

[別紙 2]

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名

樺島 重憲

高い比剛性が要求される衛星構造の形態としては、複合材料表皮を有するハニカムサンドイッチパネルが有利であるが、衛星の高性能化に伴い、衛星構造の寸法安定性に対する精度要求はますます厳しくなっている。このため本研究においては、寸法安定性に優れた複合材料表皮を有するハニカムサンドイッチパネルを実現して、衛星構造へ適用することを目的とし、 $0.1 \times 10^{-6}/K$  の精度でのハニカムサンドイッチパネルの熱膨張率制御技術の開発に取り組んだもので、本文は7章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景とハニカムサンドイッチパネルの技術的課題を示し、本研究の目的および本論文の構成について述べている。

第2章では、サンドイッチパネルの熱膨張率を正しく測定するために必要な試料寸法を有限要素解析により検討し、これをもとに熱膨張率を測定するシステムを開発し、標準試料を用いて評価したところ、概ね  $0.1 \times 10^{-6}/K$  の測定精度を持つことを示している。また、測定作業が容易な汎用の熱膨張率測定装置が活用できれば有用であるとの観点から、汎用の熱膨張率測定装置を用いてハニカムサンドイッチパネルの熱膨張率を測定した場合の精度を、有限要素解析および実測によって検討し、 $0.2 \times 10^{-6}/K$  程度の誤差を許容すれば汎用装置による測定が有用であることを明らかにしている。

第3章では、ハニカムサンドイッチパネルの熱膨張率の計算法として、サンドイッチパネルを構成する表皮、接着剤、コアといった材料の実際の挙動を考慮し、汎用の有限要素解析プログラムを用い、ハニカムサンドイッチパネルのユニットセルのみをモデル化し、ユニットセルには周期境界条件を導入して、多数のユニットセルをモデル化した場合と同様の計算精度が得られるようにし、さらに、ハニカムコアの初期不整の影響や、接着剤の塗布形態の影響などを考慮して、モデル化の手法を開発している。このユニットセルモデルによる計算結果と、異なった方法で接着された複数のサンドイッチパネルの熱膨張率の実測の結果を比較したところ、およそ  $0.1 \times 10^{-6}/K$  の精度で一致し、この計算法が十分に高い計算精度を持っていることを確認している。

第4章では、実際のハニカムサンドイッチパネル構造の熱膨張率を所望の値に制御する上で必要な、設計・製造の過程での熱膨張率の変動に関する検討を行うため、サンドイッチパネルの設計・製造の過程で、設計値と実際の製品の特性値に不一致をもたらす要因（変動要因）を分析し、設計時の変動要因である、構成材料の材料定数の見積り違いや、設計時の変動要因である、製造パラメータのばらつきの影響を、ユニットセルモデルを用いて計算している。この結果、各変動要因の影響度を示し、設計値と実際の製品の特性値の不一致を小さく抑えるために、設計・製造時に留意すべき点が明らかにしている。また、接着剤をコアのエッジ部にのみに塗布するレティキュレーションというプロセスが、熱膨張率の変動を小さくする効果をもつことを示している。

第5章では、実際の衛星構造の性能保証の観点から、ハニカムサンドイッチパネルの熱膨張特性に対して、衛星軌道上の熱サイクル（-198℃～130℃）が与える影響を調べ、エポキシ樹脂をマトリックスとする積層板においては、熱サイクル負荷によりマイクロクラックが発生して、熱膨張率の低下が生じる一方、高靱性のシアネートエステル樹脂をマトリックスとする積層板では熱膨張率の低下が見られないことを示している。また、ハニカムサンドイッチパネルにおいては、表皮の熱膨張率の低下がハニカムサンドイッチパネルの熱膨張率低下を引き起こすが、表皮のマトリックスをシアネートエステル樹脂とすれば、そのような低下は起こらないことも明らかにしている。

第6章では、以上の検討結果を利用して、ハニカムサンドイッチパネルからなる衛星構造を実際に設計・試作・評価した例を示している。第一の例は、低熱膨張と低電波透過損失という要求性能を満たすデュアルグリッドアンテナ用ハニカムサンドイッチパネルで、アラミド繊維を基材とするハニカムサンドイッチパネルを設計・製作し、所期の通信性能を有することを確認している。第二の例は、衛星構体の地球指向面パネルに用いるヒートパイプ埋込ハニカムサンドイッチパネルで、低熱膨張かつ高熱伝導で、表皮とヒートパイプの熱膨張率差で表皮が破損することなく、必要な強度・剛性を有するハニカムサンドイッチパネルを設計・製作し、必要な性能が満たされていることを確認している。

第7章は結論で、本論文の成果を総括したものである。

以上を要するに、本論文は、複合材料表皮を有するハニカムサンドイッチパネルの熱膨張率の測定法、計算法を検討し、設計・製造の過程での熱膨張率の変動、熱サイクル負荷による熱膨張特性の変化について検討し、 $0.1 \times 10^{-6}/K$ の精度でのハニカムサンドイッチパネルの熱膨張率制御を可能とし、実際の衛星構造開発において寸法安定性に優れたハニカムサンドイッチパネル衛星構造を実現可能としたものであり、工学とくに複合材料工学の発展に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。