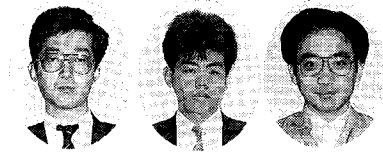


乱流攪拌槽の流動解析

Computer Simulation of Turbulent Flow in a Stirred Tank



技術開発本部 製品化技術室
高田 一 貴
Kazutaka Takata
(化)技術部 設計第1課
伊藤 久 善
Hisayoshi Itoh
技術開発本部 製品化技術室
菊池 雅 彦
Masahiko Kikuchi

Turbulent flow and mixing in a baffled tank stirred with 4-pitched paddle impeller were investigated. Its velocity distribution was measured using laser doppler anemometer, and concentration response curves were measured at one point by means of the electro conductivity method. And also the detailed velocity distribution was calculated using computational fluid dynamics based on $k-\epsilon$ model, and the concentration response curve at the measuring point was simulated. Then the computed results were compared with the measured ones. The main results obtained in this study are as follows.

- (1) The computed velocity distribution qualitatively agreed with the measured one. The maximum error of the velocity computation was 16 % of the impeller tip speed. Computed turbulent energy was considerably lower than the measured one at the most of the measuring points, and at a point the computed value could be as small as 10 % of the measured one.
- (2) The computed concentration response curve deviated from the measured ones. However computed and measured mixing times were 20sec and 16 sec, respectively, to give an impression of fair agreement.

まえがき

本報告では、低粘度液の乱流攪拌に広く用いられている傾斜パドル翼付乱流攪拌槽について、この攪拌槽内の詳細な3次元流速分布を、化学装置内の乱流解析によく用いられる2方程式乱流モデル(以下 $k-\epsilon$ モデルと略称)を用いた数値解析法とレーザードップラー流速計による流速測定結果を併用した簡略解析法により求めた。また得られた速度場を利用して濃度の拡散方程式を解析することにより拡散物質の濃度応答曲線を求めた。そして得られた計算値をレーザードップラー流速計による流速ならびに電気伝導度法による濃度応答の実測値と比較することにより $k-\epsilon$ モデルを用いた乱流攪拌槽内流動解析の可能性を検討したので次に報告する。

1. 実験

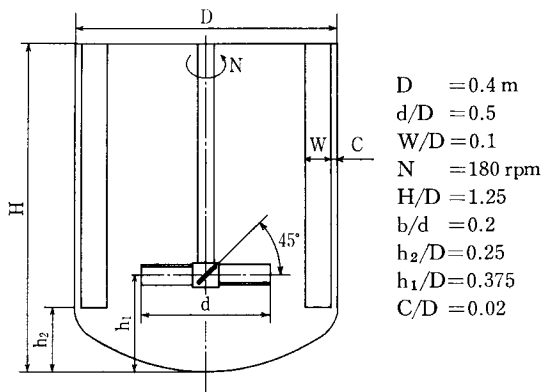
第1図に検討の対象とした攪拌槽を、第2図に実験装置及び流速測定システムの概要を示す。攪拌槽には内径400mmの2:1半楕円下鏡を有する透明アクリル製円筒を、攪拌翼には翼径200mm、翼幅40mm、傾斜角度45度の4枚傾斜パドル翼を攪拌槽中心最下部より150mm上部に設

置して使用した。ま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。レーザ光線の屈折をおさえるためにアクリル製円筒槽をアクリル製角型槽内に設置して双方に試験流体(水)を満たした。なお円筒槽には槽中心最下部より500mm高さまで水を満たした。

流速の測定には後方散乱型ファイバタイプ2次元レーザードップラー流速計(DANTEC社製)を使用し、円周方向と軸方向の2方向瞬間流速を同時測定した。また、第2図に示すようにプローブ位置を移動させて半径方向流速を測定した。各点に対してサンプリングされた20000個の変動流速をアンサンブル平均して平均流速を求めた。

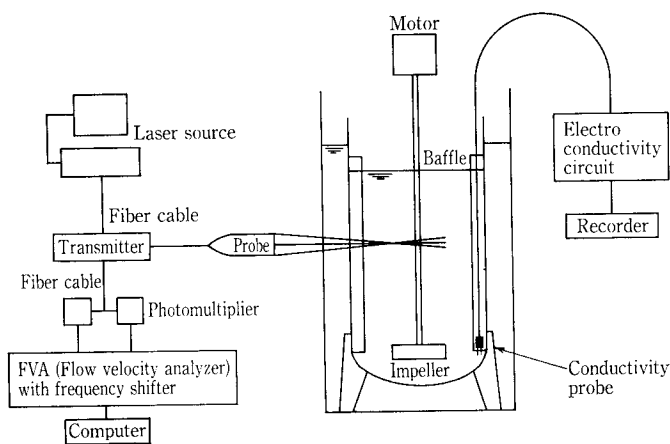
混合時間の測定にはKCL水溶液による電気伝導度法(パルス応答法)を用いた。第2図に示すように電気伝導度プローブを邪魔板下部に設置し、このプローブから検出されるKCL濃度変動に基づく伝導度変化をレコーダーに記録した。

実験条件は流速測定及び混合時間測定共に翼回転数180rpm、攪拌レイノルズ数 1.2×10^5 である。

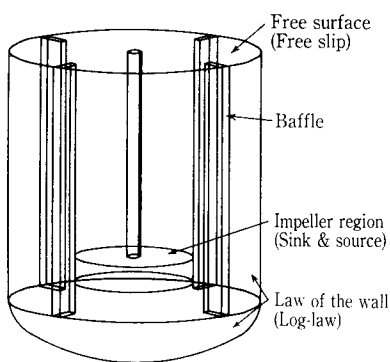


$D = 0.4 \text{ m}$
 $d/D = 0.5$
 $W/D = 0.1$
 $N = 180 \text{ rpm}$
 $H/D = 1.25$
 $b/d = 0.2$
 $h_2/D = 0.25$
 $h_1/D = 0.375$
 $C/D = 0.02$

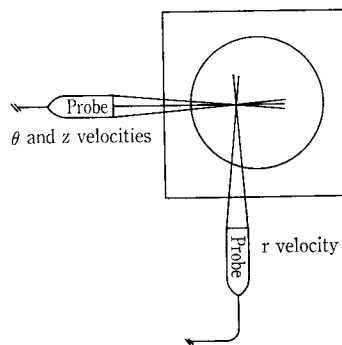
第1図 解析に使用した傾斜パドル翼付攪拌槽モデル
 Fig. 1 Schematic diagram of stirred tank with 4-pitched paddle impeller used in this work



第2図 実験装置及び流速測定システム
 Fig. 2 Experimental apparatus and velocity measuring system



第3図 解析モデル及び境界条件
 Fig. 3 Analytical model and boundary conditions



から、液面での凹凸は小さく水平に近似しても妥当であると考えられることによる。計算の簡略化のため翼部分を円柱状の検査要素で近似し、この円柱検査要素表面全域に流速の実測値 (u, v, w) を与えた。この際、検査要素に流入する流量と流出する流量に等しくなければならない。また円柱検査要素から流体が流出する部分には乱流エネルギー k の実測値を与えた。このように、解析系内で実際の攪拌翼の回転を再現せずに翼周辺に境界条件として実測値を与える理由は、一般の汎用熱流体解析コードでは攪拌翼と邪魔板との相対的位置を時間の経過と共に変化させながら移動境界問題として解析することが出来ないことによる。

(注記：現在汎用熱流体解析コード製作各社が、邪魔板付き攪拌槽内の流動解析を、回転円筒座標系と静止座標系を併用した移動メッシュ方式で解析できるようにするコード開発に乗り出している。)

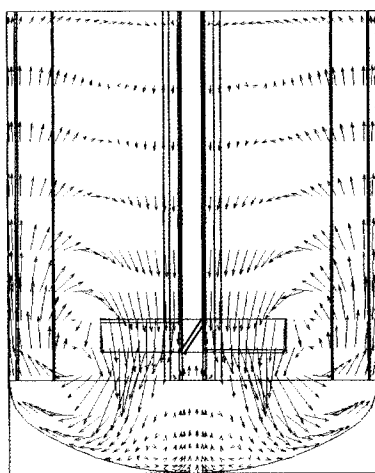
混合過程の計算には濃度の輸送方程式を用いた。濃度の輸送方程式中の u, v, w に上記流動解析により得られた時間平均流速 u, v, w を代入して数値計算した。濃度方程式の数値解析では液面付近より一定濃度のトレーサーをパルス的に投入し、そのトレーサーが槽内で拡散する過程を濃度応答曲線として検出した。濃度応答を追跡するポイントは実験で伝導度プローブを設置した場所と同一とした。

計算機にはエンジニアリングワークステーションを使用した。流動解析のみに要するCPUは圧力変動が充分小さくなって定常状態に達するまで約120時間であった。解析に用いた格子数は $23(r) \times 44(\theta) \times 46(z) = 46552$ 個である。

3. 結果及び考察

3.1 流動特性

第4図は邪魔板前面における $r-z$ 断面内流速分布の数値計算結果である。槽内では翼下部域より吐出された流体が



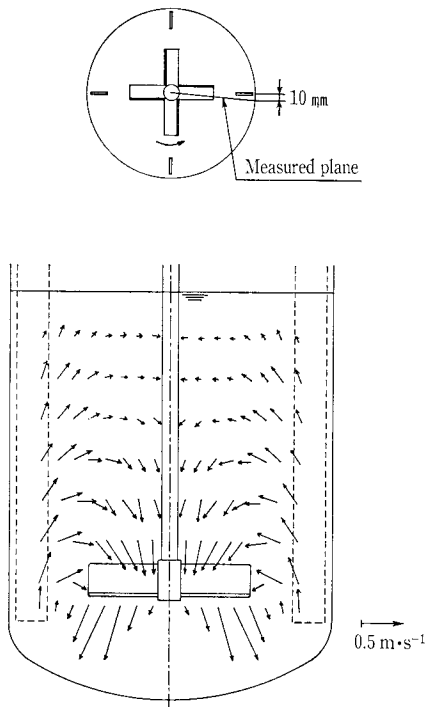
$IM = 23$
 $JM = 44$
 $KM = 46$
 $CYCL = 10000$
 $TIME = 10.000$

第4図 $r-z$ 面内流速分布の計算値
 Fig. 4 Computed velocity vectors in $r-z$ plane

2. 数値計算

本計算では有限体積法による市販の汎用熱流体解析コードを使用して流速分布及び混合過程を求めた。乱流モデルには等方性乱流の仮定を施した標準 $k-\epsilon$ モデルが用いられている。従ってここでは、時間平均連続の式、時間平均 Navier-Stokes 方程式 (u, v, w, p)、乱流エネルギー (k) 及び粘性消散率 (ϵ) の輸送方程式を連立させて数値解析を行った¹⁾。

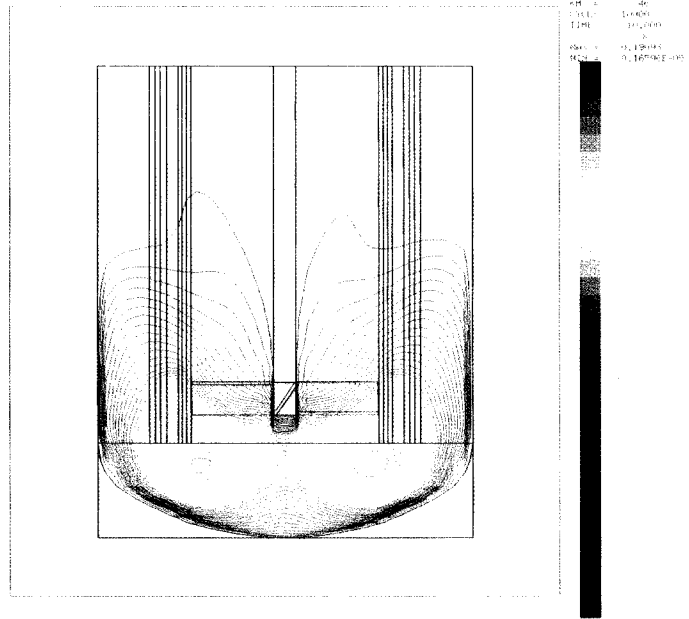
第3図に境界条件を示す。槽内壁及び邪魔板表面には3方向の速度ゼロを与え、壁近傍を対数則速度分布で近似した。自由表面(液面)にはすべりあり条件を与え、これを水平に近似した。この近似は実際のテスト槽での観察結果



第5図 r-z 面内流速分布の実測値
Fig. 5 Measured velocity vectors in r-z plane

槽底付近に衝突して反転し、攪拌槽上部に達したあと再び翼上部から吸い込まれるという1つの循環流を形成する。また翼直下付近では弱い上昇流が生じており翼下部からの多少の吸い込みが予測されるものの、その流速は遅く流体の停滞域となる可能性がある。

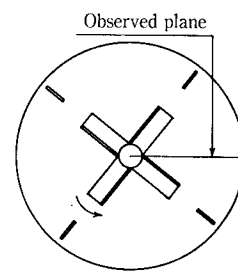
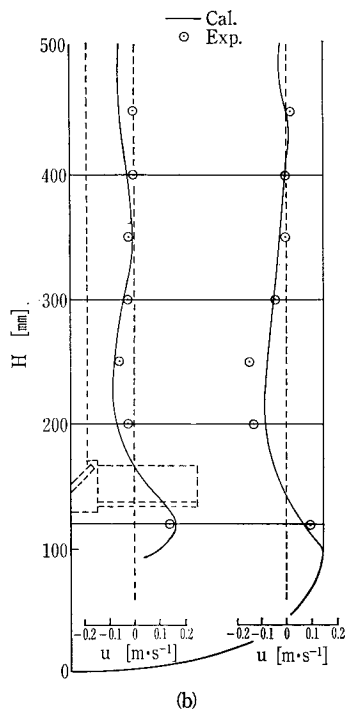
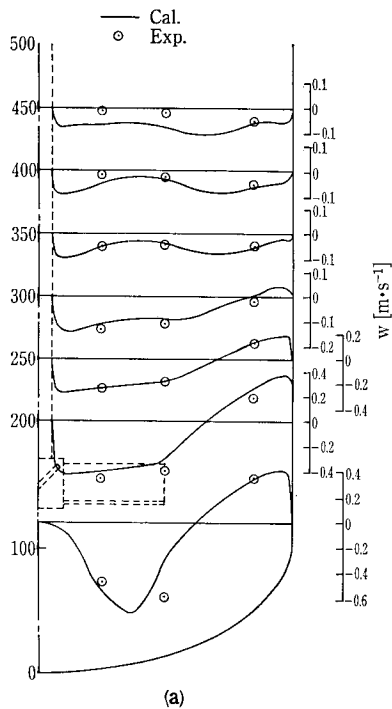
これら計算結果の一部を実測値と比較した。まず定性的な一致度を検討した。第5図は邪魔板前面におけるr-z断面内の流速分布の実測値を示したものであり、第4図で観察した断面に相当する。翼より吐出された流体が形成する循環渦の大きさ及びその中心位置は第4図に示す計算結果



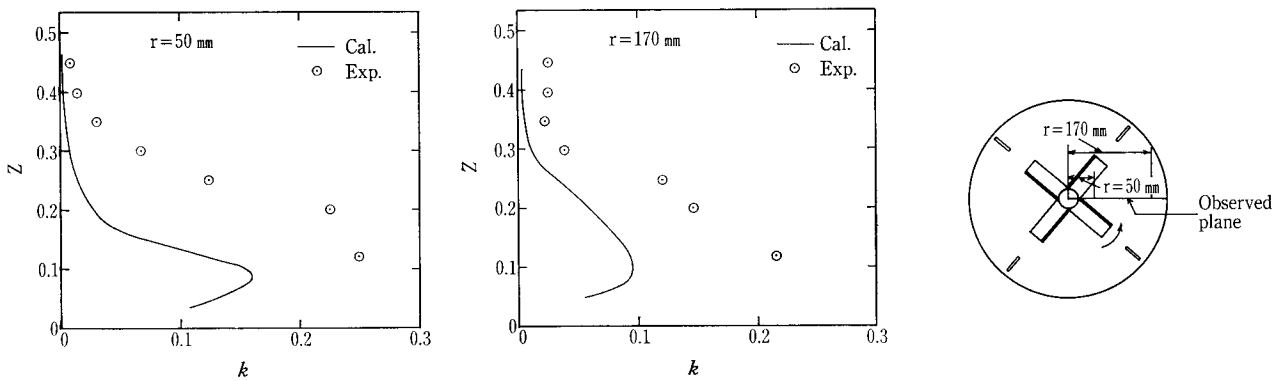
第7図 乱流エネルギー分布
Fig. 7 Contours of computed turbulent energy

とほぼ一致する。第6図は邪魔板間のr-z断面内における軸(第6図(a))及び半径方向(第6図(b))のそれぞれの流速分布の計算値と実測値を比較したものである。計算では境界条件として翼近傍の流速の実測値を与えているので、翼に近いほど両者は比較的良好に一致するが、翼から離れるに従い計算値と実測値との間に偏異を生じる。流速の計算値と実測値との間には翼先端速度に対して最大16%の誤差を有することがわかった。

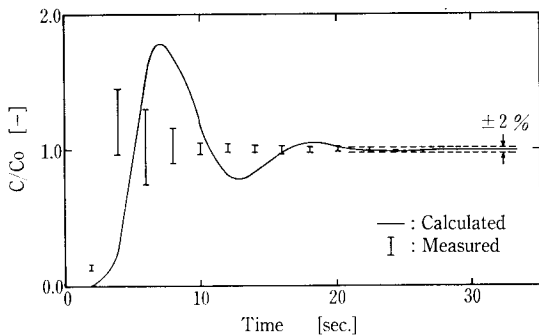
第7図はr-z断面内における乱流エネルギー分布の計算値を等エネルギー線として示したものである。乱流エネルギーは翼付近で大きく、翼から離れるにつれて小さくなる。



第6図
軸及び半径方向流速の計算値と実測値との比較
Fig. 6
Comparisons of computed and measured velocities in the axial and radial directions



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 computed and measured turbulent energy



第9図 混合過程の計算値と実測値との比較
Fig. 9 Comparisons of computed and measured concentration fluctuations

第8図は乱流エネルギーの計算値と実測値を比較したものである。計算値は実測値に較べてかなり低めに評価され、その大きさも実測値の10%程度になる所もある。

3. 2 混合特性

第9図は混合過程の計算値と実測値を示したものである。実測値の棒線は、混合過程でのKCL濃度の応答曲線を10回測定し、そのばらつきの幅を表している。混合過程の計算値と実測値はいずれも時間の経過と共に濃度変動を繰り返す、ある時間以降になると一定値に漸近する。計算値は実測値よりも遅く立ち上がり、濃度応答全体及びその大きさに計算値と実測値との間で偏異を生じている。しかし濃度の最終漸近値の±2%以内に達するまでに要する時間は計算値及び実測値でそれぞれ20秒と16秒でありその誤差は20%である。混合時間の計算値と実測値との誤差が流速、乱流エネルギー及び濃度応答の計算値と実測値との間の誤差ほどに大きくない理由として、流速の計算値は実測値よりも速く、乱流エネルギーの計算値は実測値よりも小さく評価されることによる両者の相乗効果があげられる。現状ではそれぞれの誤差要因が混合時間に及ぼす影響を解明するには至っておらず、この要因の解明は今後の課題として残された。

む す び

$k-\epsilon$ モデルによる数値解析法とレーザー流速計により測定した流速データを併用して乱流攪拌槽内流速分布及び混合過程の数値解を求め、これらを実測値と比較し次に示す結果を得た。

- (1) 計算及び実測による両者のフローパターンは定性的によく一致するものの、流速の計算値は翼先端速度に対して最大16%の誤差を有する。乱流エネルギーの計算値は実測値に較べて低めに評価され、その大きさも実測値の10%程度になる場所がある。
- (2) 混合過程を表示する濃度応答の計算値と実測値の間には偏異が認められる。しかし濃度の最終漸近値の±2%以内に達するまでに要する時間の計算値と実測値はそれぞれ20秒と16秒でありその誤差は20%である。

本解析により、数値計算による攪拌槽内流動と現実のそれとの間で、流速や混合時間等の数値を定量的に評価した時に見逃せない誤差を含むことを明らかにした。実用問題にそのまま応用するには計算精度を十分考慮に入れた取り扱い方が望まれる。

使用記号	C : 濃度変動
	C_0 : 均一化濃度
	k : 乱流エネルギー
	P : 時間平均圧力
	r : 半径方向
	u : 時間平均流速 (半径方向)
	v : 時間平均流速 (周方向)
	w : 時間平均流速 (軸方向)
	z : 軸方向
	ϵ : 粘性消散率
	θ : 円周方向

【参考文献】

- 1) 高田一貴, 佐藤栄祐, 菊池雅彦: 神鋼パンテック技報, Vol. 34, 3 (1990), p. 8