

## 論文の内容の要旨

論文題目 弾性波の伝播挙動を利用した膜上のシワの検出

氏 名 赤池 祐介

### 1. はじめに

近年、大規模宇宙構造物の軽量化・小型化の要求に応えるために、膜や網・テザーなどの柔軟構造物の利用が研究されている。膜構造は柔軟で薄い要素を使用することで大規模な構造を小さい容積に収納することを可能にし、高強度の材料を用いることで軽量かつ高い引張強度を実現している。一方で曲げ剛性の低い構造を使用するために膜構造は座屈しやすく、シワが生じやすい。望遠鏡の鏡面精度の低下などシワは膜構造の性能低下の要因となるため、その発見・修復の為に多くの研究が行われてきた。従来のしわの検知方法では、画像からの検出が多く用いられている。

一方で今後膜構造が大規模化していく中で、膜面全体をカメラで捉える事は難しくなると考えられ、軌道上での大規模膜構造の運用のためにはカメラでは捉えられない部分に適用し、従来手法を補完・補助できる光学的でない手法が必要となる。

本研究では、光学的な手法とは異なる新たな軌道上での膜面上のしわ検知手法として、弾性波の伝播を利用した手法を提案する。膜を波が伝播する場合、平坦な部分と湾曲した部分を波が伝播するが、両者の間では弾性波の伝播に違いが有る。これを観測することでシワの存在や規模を感知できると考えられる。まずシワが弾性波に与える影響に関して解析を行い、次に与えられた影響からシワの形状を推定する手法を開発することを目標とする。

### 2. 膜を伝播する弾性波

シワがある部分と平坦な部分の大きな違いは曲率の有無であり、曲率がある場合とない場合に伝播の仕方が大きく変化する弾性波があった場合、その波は平坦な部分とシワとの境界で反射されることが予想される。したがってシワの検知に活用できるとも考えられる。このような弾性波を発見するために微小振動の平面波を仮定して、シェルの方程式を用いて円筒状に一方向に曲率を持った物体上での弾性波の伝播を計算した。

このようなシェルを伝播する微小振動は、面内方向の波の伝播方向に伸縮する縦波、進行方向と垂直な面内方向に変形するせん断波、面外方向に変形する曲げ波・減衰モードの4つに分類される。弾性波の伝播方向を指定しなかった場合の計算に関しては、。計算式がやや複雑であり形状と影響を受ける周波数帯との具体的な関係式は導かず、数値計算によって弾性波の方程式をもとめた。この時、周波数が低い領域において特に縦波が曲率の影響を強く受けていることが示された。

また、曲率などのパラメータと弾性波の伝播の具体的な関係式を得るために、弾性波の伝播方向を円筒の周方向に限定し、問題を二次元問題として簡略化することでこの関係式を導いた。影響を大きく受ける周波数帯は曲率 $\kappa$ と平坦な場合での縦波の位相速度 $c_{l0}$ を用いて

$$f < \frac{\kappa \cdot c_{l0}}{2\pi}$$

として得られる。これにより曲率の大きな部分が弾性波により高い周波数まで影響をあたえることが示された。

また得られた円筒内部での弾性波の方程式を用いて、弾性波が曲率が変化する部分を通じた場合の振幅の変化を算出する方法を示し、この入射波と透過波のうちの縦波成分の振幅の比を透過率として定義した。

### 3. シワが弾性波の伝播に与える影響

円筒部と直線部から構成されるシワの簡略化モデルを作成し、モデルの持つ形状パラメータと透過率の間にある関係について考察する。

2章において円筒部の曲率が大きければより高周波の縦波にまで影響を及ぼすことが波の式として示されたが、簡略化モデルの計算値からも曲率が大きいほうが高周波まで透過率を低下させることが示された。さらに、曲率のある部分の中心角が大きい場合やシワの数が多の方がより透過率は低下した。

また、円筒部分で弾性波が反射されるために簡略化モデル内部で円筒部に挟まれた平坦部に共振が発生し、透過率のグラフにピークとして現れる。このピークのうち最も周波数の低いものの位置 $f_p$ は簡略化モデル内部の平坦部長さ $l$ と円筒部の曲率 $\kappa$ に応じて変化し、この関係は式

$$f_p = \frac{c_{l0}}{2l + 4/\kappa}$$

で示される。

さらに、簡略化モデルと同様の計算手法を用いて、内部で連続して曲率が変化する正弦波形状のシワに対しても透過率を算出した。曲線の微小な区間を取り出した場合、それは円弧として見なすことができる。したがって正弦波形状のシワに関しても多数の微小区間に分割し、それぞれを円筒の一部とみなして計算することで計算を行った。

この場合でも最大曲率や正弦波の頂点間の直線距離に対して整理すると、最大曲率が大きい物がより高い周波数まで透過率が低下し、頂点間の距離とピーク位置周波数が反比例の関係にあるなど簡略化モデルと同様の傾向が見られた。

#### 4. 有限要素法による解析との比較

シェルモデルで得られたシワに対する透過率の計算結果の確認を行うために、有限要素モデルを作成し縦波の平面波に対する透過率を比較した。

シワの稜線方向に対して垂直に弾性波が入射する場合、つまりシワに対する弾性波の入射角が0の場合は、シワの形状や変形形状が稜線方向に一定になるため有限要素モデルは二次元で十分になる。また、モデルサイズ削減のためにモデルの両端には縦波の反射を抑制するダッシュポットが入力インピーダンスが一致するように接続された。この条件下で調和振動解析を行い、その面内方向の振幅の比から透過率を計算した。得られた結果はシェルの解析によるものとよく一致した。

一方で弾性波の入射角が0でない場合は三次元の有限要素法モデルを作成する必要がある。しかし、シェルの解析モデルではモデルの幅が無限大であったのに対し、有限要素法のモデルでは有限の値に収まってしまう。有限要素法の解析での端の透過率への影響を低減するために、モデルの幅を長く取り、変位を計測する点はモデルの幅方向の中央付近に取られた。また、二次元モデルの場合はダッシュポットにより効果的にモデル端での反射波を低減し調和振動解析を行ったが、三次元モデルでは弾性波の伝播が複雑化するためこのような低減が出来ず過渡応答解析が行われた。また、二次元モデルの場合は面内方向の振動を発生させるのは縦波だけだったのに対し、三次元モデルではせん断波によっても発生する。透過率の評価にはせん断波の影響を除去する必要があるため、変位を計測する点を複数とりその平均値を取ることで縦波のみの影響を取り出した。三次元モデルから得られた値もシェルモデルによる解析値とよく一致しており、透過率をシェルの方程式を用いて導出することの妥当性が示された。

#### 5. 弾性波透過率からのシワ形状の推定

ここでは縦波の透過率のグラフからの元の形状の推定方法について議論を行った。シワ形状の簡略化モデルを用いてそれから求められる透過率と、推定対象となる透過率のグラフとの誤差の二乗和が最小になるように簡略化モデルのパラメータを最適化することでシワ形状の推定は行われている。

同一の形状が繰り返す正弦波形状のシワに対する推定では、シワの形状・数などを波長が長く、振幅が小さくなる傾向が見られるもののよく推定できた。また、正弦波のように同一の形状のシワが繰り返されていない場合として、シワ形状がメキシカンハット形状となる場合や、最大振幅を持つ部分と最大曲率を持つ部分が異なる形状に関しても推定を行った。このような形状が一定でない場合に対する推定では、推定結果から導かれる曲率は

対象の内の最も大きい部分に良く一致した。一方で振幅は透過率のグラフの最低次のピークに強く影響されるために、必ずしも最大の部分が得られるとは限らなかった。

## 6. 非接触振動計による弾性波伝播計測実験

非接触多軸振動計MaVESを用いてPETフィルム上の弾性波の伝播を計測し、シワの無い場合での振幅とシワをジグにより発生させた場合の物を比較することでシワに対する透過率を算出した。シワは曲率の大きいものと曲率の小さいものと二種類の形状を作成し、それぞれに対して弾性波の入射角を変化させ計測を行った。

曲率の大きいシワの場合に関しては透過率の傾向は3章での解析計算のものと一致した。予想された透過率のピークは見られなかったが、これはシワの形状が均一に形成されなかったためと考えられる。

一方で、曲率の小さいシワの場合に関しては透過率の傾向が合致しているとは言いがたい結果が得られた。計測の順序は曲率の大きい場合、曲率の小さい場合の順で行われたが、計測後の膜には曲率の大きい場合のシワを作成した際の曲げぐせが残っており、これによる影響を受けたものと考えられる。

## 7. 結言

本研究では今後宇宙大規模構造において利用の拡大が期待される膜構造に生じるシワの検知手法について検討を行った。従来の検知手法はカメラとそれから得られる画像を用いた手法が多く、カメラの死角となる部分や影となる部分が軌道上の利用では発生すると考えられる。これを補助・補完するために弾性波の伝播を用いた手法を提案した。

シワの存在により発生する曲率は面内に伸縮する縦波に強い影響を与えることに着目し、シワが弾性波に与える影響について考察を行った。さらにシワの形状を簡略化したモデルを用いて、推定対象の透過率のグラフと簡略化したモデルから得られた透過率のグラフが一致するようにすることで、推定対象と簡略化したモデルの透過率の誤差の最小化が行われ、透過率からシワの形状が推定された。シワの数が一つの場合や同一形状のシワが繰り返される場合では良い推定が行えることを示した。