

外 2-8

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

宇宙輸送機初段のダイナミクスと制御

申 請 者

森 英 彰  
Hidehiko Mori

平成 2 年 7 月

ペイロードを地球周回軌道に入れることをミッションとする宇宙輸送機は重力に逆らって 200 km 以上の高度に上り、かつ  $7.8 \text{ km/s}$  ( $30000 \text{ km/h}$ ) 以上の速度をえなければならない。現存のロケットエンジンを用いてこれだけ加速するためには莫大な燃料を必要とする。H-I ロケットではリフトオフ時の重量は 140 トンあるが、初段を切り離した上段重量は 14 トンとなり、周回軌道に投入されるペイロード重量は 3 トンになる。すなわちリフトオフ時重量の 2% 程度しか周回軌道に入らない。宇宙輸送コストを下げるためには特性のよいロケットエンジンを用いるとともに、構造の重量比率を下げる必要がある。ことにリフトオフ時重量の 90% を占める輸送機初段の性能を高めることは重要な意味をもつ。

中型以上の宇宙輸送機初段としては固体燃料ロケットより液体燃料ロケットを用いる方が有利である。しかしその重量の 95% 以上が液体推進剤となるため、剛性は低下し、弾性体としてそのダイナミクスを扱う必要性を生ずる。一般に同じ燃料を用いた宇宙輸送機では大型化するにつれペイロードの質量比は大きくなる。しかし輸送機の剛性は低下する。従って効率のよい宇宙輸送機を実現するためには、弾性体としての飛しょう体のダイナミクスを理解し、その制御技術に習熟することが必須である。本論文はこのような観点から液体ロケット初段を連続体として扱い、その制御、振動および荷重に関する問題を統一的な手法で解析し、見通しのよい形に整理することを試みたものである。

第 1 章においては飛しょう体を剛体と仮定して、リフトオフ後大気圏を抜けるまでの飛行経路の作り方、制御系の基本的構成法を示している。まず 1. 1 節では零リフトターンを実現するためのピッチプログラムの作成法を、無風時および風がある場合について示した。つぎに 1. 2 節ではレートジャイロ、積分ジャイロおよび加速度計のセンサーからのフィードバックを施すことによって制御系に賦与できるダイナミクス特性について示した。シグナルフローグラフ法と successive loop closure 手法とを組み合わせる簡明化を図っている。1. 3 節では前節で構成された制御系に対してフライト時に吹く風の確率的な範囲、荷重の観点からみた上限の風の設定法およびこの風に対する応答例を示している。全体にわたって SS-3、H-I、H-II 等のロケットに関する数値例を挙げてある。

第 2 章の 2. 1 および 2. 2 節においてはロケットを連続体とみなし、任意断面におけるモーメントおよび引っ張り力のつり合いの式からそれぞれ横振動および縦振動の運動方程式を導いた。これらの方程式の固有関数及び一般化質量を定義し、0 次の固有関数が剛体運動と一致することを示した。さらにロケットに働くモーメントおよび圧縮力をこの固有関数系を用いて表現する式を導いた。剛体としてのロケット各部に働くモーメントは迎え角およびエンジン舵角に比例する形で表現できる。2. 4 節では実際の各種ロケットについての曲げモーメントおよび圧縮力の計算を行い、さらにモーメントを等価軸圧縮荷重として評価し、構造設計において圧縮荷重として一元化した形で取り扱う方法を示した。すなわち

本節においては本報告で最終的な目標とする 4 種類の荷重を総合し、構造設計に反映する手法を提示している。2. 3 節では第 3 章で用いるパイプライン中の液体の音響振動の方程式を、連続体として 2. 1 および 2. 2 と同様の手法により導いている。

第 3 章においては N-II および H-I ロケットで共通して起きる縦振動（ボゴ）の安定性の問題を論じた。前章での検討は、縦振動の安定性が検討済みであり振幅が過度に大きくならないということを前提としている。縦振動の安定性に関してはロケットの種類によっても異なり、これまで定性的にも完全に解明されていない。N-II/H-I ロケットにおいては 3 種の縦振動プリメコボゴ 1、プリメコボゴ 2 およびメコボゴが生ずる。単純化したボゴ解析モデルにボゴ振動数で基準化したナイキスト線図を適用することにより、ボゴの基本構造を整理し、パラメータの特性を明確化した。この解析を N-II/H-I に適用すると、プリメコボゴ 1 とメコボゴは液体燃料供給系で発振し、前者ではタンク底部圧力の変動、後者ではポンプ部の流量変動で励振される。H-I ロケットのフライトデータに基づき、具体的に上記を確認するとともに、ボゴ振動数、縦振動モード形、一般化質量等を求めた。これらのデータをもとに感度解析により不確定パラメータの特性を分析し、結果として、H-I ロケットのフライトに沿ったボゴ現象全体を説明できるようなパラメータ選定を行った。以上の解析により物理的に妥当な範囲のパラメータ設定により、N-II/H-I ロケットのリフトオフから燃焼停止までの間のボゴに一貫した説明を与えることができた。従来このような形での解析例が公表されたことはなく新しい試みである。選定した数値が実際の特性値とどの程度の一致度を持つかは、解析のモデルの妥当性の吟味と合わせた今後の検討課題である。

第 4 章では横振動についての安定性解析ならびに安定化の手法について述べている。実際の宇宙輸送機は大型化するにつれ剛性が低くなり、そのため機体の曲げ振動、液体燃料の揺動（スロッシング）等が連成し、その運動方程式は複雑になる。まず 4. 1 節では機械回路図を用いて運動方程式を導いた。3 次までの横振動モード、2 個のタンクのスロッシング、エンジンアクチュエータ系等の運動を考えると 16 次程度の系になる。4. 2 節ではこのような高次系について伝達関数を求め、根軌跡、ゲイン-位相線図、ボード線図等を描く計算機プログラムの作成法を示した。4. 3 節では SS-3 ロケットに対しての計算例を示している。合わせて安定化のための基本方針を示した。以上の理論における安定化のための補償系は連続系を仮定して構成されているが、実際のロケットにおいては誘導計算機を用いた離散型の補償が行われる。4. 4 節では連続系を仮定して構成されたアナログ型補償法を誘導計算機を用いたデジタル補償系に変換する方法について述べた。また誘導計算機の中では姿勢制御のためのマイナーサイクルと航法・誘導のためのメジャーサイクルの異なった計算サイクルが存在する。上記

安定化補償はマイナーサイクルのみを考慮して構成されるが、メジャーサイクルも影響度は少ないながら安定性に対して影響を与える。したがって誘導パラメータを設定したあとでは、安定性についてのメジャーサイクルも含めた確認が必要である。この確認のために必要な異なった時間周期を持ったデジタル補償系に対する安定性補償の概念についても記述した。

機体の横振動が安定化されていない場合は、振動が激しくなりやがては破壊に至るほどの危険を生ずる。前章に示した内容の検討により機体が安定化している場合でも、風の中には空間周波数をもった突風が存在するため、剛体運動としての曲げモーメントと重なると許容限界を越える横振動を生ずる可能性がある。したがって突風のデータを整理し、これに対する曲げ振動の振幅を定量的に解析しておくことが必要である。第5章はこの問題を論じている。第4章で扱ったSS-3の機体に対して、妥当と思われる突風モデルを設定し、横加速度の二乗平均値を計算し、第2章でえられているモーメント係数を用いて横振動による曲げモーメントの寄与分の推定を行った。結果としてSS-3では突風によって励振されるモーメントは十分に小さいことが確認された。現行のロケットでは突風による横振動のモーメントを荷重成分として考慮していない。SS-3はこれらのロケットと類似の規模であり、その妥当性を検証しているといえる。しかしながらアポロ計画で用いられたサターンVでは乗員の搭乗した上段に大きな横振動が生じ、問題になったという報告もある。日本においても機体が大型化する将来においては重要度をもった問題になるだろう。本章はそのための解析法を示している。

以上に述べた通り、本論文は宇宙飛しょう体初段に加わる4種類の荷重：縦静軸力、縦振動軸力、静曲げモーメントおよび振動曲げモーメントに関連する内容を統一的な視点から再整理し、体系化を試みたものである。第1、第2および第4章は通常行われている解析手法の中から本質的な部分を抽出し論理を再構築した内容である。第3章は従来不明確であったボゴ現象の解明を図った内容である。第5章は将来の大型化宇宙輸送機で重要になる曲げ振動レベルに関する試験的な解析である。本論文はこれまでの宇宙開発事業団の設計解析作業の中に生かされてきているが、また今後の作業に反映される内容も含んでいる。目下の加速度計フィードバックの適用、風の計測、ボゴ安定性解析等の作業に対しては本検討内容がすぐに生かされる予定である。本論文で扱う内容は通常作業の中では多くの関連部門にまたがっている。宇宙輸送機がより大型化し、複雑になるにつれ、バランスのとれた系構成を図る上で、システム工学的な視点から全系を捕らえる本論文のようなアプローチは重要性をもつものと考ええる。