

# SSVG 宇宙探査の旅

## ユーザーズガイド

SSVG (Solar System Voyager) User's Guide

植月修志 (Shushi Uetsuki/whiskie14142)

2019/2/21

Rev. 1.3.0

SSVG Version 1.3 対応

## 目次

SSVG とは.....	1
最近の改善点 .....	1
バージョン 1.3.....	1
バージョン 1.2.....	2
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 .....	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.....	13
宇宙基地から離れる.....	15
探査機を増速させる.....	15
探査機を減速させる.....	16
探査機を横方向に加速させる .....	17
探査機を自由に飛行させる .....	18
火星を目指す.....	18
木星でスイングバイを試す.....	19
金星に向かう飛行計画.....	22
飛行計画の新規作成.....	22
START マヌーバ.....	23
FLYTO マヌーバ（その 1） .....	25
CP マヌーバ.....	25
FLYTO マヌーバ（その 2） .....	26
FLYTO マヌーバ（その 3） .....	26

小天体を目指す.....	26
小天体の例 .....	27
リファレンスマニュアル.....	29
基本用語.....	29
探査機.....	29
宇宙基地.....	29
マヌーバ .....	30
飛行計画 .....	31
ターゲット .....	32
化学推進エンジン .....	32
電気推進エンジン .....	32
ソーラーセイル .....	33
経路と軌道 .....	34
ウインドウとその操作.....	35
SSVG ウインドウ .....	35
3D 軌道ウインドウ .....	38
軌道表示ウインドウ.....	39
飛行レビューウインドウ .....	42
連続レビューウインドウ .....	43
マヌーバエディタ .....	46
飛行計画作成ウインドウ .....	48
FTA 設定ウインドウ.....	50
最適化アシスタント (START マヌーバ) .....	51
最適化アシスタント (CP マヌーバ) .....	54
座標系 .....	57
黄道座標系 .....	57
軌道ローカル座標系.....	57
ソーラーセイル座標系 .....	58
B プレーン座標系 .....	59
その他の情報 .....	60
利用者が使えるフォルダ .....	60
時刻について.....	61
探査機の飛行経路の数値積分 .....	61
2 体問題の使用.....	62
推進装置とロケット方程式.....	62
小天体の SPK ファイルを入手する .....	63
ログファイル.....	65
推力方向モード.....	65
他の言語への拡張 .....	66
飛行計画のサンプル.....	68
参考文献.....	69



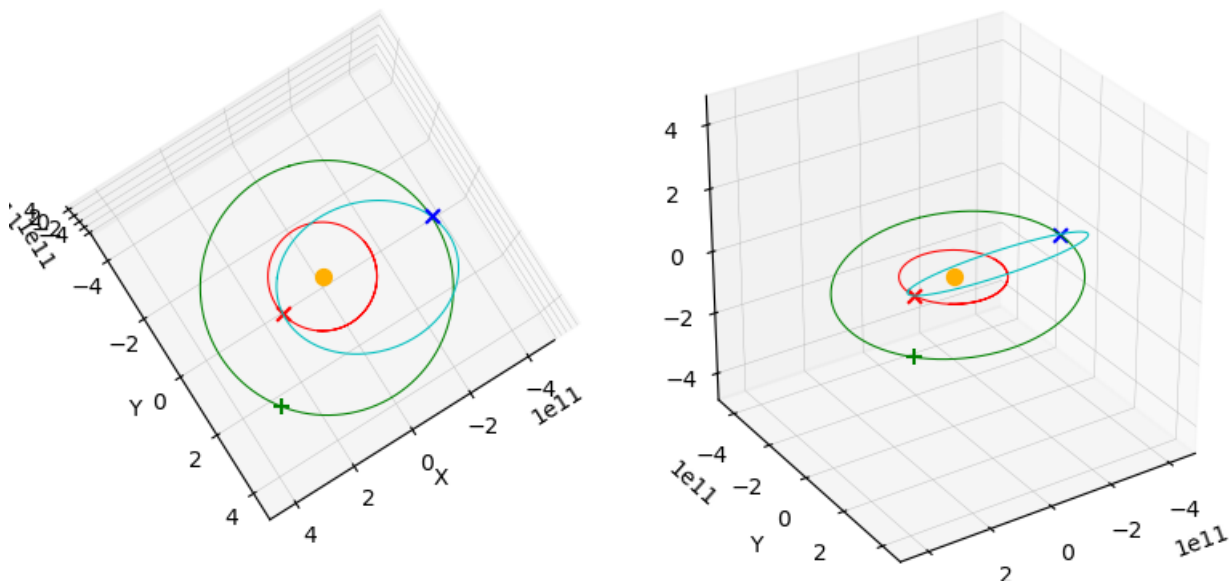
# SSVG とは

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

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

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

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



図－1 SSVG の表示例

## 最近の改善点

### バージョン 1.3

#### 日本語化（国際化）を行いました

これまで SSVG の画面表示はすべて英語でしたが、バージョン 1.3 では日本語の環境（OS）ではすべて日本語で表示されるようになりました。他の言語を使う環境（OS）ではこれまでどおり英語で表示されます。

それに加えて、他の言語への拡張が容易に（Python で記述されたプログラムを変更することなく）行えるようになりました。

#### ユーザーインターフェースを改善しました

「使う人にとって分かりやすいものにする」という視点で、ユーザーインターフェースを改善しました。みかけの違いはわずかですが、理解しやすく使いやすくなるよう手を加えています。

## バージョン 1.2

### タイプ 21 の SPK ファイルに対応しました

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

### 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。

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

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

### 実際の探査機の飛行を再現しよう

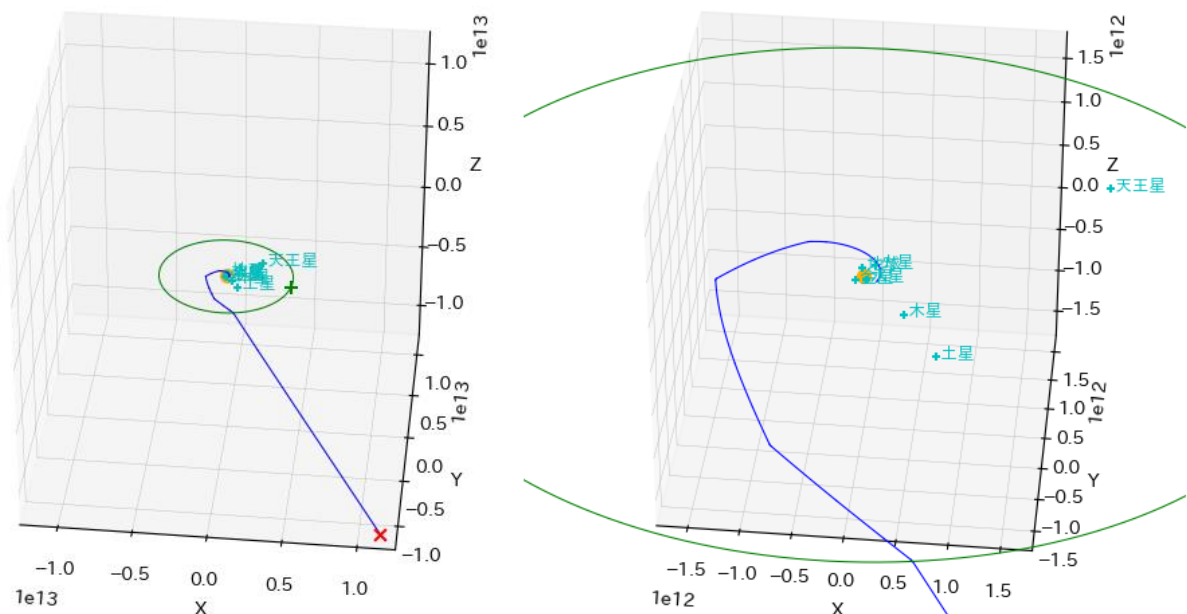
実際の惑星探査機の飛行について、こんな疑問を感じたことはありませんか？

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

- この探査機はなぜこの日に出発したのだろうか？
- 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。その飛行計画を作成すれば、これらの疑問に対する答えを自分で探すことができるでしょう。

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



図ー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、本物の宇宙探査機はそうではありません。実際に使うことのできる技術（ロケット推進の技術などのさまざまな技術）を考慮すると、実現可能な経路はごく限られたものになります。

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

### 電気推進を使おう

イオンエンジンなどの電気推進エンジンを実際に使ってみたい、と思いませんか？

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

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

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

### ソーラーセイルを使おう

太陽の光を帆に受けて静かに宇宙を漂うソーラーセイルの旅、すてきですね？

ソーラーセイルは宇宙機に取り付けられた巨大な鏡で、太陽光を反射させることで推力を得ます。ソーラーセイルは推進力を得るために推進剤を消費することはありませんし、エネルギーを消費することもあります。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/>](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であると好都合です。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、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>>

FreewareFiles：

<[https://www.freewarefiles.com/Solar-System-Voyager-SSVG-program\\_112419.html](https://www.freewarefiles.com/Solar-System-Voyager-SSVG-program_112419.html)>

Yahoo!ボックス：<<http://yahoo.jp/box/A0ffffK>>

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](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をマウスの右ボタンによるドラッグアンドドロップで Windows デスクトップにドロップしてください。サブメニューが表示されますから「ショートカットをここに作成」を選びます。



（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.bsp 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。

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

### 動作環境等

Python 3.7

ディスプレイは 1280×1024 以上の解像度のものを推奨します。

### 利用パッケージとそのバージョン

Numpy 1.15.1

Scipy 1.1.0

matplotlib 2.2.3

PyQt 5.9.2

jplephem 2.8

julian 0.14

pytwobodyorbit 1.0.0

spktype01 1.0.0

spktype21 0.1.0

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

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

### 日本語フォントのセットアップ

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

- フォントファイルを matplotlib のフォントフォルダにコピーします。
  - フォントファイルは GitHub からダウンロードした ZIP ファイルに含まれています。ファイル名は ipaexg.ttf で、ZIP ファイル内部のパスは font¥ipaexg00301 です。
  - matplotlib のフォントフォルダはお使いの Python ディストリビューションの内部にあります。筆者の環境では次の場所になります。

[Python ルート]¥Lib¥site-packages¥matplotlib¥mpl-data¥fonts¥ttf

- matplotlib のフォント管理ファイルを削除します。  
筆者の環境では次のファイルです。

[ユーザールート]¥.matplotlib¥fontList.json

## SPK ファイルの入手

GitHub のソースプログラムには、実行に必要なデータファイル（太陽および惑星の位置・速度を計算するための SPK ファイル）が含まれていません。次のアドレスから 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](http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/de430.bsp)>

## 旧バージョンからのアップグレードインストール

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

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

新しいバージョンの動作が満足できるものであれば、旧バージョンの SSVG は削除してかまいません。

## 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ィンドウが開きます。SSVG ウィンドウと 3D 軌道ウィンドウです。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 ウィンドウのメニューバーで、「ファイル」をクリックして、リストにある「開く (O)」を実行してください（次図）。SSVG をインストールしたフォルダの中にある SSVG\_plan というフォルダの内容が見え、そこには飛行計画のサンプルが複数格納されています。一番上にある sample\_Mars を開きましょう（環境によっては sample\_Mars.json と表示されます）。

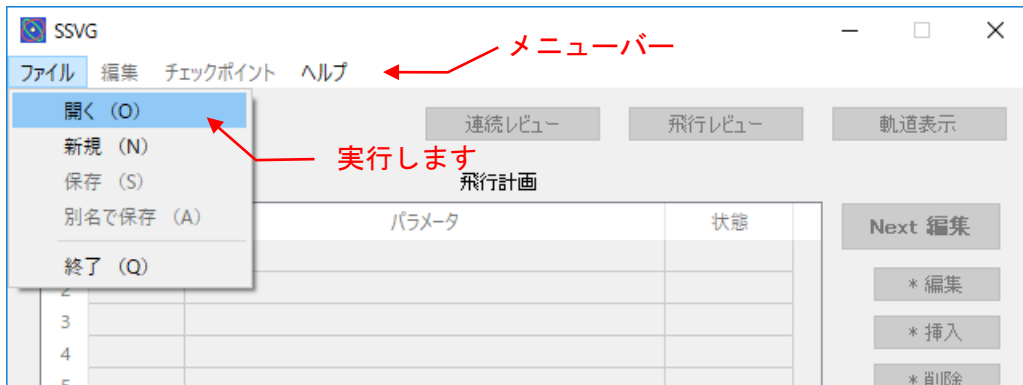


図-3 飛行計画のファイルを開く

sample\_Mars は地球の近くの宇宙空間にある「地球 L2」という宇宙基地を出発して火星に向かう探査機（名前は Marsexp）の飛行計画です。SSVG ウィ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。

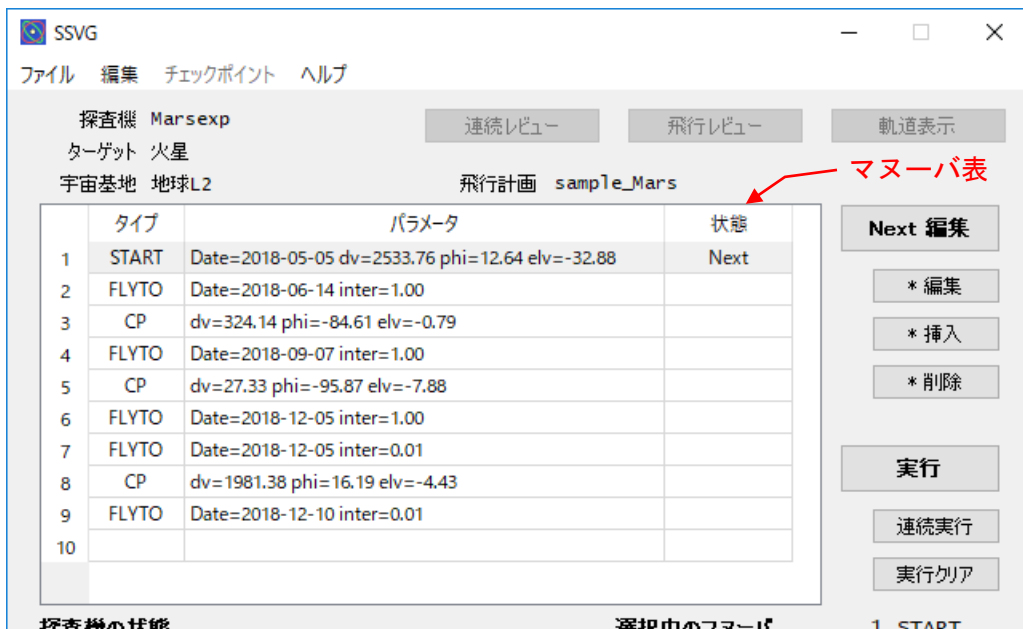


図-4 マヌーバ表

## 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【実行】ボタンを選んでクリックしてください。これで Next の表示があるマヌーバ（1 行目の START マヌーバ）が実行されます。START マヌーバの実行で探査機が飛行を開始し、SSVG ウィンドウの下に軌道表示ウィンドウが新しく開きます（次図）。



図-5 軌道表示ウインドウ

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

赤色の×：探査機の位置

赤線の楕円：探査機の軌道

緑色の+：ターゲット（ここでは火星）の位置

緑線の楕円：ターゲット（ここでは火星）の軌道

オレンジ色の小円盤：太陽の位置

水色の小さな+と文字：惑星の位置と名前（+ 水星、+ 金星など）

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

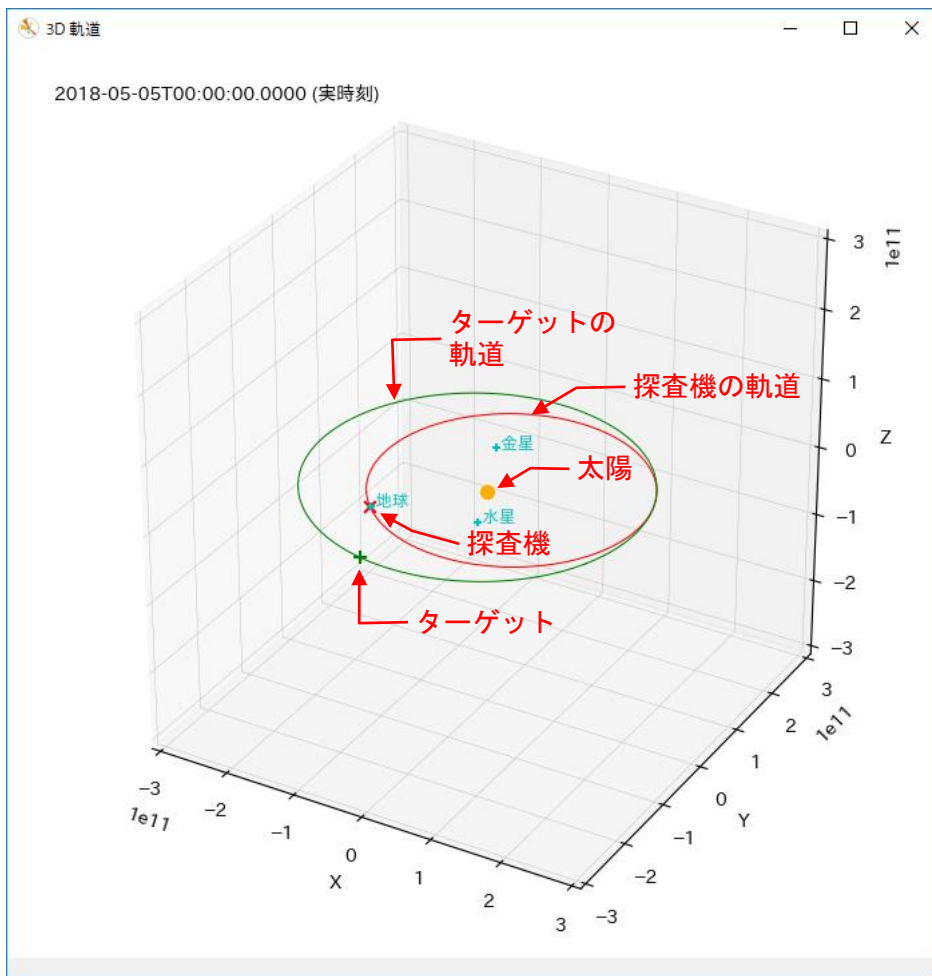


図-6 3D 軌道ウインドウの表示内容



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

3D 軌道ウインドウに表示される図の操作の一部は軌道表示ウインドウから行います。軌道表示ウインドウの「予測時刻操作」(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や他の惑星がどのような位置にあるかが予測され、3D 軌道ウインドウに表示されます。

The screenshot shows the '軌道表示' (Orbit Display) window with the following sections:

- 視野中央 (View Center):** Radio buttons for '太陽系重心' (selected), '探査機' (Probe), and 'ターゲット' (Target).
- 表示項目 (Display Items):** Checkboxes for '探査機の飛行経路' (Probe's flight path), '探査機の軌道' (Probe's orbit), 'ターゲットの軌道' (Target's orbit), and '惑星' (Planet).
- 一時設定 (One-time Settings):** Input fields for 'dv' (0.000), 'phi' (0.00), and 'elv' (0.00).
- 現在時刻 (Current Time):** 2018-05-05T00:00:00.0000
- 予測時刻 (Predicted Time):** 2018-05-05T00:00:00.0000
- 経過時間 (日) (Elapsed Time (days)):** 0.00000000, with a '設定' (Set) button.
- 予測時刻操作 (Predict Time Operation):** Navigation buttons: <<, <, >, >>. A red arrow points to the >> button. A '粗/細' (Coarse/Fine) toggle is set to '0'.
- ターゲットの相対位置 (Target's Relative Position):** Distance (km): 121044007.788, phi (度): -18.52, elv (度): 0.86.
- ターゲットの相対速度 (Target's Relative Velocity):** Velocity (m/s): 18900.321, phi (度): 129.48, elv (度): 0.53.
- ターゲットの視線速度 (Target's Line-of-sight Velocity):** Velocity (m/s): -16023.294.
- 受信しました: 軌道を SSVG から (Received: Orbit from SSVG)**

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

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

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

**FLYTO** : 飛行。指定した時刻まで探査機を飛行させます。

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

## 飛行結果を確認する

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

SSVG ウインドウの上端に並んでいるボタンの中央の [飛行レビュー] ボタンをクリックしてください。SSVG ウインドウの下に表示されていた軌道表示ウインドウが飛行レビューウインドウに入れ替わり、3D 軌道ウインドウの表示内容も変化します。飛行レビューウインドウの「レビュー操

作」(次図)にあるボタンを操作すると、飛行の経過を確認することができます。例えば[>]ボタンを連続してクリックすれば探査機(赤の×)が地球を離れてターゲット(火星:緑の+)に向かって飛行する様子が確認できるでしょう。



図-8 飛行レビューウィンドウ

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。[実行]ボタンを何回かクリックして、最後のマヌーバの次の行(10行目の空白行)にNextが表示される状態にしてください。

続いてSSVGウィンドウの上部にある[飛行レビュー]ボタンをクリックしてください。SSVGウィンドウの下が飛行レビューウィンドウになり、3D軌道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(火星)のごく近く(中心からの距離が9000キロメートルほどの場所)に到達していますので、状況を詳しく見るためにはターゲットの付近を拡大して3D軌道ウ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。

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

3D軌道ウ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軌道ウィンドウ](#)および[飛行レビューウィンドウ](#)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「ファイル」をクリックし、「新規 (N)」を実行してください。飛行計画作成ウィンドウが開きます。

図－9 飛行計画作成ウィンドウ

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

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

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

### 探査機を出発させる

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

**マヌーバエディタ**

出発時刻

ISO時刻: 2019-02-11T00:00:00.0000  
 ユリウス日: 2458525.50000000  
 継続期間(日): [ ] [編集]

マヌーバのタイプ: START  
 探査機を宇宙基地から出発させます

軌道表示

FTA

最適化

メッセージ  
 送信しました: パラメータを「軌道表示」へ

完了して実行 完了 キャンセル

パラメータ	値
dv : デルタVの絶対値 (m/s)	0.00
dvdpd : 加速率の絶対値 (m/s/日)	
phi : 角度ファイ (度)	0.00
elv : 上下角 (度)	0.00
aria : ソーラーセイルの面積 (平方 m)	
theta : 角度シータ (度)	
tvmode : 推力方向モード (L または E)	
inter : 積分間隔 (日)	

図-10 マヌーバエディタ

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

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

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

**マヌーバエディタ**

出発時刻

ISO時刻: 2019-02-11T00:00:00.0000  
 ユリウス日: 2458525.50000000  
 継続期間(日): [ ] [編集]

マヌーバのタイプ: START  
 探査機を宇宙基地から出発させます

軌道表示

FTA

最適化

メッセージ  
 送信しました: パラメータを「軌道表示」へ

完了して実行 完了 キャンセル

パラメータ	値
dv : デルタVの絶対値 (m/s)	2500
dvdpd : 加速率の絶対値 (m/s/日)	
phi : 角度ファイ (度)	0.00
elv : 上下角 (度)	0.00
aria : ソーラーセイルの面積 (平方 m)	
theta : 角度シータ (度)	
tvmode : 推力方向モード (L または E)	
inter : 積分間隔 (日)	

図-11 マヌーバエディタ (START マヌーバの編集)

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

これで探査機を出発させる START マヌーバの設定は終了です。マヌーバエディタの [完了して実行] ボタンをクリックすると、編集結果がマヌーバ表に保存されると同時にそのマヌーバが実行され、探査機は宇宙基地から出発します。SSVG ウ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、[Next 編集] ボタンをクリックしてください。マヌーバエディタが開きます。このケースでは「マヌーバのタイプ」には何も選択されていませんから、空白のドロップダウンリストをクリックして FLYTO を選択してください。継続期間（現在時刻から FLYTO マヌーバの終了時刻までの日数）がゼロの FLYTO マヌーバが用意されます。またマヌーバエディタの下には軌道表示ウ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。軌道表示ウィンドウの「予測時刻操作」にある [ >> ] ボタン（次の図の赤丸）を 5 回クリックしてください。1 回クリックするごとにマヌーバエディタの「終了時刻」グループの値が 10 日分変化します。同時に 3D 軌道ウィンドウに表示されている探査機やターゲットの位置などが 10 日後の位置に変化します。



図-12 FLYTO マヌーバの終了時刻を進める

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

## 探査機を増速させる

ここで CP マヌーバ（化学推進エンジンを働かせるマヌーバ）を使って速度変化が探査機の軌道をどのように変えるかを調べてみましょう。マヌーバ表で 3 行目の空白行に Next の表示があることを確認して SSVG ウィンドウの [Next 編集] ボタンをクリックしてください。マヌーバエディタが開

きますので、「マヌーバのタイプ」を CP にしてください（ドロップダウンリストをクリックして CP を選択します）。

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

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

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

パラメータ	
$dv$ : デルタVの絶対値 (m/s)	0.000
$dv_{pd}$ : 加速率の絶対値 (m/s/日)	
$\phi$ : 角度ファイ (度)	0.00
$elv$ : 上下角 (度)	0.00
$aria$ : ソーラーセイルの面積 (平方 m)	
$\theta$ : 角度シータ (度)	
$tv_{mode}$ : 推力方向モード (L または E)	
$inter$ : 積分間隔 (日)	

図-13 マヌーバエディタ (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、ふたつの角度 ( $\phi$  と  $elv$ ) の設定が必要になります。次の図を見てください。なお、 $dv$  は次の図の  $\Delta V$  (デルタ  $V$ ) の長さ（絶対値）に当たります。 $\Delta V$  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  $\phi$  と  $elv$  を用いて、速度変化の方向を表現します。

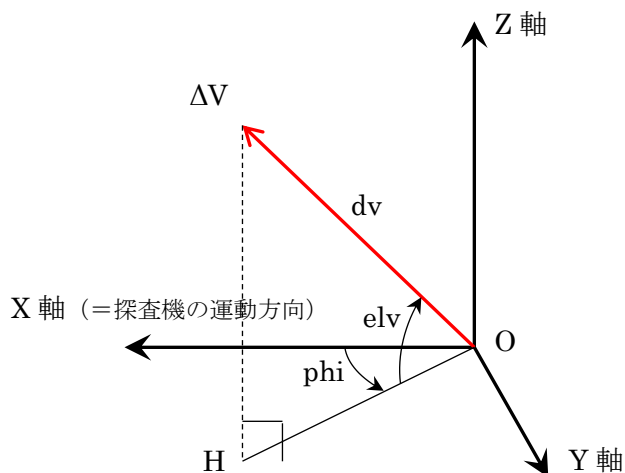


図-14 速度変化の絶対値と方向の表現

この図の座標の原点（点 O）は探査機です。X 軸は探査機の太陽に対する運動方向（速度ベクトルの向き）です。Y 軸は探査機の軌道面（探査機が太陽を公転している平面）内にあり、太陽に近づく方向を向いています。Z 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  $\Delta V$ （デルタ V）の先端から X-Y 平面に垂線を下ろしてその足を H とします。H と原点 O を結ぶ線分 OH を考えたとき、 $\phi$  は OH と X 軸のなす角を X 軸から Y 軸の方向に測った角度です。elv は OH と  $\Delta V$  のなす角で、 $\Delta V$  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。現在の探査機の手速度は X 軸の向きですから、減速するには X 軸に平行に、ただし逆向きの速度を与えればよいことになります。つまり、elv はゼロで、 $\phi$  は 180 度です。それぞれの値を設定し、dv をいろいろと変えて【軌道表示】ボタンをクリックして軌道の変化を確認しましょう。

## 探査機を横方向に加速させる

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

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

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

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

表－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
phi (角度ファイ)	0	180	90	270 または -90	自由な値	自由な値
elv (上下角)	0	0	0	0	90	-90

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

十分に試せたら、マヌーバエディタの【完了して実行】 ボタンをクリックして編集の終了とマヌーバの実行を行い、次の項に進んでください。

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

## 探査機を自由に飛行させる

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

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

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

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【\* 削除】 ボタンをクリックする
- マヌーバの挿入：マヌーバ表で挿入したい行を選択して【\* 挿入】 ボタンをクリックする

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

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

## 火星を目指す

地球のすぐ外側を公転する惑星、火星を目指して探査機を飛行させましょう。[飛行計画の新規作成](#) と [探査機を出発させる](#)、[宇宙基地から離れる](#) に従って探査機を新しく作り、宇宙基地から離れ



た場所まで探査機を飛行させてください。前項までの飛行計画が保存してあれば、それを読み込んでも結構です。

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

飛行計画を作成する上でのヒントをいくつか書いておきます。

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

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

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

## 木星でスイングバイを試す

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

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

(\*) 「出発時刻」のグループにある【編集】ボタンをクリックしてください。「日付と時刻の編集」のウインドウが表示されますから「ISO 時刻で編集」のフィールドにこの値を入力して【完了】ボタンをクリックします。
- FLYTO マヌーバを作成して実行します。継続期間を 428 日にします。  
(終了時刻は ISO 時刻で 2021-05-28T00:00:00、ユリウス日で 2459362.5 になります)

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

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

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

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

このウインドウでは、FTA のために以下の計算条件を指定します。

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

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

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

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

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



FTA 設定

FTAは探査機をターゲットに向かう軌道に乗せるデルタVを計算します。

飛行時間

☐ 軌道表示ウィンドウの経過時間を使用する

☒ ここで設定する

飛行時間<日> 150

目標位置の詳細設定

☐ ターゲットの中心

☒ B プレーン座標

オフセット距離<km> 5000000

beta<度> 0.0

☐ 軌道ローカル座標

オフセット距離<km> 0.0

phi<度> 0.0

elv<度> 0.0

実行 キャンセル

図-15 FTA 機能のパラメータの設定

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

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

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

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

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

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

表-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。しかしこの行の編集に FTA 機能を使うには、この行の右端の列に「Next」の表示がなければなりません。(SSVG では、この表示がある行のことを「Next 行」と呼びます)

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

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

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

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

FTA や B プレーン座標系について詳しく知りたい方は [FTA 設定ウィンドウ](#) 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 (6000 メートル/秒以下)
- 少数の小さな中間軌道修正だけで金星に到着

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

### 飛行計画の新規作成

SSVG ウィンドウのメニューの「ファイル」をクリックして「新規 (N)」を実行し、新しい飛行計画を作成してください。ターゲットとしては金星を選択します。次は探査機を出発させる宇宙基

地の選択ですが、地球近傍にある「地球 L1」と「地球 L2」のうち、どちらが好都合でしょうか。どちらも地球から150万キロメートルの宇宙空間にありますが、地球から見ると逆方向にあります。地球 L1 は太陽の方向にあり、地球 L2 は真逆の方向です。

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

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

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

## START マヌーバ

探査機を宇宙基地から出発させるマヌーバを作成しましょう。

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

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

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

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

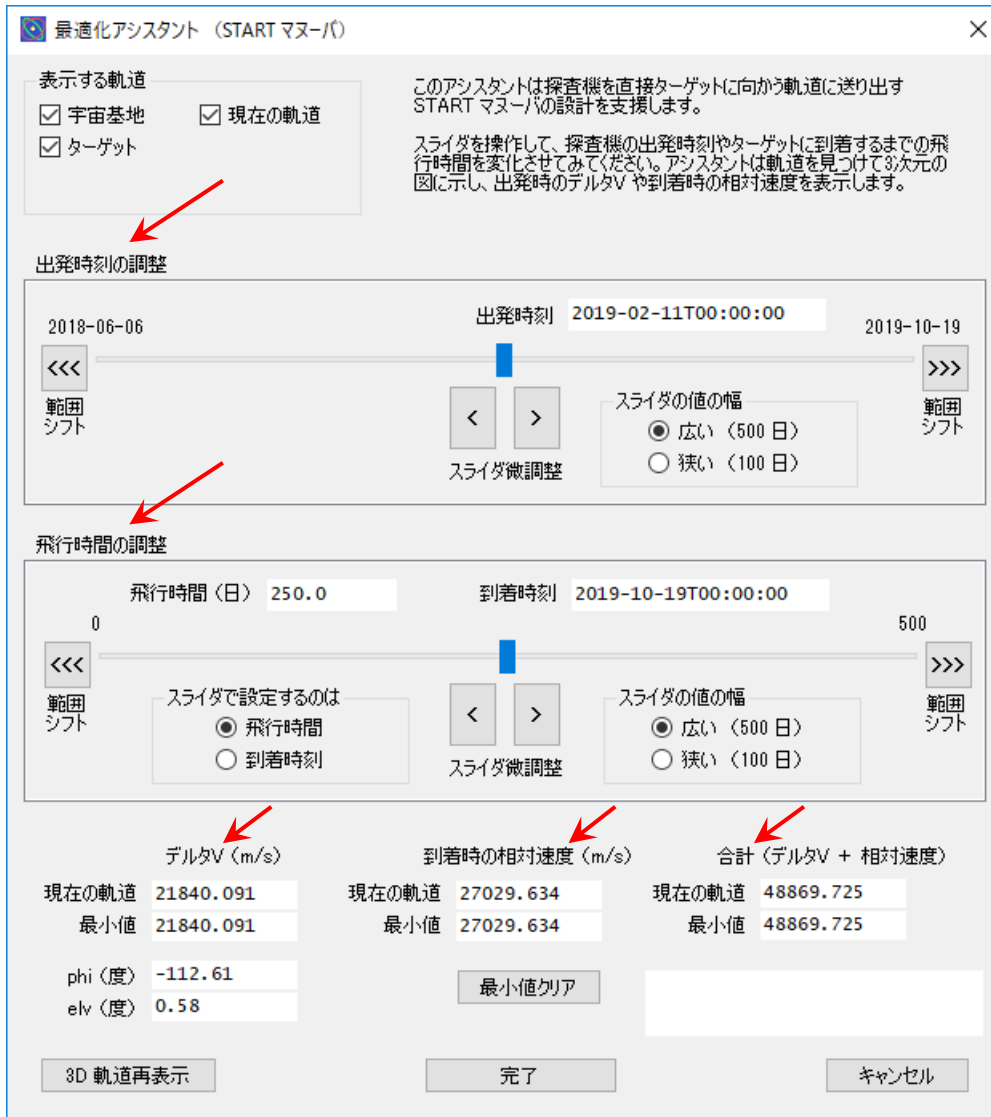


図-16 最適化アシスタント (START マヌーバ)

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

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

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

(\*) 3D 軌道ウインドウには以下のものが表示されます。

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

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

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

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

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

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

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

## FLYTO マヌーバ（その1）

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

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

## CP マヌーバ

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

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

軌道修正のデルタ  $V$ 、つまり速度変化量が大きくなりすぎないように、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、軌道表示ウィンドウの「予測時刻操作」のボタンを操作することで確認できます。接近の目標となる場所については、自由に決めることができます。

SSVG の FTA 機能を使用してマヌーバのパラメータを設定しましょう。軌道表示ウィンドウの「予測時刻操作」のボタンを操作して、探査機の予測位置が金星に最も接近する時刻を探してください。

(\*) 続いてマヌーバエディタの [FTA] ボタンをクリックしましょう。FTA 設定ウィンドウが開きますが、このとき「飛行時間（日）」のフィールドには適切な飛行時間が設定されているはずです。

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

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

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

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

## FLYTO マヌーバ (その 2)

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

## FLYTO マヌーバ (その 3)

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

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

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

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。

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

## 小天体を目指す

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

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

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



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

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

## 小天体の例

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

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

表-3 小天体の例

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

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

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

- (\*3) 木星軌道上のラグランジュ点 (L4 および L5。これらは木星軌道上にあり、太陽から見て木星の 60 度前方と 60 度後方に当たる) 付近には多数の小惑星があり、全体を総称して「トロヤ群小惑星」と呼ばれている。
- (\*4) 「はやぶさ」(2003 年打上げ、2010 年帰還) と「はやぶさ 2」(2014 年打上げ) は日本の探査機。「はやぶさ 2」は 2020 年にサンプルを持ち帰る予定。
- (\*5) OSIRIS-REx はアメリカの探査機。2016 年打上げ、2023 年にサンプルを持ち帰る予定。
- (\*6) Rosetta は ESA (ヨーロッパ宇宙機関) の探査機。2004 年打上げ。



# リファレンスマニュアル

## 基本用語

### 探査機

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

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

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

### 宇宙基地

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

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

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

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

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

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

表-4 宇宙基地

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

## マヌーバ

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

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

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

表-5 マヌーバのタイプ

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

## 飛行計画

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

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

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

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

## ターゲット

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

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

ターゲットとして選択できる天体は次の二種類です。

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

## 化学推進エンジン

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

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

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

化学推進エンジンのモデル化では、次のような単純化を行っています。

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

## 電気推進エンジン

SSVG の電気推進エンジンは、イオンエンジンやホールスラスト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小天体の実際の探査に利用されています。

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

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

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

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

電気推進エンジンのモデル化では、次のような単純化を行っています。

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

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

## ソーラーセイル

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

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

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

SSVG のソーラーセイルは次のような特徴を持っています。

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

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

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

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

(\*) 正確な値は  $\sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$  です。

## 経路と軌道

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

### 経路

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

### 軌道

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

## ウインドウとその操作

### SSVG ウインドウ

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

SSVG ウインドウには、以下のアイテムやグループがあります。

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

The screenshot shows the SSVG window with the following components and labels:

- メニューバー** (Menu Bar): Located at the top, containing 'ファイル' (File), '編集' (Edit), 'チェックポイント' (Checkpoints), and 'ヘルプ' (Help).
- 表示関連ボタン** (Display-related buttons): Includes '連続レビュー' (Continuous Review), '飛行レビュー' (Flight Review), and '軌道表示' (Orbit Display).
- マヌーバ表** (Maneuver Table): A table with columns 'タイプ' (Type), 'パラメータ' (Parameters), and '状態' (Status). It lists maneuvers from 1 to 10.
- 編集関連ボタン** (Edit-related buttons): Includes 'Next 編集' (Next Edit), '\* 編集' (Edit), '\* 挿入' (Insert), and '\* 削除' (Delete).
- 実行関連ボタン** (Execution-related buttons): Includes '実行' (Execute), '連続実行' (Continuous Execution), and '実行クリア' (Clear Execution).
- 探査機の状態** (Probe Status): A section on the bottom left showing various parameters like '最後に実行したマヌーバ' (Last executed maneuver), '現在時刻' (Current time), '太陽との距離' (Distance from the Sun), etc.
- 選択中のマヌーバ** (Selected Maneuver): A section on the bottom right showing details for the selected maneuver (3 CP), including '日付と時刻' (Date and time), 'パラメータ' (Parameters), and 'メッセージ' (Message).

タイプ	パラメータ	状態
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		

パラメータ	値
dv (m/s)	324.139
dvpd (m/s/日)	
phi (度)	-84.61
elv (度)	-0.79
aria (平方 m)	
theta (度)	
tvmode (L または E)	
inter (日)	

メッセージ  
実行しました: 行 1 の START  
送信しました: 軌道を「軌道表示」へ  
実行しました: 行 2 の FLYTO  
送信しました: 軌道を「軌道表示」へ

図-17 SSVG ウインドウ



表-6 SSVG ウィンドウのメニューバー

メニュー項目	小項目	機能
ファイル	開く (O)	ファイルから飛行計画を読み込みます。
	新規 (N)	新しい飛行計画を作成します。 <u>飛行計画作成ウィンドウ</u> を参照してください。
	保存 (S)	飛行計画を現在の飛行計画ファイルに保存します。
	別名で保存 (A)	飛行計画を新しいファイル名で保存します。
	終了 (Q)	SSVG を終了します。
編集	探査機 (P)	飛行計画の探査機の情報を編集します。 実行すると「探査機の編集」ウィンドウが開きますが、設定方法は <u>飛行計画作成ウィンドウ</u> を参照してください。
	ターゲット (T)	飛行計画のターゲットを編集します。 実行すると「ターゲットの選択」ウィンドウが開きますが、設定方法は <u>飛行計画作成ウィンドウ</u> を参照してください。
チェックポイント	作成 (C)	チェックポイントを作成します。(*1)
	復元 (R)	チェックポイントから飛行計画の実行状態を復元します。(*2)
ヘルプ	SSVG について (A)	SSVG についての情報を表示します。

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

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

## ボタン

表-7 SSVG ウィンドウのボタン

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

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



## マヌーバ表

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

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

マヌーバ表に対して行うことのできる操作は以下のとおりです。

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

## 探査機の状態

表－8 探査機の状態に表示される情報

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

## 選択中のマヌーバ

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

## その他の情報

SSVG ウィンドウの上端付近に以下の情報が表示されます。

- 探査機：探査機の名称
- ターゲット：ターゲットの名称
- 宇宙基地：宇宙基地の名称

- 飛行計画：現在の飛行計画ファイルの名称

## メッセージ

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

## 3D 軌道ウィンドウ

3D 軌道ウィンドウは探査機やターゲットの位置や軌道を 3 次元の図として表示するウィンドウで、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[軌道表示]ボタンのクリックなどの操作を行うと自動的に再表示されます。

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

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

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

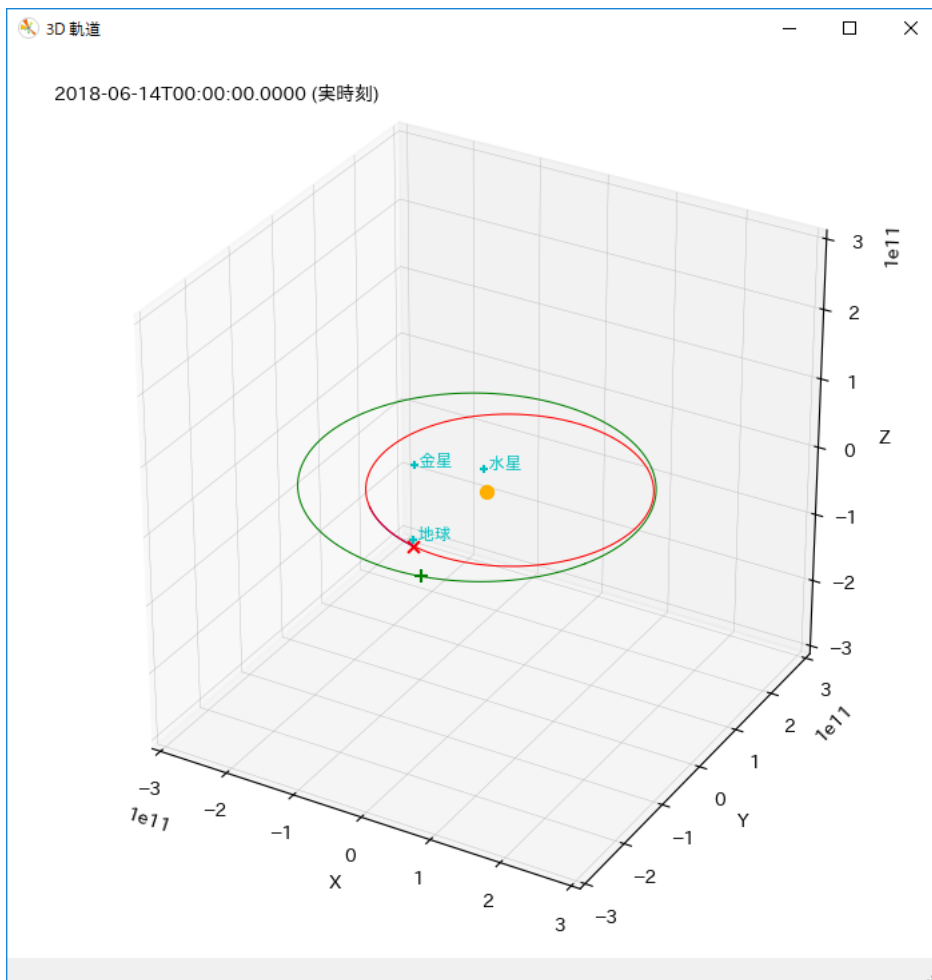


図-18 3D 軌道ウィンドウ

次の表は 3D 軌道ウインドウに表示されるすべてのアイテムとその説明です。

表－9 3D 軌道ウインドウに表示されるアイテム

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

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

表－10 3D 軌道ウインドウにおける図の操作

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

## 軌道表示ウインドウ

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

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

これらの情報に関係づけられる時刻は、ある指定された時刻です。この時刻は SSVG の現在時刻のこともありますし、過去または未来の時刻（これを「予測時刻」と呼びます）の場合もあります。

軌道表示ウインドウは予測時刻における探査機の位置を現在時刻の 2 体問題軌道から計算します。

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

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

軌道表示ウインドウは以下の場合に表示されます。

- 利用者がマヌーバを実行したとき
- 利用者が Next 行のマヌーバの編集を開始したとき (\*)
- 少なくとも一つのマヌーバが実行済みであって、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 [軌道表示] ボタンをクリックしたとき

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

図ー19 軌道表示ウインドウ

軌道表示ウインドウの上部には以下の 5 個のグループがあります。

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

表-11 軌道表示ウインドウの上部にあるグループ

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

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

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

表-12 軌道表示ウインドウの下部にあるグループ

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

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

## 飛行レビューウィンドウ

飛行レビューウィンドウは、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 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 軌道ウィンドウに、
  - 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)
  - ターゲットとその軌道
  - 惑星の位置と名称
- 飛行レビューウィンドウ自身に、
  - ターゲットの相対位置と相対速度（視線速度を含む）

(\*1) 電気推進エンジンがオンになっている場合、「EP(m)」という文字列が 3D 軌道ウ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 軌道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。

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

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



図-20 飛行レビューウィンドウ

飛行レビュー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。

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



表-13 飛行レビューウインドウの上部にあるグループ

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

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

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

## 連続レビューウインドウ

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

- 3D 軌道ウインドウに、
  - 探査機（現在のマヌーバの行番号とタイプが付記される）
  - FLYTO マヌーバに対しては、
    - 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
  - ターゲットとその軌道
  - 惑星の位置と名称
- 連続レビューウインドウ自身に、
  - ターゲットの相対位置と相対速度（視線速度を含む）

（\*1）電気推進エンジンがオンになっている場合、「EP (m)」という文字列が 3D 軌道ウインドウの探査機の右に表示



されます。ここで「EP(m)」の「m」は電気推進エンジンの推力方向モードの値（LまたはE）です。

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

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

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

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



図-21 連続レビューウインドウ

連続レビューウインドウの上部には以下の4つのグループがあります。

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

表-14 連続レビューウインドウの上部にあるグループ

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

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

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

## マヌーバエディタ

マヌーバエディタはマヌーバの編集を行うウインドウです。

マヌーバエディタは以下のいずれかの操作を行うと表示されます。

- SSVG ウィンドウの「Next 編集」ボタンをクリックする
- SSVG ウィンドウの「\* 編集」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】**マヌーバエディタは、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軌道表示ウィンドウが表示され、3D 軌道ウィンドウで 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。

マヌーバエディタ

日付と時刻

ISO時刻  
ユリウス日  
継続期間(日) 編集

マヌーバのタイプ  
CP  
化学推進エンジンにより  
探査機の軌道を変化させます 軌道表示

パラメータ

dv : デルタVの絶対値 (m/s)	27.330
dvpd : 加速率の絶対値 (m/s/日)	
phi : 角度ファイ (度)	-95.87
elv : 上下角 (度)	-7.88
aria : ソーラーセイルの面積 (平方 m)	
theta : 角度シータ (度)	
tvmode : 推力方向モード (L または E)	
inter : 積分間隔 (日)	

メッセージ  
送信しました: パラメータを「軌道表示」へ

完了して実行 完了 キャンセル

図-22 マヌーバエディタ

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

表-15 マヌーバエディタのグループ、表、ボタン

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

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

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

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

パラメータの表に設定する内容は次の表のとおりです。

表-16 マヌーバエディタのパラメータ

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

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

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

## 飛行計画作成ウインドウ

飛行計画作成ウインドウは、新しい飛行計画の情報を設定するウインドウです。

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

図-23 飛行計画作成ウインドウ

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

表-17 飛行計画作成ウインドウのグループと項目

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

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

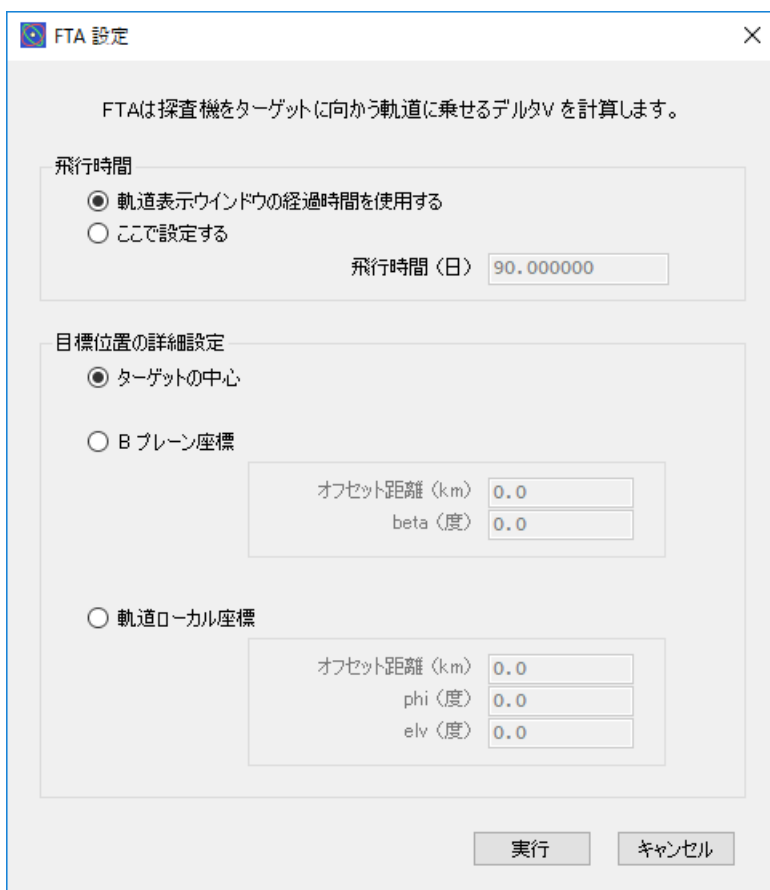
(\*2) 通常であればひとつの **SPK** ファイルはひとつの小天体のデータだけを含みますから、選択したい天体であることを **SPKID** で確認すれば充分です。しかしながら、複数の小天体のデータを含む **SPK** ファイルを入手することもできます。その場合は希望する天体の **SPKID** をドロップダウンリストで選択する必要があります。

## FTA 設定ウインドウ

FTA 設定ウインドウでは、SSVG の FTA 機能のパラメータを設定します。

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

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



FTA 設定

FTAは探査機をターゲットに向かう軌道に乗せるデルタVを計算します。

飛行時間

☒ 軌道表示ウインドウの経過時間を使用する  
☐ ここで設定する

飛行時間 (日) 90.000000

目標位置の詳細設定

☒ ターゲットの中心  
☐ B プレーン座標

オフセット距離 (km) 0.0  
beta (度) 0.0

☐ 軌道ローカル座標

オフセット距離 (km) 0.0  
phi (度) 0.0  
elv (度) 0.0

実行 キャンセル

図-24 FTA 設定ウインドウ

FTA 設定ウインドウには 2 個のグループと 2 個のボタンがあります。



表-18 FTA 設定ウインドウのグループと項目

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

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

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

## 最適化アシスタント (START マヌーバ)

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

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

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

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



表-20 出発時刻と飛行時間の調整

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

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

表-21 最適化アシスタント (START マヌーバ) の下部にあるグループとボタン

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

## 最適化アシスタント (CP マヌーバ)

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

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

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

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

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

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

です。別の意味で使う場合はそのことを明示します。

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

図-26 最適化アシスタント（CP マヌーバ）

このウインドウの上部には、オプションを指定するグループがひとつあります。

表-22 最適化アシスタント（CP マヌーバ）のオプション

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

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

表-23 マヌーバ時刻と飛行時間の調整

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

このウインドウの下部には 3 個のグループと複数のボタンがあります。

表-24 最適化アシスタント (CP マヌーバ) の下部にあるグループとボタン

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

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

## 座標系

### 黄道座標系

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

### 軌道ローカル座標系

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

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

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



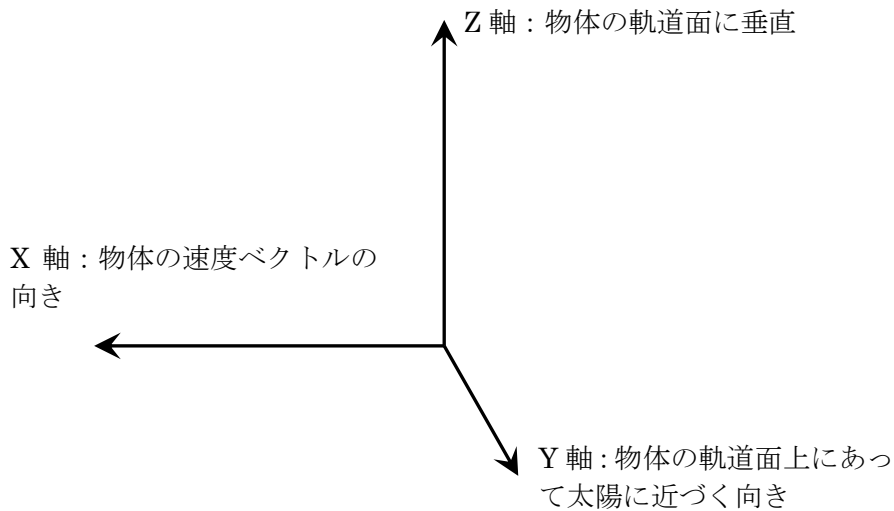


図-27 軌道ローカル座標系の定義

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

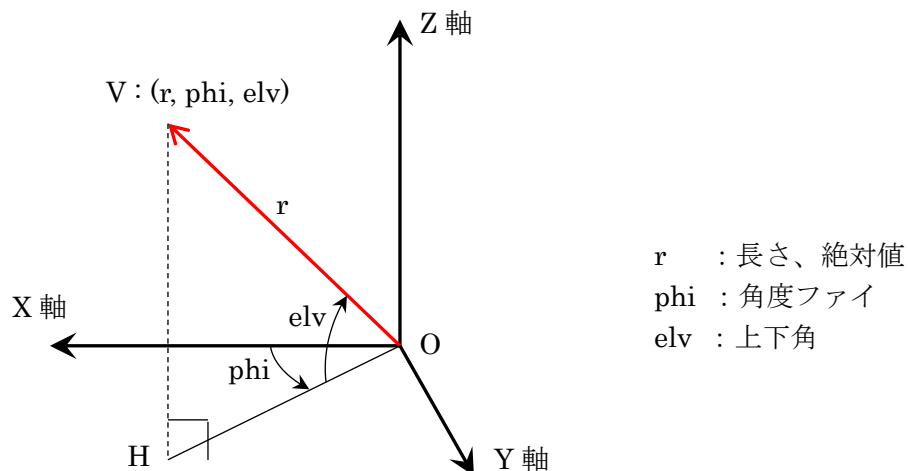


図-28 軌道ローカル座標系の極座標表現

## 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。

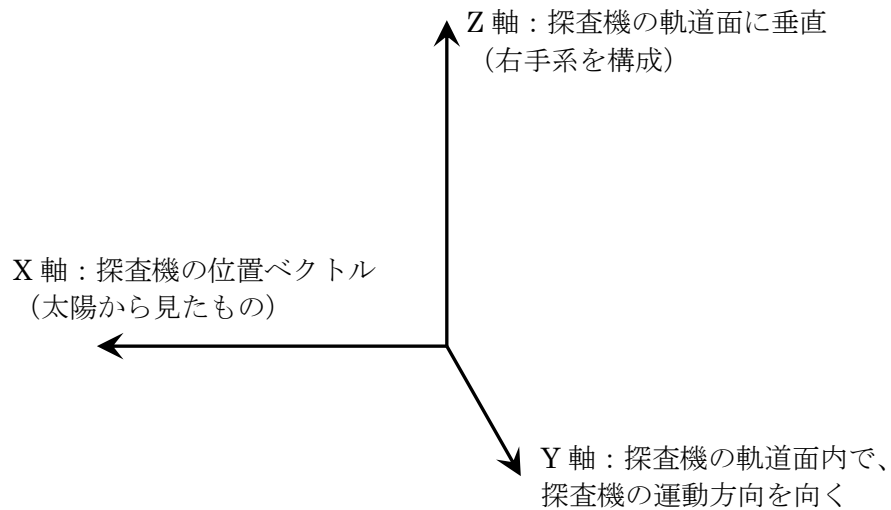


図-29 ソーラーセイル座標系の定義

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同等ですが、ここでは太陽から遠ざかる方向のものを定義に使用します。

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

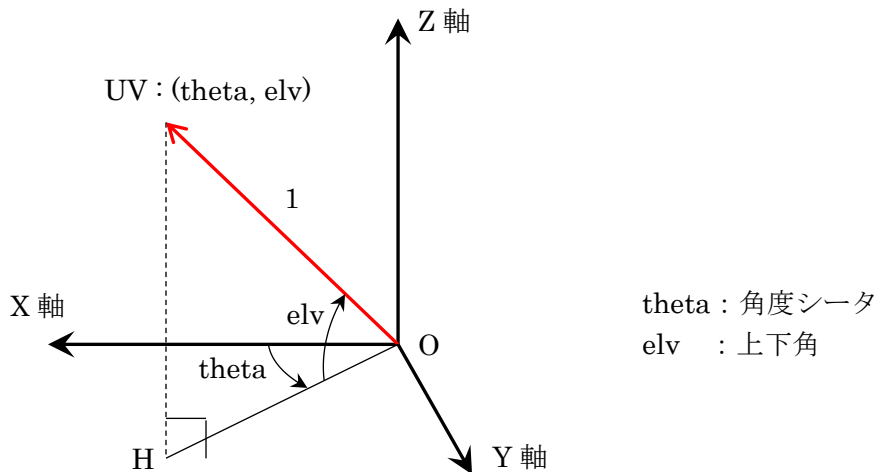


図-30 ソーラーセイル座標系の極座標表現

## 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と、その近傍を通り過ぎる探査機に対して定義されます。B プレーン座標系はターゲットに固定された直交座標系です。

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

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

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

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

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

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

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

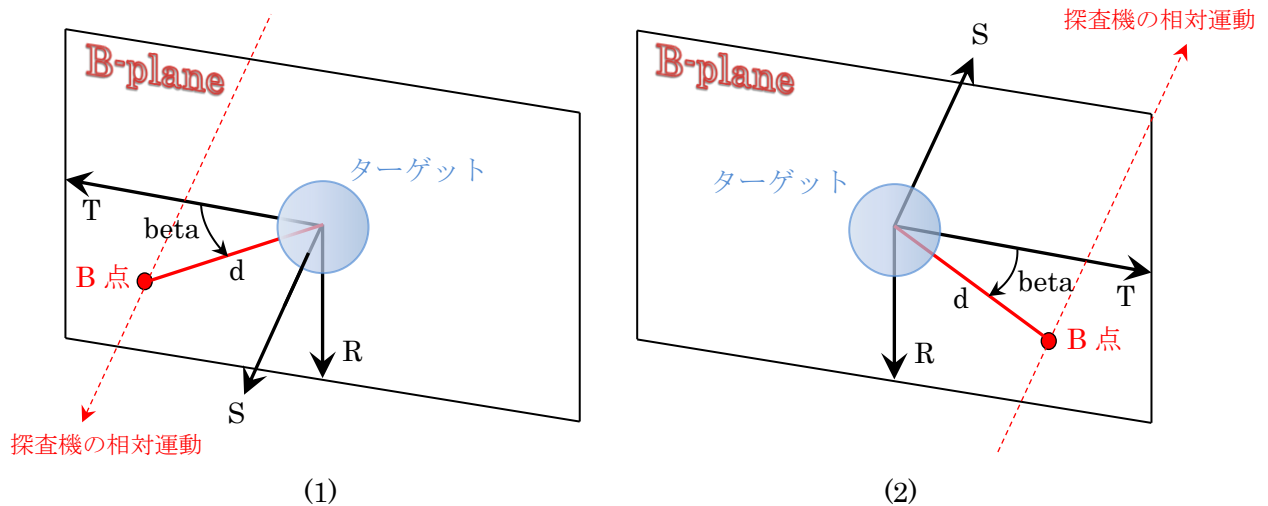


図-31 B プレーン座標系

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

## その他の情報

### 利用者が使えるフォルダ

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

- SSVG\_data : SPK ファイルを格納します  
インストール時にはこのフォルダには「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\_i18n : 国際化（多言語化）に使用するファイルが格納されています  
SSVG は日本語と英語で表示されますが、他の言語への拡張も可能です。他の言語への拡張については[他の言語への拡張](#)の項を参照してください。
- SSVG\_log : SSVG がログファイルを格納します
- SSVG\_plan : SSVG の飛行計画を格納します  
インストール時にはこのフォルダには複数のサンプル飛行計画が格納されています。  
利用者が作成した飛行計画もこのフォルダに格納するものと想定しています。

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

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

## 時刻について

SSVG の時刻はすべて TDB（太陽系力学時）です。

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

2020-01-01T06:00:00.000000 （ISO 時刻）

2458849.75000000 （ユリウス日）

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

- 開始 : 1549 年 12 月 31 日 0 時
- 終了 : 2650 年 1 月 25 日 0 時

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

## 探査機の飛行経路の数値積分

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

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

探査機の飛行経路の計算には、太陽系の小天体が探査機に及ぼす引力は使われないことに注意し

てください(地球の月は例外です)。これは比較的重い小天体(例えば準惑星であるケレスや冥王星)についても同様です。探査機が小天体に接近したとしても探査機に引力は働きませんし、探査機は小天体を周回する軌道に入ることもできません。

## 2 体問題の使用

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

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

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

## 推進装置とロケット方程式

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

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

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
- $\Delta V$  : 速度変化量(デルタ V の絶対値)
- $I_{sp}$  : 比推力(推進装置の効率を表す数値)
- $g$  : 地球の標準重力加速度
- $\exp()$  : 指数関数

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

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

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

表-25 ロケット方程式の計算結果（液体燃料ロケットエンジン  $I_{sp}=300$  秒）

$\Delta V$ (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

表-26 ロケット方程式の計算結果（イオンエンジン  $I_{sp}=3000$  秒）

$\Delta V$ (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的小天体(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およその期間を決める (\*)

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

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

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

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

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

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

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, )

図－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。

表－27 SPK ファイル生成要求の操作

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

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

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

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



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

```
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
```

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

## ログファイル

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

## 推力方向モード

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

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

電気推進システムとソーラーセイルは低推力の推進装置ですから、十分な速度変化を得るためには通常長い期間を必要とします。長い運用期間において、少数のマヌーバで効果的に推力の方向を制御するために、SSVG では「推力方向モード」という概念を導入しました。例えば、電気推進エンジンの推力方向モードを L にすることにより、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）

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

## 他の言語への拡張

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

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

### 必要なツール

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

### 作業手順（その 1）

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

(1) スペイン語用の SSVG 翻訳ファイル（ソース）を作成します。

- 日本語用の SSVG 翻訳ファイル（ssvg\_ja.ts）をコピーしてスペイン語用の SSVG 翻訳ファイル（ssvg\_es.ts）を作成します
- Qt Linguist を起動して ssvg\_es.ts を開き、Language を除く他のすべてのコンテキストについて、英文のソーステキストに対応するスペイン語を翻訳欄に記述してください。

ssvg\_es.ts を適当なエディタで開いて、XML を直接編集することもできます。

- **Language** コンテキストはひとつのソーステキストだけを含み、ソーステキストの内容は“en”ですが、これを限って“en”に翻訳してください。スペイン語の言語コードである“es”には翻訳しないでください。
- ssvg\_es.ts の編集が終了したなら、lrelease を実行して SSVG 翻訳ファイル（圧縮）を作成してください。Windows 環境でしたら、パスの通っているコマンドプロンプトで次のコマンドを実行します。

```
> lrelease -compress ssvg_es.ts
```

ファイル ssvg\_es.qm が作成されます。これがスペイン語用の SSVG 翻訳ファイル（圧縮）です。

- (2) スペイン語用の Qt 翻訳ファイル（圧縮）を作業中のフォルダにコピーします。  
必要なファイルは qt\_es.qm と qtbase\_es.qm のふたつです。筆者の環境では、[Python ルート]¥Library¥translations にありました。お使いの Qt の環境で探してみてください。

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

## 作業手順（その2）

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

- (3) フォントファイルを入手してください。True Type フォントを推奨します。このとき、フォントの名称も必要です。ここではフォントファイルを hangul.ttf、フォントの名称を HangulFont とします。

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

- (5) SSVG 翻訳ファイルに追加の修正を行ってください。  
作業手順（その1）の(1)で作成した SSVG 翻訳ファイル（ソース）（この例ではファイル名は ssvg\_ko.ts）を開き、Language コンテキストのソーステキスト“en”を、作業中の言語の言語コード（この例では“ko”）に翻訳するよう修正を行ってください。ssvg\_ko.ts の修正が終了したならば、lrelease をもう一度実行して SSVG 翻訳ファイル（圧縮）を再度作成してください。

- (6) フォントの名称の登録を行ってください。  
作業中のフォルダにある JSON ファイル（3DOrbitFont.json）をテキストエディタで開き、言語コードとフォントの名称を結び付ける行を追加してください。  
この例でしたら、次のように修正します。

修正前：

```
{  
  "en": "sans-serif",  
  "jp": "IPAexGothic"  
}
```

修正後：

```
{  
  "en": "sans-serif",  
  "ko": "HangulFont",  
  "jp": "IPAexGothic"  
}
```

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

## 飛行計画のサンプル

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

### sample\_Mars

火星探査機の飛行計画です。

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

### sample\_Mars\_SS

ソーラーセイルを使った火星旅行の飛行計画です。

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

### sample\_Mercury

水星探査機の飛行計画です。

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

### sample\_Pallas

小惑星パラスの探査ミッションの飛行計画です。

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

探査機は 2030 年 2 月 23 日に地球近傍の宇宙基地「地球 L2」を出発し、2034 年 5 月 4 日に木星でスイングバイを行います。そして 2037 年 11 月 4 日によ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「地球 L2」を出発し、200 日の旅の後、同じ年の 12 月 6 日に金星に到着します。金星近傍で化学推進エンジンを使用して相対速度を小さくし、金星を周回する衛星軌道に入ります。なお、この飛行計画は「あかつき」の飛行を正確に再現したものではありません。

### **sample\_Voyager2**

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

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

## **参考文献**

1. 室津義定, 宇宙航行力学, 宇宙工学の基礎 I, 共立出版株式会社, 1998
2. Kluever, Craig A., Space Flight Dynamics, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2018
3. <https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons> アクセス日付: 2018 年 6 月 15 日
4. <https://voyager.jpl.nasa.gov/> アクセス日付: 2018 年 6 月 15 日
5. [http://www.ieice-hbkb.org/files/11/11gun\\_02hen\\_04.pdf](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](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail) アクセス日付: 2018 年 6 月 22 日
10. <http://global.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/> アクセス日付: 2018 年 11 月 12 日
11. <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi> アクセス日付: 2018 年 11 月 15 日
12. <http://www.jaxa.jp/> アクセス日付: 2019 年 2 月 10 日
13. <https://www.nasa.gov/> アクセス日付: 2019 年 2 月 10 日
14. <https://www.esa.int/ESA> アクセス日付: 2019 年 2 月 10 日
15. <https://www.nao.ac.jp/> アクセス日付: 2019 年 2 月 10 日
16. <https://doc.qt.io/qt-5/reference-overview.html> アクセス日付: 2019 年 2 月 10 日

以上