

# ホログラフィ干渉計測及び 三次元計測に基づく FEM 解析による薄肉板の振動解析

松田 浩\*<sup>1</sup> , 大石 裕介\*<sup>2</sup> , 神原 天鳴\*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup>長崎大学工学部構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14) matsuda@st.nagasaki-u.ac.jp

\*<sup>2</sup>長崎大学大学院生 環境システム工学専攻 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

\*<sup>3</sup>長崎大学大学院生 環境システム工学専攻 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

## Vibration analysis of thin plate by holographic interferometry and FEM using 3D measuring data

Hiroshi Matsuda, Yusuke Oishi, Takanari Kanbara

A non-contact and portable 3D measurement system has been developed for measuring the three dimensional profiles of membrane and shell structures. By the present system, the surface profiles of twisted thin shells are measured, and free vibrations of finite element analysis are carried out by using measured 3D data. Their resonance vibration modes are obtained by forming a hologram on photographic plate, using the time-average method of holographic interferometry. In this study, it is examined about applicable possibility to the non-destructive test of thin-walled structures by holographic interferometry and FEM using 3D-optic measuring data .

**Key words:** 3D-optic measurement , FEM , holographic interferometry , non-destructive test

### 1. はじめに

筆者らは三次元形状計測を目的としてレーザ光と CCD カメラを用いた可搬型三次元計測装置を開発してきた<sup>1)~3)</sup> . また, 本計測器により, コンクリート表面粗度<sup>4)5)</sup>や膜面のしわ計測<sup>6)</sup>に利用するとともに, 計測により得られた三次元座標情報を用いて大規模ソリッド要素による FEM 解析を実施してきた<sup>7)~9)</sup> . さらに, FEM 解析結果の信頼性と精度を検討するために, 平板および曲面板のホログラフィ干渉計測装置を用いた振動実験を行ない, 共振周波数および振動モードを比較検討してきた .

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 三次元計測により得られるデータを用いた大規模 FEM 解析, により, 薄肉構造部材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. 振動実験および三次元計測

#### 2.1 ホログラフィ干渉計測

振動実験は, ホログラフィ干渉計測装置による振動モード測定のために, 振動絶縁された防振台上の定盤上で行なった (写真-1) . 固定治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) . 振動モード測定法には時間平均法を用いた .

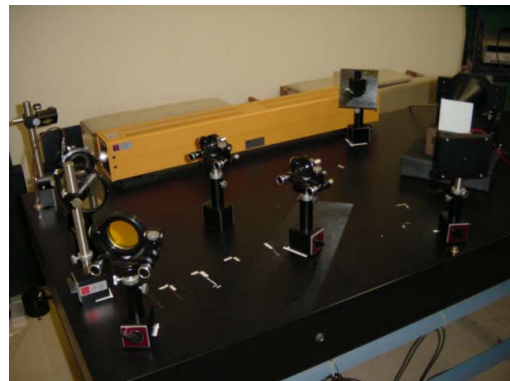


写真-1 防振台上のホログラフィ装置

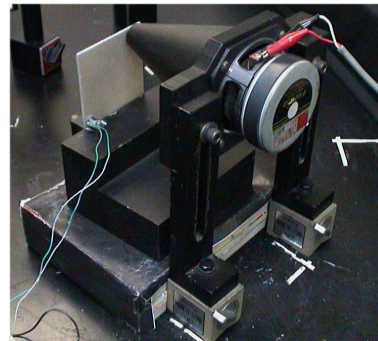


写真-2 加振装置

#### 2.2 三次元計測装置

膜などの柔構造の形状計測を目的として非接触・可搬型の三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、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。光切断法は、照射されたスリットレーザラインを CCD カメラにより撮影し、スリットレーザラインが対象物に投影している部分の画像座標値を取得し、取得した画像座標値を透視変換行列を用いて三次元座標を算出する三次元計測法である。

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。三面からなる木枠はキャリブレーション用ボードである。



写真-3 計測装置

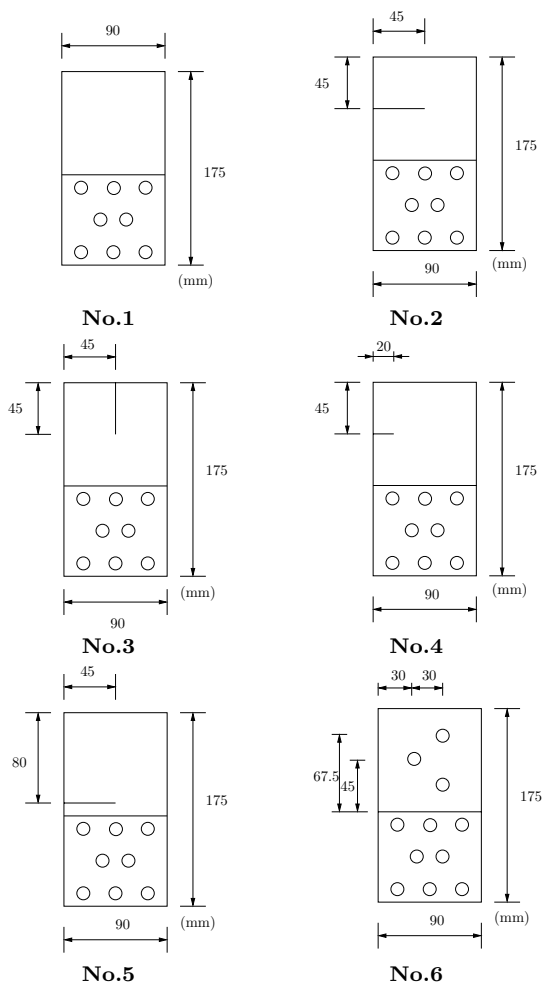


図-1 試験片

## 2.3 試験片の概要

実験では平面板試験片 6 種類を使用した。図-1 に示すように、平面板 No.2 ~ No.6 には欠陥を想定して、切欠き、開孔を人工的に生じさせている。平面板 No.1 は欠陥のない健全な試験片である。

平面板試験片は長さ 175 mm、幅 90 mm、厚さ 1 mm で、アルミニウム合金からなる。アルミニウム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。試験片は止め金とボルトにより治具に完全固定する。

## 3. FEM 解析の概要

### 3.1 三次元計測データから FEM メッシュの作成手順

触針式 3D 計測器より得られた三次元座標データはデータ間隔が均一で、メッシュ分割は比較的簡単に得られる。レーザ光式 3D 計測装置により得られた三次元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、計測データをそのまま用いてメッシュ分割することは困難である。そのため、ここでは、以下に示すようにメッシュ分割プログラムを作成した。

#### (1) 目視によるノイズの削除

被計測物の形状が複雑になるにつれ、それに伴うノイズの削除も非常に難しい問題となる。現段階では、ノイズ削除の自動化方法は構築しておらず、目視によりノイズと判断されたデータを人為的に削除した。

#### (2) データ間隔の均一化

本計測装置により得られた三次元座標データを  $xy$  平面に投影し、 $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$  間隔で  $z$  座標を平均化することにより新三次元座標データを作成して、データの均一化を図る (図-2)。

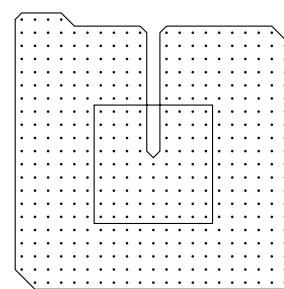


図-2 均一化されたデータ

#### (3) FEM メッシュ分割

均一化された三次元座標データを図-3 に示す方法で、実点に対応する位置に最大 5 点の補間点を設け、実点と補間点からなる三角形要素を作り、より実物に近い形状となるように FEM メッシュを作成する (図-4)。三次元計測データを用いたメッシュ作成 (解析 1) の有効性を確認するために、平面板においては座標値を直接入力して解析 (解析 2) を行った。

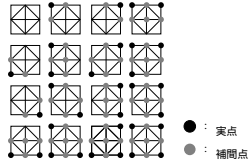


図-3 三角形要素の作成

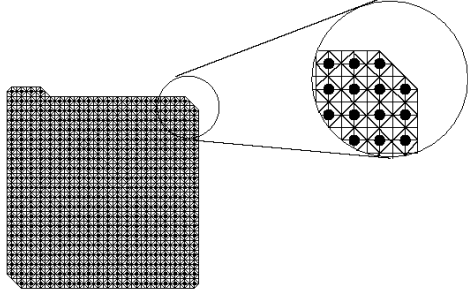


図-4 FEM メッシュ

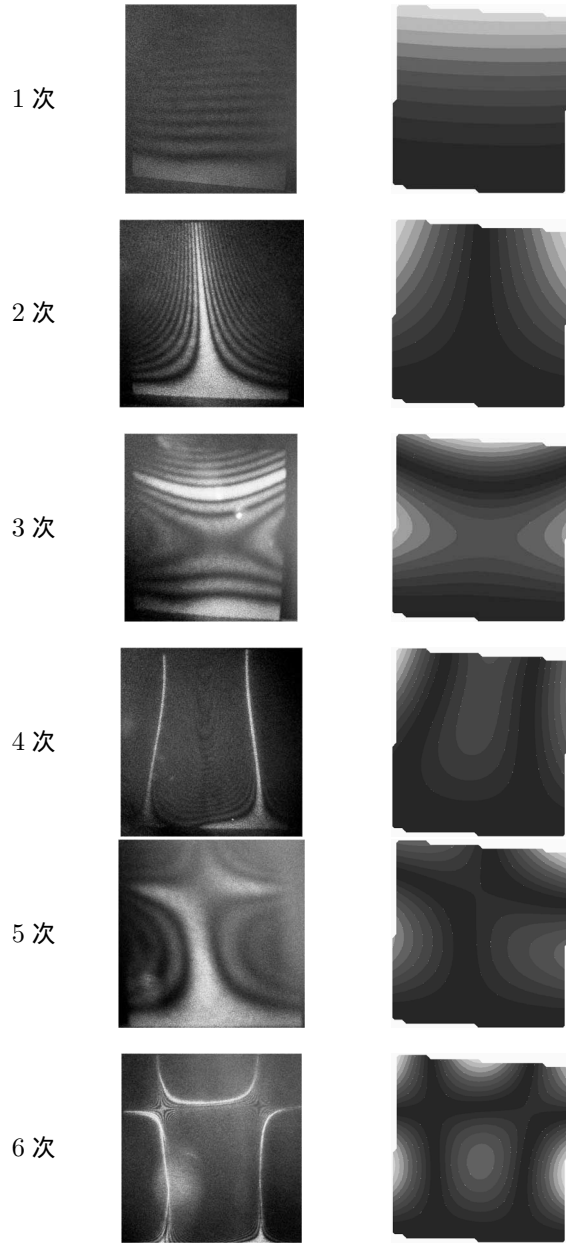
## 4. 実験・解析結果および考察

### 4.1 ホログラフィ計測と三次元計測による結果

振動実験において1次から6次までの振動モード図を求めた。平面板試験片について、振動実験におけるホログラフィ干渉計測による振動モードと三次元計測装置を用いて得られた三次元座標データに基づくFEM解析による振動モードを図-5に示す。同図よりホログラフィ干渉による振動モードと三次元計測に基づくFEM解析による振動モードはほぼ一致した結果が得られていることがわかる。同図右欄の三次元計測の結果は周辺にギザギザがある。これは計測データからFEMメッシュを作成する過程で生じたものである。簡単な形状であれば修正可能であるが、複雑な形状になると修正することができなくなるので、本実験でもあえて修正せずにそのまま利用することにした。

振動実験による共振周波数と三次元計測データを用いたFEM解析による固有振動数を図-6に示す。また、三次元計測データを用いたFEM解析による固有振動数と平面板を定規で実測して得られる座標値を基にFEMメッシュを作成して解析した固有振動数も同図に併記して示している。

振動実験による共振周波数と三次元計測データを用いたFEM解析による固有振動数は、数値自体はよく一致しているとはいえないが、1次～6次までの振動数の変化は同じ傾向で増加している。また、三次元計測データを用いたFEM解析による固有振動数と平面板を実測して得られる座標値を直接用いたFEM解析による固有振動数は比較的よく一致している。これより、本三次元計測装置を用いた方法は、座標値取得に十分信頼性があることがわかる。



(a) ホログラフィ (b) 三次元計測  
図-5 振動モード

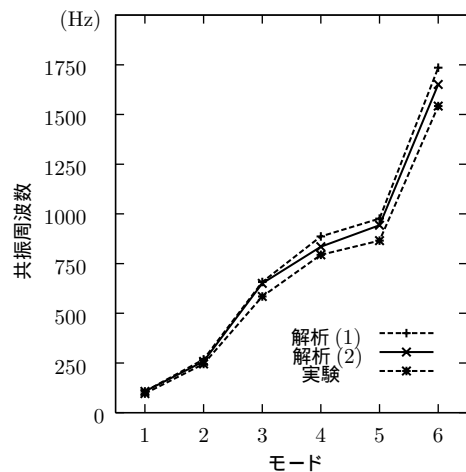
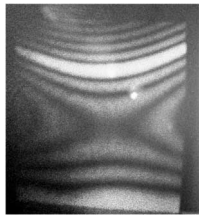
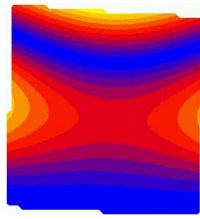


図-6 振動数の比較

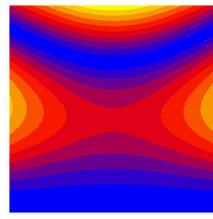
No.1



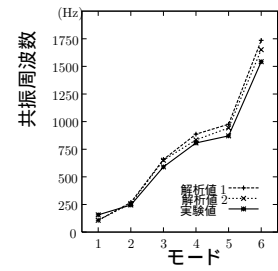
実験結果 (590Hz)



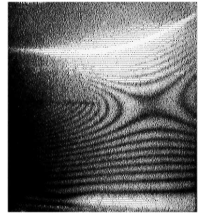
解析 1(657Hz)



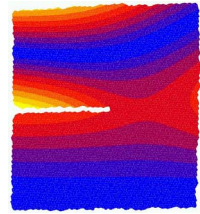
解析 2(651Hz)



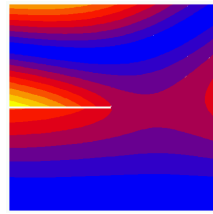
No.2



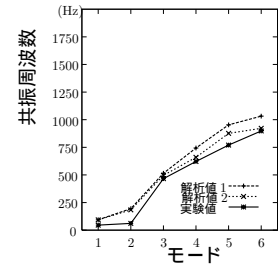
実験結果 (466Hz)



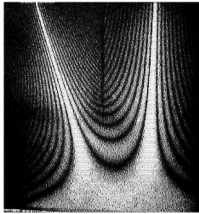
解析 1(515Hz)



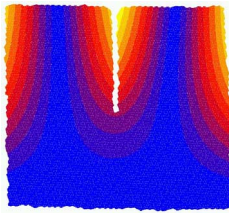
解析 2(496Hz)



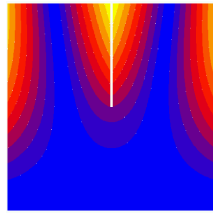
No.3



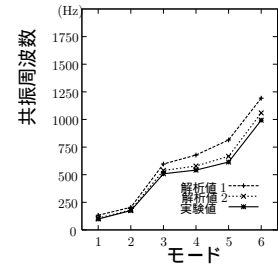
実験結果 (508Hz)



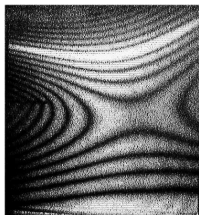
解析 1(597Hz)



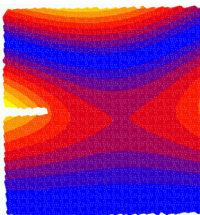
解析 2(538Hz)



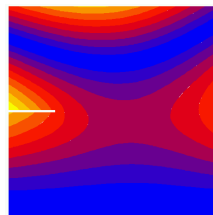
No.4



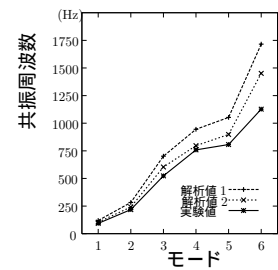
実験結果 (523Hz)



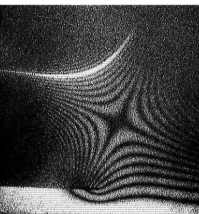
解析 1(702Hz)



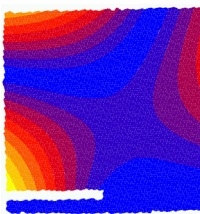
解析 2(604Hz)



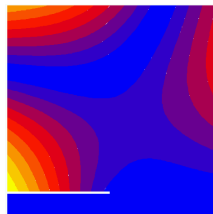
No.5



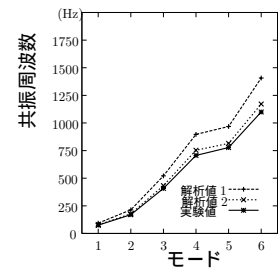
実験結果 (408Hz)



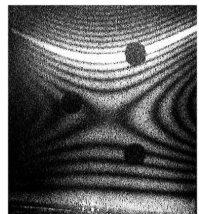
解析 1(521Hz)



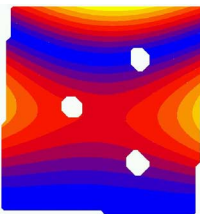
解析 2(433Hz)



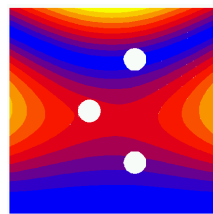
No.6



実験結果 (583Hz)



解析 1(658Hz)



解析 2(643Hz)

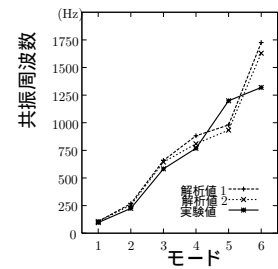


図-7 欠陥のある平面板の振動数と振動モード

## 4.2 欠陥のある平面板

図1に示すような切欠きや孔のある試験片に対して振動実験を実施し、1次～6次までの共振周波数とそのときの振動モードを計測した。そのなかで、欠陥のない健全な試験片(平面板1)の振動モードと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、三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-7に示す。また、これらの図において右端の図は、ホログラフィ干渉実験結果(実験値)、三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)の各モードにおける振動数を示したものである。これらの図より、ホログラフィ干渉実験とFEM解析(解析1および解析2)による固有振動数は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。

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No.4解析1を除いて、切欠きがある場合には健全な平面板No.1の振動数より小さくなっている。また、切欠きある場合の振動モード図は健全な平面板No.1の場合の振動モード図との違いが大きいことがわかる。これより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窺える。

孔を有する平面板No.6の場合は、孔のない平面板No.1の場合と比べて、振動数の変化および振動モードの変化も大差はみられない。

以上の結果より、切欠きのような端部からの欠陥の検査には、振動数および振動モードの変化に基づく非破壊検査は有効であるが、鋼材の内部に孔が空いたような欠陥の検知には不適であると考えられる。

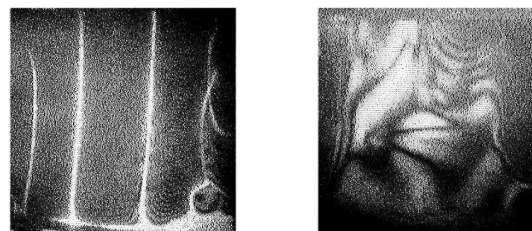
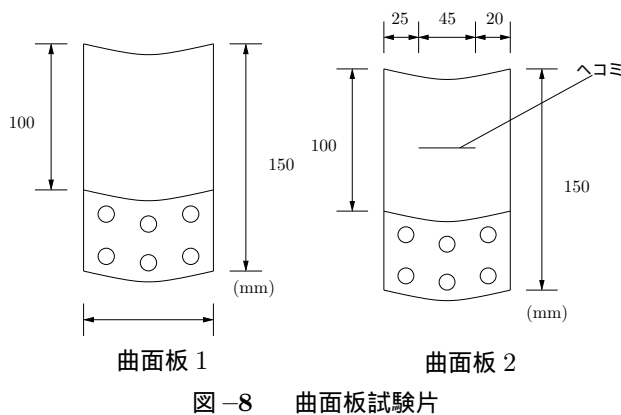
## 4.3 曲面板

図-8に示すような曲面板に対しても平面板の場合と同様の実験および計測・解析を行った。ただし、平面板の場合には、平面板の寸法や切欠きや孔の寸法を直接入力したFEM解析結果と三次元計測データに基づくFEM解析結果と比較したのに対して、曲面板の場合には、三次元計測データに基づくFEM解析結果の比較は、触針式の三次元計測器で計測したデータに基づくFEM解析結果を用いた。

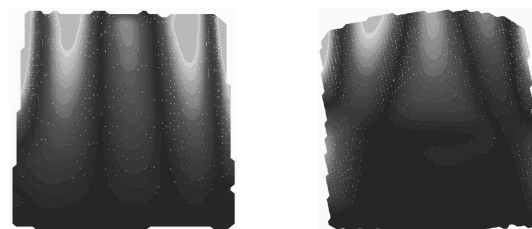
ホログラフィ振動実験による振動モード図、本三次元計測データによるFEM解析結果、触針式三次元計測データによるFEM解析結果の順に6次の振動モード図を図-9に示す。左欄が欠陥のない試験片、右欄がへこみを付けた試験片である。

また、下端の図は、ホログラフィ干渉実験結果(実験値)、本三次元計測装置による座標データを用いたFEM解析結果(解析1)、触針式三次元計測による座標データを用いたFEM解析結果(解析2)の各モード(1～6次)

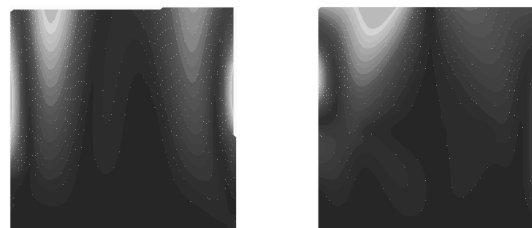
における振動数を示したものである。同図より、曲面板においても平面板同様に、共振周波数に関しては実験値



(a) 実験結果



(b) 解析1



(c) 解析2

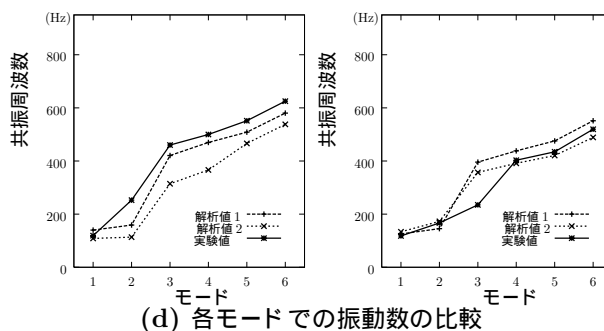


図-9 へこみを付与した曲面板の振動数と振動モード

と解析値の数値自体にはよい一致がみられないものの、各振動モードに対する振動数の変化および振動モード図は比較的一致していることがわかる。右欄はヘコミを付与した曲面版に対する結果である。図-8の図示する位置にヘコミを付与したものである。このヘコミは複雑な形状となっている。

実験でも解析でも曲面版2の振動モードが、健全な曲面版1の振動モードと比較して乱れていることがわかる。本三次元計測装置による座標データを用いたFEM解析結果(解析1)、触針式三次元計測による座標データを用いたFEM解析結果(解析2)による振動数は比較的良好一致している。また、図-9(d)の振動モードと振動数の関係図から、曲面版2の振動数は健全な曲面版1の振動数よりも小さくなっていることがわかる。

## 5. まとめ

本研究では、切欠きや孔やヘコミなどの欠陥のある試験片をアルミニウム薄板で製作し、ホログラフィ干渉計測を用いた振動実験および三次元計測装置により得られる三次元座標データに基づくFEM解析を行なうとともに、これらの手法が非破壊検査法への適用可能性について検討した。本研究の成果は以下のようにまとめられる。

1. ホログラフィ干渉実験とFEM解析による固有振動数は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。
2. ホログラフィ干渉実験およびFEM解析において、切欠きを有する場合の振動数は健全な平面版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窺える。
3. 孔を有する平面版は、孔のない平面版と比べて、振動数および振動モードも大差はみられない。
4. 曲面版の中央部にヘコミを付けた場合にも、健全な曲面版に比べて振動数が小さくなり、振動モードが乱れることが実験および解析によりわかった。
5. 可搬・非接触式三次元計測装置を用いて計測した三次元座標に基づくFEM解析でも、ある程度の非破壊検査が可能である。

## 6. あとがき

本研究では人工的に欠陥を付与した平面版および曲面版を対象として、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、ある程度の欠陥検知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、高性能CCDカメラの使用やホログラフィ干渉計測の高性能化を図り、精度向上に努める予定である。

### 参考文献

- 1) 杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩: 小規模三次元計測システムの開発, 日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, pp.59-62, 1998
- 2) 和田真禎, 森山雅雄, 松田浩, 杉原太郎: レーザ光を用いた三次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会年次講演会発表論文集, pp.297-298, 1999
- 3) 杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩, 山本晃, 和田真禎: 長さ基準における校正手法を導入した3次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会年次講演会発表論文集, pp.299-302, 1999
- 4) 仲村政彦, 松田浩, 山本晃, 和田真禎, 鶴田健: 可搬・非接触型三次元計測装置を用いたコンクリートの表面計測, 土木構造・材料論文集, 第16号, pp.85-92, 2000
- 5) 松田浩, 和田真禎, 仲村政彦, 鶴田健: 3次元計測装置を用いたコンクリート表面粗度の定量化と附着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.901-906, 2001
- 6) 松田浩, 仲村政彦, 山本晃, 和田真禎, 川口健一, 呂品崎: 非接触型3D計測装置を用いた膜形状の計測, 膜構造論文集, No.14, pp.47-56, 2000
- 7) 松田浩, 和田真禎, 小嶋悟, ほか: 3D計測によるコンクリート打継部及び曲面版の振動解析に関する研究, 応用力学論文集, Vol.3, pp.115-124, 2000
- 8) 松田浩, 小嶋悟, 和田真禎, 古賀掲雄, 仲村政彦: 膜・シェル構造解析のための3D計測+FEM解析システムの開発, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp.595-602, 2000
- 9) H. Matsuda, et-al.: Development of finite element analysis system for membrane and shell structures by using 3D-optic system, TRENDS in Computational Structural Mechanics (CSM), pp.511-518, 2001