

SSVG 宇宙探査の旅

ユーザーズガイド

SSVG (Solar System Voyager) User's Guide

植月修志 (Shushi Uetsuki/whiskie14142)

2018/12/4

Rev. 1.2.0

SSVG Version 1.2 対応

目次

SSVG とは.....	1
バージョン 1.2 の新機能	1
SSVG でできること	2
この文書の開き方	4
ソフトウェアのライセンス	4
この文書のライセンス.....	5
作者へのご連絡方法	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 スクリプトのインストール／アンインストール	7
SSVG の起動	8
Windows 実行形式プログラムの場合.....	8
Python スクリプトの場合	8
飛行計画を実行する	9
飛行計画を開く	9
マヌーバを実行する.....	10
マヌーバを続けて実行する	12
飛行結果を確認する.....	12
新しい探査機を飛行させる	14
飛行計画の新規作成.....	14
探査機を出発させる.....	14
宇宙基地から離れる.....	16
探査機を増速させる.....	16
探査機を減速させる.....	18
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.....	20
金星に向かう飛行計画.....	24
飛行計画の新規作成.....	24
START マヌーバ.....	24
FLYTO マヌーバ（その 1）	26
CP マヌーバ.....	26
FLYTO マヌーバ（その 2）	27
FLYTO マヌーバ（その 3）	27
小天体を目指す.....	28
リファレンスマニュアル.....	29

基本用語.....	29
探査機 (Probe)	29
宇宙基地 (Space Base)	29
マヌーバ (Maneuver)	30
飛行計画 (Flight Plan)	31
ターゲット天体 (Target)	32
化学推進エンジン	32
電気推進エンジン	33
ソーラーセイル	33
経路 (Trajectory) と軌道 (Orbit)	34
ウインドウとその操作.....	35
SSVG ウインドウ	35
3D Orbit ウインドウ	38
Show Orbit ウインドウ	39
Flight Review ウインドウ	42
Review Throughout ウインドウ	43
Maneuver Editor ウインドウ	46
New Flight Plan ウインドウ	48
FTA Setting ウインドウ	49
Start Optimize Assistant ウインドウ	51
CP Optimize Assistant ウインドウ	54
座標系	58
黄道座標系	58
軌道ローカル座標系.....	58
ソーラーセイル座標系	59
B プレーン座標系	60
その他の情報	62
利用者が使えるフォルダ	62
時刻について.....	62
探査機の飛行経路の数値積分	63
2 体問題の使用.....	63
推進装置とロケット方程式.....	63
小天体の SPK ファイルを入手する	64
ログファイル.....	66
推力方向モード	67
飛行計画のサンプル.....	67
参考文献.....	69

SSVG とは

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

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

SSVG では、目的の天体に向かう宇宙飛行の詳細な内容を「飛行計画」として組み立てます。飛行計画の主役は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。

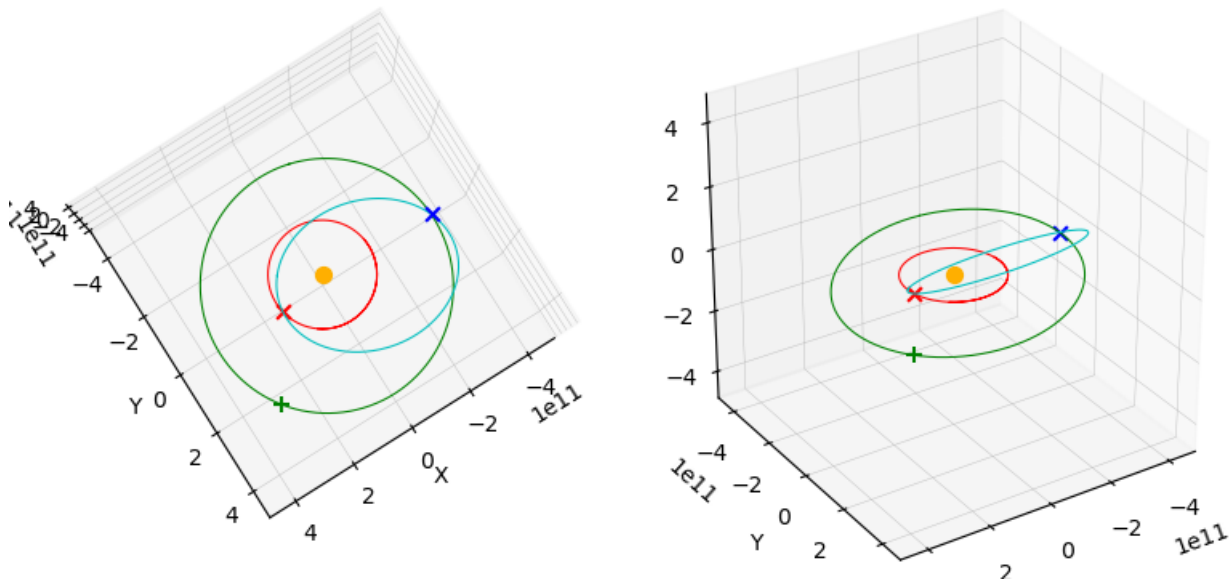


Figure 1 SSVG の表示例

バージョン 1.2 の新機能

タイプ 21 の SPK ファイルに対応しました

SSVG の旧バージョン（バージョン 1.1、2018 年 8 月リリース）では、小惑星など太陽系の小天体のための SPK ファイルとしては「タイプ 1」という形式のファイルだけを読むことができました。SSVG 1.2 では、これに加えて「タイプ 21」のファイルも読むことができるようになりました。小天体の SPK ファイルは NASA/JPL の HORIZONS システムが生成したものを使用するのですが、現時点（2018 年 11 月）ではこのタイプ 21 が標準の形式とされています。タイプ 21 に対応したことにより、SPK ファイルを入手するときに簡便なインタフェースが使えるようになりました。詳しくは[小天体の SPK ファイルを入手する](#)の項をご覧ください。

ユーザーインタフェースを改善しました

- 覚えにくい 7 桁の数字（SPKID）を入力する必要がなくなりました。太陽系の小天体用の SPK ファイルを開くと SSVG はその SPK ファイルに含まれている天体の SPKID の一覧を表示します。詳しくは[New Flight Plan ウィンドウ](#)の項をご覧ください。

- 3D Orbit ウィンドウのデザインを変更しました。使用しないツールバーの表示を消したこと、太陽のマークがオレンジの小円盤になったこと、ウィンドウの初期のサイズがやや小さくなったことなどです。
- 飛行計画ファイルの保存や読み込みが容易になりました。
- 利用者が入力した値のチェックがいっそう適切になりました。このことにより SSVG が意図に反して終了する可能性が小さくなりました。

開発環境を更新しました

SSVG の長期にわたるメンテナンスを可能にするため、SSVG の開発環境を更新しました。

SSVG でできること

SSVG を使うとどんなことができるでしょうか。以下はその例です。

探査機の軌道を変化させてみよう

探査機の宇宙航行について、こんな疑問を持ったことはありませんか？

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

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

自由に宇宙を飛び回ろう

太陽系を自由に飛び回って天体を目指したい、そんな夢はありませんか？

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

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

スイングバイを試そう

「スイングバイ」って面白そう、そう思いませんか？

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

木星は 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においてしばしば重要な役割を果たしてきました。

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

実際の探査機の飛行を再現しよう

実際の惑星探査機の飛行について、こんな疑問を感じたことはありませんか？

- 地球を離れていくとき、探査機はどれくらいの速度で飛行しているのだろう？
- 探査機が目的の天体に近づいたとき、天体との相対速度はどれくらい？

- この探査機はなぜこの日に出発したのだろうか？
- 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か？
- 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か？

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。

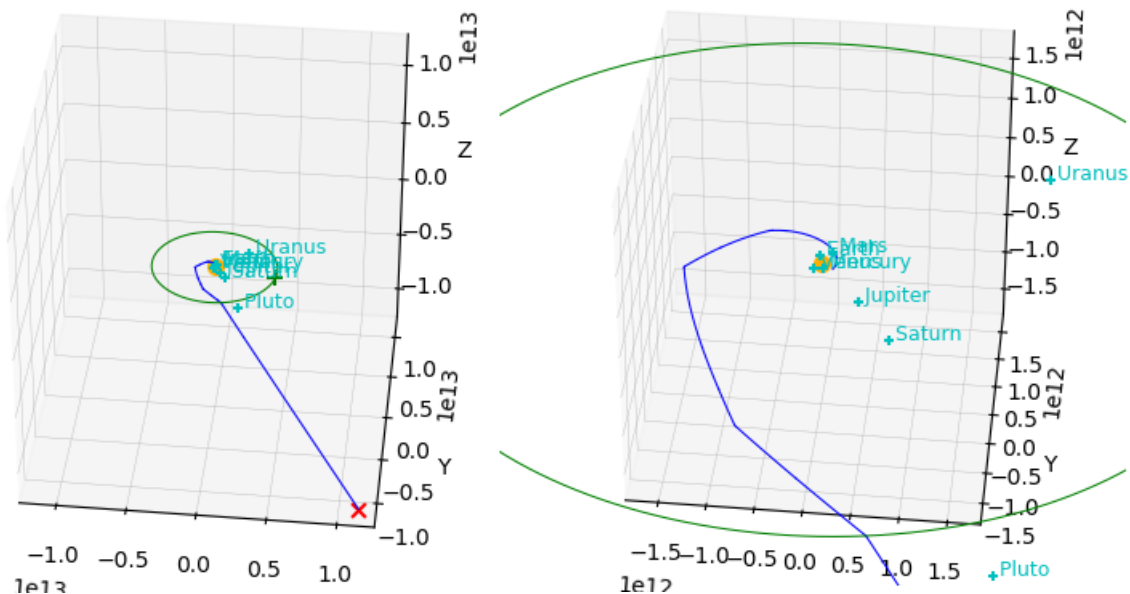


Figure 2 ボイジャー2 号の経路の再現

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「地球を出発する日付」と「飛行時間」（出発から到着までの日数）です。SSVG はそれらを決定するための使いやすく強力なツールを用意しています。

電気推進を使おう

イオンエンジンなどの電気推進エンジンを実際に使ってみたい、と思いませんか？

最近では、イオンエンジンのような電気推進エンジンが小惑星の探査やケレス（準惑星）の探査で重要な役割を担っています。通常のロケットエンジンと比較した場合、電気推進エンジンは推進

剤の使用効率の面で大きなメリットがあります。しかし推力が小さいというデメリットもあります。典型的な電気推進エンジンは探査機を非常にゆっくりとしか加速しません（24 時間連続して稼働させたとして、探査機に及ぼす速度変化は数メートル～数十メートル／秒に過ぎません）。推力がこのように小さいため、電気推進エンジンによる軌道変更には長い時間（例えば 100 日とか、それ以上）がかかることが多く、このような宇宙飛行の計画を作ることを難しくします。

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

ソーラーセイルを使おう

太陽の光を帆に受けて静かに宇宙を漂うソーラーセイルの旅、すてきですね？

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はありません。しかし太陽光の圧力は大変小さいものですから、役に立つほどの加速を得るためには大変大きくて（例えば 100 平方メートルとか、もっと大きくて）軽い鏡が必要です。現在の技術では、宇宙で巨大なソーラーセイルを開くことも、それを正しい方向に向けることも、そしてその状態を保持することも大変難しいとされています。

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

この文書の開き方

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

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

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

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

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

ソフトウェアのライセンス

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

作者はこのソフトウェアが有用であることを期待して配布しますが、ソフトウェア自体は全くの無保証です。詳細については GNU General Public License を参照してください。ライセンスの原本

はこちらにあります。<<http://www.gnu.org/licenses/>>

このソフトウェア (SSVG) のソースプログラムはこちらから入手できます。

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

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

Python : <https://www.python.org/>

Numpy : <http://www.numpy.org/>

Scipy : <http://scipy.org/>

matplotlib : <http://matplotlib.org/>

PyQt : <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>

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

julian : <https://github.com/dannyzed/julian/>

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

spktype01 : <https://github.com/whiskie14142/spktype01/>

spktype21 : <https://github.com/whiskie14142/spktype21/>

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

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、あらかじめご了承ください。

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

SSVG の使い方

インストール／アンインストール

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

Windows 実行形式プログラムのインストール／アンインストール

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、格納されている「SSVG_x_x_x」のフォルダ全体をハードディスクにコピーしてください。SSVG の配布アドレスには以下のものがあります。

SSVG ホームページ：<<http://whsk.sakura.ne.jp/ssvg/>>

Vector：<<https://www.vector.co.jp/soft/winnt/edu/se517704.html>>

Yahoo ボックス：<<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_x_x_x」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 1280×1024 以上の解像度のものを推奨します。

SSVG のインストールと実行はディスクドライブの容量を約 1GB 消費します。

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 をインストールしたフォルダの直下にある SSVG_data フォルダに格納してください。

<http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/de430.bsp>

ショートカットの作成

SSVG をインストールしたフォルダには SSVG の実行形式プログラムが含まれています。それは下に示すアイコンを持った「SSVG.exe」または「SSVG」という名前のファイルです。Windows のデスクトップにこのファイルのショートカットを作っておくことをお勧めします。



（SSVG の実行形式プログラムのアイコン）

旧バージョンからのアップグレードインストール

前述の手順に従うと SSVG は新しいフォルダにインストールされます。以下のファイルを新しいインストールフォルダにコピーしてください。

- 入手済みの SPK ファイルをすべて（de430.spk を含みます）：新しいインストールフォルダの中にある「SSVG_data」フォルダにコピーしてください。
- 旧バージョンで作成した飛行計画ファイル：新しいインストールフォルダの中にある「SSVG_plan」フォルダにコピーしてください。

新しいバージョンに満足できたなら、旧バージョンの SSVG はアンインストールしてかまいません。

Python スクリプトのインストール／アンインストール

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

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

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

動作環境等

Python 3.7

ディスプレイは 1280×1024 以上の解像度のものを推奨します。

利用パッケージとそのバージョン

Numpy 1.15.1

Scipy 1.1.0

matplotlib 2.2.3

pyqt 5.9.2

jplephem 2.8

julian 0.14

pytwobodyorbit 0.1.0

spktype01 1.0.0

spktype21 0.1.0

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

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

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、SSVG のフォルダの直下にある SSVG_data フォルダに格納してください。

<http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/de430.bsp>

旧バージョンからのアップグレードインストール

バージョン 1.1 およびそれ以前の SSVG は Python 3.5 で動作し PyQt4 を使用していました。その一方でバージョン 1.2 の SSVG は Python 3.7 で動作し、PyQt5 を使用します。それに加えてバージョン 1.2 では重要なフォルダの名称を変更しています。SSVG を旧バージョンからアップグレードする場合は、以前の版とは異なるフォルダにインストールし、以下に示すファイルを旧版のフォルダから新版のフォルダにコピーすることをお勧めします。

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

SSVG の起動

Windows 実行形式プログラムの場合

Windows のデスクトップに作成した SSVG の実行形式プログラムのショートカットをダブルクリックして実行してください。SSVG をインストールしたフォルダにある実行形式プログラム (SSVG.exe または SSVG) をダブルクリックして実行することもできます。コマンドプロンプトのウィンドウが開き、引き続いて SSVG が起動します。

Python スクリプトの場合

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

```
python SSVG.py
```

飛行計画を実行する

飛行計画を開く

SSVG を起動するとふたつのウインドウが開きます。SSVG ウインドウと 3D 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バーで、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ある SSVG_plan というフォルダの内容が見え、そこには飛行計画のサンプルが複数格納されています。一番上にある sample_Mars を開きましょう（環境によっては sample_Mars.json と表示されます）。

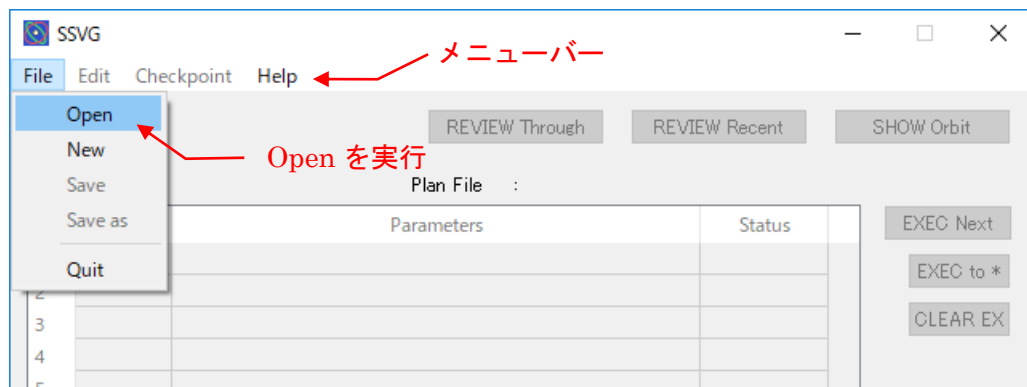


Figure 3 飛行計画のファイルを開く

sample_Mars は地球の近くの宇宙空間にある「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。

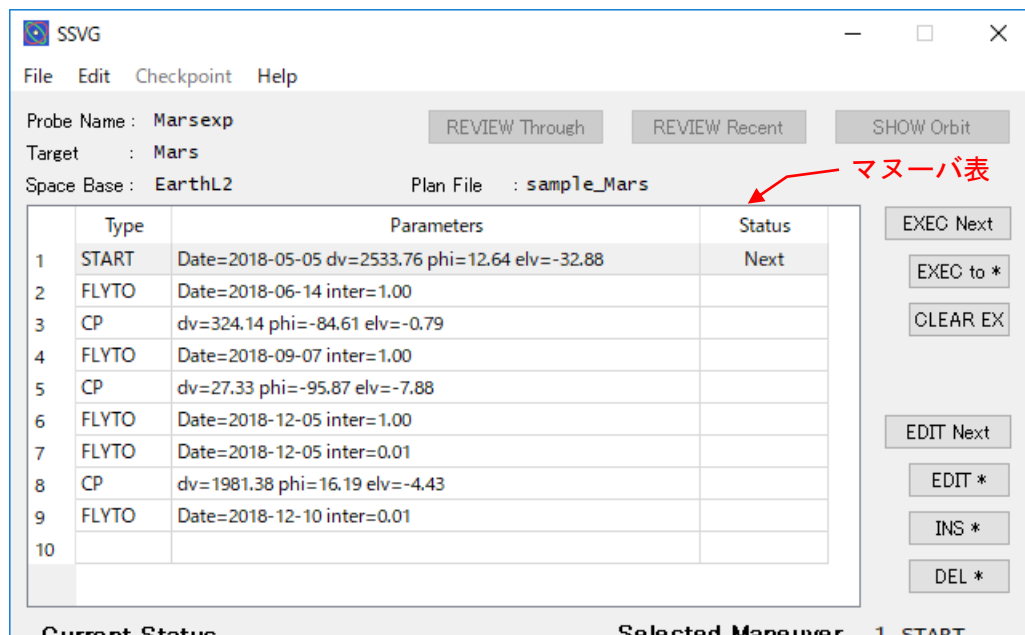


Figure 4 マヌーバ表

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)。

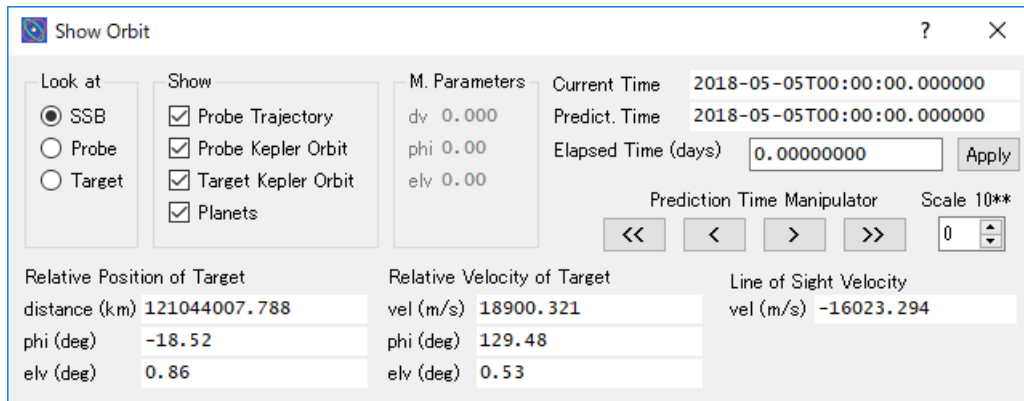


Figure 5 Show Orbit ウィンドウ

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 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

オレンジ色の小円盤：太陽の位置

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

sample_Mars 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。

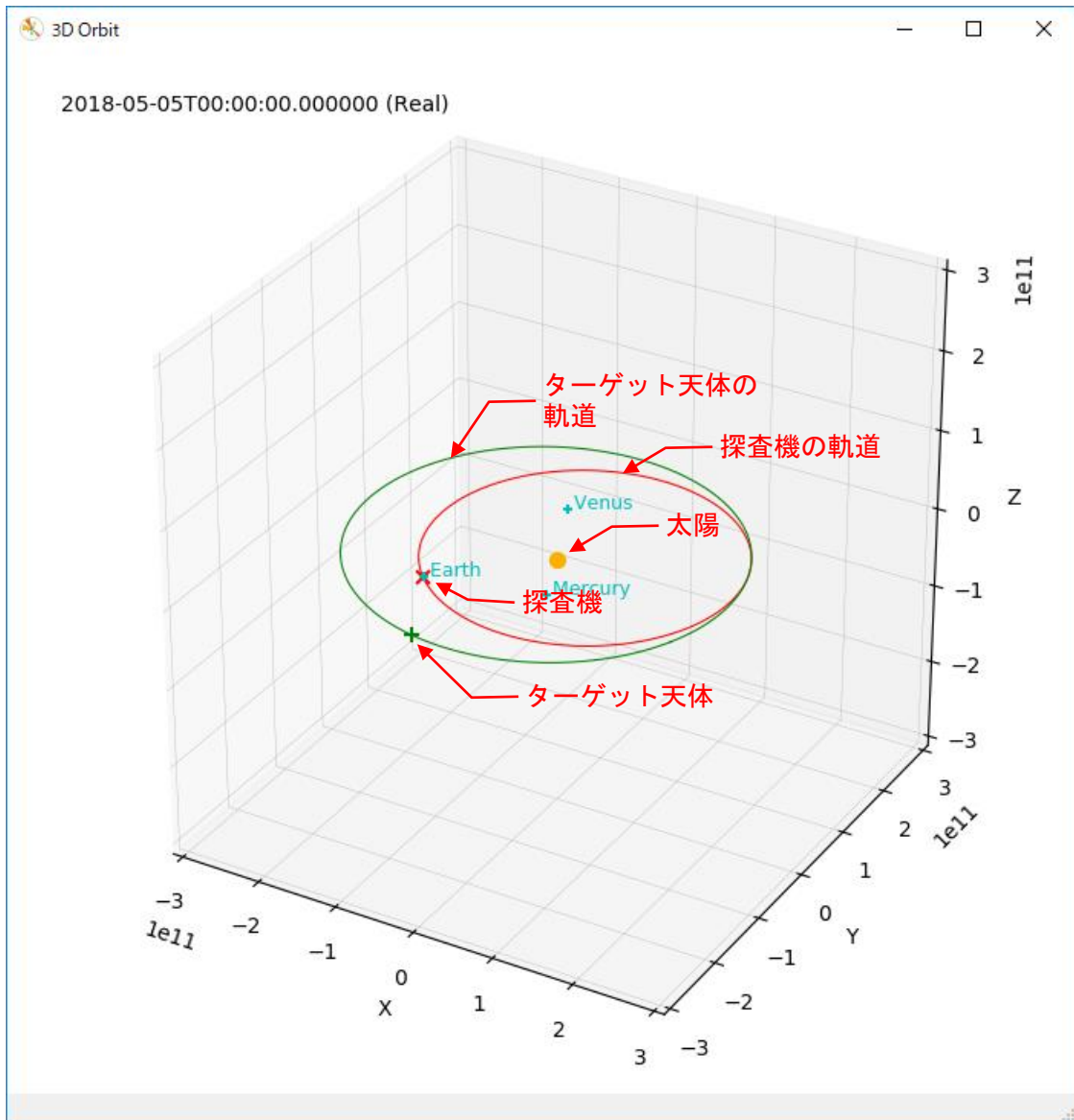


Figure 6 3D Orbit ウィンドウの表示内容

ここで、3D Orbit ウィンドウに表示される図を操作してみましょう。3D Orbit ウィンドウの上にマウスカースルを移動して、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 ウィ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 ウィンドウに表示される図の操作の一部は 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

回を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。

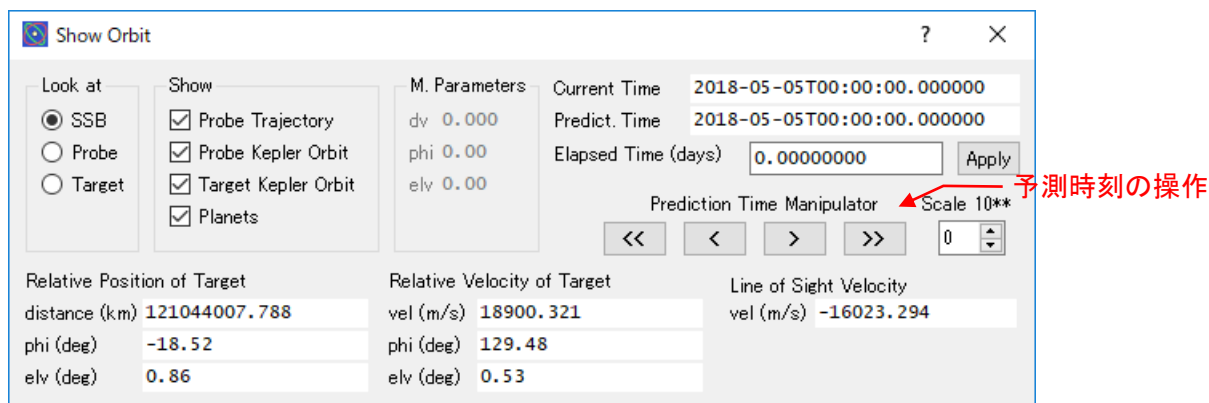


Figure 7 予測時刻の操作

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。

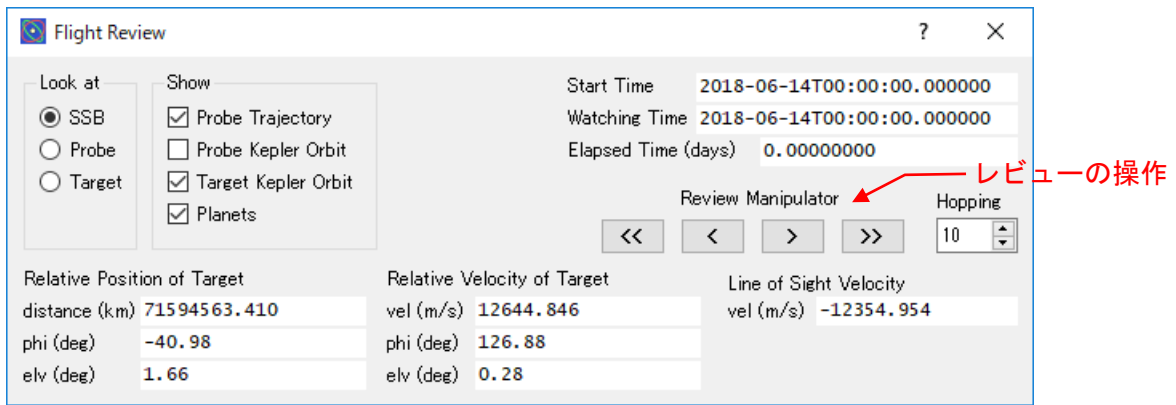


Figure 8 Flight Review ウィンドウ

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。

- 図の中心をターゲット天体にするには？
Flight Review ウィンドウの Look at グループにある Target ラジオボタンを選択する
- 図を拡大するには？
3D Orbit 画面にマウスカースルを置いた状態で、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 画面にマウスカースルを置いた状態で、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（レビューの操作）のボタンを操作する

3D Orbit ウィ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 ウィンドウ](#) および [Show Orbit ウィンドウ](#)を参照してください。

新しい探査機を飛行させる

新しい探査機の飛行計画を作り、探査機を飛行させましょう。

飛行計画の新規作成

SSVG ウィンドウのメニューバーの **File** をクリックし、**New** を実行してください。New Flight Plan ウィンドウが開きます。

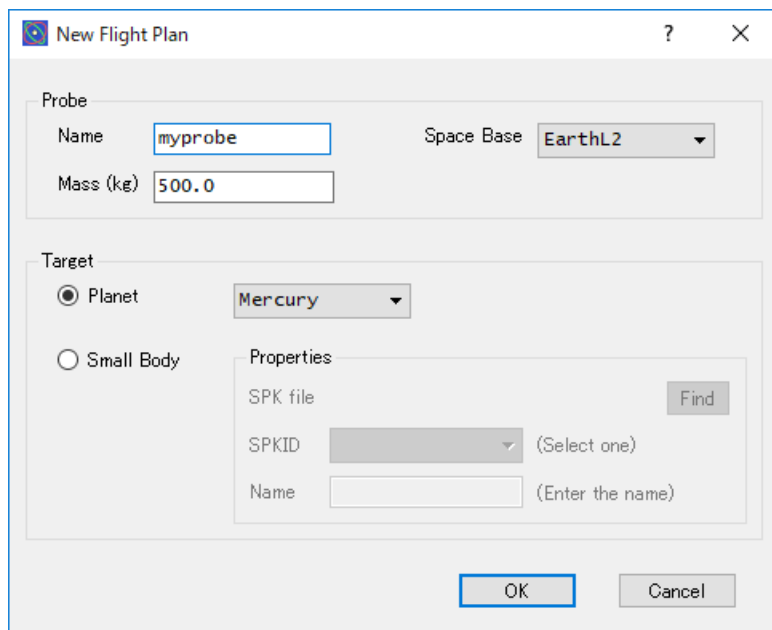


Figure 9 New Flight Plan ウィンドウ

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。

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** を選択します。ウィンドウ下部の[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ないから、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 ウィ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、[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。

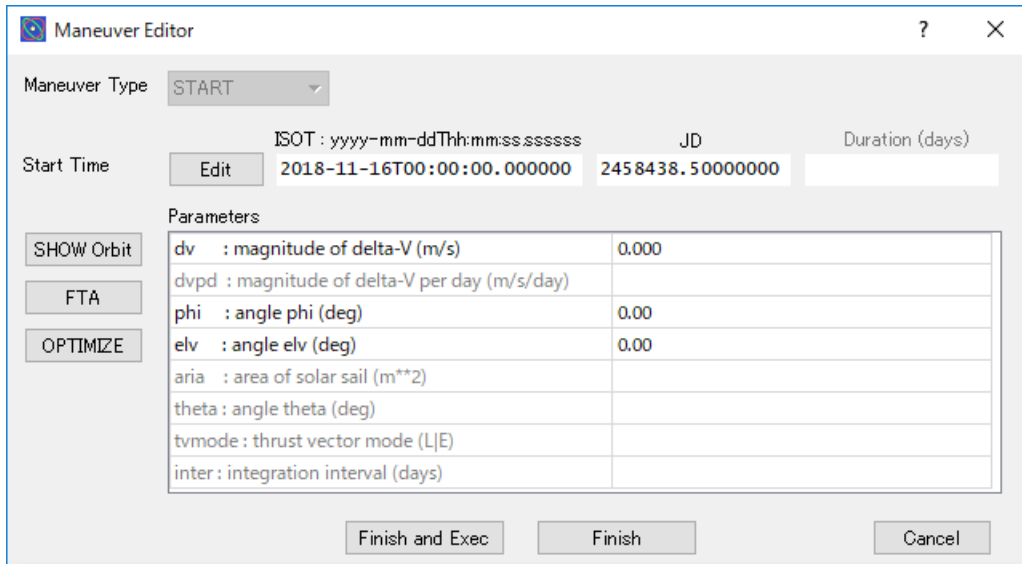


Figure 10 Maneuver Editor ウィンドウ

マヌーバ表の最初の行で実行できるマヌーバは探査機を出発させる **START** マヌーバだけです。このケースでは Maneuver Editor は「START マヌーバ」の編集を開始します。自動的に 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。

初期値のパラメータでは、探査機は宇宙基地を速度ゼロで出発します。これを 2500 メートル／秒（秒速 2500 メートル）で出発するように変更しましょう。Maneuver Editor ウィンドウの 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 ウィンドウと 3D Orbit ウィ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。

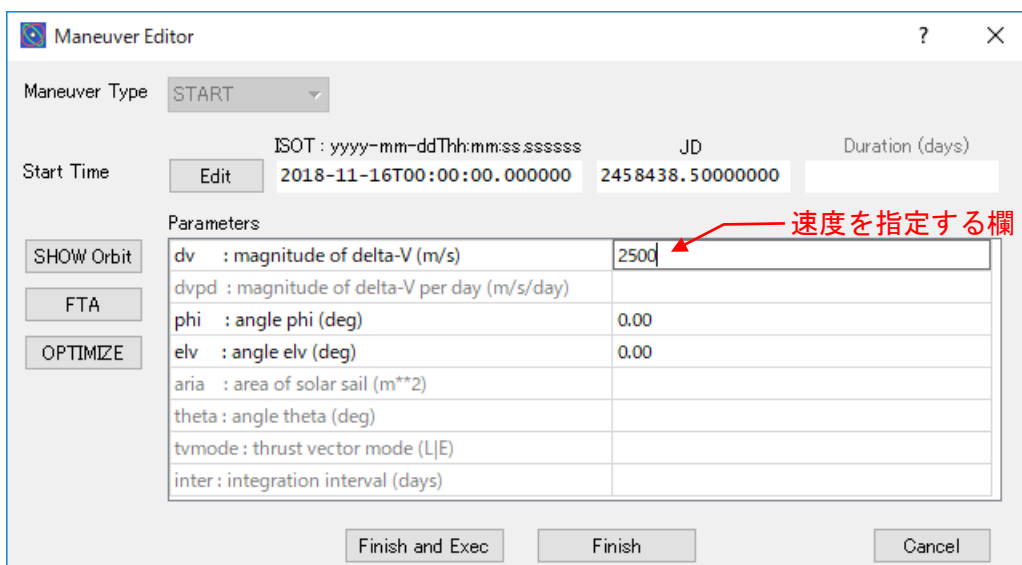


Figure 11 Maneuver Editor ウィンドウ (START マヌーバの編集)

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 マヌーバの設定は終了です。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 ウィンドウが開きます。このケースでは Maneuver Type (マヌーバタイプ) は何も選択されていませんから、空白のドロップダウンリストをクリックして FLYTO を選択してください。初期値として飛行時間がゼロの FLYTO マヌーバが用意されます。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。

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 (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。

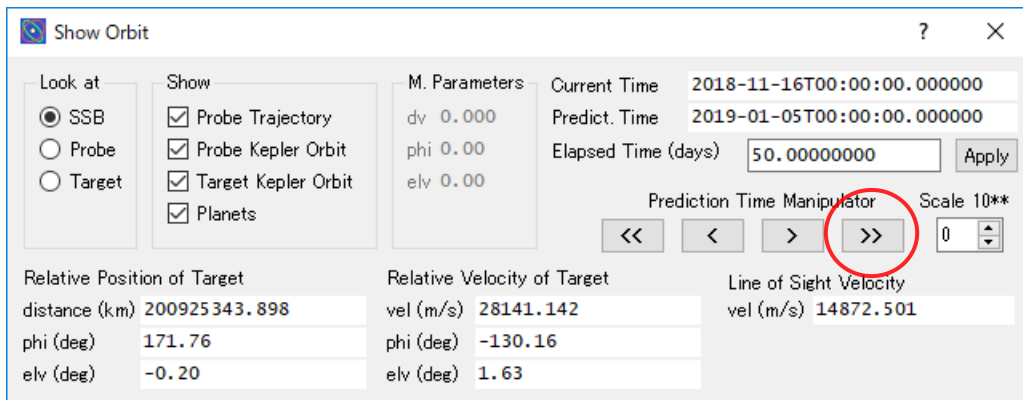


Figure 12 Endtime (飛行終了時刻) を進める

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 ウィンドウの Current Status (現在の状態) や 3D Orbit ウィンドウの図に反映されます。このとき SSVG は現在時刻を FLYTO マヌーバの飛行終了時刻 (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をクリックして CP を選択します）。

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。

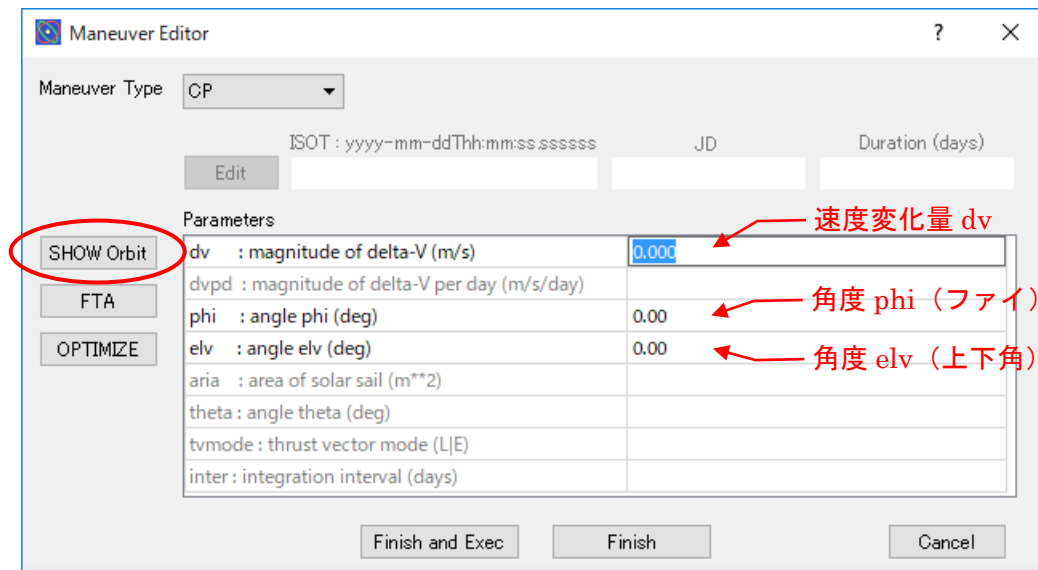


Figure 13 Maneuver Editor ウィンドウ (CP マヌーバ編集)

探査機を減速させる

では、探査機を増速ではなく減速させたら軌道はどうなるでしょうか？ また、もっと別の方向に向けて加速したらどうなるでしょうか？ これらを確認するためには、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（つまり探査機の数値に加える）、差分としての速度ベクトルです。そしてこの図の角度 ϕ と角度 elv を用いて、速度変化の方向を表現します。

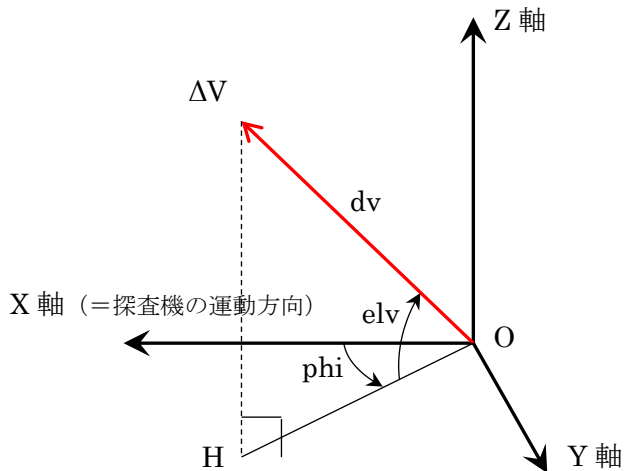


Figure 14 速度変化量と方向の表現

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。SSVG ではこの座標系を「軌道ローカル座標系」と呼びます。

上の図のように、差分としての速度ベクトル ΔV （デルタ V）の先端から X-Y 平面に垂線を下ろしてその足を H とします。H と原点 O を結ぶ線分 OH を考えたとき、角度 ϕ 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。現在の探査機の数値は X 軸の向きですから、減速するには X 軸に平行に、ただし逆向きの数値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 ϕ 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 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

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。

【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。

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を削除することや、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や[EDIT *]ボタンで編集できますが、軌道の確認など一部の重要な機能が使用できません。

SSVG ウィンドウの[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、最後のマヌーバを実行した直後に 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。

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 ウィンドウの 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 ウィンドウに表示されている図を回転させてみるのが大切です。
- ターゲット天体の近傍を拡大して観察するには、
 - Show Orbit ウィンドウの「Look at」グループで「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。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）を試みましょう。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（Duration）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）

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

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（*1）が木星に最接近する場所を目標位置として定め、探査機が目標位置に到着するまでの時間を決定し、それを実現するよう軌道修正のパラメータを設定します。この手順で最後の軌道修正パラメータを計算するのが SSVG の FTA 機能です。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。

このウィンドウでは、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。目標位置としてはターゲット天体（ここでは木星）の中心を指定することと、ターゲット天体から離れた場所を指定することの両方ができます。中心から離れた場所の指定には「B プレーン座標系」または「軌道ローカル座標系」のどちらか一方が使用できますが、ここでは「B プレーン座標系」（*2）を使用します。

（*1）ここでの軌道とは、太陽に対する 2 体問題の解としての軌道です。探査機に引力を及ぼす天体は太陽だけであると仮定します。ターゲット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。

（*2）B プレーン座標系では、探査機の 2 体問題軌道がターゲット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。

FTA Setting ウィ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「B-plane Coordinates」を選択します。
- B-plane Coordinates ラジオボタンの脇のサブグループで、
 - 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。

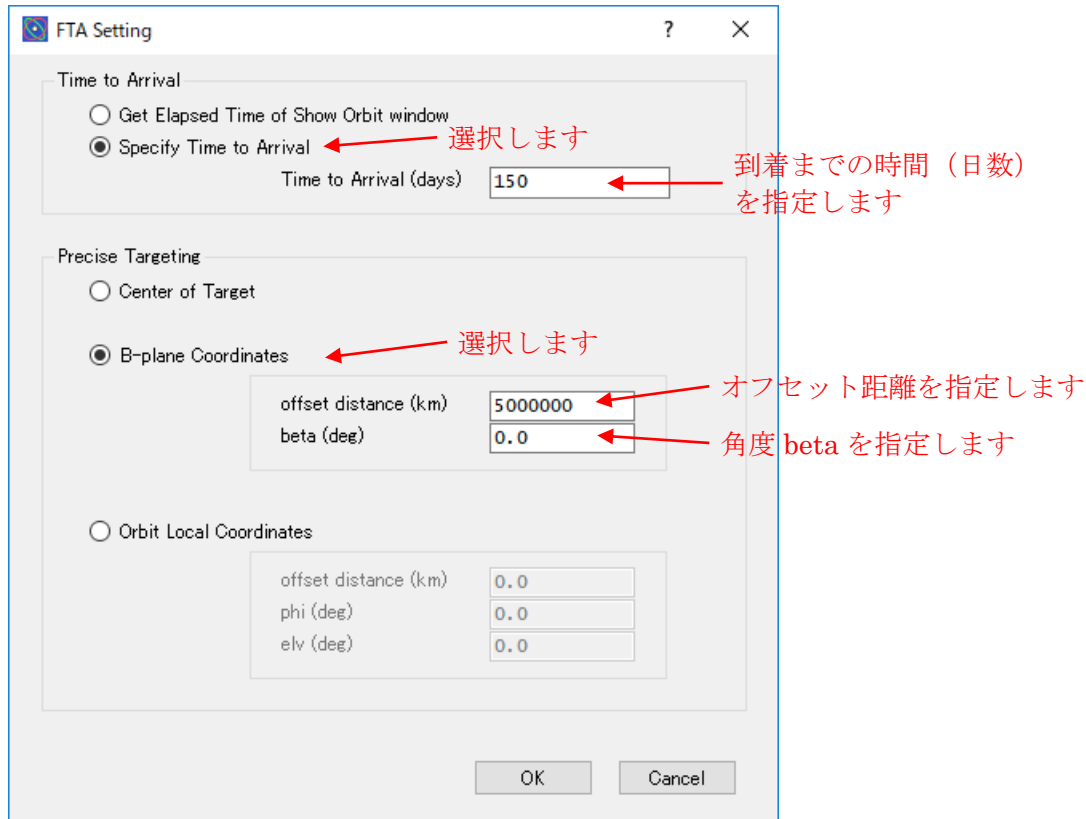


Figure 15 FTA 機能のパラメータの設定

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 ウィンドウに反映されます。

続いて Maneuver Editor ウィンドウで[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 ウィンドウで[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 Flight Review ウィンドウが現れます。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 ウィンドウの 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 体問題軌道が急激に変化する様子を見ることができます。

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みましょう。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 機能を使うには、この行の右端の列に「Next」の表示がなければなりません。(SSVG では、この表示がある行のことを「Next 行」と呼びます)

もし、マヌーバ表の一つ上の行 (2 行目) に「checkpoint」の表示があるなら、SSVG の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、この機能 (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 ウィンドウの「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 ウィンドウの「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 ウィ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 ウィンドウ](#) や [B プレーン座標系](#) の項を参照してください。

金星に向かう飛行計画

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

- 地球の近傍にある宇宙基地から出発し、探査機は直接金星に向かう
- 小さな出発速度（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」という条件には出発日の制約も含まれるでしょう。ここでは、探査機の出発日を 2019 年 9 月以降のできるだけ早い時期としましょう。

飛行計画の新規作成

SSVG ウィンドウのメニューの **File** をクリックして **New** を実行し、新しい飛行計画を作成してください。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のタイプがあります。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。飛行計画の最初のマヌーバですから、**Maneuver Editor** ウィンドウのマヌーバのタイプは自動的に **START** になります。

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

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

Maneuver Editor ウィンドウの [Optimize] ボタンをクリックしてください。Start Optimize Assistant ウィンドウが開きます。

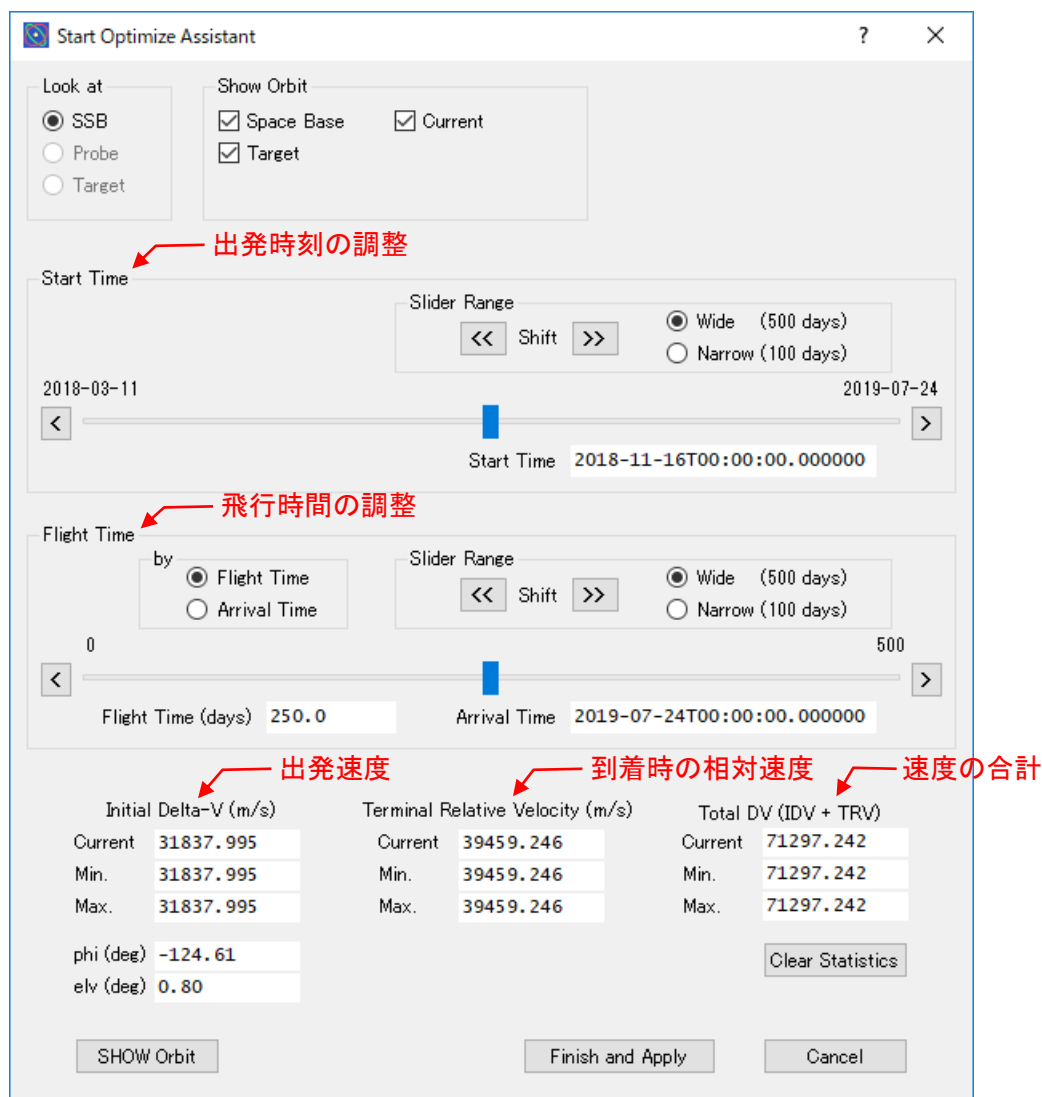


Figure 16 Start Optimize Assistant ウィンドウ

ウィ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」(出発時刻)、「Flight Time」(飛行時間)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。

スライダーのハンドルを動かして探査機の出発時刻と飛行時間を指定すると、SSVG はそれらを条件として探査機の2体問題軌道を計算し、それを3D Orbit ウィ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 ウィ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

スライダーのハンドルをマウスでドラッグして左右に動かすと、出発時刻や飛行時間が変化し、上記の値や軌道(3D Orbit ウィ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ますでしょう。

[[<<]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(上限と下限)をシフトする(ずらす)ことができます。1回のクリックで、スライダ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 ウィンドウ](#)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集中の START マヌーバに適用されます。

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小さくなるまで探査機を十分な期間飛行させ、そのあとで金星に正確に接近できるような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 ウィンドウで「EDIT Next」ボタンをクリックし、Maneuver Editor ウィ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に、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 ウィンドウの Prediction Time Manipulator 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 ウィンドウの 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 ウィンドウの[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 ウィンドウの Precise Targeting グループでは、「B-plane Coordinates」を選択しましょう。[B プレーン座標系](#)の項を参照して接近の目標位置を設定してください。続いて[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 ウィ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 ウィ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（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` の値を初期値の 1.00 から 0.01（単位は「日」）に変更します。SSVG はこの間隔で探査機の位置や速度を計算し、保存します。この値を小さくしておくと、飛行結果の確認もこの間隔で行えます。FLYTO マヌーバの編集を終了し、実行してください。

FLYTO マヌーバの実行が終了したら、SSVG ウィンドウの[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しましょう。

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、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、Binary と呼ばれる形式の SPK ファイルだけです。HORIZONS システムに SPK ファイルの作成を依頼する例が[小天体の SPK ファイルを入手する](#)にありますので参照してください。

小天体の SPK ファイルが入手できれば、飛行計画の新規作成や編集においてその小天体をターゲット天体として選択することが可能になります。[New Flight Plan ウィンドウ](#)の項を参照してください。

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

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

(参考) 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、ここでの L1 と L2 は近似的なものです。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	<p>探査機を宇宙基地から出発させます。</p> <p>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。</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。</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>電気推進エンジンがすでにオンである場合にも使うことができ、実行すると電気推進エンジンのパラメータが新しい値に変わります。</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_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。</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>ソーラーセイルがすでにオンである場合にも使うことができ、実行するとソーラーセイルのパラメータが新しい値に変わります。</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>
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>探査機を指定した飛行終了時刻まで飛行させます。</p> <p>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。</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。</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 ウィ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必要があります。

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[小天体の SPK ファイルを入手する](#)を参照してください。
地球の月以外の衛星（惑星の衛星）をターゲット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なりました。

一方、液体燃料ロケットエンジンには大きな弱点があります。それは「燃費が悪い」ことです。例えば 2000 メートル/秒といった速度変化を探査機に与えるには探査機本体の質量とほとんど同じ質量の燃料と酸化剤を搭載して、それを全部使いきるまでエンジンを働かせることが必要になります（[推進装置とロケット方程式](#)を参照してください）。この弱点は深刻なのですが、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）探査機の変速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 $\sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ です。

経路 (Trajectory) と軌道 (Orbit)

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

経路 (Trajectory)

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

SSVG 上ではこの意味の経路を「Trajectory」と表記しています。

軌道 (Orbit)

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

SSVG 上ではこの意味の軌道を「Orbit」または「Kepler Orbit」と表記しています。

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 ウィンドウには、以下のアイテムやグループがあります。

- メニューバー：いくつかの重要な機能はメニューバーから実行します。
- ボタン：三つのグループがあります。「表示関連ボタン」「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。

メニューバー

表示関連ボタン

マヌーバ表

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

	Type	Parameters	Status
1	START	Date=2018-05-05 dv=2533.76 phi=12.64 elv=-32.88	
2	FLYTO	Date=2018-06-14 inter=1.00	
3	CP	dv=324.14 phi=-84.61 elv=-0.79	Next
4	FLYTO	Date=2018-09-07 inter=1.00	
5	CP	dv=27.33 phi=-95.87 elv=-7.88	
6	FLYTO	Date=2018-12-05 inter=1.00	
7	FLYTO	Date=2018-12-05 inter=0.01	
8	CP	dv=1981.38 phi=16.19 elv=-4.43	
9	FLYTO	Date=2018-12-10 inter=0.01	
10			

Current Status

Executed Last Maneuver 2 FLYTO

Current Time 2018-06-14T00:00:00.000000

Current Time (JD) 2458283.50000000

Distance from Sun (km) 157,500,013

Velocity rel. to Sun (m/s) 30962.781

Semi-major Axis (km) 182,662,783

Semi-major Axis (AU) 1.22102529

Eccentricity 0.16556064

Inclination (deg) 2.387034

Long. of Asc. Node (deg) 43.853327

Arg. of Perihelion (deg) 181.512872

Perihelion Passage 2018-05-06T02:00:57.620099

Perihelion Passage (JD) 2458244.58400023

Mean Anomaly (deg) 28.427933

Orbital Period (days) 492.816697

Accum. DV (m/s) CP, EP, SS 0, 0, 0

Selected Maneuver 3 CP

Date&Time

Parameters

dv (m/s)	324.139
dvpd (m/s/day)	
phi (deg)	-84.61
elv (deg)	-0.79
aria (m**2)	
theta (deg)	
tvmode (L/E)	
inter (days)	

Figure 17 SSVG ウィンドウ

Table 5 SSVG ウィンドウのメニューバー

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 ウィンドウ 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編集します。 実行すると Edit Probe Properties ウィンドウが開きますが、設定方法は New Flight Plan ウィンドウ 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 ウィンドウが開きますが、設定方法は New Flight Plan ウィンドウ を参照してください。
Checkpoint	Create	チェックポイントを作成します。(*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。(*2)
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作成し、マヌーバ表のこの操作の直前に実行された行に checkpoint を表示します。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 ウィンドウの「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のレビューを開始します。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) のレビューを開始します。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、探査機の位置やその軌道の観察を開始します。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	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 ウィンドウを開き、マヌーバ表の Next 行のマヌーバを編集します。
	EDIT *	Maneuver Editor ウィンドウを開き、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 *	マヌーバ表の選択されている行を削除します。 選択されている行のマヌーバが実行済みである場合、削除を行うと飛行計画の実行状態は消去されます。

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** ウィンドウを開き、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 ウィンドウ](#) 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 ウィ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 次元の図として表示するウィンドウで、SSVG が起動しているときは通常いつでも表示されています。ウ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、マヌーバの実行や有効な[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、以下に示すウィンドウが生成し、制御します。

- Show Orbit ウィンドウ：探査機の現在の状態の詳しい観察を支援します。
- Flight Review ウィンドウ：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 ウィンドウ：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 ウィンドウ：START マヌーバの作成を支援します。
- CP Optimize Assistant ウィンドウ：CP マヌーバの作成を支援します。

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

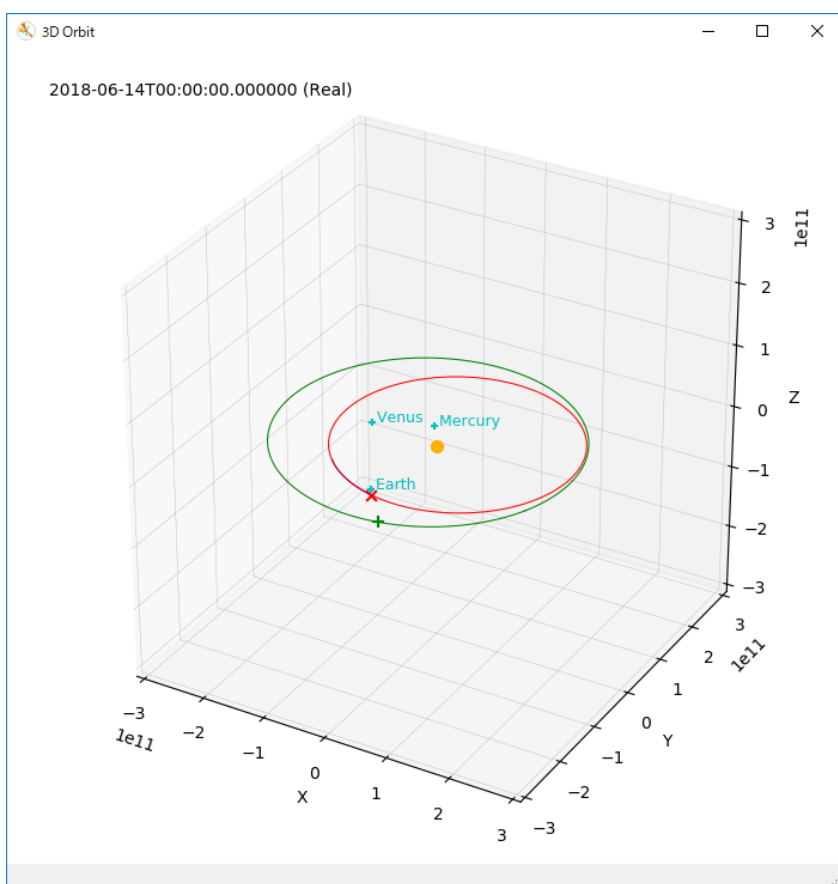


Figure 18 3D Orbit ウィンドウ

次の表は 3D Orbit ウィ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 ウィンドウに表示されるアイテム

アイテム	説明
×マーク（赤色）	探査機。マヌーバのレビュー中は推進装置の状態やマヌーバに関する情報がマークの右に表示されることがあります。
曲線（赤色）	探査機の軌道。ほとんどの場合探査機の 2 体問題軌道を示します。 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 で検討中の探査機の軌道です。
小円盤（オレンジ色）	太陽。
+マークと名称（水色）	惑星とその名称(*)。惑星ではありませんが、地球の月は+マークだけが表示されます。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 (ISOT 形式) とその属性が表示されます。属性は Real (実) と Predicted (予測) のいずれかです。

(*) 惑星の表示名は以下のとおりです。

水星：Mercury
金星：Venus
地球：Earth
火星：Mars
木星：Jupiter
土星：Saturn
天王星：Uranus
海王星：Neptune

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

Table 9 3D Orbit ウィンドウにおける図の操作

操作したい内容	操作方法
図の向きを変える	左ボタンを押した状態でマウスを上下や左右に動かします。
図の拡大率を変える	右ボタンを押した状態でマウスを上下に動かします。
図のサイズを変える	ウィンドウの辺または隅をマウスでドラッグします。
図の中心を変更する	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 グループで図の中心を選択してください。

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利用者が観察することを支援します。Show Orbit ウィ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 ウィンドウに、
 - 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 ウィンドウ自身に、
 - 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 ウィ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 ウィンドウが探査機の情報を表示できるのは、予測時刻が探査機の飛行できる時間範囲にあるときに限られます。Show Orbit ウィンドウではその範囲を超えた予測時刻を設定することができますが、その場合 3D Orbit ウィンドウには探査機やターゲット天体などの表示は行われません。また Show Orbit ウィンドウに表示されるターゲット天体の相対位置や速度は更新されません。探査機の飛行できる時間帯については[時刻についての項](#)を参照してください。

Show Orbit ウィ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済みであって、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 ウィンドウの「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 ウィンドウに反映させることができます。

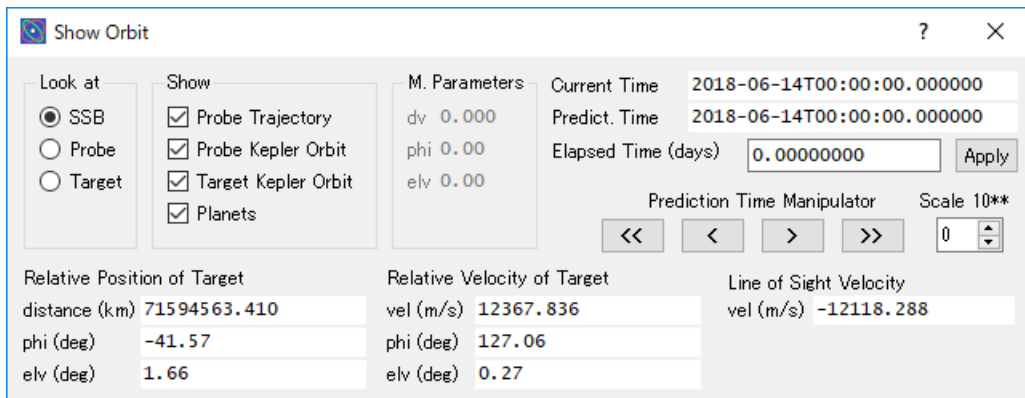


Figure 19 Show Orbit ウィンドウ

Show Orbit ウィ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)
- 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) とスピンドボックス

Table 10 Show Orbit ウィ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が表示されます。
	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）が赤線が表示されます。
	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）が緑線が表示されます。
	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 ウィ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 マヌーバまたは CP マヌーバの編集の場合に限る）
(名前なし) 時刻情報	Current Time または Start Time	SSVG の現在時刻がここに表示されます。（START マヌーバの編集 中以外の場合） Maneuver Editor ウィ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。（START マヌーバの編集の場合）
	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。（*）
	[[<]]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。
Prediction Time Manipulator 予測時刻の 操作(*)	[>]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 10** 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、予測時刻を変更するとその結果は Maneuver Editor ウィンドウの End Time（飛行終了時刻）や Duration（飛行時間）に自動的に反映されます。

Show Orbit ウィンドウの下部には、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 ウィ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)	ターゲット天体の探査機からの距離。
	phi (deg)	ターゲット天体の探査機からの方向。phi と elv の定義は軌道ローカル座標系を参照してください。
	elv (deg)	
Relative Velocity of Target	vel (m/s)	ターゲット天体の探査機を基準にした相対速度。
	phi (deg)	ターゲット天体の探査機を基準にした相対速度の方向。phi と elv の定義は軌道ローカル座標系を参照してください。
	elv (deg)	
Line of Sight Velocity	vel (m/s)	ターゲット天体の探査機を基準にした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します。

Flight Review ウィンドウ

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

- 3D Orbit ウィンドウに、
 - 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 ウィンドウ自身に、
 - 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 ウィンドウの探査機の×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 ウィンドウの探査機の×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 ウィンドウは、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 ウィンドウは利用者が SSVG ウィンドウの「REVIEW Recent」ボタンをクリックすると表示されます。

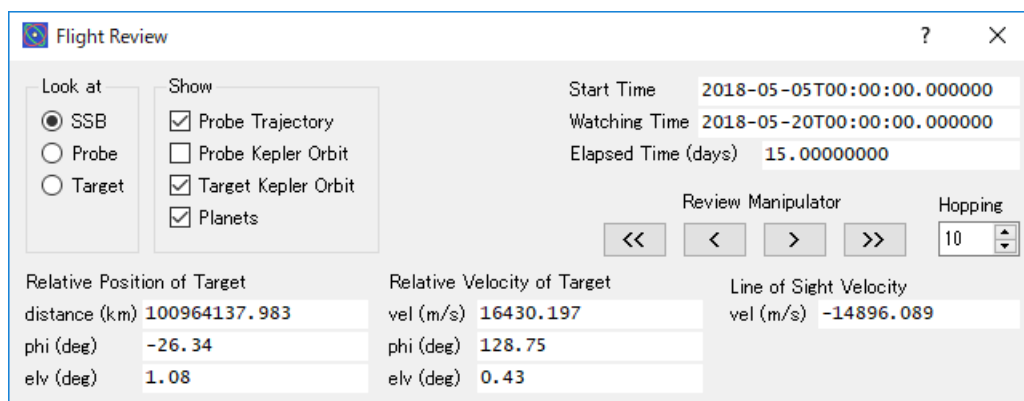


Figure 20 Flight Review ウィンドウ

Flight Review ウィ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 ウィ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が表示されます。
	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）が赤線が表示されます。
	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）が緑線が表示されます。
	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 ウィンドウの下部には、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 ウィンドウと同じです。[Table 11 Show Orbit ウィンドウの下部にあるグループ](#)を参照してください。

Review Throughout ウィンドウ

Review Throughout ウィンドウは、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 ウィ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 ウィ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 ウィンドウに、
 - 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、
 - FLYTO 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 ウィンドウ自身に、
 - 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 ウィ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 ウィ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 ウィンドウは、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 Throughout ウィ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 ウィンドウは、利用者が SSVG ウィンドウの「Review Through」ボタンをクリックしたときに表示されます。

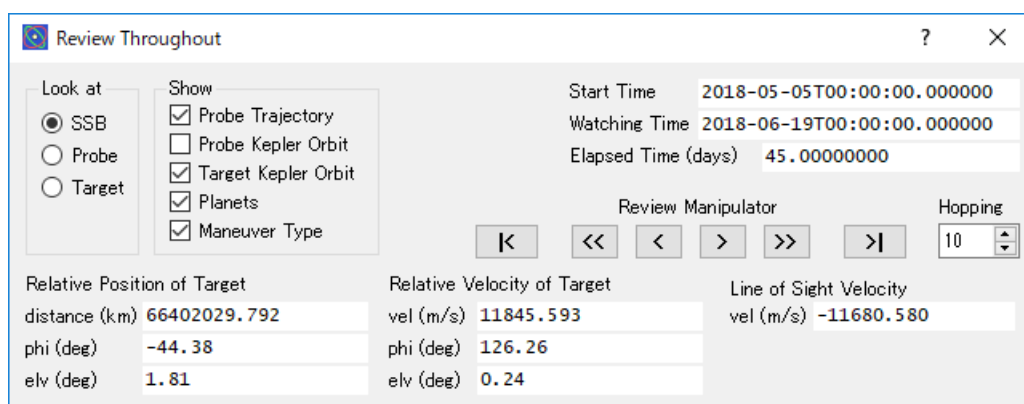


Figure 21 Review Throughout ウィンドウ

Review Throughout ウィ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 ウィ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が表示されます。
	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が表示されます。
	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が表示されます。
	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変化させる積分ステップ数を指定します。

（*）FLYTO マヌーバのレビュー中は 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と、値は 1 日当たりの速度変化量（メートル／秒／日）です。

Review Throughout ウィンドウの下部には、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 ウィンドウと同じです。

[Table 11 Show Orbit ウィ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。

Maneuver Editor ウィ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 ウィンドウの「EDIT Next」ボタンをクリックする
- SSVG ウィンドウの「EDIT *」ボタンをクリックする
- SSVG ウィ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

Maneuver Type: CP

ISOT : yyyy-mm-ddThh:mm:ss.sssss JD Duration (days)

Edit

Parameters

dv	: magnitude of delta-V (m/s)	27.330
dvpd	: magnitude of delta-V per day (m/s/day)	
phi	: angle phi (deg)	-95.87
elv	: angle elv (deg)	-7.88
aria	: area of solar sail (m**2)	
theta	: angle theta (deg)	
tvmode	: thrust vector mode (L E)	
inter	: integration interval (days)	

SHOW Orbit FTA OPTIMIZE

Finish and Exec Finish Cancel

Figure 22 Maneuver Editor ウィンドウ

Maneuver Editor ウィ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 ウィンドウのグループ、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 (ドロップダウンリスト)	全タイプ	ドロップダウンリストに編集中のマヌーバのタイプが表示されます。 マヌーバ表の空白行（第 1 行を除く）の編集を開始したときはマヌーバのタイプは表示されません。ドロップダウンリストをクリックしてマヌーバのタイプを選択します。 既存のマヌーバの編集を開始したときは、マヌーバのタイプを変更することはできません。
Start Time ([Edit]ボタンとテキストフィールド)	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。 [Edit]ボタンをクリックすることにより出発時刻を変更することができます。(*1) 変更後の時刻は直ちに Show Orbit ウィンドウと 3 次元の図に一時的に反映されます。
または End Time ([Edit]ボタンとテキストフィールド)	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) (*2)を表示します。飛行終了時刻は ISO 形式 (ISOT) とユリウス日 (JD) で表示します。 [Edit]ボタンをクリックすることにより飛行終了時間および飛行時間を変更することができます。(*1) 変更後の時刻は直ちに Show Orbit ウィンドウおよび 3 次元の図に反映されます（一時的な反映です）。 飛行終了時刻は Show Orbit ウィンドウから変更することもできます。Show Orbit ウィンドウで予測時刻 (Prediction Time) を操作するとその時刻は直ちに編集中の FLYTO マヌーバの飛行終了時刻に反映されます（一時的な反映です）。
Parameters (表)	全タイプ	編集中のマヌーバの、時刻以外のすべてのパラメータを表示します。左側のカラムはパラメータの名称と簡単な説明です。右側のカラムはパラメータの値です。詳細は次の表を見てください。 値を含むセルをダブルクリックすることによりパラメータの値を変更することができます。
「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を一時的に Show Orbit ウィンドウおよび 3 次元の図に反映させます。
[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 機能呼び出します。(*3) 詳細は FTA Setting ウィンドウ 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 機能呼び出します。詳細は Start Optimize Assistant ウィンドウ または CP Optimize Assistant ウィンドウ 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、このウィンドウを閉じ、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、このウィンドウを閉じます。
[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) [Edit]ボタンをクリックするとダイアログが現れ、ISOT、JD、または Duration (Next 行の FLYTO マヌーバを編集中の場合) のいずれかを編集することができます。編集された値は他の項目にも反映されます。

(*2) 編集中の FLYTO マヌーバの飛行時間は SSVG の現在時刻と編集中の FLYTO マヌーバの飛行終了時刻から計算されます。飛行時間 (Duration) の値を編集した場合は飛行時間と SSVG の現在時刻から飛行終了時刻が計算されます。

(*3) この時点で SSVG は Show Orbit ウィンドウから「経過時間」(Elapsed Time) を取り込んで FTA Setting ウィンドウに渡します。FTA Setting ウィンドウはその値を「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。この値は 0.00001 以上の正の値でなければなりません。

New Flight Plan ウィンドウ

New Flight Plan ウィンドウは、新しい飛行計画の情報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 ウィンドウ

New Flight Plan ウィ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 ウィ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で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。(*1)
	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、しかもその天体の情報を Properties サブグループに設定する必要があります。
	Properties	SPK file (テキストフィールドと[Find]ボタン)	[Find]ボタンをクリックし、小天体の SPK ファイル(*2)を開いてください。
		SPKID (ドロップダウンリスト)	SPKID を確認してください。またはドロップダウンリストをクリックして適切な SPKID を選択してください。(*3)
		Name (入力フィールド)	小天体の名称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) ドロップダウンリストに含まれる天体とリスト上の表記は以下のとおりです。

Mercury : 水星
Venus : 金星
Mars : 火星
Jupiter : 木星
Saturn : 土星
Uranus : 天王星
Neptune : 海王星
Pluto : 冥王星 (準惑星)
Moon : 月 (地球の衛星)
Earth : 地球

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

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

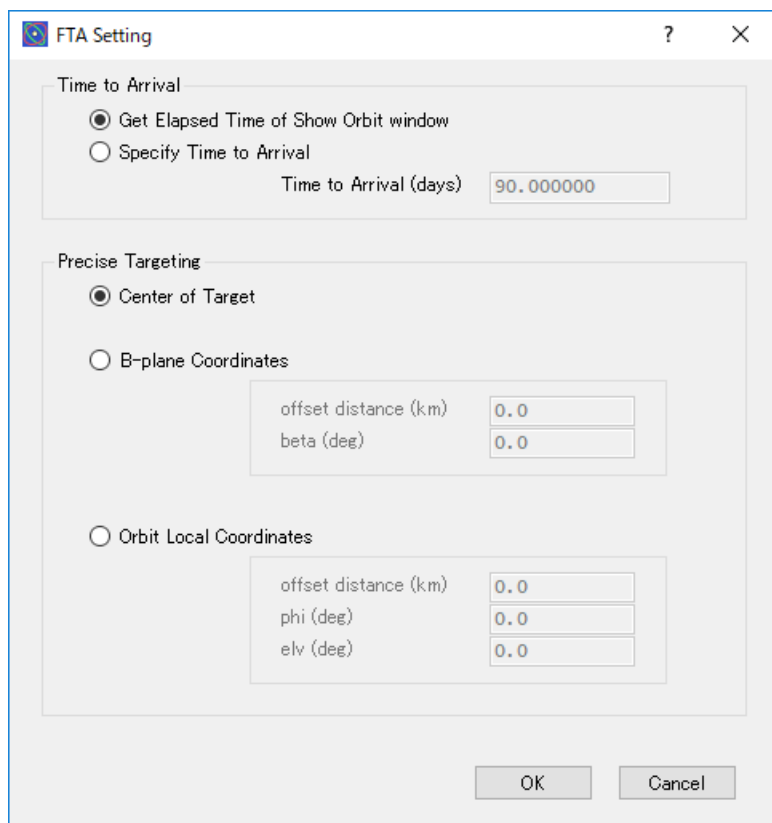
FTA Setting ウィンドウ

FTA Setting ウィンドウでは、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 **SSVG** の現在時刻から到着時刻までの時間を指定します。

FTA Setting ウィンドウは **Maneuver Editor** ウィンドウで **START** マヌーバまたは **CP** マヌーバの編集に、**[FTA]** ボタンをクリックすると表示されます。



The image shows a software dialog box titled "FTA Setting". It contains two main sections: "Time to Arrival" and "Precise Targeting".

Time to Arrival section:

- Radio button ☒ "Get Elapsed Time of Show Orbit window"
- Radio button ☐ "Specify Time to Arrival"
- Text field "Time to Arrival (days)" with value "90.000000"

Precise Targeting section:

- Radio button ☒ "Center of Target"
- Radio button ☐ "B-plane Coordinates"
- Text fields for "B-plane Coordinates":
 - "offset distance (km)" with value "0.0"
 - "beta (deg)" with value "0.0"
- Radio button ☐ "Orbit Local Coordinates"
- Text fields for "Orbit Local Coordinates":
 - "offset distance (km)" with value "0.0"
 - "phi (deg)" with value "0.0"
 - "elv (deg)" with value "0.0"

At the bottom right are "OK" and "Cancel" buttons.

Figure 24 **FTA Setting** ウィンドウ

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

Table 17 FTA Setting ウィ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 ウィンドウの 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。この値は 1.0 以上でなければなりません。
Precise Targeting 目標位置の詳細設定	Center of Target ターゲット天体の中心 (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。
	B-plane Coordinates B プレーン座標 (ラジオボタン)		選択すると、目標位置を B プレーン座標で指定することができます。詳細は B プレーン座標系 をご覧ください。
	サブグループ	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オフセット距離を入力します。単位はキロメートルです。
		beta (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として角度 beta (ベータ) を入力します。単位は度です。
	Orbit Local Coordinates 軌道ローカル座標 (ラジオボタン)		選択すると、目標位置をターゲット天体から見た軌道ローカル座標で指定することができます。詳細は 軌道ローカル座標系 をご覧ください。
	サブグループ	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 (ファイ) 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 (上下角) 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 ウィ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 ウィンドウの 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 ウィンドウ

Start Optimize Assistant ウィンドウは、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（効率）を考えると、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 ウィンドウを使うと、利用者は様々な出発時刻と飛行時間を試すことができます。各々のケースについて、現在の出発時刻と現在の飛行時間を用いて、SSVG は探査機の 2 体問題軌道を計算します。そして探査機の出発速度と、到着時のターゲット天体の相対速度を表示し、同時に探査機の 2 体問題軌道を 3D Orbit ウィンドウに 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「このウィ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 ウィンドウは、START マヌーバを編集している Maneuver Editor ウィンドウで利用者が「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 ウィンドウ

このウィ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 ウィ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)

このウィ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（上限と下限）が過去に向かってその幅の半分だけシフトします。
		[>>]ボタン	クリックすると、スライダーの範囲（上限と下限）が未来に向かってその幅の半分だけシフトします。
		Wide (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 500 日になります。
		Narrow (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 100 日になります。
	(スライダー)		ハンドル（つまみ）をドラッグすると出発時刻が変化します。
	[<]ボタン		クリックするとハンドルが 1 ピクセル左に動きます。
	[>]ボタン		クリックするとハンドルが 1 ピクセル右に動きます。
	Start Time (テキスト)		SSVG が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、このグループのスライダーは飛行時間を設定します。この状態で現在の出発時刻を変化させると、飛行時間は変化しませんが、到着時刻が変化します。
		Arrival Time (ラジオボタン)	選択すると、このグループのスライダーは到着時刻を設定します。飛行時間は出発時刻と到着時刻から計算します。この状態で現在の出発時刻を変化させると、到着時刻は変化しませんが、飛行時間が変化します。
	Slider Range	[[<]ボタン	クリックすると、スライダーの範囲（上限と下限）が値の小さくなる方向に（到着時刻の場合は過去に向かって）その幅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（上限と下限）が値の大きくなる方向に（到着時刻の場合は未来に向かって）その幅の半分だけシフトします。
		Wide (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 500 日になります。
		Narrow (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 100 日になります。
	(スライダー)		ハンドル（つまみ）をドラッグすると現在の飛行時間および到着時刻が変化します。
	[<]ボタン		クリックするとハンドルが 1 ピクセル左に動きます。
	[>]ボタン		クリックするとハンドルが 1 ピクセル右に動きます。
	Flight Time (テキスト)		SSVG が現在の飛行時間を表示します。
	Arrival Time (テキスト)		SSVG が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 ウィ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 の値のここまでの最小値が表示されます。
	Max.	このグループの Current の値のここまで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 の値のここまでの最小値が表示されます。
	Max.	このグループの Current の値のここまで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 の値のここまでの最小値が表示されます。
	Max.	このグループの Current の値のここまで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 ウィンドウが存在しない場合は再表示されます。
	[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 ウィンドウに反映し、このウィンドウを閉じます。
	[Cancel]ボタン	クリックすると SSVG はこのウィンドウを閉じます。

CP Optimize Assistant ウィンドウ

CP Optimize Assistant ウィンドウは、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（効率）を考えると、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 ウィンドウを使うと、利用者は様々なマヌーバ時刻と飛行時間を試すことができます。各々のケースについて、現在のマヌーバ時刻と現在の飛行時間を用いて、SSVG は探査機の 2 体問題軌道を計算します。そして探査機の軌道変更における速度変化の大きさと到着時のターゲット天体の相対速度を表示し、同時に探査機の 2 体問題軌道を 3D Orbit ウィンドウに 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「このウィ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 ウィンドウは、CP マヌーバを編集している Maneuver Editor ウィンドウで利用者が「Optimize」ボタンをクリックした場合に表示されます。

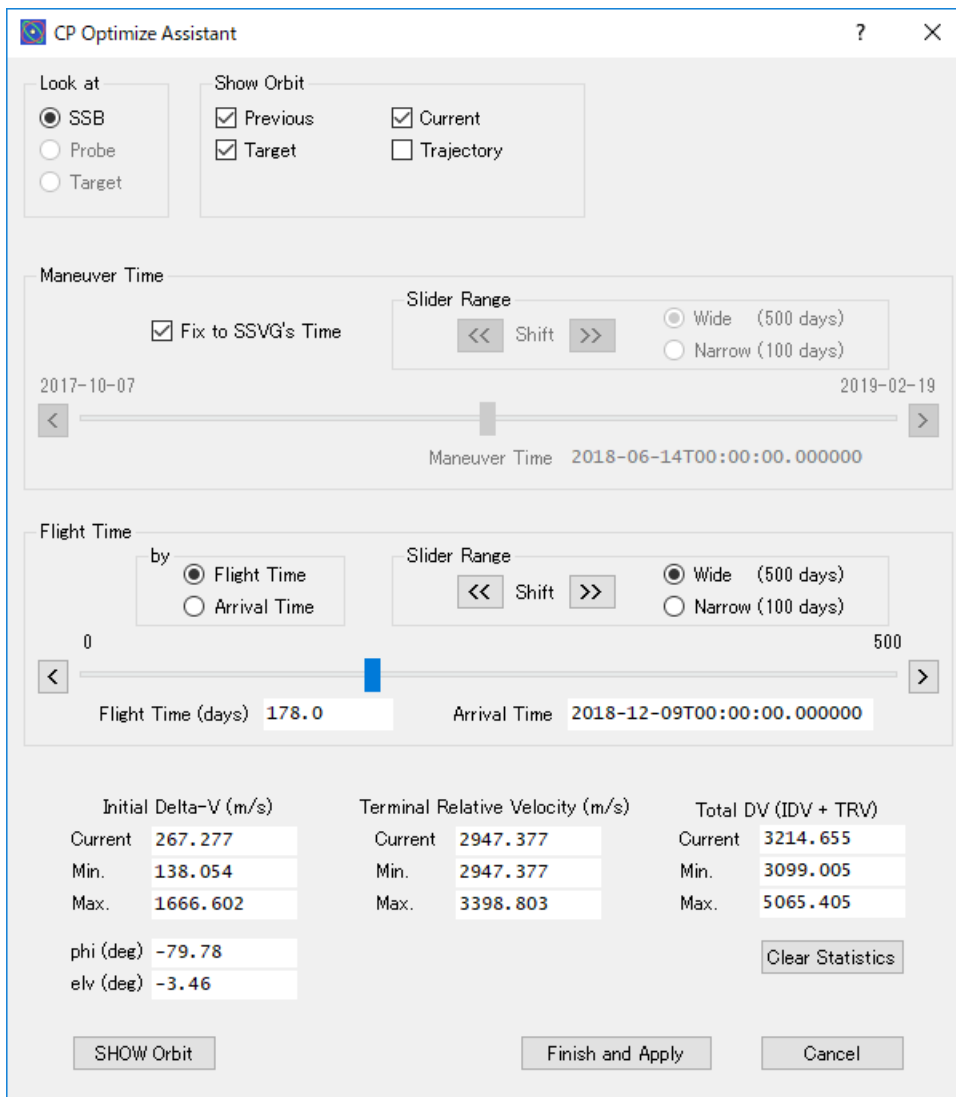


Figure 26 CP Optimize Assistant ウィンドウ

このウィンドウの上部には、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 ウィ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)

このウィ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（上限と下限）が過去に向かってその幅の半分だけシフトします。
		>>> ボタン	クリックすると、スライダーの範囲（上限と下限）が未来に向かってその幅の半分だけシフトします。
		Wide (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 500 日になります。
		Narrow (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 100 日になります。
	(スライダー)		ハンドル（つまみ）をドラッグするとマヌーバ時刻が変化します。
	< ボタン		クリックするとハンドルが 1 ピクセル左に動きます。
	> ボタン		クリックするとハンドルが 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、このグループのスライダーは飛行時間を設定します。この状態で現在のマヌーバ時刻を変化させると、飛行時間は変化しませんが、到着時刻が変化します。
		Arrival Time (ラジオボタン)	選択すると、このグループのスライダーは到着時刻を設定します。飛行時間はマヌーバ時刻と到着時刻から計算します。この状態で現在のマヌーバ時刻を変化させると、到着時刻は変化しませんが、飛行時間が変化します。
	Slider Range	<<< ボタン	クリックすると、スライダーの範囲が値の小さくなる方向に（到着時刻の場合は過去に向かって）その幅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値の大きくなる方向に（到着時刻の場合は未来に向かって）その幅の半分だけシフトします。
		Wide (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 500 日になります。
		Narrow (ラジオボタン)	選択すると、スライダーの値の幅が 100 日になります。
	(スライダー)		ハンドル（つまみ）をドラッグすると現在の飛行時間および到着時刻が変化します。
	< ボタン		クリックするとハンドルが 1 ピクセル左に動きます。
	> ボタン		クリックするとハンドルが 1 ピクセル右に動きます。
	Flight Time (テキスト)		SSVG が現在の飛行時間を表示します。
	Arrival Time (テキスト)		SSVG が現在の到着時刻を表示します。

このウィンドウの下部には 3 個のグループと複数のボタンがあります。

Table 23 CP Optimize ウィ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 の値のここまでの最小値が表示されます。
	Max.	このグループの Current の値のここまで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 の値のここまでの最小値が表示されます。
	Max.	このグループの Current の値のここまで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 の値のここまでの最小値が表示されます。
	Max.	このグループの Current の値のここまで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 ウィンドウが存在しない場合は再表示されます。
	[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 ウィンドウに反映し、このウィンドウを閉じます。(*)
	[Cancel]ボタン	クリックすると SSVG はこのウィンドウを閉じます。

(*) [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、編集中のマヌーバが正しい時刻に実行されるよう飛行計画を再構成する必要があります。この時点で SSVG は新しいマヌーバ時刻（ISOT）をクリップボードにコピーしますから、それを飛行計画の再構成に利用することができます。

座標系

黄道座標系

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

軌道ローカル座標系

SSVG の軌道ローカル座標系は、太陽の周囲を公転する物体に対して定義されます。この「物体」には探査機や宇宙基地、ターゲット天体を含みます。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に役に立つでしょう。

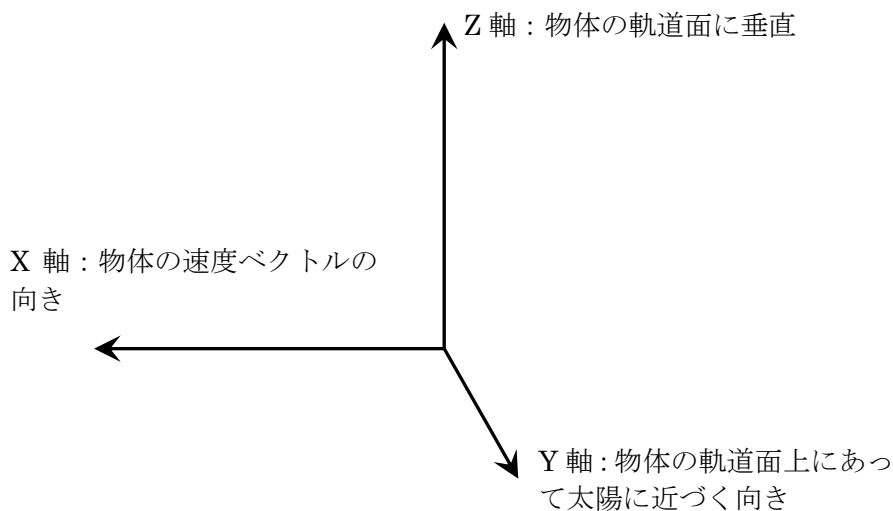


Figure 27 軌道ローカル座標系の定義

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。

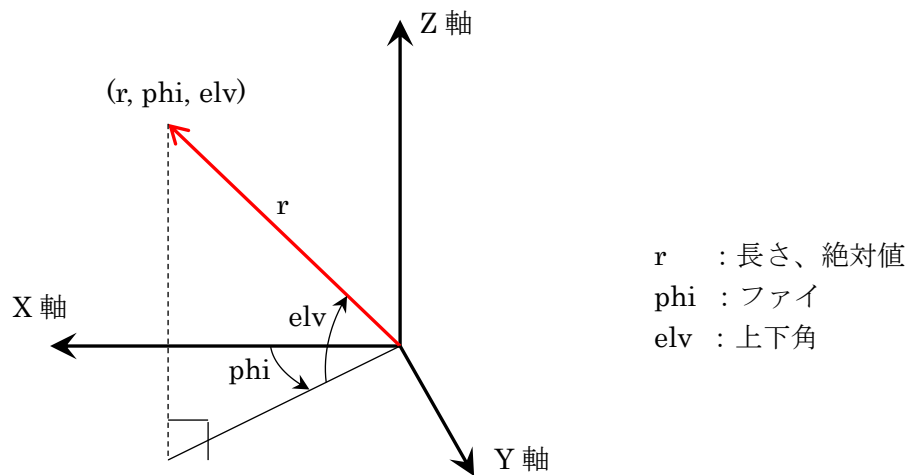


Figure 28 軌道ローカル座標系の極座標表現

ソーラーセイル座標系

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

座標軸（X、Y、Z）の原点は探査機を中心とします。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。

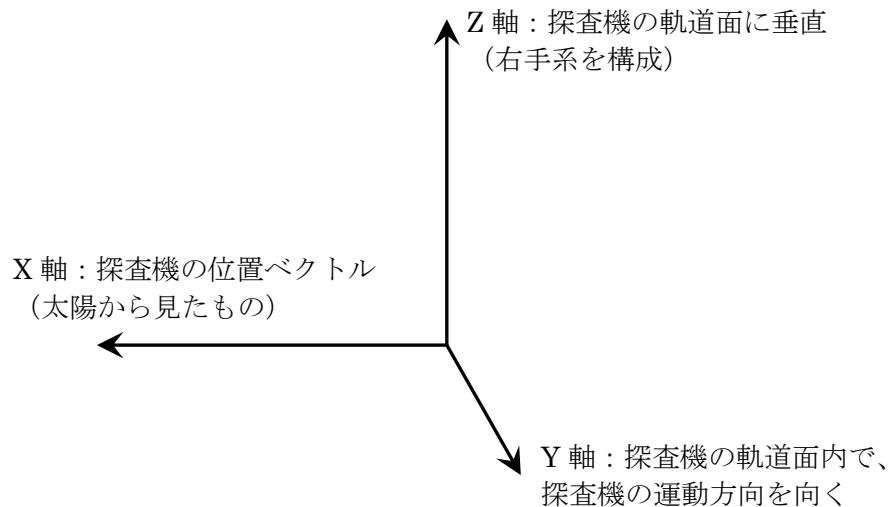


Figure 29 ソーラーセイル座標系の定義

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。

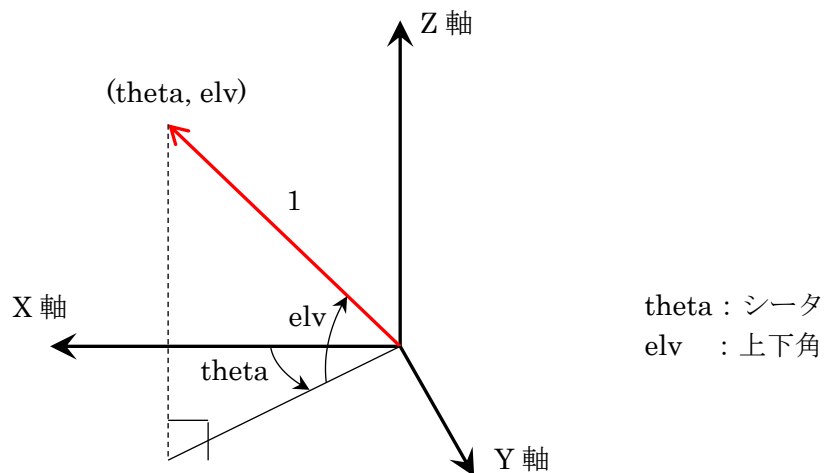


Figure 30 ソーラーセイル座標系の極座標表現

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。

$$\vec{T} = \vec{S} \times \vec{H}_T$$

ただし、

\vec{T} 、 \vec{S} : それぞれ T 軸上、および S 軸上のベクトル

\vec{H}_T : 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 ウィンドウ](#)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 β (ベータ) 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。

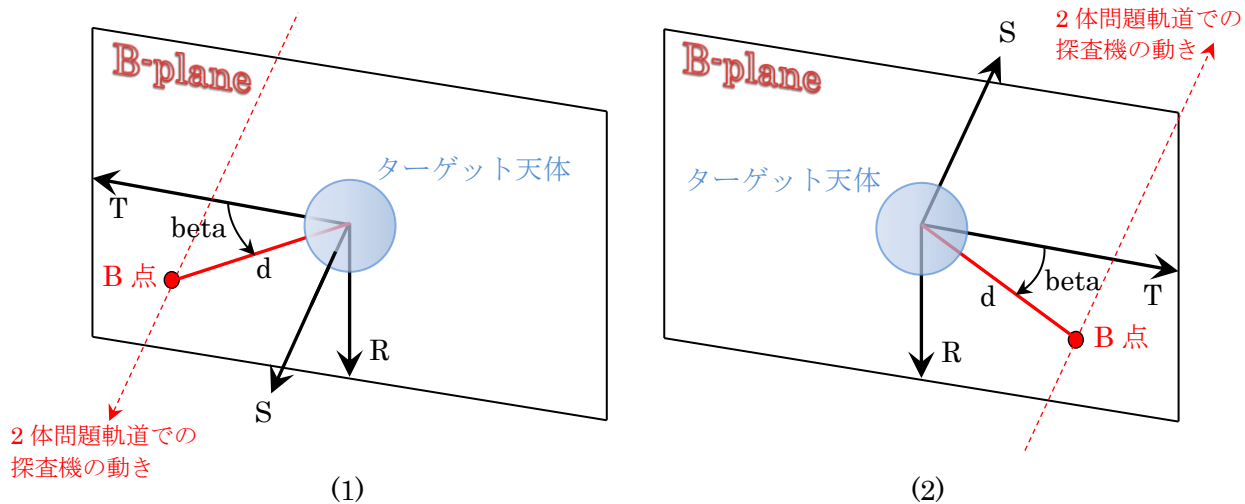


Figure 31 B プレーン座標系

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

利用者が使えるフォルダ

SSVG をインストールしたフォルダには利用者の使うことのできるフォルダが 3 個用意されています。「SSVG_data」、「SSVG_log」、そして「SSVG_plan」です。開発者はこれらのフォルダの使いかたを次のように想定しています。

- **SSVG_data** : SPK ファイルを格納します
インストール時にはこのフォルダには「2000002_Pallas_21.bsp」という名前の SPK ファイルが格納されています。このファイルはサンプルの飛行計画「sample_Pallas」が使用します。
インストールに際して利用者は「de430.bsp」という名前の SPK ファイルをダウンロードし、このフォルダに格納しなければなりません。[インストール／アンインストール](#)の節を参照してください。
利用者が入手した太陽系の小天体の SPK ファイルもこのフォルダに格納するものと想定しています。
- **SSVG_log** : SSVG がログファイルを格納します
- **SSVG_plan** : SSVG の飛行計画を格納します
インストール時にはこのフォルダには複数のサンプル飛行計画が格納されています。
利用者が作成した飛行計画もこのフォルダに格納するものと想定しています。

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

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

時刻について

SSVG の時刻はすべて TDB（太陽系力学時）です。

日付と時刻は内部処理ではユリウス日 (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 ファイルの作成期間内に限り探査機を飛行させることができます。

探査機の飛行経路の数値積分

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

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

(*) 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。

2 体問題の使用

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

- 3D 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）の表示
- 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）も 2 体問題で計算した軌道です。

推進装置とロケット方程式

SSVG で探査機に搭載されている 3 種類の推進装置はいずれも燃料や推進剤を消費しませんが、燃料や推進剤の搭載量とその消費は、実際の宇宙航行では最も注目を集める事柄のひとつです。軌道変更のデルタ V、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。

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

ここで、

- m_0 : 速度変化前の宇宙機の質量
- m_T : 速度変化後の宇宙機の質量
- ΔV : 速度変化量（速度変化の絶対値）
- I_{sp} : 比推力（推進装置の効率を表す数値）
- g : 地表での重力加速度
- $\exp()$: 指数関数

以下のふたつの表（Table 24 と Table 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。

Table 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。

Table 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、比推力を 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）

ΔV (メートル/秒)	軌道変更前の質量 m_0	推進剤の消費量 $m_0 - m_T$	軌道変更後の質量 m_T
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）

ΔV (メートル/秒)	軌道変更前の質量 m_0	推進剤の消費量 $m_0 - m_T$	軌道変更後の質量 m_T
500	1.017	0.017	1.000
1000	1.035	0.035	1.000
2000	1.070	0.070	1.000
4000	1.146	0.146	1.000
8000	1.312	0.312	1.000
16000	1.723	0.723	1.000
32000	2.967	1.967	1.000

小天体の SPK ファイルを入手する

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

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

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

HORIZONS システムに要求を出すには、次の準備が必要です。

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

(*) 探査機を飛行させる期間は、SPK ファイルを生成する期間に含まれている必要があります。また、現時点(2018 年 11 月)においては HORIZONS システムが SPK ファイルを生成できる期間は次の範囲に限られています。

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

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

ではやってみましょう。HORIZONS システムの「Asteroid & Comet SPK File Generation Request」（小惑星&彗星 SPK ファイル生成要求）のページを開いてください。

<<https://ssd.jpl.nasa.gov/x/spk.html>>

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

Advanced Horizons Asteroid & Comet SPK File Generation Request

Fill in all necessary data and submit to produce a small-body SPK file on your system.
For general information on this program, click [here](#).

For information about each input, click on its title -- a window will open.

Object	<input type="text"/>
SPK start date (TDB)	<input type="text"/>
SPK stop date (TDB)	<input type="text"/>
E-mail contact address	<input type="text"/>
SPK file format	<input type="radio"/> ASCII <input type="radio"/> Binary

After clicking "Make SPK", please wait until the integration is complete.
It could take a minute or so to generate and stream data, depending on system load.

Optional (below): define your own object by supplying heliocentric J2000 ecliptic osculating elements.

Epoch (Julian Day Number,)

Figure 32 小惑星&彗星 SPK ファイル生成要求のページ

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

Table 26 SPK ファイル生成要求の操作

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

(*) 現時点（2018 年 11 月）では HORIZONS システムが SPK ファイルを生成できる期間は次の範囲に限られています。

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

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

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

```
Object Name      = 2688 Halley
Primary SPKID    = 2002688
Primary designation= 1982 HG1
Aliases         = 1978 UO, 1978 TE9, 1978 SH6, 1955 QN1, J82H01G

Object Name      = Halley
Primary SPKID    = 1000036
Primary designation= 1P
Aliases         = 1982 U1, 1909 R1, 1835 P1, 1758 Y1, 1682 Q1, 1607 S1, 1531 P1, 1456 K1, 1378 S1,
1301 R1, 1222 R1, 1145 G1, 1066 G1, 989, 989 N1, 912, 912 J1, 837, 837 F1, 760, 760 K1, 684, 684 R1,
66, 607, 607 H1, 530, 530 Q1, 451, 451 L1, 374, 374 E1, 295, 295 J1, 218, 218 H1, 1986 III, 1982i,
1910 II, 1909c, 1835 III, 1759 I, 1682, 1607, 1531, 1456, 141, 141 F1, 1378, 1301, 1222, 1145, 1066,
66 B1, -11 Q1, -86 Q1, -163 U1, -86, -239 K1, -239, -163, -11, 4000001
```

Figure 33 小天体の候補の表示

この結果から、以下の内容を読み取ることができます。

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

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

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

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

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

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

ログファイル

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

推力方向モード

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

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

電気推進システムとソーラーセイルは低推力の推進装置ですから、十分な速度変化を得るためには通常長い期間を必要とします。長い運用期間において、少数のマヌーバで効果的に推力の方向を制御するために、SSVG では「推力方向モード」という概念を導入しました。例えば、電気推進エンジンの推力方向モードを L にすることにより、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 SSVG_plan フォルダに格納してあります。以下はその飛行計画のサンプルの解説です。

sample_Mars

火星探査機の飛行計画です。

地球近傍の宇宙基地 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。

sample_Mars_SS

ソーラーセイルを使った火星旅行の飛行計画です。

探査機は地球近傍の宇宙基地 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。

sample_Mercury

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。

sample_Pallas

小惑星パラスの探査ミッションの飛行計画です。

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

探査機は 2030 年 2 月 23 日に地球近傍の宇宙基地 **EarthL2** を出発し、2034 年 5 月 4 日に木星でスイングバイを行います。そして 2037 年 11 月 4 日によりやくパラスに到着します。

sample_Venus

JAXA の金星探査機「あかつき」の旅を再現した飛行計画です。

2010 年 5 月 20 日に地球近傍の宇宙基地 **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。

sample_Voyager2

NASA/JPL の惑星探査機「ボイジャー 2 号」の旅を再現した飛行計画です。

1977 年 8 月 20 日に地球近傍の宇宙基地 **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, 1998
2. Kluever, Craig A., Space Flight Dynamics, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2018
3. <https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons> アクセス日付 : 2018 年 6 月 15 日
4. <https://voyager.jpl.nasa.gov/> アクセス日付 : 2018 年 6 月 15 日
5. http://www.ieice-hbkb.org/files/11/11gun_02hen_04.pdf アクセス日付 : 2018 年 6 月 15 日
6. <http://www.ecei.tohoku.ac.jp/inuta/souzoukougaku/takasho/takasho01.htm> アクセス日付 : 2018 年 6 月 15 日
7. <http://astro-dic.jp/> アクセス日付 : 2018 年 6 月 18 日
8. <http://ccar.colorado.edu/imd/2015/documents/BPlaneHandout.pdf> アクセス日付 : 2018 年 6 月 20 日
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail アクセス日付 : 2018 年 6 月 22 日
10. <http://global.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/> アクセス日付 : 2018 年 11 月 12 日
11. <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi> アクセス日付 : 2018 年 11 月 15 日

以上