

自動車用トランスミッション内部の潤滑性能予測技術

Technique for Prediction of Automotive Transmission Lubrication Performance

三 枝 大 城*
Daiki SAEGUSA

河 合 信 治*
Shinji KAWAI

要 旨

トランスミッション内部のオイル流れを高速かつ高精度に予測する技術を構築した。

本研究では有限差分法を用いて解析をおこなっており、壁境界に関しては、境界情報をセルに与え物体形状を再現する手法とした。これにより、オイルの流れを形成するギヤの回転やかみ合いを取り扱うことが容易となり、計算負荷も低減できた。

本解析技術をマニュアルトランスミッションに適用した結果、従来技術では約 26 日かかるオイル流れの計算を約 4 日に短縮でき、精度面においても実機の潤滑状態の予測が可能であることを確認した。

ABSTRACT

A technique was created for rapidly and accurately predicting oil flow within a transmission.

This research employs the finite difference method to perform analysis, and handles wall boundaries by the method of assigning boundary information to cells and reproducing the object shape. This enabled the gear rotation and engagement that shape oil flows to be handled more readily, and also reduced the calculation cost.

This analytical technique was applied to a manual transmission, and the results show that the calculation of oil flows that takes approximately 26 days by the conventional technique was shortened to approximately four days. In terms of accuracy, it was further confirmed that the technique also enabled prediction of the state of lubrication in an actual transmission.

1. ま え が き

トランスミッションはエンジンより出力された動力を、最適な駆動力や回転数に変換し、ドライブシャフトに伝達する役割がある。その動力伝達経路となるギヤやベアリングなどの構成部品は、摩耗や発熱によって損傷あるいは劣化する。これらを抑制するために、運転中にはオイルを各部に確実に供給し続ける必要がある。一方で、潤滑性を向上させるためにオイルを増やすと、オイルのかくはんやせん断による抵抗トルクが増大し、この抵抗トルクは直接動力損失となり、自動車の燃費に影響する。そのため、トランスミッションの設計においてはハウジングの改良によるオイル流れの改善や、各ギヤ周りにパッフルを設けるなどにより、潤滑性と損失低減の両立がなされている。しかし、その効果を設計段階で確認するための技術は充分ではなく、開発担当者の経験や、耐久試験や流れの可視化試験などの試作物を製作してからの確認に頼っているのが実状で

ある。また、可視化試験においても、ハウジングの内壁に付着したオイルや部品に隠れ、内部の流れを十分に確認できないことが多い。

今日、開発期間の短縮や試作費用の低減、実機試験のみでは分析が難しい事象の把握など、さまざまな目的でシミュレーションが活用されている。トランスミッション内部のオイル流れについても同様であり、Computational Fluid Dynamics(CFD)を用いた流動現象の解析は徐々に一般的になりつつある。CFDには多様な手法が存在し、手法は用途によって選定されるが、トランスミッション内部全域における相反性能である潤滑性能と損失の予測を目的とした解析については、未だ課題も多く、手法が確立されていない。

トランスミッション内部において、オイルはギヤなどの複数の回転体によりかくはんされる。また、オイルと空気が混ざり合う非定常かつ複雑な流れとなり、計算量は膨大となる。さらに、微細な飛沫やギヤかみ合い部における急

*四輪 R&D センター

激な圧力変動もあり、液面の挙動を捉えることは難しい。

本稿では、このようなトランスミッション内部のオイル流れについて、実用的な計算時間内に潤滑状態を予測できる技術を構築したので報告する。

2. 研究のねらい

トランスミッション内部のオイル流れは、ギヤ回転などの物体の動きと、それにより誘起される流体の挙動の両方を再現できなければならない。CFDの代表的な手法として、有限体積法や有限要素法が挙げられる。これらの手法は、計算対象となる空間をメッシュに変換し、微小な流体要素として取扱い、流体の挙動を計算する。このとき、物体形状に沿うようにメッシュを生成するのが一般的である。また、気体と液体の両方を計算対象とするため、高回転時のオイル流れにおいて影響の大きい空気の巻込みを考慮した計算も可能である。しかし、トランスミッションでは、ギヤかみ合い部のような、計算中に刻々と変形する流体空間を取り扱う必要があるため、次に述べるような特別なアプローチが必要となる。物体の回転に伴い自動的に空間のメッシュを切りなおすダイナミックメッシュ⁽¹⁾、もしくは、回転軸を中心としたギヤ周りの空間を、円筒形の領域に分割し、その円筒領域を回転させることで、ギヤの運動を模擬するスライディングメッシュ⁽²⁾である。しかし、ダイナミックメッシュでは計算中にメッシュ品質を維持しつづけることが難しく、計算が不安定になりやすい。スライディングメッシュでは、回転メッシュ同士が干渉しないようにする必要があるため、ギヤのかみ合いが考慮できない。また、ダイナミックメッシュもスライディングメッシュも共通して、取り扱う部品点数が多い場合、メッシュの生成や、計算に対して膨大な時間を要する。

また一方では、オイルなどの液体を粒子に置き換えて計算する粒子法による解析⁽³⁾も注目されている。メッシュを用いた手法に対して、粒子化された液体のみを計算対象とするため、計算速度が速いというメリットがある。しかし、空気の巻込みや、負圧によるオイル流れへの影響を考慮することが難しいため、現状は、それらの影響の小さい低回転時のオイル流れに適用が限定される。

これらのことから、以下の項目を満足するトランスミッションの潤滑性能予測技術を構築することを、本研究のねらいとした。

- (1) かみ合い部を含めたギヤ回転の再現と、その動きにより形成されるオイル流れを計算し、各部の潤滑状態が予測できること
- (2) 開発において実用的に使える計算時間であること
- (3) 空気の巻込みや、負圧によるオイル流れへの影響を考慮できること

3. 解析対象および手法について

3.1. 解析対象

回転体によって誘起されるオイル流れを精度よく捉えているかを判断するために、油圧回路を含まない自動車用マニュアルトランスミッション (Fig. 1) を対象とした。

3.2. 計算手法

本研究では、空気の巻込みや、負圧によるオイル流れへの影響を考慮できるよう計算領域にメッシュを用いる手法である有限差分法をベースとした。そして、ギヤのかみ合いを扱う上での課題を克服するため、形状に沿って生成されたメッシュではなく、セル (メッシュにより区切られた各要素) に対してギヤの形状や運動状態の情報を組み込む手法を用いた (Fig. 2)⁽⁴⁾。ギヤの回転はセルの形状を変えずに、この情報を与え直すことで再現される。これにより、ダイナミックメッシュモデルで生じるようなメッシュ品質

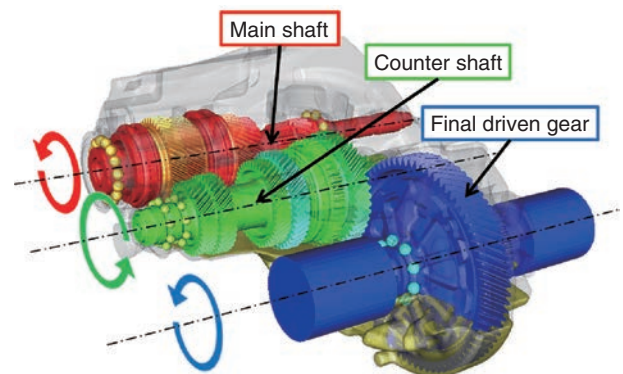


Fig. 1 Mechanical components of automotive manual transmission

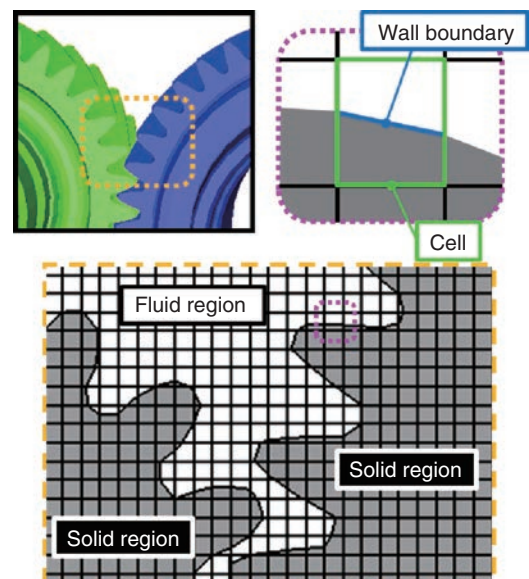


Fig. 2 Wall boundary treatment

の低下がなく、ギヤのかみ合いが再現できる。さらに、形状に沿ったメッシュを作成する必要があるため、計算時間とともに解析準備に要する時間も短縮できる。

また、液面の挙動については Volume of Fluid (VOF)⁽⁵⁾ を用いて計算した。

乱流モデルに関しては、オイルかくはんの様な非定常性の強い現象を精度よく捉えるのに適した Large Eddy Simulation (LES) を用いた⁽⁶⁾。

これらの手法を用いることにより、計算の高速化と精度の両立をはかっている。

4. 精度検証

4.1. 検証方法

本手法は、メッシュを形状に沿って作成する従来手法に比べ、物体形状の再現性は低下するため、計算精度への影響を確認する必要がある。そこで、以下のステップで本手法の確からしさを検証した。

Step 1. 単相流, 移動壁境界による流れ場の精度

Step 2. 混相流, 移動壁境界による流跡の精度

4.2. 単相流, 移動壁境界による流れ場の精度検証

流体中の回転体により形成される速度場が、精度よく解析できているかを確認するために、単相流での実験として粒子画像流速計 (Particle Image Velocimetry: PIV)^{(7), (8)} を用いて流速分布の実測をおこなった (Fig. 3)。測定対象は、円筒水槽内における Rushton turbine (Fig. 4) によるかくはん流とした。計測にあたり、2 台のカメラを使用したステレオ PIV を用いることで、レーザシート面に対し垂直成分の流速も計測可能としている。回転数は 375 rpm,

525 rpm, 750 rpm の 3 条件で計測をした。

試験結果と CFD の旋回方向流速成分の大きさの分布の比較を Fig. 5 に示す。色の表示は、流速を時間平均したものであり、赤は速く、青くなるほど遅い部位を表している。また、Fig. 6 は、径方向の流速を数値化して比較したもの

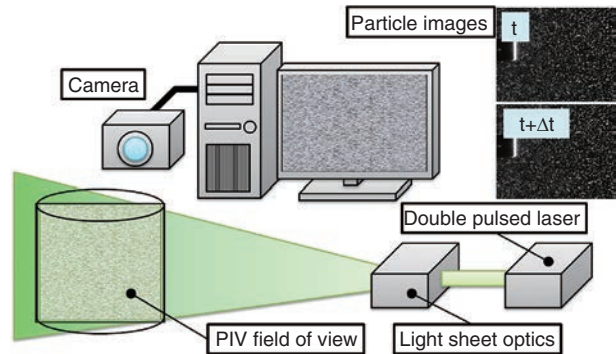


Fig. 3 PIV experiment system

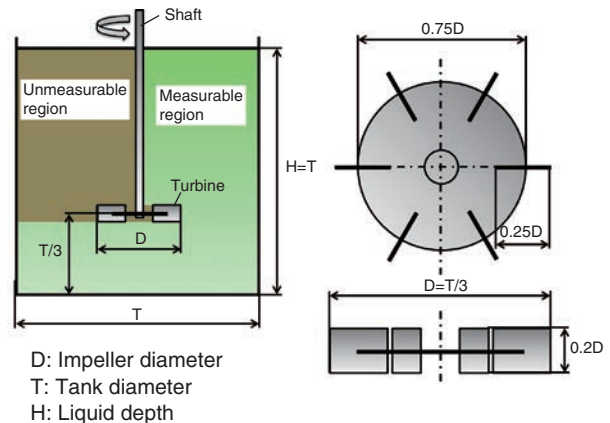


Fig. 4 Rushton turbine blade

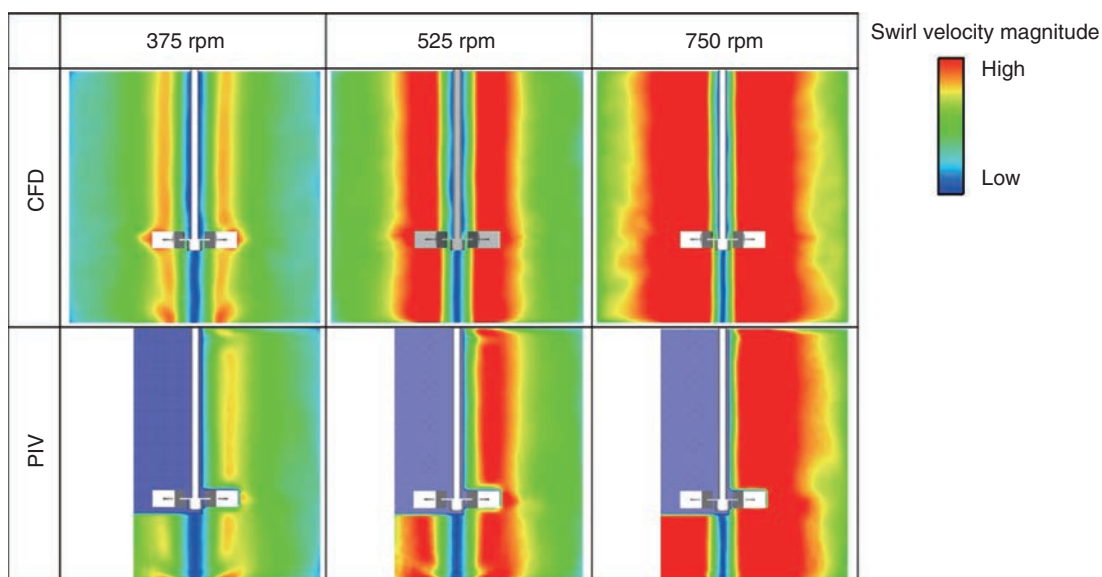


Fig. 5 Comparison of swirl velocity magnitude distribution between CFD and PIV experiment

である。回転数違いによる流速の変化、また、回転体から径方向に離れるのに従って流速が下がっていくのが定量的にも正しく捉えられていることがわかる。

4.3. 混相流，移動壁境界による流跡の精度検証

次に、本手法における気液二相流の再現性を確認するため、比較対象として、Fig. 7に示すような一對のギヤのみで構成されたギヤボックスを用いて、かくはん試験をおこなった。ハウジングは透明なアクリル樹脂で製作し、ギヤ回転によるオイルの軌跡を可視確認できるようにしている。

試験結果とCFDの軌跡の比較をFig. 8に示す。回転数条件は、200 rpm、400 rpm、800 rpmとし、回転数違いによるオイルの軌跡について再現性を検証した。

まず、200 rpmにおいて、Wheelにより持ち上げられたオイルの軌跡が良く一致している。400 rpmにおいては、Wheelに飛ばされたオイルの主流から一部が分離し、Pinionに接触している様子も一致した。また、800 rpmではギヤ回転方向成分の流速が増加し、外周部にオイルが押し付けられており、オイル溜まりにおける液面の様子も一致している。400 rpmにてPinionに接触していなかった液面が、800 rpmにて接触するようになっており、どの回転数に対しても、液面の挙動はよく一致した。

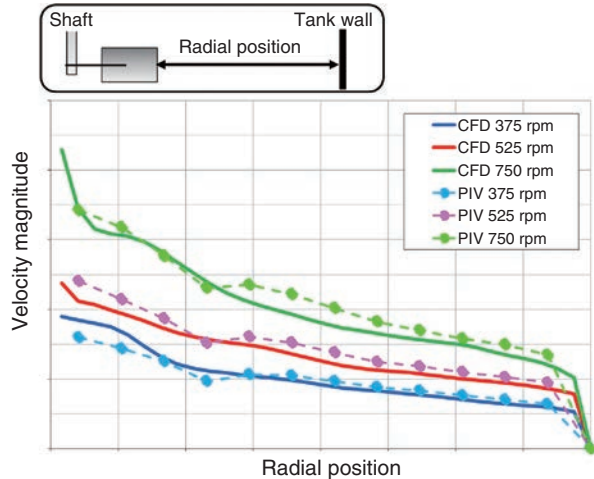


Fig. 6 Comparison of velocity magnitude distribution of radial position between CFD and PIV experiment

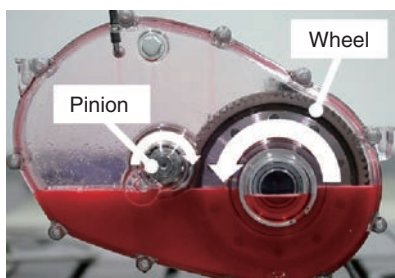


Fig. 7 PIV experiment system

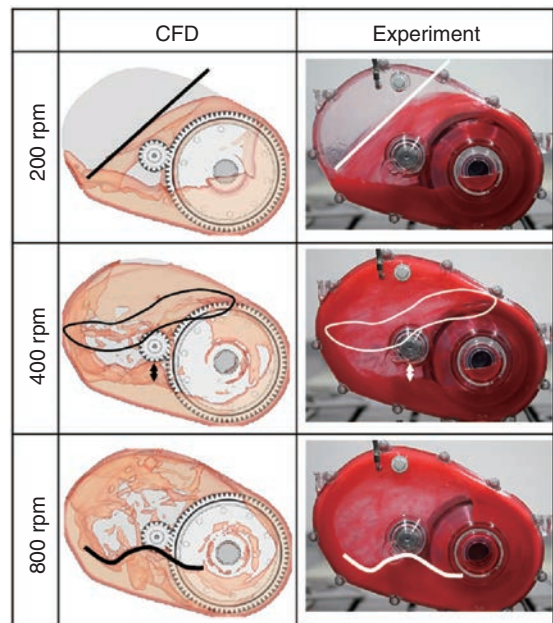


Fig. 8 Comparison of oil trajectory between CFD and experiment

5. 自動車用トランスミッションへの適用

本手法により自動車用マニュアルトランスミッション内部のオイル流れを解析し、アクリルケースを用いた可視化試験で撮影したものと、流れの特徴を比較した。ギヤの回転数は、車速として15 km/h、30 km/h、60 km/hの3条件で評価した。

CFDによる解析結果と、可視化試験で確認したオイル流れの車速ごとの比較をFig. 9, Fig. 10に示す。トランス

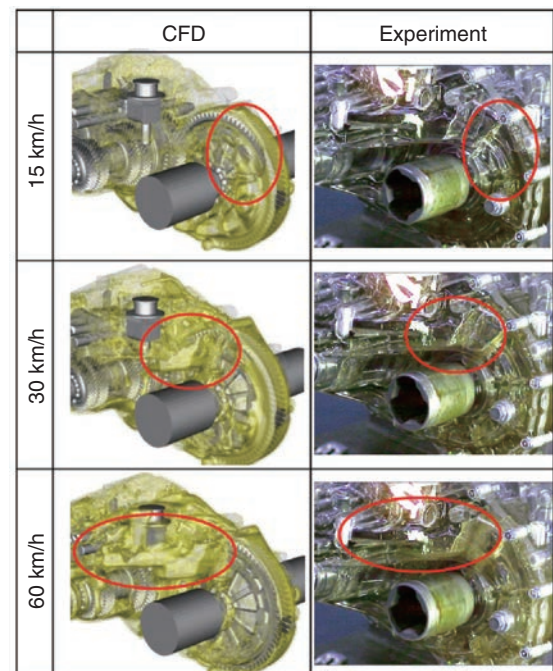


Fig. 9 Comparison of oil trajectory between CFD and experiment: rear view

ミッション内部流れにおいて、流れに影響を与える重要な要素は、ギヤである。とりわけ、ファイナルドリブンギヤは、外径が大きく、最も低い位置にあり、オイル流れに対し最も影響が強いため、この近傍の流れに着目する。車速別の特徴として、まず、15 km/h では、ギヤ近傍のオイルは、Fig. 11 における赤点線で示すラインの高さまでしか持ち上がらない。30 km/h になると、ギヤ上部まで持ち上げられたオイルがケース内壁に設けられた溝を通り、ファイナルドリブンギヤを支持する両端のベアリングに供給されていることがわかる。60 km/h においては、かくはんにより運ばれるオイル量が増し、ハウジング上部でみられる飛沫や壁面に付着するオイル量が増加している。

前述の流れの特徴は、解析結果においても同様にみられ、本手法は車速変化に伴う流動性の変化を捉えている。

また、流れの状況を別の視点から確認すると、車速の増加に応じて、壁面に付着するオイルの量が増えていくの

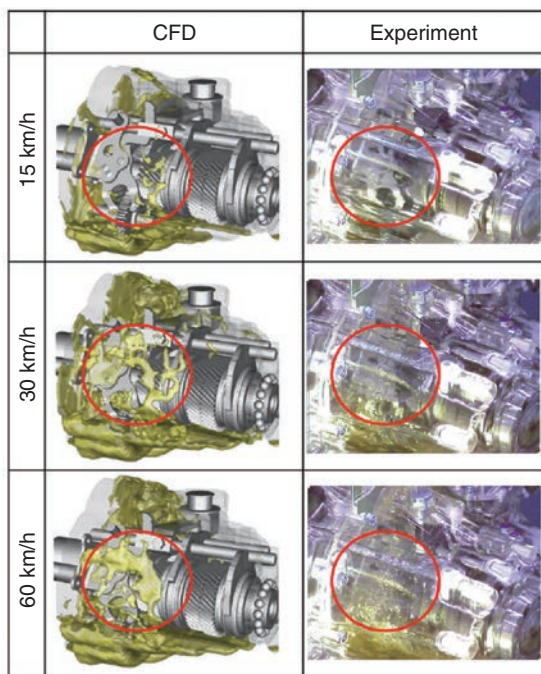


Fig. 10 Comparison of oil trajectory between CFD and experiment: front view

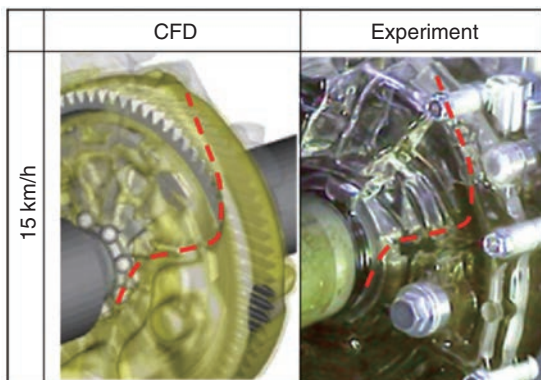


Fig. 11 Comparison of oil trajectory between CFD and experiment: detailed view at 15 km/h

が、試験結果と解析結果の両方で確認できた。

以上の結果から、本手法によるオイル流れは、試験結果をよく再現できており、設計段階において、オイル流れを検討するのに有効であることがわかる。

計算時間については、30 km/h の解析を例にとると、準定常状態となる 3.0 sec までの解析に要する時間は 3.57 days (12 CPUs を用いた並列計算による) であり、同等の解析を従来技術で実施した場合の約 1/7 にすることができた (Fig. 12)。これは、設計検討段階での潤滑性能を予測する上で実用的な計算時間である。

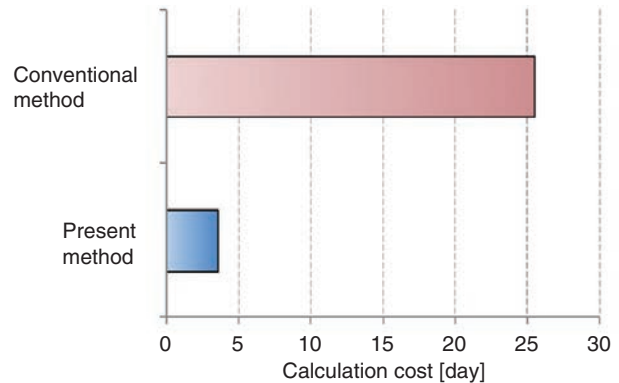


Fig. 12 Comparison of calculation cost between conventional method and present method

6. まとめ

トランスミッション内部のオイル流れを高速かつ高精度に予測する技術を構築した。

本技術は、空気の巻込みや負圧を考慮できるよう計算領域にメッシュを用いることを前提とし、離散化手法として有限差分法を使用した。物体の形状や運動状態については、セルに情報を組み込む手法とした。これにより、オイルの流れを形成するギヤの回転やかみ合い部を取り扱うことが容易となり、計算負荷も低減できた。また、液面の挙動を精度良く捉えるために VOF 法を用い、乱流モデルとしては LES を採用することで精度を高めた。

また、自動車用マニュアルトランスミッション内部のオイル流れに対して本技術を適用した結果、潤滑性能について高い実機相関を持つ予測結果を得ることができた。また、計算時間についても、設計検討段階において実用的な計算時間で結果が得られるまでに短縮できた。

参考文献

- (1) Li, L., Versteeg, H., Hargrave, G., Potter, T., Halse, C.: Numerical Investigation on Fluid Flow of Gear Lubrication, SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol. 1, Issue 1, p. 1056-1062(2009)

- (2) Moshhammer, T., Mayr, F., Kargl, K., Honeger, C.:
Simulation of Oil Flow in Gear Box Housing, SAE
Technical Paper, 2006-01-1574(2006)
- (3) 武藤一夫, 酒井勇, 尾崎直人: 粒子法を用いた流体攪
拌における抵抗値の予測, 自動車技術会春季学術講演
会, 352-20095482(2009)
- (4) Hirt, C. W., Sicilian, J. M.: A Porosity Technique
for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell
Meshes, International Conference on Numerical Ship
Hydrodynamics, 4th, p. 450-468(1985)
- (5) Hirt, C. W., Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF)
Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal
of Computational Physics, Vol. 39, p.201-225(1981)
- (6) Derksen, J., Van den Akker, H. E. A.: Large Eddy
Simulations on the Flow Driven by a Rushton
Turbine, AIChE Journal, Vol. 45, No. 2, p.209-
221(1999)
- (7) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版,
328.p(2002)
- (8) 西野耕一: 複雑乱流の全場計測—乱流モデル計算との
比較に向けて—, 最近の化学工学 57「粒子・流体解析,
数値シミュレーションの展望と実践事例」化学工学会
編, p.24-36(2007)

■ 著 者 ■



三枝大城



河合信治