|  |
| --- |
|  |
| SSVGユーザーズガイド |
| Solar System Voyager(SSVG) Users Guide |

|  |
| --- |
| 植月修志　(Shushi Uetsuki/whiskie14142)  2018/8/18  Rev. 1.1.0  SSVG Version 1.1 対応 |

目次

[SSVGとは 1](#_Toc522022104)

[SSVGでできること 2](#_Toc522022105)

[探査機の軌道を変化させてみよう 2](#_Toc522022106)

[自由に宇宙を飛び回ろう 2](#_Toc522022107)

[スイングバイを試そう 2](#_Toc522022108)

[実際の探査機の飛行を再現しよう 3](#_Toc522022109)

[実現可能な飛行計画を作ろう 4](#_Toc522022110)

[電気推進を使おう 4](#_Toc522022111)

[ソーラーセイルを使おう 4](#_Toc522022112)

[この文書の開き方 5](#_Toc522022113)

[ソフトウェアのライセンス 5](#_Toc522022114)

[この文書のライセンス 6](#_Toc522022115)

[作者へのご連絡方法 6](#_Toc522022116)

[SSVGの使い方 7](#_Toc522022117)

[インストール／アンインストール 7](#_Toc522022118)

[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 7](#_Toc522022119)

[Pythonソースプログラムのインストール／アンインストール 7](#_Toc522022120)

[SSVGの起動 8](#_Toc522022121)

[Windows実行形式プログラムの場合 8](#_Toc522022122)

[Pythonプログラムの場合 8](#_Toc522022123)

[サンプルを見る 9](#_Toc522022124)

[飛行計画を開く 9](#_Toc522022125)

[マヌーバを実行する 10](#_Toc522022126)

[マヌーバを続けて実行する 12](#_Toc522022127)

[飛行結果を確認する 12](#_Toc522022128)

[新しい探査機を飛行させる 14](#_Toc522022129)

[飛行計画の新規作成 14](#_Toc522022130)

[探査機を出発させる 15](#_Toc522022131)

[宇宙基地から離れる 16](#_Toc522022132)

[探査機を増速させる 17](#_Toc522022133)

[探査機を減速させる 18](#_Toc522022134)

[探査機を横方向に加速させる 19](#_Toc522022135)

[探査機を自由に飛行させる 20](#_Toc522022136)

[火星を目指す 20](#_Toc522022137)

[木星でスイングバイを試す 21](#_Toc522022138)

[金星に向かう飛行計画 25](#_Toc522022139)

[飛行計画の新規作成 25](#_Toc522022140)

[STARTマヌーバ 25](#_Toc522022141)

[FLYTOマヌーバ（その1） 27](#_Toc522022142)

[CPマヌーバ 28](#_Toc522022143)

[FLYTOマヌーバ（その2） 28](#_Toc522022144)

[FLYTOマヌーバ（その3） 28](#_Toc522022145)

[小天体を目指す 29](#_Toc522022146)

[リファレンスマニュアル 31](#_Toc522022147)

[基本用語 31](#_Toc522022148)

[探査機（Probe） 31](#_Toc522022149)

[宇宙基地（Space Base） 31](#_Toc522022150)

[マヌーバ（Maneuver） 32](#_Toc522022151)

[飛行計画（Flight Plan） 34](#_Toc522022152)

[ターゲット天体（Target） 34](#_Toc522022153)

[化学推進エンジン 34](#_Toc522022154)

[電気推進エンジン 35](#_Toc522022155)

[ソーラーセイル 36](#_Toc522022156)

[ウインドウとその操作 37](#_Toc522022157)

[SSVGウインドウ 37](#_Toc522022158)

[3D Orbitウインドウ 42](#_Toc522022159)

[Show Orbitウインドウ 44](#_Toc522022160)

[Flight Reviewウインドウ 47](#_Toc522022161)

[Review Throughoutウインドウ 49](#_Toc522022162)

[Maneuver Editorウインドウ 52](#_Toc522022163)

[New Flight Planウインドウ 54](#_Toc522022164)

[FTA Settingウインドウ 56](#_Toc522022165)

[Start Optimize Assistantウインドウ 58](#_Toc522022166)

[CP Optimize Assistantウインドウ 62](#_Toc522022167)

[座標系 65](#_Toc522022168)

[黄道座標系 65](#_Toc522022169)

[軌道ローカル座標系 66](#_Toc522022170)

[ソーラーセイル座標系 67](#_Toc522022171)

[Bプレーン座標系 68](#_Toc522022172)

[その他の情報 69](#_Toc522022173)

[時刻について 69](#_Toc522022174)

[探査機の飛行経路の数値積分 70](#_Toc522022175)

[2体問題軌道 70](#_Toc522022176)

[推進装置とロケット方程式 71](#_Toc522022177)

[SPKファイルを入手する 72](#_Toc522022178)

[ログファイル 75](#_Toc522022179)

[推力方向モード 75](#_Toc522022180)

[飛行計画のサンプル 76](#_Toc522022181)

[参考文献 78](#_Toc522022182)

# SSVGとは

SSVG（Solar System Voyager）は自分の探査機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。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、目的の天体に向かう宇宙航行の詳細な内容を「飛行計画」として組み立てます。飛行計画の主役は飛行する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、複数のタイプがあります。

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天体（探査機が目標としている天体）の位置や軌道、惑星の位置などが表示されます。

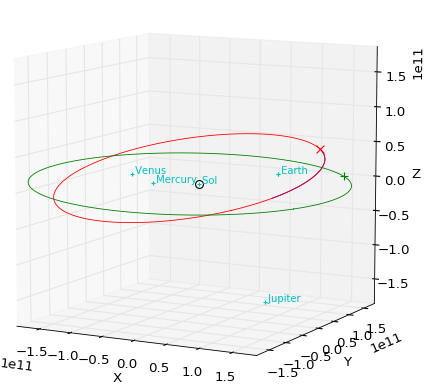
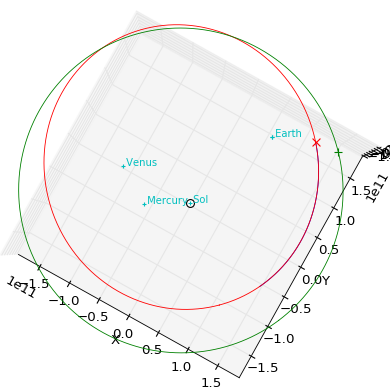


Figure 1　SSVGの表示例

## 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、探査機を減速したら？
* 探査機を横方向に加速したら？　ところで、宇宙で「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8つの惑星の中で質量が最大（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で、しばしば重要な役割を果たしてきました。

SSVGでは、探査機の飛行経路として、スイングバイを含めた現実に近い経路をシミュレートします。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

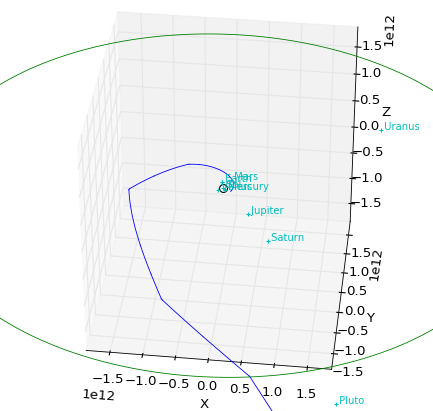
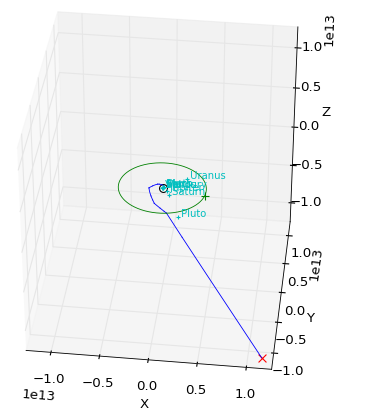
実際の惑星探査機の飛行について、こんな疑問を感じたことはありませんか？

* 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。その飛行計画を実行すれば、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。

Figure 2　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、実際の宇宙探査機はそうではありません。燃料や推進剤の搭載量には厳しい制限があるため、実際の宇宙探査機は燃料や推進剤をあまり必要としない、経済的な飛行経路を選ぶしかありません。

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。この「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「地球を離れる日付」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システム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システム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、電気推進システムは推進剤の使用効率の面で大きなメリットがあります。しかし推力が小さいというデメリットもあります。典型的な電気推進システム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～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、電気推進システム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ゆく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3行目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ています。

Numpy : http://www.numpy.org/  
 Scipy : http://scipy.org/  
 matplotlib : http://matplotlib.org/  
 PyQt4 : https://www.riverbankcomputing.com/news/

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/  
 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>>

## 作者へのご連絡方法

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を利用してください。

### 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

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圧縮ファイル（zipファイル）として配布されます。ファイルの名前は「SSVG\_x\_x\_x.zip」といったものです。x\_x\_xはバージョン番号です。zipファイルをエクスプローラーなどの適当なツールで開き、SSVGのフォルダ全体をハードディスクに展開（解凍）してください。SSVGの配布アドレスの一つはこちらです。  
<<http://yahoo.jp/box/A0fffK>>

SSVGをアンインストールするには、インストールされたSSVGのフォルダ全体を削除してください。

【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1600×1024以上の解像度のものを推奨します。

【SPKファイルの入手】

実行形式プログラムには、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。次のアドレスから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dataフォルダに格納してください。  
<<http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/de430.bsp>>

### Pythonソースプログラムのインストール／アンインストール

もしNumpy/Scipy/matplotlib/PyQt4を含むPython 3.5がインストールされているPCがあれば、Pythonで記述された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のソースプログラムは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フォルダをそっくりPCにコピーしてください。

【動作環境等】

Python 3.5

ディスプレイは1600×1024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 1.10.4

Scipy 0.17.0

matplotlib 1.5.1

pyqt 4.11.4

jplephem 2.6

julian

pytwobodyorbit 0.1.0

spktype01 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。

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sourceフォルダ全体を削除してください。

【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。次のアドレスからSPKファイル（ファイル名：de430.bsp）を入手し、sourceフォルダの直下にあるdataフォルダ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の場合

展開されたSSVGフォルダにある 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。デスクトップなどにSSVG.exeのショートカットを作成しておくと便利でしょう。

### Pythonプログラムの場合

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。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source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

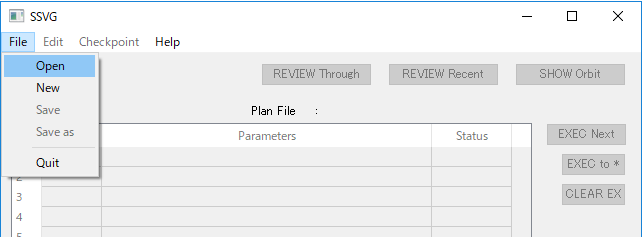
## サンプルを見る

### 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 Orbit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で、Fileをクリックして、リストにあるOpen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sampleplanというフォルダがあり、そこに飛行計画のサンプルが複数格納されています。一番上にあるMars01.jsonを開きましょう。

Figure 3　飛行計画のファイルを開く



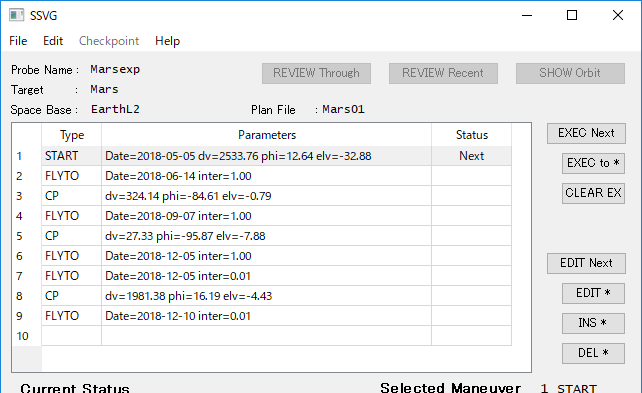
メニュー

Openを実行

Mars01は地球の近くの宇宙空間にある「EarthL2」という宇宙基地を出発して火星（Mars）に向かう探査機（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。

Figure 4　マヌーバ表

マヌーバ表

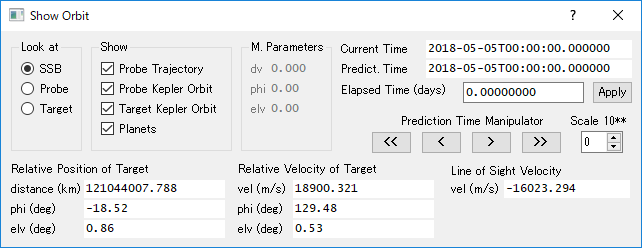


### マヌーバを実行する

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「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（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Show Orbitウインドウが新しく開きます（次図）。

Figure 5　Show Orbitウインドウ



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＋：ターゲット天体（ここでは火星）の位置

緑線の楕円：ターゲット天体（ここでは火星）の軌道

白抜き黒丸：太陽の位置

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

Mars01を開いて「EXEC Next」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。

Figure 6　3D Orbitウインドウの表示内容

探査機

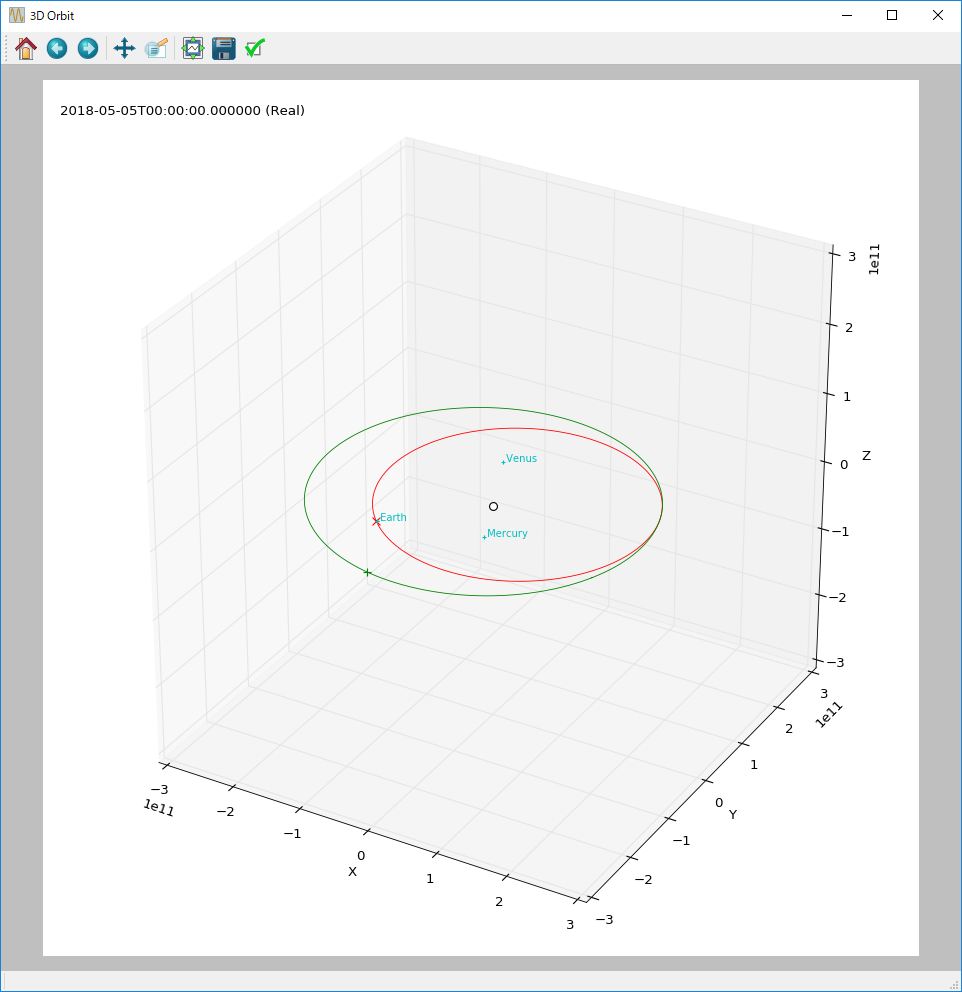
探査機の軌道

ターゲット天体

ターゲット天体の

軌道

太陽

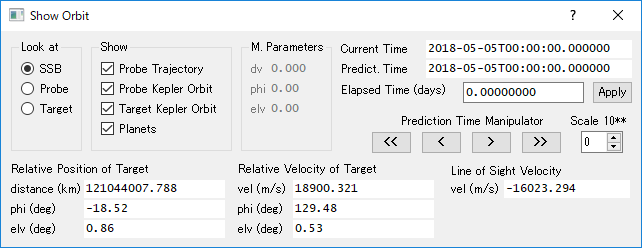


ここで、3D Orbitウインドウに表示される図を操作してみましょう。3D Orbitウインドウの上にマウスカーソルを移動して、左ボタンを押しながらマウスを上下や左右に動かしてみてください。表示される3次元の図の向きが変わり、探査機やターゲット天体、そして惑星などの位置関係を違う角度から観察できるでしょう。次に右ボタンを押しながらマウスを上下に動かしてみてください。3D Orbitウインドウに表示されている図の拡大や縮小ができます。

3D Orbitウインドウに表示される図の操作の一部はShow Orbitウインドウから行います。Show OrbitウインドウのPrediction Time Manipulator（予測時刻の操作：次図）にある「**>>**」ボタン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天体や他の惑星がどのような位置にあるかが予測され、3D Orbitウインドウに表示されます。

予測時刻の操作

Figure 7　予測時刻の操作



3D Orbit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 OrbitウインドウおよびShow Orbitウインドウを参照してください。

### 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。「EXEC Next」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、「EXEC Next」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。SSVGのマヌーバの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。

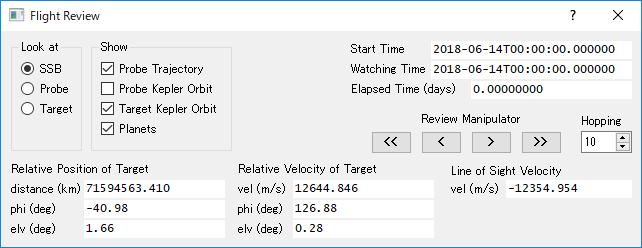
### 飛行結果を確認する

FLYTOマヌーバの実行直後には、その飛行の経過を3D Orbit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、「CLEAR EX」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「EXEC Next」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ある「REVIEW Recent」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ウインドウに入れ替わり、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Review Manipulator（レビューの操作：次図）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天体（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。

レビューの操作

Figure 8　Flight Review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。「EXEC Next」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「REVIEW Recent」ボタンをクリックしてください。SSVGウインドウの下がFlight Reviewウインドウになり、3D Orbit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天体（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天体の付近を拡大して3D Orbit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。

* 図の中心をターゲット天体にするには？  
  Flight ReviewウインドウのLook atグループにある「Target」ラジオボタンを選択する
* 図を拡大するには？  
  3D Orbit画面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 Orbit画面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？  
  Flight ReviewウインドウのReview Manipulator（レビューの操作）のボタンを操作する

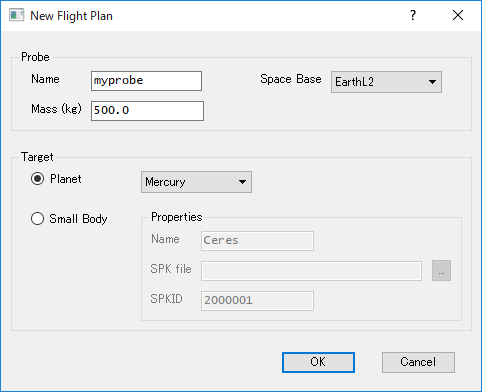
## 新しい探査機を飛行させる

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のFileをクリックし、 Newを実行してください。New Flight Planウインドウが開きます。

Figure 9　New Flight Planウインドウ



Probe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（Space Base）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EarthL2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。150万キロメートルというとずいぶん遠いようですが、太陽から地球までの距離の1％ほどに過ぎません。

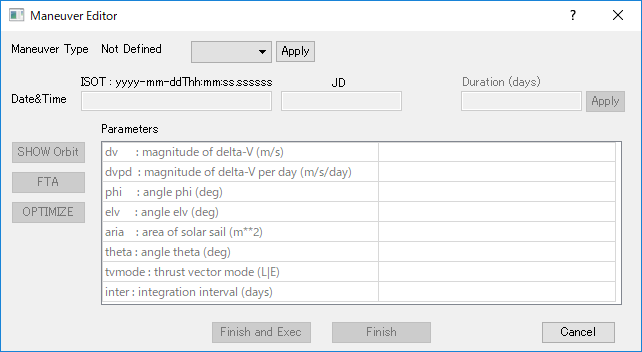
Targetグループでは目的地であるターゲット天体を指定します。ここでは火星をターゲット天体にしましょう。「Mercury」が選択されているドロップダウンリストをクリックして、Marsを選択しましょう。ウインドウ下部の「OK」ボタンをクリックすると新しい飛行計画が作成されます。まだマヌーバを作っていませんから、マヌーバ表にはマヌーバがありません。内容が空で、Nextの表示だけがある行だけが見えています。

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Fileをクリックし、Save as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。「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。

Figure 10　Maneuver Editorウインドウ



最初にマヌーバのタイプを指定します。ここで指定するのは探査機を出発させるマヌーバ「START」です。ウインドウ上部にあるManeuver Type（マヌーバタイプ）のドロップダウンリストをクリックしてSTARTを選択し、その右の「Apply」ボタンをクリックしてください。Show Orbitウインドウが開き、3D Orbitウインドウに探査機とターゲット天体の軌道と位置、惑星や太陽の位置などが表示されます。Maneuver EditorウインドウにはStart Time（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Parametersの表ではdv、phi、elvの行に初期値（いずれも0.0）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。

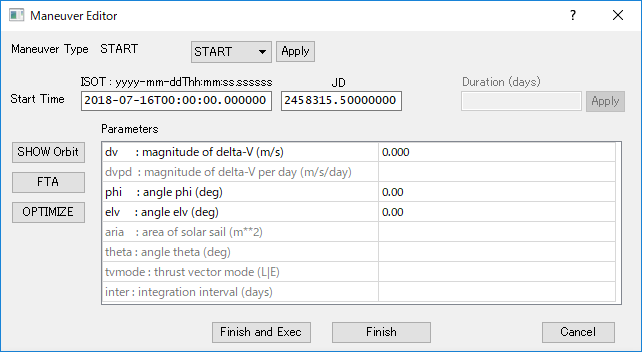
このとき表示される探査機の軌道は、「探査機が速度ゼロで出発した場合」の軌道です。これを2500メートル／秒（秒速2500メートル）で出発するように変更しましょう。Maneuver Editorウインドウの表（Parametersの表）の先頭の行（dvの行）が出発する速度を指定する行です。右方の0.000と表示されている欄（次図）をダブルクリックして、2500に書き換えてください。その左にあるSHOW Orbitボタンをクリックすると、設定内容がShow Orbitウインドウと3D Orbitウインドウの図に反映されます。

Parametersの表ではphi（ファイ）の行とelv（上下角）の行も設定できます。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、探査機は宇宙基地が動いている方向(\*)に出発します。

(\*) 宇宙基地は地球のラグランジュ点L2にあるので地球から見るとほとんど静止していますが、地球とともに太陽の周囲を公転しています。ここでの宇宙基地の動きとは、太陽に対する運動を指しています。

速度を指定する欄

Figure 11　Maneuver Editorウインドウ（STARTマヌーバの編集中）



STARTマヌーバでは出発時刻（Start Time）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マヌーバの作成は終了です。Maneuver EditorウインドウのFinish and Exec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。

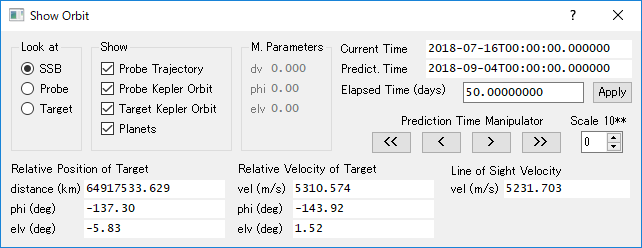
### 宇宙基地から離れる

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、EDIT Nextボタンをクリックしてください。Maneuver Editorウインドウが開きますから、Maneuver Type（マヌーバタイプ）としてFLYTOを選択し、Applyボタンをクリックしてください。初期値として飛行終了を現在時刻（つまり飛行時間をゼロ）とするFLYTOマヌーバが用意されます。またManeuver Editorウインドウの下にはShow Orbit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。Show Orbitウインドウの右端の近くにある「**>>**」ボタン（次の図の赤丸）を5回クリックしてください。クリックする度に3D Orbitウインドウに表示されている探査機やターゲット天体の位置などが10日後の位置に変化します。同時にManeuver EditorウインドウのEnd Time（飛行終了時刻）やDuration（飛行時間）の値も変化します。

Figure 12　Endtime（飛行終了時刻）を進める



Duration（飛行時間）が50日になっていることを確認し、Maneuver EditorウインドウのFinish and Exec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Current Status（現在の状態）や3D Orbitウインドウの図に反映されます。この時点でSSVGは現在時刻をFLYTOマヌーバの飛行終了時刻（End Time）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EDIT Nextボタンをクリックしてください。Maneuver Editorウインドウが開きますので、Maneuver TypeをCPにしてください（ドロップダウンリストでCPを選択し、Applyボタンをクリックします）。

CPマヌーバでは速度変化量dvと角度phi（ファイ）、角度elv（上下角）の三つのパラメータが設定できます。

速度変化量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。値を設定して左方にあるSHOW Orbit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 Orbitウインドウに表示されます。

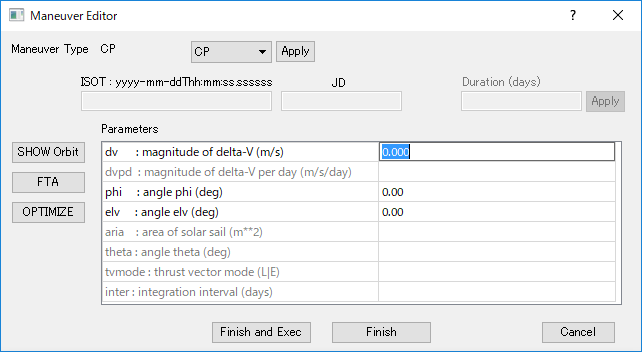
角度phiと角度elvが両方ともゼロだと、このCPマヌーバは探査機が現在動いている方向に速度を加える（増速する）ことになります。速度変化量dvの値を変えてSHOW Orbitボタンをクリックし、探査機の増速が軌道をどんなふうに変化させるか確認しましょう。

Figure 13　Maneuver Editorウインドウ（CPマヌーバ編集中）

速度変化量dv

角度phi（ファイ）

角度elv（上下角）



### 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？　それを確かめるためには、角度phiと角度elvの設定が必要になります。次の図を見てください。なお、速度変化量dvは次の図のΔV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。またこの図の角度phiと角度elvを用いて、速度変化の方向を表現します。

Figure 14　速度変化量と方向の表現

ΔV

O

H

X軸（＝探査機の運動方向）

Y軸

Z軸

phi

elv

dv

この図の座標の原点（点O）は探査機です。X軸は探査機の運動方向（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。

上の図の赤矢印は探査機の速度に加える、差分としての速度ベクトルΔV（デルタV）です。ΔV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、角度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。角度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、角度elvはゼロで、角度phiは180度（または -180度）です。速度変化量dvをいろいろと変えてSHOW Orbitボタンをクリックし、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「速度変化量と方向の表現」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方向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角度phi（ファイ）の値と角度elv（上下角）の値は次の表のようになります。「速度変化量と方向の表現」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。

Table 1　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 |
| 角度phi（ファイ） | 0 | 180 | 90 | 270または-90 | 自由な値 | 自由な値 |
| 角度elv（上下角） | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | -90 |

では、速度変化量dvと角度phi、角度elvをいろいろと組み合わせてSHOW Orbitボタンをクリックし、軌道を変化させてみましょう。

現在Maneuver Editorウインドウを開いてCPマヌーバを編集中だと思いますが、Finish and Exec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 Orbit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。3D Orbitウインドウ上でマウスの左ボタンを押しながらマウスを上下や左右に動かして観察してください。

### 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  
  （Table 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自由に飛行させ、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の削除や、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「DEL \*」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「INS \*」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EDIT Next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で編集できますが、軌道の確認など一部の役に立つ機能が使用できません。

SSVGウインドウの「CLEAR EX」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。EXEC Next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EDIT Next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、ターゲット天体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＋で表示されているはずです。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 Orbit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、Show OrbitウインドウのPrediction Time Manipulator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 Orbit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。
* ターゲット天体の近傍を拡大して観察するには、
  + Show Orbitウインドウの「Look at」グループで「Target」を選択する
  + 3D Orbit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。ひどく難しい、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天体（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）とターゲット天体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にはターゲット天体への接近を支援する便利なツール（FTA）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。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、
  + ターゲット天体： 木星（Jupiter）
  + 宇宙基地： EarthL2
* 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
* FLYTOマヌーバを作成して実行します。飛行期間は428日です。  
  （飛行終了時刻はISOTで2021-05-28T00:00:00、JDで2459362.5になります）

上記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。メニューにある「Checkpoint」をクリックし、「Create」を実行してください。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。

Show OrbitウインドウのPrediction Time Manipulator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 Type（マヌーバタイプ）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 (\*) 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。このようなきめ細かな軌道修正パラメータを計算するのがSSVGのFTA機能です。Maneuver Editorウインドウの左方にある「FTA」ボタンをクリックしてください。FTA Settingウインドウが開きます。

(\*) 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。ターゲット天体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。

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。

* 到着までの時間：探査機が2体問題軌道で目標位置に到着するまでの時間
* 詳細な目標位置：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」のいずれかが使用できますが、ここでは「Bプレーン座標系」を使用します。

FTA Setting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。

* Time to Arrivalグループで、
  + ラジオボタン「Specify Time to Arrival」を選択し、
  + 入力フィールド「Time to Arrival (days)」に150を入力します。
* Precise Targetingグループで、
  + ラジオボタン「Specify B-plane Coordinates」を選択します。
* B-plane Coordinates (\*)グループで、
  + 入力フィールド「offset distance (km)」に5000000（5百万）を入力し、
  + 入力フィールド「beta (deg)」に0.0を入力します。

(\*) 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天体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。

選択します

到着までの時間（日数）

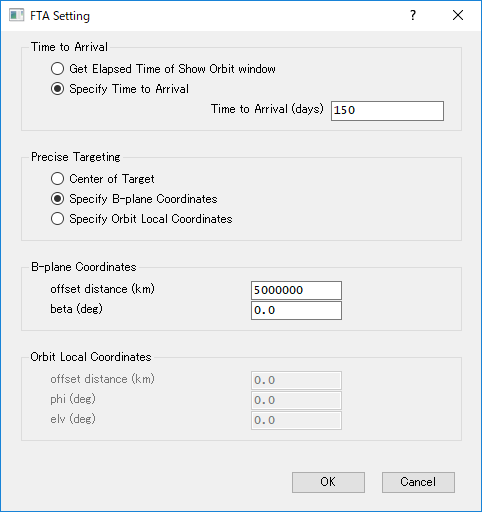
を指定します

選択します

オフセット距離を指定します

角度betaを指定します

Figure 15　FTA機能のパラメータの設定



設定が終わったら、「OK」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、ここでも「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Maneuver Editorウインドウに反映されます。

続いてManeuver Editorウインドウで「Finish and Exec」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マヌーバの飛行時間は300日にしましょう。

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「REVIEW Recent」ボタンをクリックしてください。Show Orbitウインドウに代わってFlight Reviewウインドウが現れます。Review Manipulator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。Flight ReviewウインドウのShowグループで「Probe Kepler Orbit」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。

Table 2 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。しかしこの行を編集してFTA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のレジューム機能を使うことができます(\*)。SSVGのメニューで「Checkpoint」をクリックし、「Resume」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、このレジューム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「CLEAR EX」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「EXEC Next」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「Checkpoint」をクリックし、「Create」を実行します。（これで2行目にcheckpointの表示が現れ、次の回はレジューム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。「EDIT Next」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。Table 2に掲載していないパラメータについては、Figure 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 SettingウインドウやBプレーン座標系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けて飛行
* 小さな出発速度（6キロメートル／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」には出発日時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File をクリックしてNewを実行し、新しい飛行計画を生成してください。ターゲット天体としては金星（Venus）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EarthL1とEarthL2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。EarthL1は太陽の方向にあり、EarthL2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EarthL1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EarthL2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あります。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、EarthL1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。

「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ウインドウでマヌーバのタイプとしてSTARTを指定します。

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。

Maneuver Editorウインドウの「Optimize」ボタンをクリックしてください。Start Optimize Assistantウインドウが開きます（次図）。

出発時刻の調整

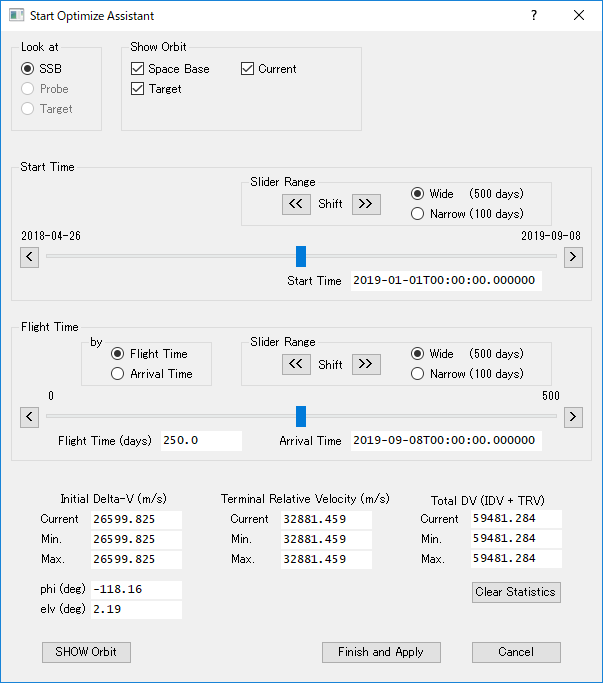
飛行時間の調整

速度の合計

到着時の相対速度

出発速度

Figure 16　Start Optimize Assistantウインドウ



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「Start Time」「Flight Time」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天体（金星）までの飛行時間を調整します。

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 Orbitウインドウに表示します。同時にSSVGは次の値を計算してStart Optimize Assistantウインドウに表示します。

* Initial Delta-V：探査機の出発速度（絶対値と方向）
* Terminal Relative Velocity：探査機が到着したときのターゲット天体の相対速度（絶対値）
* Total DV：Initial Delta-Vの絶対値とTerminal Relative Velocityの合計

スライダーを左右に動かすと、出発時刻や飛行時間が変化し、上記の値や軌道（3D Orbit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、スライダーの値の範囲をシフトする（ずらす）ことができます。1回のクリックで、スライダー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Start Optimize Assistantウインドウを見てください。

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：2019-09-01T00:00:00.000000（2019年9月1日）
* 飛行時間：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「Finish and Apply」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。

Maneuver Editorウインドウで「Finish and Exec」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）

Optimize Assistant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な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「EDIT Next」ボタンをクリックしてください。Maneuver Editorウインドウでは、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「Finish and Exec」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「EDIT Next」ボタンをクリックし、Maneuver Editorウインドウ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、Show OrbitウインドウのPrediction Time Mnipulator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。Show OrbitウインドウのPrediction Time Manipulator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Maneuver Editorウインドウの「FTA」ボタンをクリックしましょう。FTA Settingウインドウが開きますが、このときTime to Arrivalのフィールドには適切な到着までの飛行時間（日数）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、Prediction Time ManipulatorのScaleの値を-1（場合によっては-2）にしてください。

FTA SettingウインドウのPrecise Targetingグループでは、「Specify B-plane Coordinates」を選択しましょう。Bプレーン座標系を参照して接近の目標位置を設定してください。続いて「OK」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Maneuver Editorウインドウに反映されます。

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 Orbitウインドウで確認することができます。ターゲット天体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、Maneuver Editorウインドウの「Finish and Exec」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。Maneuver EditorのParametersの表のinterの値を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「REVIEW Recent」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、飛行終了時刻（End Time）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。

## 小天体を目指す

これまでの例では、ターゲット天体として太陽系の惑星の一つ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の一つをターゲット天体として選択し、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天体として選択することはできません（地球の月は例外で、ターゲット天体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天体にする場合は、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、「Type 1」と呼ばれる形式のSPKファイルだけです。筆者が確認した範囲では、HORIZONSシステムにTelnetインタフェースでSPKファイルの作成を依頼する場合にはこの「Type 1」の形式のファイルを指定することができます。HORIZONSシステムにTelnetでSPKファイルの作成を依頼する例が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。

太陽系の小天体をターゲット天体として選択する場合、SPKファイルのファイル名に加えて、その天体のSPKID（SPK object ID）がが必要です。HORIZONSシステムにSPKファイルの作成を依頼するときにSPKIDも通知されますので、忘れずにメモしておいてください。

SPKファイルとSPKID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天体として選択することが可能になります。

# リファレンスマニュアル

## 基本用語

### 探査機（Probe）

SSVGでは飛行させる宇宙機を「探査機」と呼びます。SSVGでの表記は「Probe」です。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、「ターゲット天体」を目指して飛行します。

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（Space Base）

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、と想定しています。宇宙基地のSSVGでの表記は「Space Base」です。

宇宙基地は、すべての惑星の近くの宇宙空間にふた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は惑星からみて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）ラグランジュ点L1とL2は厳密には惑星の軌道が円であり、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。

Table 3　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（Mercury） | MercuryL1 | MercuryL2 | 0.00381 | 0.22 |
| 金星（Venus） | VenusL1 | VenusL2 | 0.00934 | 1.0 |
| 地球（Earth） | EarthL1 | EarthL2 | 0.01008 | 1.5 |
| 火星（Mars） | MarsL1 | MarsL2 | 0.00476 | 1.1 |
| 木星（Jupiter） | JupiterL1 | JupiterL2 | 0.06828 | 53 |
| 土星（Saturn） | SaturnL1 | SaturnL2 | 0.04568 | 66 |
| 天王星（Uranus） | UranusL1 | UranusL2 | 0.02442 | 69 |
| 海王星（Neptune） | NeptuneL1 | NeptuneL2 | 0.02580 | 120 |

### マヌーバ（Maneuver）

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での表記は「Maneuver」です。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Maneuver Editorウインドウを参照してください。

Table 4 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の速度（大きさと向き）を指定します。指定する速度は出発する宇宙基地からの相対速度です。つまり、このマヌーバを実行すると、探査機は宇宙基地の速度に指定した相対速度を加えた（ベクトルとして足し合わせた）速度で飛行を開始します。  このマヌーバの実行によりSSVGの現在時刻がセットされます（出発時刻がSSVGの現在時刻になります）。  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。  パラメータとして速度変化（大きさと向き）を指定します。このマヌーバを実行すると、探査機の速度はそれまでの速度に指定した速度変化を加えた（ベクトルとして足し合わせた）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するマヌーバです。  パラメータとして1日あたりの速度変化（大きさと向き）および推力方向モードを指定します。  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するマヌーバです。  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するマヌーバです。  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。  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するマヌーバです。  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に加えてすべての惑星および地球の月の引力と、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（Flight Plan）

SSVGでは、探査機の情報とターゲット天体、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での表記は「Flight Plan」です。

SSVGで探査機を飛行させるには、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。またターゲット天体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、最初はターゲット天体を木星（Jupiter）にしておき、スイングバイを行った後にターゲット天体を土星（Saturn）に変更するとよいでしょう。

### ターゲット天体（Target）

ターゲット天体はSSVGがその時点で目指している（目標としている）天体です。SSVGでの表記は「Target」です。ターゲット天体の位置や軌道は3D Orbitウインドウに表示することができますし、SSVGでマヌーバを編集するときに使う支援ツール（FTAやOptimize Assistant）は、探査機がターゲット天体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マヌーバの速度変化量と方向を求めさせたい場合には、その時点でその天体がターゲット天体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天体であるかは、探査機の飛行経路には影響を与えません。

ターゲット天体として選択できる天体は次の二種類です。

* 惑星（Planet）：太陽系の8惑星と冥王星、および月（地球の月）です。これらをターゲット天体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（Small Body）： NASA/JPLのHORIZONSシステムがSPKファイルを提供している太陽系の小天体（準惑星、小惑星、彗星）です。これらの一つをターゲット天体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をターゲット天体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）。この弱点は現実なのですが、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（大きさと方向の両方に）。

### 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方法です。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方法です。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（大きさと方向の両方に）。

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仮定されています。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。その仕組みから、ソーラーセイルの推力は太陽から遠ざかる方向に向かうことは明らかでしょう。

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す。
* 瞬間的にオン／オフを切り替えることができます。
* 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します。
* セイルの面積には制限はありません。
* 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ます。
* セイルの質量は探査機の全質量に含まれます。
* セイルの面積や向きには誤差はありません。

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、それに垂直な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。

## 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：いくつかの重要な機能はメニューから実行します。
* ボタン：三つのグループがあります。「表示関連ボタン」「実行関連ボタン」そして「編集関連ボタン」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。
* 現在の状態：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。
* 選択されたマヌーバ：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、ターゲット天体、宇宙基地、飛行計画のファイル名などが表示されます。

メニュー

表示関連

ボタン

実行関連

ボタン

編集関連

ボタン

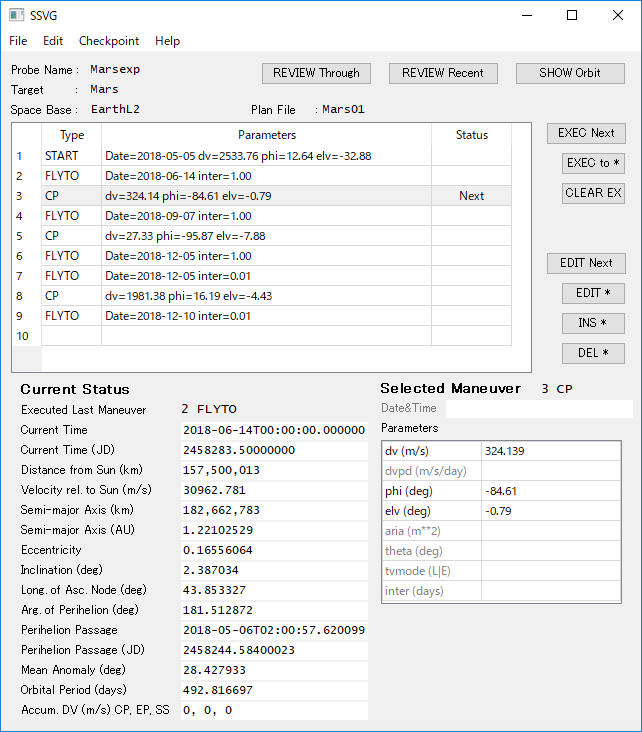
現在の状態

選択された

マヌーバ

マヌーバ表

Figure 17　SSVGウインドウ



#### メニュー

Table 5　SSVGウインドウのメニュー

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| メニュー項目 | 小項目 | 機能 |
| File | Open | ファイルから飛行計画を読み込みます。 |
| New | 新しい飛行計画を作成します。  New Flight Planウインドウを参照してください。 |
| Save | 飛行計画を現在の飛行計画ファイルに保存します。 |
| Save as | 飛行計画を新しいファイル名で保存します。 |
| Quit | SSVGを終了します。 |
| Edit | Probe | 飛行計画の探査機の情報を編集します。  実行するとEdit Probe Propertiesウインドウが開きますが、設定方法はNew Flight Planウインドウを参照してください。 |
| Target | 飛行計画のターゲット天体を編集します。  実行するとSelect New Targetウインドウが開きますが、設定方法はNew Flight Planウインドウを参照してください。 |
| Checkpoint | Create | チェックポイントを生成します。(\*1) |
| Resume | 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。 |
| Help | about SSVG | 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生成し、マヌーバ表にcheckpointを表示します。Resume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「CLEAR EX」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

Table 6 SSVGウインドウのボタン

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 表示名 | 機能 |
| 表示関連ボタン | REVIEW Through | Review Throughoutウインドウを表示し、実行済みのすべてのマヌーバのレビューを開始します。3D Orbitウインドウが閉じられている場合は再表示します。 |
| REVIEW Recent | Flight Review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 Orbitウインドウが閉じられている場合は再表示します。 |
| SHOW Orbit | Show Orbitウインドウを表示し、探査機の位置やその軌道の観察を開始します。3D Orbitウインドウが閉じられている場合は再表示します。 |
| 実行関連ボタン | EXEC Next | マヌーバ表のNext行のマヌーバを実行します。 |
| EXEC to \* | マヌーバ表の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。 |
| CLEAR EX | 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。 |
| 編集関連ボタン | EDIT Next | Maneuver Editorウインドウを開き、マヌーバ表のNext行のマヌーバを編集します。 |
| EDIT \* | Maneuver Editorウインドウを開き、マヌーバ表の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）すると飛行計画の実行状態は消去されます。 |
| INS \* | 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。 |
| DEL \* | 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。 |

#### 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。

* Typeカラム：マヌーバのタイプを表示します。
* Parameters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。
* Statusカラム：Next、checkpoint、または空白のいずれかを表示します。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：Maneuver Editorウインドウを開き、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（Finish）すると飛行計画の実行状態は消去されます。

#### 現在の状態（Current Status）

Table 7　現在の状態（Current Status）に表示される情報

|  |  |
| --- | --- |
| 項目名 | 表示内容 |
| Executed Last Maneuver | 最後に実行されたマヌーバの行番号とタイプ |
| Current Time | 探査機の現在時刻　（ISOT：西暦年-月-日[T]時:分:秒） |
| Current Time (JD) | 探査機の現在時刻（ユリウス日） |
| Distance from Sun (km) | 探査機の太陽からの距離（キロメートル） |
| Velocity rel. to Sun (m/s) | 探査機の太陽との相対速度（メートル／秒） |
| Semi-major Axis (km) | 探査機の軌道長半径（キロメートル） |
| Semi-major Axis (AU) | 探査機の軌道長半径（天文単位） |
| Eccentricity | 探査機の軌道の離心率 |
| Inclination (deg) | 探査機の軌道傾斜角（度） |
| Long. of Asc. Node (deg) | 探査機の軌道の昇交点黄経（度） |
| Arg. of Perihelion (deg) | 探査機の軌道の近日点引数（度） |
| Perihelion Passage | 探査機の近日点通過時刻（ISOT：西暦年-月-日[T]時:分:秒） |
| Perihelion Passage (JD) | 探査機の近日点通過時刻（ユリウス日） |
| Mean Anomaly (deg) | 探査機の平均近点離角（度） |
| Orbital Period (days) | 探査機の軌道周期（日） |
| Accum. 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） |

#### 選択されたマヌーバ（Selected Maneuver）

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Maneuver Editorウインドウ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。

* Probe Name：探査機の名称
* Target：ターゲット天体の名称
* Space Base：宇宙基地の名称
* Plan File：現在の飛行計画ファイルの名称

### 3D Orbitウインドウ

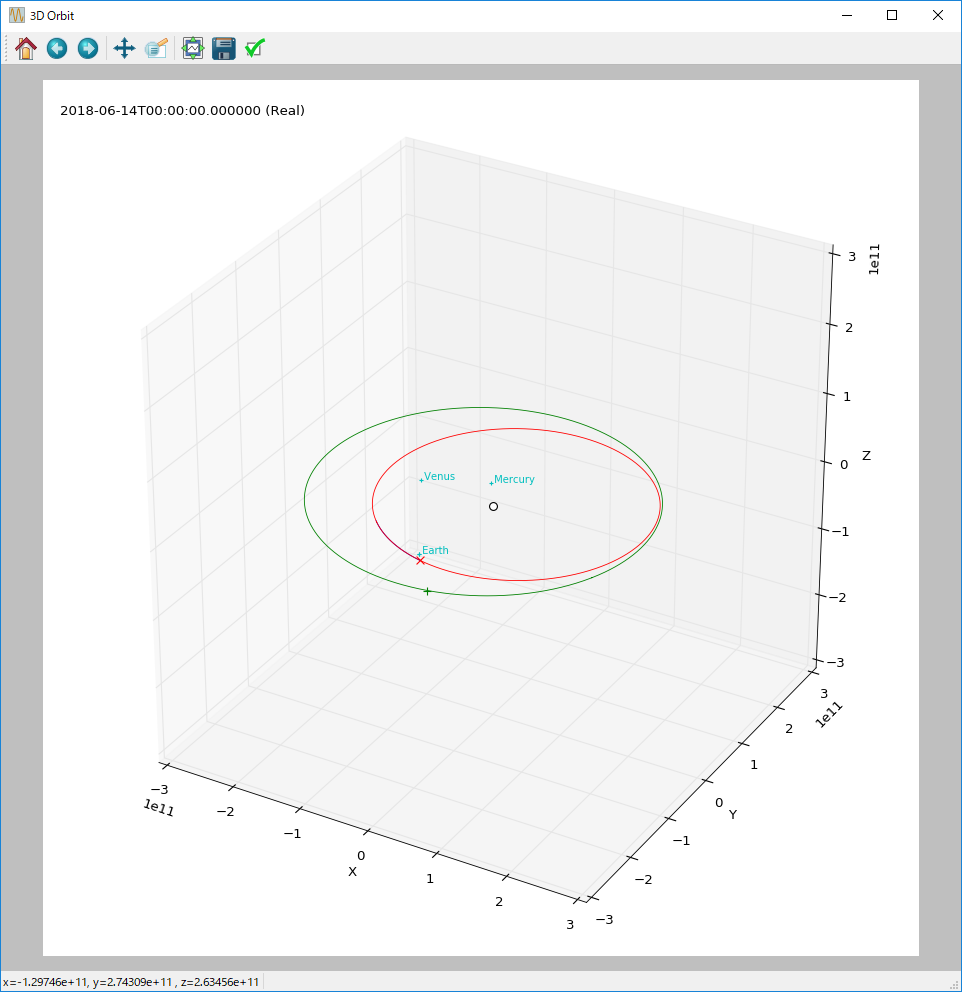
3D Orbitウインドウは探査機やターゲット天体の位置や軌道を3次元の図として表示するウインドウで、探査機が飛行しているときは通常いつでも表示されています。ウインドウのクローズボタン（右上隅の×）で閉じることができますが、マヌーバの実行や「SHOW Orbit」ボタンのクリックなどの操作を行うと自動的に再表示されます。

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

* Show Orbit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。
* Flight Review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。
* Review Throughoutウインドウ：実行済みのすべてのマヌーバのレビューを支援します。
* Start Optimize Assistantウインドウ：STARTマヌーバの作成を支援します。
* CP Optimize Assistantウインドウ：CPマヌーバの作成を支援します。

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

Figure 18　3D Orbitウインドウ



次の表は3D Orbit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。

Table 8　3D Orbit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2体問題軌道。Start Optimize Assistantの実行中は宇宙基地の経路を示します。CP Optimize Assistantの実行中は現在の（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） | ターゲット天体。 |
| 曲線（緑色） | ターゲット天体の2体問題軌道。 |
| ×マーク（青色） | 探査機がターゲット天体に到着する位置。Start Optimize AssistantおよびCP Optimize Assistant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。Start Optimize AssistantおよびCP Optimize Assistantで検討中の軌道です。 |
| 小円（黒色） | 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。Start Optimize AssistantおよびCP Optimize Assistant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とその属性が表示されます。属性はReal（実時間）とPredicted（予測時刻）のいずれかです。 |
| メニューアイコン | 3D Orbitウインドウの上端には複数のメニューアイコンが並んでいますが、SSVGでは使用しません。 |

3D Orbitウインドウ上でマウス操作を行うことにより、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。

Table 9 3D Orbit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、Flight Reviewウインドウ、またはReview ThroughoutウインドウのLook atグループで図の中心を選択してください。 |

### Show Orbitウインドウ

Show Orbit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。Show Orbit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 Orbit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
  + ターゲット天体とその軌道
  + 惑星の位置と名称
* Show Orbitウインドウ自身に、
  + ターゲット天体の相対位置と相対速度（視線速度を含む）

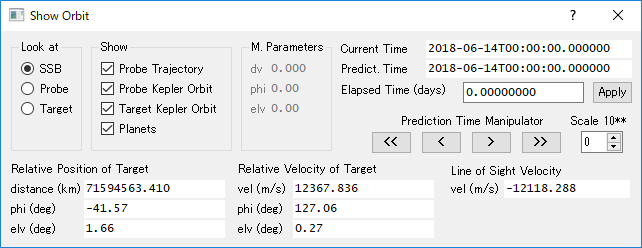
これらの情報に関係づけられる時刻は、ある指定された時刻です。この時刻はSSVGの現在時刻のこともありますし、過去または未来の時刻の場合もあります。この「ある指定された時刻」のことを「予測時刻」と呼びます。Show Orbitウインドウは予測時刻における探査機の位置を現在時刻の2体問題軌道から計算します。

Show Orbit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「SHOW Orbit」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、Maneuver Editorウインドウの「SHOW Orbit」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Show Orbitウインドウに反映させることができます。

Figure 19　Show Orbitウインドウ



Show Orbit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。

* Look at：3次元の図の中央を指定するラジオボタン（3個）
* Show：3次元の図に表示する／しないを指定するチェックボックス（4個）
* M. Parameters：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）
* Prediction Time Manipulator：予測時刻の操作を行うボタン（4個）とスピンボックス

Table 10 Show Orbit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 |
| Look at | SSB | 選択すると3次元の図の中心が太陽系重心（SSB : Solar System Barycenter） になります。 |
| Probe | 選択すると3次元の図の中心が探査機（Probe）になります。 |
| Target | 選択すると3次元の図の中心がターゲット天体（Target）になります。 |
| Show | Probe Trajectory | 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。 |
| Probe Kepler Orbit | 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。 |
| Target Kepler Orbit | チェックすると3次元の図にターゲット天体の軌道（2体問題軌道）が緑線で表示されます。 |
| Planets | チェックすると惑星の位置と名前が表示されます。 |
| M. Parameters | dv  phi  elv | Maneuver Editorウインドウ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マヌーバおよびCPマヌーバの場合） |
| （名前なし）  時刻情報 | Current Time  　　　　　または | SSVGの現在時刻がここに表示されます。 |
| Start Time | STARTマヌーバの編集中はManeuver Editorウインドウ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。 |
| Predict. Time | 予測時刻が表示されます。 |
| Elapsed Time (days)  　　　　　および  「Apply」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、「Apply」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。(\*) |
| Prediction Time Manipulator  予測時刻の操作(\*) | 「**<<**」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戻ります。 |
| 「**<**」ボタン | 逆行。クリックするとScale指定に従って予測時刻が戻ります。 |
| 「**>**」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「**<**」や「**>**」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 「**>**」のクリックで時刻が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。 |

(\*)Maneuver EditorウインドウでFLYTOマヌーバの編集を行っている場合に限り、予測時刻を操作するとその結果はManeuver EditorウインドウのEnd Time（飛行終了時刻）やDuration（飛行時間）に自動的に反映されます。

Show Orbitウインドウの下部には、次の表にあるように、予測時刻におけるターゲット天体の相対位置や相対速度が表示されます。相対位置や相対速度はともに探査機から見た位置や速度です。

Table 11　Show Orbit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 |
| Relative Position of Target | distance (km) | ターゲット天体の距離（探査機から）。 |
| phi (deg)  elv (deg) | ターゲット天体の方向（探査機から）。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。 |
| Relative Velocity of Target | vel (m/s) | ターゲット天体の相対速度（探査機から）。 |
| phi (deg)  elv (deg) | ターゲット天体の相対速度の向き（探査機から）。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。 |
| Line of Sight Velocity | vel (m/s) | ターゲット天体の相対速度の視線方向成分。正の値はターゲット天体が探査機から遠ざかりつつあることを示す。 |

### Flight Reviewウインドウ

Flight Reviewウインドウは、直前に実行されたFLYTOマヌーバの飛行結果のレビューを支援します。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 Orbit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)
  + ターゲット天体とその軌道
  + 惑星の位置と名称
* Flight Reviewウインドウ自身に、
  + ターゲット天体の相対位置と相対速度（視線速度を含む）

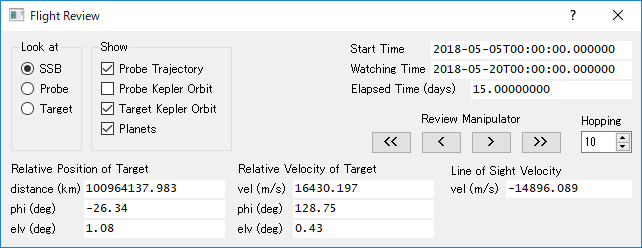
(\*1) 電気推進エンジンがオンになっている場合、「EP(m)」という文字列が3D Orbitウインドウの探査機の×マークの右に表示されます。ここで「EP(m)」の「m」は電気推進エンジンの推力方向モードの値（LまたはE）です。

(\*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 Orbit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。

Flight Reviewウインドウは、FLYTOマヌーバのひとつの積分ステップが終了した時点における情報を表示します。こ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。

Flight Reviewウインドウは利用者がSSVGウインドウの「REVIEW Recent」ボタンをクリックすると表示されます。

Figure 20　Flight Reviewウインドウ



Show Orbit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。

* Look at：3次元の図の中央を指定するラジオボタン（3個）
* Show：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）
* 時間に関する表示（右上隅の3行）
* Review Manipulator：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

Table 12　Flight Review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 |
| Look at | SSB | 選択すると3次元の図の中心が太陽系重心（SSB : Solar System Barycenter） になります。 |
| Probe | 選択すると3次元の図の中心が探査機（Probe）になります。 |
| Target | 選択すると3次元の図の中心がターゲット天体（Target）になります。 |
| Show | Probe Trajectory | 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。 |
| Probe Kepler Orbit | 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。 |
| Target Kepler Orbit | チェックすると3次元の図にターゲット天体の軌道（2体問題軌道）が緑線で表示されます。 |
| Planets | チェックすると惑星の位置と名前が表示されます。 |
| （名前なし）  時刻情報 | Start Time | 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。 |
| Watching Time | 現在の積分ステップの時刻が表示されます。 |
| Elapsed Time (days) | 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。 |
| Review Manipulator  レビューの操作 | 「**<<**」ボタン | 高速逆行。クリックするとHoppingで指定された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Hoppingで指定した数だけ現在の積分ステップが進みます。 |
| Hopping 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数を指定します。 |

Flight Review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天体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Show Orbitウインドウと同じです。Table 11　Show Orbitウインドウの下部にあるグループを参照してください。

### Review Throughoutウインドウ

Review Throughoutウインドウは、実行済みのすべてのマヌーバの実行結果の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、Review Throughout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、Flight Review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 Orbit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
  + ターゲット天体とその軌道
  + 惑星の位置と名称
* Review Throughoutウインドウ自身に、
  + ターゲット天体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 Orbit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。

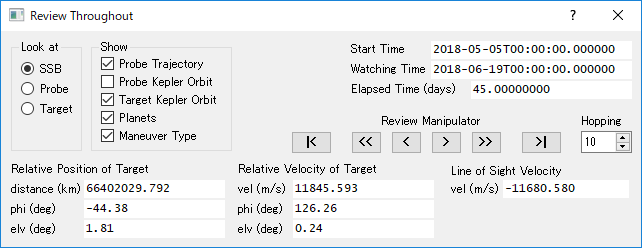
(\*2) ソーラーセイルがオンになっている場合、「SS(m) SSacc=n.nnn」という文字列が3D Orbitウインドウの探査機の右に表示されます。ここで「SS(m)」の「m」はその時点でのソーラーセイルの推力方向モードの値（LまたはE）です。「SSacc=n.nnn」の「n.nnn」はその瞬間におけるソーラーセイルによる加速度の大きさ（1日運用した場合の速度変化の大きさ。単位はメートル／秒／日）です。

Review Throughout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、Review Troughout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。

Review Throughoutウインドウは、利用者がSSVGウインドウの「Review Through」ボタンをクリックしたときに表示されます。

Figure 21　Review Throughoutウインドウ



Show Orbit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。

* Look at：3次元の図の中央を指定するラジオボタン（3個）
* Show：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）
* 時間に関する表示（右上隅の3行）
* Review Manipulator：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

Table 13 Review Throughout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 |
| Look at | SSB | 選択すると3次元の図の中心が太陽系重心(SSB : Solar System Barycenter) になります。 |
| Probe | 選択すると3次元の図の中心が探査機 (Probe) になります。 |
| Target | 選択すると3次元の図の中心がターゲット天体 (Target) になります。 |
| Show | Probe Trajectory | 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。 |
| Probe Kepler Orbit | 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。 |
| Target Kepler Orbit | 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天体の軌道が緑線で表示されます。 |
| Planets | 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。 |
| Maneuver Type | 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 | Start Time | 飛行計画の出発時刻がここに表示されます。 |
| Watching Time | 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。 |
| Elapsed Time (days) | 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。 |
| Review Manipulator  レビューの操作 | 「**|<**」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Hoppingで指定した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Hoppingで指定した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） |
| Hopping 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現在の積分ステップを変化させる数を指定します。 |

(\*) 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。

Review Throughout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天体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Show Orbitウインドウと同じです。Table 11　Show Orbitウインドウの下部にあるグループを参照してください。

### Maneuver Editorウインドウ

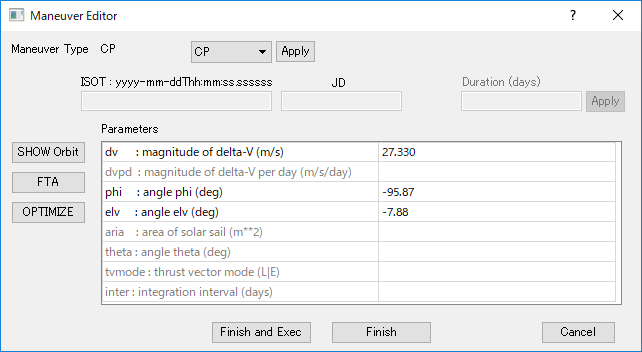
Maneuver Editorウインドウはマヌーバの編集を行うウインドウです。

Maneuver Editorウインドウ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「EDIT Next」ボタンをクリックする
* SSVGウインドウの「EDIT \*」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】**Maneuver Editorウインドウは、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Show Orbitウインドウが表示され、3D Orbit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。

Figure 22　Maneuver Editorウインドウ



Maneuver Editorウインドウにあるグループ、表、およびボタンについて次の表で説明します。

Table 14　Maneuver Editorウインドウのグループ、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 |
| Maneuver Type  （グループ） | 全タイプ | 編集中のマヌーバのタイプを表示します。  ドロップダウンリストでタイプを選択して付属する「Apply」ボタンをクリックするとタイプを変更することができます。 |
| Start Time  （グループ）  または  End Time  （グループ） | START | 探査機の現在の出発時刻（Start Time）をISO形式（ISOT）とユリウス日（JD）で表示します。  ISOTとJDのどちらかを編集することにより出発時刻を変更することができます。 |
| FLYTO | 編集中のFLYTOマヌーバの飛行終了時刻（End Time）および飛行時間（Duration）(\*1) を表示します。飛行終了時刻は2種類の形式で表示します。ISO形式（ISOT）とユリウス日（JD）です。  End TimeはISOT、JD、Durationのいずれかを編集することにより変更できます。Durationを編集したときは付属する「Apply」ボタンをクリックすることにより編集結果がISOTとJDに反映されます。(\*2)  End TimeはShow Orbitウインドウから変更することもできます。Show Orbitウインドウで予測時刻（Prediction Time）を操作すると、その値は直ちにEnd Timeに反映されます。 |
| Parameters  （表） | 全タイプ | 編集中のマヌーバのすべてのパラメータ（時刻を除く）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。  値を含むセルをダブルクリックすることによりパラメータの値を編集することができます。 |
| 「SHOW Orbit」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（時刻を含む）を一時的にShow Orbitウインドウに反映させます。 |
| 「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 Settingウインドウを見てください。 |
| 「Optimize」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Optimize Assistant機能を呼び出します。詳細はStart Optimize Assistantウインドウまたは  CP Optimize Assistantウインドウを見てください。 |
| 「Finish and Exec」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。 |
| 「Finish」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。 |
| 「Cancel」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。 |

(\*1) Durationは編集中のFLYTOマヌーバの飛行時間です。この値はSSVGが現在時刻と編集中のFLYTOマヌーバの飛行終了時刻（End Time）から計算したものです。

(\*2) Durationの値を編集して付属の「Apply」ボタンをクリックすると、Maneuver Editorはその値とSSVGの現在時刻から飛行終了時刻を計算します。

(\*3) この時点でSSVGはShow Orbitウインドウから「経過時間」（Elapsed Time）を取り込んでFTA Settingウインドウに渡します。FTA Settingウインドウはその値を「到着までの時間」（Time to Arrival）として使用します。

Parametersの表に設定する内容は次の表のとおりです。

Table 15 Maneuver EditorのParametersの表

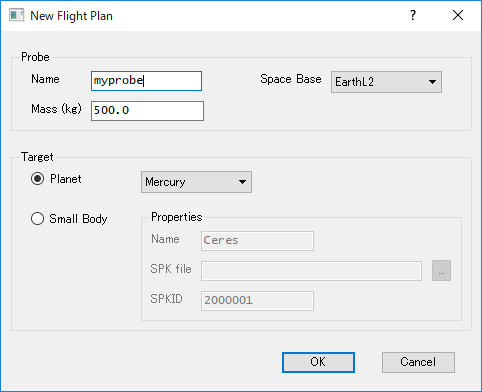
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| パラメータ名 | 対応マヌーバタイプ | 説明 |
| dv | START  CP | 速度変化の絶対値（大きさ）を指定します。「速度変化量」と呼ぶことがあります。単位はメートル／秒です。 |
| dvpd | EP\_ON | 電気推進エンジンの加速度を指定します。電気推進エンジンをちょうど1日運転した場合の速度変化の絶対値（大きさ）です。単位はメートル／秒／日です。 |
| phi | START  CP  EP\_ON | 速度変化の方向を与える角度phi（ファイ）を指定します。単位は度です。定義は軌道ローカル座標系を参照してください。 |
| elv | START  CP  EP\_ON  SS\_ON | 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。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も併せて参照してください。 |
| 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。定義はソーラーセイル座標系を参照してください。 |
| tvmode | EP\_ON  SS\_ON | 推力方向モードを指定します。指定は英文字の「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 | 数値積分の積分ステップの長さ（時間間隔）を指定します。単位は日です。探査機の位置・速度はこのステップごとに計算され、記録されます。 |

### New Flight Planウインドウ

New Flight Planウインドウは、新しい飛行計画の特性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Fileをクリックし、Newを実行すると表示されます。

Figure 23　New Flight Planウインドウ



New Flight Plan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（Probe）とターゲット天体（Target）です。ターゲット天体のグループは特性（Properties）というサブグループを持っています。またボタンも2個あります。次の表ですべてを説明します。

Table 16　New Flight Plan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 |
| Probe  探査機 | Name  （入力フィールド） | | 探査機の名前を入力してください。 |
| Space Base  （ドロップダウンリスト） | | ドロップダウンリストから宇宙基地を選択してください。  （詳細は宇宙基地（Space Base）を参照してください） |
| Mass  （入力フィールド） | | 探査機の質量を入力してください。単位はキログラムです。 |
| Target  ターゲット天体 | Planet  （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天体を選択できます。ドロップダウンリストには8個の惑星と地球の月、冥王星が含まれています。 |
| Small Body  （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天体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、しかもその天体の特性をPropertiesサブグループに設定する必要があります。 |
| Properties | Name  （入力フィールド） | 小天体の名称を入力してください。 |
| SPK file  （入力フィールドと「...」ボタン） | 小天体のSPKファイルのファイル名を入力してください。(\*1)　またはそのフルパスを指定してください。(\*2) |
| SPKID  （入力フィールド） | 小天体のSPKID (\*3) を入力してください。 |
| （なし） | 「OK」ボタン | | クリックするとSSVGは新しい飛行計画を生成します。 |
| 「Cancel」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。 |

(\*1) SPKファイルを入手するを参照して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dataフォルダに格納してください。このフィールドにはSPKファイルのファイル名だけを入力します。（推奨）

(\*2) SPKファイルを入手するを参照してSPKファイルを入手し、そのSPKファイルを適当な場所に格納してください。このフィールドに付属している「...」ボタンをクリックして、Select SPK fileダイアログでSPKファイルを選択します。ファイルを開く操作を行うとSPKファイルのフルパスが入力フィールドに設定されます。（非推奨）

(\*3) SPKファイルを入手するを参照してください。

### FTA Settingウインドウ

FTA Setting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は、ターゲット天体の近傍にある目標位置に、指定された到着時刻に、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。到着時刻については、SSVGではTime to Arrival（到着までの時間）、つまり現在時刻から到着時刻までの時間で指定します。

FTA SettingウインドウはManeuver Editorウインドウで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。

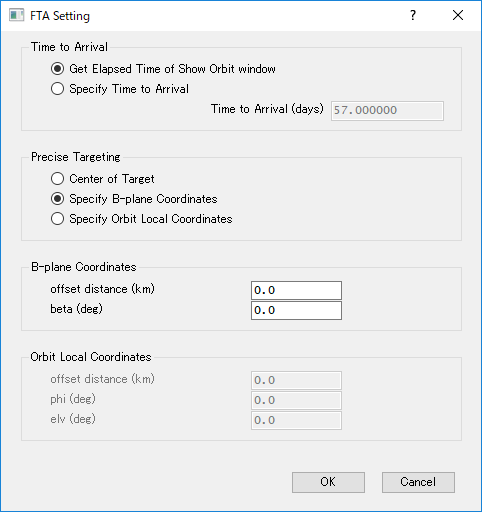


Figure 24　FTA Settingウインドウ

FTA Settingウインドウには2個のボタンと4個のグループがあります。

Table 17　FTA Setting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 |
| Time to Arrival  到着までの時間 | Get Elapsed Time of Show Orbit window  （ラジオボタン） | 選択すると、SSVGはShow OrbitウインドウのElapsed Time（経過時間）を取り込んでそれを到着までの時間とします。 |
| Specify Time to Arrival  （ラジオボタン） | 選択すると、到着までの時間を入力フィールドに設定することができます。 |
| Time to Arrival  （入力フィールド） | 到着までの時間がここに表示されます。または、到着までの時間をここに設定します。単位は日です。 |
| Precise Targeting  目標位置の詳細設定 | Center of Target  （ラジオボタン） | 選択すると、ターゲット天体の中心が目標位置になります。 |
| Specify B-plane Coordinates  （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。 |
| Specify Orbit Local Coordinates  （ラジオボタン） | 選択すると、目標位置を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。 |
| B-plane Coordinates  Bプレーン座標 | offset distance  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット天体中心からの距離を入力します。単位はキロメートルです。 |
| beta  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット天体中心からの方向を入力します。単位は度です。 |
| Orbit Local Coordinates  軌道ローカル座標 | offset distance  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット天体中心からの距離を入力します。単位はキロメートルです。 |
| phi  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット天体中心から見た角度phiを指定します。単位は度です。 |
| elv  （入力フィールド） | 目標位置のターゲット天体中心から見た角度elvを指定します。単位は度です。 |
| （なし） | 「OK」ボタン | クリックすると、SSVGはFTA機能を実行し、その結果をManeuver Editorウインドウに反映させます。(\*) |
| 「Cancel」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Maneuver EditorウインドウのParametersの表に保存します。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

### Start Optimize Assistantウインドウ

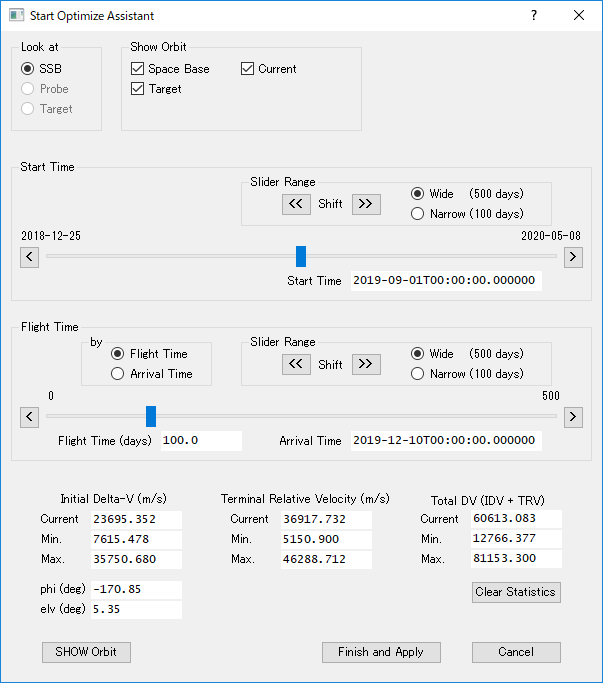
Start Optimize Assistantウインドウは、探査機を直接にターゲット天体に向かう軌道に送り出すSTARTマヌーバの作成を支援します。

宇宙飛行の経済性を考えるとき、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。Start Optimize Assistantウインドウは、様々な出発時刻と飛行時間を試すことを可能にします。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天体の相対速度を表示します。同時に探査機の2体問題軌道を3D Orbit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。（別の意味であることを明記してある場合を除きます）

Start Optimize Assistantウインドウは、STARTマヌーバを編集しているManeuver Editorウインドウで利用者が「Optimize」ボタンをクリックした場合に表示されます。

Figure 25　Start Optimize Assistantウインドウ



このウインドウの上端付近には、オプションを指定するふたつのグループがあります。

Table 18　Start Optimize Assistantウインドウのオプション

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル | 説明 |
| Look at | SSB  （ラジオボタン） | 選択すると3次元の図の中心が太陽系重心（SSB : Solar System Barycenter）になります。 |
| Probe（選択不可） | （利用できません） |
| Target（選択不可） | （利用できません） |
| Show Orbit | Space Base  （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） |
| Target  （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天体の2体問題軌道が表示されます。（緑色の曲線） |
| Current  （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。

Table 19　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 |
| Start Time  出発時刻 | Slider Range | 「<<」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が過去に向かってスライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| 「>>」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が未来に向かってスライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| Wide  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が500日になります。 |
| Narrow  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が100日になります。 |
| （スライダー） | | スライダーをドラッグすると出発時刻が変化します。 |
| 「<」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル左に動きます。 |
| 「>」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル右に動きます。 |
| Start Time  （テキスト） | | SSVGがここに現在の出発時刻を表示します。 |
| Flight Time  飛行時間 | by | Flight Time  （ラジオボタン） | 選択すると、このグループでは飛行時間を直接設定します。選択した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。 |
| Arrival Time  （ラジオボタン） | 選択すると、このグループで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。選択した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。 |
| Slider Range | 「<<」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が小さくなる方向に（または過去に向かって）スライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| 「>>」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が大きくなる方向に（または未来に向かって）スライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| Wide  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が500日になります。 |
| Narrow  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が100日になります。 |
| （スライダー） | | スライダー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。 |
| 「<」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル左に動きます。 |
| 「>」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル右に動きます。 |
| Flight Time  （テキスト） | | SSVGがここに現在の飛行時間を表示します。 |
| Arrival Time  （テキスト） | | SSVGがここに現在の到着時刻を表示します。 |

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。

Table 20　Start Optimizeウインドウ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 |
| Initial Delta-V  出発時の速度 | Current | 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。 |
| Min. | このグループのCurrentの値の最小値が表示されます。 |
| Max. | このグループのCurrentの値の最大値が表示されます。 |
| phi | 探査機の現在の出発速度の角度phi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 | 探査機の現在の出発速度の角度elv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。 |
| Terminal Relative Velocity  到着時の相対速度絶対値 | Current | 探査機が現在の2体問題軌道でターゲット天体に到着したときの、ターゲット天体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。 |
| Min. | このグループのCurrentの値の最小値が表示されます。 |
| Max. | このグループのCurrentの値の最大値が表示されます。 |
| Total DV (IDV + TRV)  速度の絶対値の合計 | Current | Initial Delta-VとTerminal Relative Velocityの両方のCurrentの値の合計がここに表示されます。 |
| Min. | このグループのCurrentの値の最小値が表示されます。 |
| Max. | このグループのCurrentの値の最大値が表示されます。 |
| （なし） | 「Clear Statistics」ボタン | クリックすると最小値と最大値がすべてクリアされます。 |
| 「SHOW Orbit」ボタン | クリックすると3D Orbitウインドウが表示されます。 |
| 「Finish and Apply」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Maneuver Editorウインドウに反映し、このウインドウを閉じます。 |
| 「Cancel」ボタン | クリックするとSSVGはこのウインドウを閉じます。 |

### CP Optimize Assistantウインドウ

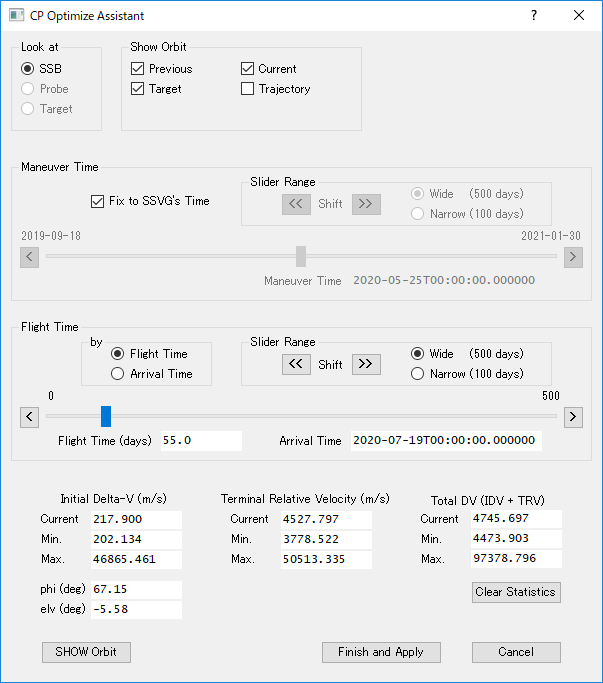
CP Optimize Assistantウインドウは、飛行中の探査機に、直接にターゲット天体に向かわせる軌道変更を行うCPマヌーバの作成を支援します。

宇宙飛行の経済性を考えるとき、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。CP Optimize Assistantウインドウは、様々なマヌーバ時刻と飛行時間を試すことを可能にします。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天体の相対速度を表示します。同時に探査機の2体問題軌道を3D Orbit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。（別の意味であることを明記してある場合を除きます）

CP Optimize Assistantウインドウは、CPマヌーバを編集しているManeuver Editorウインドウで利用者が「Optimize」ボタンをクリックした場合に表示されます。

Figure 26　CP Optimize Assistantウインドウ



このウインドウの上部には、オプションを指定するふたつのグループがあります。

Table 21　CP Optimize Assistantウインドウのオプション

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| グループ | 項目ラベル | 説明 |
| Look at | SSB  （ラジオボタン） | 選択すると3次元の図の中心が太陽系重心（SSB : Solar System Barycenter）になります。 |
| Probe（選択不可） | （利用できません） |
| Target（選択不可） | （利用できません） |
| Show Orbit | Previous  （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） |
| Target  （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天体の2体問題軌道が表示されます。（緑色の曲線） |
| Current  （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） |
| Trajectory  （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。

Table 22　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 |
| Maneuver Time  マヌーバ時刻 | Fix to SSVG’s Time  （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。 |
| Slider Range | 「<<」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が過去に向かってスライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| 「>>」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が未来に向かってスライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| Wide  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が500日になります。 |
| Narrow  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が100日になります。 |
| （スライダー） | | スライダーをドラッグするとマヌーバ時刻が変化します。 |
| 「<」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル左に動きます。 |
| 「>」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル右に動きます。 |
| Maneuver Time  （テキスト） | | SSVGがここに現在のマヌーバ時刻を表示します。 |
| Flight Time  飛行時間 | by | Flight Time  （ラジオボタン） | 選択すると、このグループでは飛行時間を直接設定します。選択した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。 |
| Arrival Time  （ラジオボタン） | 選択すると、このグループで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。選択した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。 |
| Slider Range | 「<<」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が小さくなる方向に（または過去に向かって）スライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| 「>>」ボタン | クリックすると、スライダーの範囲が大きくなる方向に（または未来に向かって）スライダーの範囲の半分だけシフトします。 |
| Wide  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が500日になります。 |
| Narrow  （ラジオボタン） | 選択すると、スライダーの範囲が100日になります。 |
| （スライダー） | | スライダー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。 |
| 「<」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル左に動きます。 |
| 「>」ボタン | | クリックするとスライダーが1ピクセル右に動きます。 |
| Flight Time  （テキスト） | | SSVGがここに現在の飛行時間を表示します。 |
| Arrival Time  （テキスト） | | SSVGがここに現在の到着時刻を表示します。 |

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。

Table 23　CP Optimizeウインドウ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 |
| Initial Delta-V  軌道変更の速度変化 | Current | 探査機の現在の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。 |
| Min. | このグループのCurrentの値の最小値が表示されます。 |
| Max. | このグループのCurrentの値の最大値が表示されます。 |
| phi | 探査機の現在の速度変化の角度phi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 | 探査機の現在の速度変化の角度elv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。 |
| Terminal Relative Velocity  到着時の相対速度絶対値 | Current | 探査機が現在の2体問題軌道でターゲット天体に到着したときの、ターゲット天体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。 |
| Min. | このグループのCurrentの値の最小値が表示されます。 |
| Max. | このグループのCurrentの値の最大値が表示されます。 |
| Total DV (IDV + TRV)  速度の絶対値の合計 | Current | Initial Delta-VとTerminal Relative Velocityの両方のCurrentの値の和がここに表示されます。 |
| Min. | このグループのCurrentの値の最小値が表示されます。 |
| Max. | このグループのCurrentの値の最大値が表示されます。 |
| （なし） | 「Clear Statistics」ボタン | クリックすると最小値と最大値がすべてクリアされます。 |
| 「SHOW Orbit」ボタン | クリックすると3D Orbitウインドウが表示されます。 |
| 「Finish and Apply」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Maneuver Editorウインドウに反映し、このウインドウを閉じます。(\*) |
| 「Cancel」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、先行する（編集中のマヌーバ以前に実行される）マヌーバを編集して、編集中であった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。

## 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、ターゲット天体を含みます。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平行であ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

Figure 27　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極座標（r、phi、elv）を示しています。

X軸

Y軸

Z軸

phi

elv

(r, phi, elv)

r

Figure 28　軌道ローカル座標系の極座標表現

r ：長さ、絶対値

phi ：ファイ

elv ：上下角

### 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、ひとつの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）

Figure 29　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まったく同等ですが、通常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に対する極座標を示します。

X軸

Y軸

Z軸

theta

elv

(theta, elv)

Figure 30　ソーラーセイル座標系の極座標表現

theta：シータ

elv ：上下角

1

### 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天体と、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天体に固定された直交座標系です。

ターゲット天体と、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。

* B点：2体問題軌道の、ターゲット天体への最近点
* 相対速度：B点における2体問題軌道の速度の、ターゲット天体から見た相対速度

座標軸（R、S、T）の原点はターゲット天体の中心です。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軸はターゲット天体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

：ターゲット天体の角運動量ベクトル（ターゲット天体の軌道面に垂直なベクトル。ターゲット天体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極方向を向く）

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 Setting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（角度betaとオフセット距離d）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

2体問題軌道での探査機の動き

ターゲット天体

**B-plane**

R

S

T

beta

d

B点

2体問題軌道での探査機の動き

ターゲット天体

(1)

(2)

Figure 31　Bプレーン座標系

Figure 31のふたつの図は、ターゲット天体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、ターゲット天体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天体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天体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天体の左遠方になります。

## その他の情報

### 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（JD）で表現していますが、ISO 8601の拡張形式（ISOT）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　（ISOT）

2458849.75000000　（JD）

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天体とする場合、入手したSPKファイルの期間内に限りそのターゲット天体が使用できます。現時点ではHORIZONSシステムが提供する小天体のSPKファイルの作成期間は次の範囲です。

* 作成開始：1000年1月1日以降
* 作成終了：2101年1月1日以前

### 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を行っています。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

(\*)太陽ならびに8惑星と地球の月の位置はNASA/JPLが公開しているSPKファイル（de430.bsp）からPythonソフトウェア「jplephem」を用いて計算しています。また太陽と惑星、月の引力の計算には、理科年表平成26年版の日心重力定数ならびに惑星と月の質量（太陽質量との比）を用いています。

### 2体問題軌道

SSVGでは探査機の「リアルな」飛行経路は、推進装置を使用しない場合であっても、太陽と惑星（および地球の月）の引力を考慮した「数値積分」という手法で計算します。この処理は正確な飛行経路を与えてくれるのですが、計算に時間がかかるなど都合が悪い場合があります。

そこで、SSVGでは探査機の運動を2体問題と考えて計算をすることがあります。2体問題とは、宇宙にふたつの物体だけ（ここでは太陽と探査機だけ）が存在すると考えて物体の運動を計算することを指します。この方法で計算した探査機の軌道（通り道）のことを、この文書では特に「2体問題軌道」と呼んでいます。2体問題と考えて計算した軌道は実際の飛行経路に近いものになりますが、誤差を含みます。

SSVGで2体問題と考えて探査機の軌道を計算しているのは次の場合です。

* 3D Orbit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）の計算
* FTA機能（ターゲット天体に到達するための軌道補正量を計算する）の内部処理
* Optimize Assistant機能（出発日時または軌道変更日時と、飛行時間の最適化を支援する）の内部処理

また、3D Orbitウインドウに表示するターゲット天体の軌道（緑の曲線）の計算も2体問題で行っています。

SSVGでは2体問題軌道のことをKepler Orbit（ケプラー軌道）または単にOrbit（軌道）と呼ぶことがあります。

### 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、つまり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（速度変化の絶対値）

：比推力（推進装置の効率を表す数値）

：地表での重力加速度

：指数関数

以下のふたつの表（Figure 24 とFigure 25）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。

Figure 24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。

Figure 25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、比推力は3000秒とした場合です。

Table 24　ロケット方程式の計算結果（液体燃料ロケットエンジン）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| （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 |

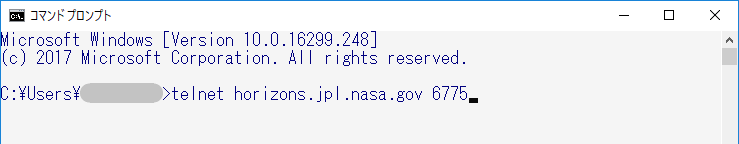
Table 25　ロケット方程式の計算結果（イオンエンジン）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| （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 |

### SPKファイルを入手する

この項では、NASA/JPLのHORIZONSシステムに太陽系の小天体のSPKファイルの作成を依頼する操作のサンプルを示します。このサンプルでは、小惑星RyuguのSPKファイルの作成を依頼し、入手します。

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

Windowsのコマンドプロンプトを起動し（他のOSであればコマンドラインインタフェースから）、TelnetでHORIZONSシステムに接続してください。次の図の下線部をタイプし、Enterキーを押します。

TelnetでHORIZONSシステムに接続する

Figure 32　HORIZONSシステムに接続する

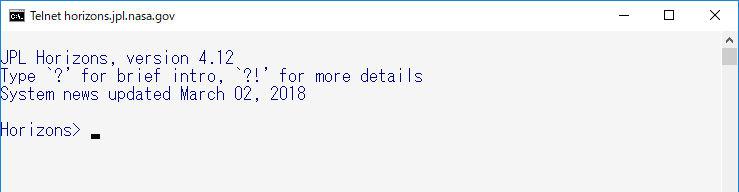
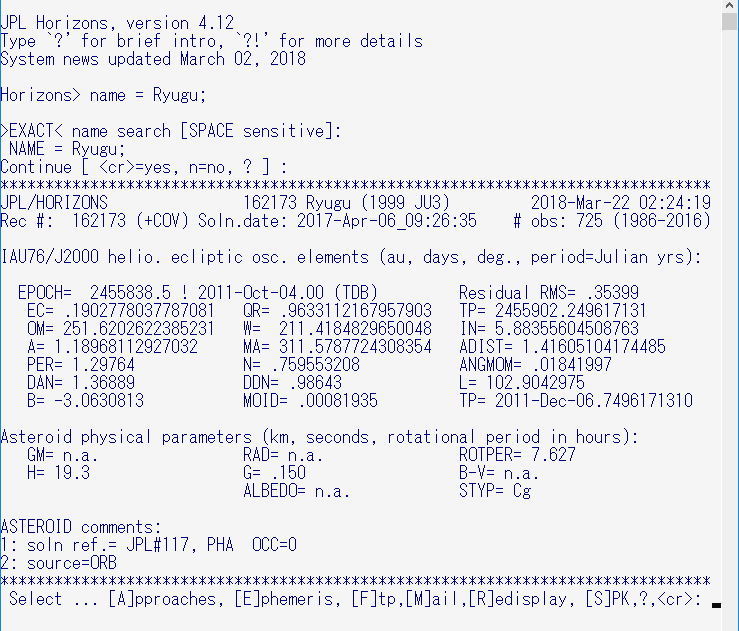
HORIZONSシステムに接続でき、コマンド待ちのプロンプトが表示されます。

Figure 33　HORIZONSシステムのプロンプト

HORIZONSシステムのプロンプトで、SPKファイル作成を依頼する天体の名前を指定し、確認のメッセージにEnterキーを押してください。次の図のようにHORIZONSシステムはその天体の詳細情報を表示します。

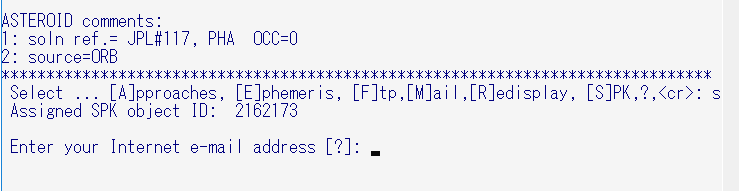


Enterキーを押す

天体を指定する

Figure 34　SPKファイルの入手（３）

SPKファイルの作成を依頼するため、次の図の単下線のようにsをタイプしてEnterキーを押します。SPKID（2重下線部の数字7桁）が表示されますので、メモしておいてください。



SPKID（メモする）

Figure 35　SPKID（SPK object ID）

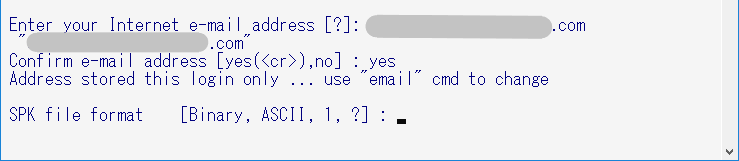
Ｅメールアドレスの入力が要求されますので次の図のように下線部に入力してEnterキーを押してください。入力したＥメールアドレスの確認が要求されますので、yesを入力してEnterキーを押してください。SPKファイルの形式を指定するコマンド待ちになります。

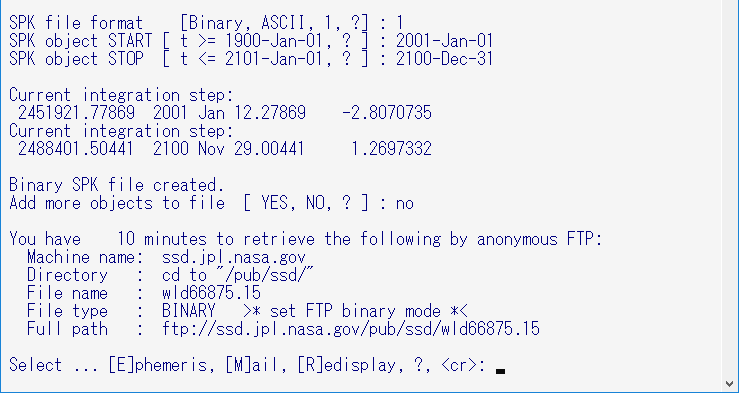
Figure 36　Ｅメールアドレスの入力

SPKファイルの形式として、次の図にあるように1を指定してください。1以外の形式を指定するとSSVGで扱うことができないファイルが作成されます。

引き続いてSPKファイルの開始日と終了日の入力が促されますので、次の図にあるような形式で指定してください。探査機の飛行期間全体を含むように開始日と終了日を指定します。ただしメッセージにある範囲を守ってください。続いて他の天体を同じファイルに追加するかどうかを聞かれますので、noと回答してください。

これでSPKファイルが作成されます。ファイル名は次の図の2重下線部にあります。このファイルは10分間だけダウンロード可能ですので、直ちに次のリンクを開いてダウンロードしてください。もちろんFTPソフトを使ってメッセージにあるURLをひらいてダウンロードすることもできます。

<<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/ssd/>>



ファイルの形式として必ず1を指定する

SPKファイル作成の開始日と終了日を指定する

他の天体の追加：noを回答する

Figure 37　SPKファイルの生成

これでSPKファイルが入手できました。コマンドxを入力してEnterキーを押し、Telnetのセッションを終了させましょう。

ダウンロードしたファイルの名前は分かりやすいものに変更しておきましょう。例えば、[天体名称].bspや [SPKID].bspといったものです。「bsp」はHORIZONSシステムがSPKファイルに付与する拡張子です。

### 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logフォルダです。

### 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）

### 飛行計画のサンプル

SSVGにはいくつかの飛行計画（探査機を飛行させる手順などを集めたもの）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sampleplan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。

#### Mars01.json

火星探査機の飛行計画です。

地球近傍の宇宙基地EarthL2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。

#### Mars02\_ss.json

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EarthL2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増加の累積値は8511メートル／秒になります。

#### Mercury01.json

水星探査機の飛行計画です。

地球近傍の宇宙基地EarthL2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。

#### Venus01.json

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EarthL2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。

#### Voyager2.json

NASA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EarthL2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, Japan, 1998.
2. Kluever, Craig A., Space Flight Dynamics, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2018.
3. <https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>. Accessed June 15, 2018.
4. <https://voyager.jpl.nasa.gov/>. Accessed June 15, 2018.
5. <http://www.ieice-hbkb.org/files/11/11gun_02hen_04.pdf>. Accessed June 15, 2018.
6. <http://www.ecei.tohoku.ac.jp/inuta/souzoukougaku/takasho/takasho01.htm>. Accessed June 15, 2018.
7. <http://astro-dic.jp/>. Accessed June 18, 2018.
8. <http://ccar.colorado.edu/imd/2015/documents/BPlaneHandout.pdf>. Accessed June 20, 2018.
9. <https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail>. Accessed June 22, 2018.
10. <https://ja.wikipedia.org/wiki/IKAROS>. Accessed June 22, 2018.

以上