

# D 機構と粒子法の連成解析と実験による流体挙動の可視化

近年、自動車や建設機械などの輸送機では、ハイブリッド化や電動化によるメカトロ化が急速に進んでいるが、動作の精度、乗り心地、操縦安定性、操作性、省エネルギーなどに多岐に亘って動的問題が存在する。そのひとつに、構造・機構系は流体、電気、制御など様々な要素が複雑に絡んでおり、これらの動的問題は構造・機構系、流体系、電気・制御系単独の特性で決まるのではなく、連成した問題であることが挙げられる。

最近では、自動車、建設機械やロボットに代表される多くの物体から構成される機械システムの運動を扱うマルチボディダイナミクスの研究が盛んに行われており、設計段階で動的問題の解決に寄与している。さらに、コンピュータの性能向上に伴い、これらの機械システムの運動と粒子法による流体挙動の連成問題にも対応できるようになっている。

当社ではマルチボディダイナミクスに関する数値解析手法や熱流体の可視化実験技術の研究・開発に長年に渡って携っており、多くの数値シミュレーション、可視化実験を行っている。本稿では、流体挙動の可視化について、機構と粒子法の連成解析による数値シミュレーションと実験の両面からアプローチした事例を紹介する。



技術本部 計算科学センター 中山 彰  
技術本部 計算科学センター 小島 俊介

機構解析では、部品の位置・速度・加速度といった運動情報、ジョイント反力やばね力といった内力・外力が算出される。一方、流体解析では、定義された境界内での流体挙動が計算され、流速や圧力によって境界面にかかる流体力が算出される。それぞれの解析結果から、連成解析では、(a) 流体解析結果から機構解析へは流体力を外力として提供し、(b) 機構解析結果から流体解析へは境界移動を提供する。この(a)と(b)によって機構と流体の相互作用を求めることができる。

自動車などのパワートレインは燃費向上のため、ギヤや軸受でのフリクション低減の課題がある。そのため、ギヤ回転によるオイル流れや表面に形成される油膜、キャビテーションの発生など、摺動部品まわりのオイルの挙動を調べることは省エネルギーの観点から重要である。次章以降には、機構と粒子法の連成解析の適用事例として「ギヤのオイルかき上げ-液滴評価」、「ローラチェーンのオイルかき上げ-揺動評価」について述べる。

## D-2 ギヤのオイルかき上げ — 液滴評価

### 2.1 液滴可視化計測<sup>5)</sup>

基礎的な形状での連成解析結果と計測結果を比較するために、ギヤ単体でかき上げられたオイルの液滴挙動を比較した。

可視化計測を行った装置の外観を第2図に示す。駆動用モータによって可視化タンク内にあるギヤを回転させ、高速度カメラで撮影し、かき上げられたオイル液滴の飛散挙動を可視化した。計測条件は、第1表に示す。計測の項目は、高速度カメラによるオイルの液滴飛散状況の取得、および粒子画像流速測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)によるオイル飛散速度の計測とした。

第2表、第3図に高速度カメラによるオイル可視化計測結果を示す。ギヤによってかき上げられたオイルは、回転速度700rpmで

はギヤ近傍で液膜状に広がり、歯先から液糸(繊維)状態となって放射状に飛散し、さらに、液糸状態から液滴となって飛散している。一方、回転速度が2倍の1400rpmは、700rpmとほぼ同様な飛散であったが、飛散するオイル量、距離は増加している様子がわかる。

### 2.2 機構解析と流体解析粒子法の連成解析

次に、同様のオイルの液滴可視化を数値解析により検討した。解析には、ギヤなどの構造部分は機構解析ソフトウェアRecurDynを、オイルは粒子法(MPS法)流体解析ソフトウェアParticleworksを使用した。

第4図に連成解析結果の粒子速度分布を示す。回転速度700rpmでは粒子速度が速度レンジの中間レベル(緑色)であり、回転速度1400rpmでは粒子速度が速い状態(赤色)を示しており、回転速度に伴って粒子速度が変化していることがわかる。また、オイルの飛散状況は、ギヤの歯先から液糸状態となって放射状に飛散した後に液滴となるので、計測結果と同様のオイルの液滴挙動が得られた。

## D-1 機構解析と流体解析粒子法(MPS法)の連成解析

ここでは、機構解析と流体解析粒子法との連成解析の理論について説明する<sup>1)</sup>。

機構解析は、複数の部品で構成されている機械システムの、時間領域での運動を計算するためのツールであり、アセンブリを構成する部品間に機構や力を定義し、その自由度にしたがってモデルを連動させて、部品間に作用する反力などの力学計算をする<sup>2) 3)</sup>。

計算する基本式は、ニュートンの運動方程式(式(1))と拘束の式となっている。

・ニュートンの運動方程式(振動方程式)

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = P(t) \quad (1)-1$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}(-ky - cv + f) \quad (1)-2$$

ここで、 $\frac{dv}{dt}$ は速度の変化量を表し、 $m$ :質量、 $k$ :ばね定数、 $y$ :変位量、 $c$ :粘性減衰定数、 $v$ :速度、 $f$ :外力である。

一方、流体解析粒子法(以下、MPS法と記述する(MPS: Moving Particle Simulation))は、流体を粒子の集まりとして表現し、各粒子は速度や圧力といった変数を保持しながら移動する。この粒子の移動により、自由表面や飛沫などを伴う液体の挙動を解析する<sup>4)</sup>。

MPS法の基本式は、ナビエ・ストークス方程式(式(2))と連続の式となっている。

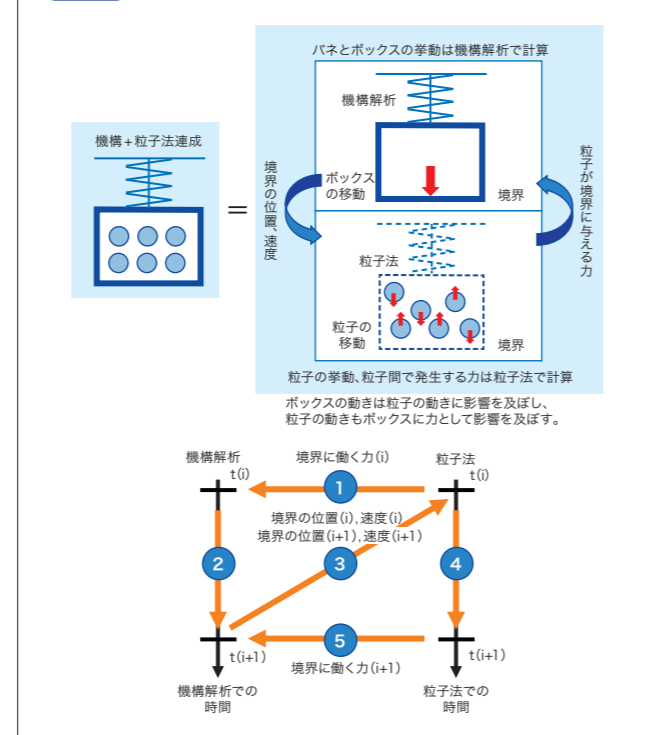
・ナビエ・ストークスの方程式(流体の運動方程式)

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2 u + g \quad (2)$$

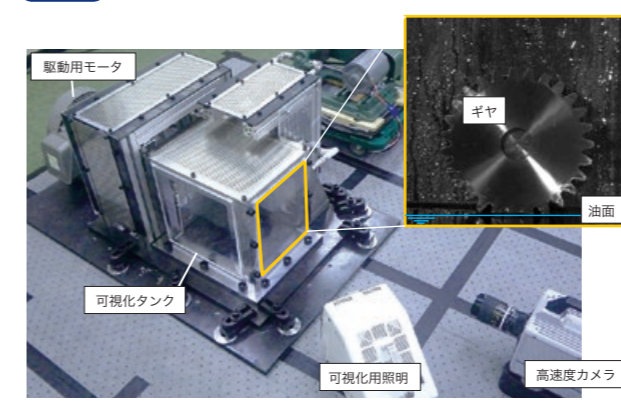
ここで、 $\frac{Du}{Dt}$ は速度の変化量を表し、 $\rho$ :密度、 $u$ :速度、 $P$ :圧力、 $\nu$ :動粘性係数、 $g$ :重力である。

(1)-2と(2)を比較すると、解析の分野は異なるが両方程式は似た形であるので連成しやすいことがわかる。これら2つの連成解析の概要を第1図に示す。

第1図 機構解析と流体解析粒子法(MPS法)の連成解析の概要



第2図 計測装置外観



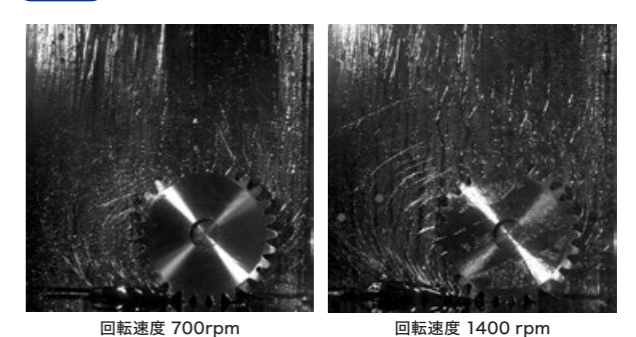
第1表 ギヤの仕様

回転速度	700rpm、1400rpm
ギヤ条件 直径	90mm
種類	平歯車
油面高さ	ギヤ一歯が浸漬する程度

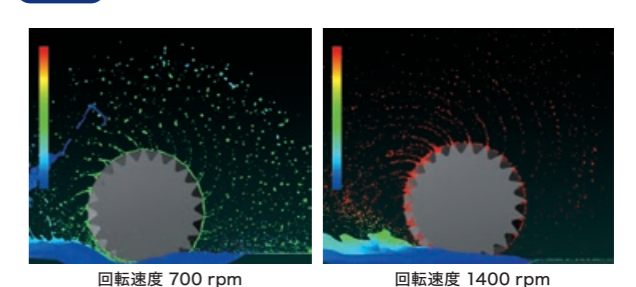
第2表 計測結果

回転速度	オイル状況
700rpm	ギヤ近傍で液膜状に広がり、全ての歯先から液糸(繊維)状態となって放射状に飛散。さらに、ギヤから離れると液糸状態から徐々に液滴へ変化。
1400rpm	700rpmとほぼ同じ飛散状態。飛散するオイル量、距離は増加。

第3図 高速度カメラによるオイル可視化計測結果

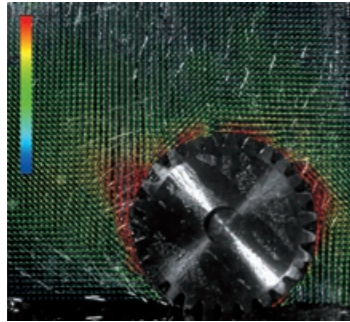


第4図 連成解析結果 粒子速度分布



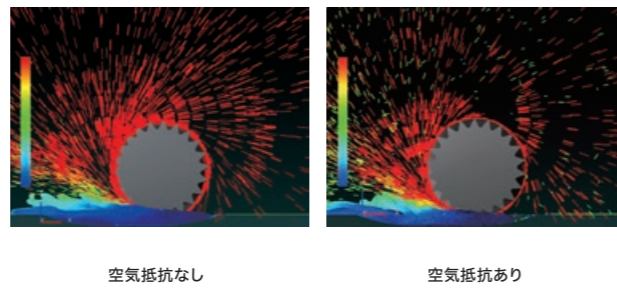


第5図 回転速度1400rpmの粒子画像流速測定法(PIV)結果速度分布



第5図に粒子画像流速測定法(PIV)による測定結果を、第6図に回転速度1400rpmでの連成解析結果の速度分布を示す。第5図のPIV結果に示すように、ギヤ近傍ではオイル飛散速度が速く、ギヤから離れるにしたがって速度の低下が見られる。一方、連成解析結果において、「空気抵抗なし」の結果(第6図の左図)では、ギヤから離れた位置でも粒子速度の低下が見られなかった。しかし、実際のオイルは、ギヤから離れるとオイル液滴1つ1つ

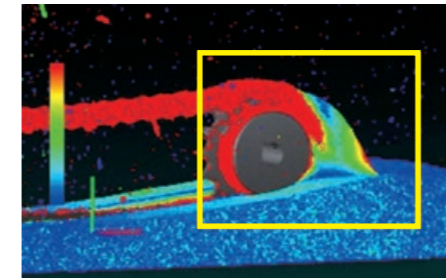
第6図 回転速度1400rpmの連成解析結果粒子速度分布(ベクトル表示)



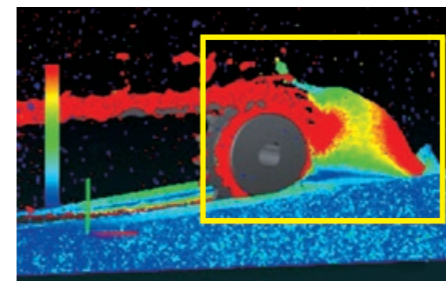
が分離して小さくなるため、空気抵抗を無視できないと考えられる。そこで、空気抵抗を考慮して連成解析を行った結果、ギヤから離れると粒子速度の低下が見られ、PIV結果に近い解析結果が得られた(第6図の右図)。

このように、オイルの液滴が小さくなると空気抵抗の影響を無視できないので、連成解析では空気抵抗を考慮することで実際の現象に近づく良好な結果が得られることが分かる。

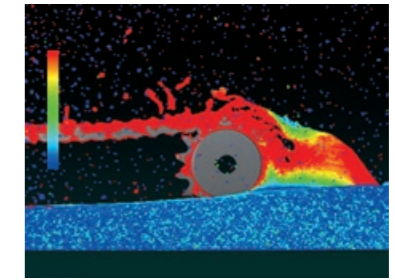
第10図 解析結果400rpm



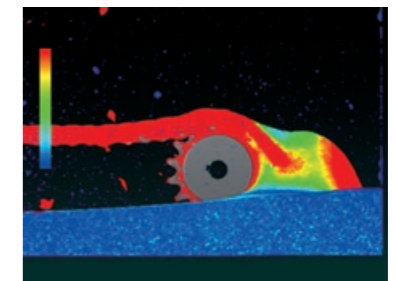
第11図 解析結果500rpm



第12図 解析結果500rpm、粒子間距離1.0mm



第13図 解析結果500rpm、粒子間距離0.6mm



### 3.2 機構解析と流体解析粒子法の連成解析

前章のギヤ単体の解析と同様に、機構解析と流体解析粒子法の連成解析を行った。第10図および第11図に解析結果を示す。オイルを模擬した粒子の速度をコンタ図で示し、青色は低速度、赤色は高速度を示している。回転速度400rpm(第10図)は、実験結果と同様に、スプロケット後方(黄色四角部分)のオイルがなだらかにかき上げられており、実際のオイル揺動を再現している。一方、回転速度500rpm(第11図)は400rpmに比べてオイルかき上げ高さは上昇しているものの、実験結果に比べてかき上げ高さが6割程度にとどまっている。このオイルかき上げ高さが一致しない原因として、解析全体のオイル量の不足や表面張力の影響などが挙げられるが、全体の油面高さは400rpmと500rpmに大きな差はないため、オイル量の不足が原因ではないと考えられる。次に、スプロケット後方のオイル状態を比較すると、奥行方向の中央位置で断面表示した第12図から、ローラチェーンの下部はオイル

が存在しているが上部はオイルが付着していないため、粒子間距離が大きくなることにより実際の油膜厚さが再現できていないことが原因として考えられた。そこで、粒子間距離1mmから0.6mmに小さくして解析を行った。第13図に粒子間距離0.6mmとした場合の解析結果を示す。ローラチェーンの上部でもオイルが存在するようになり、実際の状態に近づく結果となった。さらに粒子間距離を小さくすることで、より実際に近づくと考えられる。

以上のことから、着目する対象により粒子間距離などのパラメータを調整する必要があることがわかる。例えば、『全体の油面の揺動を再現するには、油膜を再現する必要はないために粒子間距離を大きくする』、『スプロケット後方の油膜厚さを再現するには、実際の油膜厚さに近づけるために粒子間距離を小さくする』などがあげられる。ただし、粒子間距離を小さくすることは粒子数が大幅に増加し、解析時間が膨大となるので注意が必要であるが、着目対象によってパラメータを工夫すれば、本連成解析は可視化の有効な手法と考えられる。

本稿で紹介した機構解析と流体解析粒子法(MPS法)の連成解析は、例えば、機械部品が動作しながらのオイル循環状態、地震が発生した際の容器や大型タンク内の液体揺動(スロッシング)など、小さな部品から大きな構造物まで幅広く活用できる技術である。さらに、空気を粉体(DEM法)として定義し、エンジンや攪拌槽などの内部流体に気泡を考慮した挙動解析や構造物を弾性体とすることで、流体力による製品への影響を動的に評価するなど、今後も更なる発展が期待できる。また、実験や計測は実際の現象を把握するためにデータを収集して評価するだけでなく、そのデータをCAEに活用し、原因を類推して対策の予測に役立てることで、両結果が有用なものになると考えている。

引き続き、当社の技術を用いて解析と測定の見方の両方からお客様への問題解決を提案していきたい。

## D-3 ローラチェーンのオイルかき上げ — 揺動評価

### 3.1 揺動確認実験

複雑な構造体であるローラチェーンを対象として、ローラチェーンによってかき上げられるオイル液膜および揺動を比較した<sup>6)</sup>。

実験条件は、第3表と第7図に示す。なお、回転速度については、100rpmから段階的に上昇し、液膜およびオイル揺動に変化が現れた400rpmと500rpmを比較対象とした。

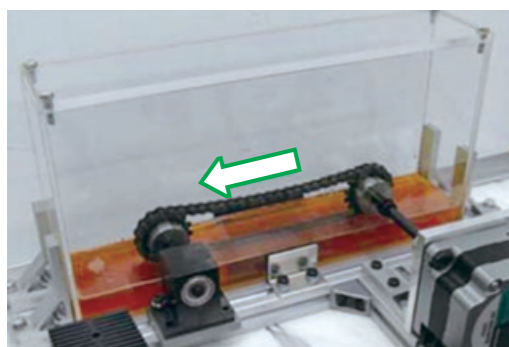
第8図および第9図に、スプロケットおよびチェーンによってかき

上げられたオイルの高さ(図の黄色四角範囲)に着目した実験結果を示す。回転速度400rpm(第8図)では、スプロケット後方のオイルがなだらかにかき上げられているが、500rpm(第9図)ではスプロケットを超える高さまでかき上げられており、回転速度が100rpm程度の差であるがオイル揺動が大きく変化している様子が分かる。

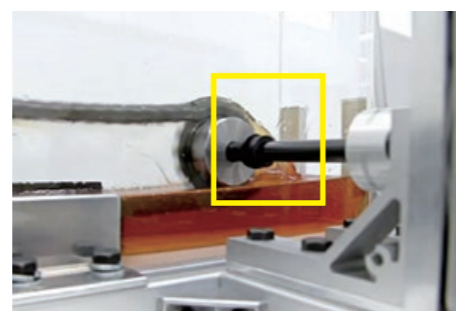
第3表 ローラチェーンの仕様

ローラ間距離	210mm
回転速度	400rpm、500rpm
水槽 幅	390mm
奥行	80mm
高さ	195mm
油面高さ	下段のチェーンが浸漬程度

第7図 実験対象のローラチェーン



第8図 実験結果 回転速度400rpm



第9図 実験結果 回転速度500rpm



参考文献 \*1) ファンクションベイ株式会社: セミナー資料「機構+粒子法連成解析セミナー」  
 \*2) 奥本泰久ほか: 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第7W号 論文番号2008W-G2-12  
 \*3) 廣岡栄子: こべるにくす, Vol.16(2007), No.31

\*4) プロメテック・ソフトウェア株式会社: マニュアル資料「Particleworks TheoryManual」  
 \*5) 延谷義晴ほか: こべるにくす, Vol.23(2014), No.41  
 \*6) ファンクションベイ株式会社: 技術資料「ローラチェーンの実験と解析」, RecurDyn Users' Conference 2016 発表資料