

京コンピュータを使った 船舶推進性能推定について(その2) — CFDワークショップ

(1) 船舶LES計算について

SRCでは2011年より「CFDによる船舶性能推定精度の向上に関する研究」を実施しております。2013年にはスーパーコンピュータ「京」を使った世界最大規模(機械、自動車、航空分野を含む)のCFD計算を船体回りの流れ場で成功させました[1,2]。その後、SRCの取り組みは徐々に認知されてきて2014年には日本経済新聞に取り上げられました[3]。2015年にはドイツで行われた国際会議(COMPIT)で、船尾のプロペラが回転する、自航状態の計算結果を発表したところ、最優秀論文に選ばれました[4]。

SRC NEWS 90、92[5、6]では、なぜ現在主流のReynolds averaged Navier-Stokes法ではなくLarge Eddy Simulation (LES)が必要かを説明しました。乱流境界層の発達には摩擦抵抗を決めるだけでなく、剥離や再付着と密接に関係し、船体の推進性能に大きく影響します。境界層内で乱流の生成に支配的な役割を果たしていると考えられている、船体表面近傍に生じる縦渦の直径は、肥大船では表1に示すように6メートル模型で800ミクロン程度であります。LESではこれらを再現するために大規模な計算が必要となります。

表1

	船長	船速	境界層厚さ	渦の直径
実船	320m	8.0m/s	1.2m	0.2mm
模型船A	6.0m	1.1m/s	10cm	0.8mm
模型船B	3.8m	0.9m/s	7cm	0.9mm
模型船C	2.4m	0.7m/s	5cm	1.1mm
模型船D	1.5m	0.6m/s	4cm	1.3mm

(2) CFDワークショップ

2015年に行われたCFDワークショップ[7]でも大規模LES計算の重要性は再認識されました。CFDワークショップは実験データと世界の研究機関で開発されたCFDコードの性能を比較するコンペであります。そこで使用されてきたベンチマーク船型であるKVLCC2は2000年から使われている船型で、各コードはその船尾伴流などを精度よく再現できるようにチューニングされてきています。しかしながら、今回、新たに海上技術安全研究所、横浜国立大学、SRCなどのグループで設計されたJapan Bulk Carrier (JBC)の船尾流場はうまく再現できていないものが多数みられ

ました。SRCで実施したLES計算(FrontFlow/blueを使用)は非常に実験と良い一致を見ました[8]。

図2はJBCの船尾プロペラ前方の流速分布(上段)とプロペラ位置における所謂、伴流分布(下段)の比較です。左列が水槽試験結果で、中列が海上技術安全研究所(NAGISA)、右列が横浜国立大学(SURF)の計算結果です。上段の船尾流場ではNAGISA、SURF共に実験に見られる目玉が再現されておらず、形状も合っていません。下段の伴流分布では概ね形状は合っていますが、NAGISAはフックの $U=0.3$ のラインを過大評価しており、SURFは $U=0.2$ の目玉の部分が再現できていません。

図3は左列が実験で、中列がスウェーデンのチャルマース工科大学(SHIPFLOW)、右列がイタリアのINSEANの結果です。上段の船尾流場は、SHIPFLOWはNAGISA、SURFより実験に近いが $U=0.2$ の目玉が再現できていません。INSEANの結果はNAGISA、SURFよりも実験と離れています。下段の伴流分布は、SHIPFLOWは目玉の位置、流速のピーク値も概ね合っています(ただし、フックの下側の形状が若干不自然です)。INSEANはそもそも目玉が出ていません。

SRCで実施した計算は計算資源の都合上、通常の大規模の半分のレイノルズ数の計算を、50億格子を用いて実施しました。図4は左列が風洞試験結果で中列がSRCで実施したLES計算、右列がスウェーデンのグループが行った壁関数を使った簡易的なLES計算です。SRCの計算結果は流速分布の形状が非常によく実験と合致しています(ただし、伴流分布の遅い領域を過大評価しています)。簡易LESでは流速のピーク値も形状も大きく違ってきます。

図5は同じレイノルズ数の計算でフランスの著名なグループの結果です。中列がExplicit Algebraic Stress Model (EASM)という最近、最も良いとされている乱流モデルを使った結果、右列が同じ乱流モデルを使いつつ、渦の強いところの格子を自動的に細分化して精度を上げる手法を試したものです。上段の船尾流場も下段の伴流分布もフックや目玉は強調されるようになりますが、何れも実験に比べ過大評価となりました。

このように、船尾伴流が実験と合わなければ、本来ならば船体抵抗や自航要素も実験と一致しません。仮に合うように何らかのチューニングをしたとしても、乱流モデルを使った計算には、新しい船型に対応するために乱流モデルのチューニングと新たな水槽試験が必要という問題点があります。一方、LES計算はチューニングを必要とせず、精度よく実験を再現できることを再確認しました。

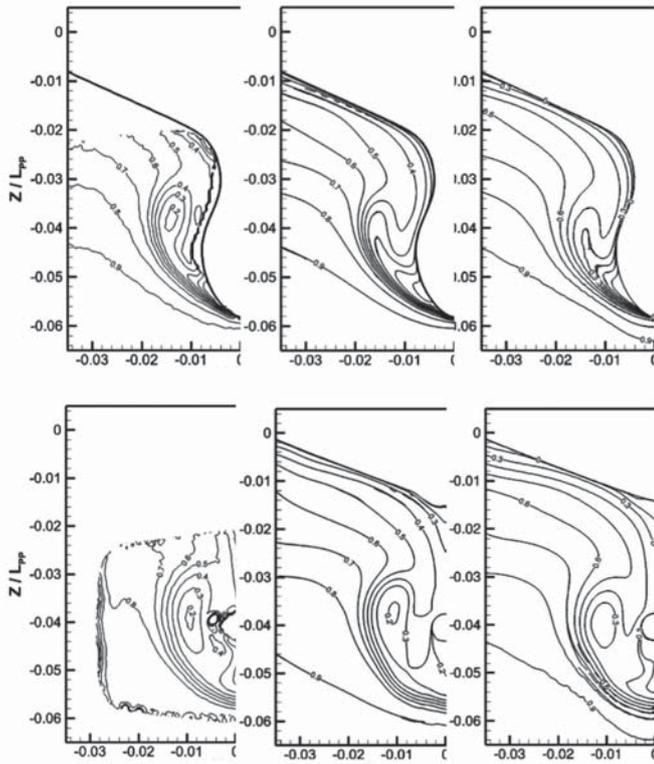


図1 船尾流場(上段)と伴流分布(下段)
(左列:水槽試験、中列:NAGISA、右列:SURF)

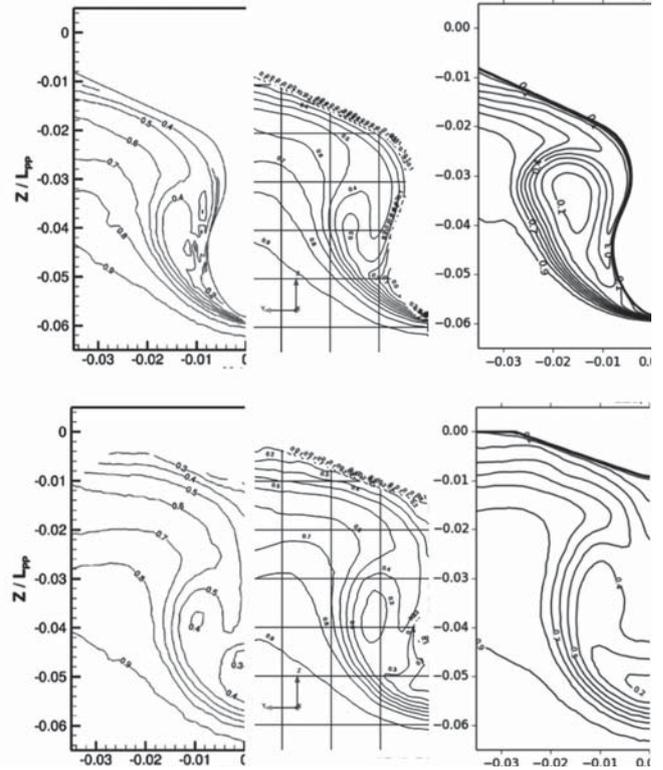


図3 船尾流場(上段)と伴流分布(下段)
(左列:風洞試験、中列:LES(SRC)、右列:LES(壁関数))

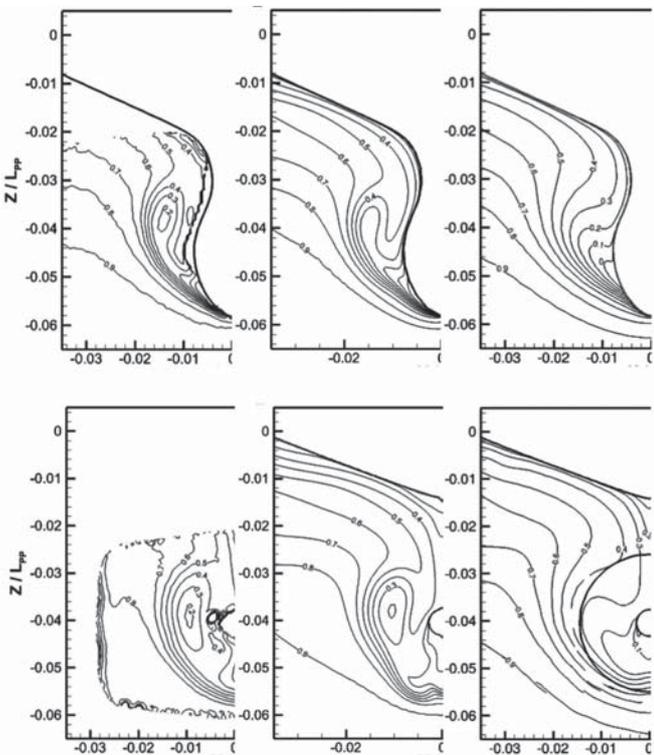


図2 船尾流場(上段)と伴流分布(下段)
(左列:水槽試験、中列:SHIPFLOW、右列:INSEAN)

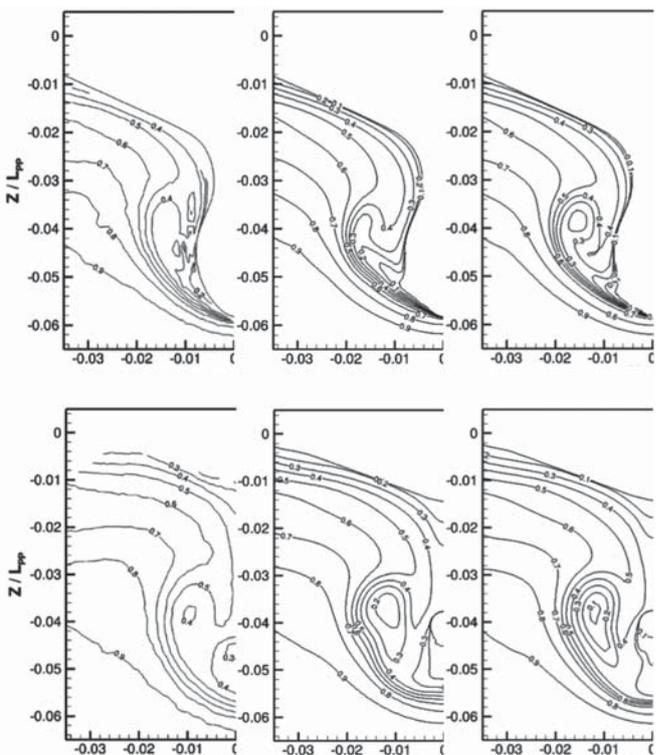


図4 船尾流場(上段)と伴流分布(下段)
(左列:風洞試験、中列:EASM、右列:EASM/Auto Refine Grid)

(3) 大規模LES計算の実用化

冒頭に述べた世界最大規模の計算では320億個の計算格子を使用しましたが、スーパーコンピュータ「京」の2/3程度を使って約1日で計算ができます。「京」のピーク性能は11ペタフロップスですが、現在、国内で最高性能を有するスパコンは東京大学の柏キャンパスに設置されているOakforest-PACSで、そのピーク性能は25ペタフロップスです。さらに2020年に完成予定のポスト「京」では1エクサフロップスを目指しています。図5に示す#500は世界で500番目のスパコンの性能で、2020年ころには「京」の2/3程度の性能に到達します。これは、一般企業で導入可能な計算機で大規模LES計算が、実用的な時間で可能となる日がすぐそこまで来ていることを意味しています。

(技術開発部 設計システム開発課 西川達雄)

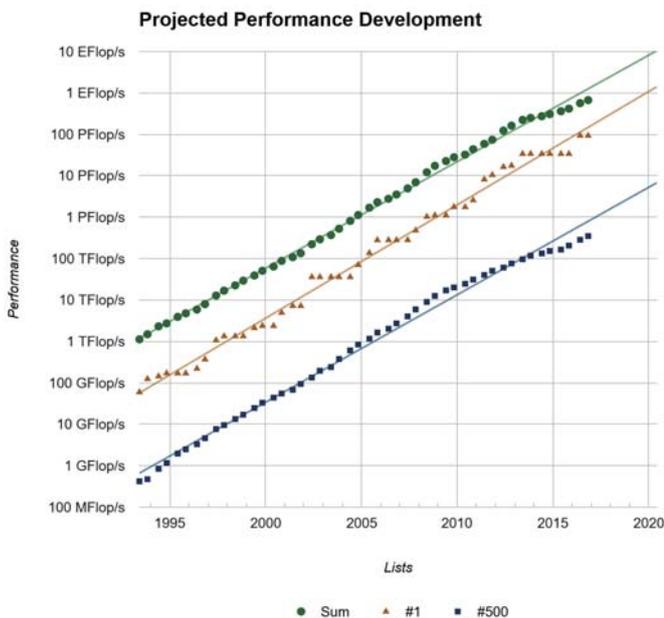


図5 近年のスパコン性能の推移
(<https://www.top500.org/>)

謝辞

本研究の一部はHPCIシステム利用課題の成果によるものです(課題題名:乱流の直接シミュレーションによる曳航水槽代替技術の実用化、課題ID:hp130042、hp140226、hp150005、hp160030、hp170108にて継続中)。

また、共同研究を実施している東京大学 生産技術研究所 革新シミュレーション研究センター長 加藤千幸教授、株式会社みずほ情報総研の山出吉信様に感謝いたします。

参考文献

[1] Nishikawa, T., Yamade, Y., Sakuma, M., Kato, C., “Application of fully-resolved large eddy simulation to KVLCC2 - Bare hull double model at model ship Reynolds number”, J. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 16, pp.1-9, 2013.

[2] Nishikawa, T., Yamade, Y., Sakuma, M., Kato, C., “Fully resolved large eddy simulation as an alternative to towing tank resistance tests - 32 billion cells computation on K computer”, 16th Numerical Towing Tank Symp. (NuTTS), Mülheim, 2013.

[3] 日本経済新聞、スパコン「京」でものづくり、2014年1月9日

[4] Nishikawa, T., “Application of Fully resolved Large Eddy Simulation to Self-Propulsion Test Condition of Double-Model KVLCC2”, 14th international conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT’15), pp.191-199, Ulrichshusen, 2015.

[5] 西川達雄、「境界層を完全に解像したラージ・エディ・シミュレーションの船舶への適用」、SRC NEWS、Vol.90、pp.6-7、2012年6月

[6] 西川達雄、「京コンピュータを使った船舶推進性能推定について」、SRC NEWS、Vol.92、pp.8-9、2013年6月

[7] Proceedings of Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, 2015.

[8] Nishikawa, T., Application of Fully Resolved Large Eddy Simulation to Japan Bulk Carrier with an Energy Saving Device, Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, 2015.