

# 352-20095482 粒子法を用いた流体攪拌における抵抗値の予測\*

武藤 一夫<sup>1)</sup>, 酒井 勇<sup>2)</sup>, 尾崎 直人<sup>3)</sup>

Kazuo Muto, Isamu Sakai, Naoto Ozaki

We carried out transient analysis of stirred fluid flow with rotating gear using the particle method (MPS method). The particle method is widely used as an effective technique for free surface flow and also easy to treat the moving boundary. In this research, we focused on the fluid resistance of gear and verified the correspondence with the experiments with two types of gear and two types of rotational rate. As a result, we found that the simulation value of stirring torque was consistent with experimental value in case of low rotational rate.

Key Words: CFD / Gear Box, Fluid Resistance, Particle Method ⑮

## 1. 概 要

ギヤボックス内のオイルは構造物の潤滑と冷却という重要な役割を果たす一方、流体抵抗によってトルク損失を発生させる原因となるため、使用するオイルの量や性質、ケーシング内壁の形状の選択には慎重が必要である<sup>(1)</sup>。ケースやギヤの形状が決まっている場合でも、与えられた形状に対して最適な油面高さ、あるいはオイルの物性値を決定することが課題になってくるが、その過程には速度や傾斜、環境温度など走行条件が異なる複数のパターンでの試行を必要とする。

以上のような場合、数値解析によって定性的・定量的にオイルの挙動が予測できれば設計コストの大幅な削減につながると考えられるが、そのためには解析の妥当性を検証することが必要不可欠である。

そこで今回、オイルのかき上げ現象において、解析による予測がどこまで可能かを明らかにすること目的とし、ギヤボックスを模擬した簡易的なモデル(impeller モデル, gear モデル)を用いて実験と解析をおこなった。本論文では特に、ギヤに及ぶ攪拌抵抗に注目し、解析上で算出したトルク値と実験でトルク計によって得られたトルク値との比較をおこなった。比較の結果は4章で報告する。

## 2. 実 験

実験に用いた装置は円筒形の亚克力ケース内にアルミ製のギヤを一つ配置した簡易的なものである。ギヤ、トルク計、モーターが軸を通して直結しており、モーター駆動によりギヤが回転し、トルク計によってオイル攪拌時のトルク値をリアルタイムで出力する仕組みになっている(Fig. 1)。ギヤの形

状は板状の八枚羽がついた“impeller”モデルとらせん状の溝が彫られた“gear”モデルの二種類について検証した。回転数については100[rpm]と1000[rpm]の二段階について検証した。

オイルには市販のデフオイルを用いた。30℃におけるオイルの物性は以下の通りである。

密度: 0.739 [g/cm<sup>3</sup>]

動粘度: 450.5 [cSt] ※ at 30℃

動粘度については、本装置で実際に攪拌したオイルに対して粘度計を用いて測定した。実験では油の温度は時間とともに上昇するが、解析値との比較のため、トルク値を読み取るタイミングは油の温度が30℃に達した時点から数秒の間とした。

以下、実験によるトルク値としては生の測定値からオイルのない空回しでのトルク値を差し引いたものを用いる。

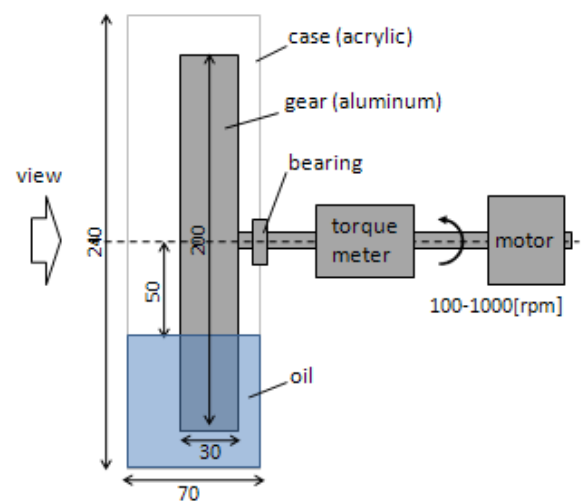


Fig. 1 Experimental setup.

\*2009年5月22日 自動車技術会春季学術講演会において発表。

1) 静岡理工大学 (〒437-8555 静岡県袋井市豊沢2-2-0-2, [kmuto@me.sist.ac.jp](mailto:kmuto@me.sist.ac.jp)) . 2) 3) (株)富士テクニカルリサーチ (〒220-6219 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-5 クイーンズタワーC19階, [is\\_sakai@ftr.co.jp](mailto:is_sakai@ftr.co.jp)) .

### 3. 数値解析

今回のケースのように液面が大変形するような流体の解析には粒子法を用いるのが有効である。粒子法は数値解析における空間の離散化手法の一つであり、液体などの連続体は粒子の集まりとして表現される。個々の粒子は圧力や速度などの物理量を変数にもち、一定の質量を保持したまま流れに沿って移動する。計算メッシュを用いないため自由表面や移動する境界が扱いやすいという利点がある。本解析では、粒子法の一種である MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法<sup>(2)</sup>を用いた。

#### 3.1. MPS 法の概要

MPS 法は主に非圧縮流体を対象とし、時間積分に半陰的アルゴリズムを用いるという特徴がある。計算の 1 step は大まかに以下の 3 つのフェーズに分けられる。

- i. 陽的計算による粒子座標の更新
- ii. 陰的計算による圧力値の算出
- iii. 圧力勾配による粒子座標の更新

i の段階では重力と粘性力に従って、粒子の仮の座標を陽的に算出する。壁を移動させる場合、壁の位置の更新はこの段階の最後に行う。ii の段階では非圧縮条件に基づき圧力の Poisson 方程式を構成し、それを解くことで各粒子の圧力値を求める。iii の段階では圧力勾配に従って粒子の座標を修正し最終的な粒子配置を決定する。

i と iii の段階では粒子間にはたらく粘性力と圧力勾配を計算する必要がある。それらの計算には MPS 法の粒子間相互作用モデルを用いる<sup>(2)</sup>。このときある粒子に作用する力は、その粒子から一定の範囲（影響半径）内に存在する粒子との相互作用を重み付けで足し合わせたものに等しい。影響半径の外にある粒子とは相互作用しない。

#### 3.1. トルク算出の概要

固定した軸周りに回転する物体が流体を攪拌している状況において、物体の回転に要するトルク  $\tau$  は次のように書ける。

$$\tau = \tau_{press} + \tau_{viscosity} + \tau_{inertia}$$

ここで  $\tau_{press}$ ,  $\tau_{viscosity}$ ,  $\tau_{inertia}$  はそれぞれ圧力、粘性、慣性によるトルクへの寄与である。

慣性によるトルク  $\tau_{inertia}$  は一般に無視できない値をとるが、今回興味があるのは軸対象モデルの定常回転時のトルク値であるため、

$$\tau_{inertia} = 0$$

とし、トルクの計算にははじめから考慮しないものとした。

圧力、粘性によるトルク  $\tau_x$  ( $x = press, viscosity$ ) は、壁としてみなされた回転体が、流体粒子に与えた力の反作用として次のように算出する。

$$\tau_x = -\Sigma \{ \mathbf{b} \cdot (\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{x_i}) \}$$

添え字  $i$  は壁と相互作用する流体粒子の index を表す。 $\Sigma$  は  $i$  について和をとることを意味する。 $\mathbf{b}$  は回転軸方向の単位ベクトル、 $\mathbf{r}_i$  は回転軸上の一点と、粒子  $i$  と相互作用した壁上の一点を結ぶベクトル、 $\mathbf{F}_{x_i}$  は壁が粒子  $i$  に与えた力を表す。 $\tau_{press}$  については 3.1 節で説明した MPS 法の計算段階の iii での計算結果を用いる。すなわち

$$\mathbf{F}_{press_i} = m_i \times \mathbf{a}_i$$

とする。ここで  $m_i$  は粒子  $i$  の質量、 $\mathbf{a}_i$  は粒子  $i$  と壁の間の圧力勾配によって粒子が得た加速度である。 $\tau_{viscosity}$  については計算段階の  $i$  での計算結果を用いる。

壁がポリゴンの場合、粒子  $i$  と相互作用するのは最近接のポリゴンのみとし、作用点は粒子  $i$  の座標をポリゴン上に射影した位置にあるとする (Fig. 2)。流体粒子とポリゴンとの相互作用には、壁重み関数を用いた相互作用モデルを用いる<sup>(3)</sup>。壁重み関数はポリゴンが粒子に与える影響の強さを表し、ポリゴンから遠いほど小さくなり、一定距離を超えると 0 となるような関数である。したがってポリゴンとの相互作用を計算するのは、ポリゴンの近傍にある流体粒子のみでよい。

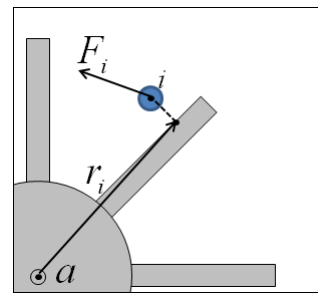


Fig. 2 Particle-Polygon interaction.

#### 3.2. 解析条件

解析ではオイルに粒子モデル、ケースとギヤにポリゴンモデルを用いた。ギヤの回転数は計算開始後 0.5[sec]まで直線的に増加させ、その後一定とした。壁面と流体の間には no-slip 条件を与えた。そのほか油面高さや物性値等の条件は実験と同様とした。

#### 4. 結 果

Fig. 3 (a)-(d) は実験と解析でのオイル挙動のスナップショットである。解析の画像は計算開始から2秒後のものであり、この時点までギヤが回った回数は(a), (c)で2回程度, (b), (d)で20回程度である。実験の画像はオイルの温度が30℃に達した時点のもので攪拌開始から数分経過している。攪拌したオイルには白濁がみられた。白濁したオイルは数分間放置しておけば元の透明な状態に回復するため、白濁は攪拌によって細かい気泡が混入した結果であると予想される。白濁状態とそうでない状態とで物性が若干異なったが、解析では白濁状態の物性値を用いた。

高回転のケースでは比較しにくいですが、底にたまったオイルの高さや形状が、実験と解析でよく一致していることが確認できる。一方実験で見られる、オイルの尾を引くような挙動やアクリルケースへの付着は解析では再現できていないことがわかる。

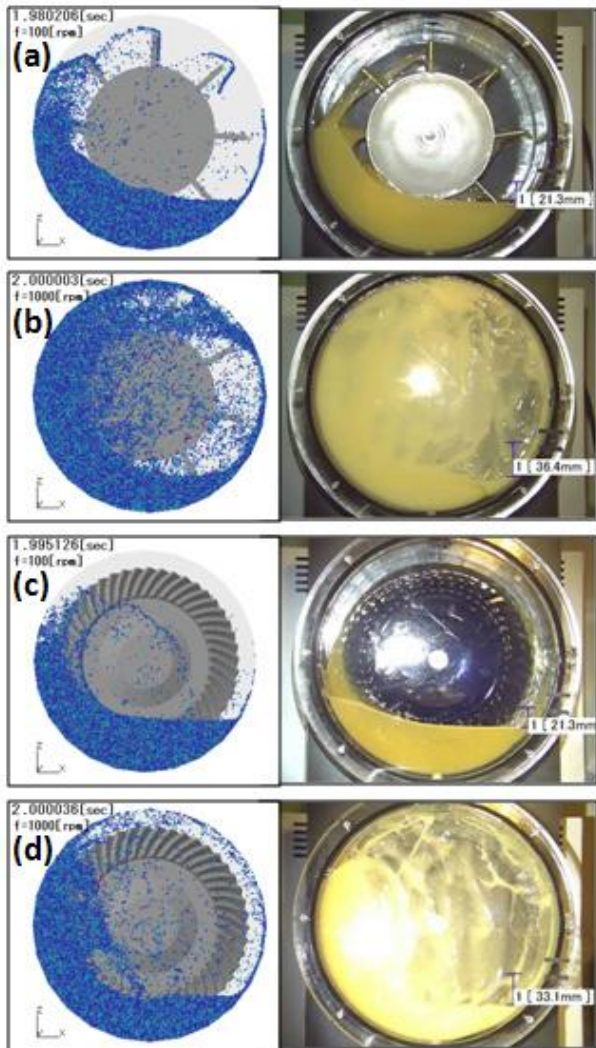


Fig. 3 Snap shot of oil motion (simulation and experiment).  
(a) impeller model at 100[rpm], (b) impeller model at 1000[rpm], (c) gear model at 100[rpm], (d) gear model at 1000[rpm].

Fig. 4 は解析でのトルク値の時間変化をプロットしたものである。データはgear モデルで1000[rpm]の解析のもの(Fig. 3 (d)に対応)である。初期段階において回転数の増加に伴いトルク値が上昇しているが、回転数が一定となる0.5秒以降は傾向が変わらないことが確認できる。1.5~2.0秒間での解析でのトルク値の平均は0.158[N・m]、ばらつきは0.02[N・m]程度であった。比較のため図中に実験値を示した。ただし実験値はデジタル値を目視で記録したものであるため、平均値とその周りでのばらつきの幅のみを示した。実験でのトルク値の平均は本ケース (gear model, 1000[rpm]) では0.18±0.02[N・m]であった。

Table. 1 は今回、実験と解析を行った全ケースのトルク値の結果である。解析値は1.5~2.0秒の平均とした。抵抗値はgear モデルより impeller モデルのほうが、回転数は100[rpm]より1000[rpm]のほうが大きいことが実験と解析の両者において確認できる。実験値と解析値のずれは、高回転ほど大きくなった。特に impeller モデルではその傾向が顕著であり、ずれの絶対値としても大きかった。

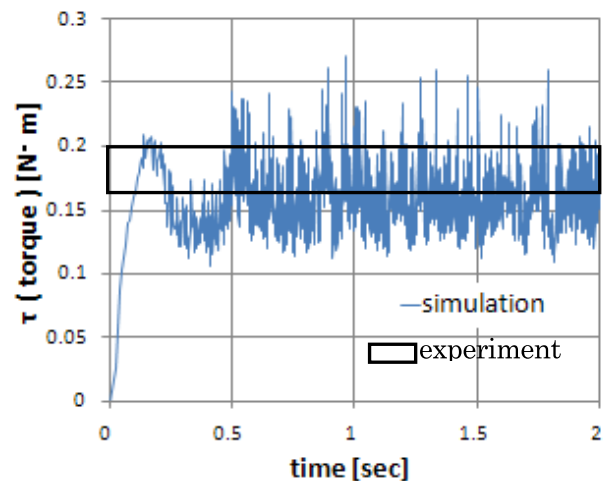


Fig. 4 Time change of fluid resistance by simulation ( gear model at 1000 [rpm] ).

Table. 1 Torque value.

“case” a-d correspond to (a)-(d) in Fig. 3. “ $\tau_{exp}$ ” and “ $\tau_{sim}$ ” mean simulation value and experimental value respectively. “error” is given by  $100 * (\tau_{sim} - \tau_{exp}) / \tau_{exp}$ .

case	model	rate [rpm]	$\tau_{exp}$ [N・m]	$\tau_{sim}$ [N・m]	error [%]
a	impeller	100	0.095	0.079	-17
b	impeller	1000	0.215	0.378	76
c	gear	100	0.075	0.072	-4.6
d	gear	1000	0.180	0.158	-12

## 5. 考 察

Fig. 5 に case a(100[rpm]) と case b(1000[rpm]) の圧力分布の様子を示す。流体内部の圧力を見るため中心部分でカット表示してある。表示の圧力は相対圧力でありコンターの範囲は0~0.5[kPa]である。羽の進行方向側の流体に注目すると、case a では羽近傍から自由表面にかけて圧力値が滑らかに分布しているのに対し case b では分布が一部に局在し、その周囲で振動しているのがわかる。時間的にみても case a では常時安定した分布を示すが、case b では振動することが確認できた。高回転時に圧力が振動するという傾向は case c と case d との間にも見られた。圧力の振動はトルク値の変化にも影響し、Fig. 4 に見られるようなデータのばらつきはその結果である。Fig. 6 に case a と case b の、圧力によるトルクと粘性によるトルクの割合を示す。縦軸は1.5-2.0[sec]間の全トルク値の平均でスケールしてある。これより圧力によるトルクのばらつきは高回転ほど大きいことがわかる。トルク値の標準偏差は case b では case a の4倍以上となった。結果的にトルク値の誤差が大きくなる原因もこのような圧力振動の影響のためだと予想される。以上のような圧力の振動は非物理的なものであり数値計算に特有のものである。MPS法の圧力振動を抑える改良アルゴリズムも考案されている<sup>(4)(5)</sup>が、本解析では用いていない。

一方、粘性によるトルク値  $\tau_{viscosity}$  は回転数によらず安定した値を示した。case c, d において比較的よい精度でトルク値が得られたのは、gear モデルでは全トルク値  $\tau$  に対する  $\tau_{viscosity}$  の寄与が大きくなるためであると考えられる。全トルク値に対する  $\tau_{viscosity}$  の割合は case a では14%程度であったのに対し case c では58%に上った。

以上のことから case b においてトルク値の精度が最も悪くなったのは、ギヤの形状の特性上、全トルク値に占める圧力によるトルク値の割合が大きくなった上、高回転による数値的な振動がトルク値に影響したためと考えられる。

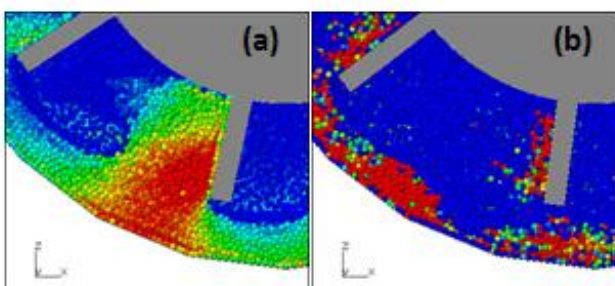


Fig. 5 Pressure distribution of fluid (sectional view).  
(a) 100 [rpm], (b) 1000 [rpm]

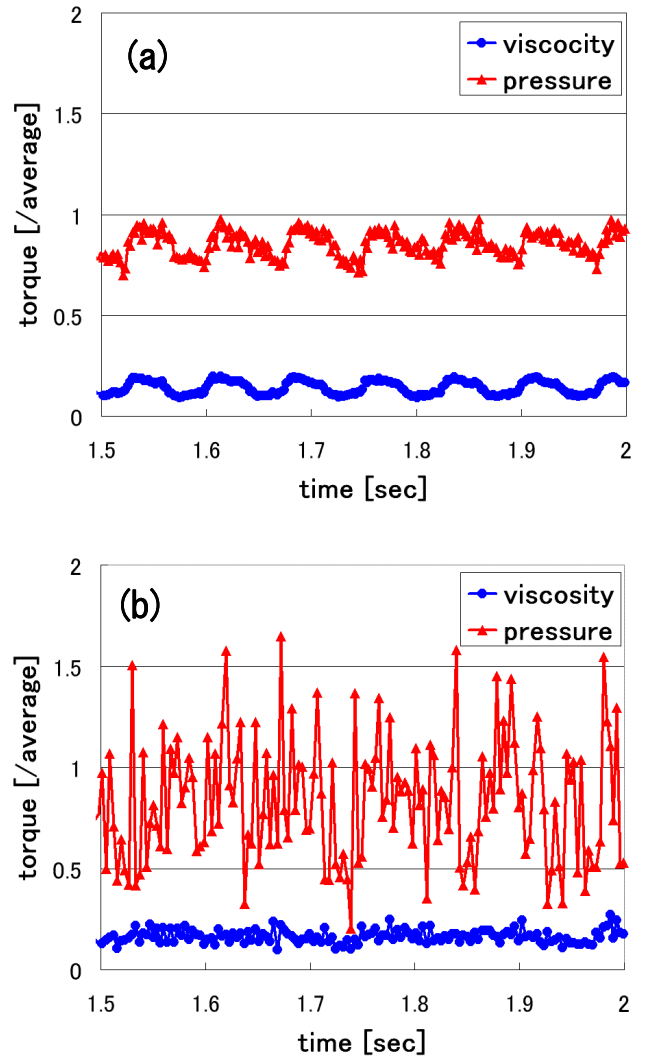


Fig. 6. Contribution of pressure-torque and viscosity-torque .  
(a) impeller, 100 [rpm], (b) impeller, 1000 [rpm]

## 6. 結 論

粒子法(MPS法)を用いた数値解析によって、簡易ギヤボックスモデルにおけるオイルの攪拌抵抗値の予測がある程度可能であることを示した。特に低回転時(100[rpm])では実験値にかなり近い結果が得られた。一方、高回転時(1000[rpm])では解析値と実験値の差が大きくなった。高回転時での精度の悪化は、解析において流体粒子の圧力値が時間・空間的に振動しデータのばらつきが大きくなってしまったことが原因の一つと考えられる。またギヤ壁面の法線が運動方向を向くような形状でも誤差が大きくなった。これは全流体抵抗の内、圧力勾配による影響が粘性力による影響よりも相対的に大きくなったためと考えられる。

以上より、MPS法を用いた流体攪拌における抵抗値の予測は1000[rpm]以上の高回転領域での精度向上が課題であり、そのためにはMPS法の圧力計算の安定化<sup>(4)(5)</sup>が今後の課題となってくるといえる。

#### 参 考 文 献

- (1) 自動車技術ハンドブック 4 設計(パワートレイン)編, 社団法人 自動車技術会(2005)
- (2) 越塚誠一: 粒子法, 丸善(2005)
- (3) T. Harada, et al.: MPS 法における壁境界モデルの改良, Transactions of JSCEs, No20080006, (2008)
- (4) M. Kondo, S. Koshizuka: MPS 法における不自然な数値振動の抑制, Transactions of JSCEs, No20080015, (2008)
- (5) M. Tanaka, T. Masunaga: 疑似圧縮性効果による MPS 法の安定化と圧力の平滑化, Transactions of JSCEs, No20080025, (2008)