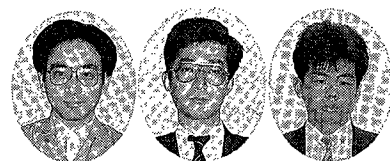


フルゾーンの流動・混合特性

Flow Structure and Mixing Characteristic in a Vessel Stirred with FULLZONE Impeller



技術開発本部

菊池 雅彦

Masahiko Kikuchi

高田 一貴

Kazutaka Takata

伊藤 久善

Hisayosi Itoh

In the previous paper, the development and some operational characteristics of FULLZONE were explained. In this paper, its flow structure and mixing under laminar flow conditions have been studied theoretically by using computational fluid dynamics (CFD) and experimentally by measuring velocity and circulation time distribution. The main results are as follows.

(1) There are two local circulating flows and an overall circulating flow connecting the local two. The overall circulating flow is caused from the pressure difference around the crosswisely arranged, upper and lower paddles of FULLZONE through its rotation.

(2) This flow pattern of FULLZONE leads to its fairly good mixing ability in the high viscosity range. Homogenous mixing will be attained with the combined effects of local mixing caused by the local circulating flows and its linkage by the overall circulating flow.

まえがき

当社は1991年1月、極めて広い粘度範囲（層流から乱流操作）において効率良い攪拌が可能な攪拌翼『フルゾーン』を開発して販売を開始した。前報¹⁾では主にフルゾーンの開発および攪拌性能について報告した。本報および次報では、流動数値計算法を用い、理論的に流速および循環時間分布を測定することにより、実験的にフルゾーンを用いた攪拌槽内の流動・混合特性を説明することを試みた。なお本報ではまず層流攪拌時の流動特性についてのみ報告する。

1. 検討手法

1.1 流体数値解析（数値実験）

層流攪拌時の攪拌槽内流動を検討する場合、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics 以下 CFD と略す) が有効であることから²⁾³⁾⁴⁾、本報告でも CFD を用いて攪拌槽内流動を定量的に把握することを試みた。流体数値解析ソフトウェアには汎用コードを攪拌槽用に一部変更したものを用いた²⁾。ハードウェアとしては、解析費用を考慮してエンジニアリングワークステーション (EWS) を用いた。また、層流攪拌ではバッフルの有無で流動状態に大きな差が無いいため、本報の解析は全てバッフル無しで行った。

1.2 流速測定

CFD 結果の妥当性を確認するために、槽内径 $D=0.4$ m、槽高 0.8 m の透明アクリル樹脂製攪拌槽内 ($H/D=0.25$, H : 液深) の流速をレーザー Doppler 流速計 (以下 LDA と略す) を用いて測定した。攪拌液には代表的なニュートン流体である水飴水溶液を用いた。

1.3 循環時間分布の測定

攪拌槽内の流動をマクロに把握して上記流動解析結果との関係を検討するために槽内循環時間分布を測定した。循

環時間分布の測定には粒子追跡法を用いた⁵⁾。粒子には直径 5 mm のスポンジを用いた。攪拌槽内の上段翼と下段翼の中間断面に検査面を設定し、粒子が攪拌槽内を1循環する時間を測定した。循環時間の測定個数は約 500 個とした。また、高粘度液用の代表的な翼であるダブルヘリカルリボン翼を用いた槽内の循環時間分布も実測し、フルゾーンのそれと比較した。

2. 結果および考察

2.1 流動特性

2.1.1 流動機構

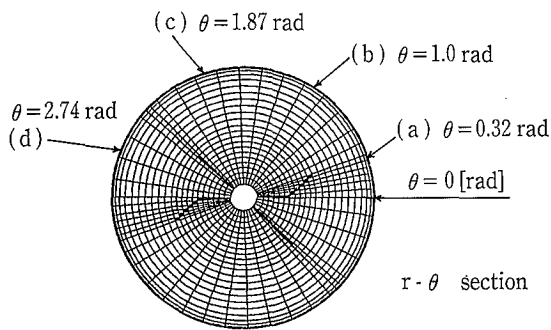
フルゾーンを用いた攪拌槽内の流動状態を CFD により解析した結果を $r-z$ 面における流速ベクトルとして第1図(a)~(d)に示す。ここに示した計算結果は信頼性の高い直接計算法により求められたものであるが、計算結果が真に正しい結果を与えているかどうかを検証することは重要である。ここでは、半径方向流速の計算値と LDA による実測値を比較した。説明の便宜上、座標系を次のように定義する。

半径方向 r (軸中心を $r=0$)

周方向 θ (下段翼平面部を $\theta=0$ 第1図参照)

軸方向 z (槽底部を $z=0$)

第2図は $z=0.35$ m, $r=0.13$ m における半径方向流速分布を円周方向に対してプロットしたものである。翼前方に発生する流速のピーク値は計算値と一致するが、ピーク間の流速にわずかの不一致が認められる。この不一致は差分計算に基づく数値誤差に起因するものと考えられる。しかし全体的な流速の増加・減少傾向は実測値と一致している。また第3図は $r=0.13$ m における半径方向流速値を軸方向距離に対してプロットしたものである。流速の実測値



第1図 CFDによる $r-z$ 断面における流速ベクトル ($Re=10$)
Fig. 1 Computed velocity vectors in $r-z$ planes ($Re=10$)

と計算値は良好に一致することから、計算結果の妥当性が確認された。

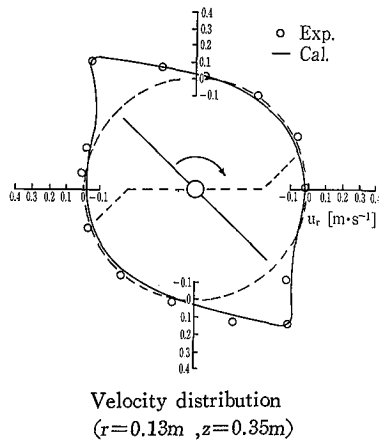
次に第1図の計算結果を用いて槽内の流動機構を概説する。

(a) $\theta=0.32$ rad

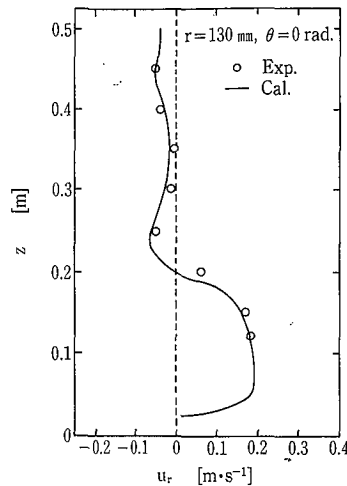
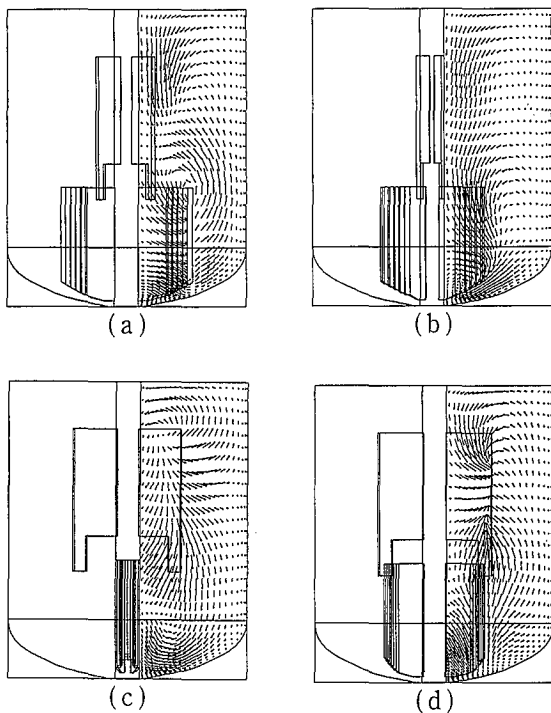
下段翼域より吐出された流体の一部は上段翼域に達し再び下段翼域に吸い込まれるが、残りの流体は壁面付近を上昇して液面にまで達し上段翼域に吸い込まれる。これより、この断面では下段翼付近を循環する循環流と下段翼から液面にまで及ぶような槽内全体を循環する循環流が形成されている。

(b) $\theta=1.0$ rad

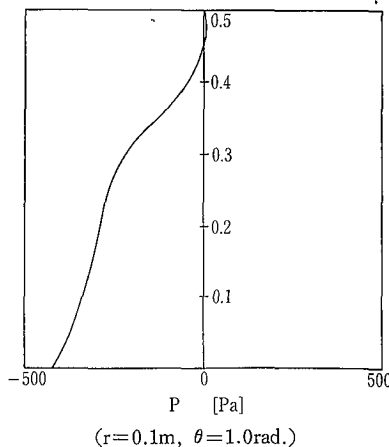
上段翼域から吸い込まれた流体は下段翼域にまで達しており、上段翼域と下段翼域との間で物質移動の促進が期待される。この流れは上段翼前方に発生する正圧と下段翼後方に発生する負圧の圧力勾配に基づく。この現象を槽内の圧力分布を用いて考察する。第4図は(b)断面における $r=0.1$ m における圧力 (各点の圧力と大気圧との差) を軸方



第2図
 CFDによる流速計算値とLDAによる流速測定値の比較 ($Re=10$)
Fig. 2
 Comparison of computed velocity and measured velocity ($Re=10$)



第3図
 CFDによる流速計算値とLDAによる流速測定値の比較 ($Re=10$)
Fig. 3
 Comparison of computed velocity and measured velocity ($Re=10$)



第4図
 攪拌槽内の軸方向圧力分布 ($Re=10$)
Fig. 4
 Axial pressure distribution in the agitated vessel ($Re=10$)

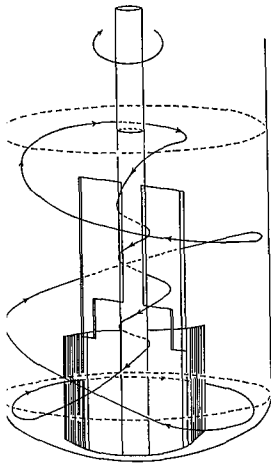
向距離に対してプロットしたものである。上段翼域では翼前面に位置するため圧力は正圧になるが、下段翼域では翼後面になるため圧力は負圧となることから、第1図(b)に示した流れはこの圧力勾配に起因することが示唆される。

(c) $\theta=1.87$ rad

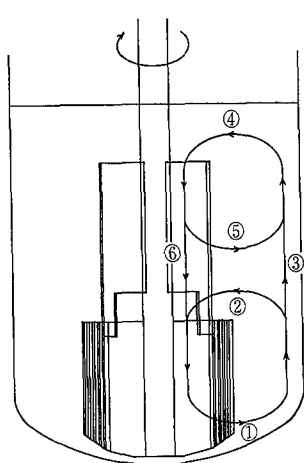
上段翼域では、流体は翼の回転により半径方向へ吐出され再び上段翼域へ吸い込まれるが、その一方で上段翼から下段翼域にまで達する軸方向流れも形成されている。これより、この断面では上段翼上部を中心とする小循環流と、上段翼域から下段翼域にまで及ぶ循環流が形成されている。

(d) $\theta=2.74$ rad

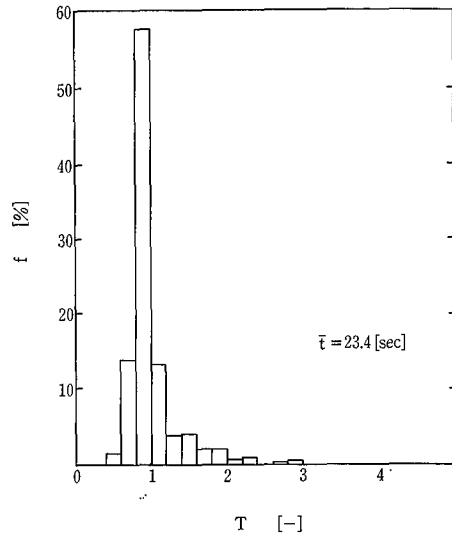
下段翼域より吐出された流体の大半は上段翼中間付近に流入し、一部は槽壁に沿って上昇し液面付近にまで達する。



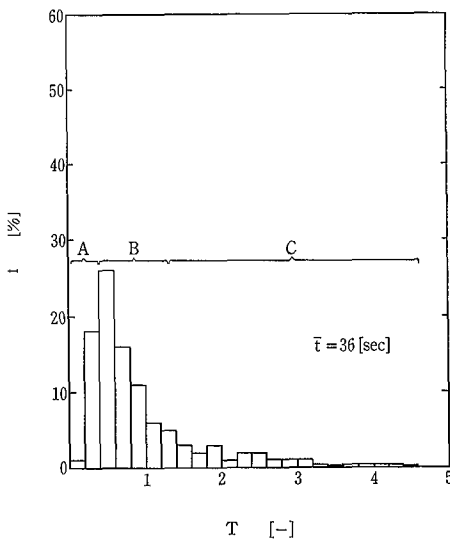
第5図 層流攪拌時のフローパターン
Fig. 5 Flow pattern at laminar flow condition



第6図 フローパターンの模式図
Fig. 6 Schematic diagram of flow pattern



第8図 ダブルヘリカルリボン翼の循環時間分布 (Re=10)
Fig. 8 Circulation time distribution of double helical ribbon impeller at Re=10



第7図 フルゾーンの循環時間分布 (Re=10)
Fig. 7 Circulation time distribution of FULLZONE at Re=10

2. 1. 2 フローパターン

流動解析および実測結果に基づいたフローパターンを第5図に示す。また攪拌槽内の主な循環流の模式図を第6図に示す。槽内では下段翼から上段翼下部付近にかけての循環流、下段翼から液面付近にまで及ぶ循環流および上段翼上部付近の循環流の3つの循環流が形成されている。したがってこのフローパターンは、上段翼域および下段翼域における局所的な循環流に基づく局所混合とそれらをうまくつなぐ循環流によって槽内全体での均一混合を実現すると考えられる。

2. 1. 3 循環時間分布

第7図は循環時間分布の実測値を無次元化したものである。循環時間分布図中に示したそれぞれの区分A, B, Cは第6図に示した3つの循環流の相互作用により形成される循環パターンである。

A : ①→②

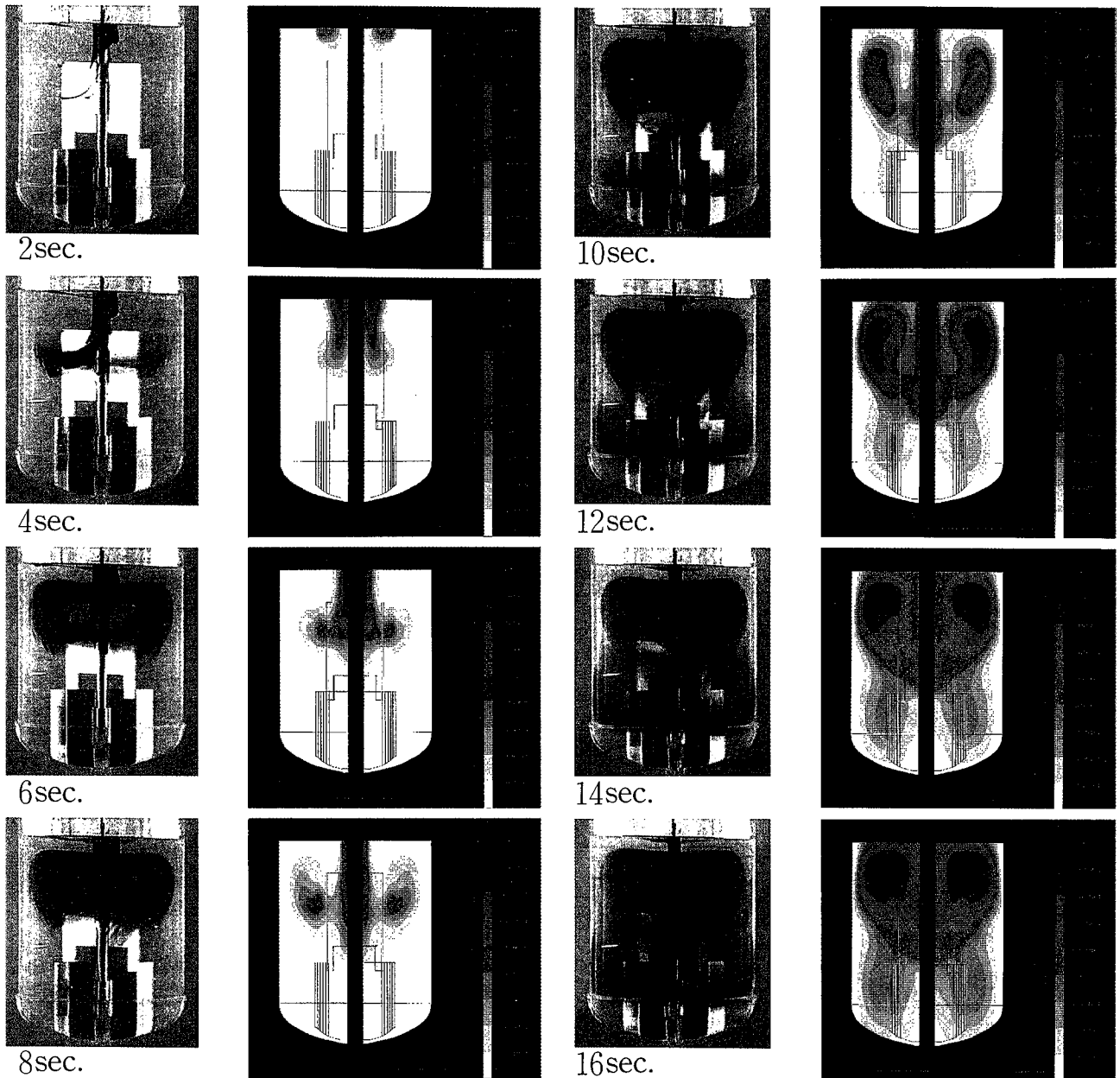
B : ①→③→④→⑥→①

あるいは
①→③→④→⑤→⑥→①
↑
(1~2回繰り返し)
C : ①→③→④→⑤→⑥→①
↑
(3回以上繰り返し)

ここでフルゾーンによる循環時間分布とダブルヘリカルリボン翼 (以下DHRと略す) によるそれを比較する。第8図はDHRを用いた循環時間分布の実測値である。DHRを用いた場合の循環時間は $t/\bar{t}=1.0$ を中心とした極めてシャープな分布となる。一方フルゾーンを用いた攪拌槽内の循環時間分布のピークは $t/\bar{t}=0.5$ 付近に存在し、分布の幅は $t/\bar{t}=4.5$ 付近に達している。この違いはDHRが軸流型の攪拌翼であるのに対し、フルゾーン翼は多少の軸流を有するが基本的には放射流型の攪拌翼であることに起因する。

2. 2 混合特性

計算により求めた槽内流動場を用いて濃度方程式を独立に数値計算することにより攪拌槽内の混合過程を求めた。第9図にトレーサー投入後の濃度分布の計算結果およびヨウ素による着色実験結果 (第9図写真) を示す。これより、投入されたトレーサーの拡散・移流過程の計算結果は実測値とほぼ一致する。このことは、流速面のみならず混合過程の面からも数値計算法の正当性が確認されたことを示す。液面より投入されたトレーサーは上段翼域で小循環流を形成しながら下段翼域に達する。下段翼域に吸い込まれたトレーサーは下段翼先端部より吐出されるが、その一部は再び下段翼域に吸い込まれ、上段翼域から下段翼域へ流れ込む流体と合流する。そして残りは槽内壁面に沿って液面付近にまで達し、上段翼域より吐出された流体と合流して再び上段翼域より吸い込まれる。これより、2.1.2で述べたフローパターンに基づく循環流間の物質交換は極めて盛んであることが容易に想像できる。



第9図 混合過程の計算値と実測値の比較 (Re=10)

Fig. 9 Comparison of computed concentration distribution and experimental photographs (Re=10)

む す び

フルゾーンを用いた層流攪拌槽内の流動・混合特性をCFD、流速測定および循環時間分布の面から解明することを試みた。その結果次の結論を得た。

1) 攪拌槽内では2つの局所的な循環流とこれらの循環流をつなぐ槽内全体におよぶ1つの循環流が存在する。槽内全体で生ずる1つの循環流は上段翼と下段翼をクロスに配置することにより生ずる圧力勾配に起因する。

2) 攪拌槽内のフローパターンに基づく物質移動は極めて良好である。攪拌槽内では上段翼域および下段翼域における局所的な混合作用とそれらをうまくつなぐ循環流の存在による槽内全体での均一混合を実現する。

今回の報告はフルゾーンを用いた層流攪拌操作における槽内の流動・混合特性の解明に限定した。遷移域から

乱流域に至る流動・混合特性については機会を改めて報告する。

[使用記号]

D: 槽内径 [m]

d: 翼径 [m]

f: 循環時間頻度 [%]

H: 液深 [m]

P: 圧力 [Pa]

r: 半径方向座標 [m]

T: 無次元循環時間 [-] = t/\bar{t}

t: 循環時間 [s]

\bar{t} : 平均循環時間 [s]

u: 半径方向流速 [m/s]

z: 軸方向座標 [m]

Greek letters

θ : 周方向座標 [m]

[参考文献]

- 1) 菊池ら: 神鋼パンテック技報, 35, 1 (1991)
- 2) 高田ら: ibid, 34, 3 (1990)
- 3) 梅垣: 日本機械学会論文集, 54, 505 (昭和63)
- 4) 上ノ山: 化学工学論文集, 14, 6 (1988)
- 5) 井上ら: 化学工学, 33 (1969)