

# 乱流促進装置による層流-乱流遷移現象の大規模 DNS

市坪 翔

横浜国立大学理工学部

## 1. はじめに

船舶の船型開発では、数百 m の長さである実船の実海域での性能を推定する必要がある。船に要求される性能はさまざまであるが、大型商船の場合、推進性能、操縦・運動性能耐航性能などが重要となっている。このうち、推進性能は船の燃費性能に直結するため、商業的な観点だけでなく温室効果ガス (GHG) の排出量削減の観点から性能を改善する試みが続いている。近年では 2018 年の IMO で採用された GHG 削減戦略では、国際海運分野から GHG 排出量を 2050 年までに半減させることが目標として定められており、代替燃料の使用が注目されている。ただし、代替燃料は现阶段ではコストが高く、別のアプローチとして船の超低速航行による排出ガスの削減も検討されている。そのため、低速航行状態での推進性能予測が非常に重要となっている。

水槽試験では、一般的に試験に用いる数 m の長さの模型船と実船のフルード数  $F_n$  が一致するように流速を設定して試験を行う。しかし、これら 2 つのスケール間ではレイノルズ数  $R_n$  が一致しないため、船体表面上の境界層の様子が模型船では層流境界層、実船では乱流境界層と大きく異なる。そこで模型船首部分に乱流促進装置を取り付けることで、模型船周りの層流境界層を乱流へと遷移させる手法が一般に用いられている。これらの乱流促進装置の使用方法については国際水槽試験会議 (International Towing Tank Conference, ITTC) によってガイドラインが定められているが、現状のガイドラインは従来の比較的速い設定速度での水槽試験に対するものであり、超低速試験での乱流促進効果は保証されておらず、スタッドによって乱流へと遷移した流れが再び層流へと戻る再層流化現象も報告されている。乱流促進装置に関する基礎的研究は理論的・実験的研究が 1960 年代から行われているが、船舶流体工学において層流-乱流遷移を直接的に測定・解析した研究はわずかである。乱流促進装置に関する数値解析としては、Lee et al. (2021) による Large-eddy Simulation (LES) が報告されている。Lee et al. (2021) では乱流モデルを必要とする LES 解析を行っており、使用した乱流モデルが層流-乱流遷移という乱流の根本的現象を正確に予測できているかどうかの議論はなされていない。そこで本研究では、超低速水槽試験での従来型乱流促進装置の性能評価及び効率的な新しい乱流促進方法の開発方針の確立を目的として、平板上にスタッド形状の突起物を設けた際の境界層の層流-乱流遷移現象について直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) を用いて大規模な乱流解析を行った。

また本研究によって得られた DNS データから LES の SGS 応力モデルについての *a priori* テストを行い、今後より効率的な乱流促進方法の開発を行う上で複雑な乱流場を再現可能な乱流モデルを検討した。

## 2. 数値解析手法 (DNS)

支配方程式は以下に示す非圧縮性流体の無次元された Navier-Stokes 方程式と連続の式である。支配方程式は高次精度コンパクト差分を用いて離散化し、フラクショナルステップ法を用いて積分した。圧力のポアソン方程式は高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) を用い

て直接解いた。計算格子は直交格子であり、平板上に設置された乱流促進装置の形状を考慮するために埋め込み境界法を用いた。これらの計算は全て乱流 DNS/LES ソルバーである Xcompact3d を用いて実行された。本研究における数値計算には、Imperial College の Turbulence Simulation Group が開発したオープンソースの CFD ソフト「Xcompact3d」を CFD ソルバーとして利用した。水槽試験で用いられる乱流促進装置の形状は多くがスタッドであり、スタッドの形状は ITTC ガイドラインで指定されている円筒状スタッド以外に、国内では矩形状スタッドが多く用いられているため、本研究では後者を解析対象とした。スタッド寸法は Figure 1 に示すとおりであり、高さ 2.0mm、前縁幅 2.5mm、後縁幅 1.5mm、厚み(D)1.0mm の台形型スタッドを使用した。解析領域の大きさはスタッド厚み(D)を基準として、流れ方向(x)に 150D、スパン方向(z)に 8D、高さ方向(y)に 15D とし、スタッドは平板上流入位置から 8D の場所に 1 つのみ配置し、スパン方向に複数個配置された実際の乱流促進装置の 1 セグメントのみを考慮した(Figure 2)。境界条件は流入入口 ( $x=0$ ) では流入速度固定、流出口 ( $x=150D$ ) では対流流出条件とし、( $y=15D$ ) の上面境界は大気開放条件とした。また、平板上 ( $y=0$ ) とスタッド表面は no-slip 条件とし、スパン方向には周期境界条件を適用した。流入速度  $U$  に関しては、Table 1 に示すように KRISO Container Ship(KCS) 船型(実船長さ  $L_f=230\text{m}$ 、模型長さ  $L_m=3.0464\text{m}$ )の実船設計速度  $V_s$  の高速  $V_s=11.5\text{kn}$  と低速  $V_s=4.0\text{kn}$  の 2 条件に対して  $Fn$  を算出し、模型スケールでの  $Fn$  が一致するように流速を設定した。Table 2 に設定流速とスタッド厚み  $D$  を基準とした  $Rn$  を示す。計算格子は不等間直交格子であり、平板方向に格子を引きつけることで壁近傍での格子解像度を高めるようにした。格子点数は  $x$  方向に 2049、 $y$  方向に 257、 $z$  方向に 256 であり、総格子点数は 134,807,808 である。計算は流入した流体が平板上を 1 周期通過してから流れが十分に発達するまで行い、変動乱流データに対してアンサンブル平均を行って平均量や乱流統計量などを求めた。

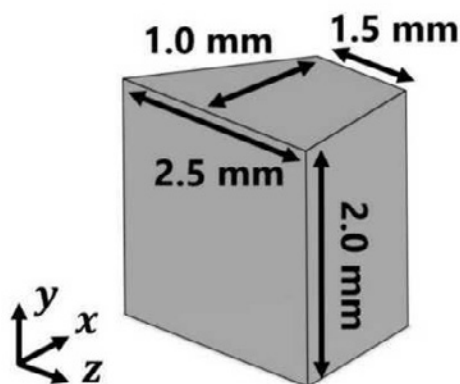


Figure 1: Plate stud.

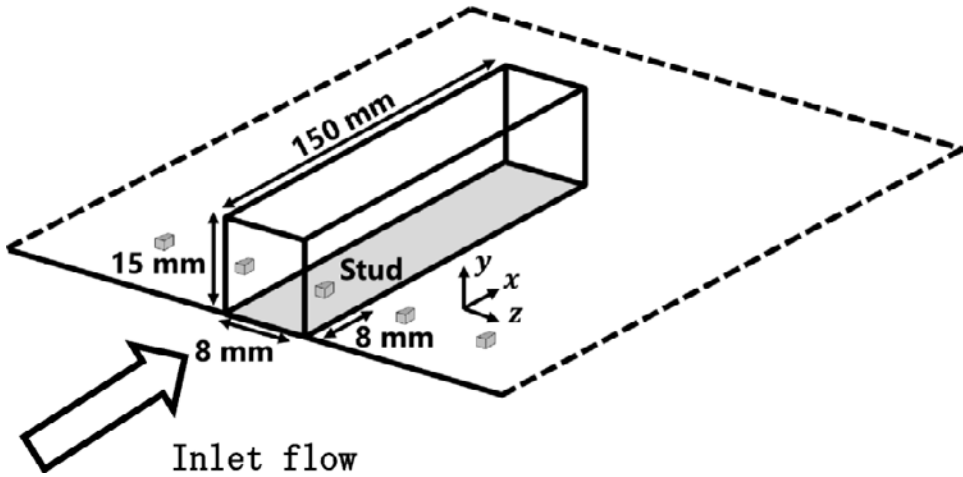


Figure 2: Schematic diagram of studs installed on flat plate in main calculation.

Table 1: Tank test conditions.

Condition	Value
Ship	KCS
$L_{pp}$ [m] (Real ship)	230
Real ship speed [kn]	4.0, 11.5
$L_{pp}$ [m] (Model ship)	3.0464

Table 2: Computational conditions.

Condition	Value
Computational domain ( $L_x \times L_y \times L_z$ )	$150D \times 15D \times 8D$
Uniform velocity $U_\infty$ [m/s] ( $Re_D = U_\infty D / \nu$ )	0.2368 ( $Re_D = 235.9$ ), 0.6808 ( $Re_D = 678.2$ )
Boundary conditions	Inflow/ Convective outflow No-slip/Free slip Periodic
	$x = 0, x = L_x$ $y = 0, y = L_y$ $z = 0, z = L_z$

### 3. 解析結果 (DNS)

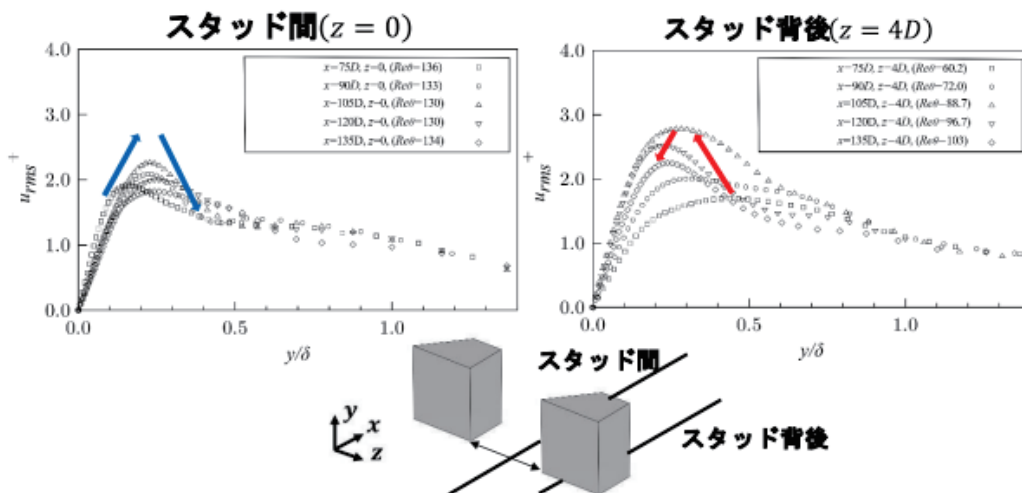


Figure 3: Nondimensionalized turbulence intensity y-directional distribution of x-directional velocity under low Reynolds number conditions

以上の条件で実施した DNS により、スタッド型乱流促進装置による縦渦の発生過程、またスタッドによって強制的に乱流へ遷移した流れの再層流化現象のプロセスが明らかとなった。Figure 3 に摩擦速度で無次元化した主流方向速度の乱流強度の y 方向の分布を、流れ方向の各地点についてプロットしたグラフを示す。低流速での水槽試験に条件を合わせた場合にはスタッドとスタッドの間の線上で一時的に乱れが活発になった後、ある地点を境に乱れが減衰している様子が確認できる。また境界層厚さに基づくレイノルズ数の算出結果から、スタッドとスタッドの間の領域では境界層の発達が早い一方でスタッドの背後の領域では境界層の発達が遅い傾向が見られた。これらの結果から境界層の発達が遅いスタッド背後の領域による乱れの減衰効果が再層流化に寄与していると考えられる。

このようなスパン方向の乱流促進効果の不均一性がみられた原因としてスタッドによって生成される縦渦の分布が関係していると考えられる。縦渦は壁面付近の流速の遅い流体粒子と速い流体粒子間の運動量交換を促進することから乱流遷移において重要な役割を果たす渦であることが知られている。Q 値に基づく渦の可視化を行った結果、スタッドとスタッドの間の領域では比較的下流まで減衰することなく流れている一方でスタッド背後の領域ではすぐに減衰しており、消滅している様子が確認できた。

以上の結果から、今後の効率的な乱流促進装置の開発のためには、縦渦をスパン方向に一樣に、または大量に放出できるスタッドの形状・配置の考案が必要であると考えられる。

### 4. 解析結果 (LES モデルのアプリオリテスト)

層流-乱流遷移現象は流れの細部の構造に起因する非常にデリケートな問題であり、滑面平板や粗面平板による乱流遷移を解析するにあたっては DNS を用いることが一般的である。一方で、DNS は莫大な計算コストを要することから、将来的に乱流促進装置の最適な形状や配置方法を

更させて多くのパターンで解析するうえで DNS を用いることは現実的ではない。

そのため、実用的な計算においては LES (Large Eddy Simulation) による CFD が現実的である。Kim et al. (2020) の研究によると、後述の WALE モデルでは十分な解像度があれば単純な平板境界層の乱流遷移が再現できるとされている。しかし、スタッド付き平板の乱流遷移過程においてはスタッドによって生成される複雑な渦構造が乱流遷移において大きな役割を担っており、LES による解析を行う際にはこれらを再現できるかどうかの検討を行う必要がある。

しかし、Lee et al. (2021) の行った LES による解析では、使用したモデルがスタッド周りの複雑な流れ場をどこまで正確に表現できているかの議論はなされていない。そのため、先述の解析で得られたスタッド付き平板境界層の DNS データベースを用いて、将来的なスタッド形状・配置法の開発に向けた LES の SGS 応力モデルの *a priori* テストを行った。

*a priori* テストの結果、Lee et al. (2021) の研究で行われた WALE モデルによる LES 解析ではスタッド背後の複雑な渦構造を再現できていない可能性があることを示した。また、P. L. Johnson (2022) によって提案された PIC モデルはスタッド背後の領域ではほかのモデルよりも良い結果を示したが、下流ではほかのモデルよりも不利であった。

以上の結果から、スタッド付近の領域では PIC モデル、スタッドから離れた領域では WALE モデルなど、モデルの特性に合わせて使い分けることでスタッドによる強制乱流場を正確に表現できる可能性があると考えられる。

今後は LES モデルを用いた *a posteriori* テストを実行し、実際にどの SGS 応力モデルがスタッド開発の CFD において適切であるかを考察する必要がある。

## 5. 結論

本研究では、今後需要が高まるとされている低速条件下における水槽試験に向けて、現行の台形スタッド型乱流促進装置による乱流構造の理解、また今後の開発方針の確立を目的として台形スタッド付き平板境界層の DNS を行った。

DNS は最小渦のスケールまで解像できることから乱流研究では一般的に用いられる手法であるが、多くの格子点数が必要なことから計算コストが高い。そこで第3章では使用した計算機に対するチューニングを行うことで、約 10% の計算効率の向上を達成した。

第4章では実際に DNS を実行し、スタッド型乱流促進装置が流れに与える効果について考察した。その結果、スタッドのすぐ後ろの領域では境界層の発達が遅く、比較的乱流遷移が早い領域に対して乱れの減衰効果を与えていることが明らかとなった。またこのようなスパン方向の乱流遷移の度合いの違いがみられた理由として、スタッドによって生成される渦、特に乱流遷移に重要な役割を果たす縦渦の分布が関係していることがわかった。以上の結果から、将来的に効率的な乱流促進装置の開発をするにあたっては縦渦を一様かつ大量に放出できるような形状・配置法に着目することが重要だと考えられる。

第5章では、第4章で得られた DNS データベースを用いて LES における SGS 応力モデルの *a priori* テストを行った。その結果、Lee et al. (2021) によって行われた円柱スタッド型乱流促進装置の LES 解析に用いられた WALE モデルは下流の発達した境界層はよく再現できる一方で、スタッド付近の複雑な渦構造を再現することは難しいことが明らかとなった。一方、P. L. Johnson (2022) によって開発された PIC モデルではスタッド付近の渦はよく再現できている一方で、下流の平板境界層はほかのモデルと比べて不利であった。これらの結果から今後の乱流

促進装置の開発において、スタッド付近では PIC モデルなどの複雑な渦を再現できるモデル、下流の領域では WALE モデルといった乱流境界層が得意なモデルといったように、その領域の乱流構造によってモデルを使い分けることによって実際の現象に近い流れを再現できると考えられる。

### 謝辞

本研究では、東京大学情報基盤センターの若手・女性研究者・学生支援制度を通してスーパー コンピューター「Oakbridge-CX」、また理化学研究所の試行課題としてスーパーコンピューター「富岳」を利用させて頂きました。

### 参考文献

- Kim, M., Lima, J., Kim, S., Jee, S., & Park, D. (2020). Assessment of the wall-adapting local eddy-viscosity model in transitional boundary layer. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 371.
- L. Johnson, P. (2022). A physics-inspired alternative to spatial filtering for large-eddy simulations of turbulent flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 934.
- Lee, J. H., Jeong, S. W., & Hwang, S. (2022). A study on turbulence stimulation effect of studs for boundary layer over a flat plate. *The Society of Naval Architects of Korea*, 59, 18-28.
- Lee, S. B., Seok, W., & Rhee, S. H. (2021). Computational simulations of transitional flows around turbulence stimulators at low speeds. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 236-245.
- 田古里哲夫. (1961). 各種形状を持つ乱流促進装置の効果ならびにその固有抵抗について. 造船協会論文集.
- 田古里哲夫. (1961). 乱流促進法の効果について : 特に Plate stud について. 造船協会論文集.
- 東京大学情報基盤センタースーパーコンピューティング部門. (n.d.). Oakbridge-CX スーパーコンピュータシステムの紹介.
- From <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/obcx/system.php#software>