|  |
| --- |
|  |
| SSVGユーザーズガイド（日本語版） |
| Solar System Voyager(SSVG) Users Guide (Japanese version) |

|  |
| --- |
| 植月修志　(Shushi Uetsuki/whiskie14142)  2016/10/25  Version 0.1.0 Beta |

# SSVGとは

SSVG（Solar System Voyager）は利用者の探査機（probe）を太陽系の中で航行させるシミュレーションソフトウェアです。探査機は利用者の指示に基づいて3つの推進装置（化学推進エンジン、電気推進エンジン、ソーラーセイル）を使い、太陽系を自由に航行することができます。

自由に、と言っても、探査機の航行には大きな制約があります。それは太陽を初めとする天体が及ぼす引力によるものです。SSVGは太陽系の主要な天体の動きとそれらが及ぼす引力を再現し、現実の探査機の航行を詳細にシミュレートします。

## ソフトウェアのライセンス

このソフトウェア（SSVG）はどなたでも無料でお使いいただけます。

このソフトウェア（SSVG）はフリーソフトウェアです。バージョン3もしくはそれ以降のバージョンのGNU General Public Licenseに従うことを条件に、あなたは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。

このソフトウェアの配布はそれが有用であることを期待して行うものですが、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）のソースコード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構築されています。

Numpy : http://www.numpy.org/  
 Copyright (c) 2005-2016, NumPy Developers.  
 All rights reserved.

Scipy : http://scipy.org/  
 Copyright (c) 2001, 2002 Enthought, Inc.  
 All rights reserved.  
 Copyright (c) 2003-2013 SciPy Developers.  
 All rights reserved.

matplotlib : http://matplotlib.org/  
 Copyright (c) 2012-2013 Matplotlib Development Team;  
 All Rights Reserved

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

PyQt4 : https://www.riverbankcomputing.com/news/

julian : https://github.com/dannyzed/julian/  
 Copyright (c) 2016 Daniel Zawada

pytwobodyorbit : https://github.com/whiskie14142/pytwobodyorbit/  
 Copyright (c) 2016 Shushi Uetsuki (whiskie14142)

spktype01 : https://github.com/whiskie14142/spktype01/  
 Copyright (c) 2016 Shushi Uetsuki (whiskie14142)

PyInstaller : http://www.pyinstaller.org/

## 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していただくことができます。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>>

# さあ始めましょう

## インストール

### Windows実行形式プログラム

SSVGのWindows実行形式プログラムは次のアドレスで圧縮ファイル（zipファイル）として配布されます。エクスプローラー等の適当なツールで開き、SSVGのフォルダ（ディレクトリ）全体をハードディスクに展開（解凍）してください。  
<<https://box.yahoo.co.jp/guest/viewer?sid=box-l-tu4wm6wgt2cerlaee3m3bgqthq-1001&uniqid=d128a71e-e5a3-4a07-83e4-8e821bee40ad>>

【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1024×1600以上の解像度のものを推奨します。

【SPKファイルの入手】

プログラムパッケージには太陽および惑星の位置・速度を計算するためのデータファイル（SPKファイル）が含まれていません。次のアドレスからSPKファイル（de430.bsp）を入手し、SSVGのディレクトリの直下にあるdataディレクトリに格納してください。  
<<http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/de430.bsp>>

### Pythonプログラム

Pythonで記述されたソースプログラムはGitHubから入手できます。  
<<https://github.com/whiskie14142/SolarSystemVoyager/>>

【動作環境等】

Python 3.5

ディスプレイは1024×1600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 1.10.4, Scipy 0.17.0, matplotlib 1.5.1, jplephem 2.5, pyqt 4.11.4, julian,   
pytwobodyorbit 0.1.0, spktype01 0.1.0

【SPKファイルの入手】

GitHubのソースプログラムには太陽および惑星の位置・速度を計算するためのデータファイル（SPKファイル）が含まれていません。次のアドレスからSPKファイル（de430.bsp）を入手し、ソースファイルのディレクトリの直下にあるdataディレクトリに格納してください。  
<<http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/de430.bsp>>

## SSVGの起動

### Windows実行形式プログラム

展開されたディレクトリにある SSVG.exe をダブルクリックして実行してください。SSVGが起動します。

### Pythonプログラム

ソースプログラムに含まれる SSVG.py をPythonで実行してください。SSVGが起動します。

## サンプルを見る

### 飛行計画を開く

SSVGが起動すると2つのウインドウが開きます。SSVGと3D Orbit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のウインドウのメニューで、File → Openを実行してください。SSVGをインストールしたディレクトリの中にsampleplanというディレクトリがあり、そこに飛行計画のサンプルが複数格納されています。まずはmars01.jsonを開きましょう。

mars01は火星に向かう探査機（probe）の飛行計画です。SSVGウインドウの表（以下「マヌーバ一覧」と呼びます）には、飛行計画の概要が表示されます。表の各行は「マヌーバ」で探査機に対する指令を示しています。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。

3D Orbitのウインドウには緑の楕円が表示されています。これは航行の目的地であるターゲット天体（ここでは火星）の軌道です。探査機の飛行は始まっていませんから、探査機の軌道はまだ表示されていません。

### マヌーバを実行する

マヌーバ一覧の右端の列に「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。

マヌーバ一覧の右に並んでいるボタンから「Exec Next」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が実行されます。Show Orbitウインドウが新しく開き、そして3D Orbit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表示されます。表示内容は以下を含みます。

赤色のX：探査機の位置

赤線の楕円：探査機の軌道

緑色の＋：ターゲット天体の位置

緑線の楕円：ターゲット天体の軌道

白抜き黒丸：太陽の位置

水色の小さな＋と文字：太陽と惑星の位置と名前（+ Mercury、+ Venusなど）

3D Orbitウインドウに表示される画像に対していくつかの操作が可能です。[3D Orbitウインドウ](#_3D_Orbitウインドウ)および[Show Orbitウインドウ](#_Show_Orbitウインドウ)を参照してください。

「Exec Next」のボタンをクリックするたびに、マヌーバが順次実行されます。このサンプルで利用しているマヌーバは次の3種類です。

START：飛行開始。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。指定した方向と大きさの速度変化を探査機に与えます。

### 飛行結果を確認する

FLYTOマヌーバの実行直後に限り、その飛行の経過を3D Orbitウインドウに表示させることができます。SSVGウインドウの上端にある「Flight Review」ボタンをクリックしてください。画面左下に表示されていたShow OrbitウインドウがFlight Reviewウインドウになり、3D Orbitウインドウの表示内容も変化します。Flight ReviewウインドウのTime Manipulatorのボタン群を操作すると、飛行の経過を確認することができます。

このサンプルで最後のマヌーバ（9番目のFLYTO）を実行した直後に飛行結果の確認を行い、ターゲット天体付近を拡大表示させれば、探査機がターゲット天体（ここでは火星）の周囲を公転する様子が確認できるはずです（探査機は火星の衛星になっています）。

## 探査機の飛行計画を作る

惑星探査機の飛行計画を作ってみましょう。JAXAの探査機「あかつき」の当初の計画を参考にして、金星を目指します。

### 飛行計画の新規作成

SSVGウインドウのメニューから、File → Newを実行してください。New Flight Planウインドウが開きます。

Probe Propertiesグループでは探査機の特性として名前と質量を指定します。探査機が出発する宇宙基地の指定がありますが、現在は「EarthL2」という宇宙基地だけが利用可能です。この宇宙基地は太陽－地球系のラグランジュ点（L2）にあります。地球から見て太陽の反対側の、約150万kmの所です。

Targetグループでは目的地であるターゲット天体を指定します。金星は惑星の一員ですから、Planet/Moonが選択されていることを確認して、その下のドロップダウンリストで金星（Venus）を選択し、OKをクリックしてください。これで新しい飛行計画が作成されます。

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からFile → Save as... を実行して適当な名前で保存してください。

### START

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。マヌーバ一覧はまだ空白で、1行目にNextの表示があるはずです。Edit Next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。Maneuver Editorウインドウが開きます。

最初にマヌーバのタイプを指定します。ウインドウ上部にあるドロップダウンリストで「FLYTO」を選択し、その右のApplyをクリックしてください。

出発日を指定します。探査機を出発させる日を決めるには試行錯誤が必要なのですけど、ここではJAXAの探査機「あかつき」の打上げ日を参考にして、2010年5月21日にします。Date&Timeの欄に日付を設定し、Show Orbitをクリックしてください。出発日時が3D Orbitウインドウに反映されます。

つぎに出発時のパラメータを指定しますが、これにはManeuver EditorのFTA機能を利用します。FTA機能は、指定した日時に探査機をターゲット天体に到着させるために必要なマヌーバのパラメータを計算してくれます。探査機がターゲット天体に到着する日の決定も本来は試行錯誤で決める必要があるのですが、ここでは「あかつき」の当初計画を参考にして、2010年12月7日にしましょう。

Show Orbitウインドウの高速順行ボタン（>>）を何回かクリックして、予測日時（P. Time）が2010年12月7日（2010-12-07）になるように操作してください。この状態でManeuver EditorのFTAボタンをクリックするとこの日を到着日とするFTAの計算が行えます。FTA Settingウインドウが開きますので、そのままOKをクリックしてください。FTAの計算結果が表示されますので、OKをクリックしてください。

Maneuver Editorウインドウで「Finish and Exec」をクリックすれば、マヌーバの編集が終わり、同時にそのマヌーバが実行されます。Show Orbitウインドウで時間を進める操作を行えば、探査機が12月7日ごろターゲット天体（金星）に接近する軌道に乗っていることが確認できるでしょう。また表示の中心をターゲット天体に変更して拡大表示を行えば、接近時に探査機がターゲット天体を追い越すように動くことが確認できるでしょう。

### FLYTO（その1）

宇宙基地から出発した探査機は徐々に地球から離れて行きますが、しばらくの間は地球の引力の影響を受けていて、出発時にFTAで予測した軌道から少しずれてしまいます。しばらく（150日）飛行させ、そのあとで金星に接近するための軌道修正を行いましょう。

SSVGウインドウのマヌーバ一覧で2行目の空白行にNextの表示があることを確認して、「Edit Next」をクリックしてください。Maneuver Editorウインドウが開きます。

マヌーバのタイプとして、ドロップダウンリストからFLYTOを選択し、Applyをクリックしてください。Flight Duration（飛行期間）に150を入力して、その右のApplyをクリックしてください。FLYTOマヌーバのパラメータである飛行終了日時が2010年10月18日に設定されます。Show Orbitボタンをクリックすれば、飛行終了時の探査機やターゲット天体の位置が3D Orbitウインドウに表示されます。

「Finish and Exec」をクリックしてください。マヌーバの編集が終了し、指定したマヌーバが実行されます。

### CP（その1）

探査機が金星に接近できるよう、化学推進エンジンを用いて軌道修正を行いましょう。マヌーバ一覧で3行目の空白行にNextの表示があることを確認して「Edit Next」をクリックしてください。Maneuver Editorウインドウが開きます。

マヌーバのタイプとしてCPを選択し、Applyをクリックしてください。

マヌーバのパラメータの設定にはここでもFTA機能を使用します。Show Orbitウインドウで（>>）を何回かクリックして、予測時刻（P. Time）が接近予定日である2010年12月7日になるようにし、FTAボタンをクリックしてください。FTA Settingsウインドウが開きます。

ここでは、探査機がターゲット天体（金星）から見てどこを通過するかを細かく指定しましょう。通過点を金星から見て太陽の反対側の、金星中心から4万kmの場所とします。「Set Probe's Sight on」グループで次のパラメータを設定します。

Range from Target Center (km) 40000

Angle phi from Target Center (deg) -90　（マイナス90）

Angle elv from Target Center (deg) 0

OKをクリックしてFTAの計算を行い、結果を確認してOKをクリックしてください。続いて「Finish and Exec」をクリックすれば、マヌーバの編集が終了して同時にそのマヌーバが実行されます。

### FLYTO（その2）

最接近予定日の5日前、2010年12月2日まで飛行するFLYTOマヌーバを作成し、実行しましょう。実行結果から、飛行は順調であることが確認できるでしょう。すでに金星の引力の影響が出始めていて、最接近の時間が少し早く、最接近の距離が少し小さくなりました。

### FLYTO（その3）

最接近予定日の5日後、2010年12月12日まで飛行する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。Maneuver EditorのParametersの表のinter : Integration Interval (days)の値を0.01に変更しましょう。実行後にSSVGウインドウの「Flight Review」ボタンをクリックして、飛行状況を確認してください。探査機は12月6日の12時28分ごろ、金星に最も近づくようです。また最接近の前後では、金星の引力の影響で探査機の軌道が大きく変化します。Flight Reviewウインドウで「Show Kepler Orbit」をオンにすれば積分ステップごとに探査機の楕円軌道が表示され、その変化の様子を見ることができます。

金星への最接近付近で飛行が終わるようにFLYTOのマヌーバを変更し、金星との相対速度が小さくなるようなマヌーバ（CPマヌーバ）を追加して実行すれば、探査機を金星の衛星にすることもできるでしょう。

## 小天体を目指す

### SPKファイルを入手する

太陽系の小天体（小惑星、彗星、準惑星）をターゲット天体にするためには小天体の軌道を計算するためのデータファイル（SPKファイル）を入手する必要があります。

SPKファイルはNASA/JPLのHORIZONSシステムに依頼すれば入手できます。作成依頼はTelnet、電子メール、Webインタフェースのいずれかで行いますが、ここではWebインタフェースでの方法を紹介します（詳しくは<<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>>を見てください）。

SPKファイルの作成を依頼するWebインタフェースのアドレスはこちらです。  
<<http://ssd.jpl.nasa.gov/x/spk.html>>

通常はページ上部の表にパラメータを入力して「Make SPK」ボタンをクリックします。直ちにSPKファイルが作成され、ダウンロードできますので、適当な場所に保存してください。パラメータと設定方法の概要は次表のとおりです。

Table SPKファイル作成依頼の設定項目

|  |  |
| --- | --- |
| 設定項目 | 説明 |
| Object | 小天体の名称、小惑星番号などを入力します。入力して「Lookup」をクリックすればSPKID（注）等が表示されます。 |
| SPK start date (TDB) | SPKファイルの作成開始日を指定します。（例：1980-Jan-01） |
| SPK stop date (TDB) | SPKファイルの作成終了日を指定します。（例：2101-Jan-01） |
| E-mail contact address | 依頼者の電子メールアドレスを記入します。 |
| SPK file format | ファイルの形式を選択します。Binaryを選択してください。 |

（注）SPKIDはHORIZONSシステムが使用する一意な天体番号です。あとで使用しますので、メモしておいてください。

冥王星（Pluto：準惑星）と地球の月（Moon）は小天体に分類されますが、軌道はインストール時に取得したde430.bspに含まれていますのでSPKファイルの取得は必要ありません。飛行計画の作成ではPlanet/Moonを選択してください。

### 飛行計画の新規作成

SSVGウインドウのメニューからFile → Newを実行してください。New Flight Planウインドウが開きます。Probe propertiesグループのパラメータを設定してください。これは惑星を目指す場合と同じです。

Targetグループで「Small Body」を選択してください。右の欄で小天体が指定できるようになります。Nameには天体の名称を指定してください。SPK file欄の右にある「...」ボタンをクリックして、HORIZONSシステムから入手したSPKファイルを指定してください。SPKIDの欄には、小天体のSPKIDを指定してください。

OKをクリックすれば、小天体をターゲット天体とする飛行計画の作成が開始されます。

# リファレンス

## 操作

### SSVGウインドウ

Table SSVGウインドウのボタン

|  |  |
| --- | --- |
| 表示名 | 機能 |
| Redraw Target Orbit | ターゲット天体の軌道を再計算し、表示します |
| Flight Review | 直前の飛行結果をレビューします。 |
| Show Orbit | 3D Orbitウインドウに探査機等の情報を表示し、同時にShow Orbitウインドウを表示します。 |
| Exec Next | Next行のマヌーバを実行します。 |
| Exec to \* | Next行から選択されている行までマヌーバを連続して実行します。 |
| Ex Initialize | マヌーバの実行結果をすべて取り消し、最初の行をNext行にします。 |
| Edit Next | Next行のマヌーバを編集します。 |
| Edit \* | 選択されている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（Finish）するとマヌーバの実行結果はすべて取り消されます。 |
| Insert \* | 選択されている行に空のマヌーバを挿入します。 |
| Delete \* | 選択されている行を削除します。 |

Table SSVGウインドウのマヌーバ一覧の操作

|  |  |
| --- | --- |
| 操作 | 機能 |
| 行のクリック | クリックした行（マヌーバ）が選択されます。 |
| 行のダブルクリック | クリックした行（マヌーバ）の編集が開始されます。 |

Table SSVGウインドウのメニュー

|  |  |
| --- | --- |
| メニュー項目 | 説明 |
| File → Open | 保存されている飛行計画を開きます。 |
| File → New | 新しい飛行計画を作成します。 |
| File → Save | 飛行計画をファイルに保存します。 |
| File → Save as... | 別の名前を付けて飛行計画をファイルに保存します |
| File → Quit | SSVGを終了します。 |
| Help → about SSVG | SSVGに関する情報を表示します。 |

### 3D Orbitウインドウ

Table 3D Orbitウインドウの操作

|  |  |
| --- | --- |
| 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。 |
| 図の中心を変更する | 3D Orbitウインドウでは操作できません。Show OrbitウインドウまたはFlight ReviewウインドウのLook atグループで中心に表示する天体を選択してください。 |

3D Orbitウインドウに表示されるマークや線、文字の意味は次表のとおりです。

Table 3D Orbitウインドウに表示されるマーク、線、文字

|  |  |
| --- | --- |
| マーク・線・文字 | 説明 |
| Xマーク（赤） | 探査機の位置。 |
| 曲線（赤） | 探査機の予測軌道。2体問題の解としての2次曲線です。 |
| 曲線（青） | 探査機の実経路。数値積分の結果の経路です。 |
| + マーク（緑） | ターゲット天体の位置。 |
| 曲線（緑） | ターゲット天体の軌道。2体問題の解としての2次曲線が表示されます。 |
| 小丸マーク（黒） | 太陽の位置。 |
| + マークと名称（水色） | 太陽および惑星の位置と名称。地球の月は + マークだけが表示されます。 |
| 座標軸 | 黄道座標系の座標軸。原点は太陽系重心です。目盛の単位はメートルです。 |

### Show Orbitウインドウ

Show Orbitウインドウでは、3D Orbitウインドウに表示される情報の操作を行います。重要なものとしては、3D Orbitウインドウに表示される軌道の中心をどこにするかがあり、これはLook atグループのラジオボタンで選択します。

もう一つの重要なものとしては、3D Orbitウインドウに表示される情報の時刻の操作があります。このウインドウに表示される探査機やターゲット天体、惑星などの位置は、最後に実行されたマヌーバが終了した時刻のものが基本ですが、探査機の運動を太陽との2体問題と仮定して予測した将来（または過去）の予測位置を表示させることもできます。この予測時刻の操作もこのウインドウで行います。探査機の運動を2体問題で予測しますから、探査機の位置には太陽以外の天体の引力や、電気推進またはソーラーセイルによる軌道変化は反映されません。

Table Show Orbitウインドウの操作

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目 | 説明 |
| Look at | SSB | 選択すると3D Orbitウインドウの描画の中心が太陽系重心(SSB : Solar System Barycenter) になります。 |
| Probe | 選択すると3D Orbitウインドウの描画の中心が探査機 (Probe) になります。 |
| Target | 選択すると3D Orbitウインドウの描画の中心がターゲット天体 (Target) になります。 |
| Show | Show Probe | チェックすると3D Orbitウインドウに探査機の位置を示すマークが表示されます。 |
| Show Target | チェックすると3D Orbitウインドウにターゲット天体の位置を示すマークが表示されます。 |
| Show Planets | チェックすると3D Orbitウインドウに太陽と惑星の位置と名前が表示されます。 |
| DT | DT(days) | 表示する予測時刻（P. Time）の現在時刻（C. Time）からの経過時間（日）が表示されます。値を設定することもできます。 |
| Applyボタン | クリックするとDT欄の値が予測時刻に反映されます。 |
| Prediction Time Manipulator | << ボタン | 高速逆行。クリックするとScale指定の10倍のステップで予測時刻が逆行します。 |
| < ボタン | 逆行。クリックするとScale指定に従って予測時刻が逆行します。 |
| > ボタン | 順行。クリックするとScale指定に従って予測時刻が進みます。 |
| >> ボタン | 高速順行。クリックするとScale指定の10倍のステップで予測時刻が進みます。 |
| Scale スピンボックス | 操作ボタン（<<、<、>、>>）をクリックしたときに予測時刻がどれだけ変化するかを10の指数で指定します。値が0であれば、<や>の操作で時刻が1日変化します。値が-1であればそれぞれ0.1日、値が1であればそれぞれ10日変化します。<<や>>の操作ではその10倍のステップで予測時刻が変化します。 |

Show Orbitウインドウには、次表に示す補助的な情報も表示されます。

Table Show Orbitウインドウに表示される補助的な情報

|  |  |
| --- | --- |
| グループ名 | 説明 |
| Parameters for CP | 化学推進マヌーバ（CPマヌーバ）およびSTARTマヌーバの編集中に、設定された速度変化の値が表示されます。3D Orbitウインドウに表示される探査機の軌道や予測位置はここに表示されている速度変化が適用された結果になります。dvは速度変化量絶対値で、phiとelvは速度変化の向きです。定義は[軌道ローカル座標系](#_軌道ローカル座標系)を参照してください。 |
| 時刻情報 | C. Time（現在時刻）、P. Time（予測時刻）、DT（経過時間）が表示されます。「現在時刻」は直前のマヌーバの終了時刻で、「予測時刻」は表示されている探査機やターゲット天体の位置に結びついた時刻です。予測時刻の値はコピーする（クリップボードに入れる）ことが可能です。経過時間（DT）の値は変更することができ、Applyボタンをクリックすれば予測時刻に反映されます。 |
| Relative Position of Target | 探査機から見たターゲット天体の距離と方向です。rangeは距離で、phiとelvの定義は[軌道ローカル座標系](#_軌道ローカル座標系)を参照してください。 |
| Relative Velocity of Target | 探査機から見たターゲット天体の速度です。velは相対速度の絶対値で、phiとelvの定義は[軌道ローカル座標系](#_軌道ローカル座標系)を参照してください。これらの値は選択してコピーする（クリップボードに入れる）ことが可能です。 |
| Line of Sight Velocity (departing) | 探査機から見たターゲット天体の視線速度です。値が正であればターゲット天体は遠ざかりつつあり、負であれば接近しつつあります。 |

### Flight Reviewウインドウ

Flight Reviewウインドウでは、飛行結果のレビューに関する操作を行います。飛行結果のレビューでは、直前に実行されたFLYTOマヌーバの飛行を積分ステップごとに3D Orbitウインドウに表示させることができます。

Table Flight Reviewウインドウの操作

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目 | 説明 |
| Look at | SSB | 選択すると3D Orbitウインドウの描画の中心が太陽系重心(SSB : Solar System Barycenter) になります。 |
| Probe | 選択すると3D Orbitウインドウの描画の中心が探査機 (Probe) になります。 |
| Target | 選択すると3D Orbitウインドウの描画の中心がターゲット天体 (Target) になります。 |
| Show | Show Kepler Orbit | チェックすると3D Orbitウインドウに探査機の現在時刻における軌道が表示されます。 |
| Show Planets | チェックすると3D Orbitウインドウに太陽と惑星の位置と名前が表示されます。 |
| Time Manipulator | << ボタン | 高速逆行。クリックするとHoppingで指定した積分ステップ数だけ現在時刻が戻ります。 |
| < ボタン | 逆行。クリックすると1積分ステップだけ現在時刻が戻ります。 |
| > ボタン | 順行。クリックすると1積分ステップだけ現在時刻が進みます。 |
| >> ボタン | 高速順行。クリックするとHoppingで指定した積分ステップ数だけ現在時刻が進みます。 |
| Hopping スピンボックス | 操作ボタン（<<または>>）をクリックしたときに現在時刻を変化させるステップ数（積分ステップ数）指定します。スピンボックスですが、値を入力することもできます。 |

Flight Reviewウインドウには、次表に示す補助的な情報も表示されます。

Table Flight Reviewウインドウに表示される補助的な情報

|  |  |
| --- | --- |
| グループ名 | 説明 |
| 時刻情報 | S. Time（開始時刻）、C. Time（現在時刻）、DT（経過時間）が表示されます。「開始時刻」は直前のFLYTOマヌーバの開始時刻で、「現在時刻」は表示される探査機やターゲット天体の位置に結びついた時刻です。現在時刻と経過時間は選択してコピーする（クリップボードに入れる）ことができます。 |
| Relative Position of Target | 探査機から見たターゲット天体の距離と方向です。rangeは距離で、phiとelvの定義は[軌道ローカル座標系](#_軌道ローカル座標系)を参照してください。 |
| Relative Velocity of Target | 探査機から見たターゲット天体の速度です。velは相対速度の絶対値で、phiとelvの定義は[軌道ローカル座標系](#_軌道ローカル座標系)を参照してください。これらの値は選択してコピーする（クリップボードに入れる）ことが可能です。 |
| Line of Sight Velocity (departing) | 探査機から見たターゲット天体の視線速度です。値が正であればターゲット天体は遠ざかりつつあり、負であれば接近しつつあります。 |

### Maneuver Editorウインドウ

Maneuver Editorウインドウはマヌーバの編集を行う画面です。SSVGのマヌーバには次表に示す7つのタイプがあります。

Table 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。出発時刻と出発の速度を指定します。 |
| CP | 化学推進エンジンを使用して探査機の軌道を変更します。速度変化を指定します。 |
| EP\_ON | 電気推進エンジンをオンにするマヌーバです。1日あたりの速度変化を指定します。 |
| EP\_OFF | 電気推進エンジンをオフにするマヌーバです。 |
| SS\_ON | ソーラーセイルをオンにするマヌーバです。ソーラーセイルの面積と向きを指定します。 |
| SS\_OFF | ソーラーセイルをオフにするマヌーバです。 |
| FLYTO | 指定した時刻まで飛行します。飛行経路にはすべての惑星の引力と、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。 |

Maneuver Editorウインドウは、Next行（最後に実行されたマヌーバの次の行）を編集する場合に限りすべての機能を利用できます。またNext行を編集する場合はShow Orbitウインドウが表示され、2体問題の解としての予測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。

Table Maneuver Editorウインドウの操作

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 項目 | 対応マヌーバタイプ | 操作 |
| Maneuver Type | すべて | マヌーバタイプを変更します。ドロップダウンリストからマヌーバタイプを選択し、右のApplyをクリックします。 |
| Date&Time - ISOT | START  FLYTO | 出発時刻をISOT形式で指定します。（START）  飛行終了時刻をISOT形式で指定します。（FLYTO） |
| Date&Time - JD | START  FLYTO | 出発時刻をユリウス日で指定します。（START）  飛行終了時刻をユリウス日で指定します。（FLYTO） |
| Get Time | START  FLYTO | クリックするとShow Orbitウインドウの予測時刻（P. Time）を取得してDate&Timeに設定します。 |
| Flight Duration | FLYTO | 飛行時間を日数（小数可）で指定します。値を入力して右のApplyをクリックするとDate&Timeに反映されます。 |
| Show Orbit | すべて | クリックすると指定した時刻やパラメータを反映させた探査機の位置や軌道がShow Orbitウインドウに設定され、3D Orbitウインドウに表示されます。  表示される探査機の位置や軌道は2体問題の解であり、電気推進エンジンやソーラーセイルによる加速度や惑星の引力は反映されません。 |
| FTA | START  CP | クリックするとFTA Settingウインドウが開きます。FTAの使い方は[FTA Settingウインドウ](#_FTA_Settingウインドウ)を参照してください。 |
| Parameters | すべて | マヌーバのパラメータを設定します。設定するパラメータのないマヌーバもあります。 |
| Finish and Exec | すべて | マヌーバの編集を完了し、そのマヌーバを実行します。 |
| Finish | すべて | マヌーバの編集を完了します。 |

Table Maneuver EditorのParametersの設定

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| パラメータ名 | 対応マヌーバタイプ | 説明 |
| dv | START  CP | 速度変化量の絶対値を指定します。単位はメートル／秒です。 |
| dvpd | EP\_ON | 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量絶対値を指定します。単位はメートル／秒です。 |
| phi | START  CP  EP\_ON | 速度変化の方向を与える角度phi（ファイ）を指定します。単位は度です。角度の定義は[軌道ローカル座標系](#_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 | 速度変化の方向を与える角度elv（上下角）を指定します。単位は度です。角度の定義は[軌道ローカル座標系](#_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。 |
| aria | SS\_ON | 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。 |
| theta | SS\_ON | ソーラーセイルの方向を与える角度theta（シータ）を指定します。単位は度です。角度の定義は[ソーラーセイル座標系](#_ソーラーセイル座標系)を参照してください。 |
| inter | FLYTO | 探査機の位置・速度の数値積分における1ステップの長さを指定します。単位は日です。 |

### New Flight Planウインドウ

新しい飛行計画の特性を設定する画面です。

Probe propertiesグループでは、探査機の名称、質量を設定し、探査機が出発する宇宙基地を選択します。現時点では選択できる宇宙基地は1つだけ（EarthL2）で、これは地球－太陽系のラグランジュ点（L2）にあります。地球から見て太陽の反対側へ約150万kmの場所にあります。

Targetグループではターゲット天体を指定します。ターゲット天体が太陽系の惑星または地球の月、もしくは準惑星Plutoであれば、ラジオボタンのPlanet/Moonを選択してください。その下のドロップダウンリストでターゲット天体を選択します。それ以外の小天体（準惑星、小惑星、彗星など）をターゲット天体にするためにはラジオボタンのSmall Bodyを選択し、その右に小天体のパラメータを指定するのですが、その前に小天体の軌道を計算するためのファイル（SPKファイル）を入手する必要があります。SPKファイルの入手方法は[SPKファイルを入手する](#_SPKファイルを入手する)に説明があります。

### FTA Settingウインドウ

FTAのパラメータを設定する画面です。

FTAはFixed Time Arrival Guidanceの略で、指定した日時に探査機がターゲット天体に到着するよう軌道修正を行うためのパラメータを計算します。想定している使い方は次のとおりです。

* Next行を編集中のManeuver Editorウインドウで、
* マヌーバのタイプがSTARTまたはCPの場合に、
* Show Orbitウインドウで予測時間を操作して到着予定日時を決定して、
* FTAボタンをクリックして機能を利用する。

上記の使い方であれば、Time to Arrival（到着までの時間）の設定はGet Prediction Time from Show Orbit Window（Show Orbitウインドウの予測時間を取得する）にします。Specify Time to Arrivalを選択して、到着までの時間（日）を指定することもできます。

FTAではターゲット天体の中心ではなく、すこし離れた場所を目指すこともよくあります。探査機を惑星の衛星軌道に投入したい場合や、惑星でスイングバイを行いたい場合などです。そのような場合には、Set Probe's Sight onグループのパラメータで目指す場所を指定します。ターゲット天体の中心からの距離と二つの角度（phiとelv）です。phiとelvについては[軌道ローカル座標系](#_軌道ローカル座標系)を参照してください。

## 座標系

### 黄道座標系

地球の公転面（黄道面）と赤道面を基準にした座標系です。X軸は春分点方向で、Z軸は黄道面に垂直で北向きです。Y軸はX軸とZ軸両方に直交します。SSVGでは西暦2000.0年の黄道面・赤道面に基づいた座標系（J2000）を使用しています。

### 軌道ローカル座標系

探査機やターゲット天体など、太陽を周回する天体の軌道に基づいた座標系です。太陽を原点にした天体の位置と、太陽に対する天体の速度が基準です。

X軸：天体の速度ベクトルに平行です。

Z軸：天体の角運動量ベクトルに平行です。

Y軸：X軸とZ軸の両方に直交します。

Figure 　軌道ローカル座標系の定義

X axis: parallel to the velocity vector of the object

Y axis: perpendicular to X axis and Z axis

Z axis: parallel to the angular momentum vector of the object

#### 【軌道ローカル座標系の極座標表現】

Figure 　軌道ローカル座標系の極座標表現

X axis

Y axis

Z axis

phi

elv

(r, phi, elv)

r

SSVGでは探査機のマヌーバにおける速度変化の向きや、探査機から見たターゲット天体の位置と速度の表現などに、軌道ローカル座標系での極座標表現（上図）を使用します。

### ソーラーセイル座標系

探査機のソーラーセイルの向きの指定に使用する座標系です。軌道ローカル座標系と同様に太陽を原点にした探査機の位置と太陽に対する探査機の速度を基準にした座標系ですが、X軸の向きは探査機の位置ベクトルと平行になります。Z軸は探査機の角運動量ベクトルと平行です。

Figure 　ソーラーセイル座標系の定義

X axis: parallel to the position vector of the probe

Y axis: perpendicular to X axis and Z axis

Z axis: parallel to the angular momentum vector of the probe

#### 【ソーラーセイル座標系の極座標表現】

Figure 　ソーラーセイル座標系の極座標表現

X axis

Y axis

Z axis

theta

elv

(theta, elv)

SSVGではソーラーセイルの向きをセイル面の法線ベクトル（面に垂直で太陽から遠ざかる向きの単位ベクトル）のソーラーセイル座標系での極座標（上図）で表現します。角度の定義は同様ですが、座標軸が異なるため角度の呼び名を変えています。

## 時刻系

SSVGの時刻はすべてTDB（太陽系重心における太陽系力学時）です。

## 化学推進エンジン

SSVGの探査機の化学推進エンジンは、瞬時に探査機の速度を変化させることできる、というモデル化を行っています。また燃料の消費は考慮されていません。推進に伴う誤差（加速度の絶対値の誤差ならびに推力の方向の誤差）は考慮されていません。

## 電気推進エンジン

SSVGの探査機の電気推進エンジンは、探査機を連続的に加速するようモデル化されています。加速に伴う推進剤の消費は考慮されていません。また電源の制約等に伴う加速度の限界についても考慮されていません。推進に伴う誤差（加速度の絶対値の誤差ならびに推力の方向の誤差）は考慮されていません。

## ソーラーセイル

SSVGのソーラーセイルは、太陽光を完全に反射する平面鏡としてモデル化されています。また任意の面積のソーラーセイルを任意の向きに開くことができます。ソーラーセイルの面積の誤差や向きの誤差は考慮されていません。

## 探査機の軌道の数値積分

探査機の軌道（2体問題の解としての予測軌道ではなく、FLYTOで飛行中の軌道）は、探査機に働く力を以下のとおりと仮定して数値積分を行っています。これら以外の力は考慮されていません。

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

以上