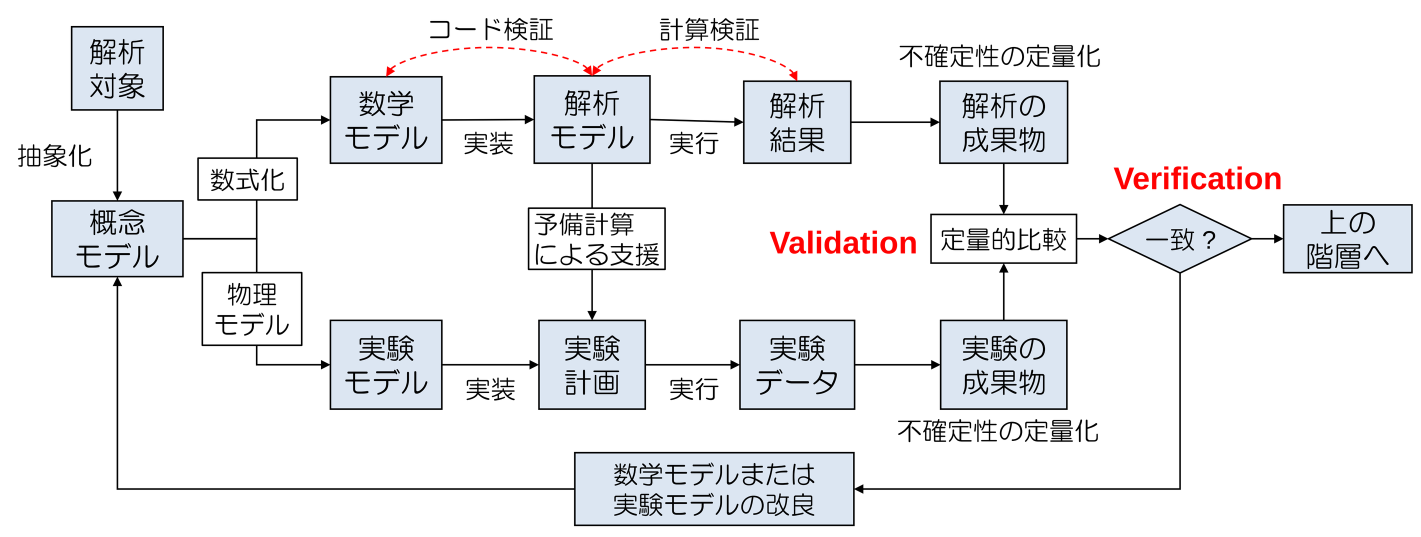
高精度大型宇宙構造システムの開発研究

設計・解析技術の確立にむけて

小木曽 望, 南部 陽介(阪府大), 秋田 剛(千葉工大), 宮崎 康行(日大), 池田 忠繁, 仙場 淳彦(名大), 岩佐 貴史(鳥取大),
荻 芳郎(東大), 坂本 啓, 古谷 寛, 佐藤 泰貴(東工大), 田中 宏明(防衛大), 鳥阪 綾子(青学大), 石村 康生(JAXA)

解析による実証技術の確立

要素レベルからシステムへ向けて妥当性検証



形状精度要求の実現にむけた不確定性モデルの構築

構造解析の高精度化 ← 地上モデル実験との比較による精度検証 ↔ 計測技術の高精度化

理論モデルの定式化誤差
FEM計算モデルの数値誤差

計測誤差の低減

地上実証計測
軌道上計測

不確定性モデルの構築

誤差要因の高精度推定
感度解析と支配的パラメータの同定

スマート構造による高精度形状制御

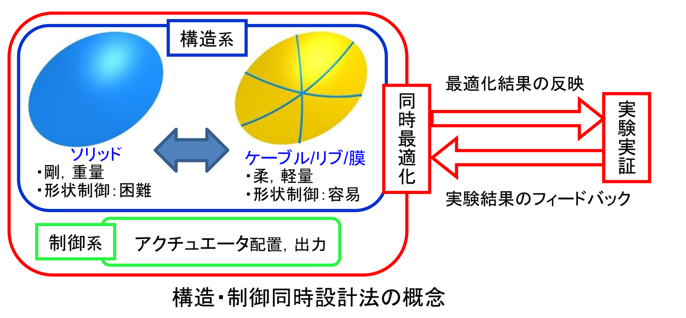
計算統計学手法やデータ同化手法を利用

不確定性や外乱等の影響の低減のための最適設計／ロバスト設計技術

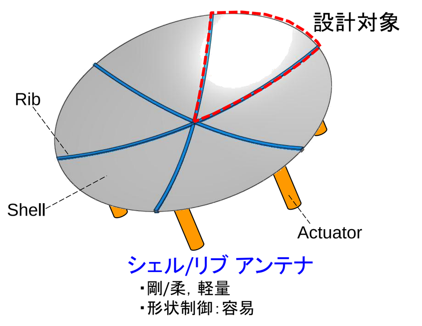
ハードウェアの擾乱／不確定性（製造誤差，経年劣化，材料定数の不確定性等を含む）の影響の低減をめざす

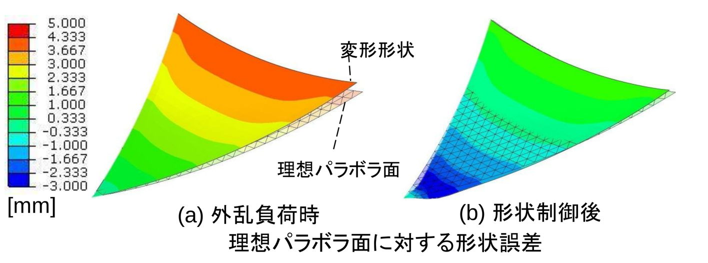
1. 構造・制御の同時設計法の開発

- 構造と制御を同時に最適化し，外乱に対してロバストな高精度大型アンテナの設計手法を検討
  - SEC'12で発表予定
  - ノミナル状態に外乱を負荷し，理想パラボラ面に対する形状誤差のRMS値を最小化



構造・制御同時設計法の概念



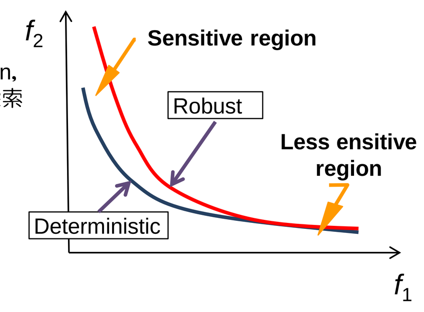


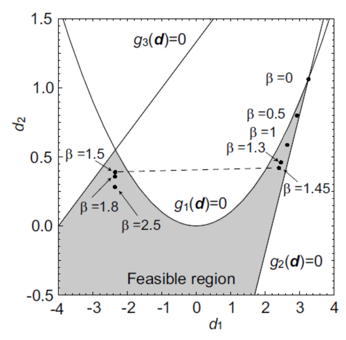
理想パラボラ面に対する形状誤差

	形状誤差 [mmRMS]
外乱負荷時	2.74
構造系最適化（制御系は初期値）	2.22
制御系最適化（構造系は初期値）	2.36
構造制御同時最適化	1.11

2. ロバスト多目的最適設計法の開発

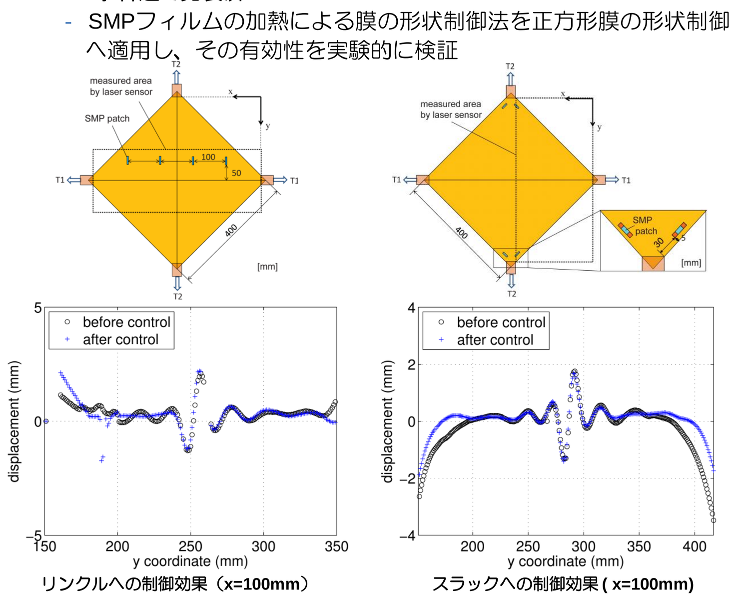
- 研究目標
  1. MOPSO（multi-objective particle swarm optimization，多目的粒子群最適化）によるパレート解の効率的探索
  2. 満足化トレードオフ法のロバスト設計への拡張
- ロバスト多目的最適設計の利点
  - パレート解の変化から，不確定性に影響を受けやすいものと，そうでないものを明確化できる．
- 問題点と解決策
  - 計算効率（制約条件）
    - MOPSOに感度解析を導入
  - 目的関数以上の場合の可視性
    - 満足化トレードオフ法の導入
- 現在
  - さまざまなベンチマーク問題に適用．
- 今後の予定
  - 宇宙構造システムへの適用

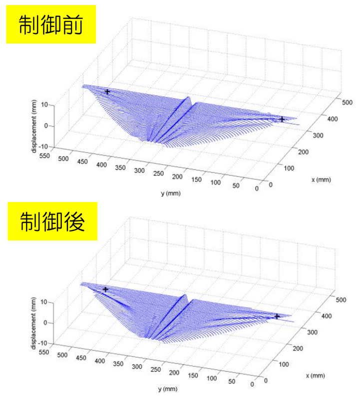




3. アクチュエータのロバスト最適配置設計法の開発

- 膜構造で精度が要求される場合について，形状制御を軌道上で運用期間全体に渡り実施可能な方法として形状記憶ポリマ（SMP）フィルムを利用した方法を提案
  - 宇科連で発表済
  - SMPフィルムの加熱による膜の形状制御法を正方形膜の形状制御へ適用し，その有効性を実験的に検証

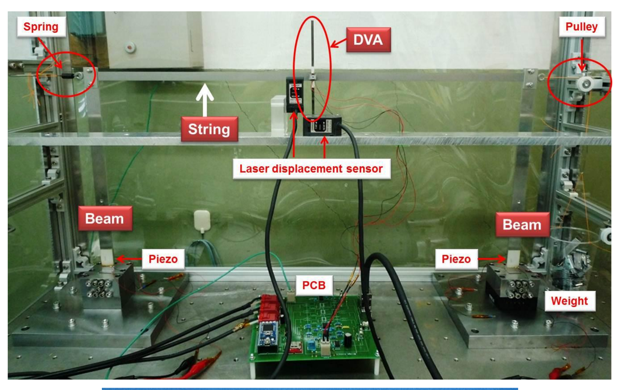


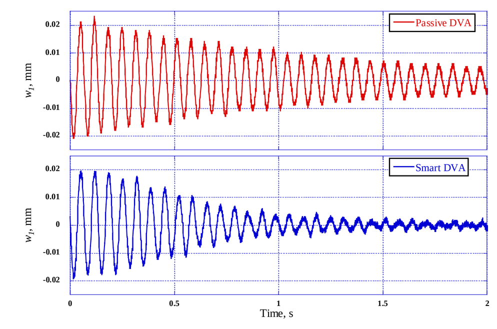


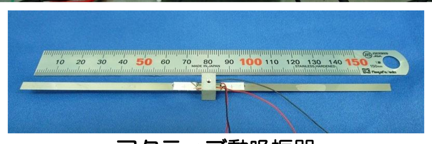
- まずはSMPで形状制御の有効性を確認できた．
- 今後はSMPの最適配置およびロバスト設計手法について研究を進める．

4. マイクロアクティブ動吸振器によるロバスト振動制御

- 張力安定化構造の微小振動を動吸振器によって抑制することを検討
  - 動吸振器の最大の欠点であるロバスト性の低さを克服するために，アクティブ動吸振器を採用
  - スマート構造（梁に圧電素子を貼付）となっており，セルフセンシング振動制御が可能
  - 片持ち梁で支持された弦の制振実験にて有効性を確認







アクティブ動吸振器

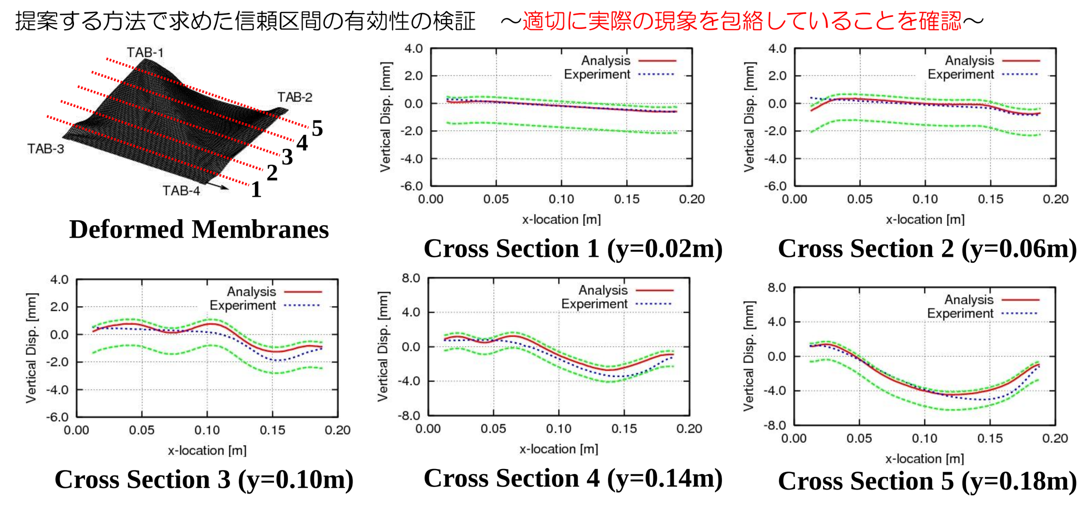
不確定性を考慮した状態推定手法

計算統計学手法やデータ同化手法を利用し，
不確定性を考慮した状態推定・信頼性評価を行う

5. 数値シミュレーション結果の信頼性評価法の検討

- ブートストラップ法を用いた膜面形状解析の信頼性評価法の提案
  - 解析結果に信頼区間を設定し，実際の応答が生じる範囲を予測
  - 信頼区間の大きさから数値シミュレーション結果の信頼度を評価
  - ブートストラップ法の適用により限定された試験データから信頼区間を算出

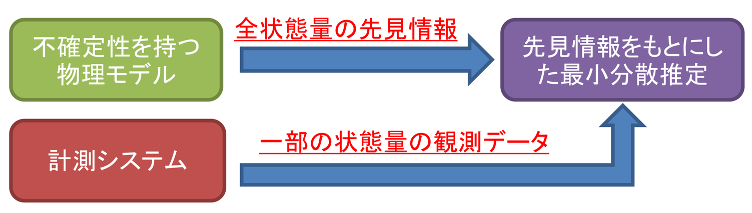
提案する方法で求めた信頼区間の有効性の検証　～適切に実際の現象を包絡していることを確認～



ポリイミドフィルム（膜厚50μm）の膜面形状解析の予測結果

6. 数値シミュレーションと計測データの融合技術の開発

- アンテナ構造制御系の疑似状態フィードバック量をデータ同化により高精度に算出することでスマートアンテナシステムの制御性能を向上させる方法を提案
  - 物理モデル単独の結果に実データの情報を組み込むことで，予測精度が向上
  - 全状態量の推定量が得られるので疑似状態フィードバック制御が可能

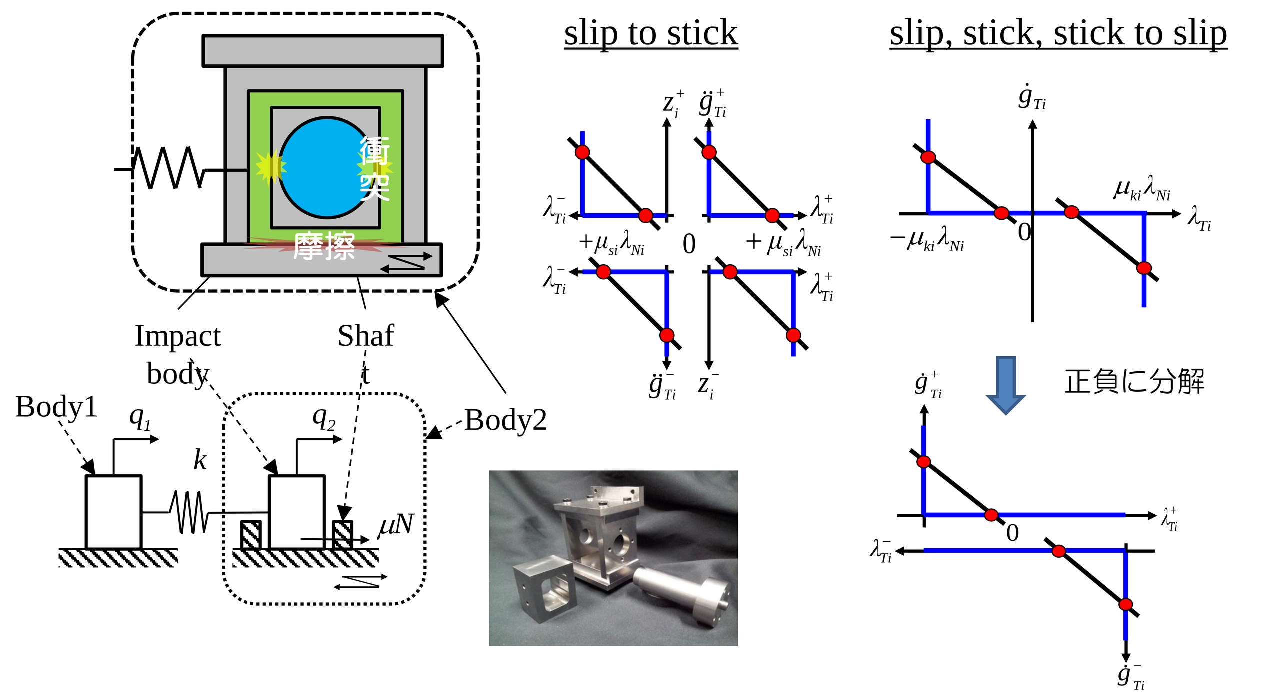


構造の不確定性を考慮した解析技術

ラッチ・ヒンジ・ジョイントのガタ等，
非可逆で構造を不確定にする要因を考慮した解析や展開再現性の評価

7. ガタを有する柔軟構造物の振動モデルの開発

- がた振動による柔軟構造物の応答解析と検証実験



8. ヒンジが形状精度ならびに展開性に与える影響の予測法

- ガタや取り付け誤差が展開構造全体に与える影響を調べる方法を提案
  - 並列化しやすい定式化
  - 特異値分解によりガタ部の不定の方向を評価

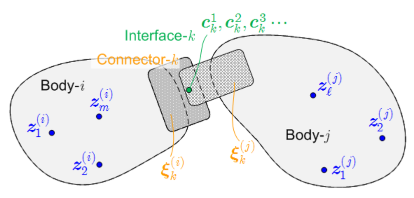
$$L=\sum_{i=1}^{N} L^{(i)}-\sum_{k=1}^{M} V_k$$

$$L^{(i)}=L^{(i)}_{free}-\sum_{k=1}^{M} U^{(i)}_k-l^{(i)T}\left[G^{(i)T}\mathbf{w}^{(i)}-L^{(i)T}\mathbf{c}\right]-\frac{1}{2}\left[G^{(i)T}\mathbf{w}^{(i)}-L^{(i)T}\mathbf{c}\right]^T \mathbf{k}^{(i)}\left[G^{(i)T}\mathbf{w}^{(i)}-L^{(i)T}\mathbf{c}\right]$$

$$\delta x^{(i)}_k=-\left[\mathbf{K}^{(i)}_{\xi k}\right]^{-}\left[\mathbf{p}^{(i)}_k+\mathbf{C}^{(i)T}_{\xi k}\delta \mathbf{z}^{(i)}_n+\mathbf{B}^{(i)}_{\xi k}\delta l^{(i)}_k+\mathbf{D}^{(i)}_{\xi k}\delta \mathbf{c}_k\right]$$

$$=\alpha^{(i)}_k+S^{(i)}_{zk}\delta z^{(i)}_n+S^{(i)}_{lk}\delta l^{(i)}_k+S^{(i)}_{ck}\delta c_k$$

$$\delta \mathbf{q}=\mathbf{A}\delta x^{(i)}_k \quad \begin{cases} \mathbf{A}^{(i)*}_k=-[\mathbf{J}^{(i)*}_k]^{-}\mathbf{P}^{(i)}_k \\ \mathbf{P}^{(i)}_k=\mathbf{Y}^{(i)}_k[\mathbf{C}^{(i)T}_{\xi k}\ \mathbf{K}^{(i)T}_{\xi k}\ \mathbf{B}^{(i)T}_{\xi k}\ \mathbf{D}^{(i)T}_{\xi k}]^T \end{cases}$$



9. ジョイントの荷重変位特性が構造特性に与える影響の調査

- ガタのあるヒンジの展開再現性の評価
- BBM-elementを用いて実験