



シネマ天文楽 3 火星映画へようこそ

福江 純 (大阪教育大学)

1. 赤い惑星

宇宙への進出の次は、月の映画、そしてその次に、火星、と思っていたのだが、いま旬の火星の方を先にしよう。

火星

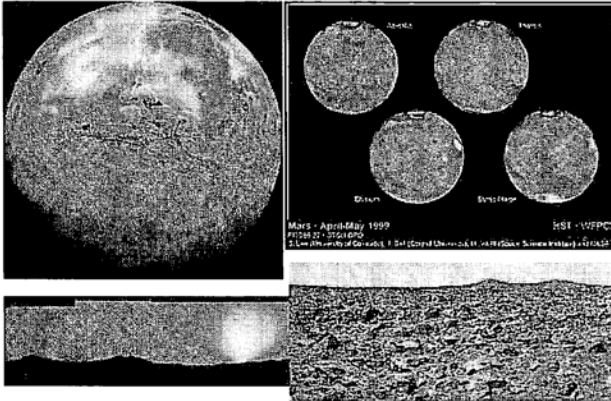


図1 赤い惑星 (NASA/STScI)

赤い惑星、火星は、古くから知られていた5惑星の一つだ(図1)。その特徴的な赤い色から、中国では“螢惑(けいわく; 正しい字は虫の部分か火)”と呼ばれ、さらに五行思想の影響のもとで“火星”となった。一方、ギリシャ・ローマ文化では、軍神アレス(Ares) / マルス(Mars)と対応させられた。もちろん後者が、英語Mars(マーズ)の語源である。

人々はもちろん大昔から月や惑星などの天界にも生き物が住んでいると想像していたが、“現代科学的”な意味で、19世紀末にはじめて火星の存在を論議したのは、よく知られているように、パーシバル・ローウェルである。そもそも1877年、イタリアの天文学者スキヤパレリ(Schiaparelli)が、新しい設備を使って火星の表面の様相をくわしく観測し、その結果をイタリア語で発表した。彼はそれらの様相をイタリア語で“溝(カナリ canali)”と呼んだのだが、イタリア語からフ

ランス語に翻訳するときに“運河(カナル)”と誤訳されたところに、混乱の始まりがある。

その誤訳を真に受けたのが、アメリカの天文学者、パーシバル・ローウェル(Percival Lowell; 1855~1916)だ。火星の表面に、(自然にできた)溝(カナリ)ならぬ(人工的な)運河(カナル)があるならば、それを作った知的生命すなわち火星人が存在するはずだ、と信じ込んでしまったのだ。そして彼は、火星の存在を確かめるためにわざわざアリゾナのフラッグスタッフに天文台まで作り(1894年)、火星の“運河”を徹底的に観測し、それが人工的なものだと宣伝したのである。人は、自分が見たいものを見る、という典型例だろう…そう、ローウェルは“運河”を見たかったのだ。そしてローウェルの活動によって、それから半世紀もの間、西欧社会では火星人が“大流行”した。いや、いまでも、“流行”は続いているというべきだろう。

なお、ローウェルは、海王星の彼方の9番目の惑星の存在も予想していて、ずっと探し続けた。彼が見つめることは叶わなかったが、ローウェルの死後、1930年に、ローウェル天文台のトンボー(Tombaugh)が冥王星を発見した。

話戻って。たしかに、現代の惑星科学・探査で、“運河”など影も形もなく火星の表面はクレーターのみであることが暴かれてしまった。いやそれどころか、1976年、火星に軟着陸してさまざまな調査を行った探査機バイキングは、火星には火星どころか微生物さえいそうにないことを明らかにしてしまった。しかし、しかしだ。いまだに、火星生物や火星人の話題は絶えない。SF(小説、

コミック、映画)でも、しばしば扱われる。火星人はフォークロアとして人類の文化に定着してしまっただけか、というべきかもしれない。

今回紹介する2つの映画も、最近の代表的な火星SF映画である。

2. 『ミッション・トゥ・マーズ』 & 『レッド・プラネット』

前者の『ミッション・トゥ・プラネット』は、『ミッション：インポッシブル』のブライアン・デ・パルマ監督作品で、2000年製作(だと思ふ)、114分。後者の『レッド・プラネット』はアントニー・ホフマン監督作品で、2000年製作、107分。同じ火星SF映画でも印象はかなり違う。

まず、『ミッション・トゥ・マーズ』。

時は西暦2020年、この時代、宇宙ステーション(World Space Stationという名前)はすでに実働していて、つぎは火星という時代だ。そしてついに人類初の有人火星探査が行われた。ところが4人の乗組員の乗ったアレス8号は、火星に着陸した後、謎のメッセージを残して、連絡が途絶してしまう。一体、何が起こったのだろうか。そこで、真相の究明と生存者の救出をミッションとして、マーズ・リカバリー号が、やはり4人の乗組員を乗せて発進する。ここからがメインだ。

で、ネタバレになるので詳しくは書かないが、前フリからもわかるように、『ミッション・トゥ・マーズ』は、一応、いわゆる“ファースト・コンタクト”ものである。つまり、地球外知的生命との遭遇があるタイプのSFだ。だけど、マーズ・リカバリー号のシーンを見ると、同時に、正統的な“宇宙開発SF”でもあるなあ。宇宙船の居住区は回転して擬似重力を発生させているし、無重力でのイベントもいろいろあるし、お約束の危機も立て続けに起こり、きちんと宇宙的な結末も用意してある。実際、NASA全面協力だそう。

ま、いちわるな目で見れば、居住区の回転

半径が5~6mぐらいしかないのに、あれじゃコリオリの力が大きくて、目眩がして、まともに歩けないんじゃないかな、って思ったぐらいだ。そういった点も検討してみるのも面白いだろう。

で、メインテーマのファースト・コンタクトの方だが、こちら、コンタクトの場所の造形がこれはないだろう、とか、コンタクトの相手の造形がこれはないだろう、というような文句はあるものの、内容的には『2001年宇宙の旅』(アーサー・C・クラーク)のつもりなんだな、という気持ちはわかる。最後の選択、ぼくはおそらくジムと同じ選択肢を選ぶだろうが、あなたならどーする?

余談だが、よくサノバビッチ、て悪態をつくでしょ。あれって、

son of a bitch

だったんだ。いやー、英語の字幕にしたからわかったが、はじめて知ったぞ。

もう一つの『レッド・プラネット』。

時は西暦2050年。地球の環境は悪化の一途を辿っていた。もはや地球を治すのは手遅れで、このままでは早晩地球は住めなくなり、人類は滅亡してしまうだろう。そこで、起死回生の策として、火星への人類移住を実行するため、「火星地球化計画」が進んでいた。すなわち、数十年にわたって、品種改良した藻を火星に送りつづけ、酸素を発生させていたのだ。ところが、ここにいたって、火星の酸素レベルが突然に減少し始める。その原因を調査するため、ボーマン船長を中心とする6人のクルーがマーズ1で火星に出発した。

さて、182日後に火星に到着した途端に、こちら、お約束の危機が続発である。そして、着陸船を手動で発射せざるを得なくなり、ボーマン船長(実はスーパーウーマン)がマーズ1に残る。船内も大変、着陸船も大変、まあ、行くも地獄、残るも地獄、ちゅうやつですな。

軌道上の女船長もスーパーウーマンぶり

大変だが、火星に降りた5人の野郎たちにも、サバイバルから始まって、つぎからつぎへと事件が起こるし、アガサ・クリステイばりに、一人また一人と…。そして、そもそもの、酸素と藻の謎は深まるばかり。

ついに明かされるか。火星で彼らを待っていたのは！！

この『レッド・プラネット』は原作の翻訳も出ていて数年前に読んでいたが、あらかた筋は忘れていたので、また新たな気分で見れた。また、悪役に相当する（最初ですぐわかるし、言っちゃっていいかな）索敵航法ロボットのAMEE（エイミー；名前はかわいい）って、そっか、こんな格好をしたヤツだったんだ。などという、映像になった楽しさも味わえた。それから、これも言ってもいいと思うが、マーズ・パス・ファインダーが設置したセーガン記念ステーションと六輪の小型探査車ソジャーナも出てくるので、エアバッグを使った軟着陸シーンと共に要注意である。

この『レッド・プラネット』には『ミッション・トゥ・マーズ』のような派手なエーリアンは出てこないのだが、より切実でリアルな近未来SFを目指したものだと思う。また『2001年宇宙の旅』の方向とは異なるものの、宗教（神）というか哲学というか、そういった問題意識も投げかけてくる部分がある。いろいろ見るべき要素は多い。

あと、どうでもいいことだが、『ミッション・トゥ・マーズ』を見たときは、音声英語で字幕も英語にして結構しんどかったので、『レッド・プラネット』では、音声吹き替えで字幕英語で見ていた。やっぱ楽だけど、後半は見るのに夢中で、メモが希薄になってしまった。でも、Fuck this Planetは“火星なんかくたばれ”って訳すんだね。いや、ほんと、どーでもいいことだけど。

それから、自分趣味的には関心が異常に高かったのが、筒の形式で携帯している巻物

状のディスプレイだ。いまのフルスペック携帯ノートは1kgを切るのがやっとだが、100gのオーダーになって欲しい人間としては、こんな巻物状のスグレモノを注視してしまった。でも、50年待たなくても実現するだろう。

3. ホーマン軌道

『ミッション・トゥ・マーズ』におけるマーズ・リカバリー号や、『レッド・プラネット』のマーズ1号などは、何日もかけて、地球から火星へ航行しなければならなかった。これは、惑星間の距離が広大であることに加えて、地球も火星も常に動きつづけているためもある。まず最初に、地球から火星への飛行経路について考えてみよう。

宇宙空間の中でA点からB点まで移動するときに、両方の点が静止しており、かつ周囲に天体など重力場がなければ、一直線にまっすぐ進むのが楽なのは明らかだろう。しかし、一般には、宇宙においては、出発点も到着点も動いているのがふつうであり、さらに惑星や太陽などの重力場が働いていることも少なくない。そのような場合には、出発点と到着点の運動および周囲の重力場を考慮しながら宇宙船の軌道を決めないと、燃料やエネルギーを無駄にしてしまうことになる。

そして、とくに、惑星周回軌道で低高度軌道から高高度軌道へ移るときや、惑星間空間で地球軌道から別の惑星（たとえば火星）の軌道に移るときなど、宇宙船をある楕円軌道から別の楕円軌道に移すときに、もっともエネルギーのかからない軌道が「ホーマン軌道（Hohmann orbit）」だ。ドイツの宇宙旅行研究者のW.ホーマン（W. Hohmann）が提唱したので、この名前がある。

ホーマン軌道は、それぞれの軌道に接する楕円になる（図2）。たとえば、周回軌道の低高度軌道と高高度軌道の両方に接する楕円、あるいは出発惑星の軌道と目的惑星の軌道の両方に接する楕円軌道になる。ホーマン軌道

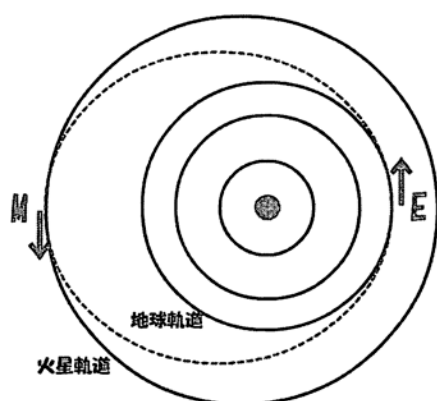


図2 ホーマン軌道

ではエネルギーが最小になる代わりに、移動時間はかかる。たとえば、ホーマン軌道を取って地球から金星まで行くには146日、火星までだと258日、木星までなら2.7年も要する。

あれ、マーズ1号は182日で火星まで行ったから、純粋なホーマン軌道じゃなかったのかな。ま、多くの探査機は、加速を少しだけ強くして飛行日数が少な目の軌道—準ホーマン軌道と呼ばれる—に乗せることが多いので、マーズ1号も純粋のホーマン軌道ではなかったのだろう。

図2をもとにもう少し細かい説明をしよう。図2は中心の赤丸が太陽で、そのまわりに、水星、金星、地球、火星の軌道が黒い実線で描いてある。地球軌道上のE点で、地球周回軌道を離脱した宇宙船は、地球と共に太陽のまわりを回っていたわけだから、すでに、地球軌道の接線方向に対して地球の公転速度（約30km/s）と等しい速度成分をもっている。それに加えて、さらに接線方向に約3km/sだけ増速することによって、E点で地球軌道に接しM点で火星軌道に接する楕円軌道（図2の破線）に乗るわけだ。

この楕円軌道上を宇宙船は何百日もかけて飛んでいくのだが、火星軌道のM点に達したときに、そこに火星が居なければ話にならない。逆算すれば、地球軌道のE点を出発する

ときには、火星はM点よりもはるか手前に居るはずである。具体的には、地球がE点にいるとき、火星は地球の45°前方にいる。また火星がM点まできたとき、地球は火星の72°前方まで進んでいる。そのような時期を見計らって地球を出発するのだが、地球と火星がちょうどよい位置関係—打ち上げウィンドウ—になるのは、地球と火星の会合周期（約2年）に一回程度であることは容易にわかるだろう。もちろん加速を上げて飛行日数を少なくした準ホーマン軌道を選ぶなら、この条件は緩和される。

さて楕円軌道を飛行していた宇宙船が火星軌道のM点まで来たとして、そして、そこに火星が居たとして、そこでの宇宙船の速度は約21km/sだが、一方、火星の公転速度は約24km/sである。すなわち宇宙船の飛行速度は、火星軌道の半径の円運動を維持するには足りない。つまりM点まで来た宇宙船が何もしなければ、M点で宇宙船と火星はしばし併走するものの、あっという間に、宇宙船は火星に追い抜かれてしまう。そして宇宙船はふたたび楕円軌道を地球軌道の方へ向けて落下する。だから、M点で、宇宙船はふたたび約3km/sほど増速し、宇宙船の接線速度を火星軌道の公転速度に合わせなければならない。これでやっと宇宙船と火星のランデブーが完了する。

帰りについても一言書いておこう。もし、火星から地球へ戻るのにもホーマン軌道を使うとすると、火星を出発して258日ほど経って地球軌道まで着いたときに、そのちょうど地球が居ないといけな。そのようなタイミングで火星を出発するには、会合周期などの計算から、火星には460日ほど滞在しなければならないことがわかっている。

ホーマン軌道だけを使った火星旅行では、行きに258日、滞在460日、帰り258日、計976日＝2年8ヶ月の長旅になるのだ。

4. テラフォーミング

『レッド・プラネット』でも、もう一つの大きな話題は、「火星地球化計画」である。これはしばしば「テラフォーミング」と呼ばれる問題だ。すなわち、地球以外の惑星で、人類が住めないような環境の惑星を、惑星規模で環境改造して人類が住めるように作り直す惑星工学の大事業のことである。ラテン語の地球(テラ)と形成(フォーム)から、テラフォーミング terraforming と名づけられた。しばしば「地球化」と訳す。研究対象として最初にテラフォーミングを考察したのは、惑星物理学者で『コスモス』や『コンタクト』でも有名な、故カール・セーガンだそう。彼は1961年の論文で金星の環境改造を議論し、その後のテラフォーミングの研究に先鞭をつけた。

地球のような惑星に改造して人類が住めるようにするとはいっても、現有技術ではさすがに惑星の重力まで変えるわけにはいかない。したがって、現有技術におけるテラフォーミングでは、

- (1) 気温を調整して適度な大気温度にする
 - (2) 酸素を増やして呼吸可能大気にする
 - (3) 液体の水を解放して開水面をつくる
- などが中心になるだろう。

以下では、火星のテラフォーミングを念頭に置いて、これらの条件をもう少し詳しく考えてみよう。なお、これらの要素は、この順番にテラフォーミングするというわけではないし、実際には相互に絡み合っている。

4-1 気温の変更

現在、火星の平均気温は絶対温度で250Kぐらいである。摂氏では、(250-273.15=) マイナス23℃ぐらいになる(場所によってマイナス100℃からプラス10℃ぐらい)。これでは寒すぎて、通常の生活を送るのは難しい。そこで、まずは、気温を上げる方法だ。

惑星は太陽に照らされ暖められるのだから、火星に限らず惑星の表面温度は、太陽か

らの距離によって基本的に決まっている。太陽からの日射量と惑星表面からの熱放射が釣り合っていると仮定して、惑星の表面温度(表面平衡温度)を求めてみると、たとえば、

惑星	表面平衡温度	観測値
金星	340K (67℃)	470℃
地球	290K (16℃)	
火星	234K (-39℃)	-100 ~ 10℃

のようになる。

これをみてわかるように、火星の平均気温は予想される表面平衡温度に近い。地球の場合もそうである。しかし、金星は平衡温度よりも実際の観測値の方がはるかに高い。これは、金星の厚い大気による「温室効果」のためだ。これが、火星の平均気温を上昇させる鍵でもある。

火星の気温を上昇させる方策はいくつか検討されているが、大きく分けると、日射量や日射の吸収量を増やしてダイレクトに気温を上昇させる方法と、温室効果を働かせて間接的に気温を上げる方法にわけられるだろう。

まず、日射量などを増やす直接的な方法として、アルミコーティングした巨大な鏡を火星周辺の宇宙空間に設置し、それで太陽光線を反射して火星表面を照射する。火星軌道では乏しい太陽光を最大限に利用するわけだ。

また火星表面に大量のススを散布して、太陽光の吸収量を上げ、気温を上昇させる方法もある。現在の火星表面の反射能(アルベド)は0.16で、地球の0.30に比べて低い。さらに小さくすれば、より吸収効率が上がるわけだ(アルベドは、完全反射物体で1、完全吸収物体で0)。

さらに火星の極冠の氷は、水と二酸化炭素でできていると考えられている(図3)。だから、火星の極冠にススを散布し、宇宙空間に設置した反射鏡で照らして暖めれば、極冠が蒸発して、大気中に水蒸気と二酸化炭素が放

出される。その結果、温室効果が働き、気温の上昇が起こるだろう。

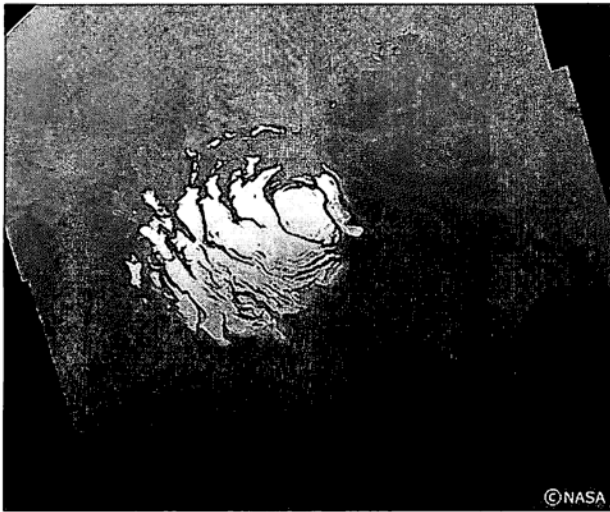


図3 火星の極冠 (NASA)

4-2 酸素の供給

つぎに呼吸可能大気の形成だ。

現在の火星大気の成分は、体積百分率で、

成分	体積百分率
二酸化炭素	95%
窒素	2.7%
アルゴン	1.6%
酸素	0.13%
水蒸気	0.03%

で、呼吸に適しているとはとてもいえない。そもそも、大気圧は0.006気圧しかないから、全然足らないのだが。したがって、火星の大気を呼吸可能にするためには、酸素を増加させて、酸素分圧と酸素量を大きくしないといけない。

大気酸素を増やす方法は、『レッド・プラネット』にもあったように、藻類が有力だと考えられている。

遺伝子工学的に手を加え、火星の環境でも生き延びることができ、かつ大量の酸素を放出できるように品種改良した藻類を火星にばらまいて、酸素を増加させるわけだ。

ただし、時間はかかるだろう。『レッド・プラネット』のように数十年というタイムスケールでは難しく、おそらくは1000年のオーダーの時間がかかるだろうと推測されている。

4-3 水

惑星環境にとって、水、は重要な要素である。地球は水惑星とも呼ばれるように、海が表面の7割を占めている。生命は海で発生したと信じられているが、テラフォーミングではそこまでの要求はしていない。

テラフォーミングにおける水の重要性は、2つぐらいあるだろう。1つは単純に生命の生存にとって水が必要不可欠だという問題だ。そのためには、最低限、人類が住む地域で、降水(降雨&降雪)や河川によって、水が利用できればよい。

もう一つは熱溜めとしての水の働きだ。水は熱容量が大きいので大量の熱を蓄えることができる。地球の場合、広大な海洋の存在が、昼夜の温度差や季節の温度差を相当に緩和している。局地的にも、湖水の存在が、地方の温度変化を緩和することができる。水が熱溜めとして働くには、湖水や海洋など開水面ができるぐらいには大量の水が必要だ。

火星では、極冠の下に、大量の水が存在していると考えられている。したがって、火星の気温を上げておいて、その上で、極冠を溶かせば、海が生じるくらい、相当量の(液体の)水が放出されるだろう。

実際、火星の表面を全域にわたって精査したマーズ・グローバル・サーベイヤーによると、火星も過去のある時期には海洋を有していたと考えられている(図4)。

図4はマーズ・グローバル・サーベイヤーが作成した火星の地形図だが、図で平らな部分が低地だ(カラーでは青)。北半球に広がる広大な低地部分には、40億年前まで大量の水が溜まっていて、ボレアリス海をなしていた

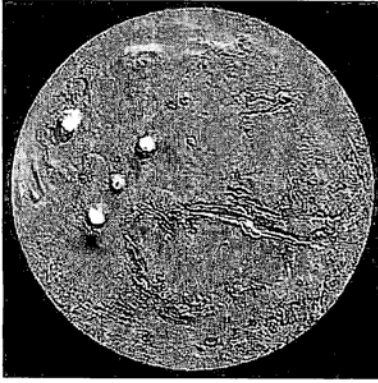


図4左 火星西半球の地形 (NASA)
左上がオリンポス山

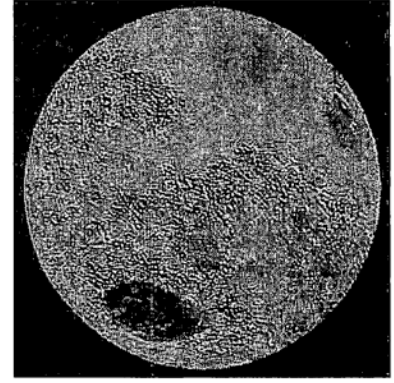


図4右 火星東半球の地形

と推定されている。火星のテラフォーミングでは、極冠の氷を溶かして、ふたたびボレアリス海を甦らせるのだ。

水の豊富な彗星をぶつけて、酸素と水をドカンとばら撒くという荒業もある。そんな方法なら短期間でテラフォーミングできるかもしれない。

5 おわりに

最初にも述べたように、火星の物語は少ない。ちょっとだけ紹介しておこう。

SF映画では、火星人が攻めてくるウェルズの古典のリメイク『宇宙戦争』(1953年)。火星探検は大欺瞞だったという『カプリコン1』(1978年)。はちゃめちゃ火星人が暴れまわるらしい(未見だが)『マーズ・アタック』(1996年)。フィリップ・K・ディック原作でわかりにくいので好みではなかったがシュワちゃんの暴れる『トータル・リコール』(1990年)。などなど。

SF小説では、クラークの傑作『火星の砂』、ハインラインの『赤い惑星』、アシモフの短編集『火星人の方法』と御三家はもちろん、出歯亀火星人の出てくるフレドリック・ブラウンの『火星人ゴーホーム』、限りない郷愁をさそうレイ・ブラッドベリの『火星年代記』、東洋的無常感の漂う光瀬龍の『東キャナル文書』、きっちりと考証された谷甲州の『火星鉄道一九』などなど、ちょっとチェックしただけでも、枚挙にいとまがない。そんな中で、ロビンソンの『レッド・マーズ』・『グリーン・

マーズ』・『ブルー・マーズ (未刊)』は最近の火星SFの大作だ。

ぼくのホームページの評から引用すると…ロビンソン『グリーン・マーズ』★近未来の火星への探査・植民・独立を描いていく、分厚い3部作の2つ目だ。この数年は、映画にもなった『ミッション・トゥ・マーズ』や『レッド・プラネット』など、いわゆる火星モノが多いが、ロビンソンの『レッド・マーズ』『グリーン・マーズ』『ブルー・マーズ』3部作は、そんな中での最高傑作といえるだろう。しかし、大気の様子や空の色や水力学など科学的な状況はもちろんだが、地球の政治体制や経済状態など政治的社会的背景もここまで書き込まれていると、もはやたんなる近未来SFというより、近未来科学ドキュメントとか近未来政治ドキュメント、あるいはむしろ、近未来科学歴史小説とでも呼んだ方が相応しい。とにかく久方ぶりに重厚なSFだった。…となる。

最後に、コミック・ゲームの分野から、木城ゆきと『銃夢』も挙げておく。後半の舞台が火星になる。これは原作コミックも面白いが、ゲームもオススメ。

補遺1 ホーマン軌道の飛行日数

ケプラーの第三法則では、天文単位で測った惑星の軌道長半径 a と年で計った惑星の公転周期 P の間に、

$$P^2 / a^3 = 1$$

という関係が成り立つ。たとえば、火星の軌

道長半径は1.52天文単位で、公転周期は1.88年であり、上の関係を満たす。

さて、地球から火星へのホーマン軌道の場合も、惑星の周辺部を除いて、おおむね太陽の重力場の中を運動する軌道だから、第三法則を含め、ケプラーの法則を満たさなければならぬ。したがって、まず、ホーマン軌道は、太陽を一つの焦点とする楕円軌道になる。

またこの楕円の長軸の長さは、図2からわかるように、地球軌道の半径と火星軌道の半径を足したもので、

ホーマン軌道の長半径 = (地球軌道の半径 + 火星軌道の半径) / 2 = 1.26天文単位
となる。これをケプラーの第三法則に入れば、この楕円軌道の公転周期は、1.41年となる。さらに火星まで行くのは楕円の半分だけなので、

ホーマン軌道の飛行日数 = 0.71年 = 258日となるわけだ。

補遺2 ホーマン軌道の増速量

少し面倒だが、高校の物理学の知識しか必要ないので、ホーマン軌道の増速量も導いてみる。

まず、出発点と到着点の基準となる地球の公転速度 V_E と火星の公転速度 V_M からだ。

$$\text{万有引力定数 } G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$$

$$\text{太陽の質量 } M = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$\text{地球の公転半径 } R_E = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$\text{火星の公転半径 } R_M = 2.27 \times 10^{11} \text{ m}$$

とする。そうすると、地球の公転速度 V_E は、

$$V_E = \sqrt{GM/R_E} = 29.8 \text{ km/s}$$

となり、火星の公転速度 V_M は、

$$V_M = \sqrt{GM/R_M} = 24.1 \text{ km/s}$$

となる。

つぎに、ホーマン軌道の速度だが、地球軌道の接する場所（すなわち近日点）での速度を V_1 、火星軌道と接する場所（遠日点）での速度を V_2 とすると、近日点と遠日点での力学

的エネルギーの保存から、

$$\frac{1}{2} V_1^2 - \frac{GM}{R_E} = \frac{1}{2} V_2^2 - \frac{GM}{R_M}$$

が成り立つ。また角運動量の保存から、

$$R_E \cdot V_1 = R_M \cdot V_2$$

が成り立つ。

これらの2つの式を解いて、 V_1 と V_2 を求めると、

$$\begin{aligned} V_1 &= \sqrt{[2GM \cdot R_M / R_E(R_E + R_M)]} \\ &= V_E \times \sqrt{[2R_M / (R_E + R_M)]} \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} V_2 &= \sqrt{[2GM \cdot R_E / R_M(R_E + R_M)]} \\ &= V_M \times \sqrt{[2R_E / (R_E + R_M)]} \end{aligned}$$

が得られる。具体的に数値を入れれば、

$$V_1 = 32.7 \text{ km/s}$$

$$V_2 = 21.5 \text{ km/s}$$

になる。

したがって、近日点では、

$$\Delta V = V_1 - V_E = 2.9 \text{ km/s}$$

の増速を、遠日点では、

$$\Delta V = V_M - V_2 = 2.6 \text{ km/s}$$

の増速が必要なのだ。