Large Eddy Simulationを用いた高レイノルズ数邪魔板付き 攪拌槽内流れの数値解析と実験による検証

Numerical Simulation for High Reynolds Number Baffled Stirred Tank (Re=45,000) Using Large Eddy Simulation and Experimental Verification

○梅景俊彦(九工大) 湯 晋一(九工大) 牧野省吾(九工大)

Toshihiko UMEKAGE, Kyushu Institute of Technology, Sensuicho 1-1, Tobata-ku, Kitakyushu
Shinichi YUU, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensuicho 1-1, Tobata-ku, Kitakyushu
Shogo MAKINO, Graduate School of Kyushu Institute of Technology, Sensuicho 1-1, Tobata-ku, Kitakyushu

Key Words: Stirred Tank, Numerical Simulation, Large Eddy Simulation, Turbulent Flows

1. 緒言

攪拌槽の内部では回転する複雑形状のインペラや邪魔板によって三次元の複雑な流れが引き起こされているため、装置設計や運転条件の最適化を図るうえで最も基礎となる流体の運動を定量的に明らかにすることは難しい。特に高レイノルズ数の攪拌槽内部の流れは瞬時瞬時に複雑に変化する乱流運動が支配的な現象であるため、それらの運動を定量的に明らかにすることは今日でも最も困難な問題のひとつである。本研究では $Re=45,000$ の乱流が支配的となる邪魔板付き攪拌槽内の非定常流れを対象として、サブグリッドスケールの流れを LES で表し（現在の計算機能力では $Re=45,000$ の流れ場の直接数値計算は不可能である）、グリッドスケールの流れを Navier-Stokes 式と連続の式を直接解いて求め、邪魔板なしの場合⁽¹⁾と比較した。

2. 計算方法

攪拌槽内流れの基礎方程式は Navier-Stokes 方程式を 1 計算グリッド内で平均した式と連続の式で次式となる。

$$\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + (\underline{v} \cdot \nabla) \underline{v} + \nabla \cdot \underline{v'v'} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \underline{v} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \underline{v} = 0 \quad (2)$$

ここで $\underline{v}$, p , Re , t , ∇ はそれぞれ無次元化された速度ベクトル、圧力、Reynolds 数、時間およびナブラ演算子である。いずれも無次元式で、各式の無次元化は翼端周速度 U_t 、攪拌槽半径 r_0 、動粘度 ν で行っている。式(1)の左辺第 3 項、 $\underline{v'v'}$ は計算格子サイズ以下の局所的空間変動によって生じる応力項で、サブグリッドスケールモデル⁽²⁾を用いて表した。本計算では回転するインペラと静止している槽本体の間に動的マルチブロック法⁽³⁾を使用した。本計算の全内点格子数は 2.6×10^6 で格子幅は均質乱流を仮定したときの Kolmogorov のミクロスケールの約 16 倍である。

3. 結果および考察

Fig.1(a)はインペラ中心を通る断面と(b)底面壁近傍断面における半径方向平均速度の計算結果と実験結果の比較を示す。いずれも計算結果は実験結果をほぼ表現している。Fig.2 は邪魔板ありとなしにおける流れ場での流体粒子の軌跡の計算結果である。邪魔板なしの場合は外周壁に沿うような流れになるが、邪魔板ありの場合は側壁から中心方向へ向かう流れが見られ、また軸上下方向への流れも生じている。Fig.3 は粒子相対移動距離を示す。邪魔板ありの場合、邪魔板により誘起された変動流れにより相対距離が増大しており、攪拌・混合作用が増加したことがわかる。

Fig.1 Mean radial velocity distributions [R-θ plane]

Fig.2 Calculated fluid particle trajectories

Fig.3 Relative distance of fluid particles

4. 結言

$Re=45000$ で乱流が支配的となる邪魔板付き攪拌槽内の非定常流れを対象とした解析を行った。流れの可視化結果および平均速度分布や乱流強度分布の計算結果を実験結果と比較したところ両者はおおよそ一致し、本計算手法および本計算結果が高レイノルズ数邪魔板付き攪拌槽内流れの表現に用いることができることを示した。邪魔板付攪拌槽における流れでは周方向流れが遮られることによって発生する半径方向と軸方向の流れが新たな乱れを誘起して攪拌を助長すること等を数値計算によって示した。

文 献

- (1) 湯 晋一, 梅景俊彦, 牧野省吾, 化学工学会第 68 年会講演論文集, CD-ROM (2003-3)
- (2) 保原 充, 大宮司久明, 数値流体力学, 東京大学出版会 (1992), pp.213-224.
- (3) Takeda, H., *Kagaku Kogaku*, **58** (1994), 189-194.