

境界層を完全に解像した ラージ・エディー・シミュレーションの 船舶への適用

1. はじめに

現在、船舶分野で主流となっている数値流体力学(CFD)技術はレイノルズ平均・ナビエ・ストークス(RANS)法と呼ばれる手法である。この手法は乱流モデルのチューニングや改良がキーとなるが、1990年頃から盛んに研究されており、特に国内では実際の船型設計で馬力推定に使われている。この手法の特徴は手軽に使用することが出来る一方で、性能推定精度において水槽試験より信頼性が劣るといったデメリットがある。

曳航水槽試験の抵抗・自航試験と同等の信頼性を実現するには直接計算(Direct Numerical Simulation, DNS)と呼ばれる手法を適用すれば良い。実際の流れ場では乱流中の渦運動エネルギーは最終的に全て熱に散逸されるが、DNSはこの散逸スケールの運動まで計算格子で捉える手法である。この手法は現在のRANS等で課題となっている乱流のモデル化に起因する誤差は一切含まず、ナビエ・ストークス方程式に厳密に従う。このため、この手法を用いれば模型製作誤差、計測誤差等を伴う曳航水槽試験よりも高精度かつ高信頼性を有する結果が得られると考えられる。一方でこの手法のデメリットは膨大な数の計算格子が必要となることである。このため、実用的な工学分野で厳密なDNSが適用された例はない。

DNSと同等な結果が得られ、計算コストがDNSより小さい手法にラージ・エディー・シミュレーション(LES)と呼ばれるものがある。乱流の中には大きなスケールの渦から小さなスケールの渦まで様々な大きさの渦が混在しており、大きな渦の周りには小さな渦があり、大きな渦の運動に従うように小さな渦は揺らいでいる。小さな渦の運動は大きな渦の運動からもたらされ、エネルギーが大きなスケールから小さなスケールへと伝わる。このエネルギーカスケードは渦運動が熱に変わるスケールまで続いているが、ある程度小さなスケールになるとそれぞれの乱流場に依存しない普遍的な特性を持った領域が現れる。この領域をモデル化し、乱流場の生成、形態に強く影響を受ける大規模渦を直接計算格子で計算する手法がfully-resolved LESである。船舶のように摩擦抵抗が重要な場合、乱流境界層内を完全に解像する必要があり、乱流生成に支配的と考えられている壁近傍の主流方向に平行な小さな縦渦が解像すべき最も小さなスケールである。この縦渦のスケールは熱への散逸スケールの高々数倍であり、DNSと同様に膨大な数の計算格子が必要となるデメリットがあるが、DNSと同様に乱流のモデル化が支配的な役割を担わないので、

準直接計算と呼ばれている。本研究ではこの手法を船舶へ適応した。

2. 計算格子数と計算機能力

具体的には6m模型の場合、レイノルズ数(Re)が 5×10^6 となり、上述の縦渦の直径は約1mm(表-1参照)で、この縦渦を計算格子で表現するために必要な計算格子の間隔は0.1mmのオーダーである。仮に模型船の浸水表面が 10m^2 とすれば、0.1mm四方の正方形で覆うのに10億格子が必要である。船体表面に垂直な方向に100格子使うとすれば計算領域全体で1000億格子が必要であり、非等方的な格子を駆使して効率化したとしても数百億格子が必要で膨大な計算量が必要となる。

一方で、近年の計算機の能力の向上は目覚しく、過去20年間で計算スピードが100万倍になっている。この能力向上は当初の所謂クロック周波数の向上に加え、2006年頃からのCPUの超並列化により、現在でも同じペースで性能向上を続けており、2020年頃までこの傾向が続くと予想されている。昨年、2011年にスパコン性能ランキングで世界一に輝いた京コンピュータはコア数が70万個以上ある計算機である。コアあたり百万格子の計算が出来るとすれば、京コンピュータを使えば7000億格子の計算ができ、6m模型を使った曳航水槽試験状態のfully-resolved LESは実現可能である。

日本造船技術センターでは昨年、本研究の一部を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」の実証研究課題として実施した。計算機は主に財団法人計算科学振興財団のFOCUSスパコンを使用し、計算コードにはFrontFlow/blueを用いた。

3. 計算結果

計算はCFDのベンチマーク船型で有名なKVLC2船型を対象として、10億格子を用いて計算を行った。計算したレイノルズ数は $Re=5 \times 10^5$ と 1×10^6 の2通りである。図-1は船体表面のある瞬時場の渦度分布であるが、船体中央部付近に乱流遷移が見られる。遷移面は長手方向で上下に一樣ではなく、平行部で遅れ、船体上部と底部で前方にあることが分かる。また、レイノルズ数が高い方が、遷移位置が前方にあり、理論と整合している。

図-2にベースラインから46%の高さの局所摩擦抵抗係数を示す。どちらのレイノルズ数でも船体前半部ではそれぞれの層流の

カーブに乗っており、遷移後はそれぞれの乱流のカーブに到達する。遷移位置も図-1の船体表面渦度分布と整合している。

図-3にS.S.2断面での渦度分布(瞬時場)を示す。レイノルズ数が高いほうで、微細な渦構造が見られる。表-1によると、どちらのレイノルズ数でも縦渦のスケールは1mm程度だが、船体のスケールに対してはレイノルズ数が高い方が相対的に細かい縦渦構造になる。

図-4に伴流分布を示す。肥大船に特徴的なフック構造が再現できている。図-5に限界流線を示す。船体中央部からプロペラシャフトに向かう流れの角度や船体底部から来る流れがプロペラシャフト高さ辺りで剥離する様子がオイルペイントの試験結果と一致している。

これら計算結果の詳細は日本船舶海洋工学会平成24年春季講演論文を参照していただきたい。

4. まとめと今後の課題

昨年度は波無し状態で、通常の曳航水槽試験より低いレイノルズ数での計算を行ったが、今年度も引き続き、波無し計算で6m模型試験レベルのレイノルズ数の計算を、昨年より大規模な計算環境で行う予定である。

また、自航試験の計算や波付計算も実施し、最終的にはこれらを統合して抵抗・自航シミュレーターとして利用する予定である。

(技術開発部 西川達雄)

表-1 模型船長さと必要計算格子数(フルード数一定)

レイノルズ数	模型長さ	境界層厚さ	縦渦直径	計算格子数
5×10^6	6m	100mm	0.9mm	1000億
1×10^6	2m	50mm	1.3mm	10億
5×10^5	1.25m	30mm	1.5mm	1億

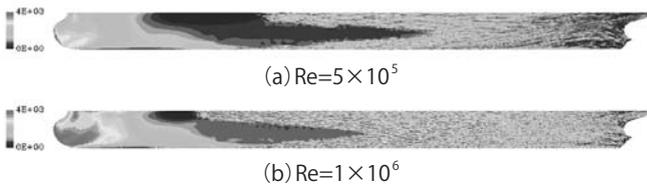
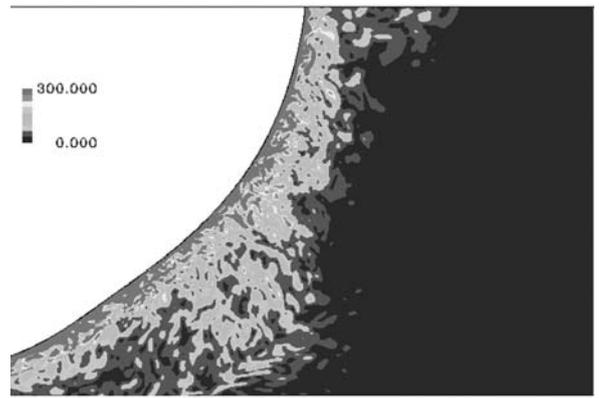
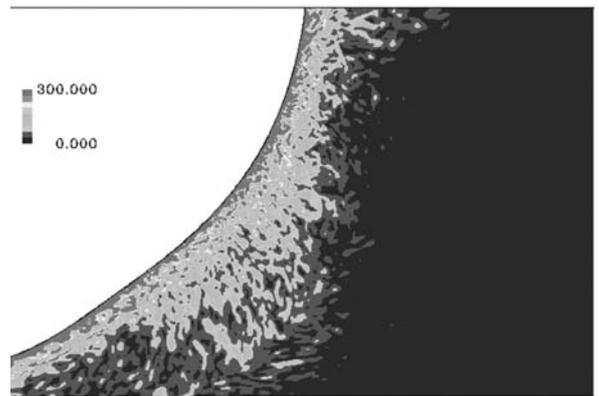


図-1 船体表面の渦度(瞬時場)



(a) $Re=5 \times 10^5$



(b) $Re=1 \times 10^6$

図-3 S.S.2断面の渦度(瞬時場)

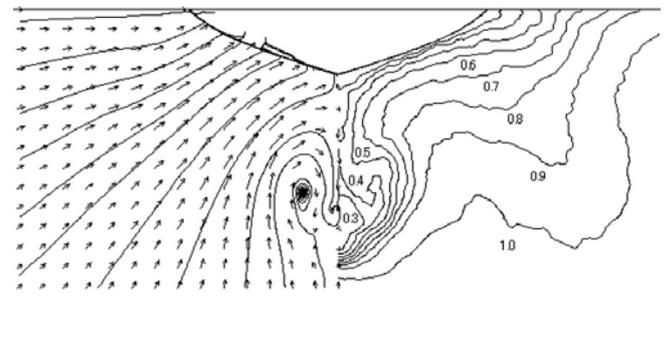


図-4 伴流分布 ($Re=5 \times 10^5$)

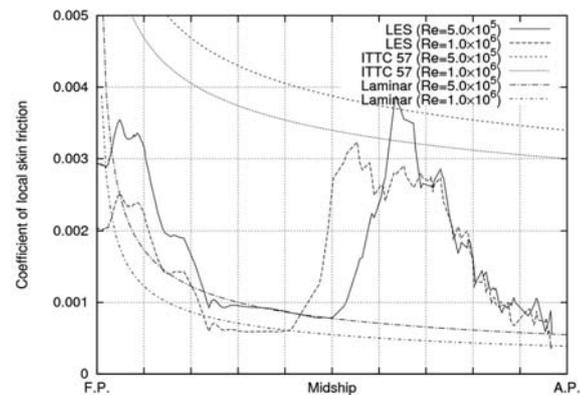


図-2 局所摩擦抵抗係数

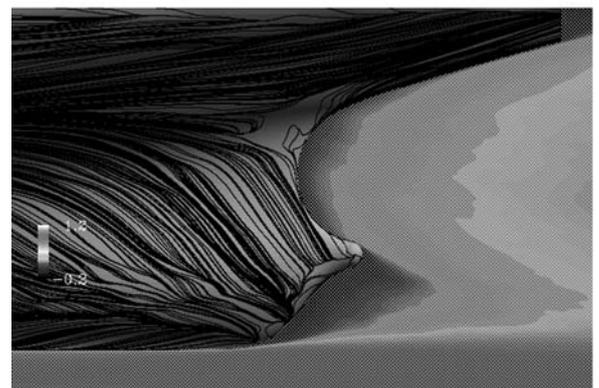


図-5 限界流線と流線分布 ($Re=5 \times 10^5$)