

SSVG ユーザーズガイド

Solar System Voyager(SSVG) Users Guide

植月修志 (Shushi Uetsuki/whiskie14142)

2018/4/1

Rev. 1.0.0

SSVG Version 1 対応

目次

SSVG とは	1
SSVG でできること	2
探査機の軌道を変化させてみよう	2
天体を目指そう	2
スイングバイを試そう	2
実際の探査機の飛行を再現しよう	3
効率のよい飛行計画を作ろう	3
電気推進エンジンを使おう	4
ソーラーセイルを使おう	4
この文書の開き方	4
ソフトウェアのライセンス	5
この文書のライセンス	5
SSVG の使い方	6
インストール／アンインストール	6
Windows 実行形式プログラムのインストール／アンインストール	6
Python ソースプログラムのインストール／アンインストール	6
SSVG の起動	7
Windows 実行形式プログラムの場合	7
Python プログラムの場合	7
サンプルを見る	8
飛行計画を開く	8
マヌーバを実行する	9
マヌーバを続けて実行する	11
飛行結果を確認する	11
新しい探査機を飛行させる	13
飛行計画の新規作成	13
探査機を出発させる	14
宇宙基地から離れる	15
探査機を増速させる	16
探査機を減速させる	17
探査機を横方向に加速させる	18
探査機を自由に飛行させる	19
火星を目指す	20
木星でスイングバイを試す	21
金星を目指す	25
飛行計画の新規作成	25

START.....	26
FLYTO（その 1）	28
CP.....	28
FLYTO（その 2）	29
FLYTO（その 3）	29
小天体を目指す.....	30
SPK ファイルを入手する	30
飛行計画の新規作成	33
リファレンス.....	35
基本用語	35
探査機（Probe）	35
宇宙基地（Space Base）	35
マヌーバ（Maneuver）	36
飛行計画（Flight Plan）	37
ターゲット天体（Target）	38
化学推進エンジン.....	38
電気推進エンジン.....	39
ソーラーセイル	39
ウインドウとその操作.....	40
SSVG ウインドウ.....	40
3D Orbit ウインドウ	44
Show Orbit ウインドウ.....	46
Flight Review ウインドウ.....	49
Review Throughout ウインドウ	52
Maneuver Editor ウインドウ	54
New Flight Plan ウインドウ.....	58
FTA Setting ウインドウ.....	59
Start Optimize Assistant ウインドウ	60
CP Optimize Assistant ウインドウ.....	63
ログファイル	66
座標系.....	66
黄道座標系	66
軌道ローカル座標系	67
ソーラーセイル座標系.....	68
時刻について	69
化学推進エンジンのモデル化.....	70
電気推進エンジンのモデル化.....	70
ソーラーセイルのモデル化.....	71

探査機の飛行経路の数値積分.....	71
2 体問題による軌道	72
推進装置とロケット方程式	72
飛行計画のサンプル.....	74
mars01.json	74
mars02_ss.json	74
Mercury01.json	75
Venus01.json	75
Voyager2.json	75

SSVG とは

SSVG (Solar System Voyager) は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。探査機を地球から宇宙に送り出すことも宇宙探査では重要な作業なのですが、SSVG ではこの部分は扱いません。SSVG では太陽系を航行する探査機の運動だけを扱います。

SSVG では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への指令 (マヌーバ) です。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があります。飛行計画を作成するときには、内容を決めながらマヌーバを順番に並べて行きます。

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、探査機の他に目標となる天体 (ターゲット天体) の位置や軌道、惑星の位置などが表示されます。

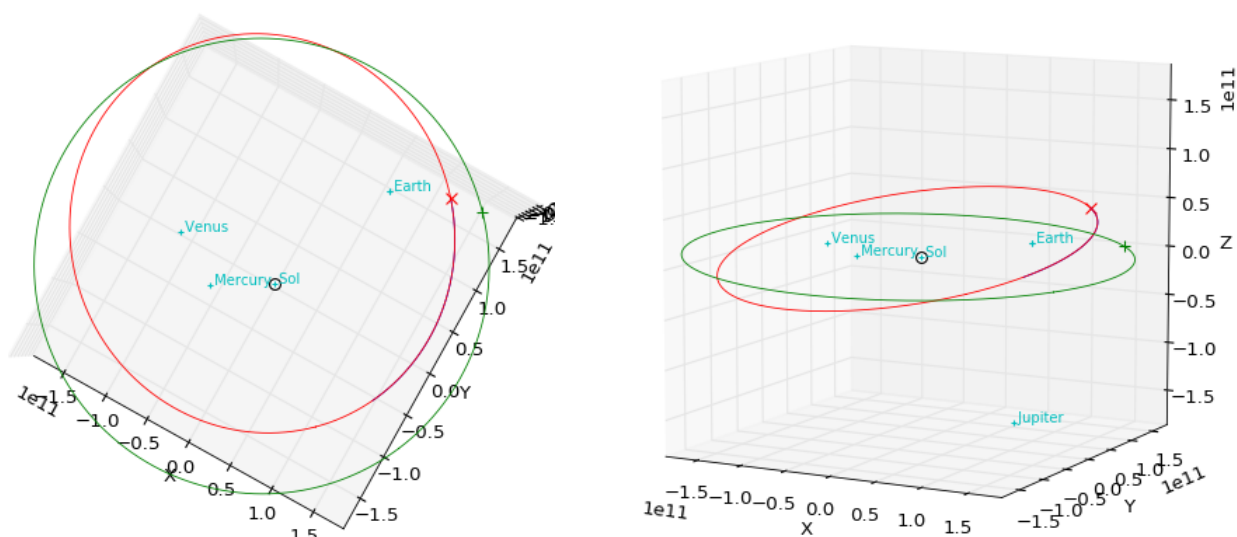


Figure 1 SSVG の表示例

SSVG でできること

SSVG を使うとどんなことができるのでしょうか。以下はその一例です。

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 3 次元の宇宙空間に描かれた軌道の図として表示されます。3 次元の軌道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よくわかります。

天体を目指そう

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？

現実の探査機は搭載できる燃料や推進剤に制限があり、太陽系を自由に飛び回るというわけには行きません。探査機の開発や打ち上げ、そしてその後の運用も大変です。でも SSVG の中で遊ぶなら何の問題もあります。どんどん探査機を飛ばして遊びましょう。

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？

惑星の引力を利用して探査機の軌道を大きく変えるのがスイングバイです。8 つの惑星の中で質量が最大の木星は、スイングバイの相手として最高です。SSVG で木星に近づくよう探査機を飛行させれば、木星の強い引力が探査機を振り回してくれるでしょう。木星への近づき方を変えながら、スイングバイで探査機の軌道を変えて遊んでみましょう。

スイングバイは現実の宇宙探査でもよく使われる技術です。現実の宇宙探査機のスイングバイは別の惑星に向かうなどの目的を達成するために精密な軌道の制御が行われるのですが、SSVG にはそのような精密なスイングバイを支援する機能も備わっています。

実際の探査機の飛行を再現しよう

実際の惑星探査機がどんな風に飛行したのか興味はありませんか？

地球から目的の惑星まで直接飛行する探査機であれば、実際の出発日と到着日から **SSVG** で経路を再現することができます。他の惑星でスイングバイを行って目的の惑星を目指す探査機の場合はぐっと難しくなりますが、**SSVG** では精密なスイングバイを含む探査機の飛行を再現できます。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。

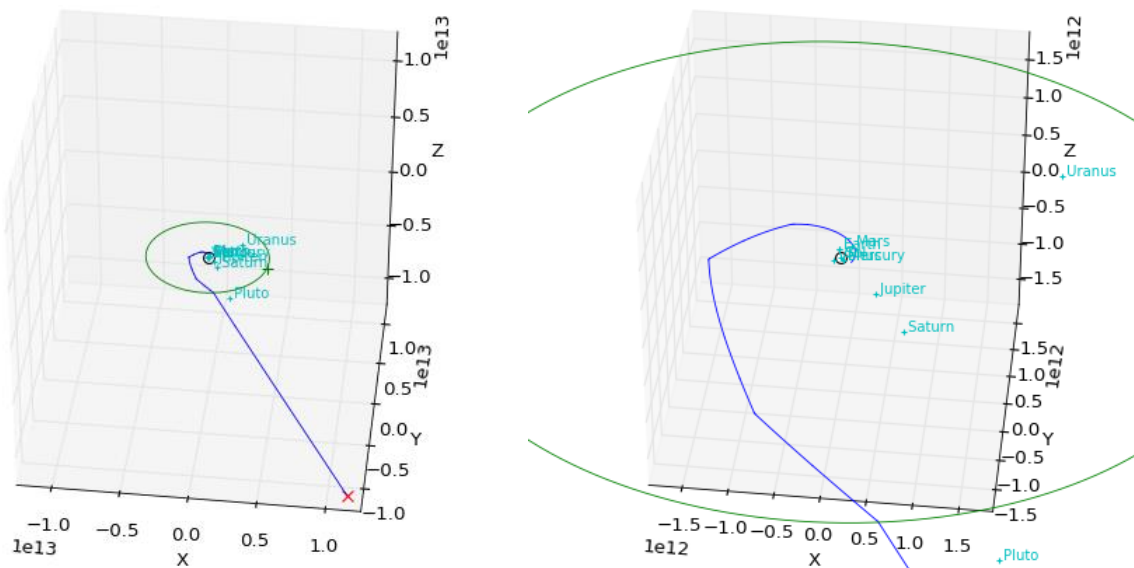


Figure 2 ボイジャー2号の経路の再現

効率のよい飛行計画を作ろう

本物の宇宙探査機で実現可能な飛行計画を作りたい、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。燃料の搭載量の制限などのため、軌道修正による速度変化が小さく効率のよい飛行計画を作る必要があります。それにはいつ出発して、どれだけの飛行時間（日数）で目的の天体に到着するかが重要です。**SSVG** には適切な出発日や飛行時間を探す便利なツールが備えられています。

電気推進エンジンを使おう

電気推進エンジン（イオンエンジン）を実際に使ってみたい、と思いませんか？

SSVG の電気推進エンジンは大変強力です。大きな推力を出すこともできますし、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、すてきですね？

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は大変難しいとされています。またそのセイルの向きを正しく設定することも大きなチャレンジです。しかし SSVG の探査機は、巨大なソーラーセイルを自由に扱うことができます。ソーラーセイルを使うとどんな宇宙航行ができるのか試してみましょう。

この文書の開き方

この文書（SSVG ユーザーズガイドの PDF ファイル）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/jp/reader/otherversions/> >

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。

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>>

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 2 つの形態で配布しています。どちらでも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2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 → 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。

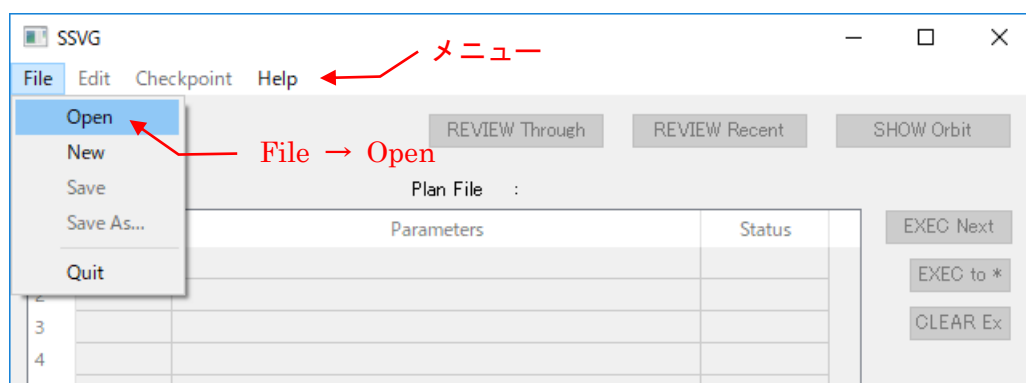


Figure 3 File → Open を実行する

mars01 は火星に向かう探査機の飛行計画です。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。

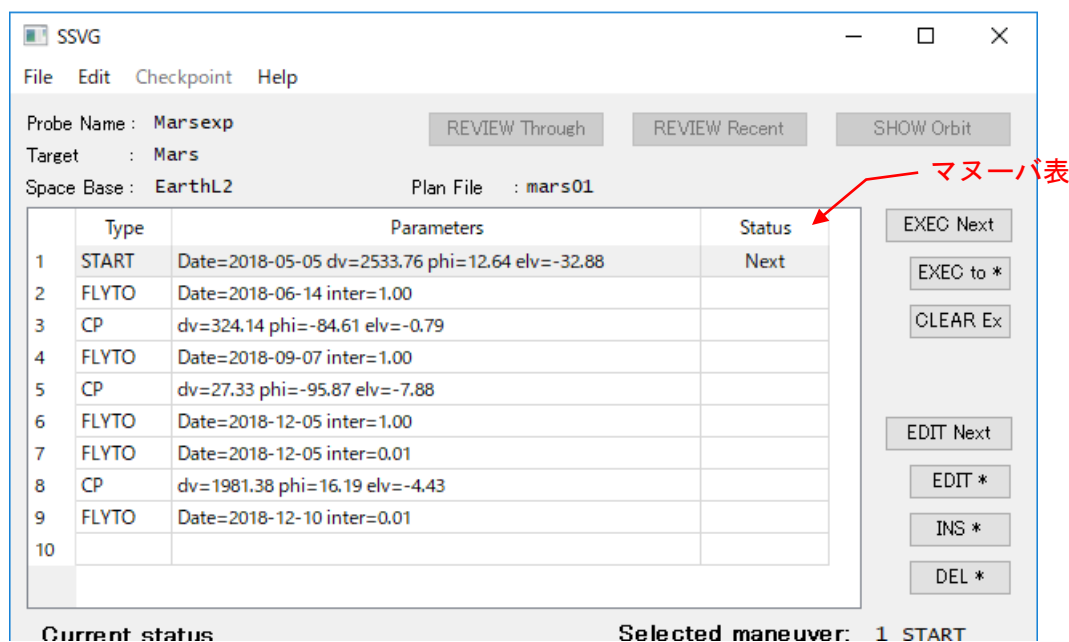


Figure 4 マヌーバ表

マヌーバを実行する

マヌーバ表の右端の列に「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 ウィンドウの下に Show Orbit ウィンドウが新しく開きます(次図)。

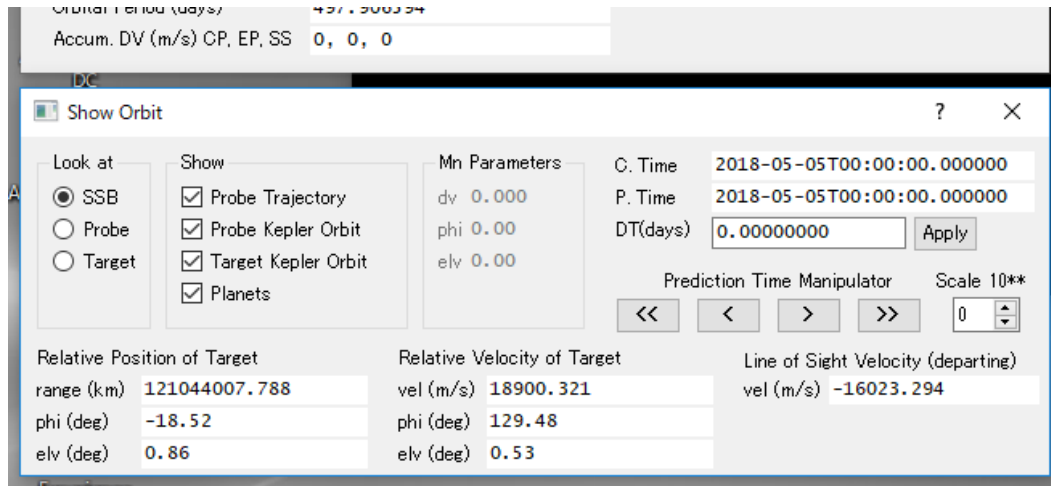


Figure 5 Show Orbit ウィンドウが開く

そして 3D Orbit ウィ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（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：太陽と惑星の位置と名前（+Sol、+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。

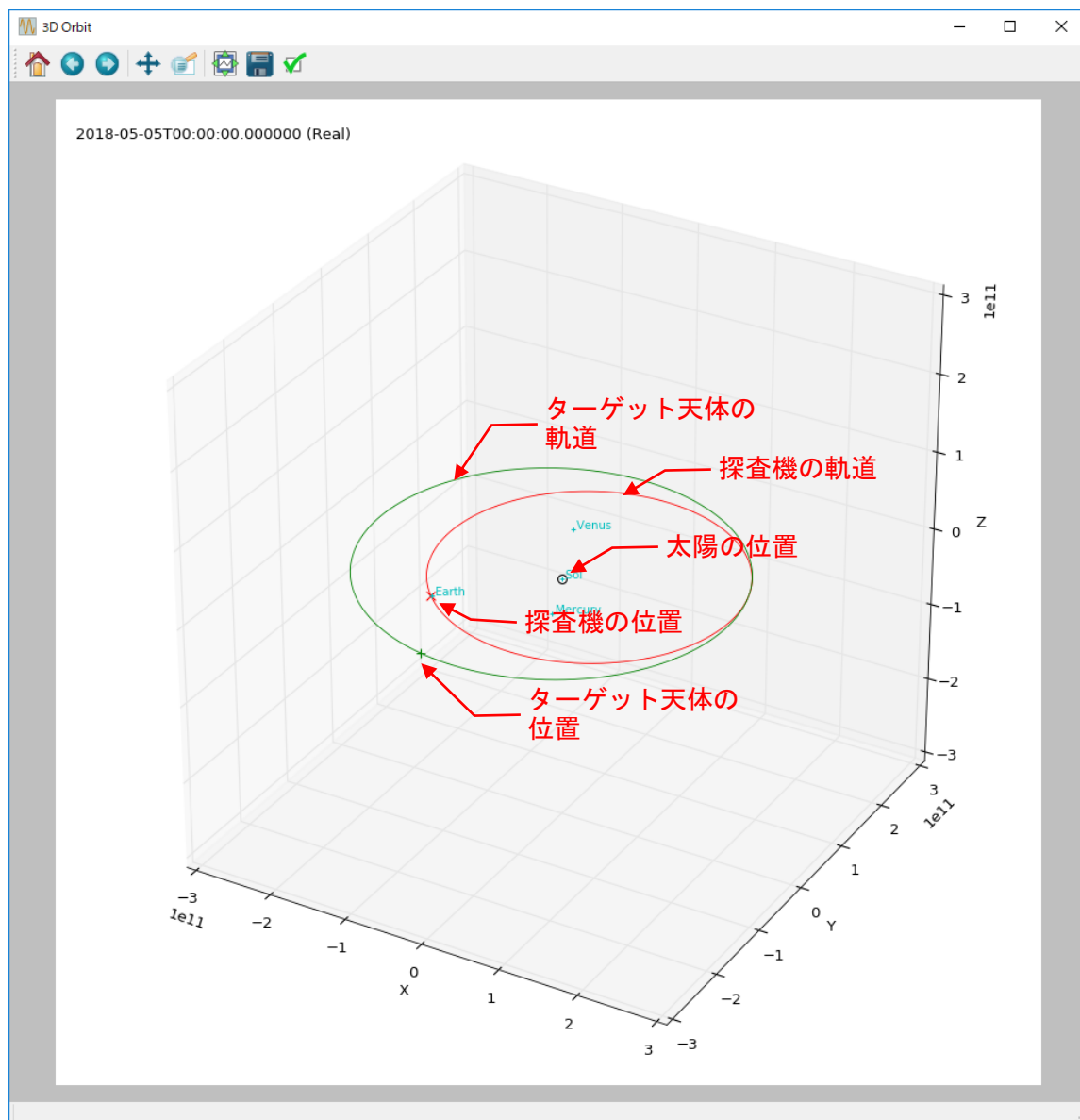


Figure 6 3D Orbit ウィンドウの表示内容

ここで、3D Orbit ウィンドウに表示される画像を操作してみましょう。3D Orbit ウィンドウの上にマウスカursor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。表示される画像の向きが変わり、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。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 ウィンドウに表示されている画像の拡大や縮小ができます。

3D Orbit ウィンドウに表示される画像の操作の一部は Show Orbit ウィンドウから行います。Show Orbit ウィンドウの 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 ウィンドウに表示されます。

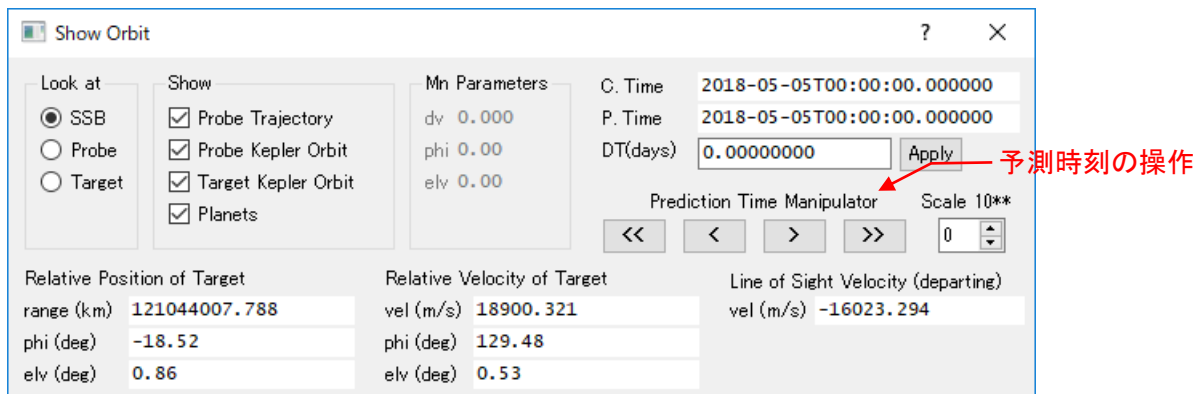


Figure 7 予測時刻の操作

3D Orbit ウィンドウに表示される画像の詳しい操作方法については [3D Orbit ウィンドウ](#)および [Show Orbit ウィンドウ](#)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 1 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 7 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 3 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。化学推進エンジンで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は、その飛行の経過を 3D Orbit ウィ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 ウィ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 ウィンドウが Flight Review ウィンドウに入れ替わり、3D Orbit ウィンドウの表示内容も変化します。Flight Review ウィンドウの 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。

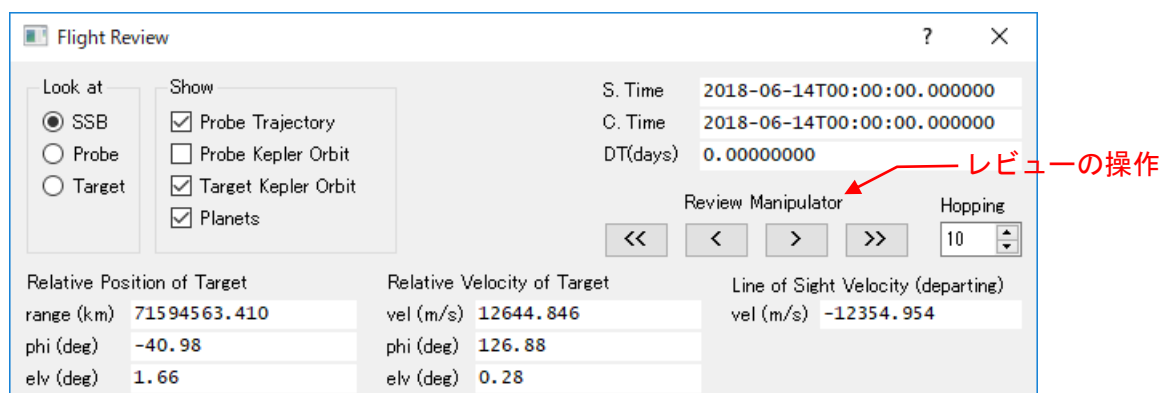


Figure 8 レビューの操作

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 ウィ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 ウィンドウの下が Flight Review ウィンドウになり、3D Orbit ウィ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 ウィ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が。

- 画面の中心をターゲット天体に変更するには：
Flight Review ウィンドウの Look at グループにある「Target」ラジオボタンにを選択する
- 画像を拡大するには：
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
- 画像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 ウィンドウの Review Manipulator（レビュー操作）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 ウィンドウのメニューから、File → New を実行してください。New Flight Plan ウィンドウが開きます。

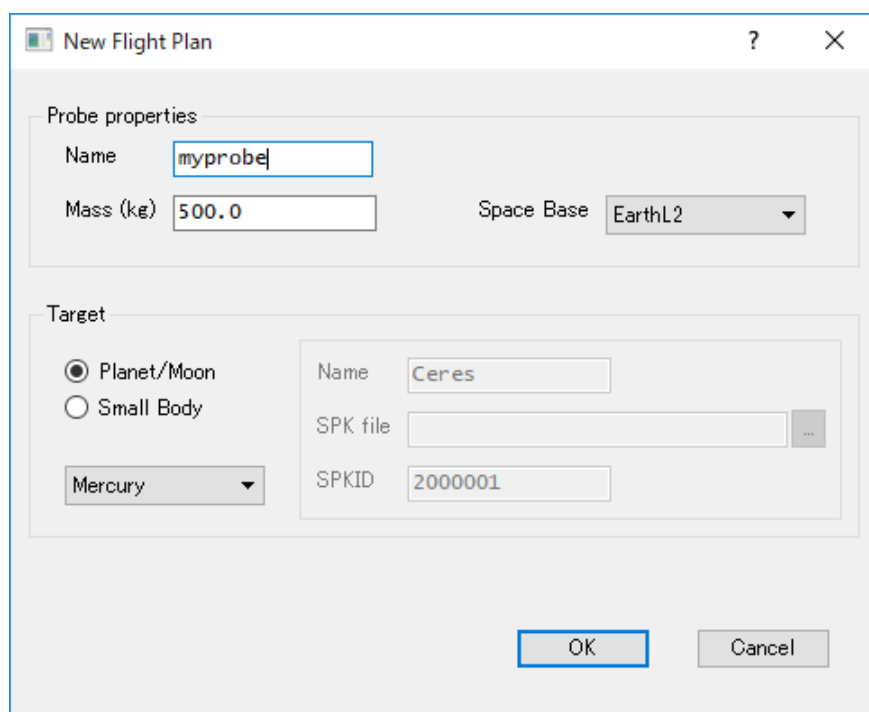


Figure 9 New Flight Plan ウィンドウが開く

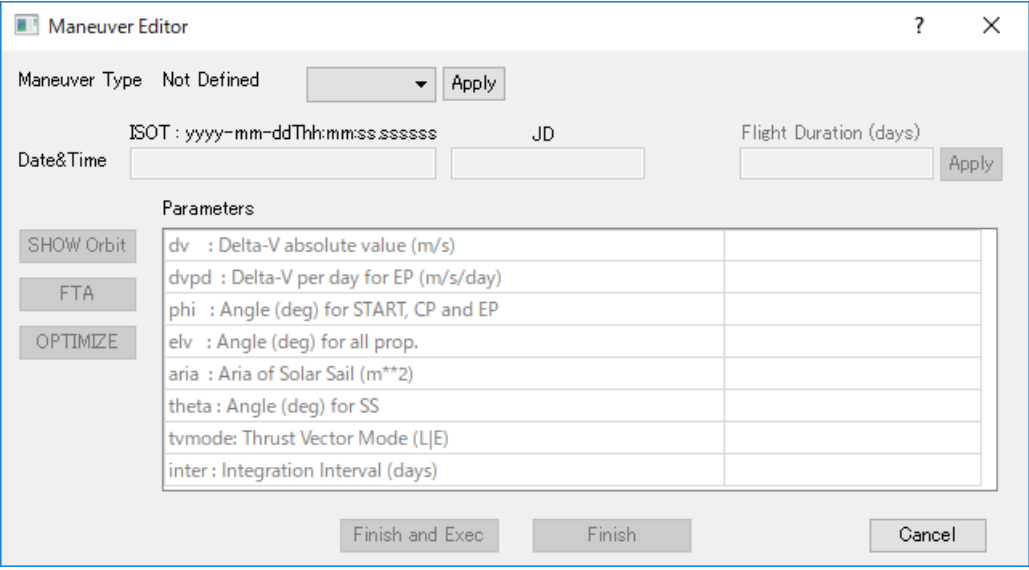
Probe Properties グループでは探査機の特徴として名前と質量を指定しますが、ここでは初期値をそのまま利用しましょう。また探査機を出発させる宇宙基地 (**Space Base**) をドロップダウンリストで選択することができますが、これも初期値の **EarthL2** にしましょう。この宇宙基地は地球から太陽の反対側に約 150 万キロメートル離れた宇宙空間にあります。150 万キロメートルというとずいぶん遠いようですが、太陽から地球までの距離の 1%ほどに過ぎません。

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。ウィンドウ下部の「**OK**」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ないから、マヌーバ表にはマヌーバがありません。

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 ウィ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。

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が、「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 ウィンドウが開きます。



Parameters	
dv	: Delta-V absolute value (m/s)
dvdpd	: Delta-V per day for EP (m/s/day)
phi	: Angle (deg) for START, CP and EP
elv	: Angle (deg) for all prop.
aria	: Aria of Solar Sail (m**2)
theta	: Angle (deg) for SS
tvmode	: Thrust Vector Mode (L E)
inter	: Integration Interval (days)

Figure 10 Maneuver Editor ウィンドウ (初期状態)

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。ウィンドウ上部にある 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 ウィンドウが開き、3D Orbit ウィ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 ウィンドウには 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 ウィンドウの表 (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、設定内容が反映されます。

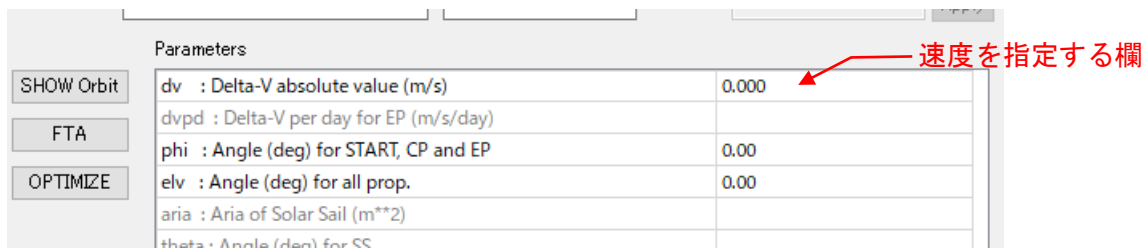


Figure 11 速度を指定する

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 (注) に出発します。

(注) 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。

START マヌーバでは出発日時 (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 ウィンドウの 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反映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 ウィ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「指定した日時まで飛行する」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 ウィ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 (次図)。また Maneuver Editor ウィンドウの下には Show Orbit ウィンドウが開きます。

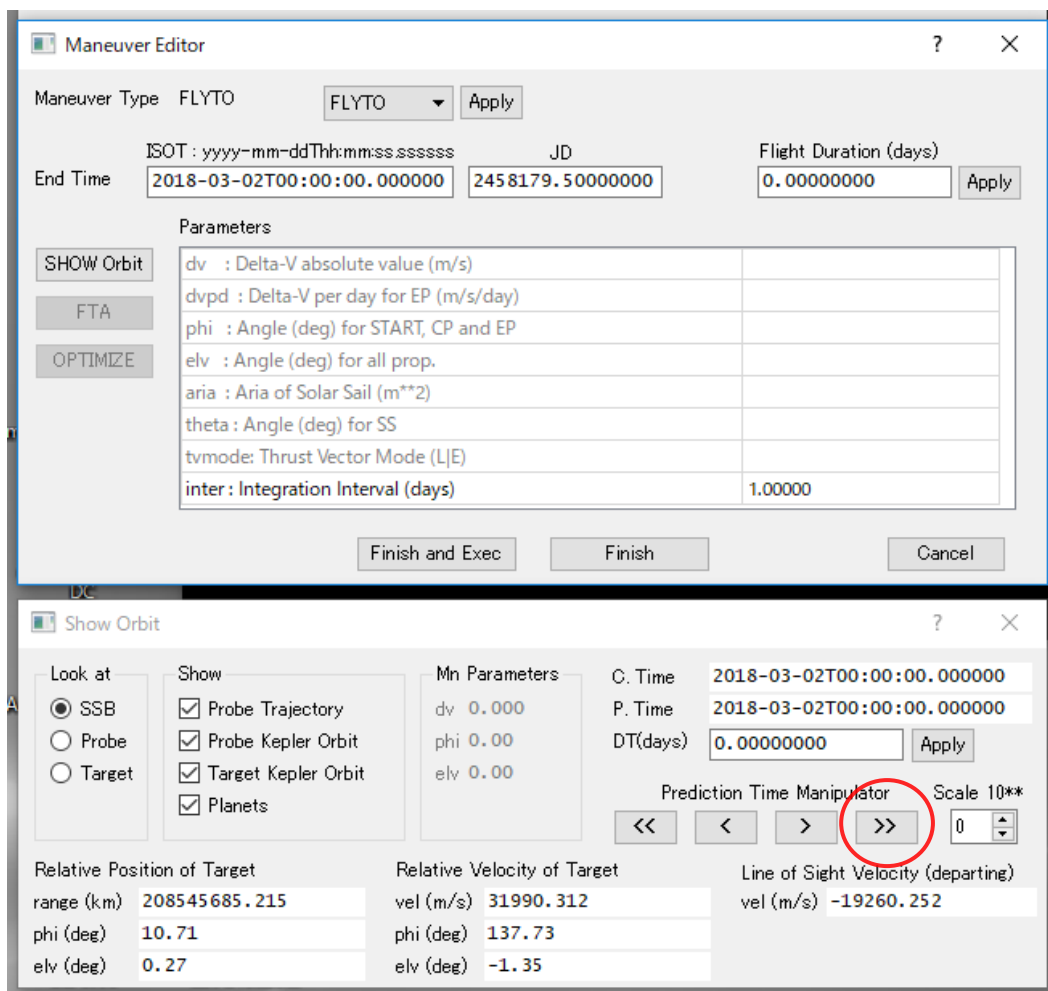


Figure 12 FLYTO マヌーバ編集開始

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 ウィンドウの右端の近くにある「>>」ボタン（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 ウィ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 ウィンドウの End Time（飛行終了日時）や Flight Duration（飛行時間）の値も変化します。

Flight Duration（飛行時間）が 50 日になっていることを確認し、Maneuver Editor ウィンドウの Finish and Exec ボタンをクリックしてください。FLYTO マヌーバの作成が終了し、同時に実行されます。飛行の結果は SSVG ウィンドウの Current status（探査機の状態）や 3D Orbit ウィンドウの図に反映されます。

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）を使って変化が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 ウィンドウの EDIT Next ボタンをクリックしてください。Maneuver Editor ウィ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 ϕ （ファイ）、角度 elv （上下角）の 3 つのパラメータが設定できます。

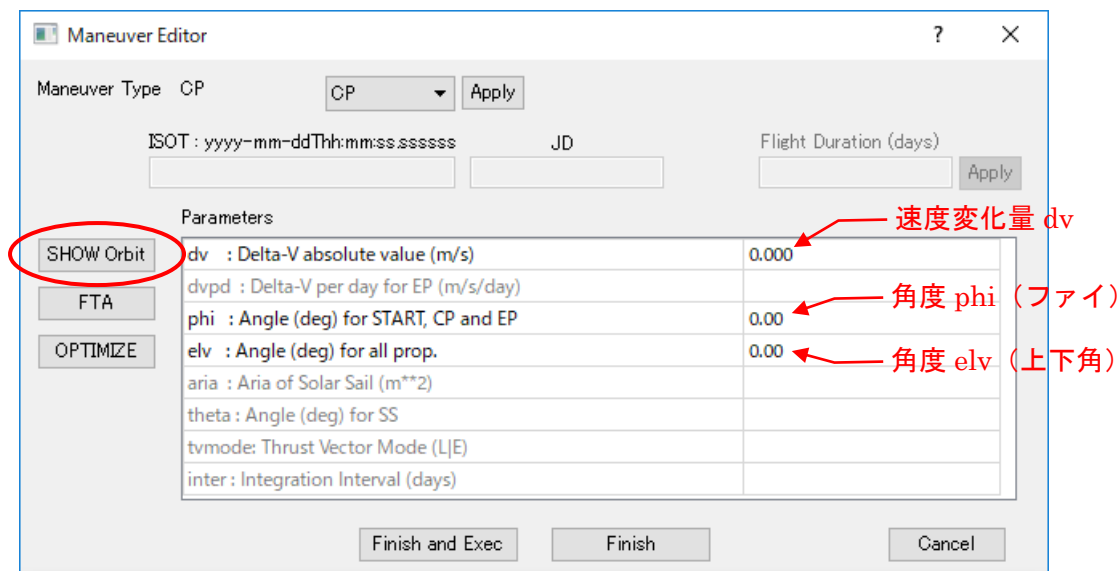


Figure 13 Maneuver Editor ウィンドウ (CP 編集集中)

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、CP マヌーバの実行結果が一時的に探査機の軌道に反映され、3D Orbit ウィンドウに表示されます。

角度 ϕ 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。このように Maneuver Editor では編集集中にそのマヌーバの結果を予測して表示させることができます。

探査機を減速させる

では、探査機を増速ではなく減速し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 ϕ 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。

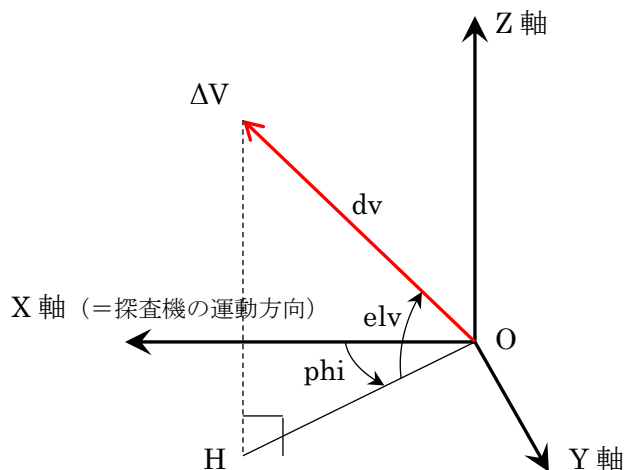


Figure 14 速度変化量と方向の表現

SSVG では上の図の角度 ϕ と角度 elv を用いて速度変化の方向を表現します。この図の X 軸は探査機の運動方向（速度ベクトルの向き）です。Z 軸は探査機の軌道面（探査機が運動している平面）に垂直（注 1）にします。Y 軸は X 軸と Z 軸の両方に対して垂直（注 2）にします。

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 です。 ΔV の先端から XY 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 ϕ は OH と X 軸のなす角を X 軸から反時計回りに測った角度です。X 軸から時計回りに測ることもできますが、その場合は角度の値が負になります。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。そうすると、角度 elv をゼロにして、角度 ϕ を 180 度（または -180 度）にすればよいことになります。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。

（注 1）方向が二つありますが、探査機が地球と同じ向きに公転している（順行している）場合、黄道面（地球の公転面）の北極に近い方を Z 軸の正の向きにします。

（注 2）XYZ の順に右手系を作るよう Y 軸を決めます。右手の親指、人差し指、中指をお互いに直交させたとき、親指が X 軸、人差し指が Y 軸、中指が Z 軸のそれぞれ正の向きになるのが右手系です。

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、その方向とは垂直な向きに加速させることにしましょう。X 軸と垂直な向きというと、Y 軸と Z 軸を含む面（YZ 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（順行の場合）
- Z 軸逆方向 : 軌道面に垂直で、黄道面の南極に近い方向（順行の場合）

これらの方向に加速する場合の角度 ϕ （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

	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 ϕ (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 ϕ 、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。

【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 ウィンドウに表示される図の表示方向を変えてみるのが大切です。3D Orbit ウィ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。

現在 Maneuver Editor ウィンドウを開いて 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。

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ます。

- 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 マヌーバを使うのが大切です。

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、作成済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 ウィンドウの「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 3D Orbit ウィンドウで火星(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。現在の軌道や、CP マヌーバで軌道変更を行ったあとの軌道で探査機がどう飛行するか、そしてそのとき火星がどこにいるかは Show Orbit ウィンドウで「>>」や「>」をクリックすると(誤差はありますが)予測できます。

火星と探査機の位置が重なって見えたとしても、それはある特定の方向から見た場合だけのこともかもしれません。3D Orbit ウィンドウ上で左ボタンを押したままマウスを上下や左右に動かして、表示の向きを回転させてみてください。

探査機が火星に近づいてきたら、探査機と火星の付近を拡大して 3D Orbit ウィンドウに表示させることもできます。次のように操作してみてください。

- Show Orbit ウィンドウの「Look at」グループで「Probe」または「Target」を選択する
- 3D Orbit ウィ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。このやり方だと、探査機から火星までの距離が 100 万キロメートル以下にできれば大成功です。探査機からターゲット天体(この場合は火星)までの距離は、Show Orbit ウィンドウの左下にある「Relative Position of Target」(ターゲット天体の相対位置)グループの「range (km)」の項目に表示されます。

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（木星でスイングバイを試す）で確認しましょう。

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。

SSVG のメニューから、File → New を実行し、新しい飛行計画を作ってください。名前と質量は初期値のままでかまいません。出発する宇宙基地も初期値の EarthL2 で OK です。ターゲット天体は Jupiter（木星）を選択しましょう。

新しい飛行計画ができれば、マヌーバ表の 1 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、編集を開始してください。

Maneuver Editor ウィンドウでは最初に Maneuver Type（マヌーバタイプ）として START を選択しましょう。次に出発日時を 2020 年 3 月 26 日 0 時 0 分にしてください。Start Time の行の ISOT の欄が 2020-03-26T00:00:00.000000 になれば OK です。右隣りの JD の欄を 2458934.5 にしても同じ日時が設定できます。次に Parameters の表で次のようにパラメータを設定してください。

dv	9058.071
phi	-4.80
elv	-8.15

出発日時と上のパラメータは SSVG の Optimize Assistant（最適化アシスタント）という機能を用いて決めた値です。木星でのスイングバイに適するよう、木星到着時の相対速度（探査機と木星の間の速度）が 10 キロメートル／秒程度になるような軌道を選んでいきます。Optimize Assistant の使い方の例は次の節（金星を目指す）で説明します。

出発日時とパラメータが設定できたら、Finish and Exec ボタンをクリックして Maneuver Editor の終了とマヌーバの実行を行いましょ。3D Orbit ウィンドウを見ると探査機の軌道やターゲット天体（木星）の軌道の一部がはみ出していますから、ウィンドウの上で右ボタンを押しながらマウスを上に向かって動かして図を縮小しましょう。Show Orbit ウィンドウの Prediction Time Manipulator にある >> ボタンを連続してクリックすると、現在の軌道で飛行すれば出発の 570 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。

次のマヌーバとして、探査機を飛行させる FLYTO マヌーバを追加しましょう。マヌーバ表の 2

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 **FLYTO** にします。 **Flight Duration** (飛行時間) を 428 日に設定し、その右の **Apply** ボタンをクリックしてください。設定が終了したら、**Finish and Exec** ボタンをクリックして編集の終了とマヌーバ実行を行ってください。

再び **Show Orbit** ウィンドウの **Prediction Time Manipulator** にある **>>** ボタンを続けてクリックすると、現在の軌道で飛行すると今 (実行中の飛行計画の現在時刻) から 150 日後あたり (注) で探査機が木星に接近するのが確認できるでしょう。

(注) これは探査機が出発してから 578 日後に当たります。出発時の予定 (570 日後に木星に接近) からは 8 日遅くなりました。この遅れは宇宙基地出発後に地球の引力の影響を大きく受けることが原因と考えられます。

ここでチェックポイントを作っておきましょう。マヌーバ表の 3 行目に **Next** が表示されているのを確認し、**SSVG** のメニューから **Checkpoint → Create** を実行してください。マヌーバ表の 2 行目 (先ほど作成して実行した **FLYTO** マヌーバの行) に「**checkpoint**」が表示されます。この表示がある状態だと、メニューの **Checkpoint → Resume** の実行によりマヌーバの実行結果を今の状態 (チェックポイントの次の行に **Next** 表示がある状態) に戻すことができます。作成したチェックポイントはあとで使用します。

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の軌道を修正し、探査機が木星とどのようにすれ違うかを決めます。具体的には、木星の引力がないと仮定した探査機の経路が木星に最接近するまでの時間と、その最接近の目標位置を決め、それを実現するよう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の設定に使えるのが **SSVG** の **FTA** 機能です。 **Maneuver Editor** ウィ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** ウィンドウが開きます。

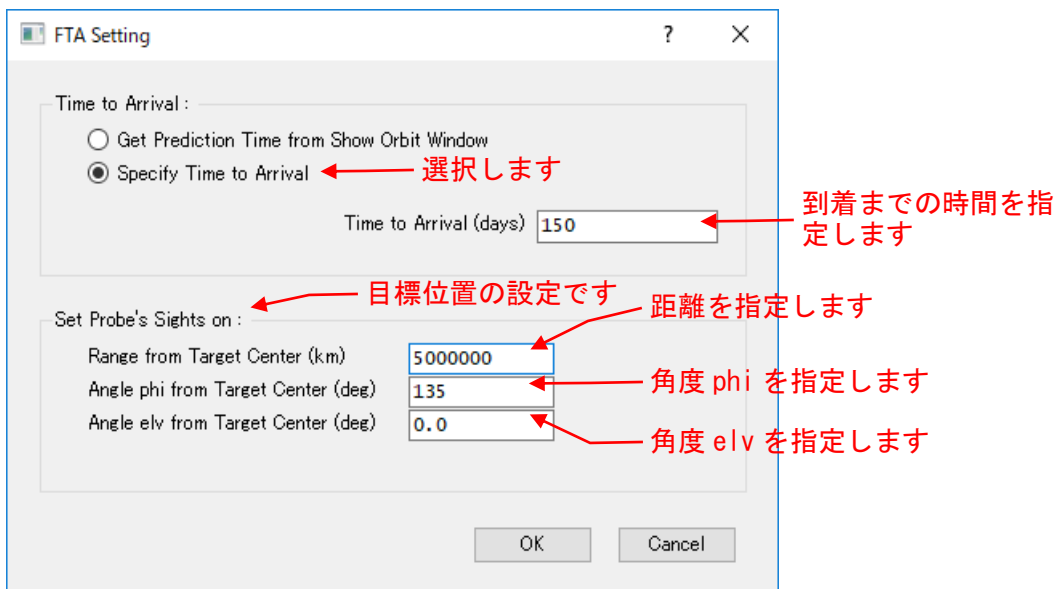


Figure 15 FTA Setting ウィンドウでのパラメータ設定

まず目標位置に到着するまでの時間を設定します。Time to Arrival グループで「Specify Time to Arrival」を選択してください。その右下の Time to Arrival (days) 欄が入力可能になりますから 150 を入力しましょう。単位は「日」です。

次は目標位置の設定です。Set Probe's Sight on グループの 3 つの入力エリアに距離（単位はキロメートル）と角度 phi、角度 elv（単位はいずれも度）を設定します。値は次のようにしましょう。phi と elv の定義は [Figure 14 速度変化量と方向の表現](#) と同様ですが、ここではターゲット天体（木星）の運動方向が X 軸の方向になります。

Range from Target Center (km)	（ターゲットの中心からの距離）	5000000
Angle phi from Target Center (deg)	（ターゲットの中心からの角度 phi）	135
Angle elv from Target Center (deg)	（ターゲットの中心からの角度 elv）	0.0

入力が終わったら OK ボタンをクリックしてください。FTA が計算したマヌーバのパラメータ (dv, phi, elv) が表示されますから、確認して OK ボタンをクリックしてください。これで計算結果が編集集中の Maneuver Editor ウィンドウに反映されます。同時にそのパラメータは Show Orbit ウィンドウに反映され、3D Orbit ウィンドウに表示される探査機の軌道も変更されます。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ましょう。

次はスイングバイの実行です。FLYTO マヌーバを追加して木星とすれ違う飛行を行いましょう。マヌーバ表で 4 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ください。Maneuver Editor ウィンドウが開きますから、Maneuver Type (マヌーバタイプ) として FLYTO を設定してください。木星に接近するのは 150 日後のはずですから、飛行時間は十分な余裕を見て 300 日としましょう。Flight Duration（飛行時間）に 300 を入力し、その右の Apply をクリックしてください。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ましょう。FLYTO マヌーバの実行前と後で探査機の軌道が大きく変われば、スイングバイは成功です。

探査機がどんな風に木星とすれ違ったか、詳しく見てみましょう。SSVG ウィンドウの上部に 3 つ並んだボタンのうち、「REVIEW Recent」ボタンをクリックしてください。Show Orbit ウィンドウに代わって直前に実行された FLYTO マヌーバの結果を確認する Flight Review ウィンドウが開き、3D Orbit ウィンドウに表示される図も変わります。

Flight Review ウィンドウの Review Manipulator のボタン (《<<、<、>、>>》) のクリックを繰り返せば、飛行の途中で探査機とターゲット天体 (木星) がどういう位置関係にあったかが確認できるでしょう。Flight Review ウィンドウの Look at グループで Target を選択し、3D Orbit ウィンドウで画像を拡大する操作 (右ボタンを押しながらマウスの方下に移動) を行えば探査機の木星に対する位置関係を詳しく確認できます。画像の向きを変更する操作 (左ボタンを押しながらマウスを上や左右に移動) を行えば 3 次元的な位置関係もよくわかるでしょう。また、Flight Review ウィンドウの Show グループにある「Probe Kepler Orbit」にチェックをいれておけば、探査機のケプラー軌道 (太陽との 2 体問題で定義される軌道) がスイングバイの途中でどんな風に変化したかも確認できるでしょう。

以上でスイングバイの 1 つのケースを試すことができました。途中でスイングバイの目標位置の設定がありましたが、このパラメータを変更するとスイングバイの様子は大きく違ったものになります。続いて違う目標位置についても試してみましょう。

[A] マヌーバ表の 3 行目にある CP マヌーバで設定したスイングバイの目標位置を変更して、スイングバイ後の探査機の軌道がどうなるか確認しましょう。3 行目の CP マヌーバを編集します。

FTA をもう一度使いたいのですが、そのためにはこの行 (3 行目) に Next の表示がなければなりません。もしマヌーバ表の 2 行目に「checkpoint」の表示があるなら、SSVG ウィンドウのメニューから Checkpoint → Resume を実行しましょう。「checkpoint」の表示がなければ、SSVG ウィンドウの CLEAR Ex ボタンをクリックしてマヌーバの実行結果を消去し、EXEC Next ボタンを 2 回クリックしてください。1 行目と 2 行目のマヌーバが実行され、3 行目の CP マヌーバの行に Next の表示が付くはずですよ。

EDIT Next ボタンをクリックして CP マヌーバの編集を開始してください。Maneuver Editor ウィンドウが開きますから、FTA ボタンをクリックしましょう。FTA Setting ウィンドウが開きますから、Specify Time to Arrival を選択し、Time to Arrival (days) に 150 を入力しましょう。ここまでは前回と同じです。

Set Probe's Sight on グループでは今回は次のような値を目標位置として設定しましょう。

Range from Target Center (km) (ターゲットの中心からの距離)	5000000
Angle phi from Target Center (deg) (ターゲットの中心からの角度 phi)	-45
Angle elv from Target Center (deg) (ターゲットの中心からの角度 elv)	0.0

FTA Setting ウィンドウの OK ボタンをクリックしてください。FTA の計算結果が表示されますから、OK ボタンをクリックしましょう。これで計算結果が Maneuver Editor ウィンドウに反映されます。Maneuver Editor ウィンドウで Finish and Exec ボタンをクリックして編集の終了とマヌ

ーバの実行を行いましょう。

続いて EXEC Next ボタンをクリックして次のマヌーバ（4 行目の FLYTO）を実行しましょう。探査機が飛行して、木星でのスイングバイを行います。

スイングバイの後の探査機の軌道は、前回とはずいぶん違ったものになっているはずです。SSVG ウィンドウの REVIEW Recent ボタンをクリックして、探査機の飛行結果を確認しましょう。

前ページの[A]からここまでを「目標位置」を変えて実行すれば、さまざまなスイングバイを試すことができます。ぜひやってみてください。目標位置としては例えば次の表のようなものが考えられます。

Table 2 木星スイングバイの目標位置の例

距離 (km)	角度 phi	角度 elv	説明
5000000	135	0	木星の軌道の後方を通り抜ける（実行済み）
3000000	135	0	木星の軌道の後方を通り抜ける
2000000	135	0	木星の軌道の後方を通り抜ける
5000000	-45	0	木星の軌道の前方を通り抜ける（実行済み）
3000000	-45	0	木星の軌道の前方を通り抜ける
3000000	0	90	木星の北極上空を通り抜ける
3000000	0	-90	木星の南極上空を通り抜ける

なお、この表の最初の 5 行では角度 phi の値として 135 度と -45 度という値を示していますが、これは今回のスイングバイにおける探査機と木星の相対的な動きから実験的に決めた値です。木星への接近の仕方が異なると、別の値を取ることが適切になります。

金星を目指す

本物の探査機で実現可能な飛行計画を作ってみましょう。ここでは地球の兄弟のような惑星、金星を目指します。金星到着の目標時期は 2020 年としましょう。

飛行計画の新規作成

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

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が、それらは初期値のままにしましょう。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。宇宙基地はすべての惑星の近くのラグランジュ点（L1 と L2）にありま

す。例えば「EarthL2」という宇宙基地は太陽－地球系のラグランジュ点 L2 にあり、これは地球から見て太陽の反対側に約 150 万 km 離れた宇宙空間です。ここではこの EarthL2 を選択しましょう（これが初期値です）。

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）を選択してください。ウインドウ下部の「OK」をクリックすると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。マヌーバ表はまだ空白で、1 行目に **Next** の表示があるはずで、「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 **START** を選択し、その右の「Apply」ボタンをクリックしてください。

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。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、ここでは最適化支援機能（Optimize Assistant 機能）を使用します。Maneuver Editor ウインドウで「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。

Start Optimize Assistant ウインドウでは、出発時刻と到着までの飛行時間を、それぞれのスライダーとボタン（<<または>>）を使って指定します。ボタンをクリックするとスライダーの中央の値が変化します。

- 出発時刻：Arrange Start Time グループのボタンとスライダーを使う
- 飛行時間：Arrange Flight Duration グループのボタンとスライダーを使う

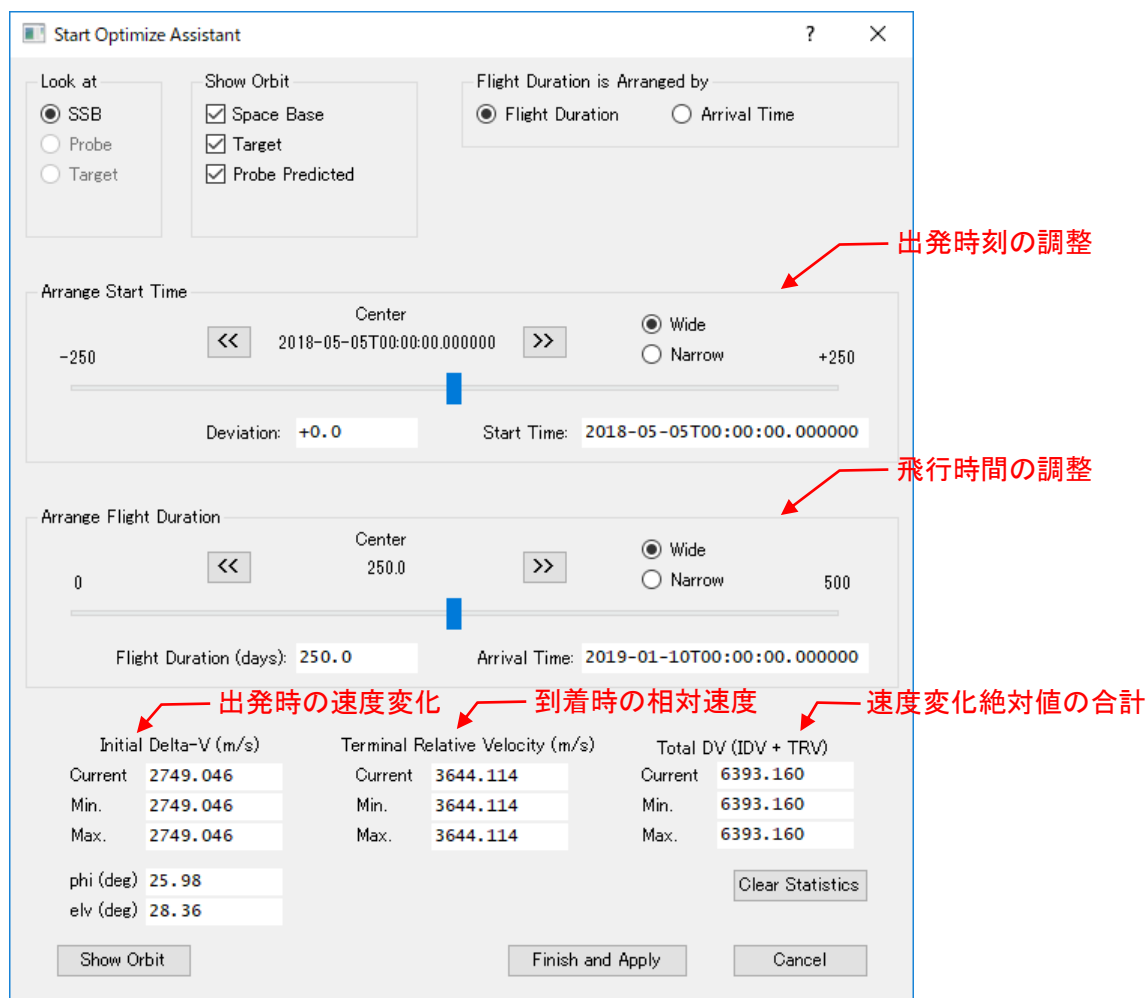


Figure 16 Start Optimize Assistant ウィンドウの例

操作の詳細は [Start Optimize Assistant ウィンドウ](#) を見てください。まずは Arrange Flight Duration のスライダーを動かして、飛行時間 (Flight Duration) を 200.0 日にしましょう。これは JAXA の金星探査機「あかつき」の軌道計画を参考にした値です。

次に適切な出発時刻 (日時) を探しましょう。Arrange Start Time のスライダーとボタン (<<と>>) を操作して、出発時刻 (日時) を変えてみてください。3D Orbit ウィンドウには、次のマークや線が随時表示されます。

水色線：探査機の軌道 (指定した出発時刻と飛行時間に対応したもの)

赤×：出発時の探査機の位置

緑+：出発時のターゲット天体 (ここでは金星) の位置

青×：到着時の探査機とターゲット天体の位置

赤線：宇宙基地の経路

緑線：ターゲット天体 (ここでは金星) の軌道

また、Start Optimize Assistant ウィンドウの下部には次の情報とそれらの最小値・最大値 (Min. と Max.) が随時表示されます。

- 探査機を宇宙基地から出発させる速度（絶対値と方向）：Initial Delta-V
- 探査機がターゲット天体に到着したときの相対速度（絶対値）：Terminal Relative Velocity
- 上記の速度（絶対値）の和：Total DV

どのような軌道が最適かは飛行計画の前提などによって変わりますが、ここでは Total DV が最小になる経路を目指します。到着時刻が 2020 年のどこかで、Total DV が最小になる出発時刻を探してください。

よさそうな出発時刻が見つかったら、Start Optimize Assistant ウィンドウの「Finish and Apply」ボタンをクリックしてください。ウィンドウが閉じて、出発時のパラメータ（出発時刻と出発速度）が Maneuver Editor に反映されます。

Maneuver Editor ウィンドウで「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 ウィンドウのボタン（>>や>）で時間を進める操作を行えば、探査機が 200 日間の飛行の後にターゲット天体（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 Optimize Assistant 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 ウィンドウのマヌーバ表で 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 ウィンドウが開きます。

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。Show Orbit ウィンドウの高速順行ボタン（>>）を何回かクリックして DT を 150.0 にしてください。Maneuver Editor の Flight Duration も同じ値になり、飛行終了時の探査機やターゲット天体の位置が 3D Orbit ウィ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、そのマヌーバが実行されます。探査機の飛行経路が計算され、3D Orbit ウィンドウに青線で表示されます。また飛行時間に対応し、SSVG の現在時刻が 150 日だけ進みます。

CP

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。マヌーバ表で 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 ウィンドウが開きます。

化学推進エンジンを使うため、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 FTA 機能を使用します。FTA 機能はターゲット天体への到着時刻を指定すると、必要な CP マヌーバのパラメータを 2 体問題（注）で計算します。Show Orbit ウィンドウで（>>）を何回かクリックして、DT が 50 日で予測時刻（P. Time）が接近予定日になるようにし、FTA ボタンをクリックしてください。FTA Settings ウィンドウが開きます。

ここでは、探査機がターゲット天体（金星）から見てどこに到着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 万キロメートルの場所とします。「Set Probe's Sight on」グループで次のパラメータを設定します（角度 phi と角度 elv については[軌道ローカル座標系](#)を参照してください）。

Range from Target Center (km) （ターゲットの中心からの距離）	40000
Angle phi from Target Center (deg) （ターゲットの中心からの角度 phi）	-90
Angle elv from Target Center (deg) （ターゲットの中心からの角度 elv）	0.0

「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 Maneuver Editor ウィンドウの「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。

（注）宇宙空間に太陽と探査機の 2 つの天体だけがあると仮定して（ターゲット天体の引力は考慮せずに）軌道の計算を行います。したがって実際の到着時刻や場所は少し違ったものになります。

FLYTO（その 2）

最接近予定日の 5 日前まで 45 日間飛行する 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るはずです。

FLYTO（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 : Integration Interval (days) の値を 0.01 に変更します。FLYTO マヌーバを実行し、SSVG ウィンドウの「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。探査機は当初の予定よりも半日ほど早く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 ウィンドウで「Probe Kepler Orbit」をオンにすれば積分ステップ（注）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、金星との相対速度を小さ

くするマヌーバ（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。

（注）積分ステップとは、FLYTO マヌーバのパラメータ `inter (days)` で指定した値です。ここでは `inter (days)` の値は 0.01 日（約 14 分）になっています。FLYTO マヌーバを実行するとこの間隔で探査機の位置と速度が計算され、記録されます。Flight Review ウィンドウを使った飛行状況の確認でもこの間隔で探査機の位置や軌道を再現することができます。

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した飛行計画を作るためには、その小天体の位置や速度を計算するためのデータファイル（SPK ファイル）が必要です。

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 または電子メールで行いますが、ここでは Telnet インタフェースでの方法を紹介します（電子メールによる依頼方法は、<<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。

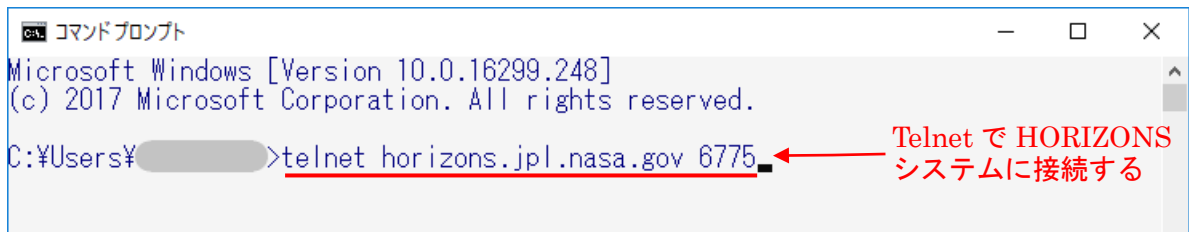


Figure 17 SPK ファイルの入手（1）

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。

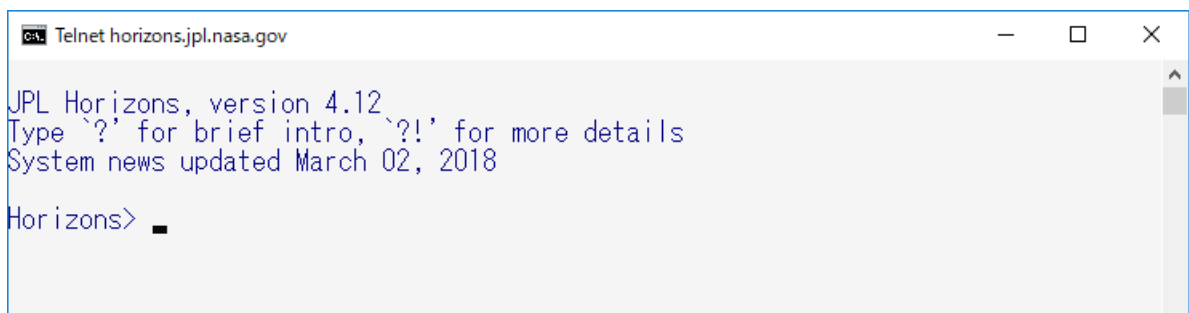


Figure 18 SPK ファイルの入手（2）

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を指定します。次の図の例では、天体の名称で小惑星「Ryugu (リュウグウ)」を指定しています（下線部）。名前以外の方法で天体を指定することもできますが、指定の方法は？ または ?! をタイプして説明書きを表示させ、その内容に従ってください。条件を付けて天体を検索することもできるようです。

天体が特定されると、その天体についての詳しい情報が表示され、コマンド待ちになります。

```
JPL Horizons, version 4.12
Type '?' for brief intro, '?!' for more details
System news updated March 02, 2018

Horizons> name = Ryugu; ← 天体を指定する

>EXACT< name search [SPACE sensitive]:
NAME = Ryugu;
Continue [ <cr>=yes, n=no, ? ] : ← Enter キーを押す
*****
JPL/HORIZONS          162173 Ryugu (1999 JU3)          2018-Mar-22 02:24:19
Rec #: 162173 (+COV) Soln.date: 2017-Apr-06_09:26:35   # obs: 725 (1986-2016)

IAU76/J2000 helio. ecliptic osc. elements (au, days, deg., period=Julian yrs):

EPOCH= 2455838.5 ! 2011-Oct-04.00 (TDB)          Residual RMS= .35399
EC= .1902778037787081      QR= .9633112167957903      TP= 2455902.249617131
OM= 251.6202622385231      W= 211.4184829650048          IN= 5.88355604508763
A= 1.18968112927032        MA= 311.5787724308354          ADIST= 1.41605104174485
PER= 1.29764                N= .759553208              ANGMOM= .01841997
DAN= 1.36889                DDN= .98643              L= 102.9042975
B= -3.0630813              MOID= .00081935          TP= 2011-Dec-06.7496171310

Asteroid physical parameters (km, seconds, rotational period in hours):
GM= n.a.                  RAD= n.a.              ROTPER= 7.627
H= 19.3                   G= .150                B-V= n.a.
ALBEDO= n.a.              STYP= Cg

ASTEROID comments:
1: soln ref.= JPL#117, PHA OCC=0
2: source=ORB
*****
Select ... [A]pproaches, [E]phemeris, [F]tp,[M]ail,[R]edisplay, [S]PK,?,<cr>: █
```

Figure 19 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。

```

ASTEROID comments:
1: soln ref.= JPL#117, PHA OCC=0
2: source=ORB
*****
Select ... [A]pproaches, [E]phemeris, [F]tp,[M]ail,[R]edisplay, [S]PK,?,<cr>: s
Assigned SPK object ID: 2162173 ← SPKID (メモする)
Enter your Internet e-mail address [?]: ■

```

Figure 20 SPK ファイルの入手 (4)

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。

```

Enter your Internet e-mail address [?]: ■■■■■■■■■■.com
Confirm e-mail address [yes(<cr>),no] : yes
Address stored this login only ... use "email" cmd to change
SPK file format [Binary, ASCII, 1, ?] : ■

```

Figure 21 SPK ファイルの入手 (5)

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。

引き続き 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/>>

```
SPK file format [Binary, ASCII, 1, ?] : 1
SPK object START [ t >= 1900-Jan-01, ? ] : 2001-Jan-01
SPK object STOP [ t <= 2101-Jan-01, ? ] : 2100-Dec-31

Current integration step:
2451921.77869 2001 Jan 12.27869 -2.8070735
Current integration step:
2488401.50441 2100 Nov 29.00441 1.2697332

Binary SPK file created.
Add more objects to file [ YES, NO, ? ] : no

You have 10 minutes to retrieve the following by anonymous FTP:
Machine name: ssd.jpl.nasa.gov
Directory : cd to "/pub/ssd/"
File name : wld66875.15
File type : BINARY >* set FTP binary mode *<
Full path : ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/ssd/wld66875.15

Select ... [E]phemeris, [M]ail, [R]edisplay, ?, <cr>: █
```

Figure 22 SPK ファイルの入手 (6)

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。入手した SPK ファイルは SSVG の data フォルダに格納しておくと好都合です。

なお、途中で表示された SPKID の値は必ずメモして残しておいてください。次のステップで使用します。

【備考】

冥王星 (Pluto : 準惑星) と地球の月 (Moon) は惑星ではありませんが、位置・速度を計算するためのデータ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、ドロップダウンリストから選んでください。

SSVG がターゲット天体として選択できる小天体は、太陽の引力に従って公転するもの、つまり準惑星や小惑星、彗星などに限られます。地球の月を除けば、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。

飛行計画の新規作成

SSVG ウィンドウのメニューから **File → New** を実行してください。New Flight Plan ウィンドウ

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 グループでは次の図のように設定します。

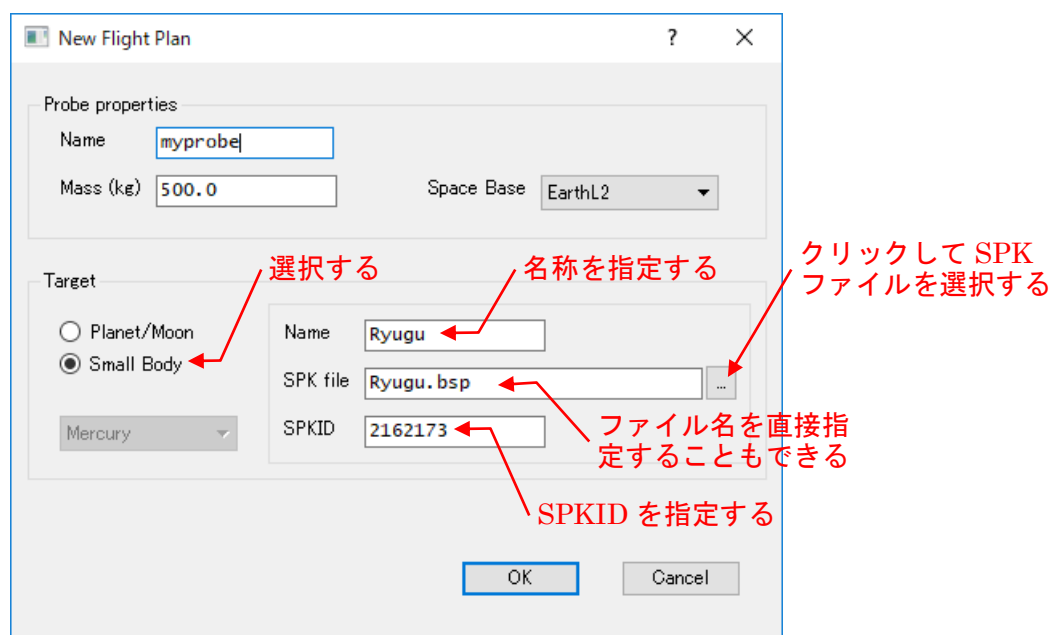


Figure 23 小天体をターゲット天体にする

まず「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。次に 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。SPK ファイルが SSVG の data フォルダに保存してあれば、ファイル名を直接 SPK file 欄に記入することもできます。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始まります。EDIT Next ボタンをクリックして START マヌーバの作成を行うところから始めてください。

リファレンス

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。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、宇宙旅行の目的地である「ターゲット天体」を目指します。

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。

探査機を惑星の近くに到達させることができれば、適切な減速を行って探査機を惑星の衛星にすることもできます。また、惑星の引力を利用して軌道を大きく変え、別の天体を目指すこともできます。いわゆるスイングバイ（または重力アシスト）です。

また、探査機をイトカワやリュウグウのような小天体に接近させて、探査機と小天体がならんで太陽の周りを公転するランデブー状態にすることもできます。残念ながら SSVG の探査機は観測装置を持ちませんので、小天体の観測はできません。また、探査機の運動には小天体の引力は考慮されませんので、小天体に近づいたときの探査機の運動は現実とは少し異なります。

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。

宇宙基地は、すべての惑星の近くの宇宙空間に 2 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。

（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る場合に限って定義されます。惑星の軌道は完全な円ではありませんから、この場所にある物体は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。例えば地球近傍の宇宙基地 EarthL1 と EarthL2 は地球中心から約 150 万キロメートル離れた場所にあります。

SSVG の宇宙基地の名前は次の表のとおりです。

Table 3 宇宙基地の名前

近傍の惑星	L1 にある宇宙基地	L2 にある宇宙基地
水星 (Mercury)	MercuryL1	MercuryL2
金星 (Venus)	VenusL1	VenusL2
地球 (Earth)	EarthL1	EarthL2
火星 (Mars)	MarsL1	MarsL2
木星 (Jupiter)	JupiterL1	JupiterL2
土星 (Saturn)	SaturnL1	SaturnL2
天王星 (Uranus)	UranusL1	UranusL2
海王星 (Neptune)	NeptuneL1	NeptuneL2

マヌーバ (Maneuver)

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

探査機を飛行させる一連のマヌーバはメインウインドウ (SSVG ウインドウ) 上に表として作成します。この表を「マヌーバ表」と呼び、一つの行 (横一列) が一つのマヌーバに対応します。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 7 つのタイプがあります。各々のマヌーバのパラメータについては [Table 18 Maneuver Editor の Parameters の設定](#) 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	<p>探査機を宇宙基地から出発させます。</p> <p>出発時刻に加えて、パラメータとして出発の速度（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。</p> <p>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。</p> <p>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）。</p> <p>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。</p>
CP	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>このマヌーバを実行しても SSVG の現在時刻は進みません。</p>
EP_ON	<p>電気推進エンジンをオンにするマヌーバです。すでにオンである場合にも使うことができ、実行すると推進のパラメータが新しい値に変わります。</p> <p>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。</p> <p>このマヌーバを実行しても SSVG の現在時刻は進みません。</p>
EP_OFF	<p>電気推進エンジンをオフにするマヌーバです。</p> <p>パラメータはありません。</p> <p>このマヌーバを実行しても SSVG の現在時刻は進みません。</p>
SS_ON	<p>ソーラーセイルをオンにするマヌーバです。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わります。</p> <p>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。</p> <p>このマヌーバを実行しても SSVG の現在時刻は進みません。</p>
SS_OFF	<p>ソーラーセイルをオフにするマヌーバです。</p> <p>パラメータはありません。</p> <p>このマヌーバを実行しても SSVG の現在時刻は進みません。</p>
FLYTO	<p>指定した飛行終了時刻まで飛行します。</p> <p>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。</p> <p>このマヌーバの実行により SSVG の現在時刻が進み、探査機の位置や速度が変化します。</p>

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や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。例えば地球でスイングバイを行って小惑星リュウグウを目指す飛行計画であれば、最初はターゲット天体を地球にしておき、スイングバイを行った後にターゲット天体をリュウグウ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 で飛行計画を作成する場合に指定する「行き先」の天体です。ターゲット天体の位置や軌道は 3D Orbit ウィンドウに表示することができますし、SSVG でマヌーバを作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「ある天体」がターゲット天体に指定されていることが必要です。

ターゲット天体として指定できる天体は次の二種類です。

- 惑星／月 (Planet/Moon) : 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に指定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 システムが太陽系重心を原点とする SPK ファイルを提供している太陽系の小天体 (準惑星、小惑星、彗星) です。これらの一つをターゲット天体に指定するためには、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に指定することはできません。

ターゲット天体の指定は、飛行計画を作成している途中であっても、SSVG ウィンドウのメニューから変更が可能です。飛行計画作成の前半は地球をターゲット天体としていて、後半は小惑星をターゲット天体にする、といった運用ができます。

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（一般的な性能のエンジンを仮定しています）。

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。目的を達成する飛行計画ができたなら、[推進装置とロケット方程式](#)の項を参考にして、その飛行計画が実際の宇宙探査機で可能かどうかを考えてみるとよいでしょう。

電気推進エンジン

SSVG の電気推進エンジンは、小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ 2」で実際に使用されているイオンエンジンをモデル化したものです。イオンエンジンはキセノン（不活性ガスの一種）などの推進剤をプラズマ（電気を帯びた粒の集まり）にし、それを電気の力で噴出させることで推力を発生させます。

イオンエンジンの長所は「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、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。ただし、SSVG の電気推進エンジンは推進剤を全く消費しないようモデル化されています。

イオンエンジン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）。

この弱点は現実ですし、実際の宇宙探査機では太陽電池から得られる電力にも限りがありますから、推力にはいっそう厳しい制限がかかることになります。しかし SSVG ではこの弱点も無視しています。SSVG の電気推進エンジンは、1 日当たりの速度変化量としてどのような値も可能なようモデル化されています。

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。ソーラーセイルで計算どおりの推力が得られることは、JAXA の宇宙機「イカロス」が実証しています。

ソーラーセイルの長所は、推進剤を全く必要としないことです。そのかわり、大きな推力を得るためには大きな「光の帆」を広げる必要があります。例えば「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）のセイルを広げることで約 1 ミリニュートンの推力を得ています。

現実の宇宙機では、宇宙空間で巨大な光の帆を平面に広げることがまず困難ですし、その帆を希望する方向に向けることも、そしてその状態を保つことも大変困難だと予想されています。しかし、SSVG のソーラーセイルは、任意の面積のセイルを指定した方向に瞬時に広げることができます。またセイルの表面は完全な平面で、両面とも完全な鏡面として光を反射します。

ソーラーセイルを使用した飛行計画のサンプルが `sampleplan` フォルダに収録されています。`mars02_SS.json` を開いて実行してみてください。地球近傍の宇宙基地を速度ゼロで出発し、ソーラーセイルによる加速だけで 7 年半かけて火星に到着します。最後は 300 メートル／秒の減速で火星の衛星になっています。ソーラーセイルの面積は 1 万平方メートルで、探査機の質量は 500 キログラムとしています。

ウィンドウとその操作

SSVG ウィンドウ

SSVG ウィンドウは SSVG のメインウィンドウです。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 ウィンドウの中央やや上には「マヌーバ表」があります。マヌーバ表の各行（横一列）が一つのマヌーバ（探査機に対する指令）です。SSVG の探査機は、この表にあるマヌーバを上から順に実行することにより飛行します。別の言い方をすると、探査機が目的にかなう飛行をするようにマヌーバ表を作り上げることが SSVG の目標になります。

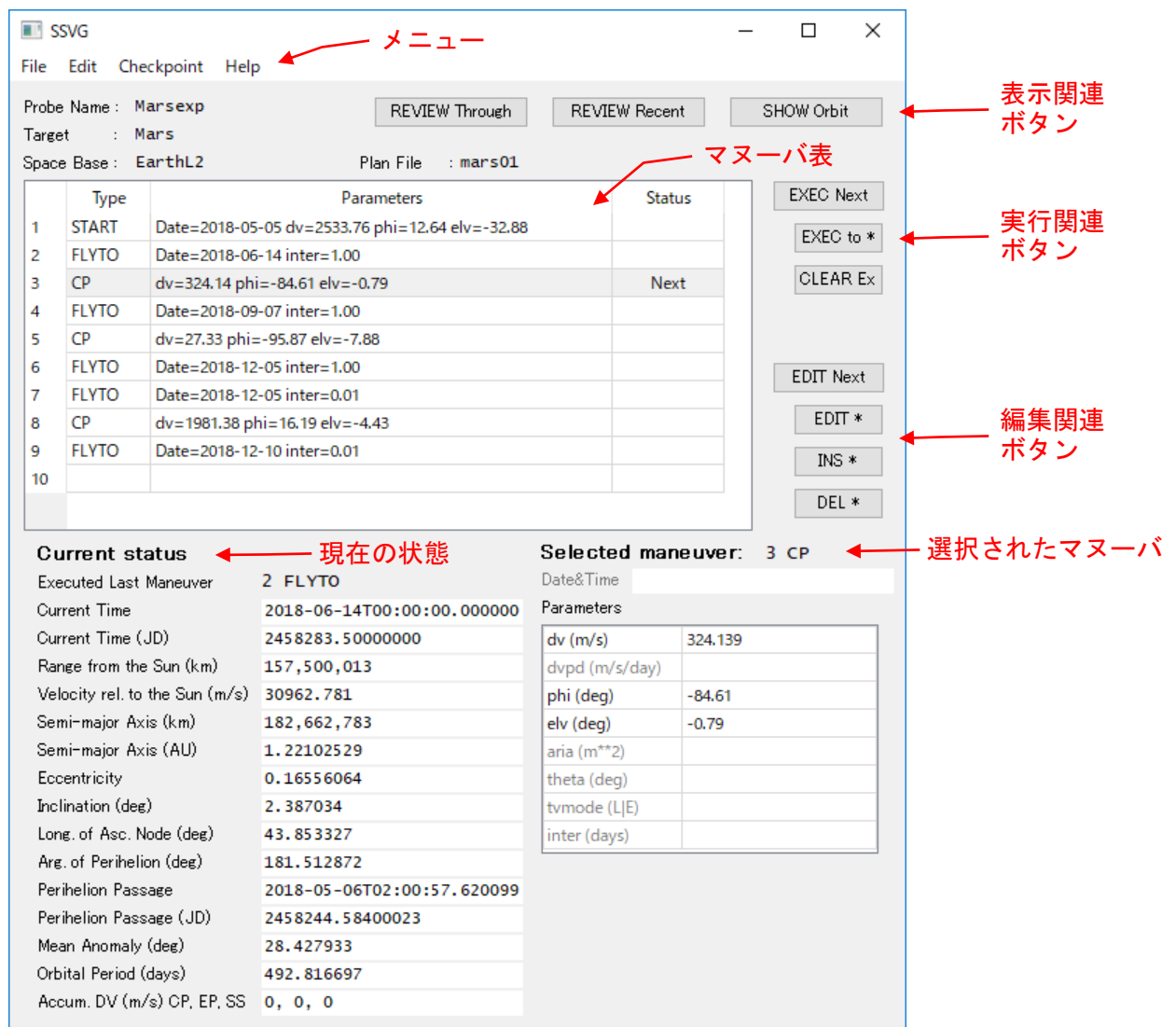


Figure 24 SSVG ウィンドウ

SSVG ウィンドウには表示関連ボタン (3つ)、実行関連ボタン (3つ)、そして編集関連ボタン (4つ) があります。これらのボタンの機能については次の表に示します。

Table 5 SSVG ウィンドウのボタン

	表示名	機能
表示関連ボタン	REVIEW Through	Review Throughout ウィンドウを表示し、実行済みのすべてのマヌーバを連続して 3D Orbit ウィンドウでレビューします。3D Orbit ウィンドウが閉じられている場合は再表示します。
	REVIEW Recent	Flight Review ウィンドウを表示し、直前の飛行結果（FLYTO マヌーバの結果）を 3D Orbit ウィンドウでレビューします。3D Orbit ウィンドウが閉じられている場合は再表示します。
	SHOW Orbit	Show Orbit ウィンドウを表示し、3D Orbit ウィンドウに探査機とその軌道、ターゲット天体とその軌道等の情報を表示します。3D Orbit ウィ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	Next 行のマヌーバを実行します。実行後に SSVG、Show Orbit、3D Orbit の各ウィンドウにマヌーバ実行後の情報が表示されます。いずれかのウィンドウが閉じていれば、ウィンドウを自動的に開きます。
	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。実行後に SSVG、Show Orbit、3D Orbit の各ウィンドウに最後のマヌーバ実行後の情報が表示されます。いずれかのウィンドウが閉じていれば、ウィンドウを自動的に開きます。
	CLEAR Ex	マヌーバの実行結果をすべて取り消し、マヌーバ表の 1 行目を Next 行にします。Show Orbit ウィンドウなど 3D Orbit ウィンドウに画像を表示するウィンドウは閉じ、3D Orbit ウィンドウの内容も消去されます。
編集関連ボタン	EDIT Next	Maneuver Editor ウィンドウを開き、Next 行のマヌーバを編集します。
	EDIT *	Maneuver Editor ウィンドウを開き、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。
	INS *	選択されている行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、挿入を行うとマヌーバの実行結果はすべて取り消されます。
	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、削除を行うとマヌーバの実行結果はすべて取り消されます。

SSVG ウィンドウのマヌーバ表に対して行うことのできる操作は次の表のとおりです。

Table 6 SSVG ウィンドウのマヌーバ表の操作

操作	機能
行のクリック	クリックした行を選択します。選択した行にあるマヌーバの詳細が SSVG ウィンドウの下部右側にある Selected maneuver（選択されたマヌーバ）に表示されます。また、選択された行は EXEC to * や EDIT * といったボタンの操作の対象になります。
行のダブルクリック	Maneuver Editor ウィンドウを開き、ダブルクリックした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。

SSVG ウィンドウの上端にはメニューがあり、マウス操作により次の表に示す機能を実行することができます。

Table 7 SSVG ウィンドウのメニュー

メニュー項目	サブ項目	機能
File	Open	保存されている飛行計画を開きます。
	New	New Flight Plan ウィンドウを開き、新しい飛行計画を作成します。
	Save	現在の飛行計画をファイルに上書き保存します。
	Save as...	現在の飛行計画に名前を付けて新しいファイルに保存します。
	Quit	SSVG を終了します。
Edit	Probe	Edit Probe Properties ウィンドウを開き、現在の飛行計画の探査機 (Probe) の情報を編集します。
	Target	Select New Target ウィンドウを開き、現在の飛行計画のターゲット天体 (Target) を変更します。
Checkpoint	Create	チェックポイントを作成します。(注)
	Resume	マヌーバの実行結果をチェックポイントから復元します。
Help	about SSVG	SSVG に関する情報を表示します。

(注) その時点までのマヌーバの実行結果を保持するチェックポイントを作成します。Resume の実行により、チェックポイントが保持するマヌーバの実行結果が復元されます。飛行の途中のマヌーバのパラメータを何度も変えて経路の変化を試すような場合に使うと便利でしょう。CLEAR Ex ボタンのクリックなど、マヌーバの実行結果を取り消す操作を行うと保持されていたチェックポイントは廃棄されます。

SSVG ウィンドウの下部には 2 つの表示エリアがあります。Current status (現在の状態) と Selected maneuver (選択されたマヌーバ) で、表示される情報は次の表のとおりです。なお、背景が白色の領域についてはマウス操作で選択し、Ctrl+C のキーボード操作で文字列を PC のクリップボードにコピーすることができます。

Table 8 SSVG ウィンドウに表示される情報

項目名	表示内容
Current status (現在の状態)	<p>最後に実行されたマヌーバの実行終了時の探査機の状態が表示されます。内容は次のとおりです。</p> <p>Executed Last Maneuver 最後に実行されたマヌーバの行とタイプ</p> <p>Current Time 現在時刻 (西暦年-月-日[T]時:分:秒)</p> <p>Current Time (JD) 現在時刻 (ユリウス日)</p> <p>Range from the Sun (km) 太陽からの距離 (キロメートル)</p> <p>Velocity rel. to the Sun (m/s) 太陽との相対速度 (メートル/秒)</p> <p>Semi-major Axis (km) 軌道長半径 (キロメートル)</p> <p>Semi-major Axis (AU) 軌道長半径 (天文単位)</p> <p>Eccentricity 軌道の離心率</p> <p>Inclination (deg) 軌道傾斜角 (度)</p> <p>Long. of Asc. Node (deg) 軌道の昇交点黄経 (度)</p> <p>Arg. of Perihelion (deg) 軌道の近日点引数 (度)</p> <p>Perihelion Passage 近日点通過時刻 (西暦年-月-日[T]時:分:秒)</p> <p>Perihelion Passage (JD) 近日点通過時刻 (ユリウス日)</p> <p>Mean Anomaly (deg) 平均近点離角 (度)</p> <p>Orbital Period (days) 軌道周期 (日)</p> <p>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)</p>
Selected maneuver (選択されたマヌーバ)	<p>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 ウィンドウ を参照してください。</p>

3D Orbit ウィンドウ

3D Orbit ウィンドウは探査機やターゲット天体の位置や軌道を 3 次元空間に描かれた図形として表示するウィンドウで、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。ウィ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。

3D Orbit ウィンドウに表示される情報は他のウィンドウ (Show Orbit、Flight Review、Review Throughout、Start Optimize Assistant、CP Optimize Assistant のいずれか) が作成し、制御します。次の図は Show Orbit ウィンドウが作成した情報を表示中の例です。それ以外のウィンドウが作成した情報を表示するときは表示内容が少し変わります (基本的には同じです)。

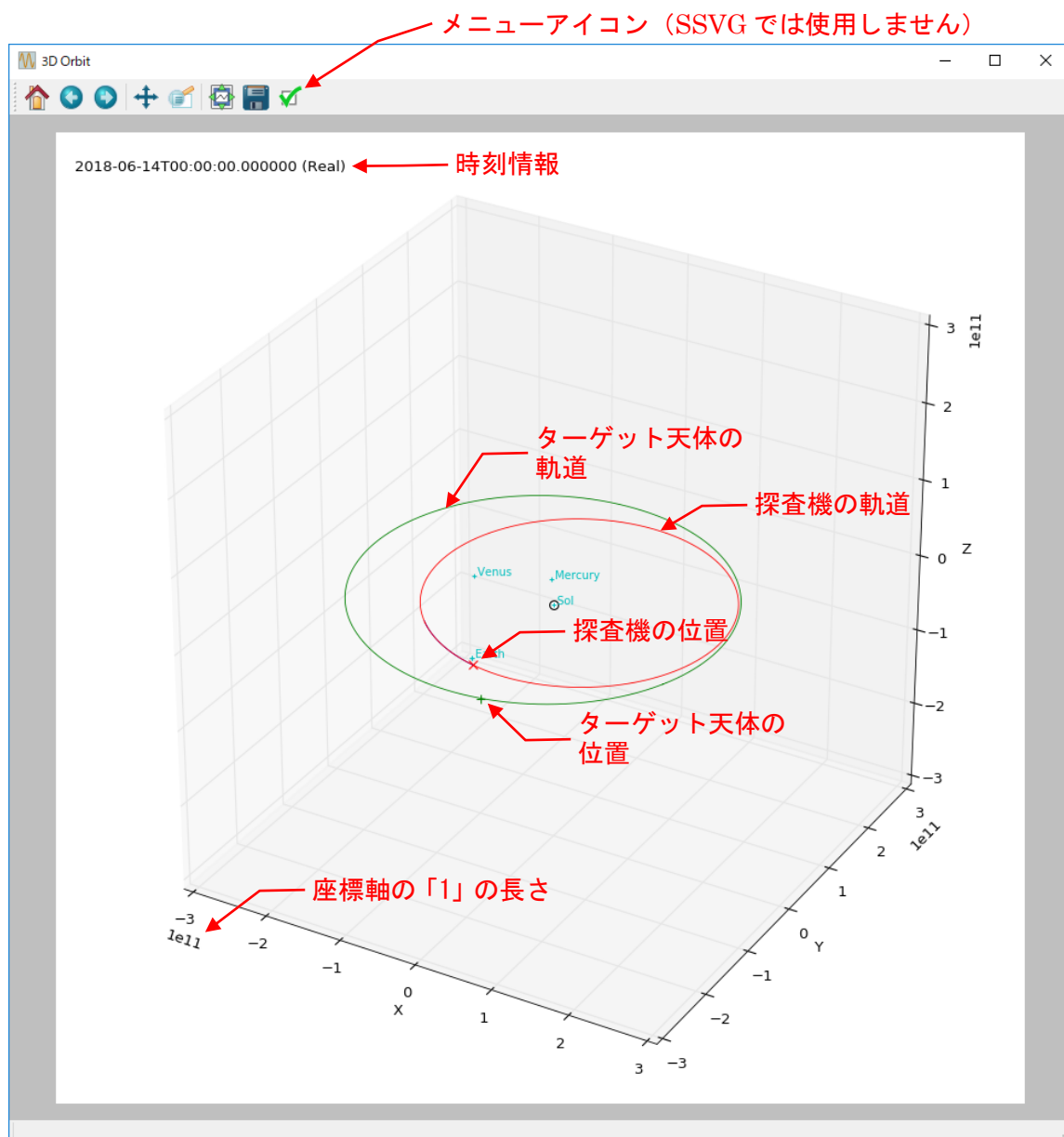


Figure 25 3D Orbit ウィンドウ

3D Orbit ウィンドウのメニューアイコンは SSVG では使用しません。

3D Orbit ウィンドウ上でマウス操作を行うことにより、表示される画像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 ウィンドウにおける画像操作

操作したい内容	操作方法
画像の向きを変える	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。
画像の拡大率を変える	右ボタンを押した状態でマウスを上下に動かします。
画像の中心を変更する	3D Orbit ウィンドウでは操作できません。Show Orbit ウィンドウ、Flight Review ウィンドウ、または Review Throughout ウィンドウの 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 ウィ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 10 3D Orbit ウィンドウに表示されるマーク、線、文字

マーク・線・文字	説明
×マーク（赤）	探査機の位置。FLYTO マヌーバのレビュー中は電気推進やソーラーセイルの状態がマークの右に赤文字で表示されることがあります。
曲線（赤）	探査機の軌道。2 体問題の解としての二次曲線です。 Start Optimize Assistant では出発する宇宙基地の経路です。 CP Optimize Assistant では軌道変更前の探査機の軌道です。
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二次曲線です。
×マーク（青）	探査機がターゲット天体に到着する位置。Optimize Assistant の実行時に表示されます。
曲線（水色）	探査機の軌道変更後の軌道。Optimize Assistant で日時（出発または軌道変更の日時）と飛行時間（または到着日時）を指定すると、可能な軌道（2 体問題の解としての二次曲線）が水色で表示されます。曲線を表現する点の間隔が大きいため、曲線の一部が多角形になることがあります。
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。地球の月は水色の + 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。座標軸に付記してある数値は座標軸の「1」の長さで、単位はメートルです。図に示す例では $1e11$ ですが、これは 1×10^{11} メートル、つまり座標軸の 1 が実際には 1 億キロメートルであることを示しています。
時刻情報	ウィンドウの左上隅に時刻とその種類が表示されます。時刻は ISO 形式（西暦年-月-日[T]時:分:秒）です。時刻の種類は Real（実時刻）と Predicted（予測時刻）のいずれかです。Optimize Assistant では 3D Orbit ウィンドウには時刻は表示されません。

Show Orbit ウィンドウ

Show Orbit ウィンドウは、探査機の現在の状態を 3D Orbit ウィンドウに表示するウィンドウです。Maneuver Editor でマヌーバが編集集中である場合に限り、編集集中のパラメータを一時的に反映させた軌道や位置を表示することがあります。

Show Orbit ウィンドウはマヌーバを実行したとき自動的に表示されます。また Next 行の編集を開始したときも自動的に表示されます。Show Orbit ウィンドウを閉じてしまったときは、SSVG ウィンドウまたは Maneuver Editor ウィンドウの「SHOW Orbit」ボタンをクリックすることにより再表示されます。

Next 行の編集集中に「SHOW Orbit」ボタンをクリックした場合、編集集中のマヌーバのタイプが START か CP であれば、編集集中の Parameters の値は Show Orbit ウィンドウの「Mn Parameters」グループに反映され、同時に 3D Orbit ウィンドウに表示される探査機の位置や軌道にも一時的に反

映されます（編集集中の Parameters のマヌーバが実行された場合の軌道や位置が表示されます）。

Show Orbit ウィンドウでよく使うのは時刻の操作です。3D Orbit ウィ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（現在時刻）のものが基本ですが、Show Orbit ウィンドウで予測時刻（Prediction Time）を操作することで、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）の位置を表示させることもできます。この操作では探査機の運動を 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。

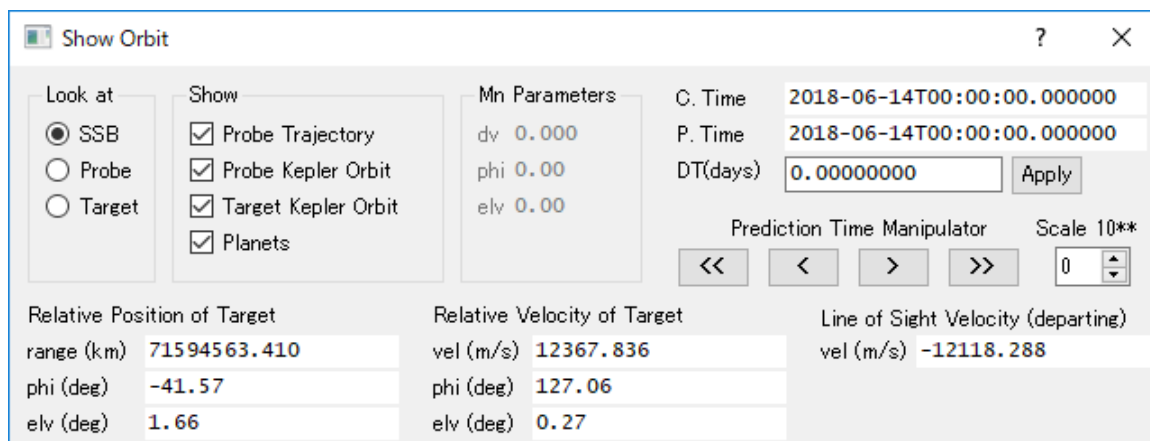


Figure 26 Show Orbit ウィンドウ

Show Orbit ウィンドウで行うことのできる操作は次の表のとおりです。

Table 11 Show Orbit ウィンドウの操作

グループ	項目	説明
Look at	SSB	選択すると 3D Orbit ウィ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 ウィ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 ウィンドウの描画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が表示されます。
	Probe Kepler Orbit	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに探査機の軌道 (2 体問題の解としての二次曲線) が赤線が表示されます。
	Target Kepler Orbit	チェックすると 3D Orbit ウィンドウにターゲット天体の軌道 (2 体問題の解としての二次曲線) が緑線が表示されます。
	Planets	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに太陽や惑星の位置と名前が表示されます。
時刻情報	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。(注)
Prediction Time Manipulator 予測時刻の操作 (注)	<< 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 倍だけ予測時刻が変化します。

(注) Maneuver Editor ウィンドウで 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 ウィンドウの End Time (飛行終了時刻) や Flight Duration (飛行時間) に自動的に反映されます。

Show Orbit ウィンドウには、次の表に示す補助的な情報も表示されます。

Table 12 Show Orbit ウィンドウに表示される補助的な情報

グループ	説明
Mn Parameters マヌーバのパラメータ	化学推進マヌーバ (CP マヌーバ) および START マヌーバの編集を開始したとき、および編集集中に SHOW Orbit ボタンをクリックしたときは、編集集中の速度変化の値が表示されます。この場合、3D Orbit ウィ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一時的に適用された結果になります。dv は速度変化量で、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 を参照してください。
時刻情報 (ウィンドウの右上 3 行)	C. Time (Current Time : 現在時刻)、P. Time (Prediction Time : 予測時刻)、DT (経過時間) が表示されます。C. Time (現在時刻) は直前のマヌーバの終了時刻で、P. Time (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。DT (経過時間) 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 ターゲットの相対位置	探査機から見たターゲット天体の中心の距離と方向です。range は距離で、phi と elv は方向です。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 ターゲットの相対速度	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 は相対速度の方向です。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 (departing) ターゲットの視線速度 (遠ざかる速度)	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この速度で遠ざかりつつあり、負であればこの速度で接近しつつあります。

Flight Review ウィンドウ

Flight Review ウィンドウは、直前に実行された FLYTO マヌーバの結果を 3D Orbit ウィンドウに表示させ、飛行結果をレビューするウィンドウです。探査機の飛行の経過を積分ステップ (注) ごとに再現して表示させる操作はこの Flight Review ウィンドウで行います。

(注) 積分ステップとは、レビュー中の FLYTO マヌーバのパラメータ inter (days) で指定した値です。FLYTO マヌーバを実行すると、この値の間隔で探査機の位置と速度が計算され、記録されます。

Flight Review ウィンドウは SSVG ウィンドウで「REVIEW Recent」ボタンをクリックすると表示されます。このボタンがクリックできるのは、マヌーバ表で FLYTO マヌーバが実行された直後の (FLYTO マヌーバの次の行が Next 行である) 場合に限られます。それ以外の場合には、「REVIEW Recent」ボタンは無効になります。

飛行結果のレビュー中は 3D Orbit ウィンドウの探査機 (赤の×マーク) 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 (注 1) 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
(注 2) 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を、値は
1 日当たりの速度変化量 (メートル/秒) です。

(注 1) 電気推進エンジンの推力方向モードについては[電気推進エンジンのモデル化](#)を参照してください。

(注 2) ソーラーセイルの推力方向モードについては[ソーラーセイルのモデル化](#)を参照してください。

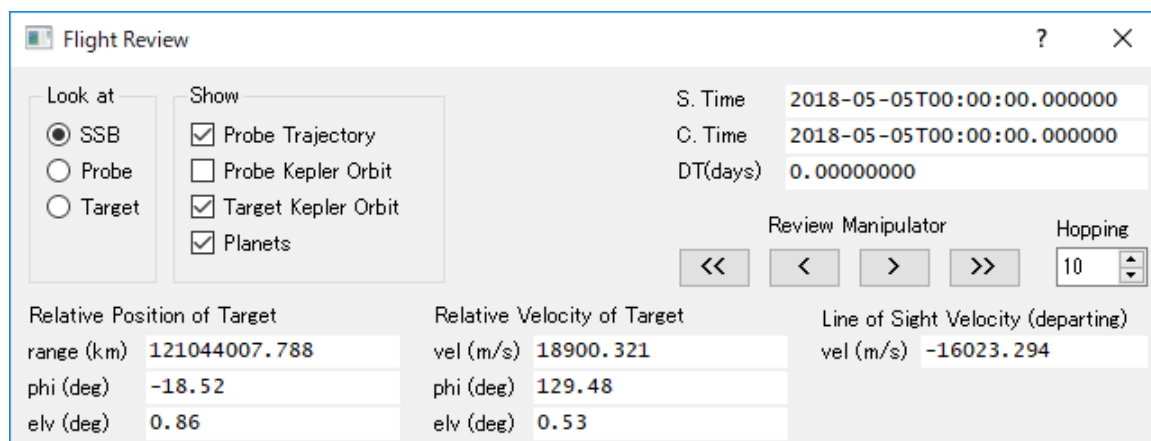


Figure 27 Flight Review ウィンドウ

Flight Review ウィンドウで行うことのできる操作は次の表のとおりです。

Table 13 Flight Review ウィンドウの操作

グループ	項目	説明
Look at	SSB	選択すると 3D Orbit ウィ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 ウィ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 ウィンドウの描画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が表示されます。
	Probe Kepler Orbit	チェックすると 3D Orbit ウィンドウにその時刻での探査機の軌道が赤線が表示されます。 電気推進エンジンやソーラーセイルの使用、または探査機が惑星の近傍を飛行しているときには、探査機の軌道が刻々と変化する様子が確認できるでしょう。
	Target Kepler Orbit	チェックすると 3D Orbit ウィンドウ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が表示されます。
	Planets	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに太陽や惑星の位置と名前が表示されます。
Review Manipulator レビューの操作	◀◀ ボタン	高速逆行。クリックすると Hopping で指定した積分ステップ数 (注) だけ時刻が戻ります。
	◀ ボタン	逆行。クリックすると 1 積分ステップ (注) だけ時刻が戻ります。
	▶ ボタン	順行。クリックすると 1 積分ステップ (注) だけ時刻が進みます。
	▶▶ 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時刻が進みます。
	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時刻を変化させるステップ数を指定します。スピンボックスですが、値を入力することもできます。

(注) 積分ステップとは、レビュー中の FLYTO マヌーバのパラメータ `inter (days)` で指定した値です。FLYTO マヌーバを実行すると、この値の間隔で探査機の位置と速度が計算され、記録されます。

Flight Review ウィンドウには、次の表に示す補助的な情報も表示されます。

Table 14 Flight Review ウィ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 (ウィンドウの右上 3 行)	S. Time (Start Time : 開始時刻)、C. Time (Current Time : 現在時刻)、DT (経過時間) が表示されます。S. Time (開始時刻) はレビュー中の FLYTO マヌーバの開始時刻で、C. Time (現在時刻) は表示中の探査機やターゲット天体の位置に結びついた時刻です。DT (経過時間) は S. Time (開始時刻) からの経過時間です。
Relative Position of Target ターゲットの相対位置	探査機から見たターゲット天体の中心の距離と方向です。range は距離で、phi と elv は方向です。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 ターゲットの相対速度	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 は相対速度の方向です。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 (departing) ターゲットの視線速度 (遠ざかる速度)	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その速度で遠ざかりつつあり、負であればその速度で接近しつつあります。

Review Throughout ウィンドウ

Review Throughout ウィンドウは、実行済みのマヌーバの実行結果を 3D Orbit ウィンドウに表示させてレビューするウィンドウです。マヌーバを順次再現して表示させる操作はこの Review Throughout ウィンドウで行います。また FLYTO マヌーバについては飛行の経過を積分ステップ(注)ごとに確認することもできます。

(注) 積分ステップとは、レビュー中の FLYTO マヌーバのパラメータ inter (days)で指定した値です。FLYTO マヌーバを実行すると、この値の間隔で探査機の位置と速度が計算され、記録されます。

Review Throughout ウィンドウは SSVG ウィンドウで「REVIEW Through」ボタンをクリックすると表示されます。このボタンがクリックできるのは、一つ以上のマヌーバが実行済みである場合です。

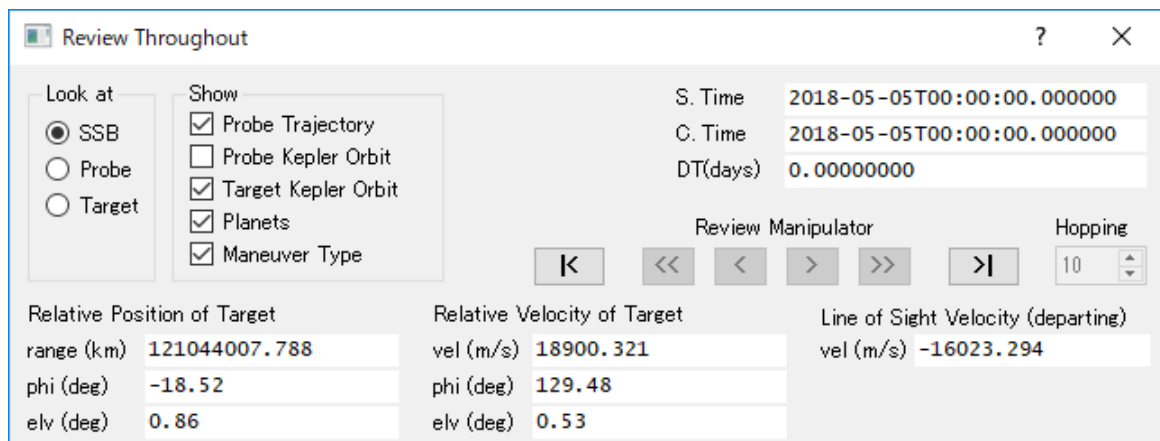


Figure 28 Review Throughout ウィンドウ

Review Throughout ウィンドウで行うことのできる操作は次の表のとおりです。

Table 15 Review Throughout ウィンドウの操作

グループ	項目	説明
Look at	SSB	選択すると 3D Orbit ウィ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 ウィ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 ウィンドウの描画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が表示されます。
	Probe Kepler Orbit	チェックすると 3D Orbit ウィンドウにその時刻における探査機の軌道が赤線が表示されます。
	Target Kepler Orbit	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに各々の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が表示されます。
	Planets	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに太陽や惑星の位置と名前が表示されます。
	Maneuver Type	チェックすると 3D Orbit ウィンドウの探査機 (赤の×) の傍にレビュー中のマヌーバのタイプが表示されます。(注)
Review Manipulator レビューの 操作	< ボタン	1 つ前のマヌーバに移ります。(FLYTO マヌーバの飛行の途中に限り、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 で指定した積分ステップ数だけ時刻が戻ります。FLYTO マヌーバのレビュー中に限り操作できます。
	< ボタン	逆行。クリックすると 1 積分ステップだけ時刻が戻ります。FLYTO マヌーバのレビュー中に限り操作できます。
	> ボタン	順行。クリックすると 1 積分ステップだけ時刻が進みます。FLYTO マヌーバのレビュー中に限り操作できます。
	>> 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時刻が進みます。FLYTO マヌーバのレビュー中に限り操作できます。
	> ボタン	1 つ後ろのマヌーバに移ります。(FLYTO マヌーバの飛行の途中に限り、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時刻を変化させるステップ数を指定します。スピンボックスですが、値を入力することもできます。

(注) 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 (tvmode) の値で、L または E です。推力方向モードについては[電気推進エンジンのモデル化](#)を参照してください。

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 (tvmode) の値で、L または E です。推力方向モードについては[ソーラーセイルのモデル化](#)を参照してください。n.nnn はソーラーセイルによる加速度の大きさと、値は 1 日当たりの速度変化量 (メートル/秒) です。

Review Throughout ウィンドウには、次の表に示す補助的な情報も表示されます。

Table 16 Review Throughout ウィ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 (ウィンドウの右上 3 行)	S. Time (Start Time : 開始時刻)、C. Time (Current Time : 現在時刻)、DT (経過時間) が表示されます。S. Time (開始時刻) は出発時刻 (START マヌーバの時刻) で、C. Time (現在時刻) は表示中の探査機やターゲット天体の位置に結びついた時刻です。DT (経過時間) は探査機の出発からの経過時間です。
Relative Position of Target ターゲットの相対位置	探査機から見たターゲット天体の中心の距離と方向です。range は距離で、phi と elv は方向です。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 ターゲットの相対速度	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 は相対速度の方向です。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 (departing) ターゲットの視線速度 (遠ざかる速度)	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その速度で遠ざかりつつあり、負であればその速度で接近しつつあります。

Maneuver Editor ウィンドウ

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

【重要】 Maneuver Editor ウィンドウは、Next 行 (SSVG ウィ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 ウィンドウが表示され、3D Orbit ウィンドウで 2 体問題の解としての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 行の編集集中であることを前提にしています。

Maneuver Editor ウィンドウは SSVG ウィンドウでマヌーバの編集を開始すると表示されます。「EDIT Next」ボタンまたは「EDIT *」ボタンがクリックされるか、マヌーバ表で行がダブルクリックされた場合です。

Maneuver Editor

Maneuver Type CP CP Apply

ISOT : yyyy-mm-ddThh:mm:ss.ssssss JD Flight Duration (days) Apply

Parameters

dv : Delta-V absolute value (m/s)	324.139
dvpd : Delta-V per day for EP (m/s/day)	
phi : Angle (deg) for START, CP and EP	-84.61
elv : Angle (deg) for all prop.	-0.79
aria : Aria of Solar Sail (m**2)	
theta : Angle (deg) for SS	
tvmode: Thrust Vector Mode (L/E)	
inter : Integration Interval (days)	

SHOW Orbit FTA OPTIMIZE

Finish and Exec Finish Cancel

Figure 29 Maneuver Editor ウィンドウ

Maneuver Editor ウィンドウで行うことのできる操作は次の表のとおりです。SSVG ウィンドウのマヌーバ表で空白の行を編集するときは、最初にマヌーバタイプを設定してください。

Table 17 Maneuver Editor ウィンドウの操作

項目	対応マヌーバタイプ	操作
Maneuver Type マヌーバタイプ	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 ボタンをクリックします。
ISOT	START	出発時刻 (Start Time) を ISO 形式で指定します。
	FLYTO	飛行終了時刻 (End Time) を ISO 形式で指定します。(注)
JD	START	出発時刻 (Start Time) をユリウス日で指定します。
	FLYTO	飛行終了時刻 (End Time) をユリウス日で指定します。(注)
Flight Duration 飛行時間	FLYTO	飛行時間を日数 (小数も可) で指定します。値を入力して右の Apply をクリックすると End Time に反映されます。(注)
SHOW Orbit ボタン	すべて	クリックすると指定した時刻やパラメータが Show Orbit ウィンドウに設定され、それを反映した探査機の予測位置や軌道が 3D Orbit ウィンドウに表示されます。 3D Orbit ウィンドウが閉じられている場合は再表示します。 表示される探査機の予測位置や軌道は 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ならびに惑星の引力は反映されません。
FTA ボタン	START CP	クリックすると FTA Setting ウィンドウが開きます。FTA の使い方は FTA Setting ウィンドウ を参照してください。
OPTIMIZE ボタン	START CP	クリックすると Optimize Assistant を実行します。 Optimize Assistant の使い方は Start Optimize Assistant ウィンドウ または CP Optimize Assistant ウィンドウ を参照してください。
Parameters パラメータ	START CP EP_ON SS_ON FLYTO	マヌーバのパラメータを設定する表です。 左の列はパラメータ名とその説明で、右の列は入力欄です。入力欄をダブルクリックして値を修正します。 設定可能なパラメータはマヌーバタイプごとに異なります。設定可能なパラメータの名前と説明は黒で表示され、それ以外のパラメータは灰色で表示されます。
Finish and Exec ボタン	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 ボタン	すべて	マヌーバの編集を完了します。
Cancel ボタン	すべて	マヌーバの編集をキャンセルします。

(注) FLYTO マヌーバの編集において **Show Orbit** ウィンドウが表示されている場合、**Show Orbit** ウィンドウで **Prediction Time Manipulator** の操作や DT の設定を行うと、設定された予測時刻が FLYTO マヌーバの飛行終了時刻 (End Time) や飛行時間 (Flight Duration) に自動的に反映されます。逆に **Maneuver Editor** 上で出発時刻や飛行終了時刻、飛行時間を変更した場合、**SHOW Orbit** ボタンをクリックすると設定値が **Show Orbit** ウィンドウの予測時刻や **3D Orbit** ウィンドウの探査機の位置等に反映されます。

Parameters の表に設定する内容は次の表のとおりです。

Table 18 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。START マヌーバの場合宇宙基地に対する相対速度の絶対値です。CP マヌーバの場合直前の探査機の数値積分の速度に対する変化（速度の差分）の絶対値です。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の絶対値（大きさ）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。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。ソーラーセイルをオンにしたときの加速度は、ここで指定した面積とソーラーセイルの方向、太陽までの距離、そして探査機の質量から計算されます。
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（推力が働く方向の決め方）を指定します。指定は英文字の「L」または「E」です。 L：推力方向はローカル座標系に対して固定されます。黄道座標系での推力方向は探査機の飛行中に変化します。（注 1） E：推力方向は黄道座標系に対して固定されます。（注 2）
inter	FLYTO	探査機の位置・速度の数値積分を行う 1 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記録され、飛行結果のレビューでもこのステップごとに探査機の位置や軌道を確認することができます。

（注 1）ローカル座標系とは、電気推進の場合は「軌道ローカル座標系」であり、ソーラーセイルの場合は「ソーラーセイル座標系」です。L モードでは、推力方向はローカル座標系に固定されます。しかしローカル座標系自体が探査機の飛行に伴って黄道座標系に対して回転するため、飛行に伴って黄道座標系で見た推力の方向が変化します。

（注 2）E モードでは、EP_ON マヌーバまたは SS_ON マヌーバの実行時点で電気推進の推力方向またはソーラーセイルの向き（黄道座標系での方向）が決定され、その方向は次の EP_ON または EP_OFF（ソーラーセイルの場合次の SS_ON または SS_OFF）の実行まで保持されます。なおソーラーセイルの場合、このモードでは探査機の飛行に伴って太陽光線が照らすセイルの面が裏側になることがあり、その場合は推力の方向が逆転します（ソーラーセイルの推力は常に太陽から遠ざかる方向に働くためです）。

New Flight Plan ウィンドウ

New Flight Plan ウィンドウは、新しい飛行計画の特性を設定するウィンドウです。

このウィンドウは、SSVG ウィンドウのメニューから **File** → **New** を実行すると表示されます。

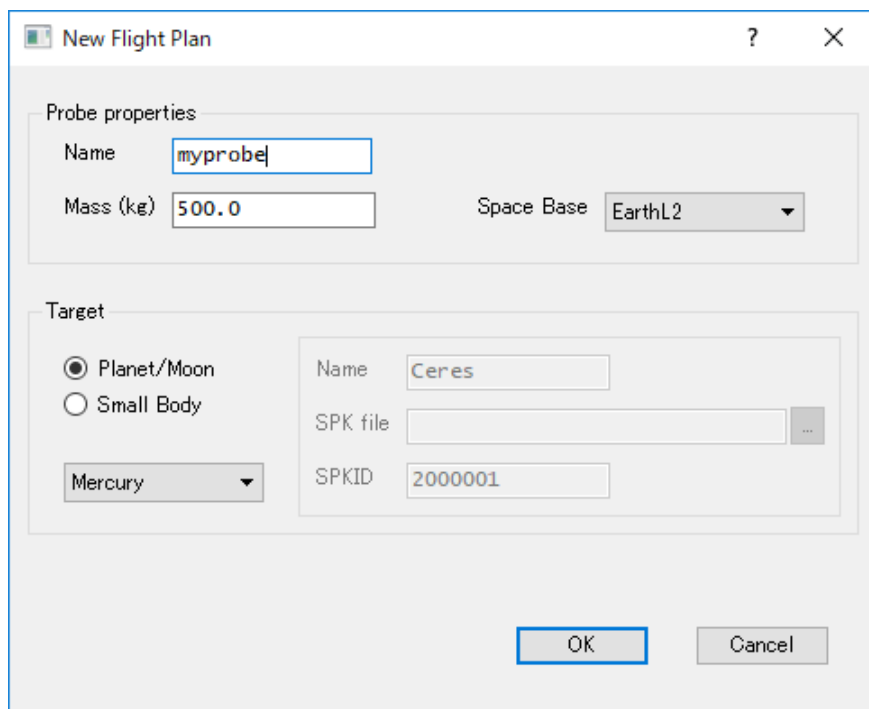


Figure 30 New Flight Plan ウィンドウ

New Flight Plan ウィンドウには 2 つの設定項目のグループがあります。

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 (**Space Base**) を選択します。宇宙基地については基本用語の[宇宙基地](#)を参照してください。探査機の名称は SSVG ウィンドウに表示されます。探査機の質量はソーラーセイルの加速度の計算に使用されますが、それ以外の推進装置や、推進装置を使用しない慣性飛行には影響を与えません。

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 (注)、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します。小天体をターゲット天体にするためには、その小天体の軌道を計算するためのファイル (**SPK ファイル**) をあらかじめ入手し、**SPKID** を調べておく必要があります。**SPK ファイル**の入手方法と **SPKID** については [SPK ファイルを入手する](#)に説明があります。

SPK file の欄に **SPK ファイル**を指定するには、その右にある「...」ボタンをクリックしてファイ

ルを選択します。SPK ファイルを SSVG の data フォルダに保存してある場合は SPK file の欄に直接ファイル名を記述することもできます。

(注) 地球の月をターゲット天体として選択することはできますが、SSVG は太陽の周囲を公転する天体を目指す旅を設計することを目指して作成されています。したがって、地球の月に向かう飛行計画の作成は大変難しいものになります。

FTA Setting ウィンドウ

FTA Setting ウィンドウは、FTA のパラメータを設定するウィンドウです。

このウィンドウは Maneuver Editor ウィンドウで START マヌーバまたは CP マヌーバの編集集中に、FTA ボタンをクリックすると表示されます。

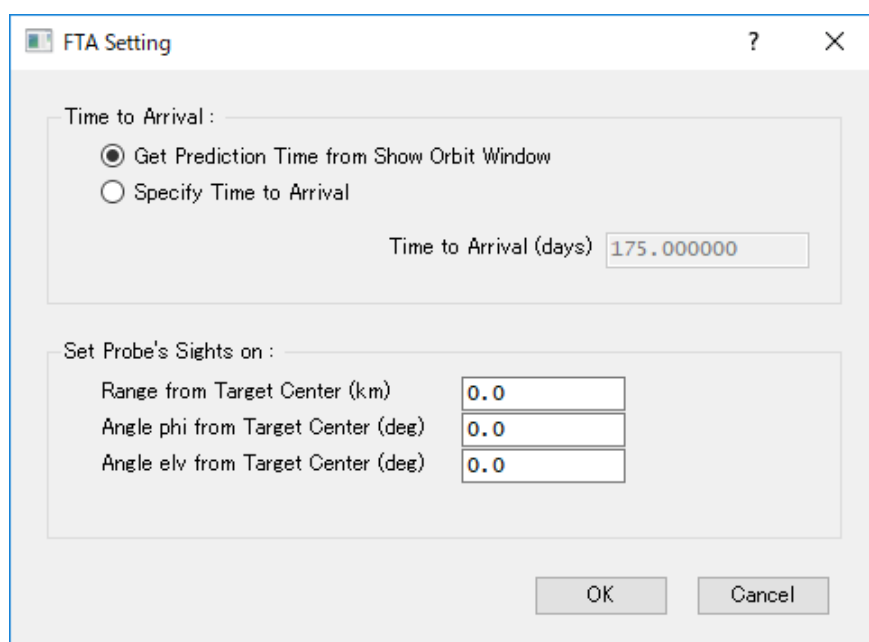


Figure 31 FTA Setting ウィンドウ

FTA とは 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（または宇宙基地からの出発）を行うためのパラメータを計算します。SSVG の FTA 機能では次の条件の下で 2 体問題を解いて探査機の軌道を求め、必要な速度変化を与えるパラメータを計算します。

- 探査機は太陽系の黄道面の北から見て反時計回りに飛行する（順行する）
- 探査機は太陽の周りを 1 公転する前にターゲット天体に到着する

SSVG の FTA 機能が想定している使い方は次のとおりです。

- Next 行を編集集中の Maneuver Editor ウィンドウで、
- マヌーバのタイプが START または CP の場合に、
- Show Orbit ウィンドウで予測時刻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。

この使い方であれば、Time to Arrival (到着までの時間) の設定は **Get Prediction Time from Show Orbit Window** (Show Orbit ウィンドウの予測時刻を取得する) にします。Specify Time to Arrival (到着までの時間を指定する) を選択して、到着までの飛行時間 (日) を指定することもできます。なお、指定する方法にかかわらず Time to Arrival (到着までの時間) は 1.0 日以上であることが必要です。

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** (探査機を目指す場所) グループのパラメータで目指す場所を指定します。ターゲット天体を基準にして、その中心からの距離と 2 つの角度 (ϕ と elv) です。 ϕ と elv については[軌道ローカル座標系](#)を参照してください。

FTA のパラメータを設定して OK ボタンをクリックすると、FTA Results ダイアログが表示され、軌道修正のパラメータが表示されます。ここで OK をクリックすると計算されたパラメータが Maneuver Editor の Parameters に反映されます。(注)

(注) 軌道修正のパラメータの計算は 2 体問題で行っていますので誤差があります。また計算結果は表示のとおり (小数点以下が 3 桁または 2 桁になるよう) 丸められています。したがって、このパラメータをそのまま適用しても探査機の経路は FTA で指定したとおりにはならず誤差が残ります。

Start Optimize Assistant ウィンドウ

Start Optimize Assistant ウィンドウは、指定された出発日時と飛行時間を用いて宇宙基地からターゲット天体まで飛行する探査機の軌道を計算し、それを 3D Orbit ウィンドウに示すとともに、出発時の速度 (dv 、 ϕ 、 elv) と到着時のターゲット天体との相対速度絶対値を表示します。

Start Optimize Assistant ウィンドウは、START マヌーバの編集集中に Maneuver Editor ウィンドウで OPTIMIZE ボタンをクリックすると表示されます。

Start Optimize Assistant ウィンドウでは、宇宙基地から出発した探査機が直接ターゲット天体を目指すことを想定し、探査機の出発日時と飛行時間の決定を支援します。出発日時と飛行時間を自由に变化させ、軌道の形や出発速度、到着時の相対速度を確認できますから、目的にかなう出発日時や飛行時間を見つけることが容易になります。

飛行時間の代わりにターゲット天体への到着日時を使って最適値を探すこともできます。

なお、Start Optimize Assistant での軌道の計算は Show Orbit ウィンドウや FTA と同じく 2 体問題として処理を行いますので正確ではありません。START マヌーバの実行後に FLYTO マヌーバで探査機を飛行させると、探査機は計算ずみの軌道とは少し違う経路を通ります。

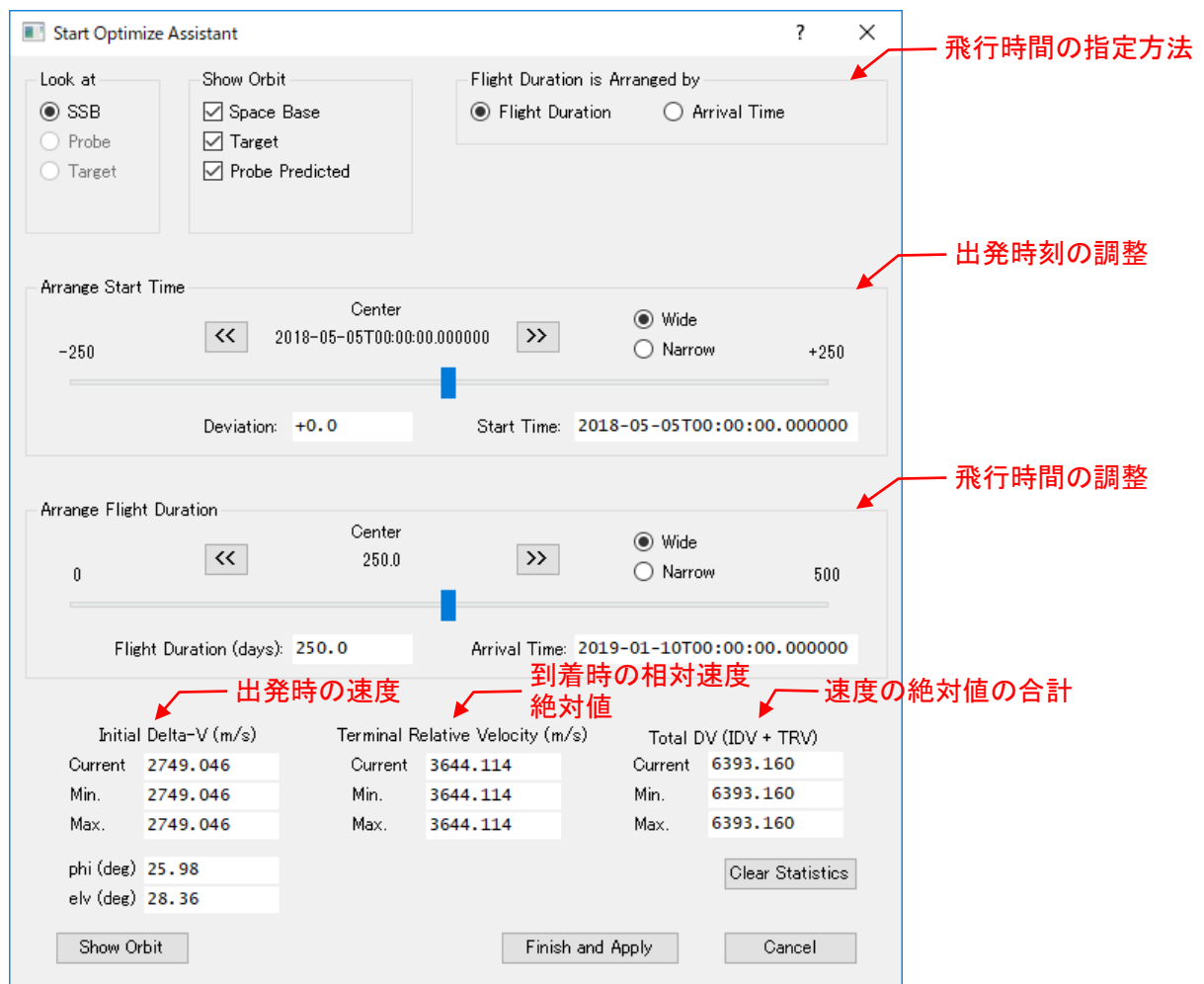


Figure 32 Start Optimize Assistant ウィンドウ

Start Optimize Assistant ウィンドウで行うことのできる操作は次の表のとおりです。

Table 19 Start Optimize Assistant ウィンドウの操作

グループ	項目	説明
Show Orbit	Space Base	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに探査機が出発する宇宙基地の経路が赤線が表示されます。
	Target	チェックすると 3D Orbit ウィンドウにターゲット天体の軌道が緑線が表示されます。
	Probe Predicted	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに探査機の軌道が水色線が表示されます。
Flight Duration is Arranged by 飛行時間の指定方法	Flight Duration	チェックすると飛行時間を直接指定できます。
	Arrival Time	チェックすると飛行時間の代わりにターゲット天体への到着日時を指定できるようになります。
Arrange Start Time 出発時刻の調整	<< ボタン	スライダーの中央の日時を過去に向けて 1 ステップ (注 1) 動かします。
	>> ボタン	スライダーの中央の日時を未来に向けて 1 ステップ (注 1) 動かします。
	Wide	スライダーによる日時の調節範囲を±250 日にします。
	Narrow	スライダーによる日時の調節範囲を±50 日にします。
	スライダー	左右に動かすと出発日時が変化します。マウスでスライダーをクリックして選択しておけば、キーボードの矢印キーやマウスのホイールでも操作できます。
	Deviation	スライダーの偏差が日を単位にして表示されます。
	Start Time	出発日時が表示されます。
Arrange Flight Duration 飛行時間の調整 (注 2)	<< ボタン	スライダーの中央の値を 1 ステップ (注 1) 小さくします。
	>> ボタン	スライダーの中央の値を 1 ステップ (注 1) 大きくします。
	Wide	スライダーによる飛行時間の調節範囲を±250 日にします。
	Narrow	スライダーによる飛行時間の調節範囲を±50 日にします。
	スライダー	左右に動かすと飛行時間が変化します。マウスでスライダーをクリックして選択しておけば、キーボードの矢印キーやマウスのホイールでも操作できます。
	Flight Duration	指定された飛行時間が日を単位にして表示されます。
	Arrival Time	探査機がターゲット天体に到着する日時が表示されます。
その他のボタン	Clear Statistics ボタン	表示されている最小値 (Min) と最大値 (Max) を消去します。
	Show Orbit ボタン	3D Orbit ウィンドウが閉じられている場合、再表示します。
	Finish and Apply ボタン	現在指定されている出発日時と出発時の速度 (dv、phi、elv) を Maneuver Editor に反映し、ウィンドウを閉じます。
	Cancel ボタン	結果を破棄してウィンドウを閉じます。

(注 1) 1 ステップの日数は 250 日 (Wide 時) または 50 日 (Narrow 時) です。

(注 2) この表は「Flight Duration is Arranged by」で「Flight Duration」を選択した場合について記述していません。「Arrival Time」を選択した場合は、Arrange Start Time の項と同じ指定方法になります。

Start Optimize Assistant ウィンドウには次の表に示す補助的な情報も表示されます。

Table 20 Start Optimize Assistant ウィンドウに表示される補助的な情報

グループ名	説明
Initial Delta-V (m/s) 出発時の速度	現在の出発時刻と飛行時間を採用した場合の、出発速度の絶対値 (Current) と、これまでの最小値 (Min)、最大値 (Max) が表示されます。(注) また Current の値については方向を示すパラメータ (phi と elv) も表示されます。定義は 軌道ローカル座標系 を参照してください。
Terminal Relative Velocity (m/s) 到着時の相対速度絶対値	現在の出発時刻と飛行時間を採用した場合の、ターゲット天体到着時の相対速度絶対値 (Current) と、これまでの最小値 (Min)、最大値 (Max) が表示されます。(注)
Total DV (IDV + TRV) 速度の絶対値の合計	出発時の速度の絶対値とターゲット天体到着時の相対速度絶対値の和が表示されます。現在の出発時刻と飛行時間を採用した場合の値と、これまでの最小値 (Min)、最大値 (Max) が表示されます。(注)

(注) 最小値と最大値は Clear Statistics ボタンをクリックすることにより消去されます。

CP Optimize Assistant ウィンドウ

CP Optimize Assistant ウィンドウは、指定された軌道変更日時とその後の飛行時間を用いてターゲット天体に到達する探査機の軌道を計算し、それを 3D Orbit ウィンドウに示すとともに、軌道変更時の速度変化 (dv、phi、elv) と到着時のターゲット天体との相対速度絶対値を表示します。

CP Optimize Assistant ウィンドウは、CP マヌーバの編集集中に Maneuver Editor ウィンドウで OPTIMIZE ボタンをクリックすると表示されます。

CP Optimize Assistant ウィンドウでは、探査機がターゲット天体を目指すように軌道を変更する CP マヌーバを想定し、探査機の軌道変更日時と軌道変更後の飛行時間の決定を支援します。軌道変更日時と飛行時間を自由に変化させ、軌道の形や軌道変更の速度変化、到着時の相対速度を確認できますから、目的にかなう軌道変更日時や飛行時間を見つけることが容易になります。

軌道変更後の飛行時間の代わりにターゲット天体への到着日時を使って最適値を探すこともできます。

なお、CP Optimize Assistant の軌道の計算は Show Orbit や FTA と同じく 2 体問題として処理を行いますので正確ではありません。軌道変更後に FLYTO で探査機を飛行させると、探査機は計算ずみの軌道とは少し違う経路を通ります。

【重要】 CP Optimize Assistant を用いて軌道変更時刻を変化させた場合、その時刻に CP マヌーバが実行されるよう直前までのマヌーバを変更する必要があります。また軌道変更の前後で電気推進エンジンやソーラーセイルを使用している場合、CP Optimize Assistant を用いて軌道変更時刻を変化させると期待した結果が得られない場合があります。

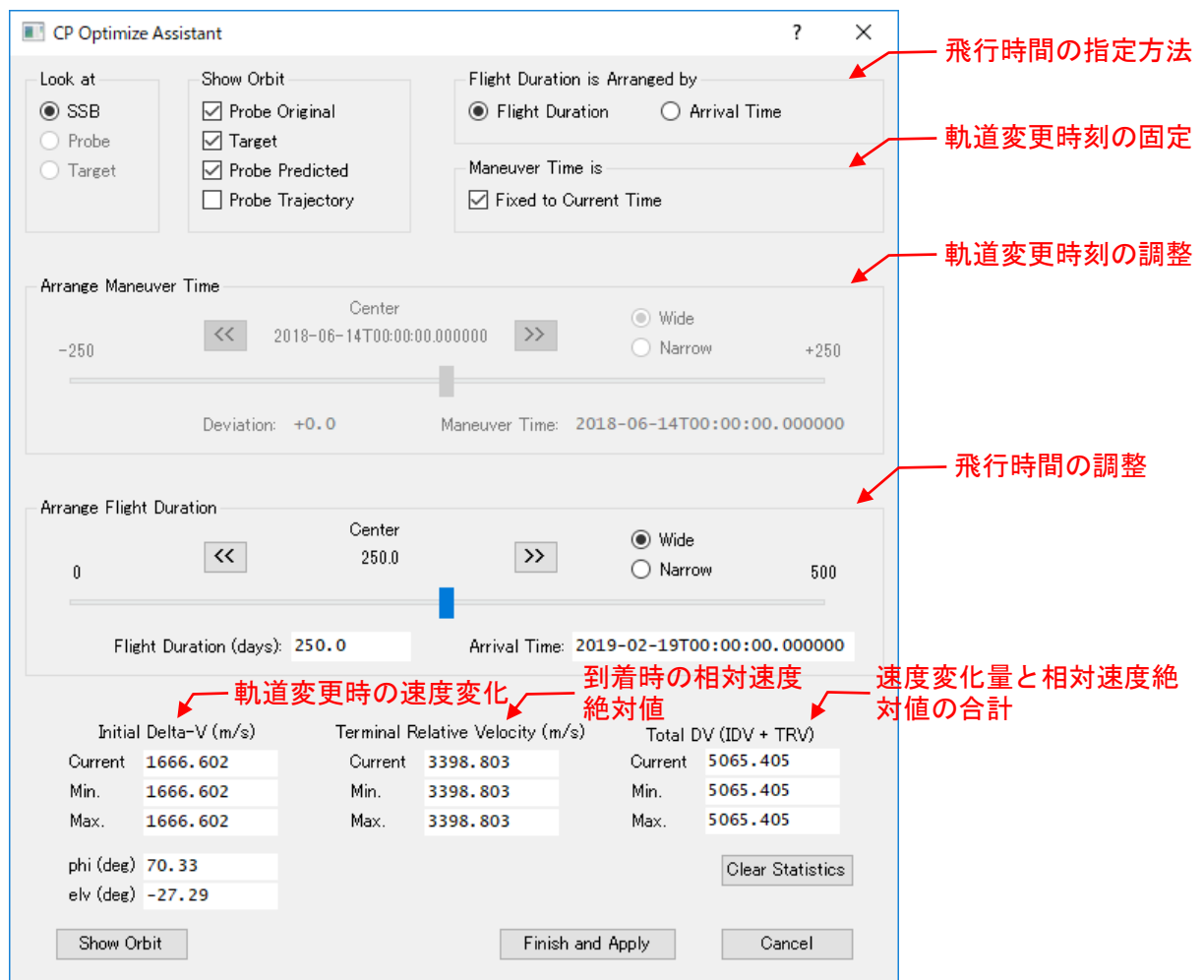


Figure 33 CP Optimize Assistant ウィンドウ

CP Optimize Assistant ウィンドウで行うことのできる操作は次の表のとおりです。

Table 21 CP Optimize Assistant ウィンドウの操作

グループ	項目	説明
Show Orbit	Probe Original	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに軌道変更前の探査機の軌道が赤線で表示されます。
	Target	チェックすると 3D Orbit ウィンドウにターゲット天体の軌道が緑線で表示されます。
	Probe Predicted	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに軌道変更後の探査機の軌道が水色線で表示されます。
	Probe Trajectory	チェックすると 3D Orbit ウィンドウに探査機のこれまでの飛行経路が青線で表示されます。
Flight Duration is Arranged by 飛行時間の指定方法	Flight Duration	チェックすると飛行時間を直接指定できます。
	Arrival Time	チェックすると飛行時間の代わりにターゲット天体への到着日時を指定できるようになります。
Maneuver Time is 軌道変更時刻の固定	Fixed to Current Time	チェックすると軌道変更時刻が現在時刻（直前のマヌーバの終了時刻）に固定され、変更できなくなります。
Arrange Maneuver Time 軌道変更時刻の調整	<< ボタン	スライダーの中央の日時を過去に向けて 1 ステップ（注 1）動かしします。
	>> ボタン	スライダーの中央の日時を未来に向けて 1 ステップ（注 1）動かしします。
	Wide	スライダーによる日時の調節範囲を±250 日にします。
	Narrow	スライダーによる日時の調節範囲を±50 日にします。
	スライダー	左右に動かすと軌道変更の日時が変化します。マウスでスライダーをクリックして選択しておけば、矢印キーやマウスのホイールでも操作できます。
	Deviation	スライダーの偏差が日を単位にして表示されます。
	Maneuver Time	軌道変更時刻が表示されます。
Arrange Flight Duration 飛行時間の調整 （注 2）	<< ボタン	スライダーの中央の値を 1 ステップ（注 1）小さくします。
	>> ボタン	スライダーの中央の値を 1 ステップ（注 1）大きくします。
	Wide	スライダーによる飛行時間の調節範囲を±250 日にします。
	Narrow	スライダーによる飛行時間の調節範囲を±50 日にします。
	スライダー	左右に動かすと飛行時間が変化します。マウスでスライダーをクリックして選択しておけば、矢印キーやマウスのホイールでも操作できます。
	Flight Duration	指定された飛行時間が日を単位にして表示されます。
	Arrival Time	探査機がターゲット天体に到着する日時が表示されます。
その他のボタン	Clear Statistics ボタン	表示されている最小値（Min）と最大値（Max）を消去します。
	Show Orbit ボタン	3D Orbit ウィンドウが閉じられている場合、再表示します。
	Finish and Apply ボタン	現在推定されている軌道変更の速度変化（dv、phi、elv）を Maneuver Editor に反映し、ウィンドウを閉じます。 （注 3：重要）
	Cancel ボタン	結果を破棄してウィンドウを閉じます。

（注 1）1 ステップの日数は 250 日（Wide 時）または 50 日（Narrow 時）です。

（注 2）この表は「Flight Duration is Arranged by」で「Flight Duration」を選択した場合について記述しています。

す。「Arrival Time」を選択した場合は、Arrange Maneuver Time の項と同じ指定方法になります。

(注 3 : 重要) 軌道変更時刻は Maneuver Editor 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。軌道変更時刻を変化させている場合、値を反映された CP マヌーバが正しくその時刻に実行されるよう、直前までのマヌーバを変更することが必要になります。軌道変更時刻 (ISO 形式) が PC のクリップボードに格納されていますので、利用してください。

CP Optimize Assistant ウィンドウには、次の表に示す補助的な情報が表示されます。

Table 22 CP Optimize Assistant ウィンドウに表示される補助的な情報

グループ名	説明
Initial Delta-V (m/s) 軌道変更時の速度変化	現在の設定値を採用した場合の速度変化量 (Current) と、これまでの最小値 (Min)、最大値 (Max) が表示されます。(注) また Current の値についてはその方向を示すパラメータ (phi と elv) も表示されます。定義は 軌道ローカル座標系 を参照してください。
Terminal Relative Velocity (m/s) 到着時の相対速度	現在の設定値を採用した場合の、ターゲット天体到着時の相対速度絶対値 (Current) と、これまでの最小値 (Min)、最大値 (Max) が表示されます。(注)
Total DV (IDV + TRV) 速度変化量と相対速度絶対値の合計	軌道変更時の速度変化量とターゲット天体到着時の相対速度絶対値の和が表示されます。現在の設定値を採用した場合の値と、これまでの最小値 (Min)、最大値 (Max) が表示されます。(注)

(注) 最小値と最大値は Clear Statistics ボタンをクリックすることにより消去されます。

ログファイル

SSVG の起動から終了までの間に行った飛行計画の作成と編集の内容が、SSVG の実行ごとにログファイル (テキスト文書) として記録されます。ログファイルの出力先は、SSVG をインストールしたフォルダの直下にある log フォルダです。ファイル名は SSVG の実行開始時の日付と時刻を用いた次のようなものになります。

SSVGLOG_[年月日]_[時分秒].log

ログファイルは SSVG を実行するたびに新しく作成されます。ログファイルは削除しても問題ありません。

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、XYZ の順に右手系を構成します。SSVG では西暦 2000.0 年 (J2000) の黄道面と赤道面に基づいた座標系を使用しています。

軌道ローカル座標系

SSVG で探査機から見た位置や速度を表すために使用する座標系です。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て決定されます。探査機以外に、ターゲット天体や宇宙基地から見た位置や速度を表すために使用することもあります。

X 軸：探査機などの速度ベクトルと同じ向きです。

Z 軸：探査機などの軌道面 (注) に垂直で、軌道の公転方向が地球と同じ (順行) であれば Z 軸は黄道面の北側を向きます。

Y 軸：X 軸と Z 軸の両方に直交し、XYZ の順に右手系を構成します。

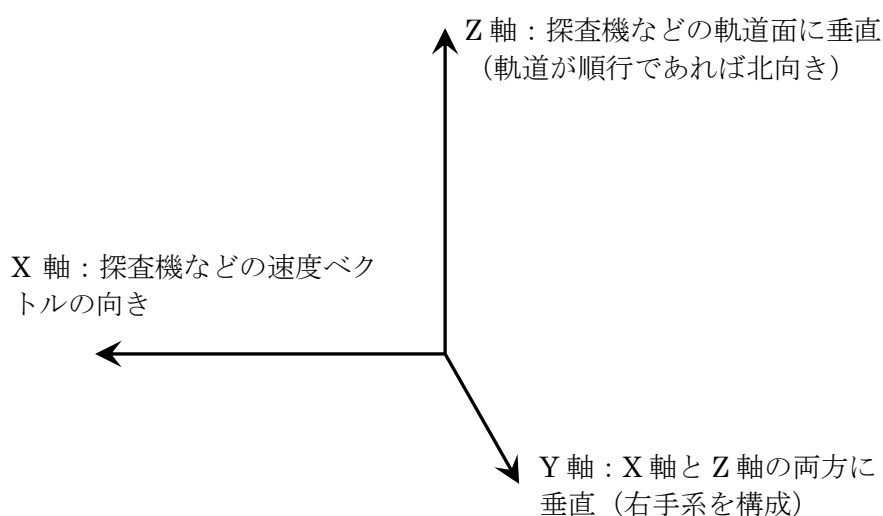


Figure 34 軌道ローカル座標系の定義

(注) 探査機の運動を太陽との 2 体問題と考えたとき、探査機は太陽を含む平面の上を運動します。この面を「軌道面」と呼びます。探査機以外の天体や宇宙基地でも同様です。

【軌道ローカル座標系の極座標表現】

SSVG では探査機のマヌーバにおける速度変化や、探査機から見たターゲット天体の位置や速度を表す場合などに、軌道ローカル座標系での極座標を使用します。例えば次の図のように探査機から見たターゲット天体の位置を赤矢印とすると、SSVG ではその位置を距離 (r) と 2 つの角 (ϕ と ψ) で表します。

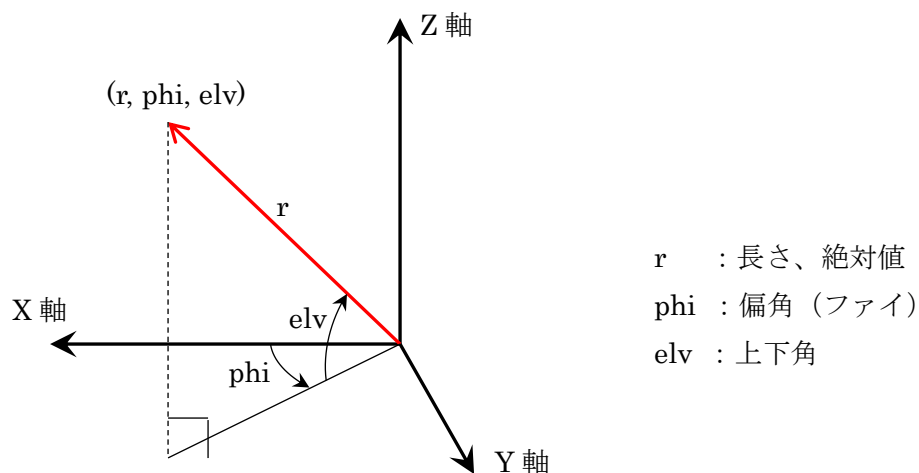


Figure 35 軌道ローカル座標系の極座標表現

ソーラーセイル座標系

探査機のソーラーセイルの向きに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を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同じです（つまり探査機から見ると太陽は **X 軸**の負の方向にあります）。**Z 軸**は軌道ローカル座標系と同じで、探査機の軌道面に垂直です。**Y 軸**は軌道ローカル座標系と同じ決め方で、**X 軸**と **Z 軸**の両方に垂直にします。

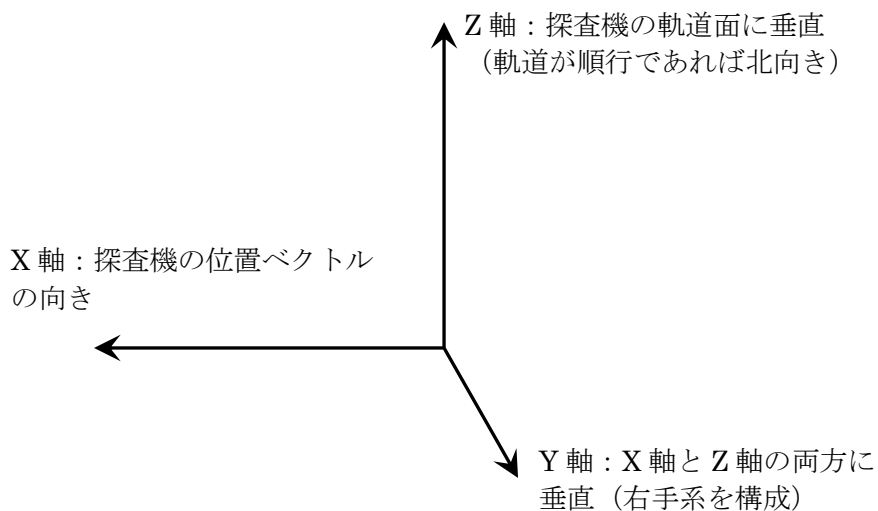


Figure 36 ソーラーセイル座標系の定義

【ソーラーセイル座標系の極座標表現】

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（面に垂直な長さ 1 のベクトル）に

よって、ソーラーセイル座標系での極座標で表現します。次の図のようにセイル面の法線ベクトルを赤矢印で表すと、ソーラーセイルの向きは 2 つの角 (**theta** と **elv**) で表されます。座標軸の向きが異なることによる混乱を避けるため軌道ローカル座標系の極座標表現とは角度の呼び名の一部を変えています。

なお、セイル面の法線ベクトルには 2 つの方向がありますが、SSVG のソーラーセイルは両面が鏡として働くと想定されていますので、どちらを選んでも同じです。

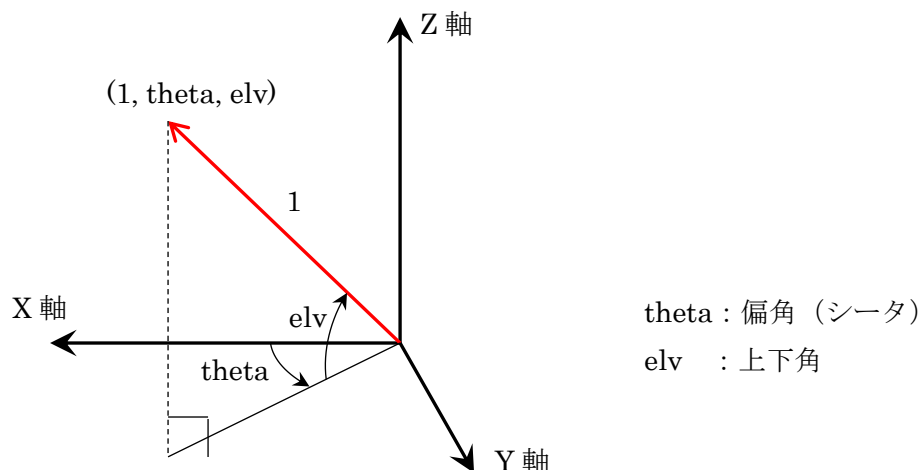


Figure 37 ソーラーセイル座標系の極座標表現

時刻について

SSVG の時刻はすべて TDB (太陽系力学時) です。この時刻系は TAI (国際原子時) に対して約 32 秒進んでいます。一方で生活時刻の基準になっている UTC (協定世界時) は TAI に対して 37 秒遅れています (2018 年 1 月現在。うるう秒の挿入により変化します)。その結果、TDB での時刻は UTC に対して約 69 秒進んでいることになります (2018 年 1 月現在)。

日付と時刻は内部処理ではユリウス日で表現していますが、ISO 8601 の拡張形式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)。この形式での表示の例は次のとおりです。

2019-12-30T13:24:45.500000

(2019 年 12 月 30 日 13 時 24 分 45.5 秒の場合。途中の文字 T は日付と時刻の間の区切り)

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：1900 年 1 月 1 日以降
- 作成終了：2101 年 1 月 1 日以前

化学推進エンジンのモデル化

SSVG の探査機の化学推進エンジンは、瞬時に探査機の変速させることができる、というモデル化を行っています。また燃料の消費は考慮していません。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）は考慮していません。

電気推進エンジンのモデル化

SSVG の探査機の電気推進エンジンは、オンになっている限り探査機を連続的に加速します。加速に伴う推進剤の消費は考慮していません。また電源の制約等に伴う加速度の限界についても考慮していません。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）は考慮していません。電気推進エンジンは瞬時にオンにすることができますし、瞬時にオフにすることができます。またオンになっている状態で、瞬時に加速のパラメータを変化させることができます。

電気推進エンジンの推力方向は軌道ローカル座標系の ϕ と ψ で指定しますが、実際に探査機が加速される方向は推力方向モード (tvmode) の値により違ってきます。

tvmode = L : 飛行途中の各時点で ϕ と ψ を用いて推力方向（黄道座標系での方向）を再計算します。探査機が飛行すると探査機の位置や速度が変化しますから、推力方向も変化します。

tvmode = E : EP_ON マヌーバの実行時に ϕ と ψ を用いて推力方向（黄道座標系での方向）を計算し、次の EP_OFF マヌーバまたは EP_ON マヌーバの実行までこの推力方向を維持します。探査機が飛行しても黄道座標系で見た推力方向は変化しません。

ソーラーセイルのモデル化

SSVG のソーラーセイルは、表裏とも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。またソーラーセイルはマヌーバにより瞬時に開く（オンにする）ことができ、瞬時に閉じる（オフにする）ことができます。また開いている状態で、瞬時にパラメータを変化させることができます。ソーラーセイルの面積の誤差や向きの誤差は考慮していません。ソーラーセイルによる加速度を計算するために、探査機の質量を用います。

ソーラーセイルの向きは法線ベクトル（ソーラーセイルに垂直な単位ベクトル）の向きで指定します。ソーラーセイルの推力方向はこの法線ベクトルに平行ですが、必ず太陽から遠ざかる方向に働きます。

法線ベクトルの向きはソーラーセイル座標系の `theta` と `elv` で指定しますが、実際に探査機が加速される方向は推力方向モード（`tvmode`）の値により違ってきます。

tvmode = L : 飛行途中の各時点で `theta` と `elv` を用いて法線ベクトルの向き（黄道座標系での方向）を再計算します。探査機が飛行すると探査機の位置や速度が変化しますから、推力方向も変化します。

tvmode = E : `SS_ON` マヌーバの実行時に `theta` と `elv` を用いて法線ベクトルの向き（黄道座標系での方向）を計算し、次の `SS_OFF` マヌーバまたは `SS_ON` マヌーバの実行までこの方向を維持します。探査機が飛行しても黄道座標系で見た法線ベクトルの向きは変化しません。ただし、飛行により太陽の照らす面が逆側になった場合は推力方向も逆向きになります（ソーラーセイルは両面が鏡面になっている想定です）。

なお、ソーラーセイルの推力の大きさは `tvmode` の値に関わらず飛行途中の各時点で太陽の距離と方向を用いて再計算します。したがって探査機が飛行するとソーラーセイルの推力の大きさは変化します。

探査機の飛行経路の数値積分

探査機の飛行経路（`FLYTO` マヌーバを実行した結果の経路）は、探査機に働く力を以下のとおりと仮定して数値積分を行っています。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（注）

8 惑星と月（地球の月）の引力（注）

電気推進エンジンおよびソーラーセイルの推力

(注) 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 体問題による軌道

SSVG では、推進装置を使用しない場合であっても、探査機の飛行経路は太陽と惑星 (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 体問題と考えることがあります。2 体問題とは、宇宙に 2 つの天体だけ (ここでは太陽と探査機だけ) が存在すると考えて天体の運動を計算することを指します。2 体問題と考えると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 体問題と考えると軌道を計算しているのは次の場合です。

- 3D Orbit ウィ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 ウィ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 体問題で計算した軌道のことを 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 で飛行計画を作り上げたとなると、その宇宙航行が実際の探査機で可能かどうか、言い換えるとそのような宇宙航行を行う宇宙機が設計できるかどうかは大いに気になるところでしょう。SSVG では敢えて無視した燃料や推進剤の消費が、実際の宇宙機では大問題になります。この項では、燃料や推進剤の消費がどれくらい問題になりそうなのか、数値を挙げて説明します。

宇宙機が推進装置を働かせて速度を変化させるとき、どれくらいの質量の燃料や推進剤を消費するかは、ロケットエンジンという推進装置で宇宙を航行することを最初に考えた人 (ロシアのツィ

オルコフスキー) がすでに方程式を示しています。この方程式は「ロケット方程式」または、その人にちなんで「ツィオルコフスキーの公式」と呼ばれます。

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。

$$\frac{m_0}{m_T} = \exp\left(\frac{\Delta V}{I_{sp} \cdot g}\right)$$

ここで m_0 は速度変化前の宇宙機の質量で、 m_T は速度変化後の宇宙機の質量です。 ΔV は速度変化量（速度変化の絶対値）で、 I_{sp} は比推力、 g は地表での重力加速度です。 $\exp()$ は指数関数です。

I_{sp} （比推力）はロケットエンジンの性能（燃費のようなもの）を表す数値で、化学推進エンジンでしたら 200 秒～450 秒というような値になります。

式の左辺の $\frac{m_0}{m_T}$ は「質量比」で、1 より大きな値になります。速度変化後の探査機の質量を 1 とすると、速度変化前の質量（燃料や推進剤の質量を加えた値）はこの質量比の値でなければならない、ということになります。

化学推進エンジンと電気推進エンジンについて、速度変化後の質量を 1.0 とした場合のロケット方程式の計算結果を以下の表に示します。化学推進エンジンは比推力を 300 秒としました。電気推進エンジンの比推力は「はやぶさ」のイオンエンジンの実績を参考に 3000 秒としました。

Table 23 ロケット方程式の計算結果（化学推進エンジン）

速度変化量 (メートル/秒)	速度変化前の質量	消費する燃料／ 推進剤の質量	速度変化後の質量
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 24 ロケット方程式の計算結果（電気推進エンジン）

速度変化量 (メートル／秒)	速度変化前の質量	消費する燃料／ 推進剤の質量	速度変化後の質量
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

いかがでしょうか。実際の宇宙航行の難しさを感じ取ることができたでしょうか。

ここで忘れてはいけないのが SSVG のもう一つの推進装置「ソーラーセイル」です。巨大なセイルを広げ、操ることができれば、燃料や推進剤を消費せずに探査機を加速することができます。将来の惑星間航行の鍵はこのソーラーセイルにあるのかもしれません。

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。

地球近傍の宇宙基地 **EarthL2** を速度ゼロで出発し、推進装置としてソーラーセイルだけを用いて火星近傍に到着する飛行計画です。火星到着までの飛行時間は **7** 年半ほど（**2730.5** 日）です。火星

近傍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。

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。

以上