

# 現地レポート／ 山口 智宏 (物理科学研究科 宇宙科学専攻)

派遣先：ドイツ

派遣先機関名：European Space Agency / European Space Operations Centre

派遣期間：2010年7月13日～2011年2月25日

## 2010年8月17日報告分

### 授業・研究の進捗状況

大きな問題も無く、ほぼ順調に研究が進んでいる。日本ともテレビ会議システムを用いて、報告やディスカッションを行うことができている。派遣先では受け入れ教官だけでなく、他のスタッフとも一緒に研究を行うことができている。具体的には下記の3項目に関する研究を行った。

#### 1. ソーラーセイル実証機 IKAROS に関するソーラーセイル加速度のモデル化

IKAROS のトラッキングデータは、問題なく取得できている。そのデータを解析し、現在は RARR トラッキングデータを用いてソーラーセイル加速度のモデル化を行っている。この結果は、9月末の IAC において発表する予定である。Delta-DOR のデータも取得しているが、まだ私が利用できる状態にはなっていない。Delta-DOR を用いた解析は今秋以降に行う予定である。

#### 2. 水星探査計画 Bepi Colombo の水星重力アシストにおける軌道修正マヌーバ解析

Bepi Colombo のノミナルの軌道計画はほぼ完成しているが、実運用時には必ず軌道にずれが生じる。そのずれを修正するマヌーバの解析は引き続き行われている。特に重力アシスト近傍における軌道修正・誘導は重要である。本件では、水星重力アシストにおける修正マヌーバを、太陽角制約を考慮しつつ評価した。

#### 3. 火星大気サンプルリターンのためのエアロキャプチャーに関する検討

ESA の次期火星探査の候補となっている火星大気サンプルリターンに関して、エアロキャプチャーに関する軌道最適化を行った。これによって、火星における Entry Flight Path Angle (EFPA) の制約などを求めた。さらに、火星大気通過中に簡単な空力制御を考慮することによって、EFPA の制約を緩和できることを定量的に評価した。

どの項目も引き続き検討していく予定である。

これらの研究課題は、宇宙機の開発において、それぞれ異なったフェーズに属している。そのため軌道工学という観点から、宇宙機ミッションがどのように構築されていき、どのように次の計画に活かされていくのかを、理解する良い機会となっている。

### 生活関連状況

ドイツには、2010年4月-5月に一度滞在しており、住居などは借りたままだだったので、問題なく生活できている。ドイツ語は、まだしゃべることができないが、秋からは少し習うことを考えている。皆英語で会話できるのだが、雑談などではドイツ語になってしまうので、話についていけないことが多い。ESOC の食堂は、安くておいしいため、食事は非常に満足している。週末になると、その食堂が開いている平日が恋しくなるほどである。

## その他報告すべき事項

特に無し。

## 2010年9月15日報告分

### 授業・研究の進捗状況

前回の報告と同様、下記の3項目に関する研究を進めた。

1. ソーラーセイル実証機 IKAROS に関するソーラーセイル加速度のモデル化  
今月も新しいデータが IKAROS から送られてきているので、それらとこれまでのデータを足しあわせて、ソーラーセイル加速度を評価した。ただ、新たに追加したデータがこれまでのデータと整合しない。これは、地球-太陽-探査機間の幾何学的関係により、姿勢情報の誤差が大きくなっているからと考えている。今後は姿勢情報の取り扱いが課題である。これらのデータ処理にそれなりの計算機資源が必要になったが、日本の研究室の計算機を用いることができた。渡欧前に、外部から日本の研究室にアクセスできるように申請しておいたのは正解であった。  
今月も日本とのテレビ会議を行い、ディスカッションを行った。また、9月末の学会発表（IAC）のために結果をまとめた。
2. 水星探査計画 Bepi Colombo の水星重力アシストにおける軌道修正マヌーバ解析  
先月に引き続き、修正マヌーバの評価を行った。今回は特に、修正マヌーバによる残りの軌道に対する影響を評価した。重力アシスト時の修正マヌーバによって、ノミナルの軌道からズレが発生する。そのズレをキャンセルするために必要な Delta V を、マヌーバ後の軌道を再最適化することで評価した。解析だけではなく、いろいろな打ち合わせにも参加した。特に、実際にものをつくる企業に関するやりとりは興味深かった。
3. 火星大気サンプルリターンのための軌道設計に関する検討  
先月はエアロキャプチャーに集中して解析を行っていたが、今月はエアロブレーキ、大気抵抗を利用したフライバイなどに関しても検討を進めた  
8月末からは、火星大気サンプルリターンミッションの概念設計（pre-phase A study）が始まっている。ESAでは、各分野から専門家を集め（20名程度）、1ヶ月間集中して、ミッションを検討する。軌道設計の観点からどのような検討が必要なのか、どのような情報をサブシステムに提供する必要があるのかなどを勉強できている。また、全体を指揮するチームリーダーの重要性を感じる事ができた。

### 生活関連状況

今年の日本の非常に暑い夏に対し、今年のドイツの夏は雨が多く、肌寒い日が続いた。ニュースによると、観測史上最も雨が降った8月だったとのこと。昼と夜との気温差が非常に大きく、オフィスには、常に上着を持っていった。私は特に体調を崩すことはなかったが、ルームメイトが風邪をひいた。薄着で寝ていたためと思われる。

8月末に ESOC のマラソン大会があった。折角の機会なので、参加した。後日、当然のように筋肉痛になったが、かなり楽しめた。私の順位はほぼ真ん中だったが、受入教官が2位になっていて驚いた。

9月からドイツ語を習い始めた。授業はもちろん日本語ではなく英語で行われ、最初は少し戸惑ったが、次第に慣れた。なかなか区別できない発音があり、前途多難だが、良い気分転換になっている。

## その他報告すべき事項

これ以上円高にはならないだろうと思ひ、渡欧前に生活資金を、すべてユーロに換金しておいた。思惑外れ、最近はさらに円が高くなっているのでは、少し後悔している。

## 2010年10月14日報告分

### 授業・研究の進捗状況

9月末に開催された第61回国際宇宙会議（International Astronautical Congress, IAC）プラハ大会に参加し、多くの研究者、企業の方の議論をすることができた。また、各国の宇宙開発の概要、およびプロジェクトの進捗状況を知ることができた。特にアメリカの宇宙開発方針が各国に与える影響（主にISS関連）は甚大であることを、再認識することができた。また、中国・インドの勢いも同時に感じた。トップダウンの宇宙政策がうまく機能しているためと思われる。国際会議参加以外は前回の報告と同様、下記の3項目に関する研究を進めた。

1. ソーラーセイル実証機 IKAROS に関するソーラーセイル加速度のモデル化  
順調に惑星間航行を続ける IKAROS のトラッキングデータを用いて、ソーラーセイル加速度のモデル化を行っている。この内容を IAC で発表し、いくつかの参考になる意見を得ることができた。それらの意見をフィードバックし、今後の研究を進めていくつもりである。
2. 水星探査計画 Bepi Colombo の水星重力アシストにおける軌道修正マヌーバ解析  
今月からは、バックアップの軌道計画に関する navigation analysis を行っている。地球出発から水星周回軌道投入まで全行程に関する軌道決定精度解析、および修正マヌーバ解析を行っている。実ミッションにおける様々な制約を考慮しつつ、修正マヌーバを見積もり、ノミナルミッションの値と比較している。ESOC がメーカーに発注したソフトウェアを用いて解析しているため、受け入れ教官のみならず、その開発メーカーの方ともディスカッションを行っている。
3. 火星大気サンプルリターンのための軌道設計に関する検討  
8月末から続いていた、火星大気サンプルリターンミッションの概念設計（pre-phase A study）が終了した。最終的にまとまったミッションには新規開発要素が多く、すぐに次のフェーズに進むことができるとは思えないが、どの技術が不足しているかを認識することができたと思う。私は主に、大気サンプリングフェーズにおける軌道最適化、および軌道修正マヌーバの見積もりを行った。火星大気突入時の軌道決定誤差、大気密度誤差を考慮し、その後の地球帰還シーケンスを再最適化し、ノミナルとの違いを求めることで、それらが必要燃料への影響を求めた。

### 生活関連状況

昨年 JAXA に来ていたオランダの学生と、ESOC で再会した。私が今所属している部署で1年間働くのだそうだ。同じ分野だったので、学会などでは会うとは思っていたが、このような再会は意外だった。秋になり、これまで長いと感じていた日照時間が一気に短くなってきた。朝の冷え込みが予想以上に厳しいが、昼間は半袖でも問題ないほど暖かい。油断をするとすぐに体調を崩しそうだ。

### その他報告すべき事項

特になし。

## 2010年11月17日報告分

### 授業・研究の進捗状況

下記の3項目に関する研究を進めた。

1. ソーラーセイル実証機 IKAROS に関するソーラーセイル加速度のモデル化  
新しいデータを用い、推定結果を更新、比較しつつ、推定した軌道精度の評価を行った。推定アークを分割し、オーバーラップさせた部分の軌道のずれを求め、より現実的な精度をもとめた。
2. 水星探査計画 Bepi Colombo のバックアップ軌道計画における修正マヌーバ解析  
先月から引き続き、バックアップの軌道計画に関する navigation analysis を行っている。今月は学術的な検討要素は少なく、ESOC が使っているソフトウェアの「くせ」をつかむために大半の時間を費やした。
3. 火星大気サンプルリターンのための軌道設計に関する検討  
全体で行う概念設計は終了した後、追加の軌道解析を行った。ミッション要求に対して、現在の軌道計画における火星サンプリングフェーズの時期が良くないことが問題となっており、それを解決するための軌道計画を検討した。地球、金星、火星スイングバイを利用する様々なパターンを検討したが、既存の軌道計画より良いものは見つからなかった。

### 生活関連状況

初めてサマータイムの切り替わりに遭遇した。もっと大々的にアナウンスがあるのかと思っていたのだが、何のアナウンスもなく切り替わった。ただ、日本とのテレビ会議の時間を間違えそうになった。

日が昇っている時間が非常に短くなってきた。時刻が1時間ずれたので、なおさら早く日が暮れる気がする。また、先月と比べ天気が悪く、自転車で通うのが億劫になってきた。気温の上下が激しく、2日間で10°C程度変化することがよくある。

### その他報告すべき事項

特になし。

## 2010年12月16日報告分

### 授業・研究の進捗状況

下記の3項目に関する研究を進めた。

1. 水星探査計画 Bepi Colombo のバックアップ軌道計画における修正マヌーバ解析  
引き続き、バックアップの軌道計画に関する航法・誘導解析を行っている。解析を進めている途中で、太陽角の制約条件を変更することになったため、一度やり直している。宇宙機の太陽角の制約条件を厳しくしたため、電気推進運用の時間が長くなり、軌道修正マヌーバに必要な燃料が少し大きくなった。予定されているマージン内であるため、大きな問題にはなっていない。
2. 彗星・惑星間ダストサンプルリターンのための軌道解析  
このダストサンプルリターン計画は、Max Planck Institute for Nuclear Physics (MPIK) の惑星間ダストを研究しているグループが、次期 Cosmic Vision へ提案しているミッションである。ターゲットは、彗星探査機ロゼッタと同じ 67P/CG である。先月から、12月頭の締め切りを目指し、解析を進めていた。2020-2022年の打ち

上げウィンドウ、地球出発-彗星フライバイ-地球リエントリのシーケンスで、必要燃料が最小となる軌道を求めた。検討中問題になったのは、対象の彗星が2018年に木星に接近し、軌道が変化することである。概念設計段階における軌道設計では、通常、2体問題で軌道を計算する。しかしながら、今回は彗星の軌道要素エポックから、彗星フライバイの時刻の間で惑星に接近するため、惑星重力による軌道変化を考慮した軌道設計が必要であった。最終的には、往復4年の軌道を設計し、MPIKの科学者に報告した。

また、2020年代後半の打ち上げウィンドウ、他の彗星へのサンプルリターンの可能性についても解析を行い、報告した。

### 3. 小惑星探査機はやぶさの光学観測によるリエントリ解析

地上望遠鏡による光学観測を用いた「はやぶさ」リエントリの軌道決定解析を行った。通常宇宙機の航法・誘導は電波計測（レンジ、ドップラー観測）を用いて行うが、宇宙機との通信ができなくなった場合、この情報を得ることができなくなる。地上望遠鏡による光学観測は、宇宙機側に能動的な行動を要求しないため、宇宙機に不具合が起きた際のバックアップとなり得る。2010年6月の「はやぶさ」リエントリでは、すばる望遠鏡など、いくつかの地上望遠鏡が「はやぶさ」の光学観測を行っている。今回はそのデータを用いて、電波計測による軌道決定と光学観測情報を用いた軌道決定との結果を、B-plane上の誤差楕円で評価し、比較した。また、解析に不具合が残っているので、今後修正していく予定である。

## 生活関連状況

一日の最高気温が氷点下の日がしばしばあり、非常に寒い日が続くが、大きく体調を崩すことなく活動できている。冬至が近づいており、日照時間が短い。さらに雪の日が多く、ほぼ一日中空は雲に覆われており、週に数時間しか日光が降り注がない。ただ12月に入ると、町中がクリスマスモードになり、あらゆるところがライトアップされている。曇天の空とデコレーションが、対照的でとてもきれいである。

12月初旬の週末、オランダへ旅行した。こちらで再会したオランダ人の同僚に、アムステルダムとデルフトを案内してもらった。観光はもちろん楽しかったのだが、同僚が学生時代に住んでいた学生寮のようなところに泊まり、その学生と交流したことが最も印象に残っている。国籍は様々で、いろいろな話を聞くことができた。特に、インド宇宙研究機関(ISRO)に働いていたという学生の話が興味深かった。

## その他報告すべき事項

特になし。

## 2011年01月17日報告分

### 授業・研究の進捗状況

下記の3項目に関する研究を進めた。

#### 1. 水星探査計画 Bepi Colombo のバックアップ軌道計画における修正マヌーバ解析

先月に引き続き解析を進めて行った。年末年始を挟んだため、あまり進捗が無かった。ソフトウェアにいくつか修正点があり、メーカーの担当者といくつかのやりとりをしている間にクリスマスシーズンに入ってしまった。第1金星フライバイにおけるB-plane targetingは特に問題がないのに、第2金星フライバイにおけるB-plane targetingで不自然な値が出力される。ソースコードを確認しても、ブラックボックスが数箇所あり、最後まで追いつけない。最終的には、メーカー側に質問をして対処法を教えてもらっている。これまで、他人が書いたコードで解析を行ったことが無かったため、予定より大幅に時間がかかっている。

## 2. 小惑星探査機はやぶさの光学観測によるリエントリ解析

地上望遠鏡による光学観測を用いた「はやぶさ」リエントリの軌道決定解析を行った。光学観測の効果を評価するために、最後の修正マヌーバの後に不具合があったと仮定し、その後、光学観測があった場合と無かった場合とを比較した。光学観測がリエントリ直前のデータを取得できていること、電波航法(レンジ・ドップラー)と観測量の感度が直交しているため、大きな精度向上が認められた。地上望遠鏡による光学観測は、有用なバックアップになると思われる。ただ、この観測は、探査機が夜側から大気圏に突入していること、十分に明るい(近い)ことなど、適用条件が厳しい。

## 3. ソーラーセイル実証機 IKAROS に関する軌道解析

12月の金星フライバイまでのデータを解析し、まとめている。途中、自身のプログラムに小さなバグを発見したので、その影響を調べるため、かなりの時間を費やした。2月末に参加する国際会議では、この内容を発表する。

ESOCで行う予定だった解析は、一通り仕上げる事ができた。

## 生活関連状況

クリスマス、お正月とイベントの多い期間だった。欧州では、日本と異なり、クリスマスは家族で過ごし、大晦日、元旦は友達や恋人と過ごすらしい。私は、受け入れ教官の実家で開催されたクリスマスパーティーに参加させてもらい、ドイツの家庭におけるクリスマスを体験した。日本における正月のようなイベントだった。彼の子供にも会ったのだが、少々落ち込んだ。小学生の子でも英語を話し、更に第2外国語も話すようだった。

ドイツでは、新年に合わせて花火を打ち上げるようで、年末のスーパー、デパートに特設された花火コーナーは、大変な盛況ぶりだった。実際、新年の花火はすごかった。1つ1つは小さいのだが、各家庭が打ち上げ花火を打ち上げるので、360°どの方向を見ても花火だった。

年始の休みを利用し、イタリアに行ってきた。カトリックの権力の大きさを実感できた旅行だった。

## その他報告すべき事項

特になし。

## 2011年02月18日報告分

### 授業・研究の進捗状況

通常の研究活動に加え、2回ESOC内で発表を行った。1つは、ESOC全体に対するIKAROSに関する発表で、もう1つは、私が所属しているセクションに対する最終報告会であった。両方とも多くの質問を得ることができた。具体的には、下記の3項目に関する研究を進めた。

#### 1. 水星探査計画 Bepi Colombo のバックアップ軌道計画における修正マヌーバ解析

最終的に、指示されたすべての解析を終え、報告書としてまとめ、受け入れ教官に提出した。想像以上に手間のかかる解析ではあったが、メーカーと関わりながらの解析を体験することができたのは良かったと思う。

#### 2. 小惑星探査機はやぶさの光学観測によるリエントリ解析

モンテカルロシミュレーションを行い、共分散解析による落下点誤差楕円と比較を行った。光学観測のみの軌道決定の場合、Along track 方向の誤差が大きいいため、それぞれかなり異なった傾向を示した。モンテカルロシミュレーションの場合は、地表到着時刻にかなりのばらつきが見えるのだが、今回の共分散解析では、地表到着時

刻に関するばらつきを考慮することができない。そのため、共分散解析による誤差楕円の端は、実際の地表到達時刻と大きな差が発生してしまっている。この解析は、帰国後も引き続き行う。

### 3. ソーラーセイル実証機 IKAROS に関する軌道解析

2010年12月8日の金星フライバイまでのデータを解析し、2月末に参加する国際会議の前刷り原稿を作成した。新しいJPL軌道暦を読み込むために、軌道暦計算ライブラリを修正したのだが、計算がかなり重くなってしまった(50%程度、考慮する摂動による)。この研究は帰国後も引き続き行う。

ESOCで行う予定だった解析は、一通り仕上げる事ができた。

## 生活関連状況

2月は、12月や1月と比較して暖かな日々だった。週末にお日さまがでる日も数日あり、久しぶりの日光を楽しめた。ただ、受け入れ教官は、雪が足りないと嘆いていた。

帰国1週間前に、以前一緒に活動した友人に会うためにGöttingenを訪ねた。私は2008年の夏、米航空宇宙局のエイムズ研究所で深宇宙探査機のプロトタイプに関する実習に参加していたのだが、彼はその時のメンバーである。Göttingenのマックスプランク研究所で、博士論文を書いているという。当時のメンバーの半数は、既にPh.D.を取得し、宇宙機関もしくは大学で働いており、残りの半数はそれぞれの大学の博士課程に所属している。懐かしい人の話などをいろいろ聞くことができ、やる気がでた。

帰国準備を2月に入ってから始めたのだが、それほど大変な作業では無かった。スーツケースに入らない物は基本的に捨て、必要な書類は電子化した。家具は次に住む人に売り、自転車はESOCの学生に売った。下手に荷物を送ると、中身以上の値段を徴収されるため、どんどん捨てていった。

帰国3日前になって、ISSFDに参加するためにビザが必要なことに気づいた。ISSFDはブラジルで開催され、帰国5日後に成田から出発する予定であった。東京のブラジル領事館に尋ねたところ、ビザの発行は間に合わないと言われてしまった。そこで、同僚に手伝ってもらい、フランクフルトのブラジル領事館に問い合わせたところ、何とか帰国前にビザを取得することができた。

## その他報告すべき事項

特になし。