

京コンピュータを使った 船舶推進性能推定について

1. はじめに

鎌倉時代、鴨長明が書いた『方丈記』の冒頭には、「ゆく河の流れは絶えずして、しかももとの水にあらず。よどみに浮かぶうたかたは、かつ消えかつ結びて、久しくとどまりたるためしなし。」と記されています。また、その数世紀後、ルネサンスの万能科学者レオナルド・ダ・ビンチのスケッチには、橋げた後方の水面上で渦巻く3次元構造が精密に描かれており、乱れた流れの中に何らかの秩序だった構造を見ていたと考えられています。

水槽試験で見えてくるものは、こういった動的な流れの平均をとった謂わば平衡状態としての力であり、特に平水中試験の場合、船体回りの流れは静的なイメージで捉えられがちです。しかしながら、実際には、時々刻々と発生し消滅する小さな縦渦が船体を覆う乱流境界層を生成し、プロペラへ流入する流場を支配するといった非常に複雑で非定常的な性質が強い現象なのです。

SRC News No.90では現在、日本造船技術センター（SRC）で取り組んでいる「Large Eddy Simulation (LES) を用いた船舶性能推定精度向上に関する研究」の平成23年度成果の一部をご紹介します。LESでは乱流境界層内の非定常な小さな縦渦を忠実に再現して飛躍的に高い精度（目標1%以内）を実現しますが、膨大な計算量を必要とします。

従来、乱流は複雑でよくわからないため、統計的手法を基に理論的研究が行われていました。統計的（確率的）手法と聞くと量子力学を思い浮かべて、それ程ミクロな世界が関係しているのかと思われるかもしれませんが、実際はニュートン力学で十分説明できるスケールの現象です。これまでの船舶分野ではこの乱流の統計量を扱う『乱流モデル』を本質的なところで使うReynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 法を使っており、精度的な限界がありました。これを解消するべくより複雑な乱流モデルが導入され、それなりの成果を上げてきましたが、依然として、数%から数十%の誤差を含んでいます。結局、支配方程式であるNavier-Stokes方程式を忠実に解くことが精度向上への王道だと思われる。

LESでは最も支配的な縦渦を再現することが重要となりますが、この縦渦のサイズは通常SRCで使用している6m模型試験で概ね1mmの直径です。この渦一つを最低限各方向10分割の計算格子で再現するとすれば、0.1mm弱の計算格子で船体全体を覆う必要があります。そのため、計算領域全体での計算格子数は300億を超えます。

平成24年度、SRCは東京大学と共同で、文部科学省事業の京速コンピュータ「京」を中核としたHPCI(革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ)の活用を目的としたHPCI戦略プログラム「分野4 次世代ものづくり」の重点課題として神戸にある京コンピュータを利用して320億格子の船体回りの計算を行いました。準備計算を含めて京コンピュータの1/3にあたる3万ノード(24万コア)を概ね100時間使用しました。格子生成にはPointwise/Gridgen、流体計算にはFrontFlow/blue、可視化にはEnSight/FieldViewを使用しました。余談ではありますが、人間の脳には140億個の神経細胞があり、その発火サイクルは1ミリ秒だそうです。京コンピュータはその名の通り1秒間に1京回の計算ができるのですが、脳の一秒当たり発火回数の14兆回と単純に比べることはできませんが膨大な量(700倍)だということが分かります。

ところで、みなさんご承知の通り、現在、船舶からの温室効果ガスの削減対策の義務化を目的として、国際海事機関(IMO)においてEEDI(Energy Efficiency Design Index; エネルギー効率設計指標)を現在の平均ベースから最大35%程度まで、15~20年程度を掛けて段階的に低減する規制が順次実施されています。これは個船の輸送効率を水槽試験や海上試運転などで設計者・造船所が実証、さらに第三者機関によって認証する仕組みや、省エネ船や革新的技術を普及させる為のインセンティブとなるような仕組みが盛り込まれており、今後の水槽試験ニーズをますます増加させると考えられています。

このような背景の中で、近年、全世界中で次々と新しい水槽が建設されております。本計算は現在のところ、京コンピュータクラスのスーパーコンピュータでしか計算できず、かなりのコストが掛かりますが、将来的に計算機の性能が向上し(毎年ほぼ倍になっている)、値段が下がれば水槽試験より短期間、低コスト、高精度で実施でき、設計コストの削減や革新的技術開発などで海運および造船業界へ貢献することが期待できます。

本稿では平成23年度、24年度計算成果についてその一部をご紹介します。

2. 計算結果

平成23年度の計算では乱流促進デバイスを付けずに自然遷移する計算を行いました(図-1参照)。SRC News No.90執筆時点では十分な分析ができていなかったのですが、まず、流れが船首から

船底に潜り込むときに乱流に遷移し、それとは別系統で喫水付近ではside flat tangency line近辺の大きな曲率(変化)に耐え切れず乱流に遷移して行き、midshipあたりのbilge circleの上あたりで上下の乱流遷移線が合体する様子が観察されました。非常に昔の昭和30年代の論文ですが、田古里先生の研究 [1]に出ているような様子を再現しています。本計算結果の詳細は日本船舶海洋工学会論文集 [2]に掲載されています。

平成24年度計算は図-2の船体表面の渦度を見てわかるように乱流促進デバイス(stud)をつけて計算を行ったので、ほぼ全面乱流になりました。また、図-3に示すような自由表面の影響を考慮した計算ができるようになりました。これは従来法のRANS法でも十分精度のよい結果が得られていますが、ここでのポイントは自由表面も考慮しながら、しかもきちんと小さな縦渦を時々刻々と解いているところであります。

その他、プロペラ単独試験を模擬した計算を行いました。概ね流体力に関して試験結果とも良好な一致を見せ、船体にプロペラがついて自航している状態の計算も行いました(図-4)。これらすべての流体力を含んだ6自由度の船体運動計算が行えるようになると完全な曳航水槽シミュレーターの完成です。

3. おわりに

今回行った計算では膨大な情報量が得られた訳ですが、まだまだ十分な解析が終わったとは言えない状態です。今後、船体回りの乱流場を詳細に分析し、他の乱流の研究など比較して船舶特有の事象をじっくりと観察していきたいと考えています。図-5の速度勾配第2不変量と呼ばれる渦の強度を示す物理量の等値面を見ると船体近傍に小さな渦が無秩序に散らばっているように見えますが、決定論的力学系ですので運動は完全にはランダムではなく、カオス力学的構造があると考えられています。冒頭の鴨長明が見ていたものも複雑系の世界で有名な散逸構造、すなわちエネルギーが散逸していく流れの中に自己組織化によって生まれる定常的な構造だと思われれます。本計算の分析を進め、小さな縦渦がプロペラにぶつかる様子をつぶさに観察すれば船舶流体力学が新たなステージに突入するのではとソワソワしています。

(技術開発部 設計システム開発課 西川達雄)

参考文献

- [1] 田古里哲夫、造船協会論文集(103)、pp.1-10、1958
- [2] 西川達雄他、日本船舶海洋工学会論文集(16)、pp.1-10、2012



図-1 船体表面の渦度分布と限界流線



図-4 自航計算の瞬時場圧力分布



図-2 船体表面の渦度分布 (Re=4.6×10⁶、320億格子)

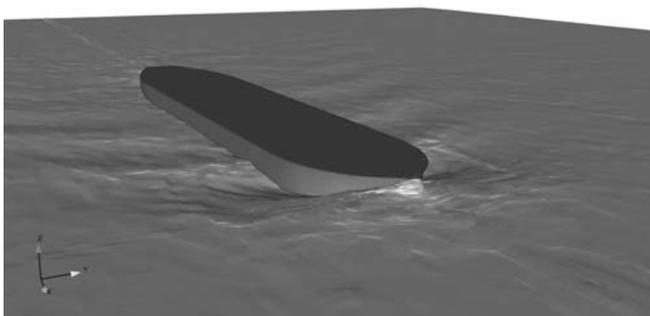


図-3 自由表面計算(計画速度)

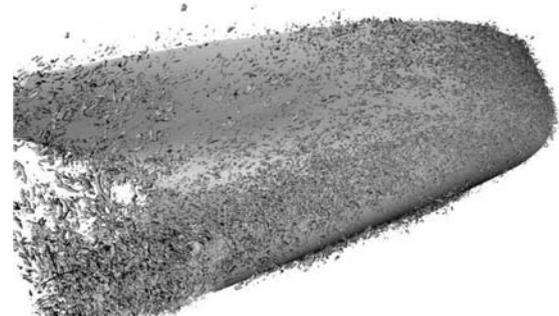


図-5 Q=30000等値面