

PS-26 NAGISA と多体剛体系運動力学を用いた 作業船と吊荷の波浪中連成運動シミュレーション

海洋開発系 * 荒木 元輝, 大坪 和久, 長谷川 賢太

1. はじめに

海洋工事に於いて作業船は必要不可欠な存在である。しかしながら、作業船の投入揚収作業においてクレーンに吊り上げられ、スプラッシュゾーンにある重量物は波浪外力と船体動揺によって複雑な振れ回り運動を行うため、船、作業員、吊荷のいずれに対してもリスクを伴う作業となる。そのため荒天待機を強いられることも多く、施工スケジュールを圧迫することにもなる。よって波浪中における船体運動とそれに連成した吊荷の振れ回り運動を正確に推定することは作業船の投入揚収作業の安全性・稼働性の観点から重要となる。

過去にも船体運動と吊荷の連成運動に関する研究はいくつかあるものの¹⁾、それらで用いられた流体力はポテンシャル理論をベースとした非粘性流体力である。しかしながら水中の吊荷にかかる正確な流体力を推定するためには粘性影響を考慮することが必要である。そこで本研究においては複数の剛体運動を連成して解く多体剛体系運動力学 (MBD) ソルバーを新たに開発し、それを本所で開発された CFD ソルバー NAGISA²⁾ に組み込むことで、粘性影響を考慮した船体と吊荷の連成運動シミュレーションを実現する。既に対応する模型試験は本所の深海水槽にて実施済みである。

2. CFD と MBD の統合シミュレーション

船体と吊荷の連成運動シミュレーションに用いた CFD ソルバー NAGISA、計算格子、MBD ソルバー、シミュレーション条件について以下に示す。

2.1 CFD ソルバー・計算格子

本研究のシミュレーションにおいて、流体力の計算に関しては本所で開発された CFD ソルバー NAGISA を用いることとする。NAGISA は構造格子によるマルチブロック非定常 Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) ソルバーである。また船体と吊荷の運動に関しては、船体と吊荷が近接してそれぞれ異なった運動をするため、動的重合格子法³⁾を用いることとした。NAGISA と動的重合格子法の詳細については文献^{2) 3)}を参照されたい。

今回のシミュレーションにおいて用いた重合格子を図-1 に示す。模型船の形状を再現するために合計 8 種類の格子を組み合わせ合わせた重合格子 (総格子点数: 約 400 万点) になっている。また今回は壁面条件に関しては計算安定化・計算時間削減のため壁関数を用いており、物体表面から格子第一層目における最小格子間隔は無次元距離 $y^+=100$ としている。

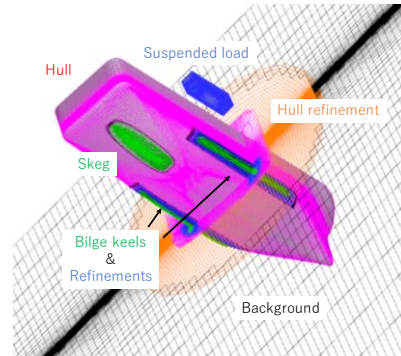


図-1 重合格子の物体表面とミッドシップ断面

2.2 MBD ソルバー

Jourdain の原理 (仮想パワーの原理)⁴⁾ から多体剛体系の連成運動方程式は式 (1) のように導出できる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \Phi_V^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}' & \Phi_{\Omega'}^T \\ \Phi_V & \Phi_{\Omega'} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}} \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}}' \\ \boldsymbol{\Lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{N}' - \tilde{\boldsymbol{\Omega}}' \mathbf{J}' \boldsymbol{\Omega}' \\ -\dot{\boldsymbol{\Phi}}^R - \alpha \boldsymbol{\Phi} - \beta \boldsymbol{\Psi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{M} : 質量行列, \mathbf{J}' : 慣性行列, \mathbf{V} : 一般化速度行列, $\boldsymbol{\Omega}'$: 一般化角速度行列, \mathbf{F} : 外力行列, \mathbf{N}' : 外力モーメント行列, $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}'$: 一般化角速度の外積行列, $\boldsymbol{\Psi}$: 位置拘束行列, $\boldsymbol{\Phi}$: 速度拘束行列, Φ_V : 速度拘束行列の速度成分, $\Phi_{\Omega'}$: 速度拘束行列の角速度成分, $\dot{\boldsymbol{\Phi}}^R$: 加速度拘束行列の速度・角速度成分, $\boldsymbol{\Lambda}$: ラグランジュ未定乗数, α, β : Baumgarte の拘束安定化係数である。

CFD ソルバーとの統合に関しては、図-2 のように MBD ソルバーをモジュール化して NAGISA に組み込んだ。NAGISA が計算した各剛体に働く流体力を外力として MBD ソルバーに与え各剛体の連成運動計算を行い、その結果を基に格子を移動させ、重合情報を更新し、時間発展を行う。

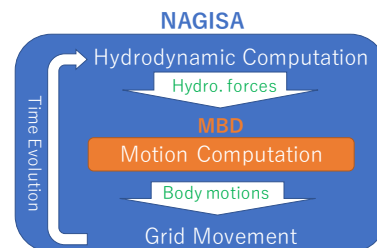


図-2 NAGISA と MBD の関係

2.3 シミュレーション条件

計算条件としては模型試験の状態を想定しレイノルズ数を 1.0×10^6 、フルード数は約 0.08 とした。乱流モデルは壁関数型 $k-\omega$ SST⁵⁾を用いた。また時間発展における内部イタレーション回数は5回とし実時間刻みは波周期の1/50とした。

船体と吊荷の運動計算における拘束条件は図-3のように船体の船首・船尾においてそれぞれ左右から2本のバネで拘束され、船体と吊荷はマスレスリンク（一定距離を保つ質量のない棒）で接続されていると設定し、できるだけ模型試験状態を再現した。ただし、それぞれの拘束点においては回転自由としている。また作業船・吊荷・係留バネ・リンク等の基本的なスペックは模型試験と同様のものを用いている。

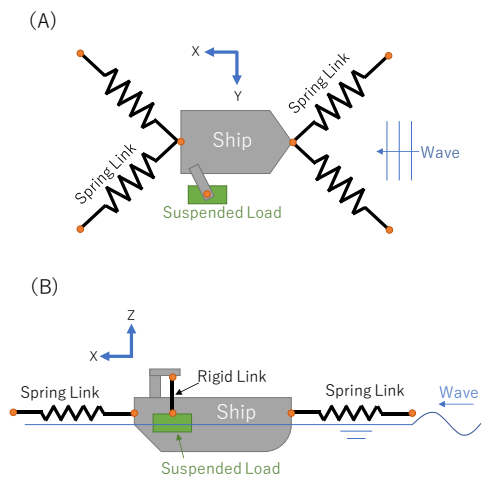


図-3 運動モデルにおける拘束条件
(A)上面図、(B)側面図

3. シミュレーション結果

実船スケールで波周期 8.0 秒、波高 0.6m、波向 150 度（船首右舷から）の規則波中における流場を図-4に示す。同図は斜向波中における自由表面、船体表面圧力、渦の範囲を表す速度勾配テンソルの第二不変量: $Q=100$ 等値面を示している。渦が船体のビルジキールやムーンプールからだけでなく、吊荷の角からも放出されており、水中の吊荷における流体力計算において粘性影響を考慮する必要性が確認できる。

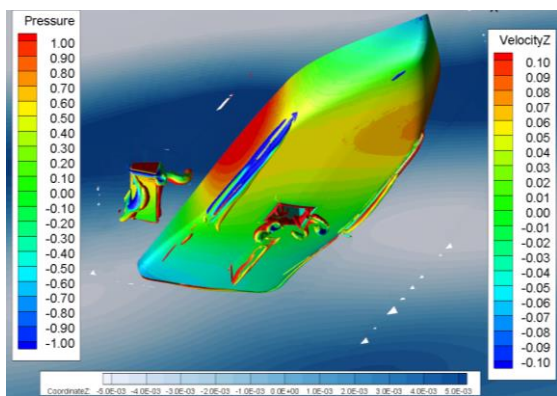


図-4 斜向波中における自由表面・船体表面圧力・ $Q=100$ 等値面

次に同じ波条件における船体と吊荷の上下運動の位相面軌道（約6波周期分）を図-5に示す。船体運動においてはほぼ調和振動状態であるのに対し、吊荷の運動は調和的とは言い難く、カオス的な振る舞いがみられる。これにより吊荷の運動は単純な振子ではなく、船体と吊荷の運動を連成して解くことが必要と考えられる。

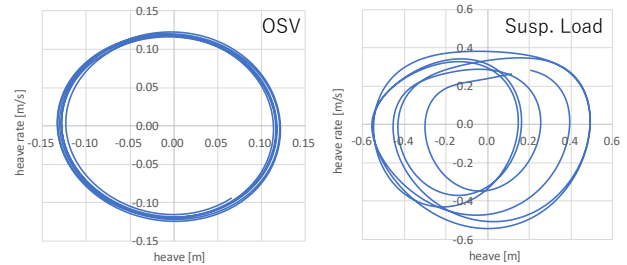


図-5 斜向波中における船体・吊荷の上下運動位相面軌道

4. まとめ

本所で開発された URANS ソルバー-NAGISA と今回新たに開発した多体剛体系運動力学に基づく運動計算ソルバーを統合することにより、斜向波中における作業船と吊荷の連成運動シミュレーションを実施した。その流場解析・運動解析の結果から、吊荷に掛かる流体力に対する粘性影響と船・吊荷の連成運動の重要性を確認した。今後、模型試験との比較・検証を実施していく予定である。

謝辞

流体性能評価系 CFD グループの大橋訓英グループ長、小林寛上席研究員には、NAGISA、動的重合格子法について大変有益な議論・助言を頂きました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Jeong D. H., *et al.*, 2016, Lifting simulation of an offshore supply vessel considering various operating conditions, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8(6), pp. 1-13.
- 2) Ohashi K., *et al.*, 2018, Development of a structured overset Navier-Stokes solver including a moving grid with a full multigrid method, *JMST*, pp.1-18.
- 3) Kobayashi H., Kodama Y., 2016, Developing Spline Based Overset Grid Assembling Approach and Application to Unsteady Flow Around a Moving Body, *Journal of Mathematic and System Science*, Vol. 6, pp. 339-347.
- 4) John Papastavridis. *On Jourdain's principle*. *International Journal of Engineering Science*, Elsevier, 1992, 30, pp.135 - 140.
- 5) Ohashi K., Hino T., 2012, Numerical study on the application of wall function models for the flow around an appendage attached to a body, *AIAA 50th Aerospace Science Meeting Papers*, AIAA 2012-0445.