

斜行する船体まわりの乱流解析

CFD 研究開発センター *平田 信行

1. まえがき

船舶流体力学の分野においても、CFD(計算流体力学)の発達は目覚ましいものがあり、実用船型に対する直進時の抵抗、伴流、自航要素、自由表面に対する高精度な推定が可能になってきた。しかしながら、船尾縦渦をはじめとする3次元剥離渦やトランサムスターンまわりの自由表面の計算がボトルネックになっており、この3月に当所が主催したCFD Workshop Tokyo 2005でも大きな問題として採りあげられた^[1]。

本研究では、これらのボトルネックのうち、操縦性評価を行う上で非常に重要な斜行状態で発生する3次元剥離渦に着目し、肥大タンカー船に対する推定精度を調査することとした。乱流モデルには、直進時の船尾縦渦に対して精度の高い推定に成功しているMSA(Modified Spalart-Allmaras)モデル^[2]を用い、流体力や伴流分布に関して計算と実験との比較・検討を行い、本モデルの有効性に関して議論する。

2. 計算法

2.1 NS ソルバー

本研究で用いたNSソルバーは、当所で開発したNEPTUNEコード(Newton-relaxization scheme for Pseudo-compressibility based Turbulent Navier-Stokes Equations)^[3]であり、以下の特徴をもっている。

疑似圧縮法を用いた非圧縮NS計算
Cell-centred 配列を使用
有限体積法による離散化
非粘性項にはRoe法で評価したMUSCL型3次風上差分を使用
粘性項には2次中心差分を使用
時間積分には1次Euler後退差分を使用
sGS収束計算に基づく準Newton法
収束加速にはマルチグリッド法と局所時間法を使用

2.2 MSA 乱流モデル^[2]

Spalart-Allmaras(SA)モデル^[4]は、比較的新しい1方程式乱流モデルであり、渦動粘性係数 ν_t に関するソース項付きの移流拡散方程式を解いている。各項の形は次元解析によって決定し、その係数は単純な流れに対する数値実験によってチューニングされている。支配方程式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = & c_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{\nu} \\ & + \frac{1}{\sigma} \left[\nabla \cdot \left\{ \left(\frac{1}{Re} + \tilde{\nu} \right) \nabla \tilde{\nu} \right\} + c_{b2} (\nabla \tilde{\nu})^2 \right] \\ & - \left[c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = Re \tilde{\nu}$$

$$\tilde{S} = |\omega| + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}.$$

式(1)の右辺は、それぞれ生成、拡散、破壊そして乱流への遷移を表す。

SAモデルは、剥離が小さい場合には、乱流場を精度良くシミュレートすることが可能だが、大きく剥離した場合には、縦渦中心近傍の渦動粘性係数を過大評価し、渦の発達を妨げるため、いわゆるフック形状と呼ばれる大きく歪んだ伴流分布を再現することができない。この欠点を克服するために、式(1)式の右辺第1項の生成項に現れる渦度 $|\omega|$ を以下のように修正する。

$$|\omega| \rightarrow |\omega| + C \times \min(0, |S| - |\omega|) \quad (2)$$

ここで、 $|S|$ は歪速度テンソルである。(2)式の利点は、薄い境界層流れの場合は、 $|S|$ と $|\omega|$ がほとんど同じであるため、オリジナルと大差ない結果を得られる。一方、縦渦中心近傍では、 $|\omega|$ が $|S|$ より大きくなるため、生成項が小さくなり、その結果縦渦が成長する。なお、 C はモデル定数であり、本研究では30とした。

3. 計算条件と結果

本研究では、テストケースとして肥大タンカー船KVLCC2M(KRISO VLCC2 with modification)^[1]を採用した。計算格子のトポロジーは両舷のO-O型であり、格子点数は主流、深さ、幅方向にそれぞれ257、97、105点とした。また、レイノルズ数は実験状態にあわせて 3.945×10^6 に設定し、乱流モデルは、SA、MSAの2つのモデルを用いた。なお、水面においては自由表面を考慮せず、対称条件を与えた二重模型流れとした。

図-1に、斜行角ベースの流体力の実験と計算との比較を示す。斜行角が大きくなるにつれて、横力に関し

て実験との差が少し大きくなるが、全般にわたって実験とほぼよい合致をみせている。また、乱流モデルによる差異は、斜行角に関わらず小さいことがわかる。

図-2 に、斜行角が 12 度の場合のプロペラ面の断面速度の比較を示す。実験結果では、 $y/L_{pp}=0.1-0.12$ に船体前半部で剥離した反時計まわりの渦が確認できるが、計算結果では多少弱くなっている。これは、格子が粗いため解像しきれていないためと考えられる。一方、 $y/L_{pp}=0.02$ で見られる船体後半部で剥離した時計まわりの強い渦は、この領域の格子が細かいため非常によく再現されている。また、乱流モデルの差異は、渦の強さと断面速度の向きや大きさともに、MSA が実験に近い結果を示している。

次に、図-3 は図-2 に対応する主流方向速度分布の比較を示す。船体前半部から剥がれた渦に関しては、MSAの方がよく再現できている。また、後半部から剥離した渦による歪んだ伴流分布も MSA の方が実験値に近い分布を示している。しかし、その影響が強過ぎるため、実験では素直な分布を示している左舷側の伴流も少し歪んだ結果になっている。

4. 結論

船舶の CFD の分野におけるボトルネックの 1 つとして問題となっている 3 次元剥離渦の精度確認のため、斜行する肥大船まわりの流れをシミュレートし、実験と比較した。その結果、MSA モデルを使うことにより流体力、伴流ともに実験値と良い合致をすることがわかった。しかしながら、MSA モデルの結果はモデル定数に依存することがわかっており、今後はこの定数の合理的な決定方法を検討する必要がある。

参考文献

- [1] -, *Proc. CFD Workshop TOKYO 2005*(Editor: Hino, T.) (2005).
- [2] Hirata, N. and Hino, T., A comparative study of zero- and one-equation turbulence models for ship flows, *J. of the Kansai Society of Naval Architects, Japan*, No.234 (2000), pp.17-24.
- [3] Hirata, N. and Hino, T.: An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship, *J. of the Society of Naval Architects, Japan*, vol.185 (1999), pp.1-8.
- [4] Spalart, P.R. and Allmaras, S.R., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *La Recherche Aérospatiale vol.1*(1994), pp.5-21.

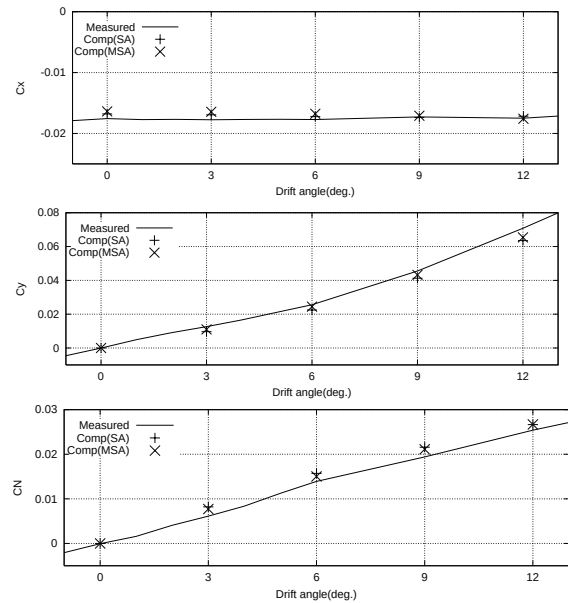


図-1：斜行角ベースの流体力の比較
(上: 前後力、中: 横力、下: 回頭モーメント)。

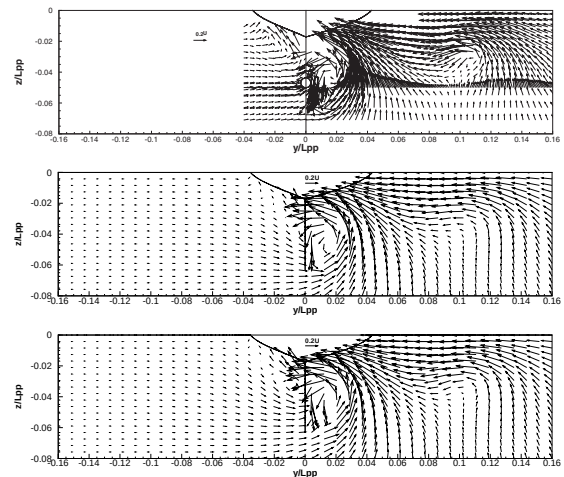


図 1-2：プロペラ面の断面速度の比較 (斜行角 12 度)
(上: 実験、中: SA、下: MSA)。

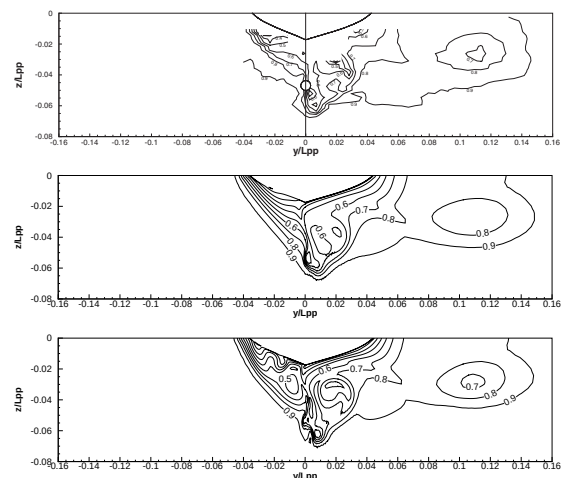


図 1-3：プロペラ面の主流方向速度分布の比較 (斜行角 12 度)
(上: 実験、中: SA、下: MSA)。