

# 低粘度系攪拌装置の製作と基本性能

鈴川一己<sup>1</sup>・橋本健治<sup>2</sup>・大坂英雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大学院 博士後期課程 設計工学専攻

<sup>2</sup>大学院 博士前期課程 機械工学専攻

<sup>3</sup>感性デザイン工学科

低粘度系攪拌槽内の輸送現象、特に乱流特性を調査するため、計測用の攪拌装置を製作した。攪拌槽は内径490mm、内壁には4枚のバツフルを設置している。攪拌槽の材質は透明なアクリル樹脂である。供試流体は水を使用し、槽径と同じ高さまで満たす。波立ち、気泡の混入を抑えるため液表面に境界板を設けている。攪拌翼は直径245 mmの4枚パドル翼を使用しており、槽中央に設置する。流速の測定には2次元後方散乱型レーザ流速計を使用する。ロータリエンコーダを設置し、翼回転との同期計測を可能としている。計測テストにより本装置の有効性を確認した。

**Key Words:** *Mixing vessel, Flat paddle impeller, LDV, Turbulent flow, Conditional sampling technique*

## 1. 緒言

低粘度系流体（液体）の攪拌・混合において、バツフルは液体の剛体的回転を防止し、2次流れを発生することにより槽内の混合を促進する役割を持っている。このバツフルについては、これまでバツフル幅が攪拌所要動力に与える影響についての報告<sup>1)</sup>はあるものの、流速分布や乱流量に与える影響を定量的に評価した報告はほとんどみられない。

本研究の目的は、攪拌レイノルズ数一定の条件下でバツフル幅を変化させたときの槽内部の流速分布および乱流特性の変化を定量的に調査することである。これによりバツフルが槽全体の混合性能に与える影響を流体力学的に解明することを試みる。本研究の遂行にあたり、約100リットルの容量をもつ槽を使用した計測用の攪拌システムを設計・製作した。測定機器としてレーザードップラ流速計（以下、LDV）を使用し、翼回転との同期計測（条件付きサンプリング）を実現した。

本研究により、攪拌槽内の流動状態の最適化を図る上で基礎的知見を与えることができ、さらに攪拌槽の設計のための指針を与えるものと考えられる。また、攪拌槽内乱流の数値計算用の乱流モデルを開発する上で基礎データを与えることができる。

関連研究をみると、Yianneskisら<sup>2)</sup>、Stoosら<sup>3)</sup>はロータリエンコーダを活用してLDVによる同期計測（条

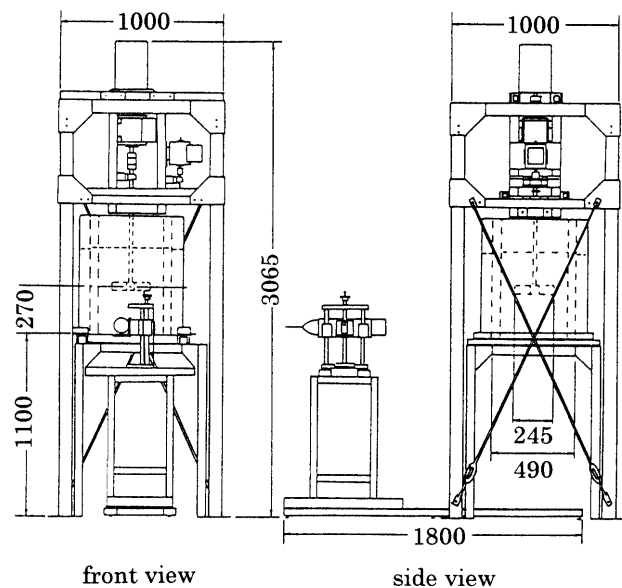


Fig 1 Overview of mixing system.

件付きサンプリング) を実施し、ディスクタービン翼先端から発生する翼端渦およびその経路について報告している。その際にYianneskisらは294 mm、Stoosらは299 mmの内径をもつ槽を使用している。

以上のことから、本報告では、著者らの製作した実験装置 (Fig 1) の設計方針、機器構成および計測システムの構成などについて述べる。また、本装置を使用して取得したデータの数例について紹介する。

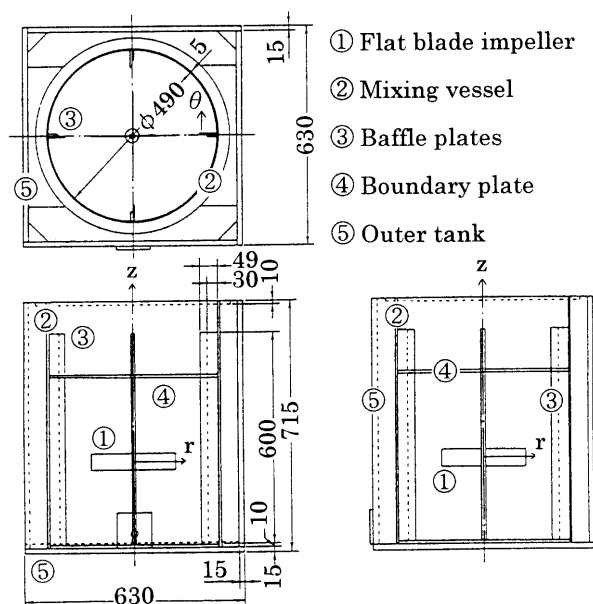


Fig 2 Mixing vessel.

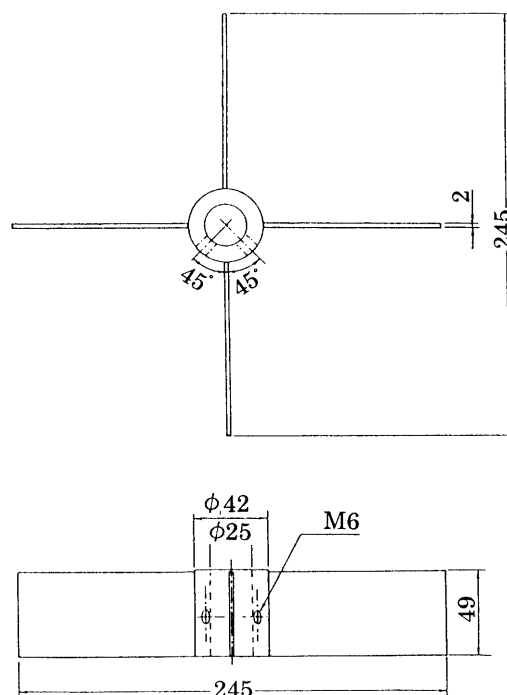


Fig 3 Flat blade impeller.

## 2. 基本計画

本研究の目的を遂行するため、低粘度用の攪拌槽を設計製作した。LDVによる条件付測定を可能とするため、種々の実験条件、計測器の性能等を考慮して以下に示すような設計の基本計画を立案した。

### (1) 攪拌槽

Fig 2に攪拌槽の形状および寸法を示す。攪拌槽の内径は系全体を設計する上で基本となる量である。槽径(D)は490 mmとした。Dの決定にあたり、できる限り実機寸法に近いこと、使用するLDVプローブの焦点距離が350 mmであること、材料が規格品として容易に入手可能であること、などを考慮した。工業上使用する攪拌槽の底は楕円体曲面であるが、アクリル樹脂を使用して製作することが困難である、屈折により測定精度が低下する、などの問題から、本装置では平底を採用した。液高さ(H)をDと同じ490 mmにとったときの槽の容量は93 リットルとなる。この容量は工業上、薬品の試験製造に使用される攪拌槽と同規模である。なお、自由表面における波立ちおよびそこからの気泡の混入を抑制し、また境界条件を明確にするなどの理由から、 $H=D$ となる液面に境界板を設置した。これにより槽内の攪拌は閉空間内で行うこととなる。

攪拌槽外周に設置した角水槽は寸法が一辺630 mmの正方形で、高さ715 mmである。角水槽と攪拌槽の間に水を満たし、円筒表面における光の屈折を抑制する。底には攪拌槽の位置を固定する板を置いている。ただ

し、攪拌槽は測定の際上方向へ回転移動することが可能である。

### (2) 攪拌翼

Fig 3に攪拌翼の形状および寸法を示す。攪拌翼の型には使用目的に応じて様々なものがある。しかし、最近10年間に海外で発表された研究報告はほとんどディスクタービン翼(円板に平板を垂直に取り付けたもの)を使用している。この翼はせん断力による攪拌能力が強く、液滴や気泡を微細化する場合に使用される。一方、工業上はハブに平板を垂直に取り付けた平パドル翼や斜めに取り付けた傾斜翼を多く利用している。本研究では実機を念頭に入れて攪拌翼として4枚平パドル翼を採用した。

混合促進をはかるために、翼直径(d)は $0.5D \sim 0.6D$ がよいといわれている。本研究では多くの研究報告で $d=D/2$ を採用していることから245 mmとした。また、翼幅(w)は $D/10=49$  mmとした。

### (3) バッフル

低粘度系流体の攪拌を行う場合、流体の剛体的回転(共回り)を防止する目的で槽内部にバッフルを設置することが多い(Fig 2参照)。これにより槽内に2次流れが発生し、混合が促進されることが知られている。しかし、バッフル幅およびバッフルの厚みの混合性能に与える影響の詳細は不明なままである。

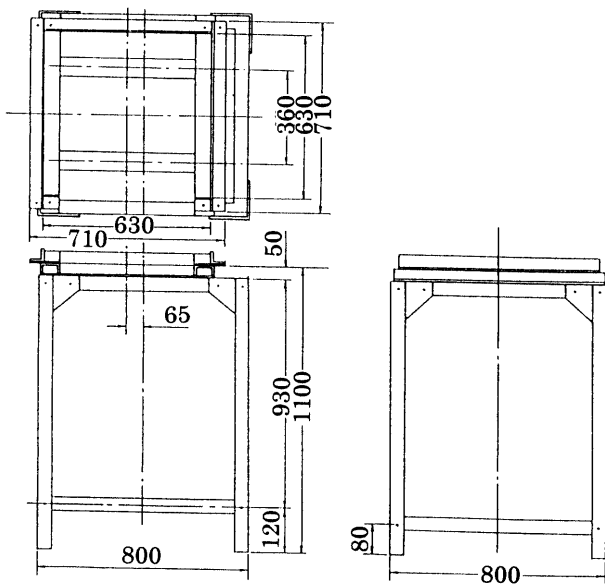


Fig 4 Table for mixing vessel and tank.

バッフル幅 ( $w_b$ ) を変化させたとき、羽根回転軸にかかるトルクが最大になるバッフル幅のときを完全バッフル条件という。これまでの研究から、完全バッフル条件は消費動力が最大になるものの槽内の循環が悪く、槽全体としては均一な混合が進みにくいことが報告されている。従って、通常、完全バッフル条件よりもバッフル幅を小さくするように設計され、工業上は、 $w_b = D/10$ を採用している。

本研究ではバッフル幅の攪拌槽内流れおよび混合性能に与える影響を調査するため、標準の49 mm ( $D/10$ ) の他に、64.3mm (完全バッフル条件) と33.7 mmの3種類を使用する。

#### (4) 全体システム

本装置における計測位置は、周方向および軸方向の流速の場合、角水槽の面に垂直で槽の中心軸を含む面上である。周方向の角度を変えて計測する場合は、攪拌槽を回転させて計測面に合わせる。一方、半径方向の流速計測は正面方向からは困難であるため、プローブを鉛直方向上方に向け槽の下方から計測する。これらを考慮してFig 4に示す槽設置台を設計・製作した。この槽設置台は、水槽と水の総重量2.17 kNが支えられるよう強度設計している。

精度の高い速度計測を行うためには水槽中に外部振動による外乱が入らないようにする必要がある。具体的には、モータを含む動力系から発生する振動を抑える、攪拌軸の横振れを小さくする、モータの振動が床を通して水槽に伝わらない、などの対策が必要である。

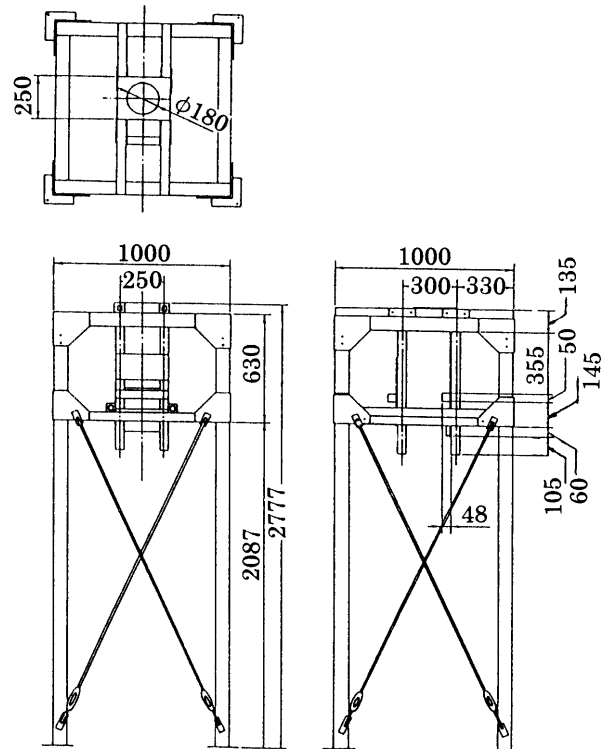


Fig 5 Power transmitted system (1).

これを考慮してFig. 5に示すような動力系の取り付け台を設計した。この台にはモータ、トルク検出器、ロータリエンコーダ、シャフト類、ベアリングなどが設置されている。

#### (5) モータ関連

モータを選定するにあたり、軸にかかるトルク値が必要になる。すでに永田らの研究<sup>1)</sup>により動力相関式(永田の式)が得られている。これによれば攪拌翼の型、直径、流体の密度・粘度、回転数、およびバッフル幅から動力数が求められ、攪拌所要動力の推定ができる。

本装置で回転数 300 rpmを想定した場合の攪拌所要動力は0.66 kWとなる。余裕を持たせ 1.5 kWのモータを選定した。また、任意の回転数で安定に運転するためインバータ制御を行う。回転数範囲は 0~360 rpmが可能である。

#### (6) 動力計測システム

トルク値は攪拌槽内の混合状態と対応するマクロな状態を表わす指標である。工業上、装置のスケールアップ時の指標としても攪拌所要動力を採用する機会が多い。また、新型翼の動力数-攪拌レイノルズ数曲線を得るためにもトルク値が必要である。

本装置では位相差型トルク検出器を採用し、攪拌状態時におけるトルク値を求める。検出器はモータと攪拌翼との間に設置した。回転数はトルク検出器に取り付けた回転数検出器にて検出する。

### (7) ロータリエンコーダ

多くの研究報告では、攪拌翼の回転角と無関係に槽内の速度を計測している。本研究では、特定の回転角における流速を得るため、翼の回転と同期させた状態におけるデータ処理を行う必要がある。このため、トルク検出器から攪拌翼に至る軸の途中にロータリエンコーダを設置した。ただし、エンコーダのシャフト強度が弱いので、攪拌軸とエンコーダの間をタイミングベルトにより接続している。使用するエンコーダはインクリメンタル型、パルス数は1回転あたり900で、90°位相のずれた2つの信号を発生し、デジタルカウンタにて1回転あたり3600パルス（回転角0.1°きざみ）の識別を行っている。

## 3. 製作と性能

2章で述べた基本計画に沿って攪拌槽システム、動力系システムおよび計測システムを具体的に製作した。以下に各システムについて説明する。

### (1) 攪拌槽システム

L D V計測および可視化を行うため、水槽関連の部分にはアクリル樹脂を採用した。攪拌槽は厚さ5 mm、高さ700 mmの円筒を使用し、底には厚さ10 mmの円板をはめ込み接着した。また、上部には補強のためリング状の縁リブを取り付けた。内部にはバッフルの取り付け用補助板として幅30 mm、厚さ5 mmの板を4カ所接着した。バッフルはこの補助板にネジで固定する。また、液表面部の境界板は供試流体を満たした後に設置し、クランプにて固定する。角水槽は厚さ15 mmのアクリル樹脂板から製作した。

### (2) 動力系システム

動力は、モータ→トルク検出器→中間軸→攪拌軸→攪拌翼と伝えられる。軸回転はタイミングベルトにより中間軸からロータリエンコーダへ減速比1で伝達される（Fig 6参照）。各部品間はカップリングにより接続されており、検出器端には衝撃、振動を抑え芯出し時の軸の偏心、偏角をある程度許容できるものを採用した。これらの動力計システムはコンクリート床にアンカーボルトで固定した動力系システム支持台に取り付けられる。

モータは（株）東芝製三相かご形誘導電動機1K-DCKL8

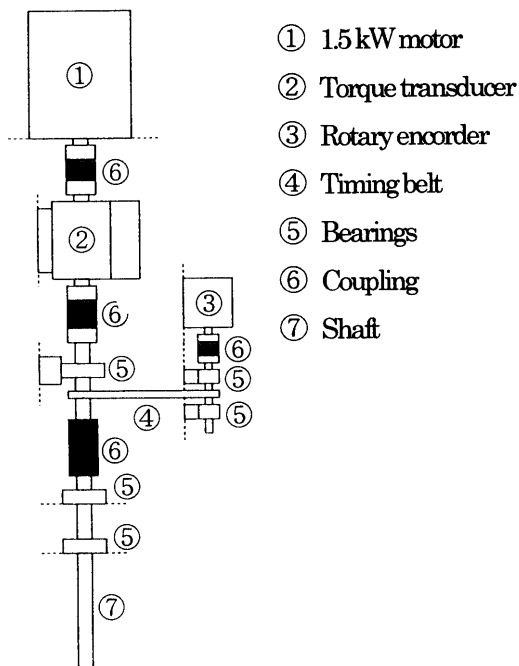


Fig 6 Power transmitted system (2).

（立取付型1.5 kW，6極），インバータとして（株）東芝製VF-SX（200 V，1.5 kW）を採用した。このコントローラにより2 rpm刻み毎に回転数制御が可能である。

次にトルク検出器として（株）小野測器製SS-101（トルク容量100 Nm，トルク最小分解能0.1 Nm），回転検出器として同社のMP-981を採用した。同社のデジタルトルクメータTS-2600により直接トルクおよび回転数を表示させる。

ロータリエンコーダとして（株）小野測器製RP-112-900 p/r，デジタルカウンタとして同社のデジタルゲージコンパレータDG-4280を使用している。このカウンタより発生させたりセット信号をL D Vの信号処理器へ送り，処理方法に応じて両者を連携する。

タイミングベルトとして（株）三ツ星ベルト製のシンクスターG 300-XL-037，タイミングプーリは同社製の36-XL-037を採用した。

中間軸の材質はS45C，直径25 mmである。攪拌軸はSU S27，直径25 mmであり，2個のベアリングにより固定し横振れを押さえている。

### (3) 計測システム

Fig. 7に本研究で使用する計測システムの全体構成を示す。使用するL D VシステムはT S I社製の2カラー4ビーム後方散乱型2次元流速計システム90-3であり，Spectra Physica社製の4Wアルゴンイオンレーザを使用している。ファイバー式プローブは焦点距離350 mm，ビーム交差角3.95°，測定部長さ1.3 mmであり，

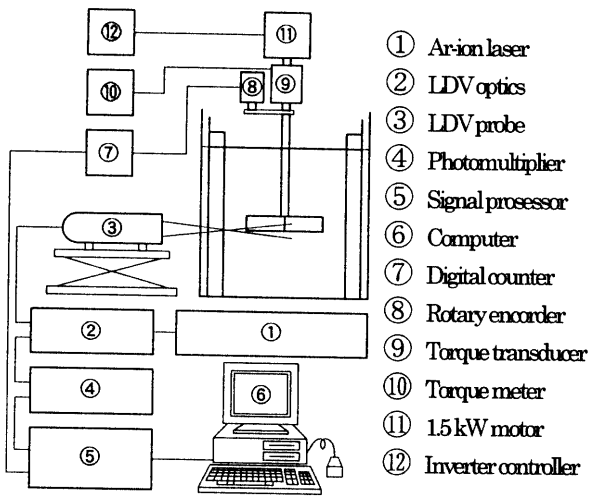


Fig 7 Measuring system

3次元移動可能な手動式トラバース装置に固定する。このプローブは周方向、軸方向の流速は水平に固定して槽の前方から計測し、他方半径方向の流速は鉛直上向きに固定し槽の下方から計測する。

LDVの信号処理器IFA-750はデジタル自己相関方式を採用している。同期計測を行う場合にはカウンターの信号をインタフェイスを介し信号処理器のリセット信号として入力される。取得したデータは最終的にパソコンに取り込まれ、必要とする出力に応じて統計処理が行われる。

(4) 基本性能

装置を運転する際、計測に支障を与えるほどの振動は発生しなかった。また、攪拌軸は翼取り付け位置において、定常回転時(100rpm)では0.1 mm程度の振れに押さえることができた。

攪拌翼の回転は、60~150 rpmの範囲で安定していることを確認した。また、液面部の境界板を取り除いた場合、130rpm以上で定常的に液面から気泡を巻き込む。このためトルク値の変動は、境界板がある場合に比べ大きいことがわかった。そこで本研究では100~120rpmの範囲を計測時の回転数として決定した。

4. 計測例

本章では、製作した装置を使用して目的のデータが得られるかどうかを検討した。計測はFig 8に示すような機器の配置に対して、槽を回転させることによりバツフルとの相対位置を変えて計測を行う。

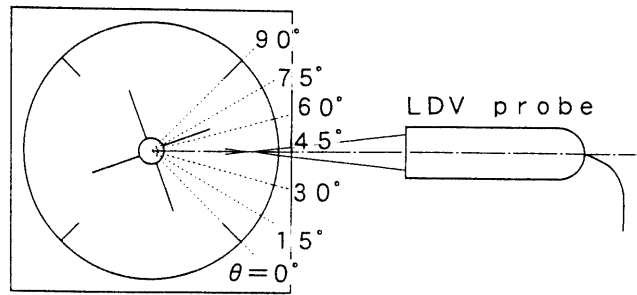


Fig 8 Measuring points.

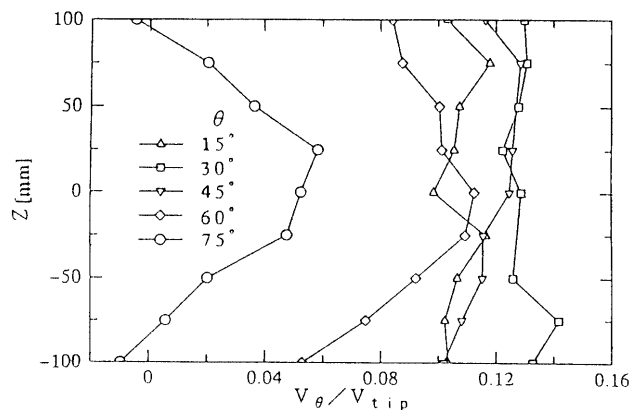


Fig 9 Mean tangential velocity profile.

(1) 速度分布

Fig 9に槽壁面近傍における周方向流速の計測結果を示す。翼回転数は100 rpmである。半径方向 $r/R=0.90$  ( $R$ ; 槽の半径),  $-100 \text{ mm} \leq z \leq 100 \text{ mm}$ の範囲を25 mmきざみ、バツフル間隔 $90^\circ$ を $15^\circ$ きざみに計測を行ったものである。データレートは約1 kHzで、1点の計測あたり5万点のデータを採取し、平均速度及び変動速度のrms値を求めた。示した図は翼先端速度 $V_{tip}$  (1.28 m/s)で無次元化している。図より $\theta=75^\circ$ ではバツフルの影響により速度分布が特異になっていることがわかる。

(2) エネルギースペクトル

翼先端 ( $r/R=0.51, \theta=45^\circ, z=0$ ) において周方向速度を計測し、その速度信号からエネルギースペクトルを求めた。結果をFig 10に示す。翼の通過周期 (6.7 Hz), 第1高調波 (13.3 Hz), 第2高調波 (20 Hz) においてピークをとっている。これより、本処理法が妥当であるものと判断した。

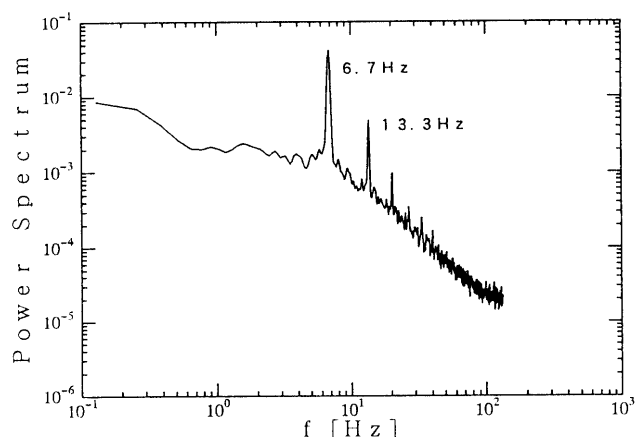


Fig 10 Power spectrum near impeller tip.

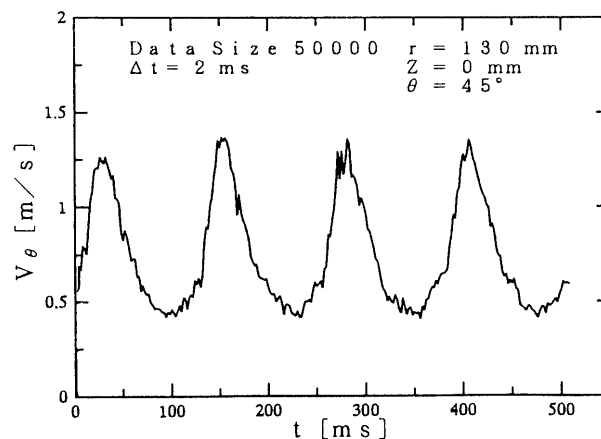


Fig 11 Periodic averaged mean velocity.

### (3) 同期計測

Fig 11は、翼を120 rpmで回転させたとき、1回転360°毎にリセット信号（1周期あたり500 ms）を出して5万点を採取し、周期平均をとった結果である。本結果をみると、翼の回転に対して周期性を持った速度分布が得られ、設計どおり同期計測が可能であることを確認した。

### 5. 結言

攪拌槽内の流速／乱流量を計測するため、低粘度系攪拌装置を製作した。また、同期計測を含めた計測システムの処理テストを行った。これより本装置および計測システムが設計通りに動作することを確認した。

今後は本装置を使用して、バッフルの流体力学的役割を解明していく。

### 参考文献

- 1) Nagata, S.: Mixing, Principles and Application, Kodansha, 1975
- 2) Yianneskis, M., Popiolek, Z. and Whitelaw, J. H.: An experimental study of the steady and unsteady flow characteristics of stirred reactors, J. Fluid Mech. 175, pp. 537-555, 1987
- 3) Stoots, C. M and Calabrese, R. V.: Mean velocity field relative to a Rushton turbine blade, AIChE J., 41, pp. 1-11, 1995

(1996. 10. 15 受理)

## A BAFFLED MIXING VESSEL FOR MEASURING THE TURBULENT FLOW BEHAVIOR

Kazumi SUZUKAWA, Takeharu HASHIMOTO and Hideo OSAKA

A mixing vessel has been developed to study the turbulent flow behavior using laser doppler velocimetry. Cylindrical tank with flat bottom and four vertical baffles were used, giving water volumes of about 100 l, for a height of liquid equal to the tank diameter. The impeller was located at the midheight of the water level in the tank. Fundamental characteristics, such as mean velocities near the cylindrical tank side wall, and energy spectrum of velocity near the impeller, were measured. Conditional sampling techniques for velocity signal were also applied.