大型パネルの表裏温度差による熱変形の評価^{*1}
Thermal Deformation of a Large Space Panel Caused by Temperature
Difference between Front and Rear Sides

市川直樹^{*2}・黒河治久^{*2}
Naoki ICHIKAWA, Haruhisa KUROKAWA
矢島信之^{*3}・小鍛治繁^{*2}
Nobuyuki YAJIMA, Shigeru KOKAJI
鈴木章夫^{*2}
and Akio SUZUKI

Key Words: SAR Antenna, Thermal Deformation, Measuring System, FEM

Abstract

This paper describes the development of a ground test system for determining the thermal deformation of large antenna panels to be used in space. The system is designed to measure the deformation occurring as a result of temperature differences between the front and rear surfaces of the panel. In the experimental set-up, a symmetric honeycomb panel was used. The front surface of the panel was heated by infra-red radiation, and the deformation was determined using a fringe scanning moiré system which measured the shape of the rear surface. It was found that the temperature difference realized by the system was of the same order as was estimated on the orbit. The variations in the temperature difference were less than 15% of the average value. The effects of temperature distribution on the deformation were evaluated to be negligible by a Finite Element Method (FEM) calculation.

1. はじめに

近年、軌道上を回る人工衛星に高精度かつ大型なアンテナパネルを搭載しようとする計画が増えてきている。例えば、地球資源探査衛星1号(JERS-1)に搭載される合成開口レーダ(SAR)の場合、パネルの大きさは横約12m、縦約2.2mで、その平面精度には解像度の要求から翼端で理想平面からの変形が±10mm

以内という条件が課せられている。このような大型で、かつ平面精度の要求の厳しいアンテナパネルでは、宇宙での厳しい熱環境による微小な熱変形が問題となってくる。1980年にSARアンテナを衛星に搭載した例が報告されているが¹⁾、その中ではこの種の変形に対する検討はなされていない。しかし、今後このようなパネルを要求するミッションは更に増えてくるものと思われ、より詳細な推定を地上で簡便に行う必要が生じてくるものと考えられる。

こうした大型の、特に平面状パネルの熱変形としては、次の2種類が考えられる。

- 1) 異種の(熱膨張率の違う)物体が張り合わされていたり、挿入されているために、パネルの構造が不均質になったことが原因で生じる変形。全体的に均一な温度変化であっても生じる、いわばバイメタル効果による変形である。
- 2) 均質な、あるいはバイメタル効果がないように設計されているパネルであるが、各々の部位(表と裏等)の温度の差による熱膨張量の違いで生じる変形。

均質性に十分注意が払われていても、パネルが大型で、かつ表裏での温度差が発生する場合には2の変形を無視することはできない。1の変形についてはパネルを恒温室に置いて測定するなど、比較的容易に地上で実験、評価ができる。JERS-1に搭載されるSARアンテナパネルの場合もパネルの一部を恒温室で測定した報告がなされている²⁾。一方、2の変形については現在のところ、有限要素法などの計算機シミュレー

^{*1} 平成3年9月2日原稿受理

^{*2} 工業技術院機械技術研究所物理情報部

^{*3} 宇宙科学研究所

ションによって推定しているに過ぎない^{3,4)}。こうしたシミュレーションの妥当性の評価のためにも、この2の変形を地上で簡便に実験、評価できることが必要となる。しかし、これまで表裏温度差による変形が特に問題となるような大型パネルを利用するミッションがなかった事もあり、特に表裏温度差による熱変形を測定するような実験システムを開発した例はほとんど報告されていない。また、軌道上の温度環境を実験的にシミュレートするために使われるスペースチャンバ中では、こうした微小な変形の測定は一般に難しいため、地上で簡便に実験できるシステムが求められている。

パネルの表裏温度差による変形を地上で簡便に実験・評価できるシステムの開発には、被験体であるパネルの表裏に温度差を生じさせる加熱システムと、その結果生じる熱変形の測定システムの各々の開発が必要である。パネルの変形を測定するシステムについてはすでに報告してあるので⁵⁾、ここでは主にパネルの温度差を表裏で均一に、かつ軌道上と同程度に与えられるような地上用加熱システムの概要と、実際に模擬のハニカムパネルに対して行った熱変形実験の結果について報告する。また、こうしたハニカムパネルの有限要素法によるシミュレーションモデルを作り、実験結果を利用してモデルの妥当性を調べると共に、今回の加熱方法ではどうしても生じてしまうパネル温度の不均一性が変形に及ぼす影響の評価を行った。

2. 軌道上でのパネル温度の推定

まず、前出のSARアンテナパネルを例にとり、その軌道上での温度状態を節点法⁶⁾でシミュレートし、全体的な温度変化およびパネルの表裏でどの程度の温度差が生じるかを調べた。このパネルは、3枚のFRPの板を2種類のハニカムコアで補強した形状をしている(第1図)。パネルの構造強度は2枚のCFRP板とその間のアルミハニカムで持たせるように設計されており、この部分だけを考えると表裏に対して対称と言ってよい。

計算は一次元を仮定し、節点はパネルの断面方向に6点とった。この計算に使われた各々の節点での物性値は実際にSARアンテナパネルに使われた材料の値を用いた(第1表)。熱放射率は赤外吸収率 ϵ と等しいとして計算した。また、JERS-1は太陽同期の極軌道を周回するので、軌道上を衛星がまわるときのパネルへの様々な熱入力(太陽輻射、地球輻射、地球アルベド)は、衛星の緯度により依存すると仮定した。

各節点の温度が計算誤差の範囲内で、周期による差のなくなるまで繰り返された結果を第2図に示す。

第1図 SAR アンテナパネルの構造断面図²⁾

第1表 SAR アンテナパネルの熱物性値²⁾

	太陽光吸収率	赤外吸収率 ϵ	熱伝導率 κ (W/m/K)	比熱 C (J/K/m ³)	ハニカムコア空間占有率
β -クロス	0.29	0.80	—	1.0×10^3	—
KFRP	0.67	0.89	—	8.7×10^3	—
NOMEXハニカムコア	—	—	1.3×10^{-3}	2.9×10^4	不明
CFRP	0.93	0.84	5.5×10^{-1}	1.5×10^6	—
アルミハニカムコア	—	—	5.9×10^{-1}	1.3×10^4	5.0×10^{-3}
MLI	0.12	0.65	—	1.0×10^3	—

第2図 軌道上でのSARアンテナパネルの温度シミュレーション

SARアンテナパネル本体であるKFRP(節点2)からCFRP(節点4)までの温度は、全体的に約 -10°C から 70°C まで 80°C 程度の温度変化を示す事がわかった。また、パネルの主構造部材であるCFRP(節点3と4)間の温度差は最大約 1.7°C になる事もわかった。

3. 実験システムおよび実験方法

3.1 方式 表裏温度差を試験パネルに与えるためには、ヒータをパネルの片側に張り付けて加熱する方法(接触加熱法)と遠赤外線ヒータ等で非接触に加熱

する方法（非接触加熱法）が考えられる。接触加熱法では、パネルに加える熱量の制御を比較的精密に行う事ができるが、ヒータのパネルへの接着がパネル自身の変形に影響を及ぼす事が考えられ、またその量を評価する事が一般に困難である。一方、非接触加熱法では、ヒータを接着した影響を考える必要はないが、ヒータから発生させた熱が効果的にパネルに伝わらず、またパネル面での温度の制御が難しくなる。しかし、容量が十分にあるヒータを複数本使い、各々の加熱量を制御する事により、この問題に対処する事とし、ここでは非接触加熱法を選んだ。熱源としては、遠赤外線ヒータを用いた。

パネルの変形を後で述べる測定システムで計測するために、ここではパネルを鉛直に設置し、片側から加熱、反対側から測定した。パネルに加えられた熱は、自然対流でパネルから大気へ逃げる。このとき、パネルと周囲の大気との間の局所的な熱伝達によりパネル面上での温度が決まる。一般に、鉛直に置いた平面からの層流自然対流では、パネルを通過する熱流束、すなわち表裏の温度差とパネル面全体での温度の絶対値の両方の分布を同時に均一にする事はできない。つまり、熱流束分布を一定にすると、パネル面上での温度分布は、パネル下端からの距離の2/5乗に比例し、温度分布を一定とすると、熱流束分布は $-1/4$ 乗に比例する⁷⁾。例えば、パネルの上下それぞれ20%の点での、温度分布一定のときの熱流束のばらつきは、約 $\pm 17\%$ となる。

今回の実験システムの場合、非接触加熱法を用いた事もあり、パネル面上での熱制御が精密にはできなかった。そのため、上に述べたような温度分布一定か温度差分布一定かが厳密に問題とはならなかった。しかし、今後、より精密なシステムを構築し、温度制御を行う際には、こうした温度分布または温度差分布のばらつきも問題となってくると考えられる。パネル面の温度の絶対値のばらつきによって生じる変形については後で有限要素法によるシミュレーションで考察する。

前章でシミュレートしたSARパネル（高さ1m、幅1.5mを想定する）を例にとり、その軌道上での熱環境を実験的に実現するための加熱、および周囲の温度条件について考える。SARパネルの構造強度はアルミハニカムとそれを挟んでいるCFRP板で決まるので、その部分だけを取り出し、パネルの熱変形実験を行う。この部分への温度条件は前出の計算結果から最大表裏温度差 2°C とする。アルミハニカム部の両端でこの温度差を定常につくりだすために必要な単位面積あたりの熱量（熱流束 q ）は、第1表の値を用いると

$$q = \alpha_h \cdot \Delta T_1 / d$$

$$= 7.6 \times 10^1 \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

となる。ここで、 α_h はアルミハニカムの実効的な熱伝導率($5.9 \times 10^{-1} \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$)で、 d はその厚さ($1.56 \times 10^{-2} \text{ m}$)、 ΔT_1 は両端の温度差(2.0°C)である。これから、 $1\text{m} \times 1.5\text{m}$ のパネル全面で約110Wの熱を加えればよい。一方、鉛直に置いた高さ l (=1m)のパネルから自然対流でハニカム部を通過した熱が大気中に逃げるとすると、パネルと大気との熱伝達率 h が問題となる。層流の自然対流で、熱流束一定または伝熱面温度一定の条件のもとでは、大気物の物性値と鉛直パネルの大きさから決まる無次元量による整理がなされている⁷⁾。熱伝達率に関する無次元量であるヌセルト数 Nu は、平板回りの流体（この場合は大気）の物性から決まるプラントル数 Pr および浮力と粘性の比であるグラフホフ数 Gf から実験的に求められる。熱伝達率 h は、こうして求めた Nu から、

$$h = Nu \cdot \alpha_s / l \quad (2)$$

として求められる。 α_s は大気の熱伝導率である。パネルと周囲の温度差 ΔT_2 は、熱伝達率と熱流束から

$$\Delta T_2 = q / h \quad (3)$$

として簡単に求められる。実際にはグラスホフ数の中に ΔT_2 に関する項があるので、(3)式から求められた温度差を用いて(2)式を再度計算し、収束するまで繰り返し行う必要がある。(1)式の熱流束一定の条件で、大気温度を 30°C とした場合、パネルと周囲の温度差 ΔT_2 は、約 18°C となる。ただし、ここで求めた温度差は定常状態の値である。

今回の場合、通常の実験室で周囲温度を定常に保ち、かつ繰り返し測定するため、周期的に加熱・放熱を繰り返した。これにより、周囲の環境温度をある程度におさえ、表裏温度差の変化を連続的にパネルに与える事ができた。熱変形測定はこのパターンが周期的になり、周囲の大気温度が定常になった後に行った。このような非定常な方法をとっても、後で示すように、変形の測定に要する時間が短いので、そのあいだの変形量の変化は無視できるほど小さい。

3.2 実験装置 実験装置は、模擬パネルに熱を与えて表裏温度差を生じさせる加熱部と、加熱で生じた模擬パネルの熱変形を非接触で測定する平面変形測定システムからなっている。全体のシステムブロック図を第3図に示す。

3.2.1 模擬パネルおよび加熱部 模擬パネルとして、現実のSARアンテナパネルとほぼ同種の構造部材を用い、 $1.5\text{m} \times 1\text{m}$ 、厚さ 15.6mm の大きさのハニカムパネル（CFRP-アルミハニカム-CFRPのみの構造的に表裏対称なパネル）を製作した。そのパネル

第3図 実験装置のシステムブロック図

第2表 模擬パネルの熱物性値

		ヤング率 (N/m^2)	線膨張係数($1/^\circ\text{C}$)	ハニカムコア 空間占有率
CFRP	CFP-6109	4.6×10^{10}	0.50×10^{-5} (25~55 $^\circ\text{C}$)	—
			0.25×10^{-5} (55~85 $^\circ\text{C}$)	—
			-1.19×10^{-5} (85~108 $^\circ\text{C}$)	—
アルミハニカム		7.0×10^8	2.3×10^{-5}	5.0×10^{-3}

注) CFRPの線膨張係数はy方向の値であり、()内の数字は測定温度範囲である。

の諸元を第2表に示す。CFRPの線膨張係数には大きな温度依存性があるが、後述の計算では25 $^\circ\text{C}$ から55 $^\circ\text{C}$ の温度範囲での値($0.50 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$)を使用した。このハニカムパネルは次に述べる平面変形測定システムと組み合わせて測定を行うため、パネル支持部によって鉛直になるように固定した。パネルは、両側から補助板を介して挟み込み、締め付ける形でパネル支持部に固定されており、固定端として取り扱った。他の3つの端は自由端となっている。ここでは加熱側の面を模擬パネルの表面、反対側の面を裏面と定義する。また、パネルの基準温度としてパネル裏面の値をとった。第4図に実験に用いた模擬パネル(a)、パネル支持部および加熱部(b)を示す。

模擬パネルは表裏対称のハニカム板なので、バイメタル効果は起こらず、変形は、表裏の温度差のみに依存するものと考えられる。ただし、パネル製作時のCFRPとアルミハニカムの接着面の表裏での違いなどによる構造的な不均質性があれば、バイメタル効果で変形する可能性がある。そこで、予備実験として、供試体として用いるハニカムパネルの不均質性による変形量をあらかじめ調べた。実験は、恒温槽の中にパネルを水平に設置し、全体の温度を0 $^\circ\text{C}$ から50 $^\circ\text{C}$ まで変化させ、そのときのパネルの変形を非接触の光変位

第4図 加熱部、パネル支持部および模擬パネル

センサを用いて測定した。パネルの支持部は、表裏温度差による熱変形実験と同じ方法をとった。またパネルを水平に置いた効果およびセンサ支持台の変形の影響を調べるために、パネルの表裏を逆にした測定も行った。実験の結果、パネルの不均質性による変形の温度依存性は上記の温度範囲で、パネルの先端部で最大0.01 mm/ $^\circ\text{C}$ であることがわかった。この不均質性による、加熱実験での変形への影響は、考察のときに検討する。

鉛直平板を地上大気中で加熱すると、自然対流の影響により平板の上部と下部で温度差が生じる。そこで模擬パネルへの加熱部として、棒状の遠赤外線ヒータ(最大3 kW/本、長さ2 m)を鉛直方向に4本並べて制御した(第4図(b))。これら4本のヒータの加熱量を4系統のコントローラで各々制御し、パネル表裏の温度差が鉛直方向に一樣となるように熱を与えた。現実には、各ヒータの鉛直方向の位置と加熱量でパネル面上の温度差分布が決まるので、予備実験によって表面の温度分布がなるべく均一になる値(ヒータ位置と加熱量)をあらかじめ得た。こうして、あらかじめ設置した各々のヒータから熱を発生させ、パネルの加熱を行った。一方、パネルの冷却はヒータからの加熱を止めることによりまわりの大気との自然対流で行った。そのため、加熱に比べて冷却は温度の制御が難しく、受動的な冷却となっている。従って、今回の方法では、パネルの温度の最低値を室温以下にする事は不可能で、軌道上の完全な温度模擬はパネル温度絶対値に関してはできない。遠赤外線ヒータの加熱の特定数から、目標とされる温度差を繰り返し生じさせるための時間を、10分加熱、10分冷却の20分周期とした。

パネル支持部により支持された模擬パネルの表裏温度(表裏各12点、合計24点)は、クロメルアルメル熱電対を用いて測定した。時刻、温度、加熱量等のデ

ータは、コンピュータに GPIB を用いて送り、ディスクに保存し、実験終了後に処理した。また、パネル裏面の温度分布も赤外線放射温度計を用いて同時に測定した。

3.2.2 平面変形測定システム 加熱により生じた模擬パネルの熱変形は、パネル裏面側に設置した平面変形測定システムで測定した。文献5)に詳細を述べてあるので、ここでは概要と予備実験の結果について記す。

システムは投影型モアレ装置に格子移動機構と画像処理装置を付加して高精度化したものである(第5図)。図の投影型モアレ装置では、レンズ L_1 に対象物に投影した格子 G_1 の像をレンズ L_2 によって格子 G_2 に結像し、モアレじまを得る。得られたモアレじまは対象物体の等高線を表すが、基本構成では $1\text{m} \times 1\text{m}$ の平面の、面に垂直な方向の変位を分解能 5mm で測定できるに過ぎない。そこで、受光側格子 L_2 を格子に垂直な方向(第5図の ξ 方向)に移動させながら複数の画像をとり、それら処理するしま走査法を用いた。格子の移動ピッチは格子間隔の $1/100$ まで可能であり、実験では4枚の画像を使った。

システムの感度と精度は小白色板を測定位置に設置し、マイクロねじで 0.25mm ずつ送りながら画像中の一点の変位を実験的に測定し求めた。これを測定面内の10点で行い、感度と精度のばらつきを調べた。また、 $1.6\text{m} \times 1.6\text{m}$ の白色平面板を用いて画像測定としての再現性を調べた。その結果、感度と精度共に面内でばらつきがあるものの、上記測定面内で 0.3mm 以下の精度を得た。また、測定の周期は最短 1.6 秒である。このように、測定の周期が短いので、対象とするパネルの変形が連続的に起こっても、測定値に対するその誤差は無視できる。

3.3 実験方法 実験は、加熱装置によって、模擬パネルに熱変形を生じさせる。実験開始から2~3周期を経過してパネルの周期ごとの温度分布がほぼ一定

と見なせ、また周囲の大気温度もほぼ定常となった後、平面変形測定システムを作動させ、パネルの熱変形量を測定した。前述の通り、加熱と冷却の周期は、20分(加熱10分、冷却10分)とした。変形の測定は、 $1.5\text{m} \times 1\text{m}$ の面に対して 128×64 画素を用い、測定雑音除去のため4回の測定の平均をとった。すべてを実時間処理し変形画像の表示とディスクへの書き込みも含め、測定周期を1分とした。測定対象の模擬パネルは CFRP の表面の反射を少なくするために白色スプレーを塗布したが、上記測定システムの予備実験に用いた板に比べると全反射が大きく残ったため、感度の変化が予想された。そのため、模擬パネルの端部(第10図、A点)を反対側から押して変形させ、その点の補正係数の測定を行った。この値を面全体の補正係数として用いた。温度のデータも1分ごとに測定した。

4. 実験結果

上記のシステムを用いて行った加熱実験の一例を第6図に示す。パネルの中心部鉛直方向の3点(第9図、PQR)の温度変化を代表的に示した。20分周期で加熱、放熱を繰り返したものであり、熱電対で測定した代表的な表裏の温度差を示している。2周期目以降はほぼ同じ温度差パターンになっており、また室温はほぼ一定になっている事がわかる。第7図に、3周期目以降の、パネルの表と裏の平均温度差とパネル中心軸上の先端部に近い一点(第10図、A点)での変形量を示す。時間の原点は第6図における40分の点に対応している。変形のパターンも周期的になっていることがわかる。表裏の温度差は最大約 1.7°C であり、前述の数値シミュレーションでの主構造部の最大温度差 1.7°C とほぼ等しい温度差が実現されている。温度差が大きくなったとき、温度差がふらつくのは周辺の大

第5図 平面変形測定システムの原理

第6図 加熱実験の一例(表裏の各々3点は第9図中のPQRの点の表裏の温度に対応)

第7図 表裏温度差およびパネル端部の変形量の変化（パネル端部は第10図A点に対応）

第8図 パネル裏側の温度分布の一例（最大温度時）

気による影響だと考えられる。

第6図の実験でのパネル面上での温度分布を赤外線放射温度計で測定した一例を第8図に示す。この図は温度が最大になったとき(第6図(a))の裏面の温度分布である。温度差が小さいとき(第6図(b))は、パネル面上での温度分布の不均一性は見られなかったが、温度差が大きくなるにつれて、端部の温度が中心部に比べて低くなることがわかった。第8図から、最大となった中心部と端部での温度の差は約10°C程度であることがわかる。こうした端部での温度の低下は、ヒータの加熱範囲がパネル長(1.5m)より小さく1mしかないためと、ヒータが4本しかない事による加熱補正の限界のためであると考えられる。更に精密な温度制御を行う場合には、加熱範囲がより広いヒータを多数本利用するか、あるいはスペースチャンバ中で使われているような均一加熱の方法で行う必要がある。しかし、この程度の温度の不均一性があってもパネルが表裏対称であるならば、表裏温度差のために生じる変形の方が温度の不均一性によって生じる

第9図 表裏温度差分布の一例（最大温度時）

第10図 パネルの熱変形の測定例（最大温度時）

ものより十分に大きいと考えられる。この点については、後に有限要素法での計算により確認する。

表裏が最大温度差になったときの、熱電対で測定したパネルの表裏温度差分布を第9図に示す。これは、第6図(a)点に対応する時点の温度差分布であり、裏面温度を基準にした表面との温度差を示している。表裏温度差はパネル面上の中心付近の大部分で平均温度差の約±15%(±0.3°C)の範囲内でほぼ一樣になっている事がわかった。このことから、本加熱方式で表裏の温度差を一樣につくりだす事が可能であると考えられる。

このときのパネルの変形を平面変形測定システムで測定した結果の一例を第10図に示す。これは、表裏温度差が最大になったとき(第6図(a))の変形の様子である。パネルの変形量としては、実験終了後のパネル表裏の温度差が0°Cになったときの値を基準としている。パネルの左端を固定しているので右端に最大変形が生じている。この場合、温度差約1.7°Cでパネル面の右端中心部(図中A点)での変形量は約1.3mmであった。

5. 考 察

前章での実験結果をもとに、本実験システムの有効性について考察する。最初に3章で問題にした試験パネルの不均質性による変形への影響について考察す

る。次に、パネルの変形について有限要素法による予測と比較する。最後にパネル面上の温度分布による変形への影響を評価する。

5.1 パネルの構造的不均質性による熱変形の評価
3.2.1項に示した恒温実験から、加熱試験に用いられたパネルの全体的な温度変化による変形は、最大 $0.01 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ であることがわかった。今回の実験での全体的な温度変化は、 30°C から 60°C の約 30°C の温度差であるので、不均質性による熱変形は最大 0.3 mm である。この値は、平面変形測定システムの精度程度である。これに対して、第10図の場合を例にとると、パネルの変形は先端の中心部で 1.3 mm 、上下端になると更に大きくなり、これと比較すると不均質性による変形はほぼ一桁小さな値となる。従って、今回の実験で測定された変形は、パネル自身の不均質性による変形は無視してよく、主として表裏温度差による変形と考えられる。

5.2 温度差によるパネルの曲率の変化 平均温度差を変えたときのパネル中心軸(第10図A点を含む線)上の平均の曲率の変化を第11図に示す。変形の曲率は、測定値から最小二乗法によって二次曲線に近似して求めた。測定点と近似曲線との二乗平均誤差は、全ての実験結果に対して $2 \times 10^{-5} (\text{m})$ 以下であった。また、曲率半径が変形量に比べて非常に大きいため、近似曲線は円弧と考えてよい。曲率で比較する事により固定端での回転など支持方法の影響は除かれる。また図中には、一次元の数値モデルの結果も示している。このモデルでは、等間隔に支持された2本の一次元梁が温度差を持つ事により、曲げ変形を生じるとして求めた。実験値は、モデルによる計算値と同様に、温度差に対してほぼ線形の関係になるが、計算値のほ

ぼ倍の値になることがわかった。これは、温度差分布のばらつき($\pm 15\%$)よりはるかに大きいため、二次的な面の広がりやを考慮にいれなければならないためか、または計算に用いた線膨張係数など物性値の誤差の影響だと考えられる。二次的な面の変形については次節で検討する。

5.3 計算モデルの構成・検証と温度分布の変形への影響 この節では、実験結果を利用して、有限要素法による熱変形の計算を行い、そのときに用いたモデルの妥当性を調べる。また、このモデルを用いて、実験のときに生じた温度分布の影響を調べる。使用した有限要素法のプログラムはMARCである。モデルには実験に用いた模擬パネルと同じ寸法、同じ物性値を与えた。但し、表裏のCFRPパネルはそれぞれ $10 \times 15 (10 \text{ cm})$ に分割し、ハニカム部は分割された薄肉角筒のセルで構成するものとした(第12図)。ハニカム部の直方体の壁の厚さは、壁の空間占有率が模擬パネルのハニカムの値と等しくなるようにした。境界条件は実験と同じ条件を与えて、パネルの一端が固定端、他の端は拘束条件を設けない自由端とした。温度

第12図 有限要素法による熱変形計算モデル

第11図 パネル表裏温度差と中心軸上の曲率の関係

第13図 有限要素法と実験の変形の比較 (最大温度時)

条件は表裏パネルでそれぞれ一定の温度とした。ハニカム部の温度は、表裏パネルの中間の温度にした。

有限要素法による計算結果と実験によって測定された変形形状の比較を行ったのが第13図である。最大変形を生じているときのパネルの上端、中心軸上および下端の3本の水平線上の全ての測定点について、面に垂直な方向の変形量を、実験測定値と有限要素法による計算値の対応によって示す。測定点の位置などによらず、実験誤差の範囲内で1本の直線上にのっている事がわかる。この直線の傾きはおよそ2で、どの点でも計算値よりほぼ倍の変形が生じている事がわかる。全ての実験データが1本の直線上にのっている事から、固定端の回転は今回の実験の場合無視してよいと考えられる。また、中心軸上の変形量は、前節で示した数値モデルの結果とも一致し、第11図の実験と計算の差は二次元的な効果ではないと考えられる。

以上の結果から、実験により測定された値は、パネル自身の変形によるもので、固定端支持部における回転などの影響は非常に小さいと考えられる。また、実験と計算の差が、前節の結果と有限要素法による結果とで同じ程度生じた事から、この差は計算に用いた線膨張係数など物性値の違いによるものであると推定する。有限要素法のモデルについては、実験結果と相似な変形を与える事から妥当なものであると考えられる。

最後に、パネルの変形に及ぼすパネル面上での温度分布による影響をこのモデルによる計算から考察する。パネルの表裏の温度差 2°C で、パネルの基準温度 50°C で均一な場合と、温度分布を持たせた場合の最大変形量の計算を行った。温度分布を持たせる計算は、 10×15 に分割したセルの一番外側のセルのみの温度を内側の温度から 10°C 低くした。計算の結果、両ケースの全体的な変形形状、最大変位点の位置はほぼ同じであり、また、最大変形量の差は約3%である事がわかった。従って、表裏温度差が一定ならば、今回の実験時に生じた程度の基準温度の不均一性は、ほとんど変形に影響しないと考えられる。

以上の事から、本システムによって軌道上を回る平面パネルの表裏温度差と同程度の温度差を模擬パネルに与え、そのときの変形が測定可能であることが確認された。

これまでは、構造的に均質なパネルの表裏温度差による熱変形の測定について述べてきた。しかし、構造的に不均質なパネルについてもこれまで述べてきた方法と同様に、恒温実験と加熱実験を行う事により、パネル温度絶対値と表裏温度差それぞれによる変形量を別個に評価できる。その結果から、軌道上でのパネル温度絶対値、表裏温度差両方を考慮した場合の不均質パネルの熱変形の推定が可能となる。

6. ま と め

大型パネルの微小な熱変形の原因について考察し、特にその表裏温度差による変形を実験的に生じさせるシステムを構成した。現実のパネルとほぼ同種の構造の模擬パネルに対して、遠赤外線ヒータを用いた非接触式の加熱装置と、しま走査モアレ法による平面変形測定システムを利用した熱変形測定実験を行った。パネルの温度分布などについて検討を行い、本システムで軌道上を回るパネルの温度差変化を実験的に模擬できることを確認した。ハニカム部を中空の直方体で近似したモデルを用いた有限要素法による計算を行った。このモデルを用いて、本装置で生じた程度のパネル表面の温度の不均一性による変形を評価し、その影響が無視できることを明らかにした。

合成開口レーダアンテナの材料の熱物性値を提供していただいた資源リモートセンシングシステム技術研究組合、三菱電気(株)に感謝致します

参 考 文 献

- 1) Rolandol, J.: The Seasat—A Synthetic Aperture Radar System, IEEE, OE-5, No. 2 (1980), pp. 154-164.
- 2) 昭和60年度委託研究成果説明書, 資源探査用観測システムの研究開発, 資源リモートセンシングシステム技術研究組合, 1986, pp. 2.1.1-16-2.1.1-19.
- 3) 昭和61年度委託研究成果説明書, 資源探査用観測システムの研究開発, 資源リモートセンシングシステム技術研究組合, 1987, p. 2.1.1-50.
- 4) 久田安正, 伊東康之, 井村信義, 谷沢一雄, 尾形慶照, 引間栄一: 合成開口レーダアンテナの機械特性, 日本航空宇宙学会誌, 31 (1983), pp. 456-460.
- 5) 黒河治久, 市川直樹, 矢島信之: 格子移動機構によるしま走査モアレ装置, 精密工学会誌, 56, 5 (1990), pp. 67-72.
- 6) 航空宇宙工学便覧, 丸善, 1983, pp. 873-874.
- 7) 伝熱工学資料(改訂第4版), 日本機械学会, 1986, pp. 68-69.