

# 1. 研究実施計画

課題名：人工衛星群カオス軌道制御の研究

研究機関名：独立行政法人通信総合研究所

任期付研究員氏名：梅原 広明

## 1. 意義、目的、必要性

### (1) 目的

衛星通信の発展にともない、静止軌道上にある衛星の数が急激に増加している。静止衛星軌道とは、自然の法則に従ってただ一つしか存在しない軌道であることから、この軌道にどれだけ多数の衛星を収容できるかということが近年の大きな課題となってきた。

本研究では、軌道上にある多数の衛星を一括して制御するための新しい方法を開発し、もって静止衛星軌道の混雑問題を解消することを狙う。特に、衛星の数が増しても制御の作業量がほとんど増えずに済むような制御方法を研究する。これにより、宇宙通信が今後さらに発展する機会を確保し、また後発の諸国が衛星通信に参入できる機会を将来にわたって確保するための技術根拠を与えることを目標とする。

### (2) 必要性

静止衛星軌道の利用において、理念上は、国際間の調整にもとづく各国に公平な利用がうたわれている。しかし現実には、宇宙通信の先発国が既得権を有し、また一方では軌道の利用権の売買行為によって軌道利用の秩序が脅かされる等、憂慮すべき実態にある。その原因は、限られた静止衛星軌道の「資源」を真に有効に利用するための軌道制御の技術が十分に開発されていないことが大きい。よって、軌道の有効利用技術の研究開発を緊急に進める必要がある。

静止衛星軌道の利用に関しては、郵政省が、通信主官庁として我国の国益を代表する立場にある。従って当研究の実施主体は、郵政省通信総合研究所とするのが適当である。

### (3) 意義

従来おこなわれて来た衛星の軌道制御では、一度に着目するのは1衛星だけであった。多数の衛星を従来技術で処理しようとする、各衛星についてそれぞれ制御を加えるほかに、衛星どうしのニアミスを避け、互いに電波を影にしないように保つ等の制御が必要となる。そのため衛星の総数が増すと、制御の作業量が急激に増す。今後、軌道上の衛星の混雑が進めば、従来の制御技術に頼っていたのでは作業量が多すぎて困難に陥ってしまう。

それに対して本研究では、衛星の数が増しても制御の作業量がほとんど増えずに済むような、新しい軌道制御の技術を開発する。この新しい制御技術では、衛星群の全体をひと

つの実体と見なし、その振舞いをカオスとして捉えつつ制御することによって、簡易でしかも安定な制御を可能にする。それは、従来の軌道制御の枠組みを原理的に変えようとする試みである。

## 2. 研究の概要

### (1) 多数衛星シミュレーション技術の確立

静止衛星軌道とその付近にある多数の衛星を、全部で一まとまりの実体として捉え、その力学的な振舞いをシミュレーションによって把握する技術を確立する。衝突の可能性がある衛星群の振舞いを、直ちに試験衛星を用いて調べることは危険であるから、ここではシミュレーション研究が本質的に重要である。即ちシミュレーション技術の確立は、本研究の基盤をなす。

多数の衛星（数百～千機）について長期間（数十年～百年）にわたるシミュレーションを行うと、ぼう大な量の数値データが出力されてくるので、たとえ専門の研究者でも理解を超えてしまう。そこで数値データを視覚化して研究開発に結び付ける支援システムを開発する。また研究者と、衛星の軌道運動とが直接に作用しあうようなバーチャルリアリティを取り入れたシミュレーション技術を開発する。

### (2) 衛星群カオス軌道制御方式の創製

シミュレーションによって把握された衛星群の振舞いのなかから、軌道制御の具体的な方法を導き出す研究である。

軌道上で混みあう衛星は、それぞれ異なる国や事業体によって運用され、各衛星の設計や性能もまちまちである。つまり、ばらばらのルールに従う衛星が多数集まって群れをなすのが「衛星の混雑」であって、その振舞いは元来、まったく無秩序である。この無秩序さを「カオス」と見なす。さてこのとき、衛星どうしの間で、わずかに相互作用（衛星間での情報交換や互いに力を及ぼし合うこと）を行わせると、衛星群の全体に、ある一定の秩序が自然に現れてくる場合がある — これを「安定カオス」という。このような秩序形成のしくみを調べて利用することにより、混み合う多数の衛星を安全に、しかも少ない作業量で制御する方法を見出そう、というのが本研究のポイントである。

## 3. 研究目標

### (1) 多数衛星シミュレーション技術の確立

次の2つの機能を実現させる。

#### ①バーチャルリアリティシミュレーション

本来、架空の曲線であって実体を持たない「軌道」というものを、あたかも針金のように実在するごとく曲げたり捻じることができる機能。この機能によれば、研究者が自由自在に軌道进行操作しながら分析することができるようになる。

#### ②抽象シミュレーション

本来、目に見えない物理量（たとえば軌道のエネルギー）を、目に見えるようにする。理論にだけ現れる仮想的な存在を、現実感を持つ実体として実視できるようにすることで、複雑な問題の解明が容易になる。

## (2) 衛星群カオス軌道制御方式の創製

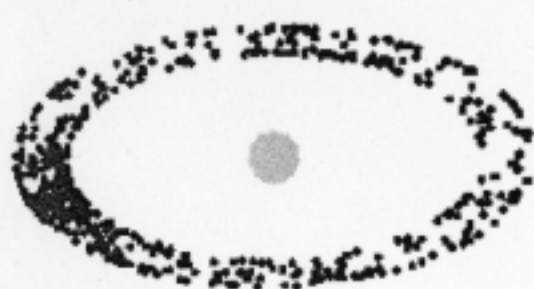
人工衛星群において「安定カオス」を発現させる方法を、次の2段階により見出す。

### ①太陽系安定カオスの応用

太陽系の天体軌道の研究において、安定カオスの例が発見されている。これをモデルにして、人工衛星に応用する方法を見出す。軌道の安定カオスの現象は極めて複雑であるため、ここではすでに知られている研究例から出発するのが能率的である。

### ②人工衛星群のカオス安定化

太陽系の安定カオスを発展させて、特に人工衛星に適した安定カオスの生成方法を開発する。衛星どうしの相互作用をできるだけ弱く（つまり少ない作業量と少ない燃料消費で済むように）しながら、長期間にわたり安定かつ安全な秩序を生じさせることで、衛星の衝突やニアミスを防止する。新しい衛星を群のなかに漸次投入しても、制御の作業量が増すことなく、同じ秩序が自然に維持され続けるような制御方法を開発する。



誕生まもない惑星系は、軌道運動  
がばらばらで無秩序



時間とともに自然に、惑星の軌道運  
動に秩序が現われはじめる



惑星軌道が、互いに衝突しない配列  
に落ち着く（自発的に秩序が生じる）

このような「自発的な秩序形成」のしくみを調べ、それを  
積極的に人工衛星の制御に応用するのが本研究の狙い

## 2. 研究成果の概要

### ①研究成果

#### 研究の背景と当初の目標

宇宙通信の発展にともない、軌道上にある衛星の数が増え続けている。特に、通信衛星の多くが用いる静止軌道では、利用可能な位置が限られていることから、衛星数の増加は衛星どうしのニアミスや衝突の危険度の上昇につながる。宇宙通信が今後も発展していく可能性を確保するためには、この問題について対処が必要である。

この問題へのアプローチとして本研究では、太陽系にみられる特徴的な現象に着目した。太陽系内には小惑星と呼ぶ多数の小天体がある。太陽系が形成されつつあった初期、小惑星は衝突を頻繁にくり返したと考えられるが、現在では希にしか衝突がおきない状態に落ちついている。また、惑星のリングは多数の微天体で構成されているが、それら微天体は互いに衝突しあわないような軌道の配置に到達して安定している。つまり、意図的な制御は何ら施されていないのに、非衝突な軌道配置が自発的に形成されるような仕組みが存在したのである。その仕組みを人工衛星について応用することができれば、衛星どうしを非衝突な軌道配置にみちびくことができるであろう。それが実現すれば、少ない労力でもって衝突の危険を防止する方法が得られるはずである。

これが当初に掲げた研究のねらいであった。以下、この研究から得た成果を示す。

#### 予備段階：軌道カオス発生装置の整備

非衝突な軌道配置が自発的に形成される、という上記の仕組みの背景には、多数の天体が軌道運動をおこなうさいに現れるカオス現象が係わっているとされている。そこで研究の第一段階として、軌道運動に関するカオス現象をシミュレーションにより再現させるための装置（「軌道カオス発生装置」）を整備した。この装置は同一規格のCPU 10組を球結合させて構成したもので、並列計算用に特化したコンピュータである（図1を参照）。本装置によれば、軌道力学の問題を数値積分によって解く際に、初期条件をわずかつつ変えた10組の解を並列的に得ることができる。すると、解どうしの差が時間発展する様子から、カオスの存在を効率的に見いだすことが可能になる。本装置によって、数値シミュレーションをベースとする研究の環境がととのった。なお本装置は、軌道現象だけに限らず、広くカオス現象を調べる手段を提供するものとなった。

## 成果 1：非衝突配置の自発形成スキームの導出

太陽系において非衝突な軌道配置が自発的に形成されてきた理由は、問題となる天体どうしに相互作用がはたらくためである。その相互作用は、天体どうしの間での重力による弾性散乱と、天体間の衝突による非弾性散乱を含む。これに対して人工衛星では、相互間の重力の作用は小さすぎて軌道運動に影響をもたないし、衛星どうしを衝突させることは許されない。そこで衛星どうしを相互作用させるには、衛星が備える小型ガスジェットを作動させる。具体的には、衛星の空間配置の関数として定まる仮想的なポテンシャルを導入し、そのポテンシャルに応じて各衛星のガスジェットが作動することで、あたかも衛星どうしが相互作用するごとく挙動させるのである。導入するポテンシャルとして様々な形を試行し、そのなかから軌道配置の自発形成につながるものを見いだすことができれば、目的が達せられるはずである。

このようなスキームを、前述の並列計算用コンピュータを用いてシミュレートしたところ、衛星の軌道配置は時間の経過とともに発散してしまい、安定状態に達することができなかった。ポテンシャルの形状や初期値の取り方を種々試みても、結果は変わらなかった。当然ながら非衝突ということも保証されない。衛星間に直接的な相互作用を導入する試みは、効果を得られなかった。

太陽系において非衝突配置が自発形成されるのは、数億年ないし数十億年という長期間が経過した後においてである。人工衛星に関連しては、短時間で自発形成を発現させなければ実用にならないことから、衛星間での相互作用を強いものにせざるを得ない。そのため、力学系の不安定性が強調されることとなって、上記の結果につながったものと解釈された。

そこでアプローチを変えて、衛星間での直接的な相互作用のかわりに、衛星の軌道パラメータの間での相互作用を導入した。衛星の軌道は、軌道要素と称する6個のパラメータで記述される。そのうち、静止軌道にある衛星どうしのニアミスに強く関連するのは離心率を表す2パラメータであり、それをベクトルで表す。そして各衛星の離心率ベクトルの間において相互作用を行わせることにした。相互作用は、各衛星のベクトルを変数とする仮想ポテンシャルを通じて導入される。作用を発生させるために衛星のガスジェットを作動させる事はここでも同じだが、それに至るプロセスがここでは一段抽象化されたものとなった。

6機の衛星を近接させて静止軌道に配置し、シミュレーションを行ったところ、各衛星の離心率ベクトルが互いに均等に分離された状態に落ち着き、非衝突な軌道配置が自発的に形成された(図2を参照)。この自発形成は、初期値のとりかたを種々変えても、また衛星数を増しても同じように発現し、しかも形成された状態は安定である。

衛星の離心率ベクトルは、摂動が無ければ一定に保たれるはずの量であって、実際には変化するとしてもその時間変化レートは小さい。そのため、離心率ベクトルどうしを相互作用させるために要する衛星間でのデータ交換が、わずかで済む。従ってこのスキームは、

衛星上における自律的な軌道制御に適している。地球局を介して制御を行う場合であっても、必要な作業量がわずかで済むという利点をもつ。

このように、太陽系における自発形成のスキームから出発し、それを一段抽象化したスキームが人工衛星への応用に適していることが見いだされた。この結論に至るまでには極めて多数回のシミュレーションを要したが、あらかじめ整備した並列計算用コンピュータによってそれを効率的に実行することができた。

#### 成果2：自発形成の検証手段の整備

上記により導出した軌道制御のスキームを、実用的な衛星に適用しようとする、種々のケースを想定して試験をおこなうことにより信頼性を検証しておく必要がある。導出したスキームは、図2のようにベクトルダイアグラムで表すと一見、明解に思われよう。しかし実空間に戻して表すとき、多数衛星の軌道が絡みあって配置される関係は想像をこえて複雑である。しかもその配置関係は、各衛星による自律的な制御につれて随時変わっていく。研究を進めるために、そのような軌道現象を観察して制御スキームの動作を把握することが欠かせないが、実際にそれは難しい。そこで、多数衛星の軌道配置を3D表示し、かつ制御スキームの動作をオペレータが監視操作しながら、軌道制御をシミュレートする“インタラクティブ軌道制御シミュレータ”を開発した(図3を参照)。この装置は、バーチャルリアリティの仕組みを軌道制御シミュレーションに取り入れたものである。この装置により、自発形成スキームの様々なバリエーションを効率的に試行して検証することが可能になった。さらに、実際の人工衛星に適用すべき制御スキームを設計することが可能になった。

#### 成果3：非協調衛星への拡張

導出した制御スキームが働くためには条件として、衛星間もしくは衛星管制局間でのデータ交換が可能であること、つまり衛星どうしが協調関係にあることを必要としている。しかし衛星のなかには、その存在を明かされたくないために協調関係をもたせられないものが現にある。そのような非協調衛星については、受動的な手段で軌道を観測して離心率ベクトルを把握しなければならない。受動的な手段としては光学観測が適している。そこで、非協調的な未知の衛星を光学的に検知して、その軌道を速報的に把握することにより、たとえ非協調的な衛星でも、それを自発形成スキームに取り入れることができるようなプロセスをととのえた。

以上、一連の研究結果により、衛星数の多少に左右されず、また協調/非協調の違いを克服して、非衝突な軌道配置を自発形成させることが原理的に可能になった。

#### ②波及効果、発展方向、改善点等

通信衛星の管制は、今のところ地球局にて行うのが主流である。しかし管制の作業量の

軽減のために、徐々にではあるが衛星上での処理に向かう傾向がある。本研究が導出した技術は、そのような傾向に適合する技術であり、将来的に実地応用の機会が期待される。

近年、多数の小型衛星を編隊飛行させて観測等の目的を遂行させる技術が関心をもたれるようになった。衛星どうしを近接させて編隊飛行させる場合には、安全を保つために、成果2による軌道制御スキームが有用である。そのような技術を事前の実証するために、複数の小型衛星を用いて軌道上で実験をおこなうことが期待される。

成果2による軌道制御スキームでは、衛星のガスジェットをインパルス状に作動させることを想定した。海外の研究集会にて発表したところ関心を寄せられ、議論をすすめる中から、インパルス状のスラストをイオン推進による連続スラストに拡張できるのではないかと、とのアイデアが浮上した。シミュレーションにのせたところ、連続スラストでも同様に効果を得られることがわかった。現在、その提案元と共同で発展研究を進めているところである。





図1  
並列計算用コンピュータ  
“軌道カオス発生装置”

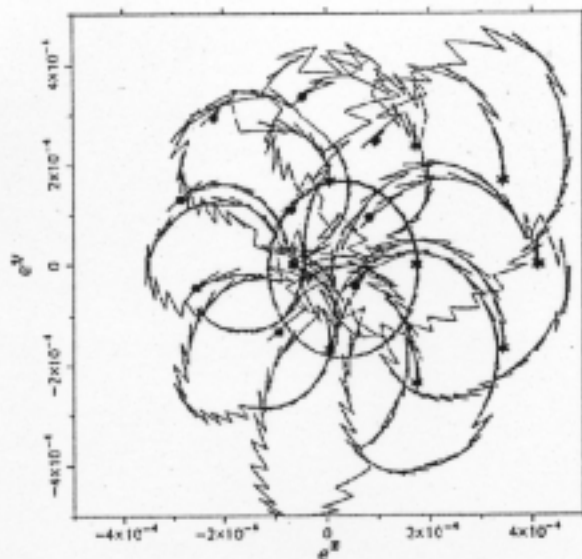


図2  
非衝突な軌道配置の形成例

\*は9衛星分のベクトルを表し、互いに分離されている。約6ヶ月経過した後のベクトル●も分離を保っている

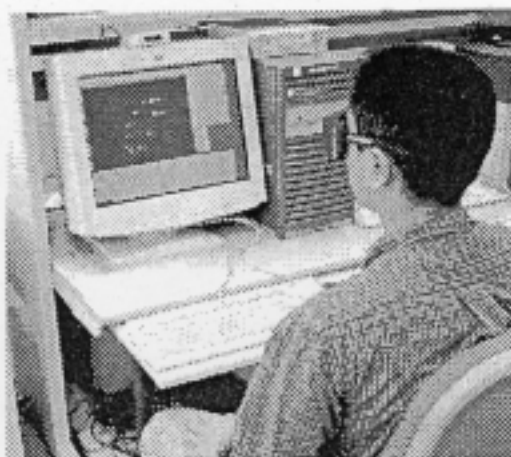


図3  
インタラクティブ軌道制御シミュレータ