min}) \quad (6-3)$$

となる。しかし、その多くは直接反射されて宇宙空間に逃げる。

仮に、コロニー全体が30度(303 K)として、Planckの放射エネルギー公式を用いると、

$$5.67 \times 10^{-8} \times 303^4 \times \{2\pi \times 9 \times 10^7 + 2 \times \pi \times 3000^2\} \times 60$$

$$\approx 3.15 \times 10^{12} (\text{J/min}) \quad (6-4)$$

の量がコロニーからの放射エネルギーとして宇宙空間へ廃熱される。

よって、太陽放射エネルギーの2割弱がコロニー内に吸収されるとすれば、ほぼ熱収支が簡単に成立する。それより多くの熱エネルギーがコロニー内に入る場合には、人工雨で陸部分を冷やすと同時に、その雨水を媒介に、円筒部の温度の低い極板の方に熱輸送することを考える必要がある。例えば、陸部分に緩い傾斜をつけて雨水を流すと同時に、宇宙廃熱が効率よくできるように極板部分をひだ状にして、その表面積を大きくするとよい。

7. おわりに

すでに前回でも述べたように、人間が宇宙に住むためには、地球と同じ重力が簡単に得られるスペースコロニーが月や火星などへの移住よりも適している。現在、米国アリゾナ州で、生態系の循環システムを調べるために、巨大なガラス張りの密閉空間を造り、その中で自立していくために

いろいろな動植物とともに環境を整え、8人の人間が入って生活している。地球上で、しかも周囲に大気があるために、この実験環境は確かにコロニーの場合とは根本的に異なる点もあるが、この実験から得られるデータは、将来コロニーを建設する際に、内部の条件設定を知る上で極めて重要なものとなるであろう。

ところで、コロニー建設のための資源は月から運ぶ必要があり、 ^3He など将来の核融合エネルギーを得るための資源が存在していることから、月面基地の建設は不可欠である。最近、世界的に東西の緊張緩和ムードが高まっているが、膨大な軍事費の一部を宇宙開発へ向けて使うために全世界が一体となれば、スペースコロニー建設という巨大プロジェクトも意外に早く実現するはずである。

人類の宇宙への進出は、よりスケールの大きい宇宙の視点を私達が日常的に持つことができる契機ともなる。この視点こそ、国境の存在しないかけがえのない地球を守る共通の基盤に立つために必要なものである。このことはまた、地球上で進化してきた私達を含む生命体の存在が、宇宙歴史の中でいかに貴重なものであるかという認識にもつながる。21世紀にむけてこの地球について考える際には、宇宙からこの惑星を眺めながら議論がしたいものである。そこに、新しい地球の平和を考えるポイントがあるように思える。

参 考 文 献

- 1) 吉村高男, 1992, 天文月報 85, 9, 398.