

乱流攪拌槽の流動解析（精度向上に関する検討）

Computer Simulation of Turbulent Flow in a Stirred Tank (a study for improved accuracy)



技術開発本部 第1研究室
高田 一貴
Kazutaka Takata

The fluid flow in a stirred tank with a 4-bladed pitched paddle impeller has been simulated by Computational Fluid Dynamics (CFD). The main purpose is to compare the results obtained from 1st-order and 3rd-order approximations for convective terms of governing equations. The results show that the velocity and turbulent energy obtained from the 3rd-order approximation well agree with the measured values, compared with those from the 1st-order one, and that the deviation of velocity and turbulent energy from the measured values are 10 % and 30 %, respectively.

The computation conducted in this work shows that the turbulent energy is still underestimated. Furthermore, a new type of numerical procedure, for moving-boundary problems, has been applied to simulate the fluid flow in a stirred tank with baffles. An impeller has been defined as a moving body, and computational results are shown for some rotational positions of the impeller relative to the baffles.

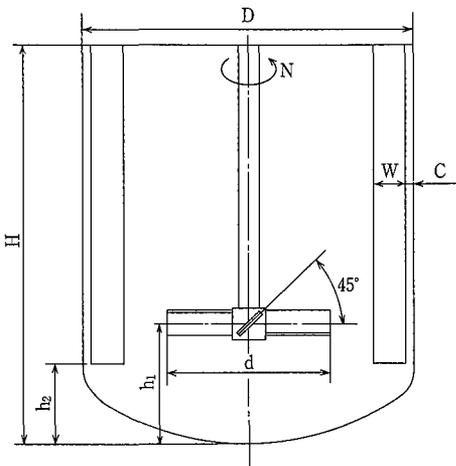
まえがき

コンピュータハードと解析コードの発展により数値流体力学 (CFD) による装置内流動の予測が可能になってきた。これまでは計算が困難とされてきた乱流域の数値解析も、ハードの発達と乱流モデルの適用により、装置内の大局的な流れの把握という制限はつくものの、比較的容易に計算結果を得ることが出来るためいたるところで適用されはじめています。

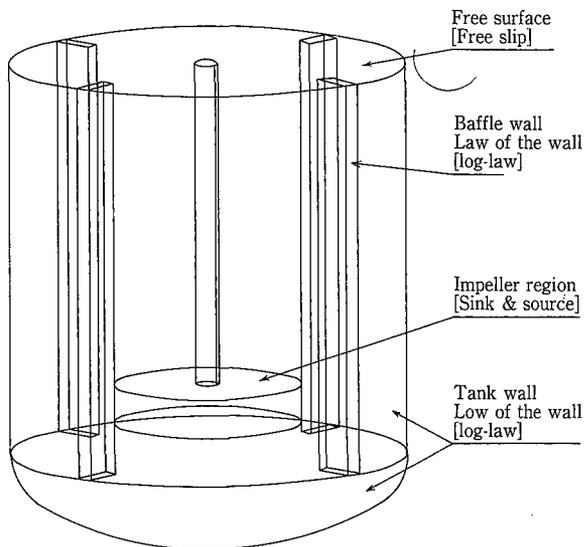
乱流攪拌槽内の流動解析に関しての初期の試みは既報¹⁾にて報告されているが、計算結果 (乱流エネルギー) が実

測値と十分に一致しないことが問題として残った。そこで今回解析精度を既報より向上させて計算を行い、計算精度が向上するかどうかを確認することを試みた。解析モデル及び乱流モデルには各々既報と同様に傾斜パドル翼の攪拌系と2方程式 ($k-\epsilon$) 乱流モデルを用いた。また、近年、攪拌槽内の流動を直接翼を回転させて解析する方法が提案されている。すなわち、攪拌翼を回転させ、静止した邪魔板との相対的な位置を考慮した解析方法 (移動境界値問題) である。翼と邪魔板の相互作用を考慮した流れをより正確に把握することが可能な計算方法として、今後の攪拌槽内流動解析の有力な方法の1つと考えられているものである。ここではこの方法についても簡単なモデルについて解析を行ったので紹介する。

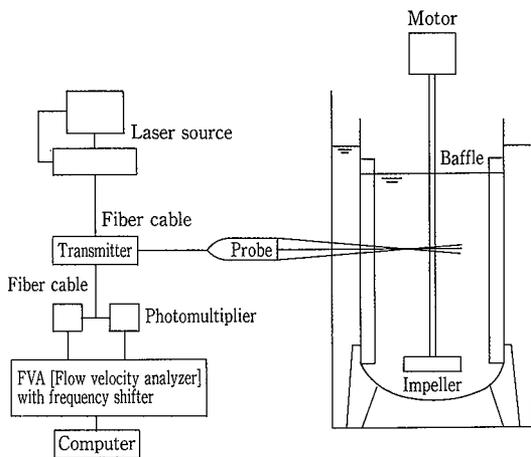
$D = 0.4 \text{ m}$ $H/D = 1.25$
 $d/D = 0.5$ $b/d = 0.2$ $h_1/D = 0.375$
 $W/D = 0.1$ $h_2/D = 0.25$ $C/D = 0.02$
 $N = 180 \text{ rpm}$



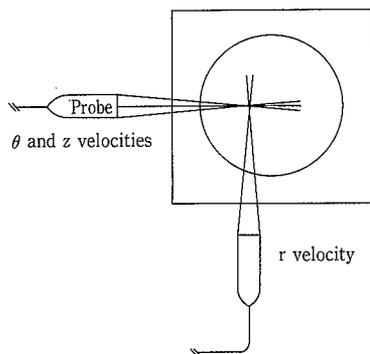
第1図 計算に使用したモデル (4枚傾斜パドル翼と板状邪魔板4枚)
 Fig. 1 Model used for simulation (4-bladed pitched paddle impeller with 4-plate-baffles).



第2図 計算のための境界条件
 Fig. 2 Boundary conditions for simulation.



第3図 実験装置及び測定システム
Fig. 3 Experimental apparatus and measuring system.



1. 計算モデルと数値解析

流れを支配する方程式は連続の式（1式）、運動量の輸送方程式（3式）、標準 $k-\epsilon$ モデルにより定式化された乱流エネルギーの輸送方程式（1式）及び粘性消散率の輸送方程式（1式）である。これら合計6式を連立させて解いた。解析には市販の汎用コードとエンジニアリングワークステーション（EWS）を使用した。

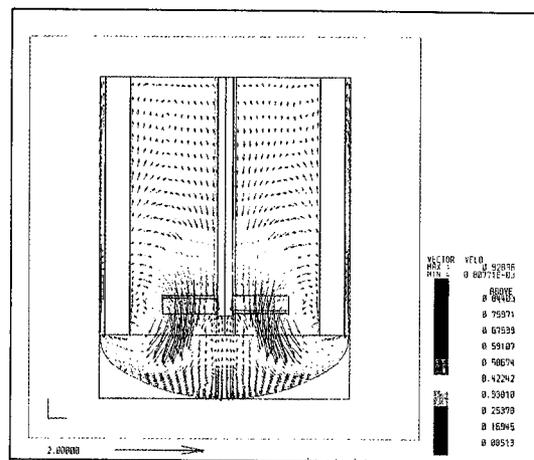
方程式中の移流項の差分精度を3次精度（QUICK法）とし、既報の1次精度に較べて数値上精度を向上させた。ただし、安定した計算を行わせるためにタイムステップを1次精度の約1/6にする必要があり、計算終了までに1次精度の約6倍の計算時間を要した。

第1図に計算モデルを、第2図に境界条件を示す。2:1半楕円ボトムを有する内径0.4 mの攪拌槽内に、槽径に対して10%幅の邪魔板4枚を等間隔に配置した。攪拌翼周辺に検査領域を設け、この検査領域まわりに流速と乱流エネルギーの実測値を与えて解析を行った。なお、流速と乱流エネルギーは後述するレーザードップラー流速計（以下LDAと略称）により測定された。

計算条件は、回転数180 rpm、攪拌レイノルズ数12000であった。

2. 流速の測定

第3図に実験装置と測定システムの概要を示す。攪拌槽



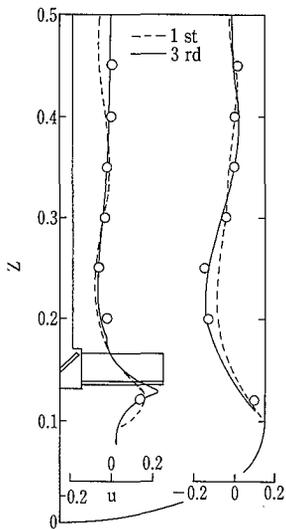
第4図 r-z面内の流速分布計算結果
Fig. 4 Computed velocity vectors in r-z plane.

には2:1半楕円ボトムを有する内径400 mmの亚克力製円筒を使用した。円筒の曲率に起因する屈折をおさえるため円筒槽を角型槽内に設置し、双方に試験流体（水道水）を満たした。攪拌翼には翼径200 mm、翼幅40 mm、傾斜角度45度の4枚傾斜パドル翼を攪拌槽中心最下部より150 mm上部に設置して使用した。邪魔板には槽内径に対して10%幅の板状邪魔板を90度間隔で4枚設置した。流速の測定には2次元後方散乱型LDAを使用し、邪魔板間のr-z面内を測定場所とした。半径方向と軸方向の変動流速を同時測定し、1点につき20000個のデータのアンサンブル平均値を求め境界条件値と計算結果検証用データとして使用した。

3. 結果と考察

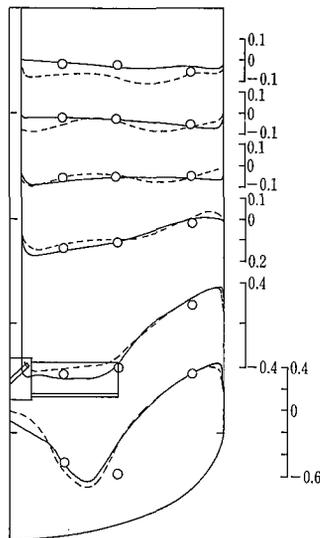
第4図に流速分布の計算値を示す。攪拌翼部より斜め下方に吐出された流体は攪拌槽底部に衝突して反転し、槽上部まで輸送されたあと再び攪拌翼部に吸い込まれるというフローパターンを呈する。1つの大循環流を形成する基本的フローパターンは既報（1次精度）と同様である。第5図は半径方向の流速分布の計算値（測定場所）を実測値と比較した結果である。1次精度よりも3次精度が実測値により近づくことがわかった。第6図は軸方向の流速分布の計算値と実測値を比較した結果である。攪拌翼周辺では1次精度、3次精度ともに大きな差異はないが、比較する場所が攪拌翼から離れた所ほど、3次精度による計算結果が実測値をよりよく表している。流速の推定精度は最大流速に対して1次精度が15%以内であるのに対し3次精度では10%以内になることがわかった。これらの結果より、流速分布に関しては計算に時間を要するものの、方程式の差分精度を上げた方がより精度を有する結果を与えることがわかった。

第7図に乱流エネルギーの分布を示す。乱流エネルギーの計算値は攪拌翼部で最大となり、攪拌翼から離れるに従い減衰していく。この傾向は1次精度による計算結果と同一である。第8図は乱流エネルギーの計算値を実測値と比



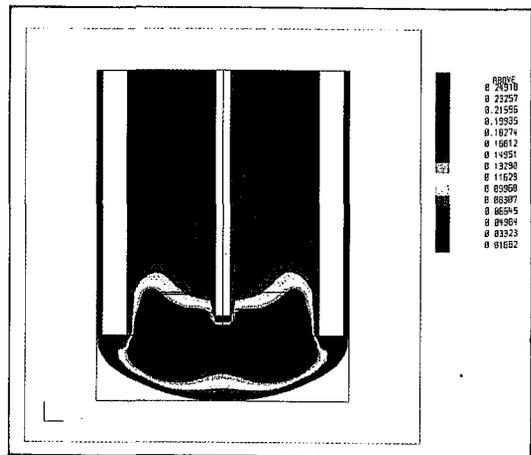
第5図 半径方向流速の計算値と実測値の比較

Fig. 5 Comparisons of calculated and measured velocities in radial direction.



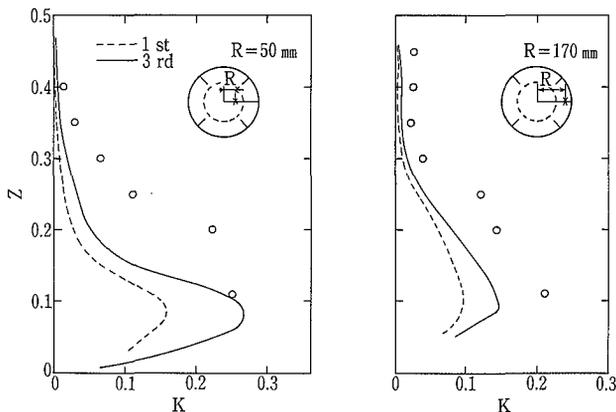
第6図 軸方向流速の計算値と実測値の比較

Fig. 6 Comparisons of calculated and measured velocities in axial direction.



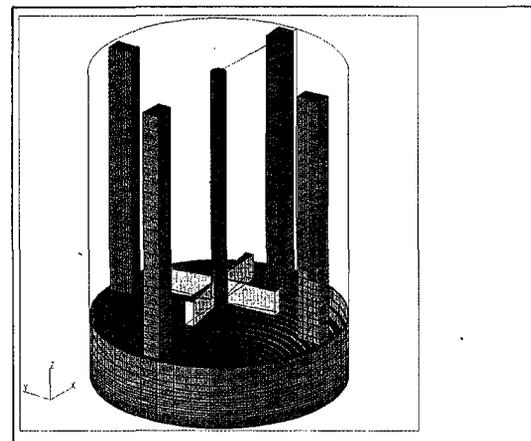
第7図 r-z面内の乱流エネルギー計算結果

Fig. 7 Computed turbulent energy contours in r-z plane.



第8図 乱流エネルギーの計算値と実測値との比較

Fig. 8 Comparisons of calculated and measured turbulent energy



第9図 攪拌槽の計算モデル (移動境界問題)

Fig. 9 Simulation model of stirred tank for moving boundary problem

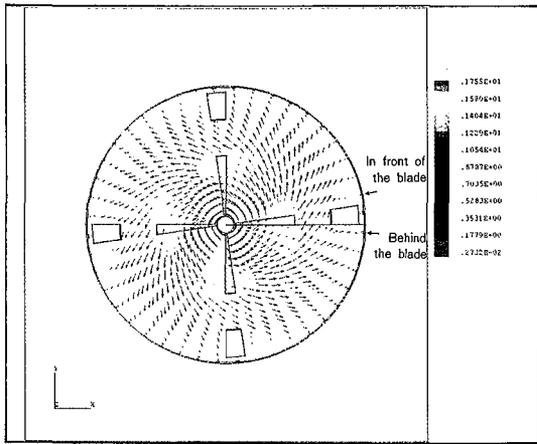
較した結果である。攪拌翼付近で乱流エネルギー値はピークとなり、攪拌翼から離れるに従い減少する。ピーク値に対し1次精度による計算値は実測値に較べて60%低めに評価されていたが、3次精度によりその誤差は30%にまで改善されている。流速と乱流エネルギーの精度向上に果たす差分精度の影響は大きく、今後乱流計算において高精度差分の採用は必須になると考えられる。しかしながら依然として乱流エネルギーは実測値よりも低めに評価されること、攪拌翼から離れるにつれて減衰が著しくなることには十分留意することが必要である。

4. 移動境界問題としての数値解析

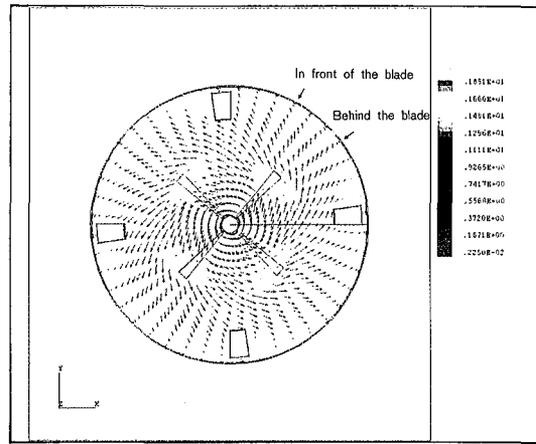
攪拌機は一般に固定されたバッフル条件下で攪拌翼が回転する構成になっている。解析においてバッフルを固定し翼を回転させることによりバッフルと翼との相対的位置と

これら相互作用を直接計算するためには、タイムステップ毎の計算結果を攪拌プロセスが終了(例えばバッチ時間)するまでメモリに格納しその結果を計算終了後に処理する必要があるが、この計算のためには膨大なメモリと計算時間を必要とするために困難な計算の1つとされてきた。前節までに述べた計算は計算時間の短縮と使用メモリの削減のため翼部を吐出部としてモデル化したため境界条件として実際の流速値を与える必要があったが、本計算法によりこれらモデル化が一切不要となる。近年、コンピュータの性能とコストパフォーマンスの向上に従い、これまで困難とされてきた本手法による計算が少しずつ行われるようになってきた²⁾。今後の攪拌流動の計算方法として注目される手法と考えられるので、結果の一部を紹介する。

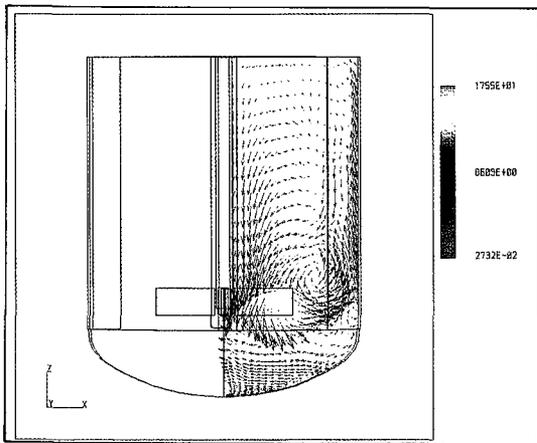
第9図に計算モデルに使用した邪魔板と直パドル翼構成を示す(傾斜パドル翼を計算領域内にメッシュで構成する



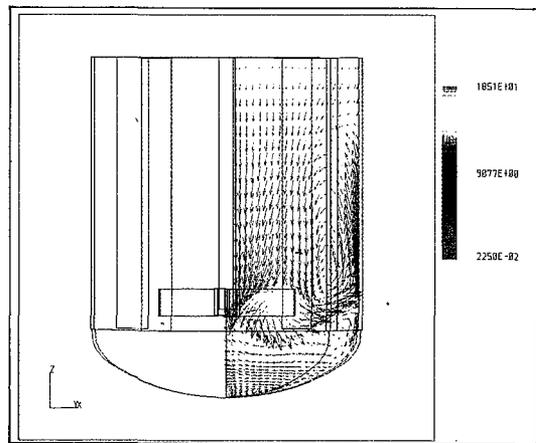
第10図 r-θ面内の流速分布の計算結果
 Fig. 10 Computed velocity vectors in r-θ plane.



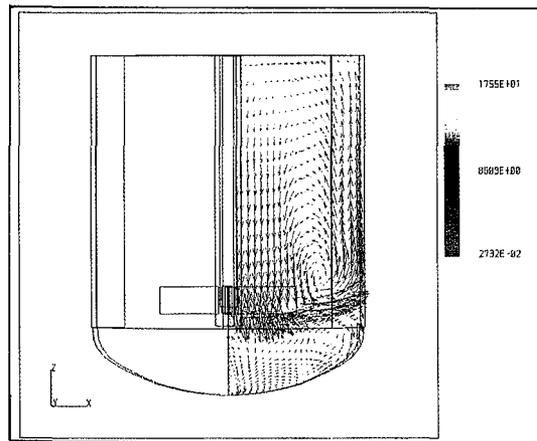
第12図 r-θ面内の流速分布の計算結果
 (第10図より0.004sec経過)
 Fig. 12 Computed velocity vectors in r-θ plane,
 0.004sec after Fig. 10



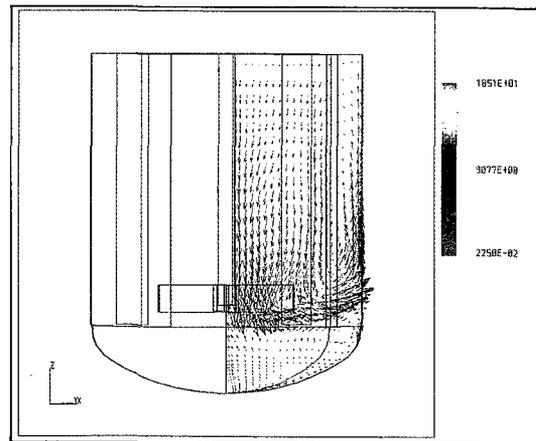
(a) in front of blade



(a) in front of blade



(b) behind blade



(b) behind blade

第11図 r-z面内の流速分布の計算結果（翼前面と翼後面）
 Fig. 11 Computed velocity vectors in r-z planes in front
 of and behind impeller blade.

第13図 r-z面内の流速分布の計算結果（翼前面と翼後面、
 第11図より0.04sec経過）
 Fig. 13 Computed velocity vectors in r-z planes in front
 of and behind impeller blade, 0.04sec after
 Fig. 11.

には現状でも多大なメモリと計算時間を有する。傾斜やネジリという構造をメッシュで構成する場合現状のEWSではまだメモリが不十分な場合がある)。2:1半楕円ボトムを有する内径400mmの攪拌槽内に、槽径に対して10%幅の邪魔板を4枚等間隔に配置し、翼スパン200mm、翼高さ40mmの4枚直パドル翼を攪拌槽中心最下部より150mm上部に設置した。計算条件は回転数180rpm、攪拌レイノルズ数12000とした。乱流モデルには2方程式($k-\epsilon$)モデルを使用した。

第10図に $r-\theta$ 面内の翼中心部における流速分布を示す。翼周辺部より半径方向に吐出する流れとなる。第11図に $r-z$ 面内の翼前面及び翼後面における流速分布の計算結果を示す。なお観察する面を第10図に示した。翼前面に衝突した流体が主に翼の半径方向と下方向に分かれて吐出する様子が観察される。翼後面の流速分布を翼前面のそれと比較すると翼上下への流れは抑制されるものの半径方向への吐出は依然として大きい。このように観察する断面により速度分布が異なることがわかる。第12図は第10図より45度(0.04秒経過)翼が回転した状態での $r-\theta$ 面内の流速分布の計算結果である。翼部から半径方向へ吐出するフローパターンは翼と邪魔板との位相差が変化しても大差はないことがわかる。第13図は第11図より45度(0.04秒経過)翼が回転した状態での $r-z$ 面内の翼前面及び翼後面の流速分布の計算結果である。観察する面を第12図中に示した。フローパターンに関しては第11図と大差はないが、翼とバッフルとの相対的位置が異なるため、翼前面における両者の流れが多少異なる。第11図と第12図の邪魔板付近の流れに

着目すると、第11図では翼前面位置が邪魔板の後面に位置していたため下降流を伴う複雑な流れを呈していたが、第12図では翼前面位置が邪魔板の前面に位置するようになるため、より活発な上下循環が形成される。このように翼と邪魔板の相対的な位置の違いにより槽内のフローパターンが異なってくるのがわかる。これら計算結果の検証には邪魔板と翼の位置を正確に評価した流速の計測値が必要である。

む す び

乱流攪拌槽内の流動解析を行い、計算結果と実測値と比較して計算精度の検証を行った。その結果次に示す結論を得た。

- ①流速の計算値と実測値との比較の結果、その誤差は一次精度の15%に対し、3次精度では10%以内に改善された。
- ②乱流エネルギーの計算値と実測値との比較の結果、その誤差は一次精度の60%に対し、3次精度では30%にまで改善された。しかし、差分精度を上げても依然として乱流エネルギーは低めに評価される。
- ③翼と邪魔板の相対的な位置を考慮した解析を移動境界問題として定式化した形で行い、翼と邪魔板の相対的な位置により流動状態が変化することが計算上示された。実測値との検証は今後の課題となった。

〔参考文献〕

- 1) 高田一貴、伊藤久善、菊池雅彦：神鋼パンテック技報 VOL36, No.3 (1992)
- 2) たとえば竹田宏：化学工学 VOL58, No.3 (p189)