

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560795  
 研究課題名（和文） ローカライズド制御理論の宇宙システムへの適用に関する研究  
 研究課題名（英文） An Idea of Localized Vibration Control of Flexible Space Structures  
 研究代表者  
 森田 泰弘（MORITA YASUHIRO）  
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・教授  
 研究者番号：80230134

## 研究成果の概要：

ローカライズド制御とは、常微分方程式を用いながらも対象の有限要素的振動特性を考慮できる理論であり、構造と制御の融合として新たな研究領域を拓くものでもある。本研究では、ローカライズド制御という新しい制御の概念を確立し、これを宇宙システムに適用するための方法論を構築、複雑な宇宙システムに対して比較的容易に制御系の設計を進めることを可能とした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体・構造・航法・制御・推進

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙システムの制御（姿勢制御と振動制御）の分野においては、システムの特性的変化や不確定性、あるいは、想定外のスペクトルをもつ外乱などに対応するべく、ロバスト制御（不確定性に対して屈強な制御）と言う一分野を切り開いてきた。ロケットを例に挙げると、部分ごとに限定された振動試験結果に基づくシステム全体の構造パラメータの推定やスケールモデルを用いた風洞試験に基づく機体の空力特性の推定など、制御対象としてのシステムの特性的には不確定性がある。さらに、アクチュエータの故障等による

制御力の低下など、不測の事態も起こりうる。設計されるべき制御には、このような不確定性に対するロバスト性が求められるわけである。

ロバスト制御の分野では、 $H^\infty$ 制御や $\mu$ 制御などいわゆるポスト現代制御理論が理論的に明快に展開されている。しかし、これらの理論は宇宙ロケットのような高次の不安定システムに対する適用可能性を補償するものではない。しかも、これら理論のこれまでの適用例としては車両の制御のように事前に繰り返し試験が可能なものがほとんど

であり、宇宙ロケットのように事前の試験が限られているために極端に高度のロバスト性が要求されるようなケースは皆無である。我々は、このような問題を克服すべく研究を重ね、先端制御理論の月・惑星探査機や衛星打ち上げロケットなど複雑な宇宙システムへの応用方法を提案し、実際の打上げを通してその有効性を示してきた。

このようなロバスト制御の設計においては、モード関数による級数展開の手法を用いて、システムの振動特性を有限個の常微分方程式で記述することにより状態空間モデルを得ている。これは極めて一般的なアプローチであり、この手法によれば振動特性の取り扱いが極めて容易になるが、その対価として局所的な振動特性に関する情報が失われてしまう。今後の宇宙インフラストラクチャの展開においては、システムの形状がより複雑になると考えられるが、そのようなシステムに対しては必ずしも有効ではない。従って、今後の宇宙システムの制御の発展のためには、制御対象の有限要素特性を陽に考慮することが強く求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、全く新しい制御論理として、ローカライズドコントロールと言う概念を提唱している。この方法は、システムを有限要素に分割し、各有限要素の変位と回転を記述するローカル座標系に基づき状態空間（ローカライズド空間）を展開することから始まる。つまり、システムの数学モデルにシステムの有限要素的振動特性を記述することにより、制御論理の構築において、構造の振動特性を陽に反映する。これを、ローカライズド制御と呼んでいる。この理論によれば、複雑な形態をした宇宙システムを従来の方法に比べてより効率よく制御することが可能である。複雑な宇宙構造物を制御する場合には、対象を単なる数学モデルとして捕らえるのではなく、構造としての特性を考慮して制御側を構築することが望ましいが、偏微分方程式を取り扱うことの難しさから、この観点での研究は十分に行われてこなかった。この研究では、従来と同様に常微分方程式を用いながらも、対象の有限要素的振動特性を考慮するものであり、画期的な制御系設計手法と言える。

その例の一つとして、最適レギュレータの設計にローカライズド制御の概念を用いれば、最適フィードバックゲインを剛性マトリクスと質量マトリクスという構造パラメータのみにより構成することができる。すなわち、構造と制御の融合としての新しい形態である。さらに、ラグランジェのマルチプライ

ヤの概念を導入することにより、各有限要素間のインターフェース力を陽に記述することができ、振動の伝播を直接抑制することができる。

このこのように、ローカライズド制御は構造と制御の融合の新しい形態を提案するものであり、極めて独創的な研究である。国内外で複雑な宇宙システムの制御の研究は盛んに行われているが、これほど単純明快に構造と制御の融合を図った例はない。この理論が確立すれば、宇宙ステーションや月基地など今後ますます複雑な形状になっていく宇宙システムの制御をより効率的に進めることができ、学術的、工学的な意義が大きい。以上の観点から、本研究では、ローカライズド制御という新しい制御の概念を確立し、これを宇宙システムに適用するための方法論を構築しようとするものである。

## 3. 研究の方法

本研究の出発点は、最も重要な研究項目として、ローカライズド制御の基本原理解に基づき、これを宇宙システムの振動制御に適用するための方法論の構築にある。具体的には、基本原理解は完全状態フィードバックにより制御器を構成する形式となっているが、本研究ではこれを拡張して、状態推定器により構成するとともに、センサの配置問題に対しても考察を加える。また、基本原理解に基づき設計される制御器は一般に高次の特性をもち、そのままでは実際の宇宙システムへの適用には不向きである。このことから、ローカライズド制御の本質を損なうことなく制御器の次数を低減するためのアルゴリズムを確立する。

さらに、ここで提案するローカライズド制御は、有限要素に対するエレメンタル・レギュレータの集大成としてのローカル・レギュレータと有限要素の境界で作用する力とモーメントの抑制器としてのインターフェース・コントローラの線形結合として実現されるものであるが、線形結合の有効性と線形結合のための重み行列の設定方法を導く。これら理論的研究の有効性の評価や妥当性の検証は数学モデルを用いた数値シミュレーションによって行う。

本研究の集大成の集大成は、ローカライズド制御という新しい制御の概念を理論として、そして、制御系設計のための方法論として確立することにある。すなわち、従来の試行錯誤的、あるいは、マクロな評価関数的制御系設計手法の枠を超え、複雑な宇宙システムの局所的振動特性を考慮しながらも比較

的容易に制御系の設計を進めるための方法論を示す。これは、構造と制御の融合の画期的な形態を創造するものであり、極めて独創的である。具体的には、宇宙システムのモデルに対してローカライズド制御器を設計する。着目するのは、振動モードの制振性に対する性能とロバスト性である。その性能と有効性は、数値シミュレーション手法により実証する。

なお、研究の実施に当たっては、宇宙システムの制御の分野において米国でも最先端の研究活動を行っているコロラド大学と連携してその協力を得ながら進める。コロラド大学の Park 博士はローカライズド制御の基本原則を最初に示した研究者であり、本研究の遂行にあたって、最も適切な助言と協力を期待できる。具体的な共同研究の実施は、現地コロラド大学での研究打ち合わせ等の方法により行う。

#### 4. 研究成果

ローカライズド制御とは、構造物の動的挙動を表現するために常微分方程式を用いながらも対象の有限要素的振動特性を考慮できる理論であり、これまでの慣性を超える画期的な制御系設計理論である。特に、最適レギュレータのような一般的な形態を取りつつ、構造パラメータを重み関数に陽に取り込むことによって、制御系の設計において構造特性を直接反映することを可能とした。すなわち、これまでのマクロな設計手法の枠組みの中で、ミクロな振動特性を表現できるという点で、構造と制御の融合として新たな研究領域を拓くものでもある。本研究では、ローカライズド制御という新しい制御の概念を理論として確立し、これを宇宙システムに適用するための方法論を構築したものであり、これまでより複雑な宇宙構造物で構成される宇宙インフラストラクチャの今後の発展において、制御系の設計を簡単かつスムーズにしたという観点で極めて意義が大きい。

本研究では、まず始めにローカライズド制御の基本原則に基づき、これを宇宙システムの振動制御に適用するための基礎を築くべく考察を行った。具体的には、完全状態フィードバックとして構成されるローカライズド制御理論の定式化を確立するとともに、論理的にこれを拡張して、状態推定器により実現するための基礎を固めた。すなわち、完全状態フィードバックの形式を直接出力フィードバックの形式に変換した。これにより、センサー情報を直接フィードバックすることにより制御系を構成することが可能となり、状態推定器の導入を不要とした。ローカライズド制

御の実用的な応用のための、これが出発点となった。

また、基本原理に基づき設計される制御器は一般に高次の特性をもち、そのままでは実際の宇宙システムへ適用することは難しい。このことから、ローカライズド制御の本質を損なうことなく制御器の次数を低減するためのアルゴリズムについて検討を行った。有限要素の切り方によっては数十次元に発達し得るローカライズド制御器を数次元にて実現することが可能となり、実用化に向けて大きな成果を得たと考えることができる。

さらに、ここで提案するローカライズド制御は、有限要素に対するエレメンタル・レギュレータの集合としてのローカル・レギュレータと有限要素の境界で作用する力とモーメントの抑制器としてのインターフェース・コントローラの線形結合として実現されるものであるが、線形結合のための重み行列の設定方法を導いた。重み関数の設定は、制御系の設計に当たっては最も設計者の経験と技量を必要とし、これまでは試行錯誤的作業を避けることができなかったということを考えると、これもまたローカライズド制御の応用にとって意義深い。これら理論的研究の有効性の評価や妥当性の検証のために、数学モデルを用いた数値シミュレーションコードの整備を行った。

以上、本研究では、ローカライズド制御という独創的な制御の概念を理論及び制御系設計のための方法論として確立し、従来の試行錯誤的、マクロな評価関数的制御系設計手法の枠を超え、複雑な宇宙システムに対して比較的容易に制御系の設計を進めることを可能とした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

2009 年度に下記の国際学会にて発表予定。

Y. Morita and K. C. Park, "An Application of Localized Vibration Control for Flexible Space Structures,"

29<sup>th</sup> IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC 2010), February 15-17, 2010, Innsbruck, Austria.

IASTED: International Association of Science and Technology for Development (国際科学技術連盟)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森田 泰弘 (MORITA YASUHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・教授

研究者番号：80230134

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者