|  |
| --- |
|  |
| SSVG 宇宙探査の旅 ユーザーズガイド |
| SSVG (Solar System Voyager) User’s Guide |

|  |
| --- |
| 植月修志　(Shushi Uetsuki/whiskie14142)  2019/3/10  Rev. 1.3.1　（SSVG Version 1.3.1 以降用） |

目次

[SSVGとは 1](#_Toc2931837)

[最近の改善点 1](#_Toc2931838)

[バージョン1.3.1 1](#_Toc2931839)

[バージョン1.3.0 2](#_Toc2931840)

[バージョン1.2 2](#_Toc2931841)

[SSVGでできること 2](#_Toc2931842)

[この文書の開き方 4](#_Toc2931843)

[ソフトウェアのライセンス 4](#_Toc2931844)

[この文書のライセンス 5](#_Toc2931845)

[作者への連絡方法 5](#_Toc2931846)

[SSVGの使い方 6](#_Toc2931847)

[インストール／アンインストール 6](#_Toc2931848)

[Windows実行形式プログラムのインストール／アンインストール 6](#_Toc2931849)

[Pythonスクリプトのインストール／アンインストール 7](#_Toc2931850)

[SSVGの起動 8](#_Toc2931851)

[Windows実行形式プログラムの場合 8](#_Toc2931852)

[Pythonスクリプトの場合 8](#_Toc2931853)

[飛行計画を実行する 9](#_Toc2931854)

[飛行計画を開く 9](#_Toc2931855)

[マヌーバを実行する 9](#_Toc2931856)

[マヌーバを続けて実行する 12](#_Toc2931857)

[飛行結果を確認する 12](#_Toc2931858)

[新しい探査機を飛行させる 13](#_Toc2931859)

[飛行計画の新規作成 13](#_Toc2931860)

[探査機を出発させる 14](#_Toc2931861)

[宇宙基地から離れる 16](#_Toc2931862)

[探査機を増速させる 16](#_Toc2931863)

[探査機を減速させる 17](#_Toc2931864)

[探査機を横方向に加速させる 18](#_Toc2931865)

[探査機を自由に飛行させる 19](#_Toc2931866)

[火星を目指す 19](#_Toc2931867)

[木星でスイングバイを試す 20](#_Toc2931868)

[金星に向かう飛行計画 23](#_Toc2931869)

[飛行計画の新規作成 23](#_Toc2931870)

[STARTマヌーバ 24](#_Toc2931871)

[FLYTOマヌーバ（その1） 26](#_Toc2931872)

[CPマヌーバ 26](#_Toc2931873)

[FLYTOマヌーバ（その2） 27](#_Toc2931874)

[FLYTOマヌーバ（その3） 27](#_Toc2931875)

[小天体を目指す 27](#_Toc2931876)

[小天体の例 28](#_Toc2931877)

[リファレンスマニュアル 30](#_Toc2931878)

[基本用語 30](#_Toc2931879)

[探査機 30](#_Toc2931880)

[宇宙基地 30](#_Toc2931881)

[マヌーバ 31](#_Toc2931882)

[飛行計画 32](#_Toc2931883)

[ターゲット 33](#_Toc2931884)

[化学推進エンジン 33](#_Toc2931885)

[電気推進エンジン 33](#_Toc2931886)

[ソーラーセイル 34](#_Toc2931887)

[経路と軌道 35](#_Toc2931888)

[ウインドウとその操作 36](#_Toc2931889)

[SSVGウインドウ 36](#_Toc2931890)

[3D 軌道ウインドウ 39](#_Toc2931891)

[軌道表示ウインドウ 41](#_Toc2931892)

[飛行レビューウインドウ 44](#_Toc2931893)

[連続レビューウインドウ 45](#_Toc2931894)

[マヌーバエディタ 48](#_Toc2931895)

[飛行計画作成ウインドウ 50](#_Toc2931896)

[FTA設定ウインドウ 52](#_Toc2931897)

[最適化アシスタント（STARTマヌーバ） 53](#_Toc2931898)

[最適化アシスタント（CPマヌーバ） 56](#_Toc2931899)

[座標系 59](#_Toc2931900)

[黄道座標系 59](#_Toc2931901)

[軌道ローカル座標系 59](#_Toc2931902)

[ソーラーセイル座標系 60](#_Toc2931903)

[Bプレーン座標系 61](#_Toc2931904)

[その他の情報 62](#_Toc2931905)

[利用者が使えるフォルダ 62](#_Toc2931906)

[時刻について 63](#_Toc2931907)

[探査機の飛行経路の数値積分 63](#_Toc2931908)

[2体問題の使用 64](#_Toc2931909)

[推進装置とロケット方程式 64](#_Toc2931910)

[小天体のSPKファイルを入手する 65](#_Toc2931911)

[ログファイル 67](#_Toc2931912)

[推力方向モード 67](#_Toc2931913)

[他の言語への拡張 68](#_Toc2931914)

[飛行計画のサンプル 70](#_Toc2931915)

[参考文献 71](#_Toc2931916)

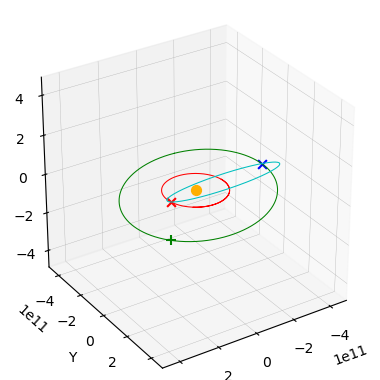
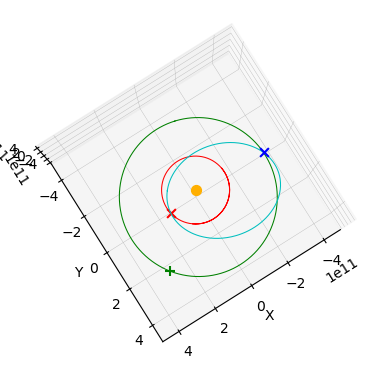
# SSVGとは

「SSVG 宇宙探査の旅」は自分の探査機を飛行させるソフトウェアです。SSVGの探査機は3種類の推進装置（化学推進エンジン、電気推進エンジン、ソーラーセイル）を持っていて、太陽系を自由に航行することができます。

SSVGの探査機は宇宙空間にある宇宙基地から出発します。地球の表面からロケットで探査機を打ち上げる必要はありません。

SSVGでは、探査機の宇宙飛行の詳細な内容を「飛行計画」として組み立てます。飛行計画の主役は探査機に対するさまざまな指令で、SSVGではそれを「マヌーバ」と呼びます。マヌーバには、探査機を出発させるもの、推進装置を動作させるもの、探査機を飛行させるものなどがあります。

SSVGでは探査機の位置や飛行経路、軌道などを3次元の図に表示します。この図は自由に向きを変えて眺めることができますし、自由に拡大／縮小することができます。この図には、探査機の他にターゲット（探査機が目標としている天体）の位置や軌道が表示されます。また太陽はいつでも表示されますし、惑星の位置や名前が表示されることもあります。



図－　SSVGの表示例

## 最近の改善点

### バージョン1.3.1

#### 配布パッケージの形態を変更しました

バージョン1.3.1以降、Windows用のSSVGの配布はインストーラーパッケージの形態で行うことにしました。これによりSSVGのインストールがいっそう容易に行えるようになりました。以前と同様な形態（ZIPファイル）も[SSVGのホームページ](http://whsk.sakura.ne.jp/ssvg/index.html)で配布しています。

#### ソフトウェアの手直しを行いました

探査機の軌道によってはSSVGが異常終了することがありましたので、対処しました。また、表示画面の手直しを行ったほか、ユーザーズガイド（この文書）やSSVGのホームページがメニューの「ヘルプ」から簡単に開けるようになりました。

### バージョン1.3.0

日本語化（国際化）を行いました。これまでSSVGの画面表示はすべて英語でしたが、バージョン1.3では日本語の環境（OS）ではすべて日本語で表示されるようになりました。また、「使う人にとって分かりやすいものにする」という視点で、ユーザーインタフェースを改善しました。

### バージョン1.2

太陽系の小天体のためのSPKファイルの最新の形式に対応しました。これにより、SPKファイルを入手するときに簡便なインタフェースが使えるようになりました。

## SSVGでできること

SSVGを使うとどんなことができるでしょうか。以下はその例です。

#### 探査機の軌道を変化させてみよう

探査機の宇宙航行について、こんな疑問を持ったことはありませんか？

* 探査機の速度を増加させたら、探査機の通り道（軌道）はどう変わる？
* もっと速度を増加させたら？
* 逆に、探査機を減速させたら？
* 探査機を横方向に加速させたら？　ところで、宇宙空間で「横」ってどっち？

SSVGを使えば、こんな疑問の答えを自分で探すことができます。SSVGの探査機は自由に速度を変えることができ、結果は空間に描かれた3次元の図として表示されます。3次元の図は眺める方向を自由に変えることができますから、探査機の軌道がどう変化したかがよくわかります。

#### 自由に宇宙を飛び回ろう

太陽系を自由に飛び回って天体を目指したい、そんな夢はありませんか？

現実世界では、探査機は事前にしっかりと計画された軌道へと打ち上げられます。そういった軌道では、飛行の途中でごく小さな軌道修正を行うだけで探査機は目的の天体に到達します。実際の探査機の飛行はほとんどすべて、そのような「計画された」飛行なのです。

しかし、SSVGではそれとはまったく違う戦略をとることができます。SSVGの探査機は事前の計画なしに、「試して、改善する」というやり方で天体を目指すことができます。

#### スイングバイを試そう

「スイングバイ」って面白そう、そう思いませんか？

探査機が惑星のすぐ近くを通り過ぎると、惑星の引力が探査機を引っ張ります。惑星の引力を利用することで、探査機の軌道を大きく（または少しだけ）変えるのがスイングバイです。

木星は惑星の中では質量が最大（つまり引力も最大）ですし、太陽系の巨大惑星の中では地球に最も近い軌道を通っていますから、木星によるスイングバイは太陽系の外部領域に向かう探査機の飛行においてしばしば重要な役割を果たしてきました。

SSVGで探査機を飛行させると、探査機はスイングバイを含めて実際の宇宙探査機と同じように飛行します。またSSVGはスイングバイを行う経路を正確に決めることを支援する便利なツールを持っています。木星を使ったスイングバイを試してみましょう。

#### 実際の探査機の飛行を再現しよう

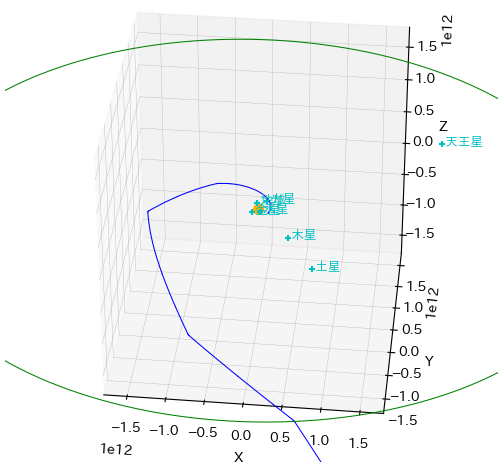
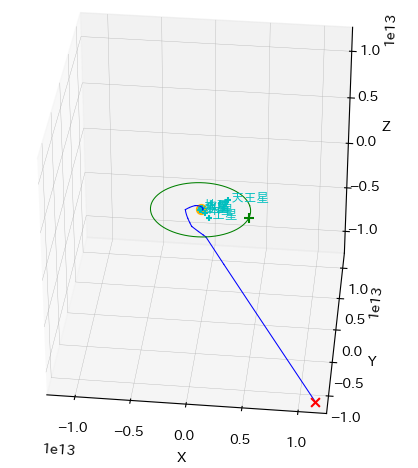
実際の惑星探査機の飛行について、こんな疑問を感じたことはありませんか？

* 地球を離れていくとき、探査機はどれくらいの速度で飛行しているのだろう？
* 探査機が目的の天体に近づいたとき、天体との相対速度はどれくらい？
* この探査機はなぜこの日に出発したのだろう？
* この探査機はなぜこの日に目的の天体に到着することになったのだろう？
* この探査機は木星でスイングバイを行って目的の天体に向かったのだけど、どうしてまっすぐに目的の天体に向かわないのだろう？

SSVGを使えば、実際の探査機の飛行をSSVGの飛行計画として再現することができます。その飛行計画を作成すれば、これらの疑問に対する答えを自分で探すことができるでしょう。

次の図は1977年に打ち上げられ、木星、土星、天王星、海王星の4惑星を一筆書きのように観測した惑星探査機ボイジャー2号の飛行を再現したものです。図の左側は2020年末までの飛行の全景で、青の線が探査機の飛行経路です。緑の楕円は最後に観測した海王星の軌道ですが、その半径が太陽から地球までの距離の約30倍であることを思い出すと、この旅のスケールの大きさが分かるでしょう。2020年末の時点で、探査機は太陽から200億キロメートルほど（太陽と地球の距離の133倍）の距離にあります。図の右側は拡大図で、探査機の経路（青の線）が何回か急に曲がっているのは惑星を観測しつつスイングバイを行ったためです。なお、この再現経路はボイジャー2号の経路を正確に再現したものではありません。

図－　ボイジャー2号の経路の再現



#### 実現可能な飛行**計**画を作ろう

本物の宇宙探査機で実現可能な飛行計画を作ってみたい、そう思いませんか？

SSVGでは探査機の飛行する経路を自由に選ぶことができますが、本物の宇宙探査機はそうではありません。実際に使うことのできる技術（ロケット推進の技術などのさまざまな技術）を考慮すると、実現可能な経路はごく限られたものになります。

宇宙飛行の実現可能性には様々な要素がありますが、中でも「経済性」（より小さな出発速度やより少ない軌道修正など）は大変重要です。SSVGで経済的な飛行計画の作成に挑戦しましょう。宇宙飛行の「経済性」を実現するには二つの重要なパラメータがあります。それは「地球を出発する日付」と「飛行時間」（出発から到着までの日数）です。SSVGはそれらを決定するための使いやすく強力なツールを用意しています。

#### 電気推進を使おう

イオンエンジンなどの電気推進エンジンを実際に使ってみたい、と思いませんか？

最近では、イオンエンジンのような電気推進エンジンが小惑星の探査やケレス（準惑星）の探査で重要な役割を担っています。通常のロケットエンジンと比較した場合、電気推進エンジンは推進剤の使用効率の面で大きなメリットがある反面、推力が小さいというデメリットもあります。典型的な電気推進エンジンは探査機を非常にゆっくりとしか加速しません（24時間連続して稼働させたとして、探査機に及ぼす速度変化は数メートル／秒から数十メートル／秒に過ぎません）。推力がこのように小さいため、電気推進エンジンによる軌道変更には長い時間（例えば100日とか、それ以上）がかかることが多く、このような宇宙飛行の計画を作ることを難しくします。

でも安心してください。SSVGの電気推進エンジンは使いやすく、しかも大変強力です。JAXA（宇宙航空研究開発機構）の小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ2」のイオンエンジンのように、小さな推力で長期間動作させ、ゆっくりと探査機を加速することもできますし、大きな推力を発生させて短時間で軌道を大きく変更することもできます。電気推進エンジンを使って宇宙を飛び回ってみましょう。

#### ソーラーセイルを使おう

太陽の光を帆に受けて静かに宇宙を漂うソーラーセイルの旅、すてきですよね？

ソーラーセイルは宇宙機に取り付けられた巨大な鏡で、太陽光を反射させることで推力を得ます。ソーラーセイルは推進力を得るために推進剤を消費することはありませんし、エネルギーを消費することもありません。しかし太陽光の圧力は大変小さいものですから、役に立つほどの加速を得るためには大変大きくて（例えば100平方メートルとか、もっと大きくて）軽い鏡が必要です。現在の技術では、宇宙で巨大なソーラーセイルを開くことも、それを正しい方向に向けることも、そしてその状態を保持することも大変難しいとされています。

でも、大丈夫です。SSVGの探査機は、いつでも、好きな大きさのソーラーセイルを、指定した向きに開くことができます。ソーラーセイルによる宇宙の旅を楽しみましょう。

## この文書の開き方

この文書（SSVGユーザーズガイド.pdf または SSVG\_UsersGuide-jp.pdf）の内容はAdobe Acrobat Reader DCで確認しています。Adobe Acrobat Reader DCはこちらから無料でダウンロードできます。

<<https://get.adobe.com/reader/>>

この文書のPDFファイルは章、節、項などの各項目に「しおり」がつけてあります。この文書を読んでいるツールでしおり（「見出し」または「ブックマーク」と呼ばれることもあります）を表示させると読みやすくなります。

また、「前の画面」や「戻る」といった、直前に読んでいた場所に戻る機能がボタンなどに割り当ててあると好都合です。できればそのような機能を持つツールの使用をお勧めします。上にご紹介したAdobe Acrobat Reader DCにも適切な機能が備わっています。

この文書ではリンクは下線付き色文字で表示してあります。インターネットへのリンクはこの節の最初の方にあるように下線付き青文字です。この文書の内部にある別の場所へのリンクは下線付き緑文字で、例えばソフトウェアのライセンスのように示します。

## ソフトウェアのライセンス

このソフトウェア（SSVG）はフリーソフトウェアであり、どなたでも無料でお使いいただけます。またバージョン3もしくはそれ以降のGNU General Public Licenseに従うことを条件に、このソフトウェアの再配布や変更を行うことができます。

作者はこのソフトウェアが有用であることを期待して配布しますが、ソフトウェア自体は全くの無保証です。詳細についてはGNU General Public Licenseを参照してください。ライセンスの原本はこちらにあります。<<http://www.gnu.org/licenses/>>

このソフトウェア（SSVG）のソースプログラムはこちらから入手できます。

<<https://github.com/whiskie14142/SolarSystemVoyager/>>

このソフトウェア（SSVG）は以下に示すプログラムまたはモジュールを使用しています。

Python : https://www.python.org/  
 Numpy : http://www.numpy.org/  
 Scipy : http://scipy.org/  
 matplotlib : http://matplotlib.org/  
 PyQt : https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro

jplephem : https://github.com/brandon-rhodes/python-jplephem/

julian : https://github.com/dannyzed/julian/  
 pytwobodyorbit : https://github.com/whiskie14142/pytwobodyorbit/  
 spktype01 : https://github.com/whiskie14142/spktype01/

　spktype21 : https://github.com/whiskie14142/spktype21/  
 PyInstaller : http://www.pyinstaller.org/

Inno Setup : http://www.jrsoftware.org/isinfo.php

## この文書のライセンス

この文書はパブリック・ドメインであり、どなたでも自由に利用することができます。利用の条件はクリエイティブ・コモンズのCC0 1.0です。  
<<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/deed.ja>>

## 作者への連絡方法

SSVGの使い方などのご質問やSSVGについてのご意見は次のいずれかの方法でお知らせください。なお、応答までに時間がかかる可能性がありますので、あらかじめご了承をお願いいたします。

* メール：　<<mailto:whiskie14142@gmail.com>> 宛にメールしてください
* Twitter：　ハッシュタグ #SSVG を付けてツイートしてください

# SSVGの使い方

## インストール／アンインストール

SSVGはWindows上で動作する実行形式プログラムとPythonスクリプト（ソースプログラム）のふたつの形態で配布しています。どちらでもお好きな方（もしくは両方）をご利用ください。

### Windows実行形式プログラムのインストール／アンインストール

#### インストール

SSVGのWindows実行形式プログラムの最新版は複数のアドレスからインストーラーパッケージ（実行するとSSVGがインストールされるプログラム）として配布されます。ファイルの名前は「SSVG\_x\_x\_x\_setup.exe」といったもので、x\_x\_xはバージョン番号です。

SSVGの配布アドレスには以下のものがあります。

* SSVGホームページ：<<http://whsk.sakura.ne.jp/ssvg/>> (\*)
* Vector：<<https://www.vector.co.jp/soft/winnt/edu/se517704.html>>
* FreewareFiles：  
  < <https://www.freewarefiles.com/Solar-System-Voyager-SSVG-_program_112419.html> >
* Yahoo!ボックス：<<http://yahoo.jp/box/A0fffK>> (\*)

(\*) これらのアドレスでは旧来の形式（ZIPファイル）のWindows実行形式プログラムも配布しています。

ダウンロードしたインストーラーパッケージのファイルをダブルクリックして実行すると、SSVGのインストールが始まります。インストーラーの指示に従ってインストールを進めてください。

標準的にはSSVGは次のようにインストールされます。

* プログラム本体とマニュアルの格納場所  
  [ユーザールートフォルダ]\AppData\Local\SSVG  
  （AppDataフォルダは「隠しフォルダ」です）
* Windowsのスタートメニューにグループとショートカットを作成  
  「SSVG Solar System Voyager」：グループ  
  「SSVG 実行」：SSVGを実行するショートカット  
  「SSVG ユーザーズガイド」：ユーザーズガイド（この文書）を開くショートカット
* Windowsのデスクトップにショートカットを作成  
  「SSVG」：SSVGを実行するショートカット  
  「SSVG ユーザーズガイド」：ユーザーズガイド（この文書）を開くショートカット

なお、バージョン1.3.0およびそれ以前のSSVGでは別途「de430.bsp」というファイルのダウンロードが必要でしたが、バージョン1.3.1およびそれ以降はこのファイルも配布されるパッケージに含まれています。

#### アンインストール

SSVGのアンインストールはWindowsの標準的な手順で行ってください。コントロールパネルの「プログラムのアンインストール」を開くと「SSVG バージョン x.x.x」といった項目が見つかりますから、右クリックして「アンインストール」を実行します。

#### 利用環境について

動作確認はWindows 8.1（64ビット版）及びWindows 10（64ビット版）で行っています。

ディスプレイは1280×1024以上の解像度のものを推奨します。

SSVGのインストールはディスクドライブの容量を約1GB消費します。

#### 旧バージョンからのアップグレードインストール

旧バージョンがZIPファイルを展開した形式のものであれば、新バージョンをインストールした後に次の操作を行ってください。

* 旧バージョンを使用していて入手したSPKファイル（de430.bspを除く）をすべて新しいインストールフォルダの中にある「SSVG\_data」フォルダにコピーしてください。
* 旧バージョンで作成した飛行計画ファイルをすべて新しいインストールフォルダの中にある「SSVG\_plan」フォルダにコピーしてください。

旧バージョンがインストーラーパッケージを使用してインストールしたものであれば、新バージョンのSSVGを同じフォルダに上書きインストールしてください。旧バージョンで使用していたSPKファイルや飛行計画ファイルはそのまま引き継がれます。

### Pythonスクリプトのインストール／アンインストール

#### インストール

もしNumpy/Scipy/matplotlib/PyQt5を含むPython 3.7がインストールされているPCがあれば、Pythonで記述されたスクリプト（ソースプログラム）をインストールしてSSVGを実行することができます。SSVGのスクリプトはGitHubから入手できます。  
<<https://github.com/whiskie14142/SolarSystemVoyager/>>

上のリンク先で「Clone or download」をクリックしてZIPファイルをダウンロードし、適当なツールで開いてsourceフォルダ（ディレクトリ）をそっくりPCにコピーしてください。このとき、コピーしたフォルダの名前を「SSVG\_x\_x\_x」（x\_x\_xはバージョン番号）に変更することをお勧めします。

#### アンインストール

SSVGをアンインストールするには、GitHubから入手してコピーしたフォルダ全体を削除してください。

#### 動作環境等

Python 3.7

ディスプレイは1280×1024以上の解像度のものを推奨します。

#### 利用パッケージとそのバージョン

Numpy 1.15.1

Scipy 1.1.0

matplotlib 2.2.3

PyQt 5.9.2

jplephem 2.8

julian 0.14

pytwobodyorbit 1.0.0

spktype01 1.0.0

spktype21 0.1.0

Numpy、Scipy、matplotlib、pyqtについては、これらが組み込まれているPythonディストリビューション（例えばAnaconda3）を利用するのが好都合でしょう。jplephem、julian、pytwobodyorbit、spktype01、spktype21についてはPyPI（Pythonパッケージインデックス）に登録されていますので、Pythonのpipコマンドを使用してインストールしてください。

pytwobodyorbitのバージョンが上がりインタフェースが変更されています。すでにお持ちの場合は最新版にアップグレードしてください。

#### 日本語フォントのセットアップ

SSVGで3次元の図を表示するために使用しているmatplotlibモジュールに対して日本語のフォントを設定する必要があります。次の手順で日本語フォントのセットアップを行ってください。

* フォントファイルをmatplotlibのフォントフォルダにコピーします。
  + フォントファイルはGitHubからダウンロードしたZIPファイルに含まれています。ファイル名はipaexg.ttfで、ZIPファイル内部のパスは font\ipaexg00301です。
  + matplotlibのフォントフォルダはお使いのPythonディストリビューションの内部にあります。筆者の環境では次の場所になります。  
    [Pythonルート]\Lib\site-packages\matplotlib\mpl-data\fonts\ttf
* matplotlibのフォント管理ファイルを削除します。  
  筆者の環境では次のファイルです。  
  [ユーザールート]\.matplotlib\fontList.json

#### SPKファイルの入手

GitHubのソースプログラムには、実行に必要なデータファイル（太陽および惑星の位置・速度を計算するためのSPKファイル）が含まれていません。次のリンクをクリックしてSPKファイル（ファイル名：de430.bsp）を入手し、SSVGのフォルダの直下にあるSSVG\_dataフォルダに格納してください。  
<[https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic\_kernels/spk/planets/de430.bsp](http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/de430.bsp)>

#### 旧バージョンからのアップグレードインストール

前述の手順に従うと、SSVGは以前の版とは異なるフォルダにインストールされます。以下に示すファイルを旧版のフォルダから新版のフォルダにコピーしてください。

* 入手済みのSPKファイル（de430.bspを含む）：新版をインストールしたフォルダの直下にある「SSVG\_data」フォルダにコピーしてください。
* 作成済みの飛行計画ファイル：新版をインストールしたフォルダの直下にある「SSVG\_plan」フォルダにコピーしてください。

## SSVGの起動

### Windows実行形式プログラムの場合

WindowsのデスクトップにあるSSVGのショートカットをダブルクリックして実行してください。Windowsのスタートメニューの「SSVG Solar System Voyager」グループにある「SSVG 実行」をクリックして実行することもできます。

コマンドプロンプトのウインドウが開き、引き続いてSSVGが起動します。

### Pythonスクリプトの場合

インストールしたPythonスクリプトに含まれる SSVG.py をPythonで実行してください。お使いのPython環境のコマンドプロンプトで、カレントディレクトリをSSVGのインストールされたフォルダに移し、次のコマンドを実行します。これでSSVGが起動します。

python SSVG.py

## 飛行計画を実行する

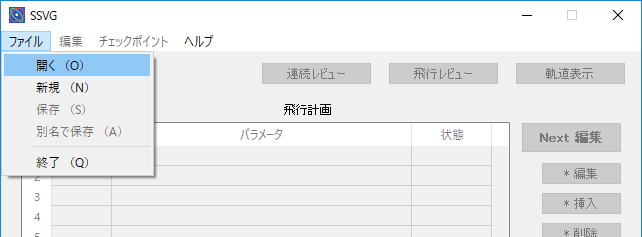
### 飛行計画を開く

SSVGを起動するとふたつのウインドウが開きます。SSVGウインドウと3D 軌道ウインドウです。まだ飛行計画がありませんから、意味のある情報は何も表示されていません。

SSVGウインドウのメニューバーで、「ファイル」をクリックして、リストにある「開く（O）」を実行してください（次図）。SSVGをインストールしたフォルダの中にあるSSVG\_planというフォルダの内容が見え、そこには飛行計画のサンプルが複数格納されています。一番上にあるsample\_Marsを開きましょう（環境によってはsample\_Mars.jsonと表示されます）。

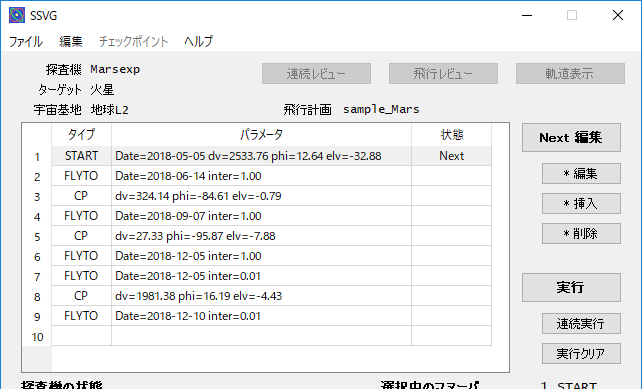
メニューバー

実行します



図－　飛行計画のファイルを開く

sample\_Marsは地球の近くの宇宙空間にある「地球L2」という宇宙基地を出発して火星に向かう探査機（名前はMarsexp）の飛行計画です。SSVGウインドウの上部にある表が「マヌーバ表」（次図）です。表の各行は探査機に対する個々の指令（マヌーバ）です。SSVGの探査機は、マヌーバを順番に実行することにより航行します。



マヌーバ表

図－　マヌーバ表

### マヌーバを実行する

マヌーバ表には、右端の列に「Next」と表示されている行があり、これが次に実行されるマヌーバを示しています。飛行計画を開いた直後であれば、最初の行にNextの表示があるはずです。

マヌーバ表の右に並んでいるボタンから [実行] ボタンを選んでクリックしてください。これでNextの表示があるマヌーバ（1行目のSTARTマヌーバ）が実行されます。STARTマヌーバの実行で探査機が飛行を開始し、SSVGウインドウの下に軌道表示ウインドウが新しく開きます（次図）。



図－　軌道表示ウインドウ

そして3D 軌道ウインドウにマヌーバ実行直後の探査機の位置や軌道が3次元の図として表示されます（次図）。表示内容は以下を含みます。

赤色の×：探査機の位置

赤線の楕円：探査機の軌道

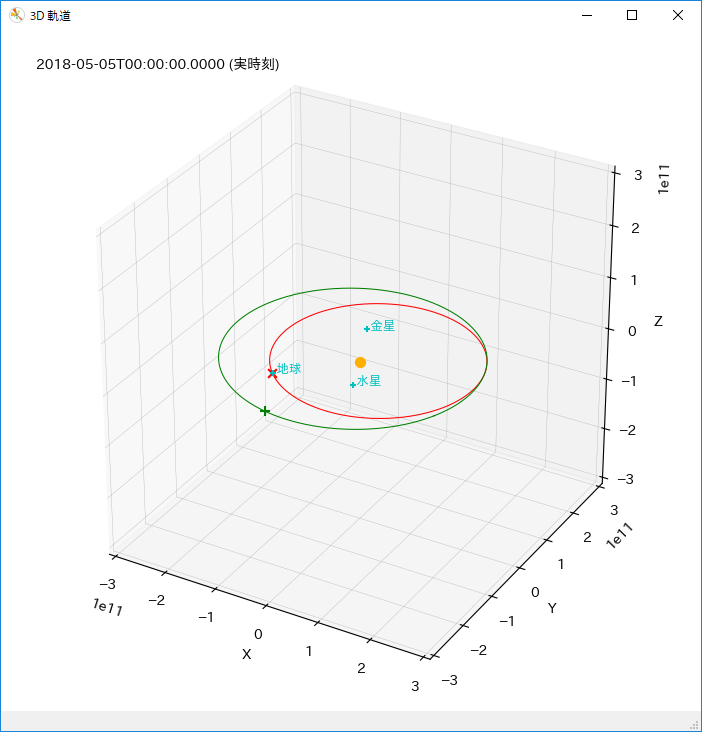
緑色の＋：ターゲット（ここでは火星）の位置

緑線の楕円：ターゲット（ここでは火星）の軌道

オレンジ色の小円盤：太陽の位置

水色の小さな＋と文字：惑星の位置と名前（+ 水星、+ 金星など）

sample\_Marsを開いて [実行] ボタンをクリックした直後であれば、探査機が地球の近傍にある宇宙基地から火星に向けてちょうど飛び立ったところです。



探査機

探査機の軌道

ターゲット

ターゲットの

軌道

太陽

図－　3D 軌道ウインドウの表示内容

ここで、3D 軌道ウインドウに表示される図を操作してみましょう。3D 軌道ウインドウの上にマウスカーソルを移動して、左ボタンを押しながらマウスを上下や左右に動かしてみてください。表示される3次元の図の向きが変わり、探査機やターゲット、そして惑星などの位置関係を違う角度から観察できるでしょう。次に右ボタンを押しながらマウスを上下に動かしてみてください。3D 軌道ウインドウに表示されている図の拡大や縮小ができます。

3D 軌道ウインドウに表示される図の操作の一部は軌道表示ウインドウから行います。軌道表示ウインドウの「時刻操作」にある [ **>>** ] ボタン（次図）を何回かクリックしてみてください。このあと探査機がどのように飛行するか、その時にターゲットや他の惑星がどのような位置にあるかが予測され、3D 軌道ウインドウに表示されます。



図－　予測時刻の操作

### マヌーバを続けて実行する

マヌーバの実行を続けましょう。[実行] ボタンを3回クリックすると、マヌーバ表の2行目のFLYTOマヌーバ、3行目のCPマヌーバ、4行目のFLYTOマヌーバが順に実行されます。そしてマヌーバ表の「Next」の表示はひとつ下の行（5行目）に移ります。このように、[実行] ボタンをクリックするたびに、マヌーバが上から順に次々と実行されます。

SSVGで使用できるマヌーバには七つのタイプ（種類）がありますが、このサンプルで利用しているマヌーバは次の三つのタイプです。すべてのタイプの説明は基本用語のマヌーバの項を見てください。

START：出発。指定した時刻に指定した速度で探査機を宇宙基地から出発させます。

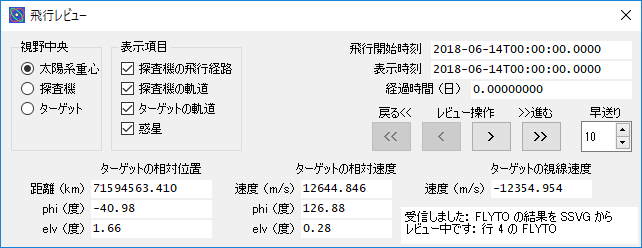
FLYTO：飛行。指定した時刻まで探査機を飛行させます。

CP：化学推進。化学推進エンジンを使用して、探査機に指定した方向と大きさの速度変化を与えます。

### 飛行結果を確認する

FLYTOマヌーバの実行直後には、その飛行の経過を3D 軌道ウインドウに表示させることができますから、試してみましょう。マヌーバ表の5行目に「Next」の表示があることを確認してください。「Next」の表示がもっと下の行に移っているときは、[実行クリア] ボタンをクリックしてマヌーバの実行結果をすべて取り消し、つづいて [実行] ボタンを4回クリックすればその状態になるはずです。

SSVGウインドウの上端に並んでいるボタンの中央の [飛行レビュー] ボタンをクリックしてください。SSVGウインドウの下に表示されていた軌道表示ウインドウが飛行レビューウインドウに入れ替わり、3D 軌道ウインドウの表示内容も変化します。飛行レビューウインドウの「レビュー操作」（次図）にあるボタンを操作すると、飛行の経過を確認することができます。例えば [ **>** ] ボタンを連続してクリックすれば探査機（赤の×）が地球を離れてターゲット（火星：緑の＋）に向かって飛行する様子が確認できるでしょう。



図－　飛行レビューウインドウ

次にこのサンプルの飛行計画を最後のマヌーバ（9行目のFLYTO）まで実行し、飛行結果の確認を行いましょう。[実行] ボタンを何回かクリックして、最後のマヌーバの次の行（10行目の空白行）にNextが表示される状態にしてください。

続いてSSVGウインドウの上部にある [飛行レビュー] ボタンをクリックしてください。SSVGウインドウの下が飛行レビューウインドウになり、3D 軌道ウインドウの表示がレビュー中の表示になります。

このとき探査機はターゲット（火星）のごく近く（中心からの距離が9000キロメートルほどの場所）に到達していますので、状況を詳しく見るためにはターゲットの付近を拡大して3D 軌道ウインドウに表示させる必要があります。以下を参考に操作してみてください。この時点では探査機は火星の衛星になっているはずです。

* 図の中央をターゲットにするには？  
  飛行レビューウインドウの「視野中央」グループに並んでいるラジオボタンから、ターゲットを選択する
* 図を拡大するには？  
  3D 軌道ウインドウにマウスカーソルを置いた状態で、右ボタンを押しながらマウスを下に向けて動かす
* 図の向きを変更するには？  
  3D 軌道ウインドウにマウスカーソルを置いた状態で、左ボタンを押しながらマウスを上下または左右に動かす
* 飛行の経過を見るには？  
  飛行レビューウインドウの「レビュー操作」のボタンをクリックする

3D 軌道ウインドウに表示される3次元の図の詳しい操作方法については

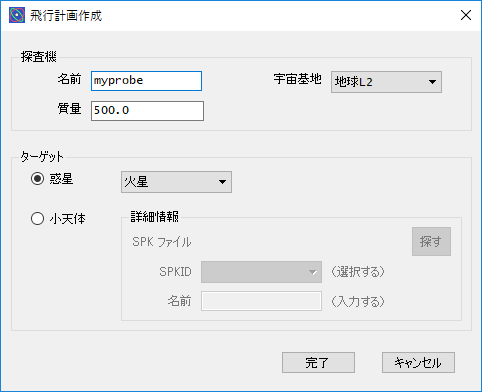
3D 軌道ウインドウおよび飛行レビューウインドウを参照してください。

## 新しい探査機を飛行させる

新しい探査機の飛行計画を作り、探査機を飛行させましょう。

### 飛行計画の新規作成

SSVGウインドウのメニューバーの「ファイル」をクリックし、「新規（N）」を実行してください。飛行計画作成ウインドウが開きます。



図－　飛行計画作成ウインドウ

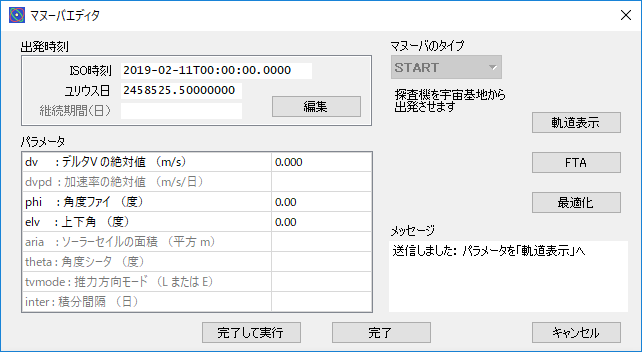
「探査機」グループでは探査機の名前と質量を指定しますが、ここでは初期値をそのまま利用しましょう。また探査機を出発させる宇宙基地をドロップダウンリストで選択することができますが、これも初期値の「地球L2」にしましょう。この宇宙基地は地球から太陽の反対側に約150万キロメートル離れた宇宙空間にあります。

「ターゲット」グループでは目的地であるターゲットを指定します。ここでは火星をターゲットにしましょう。ドロップダウンリストには初期値として「火星」が選択されています。ウインドウ下部の [完了] ボタンをクリックすると新しい飛行計画が作成されます。SSVGウインドウが見えますが、まだマヌーバを作っていませんからマヌーバ表にはマヌーバがありません。内容が空で、Nextの表示だけがある行だけが見えています。

新しい飛行計画ですから、名前を付けて保存しておきましょう。SSVGウインドウのメニューで「ファイル」をクリックし、「別名で保存（A）」を実行して適当な名前で保存してください。

### 探査機を出発させる

探査機を宇宙基地から出発させるマヌーバを作成してそれを実行しましょう。マヌーバ表はまだ空白で、1行目にNextの表示があるはずです。[Next 編集] ボタンをクリックして、マヌーバの編集を開始してください。マヌーバエディタが開きます。



図－　マヌーバエディタ

このケースではマヌーバエディタは探査機を出発させる「STARTマヌーバ」の編集を開始します。自動的に軌道表示ウインドウが開き、3D 軌道ウインドウに探査機とターゲットの軌道と位置、惑星や太陽の位置などが表示されます。マヌーバエディタには「出発時刻」として操作中の日付の0時0分が自動的に設定されます。また「パラメータ」の表ではdv、phi、elvの行に初期値（いずれもゼロ）が設定され、編集可能になります。これらがSTARTマヌーバで設定可能なパラメータで、出発させる速度と方向を指定するものです。

初期値のパラメータでは、探査機は宇宙基地を速度ゼロで出発します。これを2500メートル／秒（秒速2500メートル）で出発するように変更しましょう。マヌーバエディタの「パラメータ」の表の先頭の行（dvの行）が出発する速度を指定する行です。右のセル（次図）をダブルクリックして、2500に書き換えてください。「パラメータ」の表の右方にある [軌道表示] ボタンをクリックすると、設定内容が軌道表示ウインドウと3D 軌道ウインドウの図に反映されます。

「パラメータ」の表ではphi（角度ファイ）とelv（上下角）も設定できます。これらは探査機を出発させる方向を指定するものですが、ここではどちらもゼロのままにしておきましょう。この状態だと、探査機は宇宙基地の動いている速度の方向に出発します。（宇宙基地「地球L2」は地球と一緒に太陽の周りを公転しています）



図－　マヌーバエディタ（STARTマヌーバの編集中）

STARTマヌーバでは出発時刻も重要なのですが、ここでは初期値（操作している日の0時0分）のままにしておきましょう。

これで探査機を出発させるSTARTマヌーバの設定は終了です。マヌーバエディタの [完了して実行] ボタンをクリックすると、編集結果がマヌーバ表に保存されると同時にそのマヌーバが実行され、探査機は宇宙基地から出発します。SSVGウインドウのマヌーバ表でNextの表示が2行目に移ったことを確認してください。

### 宇宙基地から離れる

探査機は出発しましたが、まだ出発した直後ですから時間は経過していませんし位置も動いていません。探査機をしばらく飛行させて宇宙基地から離れさせましょう。探査機を飛行させるにはFLYTOマヌーバを作成し、実行します。現実の探査機では何の操作もしないで探査機を飛行させることをマヌーバとは呼びませんが、SSVGでは「指定した時刻まで飛行させる」こともマヌーバとして扱います。

マヌーバ表でNextが2行目の空白行にあることを確認して、[Next 編集] ボタンをクリックしてください。マヌーバエディタが開きます。このケースでは「マヌーバのタイプ」には何も選択されていませんから、空白のドロップダウンリストをクリックしてFLYTOを選択してください。継続期間（現在時刻からFLYTOマヌーバの終了時刻までの日数）がゼロのFLYTOマヌーバが用意されます。またマヌーバエディタの下には軌道表示ウインドウが開きます。

ここでは探査機をちょうど50日間飛行させるFLYTOマヌーバを作成しましょう。軌道表示ウインドウの「時刻操作」にある [ **>>** ]ボタン（次の図の赤丸）を5回クリックしてください。1回クリックするごとにマヌーバエディタの「終了時刻」グループの値が10日分変化します。同時に3D 軌道ウインドウに表示されている探査機やターゲットの位置などが10日後の位置に変化します。



図－　FLYTOマヌーバの終了時刻を進める

マヌーバエディタの「終了時刻」グループにある「継続期間」が50日になっていることを確認し、マヌーバエディタの [完了して実行] ボタンをクリックしてください。FLYTOマヌーバがマヌーバ表に保存され、同時に実行されます。飛行の結果はSSVGウインドウの「探査機の状態」や3D 軌道ウインドウの図に反映されます。このときSSVGは現在時刻をFLYTOマヌーバの終了時刻まで進めます。

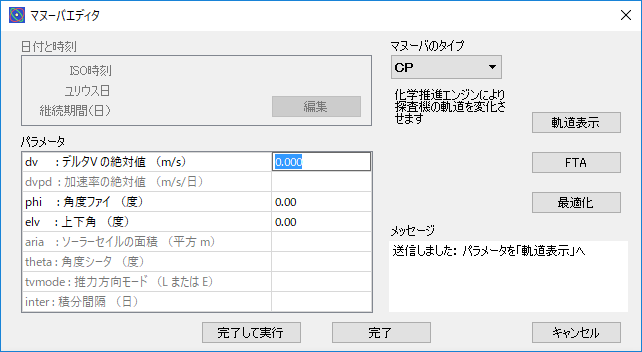
### 探査機を増速させる

ここでCPマヌーバ（化学推進エンジンを働かせるマヌーバ）を使って速度変化が探査機の軌道をどのように変えるかを調べてみましょう。マヌーバ表で3行目の空白行にNextの表示があることを確認してSSVGウインドウの [Next 編集] ボタンをクリックしてください。マヌーバエディタが開きますので、「マヌーバのタイプ」をCPにしてください（ドロップダウンリストをクリックしてCPを選択します）。

CPマヌーバではdvとphi、elvの三つのパラメータが設定できます。これらはCPマヌーバが引き起こす速度変化（デルタV）の大きさと方向です。dvはデルタVの絶対値（大きさ）です。phi（角度ファイ）とelv（上下角）はデルタVの方向を与えます。

dvの設定欄（0.000が表示されている欄）をダブルクリックして、値を3000に変更してみましょう。値の単位はメートル／秒です。値を設定して右方にある [軌道表示] ボタン（図の赤囲み）をクリックすると、編集中のCPマヌーバのパラメータが一時的に探査機の軌道に反映され、3D 軌道ウインドウに表示されます。

phiとelvが両方ともゼロだと、このCPマヌーバは探査機が現在動いている方向にdvの値だけ速度を加える（増速する）ことになります。dvの値を変えて [軌道表示] ボタンをクリックし、探査機の増速が軌道をどんなふうに変化させるか確認しましょう。



図－　マヌーバエディタ（CPマヌーバ編集中）

### 探査機を減速させる

では、探査機を増速ではなく減速させたら軌道はどうなるでしょうか？　また、もっと別の方向に向けて加速したらどうなるでしょうか？　これらを確かめるためには、ふたつの角度（phiとelv）の設定が必要になります。次の図を見てください。なお、dvは次の図のΔV（デルタV）の長さ（絶対値）に当たります。ΔVは加速する（つまり探査機の速度に加える）、差分としての速度ベクトルです。そしてこの図のphiとelvを用いて、速度変化の方向を表現します。

ΔV

O

H

X軸（＝探査機の運動方向）

Y軸

Z軸

phi

elv

dv

図－　速度変化の絶対値と方向の表現

この図の座標の原点（点O）は探査機です。X軸は探査機の太陽に対する運動方向（速度ベクトルの向き）です。Y軸は探査機の軌道面（探査機が太陽を公転している平面）内にあり、太陽に近づく方向を向いています。3軸（X、Y、Z）はお互いに垂直で、XYZの順に右手系を構成します。SSVGではこの座標系を「軌道ローカル座標系」と呼びます。

上の図のように、差分としての速度ベクトルΔV（デルタV）の先端からX-Y平面に垂線を下ろしてその足をHとします。Hと原点Oを結ぶ線分OHを考えたとき、phiはOHとX軸のなす角をX軸からY軸の方向に測った角度です。elvはOHとΔVのなす角で、ΔVがZ軸の正の領域を向いていれば正、逆であれば負になります。

では、探査機を減速するためのパラメータを考えましょう。現在の探査機の速度はX軸の向きですから、減速するにはX軸に平行に、ただし逆向きの速度を与えればよいことになります。つまり、elvはゼロで、phiは180度です。それぞれの値を設定し、dvをいろいろと変えて [軌道表示] ボタンをクリックして軌道の変化を確認しましょう。

### 探査機を横方向に加速させる

次は探査機を横方向に加速させてみましょう。もう一度、先ほどの「速度変化の絶対値と方向の表現」の図を見てください。探査機はX軸の方向に動いているわけですから、その方向に垂直な向きに加速させることにしましょう。X軸に垂直な向きというと、Y軸とZ軸を含む面（Y-Z平面）内であれば360度どちらを向いてもよいのですが、ここでは次の4つを代表として選びましょう。

* Y軸方向　：軌道面内で、太陽に近づく方向
* Y軸逆方向　：軌道面内で、太陽から遠ざかる方向
* Z軸方向　：軌道面に垂直で、黄道面の北極に近い方向 (\*)
* Z軸逆方向　：軌道面に垂直で、黄道面の南極に近い方向 (\*)

(\*) 探査機は地球の公転と同じ向きに太陽の周囲を公転していることを仮定しています。

これらの方向に加速する場合のphi（角度ファイ）の値とelv（上下角）の値は次の表のようになります。「速度変化の絶対値と方向の表現」の図を見て考えてください。これまでに試した増速と減速もそれぞれ「X軸方向」「X軸逆方向」として表に加えてあります。

表－　加速する方向とパラメータ

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| パラメータ | 加速する方向 | | | | | |
| X軸方向  （増速） | X軸逆方向  （減速） | Y軸方向 | Y軸逆方向 | Z軸方向 | Z軸逆方向 |
| phi（角度ファイ） | 0 | 180 | 90 | 270または-90 | 自由な値 | 自由な値 |
| elv（上下角） | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | -90 |

では、dvとphi、elvをいろいろと組み合わせて [軌道表示] ボタンをクリックし、軌道を変化させてみましょう。

充分に試せたら、マヌーバエディタの [完了して実行] ボタンをクリックして編集の終了とマヌーバの実行を行い、次の項に進んでください。

**【重要】**「Z軸方向に加速」や「Z軸逆方向に加速」を試したときは、3D 軌道ウインドウに表示される図の表示方向を変えてみることが大切です。このような加速を行うと、探査機の軌道を含む平面の傾きが変化します。

### 探査機を自由に飛行させる

ここまで、次のマヌーバを試してみました。実は、これらの組合せだけで探査機を自由に飛行させることができるのです。

* START：探査機を出発させる
* FLYTO：探査機を飛行させる
* CP：化学推進エンジンで探査機の軌道を変化させる  
  （表－1　加速する方向とパラメータにある6方向のどれかと適切なdvの値の組合せ）

探査機を太陽系の中で飛行させ、試してみてください。CPマヌーバで軌道を変化させるだけではできることは限られます。CPマヌーバで軌道を変えたあとFLYTOマヌーバで探査機を飛行させ、探査機の位置が動いたところで再びCPマヌーバを使うことが大切です。

探査機に複雑な飛行をさせる場合には、「新しいマヌーバを追加してそれを実行する」という作業を繰り返すわけですが、作成してあるマヌーバを削除することや、作成ずみのマヌーバを選んでその前に新しいマヌーバを挿入することもできます。

* マヌーバの削除：マヌーバ表で削除したい行を選択して [\* 削除] ボタンをクリックする
* マヌーバの挿入：マヌーバ表で挿入したい行を選択して [\* 挿入] ボタンをクリックする

挿入した行など、一連のマヌーバの途中の行を編集するときは、その行に「Next」の表示がある状態にして [Next 編集] ボタンをクリックするのがお勧めです。Next表示のない行でもダブルクリックや [\* 編集] ボタンで編集できますが、軌道の確認など一部の重要な機能が使用できません。

SSVGウインドウの [実行クリア] ボタンをクリックするとマヌーバの実行結果が消去され、マヌーバ表の先頭の行にNextの表示が移ります。 [実行] ボタンを何回かクリックすればマヌーバが順次実行されて目的の行にNextの表示が来ますから、続いて [Next 編集] ボタンをクリックしてその行の編集を開始すればよいでしょう。

### 火星を目指す

地球のすぐ外側を公転する惑星、火星を目指して探査機を飛行させましょう。飛行計画の新規作成 と 探査機を出発させる、宇宙基地から離れる に従って探査機を新しく作り、宇宙基地から離れた場所まで探査機を飛行させてください。前項までの飛行計画が保存してあれば、それを読み込んでも結構です。

この飛行計画では、ターゲットは火星になっていて、火星の軌道が緑の楕円で、火星の位置が緑の＋で表示されています。では、CPマヌーバとFLYTOマヌーバを使って、探査機が火星に到達できるような飛行計画の作成に挑戦してください。目標は、最後のマヌーバを実行した直後に3D 軌道ウインドウで火星（緑の＋）と探査機（赤の×）が重なって見えるようになることです。

飛行計画を作成する上でのヒントをいくつか書いておきます。

* 未来の探査機の位置や火星の位置を予測するには、軌道表示ウインドウの「時刻操作」で [ **>>** ] や [ **>** ] をクリックします。
* 軌道の向きや火星と探査機の相対位置を確認するときは、3D 軌道ウインドウに表示されている図を回転させてみることが大切です。
* ターゲットの近傍を拡大して観察するには、
  + 軌道表示ウインドウの「視野中央」グループで「ターゲット」を選択する
  + 3D 軌道ウインドウ上で右ボタンを押したままマウスを下に動かす

いかがでしょうか、火星に接近できたでしょうか。すごく難しい、と感じた方が大部分ではないかと想像します。探査機を飛行させるとターゲット（ここでは火星）もどんどん位置を変えていきますし、増速や減速を行うと探査機の軌道の形そのものが大きく変わってしまいます。また探査機の軌道面（軌道の楕円を含む平面）とターゲットの軌道面は微妙にずれていますから、Z軸方向（またはZ軸逆方向）の加速も必要です。

でも大丈夫です。SSVGにはターゲットへの接近を支援する便利なツール（FTA機能）が備えられていて、接近に必要なマヌーバのパラメータ（dv、phi、elv）を計算させることができます。FTA機能の使い方は次の項で説明します。

### 木星でスイングバイを試す

探査機を木星まで飛行させ、木星のすぐ近くを通り抜けさせてスイングバイ（重力アシストとも言います）を試しましょう。もちろん木星に近づく軌道を見つけるところから自分でやることも可能なのですが、ここではスイングバイに都合のよい飛行計画を用意してあります。以下の手順で飛行計画を作成してください。

* 新しい飛行計画を作成します。パラメータは、
  + ターゲット： 木星
  + 宇宙基地： 地球L2
* STARTマヌーバを作成して実行します。パラメータは、
  + 出発時刻： 2020-03-26T00:00:00.000000 (\*)
  + dv： 9058.071
  + phi： -4.80
  + elv： -8.15

(\*) 「出発時刻」のグループにある [編集] ボタンをクリックしてください。「日付と時刻の編集」のウインドウが表示されますから「ISO時刻で編集」のフィールドにこの値を入力して [完了] ボタンをクリックします。

* FLYTOマヌーバを作成して実行します。継続期間を428日にします。  
  （終了時刻はISO時刻で2021-05-28T00:00:00、ユリウス日で2459362.5になります）

ここまでの手順が終わったら、飛行計画を保存したあともう一つ操作を行っておきましょう。メニューバーにある「チェックポイント」をクリックし、「作成（C）」を実行してください。チェックポイントが作成され、マヌーバ表の2行目に「checkpoint」の表示が現れます。このチェックポイントは後で使用します。

軌道表示ウインドウの「時刻操作」にある [ **>>** ] ボタンを続けてクリックすると、現在の軌道で飛行した場合に今（実行中の飛行計画の現在時刻）から150日後あたりで探査機が木星に接近するのが確認できるでしょう。

次のマヌーバは木星のスイングバイに向けて軌道を微調整するCPマヌーバです。マヌーバ表の3行目にNextの表示があることを確認して [Next 編集] ボタンをクリックしてマヌーバの編集を開始してください。マヌーバのタイプはCPにします。

このCPマヌーバでは、探査機が木星とどのようにすれ違うかを決めて、それを目指して探査機の軌道を修正します。具体的には、探査機の軌道 (\*1) が木星に最接近する場所を目標位置として定め、探査機が目標位置に到着するまでの時間を決定し、それを実現するよう軌道修正のパラメータを設定します。この手順で最後の軌道修正パラメータを計算するのがSSVGのFTA機能です。マヌーバエディタの右方にある [FTA] ボタンをクリックしてください。FTA 設定ウインドウが開きます。

このウインドウでは、FTAのために以下の計算条件を指定します。

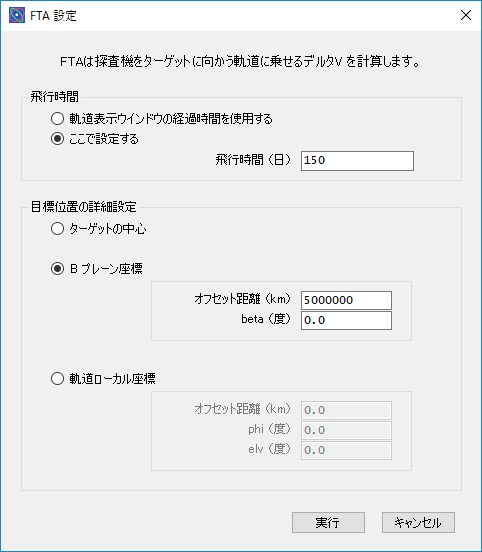
* 飛行時間：探査機が2体問題軌道で目標位置に到着するまでの飛行時間
* 目標位置の詳細設定：探査機が2体問題軌道を飛行すると仮定した目標位置。目標位置としてはターゲット（ここでは木星）の中心を指定することと、中心から離れた場所を指定することの両方ができます。中心から離れた場所の指定には「Bプレーン座標系」または「軌道ローカル座標系」のどちらか一方が使用できますが、ここでは「Bプレーン座標系」(\*2)を使用します。

(\*1) ここでの軌道とは、太陽に対する2体問題の解としての軌道です。探査機に引力を及ぼす天体は太陽だけであると仮定します。ターゲットである木星の引力も考慮しません。このような軌道のことを「2体問題軌道」と呼ぶことにします。

(\*2) Bプレーン座標系では、探査機の2体問題軌道がターゲットに最も近づく場所の距離と方向を指定します。詳しくはBプレーン座標系を見てください。

FTA 設定ウインドウを次のように操作して、スイングバイの最初のケースを準備しましょう。

* 飛行時間グループで、
  + ラジオボタン「ここで設定する」を選択し、
  + 入力フィールド「飛行時間（日）」に150を入力します。
* 目標位置の詳細設定グループで、
  + ラジオボタン「B プレーン座標」を選択します。
* 「B プレーン座標」ラジオボタンの脇のサブグループで、
  + 入力フィールド「オフセット距離（km）」に5000000（5百万）を入力し、
  + 入力フィールド「beta（度）」に0.0を入力します。



選択します

到着までの飛行時間（日数）

を指定します

選択します

オフセット距離を指定します

角度ベータを指定します

図－　FTA機能のパラメータの設定

設定が終わったら、[実行] ボタンをクリックしましょう。ダイアログが現れてFTAの計算結果が表示されます。結果を確認して、[OK] ボタンをクリックしましょう。計算結果（パラメータdv、phi、elvの値）がマヌーバエディタに反映されます。

続いてマヌーバエディタで [完了して実行] ボタンをクリックしましょう。編集していたCPマヌーバがマヌーバ表に保存され、実行されます。

この時点で探査機は木星のすぐ近くを通り過ぎる軌道に乗っています。探査機を飛行させ、スイングバイを行います。FLYTOマヌーバを飛行計画に追加し、実行しましょう。木星への最接近は150日後ですから、FLYTOマヌーバの継続期間を300日にしましょう。

マヌーバの編集を開始してFLYTOマヌーバを選択し、「終了時刻」グループの [編集] ボタンをクリックして「継続期間」に300日を設定します。

FLYTOマヌーバの作成と実行が終わったら、探査機がどんな風に木星でスイングバイをおこなったか確認しましょう。SSVGウインドウで [飛行レビュー] ボタンをクリックしてください。軌道表示ウインドウに代わって飛行レビューウインドウが現れます。「レビュー操作」のボタンを繰り返しクリックすることにより、探査機の動きを詳しく確認することができます。飛行レビューウインドウの「表示項目」グループで「探査機の軌道」にチェックを付けておけば、探査機の飛行の間に2体問題軌道が急激に変化する様子を見ることもできます。

飛行結果の確認に満足したなら、別のケースのスイングバイを試しましょう。次の表は探査機を違うスイングバイに導くFTAのパラメータの組を示しています。

表－ スイングバイのためのFTA パラメータ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Bプレーン座標系でのパラメータ | | 軌道の特徴 |
| offset distance (km) | beta (deg) |
| 5000000 | 0 | 木星の軌道の後方を通過する。距離はやや遠い。 (\*) |
| 3000000 | 0 | 木星の軌道の後方を通過する。距離は近い。 |
| 2000000 | 0 | 木星の軌道の後方を通過する。距離は非常に近い。 |
| 5000000 | 180 | 木星の軌道の前方を通過する。距離はやや遠い。 |
| 3000000 | 180 | 木星の軌道の前方を通過する。距離は近い。 |
| 3000000 | 270 | 木星の北極上空を通過する。距離は近い。 |
| 3000000 | 90 | 木星の南極上空を通過する。距離は近い。 |

\* このケースは既にこの項の前半で実行済みです。

これらのケースのスイングバイを試すには、マヌーバ表の3行目にあるCPマヌーバだけを修正すれば十分です。しかしこの行の編集にFTA機能を使うには、この行の右端の列に「Next」の表示がなければなりません。（SSVGでは、この表示がある行のことを「Next行」と呼びます）

もし、マヌーバ表の一つ上の行（2行目）に「checkpoint」の表示があるなら、SSVGの復元機能を使うことができます(\*)。SSVGのメニューで「チェックポイント」をクリックし、「復元（R）」を実行してください。マヌーバ表の3行目（CPマヌーバの行）がNext行になります。2行目に「checkpoint」の表示がある限り、この復元機能は何回でも使うことができます。

(\*) もしcheckpointの表示がなければ次の手順に従ってください。

* SSVGウインドウの [実行クリア] ボタンをクリックします。（1行目がNext行になります）
* SSVGウインドウの [実行] ボタンを2回クリックします。（3行目がNext行になります）
* SSVGウインドウのメニューの「チェックポイント」をクリックし、「作成（C）」を実行します。（これで2行目にcheckpointの表示が現れ、次の回は復元機能が使用できます）

これで3行目のCPマヌーバを編集してFTAを使う用意ができました。[Next 編集] ボタンをクリックして編集を開始し、違うケースのスイングバイを試してください。表－2に掲載していないパラメータについては、図－15を参照してください。

FTAやBプレーン座標系について詳しく知りたい方はFTA設定ウインドウやBプレーン座標系の項を参照してください。

## 金星に向かう飛行計画

地球の兄弟のような惑星、金星に向けて探査機を飛行させましょう。この節では、現在のロケット技術で「実現可能な飛行計画」を作成します。この節で言う「実現可能な飛行計画」とは、次のようなものです。

* 地球の近傍にある宇宙基地から出発し、探査機は直接金星に向かう
* 小さな出発速度（6000メートル／秒以下）
* 少数の小さな中間軌道修正だけで金星に到着

この飛行計画が現実のものであれば、「実現可能な」という条件には出発日の制約も含まれるでしょう。ここでは、探査機の出発日を2019年9月以降のできるだけ早い時期としましょう。

### 飛行計画の新規作成

SSVGウインドウのメニューの「ファイル」をクリックして「新規（N）」を実行し、新しい飛行計画を作成してください。ターゲットとしては金星を選択します。次は探査機を出発させる宇宙基地の選択ですが、地球近傍にある「地球L1」と「地球L2」のうち、どちらが好都合でしょうか。どちらも地球から150万キロメートルの宇宙空間にありますが、地球から見ると逆方向にあります。地球L1は太陽の方向にあり、地球L2は真逆の方向です。

宇宙基地を選ぶときには、探査機の出発直後の飛行方向を考える必要があります。もし飛行方向が軌道の内向き（太陽に近づく方向）であれば、探査機が出発直後に受ける地球の引力の影響を小さくするために宇宙基地として地球L1を選ぶべきでしょう。もし飛行方向が軌道の外向き（太陽から離れる方向）であれば、同じ理由で地球L2が好都合です。

実際のところ、地球から金星に向かう探査機の実現可能な経路は二つに分類できます。一つ目は「短い経路」で、100日程度の飛行時間になります。二つ目は「長い経路」で、こちらは約200日の飛行時間を必要とします。この節では「短い経路」を使用しましょう。この経路の場合、出発直後の飛行方向は内向きになりますから、地球L1が好都合です。

このような予備知識なしに飛行計画を作る場合には、両方の宇宙基地を試してみて、都合のよい方を選んでください。

### STARTマヌーバ

探査機を宇宙基地から出発させるマヌーバを作成しましょう。

[Next 編集] ボタンをクリックして、マヌーバの編集を開始してください。飛行計画の最初のマヌーバですから、マヌーバエディタのマヌーバのタイプは自動的にSTARTになります。

STARTマヌーバでは、出発時刻（日時）と出発時の速度（大きさと方向）を指定します。出発時刻と出発時の速度により、探査機の軌道が決まります（出発時刻により宇宙基地の位置と速度が決まりますから、探査機の軌道も決まります）。作成中の飛行計画は地球近傍から直接に金星に向かうものですから、この軌道は探査機を金星の近傍に送り届けるものでなければなりません。

SSVGはそのような都合のよい軌道を見つけることを支援してくれる強力なツールを持っています。それが「最適化アシスタント」です。このツールを使いましょう。

マヌーバエディタの [最適化] ボタンをクリックしてください。最適化アシスタント（STARTマヌーバ）が開きます。



図－　最適化アシスタント（STARTマヌーバ）

ウインドウの中央付近にはふたつのグループがあり、それぞれ「出発時刻の調整」および「飛行時間の調整」と名前がついています。このふたつのグループで探査機の出発時刻とターゲット（ここでは金星）までの飛行時間を調整します。

スライダのハンドル（つまみ）をドラッグして探査機の出発時刻と飛行時間を指定すると、SSVGはそれらを条件として探査機の2体問題軌道を計算し、それを3D 軌道ウインドウに表示します(\*)。同時にSSVGは次の値を計算して最適化アシスタント（STARTマヌーバ）に表示します。

* デルタV：探査機の出発速度（絶対値と方向）
* 到着時の相対速度：探査機が到着したときのターゲットの相対速度（絶対値）
* 合計：デルタVと相対速度の合計

(\*) 3D 軌道ウインドウには以下のものが表示されます。

* 赤色の×：出発時の探査機の位置
* 緑色の＋：出発時のターゲットの位置
* 青色の×：到着時の探査機とターゲットの位置
* 赤色の曲線：宇宙基地の通る経路
* 緑色の楕円：ターゲットの軌道
* 水色の曲線：探査機の計算された2体問題軌道
* オレンジ色の小円盤：太陽の位置

スライダのハンドルを左右に動かすと、出発時刻や飛行時間が変化し、上記の値や軌道（3D 軌道ウインドウの水色の曲線）も変化します。これらの情報から、適切な出発時刻や飛行時間を選ぶことができるでしょう。

[ **<<<** ] ボタンや [ **>>>** ] ボタンをクリックすることにより、スライダの値の範囲（上限と下限）をシフトする（ずらす）ことができます。1回のクリックで、スライダの幅全体の半分に当たる時間だけ範囲がシフトします。操作の詳細は最適化アシスタント（STARTマヌーバ）を見てください。

では、適切な出発時刻と飛行時間をさがしましょう。飛行計画の条件などから、初期値は次の値にすべきでしょう。

* 出発時刻の初期値：2019-09-01T00:00:00.000000（2019年9月1日）
* 飛行時間の初期値：100（日）

都合のよい出発時刻と飛行時間を見つけることができたなら、飛行時間（または到着時刻）をメモして [完了] ボタンをクリックしてください。出発時刻と出発速度が編集中のSTARTマヌーバに適用されます。

マヌーバエディタで [完了して実行] ボタンをクリックしてください。STARTマヌーバがマヌーバ表に保存され、実行されます。

### FLYTOマヌーバ（その1）

最適化アシスタントが計算する探査機の軌道は、太陽の引力だけを考慮した2体問題軌道ですから、探査機を実際に飛行させるとその位置や速度は時間とともに計算された軌道から少しずつずれて行きます。このようなずれは、探査機が地球の近くを飛行しているときは特に顕著です。地球の引力の影響が小さくなるまで探査機を十分な期間飛行させ、そのあとで金星に正確に接近できるよう軌道修正を行うことを考えます。

探査機を時間的な中間地点まで（またはその近くまで）飛行させましょう。SSVGウインドウの [Next 編集] ボタンをクリックしてください。マヌーバエディタでは、マヌーバのタイプとしてFLYTOを選択し、パラメータを編集して [完了して実行] ボタンをクリックしてください。

### CPマヌーバ

飛行の中間での軌道修正を行うため、CPマヌーバを追加しましょう。SSVGウインドウで [Next 編集] ボタンをクリックし、マヌーバエディタでマヌーバのタイプとしてCPを選択してください。

この時点で、金星への接近の詳細を決めなければなりません。探査機がいつ、金星から見てどの位置に近づくことを目指すか、です。

軌道修正のデルタV、つまり速度変化量が大きくなりすぎないよう、探査機が現在の（つまり軌道修正前の）軌道をそのまま進んだとき金星に最も近づく時刻をそのまま最接近時刻の目標値にしましょう。この時刻は、軌道表示ウインドウの「時刻操作」のボタンを操作することで確認できます。接近の目標となる場所については、自由に決めることができます。

SSVGのFTA機能を使用してマヌーバのパラメータを設定しましょう。軌道表示ウインドウの「時刻操作」のボタンを操作して、探査機の予測位置が金星に最も接近する時刻を探してください。(\*)　続いてマヌーバエディタの [FTA] ボタンをクリックしましょう。FTA 設定ウインドウが開きますが、このとき「飛行時間（日）」のフィールドには適切な飛行時間が設定されているはずです。

(\*) ボタンをクリックしたときの時間変化を小さくしたい場合には、「時刻操作」の「粗／細」の値を-1（マイナス1。場合によっては-2）にしてください。

FTA 設定ウインドウの「目標位置の詳細設定」グループでは、「B プレーン座標」を選択しましょう。Bプレーン座標系の項を参照して接近の目標位置を設定してください。続いて [実行] ボタンをクリックし、FTAの計算結果を確認してください。FTAの求めた軌道変更のパラメータがマヌーバエディタに反映されます。

この時点で、軌道変更を実行した場合の探査機の軌道を3D 軌道ウインドウで確認することができます。ターゲットの周辺を拡大してみてください。

期待通りの軌道であれば、マヌーバエディタの [完了して実行] ボタンをクリックしてください。

### FLYTOマヌーバ（その2）

最接近予定日の5日前まで飛行するFLYTOマヌーバを追加し、実行しましょう。

### FLYTOマヌーバ（その3）

最接近予定日の5日後まで10日間飛行するFLYTOマヌーバを作成し、実行しましょう。この飛行では探査機が金星のごく近所を通過し、軌道が大きく変化しますから、数値積分の積分間隔を小さくしましょう。マヌーバエディタの「パラメータ」の表のinterの値を初期値の1.00から0.01（単位は「日」）に変更します。SSVGはこの間隔で探査機の位置や速度を計算し、保存します。この値を小さくしておくと、飛行結果の確認もこの間隔で行えます。FLYTOマヌーバの編集を終了し、実行してください。

FLYTOマヌーバの実行が終了したら、SSVGウインドウの [飛行レビュー] ボタンをクリックして、飛行状況を確認してください。探査機がどんなふうに金星の近傍を通り過ぎるかが確認できるでしょう。

もし探査機を金星周回軌道に投入したいなら、上記の確認作業の中で探査機が金星に最も近づく時刻を見つけてください。そして、最後のFLYTOマヌーバを修正して、「終了時刻」がちょうどその時刻になるようにましょう。

飛行計画をもう一度最後まで実行すると、探査機はちょうど金星に最も近づいた点にいるはずです。またその瞬間における金星の相対位置や相対速度も確認できます。このあとCPマヌーバを追加して相対速度を適当な値にまで小さくすれば(\*)、探査機は金星周回軌道に入るでしょう。引き続いてFLYTOマヌーバを追加すれば、探査機が金星を周回する様子が確認できるでしょう。

(\*) 作業のヒント：CPマヌーバの編集を新しく開始した時点で軌道表示ウインドウの「ターゲットの相対速度」に表示されている数値は、探査機から見たターゲットの相対速度そのもので、しかも座標系はCPマヌーバのパラメータと同じです。この欄の「速度」をCPマヌーバのdvにコピー／ペーストし、phiとelvもそれぞれコピー／ペーストすれば、相対速度をほとんどゼロにするCPマヌーバを作ることができます。相対速度をゼロにしてしまうと衛星にはなりませんから、衛星にするにはdvの値をもっと小さな値にする必要があります。しかし、phiとelvの値はそのまま使うことができます。

## 小天体を目指す

これまでの例では、ターゲットとして太陽系の惑星を選択していました。SSVGでは小惑星や彗星、準惑星などの太陽系の小天体をターゲットとして選択し、その天体を目指す飛行計画を作成することができます。太陽系の小天体としては惑星の衛星もありますが、SSVGでは惑星の衛星をターゲットとして選択することはできません（地球の月は例外で、ターゲットとして選択することができます）。

太陽系の小天体をターゲットにする場合は、その天体の位置や速度を与えるSPKファイルが必要です。NASA/JPL（NASAジェット推進研究所）が運営するHORIZONSシステムは、そのようなSPKファイルを作成する機能を提供しています。HORIZONSシステムについては次のリンクを参照してください。

<<https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>>

HORIZONSシステムはいくつかの異なる形式のSPKファイルを作成することができます。しかし、SSVGが読むことができるのは、Binaryと呼ばれる形式のSPKファイルだけです。HORIZONSシステムにSPKファイルの作成を依頼する例が小天体のSPKファイルを入手するにありますので参照してください。

小天体のSPKファイルが入手できれば、飛行計画の新規作成や編集においてその小天体をターゲットとして選択することが可能になります。飛行計画作成ウインドウの項を参照してください。

### 小天体の例

宇宙探査で話題になった天体など、太陽系の小天体の例を次の表に挙げておきます。表にはSPKID（HORIZONSシステムでの天体の識別番号）も含めてありますので、SPKファイルが容易に入手できるでしょう。

なお、この表は太陽系の小天体のほんの一部を掲載しているに過ぎません。これら以外の天体でも正式な名称や公式の番号が分かればSPKファイルが入手できます。小天体のSPKファイルを入手するに示したWebページで検索してみてください。

表－ 小天体の例

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| IAU番号 | 名称 | 種類 | SPKID | 概要 |
| 1 | Ceres | 準惑星 | 2000001 | 最初に発見された小惑星。2006年に「準惑星」に再分類された。メインベルト (\*1) にある。Dawn (\*2) が詳細に調査した。 |
| 2 | Pallas | 小惑星 | 2000002 | メインベルト(\*1)の小惑星。軌道傾斜角が大きい。 |
| 3 | Juno | 小惑星 | 2000003 | メインベルト(\*1)の小惑星。 |
| 4 | Vesta | 小惑星 | 2000004 | メインベルト(\*1)の小惑星。Dawn (\*2) が詳細に調査した。 |
| 433 | Eros | 小惑星 | 2000433 | 地球に接近する軌道を持つ。 |
| 617 | Patroclus | 小惑星 | 2000617 | トロヤ群 (\*3) 小惑星。木星と同じ周期で公転する。 |
| 1566 | Icarus | 小惑星 | 2001566 | 地球に接近する軌道を持つ。近日点が水星の軌道よりも太陽に近い。軌道は細長い楕円。 |
| 1862 | Apollo | 小惑星 | 2001862 | 地球に接近する軌道を持つ。 |
| 3753 | Cruithne | 小惑星 | 2003753 | 地球近傍の軌道を持つ。公転周期が約1年。 |
| 4179 | Toutatis | 小惑星 | 2004179 | 地球に接近する軌道を持つ。 |
| 25143 | Itokawa | 小惑星 | 2025143 | 地球に接近する軌道を持つ。「はやぶさ」(\*4) が2010年にサンプルを地球に持ち帰った。 |
| 101955 | Bennu | 小惑星 | 2101955 | 地球に接近する軌道を持つ。OSIRIS-REx (\*5) が探査中。サンプルを地球に持ち帰る予定。 |
| 162173 | Ryugu | 小惑星 | 2162173 | 地球に接近する軌道を持つ。「はやぶさ2」(\*4) が探査中。サンプルを地球に持ち帰る予定。 |
| 1P | Halley | 彗星 | 1000036 | 地球に接近する軌道を持つ周期彗星。1986年の回帰では多数の宇宙機が探査を行った。次の回帰は2061年。 |
| 2P | Encke | 彗星 | 1000025 | 地球に接近する軌道を持つ周期彗星。近日点は水星の軌道に近い。 |
| 67P | Churyumov- Gerasimenko | 彗星 | 1000012 | 地球に接近する軌道を持つ周期彗星。Rosetta (\*6) が詳細に調査した。 |

(\*1) 小惑星の大部分は軌道が火星と木星の中間にあり、この一帯は「小惑星帯」または「メインベルト」と呼ばれる。

(\*2) Dawn（ドーン）はアメリカの探査機。2007年打上げ。VestaとCeresを詳細に観測した。

(\*3) 木星軌道上のラグランジュ点（L4およびL5。これらは木星軌道上にあり、太陽から見て木星の60度前方と60度後方に当たる）付近には多数の小惑星があり、全体を総称して「トロヤ群小惑星」と呼ばれている。

(\*4) 「はやぶさ」（2003年打上げ、2010年帰還）と「はやぶさ2」（2014年打上げ）は日本の探査機。「はやぶさ2」は2020年にサンプルを持ち帰る予定。

(\*5) OSIRIS-REx はアメリカの探査機。2016年打上げ、2023年にサンプルを持ち帰る予定。

(\*6) Rosetta はESA（ヨーロッパ宇宙機関）の探査機。2004年打上げ。

# リファレンスマニュアル

## 基本用語

### 探査機

SSVGでは飛行させる宇宙機を「探査機」と呼びます。探査機は宇宙基地から出発し、装備している推進装置で軌道を変更しながら、目的の天体に向けて飛行します。

探査機には3種類の推進装置が備えられています。化学推進エンジン、電気推進エンジン、そしてソーラーセイルです。これらの推進装置は使いやすくモデル化されていて、初めての人でも簡単に試してみることができるでしょう。これらの推進装置については別の項を参照してください。

SSVGの探査機は、惑星を周回する軌道に入ることができます。また、太陽系の小天体にランデブーする（接近して一緒に太陽の周囲を公転する）こともできます。しかしSSVGの探査機は観測装置を持ちませんので、惑星や小天体の観測を行うことはできません。

### 宇宙基地

SSVGの探査機は、地上からロケットで打ち上げるのではなく、宇宙基地から出発します。宇宙基地には、希望する速度で希望する方向に探査機を送り出してくれる射出装置（カタパルト）があることを想定しています。

宇宙基地は、すべての惑星の近くの宇宙空間に二つずつ用意されています。各惑星の宇宙基地の場所は、惑星 (\*) と太陽の引力が決めるラグランジュ点L1とL2です。どちらも惑星と太陽を通る直線上で、L1は惑星から見て太陽の方向に、そしてL2は太陽の真逆の方向にあります。L1とL2は太陽の引力と惑星の引力がある意味で「釣り合って」いる場所であり、この場所にある物体は（太陽からの距離が惑星とは異なるにも関わらず）惑星とともに惑星と同じ周期で太陽の周りを公転します。

(\*) 地球近傍の宇宙基地の場合、この項での「惑星」は正確には「地球と月の重心」を意味します。

（参考）厳密に言うと、ラグランジュ点L1とL2は惑星の軌道が真円で、宇宙に太陽とその惑星以外に天体がない場合に限って定義されます。この条件は満たされませんから、ここでのL1とL2は近似的なものであり、この場所にある物体は時間とともに徐々に位置がずれて行きます。SSVGの宇宙基地は常にL1またはL2の場所に相対的に静止しているよう何らかの方法で制御されていることを想定しています。

惑星からL1までの距離とL2までの距離はほぼ同じですが、この距離は惑星ごとに違います。SSVGでは、惑星ごとに「距離係数」という値を決め、太陽から惑星までの距離にこの「距離係数」を乗じて、それを惑星からL1までの距離および惑星からL2までの距離としています。

次の表はSSVGのすべての宇宙基地の名前と距離係数、そして宇宙基地の平均距離（惑星から宇宙基地までの平均的な距離）を示しています。

表－　宇宙基地

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 近傍の惑星 | L1の宇宙基地 | L2の宇宙基地 | 距離係数 | 平均距離  （百万km） |
| 水星 | 水星L1 | 水星L2 | 0.00381 | 0.22 |
| 金星 | 金星L1 | 金星L2 | 0.00934 | 1.0 |
| 地球 | 地球L1 | 地球L2 | 0.01008 | 1.5 |
| 火星 | 火星L1 | 火星L2 | 0.00476 | 1.1 |
| 木星 | 木星L1 | 木星L2 | 0.06828 | 53 |
| 土星 | 土星L1 | 土星L2 | 0.04568 | 66 |
| 天王星 | 天王星L1 | 天王星L2 | 0.02442 | 69 |
| 海王星 | 海王星L1 | 海王星L2 | 0.02580 | 120 |

### マヌーバ

SSVGでは、探査機に与える飛行についての指令のことを「マヌーバ」と呼びます。SSVGで探査機を飛行させるには、探査機に対する一連のマヌーバを定義し、それらを順番に実行します。

探査機を飛行させる一連のマヌーバはメインウインドウ（SSVGウインドウ）上に表として作成します。この表を「マヌーバ表」と呼び、一つの行（横一列）が一つのマヌーバに対応します。SSVGでは、各々の行（マヌーバ）を編集することも、行（マヌーバ）を追加することも、行（マヌーバ）を削除することもできます。探査機の飛行は、マヌーバ表にあるマヌーバを上から下へ順番に実行することにより実現されます。

マヌーバには、次の表に示す七つのタイプがあります。各タイプのマヌーバはそれぞれ異なるパラメータを必要とします。パラメータの詳細はマヌーバエディタを参照してください。

表－ マヌーバのタイプ

|  |  |
| --- | --- |
| タイプ名 | 説明 |
| START | 探査機を宇宙基地から出発させます。  パラメータとして出発時刻と出発時のデルタV（速度の大きさと向き）を指定します。指定するデルタVは出発する宇宙基地からの相対速度です。このマヌーバを実行すると、探査機は宇宙基地の速度にデルタVを加えた速度で飛行を開始します。  このマヌーバを実行するとSSVGの現在時刻が設定されます。  飛行計画の最初のマヌーバはこのSTARTマヌーバでなければなりません。またSTARTマヌーバは飛行計画の最初のマヌーバとしてだけ使用できます。 |
| CP | 化学推進エンジンを使用して探査機の軌道を変化させます。  パラメータとしてデルタV（速度変化の大きさと向き）を指定します。このマヌーバを実行すると、探査機はそれまでの速度にデルタVを加えた速度で飛行するようになります。  このマヌーバを実行してもSSVGの現在時刻は進みません。 |
| EP\_ON | 電気推進エンジンをオンにします。  パラメータとして加速率および推力方向モードを指定します。  電気推進エンジンがすでにオンである場合にも使うことができ、実行すると電気推進エンジンのパラメータが新しい値に変ります。  このマヌーバを実行してもSSVGの現在時刻は進みません。 |
| EP\_OFF | 電気推進エンジンをオフにします。  パラメータはありません。  このマヌーバを実行してもSSVGの現在時刻は進みません。 |
| SS\_ON | ソーラーセイルをオンにします。  パラメータとしてソーラーセイルの面積と向きおよび推力方向モードを指定します。  ソーラーセイルがすでにオンである場合にも使うことができ、実行するとソーラーセイルのパラメータが新しい値に変ります。  このマヌーバを実行してもSSVGの現在時刻は進みません。 |
| SS\_OFF | ソーラーセイルをオフにします。  パラメータはありません。  このマヌーバを実行してもSSVGの現在時刻は進みません。 |
| FLYTO | 探査機を指定した飛行終了時刻まで飛行させます。  パラメータとして飛行終了時刻および数値積分の積分間隔を指定します。  探査機の飛行経路には、太陽とすべての惑星、そして地球の月の引力と、電気推進エンジンおよびソーラーセイルによる加速度が反映されます。  このマヌーバの実行によりSSVGの現在時刻が飛行終了時刻まで進み、探査機の位置や速度が変化します。 |

### 飛行計画

SSVGでは、探査機の情報と目標となる天体（ターゲット）の情報、そして探査機を飛行させる一連のマヌーバをまとめて「飛行計画」と呼びます。

SSVGでは最初にマヌーバを含まない飛行計画を作成します。その後マヌーバを追加して実行することを繰り返して、少しずつ飛行計画を組み立てます。

作成した飛行計画は、名前を付けて保存することができます。保存した飛行計画は、あとで読み込んで実行することができますし、修正することもできます。

名前と質量、出発する宇宙基地といった探査機の情報は飛行計画を作成するときに指定しますが、これらはあとで修正することもできます。また目標となる天体（ターゲット）も飛行計画を作成するときに指定しますが、これもあとで変更することができます。例えば木星でスイングバイを行って土星を目指す飛行計画であれば、最初はターゲットを木星にしておき、スイングバイを行った後にターゲットを土星に変更するとよいでしょう。

### ターゲット

ターゲットはSSVGがその時点で目指している（目標としている）天体です。ターゲットの位置や軌道は3D 軌道ウインドウに表示されます。また、SSVGでマヌーバを編集するときに使う支援ツール（FTAや最適化アシスタント）は、探査機がターゲットに接近するためのパラメータを計算します。例えば、FTAである天体に接近するためのCPマヌーバのデルタVを求めさせる場合には、その天体がターゲットとして選択されていることが必要です。

その一方で、どの天体がターゲットであるかは、探査機の飛行経路には影響を与えません。

ターゲットとして選択できる天体は次の二種類です。

* 惑星：太陽系の8惑星と冥王星（準惑星）、および月（地球の月）です。これらをターゲットとして選択するには特別なデータファイルは必要ではありません。
* 小天体： NASA/JPLのHORIZONSシステムが太陽系重心を原点とするSPKファイルを提供している太陽系の小天体（冥王星以外の準惑星、小惑星、彗星）です。これらの一つをターゲットとして選択するためには、その天体のSPKファイルを入手する必要があります。入手方法は小天体のSPKファイルを入手するを参照してください。  
  地球の月以外の衛星（惑星の衛星）をターゲットとして選択することはできません。

### 化学推進エンジン

SSVGの化学推進エンジンは、実際の宇宙探査機でもしばしば使用される液体燃料ロケットエンジンをモデル化し、単純にしたものです。液体燃料ロケットエンジンは液体の燃料と酸化剤をエンジン内部で燃焼させ、発生した高温のガスを噴出させることで推力を発生させます。

液体燃料ロケットエンジンの長所は、推力が大きく短時間で大きな速度変化を生み出せることです。SSVGの化学推進エンジンはこの長所を単純化し、瞬間的に（時間の経過なしに）速度変化を作り出せるものとしました。

一方、液体燃料ロケットエンジンには大きな弱点があります。それは「燃費が悪い」ことです。例えば2000メートル／秒といった速度変化を探査機に与えるには探査機本体の質量とほとんど同じ質量の燃料と酸化剤を搭載して、それを全部使いきるまでエンジンを働かせることが必要になります（推進装置とロケット方程式を参照してください）。この弱点は深刻なものですが、SSVGでは敢えてこの弱点を無視しています。SSVGの化学推進エンジンは燃料を全く消費しないようモデル化されていますので、どのような飛行計画であろうと化学推進エンジンだけで実現することができます。

化学推進エンジンのモデル化では、次のような単純化を行っています。

* 瞬時に（時間の経過なしに）探査機の速度を変化させることができる。
* 推進剤（燃料や酸化剤）を消費しない。
* 加速には誤差がない。ただし指定できる精度には制限がある。

### 電気推進エンジン

SSVGの電気推進エンジンは、イオンエンジンやホールスラスタといった電気推進装置を単純化したものです。これらの電気推進装置は太陽系の小天体の実際の探査に利用されています。

電気推進装置の長所は「燃費がよい」ことです。例えば、化学推進エンジンの項の例と同じく2000メートル／秒の速度変化を探査機に与える場合、イオンエンジンの消費する推進剤の質量は探査機本体の質量のたった7パーセントに過ぎません（推進装置とロケット方程式を参照してください）。

電気推進装置の弱点は推力が小さいことです。例えば小惑星探査機「はやぶさ2」の場合、イオンエンジン1基の推力は10ミリニュートンに過ぎません。3基を同時に24時間動作させたとしても、得られる速度変化量は4.32メートル／秒です（探査機の質量を600キログラムとしています）。

SSVGの電気推進エンジンは、現実の装置の長所を強調してまったく推進剤を消費しないようモデル化されています。また弱点については、現実の装置よりも大きな柔軟性を与えることにしました。SSVGの電気推進エンジンは探査機を加速するために有限の（ゼロでない）時間を必要としますが、推力には制限はありません。

結果として、SSVGの電気推進エンジンは様々な使い方が可能なものになりました。ひとつの使い方は実際の液体燃料ロケットエンジンのように、大きな推力で短い時間動作させる使い方です。別の使い方は実際のイオンエンジンのように、小さな推力で長い時間をかけて加速する使い方です。それらに加えて、中間的な使い方も沢山ありえます。

電気推進エンジンのモデル化では、次のような単純化を行っています。

* 瞬間的にオン／オフを切り替えることができる。
* 既にオンになっている場合、瞬間的にパラメータを変更することができる。
* 推進剤をまったく消費しない。
* 推力（加速率）に制限はない。
* 推力は誤差を含まない。ただし指定できる精度には制限がある。

SSVGの電気推進エンジンは二つの運用モードを持っています。推力方向モードの「L」と「E」です。詳細は推力方向モードを見てください。

### ソーラーセイル

SSVGのソーラーセイルは太陽の光を反射することで推力を得る「光の帆」をモデル化したものです。

ソーラーセイルの長所は、推進剤をまったく消費せずに加速が行えることです。その一方で、太陽光の圧力は大変小さなものですから、必要な速度変化を作り出すためには非常に大きなセイルと長い時間が必要になります。例えばソーラーセイルによる加速を2010年に世界で初めて実証したJAXAの探査機「イカロス」の場合、約200平方メートル（14メートル四方の正方形）のセイルを広げましたが、推力は約1ミリニュートンに過ぎません。これは、10日間の運用で300kgの探査機を3メートル／秒だけ加速できる推力です。

SSVGのソーラーセイルは太陽の放射するすべての電磁波を鏡として反射します。またそのセイル面は完全な平面と想定されています。この場合、ソーラーセイルの推力はセイルの平面に垂直に働きます。またソーラーセイルの推力は常に太陽から遠ざかる方向に働きます。

SSVGのソーラーセイルは次のような特徴を持っています。

* セイル面は表裏両面とも完全な鏡である。
* 瞬間的にオン／オフを切り替えることができる。
* ソーラーセイルをオンにするときに、面積とセイルの向きをパラメータとして指定する。
* セイルの面積には制限はない。
* ソーラーセイルがすでにオンになっているときに、瞬間的にパラメータを切り替えることができる。
* セイルの質量は探査機の全質量に含まれる。
* セイルの面積や向きには誤差はない。ただし指定できる精度には制限がある。

SSVGのソーラーセイルは二つの運用モードを持っています。推力方向モードの「L」と「E」です。詳細は推力方向モードを見てください。

軌道変更を行う推進装置としてのソーラーセイルの特性を知っておくと役に立つでしょう。そのいくつかを以下に示します。（thetaとelvについてはソーラーセイル座標系を参照してください）

* ソーラーセイルの推力が最大になるのは、セイル面が太陽に正対している（theta=0.0、elv=0.0）場合です。残念なことに、この場合の推力は半径方向（動径方向）の成分しか持たず、円周方向の成分は持ちません。多くの場合、推力の半径方向の成分は軌道のエネルギーや角運動量、もしくは軌道の傾斜角を変化させるには有効ではありません。
* 多くの場合、推力の円周方向の成分は軌道のエネルギーや角運動量、もしくは軌道の傾斜角を変化させるのに有効です。
* 推力の円周方向の成分を得るには、ソーラーセイルのセイル面を傾ける必要があります。では、どれくらい傾ければいいのでしょうか？　ソーラーセイルの推力の円周方向の成分を最大化する「魔法の角度」があります。それは、約35.26度です。(\*)
* もし探査機の軌道をできるかぎり素早く大きくしたいなら、単純な回答はtheta=35.26とelv=0.0です（推力方向モードはLにします）。
* もし探査機の軌道をできるかぎり素早く傾けたいなら、単純な回答はtheta=0.0とelv=35.26です（推力方向モードはLにします）。

(\*) 正確な値は です。

### 経路と軌道

SSVGでは探査機の飛行するみちすじについて、「経路」と「軌道」という二つの用語を用い、それぞれを次のように使い分けています。

#### 経路

数値積分という手法を使い、探査機の飛行するみちすじを忠実に再現するよう計算したものが経路です。経路の計算では、探査機に働くほとんどすべての力（太陽の引力、惑星の引力、電気推進エンジンとソーラーセイルによる推力）を考慮しています。

#### 軌道

探査機に働く力として太陽の引力だけを考慮したときに探査機が飛行するはずの仮想的なみちすじです。軌道の計算は「2体問題の解」として知られる公式に基づいて行っています。惑星の引力や、電気推進エンジンとソーラーセイルの推力は考慮されていませんから、計算された軌道は実際の飛行経路とは少し（場合によると大きく）異なります。2体問題であることを強調する必要があるときは特別に「2体問題軌道」と呼びますが、意味は同じです。

## ウインドウとその操作

### SSVGウインドウ

SSVGウインドウはSSVGのメインウインドウです。SSVGを起動すると表示され、SSVGの実行中は常に表示されています。

SSVGウインドウには、以下のアイテムやグループがあります。

* メニューバー：いくつかの重要な機能はメニューバーから実行します。
* ボタン：三つのグループがあります。「表示関連ボタン」「編集関連ボタン」そして「実行関連ボタン」です。
* マヌーバ表：現在の飛行計画に含まれるマヌーバの表です。
* 探査機の状態：あるマヌーバを実行した直後の探査機の状態が表示されます。
* 選択中のマヌーバ：マヌーバ表の選択中の行にあるマヌーバの詳細が表示されます。
* その他の情報：探査機の名称、ターゲット、宇宙基地、飛行計画の名前などが表示されます。
* メッセージ：SSVGの動作状況などが順次表示されます。

メニューバー

表示関連

ボタン

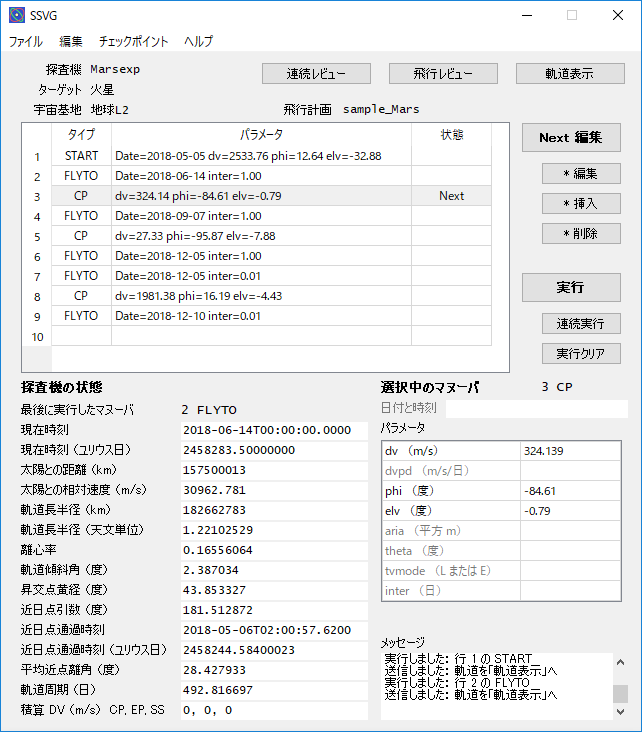
実行関連

ボタン

編集関連

ボタン

マヌーバ表



図－　SSVGウインドウ

#### メニューバー

表－　SSVGウインドウのメニューバー

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| メニュー項目 | 小項目 | 機能 |
| ファイル | 開く（O） | ファイルから飛行計画を読み込みます。 |
| 新規（N） | 新しい飛行計画を作成します。  飛行計画作成ウインドウを参照してください。 |
| 保存（S） | 飛行計画を現在の飛行計画ファイルに保存します。 |
| 別名で保存（A） | 飛行計画を新しいファイル名で保存します。 |
| 終了（Q） | SSVGを終了します。 |
| 編集 | 探査機（P） | 飛行計画の探査機の情報を編集します。  実行すると「探査機の編集」ウインドウが開きますが、設定方法は飛行計画作成ウインドウを参照してください。 |
| ターゲット（T） | 飛行計画のターゲットを編集します。  実行すると「ターゲットの選択」ウインドウが開きますが、設定方法は飛行計画作成ウインドウを参照してください。 |
| チェックポイント | 作成（C） | チェックポイントを作成します。(\*1) |
| 復元（R） | チェックポイントから飛行計画の実行状態を復元します。(\*2) |
| ヘルプ | ユーザーズガイド（U） | SSVG ユーザーズガイド（この文書）を既定のpdfリーダーで開きます。 |
| ホームページ（H） | SSVGのホームページを既定のウェブブラウザで開きます。 |
| SSVGについて（A） | SSVGについての情報を表示します。 |

(\*1) SSVGは飛行計画の現在の「実行状態」(\*2) からチェックポイントを作成し、マヌーバ表のこの操作の直前に実行された行にcheckpointを表示します。「復元」を実行すると、SSVGはチェックポイントから実行状態を復元します。SSVGウインドウの「実行クリア」ボタンのクリックなどにより飛行計画の実行状態が消去されるとチェックポイントも削除されます。

(\*2) 飛行計画の「実行状態」は、直前に実行されたマヌーバの行の番号、SSVGでの時刻、探査機の現在位置と速度、それまでの探査機の飛行経路などを含みます。

#### ボタン

表－ SSVGウインドウのボタン

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 表示名 | 機能 |
| 表示関連ボタン | 連続レビュー | 連続レビューウインドウを表示し、実行済みのマヌーバの連続レビューを開始します。3D 軌道ウインドウが閉じられている場合は再表示します。 |
| 飛行レビュー | 飛行レビューウインドウを表示し、直前の飛行結果（FLYTOマヌーバの結果）のレビューを開始します。3D 軌道ウインドウが閉じられている場合は再表示します。 |
| 軌道表示 | 軌道表示ウインドウを表示し、探査機の位置やその軌道を表示します。3D 軌道ウインドウが閉じられている場合は再表示します。 |
| 編集関連ボタン | Next 編集 | マヌーバエディタを開き、マヌーバ表のNext行のマヌーバを編集します。 |
| \* 編集 | マヌーバエディタを開き、マヌーバ表の選択中の行のマヌーバを編集します。  編集する行がNext行でない場合、編集時に一部の機能が使えない場合があります。  編集する行のマヌーバが実行済みである場合、編集を完了すると飛行計画の実行状態は消去されます。(\*) |
| \* 挿入 | マヌーバ表の選択されている行の位置に空のマヌーバを挿入します。  選択されている行のマヌーバが実行済みである場合、挿入を行うと飛行計画の実行状態は消去されます。(\*) |
| \* 削除 | マヌーバ表の選択されている行を削除します。  選択されている行のマヌーバが実行済みである場合、削除を行うと飛行計画の実行状態は消去されます。(\*) |
| 実行関連 ボタン | 実行 | マヌーバ表のNext行のマヌーバを実行します。 |
| 連続実行 | マヌーバ表のNext行から選択中の行までマヌーバを連続して実行します。 |
| 実行クリア | 飛行計画の実行状態を消去します。マヌーバ表の1行目がNext行になります。チェックポイントも削除されます。 |

(\*) マヌーバ表で、編集や挿入、削除を行った行よりも上にチェックポイントがある場合、実行状態は消去されず、チェックポイントの飛行状態が復元されます。

#### マヌーバ表

マヌーバ表は現在の飛行計画に含まれるマヌーバを実行順に並べた表です。マヌーバ表の各々の行（横一列）はそれぞれが一つのマヌーバです。マヌーバ表の行には通し番号と次の三つのカラムがあります。

* 「タイプ」カラム：マヌーバのタイプを表示します。
* 「パラメータ」カラム：マヌーバのパラメータを一部省略して表示します。
* 「状態」カラム：Next、checkpointのいずれかを表示しますが、空白の場合もあります。空白以外の表示の意味は次のとおりです。
  + Next：この行が「Next行」であることを示します。
  + checkpoint：SSVGがこの行の実行直後の状態をチェックポイントとして保持していることを示します。

マヌーバ表に対して行うことのできる操作は以下のとおりです。

* 行のクリック：その行を選択します。
* 行のダブルクリック：マヌーバエディタを開き、その行のマヌーバを編集します。編集する行がNext行でない場合、編集時に一部の機能が使えない場合があります。編集する行のマヌーバが実行済みである場合、編集を完了すると飛行計画の実行状態は消去されます。（編集した行よりも上に有効なチェックポイントがあれば実行状態は消去されず、チェックポイントの飛行状態が復元されます）

#### 探査機の状態

表－　探査機の状態に表示される情報

|  |  |
| --- | --- |
| 項目名 | 表示内容 |
| 最後に実行したマヌーバ | 最後に実行されたマヌーバの行番号とタイプ |
| 現在時刻 | 探査機の現在時刻（ISO時刻：西暦年-月-日[T]時:分:秒） |
| 現在時刻（ユリウス日） | 探査機の現在時刻（ユリウス日） |
| 太陽との距離（km） | 探査機の太陽からの距離（キロメートル） |
| 太陽との相対速度（m/s） | 探査機の太陽との相対速度（メートル／秒） |
| 軌道長半径（km） | 探査機の軌道長半径（キロメートル） |
| 軌道長半径（天文単位） | 探査機の軌道長半径（天文単位） |
| 離心率 | 探査機の軌道の離心率 |
| 軌道傾斜角（度） | 探査機の軌道傾斜角（度） |
| 昇交点黄経（度） | 探査機の軌道の昇交点黄経（度） |
| 近日点引数（度） | 探査機の軌道の近日点引数（度） |
| 近日点通過時刻（度） | 探査機の近日点通過時刻（ISO時刻：西暦年-月-日[T]時:分:秒） |
| 近日点通過時刻（ユリウス日） | 探査機の近日点通過時刻（ユリウス日） |
| 平均近点離角（度） | 探査機の平均近点離角（度） |
| 軌道周期（日） | 探査機の軌道周期（日） |
| 積算DV（m/s） CP, EP, SS | 宇宙基地出発以降の推進装置ごとの累積速度変化量（メートル／秒）  （化学推進エンジン、電気推進エンジン、ソーラーセイルの順） |

#### 選択中のマヌーバ

マヌーバ表で選択されているマヌーバの詳細が表示されます。各パラメータの意味はマヌーバエディタを参照してください。またグループラベルの右には選択されているマヌーバの行番号とタイプが表示されます。

#### その他の情報

SSVGウインドウの上端付近に以下の情報が表示されます。

* 探査機：探査機の名称
* ターゲット：ターゲットの名称
* 宇宙基地：宇宙基地の名称
* 飛行計画：現在の飛行計画ファイルの名称

#### メッセージ

SSVGウインドウの右下隅にはメッセージ領域があり、SSVGが動作状況などを表示します。

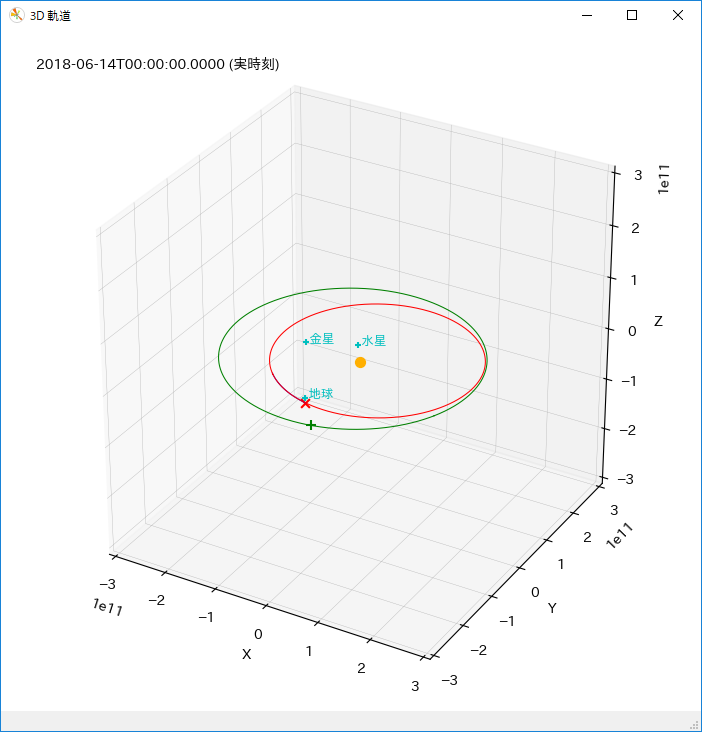
### 3D 軌道ウインドウ

3D 軌道ウインドウは探査機やターゲットの位置や軌道を3次元の図として表示するウインドウで、SSVGが起動しているときは通常いつでも表示されています。ウインドウのクローズボタン（右上隅の×）で閉じることができますが、マヌーバの実行や有効な[軌道表示]ボタンのクリックなどの操作を行うと自動的に再表示されます。

3次元の図として表示される情報は、以下に示すウインドウが生成し、制御します。

* 軌道表示ウインドウ：探査機の現在の状態の詳しい観察を支援します。
* 飛行レビューウインドウ：直前に実行されたFLYTOマヌーバのレビューを支援します。
* 連続レビューウインドウ：実行済みのマヌーバの連続レビューを支援します。
* 最適化アシスタント（STARTマヌーバ）：STARTマヌーバの作成を支援します。
* 最適化アシスタント（CP マヌーバ）：CPマヌーバの作成を支援します。

次の図は3D 軌道ウインドウの表示の例です。ここでは軌道表示ウインドウが生成した情報を表示しています。



図－　3D 軌道ウインドウ

次の表は3D 軌道ウインドウに表示されるすべてのアイテムとその説明です。

表－　3D 軌道ウインドウに表示されるアイテム

|  |  |
| --- | --- |
| アイテム | 説明 |
| ×マーク（赤色） | 探査機。マヌーバのレビュー中は推進装置の状態やマヌーバに関する情報がマークの右に表示されることがあります。 |
| 曲線（赤色） | 探査機の軌道。ほとんどの場合探査機の2体問題軌道を示します。  最適化アシスタント（STARTマヌーバ）の実行中は宇宙基地の経路を示します。  最適化アシスタント（CPマヌーバ）の実行中は軌道変更前の探査機の2体問題軌道を示します。 |
| 曲線（青色） | 探査機の飛行経路。FLYTOマヌーバの実行結果です。 |
| ＋マーク（緑色） | ターゲット。 |
| 曲線（緑色） | ターゲットの2体問題軌道。 |
| ×マーク（青色） | 探査機がターゲットに到着する位置。最適化アシスタントの実行中に表示されます。 |
| 曲線（水色） | 探査機の2体問題軌道。最適化アシスタント検討中の探査機の軌道です。 |
| 小円盤（オレンジ色） | 太陽。 |
| ＋マークと名称（水色） | 惑星とその名称。惑星ではありませんが、地球の月は＋マークだけが表示されます。最適化アシスタントの実行中は表示されません。 |
| 目盛とグリッドのある面（3面） | 黄道座標系の3平面（X-Y、Y-Z、Z-X）に平行な面。目盛の軸は黄道座標系の3軸（X、Y、Z）に平行です。各目盛には、目盛の「1」の長さがメートルを単位として表示されます。各目盛はオフセット値（目盛の「0」の本来の値）が表示されることがあります。 |
| 時刻情報 | 3次元の図の左上隅に、探査機や天体の位置に対応した時刻（ISOT形式）とその属性が表示されます。属性は（実時刻）と（予測時刻）のいずれかです。 |

3D 軌道ウインドウ上にマウスカーソルがある状態でマウスを操作すると、表示される図の向きや拡大率を自由に変更することができます。操作法は次の表のとおりです。

表－ 3D 軌道ウインドウにおける図の操作

|  |  |
| --- | --- |
| 操作したい内容 | 操作方法 |
| 図の向きを変える | 左ボタンを押した状態でマウスを上下や左右に動かします。 |
| 図の拡大率を変える | 右ボタンを押した状態でマウスを上下に動かします。 |
| 図のサイズを変える | ウインドウの辺または隅をマウスでドラッグします。 |
| 図の中央を変更する | 3D 軌道ウインドウでは操作できません。軌道表示ウインドウ、飛行レビューウインドウ、または連続レビューウインドウの「視野中央」グループで図の中央を選択してください。 |

### 軌道表示ウインドウ

軌道表示ウインドウは、探査機の現在の状態を利用者が観察することを支援します。軌道表示ウインドウは探査機の現在の状態を以下のように表示します。

* 3D 軌道ウインドウに、
  + 探査機とその軌道、そしてこれまでに飛行した経路
  + ターゲットとその軌道
  + 惑星の位置と名称
* 軌道表示ウインドウ自身に、
  + ターゲットの相対位置と相対速度（視線速度を含む）

これらの情報に関係づけられる時刻は、ある指定された時刻です。この時刻はSSVGの現在時刻のこともありますし、過去または未来の時刻（これを「予測時刻」と呼びます）の場合もあります。軌道表示ウインドウは予測時刻における探査機の位置を現在時刻の2体問題軌道から計算します。

**【重要】**軌道表示ウインドウで予測時刻を操作して表示される探査機の位置や軌道には、太陽の引力以外の力、つまり電気推進エンジンやソーラーセイルの推力、そして他の惑星の引力などは反映されません。これらの力はFLYTOマヌーバを実行したときに初めて効果を表します。

軌道表示ウインドウが探査機の情報を表示できるのは、予測時刻が探査機の飛行できる時間範囲にあるときに限られます。軌道表示ウインドウではその範囲を超えた予測時刻を設定することができますが、その場合3D 軌道ウインドウには探査機やターゲットなどの表示は行われません。また軌道表示ウインドウに表示されるターゲットの相対位置や速度は更新されません。探査機の飛行できる時間帯については時刻についての項を参照してください。

軌道表示ウインドウは以下の場合に表示されます。

* 利用者がマヌーバを実行したとき
* 利用者がNext行のマヌーバの編集を開始したとき (\*)
* 少なくとも一つのマヌーバが実行ずみであって、利用者がマヌーバの編集を終了またはキャンセルしたとき
* 利用者が有効な [軌道表示] ボタンをクリックしたとき

(\*) Next行にあるSTARTマヌーバ、CPマヌーバ、またはFLYTOマヌーバを編集しているときは、マヌーバエディタの [軌道表示] ボタンをクリックすることにより編集中のパラメータを一時的に軌道表示ウインドウに反映させることができます。



図－　軌道表示ウインドウ

軌道表示ウインドウの上部には以下の5個のグループがあります。

* 視野中央：3次元の図の中央を指定するラジオボタン（3個）
* 表示項目：3次元の図にアイテムを表示する／しないを指定するチェックボックス（4個）
* 一時設定：一時的に適用されているマヌーバのパラメータの表示
* 時間に関する表示（右上隅の3行）
* 時刻操作：予測時刻の操作を行うボタン（4個）とスピンボックス

表－ 軌道表示ウインドウの上部にあるグループ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ名 | 項目ラベル／名前 | 説明 |
| 視野中央 | 太陽系重心 | 選択すると3次元の図の中央が太陽系重心になります。 |
| 探査機 | 選択すると3次元の図の中央が探査機になります。 |
| ターゲット | 選択すると3次元の図の中央がターゲットになります。 |
| 表示項目 | 探査機の飛行経路 | チェックすると3次元の図に実行済みのマヌーバによって探査機が飛行した経路が青線で表示されます。 |
| 探査機の軌道 | チェックすると3次元の図に探査機の軌道（2体問題軌道）が赤線で表示されます。 |
| ターゲットの軌道 | チェックすると3次元の図にターゲットの軌道（2体問題軌道）が緑線で表示されます。 |
| 惑星 | チェックすると3次元の図に惑星の位置と名前が表示されます。 |
| 一時設定 | dv  phi  elv | マヌーバエディタから一時的に適用されたマヌーバのパラメータがここに表示されます。（STARTマヌーバまたはCPマヌーバの編集中の場合に限る） |
| （名前なし）  時刻情報 | 現在時刻  　　　　　または  出発時刻 | SSVGの現在時刻がここに表示されます。（STARTマヌーバの編集中以外の場合） |
| マヌーバエディタから一時的に適用された出発時刻がここに表示されます。（STARTマヌーバの編集中の場合） |
| 予測時刻 | 予測時刻が表示されます。（現在時刻の場合もあります） |
| 経過時間（日）  　　　　　および  [設定] ボタン | 経過時間（現在時刻から予測時刻まで）がここに表示されます。単位は「日」です。  経過時間の値を設定することもでき、[設定] ボタンをクリックすると結果が予測時刻に反映されます。(\*) |
| 時刻操作(\*) | [ **<<** ] ボタン | 高速逆行。クリックすると[ **<** ] ボタンの10倍のステップで予測時刻が戻ります。(\*) |
| [ **<** ] ボタン | 逆行。クリックすると予測時刻が戻ります。(\*) |
| [ **>** ] ボタン | 順行。クリックすると予測時刻が進みます。(\*) |
| [ **>>** ] ボタン | 高速順行。クリックすると[ **>** ] ボタンの10倍のステップで予測時刻が進みます。(\*) |
| 粗／細 スピンボックス | [ **<** ] や [ **>** ] などの操作ボタンをクリックして設定する予測時刻の粗さ／細かさを指定します。値を大きくすると予測時刻の設定が粗くなります。値を小さくすると、予測時刻の設定が細かくなります。 |

(\*) マヌーバエディタでFLYTOマヌーバの編集を行っている場合に限り、予測時刻を変更するとその結果は編集中のFLYTOマヌーバの終了時刻や継続期間に自動的に反映されます。

軌道表示ウインドウの下部には、予測時刻におけるターゲットの相対位置や相対速度が表示されます。相対位置と相対速度はともに探査機から見た位置と速度です。

表－　軌道表示ウインドウの下部にあるグループ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ名 | ラベル | 説明 |
| ターゲットの相対位置 | 距離（km） | ターゲットの探査機からの距離。 |
| phi（度）  elv（度） | ターゲットの探査機からの方向。phiとelvの定義は軌道ローカル座標系を参照してください。 |
| ターゲットの相対速度 | 速度（m/s） | ターゲットの探査機を基準にした速度。 |
| phi（度）  elv（度） | ターゲットの探査機を基準にした速度の方向。phiとelvの定義は軌道ローカル座標系を参照してください。 |
| ターゲットの視線速度 | 速度（m/s） | ターゲットの相対速度の視線方向成分。この値が正であれば、ターゲットは探査機から遠ざかりつつあります。 |

また軌道表示ウインドウの右下隅にはメッセージ表示領域があり、SSVGの動作状況などが順次表示されます。

### 飛行レビューウインドウ

飛行レビューウインドウは、FLYTOマヌーバの飛行結果のレビューを支援します。このウインドウはFLYTOマヌーバの実行の直後に限って利用できます。このウインドウはFLYTOマヌーバの積分ステップごとに情報を次のように表示します。

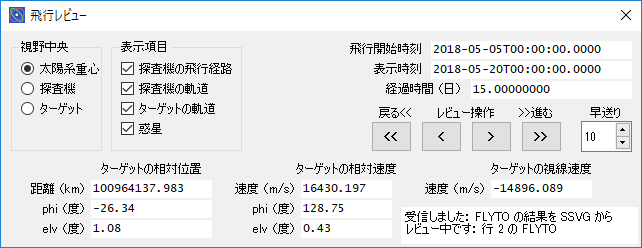
* 3D 軌道ウインドウに、
  + 探査機とその経路、そして軌道
  + 電気推進エンジンの状態 (\*1)
  + ソーラーセイルによる加速とその状態 (\*2)
  + ターゲットとその軌道
  + 惑星の位置と名称
* 飛行レビューウインドウ自身に、
  + ターゲットの相対位置と相対速度（視線速度を含む）

(\*1) 電気推進エンジンがオンになっている場合、「EP(m)」という文字列が3D 軌道ウインドウの探査機の×マークの右に表示されます。ここで「EP(m)」の「m」は電気推進エンジンの推力方向モードの値（LまたはE）です。

(\*2) ソーラーセイルがオンになっている場合、「SS(m) SSacc=n.nnn」という文字列が3D 軌道ウインドウの探査機の×マークの右に表示されます。ここで「SS(m)」の「m」はその時点でのソーラーセイルの推力方向モードの値（LまたはE）です。「SSacc=n.nnn」の「n.nnn」はその瞬間におけるソーラーセイルによる加速度の大きさ（1日運用した場合の速度変化の大きさ。単位はメートル／秒／日）です。

飛行レビューウインドウは、FLYTOマヌーバの積分ステップごとに情報を表示します。表示中の積分ステップのことを「現在の積分ステップ」と呼びます。

飛行レビューウインドウは利用者がSSVGウインドウの「飛行レビュー」ボタンをクリックすると表示されます。



図－　飛行レビューウインドウ

飛行レビューウインドウの上部には以下の4個のグループがあります。

* 視野中央：3次元の図の中央を指定するラジオボタン（3個）
* 表示項目：3次元の図にアイテムを表示する／しないを指定するチェックボックス（4個）
* 時刻情報（右上隅の3行）
* レビュー操作：現在の積分ステップを操作するボタン（4個）とスピンボックス

表－　飛行レビューウインドウの上部にあるグループ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ名 | 項目ラベル／名前 | 説明 |
| 視野中央 | 太陽系重心 | 選択すると3次元の図の中央が太陽系重心になります。 |
| 探査機 | 選択すると3次元の図の中央が探査機になります。 |
| ターゲット | 選択すると3次元の図の中央がターゲットになります。 |
| 表示項目 | 探査機の飛行経路 | チェックすると3次元の図に実行済みのマヌーバによって探査機が飛行した経路が青線で表示されます。 |
| 探査機の軌道 | チェックすると3次元の図に現在の積分ステップにおける探査機の軌道（2体問題軌道）が赤線で表示されます。 |
| ターゲットの軌道 | チェックすると3次元の図にターゲットの軌道（2体問題軌道）が緑線で表示されます。 |
| 惑星 | チェックすると3次元の図に惑星の位置と名前が表示されます。 |
| （名前なし）  時刻情報 | 飛行開始時刻 | レビュー中のFLYTOマヌーバの飛行開始時刻がここに表示されます。 |
| 表示時刻 | 現在の積分ステップの時刻が表示されます。 |
| 経過時間（日） | 経過時間（飛行開始時刻から現在の積分ステップの時刻まで）がここに表示されます。単位は「日」です。 |
| レビュー操作 | [ **<<** ] ボタン | 高速逆行。クリックすると「早送りの指定」で指定されたステップ数だけ現在の積分ステップが戻ります。 |
| [ **<** ] ボタン | 逆行。クリックすると1ステップだけ現在の積分ステップが戻ります。 |
| [ **>** ] ボタン | 順行。クリックすると1ステップだけ現在の積分ステップが進みます。 |
| [ **>>** ]ボタン | 高速順行。クリックすると「早送りの指定」で指定したステップ数だけ現在の積分ステップが進みます。 |
| 早送り スピンボックス | 操作ボタン[ **<<** ] や [ **>>** ] をクリックしたときに現在の積分ステップが変化するステップ数を指定します。 |

飛行レビューウインドウの下部には、レビュー中の時刻（現在の積分ステップの時刻）における探査機に対するターゲットの相対位置や相対速度が表示されます。項目とその意味は軌道表示ウインドウと同じです。表－12　軌道表示ウインドウの下部にあるグループを参照してください。

また飛行レビューウインドウの右下隅にはメッセージ表示領域があり、SSVGの動作状況などが順次表示されます。

### 連続レビューウインドウ

連続レビューウインドウは、実行済みのマヌーバの連続レビューを支援します。実行済みの各々のマヌーバについて、連続レビューウインドウは情報を次のように表示します。なお、FLYTOマヌーバについての表示は、飛行レビューウインドウの場合と同様に積分ステップごとに行われます。

* 3D 軌道ウインドウに、
  + 探査機（現在のマヌーバの行番号とタイプが付記される）
  + FLYTOマヌーバに対しては、
    - FLTYOマヌーバの開始（Start）と終了（End）
    - 電気推進エンジンの状態 (\*1)
    - ソーラーセイルによる加速とその状態 (\*2)
  + 探査機の経路と軌道
  + ターゲットとその軌道
  + 惑星の位置と名称
* 連続レビューウインドウ自身に、
  + ターゲットの相対位置と相対速度（視線速度を含む）

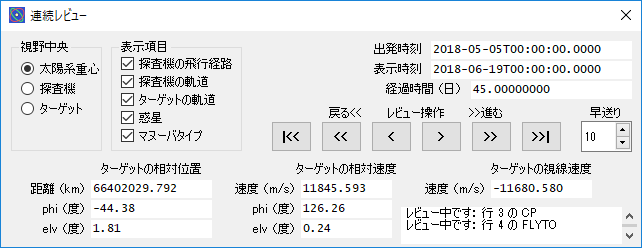
(\*1) 電気推進エンジンがオンになっている場合、「EP(m)」という文字列が3D 軌道ウインドウの探査機の右に表示されます。ここで「EP(m)」の「m」は電気推進エンジンの推力方向モードの値（LまたはE）です。

(\*2) ソーラーセイルがオンになっている場合、「SS(m) SSacc=n.nnn」という文字列が3D 軌道ウインドウの探査機の右に表示されます。ここで「SS(m)」の「m」はその時点でのソーラーセイルの推力方向モードの値（LまたはE）です。「SSacc=n.nnn」の「n.nnn」はその瞬間におけるソーラーセイルによる加速度の大きさ（1日運用した場合の速度変化の大きさ。単位はメートル／秒／日）です。

連続レビューウインドウは、ある時点では一つのマヌーバに関する情報を表示します。このマヌーバのことを「現在のマヌーバ」と呼びます。

FLYTOマヌーバの場合を除くと、連続レビューウインドウに表示されるのは「現在のマヌーバ」の実行が終了した直後の情報です。FLYTOマヌーバについては、そのマヌーバの実行の途中の各積分ステップにおける情報が表示されます。

連続レビューウインドウは、利用者がSSVGウインドウの「連続レビュー」ボタンをクリックしたときに表示されます。



図－　連続レビューウインドウ

連続レビューウインドウの上部には以下の4個のグループがあります。

* 視野中央：3次元の図の中央を指定するラジオボタン（3個）
* 表示項目：3次元の図にアイテムを表示する／しないを指定するチェックボックス（5個）
* 時刻情報（右上隅の3行）
* レビュー操作：現在のマヌーバと現在の積分ステップを操作するボタン（6個）とスピンボックス

表－ 連続レビューウインドウの上部にあるグループ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル／名前 | 説明 |
| 視野中央 | 太陽系重心 | 選択すると3次元の図の中央が太陽系重心になります。 |
| 探査機 | 選択すると3次元の図の中央が探査機になります。 |
| ターゲット | 選択すると3次元の図の中央がターゲットになります。 |
| 表示項目 | 探査機の飛行経路 | チェックすると3次元の図に実行済みのマヌーバによって探査機が飛行した経路が青線で表示されます。 |
| 探査機の軌道 | チェックすると3次元の図にその瞬間における探査機の軌道が赤線で表示されます。 |
| ターゲットの軌道 | チェックすると3次元の図にマヌーバ開始時刻におけるターゲットの軌道が緑線で表示されます。 |
| 惑星 | チェックすると3次元の図に惑星の位置と名前が表示されます。 |
| マヌーバタイプ | チェックすると3次元の図の探査機（赤の×）の右にレビュー中のマヌーバのタイプが表示されます。(\*) |
| （名前なし）  時刻情報 | 出発時刻 | 飛行計画の出発時刻がここに表示されます。 |
| 表示時刻 | 現在のマヌーバの時刻がここに表示されます。FLYTOマヌーバのレビュー中は現在の積分ステップの時刻が表示されます。 |
| 経過時間（日） | 経過時間（探査機の出発からレビュー中の時刻まで）がここに表示されます。単位は「日」です。 |
| レビュー操作 | [ **|<<** ] ボタン | 前のマヌーバ。クリックすると現在のマヌーバがひとつ前に戻ります。（FLYTOマヌーバの飛行の途中に限り、現在の積分ステップがその飛行の先頭に移動します） |
| [ **<<** ] ボタン | 高速逆行。クリックすると「早送りの指定」で指定したステップ数だけ現在の積分ステップが戻ります。（FLYTOマヌーバのレビュー中のみ） |
| [ **<** ] ボタン | 逆行。クリックすると1ステップだけ現在の積分ステップが戻ります。（FLYTOマヌーバのレビュー中のみ） |
| [ **>** ] ボタン | 順行。クリックすると1ステップだけ現在の積分ステップが進みます。（FLYTOマヌーバのレビュー中のみ） |
| [ **>>** ] ボタン | 高速順行。クリックすると「早送りの指定」で指定したステップ数だけ現在の積分ステップが進みます。（FLYTOマヌーバのレビュー中のみ） |
| [ **>>|** ] ボタン | 次のマヌーバ。クリックすると現在のマヌーバがひとつ進みます。（FLYTOマヌーバの飛行の途中に限り、現在の積分ステップがその飛行の最後に移動します） |
| 早送り スピンボックス | 高速操作ボタン（[ **<<** ] または [ **>>** ]）をクリックしたときに変化させる積分ステップ数を指定します。（FLYTOマヌーバのレビュー中のみ） |

(\*) FLYTOマヌーバのレビュー中はFLYTOの右に以下の文字が表示されることがあります。

EP(m)：電気推進エンジンがオンの場合に表示されます。mは推力方向モードの値で、LまたはEです。

SS(m) SSAcc=n.nnn：ソーラーセイルがオンの場合に表示されます。mは推力方向モードの値で、LまたはEです。n.nnnはソーラーセイルによる加速度の大きさで、値は1日当たりの速度変化量（メートル／秒／日）です。

連続レビューウインドウの下部には、レビュー中の時刻（現在のマヌーバの実行時刻。FLYTOマヌーバのレビュー中は現在の積分ステップの時刻）における探査機に対するターゲットの相対位置や相対速度が表示されます。項目とその意味は軌道表示ウインドウと同じです。表－12　軌道表示ウインドウの下部にあるグループを参照してください。

また連続レビューウインドウの右下隅にはメッセージ表示領域があり、SSVGの動作状況などが順次表示されます。

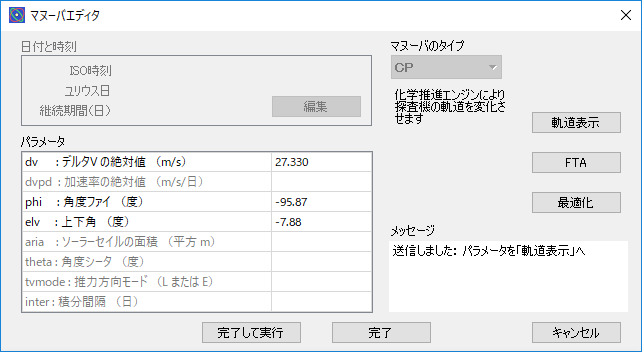
### マヌーバエディタ

マヌーバエディタはマヌーバの編集を行うウインドウです。

マヌーバエディタは以下のいずれかの操作を行うと表示されます。

* SSVGウインドウの「Next編集」ボタンをクリックする
* SSVGウインドウの「\* 編集」ボタンをクリックする
* SSVGウインドウにあるマヌーバ表の行をダブルクリックする

**【重要】**マヌーバエディタは、Next行（SSVGウインドウのマヌーバ表で、右端の列に「Next」の表示がある行）を編集する場合に限ってすべての機能を利用できます。またNext行の編集を開始すると軌道表示ウインドウが表示され、3D 軌道ウインドウで2体問題軌道や予測位置を参照することができます。以下の説明はNext行の編集中であることを前提にしています。



図－　マヌーバエディタ

マヌーバエディタにあるグループ、表、およびボタンについて次の表で説明します。

表－　マヌーバエディタのグループ、表、ボタン

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ／  表／ボタン | 関係するマヌーバのタイプ | 説明 |
| マヌーバのタイプ  （ドロップダウンリスト） | 全タイプ | ドロップダウンリストに編集中のマヌーバのタイプが表示されます。  マヌーバ表の空白行（第1行を除く）の編集を開始したときはマヌーバのタイプは表示されません。ドロップダウンリストをクリックしてマヌーバのタイプを選択します。  タイプを選択ずみのマヌーバを再編集してマヌーバのタイプを変更することはできません。 |
| 出発時刻  （テキストフィールドと [編集] ボタン）  または  終了時刻  （テキストフィールドと [編集] ボタン） | START | 探査機の現在の出発時刻をISO時刻とユリウス日で表示します。  [編集] ボタンをクリックすることにより出発時刻を変更することができます。(\*1)　変更後の時刻は直ちに軌道表示ウインドウと3次元の図に反映されます（一時的な反映です）。 |
| FLYTO | 編集中のFLYTOマヌーバの終了時刻および継続期間 (\*2)を表示します。終了時刻はISO時刻とユリウス日で表示します。  [編集] ボタンをクリックすることにより終了時刻および継続期間を変更することができます。(\*1)　変更後の時刻は直ちに軌道表示ウインドウおよび3次元の図に反映されます（一時的な反映です）。  終了時刻と継続期間は軌道表示ウインドウから変更することもできます。軌道表示ウインドウで予測時刻を変更するとその時刻は直ちに編集中のFLYTOマヌーバの終了時刻と継続期間に反映されます。 |
| パラメータ  （表） | 全タイプ | 編集中のマヌーバの、日付と時刻以外のすべてのパラメータを表示します。左側のカラムはパラメータの名称と簡単な説明です。右側のカラムはパラメータの値です。詳細は次の表を見てください。  値を含むセル（欄）をダブルクリックすることによりパラメータの値を変更することができます。 |
| [軌道表示] ボタン | 全タイプ | クリックすると、SSVGは編集中のパラメータを一時的に軌道表示ウインドウおよび3次元の図に反映させます。  電気推進エンジンとソーラーセイルのパラメータは3次元の図の探査機の軌道には反映されません。これらのパラメータはFLYTOマヌーバを実行したときに探査機の軌道の変化として効果を表します。 |
| [FTA] ボタン | START  CP | クリックすると、SSVGはマヌーバの編集を支援するFTA機能を呼び出します。(\*3) 詳細はFTA設定ウインドウを見てください。 |
| [最適化] ボタン | START  CP | クリックすると、SSVGはマヌーバの編集を支援する最適化アシスタントを呼び出します。詳細は最適化アシスタント（STARTマヌーバ）または最適化アシスタント（CPマヌーバ）を見てください。 |
| メッセージ  （テキストフィールド） | 全タイプ | SSVGの動作状況などが順次表示されます。 |
| [完了して実行] ボタン | 全タイプ | クリックすると、SSVGは編集中のマヌーバをマヌーバ表に保存し、このウインドウを閉じ、そのマヌーバを実行します。 |
| [完了] ボタン | 全タイプ | クリックすると、SSVGは編集中のマヌーバをマヌーバ表に保存し、このウインドウを閉じます。 |
| [キャンセル] ボタン | 全タイプ | クリックすると、SSVGはマヌーバの編集をキャンセルします。マヌーバ表は変更されません。 |

(\*1) [編集] ボタンをクリックするとダイアログが現れ、ISO時刻、ユリウス日、または継続期間（Next行のFLYTOマヌーバを編集中の場合）のいずれかを編集することができます。編集された値は他の項目にも反映されます。

(\*2) 編集中のFLYTOマヌーバの継続期間はSSVGの現在時刻と編集中のFLYTOマヌーバの終了時刻から計算されます。継続期間の値を編集した場合は継続期間とSSVGの現在時刻から終了時刻が計算されます。

(\*3) この時点でSSVGは軌道表示ウインドウから「経過時間」を取り込んでFTA設定ウインドウに渡します。FTA 設定ウインドウはその値を「飛行時間」として使用します。

パラメータの表に設定する内容は次の表のとおりです。

表－ マヌーバエディタのパラメータ

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| パラメータ名 | 関連マヌーバタイプ | 桁数の上限(\*1) | 説明 |
| dv | START  CP | 3 | 速度変化（デルタV）の絶対値（大きさ）を指定します。「速度変化量」と呼ぶことがあります。単位はメートル／秒です。 |
| dvpd | EP\_ON | 3 | 電気推進エンジンの加速率を指定します。電気推進エンジンをちょうど1日運転した場合の速度変化（デルタV）の絶対値（大きさ）です。単位はメートル／秒／日です。 |
| phi | START  CP  EP\_ON | 2 | 速度変化（デルタV）の方向を与えるphi（角度ファイ）を指定します。単位は度です。定義は軌道ローカル座標系を参照してください。 |
| elv | START  CP  EP\_ON  SS\_ON | 2 | 速度変化（デルタV）の方向を与えるelv（上下角）を指定します。単位は度です。定義は軌道ローカル座標系を参照してください。ソーラーセイルの方向を与えるのにも使用します。ソーラーセイル座標系を参照してください。 |
| aria | SS\_ON | 1 | ソーラーセイルの面積を指定します。単位は平方メートルです。  初期値として10000（1万平方メートル）が設定されます。 |
| theta | SS\_ON | 2 | ソーラーセイルの方向を与えるtheta（角度シータ）を指定します。単位は度です。定義はソーラーセイル座標系を参照してください。  初期値として35.26度が設定されます。この値の意味はソーラーセイルを参照してください。 |
| tvmode | EP\_ON  SS\_ON | （対象外） | 推力方向モードを指定します。値は英文字の「L」または「E」です。詳細は推力方向モードを参照してください。 |
| inter | FLYTO | 5 | 数値積分の積分ステップの長さ（積分間隔）を指定します。単位は日です。探査機の位置・速度はこの間隔で計算され、記録されます。(\*2)  この値は0.00001以上の正の値でなければなりません。 |

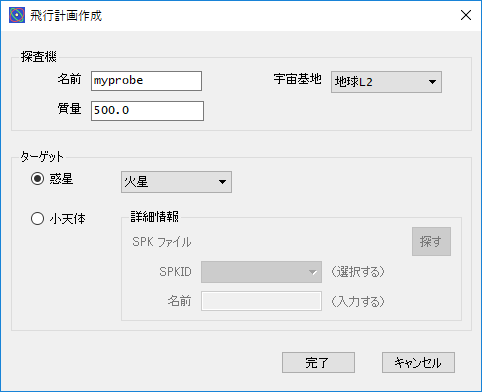
(\*1) パラメータの値に指定できる小数点以下の桁数です。この値を超える桁数の数値を指定した場合、表にある桁数になるように丸められます。

(\*2) interに小さな値を指定する場合は注意が必要です。interが小さな値（例えば0.001日）を継続期間100日のFLYTOマヌーバに指定した場合、マヌーバの実行には長い時間が必要です。

### 飛行計画作成ウインドウ

飛行計画作成ウインドウは、新しい飛行計画の情報を設定するウインドウです。

このウインドウは、SSVGウインドウのメニューで「ファイル」をクリックし、「新規（N）」を実行すると表示されます。



図－　飛行計画作成ウインドウ

飛行計画作成ウインドウにはふたつの設定項目のグループがあります。探査機とターゲットです。ターゲットのグループは「詳細情報」というサブグループを持っています。また、グループに属さないボタンもあります。次の表ですべてを説明します。

表－　飛行計画作成ウインドウのグループと項目

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル／名前 | | 説明 | |
| 探査機 | 名前  （入力フィールド） | | 探査機の名前を入力してください。 | |
| 宇宙基地  （ドロップダウンリスト） | | ドロップダウンリストで宇宙基地を選択してください。  （詳細は宇宙基地を参照してください） | |
| 質量  （入力フィールド） | | 探査機の総質量を入力してください。単位はキログラムです。 | |
| ターゲット | 惑星  （ラジオボタンとドロップダウンリスト） | | 選択するとドロップダウンリストからターゲットを選択できます。ドロップダウンリストには8個の惑星と地球の月、冥王星（準惑星）が含まれています。 | |
| 小天体  （ラジオボタンとサブグループ） | | 選択すると太陽系の小天体をターゲットとして選択できます。選択するにはその天体のSPKファイルが必要で、しかもその天体の詳細情報を設定する必要があります。 | |
| 詳細情報 | SPK ファイル  （テキストフィールドと[探す]ボタン） | | [探す] ボタンをクリックし、小天体のSPKファイル (\*1) を開いてください。 |
| SPKID  （ドロップダウンリスト） | | SPKIDを確認してください。またはドロップダウンリストをクリックして適切なSPKIDを選択してください。(\*2) |
| 名前  （入力フィールド） | | 小天体の名称を入力してください。 |
| （なし） | [完了] ボタン | | クリックするとSSVGは新しい飛行計画を作成します。作成されるのはマヌーバのない、空の飛行計画です。 | |
| [キャンセル] ボタン | | クリックするとSSVGは新しい飛行計画の作成をキャンセルします。SSVGの状態は変化しません。 | |

(\*1) 前もって小天体のSPKファイルを入手するを参照して小天体のSPKファイルを入手し、そのSPKファイルをSSVGがインストールされているフォルダの中にあるSSVG\_dataフォルダに格納しておいてください。

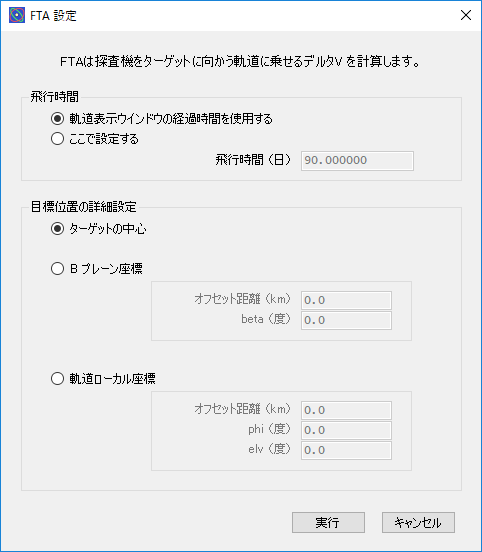
(\*2) 通常であればひとつのSPKファイルはひとつの小天体のデータだけを含みますから、選択したい天体であることをSPKIDで確認すれば充分です。しかしながら、複数の小天体のデータを含むSPKファイルを入手することもできます。その場合は希望する天体のSPKIDをドロップダウリストで選択する必要があります。

### FTA設定ウインドウ

FTA 設定ウインドウでは、SSVGのFTA機能のパラメータを設定します。

FTAはFixed Time Arrival guidance（時間を固定した到着誘導）の頭文字を取ったものです。SSVGのFTA機能は、ターゲットの近傍にある目標位置に、指定された時間の飛行の後に、2体問題軌道で到着するためのマヌーバ（STARTマヌーバまたはCPマヌーバ）のパラメータを計算します。

FTA設定ウインドウはマヌーバエディタでSTARTマヌーバまたはCPマヌーバの編集中に、[FTA] ボタンをクリックすると表示されます。



図－　FTA 設定ウインドウ

FTA 設定ウインドウには2個のグループと2個のボタンがあります。

表－　FTA設定ウインドウのグループと項目

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル／名前 | | 説明 |
| 飛行時間 | 軌道表示ウインドウの経過時間を使用する  （ラジオボタン） | | 選択すると、SSVGは軌道表示ウインドウの経過時間を取り込んでそれを飛行時間とします。 |
| ここで設定する  （ラジオボタン） | | 選択すると、飛行時間を入力フィールドに設定することができます。 |
| 飛行時間（日）  （入力フィールド） | | 飛行時間がここに表示されます。または、飛行時間をここに設定します。単位は日です。  この値は1.0以上でなければなりません。 |
| 目標位置の詳細設定 | ターゲットの中心  （ラジオボタン） | | 選択すると、ターゲットの中心が目標位置になります。 |
| Bプレーン座標  （ラジオボタン） | | 選択すると、目標位置をBプレーン座標で指定することができます。詳細はBプレーン座標系を見てください。 |
| サブグループ | オフセット距離（km）  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット中心からのずれ（オフセット距離）を入力します。単位はキロメートルです。 |
| beta（度）  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット中心からの方向を指定するbeta（角度ベータ）を入力します。単位は度です。 |
| 軌道ローカル座標  （ラジオボタン） | | 選択すると、目標位置をターゲットから見た軌道ローカル座標で指定することができます。詳細は軌道ローカル座標系を見てください。 |
| サブグループ | オフセット距離（km）  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット中心からのずれ（オフセット距離）を入力します。単位はキロメートルです。 |
| phi（度）  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット中心から見た角度phi（ファイ）を指定します。単位は度です。 |
| elv（度）  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット中心から見た角度elv（上下角）を指定します。単位は度です。 |
| （なし） | [実行] ボタン | | クリックすると、SSVGはFTA機能を実行し、その結果をマヌーバエディタに反映させます。(\*) |
| [キャンセル] ボタン | | クリックすると、SSVGはFTA機能をキャンセルします。 |

(\*) 結果とはdv、phi、elvです。SSVGはそれらをマヌーバエディタのパラメータの表に設定します。この時点でSSVGは結果を以下のように丸めます。

* dv：小数点以下3桁に丸めます
* phi、elv：小数点以下2桁に丸めます

### 最適化アシスタント（STARTマヌーバ）

最適化アシスタント（STARTマヌーバ）は、探査機をターゲットに直接向かう軌道に送り出すSTARTマヌーバの作成を支援します。

宇宙飛行の経済性（効率）を考えるとき、このようなSTARTマヌーバではふたつのパラメータが重要です。それは探査機の出発時刻（日時）と、探査機の飛行時間（出発から到着までの日数）です。最適化アシスタント（STARTマヌーバ）を使うと、利用者は様々な出発時刻と飛行時間を試すことができます。各々のケースについて、現在の出発時刻と現在の飛行時間を用いて、SSVGは探査機の2体問題軌道を計算します。そして探査機の出発速度と、到着時のターゲットの相対速度を表示し、同時に探査機の2体問題軌道を3D 軌道ウインドウに3次元の図として表示します。

なお、この項で「現在の～」と書く場合、それは「このウインドウで現在試している～」の意味です。

最適化アシスタント（STARTマヌーバ）は、STARTマヌーバを編集しているマヌーバエディタで利用者が「最適化」ボタンをクリックした場合に表示されます。



図－　最適化アシスタント（STARTマヌーバ）

このウインドウの上端付近には、オプションを指定するグループがひとつあります。

表－　最適化アシスタント（STARTマヌーバ）のオプション

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル | 説明 |
| 表示する軌道 | 宇宙基地  （チェックボックス） | チェックすると3次元の図に宇宙基地の経路が表示されます。（赤色の曲線） |
| ターゲット  （チェックボックス） | チェックすると3次元の図にターゲットの2体問題軌道が表示されます。（緑色の曲線） |
| 現在の軌道  （チェックボックス） | チェックすると3次元の図に探査機の現在の2体問題軌道が表示されます。（水色の曲線） |

このウインドウの中央付近には出発時刻と飛行時間を調整するためのふたつのグループがあります。

表－　出発時刻と飛行時間の調整

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル／名前 | | | 説明 |
| 出発時刻の調整 | 出発時刻  （テキストフィールド） | | | SSVGが現在の出発時刻を表示します。 |
| （スライダ） | | | ハンドル（つまみ）をドラッグすると出発時刻が変化します。 |
| 範囲シフト  ボタン | | [**<<<**] | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が過去に向かってその幅の半分だけシフトします。 |
| [**>>>**] | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が未来に向かってその幅の半分だけシフトします。 |
| スライダ 微調整ボタン | | [ **<** ] | クリックするとハンドルが1ピクセル左に動きます。 |
| [ **>** ] | クリックするとハンドルが1ピクセル右に動きます。 |
| スライダの値の幅 | | 広い（500日）  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダの値の幅が500日になります。 |
| 狭い（100日）（ラジオボタン） | 選択すると、スライダの値の幅が100日になります。 |
| 飛行時間の調整 | 飛行時間（日）  （テキストフィールド） | | | SSVGが現在の飛行時間を表示します。 |
| 到着時刻  （テキストフィールド） | | | SSVGが現在の到着時刻を表示します。 |
| （スライダ） | | | ハンドル（つまみ）をドラッグすると現在の飛行時間および到着時刻が変化します。 |
| 範囲シフト  ボタン | [**<<<**] | | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が値の小さくなる方向に（または過去に向かって）その幅の半分だけシフトします。 |
| [**>>>**] | | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が値の大きくなる方向に（または未来に向かって）その幅の半分だけシフトします。 |
| スライダ 微調整ボタン | [ **<** ] | | クリックするとハンドルが1ピクセル左に動きます。 |
| [ **>** ] | | クリックするとハンドルが1ピクセル右に動きます。 |
| スライダで設定するのは | 飛行時間  （ラジオボタン） | | 選択すると、このグループのスライダは飛行時間を設定します。この状態で現在の出発時刻を変化させると、飛行時間は変化しませんが、到着時刻が変化します。 |
| 到着時刻  （ラジオボタン） | | 選択すると、このグループのスライダは到着時刻を設定します。飛行時間は出発時刻と到着時刻から計算します。この状態で現在の出発時刻を変化させると、到着時刻は変化しませんが、飛行時間が変化します。 |
| スライダの値の幅 | 広い（500日）  （ラジオボタン） | | 選択すると、スライダの値の幅が500日になります。 |
| 狭い（100日）（ラジオボタン） | | 選択すると、スライダの値の幅が100日になります。 |

このウインドウの下部には3個のグループと複数のボタンがあります。また右下にはメッセージ表示領域があります。

表－　最適化アシスタント（STARTマヌーバ）の下部にあるグループとボタン

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル／名前 | 説明 |
| デルタV（m/s） | 現在の軌道 | 探査機の現在の出発速度の絶対値が表示されます。単位はメートル／秒です。 |
| 最小値 | 出発速度の絶対値のここまでの最小値が表示されます。 |
| phi（度） | 探査機の現在の出発速度のphi（角度ファイ）が表示されます。単位は度です。軌道ローカル座標系を見てください。 |
| elv（度） | 探査機の現在の出発速度のelv（上下角）が表示されます。単位は度です。軌道ローカル座標系を見てください。 |
| 到着時の相対速度（m/s） | 現在の軌道 | 探査機が現在の2体問題軌道でターゲットに到着したときの、ターゲットの相対速度の絶対値が表示されます。単位はメートル／秒です。 |
| 最小値 | 相対速度の絶対値のここまでの最小値が表示されます。 |
| 合計（デルタV＋相対速度） | 現在の軌道 | 出発速度の絶対値と相対速度の絶対値の合計がここに表示されます。 |
| 最小値 | 合計の値のここまでの最小値が表示されます。 |
| （なし） | [最小値クリア] ボタン | クリックすると最小値がすべてクリアされます。 |
| （メッセージ表示領域） | SSVGの動作状況などが順次表示されます。 |
| [3D軌道再表示] ボタン | クリックすると3D 軌道ウインドウが存在しない場合は再表示されます。 |
| [完了] ボタン | クリックするとSSVGは現在の出発時刻と出発速度をマヌーバエディタに反映し、このウインドウを閉じます。 |
| [キャンセル] ボタン | クリックするとSSVGはこのウインドウを閉じます。 |

### 最適化アシスタント（CPマヌーバ）

最適化アシスタント（CPマヌーバ）は、飛行中の探査機をターゲットに向かう軌道に乗せる軌道変更を行うCPマヌーバの作成を支援します。

宇宙飛行の経済性（効率）を考えるとき、このケースでもふたつのパラメータが重要です。それは、探査機のマヌーバ時刻（日時）と、探査機の飛行時間（軌道変更から到着までの日数）です。最適化アシスタント（CPマヌーバ）を使うと、利用者は様々なマヌーバ時刻と飛行時間を試すことができます。各々のケースについて、現在のマヌーバ時刻と現在の飛行時間を用いて、SSVGは探査機の2体問題軌道を計算します。そして探査機の軌道変更における速度変化の大きさと到着時のターゲットの相対速度を表示し、同時に探査機の2体問題軌道を3D 軌道ウインドウに3次元の図として表示します。

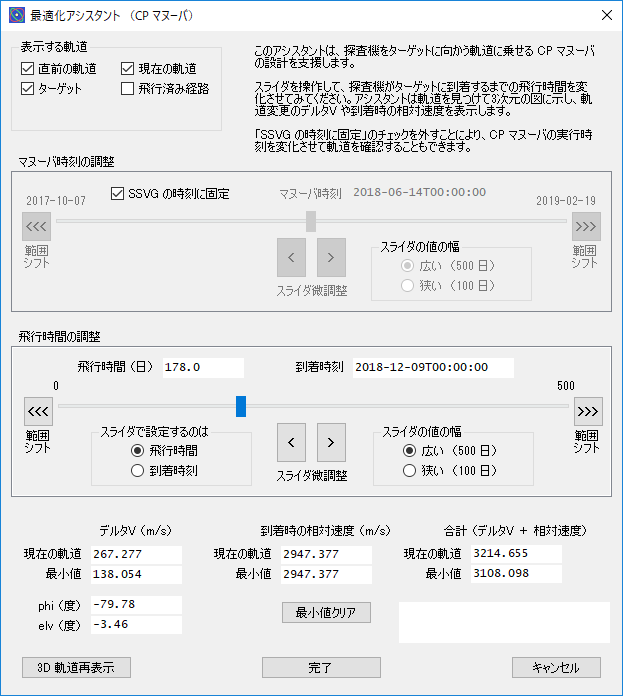
最適化アシスタント（CPマヌーバ）では様々なマヌーバ時刻と飛行時間を試すことができるのですが、マヌーバ時刻については以下の注意が必要です。

* マヌーバ時刻を変化させたとしても、そのマヌーバ時刻は編集中のCPマヌーバには適用されません。マヌーバ時刻を変化させた場合は、編集中のCPマヌーバの直前に実行されたFLYTOマヌーバの終了時刻（またはSTARTマヌーバの出発時刻）を別途変更する必要があります。
* マヌーバ時刻を変化させる場合、SSVGは探査機が2体問題に従って運動していることを仮定しています。したがって、電気推進エンジンまたはソーラーセイルがオンになっているなど探査機の運動が2体問題軌道から有意にずれるような場合には、最適化アシスタント（CPマヌーバ）は適切な支援を行えない可能性があります。

このような注意が必要であることから、最適化アシスタント（CPマヌーバ）はマヌーバ時刻を変化させない状態を初期状態にしています。

なお、この項で「現在の～」と書く場合、それは「このウインドウで現在試している～」の意味です。別の意味で使う場合はそのことを明示します。

最適化アシスタント（CPマヌーバ）は、CPマヌーバを編集しているマヌーバエディタで利用者が「最適化」ボタンをクリックした場合に表示されます。



図－　最適化アシスタント（CPマヌーバ）

このウインドウの上部には、オプションを指定するグループがひとつあります。

表－　最適化アシスタント（CPマヌーバ）のオプション

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル | 説明 |
| 表示する軌道 | 直前の軌道  （チェックボックス） | チェックすると3次元の図に軌道変更前の探査機の2体問題軌道が表示されます。（赤色の曲線） |
| ターゲット  （チェックボックス） | チェックすると3次元の図にターゲットの2体問題軌道が表示されます。（緑色の曲線） |
| 現在の軌道  （チェックボックス） | チェックすると3次元の図に探査機の現在の2体問題軌道が表示されます。（水色の曲線） |
| 飛行済み経路  （チェックボックス） | チェックすると3次元の図に探査機の過去の飛行経路が表示されます。（青色の曲線） |

このウインドウの中央付近にはマヌーバ時刻と飛行時間を調整するためのふたつのグループがあります。

表－　マヌーバ時刻と飛行時間の調整

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル／名前 | | 説明 |
| マヌーバ時刻の調整 | SSVGの時刻に固定  （チェックボックス） | | チェックすると、SSVGの時刻をマヌーバ時刻として使用します。利用者はマヌーバ時刻を変更できなくなります。 |
| マヌーバ時刻  （テキストフィールド） | | SSVGが現在のマヌーバ時刻を表示します。 |
| （スライダ） | | ハンドル（つまみ）をドラッグするとマヌーバ時刻が変化します。 |
| 範囲シフト  ボタン | [**<<<**] | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が過去に向かってその幅の半分だけシフトします。 |
| [**>>>**] | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が未来に向かってその幅の半分だけシフトします。 |
| スライダ 微調整ボタン | [ **<** ] | クリックするとハンドルが1ピクセル左に動きます。 |
| [ **>** ] | クリックするとハンドルが1ピクセル右に動きます。 |
| スライダの 値の幅 | 広い（500日）  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダの値の幅が500日になります。 |
| 狭い（100日）（ラジオボタン） | 選択すると、スライダの値の幅が100日になります。 |
| 飛行時間の調整 | 飛行時間（日）  （テキストフィールド） | | SSVGが現在の飛行時間を表示します。 |
| 到着時刻  （テキストフィールド） | | SSVGが現在の到着時刻を表示します。 |
| （スライダ） | | ハンドル（つまみ）をドラッグすると現在の飛行時間および到着時刻が変化します。 |
| 範囲シフト  ボタン | [**<<<**] | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が値の小さくなる方向に（または過去に向かって）その幅の半分だけシフトします。 |
| [**>>>**] | クリックすると、スライダの範囲（上限と下限）が値の大きくなる方向に（または未来に向かって）その幅の半分だけシフトします。 |
| スライダ 微調整ボタン | [ **<** ] | クリックするとハンドルが1ピクセル左に動きます。 |
| [ **>** ] | クリックするとハンドルが1ピクセル右に動きます。 |
| スライダで 設定するの は | 飛行時間  （ラジオボタン） | 選択すると、このグループのスライダは飛行時間を設定します。この状態で現在のマヌーバ時刻を変化させると、飛行時間は変化しませんが、到着時刻が変化します。 |
| 到着時刻  （ラジオボタン） | 選択すると、このグループのスライダは到着時刻を設定します。飛行時間はマヌーバ時刻と到着時刻から計算します。この状態で現在のマヌーバ時刻を変化させると、到着時刻は変化しませんが、飛行時間が変化します。 |
| スライダの 値の幅 | 広い（500日）  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダの値の幅が500日になります。 |
| 狭い（100日）（ラジオボタン） | 選択すると、スライダの値の幅が100日になります。 |

このウインドウの下部には3個のグループと複数のボタンがあります。

表－　最適化アシスタント（CPマヌーバ）の下部にあるグループとボタン

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル／名前 | 説明 |
| デルタV（m/s） | 現在の軌道 | 探査機の現在のデルタV（CPマヌーバによる速度変化）の絶対値が表示されます。単位はメートル／秒です。 |
| 最小値 | 速度変化の絶対値のここまでの最小値が表示されます。 |
| phi（度） | 探査機の現在のデルタVのphi（角度ファイ）が表示されます。単位は度です。軌道ローカル座標系を見てください。 |
| elv（度） | 探査機の現在のデルタVのelv（上下角）が表示されます。単位は度です。軌道ローカル座標系を見てください。 |
| 到着時の相対速度（m/s） | 現在の軌道 | 探査機が現在の2体問題軌道でターゲットに到着したときの、ターゲットの相対速度の絶対値が表示されます。単位はメートル／秒です。 |
| 最小値 | 相対速度の絶対値のここまでの最小値が表示されます。 |
| 合計（デルタV＋相対速度） | 現在の軌道 | デルタVの絶対値と相対速度の絶対値の合計がここに表示されます。 |
| 最小値 | 合計の値のここまでの最小値が表示されます。 |
| （なし） | [最小値クリア] ボタン | クリックすると最小値がすべてクリアされます。 |
| （メッセージ表示領域） | SSVGの動作状況などが順次表示されます。 |
| [3D軌道再表示] ボタン | クリックすると3D 軌道ウインドウが存在しない場合は再表示されます。 |
| [完了] ボタン | クリックするとSSVGは現在の軌道変更の速度変化をマヌーバエディタに反映し、このウインドウを閉じます。(\*) |
| [キャンセル] ボタン | クリックするとSSVGはこのウインドウを閉じます。 |

(\*)**【重要】**マヌーバ時刻を変化させたとしても、そのマヌーバ時刻は編集中のマヌーバには反映されませんし、他のどのマヌーバにも反映されません。そのマヌーバ時刻を使用したい場合は、編集中のマヌーバの直前に実行されるFLYTOマヌーバまたはSTARTマヌーバを編集して、編集中のCPマヌーバが正しい時刻に実行されるよう飛行計画を再構成する必要があります。この時点でSSVGは新しいマヌーバ時刻（ISO時刻の形式）をクリップボードにコピーしますから、それを飛行計画の再構成に利用することができます。

## 座標系

### 黄道座標系

SSVGの黄道座標系は、太陽系に固定された直交座標系であり、近似的に慣性系と考えることができる座標系です。各座標軸（X、Y、Z）の原点はSSB（太陽系重心）にあります。X-Y面は黄道面、つまり太陽に対する地球の公転面に平行です。X軸の方向は、春分点方向です。Z軸は黄道面に垂直で、北方を向いています。X、Y、Zの各軸はこの順に右手系を構成します。黄道面と春分点方向については、SSVGはJ2000系を使用します。

### 軌道ローカル座標系

SSVGの軌道ローカル座標系は、太陽の周囲を公転する物体に対して定義されます。この「物体」には探査機や宇宙基地、ターゲットを含みます。軌道ローカル座標系は、ひとつの物体に固定された直交座標系です。

座標系の各軸（X、Y、Z）の原点は物体の中心です。その物体の軌道面がX-Y平面を定義します。その物体の速度ベクトル（太陽に対する相対速度のベクトル）がX軸を定義します。Y軸は軌道面上にあり、太陽に近づく方向を向いています。Z軸は軌道面に垂直で、X、Y、Zの順に右手系を構成します。

軌道ローカル座標系のX軸は、その物体の2体問題軌道の現在位置における接線に一致することを覚えておくと役に立つでしょう。

X軸：物体の速度ベクトルの向き

Y軸：物体の軌道面上にあって太陽に近づく向き

Z軸：物体の軌道面に垂直

図－　軌道ローカル座標系の定義

次の図は軌道ローカル座標系におけるベクトルVの極座標表現（r、phi、elv）を示しています。ベクトルVの先端からX-Y平面に垂線を下ろし、その足をHとします。phiはX軸と線分OHのなす角で、X軸からY軸の方向に測ります。elvは線分OHとベクトルVのなす角で、VがZ軸の正の側にあるときに正の値を取ります。

X軸

Y軸

Z軸

phi

elv

V : (r, phi, elv)

r

図－　軌道ローカル座標系の極座標表現

r ：長さ、絶対値

phi ：角度ファイ

elv ：上下角

H

O

### ソーラーセイル座標系

SSVGのソーラーセイル座標系は、太陽の周囲を公転している探査機に対して定義されます。ソーラーセイル座標系は、探査機に固定された直交座標系です。

座標軸（X、Y、Z）の原点は探査機の中心です。探査機の軌道面がX-Y平面を定義し、探査機の太陽から見た位置ベクトルがX軸を定義します。Y軸は軌道面上にあり、探査機の運動方向を向いています。Z軸は軌道面に垂直であり、X、Y、Zの順に右手系を構成します。

X軸：探査機の位置ベクトル

（太陽から見たもの）

Y軸：探査機の軌道面内で、探査機の運動方向を向く

Z軸：探査機の軌道面に垂直

（右手系を構成）

図－　ソーラーセイル座標系の定義

SSVGでは、ソーラーセイルの向きをセイル面に垂直な単位ベクトルを使用して定義します。この単位ベクトルはふたつの方向を持つことができます。SSVGのソーラーセイルは両面鏡ですのでこのふたつの方向は同等ですが、ここでは太陽から遠ざかる方向のものを定義に使用します。

次の図はソーラーセイル座標系における単位ベクトルUVの極座標表現を示します。単位ベクトルUVの先端からX-Y平面に垂線を下ろし、その足をHとします。thetaはX軸と線分OHのなす角で、X軸からY軸の方向に測ります。elvは線分OHと単位ベクトルUVのなす角で、UVがZ軸の正の側にあるときに正の値を取ります。

X軸

Y軸

Z軸

theta

elv

UV : (theta, elv)

図－　ソーラーセイル座標系の極座標表現

theta：角度シータ

elv ：上下角

1

O

H

### Bプレーン座標系

SSVGにおけるBプレーン座標系は、太陽の周囲を公転するターゲットと、その近傍を通り過ぎる探査機に対して定義されます。Bプレーン座標系はターゲットに固定された直交座標系です。

ターゲットと、探査機の太陽に対する2体問題軌道に対し、以下のものを定義します。

* 探査機の相対運動：ターゲットから見た探査機の動き（2体問題軌道による運動）
* B点：探査機の相対運動の、ターゲットへの最近点
* 相対速度：B点における探査機の相対運動の速度

座標軸（R、S、T）の原点はターゲットの中心です。相対速度のベクトルがS軸を定義します。T-R面はS軸に垂直で、T軸はターゲットの軌道面内にあります。T軸の方向としては互いに逆向きの2方向が考えられますが、ここでは次のベクトル積で表現される方向を選択します。

ただし、

、 ： それぞれT軸上、およびS軸上のベクトル

：ターゲットの角運動量ベクトル（ターゲットの軌道面に垂直なベクトル。ターゲットが太陽の周囲を順行する場合、このベクトルは黄道面の北側を向く）

SSVGでは、このBプレーン座標系をFTA機能における目標位置の指定に使用します（FTA設定ウインドウを見てください）。目標位置（B点）はT-R平面上にありますから、この目的のためには、ふたつのパラメータ、つまりbeta（角度ベータ）とd（オフセット距離）を指定すれば十分です。なお、このT-R平面のことを「Bプレーン」と呼びます。次の図はBプレーン座標系とふたつのパラメータを示します。

**B-plane**

R

S

T

beta

d

B点

探査機の相対運動

ターゲット

**B-plane**

R

S

T

beta

d

B点

探査機の相対運動

ターゲット

(1)

(2)

図－　Bプレーン座標系

図－31のふたつの図は、ターゲットに対する探査機の相対的な動きのふたつのケースに対応しています。(1) の図は、ターゲットが探査機を追い越すケースです。探査機はBプレーンを奥から手前の方向に通り抜けます。それに対して (2) の図は探査機がターゲットを追い越すケースです。探査機はBプレーンを手前から奥の方向に通り抜けます。それぞれの図はターゲットを軌道運動の後方から見たように描かれています。太陽の位置はターゲットの左遠方になります。

## その他の情報

### 利用者が使えるフォルダ

SSVGをインストールしたフォルダには利用者の使うことのできるフォルダが4個用意されています。「SSVG\_data」、「SSVG\_i18n」、「SSVG\_log」、そして「SSVG\_plan」です。開発者はこれらのフォルダの使いかたを次のように想定しています。

* SSVG\_data：SPKファイルを格納します  
  インストール時にはこのフォルダには「de430.bsp」と「2000002\_Pallas\_21.bsp」というSPKファイルが格納されています。  
  「de430.bsp」は太陽系の主要な天体の位置や速度を計算するためのファイルです。  
  「2000002\_Pallas\_21.bsp」は小惑星パラスの位置や速度を計算するためのファイルで、サンプルの飛行計画「sample\_Pallas」が使用します。  
  利用者が入手した太陽系の小天体のSPKファイルもこのフォルダに格納するものと想定しています。
* SSVG\_i18n：国際化（多言語化）に使用するファイルが格納されています  
  SSVGは日本語と英語で表示されますが、他の言語への拡張も可能です。他の言語への拡張については他の言語への拡張の項を参照してください。
* SSVG\_log：SSVGがログファイルを格納します
* SSVG\_plan：SSVGの飛行計画を格納します  
  インストール時にはこのフォルダには複数のサンプル飛行計画が格納されています。  
  利用者が作成した飛行計画もこのフォルダに格納するものと想定しています。

SSVGをインストールしたフォルダには、これらのフォルダ以外に多数のファイルやフォルダが格納されています。これらについては、この文書で記述する操作を除き、削除や移動、変更は行わないでください。

利用者はSSVGをインストールしたフォルダの中に新しいフォルダを作り、ファイルを格納することができます。その場合、他のフォルダと容易に区別できるよう、新しいフォルダの名前は「SSVG\_」で始まるものにすることをお勧めします。

### 時刻について

SSVGの時刻はすべてTDB（太陽系力学時）です。

日付と時刻は内部処理ではユリウス日で表現していますが、ISO 8601の拡張形式（ISO時刻）で表示する場合があります（タイムゾーンの指定は付けません）。例えば、2020年1月1日の午前6時をこれらの形式で表すと次のようになります。

2020-01-01T06:00:00.000000　（ISO時刻）

2458849.75000000　（ユリウス日）

SSVGで探査機を飛行させることができるのは、太陽ならびに惑星の位置・速度がSPKファイルde430.bspから得られる範囲に限られます。この期間は次のとおりです。

* 開始：1549年12月31日0時
* 終了：2650年1月25日0時

また、小天体をターゲットとする場合、入手したSPKファイルの有効期間内に限り探査機を飛行させることができます。

### 探査機の飛行経路の数値積分

探査機の飛行経路（FLYTOマヌーバを実行した結果の経路）は、探査機に働く力を以下のとおりと仮定して数値積分により計算しています。これら以外の力は考慮していません。数値積分はニュートン力学の範囲で行っており、太陽や惑星、月はすべて質点として扱っています。

* 太陽の引力
* 8惑星と月（地球の月）の引力
* 電気推進エンジンおよびソーラーセイルの推力

探査機の飛行経路の計算には、太陽系の小天体が探査機に及ぼす引力は使われないことに注意してください（地球の月は例外です）。これは比較的重い小天体（例えば準惑星であるケレスや冥王星）についても同様です。探査機が小天体に接近したとしても探査機に引力は働きませんし、探査機は小天体を周回する軌道に入ることもできません。

### 2体問題の使用

前項に示すように、SSVGでは探査機の飛行経路は、「数値積分」という手法で計算します。しかし他のほとんどの場合は、他の天体の引力やその他の力を無視し、探査機の運動を太陽との2体問題と考えて軌道や位置、速度の計算を行います。2体問題として処理するのは次の場合です。

* 3D 軌道ウインドウに表示する探査機の軌道（赤または水色の曲線）の表示
* FTA機能（ターゲットに到達するための軌道変更のパラメータをもとめる）の内部処理
* 最適化アシスタント機能（出発時刻またはマヌーバ時刻と、飛行時間の最適化を支援する）の内部処理

また、3D 軌道ウインドウに表示するターゲットの軌道（緑の曲線）も2体問題で計算した軌道です。

### 推進装置とロケット方程式

SSVGで探査機に搭載されている3種類の推進装置はいずれも燃料や推進剤を消費しませんが、燃料や推進剤の搭載量とその消費は、実際の宇宙航行では最も注目を集める事柄のひとつです。軌道変更のデルタV（速度変化）の絶対値と、宇宙機の（燃料や推進剤を含めた）総質量の間には、「ロケット方程式」として知られている関係が成り立ちます。使いやすいように変形したロケット方程式は次のとおりです。

ここで、

：速度変化前の宇宙機の質量

：速度変化後の宇宙機の質量

：速度変化量（デルタVの絶対値）

：比推力（推進装置の効率を表す数値）

：地球の標準重力加速度

：指数関数

以下のふたつの表（表－25 と表－26）に、ロケット方程式の計算結果を示します。どちらの表も速度変化後の宇宙機の総質量を1.000としています。

表－25は典型的な液体燃料ロケットエンジンを想定して計算したもので、比推力を300秒とした場合です。

表－26はJAXAの宇宙探査機「はやぶさ」と「はやぶさ2」のイオンエンジンを想定して計算したもので、比推力を3000秒とした場合です。

表－　ロケット方程式の計算結果（液体燃料ロケットエンジン *Isp* = 300秒）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| （メートル／秒） | 軌道変更前の質量 | 推進剤の消費量  － | 軌道変更後の質量 |
| 500 | 1.185 | 0.185 | 1.000 |
| 1000 | 1.405 | 0.405 | 1.000 |
| 2000 | 1.974 | 0.974 | 1.000 |
| 4000 | 3.895 | 2.895 | 1.000 |
| 8000 | 15.169 | 14.169 | 1.000 |
| 16000 | 230.094 | 229.094 | 1.000 |
| 32000 | 52943.095 | 52942.095 | 1.000 |

表－　ロケット方程式の計算結果（イオンエンジン *Isp* = 3000秒）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| （メートル／秒） | 軌道変更前の質量 | 推進剤の消費量  － | 軌道変更後の質量 |
| 500 | 1.017 | 0.017 | 1.000 |
| 1000 | 1.035 | 0.035 | 1.000 |
| 2000 | 1.070 | 0.070 | 1.000 |
| 4000 | 1.146 | 0.146 | 1.000 |
| 8000 | 1.312 | 0.312 | 1.000 |
| 16000 | 1.723 | 0.723 | 1.000 |
| 32000 | 2.967 | 1.967 | 1.000 |

### 小天体のSPKファイルを入手する

NASA/JPLのHORIZONSシステムは利用者からの要求を受けて太陽系の小天体（小惑星、彗星、そして準惑星）のSPKファイルを作成します。HORISONSシステムは2種類のフォーマット（ASCIIまたはBinary）のSPKファイルを作成することができますが、SSVGが読むことができるのはBinaryフォーマットのSPKファイルだけです。

HORIZONSシステムについては<<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>>を見てください。

この項では、HORIZONSシステムにSPKファイルの作成要求を出す手順のサンプルをお見せします。上記のWebページにはこの手順は紹介されていませんが、ここに示す手順が我々の目的ではもっとも簡便なもののように思います。

HORIZONSシステムに要求を出すには、次の準備が必要です。

* 目的とする小天体の名称または天体番号、仮符号、SPKIDのいずれかを調べる
* 探査機を飛行させたいおおよその期間を決める (\*)

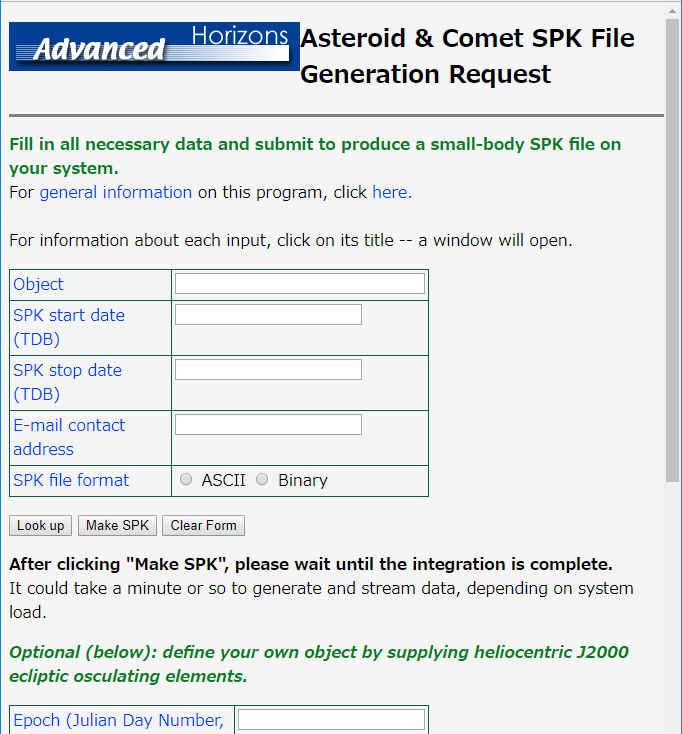
(\*) 探査機を飛行させる期間は、SPKファイルの有効期間に含まれている必要があります。また、現時点（2019年2月）においてはHORIZONSシステムが生成するSPKファイルの有効期間は次の範囲内に限られています。

* 開始：1000-Jan-01（西暦1000年1月1日）
* 終了：2101-Jan-01（西暦2101年1月1日）

上記の期間はHORIZONSシステムにTELNETで接続してSPKファイルの作成を要求する手順の中で確認することができます。前述のHORIZONSシステムのWebページを参照してください。

ではやってみましょう。次のリンクをクリックしてHORIZONSシステムの「Asteroid & Comet SPK File Generation Request」（小惑星＆彗星SPKファイル生成要求）のページを開いてください。  
<<https://ssd.jpl.nasa.gov/x/spk.html>>

お使いのブラウザが次のページを表示するはずです（図はページの上半分を示しています）。



図－　小惑星＆彗星SPKファイル生成要求のページ

我々はこのページの上半分だけを使用します。この部分には入力フィールドとラジオボタンを含む表がひとつ、そしてクリックできるボタンが3個あります。これらの操作法は次の表のとおりです。

表－　SPKファイル生成要求の操作

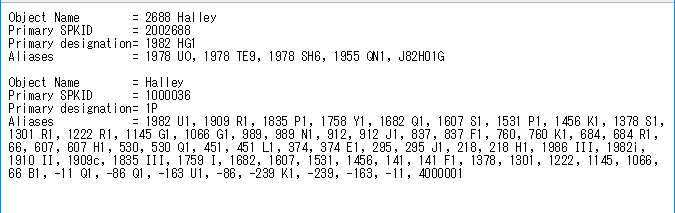
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | アイテム | 操作および説明 |
| 表 | Object  （入力フィールド） | 小天体の名称または天体番号、仮符号、SPKIDのいずれかを入力してください。名称や番号を組み合わせて指定することはできません。 |
| SPK start date (TDB)  （入力フィールド） | SPKファイルの作成を開始する日付を「YYYY-Mon-DY」の形式で入力してください。例えば2000年1月1日であれば2000-Jan-01と入力します。(\*) |
| SPK stop date (TDB)  （入力フィールド） | SPKファイルの作成を終了する日付を「YYYY-Mon-DY」の形式で入力してください。例えば2100年12月31日であれば2100-Dec-31と入力します。(\*) |
| E-mail contact address  （入力フィールド） | 連絡可能な電子メールアドレスを入力してください。 |
| SPK file format  （2個のラジオボタン） | SPKファイルのフォーマットを選択するラジオボタンです。必ずBinaryを選択してください。 |
| ボタン | [Look up] | クリックすると新しいページに小天体の候補が表示されます。小天体の候補は複数になる場合があります。 |
| [Make SPK] | クリックするとSPKファイルが生成され、ブラウザがそれをダウンロードします。 |
| [Clear Form] | クリックすると表に入力した情報がすべてクリアされます。 |

(\*) 現時点（2019年2月）では、開始する日付と終了する日付は次の範囲に含まれている必要があります。

* 開始：1000-Jan-01（西暦1000年1月1日）
* 終了：2101-Jan-01（西暦2101年1月1日）

上記の期間はHORIZONSシステムにTELNETで接続してSPKファイルの生成を要求する手順の中で確認することができます。前述のHORIZONSシステムのWebページを参照してください。

一例として、ハレー彗星のSPKファイルを入手してみましょう。「Object」の入力フィールドに「Halley」を入力して[Look up]ボタンをクリックしてください。次の図に示すように、ブラウザに小天体の候補が2グループのテキストとして表示されます。



図－　小天体の候補の表示

この結果から、以下の内容を読み取ることができます。

* 「Halley」という名称の天体は2個ある。
* ひとつめ（2688 Halley）は小惑星である（JPLの小天体データベースブラウザ<<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>> で検索すれば確認できます）。
* ふたつめが目的のハレー彗星である

ふたつめの天体の「Primary SPKID」の値（1000036）をクリップボードにコピーして、前のページに戻ってください。

SPKIDを「Object」の入力フィールドにペースト（貼り付け）して、[Look up] ボタンをクリックしてください。ひとつの天体（ハレー彗星）の情報だけが表示されるはずです。前のページに戻ってください。

残りのフィールドを埋め、「Binary」のラジオボタンを選択し、[Make SPK]のボタンをクリックしてください。HORIZONSシステムがSPKファイルを生成し、ブラウザがSPKファイルのダウンロードを開始します。ファイル名はデフォルトでは「1000036.bsp」のはずです。デフォルトのファイル名は [SPKID].bspという形式です。

ダウンロードされたファイルをSSVG\_dataフォルダ（SSVGをインストールしたフォルダの内部にあります）にコピーしてください。このときSPKファイルの名前を変更することができます。ただし、拡張子（.bsp）は変更しないことを推奨します。

以上です。これでSSVGのターゲットとしてハレー彗星を選択できるようになりました。ハレー彗星は2061年に太陽系の中心部にやってきて、地球に接近します。

### ログファイル

SSVGの起動から終了までの間に行った飛行計画の作成と編集の内容が、SSVGの実行ごとにログファイル（テキスト文書）として記録されます。ログファイルの出力先は、SSVGをインストールしたフォルダの直下にあるSSVG\_logフォルダです。ログファイルは必要がなければ消去しても問題ありません。

### 推力方向モード

推力方向モード（tvmode）はSSVGがふたつの推進装置（電気推進エンジンとソーラーセイル）の推力の方向を制御する方法を定義します。

EP\_ONマヌーバとSS\_ONマヌーバのパラメータとしての推力方向モードは、LまたはEのいずれかの値を持ちます。LはLocal（ローカル）の、EはEcliptic（黄道）の頭文字に由来します。

電気推進システムとソーラーセイルは低推力の推進装置ですから、十分な速度変化を得るためには通常長い期間を必要とします。長い運用期間において、少数のマヌーバで効果的に推力の方向を制御するために、SSVGでは「推力方向モード」という概念を導入しました。例えば、電気推進エンジンの推力方向モードをLにすことにより、長期間にわたって探査機をその軌道の接線方向に加速する運用を、たったひとつのEP\_ONマヌーバで実現することができます。

推力方向モードLでは、ひとつの運用期間中(\*)、推力の方向はローカル座標系（電気推進エンジンの場合は軌道ローカル座標系、ソーラーセイルの場合はソーラーセイル座標系）に対して固定されます。探査機の経路の数値積分を行うには黄道座標系での推力の方向が必要ですが、SSVGはそれを必要なときに毎回ローカル座標系での推力方向から計算します。

推力方向モードEでは、ひとつの運用期間中(\*)、推力の方向は黄道座標系に対して固定されます。EP\_ONマヌーバまたはSS\_ONマヌーバで推進装置の運用を開始するとき、SSVGは黄道座標系での推力方向を計算し、運用期間中は継続してその推力方向を使用します。

ソーラーセイルに対して推力方向モードEを指定した場合、黄道座標系に対して固定されるのはセイル面の向きであることに注意してください。これは、ひとつの運用期間中にセイルの「太陽に当たる面」が切り替わる可能性がある、ということです。そのような場合にはソーラーセイルによる推力の方向は逆転します。（SSVGのソーラーセイルは両面鏡であることと、ソーラーセイルによる推力はセイル面に垂直で太陽から遠ざかる向きに働くことを思い出してください）

(\*) 「ひとつの運用期間」とは、推進装置をオンにするマヌーバ（EP\_ONマヌーバまたはSS\_ONマヌーバ）の実行から、その推進装置をオフにするマヌーバ（EP\_OFFマヌーバまたはSS\_OFFマヌーバ）の実行もしくはその推進装置をオンにするマヌーバの再実行までの期間を指します。この期間内にはこれら以外の複数ののマヌーバを実行することができます。また、電気推進エンジンの運用期間とソーラーセイルの運用期間はお互いに独立に扱われます。

### 他の言語への拡張

バージョン1.3以降のSSVGは国際化に対応しています。配布されるパッケージでは、SSVGの利用者インタフェースは日本語または開発言語である英語で表示されますが、他の言語への拡張も容易に実施することができます。この項では他の言語への拡張方法を記述します。

SSVGの国際化に関するデータのほとんどはSSVGのインストールされたフォルダにある、SSVG\_i18nフォルダに格納されます。以下の説明は、特に断らない限りこのフォルダの内部での操作を示しています。

#### 必要なツール

Qt Linguistおよびそれに含まれるリリースツールlreleaseを含むQt環境が必要です。筆者が使用している環境（Windows 10、Anaconda 3.5）では、それぞれlinguist.exe およびlrelease.exeとして提供されています。

#### 作業手順（その１）

欧文フォントだけを使用する言語の場合、以下の手順を実施します。ここではスペイン語（言語コード：es）を例に説明します。

1. スペイン語用のSSVG翻訳ファイル（ソース）を作成します。

* 日本語用のSSVG翻訳ファイル（ssvg\_ja.ts）をコピーしてスペイン語用のSSVG翻訳ファイル（ssvg\_es.ts）を作成します
* Qt Linguistを起動してssvg\_es.tsを開き、Languageを除く他のすべてのコンテキストについて、英文のソーステキストに対応するスペイン語を翻訳欄に記述してください。ssvg\_es.tsを適当なエディタで開いて、XMLを直接編集することもできます。
* Languageコンテキストはひとつのソーステキストだけを含み、ソーステキストの内容は“en”ですが、これをスペイン語の言語コードである“es”には翻訳してください。
* ssvg\_es.tsの編集が終了したなら、lreleaseを実行してSSVG翻訳ファイル（圧縮）を作成してください。Windows環境でしたら、パスの通っているコマンドプロンプトで次のコマンドを実行します。  
  > lrelease -compress ssvg\_es.ts  
  ファイルssvg\_es.qmが作成されます。これがスペイン語用のSSVG翻訳ファイル（圧縮）です。

1. スペイン語用のQt翻訳ファイル（圧縮）を作業中のフォルダにコピーします。  
   必要なファイルはqt\_es.qmとqtbase\_es.qmのふたつです。筆者の環境では、  
   [Pythonルート]\Library\translationsにありました。お使いのQtの環境で探してみてください。
2. 作業中のフォルダにあるJSONファイル（3DOrbitFont.json）をテキストエディタで開き、言語コードとフォントグループ名を結び付ける行を追加してください。この例でしたら次のように修正します。  
     
   修正前：  
    {  
    "en": "sans-serif",  
    "ja": "IPAexGothic"  
    }  
   修正後：  
    {  
    "en": "sans-serif",  
    "es": "sans-serif",  
    "ja": "IPAexGothic"  
    }

欧文フォントだけを使用する言語の場合、これで終了です。SSVGを実行し、翻訳結果が表示されることを確認してください。もし、3D軌道ウインドウで惑星の名前として変な記号（□□など）が表示されるようでしたら、フォントのインストールが必要です。引き続き次の「作業手順（その２）」に示す作業を追加してください。

#### 作業手順（その２）

欧文フォント以外のフォントを必要とする言語の場合には、以下の作業を追加して実施してください。ここでは韓国語／朝鮮語（言語コード：ko）を例に説明します。

1. フォントファイルを入手してください。True Typeフォントを推奨します。このとき、フォントの名称も必要です。ここではフォントファイルをhangul.ttf、フォントの名称をHangulFontとします。
2. フォントファイルを所定の場所に保存してください。

* SSVGのWindows実行形式を利用している場合でしたら、SSVGをインストールしたフォルダの内部の次の場所にhangul.ttfを保存してください。  
  mpl-data\fonts\ttf
* SSVGのPythonスクリプトを実行している場合でしたら、matplotlibモジュールのフォントのフォルダにhangul.ttfを保存してください。Pythonがインストールされているフォルダの内部の次のようなフォルダになるはずです。  
  [Pytonルート]\Lib\site-packages\matplotlib\mpl-data\fonts\ttf  
  この場合、matplotlibのフォントの管理ファイルを削除する必要があります。筆者の環境ではこのファイルでした。  
  [ユーザーフォルダ]\ .matplotlib\fontList.json

1. SSVG翻訳ファイルを確認してください。  
   作業手順（その１）の (1) で作成したSSVG翻訳ファイル（ソース）（この例ではファイル名はssvg\_ko.ts）を開き、Languageコンテキストのソーステキスト“en”を作業中の言語の言語コード（この例では“ko”）に翻訳する設定になっていることを確認します。必要があれば、ssvg\_ko.tsを修正し、lreleaseをもう一度実行してSSVG翻訳ファイル（圧縮）を再度作成してください。
2. フォントの名称の登録を行ってください。  
   作業中のフォルダにあるJSONファイル（3DOrbitFont.json）をテキストエディタで開き、言語コードとフォントの名称を結び付ける修正を行ってください。  
   この例でしたら、次のように修正します。  
     
   修正前：  
    {  
    "en": "sans-serif",  
    "ko": "sans-serif",  
    "ja": "IPAexGothic"  
    }  
   修正後：  
    {  
    "en": "sans-serif",  
    "ko": "HangulFont",  
    "ja": "IPAexGothic"  
    }

以上で終了です。SSVGを起動して翻訳が正しく行われることを確認してください。

### 飛行計画のサンプル

SSVGにはいくつかの飛行計画がサンプルとして含まれています。飛行計画のサンプルはSSVGをインストールしたフォルダの直下にあるSSVG\_planフォルダに格納してあります。以下はその飛行計画のサンプルの解説です。

#### sample\_Mars

火星探査機の飛行計画です。

地球近傍の宇宙基地「地球L2」を出発し、推進装置としては化学推進エンジンだけを使用して火星を目指します。火星に到着した探査機は化学推進エンジンを使用して相対速度を小さくし、火星を周回する衛星軌道に入ります。火星到着までの飛行時間は215日です。

#### sample\_Mars\_SS

ソーラーセイルを使った火星旅行の飛行計画です。

探査機は地球近傍の宇宙基地「地球L2」を1000メートル／秒の速度で出発します。その後、推進装置としてはソーラーセイルだけを用いて火星近傍に到達します。宇宙基地から火星近傍までの飛行時間は5年を少し超える1896日です。ソーラーセイルの面積は10000平方メートルで、探査機の総質量は500キログラムです。ソーラーセイルによる速度変化の累積値は8511メートル／秒になります。

#### sample\_Mercury

水星探査機の飛行計画です。

地球近傍の宇宙基地「地球L2」を出発し、推進装置としては化学推進エンジンだけを使用します。飛行計画全体としての速度変化量を小さく抑えるため、金星で2回、水星で2回のスイングバイを行います。3回目の水星接近時に化学推進エンジンを使用して相対速度を小さくし、水星を周回する衛星軌道に入ります。3回目の水星接近までの飛行時間は5年半ほど（2050日）です。

#### sample\_Pallas

小惑星パラスの探査ミッションの飛行計画です。

パラスの軌道は傾斜角が34.8度と大きいため、地球から直接パラスに向かうと速度変化量の合計が大変大きくなってしまいます。この飛行計画では、木星でスイングバイを行うことにより速度変化量の合計を小さく抑えています。

探査機は2030年2月23日に地球近傍の宇宙基地「地球L2」を出発し、2034年5月4日に木星でスイングバイを行います。そして2037年11月4日にようやくパラスに到着します。

#### sample\_Venus

JAXAの金星探査機「あかつき」の旅を再現した飛行計画です。

2010年5月20日に地球近傍の宇宙基地「地球L2」を出発し、200日の旅の後、同じ年の12月6日に金星に到着します。金星近傍で化学推進エンジンを使用して相対速度を小さくし、金星を周回する衛星軌道に入ります。なお、この飛行計画は「あかつき」の飛行を正確に再現したものではありません。

#### sample\_Voyager2

NASA/JPLの惑星探査機「ボイジャー2号」の旅を再現した飛行計画です。

1977年8月20日に地球近傍の宇宙基地「地球L2」を出発し、木星、土星、天王星、海王星の順におのおのの惑星でスイングバイを行います。最後の訪問先である海王星への最接近は1989年8月25日で、ここまでの飛行時間は約12年（4389日）でした。探査機は海王星でスイングバイを行った後も飛行を続けていますが、このときの軌道は楕円ではなく双曲線で、永遠に太陽から遠ざかり続けます。なお、この飛行計画は「ボイジャー2号」の飛行を正確に再現したものではありません。

## 参考文献

1. 室津義定, 宇宙航行力学, 宇宙工学の基礎I, 共立出版株式会社, 1998
2. Kluever, Craig A., Space Flight Dynamics, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2018
3. <https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons> アクセス日付：2018年6月15日
4. <https://voyager.jpl.nasa.gov/> アクセス日付：2018年6月15日
5. <http://www.ieice-hbkb.org/files/11/11gun_02hen_04.pdf> アクセス日付：2018年6月15日
6. <http://www.ecei.tohoku.ac.jp/inuta/souzoukougaku/takasho/takasho01.htm> アクセス日付：2018年6月15日
7. <http://astro-dic.jp/> アクセス日付：2018年6月18日
8. <http://ccar.colorado.edu/imd/2015/documents/BPlaneHandout.pdf> アクセス日付：2018年6月20日
9. <https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail> アクセス日付：2018年6月22日
10. <http://global.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/> アクセス日付：2018年11月12日
11. <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi> アクセス日付：2018年11月15日
12. <http://www.jaxa.jp/> アクセス日付：2019年2月10日
13. <https://www.nasa.gov/> アクセス日付：2019年2月10日
14. <https://www.esa.int/ESA> アクセス日付：2019年2月10日
15. <https://www.nao.ac.jp/> アクセス日付：2019年2月10日
16. <https://doc.qt.io/qt-5/reference-overview.html> アクセス日付：2019年2月10日

以上