

スペースコロニーのボール投げ

——スペースコロニーの物理学①——

福 江 純*

1. 楽 際 領 域

最後の辺境（フロンティア）を求め宇宙へ飛び出していこうとするのは、人間の夢でありまた性（さが）でもあるだろう。残念ながら宇宙への進出は遅々としている。莫大な軍事費を宇宙に振り向ければ無限の可能性が開けるのだが、重力に魂を引かれてやまないのもまた人間の悲しい性である。まあ、それは置いて、オプティミスティックに、やがて人類が宇宙に進出したとき、宇宙における人間の新たな居住空間として、宇宙ステーションや、さらには巨大なスペースコロニーが提唱されて久しい（オニール 1974 年）。

このスペースコロニーというのはなかなか興味深いシステムである。それが宇宙空間にあるという点では天文学に関係する。その内部が典型的な回転流体力学系だという面からみれば物理学の実験場である。それが未だ実現していないという点からすれば SF の領域に属するかも知れない。まあ、いわば、天文学と物理学と SF の“楽 際（がくさい）”領域の研究対象といえる。

スペースコロニーはこのようにきわめてユニークな位置にあるのだが、学際領域というポケットにあるため、その科学については語られることが少ない。また実際、あまり調べられてもないのかも知れない（ただし松田 1983 年）。筆者のそもそもの問題意識は、スペースコロニーの大気構造やコロニー内での気象などがどうなっているのだろうか、という素朴な疑問から始まっている。そして調べた結果を、大学における宇宙流体力学の講義の一部で話したり、後述する「ハード SF 研究所」の公報に投稿したりしてきた。そしてその結果、スペースコロニーを舞台として、天文学や物理学のさまざまな概念が展開できることがわかった。

その間に、ある程度、材料もたまってきたので、スペースコロニーに関する解析結果を整理し、何回かにわけて紹介したい。筆者の趣味におつき合え願えば幸いである。また回を重ねるにつれ式などもバンバン出てくると思うが、大学初年級の知識で理解できる程度のもにすつもりである。式がうとうとい人は、こげ脅しだと思って斜め読みし、結果だけ見てもらえばよい。一応のスケジュールとしては、コロニー内での基本的な運動や自由落下、雨の降り方など、力学的な問題から始めて、

海や大気の構造、対流、潮汐、そして波動など、流体力学的な問題へと進んでいく予定である。

とりあえず今回は、スペースコロニー内での基本的な運動状態について考えてみるが、まず次節でスペースコロニーの概念について少し詳しく説明しておこう。さらに 3 節でコロニー内での基本的な運動として、ボール投げを数値的な立場から扱ってみよう。

ちなみに「ハード SF 研究所」というのは、たいそうな名前が付いているが、SF 作家で科学解説家の石原藤夫氏を中心とした SF ファンクラブである。筆者の知る限りでは、客員として G. H. 氏や H. H. 氏が、また所員として M. K. 女史や K. S. 先輩、S. H. 姉御が所属しておられるが、天文関係とのオーバーラップはまだあまり大きくないようだ。学問だけをガチガチやらずに少しはゆとりも持ちたいものである（ゆとりだけ持っても問題だが）。

2. スペースコロニー

スペースコロニーについては、『機動戦士ガンダム』などでかなりヴィヴィッドに描かれたので、アニメを見ている人はよく知っていると思うが、馴染みのない人のためにここで少し説明しておきたい（本稿が活字になっているところには、すでに『機動戦士ガンダム F91』が封切られていると思うので、興味のある人はビデオをレンタルして下さい）。

宇宙へ移住するという考え自体は非常に古くからある。ただし最初の頃は、惑星の上にはしか人間は住めないという考え（惑星ショービズム）が支配的で、月や惑星の上にドーム都市を建設しようというものが多かった。そのような古い考えを脱却し、宇宙ステーションやさらには第 2 の地球と呼ぶべきスペースコロニーを建造して、宇宙空間に住むべきだという主張がされ始めたのは、今世紀も半ばを越えてからだろう。とくに 1970 年代、アメリカのプリンストン大学教授だったジェラルド・K・オニールが、既存の技術に裏付けられた具体的な構想を提唱してから、スペースコロニーの概念は広く知られるようになった（オニール 1974 年、1977 年、1981 年；中富 1985 年も参照）。

スペースコロニーには、ドーナツ型のもや球型のもや円筒型のものなどいろいろなヴァリエーションがあるが、ここではオニールが論文や著書の中で一番詳しく語っていて、あたかもスペースコロニーの代表のように

* 大阪教育大 Jun Fukue: A Motion in Space Colony

なってしまった円筒型のコロニー島 3 号を念頭に置いて、コロニーについて説明していこう。

(0) スペースコロニーに対する基本的な要請

まずスペースコロニーの定義というか、スペースコロニーと宇宙ステーションや宇宙プラットフォームなどとの基本的な違いは、スペースコロニーでは、地上 0 m と同じかそれに近い居住環境が実現されている点である。具体的には、①重力は 1G 程度である。②空気は地球の空気と同じ成分で、気圧、気温、湿度などの物理量も同じである。③自然な太陽光による昼夜がある。④陸地や水圏を持つ。⑤景色や生態系なども地球に似ていることが望ましい。

スペースコロニーはこれらの条件をすべからく満足してしなければならない。

(1) スペースコロニーの構造

オニールの提唱した島 3 号モデルは、円筒型で、2 つの底面に半球をかぶせたような形をしている (図 1=表紙)。円筒の直径は 6.5 km、長さは 32 km という非常に巨大なものである。

地球と同じ重力環境を得るために、通常はコロニーを対称軸のまわりに回転させて、遠心力による疑似重力を生み出す (したがってコロニーは球、ドーナツ、円筒など回転対称な形をしている)。島 3 号モデルの場合は、円筒の中心軸のまわりに 114 秒に 1 回回転させることで、内壁での遠心力による加速度がほぼ地表の重力加速度に等しくなるようにしている。

また円筒の側面は軸に沿った方向に 6 つに等分されていて、交互に「陸地」と「窓」になっている (図 2 左)。幅 3.4 km、長さ 30 km の細長くしかもへこんだ形状をしているために、「陸地」は「谷」とも呼ばれる。この「陸地」は 1 m 程度の厚さの地面からなる居住部分である。この地面の厚さが、大気と共に、宇宙空間から飛来する有害な宇宙線を防護する役目を果たす。島 3 号の「陸地」の部分の総面積は、およそ 325 平方 km ほどで、ここに 1000 万人が住める見込みである (一人当りの居住面積は、33 平方 m ぐらいになる)。

一方、「窓」は紫外線などを通さないガラスからできている。「窓」の部分の外側には、コロニーの端から斜

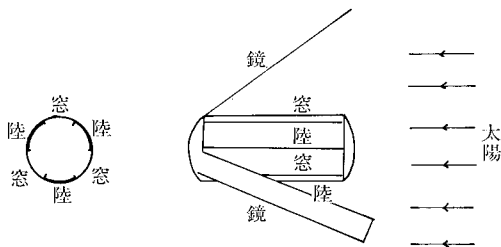


図 2 スペースコロニーの断面と側面

めに、3 つの細長い平面鏡がつけられている (図 2 右)。そしてコロニーの自転軸を太陽の方向に向けておくことによって、コロニーの軸に平行にやってきた太陽光線が、平面鏡で反射されてコロニー内部に入射し、「窓」とは反対側の陸地を照射する仕組みになっている。平面鏡の傾きを変えることによって、日照量や日照時間を変え、昼夜や季節を作り出すことができる。3 つの「陸地」のそれぞれで、異なった時間帯や季節を持つこともできる。

円筒の鏡を接続している側には、コロニー内部で発生した廃熱を宇宙空間へ放出する放熱器がついている。またもう一方の太陽に向けた側には、無重量工業区画や通信設備、ドッキングベイなどがある。さらにコロニーの周辺には、コロニーのエネルギー源である太陽発電衛星や、コロニーが自給自足するための農業衛星が設けられる。

以上のような巨大なスペースコロニーの総重量は 3000 万トン以上と見積られている。

(2) スペースコロニーの設置場所や建設方法

地球の近傍でスペースコロニーを設置するのにもっとも適切な場所は、地球-月系のラグランジュ点、すなわち力の均衡点だと考えられている (図 3)。とくに第 4 ラグランジュ点 (L4) と第 5 ラグランジュ点 (L5) は、ポテンシャルが浅いので、他のラグランジュ点よりもさらに便利だろう。L5 (エルファイブ) などに設置されたコロニーは、地球と月および太陽からの力を受ける。この制限 4 体問題はすでに解かれていて、コロニーは L5 のまわりを楕円に近い軌道を描きながら、89 日の周期でゆっくりとまわることが知られている。この軌道の全長は 80 万 km もあるので、軌道上には数千基のコロニーを建設できるだろう。さらに L5 およびコロニーは、約 1 カ月の周期で地球の周囲をまわり、1 年で太陽を 1 周する。

スペースコロニーは、互いに逆方向に回転する 2 つの円筒が機械的に結合されたペアで作られる。コロニーが単独だと、自転によるジャイロ스코ープの効果によっ

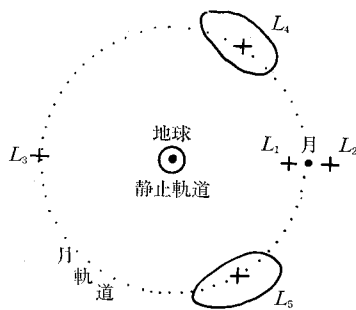


図 3 地球-月系のラグランジュ点

て、自転軸が空間に対して固定されてしまい、太陽の方向に自転軸を向けておこうとしたら大きなエネルギーが必要になる。しかしペアにして互いに逆回転させておくと、全体としては角運動量が0になるため、自転軸の方向を太陽に向けておくことが容易になるのである。

スペースコロニーを建設する材料は、構造材料のアルミニウムやチタニウムや窓ガラスの材料の珪素、水の質量の9割を占める酸素など、大部分は月から運ばれる。月からの原料の輸送には、質量駆動器マスドライバーが使われる。マスドライバーは線形加速器の一種で、電磁的な力によって原料の入ったバケツを加速して、バケツの中身のみを月面の脱出速度である秒速 2.4 km 以上の速度で月面からほうり出す装置である。結局、地球の深い重力井戸の底から持ち上げられるのは、水素と食料、高度技術製品そして人である。いや人以外の材料は、将来的には小惑星帯からすべて運ばれるだろう。

(3) 密閉型スペースコロニー

オニールのスペースコロニーには、採光のための「窓」領域があるため、コロニーの内面全体を利用できない。コロニーの内面全部を有効に利用するために、「窓」をなくして、自然光でなく、人工的な明りで内部を照明するようにしたものを「密閉型スペースコロニー」と呼ぶ。それに対して、「窓」があるものを「開放型スペースコロニー」と呼ぼう。

たとえば『機動戦士ガンダム』に出てきた例では、サイド3(ジオン公国)のコロニーが密閉型だった。そのためにソーラ・レイと呼ばれるコロニーレーザー砲が、コロニーを大きく改造せずに作れたのである。またいずれ詳しく述べる『宇宙のランデブー』に出てくるラーマも密閉型コロニーである。本シリーズにおいても、とくに流体力学的な問題を考える場合は、しばしば密閉型コロニーを念頭においている。

3. スペースコロニーのボール投げ

スペースコロニーは、一定角速度で回転することによって疑似重力を生み出す。したがってその内部の力学は一樣回転系での力学になる。本稿では、そのような回転系の力学の基礎的問題を考えてみよう。

3.1 基礎方程式

角速度 Ω で一樣回転している系(回転系)における質量 m の質点の運動方程式は、ベクトルの、

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} - m \Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}) - 2m \Omega \times \mathbf{v} - m \frac{d\Omega}{dt} \times \mathbf{r} \quad (1)$$

と表せる(導出は力学のテキスト参照)。ただし \mathbf{r} は質点の位置ベクトル、 \mathbf{v} は速度ベクトルで、 Ω は角速度ベクトルとする。右辺第1項は(重力や電磁力などの)外

力、第2項は回転に伴う遠心力、第3項がいわゆるコリオリ(Coriolis)の力である。第4項は回転の時間変化による項で名前はないようだ。

外力が0でかつ回転が定常の場合は、(1)式の右辺第1項と第4項がなくなって、

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}) - 2\Omega \times \mathbf{v} \quad (2)$$

となる。さらに図4のような回転中心を原点とする直角座標 (x, y) を用いて成分を書き下すと、

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{du}{dt} = \Omega^2 x + 2\Omega v \quad (3x)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \Omega^2 y - 2\Omega u \quad (3y)$$

となる。ただし (u, v) は速度の x, y 成分とする。この(3)式が、角速度 Ω で回転するスペースコロニー内の質点の運動を支配する基礎方程式である。

コロニー内の質点の運動については、空気抵抗のある一般的な場合について、後の回で詳しく取り扱うが、今回は、(3)式を数値的に解いたものを紹介しよう。

3.2 数値的な解

上の(3)式をさらに、

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (4a)$$

$$\frac{du}{dt} = \Omega^2 x + 2\Omega v \quad (4b)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \quad (4c)$$

$$\frac{dv}{dt} = \Omega^2 y - 2\Omega u \quad (4d)$$

のように変形する。そして初期値を与えてルンゲ・クッタ・ギル法で数値的に解いたのが、以下に示す例である。いわば、コロニー内の任意の場所から任意の方向へ任意の初速でボールを投げたときのボールの描く軌道だと思えばよい。

以下、数値計算の例を簡単に説明しておく(図5)。まず画面にはスポーク付きの車輪が2つ描かれている。そのうち左の車輪は、スペースコロニーに固定した系

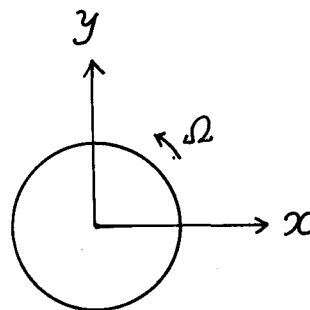


図4 座標系

(回転系) でみたコロニーの断面で、コロニーと共に回転するために、プログラムの実行中も静止している。一方、右の車輪は、コロニーの外部の慣性系からみたコロニーの断面図で、コロニーの回転と共に車輪のスポークが回転する。図5上はコロニーの半径の2分の1の場所

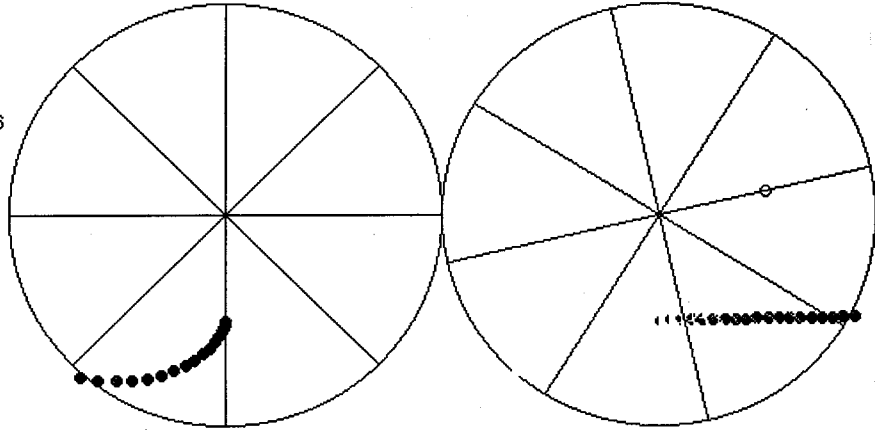
から初速0でボールを離れた場合(落体運動)の計算例で、図5下は同じ場所からコロニー周辺の回転速度と同じ初速でいろいろな方向にボールを投げた場合の例である。

画面左側には、コロニーの基本量とボールの初期値が

スペースコロニーのボール投げ：コリオリの力 91/02/08

コロニーの基本量
 $G = 1.00 \text{ G}$
 $P = 200.71 \text{ 秒}$
 $R = 10.00 \text{ km}$
 $V = 0.31 \text{ km/s}$

ボールの初期値
 $g = 0.50 \text{ G}$
 $x/R = 0.00$
 $y/R = -0.50$
 $vx/U = 0.00$
 $vy/U = 0.01$
 $r/R = 0.50$
 $\phi = -90.00^\circ$
 $v/U = 0.01$
 $\psi = 90.00^\circ$



現在時刻
 $t = 57.50 \text{ 秒}$
 $\Omega t = 1.80$

現在値(回転系)
 $x/R = -0.67$
 $y/R = -0.77$
 $vx/U = -0.87$
 $vy/U = 0.18$
 $r/R = 1.02$
 $\phi = -131.30^\circ$
 $v/U = 0.89$

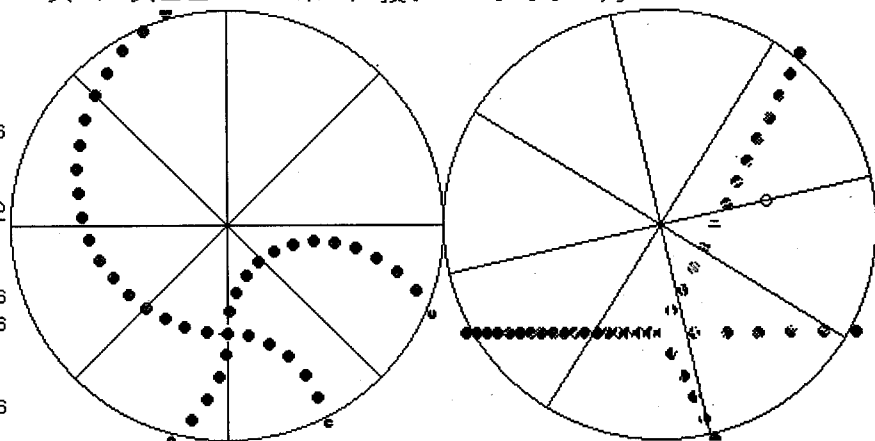
現在値(慣性系)
 $x/R = 0.90$
 $y/R = -0.48$
 $vx/U = 0.50$
 $vy/U = 0.01$
 $r/R = 1.02$
 $\phi = -28.17^\circ$
 $v/U = 0.50$

発射/[RET]: コロ-/GPRU: ホール/カール&2839&46: 単位/U: 軌跡/B: 再スタート/S

スペースコロニーのボール投げ：コリオリの力 91/02/08

コロニーの基本量
 $G = 1.00 \text{ G}$
 $P = 200.71 \text{ 秒}$
 $R = 10.00 \text{ km}$
 $V = 0.31 \text{ km/s}$

ボールの初期値
 $g = 4.90 \text{ m/s}^2$
 $x = 0.00 \text{ km}$
 $y = -5.00 \text{ km}$
 $vx = -0.31 \text{ km/s}$
 $vy = -0.00 \text{ km/s}$
 $r = 5.00 \text{ km}$
 $\phi = -90.00^\circ$
 $v = 0.31 \text{ km/s}$
 $\psi = 180.00^\circ$



現在時刻
 $t = 57.50 \text{ 秒}$
 $\Omega t = 1.80$

現在値(回転系)
 $x = -2.82 \text{ km}$
 $y = 9.90 \text{ km}$
 $vx = 0.35 \text{ km/s}$
 $vy = 0.24 \text{ km/s}$
 $r = 10.30 \text{ km}$
 $\phi = 105.92^\circ$
 $v = 0.42$

現在値(慣性系)
 $x = -9.00 \text{ km}$
 $y = -5.00 \text{ km}$
 $vx = -0.16 \text{ km/s}$
 $vy = -0.00 \text{ km/s}$
 $r = 10.30 \text{ km}$
 $\phi = -150.95^\circ$
 $v = 0.16$

発射/[RET]: コロ-/GPRU: ホール/カール&2839&46: 単位/U: 軌跡/B: 再スタート/S

図5 計算例

表示されている。コロニーの基本量は上から、 G (スペースコロニー表面での遠心力加速度; 1G 単位), P (コロニーの回転周期; 秒単位), R (コロニーの半径; km 単位), V (コロニー表面の回転速度; km/s 単位) である。ただしプログラム内での計算はすべて無次元化した方程式で計算している (長さはコロニーの半径を単位に, 時間は $1/Q = \text{回転周期}/2\pi$ を単位にしている), これらの基本量の値そのものは, 計算結果に関係ない場合もある。

ボールの初期値として表示されるのは, 上から, g (ボールの初期位置における遠心力加速度), (x, y) (ボール初期位置の直角座標; 画面水平方向右向きに x 軸, 垂直方向上向きに y 軸), (v_x, v_y) (ボールの初期速度成分), (r, ϕ) (ボール初期位置の極座標), v (ボールの初期速度の大きさ), ϕ (ボールを投げる方向; 水平方向右側から反時計回りに $^\circ$ 単位) である。

さらにボールの軌跡の表示と同時に画面下側にカレントデータが表示される。左側の現在時刻はボールを投げた瞬間から計り始めた時間で, 上が秒単位の表示, 下が無次元化した時間。まん中は回転系におけるボールの現在値。右側は慣性系で測ったボールの現在値を表す。まん中の回転系における現在値をみれば, ボールがコロニ

ー内のどの地点にどういう速度で到達するか大体わかる。なお図5上では無次元化した量で, 下では次元量で表示してある。

さて実行例をみると一目瞭然だが, 回転系と慣性系を比べると, 慣性系ではボールが等速直線運動をしており, 回転系におけるコリオリの力が見かけの力であることが理解できる。

最後に、『宇宙のランデブー』(p. 58) から, 老宇宙物理学者デヴィッドスン教授の言葉を挙げておきたい。「遠心力などというものはありません。あるのは慣性だけですよわい」……至言である。

参考文献

- 福江 純 1990, ハード SF 研究所公報, 39, 34.
 O'Neill, G. K. 1974, Physics Today, Sept., 32.
 Matsuda, T. 1983, J. Phys. Soc. Japan, 52, 1904.
 ジェラルド・K・オニール『宇宙植民島』(木村絹子訳) プレジデント社 (1977 年)
 ジェラルド・K・オニール『スペース・コロニー 2081 年』(小尾信彌訳) PHP 研究所 (1981 年)
 中富信夫『宇宙ステーション 1992』新潮文庫 (1985 年)
 『宇宙翔ける戦士達/GUNDAM CENTURY』みのり書房 (1981 年)
 アーサー・C・クラーク『宇宙のランデブー』(南山宏訳) 早川書房 (1985 年)

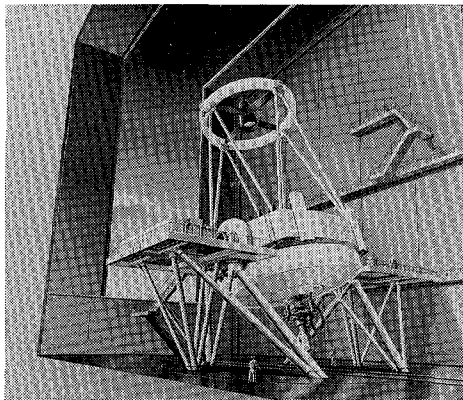
★ 8 m 望遠鏡の名称を募集します ★

国立天文台では, 今年から 8 年計画 (予定) で, ハワイ島マウナケア山頂に世界最大の口径 8 メートル望遠鏡 (可視光・赤外線共用) の建設をスタートしました。これまで, プロジェクト名として JNLT の略称をもちてきましたが, 建設の開始を機会に, 望遠鏡の名称 (愛称) を広く公募することになりました。

新しい宇宙を開く次世代の望遠鏡, また日本が海外に初めて設置する新鋭望遠鏡にふさわしい, 簡明で親しみやすい名称を期待します。ふるってご応募ください。

名称は英字, カナ, ひらがな, 漢字どれでも自由ですが, 英字以外の場合はローマ字読みを併用します。

審査は国立天文台が依頼する審査委員会で行なわれます。採用の名称を応募された方には, その名称入りの望遠鏡パンフレットなどの記念品をお送りいたします。



○応募方法: 官製ハガキ 1 枚につき名称を 1 つだけ書いて, 住所・氏名・年齢・職業を併記のうえ, 下記にお送りください。

○応募先: 〒191 東京都三鷹市大沢 2-21-1
 国立天文台 大型望遠鏡準備室
 ☎ 0422-41-3609

○応募締め切り: 8 月 15 日 (木) (消印有効)

○結果の発表: 8 月下旬 (新聞などにて発表)