

3次元計測およびホログラフィ干渉計測による鋼構造物の非破壊検査に関する研究

長崎大学大学院修士課程 小嶋 悟・大石 裕介
長崎大学工学部構造工学科 神原 天鳴・出口 万里子
長崎大学工学部構造工学科 (指導教官) 松田 浩

1 はじめに

筆者らは膜・シェル構造の形状計測のためにレーザー光と CCD カメラを用いた可搬型・非接触 3 次元計測装置を試作開発してきた。また、それにより得られる膨大な 3 次元座標情報を用いた大規模ソリッド・シェル要素による FEM 解析を実施するために、MARC, DIANA の汎用非線形 FEM コードを導入整備してきた。さらに、このようにして得られる FEM 解析結果の信頼性と精度を検討するために、板の振動実験を行ない、共振周波数およびホログラフィ干渉計測装置を用いた時間平均法による振動モードとを比較検討してきた。

一方、社会基盤構造物の維持管理・補修補強が今日の技術・研究開発のキーワードとなっており、種々の先進的な非破壊検査法の研究が進められている。ホログラフィ干渉計測は、光の波長程度の小さな変形や変位、振動状態などを精度よく測定することができる。ホログラフィを利用した非破壊計測技術は、[Ⓐ] 大面積 (数 m^2) 物体の欠陥 (接着切れ, き裂, 不均一) の直接的・全体的な可視化が可能, [Ⓑ] 被検査面に特別の処理を必要とせず, また被検査物体への作用がない, [Ⓒ] 空間的高解像力, 高感度, パルスレーザによる現場計測, 自動化が可能, などの利点があるため, X 線透視法, サーモグラフィ, 超音波などの非破壊検査法以上になるとも考えられる。

本研究ではこれまでの研究成果を踏まえ, 人工的な欠陥を有する薄板や曲面板試験片を製作して, ^① ホログラフィ干渉計測による振動数と振動モードの変化, ^② 3 次元計測により得られるデータを用いた大規模 FEM ソリッド・シェル要素解析, により, 鋼構造物の非破壊検査法としての適用可能性について検討したものである。

2 実験および計測の概要

2.1 ホログラフィ干渉計測法の概要

振動実験は, 写真 1 に示すように, ホログラフィを用いた振動モード測定のための振動絶縁された防振台上の定盤上で行なった固定金具に試験片を固定し, 試験片の裏面からスピーカーで加振した (写真 2)。

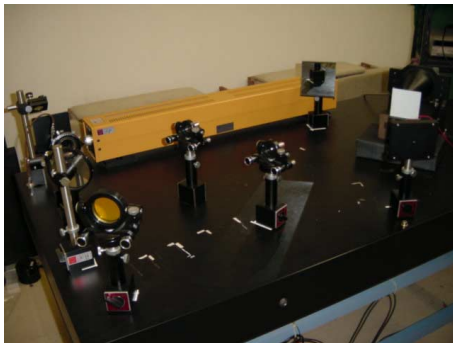


写真 1 レーザーホログラフィ装置

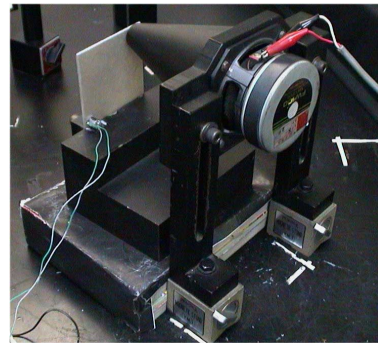


写真 2 加振装置

振動モード測定には時間平均法を用いた。計測原理を図 1 および図 2 に示す。

レーザから出た光をビームスプリッターによって二分割し, 物体光と参照光とする (図 1 参照)。物体光, 参照光ともにミラーにより方向を変え, エクスパンダーに通し, その一方を振動している試験片に照射し, その

反射光を物体光として写真乾板に照射する．もう一方は，参照光として直接写真乾板に照射し，両者を乾板上で干渉させる．これにより，試験片の振幅分布が干渉縞の等高線として現れるので，その様子を写真乾板にホログラムとして記録する．

ホログラムとして記録された物体の像を再生させるには(図2参照)，参照光と同じ光をホログラムに照射すればよい．この光を再生参照光と呼ぶ．ホログラムは細い干渉縞を記録した一種の回折格子であり，これに光を照射すれば，直進する光のほかに，別の方向に回折して進む光が生じる．回折光は再生光と呼ばれ，記録した物体光と全く同じ形をしている．

以上のような原理で，加振された試験片の固有振動モード図が3次元像としてホログラムに写し出される．

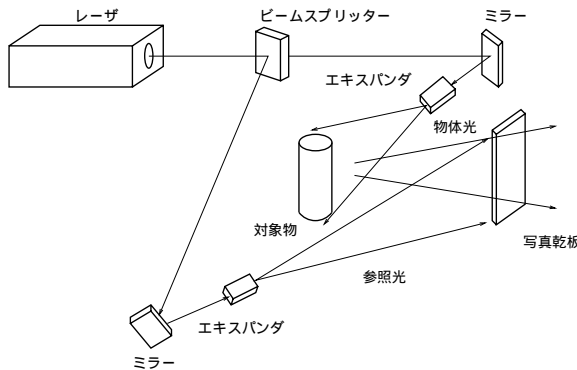


図1 ホログラムの記録

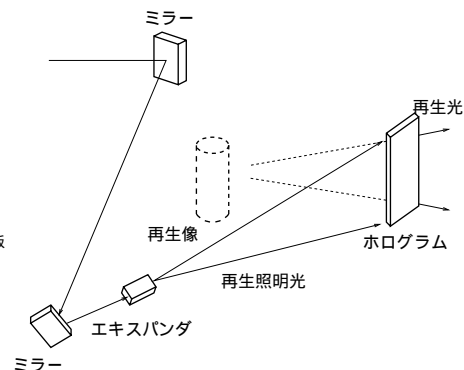


図2 ホログラムの再生

2.2 非接触・可搬型三次元計測器の概要

膜などの柔構造の形状計測を目的として非接触・可搬型の3次元計測装置を開発した．本計測装置はCCDカメラ1台とスポットレーザ投光器から構成され，図3に示すように光切断法とも呼ばれるスリットレーザ投影法による計測も可能である．本計測装置はキャリブレーションなどの手間を省くため，写真3に示すようにCCDカメラ1台とスポットレーザ投光器を同一定盤上に一体化させてある．図3にスリット計測のスリットレーザの照射図を、写真4に計測風景を示す．

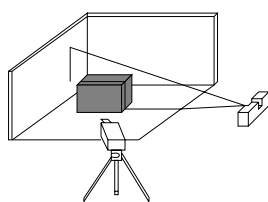


図3 スリット計測



写真3 計測装置



写真4 計測風景

2.3 試験片の概要

本実験では，平板試験片6種類と曲面板試験片2種類，合計8種類の試験片を使用した．図4に示すように，平板2～6および曲面板2には，欠陥を想定して，切欠き，開孔，変形といった欠陥を人工的に生じさせている．平板1および曲面板1は，欠陥のない健全な試験片である．平板試験片は長さ175mm，幅90mm，厚さ1mm，曲面板試験片は長さ150mm，幅90mm，厚さ0.1mmであり，どちらもアルミ合金からなる．アルミ合金の材料定数はヤング率 $E = 71 \text{ GPa}$ ，ポアソン比 $\nu = 0.33$ ，密度 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ である．

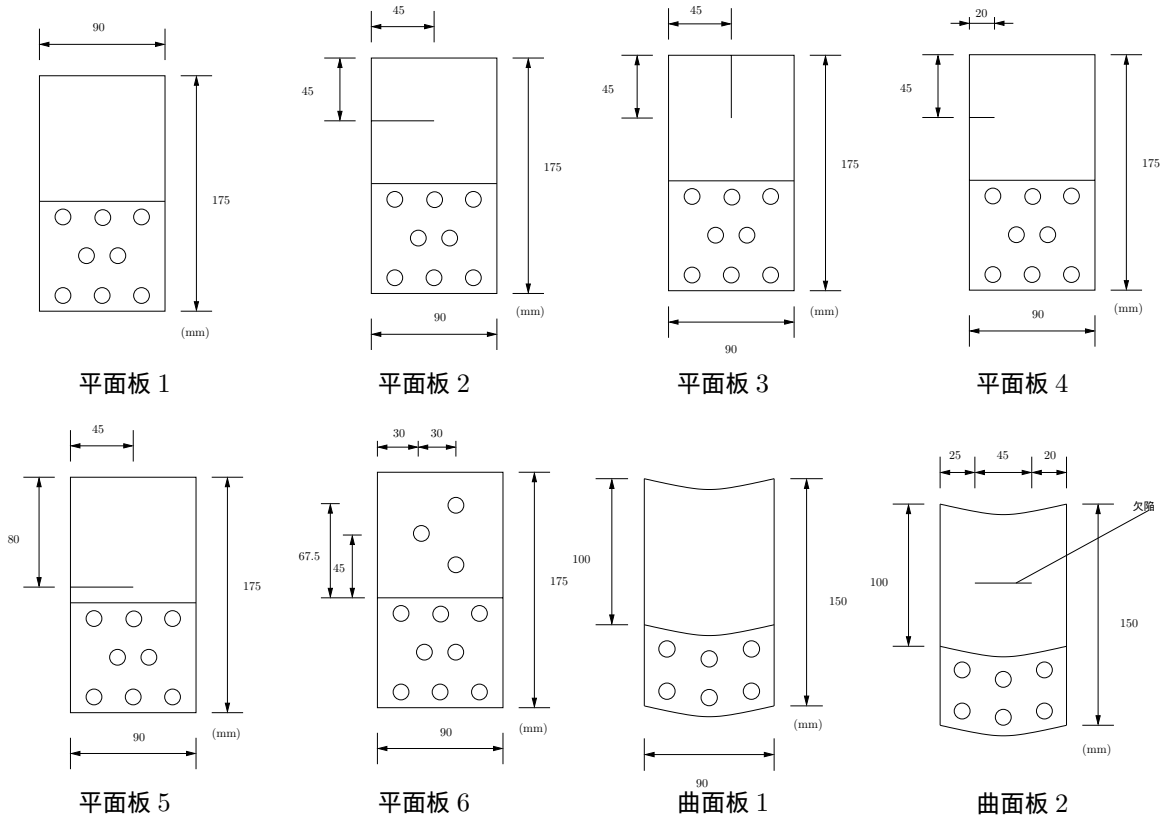


図 4 試験片

3 FEM 解析の概要

本研究で使用した FEM メッシュは三次元計測により得られた座標データを用いて作成した。本計測装置により得られる座標データはデータ数が多く、ノイズもあり、またデータ間隔が不均一なため、そのまま用いてメッシュ分割するのは困難である。そこで、FEM メッシュ分割作成のため、① データのノイズを目視により削除し、② $x-y$ 平面に投影して $0.5 \times 0.5 \text{mm}$ 間隔で平均化し、③ 三角形要素を作り、④ より実物に近い形状となるように、解析モデルを作成した。平面板 3 の計測点群、平均化点群およびメッシュ分割を図 5 ~ 図 7 に示す。また、このようにして実施するメッシュ作成の有効性の確認のために、平面板においては座標値を直接入力し、曲面板では触針式計測器を利用した計測データを用いて解析を行ない解析 2 として比較検討した。

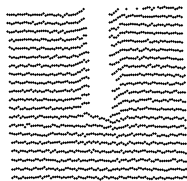


図 5 計測点群

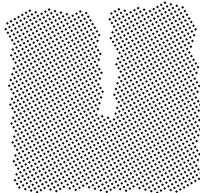


図 6 平均化点群

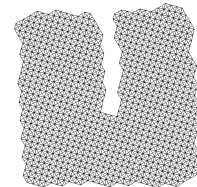
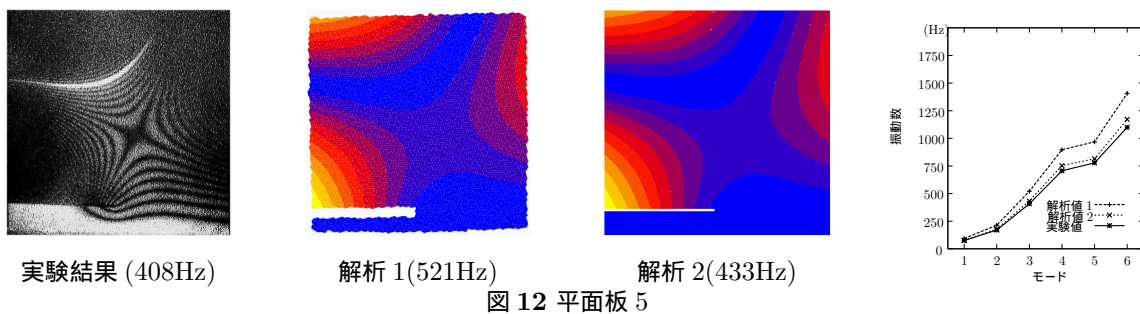
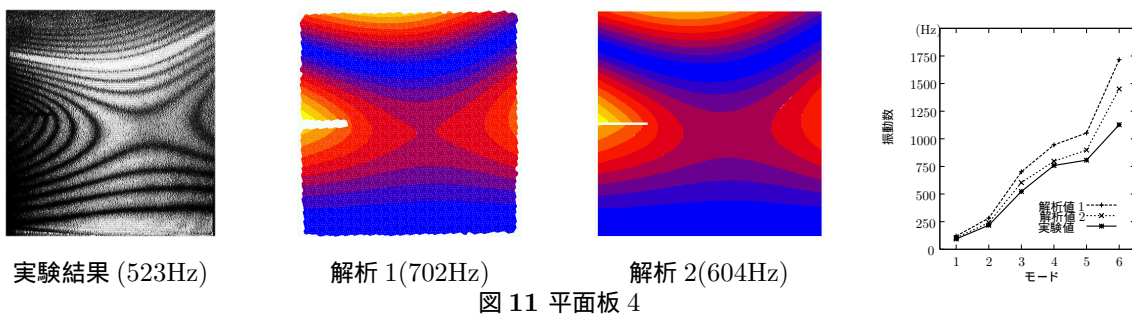
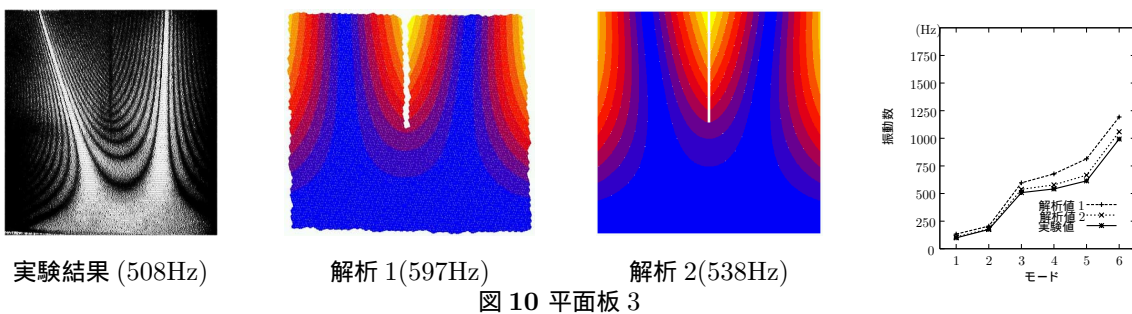
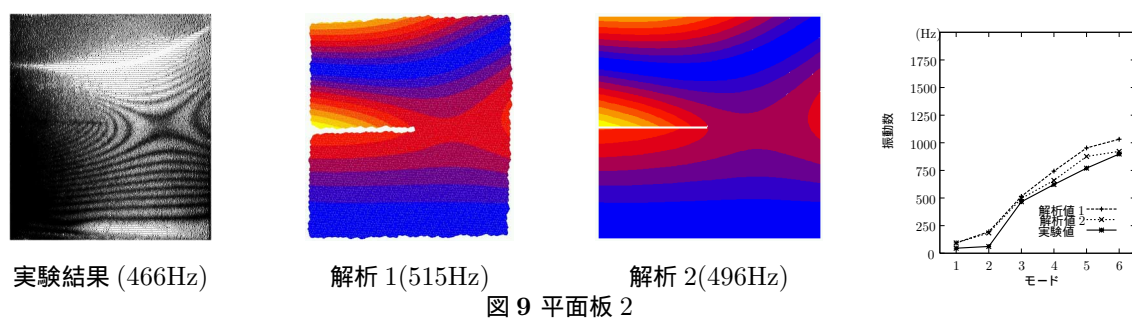
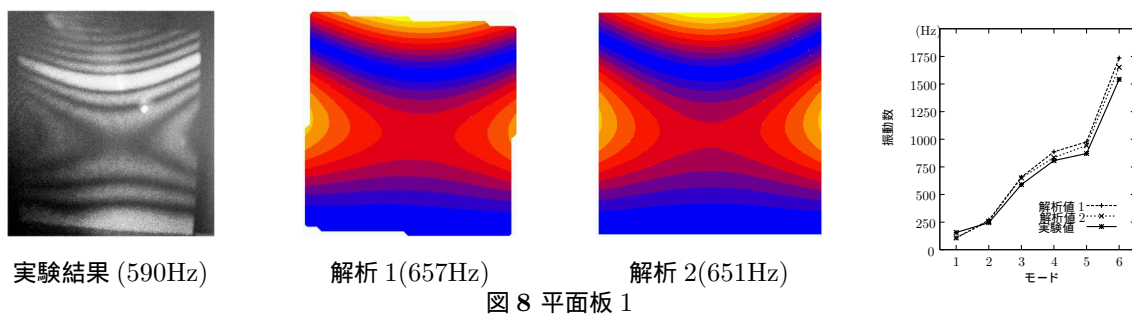


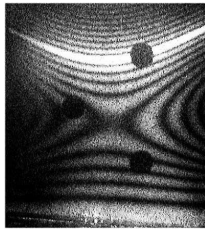
図 7 メッシュ分割

4 実験・解析結果および考察

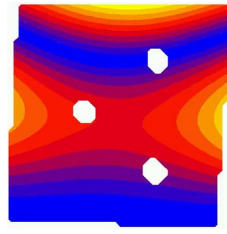
今回の実験及び解析において 1 次から 6 次までの固有モード図を得た。そのなかで、顕著な違いの現われたモード図と、解析 - 実験による振動数を各試験片ごとに描いたグラフを次に示す。

振動モード図において顕著な違いが現われた3次の振動モード図を、ホログラフィ干渉実験結果、3次元計測データを用いたFEM解析結果(解析1)、座標値を直接用いたFEM解析結果(解析2)の順に図8～図15に示す。

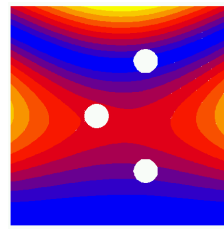




実験結果 (583Hz)

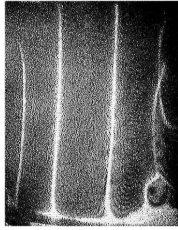
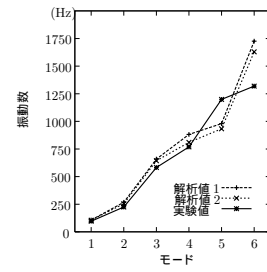


解析 1(658Hz)

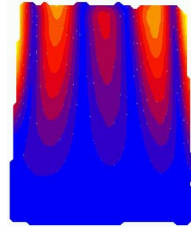


解析 2(643Hz)

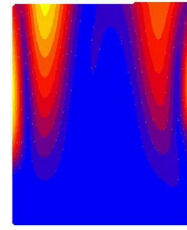
図 13 平面板 6



実験結果 (625Hz)

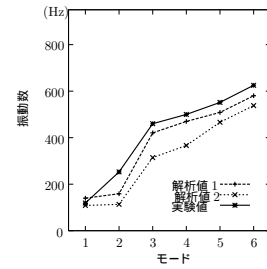


解析 1(580Hz)

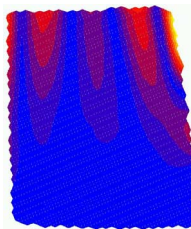


解析 2(538Hz)

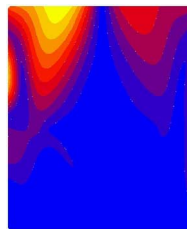
図 14 曲面板 1



実験結果 (520Hz)

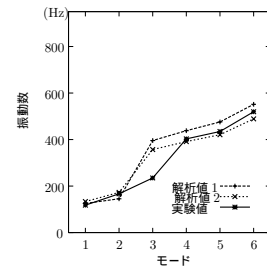


解析 1(551Hz)



解析 2(489Hz)

図 15 曲面板 2



実験および解析結果から以下のことが明らかになった。

1. ホログラフィ干渉実験と FEM 解析による固有振動数はあまりよく一致しているとはいえないが、固有振動モードは同じような結果が示されていることがわかる。
2. ホログラフィ干渉実験においても、また FEM 解析においても、平面板 4 解析 1 を除いて、切欠きがあると健全な平面板 1 の振動数より小さくなっている。また、切欠きが振動モードに与える影響が大きく、振動モードの変化が切欠きの欠陥の予知に有効であることが示唆できる。
3. 孔を有する平面板 6 の場合は、孔のない平面板 1 の場合と比べて、振動数および振動モードも大差はみられないことがわかる。
4. 曲面板の中央部にへこみを付けた場合 (曲面板 2) にも、健全な曲面板 1 に比べて、振動数が小さくなっており、振動モードが乱れていることがわかる。

5 あとがき

本研究では、切欠きや孔やへこみなどの欠陥を人工的に作成した平面板および曲面板を対象として、① ホログラフィ干渉計測による実験、② 三次元計測データに基づく FEM 解析による振動数および振動モードを求め、健全な試験片と比較検討した。実験および解析結果から、両手法により、ある程度の欠陥の診断ができることがわかった。しかしながら、ホログラフィ干渉計測と三次元計測データに基づく FEM 解析による振動数があまりよく一致していないので、今後精度向上に努める必要が残されている。