

II-450 レーザ変位計を用いた箱型浮体の3次元動揺計測法

(財)電力中央研究所 正会員○池野正明 丸山康樹 平口博丸 鹿島遼一

1. はじめに: 電力中央研究所では、浮体係留方式で発電所を建設する技術開発を行っている。そのためには、係留施設が波浪に十分耐え得るか、浮体の動揺量が許容範囲におさまるかを適切に評価する必要がある。模型実験により浮体の3次元動揺量を計測する場合、計測装置の設置により浮体の動揺に影響を与えないことが重要である。本報は、実際の波浪を再現した多方向不規則波による動揺計測にも対応でき、波浪に対する動揺の位相も含めた詳細な検討が可能な計測法として、6台のレーザ変位計により、剛な箱型浮体の3次元運動を計測する手法を新たに開発し、これを紹介するものである。

2. レーザ変位計の概要: 変位計は、投光素子と受光素子を有するセンサー部と、信号処理回路を有するコントローラ部により構成されており、光学的三角測距方式で対象物体の位置を検出するものである。もともと木板の板厚検査やPC板のソリ検査のために製作されたため、距離分解能が0.05mmと高い反面、測定範囲が25mm以内に限られる¹⁾。したがって、大変位を対象とした浮体の動揺計測には不向きであるが、1/100縮尺程度を対象とした模型実験などには適している²⁾。また、反射面は色や材質が極端に違わないように配慮する必要がある。

3. 3次元運動の測定原理 (1) 計測およびデータの解析方法 1) 図-1に示すように、箱型浮体の互いに直角に交わる3平面に貼られた画用紙を反射面として各々2台づつレーザ変位計を配置する。この場合X軸・Y軸・Z軸回りの回転運動検出用の分解能が低下しないように2台の変位計の配置を工夫する必要がある。つぎに、6台の変位計の静止時の出力値をあらかじめ計測しておき、動揺時の変位計検出値から差し引くことにより、移動量を算出する。 2) 変位計No.1~No.6により検出された反射面の移動量を $\eta_1 \sim \eta_6$ とすると、①③⑤⑦平面がNo.1とNo.2の検出点を通る条件、①②④③平面がNo.3とNo.4の検出点を通る条件、①②⑥⑤平面がNo.5とNo.6の検出点を通る条件および3平面が互いに直角に交わる条件(3平面の法線ベクトルの内積が0)により、移動後の3平面の方程式を決定する。連立方程式が非線形となるため、解法はブレンド法による収束計算を行う。 3) 移動後の残りの3平面の方程式を、既に決定された3平面に対して、静止時の剛体としての幾何学条件を満たすように決定する。これにより、浮体を構成する全平面の方程式が決定される。 4) 3平面の交点を求めることにより、浮体の8つの頂点(隅角点)の移動座標を算出する。

(2) 回転角が小さい場合の座標変換: 図-2のように回転角が小さい場合は、算出した頂点の移動座標をもとに回転成分を線形化して、以下に示す座標変換式を用いて、浮体の重心位置での動揺6成分(並進運動成分 Dx, Dy, Dz と回転運動成分 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$)を算出する。剛体の6自由度運動は、3つの頂点の移動座標により確定できるが、線形化の誤差を8つの頂点に均等に割り当てるために、8つの頂点を使用する。未知量よりも連立方程式の数の方が多いため、最小自乗法(ハウスホルダー法)による最適解を求める。

$$\begin{pmatrix} x_0' - x_0 \\ y_0' - y_0 \\ z_0' - z_0 \\ \vdots \\ x_8' - x_8 \\ y_8' - y_8 \\ z_8' - z_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (z_0 - z_8) & -(x_0 - y_8) \\ 0 & 1 & 0 & -(z_0 - z_8) & 0 & (x_0 - x_8) \\ 0 & 0 & 1 & (x_0 - y_8) & -(x_0 - x_8) & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & (z_8 - z_0) & -(y_8 - y_0) \\ 0 & 1 & 0 & -(z_8 - z_0) & 0 & (x_8 - x_0) \\ 0 & 0 & 1 & (y_8 - y_0) & -(x_8 - x_0) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Dx \\ Dy \\ Dz \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$x_0' \sim x_8'$: 8つの頂点の移動後のx座標
 $y_0' \sim y_8'$: 8つの頂点の移動後のy座標
 $z_0' \sim z_8'$: 8つの頂点の移動後のz座標
 $x_0 \sim x_8$: 8つの頂点の静止時のx座標
 $y_0 \sim y_8$: 8つの頂点の静止時のy座標
 $z_0 \sim z_8$: 8つの頂点の静止時のz座標

(3) 回転角が有限な場合の座標変換: 図-3に示すように、オイラーの角を用いて、3つの回転角を定義する。次に、算出した8頂点の移動座標のうち3頂点の移動座標から、以下に示す座標変換公式を用いて、浮体の重心位置での動揺6成分を算出する。連立方程式が非線形となるため、解法はブレンド法による収束計算を行う。

$$\begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j - x_0 \\ y_j - y_0 \\ z_j - z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 + Dx \\ y_0 + Dy \\ z_0 + Dz \end{pmatrix} \quad (2)$$

(j: 浮体の8つの頂点のうち、任意の3点の番号)

$\cos^2 \theta_x + \sin^2 \theta_x = 1, \cos^2 \theta_y + \sin^2 \theta_y = 1, \cos^2 \theta_z + \sin^2 \theta_z = 1$

4. 計測データ例：図-2に示すように、2辺をドルフィンリンク係留された発電所搭載模型（1/100縮尺で平面寸法140cm×140cm、喫水12cm）を設置し、x軸の負の方向に主波向きを有する多方向不規則波と一方向不規則波を作用させた。周波数スペクトルはBretschneider-光易型スペクトル、方向関数は光易型方向関数を用いた。有義波高を3cm、有義波周期を1secとし、多方向波については方向集中度の最大値 S_{max} を10に設定した。サンプリングデータは、変位計1ch当り0.05sec刻みで8192個計測した。これは、作用波400波分の動揺に相当する。この波浪条件では、回転動揺は ± 1 度以下であり、回転角の線形近似が十分成立するため、式（1）を用いて重心位置での動揺6成分を算出している。図-4は、多方向不規則波と一方向不規則波による重心Gの静止位置からの運動履歴およびGに対する浮体の頂点Pの相対運動の履歴を有義波高で無次元化して表わした一例である。図-4によると、作用波の有義波高・有義波周期は同じでも波の方向分散性の違いにより、重心の履歴および変位が最大となる頂点Pの履歴が明かに異なることが分かる。

5. まとめ：以上、今回開発した浮体の3次元動揺計測法を紹介した。今後、室内模型実験にこの計測法を用いて、浮体の3次元動揺解析法の運動位相を含めた詳細な検証に役立てる予定である。

<参考文献> 1) 松下電工：MQレーザアナログセンサ技術マニュアル。2) 池野他：電力中央研究所 研究報告 U88042およびU90039。

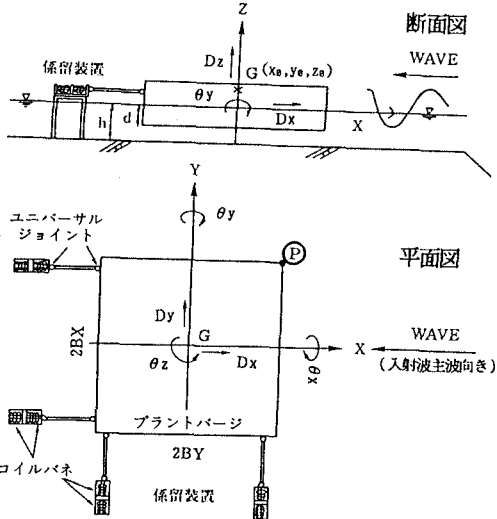


図-2 発電所搭載模型の重心Gと頂点P

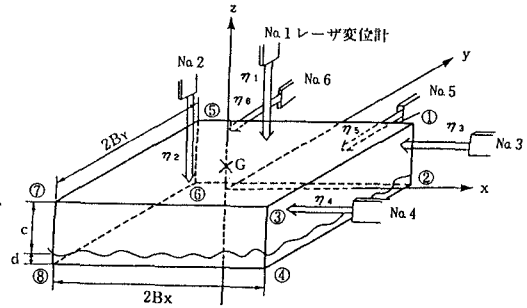


図-1 箱型浮体とレーザ変位計の設置状況

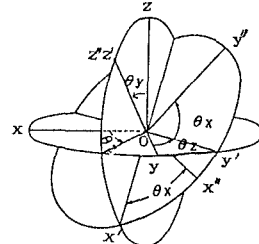


図-3 回転角が有限な場合の3つの回転角成分の定義（オイラーの角）

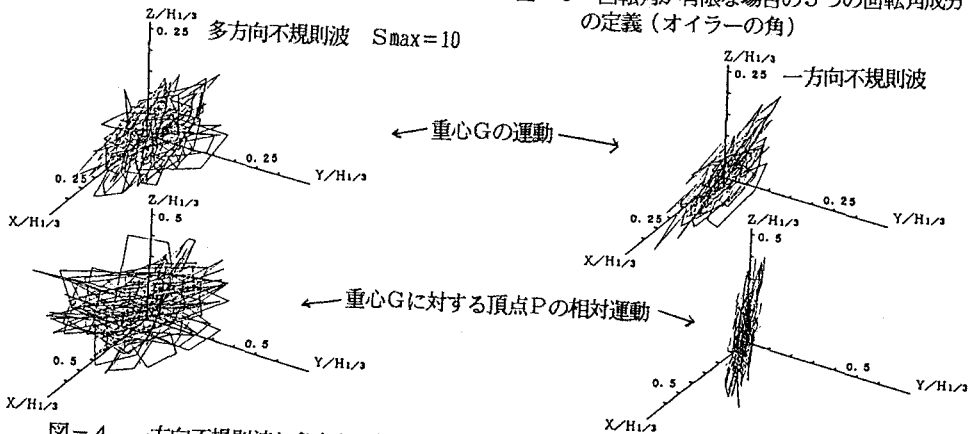


図-4 一方向不規則波と多方向不規則波による浮体の重心Gの静止位置からの運動履歴およびGに対する浮体の頂点Pの相対運動の履歴