

A9 SMA ワイヤによる適応的構造精度向上の試み

花原 和之 (神戸大院), 多田 幸生 (神戸大院)

Kazuyuki Hanahara (Kobe Univ.), Yukio Tada (Kobe Univ.)

1. 緒言

大規模かつ高精度な宇宙構造物への期待が高まっている。その代表的な分野の一つに電波天文学があり、地上における観測では大気の影響を大きく受けってしまう周波数帯が存在することや、VLBI(very long baseline interferometry: 超長基線電波干渉法)の適用等から、宇宙空間での観測が特に有望であると考えられている⁽¹⁾。しかしながら、観測対象の電波に対して波長の1/10~1/20程度のアンテナの鏡面精度が必要なことから、例えば43GHzという周波数帯を観測するためには0.4mm RMS程度の精度が要求される。このため、計画されていた電波天文衛星ASTRO-Gでは、直径9mのアンテナに対して1mm RMSという精度が達成可能であると考えられていたが、それでもこのサイエンス要求を満たす0.4mm RMSの達成が困難であると判断されたために計画中止となっている⁽²⁾。

大規模かつ高精度な宇宙構造物の実現のためには、加工精度の向上、軽量かつ高剛性の構造の採用、重力の影響を考慮した地上試験⁽³⁾、精密なモデルによる計算機シミュレーションといったことが必要となる。しかしながら、運用場所である軌道上への設置がロケットによる打ち上げによって行われるため必然的に展開構造⁽⁴⁾となる大規模宇宙構造物は、地上試験の困難さ等もあり、最終運用形態を達成した際の構造誤差を低減させることは容易ではない。そこで、軌道上の運用状況下において適応的に形状を調整する形状可変構造⁽⁵⁾の適用が考えられる。これは、元来は固定のものである構造物に、センサやアクチュエータを実装することにより適応能力を付与した、いわゆる適応構造物⁽⁶⁾の典型的な事例ということもできる。

このような場合のアクチュエータとして、真空中に代表される宇宙環境下での信頼性や軽量性という観点から、形状記憶合金(shape memory alloy: SMA^{(7),(8)})や圧電素子といった、いわゆるスマート材料の利用が考えられる。こういった材料は、その駆動の際にヒステリシス特性を示すものが多いが、このヒステリシス特性を積極的に活用することによる無電力での形状可変状態の保持機能の利用が提案されている⁽⁹⁾。本研究では、SMA ワイヤをアクチュエータとしてこのように用いることにより、軌道上で適応的に精度を向上させる大規模宇宙構造物について考察する。

対象としてSMA ワイヤを配置した長大トラス構造を用い、その基本的な考え方を示す。ヒステリシスを考慮したSMA ワイヤのふるまいのモデルを示し、その静力学変形解析について述べる。SMA ワイヤの単なる加熱・冷却では高精度の駆動は困難である。そこで、個々のSMA ワイヤには駆動誤差が存在することを前提とした、構造全体としての精度向上のためのSMA ワイヤの駆動計画を提案する。計算機シミュレーションにより、提案するアプローチの有効性について検討する。

2. 基本的な考え方

軌道上の大規模高精度アンテナの基本構造をトラスとして実現することを考える。宇宙空間におけるこのような構造システムの形状調節のためのアクチュエータに求められる特性として、以下のようなものが挙げられる。

- (1) 打ち上げコスト低減のため、軽量であること。
- (2) 利用できる電力が限られているため、低消費電力であること。
- (3) 高精度の形状調節のための微小変形が達成可能であること。
- (4) メンテナンスが困難であるから、高い信頼性があること。
- (5) 可能であれば、恒常的な電力消費を避けるため、無電力状態で駆動後の形状を保持できること。

上記のような条件を満たすアクチュエータとして、以下のような観点から、SMA ワイヤを用いることを考える。

- (1) 軽量である。
- (2) 準静的に個別に駆動するのであれば、必要な消費電力を抑制できる。

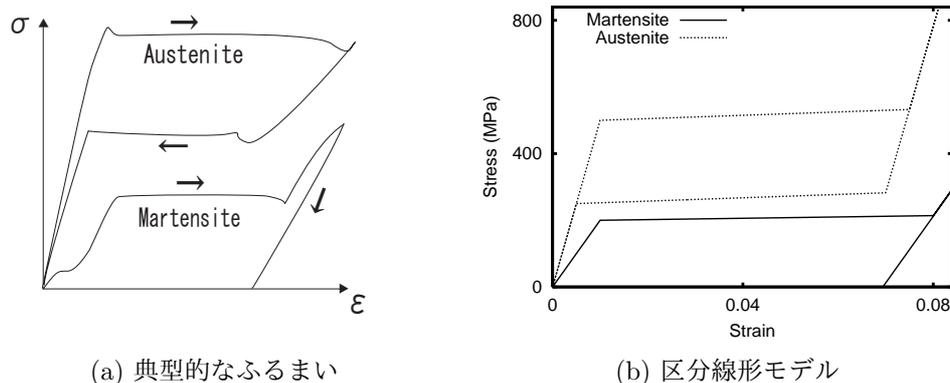


図 1: 形状記憶合金特性の区分線形モデル

- (3) 実装方法を工夫すれば、駆動による変形を微小とすることも可能である。
- (4) モータ等の機械的な可動部がないため、故障の可能性を低減できる。
- (5) ヒステリシス特性の利用により、無電力状態で変形後の形状を保持できる⁽⁹⁾。

本研究では、特に (5) の点に着目している。すなわち、初期ひずみを与えた状態で構造物に装着された SMA ワイヤを通電加熱すれば、形状記憶効果の発現による収縮力により構造物に形状変形が生じる。熱の放射や伝達による SMA ワイヤの冷却後は基本的には元の構造形状が回復されるが、SMA のヒステリシス特性により、微小な変形が残留する。この残留微小変形により構造形状の調節を行う。

このような駆動方法では、個々の SMA ワイヤによって達成される形状変形の精度は期待できない。そこで、精度は低いものの微小変形を実現する SMA ワイヤを多数実装することにより、集合的・分散的に構造全体の形状調節を行うことを考える。なお、個々のアクチュエータの精度が期待できない場合であっても、全体としては目的にかなった形状制御が可能であることが過去の研究⁽¹⁰⁾で示されている。

3. 形状記憶合金の特性のモデル

図 1(a) に形状記憶合金における典型的な応力-ひずみ関係を示す。下側がマルテンサイト相 (低温時)、上側がオーステナイト相 (高温時) である。この図に示されているように、それぞれの応力-ひずみ関係にはヒステリシスが存在し、また極めて非線形なものとなっている。このようなふるまいの定式化を精密に行い、これを用いて必要な数値計算を行うことは容易ではなく、また、そもそも本研究では、高い精度での形状変形を個々の SMA ワイヤの駆動で達成することを想定していない。そこで、図 1(a) に示す力学的ふるまいを図 1(b) に示すように区分線形化して取扱う。

ヒステリシス特性を考慮する場合、応力-ひずみ関係は一対一対応とはならない。そこで各々の相状態に対し、以下の形式で形状記憶合金の力学特性の定式化を行う。まず、特性曲線の輪郭を以下の形式で記述する。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\epsilon) \quad \underline{\sigma} = \underline{\sigma}(\epsilon) \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ はひずみゼロの状態から単調にひずみを増加させた場合の応力 (輪郭の上側) であり、 $\underline{\sigma}$ は十分な引張りの後に単調にひずみを減少させた場合の応力 (輪郭の下側) である。また、ヒステリシス特性を考慮するため、ヤング率を以下のように記述する。

$$E_+ = E_+(\epsilon, \sigma) \quad E_- = E_-(\epsilon, \sigma) \quad (2)$$

ここで、 E_+ はひずみ増大時、 E_- はひずみ減少時の値であり、ヒステリシスループを表す応力-ひずみ特性曲線の輪郭の上側と下側ではこの両者は異なる値をとる。また、その内部におけるヤング率は、左端部と右端部の傾きの線形補間により決定する。

図 1 と式 (1) および (2) からわかるように、形状記憶合金の応力-ひずみ関係は一対一とはならず、荷重履歴に依存することにも注意が必要である。

4. SMA ワイヤの相変態によるトラス構造の変形の静力学計算

トラスの全節点位置ベクトルを \mathbf{X} , 全部材長ベクトルを $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_R^T, \mathbf{L}_W^T]^T$ とする. ここで, \mathbf{L}_R は通常部材に対応し, \mathbf{L}_W が SMA ワイヤに対応する. これらの間に以下の形式の幾何学的関係式を構築することができる.

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}(\mathbf{X}) \quad (3)$$

SMA ワイヤが自然長であるときの全部材長ベクトルを $\underline{\mathbf{L}} = [\underline{\mathbf{L}}_R^T, \underline{\mathbf{L}}_W^T]^T$ とする. ここで「自然長である」とは, そのひずみが存在しない場合, すなわち図 1(b) における原点の状態を示し, トラス構造に実装された SMA ワイヤの初期状態の長さではないことに注意が必要である. この状態からの変形をまとめたベクトルを $\hat{\mathbf{R}}$ とすれば, SMA ワイヤにたるみが存在しない場合, $\mathbf{L} = \underline{\mathbf{L}} + \hat{\mathbf{R}}$ となる. 通常部材の力学特性ならびに式 (1) および (2) で表わされる形状記憶合金の力学特性による, 変形状態 $\hat{\mathbf{R}}$ とこれまでの荷重履歴によって定まる部材軸力を $\hat{\mathbf{H}}$ とする. 変形状態の変化 $\Delta\mathbf{R}$ に対応する部材軸力の変動分を

$$\Delta\mathbf{H} = \hat{\mathbf{K}}_L \Delta\mathbf{R} \quad (4)$$

と表わす. ここで $\hat{\mathbf{K}}_L = \text{diag}[\hat{\mathbf{K}}_R, \hat{\mathbf{K}}_W]$ は変形状態 $\hat{\mathbf{R}}$ における部材剛性からなる対角行列である. ただし, 通常部材に対応する $\hat{\mathbf{K}}_R$ は定数であり, SMA ワイヤに対応する $\hat{\mathbf{K}}_W$ の要素は個々の SMA ワイヤの状態と荷重履歴にもとづいて図 1(b) の特性を反映したものであり, 式 (2) に示したように, 変形 $\Delta\mathbf{R}_W$ の方向にも依存したものとなることに注意する必要がある.

式 (3) を参照したヤコビ行列を用いれば, 節点外力 \mathbf{F} との間に以下の関係が成り立つ.

$$\left(\frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}}\right)^T (\hat{\mathbf{H}} + \Delta\mathbf{H}) = \mathbf{F} \quad (5)$$

ただし, 本研究では $\mathbf{F} = 0$ としている. また, 同様のヤコビ行列を用い, 部材変形状態の変化 $\Delta\mathbf{R}$ とこれに対応する節点変位 $\Delta\mathbf{X}$ の間の次の線形関係が得られる.

$$\Delta\mathbf{R} = \frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}} \Delta\mathbf{X} \quad (6)$$

式 (5) に (4) および (6) を代入して整理し, 次式を得る.

$$\left(\frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}}\right)^T \hat{\mathbf{K}}_L \frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}} \Delta\mathbf{X} = \mathbf{F} - \left(\frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}}\right)^T \hat{\mathbf{H}} \quad (7)$$

ここで,

$$\hat{\mathbf{K}} = \left(\frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}}\right)^T \hat{\mathbf{K}}_L \frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}}, \quad \hat{\mathbf{F}} = \left(\frac{\partial\mathbf{L}}{\partial\mathbf{X}}\right)^T \hat{\mathbf{H}} \quad (8)$$

とおけば, 式 (7) は

$$\hat{\mathbf{K}} \Delta\mathbf{X} = \mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}} \quad (9)$$

となる.

SMA ワイヤの加熱あるいは冷却による力学特性の変化等によって系の平衡状態が失われた場合, 新たな姿勢は再構築した式 (9) の平衡状態に対応する $\Delta\mathbf{X}$ によって求められる. すなわち, 式 (9) を構築し, これを $\Delta\mathbf{X}$ について解き, 式 (6) から $\Delta\mathbf{R}$ を求め, $\hat{\mathbf{K}}_L$ の構築に際して想定した各 SMA ワイヤ部材の変形増分の符号と比較してその変形の向きに矛盾がある場合にはこれを修正して式 (9) の再構築を行い, 繰り返し解くことにより, 力学状態として矛盾のない平衡状態としての現在の状態からの節点変位 $\Delta\mathbf{X}$ を得, これにより \mathbf{X} を更新する.

5. SMA ワイヤの駆動計画

節点位置ベクトル \mathbf{X} のうち, 高精度での目標位置の達成が求められる部分ベクトルを \mathbf{W} , その目標値を $\underline{\mathbf{W}}$ で表す. また, SMA ワイヤの駆動状態を表す二値変数ベクトル \mathbf{B} を導入する. ここで, \mathbf{B} の各成分は個々の SMA ワイヤに対応し, 0 は駆動前の初期状態, 1 は加熱と冷却という駆動を行った後の SMA ワイヤであることを示す.

本研究における SMA ワイヤの駆動計画問題は、基本的には次のように表される。

$$\text{Minimize } E = \frac{1}{2}(\mathbf{W}(\mathbf{B}) - \underline{\mathbf{W}})^T(\mathbf{W}(\mathbf{B}) - \underline{\mathbf{W}}) \text{ subject to } \mathbf{B} \quad (10)$$

ただし、実際の駆動に際しては以下の点に注意する必要がある。

- (i) 駆動は不可逆である。個々の SMA ワイヤに対し駆動は一度限りで取消しはできない。
- (ii) 駆動には誤差がある。2 節でも述べたように、このような駆動方法では高い精度は期待できない。
- (iii) 駆動順序を考慮する必要がある。SMA の特性の非線形性と相互干渉による影響は無視できない。

したがって、SMA ワイヤの駆動は、達成されている形状と目標値との誤差の状況をセンシング機器を用いて確認しつつ、逐次的に行うこととなる。

本研究では、全ての SMA ワイヤに対して以下に示す形状修正係数を初期状態において求めておき、これを用いて SMA ワイヤの駆動計画問題 (10) を逐次的に解く。

SMA ワイヤ n を単独で加熱した後に冷却して達成される \mathbf{W} の変化を、4 節で示した静力学計算により求め、これを形状修正係数 $\Delta\mathbf{W}_n$ とする。

ところで、上記 (iii) で述べたように、個々の SMA ワイヤの駆動により達成される形状変化は実際にはその順序に影響されるため、これを考慮するためには、全ての $\Delta\mathbf{W}_n$ の計算を、駆動する SMA ワイヤの決定の際に毎回実施する必要がある。しかしながら、本研究の想定では、SMA ワイヤの駆動によって達成される形状変化は微小であり、そもそも個々の SMA ワイヤの駆動による形状修正の精度は (ii) に示したように期待できないため、 $\Delta\mathbf{W}_n$ に及ぼす駆動順序の影響を考慮する意義は小さい。

形状修正係数 $\Delta\mathbf{W}_n$ にもとづく適応的構造精度向上のための SMA ワイヤの駆動手順を以下に示す。

局所探索的逐次駆動アルゴリズム

- (0) 準備: 全ての $\Delta\mathbf{W}_n$ を計算しておく。
- (1) 誤差計測: $\mathbf{W}_{err} = \underline{\mathbf{W}} - \mathbf{W}$ を計測する。
- (2) 探索: まだ駆動していない SMA ワイヤ n の中で $|\mathbf{W}_{err} - \Delta\mathbf{W}_n|$ を最小とするものを探す。
- (3) 終了判定: $|\mathbf{W}_{err}| < |\mathbf{W}_{err} - \Delta\mathbf{W}_n|$ であれば形状修正を終了する。
- (4) 駆動: SMA ワイヤ n の加熱・冷却により形状修正を行う。
- (5) 繰り返し: 手順 (1) より繰り返す。

この手順は、現在計測されている誤差に対し、その単独での駆動 (加熱・冷却) による修正効果が最大となる SMA ワイヤの駆動を逐次的に行うものである。したがって、いわゆる最急降下法と同様、単純な局所的な評価のみにもとづくものであり、大域的最適解への到達を保証するものではないことに注意が必要である。

6. 計算機シミュレーションによる有効性の検証

一辺 1m の正方形トラスを組み合わせた全長 30m のトラス構造による計算機シミュレーションにより、提案する構造精度向上手法の有効性を検証する (図 2, 図 3)。構造精度を評価する目標節点位置ベクトル \mathbf{W} として構造の左端節点列を採用する。また、SMA ワイヤは左端列以外の各正方形トラスに斜め部材として実装している。トラス構造の通常部材には断面積 50mm^2 のアルミ棒を用いる。SMA ワイヤは、材料として図 1(b) に示す特性を持つ NiTi を想定した、 0.1mm^2 の断面積のものを用いる。また、SMA ワイヤに与える初期ひずみは 4%としているが、個々の SMA ワイヤの駆動の際に発生する誤差を考慮して最大 $\pm 3\%$ のばらつきを与えている。

一様乱数により発生させた個々の部材長の誤差が 0.1mm である場合の計算機シミュレーションの結果を図 2 に示す。図 2(a) は 2 列構成、(b) は 3 列構成となっているが、同数の SMA ワイヤが実装されている。各図の左に示す破線と実戦により、左端節点列の目標位置と拡大された誤差を示している。また、駆動された SMA ワイヤは誤差

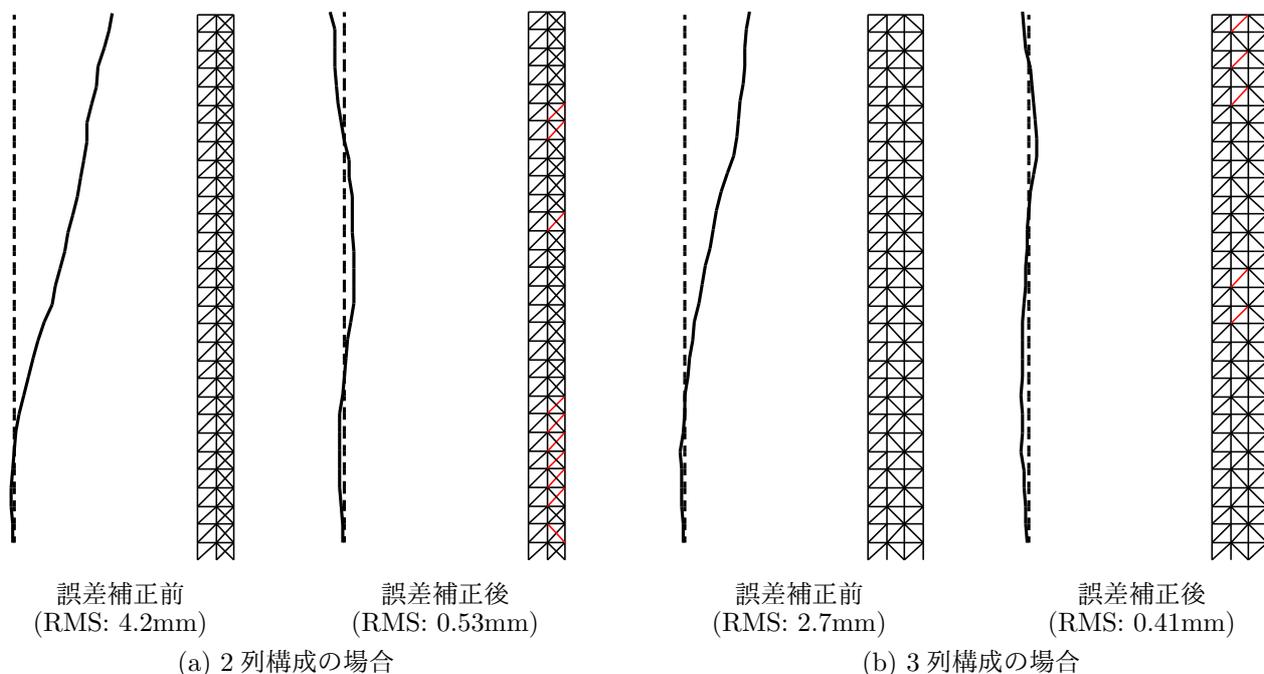


図 2: 形状修正シミュレーション結果 (部材長誤差 0.1mm: 目標誤差は 500 倍で表示)

補正後の図中に赤で示している。これらの結果において、目標節点誤差の RMS 値が $1/6 \sim 1/8$ に低減されていることが確認できる。

図 3(a) に、個々の部材長の誤差が 0.3mm である場合のシミュレーション結果を示す。この場合にも誤差が $1/7 \sim 1/8$ に低減されており、各部材長の誤差が 0.1mm であった図 2 に示した場合より駆動する SMA ワイヤの数が増えていることがわかる。また、図 3(b) に、形状修正の影響が構造全体に比較的均等に及ぶことを企図し、提案する逐次駆動アルゴリズムを多段的に適用した場合の結果を示す。これは、第 t 段階における目標値 $\underline{W}(t)$ を

$$\underline{W}(t) = \frac{t}{T}(\underline{W} - \underline{W}^{ini}) + \underline{W}^{ini} \quad (11)$$

とし、提案する駆動計画を T 回繰り返して実施するものである。ここでは、 $T = 10$ 段階で行っている。同一の初期条件で行った図 3(a) および (b) の比較から、この多段階アプローチはある程度有効であるようにも見えるが、初期条件によってはそれほど有効でない場合も見られた。

7. 結言

スマート材料によく見られるヒステリシス特性は、精度のよい制御という観点からは厄介なものであるが、エネルギーの散逸による振動抑制等では積極的に活用されている。本研究では SMA ワイヤのヒステリシス特性を利用した、無電力状態でも修正形状を保持できる適応的構造精度向上を取扱った。形状記憶合金の特性の区分線形モデルにもとづく静力学計算による、準静的な駆動を想定した逐次的駆動計画のアプローチを提案した。計算機シミュレーションにより提案手法の有効性を検証し、SMA ワイヤの状態に多少のばらつきがある場合であっても構造誤差を大幅に低減できることを示した。これは、個々の SMA ワイヤの駆動が二値的なものに限定されるものの多数の実装によりある程度の詳細な形状変化を可能としたことと、駆動計画を逐次的に実施することによって個々の SMA ワイヤのばらつきの影響を吸収したことによる。

得られた計算例から、比較的単純なアプローチではあるが、基本的な有効性を確認することができたと考えている。今後の課題として次のようなものが挙げられる。計算に用いた形状記憶合金特性のモデルは区分線形化した比較的単純なものであったが、より詳細なモデルを用い、必要な電力や加熱および冷却の過程も考慮した、より実際に近いシミュレーションを実施する必要がある。駆動計画の手法を改善し、より良い解を現実的な処理時間で求めるための手法について検討を行う。構造質量や想定される誤差に対する有効性等を考慮した、トラス構造と SMA

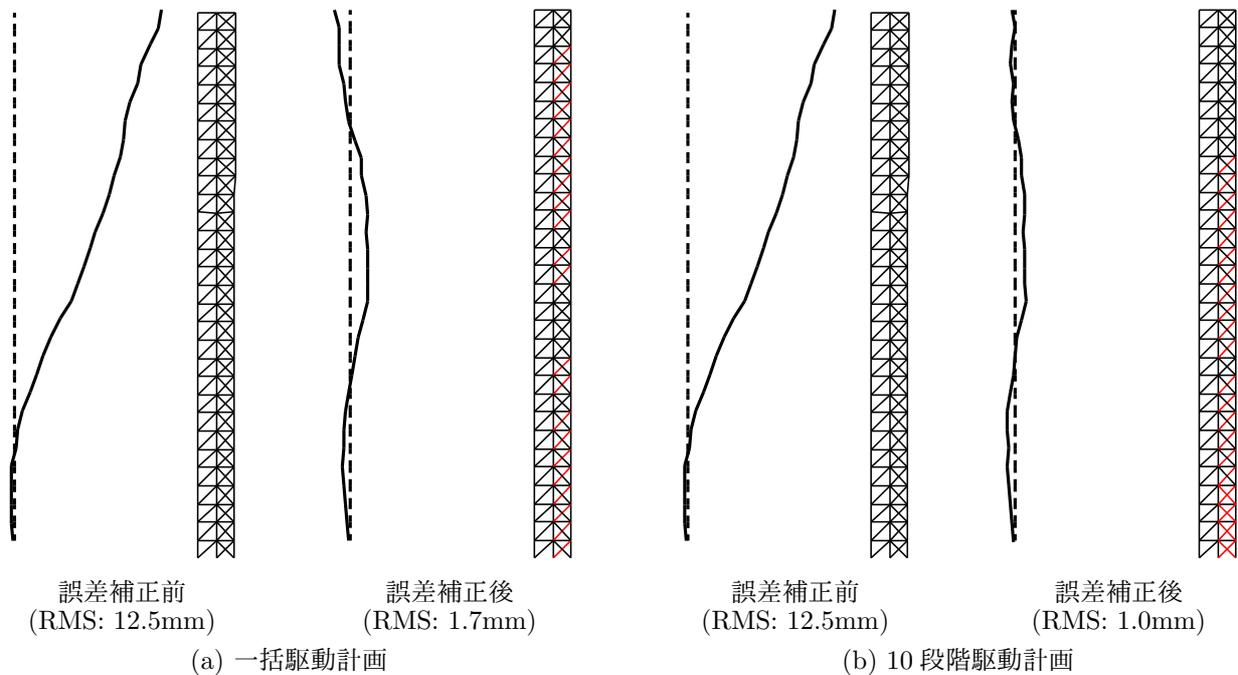


図 3: 形状修正シミュレーション結果 (部材長誤差 0.3mm: 目標誤差は 250 倍で表示)

ワイヤ部材の特性 (太さや初期ひずみの大きさ) や配置の設計方法も重要な課題である。計算機シミュレーションの結果を実験によって検証することも必要である。これらの項目については別途機会を得て報告したい。

参考文献

- (1) 村田泰宏, “宇宙からの電波天文学に必要な宇宙構造 (宇宙科学を支える構造材料技術)”, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, W191001, 2013.
- (2) 例えば, 電波天文衛星 (ASTRO-G) の状況について, 宇宙科学研究所, 2011, http://www.jaxa.jp/press/2011/08/20110824_sac_astro-g.pdf
- (3) 三澤 正吉, 目黒 在, “衛星搭載用大形アンテナの展開特性と展開信頼度の推定”, 日本機械学会論文集 (C 編), 59 巻 563 号, 104-111, 1993.
- (4) 名取通弘, “宇宙構造物工学の概要”, 土木学会論文集, Vol.410/I-12, 1-16, 1989.
- (5) Miura, K. et al., “Variable Geometry Truss and Its Application to Deployable Truss and Space Crane Arm”, Acta Astronautica, Vol.12, No.7/8, 599-607, 1985.
- (6) Wada, B. K., et al., “Adaptive Structures”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.1, No.2, 157-174, 1990.
- (7) 戸伏ほか 3 名, 形状記憶材料とその応用, コロナ社, 2004.
- (8) Lagoudas, D. C. 編, Shape Memory Alloys (Modeling and Engineering Applications), Springer, 2008.
- (9) 池田忠繁, “宇宙構造への適用を目指したスマートアクチュエータ”, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, W191004, 2013.
- (10) Tanaka, M. and Hanahara, K., “Stochastic Approach to Static Control of Adaptive Truss under Imperfection of Adjustable Member Lengths”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.3, No.4, 617-630, 1992.