

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560784

研究課題名（和文） 不確定性を考慮した宇宙スマート構造の形態創成設計に関する研究

研究課題名（英文） Topology Optimum Design Considering Uncertainty of Space Smart Structural Systems

研究代表者

小木曾 望 (KOGISO NOZOMU)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70295715

研究成果の概要（和文）：

大型アンテナのような宇宙構造システムは、ますます高精度化が求められている。その要求に応える構造様式として、センサやアクチュエータを統合した宇宙スマート構造がある。そのような高精度構造を設計するにあたっては、荷重などの環境条件や材料物性の不確定性、特に不確定性の空間分布を考えることが不可欠である。そこで、本研究では、そのような不確定性の影響を考慮した形態創成設計法として、確率過程を利用するロバストトポロジー最適設計法を開発した。これにより、少ない確率変数で空間変動を含む不確定性を表現できるため、ロバスト設計法として高い計算効率を実現することができる。

研究成果の概要（英文）：

Recently, a large-scale and high precision space structural system is required. A smart structural system that integrates sensors and actuators into the structure is a candidate of such high precision space structures. In designing such a high precision space structure, uncertainties on applied load or material properties should be considered. Such uncertainties often have spatially-varied distributions. For the purpose, we developed a new robust topology optimization approach considering such uncertainty by adopting the stationary stochastic process. Since the stochastic process model can reduce the number of random parameters, the computational efficient design approach is achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：構造・材料

1. 研究開始当初の背景

構造の形態を直接求めることができるトポロジー最適設計法として、レベルセット法に基づく新しい手法が提案された。この手法

は従来の手法と異なり、明瞭な境界形状が得られるため、広い工学的な応用が期待できる。

さらに、このトポロジー最適設計は構造力学だけでなく、電磁気や音響、伝熱問題など

マルチフィジックスと呼ばれる複合領域の設計問題にも適用することが可能で、MEMS センサ、アンテナ、モーターなどの設計に利用されるようになってきた。

これに対し、荷重条件や材料特性などの設計パラメータの不確定性を考慮する設計法として、ロバスト設計法とトポロジー最適設計を組み合わせたロバストトポロジー最適設計が提案され、構造設計問題へと適用されつつある。また、現実的な不確定性として、空間的に変動する不確定性を考慮することが重要となってきた。

一方、今後の大型アンテナなどの宇宙構造システムにおいては、観測要求などから大型で高精度な構造が求められるようになってきている。これを実現するには、従来の構造様式では限界であり、センサやアクチュエータを内蔵したスマート構造システムが一つの候補として考えられている。軽量で高精度なスマート構造システムを実現するためには、空間的な変動分布をもつ不確定性を考慮したロバスト設計とトポロジー最適設計を組み合わせた手法を確立することが望まれた。

2. 研究の目的

上記の背景から、本研究では変動を考慮したロバストトポロジー最適設計に基づく形態創成設計法を構築する。

宇宙展開構造システムとしてふさわしいロバストな宇宙スマート構造の構造形態を提案することにつながるため、本研究では、荷重などの環境特性や材料特性の不確定性に空間的な変動に着目する。

そこで、明瞭な境界形状が得られるレベルセット法に基づくトポロジー最適設計と、空間的な変動を考慮するロバスト設計法を統合した形態創成設計法を開発する。

3. 研究の方法

上述の方法論を構築するために、以下の方法を開発した。

- ① 空間的な変動を定常確率過程を用いて表現するモデルを開発した。確率過程を用いることで、現実的な空間変動を位相が異なる複数の波数の重ね合わせとして、少ない確率変数でモデル化できる利点がある
- ② 比較的小さな変動を線形近似でモデル化するロバスト設計法を構築した。ここでは、構造応答の平均と標準偏差を重み付加重和で表し、これを最小化するように定式化を行った。
- ③ 体積制約のもとで剛性を最大化する構造形態を求める手法であるレベルセット法に基づくトポロジー最適設計法と、上記のロバスト設計法を統合したロバストト

ポロジー最適設計法を構築した。

- ④ さらに、得られた最適形態におけるロバスト性をスペクトル分解することで、確率過程でモデル化する手法を開発した。
- ⑤ 数値計算例を通して、この手法の妥当性を検証した。

4. 研究成果

数値計算モデルを図1に示す。長方形設計領域の側面が固定され、上辺に下向きの空間変動を有する分布荷重が負荷されている。また、ヤング率も空間的に変動するものとし、その確率過程からの実現例を図2に示す。これに対して、体積制約のもとで剛性を最大化する問題を考える。ここで、空間変動する分布荷重は確率過程によってモデル化する。

図3に、ヤング率分布が一樣で、分布荷重も一樣とした場合の確定的最適形態と、ヤング率と荷重の空間変動を考慮したロバスト最適形態を比較する。不確定性を考慮したロバスト最適形態は、確定的最適形態と異なり、下側にもはりが存在する。これにより、

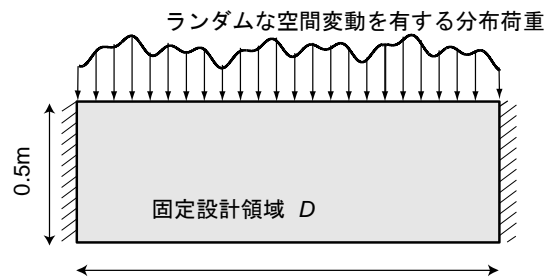


図1 設計領域

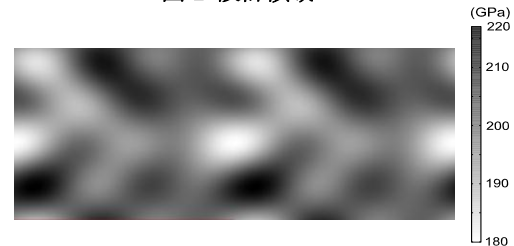


図2 ヤング率空間変動分布の一例

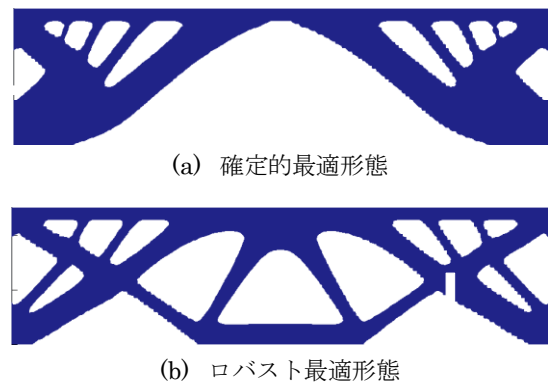


図2 確定的最適形態とロバスト最適形態との比較

ヤング率の空間的変動により、上面中央あたりのヤング率が小さい場合でも、変形を抑え、全体の剛性を確保することにつながっていると考えられる。

これらの構造形態に対して、変動を変化させた場合の平均コンプライアンス(目的関数)の変化を図4に示す。変動が小さいときは確定的最適設計の方が有利であるが、変動が大きくなるとロバスト最適設計の方が有利となるのがわかる。

さらに、この平均コンプライアンスが変動の波数成分に対してどのように変化するかをパワースペクトルで表した結果を図5に示す。この条件では変動に対して波数が小さな成分の影響が大きい。荷重の空間的変動が小

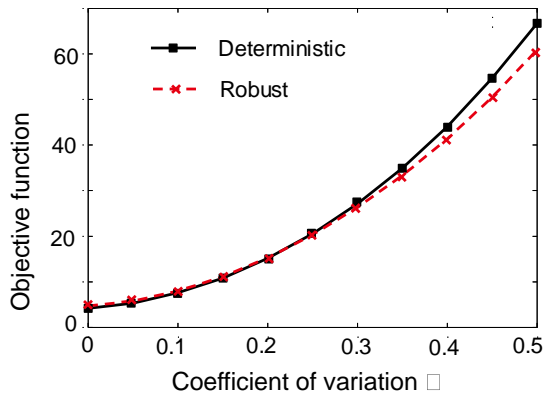
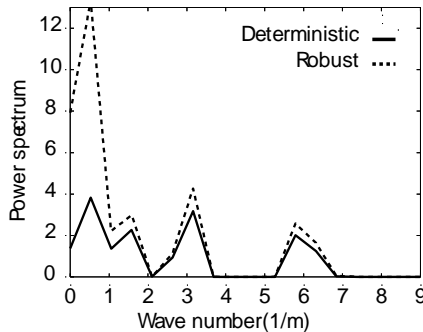
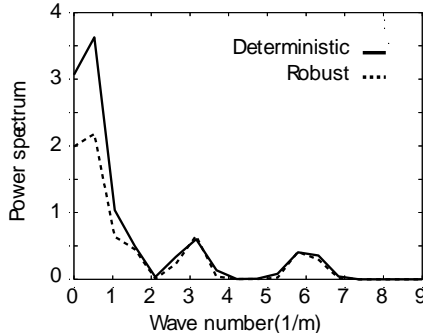


図4 変動に対する目的関数の変化



(a) 荷重の空間変動が小さいとき



(b) 荷重の空間変動が大きいとき

図5 平均コンプライアンスの変動成分のパワースペクトル表現による変動比較

さなときは確定的最適設計の方が平均コンプライアンスの空間変動が小さい。これに対し、荷重の空間変動が大きいときは、ロバスト最適設計の方が平均コンプライアンスの空間変動が小さくなるのがわかる。また、構造応答の変動をパワースペクトルで表すことで、支配的な変動成分を明確にすることができる。

これらを通して、本研究で開発した形態創成設計法の妥当性を検証している。このような数値顕彰例を通して、この形態創成設計法が、宇宙スマート構造の合理的な設計へ適用できることを示した。

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5件)

- ① 小木曾望(1番目), 西脇眞二(5番目) 他3名: レベルセット法に基づくロバストトポロジー最適設計のパラメータがロバスト最適形態におよぼす影響について, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 掲載決定
- ② 植田圭一, 小木曾望(3番目), 西脇眞二(5番目) 他2名: 定常確率過程による不確定性表現を用いたレベルセット法に基づくロバストトポロジー最適設計, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 78, No. 787, 2012, 928-942.
- ③ 小木曾望(1番目), 西脇眞二(5番目) 他3名: 確率過程を利用したロバストトポロジー最適設計, 構造物の安全性および信頼性, 査読有, Vol. 7, 2011, 151-157.
- ④ 乙守正樹, 西脇眞二(4番目) 他2名: 数理計画法を用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 77, No. 783, 2011, 4001-4014.
- ⑤ 平野佑享, 小木曾望(3番目), 西脇眞二(5番目), 他2名: レベルセット法に基づく熱構造連成問題のトポロジー最適設計に対する不確定性を考慮したロバスト設計法, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 77, No. 773, 2011, 1-13.

[学会発表] (計8件)

- ① 植田圭一, 小木曾望(2番目), 西脇眞二(5番目) 他2名: パラメータの空間的な変動を考慮したロバストトポロジー最適設計, 第49回 中部・関西支部合同秋季大会, 日本航空宇宙学会, 2012年11月30日, 名城大学(名古屋市)
- ② 堀尾仁志, 小木曾望(2番目), 西脇眞二, 他1名: レベルセット法に基づくロバストトポロジー最適設計のパラメータ特性

- について, 第 22 回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2012 年 9 月 26 日-28 日, 広島大学(東広島市)
- ③ K. Ueda, N. Kogiso(3 番目), S. Nishiwaki(5 番目) 他 2 名: Level Set-Based Robust Topology Design Considering Spatial Uncertainty, 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2012 年 9 月 17 日~19 日, インディアナポリス(米国)
 - ④ 小木曾望, 他 4 名: ハイブリッド型多目的 PSO を利用した信頼性に基づく多目的最適設計, 第 21 回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2011 年 10 月 21-23 日, 山形大学(米沢市)
 - ⑤ 小木曾望, 他 3 名: ブートストラップ法を用いた宇宙構造の不確定性推定について, 日本機械学会 年次大会 2011, 2011 年 9 月 11-14 日, 東京工業大学(東京都)
 - ⑥ K. Ueda, N. Kogiso(3 番目), S. Nishiwaki(5 番目) 他 2 名: Level Set-Based Robust Topology Optimization Using Stochastic Process Model, 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011 年 6 月 13-17 日, グランシップ(静岡市)
 - ⑦ 山田崇恭, 西脇眞二(4 番目) 他 2 名: レベルセット法に基づくトポロジー最適化問題におけるチョコノフ正則化法の拡張, 第 9 回最適化シンポジウム 2010, 日本機械学会, 2010 年 12 月 10 日, 愛知県産業労働センター(名古屋市)
 - ⑧ 山田崇恭, 西脇眞二(4 番目) 他 2 名: レベルセット法による形状表現に基づく等断面形状制約を考慮したトポロジー最適設計法, 第 20 回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2010 年 10 月 28 日, 産業技術総合研究所臨海副都心センター(東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小木曾 望 (KOGISO NOZOMU)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70295715

(2) 研究分担者

西脇 眞二 (NISHIWAKI SHINJI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10346041

(3) 連携研究者

無し