

スペースデブリ軌道生成実験システム

Computer Systems for Studying Space Debris

あらまし

近年、宇宙空間を漂う人工のゴミであるスペースデブリに対する注目が高まってきている。富士通では、スペースデブリの軌道情報を管理するデータベースシステム、およびその軌道情報をもとにスペースデブリに関する衝突や落下といった事象のシミュレーション解析を行うためのシステムを宇宙開発事業団より受託開発し、1999年度から実験運用を実施している。さらに、地上よりスペースデブリを観測するシステムの整備も進められており、そのデータ処理システムの検討・開発作業を進めている。本稿では、スペースデブリの軌道解析と観測のためのシステムについて述べる。

Abstract

In recent years, the debris generated from human activities in space has attracted much attention. Fujitsu, under contract with the National Space Development Agency of Japan (NASDA), has developed a database system that manages space debris orbit information and simulates and analyzes collisions, reentries, and other events involving space debris. Test operations using this system were started in 1999. Fujitsu is now developing a system for observing space debris from earth and processing the obtained observation data. This paper describes the database system and the new system being developed.



亀山雅也(かめやま まさや)
科学システム統括部宇宙システム部
所属
現在、人工衛星追跡管制システムの
開発に従事。



石橋史朗(いしばし しろう)
科学システム統括部宇宙システム部
所属
現在、人工衛星追跡管制システムの
開発に従事。

まえがき

現在、地球を取り巻く宇宙空間には、運用を停止した人工衛星、人工衛星打上げ時のロケットの残骸、人工衛星より遊離した部品、爆発などにより飛び散った人工衛星の破片など、多数の物体が漂っている。これらはスペースデブリ(宇宙のゴミ)と呼ばれ、その大きさは人工衛星の残骸のような大きなもので数m~数十m、小さいものは塵のようなサイズにまで至っている。その数は、カタログ化されている数十cmから1m以上の大きさのもので8,000個以上となっている。

宇宙空間では数多くの運用中の人工衛星が地球を周回しているが、その軌道はミッションの特性などから、比較的似通った軌道となっているものが多い。例えば、気象衛星や放送衛星に代表される静止衛星は赤道上空約36,000kmの静止軌道に数多く配置されており、また、各国の地球観測衛星は高度約1,000kmで地球を縦に回る極軌道を運行しているものが多い。当然、運用を停止した人工衛星などもその近傍を漂っていることとなり、その衝突の危険性が問題視されている。人工衛星に対し、たとえ1cm以下のスペースデブリが衝突した場合でも、その衝突速度が秒速数kmと高速であるため、その破壊力は想像以上に大きい。また、寿命の尽きた人工衛星のうち、高度の低いものは大気抵抗により次第に高度を下げ、最後は大気圏に突入する。通常は、大気圏で燃え尽きるため問題とはならないが、まれに燃え尽きずに地上まで落下する場合もある。

スペースデブリについては、デブリ生成のメカニズムの研究、デブリを発生させにくい衛星設計の研究、デブリの衝突から人工衛星を守るための研究、デブリの分布状況・分布モデルの研究などのいろいろな研究が行われている。富士通は長年、宇宙開発事業団(NASDA)殿からの受託業務を通じて、人工衛星の追跡管制システムにおける軌道決定・軌道伝播・軌道解析などの業務ノウハウを蓄積してきた。これらの軌道力学関連技術とコンピュータ技術をもとに、スペースデブリの軌道解析のための実験システム、およびスペースデブリ観測に関わるデータ処理システムの検討および開発を実施している。

スペースデブリ軌道生成実験システム

開発の経緯

スペースデブリの軌道データの蓄積・管理、および落下・衝突のような軌道解析を行うシステムの開発を宇宙

開発事業団殿より受託し、スペースデブリ軌道生成実験システム(DOANATS: Space Debris Orbit Analysis Test System)を開発した^{(1),(2)}。1995年度から1998年度までシステムの検討および開発を行い、1999年度から実験運用を実施している。

システムの目的

DOANATSは、つぎのような目的のために開発された。

- (1) スペースデブリの軌道情報をデータベースに蓄積管理し、その状況の把握を行う。
- (2) 落下・衝突などのスペースデブリの軌道に関わる各種解析を行う。
- (3) データベース化したスペースデブリの軌道情報を、スペースデブリの研究者やスペースデブリ観測機関の登録ユーザに提供する。
- (4) スペースデブリデータベースを利用した軌道解析機能をユーザに提供する。

システムコンセプト

本システムの設計に当たっては、つぎのようなシステムコンセプトを掲げた。まず第一に、データベースの更新・メンテナンス、システムメンテナンス、各ユーザへの機能提供・データ提供などをシステム運用者を介することなく自動で行う(システム運用の自動化)。そして第二に、ネットワーク接続されたユーザに対し、特別なコンピュータ環境やアプリケーションを要求することなく、本システムのユーザ提供機能を利用可能とする(ユーザ環境への非依存性)。

これらのシステムコンセプトに対し、それぞれ以下のような対応を行った。

- (1) 源泉データ取得に関わる手順のアプリケーションによる自動化。
- (2) 源泉データ取得からデータベース登録までの連携処理のアプリケーションによる自動化。
- (3) 定常的なシステム運用処理のスケジュール起動。
- (4) ユーザ提供機能のWebサーバによる提供。

システム構成

サーバコンピュータ(WS)では、RDBMS(Relational Database Management System)およびWebサーバが稼働し、システム運用、各種ユーザ提供機能を実現するためのアプリケーションが搭載されている。RDBMSには、スペースデブリの軌道情報やシステム運用パラメータ、ユーザ管理情報が格納されている。システム運用者向けにクライアントPCを有するが、各ユーザはネットワークを経由してサーバコンピュータにアクセスする。本システムの構成を図-1に示す。

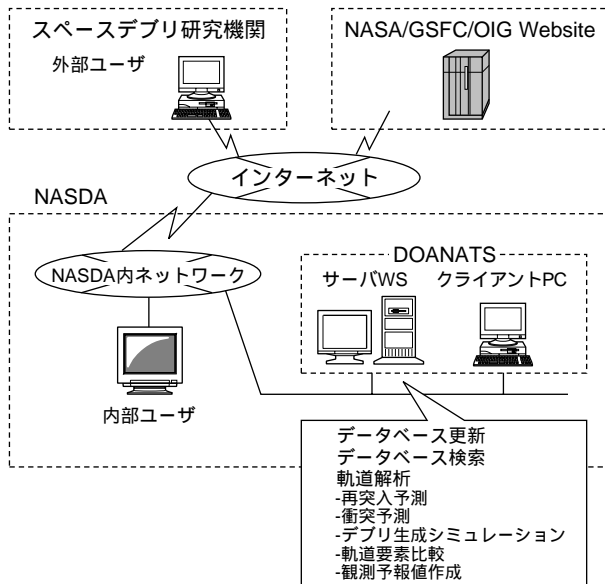


図-1 DOANATSシステム構成
Fig.1-System configuration of DOANATS.

システム運用機能

データベースの格納データの更新処理，保持期間を過ぎたデータのデータベースからの削除，定期的なデータベースのバックアップデータ作成などのシステム運用機能はあらかじめ定めたスケジュールにより自動起動される。ここでは，とくに重要なデータベース更新処理について述べる。

データベース更新処理では，データベースの源泉データの取得，付加情報の作成，データベースへの登録までの一連の処理を源泉情報の提供元の更新周期に合わせ，自動的に行う。

(1) データ取得

データベースの源泉データは，NASA GSFC(米国航空宇宙局ゴダードスペースフライトセンター)のOrbital Information Group Website(OIG)のWebサーバより取得する。ここで提供されているデータは，NORAD(北米防空司令部)により観測され，カタログ化されたスペースデブリの軌道情報(2ライン軌道要素：Two Line Element)である。OIGのWebサーバでは，ユーザID・パスワード入力によるログイン処理を行った後に，取得データの検索，ダウンロードを行う。これら一連の処理は，HTTPリクエスト発信 HTML受信 HTML解読 HTTPリクエスト作成を定められた手順に沿って実行するアプリケーションを開発し，自動実行している。

(2) 付加情報の作成

取得された2ライン軌道要素に基づき，軌道の特徴を示すパラメタの算出，および各スペースデブリの大気圏

再突入までの軌道寿命予測を行う。毎回の更新データは10,000件を超えるため，軌道寿命予測では，軌道寿命の長さに応じて簡易予測 粗予測 精予測の3段階の処理を行う。各処理は，簡易 精と予測精度が上がるにつれて計算量も増加する。とくに，精予測では精密な軌道運動のモデルにより大気圏再突入までの軌道予測を行うため，再突入間近の少数のデブリを対象としている。3段階処理の切替えのしきい値については，各予測方式の精度評価に基づき定めている。

(3) データ登録

取得されたデータは，算出された付加情報とともに，データベースへの登録を行う。

ユーザ提供機能

DOANATSがユーザに提供する機能は，すべてWebサーバを経由して使用される。各ユーザは，ネットワークを経由してそれぞれのコンピュータのWebブラウザを用いてサーバコンピュータにアクセスし，初期画面でのログイン処理の後，データベース検索，軌道解析などの各メニューを選択・実行する。初期画面以降のすべての画面は，CGI(Common Gateway Interface)により制御されている。ユーザからの処理要求は，各画面に対応したCGIプログラムで解釈し，実際の処理を行うプログラムの実行条件の作成・プログラム起動の制御が行われる。実行結果については，HTML文書としてWebブラウザに表示される。ユーザへの提供データについては，Webの画面をクリックすることにより取得できる。ユーザ提供機能の処理イメージを図-2に示す。

このように，ネットワークに接続したコンピュータとブラウザソフトウェアがあれば，場所・環境を問わずDOANATSを用いた解析処理が実施可能となる。ユーザ提供機能の概要を以下に示す。

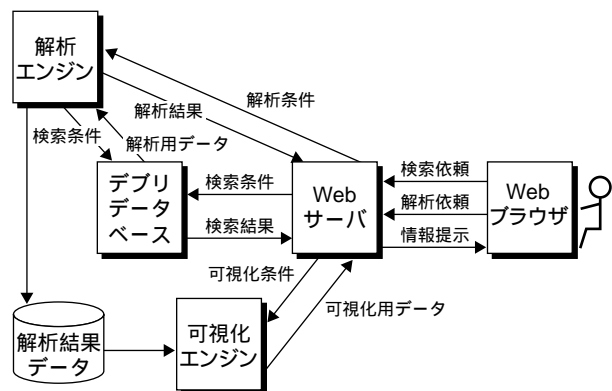


図-2 DOANATS処理イメージ
Fig.2-Data processing flow of DOANATS.

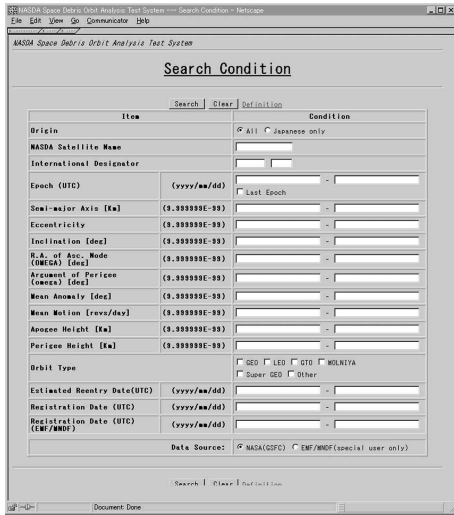


図-3 検索条件設定画面
Fig.3-Search condition setting window.

【データベース検索】

データベースに格納されている軌道データについて、対象の名称、軌道を決める時刻、各軌道パラメタの範囲、データ登録日などの検索条件を検索条件入力画面で入力し、検索条件に該当する軌道データの抽出を行う。検索の結果、抽出されたデータはブラウザでの表示、およびファイルへのダウンロードが可能である。また、ここでの検索により得られた軌道データを軌道解析の初期データとして使用することもできる。検索条件設定画面を図-3に示す。

【軌道解析】

各解析機能の初期画面で解析に使用する軌道データおよび解析条件を入力し、軌道解析処理を実行する。解析結果は、各解析機能に応じた表示機能によりユーザに提供される。また、解析に使用した軌道データは、各ユーザごとに保存することが可能であり、同一の軌道データを用いて各種解析を実行することも可能である。解析条件の設定画面例を図-4に、解析結果の3Dアニメーション画面例を図-5に示す。

軌道解析としては、以下の機能が用意されている。

(1) デブリ再突入予測

物理モデルに基づく精密な軌道シミュレーションにより、地上に落下する時刻、位置を求め、スペースデブリの軌道寿命の予測または軌道寿命末期のデブリの再突入予測解析を行う。予測結果については、その再突入軌跡を2次元ワールドマップおよびVRMLを利用した3次元アニメーションにより表示する。

(2) デブリ衝突予測

人工衛星などの飛翔体と不特定多数のデブリとの衝突

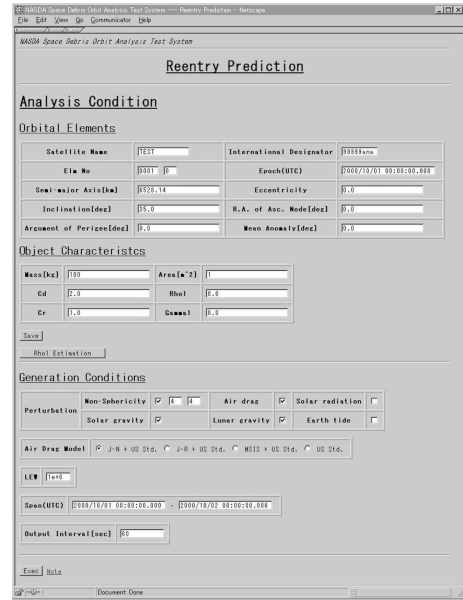


図-4 解析条件設定画面例
Fig.4-Analysis condition setting window.



図-5 解析結果表示画面例
Fig.5-Graphical display of analysis result.

予測を行う。衝突相手のデブリはデータベースに格納されているすべてのデブリを対象とし、軌道の誤差情報と相対距離情報とを総合して、衝突危険性の判定を行っている。解析結果については、その相対距離情報の2次元グラフと相対運動の3次元アニメーションが表示される。

(3) デブリ生成シミュレーション

衝突などの事象により、断片化された大量のデブリが生成された場合の軌道上での拡散状況のシミュレーションを行う。生成された個々のデブリについて、その初期の運動状態に基づき軌道シミュレーションを行い、時々刻々の拡散状況を算出する。解析結果はVRMLによる3次元アニメーションによりその拡散状況を確認可能である。

(4) 軌道要素比較

二つの軌道データについて、条件を変えて軌道シミュレーションを行い、時々刻々の位置・速度や軌道パラメータの違いを比較する。解析結果は、CSVファイルに出力されるため、各ユーザが目的に応じたグラフを作成することが可能である。

(5) 観測予報値作成

デブリ観測のための観測予報値を作成する。観測対象デブリについて、指定された期間における任意の地上位置からの仰角・方位角、距離の時系列データを算出する。算出データはブラウザ操作によりダウンロードされる。

実験運用

1999年度より開始した実験運用では、デブリデータベースの自動更新状況の監視および更新データの評価などを通じて、スペースデブリのマクロな状況の把握、データ管理のノウハウの獲得を行っている。さらに、実際のデータを使用したスペースデブリの再突入予測実験などの軌道解析実験を通じて、スペースデブリの挙動の把握や軌道解析機能の評価を行っている。これらの再突入予測実験では、NASAなどの海外宇宙機関の予測結果と比較しても遜色ない結果が得られている。これらの実験運用で得られたノウハウは、DOANATSの改修などにフィードバックされると同時に、つぎに述べるスペースデブリ地上観測システムの設計検討・開発作業に生かされている。

スペースデブリ地上観測システム

財団法人日本宇宙フォーラム殿では、スペースデブリなどを地上より観測するための、光学望遠鏡およびアクティブフェーズドアレイ方式のレーダ観測装置の整備を

1998年度より開始している。宇宙開発事業団殿では、これらの観測設備で得られた観測データを利用して、スペースデブリの軌道決定、軌道解析を行う筑波中央処理局を整備中である。富士通は、この筑波中央処理局の開発を宇宙開発事業団殿より受託している。観測システムの全体イメージを図-6に示す。

筑波中央処理局

筑波中央処理局では、各観測設備とインタフェースを持ち、スペースデブリの毎日の観測計画の立案、取得された観測データによる軌道決定、スペースデブリの同定、軌道決定により得られた軌道情報のデータベース管理などを行う。従来の人工衛星の追跡管制システムに比べて大きく異なるのは、対象物の数が圧倒的に多いということである。各観測設備からは合わせて1,000個以上のスペースデブリに関するデータが毎日送られてくる。筑波中央処理局では、そのすべてのデータについて軌道決定を行う。軌道決定したスペースデブリが、データベースに管理されているどのスペースデブリに該当するのかは、同定処理により確認する。ここで、同定されなかったものは、未知デブリとして更に調査を行うことになる。同定されたスペースデブリについては、その軌道情報をデータベースに反映する。このようにして、出来上がったデータベースのデータを使い、DOANATSと同様の各種軌道解析を行うことになる。観測計画についても、通常は各人工衛星の可視時刻をもとに観測計画を立案しているのに対し、約1,000個のスペースデブリを1日の中で効率良く観測するための計画を立案することになる。各スペースデブリの観測可能な時間はまちまちであるため、それを考慮した計画立案が必要となる。筑波中

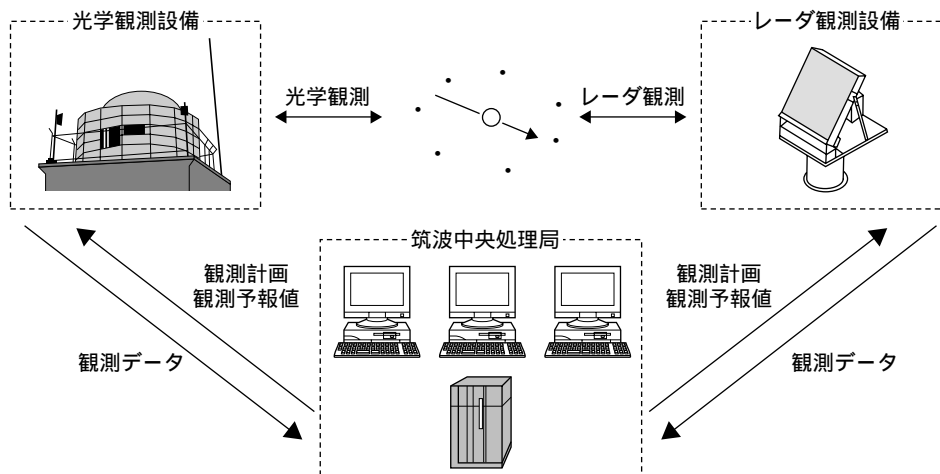


図-6 スペースデブリ地上観測システムの全体イメージ
Fig.6-Overview of space debris observation system.

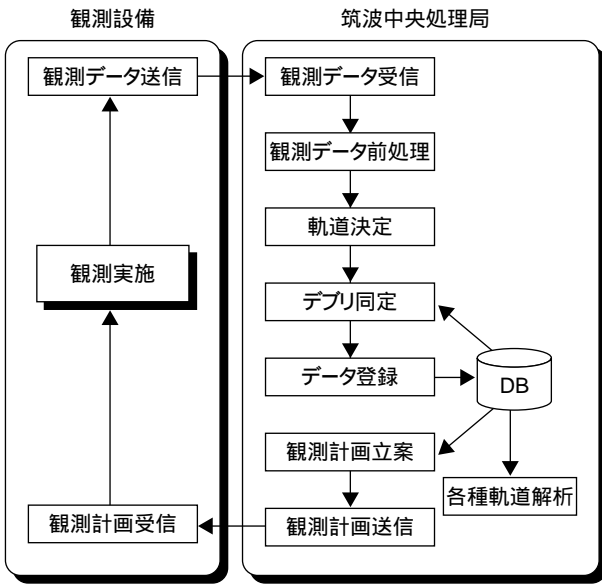


図-7 筑波中央処理局の処理イメージ
Fig.7-Function of data processing center.

中央処理局の処理イメージを図-7に示す。

開発上の課題

筑波中央処理局の整備における主な課題を以下にまとめる。

【大量デブリの軌道決定処理】

通常、人工衛星の軌道決定では運用者がその結果の妥当性を評価しているが、1日に1,000個にもなるスペースデブリの軌道決定結果を運用者がそのまま確認することは非現実的である。そこで、ある評価指標をもって、運用者に代り軌道決定結果を評価する仕組みが必要となる。この評価指標をどのように設定したらよいかは、これまでの軌道解析における技術蓄積をもとに検討し、適用評価を行わなければならない。また、これだけの数の軌道決定を行うためには、多くの処理時間を必要とする。毎日の運用スケジュールより要求される処理性能を満たすためには、使用するコンピュータの能力を大きくするのは勿論であるが、複数コンピュータを使用した同時多数の軌道決定処理システムの開発が必須条件となる。

【大量デブリに対する同定処理】

観測データを用いて軌道決定されたスペースデブリについて、カタログ管理を行うためには、すでにカタログ化されているスペースデブリとの同定を行う必要がある。観測時に対象のスペースデブリが明らかな場合は、過去のデータとの比較によりその同一性を確認すればよい。対象のスペースデブリが明らかでない場合は、その比較対象が約8,000件の全デブリになってしまう。これをそのまま順番に比較したのでは、大変多くの処理時間を

必要とするため、軌道の特性などを利用した効率的な絞り込みを行う必要がある。

【多体系の最適観測計画作成】

低高度のスペースデブリが本システムのレーダにより観測可能となるのは、多くの場合、1日に約1～2回程度である。1回の観測時間は数分～十数分程度と短時間であるが、約1,000個のデブリについて1日単位の観測計画を立案する必要がある。レーダの場合、レーダのフェーズドアレイ面の向いている範囲で複数のデブリを同時に観測することが可能であり、フェーズドアレイ面を時々刻々どこに向けておくかが、観測効率を向上させるための重要な要素となる。そこで、フェーズドアレイ面の向きと各観測対象デブリの方向を同時に考慮して、計画立案を行う。

スケジュール

筑波中央処理局の開発は、現在、光学望遠鏡対応のシステムについては製作段階であり、システム全体のプロトタイプ版として2001年度から先行リリースされる。レーダ系および光学系との統合システムについては、詳細設計を実施中であり、各種の設計課題に対する具体的な解決方法の検討および試行評価を行っている。

む す び

以上、スペースデブリの軌道解析システムおよび観測システムに関連し、富士通が開発に係わっているデータ処理システムについて述べた。スペースデブリは、今後の宇宙開発において避けることはできない問題として、ますます注目が高まっていくことが予想される。その対象とすべきものの数が膨大であり、今後も増加の一途をたどっていくため、軌道解析技術とともに計算処理技術としても高い要求が課せられている。軌道解析技術と計算処理技術をうまく融合することが、今後のシステム開発でより重要になっていくと考えている。

最後に、スペースデブリに関する業務の委託元であり、数々のご指導をいただいている宇宙開発事業団殿に心からお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 田島徹ほか：スペースデブリ軌道生成実験システムの概念検討．第40回宇宙科学技術連合講演会講演集，日本航空宇宙学会，1996，p.443-444.
- (2) 紺野博之ほか：スペースデブリ軌道生成実験システム（DOANATS）の開発．第43回宇宙科学技術連合講演会講演集，日本航空宇宙学会，1999，p.113-118.