

PS-11 極限海象中の船体の流体構造連成応答評価について

構造安全評価系 * 高見 朋希
大阪大学 飯島 一博

1. はじめに

極限海象中におけるスラミング、及びスラミングに伴って発生するホイッピングの評価は船体構造の安全性の観点から最も重要な項目の一つである。本研究では、波浪荷重及び船体構造強度評価を一貫して評価するための数値流体力学 (CFD) と有限要素解析 (FEA) を採用し、これらを組み合わせた流体構造連成評価手法を構築した。連成手法としては片方向連成及び双方向連成を考慮し、さらに双方向連成では逐次収束解を判定する強連成法と判断を行わない弱連成法を構築した。流力弾性応答について実験値及び他数値解析手法とのベンチマーク計算を実施し、CFD-FEA 連成手法の構造強度評価への適用性について考察を行った。

2. 数値解析手法

2.1 片方向連成¹⁾

本研究では CFD-FEA の片方向連成 (one-way) を比較対象の数値解析手法の一つとした。対象船、解析条件、及び詳細な解析手法及びは著者らの先行研究¹⁾に準じるものとする。One-way 手法では CFD 及び FEA は共に時間領域で実行され、CFD では各タイムステップにおいて船体の剛体運動と流体力が保存される。FEA に受け渡される荷重には流体力と剛体運動による慣性力が含まれる。FEA では各タイムステップにおいて全節点の速度及び加速度が保存され、同時に流力弾性応答 (ホイッピング応答) も受け継がれる。本研究では、先行研究と同様に CFD には汎用ソルバーである STAR-CCM+ を、FEA には LS-DYNA を使用した。図-1 には本研究で適用した FE モデルの外観を示す。船殻は全てシェル要素でモデル化されており、船体の縦曲げモーメントは中央部に縦通しているバックボーンにより再現される。

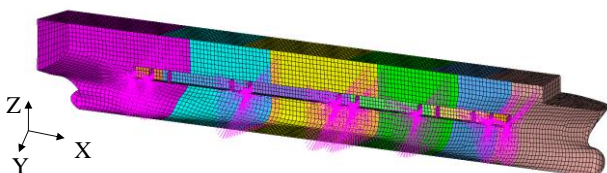


図-1 船体有限要素モデル

2.2 弱双方向連成

2 つめの手法は、FEA 計算結果を次タイムステップの CFD 計算に直接反映させる弱双方向連成である (weak two-way coupling)。本研究で採用する弱双方向連成手法は

conventional serial staggered (CSS)法²⁾に準ずるものとする。すなわち、以下の手順となる。

1. アップデートされた流体メッシュを用いて次タイムステップまで CFD を実行する。
2. 得られた CFD 結果から圧力場を抽出し、FE モデルに負荷する。
3. FEA を次タイムステップまで実行する。
4. FEA から得られた変位場を CFD の船体メッシュにマッピングする。
5. 1.~4.を繰り返す。

2.3 強双方向連成

最後の手法は、各タイムステップにおいて CFD と FEA の繰り返し計算 (sub-iteration) を組み込んだ、強双方向連成 (strong two-way coupling) である。時刻 $t=t_n$ における計算スキームは、Storti ら³⁾に準じて以下の通りとする。

1. 指定された流体メッシュを用いて次タイムステップまで CFD を実行し、k 番目の sub-iteration における圧力場 (\mathbf{F}_{tn}^k) を得る。
2. \mathbf{F}_{tn}^k を FE モデルにマッピングし、FE モデルの外力場 $\mathbf{P}_{ex,tn}^k$ を得る。
3. FEA を次タイムステップまで実行し、k 番目の sub-iteration における変位場 \mathbf{u}_{tn}^k を得る。
4. \mathbf{u}_{tn}^k を CFD 船体メッシュにマッピングし、流体メッシュ領域をアップデート (\mathbf{X}_{tn}^k) する。
5. \mathbf{F}_{tn}^k または \mathbf{u}_{tn}^k の収束をチェックする。収束が確認されれば $t=t_n$ の圧力場、変位場を $\mathbf{F}_{tn}^{correct}=\mathbf{F}_{tn}^k$, $\mathbf{X}_{tn}^{correct}=\mathbf{X}_{tn}^k$ と決定する。未収束の場合は 1.~5.を繰り返す。
6. $\mathbf{X}_{tn}^{correct}$ を用いて次タイムステップまで CFD を実行。

強双方向連成で重要となるのが、5.の収束判定である。収束判定方法には様々な方法が考えられるが、本研究では sub-iteration 回数を抑えるため、Aitken の $\Delta 2$ 乗加速法⁴⁾と 3 回の sub-iteration 結果を用いて次式により $\mathbf{F}_{tn}^{correct}$ を計算した。

$$\mathbf{F}_{tn}^{correct} = \mathbf{F}_{tn}^1 - \frac{(\mathbf{F}_{tn}^2 - \mathbf{F}_{tn}^1)^2}{\mathbf{F}_{tn}^3 - 2\mathbf{F}_{tn}^2 + \mathbf{F}_{tn}^1} \quad (1)$$

3. 結果と考察

図-2 及び図-3 には Midship における縦曲げモーメントの波浪成分及び弾性振動（ホイッピング）成分の時刻歴を、実験、One-way 法、Two-way 法とで比較して示す。図中の α は、CFD 計算において圧力場と速度場の推定に適用される SIMPLE 法で適用した収束計算のための不足緩和係数である⁹⁾。双方向連成法における連成のタイムステップは、弱連成法及び強連成法の双方で 0.002 秒とした。縦曲げモーメントは静水曲げモーメントは除去した成分で比較している。図-3 より、実験では 2 節振動によるホイッピング成分が縦曲げモーメントの時刻歴に現れていることがわかる。また、One-way 法において、このホイッピング成分の振幅が良い精度で推定できていることが確認できる。一方で、実験結果では 2 節振動の周波数は 6.7Hz 程であるが、One-way 法では弾性変形による付加質量変化を考慮していないため、2 節振動の周波数は高く（8.5Hz 程）になっている。

弱連成法（ $\alpha=0.05$ ）の結果を見てみると、波浪成分については良い推定精度となるが、ホイッピング成分が小さく評価されている。この原因については、SIMPLE 法における不足緩和係数 α が 0.05 の場合には圧力の推定精度が低くなっていることが考えられる。一方で、弱連成法において α を 0.3 とすると連成計算が発散した。弱連成法では各タイムステップにおける変位場と圧力場の差異が発生するため、FSI 問題に対する不安定性は良く知られており、この影響によると考えられる¹⁰⁾。強連成法の結果を見ると、波浪成分及びホイッピング成分の双方で応答の振幅が良い精度で推定されている。また、ホイッピング成分の周波数に着目すると、2 節振動の周波数が One-way 法の時と比較して小さくなっていることが分かる。これは強連成法では弾性変形による付加質量の影響が水圧に反映されているため、縦曲げの固有周波数が下がっていることに起因する。実験結果と比較しても同等の周波数（約 6.0Hz）となっており、本研究で用いた強連成法は弾性変形による付加質量影響を適切に評価できる手法であるといえる。

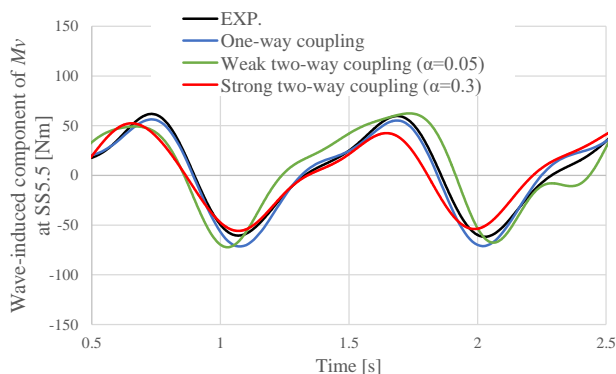


図-2 縦曲げモーメント波浪成分の比較

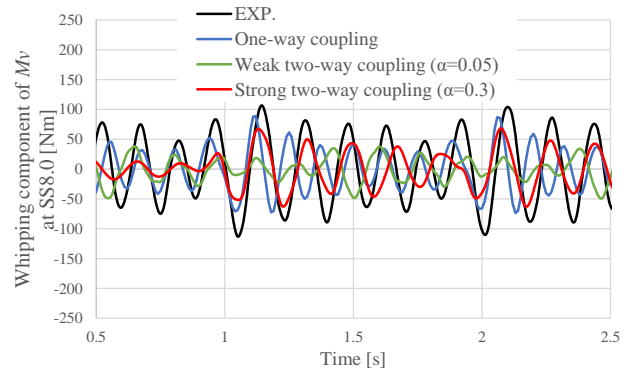


図-3 縦曲げモーメントホイッピング成分の比較

5. まとめ

本研究では CFD と FEA を組み合わせることによりコンテナ船のスラミング衝撃及び流力弾性応答の評価法を構築した。CFD-FEA の片方向連成においては、算出される水圧値に弾性変形による付加質量変化影響が反映されないが、双方向連成の構築により考慮が可能であることが確認された。双方向連成は弱連成及び強連成の 2 種類構築して比較し、各時間ステップにおいて収束計算を行う強連成法がホイッピング成分の振幅値及び周波数の厳密な再現のために適切であることが示された。

参考文献

- 1) Takami, T., Oka, M., and Iijima, K.: Study on Application of CFD and FEM Coupling Method to Evaluate Dynamic Response of Ship under Severe Wave Condition, Proceedings of the ASME 2016 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2017), 2017.
- 2) Farhat, C., Van der Zee K, G. and Geuzaine, P.: Provably second-order time-accurate loosely-coupled solution algorithms for transient nonlinear computational aeroelasticity, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.195, pp.1973-2001, 2006.
- 3) Storti M, A., Nigro N, N., Paz R, R., Dalcin L, D., Rios Rodriguez G, A. and Lopez, E.: Fluid-Structure Interaction with a Staged Algorithm, Mecánica Computacional, Vlo.XXV, pp.887-905, 2006.
- 4) Irons, B. and Tuck, R.C.: A version of the Aitken accelerator for computer implementation. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1, pp.275-277, 1969.
- 5) Versteeg, H.K. et al.: 数値流体力学 第 2 版. 森北出版, 2011.
- 6) Causin, P., Gerbeau J, F. and Nobile, F.: Added-mass effect in the design of partitioned algorithms for fluid-structure problems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.194, pp.4506-4527, 2005.