

## 自由表面乱流の“正しい”RANS/LESとは？

静岡大学 正会員 ○横嶋 哲

## 1. 課題設定

自由表面層流をシミュレートできる数値解析法（プログラムコード）があるとする。自由表面下の全てのスケールの流体運動が支配方程式で捉えられる限り、この手法は自由表面乱流にもそのまま適用できる。ではこれを、何らかの平均操作が施された流れ場に適用するにはどうすればよいか？

## 2. 古典的な“誤り”

古典的な回答では、運動方程式中の所謂乱流応力に対して何らかの乱流モデルが導入される。標準的な乱流モデルに（壁乱流に対して“壁/低 Re 数効果”が付加されたように）“自由表面効果”を付加する方法が国内外で模索されてきた。しかしその大半は理論的根拠の乏しい経験則であり、普遍性を備えた自由表面モデルは未だ得られていない。壁/自由せん断乱流でそれなりの成功を収めてきたこの手法が自由表面乱流にはうまく働かないのは何故か？自由表面乱流の最大の特徴は流れ場の形状が未知量で時々刻々と変化する点にあるが、これが適切に考慮されていないためである。幾つかの研究グループは自由表面変動のために境界条件も変わることを指摘した<sup>1)-4)</sup>。これは確かに自由表面変動効果のひとつではあるが、それだけでは十分でない。

## 3. 自由表面変動効果とその離散的な表現 – 2種類の“under-resolved”

界面に十分に近い点は自由表面の挙動に応じて気体又は液体により間欠的に占められるため、そのような点の物性値の時系列は不連続に変化する。故にその Euler 的時間平均量は間欠率に応じて気液が混ざった“新たな”流体物性を示す。混相の間欠率は位置により異なるため、流れ場全体では図1のように界面付近で平滑化された分布となり、平滑化の程度は自由表面変動に応じて決まる（空間/アンサンブル平均でも同様）。このように平均流レベルでは物性値が界面付近で急激しかし連続的に変化するため、瞬時流れでは見られない物理現象が生じる。自由表面乱流に対する“正しい”RANS/LES ではこれらの影響が考慮されなければならない。

ここでは瞬時自由表面形状（二次元）を模擬した図2(a)に陽に平均操作（ここではLESで一般的な空間ボックスフィルタ）を施し、界面で不連続な物理量がどのように（Euler平均の意味で）“混合”されるかを調べる。ある幅  $\Delta_{F1}$  及びその4倍の  $\Delta_{F2}$  の正方フィルタを施した時の分布を図2(b),(c)にそれぞれ示す。図の軸は各々のフィルタ幅で規格化されており、図中のメッシュはボックスフィルタの大きさを表す。フィルタ幅の増加と共に界面の不鮮明化が進み、平均界面厚は増す。ここで注意すべきは、図2(b),(c)は空間解像度が十分に高いか、もしくは連続な系（解像度  $\infty$ ）で描画されている点である。では実際の数値解析ではどう離散近似されるか？大半のLESではフィルタ幅と計算格子幅は同一とされる。RANSでは平均の定義が明確でないが、用いた計算格子では解像できない流体運動が乱流変動成分としてモデル化されると考えられよう。故に図2(b),(c)中のメッシュはそれぞれの流れに対するRANS/LESで用いられる典型的な計算格子と言える。そこで(c)をそのような計算格子上で離散化した例を図2(d)に示す。(d)では(c)の各計算格子セルの重心位置での値をそのセルの代表値とした。低解像度の等値線図は計算格子の配置（この例では特に  $x_2$  方向の位置関係）や代表値の決め方、等値線の作図アルゴリズムによって様相が大きく変わり得るが、(d)では(c)で観察された界面の不鮮明化は全く解像されず、平均密度は各相内ではほぼ一様、相界面で不連続となる。

故に【平均操作】でカットされる高周波/高波数成分のみならず【離散化】で解像されなくなる平均分布の両方の“under-resolved”が、自由表面変動効果として考慮されなければならない（図3参照）。

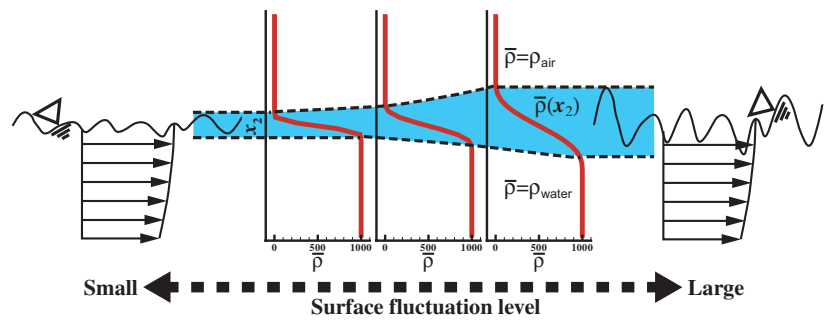


図1: 平均密度界面の自由表面変動への依存性. 変動振幅の増大と共にそれらを平滑化した場合の界面厚が増す. 他の物性値も同様.

キーワード 乱流, 自由表面流, RANS, LES, 気液二相流, 自由表面効果, 自由表面変動効果

連絡先 〒432-8561 浜松市中区城北3-5-1 静岡大学 工学部 システム工学科 Phone 053-478-1258(直通)

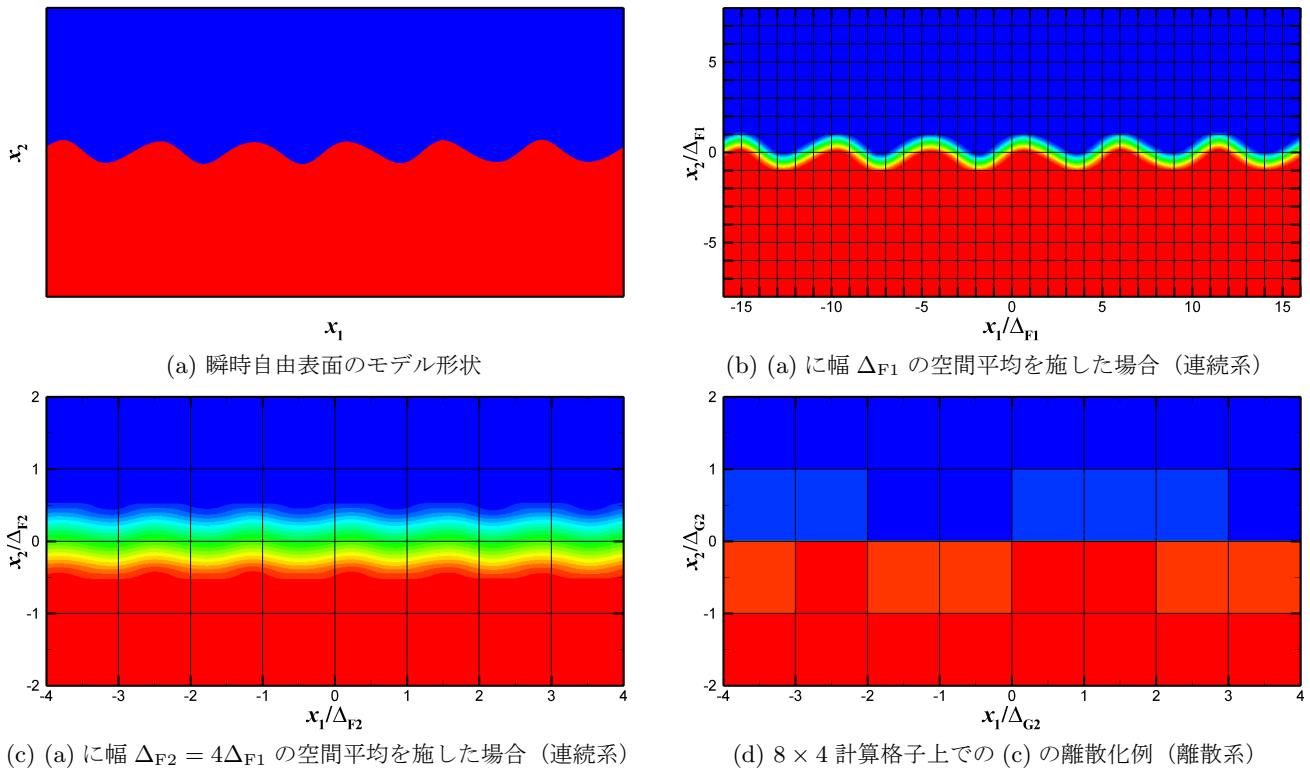


図 2: 平均操作による物性値界面の不鮮明化とその離散化によるもう一つの不鮮明化。

#### 4. 自由表面乱流の“正しい”RANS/LESに向けて

RANS/LES に自由表面変動効果を取り入れる新たな試みとして、筆者らは自由表面を密度界面として捉える気液二相アプローチを提案している<sup>5)</sup>。Reynolds 応力輸送方程式中の浮力生成項の働きを自由表面変動効果の主要因とするこの手法は、開水路流への応用例でその有用性が示されたものの、3.での議論から2つの問題点が浮上する：[I] 物性値界面が *a priori* に平滑化される；[II] [I] で得られた平均界面は計算格子3セル程の厚みを有するため、図2(d)に反して、平均物性値の成層効果が直接的に解像される。

[I]については、界面の平滑化の程度は自由表面変動に応じて動的に決められるべきである。具体的な手法としては、自由表面変動強度（流速の乱れ強度に相当）の時間発展方程式を導出・モデル化した Nakayama & Yokojima の手法<sup>4)</sup>が参考に値する。[II]は前述の【離散化】に起因する問題で、我々が数値的に扱うのは例えば図2(d)のような不連続界面であるため、図2(c)で観察された under-resolved な平均物性値の変化の影響を取り入れるには特別な工夫を要する。例えば一般的な勾配拡散近似は利用できないので、連続的变化の性質を記述する「勾配」に代わって、不連続の程度を表す「差」と界面厚に相当する上述の自由表面変動強度の利用が考えられる。なお【平均化】による物性値の乱流変動はその変動幅が極めて大きく、通常の密度成層流等とは性質が大きく異なると予想されるため、信頼性の高い直接シミュレーションによる現象の把握が望まれる。

#### 5. まとめ

本報では自由表面乱流に対する“正しい”RANS/LES とはどうあるべきかを論じた。自由表面変動には2種類の“under-resolved”が含まれることが判明し、また気液二相アプローチ<sup>5)</sup>の問題点も明らかとなった。

謝辞: 中山 昭彦 先生 (神戸大) からは多くの議論を通じて有意義なご意見を賜った。記して謝意を表す。

参考文献: 1) Hodges & Street, *J. Comput. Phys.*, **151**, 425, 1999. 2) Dimas & Fialkowski, *J. Comput. Phys.*, **159**, 172, 2000. 3) Shen & Yue, *J. Fluid Mech.*, **440**, 75, 2001. 4) Nakayama & Yokojima, *Envir. Fluid Mech.*, **3**, 1, 2003. 5) 横嶋, 土木学会論文集 B, **62**, 419, 2006.

